

果胶酶对山楂果酒酿造过程中 甲醇及主要杂醇油含量的影响

张文叶, 张磊, 迟雷, 吴庆伟

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:通过考察加酶时间和果胶酶用量,研究了果胶酶对山楂果酒酿造过程中甲醇及主要杂醇油含量的影响.结果表明:果胶酶对山楂果酒发酵过程中总糖及酒精度的变化没有显著影响;经果胶酶处理发酵的山楂果酒总酸高于未经果胶酶处理的山楂果酒;发酵前未经果胶酶处理的山楂酒样发酵过程中果胶含量呈先降低后稳定的变化趋势,但果胶含量仍在2 g/L以上;发酵前山楂酒样经果胶酶处理后甲醇含量增高,发酵后增加不明显,但其含量是未经果胶酶处理山楂酒样(对照样)的5.7倍,不同时间进行果胶酶处理对主要杂醇油含量影响不明显;发酵前和发酵后添加果胶酶,甲醇含量随着其用量的增加而增加,当其用量大于0.1 g/L时,甲醇含量增加缓慢,发酵后进行添加果胶酶对山楂果酒中主要杂醇油含量影响不显著.

关键词:果胶酶;山楂果酒;甲醇;杂醇油

中图分类号:TQ925⁺.3;TS262 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.001

Effect of pectinase on methyl alcohol and main fusel oil content in the process of Hawthorn fruit wine fermentation

ZHANG Wen-ye, ZHANG Lei, CHI Lei, WU Qing-wei

(College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Through investigating the adding time and dosage of pectinase, the effect of pectinase treatment on methyl alcohol and main fusel oil content was studied. The result suggested that pectinase had no significant influence on the change of total sugar and alcohol content in the process of Hawthorn fruit wine fermentation. The total acid content of the Hawthorn fruit wine with pectinase treatment was higher than that without pectinase treatment. The curve of pectin content in the Hawthorn fruit wine fermentation, which was not treated by pectinase before fermentation, declined firstly and then stabilized above 2 g/L. The methanol content was increasing in the wine with pectinase treatment before fermentation, which was 5.7 times higher than the wine without pectinase treatment (control sample), but changing slightly after fermentation. Different pectinase treatment time had no obvious effect on the main fusel oil content. The methanol content increased with increasing dosage of pectinase adding before or after fermentation, and changed slowly when the dosage was more than 0.1 g/L. Besides, effects of pectinase treatment at different timing on main fusel oil content were not obvious.

收稿日期:2015-03-05

基金项目:河南省科技攻关项目(142102110061)

作者简介:张文叶(1965—),女,河南省辉县市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为食品生物技术.

Key words: pectinase; Hawthorn fruit wine; methyl alcohol; fusel oil

0 引言

山楂为蔷薇科植物^[1],又名山里红、红果,在我国种植广泛,是药食兼用的特色果品.山楂作为水果鲜食量很少,而传统的山楂加工产品仅有山楂罐头、山楂酱、山楂果脯等,品种少,远不能满足人们对山楂产品的需求^[2].

山楂中含有大量的果胶、糖类和氨基酸等物质,以山楂为原料发酵制成山楂果酒既能解决山楂保鲜、贮藏的问题,又能增加产品附加值,带动地区经济发展.果胶酶是应用于果汁、果酒生产中的重要酶制剂之一,它可以有效地提高水果的出汁率,改善果汁的过滤效率,从而澄清、稳定果酒,减少化学澄清剂的用量,缩短加工时间,提高生产效率^[3-5].果酒中的甲醇主要由果胶在甲酯酶的作用下水解和甘氨酸转化而成^[6],山楂果酒中甲醇含量较高,会对人体造成伤害,食用10 mL以上可损害视神经,导致人失明^[5];而果酒中的杂醇油也称高级醇,主要由蛋白质和糖类的代谢产物转化形成^[7],它是酒食品工业的副产品^[8],其产生决定于酶、含氮物质的添加及发酵和精馏条件^[9],它虽然是果酒香味的主要构成物质之一,但含过多的杂醇油除了会对果酒的风味产生不良影响,还会使饮用者口干头痛,长期摄入过量的杂醇油甚至会引起慢性中毒^[10].因此,控制山楂果酒发酵过程中甲醇及杂醇油的含量对于确保山楂果酒的品质非常重要.

本文拟对山楂果酒发酵过程中果胶酶对甲醇及主要杂醇油含量的影响进行初步研究,以期对山楂果酒的研究和生产提供工艺参数及理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:新鲜山楂,河南省辉县市上八里村产;甲醇(色谱级),天津市四友精细化学品有限公司产;异丁醇(分析纯)、异戊醇(分析纯)、无水乙醇(色谱级),均由天津市科密欧化学试剂有限公司产;葡萄糖(分析纯),天津市永大化学试剂有限公司产;果胶酶(食品级),宁夏和氏璧生物技术有限公司产;安琪葡萄酒高活性干酵母(食品级),湖北宜昌市安琪酵母股份有限公司产.

仪器:PB303-E型分析天平,上海光正医疗仪器有限公司产;FE20型pH计,梅特勒-托利多仪

器上海有限公司产;DKB-501S型超级恒温水浴锅,上海精宏实验设备有限公司产;SHP-250型智能生化培养箱,上海鸿都电子科技有限公司产;7820A型气相色谱仪,美国Agilent公司产.

1.2 山楂果酒发酵工艺流程

山楂果酒发酵工艺流程见图1.

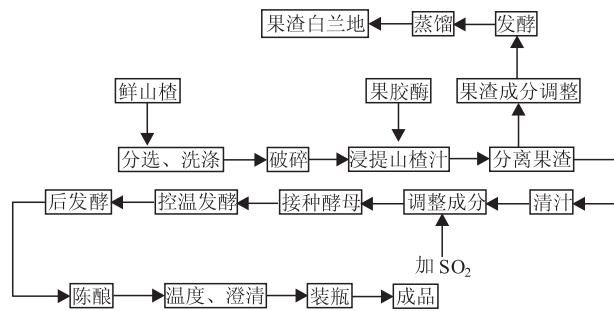


图1 山楂果酒发酵工艺流程

1.3 工艺要点

1.3.1 原料预处理 山楂:选取色泽鲜艳、个体完整、无损伤的山楂,洗涤、破碎;山楂汁:按料水比(w/v)1:3混合均匀,采用热浸法,在(90±1)℃浸提10 min,然后自然冷却至45℃.

1.3.2 工艺条件 果胶酶:用量0.1 g/L,酶解温度45℃,酶解时间2 h;调整成分:用冰糖调整糖至150 g/L,pH值2.9~3.0;加SO₂:加入30 mg/L的SO₂;发酵:将活化好的安琪葡萄酒高活性干酵母按接种量0.2 g/L加入处理好的山楂酒样发酵液,并置于2.5 L广口瓶中发酵,温度控制在(22±0.5)℃.当总糖含量降到10 g/L以下时,转至4℃下储存,测定其糖度、酒精度和酸度等指标.

1.4 加酶时间、加酶量对山楂果酒中甲醇及主要杂醇油含量的影响

分别选择在发酵前和主发酵结束后进行酶处理;果胶酶添加量分别为0 g/L,0.10 g/L,0.15 g/L,0.20 g/L,0.25 g/L,0.30 g/L,0.35 g/L,0.40 g/L,0.45 g/L,0.50 g/L,经酶处理后,定量分析发酵液中甲醇及主要杂醇油的含量.

1.5 检测方法与条件

总糖/还原糖测定:斐林试剂法(GB/T 15038—2006);酒精度测定:酒精计比重法;总酸测定:酸碱滴定法(GB/T 12456—2008);果胶测定:NY/T 2016—2011;甲醇及主要杂醇油含量测定:气相色谱法^[11-12].

气相色谱条件:色谱柱为 Innowax 柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm);升温程序 45 °C (2 min) $\xrightarrow{3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 200 °C (5 min);分流比 20:1;进样口温度 200 °C;检测器温度 280 °C;载气 He(纯度 99.999%);配制甲醇、异丁醇和异戊醇混标,浓度范围均在 20~600 mg/L(决定系数 R^2 均在 0.999 以上)。

2 结果与讨论

2.1 山楂果酒发酵过程中主要指标变化的分析

在山楂果酒生产中,总糖、总酸、果胶含量是主要考察指标.其中,总糖含量决定了酒精度的高低,果胶含量对酒中的甲醇含量有着关键性影响。

2.1.1 山楂果酒发酵过程中总糖含量及酒精度的变化

山楂果酒发酵过程中总糖含量及酒精度的变化如图 2 所示(实线指总糖含量,虚线指酒精度).由图 2 可知,经果胶酶处理与未经果胶酶处理的酒样总糖含量变化趋势没有显著差异;随着发酵时间的延长,总糖含量逐渐降低,发酵结束后总糖含量均在 9.6 g/L 以下.而酒精度在 0~8 d 时增加较快,8 d 后缓慢增加,24 d 后趋于稳定,最终酒精度度均在 7%~8% 之间.说明果胶酶对山楂果酒发酵过程中总糖及酒精度的变化没有显著影响。

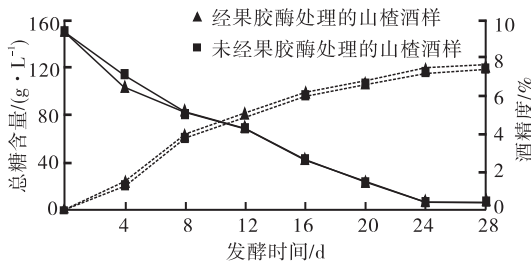


图 2 山楂果酒发酵过程中总糖含量及酒精度的变化

2.1.2 山楂果酒发酵过程中总酸含量的变化

山楂果酒发酵过程中总酸含量的变化如图 3 所示.由图 3 可知,发酵前经果胶酶处理的山楂酒样总酸高于未经果胶酶处理的山楂酒样,这与张志军^[13]的研究结论相符,即加入果胶酶后可提高发酵液中的含酸量;发酵过程中发酵液总酸含量变化趋势不大,增加平缓;发酵结束后,经果胶酶处理发酵的山楂果酒总酸高于未经果胶酶处理的山楂果酒。

2.1.3 山楂果酒发酵过程中果胶含量的变化

未经果胶酶处理的山楂果酒发酵过程中果胶含量的变化如图 4 所示.由图 4 可知,发酵前未经果胶酶处

理的山楂酒样,从第 4 d 开始果胶含量迅速降低,第 8 d 后变化趋于平缓,但果胶含量仍在 2 g/L 以上,而胡冀太^[14]的研究结果则是带果肉发酵的酒样中果胶含量逐渐升高,出现峰值后,下降至最低;发酵前加入果胶酶处理的酒样,经国标 NY/T 2016—2011 未检测出果胶,说明果胶分解较彻底。

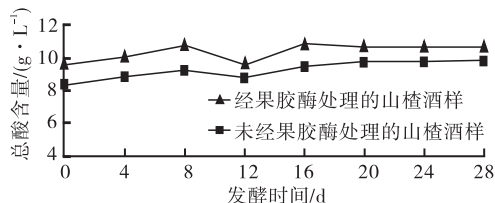


图 3 山楂果酒发酵过程中总酸含量的变化

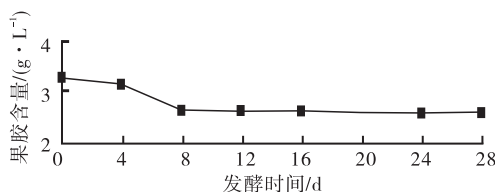


图 4 未经果胶酶处理的山楂果酒发酵过程中果胶含量的变化

2.2 山楂果酒中甲醇及主要杂醇油含量变化的分析

2.2.1 加酶时间对山楂果酒中甲醇及主要杂醇油含量的影响

加酶时间对山楂果酒中甲醇及主要杂醇油含量的影响如表 1 所示.由表 1 可知,山楂酒样发酵前经果胶酶处理后甲醇含量增高,约为 362.35 mg/L,发酵后甲醇含量约为 375.12 mg/L,增加不明显,但其含量是未经果胶酶处理(对对照样)的山楂酒样的 5.7 倍;而主要杂醇油发酵前未检测出,发酵结束后主要杂醇油含量约为 192.32 mg/L,比对照样降低 19.00 mg/L 左右.山楂酒样发酵结束后经果胶酶处理,甲醇含量约为 266.33 mg/L,其含量是对照样的 4 倍,比发酵前经酶处理的山楂汁降低 108.79 mg/L;主要杂醇油含量变化不明显.这表明,果胶酶对山楂果酒中甲醇含量具有显著影响,而发酵结束后添加果胶酶甲醇含量比发酵前添加果胶酶的低。

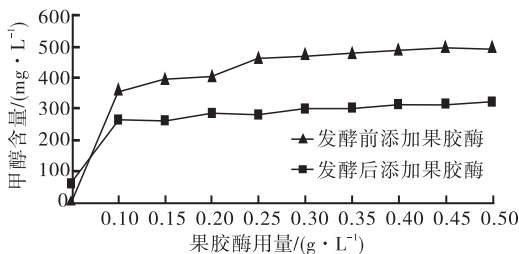
2.2.2 果胶酶用量对山楂果酒中甲醇及主要杂醇油含量的影响

果胶酶用量对山楂果酒中甲醇含量及主要杂醇油含量的影响变化如图 5 所示.由图 5a)可知,发酵前和发酵后添加果胶酶,山楂果酒中甲醇含量变化趋势相似,均随着果胶酶用量的增加而增加,当果胶酶用量 > 0.10 g/L 时,甲醇含量增加缓慢.发酵后进行果胶酶处理酿造的山楂果酒中

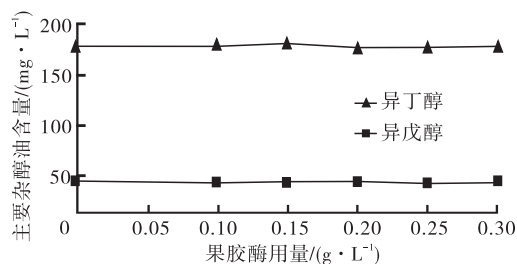
表1 加酶时间对山楂果酒中甲醇及主要杂醇油含量的影响结果

mg · L⁻¹

加酶时间	检测时间	甲醇	异丁醇	异戊醇	主要杂醇油
发酵前	发酵前	362.35 ± 6.60	0.00	0.00	0.00
	发酵后	375.12 ± 10.32	38.73 ± 0.65	153.59 ± 3.06	192.32
发酵后	发酵加酶处理后	266.33 ± 5.12	46.28 ± 1.12	165.66 ± 3.16	211.94
对照样	发酵前	10.88 ± 4.47	0.00	0.00	0.00
	发酵后	65.70 ± 6.86	46.13 ± 1.06	165.62 ± 3.20	211.75



a) 对甲醇含量的影响



b) 对主要杂醇油含量的影响

图5 果胶酶用量对山楂果酒中甲醇含量及主要杂醇油含量的影响变化

的甲醇含量低于发酵前进行果胶酶处理的甲醇含量.由图5b)可知,发酵结束后添加果胶酶,山楂果酒中杂醇油的主要成分异丁醇和异戊醇含量没有显著变化,说明发酵后添加果胶酶对山楂果酒中主要杂醇油含量影响不显著.

2.2.3 发酵过程中甲醇及主要杂醇油含量的变化

图6为山楂果酒发酵过程中甲醇含量的变化.由图6可知,经果胶酶处理的酒样发酵过程中甲醇含量在360~375 mg/L内逐渐增加,这与张丽芝^[15]报道的枣酒中甲醇含量从0开始逐渐增加的变化趋势稍有不同.而未经果胶酶处理的酒样发酵过程中甲醇含量逐渐增加,但最终不超过100 mg/L,这可能是由于加入果胶酶后,酒样中的果胶迅速分解产生甲醇,而发酵过程中果胶不易分解产生甲醇;而未加果胶酶处理的酒样中果胶分解缓慢,由图4还可知,果胶分解的量很较少,即18%左右,所以产生的甲醇含量较少.由图5a)和图6可知,山楂果酒中甲醇含量主要受果胶酶的影响,添加果胶酶后甲醇含

量显著增加;发酵过程中产生的甲醇含量低且变化不明显.

图7为山楂果酒发酵过程中异丁醇含量的变化.由图7可知,两种酒样发酵过程中异丁醇含量均从0开始呈线性关系逐渐增长,二者中异丁醇含量没有显著差异,但在16 d后,对照样中异丁醇的含量开始高于添加果胶酶的酒样,发酵结束后对照样中异丁醇的含量仍高于添加果胶酶的酒样;结合图5b)可知,发酵结束后添加果胶酶对异丁醇含量没有显著影响.

图8为山楂果酒发酵过程中异戊醇含量的变化.由图8可知,两种酒样在发酵过程中异戊醇含量的变化趋势与异丁醇相似,但在20 d后对照样中异

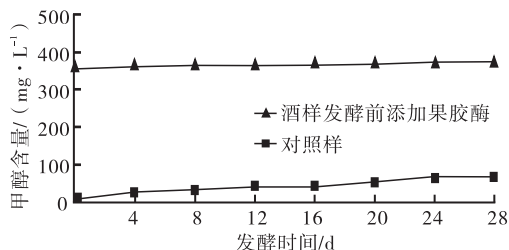


图6 山楂果酒发酵过程中甲醇含量的变化

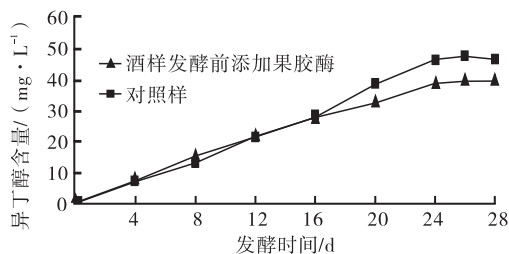


图7 山楂果酒发酵过程中异丁醇含量的变化

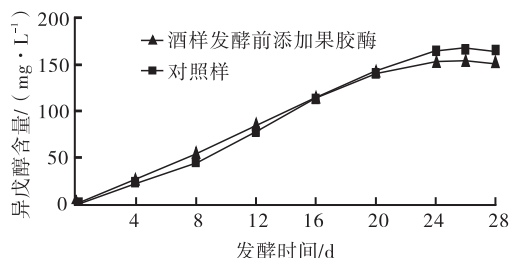


图8 山楂果酒发酵过程中异戊醇含量的变化

戊醇含量开始高于添加果胶酶的酒样,发酵结束后酒样中异戊醇含量仍高于添加果胶酶的酒样;结合图5b)可知,发酵结束后添加果胶酶对异戊醇含量没有显著影响。

3 结论

由山楂发酵制成山楂果酒,分析了山楂果酒发酵过程中总糖、酒精度、总酸及果胶含量变化,并以加酶时间和果胶酶用量为考察对象,研究了果胶酶对山楂果酒酿造过程中甲醇及主要杂醇油含量的影响。实验结果表明,果胶酶对山楂果酒发酵过程中总糖及酒精度的变化无显著影响;加入果胶酶可提高山楂果酒发酵液中的含酸量,且发酵过程中总酸含量变化趋势不明显;发酵前未经果胶酶处理的山楂酒样发酵过程中果胶含量先迅速降低,第8 d后趋于平缓,但果胶含量仍在2 g/L以上,发酵前加入果胶酶的酒样未检测出果胶;果胶酶对山楂果酒甲醇含量具有显著影响,而发酵后添加果胶酶的甲醇含量比发酵前添加的含量低;发酵前和发酵后添加果胶酶,甲醇含量随着其用量的增加而增加,当其用量大于0.1 g/L时,甲醇含量增加缓慢,发酵后进行添加果胶酶对山楂果酒中主要杂醇油含量影响不明显。

本文初步研究了果胶酶对山楂果酒中甲醇及主要杂醇油的影响,还需进一步研究酒中杂醇油对酒感官品质的影响及香气成分与杂醇油的关系,才能科学控制山楂果酒的酿造工艺条件。

参考文献:

[1] 万连步,杨力,张民.山楂[M].济南:山东科学技术出版社,2004:1-2.

- [2] 赵玉平,杜连祥.新型山楂汁饮料的研制[J].食品与发酵工业,2003,29(9):98.
- [3] 钦传光,丹·娃伦婷娜,丁诺·狄安娜.果胶酶高产菌种的筛选[J].中国酿造,2000(4):14.
- [4] 侯炳炎,李兰岭.果胶酶的开发与应用[J].天津微生物,1991(3):20.
- [5] 陈亮,刘冉,辛秀兰,等.果胶酶澄清红树莓果酒的研究[J].食品研究与开发,2014,35(7):58.
- [6] 黄亚东.杨梅酒中甲醇形成及其毒性分析[J].酿酒科技,1999(2):60.
- [7] 徐庭超.酒精生产中杂醇油的生成与提取[J].酿酒,1995(6):9.
- [8] Nemestóthy N, Gubicza L, Fehér E, et al. Biotechnological utilisation of fusel oil, a food industry by-product [J]. Food Technology and Biotechnology, 2008, 46(1):44.
- [9] Patil A G, Koolwal S M, Butala H D. Fusel oil: composition, removal, and potential utilization [J]. International Sugar Journal, 2002, 104(1238):51.
- [10] 延鑫.气相色谱法测定地方白酒中乙酸乙酯、杂醇油含量[J].北京联合大学学报:自然科学版,2009,23(3):53.
- [11] 彭松,锁然,霍莉.气相色谱法测定不同酒龄枣酒中甲醇含量[J].食品工业科技,2013,34(12):54.
- [12] 彭松,锁然,霍莉,等.气相色谱法测定枣酒中高级醇含量[J].酿酒科技,2013(9):93.
- [13] 张志军.果胶酶处理对山楂汁提取及理化指标影响的研究[J].天津农业科学,2003,9(4):18.
- [14] 胡冀大.不同工艺及酵母对山楂酒发酵过程及成品酒品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2012.
- [15] 张丽芝.发酵枣酒中的甲醇和杂醇油控制[J].酿酒科技,2013(8):36.

固相微萃取-气相-质谱联用法 分析黑蒜中的挥发性风味物质

张中义^{1,2}, 张品峰¹, 邵文科¹, 柴颖¹

(1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

摘要:以新鲜大蒜为原料,自然发酵成黑蒜,利用固相微萃取法提取发酵黑蒜中的挥发性风味物质,对其进行气相-质谱(GC-MS)分析,并与新鲜大蒜进行比较.结果表明,黑蒜中相对含量较高的挥发性风味物质有14种,主要为2,2-二甲基-1,3-二噻烷(41.26%,有香味),二烯丙基硫醚(22.10%,有淡香味),二烯丙基二硫醚(9.67%,有强刺激性)等.与新鲜大蒜相比,黑蒜中二烯丙基二硫醚等刺激性物质含量显著降低,具有香味的噻烷类物质明显增加;同时,黑蒜中还生成了新鲜大蒜中所没有的吡嗪类香味物质,使黑蒜具有愉快的特殊香气.

关键词:黑蒜;固相微萃取;GC-MS;挥发性风味物质

中图分类号:TS207.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.002

Analysis of volatile flavor compound in black garlic by solid phase microextraction-GC-MS

ZHANG Zhong-yi^{1,2}, ZHANG Pin-feng¹, SHAO Wen-ke¹, CHAI Ying¹

(1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety of He'nan, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Using fresh garlic as raw material to ferment black garlic naturally, volatile flavor compounds from black garlic were collected using solid-phase microextraction (SPME) and identified by GC-MS. The components were compared with the volatile components of fresh garlic. The results showed that 14 kinds of volatile flavor compounds content in black garlic were higher. The main compounds extracted from black garlic were 2,2-dimethyl-1,3-dithiane (41.26%, fragrant), diallyl sulfide (22.10%, light fragrant), diallyl disulphide (9.67%, strong irritant), and so on. Compared with fresh garlic, the excitant material content in black garlic such as diallyl disulphide decreased significantly while thiamethoxam alkanes with aromas material increased. At the same time, pyrazine flavoring substances also generated in black garlic which were nonexistent in the fresh garlic, and gave the black garlic special pleasant aroma.

Key words: black garlic; solid phase microextraction (SPME); GC-MS; volatile flavor compound

收稿日期:2015-03-10

基金项目:郑州轻工业学院重大项目(2011XJJZDYY005)

作者简介:张中义(1957—),男,河南省信阳市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为食品科学与技术.

0 引言

新鲜大蒜和普通大蒜制品均具有较强的刺激性气味,一定程度上限制了大蒜在食品中的应用.黑蒜是新鲜大蒜在特殊条件下发酵制成的一种新型大蒜制品,其鳞茎呈现黑色,抗氧化功能得到显著提高^[1],风味发生较大变化,口感酸甜,具有诱人的特殊香气,从而消除了新鲜大蒜的刺激气味,进一步拓宽了大蒜制品的调味应用领域.黑蒜的特殊香气表明,其加工过程中可能发生了较为复杂的香味化学变化,生成了新的香味物质.周春丽等^[2]采用固相微萃取-气质联用法分析了新鲜大蒜的风味物质,发现其主要风味物质是二烯丙基二硫醚.周菊花^[3]采用顶空固相微萃取-气质联用法分析了生、熟大蒜中的挥发性风味物质,发现大蒜的特殊风味主要是由挥发性成分中的含硫化物提供的.目前对黑蒜中挥发性物质组成的研究少见报道,笔者^[4]曾采用同时蒸馏萃取-气质联用法研究了黑蒜中的挥发性物质,结果表明,与新鲜大蒜相比,黑蒜中挥发性物质的组成发生了较大变化,刺激性挥发物质含量明显下降,香气化合物显著增加.但该方法萃取温度较高(100℃),可能会导致样品中热不稳定挥发性物质的破坏、降解,检测结果尚不能真实反映黑蒜中的挥发性物质组成.

固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)是1990年代出现的一种新颖的样品前处理技术,主要用于样品中挥发性物质的富集与萃取,属于非溶剂型选择性萃取法.样品萃取过程不需要高温加热,不会破坏样品中的热不稳定物质,能较准确地反映样品的挥发性物质组成,且避免溶剂萃取带来的污染.对食品中挥发性风味物质的分析检测多采用GC-MS联用法,这两种技术的结合是近年来发展起来的一种高效分析食品中挥发性风味物质的新方法^[2-3].本文拟采用SPME-GC-MS联用法分析黑蒜中的挥发性风味物质,以期进一步拓宽大蒜制品的调味应用领域.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:新鲜大蒜,为中牟白皮大蒜,购于陈寨农贸市场;黑蒜,郑州轻工业学院实验室自制.

仪器:TZ/HS型恒温恒湿箱,上海腾尊仪器设备有限公司产;Agilent 7890GC/5975C型气质联用

仪,美国Agilent公司产;YP6102型电子天平(0.01g),上海光正医疗仪器有限公司产;HH-S2型数显恒温水浴锅($\pm 1^\circ\text{C}$),金坛市医疗仪器厂产;SPME萃取头PDMS/DVB(65 μm),PDMS(100 μm),CAR/PDMS(75 μm),上海安谱科学仪器有限公司产.

1.2 实验方法

1.2.1 黑蒜的制备 新鲜大蒜自然发酵(60~80℃,相对湿度70%~95%)50 d.

1.2.2 SPME萃取条件的优化^[5]

1.2.2.1 萃取头的选择 分别将PDMS/DVB(65 μm),PDMS(100 μm),CAR/PDMS(75 μm)在气相色谱的进样口处于250℃下老化30 min,然后准确称取3份新鲜大蒜,各2.00 g,用研钵研碎后放入3个15 mL样品瓶中,50℃水浴平衡30 min,再将老化好的固相萃取头插入各样品瓶上部,推出萃取头,在50℃下萃取30 min后,立即在GC进样口解析5 min,进行GC-MS分析.

1.2.2.2 萃取温度的选择 在其他条件不变的情况下,用PDMS/DVB(65 μm)萃取头分别在30℃,40℃,50℃,60℃,70℃的水浴加热条件下顶空萃取30 min,然后在GC进样口解析5 min,进行GC-MS分析.

1.2.2.3 萃取时间的选择 在其他条件不变的情况下,用PDMS/DVB(65 μm)萃取头在50℃的水浴加热条件下顶空萃取10 min,20 min,30 min,40 min,50 min,然后立即在GC进样口解析5 min,进行GC-MS分析.

1.2.3 GC-MS检测条件 GC条件:色谱柱选用DB-5毛细管柱(30 m \times 0.25 mm,0.25 μm);载气He,流量1.0 mL/min;进样量1 μL ,不分流;进样口温度250℃;起始柱温50℃,以6℃/min的速率升至280℃,保持10 min.

MS条件:接口温度280℃;离子源温度230℃;四极杆温度150℃;电离方式EI;电子能量70 eV;扫描质量范围33~450 amu.

1.2.4 重复实验 在上述实验得到最佳条件的基础上,作3次重复实验,以保证GC-MS分析的准确性.

1.2.5 数据分析 利用MSD化学工作站软件并对照NIST11图谱库进行数据收集,成分先由谱库初步鉴定,再结合化学成分的保留时间、质谱等进行人工解析定性,采用面积归一化法相对定量.

2 结果与讨论

2.1 SPME 萃取条件的优化分析

2.1.1 萃取头对新鲜大蒜挥发性风味物质萃取效果的影响 将3种萃取头对新鲜大蒜挥发性风味物质的萃取效果进行比较,结果如表1所示.由表1可知,PDMS/DVB(65 μm)萃取头检测到的峰个数最多,色谱峰总面积最大,即该萃取头可检测到的大蒜挥发性风味物质的种类最多.因此PDMS/DVB(65 μm)萃取头更适于大蒜挥发性风味物质的分析.

表1 3种萃取头的萃取效果

检测项目	PDMS/DVB (65 μm)	PDMS (100 μm)	CAR/PDMS (75 μm)
检测峰个数	15	9	13
色谱峰总面积($\times 10^8$)	18.86	6.13	15.34

2.1.2 萃取温度对新鲜大蒜挥发性风味物质萃取效果的影响 萃取温度对新鲜大蒜挥发性风味物质萃取效果的影响如图1所示.由图1可以看出,在30~50 $^{\circ}\text{C}$ 之间,色谱峰总面积随着萃取温度的升高增加较为显著,而在50 $^{\circ}\text{C}$ 之后,色谱峰总面积增加趋势减缓,可能是由于萃取头吸附与解吸附挥发性风味物质达到了动态平衡,同时考虑到新鲜大蒜中一部分挥发性风味物质热不稳定,温度过高可能会使其分解,因此选择50 $^{\circ}\text{C}$ 为最佳萃取温度.

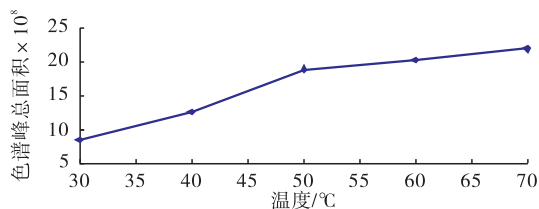


图1 萃取温度对萃取效果的影响

2.1.3 萃取时间对新鲜大蒜挥发性风味物质萃取效果的影响 萃取时间对新鲜大蒜挥发性风味物质萃取效果的影响如图2所示.由图2可以看出,萃取时间对萃取头吸附量影响很大,但达到吸附平衡后,萃取时间变化对其影响不明显.在10~30 min之间,色谱峰总面积随着萃取时间的延长而增加较为显著,30 min之后,色谱峰总面积的增加缓慢,说明此时萃取头吸附与解吸附挥发性风味物质达到了动态平衡,因此选择30 min为最佳萃取时间.

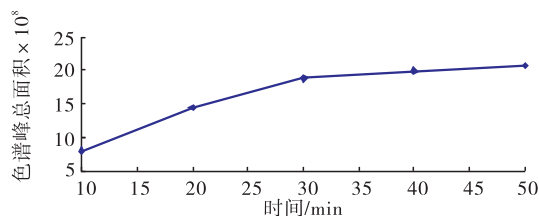


图2 萃取时间对萃取效果的影响

2.2 萃取条件优化后新鲜大蒜和黑蒜的 GC-MS 分析

新鲜大蒜和黑蒜 SPME 挥发性物质的 GC-MS 总离子流图,分别如图3和图4所示.新鲜大蒜中检测出的15种挥发性风味物质(见表2),黑蒜中检测出的14种挥发性风味物质(见表3).

由表2和表3可知,新鲜大蒜中相对含量较高的挥发性风味物质主要为二烯丙基二硫醚(42.18%),3-乙烯基-1,2-二硫环己-4-烯(18.69%),乙基硫脲(9.58%),1,3-二噻烷(6.86%),二烯丙基硫醚(5.01%);黑蒜中相对含量较高的挥发性风味物质主要为2,2-二甲基-1,3-二噻烷(41.26%),二烯丙基硫醚(22.10%),二烯丙基二硫醚(9.67%).

新鲜大蒜样品在研碎的过程中,在蒜氨酸酶的作用下蒜氨酸生成大蒜素,随后大蒜素分子中不稳定的二硫键断裂,降解成多种刺激性含硫化合物^[6].新鲜大蒜在高温发酵过程中,发酵温度不足以使蒜氨酸酶迅速失活^[7],同时该加工条件下大蒜的细胞组织遭到破坏,蒜氨酸与蒜氨酸酶得以接触,生成的大蒜素裂解生成硫醚类、噻烷类等一系列新的含硫化合物.

新鲜大蒜中二烯丙基二硫醚的含量高达42.18%,黑蒜中二烯丙基二硫醚的含量降为9.67%.黑蒜中二烯丙基二硫醚的减少可能是由于高温发酵过程中,烯丙基硫醚类化合物分子中的不稳定C-S键发生断裂,生成了烷硫基和丙烯基自由基^[8],其中部分自由基在发酵过程中转化为带有香气的噻烷类物质,如1,3-二噻烷,2,2-二甲基-1,3-二噻烷,1,3,5-三噻烷,另一部分与其他低分子化合物反应生成二烯丙基硫醚^[9].二烯丙基二硫醚有刺激性气味,其含量的减少使发酵后的黑蒜刺激性气味显著降低,气味得到很大改善^[10].

新鲜大蒜中3-乙烯基-1,2-二硫环己-4-烯的含量为18.69%,发酵后的黑蒜中其含量降低为1.07%,蒜氨酸酶与蒜氨酸作用可以生成大蒜

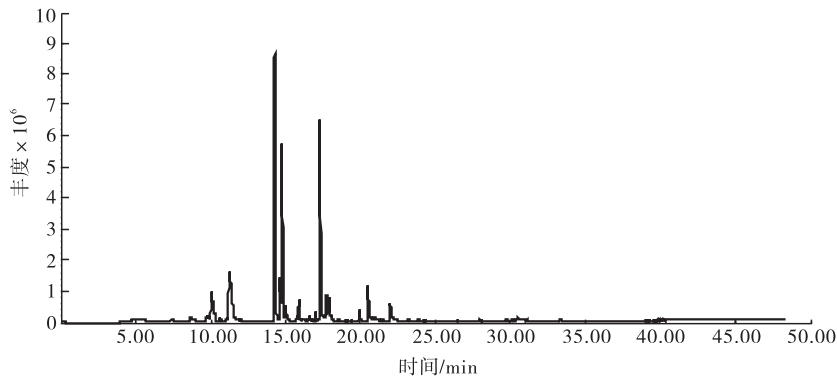


图3 新鲜大蒜中挥发性风味物质的总离子流图

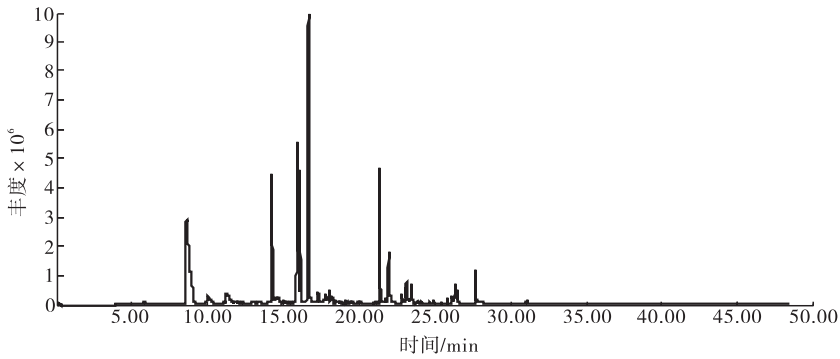


图4 黑蒜中挥发性风味物质的总离子流图

表2 新鲜大蒜中挥发性风味物质组成

峰号	名称	分子式	相对分子质量	保留时间/min	相对百分含量/%
1	3,4-二甲基噻吩	C ₆ H ₈ S	112.03	9.78	1.25
2	1,3-二噻烷	C ₄ H ₈ S ₂	120.00	10.02	6.86
3	甲基-1-丙烯基二硫醚	C ₄ H ₈ S ₂	120.00	10.59	0.65
4	乙基硫脲	C ₃ H ₈ N ₂ S	104.04	11.22	9.58
5	二烯丙基二硫醚	C ₆ H ₁₀ S ₂	146.02	14.24	42.18
6	甲基-2-丙烯基三硫醚	C ₄ H ₈ S ₃	151.97	15.88	1.11
7	1,3,5-三噻烷	C ₃ H ₆ S ₃	137.96	16.57	0.66
8	2-巯基-3,4-二甲基-2,3-二氢噻吩	C ₆ H ₁₀ S ₂	146.02	16.99	1.12
9	3-乙烯基-1,2-二硫环己-4-烯	C ₆ H ₈ S ₂	144.00	17.30	18.69
10	二戊基二硫醚	C ₁₀ H ₂₂ S ₂	206.11	17.73	1.63
11	3-乙烯基-1,2-二硫环己-5-烯	C ₆ H ₈ S ₂	144.00	17.90	1.51
12	二烯丙基硫醚	C ₆ H ₁₀ S	114.05	20.48	5.01
13	二丙烯基三硫醚	C ₆ H ₁₀ S ₃	177.99	20.87	1.74
14	5,7-二乙基-1,2,3,5,6-五硫杂环庚烷	C ₆ H ₁₂ S ₅	243.95	21.98	1.41
15	1,3-苯二硫酚	C ₆ H ₆ S ₂	141.99	30.49	0.54

表3 黑蒜中挥发性风味物质组成

峰号	名称	分子式	相对分子质量	保留时间/min	相对百分含量/%
1	二烯丙基硫醚	C ₆ H ₁₀ S	114.05	8.63	22.10
2	1,3-二噻烷	C ₄ H ₈ S ₂	120.00	10.05	1.48
3	乙基硫脲	C ₃ H ₈ N ₂ S	104.04	11.26	1.46
4	二甲基三硫醚	C ₂ H ₆ S ₃	125.96	11.51	0.63
5	2-乙基-6-甲基吡嗪	C ₇ H ₁₀ N ₂	122.08	12.04	0.31
6	二烯丙基二硫醚	C ₆ H ₁₀ S ₂	146.02	14.24	9.67
7	1,3,5-三噻烷	C ₃ H ₆ S ₃	137.96	16.58	2.15
8	2,2-二甲基-1,3-二噻烷	C ₆ H ₁₂ S ₂	148.03	16.66	41.26
9	3-乙烯基-1,2-二硫环己-4-烯	C ₆ H ₈ S ₂	144.00	17.31	1.07
10	二戊基二硫醚	C ₁₀ H ₂₂ S ₂	206.11	17.77	0.66
11	1,1'-硫代双[3-(甲硫基)]-丙烷	C ₈ H ₁₈ S ₃	210.05	18.01	0.67
12	5,7-二乙基-1,2,3,5,6-五硫杂环庚烷	C ₆ H ₁₂ S ₅	243.95	21.96	3.71
13	1-丙基-2-(4-硫代庚-2-烯-5-基)二硫醚	C ₉ H ₁₈ S ₃	222.05	23.13	1.67
14	3,5-二乙基-1,2,4-三硫杂环戊烷	C ₆ H ₁₂ S ₃	180.01	23.45	2.02

素,大蒜素可以降解为3-乙烯基-1,2-二硫环己-4-烯和3-乙烯基-1,2-二硫环己-5-烯^[11]。此前,笔者曾研究了新鲜大蒜发酵过程中蒜氨酸含量的变化,发现新鲜大蒜发酵一周后蒜氨酸的含量由11.79 mg/g(湿基)减少至2.48 mg/g(湿基)。在黑蒜发酵过程中,大蒜素的前体物蒜氨酸无法持续供应,生成的3-乙烯基-1,2-二硫环己-4-烯在发酵过程中持续挥发,使其含量不断降低。

新鲜大蒜中乙基硫脲的含量为9.58%,黑蒜中乙基硫脲的含量降为1.46%,这可能与发酵过程中乙基硫脲的不断挥发有关。新鲜大蒜中二烯丙基硫醚的含量为5.01%,黑蒜中二烯丙基硫醚的含量增加为22.10%,二烯丙基硫醚有香味特征,黑蒜中其含量显著增加,有助于增强黑蒜的香味。同时,新鲜大蒜中甲基-2-丙基三硫醚的含量为0.65%,黑蒜中未检测到该类物质,这种物质具有硫磺气味^[4],其含量的减少有助于黑蒜刺激性气味的降低。

另外,黑蒜中还发现了在新鲜大蒜中未出现的吡嗪类和硫烷类物质,如2-乙基-6-甲基吡嗪、3,5-二乙基-1,2,4-三硫杂环戊烷、1,1'-硫代双[3-(甲硫基)]-丙烷。吡嗪类物质是大蒜发酵过程中非硫氨基酸和果糖发生美拉德反应生成的一类香味物质,具有烤香气味^[12],对黑蒜的香味表现有重要的贡献。硫烷类物质有较弱的刺激性气味,黑蒜中少量硫烷及二硫醚类物质的存在,导致黑蒜仍具有较弱的刺激性气味,对此还需要进行深入的研究。研究表明,采用SPME-GC-MS联用法可以检测到同时蒸馏萃取-GC-MS联用法未检测到的黑蒜挥发性成分^[4],如对黑蒜气味有重要影响的吡嗪类和硫烷类挥发性物质。

3 结论

本文以新鲜大蒜为原料,自然发酵为黑蒜,利用SPME-GC-MS联用法分析了黑蒜中的挥发性风味物质,并与新鲜大蒜进行了比较。研究表明,SPME-GC-MS联用法可以检测到同时蒸馏萃取-GC-MS联用法不能检测到的挥发性风味物质(如吡嗪类、硫烷类),新鲜大蒜中相对含量较高的挥发性物质有15种,主要为二烯丙基二硫醚(42.18%,有强刺激性),3-乙烯基-1,2-二硫环己-4-烯

(18.69%,有刺激性),乙基硫脲(9.58%,有弱刺激性)等。黑蒜中相对含量较高的挥发性风味物质有14种,主要为2,2-二甲基-1,3-二噻烷(41.26%,有香味),二烯丙基硫醚(22.10%,有淡香味),二烯丙基二硫醚(9.67%,有强刺激性)等。由上述所得数据可知,黑蒜中二烯丙基二硫醚等刺激性物质含量显著降低,具有香味的噻烷类物质明显增加,同时,黑蒜中还生成了新鲜大蒜中不具有的吡嗪类香味物质,使黑蒜具有特殊香气,进一步拓宽了大蒜制品的调味应用领域。但黑蒜中少量硫烷及二硫醚类物质的存在,导致黑蒜仍具有较弱的刺激性气味,对此还需要进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 孙月娥,吕丹娜,王卫东,等.美拉德反应对大蒜抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2013,34(9):119.
- [2] 周春丽,陈超,李玉萍,等.固相微萃取-气质联用鉴定新鲜大蒜风味成分[J].食品工业,2013,34(6):210.
- [3] 周江菊.顶空固相微萃取气质联用分析大蒜挥发性风味成分[J].中国调味品,2010,35(9):95.
- [4] 张中义,杨晓娟,张峻松,等.发酵黑蒜中挥发性物质的GC-MS分析[J].中国调味品,2012,37(7):74.
- [5] 杨敏.SPME-GC/MS联用技术在部分蔬菜挥发性成分分析中的应用研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [6] 王瑜,邢效娟,景浩.大蒜含硫化合物及风味研究进展[J].食品安全质量检测学报,2014(10):3092.
- [7] 李燕,王荣,李冠,等.新鲜大蒜中蒜氨酸酶的分离纯化及性质[J].植物学通报,2005,22(5):579.
- [8] Yu T H, Wu C M, Rosen R T, et al. Volatile compounds generated from thermal degradation of alliin and deoxyalliin in an aqueous solution[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1994, 42(1):146.
- [9] Block E, Iyer R, Grisoni S, et al. Lipoxigenase inhibitors from the essential oil of garlic [J]. Journal of the American Chemical Society, 1988, 110(23):7813.
- [10] Amagase H, Peteseh B L, Matsuura H, et al. Intake of garlic and its bioactive components [J]. The Journal of Nutrition, 2001, 131(3):955.
- [11] 田莉,杨秀伟,陶海燕.大蒜化学成分的气-质联用分析[J].天然产物研究与开发,2005,17(5):533.
- [12] 文冬梅,伍锦鸣,赵谋明,等.烟末酶解物美拉德反应配料的优化[J].现代食品科技,2013,29(2):354.

真空包装馒头常温储藏品质变化研究

吴立根, 王岸娜, 屈凌波

(河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以馒头为研究对象,通过考察真空包装馒头储藏过程中水分、质构(TPA)、质子信号和蛋白质二级结构等的变化,研究真空包装馒头在常温储藏期间其品质的变化情况.结果表明,真空包装馒头常温储藏过程中水分和TPA指数变化较小;3种状态水分(强结合水、弱结合水、自由水)变化不明显;馒头皮部的蛋白质二级结构(α 螺旋、 β 折叠、 β 转角和无规则卷曲)变化较显著,但其心部只有 α 螺旋有较为明显的变化.

关键词:馒头;真空包装;常温储藏

中图分类号:TS210.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.003

Study on characteristics of steamed bread in vacuum package during the period of storage under indoor temperature

WU Li-gen, WANG An-na, QU Ling-bo

(College of Food Science and Technology, He'nan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Using steamed bread as the research object, the quality changes of the vacuum packing steamed bread during storage at indoor temperature were studied by investigating the changes of moisture, TPA, proton signal and protein secondary structure of the vacuum packing steamed bread. The results showed that the moisture and TPA index of the vacuum packing steamed bread during storage at indoor temperature changed slightly. Three states of water (bound water, weak bound water and free water) had no obvious changes. The protein secondary structure (α -helix, β -sheet, β -turn and random coil) of steamed bread changed obviously, but only α -helix of its centre had relatively obvious change.

Key words: steamed bread; vacuum package; storage under indoor temperature

0 引言

馒头是我国的传统主食,其加工过程温度低于100℃,营养成分破坏少,且价格低廉,与面包相比,它更适合中国人的口味.主食馒头作为工业化的商品,必须经过物流和储藏的过程才能到达消费者手中^[1-3].然而,馒头储藏期间的保质保鲜问题一直

是制约馒头工业化发展的关键问题之一.馒头在储藏过程中缓慢的物理、化学变化导致其逐渐变硬,这种现象通常称为老化.很多研究者都在试图研究添加配料延缓馒头老化或将其老化效果降至最低程度.采用低场强的NMR可以分析和检测食品中的水分,利用MRI技术能够实时监测食品中水分的分布情况,建立水分分布模型,从而研究食品在加

收稿日期:2015-03-20

基金项目:粮食公益性行业科研专项项目(201313011);河南工业大学省属高校基本科研业务费专项资金项目(2014YWJC05)

作者简介:吴立根(1969—),男,湖南省衡阳市人,河南工业大学副教授,主要研究方向为粮油食品加工与营养.

工和储藏过程中动力学性质的变化,其对改善食品的加工条件,提高食品品质等方面具有重要的意义^[4-8].利用二阶导、傅里叶自退卷积和谱线拟合技术对蛋白质红外光谱的酰胺 I 带和 II 带进行处理,可以得到复合体系中蛋白质二级结构的变化情况^[9-10].本文拟利用真空包装形式保存主食馒头,探讨其在常温储藏过程中品质的变化情况,以期为馒头的工业化生产提供理论依据和参考.

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

主要材料:馒头,郑州多福多食品有限公司提供.

主要仪器:TA - XTzi 型质构仪,英国 Stable Micro-system 仪器公司产;CS101 型电热鼓风干燥箱,上海实验仪器设备厂产;NMI20 型核磁共振成像分析仪(配备直径 18 mm 的射频线圈),上海钮迈电子科技有限公司产;WQF - 510 型傅里叶变换红外光谱仪,天津天光化学仪器有限公司产.

1.2 实验方法

1.2.1 馒头的真空包装处理 从工厂购买的馒头密封运到实验室,在无菌房间内,进行单个真空包装,包装袋在使用前经紫外杀菌处理,以消除包装过程中微生物的污染.将包装好的馒头置于实验室室温条件下储藏,每天取样测定.

1.2.2 馒头水分的测定 称取 5 mm 大小的均匀立方馒头样品 2 g 左右,放入干燥后恒重的称量瓶中,置于烘箱中,将称量瓶的瓶盖斜放于瓶身上,102 ℃ 首次烘 3 h,取出将瓶盖盖好,放入干燥器中冷却半小时,称重;102 ℃ 再烘 1 h,取出冷却半小时,称重.直至前后两次的重量差 ≤ 2 mg,即为恒重.馒头水分计算公式如下:

$$\text{馒头水分} = (\text{样品干燥前质量} -$$

$$\text{干燥恒重后质量}) / \text{样品干燥前质量} \times 100\%$$

1.2.3 馒头质构(TPA)的测定 测定真空包装馒头在常温下储藏不同天数的 TPA 变化.测试参数:探头 P/2,穿孔距离 7.5 mm,测量速度 2.00 mm/s,触发力 5 g,每次检测两个样品,取其平均值.

1.2.4 馒头低场 NMR 的测定^[11] 利用 CPMG 脉冲序列测量样品的自旋 - 自旋弛豫时间 T_2 .将样品分别置于永久磁场中心位置的射频线圈中心,进行 CPMG 脉冲序列测样. CPMG 实验采用的参数:采样点数 $TD = 22\ 290$,回波个数 $CONH = 1\ 000$,重复扫

描次数 $NS = 32$,弛豫衰减时间 $D_0 = 1$ s.利用 Fit 拟合软件拟合出强结合水、结合水、自由水的百分比^[11].

1.2.5 馒头的红外测定 取少量馒头快速冻结,并在真空中冷冻干燥,采用 KBr 压片测定其红外谱图.扫描范围为 $4\ 000 \sim 400$ cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} .采用二阶导、傅里叶自退卷积和谱线拟合技术,对反应体系红外谱图的酰胺 I 带和 II 带进行处理,以推测馒头蛋白质二级结构的变化.

2 结果与讨论

2.1 真空包装馒头常温储藏的水分变化

分别取样馒头皮和馒头心,按照 GB 5009.3—2010 水分测定方法测试真空包装馒头储藏水分变化,平行测定 3 次求平均值,结果如图 1 所示.由图 1 可以看出,实验中馒头心存放 5 d 水分几乎没有变化,维持在 36% 左右,然而馒头皮的水分随储藏时间的延长而减少,在第 5 d 时水分含量减少了 1.59%.观察馒头表面,没有出现无包装自然状态储藏的皴裂情况,因为馒头在真空包装袋内形成水分平衡,减缓水分散发,使其水分得以保持.馒头水分的保持是其抗老化的关键因素之一,这说明采用真空包装方式储藏和配送是工业化生产馒头有效的抗老化措施.

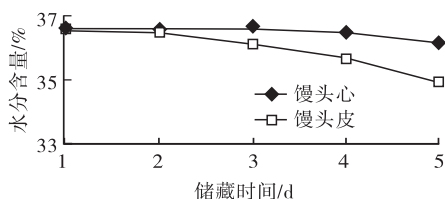


图 1 真空包装馒头常温储藏时水分变化情况

2.2 真空包装馒头常温储藏的 TPA 变化

真空包装馒头常温条件下储藏,每天取样测定其 TPA 值,结果如表 1 所示.由表 1 可知,存放 5 d 的真空包装馒头的胶黏性、咀嚼性、硬度和弹性均随着储藏时间的延长呈下降趋势,其中硬度和弹性变化的幅度不明显.这是因为馒头常温储藏期间,其凝胶结构发生变化,使其表皮弹性降低,但是表皮硬度没有增加,这主要是由于本研究中采用的真空包装材料隔水隔气性能优良,水分测定实验可以证实:储藏期间馒头水分损失很小,水分在储藏期间起到塑化剂的作用,它结合在聚合物中,增加了面制品中聚合物(如淀粉等)的柔韧性或延展性^[8].

由于本实验研究常温下真空包装对馒头储藏品质的影响,包装后没有作杀菌处理,因此,真空包装馒头在第5 d时表面开始长出霉菌。

表1 真空包装馒头常温储藏的TPA变化

储藏时间/d	胶黏性/ (g · min ⁻¹)	咀嚼性/ /g	硬度/ /g	弹性/ /g
1	2 145.22	1 655.54	5 110.23	0.810 9
2	2 136.44	1 651.63	5 107.45	0.810 0
3	1 881.37	1 439.16	4 523.23	0.784 0
4	1 725.42	1 394.53	4 189.52	0.773 0
5	1 697.06	1 329.59	4 039.98	0.764 5

2.3 真空包装馒头常温储藏的低场 NMR 质子信号变化

真空包装馒头常温储藏5 d,沿馒头顶部正中位置切成2 cm × 2 cm的立方体,离顶部0.5 cm切断为上部、离底部0.5 cm切断为下部、余为中部;分别从3个部位取样测定低场NMR,结果显示,质子信号在同一馒头中不同部位存在差异,相对来说中部的质子信号较稳定。

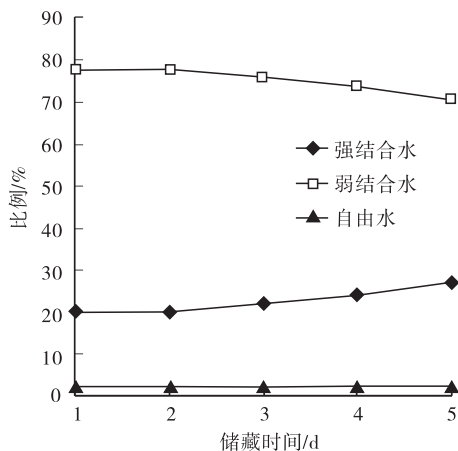


图2 真空包装常温储藏馒头上部强结合水、弱结合水和自由水比例随储藏时间的变化

常温储藏的馒头上部强结合水、弱结合水和自由水的比例变化如图2所示。由图2可以看出,强结合水和弱结合水随储藏时间变化较明显,但变化幅度不大,自由水基本没有变化,且维持在较低的水平。馒头中部3种形态水的分布见图3。由图3可以看出,馒头中部的强结合水比例维持在20%~30%之间,前4 d变化不大,第5 d下降较为明显;弱结合水比例维持在70%~80%之间,前4 d变化不大,在第5 d上升较为明显;自由水基本无变化。常温储藏的馒头下部强结合水、弱结合水和自由水的变化分布见图4,由图4可知,强结合水比例维持在20%~

60%之间,第5 d下降明显;弱结合水比例维持在40%~80%之间,第5 d上升明显;自由水基本无变化。综上可知,真空包装馒头3种状态水分变化幅度不明显,这可能是由于其与外界接触面积小,受环境影响较小。

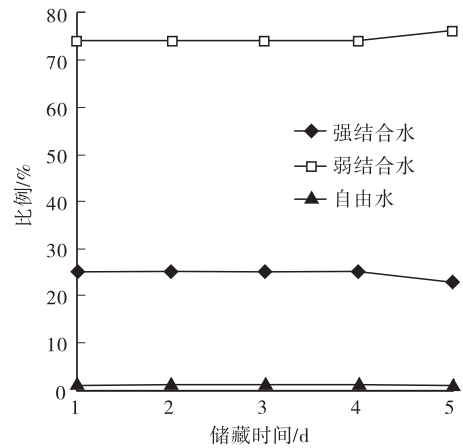


图3 真空包装常温储藏馒头中部强结合水、弱结合水和自由水比例随储藏时间的变化

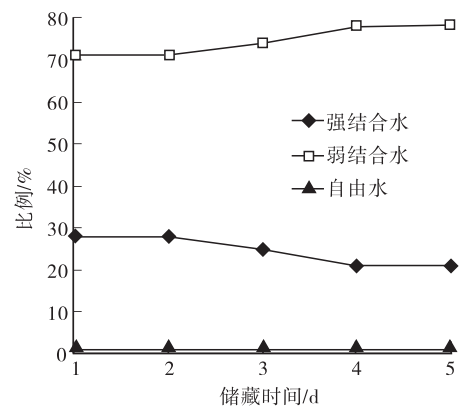


图4 真空包装常温储藏馒头下部强结合水、弱结合水和自由水比例随储藏时间的变化

2.4 真空包装馒头常温储藏的红外测定

蛋白质在红外区有明显的特征吸收带,其中酰胺I带和II带为强吸收带,这些吸收带与蛋白质二级结构的含量存在密切关系,研究表明傅里叶变换红外光谱实验技术是研究蛋白质二级结构变化的有力手段^[9,11]。真空包装馒头常温储藏皮部蛋白质中 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角和无规则卷曲的变化见图5。由图5可以看出,馒头皮部蛋白质中 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角随着储藏时间的延长呈明显上升趋势,而无规则卷曲从第2 d开始迅速下降。上述实验结果说明,随着储藏时间的延长,馒头皮部蛋白质的二级结构发生明显变化。

常温储藏真空包装馒头心部蛋白质中 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角和无规则卷曲的变化见图6. 由图6可以看出,馒头心部蛋白质中 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角随着储藏时间的延长呈上升趋势,其中 α 螺旋的上升幅度显著,而无规则卷曲则从第4d开始下降. 上述实验结果说明,随着储藏时间的延长,馒头心部蛋白质二级结构 α 螺旋发生明显的变化.

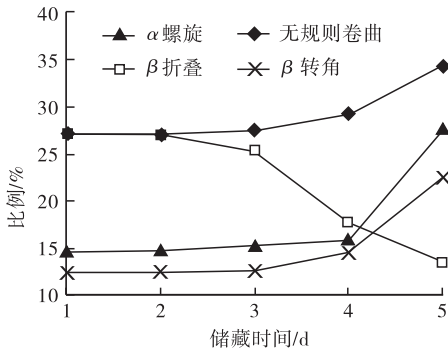


图5 真空包装常温储藏馒头皮部蛋白质中 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角和无规则卷曲比例随储藏时间的变化

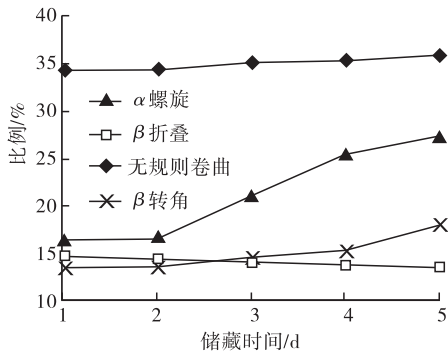


图6 真空包装常温储藏馒头心部蛋白质 α 螺旋、 β 折叠、 β 转角和无规则卷曲比例随储藏时间的变化

3 结论

本文利用真空包装形式保存馒头,探讨其在常温储藏过程中品质的变化情况. 结果表明:真空包装在常温储藏期间对馒头水分的保持效果较好;馒头心部的水分变化不明显,皮部的水分虽然在第5d减少了1.52%,但馒头的表面并未出现无包装自然状态储藏的皲裂情况. 低场NMR的数据显示,真空

包装馒头皮部和心部的3种水分形态变化不显著. 红外测定数据显示,馒头皮部蛋白质二级结构随储藏时间的延长变化较大,而其心部蛋白质二级结构中只有 α 螺旋变化较明显.

因此,真空包装方式是一种常温储藏馒头的有效手段,且操作简单,适于大规模工业化生产. 如果结合减菌处理技术,真空包装方式完全可以满足馒头工业化生产常温短期储藏的需求,人们可以放心选用.

参考文献:

- [1] 张天佐. 我国主食加工业发展现状特征和思路对策[J]. 农业工程技术:农产品加工业,2012(9):6.
- [2] 张泓,黄峰,胡宏海. 主食工业化亟待解决的问题[J]. 农产品加工,2014(5):18.
- [3] 李里特. 传统主食战略地位和发展研究[J]. 河南工业大学学报:社会科学版,2012,8(2):9.
- [4] 林向阳. 核磁共振及成像技术在面包制品加工与储藏过程中的研究[D]. 南昌:南昌大学,2006.
- [5] Esselink E, Van Aalst H, Maliapaard M, et al. Impact of industrial dough processing on structure: A rheology, nuclear magnetic resonance, and electron microscopy study [J]. Cereal Chemistry, 2003, 80(4):419.
- [6] Mahawanich T, Schmidt S J. Molecular mobility and the perceived sweetness of sucrose, fructose, and glucose solutions [J]. Food Chemistry, 2004, 84(2):169.
- [7] Ronaldo N M, Guilherme A M R. Nuclear magnetic resonance and water activity in measuring the water mobility in Pindato (*Pseudoplatystoma corruscans*) fish [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 58(1):59.
- [8] Balaban M, Pigott G M. Mathematical model of simultaneous heat and mass transfer in food with dimensional changes and variable transport parameters [J]. Food Science, 1988, 53:935.
- [9] 谢孟峡,刘媛. 红外光谱酰胺Ⅲ带用于蛋白质二级结构的测定研究[J]. 高等学校化学学报, 2003, 24(2):226.
- [10] 张丽,秦德志,杨维春,等. Pb^{2+} -牛血清白蛋白复合体系中蛋白质二级结构的研究[J]. 分析测试学报, 2010, 29(7):721.
- [11] 孙秀花,张锦胜,赵琴琴,等. 应用核磁共振技术对含抗性淀粉的速冻馒头的配方优化[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6):293.

普洱茶醇提不同萃取物的体外抑菌活性研究

吉杰丽¹, 薛桥丽², 谷大海¹, 朱仁俊³, 胡永金¹

(1. 云南农业大学 食品科学技术学院, 云南 昆明 650201;

2. 云南农业大学 图书馆, 云南 昆明 650201;

3. 云南农业大学 人事处, 云南 昆明 650201)

摘要:采用滤纸片扩散法研究了普洱茶95%醇提萃取物石油醚、氯仿、乙酸乙酯、正丁醇和萃取后剩余物对金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和大肠杆菌(*E. coli*)的体外抑菌效果及普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性的稳定性. 结果表明:上述4种普洱茶醇提萃取物对*S. aureus*和*E. coli*均有一定的抑制作用,其中,乙酸乙酯萃取物的抑菌效果最好,对两种受试菌抑菌圈直径分别为(31.88±0.24)mm和(22.81±0.31)mm,最小抑菌浓度MIC分别为0.47mg/mL和0.35mg/mL. 乙酸乙酯萃取物稳定性实验结果表明:普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物在不同温度和紫外光照条件下均具有良好的抑菌稳定性,但酸碱性对其抑菌活性影响明显,抑菌效果随pH值的增大而逐渐变差.

关键词:普洱茶;醇提萃取物;抑菌活性

中图分类号:TS202.3 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.004

Antibacterial activity of different extracts of Pu'er tea alcohol extraction in vitro

Ji Jie-li¹, Xue Qiao-li², Gu Da-hai¹, Zhu Ren-jun³, Hu Yong-jin¹

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Library, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

3. Department of Personnel, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Using Pu'er tea as raw material, filter paper diffusion method was adopted to study the antibacterial activity of petroleum ether, chloroform, ethyl acetate, n-butyl alcohol and residues after extraction from Pu'er tea 95% alcohol extraction in vitro on *S. aureus* and *E. coli*. The antibacterial activity stability of ethyl acetate extracts was also studied. The results indicated that the above four Pu'er tea extracts had certain degree of inhibitory effect against *S. aureus* and *E. coli*. Among them, ethyl acetate extracts on *S. aureus* and *E. coli* inhibitory effect was the best, and bacteriostatic ring diameters of two kinds of subjects were (31.88±0.24)mm and (22.81±0.31)mm, MIC were 0.47mg/mL and 0.35mg/mL respectively. The ethyl acetate extracts stability experimental results showed that ethyl acetate extracts was very stable antibacterial activity to temperature and UV irradiation, but the acid and alkaline influenced its antimicrobial activity obviously, antibacterial activity became poor gradually with pH increasing.

Key words: Pu'er tea; alcohol extraction; antibacterial activity

收稿日期:2015-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31060270);云南省自然科学基金项目(2011FZ091)

作者简介:吉杰丽(1987—),女,湖南省益阳市人,云南农业大学硕士研究生,主要研究方向为功能活性物质.

通信作者:胡永金(1972—),男,云南省永胜县人,云南农业大学教授,博士,主要研究方向为功能性食品与生物.

0 引言

普洱茶是我国云南省的名茶,其存在历史悠久^[1],它是云南省特有的大叶茶(*Camellia sinensis* Kuntze. var. *assamica* Kitamura)晒青毛茶为原料,采用潮水、渥堆、陈化及干燥等特殊的加工发酵工艺制成^[2]。特殊的产地环境、发酵工艺及特有的大叶茶原料,使其具有独特的口味和多种特殊功效。普洱茶对食品中常见的病原微生物有明显的抑制作用,不同的普洱茶醇提萃取物对易造成细菌性食物中毒、引起一系列疾病的金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和大肠杆菌(*E. coli*)均表现出不同程度的抑制作用。近年来,研究发现普洱茶除了具有抗氧化、抗癌、降血脂等药理功能之外,还具有高效的抗菌作用^[3-4]。韩小溪等^[3]研究了普洱茶水提物和普洱茶不同浓度乙醇提取物对 *S. aureus* 的抑制作用,结果表明,普洱茶水提物、75%乙醇提取物和95%乙醇提取物均对 *S. aureus* 有抑制作用,其中95%乙醇提取物的抑菌效果最好,最小抑菌浓度(MIC)为0.63 mg/mL。本文拟针对不同的腐败菌或致病菌,对比分析普洱茶醇提不同萃取物的体外抑菌效应和最小抑菌浓度,同时测定乙酸乙酯萃取组分的抑菌活性稳定性,旨在为将普洱茶萃取物的抑菌作用应用于食品工业和医药行业提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:普洱熟茶,云南滇南古韵茶叶有限公司产。

试剂:乙醇、石油醚、氯仿、乙酸乙酯、正丁醇,均为分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司产;盐酸(36%~38%)、氢氧化钠(AR),天津市大茂化学试剂厂产;柠檬酸、十二水合磷酸氢二钠,均为分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司产。

受试菌种类和培养基:*E. coli* 冻干菌种、*S. aureus* 冻干菌种,均购于广东环凯微生物科技有限公司,分别采用马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)和营养琼脂进行活化。

仪器:FY130型中药植物粉碎机,天津市科器高新技术公司产;RE-52A型旋转蒸发仪,上海亚荣生化有限公司产;SHB-ⅢA型循环水式真空泵,北京中兴伟业仪器有限公司产;LABCONCO型冷冻干燥仪,美国LABCONCO公司产;LDZX-40B1型立式蒸汽灭菌锅,上海华线医疗设备厂产;SHP型生化培养箱,北京中兴伟业有限公司产;SW-CJ-2F

型超净工作台,苏州净化设备有限公司产;DELTA320型移液枪,瑞士Mettler公司产;S20K型pH计,梅特勒-托利多公司产;BS110S型电子天平,沈阳龙腾电子有限公司产;ZF-2型三用紫外仪,上海安亭电子仪器厂产。

1.2 实验方法

1.2.1 普洱茶醇提萃取物的制备 将普洱散茶样品粉碎,过80目筛。在室温条件下,用95%乙醇浸泡8h左右,浸提的固液比(*m/v*)为1:10,浸提两次,抽滤得到浸提液,经旋转蒸发浓缩再冷冻干燥至恒重,得到普洱茶醇提物。依次用石油醚、氯仿、乙酸乙酯、正丁醇进行萃取,经旋转蒸发浓缩再冷冻干燥至恒重,得到普洱茶醇提不同的萃取物,将其置于4℃冰箱中备用。

1.2.2 抑菌效果的测定

1.2.2.1 菌种活化和菌悬液的制备 将受试菌接种于新鲜斜面培养基上,置于37℃恒温培养箱活化24h后,用无菌生理盐水制成菌悬液。采用10倍稀释法将菌悬液进行梯度稀释。选择3个适宜的稀释度,各吸取0.2 mL的菌悬液,分别加入到含有营养琼脂培养基的培养皿中,表面涂布均匀,于37℃下培养24h,观察菌落生长结果。选取能均匀长满整个培养皿的菌液浓度作为供试浓度^[3]。

1.2.2.2 滤纸片扩散法^[4] 量取0.2 mL供试浓度的菌悬液转移至已准备好的平板培养基表面,进行均匀涂布。用无菌镊子夹取已备好的滤纸片(直径6 mm),置于上述已接种的培养基表面,每个平皿放3片,每个样品做3个重复,以无菌水作空白对照,在37℃的条件下培养24h后,采用十字交叉法用游标卡尺量取抑菌圈直径(mm),取其平均值为测定结果。

判定标准:以抑菌圈直径大于6 mm的样品溶液判定为有抑菌作用,无菌水对照组所测直径为滤纸片直径,无抑菌圈产生,否则实验无效。

1.2.2.3 MIC的测定 用对倍稀释法^[5-6]将不同萃取物稀释成相应浓度梯度,然后吸取1 mL稀释液与19 mL 60℃的营养琼脂培养基混合均匀,倒入培养平板中,待培养基凝固后,在其表面转移0.2 mL受试菌悬液进行涂布。每个样液浓度做3个平行,并做1个未接种对照。不断缩小样品浓度梯度,在37℃条件下培养24h,观察第一个无菌落生长的培养皿,此皿的萃取物浓度即为萃取物样品的MIC值。

1.2.3 抑菌活性稳定性的考察^[5-6]

1.2.3.1 热稳定性 将0.02 g/mL乙酸乙酯浸膏溶液分别置于4℃,25℃,60℃,80℃,100℃,

121 ℃下处理 30 min,冷却至室温,以 *S. aureus* 和 *E. coli* 为指示菌,用抑菌圈直径法测定热处理后样品的抑菌效果,实验重复3次,取其平均值为测定结果。

1.2.3.2 酸碱稳定性 将 pH 值分别为 3,4,5,6,7,8 的柠檬酸 - Na_2HPO_4 缓冲溶液与 0.02 g/mL 的乙酸乙酯浸膏溶液等体积混合,以无菌水、缓冲溶液作对照,*S. aureus* 和 *E. coli* 为指示菌,用抑菌圈直径法测定酸碱处理后样品的抑菌效果,实验重复3次,取其平均值为测定结果。

1.2.3.3 紫外光照稳定性 用紫外光(254 nm, 20 W, 样距 5 cm)照射 0.02 g/mL 乙酸乙酯浸膏溶液,照射时间分别为 5 min,10 min,20 min,30 min,40 min,60 min,以未经紫外光照射的乙酸乙酯浸膏溶液作对照,*S. aureus* 和 *E. coli* 为指示菌,用抑菌圈直径法测定紫外光照处理后样品的抑菌效果,实验重复3次,取其平均值为测定结果。

2 结果与讨论

2.1 普洱茶醇提不同萃取物的抑菌效果

2.1.1 普洱茶醇提石油醚萃取物的抑菌效果

图1为不同浓度普洱茶醇提石油醚萃取物分别对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果.由图1可以看出,石油醚萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 均有较强的抑制作用,且抑菌圈直径与浓度呈正相关.浓度为 2 mg/mL 时,对受试菌的抑菌圈直径分别为 *S. aureus* (7.04 ± 0.12) mm, *E. coli* (6.08 ± 0.10) mm;当浓度达到 20 mg/mL 时,抑菌圈直径分别为 *S. aureus* (13.43 ± 0.17) mm, *E. coli* (13.32 ± 0.15) mm,由此可知,普洱茶醇提石油醚萃取物对革兰氏阳性菌 *S. aureus* 的抑制作用大于对革兰氏阴性菌 *E. coli* 的抑制作用。

2.1.2 普洱茶醇提氯仿萃取物的抑菌效果 图2为不同浓度普洱茶醇提氯仿萃取物分别对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果.由图2可以看出,当萃取物浓度为 2 mg/mL 时,对 *S. aureus* 无抑制作用,其余浓度(4~20 mg/mL)均对 *S. aureus* 有抑制作用;萃取物浓度范围为 2~20 mg/mL 时,均对 *E. coli* 有一定的抑制作用.萃取物浓度为 20 mg/mL 时,抑菌圈直径分别为 *S. aureus* (10.94 ± 0.09) mm, *E. coli* (12.89 ± 0.21) mm.由此可知,普洱茶醇提氯仿萃取物对革兰氏阴性菌 *E. coli* 的抑制作用强于对革兰氏阳性菌 *S. aureus* 的抑制作用。

2.1.3 普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物的抑菌效果

图3为不同浓度普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物分别对

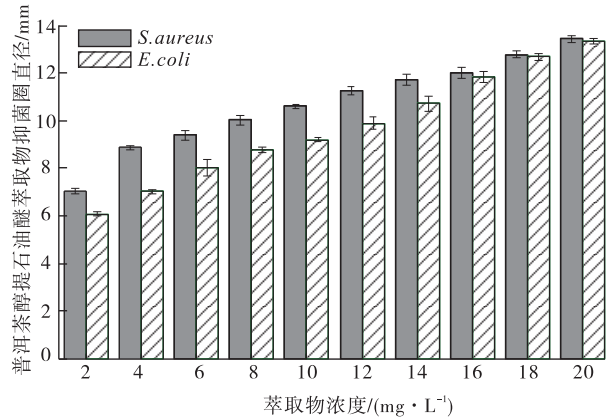


图1 不同浓度普洱茶醇提石油醚萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果

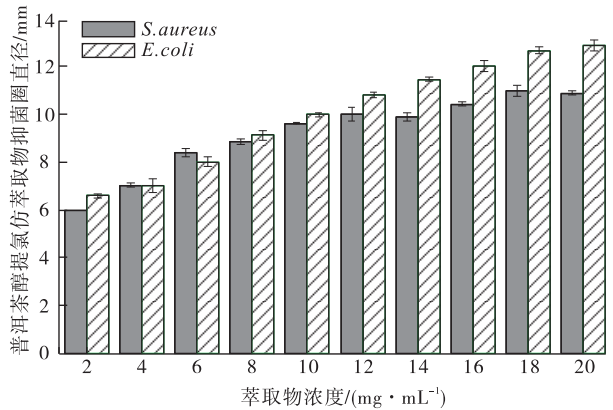


图2 不同浓度普洱茶醇提氯仿萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果

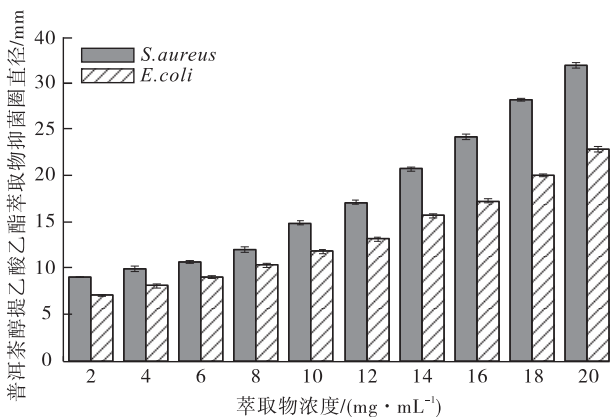


图3 不同浓度普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果

S. aureus 和 *E. coli* 的抑制效果.由图3可以看出,不同浓度乙酸乙酯萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 均有很强的抑制作用,且抑菌圈直径与浓度呈正相关.萃取物浓度为 2 mg/mL 时,受试菌的抑菌圈直径分别为 *S. aureus* (9.00 ± 0.04) mm, *E. coli* ($7.00 \pm$

0.05) mm;当浓度达到 20 mg/mL 时,抑菌圈直径达到最大,分别为 *S. aureus* (31.88 ± 0.24) mm, *E. coli* (22.81 ± 0.31) mm. 由此可知,普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物对革兰氏阳性菌 *S. aureus* 的抑制作用明显强于对革兰氏阴性菌 *E. coli* 的抑制作用.

2.1.4 普洱茶醇提正丁醇萃取物的抑菌效果 图 4 为不同浓度普洱茶醇提正丁醇萃取物分别对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果. 由图 4 可以看出,不同浓度正丁醇萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 均有较强的抑制作用,且抑菌圈直径与萃取物浓度呈正相关. 萃取物浓度为 2 mg/mL 时,受试菌的抑菌圈直径分别为 *S. aureus* (7.80 ± 0.11) mm, *E. coli* (6.60 ± 0.08) mm;当浓度为 20 mg/mL 时,抑菌圈直径达到最大,分别为 *S. aureus* (27.42 ± 0.30) mm, *E. coli* (19.69 ± 0.19) mm. 由此可知,普洱茶醇提正丁醇萃取物对革兰氏阳性菌 *S. aureus* 的抑制作用强于对革兰氏阴性菌 *E. coli* 的抑制作用.

2.1.5 普洱茶醇提萃取剩余物的抑菌效果 图 5 为不同浓度普洱茶醇提萃取后剩余物分别对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果. 由图 5 可以看出,萃取物浓度为 2 mg/mL 时,对受试菌均无抑制作用,其余浓度(4 ~ 20 mg/mL)均对受试菌有一定的抑制作用,萃取物浓度为 20 mg/mL 时,受试菌抑菌圈直径分别为 *S. aureus* (13.61 ± 0.09) mm, *E. coli* (10.14 ± 0.07) mm. 由此可知,普洱茶醇提萃取剩余物对革兰氏阳性菌 *S. aureus* 的抑制作用明显强于对革兰氏阴性菌 *E. coli* 的抑制作用.

2.1.6 普洱茶醇提不同萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的 MIC 的测定 表 1 为普洱茶醇提不同萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的 MIC 的测定结果. 由表 1 可见,不同萃取物对 *S. aureus* 的 MIC 的结果是:

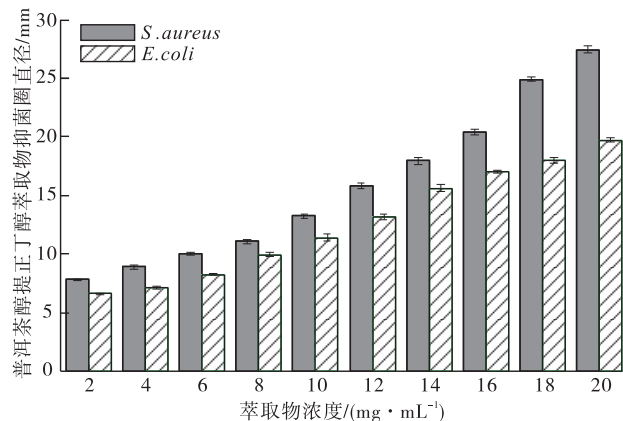


图 4 不同浓度普洱茶醇提正丁醇萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果

氯仿 > 石油醚 > 剩余物 > 正丁醇 > 乙酸乙酯,不同萃取物对 *E. coli* 的 MIC 的结果是:剩余物 > 石油醚 > 正丁醇 > 氯仿 > 乙酸乙酯. 乙酸乙酯萃取物对受试菌的 MIC 均最小,分别为 *S. aureus* 0.47 mg/mL, *E. coli* 0.35 mg/mL.

2.2 普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性稳定性的实验

2.2.1 热稳定性实验 图 6 为温度对普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性的影响. 由图 6 可以看出,经热处理后的普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑菌活性均没有明显影响,对两种受试菌的抑菌性能较稳定.

2.2.2 酸碱稳定性实验 图 7 为不同 pH 值对普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性的影响. 由图 7 可以看出,普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 抑菌效果的变化趋势相似:抑菌圈直径均随 pH 值的增大而降低;当乙酸乙酯萃取物为弱碱性时,对 *S. aureus* 抑菌效果较差,对 *E. coli* 几乎无抑菌效果.

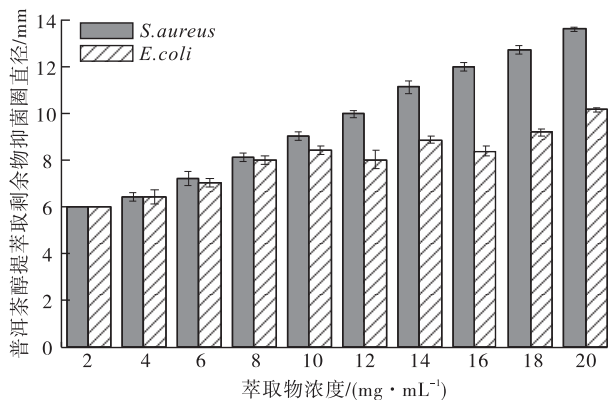


图 5 不同浓度普洱茶醇提萃取剩余物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑制效果

表 1 普洱茶醇提不同萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的 MIC 测定结果 mg/mL

受试菌	石油醚	氯仿	乙酸乙酯	正丁醇	剩余物
<i>S. aureus</i>	1.33	2.81	0.47	0.72	1.30
<i>E. coli</i>	1.30	0.70	0.35	0.71	1.35

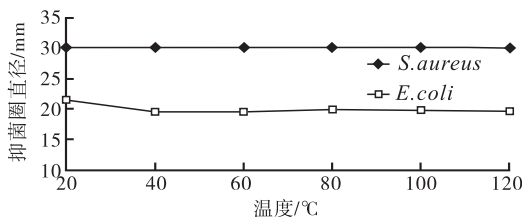


图 6 温度对普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性的影响

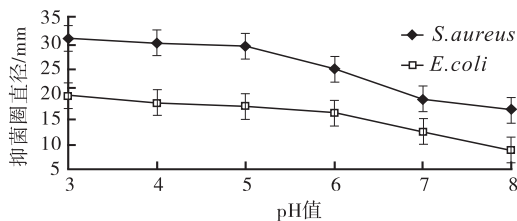


图7 不同pH值对普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性的影响

2.2.3 紫外光照稳定性实验 图8为紫外光照时间对普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性的影响。由图8可以看出,经过紫外光照射后的普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑菌活性均有微弱下降,但随着紫外光照时间的延长,两种受试菌抑菌圈直径均没有明显减小。

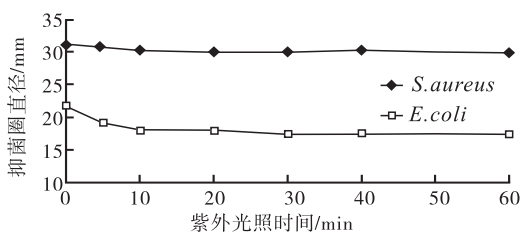


图8 紫外光照时间对普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性的影响

综上所述,在4种普洱茶醇提萃取物中,乙酸乙酯萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑菌效果最好, MIC 分别为 0.47 mg/mL, 0.35 mg/mL, 其对 *S. aureus* 的抑制效果要好于普洱茶95%乙醇提取物^[3],说明乙酸乙酯萃取使普洱茶醇物中的抑菌活性物质得到了进一步的分离提取。

3 结论

本文以 *S. aureus* 和 *E. coli* 为受试菌,采用滤纸

片扩散法分别探讨了不同普洱茶醇提萃取物石油醚、氯仿、乙酸乙酯、正丁醇和萃取后剩余物的抑菌效果与 MIC 值,得出如下结论:普洱茶醇提各萃取物在 4 ~ 20 mg/mL 范围内对 *S. aureus* 和 *E. coli* 均有一定的抑制作用;乙酸乙酯萃取物对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑菌效果大于其余几种萃取物,其 MIC 分别为 0.47 mg/mL, 0.35 mg/mL. 对普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物抑菌活性稳定性研究结果表明:普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物对温度和紫外光照具有良好的抑菌稳定性,但 pH 值对其抑菌活性影响明显,抑菌效果随 pH 值的增大而逐渐变差. 普洱茶醇提乙酸乙酯萃取物的有效抑菌活性为进一步分离普洱茶中有效抑菌活性成分奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 陈兴琰. 茶树原产地——云南[M]. 昆明:云南人民出版社,1994:15-25.
- [2] 程启坤,姚国坤,张莉颖. 普洱茶的概念与所属茶类的探讨[C]//第九届国际茶文化研讨会论文集,昆明:云南科技出版社,2006:20-23.
- [3] 韩小溪,薛桥丽,杨华松,等. 普洱茶提取物对金黄色葡萄球菌的影响[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2014,29(1):34.
- [4] Hu Y J, Qiao J L, Zhang X, et al. Antimicrobial activity of magnolia officinalis extracts in vitro and its effects on the preservation of chilled mutton[J]. Journal of Food Biochemistry, 2011, 35(2):425.
- [5] Sharma A, Gupta S, Sarethy I P, et al. Green tea extract: Possible mechanism and antibacterial activity on skin pathogens[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2):672.
- [6] Bancirova M. Comparison of the antioxidant capacity and the antimicrobial activity of black and green tea[J]. Food Research International, 2010, 43(5):1379.

HPLC 法测定粮谷中赭曲霉毒素 A 含量 结果的不确定度评定

李万鹏¹, 弓丽华¹, 付爽²

(1. 河南广电量检测有限公司 食品实验室, 河南 郑州 450001;
2. 河南检验检疫鉴定咨询中心, 河南 郑州 450003)

摘要:通过建立 HPLC 法测定粮谷中赭曲霉毒素 A (OTA) 含量的不确定度评定方法, 计算测定过程中各分量的标准不确定度和扩展不确定度, 对测定结果的不确定度来源及相对贡献进行比较与评定. 结果表明: 测定结果的不确定度来源于校准不确定度、样品称量不确定度和体积不确定度、前处理过程样品回收率 (*Rec*) 不确定度和仪器测定过程中的不确定度, 其中, 校准不确定度中标准溶液配制不确定度的相对贡献最多, 体积不确定度最小; 当粮谷中 OTA 的含量为 3.17 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 时, 其扩展不确定度为 0.476 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (包含因子 $k=2$). 因此, 检测人员应严格按照规范配制标准溶液, 同时把握好前处理过程中提取、净化、洗脱等步骤的关键控制点, 从而将测定结果的不确定度控制在可接受的范围内.

关键词: HPLC 法; 粮谷; 赭曲霉毒素 A; 不确定度

中图分类号: TS207.4; 065 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.005

Uncertainty evaluation in the determination result of ochratoxin A in cereal grains by HPLC

LI Wan-peng¹, GONG Li-hua¹, FU Shuang²

(1. Food Laboratory, He'nan GRG Metrology & Test Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. Consultancy Centre of He'nan Inspection & Quarantine Identification of P. R., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: An evaluation method for uncertainty in measuring ochratoxin A (OTA) in cereal grains with HPLC was established. Standard uncertainty and expanded uncertainty of the components in the process of the determination were calculated, an evaluation and comparison on the sources of uncertainty and the relative contribution were made. The results showed that the sources of the determination result uncertainty could be attributed to uncertainty of calibration, weighting sample, volume, recovery and testing by instrument. Preparing standard solution of the uncertainty of calibration accounted for the largest proportion of the uncertainty, and the uncertainty of volume accounted for the minimum. The expanded uncertainty was 0.476 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (coverage factor $k=2$) when the content of OTA was 3.17 $\mu\text{g}/\text{kg}$ in cereal grains. Therefore, testing personnel should prepare standard solution strictly in accordance with the specification, at the same time, hold good critical control points of pretreatment process steps such as extraction, purification,

收稿日期: 2015-04-14

作者简介: 李万鹏(1983—), 男, 河南省郑州市人, 河南广电量检测有限公司助理工程师, 主要研究方向为食品质量与安全.

elution and so on, in order to control the uncertainty of the determination results in an acceptable range.

