

# 低次烟叶中的类胡萝卜素降解研究

许春平, 杨琛琛, 王铮, 毛多斌

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**分别利用生物法和物理法处理低次烟叶,降解烟叶中的类胡萝卜素.生物法是从烟草土壤中分离得到能够有效降解 $\beta$ -胡萝卜素的丝孢酵母.GC-MS分析表明,该酵母可以彻底降解 $\beta$ -胡萝卜素.物理法是用臭氧处理低次烟叶,GC-MS分析发现烟叶中的类胡萝卜素和叶绿素a含量随处理时间延长先下降后趋平稳;而且臭氧处理后,烟叶中尼古丁、新植二烯、碳十八酸的含量有所减少,醇类、酯类和酮类化合物在总量上均有提升,可起到醇和烟香、减轻刺激的作用.

**关键词:**低次烟叶;丝孢酵母;臭氧处理;类胡萝卜素

**中图分类号:**TS49 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.001

## Study on degradation of carotenoids in discarded tobacco leaves

XU Chun-ping, YANG Chen-chen, WANG Zheng, MAO Duo-bin

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

**Abstract:** Degradation of carotenoids in discarded tobacco leaves by biological and physical treatments was investigated. Biological treatment was to isolate a strain to effectively degrade  $\beta$ -carotene and this strain was identified a yeast *Trichosporon*. GC-MS analysis showed that this yeast could completely degrade  $\beta$ -carotene. The physical method was to treat discarded tobacco leaves by ozone. GC-MS analysis showed that the contents of carotenoid and chlorophyll increased during the processing time firstly, then decreased and became stable. Moreover, after ozone treatment, the contents of alcohols, esters and ketones in tobacco were raised, and the content of nicotine, neophytadiene and carbon stearic acid were reduced to mellow tobacco aroma and reduce irritancy.

**Key words:** discarded tobacco leaf; *Trichosporon* yeast; ozone treatment; carotenoids

## 0 引言

烟草色素的含量过高不仅会直接影响烟叶的外观质量,而且还会间接地影响烟叶的内在品质.类胡萝卜素作为许多重要致香成分的前提物,对烟香气味品质的形成具有重要作用.生物法主要指利用微生物的分解作用,包括真菌、细菌或者某种酶制剂将类胡萝卜素降解转化成有用的小分子香味

物质或某种香料前提物.类胡萝卜素的生物氧化降解反应及酶催化氧化降解反应是重要的香气物质生成途径<sup>[1]</sup>.类胡萝卜素的生物降解因其条件温和且效率高而越来越受到关注.近年来有学者尝试利用 $O_3$ 处理均质烟,成功地降低了烟气中多核芳香族碳氢化合物的水平:经过 $O_3$ 处理后,烟叶内化学成分与 $O_3$ 反应会产生大量的过氧化物中间产物——臭氧化物,而这些臭氧化物极不稳定,经分

收稿日期:2013-07-03

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)

作者简介: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.

解和重组会产生大量易挥发的醛、酮和酸类<sup>[2]</sup>,有助于降低烟气中令人不愉快的化学组分前提物的浓度<sup>[3]</sup>.

本文以烟草土壤和腐烂的胡萝卜组织为筛选目标,选出有利于 $\beta$ -胡萝卜素降解的微生物,通过生物法和物理法降解低次烟叶中类胡萝卜素,以期有效提升低次烟叶的品质,并对非低次烟叶的品质提升提供参考.

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

材料:吉林长春产晒红烟 Y23,2008 年产,等级为 3 级,由瑞升烟草技术(集团)有限责任公司提供.

试剂:葡萄糖、蛋白胨、酵母粉、琼脂粉,北京奥博星生物技术有限责任公司产;磷酸二氢钾、硫酸铵、硫酸亚铁、硫酸镁,广东汕头市西陇化工厂产;二氯甲烷,天津市富宇精细化工有限公司产;以上试剂均为分析纯. 甲醇,色谱级,天津市富宇精细化工有限公司产; $\beta$ -胡萝卜素,纯度 $\geq 98\%$ ,郑州恒丰生物科技有限公司产.

仪器:2540 型台式灭菌器、3260 型立式灭菌器,山东新华医疗器械股份有限公司产;QYC200 型恒温振荡摇床、DGX-9143 型电热恒温鼓风干燥箱,上海福玛实验设备有限公司产;Q-100A3 型旗箭粉碎机,上海冰都电器有限公司产;HS-4 型恒温水浴锅,上海医疗器械五厂产;UV1700 型紫外可见分光光度计,上海凤凰光科学仪器有限公司产;PL203 型电子分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产;QL-866 型涡旋混合仪,海门市其林贝尔仪器制造有限公司产;6890/5973 型气相色谱仪/质谱仪,安捷伦科技有限公司产;CF-16RX II 型冷冻离心机,Hitachi(日立)公司产;PB-10 型 pH 计,德国赛多利斯股份公司产;RE-52AA 型旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂产;SHB-3 型循环水多用真空泵,郑州杜甫仪器厂产;1525/2998 型 Waters 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司产.

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 生物法

##### 1.2.1.1 培养基及底物的配制

1) 培养基的配制. 富集培养基:牛肉膏 5 g/L,蛋白胨 10 g/L,氯化钠 5 g/L;基本液体培养基:KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1 g/L,(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2 g/L,MgSO<sub>4</sub> 0.5 g/L,

FeSO<sub>4</sub> 0.01 g/L;PDA 培养基:马铃薯 200 g/L,葡萄糖 20 g/L,琼脂 20 g/L;种子活化培养基:酵母粉 10 g/L,牛肉膏 10 g/L,NaCl 30 g/L,葡萄糖 0.2 g/L;发酵基本培养基<sup>[4]</sup>:酵母粉 5.5 g/L,NaCl 30 g/L.

2) 底物的配制<sup>[5-6]</sup>. 以 12.5 g 吐温 40 作为增溶剂,准确称取 $\beta$ -胡萝卜素 125 mg,溶于 200 mL 二氯甲烷中,减压浓缩,充分除去二氯甲烷,即得分散均匀的 $\beta$ -胡萝卜素,将其加入到已灭菌过的基本培养基中,混匀,倒平板,即为筛选培养平板.

##### 1.2.1.2 $\beta$ -胡萝卜素降解微生物的筛选

1) 初筛. 分别取适量土壤和腐烂胡萝卜组织于 100 mL 三角瓶中,加入无菌水浸泡 2 h,过滤,取滤液 1 mL 加到富集培养基中,于 37 °C,转速 150 r/min 下,摇床培养 2 d;于无菌操作台中选择上述富集培养液中生长较好的菌液,取适量进行梯度稀释,选择 10<sup>-3</sup>,10<sup>-4</sup>,10<sup>-5</sup> 这 3 个浓度梯度进行平板涂布,每个浓度梯度平行涂布 3 个平板,同时对不含底物 $\beta$ -胡萝卜素的平板进行涂布作为对照组. 将涂布好的平板于 28 °C 培养箱中培养 2—5 d,然后挑选出菌落分布均匀、有单菌落产生的平板,保藏在冰箱中备用.

2) 复筛. 挑选出形态较好,周围有轻微褪色的单菌落,于无菌操作台将其接种于液体基本培养基中,于摇床中 37 °C 进行培养;选择生长较好的菌液进行梯度稀释,选择 10<sup>-3</sup>,10<sup>-4</sup>,10<sup>-5</sup> 这 3 个浓度梯度进行平板涂布和划线. 同时在基础培养平板(不含 $\beta$ -胡萝卜素)上进行涂布作为对照组. 置于 28 °C 培养箱中培养 2—5 d;与对照组对比,挑选出透明圈较为明显的单菌落于无菌操作台中接种于制备好的 PDA 试管培养基中,放于冰箱中备用.

##### 1.2.1.3 菌株的发酵培养

1) 筛选菌株的摇瓶发酵. 取筛选得到的菌种接种于制备好的种子活化培养基中,每个菌株接种 2 瓶,于 37 °C,150 r/min 条件下摇床培养 2 d,即得活化种子液. 取培养好的种子培养上清液 1 mL 注入已灭菌的发酵培养基中进行发酵培养. 其中每个菌株设定 3 个平行实验组,同样条件下培养 2 d 之后,加入 $\beta$ -胡萝卜素底物进行培养;同时以培养基相同但不加底物的摇瓶作为对照 1,以培养基成分相同,添加底物但不接种菌株的摇瓶为对照 2. 同样条件下,避光摇床培养 4 d.

2) 发酵液萃取. 取上述发酵好的培养液,于

250 mL 分液漏斗中加入等体积的二氯甲烷,缓缓摇晃,使两相混合均匀,静置 10 min 后收集有机相,重复以上步骤 3 次,合并有机相,旋转蒸发除去二氯甲烷后,加入 1 mL 甲醛溶解,过 0.22  $\mu\text{m}$  有机滤膜后,于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温储存备用,以上操作均在避光环境中进行。

**1.2.1.4 高效液相色谱检测** 色谱分析条件:色谱柱 symmet® C18 3.5  $\mu\text{m}$   $\times$  4.6 mm  $\times$  75 mm;流动相:甲醇:水 = 95:5,检测器波长设置 270 nm,447 nm,单样手动进样,进样体积 10  $\mu\text{L}$ 。

**1.2.1.5 质谱仪对有效菌株的初步鉴定**

1) 样品前处理:取适量(5~10 mg)样品,加入 300  $\mu\text{L}$  水,仔细混匀,再加入 900  $\mu\text{L}$  无水乙醇,仔细混匀,高速离心 2 min,弃去上清,加入 50  $\mu\text{L}$  70% 甲酸,仔细混匀,再加入 50  $\mu\text{L}$  乙腈,仔细混匀,高速离心 2 min,吸出上清液,点 1  $\mu\text{L}$  上清液置 MALDI 样品靶上,放干后点 1  $\mu\text{L}$  基质溶液,即可用测定。

2) 数据处理:通过 Biotyper 数据库检索鉴定。

**1.2.2 物理法**

1) 臭氧处理低次烟叶. 称取适量粉碎过的烟末,分成等质量的 5 份,其中 1 份不做任何处理,作为空白对照;其余 4 份分别置于敞口小烧杯中,使用臭氧发生器分别熏制处理 15 min,30 min,45 min,60 min. 实验操作在避光且空气流通的环境中进行。

2) 分光光度法检测低次烟叶中色素的变化. 用丙酮-乙醇混合液法对烟叶中的类胡萝卜素含量进行测定<sup>[7]</sup>. 分别称取臭氧处理过的烟末 0.1 g,加入丙酮-乙醇混合液(体积比 1:1)5 mL,保鲜膜封口,温室暗处理 5 h. 将提取液过滤后,分别于 645 nm,663 nm,470 nm 测定吸光度. 色素含量和叶绿素 a,叶绿素 b 及类胡萝卜素浓度  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_x$  的计算公式为:

色素含量 = (色素浓度  $\times$  提取液体积) / 叶片质量

$$C_a = 12.71A_{663} - 2.59A_{645}$$

$$C_b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663}$$

$$C_x = (1000A_{470} - 2.05C_a - 114.8C_b) / 245$$

3) 气质联用分析低次烟叶中化学成分的变化. 分别称取实验组和对照组烟丝各 25 g,置于 250 mL 圆底烧瓶中,加入 0.6 mg/mL 乙酸苯乙酯 1 mL 作为内标物,放入同时蒸馏萃取装置中,用二氯甲烷作为溶剂,连续动态萃取 2 h. 所得二氯甲烷萃取物用无水硫酸钠干燥过夜,过滤后,减压蒸发浓缩至 1 mL,采用内标法定量。

色谱条件:HP-5 色谱柱 30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ;载气为氦气,流速为 1 mL/min;程序升温  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保持 1 min,以  $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的升温速度升至  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保持 2 min,继续以  $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度升温至  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$  并保持 15 min. 进样量为 2  $\mu\text{L}$ ,分流比为 25:1。

MS 分析条件:溶剂延迟 5 min,扫描范围 35~455 aum,传输线温度  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,EI 能量 70 eV,离子源温度  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,四级杆温度  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 类胡萝卜素降解微生物的筛选结果及降解效果分析

通过大量的初筛和复筛,选择可能的菌种添加于  $\beta$ -胡萝卜素标品进行液体发酵. 结合 HPLC 对发酵产物进行分析,结果见图 1. 由图 1 可知,有 1 株菌对  $\beta$ -胡萝卜素具有明显的降解作用,但对进一步对提取液进行气相分析并未发现新的香味代谢物. 这与 H. Zorn 等<sup>[8]</sup>的研究结果相似. 推测其原因可能是:该菌对  $\beta$ -胡萝卜素的代谢过于彻底,将其降解为小分子的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,因此没有检测出新的香味代谢产物。

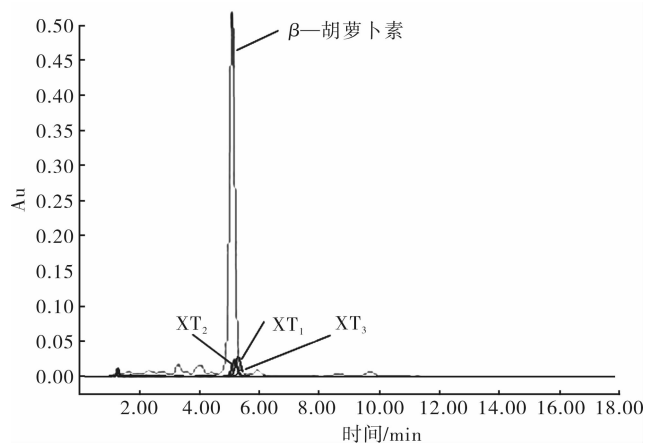


图 1 筛选菌株转化  $\beta$ -胡萝卜素发酵产物液相色谱图

### 2.2 质谱仪对有效菌株的初步鉴定分析

虽然筛选出的微生物菌株不能转化  $\beta$ -胡萝卜素产生新的香味物质,但其对  $\beta$ -胡萝卜素的降解效果明显,因此,对该菌株进行了质谱分析,结果见图 2. 通过数据库检索发现,筛选菌株为丝孢酵母。

### 2.3 臭氧处理对烟叶中类胡萝卜素的影响

将臭氧处理过的烟末按照物理法提取色素并

在紫外-可见分光光度计上检测,结果见图3.由图3可知,随着臭氧处理时间的增加,烟叶中的叶绿素b含量变化不明显,而类胡萝卜素和叶绿素a均呈现先减少后趋于平稳的趋势,在30 min时类胡萝卜素和叶绿素a含量达到基本稳定.

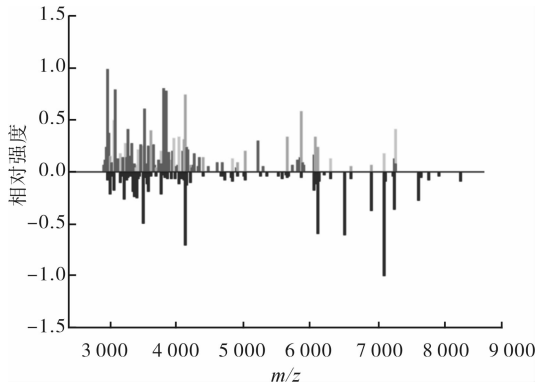


图2 筛选菌株 MALDI TOF 质谱图

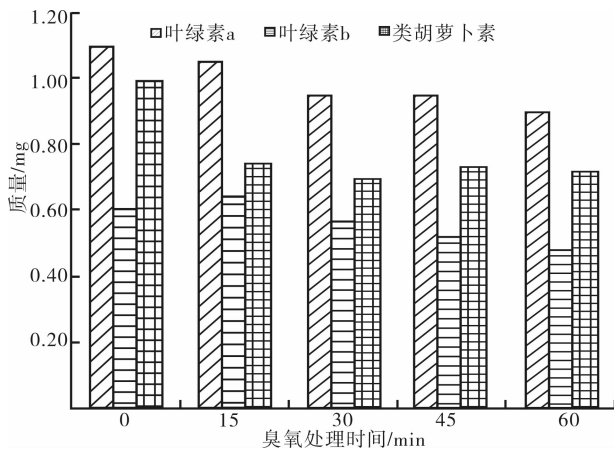


图3 臭氧处理后烟叶中色素含量的变化

## 2.4 臭氧处理对烟叶中其他化学成分的影响

对臭氧处理过的烟叶按照物理法做进一步分析,结果见表1.由表1可知,烟叶中化合物主要为醇、酮、酯、酸类化合物和新植二烯,其中后者含量大、作用显著.经臭氧处理后,尼古丁、新植二烯、碳十八酸的含量有所减少,而醇类、酯类和酮类化合物在总量上均有提升,对烟草的香气和吸味有重要的贡献.如植醇能增加卷烟的清香,芳樟醇具有浓青带甜的木青气息,能够增加烟气的木香、果香气息;柠檬酸三乙酯、肉豆蔻酸甲酯、二氢猕猴桃内酯等能够使烟气变得醇和,可起到减轻刺激、丰满烟香的作用; $\beta$ -大马酮赋予烟叶花香和天然的甜香感,是充分成熟烟草的特征香味,这些物质对烟草的香气都具有重要的贡献.另外,臭氧处理后烟叶

中增加了少量3-羟基月桂酸、2-苯乙基己酸酯、2,6,11-三甲基十二烷、2-十八烷基乙醇4种化学成分.

表1 臭氧处理前后烟叶中化学成分的变化

化合物名称	浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	
	对照组	试验组
1-甲基2-吡咯烷酮	10.75	35.51
2-环戊烯-1,4-二酮	0.02	0.23
3-羟基月桂酸	—	1.22
2-苯乙基己酸酯	—	0.78
2,6,11-三甲基十二烷	—	1.43
2-十八烷基乙醇	—	0.25
尼古丁	2.76	0.65
2,6,20,15-四甲基十七烷	0.05	2.17
芳樟醇	0.57	2.26
6-甲基正十八烷	0.10	0.49
4-(3-羟基-1-丁烯基)-3,5,5-三甲基-2-环己烯酮	0.74	1.22
柠檬酸三乙酯	1.26	3.56
植醇	34.95	53.62
茄酮	5.31	12.89
$\beta$ -大马酮	3.12	4.73
十五烷酮	5.78	20.21
3-乙基-5-(2-乙基)-正十八烷	2.17	4.45
肉豆蔻酸甲酯	2.12	3.66
乙基异胆甾醇	1.09	1.45
(4E,8E,13Z)-1,5,9-三甲基-12-(1-甲基乙基)-环十四碳-4,8,13-三烯-1,3-二醇	9.20	6.17
十八碳烯酰胺	22.42	0.32
1-甲基-5-(3-吡啶基)-2-吡咯烷酮	1.36	7.56
二氢猕猴桃内酯	1.12	2.86
巨豆三烯酮	2.02	1.75
9,12,15-十八碳三烯酸	2.30	1.32
新植二烯	110.7	90.87
正十八烷酸甲酯	8.77	22.86
十八碳烯酰胺	1.29	22.60
亚麻酸甲酯	15.69	10.23
肉桂酸苄酯	8.90	9.87
三十六烷	30.02	33.02
棕榈酸	29.14	36.97

## 3 结论

本文从生物法和物理法2个方面研究了烟叶中类胡萝卜素的降解.从烟草土壤中分离得到能够有效降解 $\beta$ -胡萝卜素的丝孢酵母,但气相色谱分析表明,其降解后并未生成新的香味物质,这可能是

由于该菌对 $\beta$ -胡萝卜素的利用过于彻底,将其充分降解为小分子的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 的缘故.而用臭氧处理低次烟叶后,烟叶中的类胡萝卜素和叶绿素a含量随处理时间延长呈现先下降后趋平稳的趋势.进一步气相分析表明,烟叶中化合物主要为醇、酮、酯、酸类化合物和新植二烯.臭氧处理后,烟叶中尼古丁、新植二烯、碳十八酸的含量有所减少,而醇类、酯类和酮类化合物在总量上均有提升,后者可起到醇香烟气、减轻刺激的作用,对烟草的香气和吸味有重要的贡献.

### 参考文献:

- [1] Winterhalter P, Rouseff R. Carotenoid-derived aroma compounds[M]. Washington: ACS symposium series, 2001.
- [2] 洗可法, 沈朝智, 戚万敏, 等. 云南烤烟中香味物质分析研究[J]. 中国烟草学报, 1992(2):1.
- [3] Robledog M, Bustamante E R, Contreras A S, et al. Production of tobacco aroma from lutein; Specific role of the microorganisms involved in the process[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 62:484.
- [4] Eduardo R B, Gabriela M R, Marco A O, et al. Bioconversion of lutein using a microbial mixture-maximizing the production of tobacco aroma compounds by manipulation of culture medium[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, 68:174.
- [5] 李秀红, 李冰, 李仙, 等. 一株产香微生物的筛选[C]//中国烟草学会工业专业委员会烟草化学学术研讨会论文集, 海口:[s. n.], 2005.
- [6] Schepartz A I, Mottola A C, Schlotzhuer W S, et al. Effect of ozone treatment of tobacco on leaf lipids and smoke PAH: A pilot plant trial [J]. Tobacco Science, 1995, 25:120.
- [7] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [8] Zorn H, Langhoff S, Scheibner M, et al. Cleavage of  $\beta, \beta$ -carotene to flavor compounds by fungi[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 62:331.

## 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。

# 烟叶糖含量与其感官舒适度的典型相关分析

王春利<sup>1</sup>, 朱文辉<sup>1</sup>, 文杰<sup>1</sup>, 马林<sup>2</sup>

(1. 海南红塔卷烟有限责任公司, 海南 海口 571100;

2. 郑州轻工业学院 烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**为研究烟叶糖含量与感官舒适度的关系,对55种烟叶原料进行了糖含量测定和感官舒适度评价,并对检测数据进行了简单相关分析和典型相关分析.结果表明:1)果糖、葡萄糖、麦芽糖和总糖与刺激性指标显著或极显著正相关,与劲头极显著负相关,与余味指标、干燥感相关性不显著;蔗糖除与口腔尖刺极显著正相关外,与其他感官舒适度指标相关性不显著.2)烟叶糖含量对典型变量的影响度大小顺序是:果糖>总糖>葡萄糖>麦芽糖>蔗糖;感官舒适度指标对典型变量影响度大小顺序为:鼻腔刺激>喉部尖刺>劲头>口腔尖刺>喉部呛刺>口腔毛刺>残留>收敛>干燥感>涂层.

**关键词:**烟叶糖含量;感官舒适度;简单相关分析;典型相关分析

**中图分类号:**TS411 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.002

## Canonical correlation analysis of sugar content and sensory coziness of tobacco leaves

WANG Chun-li<sup>1</sup>, ZHU Wen-hui<sup>1</sup>, WEN Jie<sup>1</sup>, MA Lin<sup>2</sup>

(1. Hainan Hongta Cigarette Co., Ltd., Haikou 571100, China;

2. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to investigate the relationship between the sugar content and overall sensory coziness, sugar content and sensory coziness evaluation of 55 tobacco leaves was analyzed and verified. The data of sugar content and sensory coziness were analyzed by simple correlation analysis method and canonical correlation analysis method. The results were as follows: 1) Fructose, glucose, maltose and total sugar significantly or extremely significantly positively correlated with irritancy quality, while extremely significantly negatively correlated with vigour, not significantly correlating with remaining taste and dryness; sucrose extremely significantly correlation with oral spike, while not significantly correlating with other sensory coziness qualities. 2) The specific influence degree order of correlation with overall sensory coziness was fructose > total sugar > glucose > maltose > sucrose; the specific influence degree order of correlation with sugar content was nasal stimulation > throat spine > vigour > oral spike > throat choking thorn > oral burr > residual > convergence > dryness > coating.

**Key words:** sugar content of tobacco leaves; sensory coziness; simple correlation analysis; canonical correlation analysis

**收稿日期:**2013-08-05

**作者简介:**王春利(1986—),男,河南省泌阳县人,海南红塔卷烟有限责任公司助理工程师,主要研究方向为烟草质量控制和工艺.

**通信作者:**马林(1964—),男,河南省信阳市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为烟草生物技术和卷烟工艺.

## 0 引言

随着烟草行业的发展,卷烟产品的感官舒适度已成为学术研究的焦点.杨凯等<sup>[1]</sup>采用模式识别方法分析了卷烟烟气水分变化对感官舒适度的影响;朱保昆等<sup>[2-3]</sup>对烟叶原料的35个主要化学指标与感官舒适度的关系进行了分析和验证,并对几种保润剂对感官舒适度的影响进行了剖析.这些研究无疑为企业产品开发、配方维护及提升卷烟的感官舒适度提供了一定的理论依据.糖类物质是烟草中的重要化学成分,对感官质量的影响起着重要作用,可以维持烟气的酸碱平衡,降低刺激性和改善口味,同时还是糖苷、糖脂、Amodori化合物等香气物质的前提物质.目前烟叶中的糖含量对感官舒适度的影响尚未见报道,本文拟采用典型相关分析的方法研究烟叶主要糖含量对感官舒适度的影响规律,从而为产品研发提供参考.

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

55种烟叶样品,由红塔集团提供;Waters 6001型高效液相色谱仪,美国Waters公司产;ELSD2000型蒸发光散射检测器,美国Alltech公司产;葡萄糖、果糖、蔗糖、麦芽糖标样, Solarbio 公司提供;乙腈(色谱纯),天津四友精细化工有限公司产.

### 1.2 实验方法

**1.2.1 烟叶糖含量的测定** 本文采用高效液相色谱内标-标准曲线法<sup>[4]</sup>同时测定烟叶中的葡萄糖、果糖、麦芽糖、蔗糖等糖分含量.

**1.2.2 感官舒适度评价指标及方法** 由11位具有丰富感官评吸经验的评价人员应用感官舒适度评价方法<sup>[3]</sup>对55个烟叶样品进行感官质量评价.

### 1.3 数据统计分析

采用软件DPS 7.05对实验数据进行基本统计特征分析和典型相关分析,软件SPSS 19.0进行简单相关分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 感官舒适度指标的基本统计描述

将评吸得到的感官舒适度数据进行特征分析(见表1)可知,除鼻腔刺激的偏度小于-1和鼻腔刺激的峰度、喉部尖刺的峰度大于1外,其他各感官舒适度指标的偏度和峰度均在±1之间,基本符合正态分布.

### 2.2 烟叶糖含量与感官舒适度指标的简单相关分析

烟叶各种糖成分含量与其感官舒适度的简单相关分析结果见表2.分析结果表明:果糖、葡萄糖和总糖与口腔尖刺、口腔毛刺、喉部尖刺、喉部呛刺和鼻腔刺激等感官舒适度刺激性指标呈显著或极显著正相关,与劲头呈极显著负相关,与涂层、残留、收敛、干燥感等感官舒适度指标呈不显著正相关;蔗糖除与口腔尖刺极显著正相关,与劲头呈不显著负相关外,与口腔毛刺、喉部尖刺、喉部呛刺、鼻腔刺激、涂层、残留、收敛、干燥感等指标呈不显著正相关;麦芽糖与口腔毛刺、喉部尖刺、喉部刺激和鼻腔刺激等刺激性指标呈显著或极显著正相关,与劲头呈极显著负相关,与其他感官舒适度指标呈不显著正相关.

### 2.3 烟叶糖含量与感官舒适度指标的典型相关分析

将烟叶中果糖( $x_1$ )、葡萄糖( $x_2$ )、蔗糖( $x_3$ )、麦芽糖( $x_4$ )和总糖( $x_5$ )等指标作为第I组变量,将口

表1 感官舒适度指标的基本统计特征

指标	均值	中位数	标准差	方差	偏度	峰度	最大值	最小值	变异系数/%
口腔尖刺	6.58	6.64	0.39	0.15	-0.50	0.81	7.45	5.42	5.97
口腔毛刺	6.32	6.36	0.41	0.18	0.06	0.37	7.30	5.25	6.72
喉部尖刺	6.32	6.30	0.50	0.25	-0.95	1.82	7.27	4.75	7.92
喉部呛刺	6.04	6.09	0.73	0.53	-0.61	0.55	7.36	4.08	12.02
鼻腔刺激	6.00	6.00	0.66	0.43	-1.06	2.56	7.25	3.75	10.96
涂层	6.01	6.00	0.33	0.11	-0.21	0.09	6.75	5.17	5.47
残留	5.83	5.75	0.37	0.14	0.00	-0.62	6.58	5.00	6.32
收敛	6.11	6.17	0.34	0.11	-0.11	-0.73	6.83	5.42	5.51
干燥感	5.92	5.92	0.39	0.15	0.15	-0.26	6.83	5.00	6.58
劲头	5.43	5.42	0.91	0.83	0.58	0.32	7.83	3.67	16.75

表2 糖含量与感官舒适度的简单相关分析

糖含量	口腔尖刺	口腔毛刺	喉部尖刺	喉部呛刺	鼻腔刺激	涂层	残留	收敛	干燥感	劲头
果糖	0.505**	0.366**	0.480**	0.400**	0.522**	0.060	0.241	0.191	0.094	-0.462**
葡萄糖	0.449**	0.324*	0.413**	0.365**	0.467**	0.052	0.222	0.173	0.100	-0.422**
蔗糖	0.346**	0.247	0.245	0.231	0.258	0.223	0.173	0.200	0.067	-0.209
麦芽糖	-0.154	0.291*	0.322*	0.305*	0.383**	0.055	0.207	0.048	0.022	-0.359**
总糖	0.479**	0.364**	0.458**	0.398**	0.509**	0.077	0.246	0.188	0.096	-0.455**

注:糖含量为 *Pearson* 相关性. 显著性(双侧)\*\*和\*分别表示极显著( $P < 0.01$ )和显著( $P < 0.05$ ).

口腔尖刺( $y_1$ )、口腔毛刺( $y_2$ )、喉部尖刺( $y_3$ )、喉部呛刺( $y_4$ )、鼻腔刺激( $y_5$ )、涂层( $y_6$ )、残留( $y_7$ )、收敛( $y_8$ )、干燥感( $y_9$ )和劲头( $y_{10}$ )等感官舒适度指标作为第Ⅱ组变量进行典型相关分析,结果见表3. 由分析得到的5组典型变量中,第Ⅰ组相关系数最大,并且经卡方检验达到了1%的极显著性水平,能够反映变量Ⅰ与变量Ⅱ之间相关的主要信息,其余4组典型变量均不显著.

表3 糖含量与感官舒适度指标的典型相关分析

典型变量	相关系数	卡方值	自由度	显著水平
1	0.8019	79.4116	50	0.0051
2	0.5389	32.0238	36	0.6582
3	0.4059	16.2409	24	0.8792
4	0.3727	7.9608	14	0.8914
5	0.1523	1.0802	6	0.9824

由第Ⅰ组典型变量与原变量的相关系数得到典型变量

$$u_1 = 0.8926x_1 + 0.7947x_2 + 0.3080x_3 + 0.7514x_4 + 0.8666x_5 \quad (1)$$

$$v_1 = 0.5570y_1 + 0.4876y_2 + 0.6334y_3 + 0.5528y_4 + 0.6920y_5 + 0.0586y_6 + 0.3174y_7 + 0.1908y_8 + 0.0872y_9 - 0.6138y_{10} \quad (2)$$

构成典型变量  $u_1$  和  $v_1$  的原变量系数的绝对值大小表明原变量对典型相关系数的影响程度<sup>[5]</sup>. 由表达式①②可知,对典型变量  $u_1$  影响度由大到小依次为:果糖( $x_1$ ) > 总糖( $x_5$ ) > 葡萄糖( $x_2$ ) > 麦芽糖( $x_4$ ) > 蔗糖( $x_3$ );对典型变量  $v_1$  影响度由大到小依次为:鼻腔刺激( $y_5$ ) > 喉部尖刺( $y_3$ ) > 劲头( $y_{10}$ ) > 口腔尖刺( $y_1$ ) > 喉部呛刺( $y_4$ ) > 口腔毛刺( $y_2$ ) > 残留( $y_7$ ) > 收敛( $y_8$ ) > 干燥感( $y_9$ ) > 涂层( $y_6$ ). 根据典型变量与原变量的相关系数可知,果糖、总糖、葡萄糖和麦芽糖与口腔尖刺、口腔毛刺、喉部尖刺、喉部呛刺、鼻腔刺激等刺激性指标呈较显著的正相关关系,与劲头呈较显著的负相关关系,与涂层、残留、收敛等余味指标及干燥感的相关性不显著,蔗

糖与各感官舒适度指标的相关性不显著. 这与典型相关分析的结果基本一致. 烟叶内糖分物质多含有亲水性基团,能直接影响平衡含水率和保润性能<sup>[4]</sup>,但烟叶水分和总糖的多少并不是决定烟气水分的主要因素<sup>[6]</sup>. 本文中糖分含量与干燥感的相关性不明显,是由于干燥感受烟叶中多种化学成分共同影响的缘故<sup>[7]</sup>.

### 3 结论

为研究烟叶糖含量与感官舒适度的关系,对55种烟叶原料进行了糖含量测定和感官舒适度评价,并对检测数据进行了简单相关分析和典型相关分析. 典型相关分析的结果表明:烟叶糖含量与总体感官舒适度的相关性显著( $P < 0.01$ ),不同糖组分对感官舒适度指标的相关性也不相同,果糖、总糖、葡萄糖和麦芽糖含量与口腔尖刺、口腔毛刺、喉部尖刺、喉部呛刺、鼻腔刺激等刺激性指标呈较显著的正相关关系,与劲头呈较显著的负相关关系,与涂层、残留、收敛等余味指标及干燥感的相关性不显著,蔗糖与各感官舒适度指标的相关性不显著.

### 参考文献:

- [1] 杨凯,张朝平,余苓,等. 卷烟烟气水分对感官舒适度的影响[J]. 烟草科技,2009(7):9.
- [2] 朱保昆,朱东来,王明锋,等. 烤烟主要化学指标与感官舒适度的相关性分析[J]. 中国烟草科学,2011,32(6):17.
- [3] 朱保昆,王明锋,李先毅,等. 几种保润剂对“云烟”产品舒适性的影响[J]. 烟草科技,2011(10):12.
- [4] 马林,张相辉,刘强,等. 烟丝种糖组份含量对平衡含水率的影响[J]. 中国烟草学报,2010,16(6):10.
- [5] 王建民,韩明,张相辉,等. 烤烟化学指标和平衡含水率间的关系[J]. 烟草科技,2011(2):43.
- [6] 黄正虹,刘钟祥. 部分国产卷烟主流烟气水分的分析研究[J]. 食品工业,2011(2):44.
- [7] 王明锋. 卷烟感官舒适性相关因素分析及应用技术研究[D]. 昆明:云南大学,2010.



# 切丝宽度对卷烟主流烟气7种 Hoffmann 成分释放量的影响

邱玉春, 林志平, 黄朝章, 吴清辉

(福建中烟工业有限责任公司 技术中心, 福建 厦门 361022)

**摘要:**为研究切丝宽度对卷烟主流烟气中7种 Hoffmann 成分释放量(CO, NNK, NH<sub>3</sub>, HCN, BaP, 巴豆醛, 苯酚)的影响, 通过改变切丝宽度, 测定卷烟主流烟气中7种 Hoffmann 成分的释放量. 结果表明: 在考察的切丝宽度范围内, 随着切丝宽度的增加, 烟气中 CO, HCN 和苯酚逐渐下降, NH<sub>3</sub> 逐步上升, NNK 和 BaP 先上升后下降, 而巴豆醛和卷烟危害性指数保持不变; 降低切丝宽度有利于选择性降低烟气中的 NH<sub>3</sub>、BaP 和巴豆醛, 提高切丝宽度有利于选择性降低烟气中 CO, HCN 和苯酚. 兼顾卷烟品质和卷烟减害, 最佳切丝宽度为 0.95 mm.

**关键词:**切丝宽度; 卷烟主流烟气; Hoffmann 成分; 卷烟有害成分

**中图分类号:**TS411.2   **文献标志码:**A   **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.003

## Effects of cutting width of tobacco on 7 kinds of Hoffmann components of mainstream smoke

QIU Yu-chun, LIN Zhi-ping, HUANG Chao-zhang, WU Qing-hui

(Technology Center, China Tobacco Fujian Industrial Co., Ltd., Xiamen 361022, China)

**Abstract:** In order to explore effects of cutting width of tobacco on 7 kinds of Hoffmann components (CO, NNK, NH<sub>3</sub>, HCN, BaP, crotonaldehyde, phenol) of mainstream smoke, the 7 kinds of Hoffmann components in mainstream smoke of cigarettes with different cutting width of tobacco were detected. The results indicated that: within the studied scope of the cutting width, with the increase of cutting width, CO, HCN and phenol in mainstream smoke decreased, NH<sub>3</sub> increased, NNK and BaP first increased and then decreased, while crotonaldehyde and hazard index remained unchanged; reducing the cutting width was good to selectively decreasing NH<sub>3</sub>, BaP and crotonaldehyde, while improving the cutting width was conducive to the selective reduction of CO, HCN and phenol. To take tobacco quality and tobacco harm reduction into consideration, the best cutting width was 0.95 mm.

**Key words:** cutting width of tobacco; mainstream smoke of tobacco; Hoffmann component; harmful components of tobacco

## 0 引言

生效, 卷烟制品中释放的有害成分成为公众日益关注的焦点, 中国烟草行业面临的社会和市场压力进一步加大<sup>[1]</sup>. 如何有效地减少卷烟主流烟气中的有

近年来, 随着《烟草控制框架公约》在我国正式

收稿日期: 2013-04-17

作者简介: 邱玉春(1975—), 女, 福建省龙岩市人, 福建中烟工业有限责任公司助理工程师, 主要研究方向为烟草工艺.

通信作者: 林志平(1975—), 男, 福建省漳州市人, 福建中烟工业有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为烟草工艺.

害成分、降低吸烟对消费者健康的影响已成为烟草行业研究的热点。目前卷烟烟气中的主要危害成分,通常参照 Hoffmann 名单(12类共44中有害成分),简称为 Hoffmann 成分,主要集中在焦油中。近年来,通过研究配方和卷烟辅助材料对 Hoffmann 成分的影响规律,国产卷烟产品已应用功能性助燃剂的卷烟纸、膨化烟丝、薄片、通风稀释、滤嘴加长和功能型复合滤棒等技术来实现降低卷烟 Hoffmann 成分的目的<sup>[2-3]</sup>。

卷烟加工是卷烟生产的重要环节,也是决定卷烟产品品质的关键环节之一。但是研究卷烟生产工艺对 Hoffmann 成分影响的报道较为少见。切丝宽度是卷烟加工的重要工序,是影响卷烟产品感官质量和物理质量的主要因素之一。相关研究表明:合适的切丝宽度,有利于提高卷烟香气透发性、增加烟气细腻度、增加过程造碎率和成品含末率。此外,切丝宽度的变化会影响烟气中的氨基酸、烟碱、CO 和苯酚等化学成分的释放量<sup>[4-5]</sup>。本文拟通过研究不同切丝宽度对卷烟主流烟气中7种Hoffmann成分释放量的影响,为低危害卷烟工艺设计参数的优化选择提供参考。

## 1 实验

### 1.1 材料和仪器

无水硫酸钠,异烟酸,1,3-二甲基巴比妥酸和吡啶(均为分析纯),CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>,CH<sub>3</sub>OH,环己烷(均为色谱纯),甲烷磺酸(纯度>99%),Acros公司产;NNK,N-戊基-(3-甲基吡啶基)亚硝胺、巴豆醛-2,4-二硝基苯肼衍生物(纯度>97%),BaP,D12-BaP(纯度>98%),CH<sub>3</sub>CN(色谱纯),百灵威科技有限公司产;聚乙氧基月桂醚 Brij35(30%),Skalar公司产;50 mg 硅胶固相萃取柱,Varian公司产;苯酚(AR),日本东京化工工业株式会社产;HClO<sub>4</sub>,2,4-二硝基苯肼,乙酸,NaOH,浓盐酸,氯胺 T(分析纯),上海国药化学试剂公司产;邻苯二甲酸氢钾(分析纯),广东汕头西陇化工厂产;水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>标准溶液,水中CN<sup>-</sup>标准溶液(均为分析纯),中国计量科学研究院提供。

SM-450 直线型吸烟机, Filtrona 公司产;RM-200 转盘吸烟机, Borgwaldt-KC 公司产;San<sup>plus</sup>型自动分析仪, Skalar 公司产;离子色谱仪, 戴安公司产;Acquity 超高效液相色谱仪, Waters 公司产, 配备荧光/PDA 检测器; Luna HPLC C18 色谱柱(菲罗门,

100 mm × 3.9 mm, 5 μm); Acclaim Explosive E2 色谱柱(戴安, 250 mm × 4.6 mm 120 × 10<sup>-10</sup> m), Acclaim Explosive E2 预柱(戴安, 10 mm × 4.3 mm 120 × 10<sup>-10</sup> m); PE600—600T 气相色谱-质谱联用仪, PE 公司产; 6890N—CSI—TEA610 型气相色谱-热能分析联用仪, Agilent 公司产; DB—5(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) 弹性毛细管色谱柱、HP—50(30 m × 0.53 mm × 1 μm) 弹性毛细管色谱柱、石英毛细管保护柱(1 m × 0.53 mm × 1 μm), Agilent 公司产; GFL3017 型台式旋转震荡器, Gesellschaft 公司产; AT—500N 标准自动电位滴定仪, KEM 公司产; 70/80 mL 打孔气体吸收瓶, 上海讯宏仪器公司产; Human 型超纯水系统, Pgeneral 公司产; AG104 电子天平(感量0.000 1 g), Mettler2Toledo 公司产; 950HTAE 型超声波清洗器, Crest 超声波公司产; TurboVap II 型氮吹浓缩仪, ZYMARK 公司产。

### 1.2 实验方法

以七匹狼某一四类烤烟型卷烟叶组配方(滚筒、气流干燥方式)为实验对象,选择切丝宽度0.75 mm, 0.95 mm 和 1.10 mm 进行叶丝宽度实验,其他参数均按生产标准制丝、卷制(福建中烟工业有限责任公司)。合格烟支在温度(22 ± 1)℃和相对湿度(60 ± 2)% 条件下平衡 48 h。

采用 GB/T 19609—2004《卷烟用常规分析用吸烟机测定总颗粒物相和焦油》、GB/T 23356—2009《卷烟主流烟气中 CO 的检验规程》、YC/T 253—2008《卷烟主流烟气中氰化氢的测定连续流动法》、GB/T 23228—2008《卷烟主流烟气总粒相物中烟草特有 N-亚硝胺的测定气相色谱-热能分析联用法》、YC/T 377—2010《卷烟主流烟气中氨的测定离子色谱法》、GB/T 21130—2007《卷烟烟气总粒相物中苯并[a]芘的测定》、YC/T 255—2008《卷烟主流烟气中主要酚类化合物的测定高效液相色谱法》和 YC/T 254—2008《卷烟主流烟气中主要羰基化合物的测定高效液相色谱法》分别检测烟气中的焦油, CO, HCN, NNK, NH<sub>3</sub>, BaP, 苯酚和巴豆醛含量。根据谢剑平等<sup>[1]</sup>的研究成果,通过以下公式计算各个卷烟样品的烟气危害性指数:

$$H = \left( \frac{X_{CO}}{C_{CO}} + \frac{X_{HCN}}{C_{HCN}} + \frac{X_{NNK}}{C_{NNK}} + \frac{X_{NH_3}}{C_{NH_3}} + \frac{X_{BaP}}{C_{BaP}} + \frac{X_{苯酚}}{C_{苯酚}} + \frac{X_{巴豆醛}}{C_{巴豆醛}} \right) \times \frac{10}{7}$$

式中,  $H$  为烟气危害性评价指数;  $X_{CO}$  为卷烟主流烟

气中CO释放量实测值/( $\text{mg} \cdot \text{支}^{-1}$ ); $X_{\text{HCN}}$ 为卷烟主流烟气中HCN释放量实测值/( $\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1}$ ); $X_{\text{NNK}}$ 为卷烟主流烟气中NNK释放量实测值/( $\text{ng} \cdot \text{支}^{-1}$ ); $X_{\text{NH}_3}$ 为卷烟主流烟气中 $\text{NH}_3$ 释放量实测值/( $\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1}$ ); $X_{\text{BaP}}$ 为卷烟主流烟气中BaP释放量实测值/( $\text{ng} \cdot \text{支}^{-1}$ ); $X_{\text{苯酚}}$ 为卷烟主流烟气中苯酚释放量实测值/( $\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1}$ ); $X_{\text{巴豆醛}}$ 为卷烟主流烟气中巴豆醛释放量实测值/( $\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1}$ ); $C_{\text{CO}}, C_{\text{HCN}}, C_{\text{NNK}}, C_{\text{NH}_3}, C_{\text{BaP}}, C_{\text{苯酚}}, C_{\text{巴豆醛}}$ 分别为2008年度全国卷烟主流烟气中CO,HCN,NNK, $\text{NH}_3$ ,BaP,苯酚,巴豆醛释放量加权平均值,分别为14.2 mg/支,146.3  $\mu\text{g}$ /支,5.5 ng/支,8.1  $\mu\text{g}$ /支,10.9 ng/支,17.4  $\mu\text{g}$ /支,18.6  $\mu\text{g}$ /支。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同切丝宽度对卷烟主流烟气中CO释放量的影响

不同切丝宽度对烟气CO释放量的影响见图1。图1表明:随着切丝宽度增加,CO的释放量逐渐降低,该实验结果与文献[5]的研究结果相吻合;而切丝宽度对烟气CO单位焦油释放量基本无影响。

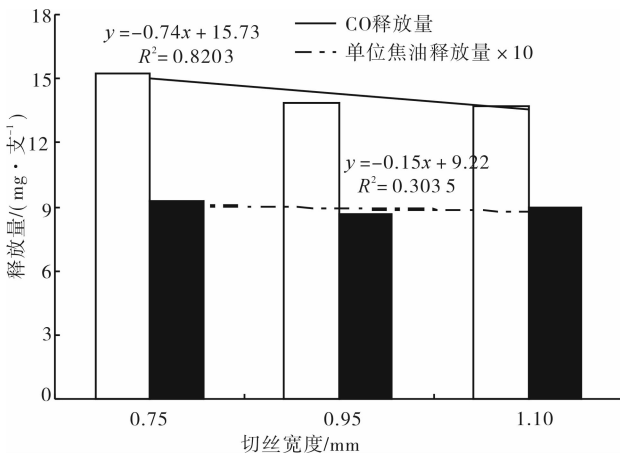


图1 不同切丝宽度对烟气CO释放量和单位焦油释放量的影响

### 2.2 不同切丝宽度对卷烟主流烟气中HCN释放量的影响

不同切丝宽度对烟气HCN释放量的影响见图2。图2表明:切丝宽度较小时,HCN的释放量和单位焦油释放量较高,切丝宽度 $\geq 0.95$  mm后,HCN的释放量和单位焦油释放量降幅较小;适当提高烟叶的切丝宽度有利于选择性降低卷烟主流烟气中的HCN。

