

海藻酸钠可食性膜对酱卤鸡腿的保鲜效果

白艳红¹, 吴晓丽¹, 张相生^{1,2}, 赵电波¹, 牛苑文¹, 蒋爱民³

(1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南大用实业有限公司, 河南 鹤壁 410600;

3. 华南农业大学 食品学院, 广东 广州 510642)

摘要:以抑菌率、失水率为评价指标,采用正交试验优化海藻酸钠可食性膜,并在15~20℃贮藏条件下对涂膜处理的酱卤鸡腿菌落总数、失水率进行了研究.结果表明,可食性膜最优配比为海藻酸钠20 g/L,氯化钙30 g/L,甘油30 g/L,涂膜处理对酱卤鸡腿的贮藏保鲜效果较好,能够降低失水率,延长货架期.

关键词:海藻酸钠;可食性膜;酱卤鸡腿;保鲜

中图分类号:TS251.6⁺1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.001

Effect of sodium alginate-based edible coating on preservation of stewed chicken leg

BAI Yan-hong¹, WU Xiao-li¹, ZHANG Xiang-sheng^{1,2},

ZHAO Dian-bo¹, NIU Yuan-wen¹, JIANG Ai-min³

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

2. He'nan Doyoo Industrial Co., Ltd., Hebi 410600, China;

3. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:The sodium alginate-based coating was optimized by the orthogonal design method based on inhibition rate and moisture loss rate, and the changes of microbial count and moisture loss rate of stewed chicken leg dealt with sodium alginate-based coating during storage at 15~20℃ were investigated. The results showed the most optimal proportion of sodium alginate-based coating was sodium alginate 20 g/L, calcium chloride 30 g/L, glycerin 30 g/L. The sodium alginate-based coating had better preservation effect to stewed chicken leg. It could reduce moisture loss rate, prolong storage time and enhance hygiene quality of food.

Key words:sodium alginate; edible coating; stewed chicken leg; preservation

0 引言

酱卤肉制品是深受我国消费者喜爱的一类传统肉制品,品类繁多、风味各异,是传统中式风味肉制品的重要子品类.目前,酱卤肉制品的销售多以

门店散装销售为主,但因其营养丰富,较适宜微生物生长繁殖,因此,在散装销售条件下货架期极短.

可食性膜是指以天然可食性物质为原料、通过不同分子间相互作用而形成的具有栅栏阻隔能力的薄膜,可食性膜用于保鲜具有简单易行、成本较

收稿日期:2014-10-27

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目子课题(2014BAD04B07-02);河南省科技攻关计划项目(132102110056)

作者简介:白艳红(1975—),女,辽宁省彰武县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为畜产品加工与质量控制.

低等优点^[1]. 肉制品的可食性膜可以通过刷涂、喷涂、浸涂等方式在其表面形成一层保护性涂膜,通过调控水分、气体或溶质的迁移,达到降低腐败微生物的接触、减少汁液流失和干耗、延长货架期的目的^[2-3]. 根据可食性膜制备材料的不同,其类别可划分为多糖类、蛋白类、脂类和复合类^[4]. 在各种成膜基质中,海藻酸钠具有良好的生物相容性和生物可降解性,价格低廉,成膜性好,适合作为肉制品的可食性膜材料^[5-8]. 但由于海藻酸钠本身是亲水性的,其形成的凝胶是水溶性的,故单独使用其用于涂膜处理,效果并不好^[2]. 研究发现,海藻酸钠与一些多价阳离子反应能形成凝胶,氯化钙中的钙离子是有效的凝胶剂,钙剂交联使海藻酸钠高分子链形成网状结构,可限制高分子链的自由运动,产生抑制水分流动的三维结构,从而降低其水溶性,经氯化钙处理的海藻酸钠膜其物理和机械性质均会得到改变^[9-11]. 而甘油作为增塑剂可以削弱大分子之间的相互作用,有利于外力场作用下的海藻酸钠链段的重排,提高膜的柔韧性,减小膜的脆性,改善膜的阻水性能和机械性能^[12-13]. 本文拟对以海藻酸钠为基质的可食性膜进行优化,以抑菌率和失水率为指标,通过正交试验设计、优化用于传统酱卤肉制品的海藻酸钠可食性膜,并对经涂膜处理的酱卤鸡腿进行涂膜保鲜试验,研究涂膜对酱卤鸡腿保鲜效果的影响.

1 材料与方法

1.1 材料与设备

材料:冷冻鸡腿、调味料、香辛料,市售;红曲红色素(色价100),东莞市天益生物工程有限公司产;海藻酸钠、甘油、氯化钙,均为食品级,市售;PCA平板计数琼脂(Plate Count Agar)培养基,北京双旋微生物培养基制品厂产.

设备:HH-W型三用恒温水箱,江苏金坛市医疗仪器厂产;DDZ-16A型陶瓷锅,广东天际电器产;CP214型电子天平,奥豪斯仪器(上海)有限公司产;LX-C35L型立式自动电热压力蒸汽灭菌器,合肥华泰医疗设备有限公司产;SW-CJ-1F型单人双面净化工作台,苏州净化设备有限公司产;SHP-250型智能生化培养箱,上海鸿都电子科技有限公司产.

1.2 方法与工艺

1.2.1 酱卤鸡腿生产工艺流程 原料→解冻→修

整→腌制→卤制→成品

1.2.2 基础成膜剂的配制 将海藻酸钠颗粒缓慢加入不断搅动的蒸馏水中,100℃水浴加热至溶液呈均一状态后,加入相应质量浓度的甘油混匀制成涂膜液,将涂膜液进行高压蒸汽灭菌处理(121℃,20 min)后,在无菌环境下使用无菌涂膜容器分装待用.

1.2.3 酱卤鸡腿涂膜工艺 在卫生环境下,使用浸涂法对酱卤鸡腿进行涂层处理,将酱卤鸡腿放入涂膜液中浸泡30 s,将其取出沥干后,立即放入相应质量浓度的氯化钙溶液中浸泡1 min,取出沥干后,在15~20℃条件下贮藏.

1.2.4 海藻酸钠可食性膜的最佳配比优化 根据预试验、文献报道及试验条件,以海藻酸钠、甘油、氯化钙浓度为试验因素,抑菌率、失水率为指标,采用 $L_9(3^4)$ 表设计正交试验. 酱卤鸡腿涂膜处理后置于15~20℃条件下贮存,24 h后测其抑菌率、48 h后测其失水率,每个试验重复3次,结果取平均值.

1.2.5 验证试验 酱卤鸡腿经最优配比的海藻酸钠可食性膜处理后,置于15~20℃条件下,每12 h测定其菌落总数和失水率,同时另设对照组.

1.3 指标测定

1.3.1 抑菌率的测定 抑菌率 = (对照组样品菌落总数 - 处理组菌落总数) / 对照组样品菌落总数 × 100%

1.3.2 酱卤鸡腿失水率的测定 失水率 = $(M - M_1) / M \times 100\%$

式中, M 为涂膜处理后酱卤鸡腿初始质量, M_1 为涂膜处理后贮藏期内酱卤鸡腿质量.

1.3.3 菌落总数的测定 按照GB 4789.2—2010食品微生物学检验菌落总数测定^[14],结果以cfu/g表示.

2 结果与讨论

2.1 正交试验

正交试验结果见表1. 由表1可知,通过极差比较,酱卤鸡腿储藏期间抑菌率和失水率的影响因素由大到小均为 B (氯化钙) > A (海藻酸钠) > C (甘油). 抑菌率越大表示抑菌效果越好,故以抑菌率为指标的涂膜剂的最佳配比为 $A_2B_3C_2$ (在验证试验中标示为A组),即海藻酸钠20 g/L,氯化钙30 g/L,甘油50 g/L. 失水率越小表示防止汁液流失的效果

越好,故以失水率为指标的涂膜剂的最佳配比为 $A_2B_3C_1$ (在验证试验中标示为 B 组),即海藻酸钠 20 g/L,氯化钙 30 g/L,甘油 30 g/L.

利用 DPS 数据处理系统对正交试验结果进行方差分析,结果见表 2. 由表 2 可知,海藻酸钠和氯化钙质量浓度对抑菌率均有显著影响 ($P < 0.05$),对失水率均有极显著影响 ($P < 0.01$),这可能是由于海藻酸钠与氯化钙中的钙离子交联形成的聚合大分子更易形成膜,并使形成的膜在贮藏过程中不易破裂,因而对抑菌作用产生了显著的影响. 而聚合大分子也使膜的局部流动性减小,使水蒸气透过率下降,从而对失水率产生极显著影响. 甘油质量浓度对抑菌率影响未达到显著水平,对失水率有显

著影响,这可能是由于甘油改善了膜的阻水性能.

2.2 验证试验

将酱卤鸡腿分别经过 A 组(海藻酸钠 20 g/L,氯化钙 30 g/L,甘油 50 g/L)和 B 组(海藻酸钠 20 g/L,氯化钙 30 g/L,甘油 30 g/L)涂膜处理后,于 15 ~ 20 °C 条件下贮藏,贮藏期间以菌落总数、失水率为指标进行保鲜效果对比.

2.2.1 涂膜处理对酱卤鸡腿菌落总数的影响

图 1 为涂膜处理对酱卤鸡腿菌落总数的影响. 由图 1 可以看出,对照组的菌落总数增长迅速,储藏 36 h 后,对照组样品的菌落总数已经接近国标 GB/T 23586—2009 酱卤肉制品^[15]的限值 8×10^4 cfu/g, 48 h 时,其菌落总数已超标. 经过 A 组和 B 组涂膜处理

表 1 正交试验结果表

试验号	测定指标	海藻酸钠 A/(g · L ⁻¹)	氯化钙 B/(g · L ⁻¹)	甘油 C/(g · L ⁻¹)	空列	抑菌率/%	失水率/%
1		1(10)	1(10)	1(30)	1	65.45	11.27
2		1	2(20)	2(50)	2	74.55	10.63
3		1	3(30)	3(70)	3	76.36	9.85
4		2(20)	1	2	3	78.18	10.94
5		2	2	3	1	80.00	9.16
6		2	3	1	2	83.64	8.38
7		3(30)	1	3	2	69.09	11.82
8		3	2	1	3	76.36	10.05
9		3	3	2	1	81.82	10.13
k_1	抑菌率	72.120 0	70.906 7	75.150 0	75.756 7		
k_2		80.606 7	76.970 0	78.183 3	75.760 0		
k_3		75.756 7	80.606 7	75.150 0	76.966 7		
R		8.486 7	9.700 0	3.033 3	1.210 0		
k_1	失水率	10.583 3	11.343 3	9.900 0	10.186 7		
k_2		9.493 3	9.946 7	10.566 7	10.276 7		
k_3		10.666 7	9.453 3	10.276 7	10.280 0		
R		1.173 3	1.890 0	0.666 7	0.093 3		

表 2 正交试验结果方差分析表

分析指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
抑菌率	海藻酸钠 A	108.771 4	2	54.385 7	37.248 5	0.026 1
	氯化钙 B	144.079 4	2	72.039 7	49.339 6	0.019 9
	甘油 C	18.402 2	2	9.201 1	6.301 8	0.137 0
	误差(空列 D)	2.920 2	2	1.460 1		
	总和	274.173 2				
失水率	海藻酸钠 A	2.571 8	2	1.285 9	152.878 5	0.006 5
	氯化钙 B	5.766 2	2	2.883 1	342.770 1	0.002 9
	甘油 C	0.670 4	2	0.335 2	39.853 4	0.024 5
	误差(空列 D)	0.016 8	2	0.008 4		
	总和	9.025 2				

的样品的菌落总数一直低于对照组,但在贮藏后期的菌落总数增长仍旧很快,这可能与涂膜处理组有效降低了失水率有关,由于膜的阻隔作用有效降低了酱卤鸡腿被贮藏环境中微生物侵染的几率,但在菌落总数已经较高的情况下,经涂膜处理的高水分含量样品仍旧有利于微生物的繁殖,因此单纯的海藻酸钠可食性膜处理对延长酱卤鸡腿货架期的效果有限。

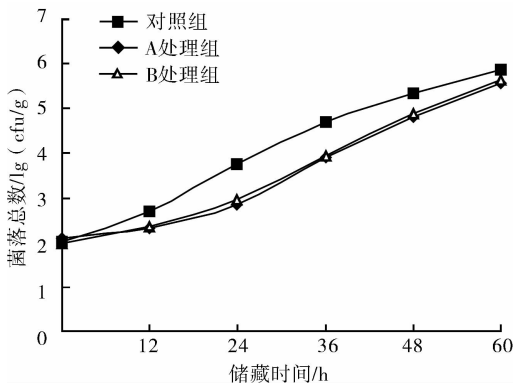


图1 涂膜处理对酱卤鸡腿菌落总数的影响

对贮藏时间与菌落总数对数值的变化做预测模型,可计算出不同产品达到相同菌落总数时的可贮时间。

对照组产品贮藏时间 X 与菌落总数对数值 Y 的预测模型为: $Y = 5.9349 \times (1 - 0.644914 \times \exp(-0.000903 \times X \times X))$ 。此方程的决定系数 $R^2 = 0.9955$, 显著水平 0.0003 。

经过 A 组涂膜处理的产品贮藏时间 X_a 与菌落总数对数值 Y_a 的预测模型为: $Y_a = 6.9070 \times (1 - 0.702907 \times \exp(-0.000357 \times X_a \times X_a))$ 。此方程的决定系数 $R^2 = 0.9983$, 显著水平 0.0001 。

经过 B 组涂膜处理的产品贮藏时间 X_b 与菌落总数对数值 Y_b 的预测模型为: $Y_b = 6.7630 \times (1 - 0.702812 \times \exp(-0.000400 \times X_b \times X_b))$ 。此方程的决定系数 $R^2 = 0.9989$, 显著水平 0.0001 。

3 个回归方程的决定系数 R^2 均大于 0.95 , 表明预测模型具有可靠的置信度。方程经显著性检验均显著, 表明预测模型能够代表和反映实际问题。依照国标 GB/T 23586—2009 酱卤肉制品^[15] 对酱卤制品菌落总数的限值 8×10^4 cfu/g, 将销售指标的菌落总数 8×10^4 取对数值 4.90 代入上述方程, 可得出

各产品在 $15 \sim 20$ °C 条件下菌落总数超标前的货架期。计算结果为对照组 38 h, A 组涂膜处理 49 h, B 组涂膜处理 48 h。

结果表明:涂膜处理有效降低了样品的菌落总数,但延长货架期的效果有限,A 组涂膜处理延长货架期 11 h,B 组涂膜处理延长货架期 10 h。但对于散装酱卤肉制品货架期短(38 h)而言,货架期的延长仍是十分必要的,也是有益的。

2.2.2 涂膜处理对酱卤鸡腿失水率的影响 图 2 为涂膜处理对酱卤鸡腿失水率的影响。由图 2 可以看出,处理组样品的失水率一直明显低于对照组,表明涂膜处理可有效降低失水率。对照组和处理组的失水率在初期增长都很快,对照组样品在经过 24 h 后已经达到 13.18%, 60 h 的失水率为 18.15%, 而经过 A 组涂膜处理的样品 60 h 的失水率为 9.63%, B 组为 8.42%, B 组在降低失水率方面略好于 A 组。

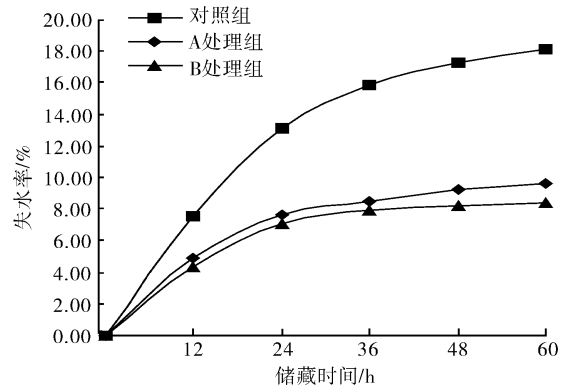


图2 涂膜处理对酱卤鸡腿失水率的影响

在验证试验中发现,涂膜处理可以降低酱卤鸡腿的失水率,延长其货架期。A 处理组在延长货架期方面要略优于 B 处理组, B 处理组对降低失水率的作用要略好于 A 组,但 B 组甘油的用量低于 A 组,综合考虑,选择 B 组作为海藻酸钠可食性膜的配比更为合适,即海藻酸钠 20 g/L,氯化钙 30 g/L,甘油 30 g/L。

3 结论

本文对以海藻酸钠为基质的可食性膜进行优化,以抑菌率和失水率为指标,通过正交试验设计、优化应用于传统酱卤肉制品的海藻酸钠可食性膜,

并对经涂膜处理的酱卤鸡腿进行涂膜保鲜试验,结果表明:海藻酸钠可食性膜最优配比为海藻酸钠 20 g/L,氯化钙 30 g/L,甘油 30 g/L,经涂膜处理可以降低失水率,将酱卤鸡腿的货架期由 38 h 延长至 48 h. 本研究表明,使用海藻酸钠可食性膜处理可以延长酱卤肉制品的货架期,但单纯使用海藻酸钠可食性膜来处理,对延长货架期的效果有限.

参考文献:

- [1] 张希斌. 可食性明胶抑菌保鲜涂层的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010: 13-15.
- [2] 马青青, 白云, 徐幸莲, 等. 正交设计优化海藻酸钠涂膜方式保鲜冷藏鸡肉[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 290.
- [3] Falguera V, Quintero J P, Jiménez A, et al. Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(6): 292.
- [4] Campos C A, Gerschenson L N, Flores S K. Development of edible films and coatings with antimicrobial activity[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(6): 849.
- [5] 汪学荣, 阚建全, 汪水平. 海藻酸钠涂膜保鲜牛肉的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(3): 475.
- [6] 张建强, 李朝阳, 官春颖, 等. 可食性复合膜对降低排酸牛肉失水率的作用研究[J]. 农产品加工学刊, 2011(2): 51.
- [7] 李朝阳, 张建强, 官春颖, 等. 海藻酸钠复合膜降低排酸牛肉失水率的研究[J]. 农产食品科技, 2011, 5(1): 19.
- [8] 詹现璞, 吴广辉. 海藻酸钠的特性及其在食品中的应用[J]. 食品工程, 2011(1): 7.
- [9] 吕跃钢, 顾天成, 张培. 可食性涂膜对熟肉制品保鲜作用的初步研究[J]. 北京轻工业学院学报, 2000, 18(3): 16.
- [10] Rhim J W. Physical and mechanical properties of water resistant sodium alginate films[J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(3): 323.
- [11] Zhang Q, Xu J C, Gao X, et al. Optimized water vapor permeability of sodium alginate films using response surface methodology[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(6): 1196.
- [12] 郭锦棠, 张瑾, 殷俊威. 抗菌性海藻酸钠膜的制备及性能分析[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2013, 46(7): 653.
- [13] 徐云升. 可食用膜的改性研究[J]. 食品工业科技, 2002, 23(10): 72.
- [14] GB 4789. 2—2010, 食品微生物学检验菌落总数测定[S].
- [15] GB/T 23586—2009, 酱卤肉制品[S].

复合添加剂对面包烘焙品质的影响

申瑞玲, 许辉, 李林

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以面包粉为主要原料,添加不同比例的葡萄糖氧化酶、真菌 α -淀粉酶、脂肪酶、单硬脂酸甘油酯4种添加剂于面包配方中,用直接发酵法制作面包,研究不同的添加剂配比及含量对面包品质的影响.通过感官评价,同时利用质构仪对面包芯硬度进行测定,结果表明,1 kg面包粉中添加葡萄糖氧化酶30 mg,真菌 α -淀粉酶2 mg,脂肪酶40 mg,单硬脂酸甘油酯1.5 g时,面包的烘焙品质得分最高,口感最好.

关键词:复合添加剂;面包;烘焙品质

中图分类号:TS213.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.002

Effect of composite additive on the quality of baking bread

SHEN Rui-ling, XU Hui, LI Lin

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

Abstract: With bread flour as main raw material, the effects of adding proportions of four kinds of additives on bread quality index were researched. Four kinds of additives including glucose oxidase, fungi α -amylase, lipase and glycerol monostearate were added in bread recipe by different adding proportions. To make bread by direct fermentation sensory evaluation and texture analyser was used to determine the hardness of bread. The results showed that optimization of the additives adding proportions of the recipe was 30 mg glucose oxidase, 2 mg fungi α -amylase, 40 mg lipase, and 1.5 g glycerol monostearate in 1 kg bread flour. The baking quality of bread was the best and had good taste.

Key words: compound additive; bread; baking quality

0 引言

在面包生产中,为了延缓面包老化,改善面包的筋力与机械加工性能,进而提高面包的品质,使其在色、香、味、形上更好地满足消费者的需要,通常在面包加工制作过程中添加适量的添加剂. F. Funami 等^[1-2]研究表明,一些食品添加剂,如非离子多糖、食品亲水胶体及乳化剂,可以与面包中的淀粉相互作用,有效降低淀粉的回生速度,延缓面包的老化.孙元琳等^[3]也认为,添加面包蓬松改良剂

能够显著地增大面包的比容.目前,用于面包加工和研究的添加剂主要有乳化剂、酶制剂、增稠剂^[4]等.在面包的烘焙加工过程中,为了增加面包体积,改善内部结构,延缓老化,可以在面包中添加适量的乳化剂以改善面包的品质^[5].脂肪酶可以氧化面粉中的色素使之褪色,使面包内部组织洁白,还可以氧化不饱和脂肪酸,使之形成过氧化物,过氧化物可氧化蛋白质分子中的硫氢基团,形成分子内或分子间二硫键,并能诱导蛋白质分子聚合,使蛋白质分子变得更大,从而提高面团筋力^[6].杨春玲

收稿日期:2014-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31271854)

作者简介:申瑞玲(1967—),女,山西省灵石县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为谷物营养与加工.

等^[7]研究表明,在面包粉中添加合理比例的葡萄糖氧化酶,能够提高面筋强度、增强其弹性,改善面团对机械冲击的承受力,提高面团入炉急涨特性,增大面包体积。另外,面包中添加真菌 α -淀粉酶不仅能加快面团发酵速度,还能改善面包的风味和表皮色泽,提高面包柔软度,延缓老化速度^[8]。但是,单一的添加剂只能改善面包部分品质,研究复合型添加剂对面包品质的影响是必要的。

本文拟以面包粉为主要原料,添加不同比例的葡萄糖氧化酶、真菌 α -淀粉酶、脂肪酶、单硬脂酸甘油酯4种添加剂于面包配方中,用直接发酵法制作面包,并对焙烤出来的面包进行感官评价,同时借助质构仪对面包芯的硬度进行评价,以期得出复配效果较好的添加剂含量。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:葡萄糖氧化酶(10 000 U/g),真菌 α -淀粉酶(2 500 U/g),脂肪酶(2 500 U/g),郑州万瑞达公司产;单硬脂酸甘油酯,广州嘉德乐公司产;面包粉、活性干酵母、白砂糖、食盐、脱脂奶粉、起酥油均为市售。

仪器:GY-HM型电动和面机,无锡新洁厨房设备有限公司产;SJ-80SP型发酵箱,无锡新洁厨房设备有限公司产;DJJ-200B型压面机,无锡新洁厨房设备有限公司产;BKD-90F型烤炉,广州焙可达机械设备有限公司产;JMTY型面包体积测定仪,郑州中谷机械设备有限公司产;LT502E型电子天平,常熟市天量仪器有限责任公司产;TA-Xt plus质构仪,英国 Stable Micro System 公司产。

1.2 实验方法

1.2.1 面包的制作方法 表1为面包制作配方。按照表1,添加不同比例的复合添加剂进行面包烘焙。面包烘焙工艺流程为

称样→和面→发酵和柔压→成型→醒发→烘烤

表1 面包制作配方

项目	面包粉	活性干酵母	食盐	白砂糖	脱脂奶粉	起酥油	水	面包添加剂
面包粉总量的百分基数/%	100	1.8	1.5	6.0	4.0	3.0	适量	适量

1.2.2 复合添加剂对面包品质的影响 将葡萄糖氧化酶、真菌 α -淀粉酶、脂肪酶、单硬脂酸甘油酯

4种添加剂按一定配比加入上述面包配方中,进行面包制作。分别按面包烘焙品质评分标准(见表2)对各组面包样品进行评分,其中面包体积/mL采用菜籽置换法进行测定。取双实验样品的算术平均值作为测定结果。

表2 面包烘焙品质评价标准

评分项目	标准	评分情况/分
面包体积(45分)	体积 < 360 mL	0
	体积 < 900 mL	45
	体积 360 ~ 900 mL	每增加 12 mL 得分增加 1 分
面包外观(5分)	面包表皮色泽正常,光洁平滑,无斑点,冠大,颈极明显	5
	冠中等,颈短	4
	冠小,颈极短	3
	冠不显示,无颈	2
	无冠,无颈,塌陷	1
	表皮色泽不正常,或不光洁,不平滑,或有斑点	0.5
面包芯色泽(5分)	洁白、乳白并有丝样光泽	5
	洁白、乳白但无丝样光泽	4.5
	黑、暗灰	1
	介于第1种情况与第3种情况之间,色泽白-黄-灰-黑	分数依次降低
面包芯质地(10分)	面包芯细腻平滑,柔软而富有弹性	10
	面包芯粗糙紧实,弹性差,按下不复原或难复原	2
	介于上述两种情况之间	3~9
面包芯纹理结构(35分)	面包芯气孔细密、均匀并呈长形,孔壁薄,呈海绵状	35
	面包芯气孔大小极不均匀,大孔洞很多,坚实部分连成大片	8
	介于第1种情况与第2种情况之间	9~34

1.2.3 复合添加剂对面包芯硬度的影响 质构测定中食品的硬度是指一次压缩的最大峰值,多数食品的硬度值出现在最大变形处,有些食品压缩到最大变形并不出现应力峰。将烘焙好的面包于室温下冷却,切片,对面包芯进行质构分析,测定面包芯的硬度。TPA测定参数为:P35铝探头,挤压前速度为1.00 mm/s,挤压速度为1.80 mm/s,挤压后速度1.80 mm/s,挤压深度为5 mm,二次挤压间隔时间2 s。所有面包样品在1 h内测完,3次测量求平均值为最终硬度值。

1.2.4 适宜复合添加剂配比的确定 在对面包品质进行评价和对面包芯硬度进行测定的基础上,兼

顾成本,选择对面包品质及面包芯硬度改良效果较好的4种添加剂配比,以面包品质和面包芯硬度为综合评价指标,作进一步的验证,以确定适宜的复合添加剂配比。

1.2.5 数据处理 上述实验结果均采用 DPS 8.5 软件进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 复合添加剂对面包品质的影响

分别对面包的体积、外观、面包芯色泽、面包芯质地、面包芯纹理进行评价并打分,综合各项指标分数得出结果见表3。由表3可知,影响面包品质的因素依其大小依次为葡萄糖氧化酶(A) > 脂肪酶(C) > 真菌 α -淀粉酶(B) > 单硬脂酸甘油酯(D)。葡萄糖氧化酶、 α -淀粉酶对面包品质的影响结果与陈颖慧等^[9]的研究结果一致。改良面包品质的最优方案为 $A_2B_3C_4D_3$,即葡萄糖氧化酶的添加量为30 mg/kg,真菌 α -淀粉酶的添加量为6 mg/kg,脂肪酶的添加量为40 mg/kg,单硬脂酸甘油酯的添加量为2.5 mg/kg时,烘烤出的面包品质较好。

表3 复合添加剂对面包品质的影响

编号	A/ (mg·kg ⁻¹)	B/ (mg·kg ⁻¹)	C/ (mg·kg ⁻¹)	D/ (g·kg ⁻¹)	评分/分
1	20	2	10	1.5	82
2	20	4	20	2	84
3	20	6	30	2.5	92
4	20	8	40	3	92
5	30	2	20	3	93
6	30	4	10	2.5	95
7	30	6	40	2	95
8	30	8	30	1.5	86
9	40	2	30	2	87
10	40	4	40	1.5	92
11	40	6	10	3	83
12	40	8	20	2.5	83
13	50	2	40	2.5	82
14	50	4	30	3.5	80
15	50	6	20	1	86
16	50	8	10	2	84
k_1	87.500	86.000	86.000	86.500	
k_2	92.250	87.750	86.500	87.500	
k_3	86.250	89.000	86.250	88.000	
k_4	83.000	86.250	90.250	87.000	
极差	9.250	3.000	4.250	1.500	
最优方案	$A_2B_3C_4D_3$				
主次顺序	$A > C > B > D$				

以单硬脂酸甘油酯为误差项对面包品质评价价值进行方差分析结果见表4。由表4可知,葡萄糖氧化酶和脂肪酶添加量 F 值均大于 F 临界值,所以葡萄糖氧化酶和脂肪酶对面包品质的影响显著,而其他因素则表现为不显著。

表4 复合添加剂对面包品质评价价值的方差分析结果

因素	偏差平方和 S	自由度 n	F 值	F 临界值	显著性
葡萄糖氧化酶	176.500	3	35.300	9.280	*
真菌 α -淀粉酶	23.500	3	4.700	9.280	
脂肪酶	48.500	3	9.700	9.280	*
单硬脂酸甘油酯	5.000	3	1.000	9.280	
误差	5.00	3			

2.2 复合添加剂对面包芯硬度的影响

使用质构仪对添加不同配比复合添加剂的面包芯的硬度进行测定,结果见表5。由表5可知,影响面包芯硬度大小的因素依次为脂肪酶 > 葡萄糖氧化酶 > 真菌 α -淀粉酶 > 单硬脂酸甘油酯,脂肪酶与葡萄糖氧化酶对面包芯硬度的影响结果与王雨

表5 复合添加剂对面包芯硬度的影响

编号	A/ (mg·kg ⁻¹)	B/ (mg·kg ⁻¹)	C/ (mg·kg ⁻¹)	D/ (g·kg ⁻¹)	硬度/ g
1	20	2	10	1.5	425.6
2	20	4	20	2.0	408.3
3	20	6	30	2.5	398.7
4	20	8	40	3.0	378.4
5	30	2	20	3.0	412.5
6	30	4	10	2.5	425.6
7	30	6	40	2.0	325.9
8	30	8	30	1.5	364.2
9	40	2	30	2.0	339.2
10	40	4	40	1.5	302.7
11	40	6	10	3.0	378.6
12	40	8	20	2.5	308.5
13	50	2	40	2.5	347.6
14	50	4	30	3.5	335.9
15	50	6	20	1.0	406.8
16	50	8	10	2.0	386.1
k_1	338.650	381.225	402.750	374.825	
k_2	359.500	368.125	382.050	364.875	
k_3	384.025	377.500	332.250	370.100	
k_4	403.975	359.300	369.100	376.350	
极差	63.325	21.925	70.500	11.475	
最优方案	$A_1B_4C_3D_2$				
主次顺序	$C > A > B > D$				

生等^[10]的研究结果一致. 正交试验的最优方案为 $A_1B_4C_3D_2$, 即葡萄糖氧化酶添加量为 20 mg/kg, 真菌 α -淀粉酶的添加量为 8 mg/kg, 脂肪酶的添加量为 40 mg/kg, 单硬脂酸甘油酯的添加量为 2 mg/kg 时, 烘烤出的面包芯较软, 口感较好.

表 6 为以单硬脂酸甘油酯为误差项对面包芯硬度进行方差分析的结果. 由表 6 可知, 葡萄糖氧化酶和脂肪酶对面包芯硬度的影响显著, 而其他因素则表现为不显著. 徐皎云等^[11]的研究也认为, 添加脂肪酶可以显著降低面包芯的硬度, 延缓面包老化. 而添加葡萄糖氧化酶会使面包体积减小, 硬度增加^[12]. 也有研究表明, 葡萄糖氧化酶作用于面粉中的水溶性戊聚糖, 氧化产生 H_2O_2 , 其在 H_2O_2 酶作用下产生自由基, 从而促进水溶性戊聚糖氧化凝胶, 并通过阿魏酸氧化交联形成大网络结构, 强化面筋, 增大面包体积^[13]. 总之, 葡萄糖氧化酶和脂肪酶添加量是对面包芯硬度影响较大的两个因素.

表 6 复合添加剂对面包芯硬度影响的方差分析

因素	偏差平方和 S	自由度 n	F 值	F 临界值	显著性
葡萄糖氧化酶	9 738.472	3	30.273	9.280	*
真菌 α -淀粉酶	1 163.202	3	3.616	9.280	
脂肪酶	10 536.728	3	32.754	9.280	*
单硬脂酸甘油酯	321.692	3	1.000	9.280	
误差	321.69	3			

2.3 适宜复合添加剂配比的确定

由上述测定结果可知, 葡萄糖氧化酶和脂肪酶对面包的综合品质影响最显著, 由此选择葡萄糖氧化酶适宜添加量为 20 mg/kg 和 30 mg/kg, 脂肪酶适宜添加量 30 mg/kg 和 40 mg/kg. 由于真菌 α -淀粉酶和单硬脂酸甘油酯对面包综合品质影响不显著, 为了减少加工成本, 选取最小添加量作进一步的验证实验. 以面包品质评价结合面包芯硬度测定对以下方案进行评分, 结果见表 7. 由表 7 可以看出, 当 1 kg 面包粉中添加葡萄糖氧化酶 30 mg, 真菌 α -淀粉酶 2 mg, 脂肪酶 40 mg, 单硬脂酸甘油酯 1.5 g 时, 面包烘焙品质较好, 包芯较软, 体积较大, 口感较好, 评分较高. 因此此种配比的复合添加剂对面包的改良效果较好.

3 结论

本文对复合添加剂配比及添加量对面包焙烤品质的影响进行了研究, 通过感官评价, 并利用质构仪对面包芯硬度进行测定. 在此基础上进一步挑

表 7 效果较好的添加剂配比对面包品质的影响

编号	A/ (mg · kg ⁻¹)	B/ (mg · kg ⁻¹)	C/ (mg · kg ⁻¹)	D/ (g · kg ⁻¹)	评分/分
1	20	2	30	1.5	88
2	30	2	30	1.5	92
3	20	2	40	1.5	91
4	30	2	40	1.5	94

选对面包品质改良效果较好的几组配比方案进行验证实验, 得到适宜的添加剂添加量为: 葡萄糖氧化酶 30 mg/kg, 真菌 α -淀粉酶 2 mg/kg, 脂肪酶 40 mg/kg, 单硬脂酸甘油酯 1.5 g/kg. 在配方中添加该配比的复合添加剂, 烘焙出来的面包, 体积较大, 色泽较白, 面包芯柔软而富有弹性, 口感较好, 总体评价要好于市售普通面包.

参考文献:

- [1] Funami T, Kataoka Y, Omoto T, et al. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(1):1.
- [2] Funami T, Kataoka Y, Omoto T, et al. Food hydrocolloids control the gelatinization and retrogradation behavior of starch. 2b. Functions of guar gums with different molecular weights on the retrogradation behavior of corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(1):25.
- [3] 孙元琳, 陕方, 宋俞, 等. 响应面分析法优化黑小麦全麦面包工艺配方研究[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2013, 28(5):5.
- [4] 陈荣华, 秦东方. 食品添加剂对面包品质影响的研究概况[J]. 中外食品, 2013(10):12.
- [5] 严晓鹏. 麸皮面包改良剂的研制[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [6] 何淑华. 面包品质改良剂的研究进展[J]. 广州化工, 2010, 38(3):33.
- [7] 杨春玲, 杨路加. 葡萄糖氧化酶在改良面包粉中的应用[J]. 粮食储藏, 2013, 42(5):41.
- [8] 汪国钧. 面包改良剂的种类及其用途[J]. 农产品加工, 2008(8):15.
- [9] 陈颖慧. 复合添加剂对面包品质的改良作用[J]. 面粉通讯, 2008(3):58.
- [10] 王雨生, 陈海华, 王坤. 响应面优化复配型面包改良剂工艺研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(2):4.
- [11] 徐皎云. 新型面包改良剂的研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [12] 于明, 吴新元, 张谦. 面包专用粉复合改良剂研究[J]. 新疆农业科学, 2004, 40(6):332.
- [13] Vemulapalli V, Miller K A, Hoseney R C. Glucose oxidase in breadmaking systems[J]. Cereal Chemistry, 1998, 75(4):439.

黑小麦面粉戊聚糖的制备与理化性质分析

崔璨¹, 仪鑫¹, 孙元琳^{1,2}

(1. 山西大学 生命科学学院, 山西 太原 030006;

2. 运城学院 生命科学系, 山西 运城 044000)

摘要:以黑小麦面粉为原料,分别采用水和 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 溶液作为介质,提取黑小麦面粉中的水溶性戊聚糖(WEAX)和碱溶性戊聚糖(WUAX),运用离子色谱、高效液相色谱和红外光谱等对黑小麦面粉戊聚糖的理化性质进行分析.结果表明:WEAX的单糖组成主要为阿拉伯糖(Ara)和木糖(Xyl),并含有少量半乳糖(Gal),摩尔比 $\text{Ara}:\text{Xyl}:\text{Gal} = 5.74:11.64:1$,其取代度 A/X 为 0.49,相对分子质量 M_w 为 7.73×10^5 ;WUAX的单糖组成主要为 Ara 和 Xyl,摩尔比 $\text{Ara}:\text{Xyl} = 1:1.74$,其 A/X 为 0.57, M_w 为 6.56×10^4 ,表明 WEAX 的分支程度低于 WUAX,但其 M_w 高于 WUAX;红外光谱表明两种戊聚糖均存在糖类的特征吸收峰.

关键词:黑小麦;戊聚糖;红外光谱

中图分类号:TS211;O629.12 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.003

Preparation and physicochemical property analysis of pentosans from black-grained wheat flour

CUI Can¹, YI Xin¹, SUN Yuan-lin²

(1. College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Department of Life Science, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China)

Abstract: Water extractable and alkali extractable pentosans from black-grained wheat were obtained by water and $\text{Ba}(\text{OH})_2$ aqueous solution, and the physicochemical properties were analyzed by ion exchange chromatography, high performance liquid chromatography and infrared spectroscopy. The results showed that the main sugar components of WEAX were arabinose (Ara) and xylose (Xyl), with a small amount of galactose (Gal). The molar ratio of $\text{Ara}:\text{Xyl}:\text{Gal}$ was 5.74:11.64:1. The substitution degree (A/X) of WEAX was 0.49 and the relative molecular weight (M_w) was 7.73×10^5 . WUAX was mainly composed of Ara and Xyl. The molar ratio of $\text{Ara}:\text{Xyl}$ was 1:1.74. The A/X was 0.57 and the M_w was 6.56×10^4 . These indicated WEAX had a lower substitution degree, but a higher M_w than WUAX. IR spectra showed that there were characteristic absorption peaks of sugar in the two kinds of pentosan.

Key words: black-grained wheat; pentosan; IR spectra

收稿日期:2014-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31101244);山西省自然科学基金项目(2012011031-1);山西省高校优秀青年学术带头人支持计划

作者简介:崔璨(1989—),男,江苏省徐州市人,山西大学在读研究生,主要研究方向为农产品资源综合利用.

通信作者:孙元琳(1971—),女,山西省运城市人,运城学院教授,博士,主要研究方向为农产品资源综合利用.

0 引言

戊聚糖,也称阿拉伯木聚糖,主要由戊糖-阿拉伯糖和木糖组成^[1]。戊聚糖广泛存在于各种谷物中,如小麦、燕麦、黑麦和大麦等,不同谷物的戊聚糖含量有所不同。戊聚糖主要集中于谷类的糊粉层、果皮及种皮部分,胚乳中含量偏少^[2]。

戊聚糖对于面团的成型及面包的焙烤有明显的改善作用。它可以吸收相当于自身质量4倍的水,有助于提高面团的吸水率,其发生氧化凝胶后吸水率会进一步提高^[3]。戊聚糖的高黏度可以提高面团的持气性,从而增大面团的体积^[4]。研究表明,戊聚糖在戊聚糖酶的作用下发生一定程度的降解,可以提高面团的机械调控性能,增大面粉烘焙和蒸煮产品的体积,延缓产品的老化^[5-6]。戊聚糖作为一种功能性多糖,还具有重要的生理功能和营养功效,如降脂减肥、润肠通便、抗氧化及预防结肠癌等,因而引起了国内外谷物科研人员的广泛关注。

黑小麦是指含有天然黑色素、籽粒呈黑色或接近于黑色的小麦,它在拥有小麦其他特征的同时还具有独特的保健功能。目前对于黑小麦营养价值的研究多集中于其色素、蛋白质、矿物质等^[7-10],对于黑小麦面粉戊聚糖的报道则较少。本文拟以黑小麦面粉为原料,分别以水和Ba(OH)₂为提取介质,制备水溶性戊聚糖(WEAX)和碱溶性戊聚糖(WUAX),并对其理化性质进行分析,为黑小麦特色谷物资源的综合利用与开发提供理论依据。

1 材料与仪器

1.1 材料与仪器

材料:黑小麦面粉,山西省农科院棉花研究所提供;苯酚、三氟乙酸、牛血清蛋白、标准单糖, Sigma公司产;α-淀粉酶、糖化酶、蛋白酶,日本和光纯药Wako公司产;相对分子质量*M_w*为6.10×10³,1.65×10⁴,2.629×10⁴,4.00×10⁴,8.40×10⁴,1.58×10⁵的葡聚糖标准品, Sigma公司产;Ba(OH)₂,冰醋酸,三氟乙酸,NaOH,NaAc,NaNO₃,均为分析纯,天津化学试剂厂产。

仪器:Waters 2690型高效液相色谱仪,美国Waters公司产;ICS-5000型离子色谱仪,美国戴安公司产;Tensor 27型傅里叶变换红外光谱仪,德国Bruker公司产;Free zone 2.5型冷冻干燥机,美国Labconco公司产;JB5-D型电力搅拌机,上海标本

模型厂产;XLJ-II型离心机,上海医分仪器制造有限公司产;RE-52A型旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂产。

1.2 实验方法

1.2.1 WEAX的提取工艺 使用参考文献[11]的方法并加以调整。称取1 kg黑小麦面粉用高压蒸汽灭菌锅处理1 h,加入5 L水,常温搅拌40 min,离心(3 000 r/min,20 min),提取2次。上清液加入α-淀粉酶、糖化酶,于60℃,pH=5.0的条件下酶解,用碘水检测直至不显色后,加入蛋白酶,于50℃,pH=7.0的条件下酶解。酶解结束后,100℃灭酶10 min,冷却至室温,离心。将上清液浓缩,加2倍乙醇沉淀,静置,离心。离心所得沉淀加水复溶,浓缩,透析(截留*M_w*=1.2×10⁴)3 d后,冷冻干燥,得到WEAX。

1.2.2 WUAX的提取工艺 使用参考文献[11-12]的方法并加以调整。取上述WEAX提取过程中的沉淀,用蒸馏水洗面筋,将面浆水先后过40目、60目、200目、400目筛。取400目筛上物,加1 L水,并加入α-淀粉酶,于60℃,pH=5.0的条件下酶解。酶解结束后,100℃灭酶10 min,离心(3 000 r/min,20 min),沉淀用水洗3次后,先后加入10倍、6倍饱和Ba(OH)₂溶液浸提,离心后,合并上清液,用乙酸调节pH值至5.0,加入2倍乙醇沉淀,静置,离心。离心所得沉淀加水复溶,浓缩,透析3 d后,冻干,得到WUAX。

1.2.3 戊聚糖得率计算

$$\text{得率} = \frac{\text{戊聚糖提取物质量}}{\text{原料质量}} \times 100\%$$

1.2.4 戊聚糖含量测定 用间苯三酚-冰醋酸法^[13]。

1.2.5 多糖含量测定 用苯酚-硫酸法^[14]。

1.2.6 蛋白质含量测定 用Lowry法^[15]。

1.2.7 单糖组成测定 称取多糖样品3~5 mg,用2 mol/L的三氟乙酸在100℃左右水解4 h。水解液经N₂吹干后,用离子色谱(电化学检测器)分析单糖组成。与标准单糖的相对保留时间比较,判断单糖种类,根据峰面积的比值确定各单糖间的比例关系。色谱柱柱温25℃,流动相分别采用NaOH做淋洗液,流速0.5 mL/min,用水、250 mmol/L NaOH和1 mol/L NaAc进行梯度洗脱。取代度A/X为阿拉伯糖(Ara)与木糖(Xyl)的摩尔比。

1.2.8 *M_w*的测定 HPLC色谱柱为Waters Ultra-

hydrogel™ Linear 柱,柱温 45 °C,流动相 0.1 mol/L NaNO₃,流速 1.0 mL/min,示差折光检测器.将不同 *M_w* 的葡聚糖标准品相继进样,以保留时间对 *LgM_w* 绘制标准曲线.样品进样量为 20 μL,根据相应的保留时间,由所得回归方程计算多糖的 *M_w*.

1.2.9 红外光谱检测 分别取微量 WEAX 和 WUAX 样品,KBr 粉末压片后,红外扫描 32 次,分辨率为 4 cm⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 戊聚糖的得率与化学组成分析

根据其溶解性,戊聚糖可分为 WEAX 和 WUAX. WUAX 无法直接用水进行提取,须借用碱液提取,其原理在于 OH⁻ 能够破坏细胞壁大分子聚合物之间的共价键与非共价键的相互作用,使不溶性大分子聚合物转变为可溶性聚合物^[16].

分别以水和 Ba(OH)₂ 为介质对黑小麦面粉戊聚糖进行提取,得到 WEAX 与 WUAX,其得率和化学组成见表 1.

表 1 戊聚糖组分的得率与化学组成 %

组分	得率	多糖	戊聚糖	蛋白质
WEAX	0.47	91.46	81.30	6.85
WUAX	0.03	82.95	79.02	11.57

由表 1 可以看出,WEAX 的得率为 0.47%,多糖含量为 91.46%. WUAX 的得率为 0.03%,多糖含量 82.95%. WEAX 和 WUAX 中均含有一定量的蛋白质,分别为 6.85% 和 11.57%,这意味着利用蛋白酶酶解的方法无法完全清除戊聚糖提取过程中的蛋白质.其中 WUAX 中的蛋白质含量高于 WEAX,这是由于碱溶液在提取过程中虽然破坏了细胞壁聚合物间的氢键等次级键之间的结合力,但由于蛋白质与戊聚糖以共价键结合,所以在 WUAX 的提取过程中蛋白质被一并提取出来^[17]. WEAX 组分的戊聚糖含量(81.30%)略高于 WUAX 组分的戊聚糖含量(79.02%).

2.2 单糖组成分析

由峰面积计算得到戊聚糖组分的单糖组成摩尔比,结果见表 2.

表 2 戊聚糖组分的单糖组成摩尔比

组分	Ara	Xyl	半乳糖(Gal)	A/X
WEAX	5.74	11.64	1	0.49
WUAX	1	1.74	-	0.57

由表 2 可知,WEAX 主要由 Ara 和 Xyl 组成,并含有少量的半乳糖(Gal),这是由于黑小麦细胞壁中的戊聚糖与阿拉伯半乳聚糖等半纤维素之间紧密缔合,并发生物理性缠结,在提取过程中一并溶出^[17].

WUAX 主要由 Ara 和 Xyl 组成,不含有 Gal,这是由于提取过程中 Ba²⁺ 可以特异性地与 Ara 和 Xyl 等戊糖相结合,使戊聚糖单独溶出,从而获得较纯净的戊聚糖^[18].

戊聚糖的基本结构是以 Xyl 通过糖苷键连接聚合而成的木聚糖作为主链,Ara 为侧链.戊聚糖的 A/X 值反映戊聚糖聚合物的分支程度,A/X 值越大,其分支程度越高.由表 2 可知,WEAX 的 A/X 值低于 WUAX,即 WEAX 的分支程度低于 WUAX.

2.3 *M_w* 的测定

采用 HPLC 凝胶柱色谱对戊聚糖组分的 *M_w* 分布进行测定,结果见图 1 和图 2.由图 1 和图 2 可以看出,除去未透析完全的少量小分子组分,WEAX 和 WUAX 的 *M_w* 分布比较均一,根据软件得到的回归方程,计算二者的 *M_w* 分别为 7.73×10^5 , 6.56×10^4 ,WEAX 的 *M_w* 高于 WUAX.

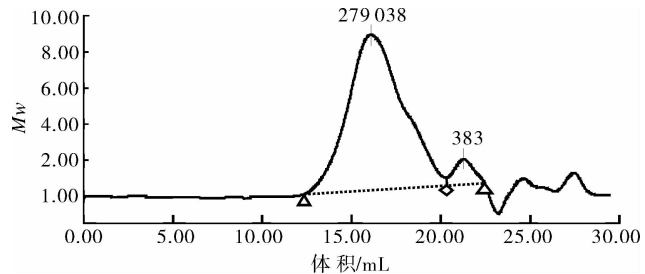


图 1 WEAX 的 *M_w* 分布

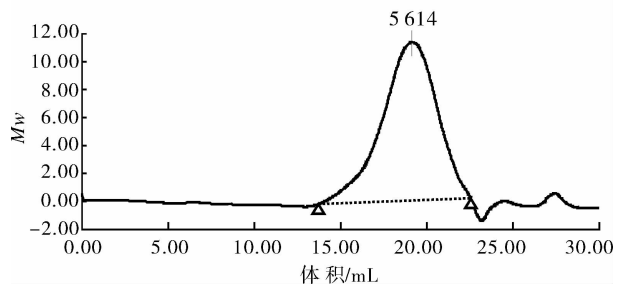


图 2 WUAX 的 *M_w* 分布

2.4 红外光谱分析

图 3 为黑小麦戊聚糖 WEAX 和 WUAX 的红外光谱图.由图 3 可以看出,WEAX 与 WUAX 在中红外波数范围内,具有糖分子的特征吸收.其中,2 400 ~ 3 600 cm⁻¹ 出现的宽大吸收峰是糖分子中

O—H 的伸缩振动峰. WEAX 中的 $2\ 925\ \text{cm}^{-1}$, $2\ 875\ \text{cm}^{-1}$ 和 WUAX 中的 $2\ 927\ \text{cm}^{-1}$, $2\ 873\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰归属于 C—H 的伸缩振动峰. $1\ 000\sim 1\ 300\ \text{cm}^{-1}$ 间的吸收峰归属于 C—O 伸缩振动峰. $1\ 730\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 274\ \text{cm}^{-1}$ 处的弱吸收峰表明两种戊聚糖组分均存在酯键,推测是由于其中所含有的阿魏酸分子与戊聚糖通过酯键键合所引起的.

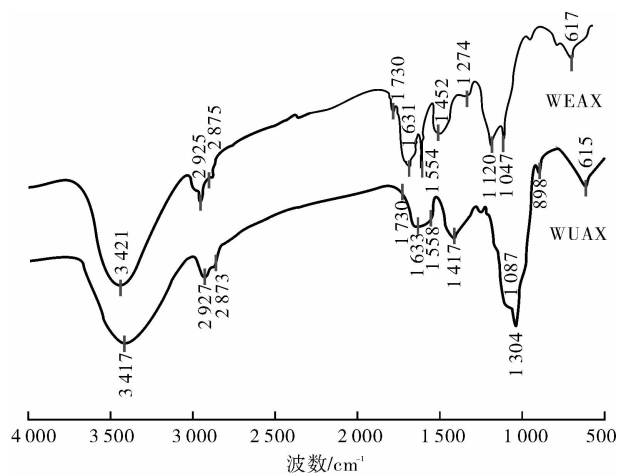


图3 戊聚糖组分的红外光谱图

3 结论

本文分别采用水和 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 溶液作为介质,提取黑小麦面粉中的 WEAX 和 WUAX,得率分别为 0.47% 和 0.03%. 运用离子色谱、高效液相色谱和红外光谱等对黑小麦面粉戊聚糖的理化性质进行分析. 结果表明:WEAX 的单糖组成主要为 Ara 和 Xyl,并含有少量的 Gal,摩尔比 Ara : Xyl : Gal = 5.74 : 11.64 : 1. 其 A/X 为 0.49, M_w 为 7.73×10^5 . WUAX 的单糖组成主要为 Ara 和 Xyl,摩尔比 Ara : Xyl = 1 : 1.74, WUAX 的 A/X 值为 0.57, M_w 为 6.56×10^4 ,表明 WEAX 的分支程度低于 WUAX,而其 M_w 高于 WUAX. 两种戊聚糖的红外光谱均表现出糖类的特征吸收峰,并具有酯键的特征吸收,推测是由于其中所含有的阿魏酸分子与戊聚糖通过酯键键合所引起的.

参考文献:

[1] 李利民,侯业茂,朱永义,等. 谷物戊聚糖国内外研究

进展[J]. 粮油加工与食品机械,2002(5):36.

- [2] 张峰,赵国华,阚健全. 谷物戊聚糖研究现状[J]. 粮食与油脂,2004,17(2):51.
- [3] 郑学玲,李利民,姚惠源. 戊聚糖的特性及戊聚糖与小麦品质之间的关系[J]. 面粉通讯,2004(2):34.
- [4] 董彬,郑学玲,王凤成. 国内外小麦戊聚糖研究进展[J]. 河南农业科学,2005(5):8.
- [5] 周素梅,王璋,许时婴. 面包制作过程中戊聚糖酶的作用机理[J]. 无锡轻工大学学报,2001,20(3):275.
- [6] 周素梅,王璋,许时婴. 小麦面粉阿拉伯木聚糖酶解性质的研究(I)——水溶性阿拉伯木聚糖的酶解[J]. 中国粮油学报,2000,15(3):13.
- [7] 杨希娟,党斌,张国权. 不同品种黑小麦色素稳定性[J]. 食品研究与开发,2012,33(1):108.
- [8] 时玉晴,苏东民,陈志成. 彩色小麦品质特性及其开发应用[J]. 粮食与油脂,2014,27(11):1.
- [9] 宋昱,谢三刚,谢飒英,等. 河东黑小麦选育与营养价值探讨[J]. 现代农业科技,2013(18):59.
- [10] 王金亭. 天然黑小麦色素研究进展[J]. 粮食与油脂,2013,26(3):45.
- [11] 周素梅. 阿拉伯木聚糖在焙烤制品中的功能性质的研究[D]. 无锡:无锡轻工大学,2000.
- [12] 马福敏,徐美玲,郭小瑞,等. 全麦粉水不溶性戊聚糖碱法提取工艺的研究[J]. 食品工业科技,2013,34(3):269.
- [13] 李利民,朱永义,姚惠源. 谷物中戊聚糖含量测定方法的比较研究[J]. 中国粮油学报,2004,19(6):76.
- [14] 张惟杰. 糖复合物生化研究技术[M]. 2版. 杭州:浙江大学出版社,2010.
- [15] 王肇慈. 粮油食品品质分析[M]. 北京:中国轻工业出版社,1994.
- [16] 郑学玲,李利民,姚惠源,等. 小麦粉戊聚糖的制备及组成成分分析研究[J]. 粮食与饲料工业,2002(2):43.
- [17] Izydorczyk M S, Dexter J E. Barley β -glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products—a review[J]. Food Research International,2008,41(9):850.
- [18] 孙元琳,李文多,张生万,等. 黑小麦麦麸戊聚糖的提取、纯化与组成分析[J]. 中国食品学报,2010,10(5):54.

婴幼儿谷物辅助食品紫色谷薯糊 工艺及配方研究

孔欣欣, 游新侠, 张娜

(郑州科技学院 食品科学与工程系, 河南 郑州 450064)

摘要:以大米、紫米、紫薯、山药为主要原料,研究一种婴幼儿谷物辅助食品——紫色谷薯糊,通过单因素试验及正交试验确定了其主要工艺参数和最佳配方.结果表明,山药先微波后化学护色的最佳工艺参数为:微波输出功率1 200 W,时间60 s,护色液配方为维生素C 0.5%,氯化钠1.0%,柠檬酸0.6%,护色时间5 min;紫米、紫薯最佳熟化工艺:紫米常压水煮20 min,紫薯于100℃汽蒸10 min.紫色谷薯糊的主要配方:大米、紫米、山药生料质量比为5:2:2.以原料湿基质量总和100计,紫薯、牛奶、蔗糖、食盐的添加量分别为30%,30%,6%,0.2%,DHA藻油添加量为2.0 mg/g.制成品适合8个月以上的婴幼儿食用.

关键词:婴幼儿谷物辅助食品;紫色谷薯糊;山药;紫米;紫薯;大米

中图分类号:TS213 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.004

The process and formula of purple cereal-potato mixed paste for infants

KONG Xin-xin, YOU Xin-xia, ZHANG Na

(Department of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: The best formula and the main process parameters of purple cereal-potato mixed paste (a kind of cereal-based complementary food for infants) using rice, purple rice, purple sweet potato and Chinese yam as materials were studied. By single and orthogonal experiment, the best process parameters of Chinese yam microwave heating and color protecting were obtained: the microwave output power 1 200 W, microwave heating time 60 s; the formula of color protecting was as following: Vc 0.5%, sodium chloride 1.0%, citric acid 0.6%, color protection time 5 min. The method of maturing for purple rice and purple sweet potato was studied by single factor test: purple rice was boiled 20 min in atmospheric pressure, purple sweet potato was steamed 10 min at 100℃. Using orthogonal test to determine the main formula as follow rice : purple rice : yam = 5 : 2 : 2 (mass ratio), the amount of purple sweet potato, milk, sugar, salt was respectively 30%, 30%, 6%, 0.2% (the sum of the main wet raw material was 100). The amount of DHA algae oil was 2.0 mg/g. The product was suitable for eight-month-or-more infants.