Key words: HPLC; cereal grains; ochratoxin A (OTA); uncertainty

0 引言

赭曲霉毒素是一组主要污染食品的真菌毒素,其中,赭曲霉毒素 A (OTA) 对农产品的污染最严重,毒量高、毒性大、分布广泛,具有致癌、致突变和免疫抑制作用,对人类、动物的肝和肾脏的毒性最大。GB 2761—2011^[1] 中规定,在谷物及其制品中 OTA 的限量为 5.0 μg/kg。因此,准确测定粮谷中 OTA 的含量非常重要。

不确定度是合理表征、赋予被测量值的分散性与测量结果相联系的参数,是科学评价检测结果的参数之一^[2]。陈荔红等^[3-6] 曾对乳粉、肉类和姜等食品中不同参数的测定进行不确定度评定,发现不确定度的主要来源是测量重复性、回收率 (Rec) 和体积等。本文拟采用 HPLC 法,并依据 GB/T 23502—2009^[7] 测定 OTA 在粮谷中的含量,参照 CNAS GL06—2006^[2], JJF 1059—1999^[8] 和 M. Robertson 等^[9-10] 对不确定度的研究,通过分析和量化各不确定度分量对测定结果的影响,计算被测量物质的标准不确定度和扩展不确定度,分析不确定度分量对测定结果不确定度的相对贡献,以期对评价测定结果的准确性和可靠性提供依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

主要试剂:OTA 标准物质(纯度 99.9%),美国 O2si Smart Solutions 产;甲醇(分析纯),西陇化工股份有限公司产;氯化钠、碳酸氢钠,均为分析纯,天津市致远化学试剂有限公司产;吐温-20(分析纯),阿拉丁试剂(上海)有限公司产。缓冲液配制:称取 25.0 g 氯化钠和 5.0 g 碳酸氢钠溶于水中,加入 0.1 mL 吐温-20,用水稀释至 1 L。

主要仪器:ME204E/02 电子天平(感量 0.1 mg),美国梅特勒-托利多公司产;e2695 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司产;Sunfire C18 色谱柱(4.6 mm × 150 mm, 5 μm),美国 Waters 公司产;OTA 免疫亲和柱,美国 Beacon 公司产;Silent Crusier M 高速均质器,德国海道夫公司产。

1.2 实验方法

参照 GB/T 23502—2009 免疫亲和柱净化高效

液相色谱法进行。

1.2.1 实验步骤 首先用乙腈水溶液提取样品中的 OTA,得到 OTA 提取液,再用含有 OTA 特异性抗体的免疫亲和柱净化提取液(利用抗体与相应抗原之间的免疫亲和反应),最后用高效液相色谱仪(配有荧光检测器)确证,外标法定量。

1.2.2 测定过程 称取已粉碎的粮谷 20 g(精确至 0.01 g)于 100 mL 容量瓶中,加入 5 g 氯化钠,用甲醇-水($v:v=4:1$)溶液定容至刻度,涡旋混合振荡 1 min 后,转移至均质器中,8 000 r/min 匀浆混合提取 2 min,经离心得到上清液后,准确移取 10.0 mL 于 50 mL 容量瓶中,加水定容,混合均匀,经玻璃纤维滤纸过滤后备用。

在 10 mL 玻璃注射器上端连接 OTA 免疫亲和柱,准确吸取 10.0 mL 上述备用液于玻璃注射器中,调节压力,使溶液通过 OTA 免疫亲和柱的流速保持在约 1 滴/s,直至有空气进入亲和柱中。再分别用 10 mL 缓冲液、10 mL 水依次淋洗免疫亲和柱,弃去流出液,抽干小柱。用 1.0 mL 甲醇洗脱 OTA,收集全部洗脱液于玻璃试管中,用甲醇定容至 1.0 mL, HPLC 法测定。

1.2.3 色谱条件 流动相:乙腈+水+冰乙酸(体积份数 99+99+2);柱温:室温;进样量 20 μL;流速 1.0 mL/min;荧光检测器:激发波长 333 nm,发射波长 477 nm。

1.2.4 定量方法 用浓度为(10.03 ± 0.86) mg/L 的标准储备液逐级稀释,配成浓度分别为 50 μg/L, 10 μg/L, 5 μg/L, 2.5 μg/L, 1 μg/L 的系列标准工作溶液,5 种不同浓度的标准工作液均用 HPLC 法重复测定 3 次,取平均值,标准工作曲线用最小二乘法拟合进行校准得到浓度-峰面积曲线。

1.2.5 OTA 含量的计算公式 按照下式计算 OTA 的含量。

$$X = \frac{(c - c_0) \times V \times 1\,000 \times f}{m \times 1\,000 \times Rec} \times f_{ref}$$

式中, X 表示样品中 OTA 的含量/(μg · kg⁻¹), c 表示提取样品中 OTA 最终定容 1 mL 甲醇溶液中 OTA 的浓度/(ng · mL⁻¹), c_0 表示提取空白样品中 OTA 最终定容 1 mL 甲醇溶液中 OTA 的浓度/(ng · mL⁻¹), V 表示样品提取 OTA 后最终的定容体积/

mL, f 表示样品稀释倍数, m 表示样品的称样量/g, f_{rel} 表示重复性因子。

2 结果与讨论

2.1 不确定度来源分析

对不确定度因素的分析见图 1。结合图 1, 从检测原理、方法及 OTA 含量计算公式到溶液的配制、仪器的使用来看, 可以认定 OTA 检测结果的不确定度主要来源于校准不确定度、样品称量不确定度、体积不确定度、前处理过程样品 Rec 的不确定度、随机效应带入的不确定度等。

2.2 不确定度分量的评定

2.2.1 校准不确定度 校准过程中的不确定度包含两种不确定因素: 一是标准溶液配制的不确定度, 二是计算样品中 OTA 浓度时带入的不确定度。

2.2.1.1 标准溶液配制的不确定度

1) 标准物质的不确定度: 不同厂家生产的标准物质的纯度不同, 由其所导致的不确定度也不同, 查找 OTA 标准物质的出厂证书可以知道其浓度为 (10.03 ± 0.86) mg/L, 置信水平为 95%, 不确定度为正态分布, 故其标准不确定度(u) 和相对标准不确定度(u_{rel}) 分别为

$$u(c_s) = \frac{0.86}{1.96} \text{ mg/L} = 0.44 \text{ mg/L}$$

$$u_{\text{rel}}(c_s) = \frac{u(c_s)}{c_s} = \frac{0.44}{10.03} = 0.044$$

2) 中间标准溶液配制的不确定度: 在配制中间标准溶液时, 准确吸取浓度为 (10.03 ± 0.86) mg/L

的 OTA 标准储备溶液 1 mL 于 10 mL 容量瓶中, 用甲醇定容, 得到浓度为 $1.00 \mu\text{g/mL}$ 的中间标准溶液。配制过程中使用移液器吸取标准储备液时, 会引入一定的不确定度, 依据 JJG 646—2006 移液器检定规程^[11] 中相应的最大允差(MPE), 并根据矩形分布计算可以得到 $u(V_1)$ 和 $u_{\text{rel}}(V_1)$ 分别为

$$u(V_1) = \frac{1 \times 1\%}{\sqrt{3}} \text{ mL} = 0.00577 \text{ mL}$$

$$u_{\text{rel}}(V_1) = \frac{u(V_1)}{V_1} = \frac{0.00577}{1} = 0.0058$$

同样可以根据 JJG 196—2006 规程^[12] 得到, 配制过程中使用的 10 mL 容量瓶的允差为 ± 0.020 mL, $u(V_2)$ 和 $u_{\text{rel}}(V_2)$ 分别为

$$u(V_2) = \frac{0.020}{\sqrt{3}} \text{ mL} = 0.0115 \text{ mL}$$

$$u_{\text{rel}}(V_2) = \frac{u(V_2)}{V_2} = \frac{0.0115}{10} = 0.0012$$

3) 标准工作液配制的不确定度: 标准工作液由 $1.00 \mu\text{g/mL}$ 的中间标准溶液经逐级稀释, 分别配成浓度为 $50 \mu\text{g/L}$, $10 \mu\text{g/L}$, $5 \mu\text{g/L}$, $2.5 \mu\text{g/L}$, $1 \mu\text{g/L}$ 的标准工作液。配制过程中使用了大小不同的移液器, 由此产生的不确定度如表 1 所示, 依据 JJG 646—2006 移液器检定规程中相应的 MPE, 计算得到

$$u_{\text{rel}}(V_s) = \sqrt{u_1^2 + 2 \times u_2^2 + u_3^2 + 5 \times u_4^2 + \dots + u_5^2} = 0.048$$

综上所述, 标准溶液配制带入的不确定度为

$$u_{\text{rel}}(\text{ref}) =$$

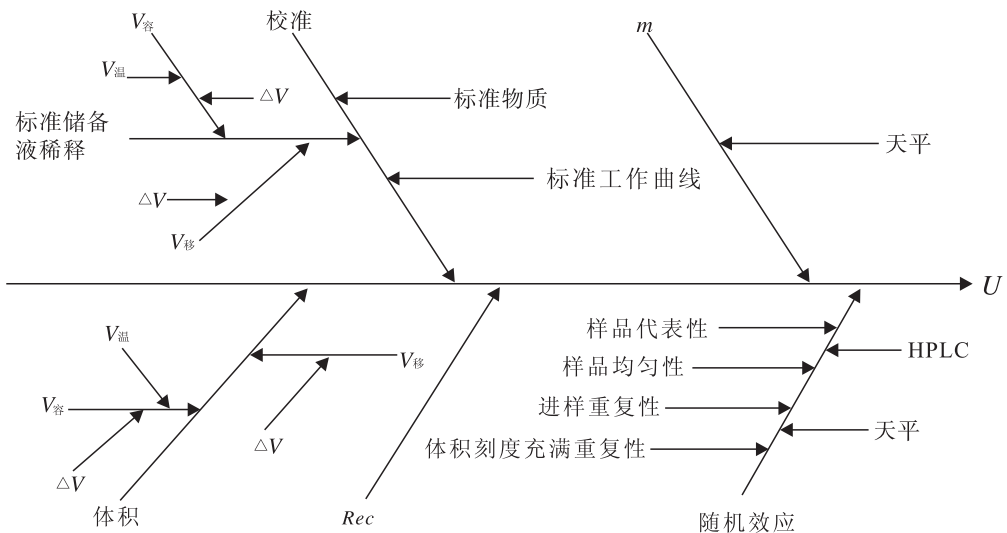


图 1 不确定度因素的分析图

$$\sqrt{u_{rel}^2(c_s) + u_{rel}^2(V_1) + u_{rel}^2(V_2) + u_{rel}^2(V_3)} = \sqrt{0.044^2 + 0.0058^2 + 0.0012^2 + 0.048^2} = 0.0654$$

2.2.1.2 计算样品中 OTA 浓度带入的不确定度

样品中 OTA 浓度测定过程采用所配制的 50 μg/L, 10 μg/L, 5 μg/L, 2.5 μg/L, 1 μg/L 的标准工作液, 每个浓度分别测定 3 次, 得到 3 次对应的峰面积 A_1 — A_3 , 根据最小二乘法计算, 拟合求得标准工作曲线的一元一次方程 $A = 895\ 158C - 224\ 677$, 结果见表 2。

将得到的 3 次样品峰面积值 ($A_1 = 8\ 951\ 273$, $A_2 = 8\ 866\ 347$, $A_3 = 9\ 125\ 334$) 代入标准曲线方程中, 求得 3 次测定的平均浓度 $C = 10.29\ \mu\text{g/L}$, 样品中 OTA 的浓度根据标准曲线求得, 而标准曲线的拟合过程中存在着一定的不确定度, 其 $u(c)$ 值为

$$u(c) = \frac{s(A)}{b} \sqrt{\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(c - \bar{c}_s)^2}{S_{CC}}} = \frac{186\ 956.0}{895\ 158} \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{15} + \frac{(10.29 - 13.7)^2}{1\ 693.80}} = 0.133$$

式中, $s(A)$ 表示标准溶液峰面积残差的标准差,

$$s(A) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [A_j - (a + bC_j)]^2}{n - 2}} = 186\ 956.0; A \text{ 表示标准溶液平均峰面积; } C \text{ 表示标准溶液浓度; } \bar{c}_s \text{ 表示标准溶液的平均浓度/}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}); S_{CC} \text{ 表示标准溶液浓度残差的平方和, } S_{CC} = \sum_{j=1}^n (c_{sj} - \bar{c}_s)^2 = 1\ 693.80; n \text{ 表示标准溶液的测定次数, 本实验取 } n = 15; p \text{ 表示试样的测定次数, 本实验取 } p = 3.$$

标准曲线的拟合过程中存在的 $u_{rel}(c)$ 值为

$$u_{rel}(c) = \frac{u(c)}{c} = \frac{0.133}{10.29} = 0.0129$$

综上所述, 校准过程带入的不确定度为

$$u_{rel}(cal) = \sqrt{u_{rel}^2(ref) + u_{rel}^2(c)} = \sqrt{0.0654^2 + 0.0129^2} = 0.0667$$

2.2.2 样品称量不确定度 称量样品时使用了电子天平, 而其本身就存在着一定的不确定度, 通过查电子天平的检定证书, 知其 $MPE = \pm 0.5\ \text{mg}$, 进而计算得到 $u(m)$ 和 $u_{rel}(m)$ 分别为

$$u(m) = \frac{0.5}{\sqrt{3}}\ \text{mg} = 0.289\ \text{mg}$$

$$u_{rel}(m) = \frac{u(m)}{m} = \frac{0.289}{20 \times 1\ 000} = 0.000\ 014\ 45$$

2.2.3 体积不确定度

2.2.3.1 配制过程中容量瓶的不确定度 称取 20 g 样品于 100 mL 容量瓶中, 并定容至刻度, 根据 JJG 196—2006 规程, 配制过程中使用到的 100 mL A 级容量瓶的 $MPE = \pm 0.10\ \text{mL}$, 计算可以得到 $u(V_3)$ 和 $u_{rel}(V_3)$ 分别为

$$u(V_3) = \frac{0.10}{\sqrt{3}}\ \text{mL} = 0.0577\ \text{mL}$$

$$u_{rel}(V_3) = \frac{u(V_3)}{V_3} = \frac{0.0577}{100} = 0.000\ 58$$

准确移取均质离心后的上清液 10 mL 定容至 50 mL 容量瓶中, 根据 JJG 196—2006 规程, 使用到

表 1 使用不同量程移液器时的不确定度

移液器 量程/mL	吸取标液 体积/mL	MPE(移 液器)/%	u (移 液器)/mL	u_{rel} (移液器)	定容总 体积/mL	定容所需 移液/mL	MPE(1 mL 移液器)/%	u (1 mL 移液器)/mL	u_{rel} (1 mL 移液器)
0.1	0.05	3.0	0.001 73	$u_1 = 0.035$	1	0.95	1.0	0.005 77	$u_2 = 0.005\ 8$
0.2	0.2	1.5	0.001 73	$u_3 = 0.008\ 6$	1	0.8	1.0	0.005 77	$u_2 = 0.005\ 8$
1.0	0.5	1.0	0.005 77	$u_4 = 0.012$	1	0.5	1.0	0.005 77	$u_4 = 0.012$
1.0	0.5	1.0	0.005 77	$u_4 = 0.012$	1	0.5	1.0	0.005 77	$u_4 = 0.012$
1.0	0.4	1.0	0.005 77	$u_5 = 0.014$	1	0.6	1.0	0.005 77	$u_4 = 0.012$

表 2 标准工作液测定结果和标准曲线方程

标准溶液浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	峰面积			
	A_1	A_2	A_3	平均值
1	855 534	890 681	810 756	852 324
2.5	2 181 316	2 361 891	1 937 229	2 160 145
5	4 282 312	4 176 233	4 119 835	4 192 793
10	8 361 874	8 686 357	8 137 591	8 395 274
50	42 325 761	46 887 593	44 569 804	44 594 386
拟合结果	$A = 895\ 158C - 224\ 677$	$R^2 = 0.9\ 999$	截距 $a = -224\ 677$	斜率 $b = 895\ 158$

的 50 mL 的容量瓶的 $MPE = \pm 0.05$ mL, 计算得到 $u(V_4)$ 和 $r_{\text{rel}}(V_4)$ 分别为

$$u(V_4) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \text{ mL} = 0.0289 \text{ mL}$$

$$u_{\text{rel}}(V_4) = \frac{u(V_4)}{V_4} = \frac{0.0289}{50} = 0.00058$$

洗脱后, 用甲醇定容至 1 mL 容量瓶中, 根据 JJG 196—2006 规程, 1 mL 容量瓶的 $MPE = \pm 0.010$ mL, 计算得到 $u(V_5)$ 和 $u_{\text{rel}}(V_5)$ 分别为

$$u(V_5) = \frac{0.010}{\sqrt{3}} \text{ mL} = 0.00578 \text{ mL}$$

$$u_{\text{rel}}(V_5) = \frac{u(V_5)}{V_5} = \frac{0.00578}{1} = 0.0058$$

2.2.3.2 移液器的不确定度 测定过程中移取样品提取液 10.0 mL 两次. 根据 JJG 646—2006 规程, 10 mL 移液器的 $MPE = \pm 0.6\%$, 计算得到 $u(V_6)$ 和 $u_{\text{rel}}(V_6)$ 分别为

$$u(V_6) = \frac{10 \times 0.6\%}{\sqrt{3}} \text{ mL} = 0.0346 \text{ mL}$$

$$u_{\text{rel}}(V_6) = \frac{u(V_6)}{V_6} = \frac{0.0346}{10} = 0.0035$$

2.2.3.3 温度效应的不确定度

1) 由温度效应造成的 100 mL 容量瓶的不确定度. 实验处理过程的温度条件一般为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 此时温度所造成的 100 mL 容量瓶的体积变化为

$$V_{\text{temp}100} = 100 \times 5 \times 3.3 \times 10^{-6} \text{ mL} = 0.00165 \text{ mL}$$

式中, 3.3×10^{-6} 为玻璃的热膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$.

同样可以根据矩形分布计算求得 $u(V_{\text{temp}100})$ 和 $u_{\text{rel}}(V_{\text{temp}100})$ 分别为

$$u(V_{\text{temp}100}) = \frac{0.00165}{\sqrt{3}} \text{ mL} = 0.000953 \text{ mL}$$

$$u_{\text{rel}}(V_{\text{temp}100}) = \frac{u(V_{\text{temp}100})}{V_{100}} = \frac{0.000953}{100} = 0.0000095$$

2) 由温度效应造成的 50 mL, 10 mL, 1 mL 容量瓶的不确定度. 按照 $u_{\text{rel}}(V_{\text{temp}100})$ 的计算方法得到:

$$u_{\text{rel}}(V_{\text{temp}50}) = \frac{u(V_{\text{temp}50})}{V_{50}} = \frac{0.000476}{50} = 0.0000095$$

$$u_{\text{rel}}(V_{\text{temp}10}) = \frac{u(V_{\text{temp}10})}{V_{10}} = \frac{0.0000953}{10} = 0.0000095$$

$$u_{\text{rel}}(V_{\text{temp}1}) = \frac{u(V_{\text{temp}1})}{V_1} = \frac{0.00000953}{1} = 0.0000095$$

由此得到温度效应带入的不确定度为①.

综上所述, 体积不确定度是由配制过程中容量瓶的不确定度、移液器的不确定度和温度效应带入的不确定度带来的, 由此计算得到体积不确定度为②.

2.2.4 前处理过程样品 Rec 的不确定度 取一份确定不含有待测物质 OTA 的样品(阴性基质样品), 处理前加入一定量的 OTA, 处理后可以得到 OTA 的测定值, 经计算可以得到 Rec, 称取 6 份阴性基质样品, 分别加入相同量 5.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的 OTA 进行平行加标测定, 测定的 Rec 分别为 88.2%, 91.6%, 81.2%, 82.8%, 91.4%, 87.2%, 平均回收率 $\bar{R} = 87.1\%$, 标准偏差 $S_R = 4.31\%$, 计算得到 $u(\bar{R})$ 和 $u_{\text{rel}}(\bar{R})$ 分别为

$$u(\bar{R}) = \frac{S_R}{\sqrt{n}} = \frac{4.31\%}{\sqrt{6}} = 0.0176$$

$$u_{\text{rel}}(\bar{R}) = \frac{u(\bar{R})}{\bar{R}} = \frac{0.0176}{87.1\%} = 0.0202$$

2.2.5 随机效应带入的不确定度 按照 GB/T 23502—2009 测定阳性粮谷中 OTA 含量, 结果分别为 3.19 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 3.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 3.31 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均值 $\bar{\omega} = 3.17 \mu\text{g}/\text{kg}$, 标准偏差 $S(\bar{\omega}) = 0.015 \mu\text{g}/\text{kg}$, 计算测定过程中伴随的随机效应导致的 $u(\bar{\omega})$ 和 $u_{\text{rel}}(\bar{\omega})$ 分别为

$$u(\bar{\omega}) = \frac{S(\bar{\omega})}{\sqrt{n}} = \frac{0.151}{\sqrt{3}} \mu\text{g}/\text{kg} = 0.0872 \mu\text{g}/\text{kg}$$

$$u_{\text{rel}}(\bar{\omega}) = \frac{u(\bar{\omega})}{\bar{\omega}} = \frac{0.0872}{3.17} = 0.0275$$

2.3 主要不确定度分量对不确定度的贡献

表 3 为主要不确定度分量对不确定度的相对贡献. 由表 3 可知, 标准溶液配制的不确定度的相对贡献占绝大部分, 随机效应次之, 体积的影响相对较小, 因此, 在测量的过程中要严格控制标准溶液的配制.

$$\textcircled{1} \quad u_{\text{rel}}(V_{\text{temp}}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(V_{\text{temp}100}) + u_{\text{rel}}^2(V_{\text{temp}50}) + u_{\text{rel}}^2(V_{\text{temp}10}) + u_{\text{rel}}^2(V_{\text{temp}1})} = 0.000019$$

$$\textcircled{2} \quad u_{\text{rel}}(V) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(V_3) + u_{\text{rel}}^2(V_4) + u_{\text{rel}}^2(V_5) + 2 \times u_{\text{rel}}^2(V_6) + u_{\text{rel}}^2(V_{\text{temp}})} = \sqrt{0.00058^2 + 0.00058^2 + 0.0058^2 + 2 \times 0.0035^2 + 0.000019^2} = 0.00683$$

表3 主要不确定度分量的相对贡献

不确定度分量	相对标准不确定度 $u(y_i)$	相对贡献 $[u(y_i)/u(y)]^2/\%$
标准溶液配制影响	0.065 40	75.63
校准曲线拟合影响	0.012 90	2.94
体积的影响	0.006 83	0.82
样品前处理 Rec	0.020 20	7.22
随机效应的影响	0.027 50	13.37

2.4 合成不确定度

测定样品中 OTA 含量结果中

$$u_{c,rel}(\bar{\omega}) =$$

$$\frac{\sqrt{u_{rel}^2(cal) + u_{rel}^2(m) + u_{rel}^2(V) + u_{rel}^2(\bar{R}) + u_{rel}^2(\bar{\omega})}}{\sqrt{0.066^2 + 0.000\ 014\ 45^2 + 0.006\ 83^2 + 0.020\ 2^2 + 0.027\ 5^2}} = 0.075\ 2$$

2.5 扩展不确定度

本实验粮谷中 OTA 的含量为 $3.17\ \mu\text{g}/\text{kg}$, 则其标准不确定度

$$u_c(\bar{\omega}) = \bar{\omega} \times u_{c,rel}(\bar{\omega}) = 3.17 \times 0.075\ 2 = 0.238\ \mu\text{g}/\text{kg}$$

在没有特殊要求的情况下, 按照国际惯例, 取扩展因子 $k=2$, 置信概率 $p=95\%$, 则 OTA 测量结果的相对扩展不确定度

$$U = k \times u_c(\bar{\omega}) = 2 \times 0.238 = 0.476\ \mu\text{g}/\text{kg}$$

3 结论

本文采用 HPLC 法测定粮谷中 OTA 的含量, 通过分析和量化各分量不确定度对测定结果的影响, 计算得出各分量的标准不确定度和扩展不确定度, 并对测定结果的不确定度来源及各分量相对贡献进行比较和评定, 得到如下结论: 1) 测量结果的不确定度主要来源于标准溶液的配制, 其次是随机效应、样品前处理 Rec 和校准曲线拟合, 体积的影响最

小; 2) 实验结果的不确定度可表示为 $(3.17 \pm 0.476)\ \mu\text{g}/\text{kg}$. 因此, 在测定过程中, 检测人员应严格按照规范配制标准溶液, 减小定容和移液过程中产生的不确定度; 同时, 还应把握好前处理过程中提取、净化、洗脱等步骤的关键控制点. 只有这样, 才能把不确定度控制在可接受的范围内.

参考文献:

- [1] GB 2761—2011, 食品安全国家标准·食品中真菌毒素限量[S].
- [2] CNAS GL06—2006, 化学分析中不确定度的评估指南[S].
- [3] 陈荔红. 高效液相色谱法测定全脂乳粉中苯甲酸含量的测定不确定度评定[J]. 质量技术监督研究, 2011(5): 27.
- [4] 常晨阳, 王碧生, 方成俊, 等. LC-MS/MS 法测定动物源食品中吡喃西林代谢物不确定度的评定[J]. 现代农业科技, 2014(12): 274.
- [5] 钟帼歌, 富志军. LC-MS 法测定猪肉中喹诺酮类药物残留的不确定度评定[J]. 海峡药学, 2014, 26(2): 63.
- [6] 倪永付, 闫秋成, 朱莉萍, 等. LC-MS/MS 法测定鲜姜中涕灭威及其代谢物的不确定度评定[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(23): 95.
- [7] GB/T 23502—2009, 食品中赭曲霉毒素 A 的测定·免疫亲和层析净化高效液相色谱法[S].
- [8] JJF 1059—1999, 测量不确定度评定与表示[S].
- [9] Robertson M, Chan T S S. APLAC interpretation and guidance on the estimation of uncertainty of measurement in testing[J]. Journal of AOAC International, 2003, 86(5): 1070.
- [10] Kuang Y C, Rajan A, Ooi M P L, et al. Standard uncertainty evaluation of multivariate polynomial[J]. Measurement, 2014, 58: 483.
- [11] JJG 646—2006, 移液器检定规程[S].
- [12] JJG 196—2006, 常用玻璃量器检定规程[S].

我国人工栽培和野生黑色羊肚菌的 菌种鉴定及系统发育分析

何培新¹, 刘伟^{1,2}, 蔡英丽³, 贺新生⁴

- (1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 中国科学院 水生生物研究所, 湖北 武汉 430072;
3. 华中农业大学 应用真菌研究所, 湖北 武汉 430071;
4. 西南科技大学 生命科学学院, 四川 绵阳 621002)

摘要:采用常规形态学原理,结合核糖体 DNA 转录间隔区(ITS)序列分析技术,对我国4个羊肚菌主要栽培菌株和5个主要采集自川渝地区的野生分离物进行菌株鉴定和系统发育分析,研究遵循羊肚菌 MLST 数据库的序列鉴定程序,基于系统研究过的可靠序列信息,对获得的 ITS 序列进行逐一比对,选取相似度靠前的信息,构建系统发育树.结果表明,目前我国大面积种植的羊肚菌分别为梯纹羊肚菌、六妹羊肚菌和七妹羊肚菌;5个野生种质分别鉴定为梯纹羊肚菌和高羊肚菌.

关键词:羊肚菌;ITS 序列分析技术;菌种鉴定;系统发育;种质资源

中图分类号:Q93;S567.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.006

Strain identification and phylogenetic analysis of cultivated and wild strains of *Morchella* belonging to *Elata Clade* in China

HE Pei-xin¹, LIU Wei^{1,2}, CAI Ying-li², HE Xin-sheng³

- (1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;
3. Institute of Applied Mycology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430071, China;
4. College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China)

Abstract: Applying regular morphology combined with the technology of ITS sequence analysis, the identification and phylogenetic analysis of the 4 cultivated strains and 5 wild morel isolates mainly collected from Sichuan province and Chongqing municipality were carried out. The study followed the sequence identification program required by data bank of multilocus sequence typing(MLST). The phylogenetic tree was constructed with reliable sequences obtained from BLAST one-by-one comparison. The results suggested that the cultivated morel varieties were identified as *Morchella importuna*, *M. sextelata* and *M. septimelata*. In addition, 5 wild isolates were identified as *M. elata* and *M. importuna*, respectively.

Key words: *Morchella*; ITS sequence analysis technique; strain identification; phylogenetic; germplasm resource

收稿日期:2015-04-08

基金项目:河南省科技创新杰出青年项目(134100510017)

作者简介:何培新(1970—),男,河南省民权县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为菌类生物技术.

通信作者:刘伟(1984—),男,河南省镇平县人,中国科学院水生生物研究所助理研究员,硕士,主要研究方向为微生物遗传.

0 引言

羊肚菌(*Morchella*)隶属于子囊菌亚门(Ascomycotina),是世界性分布的珍稀名贵食用菌,具有较大的食用和药用价值^[1]。虽然羊肚菌野生种质资源比较丰富,但是仅靠人工采集仍难以满足市场需求,且大量采集也会破坏羊肚菌的自然生态,造成种质资源的不断减少。近年来,我国人工栽培羊肚菌(主要是黑色羊肚菌支系的种类)取得了突破性进展,特别是川渝一带的“大田人工羊肚菌栽培技术”^[2],推广面积不断扩大。然而,目前我国羊肚菌的人工栽培也面临着很多亟待解决的问题,其中,还未确定广泛栽培品种的分类地位等问题比较突出,在一定程度上制约了羊肚菌产业的健康、稳定和长远发展。

基于宏观和微观形态特征的传统分类所造成的羊肚菌同物异名和异物同名的现象比较严重^[1]。核糖体 DNA 转录间隔区 ITS (internal transcribed spacer) 序列分析技术广泛用于真菌的分子鉴定和系统发育分析^[3-4],然而,由于基因库(Genbank) ITS 数据是由不同作者提交的,可能存在着定种不准确等问题,影响基于 ITS 序列分析的鉴定结果。鉴于此,J. W. Taylor 等^[5]采用多基因谱系一致性系统发育物种识别法,通过分析多个基因的 DNA 序列来界定物种,使分类与鉴定结果更加科学和客观。该技术有效地应用于羊肚菌的分类和系统发育分析,提出羊肚菌属由黄色羊肚菌支系(*Esculenta Clade*)、黑色羊肚菌支系(*Elata Clade*)和变红羊肚菌支系(*Rufobrunnea Clade*)构成^[6-8];开发了羊肚菌多基因序列模标数据库 MLST (multilocus sequence typing),收录了大量准确鉴定的羊肚菌分子信息^[9]。本文拟采用常规形态学原理,结合 ITS 序列分析技术,对目前我国广泛使用的黑色羊肚菌支系的 4 个栽培品种和 5 个主要采集于川渝地区的野生分离物进行分子鉴定和系统发育分析,以期规范我国羊肚菌人工栽培及野生羊肚菌驯化和菌种选育等提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

主要材料:羊肚菌野生分离物 M-4, M-12, M-14, M-15 和 M-19,组织分离自各地采集的野

生子囊果,子囊果发生地详见图 1。栽培菌株 M-16, M-17, M-18 和 M-20 的商业名称分别为羊肚菌 1 号、3 号、6 号和 7 号,由重庆市彭水县诚志食用菌股份合作社提供,其余标出基因号的材料均来自基因库。

试剂:酵母粉、胰蛋白胨,均为生化试剂,北京双旋微生物培养基制品厂产;Tris 碱、EDTA,均为分析纯,上海生工生物工程有限公司产;琼脂糖、琼脂粉,均为生化试剂,西班牙 Biowest 公司产;葡萄糖、氯化钠、冰乙酸和氢氧化钠,均为分析纯,国药上海化学试剂公司产;真菌基因组 DNA 抽提试剂盒(Ezup)、PCR 扩增试剂盒(Taq)、柱式 DNA 胶回收试剂盒(UNIQ-10)、T-载体 PCR 产物克隆试剂盒、染色剂和凝胶上样缓冲液,均购自上海生工生物工程有限公司;ITS₁ 和 ITS₄ 特异扩增引物,均由上海生工生物工程有限公司合成;DL2000 DNA Marker,宝生物工程(大连)有限公司产。

仪器:CF16RXII 高速冷冻离心机,日本株式会社日立制作所产;PCR 仪(P×2),美国 Thermo Electron 产;UV2000 紫外/可见分光光度计,上海凤凰光学科仪有限公司产;BioRad 3000 双恒电泳仪,美国 BioRad 公司产;BS200S 电子分析天平,北京赛多利斯天平有限公司产;ULTRA-LUM OMEGA 10 凝胶成像系统,美国 OMEGA 公司产;HH-4 电热数字恒温水浴锅,常州国华电器有限公司产;SPX-160B-2 恒温培养箱,上海福玛实验设备有限公司产;101A-1 电热恒温鼓风干燥箱,上海市实验仪器总厂产;DSX-280A 不锈钢手提式灭菌锅,上海申安医疗器械厂产;SN-CJ IFD 超净化工作台,苏净集团苏州安泰空气技术有限公司产;Zeiss A1 显微镜,德国 Zeiss 公司产。

1.2 实验方法

1.2.1 形态学鉴定 供试分离物首先通过菌丝形态、产色素情况和菌核性状等进行初步鉴定,并结合子囊果宏观形态和子囊、侧丝、子囊孢子等微观形态特征,进行传统分类学鉴定^[11]。

1.2.2 分子鉴定和系统发育分析 羊肚菌菌丝体培养、基因组 DNA 提取、ITS 序列扩增与测序、序列比对分析等参见文献[12]。序列测定后,通过测序峰图去掉两端低质量的测序碱基,并进行合并拼接,获得完整的 ITS 序列数据。将拼接完整的数据与经过系统研究的相关基因序列一起进行系统发育分析。系统发

育分析采用 Clustal X 和 MEGA 5.0 软件进行:原始数据首先通过 Clustal X 比对对齐,获得 aln 文件;通过 MEGA 5.0 读取 aln 文件,转换为 meg 格式,构建泊松检测系统发育树.发育树构建采用 NJ 法(邻近遗传距离法),泊松值设定为 1 000,种子选定为“随机”,其他参数均设定为软件默认参数^[13].

2 结果与讨论

图 1 为黑色羊肚菌支系栽培及野生种类的系统发育聚类图.常规形态学特征结合 ITS 序列分析鉴定结果表明,羊肚菌 1 号和羊肚菌 3 号为梯纹羊肚菌 (*M. importuna*),羊肚菌 6 号为六妹羊肚菌 (*M. sextelata*),羊肚菌 7 号为七妹羊肚菌 (*M. septimelata*).它们均被聚类于黑色羊肚菌支系.

梯纹羊肚菌目前我国栽培应用最为广泛,占种植面积的 95% 以上.王波等^[2]对成都市大邑县、

崇州市、郫县和涪城区的羊肚菌栽培品种进行了鉴定,发现栽培品种都是梯纹羊肚菌.羊肚菌 1 号是目前我国推广应用最广的品种,该品种原基初期细长,高 5 ~ 8 mm,直径 2 ~ 3 mm,豆芽状,浅白色或米白色;原基发育 2 ~ 3 d 后,分化出菌盖和菌柄,表现为二者分离,菌盖灰白色、浅灰色,菌柄基部有细绒毛;3 ~ 5 d 后,菌盖颜色加深,表现为黑褐色、灰黑色,开始分化形成脊,菌柄基部稍膨大,有沟痕出现;原基出现后 15 ~ 25 d 子实体成熟(气温不同,子实体成熟需要的时间不等).成熟子囊果菌盖颜色比幼嫩时稍浅,呈浅灰色、灰黑色或浅褐色,脊竖直排列,与菌盖等表面横隔,与脊垂直,呈梯格状.羊肚菌 1 号菇型稳定,变异度小;适应 6 ~ 23 °C 较宽温度范围,出菇周期长.羊肚菌 3 号主要在原基形态和分化时间方面与 1 号品种不同:原基短粗,高 3 ~ 5 mm,直径 2 ~ 3 mm;菌盖与菌柄分化较早,通常在

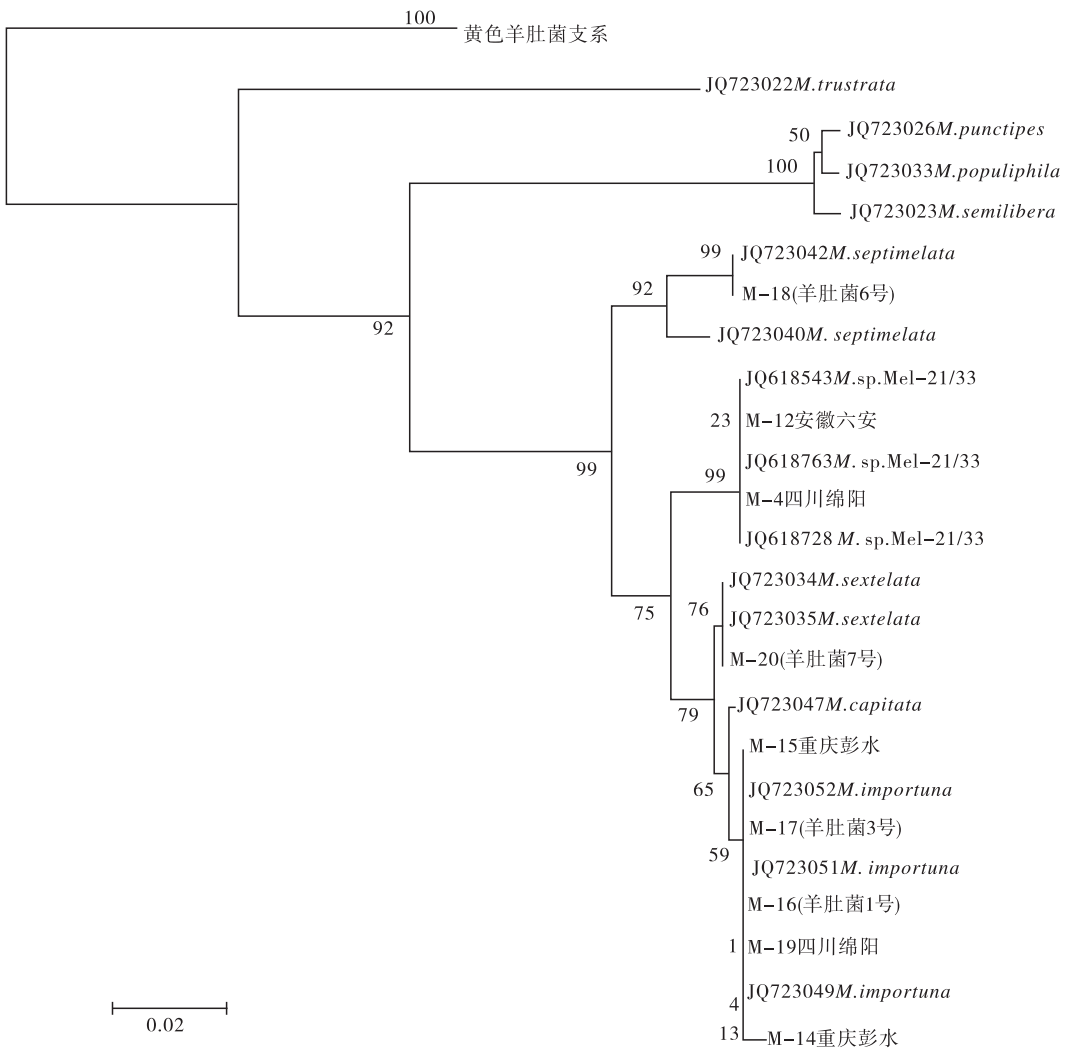


图 1 黑色羊肚菌支系栽培及野生种类的系统发育聚类图

能观察到原基的时候,菌盖已经开始分化;此外,3号品种是爆发性出菇,出菇密度较高。

六妹羊肚菌和七妹羊肚菌是近年来才被描述的两个品种^[8-9,14-15],呈欧洲-东亚-美洲间断式分布。二者的宏观和微观形态没有明显差异,但ITS等保守基因序列却差异较大,因此被定义为两个不同的品种^[14]。这两种羊肚菌同属于黑色羊肚菌支系,主要形态特征为:子囊果中等偏大(8~14 cm);随着子囊果的成熟,菌盖颜色由棕黄色、金黄色逐渐加深;菌柄与菌盖之间的连接处有细微可辨的凹痕。我国六妹羊肚菌和七妹羊肚菌主要自然生长于云南省,曾被认为是“最易成功栽培”的喜火烧地的黑色羊肚菌种类^[1,14,16];然而这两种羊肚菌目前在我国的栽培面积不大,但其产量与梯纹羊肚菌相当,因而具有很好的开发利用前景。

野生羊肚菌自然种质中,自然生长于四川绵阳的M-4和安徽六安为M-12为高羊肚菌(*M. elata*),重庆彭水的2个分离物(M-14和M-15)与来自四川绵阳的M-19为梯纹羊肚菌(图1),表明我国川渝地区羊肚菌自然种质资源非常丰富,这与前人的报道一致^[9,17]。高羊肚菌野生种质资源也比较丰富,是有待于进一步开发利用的另一个种类。

3 结论

本文采用常规形态学原理,结合ITS序列分析技术,将目前我国广泛人工栽培的羊肚菌品种鉴定为梯纹羊肚菌、六妹羊肚菌和七妹羊肚菌,其中,梯纹羊肚菌为主要的栽培种类,六妹羊肚菌和七妹羊肚菌的人工栽培有待于进一步推广应用;5个野生种质分别被鉴定为梯纹羊肚菌和高羊肚菌。分析鉴定结果表明,我国蕴含着丰富的野生羊肚菌种质资源,可为人工驯化栽培和菌种选育提供大量素材,有利于我国羊肚菌产业的持续和长远发展。

参考文献:

[1] 杜习慧,赵琪,杨祝良.羊肚菌的多样性、演化历史及栽培研究进展[J].菌物学报,2014,33(2):183.
 [2] 王波,鲜灵.人工栽培羊肚菌的鉴定[J].西南农业学报,2013,26(5):1988.
 [3] Ohyanagi H,Ikeo K,Gojobori T. Eukaryotic nuclear structure explains the evolutionary rate difference of ribosome export factors [J]. Gene,2008,421(1/2):7.

[4] Fischer M,Binder M. Species recognition,geographic distribution and host-pathogen relationships;a case study in a group of lignicolous basidiomycetes,*Phellinus* s. l. [J]. Mycologia,2004,96(4):799.
 [5] Taylor J W,Jacobson D J,Kroken S,et al. Phylogenetic species recognition and species concepts in fungi [J]. Fungal Genetics and Biology,2000,31(1):21.
 [6] O'Donnell K,Rooney A P,Mills G L,et al. Phylogeny and historical biogeography of true morels (*Morchella*) reveals an early Cretaceous origin and high continental endemism and provincialism in the Holarctic [J]. Fungal Genetics and Biology,2010,48(3):252.
 [7] Taşkın H,Büyükalaca S,Dogan H H,et al. A multigene molecular phylogenetic assessment of true morels (*Morchella*) in Turkey [J]. Fungal Genetics and Biology,2010,47(8):672.
 [8] Taşkın H,Büyükalaca S,Hansen K,et al. Multilocus phylogenetic analysis of true morels (*Morchella*) reveals high levels of endemics in Turkey relative to other regions of Europe [J]. Mycologia,2012,104(2):446.
 [9] Du X H,Zhao Q,Yang Z L,Hansen K,et al. How well do ITS rDNA sequences differentiate species of true morels (*Morchella*)? [J]. Mycologia,2012,104(6):1351.
 [10] 何培新,刘伟,贺新生,等.粗柄羊肚菌内生真菌多样性研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2014,29(3):1.
 [11] 魏景超.真菌鉴定手册[M].上海:上海科学技术出版社,1979.
 [12] 刘如钢,魏涛,何培新,等.裸盖菇属的真菌鉴定及分子系统学初探[J].微生物学通报,2006,33(2):44.
 [13] Bunyard B A. A systematic assessment of *Morchella* using RFLP analysis of the 28S ribosomal RNA gene [J]. Mycologia,1994,86(6):762.
 [14] Kuo M,Dewsbury D R,O'Donnell K,et al. Taxonomic revision of true morels (*Morchella*) in Canada and the United States [J]. Mycologia,2012,104(5):1159.
 [15] Richard F,Bellanger J M,Clowez P,et al. True morels (*Morchella*,*Pezizales*) of Europe and North America:evolutionary relationships inferred from multilocus data and a unified taxonomy [J]. Mycologia,2015,107(2):359.
 [16] 臧穆.东喜马拉雅引人注目的高等真菌和新种[J].云南植物研究,1987(1):81.
 [17] Du X H,Zhao Q,O'Donnell K,et al. Multigene molecular phylogenetics reveals true morels (*Morchella*) are especially species-rich in China [J]. Fungal Genetics and Biology,2012,49(6):455.

感染性指标 C-反应蛋白 胶体金检测法的初步建立

李静芳¹, 王云龙^{1,2,3}, 李玉林², 王继创², 程蕾², 邓黎黎³

- (1. 新乡医学院 医学检验学院, 河南 新乡 453003;
2. 河南省生物工程技术研究中心, 河南 郑州 450001;
3. 郑州市职业技术学院 生物工程系, 河南 郑州 450046)

摘要:采用 C-反应蛋白(CRP)单克隆配对抗体进行标记、包被,制成胶体金免疫层析试纸条,通过定值血清标定,制成有明显梯度显色的配套比色卡,并对其符合率、稳定性、精密性等进行检测,实现了对 CRP 的半定量检测.结果表明,该方法具有较高的稳定性、精密性、重复性,与乳胶比浊法平行比较检测 100 份临床血清,两者符合率达 98%,初步建立的半定量 CRP 胶体金检测法,具有操作简便、结果清晰明了、无需特殊实验设备辅助等优点.

关键词:C-反应蛋白;胶体金法;半定量检测

中图分类号:R446.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.007

The initial establishment of infection target C-reactive protein colloidal gold method

LI Jing-fang¹, WANG Yun-long^{1,2,3}, LI Yu-lin², WANG Ji-chuang², CHENG Lei², DENG Li-li³

(1. College of Laboratory Medicine, Xinxiang Medical University, Xinxiang 453003, China;

2. He'nan Biotechnology Research Center, Zhengzhou 450001, China;

3. Department of Biological Engineering, Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Colloidal gold immune chromatography strip was prepared by using C-reactive protein monoclonal antibody pairs to label and coat. The color card with obvious gradient color was made by serum calibration, and the coincidence rate, stability and precision of the strip and color card were detected, thus the C-reactive protein semiquantitative detecting was achieved. The results showed that this method had high repeatability, stability and precision. Compared with latex turbidimetry to detect 100 clinical serum parallelly, the two methods both met the coincidence rate of 98%. Semiquantitative C-reactive protein colloidal gold method was initially established, and it was easy in operation, clear in result and needed no special auxiliary device.

Key words: C-reactive protein(CRP); colloidal gold method; semi-quantitative detecting

0 引言

C-反应蛋白(C-reactive protein, CRP)是一种

急性时相蛋白,无特异性^[1]. CRP作为一种在肝脏合成的炎症因子,对感染性炎症极为敏感,其血清含量能够迅速反映出机体所处的各种炎症状态及

严重程度^[2],急性期浓度可升高上百甚至上千倍,反复的炎症刺激可使CRP值持续升高.一般情况下,炎症损伤6~8 h,CRP值开始上升,24~48 h达到高峰,7~12 d以后逐渐恢复正常^[3].CRP在临床上常常被视为细菌感染或病毒感染的首选指标,它可以指导规范使用抗生素^[4].

目前,CRP检测常用的方法主要有免疫比浊法、酶联免疫吸附法、金标法等^[5].但以上检测方法均需使用特殊仪器设备,成本较高,在很大程度上限制了中小型医疗机构的使用.金标法因其具有方便、快速、标本使用量少、特异性高、单份试剂检测方便等优点,在床旁快速检测(POCT)中显示出良好的应用前景^[6].本文拟通过自建胶体金试纸条和配套比色卡,实现CRP半定量检测结果的快速获取,以利于临床医生为患者提供更为简便有效的诊断方法.

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

材料:氯金酸、柠檬酸三钠、碳酸钾、氯化钠,均为AR级,上海国药集团试剂有限公司产;C-反应蛋白配对单克隆抗体、兔抗鼠多克隆抗体,均由河南省生物工程技术研究中心提供;临床定值血清标本、3种CRP定值血清 C_1 、 C_2 、 C_3 (CRP值分别为100 $\mu\text{g}/\text{mL}$,50 $\mu\text{g}/\text{mL}$,10 $\mu\text{g}/\text{mL}$),由河南省郑州大学第一附属医院提供;C-反应蛋白检测试剂盒(乳胶比浊法)(以下简称“对照试剂”),西班牙Biosystems S. A公司产;C-反应蛋白检测试剂盒(免疫比浊法)(以下简称“复核试剂”),德国Roche Diagnostics GmbH公司产.

仪器:HM 3030型三维平面点膜喷金仪、CT300型裁条机,均由上海金标生物科技有限公司产;SHT型搅拌调温电热套,山东鄞城华鲁电热仪器有限公司产;T616-W型微量高速离心机,长沙湘仪离心仪器有限公司产.

1.2 实验方法

1.2.1 胶体金溶液的制备 胶体金免疫层析快速诊断试剂中最常用的胶体金粒径为40 nm^[7],参照文献^[8]的方法,即采用柠檬酸三钠还原法制备40 nm的胶体金溶液,4 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用.用紫外分光光度计进行扫描,吸收峰峰底越窄、峰越高,说明金颗粒粒径越均匀^[9-10].

1.2.2 胶体金标记最佳蛋白浓度的选择 将制备

好的胶体金溶液分装在8个试管中,每管1 mL,用0.02 mol/L碳酸钾调整胶体金溶液pH值至8.0^[11],对照管中不加蛋白抗体,其他每管分别加入4 μg 、5 μg 、6 μg 、7 μg 、8 μg 、9 μg 、10 μg C-反应蛋白单克隆抗体.充分混匀5 min后,再向上述各试管中均加入0.1 mL 10%的NaCl溶液,混匀后静置20 min,观察结果.当加入最适蛋白量时,反应过程中胶体金保持特有红色不变;而未加蛋白和蛋白量不足的试管,会出现由红变蓝的聚沉现象.以未变色试管蛋白最低浓度加20%的量作为胶体金标记最佳蛋白浓度^[12].

1.2.3 抗体包被及试纸条的组装 用三维平面点膜喷金仪进行包被,质控线为兔抗鼠多克隆抗体,浓度为1.4 mg/mL,检测线为CRP包被McAb,浓度为1.0 mg/mL,参照文献^[13]的方法进行制备.包被好的膜立即放入37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中烘干备用.将金垫、吸水纸、玻璃纤维棉依次贴在PVC胶板上,用裁条机按照2.5 mm/条的宽度进行切割,并分装入袋,加入干燥剂封口后保存于常温下,备用.

1.2.4 反应模式的建立 室温条件下,试纸条加样75 μL ,观察时间为10~15 min,15 min后判断无效^[14].滴加待检血清样品后,在规定的时间内,若质控线不显色,无论检测线显色与否,试纸条均失效;若质控线、检测线均显色,根据检测线显色情况与自制配套比色卡进行比较,半定量读取CRP值.

1.2.5 室内定值质控品的制备 取3份CRP质控品 C_1 、 C_2 、 C_3 ,每管100 μL 分装后,置于1.5 mL离心管中4 $^{\circ}\text{C}$ 保存,分装后的血清用对照试剂进行验证.

1.2.6 最佳稀释倍数的选择 取3份CRP质控品 C_1 、 C_2 、 C_3 ,用样品稀释液分别稀释100倍、200倍、300倍至3个浓度值血清显色能出现明显梯度,此时的稀释倍数作为本试纸条的最佳稀释倍数.

1.2.7 比色卡颜色梯度的建立 取3份CRP质控品 C_1 、 C_2 、 C_3 ,按照最佳稀释倍数进行稀释(重复10次)后,用已确定工艺的试纸条检测,在10~15 min内观察检测结果,再用对照试剂进行验证,根据显色情况分析选择相应浓度的平均色度,制成比色卡.

1.2.8 试纸条及比色卡性能检测 符合率检测:分别取100份临床CRP定值血清,取100 μL 血清稀释最佳稀释倍数后,再分别取75 μL 稀释血清加入到试纸条样品垫上,15 min后通过比色卡来观察读数.

稳定性检测:将试纸条及配套比色卡分别装入铝箔袋内,分别在 37 ℃ 放置 21 d, 28 d 进行破坏测试,观察其稳定性.

精密性检测:平行测定质控品 C_1, C_2, C_3 各 5 次,观察试纸条与比色卡显色是否一致.

重复性检测:1) 批内重复性,取任意同一批试纸条重复 5 次实验,用质控品进行检测,观察实验结果能否重复;2) 批间重复性,取任意 3 个批次试纸条重复 5 次实验,用质控品进行检测,观察实验结果能否重复.

2 结果与讨论

2.1 胶体金溶液的制备

肉眼观察制备的胶体金溶液呈酒红色透明清澈液,无浑浊悬浮物出现.紫外分光光度计在 400 ~ 700 nm 范围内连续扫描,胶体金在 525 nm 处出现单一吸收峰,峰高且峰底窄,金颗粒粒径均匀,形状规则.

2.2 胶体金标记最佳蛋白浓度的确定

在本实验中,分别取 1 mL 胶体金溶液加入 5 μg , 6 μg , 7 μg , 8 μg , 9 μg , 10 μg 的 C-反应蛋白单克隆抗体,胶体金溶液保持红色不变;而分别加入 0 μg , 4 μg C-反应蛋白单克隆抗体,胶体金溶液颜色由红变蓝.因此,确定稳定 1 mL 胶体金的最低蛋白量为 5 μg ,加 20% 的量即选用 6 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 作为最佳蛋白浓度.

2.3 最佳稀释倍数的确定

实验得出,CRP 质控品 C_1, C_2, C_3 稀释 200 倍后,对应的值依次为 330 ng/mL , 165 ng/mL , 33 ng/mL ,点样后出现最明显的梯度显色反应,因此确定血清 200 倍稀释作为本试纸条的最佳显色倍数.显色结果如图 1 所示.

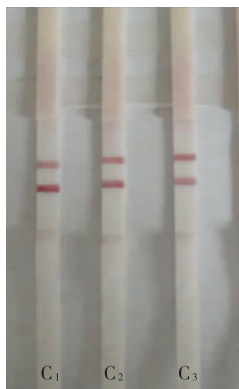


图 1 CRP 质控品稀释 200 倍显色结果

2.4 比色卡颜色梯度的建立

取 CRP 质控品 C_1, C_2, C_3 并稀释 200 倍后,进行点样,15 min 内观察显色结果(如图 2 所示),这 3 个值显色均有明显梯度,可以将此作为半定量比色卡来读取人血清 CRP 值.



图 2 半定量比色卡显色结果

2.5 符合率检测分析

将 100 份临床 CRP 血清各取 6 μL 加入到 1.2 mL 的稀释液(稀释 200 倍)后,再分别取 75 μL 稀释液加到试纸条样品垫上,15 min 后通过比色卡来观察读数,并采用对照试剂进行对比,若两者判定值不一致,采用复核试剂进行复核.

经对照试剂和复核试剂确认,在 100 份临床标本中:CRP 值低于 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的有 30 份,比色卡全部不显色,两者检测结果一致. CRP 值在 10 ~ 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之间的有 30 份,比色卡显色在 10 ~ 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之间,两者检测结果一致. CRP 值在 50 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之间的有 20 份,比色卡全部检出,CRP 值大于 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的有 20 份,但是它将其中的 2 份标本判定为 50 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之间,经明德复核试剂检测 2 份标本的 CRP 值分别为 104 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 107 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 均比较接近 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 在比色卡上未能准确判断出来.

因此,这 100 份血清标本,整体标本一致率为 98%,其中,50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 以下符合率为 100%, 50 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之间符合率为 95%, 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 以上符合率为 90%(数据见表 1).

表 1 CRP 检测符合率

CRP 值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	比色 卡	对照 试剂	复核 试剂	符合 率/%
< 10	30	30	—	100
10 ~ 50	30	30	—	100
50 ~ 100	22	20	20	95
> 100	18	20	20	90

2.6 稳定性检测分析

通过稳定性测试,试纸条与比色卡显色均一致,说明该试纸条性能稳定。

2.7 精密性检测分析

通过精密性检测,该试纸条不同浓度下5次检测结果均与比色卡显色一致,无异常结果,说明精密性良好。

2.8 重复性检测分析

批内重复性:取同一批次试纸条进行检测,显色一致,无异常结果,说明重复性良好。

批间重复性:取3个批次试纸条进行检测,显色一致,无异常结果,说明重复性良好。

C-反应蛋白作为一个临床感染监测的指标,与血常规联合检测,具有协同效应。研究表明,C-反应蛋白的敏感性优于白细胞,可以更更好地反应感染程度,临床应用日益广泛^[15]。一般情况下,若CRP值 $\geq 10 \mu\text{g/mL}$,提示感染;若CRP值 $> 50 \mu\text{g/mL}$,提示广泛性感染^[16];若CRP值 $> 100 \mu\text{g/mL}$,则提示严重疾病,往往伴有细菌感染存在^[17]。因此本实验自制比色卡以这3个浓度作为比色度划分依据,能够很好地反映病人的感染程度。

从实验评价来看,该试纸条显示本研究的方法具有较好的应用价值,能够基本满足临床的推广要求。

3 结论

本文根据胶体金免疫层析及工艺设计优化原理,制备了胶体金免疫层析试纸条及配套比色卡,并对其符合率、稳定性、精密性等进行了检测。结果表明:该方法具有较高的稳定性、精密性、重复性,与乳胶比浊法平行比较符合率高达98%,实现了对人血清CRP的半定量检测;该方法操作简捷、结果清晰明了、无需特殊实验设备辅助,特别适于基层社区医院、乡镇卫生院及边远山区推广使用,也可用于家庭和个人的保护性自测。

参考文献:

- [1] 税国顺,何代莉,杨晓红. C-反应蛋白的测定及临床应用[J]. 现代医药卫生,2005,21(11):1365.
- [2] 杨志明. C-反应蛋白和血常规测定的临床意义[J]. 实用中西医结合临床,2014(9):51.
- [3] 徐美妹,陈挺剑. C-反应蛋白检测在感染性肺炎诊断中的应用价值[J]. 中国医药导报,2009,6(6):143.
- [4] 宁振英,苏咏梅. C-反应蛋白检测的临床应用[J]. 牡丹江医学院学报,2009,30(3):76.
- [5] 张金利,何毅,黄鈞,等. C-反应蛋白快速定量检测系统性能评价[J]. 广西医学,2009,31(12):1800.
- [6] 陈晓旭,郭哲. C-反应蛋白检测技术及临床应用[J]. 实用预防医学,2006,13(4):1098.
- [7] 张东霞,邹晓平. 胶体金制备工艺的优化[J]. 华章,2011(2):279.
- [8] 梁敬博,贺昕,熊晓东,等. pH值对胶体金制备的影响[J]. 稀有金属,2005,29(4):468.
- [9] 彭剑淳,刘晓达. 可见光光谱法评价胶体金粒径及分布[J]. 军事医学科学院院刊,2000,24(3):211.
- [10] Wolfgang H,Nguyen T K T,Jenny A,et al. Determination of size and concentration of gold nanoparticles from UV-vis spectra[J]. Analytical Chemistry,2007,79(11):4215.
- [11] 孔繁德,黄印尧,赖清金. 免疫胶体金技术及其发展前景[J]. 福建畜牧兽医,2002,24(7):11.
- [12] Hampi J,Hall M,Mufti N A,et al. Upconverting phosphor reporters in immunochromatographic assays[J]. Anal Biochem,2001,288(2):176.
- [13] Paek S H,Lee S H,Cho J H,et al. Development of rapid one-step immunochromatographic assay [J]. Methods,2000,22(1):53.
- [14] 唐秋艳,王云龙,陈兴业. 免疫诊断试剂实用技术[M]. 北京:海洋出版社,2009:132-160.
- [15] 史俊敏,吴晓勇. C反应蛋白在慢性阻塞性肺疾病患者中的应用[J]. 检验医学与临床,2005,2(4):176.
- [16] 邓超. C-反应蛋白检测在儿科诊断中的临床意义[J]. 中国卫生产业,2013,10(3):106.
- [17] 代艳杰,包学英,吴玉华. CRP检测的临床意义[J]. 北华大学学报:自然科学版,2003,4(3):233.

基于 ANP 的卷烟制丝质量评价方法

张新锋

(河南中烟工业有限责任公司 南阳卷烟厂, 河南 南阳 473007)

摘要:针对传统制丝质量评价体系以主观因素为主、缺乏科学依据因而难以定量分析的问题,提出了基于网络分析法 ANP 的制丝质量评价方法.为考察制丝工艺关键工序对制丝质量的影响权重,构建了 ANP 网状模型和比较判断矩阵,再根据加权超矩阵的计算排序结果进行质量评价.结果表明,滚筒烘丝工序对制丝质量影响最为显著,生产中着重强化该环节的参数优化和稳定性控制,制丝质量明显提高.这表明基于 ANP 的制丝质量评价方法能够有效提高制丝工艺控制精度和过程质量控制能力,可为制丝工艺确定最佳的工艺条件和准确的工艺参数提供理论依据.

关键词:卷烟制丝工艺;制丝质量评价;网络分析法

中图分类号:TS411.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.008

The evaluation method of tobacco primary quality based on ANP

ZHANG Xin-feng

(Nanyang Cigarette Factory, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Nanyang 473007, China)

Abstract: To the problems that the traditional primary quality evaluation system focuses on subjective factors with lacking of scientific evidence and quantitative analysis, an evaluation method of tobacco primary quality system based on ANP was proposed. In order to research the influence weight of the key process of tobacco primary processing, the ANP network model and the comparison judgment matrix were constructed, and the quality evaluation of the ranking results was made based on the weighted super matrix. The results showed that the effect of cylinder drying on the primary quality was the most significant. In production, the quality of the tobacco primary was improved obviously through strengthening the parameters optimization and stability control of cylinder drying process. These showed that the evaluation method of tobacco primary quality based on ANP could effectively improve the control accuracy of tobacco primary processing and the control ability of process quality, and provide the theoretical basis for determining the optimum technological conditions and accurate technological parameters for tobacco primary processing.

Key words: tobacco primary processing; primary quality evaluation; ANP(analytic network process)

0 引言

卷烟加工是一个复杂的工艺过程,有许多环节影响卷烟制品的质量和消耗.在制丝、卷接、包装三大环节中,制丝加工环节工序多、工艺流程长、工艺

设备种类繁多,是提高卷烟制品内在质量、降焦降害、节约能源、降低原料消耗的重要环节.制丝加工流程性较强,它的每一道工序质量都直接或间接影响下一道工序乃至最终产品的质量,所以选用合适的制丝质量评价方法不仅能够提高卷烟生产质量

控制的稳定性,而且能推动卷烟行业的健康发展。

传统的制丝质量评价方法主要包括合格评定法、统计学评定法和层次分析法 AHP (analytic hierarchy process) [1-5]。合格评定法是按生产技术要求通过检测质量指标值来判断烟丝生产是否合格的方法,该方法使用简单,但评定结果太过粗略且缺乏科学理论依据。文献[2]提出了用过程标准偏差运算方法计算各工艺段的综合过程标偏控制能力的制丝质量评价方法,该方法根据衡量水分曲线的离散程度进行分级运算,能够反映卷烟加工全过程控制水平的总分数。统计学评定法是运用统计技术将制丝质量的各项指标按照等级分值划分评定的方法,该方法采用指标定量分析但缺乏指标间相互影响关系的分析,难以满足卷烟行业质量控制发展的新要求。文献[3]结合运用统计技术设计出新的制丝质量评价方法,将各项评价指标细分为三个质量档次,确定各档次的质量界限和得分值,根据分值对各项指标进行排序。AHP 是指用成对比较衡量质量指标的相对重要性的评价方法 [4-5],能够准确反映质量波动,具有有效性和科学性,但没有考虑指标间的反馈制约网状关系,对整体制丝质量水平的评估有局限性。文献[4]利用 AHP 对进柜烟丝含水率、出柜烟丝含水率、整丝率、碎丝率、纯净度、填充值六个主要指标彼此间的重要程度进行了分析评价。

针对传统制丝质量评价方法的不足,本文拟提出一种基于网络分析法 ANP (analytic network process) 的制丝质量评价方法,为确定关键制丝工序的影响权重,构建 ANP 网状模型和比较判断矩阵,再根据加权超矩阵的计算排序结果进行质量评价分析,以期全面分析制丝质量影响因素,改进制丝工艺质量的薄弱环节。

1 研究背景

1.1 制丝质量评价工序

本文根据制丝工艺实际生产情况,咨询多位制丝工艺质量控制专家,由专家评议组确定松散回潮、叶片加料、滚筒烘丝、烟丝混配、加香储丝 [6] 五个工序为制丝质量评价工序。

1) 松散回潮。松散回潮是制丝工艺的第一步,通过称重装置控制进入回潮筒的叶片流量,将叶片喂入回潮筒 [7]。其主要控制参数包括回风温度、出口温度和出口水分。

2) 叶片加料。对叶片准确均匀地施加料液,适

当提高叶片的含水率和温度。其主要控制参数包括叶片含水率、叶片温度、瞬时精度和总体精度。

3) 滚筒烘丝。滚筒烘丝是指用烘丝机将切后烟丝干燥去湿,以适合烟支的含水率。其主要控制参数包括筒壁温度、热风温度、出口温度和出口水分 [8-9]。

4) 烟丝混配。按照不同品牌卷烟的不同工艺要求,取不同模块的叶丝、梗丝、膨胀烟丝和薄片丝,混合均匀 [10-13]。其主要控制参数包括烟丝水分、梗丝比例、膨胀烟丝比例、薄片丝比例、瞬时精度和总体精度。

5) 加香储丝。将香料均匀喷洒附着于叶丝、梗丝、膨胀烟丝和薄片丝表面,增香保润,然后将制成的成品丝贮存于成品丝柜中心,供卷包使用。其主要控制参数包括加香比例、加香精度、物料流量、瞬时精度和总体精度。

1.2 ANP 的决策步骤

ANP 是在反馈 AHP 的基础上提出的一种适用于非独立反馈系统的决策方法 [14-15]。它在 AHP 的基础上,考虑各因素或相邻层次之间的相互影响,利用超矩阵对各相互影响的因素进行综合分析,得出其权重。ANP 的决策步骤如下。

1) 确定综合评价的组成因素,建立 ANP 结构模型。

典型的 ANP 结构模型如图 1 所示。设网络 ANP 中控制层的准则为 B_1, B_2, \dots, B_m , 网络层元素组为 C_1, C_2, \dots, C_N 。其中 C_i 包含的元素有 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}$ ($i=1, 2, \dots, N$)。

2) 构造比较判断矩阵。

根据上步构建的 ANP 结构模型,以控制层元素 B_s ($s=1, 2, \dots, m$) 为准则,以 C_k ($k=1, 2, \dots, n$) 中的元素 e_{ij} ($j=1, 2, \dots, n_i$) 为次准则,将元素集 C_i 中的元素按其对其 e_{ij} 的影响力大小进行两两比较分析,

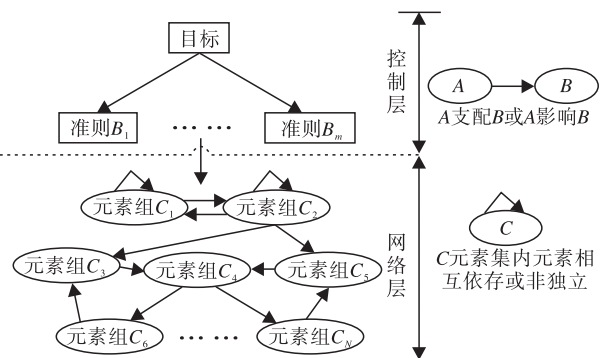


图 1 典型的 ANP 结构模型

据此而构造的判断矩阵见表1.

表1 比较判断矩阵

e_{ij}	e_{i1}	e_{i2}	...	e_{in_i}	归一化特征向量
e_{i1}	a_{i1}	a_{i2}	...	a_{in}	$w_{i1}^{(j)}$
e_{i2}	a_{i2}	a_{i2}	...	a_{2n}	$w_{i2}^{(j)}$
...
e_{in_i}	a_{ni1}	a_{ni2}	...	$a_{ni n_i}$	$w_{in_i}^{(j)}$

3) 计算超矩阵并综合排序.

将两两比较判断矩阵由特征根法得到的归一化特征向量进行一致性检验,若通过则将其写成矩阵形式,可得到局部的权重向量矩阵即超矩阵

$$W = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_N \\ e_{11} \dots e_{1n_1} & & & & \\ e_{21} \dots e_{2n_2} & & & & \\ \dots & & & & \\ e_{N1} \dots e_{Nn_N} & & & & \end{matrix} \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{bmatrix}$$

超矩阵 W 的每一元素 W_{ij} 都是基于一个两两比较判断矩阵获得的归一化特征向量,列和为1,但 W 不是归一化矩阵. 因此以控制层元素 B_s 为准则,对控制层元素 B_s 下的各元素组与各元素组 C_k 的重要性进行比较,得到一个归一化的排序向量

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix}$$

把矩阵 A 与 W 相乘得到加权超矩阵

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{k=1}^N W^k$$

如果极限收敛且唯一,则 W^∞ 的第 j 列就是控制元素下网络层各元素对于元素 j 的极限相对排序.

2 基于 ANP 的制丝质量评价模型

本文采用基于 ANP 的制丝质量评价模型,全面综合分析各重要制丝工序对制丝质量的影响权重和工序控制参数间的动态影响制约关系,以克服现有的制丝质量评价方法的局限性,达到指导制丝生产过程、提高质量控制水平的目的.

2.1 构建制丝质量评价模型

基于 ANP 的制丝质量评价模型将质量评价划分为两大部分:第一部分为控制层,包括评价目标及参与评价的工序;第二部分为网络层,由重点工序的控制参数因素层支配的元素组成,其内部是互相影响、存在反馈和反支配的网络结构. 基于 ANP 的制丝质量评价模型见图2.

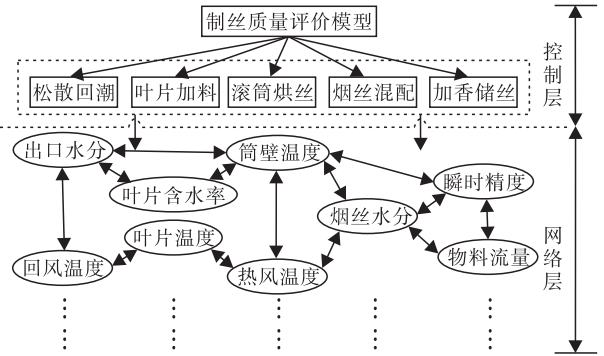


图2 基于 ANP 的制丝质量评价模型

由于制丝工艺各工序间影响关系较为复杂,构建的 ANP 模型的计算量较大. 鉴于美国 Expert Choice 公司开发的超级决策 SD (super decisions) 软件功能强大,可以计算很多 ANP 模型,并完整地表达计算结果,本文采用 SD 软件建立基于网络分析的制丝质量评价工序间相互影响关系模型.

2.2 构建比较判断矩阵

本文通过专家组评议的方式确定制丝工序间影响权重,得到相互影响的各评价工序间两两比较重要性对比情况,然后按照九分法规范性标度将评价工序间两两比较的重要性程度采用1—9的整数及其倒数进行划分. 评价工序间重要程度说明见表2.

根据九分法标度对中间层各个工序的松散回潮、叶片加料、滚筒烘丝、烟丝混配、加香储丝对于制丝质量的影响关系进行分析评价,所得各个工序对目标层制丝质量的比较判断矩阵见表3—表8.

表2 评价工序间重要程度说明表

评价标度	标度说明
1	两个因素同等重要
3	两个因素相比,前者比后者稍微重要,据经验判断前者比后者稍有利
5	两个因素相比,前者比后者明显重要,据经验判断前者比后者更有利
7	两个因素相比,前者比后者非常重要,前者比后者评价更有利且在实践中得到证实
9	两个因素相比,前者比后者极其重要,重要程度是显而易见的
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

表3 制丝质量判断矩阵

制丝质量	松散回潮	叶片加料	滚筒烘丝	烟丝混配	加香储丝
松散回潮	1	1/2	1/5	1/6	1/7
叶片加料	2	1	1/3	1/4	1/5
滚筒烘丝	5	3	1	1/2	1/3
烟丝混配	6	4	2	1	1
加香储丝	7	5	3	1	1

表4 松散回潮各参数判断矩阵

松散回潮	回风温度	出口温度	出口水分
回风温度	1	3	1
出口温度	1/3	1	1/2
出口水分	1	2	1

表5 叶片加料各参数判断矩阵

叶片加料	叶片含水率	叶片温度	瞬时精度	总体精度
叶片含水率	1	4	2	3
叶片温度	1/4	1	2	3
瞬时精度	1/2	1/2	1	2
总体精度	1/3	1/3	1/2	1

表6 滚筒烘丝各参数判断矩阵

滚筒烘丝	筒壁温度	热风温度	出口温度	出口水分
筒壁温度	1	2	3	1
热风温度	1/2	1	2	1
出口温度	1/3	1/2	1	3
出口水分	1	1	1/3	1

表7 烟丝混配各参数判断矩阵

烟丝混配	烟丝水分	梗丝比例	膨丝比例	瞬时精度	总体精度
烟丝水分	1	1	1	3	4
梗丝比例	1	1	1	2	3
膨丝比例	1	1	1	2	4
瞬时精度	1/3	1/2	1/2	1	2
总体精度	1/4	1/3	1/4	1/2	1

表8 加香储丝各参数判断矩阵

加香储丝	加香比例	加香精度	物料流量	瞬时精度	总体精度
加香比例	1	2	2	3	4
加香精度	1/2	1	2	2	3
物料流量	1/2	1/2	1	1	2
瞬时精度	1/3	1/2	1	1	2
总体精度	1/3	1/3	1/2	1/2	1

经对表3—表8的判断矩阵进行一致性检验,检验结果小于0.1(见图3),表明制丝质量评价因素间两两比较的判断矩阵是合理的。

2.3 计算超矩阵并综合排序

对得到的制丝质量评价工序间各两两比较判

不一致性指数为0.0892,该指数的可取值小于0.1



图3 一致性检验结果

断矩阵进行量化,由特征根法得到排序向量.如果上述特征向量通过一致性检验,则将其写成矩阵形式,从而得到局部的权重向量即超矩阵,见表9(其中行表示汇,列表示源).针对网络结构中的相互作用和反馈信息,基于源对汇中的元素进行两两比较,求解源对于汇的相对偏好和重要性。

将超矩阵(表9)与各个工艺段判断矩阵(表3—表8)的归一化排序向量相乘得到加权超矩阵.局部加权超矩阵见表10,最终的计算排序结果见图4。

3 质量评价分析

由图4所示的ANP计算排序结果可以对现有的制丝工艺段质量评价进行分析.在影响制丝质量的五个重要工序因素中,滚筒烘丝对整个制丝工艺段质量影响最大,其次是叶片加料工艺段,然后依次是松散回潮、烟丝混配和加香储丝。

在制丝工艺实际生产环节中,按照基于ANP的制丝质量评价结果对制丝工艺的生产控制进行调整,着重强化滚筒烘丝工艺的筒壁温度、热风温度、出口温度和出口水分的参数优化和稳定性控制,调整后的制丝工艺其制丝质量明显提高,有效降低了制丝生产的消耗.要达到大幅度提高整体制丝质量的目的,还需要严格监控并合理调整松散回潮、叶片加料、烟丝混配和加香储丝段的工艺参数。

4 结论

针对制丝工艺的生产情况,本文提出了基于ANP的制丝质量评价方法,该评价方法对制丝质量的评价分析比AHP的层次关系更加灵活,更加切合实际,能够有效提高制丝工艺控制精度和过程质量控制能力,从而为制丝工艺确定最佳工艺条件和准确工艺参数提供理论依据. ANP在制丝质量因素评价体系上的成功运用为其进一步推广到卷烟生产的其他工艺质量评价体系中提供了依据.在实际生产中,如何提前预测并及时调整工艺条件和工艺参数还需要作进一步研究。

表9 局部权重向量矩阵

工序指标	松散回潮			叶片加料				滚筒烘丝
	回风温度	出口温度	出口水分	叶片含水率	叶片温度	瞬时精度	总体精度	筒壁温度
松散回潮	回风温度	0.000	0.500	0.750	0.667	0.000	0.000	0.000
	出口温度	0.333	0.000	0.250	0.333	0.000	0.000	0.000
	出口水分	0.667	0.500	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
叶片加料	叶片含水率	1.000	0.000	0.667	0.000	0.540	0.614	0.547
	叶片温度	0.000	0.667	0.333	0.540	0.000	0.268	0.263
	瞬时精度	0.000	0.000	0.000	0.297	0.297	0.000	0.190
	总体精度	0.000	0.333	0.000	0.163	0.163	0.117	0.000
滚筒烘丝	筒壁温度	0.667	0.540	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表10 局部加权超矩阵

工序指标	松散回潮			叶片加料				滚筒烘丝
	回风温度	出口温度	出口水分	叶片含水率	叶片温度	瞬时精度	总体精度	筒壁温度
松散回潮	回风温度	0.000	0.027	0.026	0.213	0.000	0.000	0.000
	出口温度	0.012	0.000	0.009	0.106	0.000	0.000	0.138
	出口水分	0.023	0.027	0.000	0.000	0.622	0.000	0.000
叶片加料	叶片含水率	0.167	0.000	0.112	0.000	0.137	0.413	0.367
	叶片温度	0.000	0.175	0.056	0.076	0.000	0.181	0.178
	瞬时精度	0.000	0.000	0.000	0.039	0.076	0.000	0.128
	总体精度	0.000	0.088	0.000	0.021	0.042	0.079	0.000
滚筒烘丝	筒壁温度	0.064	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000






名称	图例	理想值	正常值	原始值
加香储丝		0.440 168	0.132 482	0.004 168
叶片加料		0.821 523	0.247 263	0.007 778
松散回潮		0.532 307	0.160 214	0.005 040
滚筒烘丝		1.000 000	0.300 981	0.009 468
烟丝混配		0.528 472	0.159 060	0.005 004

图4 ANP计算最终排序结果

参考文献:

- [1] 尤长虹,张楚安,彭传新.制丝质量评价方法的设计与应用[J].烟草科技,2001(7):22.
- [2] 陈景华.制丝质量评价方法的设计与应用[J].广西烟草,2007(3):36.
- [3] 范胜兴,范林晖,欧亚敏,等.烟丝质量评价方法的改进[J].中国烟草学报,2011(2):25.
- [4] 范胜兴,范林晖,欧亚敏,等.层次分析法在烟丝质量评价中的应用[C]//中国烟草学会工业专业委员会烟草工艺学术研讨会论文集,北京:中国烟草学会,2010.
- [5] 李永宽,杨耀伟,冯剑,等.提高烟丝适用性的综合质量评价方法[J].河南化工,2013(S1):14.
- [6] 姚光明,王文辉,尹献忠,等.烟丝结构对烟丝填充值和卷接质量的影响[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2003,18(4):62.
- [7] 李滢芳,李辉,毛多斌,等.真空回潮工序对卷烟产品

烟丝颜色及内在品质的影响[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2011,27(5):92.

- [8] 熊安言.烟片增温对烟丝质量的影响试验[C]//中国烟草学会2010年学术年会论文集,北京:中国烟草学会,2010.
- [9] 孙雯,李雪梅,曾晓鹰,等.烟丝含水率对卷烟燃吸品质、烟气水分及颗粒物挥发性成分的影响[J].烟草科技,2009(11):33.
- [10] 金哲,朴永革,黄树永,等.3种梗丝不同掺配比例对卷烟质量的影响[J].烟草科技,2012(12):5.
- [11] 朱文魁,张永川,向光,等.片烟成丝模式对烟丝结构与卷制质量的影响[J].烟草科技,2012(5):10.
- [12] 罗登山,曾静,刘栋,等.叶片结构对卷烟质量影响的研究进展[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2010,25(2):13.
- [13] 李东亮,胡军,许自成,等.单料烟感官质量的层次模糊综合评价[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2007,25(1):27.
- [14] 孙宏才,田平.网络层次分析法(ANP)与科学决策[C]//决策科学理论与方法——中国系统工程学会决策科学专业委员会第四届学术年会论文集,北京:中国系统工程学会,2001.
- [15] 孙振营,胡洪安.定量型多指标决策的层次分析法探讨[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,1998,13(3):70.

基于模糊神经网络的 智能混丝掺配 PID 控制模型研究

刘穗君, 杨林超, 张萍, 邱宗鹤

(河南中烟工业有限责任公司 南阳卷烟厂, 河南 南阳 473007)

摘要:为优化制丝工艺 PID 控制,提高混丝掺配瞬时精度,提出了基于模糊神经网络的智能混丝掺配 PID 控制模型 FNN-PID. 该模型依据制丝配比需求和生产动态数据计算当前瞬时精度,然后进行智能模糊量化,再通过对比专家知识库,结合推理机智能分析,决策出混丝掺配配比调差参数,并反馈参与 PID 控制. 实际应用效果表明,运用该模型控制相关参数,在瞬时精度显著提高的同时减少了系统波动,满足了高档香烟的加工工艺要求.

关键词:卷烟混丝掺配瞬时精度;模糊神经网络;PID 控制

中图分类号:TS411.1;TP273 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.009

An intelligent PID control model of shredded tobacco blending based on fuzzy neural network

LIU Sui-jun, YANG Lin-chao, ZHANG Ping, QIU Zong-he

(Nanyang Cigarette Factory, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Nanyang 473007, China)

Abstract: To optimize the PID control of tobacco primary processing and increase the instantaneous precision of shredded tobacco blending, an intelligent PID control model FNN-PID based on fuzzy neural network was proposed. The intelligent fuzzy quantization was conducted according to the demand of shredded tobacco blending ratio and production dynamic data. By comparing the expert knowledge base, and combining with the analysis of intelligent reasoning machine, the ratio adjustment parameter of shredded tobacco blending was decided to take part in the feedback PID control. The practical application results showed that by using this model to control the relative parameters, the instantaneous accuracy was improved significantly, and the system fluctuation was reduced, and consequently the processing requirements of high grade cigarette could be met.

Key words: instantaneous accuracy of shredded tobacco blending; fuzzy neural network; PID control

0 引言

混丝掺配指叶丝、梗丝、膨胀烟丝和薄片丝等

原料在卷烟制丝生产线上按一定配比均匀混合,是烟厂制丝工艺流程中非常重要的一个环节,其掺配精度对卷烟成品质量的影响举足轻重^[1],掺配精度

收稿日期:2014-12-10

作者简介:刘穗君(1976—),男,河南省南阳市人,河南中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为卷烟工艺、数理统计及控制技术.

越高,越能体现配比系统的先进性^[2]. 混丝掺配控制是一个多输入多输出系统,通过严格协调控制各核子称,实现对流量及时准确的检测和调节,进而使混丝掺配比例具有稳定性与均匀性. 目前针对混丝掺配工艺的研究多集中在计量模型分析和评价^[3-4]、混丝模式^[5]等方面,对掺配精度的控制主要依靠 PID 控制^[6]. 但传统的 PID 控制针对制丝工艺中各个工艺点仍然存在整体精度虽较高而瞬时精度却较低的问题. 作为传统 PID 控制的改进,模糊 PID 控制结合模糊控制理论制定规则,在原有 PID 单回路架构的基础上引入模糊控制. 模糊神经网络是一种智能控制方法,它综合了模糊推理和神经网络二者的优点,不需要被控对象的精确数学模型,只需要用现场采集的有效数据对网络进行训练就能达到很好的控制效果. 因此,将模糊神经网络技术引入制丝工艺混丝掺配 PID 控制系统,既能有效利用语言信息,又具有强大的自学习和自适应能力;并且模糊神经网络中的结构和权值都有一定的物理含义,可以根据控制的复杂程度与精度要求,结合先验知识来构造相应的模糊神经网络模型. 同时,可根据先验知识人工选择模糊神经网络中权值的初始化,这样,网络的学习速度大大加快,也可在一定程度上回避梯度优化算法带来的局部极值问题.

目前模糊 PID 控制在烟草工艺控制上已有一些应用^[7-9],但对模糊控制隶属度参数的确定和规则库的建立多依靠主观经验,缺乏客观性,故实时性和适应性较差^[10]. 本文拟提出一种基于模糊神经网络的混丝掺配 PID 控制模型 FNN-PID (fuzzy neural network PID),通过智能模糊量化、对比面向混丝掺配工序的专家知识库、结合推理机智能分析等环节构建模糊控制规则,参与 PID 控制以达到适时调整控制参数、提高工序瞬时控制精度的目的.

1 FNN-PID 模型

从系统控制角度来看,混丝掺配工艺是一个具有大惯性、纯滞后、强耦合的非线性时变系统,很难建立精确的数学模型,传统的 PID 控制策略对其并不适用. 本文采用模糊神经网络系统的模型进行辨识,将模糊控制与神经网络相结合,通过神经网络来实现模糊逻辑,同时利用神经网络的自学习能力,动态调整隶属度函数,在线优化控制规则,并利用模糊神经网络在线调整 PID 控制参数,使控制器

既具有模糊神经网络的自学习能力,又能充分发挥 PID 的控制优势^[11].

1.1 FNN-PID 模型架构

在制丝生产流程中,由于各种先进工艺和控制技术的广泛采用,产生和积累了大量各种类型的历史数据和当前生产的实时动态数据,这些数据包含生产和管理的大量有价值的信息和知识. 为了能够为过程监测、诊断、能效分析、先进控制、优化、调度和管理等各层次提供决策支持,使制丝内在品质达到最优,通过数据挖掘把制丝工艺流程产生的大量深层次知识和信息挖掘出来,提取这些数据的整体特征、关联及发展趋势预测等信息,建立面向混丝掺配工序的专家知识库,以提高烟丝质量指标或工艺参数的控制精度和烟丝生产过程的质量控制能力.

FNN-PID 模型主要由数据处理模块、知识库模块、PID 控制模块组成,如图 1 所示. 数据处理模块采用 ETL(extraction transformation loading)技术,负责将卷烟制丝工序中各 PLC 数据提取出来,进行清洗、转换,加载存储在数据仓库中,按照一定的规则发现并纠正数据文件中可识别的错误,包括检查数据一致性、处理无效值和缺失值等. 知识库模块是在数据挖掘基础上建立起来的,包括数据库和规则库. PID 控制模块中的智能控制采用融合式结构,即神经网络和模糊逻辑推理机相结合:一方面,模糊推理能够加快人工神经网络学习的速度,然后用此神经网络来构造高性能的模糊逻辑系统;另一方面,神经网络能够从推理机中提取模糊规则,并对模糊规则进行纠偏和优化,为模糊控制提供决策支持,使模糊逻辑系统在一定程度上拥有自学习能力.

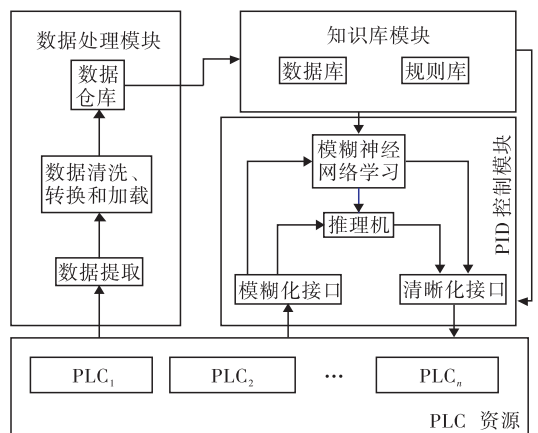


图 1 FNN-PID 模型架构

FNN-PID模型的控制流程为:控制模型根据PLC采集到当前制丝牌号配比需求和生产动态数据,计算当前瞬时精度,并将混丝配比误差 $e(k)$ 和混丝配比误差变化率 $e_c(k)$ 通过模糊神经网络得出对混丝掺配PID在线调节参数 k_p, k_i 和 k_D ,使混丝掺配瞬时精度性能指标达到最优;进行智能模糊量化,通过对比专家知识库,结合推理机智能分析,决策出混丝掺配配比调差参数,反馈给PLC适时调整控制参数,提高混丝掺配工序瞬时控制精度.由于PLC的处理能力有限,上述模块均安装部署在性能较高的服务器上,通过工业以太网与PLC相连,采集相关信息,并将控制量的输出信息传回给PLC资源,从而减轻PLC的负担.

1.2 模糊神经网络结构

模糊神经网络是FNN-PID模型的核心,其结构如图2所示.其中,A,B层主要完成模糊化功能;C层主要完成模糊推理功能;D,E层完成模糊判决功能.根据混丝掺配工序中某掺配丝的 $e(k)$ 和 $e_c(k)$,通过模糊神经网络的计算得出针对某掺配丝控制的调差参数.