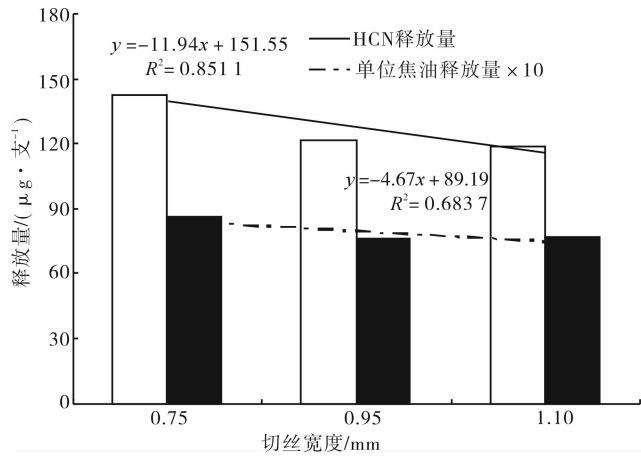


图2 不同切丝宽度对烟气HCN释放量和单位焦油释放量的影响

### 2.3 不同切丝宽度对卷烟主流烟气中 $\text{NH}_3$ 释放量的影响

不同切丝宽度对烟气 $\text{NH}_3$ 释放量的影响见图3。图3表明:随着切丝宽度的增加, $\text{NH}_3$ 的释放量和单位焦油释放量逐渐增大;减小切丝宽度可一定程度上选择性降低烟气 $\text{NH}_3$ 。

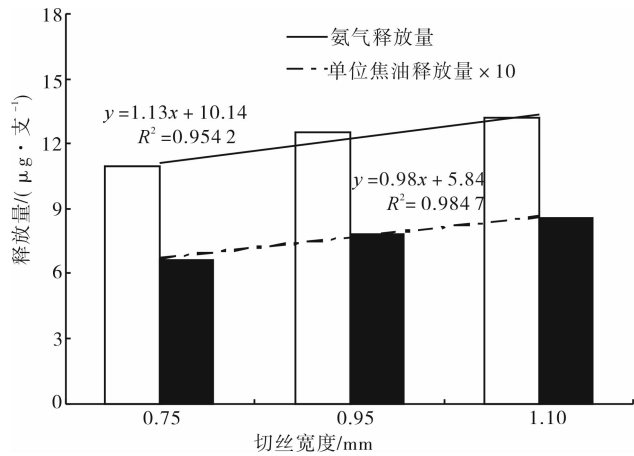


图3 不同切丝宽度对烟气氨释放量和单位焦油释放量的影响

### 2.4 不同切丝宽度对卷烟主流烟气中NNK释放量的影响

不同切丝宽度对烟气NNK释放量的影响见图4。图4表明:切丝宽度为0.95 mm时,NNK的释放量和单位焦油最高;选择合适切丝宽度可一定程度上选择性降低烟气NNK。

### 2.5 不同切丝宽度对卷烟主流烟气中BaP释放量的影响

不同切丝宽度对烟气BaP释放量的影响见图5。图5表明:切丝宽度为0.95 mm时,BaP的释放量

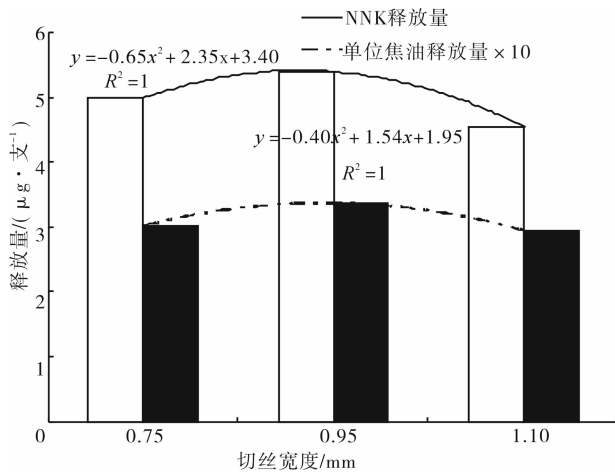


图4 不同切丝宽度对烟气 NNK 释放量和单位焦油释放量的影响

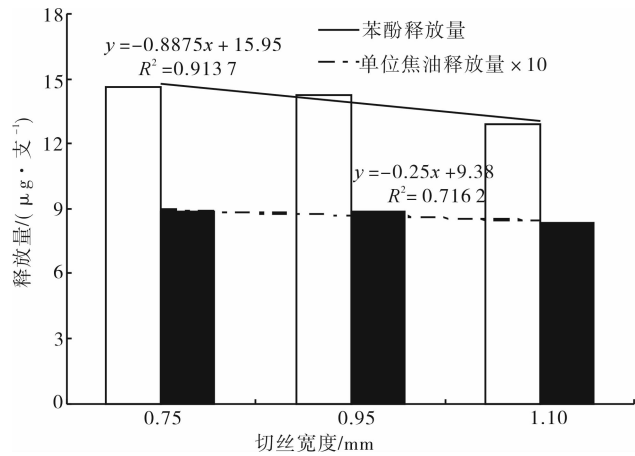


图6 不同切丝宽度对烟气苯酚释放量和单位焦油释放量的影响

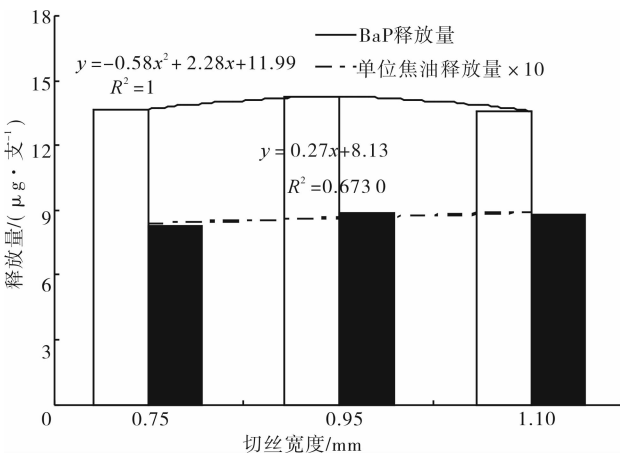


图5 不同切丝宽度对烟气 BaP 释放量和单位焦油释放量的影响

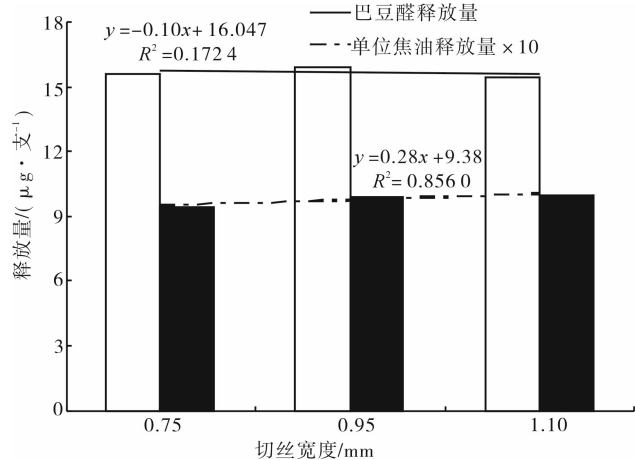


图7 不同切丝宽度对烟气巴豆醛释放量和单位焦油释放量的影响

最高;切丝宽度对烟气 BaP 单位焦油释放量有一定影响,两者呈正相关关系。

### 2.6 不同切丝宽度对卷烟主流烟气中苯酚释放量的影响

不同切丝宽度对烟气苯酚释放量的影响见图 6.图 6 表明:随着切丝宽度的增加,苯酚的释放量和单位焦油释放量逐渐减小;增加切丝宽度可一定程度上选择性降低烟气苯酚。

### 2.7 不同切丝宽度对卷烟主流烟气中巴豆醛释放量的影响

不同切丝宽度对烟气巴豆醛释放量的影响见图 7.图 7 表明:切丝宽度对烟气巴豆醛的释放量影响小;切丝宽度和巴豆醛单位焦油释放量呈正相关关系,降低切丝宽度可一定程度上选择性降低烟气

巴豆醛。

### 2.8 不同切丝宽度对卷烟危害性指数的影响

不同切丝宽度对卷烟危害性指数的影响见图 8.图 8 表明:切丝宽度对卷烟危害性指数无影响.卷烟危害性指数是 7 种 Hoffmann 成分的综合体现,切丝宽度变化对 7 种成分影响趋势和影响程度不一,导致切丝宽度的变化对危害性指数的影响程度小。

## 3 结论

本文为研究切丝宽度对卷烟主流烟气中 7 种 Hoffmann 成分释放量(CO, NNK, NH<sub>3</sub>, HCN, BaP, 巴豆醛, 苯酚)的影响,通过改变切丝宽度,测定卷烟主流烟气中 7 种 Hoffmann 成分的释放量.得出如下结论。

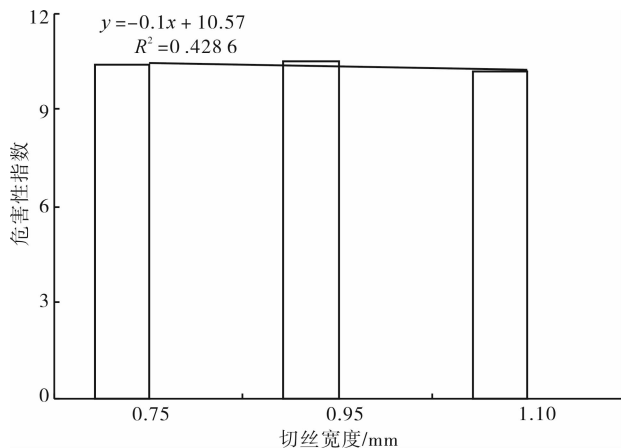


图8 不同切丝宽度对烟气危害性指数的影响

1)切丝宽度变化对7种成分影响趋势和影响程度各不相同.增加切丝宽度,有利于降低卷烟主流烟气中HCN和苯酚的释放量和单位焦油释放量;降低切丝宽度,则有利于降低主流烟气中的 $\text{NH}_3$ .兼顾卷烟品质和卷烟减害,最佳切丝宽度为0.95 mm.

2)卷烟生产过程中关键工艺参数(如切丝宽度)的调整势必改变卷烟烟丝的物理化学状态,从而对燃烧过程产生影响,导致卷烟烟气中香味成分

和Hoffmann成分的改变,以往的研究过多集中在工艺参数对香味成分的影响,忽略了Hoffmann成分的变化.在保证卷烟内外在质量的同时,如何选择更合适的切丝宽度兼顾降低7种危害成分将是未来卷烟工艺研究的重要方向.

#### 参考文献:

- [1] 谢剑平,刘惠民,朱茂祥,等.卷烟烟气危害性指数研究[J].烟草科技,2009(2):5.
- [2] 谢卫,黄朝章,苏明亮,等.辅助材料设计参数对卷烟7种烟气有害成分释放量及其危害性指数的影响[J].烟草科技,2013(1):31.
- [3] 黄朝章,蔡国华,赵艺强,等.单料烟主流烟气HCN与烟叶常规化学成分的相关性[J].烟草科技,2013(2):62.
- [4] 薛芳,李东亮,陈昆燕,等.卷烟加工重点工序工艺参数与卷烟主流烟气中苯酚释放量的关系研究[J].江西农业大学学报,2010,32(6):1307.
- [5] 唐士军,陈昆燕,曾建,等.重点工序工艺参数与主流烟气中CO量的关系研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2010,25(4):20.

# 三门峡烟区主栽烤烟两品种烟叶质量比较

王金林<sup>1</sup>, 刘国庆<sup>2</sup>, 张金召<sup>2</sup>, 周子方<sup>1</sup>,  
黄五星<sup>1</sup>, 邵惠芳<sup>1</sup>, 许自成<sup>1</sup>, 刘超<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学 烟草学院, 河南 郑州 450002;

2. 江苏中烟工业有限责任公司, 江苏 南京 210018)

**摘要:**对三门峡市主栽烤烟品种(中烟100、秦烟96)烟叶的外观质量、化学成分和感官质量进行了评价和比较.结果表明,各主栽品种烟叶外观质量好,烟叶化学成分较协调,烟叶的香气特征以焦甜香为主,辅以焦香、辛香香韵,浓香型特征尚显著.结合江苏中烟三门峡渑池基地单元的烟叶质量目标要求,中烟100较秦烟96品种更能满足工业需求.

**关键词:**烟叶外观质量;烟叶化学成分;烟叶感官质量

**中图分类号:**TS424 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.004

## Quality comparison of flue-cured tobacco leaves of main cultivars in Sanmenxia

WANG Jin-lin<sup>1</sup>, LIU Guo-qing<sup>2</sup>, ZHANG Jin-zhao<sup>2</sup>, ZHOU Zi-fang<sup>2</sup>,  
HUANG Wu-xing<sup>1</sup>, SHAO Hui-fang<sup>1</sup>, XU Zi-cheng<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>

(1. College of Tobacco Science, He'nan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. China Tobacco Jiangsu Industrial Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

**Abstract:** The appearance quality, chemical component and sensory quality of main cultivars (Zhongyan 100 and Qinyan 96) in Sanmenxia tobacco-growing area were evaluated and compared. The results showed that Sanmenxia flue-cure tobacco leaves had good appearance quality, harmonious chemical components and significant full flavor style characteristic with prominent caramel sweetish aroma and supplemented by empyreumatique and spicy flavor. According to the tobacco quality target of Sanmenxia base unit of China Tobacco Jiangsu Industrial Co. Ltd., Zhongyan 100 better meets the demands than Qinyan 96.

**Key words:** tobacco leaf appearance quality; tobacco leaf chemical component; tobacco leaf sensory quality

## 0 引言

随着“中式卷烟”的深入发展,各卷烟工业企业对烟叶原料的质量及其稳定性提出了更高的要求<sup>[1]</sup>.生态决定特色,品种彰显特色<sup>[2]</sup>,品种是烟叶生产发展和卷烟工业赖以生存的基础<sup>[3]</sup>,卷烟生产

需要多区域、多品种、多风格的卷烟原料,而不同的烤烟品种对不同生态区域有不同的适应性<sup>[4]</sup>.烟叶外观质量、化学成分和感官质量是评价烟叶质量的重要指标<sup>[5-10]</sup>.随着工业企业的深入介入,根据卷烟品牌的需求,合理地进行品种布局,充分利用自然资源,是提高卷烟烟叶原料和卷烟产品品质与稳

收稿日期:2013-07-21

基金项目:江苏中烟工业有限责任公司科技开发项目(JSZY201201);河南省烟草公司科技攻关项目(HYKJ201103)

作者简介:王金林(1987—),男,安徽省安庆市人,河南农业大学硕士研究生,主要研究方向为烟草原料学.

通信作者:许自成(1964—),男,河南省汝南县人,河南农业大学教授,博士,主要研究方向为烟草品质生态与烟叶质量评价.

定性的重要措施<sup>[11]</sup>.三门峡是江苏中烟公司的原料生产基地之一,其烟叶产量和质量对“苏烟”品牌的稳定具有重要影响.本研究将以三门峡渑池基地单元为基础,对供试烟叶品种的品质进行评价和比较,以期为企业合理利用烟叶原料提供参考.

## 1 实验

### 1.1 材料

按照取样代表性原则,选取河南省三门峡市江苏中烟渑池基地单元天池、果园和英豪3个乡镇的2012年烤后烟叶样品.供试烤烟品种为当地主栽品种,包括中烟100和秦烟96.供试样品为中部叶,样品等级为中橘三(C3F),样品等级由专职评级人员按照GB 2635—1992<sup>[12]</sup>进行评定.每个样品取3.0 kg,用于各项指标的测定.

### 1.2 分析方法

#### 1.2.1 化学成分分析 烟碱、总糖、还原糖、总氮、

钾、氯等常规化学成分的测定参照文献[13]的方法进行,每个样品各指标重复测定3次,并计算出糖碱比、氮碱比和钾氯比.

#### 1.2.2 外观质量评价

从烟叶成熟度、颜色、身份、油分、叶片结构、色度等方面按10分制评价.参照GB 2635—1992标准,对品质因素各档次赋以分值,各赋值方法见表1<sup>[14]</sup>.

#### 1.2.3 感官质量评价

烤烟感官质量定性评价:按照烟草行业标准NY/YCT 008—2002对烟叶样品进行定性描述.烤烟感官质量定量评价:按照烟草行业标准NY/YCT 008—2002,以9分制对各指标进行赋值(见表2).具体方法为每次评吸时,均以标准样品作为对照,然后对其他单料烟样品各指标赋值,以保证样品评吸结果的可比性.

### 1.3 统计分析方法

采用软件SPSS 19.0和Excel对数据进行统计分析.

表1 烤烟外观质量各因素赋值标准 分

外观	赋值	
颜色	橘黄	7~10
	柠檬黄	6~9
	红棕	3~7
	微带青	3~6
	青黄	1~4
	杂色	0~3
成熟度	成熟	7~10
	完熟	6~9
	尚熟	4~7
	假熟	3~5
	欠熟	0~4
结构	疏松	8~10
	尚疏松	5~8
	稍密	3~5
	紧密	0~3
身份	中等	7~10
	稍薄	4~7
	稍厚	4~7
	薄	0~4
	厚	0~4
油分	多	8~10
	有	5~8
	稍有	3~5
	少	0~3
色度	浓	8~10
	强	6~8
	中	4~6
	弱	2~4
	淡	0~2

表2 烤烟感官质量各因素赋值标准 分

评吸项目	程度	赋值
香气质	较好、中偏上	6.1~9
	中等	3.1~6
	中偏下、较差	≤3
香气量	较足、尚足	6.1~9
	有	3.1~6
浓度	较少、少	≤3
	浓、较浓	6.1~9
	中等	3.1~6
杂气	较淡、淡	≤3
	无、较轻	6.1~9
	有	3.1~6
劲头	略重、较重、重	≤3
	大、较大	3.1~6
刺激性	中等	6.1~9
	较小、小	3.1~6
余味	微有	6.1~9
	有	3.1~6
	略大、较大	≤3
燃烧性	舒适、较舒适	6.1~9
	尚适	3.1~6
	欠适、滞舌	≤3
灰色	强、较强	6.1~9
	中等	3.1~6
	较差、熄火	≤3
身份	白	6.1~9
	灰白	3.1~6
	灰、黑灰	≤3

## 2 结果与分析

### 2.1 烟叶外观质量比较

三门峡烟区主栽烤烟品种中烟 100 与秦烟 96 烟叶外观质量比较结果见表 3。由表 3 可知,三门峡市烟叶的总体外观质量较好,烟叶等级纯度高,综合得分均 > 85 分。中烟 100 烟叶颜色以橘黄色为主,成熟度主要为成熟,身份中等,油分足,手摸柔软富有弹性,叶片结构疏松,色泽饱满,均匀度较好。秦烟 96 烟叶颜色以橘黄为主,成熟度主要为成熟,身份中等,油分有,叶片结构较疏松,色度以中为主。两者外观质量各个指标之间的差异不明显。

表 3 中烟 100 与秦烟 96 外观质量比较 分

取样品种	颜色	成熟度	身份	油分	叶片结构	色度	综合得分
中烟 100	9	10	10	7.3	10	5.7	90.86
秦烟 96	9	10	9	6.7	9	5.3	87.24

### 2.2 烟叶化学成分比较

三门峡市各主栽品种烟叶化学成分的检测分析结果见表 4。结合江苏中烟对三门峡烟区烟叶原

表 4 中烟 100 与秦烟 96 化学成分比较

化学指标	中烟 100			秦烟 96			t 值	P
	平均值 ± 标准差	变幅	变异系数	平均值 ± 标准差	变幅	变异系数		
烟碱/%	2.13 ± 0.19	1.85 ~ 2.32	8.92	2.39 ± 0.38	1.74 ~ 2.71	15.90	-1.39	0.203
总糖/%	32.88 ± 1.43	30.32 ~ 33.53	4.35	30.21 ± 1.81	29.05 ~ 33.38	5.99	2.59*	0.032
还原糖/%	25.56 ± 1.63	23.89 ~ 27.54	6.38	23.96 ± 1.65	21.99 ~ 24.97	6.89	1.53	0.163
总氮/%	1.80 ± 0.09	1.66 ~ 1.91	5.00	1.79 ± 0.09	1.64 ~ 1.86	5.03	0.21	0.838
钾/%	1.53 ± 0.03	1.48 ~ 1.57	1.96	1.48 ± 0.06	1.41 ~ 1.57	4.05	1.55	0.161
氯/%	0.22 ± 0.04	0.18 ~ 0.27	18.18	0.29 ± 0.06	0.23 ~ 0.35	20.69	-2.26*	0.044
糖碱比	12.09 ± 1.53	10.30 ~ 14.49	12.66	10.20 ± 1.55	8.64 ~ 12.64	15.20	1.95	0.088
氮碱比	0.85 ± 0.09	0.73 ~ 0.99	10.59	0.76 ± 0.10	0.69 ~ 0.94	13.16	1.49	0.176
钾氯比	7.04 ± 1.08	5.81 ~ 8.22	15.34	5.23 ± 0.83	4.62 ~ 6.00	15.87	2.96*	0.018

表 5 江苏中烟对三门峡烤烟原料化学成分的要求

部位	烟碱/%	总糖/%	还原糖/%	总氮/%	钾/%	氯/%	钾氯比
中部叶	2.40 ± 0.40	27.00 ± 3.00	25.00 ± 3.00	2.20 ± 0.30	≥ 1.60	< 0.40	≥ 4.00

表 6 中烟 100 与秦烟 96 评吸质量比较

品种	产地	香味风格		烟气口感		质量评价						
		香型	分值	香型	分值	香气质	香气量	浓度	杂气	劲头	刺激性	余味
中烟 100	天池	浓香型	6.5	焦甜	6.5	6.5	6.5	6.0	6.0	5.5	5.5	6.0
	果园	浓香型	6.5	焦甜	6.5	6.0	6.5	6.0	5.5	5.5	5.5	6.0
	英豪	浓香型	6.5	焦甜	6.5	6.5	6.5	6.0	6.0	5.5	6.0	6.0
秦烟 96	天池	浓香型	6.0	焦甜	6.0	6.0	6.0	6.0	5.5	5.0	6.0	6.0
	果园	浓香型	6.5	焦甜	6.0	6.0	6.0	6.5	5.5	5.5	6.0	6.0
	英豪	浓香型	6.0	焦甜	6.5	6.0	6.0	6.0	5.5	5.0	6.0	6.0

料化学成分的要求(见表 5)可知,三门峡市烟叶的化学成分总体协调性较好,符合江苏中烟烟叶原料需求。样品的总糖、烟碱含量较适宜,总氮含量偏低,氮碱比较为协调;钾含量略低,氯含量适宜,钾氯比总体协调。对主栽品种中烟 100 与秦烟 96 的化学成分进行比较可知,烟叶总糖含量、氯含量和钾氯比在不同品种间的差异达到显著水平,其中中烟 100 和秦烟 96 的总糖含量均稍高于工业企业烟叶原料化学成分的适宜范围,而氯含量和钾氯比均在适应范围内,且中烟 100 的氯含量显著低于秦烟 96,钾氯比显著高于秦烟 96。

### 2.3 烟叶感官质量比较

三门峡烟区主栽烤烟品种中烟 100 与秦烟 96 评吸质量比较见表 6。由表 6 可见,三门峡市各主栽品种的香气风格特征以焦甜香为主体,浓香型特征尚显著。其中中烟 100 的香气风格特征以焦甜香为主体香韵,辅以焦香、辛香香韵,焦甜香香韵较明显;浓香型特征尚显著;香气较沉溢;烟气浓度及劲头适中。品质特征指标表现为香气质好、香气量较



充足、尚透发;烟气尚细腻、尚柔和、较圆润;稍有刺激、稍有干燥感,余味尚净尚舒适.秦烟96以焦甜香为主体香韵,辅以焦香、辛香香韵,焦甜香香韵较明显;浓香型特征尚显著;香气较沉溢;烟气浓度及劲头适中.品质特征指标表现为香气质较好、香气量较充足、尚透发;烟气尚细腻、尚柔和、较圆润;稍有干燥感,余味尚净尚舒适.两者各感官质量之间的差异不明显.中烟100的香气质、香气量和杂气略高秦烟96,刺激性比秦烟96稍小.

### 3 结论

三门峡各主栽品种烟叶外观质量较好,表现为烟叶等级纯度高,烟叶颜色桔黄,烟叶成熟度好,身份适中,油分较充足,叶片结构疏松,色泽饱满,均匀度较好.中烟100与秦烟96烟叶外观质量各个指标之间的差异不显著.

主栽烤烟品种中部烟叶整体常规化学成分含量适宜、比例协调,但总糖含量略高,总氮含量偏低,钾含量略低,氯含量整体适宜.烟叶总糖含量、氯含量和钾氯比在中烟100和秦烟96间的差异达到显著水平,中烟100的氯含量显著低于秦烟96,钾氯比显著高于秦烟96.

各主栽品种烟叶香气特征以焦甜香为主略带焦香、辛香香韵,浓香型特征尚显著.总体烟叶质量较好.其中中烟100的焦甜香韵更为突出,香气质量较好,烟气口感更为舒适,综合感官质量较好.

#### 参考文献:

[1] 周冀衡,张建平.构建中式卷烟优质特色烟叶原料保

障体系是新形势下中国烟草的战略选择[J].中国烟草学报,2008,14(1):42.

- [2] 奚柏龙,卢山冰.发挥山地特色实现特色突破[J].西部大开发,2011(5):18.
- [3] 王明金,付军军,张大信.普安县烤烟品种(系)适应性研究[J].山地农业生物学报,2012,31(5):385.
- [4] 唐永红,马英明,薛锋,等.烤烟新品种秦烟95的选育与应用研究[J].种子,2006,25(1):71.
- [5] 邓小华,周冀衡,陈新联,等.烟叶质量评价指标间的相关性研究[J].中国烟草学报,2008,14(2):1.
- [6] 逢涛,宋春满,方敦煌.云南烤烟主要栽培品种化学成分比较分析[J].西南农业学报,2009,22(6):1652.
- [7] 马爱国,宋德伟,孙在明,等.不同部位烟叶外观特征与内在质量分析研究[J].山东农业科学,2009(5):48.
- [8] 齐永杰,戴永强,刘久羽.不同成熟度对初烤烟主要质量性状的影响[J].广东农业科学,2010(6):45.
- [9] 史金钟,杨承,宋街民,等.不同烤烟品种(系)对比试验[J].安徽农业科学,2010,38(19):10061.
- [10] 程森,杜咏梅,张骏,等.烤烟不同生物碱含量特征及其与烟叶内在质量关系研究初报[J].中国烟草科学,2009,30(6):1.
- [11] 徐安传.烤烟品种种植结构对烟叶原料和卷烟产品的影响[J].中国烟草学报,2009,15(5):82.
- [12] GB 2635—1992,国家烤烟分级标准[S].
- [13] 李勇,逢涛,师君丽,等.国内外主产烟区烤烟化学成分分析[J].中国烟草科学,2013,34(1):12.
- [14] 王彦亭,谢剑平,李志宏.中国烟草种植区划[M].北京:科学出版社,2010.

# 卷烟生产中叶片加料循环温度稳定性的优化

张常记, 张伟, 郑明华, 周音志, 曾志成

(四川烟草工业有限责任公司 什邡分厂, 四川 什邡 648400)

**摘要:**以叶片加料循环温度西格玛水平为评价指标,考察了卷烟生产中预热温度、循环热风温度设定值、PID控制 $P$ 值对循环温度西格玛水平的影响.通过单因素和正交实验确定了最佳工艺条件:预热温度及循环热风温度设定值为循环热风温度标准值,PID控制 $P$ 值为500.根据优化条件对WQ3318—SJ1525型加料机的温控程序进行优化,叶片加料循环温度的西格玛水平从原来的2.0提高到3.94.

**关键词:**卷烟工艺;预热温度;循环热风温度;PID控制 $P$ 值;西格玛水平

**中图分类号:**TS452+.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.005

## The optimization of cycle temperature stability for leaf feeding in cigarette production

ZHANG Chang-ji, ZHANG Wei, ZHENG Ming-hua, ZHOU Yin-zhi, ZENG Zhi-cheng  
(Shifang Cigarette Factory, Sichuan Tobacco Industrial Co., Ltd., Shifang 648400, China)

**Abstract:** The effects of preheat temperature, cyclic hot air temperature setting value and the  $P$  value of PID control were investigated in cigarette production based on the comprehensive evaluation which were guided by the Sigma level of cyclic temperature. The optimum conditions obtained by single factor and orthogonal methodology were as follows: preheat temperature and cyclic temperature setting value were its standard value, the  $P$  value of PID control was 500. Under these conditions, the temperature control program of WQ3318 - SJ1525 was optimized, and the Sigma level of cycle temperature in leaf feeding increased from 2.0 to 3.94.

**Key words:** cigarette technology; preheat temperature; cyclic hot air temperature;  $P$  value of PID control; Sigma level

## 0 引言

在卷烟制丝过程工艺控制中,叶片加料的热风温度直接影响烟叶的加工质量.同时热风温度的波动还会影响工序点的加料控制和含水率控制,影响制丝过程加工能力.WQ3318—SJ1525型加料机的温控程序以出口温度控制为主,固定预热温度,依

靠传统的PID(proportion integral derivative)对热风风门进行单一控制,循环热风温度波动较大,过程加工能力低,目前在行业内基本被更新换代或对加热器及温控系统进行升级<sup>[1-4]</sup>.本文在原有温控系统的基础上改进PID控制程序,即依然按照出口温度来设置,而预热温度和加热器设定值采用出口温度+ $a$ ℃进行改进,通过牌号通道程序自动调用其

收稿日期:2013-04-30

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

预热温度(出口温度 +  $a$  °C)和循环热风温度(出口温度 +  $a$  °C),实现 WQ3318—SJ1525 型加料机的温控程序以出口温度控制转变为循环热风温度控制。

### 1 实验

#### 1.1 材料与仪器

红金龙(硬神州腾龙)、红金龙(虹之彩)、黄鹤楼(软蓝),湖北中烟叶组配方;天下秀(金),川渝中烟叶组配方。

WQ3318—SJ1525 型加料机,云南昆船第二机械有限公司产。

#### 1.2 加料循环热风温度西格玛水平计算方法

1.2.1 数据采集原则 1)采集频次:30 s 采集1次,且数据不作平滑处理。2)为保证采集数据为生产过程稳定状态数据,采集的有效数据在起止点前后各删去3 min。3)起止点确认:物料瞬时流量 > 100 kg/h;出口含水率:起始点含水率 > 12%,结束点含水率 < 12%;热风温度:起始点与工序出口含水率起始点同步,结束点与工序入口物料流量结束点同步。

1.2.2 西格玛水平计算方法 区间概率的计算方法为

$$\eta = \varphi\left(\frac{USL - \mu}{\sigma}\right) - \varphi\left(\frac{LSL - \mu}{\sigma}\right)$$

西格玛水平的计算方法为

$$Y = \text{NORMSINV}(\eta) + 1.5$$

式中,USL 为关键质量特性的上规格限,LSL 为关键质量特性的下规格限, $\mu$  为总体均值(用样本均值估计), $\sigma$  为总体标准偏差(用样本标准偏差估计)。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 循环热风温度和出口温度相关性分析

选取2012年3—5月份各牌号卷烟生产中循环热风温度和出口温度共计96批进行相关性回归分析,结果见图1。

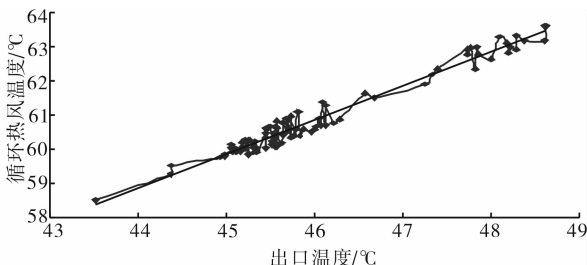


图1 循环热风温度和出口温度相关性

通过回归分析,得出各牌号卷烟生产中循环热风温度和出口温度的相互关系为  $Y(\text{循环热风温度}) = 14.8 + 1.001X(\text{出口温度})$ , 相关系数  $R = 0.9805$ 。考虑到标准的可操作性,循环热风温度与出口温度的关系修订为:循环热风温度 = 出口温度 + 15 °C。

#### 2.2 单因素实验结果分析

2.2.1 热风温度设定值对循环热风温度西格玛水平的影响 选择红金龙(硬神州腾龙)卷烟配方为研究对象,根据工厂现有工艺,设定预热温度为70 °C,PID控制P(阀门开度的比例)值为300,在此条件下,考察热风温度设定值对循环热风温度西格玛水平的影响,结果见图2。由图2可知,在热风温度设定值 < 60 °C 时,循环热风温度西格玛水平随其增加而增加, > 60 °C 后循环热风温度西格玛水平随设定值的增加而降低。热风温度设定值为60 °C 时,循环热风温度西格玛水平最大,且热风温度设定值与热风温度标准一致,因此试验选取热风温度设定值为60 °C。

2.2.2 预热温度对循环热风温度西格玛水平的影响 选择红金龙(硬神州腾龙)卷烟配方为研究对象,在热风温度设定值为60 °C,PID控制P值为300条件下,考察预热温度对循环热风温度西格玛水平的影响,结果见图3。由图3可知,在预热温度 < 60 °C 时,循环热风温度西格玛水平随其增加而增加, > 60 °C 后,循环热风温度西格玛水平随预热温度的增加而降低。热风温度设定值为60 °C 时,循环

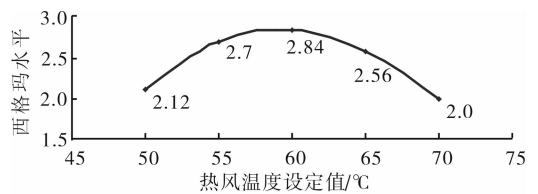


图2 热风温度设定值对循环热风温度西格玛水平的影响

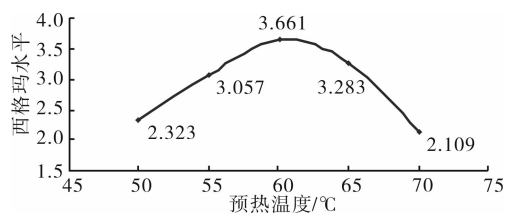


图3 预热温度对循环热风温度西格玛水平的影响

热风温度西格玛水平最大,且预热温度与循环热风温度一致,因此试验选取预热温度为 60 ℃.

**2.2.3 PID 控制 P 值对循环热风温度西格玛水平的影响** 选择红金龙(硬神州腾龙)卷烟配方为研究对象,在热预热温度为 60 ℃,热风温度设定值为 60 ℃ 条件下,考察预热温度对循环热风温度西格玛水平的影响,结果见图 4. 由图 4 可知,循环热风温度西格玛水平随 PID 控制 P 值的增加而增加,当 P 值为 500 时,循环热风温度西格玛水平最大. 这主要是由于此时阀门处于全开或全闭状态,有利于快速稳定循环热风温度,减少热风惯性对循环热风温度波动的影响,因此试验选取 PID 控制 P 值为 500.

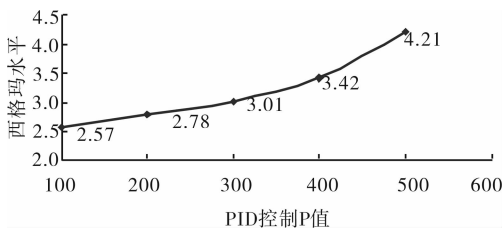


图 4 PID 控制 P 值对循环热风温度西格玛水平的影响

**2.3 正交实验结果分析**

**2.3.1 正交实验** 在上述单因素实验的基础上,选择红金龙(硬神州腾龙)卷烟配方为研究对象,对预热温度(A)、循环热风温度设定值(B)和 PID 控制 P 值(C)对循环热风温度西格玛水平的影响进行了  $L_9(3^4)$  正交实验<sup>[5-6]</sup>,实验结果见表 1.

正交实验结果表明,各因素对循环热风温度西格玛水平的影响次序为:循环热风温度设定值(B) > 预热温度(A) > PID 控制 P 值(C). 最优实验条件为  $A_2B_2C_3$ :预热温度 60 ℃,循环热风温度设定值 60 ℃,PID 控制 P 值 500. 由于红金龙(硬神州腾龙)卷烟循环热风温度的标准为 60 ℃,即各牌号卷烟预热温度和循环热风温度设定值均为其循环热风温度标准值.

**2.3.2 叶片加料温控程序的优化** 改进前后的循环热风温度控制方式分别见图 5 和图 6. 原程序预热

表 1 正交实验结果表

试验号	因素			循环热风温度西格玛水平
	A/℃	B/℃	C	
1	55	55	300	2.01
2	55	60	400	2.95
3	55	65	500	2.75
4	60	55	400	2.75
5	60	60	500	4.25
6	60	65	300	2.65
7	65	55	500	2.32
8	65	60	300	3.25
9	65	65	400	2.65
均值 1	2.570	2.360	2.637	
均值 2	3.217	3.483	2.783	
均值 3	2.740	2.683	3.107	
极差	0.647	1.123	0.470	

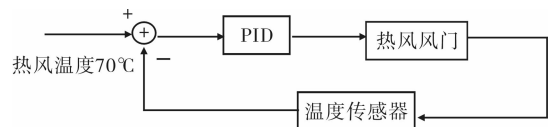


图 5 改进前循环热风温度控制方式

温度为 70 ℃,加热器固定值为 70 ℃,温控程序为出口温度控制,标准维护为设定出口温度(见图 5). 改进后标准维护依然按照出口温度来设置,预热温度和加热器设定值采用出口温度 + 15 ℃ 进行改进,即当下达各牌号生产任务时,通过牌号通道程序自动调用其预热温度(出口温度 + 15 ℃)和循环热风温度(出口温度 + 15 ℃)(见图 6).

**2.4 实验验证**

**2.4.1 批内循环热风波动情况** 改进前后循环热风温度效果对比如图 7 所示. 从图 7 中可以看出,改进前循环热风温度无法满足工艺标准,改进后循环热风温度在标准 ± 1 ℃ 内,过程控制稳定;同时其西格玛水平也从 2.0 增至 3.94.

**2.4.2 不同牌号卷烟循环热风温度西格玛水平控制情况** 选取不同循环温度标准的牌号卷烟对循环温度西格玛水平进行验证,结果见表 2. 从表 2 可知,当预热温度和循环热风温度设定值均为其循环

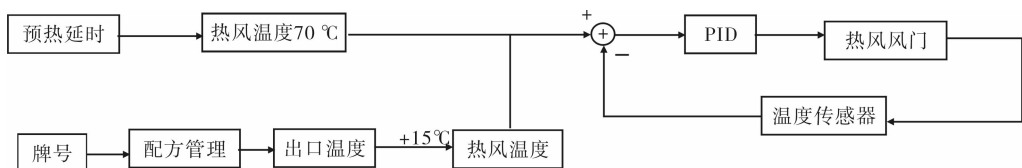


图 6 改进后循环热风温度控制方式

温度标准值、PID 控制  $P = 500$  时,各牌号卷烟的西格玛水平平均  $> 3.8$ 。

**2.4.3 改进后循环热风西格玛水平控制情况** 改进后循环热风温度西格玛水平及出口温度合格率趋势图分别见图 8 和图 9。由图可见,改进后 6 个月内叶片加料循环热风温度的西格玛水平均值达到了 3.94,同时加料出口温度合格率也达到了公司管控 95% 的要求。

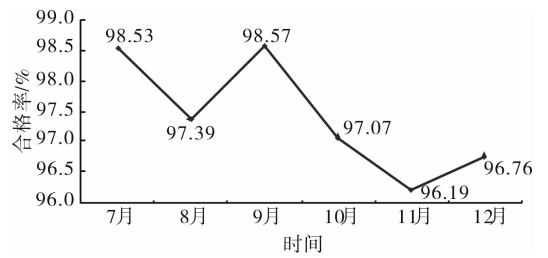


图9 改进后出口温度合格率趋势图

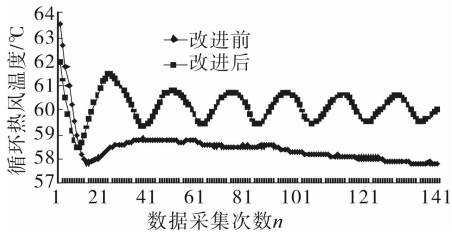


图7 改进前后循环热风温度效果对比

表2 不同循环温度标准的牌号的循环温度西格玛水平

卷烟牌号	批次	标准 /°C	平均值 /°C	标偏	区间概率	西格玛水平
天下秀(金)	121105015	60	59.87	1.04	0.995 8	4.14
	121105016	60	59.68	0.50	1.000 0	6.00
	121105017	60	59.51	0.46	1.000 0	6.00
	121107018	60	59.56	0.89	0.997 9	4.37
红金龙(虹之彩)	121218033	63	63.00	0.59	1.000 0	6.00
	121218035	63	62.77	0.76	0.999 9	5.12
	121219036	63	63.27	0.88	0.998 9	4.57
黄鹤楼(软蓝)	121219037	63	63.19	0.80	0.999 7	4.98
	121205011	55	54.63	1.11	0.989 9	3.82
	121205012	55	55.44	0.66	0.999 9	5.38
121206013	55	55.44	0.97	0.995 6	4.12	
平均	—	—	—	0.79	0.998 0	4.37

### 3 结论

本研究通过循环热风温度和出口温度相关性分析、单因素和正交试验对叶片加料循环热风温度的西格玛水平工艺参数进行了优化,确定了相关最佳控制参数:各牌号卷烟预热温度和循环热风温度设定值均为其循环热风温度标准值,PID 控制  $P$  值 500。通过对叶片加料温控程序的优化,WQ 3318—SJ1525 型加料机的温控程序实现了从出口温度控制转为循环热风温度控制,既提高了叶片加料循环热风温度的西格玛水平,又确保了加料出口温度的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 杨燕平. 复合 PID 控制技术在热风温度控制中的运用[J]. 烟草科技,2007(6):21.
- [2] 孙佩. 叶片加料机热风温度控制技术研究[J]. 硅谷,2006(6):33.
- [3] 曹正良,叶纪华. 叶片加料热风循环系统的改进[C]//中国烟草学会工业专业委员会烟草工艺学术研讨会论文集,青岛:[s. n.],2010:398-399.
- [4] 侯俊峰. 叶片加料机热风温度控制的改进[J]. 硅谷,2012(16):632.
- [5] 杨辉. 正交试验设计在烟叶配方中的运用[J]. 食品科技,1991(3):42.
- [6] 王蕊. 正交表的线性研究[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2010,25(4):118.

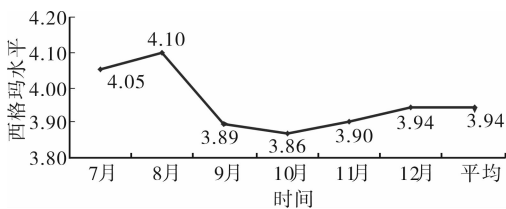


图8 改进后循环热风温度西格玛水平趋势图

# 普洱茶提取物对猪肉糜品质的影响

乔金玲<sup>1</sup>, 薛桥丽<sup>2</sup>, 杨华松<sup>3</sup>, 胡永金<sup>1</sup>, 王晶晶<sup>1</sup>, 字小平<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学 食品科学技术学院, 云南 昆明 650201;

2. 云南农业大学 图书馆, 云南 昆明 650201;

3. 云南农业大学 人事处, 云南 昆明 650201)

**摘要:**针对目前冷鲜肉制品保质期短、品质不稳定、易腐败变质等状况,考察了不同浓度普洱茶提取物(PETs)对冷却猪肉糜货架期的影响.结果表明,冷却猪肉糜中添加0.02%~0.12%的PETs后,在贮藏期间不仅可以有效抑制肠道菌群、假单胞菌和菌落总数的增殖,还可降低挥发性盐基氮和硫代巴比妥酸值的累积,增加红度值并保持猪肉糜良好的感官性状.

**关键词:**普洱茶提取物;猪肉糜品质;货架期

**中图分类号:**TS251 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.006

## Effect of Pu'er tea extract on the quality of minced pork

QIAO Jin-ling<sup>1</sup>, XUE Qiao-li<sup>2</sup>, YANG Hua-song<sup>3</sup>, HU Yong-jin<sup>1</sup>, WANG Jing-jing<sup>1</sup>, ZI Xiao-ping<sup>1</sup>

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

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

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

**Abstract:** In view of the problems of cold minced meat existing in the short shelf-life such as inconsistent quality and easiness to spoilage, the effects of different concentration of Pu'er tea extracts (PETs) on the shelf-life of minced pork were studied. The results showed that the addition of PETs (0.02%~0.12%) to the samples could not only significantly inhibit the growth of *Enterobacteriaceae*, *Pseudomonas* and the total aerobic bacterial, decrease the accumulation of the total volatile nitrogen base and thiobarbituric acid-reactive substances, but also increase the minced pork a\* value and keep its good sensory properties.

**Key words:** Pu'er tea extract; minced pork quality; shelf-life

## 0 引言

猪肉糜,作为水饺、包子、馄饨、灌肠等传统食品的主要原料和肉制品最基本的原材料,在中国具有广阔的市场.但肉糜在贮存、运输和销售环节中极易受微生物污染和脂肪氧化等,导致变质、变色、

变味,严重影响其品质.同时,由于人们对化学合成防腐剂的恐惧,开发天然、新型、高效的保鲜剂已成为当今防腐剂研究的主流.

茶叶是天然防腐剂中最受欢迎的一种,除了具有杀菌、抑菌功能外,还能够降血脂、抗氧化、减轻体重、抗疲劳、提高免疫功能、解酒、暖胃、止渴生

收稿日期:2013-11-17

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

作者简介:乔金玲(1978—),女,吉林省长春市人,云南农业大学硕士研究生,主要研究方向为畜产品品质与安全控制.