Key words: cereal-based complementary foods for infants; purple cereal-potato mixed paste; Chinese yam; purple rice; purple sweet potato; rice

收稿日期:2014-10-09

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(12B550015)

作者简介:孔欣欣(1975—),女,辽宁省葫芦岛市人,郑州科技学院讲师、工程师,硕士,主要研究方向为现代饮料、谷物食品工程制造及检测技术.

0 引言

婴儿出生1~4个月期间为纯母乳喂养阶段,其后,随着月龄的增加,乳类所含热能、蛋白质及其他营养素已不能满足其生长发育所需,必须及时给婴幼儿补充其他辅助食品.婴幼儿谷类辅助食品是以一种或多种谷物为主要原料、可添加适量的营养强化剂或其他辅料、适合6个月以上婴幼儿食用的辅助食品^[1].这类食品易消化、价格低,是很多国家6~12个月婴幼儿的首选辅助食品.6个月以上婴幼儿在添加辅食时,应从流态逐步过渡到半固态、固态,食物种类也应由少至多,此阶段婴幼儿体格发育速度开始放慢,但脑部发育加快,在膳食中必须有足够的热量和各种营养素,且营养素之间应保持平衡关系.

大米的主要成分是淀粉和蛋白质,其氨基酸组成较平衡合理,且大米蛋白质具有低抗原性、安全可靠的优点^[2],故广泛用于生产婴幼儿辅助食品.紫米与大米相比,蛋白质含量更高,氨基酸种类更为全面,其中赖氨酸含量约为普通大米的2倍,铁、钙、锌含量也明显高于普通大米^[3].紫薯是甘薯的一种,较一般甘薯含有更多的花青素、硒元素、铁元素,可以提高婴幼儿机体免疫力,预防贫血,它还含有一定量的粗纤维,有润肠通便的作用.山药质地细腻,风味鲜美,营养丰富,并具有健脾祛湿等食疗功能.牛奶是全营养食品且易消化,其蛋白属于优质蛋白,能与谷类蛋白质发生营养互补作用^[2].DHA(二十二碳六烯酸)藻油自藻类植物中提取,富含DHA,是大脑细胞膜和视网膜的重要组成部分,可促进婴幼儿脑功能和视功能发育^[4].我国卫生部于2010年发布第3号公告,将DHA藻油列入新资源食品,并允许在婴幼儿食品中添加.

我国大陆市场生产、销售的婴幼儿谷类辅食主要是以大米为主要原料的粉状米粉类制品,原料取材较单一,因而营养成分也单一.本文拟研制婴幼儿谷类辅助食品——紫色谷薯糊,以大米、紫米、紫

薯、山药为原料,并添加DHA藻油,从而使该产品营养成分全面、合理,且风味优美、易消化,并具有一定的保健功能.同类产品目前尚未见报道,表明其具有一定的市场潜力.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:大米(黄金晴品种),河南省原阳县产;紫米(香紫米品种),云南省产;紫薯(紫薯王品种),郑州市产;山药(普通品种),河南省温县产;纯牛奶,内蒙古伊利实业集团股份有限公司产;蔗糖(优级),广西贵糖(集团)股份有限公司产;DHA藻油(粉剂Ⅱ型),广东润科生物工程有限公司产;普通食盐(食品级),河南省卫群多品种盐有限公司产;一水柠檬酸(食品级),安徽丰原生物化学股份有限公司产;维生素C(食品级),华北制药集团有限责任公司产.

仪器:VYS-6HM型实验室微波设备,广州威雅斯微波设备有限公司产;SZM-20型多功能搅拌机,广州旭众食品机械有限公司产;DB-150型多功能磨浆机,广州德帮机械设备有限公司产;JMS-80型立式胶体磨,廊坊市廊通机械有限公司产;HH-W600型恒温水浴锅,金坛市晶玻实验仪器厂产;JYC-21GS02型电磁炉,九阳股份有限公司产;YXQ-LS-100A型高压灭菌锅,常州诺基仪器有限公司产;AB104-S型电子天平,瑞士梅特勒-托利多常州公司产;UV-2800型紫外-可见分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司产.

1.2 工艺流程

工艺流程见图1.

1.3 工艺要点

1.3.1 原料预处理 选择肉质洁白肥厚,粗壮均匀,无病虫害及机械损伤,直径在4~5cm的圆山药;选择具有特征色泽、气味清香、无病虫害的大米、紫米,用净水清洗1~2次,沥水备用;选择无黑腐病、虫咬及机械损伤的紫薯,清洗去皮,切成2cm厚

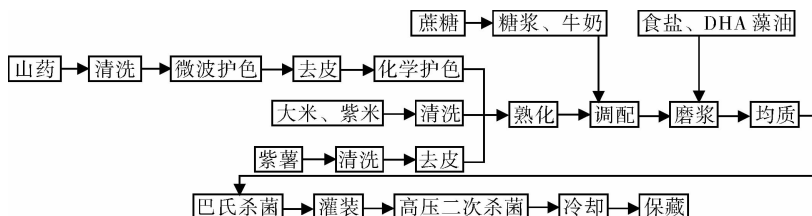


图1 紫色谷薯糊工艺流程

的紫薯片,备用。

1.3.2 山药护色 山药在加工过程中容易发生褐变,原因大致分为三类,即酶促褐变、美拉德反应和抗坏血酸的氧化作用^[5]。酶促褐变是山药褐变的主要原因,其反应非常迅速,山药中与酶促褐变密切相关的酶主要是多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)^[6]。山药最常见的护色方法是热烫和化学护色。热烫护色工艺成熟,但批量生产时卫生状况不好,能量消耗大。化学护色效果明显,但护色剂消耗量大,对于婴幼儿食品,护色剂的种类选择也受到较大限制。

本文研究微波护色和化学护色相结合的护色效果。微波护色的原理是加热钝化引起山药酶促褐变的酶类。微波传热的特点是自内向外,加热均匀且时间短,热惯性低^[7]。本试验选择微波输出功率和护色时间为研究因素,进行正交试验,以未经微波处理的山药作对照。用透光率判断试验结果,其检测方法是:将样品去皮,迅速捣碎,用等质量蒸馏水稀释降低黏度,取10 mL稀释后的山药浆和10 mL乙醇混合均匀,提取6 h,用定性滤纸过滤,取滤液置于1 cm比色皿中,用分光光度计在430 nm下测定其透光率^[8]。山药微波护色并不能让引起山药酶促褐变的酶类完全钝化失活,在后期的加工过程中,还需对山药去皮、切片、加热熟化,所以需要进一步护色。将经微波护色的山药去皮并切成约2 cm厚的山药片,浸泡在允许在婴幼儿食品中使用的维生素C、氯化钠和柠檬酸组成的复合护色液里,通过正交试验确定它们的用量及护色时间,以未经化学护色处理的山药作对照,用透光率判断试验结果,检测方法同上所述。

1.3.3 熟化 山药:常压汽蒸6 min熟化;大米:在大米中按1:5料水比加入沸水(98~100℃),恒温熟化12 min,将水沥去,煮米水冷却至20℃以下,密闭保存用于配料;紫米:紫米较大米质地更为坚硬,磨浆前,需加入一定比例的热开水进行预煮熟化,一方面通过加热吸水使米粒软化,方便制浆,另一方

面使米粒糊化,提高消化吸收率,节约能源。在紫米中按1:7料水比加入沸水,恒温熟化,将水沥去,煮米水按大米水处理,用于配料;紫薯:紫薯在打浆前,也需要进行熟化处理,一方面使薯体软化易去皮易破碎,另一方面达到一定的糊化度,缩短后期完全糊化所需时间,节约能源,紫薯常压汽蒸熟化,紫米和紫薯熟化时间用单因素试验确定。

1.3.4 调配 蔗糖用煮米水(大米、紫米)配制为50%的浓糖浆,加热至90℃,保温5 min杀菌,然后速冷至25℃左右。将熟化后的谷薯原料,按比例与糖浆、牛奶在搅拌机中混合均匀。紫薯、牛奶、蔗糖、食盐的用量用正交试验确定。

1.3.5 磨浆 将混合料送入磨浆机制成匀浆,为减小颗粒粒度,需磨浆两次,第二次磨浆时,加入预先干混好的食盐、DHA藻油混合物。

1.3.6 均质 将料糊升温至75~80℃,用胶体磨均质两次,第一次磨盘间隙20 μm,循环5 min,第二次磨盘间隙10 μm,循环3 min。

1.3.7 杀菌、灌装、二次杀菌、冷却 将均质后的料糊升温至90℃,保温3 min,趁热装入经杀菌的玻璃瓶中,121℃杀菌5 min,分段冷却至25℃以下。

1.4 紫色谷薯糊感官指标评定标准

在选用的天然谷薯原料中,大米、紫米及山药特征风味均不突出,根据婴幼儿营养需要和消化吸收特点,大米、紫米、山药以生料计,质量比设计为5:2:2。DHA藻油按GB 10765—2010《食品安全国家标准·婴儿配方食品》规定适当添加。本产品的特有滋味主要取决于紫薯、牛奶、蔗糖和食盐,其中食盐起到调和风味和防腐的作用。紫薯、牛奶、蔗糖和食盐的添加量用正交试验确定,通过感官评定对制成的试验样品进行综合评分,评定标准见表1。

2 结果与分析

2.1 山药微波护色工艺

表2为山药微波护色工艺参数正交试验结果。

表1 紫色谷薯糊感官指标评定标准

指标	等级一	等级二	等级三
香气 (满分4分)	香气宜人浓郁,无异味 (2.8~4.0)	香气较宜人浓郁,无明显异味 (1.4~2.7)	香味淡,有异味 (0.0~1.3)
滋味口感 (满分6分)	香甜鲜美,浓郁丰满,风味宜人,无异 味,入口细腻柔滑(4.1~6.0)	滋味较协调浓郁,无明显异味, 入口较粗糙(2.1~4.0)	滋味不协调,单薄寡淡,有异味, 入口粗糙有颗粒感(0.0~2.0)
总分10	6.8~10.0	3.4~6.7	0.0~3.3

表2 山药微波护色工艺参数正交试验结果

试验号	微波输出功率 A	护色时间 B	透光率/%
1	1(800 W)	1(30 s)	68.14 ± 0.40
2	1	2(60 s)	78.22 ± 0.46
3	1	3(90 s)	78.42 ± 0.47
4	2(1 000 W)	1	69.77 ± 0.41
5	2	2	79.85 ± 0.47
6	2	3	80.12 ± 0.48
7	3(1 200 W)	1	70.92 ± 0.42
8	3	2	82.61 ± 0.49
9	3	3	80.42 ± 0.48
K_1	224.8	208.8	
K_2	234.0	239.0	
K_3	229.7	240.7	
k_1	74.9	69.6	
k_2	76.6	80.2	
k_3	78.0	79.7	
极差 R	3.1	10.6	

未经微波处理的山药样品透光率为 50.44%，对比表 2 中经微波处理的各山药样品透光率可知，经微波处理后，山药褐变程度降低。通过极差分析可知，护色时间对护色效果的影响更为明显，但微波处理时间过长，会引起山药严重失水。因此，本试验最佳方案为 A_3B_2 (试验 8)，即当微波输出功率为 1 200 W，护色时间为 60 s 时，山药护色效果较好，且易剥皮，外观形态未发生明显变化。

2.2 山药化学护色工艺

山药经微波护色后，去皮、切片并浸泡在护色液里，对 3 种护色剂的用量及护色时间作正交试验，试验结果见表 3。

经检测，已经微波护色但未经化学护色的山药样品透光率为 74.38%，说明去皮、切片后，山药仍会发生褐变。由表 3 可知，经化学护色，山药的褐变程度变小，影响山药化学护色效果的因素顺序为： $A > C > B > D$ ，即维生素 C 的影响最显著。山药化学护色最佳工艺组合为 $A_2B_2C_3D_1$ ，与试验结论一致 (试验 5)，即维生素 C 0.5%，氯化钠 1.0%，柠檬酸 0.6%，护色时间 5 min。所选用的护色剂安全性好，具有提升营养价值，改善风味的作用。

2.3 紫米熟化工艺

紫米熟化时间用单因素试验确定，用感官指标及糊化度对水煮后的紫米进行评价，糊化度的检测采用葡萄糖淀粉酶法^[9]，单因素试验结果见表 4。

由表 4 可知，随着水煮时间的延长，紫米的糊化度不断提高，在水煮时间为 20 min 时，紫米米香味

表3 山药化学护色工艺参数正交试验结果

试验号	维生素 C A	氯化钠 B	柠檬酸 C	护色时间 D	透光率/%
1	1(0.3%)	1(0.8%)	1(0.2%)	1(5 min)	79.40 ± 0.49
2	1	2(1.0%)	2(0.4%)	2(10 min)	80.12 ± 0.49
3	1	3(1.2%)	3(0.6%)	3(15 min)	81.66 ± 0.50
4	2(0.5%)	1	2	3	85.53 ± 0.51
5	2	2	3	1	88.49 ± 0.52
6	2	3	1	2	86.61 ± 0.51
7	3(0.7%)	1	3	2	86.34 ± 0.51
8	3	2	1	3	86.02 ± 0.51
9	3	3	2	1	86.32 ± 0.51
K_1	241.2	251.3	252.0	254.2	
K_2	260.6	254.6	251.9	253.1	
K_3	258.7	254.5	256.5	253.2	
k_1	80.4	83.8	84.0	84.7	
k_2	86.9	84.9	84.0	84.4	
k_3	86.2	84.8	85.5	84.4	
极差 R	6.5	1.1	1.5	0.3	

表4 紫米熟化工艺单因素试验结果

水煮时间/min	感官评价结果	糊化度/%
5	煮米水呈淡紫色，米粒基本处于全生状态，手搓坚硬	7.2
10	煮米水颜色加深，米粒体积增大，用力手搓可碎，有米香味和生米味	24.5
15	煮米水呈现黑红色，米粒体积继续增大，手搓可碎，但米粒中心有少许夹生，米香味增加，生米味消失	44.3
20	煮米水呈黑红色，米粒表面有开裂，体积增大不明显，米粒基本保持完整，手搓即碎，米香味浓郁，无夹生	58.7
25	煮米水呈现黑红色，米粒开始碎烂，吸水严重，米香味降低	72.4
30	煮米水与部分米粒混合呈现粥糊状，颜色呈现黑红色，黏度较大，米香味降低	89.4

较突出，米粒质量增加至原来的 2.7 倍左右，手搓即碎，但外形仍保持基本完整，色泽未发生明显变化，糊化度为 58.7%，达到预期工艺要求。

2.4 紫薯熟化工艺

紫薯采用 100℃ 水蒸汽熟化方式，熟化时间用单因素试验确定，用感官指标对汽蒸后的紫薯进行评价，单因素试验结果见表 5。

由表 5 可知，紫薯 100℃ 汽蒸 10 min 时综合感官指标最好，且易于加工处理。

2.5 主原料配方的研究

感官评定采用分类检验法，评价员由 10 人组成，均为受过一定感官检验训练的人员。正交试验

结果见表6.

表5 紫薯熟化工艺单因素试验结果

汽蒸时间/min	感官评价结果
5	颜色呈暗紫色,表层熟化,内部仍脆硬
10	颜色呈暗紫色,中心已熟化,外形保持完整,受压易成泥,入口有软糯和起沙感
15	颜色呈暗紫色,完全熟化,表面水润,有变形塌陷现象,薯体水分回升,易碎,口感及特有滋气味变差
20	颜色呈暗紫色,水分含量继续增加,基本成泥状,特有滋气味降低
25	颜色呈黑紫色,外观成泥状,特有滋气味寡淡

表6 紫色谷薯糊主原料配比正交试验结果

试验号	紫薯A	牛奶B	蔗糖C	食盐D	感官评价/分
1	1(20%)	1(20%)	1(6%)	1(0.10%)	6.2
2	1	2(30%)	2(7%)	2(0.15%)	7.0
3	1	3(40%)	3(8%)	3(0.20%)	7.1
4	2(25%)	1	2	3	6.9
5	2	2	3	1	8.0
6	2	3	1	2	7.9
7	3(30%)	1	3	2	8.2
8	3	2	1	3	9.2
9	3	3	2	1	8.7
K_1	20.3	21.3	23.3	22.9	
K_2	22.8	24.2	22.6	23.1	
K_3	26.1	23.7	23.3	23.2	
k_1	6.8	7.1	7.8	7.6	
k_2	7.6	8.1	7.5	7.7	
k_3	8.7	7.9	7.8	7.8	
极差R	1.9	1.0	0.3	0.2	

注:以大米、紫米、山药湿基原料的质量总和为100,其余原料以其质量百分比计量.

由表6中极差值分析可知,影响试验结果的因素主次顺序为 $A > B > C > D$,即紫薯添加量对产品风味影响最大.正交试验优选出的方案为 $A_3B_2C_1D_3$,与直观结果一致(试验8),即以大米、紫米、山药湿基原料质量总和100计,紫薯、牛奶、蔗糖、食盐的添加量分别为30%,30%,6%,0.2%.

3 结论

本文以大米、紫米、紫薯、山药为主要原料,研究

一种婴幼儿谷物辅助食品——紫色谷薯糊,通过单因素试验及正交试验确定了其主要工艺参数和最佳配方.试验结果表明,山药先采用微波护色加化学护色效果较好,微波护色的最佳工艺参数为输出功率1200W,时间60s;化学护色的最佳工艺组合为维生素C0.5%,氯化钠1.0%,柠檬酸0.6%,护色时间5min.紫米最佳熟化工艺为100℃水煮20min,紫薯最佳熟化工艺为100℃汽蒸10min.紫色谷薯糊的最优配方为大米、紫米、山药生料质量比为5:2:2,如以上原料湿基质量总和以100计,则紫薯、牛奶、蔗糖、食盐的添加量分别为30%,30%,6%,0.2%,DHA藻油按GB10765—2010添加量为2.0mg/g.采用最佳工艺及配方研制出的紫色谷薯糊呈暗紫色细腻均匀糊状,无肉眼可见颗粒及异物,香气宜人,乳香及甘薯香气较突出,具有特有宜人滋味,浓郁、香甜适口,柔滑细腻,黏度适口,可直接食用或用牛奶等稀释后食用.成品蛋白质含量较高,且属优质蛋白质,此外富含钙,铁,硒,维生素B1,DHA及花青素等有益微量成分,具有健脑、益气健脾、润肠通便等食疗功能.该产品适合8个月以上的婴幼儿食用,具有较好的市场前景.

参考文献:

- [1] GB 10769—2010, 食品安全国家标准·婴幼儿谷类辅助食品[S].
- [2] 孙远明. 食品营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2010:215-216.
- [3] 王丽华,叶小英,李杰勤,等. 黑米、红米的营养保健功效及其色素遗传机制的研究进展[J]. 种子,2006,25(5):50.
- [4] 张义明. DHA的来源及合理应用[J]. 食品工业科技,2003,24(8):98.
- [5] 李红涛,袁书林. 山药加工褐变抑制方法的研究[J]. 农产品加工学刊,2009(9):23.
- [6] 谢兴源. 山药的主要成分及其应用价值[J]. 现代农业科技,2009(6):76.
- [7] 徐文通. 食品工程原理[M]. 北京:高等教育出版社,2005:141-142.
- [8] 孔欣欣,王莹莹,朱叶. 苹果、决明子、怀菊花复合保健饮料的研制[J]. 食品与发酵科技,2010,46(3):104.
- [9] 付中华,薛晓金,田素芳. 糊化度的测定方法[J]. 粮食流通技术,2004(03):27.

烟草薄片中添加烟草花蕾挥发油 对烟气化学组成的影响

农李政¹, 孙斯文², 肖源^{2,3}, 胡志忠¹, 刘绍华¹, 许春平²

(1. 广西中烟工业有限责任公司 技术中心, 广西 南宁 530001;

2. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

3. 红云红河烟草(集团)有限责任公司 新疆卷烟厂, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830000)

摘要:通过 CO₂ 超临界萃取法萃取烟草花蕾中的挥发油,研究了花蕾挥发油不同添加比例对烟草薄片烟气化学组成的影响.通过气相色谱-质谱鉴定可知,添加花蕾挥发油比例为 0.1%,0.2%,0.4%的薄片叶组卷烟所产生的烟气粒相物挥发性成分分别为 74 种、73 种、88 种.三种添加量的新增物质种类分别为 38 种、39 种、52 种,与空白样对比,烟气粒相物挥发性成分的含量均有明显提高.对卷烟烟气化学成分分析后发现,花蕾挥发油添加比例并非与烟草吃味呈正相关性.

关键词:烟草花蕾;挥发油;烟草薄片;烟气粒相物挥发性成分;CO₂ 超临界萃取

中图分类号:TS49 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.005

Effect of addition of volatile oil from tobacco flower into reconstituted sheet on the smoke chemical composition

NONG Li-zheng¹, SUN Si-wen², XIAO Yuan^{2,3}, HU Zhi-zhong¹,
LIU Shao-hua¹, XU Chun-ping²

(1. Technology Center, China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd., Nanning 530001, China;

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

3. Xinjiang Cigarette Factory, Hongyunnonghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Urumchi 830000, China)

Abstract: The effect of addition of different proportions of flowers volatile oil into reconstituted sheet on chemical composition of tobacco smoke was investigated using CO₂ supercritical extraction to extract volatile oil from flue-cured tobacco flowers. GC-MS was used to identify the particulate matter from cigarette smoke. The results showed that the total number of volatile components was 74, 73, and 88 generated from reconstituted sheet when 0.1%, 0.2%, and 0.4% flower volatile oil was added into the sheet, respectively. The number of newly generated compounds was observed to be 38, 39, and 52, respectively, and the content of volatile components from smoke condensate was significantly improved compared to the blank control. Through the analysis of the chemical composition of cigarette smoke, the taste was not positively correlated with the addition proportion of volatile oil to reconstituted sheet.

收稿日期:2014-07-17

基金项目:国家人社部“留学人员科技项目择优支持计划”(豫留学函[2010]16号);广西中烟工业公司合作项目

作者简介:农李政(1970—),男,广西省南宁市人,广西中烟工业有限责任公司助理工程师,主要研究方向为卷烟产品.

通信作者:许春平(1977—),男,河南省焦作市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为生物催化与烟草工程.

Key words: tobacco flower; volatile oil; reconstituted sheet; volatile component from smoke condensate; CO₂ supercritical extraction

0 引言

烟草打顶弃去的花蕾含有丰富的香料物质,是天然植物香源之一。从花蕾中提取出的香膏产品气味纯正,芳香浓馥^[1],但鲜见有关花蕾香膏应用方面的文献。

烟草薄片用作卷烟填充料,不但可以节省烟叶原料,有效降低卷烟成本,而且可在一定程度上使卷烟的物理性能和化学成分得到改善,是减少烟草有害成分和提高卷烟品质的一项重要措施^[2-3]。

再造烟叶在应用过程中需同烟叶掺配并经过一系列加工,其掺配的均匀性、物理及化学指标的变化等,均可影响产品的品质^[4]。本文拟从改善卷烟吸味、提高卷烟抽吸品质出发,结合目前卷烟降害增益的实际情况,研究在烟草薄片中添加花蕾挥发油对烟气化学组成的影响,以期对卷烟开发提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:2012年,内蒙古赤峰市生产烟草花蕾,品种为龙江911;叶组配方,郑州轻工业学院提供;烟草薄片丝,河南中烟提供。

试剂:无水乙醇、二氯甲烷、氯化钠,均为分析纯,天津市富宇精细化工有限公司产。

仪器:SHB-3循环水多用真空泵,郑州杜甫仪器厂产;Q-100A3旗箭粉碎机,上海冰都电器有限公司产;HS-4恒温水浴锅,上海医疗器械五厂产;PL203电子分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产;DGX-9143电热恒温鼓风干燥箱,上海福玛设备有限公司产;同时蒸馏萃取装置,郑州科技玻璃仪器厂产;HL-(5+1)L/50-III BQ型超临界流体(CO₂)萃取装置,杭州华黎泵业有限公司产;6890/5973气相色谱仪-质谱仪,安捷伦科技有限公司产;LM5+吸烟机,德国Borgwaldt公司产。

1.2 实验方法

1.2.1 烟草花蕾挥发油的提取 取适量烟草花蕾,用蒸馏水清洗干净后放于烘箱中45℃干燥3h,然后用粉碎机粉碎,过60目筛。

称取150g样品,置于萃取釜中进行提取。CO₂超临界萃取条件:压力20MPa,温度50℃,CO₂温度-10℃,流量10L/h,萃取时间2h,流速0.3mL/min,夹带剂无水乙醇500mL。将萃取物烟草花蕾粉末装入萃取釜中,采用CO₂为萃取溶剂,CO₂气体经热交换器冷凝为液体。用加压泵把压力提升至28MPa,同时调节温度使其成为超临界CO₂流体。CO₂流体从萃取釜底部进入与被萃取烟末充分接触,选择性溶解出所需化学成分。通过毛细管的口径大小控制CO₂的流出流量,流出液流入吸收池,最终得到膏状液体,即为所得挥发油。

1.2.2 烟草薄片加香工艺 取一定量烟草薄片,切丝后称取14.4g完整薄片丝与120g叶组配方进行掺配。放置于恒温恒湿箱内,相对湿度(60±5)%,温度(22±2)℃,48h后备用。

将样品按照烟丝质量的0.1%、0.2%、0.4%进行加香。空白组S:取2mL乙醇直接均匀喷洒在薄片丝上;实验组S₁(烟丝质量的0.1%):称取0.03g的花蕾挥发油,加入2mL乙醇稀释,均匀喷洒在薄片丝上;实验组S₂(烟丝质量的0.2%):称取0.06g的花蕾挥发油,加入2mL乙醇稀释,均匀喷洒在薄片丝上;实验组S₃(烟丝质量的0.4%):称取0.12g的花蕾挥发油,加入2mL乙醇稀释,均匀喷洒在薄片丝上。

按照国标要求^[5],每支烟总质量(0.80±0.01)g,在温度(22±2)℃,相对湿度(60±5)%的恒温恒湿箱中平衡24h。

1.2.3 吸烟机抽吸及烟气粒相物分析 平衡好的样品按照国标^[5]进行吸烟机抽吸,实验组和空白组各抽吸20支,每5支换1个剑桥滤片。结束后将剑桥滤片和擦拭捕集器的棉花放入1000mL圆底烧瓶中,加入36gNaCl,400mL蒸馏水,同时蒸馏萃取2.5h。然后将浓缩瓶置于60℃恒温水浴锅中,当瓶中液体浓缩至约1mL左右,将浓缩瓶取出,加入1mL内标溶液,盖上塞子待液体冷却后转入色谱瓶,进行GC-MS分析。

GC-MS条件:色谱柱HP-5MS(60m×0.25mm×0.25μm);载气高纯氦气流速1mL/min,进样口温度260℃,升温程序50℃(3min)→

280 ℃ (10 min), 分流比 5 : 1, 进样量 1 μL.

传输线温度 270 ℃, 离子源温度 230 ℃, 四级杆温度 150 ℃, 电离能 70 eV, 质量数范围 35 ~ 550 amu, MS 谱库为 Nist02 库.

1.2.4 香味物质含量的计算方法 由于烟气粒相物成分复杂, 种类繁多, 很难得到各种香味物质的标准品, 故使用 Nist02 标准图库对其定性, 采用内标法对其定量, 假定相对校正因子(相对于内标)为 1, 对各种成分按照下式进行定量计算^[6].

挥发性物质含量 =

$$\frac{\text{挥发性物质峰面积} \times \text{内标质量} \times 1\ 000}{\text{内标峰面积} \times \text{烟样质量} \times (1 - \text{含水率})}$$

2 结果与讨论

2.1 烟草薄片加香 GC-MS 分析结果

添加不同比例花蕾挥发油的薄片叶组卷烟烟气粒相物挥发性物质含量见表 1. 添加不同比例花蕾挥发油的薄片叶组卷烟烟气粒相物新增加挥发性物质见表 2.

由表 1 可见, 空白组 S 中自身所含有的物质经过加香后其烟气粒相物含量有所改变, 共鉴定出 36 种物质. 为便于分析, 按其官能团的不同归属为五大类, 其中醛酮类 10 种, 杂环类 14 种, 酯类 1 种, 萜烯类 2 种, 苯环及酚类 9 种. 与 S 组卷烟相比: S₁ 组卷烟样品中, 含量增加的有 29 种, 醛酮类、杂环类、酯类、萜烯类和苯环及酚类总含量分别增加了 34.0%、34.2%、13.2%、111.0% 和 97.0%; S₂ 组卷烟样品含量增加的有 25 种, 醛酮类、杂环类、酯类、萜烯类和苯环及酚类总含量分别增加了 32.7%、104.1%、43.8%、294.8% 和 199.4%; S₃ 组卷烟样品中含量增加的有 34 种, 醛酮类、杂环类、酯类和苯环及酚类的总含量分别增加了 139.8%、238.8%、120.4%、490.3% 和 436.2%, 其中酚类物质(如对乙烯基愈创木酚、4-乙基苯酚)增长最为明显.

由表 2 可见, 花蕾挥发油加香的叶组卷烟样品中, 新增加了 52 种新物质, 这些物质是空白样品中所不包含的或者含量极其微小可以忽略不计的. 其中醛酮类 12 种, 杂环类 6 种, 酯类 4 种, 酸类 1 种, 萜烯类 10 种, 醇类 5 种, 苯环及酚类 7 种, 烷烃类 7 种. 当加香浓度为 0.1% 时, 醛酮类、杂环类、酯类、

表 1 添加不同比例花蕾挥发油的薄片叶组

卷烟烟气粒相物挥发性物质含量 μg/g

项目	化合物	S 组 含量	S ₁ 组 含量	S ₂ 组 含量	S ₃ 组 含量
	4-环戊烯-1, 3-二酮	0.83	1.98	—	3.66
	2-甲基-2-环戊 烯-1-酮	4.10	4.49	4.94	6.46
	5-甲基呋喃醛	6.39	8.76	9.51	15.67
	甲基环戊烯醇酮	2.48	0.71	—	1.73
醛酮类	苯乙醛	1.21	1.50	1.53	2.09
	苯乙酮	0.33	1.04	0.96	1.83
	辛酮	0.90	1.00	—	3.81
	巨豆三烯酮 A	2.28	4.26	4.55	6.71
	巨豆三烯酮 B	0.43	0.95	1.21	1.30
	巨豆三烯酮 C	1.11	2.20	3.92	4.86
	合计 10 种	20.06	26.88	26.60	48.12
	吡啶	2.35	2.03	2.00	2.49
	2-甲基吡啶	1.14	1.16	1.04	1.05
	糠醛	12.11	14.72	15.10	20.18
	糠醇	0.08	1.14	2.04	4.04
	3-甲基吡啶	3.51	3.93	4.50	6.44
	2-乙酰基呋喃	1.36	2.05	—	2.54
	3-乙基吡啶	0.98	1.00	1.05	1.98
杂环类	2-乙基吡啶	3.33	3.07	3.34	4.72
	苯酚	2.63	7.47	9.47	18.79
	3-甲基吡啶	2.34	4.31	1.53	4.20
	2-甲基茛	1.25	2.42	0.84	1.32
	萘	2.28	3.27	3.77	5.37
	2-甲基萘	0.85	0.66	0.63	1.46
	烟碱	11.25	13.78	47.50	79.45
	合计 14 种	45.46	61.01	92.8	154.00
酯类	丙酮酸乙酯	0.98	1.11	1.41	2.16
	合计 1 种	0.98	1.11	1.41	2.16
	(4E)-2,3-二甲 基-2,4-丙二烯	1.43	—	—	0.91
萜烯类	新植二烯	12.44	26.26	54.7	81.01
	合计 2 种	13.87	26.26	54.7	81.92
	1,2-二甲苯	1.43	1.60	—	2.16
	苯酚	2.63	7.47	9.47	18.79
	邻甲酚	2.72	5.13	6.16	9.43
	4-甲基苯酚	2.41	7.66	13.20	22.23
苯环及 酚类	2-甲氧基苯酚	1.32	0.73	3.53	5.54
	2,6-二甲基苯酚	0.94	1.07	1.22	2.53
	4-乙基苯酚	0.87	2.12	7.00	12.17
	2,3-二甲基苯酚	2.64	1.16	1.52	2.68
	对乙烯基愈创木酚	0.73	3.97	4.83	8.61
	合计 9 种	15.69	30.91	46.90	84.14

表2 添加不同比例花蕾挥发油的薄片叶组卷烟烟气粒相物新增加的挥发性物质 $\mu\text{g/g}$

项目	化合物	S ₁ 组含量	S ₂ 组含量	S ₃ 组含量	项目	化合物	S ₁ 组含量	S ₂ 组含量	S ₃ 组含量	
醛酮类	乙酰氧基-2-丙酮	0.80	1.31	2.34	萜烯类	7-甲基-双环[4.2.0] 辛-1,3,5-三烯	0.78	1.22	1.34	
	3,3-二甲基-2-丁酮	0.60	0.72	2.12		十五烯	0.44	0.99	1.39	
	2-甲基苯甲醛	—	—	2.69		1-十九烯	1.02	1.88	3.65	
	3,4-二甲基-2-甲 基环戊烯醇酮	0.91	0.97	1.58		西柏烯	—	—	2.64	
	2,3-二甲基-2- 环戊烯酮	4.09	4.61	7.08		别香树烯	0.87	1.57	5.82	
	乙基环戊烯醇酮	—	—	2.04		1-二十二烯	0.26	0.73	2.33	
	1-茛酮	—	2.12	3.77		顺式-9-二十三烯	—	—	0.97	
	马铃薯螺二烯酮	0.76	1.46	2.23		α -法尼烯	0.45	0.69	1.05	
	植酮	1.00	2.09	3.31		总计10种	5.58	9.82	22.98	
	4-(三氟甲氧基)苯乙酮	2.51	2.84	4.01		醇类	木焦油醇	1.17	1.60	2.61
	十七烷酮	0.91	1.38	2.43			(R)-(+) - β -香茅醇	0.65	1.09	1.90
	法尼基丙酮	—	1.23	1.84			香叶基香叶醇	0.87	1.98	3.09
总计12种	11.58	18.73	35.44	黑松醇	—		—	1.23		
苯乙腈	0.85	1.12	1.80	香叶基香叶醇	2.01		2.88	4.48		
杂环类	2,3-二氢苯并呋喃	2.22	2.81	6.77	总计5种	4.70	7.55	13.31		
	吡啶	1.39	1.30	2.88	苯环及 酚类	2,3-二甲基苯酚	1.69	1.52	3.32	
	3-甲基吡啶	3.72	2.04	2.76		2,4-二甲基苯酚	2.42	4.28	6.20	
	2-甲基吡啶	1.89	2.46	2.93		2,4,6-三甲基苯酚	1.07	2.12	1.66	
	蒽	0.66	0.96	1.44		4-乙基愈创木酚	0.99	0.86	1.45	
	总计6种	10.73	10.69	18.58		邻异丙基苯硫酚	—	—	2.07	
酯类	3,7-二甲基-1,6-辛二 烯-3-醇甲酸酯	1.01	1.85	2.69		4,4'-二甲基联苯	—	0.92	1.15	
	维生素A醋酸酯	1.50	2.52	7.02		4-叔丁基-2,6-二 甲基乙酰苯	1.00	1.99	3.52	
	9,12,15-十八烷 三烯酸甲酯	0.96	1.76	3.57	总计7种	7.17	11.69	19.37		
	邻苯二甲酸二(2- 乙基己)酯	—	0.73	1.15	烷烃类	正十五烷	1.01	1.79	2.83	
	总计4种	4.58	8.27	16.59		十六烷	—	—	1.38	
酸类	壬酸	—	—	1.61		十四烷	0.73	1.08	2.23	
	总计1种	0	0	1.61		二十烷	0.99	1.46	3.14	
萜烯类	乙基甲基环戊烯	0.77	1.40	2.69		二十二烷	—	—	2.7	
	1-十四烯	0.99	1.34	1.10		二十一烷	0.29	0.42	1.24	
						二十烷	1.01	1.79	2.83	
					总计7种	3.02	5.58	16.3		

酸类、萜烯类、醇类、苯环及酚类、烷烃类增加量依次为 11.58 $\mu\text{g/g}$, 10.73 $\mu\text{g/g}$, 4.58 $\mu\text{g/g}$, 0 $\mu\text{g/g}$, 5.58 $\mu\text{g/g}$, 4.70 $\mu\text{g/g}$, 7.17 $\mu\text{g/g}$, 3.02 $\mu\text{g/g}$. 当加香浓度为 0.2% 时, 醛酮类、杂环类、酯类、酸类、萜烯类、醇类、苯环及酚类、烷烃类增加量依次为 18.73 $\mu\text{g/g}$, 10.69 $\mu\text{g/g}$, 8.27 $\mu\text{g/g}$, 0 $\mu\text{g/g}$, 9.82 $\mu\text{g/g}$, 7.55 $\mu\text{g/g}$, 11.69 $\mu\text{g/g}$, 5.58 $\mu\text{g/g}$. 当加香浓度为 0.4% 时, 醛酮类、杂环类、酯类、酸类、萜烯类、醇类、苯环及酚类、烷烃类增加量依次为 35.44 $\mu\text{g/g}$, 18.58 $\mu\text{g/g}$, 16.59 $\mu\text{g/g}$, 1.61 $\mu\text{g/g}$, 22.98 $\mu\text{g/g}$, 13.31 $\mu\text{g/g}$, 19.37 $\mu\text{g/g}$, 16.30 $\mu\text{g/g}$.

2.2 实验组与空白组各类烟气粒相物挥发性成分对比分析

将 4 组卷烟样品的各类烟气挥发性成分总量进行统计, 并绘制成柱状图(见图 1). 添加 3 种不同比例的花蕾挥发油薄片叶组卷烟与空白对照样各类挥发性成分总量相比, 醛酮类、苯环及酚类、杂环类、萜烯类、醇类和酯类总含量增加都较明显, 并且随着花蕾挥发油添加比例的增加, 烟气粒相物挥发性物质含量呈逐渐增加的趋势. 当添加比例为 0.4% 时, 各类物质含量达到最高值, 酸类物质变化不明显. 由此可见, 花蕾挥发油的加入使卷烟烟气

化学成分发生了明显的改变,但花蕾挥发油添加比例并非与烟草吃味呈正相关性.原因是随着花蕾挥发油添加量提高,部分烟气致香成分(如糠醛、新植二烯等物质)含量明显提高:糠醛可使烟气香味变甜,具有面包香和黄油香^[7];新植二烯是烟草中重要的萜烯类化合物,它本身不仅具有一定的香气,而且可分解转化形成低分子香味成分^[8].与此同时,烟气粒相物挥发性有害成分(如大部分酚类物质)的含量也随着花蕾挥发油添加比例的提高而增长,例如苯酚、2,6-二甲基苯酚等,这些物质都会在抽吸的过程中刺激人体呼吸道,对人体细胞具有毒性作用^[9].因此,将烟草花蕾挥发油应用于烟草薄片加香工艺中,既要达到提高烟草吸食品质的目的,又要减少有害成分对人体的危害,需要严格控制花蕾挥发油添加量.当花蕾挥发油添加量为0.1%~0.2%时,既减小了卷烟的刺激性,又透出了花香^[10].

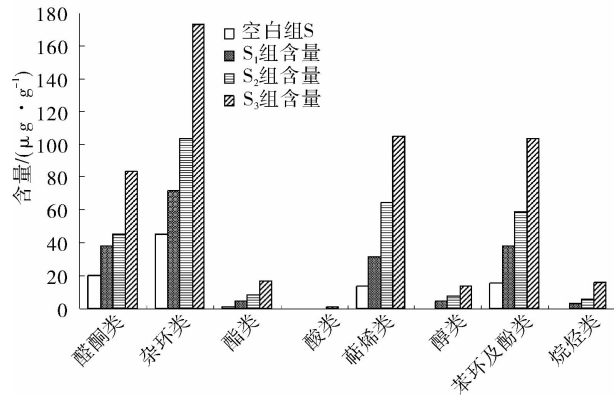


图1 4组卷烟样品烟气粒相物挥发性成分比较

3 结论

本文研究了通过CO₂超临界萃取法提取烟草花蕾挥发油并应用于烟草薄片加香工艺的方法,通

过GC-MS鉴定可知,添加烟草花蕾挥发油比例分别为0.1%、0.2%、0.4%的烟草薄片叶组卷烟所含烟气粒相物挥发性成分分别为74种、73种、88种,三种添加量的新增物质种类分别为38种、39种、52种,与空白样对比,烟气粒相物挥发性成分的含量均有明显提高.通过对卷烟烟气化学成分分析发现,花蕾挥发油添加比例并非与烟草吃味呈正相关性.烟草花蕾挥发油的加入显然对烟气物质的变化有着深刻的影响,但感官评吸及具体的变化机理有待进一步探究.

参考文献:

- [1] 康武成,崔辉正,谭根芳,等.从烟草花蕾提取香膏的工艺[P].中国:CN1049514A,1990-09-08.
- [2] 缪应菊,刘维娟,刘刚,等.烟草薄片制备工艺的现状[J].中国造纸,2009,28(7):55.
- [3] 许日鹏,苏文强,段继生.烟草薄片的开发与应用[J].上海造纸,2008,39(5):46.
- [4] 高金玲,李书芳,朱国成,等.空回潮工序对造纸法再造烟叶的质量影响[J].上海造纸,2012,27(5):55.
- [5] GB 5606.4—2005,卷烟·感官品质要求[S].
- [6] Cai J B, Liu B Z, Ling P. Analysis of free and bound volatiles by gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry in uncased and cased tobaccos[J]. J Chromatogr, 2002, 947(2):267.
- [7] 胡建军,周冀衡,李文伟,等.烤烟香味成分与其感官品质的典型相关分析[J].烟草科技,2007(3):9.
- [8] 刘典三,刘国顺,贾芳芳,等.不同光强对烤烟质体色素及其降解产物的影响[J].华北农学报,2013,28(1):234.
- [9] 姚二民,宋豪,李晓,等.茶叶再造烟叶对卷烟烟气成分的影响[J].茶叶科学,2012,32(4):319.
- [10] 牛津桥,晋照普,郭贞贞,等.茶叶添加量对再造烟叶卷烟烟气酚类有害物质的影响[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2014,29(3):44.

复合型保润剂对膨胀烟丝 感官品质和保润性能的影响

鹿洪亮¹, 曾世通², 洪祖灿¹, 张峰¹, 于静³, 林凯¹,
李跃锋¹, 伊勇涛¹, 陈小明¹, 邵柱³

- (1. 福建中烟工业有限责任公司 技术中心, 福建 厦门 361021;
2. 中国烟草总公司郑州烟草研究院 香精香料室, 河南 郑州 450001;
3. 厦门烟草工业有限责任公司 质量管理部, 福建 厦门 361022)

摘要:为了研究复合型保润剂对膨胀烟丝的影响,采用膨胀前加料方式,按0.1%的施加比例加料制备膨胀烟丝,并进行物理指标、感官品质和保润性能对比。结果表明,添加复合型保润剂的膨胀烟丝与空白样品相比,物理指标得到明显提高,长丝率由43.4%提高到50.8%,整丝率由69.7%提高到74.1%,填充值由2.163 mm/g提高到2.463 mm/g,而碎丝率则由2.8%降低到2.1%;膨胀烟丝感官品质由65.0分提高到68.8分;保润性能得到明显改善,平衡含水率提高,失水速率降低。

关键词:复合型保润剂;膨胀烟丝;保润性能;感官品质

中图分类号:TS452 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.006

Influence of compound humectant on sensory quality and moisture retentivity of expanded cut tobacco

LU Hong-liang¹, ZENG Shi-tong², HONG Zu-can¹, ZHANG Feng¹,
YU Jing³, LIN Kai¹, LI Yue-feng¹, YI Yong-tao¹, CHEN Xiao-ming¹, SHAO Zhu³

- (1. Technology Center, China Tobacco Fujian Industrial Co., Ltd., Xiamen 361021, China;
2. Laboratory of Flavor & Fragrance, Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China;
3. Quality Management Department, Xiamen Tobacco Industrial Co., Ltd., Xiamen 361022, China)

Abstract: In order to investigate the influence of compound humectants on expanded cut tobacco, casing mode before expansion was used. Expanded cut tobacco was prepared by 0.1% compound humectants and then expanded. Physical indexes, sensory quality and moisture retentivity were compared. The results indicated that: physical indexes were enhanced obviously, the long cut rate increased from 43.4% to 50.8%, the whole cut rate increased from 69.7% to 74.1%, the filling value increased from 2.163 mm/g to 2.463 mm/g, the broken cut rate was reduced from 2.8% to 2.1%; sensory quality of expanded cut tobacco increased from 65.0 point to 68.8 point; moisture retentivity was improved visibly, balanced mois-

收稿日期:2014-07-02

基金项目:中国烟草总公司增香保润重大专项项目(110201101021(BR-03))

作者简介:鹿洪亮(1974—),男,山东省诸城市人,福建中烟工业有限责任公司工程师,硕士,主要研究方向为烟草化学和烟用香精香料。

通信作者:邵柱(1967—),男,福建省厦门市人,厦门烟草工业有限责任公司工程师,主要研究方向为卷烟生产工艺。

ture content was elevated and speed of dehydration was decreased.

Key words: compound humectant; expanded cut tobacco; moisture retentivity; sensory quality

0 引言

CO₂ 膨胀烟丝是卷烟配方的重要原料之一,在卷烟的减害、降焦、降低原料消耗等方面发挥着积极作用. CO₂ 膨胀烟丝所选用的原料大多是杂气和刺激性较大、感官品质较差的低等级烟叶,通过 CO₂ 膨胀后可以提高该类烟叶的使用价值. 但 CO₂ 烟丝膨胀技术因膨胀温度较高等因素,膨胀后的烟丝存在加工性能减弱、易造碎^[1-6]、保润性能变差^[7-8]、香气量减少、枯焦气息较大和感官品质下降等缺点,影响了其在卷烟配方中的使用和卷烟的感官品质^[9-10]. 相关文献仅报道了 CO₂ 膨胀烟丝膨胀前后化学成分的变化,而对烟丝保润性能和感官品质等方面的研究比较少,没有提出较为完整和可行的解决方案. 本文拟通过在膨胀前施加复合型保润剂,考察膨胀烟丝的整丝率、碎丝率和填充值等物理指标,以及膨胀烟丝香气和感官指标改善情况,从而提高膨胀烟丝保润性能及其在卷烟中的使用价值提供参考.

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

材料: N 模块膨胀烟丝叶组 2 000 kg, 厦门烟草工业有限责任公司提供; 1[#] 保润剂, 福建中烟技术中心提供.

试剂: CH₂Cl₂ (色谱纯), 乙醇 (色谱纯), 乙酸苯乙酯 (纯度 99.9%), 德国 Dr 公司产; 甘油, 壳牌丙二醇 (纯度 99.8%), Na₂SO₄ (分析纯), 西陇化工股份有限公司产; 海藻酸钠 (纯度 99.9%), 郑州烟草研究院提供.

仪器: CO₂ 膨胀设备, 秦皇岛烟草机械有限责任公司产; YQ-2 型烟丝振动分选筛 (测量范围为 1.40~4.25 mm), 郑州嘉德机电科技有限公司产; DD60A 型填充值测定仪 (测量范围为 0~57 mm, 精度为 ±0.01 mm), 德国 Borgwaldt-KC 公司产; LC-223 型鼓风干燥箱 (测量范围为 0~250 °C, 精度 ≤ ±1 °C), 上海爱斯佩克仪器有限公司产; 烟草动态含水率测量装置 (RH = 30%, T = (22 ± 2) °C), 郑州烟草研究院自制; HP6890 型气相色谱/HP5973

质谱联用仪, 美国 Agilent 公司产; BSA224/BSA124 分析天平 (感量 0.000 1 g), 德国 Sartorius 公司产; JSM-6490LV 型扫描电子显微镜, 日本电子株式会社产.

1.2 方法

1.2.1 膨胀烟丝化学成分分析检测方法 1) 膨胀烟丝含水率测定. 按照 YC/T 31—1996 的方法进行.

2) 试样制备. 于 1 000 mL 圆底烧瓶中加入 20.0 g 膨胀烟丝样品和 350 mL 蒸馏水 (同时加入几块沸石以免爆沸), 于 100 mL 圆底烧瓶中加入 60.0 mL CH₂Cl₂. 对盛有烟样的烧瓶采用电热套加热 (温度控制在 150 °C), 对盛有 CH₂Cl₂ 的烧瓶采用水浴加热 (温控 60 °C), 同时蒸馏提取 2.5 h. 提取结束后, 在 CH₂Cl₂ 提取液中加入 6 g 无水 Na₂SO₄, 放在冰箱中 12 h. 滤去固体, 将干燥后的有机层溶液转移至浓缩瓶, 加入 0.402 72 mg 乙酸苯乙酯作为内标, 在 40 °C 左右用旋转蒸发仪浓缩至约 1.5 mL, 过 0.45 μm 有机相滤膜得到待分析样品.

3) GC-MS 分析. 分析条件如下. 色谱柱 DB-5 MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 载气 He (99.999%); 流速 1.0 mL/min; 进样口温度 290 °C; 进样量 1 μL; 进样模式为分流进样; 分流比 10:1; 升温程序为 45 °C (2 min) $\xrightarrow{5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 200 °C $\xrightarrow{3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 250 °C $\xrightarrow{5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 300 °C (10 min); 离子源为电子轰击 (EI); 电子能量 70 eV; 离子源温度 250 °C, 传输线温度 300 °C; 分析器为四级杆质量分析器; 扫描模式为全扫描; 质量扫描范围 40~500 amu; 溶剂延迟 4.5 min.

采用 Nist05 和 Wiley 标准质谱图库检索法定性, 以匹配度 ≥ 80 为可信.

1.2.2 膨胀烟丝物理性质检测方法 1) 膨胀烟丝填充值测定方法. 按照 YC/T 152—2001 的方法进行.

2) 膨胀烟丝结构测定方法. 按照 YC/T 178—2003 的方法测定.

3) 膨胀烟丝物理保润性能检测方法. 样品在 RH = 60% (恒温恒湿室) 平衡后 (48 h), 按国标方法

检测其含水率;分别用称量瓶称取样品,样品质量为 $6\text{ g} \pm 2\text{ mg}$;将样品放置在天平,运用天平测量软件对样品质量进行连续称重,每 min 测量一次样品质量,共采集 72 h 或更长时间;取出测试样品检测其含水率,计算烟丝水分散失数据;将水分散失数据导入保润性能评价软件,形成拟合方程和拟合曲线,计算出其任意时段的平均失水速率、即时失水速率等指标。

1.2.3 复合型保润剂复配及膨胀烟丝的制备

美拉德反应产物的制备:将脯氨酸、甘氨酸、葡萄糖、果糖按照摩尔比 $1:1:1.7:2.5$ 混合均匀后,加入 23 倍的蒸馏水溶解,得到混合溶液,将溶液加热到 $90\sim 95\text{ }^\circ\text{C}$,反应 $2\sim 8\text{ h}$ 后,冷却得到美拉德反应产物。

将丙二醇、甘油、海藻酸钠、美拉德反应产物、水等物质按照质量比 $3:2:1:1:3$ 调配成复合保润剂,该保润剂同时兼具增香和保润作用。

在膨胀烟丝生产线一次回潮滚筒处,将该复合型保润剂按照烟丝质量 0.1% 的比例喷加到 N 模块膨胀烟丝叶组上,储存 2 h 后进行 CO_2 膨胀,在二次回潮滚筒出口取样得到实验样品 $1^\#$ 。将相同膨胀烟丝叶组施加同比例的水,进行不加料膨胀,得到空白样品 $0^\#$ 。对 $1^\#$ 和 $0^\#$ 进行理化数据分析、感官品质评吸、保润性能检测及在卷烟中的应用评价。

1.2.4 膨胀烟丝扫描电镜观测方法 将需测试烟丝样品固定在样品台上,喷金处理后,用 $\text{JSM}-6490\text{LV}$ 扫描电子显微镜扫描,束流 $80\text{ }\mu\text{A}$,加速电压 20 kV 。根据试验需要,调整合适的放大倍数(如 200 倍、 500 倍和 1000 倍等)进行观测。

1.2.5 膨胀烟丝的感官评价方法 将 $0^\#$ 和 $1^\#$ 膨胀烟丝卷制成卷烟样品,对其进行感官评价打分,评价指标包括协调性、香气质、香气量、杂气、劲头、浓度、细腻度、柔和度、刺激性、干燥感、回甜和余味 12 项指标。

2 结果与讨论

2.1 膨胀烟丝物理指标比较

将 $0^\#$ 和 $1^\#$ 分别用烟丝振动分选筛和填充值测定仪测定膨胀烟丝的物理指标和填充值,结果见表 1。

表 1 N 模块膨胀烟丝物理指标和

样品	填充值对比			%
	长丝率	整丝率	碎丝率	
$0^\#$	43.4	69.7	2.8	2.163
$1^\#$	50.8	74.1	2.1	2.463

从表 1 可以看出:加入保润剂的 $1^\#$ 膨胀烟丝的物理指标得到较明显的提高。长丝率由 43.4% 提高到 50.8% ,整丝率由 69.7% 提高到 74.1% ,填充值由 2.163 mm/g 提高到 2.463 mm/g ,而碎丝率则由 2.8% 降低到 2.1% ,有利于降低卷烟生产成本。同时,加入保润剂的 $1^\#$ 膨胀烟丝比空白对照样品明显更柔软,弹性更好,表面有湿润感,有利于提高膨胀烟丝的耐加工性。

2.2 膨胀前后烟丝物理结构变化情况

对膨胀烟丝的物理结构进行扫描电镜分析, 500 倍和 1000 倍扫描电镜结果见图 1。

从图 1 可以看出,添加保润剂的 $1^\#$ 样品与 $0^\#$ 样品相比,物理结构发生了很大变化:一是烟丝表面的肾状气孔保卫细胞更加明显,气孔开口增大;二是烟丝表面皱褶更加明显;三是烟丝截面结构更加整齐,上下表皮细胞空腔更加明显,叶片厚度也有一定增加。不加保润剂的 $0^\#$ 样品膨胀后,细胞结构破坏较大,破损无规律,这也是膨胀烟丝容易造碎的原因之一。

2.3 N 模块膨胀烟丝香味成分比较

对膨胀烟丝样品挥发性及半挥发性香味成分进行定性定量分析,并对醛、酮、醇、酯类等化合物总量进行比较,结果见表 2。

由表 2 香味成分含量对比结果发现, $1^\#$ 样品的香味成分含量远远大于 $0^\#$ 样品。将香味成分分成各种类别的组分分析:对于酮、醇、酚、酸、酯、杂环化合物及烯炔来说, $1^\#$ 样品的含量远大于 $0^\#$ 样品的含量;对于醛类物质来说,两者含量比较相近, $1^\#$ 样品略高于 $0^\#$ 样品; $1^\#$ 样品新植二烯的含量大于 $0^\#$ 样品含量。由此可见,在膨胀前加入保润剂可以有效减少膨胀烟丝在膨胀过程中香味成分的损失。

表 2 两种膨胀烟丝香味成分含量分析表

样品											$\mu\text{g/g}$
	酮	醇	酚	醛	酸	酯	杂环化合物	烯炔	总量(除新植二烯)	新植二烯	
$0^\#$	75.056 15	37.783 85	7.692 857	3.111 631	188.109 00	53.595 53	16.689 14	94.473 21	487.822 00	459.180 20	947.002 30
$1^\#$	112.617 30	68.492 06	14.586 560	3.463 566	385.872 60	93.278 74	24.658 75	159.319 00	883.503 00	779.063 60	1 662.567 00

2.4 实验膨胀烟丝的感官评价

将0#和1#膨胀烟丝卷制成卷烟样品,感官评价结果见表3。从表3可以看出:1#膨胀烟丝样品在香气质、杂气、劲头、浓度、细腻度、回甜和余味等方面都有不同程度的改善,整体感官品质由65.0分提高到68.8分。

实验所用复合型保润剂中的美拉德反应产物可以为膨胀烟丝提供特征香味,而美拉德反应是烟草加工过程中烟草内部发生的一种重要反应,是烟草中香味成分的重要来源。选用美拉德反应产物添加到膨胀烟丝中,可以有效提高膨胀烟丝中的香味成分含量,易与烟香谐调,从而可改善卷烟抽吸品质。

2.5 试制卷烟在某实验卷烟叶组中的感官评价

1) 同比例替代实验。按某实验卷烟叶组中BC线叶组:梗丝:膨胀烟丝=100:12.5:15的比例卷制卷烟,并评吸。其中BC线叶组和梗丝为在线取某实验卷烟正常生产所用烟丝,膨胀烟丝分别用0#和1#膨胀烟丝,感官评价结果见表4。

从表4可以看出:添加1#膨胀烟丝的试制卷烟样品在香气和余味上改善较明显,与叶组谐调,烟气成团性和顺畅感有提高,烟气细腻柔和,丰富性更好,枯焦气息降低,口腔舒适度较好,整体感官品质提高1.0分。

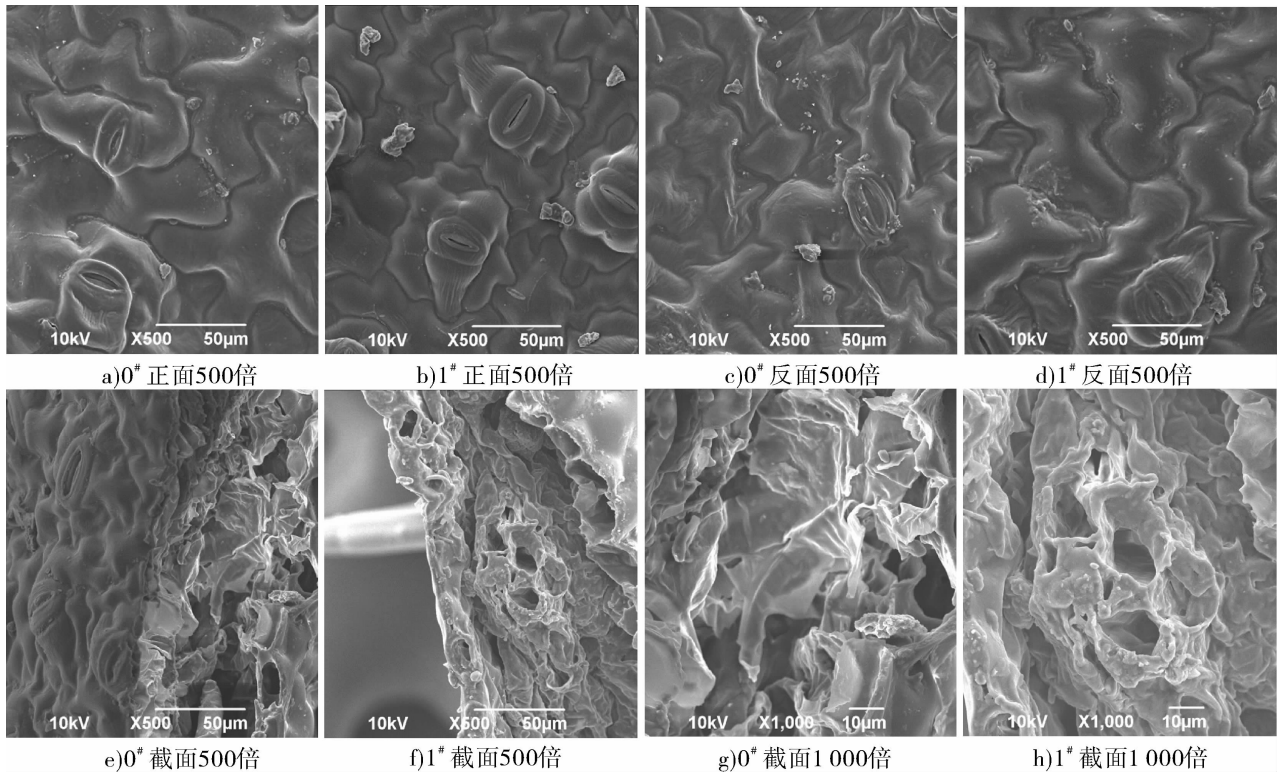


图1 膨胀烟丝扫描电镜图

表3 膨胀烟丝的感官评价结果

样品	谐调性	香气质	香气量	杂气	劲头	浓度	细腻度	柔和度	刺激性	干燥感	回甜	余味	总分
0#	7.0	6.0	6.0	6.0	3.0	3.0	6.0	5.0	6.0	6.0	5.0	6.0	65.0
	7.0	6.0	6.0	6.5	3.5	3.5	6.5	5.0	6.0	6.0	5.5	6.0	67.5
	7.0	6.0	6.0	6.5	3.0	3.0	6.0	5.0	6.0	6.0	5.0	6.0	65.5
	8.0	7.0	7.0	7.0	4.0	3.5	6.5	5.5	6.5	6.5	5.5	6.5	73.5
	7.0	6.0	6.5	5.5	4.0	4.0	7.0	6.0	5.5	6.5	5.0	5.5	68.5
	7.0	6.0	6.5	6.0	3.5	4.0	5.5	5.5	6.5	6.0	5.0	6.0	67.5
	6.5	6.0	6.0	6.5	3.5	3.5	6.0	5.0	6.0	6.0	5.0	6.0	66.0
	7.5	6.5	6.0	7.0	3.5	3.5	6.5	5.5	6.0	6.5	5.5	6.0	70.0
7.0	7.0	6.0	7.0	3.5	3.5	7.0	6.0	6.5	6.0	6.0	6.5	72.0	
1#样品平均值	7.1	6.3	6.3	6.5	3.6	3.6	6.4	5.4	6.1	6.2	5.3	6.1	68.8

2)不同比例替代实验.为了考察不同比例的1#膨胀烟丝在某实验卷烟叶组中的感官效果,实验在原来叶组比例(外比12.5%)的基础上提高了1#膨胀烟丝的使用比例,并与添加0#膨胀烟丝的对照卷烟样品进行感官品质对比评价,膨胀烟丝的添加比例(外比)见表5.