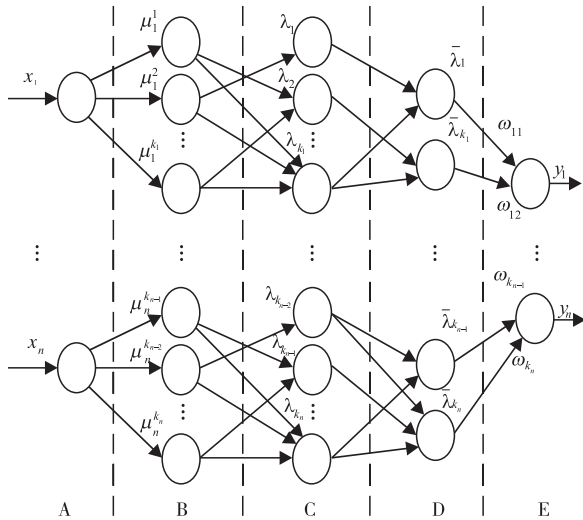


图2 FNN-PID模型的模糊神经网络结构

A层为输入语言层,负责各结点直接与输入向量的各分量 x_i 相连.混丝掺配工序要同时控制多种混丝的掺配比例,因此该层中 x_i 为混丝掺配工序中某掺配丝(如梗丝、膨胀烟丝和薄片丝)的 $e(k)$ 或 $e_c(k)$,该层可以把输入值 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 直接传到B层,其结点数 $N_A = n$.

$$f_i^{(A)} = x_i^{(A)} = x_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

B层为模糊化层,一个结点代表一个模糊语言变量值,它的作用是完成各输入分量(例如梗丝掺配的 $e(k)$)模糊集合的隶属函数 μ_i^j 的计算,从而实

现输入变量的模糊化.该层中需要学习的是隶属函数的参数,其中 $\mu_i^j = \mu_{a_j}(x_i), i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, k_i; n$ 为输入分量的维数; k_i 是 x_i 的模糊分割数.在B层,其结点数为 $N_B = \sum_{i=1}^n k_i$.

$$f_{ij}^{(B)} = \frac{(x_i^{(i)} - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2} x_{ij}^{(B)} = \mu_i^j = e^{-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}}$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, k_i$$

C层为模糊推理层,负责依据模糊逻辑的条件推理,一个结点代表一条混丝掺配中各种混丝比例的模糊控制规则,该层计算模糊推理规则前件的适用度,其结点数 $N_C = k$,即

$$f_j^{(C)} = \mu_1^1 \mu_2^2 \dots \mu_n^n \quad x_j^{(C)} = f_j^{(C)}$$

其中

$$i_1 \in \{1, 2, \dots, k_1\}, i_2 \in \{1, 2, \dots, k_2\}, \dots,$$

$$i_n \in \{1, 2, \dots, k_n\}$$

$$j = 1, 2, \dots, k \quad k = \prod_{i=1}^n m_i$$

当一个输入量进入模糊神经网络后,靠近输入点的模糊变量值具有较高的隶属度值,而远离输入点的模糊变量值很低,甚至为0.

D层负责计算混丝掺配中各种混丝比例规则后件的隶属度,实现归一化运算,即

$$\bar{\lambda}_j = f_j^{(D)} = x_j^{(C)} / \sum_{i=1}^k x_j^{(C)} = \lambda_j / \sum_{i=1}^k \lambda_j$$

$$j = 1, 2, \dots, k$$

E层为输出层,主要作用是进行模糊判决,实现混丝掺配中各种混丝比例控制的清晰化,即

$$y_i = f_j^{(E)} = \sum_{j=1}^k \omega_{ij} x_j^{(D)} = \sum_{j=1}^k \omega_{ij} \bar{\lambda}_j$$

$$i = 1, 2, \dots, k$$

其中, y_i 为混丝掺配中某掺配丝的调差控制参数.

1.3 FNN-PID控制结构

FNN-PID控制结构如图3所示.FNN-PID利用模糊神经网络分别建立 $e(k)$ 和 $e_c(k)$ 与PID控制器三个参数(k_p, k_i, k_D)的二元函数关系: $k_p = f_1(e(k), e_c(k)), k_i = f_2(e(k), e_c(k)), k_D = f_3(e(k), e_c(k))$.其中 f_1, f_2, f_3 表示模糊神经网络.

根据PLC采集到的某种混丝的核子称称得的质量,计算当前瞬时精度,并将 $e(k)$ 和 $e_c(k)$ 通过模糊神经网络FNN映射关系,得出对混丝掺配PID的在线调节参数 k_p, k_i 和 k_D ,使混丝掺配瞬时精度性能指标达到最优.混丝掺配PID模块最终控制被控对象,包括各个混丝的掺配核子称,实现对流量及时准确的检测和调节,从而使混丝掺配比例具有稳定性与均匀性.

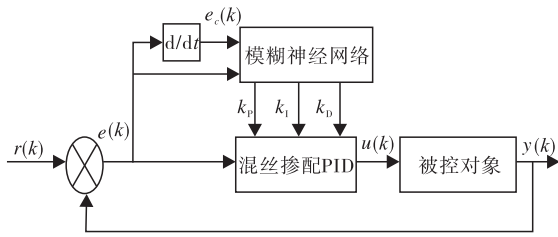


图3 FNN-PID控制结构图

2 应用效果

2.1 评测方法

在制丝生产混丝掺配工序中,一般以叶丝称为主称,其他称为从称,从称根据工艺要求的配方比例实时跟踪叶丝主称,完成混丝掺配工艺任务.若某牌号卷烟某一从称与主称配比比例为 k_1 ,在混丝掺配工序的设备运行及物料流量正常的情况下,每间隔一定时间(如1 min)分别记录两种物料的累计量,用后1 min值减前1 min值,分别得到从称和主称每min实际施加值 $W_{从}$ 和 $W_{主}$,则该时间间隔内该从称的瞬时精度^[10]

$$\delta_{从} = (W_{从}/W_{主} - k_1)/k_1 \times 100\%$$

其他配方组分的瞬时精度计算方法与此类同.

2.2 评测结果

为了验证两种控制方案的控制效果,根据制丝工艺稳定度控制原理和方法要求,选取某一牌号卷烟同一加工批次前后两个时段:前一时段采用传统PID进行控制,后一时段采用FNN-PID进行控制.选取梗丝、叶丝配比工序,梗丝与叶丝的配比比例为1:10,即 k_1 为0.1,当控制系统稳定后,分别提取两个时段中央控制室相关数据,利用2.1评测方法,得到1 min梗丝量、叶丝量、瞬时精度数据,因数据量较大,这里截取20 min数据列于表1和表2.

从表1和表2可以看出,在某牌号卷烟同一批次梗丝、叶丝掺配控制中:采用传统PID控制时段,瞬时精度最大偏差达到4.177 2%,20 min瞬时精度波动较大,在 $\pm 4.2\%$ 之间;采用FNN-PID控制时段,瞬时精度最大偏差为-0.532 3%,20 min瞬时精度波动较小,在 $\pm 0.54\%$ 之间.前后对比效果明显:采用FNN-PID的混丝掺配控制系统,在提高瞬时控制精度的同时也减少了系统波动,满足高档香烟的加工工艺要求.

3 结论

本文利用模糊神经网络技术对混丝掺配PID控制器进行了改进,提出了FNN-PID模型.该模型应

表1 某牌号卷烟PID控制掺配计量与瞬时精度

时间	梗丝量/kg	叶丝量/kg	瞬时精度/%
9:05	59.2	598.1	-1.019 9
9:06	60.2	605.5	-0.578 0
9:07	58.8	602.2	-2.358 0
9:08	59.9	596.6	0.402 3
9:09	61.3	597.4	2.611 3
9:10	60.8	603.1	0.812 5
9:11	60.3	601.8	0.199 4
9:12	57.9	600.2	-3.532 2
9:13	59.5	597.9	-0.485 0
9:14	60.2	599.5	0.417 0
9:15	62.1	596.1	4.177 2
9:16	60.2	605.2	-0.528 8
9:17	60.3	610.7	-1.260 8
9:18	61.9	608.6	1.708 8
9:19	60.2	597.3	0.786 9
9:20	57.6	599.2	-3.871 8
9:21	60.0	595.7	0.721 8
9:22	59.1	605.2	-2.346 3
9:23	59.6	603.3	-1.210 0
9:24	62.1	598.7	3.724 7
9:25	60.1	607.3	-1.037 4

表2 某牌号卷烟FNN-PID控制掺配计量与瞬时精度

时间	梗丝量/kg	叶丝量/kg	瞬时精度/%
9:40	59.2	606.2	-0.362 9
9:41	60.2	599.5	0.083 4
9:42	58.8	596.1	0.318 7
9:43	59.9	598.6	0.066 8
9:44	61.3	603.2	-0.364 7
9:45	60.8	601.0	0.000 0
9:46	60.3	599.2	-0.200 3
9:47	57.9	597.3	0.284 6
9:48	59.5	605.1	-0.512 3
9:49	60.2	602.6	-0.265 5
9:50	62.1	601.8	0.033 2
9:51	60.2	602.0	-0.498 3
9:52	60.3	601.2	-0.532 3
9:53	61.9	601.8	-0.299 1
9:54	60.2	602.3	-0.215 8
9:55	57.6	598.5	0.083 5
9:56	60.0	602.3	0.116 2
9:57	59.1	601.4	-0.066 5
9:58	59.6	598.8	-0.133 6
9:59	62.1	598.6	-0.100 2
10:00	60.1	599.7	0.216 8

用于制丝工艺中混丝掺配工序的控制,充分发挥了神经网络的自学习和模糊系统基于规则的推理能力,具有较强的自适应性,提高了系统的控制效果.应用效果表明,采用FNN-PID模型的混丝掺配控制系统,在提高瞬时控制精度的同时也减少了系统波动,可满足高档香烟的加工工艺要求,并可进一步延伸到卷烟生产的整个过程.

参考文献:

- [1] 储国海. 稳定均匀——制丝工艺管理的目标[J]. 烟草科技, 1994(5):24.
- [2] 袁书豪, 宋克强. 实现混丝掺配精度预警[J]. 设备管理与维修, 2013(S12):112.
- [3] 段玲, 陈建军. 卷烟加香加料和混丝掺配工艺过程的稳定度控制[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2002, 17(1):24.
- [4] 夏永明, 韦小玲, 谢伟强, 等. 混丝掺配系统计量模型分析[J]. 烟草科技, 2011(5):26.
- [5] 温若愚, 席年生, 张大波, 等. 不同混丝模式对烟丝掺配效果的影响[J]. 烟草科技, 2008(9):13.
- [6] 文杰, 唐着宽, 杨明权, 等. 过程能力分析在制丝工艺技术改进中的应用[J]. 烟草科技, 2012(3):12.
- [7] 戴滔. 基于PLC的模糊-PID控制在梗丝流化床干燥控制系统中的应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [8] 张红亮. 制丝线瞬时加料比例的计算与应用[J]. 烟草科技, 2013(1):20.
- [9] 乔俊飞, 王会东. 模糊神经网络的结构自组织算法及应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4):703.
- [10] 杜鹃, 张楠, 许自成, 等. 烤烟不同部位烟叶主要化学成分与感官质量的关系[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2011, 26(2):16.
- [11] 刘畅, 欧亚非, 胡林, 等. 影响卷烟烟气稳定性的主要因素源分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2014, 29(5):44.

本刊数字网络传播声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品、万方数据资源系统、维普网等中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。

微波膨胀梗丝掺配比例对卷烟品质的影响

赵云川, 廖晓祥, 陈冉, 武凯, 徐文洁, 胡宏俊, 柴俊红, 邹泉

(云南中烟工业有限责任公司 技术中心, 云南 玉溪 653100)

摘要:为改善烟梗在卷烟产品中的应用效果,研究了微波膨胀梗丝处在不同掺配比例时,烟支物理特性、感官品质等卷烟关键质量特性的变化趋势,结果表明:随掺配比例递增,掺配微波膨胀梗丝样品的吸阻、硬度均呈显著上升趋势;当烟支吸阻、硬度一致时,微波膨胀梗丝掺配样品每支质量约降低37 mg;端部落丝量与传统梗丝掺配样品无显著差异.微波膨胀梗丝掺配样品的感官品质水平优于传统梗丝掺配样品.微波膨胀梗丝的应用不仅可以提高卷烟产品的感官品质,同时还可降低单箱耗丝量,提升了产品的减害降焦效果.

关键词:微波膨胀梗丝;传统梗丝;掺配比例;物理特性;感官品质

中图分类号:TS41⁺2 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.010

The influence on blending ratio of microwave expanded tobacco stem on cigarette quality characteristics

ZHAO Yun-chuan, LIAO Xiao-xiang, CHEN Ran, WU Kai, XU Wen-jie,
HU Hong-jun, CHAI Jun-hong, ZOU Quan

(Technology Center, China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Yuxi 653100, China)

Abstract: In order to improve the application characteristics of microwave expanded cut stem blended in cigarette, a research was developed on analyzing the tendency of cigarette critical-to-quality characteristic which mainly include the physical property and sensory quality. The results of instrumental analysis and sensory evaluation turned out that: The draw resistance and hardness increased with the blending ration of microwave expanded cut stem. The weight of microwave expanded cut stem blended cigarette was 37 mg lighter when it had the same draw resistance and hardness. What's more, there was no significant difference in tobacco loss from cigarette end and the sensory quality of microwave expanded cut stem blended cigarette was better than the traditional one. The application of microwave expanded tobacco stem not only improved the sensory quality but also reduced the tobacco shred consumption of single-box, increasing the effects of reducing the tar and harmful components.

Key words: microwave expanded tobacco stem; traditional cut stem; blending ratio; physical property; sensory quality

0 引言

随着烟梗产品得到越来越多的认可,原本利用率不高的烟梗经过二次加工开发出了新的梗产品.梗丝、膨胀梗颗粒、薄片等产品均得到了很好的应用.但是,梗丝产品的木质素含量高^[1],其木质气、杂气等严重影响卷烟品质^[2-9],故梗丝几乎只添加于三、四类香烟的烟支中,且添加率控制在5%~20%左右,高于这个比例将会影响烟支的各项感官品质,如木质气、杂气明显,卷烟配伍性差,还会影响加工工艺,如梗颗粒于混丝柜中产生的分层使烟丝与梗颗粒不能均匀混合,加香工艺中香料不能均匀混合,以及出现端部落丝现象等^[10-12].经过二次切丝工艺制备出的微波膨胀烟梗,能较好地解决以上问题.目前,鲜见微波膨胀梗丝应用于产品中的报道.鉴于此,本文拟研究微波膨胀梗丝处在不同掺配比例时,烟支物理特性、感官品质等卷烟关键质量特性的变化趋势,意在为提升其在卷烟产品中的应用效果提供依据.

1 材料与方法

1.1 材料及仪器

材料:传统梗丝,微波膨胀梗丝,某品牌纯叶丝,滤嘴棒144 mm(长度,实际应用中切成6段)/24.1 mm(圆周)、3 300 CU/3 430 Pa,玉溪卷烟厂提供;木浆卷烟纸32 g/m²(定量)×26.2 mm(宽度)×4 500 m(长度)、直螺纹50 CU,红塔蓝鹰纸业公司提供;接装纸38.5 g/m²(定量)×64 mm(宽度)×2 500 m(长度)(200 CU),接装纸38.5 g/m²×64 mm×2 500 m(不通风),玉溪水松纸厂提供.

仪器:UT12型烘箱,德国HERAEUS公司产;CH888精密恒温恒湿箱,澳大利亚Thermoline公司产;AV5170烟支质量分选仪,中国电子科技集团公司第四十一研究所产;QTM综合测试台,英国斯茹林公司产;Protos70卷烟机,德国HOUNI公司产.

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 取通过常规梗丝工艺制备的传统梗丝和微波膨胀梗丝实验线生产的微波梗丝各50 kg,纯叶丝210 kg,置入贮丝房平衡48 h.采用烘箱法^[14]对传统梗丝、微波梗丝、纯叶丝的含水率进行检测,依据检测结果与掺配比例设置,折算出标准含水率(12.0%)下的物料掺配质量,之后不施

加香精滚筒混配.将制备好的混合丝样品依次在Protos70卷烟机进行卷制.

1.2.2 实验设计 为研究烟支吸阻、硬度、质量等物理指标及烟支感官品质特性随微波膨胀梗丝掺配比例变化的规律,设计以下实验:1)由于通风率会对烟支吸阻产生影响,研究通风及不通风条件下,烟支质量一致时,微波膨胀梗丝掺配比例对烟支吸阻及硬度的影响趋势.2)研究烟支吸阻及硬度一致时,微波膨胀梗丝及传统梗丝对烟支质量的影响差异.3)研究梗丝掺配常用比例(13%)及大比例(33%)情况下,梗丝使用量对烟支端部落丝量的影响.4)研究梗丝使用量对烟支感官品质的影响.

1.2.3 烟支物理特性检测^[15] 1)将卷制样品置入恒温恒湿箱中,采用22℃,60% RH条件平衡48 h,按(900±5) mg/支进行质量分选,分选时确认各样品质量、圆周、长度指标一致,分析不同掺配比例下两种梗丝卷制样品吸阻、硬度指标的变化趋势.本文选择按接装纸透气度为200 CU,梗丝掺配比例13%的条件经质量分选后的烟支样品进行物理特性分析,以得到通风状态下微波膨胀梗丝及传统梗丝对烟支吸阻影响的幅度差异,为梗丝应用提供理论支撑.2)将平衡后的样品按吸阻(940±30) Pa、硬度(68±2)%分选后,进行烟支质量差异分析.3)按标准^[16]中的方法测试卷烟端部落丝量.

实验过程中,需对分选后的样品进行均匀性验证,按CNAS-GLO3:2006^[17]分析样品均匀性验证数据,在确保样品符合均匀性要求的情况下,进行样品差异分析.

1.2.4 烟支感官品质评价 随机从卷制样品的样本中取出1 000支卷烟,置入恒温恒湿箱中采用22℃,60% RH条件平衡48 h,按(900±5) mg/支质量分选后得评吸样品.按国标^[18]对样品进行比对评吸,同时分析随梗丝掺配比例的递增,样品感官品质的变化趋势.

2 结果与讨论

2.1 梗丝掺配样品物理特性分析

2.1.1 梗丝掺配量对烟支吸阻、硬度的影响

不通风时,将质量分选后(900±5) mg/支的烟支样品按国标^[15]检测物理指标.分析结果显示,单因素方差值小于临界 F 值,即样品组内无显著性差异,样品符合均匀性要求,可进行吸阻、硬度趋势分析.

1)图1为微波膨胀与传统方法处理的梗丝掺配比例对烟支吸阻的影响情况.传统梗丝掺配样品的回归方程为 $Y_{吸阻} = 951 + 235X, R^2 = 0.756$, 回归方程的线性关系及系数显著 ($P = 0.025 < 0.05$).微波膨胀梗丝掺配样品的回归方程为 $Y_{吸阻} = 983 + 334X, R^2 = 0.941$, 回归方程的线性关系及系数显著 ($P = 0.001 < 0.05$).其中 X 为梗丝掺配比例.从图1可以看出,随梗丝掺配比例递增,吸阻指标整体上呈上升趋势.其中,微波膨胀梗丝吸阻与梗丝掺配比例呈强线性相关,即当梗丝掺配比例在8%~33%区间内时,平均每增加5%微波膨胀梗丝掺配比例,吸阻提高 $(1\ 085\ \text{Pa} - 1\ 005\ \text{Pa}) \times 5 / (33\ \text{Pa} - 8\ \text{Pa}) = 16\ \text{Pa}$.较传统梗丝,掺配微波膨胀梗丝卷制样品的吸阻指标高 $1\ 051\ \text{Pa} - 1\ 000\ \text{Pa} = 51\ \text{Pa}$,微波膨胀梗丝提升吸阻的效应高于传统梗丝.当其他因素固定时,烟支的吸阻与烟丝质量呈正相关.因此在卷烟产品开发中,卷烟吸阻一致必然造成传统梗丝掺配样品质量高于微波膨胀梗丝掺配样品,即微波膨胀梗丝的掺配使用可以降低卷烟制造成本,同时也能降低焦油等有害物质的释放量.

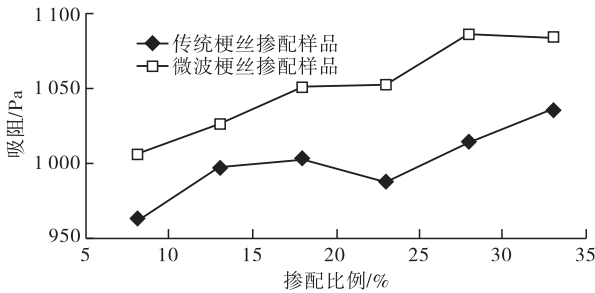


图1 两种方法处理的梗丝掺配比例对烟支吸阻的影响情况

2)图2为微波膨胀与传统方法处理的梗丝掺配比例对烟支硬度的影响情况.传统梗丝掺配样品的回归方程为 $Y_{硬度} = 68.5 + 10.7X, R^2 = 0.600$, 回归方程的线性关系及系数不显著 ($P = 0.071 > 0.05$).微波膨胀梗丝掺配样品的回归方程为 $Y_{硬度} = 69.7 + 19.5X, R^2 = 0.902$, 回归方程的线性关系及系数显著 ($P = 0.004 < 0.05$).其中 X 为梗丝掺配比例.结果表明,随掺配比例递增,传统梗丝掺配样品的硬度无明显变化趋势,而微波膨胀梗丝掺配样品的硬度整体上呈上升趋势,微波膨胀梗丝平均每增加5%掺配比例,硬度指标提高 $(76.8\% - 71.3\%) \times 5 / (33\% - 8\%) = 1.1\%$.较传统梗丝,掺配微波膨胀梗丝卷制样品的硬度指标整体高 $73.7\% - 70.7\% =$

3.0%.在实际应用中,由烟支物理指标要求可知,硬度的提高有利于产品质量特性的稳定.同时,结合卷烟产品开发要求,烟支的硬度与烟丝质量呈正相关,因此,当烟支硬度一致时,微波膨胀梗丝掺配样品的烟支质量低于传统梗丝掺配样品.

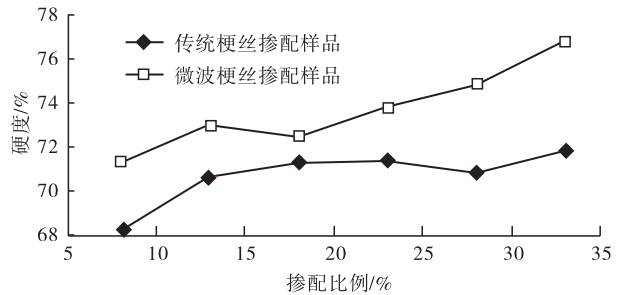


图2 两种方法处理的梗丝掺配比例对烟支硬度的影响情况

3)对于同种类型梗丝,在不同掺配比例下,通风率对烟支吸阻的影响趋势大致不变;而对于不同类型梗丝,在相同掺配比例下,通风率对烟支吸阻的影响大小不一.两样品烟支吸阻和硬度的方差分析见表1和表2.分析结果表明:两样品烟支吸阻、硬度均值 P 值分别为0.000和0.001,均小于0.05,判定为存在显著差异.由图1和图2可知,在13%常用梗丝掺配比例、滤嘴头通风,且质量、圆周、长度指标一致的前提下,较传统梗丝,掺配微波膨胀梗丝样品的吸阻提高 $(933 - 895)\ \text{Pa} = 38\ \text{Pa}$,硬度提高 $71.5\% - 69.7\% = 1.8\%$.这与前述结论基本一致,表明不管通风与否,微波膨胀梗丝提升吸阻、硬度的效果均高于传统梗丝.

2.1.2 梗丝掺配对烟支质量的影响 对掺配比例均为13%的两种梗丝掺配样品按吸阻 $(940 \pm 30)\ \text{Pa}$ 、硬度 $(68 \pm 2)\%$ 分选后进行烟支质量方差分析,见表3.分析结果表明:质量均值 $P = 0.000$,小于0.05,判定为存在显著差异,即在13%掺配比例,吸阻 $(940 \pm 30)\ \text{Pa}$,硬度 $(68 \pm 2)\%$,且圆周、长度保持一致的前提下,经Minitab软件计算,微波膨胀梗丝掺配样品较传统梗丝掺配样品的质量可降低 $949\ \text{mg} - 912\ \text{mg} = 37\ \text{mg}$,从而降低了卷烟的单箱耗丝,提升了卷烟的减害降焦效果.

表1 两样品烟支吸阻方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	5 582.7	5 582.7	106.32	0.000
误差	14	735.1	52.5		
合计	15	6 317.8			

表2 两样品烟支硬度方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	12.826	12.826	17.73	0.001
误差	14	10.125	0.723		
合计	15	22.951			

表3 两样品烟支质量方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	19 717	19 717	78.74	0.000
误差	56	14 273	250		
合计	57	33 990			

2.1.3 梗丝掺配量对端部落丝量的影响 对掺配比例分别为13%、33%的两种梗丝掺配样品端部落丝量进行方差分析,结果分别见表4和表5。结果表明:端部落丝量在13%、33%掺配比例下的P值分别为0.264和0.161,均大于0.05,掺配两种梗丝卷制样品的端部落丝量无显著差异。

2.2 梗丝掺配样品感官品质分析

一方面,传统梗丝燃吸时香气平淡、木质气较重、刺激性较大,而微波膨胀梗丝木质杂气低、吸味品质较好;另一方面,传统梗丝与微波膨胀梗丝的物理特性上存在较大差异,从而导致卷烟燃烧特性的差异,进而影响卷烟的感官品质。因此,有必要对微波膨胀梗丝对卷烟感官品质的影响进行研究,分析随梗丝掺配比例递增,两种梗丝掺配样品的感官品质变化趋势,为微波膨胀梗丝在产品中的应用提供指导。

按国标^[18]对同比例样品进行比对评吸,并进行评分与描述,同时分析两种梗丝掺配样品的感官品质随梗丝掺配比例的变化趋势。感官评吸结果表明:在掺配比例相同的条件下,微波膨胀掺配梗丝样品的感官品质较传统梗丝有明显提升,香气、杂气、刺激性指标均有明显改善。

微波膨胀与传统方法处理的梗丝随掺配比例对感官品质的影响情况见图3。从图3可看出,随掺

表4 13%掺配比例的两样品端部落丝方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	3.10	3.10	1.40	0.264
误差	10	22.13	2.21		
合计	11	25.23			

表5 33%掺配比例的两样品端部落丝方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	1.920	1.920	2.29	0.161
误差	10	8.387	0.839		
合计	11	10.307			

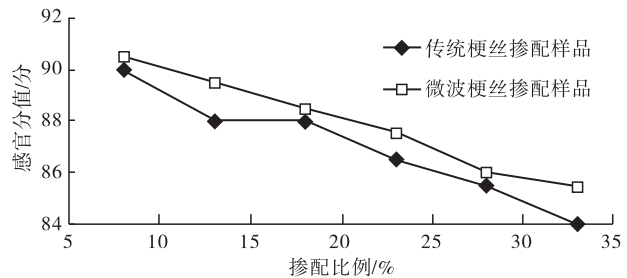


图3 两种方法处理的梗丝掺配比例对感官品质的影响情况

配比例递增,微波膨胀梗丝掺配样品的综合感官品质好于传统梗丝掺配样品。

3 结论

本文通过与传统梗丝掺配样品进行对比,研究了微波膨胀梗丝不同掺配比例时,烟支物理特性、感官品质等卷烟关键质量特性的变化趋势,得出如下结论。

1)物理特性方面:随掺配比例递增,掺配微波膨胀梗丝样品的吸阻、硬度均呈显著上升趋势。当梗丝掺配比例为13%,且吸阻、硬度一定时,掺配微波膨胀梗丝样品的质量可降低37 mg。两种梗丝掺配样品的端部落丝量无显著差异。

2)感官特性方面:在掺配比例相同的条件下,微波膨胀梗丝掺配样品的感官品质水平优于传统梗丝。同时,随掺配比例递增,微波膨胀梗丝掺配样品的香气、杂气、刺激性指标降低趋势好于掺配传统梗丝的样品。

总之,微波膨胀梗丝的应用不仅可以提高卷烟产品的感官品质,同时还可降低单箱耗丝量,提升产品的减害降焦效果。实际应用中,可结合产品风格特征及具体开发要求,选择适宜的梗丝掺配比例,从而实现产品综合品质的有效提升。

参考文献:

- [1] 郑永杰,马林,寇霄腾,等.高沸醇溶剂法提取烟梗中木质素的研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(5):51.
- [2] 王慧,曾晓鹰,杨涛,等.微波膨胀烟梗制备颗粒应用于卷烟的效果评价[J].烟草科技,2008(2):5.
- [3] 刘志华,师建全,孙志勇,等.ESS梗丝在中式卷烟中应用研究[J].烟草科学研究,2007(6):44.
- [4] 高锐,黄志强,王松峰,等.烟梗微波膨胀条件优化及其对烟梗化学成分和物理结构的影响[J].河南农业科学,2013,42(11):50.

甜橙香胶囊滤棒对 烟气有害成分及卷烟香气特性的影响

朴洪伟¹, 金勇华¹, 金钟国², 姚晓财³, 陈明¹, 任瑞冰¹

- (1. 吉林烟草工业有限责任公司 技术中心, 吉林 延吉 133001;
2. 牡丹江卷烟材料厂有限责任公司 技术中心, 黑龙江 牡丹江 157013;
3. 广州兴业生物科技有限公司 技术中心, 广东 广州 510380)

摘要:为探讨胶囊滤棒对卷烟产品烟气指标的影响,制备了甜橙香胶囊、滤棒及试验卷烟,考察了甜橙香胶囊滤棒对焦油及七种烟气有害成分释放量、卷烟危害性指数和卷烟香气特性的影响。结果表明:甜橙香胶囊滤棒可减少焦油及七种烟气有害成分的释放量、降低卷烟危害性指数;甜橙香胶囊滤棒使一支烟具有两种不同的香气特征和口味,可改变卷烟的功能特性,捏破胶囊后,烤烟型卷烟转变为外香型卷烟,具有清甜香、甜橙香,且烟香谐调。

关键词:甜橙香胶囊;卷烟滤棒;烟气有害成分;焦油;卷烟香气

中图分类号:TS452.1;TS41⁺1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.011

Effect of filter containing sweet-orange flavor capsule on harmful components in cigarette smoke and cigarette flavor characteristics

PIAO Hong-wei¹, JIN Yong-hua¹, JIN Zhong-guo², YAO Xiao-cai³, CHEN Ming¹, REN Rui-bing¹

- (1. *Technology Center, Jilin Tobacco Industrial Co., Ltd., Yanji 133001, China;*
2. *Technology Center, Mudanjiang Cigarette Material Factory Co., Ltd., Mudanjiang 157013, China;*
3. *Technology Center, Guangzhou Xingye Biotechnology Co., Ltd., Guangzhou 510380, China)*

Abstract: In order to research the effect of the filter containing capsule on the smoke composition index, the sweet-orange flavor capsule, filter and test cigarette were produced and the effect on tar, seven kinds of harmful components, cigarettes hazard evaluation index and cigarettes flavor characteristics of the filter containing sweet-orange flavor capsule were studied. The results showed that: the contents of tar and seven kinds of harmful components and cigarettes hazard evaluation index were reduced by the filter containing sweet-orange flavor capsule; the filter containing sweet-orange flavor capsule made a cigarette with two different flavor and taste characteristics and could alter the functional properties of cigarettes; after the capsule was broken, the flue-cured cigarette was made into the foreign-flavor cigarette with fresh-sweet flavor, sweet-orange flavor, and the flavor of smoke was harmonious.

Key words: sweet-orange flavor capsule; cigarette filter; harmful components in cigarette smoke; tar; cigarette smoke

收稿日期:2014-12-22

基金项目:吉林烟草工业有限责任公司科技项目(2013003)

作者简介:朴洪伟(1968—),男,吉林省延吉市人,吉林烟草工业有限责任公司高级工程师,主要研究方向为卷烟产品开发。

通信作者:任瑞冰(1983—),男,吉林省长春市人,吉林烟草工业有限责任公司工程师,博士,主要研究方向为卷烟产品开发。

0 引言

近年来,卷烟烟气有害成分分析及选择性降低已成为烟草行业研究的热点^[1-2]. 降焦减害是烟草科学研究的重要课题之一. 目前,烟草行业主要通过卷烟配方中添加造纸法再造烟叶、使用功能性添加剂及合理搭配“三纸一棒”等技术来达到降焦减害目的. 据文献报道,胶囊滤棒不仅能够截留烟气有害成分,而且可以增加主流烟气致香成分,从而改善烟气的感官舒适度^[3-5];余耀等^[3]研究制备了一种胶囊滤棒并应用于卷烟中,发现主流烟气中有害成分的释放量有所降低;C. Dolka等^[4]对薄荷胶囊滤棒进行了研究,发现其对主流烟气成分释放量有一定影响,烟气中的脂溶性挥发物成分较胶囊捏破前有所减少;包秀萍等^[5]研究表明,挥发性薄荷油微胶囊卷烟滤棒可以起到增加香气、改善舒适性和余味的作用. 甜橙香胶囊滤棒是新型的烟用辅材,目前关于甜橙香胶囊滤棒降焦减害的研究及报道鲜见. 本文拟制备甜橙香胶囊滤棒及试验卷烟,并对焦油释放量及七种烟气有害成分、卷烟危害性指数和卷烟香气特征进行研究,以为加香胶囊卷烟产品的开发提供参考.

1 材料与方法

1.1 主要材料、试剂和仪器

材料:胶囊壳材(甲壳素),甜橙香添加剂(主要成分:甜橙精油、L-薄荷醇、玫瑰油、橙花油、紫苏萜、NYA天然植物保润成分、丙二醇和水等),增塑剂(三醋酸甘油酯),胶囊,均由广州兴业生物科技有限公司产;烟用二醋酸纤维素丝素,滤嘴棒(压降3 528 Pa),滤棒成型纸(透气度6 000 CU),牡丹江卷烟材料厂有限责任公司产;卷烟纸(透气度60 CU),浙江民丰特种纸股份有限公司产;烟用接装纸(透气度450 CU),延边长白山包装材料有限公司产;某牌号烤烟型卷烟烟丝配方,吉林烟草工业有限责任公司提供.

试剂:巴豆醛、苯酚、B[a]P,纯度 $\geq 99\%$,美国Sigma公司产;N-戊基-(3-甲基吡啶基)亚硝酸胺(内标)、NNK,纯度 $\geq 97\%$,比利时Acros公司产;HCN(58 $\mu\text{g}/\text{mL}$),中国计量科学研究院产;CO标准气,国家标准气体研究中心产.

仪器:KBF240型恒温恒湿箱,德国Binder公司产.

1.2 方法

1.2.1 甜橙香胶囊、滤棒及试验卷烟的制备

橙香胶囊的制备. 将去离子水与检测合格的胶囊壳材以2:3的比例均匀混合,并于30℃下制成胶浆;将甜橙香添加剂加入料斗中,胶浆加入胶浆斗中,胶囊成型的同时把添加剂包裹于胶囊中,每粒胶囊中添加剂的量为 $(0.017 \pm 0.002)\text{g}$;成型胶囊于80℃下干燥,并进行质量检测,剔除粒径和质量不均匀及破碎压力不均匀的胶囊后,对成品胶囊进行包装.

2)滤棒的制备. 二醋酸纤维素原料中施加增塑剂,并添加成品胶囊,用成型纸包裹滤棒使胶囊滤棒成型,然后按照120 mm/支的长度切割,进行包装. 按照上述方法,制备直径分别为3.05 mm,3.20 mm,3.30 mm,3.35 mm和3.50 mm的甜橙香胶囊滤棒及一种未添加胶囊的滤棒.

3)试验卷烟的制备. 选用透气度为6 000 CU的滤棒成型纸和压降为3 528 Pa的滤棒(含有五种不同直径胶囊),以及某牌号配方烟丝卷制成烟支,得到五种卷烟样品为试验样. 在相同条件下制备一种未添加胶囊的卷烟样品为对照样.

1.2.2 焦油、七种烟气有害成分释放量测定及卷烟危害性指数计算

将试验卷烟于温度 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(60 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿箱中平衡48 h,参照GB/T 19609—2004^[6],GB/T 23356—2009^[7],YC/T 253—2008^[8],GB/T 23228—2008^[9],YC/T 377—2010^[10],GB/T 21130—2007^[11],YC/T 255—2008^[12]和YC/T 254—2008^[13]的方法检测焦油,CO,HCN,NNK,NH₃,B[a]P,苯酚和巴豆醛七种烟气的释放量,并按照文献[14-15]的方法计算卷烟危害性指数.

1.2.3 卷烟香气特征评价 将试验卷烟置于温度 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(60 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿箱中平衡48 h,由卷烟感官评吸员依据标准GB 5606.4—2005^[16]的方法对试验卷烟(分未捏破胶囊时和捏破胶囊后两种情况)香气特征进行评价.

2 结果与讨论

2.1 甜橙香胶囊及其滤棒的物理指标

甜橙香胶囊由包裹层和甜橙香添加剂组成,其外观结构呈圆球形、大小均匀、表面光滑、柔软并具有弹性,其物理指标见表1. 由表1可知,实验制备的甜橙香胶囊各项物理指标均达到了预期效果. 在胶囊制备过程中其粒径和破碎压力是关键性技术指标:大小均匀的粒径,使胶囊不易从槽中弹出;适中且均匀的破碎压力,可以避免运输过程及滤棒制备过程中胶囊的破碎,保持胶囊的捏破力度均衡.

表1 甜橙香胶囊的物理指标

技术指标	技术标准	实测值
直径/mm	3.5 ± 0.3	3.50
厚度/mm	0.06 ± 0.01	0.06
数量/(粒·kg ⁻¹)	44 000 ± 1 000	44 100
质量/(g·粒 ⁻¹)	0.021 ± 0.003	0.022
破碎压力/MPa	0.156 9 ± 0.019 6	0.161 8

甜橙香胶囊滤棒由包裹层和滤芯组成,其中滤芯内嵌裹四粒均匀相间排列的软胶囊.甜橙香胶囊滤棒的物理指标(见表2)显示,试验制备的甜橙香胶囊滤棒的物理指标均达到了预期.

表2 甜橙香胶囊滤棒的物理指标

技术指标	技术标准	实测值
长度/mm	120.0 ± 0.5	119.967
圆周/mm	24.2 ± 0.2	24.254
圆度/mm	< 0.30	0.27
压降/Pa	3 528 ± 294	3 509
硬度/%	89.0 ± 3.0	90.76
滤棒成型纸透气度/CU	6 000 ± 600	6 000

2.2 胶囊直径对焦油及七种烟气有害成分释放量和卷烟危害性指数的影响

不同胶囊直径卷烟焦油及七种烟气有害成分的释放量和卷烟危害性指数见表3.由表3可知,与对试样相比,滤嘴中含有胶囊的试验样卷烟烟气有害成分均有所降低,这与余耀等^[3]的研究结果相一致.由表3还可看出,随着胶囊直径的增大,卷烟主流烟气中焦油及七种烟气有害成分的释放量及卷烟危害性指数均有不同程度的降低.这是因为胶囊不同于滤嘴,不具有通透性,当烟气流经胶囊表面时,因阻力的突然增加,使烟气在缓慢穿过其表面后再次绕行,从而降低了烟气流速并改变了气流路

表3 不同胶囊直径卷烟焦油及七种烟气有害成分释放量和卷烟危害性指数

卷烟	胶囊直径/ mm	焦油/ (mg·支 ⁻¹)	CO/ (mg·支 ⁻¹)	HCN/ (μg·支 ⁻¹)	NNK/ (ng·支 ⁻¹)	NH ₃ / (μg·支 ⁻¹)	B[a]P/ (ng·支 ⁻¹)	苯酚/ (μg·支 ⁻¹)	巴豆醛/ (μg·支 ⁻¹)	卷烟危害 性指数
对试样	0.00	8.50	10.70	93.90	1.90	5.20	6.20	11.20	11.40	6.00
	3.05	8.18	9.80	88.50	1.80	5.11	5.80	10.80	11.30	5.80
	3.20	8.12	9.53	84.20	1.80	5.07	5.30	10.20	11.30	5.60
试验样	3.30	8.08	9.25	82.80	1.80	5.05	4.90	9.80	11.30	5.40
	3.35	8.06	9.20	79.90	1.70	5.04	4.60	9.30	11.20	5.30
	3.50	8.00	9.10	77.40	1.70	5.00	4.20	8.80	11.20	5.20

表4 捏破胶囊前后胶囊滤棒卷烟主流烟气中焦油及七种烟气有害成分释放量

胶囊状态	焦油/ (mg·支 ⁻¹)	CO/ (mg·支 ⁻¹)	HCN/ (μg·支 ⁻¹)	NNK/ (ng·支 ⁻¹)	NH ₃ / (μg·支 ⁻¹)	B[a]P/ (ng·支 ⁻¹)	苯酚/ (μg·支 ⁻¹)	巴豆醛/ (μg·支 ⁻¹)
捏破前	8.00	9.10	77.40	1.70	5.00	4.20	8.80	11.20
捏破后	8.50	10.50	77.20	1.80	5.00	6.10	11.10	11.30

注:甜橙香胶囊直径为3.50 mm,下同.

径,进而增强了滤嘴直接拦截、重力下沉、惯性膨胀、扩散沉积等的过滤作用,提高了过滤效率,比未添加胶囊的滤嘴过滤了更多的烟气中的粒相物质和气相物质,从而降低了烟气成分中焦油和七种烟气有害成分的释放量.

2.3 捏破胶囊前后焦油及七种烟气有害成分释放量

捏破胶囊前后胶囊滤棒卷烟主流烟气中焦油及七种烟气有害成分释放量见表4.由表4可知,捏破胶囊前后烟气中HCN的释放量减小,NH₃的释放量不变,但捏破胶囊后烟气焦油和其他五种烟气有害成分的释放量均有不同程度的增加.这可能是由于捏破胶囊后滤嘴压降发生变化所致.实验结果表明,捏破胶囊后,烟气受到的阻力突然减小(滤嘴压降降低了24 Pa左右),导致滤嘴通透性增加,加快了烟气流速,从而削弱了滤嘴直接拦截、惯性膨胀、扩散沉积等的过滤作用.

2.4 捏破胶囊前后甜橙香胶囊滤棒卷烟的香气特征对比

胶囊滤棒可向卷烟主流烟气中释放致香成分和保润成分,进而增加香气,改善舒适性和余味^[5].捏破胶囊前后甜橙香胶囊滤棒卷烟的香气特征见表5.由表5可知,捏破胶囊前后卷烟香气特征发生了明显变化.捏破胶囊前是烤烟型卷烟,捏破胶囊后转变为外香型卷烟,具有清甜香与甜橙香,且烟香谐调.

3 结论

本文为探讨胶囊滤棒对卷烟产品烟气指标的影响,制备了甜橙香胶囊、滤棒及试验卷烟,考察了甜橙香胶囊滤棒对焦油及七种烟气有害成分释放

表5 捏破胶囊前后甜橙香
胶囊滤棒卷烟的香气特征

胶囊状态	香型	香气特征
捏破前	烤烟型	香气丰满、较细腻、较谐调,微有杂气,余味较纯净、舒适
捏破后	外香型	香气丰满、清新、较细腻,甜橙香与烟香谐调,微有杂气,余味纯净、舒适、回甜

量、卷烟危害性指数和卷烟香气特征的影响。结果表明:甜橙香胶囊滤棒可减少焦油及七种烟气有害成分的释放量,降低其卷烟危害性指数;卷烟抽吸过程中用手指挤压滤嘴的指定部位,胶囊破裂,捏破胶囊前是烤烟型卷烟,捏破胶囊后变为外香型卷烟;甜橙香胶囊可使卷烟香气清新,有回甜感等香气特征,具有清甜香和甜橙香,且烟香谐调。甜橙香胶囊滤棒的研制及应用,可为卷烟新产品的设计开发提供参考。

参考文献:

- [1] 王彦亭,谢剑平,张虹,等.降低卷烟烟气中有害成分的技术研究[J].中国烟草学报,2003,9(3):1.
- [2] 庞永强,黄春晖,陈再根,等.通风稀释对卷烟燃烧温度及主流烟气中主要有害成分释放量的影响[J].烟草科技,2012(11):29.
- [3] 余耀,詹建波,李赓,等.一种卷烟用胶囊滤棒[P].中国:201220540436.6,2013-05-01.
- [4] Dolka C, Piadé J J, Belushkin M, et al. Menthol addition to cigarettes using breakable capsules in the filter. Impact on the mainstream smoke yields of the Health Canada list

constituents[J]. Chem Res Toxicol, 2013, 26: 1430.

- [5] 包秀萍,王松峰,何雪峰,等.薄荷油微胶囊的制备及其在卷烟中的应用[J].河南农业科学,2013,42(3):146.
- [6] GB/T 19609 — 2004, 卷烟·用常规分析用吸烟机测定总粒相物和焦油[S].
- [7] GB/T 23356 — 2009, 卷烟·烟气气相中一氧化碳的测定·非散射红外法[S].
- [8] YC/T 253 — 2008, 卷烟·主流烟气中氰化氢的测定·连续流动法[S].
- [9] GB/T 23228 — 2008, 卷烟·主流烟气总粒相物中烟草特有N-亚硝胺的测定·气相色谱-热能分析联用法[S].
- [10] YC/T 377 — 2010, 卷烟·主流烟气中氨的测定·离子色谱法[S].
- [11] GB/T 21130 — 2007, 卷烟·烟气总粒相物中苯并[a]芘的测定[S].
- [12] YC/T 255 — 2008, 卷烟·主流烟气中主要酚类化合物的测定·高效液相色谱法[S].
- [13] YC/T 254 — 2008, 卷烟·主流烟气中主要羰基化合物测定·高效液相色谱法[S].
- [14] 陈敏,郭吉兆,郑赛晶,等.烟叶部位、产地与卷烟主流烟气七种有害成分释放量关系研究[J].中国烟草学报,2012,18(5):17.
- [15] 谢剑平,刘惠民,朱茂祥,等.卷烟烟气危害性指数研究[J].烟草科技,2009(2):5.
- [16] GB 5606.4 — 2005, 卷烟·第4部分·感官技术要求[S].

在线激光打孔卷烟通风率与 卷烟理化指标的关系

解晓翠

(上海烟草集团有限责任公司技术中心 北京工作站, 北京 101121)

摘要:利用在线激光打孔设备制作通风率不同的混合型卷烟和烤烟型卷烟,考察通风率对两种卷烟物理指标、常规烟气释放量的影响.结果表明:两种卷烟的总通风率、滤嘴通风率均与卷烟质量呈正相关,与吸阻呈负相关,且通风率越高,滤嘴通风率对总通风率的贡献越大;两种卷烟的总通风率、滤嘴通风率均与烟气烟碱、焦油和CO释放量呈显著负相关,影响大小依次为CO释放量>焦油释放量>烟碱释放量.根据卷烟烟气指标设计,可先计算总通风率,再通过调整在线激光打孔参数来满足卷烟产品设计要求.

关键词:在线激光打孔;混合型卷烟;烤烟型卷烟;通风率;理化指标

中图分类号:TS426 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.012

The relationship between ventilation rate and physicochemical indicator of cigarette made by online laser punching

XIE Xiao-cui

(Beijing Working Station, Technical Center of Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Beijing 101121, China)

Abstract: In order to observe the effect of ventilation on cigarette physical and chemical properties, blended type and Virginia type cigarettes were made by online laser punching equipment. The results showed that ventilation rate of the two types of cigarettes was positively related with cigarette weight, and negatively related with cigarette resistance. The higher the ventilation rate was, the more the filter ventilation rate contributed to the total ventilation rate. The two types of cigarettes ventilation rate and filter ventilation rate had negative correlation with the release of nicotine, tar and carbon monoxide. Carbon monoxide was most affected, followed by tar, and nicotine was least affected. Once the cigarette properties were fixed, ventilation rate could be calculated firstly, then through adjusting the laser perforation parameters online, cigarette design demands could be met.

Key words: online laser punching; blended type cigarette; virginia type cigarette; ventilation rate; physicochemical indicator

0 引言

通风稀释技术是国际上广泛采用的最有效的

减焦降害技术手段之一^[1-4].传统的滤嘴通风是通过预打孔接装纸配合高透气度成型纸来实现的,在线激光打孔使用的是普通接装纸和普通透气度成

收稿日期:2015-01-05

作者简介:解晓翠(1985—),女,山东省青岛市人,上海烟草集团有限责任公司助理工程师,硕士,主要研究方向为卷烟工艺和卷烟辅助材料.

型纸,与预打孔相比,在线激光打孔具有投资少、见效快、可靠性高等特点.通风率是水松纸打孔卷烟的重要物理指标之一,其对卷烟其他物理指标及卷烟烟气指标均有重要影响.目前国内有关打孔卷烟的研究主要集中在辅材设计对预打孔卷烟通风率及烟气指标的影响研究^[5-10],对在线激光打孔卷烟的相关研究则较少.本文拟用在线激光打孔设备制备通风率不同的混合型卷烟和烤烟型卷烟,分析不同卷烟的总通风率、滤嘴通风率与卷烟其他物理指标、常规烟气成分释放量的关系,以期为在线激光打孔技术在低焦低害卷烟生产中的应用提供理论依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:混合型卷烟 A 配方烟丝,烤烟型卷烟 B 配方烟丝,北京卷烟厂产;接装纸,潍坊华港包装材料有限公司产;滤棒,牡丹江卷烟材料厂产;卷烟纸,牡丹江恒丰纸业股份有限公司产.

仪器:PROTOS70 卷烟机,常德烟草机械有限责任公司产;在线激光打孔设备,南京瑞驰电子技术工程实业有限公司产;OM-I 综合测试台,北京欧美利华科技有限公司产;SM450 直线型吸烟机,英国 Cerulean 公司产.

1.2 方法

将在线激光打孔设备与卷烟机连接,通过调整打孔时间和打孔数量等参数,制作通风率不同的混合型卷烟样品和烤烟型卷烟样品.同一卷烟样品使用的配方烟丝、卷烟纸、接装纸和滤棒均一致.按照国标及行业推荐标准^[11-14]对样品的物理指标和常规烟气指标进行检测.

2 结果与分析

2.1 通风率与卷烟物理指标间的关系

2.1.1 混合型卷烟总通风率、滤嘴通风率与卷烟其他物理指标的关系 对混合型卷烟样品的总通风率、质量、圆周、吸阻、硬度等物理指标进行相关性分析,结果显示:总通风率与吸阻和硬度呈显著负相关,相关系数分别为 -0.980 和 -0.782;质量与圆周呈显著正相关,相关系数为 0.824;吸阻与硬度呈显著正相关,相关系数为 0.805.以总通风率为因变量,质量、圆周、吸阻和硬度为自变量,采用 SPSS 全模型法对混合型卷烟物理指标进行回归分析得

模型 I^[15-16].结果显示,自变量的方差膨胀因子较大(>5),说明自变量之间可能存在共线性的问题.

对各变量进行共线性检验,结果见表 1.由表 1 可知,大部分特征根都接近 0,且多数自变量条件指数大于 100,表明自变量之间高度线性相关,自变量的微小变动可能导致回归系数估计值的较大改变.

表 1 模型 I 的共线性检验

维度	特征根	条件指数	方差比例				
			常数	质量	圆周	吸阻	硬度
1	4.986	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.014	18.69	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00
3	8.448E-5	242.93	0.00	0.22	0.00	0.10	0.17
4	5.334E-5	305.74	0.00	0.03	0.00	0.47	0.55
5	5.025E-7	3 149.92	0.99	0.74	1.00	0.09	0.27

逐步回归分析可以克服自变量间的共线性,在模型中只保留对因变量有显著影响的变量.采用 SPSS 逐步回归法对混合型卷烟样品的总通风率、质量和圆周等物理指标进行回归分析.SPSS 逐步回归法给出了两个拟合方程,方程①:总通风率 = $-0.096 \times \text{吸阻} + 134.3$, $R_{V1}^2 = 0.960$;方程②:总通风率 = $-0.097 \times \text{吸阻} + 224.4 \times \text{质量} - 59.5$, $R_{V2}^2 = 0.983$.方程②的决定系数 R_{V2}^2 大于方程①的决定系数 R_{V1}^2 ,说明方程②的建模效果优于方程①.但是方程②中常数项的显著性为 0.324,没有达到统计显著水平,因此拟合方程中不应该含有常数项.去掉常数项再次拟合,结果显示,总通风率 = $166 \times \text{质量} - 0.106 \times \text{吸阻}$,总通风率与质量呈正相关,与吸阻呈负相关.模型中各变量回归系数均达到统计显著水平, $R_{V2}^2 = 0.999$.由该方程得到的总通风率拟合值与实测值接近(见表 2),方程拟合效果良好.

用 SPSS 逐步回归法对混合型卷烟滤嘴通风率与质量、圆周、吸阻、硬度等指标的相关性进行分析,结果显示,滤嘴通风率 = $168 \times \text{质量} - 0.113 \times \text{吸阻}$, $R_{FV}^2 = 0.998$.与总通风率一样,滤嘴通风率与质量呈正相关,与吸阻呈负相关.滤嘴通风率拟合结果见表 3,拟合值与实测值接近,方程拟合效果良好.

2.1.2 烤烟型卷烟总通风率、滤嘴通风率与卷烟其他物理指标的关系 用 SPSS 逐步回归法对烤烟型卷烟总通风率与质量、圆周、吸阻、硬度等指标的相关性进行分析,得到烤烟型卷烟总通风率 = $154 \times \text{质量} - 0.105 \times \text{吸阻}$, $R_{V1}^2 = 0.994$;滤嘴通风率 = $163 \times \text{质量} - 0.120 \times \text{吸阻}$, $R_{FV}^2 = 0.991$.与混合型卷

烟一样,烤烟型卷烟总通风率、滤嘴通风率与质量呈正相关,与吸阻呈负相关。

2.1.3 总通风率与滤嘴通风率的关系 混合型卷烟和烤烟型卷烟的总通风率与滤嘴通风率的散点图如图 1 和图 2 所示. 由图 1 和图 2 可以看出,不论是混合型卷烟还是烤烟型卷烟,随着通风率的增大,

表 2 混合型卷烟总通风率拟合值与置信区间 %

实测值	拟合值	标准误	95% 置信区间	95% 预测区间
17.4	20.0	0.68	(18.4,21.5)	(16.2,23.7)
21.2	21.5	0.64	(20.0,23.0)	(17.8,25.3)
24.9	23.1	0.63	(21.6,24.5)	(19.3,26.8)
30.3	31.1	0.49	(29.9,32.2)	(27.5,34.7)
36.7	37.2	0.49	(36.1,38.3)	(33.6,40.8)
21.9	20.2	0.66	(18.7,21.7)	(16.4,24.0)
32.4	31.4	0.48	(30.3,32.5)	(27.8,35.0)
41.1	41.6	0.55	(40.3,42.9)	(37.9,45.3)
50.7	51.8	0.81	(49.9,53.7)	(47.9,55.7)
60.8	59.6	1.04	(57.2,62.0)	(55.4,63.8)

表 3 混合型卷烟滤嘴通风率拟合值与置信区间 %

实测值	拟合值	标准误	95% 置信区间	95% 预测区间
11.6	12.9	0.773	(11.1,14.7)	(8.5,17.2)
14.6	14.5	0.733	(12.8,16.2)	(10.2,18.8)
19.1	16.0	0.725	(14.3,17.6)	(11.7,20.3)
23.6	24.6	0.561	(23.4,25.9)	(20.5,28.8)
30.1	31.4	0.556	(30.1,32.7)	(27.3,35.6)
14.1	13.2	0.759	(11.4,15.0)	(8.9,17.5)
24.8	25.0	0.548	(23.8,26.3)	(20.9,29.2)
33.6	35.9	0.627	(34.4,37.4)	(31.7,40.1)
47.9	47.0	0.927	(44.8,49.1)	(42.5,51.5)
56.5	55.2	1.185	(52.4,57.9)	(50.4,60.0)

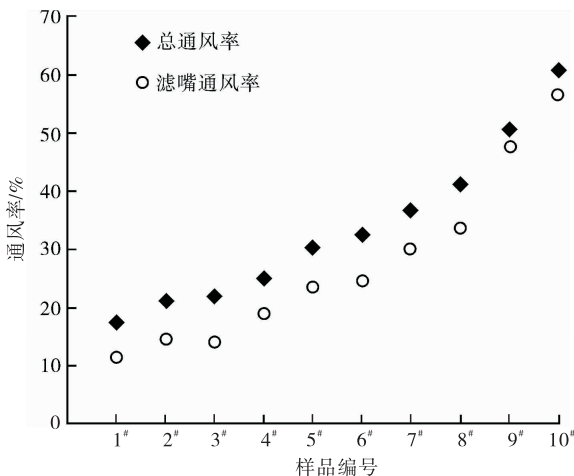


图 1 混合型卷烟总通风率与滤嘴通风率散点图

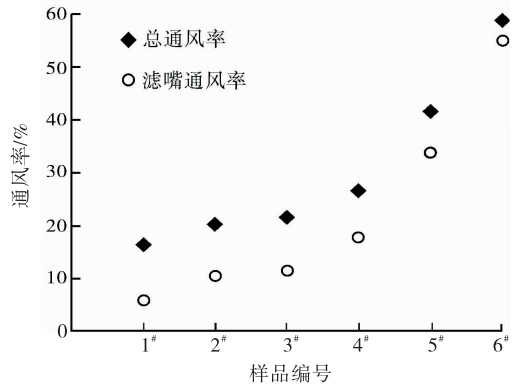


图 2 烤烟型卷烟总通风率与滤嘴通风率散点图

总通风率与滤嘴通风率越来越接近. 说明通风率越高,滤嘴通风率对总通风率的贡献越大. 由总通风率极差和滤嘴通风率极差可知,打孔稀释对滤嘴通风率的影响大于其对总通风率的影响. 这是由于总通风由滤嘴通风和纸通风两部分组成,标准条件下,从烟蒂端流入的总气流量是固定的,为 17.5 mL/s,激光打孔后,由滤嘴端进入的空气量增大,导致纸通风减少.

2.2 通风率与常规烟气成分释放量的关系

2.2.1 混合型卷烟总通风率、滤嘴通风率与常规烟气成分释放量的关系 混合型卷烟不同通风率下常规烟气成分释放量见表 4. 对混合型卷烟总通风率与常规烟气成分释放量进行相关性分析,结果显示,通风率与烟碱、焦油、CO 释放量等烟气指标呈显著负相关,相关系数分别为 -0.931, -0.973, -0.992. 线性回归分析结果显示,焦油释放量 = $9.99 - 0.0952 \times$ 总通风率, $R^2_{TAR} = 0.946$; 烟碱释放量 = $0.867 - 0.00508 \times$ 总通风率, $R^2_{NIC} = 0.866$; CO 释放量 = $12.7 - 0.130 \times$ 总通风率, $R^2_{CO} = 0.983$. 由回归方程系数可以看出,总通风率对常规烟气成分释放量的降低程度由高到低依次为:CO 释放量 > 焦油释放量 > 烟碱释放量. 混合型卷烟烟碱、焦油、CO 释放量的降低比例为 1 : 19 : 26.

对混合型卷烟滤嘴通风率与常规烟气成分释放量进行相关性分析,结果表明,滤嘴通风率与烟气烟碱、焦油、CO 释放量呈显著负相关,相关系数分别为 -0.937, -0.980, -0.994. 线性回归分析结果显示,焦油释放量 = $9.17 - 0.0877 \times$ 滤嘴通风率, $R^2_{TAR} = 0.949$; 烟碱释放量 = $0.820 - 0.00458 \times$ 滤嘴通风率, $R^2_{NIC} = 0.893$; CO 释放量 = $11.6 - 0.122 \times$ 滤嘴通风率, $R^2_{CO} = 0.986$. 由回归方程系数可以看出,滤嘴通风率对常规烟气成分释放量的降

低程度由高到低依次为:CO 释放量 > 焦油释放量 > 烟碱释放量. 混合型卷烟烟碱、焦油、CO 释放量的降低比例为 1 : 19 : 26.

表 4 混合型卷烟不同通风率下常规烟气成分释放量

滤嘴通风率/%	总通风率/%	抽吸口数	烟碱 / (mg · 支 ⁻¹)	焦油 / (mg · 支 ⁻¹)	CO / (mg · 支 ⁻¹)
11.60	17.40	6.02	0.76	8.33	10.29
14.60	21.20	6.20	0.77	8.02	9.94
14.10	21.90	6.22	0.71	8.00	9.59
19.10	24.90	6.12	0.74	7.05	9.32
23.60	30.30	6.38	0.72	7.07	8.95
24.80	32.40	6.35	0.72	6.93	8.50
30.10	36.70	6.42	0.72	6.61	7.80
33.60	41.10	6.58	0.69	6.75	7.86
47.90	50.70	6.62	0.61	5.15	5.90
56.50	60.80	6.62	0.52	3.89	4.55

从以上分析可以看出,总通风率和滤嘴通风率对烟气成分释放量的影响趋势完全一致,总通风率与滤嘴通风率反映的烟碱、焦油和 CO 释放量的降低比例也基本相同. 比较通风率与各烟气成分的回归方程可以看出,滤嘴通风率与烟碱、焦油、CO 三种成分的拟合系数小于总通风率与各成分的拟合系数,说明滤嘴通风率对烟气成分释放量的影响小于总通风率对烟气成分释放量的影响.

2.2.2 烤烟型卷烟总通风率、滤嘴通风率与常规烟气成分释放量的关系 烤烟型卷烟不同通风率下常规烟气成分释放量见表 5. 对烤烟型卷烟总通风率、滤嘴通风率与常规烟气成分释放量进行相关性分析,结果表明,总通风率、滤嘴通风率与常规烟气成分释放量呈显著负相关. 总通风率与烟碱、焦油、CO 释放量的相关系数分别为: -0.916, -0.986, -0.989, 滤嘴通风率与烟碱、焦油、CO 释放量的相关系数分别为 -0.924, -0.983, -0.988. 回归分析结果显示,焦油释放量 = 13.0 - 0.135 × 总通风率, $R_{\text{TAR}}^2 = 0.973$; 烟碱释放量 = 1.16 - 0.008 38 × 总通风率, $R_{\text{NIC}}^2 = 0.839$; CO 释放量 = 14.7 - 0.161 × 总通风率, $R_{\text{CO}}^2 = 0.979$. 焦油释放量 = 11.5 - 0.117 × 滤嘴通风率, $R_{\text{TAR}}^2 = 0.966$; 烟碱释放量 = 1.06 - 0.007 33 × 滤嘴通风率, $R_{\text{NIC}}^2 = 0.853$; CO 释放量 = 12.9 - 0.139 × 滤嘴通风率, $R_{\text{CO}}^2 = 0.977$.

与混合型卷烟一样,通风率对烤烟型卷烟不同烟气成分释放量的降低程度由高到低依次是 CO 释放量 > 焦油释放量 > 烟碱释放量. 烤烟型卷烟的滤

嘴通风率的决定系数小于总通风率的决定系数,滤嘴通风率对烤烟型卷烟烟气成分释放量的影响小于总通风率对烤烟型卷烟烟气成分释放量的影响. 回归方程显示,烤烟型卷烟的烟碱、焦油、CO 释放量的降低比例为 1 : 16 : 19,与混合型卷烟相比,减少相同的焦油量,烤烟型卷烟的烟碱降低量比混合型卷烟多. 此外,烤烟型卷烟总通风率、滤嘴通风率与常规烟气释放量的拟合系数大于混合型卷烟总通风率、滤嘴通风率与常规烟气释放量的拟合系数,说明单位通风率对烤烟型卷烟烟气释放量的影响大于其对混合型卷烟烟气释放量的影响,这可能与烤烟型卷烟的烟气初始释放量较高有关. 通风率相同的情况下,初始烟气成分释放量高的卷烟,由小孔散失的烟气量更多.

表 5 烤烟型卷烟不同通风率下常规烟气成分释放量

滤嘴通风率/%	总通风率/%	抽吸口数	烟碱 / (mg · 支 ⁻¹)	焦油 / (mg · 支 ⁻¹)	CO / (mg · 支 ⁻¹)
5.80	16.50	6.65	0.99	10.38	11.92
10.60	20.30	6.95	0.99	10.45	11.65
11.50	21.70	6.38	0.96	9.94	10.69
17.90	26.50	6.98	0.92	10.03	10.94
34.00	41.60	7.18	0.92	7.07	8.36
55.10	58.90	7.70	0.60	5.07	5.03

2.2.3 总通风率与烟气成分释放量关系在实际生产中的应用 由总通风率与常规烟气成分释放量的回归方程可知,要生产焦油量为 7 mg 的混合型卷烟,总通风率理论值为 31.4%; 要生产焦油量为 9 mg 的烤烟型卷烟,总通风率理论值为 29.5%. 对总通风率数据进行修约,并综合考虑其他烟气成分释放量,最终两者总通风率分别定为 32% 和 30%. 通过调整在线激光打孔设备的打孔孔数和打孔时间,使烟支总通风率满足 32% 和 30% 的标准要求. 该两个牌号卷烟的烟气月检数据分别见表 6 和表 7,烟气月检得分均为 100 分,满足标准要求. 可见,卷烟烟气指标确定后,根据总通风率与烟气指标回归方程计算出总通风率,再通过调整在线激光打孔的工艺参数,可优化卷烟产品的设计.

表 6 混合型卷烟月检数据

序号	焦油含量 / (mg · 支 ⁻¹)	烟碱含量 / (mg · 支 ⁻¹)	CO 含量 / (mg · 支 ⁻¹)
1	6.9	0.73	8.3
2	6.9	0.75	8.5
3	6.5	0.70	8.6
4	6.6	0.68	7.9

表7 烤烟型卷烟月检数据

序号	焦油含量 /(mg·支 ⁻¹)	烟碱含量 /(mg·支 ⁻¹)	CO含量 /(mg·支 ⁻¹)
1	9.3	0.90	9.5
2	8.9	0.91	9.3
3	9.1	0.92	9.1
4	9.3	0.94	9.7

3 结论

本文通过对混合型卷烟和烤烟型卷烟的总通风率、滤嘴通风率与卷烟物理指标、常规烟气释放量的关系的分析发现:1)两种卷烟的总通风率、滤嘴通风率均与卷烟质量呈正相关,与吸阻呈负相关,且通风率越高,滤嘴通风率对总通风率的贡献越大;2)不论是烤烟型卷烟还是混合型卷烟,通风率对常规烟气成分释放量均有显著负影响,影响大小依次为CO释放量>焦油释放量>烟碱释放量.混合型卷烟烟碱、焦油、CO释放量的降低幅度比为1:19:26,烤烟型卷烟三者的降低幅度比为1:16:19.

根据卷烟设计需求,计算出总通风率,再通过调整在线激光打孔的工艺参数,可实现卷烟产品设计的技术要求.

参考文献:

- [1] 赵威,庞天河,刘艳芳,等.卷烟降焦减害技术研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(22):5897.
- [2] 王理珉,马静,胡群,等.通风技术对卷烟性能的影响研究[C].中国烟草学会工业专业委员会烟草化学学术研讨会论文集,海南[s.n.]:2005,11:158.
- [3] 云南烟草科学研究院.“三纸一棒”的科学选用和设计

在卷烟降焦减害中的应用研究[J].云南烟草,2003(2):14.

- [4] 杨国荣,李忠任,许健,等.卷烟减害降焦技术的研究进展[J].云南化工,2009,36(2):44.
- [5] 赵乐,彭斌,于川芳,等.辅助材料设计参数对卷烟7种烟气有害成分释放量的影响[J].烟草科技,2012(10):46.
- [6] 彭斌,孙学辉,尚平平,等.辅助材料设计参数对烤烟型卷烟烟气焦油、烟碱和CO释放量的影响[J].烟草科技,2012(2):61.
- [7] 黄晓飞,姚二民.烟支通风率控制参数研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(5):43.
- [8] 于川芳,罗登山,王芳,等.卷烟“三纸一棒”对烟气特征及感官质量的影响(一)[J].中国烟草学报,2001,7(2):1.
- [9] 魏玉玲,胡群,王建,等.材料多因素对30mm滤嘴长卷烟通风率的影响[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2008,23(4):19.
- [10] 江威,李斌,于川芳.卷烟纸透气度对卷烟年燃烧温度分布的影响[J].烟草科技,2007(9):5.
- [11] GB/T 22838.15—2009,卷烟和滤棒物理性能的测定.第15部分:卷烟·通风的测定·定义和测量原理[S].
- [12] GB/T 19609—2004,卷烟·用常规分析用吸烟机测定总粒相物和焦油[S].
- [13] YC/T 156—2001,卷烟·总粒相物中烟碱的测定·气相色谱法[S].
- [14] GB/T3356—2009,卷烟烟气气相中CO的测定·非散射红外法[S].
- [15] 罗凤明,邱劲飏,李明华,等.如何使用统计软件SPSS进行回归分析[J].电脑知识与技术,2008(2):293.
- [16] 张文彤.SPSS统计分析高级教程[M].北京:高等教育出版社,2004.

响应面分析法优化洗梗水温合格率的应用研究

张常记, 李刚, 蒲辉艳, 杨中, 袁丹宇, 侯莹

(四川烟草工业有限责任公司 什邡分厂, 四川 什邡 648400)

摘要:以洗梗水温的合格率为评价指标,通过单因素试验、运用响应面和绝对差值分析法,考察了液位计安装位置、液位计高低检测位置、补偿蒸汽阀门开启和关闭点对洗梗水温合格率的影响。结果表明:液位计的安装位置为34 cm,低位检测位置为28 cm,高位检测位置为38 cm时,洗梗水温合格率的最高预测值为94.996%。当水温 $<47.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,补偿蒸汽阀门开度为100%;随着水温的增加逐渐减少补偿蒸汽阀门开度,当水温 $>52.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,关闭补偿蒸汽阀门。经对液位检测程序和补偿蒸汽阀门开启和关闭程序优化,YSG-8AF型洗梗机PID控制程序实现了加水和增温的自动控制,洗梗水温合格率从79.85%提高到99.92%。

关键词:洗梗水温;补偿蒸汽阀门开度;响应面分析法;绝对差值分析法

中图分类号:TS43;TS452 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.013

The application research on the qualification rate of the stem washing temperature by response surface methodology optimization

ZHANG Chang-ji, LI Gang, PU Hui-yan, YANG Zhong, YUAN Dan-yu, HOU Xuan
(Shifang Cigarette Factory, Sichuan Tobacco Industrial Co., Ltd., Shifang 648400, China)

Abstract: Through the single factor test, the response surface methodology and the absolute difference analysis method, the effect of the factors such as mounting position of the liquid level meter, the high and low level detection position of the liquid level meter, the compensation steam valve opening and closing point were investigated based on the comprehensive evaluation which were guided by the qualification rate of the stem washing temperature. The results showed that: When the mounting position of the liquid level meter was 34 cm, the low level detection position was 28 cm, the high level detection position was 38 cm, the maximal prediction value of the qualification rate of the stem washing temperature was 94.996%. When the temperature was less than $47.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the opening of the compensation steam valve was 100%, which was gradually reduced with the increase of the water temperature; when the water temperature was more than $52.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the opening of the compensation steam valve was closed. Through the program optimization of the liquid level detection, the compensation steam valve opening and closing point, the PID control program of the stem washing machine of YSG-8AF realized the automatic control of adding water and increasing temperature, the qualification rate of the stem washing temperature was increased from 79.85% to 99.92%.

Key words: the stem washing temperature; opening compensation steam valve; response surface methodology; the absolute difference analysis method

收稿日期:2014-09-22

作者简介:张常记(1981—),男,河南省确山县人,四川烟草工业有限责任公司助理工程师,硕士,主要研究方向为制丝工艺过程控制和质量管理。

0 引言

洗梗是烟梗加工的第一道工序,提高洗梗水温的合格率有利于提高烟梗吸收水分的均匀性和烟梗在后续工序生产中的水分控制,从而提高烟梗的利用率^[1].某卷烟厂的 YSG-8AF 型洗梗机升温缓慢,只有进水管无排水管,过程控制中易受补偿加水及时性的影响:当水温过高时,只能依靠补偿加水,但由于无排水管,当加水过多时,洗梗过程水温波动较大;同时,受热惯性的影响,PID 控制参数补偿蒸汽阀门开启和关闭存在延迟现象,造成洗梗水温波动较大.目前对洗梗水温的控制方法主要是改进加热管、补水旁通阀,改进控制系统、蒸汽系统:胡平安等^[2]通过对洗梗机水温控制系统中的加热管、补水旁通阀和控制系统的改进,提高了洗梗水温的稳定性及洗梗后烟梗水分的稳定性;苏兴亮^[3]通过对蒸汽系统进行改造,提高了洗梗水温的控制精度;张常记等^[4]通过对 PID 控制参数的优化,加料热风温度的西格玛水平从 2.00 提高到 3.94.本文拟在原有控制系统的基础上,通过响应面分析法对液位计安装和检测位置进行优化,确定最佳加水条件;通过批内洗梗水温趋势及绝对差值分析^[5],找到洗梗水温 PID 加热延迟点,然后通过优化 PID 控制参数,实现 YSG-8AF 型洗梗机加水和加热的自动控制,以期提高洗梗水温合格率.

1 材料与方法

1.1 材料

川渝中烟配方烟梗;湖北中烟配方烟梗.

1.2 仪器

YSG-8AF 型洗梗机,徐州华达机电有限公司产.

1.3 洗梗水温合格率的计算方法

1.3.1 数据采集 每隔 30 s 采集一个点的值,数据不作平滑处理.为保证采集的数据是生产过程中稳定状态的数据,采集的有效数据在起点后止点前各删去 3 min 的数据.物料流量的起止点均为物料瞬时流量 > 100 kg/h.出口含水率起始点设置为 > 20%,结束点设置为 < 20%.

洗梗温度起始点与工序出口含水率起始点同步,结束点与工序入口物料流量结束点同步.

1.3.2 洗梗水温合格率

$$\text{合格率} = \frac{\text{批采集的符合标准的数据总数}}{\text{批采集数据总数}} \times 100\%$$

1.4 试验设计

1.4.1 单因素试验 主要考察液位计安装位置、液位计低位检测位置、液位计高位检测位置对洗梗水温合格率的影响.单因素水平表见表 1.

表 1 单因素水平表

水平	液位计安装位置	液位计低位检测位置	液位计高位检测位置
1	30	24	34
2	32	26	36
3	34	28	38
4	36	30	40
5	38	32	42

1.4.2 响应面分析法优化 选择因素时,主要选择单因素试验中对响应值(洗梗水温合格率)有显著影响的因素.采用 Design-Expert 对试验数据进行回归分析^[6-7].每一自变量的低、中、高试验水平分别以 -1, 0, 1 进行编码,该模型通过最小二乘法拟合二次多项方程.

1.4.3 绝对差值分析法 绝对差值是指两次平行测定结果相减得到的差值之绝对值.根据洗梗水温绝对差值的控制趋势图,可以看出洗梗水温的控制精度,进而确定 PID 控制中补偿蒸汽阀门开启和关闭的控制点.

2 结果与讨论

2.1 单因素分析

2.1.1 液位计安装位置对洗梗水温合格率的影响

在液位计低位检测位置为 25 cm,高位检测位置为 40 cm 时,考察液位计安装位置对洗梗水温合格率的影响,结果如图 1 所示.由图 1 可知,当液位计安装位置 < 34 cm 时,洗梗水温合格率随液位计安装位置的增加而升高;当液位计安装位置 > 34 cm 时,洗梗水温合格率随液位计安装位置的增加而降低.因此选择液位计安装位置为 34 cm.

2.1.2 液位计的低位检测位置对洗梗水温合格率的影响

在液位计的安装位置为 34 cm,液位计的高位检测位置为 40 cm 时,考察液位计的低位检测位置对洗梗水温合格率的影响,如图 2 所示.由图 2 可知,当液位计的低位检测位置 < 28 cm 时,洗梗水温合格率随液位计低位检测位置的增加而升高;当液位计的低位检测位置 > 28 cm 时,洗梗水温合格率随液位计低位检测位置的增加而降低.因此选择

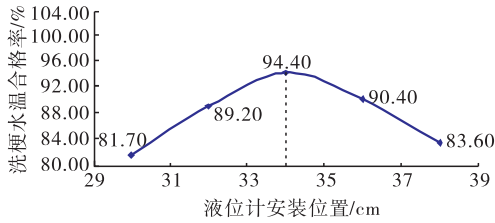


图1 液位计安装位置对洗梗水温合格率的影响

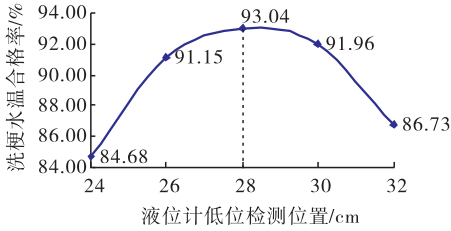


图2 液位计的低位检测位置对洗梗水温合格率的影响

液位计的低位检测位置为 28 cm.

2.1.3 液位计的高位检测位置对洗梗水温合格率的影响 在液位计的安装位置为 34 cm, 液位计的低位检测位置为 28 cm 时, 考察液位计的高位检测位置对洗梗水温合格率的影响, 结果如图 3 所示. 由图 3 可知, 当液位计的高位检测位置 < 38 cm 时, 洗梗水温合格率随液位计高位检测位置的增加而升高; 当液位计的高位检测位置 > 38 cm 时, 洗梗水温合格率随液位计高位检测位置的增加而降低. 因此选择液位计的高位检测位置为 38 cm.

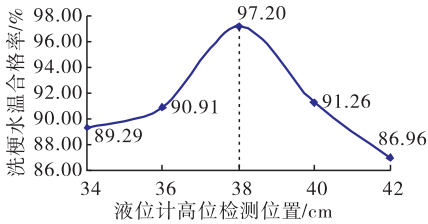


图3 液位计的高位检测位置对洗梗水温合格率的影响

2.2 响应面分析试验结果与分析

2.2.1 响应面分析试验 在上述单因素试验的基础上, 根据 Box-Behnken 的中心组合设计原理, 以液位计的安装位置、液位计的低位检测位置、液位计的高位检测位置三个因素为自变量(分别以 A, B, C 为代表), 以洗梗水温合格率(以 Y 为代表)为响应值, 设计了三因素三水平共 17 个试验点的响应面分析试验, 其因素水平选取如表 2 所示, 试验方案与结

果见表 3.

利用 Design-Expert 软件对表 3 数据进行二次多元回归拟合, 得到洗梗水温合格率的二次多项回归方程:

$$Y = 95.00 - 0.26A - 0.46B - 0.34C + 0.54AB - 0.66AC + 0.41BC - 4.916A^2 - 3.29B^2 - 2.69C^2$$

对上述回归模型进行方差分析, 分析结果见表 4. 由表 4 可知, 回归模型是显著的 ($P < 0.0001$), 其决定系数为 0.9983, 说明该模型能够解释 99.83% 的变化, 因此, 可用此模型对洗梗水温合格率进行分析和预测.

2.2.2 洗梗水温合格率的响应面分析优化 利用 Design-Expert 软件对表 3 数据进行拟合, 得到响应面及其等高线. 液位计的安装位置和液位计的低位检测位置交互作用对洗梗水温合格率的影响见图 4, 液位计的安装位置和液位计的高位检测位置交互作用对洗梗水温合格率的影响见图 5, 液位计的低位检测位置和液位计的高位检测位置交互作用对洗梗水温合格率的影响见图 6.

表2 响应面设计因素与水平

水平	A	B	C
-1	32	26	36
0	34	28	38
1	36	30	40

表3 响应面分析方案与试验结果

试验点	A	B	C	Y
1	-1	-1	0	88.24
2	0	0	0	95.03
3	0	0	0	94.91
4	0	-1	-1	90.27
5	-1	1	0	86.03
6	0	1	1	88.59
7	1	1	0	86.43
8	0	1	-1	88.73
9	-1	0	-1	87.12
10	1	0	1	86.35
11	0	-1	1	88.48
12	0	0	0	95.11
13	-1	0	1	88.03
14	0	0	0	94.86
15	1	-1	0	86.48
16	1	0	-1	88.07
17	0	0	0	95.07

从图4等高线图可以看出,液位计的高位检测位置为38 cm时,液位计的安装位置和液位计的低位

表4 回归模型方差分析结果

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	203.424	9.000	22.603	468.039	<0.000 1
A	0.546	1.000	0.546	11.306	0.012 0
B	1.702	1.000	1.702	35.244	0.000 6
C	0.938	1.000	0.938	19.433	0.003 1
AB	1.166	1.000	1.166	24.153	0.001 7
AC	1.729	1.000	1.729	35.808	0.000 6
BC	0.681	1.000	0.681	14.094	0.007 1
A ²	101.632	1.000	101.632	2 104.522	<0.000 1
B ²	45.520	1.000	45.520	942.592	<0.000 1
C ²	30.479	1.000	30.479	631.140	<0.000 1
残差	0.34	7	0.048		
总变异	0.19	16			

注: $R^2=0.998 3, R_{adj}=0.996 2$.

位检测位置对洗梗水温合格率交互作用显著.在液位计的安装位置为32 cm时,要满足洗梗水温合格率需要液位计的低位检测位置为30 cm;当液位计的安装位置提高到34 cm时,液位计的低位检测位置需要变为28 cm.这表明,在本试验水平范围内,适当提高液位计的安装位置有助于提高洗梗水温合格率并可增加液位计的低位检测范围.

从图5可看出,液位计的低位检测位置为28 cm时,液位计的安装位置和液位计的高位检测位置对洗梗水温合格率的交互作用显著.在液位计的安装位置为32 cm时,得到较高洗梗水温合格率需要液位计的高位检测位置为40 cm;当液位计的安装位置提高到34 cm时,液位计的高位检测位置只需要38 cm.这表明,在本试验水平范围内,适当提高液位计的安装位置有助于洗梗水温的稳定.

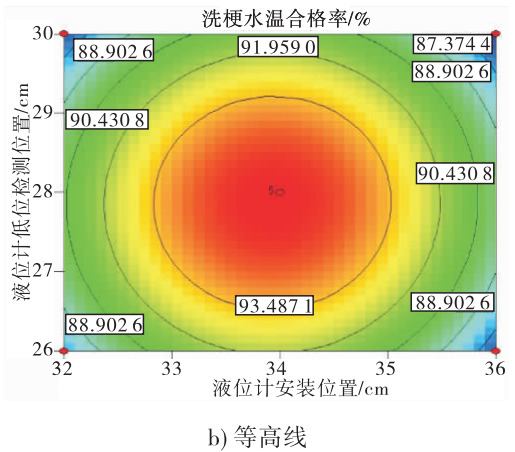
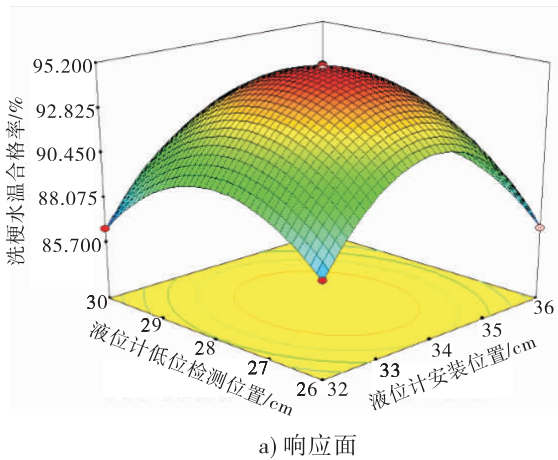


图4 液位计安装位置和液位计低位检测位置的交互作用对洗梗水温合格率的影响

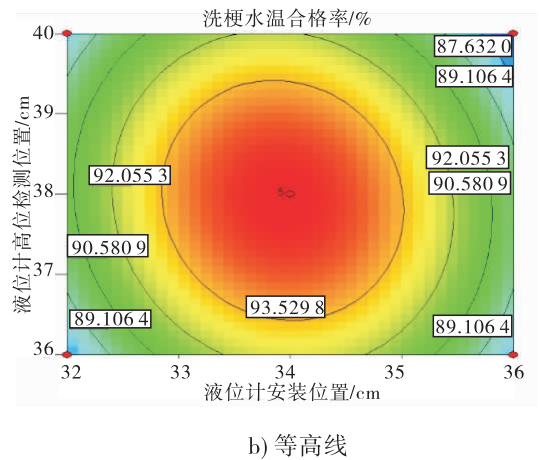
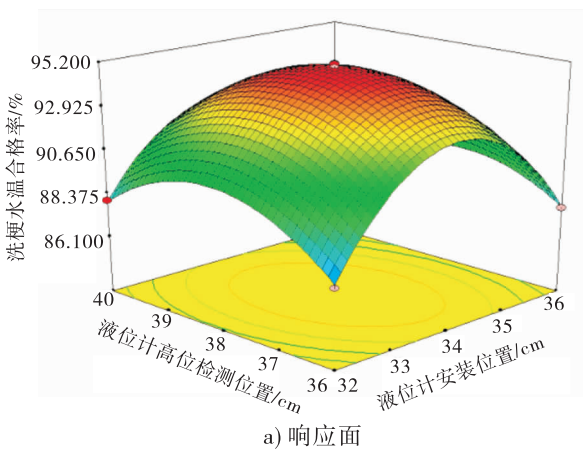


图5 液位计安装位置和液位计高位检测位置的交互作用对洗梗水温合格率的影响

从图6可看出,液位计的安装位置为34 cm时,液位计的低位检测位置和液位计的高位检测位置对洗梗水温合格率的交互作用显著.随着液位计的低位检测位置的增加,达到洗梗水温合格率所需要的液位计的高位检测位置降低.在一定的液位计的低位检测位置范围内,随着液位计的低位检测位置的增加,洗梗水温合格率升高;而当液位计的低位检测位置超过28 cm时,洗梗水温合格率水平反而下降.

2.2.3 最佳条件的确定 通过求解洗梗水温合格率二次多项数学模型的逆矩阵,得出液位计最佳安装条件:液位计的安装位置为34 cm,液位计的低位检测位置为28 cm,液位计的高位检测位置为38 cm时,洗梗水温合格率的 $P < 0.0001$);洗梗机最佳加水条件:当水位 < 28 cm,加水电磁阀打开加水;当水位 > 38 cm,时,关闭加水电磁阀;水位在 $28 \sim 38$ cm 范围内不加水.

0.0001);洗梗机最佳加水条件:当水位 < 28 cm,加水电磁阀打开加水;当水位 > 38 cm,时,关闭加水电磁阀;水位在 $28 \sim 38$ cm 范围内不加水.

2.3 绝对差值分析的结果分析

随机选择一批烟梗 131111024(洗梗水温合格率90.91%),进行批内趋势图分析,结果如图7所示.由图7可看出,批内趋势图的波峰和波谷超过了洗梗水温的标准(50 ± 3) $^{\circ}\text{C}$,这说明洗梗水温PID加热控制点存在延迟现象.