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

津、防治高血压、抗癌、平衡和调节胆固醇<sup>[1-3]</sup>。茶叶作为新型的功能性天然保鲜剂具有很好的开发前景,同时也符合当代消费者的消费观念。在茶叶中普洱茶由于具有多种生物学功能而受到人们的关注<sup>[4-6]</sup>。但目前对其研究多集中于理论方面,对其应用研究特别是在食品中的应用还很少报道。针对目前市场中猪肉糜保质期短、品质不稳定、易腐败变质等状况,本研究拟探讨不同浓度普洱茶提取物(PETs)对猪肉糜货架期的影响,旨在为普洱茶在冷却肉保鲜中的应用提供理论依据,为天然保鲜剂的开发利用提供参考。

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

普洱茶:由云南农业大学龙润普洱茶学院提供。

101A—E 电热鼓风干燥箱,上海市实验仪器总厂产;GNP—902 电热恒温培养箱,沪南实验仪器厂产;LDZX—40B1 型立式自动电热压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂产;CR—400 色彩色差计,Konica Minolta 公司产;SW—CJ. 1F 无菌操作台,苏州净化设备有限公司产;BS110S 型电子天平,北京赛多利斯天平有限公司产。

### 1.2 PETs 制备

普洱茶样品用植物粉碎机粉碎,过 80 目。取普洱茶粉以 1:10 的茶水比例在煮沸蒸馏水中浸提 2 次(每次 30 min),浸提液合并,经旋转蒸发再冷冻干燥至恒重,得到 PETs,于 4 ℃ 冷藏备用。

### 1.3 样品的处理

新鲜猪肉去除筋膜及多余的脂肪,使肥肉与瘦肉的比例为 4:1,用绞肉机绞碎,随机分成 5 组,第 1 组为对照组,第 2—5 组中分别加入 0.02%,0.04%,0.08%,0.12% 的 PETs,然后各组中加入 1.5% 的食盐,混匀后再将每组分成 10 份,每份肉糜重 100 g,分别装入标有 PETs—2, PETs—4, PETs—8 和 PETs—12 的无菌自封袋内后,于 4 ℃ 冷藏,分别在第 0 d,3 d,6 d,9 d,12 d,15 d 进行微生物、理化指标和感官分析。

### 1.4 微生物指标和理化指标测定

**1.4.1 微生物的测定** 对各样品进行菌相分析,分别采用选择性培养基对菌落总数、假单胞菌属、肠道菌群的数量进行测定,计数方法参照 GB/T 4789.2—2010<sup>[7]</sup>,其培养条件分别为:菌落总数采用营养

琼脂培养基,在 37 ℃ 下培养 48 h;假单胞菌属采用结晶紫胆盐培养基在 30 ℃ 下培养 48 h;肠道菌群采用麦康凯培养基在 37 ℃ 下培养 48 h。

**1.4.2 理化指标测定** 红度值:采用色彩色差计直接测定猪肉糜的  $a^*$  值,重复测试 5 次。

挥发性盐基氮(TVBN):采用 GB/T 5009.44—2003 中的微量扩散法测定。

硫代巴比妥酸(TBARS)的测定:样品经剪碎、研磨后,准确称取 5 g 置于 50 mL 离心管中,加 15 mL 去离子蒸馏水高速匀浆 15 s。取肉浆 1 mL 转到小离心管中,加入 20 mmol/L 硫代巴比妥酸的 15% 三氯乙酸溶液(20 mmol/L TBA/15% TCA,  $w/v$ ) 2 mL,涡旋混合后于 95 ℃ 水浴锅中反应 15 min 产生颜色。冷水冷却 10 min 后于 5 ℃ 条件下 3 000 r/min 离心 15 min。取上清液在波长 531 nm 处测定,同时以 1 mL 去离子蒸馏水和 2 mL TBA/TCA 溶液为空白<sup>[8]</sup>。

### 1.5 感官评定

10 名经过培训的人员组成评定小组对经普洱茶提取物处理的样品组和对照组进行感官色泽、气味、弹性和整体接受程度的判定。在评定之前每个样品被切成 3 块相同厚度(约 0.2 cm)的肉块并编号,随机分给每个小组进行评定。分组“1”表示极度厌恶,“9”表示非常喜欢,“5”表示既不讨厌也不喜欢。

### 1.6 试验数据的统计分析

利用 SPSS 统计软件对原始数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 PETs 对冷却猪肉糜中微生物的影响

添加 PETs 的样品和对照组分别在取样当天,第 3 d,6 d,9 d,12 d 和 15 d 测得样品中微生物结果见图 1。从图 1 可看出,对照组样品在贮藏期间菌落总数呈指数级增长,到第 9 d 已经达到 7 log CFU/g。在贮藏的前 6 d, PETs 表现出杀灭或抑制微生物生长的作用,抑制效果随普洱茶浓度的增加而增强。从第 6 d 开始,添加 PETs 处理组菌落总数随贮藏时间呈一定的增长趋势,特别是添加 PETs—2 的样品组。一般认为,冷却肉的细菌总数达到 6 log CFU/g 时为警戒线,达到 7 log CFU/g 时外观有明显的腐败现象。以此标准判断,对照组肉样贮期不超过 9 d, PETs—2 组约 12 d, PETs—4, PETs—8 和 PETs—12

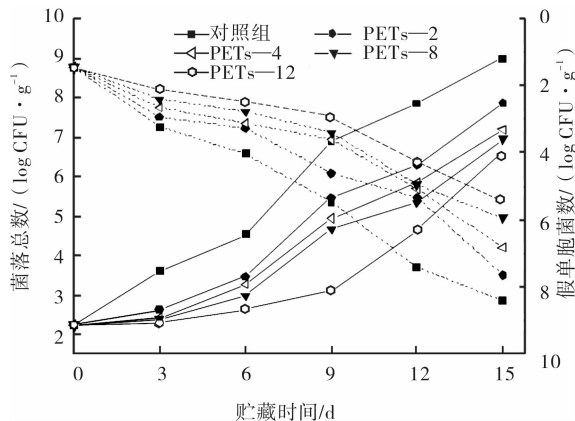


图1 猪肉糜在冷却贮藏期间菌落总数和假单胞菌数的变化

组约 15 d. 实验结果表明, PETs 对猪肉糜贮藏期间的细菌增殖抑制作用明显, 且随添加量的增加, 抑制效果越好.

从图 1 还可看出, 对照组样品在贮藏的第 3 d, 假单胞菌的数量已增至 3.23 log CFU/g, 而其他 PETs 处理组样品中的假单胞菌数量在最初 3 d 都有一段生长停滞期, 即表现出杀灭或显著抑制假单胞菌生长的趋势; 从第 3 d 开始, 普洱茶处理组样品中的假单胞菌数量呈一定的增长, 但到 15 d 时, 除 PETs—2 外其数量仍在 5 ~ 7 log CFU/g 之内.

PETs 对肠杆菌科细菌的影响情况见图 2. 从图 2 中可看出肠道菌群随贮藏时间的变化趋势与菌落总数的情况非常相似, 用 PETs 处理的各组样品其肠杆菌科细菌的数量受到明显的抑制.

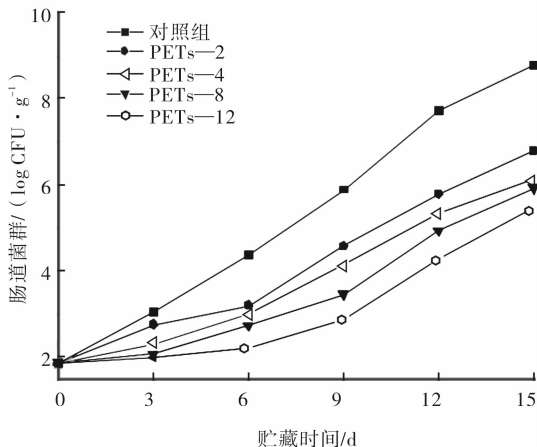


图2 猪肉糜在冷却贮藏期间肠道菌群的变化

### 2.2 PETs 对冷却猪肉糜中 TVBN 的影响

猪肉糜在冷却贮藏期间 TVBN 值变化情况见图 3. 由图 3 可见, 样品最初的 TVBN 值为 0.96 ~

1.44 mg/100 g. 随着贮藏时间的延长, 对照组的 TVBN 值显著增加, 最高达到 48.68 mg/100 g. 与之相反, 在 0 ~ 9 d 内, PETs 处理组的 TVBN 值只是少量增加. 贮藏 15 d 后, 对照组样品的 TVBN 值达到 48.78 mg/100 g, 而添加 PET 的样品除 PETs—2 外, 其余处理组样品的 TVBN 值均在腐败界限之内.

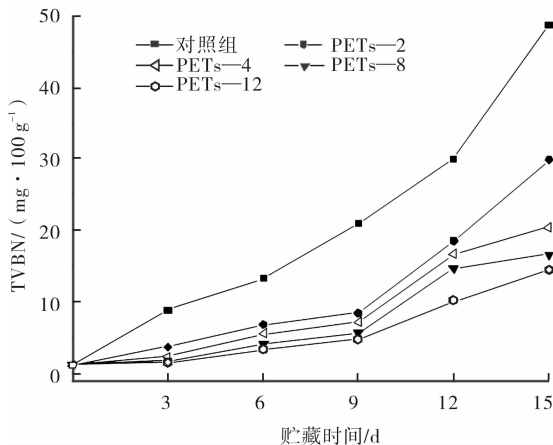


图3 猪肉糜在冷却贮藏期间 TVBN 的变化

### 2.3 贮存期间冷却猪肉糜 TBARS 值的变化

表 1 为猪肉糜冷藏期间 TBARS 的变化情况. 由表 1 可以看出, 随着贮藏时间延长各组的 TBARS 值呈上升趋势. 但对照组样品 TBARS 值增长较快, 在第 6 d 时其 TBARS 值就超过良质肉的标准 (TBARS 为 0.202 ~ 0.664 时为良质肉). 而添加提取物的样品 TBARS 值均小于贮藏相同时间的对照组, 说明 PETs 表现出明显的抗氧化作用, 并且抗氧化效应随浓度的增加而增强.

### 2.4 PETs 对冷却猪肉糜红度值的影响

猪肉糜在冷却贮藏过程中红度值 (a\*) 的变化见表 2. 由表 2 可以看出, 随贮藏时间的增加, 各处理组的红度值逐渐减小. 在第 0 d 时, 处理组之间以及处理组与对照组之间无显著差异 (P > 0.05). 在贮藏过程中, 添加 PETs 的样品红度值一直高于对照组, 且差异显著 (P < 0.05), 这是由于对照组中的脂肪氧化降低了生肉糜的红度; 而 PETs 能抗氧化, 且添加量越大, 效果越好.

### 2.5 贮存期间冷却猪肉糜的感官质量分析

贮藏过程中样品的色泽、风味和总体接受性的变化见表 3. 由表 3 可以看出, 随贮藏时间的延长, 猪肉糜的各项感官评定值整体逐渐降低. 在外观上, 随着时间的延长猪肉糜颜色呈下降趋势, 对照组第 9 d 时色泽呈暗褐色, 第 12 d 时肉色灰暗、无光泽; 添加 PETs 的各组颜色相对于对照组都比较深, 添加浓度越高时肉样的颜色越深, 没有出现肉色发



黑无光泽、灰绿的现象,说明 PETs 具有一定的护色效果. 在风味方面,添加 PETs 的样品高于对照组,对照组在贮藏第 6 d 时有轻微腐败的臭味,第 9 d 时有较重的腐臭味,第 12 d 时样品已不能接受;添加

了 PETs 的样品均显示出良好的风味,其中 PETs—12 得分最高. 从总体可接受水平上看,添加了 PETs 的样品均高于对照组,说明添加 PETs 对感官无不良影响.

表 1 猪肉糜冷藏期间 TBARS 的变化

mg · 100 g<sup>-1</sup>

时间/d	对照组	PETs—2	PETs—4	PETs—8	PETs—12
0	0.36 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>a</sup>
3	0.62 ± 0.06 <sup>ab</sup>	0.48 ± 0.02 <sup>abA</sup>	0.44 ± 0.04 <sup>abA</sup>	0.42 ± 0.03 <sup>abA</sup>	0.40 ± 0.02 <sup>abA</sup>
6	1.0 ± 0.08 <sup>cb</sup>	0.59 ± 0.06 <sup>ba</sup>	0.54 ± 0.05 <sup>ba</sup>	0.51 ± 0.02 <sup>ba</sup>	0.49 ± 0.02 <sup>baA</sup>
9	1.34 ± 0.06 <sup>dc</sup>	0.84 ± 0.05 <sup>cb</sup>	0.78 ± 0.04 <sup>cbA</sup>	0.74 ± 0.06 <sup>cbA</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>ca</sup>
12	1.84 ± 0.10 <sup>cd</sup>	1.02 ± 0.08 <sup>dc</sup>	0.94 ± 0.02 <sup>dbc</sup>	0.90 ± 0.03 <sup>dbA</sup>	0.72 ± 0.03 <sup>da</sup>
15	2.32 ± 0.04 <sup>cd</sup>	1.42 ± 0.10 <sup>cc</sup>	1.02 ± 0.08 <sup>db</sup>	0.96 ± 0.04 <sup>dbA</sup>	0.82 ± 0.06 <sup>da</sup>

注:不同上标字母(a—f)表示相同列不同数据之间存在显著差异( $P < 0.05$ );不同上标字母(A—D)表示相同行不同数据之间存在显著差异( $P < 0.05$ ).

表 2 猪肉糜在冷却贮藏过程中红度值(a\*)的变化

时间/d	对照物	PETs—2	PETs—4	PETs—8	PETs—12
0	15.70 ± 0.12	15.70 ± 0.44	15.70 ± 0.32	15.70 ± 0.28	15.70 ± 0.30
3	13.10 ± 0.48 <sup>A</sup>	15.49 ± 0.17 <sup>B</sup>	15.56 ± 0.48 <sup>B</sup>	15.62 ± 0.32 <sup>B</sup>	15.69 ± 0.24 <sup>B</sup>
6	11.30 ± 0.64 <sup>A</sup>	14.15 ± 0.36 <sup>B</sup>	14.80 ± 0.32 <sup>B</sup>	14.85 ± 0.40 <sup>B</sup>	15.10 ± 0.31 <sup>B</sup>
9	9.10 ± 0.38 <sup>A</sup>	13.05 ± 0.24 <sup>B</sup>	14.13 ± 0.48 <sup>BC</sup>	14.45 ± 0.25 <sup>BC</sup>	15.03 ± 0.37 <sup>C</sup>
12	7.90 ± 0.32 <sup>A</sup>	12.35 ± 0.18 <sup>B</sup>	13.89 ± 0.13 <sup>BC</sup>	14.11 ± 0.30 <sup>C</sup>	14.88 ± 0.24 <sup>C</sup>
15	6.88 ± 0.26 <sup>A</sup>	10.32 ± 0.30 <sup>B</sup>	11.28 ± 0.30 <sup>BC</sup>	12.52 ± 0.22 <sup>C</sup>	13.18 ± 0.25 <sup>C</sup>

表 3 猪肉糜在冷却贮藏期间感官评定

感官指标	时间/d	对照组	PETs—2	PETs—4	PETs—8	PETs—12
色泽	0	9.00 ± 0.08	9.00 ± 0.13	9.00 ± 0.13	9.00 ± 0.10	9.00 ± 0.13
	3	8.04 ± 0.06	8.11 ± 0.15	8.64 ± 0.11	8.52 ± 0.11	8.32 ± 0.20
	6	6.09 ± 0.03	8.06 ± 0.17	8.34 ± 0.13	8.48 ± 0.13	8.16 ± 0.14
	9	4.86 ± 0.05	6.43 ± 0.12	8.17 ± 0.12	8.14 ± 0.16	7.80 ± 0.18
	12	—	6.20 ± 0.06	7.64 ± 0.20	7.40 ± 0.12	7.12 ± 0.27
	15	—	6.06 ± 0.14	7.24 ± 0.12	7.20 ± 0.08	6.48 ± 0.08
风味	0	9.00 ± 0.03	9.00 ± 0.08	9.00 ± 0.13	9.00 ± 0.08	9.00 ± 0.03
	3	8.04 ± 0.2	8.42 ± 0.13	8.64 ± 0.12	8.61 ± 0.10	8.86 ± 0.12
	6	6.24 ± 0.3	7.60 ± 0.15	8.00 ± 0.12	8.28 ± 0.11	8.48 ± 0.16
	9	4.40 ± 0.2	6.63 ± 0.03	7.46 ± 0.17	7.69 ± 0.14	8.10 ± 0.09
	12	—	6.68 ± 0.10	7.22 ± 0.08	7.43 ± 0.04	7.87 ± 0.12
	15	—	6.02 ± 0.15	7.08 ± 0.17	7.16 ± 0.15	7.49 ± 0.11
总体接受性	0	9.00 ± 0.04	9.00 ± 0.02	9.00 ± 0.05	9.00 ± 0.11	9.00 ± 0.07
	3	7.66 ± 0.14	8.62 ± 0.12	8.79 ± 0.18	8.46 ± 0.20	8.48 ± 0.23
	6	5.22 ± 0.12	7.85 ± 0.10	8.24 ± 0.16	8.30 ± 0.16	8.08 ± 0.18
	9	3.27 ± 0.13	6.43 ± 0.12	7.85 ± 0.15	8.08 ± 0.10	7.27 ± 0.14
	12	—	5.89 ± 0.15	7.63 ± 0.15	7.84 ± 0.13	7.57 ± 0.12
	15	—	5.46 ± 0.16	7.22 ± 0.20	7.28 ± 0.12	7.09 ± 0.22

注:—表示因样品已腐败,未进行评分.

### 3 结论

本文考察了不同浓度普洱茶提取物(PETs)对冷却猪肉糜货架期的影响. 在猪肉糜中添加不同浓度的PETs(0.02%~0.12%)可以在不同程度上抑制猪肉糜在贮藏期间菌落总数、肠道菌群、假单胞菌的生长繁殖,并降低TVBN和TBARS的累积;添加PETs能够增加猪肉糜的红度值并在贮藏过程中显示出良好的感官属性.

#### 参考文献:

- [1] Yeo S G, Ahn C W, Kim I S, et al. Antimicrobial effect of tea extracts from green tea, oolong tea and black tea[J]. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition, 1995, 24(2):293.
- [2] 唐裕芳, 张妙玲, 冯波, 等. 茶多酚的抑菌活性研究[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(5):553.
- [3] Jia Z S, Zhou B, Yang L, et al. Antioxidation synergism of tea polyphenols and  $\alpha$ -tocopherol against free radical induced peroxidation of linoleic acid in solution[J]. Journal of the Chemical Society, 1998(2):911.
- [4] Hu Y J, Jia J J, Ge C R, et al. Antimicrobial activity of Pu-er tea extracts in vitro and its effects on the preservation of cooled mutton[J]. Journal of Food Safety, 2010, 30(1):177.
- [5] Wang B S, Yu H M, Chang L W, et al. Protective effects of Pu-er tea on LDL oxidation and nitric oxide generation in macrophage cells[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41:1122.
- [6] Hou Y, Shao W, Xiao R, et al. Pu-er tea aqueous extracts lower atherosclerotic risk factors in a rat hyperlipidemia model[J]. Experimental Gerontology, 2009, 44:434.
- [7] GB 4789.2—2010. 食品微生物学检验·菌落总数测定[S].
- [8] Sinnhuber R O, Yu T C. The 2-thiobarbituric acid reaction, an objective measure of the oxidative deterioration occurring in fats and oils[J]. Journal of Japan Oil Chemists Society, 1977, 26(5):259.

# 猪骨蛋白酶解制取多肽钙的研究综述

安广杰, 胡加松, 王章存, 赵学伟

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**综述了猪骨的酶法处理及骨胶原多肽钙合成、结构表征、螯合机理等方面的研究成果,指出目前有关猪骨蛋白酶解制取多肽钙的研究多集中在合成方面,对于多肽与钙的具体螯合机理研究只是简单地通过产物表征反推配位机理,不能真正反应出螯合过程的每步变化,有待进一步深化。

**关键词:**猪骨;酶解;多肽;多肽螯合钙;螯合机理

**中图分类号:**TS201.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.007

## Review of preparation polypeptide calcium from pig bones protease solution

AN Guang-jie, HU Jia-song, WANG Zhang-cun, ZHAO Xue-wei

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

**Abstract:** The research achievements of pig bones treatment with enzymes and collagen polypeptide calcium synthesis, structure characterization and calcium chelating mechanism were reviewed. At present, most studies have focused on the synthesis of polypeptide calcium with enzymatic pig bones; the specific calcium chelating peptide characterization process simply reverse illation the mechanism to explore more complex by the product, but can not really reflect each process change of chelation. It needs further exploration and research.

**Key words:** pig bone; enzymatic hydrolysis; poly peptide; poly peptide chelation calcium; chelation mechanism

## 0 引言

据《2012年国民经济和社会发展统计公报》统计,2012年中国年肉类总产量达 $8.384 \times 10^{10}$  kg,按比例将产生近 $8 \times 10^9$  kg的动物骨骼,其中当作下脚料丢弃的骨骼就占1/10。因诸多因素限制,大多动物食品加工副产物都未能得到有效的开发和利用。这既浪费了具有天然营养成分的丰富资源,又会因骨骼处理问题严重污染环境。骨骼是一种天然复杂的有机体,主要包括骨基质(胶原与胶原蛋白)和骨矿物质(羟基磷酸钙与羟基磷酸镁)。猪的骨骼中有

67%是以羟基磷酸钙为主的矿物质,其余是骨胶原。磷酸盐对钙的结合能力取决于其分子结构,而不是磷酸盐中的有机或无机分子<sup>[1]</sup>。骨骼的生成首先是形成胶原(I、II型胶原)和基质网,然后钙、磷以羟基磷酸钙盐的形式沉积在基质网空隙中。

骨胶原多肽通过胶原蛋白降解可得,它不仅在抗氧化和衰老、抗高血压方面有明显作用,而且能够预防和治疗骨质疏松和骨关节炎、胃溃疡等疾病,另外还能促进皮肤胶原的代谢和矿物质吸收等。多肽的加工特性良好,营养吸收特性比氨基酸或胶原蛋白更佳。鲜猪骨中的骨胶原蛋白含量很

高,若直接食用不能被很好地吸收利用,但若经酶解处理成多肽,则具有了良好的吸收性,从而有助于提高其营养价值<sup>[2]</sup>。

钙是人正常生理活动不可缺少的元素,参与机体的多种生理活动。缺钙易引起很多疾病,使得人体进入亚健康状态<sup>[3]</sup>,所以补钙成为人们长期的热点话题。无机型钙生物学效价低,有机钙盐溶解度大、易溶失且价格高,为了克服这些缺点,逐渐出现钙的氨基酸螯合物。氨基酸螯合钙具有易被吸收、使用安全、成本低、氨基酸和钙能同时补充的优点,成为首选补钙产品。研究发现多肽螯合钙具有特殊的螯合体制和转运机制,相比氨基酸螯合钙更易被吸收且吸收速度更快<sup>[4]</sup>,所以有一定生物功能性的多肽螯合钙发展空间更广。

猪骨中存在大量的胶原蛋白和钙,若将骨中的胶原蛋白与钙都利用起来制备特殊的补钙试剂——多肽螯合钙,既可提供人体每天所必需的氨基酸,又能补充机体所需要的钙离子,同时过多骨资源造成的环境污染问题也会得到相应解决。本文拟对猪骨蛋白酶解制取多肽钙进行综述,以期有助于进一步的科学研究及产品开发。

## 1 猪骨蛋白的酶解

猪骨中胶原蛋白的降解主要采用化学法和酶法。化学法反应条件剧烈,对生成的氨基酸破坏性较大,且可能生成有毒物质,越来越多的降解选择较温和的降解技术——酶法水解骨胶原蛋白。胶原蛋白酶法水解反应条件温和、用时短、无污染、产品的营养价值高,产物以胶原多肽和左旋型游离氨基酸为主,易被人体消化吸收,因而利用酶处理胶原蛋白逐渐受到了人们的重视<sup>[5]</sup>。

### 1.1 猪骨蛋白酶解的常用酶

蛋白酶主要有3种:动物蛋白酶(如胰蛋白酶)、植物蛋白酶(如木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶)和微生物蛋白酶(如碱性和中性蛋白酶)。在酶法水解胶原蛋白研究中以碱性蛋白酶居多<sup>[6]</sup>。木瓜蛋白酶用于降解大分子的胶原蛋白时只会切掉原端肽而保留三股螺旋区域。从胶原蛋白肽分子量来看,动物蛋白酶酶解得到的胶原蛋白肽的分子量范围比植物型蛋白酶酶解的更广,原因有可能是这2种蛋白酶的酶切位点不同造成的<sup>[7]</sup>。

### 1.2 骨骼酶解研究现状

大多酶解骨骼的工艺是,鲜骨经捣碎、脱脂后

进行酶解,然后灭酶干燥得到产品,最后进行指标检测<sup>[8]</sup>。李彦春等<sup>[9]</sup>用分步酶解法处理牛皮边角废料制备多肽,发现水解方式及酶种类对水解产物分子量的分布影响较大,分子量分布呈间断状态集中在某些分子量处。张根生等<sup>[10]</sup>用碱性蛋白酶和风味蛋白酶分别酶解火鸡骨制备胶原蛋白液,确定碱性蛋白酶水解的条件更优。李帆等<sup>[11]</sup>以水解度并参照固形物溶出率为指标水解牦牛骨蛋白,比较3种酶处理效果,结果表明木瓜蛋白酶最适宜。付刚<sup>[12]</sup>对比木瓜蛋白酶和中性蛋白酶的酶解效果,确定后者酶解猪骨效果最佳,制得的产品具有比谷胱甘肽略好的羟基自由基清除能力,且表现出抗氧化性功能。安广杰等<sup>[13]</sup>用 *Neatrase* 蛋白酶制备水解明胶,产物的主要分子量为5~20 kDa,这也充分说明酶处理得到的产物主要集中在某些分子量处。杜云建等<sup>[14]</sup>使用复合蛋白酶处理草鱼鱼鳞,得到产物的羟基自由基清除率最高为99.24%最佳酶解工艺。付文雯等<sup>[15]</sup>用新鲜牛骨为原料,首先用胃蛋白酶酶解得到骨胶原蛋白,继续加入中性蛋白酶,水解得到较小分子量的胶原多肽。孟欢等<sup>[16]</sup>采用木瓜蛋白酶降解明胶制备多肽,得到的产物分子量低,非常符合护发调理剂的分子量要求。洪惠等<sup>[17]</sup>使用碱性蛋白酶制备骨胶原多肽,发现产物具有良好的溶解性、热稳定性和乳化性。

## 2 多肽螯合钙的研究

多肽螯合钙是一种多肽和钙离子通过配位离子键结合或者吸附作用形成的络合物<sup>[5]</sup>,其稳定常数大于氨基酸钙,这既有利于微量元素以螯合物形式完整地运转吸收,又可在需要时随时将  $\text{Ca}^{2+}$  释放。多肽与金属离子的螯合过程中,多肽的氮端氨基和碳端羧基及氨基酸侧链的部分基团会参与配位,同时在肽链中的—CO—和—NH—亦可能参与配位,故和氨基酸与微量元素螯合效果相比,多肽与微量元素在配合率及稳定性方面可能会更高。

多肽螯合钙的吸收依靠人体的小肽转运系统,它具有快速转换、低耗能、不易饱和等较多优点,人体大部分氨基酸获得都靠此系统。完整的多肽与矿物质配位后通过转运机制进入黏膜细胞,不但提升了多肽利用率,还促使金属离子在消化道、胃及小肠中离解<sup>[18]</sup>。

### 2.1 多肽钙的合成研究

大多数的多肽螯合钙都是以胶原多肽为原料,选

用一定的钙源进行螯合制备产物。杨燊等<sup>[19]</sup>通过木瓜蛋白酶和风味蛋白酶水解南海低价值鱼蛋白制备多肽,然后再与氯化钙进行螯合反应制取多肽钙。张晓霞等<sup>[20]</sup>采用碱法水解黑鱼鱼鳞制备多肽,然后对钙螯合进行修饰得到螯合的最佳制备条件,发现螯合产物在 pH = 1.0 时的溶解度最大。郑炯等<sup>[21]</sup>用猪血多肽与铁盐反应制备多肽螯合铁,结果表明最适作为螯合反应的铁源是氯化亚铁。

赵妍嫣等<sup>[22]</sup>利用乳酸菌酶解猪骨粉,得到的发酵浓缩液与胶原多肽液螯合,通过单因素和响应面试验确定螯合的最佳条件。洪惠等<sup>[17]</sup>以鲮鱼骨为原料采用碱性蛋白酶制备胶原多肽螯合钙。桑亚新等<sup>[23]</sup>采用扇贝壳为原料,使用 95% 乙醇进行沉淀得到胶原螯合钙产物。X. L. Bao 等<sup>[24]</sup>通过透析凝胶色谱和傅里叶红外色谱 FT-IR 分析大豆多肽钙的结构,发现在不同条件下所得的多肽分子量大小不同,与钙结合能力有明显差异,与钙结合最好的多肽液分子量为 14.4 ku,并且其结合效果与羧基含量呈线性关系,结合位点最可能位于天冬氨酸和谷氨酸的羧基上。许多研究表明<sup>[13,25-26]</sup>,螯合性能较好的多肽都具有特殊的氨基酸组成特征,甘氨酸、谷氨酸、丙氨酸、天冬氨酸和羟脯氨酸含量较高。W. K. Jung 等<sup>[27]</sup>在醋酸中直接用胃蛋白酶处理长尾鳕的废弃物,所得多肽钙易溶解,结构与肌动蛋白很相似。

不同分子量为主的胶原多肽与金属的结合能力也不同。刘丽莉<sup>[28]</sup>发现发酵液经超滤膜逐步分离得到的不同分子量的多肽液,在螯合骨钙的能力上相差很大。>10 kDa 的高分子量多肽液螯合钙的能力低,而 2~4 kDa 范围分子量的胶原多肽螯合率高达 41.23%,明显高于其他分子量的多肽液,易卓林等<sup>[29]</sup>利用噬菌体随机十二肽库和金属亲和层析对 4 种重金属进行结合肽筛选,发现多肽与 Ni<sup>2+</sup> 的结合能力较强,结合力最强的多肽序列为 HASNRVH-HHHLV。此方法可寻找出与钙结合能力较好的胶原多肽链。进而提高多肽的利用率。

## 2.2 多肽螯合钙的结构表征

多肽螯合钙是二价钙离子与多肽形成具有环状结构的螯合物。祝德义等<sup>[30]</sup>对多肽的氨基和羧基进行修饰,发现经过乙酰化的胶原多肽与钙的结合量变大,而酯化后恰巧相反,表明在胶原多肽与钙的结合中羧基起主要作用。多肽钙的结构较复杂,既有钙与氨基及羧基的配位作用,也有钙离子与多

肽中羧基的离子作用,另外胶原多肽对钙还具有吸附作用。

对氨基酸和钙配位反应的研究<sup>[31-32]</sup>认为:属于硬酸的 Ca<sup>2+</sup> 易与氨基酸的羧基和氨基发生配位作用,不易和氮原子作用。但 pH > 6.5 时,因质子化后氨基解离作用可与钙离子形成五元配合物,其中包括氧、氮等参与配位的原子。胶原多肽在波长 200~230 nm 之间有较强的吸收,这是胶原多肽的肽键和羰基的特征峰,而与钙结合后因内部电子的跃迁变化使得所吸收光的波长也相应发生变化,其整体吸收峰正移,且在 203 nm 处出现了新吸收峰<sup>[28]</sup>。多肽与钙具备螯合能力,主要因为与氨基、羧基、羟基或其他基团作用<sup>[33-34]</sup>,可使用 X 射线光电子能谱分析 XPS<sup>[35-36]</sup>测定氧和氮元素的电子能变化来确定是否发生这些作用。

在胶原多肽液中大量存在氨基酸残基之间的酰胺键,也有少量的末端或侧链氨基和羧基,因此在红外光谱中必然有氨基的伸缩振动、变角振动和羧基的伸缩振动等吸收峰,与 Ca<sup>2+</sup> 结合后必然引起其吸收峰位的变化<sup>[5]</sup>。当 Ca<sup>2+</sup> 加入后氨基的伸缩振动吸收峰正移,且变强变宽,酰胺 I 带负移且吸收峰变强变尖;同时 C=O 面内的摇摆吸收峰和 N-H 的收缩振动峰消失,也证明胶原多肽的氨基和羧基都与 Ca<sup>2+</sup> 进行了配位作用<sup>[37]</sup>。

## 2.3 多肽与钙的螯合机理

**2.3.1 吸附反应机理** 蛋白质是一种含多肽的大分子,在酸性介质中肽键结合氢离子成为亲水基团,其侧链的疏水基团聚集成为疏水核,形成类似于阳离子表面活性剂的带电胶束,其正电荷均匀分布在表面,容易吸引大量负电核的酸性染料,对金属的络合产生增敏作用<sup>[38]</sup>。这是因为胶原多肽是胶原蛋白的水解产物,具有一定的乳化性<sup>[39]</sup>,而且多肽的等电点大多在 4.8~5.0 左右的缘故<sup>[9]</sup>,其对金属离子的吸附形式主要有离子交换、表面配位、静电吸附、无机微沉、孔径道吸附和氧化还原等<sup>[40]</sup>。

**2.3.2 配位反应机理** 卢业玉等<sup>[41]</sup>研究发现,因为 Zn(II) 的配位不饱和,在 pH = 2.8 时蛋白质容易带电,易与锌试剂中的磺酸基相互作用,同样锌试剂可与蛋白质肽键的氮和氧产生配位键作用,形成类似五元环结构的多元型络合物。因二价锌离子存在,改变锌试剂与蛋白质的电荷相互作用机制,继续进行混配络合反应,使产物更加稳定,吸光度明显提高,最终得到蛋白质的肽键氮和氧带电胶粒

及其形成的亲水外相和疏水内相微胶囊,它们是络合反应的主要部位.张朝平等<sup>[42]</sup>在中性条件下研究  $\text{Ag}^+$  和  $\text{Cu}^{2+}$  与血清蛋白和血红蛋白的作用,证明脱氨酸残基以及肽键端基氮和氧与  $\text{Ag}^+$  和  $\text{Cu}^{2+}$  络合显色;在偏碱性条件下 ( $\text{pH} = 11.40$ ) 溴邻苯三酚红与血清白蛋白作用时,试剂与产物都不稳定而且慢慢氧化变色.祝德义等<sup>[30]</sup>通过对胶原多肽进行化学修饰,发现胶原多肽与钙的结合反应中  $-\text{COO}-$  一起到至关重要的作用.  $-\text{COO}-$  基团与金属离子的结合有 4 种模型<sup>[43-44]</sup>:单齿、多齿、桥接双齿、虚桥接双齿,如图 1 所示.当金属离子仅仅与羧基一侧的氧原子结合,结构就是如图 1a) 的单齿模型.在双齿模型中金属离子与羧基的 2 个氧原子平行结合.桥接双齿模型中,每一个金属离子分别与羧基一侧的氧原子进行结合.在另外一种非常特殊的虚桥接双齿结合模型中,羧基的 2 个氧原子一侧与金属离子结合另一侧与一个水分子结合<sup>[43,45]</sup>.胶原多肽结合钙前后的紫外光谱分析发现,羰基和肽键的特征吸收峰整体发生了红移,而且在 203 nm 处出现了一个新的吸收峰,证明发生了配合反应.另外,通过红外的酰胺带波数的变化比较可推测出胶原多肽的氨基和羧基参与了与钙离子的配位反应的结论.

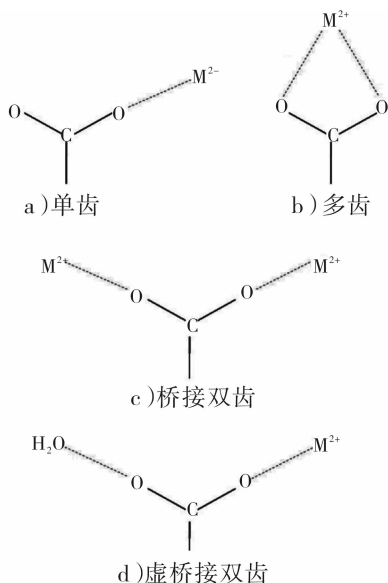


图 1 羧基基团与金属离子结合的 4 种模型

**2.3.3 微相分散机理** 分散机理认为,某种试剂分子分散进入蛋白质微相中,达到某一临界浓度以上后便产生新的吸收峰.例如  $\text{pH} = 2.0$  时,蛋白质的亚胺基与四苯基卟啉四磺酸的一  $\text{SO}_3^-$  相互作用,在 422 nm 处有更多的四苯基卟啉四磺酸分子进入蛋

白质的微相中,当超过临界限度后,便在 488 nm 处产生一个新吸收峰<sup>[46]</sup>.采用扫描电镜(SEM)对胶原多肽钙表面进行观察,可清晰地看到有氯化钙分子的结晶吸附在胶原多肽分子表面<sup>[12,28,30]</sup>.

### 3 结论与展望

猪骨酶解制备出的多肽属于多种肽的混合物,促使目前对于多肽与钙的合成工艺研究较多,而对具体的螯合机理研究不够深入.对于多肽与钙的螯合机理,由于多肽本身所具备的特殊性导致研究具有极大困难,目前也有很多学者使用红外色谱、紫外色谱、扫描电镜、原子能量色谱等仪器分析方法研究,总结表征结果反向推理出 3 大螯合机理:吸附反应机理、配位反应机理和微相分散机理,没有学者像有机反应一样使用如元素示踪法等一些可直接判断分析反应过程的方法,这与猪骨胶原水解后产物的天然混合物存在形式有关.多肽对钙有很大吸附,具体吸附和微相分散的程度和过程研究较少,需要在这方面加大研究.另外猪骨胶原多肽螯合钙的功能性及应用性也有待研究开发.

### 参考文献:

- [1] Rerat A. Amino acid absorption and production of pancreatic hormones in non-anesthetized pigs after duodenal infusions of a milk enzymic hydrolysate or of free amino acids[J]. Brit J Nutr, 1988, 60: 121.
- [2] 唐传核,杨晓泉.食物蛋白质来源的水解物或多肽的现状与进展(I)营养吸收特性、国内外现状以及生产工艺[J].中国食品添加剂, 2003(S1): 288.
- [3] 萧家捷.缺钙与补钙[J].中国食物与营养, 1997(2): 32.
- [4] Hara H, R Funabiki, M Iwata, et al. Protein absorption of small peptides in rats under unrestrained conditions[J]. J Nutr, 1984, 114: 1122.
- [5] 付文雯,马美湖,蔡朝霞.牛骨蛋白酶解制取肽钙的研究进展[J].食品与发酵科技, 2009, 45(1): 1.
- [6] 宋晓燕,高彦祥,袁芳.水解胶原蛋白的研究进展[J].中国食物与营养, 2008(2): 32.
- [7] 蒋哲,王勤,邱凌,等.鲨鱼皮胶原蛋白肽成分分析[J].厦门大学学报:自然科学版, 2006, 45: 169.
- [8] 甘桂珍,何建忠.酶法水解提取骨骼蛋白的实验研究[J].广西轻工业, 2007, 23(12): 11.
- [9] 李彦春,祝德义,侯立杰,等.酶解胶原蛋白多肽的制备与分析[J].中国皮革, 2004, 33(3): 22.
- [10] 张根生,岳晓霞,叶瞰昊,等.火鸡骨胶原多肽口服液的研究[J].食品科学, 2005, 26(8): 563.

- [11] 李帆,贾冬英,姚开,等. 牦牛骨蛋白的酶解条件研究[J]. 氨基酸和生物资源,2006,28(4):7.
- [12] 付刚. 猪骨胶原多肽的制备及其抗氧化性的研究[D]. 雅安:四川农业大学,2006.
- [13] 安广杰,徐清萍. *Neutrase* 蛋白酶降解骨胶原蛋白制备水解明胶[J]. 食品与机械,2007,23(3):172.
- [14] 杜云建,赵玉巧,李念念. 酶解法制备草鱼鱼鳞多肽及其清除羟自由基的研究[J]. 食品科学,2010,31(7):168.
- [15] 付文雯,马美湖,蔡朝霞,等. 牛骨蛋白分步酶解制取胶原多肽螯合钙的研究[J]. 食品工业,2010(1):1.
- [16] 孟欢,罗儒显. 木瓜蛋白酶水解明胶制备多肽的工艺研究[J]. 广东化工,2010,37(1):36.
- [17] 洪惠,罗永康,吕元萌,等. 酶法制备鱼骨胶原多肽螯合钙的研究[J]. 中国农业大学学报,2012,17(1):149.
- [18] 方细娟,曾庆祝,战宇,等. 多肽-金属元素配合物的研究进展及发展前景[J]. 食品工业科技,2012,33(4):413.
- [19] 杨桑,邓尚贵,秦小明. 低值鱼蛋白多肽-钙螯合物的制备和抗氧、抗菌活性研究[J]. 食品科学,2008,29(1):202.
- [20] 张晓霞,刘盛取,李国英. 碱法水解黑鱼鱼鳞及制备多肽螯合钙工艺的研究[J]. 食品科技,2010(12):130.
- [21] 郑炯,汪学荣,阚建全. 猪血多肽螯合铁的制备工艺研究[J]. 食品工业科技,2010(2):261.
- [22] 赵妍嫣,胡林林,姜绍通. 猪骨粉制备胶原多肽螯合钙工艺优化[J]. 农业工程学报,2011,27(S2):277.
- [23] 桑亚新,王昌禄,王苏,等. 利用扇贝壳制备胶原螯合钙的研究[J]. 中国食品学报,2012(5):49.
- [24] Bao X L, Lv Y, Yang B, et al. A study of the soluble complexes formed during calcium binding by soybean protein hydrolysates [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(3):117.
- [25] 郭媛. II, X型胶原与钙离子的相互作用[J]. 科学通报,1996(4):18.
- [26] 陆剑锋. 斑点叉鱼鲷鱼胶原多肽螯合钙的制备及其特征[J]. 水产学报,2012,36(2):314.
- [27] Jung W K, Kim S K. Calcium-binding peptide derived from pepsinolytic hydrolysis of hoki (*Johnius belengerii*) frame[J]. *Eur Food Res Technol*,2007,224:763.
- [28] 刘丽莉. 牛骨降解菌的筛选及其发酵制备胶原多肽螯合钙的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2010.
- [29] 易卓林,佟鑫,马春燕,等.  $Ni^{2+}$  高效结合肽的筛选与作
- 用研究[J]. 微生物学报,2006,46(5):745.
- [30] 祝德义,李彦春,靳丽强,等. 胶原多肽与钙结合性能的研究[J]. 中国皮革,2005,34(3):26.
- [31] 赵淑富,王增林,刘启民,等. 生理条件下锌、钙离子与氨基酸配位作用的研究[J]. 高等学校化学学报,1995(6):847.
- [32] 高峰,徐光,李霞. 生理条件下稀土及钙锌离子与 L-Pro 配位作用的研究[J]. 泰安师专学报,1997(5):59.
- [33] 庞煜霞,邱学青,杨东杰,等. 木质素磺酸钙的络合性能研究[J]. 林产化学与工业,2004,24(4):28.
- [34] 曾绍汉,阮湘元,蔡明招. 谷胱甘肽与金属离子相互作用研究进展[J]. 中国公共卫生,2009,25(7):23.
- [35] 季军晖. 壳聚糖吸附铜离子机理的 XPS 研究[J], 应用化学,2000,17(1):115.
- [36] 欧阳明,丁纯梅,肖莎,等. 壳聚糖及锌离子模板壳聚糖膜与锌离子反应的动力学及机理探讨[J]. 化学世界,2006,47(7):388.
- [37] 范小娜,李蕾,余磊. 稀土-蛋白质配合物合成及其傅里叶红外光谱分析[J]. 赣南医学院学报,2001,21(2):107.
- [38] 罗宗铭,方岩雄,张焜,等. 蛋白质及核酸多元络合反应及机理的研究进展[J]. 广西师范大学学报:自然科学版,2002,46(2):55.
- [39] 贾东英,王文贤,姚开,等. 胶原蛋白多肽功能特性的研究[J]. 食品科学,2001,22(6):21.
- [40] 孔宪慧. 含银废水中银离子及银的配位离子的吸附与解吸研究[D]. 沈阳:东北大学,2005.
- [41] 卢业玉,罗宗铭,张焜,等. Zn(II)-锌试剂络合物与蛋白质的显色反应及其应用研究[J]. 理化检验(化学分册),2001,37(7):30.
- [42] 张朝平,夏敏. 蛋白质银(I)-铜(II)络合物的生成及其紫外与红外光谱[J]. 光谱学与光谱分析,1996,6(5):43.
- [43] Deacon G B, Phillips R J. Relationships between the carbon-oxygen stretching frequencies of carboxylate complexes and the type of carboxylate coordination [J]. *Coord Chem Rev*,1980,33:227.
- [44] Nakamoto K. Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds (Part B) [M]. New York: Wiley,1997:57-62.
- [45] Tackett J E. FT-IR characterization of metal acetates in aqueous-solution [J]. *Appl Spectrosc*,1989,43:483.
- [46] Li N, Tong S Y. Spectrophotometer study of the interaction of tetraphenyl-porphyrin tetrasulfonate (TPPS4) with protein [J]. *Talanta*,1994,41(10):1657.

# 麻疹病毒 N 蛋白原核表达 纯化条件的优化

侯丹丹<sup>1</sup>, 王云龙<sup>1</sup>, 张怡青<sup>1</sup>,  
孙新城<sup>2</sup>, 李玉林<sup>3</sup>, 米海<sup>3</sup>, 王继创<sup>3</sup>, 程蕾<sup>3</sup>

(1. 河南师范大学 生命科学学院, 河南 新乡 453007;  
2. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;  
3. 河南省生物工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

**摘要:**通过构建重组表达质粒,诱导表达纯化麻疹病毒 N 蛋白.将麻疹病毒 N 蛋白基因片段与载体 pET-32a(+)相连接,通过 PCR 方法扩增获得重组质粒 pET-32a(+)/N,然后将重组质粒转入大肠杆菌 *E. coli* BL21(DE3)内,并优化诱导表达时间、温度、诱导剂浓度等条件. SDS-PAGE 和 Western blot 蛋白印迹检测表明,麻疹病毒 N 蛋白分子质量约为 60 kD,表达产物用 Ni-NTA 亲和层析和 DEAE 纯化后,纯度达 90%.

**关键词:**麻疹病毒;核壳蛋白;原核表达;蛋白纯化

中图分类号:Q786.4 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.008

## Optimization of measles virus N protein's prokaryotic expression and purification

HOU Dan-dan<sup>1</sup>, WANG Yun-long<sup>1</sup>, ZHANG Yi-qing<sup>1</sup>, SUN Xin-cheng<sup>2</sup>,  
LI Yu-lin<sup>3</sup>, MI Hai<sup>3</sup>, WANG Ji-chuang<sup>3</sup>, CHENG Lei<sup>3</sup>

(1. College of Life Science, He'nan Normal University, Xinxiang 453007, China;  
2. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;  
3. He'nan Biotechnology Research Center, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to construct a recombinant expression plasmid which induced express purification measles virus(MV) N protein, the recombinant plasmid of pET-32 a(+)/N amplified by PCR from MV N protein genes was inserted into expression vector pET-32 a(+), then it was transformed into *E. coli* BL21 (DE3). The condition of time, temperature and concentration of IPTG were optimized. The results of SDS-PAGE and Western blot tests showed that MV N protein molecular was 60 kD. The protein's purity was 90% after being purified by Ni-NTA and DEAE.