经感官评吸对比后发现:试制卷烟1#感官品质比对照样品0#整体提高很多,烟香谐调,香气更丰富,烟气更加细腻顺畅,口腔舒适度改善较明显;试制卷烟2#感官品质比对照样品0#略好,在香气质和香气量上较0#好,香气更丰富,烟气更加细腻顺畅,口腔舒适度改善较明显;试制卷烟3#感官品质与对照样品0#在香气质和香气量上基本相同,整体差异不大,但膨胀烟丝气息略显露;试制卷烟4#感官品质比对照样品0#在香气质和香气量上要差一些,膨

表4 试制膨胀烟丝在某实验卷烟中的感官品质评吸表

样品	感官品质评吸表						合计
	光泽 (5.0)	香气 (32.0)	谐调性 (6.0)	杂气 (12.0)	刺激性 (20.0)	余味 (25.0)	
0#	5.0	29.0	5.0	11.0	17.5	21.5	89.0
1#	5.0	29.5	5.0	11.0	18.0	22.0	90.5
	5.0	29.0	5.0	11.5	17.5	21.5	89.5
	5.0	29.5	5.0	11.0	17.5	22.5	90.5
	5.0	29.5	5.0	11.0	17.5	22.5	90.5
	5.0	29.0	5.0	11.0	17.5	22.0	89.5
	5.0	29.5	5.0	11.0	17.5	22.0	90.0
	5.0	29.5	5.0	11.0	17.5	22.5	90.5
	5.0	29.5	5.0	11.0	17.5	22.0	90.0
1#样品平均值	5.0	29.5	5.0	11.0	17.5	22.0	90.0

表5 实验卷烟样品中膨胀烟丝比例(外比) kg

样品	B线	C线	A梗	0#膨胀	1#膨胀	质量合计
试制0#(外比12.5%)	8.23	7.77	2.00	2.00		20.00
试制1#(外比12.5%)	8.23	7.77	2.00		2.00	20.00
试制2#(外比15.0%)	8.07	7.62	1.96		2.35	20.00
试制3#(外比17.5%)	7.92	7.47	1.92		2.69	20.00
试制4#(外比20.0%)	7.72	7.28	2.00		3.00	20.00

表6 施加保润剂的N模块叶组膨胀烟丝保润性能测试结果

样品	a	b	c	拟合率/%	0~12h平均失水速率/(%·min ⁻¹)	12h瞬间失水速率/(%·min ⁻¹)	12~24h平均失水速率/(%·min ⁻¹)	14%~10%水分失水时间/min	初始含水率(60%RH)/%	平衡含水率(30%RH)/%
0#	7.50122	7.37178	0.00219	99.855	0.00812	0.00334	0.00168	436	14.82	7.50
1#	8.28300	6.82363	0.00263	99.720	0.00805	0.00270	0.00121	458	15.05	8.28

胀烟丝气息较明显,干燥刺激较大.所以,使用1#膨胀烟丝替代0#膨胀烟丝,可以在同比例添加的情况下提高卷烟整体的感官品质;在施加比例(外比)由12.5%提高到15.0%时,卷烟整体感官品质略好;在施加比例由15.0%提高到17.5%时,卷烟整体感官品质相当;但施加比例提高到20.0%时,卷烟感官品质变差.由此可见:为了提高膨胀烟丝的感官品质,可通过提高1#膨胀烟丝在卷烟叶组中的使用比例,降低上等叶组的使用量也可以达到相同的卷烟感官品质.

2.6 膨胀烟丝保润性能测试及保润机理探讨

2.6.1 施加保润剂的N模块叶组膨胀烟丝保润性能测试

施加保润剂的N模块叶组膨胀烟丝保润性能测试曲线见图2,具体数据见表6.

由图2和表6可以看出,样品从相对湿度60%到30%的过程中,失水主要集中在0~24h之间:前12h失水趋势大致相同,差异不明显;12~24h产生明显差距;在0~12h与12~24h的平均失水速率皆是0#样品大于1#样品,说明0#样品比1#样品的失水速度要快.样品含水率由14%降到10%所需时间,0#样品要快于1#样品,说明0#样品的持水性不如1#样品.从表6中拟合数据a值也可看出:在起始含水率接近的情况下,1#样品的平衡含水率8.28%,高于0#样品的平衡含水率7.50%.综合以上数据可以看出:1#样品的保润性能明显高于0#样品.

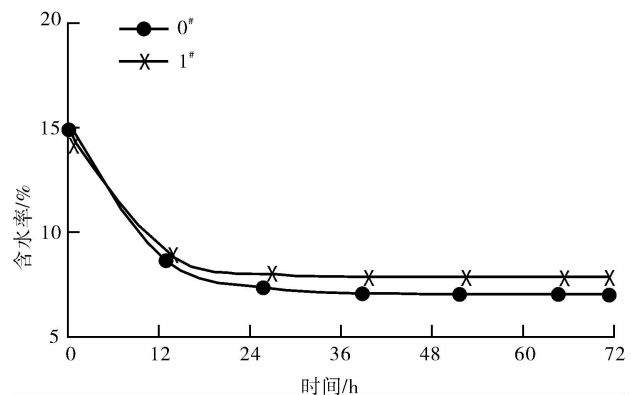


图2 施加保润剂的N模块叶组膨胀烟丝保润性能测试曲线

2.6.2 保润机理探讨 实验所用复合型保润剂包括吸湿性保润剂、封阻型保润剂、美拉德反应产物及溶剂水。

吸湿性保润剂为丙二醇、甘油,其作用在于利用丙二醇、甘油分子上的羟基,在烟丝膨胀回潮过程中吸收水分,提高烟丝的含水率和柔韧性。

封阻型保润剂为海藻酸钠,别名褐藻胶、藻酸钠、藻朊钠、藻酸钠,分子式是 $(C_5H_7O_4COONa)_n$,其中 $n=500\sim 600$ 。海藻酸钠是具有较大分子量的长链结构物质,结构上含有羟基、氨基、羧基、盐类等不同基团,其作用是这些基团能与烟丝中不同类型的化学成分形成较强的相互作用,从而减少了膨胀过程中烟丝化学成分的损失。海藻酸钠还能在烟叶表面形成一定厚度的膜,可以降低高温快速膨胀对烟丝细胞的破坏,修补烟丝表面由于膨胀造成的破损,从而减少水分等物质的损失,提高了烟丝物理保润性能。

美拉德反应产物及剩余的反应原料葡萄糖、果糖,其中的醛基和羟基容易与水结合,也会起到一定的保润作用。

3 结论

从上述研究结果可以看出,在烟丝膨胀前,适当添加一定量的复合型保润剂可以有效降低高温膨胀给烟丝带来的负面影响,改善膨胀烟丝的品质,提高膨胀烟丝在叶组配方中的使用比例。具体表现在:

1) 物理指标得到较明显的提高,长丝率由43.4%提高到50.8%,整丝率由69.7%提高到74.1%,填充值由2.163 mm/g提高到2.463 mm/g,而碎丝率则由2.8%降低到2.1%;

2) 添加保润剂的膨胀烟丝截面结构更加整齐,上下表皮细胞空腔更加明显,叶片厚度也有一定增加,填充能力得到提高;

3) 膨胀前添加复合型保润剂的膨胀烟丝,其香气质、杂气、细腻度、回甜和余味等得到改善,感官品质由65.0分提高到68.8分;

4) 在相同用量的时候,使用加料膨胀烟丝的卷烟要比使用正常膨胀烟丝的卷烟感官品质提高1.0分;在保持卷烟整体感官品质的前提下,膨胀烟丝的使用比例可以由12.5%提高到17.5%;

5) 添加保润剂的膨胀烟丝其物理保润性能得到明显提高。

参考文献:

- [1] 吴桂兵,张楚安,蔡冰,等. CO₂ 膨胀烟丝分类加工应用研究[J]. 烟草科技, 2007(12):5.
- [2] 张鼎方,刘江生. CO₂ 膨胀前后烟丝中游离氨基酸的变化[J]. 烟草科技, 2006(11):14.
- [3] 刘江生,谢卫,杨斌,等. CO₂ 膨胀前后不同部位烤烟香味成分的变化[J]. 烟草科技, 2006(2):5.
- [4] 杨力佳,黄海涛,杨伟祖,等. 干冰膨胀烟丝有机酸变化分析[J]. 云南化工, 2002, 29(4):39.
- [5] 倪克平. 提高二氧化碳膨胀烟丝加工质量及可用性研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2008.
- [6] 廖旭东,胡延奇,阁威,等. 新型香料在烟丝膨化工艺中的研究和应用[C]//中国烟草学会 2004 年烟草化学学组年会论文集,广州:[s. n.], 2004:30-39.
- [7] 许春平,杨琛琛,高建奇,等. 天然多糖的提取及其在卷烟中应用述评[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2012, 27(5):34.
- [8] 张丽,张相辉,徐丽霞,等. 保润剂对卷烟保润性能的影响[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2012, 27(5):38.
- [9] 石怀彬. 中式卷烟保润技术研究的几点思考[C]//中国烟草自主创新高层论坛文集,武汉:中国烟草自主创新高层论坛组委会, 2007:594-597.
- [10] 陈建军,李奇,安毅,等. 双向保润剂的性能及其在卷烟中应用[J]. 中国烟草学报, 2008(S1):21.

枇杷叶浸膏的热裂解行为研究

戴建国¹, 李永杰¹, 张鹏², 王聚奎¹, 刘媛媛³, 聂鑫³

- (1. 河南中烟工业有限责任公司 漯河卷烟厂, 河南 漯河 462400;
2. 红塔辽宁烟草有限责任公司 营口卷烟厂, 辽宁 营口 115002;
3. 红云红河烟草(集团)有限责任公司 原料部, 云南 昆明 650202)

摘要:采用热裂解-气相色谱-质谱联用技术,研究枇杷叶浸膏在不同裂解氛围(N_2 和含10% O_2 的 N_2)和不同温度(300 °C, 600 °C和900 °C)下的热裂解行为,将裂解产物直接引入气相色谱-质谱联用仪,用质谱法对其进行定性分析,并用面积归一法作半定量分析.结果表明:枇杷叶浸膏无氧裂解产物主要为醛类、醇类和酚类等,而有氧裂解产物主要为羧酸类、酮类和酚类等;这些裂解产物可以产生草香、辛香、烘烤香、焦糖香、坚果香、甜香、花香等韵调,添加至卷烟中可以丰富卷烟香气;有氧条件下枇杷叶浸膏的裂解产物多于无氧条件,高温下氧气的引入加剧了枇杷叶浸膏的裂解反应;裂解产物随温度的升高而变复杂,苯系物和稠环芳烃类有害物质增加.

关键词:枇杷叶;热裂解;热裂解-气相色谱-质谱;致香成分

中图分类号:TS41+1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.007

Study on the pyrolysis behavior of loquat leaf extract

DAI Jian-guo¹, LI Yong-jie¹, ZHANG Peng²,
WANG Ju-kui¹, LIU Yuan-yuan³, NIE Xin³

- (1. Luohe Cigarette Factory, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Luohe 462400, China;
2. Yingkou Cigarette Factory, Hongta Liaoning Tobacco Co., Ltd., Yingkou 115002, China;
3. Department of Tobacco Leaf, Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Kunming 650202, China)

Abstract: In order to study the pyrolysis behavior of loquat leaf extract that pyrolyses effect to the component of cigarette smoke, the pyrolyses were investigated in N_2 , N_2 containing 10% O_2 and at three temperature levels of 300 °C, 600 °C and 900 °C, respectively. The pyrolyses were directly introduced into GC-MS, qualitative analysis of the pyrolyses by mass spectrometry, and a semi-quantitative analysis by area normalization were made. The results showed that loquat leaf extract anaerobic pyrolysis products were mainly the aldehydes, alcohols and phenols, and aerobic pyrolysis products were mainly carboxylic acids, ketones and phenols, etc. The pyrolysis products could produce grassy, spicy, fragrant baked, caramel aroma, nutty aroma, sweet, floral and other rhyme tune, which could enrich the aroma of cigarettes. The amount of these pyrolyses under aerobic conditions was more than anaerobic pyrolyses, the oxygen introduced could exacerbate the pyrolysis of loquat leaf extract. With the increase of temperature, pyrolysis was

收稿日期:2014-11-26

作者简介:戴建国(1966—),男,河南省许昌市人,河南中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为卷烟配方和烟叶质量.

通信作者:王聚奎(1969—),男,河南省临颖县人,河南中烟工业有限责任公司工程师,博士,主要研究方向为烟草工艺、质量管理.

more and more complex, benzenes and polycyclic aromatic hydrocarbons substances released was found to increase.

Key words: loquat leaf; pyrolysis; Py-GC-MS; aromatic component

0 引言

枇杷叶系蔷薇科枇杷属,常用于中草药。《本草新编》载:枇杷叶,味苦,气平,无毒。入肺经,止咳嗽,下气,除呕哕不已,亦解口渴。枇杷叶为肺胃之药,能清肺气而澄胃浊,长于理咳治呕^[1-3],因而枇杷叶浸膏有清热、润肺、止咳化痰等之功效。

热裂解-气相色谱-质谱(Py-GC-MS)联用技术是一种能有效预测燃烧产物的技术,随着仪器功能的扩展逐渐应用到烟草领域研究中^[4-5]。卷烟中的香精、香料等添加剂在卷烟燃吸时会发生热解过程,产生许多复杂的裂解产物,应用Py-GC-MS联用技术模拟卷烟添加剂在卷烟燃烧过程中化学物质的变化,对卷烟加香及感官评吸具有指导意义^[6-9]。目前对枇杷叶浸膏热裂解产物的分析尚未见文献报道。因此,本文拟采用Py-GC-MS联用技术模拟卷烟燃烧过程,对枇杷叶浸膏在不同氛围中和不同温度下的热裂解产物进行分析,以期对枇杷叶浸膏作为烟用添加剂在卷烟中的应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

枇杷叶浸膏,西安天瑞生物技术有限公司产。Agilent GC7890-MS59735型GC-MS联用仪,美国Agilent公司产;CDS 5200热裂解仪(配备热裂解专用石英管),美国CDS公司产;AB265-S型电子天平,瑞士Mettler公司产。

1.2 实验方法与条件

称取样品加入中空小石英管中,两端塞入石英棉,将其置于热裂解仪的裂解头加热丝中。

裂解氛围:无氧条件为N₂;有氧条件为10%的O₂+90%的N₂。

热裂解条件:初始温度为25℃,保持8 min,以1℃/min升温到72℃;接着以5℃/min升至280℃,保持5 min,然后以20℃/ms的速度分别升温到300℃,600℃,900℃,各保持10 s。最后将裂解产物导入GC-MS进行分析。

GC条件:DB-5MS型弹性石英毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);进样口温度280℃,

进样量1 μL;载气选择高纯He(纯度99.999 9%);升温程序为50℃保持2 min,然后以5℃/min升到280℃,保持20 min;分流比为25:1。

MS条件:电子轰击离子源(EI),离子源温度230℃,电离能量70 eV,传输线温度280℃,质量扫描范围30~550 amu。利用NIST11 MS标准谱库联机定性检索。

2 结果与讨论

2.1 裂解产物分析

卷烟燃烧过程中由于温度和O₂供应量的不同,其燃烧机制不同,产生烟气的化学成分也不同。卷烟热解蒸馏区的温度大约为200~900℃,卷烟燃烧时,燃烧中心在无氧的裂解状态中,中心外热解蒸馏区氧气含量为8%~12%。为了有效地模拟卷烟燃烧过程,分别选择N₂和含10% O₂的N₂两种氛围,在不同温度条件下,对枇杷叶浸膏的热裂解产物进行对比分析研究。

枇杷叶浸膏在300℃,600℃,900℃下裂解,经过NIST11 MS数据库检索和人工解析,用质谱法对裂解产物进行定性分析,并用分析软件MSD ChemStation按峰面积归一法得到裂解产物的百分含量,结果见表1。

2.2 裂解氛围和温度对裂解产物的影响分析

表2为不同裂解氛围和不同裂解温度下枇杷叶浸膏裂解产物的释放量对比。由表1和表2可以看出,无论无氧或有氧裂解,裂解温度对裂解产物的数量均有显著影响。在无氧条件下,300℃检出33种物质,600℃检出75种,900℃检出71种;在有氧条件下300℃检出89种物质,600℃检出82种,900℃检出86种。在无氧条件下枇杷叶浸膏裂解产生了多种化合物,随着裂解温度的升高总离子流谱图越来越复杂,说明温度越高,裂解产生的化合物越多。300℃到600℃的裂解产物在种类和含量上变化最为明显,在有氧条件下,不同裂解温度产生的化合物数量都较多,300℃检出化合物明显多于无氧条件下。表明O₂参与加剧了枇杷叶浸膏的裂解行为,可能是有O₂存在时裂解过程伴随发生了一些氧化反应等。

续表 1

序号	保留时间/min	化合物名称	无氧热裂解 质量百分比/%			有氧热裂解 质量百分比/%			序号	保留时间/min	化合物名称	无氧热裂解 质量百分比/%			有氧热裂解 质量百分比/%		
			300 °C	600 °C	900 °C	300 °C	600 °C	900 °C				300 °C	600 °C	900 °C	300 °C	600 °C	900 °C
77	28.50	异山梨醇	—	1.30	0.73	1.44	—	0.92	104	37.24	芴	—	—	1.31	0.16	—	—
78	29.13	2-甲氧基-4-乙炔基苯酚	—	3.20	1.92	2.97	5.13	4.95	105	37.47	9-芴甲醇	—	—	0.62	—	—	—
79	29.31	6-甲基-3(2H)-吡嗪酮	—	—	—	—	3.72	—	106	37.48	巨豆三烯酮1	0.21	0.76	—	0.68	0.82	0.86
80	29.33	对苯二酚	—	—	0.32	2.97	—	2.43	107	37.76	2-甲基联苯	—	0.15	0.19	—	—	—
81	29.88	1,2,3,4-四氢-1,1,6-三甲基萘	—	0.57	0.38	—	0.54	0.47	108	37.97	1,5,6,7-四氢-4-吡啶酮	—	0.44	—	0.53	—	—
82	30.44	2,6-二甲氧基苯酚	—	1.26	0.59	1.70	1.94	1.81	109	38.18	4-烯丙基-2,6-二甲氧基苯酚	—	0.55	0.32	0.33	0.52	0.63
83	31.09	异丁酸丁酯	0.18	—	—	—	—	—	110	38.46	巨豆三烯酮2	—	0.30	—	0.33	0.35	0.42
84	31.63	1-乙基萘	—	—	0.58	—	0.43	0.50	111	38.80	巨豆三烯酮3	—	0.97	0.14	0.79	1.06	0.94
85	31.98	3-乙酰基-2,5-二甲基咪唑	—	—	—	—	1.25	—	112	38.97	对甲基-1(7)-烯-9-醇	0.26	0.17	0.22	—	—	—
86	31.98	2,7-二甲基萘	—	1.24	1.30	0.53	—	1.41	113	41.16	2,4-二甲基联苯	—	0.21	—	0.20	0.21	0.23
87	32.93	反式- β -法尼烯	—	0.57	0.20	—	—	—	114	41.41	法呢醇	—	—	—	—	0.14	0.14
88	33.37	联苯	—	—	0.92	—	—	—	115	41.42	反式-金合欢醇	—	—	—	0.14	—	—
89	33.44	对甲基苯甲醛	0.05	0.82	—	0.76	0.62	0.77	116	41.59	2-异己基-6-甲基-1-庚烯	—	0.33	0.29	0.22	0.23	0.20
90	33.64	(6E)-2,6-二甲基辛-2,6-二烯	0.42	2.07	0.90	2.69	2.73	2.67	117	41.87	1,4,5,8-四甲基萘	—	0.09	0.19	0.13	0.10	0.12
91	33.72	芳樟醇	0.98	1.27	—	1.76	1.75	1.72	118	42.54	正十四碳酸	—	0.07	0.13	0.15	0.20	0.15
92	33.96	5,9,13-三甲基-4,8,12-十四三烯醛	1.78	4.63	2.24	5.99	6.58	6.12	119	42.79	蒎	—	—	0.71	—	—	—
93	34.72	1-十三烯	0.07	0.99	0.34	0.70	0.54	0.83	120	44.45	醋酸叶绿醇酯	—	1.39	0.62	—	1.59	1.41
94	35.02	十五烷	—	0.22	0.40	0.19	—	0.16	121	44.47	顺式蒎烷	—	—	—	1.47	—	—
95	35.32	红没药烯	0.99	1.40	0.53	1.58	1.70	1.68	122	45.05	1,13-十四碳烯	—	0.15	—	0.23	0.22	0.24
96	35.56	2-烯丙基酚	—	0.56	—	—	0.51	0.56	123	45.21	邻苯二甲酸二异丁酯	—	0.25	0.18	—	0.28	—
97	35.64	二甲基萘	—	—	0.59	0.41	—	—	124	45.21	邻苯二甲酸二仲丁酯	1.19	—	—	0.20	—	0.30
98	35.96	5-叔丁基焦倍酚	—	—	—	0.48	0.40	0.42	125	45.50	1-甲基-4(1-甲基乙炔基)-环己烷	0.16	0.68	0.28	0.65	0.70	0.62
99	36.05	二氢猕猴桃内酯	0.39	—	—	—	—	—	126	46.60	十六酸甲酯	—	0.07	—	0.12	—	0.10
100	36.34	顺-Z- α -环氧红没药烯	0.35	0.71	0.36	0.73	0.63	0.76	127	47.68	棕榈酸	—	1.19	2.32	3.22	4.35	3.66
101	36.82	1,3,7-三甲基萘	—	1.02	1.09	0.99	0.71	1.08	128	48.25	棕榈酸乙酯	—	0.10	0.04	0.10	—	—
102	36.98	橙化叔醇	0.14	0.48	0.45	0.53	0.54	0.56	129	49.88	十七烷酸	—	—	—	0.09	0.16	0.13
103	37.10	2,3,5,6-四氟茴香醚	0.15	0.71	—	0.74	0.79	0.83	130	50.97	植物醇	—	0.17	—	0.46	0.61	0.56
									131	51.54	亚油酸	—	1.20	0.13	0.27	0.40	0.33
									132	51.90	α -亚麻酸	—	—	—	3.41	5.45	4.46
									133	52.25	硬脂酸	—	0.24	0.40	0.58	0.81	0.62

注:—表示未检出,下同.

同时可以看出,无氧裂解产物类别主要为醛类、醇类和酚类,而有氧裂解产物类别主要为羧酸类、酮类和酚类.以600 °C裂解产物为例,无氧条件下检测到醛类和酚类分别占裂解产物百分含量的20.59%和18.96%;而有氧条件下检测到酚类和羧

酸类分别占裂解产物百分含量的19.46%和15.25%.有氧条件下检测到羧酸类、咪唑类和酮类占裂解产物百分含量比无氧裂解产物类别更多,有氧环境下裂解产生了更多的氧化物.

无氧和有氧条件裂解产物的品种有明显差异,

根据表1和表2可以得到不同裂解温度下有氧和无氧热裂解产物对比分析结果(见表3)。由表3可以看出,在300℃裂解温度下,无氧和有氧热裂解的产物相同有22种,不同的有108种;在600℃裂解温度下,两者相同的有55种,不同的有85种;在900℃裂解温度下,两者相同的有57种,不同的有101种。上述实验结果说明, O_2 分子在裂解过程中可能参与裂解反应过程,造成裂解产物数量和品种不同,这种不同可能造成最终裂解产物的总体香气的差异。因此,对添加剂热裂解模拟卷烟燃烧过程,有必要考虑有氧热裂解分析结果和无氧热裂解分析结果总和的影响。

表2 不同裂解氛围中和不同裂解温度下

枇杷叶浸膏裂解产物的释放量对比 %

裂解产物	无氧热裂解产物释放量			有氧热裂解产物释放量		
	300℃	600℃	900℃	300℃	600℃	900℃
醇类	2.85	11.14	1.73	9.05	8.10	8.96
酮类	1.84	3.91	0.84	6.30	12.20	7.59
呋喃类	—	4.42	1.47	10.70	8.38	8.31
醛类	3.15	20.59	4.00	15.97	11.97	8.71
羧酸类	17.94	3.42	1.00	11.78	15.25	12.69
酯类	2.71	2.03	1.16	0.63	2.02	2.15
烯类	2.54	10.01	6.55	7.35	7.88	8.05
酚类	1.47	18.61	11.61	21.00	18.21	20.84

表3 不同温度下无氧和有氧热裂解

产物数目对比分析

种

裂解温度/℃	无氧专有数	有氧专有数	共有数
300	23	85	22
600	47	38	55
900	55	46	57

2.3 裂解产物香气特征分析

枇杷叶浸膏无氧和有氧裂解产物类别有醇类、酮类、呋喃类、醛类、羧酸类、酯类、烯类、酚类,大多为致香成分,可以产生草香、辛香、烘烤香、焦糖香、坚果香、甜香、花香等韵调,在卷烟中添加可以丰富卷烟香气。

在无氧600℃裂解条件下,枇杷叶浸膏裂解产生醇类化合物含量最高,达到11.14%,主要包括环丙基甲醇(7.76%),芳樟醇(1.27%),橙化叔醇(0.48%),植物醇(0.17%)等。芳樟醇带有浓青带甜的木青气息,似玫瑰木,既有紫丁香、铃兰与玫瑰的花香,又有木香、果香气息;橙化叔醇具有木香花

香香气;植物醇具有清香轻度辛辣味。在有氧600℃裂解条件下,枇杷叶浸膏裂解产生酮类化合物含量最高,达到12.21%,致香成分主要包括甲基环戊烯醇酮(0.41%),3-甲基-1,2-环戊二酮(1.71%),3种巨豆三烯酮(2.23%)等。甲基环戊烯醇酮具有咖啡似的焦糖样愉快香气,稀释时有枫槭样甜美香气;3-甲基-1,2-环戊二酮具有奶油香;巨豆三烯酮具有改善烟香,柔和丰满,掩盖杂味,增进吃味,是烟草重要挥发成分。在无氧600℃裂解条件下,枇杷叶浸膏裂解产生醛类化合物含量最高,达到20.59%,主要包括丙酮醛(11.16%),糠醛(2.25%),5-甲基糠醛(1.77%)等。糠醛具有焦糖、面包香气;5-甲基糠醛可以增强烤烟香、甜香及焦糖香,对烟香作用很大。在有氧600℃裂解条件下,枇杷叶浸膏裂解产生酮类化合物种类最多,共8种,含量为15.25%,非挥发酸可以调节烟草pH,改善抽吸质量,使吃味醇和,还能增加烟气浓度,其中棕榈酸(4.35%)有甜味,可增加丰满度;硬脂酸(0.81%)具有坚果香,蜡脂香;十七烷酸(0.16%)具有白肋烟样香。在有氧900℃裂解条件下,枇杷叶浸膏裂解产生酚类化合物含量最高,达到20.84%,主要致香成分包括4-甲基愈创木酚(0.71%),2-甲酚(0.6%),苯酚(2.79%),对甲苯酚(0.97%),4-乙基愈创木酚(0.81%)等。4-甲基愈创木酚,呈奶香和烟熏香气;2-甲酚可增加丰满,甜,白肋烟特征;苯酚(2.79%),甜香,药香,焦香;对甲苯酚粗糙酚香;4-乙基愈创木酚,有酱香味。在有氧900℃裂解条件下,枇杷叶浸膏裂解产生酯类化合物含量最高,达到2.71%,主要致香成分包括二氢猕猴桃内酯水杨酸甲酯(1.21%)等。二氢猕猴桃内酯(0.39%),带有香豆素样香气,并有麝香样气息;水杨酸甲酯具有薄荷、花香、茴香大料味。

3 结论

本文采用Py-GC-MS联用技术模拟卷烟燃烧过程,对枇杷叶浸膏在不同氛围中和不同温度下的热裂解产物进行分析,枇杷叶浸膏无氧裂解产物主要为醛类、醇类和酚类等,而有氧裂解产物主要为羧酸类、酮类和酚类等。这些裂解产物可以产生草香、辛香、烘烤香、焦糖香、坚果香、甜香、花香等韵调,减少卷烟刺激性,使其口感醇和。有氧条件下枇杷

叶浸膏裂解产物多于无氧裂解产物,高温下 O_2 的引入加剧了枇杷叶浸膏的裂解反应;裂解产物随温度的升高而变得复杂,苯系物和稠环芳烃类有害物质增加.对枇杷叶浸膏的热裂解产物进行分析,可为其在卷烟中的使用提供指导.

参考文献:

- [1] 张贵君.常用中药鉴定大全[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1995:477-478.
- [2] 王立为,刘新民,余世春,等.枇杷叶抗炎和止咳作用研究[J].中草药,2004,35(2):174.
- [3] 钱萍萍,田菊雯.枇杷叶对小鼠的止咳、祛痰作用[J].现代中西医结合杂志,2004,13(5):580.
- [4] 王保会,吴键,郭春生,等.烟叶热裂解产物的分析研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(2):69.
- [5] 苏东赢.枫槭浸膏热裂解产物分析及其在卷烟中的应用[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(2):41.
- [6] Richard R, Louise J. The pyrolysis of tobacco ingredients [J]. Pyrolysis, 2004, 71: 223.
- [7] 闫克玉.卷烟烟气化学[M].郑州:郑州大学出版社, 2002:2-6.
- [8] Bakeer R, Coburn S, Liu C. Pyrolysis of saccharide tobacco ingredients: A TGA-FTIR investigation [J]. J Anal Appl Pyrol, 2005, 74(1/2): 171.
- [9] Senneca O, Ciaravol S, Nunziata A. Composition of the gaseous products of pyrolysis of tobacco under inert and oxidative conditions [J]. J Anal Appl Pyrol, 2007, 79: 234.

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。

个性化网络地图自主标注系统研究

张素智, 王威, 孙嘉彬

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对目前网络地图的标注更新慢、标注不全、信息获取不及时等问题,提出了一种个性化网络地图自主标注系统.该系统根据用户信息生成(UGC)思想,采用 Web 2.0 和 AJAX 技术,将自主标注信息和空间地理信息建立关联,允许用户参与地图自主标注,方便用户以地图为载体对城市生活信息进行发布、查询、浏览等.测试实验表明,该系统提高了访问效率,增强了网络地图的可移植性,改善了用户体验.

关键词:网络地图;地理信息系统;信息标注;用户信息生成

中图分类号:TP393.09 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.008

Research on autonomous tagging system of personalized Web map

ZHANG Su-zhi, WANG Wei, SUN Jia-bin

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

Abstract: Aiming at the problems of slow updates in tags, incomplete marks, no timely access to information and so on in the present Web map, an autonomous tagging system of personalized Web map was put forward. The system established association between the autonomous tagging of Web map and spatial geographic information using Web 2.0 and AJAX technologies according to user generated content (UGC) ideas. The system allowed the user to participate in the autonomous tagging of Web map, and was convenient for the user to publish, query, browse city life information on the Web map. Test results showed that the system improved the access efficiency and user experience, and enhanced the network map of portability.

Key words: Web map; geographic information system (GIS); information label; UGC

0 引言

随着我国互联网的迅速发展及地理信息系统(GIS)技术的逐步推广,网络地图已经成为传播信息的主要媒介之一.进入 Web 2.0 时代以后, Yahoo, Google, 百度, 高德等公司先后推出自己的网络地图服务, 给人们的生活提供了更为多样化、立体化和便利化的信息服务^[1]. 目前, 基于关系型数据库的信息管理系统主要提供传统的信息发布、浏览和搜

索功能, 缺乏 GIS 平台特别是网络地图平台的支撑, 限制了与空间位置相关联的信息的利用, 主要存在以下问题^[2]: 1) 城市发展日新月异, 商户信息变化迅速, 而网络地图上商业位置标注信息更新缓慢; 2) 专业的网络地图需要大量的人力、物力进行信息标注, 而且一般仅提供大城市、大单位等大型的公共标注服务, 对于二三线城市及城市街道商店的地理信息, 仅能提供小部分标注, 甚至尚未进行信息标注. 因此迫切需要利用网络地图技术构建新型城

收稿日期:2014-06-27

作者简介:张素智(1965—),男,河南省孟州市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为 Web 数据库、分布式计算和异构系统集成.

市商业信息平台,尽可能体现商业信息中属性数据与空间数据结合的特性,以网络地图为载体,更加形象、直观地展示用户感兴趣的信息。

针对上述问题,结合用户信息生成(UGC)思想和 Web 2.0 和 AJAX 技术,本文拟提出一种个性化网络地图自主标注系统,以使用户由地图信息的被动消费者转化为地图信息的主动提供者。

1 自主标注系统设计

1.1 自主标注系统体系结构

个性化网络地图自主标注系统采用表示层、业务逻辑层和数据访问层三层 B/S 模式的体系结构^[3](见图 1),各层的功能分别为:

1)表示层位于用户客户端,显示在 Web 浏览器上是系统的用户操作界面部分,负担着用户与系统的直接对话.表示层主要为用户提供操作界面,同时,标注和查询结果均以地图为背景,为用户提供地理信息和查询结果的数据展示。

2)业务逻辑层根据表示层发送来的请求条件和系统本身的业务流程逻辑进行分析检索,并处理从数据层获取的业务数据,然后将相应的业务处理结果存入后台数据库,并从数据库中读取数据,显示在客户端浏览器上。

3)数据访问层是系统利用 Hibernate 提供的对象关系映射框架 ORM 将内存对象和关系数据进行相互映射,进行对象的持久化.初始化网络地图时,从其空间数据库读取相应的数据并在地图上显示,而系统使用 MySQL 数据库存储数据表格,主要包括用户个人信息、地理位置标注信息及其他扩展信息。

1.2 自主标注系统流程图

用户登录系统后,可以录入想要标记的位置信息,通过网络地图提供的地址解析服务,获取要标注位置的地理坐标,在地图上以“小气泡”的形式进行标注,同时用户可以录入一些个人基本信息来完善注册内容,提交相应的数据给服务器进行审核计算,并将结果存入数据库.用户还可以浏览地图上的标注信息,按要求查询,从后台获取查询数据,点击“小气泡”,使相应的信息以气泡浮窗的形式显示在用户面前。

个性化网络地图自主标注系统流程见图 2。

1.3 数据库设计

数据库服务器主要包括 Google 空间数据库和本地数据库,根据系统平台业务特点,空间数据库

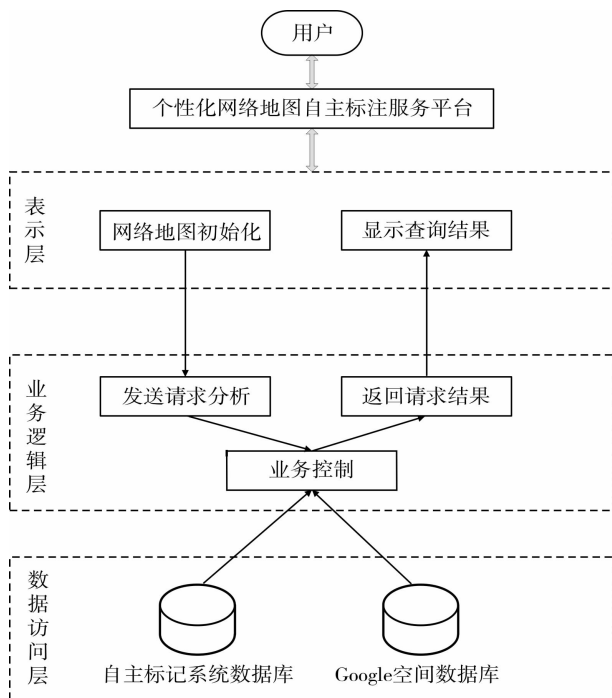


图 1 系统体系结构图

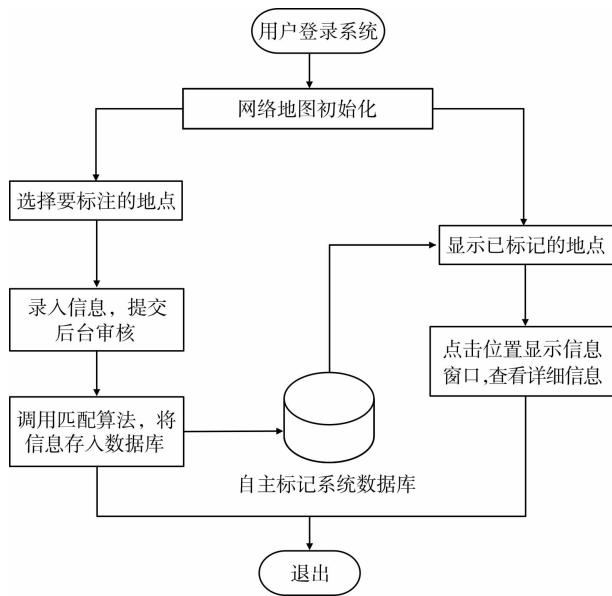


图 2 自主标注系统流程图

主要完成地图初始化加载,而本地数据库采用关系型数据库和系统配置文件共同组织和管理数据.数据主要由基础数据、商铺情况统计数据 and 系统配置数据三部分组成.基础数据主要包括商铺类型、商业圈位置信息、网络地图初始化加载等数据;商铺数据主要有商铺基本信息、商户发布信息、上传图片信息等数据;系统配置数据主要包括系统的数据字典、管理员权限信息、用户管理等。

2 自主标注系统实现

系统采用 AJAX + SSH + J2EE 架构模型, MyEclipse 8.5 开发环境, 服务器端采用开源项目 JDK 7 和 Tomcat 7, 后台数据库采用体积小、速度快、总体成本低的 MySQL 数据库。

2.1 AJAX 技术的引入

AJAX(Asynchronous JavaScript and XML) 即异步的 JavaScript 和 XML 处理技术, 结合了 JavaScript, XML 及 XMLHttpRequest 等技术, 具有用户界面高度互动、交互性强、响应速度快等优点, 此外还具有平衡计算负载的能力^[4]。传统的前台与后台交互的方式是: 前台向服务器发送请求, 服务器处理完请求后再将数据返回到前台页面, 在服务器处理请求过程中, 用户必须等待服务器的响应。

本文将 AJAX 技术引入到网络地图中, 使得传统的网络地图交互模型由同步模式改变为异步交互模式。当用户从前台页面向服务器发送请求时, 并不影响用户的其他操作, 这种方式提高了用户体验, 且传输效率相对较高, 能够很好地支持后台数据传输。浏览器 AJAX 交互方式如图 3 所示。

由图 3 可知, 引入 AJAX 技术不仅能够快速高效地发布各种基于网络地图的相关数据, 而且实现了业务逻辑与底层数据的分离, 具有很好的可扩展性和重用性。用户端可兼容的浏览器可实现异步无刷新的网络地图服务。服务器端包括应用程序和

Web 服务程序, 任务是判断用户端发送来的请求信息并生成相应的地图信息, 把处理结果返回给 AJAX 引擎。数据库端、数据逻辑层可直接访问空间地图数据和本地数据库数据。

2.2 Google Maps 空间数据的实现

先通过 JavaScript 脚本语言调用 Google Maps API^[5-6] 数据接口, 完成空间数据提取、显示和 Google Maps 的初始化, 并将其嵌入到系统平台中。接着, 将用户自主标注信息与 Google Maps 空间信息建立联系, 在平台上建立相应地理标记, 实现个性化自主标注信息在 Google 地图上的显示、查询等功能。

2.3 信息标注发布和查询功能的实现

浏览器端提供服务端和客户端信息交互。本系统使用 Google Maps 来完成测试实验, 通过调用 Google Maps API 方法加载地图, 并使用户在地图上完成自主标注和查询。用户登录信息平台后, 可以进行位置标注, 如图 4 所示, 完成例如用户商店名称、地址、营业执照、电话等相关信息的注册, 待审核通过后可以登录个人中心, 完成商店商品详细信息的发布。查询功能完成对空间属性和商品标签属性的解析, 在地图上显示符合用户检索的商品信息。

个性化网络地图自主标注系统除了实现地图的各种基本功能, 如初始化、移动、缩放等之外, 还着重实现了用户自主标注位置信息发布和信息查询功能, 以解决地图更新慢、更新不全带来的问题,

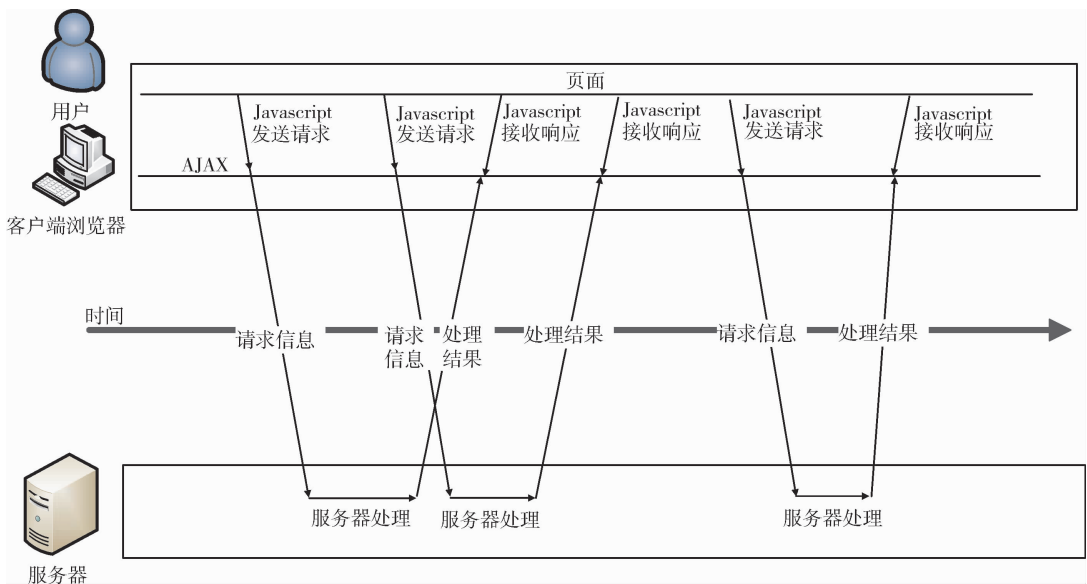


图 3 浏览器 AJAX 交互方式



图4 自主标注功能实现

为人们实时获取信息提供了保障。

3 结语

针对网络地图标注更新慢、标注不全等问题,设计了个性化网络地图自主标注系统,将 Web 2.0 和 UGC 概念融合到网络地图中,将用户标注发布的信息与网络地图提供的地理空间信息建立相关联系,方便用户以地图形式进行信息标注、查询以及浏览城市生活信息,有效地解决了地图信息更新不及时、信息不完整等问题。系统运用 AJAX 技术,提高了用户交互性,克服了传统网络地图界面初始化能力差、响应速度慢等缺点,显著提高了访问效率,同时增强了网络地图的可移植性,改善了用户体验。

参考文献:

[1] 冯骏,刘文兵,夏翔. Web 2.0 下网络地图的发展及存

在问题探讨[J]. 测绘工程,2013,22(2):37.

- [2] 邵国川,邵艳丽,李晓霞. Web 2.0 时代的互联网地图服务——发展策略与前景展望[J]. 现代情报,2011,31(6):95.
- [3] 陈海燕,刘珍. 基于 Google Maps 的地理信息标注系统的设计与实现[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2009,24(3):87.
- [4] 朱付保,郭倩倩,杨金梅. 基于 Flex 的应急网络地理信息系统架构的设计与实现[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(3):20.
- [5] 陈婷,畅伟杰,张立臣. 基于 Google Map 的西安旅游电子地图设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2013,23(9):230.
- [6] 梁智学. 基于 Google Maps API 的旅游信息系统设计与实现[J]. 计算机与现代化,2013(7):208.

基于无线射频识别技术的 在制品管理系统的设计与实现

罗国富, 杨文超, 王凯歌

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对制造物联环境下车间层生产数据有余、有用信息不足的问题,提出了一种基于RFID的在制品管理系统(WMS)。该系统通过对车间层次的划分和RFID的绑定规则的定义来构建车间层SOs事件的模型,并且用XML语言对车间SOs事件进行语义封装以便于车间层的实时信息采集和集成。实例验证表明,该系统操作简单,可视化界面友好,具有很强的实用性和稳定性,可用于提高产品质量和改善库存。

关键词:在制品管理系统;无线射频识别技术;信息采集;语义定义;数据集成

中图分类号:TP391.45;TP302.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.009

Design and implementation of work-in-process management system based on RFID technology

LUO Guo-fu, YANG Wen-chao, WANG Kai-ge

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aiming at the “rich data but poor information” problem under internet of manufacturing things environment in the workshop layer, a RFID-enabled work-in-process management system was presented. The SOs event model of the system was constructed by the division of workshop level and the RFID binding rules. Using XML language to semantically encapsulate the SOs event for acquisition and integration the real-time information of workshop layer. The example proved that the system had advantages of simple operation, friendly visual interface, strong practicability and stability. It could be used to improve product quality and control inventory.

Key words: work-in-process (WIP) management system; RFID technology; information collection; semantic definition; data integration

0 引言

全球市场竞争的加剧对制造企业在提高产品

品质、降低生产成本和减少资源消耗等方面提出了更高的要求,在制品WIP(work-in-process)管理的透明化、智能化和可追溯已成为制造企业的发展方

收稿日期:2014-09-01

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAF12B13)

作者简介:罗国富(1963—),男,河南省禹州市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为制造执行系统、企业信息集成。

向。目前,中国制造业面临着产能过剩、物料上涨等挑战;从国际环境来看,制造模式变化的趋势是精细化、绿色化和全球化。物联网技术,特别是无线射频识别(RFID)技术的成熟,对先进制造管理模式的发展起到了很大的促进作用。RFID在制造行业的应用加强了车间层与管理层的信息交互,解决了制造业中横向的“信息孤岛”和纵向的“信息断层”问题。WIP管理是制造业信息化的一个重要组成部分,如何把RFID等先进技术融入WIP管理,是行业内当今研究的热点。W. Kohn等^[1]首先采用实时RFID数据支持调度和过程控制,由此开始,RFID被广泛地应用到制造行业。蔡增玉等^[2]把无线技术、计算机技术和人工智能相结合,设计了一种基于RFID的物流管理系统。曲仁秀等^[3]针对目前在离散制造业的制造过程中缺少有效的监控、集成与可靠的生产管理决策软件现状,为自动、实时、准确地获取离散制造过程中发生的各种信息,提出了基于RFID技术的离散制造过程质量指标监控研究。毕晓东^[4]将物联网技术引入到当前仓库管理系统,确保企业及时准确地掌握库存的真实数据,进而有效控制库存。王静等^[5]开发了基于RFID的制造执行系统,探讨了基于RFID的制造执行系统数据采集的一体化信息平台优化模型,为解决现代物流系统问题提供了有益的方法和方向。倪霖等^[6]构造了一个基于RFID的汽车制造生产线垂直分布式应用模型体系框架,以解决生产过程中存在的信息采集数据缺失、遗漏及人工操作效率较低的问题。以上学者对RFID在制造业的应用虽然做了多方面的研究,但一些研究主要是模型和概念的设计,没有充分考虑对上层系统的集成问题^[3-5];另一些研究虽然对概念或者模型进行了实例验证,但是对于该模型系统的车间布置未作具体详细地阐述^[2,6]。针对上述问题和制造物联车间的实际情况,笔者拟以车间智能物件(SOs)的物流和信息流为研究对象,提出一种融合RFID技术、信息采集技术、数据处理技术等先进技术的WIP管理系统的设计和实现方案,以期优化制造过程、提高生产效率、降低生产成本,提高企业效益。

1 基于RFID的WIP管理系统

本文提出一种基于RFID的在制品管理系统WMS(work-in-process management system),其体系

架构如图1所示。其中文档管理、人员管理、质量管理、生产设备管理、RFID中间件管理、数据采集和与上层系统的业务集成均采用C/S架构;WIP的可视可追溯采用B/S架构。系统总共分为三层,即企业层、WMS层和制造车间层。WMS通过标准接口与上层企业信息系统集成;车间层的物料、机床、叉车和工人等都与RFID或传感器绑定,以实时获取它们的信息来实现生产现场的全面监控。这些信息通过现场总线或者加密WiFi上传到应用服务器,再通过工业以太网上传到WMS服务器,从而实现WMS与车间层的信息集成。

2 系统的实现

2.1 车间制造单元的划分与绑定规则

为了实现对WIP精准、有效的监管和控制,需要系统对WIP的物流和信息流的实时数据进行采集。车间层的感知原件包括RFID标签、RFID读写器和传感器(如震动传感器、温度传感器等)。为了方便车间数据的采集和管理,首先要对车间的制造单元进行划分,如图2所示。然后,对车间的机床、物料、人员、RFID标签和RFID读写器等进行编号。编号规则基于以下两种绑定关系:

1)读写器与关键设备和加工工位的绑定关系。每一个制造单元的关键设备有一个RFID读写器,所以关键设备与读写器是一一映射的关系;关键设备与加工工位是多对一的关系,一个加工工位上可能有多个设备。

2)RFID标签、物料、工人与生产任务的绑定关系。每一个工人都有唯一的RFID标签,所以RFID标签与工人是一一对应关系;每一件物料有唯一标示的RFID标签,所以物料与RFID标签也是一一对应的;一个生产任务需要多种物料,所以物料与生产任务是多对一关系。

2.2 建立SOs模型

依据上述RFID绑定规则,把车间中的人(如机器操作员、物料运输人员和车间主管人员等)、机器、刀具和材料(如原材料、在制品和成品产品等)等与相应的RFID标签进行绑定,称与RFID标签绑定的物体(包括机床、刀具、物料、人等)为SOs。通过读写器实时读取其在不同加工工位的信息,达到实时监控的目的。

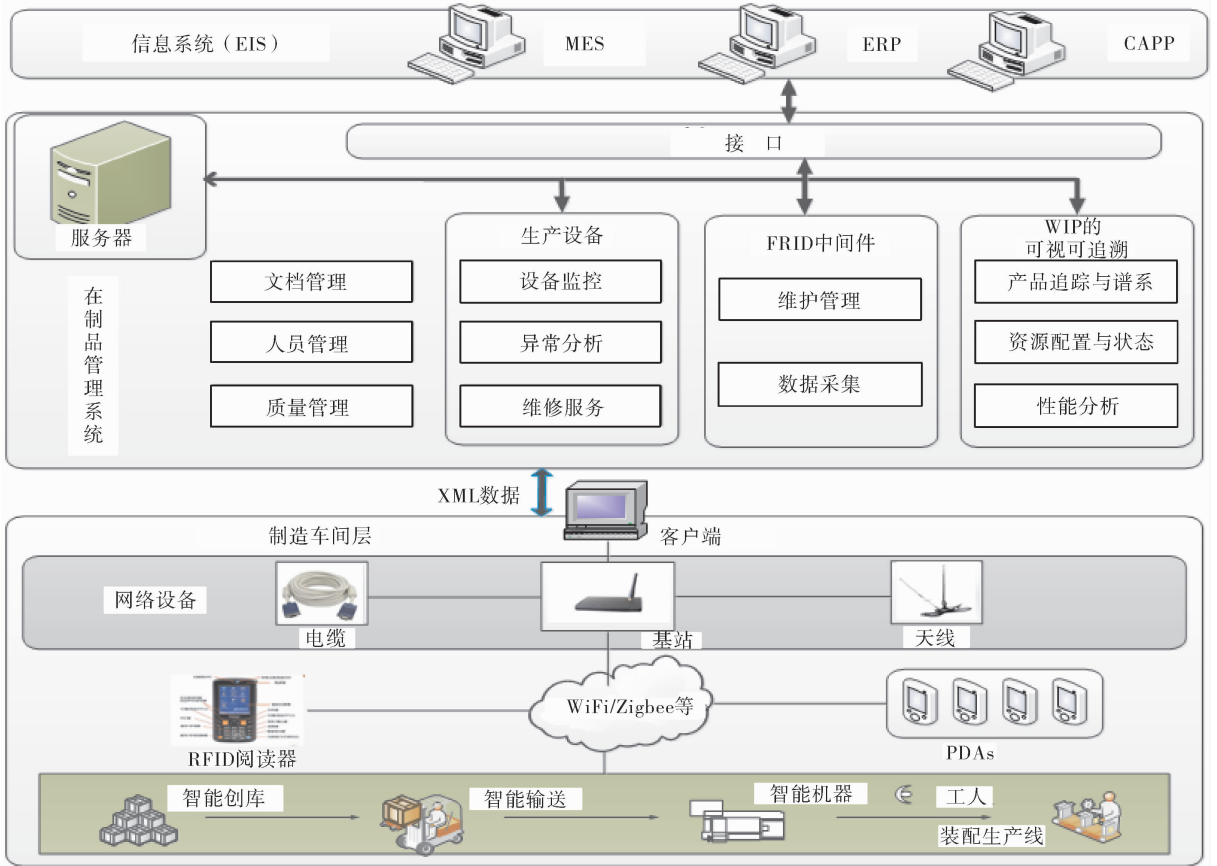


图1 基于RFID的WMS的体系架构

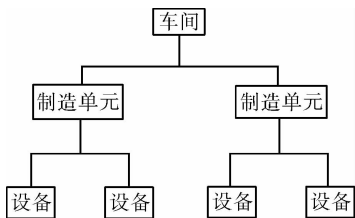


图2 车间制造单元的划分

将SOs的信息定义为集合.相应地,在某一时刻 t 的信息链节点 $P_t(S)$ 的物流状态可以描述成以下形式:

$$P_t(S) = \{ \sum_{j=1}^n M_j(S), \sum_{k=1}^m A_k(S), I, Id(S), L_t(S), U_t(S), P_t(S), O_t(S) \}$$

其中, $\sum_{j=1}^n M_j(S)$ 是材料参数,表示在 t 时刻物品的 n 种主要原材料; $\sum_{k=1}^m A_k(S)$ 是属性参数,表示在 t 时刻物品的 m 种属性,包括物理属性和化学属性等; T 是物品状态或属性变化的时间,是RFID读写器读写物品 S 标签时立刻生成的; $Id(S)$ 是物品 S 的电子

标签编码; $L_t(S)$ 是位置参数,表示物品状态变化的地点,即读写器的地点; $U_t(S)$ 是操作用户,物品 S 信息变化时操作者的ID; $P_t(S)$ 是业务类型,如开始加工、生产下线、入库、出库等; $O_t(S)$ 是单据参数,如车间工单、外购单、入库单等.通过SOs的电子标签ID号,可以查询任意时刻信息流节点的信息以达到产品信息的谱系.