为了进一步了解延迟点,对该批次进行绝对差值分析,结果如图8所示.由图8可看出,中位数值为0.58,最大绝对差值1.13,最小绝对差值0.03,平均绝对差值0.35,最大值和最小值的平均值为0.58,

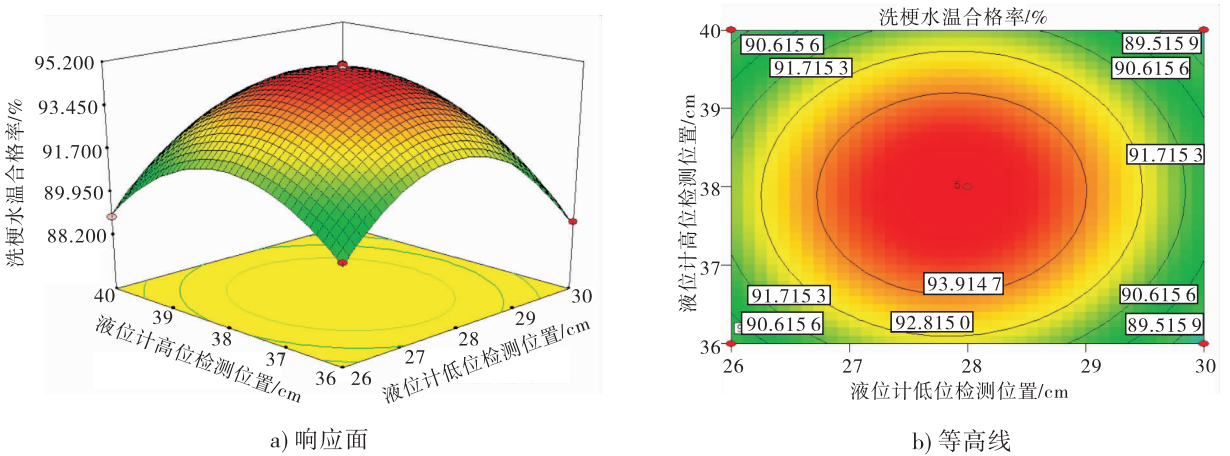


图6 液位计低位检测位置和液位计高位检测位置的交互作用对洗梗水温合格率的影响

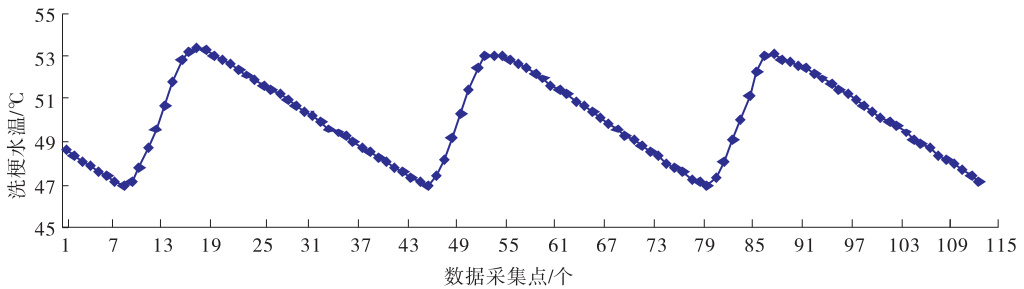


图7 洗梗水温批内趋势图

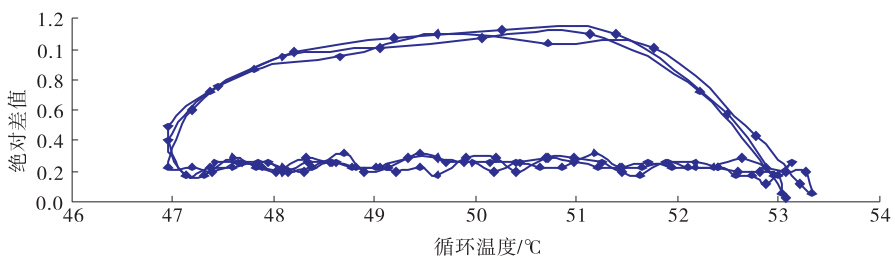


图8 洗梗水温绝对差值趋势图

这说明PID控制中补偿蒸汽阀门开启和关闭存在约0.58℃的延迟。

3 PID控制程序的优化与验证试验

3.1 洗梗水温PID温控程序的优化

基于绝对差值分析结果,将原来的补偿蒸汽阀门开度控制点(47/53)℃调整为(47.5/52.5)℃,即水温<47.5℃,补偿蒸汽阀门开度为100%;随着水温的增加,逐渐减小补偿蒸汽阀门开度,当水温>52.5℃时,关闭补偿蒸汽阀门开度。

3.2 其他PID控制程序的优化

通过优化试验,对液位检测程序和补偿蒸汽阀门开启和关闭程序进行优化,优化的PID控制程序见图9—图13。

3.3 改进前后批内洗梗水温的对比

改进前后批内洗梗水温的对比如图14所示,从对比图中可以看出,改进后,洗梗水温都符合工艺标准(50±3)℃,过程控制稳定。

3.4 改进后洗梗水温合格率控制情况

经过改进以后,从2013年12月份到2014年3

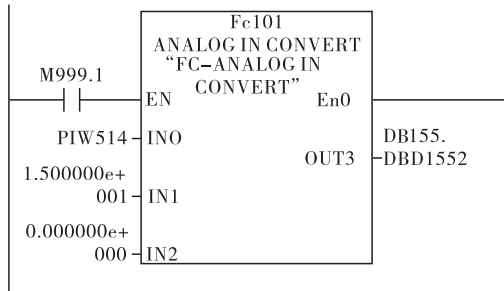


图9 水位计的数据采入程序图

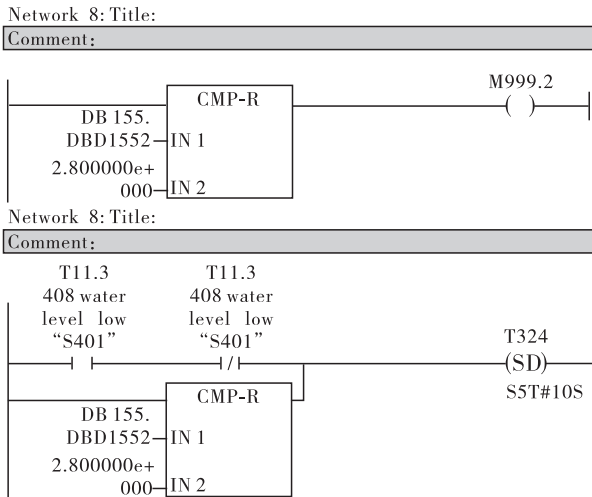


图10 加水控制程序图

月份洗梗水温的合格率为79.85%提高到99.92%。

4 结论

本文以洗梗水温合格率为评价指标,考察了液位计安装位置、液位计高低检测位置、补偿蒸汽阀门开启和关闭点对洗梗水温合格率的影响优化了PID控制程序,得出如下结果结论。

1)通过单因素试验和响应面分析法优化了液位计安装的最佳条件:液位计安装位置为34cm,液位计低位检测位置为28cm,液位计高位检测位置为38cm。

2)基于绝对差值分析结果,对洗梗水温PID温控程序进行优化,确定了补偿蒸汽阀门开启和关闭的最佳条件:当水温<47.5℃时,补偿蒸汽阀门开度为100%;随着水温的增加逐渐减少补偿蒸汽阀

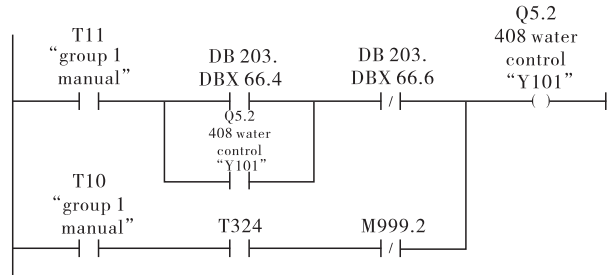


图11 加水控制程序图

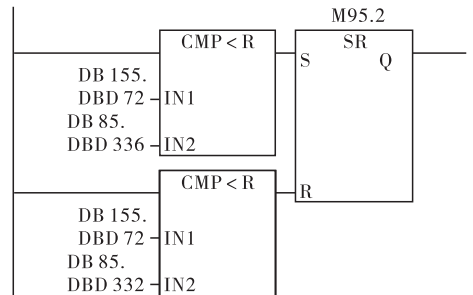


图12 补偿蒸汽阀门开启的控制程序图

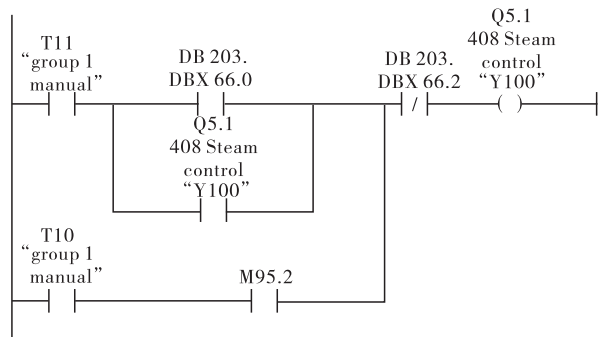


图13 补偿蒸汽阀门关闭的控制程序图

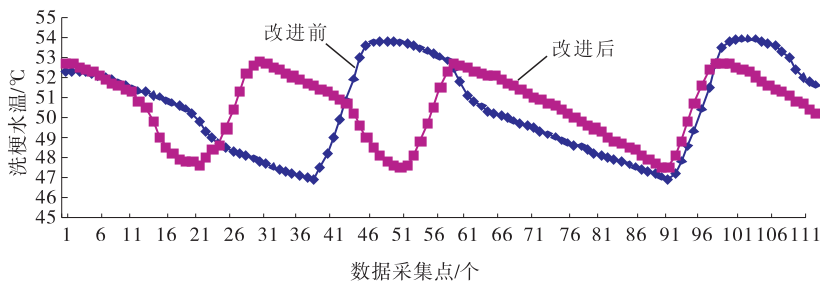


图 14 改进前后批内洗梗水温对比图

门开度,当水温 $> 52.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,关闭补偿蒸汽阀门。

3) 验证试验表明,通过对 PID 控制程序中液位检测程序和补偿蒸汽阀门开启和关闭程序的优化, YSG-8AF 型洗梗机的控制程序实现了加水和增温的自动控制,洗梗水温合格率从 79.85% 提高到 99.92%。

参考文献:

- [1] 李正春,王东方,傅怀云. 水洗梗工序水温和浸泡时间对预贮后烟梗含水率的影响[J]. 重庆与世界,2011, 28(12):126.
- [2] 胡平安,朱东风. 洗梗机补水和加温系统的改进[J]. 科技与企业,2007(6):342.

- [3] 苏兴亮. 洗梗机水加热系统的改进[J]. 科技风,2010 (23):283.
- [4] 张常记,张伟,郑明华,等. 卷烟生产中叶片加料循环温度稳定性的优化[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(6):18.
- [5] 旺媛媛,邵谦明,刘冀. 采用“绝对差值平均算法”进行超声多普勒胎心率的检测[J]. 中国医疗器械杂志, 2011(2):72.
- [6] 张峻松,张常记,潘存宽,等. 超高压提取甘草中甘草酸的工艺研究[J]. 食品科学,2009,30(18):75.
- [7] 范龚健,韩永斌,顾振新. 用响应面法优化红甘蓝色素提取工艺参数[J]. 南京农业大学学报,2006, 29(1):103.

(上接第 47 页)

- [5] 杨伟祖,李雪梅,邱晔,等. 微波烘烤对烤烟梗丝填充力及内在化学成分的影响[J]. 中国烟草学报,1997 (4):1.
- [6] 李涛,杨伟祖,许琨敏,等. 烟梗梗丝加工方法[P]. 中国:201110132050.1,2011-09-14.
- [7] 何炬,刘维涓,师健全,等. 微波膨胀烟梗质量研究[J]. 烟草科技,2006(2):9.
- [8] 于建军,焦桂珍,刘学枝,等. 微波烘烤对烟丝填充力及吸食品质的影响[J]. 河南农业大学学报,2001,35 (1):50.
- [9] 易文波,朱效群,吴文强,等. 颗粒状梗丝在卷烟中的可用性[J]. 烟草科技,2008(2):13.
- [10] 李红武,张强,孙力,等. 微波膨胀对烟梗致香物质的影响分析[J]. 中国农学通报,2013,29(24):207.
- [11] 高尊华,鲍文华,程红军,等. 梗丝结构对卷烟质量稳定性的影响[J]. 烟草科技,2007(2):5.

- [12] 卢幼祥,舒俊生,徐迎波,等. 微波膨胀梗丝理化指标及其应用于卷烟产品的效果[J]. 湖南文理学院学报:自然科学版,2013,25(3):8.
- [13] 杜鹏,车靖,王海滨,等. 烟梗表面基团分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2014,29(3):35.
- [14] YC/T 31—1996,烟草及烟草制品·试样的制备和水分的测定·烘箱法[S].
- [15] GB/T 22838.2—2009,卷烟和滤棒物理性能的测定·第 2 部分·长度·光电法[S].
- [16] YC/T 151.2—2001,卷烟端部掉落烟丝的测定·第 2 部分·旋转箱法[S].
- [17] CNAS—GL03:2006,能力验证样品均匀性和稳定性评价指南[S].
- [18] GB 5606.4—2005,卷烟·第 4 部分·感官技术要求[S].

基于计算机视觉的卷烟包装尺寸测量方法

彭莉科¹, 方细玲², 刘丹², 张龙³, 李志刚³,
闫龙³, 花昌义³, 刘勇³, 李旭华²

- (1. 国家烟草专卖局 经济运行司, 北京 100045;
2. 广东中烟工业有限责任公司 技术中心, 广东 广州 510610;
3. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要:为了实现卷烟包装尺寸的非接触式测量,提出了一种基于双线结构光的烟包尺寸测量方法:采用成一定交角的双色线结构光对样品进行旋转扫描;使用 CCD 相机获取每个旋转角度下结构光在烟包上的反射图像;利用世界坐标系、结构光坐标系和图像坐标系的转换关系,从结构光的形变特征反演得到烟包的表面形貌,并从获取的 3D 点云中拟合出相应的外切长方体尺寸.实验结果表明,该方法的测量精度和标准偏差能够满足实际检测需求,有效地提高烟包和条包尺寸的测量效率和准确性,为卷烟包装尺寸测量提供了一种有效的自动化测量方法.

关键词:卷烟包装尺寸测量;计算机视觉;结构光;3D 点云

中图分类号:TS43;TP311 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.014

Method for cigarette packing size measurement based on computer vision

PENG Li-ke¹, FANG Xi-ling², LIU Dan², ZHANG Long³, LI Zhi-gang³,
YAN Long³, HUA Chang-yi³, LIU Yong³, LI Xu-hua²

- (1. *Economic Operation Department, State Tobacco Monopoly Administration, Beijing 100045, China;*
2. *Technology Centre, China Tobacco Guangdong Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510610, China;*
3. *Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: In order to achieve the non-contact measurement of cigarette packing size, a size measuring method based on dual structured light was proposed. The dual structured light which crossed with a certain angle was used to scan the cigarette packing. The CCD camera was used to obtain reflection images of structured light in each rotation angle on cigarette packing. According to the conversion relationship between world coordinate system, structured light coordinate system and image coordinate system, the surface characteristics of the case was calculated from the deformation feature of structured light. Then, the size of the circumscribed cuboid from 3D point cloud was calculated. The experimental results showed that the measuring accuracy and the standard deviation of the method could meet the actual demand for testing, improving the measurement efficiency and accuracy effectively, providing an effective method of automatic measurement for cigarette packing size measurement.

Key words: cigarette packing size measurement; computer vision; structured light; 3D point cloud

收稿日期:2014-09-30

作者简介:彭莉科(1973—),女,湖南省衡阳市人,国家烟草专卖局工程师,主要研究方向为卷烟生产工艺。

通信作者:李旭华(1962—),男,福建省上杭县人,广东中烟工业有限责任公司高级工程师,主要研究方向为烟草工艺。

0 引言

计算机视觉是近几年兴起的高新技术,它涉及人工智能、神经生物学、图像处理、模式识别等多个专业,具有智能化、操作简便及无损测量等优点,在烟草行业内日益受到重视。

目前,卷烟企业对烟包尺寸的控制需求越来越高,加强烟包的尺寸控制是各卷烟企业的普遍要求,但烟包、条包外观的检测方法大多还停留在人工抽检的阶段,且多利用直尺、游标卡尺等传统测量工具进行接触式的人工测量。由于烟包质地柔软,接触测量容易导致测量误差;人工测量方式不仅效率低,测量结果也随着测量工具和方法的不同而存在一定的差异。所以,实现烟包尺寸测量的首选方法应为非接触测量法。研究者根据烟包、条包尺寸的测量要求,以卷烟外包装作为对象,以计算机视觉技术为核心,开展了图像分析算法、检测装置、3D空间测量方法等研究^[1-5]。在此基础上,本文拟提出一种基于双线结构光的烟包尺寸测量方法,以期为卷烟烟包和条盒的尺寸测定提供一种代替传统人工检测的新的技术手段,以实现自动化测量,提高测量的效率和准确性。

1 检测系统

1.1 系统结构

卷烟烟包尺寸测量系统结构如图1所示,主要包括成像系统、图像处理系统(电脑)、旋转载物台、电气控制系统等。成像系统用于采集待测样品图

像,由图像采集卡、CCD相机、镜头和两组结构光源等组成。图像处理系统用于分析获取的数字图像,提取图像中的结构光信息,生成烟包的点云数据,并给出烟包的尺寸信息。旋转载物台用于承载待测样品,能够在电气控制系统的精密控制下进行旋转,配合成像系统和结构光实现待测样品的360°扫描。

1.2 检测步骤

基于计算机视觉的3D烟包测量方法的原理如图2所示。结构光为成像视场内的待测样品提供空间参照,CCD相机通过光电效应实现结构光照明下烟包图像的获取,并通过图像采集卡将图像传输到计算机,利用图像分析算法对获取的烟包结构光图像进行分析与测量,测试结果由计算机输出。

1.3 双线结构光照明方式

本文检测系统采用的双线结构光照明模式(如图3所示)。该模式是线结构光模式的扩展,由光学投射器向物体表面投射多条光条,这样可以在一幅图像中处理多条光条。与单线结构光相比,本系统模式避免了重建死角(单线结构光扫描不到的区域),提高了图像的处理效率,并且增加了测量的信息量。

2 基于双线结构光的烟包尺寸测量方法

本文方法通过采集结构光在烟包上的反射图像,利用图像处理分析技术实现烟包外观的3D重建,从而实现烟包空间尺寸的测量,其流程见图4。

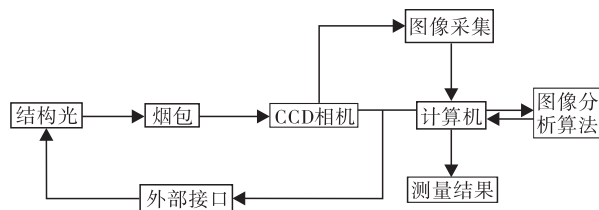


图2 基于计算机视觉的3D烟包测量方法原理框图

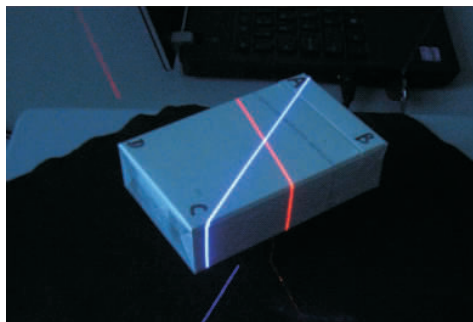
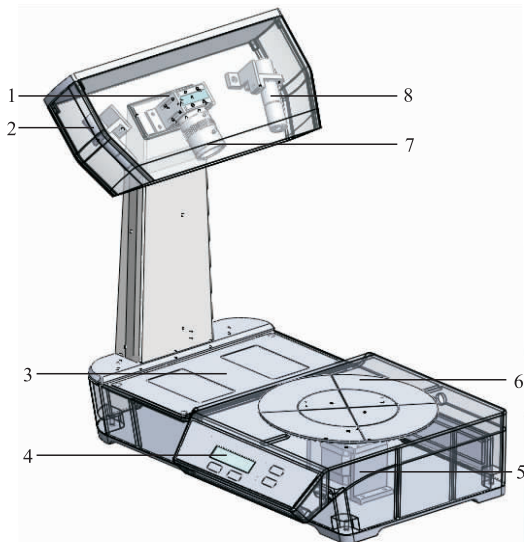


图3 双线结构光照明方式



1.CCD相机 2.结构光源(线激光器) 3.电气控制 4.状态显示
5.旋转电机 6.旋转载物台 7.镜头 8.结构光(线激光器)

图1 烟包尺寸测量系统结构

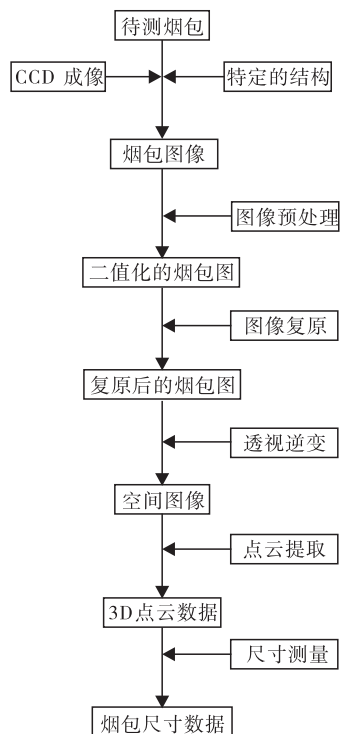


图4 本文烟包空间尺寸测量方法的流程图

本方法包括以下几个步骤: 1) 优化、增强计算机获取的原始图像, 滤除原始图像中的噪声、背景等无用信息; 2) 成像系统标定, 实现欧式空间到图像空间坐标的匹配, 获取镜头引入的各类畸变与场曲参数; 3) 图像获取与预处理, 获取原始图像, 进行图像增强和 ROI 提取; 4) 图像复原, 利用标定参数对图像进行复原; 5) 透视逆变换, 修正成像目标在景深方向上由放大倍数不一致而引入的误差和由成像光轴与测量面的交角而引入的透视误差; 6) 参考线识别与提取, 通过特定的图像分割算法, 对双色参考线分别进行识别、提取和细化; 7) 逆成像变换, 将图像空间中的参考线变换到欧式空间中, 实现参考线标记的卷烟包装空间定位; 8) 点云重构, 通过旋转扫描卷烟包装, 获取 3D 坐标点云数据, 并借助 OpenGL 实现空间重绘; 9) 尺寸提取, 对重绘后的空间目标进行尺寸测量, 提取目标的各类测量数据。

2.1 基本图像信息获取

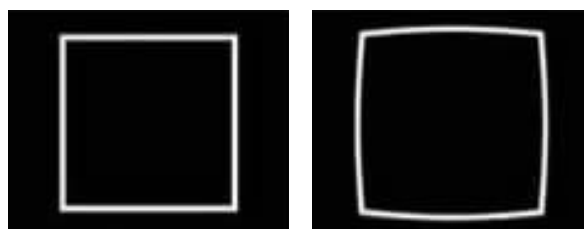
2.1.1 图像复原

本方法采用 $f=5\text{ mm}$ 的镜头, 该类型的镜头存在径向畸变, 中心位置畸变较弱, 远离中心位置畸变较严重, 属于典型的桶形畸变^[6-7], 如图 5 所示。

利用已知参数的标准形状或空间位置的形变来获得畸变参数, 从而复原图像。具体的标定步骤

为: 1) 制作棋盘标定板; 2) 在视场空间的多个位置以不同的旋转角度获得多幅标定板图像; 3) 由图像中棋盘格顶点的位置信息计算成像系统的内、外参数; 4) 由获得的内外参数矫正图像。

图 6 为矫正前后图像效果对比, 图中红线为参考线, 矫正前黑色边缘存在明显弯曲, 矫正后黑色边缘更加平直。



a) 无失真图像

b) 桶形畸变后图像

图5 桶形畸变

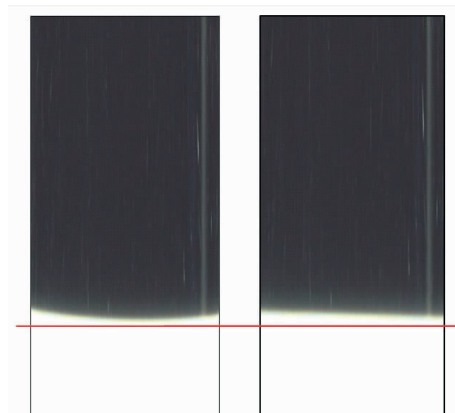


图6 图像矫正前后效果对比

2.1.2 结构光识别与细化

本文方法中分别采用红色和蓝色线激光作为结构光, 两者在 RGB 颜色空间中具有很强的特异性, 易于实现两条结构光的识别与提取。利用结构光的颜色特异性, 在 RGB 颜色空间中, 使用像素的 R(红)分量与 B(蓝)分量的差值作为结构光识别和二值化的阈值, 实现了两条结构光的分别提取^[8]。

结构光光条中心线的获取, 采用霍夫变换^[9-10]与最小二乘法相结合的方法: 利用霍夫变换统计图像上的各个目标像素点的坐标位置, 分别计算每个像素点可能存在的直线的相关参数, 然后通过对所有像素点的斜率参数进行归类计算, 将斜率差异值较大的像素点按照斜率进行分类; 利用最小二乘曲线拟合原理, 分别对不同区域的像素点进行分段拟合, 从而获取单像素宽度的结构光中心线。图 7 为结

构光识别与细化示意图。

2.1.3 透视逆变换 在世界坐标系到图像坐标系的投影过程中,存在透视现象,这会导致视场出现透视畸变.为准确获取样品的空间坐标,需对获取的中心线进行透视逆变换,并对透视畸变进行复原^[11].图8为分别对不同激光线颜色方向进行透视逆变换的结果。

2.2 3D重建与尺寸测量

上述步骤实现了从被样品调制的结构光图像到样品被照射位置的空间坐标.为测量样品的空间信息,需融合每幅图像获取的空间坐标,实现3D重建,并从重建后的点云数据中提取待测信息^[12].

2.2.1 点云重构 为获取完整的待测样品的外观信息,需对样品进行旋转扫描,获取并记录每个旋转角度下结构光方向的样品空间位置坐标信息.图9为点云重构示意图.由图9可见,蓝色结构光测量面与红色结构光测量面均通过测试样品的旋转

中心,两条结构光分别在样品的表面产生折线1,通过透视逆变换可以计算得到该折线每一段的长度,即获得结构光照射位置的样品空间坐标.旋转测试样品,结构光分别照射到2,3,4,⋯位置,分别测量该位置的空间坐标.样品旋转360°后,即完成样品扫描.本方法设置测试样品每旋转1.8°获取1幅样品图像,一次完整测量共获取图像200幅。

将每幅图像处理得到的样品空间坐标按照其旋转角度组合到一起,即构成了测试样品的空间坐标点云.按照上述方法得到的烟包空间点云如图10所示。

2.2.2 尺寸测量 为实现从空间点云中提取样品的尺寸参数,采用基于数值拟合的数据分析方法,从点云数据中拟合出面交线(该面交线即长方体的边),以面交线的交点作为长方体的顶点.获取长方体的8个顶点后,即获得了样品的外切长方体各边长。

3 实验结果与分析

3.1 尺寸测量准确性分析

以标准块测量为对象,考察本方法中尺寸测量的准确性和重复性.20次重复测量的统计结果见表1。

表1中数据表明,本方法的测量误差优于0.012 mm,标准偏差优于0.06,能够满足卷烟包装尺寸测量的要求。

3.2 与人工测量方法的对比分析

实验考察本文方法与人工方法(参照YC/T273)测量效率的差异.实验选取5组样品,由同一实验员操作,分别对同一样品进行20次重复测量,所用时间及测量结果的变异系数对比结果见表2。

由表2可以看出,人工方法耗时约是本文方法的8倍,测量结果的变异系数高于本文方法两个数量级,本文方法极大地提高了测试效率与稳定性,且具有不直接接触待测样品、易于实现自动化测量、最大

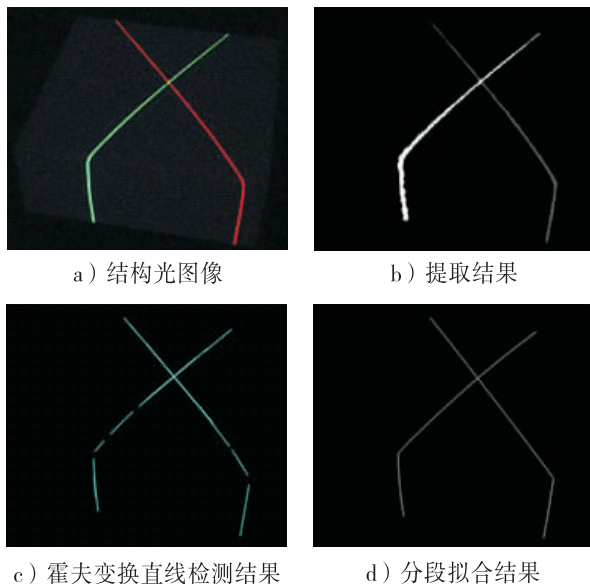


图7 结构光识别与细化示意图

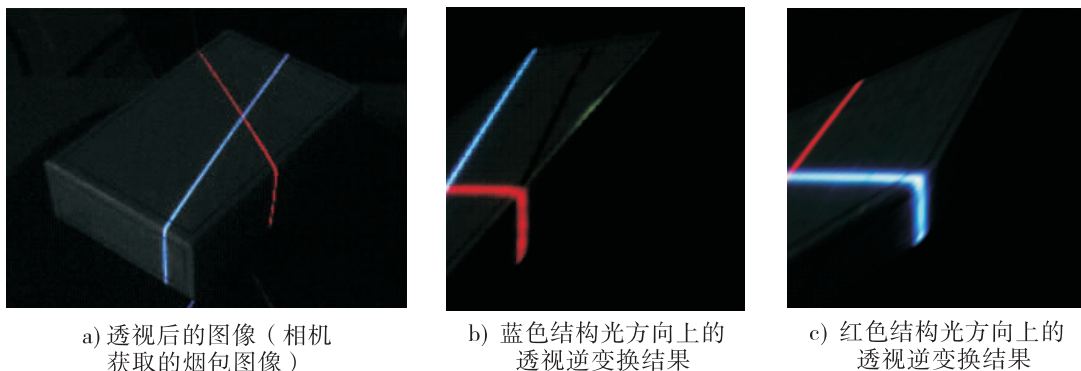


图8 不同激光线颜色方向上的透视逆变换结果

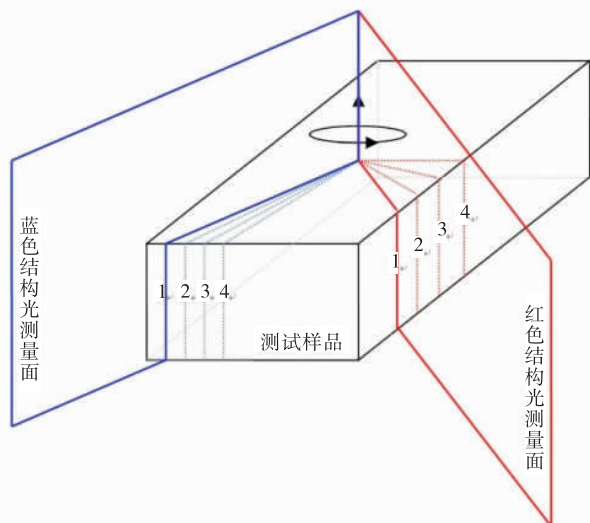


图9 点云重构示意图

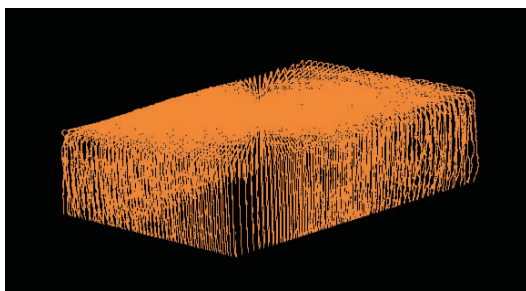


图10 实验得到的空间点云

表1 标准块测试结果

对象	标称值/mm	测量均值/mm	误差/mm	标准偏差
长	209.000	209.006	0.006	0.03
宽	169.400	169.388	0.012	0.06
高	20.210	20.200	0.010	0.01

表2 两种方法之测量时间和变异系数对比结果

样品	测量时间/s		变异系数	
	人工方法	本文方法	人工方法	本文方法
1	312	41	4.31	0.04
2	305	40	3.67	0.05
3	329	41	4.09	0.04
4	314	41	4.16	0.05
5	302	40	3.75	0.04

程度降低人为误差等优点. 实验结果表明, 本文方法与人工方法的测试结果无显著差异, 重复性数据变异系数与标准偏差不依赖于均值, 能够满足实际检测的需求. 该检测技术能够在最大程度上还原目标模型并进行自动尺寸测量, 且操作相对简便、高效.

4 结语

针对卷烟烟包和条包的尺寸测量, 本文采用基于双线结构光的3D成像方法, 获取了样品的三维表面形貌, 较好地实现了卷烟烟包外观几何参数的非接触式测量. 实验结果表明, 本文方法测量误差优于0.012 mm, 标准偏差优于0.06, 单次测量耗时约40 s, 能够很好地满足实际检测的需求, 有效地提高烟包和条包尺寸测量的效率和准确性, 为卷烟包装尺寸测量提供了一种有效的自动化测量方法.

参考文献:

- [1] 刘朝营, 许自成, 闫铁军. 机器视觉技术在烟草行业的应用状况[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(4): 79.
- [2] 夏营威. 基于计算机视觉的烟草检测方法系统与系统研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2012.
- [3] 刘枝梅, 邓文怡, 娄小平. 结构光测量系统中光条中心的提取算法[J]. 北京机械工业学院学报, 2009, 24(1): 42.
- [4] 陈晨, 黄欢. 基于数字图像处理的棒材自动统计方法[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2012, 27(1): 73.
- [5] 方隼, 张乐年, 郑启旺. 机器视觉在烟条外包装检测系统中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2009(5): 138.
- [6] 马丽娜, 曹新德. 基于图像处理技术的车型自动识别系统设计[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(3): 42.
- [7] Xie J, Huang S H, Duan Z C, et al. Correction of the image distortion for laser galvanometric scanning system[J]. Optics and Laser Technology, 2005, 37(4): 305.
- [8] 魏宝刚, 鲁东明, 潘云鹤, 等. 多颜色空间上的交互式图像分割[J]. 计算机学报, 2001, 24(7): 770.
- [9] Hough P V C. Method and means for recognizing complex patterns[P]. US:3069654, 1962-12-18.
- [10] 曾接贤, 张桂梅, 储璐, 等. 霍夫变换在指数函数型曲线检测中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(2): 236.
- [11] 李银华, 路新惠. 改进型自适应中值滤波算法在图像处理中的应用[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2009, 24(1): 83.
- [12] Kaihara Y, Kihara T, Kakayama A, et al. Accuracy of a non contact 3D measuring system for dental model analysis[J]. Pediatric Dental Journal, 2013, 23(2): 71.

基于数据库安全保障的审计系统的设计与实现

张伟伟, 郑峰弓, 张秋闻

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对目前大多数数据库内部操作不透明,易造成机密信息泄漏、资源滥用等问题,设计了一套数据库审计系统.该系统采取旁路监听的方式,对同一局域网中服务器的指定端口进行流量抓取,获得监听网络数据,通过分析抓取到的网络数据包,将审计信息及时备份到安全的数据库中,以备查找与分析.系统通过监控外界用户对数据库的访问操作,记录操作行为,并及时反馈给审计人员,从而使审计人员能够实时掌握数据库系统的安全状态,有效保障数据库的安全.测试结果表明,系统的有效性和实时性良好.

关键词:数据库安全;审计系统;MySQL;SQL Server

中图分类号:TP392 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.015

Design and implementation of audit system based on database security control

ZHANG Wei-wei, ZHENG Feng-gong, ZHANG Qiu-wen

(College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001)

Abstract: In view of the drawbacks that internal operations of present database are mostly opaque, which likely causes confidential information leakage and resource abuse, a set of database audit system was proposed. The bypass to monitor was adopted in the system, through traffic grab to the specified port number on the server in the same LAN, network packets could be obtained. And then these captured network packets were analyzed, finally the analyzed audit information would backup to the secure database in a timely manner for search and analysis. The system could effectively ensure the security of database by monitoring the external users access to the database operation, recording operation behavior, and timely feeding back to the auditor controlling the database system security status in real time. The test results showed that the system had good character of effectiveness and real-time.

Key words: database security; audit system; MySQL; SQL Server

0 引言

目前,国内外大多数数据库系统没有对外界用户提供访问接口,无法从数据库系统内部对系统的安

全性采取加强措施,因此只有利用数据库安全加固技术来提高系统安全性能.现有数据库系统的安全维护主要通过数据库日志文件完成.这样的方式存在很大的弊端,例如:数据库审计的开启会影响数

收稿日期:2014-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(61403349,61302118,61402422);河南省教育厅科技攻关重点项目(14B520066,15A520033);郑州轻工业学院博士基金项目(2013BSJJ044)

作者简介:张伟伟(1986—),女,河南省驻马店市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为智能计算.

数据库本身的性能,日志文件的安全管理必须依赖数据库系统,日志记录的复杂性也增加了查找和分析的难度,因此有效的数据库安全防护技术是必不可少的.但如果通过重新设计数据库的存储方式来增强安全性,必将带来很多不必要的开销.而数据库安全加强技术则可以轻松化解以上难题,既不需要改变原数据库,还可以提供更有效的安全保障^[1-4],数据库审计系统便是由此而来的.数据库审计分为对数据库事件进行记录和对记录信息进行分析两部分.国内外学者在数据库审计方面做了很多研究,并取得了丰富的研究成果. M. Bishop^[5]认为审计应该包含日志和审计分析两部分.针对不同的技术和侧重点,研究人员也分别提出了不同的数据库审计系统,比如基于网络侦听,基于 XML 和 Web Service,基于入侵检测,基于误用检测等^[2,6-8]的数据库审计系统.但这些数据库审计系统大多存在效率低、功能不定和安全保障弱等问题.鉴于此,本文针对 MySQL 和 SQL Server 两大主流数据库设计一种数据库审计系统,以期在不改变已有数据库的网络结构、不影响其他服务器性能的前提下,达到外界用户对数据库操作行为进行监控的目的.

1 审计系统模块搭建

数据库审计系统的工作目标是实时监视并记录外界用户对数据库的操作行为^[9-12].当事件发生时,数据库审计系统自动记录操作者、操作时间、操作对象和操作行为,并实时存储,以实现审计信息的查询、分析等功能.审计系统分为审计引擎核心块、事件收集器、审计信息入库控制块和审计中心四个模块,审计系统工作原理如图 1 所示.

1.1 审计引擎核心块

审计引擎核心块对事件收集器收集的数据包顺序进行以太网协议解析、数据库通信协议解析,将分析到的审计信息直接通过 ZeroMQ 转送给审计信息入库控制块,不负责审计信息的入库操作,这就减轻了审计核心部分的运行负荷.审计引擎核心块工作在 Linux 系统上,主要利用 Libpcap 分析数据包技术对不同数据库进行审计.此模块采用 C++ 的设计模式——工厂模式:只需根据配置文件的内容,就可以对相应数据库协议进行分析,该模式使得系统具有较强的可扩展性,有利于扩充后续各种数据库.

1.1.1 Libpcap 网络抓包及分析 网络安全维护中最常用的方法是对网络数据包的分析,这是以捕

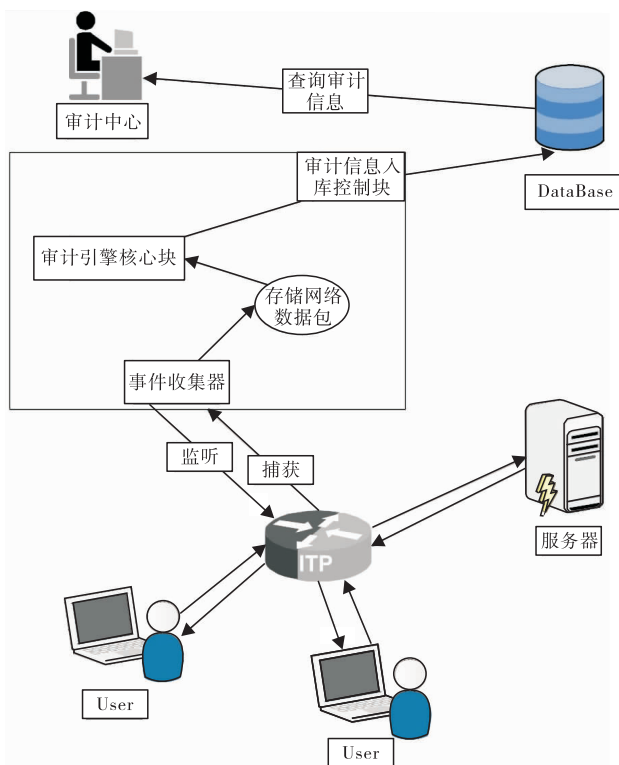


图 1 审计系统工作原理图

获网络数据包为前提的.网络数据包的捕获速度和抓获能力直接影响到数据分析的效率和准确率^[13-14].

本系统主要利用 Libpcap 进行网络抓包和网络数据包的分析.在审计引擎的事件收集器中,Libpcap 的主要工作是抓取指定服务器的流量数据,在事件收集器中通过配置文件设置过滤规则,从而获取更有效的数据流量.在审计引擎核心块中,Libpcap 主要负责网络数据包的解析.它可以将以以太网的数据、有效的载荷数据解析出来,为下一步的数据信息解析奠定基础.

1.1.2 ProtocolBuffer 数据序列化 ProtocolBuffer 结构化序列数据的方法是由谷歌公司提出的,常用作通信协议的编写、数据保持方式等.本系统采用 ProtocolBuffer 结构化序列数据编写通信协议,主要解决审计引擎核心块和审计信息入库控制块之间的数据传输问题.其操作步骤如下:首先在核心模块序列化审计信息,然后通过 ZeroMQ 通信把完成序列化的数据发送到审计信息入库控制块,审计信息入库控制块接收到数据后,再将数据反序列化,最后根据格式将数据及时地保存到数据库中.

1.1.3 ZeroMQ 通信技术 ZeroMQ 有多种通信模式,常见的有请求—应答模式、发布—订阅模式、管

道共享模式. 根据需求分析, 本系统采用了具有快速传递大量数据优势的发布—订阅模式. 系统设定审计引擎核心块为信息的发布端, 审计信息入库控制块为订阅端, 实时检查并接收发布的消息, 而 ZeroMQ 通信主要工作在这两者之间.

1.2 事件收集器

系统中的事件收集器主要用来监听、捕获网络中对数据库数据操作的行为数据包, 将抓到的数据包存到指定文件夹, 供审计引擎核心块审计. 事件收集器同样工作在 Linux 机器上, 随时待命, 当有事件发生时及时捕获, 没有网络流量时就“休息”, 可以大大减轻系统的负载. 根据系统设计, 每捕获 20 个 Cap 数据包就保存起来, 数据包的文件名以文件的创建时间命名.

1.3 审计信息入库控制块

审计信息入库控制块采用 MySQL ++ 数据库存储技术, 避免了大量 SQL 句柄的书写, 可以工作在任意一台机器上, 及时接收审计引擎核心块发布的审计信息, 并快速存储到数据库中.

1.4 审计中心

审计中心在 Windows 平台上工作, 其任务是实现数据库审计信息系统的查询. 本模块在 JavaWeb 上开发, 并设定了分角色登录的机制. 角色分为管理员、普通用户两种. 管理员用户拥有最高权限, 主要负责用户信息和审计信息的管理, 而普通用户只能进行相应的审计信息查询, 比如可以根据事件发生的时间、操作者的 IP 地址等进行相关信息的查询.

2 审计引擎的设计

2.1 协议解析

事件收集器捕获的网络数据包主要由以太网头部、IP 首部、TCP 首部和有效的数据载荷组成. 审计引擎的功能是把需要有效数据从网络数据包中解析出来, 其过程主要涉及 TCP/IP 层协议的解析、应用层协议的解析. 在 TCP/IP 层的数据解析的基础上, 还需获得应用层的有效数据, 而这些数据是以 MySQL, TDS 协议结构为基础的.

2.1.1 MySQL 协议的解析 1) 报文结构. 报文分为消息头和消息体两部分, 其中, 消息头占用固定的 4 个字节, 消息体长度由消息头中的长度字段决定, 报文结构如图 2 所示.

Packet length 表示报文数据的实际长度; Packet number 表示当前请求消息的编号, 在一次完整的请求/响应交互过程中, 用于保证消息顺序的正确性, 每次客户端发起请求时, 序号值都会从 0 开始计算. 消息体用于存放请求的内容及响应的数据.

2) Server Greeting Pocket 信息格式. Server Greeting Pocket 信息格式如图 3 所示.

Protocol 为服务协议版本号; Version 为服务版本信息; Server capabilities 为服务器权能标志, 用于与客户端协商通信方式; Server status 为服务器状态.

3) Login Packet 信息格式. Login Packet 信息格式如图 4 所示.

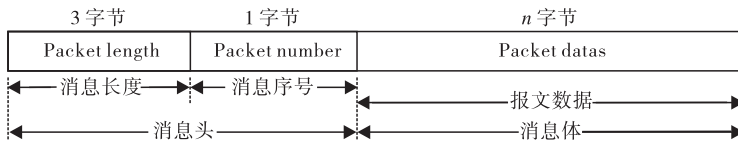


图 2 报文结构

1 字节	n 字节	4 字节	9 字节	2 字节	1 字节	2 字节	13 字节	13 字节
Protocol	Version(end with'0')	Thread id	Salt	Server capabilities	Character set	Server status	Unused	Salt

图 3 Server Greeting Pocket 信息格式

2 字节	2 字节	4 字节	1 字节	23 字节	n 字节	1 字节	20 字节	n 字节
Client capabilities	Extended Client capabilities	Max packet	Character set	Unknown	Username (end with'0')	SHA1	Password	Initialdatabase (end with'0')

图 4 Login Packet 信息格式

Client capabilities 为客户端权能标志,表示与客户端的协商通信方式;Max packet 为最大消息长度,表示客户端发送请求报文时所支持的最大消息长度值;Character set 为字符编码,表示通信过程中要用到的字符编码;Username 为用户名,表示客户端登陆用户的用户名称;Password 为用户登录的密码,一般是加密过的数据.

4) Commands Packet 信息格式. Commands Packet 信息格式如图 5 所示.

Command 表示请求的类型,Parameter 表示客户端发送的请求命令.

5) Error 信息格式. Error 信息是执行状态的一种,客户端协议的 Error 信息格式如图 6 所示.

255 是一个标志位,表示为 Error 信息;Errorno 是 MySQL 对应的错误号;“#”用于将错误号与错误信息分开;SQL_state 表示 SQL 执行的状态;Error msg 表示错误信息.

6) OK 信息格式. OK 信息是 SQL 执行的成功状态信息,客户端 OK 信息格式如图 7 所示.

0 是一个标志位,表示 OK 信息;Affected rows 表示 SQL 执行影响的记录行数;Server status 表示 SQL 执行后 Server 的状态值;Message 表示传输的信息.7) EOF 信息格式. EOF 信息是用于表示传输数据结束的信息,客户端 EOF 信息格式如图 8 所示.

254 是一个标志位,表示 EOF 信息.

上述是 MySQL 协议的一些基本协议格式,接下来是根据协议格式进行数据解析.通过各个报文的格式特点,对于 MySQL 数据库客户端与服务器之间传输的数据,可以解析出客户端的登录名,客户端

对服务器做了哪些操作及服务器返回的一些状态和消息.

2.1.2 TDS 协议的解析 1) 报头格式. TDS 报头格式如图 9 所示.

Token 表示 TDS 操作请求种类;Status 表示信息状态:值为 0 时表示还有后续报,值为 1 时表示此包为当前 TDS 会话中的最后一个包;Length 表示 TDS 数据包总长度,其中含 TDS 包头的长度;Signn 表示命名管道信息要用的通道数,此字段通常值为 0;Packetn 表示 TDS 包在当前 TDS 操作请求中的序号;Winnun 表示在确认信息收到前必须发送的框架数目.

2) 登录报格式. 登录报格式如图 10 所示.

报文头 Token 值为 0x10,表示当前 TDS 报文为客户端登录报.登录报内容主要描述报文头的报文数据长度、协议版本和一些标识信息位.指示字段是以 4 字节为一组存储的数据,其中偏移值占 2 字节,长度占 2 字节.分别存储客户端主机名称偏移和长度、登录的用户名称偏移和长度、登录的密码偏移和长度、客户端应用程序名称偏移和长度、服务器端主机名称偏移和长度、预留 4 字节、库名称偏移和长度、本地名称偏移和长度、数据库名称偏移和长度.最后依次存储的是具体的客户端主机名称、登录的用户名称、登录密码、应用程序名称、服务器端主机名称、库名称.

3) SQL 请求报文格式. SQL 请求报文格式如图 11 所示.

客户端 SQL 语言命令包报文格式首先是 8 个

1 字节 Command	n 字节 Parameter
-----------------	-------------------

图 5 Commands Packet 信息格式

1 字节 0	1-9 字节 Affected rows	1-9 字节 Id	2 字节 Server status	2 字节 Warnings	n 字节 Message
-----------	-------------------------	--------------	-----------------------	------------------	-----------------

图 7 客户端 OK 信息格式

1 字节 255	2 字节 Errorno	5 字节 #	SQL_state	255 字节 Error msg
-------------	-----------------	-----------	-----------	---------------------

图 6 客户端协议 Error 信息格式

1 字节 254	2 字节 Warnings	2 字节 Server status
-------------	------------------	-----------------------

图 8 客户端 EOF 信息格式

1 字节 Token	1 字节 Status	2 字节 Length	2 字节 Signn	1 字节 Packetn	1 字节 Winnun
---------------	----------------	----------------	---------------	-----------------	----------------

图 9 TDS 报头格式

8 字节 报文头	36 字节 登录报内容	50 字节 指示字段	n 字节 登录报负载信息
-------------	----------------	---------------	-----------------

图 10 登录报格式

字节的报文头,紧接着是用 Unicode 编码的客户端 SQL 语言命令,最后是固定的 4 个字节的 SQL 语言结束符,其报文头 Token 值为 0x01,表示当前 TDS 报文为客户端 SQL 语言命令报。

4) 响应报格式. 响应报格式如图 12 所示。

响应报的前 8 个字节依然是报文头,紧接着是响应的一些信息标志. 其响应报类型的不同主要根据报文头 Token 值来区别。

2.2 后台审计引擎的运行与配置

1) 事件收集器的运行与配置. 图 13 显示的是事件收集器的工作状态,当前抓包的对象是对服务器的 3306 端口(MySQL 数据库的默认端口)进行监听并捕获有效数据. 监听的端口和抓包规则可由 filter.ini 配置文件设定。

2) 审计引擎核心块的运行与配置. 图 14 显示的是审计引擎核心块的工作状态,当前是时间收集器收集的外界对 MySQL 数据库的一些操作数据包的解析,具体解析的是哪个数据库协议是由 dbport.ini 这个配置文件设定的。

3) 审计信息入库控制块的运行. 图 15 显示的是审计信息入库控制块的工作状态. 该模块进入工作前首先要连接本地的数据库:连接成功,会进入接收审计信息的等待状态;连接失败,会显示相应的错误。

3 系统测试

系统测试的主要目的是检测系统能否在大网络流量中正常工作,其关键是检测审计引擎的实时性和有效性。

审计引擎工作环境:64 位 CentOS 6.5 操作系统

8 字节	n 字节	4 字节
报文头	SQL 命令	结束符

图 11 SQL 请求报文格式

8 字节	n 字节
报文头	响应的信息

图 12 响应报格式

```
[root@pc_macalzhang capture]# ./capture
*****Welcome to use Database audit procedures!
tcp port 3306
Capturing,wait for a moment ,please!
```

图 13 收集器工作状态

平台下,硬件配置为 CPU 2.6 GHz, RAM 512 M,网络带宽为 100 Mb/s。

测试环境:由三台 Linux 机、一台 Windows 机、审计引擎、审计中心、数据库服务器构成网络. 数据库服务器装配有 MySQL 和 SQL Server 2000 两种数据库,并将其与审计引擎安置到同一局域网中. 一台 Linux 机和一台 Windows 机负责对数据库服务器中的数据库进行操作,另外两台 Linux 机负责发送大量的包含数据库操作语句的网络数据包,从而模拟现实的网络环境。

测试的数据来源:系统的测试数据源一定要使用实际中外界用户对数据库服务器操作的数据流量. 本次测试的数据源是捕获到的某两家公司财务部对其数据库服务器(两家数据库服务器分别是 MySQL,SQL Server 2000)的操作流量数据包. 具体做法是将两台装有 Wireshark 的 Linux 机安置在与两家财务部数据库服务器相同的局域网中,分别设置两个 Wireshark 的抓包过滤规则,并开启抓包工具,进行 24 h 监听,尽可能多地抓取带有数据库操作语句的流量数据包。

测试工具:Wireshark, Tcreply.

测试步骤:1) 安装并配置带有 Wireshark 抓包工具的 Linux 机;2) 获取包含大量数据库操作语句的网络数据包;3) 组建网络环境;4) 两台 Linux 机运行 Tcreply 向局域网中发送捕获来的网络数据包,两个操作员分别操作一台 Linux 机和一台 Windows 机,对一台自己配置的数据库服务器进行操作;

```
[root@pc_macalzhang analyze]# ./analyze
18446744072180623417.cap
18446744072180623324.cap
.
18446744072180623273.cap
18446744072180573866.cap
18446744072180623298.cap
18446744072180623323.cap
18446744072180544384.cap
..
18446744072179187759.cap
the size of 18446744072179187759.cap is 0!
18446744072178082048.cap
the size of 18446744072178082048.cap is 0!
887185589.cap
the size of 887185589.cap is 0!
```

图 14 审计引擎核心块的工作状态

```
[root@pc_macalzhang database]# ./database
DB connect success!
```

图 15 审计信息入库块的工作状态

5) 统计丢包率和误报率.

测试结果:在 100 Mb/s 网络环境下,对 MySQL 数据库服务器审计的丢包率低于 2%,对 SQL Server 2000 数据库服务器审计的丢包率低于 1%,而两者的误报率也均小于 0.5%.这说明在 100 Mb/s 网络环境下,数据库审计引擎可以正常工作,且有效性较高.在测试中可以检测到审计引擎能够 24 h 实时监听外界对数据库服务器的操作,这也证明审计引擎具有良好的实时性.

4 结语

本文设计了一种针对 MySQL, SQL Server 两种数据库的数据库审计系统,实现了审计引擎、审计信息的收集与存储、审计信息的查询三部分功能.通过以太网协议解析和应用层协议解析环节,获取被审计数据库的操作时间、操作地点 IP、操作对象 DB、操作行为四要素.本审计系统实现了对日常数据库操作行为的监控和分析,系统扩展性较强,设计实现着重于用户管理和审计信息的查询反馈,对于审计报警、审计报表功能将后续完成.

参考文献:

- [1] 索炜. 浅谈 IT 技术在数据库审计领域的应用[N]. 中国审计报, 2013-01-09(8).
- [2] 钱正麟, 高航, 李曙强. 基于网络侦听的数据库审计方法[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(4): 97.
- [3] 徐国智. 基于 Web 2.0 技术的数据库审计管理系统的设计与实现[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [4] 余本德, 陈永义. 对数据库审计的思考[J]. 华南金融电脑, 2008(1): 21.
- [5] Bishop M. Computer Security: Art and Science [M]. New York: Addison Wesley, 2002.
- [6] 李亿红, 徐初, 程祥圣. 基于 XML 和 Web Service 的数据库审计系统[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(1): 198.
- [7] 王渊, 马骏. 一种基于入侵检测的数据库安全审计[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 33.
- [8] 李晶媛, 韩慧莲. 一个基于误用检测的数据库安全审计系统[J]. 计算机与数字工程, 2009, 37(10): 116.
- [9] 李丽萍, 杨寅春, 何守才, 等. 数据库安全中审计的设计与实现[J]. 计算机科学, 2005, 32(S7): 83.
- [10] Liu P. Architectures for intrusion tolerant database systems[C]//Proceedings of 2002 18th Annual Conference on Computer Security Applications, Piscataway: IEEE, 2003: 311.
- [11] Stevens W R. TCP-IP 详解卷 1: 协议[M]. 范建华, 胥光辉, 张涛, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [12] 冯玉东, 冯明卿, 余宁. ASP 常见安全隐患及防范措施[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2005, 20(3): 102.
- [13] 胡滨. 基于 Windows 平台的底层网络数据包捕获技术[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(11): 3037.
- [14] 刘斌, 代素环. 基于 Libpcap 的数据包捕获机制的实现[J]. 农业网络信息, 2008(9): 62.

基于 FFmpeg 的 AVS 视频播放器设计与实现

刘嘉¹, 柳英飞²

(1. 郑州轻工业学院 软件学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对目前数字电视监控系统的 AVS 视频解码方案僵化、更改不易、升级困难等问题,设计了一种基于 FFmpeg 编解码库和 DirectX 平台的 AVS 视频 C++ 类播放器. 该设计采用多线程数据库队列技术对数据进行共享,通过控制视频播放速度并同步到音频播放时钟上,保证了音视频播放流畅. 经测试,此视频播放器支持大多数媒体格式、依赖少、易于扩展,具有一定的市场前景.

关键词:FFmpeg;AVS;多媒体;多线程

中图分类号:TP317.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.016

Design and implementation of the AVS video player based on FFmpeg

LIU Jia¹, LIU Ying-fei²

(1. College of Software Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract:To solve the problem that the AVS video decoding scheme in present digital television monitoring system was rigid which caused difficulty in change and upgrading and so on, the AVS video C++ class player was designed based on FFmpeg codec library and DirectX platform. The design adopted the multi-thread database queue technology to share data, and synchronized to the audio play clock by controlling the video playback speed to ensure the smooth play of audio and video. The test result showed that the video player was supporting most media formats, less dependent and easy to expand, and it had a certain market prospects.

Key words:FFmpeg;AVS;multimedia;multi-thread

0 引言

AVS 是由我国自主制定的数字音视频编解码技术标准,是基于创新技术和部分开放技术构建的自主标准,它的压缩编码效率比 MPEG-2 高出 2~3 倍. AVS 采用较少的预测模式,使方案更加简洁,芯片实现复杂度大为降低^[1]. 此外,AVS 是一套包含系统、视频、音频、媒体版权管理在内的完整标准体系,为数字音视频产业提供了更全面的解决

方案^[2].

目前国内外多以添加专用 AVS 视频解码芯片的方式来实现 AVS 视频的解码,但该种方式存在设计方案僵化、更改不易、升级困难等问题,而利用嵌入式硬件本身优势与特点并以软件协同完成解码的解决方案显然更具优势^[3]. 基于此,本文拟设计一种基于多线程技术、能够嵌入系统中并支持 AVS 视频格式的 C++ 类播放器,使其达到较优的运行速度,并具有设计灵活、易于扩展的特点.

收稿日期:2014-11-04

基金项目:河南省基础与前沿技术研究计划项目(142300410248)

作者简介:刘嘉(1983—),女,山西省阳城县人,郑州轻工业学院讲师,硕士,主要研究方向为计算机网络.

1 系统设计

1.1 总体设计

本设计基于多线程技术,采用 FFmpeg 编解码库设计,并使用 DirectX 进行音视频的输出;同时使用 Windows 标准程序库作为开发基础,以实现播放器类的控制;内部由播放器类统一进行控制,播放器类中分别嵌入输入线程类、解码线程类及输出线程类,线程间同步的队列也存储在播放器类中;对外提供播放、暂停、跳转、音量、停止播放等接口。

FFmpeg 是在 Linux 下开发的可支持多种操作系统的开源项目。要取得 Windows 下使用的动态链接库,有多种解决方案,本系统采用 Windows 下搭建 MinGW + MSys 的模拟 Linux 环境进行编译。

1.2 播放器工作流程

播放器工作流程如图 1 所示。

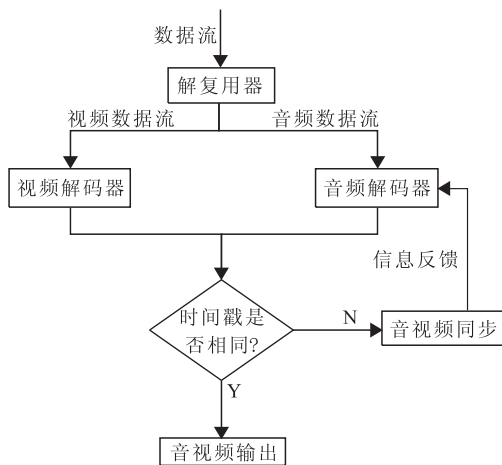


图 1 播放器工作流程图

1) FFmpeg 解复用。一个多媒体文件既有视频又有音频,因其压缩算法各不相同,所以解码的第一步是将绑在一起的音频流和视频流分开^[3]。通过文件格式解析器 (demuxer) 对每个视频文件进行解析,文件解析的过程是根据已知的数据布局,在相应的文件位置找到相关数据。

2) FFmpeg 解码。通过解复用得到的帧包含有音频帧和视频帧。FFmpeg 首先根据解码器 id 通过 `avcodec_find_decoder()` 找到适用的解码器,然后通过 `avcodec_open()` 打开解码器,以解复用得到的包为参数调用 `avcodec_decode_video()` 或 `avcodec_decode_audio()` 分别解码视频数据和音频数据。

3) DirectX 视频输出。通过调用 `DirectDrawCreate()` 创建 `DirectDraw` 对象用于代表一个显卡,利用

`QueryInterface()` 实现接口 `IDirectDraw2`, 调用 `IDirectDraw2::CreateSurface()` 创建用于代表物理屏幕或逻辑屏幕的 `DirectDrawSurface` 对象。

通过 `IDirectDrawSurface2::Flip()`, `IDirectDrawSurface2::BltFast()` 等方法,切换显示页或映射部分屏幕内容。

通过函数 `IDirectDraw2::CreatePalette()` 创建 `DirectDrawPalette` 对象,由它代表显卡的物理调色板,每个 `DirectDrawPalette` 必须附着 (attach) 在一个 `DirectDrawSurface` 上,不同的 `DirectDrawSurface` 对象可以有不同的 `DirectDrawPalette`。

`DirectDrawClipper` 对象由函数 `IDirectDraw2::CreateClipper()` 创建, `DirectDraw` 用它来处理屏幕的剪贴。

4) DirectX 音频输出。DirectSound 是 DirectX-Audio 的一个较底层的部件,可实现多个声音的混合播放^[4]。通过调用 DirectXAPI 函数提供的 `DirectSoundCreate8()` 创建一个 `IDirectSound8` 接口对象,通过调用 `SetCooperativeLevel` 进一步设置设备的协调级别,如果需要设置主缓冲区的新播放格式,可通过调用 `IDirectSound8` 接口的 `CreateSoundBuffer` 函数,从声卡内存中分配缓冲区,次缓冲区用来装入实际的声音数据。DirectSound 提供了对动态流缓冲区播放的功能,通过手动设置 DirectSound 的通知机制,利用 `IID_IDirectSoundNotify` 的 `SetNotificationPositions` 实现把一部分音频样本放入,待接到 DirectSound 的通知后,将新的数据填充到缓冲区中,实现流式缓冲的播放。

5) 同步控制。当使用 FFmpeg 解复用器得到一个包时,PTS 和 DTS 的信息也会保存在包中^[4]。因此可以通过包的 PTS 和 DTS 信息来同步音视频的播放。本文播放器采用视频同步到音频的解决方案,即利用音频的采样率,依赖 DirectSound 的信号通知机制,当播放到指定位置的声音样本时,记录下此刻的时间,以及样本的播放时间戳,需要播放视频时,比较当前帧的视频时间戳与音频时间戳来决定视频帧的延迟时间以及是否需要丢弃。

2 系统实现

2.1 多线程数据队列的实现

本系统采用了 Windows 下的 Critical Section 实现临界区控制,并且采用信号量 Semaphore 控制队列中资源数目实现生产与消费的同步。

信号量的操作被封装在方法 `PSource()` 与

VSource()中,分别对应信号量的P,V操作,为了使线程能够及时响应关闭及暂停操作逻辑,防止线程死锁的发生,操作为非阻塞式的实现。

初始时信号量为0,待读线程将读得的包插入队列时,信号量增加,而解码线程从包队列中取出包时,信号量减少,信号量用于维护资源的数量信息,并且使输入与解码线程同步。

2.2 多线程的实现

播放器使用了多线程来实现各线程之间共享数据、互相协同,共同完成视频从文件中经编码复用过的数据流转为能够播放的原始音频样本与画面的工作。一个线程相当于一个过滤器,从视频文件中读入,然后一步步将流进行转化,源源不断的送往屏幕与音响设备,实现视频的播放。所有线程均以CFPlayer::BeginThreads()开始,以CFPlayer::EndThreads()结束,其中Read Thread状态图如图2所示。

2.3 画面绘制的实现

画面的绘制是通过CFPlayer::DrawScreen()来实现的,其传入数据为AVFrame,在本函数中首先创建能显示YUV420P格式图像的DirectDraw的离屏表面,然后通过DirectDraw的Lock获得图像缓冲区,将图像数据以对齐方式填入缓冲区^[5],其过程如图3所示。

2.4 音频播放的实现

音频播放采用DirectSound的动态缓冲区播放

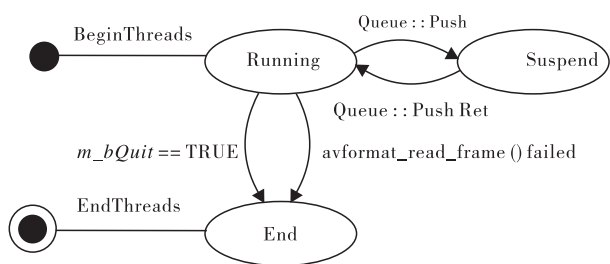


图2 ReadThread 状态图

功能,实现大音频文件内容的播放。设置DirectSoundBuffer的通知机制,当有接收到通知时,可以通过DirectSoundBuffer的Lock获得DirectSound需要存放下一部分声音样本的缓冲区,将解码并经转换过的声音样本存入该缓冲区中,DirectSound就会接着进行播放。宏观上,DirectSound的播放是连续的。由于解码出的音频帧样本长度和通过Lock获得的缓冲区长度并不对应,所以需要实现一个后备的缓冲区,用于暂存自音频帧中拷入,并准备向DirectSound缓冲区中拷出的音频样本,将多余的样本内容留待下一次向DirectSound缓冲区中拷贝时使用^[6]。CFPlayer::GetFrameBuffer()实现了从解码过后的音频帧队列中取得帧数据的功能。至此,音频播放功能基本完成。

2.5 音视频同步的实现

DirectSound的音频播放是按照设定好的采样率及样本字节数进行播放的^[7],其播放速率比较稳定,故本播放器音视频同步的实现是以音频帧的PTS作为参照,按照视频同步到音频的方法实施。在解码得到音频帧及视频帧时,帧中的额外信息记录了帧的PTS,在音频播放线程中DirectSound要读取音频帧数据时,记录了当前音频帧的PTS信息,当需要播放视频帧时,取得其PTS值,并与前一帧播放时间进行差值计算,得到当前帧需要的延迟时间,并将该PTS值与音频帧的播放时间PTS时行差值计算,得到音视频播放不同步的时间差值,将前后两个差值进行比较,如果视频帧播放时间超前音频帧,则提高延时,若视频帧播放时间滞后音频帧,则减少延时,其他则按正常延时。

2.6 随机播放的实现

随机播放通过FFmpeg的流查找函数avformat_seek_file()实现。同时由于解码上下文随着读文件位置的改变,需要进行刷新,通过FFmpeg的avcodec_flush_buffers()实现清空当前解码帧所用到的一些

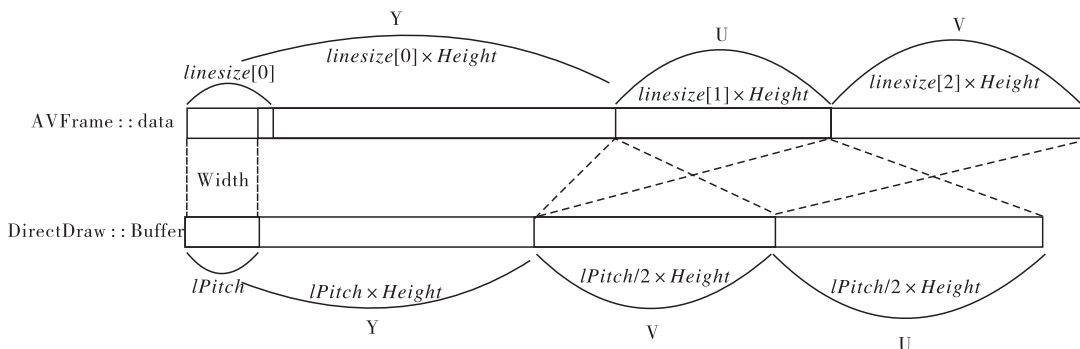


图3 YUV420P 图像数据向 DirectDrawBuffer YV12 图像缓冲区拷贝

上下文内容. 随机播放的具体实现过程是: 当调用 Seek() 时取得当前播放位置信息, 通过计算得到要跳转到的位置信息, 并设置 Seek 请求标记, 通过方法 CFPlayer::StreamSeek() 实现; 当读入线程检测到 Seek 请求标记时, 清空当前包队列, 插入定义刷新标记的定义包, 以通知音视频解码器刷新解码上下文结构, 并通过 avformat_seek_file 实现跳转. 随机播放功能线程间协作图如图 4 所示.

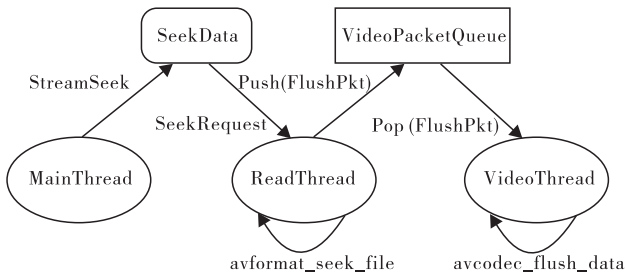


图 4 随机播放功能线程间协作图

2.7 测试评价

以 CFPlayer 为播放器对象, 内部包含音频及视频包 m_qVideoPacket, m_qAudioPacket 队列, 用于读线程 ReadThread 与音视频编解码线程 VideoDecodeThread, AudioDecode Thread 的数据共享与同步. 经过测试, 该应用程序能够较好地实现多媒体的播放与暂停; 能够实现对多媒体的快进、倒退及声音大小的调节, 拥有一定的安全性、兼容性和实用性. 功能相对完善, 基本支持所有格式的多媒体; 界面相对简单, 总体评价良好.

3 结语

为满足未来广播电视行业对 AVS 编码的音视频电视监控的需求, 设计了一种便于转接到数字电视监控系统中的 AVS 视频播放器, 实现了多线程数据队列、画面的最终绘制、音频的播放、音视频的同步及随机播放等功能. 因其无需硬件解码芯片, 设计灵活简洁、易于护展、升级方便, 具有一定的市场应用前景.

参考文献:

- [1] 陈跃, 王昭惠. MPEG 标准与视听技术发展趋势[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2002, 17(3): 23.
- [2] 刘丽霞, 边金松, 张琨, 等. 基于 FFmpeg 解码的音视频同步实现[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6): 2087.
- [3] 吴文相, 邵时. 基于 ARM 的嵌入式 AVS 视频播放器的设计[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(1): 247.
- [4] 李晓妮. 面向 H. 264 的嵌入式音视频同步编码技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [5] 刘建敏, 杨斌. 嵌入式 Linux 下基于 FFmpeg 的视频硬件编解码[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011(6): 28.
- [6] Fu F F, Yi Q M, Shi M. Functional verification based on FPGA for AVS video decoder[J]. Semiconductor Photonics and Technology, 2009, 15(4): 219.
- [7] 付丽方. 基于 AVS 的播放系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.

基于 Android 的智能导航系统的设计与实现

马欢¹, 景志勇¹, 李健勇², 陈明¹

(1. 郑州轻工业学院 软件学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对传统导航系统成本高、无动态交通路况等不足,提出了一种基于 Android 的智能导航系统.该系统采用 C/S 结构,使用百度地图 Android SDK 开发客户端,服务器端以 WebService 的形式向客户端提供服务.经测试,该系统具有良好的用户体验、操作便捷、功能完备、性能稳定,能够满足不同用户的多种出行导航需求.

关键词:智能导航系统;最优路径决策;Android;百度地图

中图分类号:TP393.09 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.017

Design and realization of the intelligent navigation system based on Android

MA Huan¹, JING Zhi-yong¹, LI Jian-yong², CHEN Ming¹

(1. College of Software Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the high cost and poor dynamic traffic conditions of traditional navigation system, the intelligent navigation system based on Android was presented. The system adopted C/S structure, and used the Baidu map Android SDK to develop the client. The server provided services to the client in the form of WebService. The test results showed that the system had a good user experience, convenience in operation, completeness in function, stability in performance, and could meet a variety of travel navigation requirements of different users.

Key words: intelligent navigation system; optimal path decision; Android; Baidu map

0 引言

近年来,由于城市的不断扩建和汽车市场的不断扩大,在我国很多的大中城市中普遍存在着道路运输效率低、交通道路拥挤、交通事故频繁发生的现象^[1].以北京市为例,堵车曾造成一天约

6 000 万元的社会成本损失,一年则高达 200 多亿元^[2].利用导航系统实现对城市交通流的实时诱导是缓解交通拥堵和解决行车安全问题的有效手段之一.

车辆导航系统的市场前景广阔、应用价值巨大,备受各国政府、研究机构 and 企业的青睐.美国的

收稿日期:2014-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(60974005);河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A520379);国家级大学生创新创业训练计划项目(201310462018)

作者简介:马欢(1981—),男,河南省孟州市人,郑州轻工业学院讲师,硕士,主要研究方向为多媒体信息处理.

TravTek 系统、欧洲的 Ali-scout 系统^[3]、日本的 VICS 系统^[4]和 DRGS 系统^[5]等导航系统应用后,对改善当地交通拥堵起到了较为显著的作用.作为发展中国家,我国交通运输的整体发展水平仍处于较低层次,对车辆导航系统的研究也较晚,目前虽然取得了一些可喜的成果,但是能成功运用于实际的成套系统还比较少.国内市场上流行的导航系统大都采用基于静态地图的路径规划策略,而未考虑可能发生的交通拥堵、道路修建、交通事故等实时道路状况^[6].鉴于此,本文拟设计一种基于 Android 的智能导航系统,以期降低发生拥堵等交通事件的可能性,从而在一定程度上解决因交通拥堵而导致道路运输效率低的问题.

1 系统设计

1.1 需求分析

针对传统导航系统存在的问题,结合基于 Android 的智能终端的广泛应用^[7-8],开发一套运行于手机、平板电脑等智能终端的导航系统.鉴于系统用户为多种不同群体,所以 UI 必须简洁大方,浅显易懂.考虑到地图信息与用户信息等大量数据需要交互,采用本地/服务器模式以节省用户的移动设备储存空间及数据交换流量.综上所述,该系统应满足以下功能需求.

1) 地图信息管理.基于 Struts2 框架服务器端储存用户信息、显示地图所必需的静态信息及本地的公交车站点信息,供 Android 客户端查询浏览与下载.

2) 用户管理.针对不同用户不同的功能需求,为使用导航的用户增加常用查询点记忆存储功能,让不同用户能够设置个人常用搜索位置信息.另外,可把搜索好的路径存储下来,再次使用的时候,可一键操作.

3) 公交导航.公交是城市交通的主体部分,线路比较多,难以记忆,为了满足用户公交出行的需求,系统需要增加公交线路导航功能,包括公交站点管理、公交换乘管理、线路管理等.

4) 驾车导航.由于城市路网复杂,而且在城市建设中会不断增加或者改建道路,为了满足用户驾车出行的需求,系统需要有驾驶导航功能.

5) 拥堵点实时信息.交通事故或者其他突发交通状况导致的交通拥堵已经越来越频繁,为了回避拥堵点,需要将拥堵点信息集中并推送给用户.

6) 系统应能保证良好的用户体验.手机之所以能够快速赢得可观的市场份额,很大程度上可以归功于其超强的用户体验.在功能具备的前提下,软件界面友好、操作便捷成为用户选择时比较注重的因素.

1.2 系统体系结构

系统采用客户端/服务器(C/S)结构,客户端使用百度地图 Android SDK 开发,服务器端以 Webservice 的形式向客户端提供服务,使用的地图信息是由百度地图远程服务器提供的.

服务器端的功能可以分为登录功能、站牌信息管理、公交线路数据管理及为客户端提供的查询等.

客户端的功能可以分为查询功能、导航功能、收藏功能、设置功能等.

查询功能是系统的主要功能,主要包括附近信息查询和路线查询两部分.附近信息查询主要是指用户通过指定一个中心点和关键字后查询该中心点附近的信息.路线查询主要是指用户指定起点和终点、选择出行方案和排序方式后,为用户提供路线选择,通过语音提示给用户最新的导航信息.

收藏功能用来显示和管理用户常用的查询路线,用户可以选择对常用线路进行保存、查询或删除.

系统设置模块为用户提供系统相关配置信息的设置,满足用户的个性化需求.

1.3 系统流程

用户登录系统后,首先进入欢迎界面,此时后台完成一系列系统初始化操作,准备系统运行所需的数据,加载相应信息,进入主界面;主界面是一个以百度地图为载体的综合查询显示界面,主要分为三部分,即顶部操作栏、地图显示区域和底部菜单栏,随后用户可以输入综合查询数据,譬如输入起点、终点、行驶方式及排序依据等信息数据,向本地的服务器和百度地图的服务器发出数据请求;服务器端接到数据后,经过业务处理后,以对话框形式向客户端返回请求结果集,用户在选择某一结果后,可在地图上标记显示.

系统流程如图 1 所示.

1.4 数据库设计

系统主要提供自驾、步行、公交三种不同的路径规划方案.由于地图数据量过大,自驾和步行两种方案需借助第三方平台提供的数据和 API 支持^[8].而公交线路属于本地化数据,其规划由服务

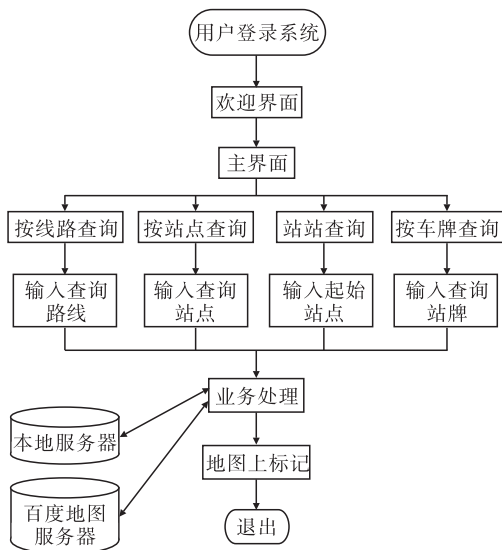


图1 系统流程图

器端提供支持。服务器端数据库主要保存管理员信息、站点信息、线路信息、公交车信息等。而客户端数据库主要保存用户的收藏信息和部分缓存信息，便于用户操作。考虑到服务器端和客户端对数据量的不同需求，服务器端数据库使用 MySQL，而客户端数据库使用轻量级嵌入式数据库 SQLite。

2 系统关键技术

2.1 路径搜索算法实现

路径最优算法是本系统首先要考虑的问题。车辆导航系统中最常见的最优路径问题是求解道路网中任意两个结点之间的最短路径。求解此类问题常用的算法有 Dijkstra 算法、Bellman-Ford-Moore 算法、GraphGrowth 算法、Threshold 算法及 A* 启发式搜索算法^[9-10]。Dijkstra 算法以起始点作为中心向外扩展，最终一定能够寻找到最优路径，是求解该类问题的经典算法，但同时也是一种盲目式搜索算法，效率较低。A* 算法是基于 Dijkstra 算法改进的一种启发式搜索算法，该算法通过减少搜索空间而节省搜索时间，效率较高。

本系统的动态路径规划算法建立在传统 Dijkstra 算法和 A* 算法的基础上，采用双向 A* 路径的搜索算法^[10]。双向 A* 算法是在传统 A* 算法的基础上，采用正向和反向同时搜索的策略，当发现一个点同时被正向搜索和反向搜索选为路径点的时候，算法结束。使用双向搜索的时候，搜索空间的优化效果更为明显，效率更高。

2.2 系统框架实现

系统采用 C/S 架构，并且借助第三方平台的数据和 API 支持。其中服务器端数据分为静态数据和动态数据两种。静态数据是指相对稳定的公交线路的站点和路线信息；动态数据是指数据实时发生变化的公交车车辆信息和道路的信息。

服务器端向客户端提供认证、静态数据的查询功能。服务器端最优路径的算法采用双向 A* 算法，根据交通控制中心(TMC)发布的实时动态交通信息，按照用户需求计算最佳出行路径^[11]。

客户端(即 Android 智能终端)按需要连接服务器和第三方平台 Service，查询所需的数据。为了实时地获取道路信息，智能终端用户可以实时地提供道路上的信息，由服务器接收以告知其他用户规避可能出现的情况，及时地修改出行路线，让用户也参与进来以达到实时的目的。

客户端和服务器端采用长连接、双工通信的方式，采用服务器端向客户端推送回避拥堵点的方法，实现数据实时更新，减轻服务器端的压力，保证数据的实时性满足需求。客户端向服务器端返回位置、速度等信息，以供服务器端计算生成实时的路况信息。

2.3 拥堵点回避方法实现

系统能够在电子地图上显示实时路况信息，将路况信息通过不同颜色的线条在电子地图上表示出来，还能够动态规划出一条当前路况条件下的最优行驶路线，从而规避不必要的交通拥堵，从而在一定程度上提高交通运输效率。

交通状况是实时发生变化的，之前规划的最优路径可能已经不再适合现在的路况了。因此，路径的规划必须具有动态性。所谓动态路径规划，即检测到交通信息发生变化时，以当前结点作为起点，以目的地作为终点，在综合考虑实时交通信息的情况下重新规划一条最优路径，从而保证导航数据的实时性和准确性，满足用户的需求。

3 结论

本文提出了一种基于 Android 的智能导航系统，与传统导航相比，实现了在现有智能终端(如手机、平板电脑等)的直接运行，节省了购买新硬件的成本；基础地图信息采用了现有百度地图，减少了开发成本；集成了交通流量信息，对城市交通起到

(下转第 160 页)

基于过完备字典稀疏表示的云分类研究

黄敏, 王嘉利

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对目前云类别自动识别方法较少的问题,提出了一种基于过完备字典稀疏表示的云分类的新方法.该方法用不同的云类型样本去建立自适应的过完备字典,提取字典特征,设计稀疏分类器,确定样本的云类型.仿真分析结果显示,本方法识别 Ca,Cs&Cd,As&Ac,Ns&Cu,Cb 云类型的准确率分别为 100%,63.5%,90.3%,94.1%,98.2%,全局分类准确率为 89.2%,优于支持向量机分类器和传统的稀疏表示分类器.

关键词:卫星云图;稀疏表示;过完备字典

中图分类号:TP311;P412.15 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.018

Cloud classification research based on over complete dictionary sparse representation

HUANG Min, WANG Jia-li

(College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aimed at the problem that automatic identification method for the cloud categories was less at present, a new method of cloud classification based on sparse representation of overcomplete dictionary was proposed. The method used different cloud types samples to establish an adaptive overcomplete dictionary, extracted dictionary features and designed sparse classifier to determine the type of cloud. The simulation analysis results showed that the classification accuracy of Ca, Cs&Cd, As&Ac, Ns&Cu, Cb were 100%, 63.5%, 90.3%, 94.1%, 98.2%, respectively. The overall classification accuracy was 89.2%. The classification accuracy was higher than the support vector machine classifier and the traditional sparse representation classifier.

Key words: satellite cloud; sparse representation; overcomplete dictionary

0 引言

卫星图像的云分类有助于获取全天候大气、海洋和云况的信息^[1].不同的云类型有不同的微观物理学特性和不同的动态运动过程,因此云分类研究的本质是理解大气演变的规则.而卫星图像分析的重要任务是提取云特征和建立云型识别的分类模型^[2-3].我国早期的云识别方法主要是手动分类,这

种方法过于依赖操作者的个人判断,主观性强,与天气预报科学化、自动化和量化的发展趋势不符,甚至相悖^[4].随着计算机技术的快速发展,人们不断提出对卫星云图进行自动处理分类的新方法.目前常用的方法有阈值法、多谱阈值法、灰度共生矩阵法、数学形态学法、聚类法、人工神经网络法、小波分析法等^[5-6],但是这些方法都不成熟,尚待完善,所使用的频谱特征和纹理特征只能对个别云类

收稿日期:2014-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(61201447);河南省基础与前沿技术研究计划项目(102300410266,122300410287)

作者简介:黄敏(1972—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为图像处理技术.

型进行识别.

周雪珺等^[5]提出了一种基于灰度特性的算法,实现了遥感图像高效自动的云分类及云检测,但该方法只是简单地把云分成了无云、薄云和厚云三种类别.金炜等^[6]提出了一种基于多模糊支持向量机的积雨云检测方法,但该方法只适用于积雨云的检测.鉴于此,本文拟提出一种基于过完备字典稀疏表示的云分类方法,用新的特征对整体云类型进行识别,以提高云分类的准确率.

1 基于过完备字典稀疏表示的云分类

云图的每一个像素通常是云和地表的综合反射,如果把原始光谱特性直接用于云分类,其分类准确率很难令人满意,因此迫切需要一个提取特征的新方法:将图像表示成几个基础函数的线性组合,组合系数看作图像的高级特征,这类类似于哺乳类动物的视觉特性^[7-8].因此,本文使用过完备字典稀疏表示云样本光谱特征,以便获取字典特征.

1.1 稀疏表示

稀疏表示是在给定的过完备字典中用尽可能少的原子来表示信号,该法更容易获取信号中所蕴含的信息,方便进一步对信号进行加工处理,是近20年来信号处理领域引人关注的研究方向.

对于一幅卫星图像,几乎所有的像素都是非0的,但是将其变换到特定的变换域时,大多系数的绝对值都接近于0,用有限的大系数就能够表示原始图像的绝大部分信息.从数学的角度理解,信号稀疏表示是在稀疏规则的约束下,原始信号 $\mathbf{y} \in R^M$ 可表示为过完备字典中特定原子的线性组合:

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{x}$$

其中, $\mathbf{D} \in R^{M \times N}$ ($N \ll M$) 是被向量集 $(\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_N)$ 扩展的过完备空间,又称为过完备字典, $(\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_N)$ 里的每一列都是字典的一个原子; $\mathbf{x}^T = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$ 是原始信号线性组合系数,信号的稀疏表示就是 \mathbf{X} 中绝大部分元素都是0或接近0,常用 $\|\mathbf{X}\|_0$ 来评价系数的稀疏度,即

$$\min \|\mathbf{x}\|_0 \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{D}\mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon \quad (1)$$

式①的解决方案是个NP难题,因此,经常用公式②来近似:

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{D}\mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon \quad (2)$$

式②是个凸最优问题,可以转化为线性规划问题.

稀疏表示是使用过完备字典去代替传统正交完备基分解原始信号,产生简明的分解结果,即稀

疏表示系数.使用这种方法分解云样本的原始光谱特性,一方面可以提取云图中不同云型和地表物体的光谱特征;另一方面,系数的稀疏度非常符合人类的视觉特性.过完备字典的构建不仅在表示系数的稀疏度上很重要,而且对信号稀疏分解的速度也有很大的影响.

1.2 自适应过完备字典

目前,通常会通过以下方法获得过完备字典:基于数学模型选择过完备基向量组成不变基字典,即解析字典;通过学习一些已知的稀疏表示样本得到自适应过完备字典,即学习字典.云图作为一种遥感图像,包含了丰富的光谱信息,特别是不同云系的光谱特征可能会非常相似,不同类型的云会互相重叠,还有一些云系可能包含在其他云系里,因而不不变基字典不能精确和唯一地稀疏表示云图的样本.此外,当获取云图的时候不可避免地会存在噪声,如果预先对精选的样本去噪,云图的原始信息就会被破坏.鉴于此,本文应用学习算法构建一个自适应的过完备字典,使之可以代表原始光谱特性向量形成字典特征,从而确保稀疏度和信号表示的唯一性,且具有一定的抗干扰性.

首先,对图像进行快速傅里叶变换;然后,采用最大后验概率(MAP)字典学习算法来构造过完备字典.训练字典模型表示为

$$\min \|\mathbf{Y} - \mathbf{D}\mathbf{X}\|_2^2 \quad \text{s. t.} \quad \forall i, \|\mathbf{x}_i\|_0 \leq C$$

其中, $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i | \mathbf{x}_i \in R^N, i = 1, 2, \dots, N\}$ 是稀疏地表示样本集 $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i | \mathbf{y}_i \in R^M, i = 1, 2, \dots, N\}$ 的稀疏矩阵, \mathbf{x}_i 是样本 \mathbf{y}_i 的稀疏表示系数.为通过限制公式①中 ε 的值达到抗噪的目的,可将模型分解为两步:

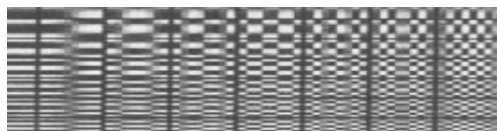
1) 稀疏编码:对于一个不变字典 \mathbf{D} ,通过迭代阈值解决每个样本 \mathbf{y}_i 的 \mathbf{x}_i .

2) 字典更新:稀疏表示的样本系数固定,计算误差矩阵,挑选出相关的部分构成子矩阵,采用MAP分解子矩阵,用分解结果更新当下的字典原子.