**Key words:** measles virus; N protein; prokaryotic expression; protein purification



## 0 引言

麻疹是一种高度传染的呼吸道疾病,具有典型的临床症状,包括斑丘疹、发热、咳嗽、鼻炎和结膜炎。麻疹病毒是麻疹的病原体,分类上属于副黏病毒科麻疹病毒属。麻疹病毒可以划分为8个基因组(A—H),21个基因型,核壳蛋白(N蛋白)是麻疹病毒的主要抗原,可产生中和(Nt)抗体。在研究基因工程麻疹疫苗中,N蛋白基因是首选的病毒抗原<sup>[1]</sup>,它是麻疹病毒颗粒中含量最多的蛋白,并且是麻疹病毒在繁殖和转录过程中第一个被合成的蛋白,一般由525个氨基酸残基组成,分子量为60 kD。N蛋白主要是以磷酸化的形式存在,并同病毒的RNA结合形成多聚复合物,该复合物表现相当稳定,可以抵抗高盐的环境。当前利用基因工程方法表达麻疹病毒蛋白已有不少报道<sup>[2-5]</sup>。N蛋白诱导表达主要采用载体pET-28a(+)并在大肠杆菌BL21(DE3)中进行,通过Ni-NTA亲和层析获得的高纯度目的蛋白用于ELISA检测。本实验拟选择麻疹病毒N蛋白基因片段,构建原核表达载体,以期经诱导表达和纯化,获得目的蛋白。

## 1 实验

### 1.1 材料

**1.1.1 质粒和宿主菌** pUC19/N由河南省生物工程技术研究中心提供;载体pET-32a(+),购自Novagen公司;E. coli BL21(DE3)大肠杆菌菌株由本实验室保存。

**1.1.2 引物的设计** 依据表达质粒和N蛋白基因编码区设计引物,上游引物5'-CGCGGATCCATGTTGGAGGTTGTCCAG-3'(含BamH I酶切位点),下游引物5'-CCCAAGCTTCTAGTCTAGAAGGTCTCT-3'(含Xho I酶切位点),由上海生工生物工程技术服务有限公司合成。

**1.1.3 主要试剂** BamH I, Hind III限制性内切酶, T4 DNALigase连接酶购自宝生物工程(大连)有限公司;DNA胶回收试剂盒、异丙基硫代-β-半乳糖苷(IPTG)购自Sigma公司。

### 1.2 方法

**1.2.1 重组质粒pET-32a(+)/N载体构建及转化** 1)依据N蛋白基因编码区设计引物,建立30 μL PCR反应体系(20×buffer, 1.5 μL; MgCl<sub>2</sub>, 0.3 μL; dNTP, 0.3 μL; 上游引物, 0.2 μL; 下游引

物, 0.2 μL; DNA聚合酶, 0.3 μL; 模板, 0.5 μL; dd H<sub>2</sub>O, 4 μL)扩增目的基因片段,扩增产物与pET-32a(+)载体经BamH I, Xho I双酶切后,由T4 DNA连接酶连接双酶切产物而构建重组质粒pET-32a(+)/N; 2)将质粒转入宿主细胞大肠杆菌中,接种于1 mL LB液体培养基中,37℃摇床培养1 h,然后取菌液50 μL转接于3.5 mL LB(含Amp 30 mg/mL)液体培养基中,培养至OD<sub>600</sub>约为0.3~0.5,加IPTG至终浓度为0.2 mmol/L,诱导表达5 h,分别进行12% SDS-PAGE分析; 3)将表达菌送上海生物工程技术服务有限公司测序。

### 1.2.2 重组菌的小样诱导表达及条件的优化

1)温度诱导:在IPTG浓度为0.2 mmol/L下,分别于30℃, 37℃和42℃诱导表达5 h。2)IPTG浓度诱导:在37℃, IPTG浓度分别为0.1 mmol/L, 0.2 mmol/L, 0.5 mmol/L, 1.0 mmol/L, 2.0 mmol/L, 诱导表达5 h。3)时间诱导:在IPTG浓度为0.2 mmol/L, 37℃条件下,分别诱导3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 7 h, 8 h。取表达产物各1 mL以1 000 r/min破碎离心5 min,离心后取上清进行12% SDS-PAGE分析。

**1.2.3 重组菌大样的诱导表达** 按小样最佳诱导条件,取表达稳定的菌液1 mL接于1 000 mL LB液体培养基(含Amp 30 mg/mL),进行大样诱导表达,收集菌液,4 500 r/min离心15 min,弃上清,加入0.05 mol/L PB洗涤沉淀,再次离心后收集沉淀。

**1.2.4 N蛋白的纯化及Western blot蛋白印迹验证** 将收集的沉淀用0.05 mol/L PB(pH=7.8)溶解,在冰浴条件下超声破碎,将破碎的菌液8 000 r/min离心15 min,取上清过Ni-NTA亲和层析柱和DEAE柱纯化,Western blot蛋白印迹验证。

## 2 结果与讨论

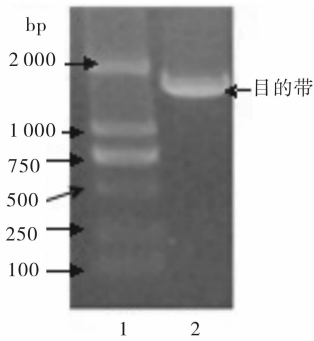
### 2.1 N蛋白基因的克隆及pET-32a(+)/N表达载体构建

PCR产物电泳结果见图1,在1 452 bp左右有一条目的带,与测序结果相符。诱导表达结果见图2,与BL21空菌和未诱导重组菌相比,上清中约在60 kD处有目的条带,大小与预期值相符。

测序结果表明表达菌含N蛋白基因片段,即重组质粒构建成功。

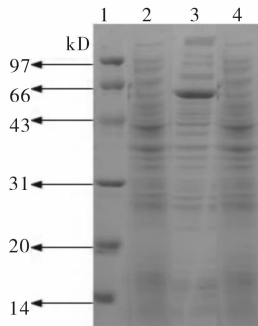
### 2.2 目的蛋白的表达及条件的优化

温度梯度诱导结果见图3,37℃表达量最大; IPTG梯度诱导结果见图4, IPTG浓度为0.2 mmol/L



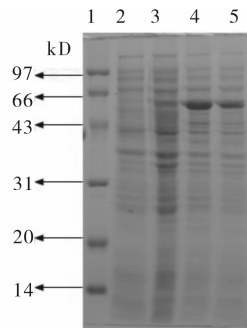
1) Marker 2) PCR 产物

图 1 PCR 产物电泳结果



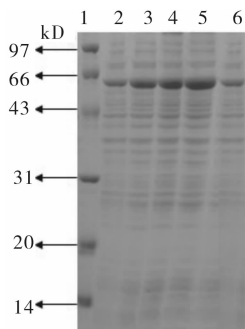
1) Marker 2) BL21 空菌 3) 上清 4) 沉淀

图 2 诱导表达结果



1) Marker 2) BL21 空菌 3) 42 °C 4) 37 °C 5) 30 °C

图 3 温度梯度诱导结果



1) Marker 2) 2.0 mmol/L 3) 1.0 mmol/L

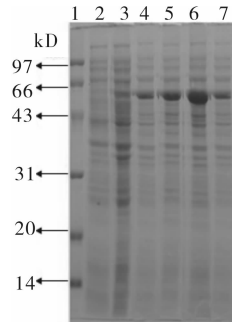
4) 0.5 mmol/L 5) 0.20 mmol/L 6) 0.10 mmol/L

图 4 IPTG 梯度诱导结果

时最优;时间梯度诱导结果见图 5,4 h 时菌体表达量最优. 综上可知,37 °C ,IPTG 浓度为 0.2 mmol/L,诱导 4 h 条件下,目的蛋白的表达结果最佳.

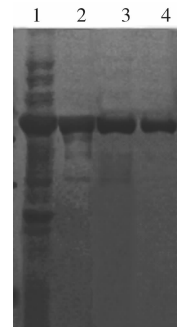
### 2.3 目的蛋白的纯化及 Western blot 蛋白印迹验证

目的蛋白经 Ni 柱和 DEAE 纯化后 SDS-PAGE 检测结果见图 6. Western blot 免疫印迹结果见图 7. 纯化后蛋白浓度的测定结果为  $A_{280} = 2.704$ , 根据标准 N 蛋白吸光度值与蛋白浓度之间的转换关系,  $A = 0.963$  时相当于蛋白浓度为 1.0 mg/mL, 可粗略计算出所纯化的 N 蛋白浓度约为 3.0 mg/mL, 最终



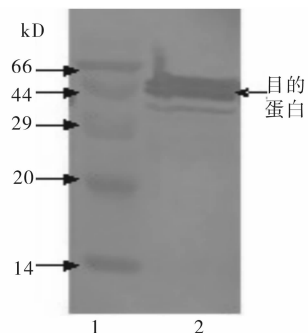
1) Marker 2) BL21 空菌 3) 8 h 4) 6 h 5) 5 h 6) 4 h 7) 3 h

图 5 时间梯度诱导结果



1) 上样 2) Ni 柱第一次纯化后 3) DEAE 柱纯化后 4) Ni 柱第二次纯化后

图 6 纯化结果



1) Marker 2) 上清

图 7 免疫印迹结果

# 离子液体对高等植物的毒性 及其生物降解性研究综述

杨艺晓, 赵继红, 张宏忠

(郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**离子液体作为新型绿色溶剂存在一定的毒性,降解不完全将对环境造成巨大的危害.关于离子液体对高等植物的毒性方面的研究主要集中在其对植物种子发芽率和幼苗生长的影响2个方面.常见的咪唑或者吡啶类的离子液体的生物降解性都不理想;氨基酸离子液体由于具有生物降解性、低毒性及高生物相容性而成为新型离子液体的开发方向.深入研究吡啶类、季铵盐、季磷盐等离子液体对高等植物的毒性,探究离子液体对植物生命周期的影响,设计易生物降解的离子液体,通过基因工程等筛选出能够降解离子液体的优势微生物,构建全面的离子液体毒性和生物降解性的构效关系模型等,将是今后要加强的研究内容.

**关键词:**离子液体;高等植物毒性;生物降解性

**中图分类号:**R994.6 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.009

## Review of higher plant toxicity and biodegradation of ionic liquid

YANG Yi-xiao, ZHAO Ji-hong, ZHANG Hong-zhong

(College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:**As the green solvent, ionic liquids have certain toxicity, and it's incompleated degradation will cause huge damage to the environment. The study of ionic liquids toxicity to the higher plants focused on its impact on seed germination and seedling growth. The biodegradability of imidazole and pyridine ionic liquids are not ideal; amino ionic liquids with biodegradability, low toxicity and high biocompatibility will become new research direction. Exploring the impact of ionic liquids on plant life cycle, designing readily biodegradable ionic liquids, screening dominant bacteria that have high degrading effect to ionic liquids through genetic engineering and building a comprehensive QSAR models of ionic liquid toxicity and biodegradability, will be the main studies in the future.

**Key words:**ionic liquid;higher plant toxicity;biodegradation

## 0 引言

离子液体 IL(ionic liquid)是指液态的离子化合

物,一般由体积较大的有机阳离子与无机或有机阴离子构成,大多在室温下呈液体状态,所以又叫低温熔融盐<sup>[1-2]</sup>.离子液体与传统的有机溶剂相比具

收稿日期:2012-12-21;修回日期:2013-07-31

基金项目:郑州轻工业学院大学生科技创新项目(2013)

作者简介:杨艺晓(1988—),女,河南省汝州市人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为水处理.

通信作者:张宏忠(1968—),男,河南省新乡市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为水处理.

有一系列突出的优点:熔点低、热稳定性高、化学稳定性高、几乎无蒸汽压、电化学窗口大及良好的可设计性等<sup>[3]</sup>. 它能有效避免传统有机溶剂所造成的严重环境问题、健康问题、安全以及设备腐蚀问题等,从而在有机合成、萃取分离、电化学、纳米材料、清洁燃料生产、环境科学等方面得到了广泛的应用.

随着研究和应用的不断深入,人们逐渐认识到离子液体作为新型绿色溶剂的缺点,即离子液体具有毒性. 近年来,离子液体毒性的研究引起了国内外科研工作者的广泛关注<sup>[4-7]</sup>. 离子液体最终可能有一部分流失到环境中从而污染环境,由于其具有较高的化学稳定性,会以持久污染物形式通过水循环或其他途径进入农业生态系统. 另外,很多研究者认为,离子液体的生物降解性是从环境中消除有害化合物的重要过程,是通过化合物进行环境安全性评价的一个重要指标<sup>[8]</sup>. 鉴于此,本文将分别从离子液体对高等植物的毒性和其生物降解性2个方面进行综述分析.

## 1 离子液体对高等植物的毒性

离子液体一旦作为工业溶剂大规模使用,不可避免地流失和废弃就会对环境中的生物体产生危害<sup>[9]</sup>. 相关研究表明,离子液体对微生物、藻类、动物等均有不同程度的毒性<sup>[10-13]</sup>,而离子液体对高等植物的毒性的研究则相对较少.

目前,离子液体对高等植物的毒性研究主要集中在其对植物种子发芽率的影响及对幼苗生长的影响2个方面. 刘萍等<sup>[14]</sup>的研究结果表明,1-辛基-3-甲基咪唑溴化盐( $[C_8mim]Br$ )的暴露导致小麦种子发芽势、发芽率和淀粉酶活力显著降低;同时,根长、芽长、根活力、叶片中的叶绿素和类胡萝卜素含量也显著下降. 另外,处理组幼苗叶片中超氧负离子产生速率和丙二醛含量均高于对照,差异为显著或极显著水平.  $[C_8mim]Br$ 对小麦种子的抑制效应具有典型的剂量依赖型特点. 该课题组还研究了 $[C_8mim]Br$ 对小麦幼苗的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)及干重等的影响,结果表明,随着处理浓度的增加,各种过氧化物酶的活性降低,幼苗的干重减少, $[C_8mim]Br$ 对小麦具有明显的毒性效应<sup>[15]</sup>.

为了探究离子液体对植物可能造成的伤害,陈忠林等<sup>[16]</sup>采用在种子萌发期直接胁迫的方法,研究

了1-甲基-3-乙基-咪唑缬氨酸盐( $[C_2mim][Val]$ )对小麦幼苗及叶片保护酶的影响,得出了与文献<sup>[14]</sup>相似的结论,而 $[C_2mim][Val]$ 的亲水性和亲脂性可能是其对植物存在潜在毒性的2个主要原因. L. S. Wang等<sup>[17]</sup>研究了1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐( $[C_4mim]BF_4$ )对小麦幼苗的影响. 当 $[C_4mim]BF_4$ 浓度为4.4 mmol/L时小麦的发芽率为38%,同时小麦幼苗的根长和芽长随着 $[C_4mim]BF_4$ 浓度的增加而减少,特别当 $[C_4mim]BF_4$ 浓度超过1.8 mmol/L时小麦发芽种子的淀粉酶的活性显著降低,从而得出了 $[C_4mim]BF_4$ 浓度 $>0.9$  mmol/L时对小麦幼苗具有毒害作用的结论. Y. Du等<sup>[18]</sup>研究了1-丁基-3-甲基咪唑氯盐( $[C_4mim]Cl$ )对水稻幼苗的毒性,结果表明,水稻幼苗的根长和茎长均随该离子液体浓度的增加而减小,各种过氧化物酶的活性也明显低于对照组,丙二醛的含量最高可达对照组的155.9%.

以上研究只是针对一种离子液体对植物的毒性,而B. Jastorff等<sup>[7]</sup>研究了2种咪唑类离子液体1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐( $[BMIM][BF_4]$ )和1-辛基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐( $[OMIM][BF_4]$ )对独行菜的毒性,结果表明其毒性随取代烷基链长度的增加而增加. S. Studzińska等<sup>[19]</sup>则研究了3种咪唑类离子液体对独行菜的毒性,得到了随着离子液体疏水性的减少幼苗增长程度增大,且离子液体阳离子的亲油性与其毒性线性相关的结论,为将来预测咪唑类离子液体的毒性提供了一定的参考价值. M. Matzke等<sup>[20]</sup>研究了咪唑类离子液体多种阴离子对普通小麦在含有不同金属矿物的黏土中的生长影响,结果表明, $Tf_2N^-$ 阴离子的毒性最强, $[BMIM]Tf_2N^-$ 的加入会导致土壤对植物抑制作用增加.

杨芬芬等<sup>[21]</sup>研究了5种离子液体对白菜、黄瓜、玉米3种植物发芽及生长状况的影响. 结果表明:离子液体对白菜、玉米、黄瓜均具有一定的毒害作用,且随着离子液体浓度和作用时间的增加而增加;就种子发芽这一生态毒理指标而言,不同作物对离子液体毒性敏感次序为黄瓜 $>$ 玉米 $>$ 白菜;以卤素为阴离子的烷基咪唑类离子液体 $[EMIM]Br$ 和 $[BMIM]Cl$ 比以烷基硫酸酯和烷基磷酸酯为阴离子的同类离子液体的毒性高. 这种毒性顺序可能与卤素离子对细胞膜较强的穿透能力和由于离子液体的稳定所造成的阴阳“离子对”的共迁移有关.

## 2 离子液体生物降解性

离子液体的稳定性会随其阴、阳离子的变化有很大的不同,例如,有的离子液体耐大剂量的核辐射,有的离子液体在酸性条件下会分解,而氯铝酸离子液体遇水则会立即分解.如果在工业应用时有一部分离子液体排放到环境中,其自然降解程度就成为是否对环境友好的一个重要参数<sup>[22]</sup>.

许多研究者对常见的咪唑类或者吡啶类的离子液体的生物降解性的进行了研究. M. T. Garcia等<sup>[23]</sup>采用封闭瓶实验法研究了咪唑类离子液体的生物降解性,实验28 d后发现生物可降解性基本为0. M. Stasiewicz等<sup>[24]</sup>采用同样方法测定了1-烷氧甲基-3-羟基吡啶阳离子,邻磺酰苯甲酰亚胺、糖精、氯等阴离子离子液体的生物降解性(28 d测定降解率).当碳原子为4—11时,该类吡啶类离子液体的生物降解性随着碳原子链的增长而增大,但总体上无一定规律可言,当1位取代烷基碳原子数为11时,降解率最大(72.2%),其他离子液体的生物降解率都<50%.虽然K. M. Docherty等<sup>[25]</sup>的研究证明了吡啶类离子液体比咪唑类离子液体更容易生物降解,但是文献[26—30]的研究表明,常见的咪唑或者吡啶类的离子液体的生物降解性都不理想.

离子液体的稳定性使得人们必须考虑在完全利用了离子液体之后,如何更好地处理它,这便对设计制造出易生物降解的离子液体有着越来越迫切的要求<sup>[31]</sup>.戴宁等<sup>[32]</sup>参考并改善表面活性剂生物降解性的实验,在支链上添加酯基来改善离子液体的生物降解性.方东等<sup>[33]</sup>设计并合成了含开链季铵阳离子的N,N-二甲基-N-十二烷基-N-磺酸丙基硫酸氢铵盐([DMDAPS]·[HSO<sub>4</sub>])离子液体,作为催化剂重复使用9次后其催化活性无明显变化,对该离子液体采用活性污泥法进行生物降解实验,COD去除率为88.8%~90.0%.

氨基酸是一种无毒的天然产物,由于其既含有氨基又含有羧基,因此既可作为离子液体的阴离子又可作为其阳离子.氨基酸离子液体由于具有手性、生物降解性、低毒性及高生物相容性已成为新型离子液体的研究开发方向<sup>[34]</sup>.最近,S. Pavlovica等<sup>[35]</sup>合成的2-乙羟基氨基乳酸离子液体易生物降解且几乎没有毒性,生物降解率都在60%以上,最高可达95%,作为溶剂和催化剂至少可以重复利

用20次,是一类绿色的离子液体.针对国内外氨基酸离子液体的研究进展状况,吴阳等<sup>[36]</sup>综述了氨基酸离子液体具有生物可再生及生物可降解并且生产成本低的特点,表明其在工业及应用领域发展的机遇和潜力是无比深远的,而且正在迎来新的突破.

## 3 结论与展望

离子液体具有巨大的潜在工业应用价值,毒性及降解性的研究已经成为制约其大规模应用的瓶颈.目前,对离子液体的毒性研究多集中于其对微生物、藻类、动物等的毒性,而其对高等植物的毒性研究相对较少,并且离子液体对高等植物的研究多是某种咪唑类物质对1种植物种子的毒性.通过对离子液体生物降解性的研究发现,吡啶类离子液体要比咪唑类离子液体较易生物降解.然而,常见离子液体的生物降解性却并不理想,有的研究者开始考虑合成一些容易生物降解的离子液体,如加入酯基、酰胺基等,并取得了不错的效果.通过离子液体对高等植物的毒性和生物降解性的研究,可为环境影响评价提供一定参考,同时也为离子液体的工业化应用打下了基础.

根据以上情况提出以下建议:1)系统深入地研究离子液体对植物生命周期的影响;2)研究吡啶类、季铵盐、季磷盐等离子液体对高等植物的毒性;3)设计易生物降解离子液体;4)通过微生物筛选、基因工程等筛选出能够降解离子液体的优势微生物;5)建立离子液体生物毒性和降解性的构效关系模型.

### 参考文献:

- [1] Matsumoto H, Yanagida M, Tanimoto K, et al. Highly conductive room temperature molten salts based on small trimethylalkylammonium cations and bis (trifluoromethylsulfonyl) imide[J]. Chemistry Letters, 2000, 29(8): 922.
- [2] Seddon K R. Ionic liquids for clean technology [J]. J Chem Tech Biotechnol, 1997, 68: 351.
- [3] 李汝雄. 绿色溶剂——离子液体的合成与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 柯明, 周爱国, 宋昭峥, 等. 离子液体的毒性[J]. 化学进展, 2007, 19(5): 671.
- [5] Bernot R J, Brueske M A, Evans-white M A, et al. Acute and chronic toxicity of imidazolium-based ionic liquids on *Daphnia magna* [J]. Environ Toxicol Chem, 2005, 24(1): 87.
- [6] Pretti C, Chiappe C, Pieraccini D, et al. Acute toxicity of

- ionic liquids to the zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Green Chem*, 2006(8):238.
- [7] Jastorff B, Molter K, Behrend P, et al. Progress in evaluation of risk potential of ionic liquids-basis for an eco-design of sustainable products [J]. *Green Chem*, 2005(7):362.
- [8] 张锁江, 徐春明, 吕兴梅, 等. 离子液体与绿色化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] 吴波, 张玉梅, 王华平. 离子液体的安全性研究进展 [J]. *化工进展*, 2008, 27(6):814.
- [10] Docherty K M, Kulpa C F. Toxicity and antimicrobial activity of imidazolium and pyridinium ionic liquids [J]. *Green Chem*, 2005(7):185.
- [11] 李俊峰, 胡翔, 李春喜, 等. 咪唑类 ILs 对天然水体中斜生栅藻的毒性效应 [J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(3):37.
- [12] Fatemi M H, Izadiyan P. Cytotoxicity estimation of ionic liquids based on their effective structural features [J]. *Chemosphere*, 2011, 84:553.
- [13] 卢珩俊, 陆胤, 徐冬梅, 等. 咪唑类离子液体系列对卤虫的急性毒性研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(3):454.
- [14] 刘萍, 孙莉萍, 刘海英, 等. 离子液体 1-辛基-3-甲基咪唑溴化盐对小麦种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2):425.
- [15] Liu P, Ding Y F, Liu H Y, et al. Toxic effects of 1-methyl-3-octylimidazolium bromide on the wheat seedlings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(12):1974.
- [16] 陈忠林, 王洋, 关伟, 等. 离子液体 [C<sub>2</sub>mim][Val] 对小麦幼苗生长及生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8):1508.
- [17] Wang L S, Wang L, Wang L, et al. Effect of 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate on the wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings [J]. *Environmental Toxicology*, 2009, 24(3):296.
- [18] Du Y, Lu Q L, Duan L, et al. Effects of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ionic liquid on the growth of rice seedlings [C]//Remote Sensing Environment and Transportation Engineering (RSETE), Nanjing:IEEE, 2011.
- [19] Studzińska S, Buszewski B. Study of toxicity of imidazolium ionic liquids to watercress (*Lepidium sativum* L.) [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2009, 393:983.
- [20] Matzke M, Stoite S, Aming J, et al. Ionic liquids in soils: effects of different anion species of imidazolium based ionic liquids on wheat (*Triticum aestivum*) as affected by different clay minerals and clay concentrations [J]. *Ecotoxicology*, 2009, 18(2):197.
- [21] 杨芬芬, 孟洪, 李春喜, 等. 离子液体对三种农作物发芽和生长的毒性研究 [J]. *环境工程学报*, 2009(4):751.
- [22] 张星辰, 刘宝友, 刘会茹, 等. 离子液体——从理论基础到研究进展 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [23] Garcia M T, Gathergood N, Scammells P J. Biodegradable ionic liquids (Part II): Effect of the anion and toxicology [J]. *Green Chem*, 2005(7):9.
- [24] Stasiewicz M, Mulkiwicz E, Tomczak-Wandzel R, et al. Assessing toxicity and biodegradation of novel, environmentally benign ionic liquids (1-alkoxymethyl-3-hydroxypyridinium chloride, saccharinate and acesulfamates) on cellular and molecular level [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2008(71):157.
- [25] Docherty K M, Dixon J K, Kulpa J C F. Biodegradability of imidazolium and pyridinium ionic liquids by an activated sludge microbial community [J]. *Biodegradation*, 2007, 18:481.
- [26] Wells A S, Coombe V T. On the fresh water ecotoxicity and biodegradation properties of some common ionic liquids [J]. *Org Process Res Dev*, 2006(10):794.
- [27] 常睿. 咪唑类及吡啶类离子液体降解性的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [28] Docherty K M, Joyce M V, Kulacki K J, et al. Microbial biodegradation and metabolite toxicity of three pyridinium-based cation ionic liquids [J]. *Green Chem*, 2010(12):701.
- [29] Zhang C, Wang H, Malhotra S V, et al. Biodegradation of pyridinium-based ionic liquids by an axenic culture of soil *Corynebacteria* [J]. *Green Chem*, 2010(12):851.
- [30] Quijano G, Couvert A, Amrane A, et al. Toxicity and biodegradability of ionic liquids: New perspectives towards whole-cell biotechnological applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 174:27.
- [31] 刘宝友, 何文杰, 陈金. 离子液体生物毒性及可生物降解离子液体设计的研究进展 [J]. *河北工业科技*, 2008, 25(2):112.
- [32] 戴宁, 张凤君, 陈继, 等. 离子液体 [omim][PF<sub>6</sub>] 的生物降解性研究 [J]. *环境科学*, 2009, 30(2):480.
- [33] 方东, 曹少庭, 费正皓, 等. 降解性离子液体催化的 Mannich 反应 [J]. *含能材料*, 2009, 17(4):404.
- [34] 陈志刚, 宗敏华, 顾振新. 离子液体毒性、生物降解性及绿色离子液体的设计与合成 [J]. *有机化学*, 2009, 29(5):672.
- [35] Pavlovica S, Zicmanis A, Gzibovska E, et al. (2-Hydroxyethyl) ammonium lactates-highly biodegradable and essentially non-toxic ionic liquids [J]. *Green and Sustainable Chemistry*, 2011(1):103.
- [36] 吴阳, 张甜甜, 宋溪明. 氨基酸离子液体研究进展 [J]. *渤海大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(1):1.

# L-半胱氨酸修饰的Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性复合粒子的制备及其对牛血清蛋白的吸附性能

陈志军, 汤凯, 杨清香, 王雪兆, 朱海燕, 魏永豪

(郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**采用L-半胱氨酸在Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>表面链接Au纳米粒子的方法,制备了L-半胱氨酸修饰的Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性复合粒子(LC-Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>),并将其用于吸附牛血清蛋白(BSA).通过紫外可见分光光度计、X-射线衍射仪、傅里叶红外光谱仪、扫描电镜、透射电子显微镜、Zeta电位仪对样品的光学性质、结构形貌、稳定性进行表征,结果表明:复合粒子中的Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>具有尖晶石结构,粒径在200 nm左右,稳定性较好.对BSA的吸附实验结果表明:LC-Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的BSA单位吸附量达到161.5 mg/g.

**关键词:**Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性复合粒子;L-半胱氨酸;牛血清蛋白吸附

**中图分类号:**TB383.1;Q513+.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.010

## Preparation of L-cysteine modified Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic composite particle and its adsorption for bovine serum albumin

CHEN Zhi-jun, TANG Kai, YANG Qing-xiang, WANG Xue-zhao, ZHU Hai-yan, WEI Yong-hao  
(College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The L-cysteine modified Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic composite particles (LC-Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) were synthesized and their adsorption properties for bovine serum albumin (BSA) were investigated. The obtained samples were characterized by UV-Vis spectrophotometer (UV-vis), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and Zeta potential, respectively. The results showed that Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> of LC-Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> has a spinel structure; its diameter was about 200 nm, and the particles showed good stability. The adsorption capacity of LC-Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite particles for BSA was 161.5 mg/g.

**Key words:** Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic composite particle; L-cysteine; bovine serum albumin adsorption

## 0 引言

蛋白质的磁分离技术是在磁性粒子表面修饰—COOH, —CHO, —NH<sub>2</sub>, —SH等配基,与目标蛋白质结合形成蛋白质-磁性粒子复合物,在外加磁

场的作用下将复合物从原体系中分离出来,经洗脱富集实现蛋白质的快速分离纯化<sup>[1-2]</sup>.与传统分离方法相比,蛋白质磁分离技术具有快速、高纯、高收率等优点<sup>[3-4]</sup>. Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性复合粒子作为一种新型的生物分离介质,不仅具有Au纳米粒子优异的





81.7°处出现的衍射峰分别对应于 Au 的(111), (200), (220), (311), (222)晶面,从而表明在 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中有 Au 存在.

### 2.3 红外光谱分析

图3是样品的傅里叶红外光谱图.从图3可以看出,578 cm<sup>-1</sup>处吸收峰对应于 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的 Fe—O 特征吸收峰.1 073 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰对应于 Si—O 的伸缩振动峰.1 412 cm<sup>-1</sup>,1 555 cm<sup>-1</sup>,1 629 cm<sup>-1</sup>处

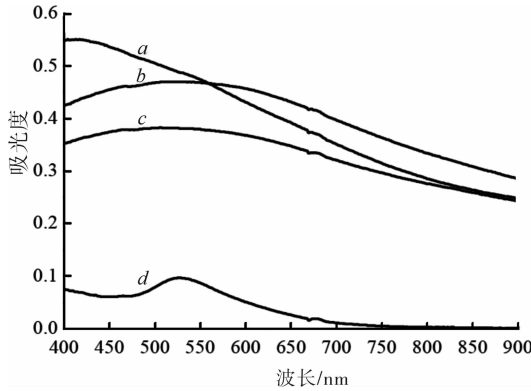


图1 样品的紫外-可见吸收光谱图

的吸收峰可能对应于—NH<sub>2</sub> 的吸收峰. 2 930 cm<sup>-1</sup>和 2 973 cm<sup>-1</sup>的谱带对应—CH<sub>2</sub> 中—C—H 伸缩振动.3 340 cm<sup>-1</sup>附近出现的谱带则为 N—H 伸缩振动,它与—OH 的伸缩振动峰发生了重叠,说明 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米粒子表面已被氨基化.图3曲线 c 中 2 923 cm<sup>-1</sup>和 2 953 cm<sup>-1</sup>附近处的吸收峰对应—CH<sub>2</sub>—中—C—H 伸缩振动,3 421 cm<sup>-1</sup>附近出现的谱带则为—OH 的伸缩振动峰,说明 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 粒子表面铆接有 L-半胱氨酸,即 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子表面铆接有 Au 纳米粒子.

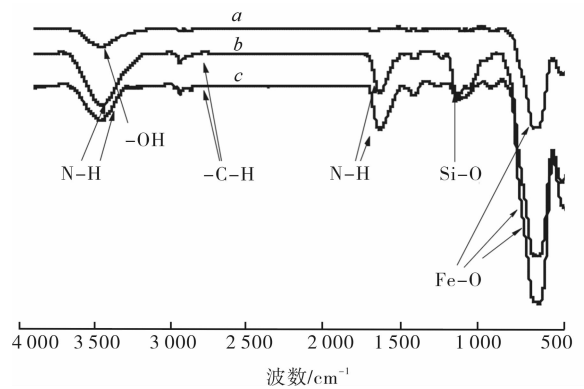


图3 样品的傅里叶红外光谱图

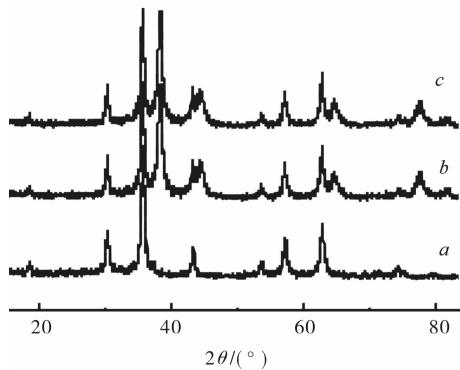


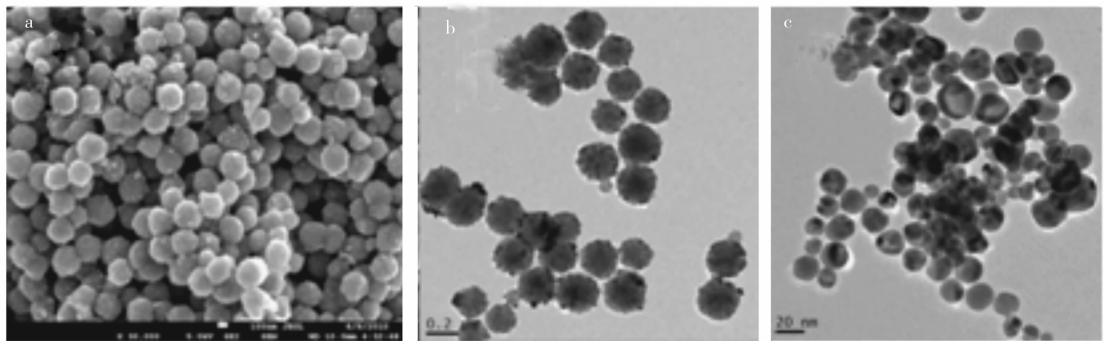
图2 样品的XRD谱图

### 2.4 形貌表征

图4为样品的扫描电镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)图片.由图4可以看出,Au 纳米粒子平均粒径约 20 nm; Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性复合粒子尺寸均匀,粒径约 200 nm;形状近似规整球形的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子表面铆接有 Au 纳米粒子.

### 2.5 磁性能测试

图5给出 L-半胱氨酸修饰的 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性



a) L-半胱氨酸修饰的Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性复合粒子SEM照片

b) Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>磁性复合粒子TEM照片

c) Au纳米粒子的TEM照片

图4 样品的SEM和TEM图片

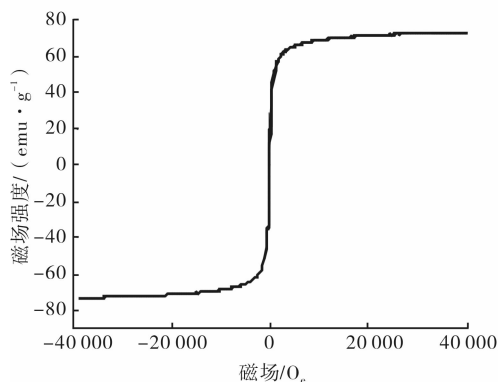


图5 L-半胱氨酸修饰的 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性复合粒子磁滞回线

复合粒子磁滞回线.从图5可知,复合粒子饱和磁化强度为 73.0 emu/g,磁矫顽力和剩余磁强度都极低,趋近于0.这表明 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性复合粒子具有超顺磁性.

## 2.6 Zeta 电位测试

图6为样品的 Zeta 电位图.由图6可知,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米粒子、氨基化 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子、L-半胱氨酸修饰的 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子的 Zeta 电位值分别为 -20.12 mV, -38.21 mV, -43.92 mV,表明用 L-半胱氨酸修饰的 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性复合粒子较 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性复合粒子和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子稳定性明显提高.

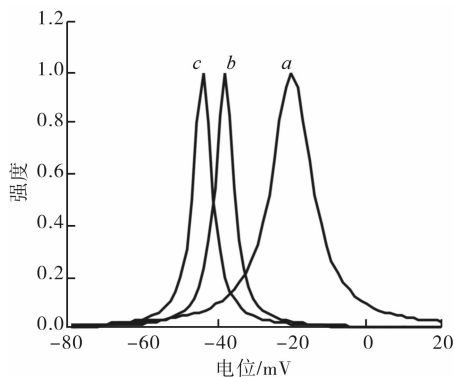


图6 样品的 Zeta 电位图谱

## 2.7 牛血清蛋白吸附实验测定

图7为 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性复合粒子对蛋白质的单位吸附量曲线.由图7可知,经 L-半胱氨酸修饰后,Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子对 BSA 的吸附能力明显增强;随着 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子质量的增加,单位质量磁粒子的吸附量呈现降低的趋势,修饰后的复合粒子对 BSA 单位吸附量最高达到 161.5 mg/g,明显高

于未修饰复合粒子的最高单位吸附量(55 mg/g).这可能是由于 L-半胱氨酸增加了 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 复合粒子表面的氨基和羧基的数量,从而增大了磁粒子表面和蛋白质分子之间的作用力,因而 L-半胱氨酸化的 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 复合粒子单位质量的 BSA 吸附量增大.

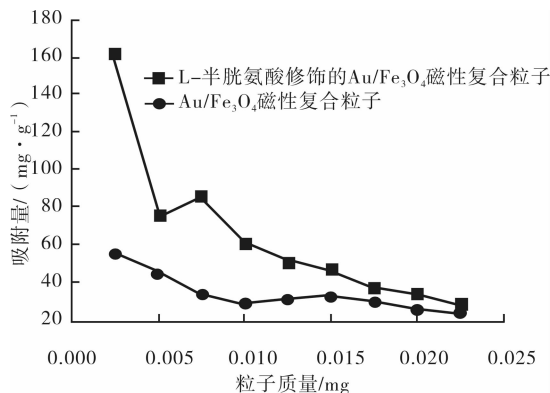


图7 磁性复合粒子对蛋白质的单位吸附量曲线

## 3 结论

本文制备了 L-半胱氨酸修饰 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的纳米复合粒子,并对其进行了结构和性能表征.结果表明:复合粒子中的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 具有尖晶石结构,粒径在 200 nm 左右,稳定性好. L-半胱氨酸修饰 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 对牛血清蛋白吸附实验结果表明:随着 L-半胱氨酸修饰的 Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性粒子质量的增加,其对 BSA 的吸附量也随之增加,单位吸附量最高达到 161.5 mg/g.

## 参考文献:

- [1] Bao J, Chen W, Liu T, et al. Bifunctional Au-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for protein separation [J]. *ACS Nano*, 2007, 1 (4):293.
- [2] Wei Y, Li Y, Tian A, et al. Ionic liquid modified magnetic microspheres for isolation of heme protein with high binding capacity [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2013 (1):2066.
- [3] Reddy A N, Anjaneyulu K, Basak P, et al. A simple approach to the design and functionalization of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Au nanoparticles for biomedical applications [J]. *Chem Plus Chem*, 2012, 77(4):284.
- [4] He X, Chen Y, Wang K, et al. Selective separation of proteins with pH-dependent magnetic nanoadsorbents [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(36):365.
- [5] Franzreb M, Siemann-Herzberg M, Hobley T J, et al. Pro-

- tein purification using magnetic adsorbent particles [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 70 (5):505.
- [6] Shao M, Ning F, Zhao J, et al. Preparation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>@layered double hydroxide core shell microspheres for magnetic separation of proteins [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(2):1071.
- [7] Xie H Y, Zhen R, Wang B, et al. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Au core/shell nanoparticles modified with Ni<sup>2+</sup>-nitrotriacetic acid specific to histidine-tagged proteins [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(11):4825.
- [8] Fang W, Chen X, Zheng N. Superparamagnetic core-shell polymer particles for efficient purification of his-tagged proteins [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(39):8624.
- [9] Hui W, Shi F, Yan K, et al. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoflowers exhibiting tunable saturation magnetization and enhanced bioconjugation [J]. *Nanoscale*, 2012, 4(3):747.
- [10] Song Y, Tao L, Shen X. Synthesis of new type of Au-magnetic nanocomposite and application for protein separation thereof [J]. *Nanoscale research letters*, 2012, 7(1):1.
- [11] Tian Y, Chen L, Zhang J, et al. Bifunctional Au-nanorod@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites: synthesis, characterization, and their use as bioprobes [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, 14(7):1.
- [12] Behrens S. Preparation of functional magnetic nanocomposites and hybrid materials: recent progress and future directions [J]. *Nanoscale*, 2011, 3(3):877.
- [13] Gu H, Xu K, Xu C, et al. Biofunctional magnetic nanoparticles for protein separation and pathogen detection [J]. *Chemical Communications*, 2006, 3(9):941.
- [14] Gao J, Gu H, Xu B. Multifunctional magnetic nanoparticles: design, synthesis, and biomedical applications [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2009, 42(8):1097.
- [15] Tamer U, Gündoğdu Y, Boyacı H, et al. Synthesis of magnetic core-shell Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Au nanoparticle for biomolecule immobilization and detection [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2010, 12(4):1187.
- [16] Wang C N, Fang J H. Preparation and spectral properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Au nano materials [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2011, 28(4):1869.
- [17] Lin F, Chen W, Liao Y H, et al. Effective approach for the synthesis of monodisperse magnetic nanocrystals and M-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (M = Ag, Au, Pt, Pd) heterostructures [J]. *Nano Research*, 2011, 4(12):1223.
- [18] Lyon J L, Fleming D A, Stone M B, et al. Synthesis of Fe oxide core/Au shell nanoparticles by iterative hydroxylamine seeding [J]. *Nano Letters*, 2004, 4(4):719.
- [19] Lu Q H, Yao K L, Xi D, et al. Synthesis and characterization of composite nanoparticles comprised of gold shell and magnetic core/cores [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, 301(1):44.
- [20] Chen M, Yamamuro S, Farrell D, et al. Gold-coated iron nanoparticles for biomedical applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(10):7551.
- [21] Seino S, Kinoshita T, Nakagawa T, et al. Radiation induced synthesis of gold/iron-oxide composite nanoparticles using high-energy electron beam [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2008, 10(6):1071.
- [22] 陈志军, 朱海燕, 郝莹, 等. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-壳聚糖磁性微球的制备及对Cu<sup>2+</sup>的吸附性能 [J]. *郑州轻工业学院学报:自然科学版*, 2012, 27(2):1.
- [23] Wu W, He Q, Chen H, et al. Advances of magnetic nanoparticle for biosensor applications [J]. *Chemistry*, 2007, 65(13):1273.
- [24] Frens G. Controlled nucleation for the regulation of the particle size in monodisperse gold suspensions [J]. *Nature*, 1973, 241(105):20.
- [25] Wang X X, Huang S, Shan Z, et al. Preparation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Au nano-composites by self-assembly technique for immobilization of glucoseoxidase [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(4):430.
- [26] Link S, El-Sayed M A. Size and temperature dependence of the plasmon absorption of colloidal gold nanoparticles [J]. *J Phys Chem B*, 1999, 103(5):4212.

# 聚甲基乙撑碳酸酯加工性能研究

李亚东, 苏海丽, 白宝丰, 高丽君

(郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**利用差示扫描量热分析仪、热重分析仪、电子拉力机、熔体流动速率仪和毛细管流变仪等对聚甲基乙撑碳酸酯(PPC)的热性能、力学性能和熔融流变行为进行了研究.结果表明:PPC 具有较低的玻璃化转变温度( $T_g$ )和热分解温度( $T_d$ ), $T_g$ 和失重率5%的 $T_d$ 分别为31℃和211.3℃;PPC的力学性能较差,其拉伸强度和断裂伸长率分别为7.50 MPa和536.63%,熔体流动速率随温度提高而有所升高;PPC熔体为假塑性流体,其熔体表观黏度随剪切速率和温度的增加而下降.因此在PPC成型加工中可采用升高加工温度和剪切速率的方法来提高其熔体的流动性.

**关键词:**聚甲基乙撑碳酸酯热性能;熔融流变;假塑性流体;表观黏度

**中图分类号:**TB30 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.011

## Study on the processing properties of poly(propylene carbonate)

LI Ya-dong, SU Hai-li, BAI Bao-feng, GAO Li-jun

(College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The thermal property, mechanical property and rheological properties of poly(propylene carbonate) were studied by differential scanning calorimetry, thermo gravimetric analyzer, electronic tensile machine, melt flow rate instrument and capillary rheometer, respectively. The results showed that PPC had a lower glass transition temperature ( $T_g$ ) and thermal decomposition temperature ( $T_d$ ), the glass transition temperature and temperatures of weight loss ratio at 5% were 31℃ and 211.3℃ respectively; the mechanical properties of PPC was low, the tensile strength and elongation at break were 7.50 MPa and 536.63% respectively, the melt flow rate increased with the temperature; PPC was pseudoplastic fluid, and the melt apparent viscosity decreased with increasing shear rate and temperature. Thus, the flowability of PPC melt could be improved by increasing temperature and shear rate during its preparation.