2.3 SOs事件的语义封装

EPCIS接口是EPCIS global组织为了实现企业内部和企业之间的数据共享所发布的一种接口标准,XML是各种应用程序之间进行数据传输的常用工具.本文以EPCIS接口标准为基础,利用XML语义来描述SOs物流节点的业务事件.利用XML标准模板封装车间层信息,以便于信息流的传递与管理.

根据SOs在生产物流的事件模型,本文按照信息聚合度大小将其分为读取事件、简单事件、复杂事件.读取事件是读写器读取的原始事件,经过过滤聚合后的事件是简单事件,简单事件再根据时间、空间及业务逻辑关系的聚合形成复杂事件.其

中,简单事件包括:1)转换事件,指物品经过加工处理产生新物品事件;2)聚合事件,指产品通过包装形成更高级别的产品事件;3)分解事件,指包装箱拆箱后形成更多的小级别包装事件;4)移动事件,指企业内部产品位置发生变化事件。

SOs 事件中的 XML 元素包括 { EventTime, Id, ReadPiont, BizStep, BizLocation, Ep--cList, BizTransactionList } 分别对应于 SOs 物流节点中的状态参数 { 发生时间, 电子标签号码, 读写器的地点, 业务环节, 所属单位, 关联标签, 单据值 }。采用 XML 形式定义 EPCIS 事件,描述 SOs 事件的内容,易于与上层系统(如 MES, ERP)的集成,有效优化系统之间的异构性。以聚合事件中的穿销动作为例来说明 SOs 事件的语义描述如下:

```
< AggregationEvent >
  < EventTime > 2014 - 04 - 02T15: 23: 11 </
EventTime > < EventTimeZoneOFFset > + 8: 00 </
EventTimeZoneOFFset >
  < parentID > urn:epc:id:GID:NX </parentID >
  < childEPCs >
    < epc > urn:epc:id:GID:N1 </epc >
    < epc > urn:epc:id:GID:N2 </epc >
  </childEPCs >
  < action > ADD </action >
  < BizStep > urn:demo: BizStep: pin </BizStep >
  < disposition > urn:demo: disp: storage </dispo-
sition >
  < ReadPiont >
    < id > urn:demo: readpiont: 012 </id >
  </ReadPiont >
  < BizLocation >
    < id > urn:demo: bizl: workshop: 002 </id >
  </BizLocation >
</ AggregationEvent >
```

其中,装配体的聚合事件聚合前的 EPC 编码分别为 N1 和 N2,聚合后为 NX;action 是增加标签;业务步骤是穿销(pin);配置信息为入库(storage);读写器编码为 012;业务位置为 002 车间。

2.4 实时信息采集系统

实时信息采集系统是 WIP 管理系统中一个非常重要的部分,它不仅需要实现生产现场信息的实

时采集,还要将采集到的实时信息传递到上位系统。信息采集系统原理如图 3 所示。每一个工位上的读写器对相应工位上的 SOs 进行实时的信息采集。RFID 读写器获得的信息通过 RS232 串行接口传递到 PLC200;传感器通过 I/O 接口单元发送到 PLC200。多个工位上的 PLC200 利用 RS485 接口通过 Profibus 总线并联并与装有 WIP 管理系统客户端的车间应用服务器建立通信,最终实现车间层的实时信息采集。

车间应用服务器采用 Profibus-DP 协议,通过 PLC300 与各分站进行通信。总控台和各控制单元上装有橙、红、绿三种颜色的指示灯,指示灯的状态为系统当前的状态:1)红灯闪烁,表示复位完成状态或者是停止状态;2)橙色灯长亮,表示系统处于复位状态中;3)橙色灯闪烁,橙色灯是报警灯,当系统存在故障时会闪烁;4)绿色灯闪烁,表示系统运行状态正常。

该系统可通过操作触摸屏面板进行控制,同时可通过触摸屏及工控机进行监测。在联机状态下还可以通过触摸屏中“手动控制”对各个从站进行控制。

2.5 WIP 的可视可追溯管理

以管理和控制 SOs 在车间的物流和信息流为目的的 WIP 实时可视可追溯系统如图 4 所示。此系统有四个关键部分。

1)基于 SOs 的可视可追溯模型的建立。从生产车间获得的 SOs 实时数据是一切车间层事件信息源。通过读写器实时读取它们在不同工位上的信息,利用它们相对位置与逻辑关系的相互作用,达到实时监控的目的。

2)SOs 信息增值服务。作为与上层连接和管理所有 SOs 的信息服务,它把车间层的实时生产数据用 XML 标准格式进行语义封装。首先对无关数据和重复数据进行删除处理,然后根据事件间的业务逻辑关系分类合并形成复杂事件,最后再把这些数据结构相对简单的有用信息传输给上层系统。

3)可视化服务。对复杂事件统计并根据业务逻辑归类、统计,进行图形化、表格化等可视化处理,以图表的形式通过网页发布。

4)决策。生产管理人员或上层领导者可通过 WMS 发布的生产现场图表信息,根据订单需求和车间生产状态做出决策,如重新排产、调度等。

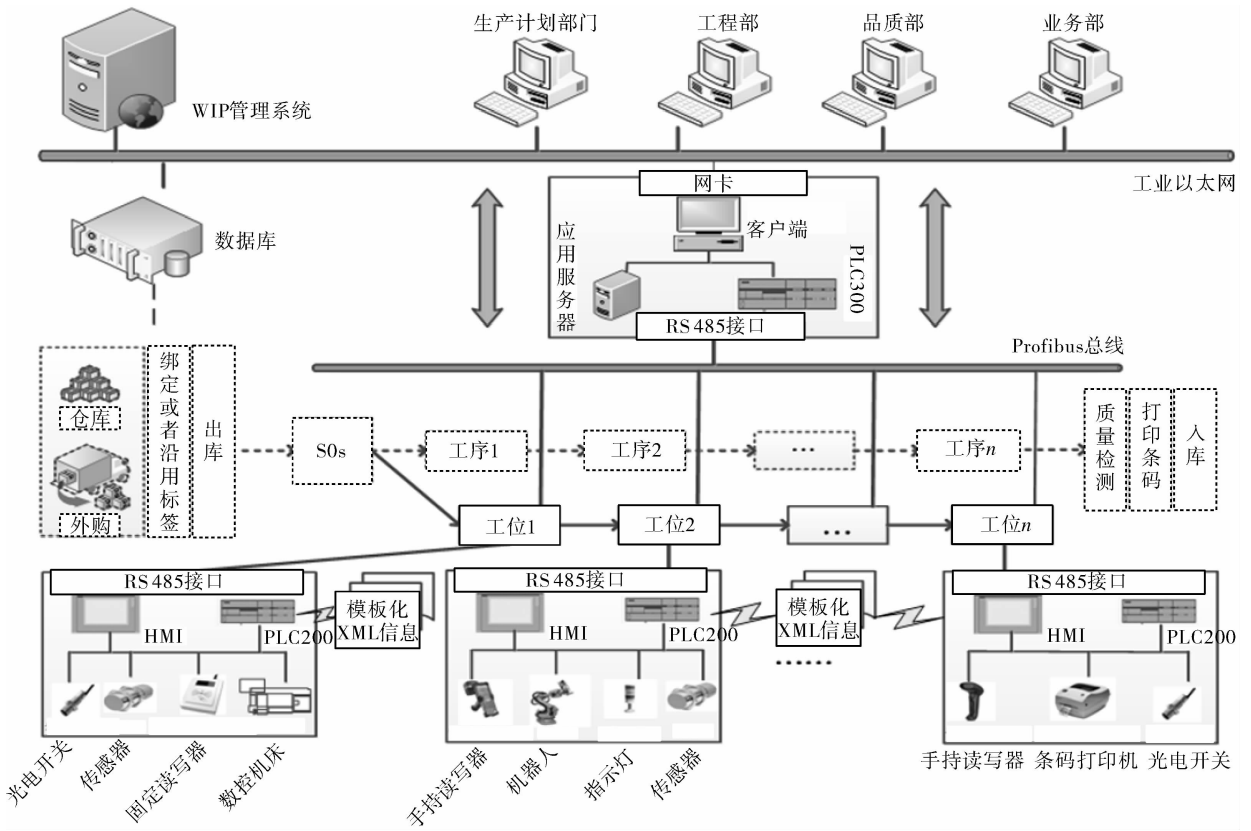


图3 信息采集系统原理图

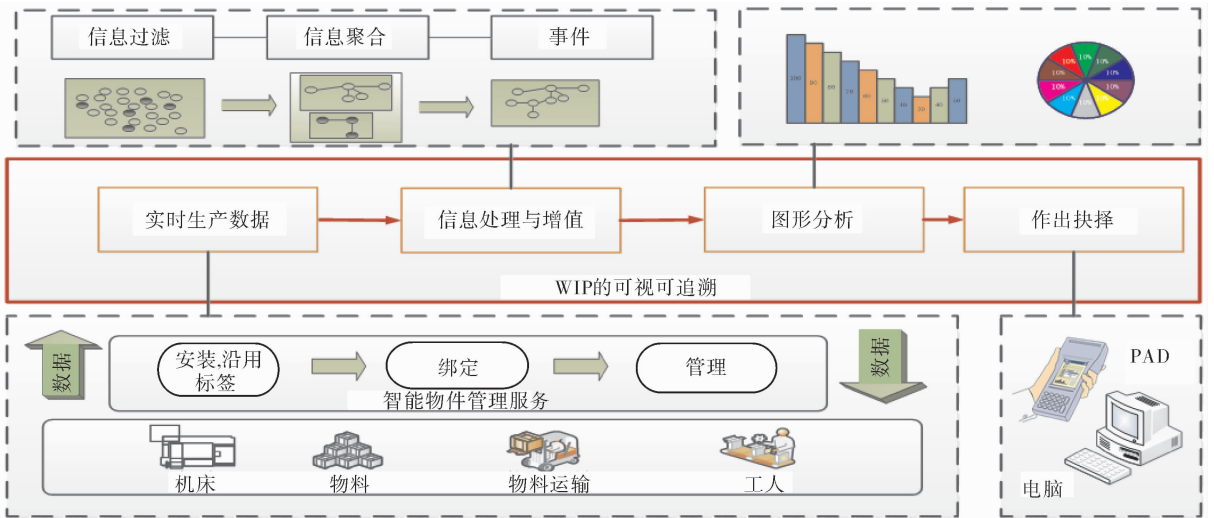


图4 WIP的可视可追溯系统

3 应用实例

苏州博实机器人技术有限公司的制造物联平台是一种典型的多单元环形柔性自动生产线。把WMS与该平台进行集成,管理生产线上的WIP。

原型系统的硬件和软件的基本配置:

1) 硬件:RFID 读写器是固定式,固定在工位和

仓库的入口;RFID 标签采用抗金属超高频标签,固定在可以动的物料托盘上;MCGS 触摸屏控制面板;IBM 数据库服务器。

2) 软件:程序采用 C/S 架构,语言为 C#语言;通过 MCGS 嵌入式组态软件,以实现触摸屏控制面板与可编程逻辑控制器间的通信;服务器上装有 SQL Server 2008 来实现车间生产数据的长久储存。

首先,把 RFID 读写器与各个单元绑定,把 RFID 标签与托盘绑定.其次,以规定格式的 XML 语言对文中定义的事件进行封装(上文聚合事件为例),以格式标准化的 XML 文件来实现系统的数据传输和储存;最后,对控制面板、PLC 及 RFID 读写器等进行组态,建立通信.

本文所提出的 WMS 应用于该物联平台,实现

了 WIP 物流的可视化和信息流的可追溯.系统获得的实时生产数据对提高产品质量和控制 WIP 库存也起到了很好的优化作用.经实例验证,该系统具有以下优点:操作简单,信息获得及时、准确;标准化的接口和 XML 格式的信息文件使得系统更易于扩展和集成;系统运行稳定,具有良好的实用性.图 5 为系统总控界面.



图 5 系统总控界面

4 结语

本文提出了一种基于 RFID 的 WMS,并对其关键技术进行了研究.通过对车间层次的划分和 RFID 的绑定规则的定义来构建车间层 SOs 事件的模型,并且用 XML 语言对车间 SOs 事件进行语义封装以便于车间层的实时信息采集和集成.该系统操作简单、界面友好、具有良好的实用性和稳定性,可提高产品质量和改善库存.

参考文献:

[1] Kohn W, Brayman V, Littleton J. Repair-control of enterprise systems using RFID sensory data[J]. IIE Transac-

tions, 2005, 37(4):281.

[2] 蔡增玉,甘勇,金保华,等.基于 RFID 的物流管理系统设计[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2009, 24(6):113.

[3] 曲仁秀,王志国.基于 RFID 技术的离散制造过程其量指标监控研究[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2011, 36(2):263.

[4] 毕晓东.物联网技术在制造业智能仓库管理系统中的应用[J]. 软件导刊, 2012, 11(3):136.

[5] 王静,马荣全.基于 RFID 的制造执行系统物流信息平台优化模型研究[J]. 现代情报, 2013, 33(8):17.

[6] 倪霖,钟辉,段超.汽车制造生产线上 RFID 应用模式研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(4):224.

SSI 集成框架技术与应用

邓璐娟, 张圆方, 李金萌, 董东晓

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对基于 Web 的三层结构应用软件存在表示逻辑和业务逻辑的强耦合而导致程序可维护性差的问题,研究了 J2EE 开源框架 Struts, Spring, iBatis 的无缝集成技术,所形成的 SSI 集成框架可以使表示层、业务层、数据持久层分离开来,达到高内聚、低耦合的目标.实践证明,把 SSI 集成框架技术应用于面向服务的校园电子商务平台设计,所实现的系统,性能优良,具有高扩展性和可维护性.

关键词:Struts 框架; Spring 框架; iBatis 框架; SSI 集成框架; 校园电子商务

中图分类号:TP311 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.010

The technology and application of SSI integration framework

DENG Lu-juan, ZHANG Yuan-fang, LI Jin-meng, DONG Dong-xiao

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

Abstract: Aiming at the problem that the strong coupling between view logic and business logic of the application software based on Web three-tier structure caused the poor maintainability, the J2EE open source frameworks Struts, Spring, iBatis seamless integration technology were studied. The formation of SSI integration framework allowed the presentation layer, business layer, data persistence layer separated, to achieve "high cohesion, low coupling" goal. It was proved that the SSI integration framework technology in service-oriented campus e-commerce platform achieved superior system performance, high scalability and maintainability.

Key words: Struts frame; Spring frame; iBatis frame; SSI intergration frame; campus e-commerce

0 引言

基于 Web 的应用软件系统一般采用三层结构,但设计时如何解决表示逻辑和业务逻辑的强耦合问题,以克服由此而导致的产品开发过程复杂、程序维护性差、不利于扩展和更新的缺点,在此是一个关键的技术问题. J2EE 有许多开源框架,如 Struts, Webwork, JSF, Echo, Spring, Realmethods, Keel, Hibernate, JPA, iBatis 等,都具有自己独特的优点^[1-5]. 孙强等^[2]研究了基于 Struts, Spring 和 iBatis 的轻量级开发策略 SSI,在高校校园网络

设备管理系统中设计并集成三种框架技术;高志亮^[3]采用 J2EE 技术框架 SSI 作为系统构架,并应用到某市天气预报评分系统中;甄光畴等^[4]研究了 SSI 三种框架技术,整合这三种框架并设计和实现了农村信息管理系统.但是,目前的研究存在系统集成度不高、可复用性和可扩展性差、开发成本高等问题.因此,SSI 框架要想在开发简洁性、开发效率、开发成本及维护费用等方面占有优势,有必要对 SSI 框架进行补充和改进.本文拟结合 Struts, Spring, iBatis 构建 SSI 集成框架,以期解决上述问题.

收稿日期:2014-09-10

基金项目:河南省科技攻关项目(142102210078)

作者简介:邓璐娟(1964—),女,湖南省浏阳市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为软件工程、软件测试.

1 SSI集成框架思路

Struts, Spring 和 iBatis 的集成方案采用了如下策略: Spring 与 Struts 整合、Spring 与 iBatis 整合、iBatis 实现数据持久层与 SQL Map 的有效衔接. 在构建 SSI 集成框架时, 设计主线采用 MVC 设计思想, 并在此基础上做了改进, 引进了数据持久层 (iBatis) 的概念, 将 Struts 框架贯穿于整个工作流程, 由 Spring, iBatis 提供支撑. Struts 框架用于表现层, 通过 JSP 等技术编写动态页面, 与用户交互^[6]; Spring 框架用于业务逻辑层, 完成逻辑控制流转; iBatis 用于数据持久层, 完成数据交互, 将三者无缝地集成, 所形成的 SSI 集成框架, 其结构原理如图 1 所示.

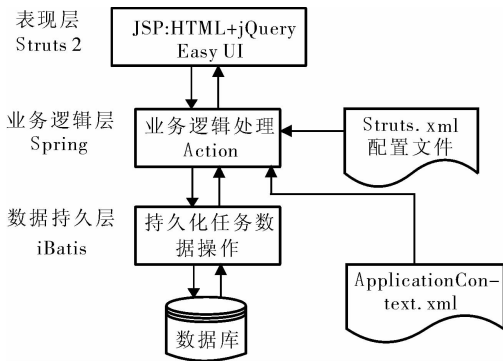


图1 SSI集成框架的结构原理

1.1 Spring 与 Struts 集成

目前, 比较传统的做法是采用 Spring 的 Action-Support 类整合 Struts, 但会导致 Struts 框架过分依赖 Spring, 当 Spring 有变化 (如更换版本) 时, 则需要重写代码, 由此造成了 Spring 和 Action 的过多耦合; 或者用 Spring 的 DelegatingRequestProcessor 类覆盖 Struts 的 RequestProcessor 类, 在扩展 RequestProcessor 类时, 就需要增加新代码进行重新整合, 而新增代码会带来高风险^[7]. 因此, 笔者研究和实践了如下方案: 当 Struts 与 Spring 整合时, Struts 主要实现 MVC 三层思想, 注重将视图层与控制层分开, 但不涉及对模型层的优化设计^[8], 而 Spring 框架除了实现 Struts 的 MVC 功能外, 还可以利用其控制反转的思想实现对模型的优化, 更深层次地降低各个组件间的耦合程度. 其具体实现方式为: 请求对应的映射不再是处理用户请求的 Action 实例类名称 (UserAction), 而是 Spring 代理类的名称 (userAction), 该代理类直接将用户请求名称作为 Spring 环境中处理请求的类的对象名称, 对象的某些属性值

可以通过 Spring IoC 容器实现依赖注入, 促成组件间的松耦合, 可独立完成测试和开发^[9]. 配置代码如下:

```
<bean id = "userAction" class = "com. dzsw. ac-
tion. UserAction" > < propertyName = " userService "
> </property > </bean > .
```

为使权限安全易控, 在集成框架中采用 Spring Security 对访问权限和资源进行控制, 做到了 Spring 和 Struts 的无缝、安全和松耦合集成.

1.2 Spring 与 iBatis 整合

在传统 J2EE 架构中, 业务层靠组件 EJB 实现, 部署复杂, 资源耗费大, 各个组件跟 EJB 组件定义的 Bean 紧耦合. SSI 集成框架采用 Spring 取代传统项目中的 EJB 等远程调用技术, 按照“接口和实现”方式开发, 对代码的影响小, 使系统代码结构清晰, 各个组件间的耦合降低, 系统的可维护性增强^[10-11]. 配置代码如下:

```
<bean id = " userService " class = " com. dzsw.
service. imp. UserServiceImpl " > </bean > .
```

由于 Hibernate 与 EJB 都要求数据库表、对象关系完全一致, 在实际应用中很难实现, 采用 iBatis 取代传统架构中的 Hibernate, iBatis 在配置文件中对数据库中的数据进行映射, 使 Java 类与数据库表结构之间的关联解耦.

1.3 iBatis 实现持久层与 SQL Map 的有效衔接

iBatis 对数据库一系列操作的实现是在 iBatis SQL Map 中定义的, 这些操作保存到相关的 XML 配置文件中, 运用 iBatis 提供的 ORM 工具进行关系数据库与对象关联, iBatis 以 SQL 作为数据交互的主要方式, 在对象与数据库之间传递数据, 并保持两者与映射层本身相互独立^[12]. 配置代码如下:

```
<typeAliases > <typeAlias alias = " user " type = "
com. dzsw. bean. User " > </typeAliases > < mappers >
< mapperresource = " com/dzsw/mappers/UserMapper.
xml " / > < mappers > .
```

2 SSI集成框架技术的应用

为了给学生提供实践平台和勤工俭学的岗位, 并加快闲置物品的流通, 避免资源浪费, 用 SSI 集成框架技术, 设计并实现了面向服务的校园电子商务平台.

2.1 面向服务的校园电子商务平台功能

面向服务的校园电子商务平台后台和前台功能分别如图 2 和图 3 所示.

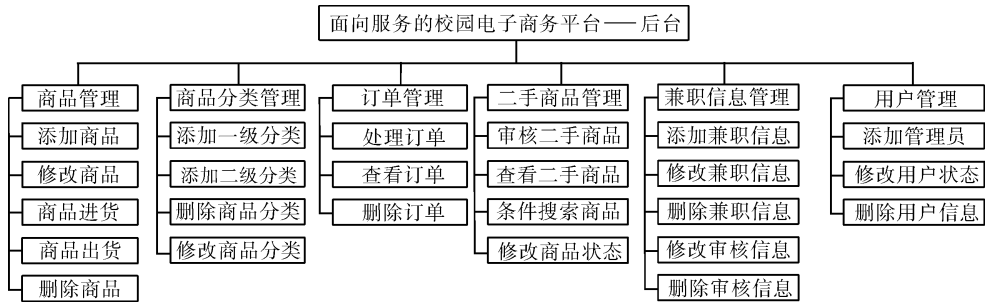


图2 面向服务的校园电子商务平台的后台功能

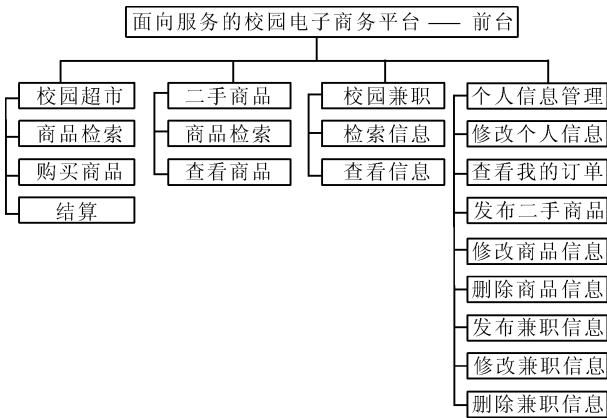


图3 面向服务的校园电子商务平台的前台功能

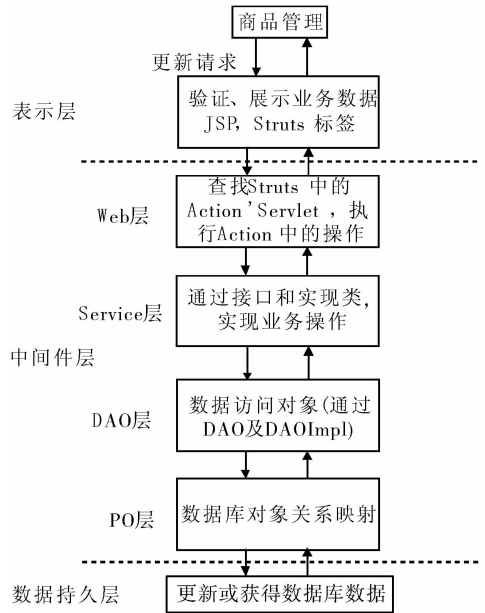


图4 商品管理模块的实现

2.2 面向服务的校园电子商务平台实现

以商品管理模块为例,说明 SSI 集成框架技术可很好地应用于面向服务的校园电子商务平台项目中,该模块的实现如图 4 所示,主要包括三层:表示层、中间件层(业务逻辑层)和数据持久层。在这里只关注各层之间接口的实现。

2.2.1 表示层 表示层通过 Struts 来实现,首先通过配置 Web. xm 来实现 Struts 和 Spring 的集成,代码如下:

```
<web-app> <context-param> <param-name> contextConfigLocation </param-name> <param-value>/WEB-INF/applicationContext*.xml </param-value> </context-param> <listener> <listener-class> org.springframework.web.context.ContextLoaderListener </listener-class> </listener> </web-app>
```

再配置 Struts-config.xml 文件实现从页面跳转到相应的 Action,在 Action 中调用 Spring 的方法来实现对数据库的具体操作。

商品管理模块的主要功能是通过表示层修改商品信息,如商品名称、商品价格、商品数量等。表

示层通过 JSP 页面来展示信息,并且通过控制器来与中间件层链接,中间件层与数据持久层链接,最后,从中间件层返回的数据将通过 Struts 标签库在 JSP 页面进行展示。

2.2.2 中间件层 Spring 把表示层和数据持久层整合起来,它对数据持久层的操作进行封装,通过表示层调用相应的 Bean 来完成对数据库的操作,进而实现 Spring 和 iBatis 的整合,其关键文件 applicationContext.xml 的核心配置如下:

```
<beans> <bean id="dataSource" class="com.jolbox.bonecp.BoneCPDataSource" destroy-method="close"> <property name="jdbcUrl" value="jdbc:mysql://localhost/dzsw?characterEncoding=utf8"/> </bean> <bean id="sqlSessionFactory" class="org.ibatis.spring.SqlSessionFactoryBean"> <property name="dataSource" ref="dataSource"/> <property name="configLocation" value
```



```
="/WEB-INF/ibatis.xml" > </property > </bean > </beans > .
```

Spring 是面向接口的编程,因此在实现具体方法之前需创建相应的 DAO 接口,与之对应的 DAO 对象用来和数据持久层进行交互,完成对象的持久化及对数据的操作.其核心代码如下:

```
public interface UserDao { public abstract void addUser( User user ); public abstract List < User > showUsers(); ... }.
```

iBatis 对数据库的操作保存到相关的 XML 配置文件中,通过运用 iBatis 提供的 ORM 工具进行数据库与对象关联,iBatis 以 SQL 作为数据交互的方式,在对象与数据库之间传递数据,并保持两者与映射层本身相互独立.如文件 users.xml:

```
< sqlMap namespace = " users " > < typeAlias alias = " users " type = " com. dzsw. orm. UsersBean " / > < resultMap class = " users " id = " user_map " > < result property = " userID " column = " userid " / > < result property = " userName " column = " username " / > < result property = " password " column = " password " / > < /resultMap > .
```

中间件层可以分为四部分,它们是 Web 层、服务层、DAO 层(数据访问对象)和 PO(持久对象层):1)Web 层:Struts 控制器的责任为表示层和业务逻辑之间的数据交换,它用业务逻辑层 Bean 去处理商品信息,然后,将返回数据在表示层进行展示;2)服务层:实现了业务逻辑和处理商品在 DAO 组件和 Web 层之间的信息交换;3)DAO 层:封装了商品信息查询、修改、添加、删除功能,并且可以在 Service 层和 PO 层之间对商品信息进行处理;4)PO 层:通过运用 iBatis 提供的 ORM 工具进行关系数据库与对象关联,iBatis 明确以 SQL 作为数据交互的主要方式,在对象与数据库之间传递数据,并保持二者与映射层本身相互独立,然后开发人员可以操作商品数据库表作为商品对象.

2.2.3 数据持久层 采用 MySQL 数据库来存储和检索数据信息,该层中的数据独立于应用服务器和业务逻辑,提高了数据的操作和处理效率.

这样用户通过浏览器提交相关请求,就会将页面的内容和 Struts 的相关配置转到 Action 处理,在 Action 里调用 Spring 提供的相关 Bean 方法,然后通过数据持久层的 iBatis 来操作关系数据库,这样通过 SSI 集成框架技术就实现了 Web 应用软件三层的无缝集成,且程序代码简介、框架清晰、可扩展

性好.

3 结语

本文整合 Struts, Spring 和 iBatis 形成 SSI 集成框架,对应用程序采用分层结构,使一个集成框架管理一个层次,各司其职,具有明确的分层;采用延时注入思想组装代码,使代码的扩展性达到最佳;将 SSI 集成框架技术用于面向服务的校园电子商务平台设计中,实现了高内聚、低耦合的目标.经实践运行,本设计能满足校园用户真实需求,系统具有良好的可扩充性、高稳定性、可靠性,可为类似系统设计提供参考和借鉴.

参考文献:

- [1] Jiang J Y, Liu T, Liu Y. The Construction of e-business portal based on Struts, Spring and Hibernate[J]. Beijing Municipal Science and Technology Commission, 2009, 9(9):78.
- [2] 孙强,孙龙清,邱小彬,等.基于 Struts + Spring + iBATIS 的轻量级 Web 应用框架研究[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(10):135.
- [3] 高志亮.一种基于 SSI 的天气现象评价系统的研究[J]. 青岛理工大学学报:自然科学版, 2011, 32(4):101.
- [4] 甄光畴,杨文伟.基于 SSI 框架的农村信息管理系统的设计与实现[J]. 计算机与现代化, 2013, 215(7):156.
- [5] Wei Q Y. Study on the Web application based on Struts framework[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2009, 114(5):95.
- [6] Kou Y, Wu L W. 基于 MVC 设计模式的 Struts 框架的应用方法[J]. 计算机应用, 2003, 23(11):91.
- [7] Hao X F, Tang H X. Struts + Spring + Hibernate integrated framework and its use in log accounting and analyzing system[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Multimedia Information Networking and Security, Piscataway:IEEE, 2010:936.
- [8] 董卓亚.基于 Struts2 Ajax 校验的资源管理系统槽位端口添加方案[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2013, 28(4):86.
- [9] 张琪.企业 WEB 应用下 SSI 框架分析[J]. 南京工业职业技术学院学报, 2011, 11(2):56.
- [10] 赵晓君,崔建涛,邓璐娟,等.基于 SSH2 和 jQuery 的大校园综合服务平台的设计与实现[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2014, 29(3):100.
- [11] 许亮,陈刚.基于 J2EE 的高校后勤管理系统的研究和实现[J]. 现代电子技术, 2012, 35(4):48.

基于粗糙集的 ID3 决策树算法改进

朱付保, 霍晓齐, 徐显景

(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 ID3 等传统的决策树算法通常采用单个属性作为分枝判断依据,导致生成树的规模大、形成的规则较难理解的问题,提出了一种以多变量作为结点属性判断条件的算法.该算法利用粗糙集中属性依赖的特性,选择信息系统中条件属性相对决策属性的核属性作为多变量结点属性,使用相对泛化的概念辅助分枝过程,进而生成多变量决策树.通过实例分析与传统的 ID3 算法进行比较,证明了改进算法的高效性.

关键词:粗糙集;ID3 算法;决策树;相对泛化;等价关系

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.011

Improved ID3 decision tree algorithm based on rough set

ZHU Fu-bao, HUO Xiao-qi, XU Xian-jing

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

Abstract: The traditional decision tree algorithms such as ID3 usually uses a single attribute as the basis of branching judgment. The scale of the tree generated by ID3 is very large and rules formed are difficult to understand. Aiming at the problems described above, an algorithm was proposed using multi-variable as the judging conditions of node attributes. By using the property of attribute dependency in rough set and choosing nuclear properties of condition attributes relative to decision attributes in the information system as multi-variable node attributes, the algorithm used the concept of relative generalization to aid the branching process and generated a multi-variable decision tree. Through the analysis of example and by comparing with the conventional ID3 algorithm, the high efficiency of the improved algorithm was verified.

Key words: rough set; ID3 algorithm; decision tree; relative generalization; equivalent relationship

0 引言

粗糙集理论是处理模糊和不确定性知识的一种数学工具,最早起源于波兰数学家 Z. Pawlak 于 1982 年提出的数学分析理论^[1].粗糙集理论的主要内容包括近似分类、知识约简、属性相依性分析、根据决策表产生最优或次优决策控制算法等,在粗糙集理论中,知识被当作样本集合的划分.粗糙集理

论自身并没有包含处理不确定和不准确数据的机制,通常应用当中,它需要和其他方法结合起来共同使用,相互补充.

ID3 算法是数据挖掘技术中比较常用的一种决策树生成算法,由于其不需要繁琐的先验知识,能够分析处理复杂的海量高维数据而且获得规则的方法简单快捷,已经在各个领域得到了广泛的应用.ID3 算法作为一种传统的构造决策树的方法,通

收稿日期:2014-04-01

基金项目:河南省科技攻关计划项目(122102210492)

作者简介:朱付保(1974—),男,河南省柘城县人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为智能信息处理、空间数据库、地理信息系统、数据挖掘.

过使用信息熵和信息增益指标来选择结点属性作为分枝依据. 由于每个结点都选取单个属性进行检验, 在解决实际问题的过程中, 面对大量信息和海量数据, 许多复杂的概念很难进行描述, 即使可以生成决策树, 树的规模也非常大, 得到的结果不便于理解. 与此同时, 在构造决策树的过程中可能会出现重复的子树, 同一属性在决策树的一些路径上也会出现被多次检验的可能.

黄爱辉等^[2]利用数学上等价无穷小的性质提出一种新的改进的 ID3 算法, 提高了 ID3 算法中信息增益的计算效率. 朱颢东等^[3]引入了属性重要性, 利用凸函数的性质进行简化, 提高了 ID3 算法的准确率和计算速度. 本文拟结合粗糙集中知识依赖的理论, 对 ID3 决策树算法进行改进, 以期在进一步减少树的结点数的同时提高生成规则的准确度.

1 基本定义

定义 1 知识表达系统

一个知识表达系统可以表示为有序四元组 $\{U, R, V, f\}$, 其中, 论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 是全体样本的集合; 属性集合 $R = C \cup D$, C 为条件属性集合, 反映对象的特征, D 是决策属性集合, 反映对象的类别; V 是属性值的集合, V_r 是属性 r 的取值范围; 信息函数 f 用于确定 R 中每一个对象 x 的属性值, 即任一 $x_i \in U, r \in R$, 则 $f(x_i, r) = V_r$.

定义 2 等价关系

在粗糙集中, 对任意属性子集 $B \in R$, 假若 $x_i, x_j \in U, \forall r \in B$, 当 $f(x_i, r) = f(x_j, r)$ 时, 则 x_i 与 x_j 为等价关系^[3].

定义 3 上近似集和下近似集^[4]

上近似集: 根据已有的知识 R , 判别论域 U 中一定属于和可能属于集合 X 的对象所组成的集合, 公式表示为

$$R^-(X) = \{x \in U, [x]_R \cap X \neq \emptyset\} \quad ①$$

下近似集: 根据现存的知识 R , 判别论域 U 中一定属于集合 X 的对象所组成的集合, 公式表示为

$$R_-(X) = \{x \in U, [x]_R \in X\} \quad ②$$

在式 ①② 中, $[x]_R$ 为等级关系 R 中包含 x 元素的等价类.

通过上近似集和下近似集的定义可知, 对于一个给定的知识表达系统 $S = \{U, R, V, f\}$, $X \in U$ 表示一个样本子集, R 表示等价关系, 那么一切与 X 的交集不为空的基本集合的并集即为 $R^-(X)$, 一切包含于 X 的基本集合的并集即为 $R_-(X)$.

定义 4 信息熵^[5]

已知随机样本集合 T 中样本个数为 a , 类别属性有 n 个互不相同的值, 可以得出 n 个类别 $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$. 假设类别值为 M_i 的样本个数为 a_i , 则对某一样本进行分类需要的期望信息为

$$L(a_1, a_2, \dots, a_n) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)$$

其中, p_i 为样本集合中 M_i 的概率值, 可以用 a_i/a 进行计算, 由于信息须用二进制进行编码, 因此对数底数值取 2.

定义 5 信息增益

假定 $\{b_1, b_2, \dots, b_e\}$ 是属性 B 的 e 个不相同的值, 按照属性 B 可以将 T 划分成 e 个子集合 $\{a_1, a_2, \dots, a_e\}$, 其中 a_j 表示样本 T 中在属性 B 上取值为 b_j . 假如选属性 B 作为决策树的测试属性, 则以上的子集即与由结点生成的分枝相对应, 并且由属性 B 对集合进行划分的期望信息为

$$E(B) = \sum_{j=1}^e \frac{a_{1j} + \dots + a_{nj}}{a} L(a_{1j}, \dots, a_{nj}) \quad ③$$

其中, $\frac{a_{1j} + \dots + a_{nj}}{a}$ 是子集 a_j 的权值, 其值可以用属性 B 取 b_j 的样本数除以 a 得到. 最终的信息增益为

$$Gain(B) = L(a_1, a_2, \dots, a_n) - E(B) \quad ④$$

在构造决策树的过程中, 通过比较各个属性信息增益的大小, 选择信息增益值最大的属性作为随机样本的测试属性.

2 ID3 算法

ID3 算法是通过各个属性的信息增益来选择测试属性构造决策树的, 其构造流程如图 1 所示.

输入: 训练数据集

输出: 生成的决策树

步骤:

1) 将所有训练样本数据集合作为结点;

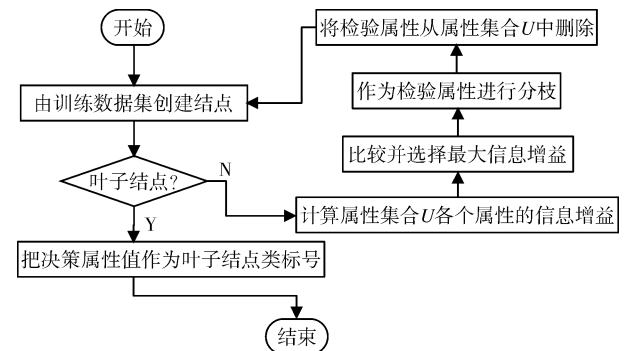


图 1 ID3 算法构造决策树的流程图

2) 建立决策表, 对训练样本进行判断, 若都属于同一类或可供选择的条件属性为空, 则该结点为叶子结点, 循环结束, 否则执行步骤 3);

3) 根据公式③和④计算出各个属性的信息增益, 将信息增益值最大的作为结点属性, 对其检验实现分枝, 各个分枝组成新的样本数据子集, 并将已检验属性列删除;

4) 对各个子树重复执行步骤 2)、步骤 3) 最终得到决策树。

上述决策树的构建过程中, 通过信息增益值来选择内部结点的测试属性. 将信息增益值最大的属性选作特定结点的测试属性, 确保选中的测试属性对随机样本数据的分类所需要的信息量最小, 且反映出划分的最小随机性. 使用 ID3 算法可以保证对样本对象进行分类时期望检测次数达到最少, 可以方便地计算出一棵简单的决策树。

3 基于粗糙集的 ID3 改进算法

在构造决策树的过程中, 选择哪些属性作为结点属性是首要问题. 在训练数据集中, 有许多不相关数据, 还有部分噪声数据, 由于在信息系统中属性的各种组合是呈指数增长的, 通过尝试其各种组合来选择结点属性是不切实际的. 粗糙集中的核是保证粗糙集分类能力必不可少的属性, 相对核能够在保证将对象划分到另一个分类的同时保证分类能力, 考虑到条件属性对决策属性的依赖性, 尝试选用相对核作为决策树的结点属性。

定义 6 相对核

相对核设 P 和 Q 为论域 U 上的等价关系, $r \in P$. 若 $Pos_p(IND(Q)) = Pos_{(P-r)}(IND(Q))$, 则称 r 为 P 中 Q 可省的, 否则称 r 为 P 中 Q 不可省的. 上

式可记为 $Pos_p(Q) = Pos_{(P-r)}(Q)$, 当 P 中的每一个 r 都是 Q 不可省的, 则称 P 是相对于 Q 独立的, 否则就称为是依赖的. 当 $(P-r)$ 为 P 的 Q 独立子族, 且 $Pos_p(Q) = Pos_{(P-r)}(Q)$, 则族 $(P-r)$ 称为 P 的 Q 相对约简, 记为 $Red_Q(P)$. 它是用属性 P 表达属性 Q 必不可少的属性集, 如果从分类的观点看, 就是用一种分类关系表达另一种分类关系必不可少的关系集合. P 所有 Q 约简的交集, 称为 P 的 Q 核, 记为 $Core_Q(P)$, 亦称相对核。

由于属性与等价关系之间存在着对应关系, 可以理解为两者之间是等价的. 根据定义 6, 若 T 和 D 分别表示信息系统的条件属性与决策属性, 存在一个属性 $C \in T$ 是 D 不必要的, 那么将 C 从 T 中去除后并不会改变最终的决策结果, 当去掉相对核属性时则会改变决策结果. 基于 T 相对于 D 核属性的重要性, 选择 T 相对 D 的核属性作为结点属性. 简单的将核属性合取进行检验可能会引起过拟合的现象, 因此用相对泛化辅助多属性检验的过程。

定义 7 相对泛化^[6]

若 P 与 Q 为论域 U 的 2 组等价关系, 同时

$$U/P = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

$$U/Q = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$$

$$Z_i = \bigcup_{x_j \in U/IND(P)} \{X_j : X_j \subseteq Y_i\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$Z_{m+1} = \bigcup_{x_j \in U/IND(P)} \{X_j : X_j \not\subseteq Y_i, \forall i\} \quad ⑤$$

那么, $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_{m+1}\}$ 即为 P 相对 Q 的泛化, 记作 $GEN_Q(P)$ 。

本文依据属性的分类能力^[7-8]作为划分度量的准则, 根据定义中相对核的概念提出了构建 ID3 改进算法的步骤, 如图 2 所示。

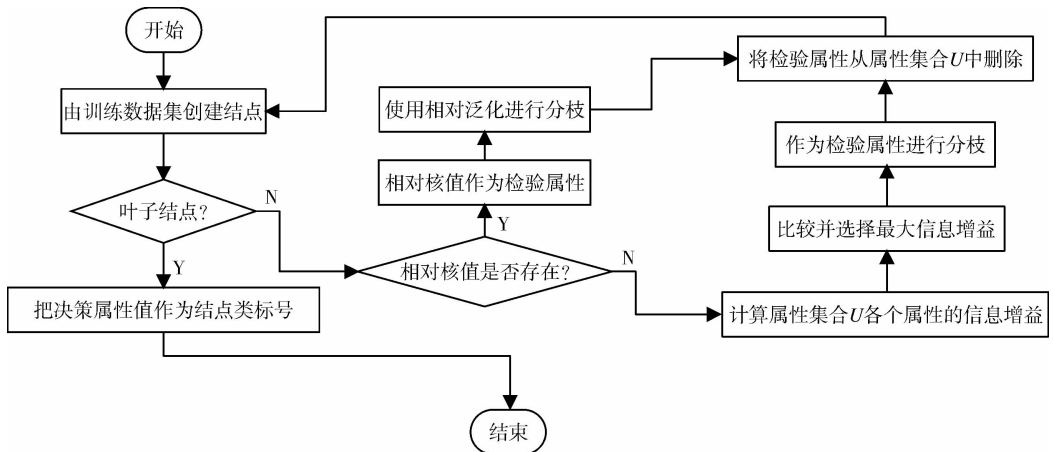


图 2 改进算法构造决策树流程图

输入:训练数据集
输出:生成的决策树
步骤:

- 1) 将所有训练样本数据集合作为结点;
- 2) 建立决策表,对训练样本进行判断,若都属于同一类或可供选择的条件属性为空,则该结点为叶子结点,循环结束,否则执行步骤 3);
- 3) 根据定义 6 求出条件属性相对于决策属性的相对核,若不存在则按照 ID3 算法进行分枝,若存在则按照相对泛化规则进行分枝,各个分枝组成新的样本数据子集,并将已检验属性列删除;

4) 对各个子树重复执行步骤 2)、步骤 3) 最终得到决策树。

从 ID3 算法和改进算法生成决策树的步骤可以看出其差别在第 3 步,传统 ID3 算法单纯以信息熵、信息增益来权衡属性的重要性,选择信息增益最大的属性作为检验对象;基于粗糙集改进算法则首先求出条件属性相对于决策属性的相对核,利用属性之间的依赖性可以避免在一条路径上对同一属性的重复检验,由于相对核属性可能为多个属性的组合,分枝会减少,生成树的效率更高。

4 实验验证

为了验证上述改进算法的有效性,选用变压器绝缘油色谱分析信息系统数据进行分析,结果见表 1。

运用传统的 ID3,以信息增益量为标准选择结点属性进行分枝,生成的决策树如图 3 所示,树中所

有结点的个数即树的复杂度为 8。

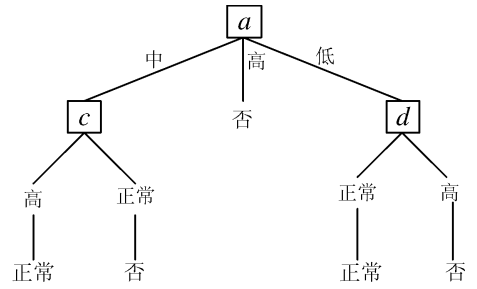


图 3 ID3 算法生成的决策树

采用 ID3 改进算法构造决策树. 首先,根据以上色谱油分析信息系统数据计算出条件属性集 T 相对于决策属性集 D 的核. 根据以上定义易得

$$U/IND(T) = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \{11\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}\};$$

$$U/IND(D) = \{\{1, 2, 6, 8, 14\}, \{3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13\}\}$$

$$POST(D) = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14\} = U$$

然后检验 4 个条件属性(分别用 a, b, c, d 表示)相对决策属性 D 是否是必需的,首先检验 a ,由 $Pos_{c-a}(D) = \{5, 9, 10, 11, 13\} \neq Pos_c(D)$,根据定义 6 可得 a 在 T 中相对 D 是必需的,同理可得, b 和 c 是不必要的, d 是必要的,因此,条件属性相对决策属性的核 $Core_D(T) = \{a, d\}$. 最后使用相对泛化进行多变量的检验,令 $Q = c \wedge d$,易得 $U/Q = \{\{1, 8, 9\}, \{2, 11\}, \{3, 13\}, \{4, 5, 10\}, \{6, 14\}, \{7, 12\}\}$,根据公式⑤求出 Q 相对于 D 的泛化在 U 上得到的等价关系 $\{\{1, 2, 8, 9, 11\}, \{3, 4, 5, 7, 10, 12, 13\}, \{6, 14\}\}$,根据等价关系与属性相互一一对应,可以用 $GEN_D(Q)$ 来表示这种新的属性,其实质仍是相对核属性,只是在分枝时运用了相对泛化得到的结果. 根据以上步骤得出新算法生成的决策树如图 4 所示。

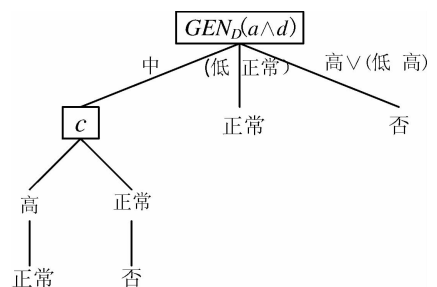


图 4 基于粗糙集的 ID3 改进算法生成的决策树

表 1 变压器绝缘油色谱分析信息系统数据

编号	H ₂	条件属性 T		CH ₄	结果 D
		CO	CO ₂		
1	中	高	高	高	正常
2	中	高	高	正常	正常
3	高	高	高	高	否
4	低	中	高	高	否
5	低	低	正常	高	否
6	低	低	正常	正常	正常
7	高	低	正常	正常	否
8	中	中	高	高	正常
9	中	低	正常	高	否
10	低	中	正常	高	否
11	中	中	正常	正常	否
12	高	中	高	正常	否
13	高	高	正常	高	否
14	低	中	高	正常	正常

新算法以 $GEN_D(Q)$ 作为结点属性^[9], 根据相对泛化的结果把信息系统分成若干子集, 不同子集应用类似的方法导出最终的多变量决策树. 这 2 种算法得到的决策树都能进行正确的分类. 通过比较可知, 由改进的 ID3 算法得到的树复杂度^[10] 较小, 得到的结果更简单, 这在处理属性较多、数量较大的信息系统时具有很大的优势, 即使在不存在相对核的情况下也能够得到与传统 ID3 算法一致的结果. 由于利用了属性之间的依赖关系, 运用相对核和相对泛化实现的决策树可以有效减少在一条路径上重复检验某一属性. 不过, 可以看出新算法明显增加了算法步骤.

通过实验仿真 ID3 和基于粗糙集的 ID3 改进算法模型分别对输入数据进行处理, 从由输入到输出消耗的时间, 以及对检验样本判断的准确率 2 个方面对其进行比较. 仿真环境: Matlab 7.0; Windows XP 操作系统. 以电力公司提供的变压器绝缘油色谱分析中的 600 组数据作为研究对象进行对比试验, 其中 400 组数据作为测试样本, 剩余的 200 组数据作为检验样本.

1) 生成决策树所消耗的时间: ID3 算法得到结果消耗的时间为 41 ms, 用时较短, 适合大数据分析; 本文提出的 ID3 改进算法由于其运算量较大, 生成决策树所消耗时间为 66 ms, 不如 ID3 算法快捷.

2) 对检验样本进行判断的准确率: ID3 算法得到判断结果准确率为 0.90, 低于改进算法的准确率 0.96.

综上所述, 基于粗糙集的 ID3 改进算法由于增加了相对核的计算、相对泛化的处理等步骤, 其运算量在 ID3 算法上有所增加, 尤其对样本进行分析处理的时间相对较长. 尽管如此, 由其生成的决策树所含的结点较少, 最终生成的决策规则准确度高, 在判断决策系统对结果精度要求较高的情况下, 数据分析处理时间在 ms 级上有所增加也是可以接受的.

5 结论

本文提出了一种基于粗糙集 ID3 改进算法, 利用粗糙集中属性依赖的特性, 选择信息系统中条件属性相对决策属性的核属性作为多变量结点属性, 使用相对泛化的概念辅助分枝过程, 进而生成多变量决策树. 通过实例验证该决策树生成的规则不仅能够对样本数据进行正确的分类, 也降低了生成树的复杂性, 通过利用相对泛化的概念避免了一条路径上对某一属性的重复检验, 提高了生成树的效率. 通过一些启发式算法寻求更优的结点属性选择方法是下一步的研究方向.

参考文献:

- [1] 徐晓, 翟敬梅, 刘海涛. 制造决策的知识融合粗糙集模型[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(8): 36.
- [2] 黄爱辉, 陈湘涛. 决策树 ID3 算法的改进[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(6): 109.
- [3] 朱颖东, 钟勇. ID3 算法的优化[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 9.
- [4] 费洪晓, 胡琳. 一种粗糙集-决策树结合的入侵检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2012(22): 124.
- [5] 戴小廷, 陈荣思, 肖冰. 基于信息熵的决策树挖掘算法在智能电力营销中的应用[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2012, 27(3): 49.
- [6] 苗夺谦, 王珏. 基于粗糙集的多变量决策树构造方法[J]. 软件学报, 1997(6): 425.
- [7] 王飞, 王卓, 曾姚. 基于变精度粗糙集的决策树构造改进算法[J]. 计算机与数字工程, 2013(3): 337.
- [8] 翟俊海, 翟梦尧, 李胜杰. 基于相容粗糙集技术的连续值属性决策树归纳[J]. 计算机科学, 2012(11): 183.
- [9] 王永梅, 胡学钢. 决策树中 ID3 算法的研究[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2011(3): 71.
- [10] 卢铮松. 研究生奖学金的决策树分类数据挖掘研究[J]. 计算机工程与应用, 2012(26): 139.

基于 HEVC 的三维视频编码关键技术述评

张秋闻, 黄新彭, 甘勇

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:综述了基于高效率视频编码 HEVC (high efficiency video coding) 标准的两种扩展, 即 MV-HEVC (high efficiency video coding based multiview) 和 3D-HEVC (high efficiency video coding based 3D video coding) 的工作原理及其编码工具, 分析了 3D-HEVC 模型的特点、编码模块与方法, 并将 3D-HEVC 与 MV-HEVC 进行了性能对比。总结发现, 由于 3D-HEVC 采用纹理视频加深度格式来合成虚拟视点, 从而降低了大量的编码码率, 可方便应用于 3D 电视、自由立体视点电视和 3D 数字电影等多种三维体验中。随着智能移动设备的发展, 手持终端采用 3D-HEVC 支持多视点 3D 视频将会成为未来的研究趋势。

关键词: 三维视频; 高效率视频编码; 压缩

中图分类号: TN919.81 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.012

Review of key technology of 3D video coding based on HEVC

ZHANG Qiu-wen, HUANG Xin-peng, GAN Yong

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

Abstract: The operating principle and coding tools of two kinds of extension of HEVC (high efficiency video coding) standards including MV-HEVC (high efficiency video coding based multiview) and 3D-HEVC (high efficiency video coding based 3D video coding) were reviewed. The feature, coding modules and method of 3D-HEVC model were analyzed, and the performances between 3D-HEVC and MV-HEVC were compared. The conclusion showed that 3D-HEVC synthesized virtual view with the format of texture video plus depth, thus its bit rates would be reduced notably, so 3D-HEVC would be applied to many kinds of 3D experience like 3D TV, free viewpoint video and 3D digital movie. With the development of smart mobile devices, handheld terminal using 3D-HEVC to support multiview 3D video would become the research tendency in the future.