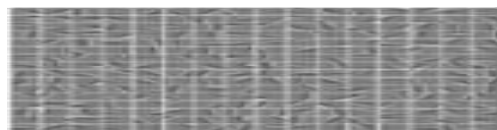
迭代运算以上过程直到结果收敛.图1为原始的快速傅里叶变换(FFT)字典和经过MAP训练的字典.显然原始的FFT字典的结构有些规则,可以对确定的信号建立稀疏矩阵.通过学习的字典破坏了这些规则,这就说明用不同类型的云样本训练原子库之后,有效地改善了字典的结构,因此新字典可以对不同云类样本产生不同的影响,可以稀疏表示样本,建立稀疏分类器.

1.3 字典特征提取

通过MAP字典学习算法建立的过完备字典



a) 原始的FFT字典



b) MAP训练之后的字典

图1 学习前后的字典对比

$\mathbf{D} \in R^{M \times N}$, 等同于从训练样本提取原子特征向量, 以便可以稀疏表示每个样本, 就如同字典原子的线性组合, 即

$$\|\mathbf{y}_i - \mathbf{D}\mathbf{x}_i\|_2 \leq \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, N$$

绝大部分的系数向量 \mathbf{x} 都是 0, 非 0 部分意味着样本在特定的字典原型有回应. 与原始的样本向量 \mathbf{y}_i 比较, \mathbf{x}_i 增加了云分类的信息, 因此将 $\mathbf{x}_i \in R^N$, $i = 1, 2, \dots, N$ 看作云图样本的字典特征.

1.4 稀疏分类器设计

特征提取的本质是采用几个稀疏系数描述图像的主要特征^[9], 可以认为它是样本云系的线性组合, 这恰好符合稀疏表示的理念, 即把图像看作多重元素的线性组合^[10-11]. 本文首先用样本训练自适应字典, 再反过来使用自适应字典稀疏表示各种测试样本, 然后根据测试样本和重建样本的测量误差判断云类别.

假定训练样本 $\mathbf{y}_i \in R^M$, $i = 1, 2, \dots, N$ 分别属于 n 个不同类型, m_i 表示第 i 种训练样本的数目 (总样本数是 $N = \sum_{i=1}^n m_i$). 这些样本向量依次安排到对应类别中去建立样本矩阵 $\Psi = [\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_n]$, $\Psi \in R^{M \times N}$, 子矩阵 $\mathbf{D}_i = [y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,m_i}]$ 的每个列向量来自相同云型的样本. 如果每一个云型都有足够的训练样本, 构建出来的 Ψ 就是完备的训练矩阵, 同时也可以认为是完备的分类字典. 假定测试样本 $\mathbf{y} \in R^M$ 属于字典的第 i 种云型, 理论上 \mathbf{y} 将表示成同种云型 \mathbf{D}_i 的训练样本的线性组合, 即 $\mathbf{y} = x_{i,1}d_{i,1} + x_{i,2}d_{i,2} + \dots + x_{i,m_i}d_{i,m_i}$, 并且 \mathbf{y} 和其他云型的训练样本毫不相关. 也就是说, 如果把 \mathbf{y} 描绘成全部字典 Ψ 的线性组合, 只有与 \mathbf{D}_i 一致的列向量系数才是非 0 的. 如此, 可以把字典 Ψ 中训练样本的稀疏编码系数看作组合系数, 可以通过如下最小值问题解决:

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{y} - \Psi\mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon$$

其中, 稀疏编码系数

$$\mathbf{x} = [x_{1,1}, \dots, x_{1,m_1}, x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m_i}, \dots, x_{n,1}, \dots, x_{n,m_n}]^T \in R^N$$

理论上, 我们期望 \mathbf{x} 的非 0 处仅仅在子矩阵 \mathbf{D}_i 中, 并且高度集中, 剩下的系数应该是 0 或接近 0. 获取 \mathbf{y} 的稀疏编码系数后, 通过计算原始测试样本和子矩阵 \mathbf{D}_i 重建结果之间的差可以实现分类. 为了进一步说明, 引进一个新的运算符 $\delta_i(\mathbf{x})$ 用于提取与第 i 种类型有关的 \mathbf{x} 的条目, 记为 $\delta_i(\mathbf{x}) = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m_i}]^T$. 那么, 可以通过子矩阵 \mathbf{D}_i 重建测试样本 \mathbf{y} :

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{D}_i \delta_i(\mathbf{x})$$

根据 \mathbf{y} 和 $\bar{\mathbf{y}}$ 之间的重建误差 $e_i(\mathbf{y}) = \|\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}\|_2$ 的值判断 \mathbf{y} 是否属于第 i 类. 因此可以通过寻找最小重建误差对测试样本 \mathbf{y} 进行分类识别:

$$(\mathbf{y}) = \min \{e_i(\mathbf{y}) = \|\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}\|_2\} \\ i = 1, 2, \dots, n$$

2 仿真结果与分析

目前, 国际上根据云的高度, 把云划分为高云、中云、低云和直展云四大类. 这四大云类又细分成如下十个小类别: 高云被细分为卷云、卷层云和卷积云; 中云被细分为高层云和高积云; 低云被细分成层云、层积云和雨层云; 直展云被细分成积云和积雨云. 根据分析, 本文将卫星云图构造进行分类: 晴空区域(无云区 Ca)、高层云(卷层云和密卷云, Cs&Cd)、中层云(高层云和高积云, As&Ac)、低层云(雨层云和积云, Ns&Cu)和直展云(积雨云 Cb). 在冬天, As&Ac 的出现意味着有移动气旋, 将有可能导致长期的雨雪天气; 在夏天, As&Ac 常与暴风雨和热带气旋联系在一起, Ns&Cu 经常出现在云系的暖锋上从而导致持续性降雨, 这是由整层湿空气不稳定的上升和下降造成的. Cb 常常与强对流有关, 易形成闪电、阵雨、狂风和冰雹. 这些云型是监视天气变化的关键, 它们的识别效果可反映使用方法工具的有效性.

下面依据真实的卫星数据对本方法进行仿真分析, 从而评估过完备字典稀疏分类器的准确率.

采用 10 个白天 FY-2 的卫星资料和各种预先定义的云类型作为数据, 然后在标记的云图中为每个定义的云类型挑选 340 个样本. 将样本随机分成 10 份, 其中 9 份进行训练, 1 份进行测试, 取 10 次测试结果的总和作为最终的实验结果. 为了有效地表

示光谱信息,精选样本的特征向量在实验前都进行了合理的校正和标准化.对FY-2数据的1700个测试样本进行10折交叉验证,结果见表1.

表1 FY-2数据分类结果

云型	Ca	Cs&Cd	As&Ac	Ns&Cu	Cb
Ca	340	0	0	0	0
Cs&Cd	0	216	23	101	0
As&Ac	2	31	307	0	0
Ns&Cu	0	20	0	320	0
Cb	0	0	0	6	334

由表1可知,采用过完备字典稀疏分类法对1517个样本进行了分类,全局分类准确率为89.2%,Ca,Cs&Cd,As&Ac,Ns&Cu,Cb云型的分类准确率分别为100%,63.5%,90.3%,94.1%,98.2%.由上述结果可知,分类器的整体分类效果不错,但是其对Cs&Cd的分类效果偏低.

将本文提出的过完备字典的稀疏分类(ODSR)与传统稀疏表示分类器(SRC)和支持向量机分类器(SVMC)相比较,其中SRC用基追踪算法求取最优系数,用包裹法模型构造Gabor字典;SVMC采用径向基函数作为核函数,惩罚因子为 2^{11} ,径向基宽度为 2^4 .随机挑选170个样本用于测试,表2为SRC,SVMC,ODSR三种不同分类方法识别五种云型的准确率.

表2 不同分类方法识别云型的准确率 %

分类方法	准确率					全局准确率
	Ca	Cs&Cd	As&Ac	Ns&Cu	Cb	
SRC	96.1	0.0	2.0	6.0	99.1	40.6
SVMC	93.3	17.3	74.9	90.6	98.9	75.0
ODSR	100.0	63.5	90.3	94.1	98.2	89.2

由表2可知,ODSR对于几乎所有云型的识别几乎都优于其他方法.传统SRC几乎识别不出As&Ac,Cs&Cd和Ns&Cu,其全局分类准确率仅有40.6%,这表明SRC不能有效地用作卫星云图识别.而SVMC对云型Cb的分类准确率几乎同ODSR一致,但对云型As&Ac和Cs&Cd的分类准确率较低.

3 结论

本文提出一种新的云分类方法.此方法通过不断学习更新获取过完备字典,然后用过完备字典稀疏表示测试样本得到稀疏表示系数,再通过比较重建样本和测试样本进行云类识别.实验结果显示,ODSR的全局分类准确率为89.2%,对Ca,Cs&Cd,

As&Ac,Ns&Cu,Cb云型的分类准确率分别为100%,63.5%,90.3%,94.1%,98.2%,而SVMC和SRC的全局分类准确率只有75.0%,40.6%.综上所述可知,ODSR是一个比SRC和SVMC更好的选择.但其对Cs&Cd的分类准确率不是很高,这主要是由于Cs&Cd属于高层云,常常与中低层云同时存在.如何定义混合云的分类表和改善分类准确率是未来研究工作的重点.

参考文献:

- [1] Dai D, Yang W. Satellite image classification via two-layer sparse coding with biased image representation [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8 (1): 173.
- [2] Zhang L, Yang M, Feng X C. Sparse representation or collaborative representation: Which helps face recognition? [C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Computer Vision, Piscataway: IEEE, 2011:471.
- [3] Naeger A R, Christopher S A, Ferrare R, et al. A new technique using infrared satellite measurements to improve the accuracy of the CALIPSO cloud-aerosol discrimination method [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51 (1): 642.
- [4] Han D, Yan W, Ren J Q, et al. Cloud type classification algorithm for CloudSat satellite based on support vector machine [J]. Atmospheric Science, 2011 (34): 583.
- [5] 周雪瑞,杨晓非,姚行中. 遥感图像的云分类和云检测技术研究 [J]. 图学学报, 2014, 35(5): 768.
- [6] 金炜,符冉迪,范亚会,等. 采用多模糊支持向量机决策融合的积雨云检测 [J]. 光学精密工程, 2014, 22 (12): 3427.
- [7] Wright J, Yu L, Mairal J, et al. Sparse representation for computer vision and pattern recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98 (6): 1031.
- [8] Sun X P, Wang J, She M, et al. Scale invariant texture classification via sparse representation [J]. Neurocomputing, 2013(122): 338.
- [9] Sheng G F, Yang W, Yu L, et al. Cluster structured sparse representation for high resolution satellite image classification [C]//Proceedings of 2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing (ICSP), Piscataway: IEEE, 2012: 693.
- [10] Jaiswal N, Kishtawal C M. Automatic determination of center of tropical cyclone in satellite-generated IR images [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2011, 8 (3): 460.
- [11] 尹雯,李元祥,周则明,等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 267.

一种改进的基于云计算的在线迁移算法

穆瑞辉

(新乡学院 计算机与信息工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要:针对当前虚拟机迁移算法物理节点负载不均衡、能耗高、SLA 违反率高等问题,提出了一种改进的基于云计算的在线迁移算法.构建了在线迁移算法模型和虚拟机负载评估向量,依据各物理节点的 CPU 占用率、内存占用率和带宽占用率,来确定迁移时机、需要迁移的源物理节点和目标物理节点.仿真模拟环境实验表明,本算法在虚拟机在线迁移中能够大幅度地提高物理节点的负载均衡,同时使 SLA 违反率和云计算数据中心能耗降到最小.

关键词:云计算;在线迁移算法;违反率;虚拟机;物理节点

中图分类号:TP301.6 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.019

An improvement online migration algorithm based on cloud computing

MU Rui-hui

(College of Computer and Information Engineering, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: For the current virtual machine migration algorithm is likely to cause physical node load imbalance, high energy consumption, SLA violation rate and other issues, a new cloud computing based online migration algorithm was proposed. An online migration algorithm model and virtual machine loads assessment vector were built, according to the CPU utilization, memory utilization and bandwidth utilization for each physical node to determine migration timing, source physical nodes which needed to migrate and the target physical nodes. The simulation of environmental testing showed that the proposed algorithm in a virtual machine live migration could greatly improve load balancing of the physical nodes, and meanwhile reduce the SLA violation rate and cloud computing data center power consumption to a minimum.

Key words: cloud computing; online migration algorithm; violation rate; virtual machine; physical node

0 引言

云计算^[1](cloud computing)是一个系统运算平台或可执行应用的程序,通过 Internet 将各种 Service 和为这些 Service 服务^[2]的资源链接起来,使客户端可以在不了解其工作原理的情况下提供服务.云计算的一个重要特点^[3]就是资源的虚拟化和服

务的虚拟化.基于云计算的虚拟机在线迁移可以描述为:在不影响云计算中心提供服务的前提下,在规定的时间内,将虚拟机从源物理节点迁移到目标节点上,以均衡节点负载和节约云计算数据中心能耗.截至目前,已经应用的有来自 VMware 企业的 VMotion^[4]虚拟机产品和来自 Xen 企业的 Live Migration^[5]虚拟机产品.

收稿日期:2014-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(61250007);河南省自然科学基金项目(1221013210871)

作者简介:穆瑞辉(1980—),男,河南省辉县人,新乡学院讲师,主要研究方向为软件设计与开发.

目前,基于虚拟机的迁移算法主要体现在物理节点的迁移、选择恰当的迁移时间、选择等待迁移的虚拟机和选择恰当的目标物理节点等方面.文献[4]提出了一种虚拟机全系统在线迁移算法,重点解决外存的迁移问题,它通过预迁移、后续迁移和停机迁移来实现全系统的迁移,并通过 Block Bitmap 来同步外存数据.文献[5]侧重虚拟机在动态迁移中的内存迁移问题,为了有效防止反复传输脏内存页,通过引入马尔科夫链对脏页组成的工作集进行预测,该算法只对预测修改率低的内存页进行传输,以此来缩短迁移总时间.文献[6]提出了一种新的基于双限定阈值的虚拟机动态迁移调度算法,即通过设定虚拟机迁移的总利用率上限和设定关闭物理节点的下限进行迁移操作.文献[7]首先选择 CPU 利用率高的节点作为待迁移的源物理节点,同时,通过概率选择法选择目标物理节点,也就是选择 CPU 和内存可利用率较高的节点进行虚拟机的迁移.在应用中人们发现,以上几种迁移算法都容易造成物理节点负载不均衡、能耗高、SLA 违反率高等问题.

鉴于此,本文拟提出一种改进的基于云计算的在线迁移算法,构建在线迁移算法模型,以期大幅度提高物理节点的负载均衡,同时使 SLA 违反率和云计算数据中心能耗降到最小.

1 在线迁移算法模型的构建

图 1 为构建的在线迁移算法模型.

由图 1 可见,客户端可以把数据计算任务上传到云计算中心,云计算平台就会依据各服务器的数

据计算负载状况,自主确定把数据计算任务分配给负载较轻的服务器,最后用相应的虚拟机来进行云计算.

2 改进的云计算在线迁移算法

2.1 评估虚拟机负载度量

通过检测 CPU,内存和带宽流量的占用率来确定相应物理节点的负载.CPU 的平均占用率为

$$Use_{cpu} = \frac{\sum_{k=1}^n V_{cpuk}}{n} \quad (1)$$

其中, k 表示虚拟机对应的物理节点所拥有 CPU 的数目, V_{cpuk} 表示单个 CPU 在虚拟机 v_k 中的占用率.

物理节点上内存的占用率为

$$Use_{memo} = \frac{\sum_{k=1}^m (V_{usek} + V_{swapk})}{M} \quad (2)$$

其中, k 表示物理节点上的虚拟机 v_k 的个数, V_{usek} 表示虚拟机 v_k 正在使用的内存大小, V_{swapk} 表示虚拟机 v_k 交换页面实际需要的内存大小, M 表示该物理节点总的内存大小.

物理节点带宽的占用率为

$$Use_{band} = \frac{\sum_{k=1}^m V_{bandk}}{Tb} \quad (3)$$

其中, k 表示该物理节点上的虚拟机 v_k 的数量, V_{bandk} 表示带宽在虚拟机 v_k 上的占用情况, Tb 表示该物理节点最大的带宽流量.

该物理节点的负载情况为

$$S = \{Use_{cpu}, Use_{memo}, Use_{band}\}$$

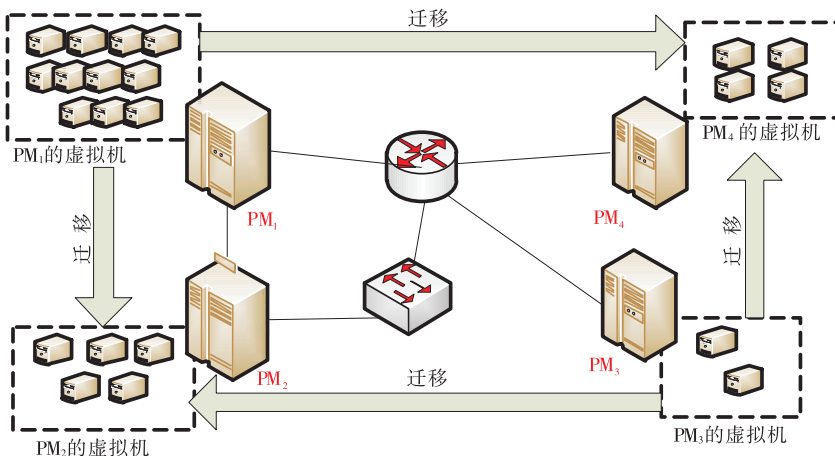


图 1 在线迁移算法模型

2.2 确定源物理节点和选择迁移时机

数据计算中心设置一个阈值向量 $S_{th} = \{Use_{cpu_{th}}, Use_{memo_{th}}, Use_{band_{th}}\}$, 同时采集每个物理节点在采集周期 T_c 中的节点负载向量 $S = \{Use_{cpu}, Use_{memo}, Use_{band}\}$. 如果在3个连续的周期 T_c 内, 该物理节点采集的负载向量值都大于 S_{th} 分量, 那么就会激活相应的迁移算法. 也就是说, 在3个连续的数据采集周期 T_c 中, 如果 Use_{cpu} 都大于 $Use_{cpu_{th}}$, 那么CPU会激发迁移; 如果 Use_{memo} 都大于 $Use_{memo_{th}}$, 内存会激发迁移; 如果 Use_{band} 都大于 $Use_{band_{th}}$, 带宽会激发迁移. 确定源物理节点和选择迁移时机流程图见图2.

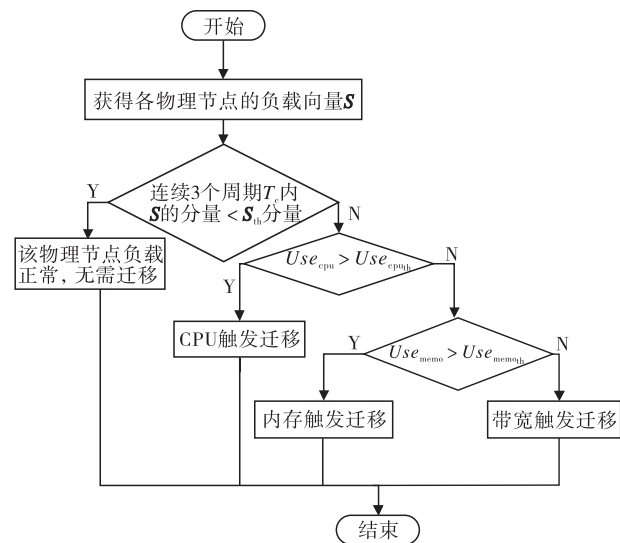


图2 确定源物理节点和选择迁移时机流程图

2.3 确定和选择高效的在线迁移算法

之前的迁移算法^[5]只迁移CPU占用率高的虚拟机, 为了高效地利用虚拟机, 不仅要考虑CPU的占用率, 还要考虑内存、带宽的占用率. CPU的占用率越高, 则占用的资源就越大; 内存存在虚拟机中的占用率越大, 则内存迁移需要的能量消耗就越多; 带宽流量在虚拟机中的占用率越大, 则需要发送和接收的资源越大. 因此选择CPU占用率、内存占用率和带宽占用率都比较高的虚拟机进行迁移. 其CPU占用率、内存占用率和带宽占用率表示为

$$V = \{V_{cpuk}, V_{usek}, V_{bandk}\}$$

如果选择的是CPU激发的物理节点, 那么就要对该物理节点所对应的虚拟机向量 V 进行占用率排序, 然后确定迁移最大 V_{cpuk} 值的虚拟机; 同理, 选择迁移最大 V_{usek} 值和最大 V_{bandk} 值的虚拟机.

2.4 选择目标物理节点

一旦确定了等待迁移的虚拟机集合 $S_v = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$, 那么就要选择恰当的目标物理节点, 选择步骤如下.

步骤1 依据源物理节点激发的类别, 即根据CPU、内存和带宽激发的类别, 把源物理节点对应的虚拟机分成3个等待队列 Q_{cpu} , Q_{memo} 和 Q_{band} , 同时按照各自占用率的大小排序;

步骤2 依据CPU、内存和带宽的占用率由小到大对各物理节点排序, 由此得到3个等待队列 $Q_{nodecpu}$, $Q_{nodememo}$ 和 $Q_{nodeband}$;

步骤3 把 $Q_{nodecpu}$ 等待队列中的首元素取出, 与之同时, 把该首元素在 $Q_{nodememo}$ 和 $Q_{nodeband}$ 等待队列中删除, 同时把该首元素作为目标物理节点中 Q_{cpu} 队列的首元素;

步骤4 把 $Q_{nodememo}$ 等待队列中的首元素取出, 与之同时, 把该首元素在 $Q_{nodecpu}$ 和 $Q_{nodeband}$ 等待队列中删除, 同时把该首元素作为目标物理节点中 Q_{memo} 队列的首元素;

步骤5 把 $Q_{nodeband}$ 等待队列中的首元素取出, 与之同时, 把该首元素在 $Q_{nodecpu}$ 和 $Q_{nodememo}$ 等待队列中删除, 同时把该首元素作为目标物理节点中 Q_{band} 队列的首元素;

步骤6 一直重复步骤3—5, 直到等待队列 $Q_{nodecpu}$, $Q_{nodememo}$ 和 $Q_{nodeband}$ 都为空, 结束.

2.5 算法表述

基于云计算的在线迁移算法可以表述如下.

INPUT: 基于云计算的各个源物理节点;

OUTPUT: 需要迁移的等待队列 $\langle s, v, g \rangle$, 也就是说, 需要把虚拟机 v 从源物理节点 s 中迁移到目标物理节点 g 上;

步骤1 依据公式①—③, 分别计算物理节点上CPU的占用率、内存的占用率和带宽的占用率, 进而计算出物理节点的负载值 S ;

步骤2 根据 S_{th} 阈值向量值, 在3个连续的 T_c 周期内, 采集 S 分量值都大于 S_{th} 向量值的源物理节点, 同时把 S 分量记录为对应的CPU激发节点、内存激发节点、带宽激发节点, 从而得到源物理节点 s 的集合;

步骤3 依据激发类型, 把物理节点上对应值最高的虚拟机用来进行迁移, 比如该物理节点是内

存激发节点,那么就在该物理节点上选择内存占用率最大的虚拟机来迁移,从而得到等待迁移的虚拟机 v 的集合;

步骤4 依据 CPU 激发、内存激发和带宽激发把等待迁移的虚拟机进行分类,从而得到 3 个等待队列 Q_{cpu} , Q_{memo} 和 Q_{band} ;

步骤5 依据 CPU、内存和带宽的占用率由小到大对各物理节点排序,由此得到 3 个等待队列 $Q_{nodecpu}$, $Q_{nodememo}$ 和 $Q_{nodeband}$;

步骤6 将 Q_{cpu} , Q_{memo} 和 Q_{band} 中的虚拟机根据 2.4 节分别迁移到物理节点队列 $Q_{nodecpu}$, $Q_{nodememo}$ 和 $Q_{nodeband}$ 中.

3 仿真模拟实验

为了验证本文算法,利用基于云计算的仿真模拟工具 Cloudsim^[6] 来构建实验环境,表 1 是基于云计算环境的实验参数.

在仿真模拟环境中,将本文算法与文献[4-7]算法进行比较,结果见表 2.

表 1 云计算环境实验参数

参数	数值
物理节点总数	200
节点 CPU 计算能力	{1 000, 2 000, 3 000}
节点内存	800 M
虚拟机总数	1 000
虚拟机 CPU 计算能力	{300, 430, 620}
虚拟机内存	256 M
执行任务数	1 000

表 2 实验结果的比较

实验算法	能耗/kWh	迁移虚拟机数量	SLA 违反率/%
文献[4]	14.78	1 930	90.13
文献[5]	13.56	1 910	90.81
文献[6]	12.32	1 954	92.13
文献[7]	11.21	1 884	90.12
本文算法	10.34	1 890	89.71

由表 2 可知,由于本文算法分别从 CPU 占用率、内存占用率和带宽占用率进行分析,所以在选

择目标物理节点、等待迁移的虚拟机和源物理节点时效率更高,从而使迁移对应的虚拟机效率更高.因此在等待迁移的虚拟机数量不为最小值的情况下,该算法 SLA 违反率较低,能耗最小.同时,也可以看出,以牺牲用户 QoS 为代价来提高负载均衡和节能的方法,都有很高的 SLA 违反率.

4 结语

本文提出了一种改进的基于云计算的在线迁移算法,该算法在确定目标物理节点、选择等待迁移的虚拟机和选择源物理节点等迁移的各个关键点上,对以往传统算法进行了优化,通过动态分配迁移虚拟机来提高云计算环境下的节能和负载均衡.仿真结果表明,本文算法在虚拟机在线迁移中,能够提高物理节点的负载均衡,降低 SLA 违反率,同时能耗最小.后续的研究方向是,如何在用户越来越高的 QoS 需求下,实现云计算环境中高效的虚拟机迁移问题.

参考文献:

- [1] Vaquero L M, Rodero-Marino L, Caceres J, et al. A break in the clouds: towards a cloud definition [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39 (1): 50.
- [2] 张建伟,王玲艳,姚云磊.一种基于 OPTICS 聚类的流量分类算法[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2013, 28(2): 83.
- [3] 张彬彬,罗英伟,汪小林,等.虚拟机全系统在线迁移[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 894.
- [4] 徐志红,刘进军,赵生慧.适应广域网的虚拟机在线迁移模型[J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1929.
- [5] 王得发,王丽芳,蒋泽军.云计算环境中虚拟机智能迁移关键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (5): 1389.
- [6] 方义秋,唐道红,葛君伟.云环境下基于虚拟机动态迁移的调度算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29 (4): 45.
- [7] 胡志刚,欧阳晟,阎朝坤.云环境下面向能耗降低的资源负载均衡方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(5): 53.

嵌入式混合型实时事务并发控制研究

陈亚峰¹, 王艳军², 李蔚²

(1. 河南省轻工业学校 计算机系, 河南 郑州 450000;

2. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对嵌入式混合型实时事务并发控制新特点,引入替代和补偿,提出一种混合型并发控制算法,即无冲突混合并发控制 MCC-CCCP 算法.该算法将冲突分为类内和类间两种,利用 ET-CCCP 和 CCCP 协议分别解决硬实时事务类内和软实时事务类内的冲突;设计的 LC-CCCP 算法通过比较选出冲突数量最少的替代参与到并发控制中,同时采取一定的补偿措施降低冲突数量,以解决不同类间冲突.模拟实验表明,该混合型算法降低了事务重启率和错失率,具有一定的优越性.

关键词:嵌入式实时数据库;实时事务;混合型并发控制

中图分类号:TP311.13 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.020

Research on embedded hybrid real-time transaction concurrency control

CHEN Ya-feng¹, WANG Yan-jun², LI Wei²

(1. Department of Computer, School of Light Industry in He'nan Province, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on new characters of embedded hybrid real-time transaction concurrency control, a hybrid concurrency control algorithm, namely mixed concurrency control-CCCP (MCC-CCCP), was proposed by adding substitution and compensation. Conflict was divided into the intra-class and inter-class in the algorithm. ET-CCCP protocol solved the intra-class conflict of hard real-time transaction, while CCCP protocol solved the intra-class conflict of soft real-time transaction. The LC-CCCP algorithm was designed to resolve the inter-class conflicts by comparing to select the least number of alternative involved in the concurrency control and taking some compensation measures to reduce the number of conflicts. Simulation experiments showed that the hybrid algorithm decreased the rate of restart and transaction miss, which had certain advantages.

Key words: embedded real-time database; real-time transaction; hybrid concurrency control

0 引言

在现实世界,实时事务通常是混合并存的^[1].混合型实时事务包含真实实时事务和非实时事务两部分.硬实时事务、软实时事务和固实时事务称为真实实时事务^[2].

嵌入式混合型实时事务混合并存各类截止期不同的实时事务^[3],对不同类型的实时事务的处理需要采取不同的策略.单一类型的实时事务并发控制策略一般对事务到达方式、系统性能评价及事务对数据的访问方式有着特殊要求,所以无法满足嵌入式混合型实时数据库系统的要求.目前,混合型

实时事务的处理已经引起国内外研究者的重视,主要从类内和类间两种类型的冲突出发,采取不同的策略进行控制. K. Y. Lam 等^[1]提出一个二层并发控制模型,其中主并发控制主要解决类间冲突,从并发控制着重处理类内冲突; V. C. S. Lee 等^[4]提出动态调整时间戳 OCC-DA 算法以避免不必要的重启; L. Sha 等^[5]定义了一个嵌入式混合型实时数据库系统的框架,对不同类型事务采取不同的并发控制策略,对类间事务冲突采取忽略的措施; K. Y. Lam 等^[6]在经典 PCP 策略的基础上,提出了适应混合事务的 RCP 策略,对硬实时事务和软实时事务分别采取不同并发控制算法,而当出现类间冲突时优先考虑硬实时事务;王强等^[7]提出了一种新的并发控制协议 MCC-DATI. 以上并发控制协议在特定环境下具有一定的优越性,其中无冲突并发控制协议 CCCP^[8]在实时事务处理中最具代表性,但是通用性不够强,系统资源未得到有效利用.

鉴于此,本文拟提出一种新的嵌入式混合型并发控制算法,即无冲突混合并发控制 MCC-CCCP 算法,以提高系统的可靠性和事务的成功率,更适用于嵌入式混合型实时数据库系统.

1 MCC-CCCP 算法思路

本算法考虑硬实时事务、软实时事务混合并存的嵌入式混合型实时事务,将冲突分为类内和类间两种. 硬实时事务内部之间采取 ET-CCCP 协议^[9],加大了相容性检测范围,选取合适的替代予以执行,以保证事务得以顺利提交,减少事务重启的次數,使该类实时事务尽可能地满足截止期的要求. 软实时事务内部之间采取传统的 CCCP 协议,引入替代,为就绪事务的执行提供较多时间,以提高系统的吞吐率. 对类间冲突设计了最少冲突的 CCCP 协议 LC-CCCP (least conflict-CCCP),针对不可避免的冲突,通过比较选出冲突数量最少的替代参与到并发控制中,以达到冲突数量降到最低的目的. 在消解相互之间的冲突时,采取一定的补救手段.

2 LC-CCCP 算法设计与实现

LC-CCCP 算法充分考虑并借鉴了 CCCP 协议引入事务替代的特性和基于推测的并发控制协议能提供稳定性能的优点. 首先分析处在接纳队列事务的所有替代与活跃事务是否相互冲突:如果其中存在某个替代与活跃事务集中的所有事务均不相互

冲突,那么该替代被选出并参与并发控制;相反,如果不存在这样的替代,则分别确定所有替代的冲突集,经过比较选出冲突集中冲突数量最少的替代参与并发控制. 同时对硬实时事务引入一定的补偿手段并采取一定的补救措施.

2.1 相关说明

1) 活跃事务集. 活跃事务集用 $Active(T)$ 表示,并且 $Active(T) = Run(T) + Ready(T)$. 其中, $Run(T)$ 为正在执行的事务集, $Ready(T)$ 为处在就绪状态的事务集, $Accepted(T)$ 为处在接纳状态的事务集.

2) 活跃替代集. 活跃替代集用 $Active(FX)$ 表示,并且 $Active(FX) = Run(FX) + Ready(FX)$. 其中, $Run(FX)$ 为处在执行状态的替代集, $Ready(FX)$ 为处在就绪状态的替代集.

3) 对于某活跃事务 T_i ,至少有一个替代是活跃替代,即

$$T_i \in Active(T) \Rightarrow FX_i \in Active(FX)$$

4) 若替代 FX_i 与另一个替代 FX_j 存在冲突操作,就称这两个替代互为冲突操作,并记作 $CT(FX_i, FX_j) = 1$;相反,则称 FX_i 与替代 FX_j 互为非冲突替代,并记作 $CT(FX_i, FX_j) = 0$.

5) 如果事务 T_i 和另一个事务 T_j 存在某方面冲突操作,就称两个事务互为冲突事务,并记作 $CT(T_i, T_j) = 1$;反之,则称 T_i 和 T_j 互为非冲突事务,并记作 $CT(T_i, T_j) = 0$.

6) 如果处在接纳状态队列中的事务 T_i 与某一活跃事务 T_j 互为冲突事务,则对于该接纳事务 T_i 的一切替代都与该活跃事务 T_j 处在活跃状态的替代互为冲突替代,即

$$CT(T_i, T_j) = 1, T_i \in Accepted(T), T_j \in Active(T) \Rightarrow \forall FX_i \in T_i, FX_j \in T_j, CT(FX_i, FX_j) = 1$$

7) 如果处于接纳状态队列中的事务 T_i 和某一活跃事务 T_j 互为非冲突事务,那么对于该接纳事务 T_i ,总会存在某一替代与该活跃事务 T_j 处在活跃状态的替代互为非冲突替代,即

$$CT(T_i, T_j) = 0, T_i \in Accepted(T), T_j \in Active(T) \Rightarrow \exists FX_i \in T_i, FX_j \in T_j, CT(FX_i, FX_j) = 0$$

8) 若 FX_i 为处在接纳状态队列中 T_i 的某一替代,则与其冲突的活跃事务组成的全集记为 $CT(FX_i)$,并记 $Num(CT(FX_i))$ 为 $CT(FX_i)$ 中活跃事务成员的数量.

2.2 具体实现

算法实现如下:

For ($i = 1; T_i \in AcceptedQueue(T)$

&& $i \leq Num(AcceptedQueue(T)); i++$)

//对接纳队列中的所有事务,如果其中存在某个替代与活跃事务集中的所有事务均不相互冲突,那么该替代进入就绪队列.其中 $AcceptedQueue(T)$ 表示的是接纳队列.

{ For ($y = 1 \&\& a = 0; FX_y \in T_i \&\&$

$y \leq Num(T_i) \&\& a = 0; y++$)

{ For ($j = 1 \&\& b = 0; T_j \in Active(T) \&\&$

$j \leq Num(Active(T)) \&\& b = 0; j++$)

{ If ($CT(FX_y, T_j) = 1$)

Then $b = 1;$

Else $b = 0;$

}

If ($b = 0$)

Then $a = 1, t = y;$

}

If ($a = 1$)

Then join FX_i into $Ready(T);$

Else { For ($y = 1; FX_y \in T_i \&\& y = Num(T_i);$

$y++$)

{ $Num(CT(FX_y)) = 0;$

For ($j = 1; T_j \in Active(T) \&\& j = Num(Active$

$(T)); j++$)

If ($CT(FX_y, T_j) = 1$)

Then

{ $Num(CT(FX_y))++;$

Join T_j into $CT(FX_y);$

}

}

$Min = Num(CT(FX_1));$

$k = 1;$

For ($i = 1; FX_i \in T_i \&\& i = Num(T_i); i++$)

{ If ($Num(CT(FX_i)) < Min$)

Then { $Min = Num(CT(FX_i));$

$k = i;$

}

}

Select FX_k into $Ready(T);$

}

}

2.3 补救措施

如果被夭折的活跃替代是硬实时事务的替代,

为防止过载带来的灾难性后果,该算法引入了补偿,即替代在执行中已涵盖了需要的补偿,当硬实时事务的替代夭折时,调度相应的补偿任务予以执行.该算法采取了立即补偿的方式,即当替代失败后立即调度补偿任务,当该替代的影响被消除后再执行其他替代.

3 实验结果与分析

模拟实验采用 SimPack 软件包编写,具体参数见表 1.

表 1 实验参数表

实验参数	参数值
数据库的大小	100
事务访问数据对象中的被访问到的平均页面数	5
修改被访问页的可能性	50%
页面命中率	80%
实时事务包含功能替代集的平均数	3
事务空闲时间与处理时间的平均比例	1 : 2
软实时事务 : 硬实时事务	19 : 1

图 1 为 MCC-CCCP 与 CCCP 事务重启率的比较.由图 1 可以看出,传统 CCCP 协议的事务重启率要比 MCC-CCCP 算法的事务重启率高,而且随着事务到达数的增加,二者的差别越来越大.其原因是:当硬实时事务与硬实时事务发生冲突时, MCC-CCCP 加大了相容性检测范围,选取合适的替代予以执行,保证了事务可以顺利提交,减少了事务重启的次数.当软实时事务与硬实时事务之间发生冲突时,从冲突集中选取最少冲突的替代参与并发控制;此外为使事务能顺利提交,引入了补偿措施.而传统的 CCCP 机制,一旦新接纳事务 T 中所有的替代与就绪队列中的某些事务存在资源冲突时,那么该新接纳事务 T 就不能进入就绪队列,如果时间允许将会被重启,否则夭折.

图 2 为 MCC-CCCP 与 CCCP 事务错失率的比较.

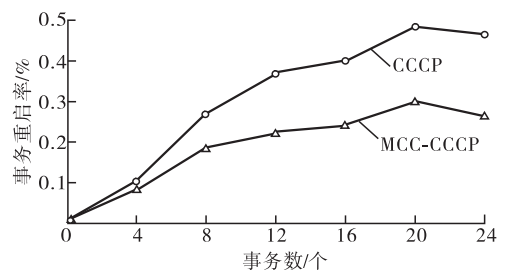


图 1 MCC-CCCP 与 CCCP 事务重启率的比较

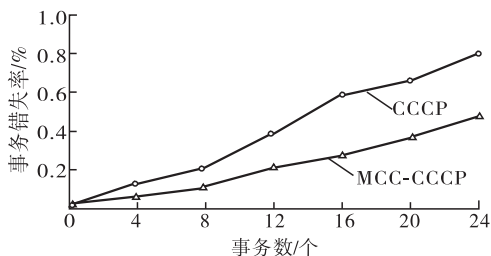


图2 MCC-CCCP与CCCP事务错失率的比较

由图2可以看出,MCC-CCCP算法的事务错失率比传统CCCP协议的事务错失率低.原因是:MCC-CCCP加大了相容性检测范围,选取合适的替代予以执行,使硬实时事务尽可能地满足截止期的要求;当不同类间发生冲突时,从冲突集中选取最少冲突的替代参与并发控制,除此之外,采取补偿等措施也可使得这些实时事务能较好地满足定时限制.而CCCP协议一旦检测到接纳事务队列中与就绪事务队列中存在事务冲突,那么接纳事务将不被执行并且等待,当能满足定时限制时,该事务被重新接纳;否则该事务只能被夭折.显然混合型的并发控制算法的错失率低一些.

以上实验结果表明,从事务的重启率和事务的错失率来看,MCC-CCCP的性能优于传统的CCCP协议,该算法能更好地适应嵌入式混合型实时数据库系统.

4 结论

本文提出了一种无冲突混合并发控制算法,将冲突分为类内和类间两种,LC-CCCP协议引入了替代和补偿,通过比较选出冲突数量最少的替代参与到并发控制中,同时采取一定的补偿措施以降低冲突数量,解决不同类间冲突;硬实时事务内部之间

的冲突采取ET-CCCP协议,软实时事务内部之间的冲突采取CCCP协议.通过事务重启率和事务错失率两个指标进行模拟实验比较,结果表明该混合型并发控制算法的性能优于CCCP协议,更适用于嵌入式混合型实时事务.

参考文献:

- [1] Lam K Y, Kuo T W, S H Lee T. Strategies for resolving inter-class data conflicts in mixed real-time database systems [J]. *Journal of Systems and Software*, 2002, 61 (1): 1.
- [2] 李刚,魏涛,李蔚,等.嵌入式数据库嵌套实时事务模型研究[J].*郑州轻工业学院学报:自然科学版*,2009,24(5):59.
- [3] 梁平,张晓龙,陈和平,等.基于实时日志的故障恢复策略[J].*武汉大学学报:理学版*,2014,60(2):160.
- [4] Lee V C S, Lam K W, Hung S L. Concurrency control for mixed transactions in real-time databases [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2002, 51(7): 821.
- [5] Sha L, Rajkumar R, Son S H, et al. A real-time locking protocol [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1991, 40 (7): 793.
- [6] Lam K Y, Kuo T W, Tsang W H, et al. The reduced ceiling protocol for concurrency control in real-time databases with mixed transactions [J]. *Computer Journal*, 2000, 43 (1): 65.
- [7] 王强,王宏安,金宏,等.一种面向混合实时事务调度的并发控制协议[J].*计算机研究与发展*,2005,42(1):18.
- [8] 夏家莉.嵌入式实时数据库系统中无冲突并发控制协议CCCP[J].*计算机研究与发展*,2004,41(11):1936.
- [9] 夏家莉,韩增波,陈辉.基于功能替代模型的无冲突并发控制协议[J].*计算机工程*,2010,36(15):57.

对 Tasi 群密钥协商协议的改进及安全分析

霍丽娟¹, 李朝阳², 孙垒³

1. 河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454003;
2. 郑州轻工业学院 数学与信息科学学院, 河南 郑州 450002;
3. 河南理工大学 数学与信息科学学院, 河南 焦作 454003)

摘要:针对 J. L. Tsai 等人提出的移动环境下群密钥协商协议存在的安全缺陷,利用数字签名技术,对其进行了改进:在数字签名中加入序列号,用以标记签名和将要生成的群密钥的次序,并将序列号作为数字签名公开验证信息之一,从而实现对移动用户或者具有较强计算能力的节点所发送消息的及时验证.由安全分析可知,改进后的协议不仅具有原来的安全特性,而且可以抵抗重放攻击或冒充攻击.

关键词:群密钥协商协议;双线性对;移动通信;数字签名

中图分类号:TP309 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.021

Improvement and security analysis on Tasi's group key agreement

HUO Li-juan¹, LI Zhao-yang², SUN Lei³

1. College of Computer Science and Technology, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. College of Mathematics and Information Science, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
3. College of Mathematics and Information Science, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Aimed at the security defect of group key agreement protocol for mobile environment proposed by J. L. Tsai, the protocol was improved by using the digital signature technology. That is, some serial numbers were inserted in the digital signatures so as to identify the signatures and the order of the group keys to be generated, and the serial numbers were used as part of public information to verify the digital signatures. So the freshness of messages sent by the mobile users or the powerful node could be checked. According to the security analysis, it is found that the improved protocol not only had the old security properties, but also could resist against impersonation attack or forgery attack.

Key words: group key agreement protocol; bilinear pairing; mobile communication; digital signature

0 引言

群密钥协商协议^[1]是一种非常重要的群体通信协议,群成员共同参与,通过协商和共同计算,形

成一个群体共享的密钥.同时,群体成员通过这个共享密钥对群成员之间的通信内容进行加密和解密,以实现群体成员之间的安全通信.移动环境下群密钥协商协议是安全通信重要的研究内容.

收稿日期:2015-01-01

基金项目:国家自然科学基金项目(61272525);河南省教育厅科学技术研究项目(14A110003)

作者简介:霍丽娟(1978—),女,河南省临颖县人,河南理工大学助教,主要研究方向为计算机网络安全.

早期移动环境下的群密钥协商协议^[2-4]计算量大,其计算耗费随着移动用户的增加而线性增加,因此这些协议在移动环境下的应用受到了限制。为此, J. Nam 等^[5]提出了一种计算轮数固定、计算量小且具有前向安全性的密钥协商协议,但该协议无法证明移动用户都具有同样的群密钥计算贡献。 Y. M. Tseng^[6]给出一种非平衡无线网络下的群密钥协商协议,以保证群密钥协商中所有移动用户在生成群密钥时提供相同的密钥贡献。随后, C. C. Lee 等^[7]证明了文献[6]中群密钥协商协议存在的安全缺陷,即该协议是非认证的,并且提出一种新的认证群密钥协商协议。2011年, J. L. Tsai 等^[8]分析了文献[7]的群密钥协商协议,指出该协议不能抵抗冒充攻击,并给出了一种改进的协议(以下简称 Tsai 协议)。然而,通过本文分析,发现 Tasi 协议仍然存在安全缺陷,即该协议不能抵抗重放或冒充攻击。事实上,对于文献[2-8]所给出的群密钥协商协议,都可以归结为基于公钥证书的群密钥协商协议。最近几年,为简化公钥证书管理,一些学者也相继提出了基于身份的群密钥协商协议^[9-11]。然而,这些群密钥协商协议都需要一个绝对可信的密钥生成机构为用户生成私钥,所有用户都必须绝对信任这些密钥生成机构,这使得这些协议的使用范围受到了限制,即其只能用于封闭的机构(如一个企业或单位的内部)。同基于身份的群密钥协商协议相比,基于公钥证书的群密钥协商协议仍然具有自己的优势,即这种协议不需要可信的密钥生成机构为用户生成私钥,从而避免了密钥托管。因此,本文将研究重点放在基于公钥证书的群密钥协商协议的安全构造上,在分析 Tsai 协议基础上对其进行改进,以使改进后的协议不仅具有原来的安全特性,而且可以抵抗重放或冒充攻击。

1 Tasi 协议分析

Tasi 协议中需要用到的参数如表 1 所示。

假设 U_1, U_2, \dots, U_{n-1} 为计算能力较弱的移动用户,而 U_n 为具有较强计算能力的节点, Tasi 协议实现步骤如下。

步骤 1 每个 $U_i (1 \leq i \leq n-1)$ 分别计算 $A_i = a_i P (a_i \in {}_R Z_q^*)$ 和 $S_i = \frac{1}{H(A_i) + X_i} P$, 并将 (U_i, A_i, S_i) 发送给 U_n 。

表 1 Tasi 协议中的部分符号描述

符号	符号描述
p, q	分别为一个素数和椭圆曲线的阶数
G_1, G_2	分别为阶数为 q 的加法循环群和乘法循环群
P	G_1 中公开选取的一个点
n	参与密钥协商的用户个数
$H(\cdot)$	单向 Hash 函数, $H: \{0, 1\}^* \rightarrow G_1$
X_i	移动用户或者具有较强计算能力的节点的私钥
Y_i	移动用户或者具有较强计算能力的节点的公钥
$a_i \in {}_R Z_q^*$	a_i 为在 Z_q^* 中随机选取的一个数

步骤 2 收到 (U_i, A_i, S_i) 后, U_n 验证双线性映射^[12] $e(H(A_i)P + Y_i, S_i) = e(P, P)$ 是否成立。若成立, U_n 计算 $x_i = a_n A_i$, 其中 $a_n \in {}_R Z_q^*$ 。然后, U_n 计算 $B = H(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ 和其签名 $S_n = \frac{1}{B + X_n} P$, 以及群密钥 $K = H(a_n P, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, S_n)$ 。 U_n 向 U_i 广播 $(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, S_n)$ 。

步骤 3 收到广播后, 每个 U_i 计算 $B = H(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ 并验证 $e(BP + Y_n, S_n) = e(P, P)$ 是否成立。若成立, 每个 U_i 计算群密钥 $K = H(a_i^{-1} x_i, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, S_n) = H(a_n P, a_n a_1 P, a_n a_2 P, \dots, a_n a_{n-1} P, S_n)$ 。

虽然文献[8]证明了其所提出 Tasi 协议的安全性,但事实上,在上述步骤 1 中,是利用短签名方案^[12]对数据 A_i 进行签名的,并将签名 (U_i, A_i, S_i) 发给 U_n , 而这个签名并不能抵抗重放或冒充攻击。由于 (U_i, A_i, S_i) 是公开的,任何人都可以窃听或截获这个签名。当恶意的攻击者 Alice 截获 (U_i, A_i, S_i) 后,可以保存这些旧数据。当移动用户发动下一次的群密钥协商时, Alice 可以冒充任何一个 U_i , 并将该 U_i 相应的旧 (U_i, A_i, S_i) 重新发送给 U_n 。由于 (U_i, A_i, S_i) 是 U_i 合法的签名,其必然能通过 U_n 的验证。这种重放攻击使得 Alice 能够冒充 U_i 参与群密钥协商,从而干扰了 U_i 参与群密钥协商的行为,破坏了群密钥协商的协作性。

另外,当移动用户发动下一次的群密钥协商时,在这种重放攻击下, Alice 还可以计算出新的群密钥。事实上, $A_i = a_i P$ 中的 a_i 作为临时使用的数据,有可能遭到泄露。而一旦 a_i 遭到泄露,攻击者可以冒充 U_i 获得下次的群密钥协商所产生的群密钥 K 。比如,假定在某次群密钥协商中,攻击者 Alice 获得了某个 U_i 的有效 (U_i, A_i, S_i) , 并且掌握了 a_i 。 Alice 可以通过以下步骤冒充 U_i 参与以后的群密钥协商,并计算出新的群密钥。

步骤1 每个 $U_j (1 \leq j \leq n-1, j \neq i)$ 分别计算 $A'_j = a'_j P (a'_j \in_R Z_q^*)$ 和 $S'_j = \frac{1}{H(A'_j) + X_j} P$, 并将 (U_j, A'_j, S'_j) 发送给 U_n . 而 Alice 冒充 U_i 将以前所保存的旧 (U_i, A_i, S_i) 发送给 U_n .

步骤2 收到 (U_j, A'_j, S'_j) 和 (U_i, A_i, S_i) 后, U_n 验证双线性映射 $e(H(A'_j)P + Y_j, S'_j) = e(P, P)$ 和 $e(H(A_i)P + Y_i, S_i) = e(P, P)$ 是否成立. 若成立, U_n 计算 $x'_j = a'_n A'_j$ 和 $x'_i = a'_n A_i$, 其中 $a'_n \in_R Z_q^*$. 然后, U_n 计算 $B' = H(U_n, x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1})$ 和其签名 $S'_n = \frac{1}{B' + X_n} P$, 以及群密钥 $K' = H(a'_n P, x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1}, S'_n)$. U_n 向 U_j 广播 $(U_n, x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1}, S'_n)$.

步骤3 收到广播后, 每个 U_j 计算 $B' = H(U_n, x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1})$ 并验证 $e(B'P + Y_n, S'_n) = e(P, P)$ 是否成立. 若成立, 每个 U_j 能够计算群密钥

$$K' = H(a'_j^{-1} x'_j, x'_1, x'_2, \dots, x'_{i-1}, x'_i, x'_{i+1}, \dots, x'_{n-1}, S'_n) = H(a'_n P, a'_n a'_1 P, a'_n a'_2 P, \dots, a'_n a'_{i-1} P, a'_n a_i P, a'_n a'_{i+1} P, \dots, a'_n a'_{n-1} P, S'_n)$$

同时, 攻击者 Alice 也可以计算群密钥

$$K' = H(a_i^{-1} x'_i, x'_1, x'_2, \dots, x'_{i-1}, x'_i, x'_{i+1}, \dots, x'_{n-1}, S'_n) = H(a'_n P, a'_n a'_1 P, a'_n a'_2 P, \dots, a'_n a'_{i-1} P, a'_n a_i P, a'_n a'_{i+1} P, \dots, a'_n a'_{n-1} P, S'_n)$$

2 Tasi 协议的改进及安全分析

由以上分析可知, Tasi 协议的主要问题在于步骤 1 中 U_i 仅仅对随机数 A_i 进行了签名 (U_i, A_i, S_i) , 其作用缺乏时效性. 为保证签名的时效性, 防止 Alice 进行重放或冒充攻击, 可以改变签名的内容, 即在签名中加入序列号, 序列号是本次将要生成群密钥次序的唯一标记. 为此, 对协议进行如下改进.

步骤1 每个 $U_i (1 \leq i \leq n-1)$ 分别计算 $A_i = a_i P (a_i \in_R Z_q^*)$ 和 $S_i = \frac{1}{H(A_i \parallel T) + T_i} P$, 并将 (U_i, A_i, T, S_i) 发送给 U_n , 其中, T 为当前序列号, 标记为本次将要生成的群密钥的次序.

步骤2 收到 (U_i, A_i, T, S_i) 后, U_n 验证 $e(H(A_i \parallel T)P + Y_i, S_i) = e(P, P)$ (“ \parallel ”表示二进制串的连接) 是否成立. 若成立, 并且序列号 T 符合本次将要生成的群密钥的次序, 则 U_n 计算 $x_i = a_n A_i$, 其中 $a_n \in_R Z_q^*$. 然后, U_n 计算 $B = H(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, T)$ 和其签名 $S_n = \frac{1}{B + X_n} P$, 以及群密钥 $K = H(a_n P, x_1, x_2, \dots, x_n, S_n, T)$. U_n 向 U_i 广播 $(U_n, x_1,$

$x_2, \dots, x_{n-1}, T, S_n)$.

步骤3 收到广播后, 每个 $U_i (1 \leq i \leq n-1)$ 计算 $B = H(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, T)$ 并验证 $e(BP + Y_n, S_n) = e(P, P)$ 是否成立. 若成立, 并且 T 符合规定的群密钥的次序, 则每个 U_i 能够计算群密钥

$$K = H(a_i^{-1} x_i, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, S_n) = H(a_n P, a_n a_1 P, a_n a_2 P, \dots, a_n a_{n-1} P, S_n)$$

定理1 在改进的协议中, 敌手通过窃听或截获所有 $U_i (1 \leq i \leq n-1)$ 和 U_n 之间的通信内容, 无法获得群密钥.

证明 敌手通过窃听或截获所有 $U_i (1 \leq i \leq n-1)$ 和 U_n 之间的通信内容, 可以获得 (U_i, A_i, T, S_i) 和 $(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, T, S_n)$. 在离散对数问题假设下^[12], 敌手由 A_i 计算出 a_i 是困难的. 而群密钥 $K = H(a_n P, a_n a_1 P, a_n a_2 P, \dots, a_n a_{n-1} P, S_n)$, 故敌手若想计算出 K , 就必须先计算出 $a_n P$. 但是, 在不知道 a_i 的条件下, 利用椭圆曲线下的计算 Diffie-Hellman 问题和离散对数问题假设^[13], 可知敌手无法由 $a_n a_1 P, a_n a_2 P, \dots, a_n a_{n-1} P$ 计算出 $a_n P$. 因此, 敌手无法获得群密钥 K .

定理2 改进的协议可以抵抗冒充攻击.

证明 假定一个敌手想冒充合法的用户 $U_i (1 \leq i \leq n-1)$ 和 U_n 进行通信, 希望能够计算出群密钥 K . 若想冒充 U_i , 敌手需要计算出短签名 $S_i = \frac{1}{H(A_i \parallel T) + X_i} P$. 若敌手想冒充 U_n 和 U_i 进行通信, 其也必须计算出短签名 $S_n = \frac{1}{B + X_n} P$. 然而, 短签名是不可伪造的^[12], 即非法用户无法计算出这些短签名, 故敌手无法成功冒充用户 U_i 和 U_n . 因此, 改进的协议可以抵抗冒充攻击.

然而, 需要进一步考虑的是, Alice 能否重放旧 (U_i, A_i, T, S_i) 得到新的群密钥. 事实上, 在改进的协议中使用序列号 T 对每次通信的 (U_i, A_i, T, S_i) 和 $(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, T, S_n)$ 进行标记, 即本次将要生成的群密钥的次序. 一旦 Alice 重新将某个旧 (U_i, A_i, T, S_i) 发送给 U_n , U_n 可以通过检查序列号 T 是否符合本次群密钥的生成次序. 若 T 已经使用过, 则可以检测出 Alice 重放 (U_i, A_i, T, S_i) 或冒充 U_i . 类似地, 在 S_n 中也加入序列号 T , U_i 可以通过检查序列号 T 来检测出 Alice 重放旧数据 $(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, T, S_n)$ 或冒充 U_n . 从而, Alice 无法利用旧 (U_i, A_i, T, S_i) 计算新的群密钥.

同时, 由于所使用的文献[12]的短签名可证明

是安全的,故在改进的协议中, (U_i, A_i, T, S_i) 和 $(U_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, T, S_n)$ 仍具有不可伪造性,所使用的序列号保证了这些数据的新鲜性,进而保证协议可以检测出敌手的重放攻击或冒充攻击.

3 结语

本文对 J. L. Tsai 等提出的移动环境下群密钥协商协议存在的安全缺陷,作出了改进:通过在移动用户 U_i 和节点 U_n 所发送或广播的数据中加入序列号,并将这些数据和相应的序列号绑定后再利用短签名方案对其签名,以保证用户之间通信内容的认证性和新鲜性,使得改进后的群密钥协商协议可以抵抗重放或冒充攻击.同时,改进的协议具备 Tasi 协议的其他安全特性.

参考文献:

- [1] Asokan N, Ginzboorg P. Key agreement in ad hoc networks [J]. Computer Communications, 2000, 23(17): 1627.
- [2] Burmester M, Desmedt Y. Advances in Cryptology—EUROCRYPT94 [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1994: 275 – 286.
- [3] Bresson E, Catalano D. Public Key Cryptography—PKC 2004 [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 115 – 129.
- [4] Katz J, Yung M. Scalable protocol for authenticated group key exchange [J]. Journal of Cryptology, 2007, 20(1): 85.
- [5] Nam J, Lee J, Kim S, et al. DDH-based group key agreement in a mobile environment [J]. Journal of Systems and Software, 2005, 78(1): 73.
- [6] Tseng Y M. A resource-constrained group key agreement protocol for imbalanced wireless networks [J]. Computer & Security, 2007, 26(4): 331.
- [7] Lee C C, Lin T H, Tsai C S. A new authenticated group key agreement in a mobile environment [J]. Annals of Telecommunications, 2009, 64(11 – 12): 735.
- [8] Tsai J L. A novel authenticated group key agreement protocol for mobile environment [J]. Annals of Telecommunications, 2011, 66(11 – 12): 663.
- [9] Teng J, Wu C K, Tang C. An ID-based authenticated dynamic group key agreement with optimal round [J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(11): 2542.
- [10] Konstantinou E. Network and System Security [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 563 – 574.
- [11] Hu K W, Xue J F, Hu C Z, et al. An improved id-based group key agreement protocol [J]. Tsinghua Science and Technology, 2014, 19(5): 421.
- [12] Zhang F G, Safavi-Naini R, Susilo W. Public Key Cryptography—PKC 2004 [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 277 – 290.
- [13] Zhang J H, Yang Y X, Niu X X. Advances in Neural Networks—ISNN 2009 [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 318 – 327.

三种跨临界 CO₂ 制冷循环的性能对比研究

龚毅, 彭锦晨, 吴学红, 张文慧

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:对跨临界 CO₂ 节流阀循环、跨临界 CO₂ 回热器循环、跨临界 CO₂ 膨胀机循环三种跨临界 CO₂ 制冷循环进行了理论分析和模拟计算,研究了三种循环的性能差异.结果表明,相同条件时,回热器循环的制冷量最大,膨胀机循环次之,节流阀循环最小;回热器循环的功耗最大,节流阀循环次之,膨胀机循环最小;膨胀机循环的 COP 最大,回热器循环次之,节流阀循环最小;回热器循环的压缩机排气温度高于节流阀循环和膨胀机循环.综上可得,节流阀循环的 COP 最小,回热器循环能够提高系统的制冷量,但是会导致压缩机排气温度的升高,膨胀机循环能够有效地减少系统功耗,对系统 COP 的提升更为显著,综合性能更好.

关键词:跨临界 CO₂ 制冷循环;能效比;膨胀机循环;回热器循环;节流阀循环

中图分类号:TB61 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.022

Numerical study for three kinds of transcritical CO₂ refrigeration cycle

GONG Yi, PENG Jin-chen, WU Xue-hong, ZHANG Wen-hui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The performance difference of trans-critical CO₂ throttle valve cycle, trans-critical CO₂ internal heat exchanger cycle and trans-critical CO₂ expander cycle was investigated by theoretical analysis and numerical simulation. The results showed that: under the same conditions, the cooling capacity of internal heat exchanger cycle was the biggest and throttle valve cycle was the smallest; the power dissipation of internal heat exchanger cycle was the biggest and the expander cycle was smallest; the COP of expander cycle was the biggest and throttle valve cycle was the smallest; the compressor discharge temperature of internal heat exchanger cycle was higher than throttle valve cycle and expander cycle. To sum up, the COP of throttle valve cycle was the smallest. Internal heat exchanger cycle could improve the system cooling capacity, but it also increased the compressor discharge temperature. Expander cycle could reduce system power dissipation effectively, and could more significantly improve system COP, it had the better performance.

Key words: transcritical CO₂ refrigeration cycle; COP; expander cycle; internal heat exchanger cycle; throttle cycle

收稿日期:2014-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51476148);河南省骨干教师项目(2012GGJS-115);郑州市领军人才项目(131PLJRC640)

作者简介:龚毅(1954—),男,江苏省南通市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为制冷与低温设备节能技术和替代工质.

0 引言

近年来,人们越来越关注由于使用人工合成制冷剂而导致的环境破坏和温室效应等问题^[1-4],《蒙特利尔议定书》和《京都议定书》签署以后,全世界的制冷工作者们都在积极寻找合适的天然制冷剂.前国际制冷学会主席 G. Lorentzen^[5]认为,具有良好特性的 CO₂ 工质有很好的应用前景.但是,较大的压差和节流损失等原因使跨临界 CO₂ 循环性能系数很低^[6-7].因此,对跨临界 CO₂ 循环的优化迫在眉睫.对于单级跨临界 CO₂ 循环,国内外学者主要研究了回热器^[8-11]和膨胀机^[12]对循环的影响,但对于各循环性能的比较研究较少.针对以上情况,本文拟对三种跨临界 CO₂ 循环进行理论分析和模拟计算,对比各循环的优劣,以期为进一步优化和实际应用提供理论依据.

1 三种循环系统的理论分析

1.1 跨临界 CO₂ 节流阀循环

跨临界 CO₂ 节流阀循环原理(见图1)为:低温低压的 CO₂ 蒸气进入压缩机压缩到高温高压状态后进入气体冷却器;气态 CO₂ 在气体冷却器中放热,降温降压后经过节流阀节流,温度和压力进一步降低;低温低压液态 CO₂ 在蒸发器中发生相变,蒸发吸热制冷;低温低压的 CO₂ 蒸气再次进入压缩机,完成一次制冷循环.

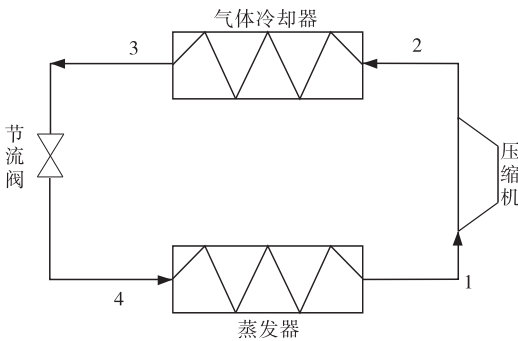


图1 跨临界 CO₂ 节流阀循环原理图

以熵(*S*)为横坐标,温度(*T*)为纵坐标,作出系统在相应热力学过程中的图形,即该过程对应的*T-S*图.跨临界 CO₂ 节流阀循环*T-S*图如图2所示,其基本计算公式如下.

系统单位质量制冷量

$$q = h_1 - h_4$$

压缩机比功

$$w = h_{2s} - h_1 / \eta \tag{1}$$

压缩机等熵压缩效率^[13]

$$\eta = 1.003 - 0.121r \tag{2}$$

式中,*r*为压比.

系统能效比

$$COP = q/w \tag{3}$$

1.2 跨临界 CO₂ 回热器循环

跨临界 CO₂ 回热器循环原理(见图3)为:低温低压的 CO₂ 蒸气进入压缩机压缩到高温高压状态后进入气体冷却器;气态 CO₂ 在气体冷却器中放热,从气体冷却器出来的气体在回热器中进一步被回气冷却,再经过节流降压;低温低压的 CO₂ 在蒸发器中发生相变,蒸发吸热制冷;低温低压的 CO₂ 蒸气经过回热器过热后再次进入压缩机,完成一次制冷循环.

回热器一方面可以使压缩机吸气过热,避免压缩机液击,另一方面也可以用来提高跨临界 CO₂ 制冷系统的效率.跨临界 CO₂ 回热器循环*T-S*图如图4所示,其基本计算公式如下:系统单位质量制冷量 $q = h_6 - h_5$,压缩机比功、压缩机等熵压缩效率、系统能效比的计算方法同①—③式.

1.3 跨临界 CO₂ 膨胀机循环

跨临界 CO₂ 膨胀机循环原理(见图5)为:低温

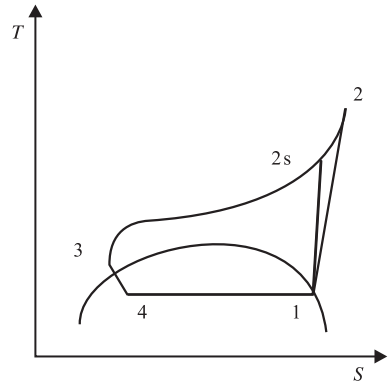


图2 跨临界 CO₂ 节流阀循环*T-S*图

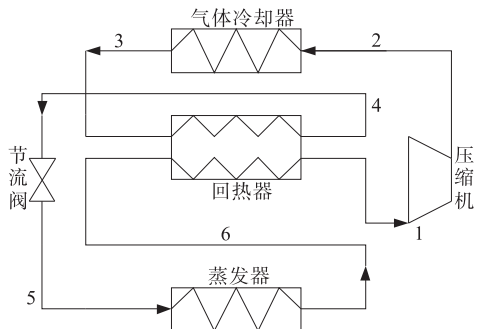


图3 跨临界 CO₂ 回热器循环原理图

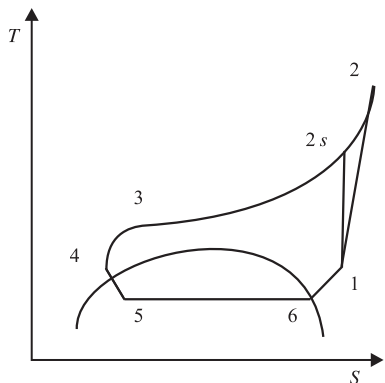


图 4 跨临界 CO₂ 回热器循环 T-S 图

低压的 CO₂ 蒸气进入压缩机压缩到高温高压状态后进入气体冷却器; 气态 CO₂ 在气体冷却器中放热, 降温降压后经过膨胀机, 温度和压力进一步降低; 低温低压液态 CO₂ 在蒸发器中发生相变, 蒸发吸热制冷; 低温低压的 CO₂ 蒸气再次进入压缩机, 完成一次制冷循环。

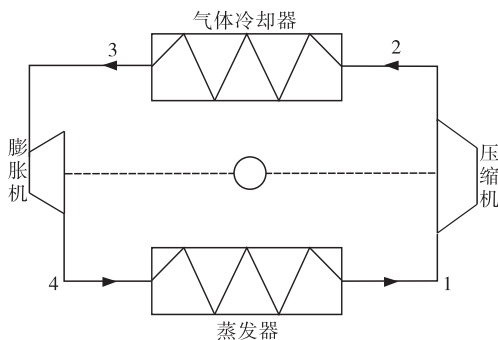


图 5 跨临界 CO₂ 膨胀机循环原理图

膨胀机可以有效回收系统膨胀功, 并且可以增加单位制冷量。

跨临界 CO₂ 膨胀机循环 T-S 图如图 6 所示, 其基本计算公式如下: 系统单位质量制冷量 $q = h_1 - h_{4e}$, 压缩机比功 $w = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta} - (h_3 - h_{4e})$, 压缩机等熵压缩效率、系统能效比的计算方法同②③式。

2 性能模拟结果及分析

运用 Aspen Plus 软件对三种跨临界 CO₂ 系统进行流程模拟和理论计算, 可以得到三种跨临界 CO₂ 系统在不同工况下制冷量、功耗、COP 及压缩机排气温度等数据, 从而分析各系统性能差异。跨临界 CO₂ 循环 P-h 图见图 7。

计算条件和假设: 系统循环处于稳态; 压缩过程为绝热非等熵过程; 换热器与环境无热交换; 不

考虑管路能量损失, 不考虑管路的液相积存; 过热度 10 °C; 蒸发温度范围 -5 ~ 5 °C; 气体冷却器出口温度恒定 (35 °C)。

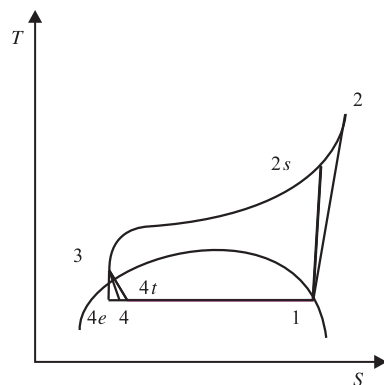


图 6 跨临界 CO₂ 膨胀机循环 T-S 图

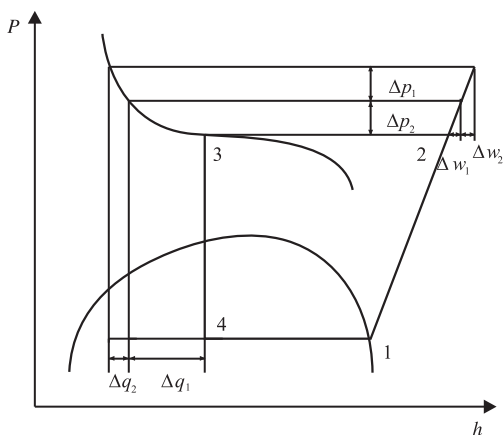


图 7 跨临界 CO₂ 循环 P-h 图

2.1 系统制冷量对比

图 8 为不同蒸发温度下制冷量随高压侧压力变化情况对比。由图 8 可以看出, 当气体冷却器出口温度一定时, 各个循环在不同蒸发温度下制冷量的变化趋势是相同的, 都是随着高压侧压力的增大而增大, 增加趋势为先迅速增加然后变缓。这是因为跨临界区域中等温线的斜率绝对值是由小到大变化的, 当压力的增量相同时 ($\Delta p_1 = \Delta p_2$), 系统制冷量的增加量会越来越小 ($\Delta q_1 > \Delta q_2$) (见图 7)。相同条件时, 回热器循环的制冷量最大, 膨胀机循环次之, 节流阀循环最小。出现这种情况的原因是从气体冷却器出来的 CO₂ 蒸气经过回热器过冷后再经过节流阀节流可以降低节流后 CO₂ 气液混合物的干度, 从而提高系统的制冷量。

2.2 系统功耗对比

图 9 为不同蒸发温度下功耗随高压侧压力变化情况对比 (图 8—图 10 图注相同)。由图 9 可以看

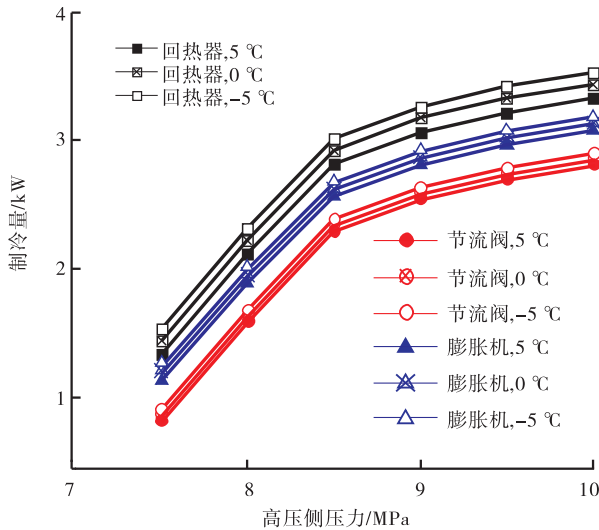


图8 不同蒸发温度下制冷量随高压侧压力变化情况对比

出,当气体冷却器出口温度一定时,各个循环在不同蒸发温度下功耗的变化趋势是相同的,都是随着高压侧压力的增大而增大,增加趋势几乎为线性.这是因为等熵线的斜率不变,当压力的增量相同时($\Delta p_1 = \Delta p_2$),系统功耗的增加量也相同($\Delta w_1 = \Delta w_2$)(见图7).不同蒸发温度时,蒸发温度越低,系统功耗越大.相同条件下,回热器循环的功耗最大,节流阀循环次之,膨胀机循环最小,这是因为膨胀机回收了部分膨胀功,从而使得功耗减小.

2.3 系统 COP 对比

图10为不同蒸发温度下能效比随高压侧压力变化情况对比.由图10可以看出,当气体冷却器出口温度一定时,各个循环在不同蒸发温度下的COP

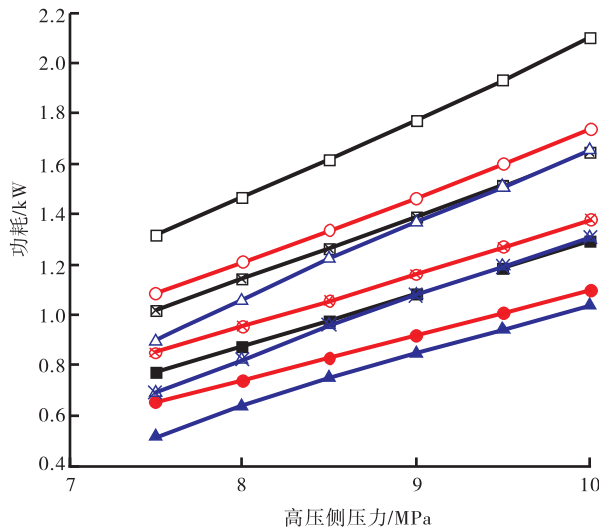


图9 不同蒸发温度下功耗随高压侧压力变化情况对比

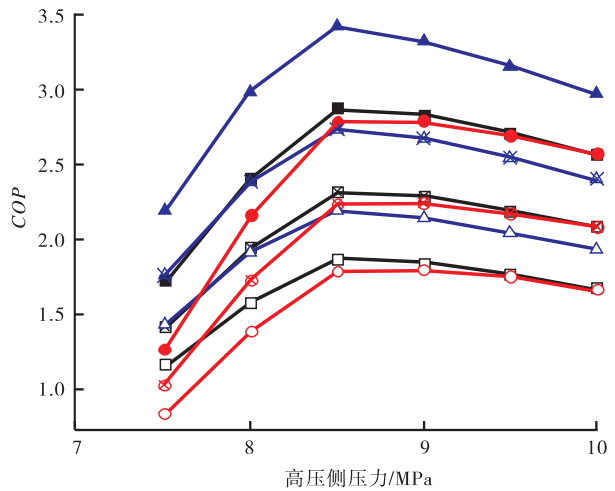


图10 不同蒸发温度下能效比随高压侧压力变化情况对比

都随着高压侧压力的增加先增加后减小,存在一个最大COP值,此时对应的高压侧压力即为最优高压侧压力.随着高压侧压力的增加,系统的功耗线性增加,而系统制冷量的增加则越来越少,从而导致最大COP值的出现.相同条件下,膨胀机循环有效地回收了膨胀功,其COP最大;回热器循环能够在一定程度上提高制冷量,COP值次之;节流阀循环的COP最小.蒸发温度0 °C,高压侧压力8.5 MPa时(由于各循环制冷量和功率随高压侧压力的变化而不同,所以其最优高压侧压力也不相同,这里统一取8.5 MPa),膨胀机循环和回热器循环COP分别比节流阀循环提高了22%和4%.

2.4 压缩机排气温度对比

图11为不同蒸发温度下压缩机排气温度随高压侧压力变化情况对比.由图11可以看出,各循环中压缩机排气温度都随着高压侧压力的增加而升高.蒸发温度越低,压缩机排气温度越高.回热器循环的压缩机排气温度高于节流阀循环和膨胀机循环(膨胀机的加入不影响压缩机吸气温度,所以膨胀机循环和节流阀循环的压缩机排气温度相同),这是因为压缩机回气经过回热器过热后温度升高,导致压缩机排气温度升高.

3 结论

本文通过对跨临界CO₂节流阀循环、跨临界CO₂回热器循环、跨临界CO₂膨胀机循环三种跨临界CO₂制冷循环进行理论分析和模拟计算,得出以下结论:①三种循环都存在最优高压侧压力使得循环COP达到最大值,为保证系统效率,实际应用中

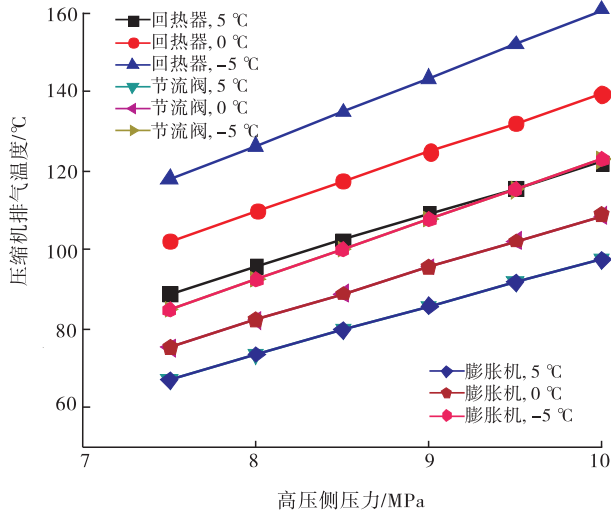


图 11 不同蒸发温度下压缩机排气温度随高压侧压力变化情况对比

应使系统在最优高压侧压力附近运行。②蒸发温度为 0 °C, 高压侧压力为 8.5 MPa 时, 膨胀机循环和回热器循环 COP 分别比节流阀循环提高了 22% 和 4%, 膨胀机循环的性能明显优于其他两个循环。③蒸发温度的降低会导致循环 COP 的降低和压缩机排气温度的升高, 实际应用中应采取措施尽量避免过低的蒸发温度。④回热器的加入会导致压缩机排气温度的升高. 在实际应用中, 为了保护压缩机, 应避免压缩机排气温度长期过高。

综合以上分析可以得出: 节流阀循环的 COP 最小, 回热器循环能够提高系统的制冷量, 但是会导致压缩机排气温度的升高, 对压缩机的安全有一定的威胁。膨胀机循环能够有效减少系统功耗, 对系统 COP 的提升更为显著。所以膨胀机循环有着更为良好的综合性能。

在实际应用中, 由于膨胀机循环成本较高, 应该根据具体情况作具体分析。当工况与模拟计算相同, 以一台制冷量为 5 kW, 日工作时间 10 h, 一年工作 300 d 的制冷系统为例作市场调查可知, 适用于小型制冷系统的膨胀机价格约为 7 000 元, 回热器价格约为 600 元。节流阀价格约为 100 元, 居民用电电价约为 0.5 元/kWh 时, 在只考虑经济性的前提下, 节流阀循环适用于 4.6 a 以内, 回热器循环适用于 4.6 ~ 11.2 a, 膨胀机循环适用于 11.2 a 以上的情况。在制冷工程中, 系统设计应综合考虑以上影响因素, 以使系统设计最优化。

参考文献:

- [1] 王哲. 跨临界 CO₂ 水源热泵与空气源制冷循环试验研究[D]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2013.
- [2] 马一大, 魏东, 吕灿仁. 温室气体减排与 CO₂ 资源化宏观研究与探讨[J]. 大连理工大学学报, 2001(1): 9.
- [3] Lemons J. 二氧化碳与环境[J]. 世界环境, 1987(1): 16.
- [4] Agrawal N, Bhattacharyya S. Studies on a two-stage transcritical carbon dioxide heat pump cycle with flash intercooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2007(27): 299.
- [5] Lorentzen G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant[J]. International Journal of Refrigeration, 1994, 17(5): 292.
- [6] Yang J L, Ma Y T, Li M X, et al. Exergy analysis of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle with an expander[J]. Energy, 2005, 30(7): 1162.
- [7] Cassona V, Cecchinato L, Corradia M, et al. Optimisation of the throttling system in a CO₂ refrigerating machine[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(8): 926.
- [8] Shafiei S E, Rasmussen H, Stoustrup J. Modeling supermarket refrigeration systems for demand-side management[J]. Energies, 2013, 6(2): 900.
- [9] 姜云涛, 马一大, 张子坤, 等. 回热器对跨临界 CO₂ 水源热泵的影响判别式及实验研究[J]. 热科学与技术, 2009, 8(4): 307.
- [10] Wang Z, Gong Y, Wu X H, et al. Thermodynamic analysis and experimental research of transcritical CO₂ cycle with internal heat exchanger and dual expansion[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2013, 21(1): 1.
- [11] Zhang W H, Wang Z, Gong Y, et al. Thermodynamic analysis and experimental investigation of internal heat exchanger influence on CO₂ transcritical cycle performance[J]. Advanced Materials Research, 2013, 614: 259.
- [12] 杨俊兰, 马一大, 李敏霞, 等. 带膨胀机 CO₂ 跨临界热泵系统的模拟计算与实验[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术, 2007, 40(9): 1099.
- [13] Kim J K, Jeon H K, Lee J S. Wall temperature measurement and heat transfer correlation of turbulent supercritical carbon dioxide flow in vertical circular/non-circular tubes[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(15-17): 1795.
- [14] 龚毅, 侯峰, 梁志礼, 等. 带回热器的跨临界 CO₂ 制冷系统的试验研究[J]. 流体机械, 2011, 39(10): 56.

空气弹簧动态刚度和阻尼数学模型的建立

高芳

(河南经贸职业学院 技术科学系, 河南 郑州 450018)

摘要:根据运动学、气体动力学和气体热力学相关理论,推导了某空气弹簧振动的动力学方程、流经阻尼孔气体流量的微分方程,建立了空气弹簧的动态刚度和阻尼数学模型.由该数学模型可知,空气弹簧动态刚度与阻尼和气室体积、阻尼孔直径、簧内初始压力、等效工作面积及主气室横截面积等参数有关,同时随外界激振频率而变化.以阻尼孔直径对空气弹簧的动态性能影响为例,验证了该模型是有效的、实用的.

关键词:空气弹簧;动态刚度;阻尼

中图分类号:TH135 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.023

Mathematical model establishment for dynamic stiffness and damp of air spring

GAO Fang

(Department of Technical Sciences, He'nan Economy and Trade Vocational College, Zhengzhou 450018, China)

Abstract: According to the related theories of kinematics, gas dynamics and gas thermodynamics, the kinematical equations for vibration of the air spring, and the differential equation of the gas flow rate through the damping hole air spring through the damping hole gas were deduced firstly. Then, the mathematical model of dynamic stiffness and damping was established. The mathematical model showed that the dynamic stiffness and damping of the air spring were related to the parameters of air chamber volume, damping hole diameter, initial spring pressure, equivalent working area and cross-sectional area of main air chamber, at the same time they changed with external vibration frequency. Finally, taking the effect of damping hole diameter on dynamic performance of air spring as the example, the model was confirmed that it was effective and practical.

Key words: air spring; dynamic stiffness; damp

0 引言

随着科技的发展进步,制造业对机械设备的加工精度提出了更高的要求.工业生产上普遍存在振动现象,振动会降低设备的性能,减少设备的寿命,因此需要严格控制振动,采用空气弹簧隔振是常用的一种减小振动的方法.空气弹簧是利用柔性密闭容器中气体的可压缩性以实现减振效果的装置.建立空气弹簧各参数与其动态性能之间的理论模型,

是研究其隔振性能的常用方法.国内外学者开展了大量研究,分析了空气弹簧气室体积^[1]、有效工作面积及其变化率^[2]、外界激振频率^[3]、橡胶囊的复合刚度^[4]、流经阻尼孔的气流振动^[5]对空气弹簧整体刚度和阻尼的影响.但目前建立的诸多理论模型中,能够较好地说明空气弹簧结构参数及各因素间耦合关系对系统隔振性能影响的还很少.鉴于此,本文拟以某空气弹簧为例,运用运动学、气体动力学、气体热力学等理论,建立空气弹簧的等效动态

刚度和阻尼数学模型, 以期分析各参数对空气弹簧动态特性的影响规律、合理调整空气弹簧的参数、有效隔离振动提供理论根据。

1 空气弹簧结构及工作原理

本文所研究的空气弹簧(结构如图1所示), 主要由活塞、橡胶囊、主气室、附加气室和连接主附气室的常开阻尼孔、可调阻尼孔组成。主气室是由金属壳体 and 橡胶囊围成的腔室, 体积可随橡胶囊位置的变化而改变。附加气室是体积恒定的金属腔体。常开阻尼孔是直径0.7 mm的圆形孔, 置于主、附气室间的金属板上。可调阻尼孔结构如图2所示, 是角度为 4° 的锥形孔, 开在附加气室壁上, 通过气道与主气室连接。在锥形孔上安装一个阻尼杆, 阻尼杆一端为与锥形孔配合的锥形头, 另一端带有旋转螺纹, 用以调整阻尼杆的横向位置, 进而控制阻尼孔的大小。

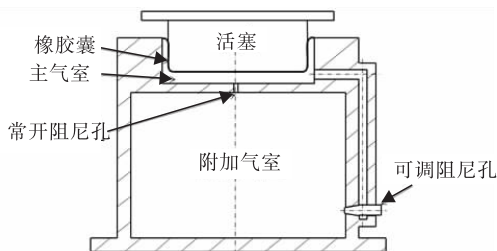


图1 空气弹簧结构

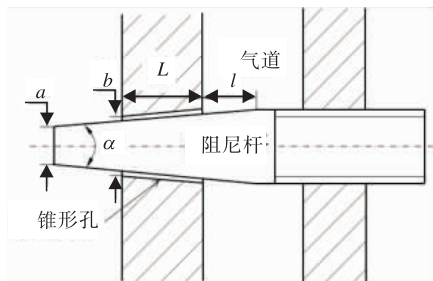


图2 可调阻尼孔结构

为研究方便, 将常开阻尼孔和可调阻尼孔等效为一个与二者总面积相等的圆形阻尼孔, 则等效阻尼孔的直径

$$d = \begin{cases} \sqrt{d_c^2 + 4(bt \tan \alpha - lt \tan \alpha)^2} & \text{当 } 0 \leq l \leq \frac{b-a}{2 \tan \alpha} \\ \sqrt{d_c^2 + 4(at \tan \alpha + lt \tan \alpha)^2} & \text{当 } \frac{b-a}{2 \tan \alpha} < l \leq \frac{b-a}{2 \tan \alpha} + L \\ \sqrt{d_c^2 + b^2} & \text{当 } \frac{b-a}{2 \tan \alpha} + L < l \end{cases}$$

式中, d_c 为常开阻尼孔直径, a 为阻尼杆锥形头端面直径, b 为锥形孔在附加气室内壁的孔径, l 为阻尼孔横向位移, α 为锥形头角度, L 为锥形孔长度。

当空气弹簧振动时, 主、附气室体积变化, 气室内的气压也发生变化, 气体经阻尼孔在两个气室间流通。振动能量随气体流通过程中做功及分子内能损耗而减少, 从而起到隔振的作用。

2 空气弹簧动态刚度和阻尼的数学建模

当空气弹簧的基座振动时, 主、附气室内气体状态都会发生变化。本文作以下假设: 基座振动导致的橡胶囊形变量极小; 主气室体积随橡胶囊伸缩呈线性变化; 簧内气体出现绝热变化。

2.1 空气弹簧振动的动力学方程推导

假设空气弹簧承载质量块质量为 m , 其运动状态变化如图3所示。静止时主、附气室内气体表压力均为 p_0 , 体积分别为 V_0 和 V_f 。忽略活塞的质量, 认为 p_0 完全由质量块的重力产生, 则空气弹簧的有效工作面积 A_0 为空气弹簧垂直方向受到的力与主气室表压力的比值, 即

$$A_0 = mg/p_0 \quad (1)$$

式中, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

假设空气弹簧在时刻 t 以位移 $Z_0(t)$ 向上运动, 主气室体积减小, 其内气体压力增大 Δp 。由于主、附气室间产生了压力差, 部分气体经阻尼孔流向附加气室, 附加气室气压随之增加, 同时质量块也在气体压力的作用下产生响应位移 $Z(t)$ 。根据牛顿第二定律及式(1), 得空气弹簧振动的动力学方程为

$$m \ddot{Z}(t) = (p_0 + \Delta p) A_0 - mg = A_0 \Delta p \quad (2)$$

其中, $\ddot{Z}(t)$ 是时刻 t 时质量块 m 的加速度。

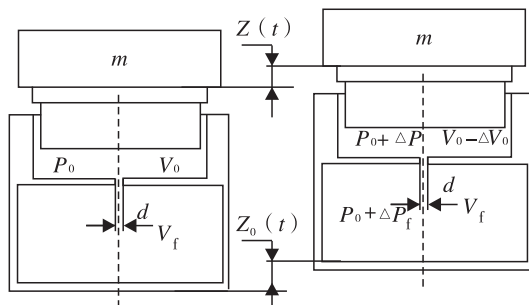


图3 空气弹簧运动状态变化示意图

2.2 流经阻尼孔气体流量的微分方程推导

在上述振动过程中, 主、附气室内气体压力及气体量均发生了变化, 依据理想气体多变方程, 主、

附气室内气体由静止状态进入被压缩的过程中,有

$$\begin{cases} (p_0 + p_a)(V_0 - V)^n = (p_0 + p_a + \Delta p)(V_0 - \Delta V)^n \\ (p_0 + p_a)(V_f - V)^n = (p_0 + p_a + \Delta p_f)V_f^n \end{cases} \quad (3)$$

式中,标准大气压 $p_a = 1.01 \times 10^5$ Pa, V 为主气室流向附加气室气体的体积在静止状态下的等效值/ m^3 ,绝热变化时气体多变指数 $n = 1.4^{[6]}$, ΔV 为主气室体积的改变量/ m^3 , V_f 为附加气室体积/ m^3 , Δp_f 为附加气室内气体压力的改变量/Pa.