**Key words:** poly(propylene carbonate) thermal properties; melt rheological; pseudoplastic fluid; apparent viscosity

## 0 引言

1969年,日本东京大学的井上祥平等<sup>[1-2]</sup>首次利用CO<sub>2</sub>和环氧丙烷聚合生成了可完全生物降解

的聚甲基乙撑碳酸酯(PPC),产物一方面可以固定利用CO<sub>2</sub>,缓和温室效应;另一方面可以生物降解,减轻白色污染,有利于生态环境保护,因而受到广泛重视.PPC具有优良的生物降解性、光降解性、良

收稿日期:2013-10-14

作者简介:李亚东(1963—),女,满族,河北省玉田市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为高分子材料改性加工。

好的透明性、高阻隔性和生物相容性等<sup>[3-5]</sup>优点,在食品保鲜、医用材料等方面具有广泛的应用前景。

但是,近几十年各国研究人员一直把PPC的研究重点放在催化剂及聚合工艺研究上<sup>[6]</sup>,而对其加工成型性能及实际应用研究相对较少。PPC成型加工性能及工艺研究是开发实用制品的前提,而聚合物的熔体流动行为是确定加工成型工艺的基础。鉴于此,本文拟对PPC的热性能及熔体流变行为进行分析研究,以期为PPC的成型加工工艺条件的制定提供依据。

## 1 实验

### 1.1 原料

PPC粒料:河南天冠企业集团有限公司产,数均分子量为110 900,分子量分布2.84,实验前,PPC在50℃的干燥箱干燥24 h。

### 1.2 仪器与设备

CP214电子天平,奥豪斯(上海)有限公司产;DHG-101-0A型电热鼓风干燥箱,北京中兴伟业仪器有限公司产;Q100差示扫描量热分析仪,德国Bruker公司产;TG209热重分析仪,德国Netzsch公司产;QLB-400×400平板硫化机,中国上海轻工机械股份有限公司产;ZHY-W万能制样机,承德建德检测仪器有限公司产;SPL-10KN型电子拉力机,日本岛津有限公司产;XNR-400型熔体流动速率仪,承德市金建检测仪器有限公司产;RM-400B型哈普转矩流变仪,哈尔滨哈普电气技术有限公司产。

### 1.3 性能测试

**1.3.1 差示扫描量热分析(DSC)** 氮气保护下快速升温至200℃,消除热历史3 min,以10℃/min的速度降温至0℃,再以10℃/min的速度升温至200℃,整个过程在20 mL/min的氮气流保护下进行。

**1.3.2 热失重分析(TG)** 以10℃/min的速率进行等速升温,温度范围为30~600℃。整个过程在20 mL/min的氮气流保护下进行。

**1.3.3 拉伸性能测试** 根据标准GB/T 1040-1992,将模压好的PPC片材利用万能制样机制成I型试样,然后使用电子拉力机进行拉伸性能测试,拉伸速率50 mm/min。

**1.3.4 熔体流动速率分析** 熔体流动速率(MFR)按ASTM D 1238-82标准测定。标准毛细管的口模内径为 $(2.0955 \pm 0.005)$  mm,长度为 $(8.000 \pm$

$0.025)$  mm。熔融温度范围160~180℃,测试载荷为5.00 kg。

**1.3.5 熔体流变行为分析** 聚合物流变行为研究在哈普转矩流变仪上进行。测试温度分别为155℃,160℃,165℃,170℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 DSC分析

PPC材料的DSC曲线见图1。从图1可知,PPC的玻璃化转变温度 $T_g = 31$ ℃。PPC较低的玻璃化转变温度使得制品高温尺寸稳定性差,高温下强度迅速下降,低温下脆性加大,限制了其作为新型高分子材料的大规模应用。

### 2.2 TG分析

PPC材料的TG曲线和DTG曲线见图2。从TG曲线可知,PPC失重率5%和10%时的温度分别为211.3℃和250℃,且PPC的加工热稳定性较差,在170℃左右就会发生明显的降解,限制了其进一步的使用。由DTG曲线可知,PPC有2个失重台阶,即

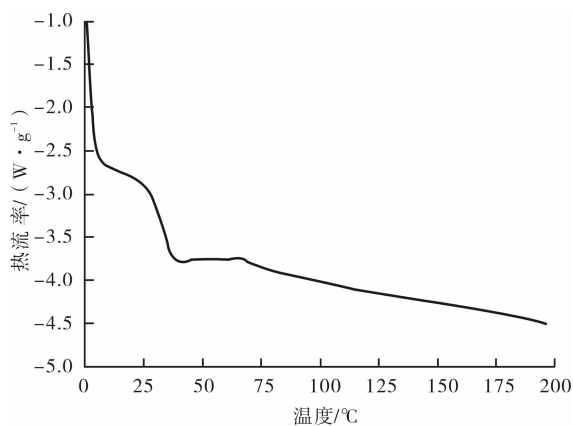


图1 PPC的DSC曲线

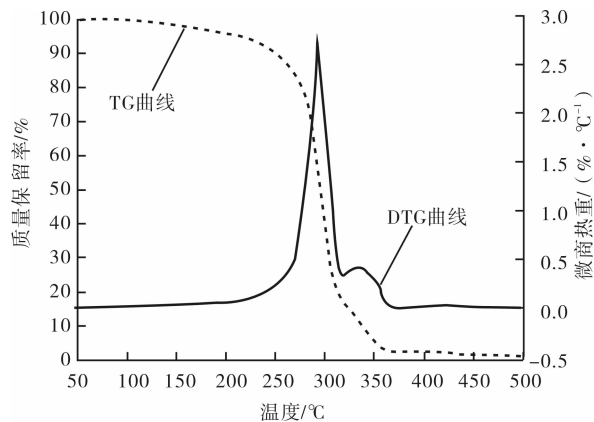


图2 PPC的TG曲线和DTG曲线

存在2个失重阶段,其中低温最大分解失重温度和高温最大分解失重温度分别为296.3℃和339.5℃.

### 2.3 PPC材料拉伸性能分析

PPC片材的拉伸性能测试结果显示,其拉伸强度为7.50 MPa,断裂伸长率为536.63%.由此可见,PPC材料属韧性材料且力学性能较差,可通过其他材料增强的方法来提高其力学性能,达到扩大其应用范围的目的.

### 2.4 熔体流动速率分析

熔融流动速率(MFR)定义为热塑性塑料在一定温度和负荷下,熔体每10 min通过规定的标准口模的质量,单位为g/10 min.对于一定结构的塑料熔体,其熔体流动速率愈大则成型时流动性愈好.按ASTM D 1238—82标准测定了PPC在不同挤出条件下的MFR,实验结果如图3所示.结果表明,PPC的MFR随着温度的提高而升高,即聚合物的流动性随温度升高而有所改善.

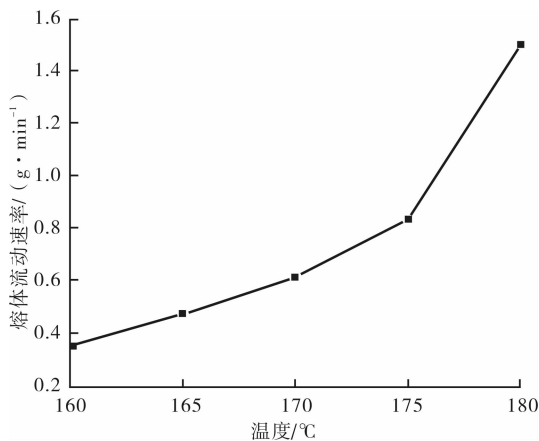


图3 PPC的熔体流动速率图

### 2.5 熔体流变行为研究

PPC材料剪切应力、熔体表观黏度( $\eta_a$ )与剪切速率的关系曲线分别见图4.

从图4可知,PPC材料是典型的假塑性流体,其剪切应力随剪切速率的增加而增大;熔体表观黏度随剪切速率的增加而降低.这是由于聚合物熔体中的大分子彼此缠结,当其承受应力时,缠结点就会解开,同时还沿着流动的方向规则排列,因此黏度降低.从图4还可以看出,PPC材料的黏度对剪切速率比较敏感,因此加工时选择合适的剪切速率可以有效地提高材料的加工流动性.

图5是不同剪切速率下聚合物的表观黏度随温度的变化图.从图5可以看出,PPC材料的表观黏度随温度的升高而降低.这是因为随着温度的升高,

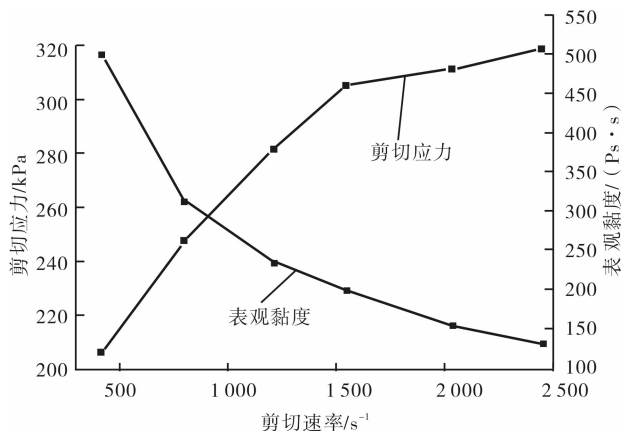


图4 PPC的剪切应力和熔体表观黏度随剪切速率变化曲线

熔体的自由体积增加,链段的活动能力增强,分子间的相互作用力减弱,从而使高聚物的流动性增大、黏度降低.在成型操作中,可以通过提高温度来增加PPC材料的流动性,但是升温幅度不能太大,这是由于大幅度地增加温度很可能使材料发生热降解,从而降低制品质量,而且成型设备等损耗也会较大,并且会恶化工作条件,因此需选择合适的加工温度来提高材料的加工流动性.

升高熔融温度可以改善聚合物的熔体流动行为.聚合物熔体黏度的温度依赖性可用Arrhenius方程来描述:

$$\eta = A \exp(E_a/RT)$$

其中 $\eta$ 是黏度/(Pa·s), $A$ 是常数, $E_a$ 是熔体黏流活化能/(J·mol<sup>-1</sup>), $R$ 是普适气体常数/(J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), $T$ 为绝对温度/K. PPC熔体的黏流活化能 $E_a$ 可由 $\ln\eta$ 对 $1/T$ 线性关系的斜率获得,实验结果见表1.

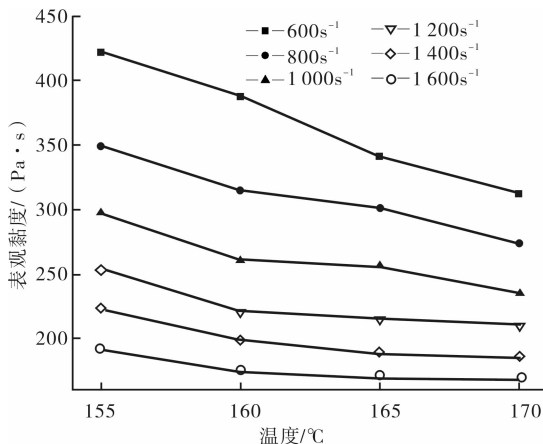


图5 PPC的表观黏度随温度变化曲线

表1 PPC熔体不同剪切速率下的黏流活化能

剪切速率/(s <sup>-1</sup> )	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
$E_a$ /(kJ·mol <sup>-1</sup> )	13.69	10.22	9.61	8.18	8.03	6.12

PPC材料 $E_a$ 的大小反映了聚合物熔体对温度的敏感性.从表1知,PPC材料熔体的黏流活化能随着剪切速率的增加而降低,表明其黏度随剪切速率的增加对温度的敏感性降低.

### 3 结论

本文利用差示扫描量热分析仪、热重分析仪、电子拉力机、熔体流动速率仪和毛细管流变仪等对聚甲基乙撑碳酸酯(PPC)热性能、力学性能和熔融流变行为进行了研究.结果表明:

1) PPC具有较低的玻璃化转变温度和较差的热稳定性,其中 $T_g = 31\text{ }^\circ\text{C}$ ,失重率5%时的温度为211.3 $^\circ\text{C}$ .

2) PPC的力学性能较差,其拉伸强度和断裂伸长率分别为7.50 MPa和536.63%.

3) PPC熔体的流动速率随温度的升高有所增加,这为PPC的成型加工工艺制定提供了依据.

4) 由PPC熔体表观黏度与剪切应力和剪切速率关系曲线可以发现PPC熔体是典型的非牛顿假塑性流体,表观剪切黏度随剪切速率的增加而降低.

5) PPC熔体的表观黏度随温度的增加而降低,流动活化能随剪切速率提高而降低,表明其表观黏

度对温度较敏感,在PPC成型加工工艺条件制定时,可采用升高加工温度和剪切速率的方法来提高其熔体的流动性.

### 参考文献:

- [1] Inoue S, Koinuma H, Tsuruta T. Copolymerization of carbon dioxide and epoxide[J]. Journal of Polymer Science (Part B): Polymer Letters, 1969, 7(4): 287.
- [2] Inoue S, Koinuma H, Tsuruta T. Copolymerization of carbon dioxide and epoxide with organometallic compounds[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 1969, 130(1): 210.
- [3] 王秋艳, 翁云宣, 许国志. 聚甲基乙撑碳酸酯的研究进展[J]. 中国塑料, 2011, 25(1): 9.
- [4] Wang S J, Du L C, Zhao X S, et al. Synthesis and characterization of alternating copolymer from carbon dioxide and propylene oxide[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 85: 2327.
- [5] Zhu Q, Meng Y Z, Tjong S C, et al. Thermally stable and high molecular weight poly(propylene carbonate)s from carbon dioxide and propylene oxide[J]. Polymer International, 2002, 51(10): 1079.
- [6] Yoo S J, Lee S H, Jeon M, et al. Effects of compatibilizers on the mechanical, morphological and thermal properties of poly(propylene carbonate)/poly(methyl methacrylate) blends[J]. Macromolecular Research, 2013, 21(11): 1182.

(上接第34页)

收集纯化后N蛋白的体积约为35 mL, Ni柱亲和层析纯化所得蛋白质量约为105 mg.

由图7可见, 纯化后的麻疹N蛋白与相应抗体产生特异性反应, 证明该蛋白有较好的抗原性.

### 3 结论

本研究将麻疹病毒核壳蛋白基因导入到大肠杆菌中, 选择pET-32a(+)载体, 得到重组表达质粒pET-32a(+)/N. 同时对温度、时间、诱导剂浓度等诱导条件进行优化. 实验发现, 在温度37 $^\circ\text{C}$ , 诱导时间4 h, IPTG浓度0.2 mmol/L的条件下目的蛋白表达量最高. 选择Ni<sup>2+</sup>配体亲和层析和DEAE柱纯化后, 蛋白纯度高达90%. 此蛋白表达纯化系统的建立和优化将会对MV病毒N蛋白的纯化和进一步探讨其功能提供依据.

### 参考文献:

- [1] 马雷钧, 陈志慧. 麻疹病毒流行株主要结构蛋白的基因变化[J]. 国外医学预防诊断治疗用生物制品分册, 2002, 25: 6.
- [2] 王伟, 王海梅. RT-PCR法检测尿液标本中麻疹病毒核蛋白(N)基因的临床应用及意义[J]. 山西医科大学学报, 2012, 43(12): 118.
- [3] Sousa E, Agudelo-Suárez A, Benavides F G, et al. ITSAL project: Immigration, work and health in Spain: the influence of legal status and employment contract on reported health indicators[J]. Publ Health, 2010, 55(5): 443.
- [4] 陈寅, 卢亦愚. 麻疹核蛋白基因的表达及检测应用的研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(5): 123.
- [5] Willen S. How is health-related "deservingness" reckoned? Perspectives from unauthorized immigrants in Tel Aviv[J]. Soc Sci Med, 2012, 74(6): 812.

# 染料敏化太阳能电池中 TiO<sub>2</sub> 和 ZnO 薄膜光阳极制备方法述评

张林森<sup>1,2</sup>, 白庆玲<sup>1</sup>, 宋铁峰<sup>3</sup>, 刘赞<sup>1</sup>, 王力臻<sup>1,2</sup>, 李素珍<sup>1</sup>

- (1. 郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 河南省表界面科学重点实验室, 河南 郑州 450001;
3. 灵宝华鑫铜箔有限责任公司, 河南 灵宝 472500)

**摘要:**对染料敏化太阳能电池光阳极 TiO<sub>2</sub> 和 ZnO 薄膜制备的常用方法溶胶凝胶法、水热合成法、磁控溅射法、电化学沉积法以及脉冲激光沉积法、金属有机物化学气相沉积法、化学气相沉积法、喷雾热解法和化学沉淀法进行了述评,指出:半导体薄膜的制备和优化,减少电子在其传输过程中的损失,探索多种半导体材料的复合薄膜,优化半导体薄膜的能级结构和与光敏染料能级的匹配性,以及制备更为紧凑有序的纳米阵列光阳极材料和适合规模化生产的工艺是今后应强化的主要研究内容.

**关键词:**染料敏化太阳能电池;光阳极;TiO<sub>2</sub> 薄膜;ZnO 薄膜;制备方法

中图分类号:TM914.4<sup>+</sup>2 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.012

## Review of TiO<sub>2</sub> and ZnO thin films photo-anode preparation methods in dye-sensitized solar cells

ZHANG Lin-sen<sup>1,2</sup>, BAI Qing-ling<sup>1</sup>, SONG Tie-feng<sup>3</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, WANG Li-zhen<sup>1,2</sup>, LI Su-zhen<sup>1</sup>

- (1. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. He'nan Provincial Key Laboratory of Surface & Interface, Zhengzhou 450001, China;
3. Lingbao Huaxin Copper Foil Co., Ltd., Lingbao 472500, China)

**Abstract:** This review presented the commonly used preparation methods for TiO<sub>2</sub> and ZnO thin film of photo-anode of dye-sensitized solar cells (DSSCs), such as sol-gel, hydrothermal synthesis, magnetron sputtering and electrochemical deposition, in addition with pulsed laser deposition method, metalorganic chemical vapor deposition, spray pyrolysis method and chemical precipitation process. The forecasts of the future developments of DSSCs will be preparation and optimization of semiconductor thin film, decreasing loss of electron conduction, composite of different semiconductor materials, optimizing energy structure and energy level matching of semiconductor and photosensitive dye, preparation of more compact and orderly nano-array optical anode materials and processes suitable for large-scale production.

**Key words:** dye-sensitized solar cell; photo-anode; TiO<sub>2</sub> thin film; ZnO thin film; preparation method



## 0 引言

随着能源危机和化石燃料的逐渐枯竭,发展新能源材料是人类进入 21 世纪必须解决的重大课题. 可再生能源日益成为研究的热点,相比于常见的风能、水能、地热能等可再生能源,太阳能不受季节和地域的限制. 太阳能利用主要有 2 种方式:直接利用和间接利用,其中太阳能电池是间接利用太阳能的主要方式之一.

太阳能电池的发展已有几十年的历史,目前技术较成熟的是硅系太阳能电池和化合物薄膜太阳能电池. 但传统硅太阳能电池制作工艺繁杂、生产成本高,薄膜太阳能电池含有重金属镉,从而限制了其大规模的推广应用. 染料敏化太阳能电池(DSSCs)具有成本低、制备工艺简单、对环境污染小等众多优点,是下一代太阳能电池的瞩目产品.

1991 年,瑞士洛桑高等工业学院的 B. O' Regan 等<sup>[1]</sup>报道了利用纳米晶 TiO<sub>2</sub> 多孔膜和联吡啶钌(II)配合物得到光电转换效率为 7.1% 的 DSSCs,这一突破性进展为世界所瞩目. 对 DSSCs 中光阳极半导体材料 TiO<sub>2</sub> 的研究目前已获得较好的光电性能,但是由于 TiO<sub>2</sub> 的光催化使敏化染料有一定的降解,影响到 DSSCs 的使用寿命,因此各国学者开始研究探索其他宽禁带纳米半导体薄膜以取代 TiO<sub>2</sub>. ZnO 为宽禁带半导体材料,具有良好的物理特性和化学特性,有望取代 TiO<sub>2</sub>. 同时,它们的导带电位接近,边带能级低于光敏染料的 LUMO 能级,光敏染料激发的光电子能够注入到半导体导带上去. 在 ZnO 半导体中,电子具有较大的迁移率,可以减小其在薄膜中的传输时间,且 ZnO 薄膜的制备方法要比 TiO<sub>2</sub> 简单得多,可以进一步降低染料敏化太阳能电池成本,有利于规模化生产. 因此本文拟对 DSSCs 中光阳极 TiO<sub>2</sub> 和 ZnO 薄膜研究进展进行综述.

## 1 DSSCs 的工作原理

DSSCs 主要由导电玻璃、光阳极、敏化染料、电解质和对电极等组成<sup>[2]</sup>. 导电玻璃起着收集和传导正、负极电子的作用. 光阳极是 DSSCs 的核心构件,多为半导体多孔氧化物薄膜,但由于大多数无机半导体只有单一的基态和激发态,因此太阳光的吸收主要依靠光敏染料. 光敏染料主要有酞菁系列染料、卟啉系列染料、天然色素和 Ru, Os 的多或联吡啶光敏染料等,其中 Ru, Os 的多或联吡啶光敏染料具

有较好的光敏性能. 太阳光被光敏染料吸收,染料由基态跃迁至激发态,产生光生电子,电子再被注入到半导体的导带中,被导电玻璃收集并传输到外电路. 电解液将处于氧化态的染料还原,将空穴传输到对电极与外电路的电子结合,完成一个循环,同时,对电极将没有被染料吸收的光反射回去,再次供染料吸收<sup>[3-5]</sup>.

## 2 光阳极的制备方法

### 2.1 TiO<sub>2</sub> 薄膜的制备

1) 溶胶凝胶法<sup>[6-7]</sup>. 制备 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的方法很多,目前广泛使用的是由 M. Grätzel<sup>[2]</sup>报道的溶胶-凝胶手术刀涂膜技术. 利用此技术制备的 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜比表面积大,膜的平整度较好,得到的 DSSCs 的光电转换效率较高,缺点是操作较复杂、重现性差、难以扩大实现规模化生产.

2) 水热合成法<sup>[8-9]</sup>. 水热合成法制备 TiO<sub>2</sub> 薄膜主要是通过水解氯化物前驱体或钛的醇盐生成无定形钛盐沉淀物,然后在酸性或碱性溶液中得到溶胶物质,再将溶胶在水热高压反应釜中进行反应并陈化,最后将其经高温煅烧后得到 TiO<sub>2</sub> 颗粒或薄膜<sup>[10]</sup>. 反应过程中为了防止颗粒之间团聚,通常采用表面改性的办法,在母液中添加如有机螯合剂、表面活性剂、乳化剂等以降低颗粒的表面能,增加胶粒间静电排斥或产生空间位阻而使胶体稳定. 添加的这些有机物在高温煅烧过程中会受热分解而除去. 水热合成法与溶胶-凝胶法相比,增加了水热的陈化过程,进而控制产物的结晶度和生长过程,进而控制半导体氧化物的颗粒尺寸和分布.

3) 磁控溅射沉积法<sup>[11-13]</sup>. 磁控溅射沉积法制备 TiO<sub>2</sub> 薄膜是以金属钛靶作为阴极,导电玻璃基体作为阳极,在氩气和氧气氛围下金属钛溅射沉积到导电玻璃基体上,得到 TiO<sub>2</sub> 薄膜. 该方法通过调节气体的压力来控制 TiO<sub>2</sub> 薄膜的厚度和结构,因此可方便地控制 TiO<sub>2</sub> 薄膜的厚度和均匀性,且制备的 TiO<sub>2</sub> 薄膜与导电玻璃基体的结合力较强,不易脱落. 由磁控溅法制备的光阳组件装的 DSSCs 通常可获得较高的开路电压,但是短路电流相对较低. 这是因为得到的 TiO<sub>2</sub> 薄膜致密、颗粒小、比表面积小,导致染料吸附量少,吸收利用的太阳光少,使得其短路电流小;而致密的 TiO<sub>2</sub> 薄膜内颗粒与颗粒之间接触良好,有利于光生电子的传输,因而能够获得高的开路电压.

4) 电化学沉积法<sup>[14-15]</sup>.  $\text{TiO}_2$  薄膜的电化学沉积法可分为阳极沉积法和阴极沉积法. 韦世良等<sup>[14]</sup> 用导电玻璃为工作电极、铂电极为对电极和饱和甘汞为参比电极组成三电极体系, 电解液选用  $\text{TiCl}_3$  溶液并通以氩气作为保护气体, 通过恒电压、恒电流和电解 3 种阳极水解法分别获得致密、高纯、均匀性和透光性能等都较好的  $\text{TiO}_2$  薄膜. 阳极氧化法是以钛作阳极<sup>[16]</sup>, 以铂等金属做阴极, 采用两电极体系制备二氧化钛, 这种方法的优点是能够制备出有序的二氧化钛纳米管, 与  $\text{TiO}_2$  多孔薄膜相比, 纳米管具有更大的比表面积和更强的吸附能力, 有利于光敏染料分子的吸附; 同时有序的结构有利于电子传导, 可以提高 DSSCs 的开路电压.

## 2.2 ZnO 薄膜的制备

ZnO 是一种宽禁带直接带隙化合物半导体材料, 室温下禁带宽度  $3.35 \text{ eV}$ <sup>[17]</sup>, 激子结合能高达  $60 \text{ meV}$ <sup>[18]</sup>. 它具有较高的导电性, 耐高温, 且来源丰富, 价格低廉. 目前常采用的 ZnO 薄膜的制备技术如下.

1) 脉冲激光沉积法<sup>[19-23]</sup>. 激光脉冲沉积 (PLD) 是一种真空物理沉积方法, 可以通过控制激光的入射能量、沉积压力、基体温度、基体与靶之间的距离等工艺参数实现对 ZnO 形貌和性能的调控. 该方法设备较简单, 可低温操作, 工艺参数可独立控制, 能得到理想的化学计量比且较平整的薄膜, 多层膜结构的生长过程易于控制, 同时还避免了不必要的污染, 保证生长出高质量的薄膜. 但由于熔蒸具有很强的定向性, 因此 PLD 方法不适于制备大面积厚度均匀的薄膜.

2) 金属有机物化学气相沉积法<sup>[24-25]</sup>. 金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 是气相条件下把反应物引入到基体表面发生反应, 生成薄膜的一种工艺. 该法的突出特点是反应 (掺杂) 气体流量可控, 气体改变迅速灵活, 可以实现大面积、均匀外延生长, 生长温度低. ZnO 薄膜的制备常采用二乙基锌 (DEZn) 作 Zn 源, 氧气、水或  $\text{N}_2\text{O}$  等作 O 源, 且容易实现多种元素的掺杂.

MOCVD 法生长的 ZnO 薄膜可用于太阳能电池、紫外探测器和传感器等器件. 用该法制备薄膜时往往由于 Zn 源与 O 源过早接触, 从而导致反应物未到基体以前气相反应已经发生, 形成的小颗粒进入 ZnO 薄膜, 这必然会降低 ZnO 薄膜的质量. 因此气体输入的位置非常重要, 要尽可能地限制其副

反应.

3) 化学气相沉积法<sup>[26-27]</sup>. 化学气相沉积法是气相法合成纳米 ZnO 常见的一种方法. 应用加热蒸发高纯锌粉或采用 C 还原 ZnO 或 Zn 盐. 实验前进行抽真空, 当真空度达到要求值时以惰性气体 Ar 等作载气, 形成 Zn 的蒸气, 然后在高温下通入氧气, 进行氧化反应制得 ZnO. 此方法有利于进行定量掺杂.

4) 喷雾热解法<sup>[28-30]</sup>. 喷雾热解法是把 Zn 盐等组成的前驱体溶液 (一般是用醋酸锌溶于醇类或蒸馏水中得到的溶液) 经超声波雾化后, 以气溶胶 (雾) 的形式喷入高温区或由载气送入薄膜生长室, 在高温下分解制备 ZnO 薄膜, 温度一般控制在  $400 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$  之间. 该方法的优点是容易对薄膜掺杂与共掺杂, 可以获得较好性能的薄膜. 此法在 p 型掺杂 ZnO 薄膜的制备方面具有独特的优势: 首先掺杂在溶液中进行, 易于达到分子水平的混和, 利于薄膜掺杂的均匀性; 其次, ZnO 薄膜在常压气氛下生长, 可以尽可能地降低氧空位等本征施主缺陷, 达到抑制自补偿作用的效果, 有利于 p 型掺杂的实现. 低成本和易掺杂的优点也促进了喷雾热解法制膜的规模化生产, 有望实现产业化.

5) 化学沉淀法. 化学沉淀法分为直接沉淀和均匀沉淀 2 种, 直接沉淀常用的沉淀剂有氨水、碳酸铵、碳酸氢铵、草酸铵、碳酸钠等. A. Ennaoui 等<sup>[31]</sup> 使用氨水作为沉淀剂,  $\text{ZnSO}_4$  作为 Zn 盐采用直接沉淀法得到 ZnO. 均匀沉淀法是利用化学反应使溶液中的构晶离子由溶液中缓慢均匀地释放出来, 常用的沉淀剂有尿素、六亚甲基四胺等. 陈建刚等<sup>[32]</sup> 分别用  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  和  $\text{Zn}(\text{AC})_2$  2 种 Zn 盐, 六亚甲基四胺作为沉淀剂, 得到了 ZnO 亚微米棒. A. M. Peiro 等<sup>[33]</sup> 采用连续微波, 分别以  $\text{Zn}(\text{AC})_2$  和  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  为 Zn 源, 尿素和六亚甲基四胺 2 种沉淀剂在导电玻璃基体上制备出了 ZnO 纳米线. 均匀沉淀法制备的 ZnO 颗粒均匀且致密, 分散性好, 反应条件温和易于控制, 容易洗涤, 工业前景好, 但是因  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  的两性, 必须将 pH 值维持在较窄的范围内.

6) 溶胶-凝胶法<sup>[34-36]</sup>. 溶胶-凝胶法的原理是在较低的温度下, 从溶胶-凝胶溶液中提拉得到所需要的涂层, 然后经过干燥和煅烧形成晶体薄膜. 一般选用的前驱体为二水合醋酸锌等 Zn 的有机盐, 乙二醇甲醚或无水乙醇作为溶剂, 乙醇胺作为稳定剂. 该方法具有成膜均匀性好、易于原子级

掺杂、可精确控制掺杂水平等优点,而且无需真空设备,工艺简单,适合大面积批量生产透明 ZnO 导电薄膜.其缺点在于制备的 ZnO 薄膜的结晶质量欠佳,限制了其进一步发展.

7) 水热合成法.水热合成法是在密闭容器中,利用高温和水在该温度下的自生压强,将 Zn 盐和表面活性剂及沉淀剂(常用 NaOH)混合进行反应的一种合成法.王艳香等<sup>[37]</sup>用 ZnSO<sub>4</sub> 为 Zn 源,以三聚磷酸钠为表面活性剂,制备了二维 ZnO 纳米片. A. E. Suliman 等<sup>[38]</sup>以 ZnCl<sub>2</sub>, NaOH 为反应物在水溶液生成 Zn(OH)<sub>2</sub> 沉淀,再与聚乙烯基吡咯烷酮溶液混合、加压、洗涤、干燥得平均粒径为 30 nm 的 ZnO 粉体. C. M. Shin 等<sup>[39]</sup>以 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O、六亚甲基四胺为反应物,在 95 °C 下反应 10 h 成功制备出 ZnO 纳米棒.该法可直接制得结晶度好、粒度小、分布均匀、团聚少的纳米 ZnO 粉体,工艺相对简单,无需煅烧处理.

8) 磁控溅射法<sup>[40-43]</sup>.磁控溅射法是采用荷能粒子轰击装有高纯 Zn 或 ZnO 粉的反应腔,通过通入气体维持一定的压力,使 ZnO 被溅射出来并沉积到衬底表面形成薄膜的一种工艺.其优点是溅射频率强度可控、基片薄膜结合力好、操作简单、薄膜质量高,并且可根据要求进行不同成分薄膜的逐层沉积,可得到低电阻率、高取向性的薄膜.

9) 电化学沉积法.电化学沉积法是近年来被广泛应用的一种合成方法,可以通过调节电流密度、前驱体浓度等工艺参数制备出不同性质的薄膜.该法具有环保、设备简单、过程易于控制等优点.甘小燕等<sup>[44]</sup>采用电化学沉积法制备出了 ZnO/曙红多孔膜.王春梅等<sup>[45]</sup>使用质量分数为 5% 的 SDS 和浓度 0.02 mol/L 的 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液为电解液,利用电化学沉积制备了 ZnO 多孔膜.此法的合成温度低,操作简单,合成时间短,能量消耗低,但膜的质量欠佳.

### 3 展望

光阳极作为 DSSCs 的核心部分对提高 DSSCs 的转换效率具有重要作用,因此优化光阳极的性能成为现今的研究重点.尽管染料敏化纳米太阳能电池总的光电转换效率已超过 10%,发展潜力巨大,但工业化生产还有许多难题需要解决.半导体薄膜的制备和优化以减少电子在其传输过程中的损失,探索多种半导体材料的复合薄膜,优化半导体薄膜的能级结构和与光敏染料能级的匹配性,制备更为

紧凑有序的纳米阵列光阳极材料和适合规模化生产的工艺是今后应加强的主要研究内容.虽然目前还存在一些问题,但是随着技术的进一步发展, DSSCs 必将走向产业化应用,成为下一代太阳能电池的有利竞争者.

### 参考文献:

- [1] O' Regan B, Grätzel M. A low-cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films[J]. Nature, 1991, 353: 737.
- [2] Grätzel M. Photovoltaic performance and long-term stability of dye-sensitized mesoscopic solar cells[J]. Comptes Rendus Chimie, 2006, 9: 578.
- [3] Kay A, Gretel M. Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder[J]. Solar Energy Mater&Solar Cells, 2006, 99(44): 99.
- [4] He J, Benk G, Korodi F, et al. Modified photo cathodes for efficient near-sensitization of nanostructured TiO<sub>2</sub> electrode[J]. Am Chem Soc, 2002, 124(17): 4922.
- [5] Yanagisawa M, Korodi F, He J J, et al. Synthesis and function in solar cells based on Nanocrystalline TiO<sub>2</sub>[J]. J Porphyryns Phthalocyanines, 2002(6): 217.
- [6] Teng X G, Zhao Y T, Xi J Y, et al. Nafion/organic silica modified TiO<sub>2</sub> composite membrane for vanadium redox flow battery via in situ sol-gel reactions[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 341(1-2): 149.
- [7] Chen L J, Tian J T, Qiu H, et al. Preparation of TiO<sub>2</sub> nanofilm via sol-gel process and its photocatalytic activity for degradation of methyl orange[J]. Ceramics International, 2009, 35(8): 3275.
- [8] Yu J G, Yue L, Liu S W, et al. Hydrothermal preparation and photocatalytic activity of mesoporous Au-TiO<sub>2</sub> nanocomposite microspheres[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 334(1): 58.
- [9] Tian H, Ma J F, Li K, et al. Hydrothermal synthesis of S-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles and their photocatalytic ability for degradation of methyl orange[J]. J Ceramics International, 2009, 35(3): 1289.
- [10] Wang X Y, Li H B, Liu Y, et al. Hydrothermal synthesis of well-aligned hierarchical TiO<sub>2</sub> tubular macrochannel arrays with large surface area for high performance dye-sensitized solar cells[J]. Applied Energy, 2012, 99: 198.
- [11] Zhang C, Ding W Y, Wang H L, et al. Influences of working pressure on properties for TiO<sub>2</sub> films deposited by DC pulse magnetron sputtering[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(6): 741.

- [12] Song S M, Yang T L, Li Y H, et al. Structural, electrical and optical properties of ITO films with a thin TiO<sub>2</sub> seed layer prepared by RF magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2009, 83(8):1091.
- [13] Zhang W J, Wang K L, Zhu S L, et al. Yttrium-doped TiO<sub>2</sub> films prepared by means of DC reactive magnetron sputtering[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(1-2):83.
- [14] 韦世良, 何翔, 孙奉姿, 等. 阳极氧化法制备 TiO<sub>2</sub> 纳米管及特性研究[J]. 化工新型材料, 2008, 36(11):91.
- [15] Karuppuchamy S, Nonomura K, Yoshida T, et al. Cathodic electrodeposition of oxide Semiconductor thin films and their application to dye-sensitized solar cells[J]. Solid State Ionics, 2002, 151:19.
- [16] Andrea L, Adriano S, Stefano B, et al. An easy approach for the fabrication of TiO<sub>2</sub> nanotube based transparent photoanodes for dye-sensitized solar cells[J]. Solar Energy, 2013, 95:90.
- [17] Norton D P. Synthesis and properties of epitaxial electronic oxide thin-film materials[J]. Materials Science and Engineering(Reports), 2004, 43(5-6):139.
- [18] Look D C, Reynolds D C, Fang Z Q, et al. Point defect characterization of GaN of ZnO[J]. Materials Science and Engineering(B), 1999, 66(1-3):30.
- [19] Daniel H, Jaroslav B. AFM surface analysis of ZnO layers prepared by pulsed laser deposition at different oxygen pressures[J]. Vacuum, 2010, 84:166.
- [20] Daniel H, Jaroslav B, Andrej V, et al. Comparative study of ZnO layers prepared by PLD from different targets at various oxygen pressure levels[J]. Cent Eur J Phys, 2009, 7(2):345.
- [21] Liu Y D, Li Q, Shao H L. Optical and photo-luminescent properties of Al-doped zinc oxide thin films by pulsed laser deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 485(1-2):529.
- [22] Ayouchi R, Bentes L, Casteleiro C. Particulate assisted growth of ZnO nanorods and microrods by pulsed laser deposition[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(11):5917.
- [23] Venkatachalam S, Kanno Y. Preparation and characterization of nano and microcrystalline ZnO thin films by PLD[J]. Current Applied Physics, 2009, 9(6):1232.
- [24] Ye Z Z, Wang J R, Wu Y Z. Growth of phosphorus-doped p-type ZnO thin films by MOCVD[J]. Front Optoelectron China, 2008, 1(1-2):147.
- [25] 李香萍, 张宝林, 申人升. MOCVD 法制备 ZnO 薄膜的正交试验设计[J]. 半导体光电, 2008, 29(5):700.
- [26] Ye Z Z, Huang J Y, Xu W Z, et al. Catalyst-free MOCVD growth of aligned ZnO nanotip arrays on silicon substrate with controlled tip shape[J]. Solid State Commun, 2007, 141(8):464.
- [27] Chen Y J, Lo Y S, Huang C H, et al. Anode growth of DSSCs by flat-flame chemical vapor deposition method[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 120:181.
- [28] Goyal Rajendra N, Kaur Davinder, Pandey Ashish K. Growth and characterization of iron oxide nanocrystalline thin films via low-cost ultrasonic spray pyrolysis[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 116(2-3):638.
- [29] 周佳, 韩高荣. 超声喷雾热解法制备 ZnO 薄膜及性能研究[J]. 功能材料, 2006, 37(4):576.
- [30] 边继明, 刘维峰, 胡礼中, 等. 超声喷雾热解法生长氧化锌同质 p-n 结及其电致发光性能研究[J]. 无机材料学报, 2007, 22(1):173.
- [31] Ennaoui A, Weber M, Scheer R, et al. Chemical-bath ZnO buffer layer for CuInS<sub>2</sub> thin-film solarcells[J]. Solar Energy Material & Solar Cells, 1998, 54(1-4):277.
- [32] 陈建刚, 郭常新, 张琳丽, 等. 一步溶液法制备 ZnO 亚微米晶体棒及其发光性能[J]. 发光学报, 2006, 27(1):59.
- [33] Peiro A M, Ayllon J A, Peral J, et al. Nanostructured zinc oxide films grown from microwave activated aqueous solutions[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 285(1-2):6.
- [34] Wang D Y, Zhou J, Liu G Z. Effect of Li-doped concentration on the structure, optical and electrical properties of p-type ZnO thin films prepared by sol-gel method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 481(1-2):802.
- [35] Wang D Y, Zhou J, Liu G Z. The microstructure and photoluminescence of Cu-doped ZnO nano-crystal thin films prepared by sol-gel method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487(1-2):545.
- [36] 肖宗湖, 张萌. 溶胶-凝胶法制备 c 轴取向生长 ZnO 薄膜[J]. 功能材料, 2007, 38(12):2015.
- [37] 王艳香, 范学运, 余熙, 等. 三聚磷酸钠辅助水热合成制备氧化锌纳米片[J]. 无机化学学报, 2008, 124(3):434.
- [38] Suliman A E, Tang Y W, Liang X. Preparation of ZnO nanoparticles and nanosheets and their application to dye-sensitized solar cells[J]. Solar Energy Material & Solar Cells, 2007, 91:1658.

# 塔式起重机平衡重参数化计算系统

王良文, 王传鹏, 王才东, 穆小奇

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对塔式起重机在实际工作中经常出现需要变换臂长,而对应的起升载荷也将变化等问题,研究开发出一套适合实际应用、简洁、方便的塔式起重机平衡重参数化计算系统.本系统根据塔机的工作特点和起重特性,针对塔机的不同臂长状态,利用三维设计软件 Pro/E 建立塔机主要结构参数化模型,进行结构的快速设计及自动化装配.以 VB 为系统开发工具,与 Pro/E 相结合,实现数据的传输与调用,简化了建模与计算等过程.通过算例验证了系统的正确性和可行性.

**关键词:**塔式起重机;平衡重;参数化计算系统

**中图分类号:**TH213.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.013

## The parameterization calculation system for the counterweight of the tower crane

WANG Liang-wen, WANG Chuan-peng, WANG Cai-dong, MU Xiao-qi

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

**Abstract:** Aiming at the problems that the tower crane often needs to transform arm length and the corresponding hoisting load varies frequently in the practical situation, a new parameterized calculation system of tower crane counterweight was developed, which was more practical, simple and convenient. The system which was based on the feature and working conditions, could build the tower crane main structure parametric model with Pro/E (the three dimensional design software), design and assemble automatically, according to the different length of the crane arm. It could transfer and invoke the data using VB cooperated with the Pro/E as the developing tool, so as to simplify the model and calculating process, which was proven to be correct and feasible by the examples.

**Key words:** tower crane; counterweight; parameterization calculation system

## 0 引言

目前,塔式起重机(简称塔机)的发展方向是大型化、结构超高超长.塔机通常有多种臂长组合方式以适应实际的工作需要,每种臂长组合方式都对

应不同的起重性能.为了保证塔机的抗倾覆稳定性,其平衡重的设计计算就显得尤为重要.采用传统的方法来计算确定不同工况的平衡重,计算过程较复杂、准确度较差<sup>[1-2]</sup>.为了提高计算效率和精度,本文拟对塔机平衡重参数化计算系统进行研

收稿日期:2013-10-19

基金项目:河南省科技攻关项目(122102210221);河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A460375)

作者简介:王良文(1963—),男,湖北省荆州市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为机器人机构设计及动力学分析与综合、数字化设计、CAE工程.

究,开发相应的系统,以提高塔机设计水平.

# 1 塔机平衡重参数化计算系统总体设计

本文所开发的塔机平衡重参数化计算系统实现过程是:在三维设计环境下,利用 Pro/E 软件建立臂架、拉杆、平衡臂、套架、过渡节等结构的参数化模型,由 VB 建立与 Pro/E 的联接,用参数驱动设计系统,通过相关参数的修改快速完成模型的再生<sup>[3-4]</sup>,然后根据实际要求进行塔机臂架自动装配,形成参数列表,借助相关函数提取塔机各部件质量载荷及距回转中心的距离等,再依据平衡重计算方法,进行平衡重可视化计算,如满足塔机实际工作要求,则提取计算结果,否则返回,重新进行参数化计算. 整个过程通过 VB 进行封装并调用,从而使计算出的结果在可视化平台清晰展现. 主程序流程如图 1 所示. 对塔机主要结构进行参数化建模、自动装配、建立参数列表等,是本文工作的基础. 作者前期的研究<sup>[3-5]</sup>为开展塔机平衡重参数化计算提供了技术上的支撑.

## 2 塔机平衡重的计算原理

### 2.1 塔机平衡重的确定原则及常用方法

完整的塔机主要由标准节、上下支座、起重臂、起升机构、回转机构、平衡重等组成,塔机组成结构简图见图 2.

塔机平衡重的功能主要是保证塔机平衡,构成设计上所要求的、与起重力矩方向相反的平衡力矩. 平衡重的计算在塔机设计中非常关键. 塔机基本臂、基本臂幅度的起重量、额定起升力矩等参数在

《塔式起重机分类》(JG/T 5037—93)中都有明确的规定;《塔式起重机设计规范》(GB/T 13752—92)中指出了塔机平衡重的确定原则:上回转塔机应按塔身所受的荷载最小原则确定平衡重质量<sup>[6]</sup>.

对于塔机平衡重的确定,一种常用方法是:塔机非工作状态,小车在最小幅度、吊钩空钩且 250 Pa 风载由吊臂向平衡臂吹时的向后倾翻力矩等于最大起重量的最大幅度处超载 10%,且 250 Pa 风力由平衡臂吹向吊臂时的向前倾翻力矩. 另一种常用方法是:塔机最大起重量的最大幅度处吊 110% 的最大起重量时载荷突然坠落,250 Pa 风载由吊臂向平衡臂吹时向后的倾翻力矩等于最大起重量的最大幅度处超载 10% 且 250 Pa 风力由平衡臂吹向吊臂时的向前倾翻力矩.