Key words: 3D video; high efficiency video coding (HEVC); compression

0 引言

2013年, 第一代高效率视频编码(HEVC)标准

完成, 且被批准称为 ITU-T H.265 标准及 ISO/IEC 23008-2^[1]。随后, 相关的国际标准化委员会又将工作重点转移到了其重要性能的扩展开发上。尽管

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61302118, 61401404); 河南省教育厅科技攻关重点项目(14A520034); 郑州市科技计划项目(141PPTGG360); 郑州轻工业学院博士基金项目(2013BSJJ047)

作者简介: 张秋闻(1982—), 男, 河南省禹州市人, 郑州轻工业学院讲师, 博士, 主要研究方向为三维视频编码。

第一代 HEVC 标准涉及许多领域,但是其中一些关键技术还没有得到完全开发,未来开发人员将会专注于对 HEVC 最核心技术的研发。

HEVC 标准委员会由 ITU - T 的视频编码专家组 (VCEG) 和 ISO/IEC 的运动图片专家组 (MPEG) 合作组成. HEVC 的大部分高层语法都是从 H. 264/MPEG - 4 高级视频编码 (AVC) 标准中保留并延续下来的,且其参数集中包含了为视频流中的图片解码的信息. 该参数集提供了强大的数据传送机制,传送的数据只有在解码过程中通过解析顶层头文件才能得到,而且该机制确保了与之匹配的“带外”数据可以被反复传送. 其中每一条语法都被载入一个逻辑数据包中,该数据包被称为网络抽象层 (NAL) 单元. 根据一个仅有 2 个字节的 NAL 单元的头文件,能很轻易地判断出相关负载数据的传送目的地,这些数据就包括了为随机访问图片解码的参数集。

第一代 HEVC 的高层语法在兼容性方面具有可扩展的能力,尤其是传统解码器在对部分比特流进行解码方面具有可扩展性. 为此,高级视频编码定义了视频参数集 (VPS) 用于解码,除此之外,还应用了序列参数集 (SPS) 和图片参数集 (PPS). 从某种程度上讲,NAL 单元概念的提出,可以更灵活地实现随机访问、trick play 和部分序列访问. HEVC 中其余的 NAL 单元类型支持对视频系统的各种随机访问行为。

HEVC 的视频编码层采用的是基于分块的混合编码方法 (帧间预测和 2D 转换编码混合),且该方法可以用在自 H. 261 以来的所有视频压缩标准中. HEVC 比特流的混合编码器的框图如图 1 所示。

基于 HEVC 标准的 3D 视频扩展能够实现立体

和多视点的成像,其中深度图加视频的多视点技术是较新的 3D 扩展技术. 为了研究更多的 3D 视频项目,尤其是基于 HEVC 标准的 3D 视频扩展,HEVC 标准委员会在 2012 年 7 月组成了 3D 视频联合组 (JCT-3V).

3D 多视点视频格式通过特殊的 3D 显示系统,就能够将真实场景的深度感表现出来,且该视频系统预计将以合适的价格进入消费市场^[2]. 对于传统的立体视频格式来说,观看者需要佩戴特殊的眼镜才能感受到立体效果,而自由立体视频格式的显示器却能够达到裸眼 3D 的效果. 自由立体视频格式采用的是基于深度图合成的技术,该技术的亮点在于可利用编码表现出大部分高质量深度图^[3-5].

为了支持这些功能,JCT-3V 小组正在研发对立体视频和多视点视频高效压缩的 HEVC 功能扩展,同时也在研发绘制高级 3D 功能的深度图^[6-8]. 本文在概述基于 HEVC 标准的多视点扩展的基础上,对正在发展中的 3D-HEVC 进行深入讨论,并对这两种扩展进行性能对比,以期三维视频编码技术的发展提供参考和借鉴。

1 基于 HEVC 的多视点扩展 (MV-HEVC)

MV-HEVC 是 HEVC 扩展中最简单的扩展. 多视点扩展的设计原则与之前高级视频编码框架中多视点视频编码的设计原则相同^[9-10]. 2014 年将完成 MV-HEVC 的设计,且其草案在文献[11]中可以找到. 与 MVC 设计框架一样,MV-HEVC 的设计框架可以实现视点间估计,因此,同一时刻其他视点的图像将被用于预测当前视点的图像,而且 MV-HEVC 的设计框架可以兼容 HEVC 的单视点编码。

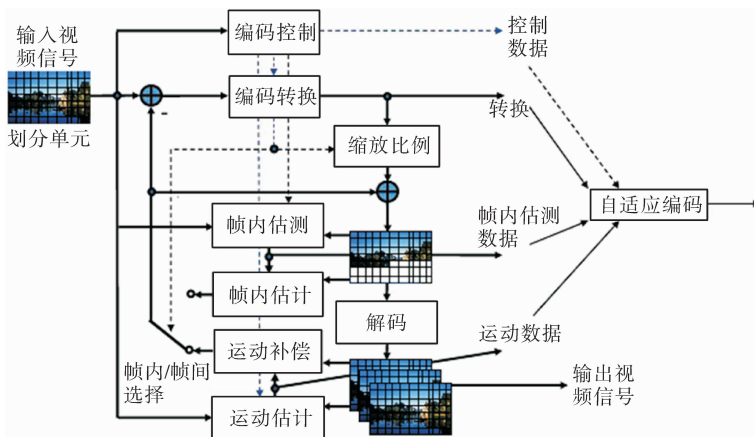


图 1 HEVC 比特流的混合编码器的框图

预测结构如图 2 所示,视点 0 表示基本视点,通过同一时刻的基本视点的图像可以预测出非基本视点(视点 1 或视点 2)中的一帧图像。I 帧图像只能使用帧内预测,P 帧图像可以使用单方向帧内预测,而 B 帧或 b 帧图像则可以使用双向帧内预测。

对视点间图像的估计,可通过灵活的基于 HEVC 的参考图像管理功能实现。从本质上讲,就是将其余视点的解码图像嵌入至当前视点的参考图像列表中,用于预测处理。因此,参考图像管理包含了当前视点的时域参考图像,可以用于相邻视点预测当前图像与视点间参考图像。对高层语法基本不做改变或只做小范围改动,即可完成这样基于分块的解码模块的扩展设计。由于预测是自适应的,所以应该根据失真率代价来判断是选择使用时域参考图像预测器,还是选择使用视点间参考图像预测器(以及双向预测器或者权重预测器)^[12-15]。

用这种预测结构取得了比使用所谓的兼容框架结构更高效的立体压缩效果,兼容框架结构将不同视点的图像嵌入单个视点框架(左或右视点,上或下视点),但是无法消除视点间冗余。多视点扩展方案的后向兼容指的是单个视点的子比特流可从 3D 视频比特流中提取出来,并用 HEVC 解码器对其进行解码。

为了实现更高效地压缩,还要继续使用 HEVC 对单个视点视频编码保持向后兼容,构成可选择的编码结构,可以利用改进后的基于分块编码工具的优势进行编码。这样的结构及上一节提到的类似结构,都能够完全兼容第一代 HEVC 的基本视点,并抽取出单个视点视频,这样,非基本视点就只能应用其他的编码。由于同一物体投射到不同视点有着相似的运动特征和纹理特点,因此如果能够发现视点间运动数据与残差数据之间的关系,就能够节省大量的码率开销^[16-19]。

JCT-3V 已经设计了参考模型,同时也起草了

3D 扩展的工作草案详述,并命名为 3D-HEVC,目的是实现使用高级工具对多视点编码进行研发^[20-21]。下面将从更多细节方面来描述一些常用的 MV-HEVC 工具。

1.1 基于相邻块视差矢量(NBDV)获取当前块视差矢量

基于 NBDV 获取当前块视差矢量的基本思想是利用时空域上相邻块的有效视差运动矢量推导出当前块的视差矢量。

为了识别不同视点间相关块的关系,在 MV-HEVC 中基于 NBDV 进行矢量识别,是按照类似高级位移矢量预测(AMVP)模式的方法和 HEVC 的合并(MERGE)模式的方法设计的。该技术的主要优点是用于视点间估计的视差矢量可以被直接推导出来,而不需要额外的比特开销,而且该视差矢量独立于相对应的深度图。当相机参数有效时,视差矢量也可以通过解码深度图来得到^[23]。

空间相邻块在 AMVP 模式和 MERGE 模式中一样,有着相同的访问顺序,即 A_1, B_1, B_0, A_0 和 B_2 ,如图 3 所示。但是由于这两种模式都不能用于空域上的视点间参考,所以时域上的基于 NBDV 是可以被检测到的^[24-25]。一旦 NBDV 被识别,那么 NBDV 的搜索过程将被终止,而且推导出来的视差矢量将被定义为识别出来的视差矢量。

1.2 视点间运动估计

视点间的运动信息具有很高的相关度,而且比特流中包含了这些信息,因而良好的预测器通常可由一个视点估计出另一个视点,大大提高编码效率。为了实现这类估计,NBDV 将被用于建立每个视点中块之间的联系,如图 4 所示。由图 4 可知,可以根据时间 1 中的视点 0 所对应的块的位置,以及基于这些块之间的视差矢量推导出视点 1 的运动矢量,推导过程类似 NBDV 的推导过程。

3D-AVC 和 MV-HEVC 中都有视点间运动估计

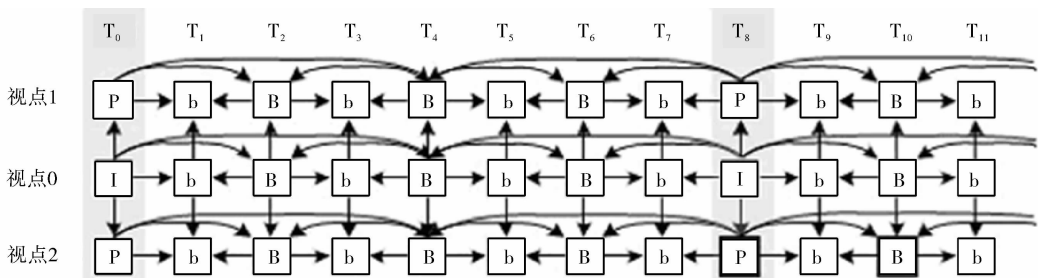


图 2 预测结构

的概念,但是其设计不一样. 在 3D-AVC 中,视点间运动估计是用一种新的预测模式实现的. 而在 MV-HEVC 中,视点间运动估计是通过利用 MERGE 和 AMVP 模式中的语法和解码过程实现的,且该实现过程已经引入到 HEVC 标准中.

1.3 视点间残差估计

高级残差估计 (ARP) 是利用两个视点间的运动补偿残差信号的相关性进行估计^[26], 可以提高残差估计的精确度. ARP 中的运动矢量是连接当前块与参考块之间的一条有方向的线段, 所以当前块的残差估计和残差信号之间的相似度是非常高的, 这样 ARP 的其余矢量便可被略去, 从而达到节省代码的目的.

ARP 的估计结构如图 5 所示, 非基本视点中的块 D_C 使用运动矢量 V_D 实现运动补偿. 首先, 用

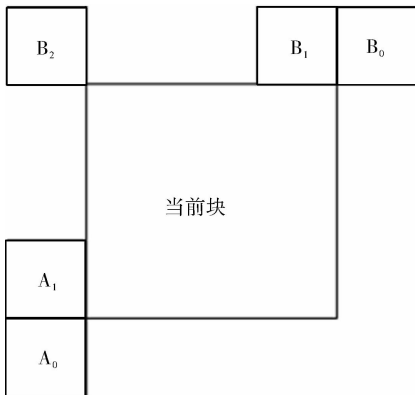


图 3 空间相邻块访问 NBDV

NBDV 识别出视点间参考块 B_C , 再在基本视点中的重建块 B_C 和对应的重建块 B_i 之间进行运动补偿 (用 V_D 进行补偿), 接着在预测信号中 (来自块 D_i 的运动补偿) 添加预测残差信号. 在使用相同的运动矢量 V_D 的情况下, 当前块的残差信号可以被更加准确地估计出来. 一旦使用了 ARP, 残差估计就可以赋予 0.5 或 1 的加权.

基本视点的运动补偿增加了内存访问量和计算量, 所以 JCT-3V 研发了一些可使扩展设计更加实用的方法^[26], 但这些方法都不同程度地以牺牲编码效率作为代价. 例如被同时用于参考块和当前块的运动补偿的双线性滤波器.

1.4 光照补偿

如果相机对色彩传递或光照效果不进行校准, 那么对于不同相机捕捉的同一场景, 则无法进行预

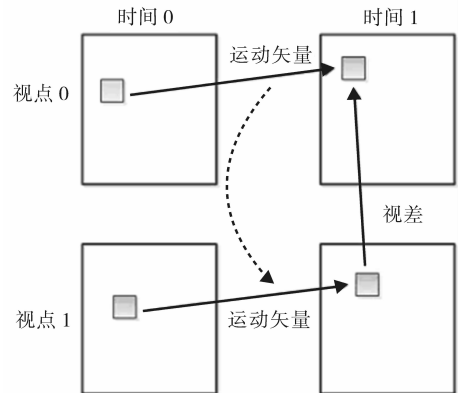


图 4 视点间运动估计

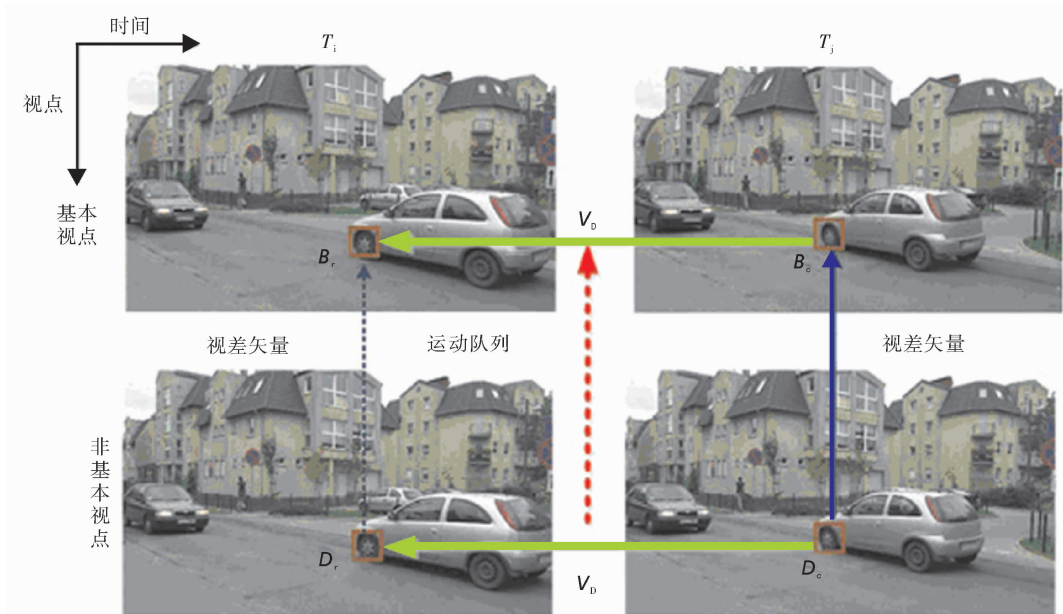


图 5 ARP 的估计结构

测处理.为了解决这个问题,研发人员开发了一项名叫光照补偿的技术,用来提高对视点间参考图像块进行预测编码的效率^[27].而这项技术只能应用于对视点间参考图像的块预测.

然而,对于立体自由显示器的 3D 应用,如果使用 MV-HEVC 编码,则需要 20 个甚至更多的视点数据.由于数据量庞大,不但给网络带来了巨大的负载压力,也对解码端的能力提出了很高的要求.因此,JCT-3V 将深度信息(视差信息)融合了多视点视频编码,命名为 3D-HEVC,这样就只需要两三个视点的信息便可表示出 3D 内容,从而降低了需要传送的数据量,所以 3D-HEVC 将会成为未来 3D 应用的发展趋势^[28].

2 正在发展中的基于深度信息的 HEVC 扩展(3D-HEVC)

为了对“视频加深度”格式的 3D 视频数据进行高效的压缩,研究人员开发了许多编码工具,并针对各个深度分量之间的独立性进行研究.如果某一个视频分量可以通过传统 HEVC 进行独立编码,那么该视频分量就需要兼容现有的 2D 视频业务.3D 视频的各个分量,如基本视点的视频分量,可以通过传统的 HEVC 编码器编码,而基本视点的深度分量,则可采用改进了的编码工具进行编码.这样,3D 视频编码可以从一系列传统 2D 编码工具和改进了的编码工具中选择最佳编码工具进行编码.

深度图具有纹理单一、边缘锐利等特点.由于错误边缘重建可能会导致严重的失真,且会影响人工视点合成,所以保证深度图中边缘的有效性对高质量虚拟视点合成非常重要.深度图的另一个特点是其边缘信息(即场景中的深度的间断点)的一部分可以从对应的纹理分量中提取出来.

JCT-3V 已经计划制定出两个重要编码模块:基于分区的帧内深度编码模块和运动参数继承模块.另外,由于深度信息具有锐利边缘的特点,所以仅使

用第一代 HEVC 中运动补偿的插值滤波器不能对保护深度图边缘起到效果.因此,运动补偿将整像素应用于深度图编码中,可以通过闭环滤波器(包括区块滤波器(DBF)和采样点自适应偏移(SAO)回路滤波器)对深度图边缘进行优化.此外,已经设计出来的虚拟视点合成估计可以利用深度信息进行纹理编码.

2.1 基于分区的帧内深度编码

为了更好地表达深度信息,现有的 3D-HEVC 中已经引入了许多特制的深度编码工具,这些工具都可以将深度块分割成非矩形的小块.这种基于深度图分割的编码模式包括深度模型模式(DMM)^[29]、区域边界循环编码模式(RBC)^[30]及简单深度编码模式(SDC)^[31].在这些模式中,每一个深度预测单元都可以被分成两个部分,其每一部分都可以用一个定值来表示,深度预测单元分区模式如图 6 所示.每一部分的深度值都是通过相邻参考像素预测出来的,而且残差值可以进一步通过编码来补偿预测过程中出现的误差.

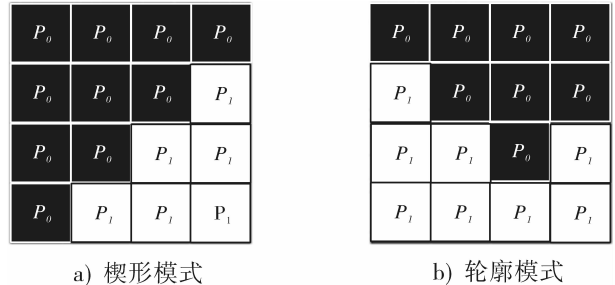


图 6 深度预测单元分区模式

尽管 DMM 和 RBC 都会将一个深度预测单元分割成两个部分,但是它们所表征的分区模式不同.DMM 中应用了两种类型的分区模式,包括楔形模式和轮廓模式.如图 6 所示,楔形模式是用一条直线来分割深度预测单元.与楔形模式不同,轮廓模式用一系列方位链码来明确地表示出分割部分,方位链

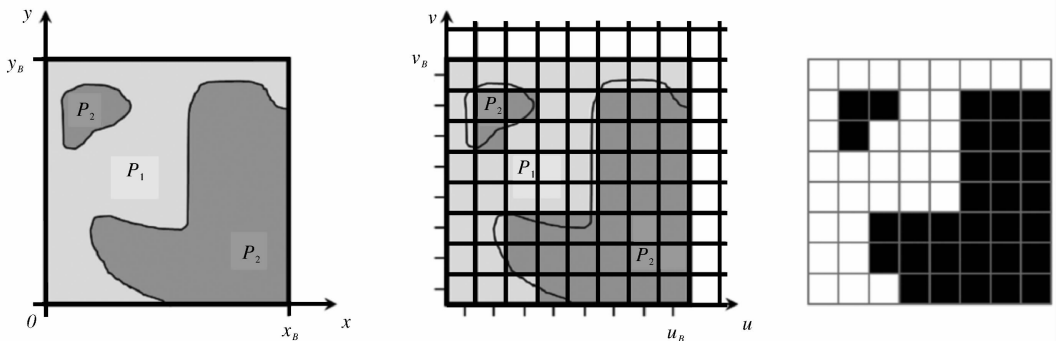


图 7 深度块的轮廓分割

码是把 1 个像素与其周围的 8 个方位的像素连接起来,赋予 0 到 7 的值,所以其分区边缘是非直线的.图 7 为深度块的轮廓分割.如图 7 所示,左边一幅图表示连续的深度区域,中间一幅图表示对其进行离散化,右边一幅图表示对应的分割情况,其中,深度块的轮廓(分区边缘)取决于纹理图中的同位置块.

2.2 运动参数继承

在 3D-HEVC 中,深度信息的运动参数继承是通过将 MERGE 模式候选者添加到当前深度块的 MERGE 模式列表中实现的,其中也包括第一代 HEVC 里面 MERGE 模式中的时空候选者,而其余的候选者则由纹理图中同位置块的运动信息生成^[32].

2.3 视点合成估计

视点合成估计 VSP(view synthesis prediction)是一种减少视点间冗余的有效方法,它利用深度信息把参考视点的纹理数据应用到当前视点中,从而实现当前视点的预测^[33].

在虚拟视点合成估计的编码环境下,基于深度图合成技术还不成熟,由于在对当前图像进行编解码之前,需要先生成一整个合成图,并将其存放在参考图的缓冲区内,这将提高解码复杂度.基于分块的向后虚拟视点合成估计(BVSP)框架已经引入了 3D-HEVC 中,其中,当前块的深度信息是由视点间参考图像的对应像素点推算出来的^[34-35].因为纹理编码是在深度编码之前进行的,所以当前块的深度信息可以用之前所提到的 NBDV 估计出来.此时,当前块有着与相邻块相同的深度信息(以及相同的视点间位移矢量).该深度块的最佳深度信息被转换成了视差矢量,该视差矢量可以被用于运动继承及执行向后虚拟视点合成估计.

由于拍摄角度存在差异,多个摄像机在拍摄同一场景时,生成的视点之间存在几何失真.在现有的 3D-HEVC 设计中,虚拟视点合成估计是针对补偿几何失真所提出的,其主要思想是利用深度信息或者视差信息合成一个虚拟的视图用作当前编码图像的参考图像,并要求生成的虚拟图像比视点间参考图像更接近于当前编码图像,从而提高多视点编码的编码效率.

3 性能比较

为了评估不同结构和不同编码技术的压缩效率,需要使用参考软件完成仿真,同时标准化组织也给出了实验方法^[36-37].实验分为两组,第 1 组实验评估了单视点及多视点纹理视频(不含深度图)的压缩效率,而第 2 组实验评估了多视点加深度图

的编码效率.

第 1 组仿真实验是 MV-HEVC 与 HEVC 联播编码的性能比较,其中 MV-HEVC 与 HEVC 联播编码相比,增加了视点间预测算法,而它们都不包含深度图信息.表 1 为 MV-HEVC 较联播编码的码率节省结果.由表 1 可见,MV-HEVC 的平均码率相对于 HEVC 联播编码而言,在双视点的情况下可节省 28%,在三视点的情况下可节省 38%,由此论证了 MV-HEVC 编码视点间预测的效率要高于 HEVC 联播编码.从表 1 中还可以看出,对于单视点的编码((仅有)视点 1 或(仅有)视点 2),MV-HEVC 相比于 HEVC 联播编码,同样有着高于 60% 的码率节省.对于多视点视频来讲,由于 MV-HEVC 的编码复杂度比 HEVC 联播编码的编码复杂度低,因而,更多的是采用 MV-HEVC 的编码方案.

表 1 MV-HEVC 较联播编码的码率节省结果 %

序列	(仅有)视点 1	(仅有)视点 2	双视点	三视点
Balloons	53.9	49.7	23.5	31.5
Kendo	52.5	47.2	23.3	30.4
Newspaper	56.4	54.4	23.3	33.2
GT_Fly	82.0	81.3	38.7	52.4
Poznan_Hall2	53.5	53.9	23.3	32.8
Poznan_Street	69.7	69.4	39.7	41.4
Undo_Dancer	74.5	76.0	34.0	47.3
1 024 × 768	54.2	50.4	23.4	31.7
1 920 × 1 088	69.9	70.2	31.4	43.5
平均	63.2	61.7	28.0	38.4

第 2 组仿真实验是 3D-HEVC 标准与 MV-HEVC 和 HEVC 联播编码的性能比较.其中,3D-HEVC 标准增加了一些新的编码工具,像基于深度图像绘制技术,利用该技术可以产生虚拟视点,然后进行视点合成优化 VSO(view synthesis optimization),从而完成解码端的视点合成.第 1 组实验只是对纹理视频编码的压缩效率进行评估,而第 2 组实验由于加入了深度图信息,则需要考虑深度图质量和合成视点的编码质量.表 2 为三视点情况下 3D-HEVC 较联播编码和 MV-HEVC 的码率节省结果.由表 2 可见,即使 3D-HEVC 标准不采用 VSO,相对于所有纹理图像和深度图像都独立编码的 HEVC 联播编码,也可以节省 41% 的平均码率,而相对于 MV-HEVC 编码标准可以节省平均 15.5% 的码率.通过这两个对比,可以猜测性地认为,在深度图编码方面,MV-HEVC 标准的编码效率要高于 HEVC 联播编码效率,然而,当 3D-HEVC 标准进行

VSO 时,与 MV-HEVC 相比,可以节省平均 30.6% 的码率(几乎是在不采用 VSO 情况下的两倍).同时,解码运行时间则是评估 3D-HEVC 编码复杂度的一个标准.由表 2 中的解码时间可见,3D-HEVC 相对于联播编码与 MV-HEVC 参考模型的运行时间分别平均增长了 11% 和 18%,虽然有所增长,但是与其降低的码率相比,这样的时间增加是在允许范围内的.

表 2 三视点情况下 3D-HEVC 较联播编码和 MV-HEVC 的码率节省结果 %

序列	(关闭 VSO) 3D-HEVC 比联播编码	(关闭 VSO) 3D-HEVC 比 MV-HEVC	(打开 VSO) 3D-HEVC 比 MV-HEVC
Balloons	34.2	12.6	25.1
Kendo	31.3	12.5	30.9
Newspaper	34.7	9.8	29.8
GT_Fly	54.1	21.0	32.9
Poznan_Hall2	36.6	14.3	30.4
Poznan_Street	39.6	9.3	19.5
Undo_Dancer	56.8	29.0	45.5
1 024 × 768	33.4	11.6	28.6
1 920 × 1 088	46.8	18.4	32.1
平均	41.0	15.5	30.6
解码时间	111	118	118

由于 3D-HEVC 是视频加深度格式,且使用了虚拟视点合成技术,所以相对于 MV-HEVC,省去了大量的视点信息,从而可以实现节省码率.这样,在同样的处理性能和网络环境下,对同一视频序列进行编码和传输时,3D-HEVC 的效率要明显高于 MV-HEVC 的效率,但是提取深度信息方面,如何快速去除块效应是一项 3D-HEVC 也未攻破的技术难题,还需要做进一步深入研究.

4 结语

综述了当前较流行的 HEVC 标准的多视点扩展 MV-HEVC,以及基于深度信息的 MV-HEVC 即 3D-HEVC.虽然 3D 视频在影院里很受欢迎,但是由于 3D 视频较高的编码代价,导致其在家庭娱乐和消费类电子产品中的潜能未能得到充分挖掘开发.随着显示技术的革新,可以达到裸眼立体效果的 3D-HEVC 编码技术,由于其具有低编码代价的特点,3D-HEVC 更适于 3D 电视、自由立体视点电视和 3D 数字电影等多种三维体验中.随着智能移动设备的发展,手机互联网的规模日益壮大,手持终端采用 3D-HEVC 支持多视点 3D 视频将会成为未来的

研究趋势.

参考文献:

- [1] Zhang Q, An P, Zhang Y, et al. Low complexity multiview video plus depth coding[J]. IEEE Transactions Consumer Electronic, 2011, 57(4):1857.
- [2] Chen Y, Vetro A. Next-generation 3D formats with depth map support[J]. IEEE MultiMedia, 2014, 21(2):90.
- [3] Müller K, Schwarz H, Marpe D, et al. 3D high efficiency video coding for multi-view video and depth data[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 22(9):3366.
- [4] Zhang Q, Tian L, Huang L, et al. Rendering distortion estimation model for 3D high efficiency depth coding[J]. Math Probl Eng, 2014, 2014:1.
- [5] Ohm J, Sullivan G J, Schwarz H. Comparison of the coding efficiency of video coding standards—including high efficiency video coding (HEVC)[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12):1669.
- [6] Zhang Q, An P, Zhang Y, et al. Efficient depth map compression for view rendering in 3D video[J]. Imaging Sci J, 2013, 61(4):385-395.
- [7] Zhang Q, Li N, Wu Q. Fast mode decision for 3D-HEVC depth intracoding[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014:1.
- [8] Zhang Q, Li N, Gan Y. Effective early termination algorithm for depth map intra coding in 3D-HEVC[J]. Electron Lett, 2014, 50(14):994.
- [9] Chen Y, Wang Y K, Ugur K, et al. The emerging MVC standard for 3D video services[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2009, 2009:1.
- [10] Vetro A, Wiegand T, Sullivan G J. Overview of the stereo and multiview video coding extensions of the H. 264/AVC standard[J]. Proc IEEE, 2011, 99(4):626.
- [11] Tech G, Wegner K, Chen Y, et al. MVHEVC draft text 5 [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) Document JCT3V-E1004, Vienna: JCT-3V, 2013.
- [12] Shen L, Zhang Z. Content-adaptive motion estimation algorithm for coarse-grain SVC[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(5):2582.
- [13] Wang H, Sam K, Chi-Wah K. An efficient mode decision algorithm for H. 264/AVC encoding optimization[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2007, 9(4):882.
- [14] Liu Z, Shen L, Zhang Z. An efficient intermode decision algorithm based on motion homogeneity for H. 264/AVC[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video

- Technology, 2009, 19(1): 128.
- [15] Shen L, Liu Z, Zhang X, et al. An effective CU size decision method for HEVC encoders [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(2): 465.
- [16] Fang C, Chang Y, Chung W. Fast Intra Mode Decision for HEVC Based on Direction Energy Distribution [R]. Hsinchu: IEEE, 2013: 61 - 62.
- [17] Shen L, Liu Z, Zhang Z, et al. Fast inter mode decision using spatial property of motion field [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008, 10(6): 1208.
- [18] Shen L, Zhang Z, An P. Fast CU size decision and mode decision algorithm for HEVC intra coding [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2013, 59(1): 207.
- [19] Jongho K, Yoonsik C, Yong-Goo K. Fast coding unit size decision algorithm for intra coding in HEVC [R]. Las Vegas: IEEE, 2013: 637 - 638.
- [20] Tech G, Wegner K, Chen Y, et al. 3D-HEVC draft text 1 [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 5th Meeting Document JCT3V-E1001, Vienna: JCT-3V, 2013.
- [21] Zhang L, Tech G, Wegner K, et al. 3D-HEVC test model 5 [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 5th Meeting Document JCT3V-E1005, Vienna: JCT-3V, 2013.
- [22] Schwarz H, Bartnik C, Bosse S, et al. Description of 3D video technology proposal by fraunhofer HHI (HEVC Compatible; Configuration A) [Z]. ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 (MPEG) document m22570, [s. n.]: [s. n.], 2011.
- [23] Zhang L, Chen Y, Marta Karczewicz. Disparity vector based advanced inter-view prediction in 3D-HEVC [R]. Beijing: IEEE, 2013: 1632 - 1635.
- [24] Kang J, Chen Y, Zhang L, et al. 3D-CE5. h related: Improvements for disparity vector derivation [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 2nd Meeting Document JCT3VB0047, Shanghai: JCT-3V, 2012.
- [25] Sung J, Koo M, Yea S. 3D-CE5. h; Simplification of disparity vector derivation for HEVC-based 3D video coding [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 1st Meeting Document JCT3V-A0126, Stockholm: JCT-3V, 2012.
- [26] Zhang L, Chen Y, Li X, et al. CE4: Advanced residual prediction for multiview coding [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 4th Meeting Document JCT3V-D0117, Incheon: JCT-3V, 2013.
- [27] Liu H, Jung J, Sung J, et al. 3D-CE2. h: Results of illumination compensation for inter-view prediction [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 2nd Meeting Document JCT3VB0045, Shanghai: JCT-3V, 2012.
- [28] Gu Zhouye, Zheng Jianhua, Ling Nam, et al. Fast Depth Modeling Mode Selection for 3D HEVC Depth Intra Coding [R]. San Jose: IEEE, 2013: 1 - 4.
- [29] Müller K, Merkle P, Tech G, et al. 3D video coding with depth modeling modes and view synthesis optimization [R]. Hollywood: IEEE, 2012: 1 - 4.
- [30] Heo J, Son E, and Yea S. 3D-CE6. h: Region boundary chain coding for depth - map [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 1st Meeting Document JCT3V-A0070, Stockholm: JCT-3V, 2012.
- [31] Jäger F. 3D-CE6. h results on simplified depth coding with an optional depth lookup table [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 2nd Meeting Document JCT3V-B0036, Shanghai: JCT-3V, 2012.
- [32] Chen Y W, Lin J L, Huang Y W, et al. 3D-CE3. h results on removal of parsing dependency and picture buffers for motion parameter inheritance [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 3rd Meeting Document JCT3V-C0129, Geneva: JCT-3V, 2013.
- [33] Yea S, Vetro A. View synthesis prediction for multiview video coding [J]. Signal Processing: Image Communication, 2009, 24(1-2): 89.
- [34] Tian D, Zou F, Vetro A. CE1. h: Backward view synthesis prediction using neighbouring blocks [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 3rd Meeting Document JCT3V-C0152, Geneva: JCT-3V, 2013.
- [35] Tian D, Zou F, Vetro A. Backward View Synthesis Prediction for 3D-HEVC [R]. Melbourne: IEEE, 2013: 1729 - 1733.
- [36] Rusanovskyy D, Mueller K, Vetro A. Common test conditions of 3DV core experiments [C]//Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extensions (JCT-3V) 5th Meeting Document JCT3V-E1100, Vienna: JCT-3V, 2013.
- [37] Advanced Television Systems Committee (ATSC). 3D-TV Terrestrial Broadcasting, Part 2-SCHC Using Real-Time Delivery [Z]. Washington DC: [s. n.], 2012.

无人机航拍图像配准算法研究

史俊莉

(河南工业职业技术学院 建筑工程系, 河南 南阳 473000)

摘要:针对无人机航拍图像对尺度变化不明显的问题,在经典 SIFT 特征匹配算法的基础上,提出了一种改进的 CS-SIFT 特征匹配算法.该算法通过建立 S 层金字塔,达到降低多尺度空间和减少特征点数量的目的.在特征向量的匹配中,利用准欧氏距离替代常用欧氏距离,并通过极限几何约束,消除部分错误配准点对,进一步提高特征匹配效率. Matlab 仿真结果表明,改进后的算法具有较高的配准精度和较少的匹配时间,适用于对实时性要求较高的无人机航拍系统.

关键词:无人机航拍图像;CS-SIFT;尺度空间;准欧氏距离

中图分类号:TP751 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.013

Research on UAV aerial image registration algorithm

SHI Jun-li

(Department of Architectural Engineering, He'nan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China)

Abstract: Aiming at the problem that UAV aerial image was not obvious to scale change, an improved CS-SIFT feature matching algorithm was presented based on the classical feature matching algorithm of SIFT (scale invariant feature transform). The algorithm established S -layer pyramid to reduce the multi-scale space and the number of feature points. In the matching feature vectors, quasi-Euclidean distance substituted commonly used Euclidean distance and geometric constraints limited by eliminating part of the registration error points to further improve the efficiency of feature matching. The simulation results using Matlab language indicated that the improved algorithm had higher matching accuracy and needed less matching time and it was quite suitable for the UAV aerial system of high real-time demand.

Key words: UAV aerial image; CS-SIFT; scale-space; quasi-Euclidean distance

0 引言

无人机航拍图像能够准确、全面地提供地域动态观测数据,是多领域获得信息的重要手段之一^[1].理论上,利用无人机航拍图像进行图像匹配,能够达到对地侦察和目标精确定位等目的,但是在实际运用中,往往因为图像匹配处理速度慢而无法

达到目的.

图像特征点是指图像中具有鲜明特性并能把图像中的目标物体识别出来的点^[2].特征点的信息含量较高,可以对视觉处理提供足够的约束,其数目相对于图像像素点来说微不足道,这样就可以提高计算速度,使实时处理成为可能.在特征点的提取和匹配方法中,D. G. Lowe^[2]在2004年提出一种

收稿日期:2014-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(61271279)

作者简介:史俊莉(1984—),女,河南省南阳市人,河南工业职业技术学院助教,硕士,主要研究方向为大地测量学与测量工程.

基于尺度空间的尺度不变特征变换算法——SIFT (scale invariant feature transform) 算法,它具有对平移、旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,同时对噪声、视角变化、仿射变化也具有相当程度的鲁棒性的特点.但 SIFT 算法也有很多不足,其提取的特征点相对繁多、提取速度较慢、计算量大,不适合实时处理,尤其是在无人机实时处理系统中,大量的特征点及后续匹配会占用大量内存和时间开销.

无人机处于高空,其拍摄距离远大于地面的起伏变化,因而其匹配性能对起伏尺度的变化不敏感.本文对 SIFT 特征点提取算法进行改进,提出一种 CS-SIFT 算法,并在特征点匹配时运用准欧氏距离公式,以期进一步缩短图像配准时间.

1 SIFT 算法

1.1 特征点检测

首先,采用 SIFT 算法计算高斯金字塔图像,并对高斯金字塔图像进行处理得到高斯差分多尺度空间 DoG (difference-of-Gaussian),在 DoG 尺度空间内求得图像局部极值点;然后通过子像元插值的方法对这些极值点进一步精确定位,并采用高斯差分图像的 Hessian 矩阵剔除初始特征点中的边缘点和对比度较低的点,从而得到图像的精确特征点. SIFT 算法特征提取步骤如下^[3-5].

1) 生成尺度空间. 首先将航拍图像 $I(x, y)$ 的尺度空间用函数 $L(x, y, \sigma)$ 表示:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$$

其中, * 表示卷积运算,高斯尺度函数 $G(x, y, \sigma) =$

$$\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}.$$

在实际应用中,先是对相邻的两个高斯尺度空间图像做减处理,获得与 DoG 的相应值函数 $D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma)$,然后计算高斯差分图像间的局部极值,获取高斯空间域上的具体特征点坐标.

2) 检测极值点. 把高斯空间各层图像中所有像素点与其相邻点比较,计算各点在图像域和尺度域之间的精确大小. 为保证被检测点在二维空间和尺度空间都可以寻找到极值点,像素点要与其同层相

邻的 8 个点、上下层对应的 9×2 个点,总计 26 个点比较.

3) 精确定位极值点. 利用候选极值点处的拟合函数 $D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X$ 求导,得极值点

$$X = - \left(\frac{\partial^2 D}{\partial X^2} \right)^{-1} \frac{\partial D}{\partial X} \text{ 与对应极值 } D(X) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial X} X.$$

通过不断修正 X , 获取局部最优点,剔除不稳定且对比度较低的点. D. G. Lowe 在文献[6] 中描述,如果极值点不大于 0.04, 那么就可以抛弃它(其中像素灰度值范围[0,1]).

去除边缘点时获取特征点的 Hessian 矩阵,令 $Tr(H)$ 和 $Det(H)$ 分别为其特征值的和与积, γ 为其特征值的比. 为了检测主曲率是否小于 γ , 只需检测 $\frac{Tr(H)^2}{Det(H)} < \frac{(\gamma + 1)^2}{\gamma}$ 是否成立,一般 γ 取 6 ~ 10.

1.2 SIFT 特征描述符的生成

得到特征点之后,需要对其进行方向参数计算. 建立关键点方向参数的主要目的是,当进行匹配时能够将图像旋转到主方向,以保持其旋转不变性. (x, y) 坐标的梯度值和主方向描述分别为①式和②式*.

为了获取主方向,用直方图来计算像素的梯度方向,并在以特征点为中心的领域窗口内进行采样,读取直方图的极值.

为所有关键点确立特定的描述符,可以利用特定向量作为描述子,避免它因外界条件(如视角、仿射等)的不同而变化. SIFT 描述子是特征点领域尺度空间梯度统计结果的一种描述,把关键点领域图像区域分块,然后生成块内梯度直方图,计算拥有独特性的向量,此向量是特定区域图像信息的一种具体化,具有不变性.

2 SIFT 算法的改进

在基于 SIFT 算法的特征检测中,高斯滤波特性能够使特征点避免噪声影响,高斯差分则使特征点免遭亮度差异影响. 对于无人机航拍图像而言,实时获取的航拍图像与预存图像之间的尺度变换不大,所以只需关注特征点的配准,图像尺度可忽略,

①式 $m(x, y) = \sqrt{(L(x + 1, y) - L(x - 1, y))^2 + (L(x, y + 1) - L(x, y - 1))^2}$

②式 $\theta(x, y) = \arctan((L(x, y + 1) - L(x, y - 1)) / (L(x + 1, y) - L(x - 1, y)))$

故 SIFT 算法不需要搜索整个尺度空间. 基于此, 笔者提出了 CS-SIFT 算法, 旨在降低尺度空间复杂度和减少特征点的数量^[7].

2.1 CS-SIFT 算法

1) 降低空间复杂度. 首先需要建立 S 层金字塔, 将图像金字塔分为 S 组, 且第一组有 s 层, 其余 $S-1$ 组仅有 1 层图像, 第一组图像采用与经典 SIFT 算法同样的高斯差分算法, 生成 $s-1$ 层与原图像同样大小的高斯差分图像, 其他组图像是由上组图像的 $1/2$ 采样得到, 上组图像比下组图像尺寸小, 一般上组图像行和列的大小是相邻下层图像的 $2^{-1/s}$.

2) 极值点检测. 由于只有第一组构造了高斯差分图像, 其他组仅有 1 幅图像, 所以第一组采用经典 SIFT 算法极值检测方法, 其他组仅对每个像素与周围 8 邻域的像素进行比较, 判断其是否为极值点. 如果是极值点, 计算这个像素点 8 邻域的像素平均值, 假如该平均值也是另外一组的 16 邻域的极值点, 则采样点设为 CS-SIFT 的极值点^[6].

CS-SIFT 算法后面的步骤与 SIFT 算法类似. 改进算法只降采样 1 组图像, 在这组图像上进行关键点计算, 就可以保证足够多的特征数量.

2.2 特征点匹配

虽然减少了特征点的数量, 但特征点向量高达 128 维, 其配准时的计算量对无人机实时处理造成不利影响, 本文在特征点的匹配中, 利用准欧氏距离^[8]代替常用的欧氏距离, 并通过极限几何约束消除部分错误配准点对, 以进一步缩短配准时间, 提高算法的配准效率.

SIFT 算法图像配准一般采用欧氏距离作为特征的相似性度量, 它是多维空间中两点之间的真实距离. 在二维情况下欧氏距离的定义为

$$L_0 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3)$$

而准欧氏距离是按照水平、垂直和对角线分段估计全部的欧氏距离, 即

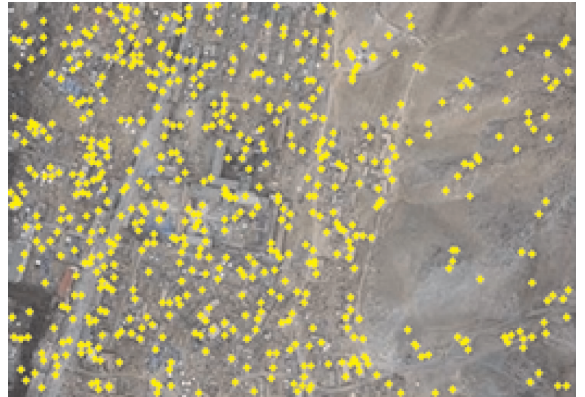
$$L_q = |x_1 - x_2| + (\sqrt{2} - 1) |y_1 - y_2| \quad (4)$$

其中, 式 (4) 中 L_q 的计算量比式 (3) 中 L_0 小得多, 但是, 如果直接使用准欧氏距离替代欧氏距离进行计算, 则获取的值偏小. 若将 L_q 进行线性处理后代替 L_0 , 既可以确保计算量小, 又能使最终计算的偏差减少. 本文中用 αL_q 代替 L_0 , 即 $L_0 = \alpha L_q$. 若图像中生成的 128 维 CS-SIFT 特征点有 K 个, 则乘法计算量较少为 $127 K$. 算出两点距离最短的特征向量就

是图像配准的配准点对, 所以用这个方法可以明显缩短运算时间, 提高算法的配准效率.

3 实验结果及分析

一幅无人机航拍图像分别采用 SIFT 算法与改进后的 CS-SIFT 算法进行特征点检测, 结果如图 1 所示. 检测到的特征点太多, 会严重影响处理速度, 但太少也不利于精确配准. 由图 1a) 可见, SIFT 算法检测到非常多的极值点. 由图 1b) 可见, CS-SIFT 算法得到的特征点明确、稳定, 并且数量适中.



a) SIFT 算法的检测结果



b) CS-SIFT 算法的检测结果

图 1 两种算法的特征点检测结果之比较

本实验重点是要降低 SIFT 算法的计算时间, 所以时间特征是很重要的观察量, 但同时也使用配准率和误配准率来评价改进后特征描述符的性能. 在进行匹配的过程中, 对算法中的 α 值不断地赋值、不断地测试, 得到其最佳 α 值为 $1.001 \sim 1.100$.

通过在 Matlab 上反复进行 100 次以上实验, 计算图像配准时间、误配准率的对比见表 1, 其中, 配准时间表示对前 100 个特征点进行配准的时间.

表1 对比不同算法与CS-SIFT算法的处理结果

算法	特征系数 α	特征点数量	配准时间 /ms	误配准率 /%
SIFT 算法	无	782	63.5	6.26
	1.090	782	49.7	6.26
文献[9]算法	无	542	48.4	9.90
	1.090	542	37.3	9.90
CS-SIFT 算法	无	512	46.7	7.42
	1.090	512	36.6	7.42

由表1可知,在图像相同的条件下,文献[9]算法和CS-SIFT算法相对保持了SIFT特征配准的精度,而且配准时间大约减少了25%,如果再加上准欧氏距离(无特征系数),配准时间进一步缩减,最终时间减少达40%。不难发现,虽然文献[9]算法与CS-SIFT算法在时间的缩减方面,几乎没有差别,但是前者精度降低程度较后者高。

4 结论

本文基于SIFT算法提出了一种改进的CS-SIFT算法,该算法针对无人机航拍图像对尺度变化不明显的问题,通过建立S层金字塔,达到降低多尺度空间和减少特征点数量的目的。在特征向量的匹配中,利用准欧氏距离替代常用的欧氏距离,并通过极限几何约束消除部分错误配准点对,从而进一步提高特征匹配效率。经验证,改进后的算法运算效率高、性能稳定。在特征点配准过程中,用准欧氏距离来代替欧氏距离,可以显著提高图像配准时效性。

同时发现,改进后的算法使图像的配准度降低了,而且当预处理目标图像的尺寸较大时,图像的

数据量增大,特征点数量随之增多,特征配准的计算量就会增加,配准的速度也会降低。今后需进一步改进配准算法,以提高配准精度并降低时间消耗。

参考文献:

- [1] Barmca D I, Silverman H F. A class of algorithms for fast digital image registration[J]. IEEE Transactions on Computers, 1972, C-21(2): 179.
- [2] Lowe D G. Distinctive image feature from scale-invariant keypoints[J]. IEEE International Journal of Computers, 2004, 60(2): 91.
- [3] Zhang Y, Zhu D, Wang Y L. Improved fast feature matching method of SIFT[J]. Control and Automation Publication Group, 2008, 24(11): 220.
- [4] 肖健. SIFT特征配准算法研究与改进[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [5] Schmid C, Mohr R. Local gray value invariants for image retrieval[J]. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 25(8): 15.
- [6] Lowe D G. Local feature view clustering for 3D object recognition[C]//Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on CVPR 2001, Piscataway: IEEE, 2001: 682.
- [7] 刘宏娟. 基于DSP的航拍图像配准系统的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [8] 程德志, 李言俊, 余瑞星. 基于改进SIFT算法的图像配准方法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(7): 285.
- [9] 姚文伟, 张智斌, 李国, 等. 图像匹配算法SIFT的改进[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(6): 67.

一种改进的植物叶片病斑区域边缘提取技术

夏永泉, 曾莎, 李耀斌

(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 Canny 算子边缘检测时容易丢失边缘细节的缺陷,提出了一种改进的植物叶片病斑区域边缘提取技术.运用最大类间方差法对病害图像进行二值化,添加对两个斜方向上梯度信息的提取,更加完整地保存了梯度信息,从而得到更完整的边缘图像.实验结果表明,本文方法能够有效地滤除图像中的噪声,检测到细节梯度,去除伪边缘和噪声边缘,得到更加精确的病斑区域边缘.

关键词:植物叶片病斑区域;边缘检测;最大类间方差法;梯度计算

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.014

An improved edge extraction technology of the plant leaf disease region

XIA Yong-quan, ZENG Sha, LI Yao-bin

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

Abstract: Aiming at the defect that the traditional Canny operator edge detection easily lost the edge details, an improved technology was developed to extract the edges of the leaf disease region. More complete gradient information was preserved by using Otsu to binary plant disease images and adding on two oblique directions gradient information extraction, so as to get a more complete edge image. The experimental results showed that this method could effectively filter out noise in the image and detect the details of the gradient, remove the false edges and noise edges and get the lesion edges more accurately.

Key words: plant leaf disease region; edge detection; Otsu; gradient calculation

0 引言

在农业生产中,病害对农作物的产量有着重要影响.植物病害的发生,不但降低了农作物产品的价值,严重的还会导致农作物大量减产乃至绝收.因此,对农作物病害的防治是农业生产中的一个关键问题.作物病害最直接的外在表现是病斑,由于作物种类较多,在同一种作物上的病害也有多种,因此病害呈现出多样化、复杂化的特征,需要针对不同作物的叶片病斑^[1]分别进行研究.

边缘是图像中梯度发生急剧变化的像素的集合^[2],是图像的重要特征之一.边缘检测是进行图像分割、特征提取等的基础^[3-4].边缘检测的方法有很多,传统的算子有 Robert, Sobel, Prewitt, Log 和 Dog 等.然而这些算子对噪声敏感,并且是基于局部窗口运算的梯度算子,在复杂背景或噪声较多的情况下,效果不理想.目前,Canny 算子^[5-7]是一种相对较好的边缘检测算子,但是传统的 Canny 算子也存在对噪声敏感、容易丢失边缘细节、不能进行参数的自动化计算等缺陷.

收稿日期:2014-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(61302118);河南高校青年骨干教师资助计划(2010GGJS-114)

作者简介:夏永泉(1972—),男,辽宁省绥中县人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为图像处理、计算机视觉、模式识别与人工智能.

鉴于此,本文拟提出一种对 Canny 进行改进的植物叶片病斑区域边缘提取技术,以期更加准确地提取出病斑区域的边缘,为后续对病斑的研究提供依据.

1 病害叶片预处理

1.1 图像灰度化

目前病害叶片图像大多是利用高像素数码相机、单反相机、智能手机等拍摄工具人工获得的 24 位真彩色图像. 由于受外界光照、天气和复杂背景的影响,需挑选、裁剪出易于处理的病害图像. 病害叶片图像的每个像素都由 R, G, B 三个分量来表示. 为便于研究,先将彩色图像转换为灰度图像,转换公式为

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

其中, R, G, B 分别为像素的红、绿、蓝颜色值; Y 为转换后像素的灰度值.

1.2 最大类间差法 (Otsu) 二值化

Otsu 的基础是最小二乘法,找出使前景、背景区域像素的平均灰度值与整个图像像素的平均灰度值之间差别最大的值作为二值化阈值. Otsu 算法^[5]的计算过程如下.

首先求出图像的像素总数为 N , 其灰度级为 L , 图像灰度值为 i 的像素总数为 n_i , 则 i 的概率为

$$p_i = \frac{n_i}{N}$$

阈值 T 将图像按灰度级分成 C_0 和 C_1 两类, 其对应的灰度级范围分别在 $[0, T - 1]$ 和 $[T, L - 1]$ 之间, 所以 C_0 和 C_1 的灰度均值分别为

$$u_0 = \sum_{i=0}^{T-1} \frac{ip_i}{w_0} \quad u_1 = \sum_{i=T}^{L-1} \frac{ip_i}{w_1}$$

整个图像的灰度均值为

$$u = w_0u_0 + w_1u_1$$

而定义类间方差为

$$\sigma^2 = w_0(u_0 - u)^2 + w_1(u_1 - u)^2$$

该方法不需要人为设置阈值, 最佳阈值为 σ^2 值最大时对应的 T 值, 当图像没有明显的双峰时, 也能得到较好的效果.

2 改进的 Canny 算子边缘检测

2.1 传统的 Canny 算子

传统的 Canny 算子是在信噪比准则、定位精度

准则、单边响应准则下衍生出的最优边缘检测算子, 其基本过程是用高斯滤波器平滑图像, 再由一阶微分的极大值得到边缘点, 求得边缘点的梯度幅值和方向, 然后对梯度幅值进行非极大值抑制, 最后利用人工设定的高低阈值得到图像的边缘轮廓.

1) 高斯平滑滤波: 用二维高斯函数对图像 $f(x, y)$ 进行滤波, 设二维高斯函数为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

其中, σ 是控制着图像平滑度的高斯滤波参数. 滤波平滑后的图像 $g(x, y) = G(x, y) \times f(x, y)$.

2) 梯度的幅值和方向: 传统 Canny 算子对图像梯度和方向是用 2×2 领域的一阶偏导有限差分来计算的, 梯度幅值和方向的计算公式分别为

$$M(x, y) = \sqrt{S_x(x, y)^2 + S_y(x, y)^2}$$

$$\theta(x, y) = \arctan(S_y(x, y)/S_x(x, y))$$

其中, S_x 和 S_y 分别是 x 和 y 方向的一阶偏导数矩阵.

3) 非极大值抑制: 此步骤是为了准确定位边缘, 保留像素点沿幅角方向的最大值. 传统的 Canny 算子是在梯度幅值范围内, 以每个像素点为中心, 用 3×3 矩阵沿梯度方向 $\theta(x, y)$ 进行梯度幅值插值计算. 比较点 (x, y) 处的梯度幅值与其相邻的插值的大小, 如果前者大, 则点 (x, y) 为候选边缘点, 否则即为非边缘点.

4) 双阈值处理: 人工选取高阈值 T_h 和低阈值 T_l , 对图像进行扫描. 若点 (x, y) 的梯度幅值大于 T_h , 则判定为边缘点; 若小于 T_l , 则认为是非边缘点; 处于两阈值之间的像素点, 暂作为边缘点, 根据边缘的连通性二次判断, 若该点有邻接边缘点, 则也认为是边缘点, 反之则为非边缘点.

2.2 改进的 Canny 算子

传统 Canny 算子只提取了 x 和 y 方向的梯度来进行计算, 忽略了一些斜边上的信息, 因此可以再提取两个斜方向上的梯度, 使边缘信息更加丰富、精确. 改进的 Canny 算子流程图如图 1 所示.

2.2.1 提取斜方向梯度信息 为了求得斜方向上的梯度, 使用图 2 所示的两个对角模板对图像中的像素值进行加权平均. 图 2a) 的梯度计算为

$$Gr'_1(x, y) = f(x, y - 1) + 2f(x + 1, y - 1) - f(x - 1, y) + y(x + 1, y) - 2f(x - 1, y + 1) - f(x, y + 1)$$

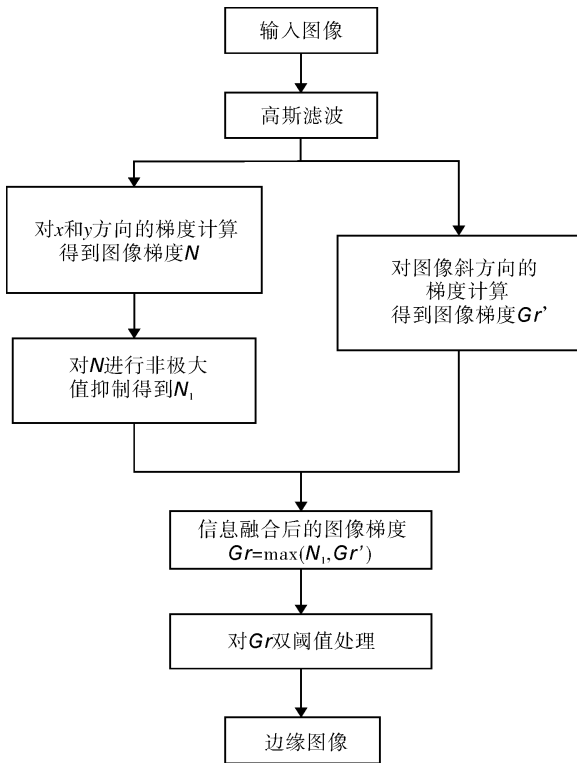


图1 改进的 Canny 算子流程图

0	1	2
-1	0	1
-2	-1	0

-2	-1	0
-1	0	1
0	1	2

a) 模板 1

b) 模板 2

图2 对角模板

图2b)的梯度计算为

$$Gr'_2(x,y) = -2f(x-1,y-1) - f(x,y-1) - f(x-1,y) +$$

$$y(x+1,y) + f(x,y+1) + 2f(x+1,y+1)$$

斜方向上总梯度大小为

$$Gr' = \sqrt{Gr_1'^2 + Gr_2'^2}$$

2.2.2 最后的梯度计算 因得到斜方向的梯度与原图像的梯度是大小相同的矩阵,当原图像的梯度值大于斜方向上时,说明该点的梯度值主要是水平方向和垂直方向;反之,则取斜方向上的梯度值.即信息的融合是取两个矩阵中对应位置数据的最大值.