整理式③得

$$\begin{cases} \Delta p = (p_0 + p_a) \left(\frac{V_0 - V}{V_0 - \Delta V} \right)^n - (p_0 + p_a) \\ \Delta p_f = (p_0 + p_a) \left(\frac{V_f - V}{V_f} \right)^n - (p_0 + p_a) \end{cases} \quad (4)$$

设 p 为空气弹簧静止状态下簧内气体的绝对压力, x 为主气室橡胶囊振动时垂直方向的形变量,则

$$\begin{cases} p = p_0 + p_a \\ x = Z_0(t) - Z(t) \end{cases} \quad (5)$$

空气弹簧主气室体积随橡胶囊形变量 x 变化而改变,根据假设,其变化为线性,则

$$\Delta V = (dV/dx)x = A_s x$$

式中, A_s 为主气室横截面积.

由于 V 和 ΔV 远小于 V_0 和 V_f ,将式④泰勒展开,并将式⑤代入整理,即可得到振动过程中主、附气室内气体压力增量分别为

$$\begin{cases} \Delta p \approx \frac{npA_0}{V_0}x - \frac{np}{V_0}V \\ \Delta p_f \approx \frac{np}{V_f}V \end{cases} \quad (6)$$

由于气体在流经阻尼孔过程中的势能变化可忽略不计,主、附气室压力增量导致的空气密度变化微小,均可等效为静止状态下的密度值,因此根据伯努利方程,得到两个气室内气体压力与流速的关系式为

$$p + \Delta p + \frac{1}{2}\rho v_{s0}^2 = p + \Delta p_f + \frac{1}{2}\rho v_{sf}^2 \quad (7)$$

式中, ρ 为静止状态时簧内气体密度, v_{s0} 为主气室内气体流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, v_{sf} 为附加气室内气体流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$.

当 $\Delta p > \Delta p_f$ 时,主气室内气体压力大于附加气室,气体由主气室经阻尼孔流向附加气室,此时 $v_{s0} = 0$,依据式⑦求得

$$v_{sf} = \sqrt{\frac{2}{\rho}(\Delta p - \Delta p_f)} \quad (8)$$

当 $\Delta p < \Delta p_f$ 时,主气室内气体压力小于附加气

室,气体由附加气室经阻尼孔流向主气室,此时 $v_{sf} = 0$,依据式⑦求得

$$v_{s0} = \sqrt{\frac{2}{\rho}(\Delta p_f - \Delta p)} \quad (9)$$

单位时间内流经阻尼孔的气体流量,是气体流速和与流速方向相垂直的通孔等效面积的乘积.在实际气体流动中,通孔出口的流速不是均匀的,工程中一般将流速乘以流量系数,以求得流速平均值^[7].规定由主气室流入附加气室的气体流量为正值,则根据式⑧⑨得到空气弹簧流经阻尼孔的气体流量为

$$v = \pm \frac{\pi}{4}C_s d^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}|\Delta p - \Delta p_f|} \quad (10)$$

式中, C_s 为节流孔流量系数,此处取 $C_s = 0.82^{[8]}$.

根据伯努利方程,静止状态时簧内气体密度可表示为

$$\rho = pM_m / (RT) \quad (11)$$

式中, M_m 为气体摩尔质量/ $(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$,气体摩尔常数 $R = 8.314$ J/ $(\text{mol} \cdot \text{K})$, T 为开氏温度/K.

将式⑪代入⑩,可求得单位时间内流经阻尼孔的气体流量

$$\dot{v} = \pm \frac{\pi}{4}C_s d^2 \sqrt{\frac{2RT}{pM_m}|\Delta p - \Delta p_f|} \quad (12)$$

由式⑫可知,单位时间内流经阻尼孔的气体流量与两气室压力差之间呈非线性关系.因此,对式⑫进行线性化处理,构建流量与压力差之间的线性化解析式.依据假设条件,设与式⑫等价的气体流量线性解析式为

$$\lambda \dot{v} = \Delta p - \Delta p_f \quad (13)$$

式中, λ 为比例常数.

当空气弹簧基座振动的位移是以角频率 ω 正弦变化时,空气弹簧主气室橡胶囊形变量 x 、流经阻尼孔气体流量 v 均随之以角频率 ω 正弦变化,则各量可分别表示为

$$\begin{cases} Z_0(t) = a_0 \sin(\omega t) \\ x = a' \sin(\omega t + \varphi_1) \\ v = v_0 \sin(\omega t + \varphi_2) \end{cases} \quad (14)$$

式中, a_0 为基座振动振幅; a' 为橡胶囊挠曲振幅; v_0 为流经阻尼孔气体流量振幅; φ_1, φ_2 为相位差.

流经阻尼孔的气体流量在如式⑭振动过程中,采用非线性方程式⑫及线性方程式⑬计算得出一个振动周期内消耗的能量应相等.按照式⑫计算得到的一个振动周期内气体消耗的能量为

$$\int (\Delta p - \Delta p_f) dv = \int \frac{8pM_m}{\pi^2 C_s^2 d^4 RTg} (v)^2 dv =$$

$$\frac{64pM_m}{3\pi^2C_s^2d^4RTg}v_0^3\omega^2 \quad (15)$$

按照式(13)计算得到的一个振动周期内气体消耗的能量为

$$\int(\Delta p - \Delta p_f)dv = \lambda \int \dot{v}dv = \lambda \pi v_0^2 \omega \quad (16)$$

联立式(15)(16)可求得

$$\lambda = \frac{64pM_m}{3\pi^2C_s^2d^4RTg}v_0\omega \quad (17)$$

即当比例常数按照式(17)取值时,单位时间内流经阻尼孔的气体流量可按照式(13)计算.联立式(6)(13)(14),求得关于气体流量的微分方程为

$$\sigma C_t \dot{v} + v = C_t A_s a' \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (18)$$

式中, $C_t = \frac{V_f}{V_0 + V_f}$, $\sigma = \lambda \frac{V_0}{np}$.

2.3 动态刚度与阻尼的数学模型建立

求解微分方程式(18),可求得流经阻尼孔的气体流量表达式为

$$V = \frac{C_t A_s}{1 + (\sigma C_t \omega)^2} a' [\sin(\omega t + \varphi_1) - (\sigma C_t \omega) \cos(\omega t + \varphi_1)] \quad (19)$$

对比式(14)与式(19),可得

$$v_0 = \frac{C_t A_s}{\sqrt{1 + (\sigma C_t \omega)^2}} \quad (20)$$

式(19)可变化为如下形式:

$$V = \frac{C_t A_0}{1 + (\sigma C_t \omega)^2} [x - \sigma C_t \dot{x}] = \frac{C_t A_0}{1 + (\sigma C_t \omega)^2} [(Z_0(t) - Z(t)) - \sigma C_t (\dot{Z}_0(t) - \dot{Z}(t))] \quad (21)$$

联立式(2)(6)(21),可得

$$m \ddot{Z}(t) = \frac{npA_0A_s}{V_0} \frac{\sigma C_t^2}{1 + (\sigma C_t \omega)^2} [\dot{Z}_0(t) - \dot{Z}(t)] + \frac{npA_0A_s}{V_0} [1 - \frac{C_t}{1 + (\sigma C_t \omega)^2}] [Z_0(t) - Z(t)] \quad (22)$$

对于一个单自由度被动隔振系统,其动力学方程为

$$m \ddot{y} = c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) \quad (23)$$

式(22)与式(23)形式完全相同,因此可将空气弹簧振动过程中的动态刚度 k 与动态阻尼 c 等效为

$$\begin{cases} k = \frac{npA_0A_s}{V_0} [1 - \frac{C_t}{1 + (\sigma C_t \omega)^2}] \\ c = \frac{npA_0A_s}{V_0} \frac{\sigma C_t^2}{1 + (\sigma C_t \omega)^2} \end{cases} \quad (24)$$

由式(17)~(20)可知,空气弹簧动态刚度和阻尼与主气室橡胶囊的挠曲振幅有关.假设主气室橡胶囊本身对质量块的作用力极小,质量块的加速度最大值可视为由主气室最大气压作用所产生.当主气室被瞬时压缩时,没有气体向附加气室流通,此时其腔室内压力最大,则:

$$pV_0 = (p + \Delta p_{\max})(V_0 - \Delta V_{\max}) \quad (25)$$

式中, ΔV_{\max} 为主气室内压力最大时对应的体积变化量.

整理式(25),并略去无穷小量,可推得主气室压力最大增量

$$\Delta p_{\max} = \frac{p}{V_0} \Delta V_{\max}$$

外界激励振动 $Z_0(t)$ 产生的加速度最大值为 $\omega^2 a_0$,此时对质量块进行如下受力分析:

$$\frac{p}{V_0} \Delta V_{\max} A_0 = m \omega^2 a_0$$

设 a' 为主气室橡胶囊体积的变化量 ΔV_{\max} 与横截面积的比值,则

$$a' = \frac{\Delta V_{\max}}{A_s} = \frac{m \omega^2 a_0}{A_0 A_s} \frac{V_0}{p}$$

为简化空气弹簧动态刚度与阻尼的解析表达式,引入参量 H 与 β ,其表达式为

$$\begin{cases} H = \frac{npA_0A_s}{V_0} \\ \beta = \frac{64pM_mv_0}{3\pi^2C_s^2RTg} \end{cases} \quad (26)$$

其中, H 是与空气弹簧初始状态相关的量, β 是与流经阻尼孔气体流量振幅相关的量.

则空气弹簧动态刚度和阻尼的数学模型为

$$\begin{cases} k = H [1 - \frac{C_t}{1 + (\beta C_t \omega^2/d^4)^2}] \\ c = H \frac{\beta C_t^2 \omega/d^4}{1 + (\beta C_t \omega^2/d^4)^2} \end{cases} \quad (27)$$

由式(27)可知,空气弹簧等效动态刚度和阻尼与空气弹簧静止状态时主附气室体积、主气室几何横截面积及有效工作面积、簧内初始气体压力、阻尼孔直径等因素有关,同时动态刚度与阻尼随外界激励频率呈非线性变化.

3 算例

阻尼孔的直径对空气弹簧的动态性能影响显著,故以阻尼孔直径这一因素为例,分析阻尼孔直径对空气弹簧动态特性的影响.当阻尼孔的直径

$d = 0$ 时,空气弹簧的刚度与阻尼分别为

$$\begin{cases} k_{d=0} = npA_0A_s/V_0 \\ c_{d=0} = 0 \end{cases} \quad (28)$$

由式(28)可知,当阻尼孔关闭时,空气弹簧的刚度仅与主气室有关,附加气室不工作. 由于气体不能经阻尼孔流通耗散能量,因此弹簧的阻尼为0. 当 d 足够大($d \gg 0$) 时,求得空气弹簧的刚度与阻尼分别为

$$\begin{cases} k_{d \gg 0} = npA_0A_s/(V_0 + V_f) \\ c_{d \gg 0} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

由式(29)可知,由于 d 足够大,附加气室与主气室等同于一个腔室,此时气室之间不会产生压力差,故没有气体流通耗散能量,在假设的理想情况下,弹簧阻尼依然为0.

当 d 介于上述两种情况之间时,在同等激振振幅扫频激励下动态刚度和阻尼随 d 的变化规律如图4所示.

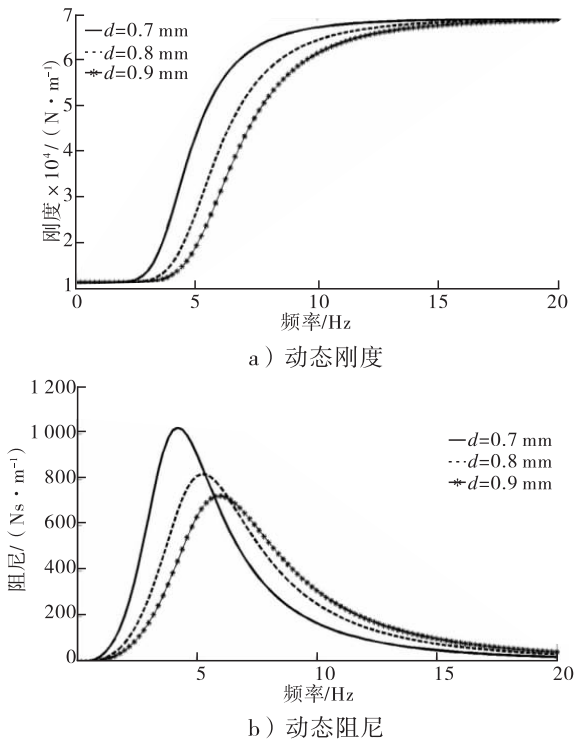


图4 动态刚度和阻尼随 d 变化曲线

随着 d 的增加,动态刚度整体减小,低刚度值的频带范围扩大,使空气弹簧达到高刚度值的频率增加;阻尼峰值降低,且最大阻尼所对应的频率变大. 原因是当 d 增大后,气流受阻尼孔的限制作用减弱,在同等激振频率下,由主气室流入附加气室的气流量增多,主气室内气体量减少,压缩同等位移时主气室内气体分子间作用力变小,从而刚度降低. 在

此过程中,由于流入附加气室的气流量增加,两气室间的压差降低,气流以动能及内能形式消耗的能量也降低,阻尼也随之减小.

其他参数对空气弹簧动态性能的影响可以采用相同的方法进行分析,证明本文所建立的数学模型是有效的、实用的. 该数学模型对于分析各参数对空气弹簧动态特性的影响规律、合理调整空气弹簧的参数、有效隔离振动具有指导意义.

4 结论

本文基于某空气弹簧的结构及其工作原理,推导了空气弹簧振动的动力学方程、流经阻尼孔气体流量的微分方程,进而建立了空气弹簧动态刚度和阻尼的数学模型. 由该模型可知,空气弹簧的等效动态刚度和阻尼,其与气室体积、阻尼孔直径、簧内初始压力、等效工作面积及主气室横截面积等参数有关,同时随外界激振频率变化而变化. 以阻尼孔直径对空气弹簧动态特性的影响为例,验证了该数学模型是有效的. 本文的结论对于分析各参数对空气弹簧动态特性的影响规律、合理调整空气弹簧的参数、有效隔离振动具有指导意义. 后续研究重点是进一步分析各因素(如:激振频率、阻尼孔直径、主气室高度、簧内初始压力)对空气弹簧动态性能的影响.

参考文献:

- [1] 应杏娟,李郝林,倪争技. 空气弹簧振动器的动力特性研究[J]. 上海理工大学学报,2006,28(2):164.
- [2] Moon J H, Lee B G. Modeling and sensitivity analysis of a pneumatic vibration isolation system with two air chambers [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45 (12):1828.
- [3] 王家胜,朱思洪. 带附加气室空气弹簧动态刚度的线性化模型研究[J]. 振动与冲击,2009,28(2):72.
- [4] Erin C, Wilson B, Zapfe J. An improved model of a pneumatic vibration isolator; theory and experiment [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 218 (1):81.
- [5] Lee J H, Kim K J. Modeling of nonlinear complex stiffness of dual-chamber pneumatic spring for precision vibration isolations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301 (3-5):909.
- [6] 张学学,李桂馥. 热工基础[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [7] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006.
- [8] 承颖璐. 柔性隔振系统的功率流传递特性与控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

考虑中间主应力的隧道洞口土体可靠度研究

黄志波¹, 崔广强¹, 郑强²

(1. 福建农林大学 金山学院, 福建 福州 350002;

2. 福建省建专岩土工程有限公司, 福建 福州 350002)

摘要:根据统一强度理论和摩尔库伦强度理论,推导考虑中间主应力时土体的功能函数,基于验算点法编制相应的 Matlab 程序计算隧道洞口松散土体的塌方概率,进而研究中间主应力对土体可靠度的影响.结论是:考虑中间主应力可以降低隧道洞口土体的塌方概率,充分发挥材料的强度,节约工程费用;当 $b=0$ 或 $t=0$ 或 $t=1$ 时,土体的塌方概率与未考虑中间主应力时相等且为最大值;土体塌方概率随 t 的增大先减小后增大,随着 b 的增大而减小,故对于 b, t 的取值要格外慎重.本研究成果对准确评价隧道稳定性具有重要意义.

关键词:统一强度理论;摩尔库伦强度理论;中间主应力;土体可靠度;塌方概率

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.024

Study on the reliability of soil at the tunnel hole considering effect of intermediate principal stress

HUANG Zhi-bo¹, CUI Guang-qiang¹, ZHENG Qiang²

(1. College of Jinshan, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Jianzhu Geotechnical Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350002, China)

Abstract: According to the unified strength theory and Mohr coulomb theory, the function of soil was deduced considering the intermediate principal stress, and the soil collapse probability at the tunnel hole was derived from Matlab program based on design point method in order to analyze the influence of intermediate principal stress made on reliability of soil. The results showed that: firstly, considering that effect of intermediate principal stress could reduce the soil collapse probability at the tunnel hole and give the potential of material into full play, the project expense could be saved; secondly, when $b=0$ or $t=0$ or $t=1$, the probability value of soil collapse was equal to the value under the circumstance of taking no account of the intermediate principal stress, at the meantime, the value could be the maximum one; thirdly, the soil collapse probability would change over the numerical value of b and t , generally speaking, the probability would decrease and then increase with the rise of the numerical value of t , while the probability would decrease with the rise of the numerical value of b , therefore the value of b and t should be considered carefully, which had important significance for accurate evaluation of tunnel stability.

Key words: unified strength theory; Mohr coulomb strength theory; intermediate principal stress; reliability of soil; collapse probability

0 引言

在山岭隧道进出洞口段进行施工,通常要穿越较厚的松散覆盖层.该段隧道理深浅且围岩稳定性差,在隧道与边坡的相互作用下极易诱发塌方.隧道安全问题一直是隧道工程的重点、难点课题之一.许多学者都对隧道进行过可靠度分析,但有关隧道洞口土体可靠度方面的研究较少^[1-2],且成果主要集中在对隧道中间段衬砌可靠度方面的研究^[1,3-5].在可靠度分析过程中,研究者普遍采用摩尔库伦强度理论,只考虑最大和最小主应力,忽略了中间主应力的作用,导致计算结果偏保守.而统一强度理论能很好地克服上述缺点,充分考虑中间主应力的作用,发挥材料的自承能力^[6-7].因此,本文拟同时采用统一强度理论和摩尔库伦强度理论推导考虑中间主应力时土体的功能函数,研究中间主应力对土体可靠度的影响,为准确评价隧道洞口段土体稳定性提供理论依据.

1 基于统一强度理论考虑中间主应力的摩尔库伦强度理论

1.1 统一强度理论及摩尔库伦强度理论

统一强度理论是宏观强度理论的高度概括,对于外凸型强度理论而言,以摩尔库伦强度理论为下限($b=0$),双剪强度理论为上限($b=1$),其表达式如下^[6-7].

当 $\sigma_2 < \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1 + \alpha}$ 时,有

$$F = \alpha\sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1 + b} = f_1 \quad (1)$$

当 $\sigma_2 \geq \frac{\alpha\sigma_1 + \sigma_3}{1 + \alpha}$ 时,有

$$F = \frac{\alpha}{1 + b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = f_1 \quad (2)$$

式中, F 为屈服函数;材料拉压强度比 $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} =$

$\frac{1 - \sin\varphi_0}{1 + \sin\varphi_0}$; b 为反映中间主应力效应的统一强度理论参数; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为最大、中间及最小主应力;极限拉伸强度 $f_t = \frac{2c_0 \cos\varphi_0}{1 + \sin\varphi_0}$, c_0, φ_0 分别为岩土体的内聚力和内摩擦角.

根据摩尔库伦强度理论,以主应力表示屈服条

件为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi_0 + 2c_0\cos\varphi_0$$

即

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin\varphi_0}{1 - \sin\varphi_0}\sigma_3 + \frac{2c_0\cos\varphi_0}{1 - \sin\varphi_0} \quad (3)$$

1.2 考虑中间主应力的摩尔库伦强度理论

当 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 时,设 $t = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, 则有

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{3} - \frac{(1 - 2t)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (4)$$

将式(4)分别带入式(1)(2)得:

1) 当 $t < \frac{1 - \sin\varphi_0}{2}$ 时,有

$$\sigma_1 = \frac{(1 + \sin\varphi_0)(1 + b - bt)}{(1 + b)(1 - \sin\varphi_0) - bt(1 + \sin\varphi_0)}\sigma_3 + \frac{2(1 + b)c_0\cos\varphi_0}{(1 + b)(1 - \sin\varphi_0) - bt(1 + \sin\varphi_0)} \quad (5)$$

2) 当 $t \geq \frac{1 - \sin\varphi_0}{2}$ 时,有

$$\sigma_1 = \frac{(1 + b)(1 + \sin\varphi_0) - b(1 - t)(1 - \sin\varphi_0)}{(1 - \sin\varphi_0)(1 + bt)}\sigma_3 + \frac{2(1 + b)c_0\cos\varphi_0}{(1 - \sin\varphi_0)(1 + bt)} \quad (6)$$

分别将式(5)(6)与式(3)对比可知,统一强度理论的屈服条件可表达为

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin\varphi_u}{1 - \sin\varphi_u}\sigma_3 + \frac{2c_u\cos\varphi_u}{1 - \sin\varphi_u} \quad (7)$$

其中, c_u 和 φ_u 为岩土体的等效内聚力和等效内摩擦角.

当 $t < \frac{1 - \sin\varphi_0}{2}$ 时,有

$$\sin\varphi_u = \frac{(1 + b)\sin\varphi_0}{1 + b(1 - t) - bt\sin\varphi_0}$$

$$c_u = \frac{(1 + b)c_0\cos\varphi_0\cos(45^\circ + \varphi_u/2)}{1 + b(1 - t) - (1 + b + bt)\sin\varphi_0}$$

当 $t \geq \frac{1 - \sin\varphi_0}{2}$ 时,有

$$\sin\varphi_u = \frac{(1 + b)\sin\varphi_0}{1 + bt + b(1 - t)\sin\varphi_0}$$

$$c_u = \frac{(1 + b)c_0\cos\varphi_0}{(1 + bt) - (1 - \sin\varphi_0)\tan(45^\circ + \varphi_u/2)}$$

综上所述,式(7)即为考虑中间主应力的摩尔库伦准则.

2 考虑中间主应力时隧道洞口土体的可靠度

2.1 模型简化及基本假设

对山岭隧道出洞口的工程地质模型进行简化,建立力学模型,并作如下假设:1)假设隧道出洞口所处坡体由两层不同的岩土层组成,上层(I)为松散破碎岩土体,即松散体,下层(II)为相对完整的基岩层.把岩土层看作松散体,不考虑岩体结构面的影响.2)假设塌方发生时,滑动面是铅直的,即隧道开挖至松散体 I 后,在洞室顶部出现垂直滑动面 AD 与 BC 并延伸至地表,如图 1 所示^[1-2].

2.2 考虑中间主应力时土体的功能函数

在图 2 所示单元受力分析示意图中,在 ABCD 所包围的松散体中切取厚度为 dz 的薄层单元,对其进行受力分析.

由图 2 可知,当滑面上的摩擦力与初期支护力的合力无法克服重力的影响时,便发生塌方.则土体的功能函数为

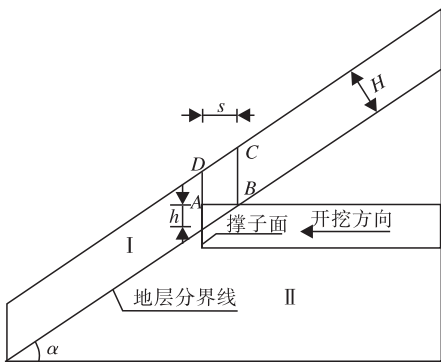


图 1 简化力学模型图

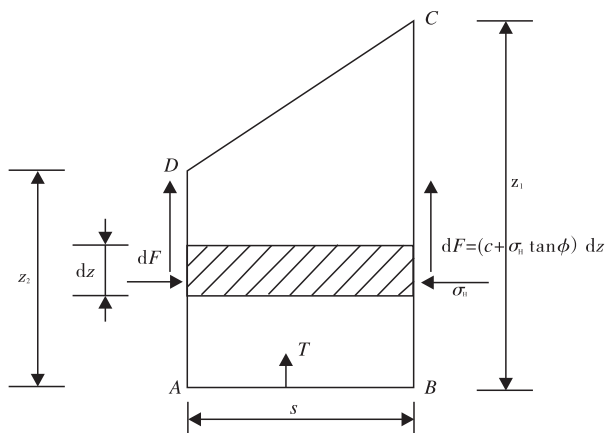


图 2 单元受力分析

$$SM = R - S = \int_0^{z_1} dE + \int_0^{z_2} dE + T - \left(\int_0^{z_2} rsdz + \frac{1}{2} \int_{z_2}^{z_1} rsdz \right) \quad (8)$$

式中, Z_1 和 Z_2 分别为滑动面 BC 和 AD 的长度, dE 为摩擦力, T 为初期支护力, r 为松散体 I 的重度, s 为隧道进入松散体 I 的水平距离.

考虑中间主应力时

$$dE = (\sigma_H \tan \varphi_u + c_u) dz = (\zeta r z \tan \varphi_u + c_u) dz \quad (9)$$

式中, σ_H 为水平主应力, ζ 为侧压力系数, z 为地下某点到地表的铅垂距离.

由几何关系可知

$$z_1 = \frac{H}{\cos \theta} \quad z_2 = \frac{H}{\cos \theta} - h \quad h = \tan \theta \quad (10)$$

式中, H 为松散体 I 的厚度, θ 为边坡的坡脚, h 为隧道进入松散体 I 的高度.

将式 (8)(9) 代入式 (7), 化简得

$$SM = \frac{1}{2} \xi r \tan \varphi_u \frac{H^2}{\cos^2 \theta} + \frac{c_u H}{\cos \theta} + \frac{1}{2} \xi r \tan \varphi_u \left(\frac{H}{\cos \theta} - \tan \theta \right)^2 + c_u \left(\frac{H}{\cos \theta} - \tan \theta \right) + T - \frac{1}{2} rs \left(\frac{2H}{\cos \theta} - \tan \theta \right)$$

2.3 可靠度计算方法

验算点法是能准确求解可靠度的方法之一,故本文采用验算点法求解可靠度.当结构功能函数 $SM = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 x_1, x_2, \dots, x_n 为相互独立且服从正态分布的基本变量,设计验算点 $P^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, 则结构的可靠指标为

$$\beta = \frac{\mu_{SM}}{\sigma_{SM}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{x_i} - x_i^*) \frac{\partial SM}{\partial x_i} \Big|_{x^*}}{\sum_{i=1}^n a_i \sigma_{x_i} \frac{\partial SM}{\partial x_i} \Big|_{x^*}}$$

式中, μ_{SM}, σ_{SM} 分别为功能函数的均值和标准差; a_i 为灵敏系数.

塌方概率为

$$P_f = 1 - \Phi(\beta)$$

2.4 洞顶松散土体塌方概率计算

根据工程地质勘察报告和现场勘测,得出以下各项计算参数^[8]:坡角 $\alpha = 30^\circ$, 上覆松散层厚度 $H = 10$ m, 黏聚力 $c = 20$ kPa (变异系数 0.34), 内摩擦角 $\varphi = 26^\circ$ (变异系数 0.26), c 和 φ 的相关系数均为 -0.5, 重度 $\gamma = 19$ kN/m³, 侧压力系数 $\xi = 0.38$, 初期支护力 $T = 0$. 基于 Matlab, 采用验算点法编制

相应的计算机程序来计算洞顶松散土体的可靠指标及塌方概率。

在改变计算时采用的强度理论和可靠度计算方法的情况下,洞顶土体塌方概率分别为 P_1, P_2 和 P_3 , 其中 P_1 为文献[1]中的计算结果. 各土体塌方概率计算时采用的可靠度计算方法和强度理论详见表1. 土体塌方概率随进入松散体 I 的水平距离的变化分别见表2.

表1 土体塌方概率计算时采用的可靠度计算方法和强度理论

失效概率	可靠度计算方法	强度理论
P_1	中心点法	摩尔库伦
P_2	验算点法	摩尔库伦
P_3	验算点法	考虑中间主应力的摩尔库伦($b=0.5, t=0.2$)

表2 土体塌方概率随进入松散体 I 的水平距离的变化 %

s/m	P_1	P_2	P_3
1	0.01	0.02	0.01
2	0.43	0.95	0.41
3	8.74	11.55	5.30
4	47.26	47.61	27.90
5	89.15	85.59	67.13
6	99.46	98.47	92.84
7	99.99	99.94	99.32
8	100.00	100.00	99.97
9	100.00	100.00	100.00
10	100.00	100.00	100.00

由表2可知: 1) 采用不同的可靠度计算方法导致曲线 P_1 和 P_2 局部点的塌方概率值略有差别, 其中采用验算点法计算得到的曲线 P_2 更为准确. 2) 当 $1 \text{ m} \leq s \leq 6 \text{ m}$ 时, 采用考虑中间主应力的摩尔库伦强度理论计算得到土体的塌方概率 P_3 比未考虑时计算得到的概率 P_2 小 21.6% ~ 54.1%. 可见考虑中间主应力能够充分利用土体的强度, 更符合实际情况, 节约工程费用.

3 中间主应力对土体可靠度的影响

考虑中间主应力的摩尔库伦屈服条件中存在参数 t 和 b , 它们直接影响中间主应力的效应, 且对于外凸型强度理论, $0 \leq b \leq 1$. 为了进一步研究中间主应力对土体可靠度的影响, 结合图3在上述土体

塌方概率的计算条件的基础上取 $s = 3 \text{ m}$, 分别计算 t 和 b 不同时土体的塌方概率(见表3).

表3 t 和 b 不同时土体的塌方概率 %

t	b					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.0	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55
0.2	11.55	8.56	6.84	5.76	5.02	4.49
0.4	11.55	7.41	5.17	3.84	3.00	2.44
0.6	11.55	8.66	6.92	5.78	5.00	4.43
0.8	11.55	10.04	9.04	8.33	7.81	7.41
1.0	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55	11.55

由表2和表3可知:

1) 采用考虑中间主应力的摩尔库伦强度理论计算土体的塌方概率, 根据 b, t 取值的不同, 塌方概率有不同程度的降低, 最多可以降低 73.9%.

2) 当 $b=0, t=0, t=1$ 三者中有一个成立时, 不论是否考虑中间主应力, 摩尔库伦强度理论计算得到的土体塌方概率值相等, 且此时土体的塌方概率值达到最大. 这是由于当 $b=0$ 时, 考虑中间主应力的摩尔库伦强度理论已经退化为一般的摩尔库伦强度理论; 当 $t=0$ 时, $\sigma_2 = \sigma_3$; 当 $t=1$ 时, $\sigma_1 = \sigma_2$.

3) 土体塌方概率随 t ($0.1 \leq t \leq 0.9$) 的增大呈先减小后增大的规律, 且减小、增大的幅度随着 b 的增大而增大, 当 $b=1$ 时该幅度达到最大. 同时, 可用三次多项式函数 ($y = ax^3 + bx^2 + cx + d$) 高精度拟合土体塌方概率随 t 的变化曲线.

4) 土体塌方概率随 b ($0.1 \leq b \leq 1.0$) 的增大而减小, 且减小的幅度随着 t 的增大而呈现出先增大后减小的规律, 当 $t=0.4$ 时达到最大. 同时, 可用指数函数 ($y = ae^{bx}$) 高精度拟合土体塌方概率随 b 的变化曲线.

4 结论

本文推导了考虑中间主应力时土体的功能函数, 编制了相应的计算程序, 研究了中间主应力对土体可靠度的影响, 结论如下.

1) 统一强度理论的屈服条件通过简单变换, 再加上引入岩土体的 c_u 和 φ_u , 即可得到考虑中间主应力的摩尔库伦强度理论的屈服条件.

2) 考虑中间主应力可以降低隧道洞口土体的塌方概率, 充分利用土体的强度, 节约工程费用.

3) 当 $b=0$ 或 $t=0$ 或 $t=1$ 时, 土体的塌方概率与未考虑中间主应力时相等且为最大值.

(下转第141页)

中小型电动汽车智能充电机设计

郑安平, 苏向上

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:基于单片机 PIC16F873A 和开关电源控制器 UC3846N, 针对一般铅酸蓄电池存在的问题, 引入电压反馈环和电流反馈环, 采用四段式充电控制策略, 设计了便携式中小型电动汽车智能充电机. 整机调试得到的参数特征表明, 充电机很好地实现了快速均衡充电及参数实时监控, 具有热保护、反接保护、过压过流保护功能, 并且体积小、重量轻、携带使用方便.

关键词:电动汽车; 开关电源控制器; 智能充电

中图分类号:U469; TM91 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.025

Design of intelligent chargers for small and medium size electrical vehicle

ZHENG An-ping, SU Xiang-shang

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aiming at the problems existed in the lead-acid battery, using voltage feedback loop and current feedback loop, the design of small and medium size electrical vehicle portable intelligent charger based on PIC16F873A and UC3846N was introduced to achieve the four-stage charging process. By testing the main board, the parameter characteristics showed that this charger could achieve fast charging with constant current and parameter real time monitoring, and realize the functions of over-heat protection, reverse polarity protection, over-voltage/current protection required above and it was low in weight, small in size and portable.

Key words: electrical vehicle; switched power supply controller; intelligent charging

0 引言

由于具有高效、节能、环境污染小等突出的优势, 近年来电动汽车逐渐流行起来, 如同美国特斯拉公司的划时代电动汽车 Model-S 一样, 它正在走进平常百姓的生活中. 蓄电池是电动汽车的核心部件之一, 其性能决定了电动汽车的寿命. 影响蓄电池性能的因素有很多, 如电动汽车的配置、行驶状态、充电电流和充电策略等. 其中, 充电过程对蓄电池的影响最大, 过度充电、充电不足, 充电电流、电压不稳定等, 都是引起蓄电池故障的重要

原因^[1].

常见的充电机有车载充电机、便携式充电机和充电桩(固定式充电机, 可实现大电流快速充电). 国外智能充电机技术比较成熟: 将微型计算机控制和智能算法应用到充电机的设计中, 可对充电过程中电池参数进行实时跟踪控制, 并据此定制充电策略. Tesla 的超级充电站可用 40 min 将 85 kWh 的 Model-S 的电量充到 80%, 75 min 充到 100%. 国内智能充电机研究起步较晚, 目前市面上大多数便携式充电机的硬件电路设计较为简单, 充电方法比较单一, 多为恒压充电、恒流充电及定时充电, 且充电

控制过程大多针对某一种蓄电池,不能对充电过程进行有效采样和控制,容易造成电池欠充或过充,不利于蓄电池的维护^[2].因此设计一款电动汽车智能充电机具有理论和实际双重意义.本文拟以单片机 PIC16F873A 和开关电源控制器 UC3846N 为核心,提出中小型电动汽车智能充电机的设计方案,以优化充电策略,实现便携式智能充电和对蓄电池的维护功能.

1 充电机电路设计

本设计使用的 PIC16F873A 为 Microchip 公司 PIC16F87XA 系列增强型 Flash 单片机,再编程功能可实现充电控制策略的定制.单片机根据蓄电池的充电特性和电压电流采集处理电路反馈的信号控制 UC3846N,然后 UC3846N 输出不同占空比的 PWM 波控制功率管的通断,自动调节输出电压和电流,实现智能充电.该充电机控制系统具有温控过热保护功能,能够实时监控充电过程.本设计是适用于中小型电动汽车的小型化、便携式车载充电机,要达到充电快、效率高、维护方便的预期.充电机工作原理为:220 V 的市电经输入全桥整流滤波成 310 V 的直流电,然后直流电经高频逆变器后成为脉宽可调的高频交流电,再经高频变压器耦合到副边,最后经输出整流滤波电路得到电压可调且纹波较小的直流电,接入蓄电池.

1.1 总体设计

铅酸蓄电池技术成熟、价格低廉,高倍率放电性能良好,单体电池电压可达 2.2 V,比能量为 30 ~ 40 Wh/kg,易于浮充,没有记忆效应,是最常用的电动汽车动力电池.镍镉电池的应用也比较广泛,单体电池电压一般为 1.2 V,比能量可达 55 Wh/kg,可快速充电,循环使用寿命长,但价格是铅酸蓄电池的 2 倍多;锂蓄电池体积小、比能量高,单体电池的平均电压可达 3.6 V,能量密度可达镍镉蓄电池的 1.5 ~ 3 倍,比能量一般能达到 100 Wh/kg,近年来锂电池开始被用作电动汽车的动力电池,但造价太高,市场小众化.

本设计的充电机主要针对铅酸蓄电池(胶体免维护和铅酸加液),后续工作的目标是再编程充电算法,以实现对其他类型电池的支持.为了实现充电机工作过程中电压、电流和其他参数的实时监控,以及多段式智能充电策略,设计引入电压、电流反馈环.充电机大致分为开关电源、检测控制及为

控制部分供电的辅助电源电路.

1.2 主要电路设计

依据充电机工作原理,可将充电机电路设计分为主电路、控制电路和辅助电源电路三部分.

1.2.1 主电路 输入整流滤波部分采用整流桥 KBPC-3510 将输入的市电初步整流为 310 V 的直流电,再经过大电容滤波,将直流电送到逆变电路部分.

图 1 所示是主电路的全桥逆变电路部分,采用由脉冲驱动变压器驱动的 IGBT 全桥隔离式降压电路,4 个 IGBT(T_1 — T_4)由图 2 所示的 2 个脉冲驱动变压器 TB_1 和 TB_2 驱动控制 4 个功率管的基极以控制它们的通断,采用 PWM 方式的逆变获得脉宽可调的高频交流电.

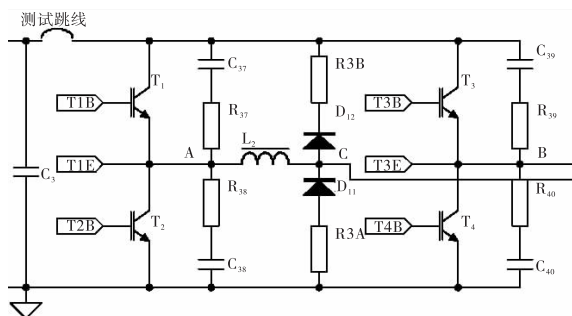


图 1 全桥逆变电路

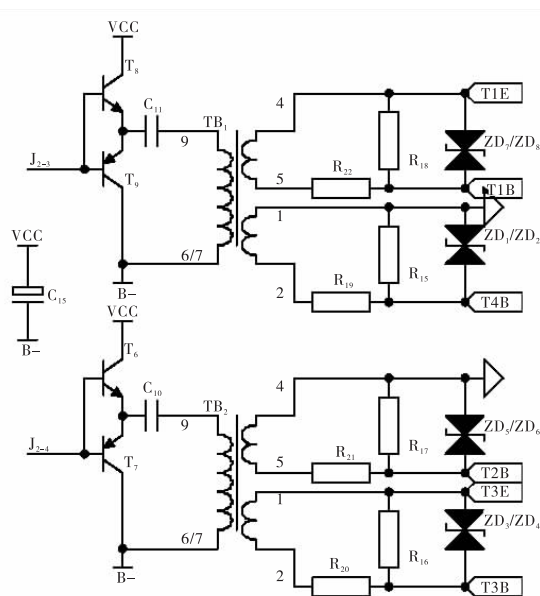


图 2 脉冲驱动变压器

TB_1 和 TB_2 负责驱动 T_1 — T_4 , 它们的信号来源是 UC3846N 的输出口 A 和 B, PWM 信号先经 T_6 — T_9 2 组三极管放大电路初步放大, 然后经过 TB_1 和

TB₂ 进一步放大从而得到用于驱动 IGBT 的 PWM 信号. 设计增加了瞬态抑制二极管 (ZD₁/ZD₂—ZD₇/ZD₈), 该二极管具有响应时间快、瞬态功率大、漏电流低、击穿电压偏差、箝位电压较易控制、无损坏极限、体积小等优点, 能有效保护驱动电路, 有效吸收造成器件损坏的脉冲.

图 3 是主变压器和输出整流滤波电路. 主变压器的输出经过输出电感和电容进一步处理后接入的蓄电池. 电压采集电路采集输出的直流电压作为电压反馈环, 即将采集到的蓄电池端电压信号处理后送到单片机内处理, 反馈的信号对充电电压进行实时调节.

1.2.2 控制电路 控制电路将采集到的蓄电池端电压、充电电流、温度等信息送到单片机进行分析处理, 得到相应的控制信号, 控制主电路 IGBT 的通断, 从而改变充电电流与充电电压. 同时, 充电过程

主板的过热保护是由电流互感器 CS 采集主变压器原边电流, 接到 UC3846N 的 C/S + 端和 C/S - 端, 进行主板过热保护.

图 4 和图 5 所示为直流电压、电流采集处理电路, 分别将采集到的蓄电池电压和充电电流进行转换和处理. 该电路主要通过运放将采集到的模拟量信号输入单片机, 单片机处理后输出 PWM 信号到开关电源控制器: IC₁₋₁₂ 和 IC₁₋₁₃ 分别接单片机的 2 路 PWM 波, 与采集到的电压、电流信号运算后接到 UC3846N 误差放大器的反相输入端 (6 引脚), 以实现 UC3846N 的控制.

图 4 所示电路中, 可调电阻 VR₃ 为输出电压调节, 采集到的蓄电池端电压提供单片机的电压模拟信号输入, 单片机将采集到的电压信号 A/D 转换后与程序中预先设置值作比较运算, 再输出 PWM 波到 UC3846N 的 6 引脚.

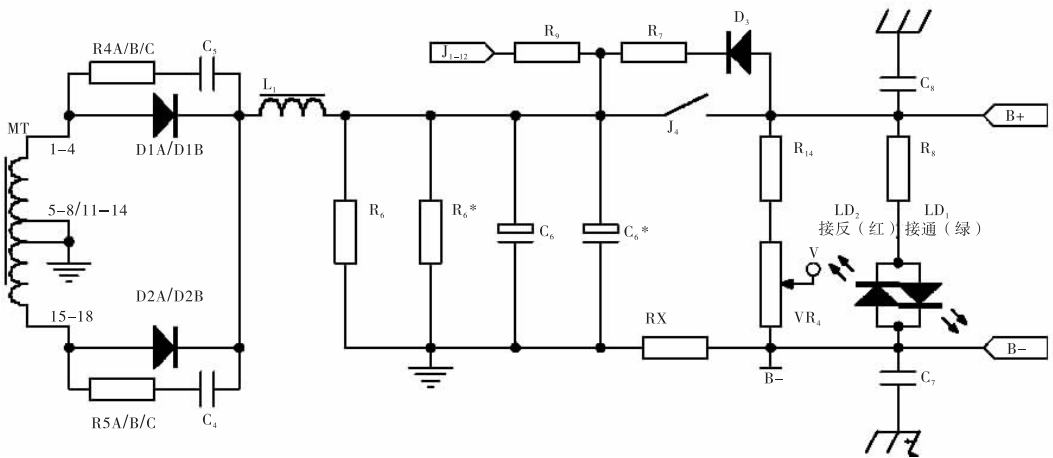


图 3 主变压器和输出整流滤波电路

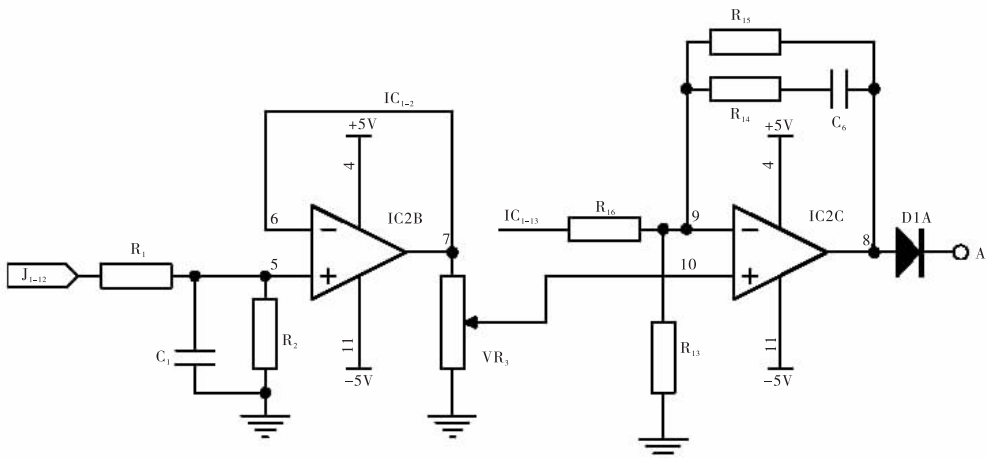


图 4 电压采集处理电路

图5所示电路中, J_{1-9} 接蓄电池负极, J_{1-10} 接地用作电流反馈, 电路将采集到的充电电流运算后输出接单片机电流模拟信号输入, 单片机将采集到的电流信号 A/D 转换后与程序中预先设置的值作比较运算后, 输出 PWM 波到 UC3846N 的 6 引脚。

图6和图7所示的控制芯片连接电路, 主要实现 PIC16F873A 对 UC3846N 的控制。单片机将电压、电流采集处理电路采集的信号处理后输出的电压、电流 PWM 控制信号输出到 UC3846N 的误差放大器的反相输入端, 经 UC3846N 处理后, 其输出端 A 和 B 分别接到主电路的 2 个 IGBT 脉冲驱动变压器驱动电路上, 以一定占空比控制 IGBT 的通断, 实现对逆变电路 4 个功率管的控制, 从而实现充电电流、电压的反馈控制。

2 充电控制策略

铅酸蓄电池的充电接受能力是指其电解液在只产生微量析气的前提下能够接受的最大充电电

流。1967 年美国的马斯(J. A. Mas) 经过大量实验提出了蓄电池充电的可接受定律^[3]:

$$I = I_0 e^{-at}$$

其中, I_0 为 $t=0$ 时的最大起始电流; I 为任意时刻可接受的充电电流; a 为衰减常数, 即充电接受比。铅酸电池可接受充电曲线如图8所示。

为了实现智能充电, 需在整個充电过程中动态跟踪蓄电池可接受的充电电流, 尽量使充电曲线符合图8所示的曲线, 应用电压跟随技术, 充电电源根据蓄电池的状态自动确定充电参数, 最终实现智能充电^[4]。智能充电机应能实现快速充电和均衡充电^[5-6]。快速充电是指用 1 C (C 是待充电蓄电池的额定容量) 以上的电流对蓄电池进行充电, 并在充电过程中不会产生大量气体、温升不会过高。典型的智能充电机快速充电模式是指 1 h 内可将蓄电池的电量充到 85%。

为了延长电池组的使用寿命, 本设计提出了均衡充电的方法, 充电时必须使串联蓄电池组中所有

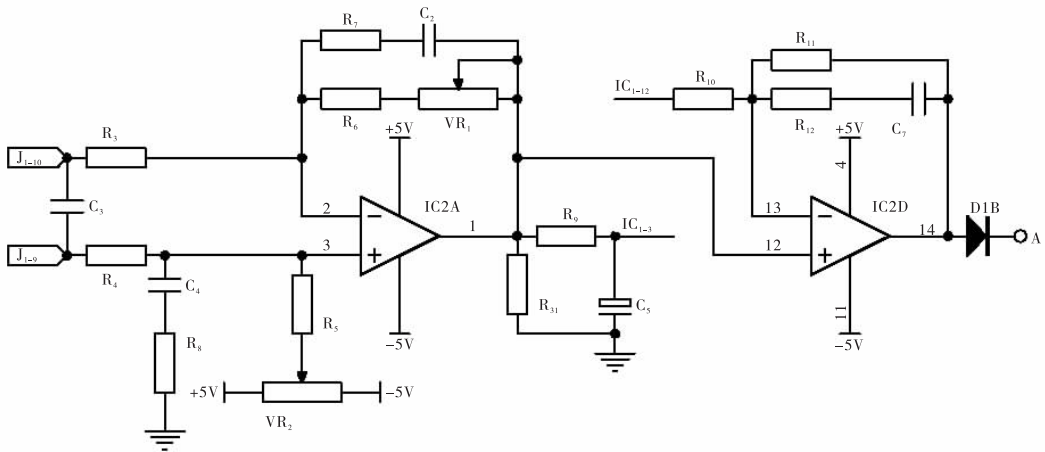


图5 电流采集处理电路

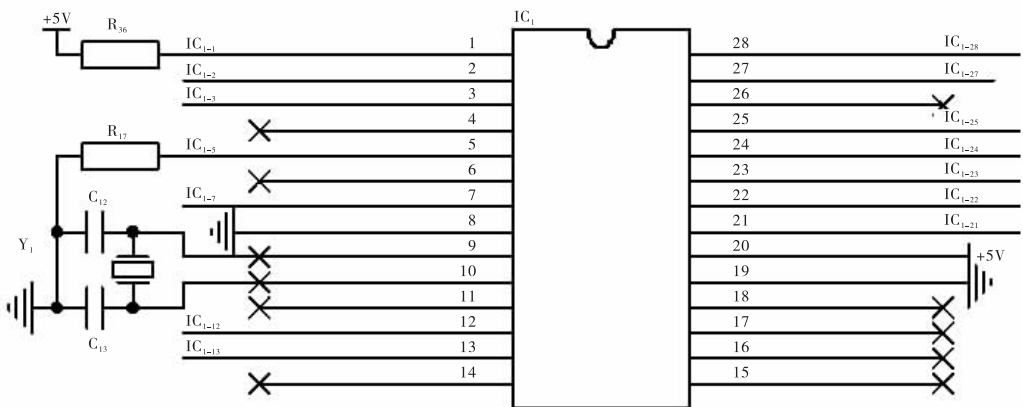


图6 控制芯片 PIC16F873A 连接电路

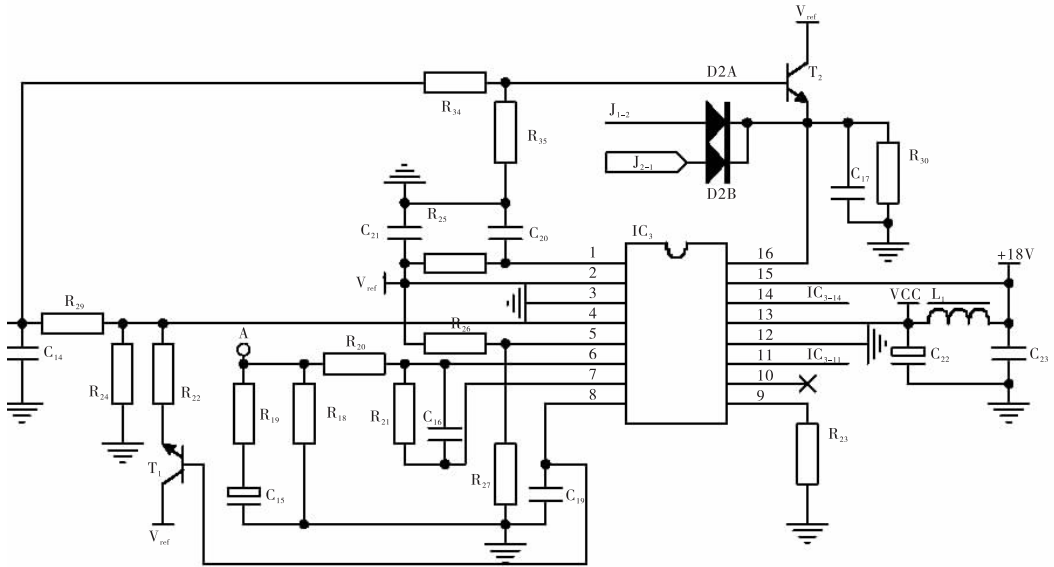


图 7 控制芯片 UC3846N 连接电路

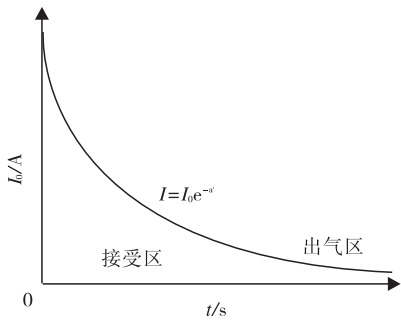


图 8 铅酸电池可接受的充电曲线

单体电池保持同样的放电深度,即每个单体电池保持在同一电平.为此,本设计采取的充电策略分 4 个阶段,即涓流短时充电、恒流快速充电、恒压均衡充电、浮充电.蓄电池在充电初期可能处于深度放电状态,为避免充电电流过大对蓄电池造成伤害, PIC16F873A 通过实时监控电池的端电压对蓄电池进行恒流小电流充电,以激活电池内的反应物,为下阶段快速充电做准备.此阶段蓄电池电压缓慢上升,当上升到能接受大电流充电的阈值时则进入快速充电阶段.充电机在恒流快速充电阶段以较大的恒定电流对蓄电池进行充电,蓄电池电压短时间内得以快速提升,这期间充电主板和电池的发热量比较大,对散热要求比较高,当蓄电池电压上升到恒压充电阶段阈值时则转入恒压充电阶段.恒压均衡充电阶段充电电压保持恒定,蓄电池容量很快恢复,充电电流逐渐减小,当电流下降到某一阈值时自动转到浮充电.浮充电阶段主要补充蓄电池自放电所消耗的能量,预示着充电过程即将结束.

图 9 所示为充电机充电软件流程, PIC16F873A 的软件模块主要采集传感器的输入信号,控制 UC3846N 处理异常状况.充电过程中程序主要完成下述功能:实时采集充电机的充电电压、充电电流、充电状态、充电时间、蓄电池端电压、温度等信息,送入 PIC16F873A 的控制单元;控制器根据预先的编程算法对采集的数据进行分析、比较、计算,选择合适的充电方式,得出相应的控制数据,对充电阶段进行判断和切换,控制 IGBT 功率管的通断,相应地控制主电路的输出电压和输出电流,完成对蓄电池的智能充电;充电过程中,系统自动检测是否出现未接电池、短路、主板过热、充电过压、过流等故障,若出现故障,则进行相关的处理和自保护措施.

再编程支持不同类型蓄电池的实现过程: PIC16F873A 与电池管理系统通信,获得电池组的类型、荷电状态、充放电电流、电池组的端电压等数据,然后从存储中读取这种类型蓄电池的充电参数、温度补偿系数、SOC 补偿系数,确定相应的充电方案.其中 PIC16F873A 的 24,27,28 引脚实现 ICSP (in-circuit serial programming) 片内串行编程功能,通过专用程序下载器再编程充电程序,下载到单片机中.

3 整机测试

为了验证该设计的有效性,对充电机主板进行如下测试和整机调试:上电前检查,接线,零点调试,功率管驱动波形测试,输出测试波形,热保护,装散热片打高压后复测,调整最大输出电压,调整最大输出电流等.测试结果表明,功率管驱动波形

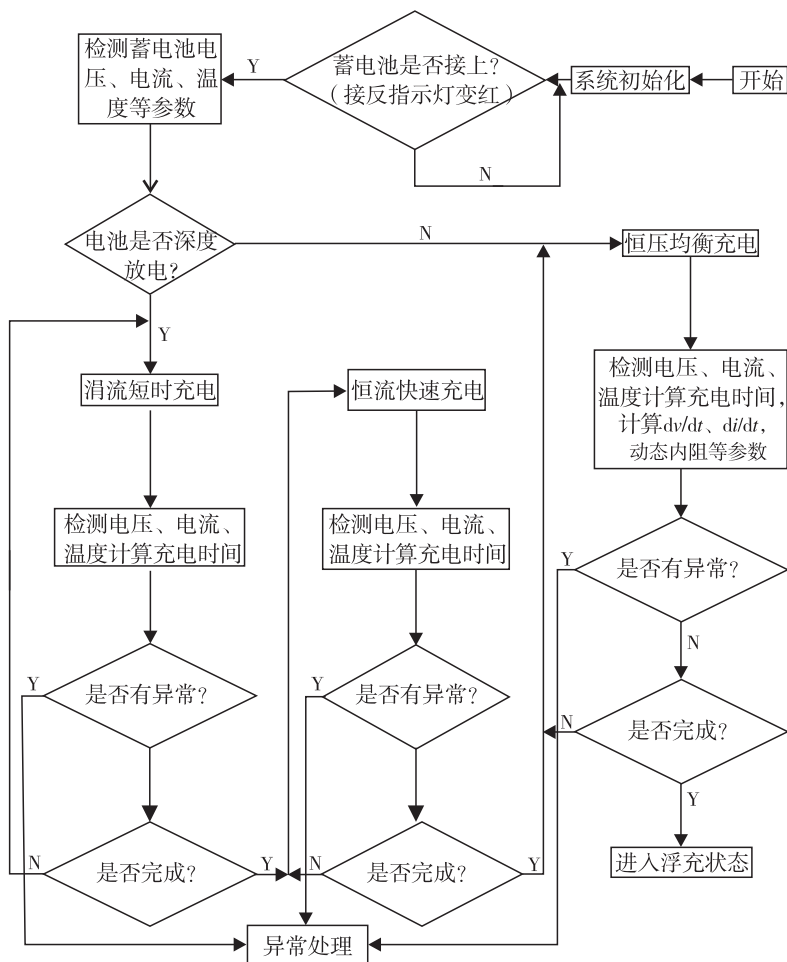


图9 充电机充电软件流程

稳定,频率(25 ± 2.5) kHz,驱动电压 ± 15 V;调节 VR_3 使输出波形(重载)稳定,上下对称;调节 VR_3 使输出波形(轻载)稳定,上下对称。

经测试,充电机具有下列参数特性:输入市电(220 ± 22) V,即198~242 V;输出电压范围36~86 V;输出电流范围25~50 A;功率因数 >0.99 ;充电噪声 <20 dB;充电效率 $>90\%$ 。

输出电压范围支持市面上常见的电池组合,输出大电流支持快速充电,整体输出低电压和大电流对电池的伤害较低。功率因数表明充电机工作过程中不会产生太多的无功功率。本设计采用风冷散热,整体噪音比较小,对周围环境的影响较小,整机充电效率和充电转换率符合行业标准。

4 结论

本文基于单片机 PIC16F873A 和开关电源控制器 UC3846N,引入电压反馈环和电流反馈环,采用四段式充电策略,设计了一种便携式电动汽车车载智能充电机,该充电机可以实现快速充电、均衡充

电、主板过热保护等功能,充电过程中可对输出电压、电流、温度等参数实时监控,调整充电电压、电流使其尽量符合蓄电池的最佳充电曲线,实现智能充电。后续研究工作的重点是编写不同的程序,以实现对不同类型蓄电池的支持。

参考文献:

- [1] 朱松然. 铅蓄电池技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002:315-320.
- [2] 江友华,童勇,曹以龙. 电动汽车智能充电器的设计与实现[J]. 电力电子技术,2012(2):38.
- [3] 罗书克,张元敏. 正负脉冲式电动汽车快速充电站的研究[J]. 电气自动化,2011(4):72.
- [4] 王莹莹,冯冬青,赵红蕊. 通用型电动汽车蓄电池智能充电机设计[J]. 电源技术,2011(8):922.
- [5] 苏玉刚,夏永峰,陈强,等. 电动汽车用铅酸电池组的智能充电[J]. 重庆工学院学报:自然科学版,2008,22(2):6.
- [6] 郑帅,王亚威,陈翠丽,等. VRLA 蓄电池并联充电技术研究[J]. 电源技术,2014(7):1276.

一种改进型微弱电流低噪声放大应用电路

姜利英, 岳保磊, 梁茂, 周鹏磊, 肖小楠

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对微弱电流信号检测技术存在的背景噪声、电路噪声、元器件噪声等的干扰往往大于信号本身,从而影响测量结果准确性的问题,设计了一种微弱电流低噪声信号放大应用电路.该设计采用高精度、小阻值的反馈电阻和高性能运算放大器 AD795 对 T 型 I/V 转换电路进行改进,选用高性能分立元件搭建前置放大电路,进而基于调制-解调原理设计锁相放大电路.软件仿真结果表明,电路具有较强的噪声抑制能力和稳定性,可以满足各种传感器微弱信号的测量要求.

关键词:微弱电流;低噪声;T型 I/V 转换;前置放大;锁相放大

中图分类号:TP216 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.026

An improved weak current low noise amplifier application circuit

JIANG Li-ying, YUE Bao-lei, LIANG Mao, ZHOU Peng-lei, XIAO Xiao-nan

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to solve the problem in weak current signal detection technology that the interference of background noise, circuit noise and component noise is stronger than signal itself, a weak current low noise amplifier application circuit was designed. The model improved T-type I/V conversion circuit by adopting high precision and small resistance value feed back resistance and high performance operational amplifier AD795, set up preamplifier circuit by high performance discrete elements and designed phase-locked amplifier circuit based on modulation and demodulation principle. The simulation analysis showed that the circuit had higher noise suppression capability and stability and could meet the weak current measurement requirement of various sensors.

Key words: weak current; low noise; T-type I/V conversion; preamplifier; phase-locked amplifier

0 引言

随着传感器及检测技术的发展,微弱电流检测技术在许多领域都展示了广泛的应用前景,例如核酸适体浓度、光电信号、小位移、微流量、微振动等,其检测都要通过相应的传感器将其转化为微电流信号,再经过放大器放大显示被测量信号的大小^[1].但测量中产生的背景噪声、电路噪声和元器

件噪声的干扰往往大于微弱电流信号本身,从而影响测量结果的准确性.因此,高精度低噪声放大电路的设计非常必要.

传统的微弱电流放大应用电路受温度漂移和噪声影响较大,制约着高灵敏度自动化仪表及检测装置的运用和发展.本文拟针对传统微弱电流放大应用电路的误差成因,根据低噪声原则,在对 T 型 I/V 转换电路、前置放大电路进行改进的基础上,基

于调制-解调原理设计锁相放大电路,从而构成改进型微弱电流低噪声放大应用电路,以实现经过该放大电路的噪声均能达到各种被测信号放大处理标准的目的。

1 T型 I/V 转换电路

传统的 I/V 转换电路由运算放大器和反馈电阻 R_f 并联组成,如图 1 所示,输出电压 $V_{out} = -I_{in} R_f$,反馈电阻和运算放大器决定了 I/V 转换能力和转换精度。

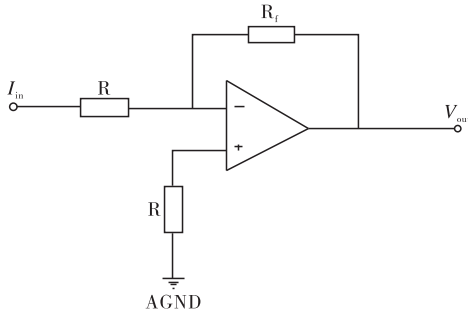


图 1 传统 I/V 转换电路图

图 1 所示的 I/V 转换电路在实际运用中运算放大器的性能达不到理想状态:受失调电压 U_{10} ,失调电流 I_{10} ,输入偏置电流 I_{1B} ,以及温度漂移的影响而产生误差^[2]。误差影响分析模型等效电路如图 2 所示。

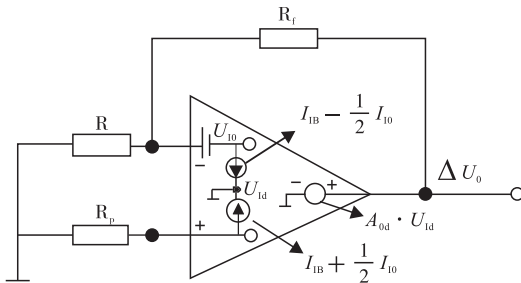


图 2 误差影响分析模型等效电路图

利用平衡电阻 $R_p = R/R_f$, 并采用调零电路适当改变 I_{10} , 可以消除 I_{1B}, I_{10}, U_{10} 所带来的误差, 但失调电压温度漂移 ΔU_{10} 和失调电流温度漂移 ΔI_{10} 所引起的误差是导致 I/V 转换电路出现误差的原因, 其输出误差电压^[3]

$$\Delta U_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) (\Delta U_{10} - R_p \Delta I_{10}) \quad (1)$$

其中, $\Delta U_{10} = \frac{dU_{10}}{dT} \Delta T, \Delta I_{10} = \frac{dI_{10}}{dT} \Delta T$, 整理①式得到最大误差电压值为

$$\Delta U_{0max} = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left| \frac{dU_{10}}{dT} \Delta T \right| + R_f \left| \frac{dI_{10}}{dT} \Delta T \right| \quad (2)$$

根据式②可知,降低 $\Delta U_{10}, \Delta I_{10}$ 和 R_f 的值,可以有效减少 ΔU_{0max} 。为了提高 I/V 电路的转换能力,应增大 R_f 值,但较大的阻值会产生精度降低、温度漂移加大、噪声干扰增强等现象。选用高性能(失调温漂较小)的运算放大器能降低 ΔU_{10} 和 ΔI_{10} ,从而降低 ΔU_{0max} ,但降低 R_f 值又会影响 I/V 转换能力。

采用高精度、小阻值的反馈电阻和高性能运算放大器 AD795 对传统的 I/V 转换电路进行改进,得到图 3 所示的微弱电流 T 型 I/V 转换电路,该电路可满足电流转换电压后的幅度要求。

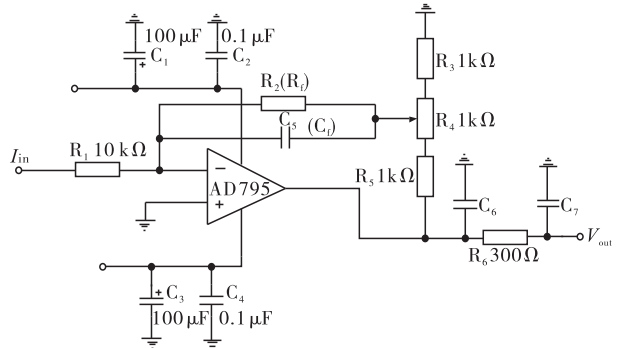


图 3 改进的微弱电流 T 型 I/V 转换电路图

该电路的总反馈电阻

$$R = -\frac{R_2 + R'_4 + R_5}{R_1} \left[1 + \frac{R_2 // (R''_4 + R_5)}{R_3 + R_4} \right]$$

其中, R'_4 表示 R_4 上半部分电阻, R''_4 表示 R_4 下半部分电阻, R_2 的输出端接到电阻分压器 R_4 上, 构成了部分负反馈。图 3 电路采用小阻值的电阻就可以得到足够大的反馈电阻, 解决传统 I/V 转换电路中 R_f 过大导致的温度漂移误差和噪声干扰问题。在电阻 R_2 上并联的积分电容 C_5 有抑制瞬间电磁干扰和相位补偿的作用, 电容值的选择要适当, 太小会影响电路的低频特性, 太大会增大反应时间^[4]。 C_6, C_7, R_6 构成 Π 型滤波器以平滑输出电压, 降低干扰和噪声。

2 前置放大电路

微弱信号的放大和转化需要多级电路级联才能实现, 根据费里斯公式

$$F = F_1 + (F_1 - 1)/K_1 + (F_2 - 1)/(K_1 \times K_2) + \dots + (F_n - 1)/(K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n) \quad (3)$$

可知, 放大电路的性能主要取决于前置级, 降低前置级噪声系数, 整个微电流检测系统就可获得良好的低噪声性能。式③中, F 表示系统噪声, F_i 表示各级放大电路的噪声系数 ($i = 1, 2, \dots, n - 1$), K_i 表示

每一级放大电路的功率增益^[5]。

传统的前置放大电路与图 1 所示的 I/V 转换电路相似,只是把输入电流 I_{in} 变为输入电压 U_{in} 。放大电路的放大倍数 $A_u = -R_f/R$,由于传感器输出的是微弱信号,故放大倍数要求较大。在 R 不能减小的情况下,要提高放大倍数就必须增加 R_f 的值,假如输入电阻 $R = 100\text{ k}\Omega$,前置放大电路放大倍数要达到 10 倍以上, R_f 的值至少为 $1\text{ M}\Omega$,超过 $1\text{ M}\Omega$ 的电阻精度很差、噪声较高,会产生较大的测量误差,同时传统的放大电路对共模噪声信号的抑制能力也较差。

鉴于传统放大电路存在的缺点,选用高性能的分立元件搭建了前置级放大电路如图 4 所示。

图 4 所示电路中,电阻选用精度为 $\pm 0.1\%$ 的金属膜电阻且阻值都不超过 $100\text{ k}\Omega$;电容选用聚丙烯电容(CBB),CBB 频率特性优异(频率响应宽广),而且介质损失很小;场效应管选用热稳定性好、输入阻抗高、噪声系数小的 JEET 型^[6]。 C_6, D_1, D_2, D_3, D_4 构成滤波限幅电路,输入信号通过电容滤除其中的直流分量,不让直流信号影响场效应管的静态工作点,同时限制输入电压值,防止信号过大烧毁器件,限幅电路将输入电压控制在 $\pm 0.6\text{ V}$ 之内。性能相同的 JEET 型场效应管 Q_1 和 Q_2 构成差分式放大电路,无论是温度变化、噪声干扰,还是电源电压的波动都会引起两管漏极电流变化,差分电路的对称性对共模干扰具有很强的抑制作用,从而抑制零点

漂移。 Q_4 形成共集电极放大电路,对信号进一步放大, Q_5 形成共集电极电路使输入输出信号同相, C_4 和 R_9 形成 RC 滤波器滤除直流成分。

前置级放大电路输入输出信号波形如图 5 所示,输入信号是幅度为 10 mV ,频率为 10 kHz 的正弦波,在示波器中为 A 通道波形。输出信号为 B 通道波形,输出波形与输入波形同相, $A_u \approx 50$ 。因此,改进后的放大电路比传统的放大电路性能更稳定,容易得到较大的放大倍数。

在 Multisim 搭建如图 4 所示的电路进行噪声仿真,仿真结果如图 6 所示,由于图 6 所示的最大噪声为 $10^{-18}\text{ V}^2/\text{Hz}$,换算成噪声标准单位为 $10^{-9}\text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$,证明前置放大电路具有很强的抑制噪声能力。

3 锁相放大电路

在对 T 型 I/V 转换电路和前置放大电路进行改进的基础上,还需要设计锁相放大电路以实现去噪的目的。

锁相放大过程为:用调制器将待测微弱直流或缓慢变化信号变换成高频交流信号,对其放大后再解调恢复出原始信号。该过程滤除了原信号中的低频噪声($1/f$ 噪声),同时避免了直流感应器的直流漂移偏差。锁相放大器的基本结构如图 7 所示,由信号通道、参考通道、相敏检测器(PSD)和低通滤波器(LPF)等构成^[7]。

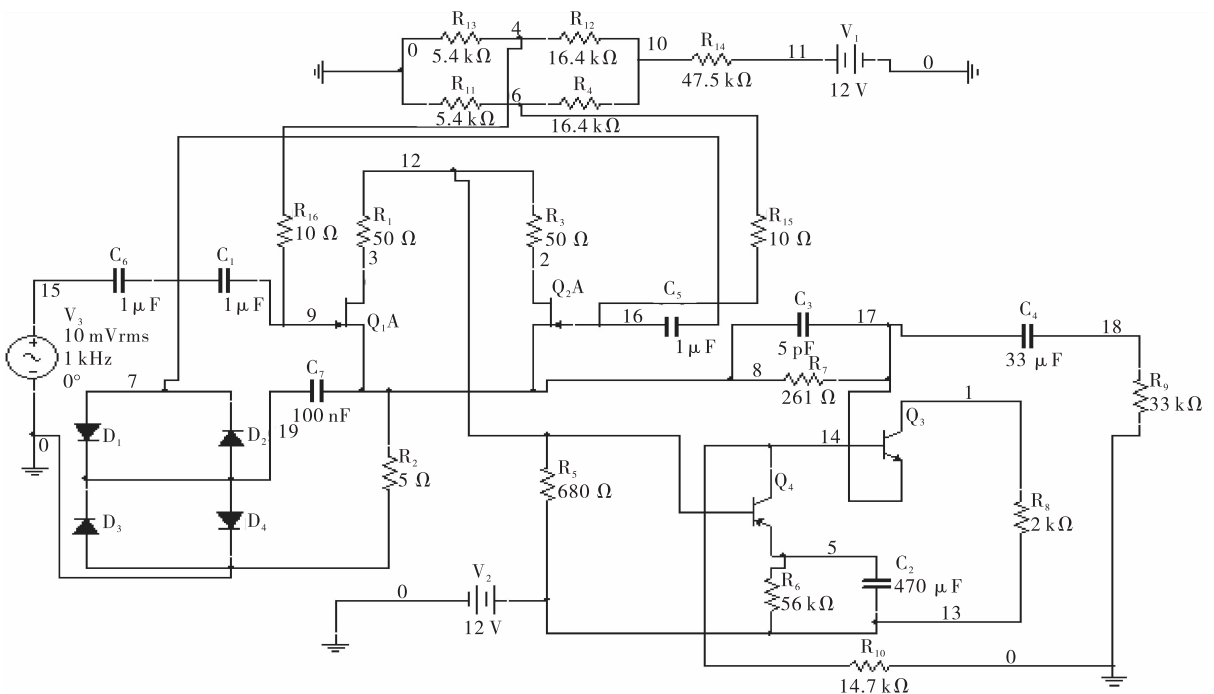


图 4 前置级放大电路图

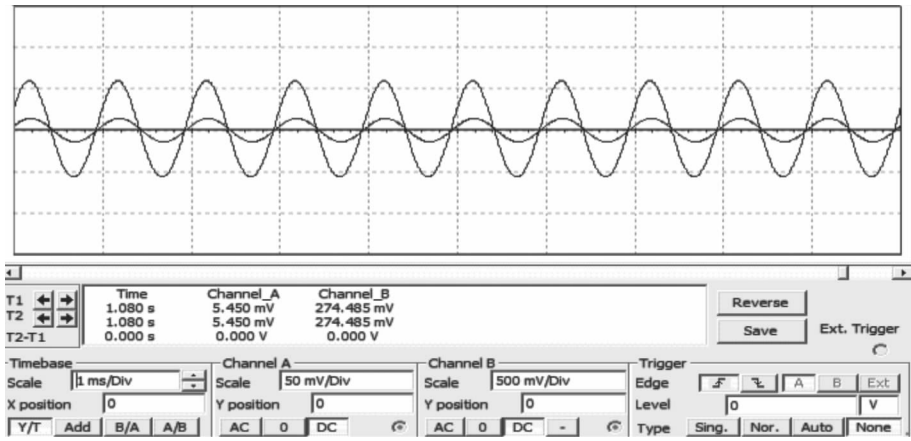


图5 输入输出信号波形图

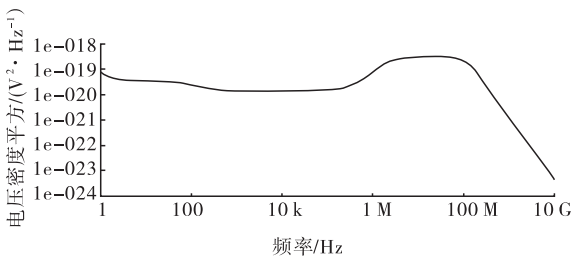


图6 噪声仿真波形图

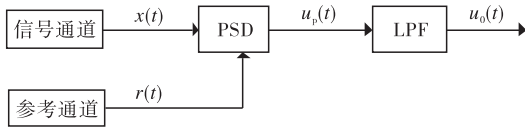


图7 锁相放大器的基本结构图

本电路的输入信号为 10 kHz 正弦信号与前端低频信号调制后的信号,参考信号为 10 kHz 的正弦信号.在信号通道内对调制信号进行交流放大以满足相敏检测工作电压的要求,再由带通滤波器滤除其他频率信号干扰,相敏解调后的信号通过低通滤波器恢复出待测低频信号,从而实现频带搬移,消除低频噪声.以相敏解调芯片 AD630 为核心搭建的相敏检测电路如图 8 所示.

参考信号 $x(t)$ 为 $V_s \cos(\omega_0 t + \theta)$, 噪声信号为 $V_n \cos(\omega_n t + \alpha)$, 参考信号 $r(t)$ 为 $V_r \cos \omega_0 t$ 经过解调后的信号为

$$u_p(t) = x(t)r(t) = 0.5V_s V_r \cos(\omega_0 t + \theta) + 0.5V_s V_r \cos(2\omega_0 t + \theta) + 0.5V_n V_r \cos[(\omega_0 + \omega_n)t + \alpha] + 0.5V_n V_r \cos[(\omega_n - \omega_0)t + \alpha] \quad (4)$$

式④右边的第 1 项为调制信号与参考信号的差频项,第 2 项为调制信号与参考信号的和频项,第 3 项为噪声与参考信号的和频项,第 4 项为噪声与参考信号的差频项.经过低通滤波器后,输出为第 1 项和第 4 项中 $|\omega_n - \omega_0| < B_L$ (B_L 为 LPF 的等效噪声带宽)的噪声,只要 LPF 的等效噪声带宽足够窄,就可以得到满意的信噪比.

根据锁定放大器的原理,利用 Matlab 软件搭建的仿真电路如图 9 所示,仿真波形如图 10 所示.图 10a) 所示波形为缓慢变化的待测信号与正弦载波信号进行调制的信号,加上图 10c) 所示的高斯噪声信号得到如图 10d) 所示的输入信号,输入信号与图 10b) 所示的参考信号(与载波信号同频同相)进入相敏解调器,相乘解调后得到图 10e) 所示的相敏检波信号.相敏检波信号含有多种频率的信号,根据

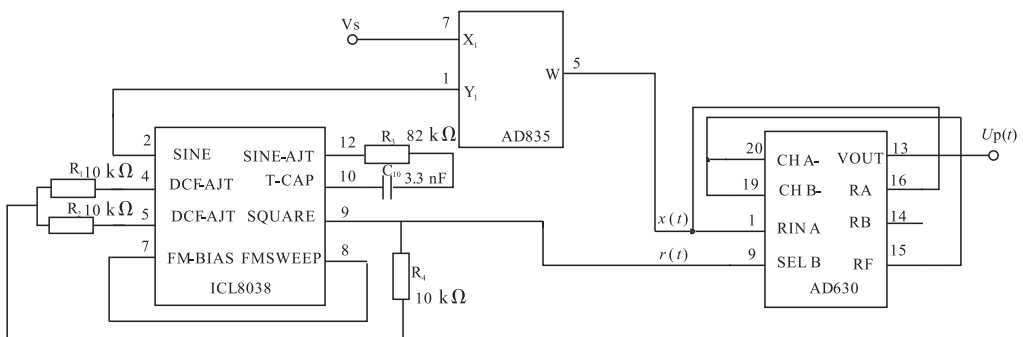


图8 相敏检测电路图

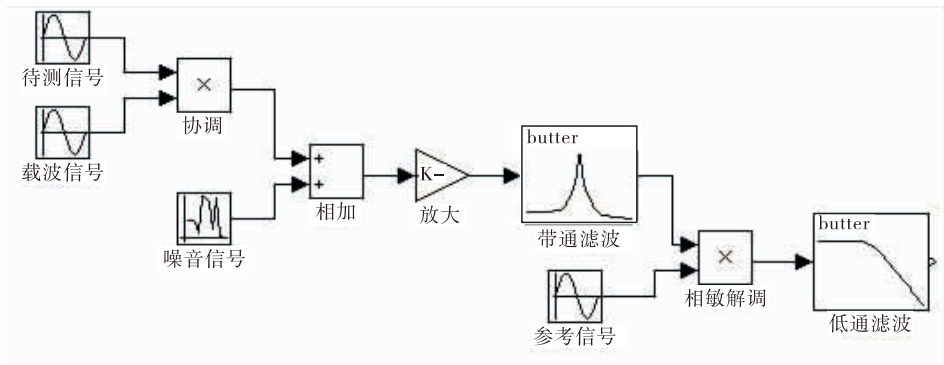


图9 锁定放大器仿真电路图

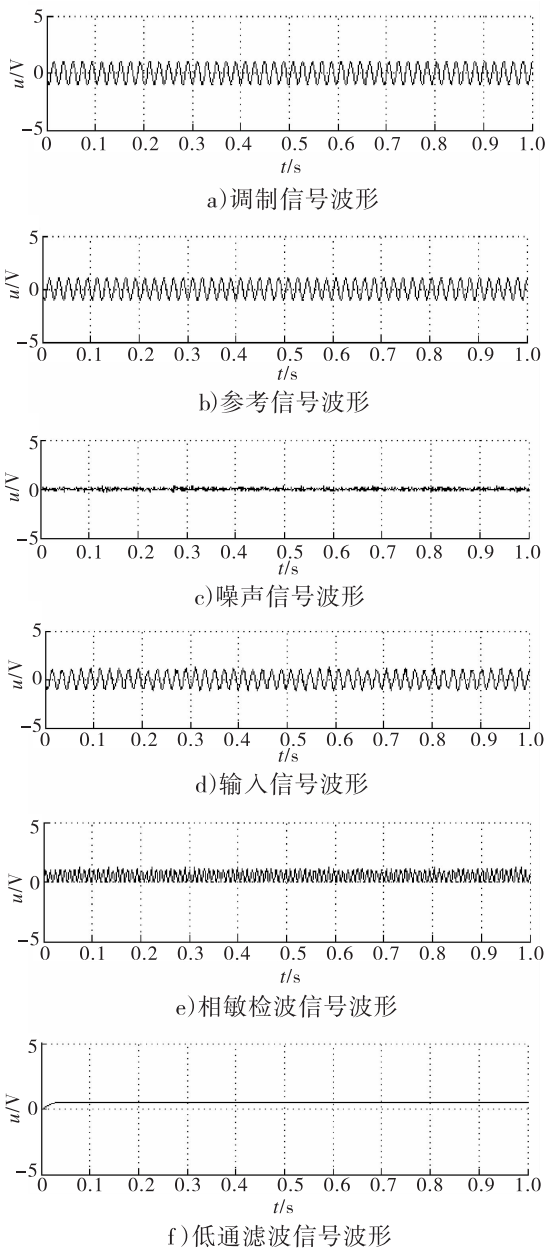


图10 仿真波形图

待测信号的频率设置相应的 LPF 截止频率, 经过 LPF 滤除其他频率的信号后, 剩下如图 10f) 所示的待测信号. 通过仿真分析可知, 锁相放大器保存了待测信号的信息, 高斯噪声信号全部被抑制, 较大地提高了微弱电流信号检测系统的信噪比.

4 结论

本文对传统 T 型 I/V 转换电路、前置放大电路进行改进的基础上, 基于调制 - 解调原理设计了锁相放大电路. 仿真结果表明, 该电路具有较高的共模抑制比和较强的噪声抑制能力, 能满足各种传感器微弱信号的测量要求, 解决了传统微弱电流信号检测技术存在的背景噪声、电路噪声、元器件噪声等的干扰往往大于信号本身, 从而影响测量结果准确性的问题. 此外, 该电路具有很强的扩展能力, 不仅可用于微弱电流信号测量, 还可以应用于光谱分析、RLC 阻抗分析等, 具有较高的实用价值.

参考文献:

- [1] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2011: 7-12.
- [2] 刘鹏民, 莫德举. T型反馈电阻网络在微弱信号放大电路中的应用[J]. 电测与仪表, 2009, 12(36): 31.
- [3] 李圣昆, 郑永秋, 安盼龙, 等. T型反馈网络在谐振式光纤陀螺频率锁定中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1161.
- [4] 张金利, 景占荣, 梁亮, 等. 微弱信号的调理电路设计和噪声分析[J]. 电子测量技术, 2007, 30(11): 40.
- [5] [美] W·O·亨利. 电子系统噪声抑制技术[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1978: 209-239.
- [6] 侯跃新, 周东亮, 肖丹, 等. 传感器弱信号的放大应用电路[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(11): 65.
- [7] 姜利英, 胡杰, 陈青华, 等. 基于核酸适体传感器的便携式循环伏安测试系统[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2014, 29(2): 38.

一种新六维 Duffing-Lu 超混沌系统的同步控制

王东晓

(郑州航空工业管理学院 数理系, 河南 郑州 450015)

摘要:针对一种新六维 Duffing-Lu 超混沌系统的同步问题,基于 Lyapunov 稳定性理论,分别采取非线性同步控制和线性同步控制两种方案,通过选取合适的控制器参数(m)值,使 $A + mI$ 为正定矩阵从而实现同步. Matlab 数值仿真结果表明,在采用相同参数、相同初始值的情况下,两种方案均可实现同步,其中线性同步控制的控制器更为简单,且可以实现参数识别.

关键词:六维 Duffing-Lu 超混沌系统;混沌同步控制;Lyapunov 稳定性理论

中图分类号:TP27 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.027

Synchronization control of a new six-dimensional Duffing-Lu hyper-chaotic system

WANG Dong-xiao

(Department of Mathematics and Physics, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Aiming at synchronization problem of a new six-dimensional Duffing-Lu hyper-chaotic system, a new controller was designed through two different methods of synchronization control and non-synchronization control based on the Lyapunov stability theory. By choosing proper parameter (m) to set $A + mI$ as positive definite matrix, synchronization was realized. Matlab numerical simulations results showed that both the methods could realize synchronization on the condition of the same parameter and same initial value, and the synchronization controller was proved to be simpler and could realize parameter identification.

Key words: six-dimensional Duffing-Lu hyper-chaotic system; chaotic synchronization control; Lyapunov stability theory

0 引言

生活中混沌现象几乎无处不在,为求解混沌问题,混沌理论研究从20世纪开始就引起科技工作者的广泛关注,实验中观察到的混沌同步现象^[1-2],拉开了混沌同步研究的序幕.混沌同步在诸多领域具有广泛的应用前景,实现混沌同步的

方法也多种多样.新的混沌系统不断被发现^[3-7],通过整合已知的混沌系统能不断得到新的超混沌系统^[8-9],超混沌系统、多翼混沌系统、高维混沌系统成为混沌研究领域新的热点.其中,超混沌具有更加复杂的拓扑结构,其同步虽然更难以实现,但更具有实际意义.

本文拟对一个新六维 Duffing-Lu 超混沌系

收稿日期:2015-01-08

基金项目:河南省基础与前沿技术研究计划项目(142300410410);河南省教育厅项目(2011B110030)

作者简介:王东晓(1974—),男,河北省威县人,郑州航空工业管理学院讲师,主要研究方向为动力系统及其应用.

统^[9]的同步问题进行研究,设计同步方案,给出理论证明,并通过数值仿真验证该方案的有效性与可行性.

1 一种新的六维混沌系统

基于混沌系统的可加性,对 Duffing 混沌系统和 Lu 混沌系统进行整合^[8],得到一个新的六维 Duffing-Lu 超混沌系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a(x_2 - x_1) + bx_6 \\ \dot{x}_2 = -x_1x_3 + cx_2 \\ \dot{x}_3 = x_1^2 - dx_3 \\ \dot{x}_4 = x_5 \\ \dot{x}_5 = -ex_5 - x_4^3 + f\cos x_6 \\ \dot{x}_6 = gx_2x_3 \end{cases} \quad (1)$$

当系统参数取值 $a = 36, b = 1, c = 20, d = 3, e = 0.6, f = 3, g = 1$ 时,对应 Lyapunov 指数为 1.22, 0.16, -0.38, -0.54, -1.17, -18.85, 系统为超混沌态. 其吸引子见图 1.