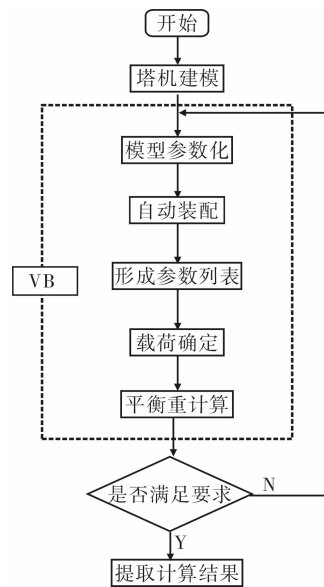


图 1 塔机平衡重参数化计算流程图

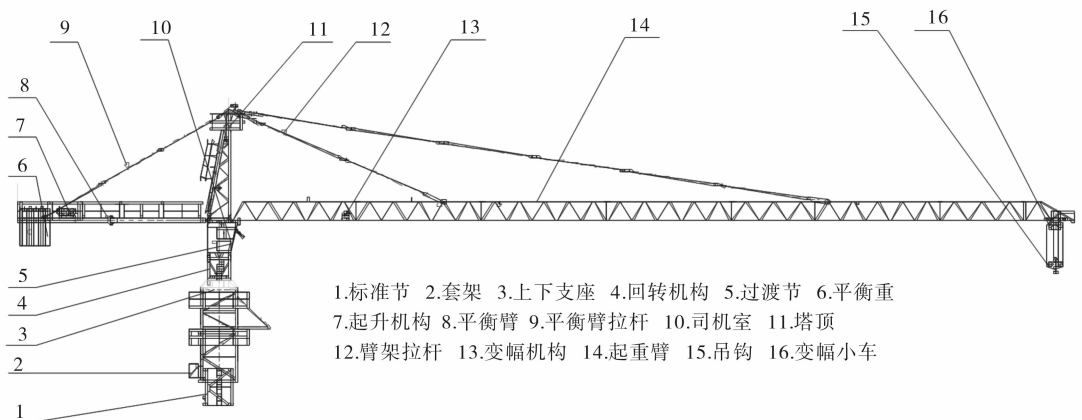


图 2 塔机组成结构简图

### 2.2 塔机平衡重常用计算方法存在的问题

塔机的平衡重设计计算,在结构的受力情况条件下,要满足安装、使用、拆卸的实际需要。按照第1种方法计算的平衡重虽然可以满足液压顶升的要求,但是液压顶升点在塔机上部重心的前部,向后倾翻的力矩并不是最恶劣工况下的后倾翻力矩,所以按照这种方法计算的平衡重,不能保证塔身所受载荷最小。第2种方法计算的平衡重能够实现塔身所受载荷最小,却出现这样的情况:塔机在顶升的过程中,小车处于最小幅度,上部重心处于液压顶升点的前部(即吊臂一侧),会出现“前重”现象,不能满足塔机顶升时上部的平衡调整<sup>[7-8]</sup>。

### 2.3 塔机平衡重计算方法的改进

综观塔机的整个工作过程,塔身向平衡臂方向倾翻的最恶劣工况为:250 Pa 风载由其吊臂吹向平衡臂、且最大起重量的最大幅度处吊 110% 的最大起重量;向吊臂方向倾翻时最恶劣的工况为:250 Pa 风力由平衡臂吹向吊臂、且最大起重量的最大幅度处起吊 110% 的最大起重量。

根据塔机平衡重的确定原则列方程如下:

$$\sigma_{前} = \sigma_{后} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{前}$  为塔身向吊臂侧倾翻时,最恶劣工况产生的塔身主肢应力;  $\sigma_{后}$  为塔身向平衡臂侧倾翻时,最恶劣工况产生的塔身主肢应力。

根据塔机的结构受力情况,其受力简图见图 3。图 3 中,  $G'$  为平衡重;  $G_1$  为吊重,即塔机起吊的载荷质量(含变幅小车、吊钩、钢丝绳);  $G_2$  为吊臂及吊臂上变幅机构等的自重;  $G_3$  为前长拉杆的自重;  $G_4$  为前短拉杆的自重;  $G_5$  为塔顶的自重;  $G_6$  为平衡臂及平衡臂上起升机构等的自重;  $G_7$  为后拉杆的自重;  $l_0$  为平衡重到塔身中心距离;  $M_{前}$  为塔身以上结构产生的向吊臂侧的倾翻力矩;  $M_{后}$  为塔身以上结构产生的向平衡臂侧的倾翻力矩;  $A$  为塔身标准节的主肢截面积。

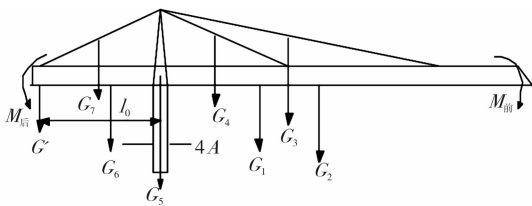


图 3 塔机受力简图

由应力计算公式知①为

$$\frac{G + G' + G_1}{4A} + \frac{M_{前}}{2A \times a} = \frac{M_{后}}{2A \times a} + \frac{G + G'}{4A} \quad (2)$$

式中,  $a$  为塔身标准节的主肢之间的中心距,记塔身标准节主肢角钢外包尺寸  $B$ ,主肢外缘与重心间距离  $Z_0$ ,得  $a = B - 2 \times Z_0$ ;  $G$  为塔身控制截面以上部分除平衡重以外的总自重,  $G = (G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7)$ 。

$$M_{前} = 110\% \times M_{额} + M_{风} + M_{自} + M_{吊具} - M_{平} \quad (3)$$

$$M_{后} = M_{平} + 0.5 \times 110\% \times M_{额} + M_{风} - M_{自} - M_{吊具} \quad (4)$$

$$M_{平} = G' \times l_0 \quad (5)$$

将式③④⑤代入②求得平衡重为

$$G' = \frac{0.275M_{额} + M_{自} + M_{吊具} + 0.2a \times G_1}{l_0} \quad (6)$$

式中,  $M_{额}$  为塔机额定起升力矩;  $M_{自}$  为各部件自重产生的力矩;  $M_{吊具}$  为塔机吊具产生的力矩(包含吊钩、钢丝绳、变幅小车等)。

按此方法计算的平衡重还需满足塔机架设要求。通常塔机顶升过程中利用改变小车的位置,使被顶升部分达到平衡。为了对平衡重进行校核,建立塔机顶升过程受力简图见图 4。图 4 中,  $O'$  为标准节上踏步位置,是顶升过程中塔机需要前后平衡的平衡中心;  $G_i$  为塔机装配中,被顶升的部分零部件质量(包含图 3 中的  $G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7$  以及图 2 中的套架、司机室、上下转台、回转机构的自重,不含平衡重);  $x_i$  为  $G_i$  到塔身中心的距离;  $G_{节}$  为准备加入的塔身标准节重以及变幅小车、吊钩、钢丝绳的质量;  $b$  为准备加入的标准节重心到塔身回转中心的距离;  $x_0$  为塔机踏步顶升轴心到塔身回转中心的距离。

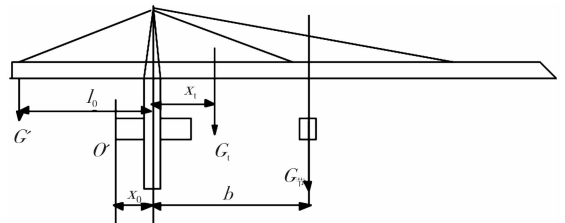


图 4 塔机顶升过程受力简图

两侧平衡满足条件为

$$MO' = 0$$

即

$$\sum G_i \times (x_i + x_0) + G_{节} \times (x_0 + b) -$$

$$\mathbf{G}' \times (l_0 - x_0) = 0 \quad (7)$$

由(7)式求得

$$b = \frac{\sum \mathbf{G}_i \times (x_i + x_0) + \mathbf{G}' \times (l_0 - x_0)}{\mathbf{G}_{\text{节}}} - x_0 \quad (8)$$

为了满足塔机顶升要求

$$l_{\min} < b < l_{\max} \quad (9)$$

式中,  $l_{\min}$  为塔机臂架最小工作幅度,  $l_{\max}$  为塔机臂架的最大工作幅度。

如果由(8)计算的结果满足(9)式,则表明(6)式计算的平衡重满足要求;否则取一个合适的  $b$ , 按下式重新计算平衡重:

$$G' = (\sum \mathbf{G}_i \times (x_i + x_0) + G_{\text{节}} \times (x_0 + b)) / (l_0 - x_0)$$

### 3 平衡重参数化计算系统开发的关键技术

#### 3.1 基于 VB 的 Pro/E 自动装配技术

VB 对 Pro/E 的二次开发过程就是在 VB 的 IDE 中编写程序代码,通过 ActiveX Automation 技术,控制 Pro/E 应用程序.完成自动装配的关键是正确选择装配基准约束和建立尺寸约束.首先是将 ASM 格式的装配文件调入内存并显示出来,即调入装配图.主要由 2 个关键函数来完成这个过程: `ModelRetrieve()`,是将事先完成的 Pro/E 模型调入内存,但是并不在 Pro/E 屏幕环境中显示; `Sessionsetcurrent-Model()`,是将内存中 Pro/E 模型调出并在屏幕中显示.在进行装配之前,要确定基础和装配物之间的装配基准约束,如果没有合适的装配约束就要创建新的装配基准约束,完成自动装配的 2 个关键函数是: `Object. AsmAddConstraint()`,为添加装配部件之间的约束关系; `Object. AsmAddComponent()`,把装配部件添加到装配图中<sup>[9-10]</sup>.在本系统中可以根据设计的需要,选择装配不同的臂架节数来计算平衡重,装配完成之后,保存并进入下一步界面.为平衡重计算而形成的塔机参数化装配界面见图 5.

#### 3.2 Pro/E 自动提取特征属性

对 Pro/E 二次开发可以对模型的单位进行修改(长度单位和质量单位),并计算出模型的质量属性(体积、质量、表面积等).其中用到的关键函数如下: `ModelSetLengthUnits()` 和 `ModelSetMassUnits()`,这 2 个函数分别对模型的长度单位和质量单位进行



图 5 塔机平衡重参数化装配界面

设定; `ModelSetDensity()` 和 `ModelGetMass Prop()`, 这 2 个函数的作用是设定密度和计算质量属性. `ModelSetDensity()` 的函数原型为: `object. ModelSetDensity(density, [modelName])`. `ModelGetMass Prop()` 的函数原型为: `ModelGetMassProp(Volume, Surface, Density, Mass, X, Y, Z, [CSYS], Volume, Surface, Density)`. `Mass, X, Y, Z` 都是必需项,分别指计算后得到的体积、表面积、密度、质量、重心的  $X, Y, Z$  坐标.在系统中通过程序函数的设定,可以完成塔机部件的质量和质心坐标的提取.

#### 3.3 参数列表

在本设计系统中,运用 VB 程序的数据库技术将部件参数化设计中每一个部件的参数化结果都保存,归档到参数列表.参数列表是塔机参数化并装配后存入到数据库的参数数据,是为了更好地整体把握塔机的参数化过程而设计的一个界面,塔机的参数在这个界面一目了然,其中相互配合的参数是否满足要求会清晰展现,比如部件之间的连接尺寸,回转塔身节和臂架、塔顶、平衡臂的配合尺寸等.在开发的系统中保存参数列表中的数据,进入参数化计算界面自动提取质量特性参数,系统就可完成平衡重计算.

### 4 实例

以某公司生产的 QTZ63 塔机为例,在塔机快速设计系统中,完成塔机建模、参数化、装配、参数列表之后,通过调用相关的数据进行平衡重参数化计算.塔机最大幅度为 50 m,7 节臂架组合,塔身主肢为角钢 L:160 mm × 160 mm × 12 mm,计算工况为起吊最大额定起重量时的最大幅度处,最大额定起重量为 6 t,其最大幅度为 13.22 m.参数化计算界面见图 6.



**塔式起重机平衡重参数化计算系统**

输入参数		
参数化部件名称	KG	质心距回转中心距离(m)
平衡臂总重	1048	-6.2
平衡臂拉杆	363	-6.1
塔顶重	1873	0
起重臂短拉杆重	394	6.3
起重臂长拉杆重	1028	18.8
臂架重	4418	25

简化部件		
部件名称	KG	质心距回转中心距离(m)
起升机构	1266	-9.13
配电箱	350	-3.9
力矩限制器	10	0
司机室	650	0
牵引机构	353	7.8
小车及吊钩	451	13.2
回转支撑及机构	1228	0
上下支座	1716	0
套架	2420	0

输入变量值(单位:m)	
平衡重到回转中心距离	11.01
小车到回转中心最大距离	50
小车到回转中心最小距离	2
吊重(kg)	6000

基本参数	
主肢中心距a	1.67 m
M额	63250 kg*m

计算模块

计算平衡重并显示结果

平衡重总质量(kg) 13186

校核验证模块

顶升轴心到中心距离(m) 0.71

标准节重心到中心距离(m) 4.23

上一步      校核验证

刷新数据      装配配重并显示总装图

重新计算      退出系统

图6 塔机平衡重计算系统界面

用户直接在 VB 界面中根据界面引导,点击 Frame 框架中的相关命令按钮,提取塔机结构的质量和质心距回转中心的距离.为了保证计算结果的正确性,需要将某些简化部件的参数代入计算:在简化部件的框架中输入相关结构的数值,还要在对应的窗口手动输入基本参数、变量值等,完善平衡重计算所需的参数,然后点击平衡重计算按钮调用计算模块,计算结果便显示出来.最后通过校核验证模块判断计算结果是否满足要求.通过实例得出计算结果与实例塔机说明书给出的结果相差很小.实例塔机说明书的平衡重为 13 400 kg,与本系统的计算结果差距为 214 kg,这主要是系统模型简化计算误差所致.

## 5 结论

本文研究开发出一套适合实际应用、简洁、方便的塔式起重机平衡重参数化计算系统.

1)本系统在设计方面考虑了多种臂长的工作状态,计算方法符合《塔式起重机设计规范》,并且具有人机交互功能,实用性强.

2)本系统采用 VB 对 Pro/E 进行二次开发,并结合 VB 建立塔机的参数化模型.整个操作过程通过参数赋值进行模型再生、自动装配、数值提取,提高了塔机设计效率和计算的准确性.

3)通过具体的实例验证,系统能够可靠地运行,并且计算结果与实际计算值基本吻合,可用于产品的设计计算.

## 参考文献:

- [1] 杜波,陈世教.塔式起重机计算机辅助设计的研制及程序系统实现[J].建筑机械,2009(1):81.
- [2] 辛虹.系列零部件三维参数化设计方法研究[J].机械设计与制造,2013(4):202.
- [3] 王良文,王雷.塔式起重机参数化设计[J].工程机械,2008(12):21.
- [4] 王良文,王雷,赵北辰,等.基于 VB 的塔机参数化设计[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2010,25(1):76.
- [5] 王良文,王雷,赵北辰,等.参数化塔机模型有限元分析中的接口技术[J].工程机械,2010(41):35.
- [6] GB/T 13752—92,塔式起重机设计规范[S].
- [7] 王积永,宋世军.塔式起重机平衡重的确定及起升特性的调整[J].工程机械,2000(2):22.
- [8] 范俊祥.塔式起重机[M].北京:中国建材工业出版社,2004.
- [9] 张长富,陈华.Visual Basic 6.0 中文版入门图解教程[M].北京:北京希望电子出版社,1999.
- [10] 张继春.Pro/ENGINEER 二次开发实用教程[M].北京:北京大学出版社,2002.

# X型方钢管节点平面内受弯性能研究

陈栋芬, 陈誉

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:**为考察X型方钢管节点在平面内弯矩作用下的静力性能,通过ABAQUS进行建模及非线性有限元计算,结合验证性试验,对节点的破坏模式、应变强度发展过程、极限承载力进行研究,并讨论轴力和平面内弯矩联合作用对节点极限承载力的影响.结果表明:节点在平面内弯矩作用下,发生弦杆受拉侧鼓凸,受压侧凹陷,腹杆受拉侧焊缝被拉开;节点弦杆最先进入塑性,最终由于塑性变形过大而导致试件破坏;试件极限承载力随着 $\beta$ 值的增大而增大;在轴力和平面内弯矩联合作用下,节点的受弯极限承载下降.

**关键词:**X型方钢管节点;平面内受弯性能;有限元分析

**中图分类号:**TU392.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.014

## Study on in-plane bending property of SHS X-joints

CHEN Dong-fen, CHEN Yu

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to investigate the static behavior of SHS (square hollow section) X-joints under in-plane bending, geometry model and non-linear finite element analysis were carried out using ABAQUS software. Combining with verifying experiment, the failure mode, deformation process and ultimate capacity of SHS X-joints were investigated, the effect of joint action between axial force and bending moment on the ultimate bearing capacity was also discussed. The results showed that, under in-plane bending, tension side of chord protruded, compression side sunk, and the welds in tension side of brace failed. Node chord entered a plastic phase and finally the sample failed due to large plastic deformation. The ultimate capacity increased remarkably as  $\beta$  value increased. Under the joint action between axial force and bending moment, the ultimate bearing capacity decreased.

**Key words:** SHS (square hollow section) X-joints; in-plane bending property; finite element analysis

## 0 引言

近年来,方钢管节点以其质量轻,外形美观,传力明确,抗压、弯、扭性能良好,易于加工,有利于快速施工等特点而广泛运用于土木工程中.在受力方面,弯矩作用常被作为次要受力情况而得不到足够的重视.在国内的规范中<sup>[1]</sup>,钢管相贯节点大多被

当做平面的或空间铰接杆件体系考虑,这虽然能满足工程精度要求,但是现实中,往往出现需要考虑节点抗弯性能的情况.目前国内外已对钢管相贯节点的平面内抗弯问题进行了大量的研究<sup>[2-5]</sup>.武振宇等<sup>[6]</sup>根据节点抗弯的塑性铰线模型,得出了节点承载力公式.王伟等<sup>[7]</sup>从节点抗弯刚度和承载力2个方面进行参数分析并论述了计算公式建立的理

收稿日期:2013-08-07

基金项目:福建省自然科学基金面上项目(2012J01219)

作者简介:陈栋芬(1989—),男,福建省泉州市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为钢结构.

论基础. 吴颖等<sup>[8]</sup>则对方支管与H型钢主管连接节点的轴压性能进行数值分析. 相比平面节点, 空间相贯节点构造复杂, 空间组合形式多样, 刚度特征、极限承载力、极限破坏模式等均展现出复杂的三维非线性特征, 这使得相贯节点的刚度研究方面仍有许多工作要做.

本文拟采用 ABAQUS 有限元分析方法, 从节点破坏模式、应变强度发展过程、极限承载力等方面对方钢管节点平面内受弯性能进行研究, 并简要讨论轴力和平面内弯矩联合作用对节点受弯极限承载力的影响. 将分析结果与试验结果进行对比, 以验证有限元分析方法的可行性.

## 1 有限元分析概况

### 1.1 有限元模型

有限元模型如图 1 所示, 为了便于与试验结果比较, 消除端部加载条件对节点区域的影响, 模型尺寸与试验试件一致, 图 2 为模型与试件的尺寸示意图. 模型与试件尺寸见表 1.

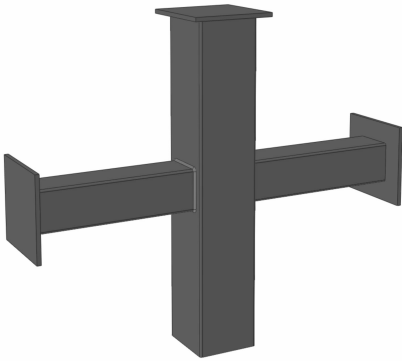


图 1 有限元模型

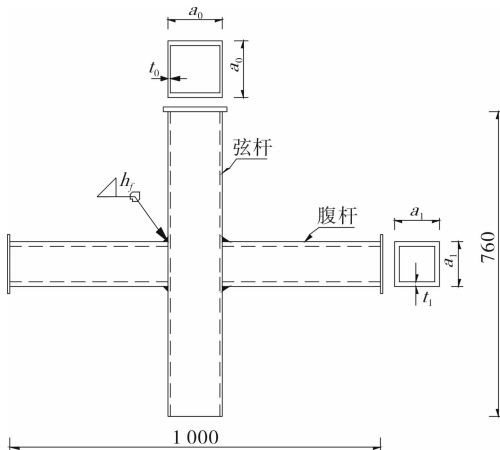


图 2 模型与试件尺寸示意图/mm

表 1 模型与试件尺寸表

试件编号	$a_0/\text{mm}$	$t_0/\text{mm}$	$a_1/\text{mm}$	$t_1/\text{mm}$	$\beta$	$\tau$
IPN08	150	6	80	5	0.533	0.83
IPN10	150	6	100	5	0.667	0.83
IPN12	150	6	120	5	0.800	0.83

注:  $\beta = a_1/a_0$ ;  $\tau = t_1/t_0$ .

本文有限元实用性分析在建立实体有限元分析模型时考虑了实际焊缝的存在, 对节点的连接焊缝进行了模拟, 建立了实体角焊缝模型, 焊缝高度同实际测量结果, 焊缝强度同母材. 同时本文还考虑了残余应力的影响: 横向残余应力在钢管相贯线处呈周期性拉压间分布; 纵向残余应力除了在焊缝端部有较小的压应力外, 其余均为拉应力; 等效残余应力沿焊缝相贯线分布呈周期变化, 应力最大值出现在每一焊缝段的中心.

### 1.2 材性试验

采用 ABAQUS 建模时, 材料特性由标准拉伸试验确定, 测试方法依据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)<sup>[9]</sup>的有关规定进行, 材性试验试件示意图见图 3, 测得荷载位移曲线见图 4. 屈服强度  $f_y$  和抗拉强度  $f_u$  见表 2, 弹性模量  $E$  与泊松比取经验值.

### 1.3 试验加载装置

试验装置如图 5 所示, 装置为自平衡体系, 千斤顶对弦杆端部施加竖向推力, 在节点区产生平面内弯矩.

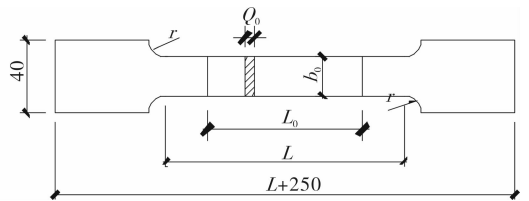


图 3 材性试验试件示意图/mm

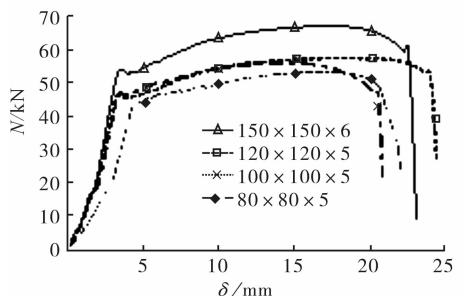


图 4 材性试验荷载位移曲线

表 2 钢材材料特性一览表

方钢管尺寸/ (mm × mm × mm)	屈服强度 $f_y$ /MPa	抗拉强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比
150 × 150 × 6	327	418	2.06 × 10 <sup>5</sup>	0.3
120 × 120 × 5	334	426		
100 × 100 × 5	350	421		
80 × 80 × 5	402	489		

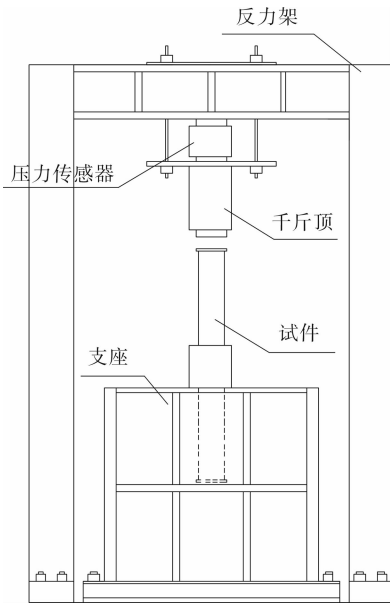


图 5 试验加载装置

图 6 为试验设备整体照片及试验流程示意图。整个试验系统包括:试验加载及测试系统、数据采集系统和监控系统。其框图和主要设备规格如下:主要设备及测试仪器型号:DH3816 数据采集系统;BF—120—2A 电阻应变计;YHD—50 型、YHD—30 型、YHD—100 型位移传感器;YQ—320 液压千斤顶、YQ—500 液压千斤顶、YQ—100 液压千斤顶。试验中位移传感器用万向磁性支架固定在不动体上。YHD—50 型和 YHD—100 型电子位移传感器灵敏度为 200  $\mu\epsilon$ /mm,最大量程为 50 mm 和 100 mm,精度达到 1  $\mu\epsilon$ 。YHD—30 型电子位移传感器灵敏度为 300  $\mu\epsilon$ /mm,最大量程为 30 mm,精度达到 1  $\mu\epsilon$ 。

### 1.4 网格划分

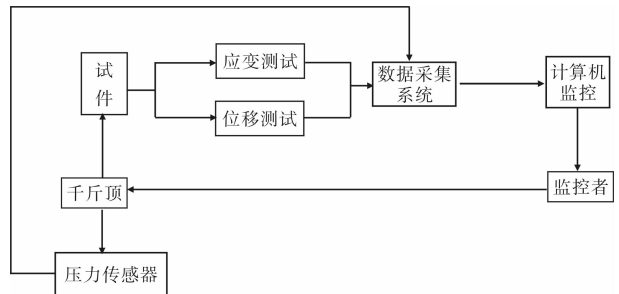
在进行管节点的有限元模拟时,单元类型采用八节点线性六面体非协调单元(C3D8I),非协调单元的计算精度与二次单元十分接近,对位移求解的结果也较为精确,且有利于观察节点应力发展<sup>[10-11]</sup>。

网格划分采用结构化网格划分技术。网格密度的控制非常重要,经验表明,采用不同精度的网格

划分方式,有限元的计算精度和计算时间也大不相同。当采用较稀疏的网格时,能够大大减少计算的时间,但是同时会使计算精度降低。故网格划分时,为得到较理想的计算精度并尽量节约时间,对网格部分加密。在进行网格划分时,相贯区域的主管和支管的网格划分较密,对于节点的其余部分网格划分较稀疏,这样可以在保证结果精度的情况下大大降低计算成本。采用此网格划分方法得到的节点如图 7 所示,单元总数为 14 584 个。



a) 试验设备照片



b) 试验流程示意图

图 6 试验系统

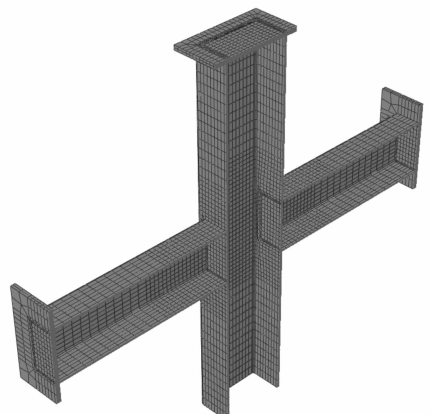


图 7 节点有限元网格

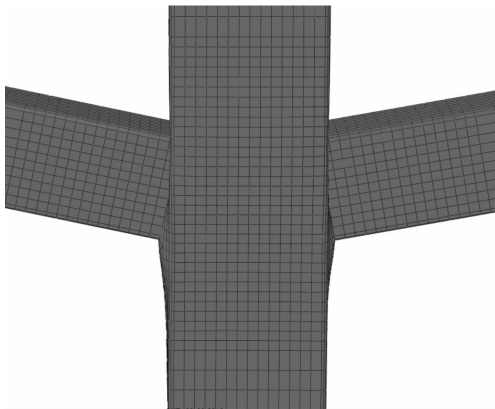
## 2 有限元结果及试验验证

### 2.1 破坏模式分析

通过 ABAQUS 的模拟得出 3 个试件的破坏现象均相同,如图 8 所示. X 型方钢管节点在平面内弯矩作用下,主要发生弦杆受拉侧鼓凸,受压侧凹陷. 通过与文献[12]中的试验现象比对,可以发现有限元模拟与试件实际破坏现象较为吻合. 试验在加载末期均是由于腹杆根部焊缝开裂导致终止加载,因为腹杆根部焊缝位于节点区,因此可以认为焊缝破坏即该节点的破坏. 从试件破坏模式上看,本次试验并未发生翘曲破坏,主要原因在于:翘曲破坏主要发生在受弯构件两端有比较强的约束情况(如梁柱节点中),而本文试件主管径向刚度较小,破坏部位主要为主管表面. 由于焊缝开裂的成因众多,且基于 ABAQUS 的连续介质分析,本文未对焊缝开裂情况进行模拟.

### 2.2 试件应力分布

图 9 为试件破坏阶段应力云图,由图 9 可以看出:腹杆远离相贯处的区域,应力较小且分布均匀,腹杆根部应力较大;弦杆靠近相贯处及支座部位,



a) 有限元



b) 试验

图 8 破坏现象

应力较大. 弦杆的应力比腹杆大,应力最大值也发生在弦杆,故试件的破坏模式以弦杆破坏为主.

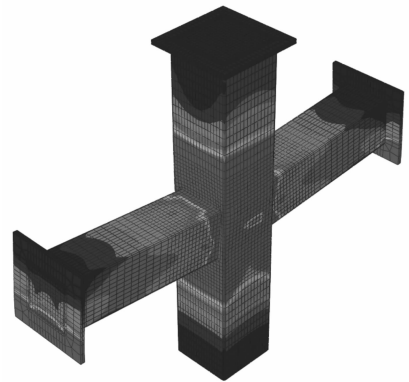
### 2.3 荷载应变曲线

通过分析测点应变的数据,可以了解腹杆根部截面、弦杆相贯区的应变强度变化和分布规律,用来研究节点域在平面内弯曲荷载作用下的塑性发展及破坏机理.

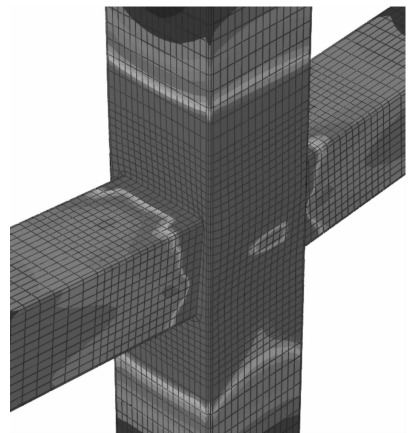
由图 10 测点的应变曲线可知:最先进入塑性的测点总是出现在弦杆受压一侧的测点中,而破坏时应变最大的位置出现在弦杆受拉侧,腹杆进入塑性的测点较少,在进入塑性的测点中,多出现在受拉侧. 可以认为试件进入屈服的顺序及塑性发展如下:首先在弦杆相贯区受压侧出现屈服,随着荷载的增加弦杆受拉区也出现屈服并进入塑性.

### 2.4 承载力比较

将模拟值和试验值与 Eurocode3<sup>[13]</sup> 以及 IIW<sup>[14]</sup> 中 X 型方钢管受平面内弯矩作用承载力设计计算公式进行比对,比对结果见表 3.



a) 试件整体应力云图



b) 节点区应力云图

图 9 试件应力云图

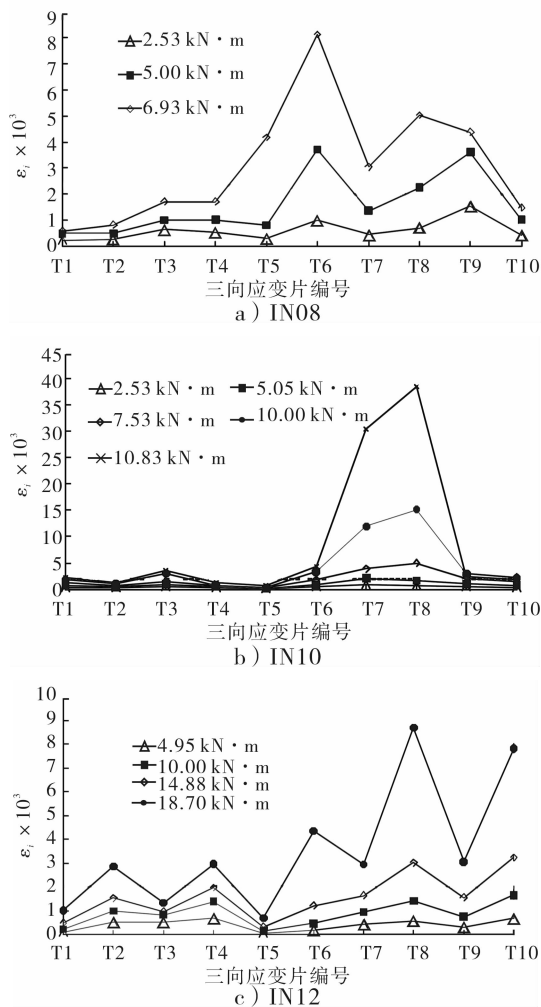


图10 测点应变强度曲线

表3 试件极限承载力计算值与模拟值比对照表

试件名称	Eurocode3 计算值	IIW 计算值	极限承载力模拟值	极限承载力试验值
IN08	2.65	4.82	6.81	6.93
IN10	5.23	7.47	10.33	10.83
IN12	10.50	13.13	18.69	18.70

通过试件极限承载力模拟值与规范承载力计算值的比对,可以看出模拟值与IIW规范的计算结果最为接近;Eurocode3规范计算值较为保守,并且与模拟值相差较大.从表3还可以看出随着 $\beta$ 值的增大,试件的极限承载力增大.

实际工程中出现的受力情况并非单一的平面内受弯,往往由几种不同的受力情况联合作用,导致试验极限承载力与实际工程相差很大的情况.对此,本文将通过有限元模拟简要的讨论轴力和平面内受弯联合作用对X型方钢管节点受弯极限承载

力的影响.

加载方式如图11,通过 $F_1$ 施加平面内弯矩, $F_2$ 施加腹杆轴力.轴力和平面内弯矩共同作用下的荷载位移曲线如图12所示.由图可以看出,随着所施加在腹杆的轴力变大,节点的受弯极限承载力变小.这是因为在加载过程中,随着弦杆变形,施加在腹杆的轴力将对节点产生附加弯矩,使节点提前进入破坏,降低了节点的受弯极限承载力.

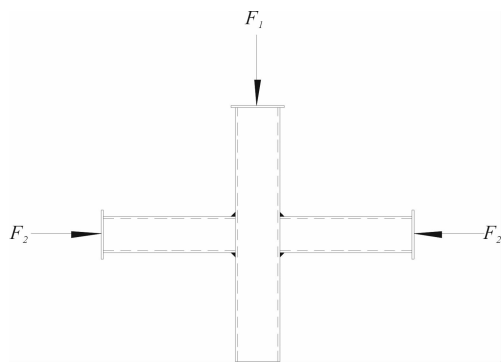


图11 联合作用加载示意图

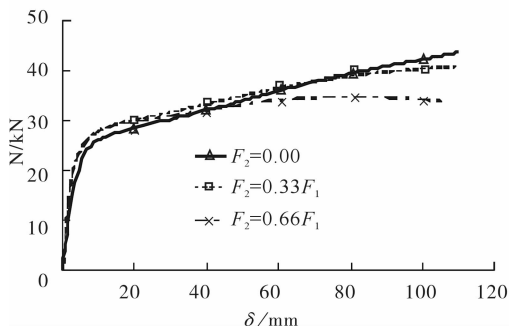


图12 联合作用荷载位移曲线

### 3 结论

本文运用有限元软件ABAQUS对X型方钢管节点平面内受弯进行建模和计算,并与相应的试验结果进行比对,讨论了轴力和平面内受弯联合作用对X型方钢管节点极限承载力的影响,得到了以下结论:

1) 试件在平面内弯矩作用下,破坏模式为:弦杆受拉侧鼓凸,受压侧凹陷,破坏发生在弦杆相贯部位,腹杆无明显破坏现象.

2) 试件从屈服到破坏的全过程,弦杆相贯区受压侧首先出现屈服,随着荷载的增加弦杆受拉区也出现屈服并进入塑性,最终由于塑性变形过大而导致试件破坏.

(下转第76页)

# 星载机箱结构设计及力学分析

高志巧

(中国电子科技集团公司 第27研究所, 河南 郑州 450047)

**摘要:**为提高星载设备可靠性,根据航天产品特点,采用拼接箱体,内装9个屏蔽盒,其上内装1个印制板,对某星载机箱进行结构设计.对设备进行冲击响应谱和随机振动的力学分析,结果表明箱体强度满足要求,设备未出现裂纹、继裂问题.力学试验验证了其结构合理,强度可靠.

**关键词:**星载机箱结构设计;箱体力学强度;冲击响应谱;随机振动

**中图分类号:**TN03 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.015

## Structural design and mechanical analysis for spaceborne cabinet

GAO Zhi-qiao

(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** In order to enhance the reliability of spaceborne equipment, structural design was made for the spaceborne cabinet based on the characters of spacecraft products. Adopting splicing enclosure, built-in 9 shielding box, it's built-in one print. Mechanical analysis of shock response spectrum and random vibration at the design phase were carried out. The results showed that the strength of the equipment was sufficient, without crack and fracture, the structural form was validated reasonable and the structural strength was validated reliable through mechanical experiments.

**Key words:** spaceborne cabinet structural design; cabinet mechanical strength; shock response spectrum; random vibration

## 0 引言

随着卫星的应用和发展,对星载设备的可靠性、精确性以及使用寿命的要求越来越高<sup>[1]</sup>.对星载设备来说,振动常常会导致电子元器件的失效或损坏、电子线路的短路或断路、接插件松动等环境效应.在振动所引起的机械力作用下,当设备的固有频率与振动频率一致时,会引起共振<sup>[2]</sup>.由于机箱应用环境极为恶劣,在其结构上必须采取一系列的加固措施,尽量避免或减小由于高低温、振动冲击、电磁干扰等不利因素对电气性能造成的影响.机箱结构的力学分析对于提高产品的环境适应

性起着举足轻重的作用,它不仅有助于在产品研发阶段寻找最优化的解决方案,而且能明显缩短产品研制周期、降低生产成本、确保产品质量,同时可产生显著的经济效益<sup>[3]</sup>.

近年来,星载机箱的结构形式已基本确定.本文拟设计一个结构合理、满足质量、体积尽量小的星载机箱,并进行力学分析,以确保设备的高可靠性.

## 1 星载机箱结构设计

### 1.1 机箱主结构及结构布局

星载机箱的主结构为一拼接的箱体,内装9个

收稿日期:2013-09-16

作者简介:高志巧(1981—),女,河南省许昌市人,中国电子科技集团公司第27研究所助理工程师,主要研究方向为电子(电气)设备结构.

屏蔽盒,每个屏蔽盒内装 1 个印制板,9 个屏蔽盒的印制板固定于底部母板的插座上.母板固定于箱体底板上,箱体底板上部设计加强筋,母板与底板之间采用 11 个 M3 螺钉连接,以提高母板强度.机箱的一个侧面安装电连接器.该星载机箱的结构外形如图 1 所示.9 个屏蔽盒包括 2 个电源模块,2 个信息处理模块,5 个光电接收模块,其内部结构布局如图 2 所示.质量较大的电源模块、信息处理模块布于箱体两侧.对称分布的结构形式振动时受力均匀,且质量大的模块靠近两侧,这个结构形式可提高箱体的整体结构强度<sup>[4]</sup>.

机箱主结构件材料根据需要选用 2A12 铝合金.铝合金 2A12 具有较高的硬度和强度,且密度在金属材料中偏小,可保证结构件不变形,并且质量较轻<sup>[5]</sup>.

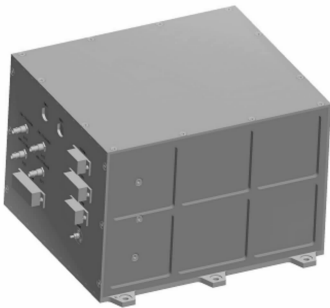


图 1 机箱结构外形图

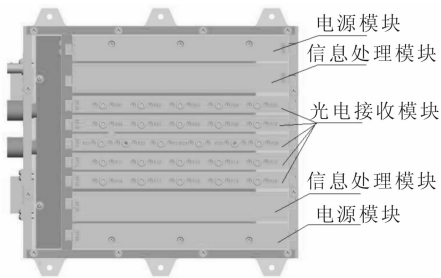


图 2 机箱内部布局图

### 1.2 箱体结构设计

机箱的箱体采用拼接的方式组成.拼接处由螺钉螺装连接,星载螺钉选用航天局指定厂家生产的钛合金螺钉,并涂胶连接以增强其连接可靠性.机箱箱体的各个零件之间相互咬合:底板和盖板的基板厚度为 3 mm,与机箱侧板贴合面内侧均设计有 5 mm 高的凸台,形成一周;机箱侧板之间,如图 2 所示,形成咬和结构.这种设计方法既确保箱体足够的强度,又保证机箱各个板块之间的缝隙非直通箱体内部,可滤去大部分波段的电磁波,增强其电磁

屏蔽性能.箱体底面平坦,对粗糙度、平面度均有较高的要求,应保证箱体底面与舱内安装面接触良好,这有利于机箱整体散热.箱体底板面积较大,为保证箱体底面平面度和粗糙度,在底板加工时厚度保留正差,进行研磨保证零件平面度、粗糙度,并在箱体完成装备并胶粘固封完成后,对整个箱体的底面进行二次研磨,消除底板与其他侧板连接的螺钉产生的应力对底面平面度的影响.

箱体除安装电连接的侧面和安装屏蔽盒导轨的侧面外,另 2 块侧面为提高其力学强度,设计加强筋,如图 1 所示.这 2 个侧面的加强筋保留在箱体外部,既提高力学强度,又增大箱体外部散热面积,且增强设备的美观性.

### 1.3 屏蔽盒结构设计

机箱屏蔽盒与箱体的导轨之间的固定方式为楔形锁紧机构.这种锁紧机构固定的方式常用于屏蔽盒或印制板的固定,其优点是可提高所固定件的强度,提高其抗振性能,且固定件拆卸方便.

屏蔽盒内装印制板,电源模块和信息处理模块.内印制板尺寸为 200 mm × 130 mm × 2 mm,印制板尺寸较大,只边缘固定时印制板中部振动时位移偏大,存在振动风险,故在屏蔽盒中间增加 2 个凸台固定印制板中部.屏蔽盒的底部和侧面为同一零件加工形成,非拼接盒体.屏蔽盒盖板与盒体螺装连接.这种结构形式力学性能强,且相对于拼接盒体,侧面与底面之间不存在缝隙,屏蔽盒的电磁屏蔽性能好.屏蔽盒盒体结构如图 3 所示.为提高印制板刚性,在元器件较少的电源板上安装一块铝板作为冷板,元器件通过导热绝缘垫与冷板接触并穿过印制板,在印制板背部焊接固定元器件管腿.这种形式既增加印制板强度,又有利于印制板上热耗较大的元器件散热.调试完成后,印制板元器件使用硅橡胶进行灌封.



图 3 屏蔽盒盒体结构图

### 1.4 其他设计

屏蔽盒通过 6 个凸耳与卫星安装面固定连接,安装孔径大小为 5.5 mm,采用 6 个 M5 螺钉连接,



凸耳形式如图 1 机箱机构外形图所示。

机箱表面作黑色阳极氧化处理,提高其辐射和热交换率;底面与卫星载荷舱的安装面良好接触,提高导热效率;在机壳侧面开减轻槽,增加其侧面表面积,加强辐射散热<sup>[6]</sup>。

## 2 星载机箱力学分析

对星载机箱进行力学分析,其力学试验包括模态分析、静力加速度、冲击响应谱、正弦振动、随机振动。模态分析是其他分析的先决条件,且可以通过模态分析确定结构的固有频率和固有振型,在 6 个安装孔上添加固定约束后,对机箱进行模态分析。其各阶模态见表 1。动力分析中,冲击响应谱和随机振动产生的应力较大,其振动风险也较大,故对该星载机箱进行 3 个轴向的冲击响应谱和随机振动应力分析,其振动条件见表 2(其中,每个轴向 3 次,试验持续时间 $\leq 20$  ms)和表 3(均方根加速度为 12.81 Grms,持续时间为 2 min)。

表 1 机箱模态分析结果

第 N 阶模态	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	431.1	431.6	605.8	677.5	677.8	847.2

表 2 冲击响应谱试验条件

频率范围/Hz	100 ~ 500	500 ~ 3 000
响应谱值/g	301	600

表 3 随机振动试验条件

频率范围/Hz	10 ~ 100	100 ~ 600	600 ~ 2 000
功率谱密度/( $g^2 \cdot Hz^{-1}$ )	0.020 2	0.200 0	0.005 5

对星载机箱的模型进行简化,导入力学分析软件 ANSYS,对 6 个安装孔添加固定约束,依次在 X, Y, Z 这 3 个轴向施加表 2 中载荷,进行冲击响应谱分析。计算结果见图 4—图 6。X 向冲击作用下最大变形量为 1.62 mm,最大应力为 54.8 MPa;Y 向冲击作用下最大变形量为 0.67 mm,最大应力为 180.1 MPa;Z 向冲击作用下最大变形量为 0.79 mm,最大应力为 40.3 MPa,它们均小于铝合金的许用应力 420 MPa,印制板的许用应力 340 MPa,满足强度要求。

对 6 个安装孔添加固定约束,依次在 X, Y, Z 这 3 个轴向施加表 3 中载荷,进行随机振动分析,计算结果见图 7—图 9。X 向振动作用下最大变形量为 0.67 mm,最大应力为 23.5 MPa;Y 向振动作用下最大变形量为 0.23 mm,最大应力为 61.9 MPa;Z 向振动作用下最大变形量为 0.37 mm,最大应力为

18.7 MPa。它们均小于铝合金的许用应力 420 MPa,印制板的许用应力 340 MPa,满足强度要求。

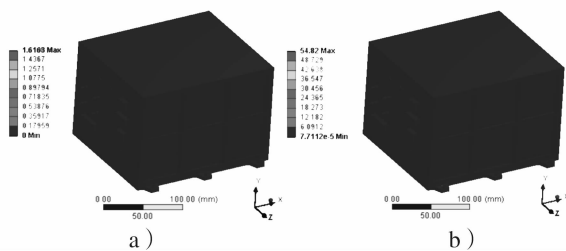


图 4 X 向冲击变形及应力图

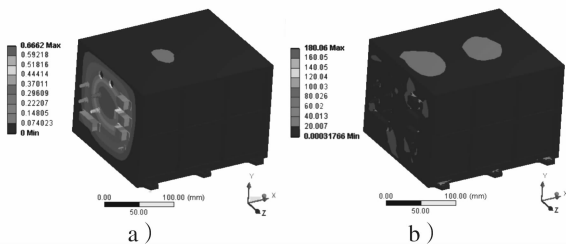


图 5 Y 向冲击变形及应力图

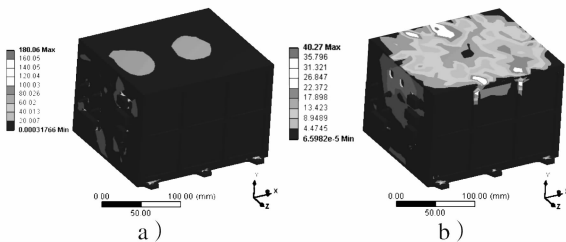


图 6 Z 向冲击变形及应力图

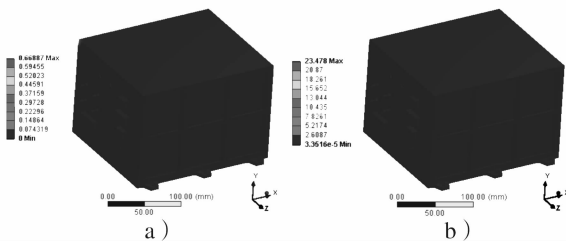


图 7 X 向随机振动变形及应力图

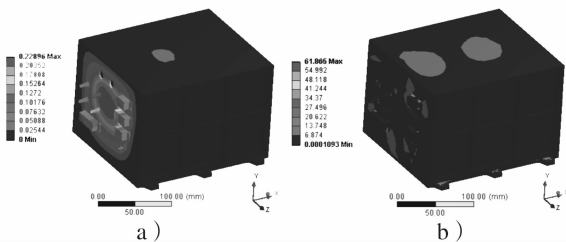


图 8 Y 向随机振动变形及应力图

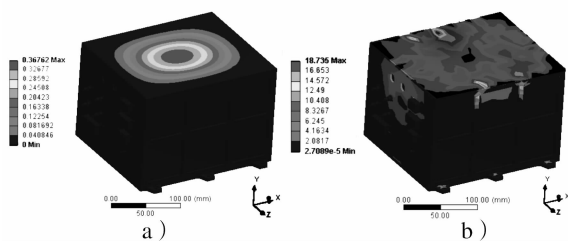


图9 Z向随机振动变形及应力图

### 3 试验验证

对星载机箱做力学试验,设计其振动架.机箱通过6个安装孔固定于振动架上,振动架与振动台螺栓连接.振动架为25 mm厚铝板,上下2面加工平整,此种振动架用于正弦振动、随机振动.振动台分为水平振动台和竖直振动台,水平振动台用于X向、Y向振动试验,竖直振动台用于Z向振动试验.静力加速度、冲击响应谱所需振动架分为水平和竖直2种,水平振动架同为25 mm铝板,竖直振动架为常用的倒T型振动架,由铝板焊接成形,机箱悬挂安装.将振动架和设备固定于振动台面上,加载力学试验条件,进行力学试验.目前该星载机箱已通过所有力学试验,未出现裂纹、断裂等问题,设备工作正常,指标测试正常,这验证了其足够的力学可靠性.