3 实验结果与分析

实验分别对小麦、番茄和黄瓜三种植物叶片病斑(见图3)区域的边缘进行提取,病斑区域提取结果如图4所示.由图4a)和图4b)可以看出,传统方法检测出的病斑边缘存在较多的伪边缘,如对黄瓜病斑区域的提取中出现大量片状区域,而番茄病害叶片也存在错检,边缘不明确.而由改进方法得到的边缘则较精确,尤其是蕃茄的病斑图像有比较明确的边缘.由图4c)和图4d)可以看出提取的病斑区域在原图像上的映射,本文提出的改进方法对番茄病斑的边缘提取得较为完整、精确,而对小麦和黄瓜叶片上复杂的病斑区域边缘的提取,精确度有待提高,但相对于传统的方法,精确度已得到明显改善.

4 结语

本文提出了一种对 Canny 进行改进的植物叶片病斑区域边缘提取技术.通过使用 Otsu 能够自动得到最佳阈值,方便了对图像的二值化;与传统方法相比,改进的 Canny 算子增加了斜方向梯度信息,使得到的边缘图像线条在某些间断的地方实现了连接,连续性有了很大改善.本文的改进方法能够有效减少边缘噪声,得到更加精确的病斑区域边缘,去除伪边缘.叶片病斑存在多样性、复杂性,开发针对各种不同颜色、形状的病斑进行准确的区域边缘提取的技术,将是下一步继续研究的课题.



a) 小麦锈病

b) 番茄病害

c) 黄瓜病害

图3 三种植物叶片病害

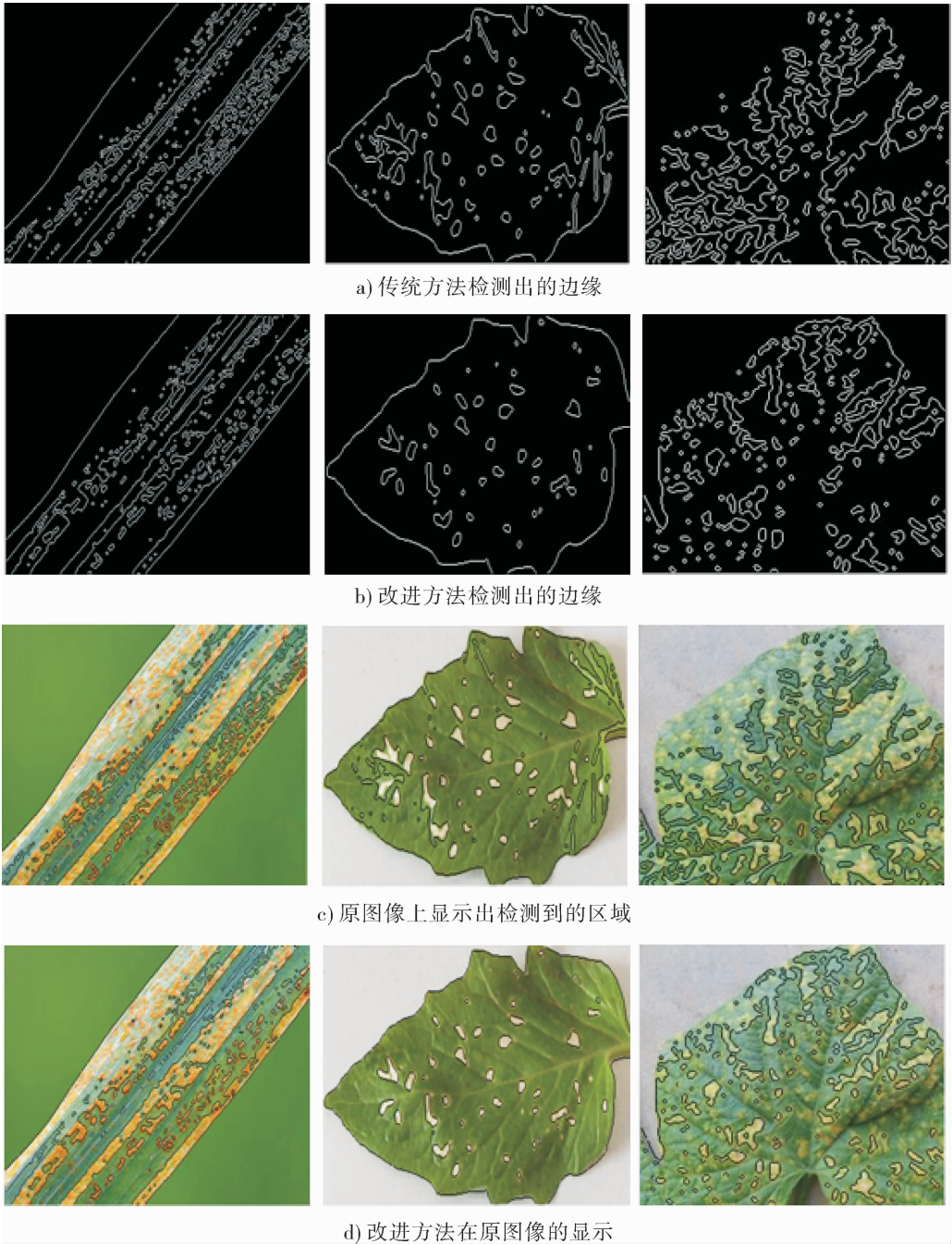


图 4 传统方法与改进方法边缘提取实验结果对比

参考文献:

[1] Liu T, Yuan Z J, Sun J, et al. Learning to detect asalient object[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011,33 (2):353.

[2] Martin D R, Fowlkes C C, Malik J. Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color, and texture cues[J]. IEEE Transactions on Parrern Analysis and Machine Intelligence, 2004,26 (5):530.

[3] 彭辉,文友先,吴兰兰,等.采用自适应 canny 算子的树上柑橘图像边缘检测[J].计算机工程与应用,2011,

47(9):163.

[4] 夏永泉,王会敏,曾莎.基于 Android 的植物叶片图像病害检测[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2014,29(2):71.

[5] 梁光明,孙即祥,马琦,等. Otsu 算法在 Canny 算子中的应用[J].国防科技大学学报,2003,25(5):36.

[6] 靳艳红,蒙建军.一种基于 Canny 算子改进的边缘检测算法[J].重庆文理学院学报:自然科学版,2011,30(2):27.

[7] 徐亮,魏锐.基于 Canny 算子的图像边缘检测优化算法[J].科技通报,2013,29(7):127.

TiAl 合金的研究进展及应用述评

樊江磊, 田淑侠, 王胜永

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:金属间化合物 TiAl 合金因具有密度低、高温性能好等特点而成为极具开发价值的新一代高温合金之一。考察 TiAl 合金的发展历程、研发现状、合金中各元素的作用及组织控制技术,认为现有 TiAl 合金存在室温塑性低、高温强度不足、制备成本高等问题,指出通过多元合金化和凝固组织精确控制,是进一步提高 TiAl 合金综合性能的有效方法,也是 TiAl 合金未来研究的重点之一。

关键词:TiAl 合金;金属间化合物;合金化;凝固组织

中图分类号:TG249.9;TG146.23;TG292 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.015

Development and applications review of TiAl alloys

FAN Jiang-lei, TIAN Shu-xia, WANG Sheng-yong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Intermetallics TiAl alloy is one of the most promising materials for new generation high temperature structural application due to the properties of low-density and high temperature. The development, research status, effects of alloying elements and microstructure control technologies of TiAl alloys were reviewed. At present, the low room temperature ductility, insufficient high temperature strength and high cost of manufacture were the main problems. The practical method to improve the comprehensive mechanical properties was multi-component alloying and accurate microstructure control, which was also the important research field of TiAl alloys in the future.

Key words: TiAl alloys; intermetallics; alloying; solidification microstructure

0 引言

航空航天工业的发展及武器装备性能的提高,对新材料的需求日益迫切。金属间化合物材料中金属键和共价键共存,兼有金属的韧性和陶瓷的耐高温性能,具有密度低、耐腐蚀、耐高温及比强度高优点,已成为一种新型的高温结构材料^[1-6],因而先进工业国家投入大量人力、物力对这种材料进行研究。先进制造领域对轻质合金的需求日益增加,为 TiAl 合金的发展提供了契机,它已经成为先进武器装备和高技术产品轻量化、高性能、低成本和长寿

命的物质基础,是各国竞相研究的热点^[3,7]。本文拟综述 TiAl 合金的最新研究进展,并对新型 TiAl 合金的发展趋势进行展望。

1 TiAl 合金的成分与性能

TiAl 合金以其特殊性能而成为一种可应用于航空航天飞行器及地面燃气轮机的理想材料^[8-10]。D. M. Dimiduk^[9]通过对比不同温度下多种合金的比强度发现:在 800 ~ 1 000 °C 的范围内,TiAl 合金的比强度明显高于 Ni 基高温合金,其高温性能明显优于 Ti 基合金;F. Appel 等^[10]发现,当疲劳周期数高

收稿日期:2014-06-13

作者简介:樊江磊(1983—),男,河南省南阳市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为新型金属材料与凝固技术。

于106次时, TiAl合金的抗疲劳性能明显优于传统的Ti基合金和Ni基高温合金。

张永刚等^[11]给出了TiAl合金与Ti基合金、Ti₃Al合金、Ni基高温合金性能对比结果(见表1)。由表1可以看出,除塑性外, TiAl合金的其他性能均优于Ti基合金。与Ti₃Al合金相比, TiAl合金也具有更好的综合性能。其抗蠕变性能和抗氧化性均优于Ti₃Al合金,而与Ni基高温合金相当,但其密度不及Ni基高温合金的一半,使得TiAl合金取代Ni基高温合金成为可能。TiAl合金的这些优良性能使其能够部分取代Ti基合金和Ni基高温合金,成为可应用于航空航天和汽车工业等领域的新型材料^[9,12-13]。

虽然TiAl合金整体性能较好,但是无法完全满足工程应用的要求。研究者发现,阻碍其应用的因素包括室温塑性太低、变形加工能力弱、高温强度低和800℃以上的高温抗氧化性能差等^[6,14-16]。但是,通过对合金成分的调整和凝固组织的控制可改善TiAl合金的塑性和强度等性能。

1.1 TiAl合金成分的研究进展

TiAl合金的研究始于1950年代,经过半个多世纪的发展,形成了具有不同特点的TiAl合金系列。表2给出了典型的TiAl合金成分的发展过程^[17-18]。

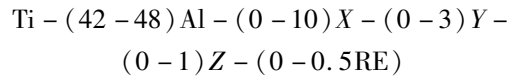
最初,研究者发现二元TiAl合金具有良好的抗氧化性和高温性能,从而揭开了TiAl合金研究的序幕。美国科学家最早研究了Ti-50Al二元合金,但这种合金的室温塑性和断裂韧性太差,随后, TiAl合金的研发活动在相当长时间内几乎停滞。1975—1985年,美国P&W实验室对近100种不同成分的TiAl合金进行了研究,最后发现Ti-48Al-1V-0.3C(at.%) (后文合金成分未经说明均为原子百分比, at.%)具有最佳的性能,此即第I代TiAl合金,室温塑性高达2%,但是由于多方面的原因, TiAl合金并未作为工程合金而得到发展^[19]。

第II代TiAl合金主要通过合金元素的固溶强化来提高其性能^[17],以铸造合金为主,其成分可以表示为^[18]

$$\text{Ti} - (45 - 48)\text{Al} - (1 - 3)\text{X} - (2 - 5)\text{Y} - \text{Z} (<1)$$

其中, X = Cr, Mn, V; Y = Nb, Ta, W, Mo; Z = Si, B, C. 代表合金为美国空军实验室和GE公司共同开发的Ti-48Al-2Cr-2Nb. 该合金的室温塑性、强度和抗氧化性能均优于第I代TiAl合金,现已有多个系列合金的零部件进行了发动机装机试验。第II代TiAl合金在高温时(800℃左右)的比刚度、比强度、蠕变抗力、氧化抗性、腐蚀性抗性等,均优于或相当于Ni基高温合金,极大地推动了TiAl合金的工程应用^[18]。

经过大量的研究,现已发展到第III代TiAl合金。第III代TiAl合金中的添加元素明显地改变了二元相图,生成新相,达到了优化组织的目的^[17,20]。它以锻造合金为主,其成分可以表示为^[2]



其中, X = Nb, Cr, Ta, Mn; Y = Mo, W, Hf, Zr; Z = C, B, Si; RE为稀土元素。

第III代TiAl合金有如下特点:蠕变速率低;强度高;热稳定性好;合金中含有大量的Nb, Ta, W等高熔点元素,合金密度较大;塑性低,成本高^[17]。

1.2 TiAl合金的合金化

M. Nazmy等^[21-22]研究发现,提高TiAl合金的室温塑性、强度、蠕变性能、高温性能、断裂韧性及抗氧化能力的一个重要途径是合金化^[21-22]。由于合金化已经在改善TiAl合金性能方面取得了显著的效果,所以人们日益重视合金元素在TiAl合金中的应用^[21]。为了进一步提高TiAl合金的综合性能,研究者对TiAl合金中添加元素的作用进行了全面而深入的研究^[23-24]。随着研究的深入,添加元素的种类和含量都呈增加的趋势。

总体而言,合金元素对TiAl合金性能的影响主要有以下几个方面^[24-26]:

1) 通过改变c轴与a轴的比值,提高晶体结构的对称性,从而降低点阵阻力,达到增强位错可动性的目的;

表1 TiAl合金与Ti基合金、Ti₃Al合金、Ni基高温合金的物理特性和力学性能比较

合金	结构	密度ρ/(g·cm ⁻³)	弹性模量E/GPa	屈服强度σ _{0.2} /MPa	断裂强度σ _b /MPa	蠕变极限温度/℃	抗氧化极限温度/℃	室温塑性/%	高温塑性/%/℃	加工延伸性/%	断裂韧性KQ/(MPa·m ^{1/2})
TiAl合金	Ll ₀	3.7~3.9	160~180	350~600	440~700	750~950	800~950	1~4	10~60/870	7~12	12~35
Ti基合金	hcp/bcc	4.5	95~115	380~1150	480~1200	600	600	10~25	12~50	高	12~50
Ti ₃ Al合金	DO ₁₉	4.1~4.7	110~145	700~990	800~1140	750	650	2~10	10~20/660	5~8	13~30
Ni基高温合金	fcc/Ll ₂	7.9~8.5	206	800~1200	1250~1450	800~1090	870~1090	3~25	20~80/870	10~20	30~100

表 2 TiAl 合金成分的发展过程^[17-18]

发展阶段	合金成分	制备工艺	研究者
第 I 代	Ti - 48Al - 1V - 0.3C	铸造	M. Blackman
	Ti - 47Al - 2(Mn, Cr) - 2Nb	铸造	GE 公司
	Ti - (45 ~ 47)Al - 2Mn - 2Nb + 0.8% TiB ₂	铸造 XD	Howmet 公司
	Ti - 47Al - 3.5(Nb, Cr, Mn) - 0.8(Si, B)	铸造	GKSS 研究所
第 II 代	Ti - 47Al - 2W - 0.5Si	铸造	ABB 公司
	Ti - 46.2Al - 2Cr - 3Nb - 0.2W	锻造	Y. W. Kim
	Ti - 47Al - 5(Nb, Ta, Cr)	铸造	GE 公司
	Ti - 45Al - (5 ~ 10)Nb	锻造	北京科技大学
第 III 代	Ti - (45 ~ 47)Al - (1 ~ 2)Cr - (1 ~ 5)Nb - (0 ~ 2)(Ta, Mo, W, Hf, Zr) - (0 ~ 0.2)B - (0.03 ~ 0.3)C - (0.03 ~ 0.2)Si - (0.1 ~ 0.25)O	铸造	Y. W. Kim

2) 通过减小层错能,降低孪生过程的启动难度,产生提高塑性的效果;

3) 减小晶粒的尺寸及有效滑移的长度,降低局部应力峰值;

4) 吸收 TiAl 中 O, H 等有害杂质;

5) 通过第二相弥散强化,增加晶界迁移的阻力,降低晶界在高温条件下的扩散能力,增强高温蠕变性能;

6) 改变合金表面氧化膜结构,增强表面氧化膜致密化及抗氧化性能。

TiAl 合金中的合金元素种类越来越多,按照其作用之不同,可大致分为以下几类^[24,27-28]。

1) 提高 TiAl 合金的塑性. 主要包括添加 V, Cr, Mn, Mo, RE, B, Ni, C, Sn 等. V, Cr, Mn 占据 TiAl 合金相中 Al 的亚点阵,能提高 Ti 原子电子云的对称性,可改善合金塑性,但在一定程度上会降低 TiAl 合金抗氧化性. Mo 可显著提高组织细小的 TiAl 合金塑性. 通过细化晶粒 RE, B, 可提高 TiAl 合金的塑性. Ni, C 可提高单相 γ 合金的塑性. Sn 不仅可以细化组织,提高 TiAl 合金塑性,还可均匀片层尺寸,减小晶胞体积。

2) 提高抗氧化性能. 主要包括添加 Cr, Si, Sb, P 等. Cr 比较特殊,只有当 Cr 含量大于 8% 时,才能明显改善 TiAl 合金的抗氧化性. Si 元素通过形成以 Ti₅Si₃ 为第二相的共晶类组织,提高 TiAl 合金的抗氧化性能. Sb 可以促进 TiAl 合金表面形成致密的 Al₂O₃ 薄膜. P 可降低 TiAl 合金的氧化速率。

3) 提高抗蠕变性能. 主要包括添加 Er, Ta, O, Si 等. 这一类元素在改善蠕变性能的同时,也会对 TiAl 合金产生不良影响. 例如:Er 可降低 TiAl 合金的塑性. Ta 会降低 TiAl 合金的抗热裂能力. 铸造合金含 O 量从 8×10^{-4} 提高到 11×10^{-4} 时,可改善 TiAl 合

金的抗蠕变性能且不降低其塑性;过量的 O 则会显著降低 TiAl 合金的塑性. Si 合金化析出 Ti₅(Si, Al)₃ (ζ 相),能够同时缩短 TiAl 合金的初始应变和最小蠕变时间,并提高蠕变激活能,延长蠕变时间. Si 的含量一般在 0.2% ~ 0.6%,过多的 Si 会析出过多的 ζ 相,引起组织稳定性的恶化,导致蠕变性能降低。

4) 提高断裂韧性. 主要包括添加 C, N 等. 通过 C, N 的固溶强化和弥散强化可提高 TiAl 合金的断裂韧性。

5) 提高合金高温强度. 主要包括添加 Mo, Nb, B 等. 这些元素通过提高 TiAl 合金熔点,减缓扩散,并降低层错能,增强高温组织的稳定性,可实现 TiAl 使用温度的提高. 但是,添加过量的 Nb 后,会降低 TiAl 合金的断裂韧性。

6) 稳定 β 相. 主要包括添加 Cr, V, Nb, Mo, W 等. 这类合金元素是 β 相稳定元素,能够扩大 β 相区向高 Al 方向扩展. 这些元素在扩大 β 相区的同时缩小 α 相区,降低 T_{β} 和 T_{α} 温度。

7) 固溶强化. 主要包括添加 W, Mo, Nb, Ta 等。

TiAl 合金中每一种合金元素的作用都是多方面的,当多种元素共同作用于 TiAl 合金时,受各种元素交互作用的影响, TiAl 合金性能的变化将更加复杂. 为了便于分析合金元素的作用,研究者提出了 Al 当量和 Mo 当量的概念,分别分析 α 相稳定元素和 β 相稳定元素的影响^[29],其计算公式为

$$[\text{Al}]_{\text{eq}} = [\text{Al}] + \frac{1}{6}[\text{Zr}] + \frac{1}{3}[\text{Sn}] + 10[\text{O}]$$

$$[\text{Mo}]_{\text{eq}} = [\text{Mo}] + \frac{1}{2.5}[\text{W}] + \frac{1}{5}[\text{Ta}] + \frac{1}{3.6}[\text{Nb}] + \frac{1}{1.5}[\text{V}] + 1.25[\text{Cr}] + 1.25[\text{Ni}] + 1.7[\text{Mn}] + 1.7[\text{Co}] + 2.5[\text{Fe}]$$

D. R. Johnson 等^[30]通过确定 Al 当量关系,同时分析了 α 相稳定元素和 β 相稳定元素对 α 相区范围的影响,Al 当量关系式为

$$[Al]_{eq} = 47 - 4.2[C] - 2.8[Si] + 0.1[Cr] + 0.3[V] + 0.3[Nb] + 0.6[Mo] + 0.8[Re] + 1.0[W]$$

上述成分计算公式,对于分析多元 TiAl 合金的凝固行为有一定的指导意义.把多元合金折算成二元合金后,可以参照 TiAl 合金二元相图,分析合金的凝固行为.

1.3 TiAl 合金的凝固组织控制

合金的性能与微观组织特征直接相关. TiAl 合金的性能可以通过对凝固组织的合理控制进行优化.一般来说,具有以下组织特征的 TiAl 合金具有较好的综合性能^[11,18]:组织为全层片;片层组织中的两相(α_2 相和 γ 相)平均体积百分处于 0.05 ~ 0.25 之间;合适的晶粒尺寸范围为 50 ~ 350 μm ;片层间距为 0.05 ~ 1 μm ;晶界是锯齿状的.

TiAl 合金的组织因其成分的不同而发生变化,组织中 γ 相和 α_2/γ 层片组织的比例是不同的.根据组织中两者体积分数的不同,TiAl 合金有 4 种典型的室温组织^[31-32]:1)等轴近 γ 单相组织(single γ -phase);2)双态组织(duplex microstructure);3)近层片状组织(near-lamellar microstructure);4)全层片状组织(full-lamellar microstructure).

等轴近 γ 单相组织由完全的 γ 相等轴晶组成,一般还有少量的细小 α 相晶粒存在于晶界,该组织可以通过不同的热处理工艺改变晶粒尺寸;双态组织是由 γ 相等轴晶和 α_2/γ 层片团组成,其晶粒尺寸较小,一般为 10 ~ 40 μm ;近层片状组织是由 α_2/γ 层片团和少量的 γ 相等轴晶组成,这些 γ 相主要分布在层片团之间,层片团的尺寸一般为 200 ~ 500 μm , γ 相等轴晶的尺寸小于 20 μm ;全层片状组织全部由 α_2/γ 层片团组成,铸造条件下的层片团的尺寸较大,多为 600 ~ 1 000 μm ,但是通过合理的热处理工艺能够使晶粒尺寸减小至 50 ~ 300 μm ^[11].

在这 4 种典型的显微组织中,塑性最好的是双态组织,但是由于 γ 相的解离能低,抵抗裂纹扩展能力差,双态组织 TiAl 合金的室温断裂韧性和蠕变抗力都较低.而全层片状组织合金具有较好的屈服强度、抗蠕变能力和断裂韧性.这是由于 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al 相组成的全层片晶团组织中存在大量 γ/α_2 相界面,能有效地阻碍裂纹的扩展,增大了全层片 TiAl 合金的断裂韧性,但塑性较差,低于双态组织.而等轴 γ 单相组织中晶粒粗大、无层片组织,

因而塑性、断裂韧性等各方面性能都比较差,双相合金的强度要明显优于单相 γ 合金^[18].

TiAl 合金的力学性能对组织很敏感,其塑性和强度可以通过调整显微组织的尺寸进行控制. J. Beddoes 等^[33]对比了 Ti-47Al-2W-0.5Si 全层片多晶组织和柱状晶组织的蠕变性能,发现全层片柱状晶组织具有较小的初始蠕变应力,同时能延缓第三阶段蠕变的出现,但该合金室温延性因组织晶粒尺寸粗大和层片组织的力学性能各向异性而降低.

根据对 TiAl 合金凝固组织的影响方式,可以把合金元素分为两类^[1,2]:

1) α 相稳定化元素:C, Si, O, Zr, Sn 等元素优先熔解于 α 相中,能够扩大 α 相区,升高同素异构转变温度.

2) β 相稳定化元素:W, Nb, V, Mo, Ta, Cr, Re 等固熔于 β 相中,可扩大 β 相区,降低同素异构转变温度.

控制 TiAl 合金的方法包括控制凝固条件和凝固过后的热处理两个方面.

对于凝固条件的精确控制,一般采用定向凝固的方法.定向凝固技术能够控制凝固过程中的热流传导方向,在凝固界面前方形成特定取向的温度梯度,从而达到控制合金凝固组织的目的.定向凝固技术可以消除横向晶界,有效地控制晶体生长方向,获得特定取向的柱状晶组织,能够显著提高合金的单向拉伸强度、塑性、断裂强度、抗蠕变性能等性能.采用定向凝固法能制备具有全片层组织的柱状晶类型的 TiAl 合金,利用层片组织的各向异性能显著地提高合金强度和高温性能.例如:用定向凝固方法制备的 Ti-46Al-1.5Mo-0.2C 铸锭,具有优异的抗蠕变性能,在 210 MPa 应力,750 $^{\circ}\text{C}$ 温度条件下,经过 200 h 后,试样仅产生 0.15% 的蠕变变形,接近 10^{-10} s^{-1} 稳态蠕变率;同时,其持久寿命也远高于由 Howmet, ABB 和通用电气公司用普通铸造方法制备的多种 γ -TiAl 基合金^[32].

TiAl 合金的热处理多利用固态相变,在合适的温度选择适当的冷却方式,以获得所需凝固组织的方法^[34].TiAl 合金常见的热处理区在 α 单相区和 ($\alpha + \gamma$)两相区,选择不同区间和冷却方式可获得具有不同晶粒尺寸的凝固组织,从而达到提高合金性能的目的^[2].

2 TiAl 合金的应用

经过大量的系统性研究,TiAl 合金在性能方面

获得了很大的提升,在航空、汽车等领域得到了广泛的应用。

2.1 TiAl合金在航空领域的应用

美国通用电气公司早在1993年就开始对Howmat公司铸造的TiAl合金(Ti-47Al-2Cr-2Nb)低压气机叶片进行模拟飞行周次考核,结果是TiAl合金叶片并未损害,通过考核。该公司又于1996年,采用铸造TiAl合金叶片取代GE90发动机5级和6级低压压气机中的Ni基高温合金叶片(Rene77),使发动机减重80 kg,同时提高了发动机效率^[35]。

波音公司于2007年宣布在波音787飞机发动机低压涡轮第6,7级叶片上端采用TiAl合金,发动机减重约200 kg,并计划在波音747-8等多种机型的航空发动机上应用TiAl合金。除了用于航空发动机叶片方面,TiAl合金还可以在非受力轮盘、非转动部件等方面获得应用。根据美国IHPTET(综合高性能涡轮技术)计划和HSCT计划(高速民用运输机计划),在飞机的燃烧室及高温蒙皮结构中使用TiAl合金,可提高工作温度,无需用Ni基高温合金,喷气发动机的推重比可提高50%以上^[36]。目前,采用铸造法^[37]和锻压法^[38]制造的TiAl合金航空发动机叶片、叶片盘等,已部分应用于波音GENX发动机的低压涡轮后两级。

除了在航空压气机叶片方面的应用外,随着TiAl合金综合性能的提高,它也逐渐被应用在发动机机匣、支撑架、涡轮盘、导梁等方面。美国航空航天局预测,到2020年,在航空发动机用材中,TiAl合金约占总用量的20%^[35]。

2.2 TiAl合金在汽车工业的应用

TiAl合金在汽车工业的应用主要是发动机进、排气阀门材料减重方面。日本京都大学和川崎重工开发的Ti-47Al-(Fe,B)合金,用于制备外径80 mm的车用废气增压涡轮,经试验检测表明,TiAl合金涡轮比Ni基高温合金涡轮减重50%,使发动机加速响应时间显著减少。日本三菱公司分别在1998年和2003年,在赛车发动机的增压涡轮中采用低压铸造的TiAl-Nb合金件,减少了发动机启动时间,提高了最大转速,使TiAl合金在民用工业也呈现出很大的潜力。在汽车工业中,TiAl合金在增压涡轮^[40]和排气阀门中的应用^[6]将成为未来研发的重点。

2.3 TiAl合金在其他领域的应用

TiAl合金因其独特的物理和化学性能,在非结构方面也有较多的应用:

1)绝热贴面材料。TiAl合金弹性模量高,并具有与陶瓷材料接近的绝热性能和与金属材料接近的热膨胀系数。采用TiAl合金作为绝热贴面材料,可以增加与金属材料基体的物理相容性。

2)工具镀膜靶材。采用TiAl合金作为等离子镀膜靶材料,可以获得硬度很高的镀层,并且具有很好的耐高温性能,可显著提高工具的性能,满足高速切削Ti合金、高温合金和其他复合材料等特殊材料的需求。

尽管TiAl合金在国外已应用于航空航天领域和汽车工业,但是在国内还没有实现真正意义上的工程化及实际应用。其主要原因是,国内还没有掌握实现TiAl合金工程化应用的关键技术,特别是缺少TiAl合金成形和加工方面的相关基础研究。

3 结语

虽然TiAl合金在性能改善方面取得了很大的进步,并在航空航天和汽车工业等领域得到了一些应用,但是距大规模的工业化应用还有很大的差距。TiAl合金的工业化应用不仅在于具有优良综合性合金的开发,还在于大尺寸铸锭熔炼工艺过程的控制和切实可行的成形技术的开发等。而通过多元合金化和凝固组织精确控制,来提高TiAl合金综合性能,是一种有效方法,也是TiAl合金未来的研究重点之一。

参考文献:

- [1] Gupta R K, Pant B, Sinha P P. Theory and practice of $\gamma + \alpha_2$ Ti aluminide: A review [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2014, 67(2): 143.
- [2] Clemens H, Mayer S. Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15(4): 191.
- [3] 林均品, 张来启, 宋西平, 等. 轻质 γ -TiAl金属间化合物的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(2): 1.
- [4] 李金山, 张铁邦, 常辉, 等. TiAl基金属间化合物的研究现状与发展趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(3): 1.
- [5] Imayev R M, Imayev V M, Oehring M, et al. Alloy design concepts for refined gamma titanium aluminide based alloys [J]. Intermetallics, 2007, 15(4): 451.
- [6] Wu X. Review of alloy and process development of TiAl alloys [J]. Intermetallics, 2006, 14: 1114.
- [7] Appel F, Paul J D, Oehring M. Gamma Titanium Aluminide Alloys [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH &

- Co. KGaA, 2011: 357-402.
- [8] 傅恒志, 郭景杰, 苏彦庆, 等. TiAl 金属间化合物的定向凝固和晶向控制[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 797.
- [9] Dimiduk D M. Gamma titanium aluminide alloys—An assessment within the competition of aerospace structural materials [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 263: 281.
- [10] Appel F, Wagner R. Microstructure and deformation of two-phase γ -titanium aluminides [J]. *Materials Science and Engineering R*, 1998, 22(5): 187.
- [11] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良, 等. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 686-784.
- [12] Edward A L. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials [J]. *Intermetallics*, 2000(8): 1339.
- [13] 阎蕴琪, 王文生. TiAl 化合物——一种具有竞争力的高温结构材料[J]. 钛工业进展, 2000(5): 9.
- [14] Lasalmonie A. *Intermetallics: why is it so difficult to introduce them in gas turbine engines?* [J]. *Intermetallics*, 2006, 14(10/11): 1123.
- [15] Clemens H, Kestler H. Processing and applications of intermetallic γ -TiAl-based alloys [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2(9): 551.
- [16] Su Y, Liu T, Li X, et al. Lamellar orientation control in directionally solidified TiAl intermetallics [J]. *China Foundry*, 2014, 11(4): 219.
- [17] 黄金昌, 阎蕴琪. γ -TiAl 合金的研究与开发[J]. 稀有金属快报, 2003(6): 16.
- [18] Leyens C, Peters M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 307-342.
- [19] 章德铭, 陈贵清, 韩杰才, 等. γ -TiAl 基高温结构材料研究评述[J]. 中国稀土学报, 2005(S2): 163.
- [20] 陈玉勇, 张树志, 孔凡涛, 等. 新型 β - γ TiAl 合金的研究进展[J]. 稀有金属, 2012(1): 154.
- [21] Nazmy M, Staubi M. Alloy modification of TiAl for improved mechanical properties [J]. *Scripta Materialia*, 1994, 31: 829.
- [22] Kumagai T, Nakamura M. Effects of aluminum content and microstructure on tensile properties of TiAl alloys [J]. *Scripta Materialia*, 1996, 34(7): 1147.
- [23] 张秋平. γ -TiAl 金属间化合物的研发进展[J]. 飞航导弹, 2007(8): 59.
- [24] 孔凡涛, 陈玉勇, 田竞, 等. TiAl 基金属间化合物研究进展[J]. *材料科学与工艺*, 2003(4): 441.
- [25] 刘咏, 黄伯云, 周科朝, 等. 粉末冶金 γ -TiAl 基合金研究的最新进展[J]. *航空材料学报*, 2001(4): 50.
- [26] 朱峰, 李宝成, 张杰, 等. Ti-Al 合金的开发动向[J]. 上海有色金属, 2001, 22(2): 83.
- [27] 李宝辉, 孔凡涛, 陈玉勇, 等. TiAl 金属间化合物的合金设计及研究现状[J]. *航空材料学报*, 2006(2): 72.
- [28] 陈国良, 林均品. 有序金属间化合物结构材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 35.
- [29] 王桂生. 钛的应用技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 50-162.
- [30] Johnson D R, Inui H, Muto S, et al. Microstructural development during directional solidification of α -seed TiAl alloys [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54: 1077.
- [31] Paul J D H, Appel F, Wagner R. The compression behaviour of niobium alloyed γ -titanium aluminides [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46: 1075.
- [32] 陈国良, 林均品. 有序金属间化合物结构材料物理金属学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 35-38.
- [33] Beddoes J, Seo D Y, Saari H. Long term creep of TiAl + W + Si with polycrystalline and columnar grain structures [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(8): 745.
- [34] Ramanujan R V. Phase transformations in γ based titanium aluminides [J]. *International Materials Reviews*, 2000, 45(6): 217.
- [35] 傅恒志, 郭景杰, 苏彦庆, 等. TiAl 金属间化合物的定向凝固和晶向控制[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 797.
- [36] 李成功, 傅恒志, 于翹. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 16-18.
- [37] Appel F, Brossmann U, Christoph U, et al. Recent progress in the development of gamma titanium aluminide alloys [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 11(2): 699.
- [38] 张继, 仲增镛. TiAl 金属间化合物工程实用化研究与进展[J]. 中国材料进展, 2010(2): 9.
- [39] Yamaguchi M, Inui H. High temperature structural intermetallics [J]. *Acta Materialia*, 2000, 48: 307.

基于 ANSYS 的二维发动机 风扇盘结构应力分析方法研究

叶惠娟, 黄致建

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:为了提高发动机风扇盘二维有限元模型应力分布的精确度,选择典型的三辐板结构,利用 ANSYS 12.0 完成三辐板风扇盘三维结构的有限元建模.同时建立三辐板风扇盘的二维轴对称有限元模型,将非轴对称载荷分解成傅里叶级数,并求解了其径向应力、周向应力和等效应力,对比了传统的二维分析、非轴对称加载二维与三维分析的结果.结果表明:施加均布载荷的二维模型应力分布与三维模型的应力分布情况相差较远,施加非轴对称载荷的二维模型的应力分布与三维模型的应力分布情况较为接近.与只施加均布载荷的方法相比,本方法提高了发动机风扇盘二维有限元模型应力分布的准确性.

关键词:风扇盘;有限元建模;应力分布;非轴对称载荷;傅里叶级数

中图分类号:V232.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.016

Stress analytical method research of 2D engine fan disk structure based on ANSYS

YE Hui-juan, HUANG Zhi-jian

(College of Mechanical & Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Typical three-wheel disk structure was chosen in order to improve the accuracy of the stress distribution of 2D finite element model of the engine fan disk. Three-wheel fan disk structure of 3D finite element modeling was completed by using ANSYS 12.0. And the three-wheel fan disk of 2D axisymmetric finite element model was established. The non axisymmetric load was decomposed into Fourier series. Solution of radial stress, circumferential stress and equivalent stress was done subsequently. Compared with typical 2D analysis load, 2D non axisymmetric load and 3D analysis load show that the stress distribution of 2D model applying the uniform load is far away from the stress distribution of 3D model, and the stress distribution of 2D model applying the non axisymmetric load was close to the stress distribution of 3D model. Compared with applying the uniform load, this method can improve the accuracy of the stress distribution of 2D finite element model of the engine fan disk.

Key words: fan disk; finite element model; stress distribution; non-axisymmetric load; Fourier series

收稿日期:2014-02-28

作者简介:叶惠娟(1988—),女,福建省漳州市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助设计与工程.

通信作者:黄致建(1954—),男,福建省泉州市人,华侨大学研究员,主要研究方向为工程机械设计与控制、计算机辅助设计与工程(CAD/CAE)、现代设计理论与方法.

0 引言

压气机作为航空发动机的三大部件之一,其先进性决定了航空发动机的性能.在大涵道比航空发动机的压气机盘零件中,风扇盘的设计难度最大,结构也日趋复杂,这主要是因为风扇叶片广泛采用宽弦叶片以提高性能,致使风扇盘轮缘很宽、质量增加,从而影响整台发动机的推重比.风扇盘是转子的主要构件,其高速旋转具有如下几个作用:固定叶片,承受来自叶片的离心载荷;连接低压轴,使其驱动风扇旋转;吸收冲击载荷;连接进气锥和其他部件^[1].

目前,已有一些关于风扇盘结构的研究.文献[2]介绍了CFM56-7发动机采用双辐板风扇盘的结构.文献[3]介绍了三辐板和四辐板的结构形式.文献[4]以专利的形式提出了一种三辐板风扇盘的结构.文献[5]对航空发动机多辐板风扇盘进行拓扑优化分析,得到了两种三辐板、四辐板形式的新型风扇盘结构,以及相对于单辐板,多辐板风扇盘质量有所减少的结论.文献[6]对典型风扇盘施加均布载荷和最大工作转速,以盘心最大周向应力、子午面平均周向应力、圆柱面最大平均径向应力和盘心最大等效应力为状态变量,分别进行单辐板风扇盘和多辐板风扇盘结构优化设计.上述研究主要在有限元分析的基础上,施加轮缘均布载荷和最大工作转速加以分析.但是这种加载方式是否能满足实际工作中的风扇盘的要求,至今未见详细报道.

三维分析方法简单直观,但计算精度与网格等分数关系密切,对三维进行优化分析难以实现.二维分析方法建模简单,但其加载分析结果与三维分析存在一定的差别,提高二维分析结果的精确度,可提高二维优化分析的准确性.本文拟采用典型的三辐板风扇盘,基于ANSYS平台,采用APDL编程对三辐板风扇盘进行三维参数化建模.同时建立三辐板风扇盘二维轴对称有限元模型,分析施加均布载荷与三维风扇盘应力分析结果的区别.

1 风扇盘的三维有限元模型

以典型的三辐板风扇盘为例,根据风扇盘的工作原理,建立风扇盘的有限元模型.由于叶片在轮盘上的布局是循环对称的,所以风扇盘的几何形状、载荷条件及边界条件都满足对称条件.任取1个叶片与轮盘进行接触计算,采用周期对称模型进行

强度分析.叶片数为22,即采用1/22模型求解,三维风扇盘模型扇形段如图1所示.

采用20节点6面体三维单元solid186建立三辐板风扇盘的循环对称模型,并以循环对称方法进行计算,对三辐板风扇盘施加轴向约束、离心载荷和叶片工作时所受的气动力,并求解,最终得到三辐板风扇盘的周向应力分布,如图2所示.

通过后处理分析,选取三维三辐板风扇盘盘体作为分析对象,其有限元模型如图3所示.将图3所示的盘体在周向上分成15个大小相同的扇区,盘体上端面可得到16条节点弧线和624个节点,每条节点弧线上都有39个节点,风扇盘周向应力分布如图4所示.从ANSYS 12.0通用后处理模块结果列表输出命令下,提取各节点在周向坐标的受力数值,分别做出周向各线上节点受力特征曲线,如图5所示.

由图5可知,风扇盘周向所受的载荷并非均布载荷,而是类似正弦分布函数曲线.其公式如下:

$$f = A \sin(22\theta)$$

其中, f 为风扇盘各节点的周向载荷; A 为风扇盘周向各线上节点的峰值,采用Origin 8拟合数据,取数值 $A = 220$; θ 为周向角度,用弧度表示.

2 二维风扇盘应力分析

二维轴对称结构可以用1个平面(X, Y)有限元

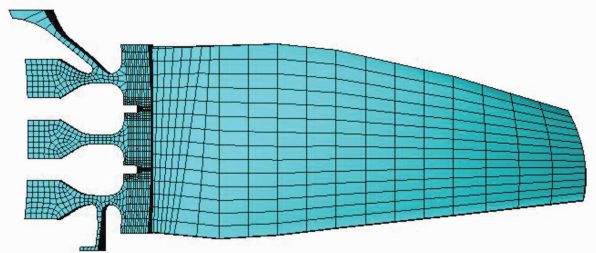


图1 三维三辐板风扇盘扇形段有限元模型

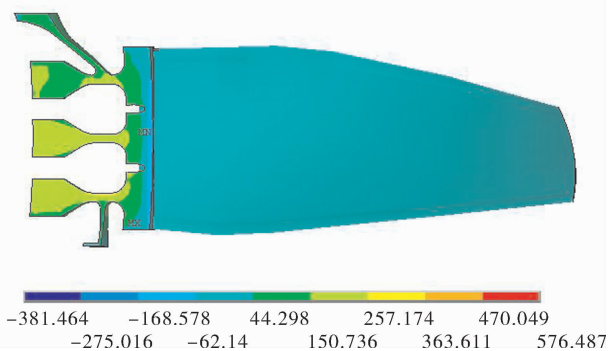


图2 三辐板风扇盘周向应力云图

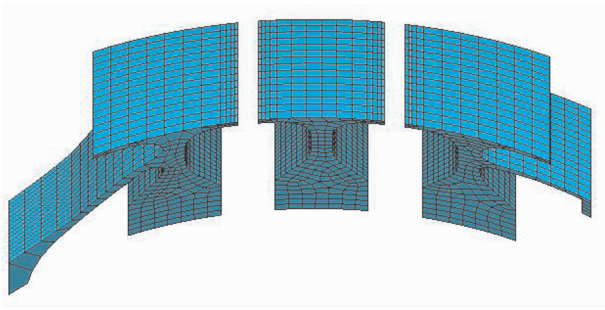


图3 三辐板风扇盘盘体有限元模型

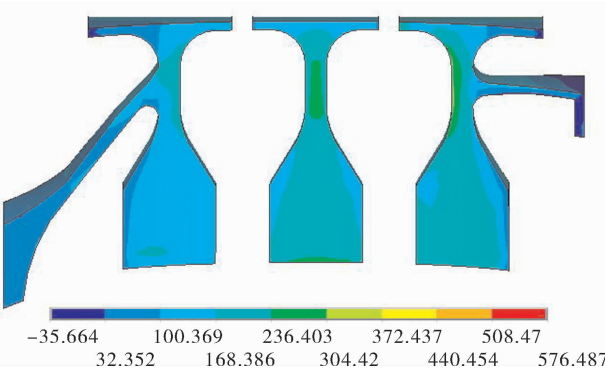


图4 三辐板风扇盘盘体的周向应力云图

模型表示,相比于三维有限元模型,二维模型的使用可大大减少建模和分析的时间. ANSYS 12.0 提供了一种特殊的轴对称结构——谐单元,主要有 PLANE25, PLANE75, PLANE78 和 PLANE83 等单元类型. 这种单元允许施加非轴对称载荷,该种载荷通常被定义为一系列的调和函数(傅里叶级数). 例如函数定义为

$$F(\theta) = A_0 + A_1 \cos\theta + B_1 \sin\theta + A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta + A_3 \cos 3\theta + B_3 \sin 3\theta + \dots$$

以上级数的每一项必须定义为一个单独的载荷步.

根据风扇盘三维形状,得到了风扇盘二维主要参数:盘外缘半径为 116 mm,盘内径为 45 mm,轮缘宽度为 133 mm,轮盘转速为 8 181 r/min,盘外缘分布载荷依据三维风扇盘提取结果. 模型材料选用 TC4 合金,其弹性模量 $E = 1.09 \times 10^5$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b = 890$ MPa,屈服强度 $\sigma_{0.2} = 825$ MPa,线膨胀系数 $EMIS = 9.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 4.44 \times 10^3$ kg/m³.

用 ANSYS 12.0 单元库中的 PLANE25 单元对二维模型进行网格划分,如图 6 所示. 该单元为二维 4 节点谐单元,可用于非轴对称载荷下轴对称问题的分析. 根据三维风扇盘周向分布情况,风扇盘轮缘载荷沿周向的分布可表示为

$$f(\theta) = 220 \sin(22\theta) \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

因此,可将上式展开为傅里叶级数:

$$f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n>0} \left(a_n \cos\left(\frac{2n\theta}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\theta}{T}\right) \right)$$

其中, $T = \frac{2\pi}{22} = \frac{\pi}{11}$; $a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(\theta) d\theta = \frac{2 \times 220}{\pi}$;

$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(\theta) \cos(n22\theta) d\theta$, 所以

$$\begin{cases} a_{2n} = \frac{-2 \times 220}{\pi((2n)^2 - 1)} \\ a_{2n+1} = 0 \end{cases}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(\theta) \sin(n22\theta) d\theta$$

所以

$$\begin{cases} b_1 = \frac{220}{2} = 110 \\ b_n > 1, b_n = 0 \end{cases}$$

在风扇盘的轮缘上,耦合径向位移自由度. 根据三维风扇盘轮缘应力分布规律,对二维风扇盘施

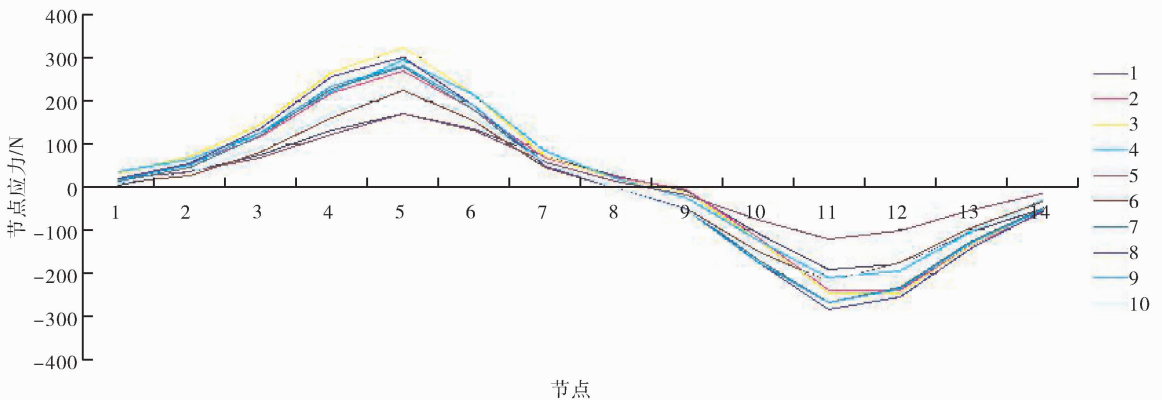


图5 三辐板风扇盘周向节点受力特征曲线

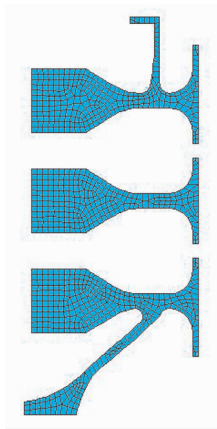


图6 三辐板风扇盘二维有限元模型

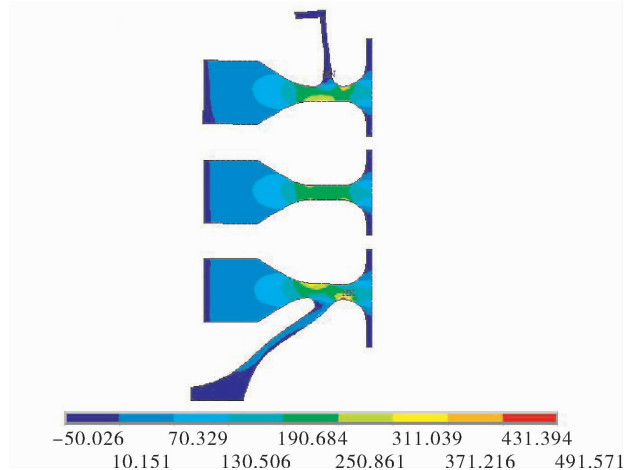


图7 三辐板风扇盘二维径向应力云图

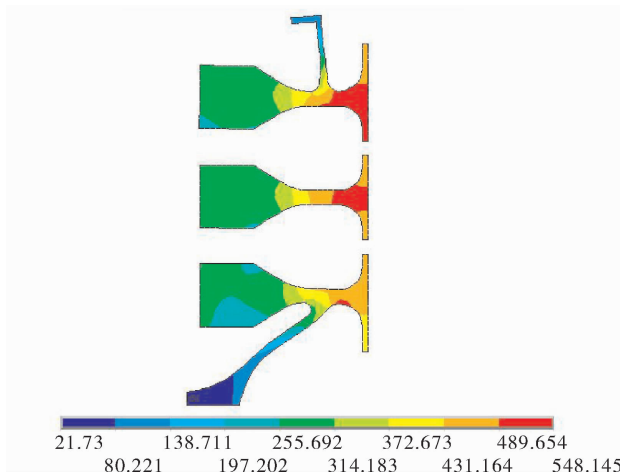


图8 三辐板风扇盘二维周向应力云图

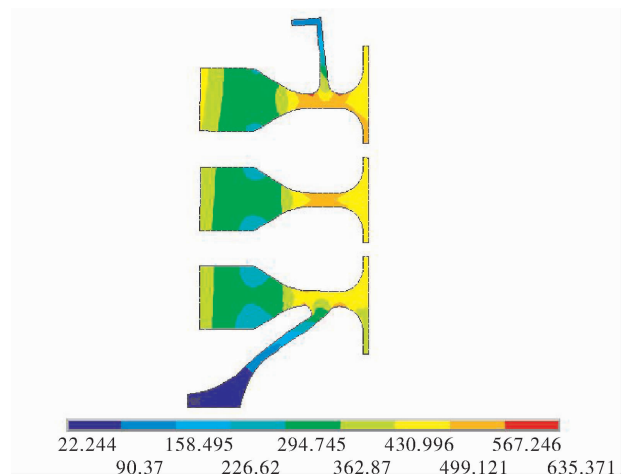


图9 三辐板风扇盘二维等效应力云图

加径向力. 周向应力根据傅里叶级数分解, 使用MODE命令, 取傅里叶级数前两项对二维风扇盘施加周向应力, 每一项定义为一个载荷步, 共生成4个载荷步文件, 求解, 完成二维分析. 应用ANSYS 12.0软件的后处理功能对二维分析的结果进行叠加处理, 可以很方便地得到轴对称体的二维分析结果. 其径向应力分布、周向应力分布和等效应力分布如图7—图9所示.

非对称载荷条件下的二维分析和三维分析结果比较发现, 两者径向应力、周向应力和等效应力的最大应力结果相差不大, 且最大最小值出现的位置相同. 表1列出了传统的二维分析结果(只加均布载荷)和非轴对称加载二维分析结果与三维分析结果的对比.

由表1可知, 当二维风扇盘的径向应力满足三维风扇盘应力要求时, 二维风扇盘的周向应力和等效应力与三维风扇盘存在差别. 对于施加非轴对称载荷的风扇盘, 其径向应力、周向应力和等效应力的

表1 不同的二维加载方式分析与三维分析结果对照表

分析方法	径向最大值	周向最大值	等效应力最大值
传统二维分析	479.5	276.3	408.1
非轴对称加载二维分析	491.6	548.1	635.4
三维分析	479.1	576.5	628.9

最大与三维风扇盘应力最大值相差不大. 而对于风扇盘的优化, 常与盘心最大周向应力和盘心最大等效应力联系, 所以合理的风扇盘周向应力分布和等效应力分布, 可提高风扇盘的优化品质.

3 结论

本文采用典型的三辐板风扇盘, 基于ANSYS平台, 采用APDL编程对三辐板风扇盘进行三维参数化建模, 同时建立三辐板风扇盘二维轴对称有限元模型, 分析施加均布载荷与三维风扇盘应力分析结

(下转第99页)

航空发动机双辐板涡轮盘温度场与应力场分析

金琰, 郝艳华, 黄致建

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:基于 ANSYS 软件,研究了双辐板涡轮盘的温度场和应力场,通过划分各个区域的换热模型,较精确地计算了温度分布,再通过间接热-结构耦合计算出双辐板涡轮盘的应力分布.结果表明,双辐板涡轮盘最大平均径向应力、最大平均周向应力、盘心平均周向应力分别为 702.35 MPa, 679.68 MPa和 880.98 MPa,不仅可满足规范设计要求的安全系数,还远小于材料的屈服强度 1 070 MPa,其结构完全满足了强度要求,并具有很大的发展空间.

关键词:航空发动机;双辐板涡轮盘;换热边界;温度场;应力分布

中图分类号:V232.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.017

Analysis of temperature field and stress field for the twin-web turbine disk of aero engine

JIN Yan, HAO Yan-hua, HUANG Zhi-jian

(College of Mechanical & Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The temperature field and stress field of the twin-web turbine were studied based on the ANSYS. Through dividing different parts of the turbine disk into different heat transfer model, the temperature field distribution was accurately calculated. And then the stress field distribution of the twin-web turbine disk was calculated by using the method of the indirect heat-structure coupling. The results showed that the maximum average radial stress, the maximum average circumferential stress and the average circumferential stress of plate heart were 702.35 MPa, 679.68 MPa and 880.98 MPa, respectively. It not only met the requirement of the safety factor, but also was less than the value of the yield strength, 1 070 MPa. So the structure completely met the requirements of strength, and had the large development potential.

Key words: aero engine; twin-web turbine disk; heat transfer boundary; temperature field; stress distribution

0 引言

涡轮是航空发动机核心部件之一,主要作用是提供动力,由于它一直处于高温、高转速的恶劣工作环境,其可靠性直接关系到发动机的性能和寿命^[1].双辐板涡轮盘是一种新型涡轮盘结

构,仅有很少的文献报道其相较于传统的单辐板涡轮盘,可以提高转速和减轻质量^[2].涡轮盘在工作时主要受到温度载荷和离心载荷的作用,为了得到涡轮盘的温度载荷,需精确地计算涡轮盘的温度场,但目前鲜有文献对此进行研究,文献[3]对空心盘的换热做了研究,具有借鉴作用.准确地计算双

收稿日期:2014-04-22

作者简介:金琰(1989—),男,安徽省巢湖市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为机械设计与理论.

通信作者:郝艳华(1956—),女,辽宁省沈阳市人,华侨大学研究员,主要研究方向为工程辅助设计、计算机辅助设计与工程(CAD/CAE).