电路设计者经常会遇到不确定的输出波形,一般认为是由电路产生的自激振荡和噪声干扰所致,而经研究表明,此时电路处于混沌态. 高维混沌系统具有比低维系统更加复杂的拓扑结构,相对而言增大了同步的难度. 本文整合的新六维 Duffing-Lu 超混沌系统 (1), 含有三次项、交叉项、三角函数,这是造成同步困难的原因所在. 即使实现了同步,在构造的同步方案中,控制器也非常复杂. 本文尽可能构造简单的控制器来实现系统 (1) 的同步.

2 六维 Duffing-Lu 超混沌系统的同步构造

以 $\dot{x} = f(t, x)$ 为驱动系统, $\dot{y} = g(t, y) + u(t, x, y)$ 为响应系统,其中 $x, y \in R^n$ 为状态变量, $f, g: R^n \rightarrow R^n$ 为非线性映射, $u(t, x, y)$ 为控制器,记系统误差 $e_i = y_i - x_i$,误差系统为

$$\dot{e} = g(t, y) - f(t, x) + u(t, x, y)$$

如果所设计控制器 u 使 Lyapunov 函数 $V = 0.5(e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2)$ 对 t 的导数中仅含有二次误差量(不考虑 x),由混沌系统的有界性可知,适当放缩可使 $\dot{V} < -E^T A E$,其中 A 为对称矩阵,如果特征值均小于 0,取 $m = 0$,此时已经同步;如果存在负特征

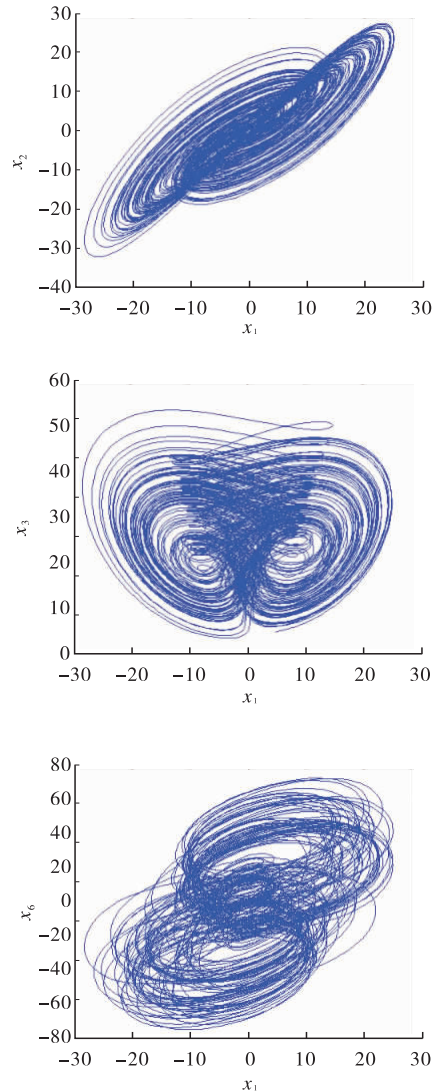


图 1 系统 (1) 的吸引子

值,取 m ,使得 m 大于最小负特征值的绝对值,重新取 $u - me$ 为控制器,此时有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$,即系统同步.

2.1 非线性同步控制

以系统 (1) 作为驱动系统,响应系统为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = a(y_2 - y_1) + by_6 + U_1 \\ \dot{y}_2 = -y_1y_3 + cy_2 + U_2 \\ \dot{y}_3 = y_1^2 - dy_3 + U_3 \\ \dot{y}_4 = y_5 + U_4 \\ \dot{y}_5 = -ey_5 - y_4^3 + f\cos y_6 + U_5 \\ \dot{y}_6 = gy_2y_3 + U_6 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $U_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为控制器,误差变为 $e_i (i = 1, 2, \dots, 6)$,系统 (1)(2) 的误差系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = ae_2 - ae_1 + be_6 + U_1 \\ \dot{e}_2 = -e_1e_3 - e_1x_3 - x_1e_3 + ce_2 + U_2 \\ \dot{e}_3 = e_1(e_1 + x_2) - de_3 + U_3 \\ \dot{e}_4 = e_5 + U_4 \\ \dot{e}_5 = -ee_5 - (y_4^3 - x_4^3) + \\ f(\cos y_6 - \cos x_6) + U_5 \\ \dot{e}_6 = g(e_2e_3 + x_2e_3 + e_2x_3) + U_6 \end{cases} \quad (3)$$

当选取如下控制器 $U_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 时, 误差系统在0处是稳定的, 即驱动系统①与响应系统②同步。

$$\begin{cases} U_1 = -me_1 \\ U_2 = e_1e_3 - me_2 \\ U_3 = -e_1^2 - me_3 \\ U_4 = -me_4 \\ U_5 = 3x_4e_4^2 + e_4^3 - me_5 \\ U_6 = -e_2e_3 - me_6 \end{cases} \quad (4)$$

其中 m 为待定常数. 选取 Lyapunov 函数

$$V = 0.5(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2)$$

由误差系统③和控制器④, 以及系统成混沌态时取定的系统参数和

$$\begin{aligned} & |\cos y_6 - \cos x_6| = \\ & 2 \left| \sin \frac{y_6 + x_6}{2} \sin \frac{y_6 - x_6}{2} \right| \leq |y_6 - x_6| \end{aligned}$$

可得 Lyapunov 函数的导数

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + e_3\dot{e}_3 + e_4\dot{e}_4 + e_5\dot{e}_5 + e_6\dot{e}_6 = \\ & -ae_1^2 + ce_2^2 - de_3^2 - ee_5^2 + (a - x_3)e_1e_2 + \\ & 2x_1e_1e_3 + be_1e_6 - x_1e_2e_3 + gx_3e_2e_6 + gx_2e_3e_6 + \\ & (1 - 3x_4^2)e_4e_5 + f(\cos y_6 - \cos x_6)e_5 - \\ & m(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2) \leq \\ & -[36|e_1|^2 - 20|e_2|^2 + 3|e_3|^2 + 0.6|e_5|^2 - \\ & (36 + |x_3|)|e_1||e_2| - 2|x_1||e_1||e_3| - |e_1||e_6| - \\ & |x_1||e_2||e_3| - |x_3||e_2||e_6| - |x_2||e_3||e_6| - \\ & |1 - 3x_4^2||e_4||e_5| - |e_5||e_6|] - m(|e_1|^2 + \\ & |e_2|^2 + |e_3|^2 + |e_4|^2 + |e_5|^2 + |e_6|^2) \end{aligned}$$

当系统处于混沌态时, 由混沌系统的有界性可以得到

$$\begin{aligned} 36 + |x_3| &< 136 & |x_1| &< 40 & |x_2| &< 60 \\ |x_3| &< 100 & |x_5| &< 2 \\ |x_6| &< 10 & |1 - 3x_4^2| &< 8 \end{aligned}$$

从而

$$\dot{V} < -E^T A E -$$

$$m(|e_1|^2 + |e_2|^2 + |e_3|^2 + |e_4|^2 + |e_5|^2 + |e_6|^2) = -E^T(A + mI)E$$

其中, I 为六阶单位矩阵, 此外,

$$E = \begin{pmatrix} |e_1| \\ |e_2| \\ |e_3| \\ |e_4| \\ |e_5| \\ |e_6| \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 36 & -68 & -40 & 0 & 0 & -0.5 \\ -68 & -20 & 0 & 0 & 0 & -50 \\ -40 & 0 & 3 & 0 & 0 & -20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4 & 0.6 & -0.5 \\ -0.5 & -50 & -20 & 0 & -0.5 & 0 \end{pmatrix}$$

用 Matlab 计算矩阵 A 的 6 个特征值, 分别为 $-94.4861, -3.7350, -3.4309, 4.3017, 12.7814, 104.1689$, 取控制器中参数 $m = 95$, 则 $A + mI$ 的特征值为 $0.5139, 91.2650, 91.5691, 99.3017, 107.7814, 199.1689$, 矩阵 $A + mI$ 为正定矩阵, V 是负定的, 误差系统在原点全局渐进稳定, 即系统①和系统②完全同步。

基于 Matlab 软件构建同步仿真系统, 四阶龙格-库塔法方法求解, 得出同步控制过程的模拟结果. 系统状态变量初始值取 $x(i) = 5, y(i) = -5, i = 1, 2, \dots, 6$. 图 2 分别为系统①②状态变量的相图与同步误差曲线。

2.2 线性同步控制

上述控制器 U_i 中含有 e_i 且有交叉项, 而控制理论的一个基本常识是: 控制器中状态变量越少, 则控制方案越简单有效. 在实际问题中, 更多的时候系统参数是未知的, 因此笔者尝试对控制器进行简化, 并对参数进行识别. 考虑系统

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = a_0e_2 - a_0e_1 + b_0e_6 + U_1 \\ \dot{y}_2 = -e_1e_3 - e_1x_3 - x_1e_3 + c_0e_2 + U_2 \\ \dot{y}_3 = e_1(e_1 + x_2) - d_0e_3 + U_3 \\ \dot{y}_4 = e_5 + U_4 \\ \dot{y}_5 = -e_0e_5 - (y_4^3 - x_4^3) + \\ f_0(\cos y_6 - \cos x_6) + U_5 \\ \dot{y}_6 = g_0(e_2e_3 + x_2e_3 + e_2x_3) + U_6 \end{cases} \quad (5)$$

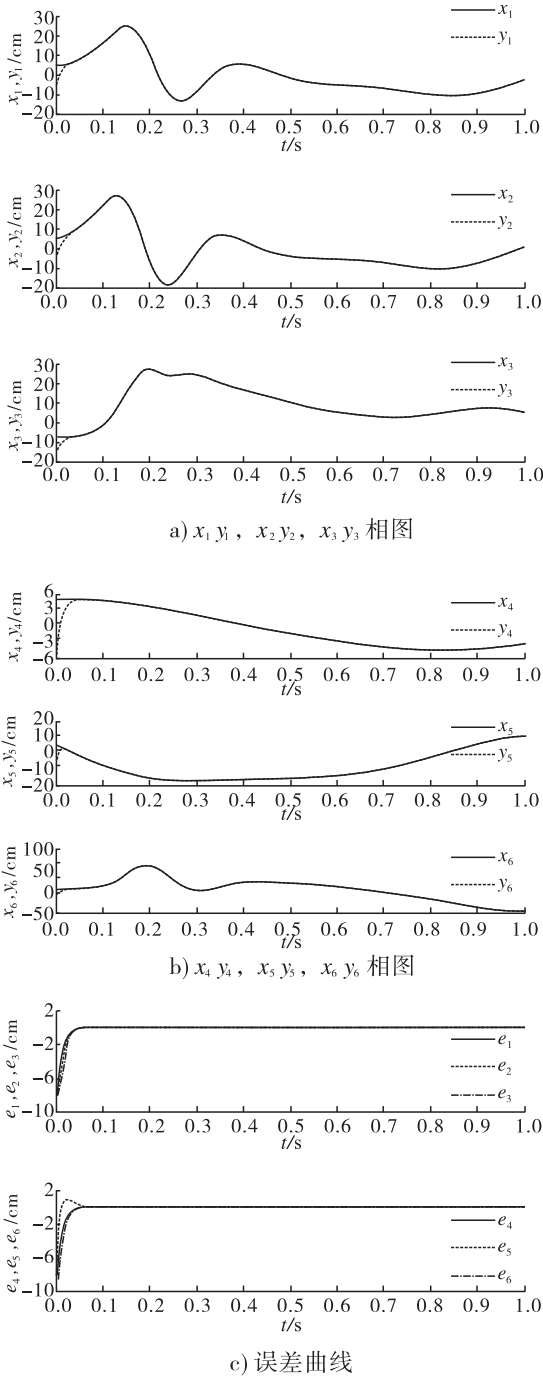


图2 系统①②状态变量的轨迹图

为相应系统,目标是由 $a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, f_0, g_0$ 来识别 $a = 36, b = 1, c = 20, d = 3, e = 0.6, f = 3, g = 1$, 记

$$\begin{aligned} e_a &= a_0 - a & e_b &= b_0 - b & e_c &= c_0 - c \\ e_d &= d_0 - d & e_e &= e_0 - e \\ e_f &= f_0 - f & e_g &= g_0 - g \end{aligned}$$

取控制器为

$$\begin{aligned} U_1 &= -m_1 e_1 & U_2 &= -m_2 e_2 & U_3 &= -m_3 e_3 \\ U_4 &= -m_4 e_4 & U_5 &= -m_5 e_5 & U_6 &= -m_6 e_6 \end{aligned}$$

其中, m_i 为待定常数. 取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 e_i^2 +$$

$$\frac{1}{2} (e_a^2 + e_b^2 + e_c^2 + e_d^2 + e_e^2 + e_f^2 + e_g^2)$$

并取

$$\begin{cases} \dot{e}_a = -e_1 e_2 - x_2 e_1 + x_1 e_1 + e_1^2 \\ \dot{e}_b = -e_1 e_6 - e_1 x_6 \\ \dot{e}_c = -e_2^2 - x_2 e_2 \\ \dot{e}_d = e_3^2 + x_3 e_3 \\ \dot{e}_e = e_5^2 + x_5 e_5 \\ \dot{e}_f = -\cos(e_6 + x_6) \\ \dot{e}_g = -e_2 e_3 e_6 - e_2 x_3 e_6 - x_2 e_3 e_6 - x_2 x_3 e_6 \end{cases} \quad (6)$$

再结合系统的有界性,类似上文推导过程可以得到 $\dot{V} < -E^T A E$, 其中

$$A = \begin{pmatrix} 36 + m_1 & -68 & -40 & 0 & 0 & -0.5 \\ -68 & m_2 - 20 & 0 & 0 & 0 & -50 \\ -40 & 0 & 3 + m_3 & 0 & 0 & -20 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4 & 0.6 + m_5 & -0.5 \\ -0.5 & -50 & -20 & 0 & -0.5 & m_6 \end{pmatrix}$$

选取合适的 m_i 值,使得矩阵 A 为正定矩阵, V 是负定的,误差系统在原点全局渐进稳定,即系统①和系统⑤完全同步. 笔者选取 $m_1 = 0, m_2 = 210, m_3 = 187, m_4 = 2, m_5 = 100, m_6 = 180$, 即

$$U_1 = 0 \quad U_2 = -210e_2 \quad U_3 = -187e_3$$

$$U_4 = -2e_4 \quad U_5 = -100e_5 \quad U_6 = -180e_6$$

系统状态变量初始值取 $x(i) = 5, y(i) = -5, i = 1, 2, \dots, 6$. $a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, f_0, g_0$ 初始值均取 2. 图3分别为系统①⑤状态变量的相图与同步误差曲线,及其参数识别曲线.

由数值仿真结果可以看出,所设计的两种方案,均可在短时间内实现驱动系统与响应系统的同步. 如前文所述,在两种方案中,即使控制器比所构造同步方案简单,同样可以实现系统同步. 出现这种情况的原因是,本文设计方案仅仅是基于充分条件,而非基于充要条件;两种方法都具有一定的普适性. 在采用相同参数、相同初始值的情况下,两种方法各有优点,第一种方法实现同步的时间更短,而第二种方法控制器更为简单.

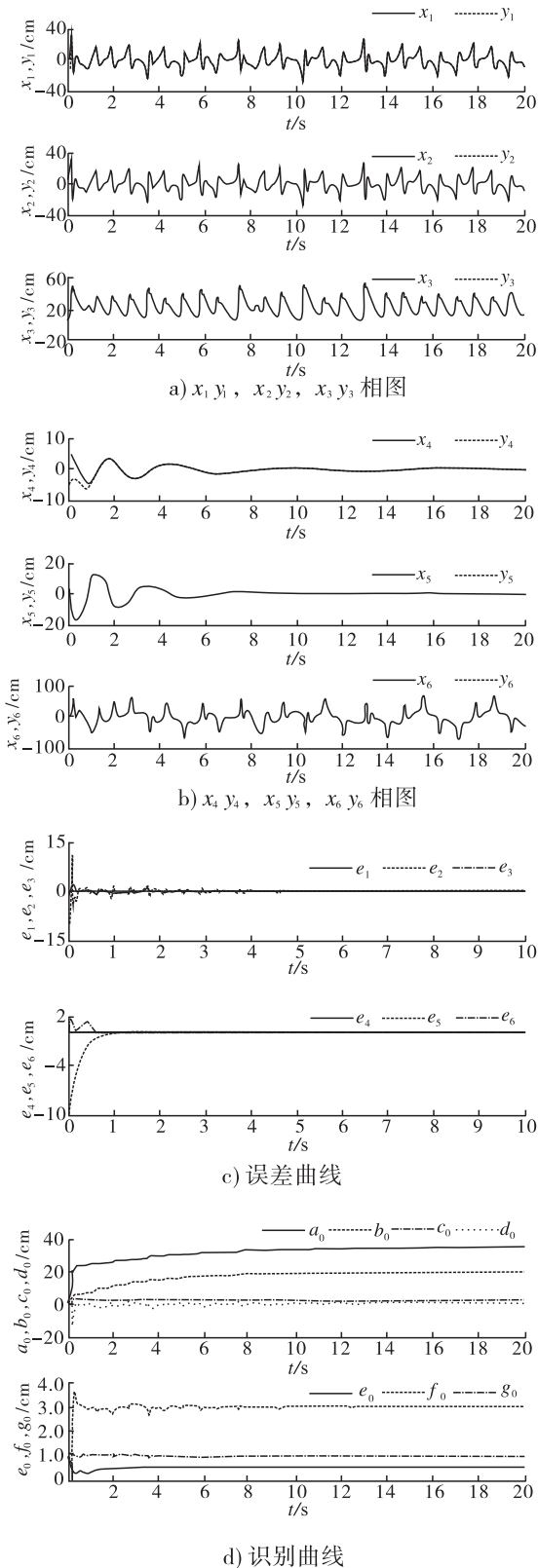


图3 系统①⑤状态变量的轨迹图

3 结语

本文基于混沌系统的可加性,对 Duffing 混沌系统和 Lu 混沌系统进行整合,得到一个新的六维 Duffing-Lu 超混沌系统,并对其同步问题进行了研究.在采用相同参数、相同初始值的情况下,所设计的非线性同步控制和线性同步控制两种方案均可实现系统同步,其中非线性同步控制同步时间短,线性同步控制控制器更为简单并可以实现参数识别.两种方案都具有一定的普适性,其他混沌系统同样可以通过选取合适的 m 值使 $A + mI$ 为正定矩阵而实现同步.该同步方案对保密通信具有指导意义.设计更简单的控制器、实现混沌系统或网络同步,并给出理论推导,将是今后的研究重点.

参考文献:

- [1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization of chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821.
- [2] Carroll T L, Pecora L M. Synchronizing chaotic circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(4): 453.
- [3] 余飞,王春华,尹晋文,等. 一个具有完全四翼形式的四维混沌[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 020506(1-9).
- [4] 高智中,韩新风,章毛连. 一个新的四维超混沌系统及其电路仿真[J]. 东北师范大学学报:自然科学版, 2012, 44(1): 77.
- [5] 魏亚东,周爱军. 新五维超混沌系统反同步研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(11): 33.
- [6] 李亚,张正明,陶志杰. 一个超混沌六阶蔡氏电路及其硬件实现[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 6818.
- [7] Qi G, Chen G, Zhang Y. On a new hyperchaotic system[J]. Phys Letters A, 2007, 352: 386.
- [8] 张帆. 一种新六维 Duffing-Lu 混沌系统及其电路实现[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(12): 3375.
- [9] 张帆,刘剑鸣. 一种新的六维超混沌系统及其电路实现[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(23): 6659.

基于 PLC 的吹脱法脱氨塔内 污水温度模糊控制器的设计

全卫卫¹, 郝建新², 王少辉¹

(1. 河南理工大学 数学与信息科学学院, 河南 焦作 454000;

2. 解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要:针对吹脱塔内污水温度是影响吹脱法脱氨效率的主要因素,而传统 PID 控制无法精确控制污水温度的问题,设计了基于 PLC 的污水温度模糊控制器. 该设计在 PLC 中采用定时中断组织块实现离散论域二维模糊控制,通过改变蒸汽调节阀开度调节蒸汽加入量,进而实现对污水温度的精确控制. 实验结果表明,该设计控制精度达 1.5 °C,可有效提高吹脱法的脱氨效率,且节省成本.

关键词:PLC;模糊控制;吹脱法;脱氨

中图分类号:TP29 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.028

Design of sewage temperature fuzzy controller in the Ammonia removal tower for Stripping based on PLC

TONG Wei-wei¹, HAO Jian-xin², WANG Shao-hui¹

(1. College of Mathematics and Informations, Henan Polytechnics University, Jiaozuo 454000, China;

2. College of National Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: For Stripping is the main factor of the efficiency of ammonia removal, and the traditional PID control can't get good control on sewage temperature, the sewage temperature fuzzy controller based on PLC was designed. The design adopted the timer interrupt block to implement two-dimensional fuzzy control of discrete domain, and adjusted steam addition amount by changing steam regulation value opening to realized precise control of sewage temperature. The experimental results showed that the practical control precision could reach 1.5 °C, the design could effectively improve the efficiency of the deamination of Stripping and cost savings.

Key words: PLC; fuzzy control; stripping; ammonia removal

0 引言

化工企业的工业废水中氨氮含量非常高,将工业废水排入污水处理厂之前需要先脱氨. 脱除废水中高浓度氨氮的常用方法是吹脱法. 影响吹脱法吹

脱效率的主要因素有两个,即污水的 pH 值和塔内污水温度,其中塔内污水温度控制是难点. 平凡^[1]比较了超声吹脱法、单独超声法和单独吹脱法在氨氮去除效果上的差异,以及超声吹脱法氨氮去除率随污水 pH、污水温度、声能密度和时间等因素的变

化规律.上海新奥托实业有限公司生产的 EFPT 过程控制实验装置采用模糊 PID 控制方法对吹脱塔顶温度控制进行了仿真研究,得到了比传统 PID 控制方法更好的控制效果^[2].路桂明^[3]研究了基于单片机的模糊 PID 在电锅炉温度控制系统中的应用.钟汉如等^[4]研究了基于 PLC 的染色机温度控制系统,采用温度补偿解决控制系统的时间滞后问题,利用分块控制思想,在目标温度附近进行模糊控制,但其控制对象是气体.

本文拟以某化工企业高浓度氨氮废水处理过程为例,设计基于 PLC 的吹脱法脱氨塔内污水温度模糊控制器,以保证废水在脱氨过程中温度恒定,从而有效提高脱氨效率.

1 吹脱法脱氨流程

吹脱塔内温度控制示意图如图 1 所示,其脱氨流程为:调节好 pH 值的污水被进水泵提升至吹脱塔的顶部,然后从塔内填料的间隙流入塔底的蓄水池;风携带着蒸汽从塔底吹入塔内,沿塔内填料间隙逆流而上,蒸汽将污水加热到一定温度;污水中溶解的氨氮在合适的 pH 值和温度的环境中会游离出来,从吹脱塔底部吹入的风将游离态氨从塔顶排气筒吹出,从而实现脱氨的目的.

2 模糊控制器设计

由于进水量、进风量和进蒸汽量不稳定,而且

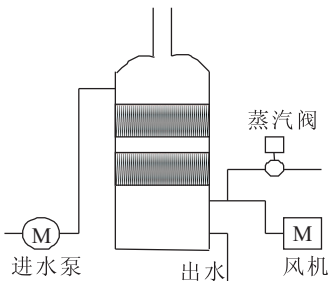


图 1 吹脱塔内温度控制示意图

温度变化本身具有非线性、滞后性,故很难建立精确的数学模型,对于这类控制对象,PID 控制系统的控制效果并不理想.但是,操作工人熟练的手动调节却能实现良好的控制,在各种控制器中,能够模仿人工控制功能的是模糊控制器^[10].模糊控制器在一定控制规则下,通过模糊推理得到控制量,其控制规则是在分析总结操作工人控制经验和专家设计经验的基础上得到的.模糊控制器对被控对象的数学模型没有要求,是吹脱法脱氨污水温度控制的最佳选择.

2.1 模糊控制器结构

二维模糊控制器对被控对象参数变化具有较强的适应能力,且具有控制性能较好、设计简单等特点^[5].因此,本文采用二维模糊控制器作为塔内污水温度控制器,其结构见图 2.

模糊控制器的二维输入量为设定值与反馈值的偏差和偏差变化率,输出量为蒸汽阀门的开度增量.根据实际情况,模糊控制器输入和输出的隶属函数与模糊控制规则表采用模糊集合及论域来表示,从而得到模糊控制器的模糊控制查询表.通过定时查询模糊控制查询表得到蒸汽阀门开度的控制量,从而实现吹脱塔底污水温度的恒温控制.

2.2 方案设计

本文以 PLC 控制为主,采用模糊控制方法,利用蒸汽作为热源加热吹脱塔底的污水.为了使系统得到最优的脱氨效果,在气液比和吹脱时间相同的条件下,考察不同 pH 值和不同温度对脱氨效率的影响,结果见图 3.

由图 3 可知,吹脱法脱氨效率为 80% 时的 pH 值在 10 左右,污水温度在 42 °C 左右;而 pH 值在 11 ~ 13 之间时,影响脱氨效率的主要因素是污水温度;当 pH 值保持在 12 ~ 13 之间、污水温度保持在 40 ~ 50 °C 之间时,脱氨效率在 98% 以上.从加碱量和蒸汽量的综合成本考虑,设定吹脱塔内污水 pH 值

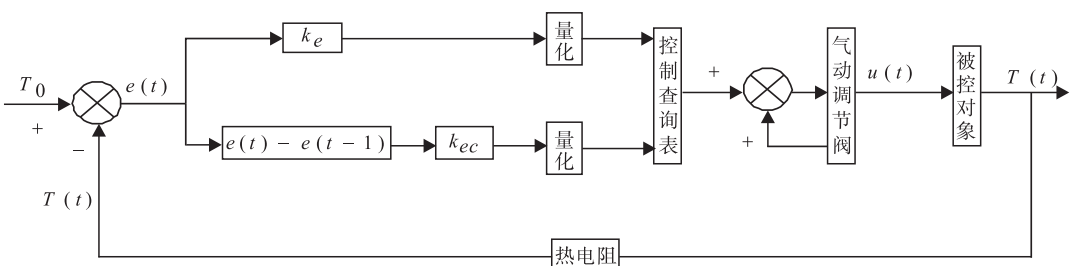


图 2 模糊控制器结构的示意图

为 12, 污水温度为 42 ℃.

二维模糊控制器的偏差输入 e 和偏差变化率输入 Δe 以及蒸汽阀门开度增量输出 u 的模糊语言变量各分为 7 个:

[NB, NM, NS, O, PS, PM, PB]

设其模糊论域为

[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]

吹脱塔的进水温度随着季节的变换而变化, 模糊控制器的给定值设为 42 ℃, 因此 e 的基本论域为 [-12, 12], Δe 的基本论域为 [-5, 5], u 的基本论域为 [-12, 12].

偏差的量化因子

$$k_e = \frac{n_e}{e_{\max}} = \frac{6}{12} = 0.5$$

偏差变化率的量化因子

$$k_{ec} = \frac{n_{\Delta e}}{ec_{\max}} = \frac{6}{5} = 1.2$$

蒸汽阀门开度增量的量化因子

$$k_u = \frac{u_{\max}}{n_u} = \frac{12}{6} = 2$$

其中 $n_e, n_{\Delta e}, n_u$ 分别为其模糊论域中正值或负值的个数.

模糊控制器控制变量的语言值隶属函数采用三角函数, e 和 Δe 的语言值隶属度见图 4. u 的输出变量的语言值隶属度见图 5. 模糊控制器的控制规则见表 1. 采用合成推理法计算控制查询表见表 2.

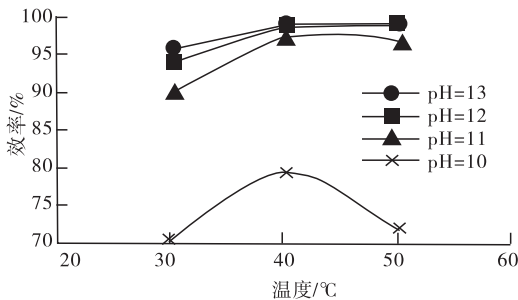


图 3 不同 pH 值、不同温度下的吹脱效率

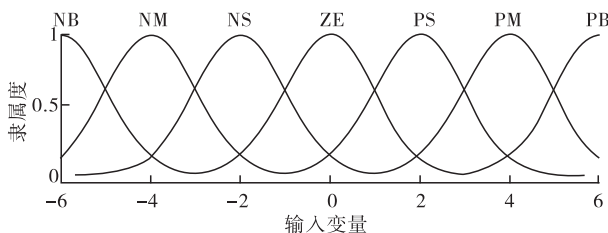


图 4 输入变量语言值隶属度

3 PLC 程序编制

3.1 编程思路

因为 S7-300 可编程控制器只能按地址顺序进行数据存储, 且地址没有负数, 因此将 e 和 Δe 的模糊量加 6, 这样就将模糊控制器的模糊论域转化为 (0, 12).

把控制查询表的数据存储在可编程控制器数据块的方法为:

$e = 0$ 时, Δe 从 0 到 12;

$e = 1$ 时, Δe 从 0 到 12;

……;

$e = 12$ 时, Δe 按照从 0 到 12 的顺序存储在可编程控制器数据块中.

若控制查询表中的数据只占 1 B, 则存储到可编程控制器数据块的控制查询表内数据地址为 0, 1, 2, …, 168.

根据上面的分析, 确定可编程控制器数据块与控制查询表内数据的对应关系:

当 $e = 0$ 时, 控制数据在可编程控制器数据块中的地址等于 ec 的模糊量;

当 $e = 1$ 时, 控制数据在可编程控制器数据块中的地址等于 $13 + ec$ 的模糊量;

当 $e = 2$ 时, 控制数据在可编程控制器数据块中的地址等于 $13 \times 2 + ec$ 的模糊量;

……;

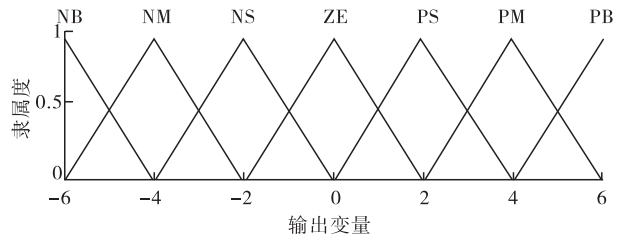


图 5 输出变量语言值隶属度

表 1 控制规则

ec	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	ZE	ZE	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

表2 控制查询表

ec	e												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-5.370	-5.230	-4.910	-4.710	-4.280	-3.900	-3.200	-2.670	-2.000	-0.997	0.000	0.359	0.342
-5	-5.230	-5.140	-4.710	-4.270	-3.940	-3.280	-2.690	-1.970	-1.300	-0.955	0.00	0.998	1.030
-4	-4.910	-4.710	-4.280	-3.940	-3.680	-3.000	-2.040	-1.300	-0.465	0.000	0.465	1.300	2.000
-3	-4.310	-4.270	-3.940	-3.280	-3.000	-2.920	-1.950	-0.957	0.000	0.955	1.300	1.970	2.670
-2	-4.020	-3.990	-3.680	-3.000	-2.040	-1.950	-1.530	-0.659	0.464	1.300	2.000	2.670	3.170
-1	-3.960	-3.900	-3.550	-2.920	-1.950	-1.000	-0.695	0.000	0.997	1.970	2.670	2.970	3.550
0	-3.660	-3.550	-3.170	-2.630	-1.530	-0.695	0.000	0.695	1.530	2.630	3.170	3.550	3.660
1	-3.550	-2.970	-2.670	-1.970	-0.997	0.000	0.695	1.000	1.950	2.920	3.550	3.900	3.960
2	-3.170	-2.670	-2.000	-1.300	-0.464	0.659	1.530	1.950	2.040	3.000	3.680	3.990	4.020
3	-2.670	-1.970	-1.300	-0.955	0.000	0.957	1.950	2.920	3.000	3.280	3.940	4.270	4.310
4	-2.000	-1.300	-0.465	0.000	0.465	1.300	2.040	3.000	3.680	3.940	4.280	4.710	4.910
5	-1.030	-0.998	0.000	0.955	1.300	1.970	2.690	3.280	3.940	4.270	4.710	5.140	5.230
6	-0.342	-0.359	0.000	0.997	2.000	2.670	3.200	3.900	4.280	4.710	4.910	5.230	5.370

当 $e = n (n = 3, \dots, 12)$ 时,控制数据在可编程控制器数据块中的地址等于 $13 \times e + ec$ 的模糊量。

因此,将 e 和 Δe 模糊与量化之后,将其模糊论域从 $(-6, 6)$ 转化为 $(0, 12)$,可以得到模糊控制器的输出量在可编程控制器数据块中的地址,其算法为

$$Address_1 = (e + 6) \times 13 + (ec + 6) \quad \text{①}$$

实际上,模糊控制器控制查询表中的数据均为浮点数,所以在可编程控制器数据块中每个数据占 4 B 的地址。根据①式可得,可编程控制器数据块中的实际地址为

$$Address = [(e + 6) \times 13 + (ec + 6)] \times 4$$

基于以上分析,可编程控制器中模糊控制器的程序可按下述步骤编写:

1) 将控制查询表中的数据按顺序放入可编程控制器数据块中;

2) 循环采样现场仪表的温度值,在每次循环过程中将采样值与设定值运算后得到 e 和 ec ;

3) 将得到的 e 和 ec 进行模糊化与量化后,根据 $Address$ 的算法计算出输出控制量在可编程控制器数据块中的地址;

4) 利用存储区间接寻址的方法读出存储在可编程控制器数据块中的数据;

5) 将得到的控制增量与阀门当前开度相加后写入阀门控制程序中,从而实现对被控量的模糊控制。

3.2 编程方法

西门子 S7-300 系列 PLC 可调用循环中断组织块 OB30—OB38,再在循环中断组织块中调用模

糊控制子程序 FC65。本程序采用缺省时间为 100 ms 的 OB35。

1) 采样部分。根据采样的温度值和温度给定值计算出 e 和 ec ,根据量化因子将 e 和 ec 模糊化,然后将模糊化的 e 和 ec 量化成离散论域内的模糊量。

2) 指针部分。由 Address 算法算出 e 和 ec 的模糊控制量在可编程控制器数据块中的地址,作为模糊控制量的指针。

3) 查表部分。利用模糊控制量的指针,采用存储区间接寻址方式读出存储在可编程控制器数据块中的模糊控制量。

4) 输出部分。解模糊后的模糊控制量加上当前的阀门开度得到阀门的控制量。利用 S7-300 中的功能块 SFC15 将阀门控制量写入阀门定位器,以控制阀门开度,进而控制进入吹脱塔的蒸汽量,实现吹脱塔内污水温度的调节与控制。

在上述查表程序中,由 1) 和 2) 可以得到输出量在可编程控制器数据块中的地址,采用指针方式取出控制量。程序见图 6。

图 6 中可编程控制器数据块 DB65。DBD720 内存储双字格式的模糊控制器输出控制量指针。因为双字格式的 0—2 b 是位编号,故 Network 37 将 DB65。DBD720 向左移 3 位。Network 38 读出指针对应的控制增量,存储到可编程控制器数据块 DB65。DBD724 中。

4 实验结果与分析

本设计应用于某公司污水预处理实验,实验采

Network 37: Title:

Comment:

```

L L#3
L DB65,DBD 720
SLD
T DB65,DBD 720
NOP 0

```

Network 38: Title:

Comment:

```

OPN DB 65
L DBD [DBD 720]
T DB65,DBD 724

```

图 6 存储器间接寻址查表程序

用饱和蒸汽作为热源,压力 0.1 MPa,温度 100 ℃. 实验过程为:首先打开调节池提升泵,控制调节池气动调节阀的开度,使进水流量保持 15 m³/h;然后打开风机,等风量达到稳态后,投入模糊控制功能. 实验时,污水温度设定值为 42 ℃,采样时间为 1 s,得到吹脱塔内温度曲线如图 7 所示. 由于污水温度低于 40 ℃时,脱氨效率显著下降,高于 42 ℃时脱氨效率增加较慢,且蒸汽的消耗量增加,故控制精度要选择 ±2 ℃. 根据实验结果,采用离散论域二维模糊控制器的控制精度为 1.5 ℃,控制效果明显优于超定量 3 ℃左右、调节时间较长、采用经典控制理论的 PID 控制方式.

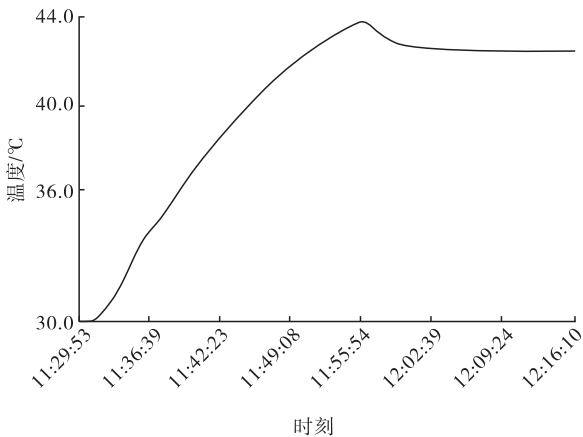


图 7 吹脱塔内温度曲线

5 结论

本文以某化工企业吹脱法脱氨进行废水处理为例,设计了基于 PLC 的污水温度模糊控制器. 该设计以蒸汽作为热源,在 PLC 中采用定时中断组织块实现了离散论域二维模糊控制,通过改变蒸汽调节阀的开度来调节蒸汽的加入量,进而实现对污水处理过程中水温的精确控制,使污水温度保持在设定的范围内. 实验结果表明,该设计控制精度为 1.5 ℃,满足了吹脱塔内污水温度控制精度的要求,有效提高了吹脱法的脱氨效率,且节省成本. 下一步的研究重点是采用在线模糊控制器或神经网络等更为智能的控制方法,进一步提高控制精度.

参考文献:

- [1] 奥斯曼·吐尔地,杨令,安迪,等. 吹脱法处理氨氮废水的研究和应用进展[J]. 石油化工, 2014, 43 (11):1348.
- [2] 平凡. 超声吹脱去除水中高浓度氨氮的方法研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [3] 左爱武. 一种用于蒸氨生产的智能控制系统[D]. 武汉:武汉科技大学,2004.
- [4] 路桂明. 基于模糊 PID 控制的电锅炉温度控制系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2007.
- [5] 钟汉如,蔡杰. 基于 PLC 的染色机温度模糊控制器的设计[C]//2013 全国染整可持续发展技术交流会议论文集,北京:1994—2015 China Academic Journal Electronic Publishing House,2013:286—289.
- [6] 吴成强,任国芬,王宏宇,等. 高氨垃圾渗滤液的吹脱条件控制研究[J]. 环境污染与防治, 2006, 28 (8):592.

基于 LonWorks 的高校智能节电及 管理系统的设计

任静¹, 张平², 陈继斌¹, 曹祥红¹

(1. 郑州轻工业学院 建筑环境工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对目前高校教室浪费电的现象,基于 LonWorks 技术,利用 DDC 控制器及组态王软件设计了高校智能节电及管理系统:该系统根据教室人数、光照度参数等情况,对照明灯具进行分布式控制与集中管理,适时地智能调控教室照明,同时实现教务管理、防盗报警等功能。测试结果表明,该系统操作界面友好,安装方便,运行稳定,达到了预期目的。

关键词:LonWorks; DDC; 智能节电; 组态王; LNS DDE Server

中图分类号:TU852 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.029

Design of the intelligent power saving and management system in colleges based on LonWorks

REN Jing¹, ZHANG Ping², CHEN Ji-bin¹, CAO Xiang-hong¹

(1. College of Building Environment Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Electronic Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract:In view of electricity being wasted in the classrooms at university, the intelligent power saving and management system in colleges was designed based on LonWorks with the use of DDC controller and Kingview. The system could regulate and control the lighting in the classroom intelligently according to the number of students, illumination parameters, etc. At the same time, it realized the function of educational administration, anti-theft alarm, etc. The test results showed that the system was good in operation, easy to set up and ran stably, and achieved the purpose of saving electricity.

Key words: LonWorks; DDC; intelligent power saving; Kingview; LNS DDE Server

0 引言

近年来,我国社会用电量极速增长,但在电力供应紧张的同时又存在着大量浪费现象^[1]. 在各种节电渠道与方法中,照明节电具有良好的经济效

益. 高校是人群高度集中、照明用电量较大的场所,根据不完全统计,教室中人走灯不关、白天亮灯,以及人少时教室灯全部开启等浪费电的现象相当严重. 目前,针对高校智能节电所研发的系统主要分为两种类型,一种以单片机作为智能控制的核心,

收稿日期:2015-03-02

基金项目:河南省科技攻关计划项目(142102310361)

作者简介:任静(1988—),女,河南省新乡市人,郑州轻工业学院助理实验师,硕士,主要研究方向为控制工程、建筑智能化。

将智能节电器安装在各个教室,可以根据教室人数、光照度及时间参数分时分量地控制照明灯具,但各个教室分散控制,管理人员无法掌握教学楼中所有教室灯具的开启情况,也无法远程控制灯具,适时性和自动化程度较低^[2];另一种设计是基于各种现场总线的,这种系统多采用 CAN, LonWorks 现场总线,通过上位机监控系统实现对整栋教学楼的集中控制,但系统在控制灯具时所考虑的因素不够全面,比如系统是“灯随人开”,当教室人数较少,或者学生坐位比较分散时,灯具开启数量较多,没有将电量节省做到最大化。

针对上述情况,本文拟基于 LonWorks 设计高校智能节电及管理系统,该系统采用“以人找灯”的设计原则,通过检测教室内人数及光照度参数,对照明灯具进行分布式控制与集中管理,以实现现场照明的智能调控。同时,管理员可以通过上位机软件远程监控教室照明情况,并对教室灯具进行人工控制。

1 LonWorks 技术

LonWorks 总线是美国 Echelon 公司在 1990 年代推出的一种综合测控网络,采用面向对象的开放式通信协议,支持多种传输介质及所有的网络拓扑结构。智能节点之间通过网络变量和显式报文进行通信,互操作性强,节点之间能够实现快速通信。

神经元芯片是 LonWorks 技术的核心,每个神经元芯片都有 3 个 8 b 的 CPU 处理器,这 3 个处理器实现了 ISO/OSI 七层协议的 1—6 层。因此,用户在使用时,无需关心底层协议是如何实现的,只要对最上面的应用层进行编程配置,即可实现相应的功能,从而降低开发难度,缩短开发时间。神经元芯片通过 11 个 I/O 引脚与外部硬件连接,用户可以根据实际应用将这些引脚组成 34 种不同的 I/O 对象,以满足设计需求。通过多种介质的收发器,神经元芯片可实现与外部的通信,并可通过网络设备接口连接至 LonWorks 网络^[3]。

在当前各种现场总线技术中, LonWorks 是兼容性最强、支持几乎所有的网络拓扑结构及传输介质的现场总线,所以其应用领域也是最广泛的。

2 系统功能

从图 1 所示系统结构图中可以看出,系统的硬件部分主要由多个集成了 DDC 控制模块、数据采集

单元及执行单元的智能节点组成。其中数据采集单元包括人数检测与防盗模块、红外控制模块、照度检测模块,执行单元包括灯具驱动模块、强制控制模块、广播模块。硬件设计流程如图 2 所示。

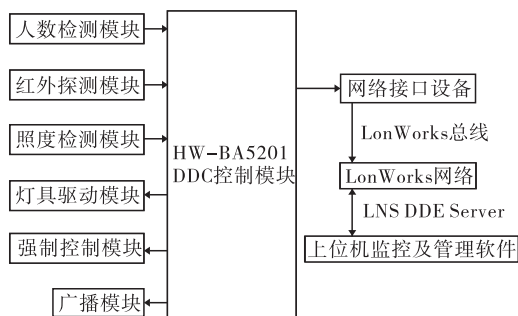


图 1 系统结构图

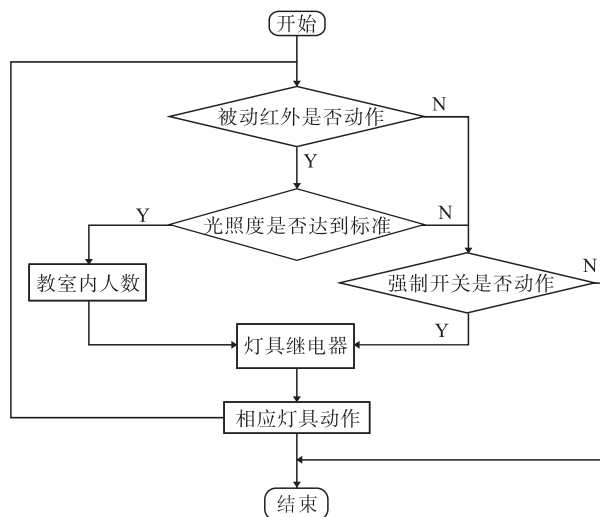


图 2 硬件设计流程图

软件部分主要包括下位机底层控制网络的设计、上位机监控及管理软件的设计,以及 LNS DDE Server 连接。

3 系统硬件设计

3.1 DDC 控制模块

HW-BA5201 DDC 控制模块采用 LonWorks 现场总线技术与外界进行通信,具有 11 路通用输入端口,可采集多种类型的模拟量信号与不同电平的开关量信号,并对其进行不同方式的处理;同时还具有 4 路开关量输出端口,通过插针跳线和软件配置,可将各通道配置成直接输出、延时输出、脉冲输出等多种形式的开关量控制信号^[4]。通过对 DDC 控制模块主机底板上的跳线进行设置,可修改其输入输出信号的属性。

3.2 人数检测与防盗模块

人数检测与防盗模块主要负责教室人数检测,根据教室人数计算需要开启的灯具数目,并将信号传送到 DDC 控制模块输出端口;晚上教学楼停止使用后,利用该模块的人体检测功能,还可以检测是否有人进入教室,从而实现防盗功能.人数检测与防盗功能通过两对红外对射器实现,其工作原理如图 3 所示.

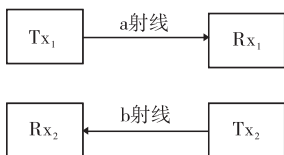


图 3 人数探测器工作原理

两对红外对射器发射方向相反的两条平行红外线,一条作为“进”的信号标志,一条作为“出”的信号标志.若无人通过时,红外对射发射器与接收器之间的红外线没有遮挡,接收器的输出信号为常闭;若有人通过时,红外对射发射器与接收器之间的红外线被遮挡,接收器接收不到红外线信号,输出信号为常开^[5].当对射 1 的 a 射线先被遮挡、对射 2 的 b 射线后被遮挡时,判断为“进入”;当对射 2 的 b 射线先被遮挡、对射 1 的 a 射线后被遮挡时,判断为“离开”.通过计数软件对两个信号进行累加计数,得到教室内进出人数数据.

通过长期调研得出,学生上自习时出于独立性的要求,座位分布较上课时分散,且教室内人数不超过满负荷人数的 70%,因此设定每 8 人开启一盏灯具.

3.3 红外探测模块

红外探测模块利用被动红外微波双鉴探测器检测照明区域是否有人存在.若无人,则自动关闭照明灯具;若有人,则根据所在区域的优先级及教室人数开启灯具.被动红外微波双鉴探测器工作原理如图 4 所示,探测器防拆开关压下时亮灯,表示正常状态;弹起时灭灯,表示被拆状态.正常状态和通电状态下的被动红外微波双鉴探测器 C-NC 为常闭状态,触发状态或断电状态或被拆状态都将使 C-NC 断开,进入报警状态.

3.4 照度检测模块

照度检测模块利用光照度传感器完成现场照度值的检测.按照《建筑照明设计标准》规定,当教室中的光照度值低于 300 lx 时,应开启灯具.

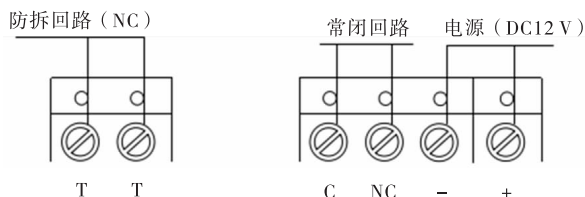


图 4 被动红外微波探测器工作原理

光照度传感器采集到照度数据,经内部放大电路后输入 DDC 控制模块进行处理.光照度传感器除了需要 DC24 V 电源外,其接线原理与被动红外微波双鉴探测器基本一致.

3.5 灯具驱动模块

由于照明场所不同区域的照度值不同,为了最大限度地利用自然光源,对灯具进行智能控制时需要为灯具设定开启优先级.本设计将教室分为三个区域,靠近窗户一侧的区域优先级最高,远离窗户一侧的区域优先级最低.根据红外探测器值、光照度值及教室人数,首先驱动高优先级的灯具开关,保持某一区域照度值恒定不变.

由于输出控制信号的电压不能直接控制灯具,因此系统需通过继电器控制灯具.当 DDC 模块输出控制信号时,将开关量信号加在继电器线圈两端,继电器线圈通电,常开/常闭触点动作,灯具做出相应动作.

3.6 强制控制模块

强制控制模块采用红外遥控的方式向 DDC 模块输入强制控制信号,在有特殊情况时,管理人员可使用遥控器向 DDC 主机发出控制信号,强制控制灯具的亮或灭.

3.7 广播模块

广播模块的功能是系统自动通过广播通知将分散在各教室内的学生集中在优先级高的区域学习,最大限度地利用光源,进一步提高节能效果.

4 系统软件设计

4.1 底层 LonWorks 控制网络设计

系统采用 Echelon 公司的 LonMaker for Windows 集成工具来进行底层控制网络的设计开发,采用 LonWorks 现场总线通过网卡连接并控制 DDC 模块中的 3150 神经元芯片,为系统中 5 个输入模块及 5 个输出模块选择端口并进行参数设置,使 DDC 模块可实现对开关量信号和模拟量信号的采集,并且对各种模拟量以及开关量设备进行控制.底层控制

网络设计图如图5所示.图中对应的I/O端口信息如表1所示.

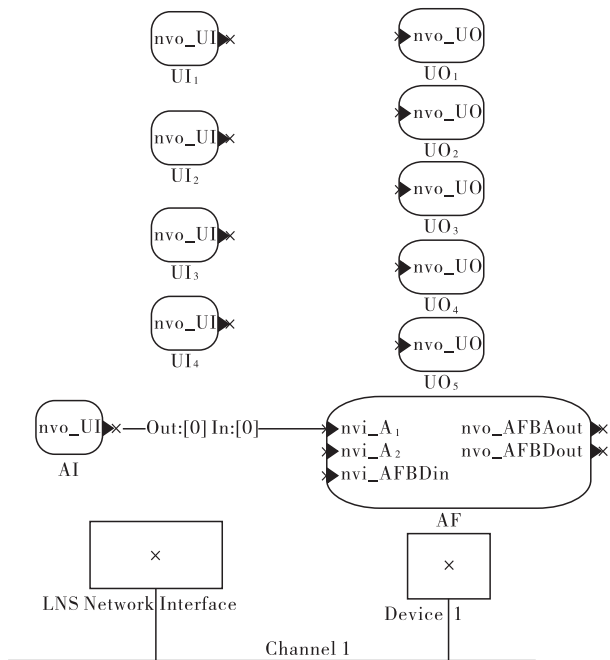


图5 底层控制网络设计

表1 I/O 端口信息

I/O 端口	端口性质	传感器名称
UI ₁ —UI ₂	数字量输入端口	人数检测对射输入 1,2
UI ₃	数字量输入端口	被动红外探测器信号输入
UI ₄	数字量输入端口	遥控开关强切信号输入
AI	模拟量输入端口	光照度传感器照度值输入
UO ₁ —UO ₄	数字量输出端口	灯具 1—4 控制输出
UO ₅	数字量输出端口	广播信号输出

4.2 上位机监控及管理软件的设计

系统利用组态王软件进行上位机监控及管理软件的设计.

4.2.1 定义硬件设备 LNS DDE Server 用于在 LonWorks 网络与 Windows 应用之间交换网络变量或显式消息.在客户应用程序中通过向 LNS DDE 服务器发送报文或轮询等方式,来获得网络变量的更新值,实现 LonWorks 网络与客户应用程序之间的数据通信^[6].

当启动 DDE 服务器后,可以看到已经成功组网的所有 LonWorks 应用,选择所需要的应用程序名,即可自动启动其对应的 LNS DDE 服务器.而 DDE Server 与组态王的连接需要在组态王中新建一个以 DDE 为服务器的 DDE 设备,从 LNS DDE 服务器复制一个网络变量,加上 NV,作为新建设备的话题名

进行标准交换,当新建设备的所有参数设置完成后,即可实现组态王与 DDC 设备的数据通信.

4.2.2 添加工程变量 组态王中的工程变量分为两种类型,即 I/O 变量和内存变量.I/O 变量是指可与外部数据采集程序直接进行数据交换的变量,可以实时更新;内存变量是指不需要与其他应用程序交换数据,也不需要从下位机得到数据,只在组态王内需要的变量.该系统主要工程变量如表2所示.

表2 主要工程变量

变量名	变量类型
人数检测对射输入 1,2	I/O 变量
光照度值	I/O 变量
遥控开关	I/O 变量
广播开关	I/O 变量
灯具 1—4 强行开关	I/O 变量
报表查询变量	内存字符串
进入/离开教室人数	内存整型
教室实际人数	内存整型

4.2.3 制作图形画面并定义动画连接

笔者利用组态王软件创建了智能节电与管理系统人机界面.除静态界面之外,系统还需建立动画连接,显示并监控下位机传感器采集到的数据,并直观地将教室灯具的开启情况展现出来,以便管理人员及时了解每个教室内的人数情况和系统中所有照明回路的工作状态,从而对照明回路中指定教室的灯具进行远程控制.

除此之外,通过监控及管理软件,管理员可以随时将相关数据生成报表并保存至数据库,以供日后查询.

4.2.4 编写命令语言 通过组态王软件编写命令语言可以定义每个对象的执行条件、动作等属性,完整实现对象的相应功能.灯具智能控制的命令语言如下所示:

```
“事件描述”\\本站点\教室 101 人数 > =1&&
\\本站点\教室 101 被动红外 = =1&&\\本站点\教室
101 照度值 < =300“存在时”
\\本站点\教室 101 灯具 1 = 1;
if(\\本站点\教室 101 人数 < =5)
{\\本站点\教室 101 灯具 2 = 0;
\\本站点\教室 101 灯具 3 = 0;
\\本站点\教室 101 灯具 4 = 0;}
```

5 系统测试

系统开发完毕后,将 DDC 控制模块、人数与防

盗检测模块、红外探测模块、照度检测模块、灯具驱动模块等外围电路安装在一个模拟的教室环境中。启动上位机监控软件,通过 LNS DDE Server 服务器建立连接,对系统功能进行测试。经测试,在 I/O 设备设置合理、参数配置正确的情况下,布置在现场的智能照明节点能够采集到现场照度值,并由 LonWorks 网络传输至监控上位机,通过在组态王中对每个数据建立数据库变量,软件系统可以显示并监控下位机传感器采集到的数据。将采集到的数据与所设置的参数进行比较,可以判断灯具是否需要开启,并能直观地显示教室灯具的开启情况,供管理人员及时了解每个教室内人数情况和系统中所有照明回路的工作状态。同时,用户可将当前数据保存至数据库中,通过查看监控界面的“历史查询”界面,了解不同时刻智能照明系统的工作状况。在上位机监控界面中,也可通过切换手动、自动控制按钮,实现不同的控制方式。在手动控制模式下,用户可通过监控软件远程开启或关闭照明灯具;在自动控制模式下,系统会根据传感器采集到的数据,参照用户设置的相关参数,自动开启或关闭灯具,并启动广播系统。

测试结果表明,该智能节电及管理系统能够正确地采集环境数据、控制灯具,系统性能可靠、运行稳定,达到了预期设计的要求。

6 结语

针对目前高校教室浪费电的现象,基于 LonWorks 技术,利用 DDC 控制器及组态王软件完成了

高校智能节电及管理系统的的设计。该系统依据教室内学生人数、光强等参数自动控制相应数量的照明灯具,灯具开启按照最优化照度分配,利用语音调度,使教室内较少的人数合理集中到优先级高的区域,优化配置,实现“以人找灯”就坐的方式。管理员通过管理主机可以监视灯具的开闭状况,远程控制各教室灯具的功能,此外,系统还具有无线遥控强制控制照明灯具的功能。

在管理方面,系统可以根据计数器测得的教室人数的多少生成报表,并将数据上传至管理中心,更加方便教务管理和考勤;系统还具有防盗功能。测试表明,该系统操作界面友好,安装方便,运行稳定,达到了预期目的。

参考文献:

- [1] Zografakis N, Karyotakis K, Tsagarakis K P. Implementation conditions for energy saving technologies and practices in office buildings (Part 1): Lighting [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 12(6):4165.
- [2] 胡兴军. 发展中的智能照明系统 [J]. *光源与照明*, 2004(3):44.
- [3] 刘艳. 基于 LonWorks 的智能照明系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [4] 张扬吉, 赵智聪. 直接数字控制器在楼宇自控系统教学实验中的应用 [J]. *中国电力教育*, 2012(32):90.
- [5] 涂平平. 红外 APC 乘客计数精度改进及公交客运量预测模型研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [6] 王忠民, 蒋平. 基于 LNS 的 LonWorks 组网与监控软件开发 [J]. *测控技术*, 2002, 21(1):37.

最优加权融合 SO_2 转化率预测模型

王宁宁

(阿坝师范学院 党委办公室, 四川 汶川 623002)

摘要:以冶炼烟气制酸 SO_2 转化率为研究对象,针对单一 BP 或 RBF 神经网络,预测 SO_2 转化率存在的过学习或网络速度收敛慢的问题,利用最优均方误差加权融合算法对两种单一神经网络进行融合,从而构建更优的 SO_2 转化率预测模型.仿真结果表明:最优均方误差加权融合模型避免了单一模型信息的缺失,实现了信息互补,从而提高了 SO_2 转化率预测精度.

关键词:神经网络;冶炼烟气制酸; SO_2 转化率;信息融合;最优加权融合

中图分类号:TP391;TQ111 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.030

Optimal weighted fusion SO_2 conversion ratio predication model

WANG Ning-ning

(Party Committee Office, Aba Teachers University, Wenchuan 623002, China)

Abstract: Selecting SO_2 conversion ratio of metallurgical off-gases making acid as the research object, in order to solve the problem of over learning or slow network convergence speed existed in using single BP or RBF neural network to predict SO_2 conversion ratio, the optimal mean square error weighted fusion algorithm was used to achieve fusion of two kinds of neural network and construct the better SO_2 conversion ratio predication model. The simulation results showed that the optimal mean square error weighted fusion model avoided the lack of information of the single model, realized the complementation of information and effectively improved the SO_2 conversion ratio predication precision.

Key words: neural network; metallurgical off-gases making acid SO_2 conversion ratio; information fusion; optimal weighted fusion

0 引言

冶炼烟气制酸是一个相关参数较多且耦合严重的高度复杂的工业过程.其中, SO_2 转化率是反映制酸过程优劣的关键因素,但很难直接对其在线监测,通常都是靠人工化验取得其数据,设定值由经验来判断,缺乏充分的理论根据^[1].采用软测量技术可以快速地预测 SO_2 转化率,但建立软测量模型

需要了解过程稳态和动态的先验知识,而 SO_2 的转化过程比较复杂,影响因素较多,一般很难建立其精确模型.神经网络具有结构简单、工作状态稳定、易于实现等优点^[2],且不需要了解过程稳态和动态的先验知识,若分别采用应用最为广泛的两种神经网络(BP神经网络、RBF神经网络)建立 SO_2 转化率预测模型,虽然模型具有较高的容错性和鲁棒性,自组织、自学习、自适应能力强,但模型的预测

收稿日期:2014-12-03

基金项目:四川省教育厅科研项目(14ZB0339)

作者简介:王宁宁(1986—),女,河南省商丘市人,阿坝师范学院助教,硕士,主要研究方向为测试计量技术、仪器电子技术及控制.

精度不高,并且单一 BP 神经网络预测模型会出现过学习现象,单一 RBF 神经网络在隐含层节点数处理不当时,会导致网络收敛速度较慢^[3]。

鉴于此,本文拟采用最优均方误差加权融合算法对两种单一神经网络预测模型进行信息融合,建立更优的 SO₂ 转化率预测模型,使融合模型具有协同性、互补性^[4],以期为冶炼企业烟气制酸过程 SO₂ 转化率的在线监测与预测提供参考。

1 SO₂ 转化率传统预测模型

1.1 数据预处理传统预测模型

为了获得合理有效的 SO₂ 转化率模型,需对原始数据进行相关性分析与预处理。冶炼烟气制酸转化器中 SO₂ 转化率影响因素较多,本文采用相关分析法,根据生产工艺要求,结合专家给出的建议^[5],初步选定 13 个过程量作为 SO₂ 转化率模型的辅助变量,即 1—5 层的入口出口温度、SO₂ 入口浓度、SO₂ 出口浓度和风机转速;SO₂ 转化率为主导变量。

建立预测模型之前,还应对数据进行预处理,主要包括异常数据侦破与剔除、数据归一化与反归一化处理等。本文采用拉依达准则(3σ 准则)进行数据剔除,采用中心化压缩和归一化方法进行数据归一化处理^[2]。

1.2 BP 神经网络模型和 RBF 神经网络模型

1.2.1 BP 神经网络模型 BP 神经网络中的误差反响传播算法是指当网络输出与期望输出的误差不能满足需要时而采用的一种有效的学习算法^[3,6]。其具有一个隐含层的三层神经网络,完全能够实现输入到输出的任意非线性逼真映射。

神经元模型的输出可表示为

$$O_i = f(\text{net}_i)$$

$$\text{net}_i = \sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \theta_i$$

其中,net_i 是模型第 i 个神经元输入总和,以 $\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j$ 的形式求和后形成激活函数 f(·) 的输入;θ_i 为神经元的阈值;f(·) 是传递函数,其常见形式有纯线性函数和非线性的 Sigmoid 函数,最后得出 SO₂ 转化率预测值。

根据上述原则,确定 SO₂ 转化率 BP 神经网络软测量模型为三层结构。由于冶炼烟气制酸 SO₂ 转化率的输入变量有 13 个、输出变量有 1 个,所以确定其神经网络的输入层节点为 13,输出层节点为 1,隐含

层为单层,隐含层的节点数用试算法求得。

1.2.2 RBF 神经网络模型 RBF 神经网络的思想就是采用 RBF 作为隐含层单元“基”构成隐含层空间,使用局部分布关于中心点对称的高斯函数作为 RBF。本文对 SO₂ 转化率模型的训练采用三层 RBF 神经网络,隐含层神经元的个数与样本训练的个数相同,用线性方程求取值和阈值,以获取较快的学习速度。

q 个隐含层神经元对应的径向基函数中心为 C = X', q 个隐含层神经元对应的阈值为 b₁₁ = b₁₂ = ... = b_{1q} = \frac{0.832}{\text{spread}}, \text{spread} 为径向基函数的扩展速度。}

隐含层神经元的输出为 a_i。假设 n 个模型输出层的神经元阈值 b₂ = [b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2n}]'。RBF 神经网络隐含层输出到输出层是进行线性加权,可得}}}

$$[\mathbf{W} \quad b_2] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \quad (1)$$

其中 I = [1, 1, ..., 1]_{1×q}, W 是隐含层和输出层之间连接的权值矩阵,由 (1) 式可求得

$$[\mathbf{W} \quad b_2] = \mathbf{Y} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}^{-1}$$

一般情况下,RBF 神经网络径向扩展系数越大,融合预测结果就越平滑,但系数过大和过小会导致网格融合性能变差。本文通过实验找出适合的径向扩展系数,使融合模型性能最好。

2 SO₂ 转化率最优加权融合模型

加权融合是一种比较典型的信息融合方法,所以本文采用最优均方误差加权融合算法对 SO₂ 转化率进行建模和预测。首先建立 SO₂ 转化率最优加权融合模型的结构;然后求出两个融合加权系数,对 BP 神经网络和 RBF 神经网络融合结果进行融合,以此来提高 SO₂ 转化率的预测精度^[7-8]。

2.1 最优加权融合模型

本文提出的冶炼烟气制酸 SO₂ 转化率最优加权融合模型结构如图 1 所示。该结构对 13 个辅助变量进行预处理后,对 BP-RBF 预测模型的 SO₂ 转化率进行最优加权融合,进而求出输出 SO₂ 转化率的预测值。因 SO₂ 转化率模型在特征层采取最优加权融合算法,所以,该模型汇集了两种模型的性能优点,避免了单一神经网络模型存在的信息丢失问题,也能减少随机性,从而可实现多种信息互补,最终达到提高 SO₂ 转化率系统融合精度的目的^[8]。

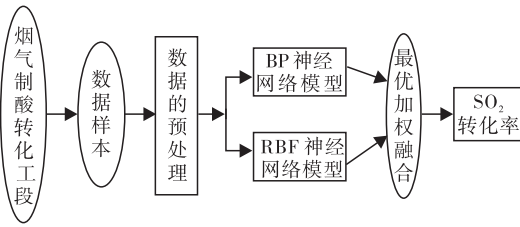


图 1 SO₂ 转化率最优加权融合模型结构

2.2 最优加权融合改进算法

为了不失一般性,需对最优加权融合算法进行改进,求出最优加权系数. 记 y_t 是第 t 个样本的真实值, \hat{y}_t 是第 t 个样本加权融合值. x_{it} 是第 i 个传感器在第 t 个样本输出值, 选取权值系数 $K = (k_1, k_2, \dots, k_m)$, 其中 k_i 为第 i 个传感器的加权系数, 且满足 $\sum_{i=1}^m k_i = 1$, 加权融合模型可以表示为

$$\hat{y}_t = \sum_{i=1}^m k_i x_{it} \quad t = 1, 2, \dots, n$$

$E_{(m)} = (E_{ij})_{(m)}$, $i, j = 1, 2, \dots, m$, E_{ij} 为第 i 个融合算法与第 j 个融合算法之间的误差平方和. 若加权系数向量 K^* 使组合预测值的均方误差 J 达到极小值 J_{\min} , 则 K^* 就是最优加权的系数向量, 其对应融合算法就是最优加权融合算法. 因此, 该算法的线性最优组合预测就转化为下列最优化问题:

$$\begin{cases} \min J = \frac{1}{n} K' E_{(m)} K \\ R' K = 1, R = [1, 1, \dots, 1]' \end{cases}$$

本文融合系统是由两个系统组成, 即取 $m = 2$, e_{1t}, e_{2t} 分别是两个系统的误差向量. 求得融合系统的条件极值, 融合加权系数分别为

$$\begin{cases} k_{BP} = \frac{\sum_{t=1}^n e_{2t}^2 - \sum_{t=1}^n e_{1t} e_{2t}}{\sum_{t=1}^n e_{1t}^2 + \sum_{t=1}^n e_{2t}^2 - 2 \sum_{t=1}^n e_{1t} e_{2t}} \\ k_{RBF} = \frac{\sum_{t=1}^n e_{1t}^2 - \sum_{t=1}^n e_{1t} e_{2t}}{\sum_{t=1}^n e_{1t}^2 + \sum_{t=1}^n e_{2t}^2 - 2 \sum_{t=1}^n e_{1t} e_{2t}} \end{cases}$$

3 最优加权融合预测模型的应用

为了验证信息融合模型的有效性, 本文采用经过预处理的某冶炼企业烟气制酸过程 DCS 系统实时在线测量值及有关化验值, 样本共 218 组. 数据预处理后样本降为 200 组, 其中, 建模样本 160

组, 校验样本 40 组. 为了评价不同模型的效果, 选用相对误差和均方误差对模型的性能进行量化评价.

采用 3 种模型预测 SO₂ 转化率的对比结果如图 2 所示, 其预测结果相对误差对比如图 3 所示. 进行 20 次实验, 3 种模型预测的 SO₂ 转化率均方误差如图 4 所示.

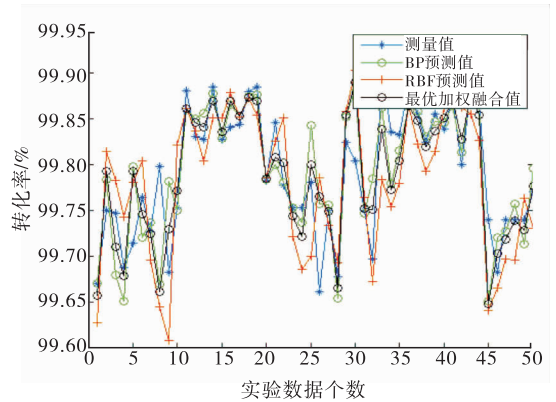


图 2 SO₂ 转化率预测结果对比

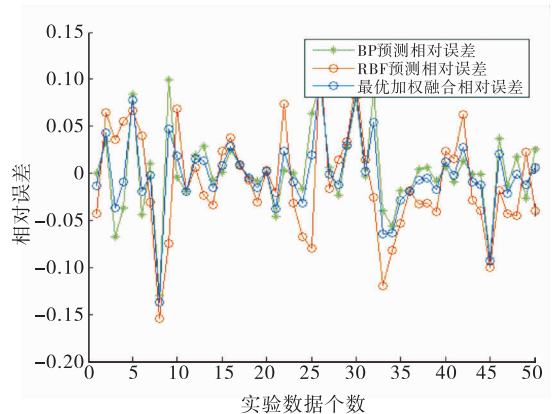


图 3 SO₂ 转化率相对误差对比

由图 2 可知, 3 种模型都能预测 SO₂ 转化率, 预测的结果与实际测量值大致趋势相同, 大部分预测值和测量值有较小的偏差.

图 3 表明, BP, RBF 神经网络模型预测相对误差有较大的波动, 而最优加权融合预测模型的相对误差有较小的波动, 这进一步说明, 采用最优加权融合算法预测 SO₂ 转化率更准确、更稳定.

由图 4 可知, 均方误差越小, 说明模型性能越好, 在 20 次实验中, BP 神经网络模型的均方误差值大部分都小于 RBF 神经网络模型, 而最优加权融合均方误差最小. 以上实验证明, 采用最优加权融合算法预测的 SO₂ 转化率模型性能最好.

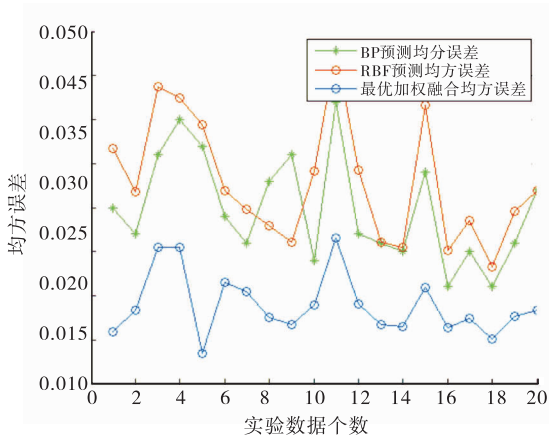


图4 SO₂ 转化率均方误差对比

4 结语

本文将BP神经网络、RBF神经网络及最优加权融合模型应用到冶炼烟气制酸SO₂转化率的预测中。实验表明:两种单一模型均具有有效性,但BP融合精度较高;两种单一模型加权融合后的模型性能最好。采用最优加权融合避免了单一模型信息的缺失,实现了信息互补,从而提高了SO₂转化率预测精度。

(上接第111页)

4) 土体塌方概率随 $t(0.1 \leq t \leq 0.9)$ 的增大先减小后增大;随着 $b(0.1 \leq b \leq 1)$ 的增大而减小。可见,在考虑中间主应力的同时,对关键参数 t, b 的取值要格外慎重。

参考文献:

- [1] 黄志波,林从谋,陈莹,等.隧道洞口土体塌方的可靠度分析[J].华侨大学学报:自然科学版,2012,33(5):557.
- [2] 王迎超,尚岳全,徐兴华,等.隧道出洞口松散围岩塌方时空预测研究[J].岩土工程学报,2010,32(12):1868.
- [3] 苏雅,杨明辉,苏永华,等.深埋隧道衬砌稳定可靠度

参考文献:

- [1] 孙治忠,谢成,柴瑾瑜.金川公司冶炼烟气制酸技术创新回顾[J].硫酸工业,2014(2):10.
- [2] 潘立登,李大字.软测量技术原理与应用[M].北京:中国电力出版社,2009:1-4.
- [3] 周品.MATLAB神经网络设计与应用[M].北京:清华大学出版社,2013:153-184.
- [4] 王芹,王晓东,吴建德,等.神经网络和SVM多传感器融合的隧道CO体积分数研究[J].传感器与微系统,2012(7):6.
- [5] 黄清容.云铜冶炼烟气制酸系统DCS控制系统的升级改造[D].昆明:昆明理工大学,2010:4-12.
- [6] 李东玉,王睿.基于BP神经网络的阀控铅酸盐蓄电池劣化程度预测[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(4):12.
- [7] 潘泉,王增福,梁彦,等.信息融合理论的基本方法与进展(II)[J].控制理论与应用,2012(10):1233.
- [8] 李伟,何鹏举,高社生.多传感器加权信息融合算法研究[J].西北工业大学学报:自然科学版,2010(5):674.

的Kriging插值法与遗传算法协同优化求解法[J].岩土力学,2013,34(9):2661.

- [4] 黄逸群,林从谋,黄清祥,等.隧道型钢喷混凝土初期支护的可靠度计算方法及应用[J].华侨大学学报:自然科学版,2014,35(2):212.
- [5] 苏永华,李翔,徐能雄,等.锚喷衬砌隧道结构稳定可靠度计算[J].土木工程学报,2011,44(3):113.
- [6] 郑强,林从谋,孟凡兵.采用统一强度理论的锚喷支护围岩弹塑性统一解[J].华侨大学学报:自然科学版,2011,32(3):322.
- [7] 俞茂宏,何丽南,宋凌宇.双剪应力强度理论及其推广[J].中国科学,1985,12:1113.
- [8] 周晓帆,李升才,张玉芳.城市供水管网抗震功能可靠性分析[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(1):49.

关节软骨显微成像技术

夏阳

(奥克兰大学 物理和生物研究中心, 美国 罗彻斯特 48309)

摘要:对关节软骨组织成像研究中磁共振成像(MRI和 μ MRI)、偏振光显微术(PLM)、傅里叶变换红外成像(FTIRI)及计算机断层扫描成像(CT)等技术方法进行了综述,指出每一种技术方法利用其自身技术原理均能描述组织退化复杂机制的一个方面,但多学科交叉法被认为是最好的技术手段。

关键词:关节软骨退化;显微成像;多学科交叉;核磁共振;偏振光显微镜;傅里叶变换红外成像

中图分类号: O433.3; R445.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.031

Articular cartilage by microscopic imaging

XIA Yang

(Department of Physics and Center for Biomedical Research, Oakland University, Rochester 48309, USA)

Abstract: The multidisciplinary research techniques in the study of articular cartilage tissue imaging were reviewed. The magnetic resonance imaging (MRI), microscopic MRI (μ MRI), polarized light microscopy (PLM), Fourier-transform infrared imaging (FTIRI) and computer tomography (CT) were emphatically introduced. It was pointed out that each technique could probe an aspect of the tissue degradation complex mechanism with its own scientific principles. But in the current study of biomedical problems, the multidisciplinary approach is the best.

Key words: articular cartilage degeneration; microscopic imaging; multidisciplinary approach; MRI; PLM; FTIRI

0 Introduction

The gradual degradation of articular cartilage is a hallmark of osteoarthritis (OA), which is the number one cause of disability in the U. S. population^[1]. OA progresses very slowly, often spanning over ten or twenty years. Since cartilage is avascular and aneural, early degradation remains silent (i. e., undetected). Although OA always has the same end-stage symptoms (i. e., losses in joint function), the disease can have different early-stage characteristics, each being the consequence of a different initiation event (or risk factor), such as trauma, obesity, or instability. Due to

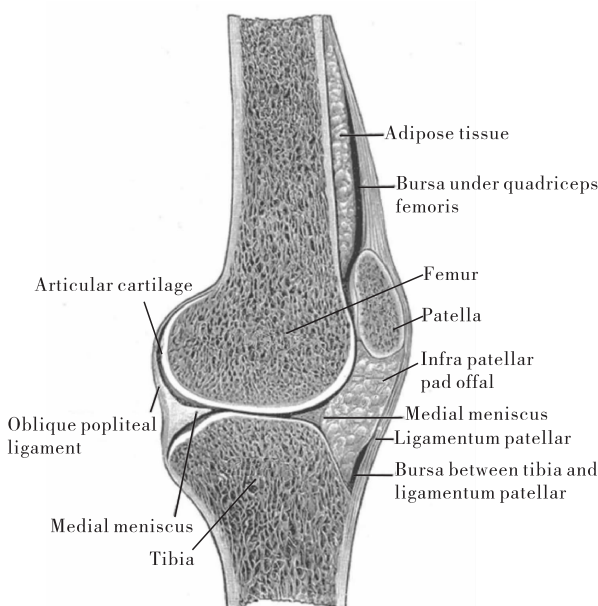
these complexities, an accurate diagnosis of early OA in humans, at a time when the joint is still structurally sound but its load-bearing ability is compromised, remains elusive in current clinical practice. Since one cannot initiate diseases in humans, nor test some potential disease-modification drugs on humans before their effectiveness is demonstrated, the use of animal models in OA research serves an essential purpose^[2-3].

Articular cartilage is a thin layer of load-bearing tissue covering the ends of the bones in a diarthrodial joint (Fig. 1). Cartilage is composed of a small amount of cells (chondrocytes) and an extensive extracellular

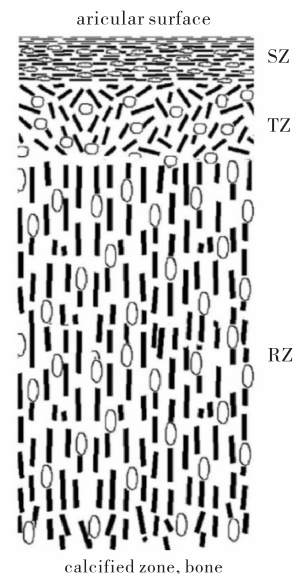
matrix, which has three major constituents: water, collagen fibers (mostly type II), and proteoglycan (PG, a protein with many covalently attached chains of glycosaminoglycans (GAG)). A unique structural feature of articular cartilage is its depth-dependent characteristics across its thin thickness, which is signified by a nominal 90° orientation change between the surface and the deep tissue (Fig. 1b)). Consequently, a thin layer of articular cartilage is commonly sub-divided in histology, based on the local fibril orientation, into three sequential zones depth-wise: the superficial zone (SZ), where the fibers run parallel with the articular surface; the transitional zone (TZ), where the fibers are randomly oriented; and the radial zone (RZ), where the fibers are perpendicular to the surface. Nearly all biological and molecular properties of cartilage consequently bear some type of depth-dependency with regard to its thin thickness^[4-12]. Even at the proteomic level, a recent study has found, for the first time, the depth-dependent zonal distribution of a broad range of cartilage ECM proteins^[13].

Since early lesions tend to be small and localized, any early detection tool must be non-invasive, sensitive to molecule-specific changes in the tissue, and able to resolve small lesions. Molecular imaging at high resolu-

tions meets these requirements. During the last twenty-one years, we have been studying the degradation of articular cartilage extensively in our laboratory at Oakland University. Initially, we used μ MRI, which shares the same physics principles and engineering architectures as in clinical MRI scanners. In the later 1990s, we started to incorporate polarized light microscopy (PLM) into our work, because PLM is the gold standard in histology and capable of visualizing the fibril organization in cartilage, which modulates the μ MRI signal. As our projects progressed, we aimed to image the early lesions in cartilage as directly as possible, at high resolutions. For this reason, we started to use Fourier-transform infrared imaging (FTIRI) in our work, since FTIRI is sensitive to the chemical bonds in the tissue. One of the latest additions to our research tools is microscopic computer tomography (μ CT), which enables the investigation of the cartilage-bone interface. In addition to these high-resolution imaging tools, we also employ several biomechanical and biochemical methods—each measures a unique aspect of the tissue's bulk properties and can be correlated with the spatially resolved changes in imaging. This multidisciplinary research approach in our cartilage research is recognition that many of today's biomedical problems are best



a) A schematic of the articular capsule of the knee joint



b) A schematic of the depth-dependent nature of articular cartilage

Fig. 1 Articular cartilage

addressed using multi-disciplinary techniques; each method has its own scientific merit^[14]. This article provides a brief summary of our multi-disciplinary research in cartilage and osteoarthritis.

1 Microscopic imaging

1.1 Magnetic resonance imaging (MRI) and microscopic MRI (μ MRI)

NMR imaging (MRI) is based on a linear proportionality between the precessional frequency of the nuclei (e. g., protons in water molecules) and the magnitude of the external magnetic field in which the nuclei are immersed^[15-16]. By making the magnetic field in the sample space deliberately non-uniform, the spatial positions of the nuclei can be encoded by the variations of their precessional frequency. A set of three orthogonal gradients will enable the precise localization of any nucleus in a three dimensional space. When the resolution of MRI is finer than 100 μm , the smallest size that can be recognized by a naked eye, MRI is termed NMR microscopy or μ MRI^[17-19]. Since μ MRI and clinical MRI share the same physics principles and engineering architectures, μ MRI offers a direct translational bridge between invasive imaging (e. g., light microscopy and electron microscopy, which have higher resolution) and non-invasive MRI of humans.

The unique value of MRI is the combination of its true non-invasiveness and its excellent sensitivity to a number of molecular-level characteristics in the specimen. These characteristics may include magnetic susceptibility variation due to the hetero-structure of a sample, relaxation processes of the nuclei, chemical shift variations, and molecular motions (translational flow and Brownian motion)^[19]. In MRI studies of articular cartilage, measurements of relaxation times (T_1 , T_2 , $T_{1\rho}$) have particular importance. For example, T_2 (spin-spin relaxation time) in articular cartilage has a depth-dependent anisotropy (Fig. 2c)^[20-21], which is caused by the nuclear dipolar interaction of the protons under the influence of the collagen architectures in cartilage^[22-23]. This T_2 anisotropy, which follows the geometric factor ($3\cos^2\theta - 1$) in dipolar Hamiltonian,

is the origin of the magic angle effect in clinical MRI of cartilage^[22-30]. In contrast to the strongly anisotropic T_2 in cartilage, T_1 (spin-lattice relaxation time) in native cartilage is isotropic^[23]. These isotropic T_1 and anisotropic T_2 times precisely reflect the slow molecular motion in cartilage due to the highly constrained and swollen PG in the collagen matrix (i. e., there is a large amount of proteoglycan macromolecules present in cartilage). With the use of the gadolinium-based contrast agent in MRI, we can also image the PG concentrations in cartilage quantitatively (Fig. 2d)^[31], which provides a direct measure of the load-bearing ability of cartilage.

Since articular cartilage is a load-bearing tissue, an external loading should be able to change the fibril architecture and hence the relaxation characteristics in cartilage^[32-33]. A diseased cartilage becomes easier to deform due to the reduction of its negatively charged proteoglycans. This implies that using static loading during microscopic imaging can become, in every sense, a functional study of the tissue's structures and properties. Imaging a cartilage block while it is being loaded in μ MRI is analogous to imaging a joint in a human while a force or weight is applied to the person in a clinical MRI scanner—both rely on the articular cartilage to act its primary role as a load-bearing medium^[34]. Detailed knowledge of the load-modified relaxation anisotropy in cartilage could provide a better understanding of structural modifications to the functional adaptability of cartilage, which could facilitate the monitoring of tissue degradation more accurately and provide critical information toward the understanding, and ultimately prevention, of arthritic diseases^[35-40].

1.2 Polarized light microscopy (PLM)

Light microscopy is the gold standard in biology and histology labs, due to its low cost and high resolution (up to a fraction of one micron). Light in non-quantum mechanical physics can be treated as a transverse electromagnetic wave, which enters a specimen with a certain amplitude and phase. A characteristic of an anisotropic material is its intrinsic birefringence, i. e., an anisotropic material will have (at least) two

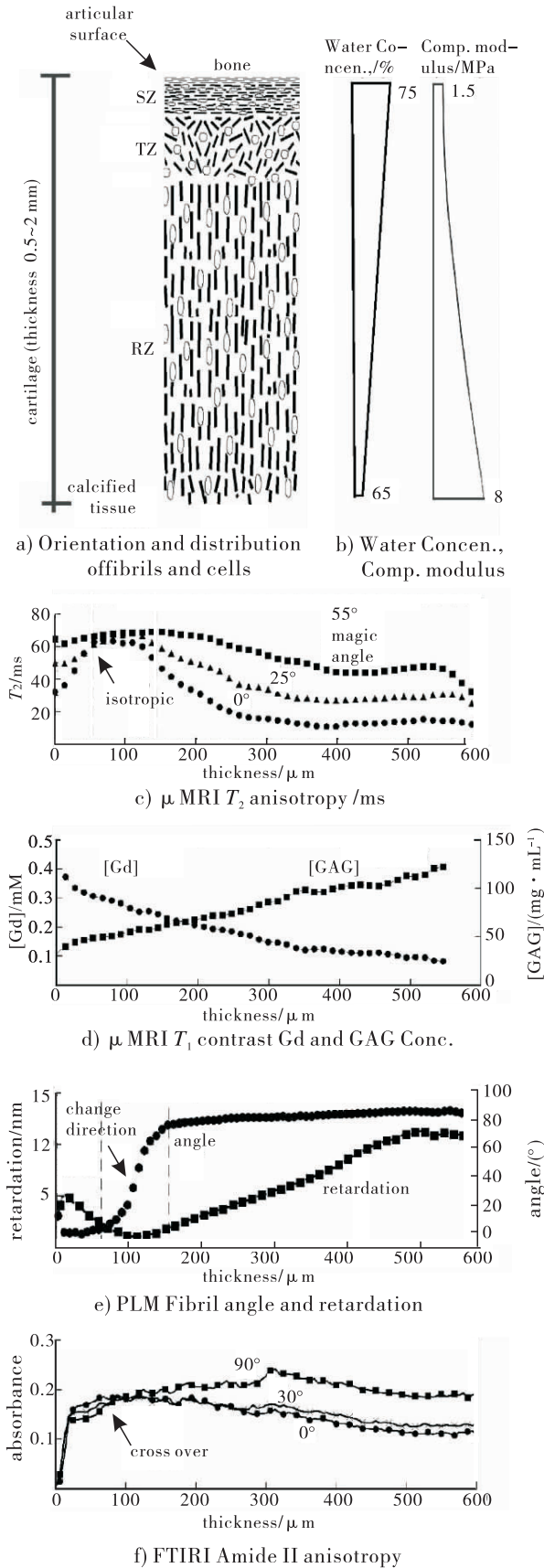


Fig. 2 Multidisciplinary correlation of the depth-dependent characteristics of articular cartilage

different indices of refraction, which result in two possible speeds of light transmission in the specimen. In articular cartilage, the polarized light interacts with the valence electrons of the collagen fibrils and is transmitted in two orthogonal axes. The difference of two indices of refraction results in the intrinsic birefringence, which is dependent on the angle between the axis of linear polarization and the axis of the fibrils^[41-42]. The use of polarized light in light microscopy^[43] enables the construction of two quantitative parameter images of the specimen: angle (in units of degrees) and retardation (in units of nm)^[44-46].

The value of the angle in PLM represents the averaged orientations of all collagen fibrils within each image voxel (volume of element in imaging), which has a nominal 90° difference in the orientations between the superficial zone and the radial zone in articular cartilage (Fig. 2e)^[44]. The value of the retardation characterizes the averaged organization of all collagen fibrils within each voxel (Fig. 2e). A voxel of uniformly oriented fibrils would give the highest retardation value while randomly oriented fibrils would result in the smallest retardation value. In fact, both angle and retardation measurements can be used to model the averaged behaviour of molecules in cartilage using a generalized ellipse model^[14]. Our work shows that the pixel-by-pixel mapping of angle and retardation allows investigations into the disrupted collagen morphology due to early onset lesions^[35] and deformation of loaded articular cartilage^[47-48]. A quantitative correlation study between μ MRI and PLM successfully showed a statistically significant agreement between the structural zones in μ MR images and in PLM images^[44]. Since a disruption of the collagen morphology provides a clear signal to the onset of the cartilage degradation^[49-51], PLM has been used extensively in recent years in cartilage and OA research^[26, 35, 47-48, 52-54].