### 4 结论

本文根据航天产品的特殊性,对星载机箱进行

了结构设计和力学分析,所作的工作及结论如下:

1)对星载机箱的主结构、箱体、屏蔽盒等进行了结构设计,并论述了所采用的结构形式的优点.

2)对星载机箱进行了力学分析,分析类型包括冲击响应谱和随机振动各3个轴向方向,分析证明所设计的结构合理,满足强度要求.

3)星载设备顺利通过了力学振动试验,验证了结构的可靠性.

航天产品的不可维修性和恶劣的环境,对航天产品的可靠性提出了较高的要求.在航天产品的结构设计阶段,需进行全方面的设计研究,且进行力学分析,将力学分析结果与试验结果进行比较,从而为设计优化提供依据,今后要加强这方面的研究.

### 参考文献:

- [1] 陈烈民. 航天器结构与机构[M]. 北京:中国科学技术出版社,2008.
- [2] 范文杰. 星载电子设备宽频随机振动响应分析[J]. 电子机械工程,2010,26(4):5.
- [3] 杨宇军. ANSYS动力学仿真技术在航天计算机机箱结构设计中的应用[J]. 电子机械工程,2003,19(5):42.
- [4] 李勇. 星载信息处理机的热设计与分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2007,22(4):75.
- [5] 曾斌. 航天电子设备的结构设计[J]. 电子机械工程,2008,24(5):5.
- [6] 何菊. 某星载电子设备结构设计简述[J]. 中国科技信息,2010(5):45.

# 基于螺旋理论的3-RRS并联 机器人运动学分析

毕亚东

(安徽国防科技职业学院 机械工程系, 安徽 六安 237011)

**摘要:**提出了一种新的3-RRS并联机器人运动学分析方法:应用螺旋理论建立了螺旋和反螺旋模型,通过模型分析得其运动自由度与Kutzbach Grubler公式计算结果一致;推导了并联机器人的位置正反解模型,用仿真软件Matlab中牛顿迭代法进行了先正解后反解和先反解后正解计算,验证了数值的正确性.该方法同样适用其他并联机器人,具有应用价值.

**关键词:**螺旋理论;并联机器人;运动学分析;正反解;运动自由度

**中图分类号:**TP24 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.016

## Kinematics analysis of the 3-RRS parallel robot based on screw theory

BI Ya-dong

(Department of Mechanical Engineering, Anhui Vocational College of Defense, Liuan 237011, China)

**Abstract:** A new type of 3-RRS parallel robot kinematics analysis method was proposed. Based on the screw theory, a 3-RRS parallel robot kinematics and anti-helix spiral model was established, obtaining the freedom of movement through the model analysis and Kutzbach Grubler calculated results, deriving a parallel position of the robot inverse solution models. Using Newton's iterative method of simulation software Matlab, the first positive solution and then inverse solution and then inverse solution after the first positive solution were calculated to verify the numerical accuracy. The 3-RRS method also applied to other parallel robots, and had application value.

**Key words:** screw theory; parallel robot; kinematics analysis; positive and inverse solution; freedom of movement

## 0 引言

1980年代以来,各国的并联机构研究者相继开展了少自由度并联机器人的研究,提出一些有应用价值的并联机构,比如DELTA机器人、5R并联机构、3-RPS机器人等<sup>[1-3]</sup>.与串联机器人比较,并联机器人具有结构稳定、刚度大、承载力强、精确度高

等优点,因此,并联机器人的研究受到国内外学者的广泛重视<sup>[4-5]</sup>.

并联机器人的运动特性决定了机器人的运动水平和应用范围,因此并联机器人的运动学分析非常重要.文献[3]针对新型4-RUP<sub>a</sub>R和4-RUPR并联机器人机构进行了运动学分析,计算了自由度,讨论了输入选取的合理性,并进行了速度和加速度的正解分析.文献[6]对3-RRR平面微动机

收稿日期:2013-09-13

作者简介:毕亚东(1981—),男,陕西省宝鸡市人,安徽国防科技职业学院讲师,硕士,主要研究方向为机械设计及其理论.

机器人进行了动力学分析,得到了理论的 Jacobian 矩阵,后用实验方法和 ANSYS 有限元方法分别得到了实验和有限元运动方程,并与理论方程进行了误差比较. 文献[7]通过对 3-RRS 并联机器人建立支链动力学模型,进行动力学分析,取得系统的弹性动力学方程,分析了系统固有频率与机构基本参量之间的关系. 文献[8]对 3-RRS 并联机器人运用 Lagrange 方程导出其动力学模型,并分析了动力学特性. 文献[9]对 3-RRS 并联机器人位姿运动特点进行了分析,并以工作行程和全域条件数作为目标,优化了机构参数. 文献[10]对一种新型的 3-RRUR 并联机器人进行了运动学分析,并通过运动学分析给出了合理的驱动方案和进行了运动学正反解的理论和实验研究.

并联机器人的运动学分析对于了解机器人机构的运动情况非常重要,而应用螺旋理论进行 3-RRS 并联机器人运动学分析方面的研究在公开发表的学术文献中还未见到. 鉴于此,本文拟应用螺旋理论对 3-RRS 并联机器人进行运动学分析.

### 1 运动自由度分析<sup>[10-11]</sup>

#### 1.1 3-RRS 并联机器人坐标系的建立

如图 1 所示,3-RRS 并联机器人共有 3 个分支构成,各分支有 2 个转动副和 1 个球面高副构成,上下平台为等边三角形,外接圆半径为  $r$  和  $R$ ,下平台  $ABC$  为基平台(固定不动),上平台  $abc$  为动平台.

基坐标  $O-XYZ$  固定在基平台  $ABC$  上,原点位于基平台  $ABC$  的中心, $X$  轴平行于  $BC$ , $Y$  轴由  $O$  到  $A$ , $Z$  轴沿基平台的法向向上;动坐标系  $o'-xyz$  在动平台  $abc$  上,原点位于动平台  $abc$  的中心, $x$  轴平行于  $bc$ , $y$  轴由  $o'$  到  $a$ , $z$  轴沿动平台的法向向上. 在分支  $Aa, Bb, Cc$  上分别建立分支坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1, O_2-X_2Y_2Z_2, O_3-X_3Y_3Z_3$ , 原点  $O_i$  位于点  $A, B, C$  处,分支坐标系的  $Z_i$  轴平行于基坐标系的  $Z$  轴, $Y_i$  轴指向  $\Delta ABC$  的形心, $X_i$  轴沿转动副的轴线方向.

#### 1.2 分支位置坐标

如图 2 所示,用  $Aa$  分支来阐释在正视图中的长度与角度的关系, $L_{ij}$  表示  $i$  分支中  $j$  杆件的长度, $\alpha_{ij}$  表示  $i$  分支中远离  $Y_i$  坐标轴的第  $j$  个角度( $i=1, 2, 3$ ), $Aa$  表示第 1 分支, $Bb$  表示第 2 分支, $Cc$  表示第 3 分支.

在分支坐标系  $O_i-X_iY_iZ_i$  中,各运动副节点在坐标系  $O_i-X_iY_iZ_i$  中的位置坐标分别为  $(0, 0, 0)$ ,  $(0, L_{i1} \cos \alpha_{i1}, L_{i1} \sin \alpha_{i1})$ ,  $(0, L_{i1} \cos \alpha_{i1} + L_{i2} \cos \alpha_{i2}, L_{i1} \sin \alpha_{i1} + L_{i2} \sin \alpha_{i2})$ .

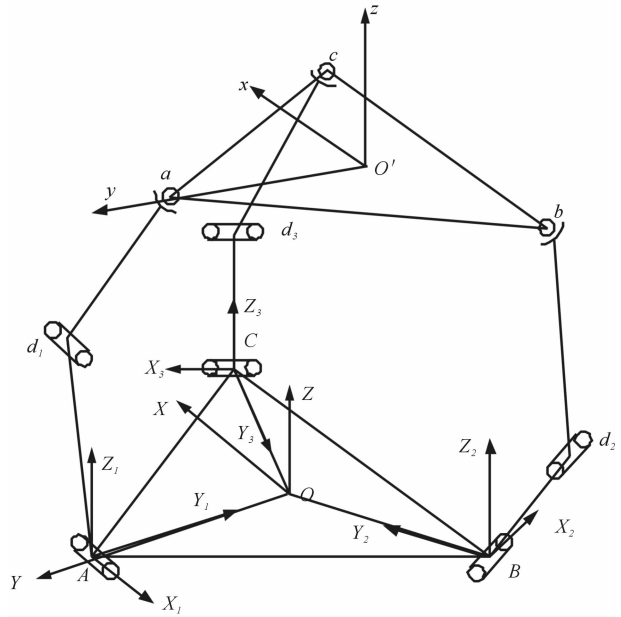


图 1 系统坐标系

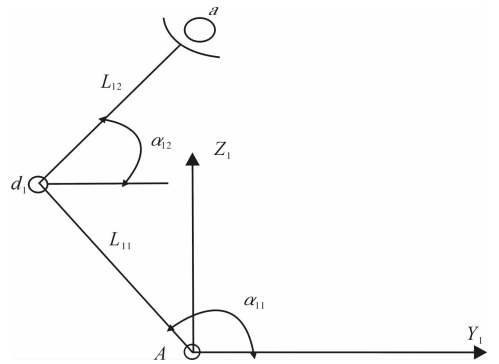


图 2  $Aa$  分支坐标系

坐标系  $O_i-X_iY_iZ_i$  与基坐标系  $O-XYZ$  之间的变换矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ t \end{pmatrix} = M_{oi} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ t_i \end{pmatrix}$$

其中

$$M_{o1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{o2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}R \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2}R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{03} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2}R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$i$  分支中,各运动副节点在坐标系  $O_i - X_i Y_i Z_i$  的位置坐标转换到基坐标系  $O - XYZ$  中可表示为

$$M = M_{O_i} M_{ij} \quad (1)$$

式中, $j$  为偏离  $Y_i$  轴的运动副节点, $i = 1, 2, 3$ .

把各分支中在坐标系  $O_i - X_i Y_i Z_i$  的运动副节点位置坐标代入式(1)中可以得到在基坐标系  $O - XYZ$  中的坐标分别如下.

$Aa$  分支:  $(0, R, 0), (0, Y_{12}, Z_{12}), (0, Y_{13}, Z_{13})$ .

其中

$$\begin{aligned} Y_{12} &= L_{11} \cos\alpha_{11} + R & Z_{12} &= L_{11} \sin\alpha_{11} \\ Y_{13} &= -L_{11} \cos\alpha_{11} - L_{12} \cos\alpha_{12} + R \\ Z_{13} &= L_{11} \sin\alpha_{11} + L_{12} \sin\alpha_{12} \end{aligned}$$

$Bb$  分支:  $(-\frac{\sqrt{3}}{2}R, -\frac{1}{2}R, 0), (X_{22}, Y_{22}, Z_{22}),$

$(X_{23}, Y_{23}, Z_{23})$ . 其中

$$\begin{aligned} X_{22} &= \frac{\sqrt{3}}{2}L_{21} \cos\alpha_{21} - \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ Y_{22} &= \frac{1}{2}L_{21} \cos\alpha_{21} - \frac{1}{2}R & Z_{22} &= L_{21} \sin\alpha_{21} \\ X_{23} &= \frac{\sqrt{3}}{2}L_{21} \cos\alpha_{21} + \frac{\sqrt{3}}{2}L_{22} \cos\alpha_{22} - \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ Y_{23} &= \frac{1}{2}L_{21} \cos\alpha_{21} + \frac{1}{2}L_{22} \cos\alpha_{22} - \frac{1}{2}R \\ Z_{23} &= L_{21} \sin\alpha_{21} + L_{22} \sin\alpha_{22} \end{aligned}$$

$Cc$  分支:  $(\frac{\sqrt{3}}{2}R, -\frac{1}{2}R, 0), (X_{32}, Y_{32}, Z_{32}),$

$(X_{33}, Y_{33}, Z_{33})$ . 其中

$$\begin{aligned} X_{32} &= -\frac{\sqrt{3}}{2}L_{31} \cos\alpha_{31} + \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ Y_{32} &= \frac{1}{2}L_{31} \cos\alpha_{31} - \frac{1}{2}R & Z_{32} &= L_{31} \sin\alpha_{31} \\ X_{33} &= -\frac{\sqrt{3}}{2}L_{31} \cos\alpha_{31} - \frac{\sqrt{3}}{2}L_{32} \cos\alpha_{32} + \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ Y_{33} &= \frac{1}{2}L_{31} \cos\alpha_{31} + \frac{1}{2}L_{32} \cos\alpha_{32} - \frac{1}{2}R \\ Z_{33} &= L_{31} \sin\alpha_{31} + L_{32} \sin\alpha_{32} \end{aligned}$$

### 1.3 基于螺旋理论的运动自由度分析<sup>[12]</sup>

机构转动副螺旋可表示为  $R = (S; S_0)$  的形式,

$S$  为转动副旋转中心线的单位矢量,  $S_0 = r \times S$ , 为从基坐标系原点到该转动副轴线的矢量  $r$  与  $S$  的叉乘积. 关于反螺旋有以下 2 个命题:

**命题 1** 在三维空间中,线性无关的螺旋数目是 6,当螺旋系的线性无关的螺旋数目  $r < 6$  时,就有  $6 - r$  个反螺旋  $R'$ ,且反螺旋  $R'$  为约束反力.

**命题 2** 机构的公共约束可以定义为:一个机构的运动副均以螺旋表示时形成一个螺旋系,若存在与该螺旋系中每一螺旋均相逆的反螺旋时,这就是机构的一个公共约束,反螺旋数目就是公共约束数目.

为了方便用转动副螺旋来进行分析,对于并联机器人中的球面副  $S$  进行如下转化分析,由于球面副允许 2 个构件间具有 3 个独立的相对转动,具有 3 个相对自由度,因此可以把球面副螺旋表示成 3 个转动副螺旋,如图 3 所示(以  $Aa$  分支为例,其他分支相对转  $60^\circ$ ).

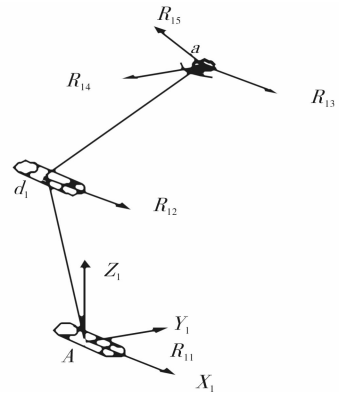


图 3  $Aa$  分支螺旋坐标系

$Aa(i = 1)$  分支中,所有运动副在基坐标系中的螺旋可以表示为

$$\begin{cases} R_{11} = (1, 0, 0; 0, 0, -R) \\ R_{12} = (1, 0, 0; 0, Z_{12}, -Y_{12}) \\ R_{13} = (\beta, 0, -\alpha; -\alpha Y_{13}, \beta Z_{13}, -\beta Y_{13}) \\ R_{14} = (0, -1, 0; -Z_{13}, 0, 0) \\ R_{15} = (\alpha, 0, \beta; \beta Y_{13}, \alpha Z_{13}, -\alpha Y_{13}) \end{cases}$$

式中, $\alpha, \beta$  分别是  $R_{15}$  与  $X_1, Z_1$  轴夹角的余弦,且  $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ .

$Aa$  分支的反螺旋为

$$R'_1 = (0, 0, 0; 0, 0, 0) \quad (2)$$

$Bb(i = 2)$  分支中,所有运动副在基坐标系中的螺旋可以表示为

$$\begin{cases} R_{21} = (\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}, 0; 0, 0, R) \\ R_{22} = (\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}, 0; \frac{\sqrt{3}}{2}Z_{22}, \frac{1}{2}Z_{22}, -\frac{\sqrt{3}}{2}X_{22} - \frac{1}{2}Y_{22}) \\ R_{23} = (\theta, \varphi, \lambda; \lambda Y_{23} - \varphi Z_{23}, \theta Z_{23} - \lambda X_{23}, \varphi X_{23} - \theta Y_{23}) \\ R_{24} = (-\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2}, 0; \frac{1}{2}Z_{23}, -\frac{\sqrt{3}}{2}Z_{23}, -\frac{1}{2}Z_{23} + \frac{\sqrt{3}}{2}Y_{23}) \\ R_{25} = (\chi, \varepsilon, \delta; \delta Y_{23} - \varepsilon Z_{23}, \chi Z_{23} - \delta X_{23}, \varepsilon X_{23} - \chi X_{23}) \end{cases}$$

式中,  $\chi = \frac{1}{2}\alpha$ ,  $\varepsilon = -\frac{\sqrt{3}}{2}\alpha$ ,  $\delta = \beta$ ,  $\theta = \frac{1}{2}\beta$ ,  $\varphi = -\frac{\sqrt{3}}{2}\beta$ ,  $\lambda = \alpha$ .

则第  $Bb$  分支的反螺旋为

$$R'_2 = (1, 1, 0; 0, 0, 1) \quad (3)$$

$Cc(i=3)$  分支中, 所有运动副在基坐标系中的螺旋可以表示为

$$\begin{cases} R_{31} = (\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0; 0, 0, R) \\ R_{32} = (\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0; -\frac{\sqrt{3}}{2}Z_{32}, \frac{1}{2}Z_{32}, \frac{\sqrt{3}}{2}X_{32} - \frac{1}{2}Y_{32}) \\ R_{33} = (\theta', \varphi', \lambda'; \lambda' Y_{33} - \varphi' Z_{33}, \theta' Z_{33} - \lambda' X_{33}, \varphi' X_{33} - \theta' Y_{33}) \\ R_{34} = (\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2}, 0; -\frac{1}{2}Z_{33}, \frac{\sqrt{3}}{2}Z_{33}, \frac{1}{2}Z_{33} - \frac{\sqrt{3}}{2}Y_{33}) \\ R_{35} = (\chi', \varepsilon', \delta'; \delta' Y_{33} - \varepsilon' Z_{33}, \chi' Z_{33} - \delta' X_{33}, \varepsilon' X_{33} - \chi' Y_{33}) \end{cases}$$

其中,  $\chi' = \frac{1}{2}\alpha$ ,  $\varepsilon' = \frac{\sqrt{3}}{2}\alpha$ ,  $\delta' = \beta$ ,  $\theta' = \frac{1}{2}\beta$ ,

$\varphi' = \frac{\sqrt{3}}{2}\beta$ ,  $\lambda' = -\alpha$ .

则  $Cc$  分支的反螺旋为

$$R'_3 = (1, 1, 0; 0, 0, 1) \quad (4)$$

由 ②③④ 可见 3 条支链共同对动平台施加了 3 个约束, 分别是沿  $X_i, Y_i$  方向的移动, 沿  $Z_i$  方向的约束力偶. 此反螺旋为一个力线矢, 且该力线矢过球副中心, 在  $Y_i Z_i$  平面内.

由 Kutzbach Grubler 公式, 该并联机构的自由度计算公式表示为

$$F = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (5)$$

式中,  $d$  为机构的阶数, 若  $\lambda$  为机构的公共约束数,  $d = 6 - \lambda$ ;  $n$  为杆件数;  $g$  为运动副数;  $f_i$  为第  $i$  个运动

副的自由度.

对于本文中的并联机器人机构,  $\lambda = 0, d = 6$ ,

$n = 8, g = 9, \sum_{i=1}^g f_i = 15$ , 将以上各数值代入式 ⑤ 得到机构的自由度  $F = 3$ , 与反螺旋分析结果吻合.

## 2 3 - RRS 并联机器人的位置正反解

### 2.1 位置正解

图 1 中 3 - RSS 并联机器人的上下平台以 3 个分支相连, 每个分支的两端分别是一个转动副和一个球铰, 中间是一个转动副, 驱动器推动转动副做相对转动, 改变杆件与下平台的夹角, 使上平台变化空间的位置和姿态. 3 - RRS 并联机器人的位置正解, 则已知 3 个驱动  $R$  副的输入角度  $\alpha_{1i} (i = 1, 2, 3)$ , 确定动平台的位姿.

点  $A, B, C$  在基坐标系  $O - XYZ$  中的位置矢量为

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}R \\ -\frac{1}{2}R \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ -\frac{1}{2}R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

点  $d_i (i = 1, 2, 3)$  在基坐标系  $O - XYZ$  的位置矢量为

$$d_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ Y_{12} \\ Z_{12} \end{bmatrix} \quad d_2 = \begin{bmatrix} X_{22} \\ Y_{22} \\ Z_{22} \end{bmatrix} \quad d_3 = \begin{bmatrix} X_{32} \\ Y_{32} \\ Z_{32} \end{bmatrix} \quad (7)$$

点  $a, b, c$  在动坐标系  $o' - xyz$  中的位置矢量为

$$a = \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}r \\ -\frac{1}{2}r \\ 0 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}r \\ -\frac{1}{2}r \\ 0 \end{bmatrix}$$

动平台上的原点  $O'$  在基坐标系中的位置矢量为

$$O' = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}$$

根据文献[9], 在动坐标系中的任一位置矢量可以通过如下的坐标变换方法变换到基坐标系中去.

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \mathbf{TR}' + \mathbf{O}' \\ \mathbf{T} = \begin{bmatrix} C\theta_z C\theta_y & C\theta_z S\theta_y S\theta_x - S\theta_z C\theta_x & C\theta_z S\theta_y C\theta_x + S\theta_z S\theta_x \\ S\theta_z S\theta_y & S\theta_x S\theta_y S\theta_z + C\theta_z C\theta_x & S\theta_z S\theta_y C\theta_x - C\theta_z S\theta_x \\ -S\theta_y & C\theta_y S\theta_x & C\theta_y C\theta_x \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{R}'$  表示点在动坐标系中的矢量形式,  $\mathbf{R}$  表示点在基坐标系中的矢量形式,  $C\theta = \cos\theta, S\theta = \sin\theta, \theta_x, \theta_y, \theta_z$  动平台的动坐标系相对于固定平台的基坐标系的3个独立的转角. 由于  $\theta_z = 0$ , 则矩阵  $\mathbf{T}$  可简化为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C\theta_y & S\theta_y S\theta_x & S\theta_y C\theta_x \\ 0 & C\theta_x & -S\theta_x \\ -S\theta_y & C\theta_y S\theta_x & C\theta_y C\theta_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

将⑥⑦式代入⑧⑨得点  $a, b, c$  在基坐标系中的坐标矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}' &= \begin{bmatrix} rS\theta_y S\theta_x \\ rC\theta_x \\ rC\theta_y S\theta_x + Z_p \end{bmatrix} \\ \mathbf{b}' &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}S\theta_y S\theta_x - \frac{\sqrt{3}}{2}rC\theta_x \\ -\frac{1}{2}C\theta_x \\ \frac{\sqrt{3}}{2}rS\theta_y - \frac{1}{2}C\theta_y S\theta_x + Z_p \end{bmatrix} \\ \mathbf{c}' &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}S\theta_y S\theta_x + \frac{\sqrt{3}}{2}rC\theta_x \\ -\frac{1}{2}C\theta_x \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}rS\theta_y - \frac{1}{2}C\theta_y S\theta_x + Z_p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

根据杆长约束条件, 可以得方程组

$$\begin{cases} \|\mathbf{a}' - d_1\| = L_{12} \\ \|\mathbf{b}' - d_2\| = L_{22} \\ \|\mathbf{c}' - d_3\| = L_{32} \end{cases} \quad (11)$$

将式⑦⑩代入式⑪后整理后得式⑫:

$$\begin{cases} (rS\theta_y S\theta_x)^2 + (rC\theta_x - Y_{12})^2 + (rC\theta_y S\theta_x + Z_p - Z_{12})^2 = L_{12}^2 \\ (-\frac{1}{2}S\theta_y S\theta_x - \frac{\sqrt{3}}{2}rC\theta_x - X_{22})^2 + (-\frac{1}{2}C\theta_x - Y_{22})^2 + (\frac{\sqrt{3}}{2}rS\theta_y - \frac{1}{2}C\theta_y S\theta_x + Z_p - Z_{22})^2 = L_{22}^2 \\ (-\frac{1}{2}S\theta_y S\theta_x + \frac{\sqrt{3}}{2}rC\theta_x - X_{32})^2 + (-\frac{1}{2}C\theta_x - Y_{32})^2 + (-\frac{\sqrt{3}}{2}rS\theta_y - \frac{1}{2}C\theta_y S\theta_x + Z_p - Z_{32})^2 = L_{32}^2 \end{cases}$$

式⑫为一个三元非线性方程组, 求解该非线性方程组是比较困难的, 但是利用牛顿迭代法来构造迭代函数  $G(X)$  却是非常的简便, 牛顿迭代式是

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n - [\mathbf{DF}(\mathbf{X}_n)]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{X}_n)$$

其中,  $\mathbf{DF}(\mathbf{X})$  称为  $\mathbf{F}(\mathbf{X})$  的 Jacobi 矩阵.

### 2.2 位置反解

3-RRS 并联机器人的位置反解就是已知动平台上的参考点  $O'$  和动平台的位姿角  $\theta_x$  和  $\theta_y$ , 求基平台的3个  $R$  副的输入角度  $\alpha_{1i} (i = 1, 2, 3)$ , 根据公式⑫, 可以求出3个  $R$  副的输入角度  $\alpha_{1i}$  构成的非线性方程组可以表示为

$$\begin{cases} f_1(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}) = 0 \\ f_2(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}) = 0 \\ f_3(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}) = 0 \end{cases}$$

记

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ f_3(X) \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{12} \\ \alpha_{13} \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

同样利用牛顿迭代法可以求出3个  $R$  副的输入角度  $\alpha_{1i}$ .

## 3 数值验证

### 3.1 求解方法

在 Matlab 中求解非线性方程组的函数名称是 *fsolve*, 使用的格式是

$$\mathbf{X} = \text{fsolve}('myfun, X_0, option)$$

其中,  $X_0$  为预估计值, *option* 为参数设置选项,  $\mathbf{X}$  为返回解, *myfun* 为定义求解非线性方程组的函数名, 可以表达为以下的形式

$$\text{Function } \mathbf{F} = \text{myfun}(\mathbf{X})$$

其中

$$\mathbf{F} = f(\mathbf{X})$$

可以选用的迭代法有牛顿迭代法、拟牛顿法、割线法和 Steffenson 法等, 这里选用牛顿迭代法来进行求解.

### 3.2 仿真求解

设3-RRS 并联机器人的结构参数  $L_{11} = L_{12} = L_{21} = L_{22} = L_{31} = L_{32} = 200, R = 200, r = 100$ . 在验证结果的时候, 采用先正解后反解, 即根据  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$  参数求解输出参数  $\theta_x, \theta_y, Z_p$ , 再根据求解出的

$\theta_x, \theta_y, Z_p$  参数反求  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$  参数, 然后把该输入参数与原输入参数进行偏差比较 (见表 1).

再采用先反解后正解, 即根据  $\theta_x, \theta_y, Z_p$  参数求

解输入参数  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$ , 再根据求解出的  $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$  参数反求  $\theta_x, \theta_y, Z_p$  参数, 然后把该输出参数与原输出参数进行偏差比较 (见表 2).

表 1 正解求出输出先正后反偏差比较

组别	输入参数	正解给定输入数值	输出参数	正解求出输出数值	反解求出输入数值	偏差
1	$\alpha_1$	70.000 000 0	$\theta_x$	12.560 407 6	69.999 976 5	-0.000 023 5
	$\alpha_2$	60.000 000 0	$\theta_y$	10.979 397 6	60.000 013 6	0.000 086 4
	$\alpha_3$	100.000 000 0	$Z_p$	318.345 889 7	100.000 009 7	0.000 009 7
2	$\alpha_1$	120.000 000 0	$\theta_x$	12.551 608 7	119.999 956 4	-0.000 043 6
	$\alpha_2$	40.000 000 0	$\theta_y$	10.971 445 6	39.999 908 7	-0.000 091 3
	$\alpha_3$	50.000 000 0	$Z_p$	315.972 476 5	50.000 074 3	0.000 074 3
3	$\alpha_1$	30.000 000 0	$\theta_x$	5.390 043 5	29.999 897 0	-0.000 103 0
	$\alpha_2$	40.000 000 0	$\theta_y$	5.535 398 6	40.000 007 8	0.000 007 8
	$\alpha_3$	60.000 000 0	$Z_p$	348.507 723 4	60.000 012 5	0.000 012 5

表 2 反解求出输入先反后正偏差比较

组别	输出参数	反解给定输出数值	输入参数	反解求出输入数值	正解求出输出数值	偏差
1	$\theta_x$	12.560 407 6	$\alpha_1$	69.999 909 7	12.560 412 5	0.000 004 9
	$\theta_y$	10.979 397 6	$\alpha_2$	60.000 086 5	10.979 390 7	-0.000 006 9
	$Z_p$	318.345 889 7	$\alpha_3$	100.000 009 0	318.345 879 2	0.000 010 5
2	$\theta_x$	12.551 608 7	$\alpha_1$	119.999 990 0	12.551 608 0	-0.000 000 7
	$\theta_y$	10.971 445 6	$\alpha_2$	40.000 008 6	10.971 449 7	0.000 004 1
	$Z_p$	315.972 476 5	$\alpha_3$	50.000 007 6	315.972 470 0	-0.000 006 5
3	$\theta_x$	5.390 043 5	$\alpha_1$	29.999 908 7	5.390 000 3	-0.000 043 2
	$\theta_y$	5.535 398 6	$\alpha_2$	40.000 008 6	5.535 398 9	0.000 000 3
	$Z_p$	348.507 723 4	$\alpha_3$	59.999 907 5	348.507 770 7	0.000 047 3

### 4 结论

本文提出了一种新的 3 - RRS 并联机器人运动学分析方法, 得出如下结论.

1) 基于螺旋理论分析了 3 - RRS 并联机器人的运动螺旋和反螺旋, 结果与 Kutzbach Grubler 公式计算结果相同.

2) 分析了该并联机器人的位置正反解, 并且利用数值方法 - 牛顿迭代法和 Matlab 软件进行了位置正反解的偏差比较求解, 求解结果的偏差数量级满足正常的控制要求.

### 参考文献:

[1] Gosselin C M, Lemieux S, Merlet J P. A new architecture of planar three-degrees of freedom parallel manipulator [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis; M N, 1996.

[2] 李伟, 曹晓彦, 庐江, 等. 基于 5R 并联堆垛机构的运动学分析与示教再现[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2013, 28(1): 62.

[3] Hunt K H. Structural kinematic of in-parallel-actuated robot arms[J]. Journal of Mechanism Transmissions and

Automation in Design, 1983, 105(4): 705.

[4] Gosselin C, Angeles J. The optimum kinematic design of a planar three degree of freedom parallel manipulator[J]. ASME Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design, 1988, 110(1): 35.

[5] 刘善增, 余跃庆. 平面 3 自由度并联机器人的动力学设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 47.

[6] 杨春辉, 刘平安. 3 - RRR 平面微动机器人的运动学分析[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(6): 770.

[7] 刘善增, 余跃庆, 苏丽颖, 等. 3 - RRS 柔性并联机器人的动力学建模与频率特性分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1219.

[8] 刘善增, 余跃庆, 刘庆波, 等. 3 - RRS 并联机器人的动力学分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(15): 1778.

[9] 刘永均, 张静, 李柏林. 基于条件数的 3 - RRS 并联机器人运动性能优化[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(6): 32.

[10] 李艳文, 黄真, 王鲁敏, 等. 新型 4 自由度并联机器人运动学分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 66.

[11] 车林仙. 4 - RUP<sub>a</sub>R 并联机器人机构及其运动学分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 35.

[12] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.



# 聚丙烯纤维混凝土强度冻融 损失率灰色关联分析

王金圳

(黎明职业大学 土木建筑工程学院, 福建 泉州 362000)

**摘要:**利用灰色系统理论的灰色关联分析,在文献数据基础上,对影响聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的4个主要参数(水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量)的关联度大小进行分析,并利用灰色预测模型建立关于聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率GM(1,N)方程.结果表明:对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率影响因素关系为水灰比>减水剂含量>粉煤灰含量>纤维含量,可利用灰色关联分析的方法有效预测聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率.灰色预测模型GM(1,5)的冻融损失率的预测结果有较好精度.

**关键词:**聚丙烯纤维混凝土;强度冻融损失率;灰色关联分析;预测模型

**中图分类号:**TU528.01 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.017

## Grey relational analysis on strength loss rate in freeze-thaw cycles of polypropylene fiber concrete

WANG Jin-zhen

(College of Civil and Architectural Engineering, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** Using the grey relational analysis of grey system theory, the correlation of four main parameters of the effect strength loss rate of polypropylene fiber concrete on freeze-thaw cycles: water-cement ratio, volume fraction of fiber, fly ash content, and superplasticizer content was analyzed based on literature, and using the grey prediction model, the GM(1, N) equation of the strength loss rate of polypropylene fiber concrete in freeze-thaw cycles was established. The results showed that influencing factors of the strength loss rate of polypropylene fiber concrete in freeze-thaw cycles were as follows: water-cement ratio > superplasticizer content > fly ash content > volume fraction of fiber. The results of grey forecasting model GM(1, 5) showed good agreement with the experimental results. It was shown that could effectively predict the strength loss rate of polypropylene fiber concrete in freeze-thaw cycles by using the method of grey relational analysis.

**Key words:** polypropylene fiber concrete; the strength loss rate in freeze-thaw cycles; grey relational analysis; prediction model

# 0 引言

寒冷地区,混凝土的冻融破坏是影响混凝土耐久性的主要因素之一,在普通混凝土中掺入聚丙烯纤维能有效改变混凝土的品质,提高混凝土抗冻性能.聚丙烯纤维作为混凝土的次要加强筋与混凝土的水泥基体有较好的握裹力,能够补偿由外界温差变化引起混凝土变形而产生的应力作用.由于聚丙烯纤维的优异性能,在工程上被广泛应用<sup>[1]</sup>.在国外,从1960年代就开始对聚丙烯纤维混凝土进行研究,并在军工工程、市政工程及高层建筑工程中大量应用.在国内,对聚丙烯纤维混凝土的研究起步较晚,目前的研究主要是针对其力学性能、物理性能及工作性能等方面<sup>[2]</sup>.部分学者对聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损伤进行了试验研究<sup>[1,3]</sup>,也有学者采用正交设计,对聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率进行了专门研究<sup>[4]</sup>.

本文将基于文献[4]的试验数据,采用灰色理论中GM模型预测,建立关于聚丙烯纤维混凝土水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量的GM(1,5)灰色模型,以期对聚丙烯纤维混凝土的合理配置提供参考.

# 1 灰色关联分析

灰色关联分析是系统因素作用大小分析的一种方法,能分析数据灰度较大的各系统因素.其基本思想是分析各序列曲线的几何形状,根据序列曲线的接近程度,来衡量它们之间的关联性大小:若两者之间同步变化较大,曲线较接近,关联系数较大;反之,关联系数较小<sup>[5]</sup>.

文献[4]采用正交设计进行实验,得出聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的影响因素大小为:水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量.本文基于文献[4]的实验数据,运用灰色关联分析进行关联度求解,选择以聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率为母序列,用  $X_0$  表示.以水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量为子序列,用  $X_1, X_2, X_3, X_4$  表示.灰色关联分析的步骤如下:

原始数据预处理 → 求差序列 → 取差值绝对值中的最大值和最小值 → 求母序列和子序列的关联性系数 → 求关联度

在求解关联系数时,应注意以下几点:

1) 在原始数据中,各指标数据量纲不同,数量级也悬殊,因此采用数据初值化变换,消除量纲,合并数量级,使其具有可比性.

2) 一般情况下分辨系数取值  $\xi = 0.5$ .

关联系数的平均值即为关联度,通过求解,可得出聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率各影响因素的关联度为:0.827 2(水灰比)、0.597 1(纤维含量)、0.735 9(粉煤灰含量)、0.746 6(减水剂含量).因此,对聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率的影响因素,用关联系数表示为:水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量.与文献[4]的试验结果比较一致,表明用灰色关联理论方法分析聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率是可行的.

# 2 建立灰色系统预测模型 GM(1, N)

灰色系统预测是在分析研究系统因子之间相互影响与协同作用的基础上,建立系统主行为特征量与关联因子的灰色动态模型群,然后通过求解进行预测.所采用的数学方法是建立状态方程并求解,即以数学的形式把系统的状态和它的历程及系统的输入联系起来,并突出系统内部变化特征.GM(1, N)是描述多变量一阶线性动态模型,可反映的是  $N$  个关联因素对其中某个因素变化率的影响,即其增量的动态关系<sup>[6]</sup>.

本文采用GM(1,5)建立聚丙烯纤维混凝土冻融损失率与水灰比、纤维含量、粉煤灰含量、减水剂含量的灰色模型,GM(1,5)模型为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)} = b_2x_2^{(1)} + b_3x_3^{(1)} + b_4x_4^{(1)} + b_5x_5^{(1)}$$

模型参数求解如下:

1) 给出原始数据列为

$$X_5^{(0)} =$$

$$\begin{bmatrix} X_1^{(0)}(1) & X_2^{(0)}(1) & X_3^{(0)}(1) & X_4^{(0)}(1) & X_5^{(0)}(1) \\ X_1^{(0)}(2) & X_2^{(0)}(2) & X_3^{(0)}(2) & X_4^{(0)}(2) & X_5^{(0)}(2) \\ X_1^{(0)}(3) & X_2^{(0)}(3) & X_3^{(0)}(3) & X_4^{(0)}(3) & X_5^{(0)}(3) \\ X_1^{(0)}(4) & X_2^{(0)}(4) & X_3^{(0)}(4) & X_4^{(0)}(4) & X_5^{(0)}(4) \\ X_1^{(0)}(5) & X_2^{(0)}(5) & X_3^{(0)}(5) & X_4^{(0)}(5) & X_5^{(0)}(5) \\ X_1^{(0)}(6) & X_2^{(0)}(6) & X_3^{(0)}(6) & X_4^{(0)}(6) & X_5^{(0)}(6) \\ X_1^{(0)}(7) & X_2^{(0)}(7) & X_3^{(0)}(7) & X_4^{(0)}(7) & X_5^{(0)}(7) \\ X_1^{(0)}(8) & X_2^{(0)}(8) & X_3^{(0)}(8) & X_4^{(0)}(8) & X_5^{(0)}(8) \\ X_1^{(0)}(9) & X_2^{(0)}(9) & X_3^{(0)}(9) & X_4^{(0)}(9) & X_5^{(0)}(9) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.069\ 93 & 0.37 & 0.6 & 0.20 & 0.002\ 0 \\ 0.069\ 72 & 0.40 & 0.6 & 0.10 & 0.001\ 5 \\ 0.067\ 59 & 0.45 & 0.6 & 0.15 & 0.002\ 5 \\ 0.069\ 82 & 0.37 & 0.9 & 0.15 & 0.001\ 5 \\ 0.069\ 65 & 0.40 & 0.9 & 0.20 & 0.002\ 5 \\ 0.055\ 85 & 0.45 & 0.9 & 0.10 & 0.002\ 0 \\ 0.069\ 25 & 0.37 & 1.2 & 0.10 & 0.002\ 5 \\ 0.069\ 06 & 0.40 & 1.2 & 0.15 & 0.002\ 0 \\ 0.068\ 01 & 0.45 & 1.2 & 0.20 & 0.001\ 5 \end{bmatrix}$$

2) 做一次累加(1-AGO)生成一阶累加序列,即

$$X_5^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.069\ 93 & 0.37 & 0.6 & 0.20 & 0.002\ 0 \\ 0.139\ 65 & 0.77 & 1.2 & 0.30 & 0.003\ 5 \\ 0.207\ 24 & 1.22 & 1.8 & 0.45 & 0.006\ 0 \\ 0.277\ 06 & 1.59 & 2.7 & 0.60 & 0.007\ 5 \\ 0.346\ 71 & 1.99 & 3.6 & 0.80 & 0.010\ 0 \\ 0.402\ 56 & 2.44 & 4.5 & 0.90 & 0.012\ 0 \\ 0.471\ 81 & 2.81 & 5.7 & 1.00 & 0.014\ 5 \\ 0.540\ 87 & 3.21 & 6.9 & 1.15 & 0.016\ 5 \\ 0.608\ 88 & 3.66 & 8.1 & 1.35 & 0.018\ 0 \end{bmatrix}$$

3) 求解模型参数构造系数矩阵

$X_1^{(1)}$  的紧邻均值序列为

$$Z_1^{(1)} = [Z_1^{(1)}(2) \quad Z_1^{(1)}(3) \quad Z_1^{(1)}(4) \quad Z_1^{(1)}(5) \\ Z_1^{(1)}(6) \quad Z_1^{(1)}(7) \quad Z_1^{(1)}(8) \quad Z_1^{(1)}(9)] = \\ [0.104\ 8 \quad 0.174\ 3 \quad 0.242\ 2 \quad 0.311\ 9 \\ 0.374\ 6 \quad 0.437\ 2 \quad 0.506\ 3 \quad 0.574\ 9]$$

于是有

$$B = \begin{bmatrix} -Z_1^{(1)}(2) & X_2^{(1)}(2) & X_3^{(1)}(2) & X_4^{(1)}(2) & X_5^{(1)}(2) \\ -Z_1^{(1)}(3) & X_2^{(1)}(3) & X_3^{(1)}(3) & X_4^{(1)}(3) & X_5^{(1)}(3) \\ -Z_1^{(1)}(4) & X_2^{(1)}(4) & X_3^{(1)}(4) & X_4^{(1)}(4) & X_5^{(1)}(4) \\ -Z_1^{(1)}(5) & X_2^{(1)}(5) & X_3^{(1)}(5) & X_4^{(1)}(5) & X_5^{(1)}(5) \\ -Z_1^{(1)}(6) & X_2^{(1)}(6) & X_3^{(1)}(6) & X_4^{(1)}(6) & X_5^{(1)}(6) \\ -Z_1^{(1)}(7) & X_2^{(1)}(7) & X_3^{(1)}(7) & X_4^{(1)}(7) & X_5^{(1)}(7) \\ -Z_1^{(1)}(8) & X_2^{(1)}(8) & X_3^{(1)}(8) & X_4^{(1)}(8) & X_5^{(1)}(8) \\ -Z_1^{(1)}(9) & X_2^{(1)}(9) & X_3^{(1)}(9) & X_4^{(1)}(9) & X_5^{(1)}(9) \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -0.104\ 8 & 0.770\ 0 & 1.200\ 0 & 0.300\ 0 & 0.003\ 5 \\ -0.173\ 4 & 1.220\ 0 & 1.800\ 0 & 0.450\ 0 & 0.006\ 0 \\ -0.242\ 2 & 1.590\ 0 & 2.700\ 0 & 0.600\ 0 & 0.007\ 5 \\ -0.311\ 9 & 1.990\ 0 & 3.600\ 0 & 0.800\ 0 & 0.010\ 0 \\ -0.374\ 6 & 2.440\ 0 & 4.500\ 0 & 0.900\ 0 & 0.012\ 0 \\ -0.437\ 2 & 2.810\ 0 & 5.700\ 0 & 1.000\ 0 & 0.014\ 5 \\ -0.506\ 3 & 3.210\ 0 & 6.900\ 0 & 1.150\ 0 & 0.016\ 5 \\ -0.574\ 9 & 3.660\ 0 & 8.100\ 0 & 1.350\ 0 & 0.018\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Y = [X_1^{(0)}(2) \quad X_1^{(0)}(3) \quad X_1^{(0)}(4) \quad X_1^{(0)}(5) \\ X_1^{(0)}(6) \quad X_1^{(0)}(7) \quad X_1^{(0)}(8) \quad X_1^{(0)}(9)] = \\ [0.069\ 72 \quad 0.067\ 59 \quad 0.069\ 82 \quad 0.069\ 65 \\ 0.558\ 50 \quad 0.692\ 50 \quad 0.069\ 06 \quad 0.068\ 01]$$

采用最小二乘法结合 Matlab 软件求解灰色系数

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} = B^T B^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} 2.650\ 1 \\ 0.231\ 0 \\ -0.001\ 9 \\ 0.340\ 0 \\ 16.719\ 6 \end{bmatrix}$$

#### 4) 参数优化

把计算参数代入模型时间响应方程,考虑通过参数优化,使预测模型得到优化<sup>[7]</sup>,根据前面关联度分析得知,水灰比是影响聚丙烯纤维混凝土强度的冻融损失率的最主要因素.现考虑能否通过调整水灰比参数使模型精度上升,记模型为<sup>[8]</sup>

$$\hat{x}^{(1)}(a, u) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)e^{-at} + \frac{u}{a}$$

$$\text{则 } \frac{\partial \hat{x}^{(1)}(a, u)}{\partial u} = \frac{1}{a}(1 - e^{-at}) > 0.$$

上述公式中对所有的  $a(a \neq 0)$  及任意的  $t(t > 0)$  都成立,所以当  $a, t$  不变时,  $\hat{x}^{(1)}$  随  $u$  的增加而增加<sup>[9]</sup>.将原模型参数  $u$  增大,即其他参数不变调整参数  $b_2$ ,其模型值将增大,使得计算出的损伤率与试验数据更接近.经过调整最终  $(a, b_2, b_3, b_4, b_5)$  取值为  $(2.650\ 1, 0.242, -0.001\ 9, 0.343, 16.719\ 6)$ ,把模型参数带入方程,于是得估计模型为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + 2.650\ 1x_1^{(1)} = 0.242x_2^{(1)} -$$

$$0.001\ 9x_3^{(1)} + 0.34x_4^{(1)} + 16.719\ 6x_5^{(1)}$$

近似时间响应函数为

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (0.069\ 93 - 0.091\ 3x_2^{(1)} + \\ 0.000\ 7x_3^{(1)} - 0.128\ 3x_4^{(1)} - 6.309\ 0x_5^{(1)})e^{-2.650\ 1k} + \\ 0.091\ 3x_2^{(1)} - 0.000\ 7x_3^{(1)} + 0.128\ 3x_4^{(1)} + 6.309\ 0x_5^{(1)}$$

损失率的计算值与试验值比对见表1.