辐板涡轮盘温度场不仅可以为其结构强度分析和寿命估算提供可靠的数据,还可以根据温度分布来改进其结构以达到更好的散热效果。

本文拟研究双辐板涡轮盘的温度场与应力场,针对不同部位给出不同的换热模型,并分别计算涡轮盘不同部位的温度分布,把获得的换热系数应用于涡轮盘的有限元分析,以说明双辐板涡轮盘这种结构在降低质量方面具有很大优势。

1 温度场计算的数学模型

对于各项同性及无内热源的结构体,二维轴对称稳态热传导方程可表示为^[4]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z r \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

式中, T 为温度场函数; k_r, k_z 为结构体导热系数; r, z 分别为结构体的径向方向和轴向方向。

涡轮盘与周围流体的换热按第三类边界条件来考虑,在盘面温度 T_w ,周围流体温度 T_f 及盘面和周围流体的对流换热系数 h 已知的情况下,边界条件表示为

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T_w - T_f)$$

式中, k 为结构体导热系数, n 为结构体与流体接触边界的外法线方向。

2 有限元模型的建立

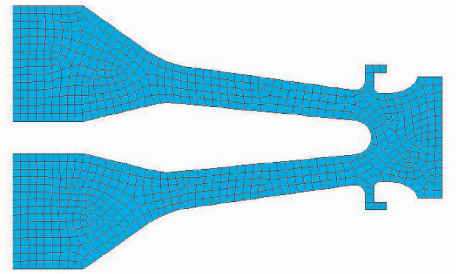
由于双辐板涡轮盘是一个回转体,在不考虑其安装边和一些通孔的情况下,可以简化为二维轴对称模型来分析。温度场计算采用 PLANE77 单元,对应的应力场计算采用 PLANE82 单元,都是四边形八节点单元。划分网格后的模型如图 1 所示,共生成 846 个单元和 2 821 个节点。

3 热力边界条件

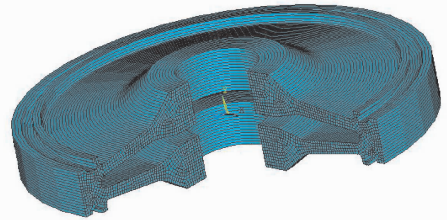
双辐板涡轮盘在工作状态时,盘缘受到来自叶片的热传导,盘的侧面和盘腔与压气机出来的高压冷却气体进行对流换热。根据结构特点和换热机理,将双辐板涡轮盘划分为有外部供气的转静系、自由盘和旋转盘腔。双辐板涡轮盘各个区域的换热模型如图 2 所示。

3.1 有外部供气的转静系模型

为了使涡轮盘更安全可靠地工作,一般是提供



a) 双辐板涡轮盘二维有限元模型



b) 扩展后的三维模型

图 1 双辐板涡轮盘有限元模型

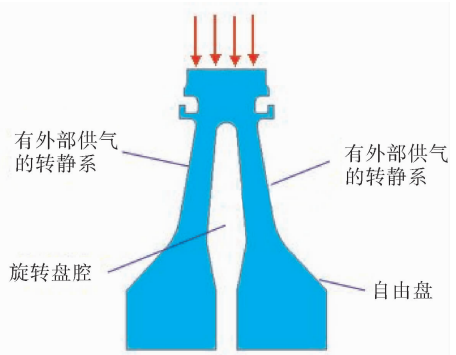


图 2 各个区域的换热模型

一定数量的冷气对其进行冷却。这些冷气有两个作用:一是冷却涡轮盘,二是阻止高温燃气从转静结合处侵入腔内。有外部供气的转静系努赛尔数^[5]为

$$\frac{Nu_{av}^*}{Nu_{fd}^*} = 1 + 0.22 \left(\frac{r_0}{r_{in}} \right)^2 \frac{C_w}{Re_w}$$

其中, Nu_{av}^* 为转静系努赛尔数, Nu_{fd}^* 为自由盘努赛尔数, r_0 和 r_{in} 为盘的半径和进气口半径, C_w 为进气系数, Re_w 为旋转雷诺数。

3.2 自由盘模型

理想的自由盘模型是指轮盘周围的空气是静止的,轮盘与周围空气之间只有旋转引起的相对运动,且周围空间无限大。发动机涡轮盘中有些地方属于这种情况,自由盘的努赛尔数为^[5]

$$Nu_{av} = 0.0197(n+2)(n+2.6)^{-0.8} Re_w^{0.8} P_r^{0.6}$$

其中, n 为盘温度分布的系数, Re_w 为旋转雷诺数, P_r 为普特数.

3.3 旋转盘腔模型

对于轴向贯通流的旋转腔,中心射流在腔内产生诱导性涡环,其强度随进气流速的增加而增大,随转速的增加而减小.所研究的涡轮盘因为转速很大,浮升力起主导作用,所以呈自然对流状态,其努赛尔数为^[5]

$$Nu = 0.026 7Gw_r^{0.286}$$

其中, Gw_r 为旋转格拉晓夫数.

3.4 外缘与叶片根部的换热系数

外缘与叶片根部的换热系数,通过转换可以换算成外缘与热流之间的第三类边界条件^[6].将热流和涡轮盘外缘之间建立直接的等效换热关系,等效的第三类边界条件为

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = h_c(T_w - T_g)$$

式中, h_c 为等效对流换热系数, T_w 和 T_g 分别为盘外缘温度和热流温度.

4 结果与分析

4.1 材料参数

双辐板涡轮盘采用的是 GH4169 合金,材料属性如表 1 所示.

表 1 GH4169 合金的材料属性 MPa

温度 $T/^\circ\text{C}$	屈服应力 σ_b	屈服极限 $\sigma_{0.2}$	弹性模量 E	热导系数 λ
300	1 190	1 350	185.5	17.52
400	1 210	1 350	177.1	18.92
500	1 070	1 310	167.5	20.32
600	1 130	1 280	158.1	21.70
700	1 090	1 230	150.2	23.20

4.2 温度场计算结果

进入 ANSYS 热分析模块,加上边界条件和载荷计算出的双辐板涡轮盘温度场分布情况如图 3 所示.由图 3 可以看出,双辐板涡轮盘的温度按盘缘到盘心呈梯度分布,其最高温度在盘缘为 600°C ,在盘心为 350°C .由于进气温度不同,左右两侧的辐板温度是不同的,同时根据涡轮盘结构特点,各个换热模型也是不同的,符合实际情况.计算完成的温度场会以节点温度的形式保存在一个文件中,用于强度分析.

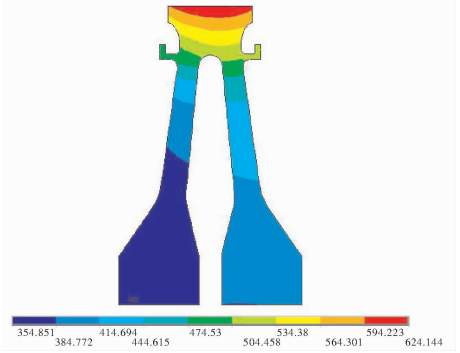


图 3 双辐板涡轮盘温度场分布

4.3 应力场计算结果

双辐板涡轮盘在工作状态中,受到温度载荷和离心载荷的作用^[7].笔者采用间接热-结构耦合,双辐板涡轮盘采用 1 个轴向(即 y 向)约束,在两辐板之间的进气口还有轴向位移耦合,盘缘拉力为 169 MPa ,轮盘转速为 $13\ 000\text{ r/min}$,计算出的应力分布如图 4 和图 5 所示.

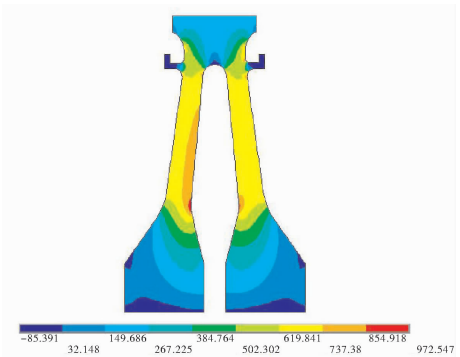


图 4 双辐板涡轮盘径向应力分布

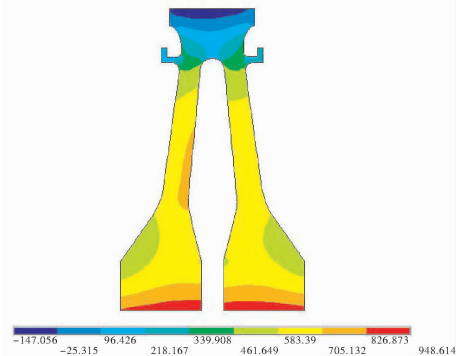


图 5 双辐板涡轮盘周向应力分布

通过 ANSYS 软件的后处理方法得到双辐板涡轮盘的辐板最大平均径向应力、最大平均周向应力、盘心平均周向应力,如表 2 所示.其中圆柱截面辐板最大平均径向应力和最大平均周向应力是按

一定的间距沿轮盘径向选取若干个截面,在每个截面上建立路径并按路径进行应力平均得到的^[8].盘心平均周向应力是先选取盘心的所有单元,提取每个单元的周向应力,然后乘以各自的面积再除以所选单元的面积和得到的.

表2 双辐板涡轮盘的应力水平

应力	应力值 /MPa	安全系数	
		$n_{0.2}$	n_b
最大平均径向应力	702.35	1.61	1.82
最大平均周向应力	679.68	1.66	1.88
盘心平均周向应力	880.98	1.28	1.45

规范设计要求的应力水平见表3.

表3 规范设计要求的应力水平

应力	安全系数	
	$n_{0.2}$	n_b
最大平均径向应力	≥ 1.33	≥ 1.67
最大平均周向应力	≥ 1.18	—
盘心平均周向应力	≥ 1.05	—

通过对照可知,双辐板涡轮盘的安全系数均大于规范设计要求的的安全系数,说明双辐板涡轮盘满足了结构强度要求.

5 结论

本文结合航空发动机传热学相关知识,研究了双辐板涡轮盘的温度场和应力场,将涡轮盘划分成不同的区域,给出各个部分的换热模型并计算对流

换热系数,再利用有限元分析软件 ANSYS 热分析模块对双辐板涡轮盘的温度分布进行数值模拟,最后计算在这种温度载荷下的应力分布情况.通过后处理的结果分析,可以看出双辐板涡轮盘最大平均径向应力、最大平均周向应力、盘心平均周向应力分别为 702.35 MPa,679.68 MPa 和 880.98 MPa,不仅可满足规范设计要求的安全系数,还远小于材料的屈服强度 1 070 MPa,说明其在降低质量方面具有很大的潜力.通过进一步的优化,相信可以达到更好的结构.这种方法可以应用于其他类似盘的研究.

参考文献:

- [1] 陈光.航空发动机结构设计分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [2] 陆山,李伦未.航空发动机高负荷涡轮盘双辐板结构优化设计[J].推进技术,2011,32(5):35.
- [3] 赵熙,徐国强,罗翔.等重量空心盘冷气布置方案[J].北京航空航天大学学报,2009,35(5):527.
- [4] 龚曙光,黄云清.有限元分析与 ANSYS APDL 编程及高级应用[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [5] 曹玉璋,陶智,徐国强,等.航空发动机传热学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [6] 张艳春,施丽铭.燃气轮机涡轮盘结构应力有限元分析[J].燃气轮机技术,2007,20(3):49.
- [7] 栾永先.双辐板涡轮盘结构强度分析[J].航空发动机,2012,8(4):42.
- [8] 李伦未,陆山.基于 ANSYS 的多辐板风扇盘结构优化设计技术[J].航空动力学报,2011,28(10):2246.

基于电极阵列优化的类真空静电吸附技术

过金超, 楚东月, 崔光照

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:提出一种基于电极阵列优化的类真空静电吸附技术:基于库伦作用、J-R 效应和静电吸附机理,采用有限元分析方法,构建了三极性电极吸附力输出模型,用于指导电极阵列的优化设计;采用电流变胶技术,设计不同吸槽深度和占空比的多组类真空静电吸盘,以进一步提升吸附力.将该类真空静电吸附技术应用于手持无线控制电控吸附攀爬机器人的设计,机器人的运行效果验证了该技术的可行性.

关键词:攀爬机器人;类真空静电吸附;电极阵列

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.018

Analogous vacuum electrostatic adsorption technology based on the electrode array optimization

GUO Jin-chao, CHU Dong-yue, CUI Guang-zhao

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Analogous vacuum electrostatic adsorption technology based on electrode array optimization was put forward. Based on the mechanism of role of Kulun, J-R effect and the electrostatic adsorption, The finite element analysis method was used to construct the triode adsorption force output model for guiding the optimized design of electrode array. Using electrorheological adhesive technology, several groups of different suction slot depth and duty ratio of analogous vacuum electrostatic chuck were designed to further improve the adsorption force. Analogous vacuum electrostatic adsorption technology was applied in the handheld wireless control electric adsorption climbing robot. The running results of the robot verified the feasibility of this method.

Key words: climbing robot; analogous vacuum electrostatic adsorption; electrode array

0 引言

静电吸附技术起源于18世纪初,自1973年静电吸盘首次被G. A. Wardly^[1]提出以来,该技术就引起了学术界和工业界的广泛关注.在工业领域,该

技术已被普遍应用,但在其他领域,应用相对较少.与传统的负压吸附、磁力吸附、夹持力吸附^[2-4]相比,静电吸附技术用于攀爬机器人设计具有以下显著优点:功耗低、噪声小、安全稳定、适用范围广,能够长时间独立工作且自身配置较轻,易于小型化.

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1304508);郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(01004)

作者简介:过金超(1978—),男,河南省开封市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为机器人智能控制及信息融合.

2006 年, J. Berengueres 等^[5] 提出采用微型静电吸盘作为攀爬机器人的吸附机构. 2012 年, 西蒙弗雷泽大学 Jeffrey 研究组在静电吸附技术基础上引入了壁虎刚毛阵列结构^[6], 制作了复合吸附阵列, 明显提升了吸附力, 但该研究还处于试验阶段, 仍存在诸多问题. 在国内, 静电吸附技术应用比较成熟的是哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室和北京航空航天大学. 2012 年, 哈尔滨工业大学开发出了滚轮式静电吸附攀爬机器人^[7], 但其吸附力相对较小, 仅有 $4.17 \times 10^{-3} \text{ N/cm}^2$, 经优化后, 电极阵列吸附力明显提升.

在已有研究基础上, 本文拟设计一种三极性电极阵列模型, 根据电极电场的分布特点及电流变胶柔性吸附特性提出类真空静电吸附; 再以真空吸槽深度为变量设计不同参数的吸盘, 并进行吸附力测试、分析, 从而得到吸附力更大的输出模型, 以期为后续研发攀爬机器人打下基础.

1 三极性电极吸附阵列模型的构建

常见的吸附阵列按结构可分为单极性和双极性, 现有文献对其他模型的研究比较少, 本文将针对三极性电极阵列进行仿真与分析研究. 三极性电极阵列指三组梳状电极阵列交叉排列, 并依次加载正、零、负高压静电. 为了研究电极阵列的电场分布情况, 首先采用有限元分析软件 Maxwell - 14, 在真

空环境下对不同电极宽度及对数的梳状共面电极阵列进行电场分布仿真分析. 其中, 电极材料采用铜材质, 电极组数分别为 2, 3, 4, 电极宽度分别为 10 mm, 15 mm, 25 mm, 电极占空比为 0.25, 加载电压为 4 kV, 三极性梳状电极有限元仿真电势分布如图 1 所示.

由图 1 可以看出, 三极性梳状电极的最高电势场可达 $3.50 \times 10^3 \text{ V/m}$, 比双极性模型大了一个数量级. 且电极对数越多, 电极间的相互影响越小, 端效应的影响可以忽略, 三极性梳状电极可以近似成单电极电容单元的并联形式.

根据高斯定理可得电极上任一点电荷量的切比雪夫多项式为^[8]

$$\sigma(x) = \frac{\sum_{n=0}^N A_n \cdot T_n(2x/w)}{\sqrt{1 - (2x/w)^2}}$$

其中, x 为该点在电极上的位置, n 为多项式系数, A_n 为切比雪夫多项式 T_n 的振幅, w 为电极宽度, 则一块电极长度为 l , 电极最小间距为 s , 吸盘宽度为 q 的梳状电极阵列的总电容^[9] 为

$$C = lq \frac{4}{\pi(s+w)} \varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} J_0^2\left(\frac{(2n-1)\pi s}{2(s+w)}\right) \quad (1)$$

其中, J_0 为第一类零阶贝塞尔函数, ε 为相对介电常数. 于是静电吸附力的大小为

$$F_1 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 s U^2}{2d_0^2} = \frac{CU^2}{2d_0} \quad (2)$$

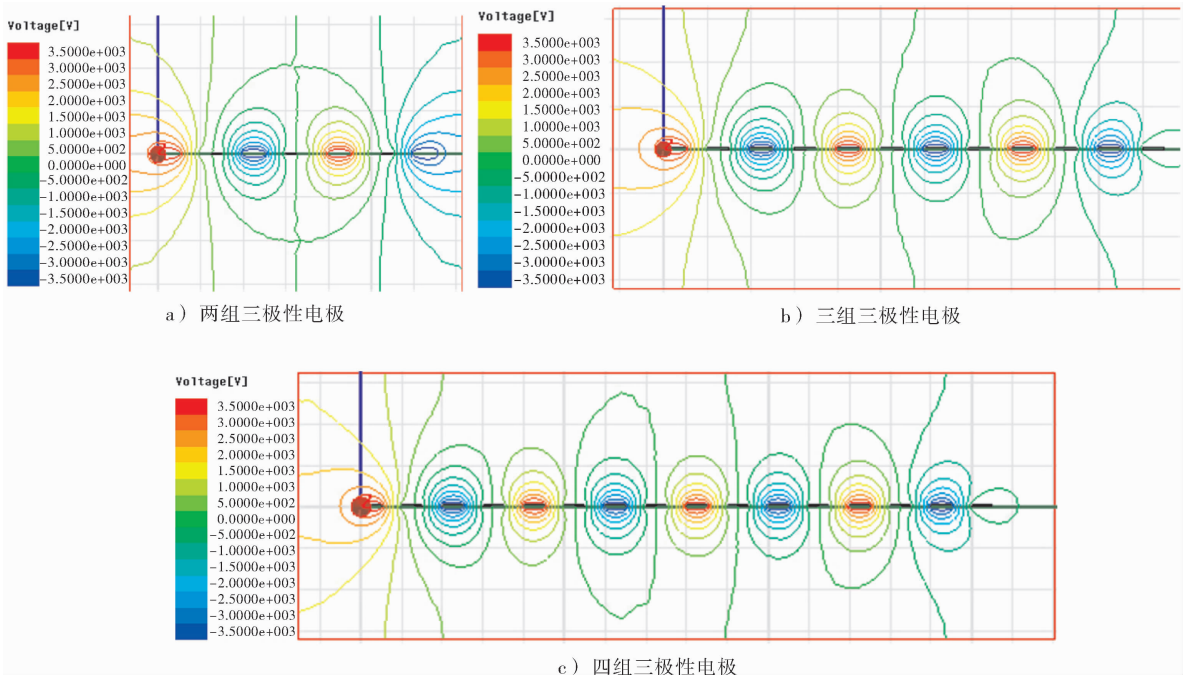


图 1 三极性梳状电极有限元仿真电势分布

由①和②式可知,静电吸附力主要由加载电压 U ,离壁面距离 d_0 ,电极占空比 $s/(s+w)$ 决定。

2 电极阵列的优化与类真空吸盘设计

由式①②分析可知,影响电极阵列吸附力大小的各个因素之间存在着矛盾关系.比如,小的电极间距限制了高的加载电压,更容易发生极间放电,这必然限制了加载电压的大小.同时,电极阵列的电场分布特性、电击穿特性、功耗及电极阵列“吸附/脱附”开关特性等也是影响其吸附力的重要因素。

2.1 电极阵列的电场分布特性与优化

由有限元分析可知,三极性电极阵列实际上是若干对电极的并联,把一对电极扩充到整个吸附阵列,并利用柯西黎曼方程进行 Shwattes-Christiffle 逆变换,可得到共面双面电极的解析式为^[7]

$$\begin{cases} |E| = \frac{U_a}{2k} \frac{1}{\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} \\ \delta_1 = (x^4 + y^4 - 6x^2y^2)k^2 - \\ (1 + k^2)(x^2 - y^2) + 1 \\ \delta_2 = 4k^2xy(x^2 - y^2) - 2xy(1 + k^2) \end{cases} \quad (3)$$

其中, E 是任意一点 a 处的电场强度, U_a 是对应 a 点处的电压, x 是该点的位置, y 是该点偏离电极的距离.因为吸附力大小和电场大小的平方成正比,所以由式③得

$$|E|^2 = \left(\frac{U_a}{2k}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} \quad (4)$$

由式④可知,电极电场的分布情况与电极吸附力的大小分布情况相同.有限元分析可得不同电极的电场分布,如图2所示。

由图2可以看出,电场强度并非均匀分布,而是在电极的边缘存在极大值,电极及电极间隙处则是沿各自边缘到中心方向呈递减趋势.这就意味着在电极阵列上加载一定电压的情况下,电极阵列的电极边缘总长度越大,并联后的总吸附力就会越大.因此,在电极吸盘大小一定的情况下,优化电极的尺寸、形状、边缘长度等参数,能增大电极阵列的吸附力.例如,根据攀爬机器人的特点设计非直线、非均匀分布的电极阵列,可以提高电极阵列性能。

2.2 电流变胶与类真空吸盘设计

电场的非均匀分布,导致类真空静电吸盘静电吸附力的分布也不均匀.利用此特性设计吸盘时,使电场的最大点处在真空吸槽的边缘,可提供较大静电吸附力作为真空吸槽的预应力,使得吸槽边缘

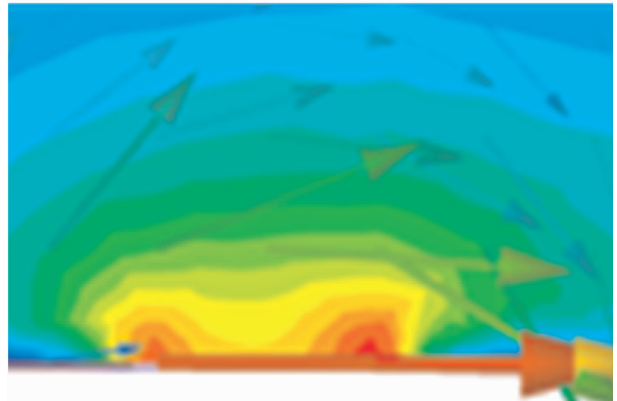
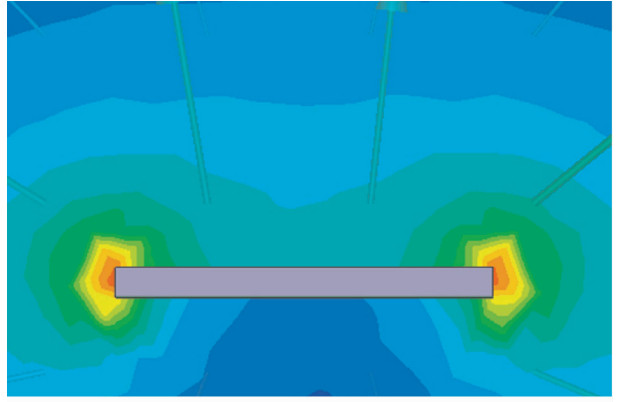


图2 三极性电极和双极性电极电场分布情况

与壁面实现更可靠的吸附,获得更好的吸附性能。

首先引入电流变胶特性,电流变胶是将ER微粒混入绝缘胶体中形成的,它和电流变液一样都会发生电流变效应^[10].将电流变胶涂在平行板电极中间,没有直流强电场时,电流变微粒突出于胶体表面(见图3),电极板与电流变胶的接触面积较小.当在电极板上施加强电场(kV级)时,电流变微粒在强电场作用下被极化并相互吸引,电流变微粒由胶体表面沉入了胶体内部,电极板和电流变胶的接触面积增大,不仅减小了电极电荷与壁面电荷之间的距离,也使彼此间的接触更加紧密,提升了吸附阵列的吸附力.但绝缘层的性能与厚度在很大程度上决定了漏电流的大小,也决定了J-R效应的强弱,对吸附力的输出起着至关重要的调节作用。

本设计提出的类真空静电吸盘,其横切面如图4所示,红褐色部分为铜电极,灰色部分为电流胶体沉积物.电流胶体包围每一条铜电极,四周形成一个类似壁虎刚毛末端的长形真空吸槽。

此类真空静电吸盘要实现可靠吸附,要求施加一定的初始应力,而静电吸附力刚好可以满足此要求,同时又能增大吸盘与壁面的接触面积,有利于提升静电吸附性能.因此,静电吸附力和类真空吸

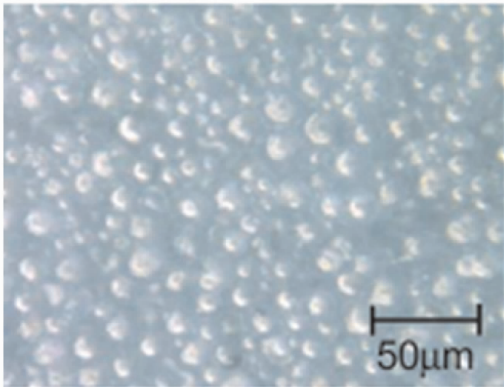
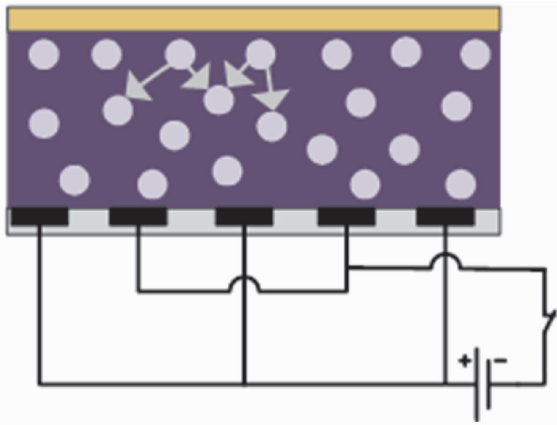


图3 电流变效应示意图

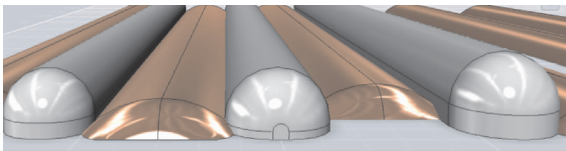


图4 类真空静电吸盘横切面示意图

附力间形成正激励作用,能够有效提高电极阵列的吸附性能.此外,在电流变的作用下,可以把吸盘表面的灰尘吸入胶体中,使吸盘具有一定的自清洁能力.但真空吸槽的厚度不仅影响静电吸附力的大小,也决定了能否形成有效的真空吸附效应,同时还影响 J-R 效应的强弱.因此真空吸槽的厚度就成了吸附力的关键指标.

3 电极性能测试与分析

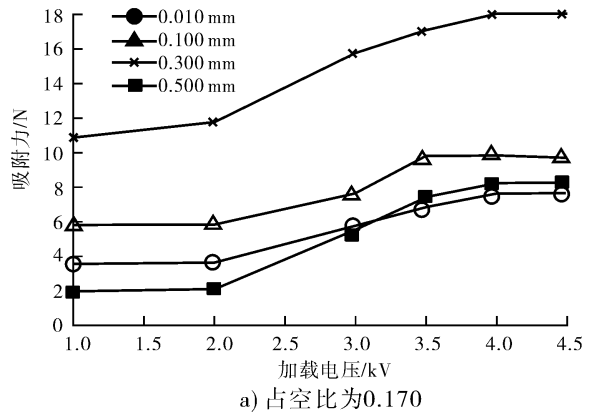
根据上面分析可知,绝缘吸槽越厚,静电吸附力就越小,但绝缘吸槽厚度太薄,吸槽深度就会太小,不易形成真空吸附效应,反而会降低吸盘的整体性能.为了得到较大的整体吸附力输出模型,研究小组设计制作了电极间距 4 mm,边长 150 mm,占空比不同、吸槽厚度不同的 4 组 8 个类真空静电吸

盘,然后在玻璃上进行吸附力测试与分析,吸盘参数见表 1.

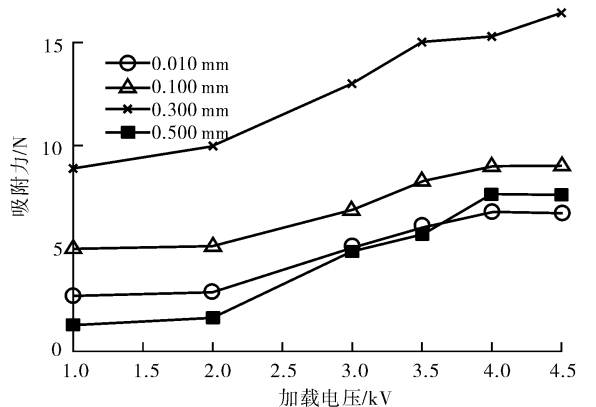
表 1 吸盘参数表

编号	吸槽厚度/mm	电极宽度/mm	占空比	电极长/mm
1	0.010	10	0.170	150
2		14	0.125	150
3	0.100	10	0.170	150
4		14	0.125	150
5	0.300	10	0.170	150
6		14	0.125	150
7	0.500	10	0.170	150
8		14	0.125	150

为了保证试验数据的可靠性,吸附力测试试验须满足以下条件:给每块吸盘分别加载 1 kV, 2 kV, 3 kV, 3.5 kV, 4 kV, 4.5 kV 电压;每块吸盘加载不同电压时都重复进行 8 次测量、记录、提取最大值、再取平均值的方式,然后利用 Matlab 对测得的数据进行分析处理,结果如图 5 所示.



a) 占空比为0.170



b) 占空比为0.125

图5 类真空静电吸盘吸附力与加载电压曲线图

由图 5 可以看出:吸盘的吸附力随着加载电压的升高而增大,这与前面的分析相吻合;随着绝缘吸槽的加厚,吸附力呈先增大后减小的趋势,这是由于当吸槽厚度太薄时不能形成有效的真空吸槽,

只有库仑力和 J-R 效应起作用,随着吸槽的增厚,虽然库仑力和 J-R 效应有所减弱,但到一定程度时形成了有效的真空吸槽,在负压吸附作用下,对外表现的整体吸附力增加了.但是,当吸槽太厚时,由于库仑力和 J-R 效应太弱,不能提供真空吸槽所需的初始应力,无法实现可靠吸附,因此整体吸附力又会减小.

当加载电压较低时,吸槽厚度 0.010 mm 的吸附力比吸槽厚度 0.500 mm 时大.而随着加载电压的增加,吸槽厚度为 0.500 mm 的吸附力又大于吸槽厚度 0.010 mm 时.这是由于随着加载电压的增大,库仑力和 J-R 效应增强,满足了真空吸槽所需的初始应力,实现了可靠吸附.从图 5 可以看出,当占空比为 0.170 时,吸盘的整体吸附力要比占空比为 0.125 时大,这也为后期进一步研究提供了依据.

最后,为了验证类真空静电吸盘的吸附效果,课题组设计了一款基于类真空吸盘的小型单履带静电吸附攀爬机器人,以机器人实际攀爬效果来验证.机器人整机重 450 g,履带有效吸附面积为 170 mm × 200 mm,单位面积承重 1.32 g/cm²,明显大于王黎明课题组^[11]开发的静电吸附机器人.对机器人在水泥墙上的运行过程进行抓拍,如图 6 所示.在手持无线控制器的控制下,该机器人能够在水泥、木板、玻璃等多种壁面上可靠吸附,并进行向上、向下攀爬,吸附性能明显提高.



图 6 攀爬机器人运行抓拍图

4 结论

本文对电极阵列的结构设计进行优化,利用有限元分析软件对三极性电极吸附模型进行仿真、分析,填补了国内研究大多基于双极性静电吸附阵列,缺失针对其他极性静电吸附阵列研究的空白.根

据攀爬机器人的特点与电极电场分布特性,结合电流变胶特性,提出将静电吸附与真空吸附相结合的新型类真空静电吸盘,设计不同吸盘参数,进行吸附力测试实验与分析,并得出有指导意义的结论.基于此类真空静电吸附技术设计的一款静电吸附攀爬机器人,能够在水泥、木板、玻璃等多种壁面上可靠攀爬,为后期静电吸附攀爬机器人的功能完善及深入研究打下了良好基础.

参考文献:

- [1] Wardly G A. Electrostatic wafer chuck for electron beam microfabrication[J]. Review of Scientific Instruments, 1973, 44:1506.
- [2] Wang Z H, Bao G J, Zhang L B, et al. Development and control of flexible pneumatic wall-climbing robot [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(6):961.
- [3] Tosun O, Akin H L, Tokhi M O, et al. TRIPILLAR: Miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability [C]//12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Istanbul:CLAWAR, 2009:343-350.
- [4] Yasong L, Ausama A, Dan S, et al. Abigail II: toward the development of a spider inspired climbing robot [J]. Robotics, 2012(30):79.
- [5] Berengueres J, Tadakuma K, Kamoi T, et al. Compliant distributed magnetic adhesion device for wall climbing [C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma:IEEE, 2007:1256.
- [6] Ruffatto D, Shah J, Spenko M. Optimization and experimental validation of electrostatic adhesive geometry [J]. Aerospace UK, 2013(1):130.
- [7] 黄之峰,王鹏飞,李满天,等.基于柔性静电吸附技术的爬壁机器人研究[J].机械设计与制造, 2011(6):166.
- [8] Stefan S, Bernhard J. A numerically efficient method of modeling interdigitated electrodes for capacitive film sensing [J]. Procedia Engineering, 2011(25):431.
- [9] Matthijs W. den Otter. Approximate expressions for the capacitance and electrostatic potential of interdigitated electrodes [J]. Sensors and Actuators, 2002, 96:140.
- [10] Kazuhiro Y, Kazuhito K, Joon-wan K. An intelligent microactuator robust against disturbance using electro-rheological fluid [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 175:101.
- [11] 王黎明,胡长春.基于静电吸附原理的双履带爬壁机器人设计[J].机械设计, 2012, 29(4):22.

基于网络预测的粮食颗粒输送 模糊控制系统设计

李阳¹, 裴旭明¹, 胡英杰²

(1. 郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 西安交通大学 机电工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:针对粮食颗粒管道气力输送系统中风速、压损、料气比等参数之间存在复杂非线性关系,难以建立准确的数学模型以实现闭环控制的问题,以CXLD50吸压混合输送移动式吸粮机为研究平台,设计了用BP神经网络的物料流量预测为反馈环节的模糊控制系统;使用神经网络工具建立物料流量预测模型,以快速方便地进行两相流流量在线测量;模型输出的预测流量与期望流量进行比较后,输入到模糊控制器进行判断推理并输出.仿真结果表明,系统响应迅速,可在50s内达到理想输出;抗干扰能力强,其误差量稳定在 ± 0.5 kg/s左右,有效改善了离线测量方法的信号反馈滞后现象,提高了输送系统的稳定性.

关键词:网络预测;气力输送;粮食颗粒输送;模糊控制系统

中图分类号:TH232 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.019

Design on fuzzy control system of grain particles transport based on network prediction

LI Yang¹, PEI Xu-ming¹, HU Ying-jie²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is difficult to establish accurate mathematical model to realize the closed-loop control, because of the complex nonlinear relationship among the wind speed, pressure loss, feed-gas ratio and other parameters in grain particles pneumatic transport. To solve this problem, with CXLD50 suction pressure mixed conveying mobile grain sucking machine as the research platform, fuzzy control strategy was put forward with the material flow prediction of BP neural network as feedback loop. The system uses the material flow prediction model based on neural network tools which could quickly and conveniently online measured two-phase flow. After comparing the model output flow of prediction and expectation, it was input to the fuzzy controller for judgement and output. Simulation showed that the system has rapid response, achieving ideal output in 50 s and strong anti-interference ability, keeping deviation stable in ± 0.5 kg/s so that the fuzzy control system could improve the signal of off-line measurement feedback lag and raise the stability of transport system.

Key words: network prediction; pneumatic transport; grain particles transport; fuzzy control system

收稿日期:2014-09-14

基金项目:河南省科技攻关项目(102102210134);河南省教育厅科学技术研究重点项目(12A460013)

作者简介:李阳(1989—),女,河南省确山县人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为粮食气力输送技术.

0 引言

粮食气力输送系统具有效率高、管道布置灵活、占地少、无粮食抛洒、节能环保等优点,已成为世界范围内广泛采用的散状物料输送方式。然而,输送系统中风速、压损和料气比各参数之间互相耦合,存在复杂的非线性关系,且输送对象多变,两相混合流流态不稳定,这些因素都导致系统的瞬时流量难以准确测量。目前,流量测量的主要手段是使用电子秤,然而这种测量方式反应迟钝,存在显著的滞后性,无法建立带有实时反馈环节的闭环控制系统。

为解决流量测量滞后和物料输送不稳定的问题,文献[1]采用模糊控制方法,设计了颗粒物料的气力输送系统临界风速模糊控制器,实现了整个控制过程的快速稳定。文献[2]基于并行模块化神经网络建立了浓相气力输送系统的控制模型,利用模糊控制手段初步实现了浓相气力输送的自动控制,控制平稳,响应迅速。文献[3]研究了烟丝接种中流量控制的问题,使用模糊PID方法实现了烟丝流量和生物酶的比例控制。已有文献多使用模糊控制方法解决气力输送中的部分输送问题,但对稀相粮食气力输送中的输送不稳定问题还鲜有探究。本文以CXLD50型吸压混合输送移动式吸粮机为研究平台,在粒径为2 mm以上大颗粒物料的输送状态下,利用神经网络流量预测模型以任何精度逼近非线性关系的特点,应用模糊控制理论,以BP神经网络的物料流量预测为反馈信息,建立输送系统的模糊控制模型并进行仿真研究,以解决流量测量滞后问题,提高系统输送的稳定性。

1 模糊控制系统的建立

1.1 系统构成

模糊控制是用模糊数学知识,模仿人脑的思维

方式,对模糊现象进行识别和判断,并给出精确的控制量,对被控对象进行控制,其核心是语言规则和模糊推理,其基本组成见图1。由图1可知,模糊控制系统的主要组成部分是输入/输出、模糊控制器和控制对象,其中模糊控制器又包括模糊化、模糊推理、清晰化和知识库(数据库、规则库)4个模块。

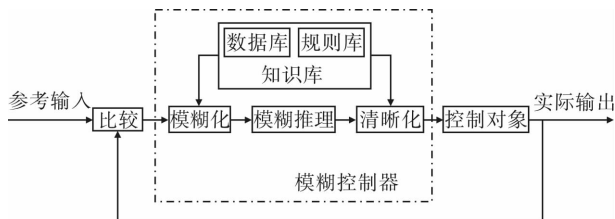


图1 模糊控制结构简图

1.2 模糊控制器工作原理

模糊控制器首先将来自实际输出量与参考输入量之间的偏差量和误差变化率放入各自的论域模糊函数域内,使精确量变成模糊量,完成输入的模糊化;然后经数据库各模糊集的隶属度函数转换后,再运用控制规则使模糊控制量转换成各自论域范围内的清晰实际的控制量,以此实现对控制对象的控制^[4]。这里,模糊推理规则是核心,它根据实际对象特性和控制性能给定调整误差、误差变化率和控制量的权重,在整个控制系统中起重要作用,决定控制系统的品质和特性。

1.3 模糊控制系统的设计

本控制系统建立在CXLD50型吸压混合输送移动式吸粮机的研究平台上,其基本结构如图2所示,主要技术参数为额定输送功率50 t/h,输送管直径170 mm,风机风压37 kPa,输送风量3 300 m³/s,电机功率55 kW,输送距离≥16 m,物料粒径范围2~8 mm。

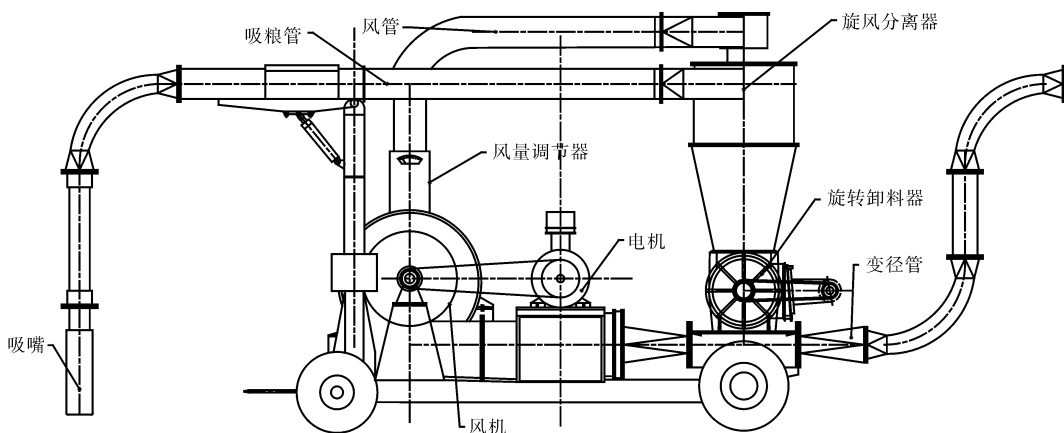


图2 CXLD50型吸压混合输送移动式吸粮机结构简图

该吸粮机以正负气压混合方式对粒径为 2 ~ 8 mm 的粮食颗粒进行输送. 主电机带动多级离心风机通过叶片旋转在进风管中产生负压, 将粮食物料吸入管内, 通过水平管道输入离心式分离器进行料气分离, 空气经除尘后经分离器顶部的风管进入风机进风口; 同时, 粮食物料旋转下落, 通过卸料器拨轮的旋转落入变径管, 经变径管被正压气流吹出. 由于粮食输送系统吸压混合、风速、压损及料气比等因素的影响, 物料流量测量和数据显示存在明显滞后. 另外, 传统的物料输送控制方式是主要依赖人工观察和操作的开放式控制, 难以对输送系统中复杂多变的情况进行自动调整, 有可能导致系统输送效率波动. 利用 BP 神经网络能以期望的精度逼近任何非线性函数, 并具有自学习、自组织、自适应与并行处理等功能^[5]. 本文提出的基于 BP 神经网络的预测模型, 为反馈环节的模糊控制系统模型, 如图 3 所示.

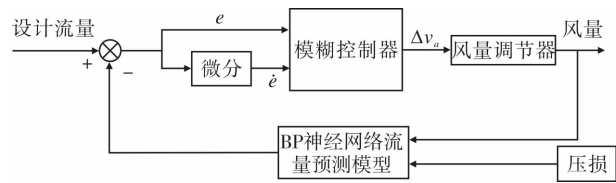


图 3 以 BP 神经网络预测模型为反馈环节的模糊控制系统

由图 3 可知, 以输送物料的参考流量和预测流量之间的误差及误差变化作为模糊控制器的输入, 因为风速最易于调节^[6], 所以将输送风速作为模糊控制器的输出. 输出的风速通过风量调节器进行控制, 风速和差压变送器得到的压损一起作为 BP 神经网络预测模型的输入量进行流量预测, 得到的物料流量反馈给系统输入端, 与参考流量进行比较, 模糊控制器不断做出相应的判断和输出, 从而实现稳定流量的自动控制.

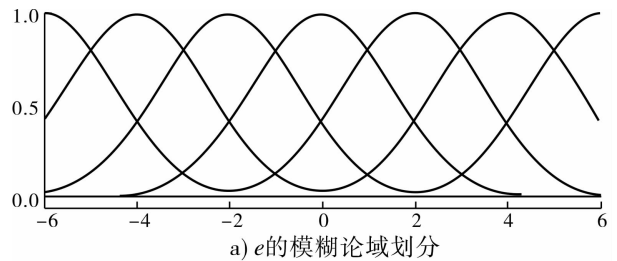
2 模糊控制器的设计

选取系统误差 e 和误差变化 \dot{e} 的二维非线性 PD 控制器. 前者为物料流量期望值和输送系统瞬时物料流量的预测值之差, 即 $e = u_0 - u$; 后者是偏差的变化量, 即 $\dot{e} = du/dt$. 当 $u_0 = u$ 时, e 和 \dot{e} 都为 0, 此时系统达到期望值.

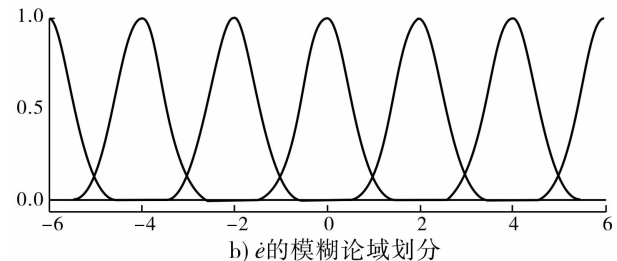
气力输送风速是管道压损和输送物料流量的直接影响因素^[6], 且易于调节, 故模糊控制器的输出选择输送风速的变化量 Δv .

2.1 模糊论域的划分

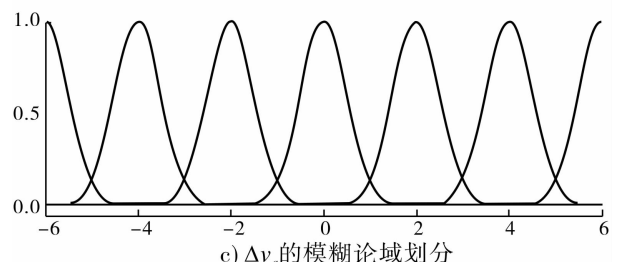
论域划分的个数决定了模糊控制的精确程度. 考虑到规则库的完备性和一致性, e 的模糊子集设计为 $\{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$; \dot{e} 的模糊子集为 $\{NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL\}$; Δv_a 对应的模糊子集为 $\{NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL\}$. 其中, 字母含义为正 (P)、负 (N)、大 (L)、中 (M)、小 (S)、零 (Z). 它们对应的论域范围均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 输入输出变量的隶属度函数都取正态 Gauss 形, 各自的论域划分情况如图 4 所示.



a) e 的模糊论域划分



b) \dot{e} 的模糊论域划分



c) Δv_a 的模糊论域划分

图 4 输入输出变量的模糊论域划分

图 4a) 中, e 的隶属函数形状系数取 1.5, 各阈值函数的交叉覆盖率较高, 可使偏差量更易于识别; 图 4b) 和 c) 中, \dot{e} 和 Δv_a 的隶属函数形状系数都取 0.6, 各阈值函数的交叉覆盖率较低, 形状更尖锐, 使偏差更便于跟踪与捕捉, 同时使输出的控制量更加精确.

2.2 模糊控制规则库的建立

模糊控制规则库采用十字交叉方法建立. 在模糊推理过程中, 蕴含运算采用 Mamdani 方法, 合成运算采用 Min-Max 方法, 清晰化采用重心法.

设输入空间 e 和 \dot{e} 的模糊分级数均为 7, 故最大

可能的模糊规则数 $n = 7 \times 7 = 49$. 当 e 为 PL, 且 \dot{e} 为 P^* 时, 说明预测流量 u 远远小于期望值 u_0 , 并有进一步减少的趋势, 此时应大幅增加输送风速, 因此 Δv_a 应取 PL, 目的是快速消除偏差. 模糊控制规则为: If (e is PL) and (\dot{e} is P^*) then (Δv_a is PL), 其他控制规则依此类推. 这里规则库中的模糊控制规则如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则

e	\dot{e}						
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z
Z	NM	NL	NL	NM	NM	NS	Z
PS	NS	NL	NM	NM	NS	Z	Z
PL	Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM
PL	PS	NS	Z	Z	PS	PM	PM
PL	PM	Z	Z	PS	PM	PM	PL
PL	PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL

将表 1 所示模糊控制规则输入到 Matlab 的工具箱中, 得到二维模糊控制曲面如图 5 所示.

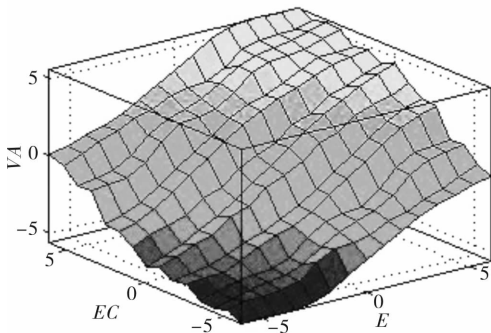


图 5 二维模糊控制输出曲面

图 5 中的 E 和 EC 分别表示 e 和 \dot{e} 尺度变换后的论域范围, VA 表示 Δv_a 尺度变换前的论域范围. 曲面反映了输出控制量随 e 和 \dot{e} 的改变而做出改变的过程. e 和 \dot{e} 在负向最大和正向最大之间变化时, 控制量的动态输出平稳无突跳; 当 e 正向较大且 \dot{e} 正向也较大时, 预测的输送流量远低于设计流量且偏差有继续增大的趋势, 此时应大幅增加输送风量从而提高系统输出量以修正偏差; 当 e 负向较大且 \dot{e} 负向也较大时, 预测的输送流量超出了设计流量且偏差有继续增大趋势, 此时应减小输送风量从而降低系统输出量以修正偏差. 模糊控制器正是通过这一过程来实现输送系统的自动调整, 从而达到稳定输出目的.

3 模糊控制系统的仿真

针对粮食气力输送的模糊控制系统是建立在使用 BP 神经网络工具进行输出流量预测的基础上, 控制对象使用传递函数定性描述水平管道压力损失跟随风速的变化趋势, 以观察模糊控制器的控制效果. 在 BP 神经网络流量预测模型中, 将风速和压损作为输入量, 物料流量为输出量进行网络训练和仿真.

粮食物料的气力输送使用两相流体力学中的达西理论, 可以得出风速与压损的近似关系, 处于牛顿计算区水平管道稀相输送情况下的压损与风速关系的近似理论关系式为

$$\Delta p_t = \lambda_a \frac{L}{D} \rho_a \frac{v_a^2}{2} + \left[\lambda_s \frac{L}{D} \rho_a \frac{v_s^2}{2} \frac{1}{\varphi} + \rho_a g \frac{u_t L}{\varphi v_a} \right] \frac{m_s}{m_a} \quad (1)$$

其中, λ_a 为空气摩擦系数, L 为测试管长, D 为相应管径, ρ_a 为输送气流密度, v_a 为输送气流速度, λ_s 为固相颗粒群空气摩擦系数, v_s 为固相颗粒群运动速度, 固相颗粒群当量密度 $\rho_s = \rho_a m / \varphi$, g 为重力加速度, u_t 为固相颗粒群悬浮速度, 固气混合比(固相颗粒和气相流体的质量流量比) $m = m_s / m_a$, $m_a = A v_a \rho_a$, A 为管道截面面积, 固气速度比 $\varphi = v_s / v_a$.

牛顿计算区 φ 值的近似计算方法为

$$\varphi = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\lambda_s u_t^s}{2gD}\right) \left(1 - \frac{u_t^2}{v_a^2}\right)}}{1 - \frac{\lambda_s u_t^2}{2gD}} \quad (2)$$

由于风速、压损和流量三者之间相互影响, 无法用准确的数学模型来描述, 本研究列出压损随风速的近似变化关系来替代实际生产中的风量调节器, 这种近似数学关系的建立是为了验证模糊控制系统的可行性. 仿真模型中控制对象的输出信号等效于在硬件实验中使用差压变送器实时测量的压损信号, 输入到 BP 神经网络预测模型中进行预测反馈, 再与期望值进行比较, 完成控制系统的闭环处理. 在表 1 参数和式(1)(2)的基础上, 推导出水平输送管中压损随风速变化的近似数学模型如下:

$$G(s) = \frac{110}{1127s^2 + 40s + 1}$$

3.1 模糊控制系统的建立

在 Matlab/Simulink 软件环境下建立模糊控制系统仿真模型如图 6 所示.

图 6 中仿真系统的信号源为阶跃信号, 在 100 s

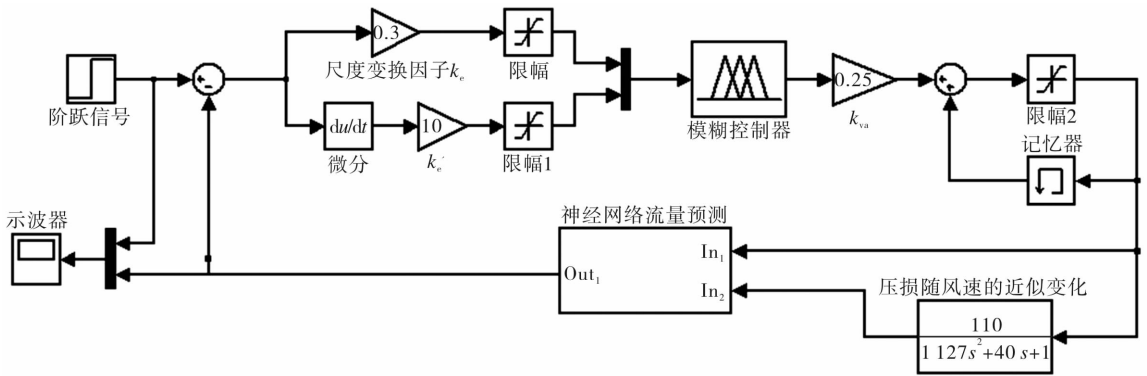


图 6 模糊控制系统仿真模型

后阶跃到期望流量值 6 kg/s, 信号源模拟吸粮机的设计流量, 经过 100 s 的启动之后开始正常输送, 期望流量为 6 kg/s. 阶跃信号与反馈信号进行比较后形成的 e 与微分后的 \dot{e} 都需要进行尺度变换, 均经过限幅后输入到模糊控制器进行判断推理. 输出的控制量为风量变化量, 经过传递函数模块后等效输出为压损, 共同输入到神经网络子系统中进行流量预测, 预测信号为反馈信号, 示波器用来显示控制效果. 这里取 e 的尺度变换因子 $k_e = 0.3$, 取 \dot{e} 的尺度变换因子 $k_e' = 10$, Δv_a 的尺度变换因子 $k_{v_a} = 0.25$; 模糊控制器输入变量的限幅函数上下限取 $[-6, 6]$, 以使输入量 e 和 \dot{e} 的语言值处于论域范围内, 输出变量的限幅函数上下限取 $[0, 30]$, 使 Δv_a 在 $0 \sim 30$ m/s 之间变化.

3.2 结果与分析

模型建立完成后进行调试, 继而开始仿真运行, 运行时间为 450 s, 示波器模块将阶跃信号与预测信号同时输出, 控制响应如图 7 所示.

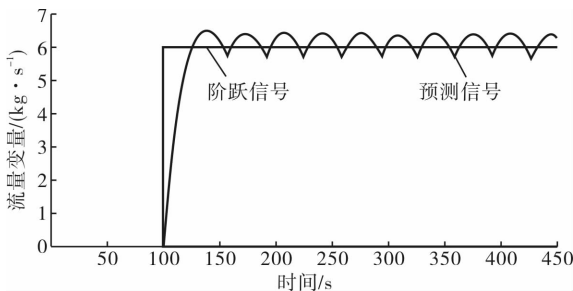


图 7 模糊控制器流量控制响应

由图 7 可知, 阶跃信号代表期望输出即设计流量, $0 \sim 100$ s 的时间内信号输出为 0, 表示系统处于启动过程, 风机需要无负载启动, 运行稳定后再进行输送工作; 预测信号直接体现控制效果, $0 \sim 100$ s 内的预测值为 0; 第 100 s 时期望值阶跃为 6 kg/s, 模糊控制器的输出控制信号在 $100 \sim 150$ s 内快速

到达期望值, 150 s 之后在期望值附近规则震荡, 控制偏差最大为 0.5 kg/s, 最小为 0.2 kg/s, 平均偏差超过 ± 0.5 kg/s, 表明控制效果比较理想.

4 结论

本文以 CXLD 吸压混合输送移动式吸粮机为研究平台, 提出了用 BP 神经网络的物料流量预测为反馈环节的模糊控制策略. 设计出的模糊控制规则库符合专家控制经验和实际生产规律, 生成的模糊控制曲面圆滑无突变, 符合控制规律, 依据两相流体力学理论建立的稀相混合流中压损随风量变化的近似数学模型, 便于控制模型在软件环境仿真的进行. 仿真结果显示, 模糊控制系统能在 50 s 内达到理想输出, 并稳定在 ± 0.5 kg/s 的误差范围内, 控制系统响应迅速、稳定性强, 控制效果较为理想, 实现了模糊控制器与 BP 神经网络预测模型的仿真结合, 为模糊控制系统的硬件实现提供了一个可供参考的范例.

参考文献:

- [1] 王泽南, 张鹏. 临界风速气力输送模糊控制仿真[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 116.
- [2] 张英建, 朱正泽. 基于 Elman 神经网络的浓相输送模糊控制系统[J]. 控制系统, 2007, 23(9): 68.
- [3] 范蟠果, 杨宵鹏. 基于模糊控制的烟丝接种控制系统设计[J]. 机械与电子, 2012(8): 48.
- [4] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 86 - 124.
- [5] 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.
- [6] 赵昀, 黄志尧. 基于神经网络及机理分析的气力输送粉料质量流量软测量[J]. 仪器仪表学报, 2000, 8(21): 360.

基于 NicheStack TCP/IP 协议栈的 嵌入式以太网控制器的设计与实现

刘黎明¹, 王用玺²

(1. 商丘师范学院 物理与电气信息学院, 河南 商丘 476000;

2. 河南省城乡规划设计研究总院有限公司智能化研究所, 河南 郑州 450000)

摘要:针对传统嵌入式以太网系统存在的数据传输速率低、硬件不能升级、实时性和通用性不足等问题,提出了基于内嵌有 Nios II CPU 的 Altera Cyclone 系列 FPGA 的以太网控制器设计方案. 该方案针对以太网协议利用 Quartus II 和 Nios II IDE 为开发工具,对硬件进行重新配置,以提高系统集成度;采用 SOPC 技术构建了嵌入式网络硬件平台;基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实现了 NicheStack TCP/IP 协议栈的移植及顶层应用程序的编写. 系统测试结果表明,数据能够以 400 Mb/s 的速率正确收发,满足了以太网通信速率的要求,并可根据实际情况灵活配置.