1.3 Fourier-transform infrared imaging (FTIRI)

FTIRI has been used extensively in cartilage studies during the last decade, due to its potential to provide quantitative and spatially resolved information about the chemical composition of the tissue^[48, 55-62].

Infrared (IR) spectroscopy is based on the vibrational motions of the dipole moment of the molecule, which absorbs IR light when their vibrational frequency is equal to the frequency of incident radiation. In the mid-infrared region ($4\ 000 \sim 400\ \text{cm}^{-1}$), the infrared spectrum of cartilage contains the major absorption of several biomedically important dipoles, such as amide I (C=O stretching), amide II (C—N stretching and N—H bending), amide III (N—H and C—C vibrations), and proteoglycan via sugar (C—C ring vibrations). FTIRI, which combines a classical Fourier-transform infrared spectrometer and an IR microscope that has a scanning stage, is a spectroscopic imaging technique that scans a 2D tissue section and produces a 3D spectroscopic imaging data cube, which contains both spatial (X and Y in microns) and chemical (Z in wavenumbers) information. At any particular frequency or range of frequencies, one can construct a 2D spatial image of the particular chemical bonds, which allows the visualization of those chemicals in the specimen as a 2D map^[58, 63].

One important feature in FTIRI study of cartilage is the recognition that the transition moments of amide I and amide II are qualitatively perpendicular to each other in the context of the long axis of collagen in cartilage^[59, 64–67]. Consequently, one can study the anisotropy of these spectroscopic absorptions in cartilage when the infrared light is polarized (Fig. 2f), employing a similar concept as in T_2 anisotropy of μMRI ^[68] and retardation/angle calculations of PLM^[44]. By using one or two polarizers in the optical path of infrared light in FTIRI experiments, all major absorption peaks in cartilage have been shown to possess depth-dependent anisotropies^[60–62, 69]. In addition, through the establishment of an infrared spectroscopic library that characterizes the pure chemicals in the specimens, the amide absorption maps can be converted into chemical concentration maps in the tissue, via a factor analysis that utilizes all spectral data in multivariate analysis (e. g., principal component regression)^[55, 58, 70–73]. The ability of measuring the changes in molecular concentration and fibril structures may prove important in

identifying early signs of tissue degradation, such as collagen disruption and PG loss associated with pathological conditions in osteoarthritis.

1.4 Other imaging and non-imaging tools

In addition to the imaging techniques mentioned in the previous sections of this report, we have used several additional imaging and non-imaging techniques—each provides complementary and unique information of the structure and properties of cartilage during its early degradation.

Microscopic computer tomography (μCT) shares the same physics principles and engineering architectures as X-ray computer tomography (CT), a technique widely used in the hospitals. The image contrast in CT is mainly based on the attenuation of X-rays. In cartilage and bone specimens, bone, with its high mineral content, attenuates X-rays sufficiently to yield high quality images of the microstructures of the bone^[74–75]. In comparison, articular cartilage (and other non-mineralized soft tissues) absorbs little X-ray. One approach to increase the contrast of cartilage in μCT is the use of contrast agents^[76–84]. Since most contrast agents have specific charges, the equilibrium distribution of the ionic contrast agent in cartilage can be used to map the negatively charged proteoglycans in cartilage^[76, 81]. μCT can also be combined with μMRI to study the bone lesions. For example, the high intensity regions in bone marrow in some T_2 -weighted MRI images have been used to indicate bone marrow lesions, which represent bone marrow necrosis and fibrosis, trabecular abnormalities, and bone edema^[85–86]. μCT is quickly becoming a useful tool in animal model research of cartilage and bone disease.

Electron microscopy (e. g., transmission electron microscopy, TEM) is the only imaging tool that has sufficient resolution to directly visualize ultrastructural objects such as individual collagen fibrils in cartilage^[5, 87–93]. However, the significance of the fine structure of cartilage at the nano-scale can often be better understood as a part of its gross morphological architecture. This desire for both morphological and nano-scale knowledge motivated a 2D image analysis

procedure in our lab, a procedure which can quantify and summarize the graphical features of TEM images without losing the significance of the fine structures^[94]. The procedure involves a localized ‘vector’ analysis that analyzes the power spectrum in reciprocal (Fourier) space. Three quantitative attributes essential to the biology and biomechanics of the tissue can be extracted, permitting direct correlations and comparisons among interdisciplinary techniques including μ MRI, PLM, TEM and FTIRI^[94].

The relationship between the depth-dependent structure and the mechanical properties of articular cartilage has long been of interest, since the ultimate measure of cartilage is its load-bearing ability. Investigations have involved the use of techniques requiring tissue to be substantially modified (i. e. , enzymatically) from its fresh, functional condition. By using a technique that combines microscopic optical imaging and mechanical loading^[95], we showed the possibility of visually tracking intra-tissue displacement of the chondrocytes to obtain quantitative depth-dependent stiffness measurements in healthy and degraded cartilage. Compressive resistance in cartilage increased with depth from the articular surface, confirming the concentration gradient of the negatively charged proteoglycan molecules in articular cartilage^[31]. The understanding of intra-tissue load distribution in approximate *in vivo* conditions is of great importance in cartilage biology and medicine, potentially providing an important method for analyzing the coordinated changes in cartilage composition and function due to aging and disease.

2 Final remarks

The importance of imaging-derived data in OA research cannot be overemphasized^[96-97]. In our laboratory, μ MRI plays a central role since it is uniquely positioned to offer directly translational data to clinical MRI. In addition, we employ in our work PLM (which images the collagen organization based on the optical birefringence), FTIRI (which images the chemical concentrations based on the dipolar vibrations), and μ CT

(which images the interface between cartilage and bone). Even though neither μ MRI nor PLM nor FTIRI nor μ CT has the resolution to identify individual collagen fibrils or other molecules, a multidisciplinary approach in microscopic imaging can identify subtle changes in the morphological structure and molecular concentration of cartilage due to natural lesions and mechanical loading. This enables the monitoring and prediction of early changes in tissue that lead to cartilage degradation as a clinical disease. We show that most of the early events in joint degradation after the impact can be monitored by microscopic imaging studies of animal models.

In addition to the clinical relevance of our cartilage research, articular cartilage (together with bone and other tissues in the joint) is an ideal integrated system in interdisciplinary research. This is because the essential performance of the tissue and the organ (joint) is assessed at the biomechanical, functional, morphological, and clinical levels while the control of the tissue’s performance is rooted deeply at the ultrastructural, molecular, cellular, and biochemical levels. The areas of potential focus of cartilage research are therefore numerous, ranging from tissue engineering and nanotechnology for replacement tissues, physical sciences for molecular and cellular interactions in healthy and lesioned tissues, imaging and image analysis in multiple digital platforms, and clinical diagnostics for the management of this disease, the number one cause of human disability. The multidisciplinary nature of our biomedical research has enabled the training of graduate students who gain critical abilities and diverse skills through carrying out applied scientific research in their own careers.

In summary, multidisciplinary imaging at microscopic resolutions offers a unique approach to study the complex events during tissue degradation in animal models; each technique can be purposely tailored to dissect one aspect of the complex mechanisms of tissue degradation with microscopic resolutions. The necessity of this multidisciplinary approach recognizes the complex nature of the biomedical problems in our research.

Because cartilage at different depths can have a unique combination of structures and properties (e. g. , bio-electrochemical composition, solid/fluid interaction, morphological architecture, mechanical property), many aspects of these depth-dependent tissue properties can be interpreted beyond their usual meanings as measured. With this approach, we aim to provide a unique and clinical-relevant roadmap that has direct translational potential to clinical disease management. It is our ultimate goal that this bench-top research will lead to the successful detection and intervention of early joint degeneration in humans.

[**Acknowledgement**] The author is grateful to the three R01 grants from the National Institutes of Health (NIH) of the United States since 1999 that have supported his cartilage research at Oakland University, and to the students and staff in his Lab who carried out the original experimental work.

References:

- [1] CDC. Prevalence and Most Common Causes of Disability Among Adults—United States, 2005 [R]. Atlanta: Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR), 2009.
- [2] Pond M J, Nuki G. Experimentally-induced osteoarthritis in the dog[J]. *Ann Rheum Dis*, 1973, 32(4):387.
- [3] Gregory M H, Capito N, Kuroki K, et al. A review of translational animal models for knee osteoarthritis [J]. *Arthritis*, 2012(2012):764621.
- [4] Maroudas A, Muir H, Wingham J. The correlation of fixed negative charge with glycosaminoglycan content of human articular cartilage [J]. *Biochim Biophys Acta: General Subjects*, 1969, 177(3):492.
- [5] Muir H, Bullough P, Maroudas A. The distribution of collagen in human articular cartilage with some of its physiological implications [J]. *J Bone Joint Surgery*, 1970, 52(3):554.
- [6] Clarke I C. Articular cartilage: A review and scanning electron microscope study: 1. The interterritorial fibrillar architecture [J]. *J Bone Joint Surgery*, 1971, 53(4):732.
- [7] Venn M, Maroudas A. Chemical composition and swelling of normal and osteoarthritic femoral head cartilage [J]. *Ann Rheum Dis*, 1977, 36(2):121.
- [8] Franzen A, Inerot S, Hejderup S O, et al. Variations in the composition of bovine hip articular cartilage with distance from the articular surface [J]. *Biochem J*, 1981, 195(3):535.
- [9] Bayliss M T, Venn M, Maroudas A, et al. Structure of proteoglycans from different layers of human articular cartilage [J]. *Biochem J*, 1983, 209(2):387.
- [10] Volpi M, Katz E P. On the adaptive structures of the collagen fibrils of bone and cartilage [J]. *J Biomechanics*, 1991, 24(1):67.
- [11] Maroudas A, Wachtel E J, Grushko G, et al. The effect of osmotic and mechanical pressures on water partitioning in articular cartilage [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1991, 1073(2):285.
- [12] Chen S S, Falcovitz Y H, Schneiderman R, et al. Depth-dependent compressive properties of normal aged human femoral head articular cartilage: relationship to fixed charge density [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2001, 9(6):561.
- [13] Muller C, Khabut A, Dudhia J, et al. Quantitative proteomics at different depths in human articular cartilage reveals unique patterns of protein distribution [J]. *Matrix Biol*, 2014(40):34.
- [14] Xia Y. Averaged and depth-dependent anisotropy of articular cartilage by microscopic imaging [J]. *Semin Arthritis Rheum*, 2008, 37(5):317.
- [15] Abragam A. *The Principles of Nuclear Magnetism* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1961.
- [16] Slichter C P. *Principles of Magnetic Resonance 3ED (Springer Series in Solid-state Sciences)* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [17] Callaghan P. *Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1991.
- [18] Blümich B. *Magnetic Resonance Microscopy: Methods and Application in Materials Science, Agriculture and Biomedicine* [M]. Weinheim: VCH, 1992.
- [19] Xia Y. Contrast in NMR imaging and microscopy [J]. *Concepts in Magn Reson*, 1996, 8(3):205.
- [20] Fullerton G D, Cameron I L, Ord V A. Orientation of tendons in the magnetic field and its effect on T_2 relaxation times [J]. *Radiology*, 1985, 155(2):433.
- [21] Henkelman R M, Stanisz G J, Kim J K, et al. Anisotropy of NMR properties of tissues [J]. *Magn Reson Med*, 1994, 32(5):592.
- [22] Xia Y, Farquhar T, Burton-Wurster N, et al. Origin of cartilage laminae in MRI [J]. *J Magn Reson Imaging*, 1997, 7(5):887.
- [23] Xia Y. Relaxation anisotropy in cartilage by NMR micros-

- copy (μ MRI) at 14 μ m resolution [J]. Magn Reson Med, 1998,39(6):941.
- [24] Gr nder W, Kanowski M, Wagner M, et al. Visualization of pressure distribution within loaded joint cartilage by application of angle-sensitive NMR microscopy [J]. Magn Reson Med, 2000,43(6):884.
- [25] Gray M L, Burstein D, Xia Y. Biochemical (and functional) imaging of articular cartilage [J]. Semin Musculoskelet Radiol, 2001,5(4):329.
- [26] Nieminen M T, Rieppo J, Toyras J, et al. T_2 relaxation reveals spatial collagen architecture in articular cartilage: A comparative quantitative MRI and polarized light microscopic study [J]. Magn Reson Med, 2001,46(3):487.
- [27] Trattnig S, Mlynarik V, Jung B, et al. Bilaminar pattern of tibial condyle cartilage layer on the fat-suppressed 3D gradient echo images: Artifact or structural and biochemical difference in composition of cartilage [J]. Magn Reson Imaging, 2001,19(2):187.
- [28] Liess C, Lusse S, Karger N, et al. Detection of changes in cartilage water content using MRI T_2 -mapping in vivo [J]. Osteoarthritis and Cartilage, 2002,10(12):907.
- [29] Yoshioka H, Haishi T, Uematsu T, et al. MR microscopy of articular cartilage at 1.5 T: Orientation and site dependence of laminar structures [J]. Skeletal Radiol, 2002,31(9):505.
- [30] Menezes N M, Gray M L, Hartke J R, et al. T_2 and $T_1\rho$ MRI in articular cartilage systems [J]. Magn Reson Med, 2004,51(3):503.
- [31] Xia Y, Zheng S, Bidthanapally A. Depth-dependent profiles of glycosaminoglycans in articular cartilage by μ MRI and histochemistry [J]. J Magn Reson Imaging, 2008,28(1):151.
- [32] Alhadlaq H A, Xia Y. The structural adaptations in compressed articular cartilage by microscopic MRI (μ MRI) T_2 anisotropy [J]. Osteoarthritis Cartilage, 2004,12(11):887.
- [33] Alhadlaq H A, Xia Y. Modifications of orientational dependence of microscopic magnetic resonance imaging T_2 anisotropy in compressed articular cartilage [J]. J Magn Reson Imaging, 2005,22(5):665.
- [34] Wang N, Chopin E, Xia Y. The effects of mechanical loading and gadolinium concentration on the change of T_1 and quantification of glycosaminoglycans in articular cartilage by microscopic MRI [J]. Phys Med Biol, 2013,58(13):4535.
- [35] Alhadlaq H A, Xia Y, Moody J B, et al. Detecting structural changes in early experimental osteoarthritis of tibial cartilage by microscopic MRI and polarized light microscopy [J]. Ann Rheum Dis, 2004,63(6):709.
- [36] Gold G E, Han E, Stainsby J, et al. Musculoskeletal MRI at 3.0 T: Relaxation times and image contrast [J]. American Journal of Roentgenology, 2004,183(2):343.
- [37] Regatte R R, Akella S V, Borthakur A, et al. Proteoglycan depletion-induced changes in transverse relaxation maps of cartilage: comparison of T_2 and $T_{1\rho}$ [J]. Acad Radiol, 2002,9(12):1388.
- [38] Li X, Benjamin Ma C, Link T M, et al. In vivo $T_{1\rho}$ and T_2 mapping of articular cartilage in osteoarthritis of the knee using 3 T MRI [J]. Osteoarthritis and Cartilage, 2007,15(7):789.
- [39] Wang N, Xia Y. Depth and orientational dependencies of MRI T_2 and $T_{1\rho}$ sensitivities towards trypsin degradation and Gd-DTPA²⁻ presence in articular cartilage at microscopic resolution [J]. Magn Reson Imaging, 2012,30(3):361.
- [40] Wang N, Xia Y. Orientational dependent sensitivities of T_2 and $T_{1\rho}$ towards trypsin degradation and Gd-DTPA²⁻ presence in bovine nasal cartilage [J]. Magnetic Resonance Materials in Physics: Biology and Medicine, 2012,25(4):297.
- [41] Bennett H S. Methods Applicable to the Study of Both Fresh and Fixed Materials Themicrosscopic Investigation of Biological Materials with Polarized Light [M]. New York: Paul B Hoeber, 1950.
- [42] Arokoski J P, Hyttinen M M, Lapveteläinen T, et al. Decreased birefringence of the superficial zone collagen network in the canine knee (stifle) articular cartilage after long distance running training, detected by quantitative polarized light microscopy [J]. Annals of the Rheumatic Diseases, 1996,55(4):253.
- [43] Oldenbourg R, Mei G. New polarized light microscope with precision universal compensator [J]. Journal of Microscopy, 1995,180(2):140.
- [44] Xia Y, Moody J B, Burton-Wurster N, et al. Quantitative in situ correlation between microscopic MRI and polarized light microscopy studies of articular cartilage [J]. Osteoarthritis and Cartilage, 2001,9(5):393.
- [45] Xia Y, Moody J B, Alhadlaq H, et al. Characteristics of topographical heterogeneity of articular cartilage over the joint surface of a humeral head [J]. Osteoarthritis and Cartilage, 2002,10(5):370.
- [46] Xia Y, Moody J B, Alhadlaq H, et al. Imaging the physical and morphological properties of a multi-zone young articular cartilage at microscopic resolution [J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2003,17(3):365.
- [47] Alhadlaq H A, Xia Y, Hansen F M, et al. Morphological changes in articular cartilage due to static compression: polarized light microscopy study [J]. Connective Tissue Research, 2007,48(2):76.
- [48] Xia Y, Alhadlaq H, Ramakrishnan N, et al. Molecular

- and morphological adaptations in compressed articular cartilage by polarized light microscopy and Fourier-transform infrared imaging [J]. *Journal of Structural Biology*, 2008, 164(1):88.
- [49] Burton-Wurster N, Todhunter R J, Lust G. *Animal Models of Osteoarthritis* [M]. New York: Marcel Dekker, 1993.
- [50] Hollander A P, Pidoux I, Reiner A, et al. Damage to type II collagen in aging and osteoarthritis starts at the articular surface, originates around chondrocytes, and extends into the cartilage with progressive degeneration [J]. *Journal of Clinical Investigation*, 1995, 96(6):2859.
- [51] Buckwalter J A, Mankin H J. Articular cartilage: Degeneration and osteoarthritis, repair, regeneration, and transplantation [J]. *Instr Course Lect*, 1998, 47:487.
- [52] Rieppo J, Toyras J, Nieminen M T, et al. Structure-function relationships in enzymatically modified articular cartilage [J]. *Cells Tissues Organs*, 2003, 175(3):121.
- [53] Rieppo J, Hyttinen M M, Halmesmaki E, et al. Changes in spatial collagen content and collagen network architecture in porcine articular cartilage during growth and maturation [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2009, 17(4):448.
- [54] Xia Y, Zheng S K, Szarko M, et al. Anisotropic properties of bovine nasal cartilage [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2012, 75(3):300.
- [55] Potter K, Kidder L H, Levin I W, et al. Imaging of collagen and proteoglycan in cartilage sections using Fourier transform infrared spectral imaging [J]. *Arthritis and Rheumatism*, 2001, 44(4):846.
- [56] Camacho N P, Torzilli P A, Mendelsohn R, et al. FTIR microscopic imaging of collagen and proteoglycan in bovine cartilage [J]. *Biopolymers*, 2001, 62(1):1.
- [57] West P A, Bostrom M P, Torzilli P A, et al. Fourier transform infrared spectral analysis of degenerative cartilage: An infrared fiber optic probe and imaging study [J]. *Applied Spectroscopy*, 2004, 58(4):376.
- [58] David-Vaudey E, Burghardt A, Keshari K, et al. Fourier transform infrared imaging of focal lesions in human osteoarthritic cartilage [J]. *European Cells and Materials*, 2005(10):51.
- [59] Bi X, Li G, Doty S B, et al. A novel method for determination of collagen orientation in cartilage by Fourier transform infrared imaging spectroscopy (FT-IRIS) [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2005, 13(12):1050.
- [60] Xia Y, Ramakrishnan N, Bidthanapally A. The depth-dependent anisotropy of articular cartilage by Fourier-transform infrared imaging (FTIRI) [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2007, 15(7):780.
- [61] Ramakrishnan N, Xia Y, Bidthanapally A. Polarized IR microscopic imaging of articular cartilage [J]. *Physica in Medicine and Biology*, 2007, 52(15):4601.
- [62] Ramakrishnan N, Xia Y, Bidthanapally A, et al. Determination of zonal boundaries in articular cartilage using infrared dichroism [J]. *Applied Spectroscopy*, 2007, 61(12):1404.
- [63] Kim M, Bi X H, Horton W E, et al. Fourier transform infrared imaging spectroscopic analysis of tissue engineered cartilage: histologic and biochemical correlations [J]. *J Biomed Opt*, 2005, 10(3):031105.
- [64] Marsh D, Schmitt F J, Muller M. Orientation of the infrared transition moments for an alpha-helix [J]. *Biophysical Journal*, 2000, 78(5):2499.
- [65] Gadaleta S J, Landis W J, Boskey A L, et al. Polarized FT-IR microscopy of calcified turkey leg tendon [J]. *Connective Tissue Research*, 1996, 34(3):203.
- [66] Coats A M, Hukins D W L, Imrie C T, et al. Polarization artefacts of an FTIR microscope and the consequences for intensity measurements on anisotropic materials [J]. *Journal of Microscopy*, 2003, 211(1):63.
- [67] West P A, Torzilli P A, Chen C, et al. Fourier transform infrared imaging spectroscopy analysis of collagenase-induced cartilage degradation [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2005, 10(1):014015.
- [68] Xia Y, Moody J B, Alhadlaq H. Orientational dependence of T_2 relaxation in articular cartilage: A microscopic MRI (μ MRI) study [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2002, 48(3):460.
- [69] Yin J H, Xia Y. Proteoglycan concentrations in healthy and diseased articular cartilage by Fourier transform infrared imaging and principal component regression [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2014, 133:825.
- [70] Yin J H, Xia Y. Macromolecular concentrations in bovine nasal cartilage by Fourier transform infrared imaging and principal component regression [J]. *Applied Spectroscopy*, 2010, 64(11):1199.
- [71] Yin J H, Xia Y, Lu M. Concentration profiles of collagen and proteoglycan in articular cartilage by Fourier transform infrared imaging and principal component regression [J]. *Spectrochim Acta Part A: Molecular & Biomolecular Spectroscopy*, 2012, 88:90.
- [72] Rieppo L, Rieppo J, Jurvelin J S, et al. Fourier transform infrared spectroscopic imaging and multivariate regression for prediction of proteoglycan content of articular cartilage [J]. *PLoS One*, 2012, 7(2):32344.
- [73] Rieppo L, Saarakkala S, Narhi T, et al. Application of second derivative spectroscopy for increasing molecular specificity of Fourier transform infrared spectroscopic imaging of articular cartilage [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2012, 20(5):451.
- [74] Batiste D L, Kirkley A, Laverty S, et al. High-resolution

- MRI and micro-CT in an ex vivo rabbit anterior cruciate ligament transection model of osteoarthritis [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2004, 12(8):614.
- [75] Van Lenthe G H, Hagenmuller H, Bohnerd M, et al. Nondestructive micro-computed tomography for biological imaging and quantification of scaffold-bone interaction in vivo [J]. *Biomaterials*, 2007, 28(15):2479.
- [76] Palmer A W, Guldborg R E, Levenston M E. Analysis of cartilage matrix fixed charge density and three-dimensional morphology via contrast-enhanced microcomputed tomography [J]. *Proceeding of National Academy of Sciences of USA*, 2006, 13(51):19255.
- [77] Cockman M D, Blanton C A, Chmielewski P A, et al. Quantitative imaging of proteoglycan in cartilage using a gadolinium probe and microCT [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2006, 14(3):210.
- [78] Kallioniemi A S, Jurvelin J S, Nieminen M T, et al. Contrast agent enhanced pQCT of articular cartilage [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2007, 52(4):1209.
- [79] Taylor C, Carballido-Gamio J, Majumdar S, et al. Comparison of quantitative imaging of cartilage for osteoarthritis: T_2 , $T_{1\rho}$, dGEMRIC and contrast-enhanced computed tomography [J]. *Magn Reson Imaging*, 2009, 27(6):779.
- [80] Xie L, Lin A S, Levenston M E, et al. Quantitative assessment of articular cartilage morphology via EPIC-microCT [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2009, 17(3):313.
- [81] Silvast T S, Jurvelin J S, Aula A S, et al. Contrast agent-enhanced computed tomography of articular cartilage; association with tissue composition and properties [J]. *Acta Radiologica*, 2009, 50(1):78.
- [82] Joshi N S, Bansal P N, Stewart R C, et al. Effect of contrast agent charge on visualization of articular cartilage using computed tomography: exploiting electrostatic interactions for improved sensitivity [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(37):13234.
- [83] Xia Y, Oravec D, Mittelstaedt D, et al. Depth-dependent ion concentrations in healthy and lesioned articular cartilage by μ CT and μ MRI [C]//57th Conference of Orthopaedic Research Society, California; Long Beach, 2011.
- [84] Bansal P N, Joshi N S, Entezari V, et al. Cationic contrast agents improve quantification of glycosaminoglycan (GAG) content by contrast enhanced CT imaging of cartilage [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2011, 29(5):704.
- [85] Hunter D J, Zhang Y, Niu J, et al. Increase in bone marrow lesions associated with cartilage loss: A longitudinal magnetic resonance imaging study of knee osteoarthritis [J]. *Arthritis and Rheum*, 2006, 54(5):1529.
- [86] Xu L, Hayashi D, Roemer F W, et al. Magnetic resonance imaging of subchondral bone marrow lesions in association with osteoarthritis [J]. *Semin in Arthritis and Rheum*, 2012, 42(2):105.
- [87] Bullough P, Goodfellow J. The significance of the fine structure of articular cartilage [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery: British Volume*, 1968, 50(4):852.
- [88] Weiss C, Rosenberg L, Helfet A J. An ultrastructural study of normal young adult human articular cartilage [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 1968, 50(4):663.
- [89] Minns R J, Steven F S. The collagen fibril organization in human articular cartilage [J]. *Journal of Anatomy*, 1977, 123(2):437.
- [90] Poole C A, Flint M H, Beaumont B W. Morphological and functional interrelationships of articular cartilage matrices [J]. *Journal of Anatomy*, 1984, 138(1):113.
- [91] Eggl P S, Herrmann W, Hunziker E B, et al. Matrix compartments in the growth plate of the proximal tibia of rats [J]. *The Anatomical Record*, 1985, 211(3):246.
- [92] Clark J M. The organisation of collagen fibrils in the superficial zones of articular cartilage [J]. *Journal of Anatomy*, 1990, 171:117.
- [93] Chen M H, Broom N D. Concerning the ultrastructural origin of large-scale swelling in articular cartilage [J]. *Journal of Anatomy*, 1999, 194(3):445.
- [94] Xia Y, Elder K. Quantification of the graphical details of collagen fibrils in transmission electron micrographs [J]. *Journal of Microscopy*, 2001, 204(1):3.
- [95] Szarko M, Xia Y. Direct visualisation of the depth-dependent mechanical properties of full-thickness articular cartilage [J]. *Open Journal of Orthopedics*, 2012, 2(2):34.
- [96] Xia Y. Resolution 'scaling law' in MRI of articular cartilage [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2007, 15(4):363.
- [97] Hayashi D, Guermazi A, Hunter D J. Osteoarthritis year 2010 in review: imaging [J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2011, 9(4):354.

广义 Boussinesq 方程的精确行波解研究

景书杰, 赵建卫, 王世磊

(河南理工大学 数学与信息科学学院, 河南 焦作 454000)

摘要:利用辅助函数法,把广义 Boussinesq 方程转化为代数方程组进行求解,并运用 Maple 软件计算得出非线性广义 Boussinesq 方程的 10 组精确行波解,解的形式丰富多样;利用该解题思路还可以求解推广的 KdV 方程和耦合的薛定谔方程的精确行波解。

关键词:辅助函数法;广义 Boussinesq 方程;精确行波解

中图分类号: O224 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.032

Study on the exact travelling wave solution of the generalized Boussinesq equation

JING Shu-jie, ZHAO Jian-wei, WANG Shi-lei

(Mathematics and Information Science Academy, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The auxiliary functions method was used to solve the generalized Boussinesq equations by transforming them into solving the algebraic equations. By the further application of the Maple software, ten exact travelling wave solutions of nonlinear generalized Boussinesq equation were gotten, which were abundant. Besides, the exact travelling wave solutions of the generalized KdV equations and the nonlinear coupled Schrodinger system will be gotten in this way.

Key words: auxiliary functions method; generalized Boussinesq equation; exact travelling wave solution

0 引言

广义 Boussinesq 方程是物理学中描述规则波和不规则波在复杂地形上发生折射、绕射和反射等效应的非常重要的数学模型,很多学者都对它进行了研究:C. J. Bai 等^[1]应用扩展双曲函数法得到了 6 组精确解;P. A. Clarkson 等^[2-3]给出了由 W. G. Zhang 等^[4-5]提出的由弹性棒产生的纵波传播的非线性模型在 $p = 1, 2, 4$ 时的孤立波解;A. Park^[6]也研究了此类方程的孤立波解和显式解;J. B. Li 等^[7]运用分支方法得到几组孤立波解和扭波解;而 D. Kaya^[5]运用 Adomian 分解法也求出此类方程的一个孤立波解;

M. Rafei 等^[8]运用同伦扰动的方法求出了此类方程的一个近似解. 在此类研究的基础上,本文将利用辅助函数法,给出广义 Boussinesq 方程的精确行波解.

1 研究方案

给定一个方程

$$F(x, t, u, u_t, u_x, u_{xx}, \dots) = 0 \quad (1)$$

其中, F 是已知函数, $u = u(x, t)$ 是待求函数. 方程 ① 的精确行波解的定义为:如果某个用解析表达式表达的函数 $u = u(x, t) = u(\xi)$ 使方程 ① 成为恒等式,其中 $\xi = bx + ct$, 则称 u 是方程 ① 的精确行

收稿日期:2015-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(10671057)

作者简介:景书杰(1965—),男,河南省长垣县人,河南理工大学教授,主要研究方向为优化理论.

波解.

这里,以一个简单的 KdV 方程

$$u_t + 6uu_x + u_{xxx} = 0 \quad (2)$$

为例,研究行波解的求法.

作行波变换 $\xi = ax + bt$, 则原偏微分方程解的形式可设为 $u = u(\xi)$. 由此可得

$$u_t = bu' \quad u_x = au' \quad u_{xxx} = a^3 u'''$$

将其代入方程 (2), 可得

$$bu' + 6auu' + a^3 u''' = 0 \quad (3)$$

设

$$u = \sum_{i=0}^n k_i f^i(\xi) = k_0 + k_1 f(\xi) + \cdots + k_n f^n(\xi)$$

其中 f 满足

$$f' = \sqrt{\sum_{k=0}^4 c_k f^k} \quad (4)$$

由齐次平衡思想可知, (3) 式中的非线性项 $6auu'$ 应与最高阶导数项 $a^3 u'''$ 中 f 的次数相等, 故可得

$$n + n + 1 = n + 3$$

因而 $n = 2$. 由此可得

$$\begin{cases} u = k_0 + k_1 f(\xi) + k_2 f^2(\xi) \\ u' = k_1 f' + 2k_2 f f' \\ u'' = k_1 f'' + 2k_2 [ff'' + (f')^2] \end{cases} \quad (5)$$

由 (4) 式可知

$$(f')^2 = c_0 + c_1 f + c_2 f^2 + c_3 f^3 + c_4 f^4$$

两边求导, 得到

$$2f'f'' = c_1 f' + 2c_2 f f' + 3c_3 f^2 f' + 4c_4 f^3 f'$$

等式两边约掉 f' , 从而得到

$$2f'' = c_1 + 2c_2 f + 3c_3 f^2 + 4c_4 f^3 \quad (6)$$

将 (4) 式和 (6) 式代入 (5) 式, 得到

$$u'' = l_0 + l_1 f + l_2 f^2 + l_3 f^3 + l_4 f^4$$

从而有

$$u''' = l_1 f' + 2l_2 f f' + 3l_3 f^2 f' + 4l_4 f^3 f'$$

其中, $l_i (i = 0, 1, \dots, 4)$ 是与 $c_i (i = 0, 1, \dots, 4)$ 和 $k_i (i = 0, 1, 2)$ 相关的常数, 将 u', uu' 和 u''' 代入 (3) 式得出的是关于 $f', ff', f^2 f'$ 和 $f^3 f'$ 的等式, 因为它们线性无关, 所以其系数必须为零, 进而得到关于 $c_i (i = 0, 1, \dots, 4)$ 与 $k_i (i = 0, 1, 2)$ 的代数方程组, 求其解, 再利用方程 (4) 解的形式, 就可解出 u .

2 求解过程

对广义 Boussinesq 方程

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + p \frac{\partial}{\partial x}\right)^2 u + q \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + r \frac{\partial^2 u^2}{\partial x^2} - s \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0$$

即

$$(p^2 + q)u_{xx} + u_{tt} + 2pu_{xt} + 2ru_x^2 + 2ruu_{xx} - su_{xxxx} = 0 \quad (7)$$

假设 $u = u(\xi)$, 其中 $\xi = ax + bt$, 则

$$\begin{aligned} u_t &= bu' & u_x &= au' & u_{xx} &= a^2 u'' \\ u_{tt} &= b^2 u'' & u_{xt} &= abu'' & u_{xxxx} &= a^4 u^{(4)} \end{aligned} \quad (8)$$

将 (8) 式代入 (7) 式得到

$$(p^2 + q)a^2 u'' + b^2 u'' + 2pabu'' + 2ra^2 (u')^2 + 2ra^2 uu'' - sa^4 u^{(4)} = 0 \quad (9)$$

设

$$u = \sum_{i=0}^n k_i f^i(\xi) = k_0 + k_1 f(\xi) + \cdots + k_n f^n(\xi) \quad (10)$$

其中 f 满足 (4) 式.

由齐次平衡思想可知, 非线性项 $2ra^2 uu''$ 应与最高阶导数项 $sa^4 u^{(4)}$ 中 f 的次数相等, 可得 $n + n + 2 = n + 4$, 从而 $n = 2$. 于是, (10) 式可写为

$$u = k_0 + k_1 f(\xi) + k_2 f^2(\xi) \quad (11)$$

则有

$$u' = k_1 f' + 2k_2 f f' \quad (12)$$

$$u'' = k_1 f'' + 2k_2 [ff'' + (f')^2] \quad (13)$$

由 (4) 式可得 $(f')^2 = c_0 + c_1 f + c_2 f^2 + c_3 f^3 + c_4 f^4$, 两边求导, 得到

$$2f'f'' = c_1 f' + 2c_2 f f' + 3c_3 f^2 f' + 4c_4 f^3 f'$$

从而

$$2f'' = c_1 + 2c_2 f + 3c_3 f^2 + 4c_4 f^3 \quad (14)$$

将 (4)(14) 式代入 (13) 式, 得到

$$u'' = \left(\frac{1}{2}k_1 c_1 + 2k_2 c_0\right) + (k_1 c_2 + 3k_2 c_1)f +$$

$$\left(\frac{3}{2}k_1 c_3 + 4k_2 c_2\right)f^2 + (2k_1 c_4 + 5k_2 c_3)f^3 + 6k_2 c_4 f^4 = l_0 + l_1 f + l_2 f^2 + l_3 f^3 + l_4 f^4 \quad (15)$$

其中, $l_0 = \frac{1}{2}k_1 c_1 + 2k_2 c_0, l_1 = k_1 c_2 + 3k_2 c_1, l_2 = \frac{3}{2}k_1 c_3 + 4k_2 c_2, l_3 = 2k_1 c_4 + 5k_2 c_3, l_4 = 6k_2 c_4$.

另一方面, 由 (12) 式可得

$$\begin{aligned} (u')^2 &= k_1^2 c_0 + (k_1^2 c_1 + 4k_1 k_2 c_0)f + \\ &(k_1^2 c_2 + 4k_1 k_2 c_1 + 4k_2^2 c_0)f^2 + \\ &(k_1^2 c_3 + 4k_1 k_2 c_2 + 4k_2^2 c_1)f^3 + \\ &(k_1^2 c_4 + 4k_1 k_2 c_3 + 4k_2^2 c_2)f^4 + \\ &(4k_1 k_2 c_4 + 4k_2^2 c_3)f^5 + 4k_2^2 c_4 f^6 \end{aligned} \quad (16)$$

$$u^{(4)} = \left(\frac{1}{2}l_1 c_1 + 2l_2 c_0\right) + (l_1 c_2 + 3l_2 c_1 + 6l_3 c_0)f +$$

$$\left(\frac{3}{2}l_1 c_3 + 4l_2 c_2 + \frac{15}{2}l_3 c_1 + 12l_4 c_0\right)f^2 +$$

$$\begin{aligned} & (2l_1c_4 + 5l_2c_3 + 9l_3c_3 + 14l_4c_1)f^3 + \\ & \left(6l_2c_4 + \frac{21}{2}l_3c_3 + 16l_4c_2\right)f^4 + \\ & (12l_3c_4 + 18l_4c_3)f^5 + 20l_4c_4f^6 \end{aligned} \quad (17)$$

将⑮⑯⑰式代入⑨式,得到

$$\begin{aligned} & (p^2a^2 + qa^2 + b^2 + 2pab)l_0 + \\ & 2ra^2k_1^2c_0 + 2ra^2k_0l_0 - sa^4\left(\frac{1}{2}l_1c_1 + 2l_2c_0\right) + \\ & [(p^2a^2 + qa^2 + b^2 + 2pab)l_1 + \\ & 2ra^2(k_1^2c_1 + 4k_1k_2c_0) + 2ra^2(k_0l_1 + k_1l_0) - \\ & sa^4(l_1c_2 + 3l_2c_1 + 6l_3c_0)]f + \\ & [(p^2a^2 + qa^2 + b^2 + 2pab)l_2 + \\ & 2ra^2(k_1^2c_2 + 4k_1k_2c_1 + 4k_2^2c_0) + \\ & 2ra^2(k_0l_2 + k_1l_1 + k_2l_0) - \\ & sa^4\left(\frac{3}{2}l_1c_3 + 4l_2c_2 + \frac{15}{2}l_3c_1 + 12l_4c_0\right)]f^2 + \\ & [(p^2a^2 + qa^2 + b^2 + 2pab)l_3 + \\ & 2ra^2(k_1^2c_3 + 4k_1k_2c_2 + 4k_2^2c_1) + \\ & 2ra^2(k_0l_3 + k_1l_2 + k_2l_1) - \\ & sa^4(2l_1c_4 + 5l_2c_3 + 9l_3c_2 + 14l_4c_1)]f^3 + \\ & [(p^2a^2 + qa^2 + b^2 + 2pab)l_4 + \\ & 2ra^2(k_1^2c_4 + 4k_1k_2c_3 + 4k_2^2c_2) + \\ & 2ra^2(k_0l_4 + k_1l_3 + k_2l_2) - \\ & sa^4(6l_2c_4 + \frac{21}{2}l_3c_3 + 16l_4c_2)]f^4 + \\ & [2ra^2(4k_1k_2c_4 + 4k_2^2c_3) + \\ & 2ra^2(k_1l_4 + k_2l_3) - sa^4(12l_3c_4 + 18l_4c_3)]f^5 + \\ & [2ra^2(4k_2^2c_4) + 2ra^2k_2l_4 - sa^4(20l_4c_4)]f^6 = 0 \end{aligned}$$

由于 $1, f, f^2, f^3, f^4, f^5$ 与 f^6 线性无关,所以各项系数均为0. 经化简,并令

$$\frac{p^2a^2 + qa^2 + b^2 + 2pab}{sa^4} = A \quad \frac{r}{sa^2} = B \quad (18)$$

从而得到

$$\begin{aligned} & A\left(\frac{1}{2}k_1c_1 + 2k_2c_0\right) + B(2k_1^2c_0 + k_0k_1c_1 + 4k_0k_2c_0) = \\ & \frac{1}{2}k_1c_1c_2 + \frac{3}{2}k_2c_1^2 + 3k_1c_0c_3 + 8k_2c_0c_2 \\ & A(k_1c_2 + 3k_2c_1) + B(3k_1^2c_1 + 2k_0k_1c_2 + \\ & 6k_0k_2c_1 + 12k_1k_2c_0) = \\ & k_1c_2^2 + 15k_2c_1c_2 + \frac{9}{2}k_1c_1c_3 + 12k_1c_0c_4 + 30k_2c_0c_3 \\ & A\left(\frac{3}{2}k_1c_3 + 4k_2c_2\right) + B(4k_1^2c_2 + 15k_1k_2c_1 + \\ & 12k_2^2c_0 + 3k_0k_1c_3 + 8k_0k_2c_2) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{15}{2}k_1c_2c_3 + 42k_2c_1c_3 + 16k_2c_2^2 + 15k_1c_1c_4 + 72k_2c_0c_4 \\ & A(2k_1c_4 + 5k_2c_3) + B(5k_1^2c_3 + 18k_1k_2c_2 + \\ & 14k_2^2c_1 + 4k_0k_1c_4 + 10k_0k_2c_3) = \\ & 20k_1c_2c_4 + 90k_2c_1c_4 + \frac{15}{2}k_1c_3^2 + 65k_2c_2c_3 \\ & 6Ak_2c_4 + B(6k_1^2c_4 + 21k_1k_2c_3 + 16k_2^2c_2 + 12k_0k_2c_4) = \\ & 30k_1c_3c_4 + 120k_2c_2c_4 + \frac{105}{2}k_2c_3^2 \\ & B(24k_1k_2c_4 + 18k_2^2c_3) = 24k_1c_4^2 + 168k_2c_3c_4 \\ & 20Bk_2^2c_4 = 120k_2c_4^2 \end{aligned}$$

以上公式联立,利用 Maple 软件计算可得以下四组解:

1) $k_1 = 0, k_2 = 0, k_0$ 和 $c_i (i = 0, 1, \dots, 4)$ 为任意常数;

$$2) k_2 = 0, c_4 = 0, c_3 = \frac{2Bk_1}{3}, c_2 = A + 2Bk_0, c_0,$$

c_1, k_0 和 k_1 为任意常数;

3) $c_0 = c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 0, k_i (i = 0, 1, 2)$ 为任意常数;

$$4) k_0 = \frac{16c_2c_4 - 4Ac_4 - 3c_3^2}{8Bc_4}, k_1 = \frac{3c_3}{B}, k_2 = \frac{6c_4}{B}, c_1 = \frac{c_3(4c_2c_4 - c_3^2)}{8c_4^2}, c_0, c_2 \text{ 和 } c_3 \text{ 为任意常数, } c_4, a \text{ 和 } b \text{ 为非零任意常数.}$$

由于 k_2 不可以为0,故解1), 2) 应舍去;且在取解3)时,函数 f 为0,不可取,因此,只有解4)符合情况.

下面分10种情况讨论函数 f ,进而利用⑩式得出所求函数 u .

1) 当 $c_0 = 0, c_2 > 0, c_3 = 0, c_4 < 0$ 时, $c_1 = 0$, ④

$$\text{式有解 } f = \sqrt{-\frac{c_2}{c_4}} \operatorname{sech}(\sqrt{c_2}\xi), \text{ 此时, } k_0 = \frac{4c_2 - A}{2B},$$

$$k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}, \text{ 从而可得}$$

$$u = \frac{4c_2 - A}{2B} - \frac{6c_2}{B} \operatorname{sech}^2(\sqrt{c_2}(ax + bt)) \quad (19)$$

2) 当 $c_0 = \frac{c_2^2}{4c_4}, c_2 < 0, c_3 = 0, c_4 > 0$ 时, $c_1 = 0$,

$$\text{④式有解 } f = \sqrt{-\frac{c_2}{2c_4}} \tanh\left(\sqrt{-\frac{c_2}{2}}\xi\right), \text{ 此时, } k_0 =$$

$$\frac{4c_2 - A}{2B}, k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}, \text{ 从而可得}$$

$$u = \frac{4c_2 - A}{2B} - \frac{3c_2}{B} \tanh^2\left(\sqrt{-\frac{c_2}{2}}(ax + bt)\right)$$

3) 当 $c_0 = 0, c_2 < 0, c_3 = 0, c_4 > 0$ 时, $c_1 = 0$, ④

式有解 $f = \sqrt{-\frac{c_2}{c_4}} \sec(\sqrt{-c_2} \xi)$, 此时, $k_0 =$

$\frac{4c_2 - A}{2B}, k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}$, 从而可得

$$u = \frac{4c_2 - A}{2B} - \frac{6c_2}{B} \sec^2(\sqrt{-c_2}(ax + bt))$$

4) 当 $c_0 = \frac{c_2^2}{4c_4}, c_2 > 0, c_3 = 0, c_4 > 0$ 时, $c_1 = 0$,

④ 式有解 $f = \sqrt{\frac{c_2}{2c_4}} \tan\left(\sqrt{\frac{c_2}{2}} \xi\right)$, 此时 $k_0 = \frac{4c_2 - A}{2B}$,

$k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}$, 从而可得

$$u = \frac{4c_2 - A}{2B} + \frac{3c_2}{B} \tan^2\left(\sqrt{\frac{c_2}{2}}(ax + bt)\right) \quad (20)$$

5) 当 $c_0 = 0, c_2 = 0, c_3 = 0, c_4 > 0$ 时, $c_1 = 0$, ④

式有解 $f = -\frac{1}{\sqrt{c_4} \xi}$, 此时, $k_0 = -\frac{A}{2B}, k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}$,

从而可得

$$u = -\frac{A}{2B} + \frac{6}{B(ax + bt)^2}$$

6) 当 $c_0 = -\frac{c_2^2 m^2 (1 - m^2)}{c_4 (2m^2 - 1)}, c_2 > 0, c_3 = 0, c_4 <$

0 时, $c_1 = 0$, ④ 式有解

$$f = \sqrt{-\frac{c_2 m^2}{c_4 (2m^2 - 1)}} \operatorname{cn}\left(\sqrt{\frac{c_2}{2m^2 - 1}} \xi, m\right)$$

此时, $k_0 = \frac{4c_2 - A}{2B}, k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}$, 从而可得

$$u = \frac{4c_2 - A}{2B} -$$

$$\frac{6c_2 m^2}{B(2m^2 - 1)} \operatorname{cn}^2\left(\sqrt{\frac{c_2}{2m^2 - 1}}(ax + bt), m\right)$$

7) 当 $c_0 = -\frac{c_2^2 (1 - m^2)}{c_4 (2 - m^2)^2}, c_2 > 0, c_3 = 0, c_4 <$

时, $c_1 = 0$, ④ 式有解

$$f = \sqrt{-\frac{c_2}{c_4 (2 - m^2)}} \operatorname{dn}\left(\sqrt{\frac{c_2}{2 - m^2}} \xi, m\right)$$

此时, $k_0 = \frac{4c_2 - A}{2B}, k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}$, 从而可得

$$u = \frac{4c_2 - A}{2B} -$$

$$\frac{6c_2}{B(2 - m^2)} \operatorname{dn}^2\left(\sqrt{\frac{c_2}{2 - m^2}}(ax + bt), m\right)$$

8) 当 $c_0 = -\frac{c_2^2 m^2}{c_4 (m^2 + 1)^2}, c_2 < 0, c_3 = 0, c_4 >$

时, $c_1 = 0$, ④ 式有解

$$f = \sqrt{-\frac{c_2 m^2}{c_4 (m^2 + 1)}} \operatorname{sn}\left(\sqrt{-\frac{c_2}{m^2 + 1}} \xi, m\right)$$

此时, $k_0 = \frac{4c_2 - A}{2B}, k_1 = 0, k_2 = \frac{6c_4}{B}$, 从而可得

$$u = \frac{4c_2 - A}{2B} -$$

$$\frac{6c_2 m^2}{B(m^2 + 1)} \operatorname{sn}^2\left(\sqrt{-\frac{c_2}{m^2 + 1}}(ax + bt), m\right)$$

9) 当 $c_0 = 0, c_3(4c_2 c_4 - c_3^2) = 0, c_2 < 0, c_4 >$

时, ④ 式有解

$$f = -\frac{c_2 \sec^2\left(\frac{1}{2} \sqrt{-c_2} \xi\right)}{2 \sqrt{-c_2 c_4} \tan\left(\frac{1}{2} \sqrt{-c_2} \xi\right) + c_3}$$

此时, $k_0 = \frac{16c_2 c_4 - 4Ac_4 - 3c_3^2}{8Bc_4}, k_1 = \frac{3c_3}{B}, k_2 = \frac{6c_4}{B}$,

从而可得

$$u = \frac{16c_2 c_4 - 4Ac_4 - 3c_3^2}{8Bc_4} -$$

$$\frac{3c_2 c_3 \sec^2\left(\frac{1}{2} \sqrt{-c_2}(ax + bt)\right)}{2B \sqrt{-c_2 c_4} \tan\left(\frac{1}{2} \sqrt{-c_2}(ax + bt)\right) + c_3 B} +$$

$$\frac{6c_4}{B} \frac{c_2^2 \sec^4\left(\frac{1}{2} \sqrt{-c_2}(ax + bt)\right)}{\left(2 \sqrt{-c_2 c_4} \tan\left(\frac{1}{2} \sqrt{-c_2}(ax + bt)\right) + c_3\right)^2}$$

10) 当 $c_0 = 0, c_3(4c_2 c_4 - c_3^2) = 0, c_2 > 0, c_4 >$

0 时, ④ 式有解

$$f = -\frac{c_2 \operatorname{sech}^2\left(\frac{1}{2} \sqrt{c_2} \xi\right)}{2 \sqrt{c_2 c_4} \tanh\left(\frac{1}{2} \sqrt{c_2} \xi\right) + c_3}$$

此时, $k_0 = \frac{16c_2 c_4 - 4Ac_4 - 3c_3^2}{8Bc_4}, k_1 = \frac{3c_3}{B}, k_2 = \frac{6c_4}{B}$,

从而可得

$$u = \frac{16c_2 c_4 - 4Ac_4 - 3c_3^2}{8Bc_4} -$$

$$\frac{3c_2 c_3 \operatorname{sech}^2\left(\frac{1}{2} \sqrt{c_2}(ax + bt)\right)}{2B \sqrt{c_2 c_4} \tanh\left(\frac{1}{2} \sqrt{c_2}(ax + bt)\right) + c_3 B} +$$

$$\frac{6c_4}{B} \frac{c_2^2 \operatorname{sech}^4\left(\frac{1}{2} \sqrt{c_2}(ax + bt)\right)}{\left(2 \sqrt{c_2 c_4} \tanh\left(\frac{1}{2} \sqrt{c_2}(ax + bt)\right) + c_3\right)^2}$$

以上各种情况中, A, B 的取值见 ⑱ 式. 经验证, 这些解全部是 ⑦ 式的解.

在 ⑲ 式中, 取 $c_2 = 1, a = 1, b = 1, r = 1, s = 1, p = 1, q = 2$, 可得

$$u = -1 - 6\text{sech}^2(x + t)$$

利用 Maple, 可画出在 $-8 \leq x \leq 5, 0 \leq t \leq 5$ 时的图形, 即孤立波解, 波形见图 1; 在 ⑳ 式中, 取 $c_2 = 2, a = 1, b = 1, r = 1, s = 1, p = 1, q = 2$, 可得

$$u = 1 + 6\tanh^2(x + t)$$

利用 Maple, 可画出其在 $-3 \leq x \leq 3, 0 \leq t \leq 6$ 时的图形, 即行波解, 波形见图 2. 对于其他情况解的图形, 这里不作研究.

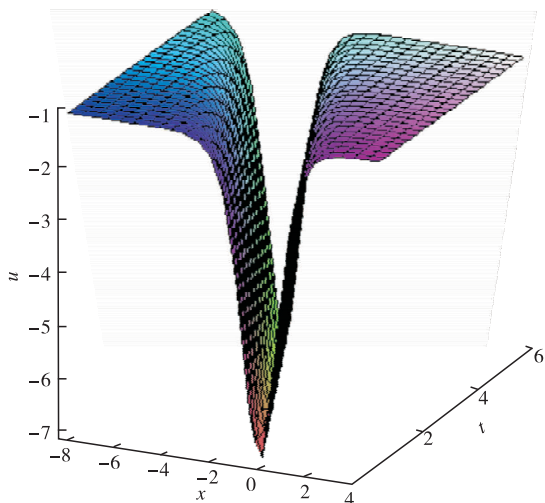


图 1 孤立波解波形图

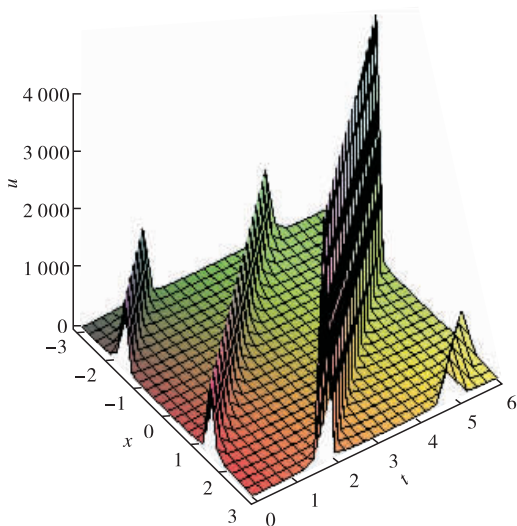


图 2 行波解波形图

3 结语

本文利用辅助函数法, 对广义 Boussinesq 方程的精确行波解进行研究, 得到了非线性广义 Boussinesq 方程的 10 组精确行波解, 其中解的形式丰富多样, 有三角函数、双曲函数、雅克比椭圆函数和有理函数等. 另外, 经过验证, 利用本文的解题思路还可以求解推广的 KdV 方程和耦合的薛定谔方程的精确行波解, 并且同样能够得到形式丰富的解.

参考文献:

[1] Bai C J, Zhao H. A New rational algebraic approach to find exact analytical solutions to a (2 + 1)-dimensional system[J]. Commun Theor Phys, 2007, 48(5): 801.

[2] Clarkson P A, Leveque R J, Saxton R. Solitary wave interactions in elastic rod[J]. Stud Appl Math, 1986, 75: 95.

[3] Bogolubsky I L. Some examples of inelastic solution interaction[J]. Comput Phys Commun, 1977(13): 149.

[4] Zhang W G, Chang Q S, Fan E G. Methods of judging shape of solitary wave and solution formulae for some evolution equations with nonlinear terms of high order [J]. J Math Anal Appl, 2003, 287: 1.

[5] Kaya D. The exact and numerical solitary-wave solutions for generalized modified Boussinesq equation [J]. Phys Lett A, 2006, 348: 244.

[6] Parker A. On exact solutions of the regularized long-wave equation: A direct approach to partially integrable equation. 1. solitary wave and solutions [J]. J Math Phys, 1995, 36: 3498.

[7] Li J B, Zhang L J. Bifurcations of traveling wave solutions in generalized Pochhammer-Chree equation [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002(14): 581.

[8] Rafei M, Ganji D D, Mohammadi Daniali H R, et al. Application of homotopy perturbation method to the RLM and generalized modified Boussinesq equations [J]. Phys Lett A, 2007, 364: 1.

[9] 李画眉, 林机, 许友生. 两组新的广义 Ito 方程组的多组行波解[J]. 物理学报, 2004, 53(2): 349.

[10] 套格图桑. 构造非线性发展方程无穷序列复合型精确解的一种方法[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 010202.

逐段决定复合泊松风险模型的最优分红与注资策略

岳毅蒙¹, 王欣², 赵锐¹

(1. 商洛学院 数学与计算机应用学院, 陕西 商洛 726000;

2. 商洛学院 经济与管理学院, 陕西 商洛 726000)

摘要:研究了逐段决定复合泊松风险模型的最优分红和注资问题,以股东的破产时刻折现分红减去惩罚折现注资的差的期望值最大化为目标,通过求解相应的HJB方程,得到了对应的值函数,进而得出最优分红和注资策略是Threshold策略的结论,使风险模型更加符合实际,更具现实意义。

关键词:逐段决定复合泊松风险模型;HJB方程;分红;注资

中图分类号:O211.6;F840 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.033

Optimal dividend and capital injection strategies in the piecewise-deterministic compound Poisson risk model

YUE Yi-meng¹, WANG Xin², ZHAO Rui¹

(1. Faculty of Mathematics and Computer Application, Shangluo University, Shangluo 726000, China;

2. Faculty of Economics and Management, Shangluo University, Shangluo 726000, China)

Abstract: Optimal dividend payments and capital injections of the piecewise-deterministic compound Poisson risk model were discussed. The objective of an insurance business under consideration was to maximize the discounted dividend payments minus the penalized discounted capital injections. By a method to determine numerically the solution to the HJB equation, the corresponding Hamilton-Jacobi-Bellman equation was derived. And the optimal dividend and strategy was the Threshold strategy. This conclusion made the risk model have more realistic and more practical significance.

Key words: piecewise-deterministic compound Poisson risk model; HJB equation; dividend; capital injection

0 引言

逐段决定复合泊松风险模型的概念是由 J. Cai 等^[1]在2009年首次提出的,相对于经典复合泊松模型,此模型的保费收入率依赖盈余过程,因此更加

符合实际. 逐段决定复合泊松风险模型包括经典风险模型、常利率风险模型、多重阈值分红策略下的风险模型、存息利率风险模型、对偶模型等. 目前,针对这些众多特殊情形已有不同程度的讨论,文献[1]讨论了此模型在一般框架下的最优分红问题;

收稿日期:2015-01-14

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2013JM1023);陕西省教育厅科研项目(2013JK0605);商洛学院教改项目(14JYJX103,15JYJX118);商洛学院科研项目(13SKY013)

作者简介:岳毅蒙(1984—),男,陕西省富平市人,商洛学院讲师,硕士,主要研究方向为金融数学、保险精算.

文献[2]讨论了在带交易费用的情况下,此模型的最优分红问题,但对逐段决定复合泊松风险模型本身及其一般的最优控制研究很少. 本文拟在前人研究成果^[3-13]的基础上,进一步考虑在允许注资的情况下,逐段决定复合泊松风险模型的最优分红和注资问题,为保险公司的科学决策提供相应的理论指导.

1 模型构建

定义 1 设 $\{X_t, 0 \leq t < \infty\}$ 是定义在概率空间 $(\Omega, F, \{F_t\}_{t \geq 0}, P)$ 上的实值随机过程,若满足以下条件,则称之为逐段决定复合泊松过程(PDCP).

1) $X_0 = x$;

2) $\tau_0 = 0, \tau_i$ 为过程 $\{X_t\}$ 的一系列随机跳时刻,相应的跳跃次数由强度为 λ 的齐次泊松过程 $\{X_t\}$ 来表示;

3) $\{Y_i\}_{i \in N}$ 是一系列独立同分布的非负随机变量,表示两次相邻随机跳的跃度,其分布函数和密度函数分别为 $F(y)$ 和 $f(y)$, 并且 $E(Y_i) = \frac{1}{\mu}, F(0) = 0$;

4) 相邻两次随机跳跃之间的过程表示为 $\varphi(t - \tau_i, X_{\tau_i})I_{|\tau_i \leq t < \tau_{i+1}|}$, 由 $\varphi(t, x) = x + \int_0^t C(\varphi(s, x)) ds$ 决定,其中, $C(\cdot)$ 是局部利普希兹连续的.

在逐段决定复合泊松风险模型中,保险公司的盈余过程表示为

$$X_t = x + \int_0^t C(X_s) ds - \sum_{i=1}^{N_t} Y_i \tag{1}$$

其中, $\{Y_i\}_{i \in N}$ 为索赔额度, $\{N(t)\}_{t \geq 0}$ 为索赔次数,二者相互独立. ①式可以等价地表示为

$$X_t = \sum_{i=0}^{\infty} \varphi(t - \tau_i, X_{\tau_i}) I_{|\tau_i \leq t < \tau_{i+1}|} \quad t < \tau$$

其中 $\tau = \inf\{t > 0 \mid X_t < 0\}$.

在①式基础上考虑策略 $\pi = \{(D_t, Z_t)\}$, 其中 $D = (D_t)_{t \geq 0}, Z = (Z_t)_{t \geq 0}$ 分别表示截至 t 时刻的累积分红与注资. 假设对于 $x \geq 0, C(x)$ 是连续的、单调不减的,且 $0 < C(x) \leq cx + c_0$, 其中 $C(0) > 0, c$ 和 c_0 为非负常数.

定义 2 我们称分红率过程 $\{D_t\}_{t \geq 0}$ 是可允许策略,如果 $0 \leq D_t \leq C(X_t^R) + r_0$, 其中 r_0 为常数,则盈余过程变为

$$X_t^\pi = x + \int_0^t C(X_s^\pi) ds - \sum_{i=1}^{N_t} Y_i - D_t^\pi + Z_t^\pi$$

破产时刻定义为

$$T^\pi = \inf\{t \geq 0 \mid X_{t+}^\pi < 0\}$$

对应策略 π 的性能指标定义为

$$V^\pi(x) = E_x \left[\int_0^{T^\pi} e^{-\delta t} dD_t - \varphi \int_0^{T^\pi} e^{-\delta t} dZ_t \right]$$

其中 $\varphi > 1$ 是罚金因子. 本文考虑带有约束的分红策略,目标就是最大化值函数 $V^\pi(x)$, 即 $V(x) = \sup_{\pi \in \Pi} V^\pi(x)$, 其中 Π 表示所有可行策略的集合.

2 值函数的性质

引理 1 $V(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上是递增的、Lipschitz 连续的函数,且满足

$$0 \leq V(x) \leq u_0/\delta \quad \lim_{x \rightarrow \infty} V(x) = u_0/\delta$$

对 $x \geq 0$ 及任意停时 τ , 有如下动态规划原理成立:

$$V^\pi(x) = \sup_{\pi} E_x \left[\int_0^{T^\pi \wedge \tau} e^{-\delta t} dD_t - \varphi \int_0^{T^\pi \wedge \tau} e^{-\delta t} dZ_t + e^{-\delta(T^\pi \wedge \tau)} V(X_{T^\pi \wedge \tau}^\pi) \right] \tag{2}$$

令 $\varepsilon > 0$ 和任意可行策略 π , 定义

$$\sigma^\pi = \inf\{t \geq 0, X_t^\pi \notin (x - \varepsilon, x + \varepsilon)\}$$

选择 ε 充分小, 则 $\sigma^\pi < T^\pi$, 令 $\tau^\pi = T^\pi \wedge h, h > 0$, 所以当 $h \rightarrow 0$ 时 $\tau^\pi \rightarrow 0$, 应用 Itô 公式于 $e^{-\delta \tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi)$ 得

$$\begin{aligned} e^{-\delta \tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi) &= V(X_{0-}^\pi) + \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} (C(x) - u_s) V'(X_{s-}^\pi) - \delta V(X_{s-}^\pi) ds + \\ &\sum_{\substack{0 \leq s \leq \tau^\pi \\ X_s^\pi \neq X_{s+}^\pi}} e^{-\delta s} [V(X_s^\pi) - V(X_{s-}^\pi)] + \\ &\sum_{\substack{0 \leq s \leq \tau^\pi \\ X_s^\pi \neq X_{s+}^\pi}} e^{-\delta s} [V(X_{s+}^\pi) - V(X_s^\pi)] \end{aligned} \tag{3}$$

其中 $X_s^\pi \neq X_{s+}^\pi$ 仅在注资时刻发生, 所以

$$\sum_{\substack{0 \leq s \leq \tau^\pi \\ X_s^\pi \neq X_{s+}^\pi}} e^{-\delta s} [V(X_{s+}^\pi) - V(X_s^\pi)] = \varphi \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} dZ_s$$

当索赔到达或分红时 $X_{s-}^\pi \neq X_s^\pi$, 由索赔达到引起的跳导致了

$$M(\tau^\pi) = M(\sigma^\pi \wedge h) =$$

$$\sum_{\substack{0 \leq s \leq \tau^\pi \\ X_s^\pi \neq X_{s+}^\pi}} e^{-\delta s} [V(X_s^\pi) - V(X_{s-}^\pi)] -$$

$$\lambda \int_0^{\tau^\pi} \int_0^\infty e^{-\delta s} (V(X_{s-}^\pi - y) - V(X_{s-}^\pi)) dF(y) ds$$

是一个初值为 0 的鞅. 而由分红导致的跳等于

$-\int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} dD_s$, 所以由 ② 可得

$$V(x) \geq E_x \left[\int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} dD_s - \varphi \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} dZ_s + V(x) + \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} [(C(x) - u_s) V'(X_{s-}^\pi) - \delta V(X_{s-}^\pi) + \lambda \int_0^\infty V(X_{s-}^\pi - y) - V(X_{s-}^\pi) dF(y)] ds - \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} dD_s + \varphi \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} dZ_s \right]$$

等价于

$$E_x \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} [(C(x) - u_s) V'(X_{s-}^\pi) - (\lambda + \delta) V(X_{s-}^\pi) + \lambda \int_0^\infty V(X_{s-}^\pi - y) dF(y)] ds \leq 0$$

当 $T^\pi > 0$ 时, 适当选择 ε 使得 $E\tau^\pi > 0$. 上式两端同时除以 $E\tau^\pi$, 令 $h \rightarrow 0$, 则

$$(C(x) - u) V'(x) + u - (\lambda + \delta) V(x) + \lambda \int_0^\infty V(x - y) dF(y) \leq 0 \quad (4)$$

其中 $z \in R_+$.

另一方面可考虑这样的策略, 股东首先注资 $\varepsilon > 0$, 之后从 $x + \varepsilon$ 开始应用最优策略, 则 $V(x) \geq V(x + \varepsilon) - \varphi\varepsilon$, 令 $\varepsilon \rightarrow 0$, 则

$$V'(x) \leq \varphi \quad (5)$$

类似于 W. Fleming^[14] 中的讨论, ④⑤ 式中至少有一个等号成立. 因此有以下定理成立.

定理 1 函数 $V(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上几乎处处可导, 且满足 HJB 方程

$$\max \left\{ \sup_{0 \leq t \leq C(x) + r_0} \{ (C(x) - u) V'(x) + u - (\lambda + \delta) V(x) + \lambda \int_0^x V(x - y) dF(y) \}, V'(x) - \varphi \right\} = 0 \quad (6)$$

3 最优分红和注资策略

⑥ 式中左边需要最大化的两项分别为 $u(1 - V'(x))$ 和 $\int_0^{x+z} V(x - y) dF(y)$, 首先, 因为 $u(1 - V'(x))$ 关于 u 是线性的, 最大化 $u(1 - V'(x))$ 的 u^* 可以写为

$$u^*(x) = \begin{cases} 0 & V'(x) > 1 \\ u_0 & V'(x) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

其次, 要最大化 $\int_0^{x+z} V(x - y) dF(y)$, 因为 $V(x) \geq 0$, 所以可以定义 $z^* = \inf \{ z : V(x) > 0 \}$, 当 $x < 0$ 时,

股东或者注资使公司恢复经营, 或拒绝注资使公司破产. 对于前一种情况, 无论注资量为多少, 在 $x < 0$ 时, $V(x)$ 是线性的, 即 $V(x) = V(0) + \varphi x$, 由 z^* 的定义

$$z^* = \frac{V(0)}{\varphi} \quad (8)$$

可知 z^* 是股东愿意承担的最大赤字, 故称 $-z^*$ 为最优注资下限.

定理 2 策略 ⑦⑧ 所得的 Threshold 策略是最优的, 即

$$V^{\pi^*}(x) = V(x)$$

证明 对 ③ 式两边取期望值得

$$E_x [e^{-\delta\tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi)] - V(X_0^-) =$$

$$E_x \left[\int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} [(C(x) - u_s) V'(X_{s-}^\pi) - (\delta + \lambda) V(X_{s-}^\pi) + \lambda \int_0^\infty V(X_{s-}^\pi - y) dF(y)] ds + \varphi \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} dZ_s \right]$$

结合 HJB 方程得

$$V^\pi(x) = E_x [e^{-\delta\tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi)] + E_x \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} u_s^* ds \quad (9)$$

又当 $y < 0$ 时 $V^\pi(y) = 0$ 可得

$$E_x [e^{-\delta\tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi)] = e^{-\delta\tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi) I_{|t| < \tau} + e^{-\delta\tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi) I_{|\tau| < t} = e^{-\delta\tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi) I_{|t| < \tau}$$

由引理 1 及控制收敛定理知

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E_x [e^{-\delta\tau^\pi} V(X_{\tau^\pi}^\pi)] = 0$$

对 ⑨ 式两边取极限值得

$$V^\pi(x) = E_x \int_0^{\tau^\pi} e^{-\delta s} u_s^* ds = V(x)$$

4 结语

本文在逐段决定复合泊松模型的基础上考虑受限分红情况, 利用随机控制理论得出值函数是相应问题 HJB 方程的经典解, 最优分红和注资策略是 Threshold 策略. 这一研究结果推广了前人的结论, 使风险模型更加符合实际, 更具现实意义, 因而可为保险公司相关策略的制订提供一定理论支持.

参考文献:

- [1] Cai J, Feng R, Willmot G E. On the expectation of total discounted operating costs up to default and its applications [J]. *Advances in Applied Probability*, 2009 (41):495.
- [2] 董继国. 逐段决定复合泊松风险模型的最优控制问题 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2014.

- [3] Schmidli H. Optimal dividend strategies in a Cramer-Lundberg model with capital injections[J]. Insurance: Mathematics and Economics, 2008(5):1.
- [4] Scheer N, Schmidli H. Optimal dividend strategies in a Cramer-Lundberg model with capital injections and administration costs [J]. European Actuarial Journal, 2011(1):57.
- [5] Akyildirim E, Güney I E, Rochet J C, et al. Optimal dividend policy with random interest rates [J]. Journal of Mathematical Economics, 2014, 51:93.
- [6] Hunting M, Paulsen J. Optimal dividend policies with transaction costs for a class of jump-diffusion processes [J]. Finance and Stochastics, 2013, 17(1):73.
- [7] Zhu J. Optimal dividend control for a generalized risk model with investment incomes and debit interest [J]. Scandinavian Actuarial Journal, 2013, 2013(2):140.
- [8] Eisenberg J, Schmidli H. Optimal control of capital injections by reinsurance in a diffusion approximation [J]. Blätter der DGVM, 2009, 30(1):1.
- [9] Eisenberg J, Schmidli H. Minimising expected discounted capital injections by reinsurance in a classical risk model [J]. Scandinavian Actuarial Journal, 2011, 2011(3):155.
- [10] Albrecher H, Thonhauser S. Optimality results for dividend problems in insurance [J]. Racsam Rev R Acad Cien Serie A Math, 2009, 103(2):295.
- [11] Shen Y, Yin C. Optimal dividend problem for a compound poisson risk model [J]. Applied Mathematics, 2014, 5(10):1496.
- [12] Paulsen J. Optimal dividend payments and reinvestments of diffusion processes with both fixed and proportional costs [J]. Siam Journal on Control and Optimization, 2008, 47(5):2201.
- [13] Zhou M, Yuen K C. Portfolio selection by minimizing the present value of capital injection costs [J]. Astin Bulletin, 2015, 45(1):207.
- [14] Fleming W, Soner H. Controlled Markov Processes and Viscosity Solutions [M]. New York: Springer-Verlag, 1993.

(上接第 81 页)

了一定的正向诱导作用,在一定程度上减少了出行的盲目拥堵等待,节约了出行成本.经河南省 863 软件评测中心测试,本系统具有良好的用户体验.操作便捷、功能完备、性能稳定,能够满足不同用户的多种出行导航需求.

参考文献:

- [1] 孙凤梅,苏伟,冯云英.对城市交通拥挤问题分析[J].科技传播,2011(6):20.
- [2] 于春全.北京市道路交通流实时动态信息系统的研究[J].交通运输系统工程与信息,2002,2(3):22.
- [3] 陈洪亮,张保忠.交通路线引导系统及其技术发展跟踪[J].中国公路学报,1996,9(2):84.
- [4] 李宏海,刘冬梅,王晶.日本 VICS 系统的发展介绍[J].交通工程,2011,8(15):107.
- [5] 杨兆升,初连禹.动态路径诱导系统的研究进展[J].公路交通科技,2000,17(1):34.
- [6] 王海峰,杨翊,张建栋.基于驾驶员偏好的智能导航终端开发中的路网权值标定方法研究[J].科学技术与工程,2009,9(3):628.
- [7] 马越. Android 的架构与应用 [D]. 北京:中国地质大学,2008.
- [8] 刘玉玮,刘爱莲,谢涛,等.基于 Android 平台的人员定位与监控系统的设计与实现[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(6):17.
- [9] 韩平阳,肖云魁,姚遵恩,等.车辆导航系统中路线寻优算法研究[J].军事交通学院学报,2010,12(2):75.
- [10] 夏国平.基于 Android 的车载智能导航系统的研究与设计 [D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [11] Pisinger D, Ropke S. A general heuristic for vehicle routing problems [J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(8):2403.

基于遗传模拟退火算法的绝对值方程求解

封京梅¹, 卢楠²

- (1. 陕西广播电视大学 工程管理系, 陕西 西安 710119;
2. 西安电子科技大学 数学与统计学院, 陕西 西安 710126)

摘要:将遗传算法的全局搜索能力和模拟退火算法的局部细化能力结合起来,设计了一种新的遗传模拟退火算法(GSAA),将该算法用于求解一类不可微的 NP-hard 问题:绝对值方程 $Ax - |x| = b$. 数值仿真表明,该算法有效地克服了遗传算法易早熟、模拟退火算法运算效率低的缺点.

关键词:绝对值方程;遗传算法;模拟退火算法

中图分类号: O221; TP301 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.034

Solving absolute value equations based on genetic simulated annealing algorithm

FENG Jing-mei¹, LU Nan²

- (1. Department of Project Management, Shanxi Radio TV University, Xi'an 710119, China;
2. School of Mathematics and Statistics, Xi'an Electronics Science and Technology University, Xi'an 710126, China)

Abstract: Combining the global search ability of genetic algorithm and the local refinement ability of simulated annealing algorithm, a new kind of genetic simulated annealing algorithm was designed. The algorithm was used for solving a class of no differentiable NP-hard problem: Absolute value equations $Ax - |x| = b$. Numerical experiments showed that the algorithm could effectively overcome the shortcomings that the genetic algorithm was easy to premature and simulated annealing algorithm had low efficiency of operation.

Key words: absolute value equation; genetic algorithm; simulated annealing algorithm

0 引言

绝对值方程 AVE (absolute value equations) 是指

$$Ax - |x| = b \quad (1)$$

其中, $A \in R^{n \times n}$; $x, b \in R^n$; $|x|$ 表示对 x 的各个分量取绝对值.

最初由 O. L. Mangasarian 等^[1]给出了①式有唯一解、非负解、 2^n 个解及无解的充分条件, J. Rohn^[2]

给出了①式存在无穷多解时的求解方法,但是大多数学者还是在①式存在唯一解的前提下对其算法进行更加深入的研究;文献[3-4]在无任何假设条件的情况下把 AVE 用半光滑牛顿算法转换为二阶锥互补问题,利用其研究结果,给出了 AVE 解的凸性;文献[4]利用区间算法对①式进行求解,并对其算法进行了收敛性分析;由于 AVE 的不可微性,许多学者开始尝试利用人工智能算法对其进行求解,文

收稿日期:2014-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(11301409);陕西广播电视大学校级项目(14D-07-B11)

作者简介:封京梅(1983—),女,河北省石家庄市人,陕西广播电视大学讲师,博士研究生,主要研究方向为最优化理论与算法.

通信作者:卢楠(1983—),女,河南省周口市人,西安电子科技大学副教授,博士,主要研究方向为对称锥优化与矩阵优化.

献[5-6]分别给出了差分进化与生物地理学混合算法、交叉熵蝙蝠算法对 AVE 进行求解,与传统的优化算法相比,效果不错,但传统优化算法对目标函数的解析性要求较高,在求解不可微这类绝对值方程时有一定的局限性。鉴于此,本文拟提出一种新的遗传模拟退火算法 GSAA(genetic and simulated annealing algorithm)。该算法对目标函数解析性无要求,可用遗传算法完成前期全局搜索,再让模拟退火算法进行局部细致搜索,以期有效提高寻找最优解的效率。

1 问题转化

引理 1^[1] 对任意的 $\mathbf{b} \in R^n$,若 \mathbf{A} 的奇异值 > 1 ,则 AVE 存在唯一解。

本文假设矩阵 \mathbf{A} 的奇异值 > 1 ,则①式等价于无约束优化问题

$$\min f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{Ax} - |\mathbf{x}| - \mathbf{b})^T(\mathbf{Ax} - |\mathbf{x}| - \mathbf{b}) \quad (2)$$

显然,②式的解 $\mathbf{x}^* = \arg \min f(\mathbf{x})$ 是①式的近似解,因为②中含有 $|\mathbf{x}|$,所以这是一个不可微的优化问题,传统的优化算法因为需要目标函数的导数信息而无法求解该类问题。本文在 AVE 存在唯一解的前提下,将求解①式转化为求解无约束优化问题,然后用 GSAA 求解绝对值方程,该算法的基础——模拟退火算法,已经应用于多种混合算法^[7-10]。

2 遗传模拟退火算法设计

2.1 遗传算法

遗传算法^[11] GA(genetic algorithm)的主要思想源于达尔文的生物进化论和孟德尔的遗传学理论,是一种求解优化问题的适应性搜索方法。但该算法在后期,适应度趋向一致,有些个体在产生后代时优势不明显,致使算法停滞不前,容易造成早熟,如果能在后期适当拉伸适应度值,将会提升算法的收敛性,克服早熟现象。

2.2 模拟退火算法

模拟退火算法 SAA(simulated annealing algorithm)^[12]的基本思想是把优化问题的求解过程与统计热力学中的热平衡问题相结合,其物理背景是固体退火过程的物理图像和统计性质,固体退火是先将固体加热至熔化,然后慢慢冷却,使之凝固成规整晶体的热力学过程,从统计物理学的观点来看,随着温度的降低,物质的能量将逐渐趋近于一个较低的状态,并最终达到某种平衡。其中主要包

括 4 个基本概念:

1) 目标函数。即待优化的函数,通常是对目标函数取最小值进行优化。

2) 温度。对于退火算法来说,这是一个重要的参数,它随着算法的迭代次数而下降,以模拟固体退火过程中的降温过程。温度一方面用于限制 SAA 产生的新解与当前解之间的距离,即搜索范围;另一方面初始温度较高时,SAA 接受较差解的概率也相对较高,这样 SAA 就有更大的机会跳出局部最优解,且温度下降速度较平稳时,SAA 搜索范围越大,找到最优解的概率就越大。

3) 退火进度表。是指温度随着算法迭代次数增加的速度下降,退火过程越慢,SAA 找到全局最优解的概率越大,但是运行时间会增加,因此把握好温度下降的速度是关键。

4) Metropolis 准则。是指 SAA 接受新解的概率,本文采用的是 Boltzmann 概率分布,即

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}') = \begin{cases} 1 & f(\mathbf{x}') < f(\mathbf{x}) \\ \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{f(\mathbf{x}') - f(\mathbf{x})}{T}\right]} & f(\mathbf{x}') \geq f(\mathbf{x}) \end{cases}$$

其中, \mathbf{x} 为当前解, \mathbf{x}' 为新解, $f(\cdot)$ 表示解得目标函数值, T 为温度。

2.3 GSAA

GSAA 的主要思想是先利用 GA 进行全局搜索,使种群靠近最优点附近后再利用 SAA 进行局部细致寻优,两种算法交替使用直至满足终止条件,算法步骤如下。

步骤 1 设置 GA 参数:种群规模 P ,进化代数 M ,交叉概率 P_c ,变异概率 P_m ;设置 SAA 参数:退火初始温度 T_0 ,温度冷却系数 k ,终止温度 T_{end} 。

步骤 2 利用 GA 初始化种群。

步骤 3 计算个体的适应度值,然后进行选择、交叉、变异等操作。

步骤 4 判断是否满足终止条件,如果 $|\mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{x}^{(k)}| \leq \varepsilon$,输出当前染色体,如果否,则转到步骤 5。

步骤 5 以当前所得种群为初始种群,对每个个体进行一次 SAA 局部寻优,如果满足终止条件则停止迭代,得到最优点 \mathbf{x}^k ;否则转到步骤 3。

3 算法仿真与分析

为了测试 GSAA 混合算法求解方程①的性能,测试如下三个算例(\mathbf{A} 的奇异值均大于 1,都能保证

有唯一解):

算例1 考虑如下 AVE,其中

$$A = \begin{bmatrix} 50 & 2 \\ 3 & 60 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -49 \\ 56 \end{bmatrix}$$

算例2 考虑如下 AVE,其中

$$A = \begin{bmatrix} 100 & 1 & 1 \\ 0 & 200 & 2 \\ 1 & 1 & 300 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 101 \\ 201 \\ 301 \end{bmatrix}$$

算例3 考虑如下 AVE,其中

$$A = \begin{bmatrix} 10 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 11 & 3 & 1 \\ 0 & 2 & 12 & 1 \\ 1 & 7 & 0 & 13 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 12 \\ 15 \\ 14 \\ 20 \end{bmatrix}$$

构造目标函数

$$\min f(x) = \frac{1}{2} (Ax - |x| - b)^T (Ax - |x| - b)$$

GSAA 算法选择参数如下:群体规模 $p = 5$, 进化代数 $maxgen = 30$, 交叉概率 $p_c = 0.6$, 变异概率 $p_m = 0.1$, 退火初始温度 $T_0 = 100$, $k = 0.8$, $T_{end} = 1$.

连续用基本算法 GA, SAA, GSAA 求解算例1—3 各 30 次, 表 1 列出了各种算法的寻优结果, 由数

据对比可以看出, GA 容易陷入局部收敛, 无法跳出; SAA 运算效率低、寻优效率低、运行时间长; 而 GSAA 能有效、快速地收敛到问题的全局最优解, 优势明显.

图 1—图 3 给出终止代数 30 的条件下, SAA, GA, GSAA 三种算法求解算例 1—3 时, 每次迭代的最佳函数值随着迭代次数增加的收敛情况. 从图 1—3 可以看出, 在迭代初期由于退火温度比较高, SAA 接受目标函数值比当前解差的新解的概率相对较高, 因此当前解的目标函数值的变化和跳动较为频繁, 到迭代后期, 逐渐平稳下来; GA 容易陷入局部最优无法跳出; GSAA 的收敛速度与整体寻优上明显优于其他两种算法.

为了测试 GSAA 混合算法求解方程①的有效性, 可以求解如下随机生成的绝对值方程, 矩阵 A (奇异值 1) 和向量 b 由如下 Matlab R2010a^[13] 程序生成:

```
rand('state',0);
R = rand(n, n);
b = 100 * rand(n, 1);
A = R' * R + n * eye(n);
```

表 1 三种算法的寻优结果

算例	算法	时间/s	平均最优解	最优解
1	GA	1.789 0	(1.086 1, 0.996 5)	(1.000 0, 1.000 0)
	SAA	10.121 0	(1.008 91, 0.990 5)	(1.000 0, 1.000 0)
	GSAA	2.265 0	(1.000 0, 1.000 0)	(1.000 0, 1.000 0)
2	GA	2.331 0	(1.073 2, 1.221 0, 1.201 8)	(1.000 03, 0.977 1, 1.002 7)
	SAA	12.562 0	(1.045 6, 1.203 1, 1.251 8)	(1.000 1, 1.001 21, 0.999 7)
	GSAA	3.862 4	(1.000 0, 1.000 0, 1.000 0)	(1.000 0, 1.000 0, 1.000 0)
3	GA	2.566 0	(0.973 3, 1.043 8, 1.008 0, 0.937 5)	(1.025 0, 1.012 0, 0.981 7, 0.940 7)
	SAA	15.782 0	(0.974 3, 1.156 3, 1.253 0, 0.979 5)	(0.971 0, 1.127 8, 1.142 1, 0.927 9)
	GSAA	6.231 1	(0.999 6, 1.000 9, 1.000 3, 0.999 9)	(1.000 0, 1.000 0, 1.000 0, 1.000 0)

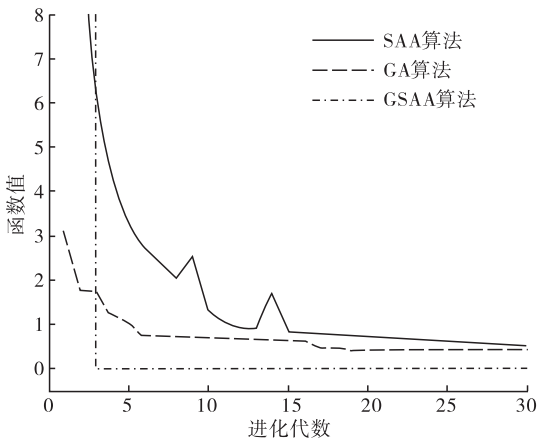


图 1 三种算法求解算例 1

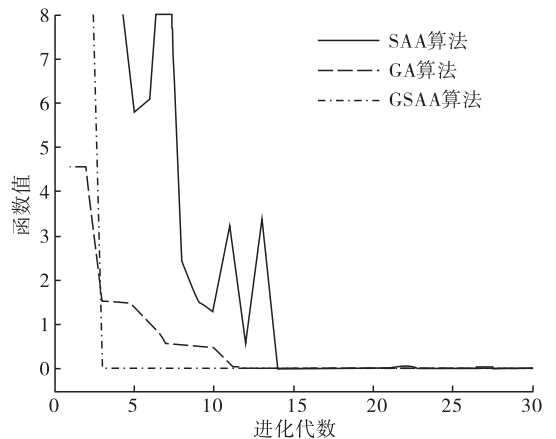


图 2 三种算法求解算例 2

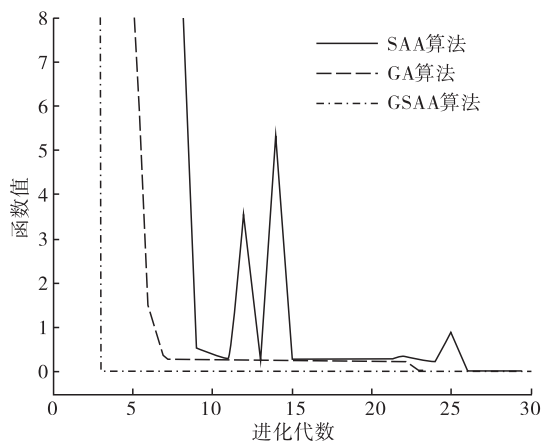


图3 三种算法求解算例3

给定矩阵的阶数 n , 调用本文算法, 可以快速得到 AVE 的最优解或近似最优解。

4 结语

考虑到绝对值方程 $Ax - |x| = b$ 是一类不可微的 NP-hard 问题, 本文设计了一种基于 GSAA 的算法, 该算法充分利用 GA 极强的全局平行搜索能力, 以及 SAA 极好的局部搜索能力, 同时有效地避开了 GA 容易陷入早熟、SAA 运行效率低的局限, 数值仿真结果表明, 较之传统算法, GSAA 混合算法的运算效率、运算精度都得到了明显提高。

参考文献:

- [1] Mangasarian O L, Meyer R R. Absolute value equations [J]. *Linear Algebra and Its Application*, 2006, 419 (5):359.
- [2] Rohn J. An algorithm for computing all solutions of an absolute value equation [J]. *Optimization Letters*, 2012, 6 (5):851.
- [3] Hu S L, Huang Z H. A note on absolute value equations [J]. *Optimization Letters*, 2009, 4(3):417.
- [4] Hu S L, Huang Z H, Zhang Q. A generalized Newton method for absolute value equation associated with second order cones [J]. *Computational Optimization and Applications*, 2011, 235:1490.
- [5] Yong L Q, Liu S Y, Feng Q X, et al. Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for absolute value equation [J]. *Journal of Information & Computational Science*, 2013, 10(8):2417.
- [6] 李国成, 肖庆宪. 绝对值方程的交叉蝙蝠算法求解 [J]. *计算机应用研究*, 2014, 28(10):2966.
- [7] 刘佳, 梁秋丽, 王书青, 等. 基于模拟退火算法的萤火虫群优化算法研究 [J]. *计算机仿真*, 2014, 31(5):284.
- [8] 刘波, 孟培生. 采用基于模拟退火的蚁群算法求解旅行商问题 [J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2009, 37(11):26.
- [9] 卢莉蓉, 行小帅, 霍冰鹏. 基于免疫规划的模拟退火算法 [J]. *计算机工程*, 2007, 33(10):196.
- [10] 梁衡, 刘新新, 郑远攀, 等. 基于退火遗传算法的无线传感器网络路由优化研究 [J]. *郑州轻工业学院学报:自然科学版*, 2012, 27(6):93.
- [11] 梁艳春, 吴春国, 时小虎, 等. 群智能优化算法理论与应用 [M]. 北京:北京科学技术出版社, 2009:1-33.
- [12] 陈宝林. 最优化理论与算法 [M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2005:349-359.
- [13] 史峰, 王辉, 胡斐, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.