关键词:NicheStack TCP/IP 协议栈;以太网控制器;FPGA;SOPC; $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.020

Design and realization of the embedded ethernet controller based on NicheStack TCP/IP protocol stack

LIU Li-ming¹, WANG Yong-xi²

(1. School of Physics and Electrical Information, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China;

2. Intelligent Research Institute, He'nan Urban and Rural Planning and Design
Research Institute Co., Ltd. Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to solve the problems of the traditional embedded Ethernet system, such as low data transmission rate, hardware cannot be upgraded, poor real-time and universality etc, the Ethernet controller design scheme based on Altera Cyclone series FPGA with Nios II CPU was proposed. The design aimed at Ethernet protocol using the Quartus II and Nios II IDE as the development tools for reconfiguration of the hardware in order to reduce the cost and improve the system integration. The SOPC technology was used to construct the embedded network hardware platform and based on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ to achieve the migration of NicheStack TCP/IP and compiling of the top application. The system test results showed that the design met the requirement of the Ethernet communication rate at the data rate of about 400 Mb/s, and could be flexible configured according to actual situation.

Key words: NicheStack TCP/IP protocol stack; ethernet controller; FPGA; SOPC; $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

0 引言

随着网络技术的发展,网络通信技术的应用日益广泛,将嵌入式设备和以太网技术结合^[1]进行高速数据传输、远程实时监控及远程视频会议等,已经成为嵌入式领域的研究热点,而这些研究都对网络性能、实时性和灵活性等提出了严苛的要求。

目前,传统的嵌入式网络系统多采用 8 b 或 16 b 的低速控制单位(MCU),在运行协议栈时,可靠性和实时性都难以保证。以 ARM7 为例,在没有其他任务占用资源时,CPU 向 PC 传送数据的最大传输速率仅为 31 Mb/s。文献[2]基于以 LPC2478 嵌入式处理器为核心的硬件平台实现了以太网通信,但只适用于小型协议;文献[3]基于 SAMSUNG S3C44B0X 微处理器和 RTL8019S,通过 Socket 编程在嵌入式 uCLinux 系统上实现了网络通信,但仅适用于系统网络数据较小且传输速率为 10 Mb/s 的以太网传输。在以上方案中,如果处理器在同时执行其他运算和控制任务,数据传输速率将会大幅减小。随着电子技术的发展,研究者开始尝试采用可编程逻辑器件实现网络数据的传输、交换、控制等功能^[4-5]。本文拟将性价比高、配置灵活的现场可编程门阵列(FPGA)用于以太网控制器设计,采用 NicheStack TCP/IP 协议栈和 Nios II 处理器,通过定制 IP 核实现整个系统,以提高系统实时性和扩展性。

1 NicheStack TCP/IP 协议栈

NicheStack TCP/IP 是专用于嵌入式系统的精简协议栈,具有移植简单、可靠性高和代码精简等特点,包含 Socket API,ANSI C 代码和基本网络通信功能,是 TCP/IP 组的 smal_footprint 实现。目前,NicheStack 支持 ICMP,IP,TCP,UDP 等多种协议和服务^[6]。NicheStack TCP/IP 协议栈具有以下特点:

- 1) 占用内存少。Boot 最小启动客户(包括 ARP,IP,ICMP,UDP,DHCP 和 TFTP)只占 12.8 KB,完整的 TCP/IP 只需 42.4 KB,增加 Socket API 需要 51.5 KB。
- 2) 支持两种任务模式,即支持主循环查询方式和任务挂起/恢复方式。
- 3) 通用性的内存管理。在使用内存时,利用宏定义对其进行分配和释放,分配时其大小固定。
- 4) 与 RTOS 无关。

5) 可靠性高,在数据通信中,TCP 数据包传输只受传输介质的频带宽度限制。

6) 可支持多种网络硬件,包括令牌环网、以太网和 SLIP。

2 系统硬件平台的搭建

本设计以 Cyclone II 系列的 FPGA 为核心硬件平台,采用嵌入 FPGA 的 Nios II 软核为主处理器,基于 Altera 提供的 Enternet IP 协议,采用 DAVICOM 公司的 DM9000 网络控制芯片为以太网控制芯片(该芯片具有通用处理器接口,1 个 10/100 PHY 和 4 KB 的 SRAM,可实现网络协议中 MAC 层和传输层的功能,是一款低功耗高性能的控制器),其他硬件还包括 JTAG 接口、Flash 存储器接口等。系统结构如图 1 所示。

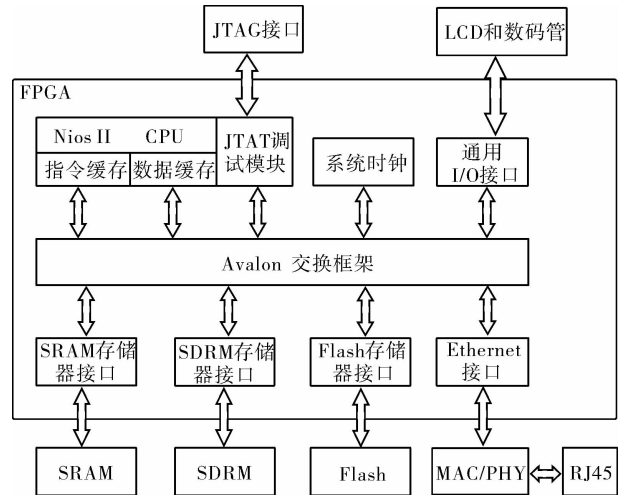


图 1 系统结构图

系统硬件平台设计过程如下:

首先,在 SOPC builder 中构建 SOPC 系统,包括 Nios II 软核 CPU、存储器接口、以太网接口等,这也是系统的主要硬件部分,并通过 Avalon 总线将它们相连;其次,将 SOPC builder 生成的原理图模块进行布局连线设计;最后,由系统生成配置文件,下载到开发板上。由上述过程生成的以太网 SOPC 系统如图 2 所示。

3 软件设计

本系统软件设计主要包括三部分,即 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 移植、NicheStack TCP/IP 网络协议栈的移植、顶层应用程序的编写和实现。其软件结构如图 3 所示。

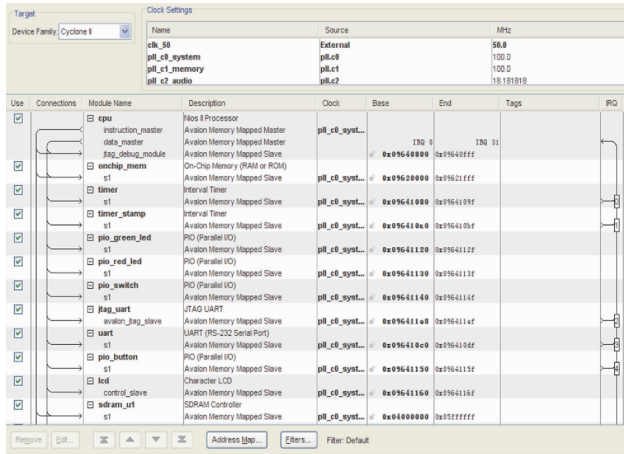


图 2 以太网 SOPC 系统结构图

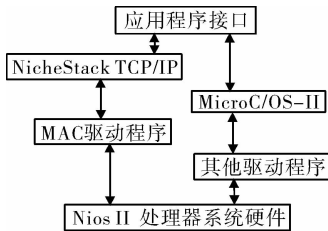


图 3 以太网 SOPC 系统软件结构图

3.1 μC/OS-II 移植

μC/OS-II 移植就是将 μC/OS-II 实时内核移植到特定的微处理器,运行 μC/OS-II 时需提供源代码和系统运行软件^[7-8]。

μC/OS-II 是一个多任务调度器,添加了与多任务操作系统相关的信号量、邮箱等服务.其中,实现多任务之间的切换是移植过程的主要工作,因为这部分代码是用来恢复和保存处理器现场的,因此只能使用处理器的汇编语言完成,而不能用 C 语言完成^[9]。

本设计将 μC/OS-II 移植到 Nios II 软核上,需要对与 Nios II 体系结构相关的 OS_CPU.H 文件、OS_CPU.C.C 文件和 OS_CPU.A.ASM 文件进行修改.μC/OS-II 通过以上文件实现任务切换和中断机制,通过编写相应的中断响应函数使系统在目标处理器上运行。

μC/OS-II 建立在安全线程 HAL 系统库上,与 Nios II 系统兼容,是系统软件设计和 Nios II 系统的一部分.HAL 提供了 μC/OS-II 在 Nios II 上运行所需的驱动,因此 μC/OS-II 不仅可以调用 HAL 服务,而且可以调用 API 函数.对于 Nios II 处理器而言,μC/OS-II 作为 HAL 库的一个子集,是 HAL 环境的

一种扩展,包括相应的 μC/OS-II API 功能和 μC/OS-II 系统的调度^[10-11].利用 Nios II IDE 对 RTOS 模块进行配置,其结果保存在 OS_CFG.H 文件中,无需编写头文件或源代码。

3.2 NicheStack TCP/IP 协议栈的移植

本文采用 NicheStack TCP/IP 协议栈作为系统的数据传输协议,通过该协议栈调度实现系统通信功能.NicheStack TCP/IP 在 Nios II 处理器实现移植须满足以下要求:

- 1) 系统程序要在基于 μC/OS-II 的实时操作系统运行;
- 2) μC/OS-II 的运行需要有时钟控制机制和时钟节拍,建立任务数不小于 4;
- 3) FPGA 硬件系统需要提供带有中断的以太网接口;
- 4) 必须由专用的定时器件提供系统时钟.

3.2.1 初始化 NicheStack TCP/IP 协议栈

NicheStack TCP/IP 协议栈的初始化可通过两个函数来完成,一个是 alt_iniche_init() 函数,另一个是 netmain() 函数,并设置 iniche_net_ready 变量为一个非零值.系统在初始化设备过程中,调用 get_mac_addr() 函数和 get_IP_addr() 函数来完成 MAC 地址、IP 地址的设置。

3.2.2 调用套接字接口

在以太网硬件初始化完成后,程序主要通过定义套接字的结构体来管理套接字的链接.程序中使用套接字接口访问 IP 协议栈需利用 TK_NEWTASK() 函数,它通过调用 μC/OS-II 的 OSTaskCreat() 函数来创建线程,且进行其他 NicheStack TCP/IP 协议栈特定的操作.本设计通过 TK_NEWTASK(&ssstask) 来建立网络线程。

3.3 顶层应用程序的编写和实现

通信的软件部分主要通过编写相应的应用程序并调用移植的协议栈库函数来实现.在通信应用程序设计之前,首先要将与系统有关的以太网协议栈、驱动程序和操作系统移植,通过 Nios II IDE 对其进行加载,然后在 Nios II IDE 中完成系统通信应用程序的设计和编写.系统软件部分的通信流程如图 4 所示。

系统上电后,整个系统(包括硬件和任务)都需要初始化.通信的整个过程为:通过任务建立网络连接,首先在网络连接中建立一个 TCP/IP 服务的 socket,通过调用 socket() 函数来创建一个套接字;

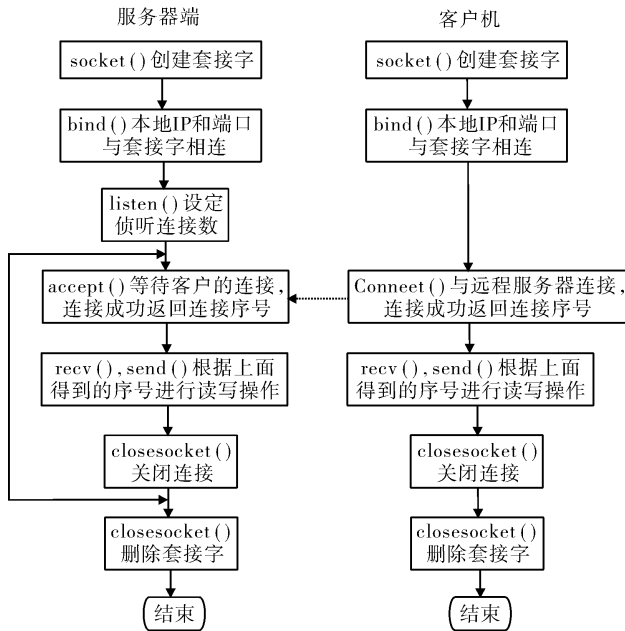


图 4 以太网通信程序流程图

然后,listen() 函数设定侦听的连接数,若此时有来自客户机端请求,就调用 accept() 函数接受请求,与此同时客户机端则通过 socket() 函数创建一个套接字,通过 bind() 函数将本地 IP 及端口号与套接字相连,再利用 connect() 函数与远程服务器连接,连接成功后,客户机与服务器将通过调用读、写套接字来进行通信,发送数据直至传输完毕后断开连接。

4 系统测试与结果

在本设计中,使用 DE2_70 开发板的快速以太网控制器发送和接收数据包,采用 Nios II 处理器,并通过 DM9000A 以太 PHY/MAC 控制器来发送和接收以太网数据包。

在发送端,Nios II 处理器每 0.5 s 向 DM9000A 发送 64 B 的数据包,DM9000A 接收完成后,给其附上一个 4 B 的校验和,并把它发送给以太网接口,在接收和发送数据时对其进行检验.符合 IEEE802.3 标准的 CRC 多项式为

$$FCS(s) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

在第 1 个字节最后的重要位,32 位的 CRC(cyclic redundancy check,循环冗余校验)校验值占据着带有 x^{31} 的 FCS(frame check sequence,帧校验).CRC 位按命令 $x^{31}, x^{30}, x^{29}, \dots, x^1, x^0$ 接收和发送,在接收

端检验是否丢弃。

在接收端,DM9000A 检验每个接收到的数据包,确定数据包的目的地 MAC 地址是否与 DE2-70 开发板的 MAC 地址一致,如果地址一致或这是一个广播包,DM9000A 将接收数据包并发送一个中断给 Nios II 处理器,处理器就会在 Nios II IDE 控制窗口中显示数据包内容.测试结果如图 5 所示。

通过上位机对数据传输速率进行仿真测试,测试结果如图 6 所示.由图 6 可知,数据在正确传输过程中能够以 400 Mb/s 的速率正确收发。

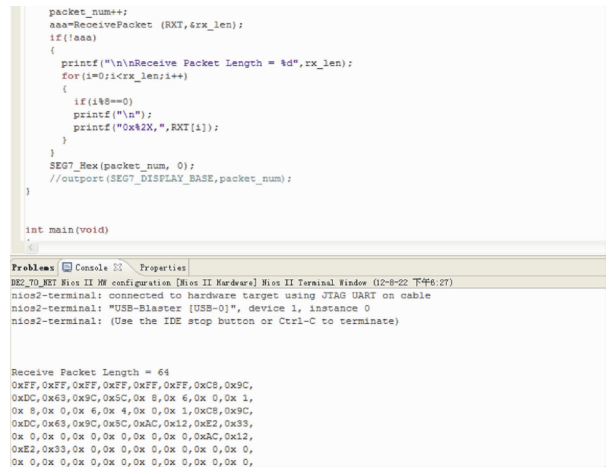


图 5 系统测试结果

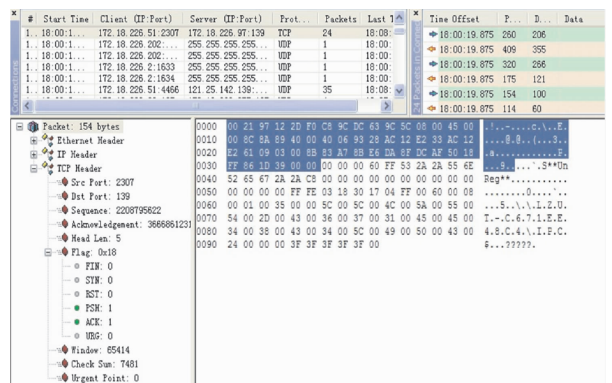


图 6 数据传输速率仿真测试结果

5 结语

本设计使用 Altera Cyclone 系列 FPGA 实现了 NicheStack TCP/IP Stack 协议栈,并移植到嵌入式实时操作系统,测试结果验证了该方法的有效性和可行性:满足了系统实时性和稳定性的要求,充分利用 FPGA 配置的灵活性,使得功能具备较好的扩展性,为今后嵌入式网络控制器在工业控制系统等领

域的应用提供了有效的技术支持。

参考文献:

- [1] 杨新华,王用玺,刘欣.基于FPGA的以太网高速数据传输系统的设计[J].仪表技术与传感器,2013(12):80.
- [2] 王国法,刘炜,段明玮.基于嵌入式系统的以太网通信开发[J].光通信技术,2012(4):36.
- [3] 徐海军,刘金刚,王益华.基于ARM核的嵌入式TCP/IP协议栈简化实现[J].计算机应用研究,2006,23(10):251.
- [4] 王鹏,姚明眸,鲍民权.基于FPGA的航空全双工以太网交换芯片[J].计算机工程,2008,34(23):261.
- [5] Yang H C, Wang F, Zhang J J, et al. Design of embedded tri-mode ethernet based on FPGA [J]. Computer Engi-

neering, 2007(15):139.

- [6] 李硕.基于FPGA的SOPC嵌入式系统设计技术的研究与应用[D].北京:北京工业大学,2012.
- [7] 赵星星,罗克露,张军,等.嵌入式实时操作系统移植技术的研究与应用[J].计算机工程,2007(17):90.
- [8] Labrose J J. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ [M]. 2版. 邵贝贝,译.北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [9] 黄布毅,刘国梅,郑安平,等.嵌入式家庭网络中央控制器的开发[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2004,19(2):41.
- [10] 杨威.基于FPGA的以太网和串口数据传输系统设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [11] 张志刚.FPGA与SOPC设计教程/DE2实践[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007.

(上接第80页)

果的区别.将施加均布载荷的三辐板与实际模型三辐板进行对比,发现施加均布载荷的二维模型应力分布与三维模型的应力分布情况相差较远,施加非轴对称载荷的二维模型的应力分布与三维模型的应力分布情况较为接近.与只施加均布载荷的方法相比,本方法提高了发动机风扇盘二维有限元模型应力分布的准确性.

参考文献:

- [1] 刘长福,邓明.航空发动机结构分析[M].西安:西北

工业大学出版社,2006:60-78.

- [2] 陈光.CFM56系列发动机结构设计与研究特点[M].北京航空航天大学出版社,2006:38-40.
- [3] 陈光.用于波音787客机的GENx发动机设计特点[J].航空发动机,2010,36(1):1.
- [4] Forrester J M. Circular arc multi-bore fan disk[P]. US Patent:6520742B1,2003-02-18.
- [5] 宋健.多辐板风扇盘拓扑优化方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [6] 李伦未,陆山.基于ANSYS的多辐板风扇盘结构优化设计技术[J].航空动力学报,2011,26(10):2245.

一种用于便携式12导数字化心电导联线的QRS波检测方法

郑晓婉¹, 闫艳霞¹, 苗维普², 姚文波³, 李海威⁴

(1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 郑州市起重自动化工程研究中心, 河南 郑州 451191;

3. 河南省电力公司 信阳供电公司, 河南 信阳 464000;

4. 新开普电子股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要:针对便携式12导数字化心电导联线不易识别心电信号QRS波的问题,基于信号处理,利用小波函数良好的时频局域化特性和对时变信号分析的优越性,运用小波变换的奇异点与信号变化剧烈处间的联系理论,以软件方法实现了QRS波的检测.仿真结果表明,该方法对于QRS波、特别是R波的检测,有较高的精确度.

关键词:便携式12导数字化心电导联线;QRS波检测;小波变换;奇异点

中图分类号:R318.6;TH776 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.021

Detection method for QRS wave used in portable digital 12-lead ECG cable

ZHENG Xiao-wan¹, YAN Yan-xia¹, MIAO Wei-pu², YAO Wen-bo³, LI Hai-wei⁴

(1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Hoisting Automation Engineering Research Center of Zhengzhou, Zhengzhou 451191, China;

3. Xinyang Power Supply Company, He'nan Electric Power Corporation, Xinyang 464000, China;

4. Newcapec Electronics Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to detect the QRS wave of ECG based on portable digital 12-lead ECG cable, according to the characteristics of time-domain and frequency-domain based on the signal processing method, and the theory of the relation between the singularity and the severe changing point of signal, the detection of QRS wave of ECG was achieved. The simulation results showed that the method had more accuracy for diagnosing QRS wave, especially R wave.

Key words: portable digital 12-lead ECG cable; detection of QRS; wavelet transform; singularity

0 引言

与传统心电导联线相比,便携式12导数字化心电导联线不仅可以采集到人体心电信号,而且可以

同时实现心电检测、心电图(ECG)显示和打印、心电信号分析及疾病诊断等功能^[1].QRS波是ECG信号的特征参数,包含了大量的心电信息.通过对心电信号特征参数进行分析,可以实现对心血管疾病

收稿日期:2014-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(61002007)

作者简介:郑晓婉(1979—),女,河南省南阳市人,郑州轻工业学院讲师,硕士,主要研究方向为测试计量技术及仪器.

的诊断.因此,对QRS波的检测结果不仅可以作为心血管疾病诊断的重要依据,也是检测与分析其他ECG信号特征参数(P波、T波等)的重要依据.国内外许多学者针对QRS波检测做了大量的研究,也形成了不同种类的检测方法,其大体可分为硬件检测方法和软件检测方法.硬件检测方法主要是利用ECG的各种心电参数与噪声间不同的频率特性来实现QRS波的检测,其优点是处理速度快和硬件结构相对比较简单,其缺点是检测不够灵活,对于复杂情况的应对能力较差,能够处理的参数有限.与硬件检测方法相比,软件检测方法的优点是:在实现数字滤波、线性与非线性变换、判定和处理等方面都很方便,对参数的选择、调节和处理具有一定的灵活性,可以应对复杂情况且进行判断,而且可处理的参数也较多,所以软件检测方法在QRS波检测中有一定的优越性.目前,检测QRS波的软件方法大致可分为两种:一种基于图像识别,一种基于信号处理.小波变换检测法就是一种基于信号处理的方法.小波变换已经被应用于心电信号滤波和特征值检测等医疗信号处理方面.与其他QRS波检测方法相比,小波变换本身具有非常好的时频局域化特性,尤其对于时变信号的分析具有独特的优越性,检测更灵活,应对复杂情况能力强,处理的参数范围大,识别R波峰值准确率高.所以小波变换分析法在ECG特征点检测和QRS波检测方面得到了越来越广泛的应用^[2].本文拟运用小波变换的奇异点和信号变化剧烈处之间的联系理论,以软件方法实现QRS波的检测.

1 小波变换与检测原理

QRS波的检测对于便携式12导数字化心电导联线是一项非常重要的功能.在便携式12导数字化心电导联线各种功能中,心血管疾病的诊断主要通过QRS波的识别与分析实现,因此设计一种适用于便携式12导数字化心电导联线的QRS波检测方法十分必要.

1.1 小波变换的奇异点与信号变化剧烈处之间的联系

小波变换的奇异点与信号变化剧烈处之间具有一定的联系^[3].在进行心电信号分析时,QRS波群处于心电信号的突变位置.将心电信号进行小波变换分解到多个尺度上,信号可以由多尺度小波变换的过零点、极值点等奇异点综合表示.

图1所示为小波变换的奇异点与信号变化剧烈

处之间的联系.由图1可知,峰值突变信号用 $x(t)$ 表示,信号突变点的位置对应小波变换的过零点或者极值点.以连续函数一阶导数 $\Psi^{(1)}(t)$ 为母小波作小波变换,信号突变点对应于各尺度下其小波变换的模极大值(过零点).

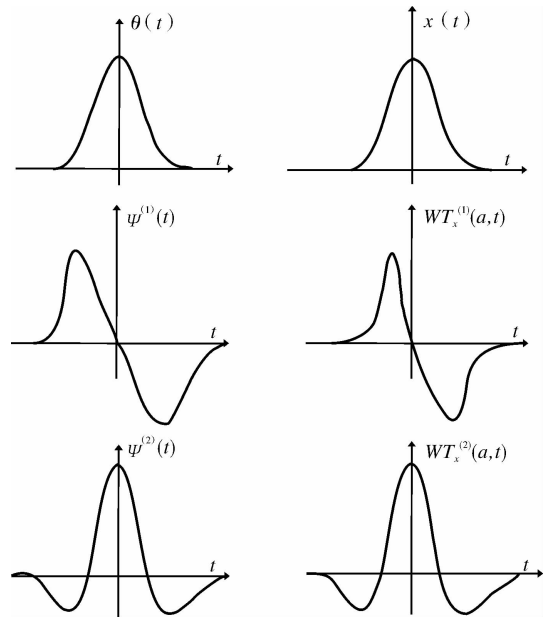


图1 小波变换的奇异点与信号变化剧烈处之间的联系

1.2 QRS波检测原理

Mallat等^[4]研究了信号的奇异点及其与小波变换的关系,得到以下结论: $W_s f(x)$ 是信号 $f(x)$ 的小波变换,当 s 无限趋近于0时,其模极大值对应于信号 $f(x)$ 变化的最激烈处.对于二进小波变换,在较小尺度上信号的奇异点应该对应小波变换的模极大值,但在 $s = 2^j (j \in Z, j > 0)$ 时,并不能真正地趋于零.因此,数字信号的二进小波变换在 $s = 2^j$ 尺度上时,信号的奇异点与小波变换相应的模极大值之间会存在一个偏移量 $\delta_j = \frac{2^j - 1}{2}$ ^[5],即小波变换的时移,其示意图见图2.

利用小波变换将心电信号分解到 $j = 1, 2, 3, 4$ 这4个尺度上.在 $j = 3, 4$ 尺度上QRS波最为集中,而R波的最大小波变换幅度则集中在 $j = 3$ 尺度上,由此可以选取 $j = 3$ 尺度进行R波检测.由小波变换与信号奇异点的对应关系可得到小波变换与R波之间的关系,如图3所示.由图3可知,在 $j = 3$ 尺度上,小波变换的一个正负极值对对应着心电信号的QRS波,QRS复合波的R峰值点对应于正极大值和负极小值连线的零交叉点,也就是过零点再加上时

移为 $\frac{2^3 - 1}{2}$ 的偏移量. 同理, 即可实现对 Q 波、S 波的检测.

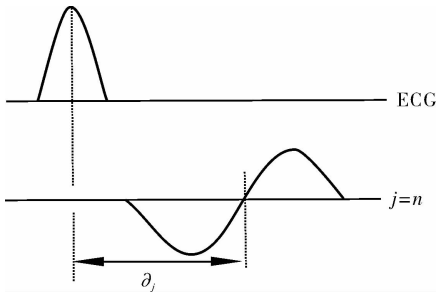


图 2 小波变换时移示意图

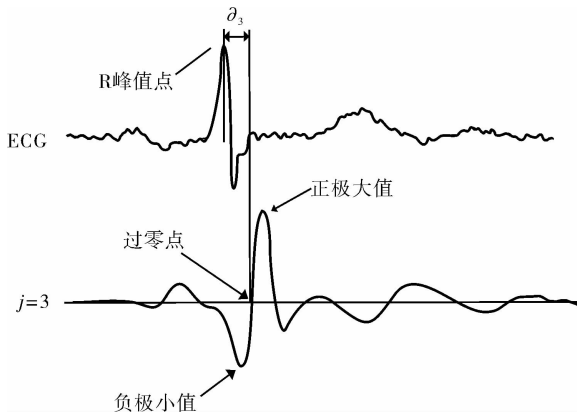


图 3 心电信号 R 波与小波变换的关系

1.3 R 波复检策略

对 QRS 波的检测可能出现漏检和伪迹, 从而影响心血管疾病的诊断, 因此有必要对已检测出的 R 波进行复检. 设置斜率阈值可以实现对伪迹点的判断.

设正极大值和负极小值分别为 H_{maxi} 和 H_{mini} , 其对应位置分别为 T_{maxi} 和 T_{mini} , 斜率

$$L = \left| \frac{H_{maxi} + H_{mini}}{T_{maxi} + T_{mini}} \right|$$

设置斜率阈值 K , 如果一组正负极值对应的斜率 $L < K$, 可以认为其为伪迹点, 将其去除.

2 检测方法

根据上述原理, 本文设计的 R 波检测方法具体步骤如下.

- 1) 心电信号输入;
- 2) 利用小波变换对心电信号进行 $j = 1, 2, 3, 4$ 这 4 个尺度上的分解;
- 3) 在 $j = 3$ 尺度上检测正负极值对应的过零点, 并记录该点;

- 4) 计算并记录该正负极值所对应的斜率 L ;
- 5) 将所找到的过零点加上偏移量 $\frac{2^3 - 1}{2}$ 进行时移处理得到时移点;

6) 在 $j = 4$ 尺度上找出处理得到的时移点所对应的点, 检测在该点的左右是否还存在正负极值, 如果存在, 则记录此点并记作 R 点;

- 7) 设置阈值 K ;
- 8) 对找到的 R 波复检^[6];

9) 如果 R 点通过复检, 则可确定该点为 R 波的峰点, 否则将该点去除.

R 波检测流程如图 4 所示.

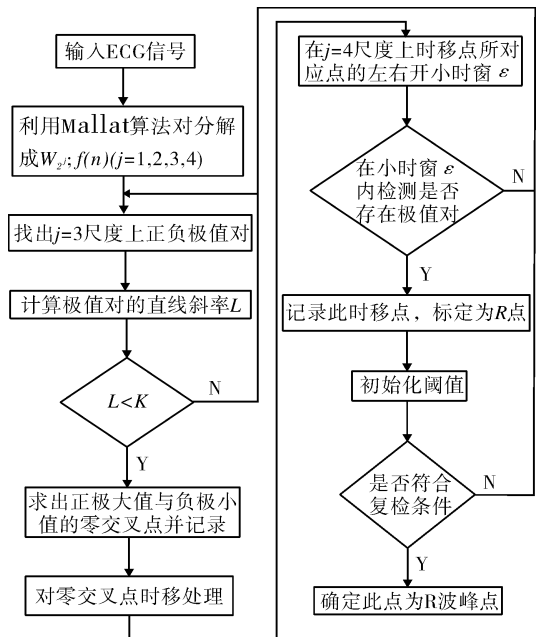


图 4 R 波检测流程图

3 实验分析

通过 Matlab 软件, 使用本文提出的检测方法, 对 QRS 波的检测进行了仿真实验, 结果如图 5 所示. 由图 5 可看出, 叉号处为识别出的 R 波, 识别率较高, 识别较准确.

同时利用该检测方法对 MIT-BIH 心率失常库的 40 个记录进行了检验分析, 其中漏检 2 次, 误检 3 次, 综合平均正确率为 97.71% (见表 1), 说明利用该 QRS 波检测方法对心率失常库记录中的常见心血管疾病判别效果较好.

4 结论

针对便携式 12 导数字化心电导联线不易识别

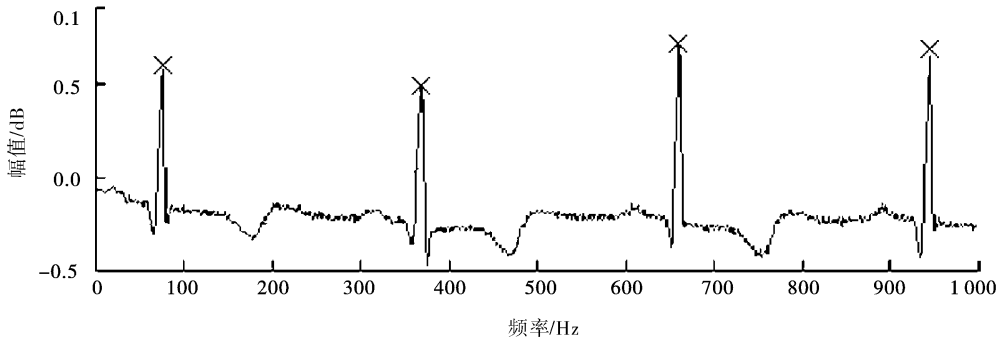


图5 仿真实验结果

表1 检验分析结果

MIT-BIH 心率 失常库记录序号	漏检/次	误检/次	错检总 数/次	平均正确 率/%
100 ~ 109	0	1	1	97.21
110 ~ 129	1	0	1	97.44
200 ~ 209	1	2	3	96.22
210 ~ 219	0	0	0	100.00

心电信号 QRS 波的问题,采用基于信号处理的方法,利用小波函数良好的时频局域化特性和对时变信号分析的优越性,运用小波变换的奇异点和信号变化剧烈处之间的联系理论,以软件方法实现了 QRS 波的检测.通过仿真实验发现,该方法对于 QRS 波的检测有较好的效果,特别对 R 波的检测精确度较高.

该方法仍存在待解决的问题,在后续的研究中,应主要针对漏检这一问题,进一步提高检测

精度.

参考文献:

- [1] 郑晓婉,董洁,苗维普.基于小波变换的抑制心电信号噪声方法研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(4):9.
- [2] 刘明才.小波分析及其应用[M].2版.北京:清华大学出版社,2013.
- [3] 汪振兴,张思杰,曾孝平.心电信号 ST 段形态识别算法[J].计算机应用,2011(10):2811.
- [4] 邹进,何乐生.基于区域极值法心电图 QRS 波的检测[J].电子测量技术,2012(3):100.
- [5] 何史林,陈广飞,应俊,等.串口型心电信号检测模块设计[J].医疗卫生装备,2012(10):30.
- [6] 姚成,司玉娟,郎六琪,等.基于小波提升的 ECG 去噪和 QRS 波识别快速算法[J].吉林大学学报:工学版,2012(4):254.

基于核酸适体传感器检测 IgE 研究进展

姜利英, 周鹏磊, 闫艳霞, 岳保磊, 肖小楠, 陈青华

(郑州轻工业学院 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:综述了利用电化学核酸适体传感器、光学核酸适体传感器和压电核酸适体传感器检测 IgE 的原理、检测限及线性范围等的研究现状,认为将纳米技术运用到适体传感器检测 IgE,将会成为未来的研究方向。

关键词: IgE 检测;核酸适体传感器;纳米技术

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.01.022

Research progress of IgE detection based on aptamer sensor

JIANG Li-ying, ZHOU Peng-lei, YAN Yan-xia, YUE Bao-lei, XIAO Xiao-nan, CHEN Qing-hua
(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The IgE detection principle, detection limit and linear range using electrochemical aptamer sensors, optical aptamer sensors and piezoelectric aptamer sensor were reviewed. Applying nanotechnology to aptamer sensor to detect IgE would become the research direction.

Key words: IgE detection; aptamer sensor; nanotechnology

0 前言

免疫球蛋白 E (IgE)^[1-3] 主要由呼吸道和消化道黏膜固有层淋巴组织中的 B 淋巴细胞合成,是人体血清中含量最少的 Ig,可以引起 I 型超敏反应.与 IgE 水平升高相关的疾病有过敏性哮喘、季节性过敏性鼻炎、特应性皮炎、药物性间质性肺炎、支气管肺曲菌病及某些寄生虫感染等.研究还表明, IgE 与包括 AIDS 在内的免疫缺陷疾病相关.所以,快速、准确地检测 IgE,在疾病预防、诊断和治疗方面意义重大.传统的 IgE 检测分析基于抗体-抗原的免疫分析方法,如放射免疫法、酶联免疫法、免疫投射比浊法、免疫印迹法等^[4-8].针对 IgE 含量检测,已经研制出了检测试剂盒、检测试纸条及检测芯片

等^[9-11],临床常用的检测 IgE 方法主要有颗粒增强免疫透射比浊法和免疫散射比浊法^[12].但 IgE 的抗体制备比较繁琐,固定的生物活性抗体保存时间有限且易失活,系统进行测量反应时对含 IgE 的样品纯度要求又比较高,因而限制了这两种免疫分析的发展.

随着科学技术的不断发展,利用核酸适体传感器检测 IgE 的技术越来越成熟,特定的核酸适体可以和 IgE 高度特异性结合,从而避免检测时杂蛋白的干扰;与 IgE 结合的核苷酸链通过体外 SEL-EX^[13-16] 筛选获得,减少了生物合成的复杂过程;经过修饰的 IgE 核酸适体和 IgE 结合过程具有较高的稳定性,且该过程能反复变性和复性.不同类型的核酸适体传感器在 IgE 检测方面的应用会越来越广

收稿日期:2014-08-12

基金项目:国家自然科学基金项目(61002007);河南省科技创新人才计划项目(124100510001)

作者简介:姜利英(1981—),女,河南省郾城市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为生物传感器及检测微系统.

泛. 本文拟基于不同核酸适体传感器检测 IgE 的原理,对电化学核酸适体传感器、光学核酸适体传感器和压电核酸适体传感器检测 IgE 的研究进展进行综述,以期核酸适体传感器检测 IgE 提供参考.

1 核酸适体传感器原理

核酸适体传感器是一种能够连续且可逆地进行分子识别的装置,也可以视作信息采集和处理链中的一个逻辑元件^[17-19],主要由接收器、换能器和电子线路三部分组成. 待测物质通过具有分子识别功能的接收器时,固定在接收器上的亲合配基在与待测生物分子相互作用的瞬间发生能量转移,这种能量经过换能器时会以电或光等物理信号的方式输出,经过电子系统的放大处理和显示,可以对待测物质进行定性、定量检测. 根据换能器的不同,核酸适体传感器主要可分为电化学核酸适体传感器、光学核酸适体生物传感器和压电晶体核酸适体传感器^[20-21].

2 核酸适体传感器检测 IgE

2.1 电化学核酸适体传感器检测 IgE

电化学适体传感器是将适体作为分子识别物质固定在电极上,依据适体与目标分析物-配体结合前后电化学信号的变化进行检测的电化学传感器^[22-25]. 其检测过程包括以下四步:一是适体固定;二是适体与目标的结合;三是将识别信息转为可测的电化学信号;四是电化学信号的放大检测.

目前,根据不同的电化学原理构建了多种类型的电化学适体传感器检测 IgE. D. K. Xu 等^[26]构建了一种基于阻抗法原理的电化学传感器,将巯基乙胺和单链 DNA 核酸适体通过分子自组装固定在光刻金的表面,利用阻抗发生变化定量测出人的 IgE. 该实验通过原子力显微技术分析可以看出,人的 IgE 可和核酸适体特异且稳定地结合. 该实验中人的 IgE 的线性变化范围为 2.5 ~ 100 nmol/L,检测限为 0.1 nmol/L,变异系数小于 10%. 徐大炜^[27]分别利用无标记电化学阵列传感器和电寻址适体阵列传感器测出了 IgE 的含量,在使用无标记电化学阵列传感器时,把芯片中不同 IgE 的单链 DNA 适体 5' 端用巯基进行修饰,然后固定在金电极表面,通过电化学工作站描绘出了电极阻抗谱图. 该实验结果表明:当 IgE 浓度在 2.5 ~ 100 nmol/L 范围内时,芯片表面阻抗值和人的 IgE 有很好的线性关系,线性

相关系数达到 0.998,其检测限为 0.1 nmol/L,相对标准偏差为 7.4%;在使用电寻址适体阵列传感器时,通过电压把经巯基乙胺修饰 5' 端的单链 DNA 适体固定在金电极上,同时通过电化学阻抗谱变化,优化了测量 IgE 的实验条件,如电压、通电时间和扫描速率等. I. P. Katerina 等^[28]利用差分脉冲溶出伏安法设计出一种检测人体血浆中 IgE 的一次性电化学核酸适体传感器,首先对 IgE 抗体进行生物素标记,然后通过实验确定缓冲液、试剂浓度、离子强度及 pH 等反应参数. 该种传感器检测限为 300 ng/mL,其敏感性与免疫传感器相似,但其热稳定性明显优于相应的 IgE 受体传感器. 郑帆^[29]利用 IgE 与设计核酸适体结合时形成的复合物生物分子/电解液界面被推挤,使结合物远离了电极表面,在没有任何放大作用下使峰电流大幅下降,从而使 IgE 检测易于完成. Y. Lu 等^[30]设计了一种利用 cDNA 作为探针的电化学适体传感器检测 IgE,该传感器具有高特异性且能够快速重生. 随着纳米材料的出现,因其独特的性质,出现了纳米材料和核酸适体相结合检测 IgE 的电化学传感器. O. Yasuhide 等^[31]利用改造后的字母场效应晶体管 (G-FETs) 与 IgE 适体结合制成一种高性能的化学传感器. 该实验通过原子力显微镜观察到, IgE 核酸适体固定在单层石墨烯上, G-FETs 可以通过无标记电化学方法检测 IgE,同时对生物分子检测具有很大的应用潜力. T. T. Dinh 等^[32]利用纳米金刚石薄膜 (NCD) 作为电极,制作了一种适体阻抗传感器,用于检测人的 IgE. 该传感器利用金刚石表面的适体与 IgE 结合时阻抗显著增加的特性,定量检测出人血清中的 IgE,其检测限达到了 0.03 $\mu\text{g/mL}$,同时具有较好的线性范围和重现性. 该研究表明,利用电化学阻抗 (EIS) 纳米适体传感器检测人血清中的 IgE 具有很好的应用前景.

目前,大多电化学核酸适体传感器检测 IgE,都是根据适体和 IgE 结合后空间构象变化,从而引起检测液中电信号变化,进而根据电信号改变定量检测出 IgE. 而纳米材料的应用为电化学传感器检测 IgE 中适体固定、信号放大提供了新的思路.

2.2 光学核酸适体传感器检测 IgE

光学适体传感器检测 IgE 主要是利用适体与 IgE 作用前后荧光信号的变化来进行检测的^[33-34]. 基于荧光偏振原理,人们设计出了不同传感器来检测 IgE,但其检测限较低. G. Giridharan 等^[35]基于快

速、均一核酸实体的生物分析,设计了用荧光偏振原理检测 IgE 的方法,分别使用荧光黄和德州红两种荧光团在 DNA 双链适体 5'末端进行标记,这种双链 DNA 适体具有一个颈环结构,随后在均一溶液中检测标记配体在反应平衡后各向异性的变化,从而能特异性检测出 10^{-9} 级的 IgE. 该种传感器检测限达到了 350 pmol/L. 胡坤等^[36]设计了一种基于核酸适体分子高灵敏性以检测 IgE 的荧光偏振分析方法,并测定了人血清中的 IgE. 该实验表明,在一定范围内 IgE 浓度范围与荧光偏振值呈较好的线性关系. 根据荧光在实验过程的淬灭信号检测 IgE 的方法操作简单,应用范围广. Y. X. Jiang 等^[37]利用蛋白质和适体结合时复杂的核酸分子开关检测 IgE,设计了 37-nt 的双链 DNA 适体,使其与 IgE 结合,然后检测 $[\text{Ru}(\text{phen})_2(\text{dppz})]^{2+}/\text{IgE}$ 发出冷光的变化, IgE 含量越高,发出的冷光就越少. 该实验有很高的选择性和灵敏度,其检测限为 100 pmol/L. 康燕^[38]设计了一种新型的简单快速的荧光适配体探针来检测蛋白质,在单链 DNA 适配体分子上标记一个荧光报告基团,再将 IgE 加入其中与之充分反应,然后将另一条与适配体碱基互补单链 DNA 序列进行修饰,互补链加上淬灭基团,随后把修饰的互补链加入到前两者的反应溶液中,这样,没有与目标物结合的适配体分子就会与互补链杂交,从而发生荧光淬灭,通过反应前后荧光强度的减小幅度来对溶液中的目标物进行定量. 该方法设计原理简单,目标物应用范围广泛. 何婧琳等^[39]研究了一种基于适体的荧光传感器,该传感器通过标记德克萨斯红短链 DNA 与部分 IgE 的适体序列互补配对,从而使结合 IgE 后体系的荧光信号增强. 该种非标记核酸适体荧光传感器检测下限可达到 5.7×10^{-11} mol/L. H. Q. Wang 等^[40]根据适体和 IgE 结合后出现的空间位阻效应使荧光素免于淬灭的原理,定量测出了 IgE 的浓度. 该研究的线性范围为 0.1 ~ 50 nmol/L,实验稳定性强、易于操作,可用于同源蛋白的检测. 胡鹏^[41]构建了一种基于分子间平行的 G4 股螺旋结构的多功能生物传感体系检测 IgE,分别把标记单链的富 G 寡聚核苷酸、完整 IgE 核酸适体作为荧光信号探针、目标识别探针. 该种传感器体系解决了绑定位点的优化问题,同时克服了荧光被核酸碱基淬灭的局限,是把 G4 股螺旋首次应用于 IgE 适体传感器的检测. 汪凤林^[42]利用荧光素标记 IgE 适体与 IgE 结合后形成的复合物能够阻碍荧光素与抗荧光

素抗体结合而继续发出荧光、当无 IgE 时荧光素抗体与荧光素结合而淬灭荧光的原理,设计出了一种新型荧光适体传感器. 该研究对 IgE 的检测下限为 0.1 nmol/L,达到了临床检测 IgE 的浓度要求. Kim 等^[43]基于超分子聚二乙炔(PDA)设计了无标记比色检测人 IgE 的适体传感器,在 PDA 脂质体上将功能化 IgE 适体作为接收器,检测 IgE 与适体结合后荧光信号的变化. 该实验检测限为 141 ng/mL,可应用于临床检测.

把荧光基团标记在 IgE 的核酸适体上,或将荧光基团和淬灭基团分别标于 IgE 核酸适体上形成其核酸适体分子信标, IgE 进入光学体系后,根据荧光信号的改变对 IgE 进行定量分析. 光学检测 IgE 既可在均相中进行,也可以在界面上完成,同时易与信号放大技术相结合.

2.3 压电核酸适体传感器检测 IgE

压电传感器又称石英晶体微天平,它的理论基础是压电效应^[44-46], Sauerbery 已证实:石英谐振器表面质量的变化与谐振频率的变化呈负相关,即 $\Delta F = -2.3 \times 10^6 F^2 \Delta M/A$, 其中, F 为晶体震动频率/MHz, M 为被晶体吸附的外源物质的质量/g, A 为晶体的面积/cm². 先在石英晶体镀上金膜,然后让石英谐振器选择性吸附 DNA,通过 DNA 分子杂交,对另一条还有互补碱基序列的 DNA 进行识别,结合成双链 DNA,利用频率的变化测定杂交量,构成压电式 DNA 传感器. 该传感器能对表面纳克级的质量有响应,是一种特别敏感的检测装置.

压电核酸适体传感器检测 IgE,操作方便、响应灵敏、选择性好,是生物传感器研究的热点. C. Y. Yao 等^[47]把单层亲和素应用到固定适体石英金的表面,该 DNA 单链适体为 37-nt 且 5'端经亲和素修饰, QCM 的频移随 IgE 含量而变化,在 15 min 内适体就可以探测出 IgE. 该传感器具有较高的特异性和灵敏度. IgE 浓度在 2.5 ~ 200 $\mu\text{g/L}$ 范围内时, IgE 浓度与频移是线性关系. 质量型适体生物传感器与传统检测方法相比,不需要任何标记,仪器简单,便于自动化,其在生物学领域的检测上发挥着越来越重要的作用. 姚春燕等^[48]设计出了以 AT 切型、基频 10 MHz 的镀金石英晶体作为换能器的适配子型压电石英晶体传感器阵列. 该传感器能快速检测出人血清中的 IgE,且响应特性良好,可用于临床诊断. 齐永志等^[49]用生物素-亲和素法建立了适体压电石英传感器阵列检测人的 IgE 并对传感

器的各项参数进行了研究. 该传感器可检测 ng 级含量的 IgE 且非特异性信号小, 可运用于临床检测. M. Liss 等^[50] 构建了基于人 IgE 适体的 QCM 适体传感器, 利用单链 DNA 作为适体, 检测限为 0.5 nmol/L, 对传感器的敏感性、专一性、再生性做了相关的研究, 其检测限比传统免疫传感器高出了 10 倍.

QCM 系统检测 IgE 简单, 但其灵敏度和稳定性与前者相比还有待改善, 谐振器的品质因数和灵敏度及其阵列密度通量需要提高. 压电核酸适体阵列化检测 IgE 将是未来压电适体传感器检测 IgE 的发展方向.

3 展望

本文综述的三种核酸适体传感器所用适体都是从 SEXEL 系统中选出的 DNA 单链或双寡核苷酸链, 且适体的 5' 端都要经过巯基或生物素的修饰, 三种核酸适体传感器对 IgE 的检测都有较好的效果.

核酸适体传感器检测 IgE 的研究工作目前还处于初级阶段, 其性能的完善和应用推广都有许多问题需要研究: 如 IgE 适体的固定步骤比较繁琐, 且适体固定时还要借助一定的基因而不能直接固定, 纳米材料的出现能很好地解决这些问题, 因此将纳米技术运用到适体传感器检测 IgE, 将会成为今后研究的方向.

参考文献:

- [1] Lawren C W, Ali A Z. The production and regulation of IgE by the immune system[J]. *Nature Reviews Immunology*, 2014, 14(4):247.
- [2] Hannah J G, Brian J S, Andrew J. Beavil, et al. The biology of IgE and the basis of allergic disease[J]. *Annu Rev Immunol*, 2003, 21:579.
- [3] Dang Y, Ren J W, Guo Y Y, et al. Hyper IgE syndrome[J]. *Indian Dermatology Online Journal*, 2014, 5(1):69.
- [4] Kataria A K, Kataria N. Immunoradiometric assay of serum IgE levels in dromedary camel[J]. *Journal of Camel Practice and Research*, 2004, 11(1):11.
- [5] Ali K G, Pourpak Z. The design of a "sepecific-IgE ELISA kit" for major cow's milk allergens[J]. *Tehran University Medical Journal*, 2010, 68(3):147.
- [6] 沃纳·埃伯, 博格·克拉克. 使用酶联免疫捕获方法检测抗过敏原 IgE——不同方法间和实验室间的质量评估[J]. *检验医学*, 2006, 21:11.
- [7] 卢琦, 鲍盛杰, 谭少华. 免疫投射比浊法测定血清 IgE 的方法建立与评价[J]. *放射免疫学杂志*, 2008, 21(5):449.
- [8] 赵俊芳, 王学谦, 丁红梅, 等. 免疫印迹法检测过敏原特异性 IgE[J]. *现代检验医学杂志*, 2008, 23(1):56.
- [9] 沃克(天津)生物科技有限公司. 血清总 IgE 测定诊断试剂盒及制备和使用方法[P]. CN, 201210286692. 2012-11-28.
- [10] 北京还瑞祥天生物科技有限公司. 一种过敏原特异性 IgE 抗体检测试纸条[P]. CN, 201320110920. 2013-10-02.
- [11] 合富生化科技股份有限公司. 过敏原检测芯片[P]. CN, 01145275. 2003-07-16.
- [12] 李萍珠, 印美娟. PETIA 与 PENIA 测定 IgE 的分析灵敏度比较[J]. *检验医学*, 2013, 28(11):1033.
- [13] Famulok M, Mayer G, Blind M. Nucleic acid aptamers—from selection in vitro to applications in vivo[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2000, 33(9):591.
- [14] Brody E N, Gold L. Aptamers as therapeutic and diagnostic agents[J]. *Reviews in Molecular Biotechnology*, 2000, 74(1):5.
- [15] Li N, Ho C M. Aptamer-based optical probes with separated molecular recognition and signal transduction modules[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 30(8):2380.
- [16] Zhou L, Ou L, Chu X, et al. Aptamer-based rolling circle amplification: a platform for electrochemical detection of protein[J]. *Analytical Chemistry*, 2007, 79(19):7492.
- [17] Zayats M, Huang Y, Gill R, et al. Label-free and reagentless aptamer-based sensors for small molecules[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(42):13666.
- [18] Floch F L, Ho H A, Leclerc M. Label-free electrochemical detection of protein based on a ferrocene-bearing cationic polythiophene and aptamer[J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(13):4727.
- [19] 姜利英, 陈青华, 王云龙, 等. 用于检测小分子靶标的电流型识体传感器研究进展[J]. *郑州轻工业学院学报:自然科学版*, 2011, 26(2):56.
- [20] 张先恩. 生物传感器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008:165-231.
- [21] 缪煜清. 生物传感器及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005:24-193.
- [22] Bang G S, Kim B G. A novel electrochemical detection method for aptamer biosensors[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 21(6):863.
- [23] Xiao Y, Lubin A A, Heeger A J, et al. Label-free electron-

- ic detection of thrombin in blood serum by using an aptamer-based sensor[J]. *Angewandte Chemie*,2005,117(34):5592.
- [24] Zhang Y L, Huang Y, Jiang J H, et al. Electrochemical aptasensor based on proximity-dependent surface hybridization assay for single-step, reusable, sensitive protein detection[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007,129(50):15448.
- [25] Baker B R, Lai R Y, Wood M S, et al. An electronic, aptamer-based small-molecule sensor for the rapid, label-free detection of cocaine in adulterated samples and biological fluids[J]. *Journal of the American Chemical Society*,2006,128(10):3138.
- [26] Xu D K, Xu D W, Yu X B, et al. Label-free electrochemical detection for aptamer-based array electrodes[J]. *Anal Chem*,2005,77:5107.
- [27] 徐大炜. IgE 核酸适配体生物传感器的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2006.
- [28] Katerina I, Mark P, George G G. Viability of allergy (IgE) detection using an alternative aptamer receptor and electrochemical means[J]. *Sensors and Actuators (B): Chemical*,2007,121(1):178.
- [29] 郑帆. 基于核酸适配体和纳米材料的电化学生物传感器[D]. 长沙:湖南大学,2008.
- [30] Lu Y, Li X C, Zhang L M, et al. Aptamer-based electrochemical sensors with aptamer-complementary DNA oligonucleotides as probe[J]. *Analytical Chemistry*,2008,80(6):1883.
- [31] Yasuhide O, Kenzo M, Koichi I, et al. Label-free aptamer-based immunoglobulin sensors using graphene field-effect transistors[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011,50(7):070120-1~070120-4.
- [32] Dinh T T, Veronique V, Lars G, et al. Nanocrystalline diamond impedimetric aptasensor for the label-free detection of human IgE[J]. *Biosens Bioelectron*,2011,26(6):2987.
- [33] Wang J, Jing Y, Zhou C, et al. Aptamer-based ATP assay using a luminescent light switching complex[J]. *Analytical Chemistry*,2005,77(11):3542.
- [34] Nutiu R, Li Y. Structure-switching signaling aptamers[J]. *Journal of the American Chemical Society*,2003,125(16):4771.
- [35] Giridharan G, Jay R U, Douglas F H, et al. DNA aptamer-based bioanalysis of IgE by fluorescence anisotropy[J]. *Anal Chem*,2005,77:1963.
- [36] 胡坤,田建泉,邹华红,等. 基于核酸适配体的荧光偏振分析法检测人血清中的免疫球蛋白 E[C] //第十六届有机分析与生物分析学术研讨会,乌兰巴托:内蒙古大学出版社,2011:153-154.
- [37] Jiang Y X, Fang X H, Bai C L. Signaling aptamer/protein binding by a molecular light switch complex[J]. *Anal Chem*,2004,76:5230.
- [38] 康燕. 基于核酸适配体的生物传感器的研究[D]. 长沙:湖南大学,2008.
- [39] 何婧琳,吴再生,张松柏,等. B18 基于非标记 DNA 核酸适配体的高灵敏 IgE 荧光传感器检测研究[C]//第十届全国化学传感器学术会议,重庆:[s. n.],2008:38.
- [40] Wang H Q, Wu Z, Tang L J, et al. Fluorescence protection assay: A novel homogeneous assay platform toward development of aptamer sensors for protein detection[J]. *Nucleic Acids Res*,2011,39(18).
- [41] 胡鹏. 核酸适配体在蛋白质和小分子检测中的新方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- [42] 汪凤林. 功能型核昔酸用于光化学传感器的研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- [43] Kim, Jun P, Park, et al. Aptamer biosensors for label-free colorimetric detection of human IgE based on polydiacetylene(PDA) supramolecules[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*,2011,11(5):4269.
- [44] Evans-Nguyen K M, Fuierer R R, Fitchett B D, et al. Changes in adsorbed fibrinogen upon conversion to fibrin[J]. *Langmuir*,2006,22(11):5115.
- [45] Li B, Wang Y, Wei H, et al. Amplified electrochemical aptasensor taking AuNPs based sandwich sensing platform as a model[J]. *Biosensors and Bioelectronics*,2008,23(7):965.
- [46] Minunni M, Tombelli S, Gullotto A, et al. Development of biosensors with aptamers as bio-recognition element: The case of HIV-1 Tat protein[J]. *Biosensors and Bioelectronics*,2004,20(6):1149.
- [47] Yao C Y, Qi Y Z, Zhao Y H, et al. Aptamer-based piezoelectric quartz crystal microbalance biosensor array for the quantification of IgE[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009,24(8):2499.
- [48] 姚春艳,齐永志,府伟灵. 适配子型压电石英晶体传感器检测人免疫球蛋白 E 的实验研究[J]. *中华医院感染学杂志*,2008,18(3):324.
- [49] 齐永志,姚春燕,罗阳,等. 适配子压电传感器的实验研究[J]. *中华医院感染学杂志*,2008,18(3):353.
- [50] Michael L, Birgit P, Hans W, et al. An aptamer-based quartz crystal protein biosensor[J]. *Analytical Chemistry*, 2002,74(17):4488.