从表1可知,聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率 GM(1,5)模型的预测值相对误差绝对值的平均值为 8.17%,由于个别试验数据离散性较大影响相对误差的大小,模型的预测精度为 II 级,能够满足预测要求.利用灰色系统理论建立的预测模型能简

便地预测水灰比、减水剂含量、粉煤灰含量、纤维含量对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的影响。

表1 损失率的计算值与试验值比对

编号	试验值	计算值	残差	相对误差
1	0.069 93	0.069 9	0.000 0	0.000 0
2	0.069 72	0.055 8	0.013 9	0.198 9
3	0.067 59	0.065 6	0.002 0	0.029 7
4	0.069 82	0.060 3	0.009 5	0.136 8
5	0.069 65	0.067 8	0.001 8	0.026 5
6	0.055 85	0.064 1	-0.008 2	0.146 9
7	0.069 25	0.069 7	-0.000 5	0.007 0
8	0.069 06	0.068 0	0.001 0	0.015 2
9	0.068 01	0.074 3	-0.006 3	0.092 6

### 3 结论

1) 基于已有的试验数据,对聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率进行灰色关联度分析,得出影响聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率因素的关联度关系为:水灰比 > 减水剂含量 > 粉煤灰含量 > 纤维含量。

2) 利用 GM(1,5) 模型建立聚丙烯纤维混凝土强度冻融损失率的预测方程,模型具有较好的预测精度,其预测结果具有一定的参考价值,为聚丙烯纤维混凝土冻融损失率的预测提供了一种有效的

方法。

### 参考文献:

[1] 程红强,高丹盈. 聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版,2010,40(S II):197.

[2] 阎利,万朝均,王绍东. 聚丙烯纤维增强混凝土概述[J]. 化学建材,2003(1):52.

[3] 姚武. 纤维混凝土的低温性能和冻融损伤机理研究[J]. 冰川冻土,2005,27(4):545.

[4] 霍俊芳,申向东,曹喜. 聚丙烯纤维混凝土正交试验研究[C]//纤维混凝土的技术进展与工程应用——第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集,大连:[s. n.],2006.

[5] 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[6] 王学萌,张继忠,王荣,等. 灰色系统分析及其实用计算程序[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.

[7] 商怀帅,宋玉普. 灰色系统理论的优化方法及其在结构寿命预测中的应用[J]. 混凝土,2004(10):25.

[8] 路晓峰,贾小林,崔先强. 灰色系统理论的优化方法及其在卫星钟差短期预报中的应用[J]. 测绘工程,2006,15(6):12.

[9] 陈举华,史岩彬. GM 预测模型的模糊-灰色优化方法[J]. 农业机械学报,2003,34(2):129.

(上接第 62 页)

3) 节点极限承载力随着  $\beta$  值的增大而增大,极限承载力的模拟结果与 IIW 规范最为接近。

4) 节点在腹杆轴力和平面内弯矩共同作用下,受弯极限承载力下降。

5) 通过与试验结果比对,可知该试件在极限承载力、破坏模式等方面与试验值均吻合良好,可以作为参数分析的基础。

### 参考文献:

[1] GB 50017—2003, 钢结构设计规范及条文说明[S].

[2] 陈以一,陈扬骥. 钢管结构相贯节点的研究现状[J]. 建筑结构,2002,32(7):52.

[3] Packer J A, Henderson J E. 空心管结构连接设计指南[M]. 曹俊杰,译. 北京:科学出版社,1997.

[4] Wardenier J. Hollow sections in structural applications [M]. Netherlands: Bouwen Met Staal, 2002.

[5] 刘飞飞,陈誉. 不同受力状态下 N 型钢圆管完全搭接节点力学性能研究[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(1):37.

[6] 武振宇,谭慧光. 不等宽 T 型方钢管节点初始抗弯刚度计算[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(10):1517.

[7] 王伟,陈以一. 圆钢管相贯节点的非刚性能与计算公式[J]. 工业建筑,2005,11(35):5.

[8] 吴颖,陈誉. 方支管-H 型钢主管 T 型节点轴压性能数值分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(2):15.

[9] GB/T 228—2002, Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature[S].

[10] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[11] 曹金凤,石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[12] 陈栋芬. X 型方钢管节点平面内受弯性能试验报告[R]. 厦门:华侨大学,2012.

[13] EN1993—1—8, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1—8: Design of Joint [S].

[14] XV—E—07—378. International institute of welding (IIW). Static design procedure for welded hollow section joints—recommendations (IIW Doc) [S].

# 一种改进的多机器人路径规划 自适应人工势场法

高瑜, 过金超, 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:**在研究多机器人路径规划传统方法的基础上,提出了一种改进的自适应人工势场法.该方法通过设置虚拟目标点来解决传统人工势场法易陷入局部极小点的问题,同时根据各个机器人所承担的任务和速度,采用自适应优先权策略来实现机器人之间的自适应避障.仿真实验验证了该方法的有效性和可行性.

**关键词:**多移动机器人;人工势场法;虚拟目标点;自适应避障

**中图分类号:**TP242      **文献标志码:**A      **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.018

## An improved adaptive artificial potential field method for the path planning of multi-robot

GAO Yu, GUO Jin-chao, CUI Guang-zhao

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

**Abstract:** Based on the study of the traditional multi-robot path planning, an improved adaptive artificial potential field method was proposed. In this method, the local minimum problem of the traditional artificial potential field could be solved by setting the virtual target point for mobile robot to escape local minimum. At the same time, according to the task and speed of the robot, it used the adaptive priority strategy to realize the adaptive obstacle avoidance of the robot. The results of the simulation proved the effectiveness and feasibility of this method.

**Key words:** multiple mobile robots; artificial potential field; virtual target point; adaptive obstacle avoidance

## 0 引言

多移动机器人研究中,路径规划一直是研究的重点.机器人的路径规划就是在有障碍物的环境中按照某一性能指标搜索一条从起始状态到目标状态的最优或近似最优的无碰撞路径<sup>[1]</sup>.多移动机器人的路径规划要求多个机器人从各自的起始点出发,在不与障碍物发生碰撞且机器人之间也没有碰撞的情况下,沿着最优或者近似最优的路径到达各

自的目标点.

针对机器人的路径规划问题,研究人员已经提出了很多方法,如蚁群算法<sup>[2]</sup>、人工势场法<sup>[3-4]</sup>、空间法、栅格法、拓朴法、遗传算法<sup>[5]</sup>、神经网络法<sup>[6]</sup>和人工免疫算法<sup>[7]</sup>等.其中人工势场法由于其结构简单、计算方便且容易满足实时性而获得了广泛的应用.但传统的人工势场法多应用于单个机器人的路径规划,且存在局部极小点问题. S. Fazli 等<sup>[8]</sup>通过采用沿墙跟踪的方法来解决障碍物附近目标不

可达的问题.程拥强等<sup>[9]</sup>采用极限环法使机器人以圆弧状轨迹避开障碍物来达到避障的目的.M. H. Mabrouk等<sup>[10]</sup>采用内部立体状态来解决传统人工势场法的局部极小点问题.这些方法虽然在一定程度上可以解决机器人路径规划的局部极小点问题,但也存在一定的缺陷.沿墙跟踪法和极限环法规划速度慢,内部立体状态法不能解决静态势场问题.本文拟提出一种改进人工势场法来解决局部极小点和多机器人路径规划问题,并通过仿真验证该方法的有效性.

## 1 传统人工势场法

人工势场法是由 O. Khatib<sup>[11]</sup>提出的一种虚拟方法.它把移动机器人在环境中的运动视为在一种抽象的人造受力场中的运动,障碍物对机器人产生斥力,目标点产生引力.机器人就是在斥力和引力的合力控制下向着目标点运动.机器人的引力势场函数为

$$U_{\text{att}}(q) = \frac{1}{2}\varepsilon d^2(q, q_{\text{goal}})$$

其中,  $\varepsilon$  是引力势场常量,  $d(q, q_{\text{goal}})$  是机器人  $q$  到目标点  $q_{\text{goal}}$  的距离.相应的引力为引力势场函数的负梯度

$$F_{\text{att}}(q) = -\nabla U_{\text{att}}(q) = \varepsilon(q_{\text{goal}} - q)$$

机器人的斥力势场函数为

$$U_{\text{req}}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{d(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{d_0}\right)^2 & d(q, q_{\text{obs}}) \leq d_0 \\ 0 & d(q, q_{\text{obs}}) > d_0 \end{cases}$$

其中,  $\eta$  为斥力势场常量,  $q_{\text{obs}}$  为障碍物到机器人最近的点,  $d(q, q_{\text{obs}})$  为机器人到障碍物最小的距离,  $d_0$  为障碍物的影响范围.相应的斥力为斥力势场函数的负梯度

$$F_{\text{req}}(q) = -\nabla U_{\text{req}}(q) =$$

$$\begin{cases} \eta\left(\frac{1}{d(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{d_0}\right)\frac{1}{d^2(q, q_{\text{obs}})}\frac{q - q_{\text{obs}}}{d(q, q_{\text{obs}})} & d(q, q_{\text{obs}}) \leq d_0 \\ 0 & d(q, q_{\text{obs}}) > d_0 \end{cases}$$

机器人所受的合力

$$F_{\text{total}} = F_{\text{att}}(q) + F_{\text{req}}(q)$$

## 2 改进的人工势场法

传统的人工势场法一般应用于单个机器人的

路径规划,且存在局部极小点<sup>[12]</sup>问题.当应用于多机器人的路径规划时,由于每个机器人的避障算法相同,有时会导致机器人之间的反复避障,严重时甚至产生死锁<sup>[13]</sup>.针对上述2个问题,引入虚拟目标点法和自适应优先权策略以改进传统人工势场法.

### 2.1 虚拟目标点法

当机器人在运动过程中陷入局部极小点时,通过算法在原目标点周围产生一个虚拟目标点.由于机器人陷入局部极小点时,机器人所受的合力为0,当增加虚拟目标点后,机器人所受的合力不为0,这样机器人就在障碍物、原目标点和虚拟目标点的合力作用下向目标点运动.当机器人走出局部极小点后撤销虚拟目标点,机器人就在障碍物和原目标点的作用下向目标点运动.增加虚拟目标点后,机器人的受力分析如图1所示.

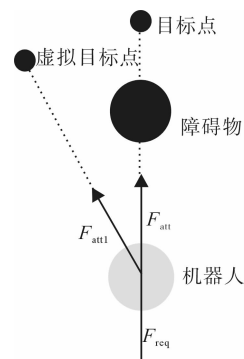


图1 虚拟目标点受力分析

### 2.2 自适应优先权策略

为了实现多机器人之间的避障,必须解决机器人之间的最小安全距离问题和各个机器人之间的优先权问题.机器人在最小安全距离下的优先权高低取决于机器人所承担的任务、速度和大小,机器人的优先权方程为

$$priority_i = V_i \times T_i \times Size_i \quad (1)$$

其中,  $priority_i$  是机器人  $i$  的优先权,  $V_i$  是速度,  $T_i$  是任务的重要性,  $Size_i$  是机器人的大小.

当2个或多个机器人相遇时,会根据公式(1)来确定机器人运动的优先权,优先权高的机器人先通过.但是当2个机器人的优先权相同时,可以参考以下的策略来实现机器人之间的规避:1)根据2个机器人之间任务的重要性,来决定机器人之间的优先权,任务重要性高的机器人,优先通行;2)如果机器

人之间的任务重要性相同,那么就根据机器人的速度来决定机器人之间的优先权,速度大的机器人优先通行;3) 如果机器人的任务重要性和速度都相同,那么机器人就随机产生优先权,优先权高的机器人优先通行.

### 2.3 改进人工势场法具体步骤

针对人工势场法存在局部极小点和多机器人之间的避障问题,本文采用虚拟目标点来解决人工势场法的局部极小点问题,同时采用自适应优先权策略来实现多机器人之间的避障.改进的适应人工势场法的流程图如图2所示.

如图2可知,首先进行初始化,然后根据机器人当前位置判断机器人是否到达了目标点,若到达目

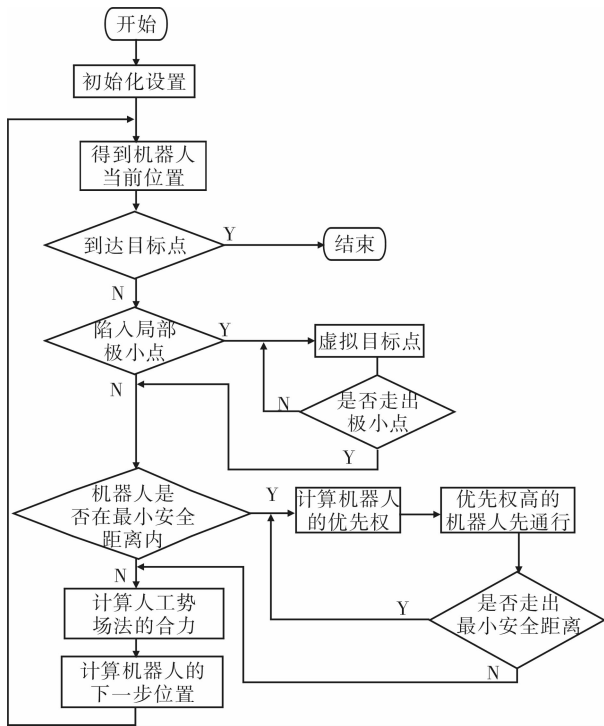


图2 改进的人工势场法

标点,则循环结束.若没有到达目标点,则判断机器人是否陷入局部极小点,若陷入局部极小点,则用虚拟目标点法走出极小点.然后判断机器人之间的距离是否在最小安全距离之内,若在最小安全距离之内,则进行优先权判决,决定哪个机器人优先通行.最后,根据人工势场法计算机器人下一步的位置.

### 3 仿真实验

为了证明该方法的有效性,进行了2个仿真实验.实验1来证明虚拟目标法可以解决局部极小值点问题,实验2是根据自适应优先权策略来实现机器人之间的规避.实验参数设置如下,引力常数 $\epsilon = 1$ ,斥力系数 $\eta = 10$ ,障碍物影响范围 $d_0 = 2 \text{ cm}$ ,机器人的移动速度 $v = 25 \text{ cm/s}$ .

1) 当机器人陷入局部极小点时,采用虚拟目标点法可以使机器人走出局部极小点,从而到达目标点.机器人陷入局部极小点的情况如图3a)所示,图3b)是采用虚拟目标点使机器人走出局部极小点的情况.

2) 多机器人之间的避障分为2种情况:当机器人之间没有交叉时,每个机器人根据各自的人工势场法到达自己的目标点,仿真结果如图4a)所示;当机器人之间有交叉时,要设置每个机器人的优先权,优先权高的机器人优先通行,仿真结果如图4b) - f)所示.其中机器人的优先权如下,机器人3 > 机器人2 > 机器人1.

机器人1和机器人3相遇的情况下,机器人3优先通行,仿真结果如图4b)和4c)所示.机器人1和机器人2相遇的情况下,机器人2优先通行,仿真结果如图4d)和4e)所示.图4f)证明了该方法可以实现多机器人之间的路径规划.该方法和一般的智能优化算法相比,如粒子群优化算法<sup>[14]</sup>,具有计算量小、实时性强等优点.

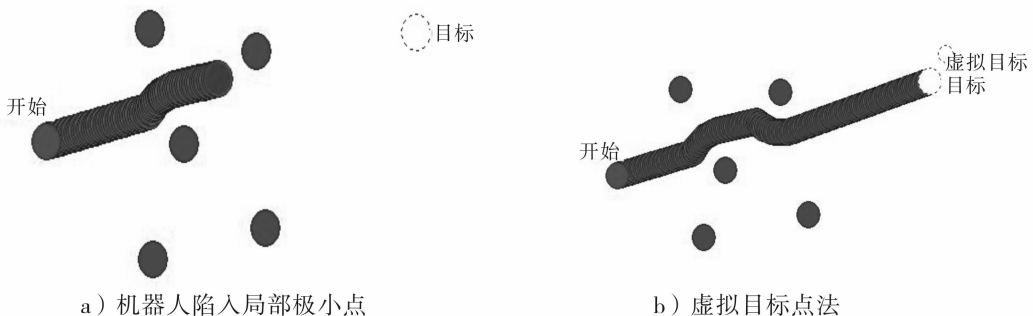


图3 实验1仿真结果

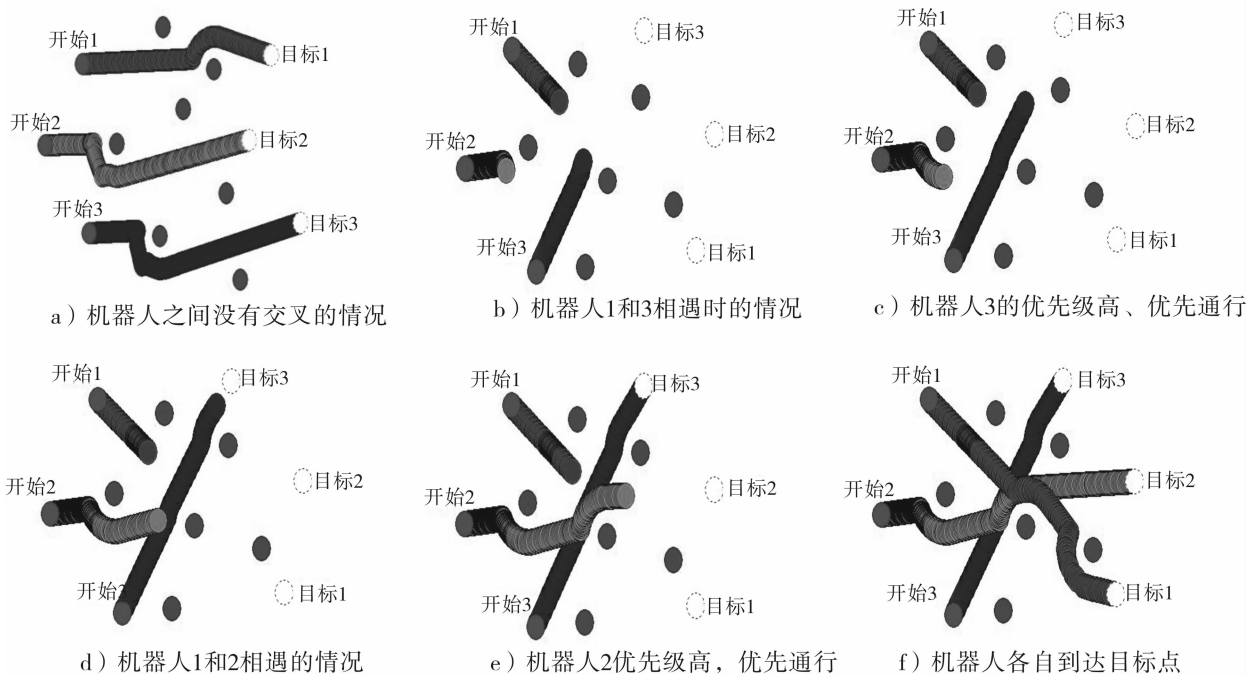


图4 实验2 仿真结果

### 4 结论

本文提出了一种改进的多机器人路径规划人工势场法. 该方法针对人工势场法的局部极小点问题, 提出了虚拟目标点法解决极小点问题; 同时对多机器人之间的避障问题, 提出了自适应优先权策略来实现多机器人之间的避障. 经过仿真实验, 验证了改进算法的有效性和可行性.

### 参考文献:

[1] 殷路, 尹怡欣. 基于动态人工势场法的路径规划仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(11): 3325.

[2] 朱庆保, 张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J]. 机器人, 2005, 27(2): 133.

[3] Ge S S, Cui Y J. New potential functions for mobile robot path planning [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(5): 615.

[4] Zhao Jie, Yu Zhenzhong, Yan Jihong, et al. Mobile robot path planning method combined improved artificial potential field with optimization algorithm[J]. High Technology Letters, 2011, 17(2): 160.

[5] Luo X, Fan X P, Yi S, et al. A novel genetic algorithm for robot path planning in environment containing large numbers of irregular obstacles[J]. Robot, 2004, 26(1): 135.

[6] Ni B, Chen X, Zhang L M, et al. Recurrent neural network for robot path planning[J]. PDCAT, 2004, 8(1): 188.

[7] 过金超, 刘征, 崔光照. 基于人工免疫网络理论的移动机器人路径规划[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2012, 27(4): 1.

[8] Fazli S, Kleeman L. Wall following and obstacle avoidance results from a multi-DSP sonar ring on a mobile robot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls: IEEE, 2005: 432.

[9] 程拥强, 蒋平, 朱劲, 等. 用势场法改进的极限环导航方法在移动机器人中的应用[J]. 机器人, 2004, 26(2): 133.

[10] Mabrouk M H, McInnes C R. Solving the potential field local minimum problem using internal agent states[J]. Robots and Autonomous Systems, 2008, 56(12): 1050.

[11] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90.

[12] 张明开, 李龙澍. 关于人工势场法局部极小问题的一种解决方法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(5): 137.

[13] Zu L N, Tian Y T, Liu J F. Algorithms of task-allocation and cooperation in multi mobile robot system [C]// Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, New York: IEEE, 2004: 2841.

[14] 丁华胜, 王华忠. 基于 PSO 的人工势场法在移动机器人路径规划中的应用[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2010, 36(5): 727.



# 一种融合模块2DPCA与PCA的人脸识别方法

黄海波, 全海燕, 谢鹏

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**针对主成分分析(PCA)求解高阶矩阵计算量很大和模块二维主成分分析(M2DPCA)特征数量仍然较大且有一定的相关性的问题,提出了融合模块2DPCA与PCA的方法进行人脸识别.该方法先通过M2DPCA对子图像进行特征提取,然后把每个图像中的子图像按分块的顺序重新组成新的矩阵,再对新的矩阵进行PCA.在ORL人脸库中实验,结果表明,该算法在一定程度上去除了特征参数间的相关性并大大减少了特征维数.

**关键词:**模块二维主成分分析;主成分分析;特征提取;人脸识别

**中图分类号:**TP391.41 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.019

## A method for face recognition by fusing modular 2DPCA with PCA

HUANG Hai-bo, QUAN Hai-yan, XIE Peng

(Institute of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that principal component analysis (PCA) leads to a large amount of calculation in solving high rank-matrix and the modular two-dimensional principle component analysis (2DPCA) is still large in feature calculation and a certain correlation still exists in feature extraction, a method fusing the Modular 2DPCA with PCA was put forward. The method extracted feature from sub-image using M2DPCA, and re-formed a new matrix according to the order of sub-images of each image, then PCA was carried out on the new matrix. The experimental results in ORL human face database showed that the correlation among feature parameters was removed to a certain extent and it also greatly reduced the dimension of features.

**Key words:** modular two-dimensional principle component analysis (M2DPCA); principal component analysis (PCA); feature extraction; face recognition

## 0 引言

在人脸识别中,特征提取是一个关键问题,一直都受到高度重视.其目的是抽取最优的特征表示,而主成分分析PCA(principal component analysis)<sup>[1-2]</sup>是经典的特征抽取方法之一,目前在人脸

识别中仍被广泛地应用<sup>[3]</sup>.

PCA的主要思想是将原始图像矩阵转换为向量,通过计算图像向量的总体散布矩阵,并求出一组使得总体散布矩阵最大的标准正交向量组,作为最优投影轴.而人脸图像是高维的,求取最优特征向量组的计算量是很大的,针对这个问题,文献[4]

收稿日期:2013-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(D0405);云南省自然科学基金项目(2009ZC048M)

作者简介:黄海波(1988—),男,安徽省六安市人,昆明理工大学硕士研究生,主要研究方向为模式识别.

通信作者:全海燕(1970—),男,云南省红河州人,昆明理工大学副教授,博士,主要研究方向为信号处理与模式识别.

提出了模块二维主成分分析 M2DPCA (modular two-dimensional principal component analysis) 的方法. 此方法对每个图像进行分块, 进而求子图像的总散布矩阵. 由于是对二维子图像进行特征抽取, 因而减少了计算量, 提高了识别率和识别速度. 文献[5-6]提出采用二维投影与 PCA 结合的方法, 提高二维图像的特征抽取速度, 但由于抽取出的特征是矩阵, 并且提取的特征参数间仍存在一定相关性, 故可通过 PCA 对其再降维, 抽取少量特征进行分类, 以提高分类速度和识别率. 由于在二维投影时, 原始图像存在局部特征的差别, 结合两者的优点, 既可去除特征向量间的相关性, 又能大大减少特征维数.

本文拟采用融合模块 2DPCA 与 PCA 的人脸识别方法, 在提取特征时先后进行 M2DPCA 和 PCA, 并对该算法的有效性在 ORL 库上进行验证.

### 1 主成分分析 (PCA) 人脸识别法

特征抽取是指通过已有特征的组合建立一个新的特征集. PCA 的实质就是在尽可能好地代表原始数据的前提下, 通过线性变换将高维空间中的样本数据投影到低维空间中.

设人脸库图像大小为  $m$  像素  $\times n$  像素, 则每幅图像可以用按行或者按列的形式转换成  $M$  维向量, 其中  $M = m \times n$ . 设有  $C$  类样本, 每类的训练样本数为  $N_i$ ,  $P$  是训练样本总数,  $P = \sum_{i=1}^C N_i$ ,  $A_i$  表示第  $i$  幅图像所形成的行向量, 则样本集的总协方差矩阵为

$$S = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (A_i - \mu)(A_i - \mu)^T$$

其中, 所有样本的均值行向量

$$\mu = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p A_i$$

定义准则函数

$$J(X) = X^T S X \tag{1}$$

最大化该准则函数式 (1) 的单位向量  $X$  称为最优投影矩阵. 求出  $S$  的前  $r$  个最大的非零特征值所对应的特征向量. PCA 方法就是寻找一组正交归一化的最优投影矩阵  $X = (X_1, X_2, \dots, X_r)$ , 将训练样本投影到特征空间, 得到  $B_i = A_i X (i = 1, 2, \dots, p)$ . 构成新的训练样本集  $B = [B_1, B_2, \dots, B_p]$ , 此时训练样本矩阵的大小为  $p \times r$ .

一般来说, 在样本类别数较多的情况下, 需要

寻找一组满足标准正交条件且极大化准则函数式 (1) 构成的最优投影向量  $X_1, X_2, \dots, X_r$ .

对于测试样本, 把待测样本  $A$  投影到最优投影矩阵  $X$ , 得到相应的  $B = AX$ ; 接下来可以运用模式分类进行识别.

主成分分析 PCA 在人脸识别中有着重要的地位, 但在特征提取时需将原始样本矩阵转换成向量的形式, 导致求解高维矩阵的难度加大, 运算时间长.

### 2 模块 2DPCA 人脸识别法

模块 2DPCA 方法<sup>[4,7]</sup> 是先将一个  $m \times n$  的图像矩阵  $A$  分成  $p \times q$  模块图像矩阵, 即

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{p1} & \cdots & A_{pq} \end{pmatrix}$$

其中, 每个子图像矩阵是  $m_1 \times n_1$  矩阵 ( $pm_1 = m, qn_1 = n$ ).

设有  $C$  类样本:  $w_1, w_2, \dots, w_c$ . 每类有训练样本  $N_i$  个,  $A_1, A_2, \dots, A_M$  为所有训练样本图像 ( $M = \sum_{i=1}^C N_i$ ), 每个样本图像是  $m \times n$  矩阵. 训练样本  $A_i$  的  $p \times q$  模块图像矩阵表示为

$$A_i = \begin{pmatrix} (A_i)_{11} & \cdots & (A_i)_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (A_i)_{p1} & \cdots & (A_i)_{pq} \end{pmatrix}$$

则训练图像样本的子图像矩阵的总散布矩阵

$$G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^q ((A_i)_{kl} - \bar{A})^T ((A_i)_{kl} - \bar{A})$$

其中,  $N = Mpq$  表示训练样本子图像矩阵总数,  $\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^q (A_i)_{kl}$  为所有训练子矩阵均值矩阵. 容易证明  $G$  为  $n_1 \times n_1$  非负定矩阵.

同 PCA 方法<sup>[8-9]</sup> 一样, 寻找一组正交归一化的最优投影矩阵. 取  $G$  的前  $d$  个最大的特征值所对应的标准正交的特征向量组成的最优投影矩阵  $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_d)$ .

$$\text{训练样本 } A_i = \begin{pmatrix} (A_i)_{11} & \cdots & (A_i)_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (A_i)_{p1} & \cdots & (A_i)_{pq} \end{pmatrix} \text{ 的特征矩}$$

阵为

$$B_i = A_i Z = \begin{pmatrix} (A_i)_{11} Z & \cdots & (A_i)_{1q} Z \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (A_i)_{p1} Z & \cdots & (A_i)_{pq} Z \end{pmatrix}$$

对于测试样本,把待测样本  $A =$

$$\begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{p1} & \cdots & A_{pq} \end{pmatrix}$$

投影到最优投影矩阵矩阵,得到相应特征矩阵  $B = AZ$ ,即

$$B = \begin{pmatrix} A_{11}Z & \cdots & A_{1q}Z \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{p1}Z & \cdots & A_{pq}Z \end{pmatrix}$$

将待测样本特征矩阵  $B$  与训练样本的特征矩阵  $B_i$  比较,通过最小距离分类器,判别出该待测样本属于训练库中哪一类的哪一幅图像。

M2DPCA 在求取特征值时,由于避免了将原始样本矩阵转换成高维向量,计算量以及特征抽取时间减少,优于 PCA,但最终得到的样本的维数比较高,特征参数间存在一定的相关性.为了有效消除特征参数间存在的相关性,本文提出融合 M2DPCA 与 PCA 的人脸识别法。

### 3 模块2DPCA和PCA相融合的人脸识别法

#### 3.1 训练阶段

开始进行 M2DPCA,将维数为  $m \times n$  的人脸样本矩阵分成  $p \times q$  模块矩阵.每个子模块大小为  $m_1 \times n_1$ ,其中  $pm_1 = m, qn_1 = n$ ;接下来通过所有训练样本中的子图像矩阵计算总体散布矩阵  $G$ ,求解  $G$  的前  $d$  个最大特征值所对应的特征向量组成的最优投影矩阵  $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_d)$ ,构成  $n_1 \times d$  特征矩阵.将所有训练样本的子模块矩阵投影到  $Z$  上,抽出图像  $A_i$  的特征为:  $B_i = A_i Z$  构成  $m \times dq$  矩阵,得到训练样本构成的矩阵为  $B = [B_1, B_2, \dots, B_N]$ ,  $N$  为图像样本总数。

进行 PCA:将 M2DPCA 所抽取到的训练样本特征  $B_i$  转换成  $1 \times mdq$  行向量  $b_i$ ,然后再将  $B$  构成一个新的样本矩阵  $b = N \times mdq$ ,求出  $N$  个样本  $b_i$  的总体均值  $\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i$ ,则新样本的总体散布矩阵  $S$ ,求出  $S$  的前  $r$  个最大特征值所对应的特征向量组成的最优投影向量组  $X = (X_1, X_2, \dots, X_r)$ ,则所有样本投影到  $X$  上得到  $C_i = b_i X (i = 1, 2, \dots, N)$ ,其维数已经降到  $1 \times r$ ,构成向量组  $C = [C_1, C_2, \dots, C_N]$ ,以此作为最终投影特征存入人脸识别数据库。

算法的具体步骤如下:

- 1) 将原始图像  $A_i$  分成  $p \times q$  块,求子块的总体散布矩阵  $G$ ;
- 2) 求总体散布矩阵  $G$  的前  $d$  个最大特征值对应的特征向量组成的最优投影矩阵  $Z$ ;
- 3) 将训练样本投影到最优投影矩阵  $Z$  上,得到  $B_i = A_i Z$ ,构成新的训练样本库  $B$ ;
- 4) 将新的训练样本库  $B$  中每个新样本转换成行向量  $b_i$ ,求其总体散布矩阵  $S$ ;
- 5) 在总体散布矩阵  $S$  的基础上,求取最优投影矩阵  $X$ ,得到  $C_i = b_i X$ ,构成向量组  $C$ ,作为最终投影特征存入人脸识别数据库。

#### 3.2 测试阶段

将待测样本  $A$  先投影到  $Z$  上,得到  $B = AZ$ ,再将  $B$  转为行向量  $b$ ,将其投影到  $X$  上,得到  $C = bX$ .再将  $C$  与数据库中的每一个  $C_i$  比较,通过最小距离分类器,判别出测试样本属于训练库中哪一类的哪一幅图像。

算法的具体步骤如下:

- 1) 将待测样本  $A$  分成  $p \times q$  块,投影到最优投影矩阵  $Z$  上,得到  $B = AZ$ ;
- 2) 将 1) 求得的  $B$  转换成行向量  $b$ ,将其投影到  $X$  上,得到  $C = bX$ ;
- 3) 通过最小距离分类器,比较  $C$  与数据库中的  $C_i$ ,作出判别。

### 4 实验结果与分析

本实验采用的是 ORL 人脸库样本.该人脸库包含 40 个人,每人有 10 幅图像,每幅大小为 112 像素  $\times$  92 像素的正面图像,包含一定的光照、姿态、角度和面部细节等变化.本实验分别选取 ORL 库中每人的前 5 幅图片作为训练样本,后 5 幅作为测试样本,这样训练与测试样本总数均为 200 个。

实验结果如图 1—4 所示.在图 1 中,原始图像被分成  $4 \times 4$  模块;图 2 中,分成  $4 \times 2$  模块;图 3 中,分成  $4 \times 1$  模块.在 3 种情况下,每个子模块的大小分别为  $28 \times 23, 28 \times 46, 28 \times 92$ .本文的 M2DPCA 与 PCA 结合的方法中求 M2PCA 的总体散布矩阵的大小分别是  $23 \times 23, 46 \times 46, 92 \times 92$ .每一组实验中分别取前  $d$  个特征值所对应的特征向量所组成的最优投影矩阵,其大小分别是  $112 \times 4d, 112 \times 2d$  和  $112 \times d$ .在 PCA 阶段,3 种分块对应的总体散布矩阵大小为  $448d \times 448d, 224d \times 224d, 112d \times 112d$ ,均取其  $r = 30$  个特征值所对应的特征向量所组成的最优投影向量组为  $448d \times 30, 224d \times 30, 112d \times 30$ .最终使

得原始图像的维数由 10 344 降到 30 维. 本文融合 M2DPCA 与 PCA 方法中分类采用的是最小距离分类器. 鉴于特征向量个数不同, 图 1—3 给出了本文方法与 M2DPCA 在特征向量不同个数情况下的识别率.

从图 1—3 中可以看出, 本文方法的识别率优于 M2DPCA. 并且, 图 1—3 共同说明在鉴别矢量个数达到一定程度时识别率反而下降, 主要是由于鉴别矢量增加的同时, 会引入一些次要人脸模式和噪声, 增加了数据的冗余性, 导致在用最小距离分类器时, 采用累加使得最小值发生变化, 使得识别率下降.

图 4 说明在本文的算法中并不是分块越多越好. 由于人脸结构的特点, 分块越多, 每个子块包含的信息越少, 在识别过程中会被误认为相似子块, 影响分类效果. 故在本文融合 M2DPCA 与 PCA 的方法中,  $4 \times 1$  分块方式在识别率上优于  $4 \times 2$  与  $4 \times 4$  分块方式.

由上述的实验结果发现, 本文方法中的第一阶段在求 M2DPCA 的最优投影矩阵时, 鉴别矢量在 5—16 个, 识别率已经趋于稳定. 为了进一步比较本文方法与双向压缩 2DPCA(LR2DPCA) 和 PCA 结合的方法, 对它们在 ORL 人脸库实验中得到的最终相同维数进行比较, 发现二者所达到的识别率不同. 故在二维投影中水平方向压缩(R2DPCA)和垂直方向压缩(L2DPCA)分别取  $d=5$  和  $e=5$  作为鉴别矢量个数, 对比结果见表 1. 表 1 中括号内表示在此识别率下的特征维数, 可以看出特征维数降到最低时, 本文方法能够稳定在较高识别率上.

### 5 结论

本文提出融合模块 2DPCA 与 PCA 的人脸识别算法: 先用模块 2DPCA 对图像矩阵进行特征提取和降维, 得到特征矩阵, 再用 PCA 对其作进一步的特征提取和降维. 该方法的突出优点是在一定程度上

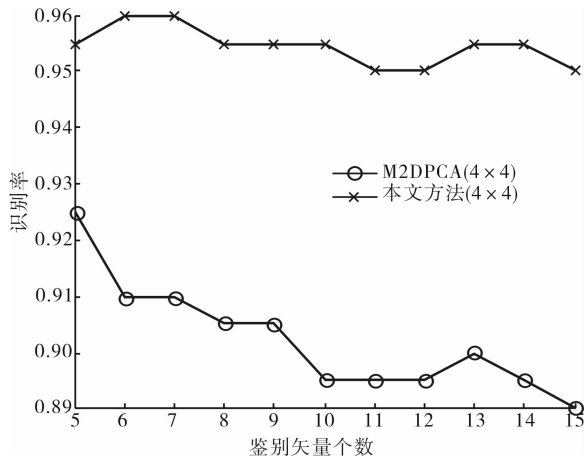


图 1 本文方法与 M2DPCA 的比较(4x4)

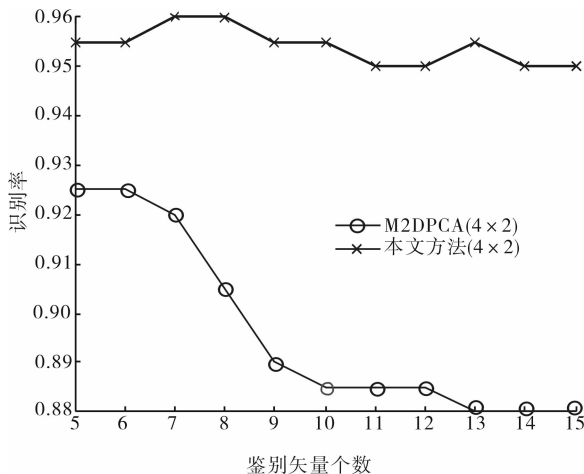


图 2 本文方法与 M2DPCA 的比较(4x2)

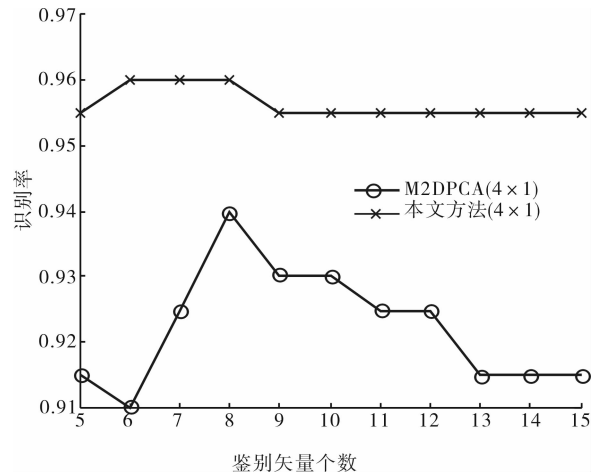


图 3 本文方法与 M2DPCA 的比较(4x1)

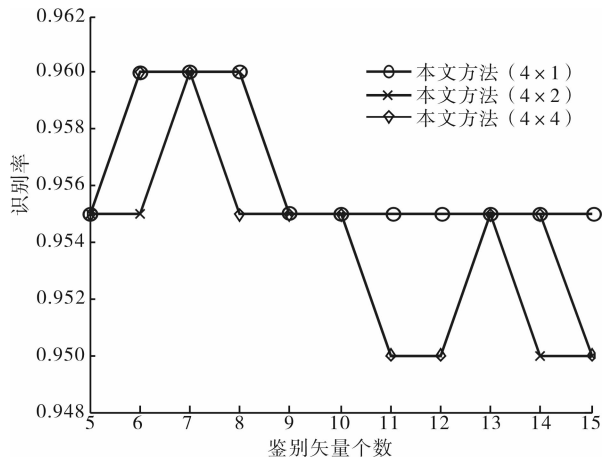


图 4 本文方法 3 种分块方式比较

表1 不同识别算法对不同特征值及对应维数的识别率比较

算法	$r=10(10 \times 1)$	$r=15(15 \times 1)$	$r=18(18 \times 1)$	$r=20(20 \times 1)$	$r=22(22 \times 1)$
L2DPCA + PCA	0.820 0	0.865 0	0.895 0	0.890 0	0.890 0
R2DPCA + PCA	0.855 0	0.865 0	0.865 0	0.870 0	0.860 0
LR2DPCA + PCA	0.845 0	0.870 0	0.875 0	0.885 0	0.895 0
	$4 \times 1$	0.950 0	0.950 0	0.955 0	0.960 0
M2DPCA + PCA	$4 \times 2$	0.955 0	0.955 0	0.955 0	0.945 0
	$4 \times 4$	0.945 0	0.940 0	0.950 0	0.945 0

消除了特征参数间的相关性,达到了很好的降维效果,同时保证了较高的识别率.在ORL人脸库进行实验,结果表明该方法十分有效,优于模块2DPCA和双向压缩2DPCA与PCA结合的2种方法.

### 参考文献:

- [1] Gao C B, Zhou J L, Pu Q. Theory of fractional covariance matrix and its applications in PCA and 2DPCA [J]. Expert Systems with Applications 2013, 40:5395.
- [2] 焦斌亮,陈爽.基于PCA算法的人脸识别[J].计算机工程与应用,2011,47(18):201.
- [3] 龚劬,卢力,廖武忠.基于主成分分析的人脸个体差异识别算法[J].计算机工程,2012,38(1):45.
- [4] 陈伏兵,陈秀红,张生亮,等.基于模块2DPCA的人脸

识别[J].中国图象图形学报,2006,11(4):580.

- [5] 李娟,何伟,张玲,等.双向压缩的2DPCA与PCA相结合的人脸识别算法[J].计算机应用,2009,29(6):245.
- [6] 张生亮,杨静宇.二维投影与PCA相结合的人脸识别算法[J].计算机工程,2006,32(16):165.
- [7] 张龙翔.改进的模块2DPCA人脸识别[J].计算机工程与应用,2010,46(13):147.
- [8] Ali Mashhoori, Mansoor Zolghadri Jahromi. Block-wise two-directional 2DPCA with ensemble learning for face recognition [J]. Neurocomputing, 2013, 108:111.
- [9] 陈伏兵,谢永华.分块PCA鉴别特征抽取能力的分析研究[J].计算机科学,2006,33(3):155.

(上接第52页)

- [39] Shin C M, Lee J Y, Heo J H, et al. Effects of the annealing duration of the ZnO buffer layer on structural and optical properties of ZnO rods grown by a hydrothermal process [J]. Applied Surface Science, 2009, 255:8501.
- [40] You J B, Zhang X W, Fan Y M, et al. Effects of crystalline quality on the ultraviolet emission and electrical properties of the ZnO films deposited by magnetron sputtering [J]. Applied Surface Science, 2009, 255:5876.
- [41] Huang J H, Wang C Y, Liu C P, et al. Large-area growth of vertically aligned ZnO pillars by radio-frequency magnetron sputtering [J]. Appl Phys (A), 2007, 87(3):749.
- [42] Peng L P, Fang L, Yang X F, et al. Characteristics of ZnO

in thin films prepared by RF magnetron sputtering [J]. Physica E, 2009, 41(10):1819.

- [43] Sutthana S, Hongsith N, Choopun S. AZO/Ag/AZO multi-layer films prepared by DC magnetron sputtering for dye-sensitized solar cell application [J]. Current Applied Physics, 2010, 10:813.
- [44] 甘小燕,李效民,高相东,等.电化学沉积法制备纳米多孔ZnO/曙红复合薄膜[J].无机材料学报,2009,24(1):73.
- [45] 王春梅,杨立荣,段满珍,等.沉积电压对电化学合成纳米ZnO多孔薄膜的影响[J].兵器材料科学与工程,2008,31(1):63.

# Dr. COM 认证环境下 Internet 接入共享与仿真

崔建涛<sup>1</sup>, 赵晓君<sup>1</sup>, 张烁<sup>2</sup>

(1. 郑州轻工业学院 软件学院, 河南 郑州 450001;

2. 中国铝业郑州研究院 设备与自动化研究所, 河南 郑州 450041)

**摘要:**为了满足企业内、外网之间灵活访问的需求,设计了一个改进的 Internet 接入共享方案,基于路由和远程访问服务和网络地址转换技术,成功实现了 Dr. COM 宽带认证环境下主机和移动终端的网络接入共享,并在 VMware 虚拟机上仿真某企业网络.改进后的方案,无需购置专用硬件路由器,具有成本低、软硬件可扩充性强、组网灵活等优点,尤其适用于中小型企业,并为工程技术人员研究 Internet 接入提供了有益参考.

**关键词:**宽带认证;Internet 接入共享;路由和远程访问服务;网络地址转换

**中图分类号:**TP393.07 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.020

## Internet access share and the simulation under the Dr. COM authentication environment

CUI Jian-tao<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-Jun<sup>1</sup>, ZHANG Shuo<sup>2</sup>

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

2. Equipment&Automation Division, Zhengzhou Research Institute of CHALCO, Zhengzhou 450041, China)

**Abstract:** In order to meet the flexible access requirements between internal and external enterprise network, the improved Internet connection share scheme based on RRAS and NAT was designed. The simulation of the company network based on VMware virtual machine was carried out, and Internet access share of host and mobile terminal under the Dr. COM broadband authentication environment was successfully realized. Compared with traditional network access scheme, without purchasing dedicated hardware routers, the improved scheme has some advantages, such as the lower cost, the strong scalability of hardware and software, the flexible networking, etc, which was especially suitable for small and medium enterprises. This scheme provided the beneficial reference about studying Internet access for engineering and technical personnel.

**Key words:** broadband authentication; Internet access share; routing and remote access service (RRAS); network address translation (NAT)

## 0 引言

实现企业内部网络接入 Internet, 通常需要购置

专用的路由器或三层交换机等硬件设备<sup>[1]</sup>, 实施网络地址转换 (NAT)<sup>[2]</sup>, 再接入运营商 ISP 路由器. 该传统接入方案具有数据吞吐量大、稳定可靠等优

点,但由于需要购置专用的硬件设备,存在建网成本高、可扩展性不强、灵活性欠佳等问题<sup>[3]</sup>,并且在部署有宽带认证软件的网络环境下,还有共享接入受限等缺陷.例如,Dr. COM 宽带认证环境限制在主机端安装双网卡,限制使用代理、ICS、NAT 等共享技术,也限制接入无线路由器<sup>[4]</sup>,主机和移动终端无法共享现有的宽带认证账号接入 Internet.

针对 Dr. COM 宽带认证环境下共享接入受限的问题,目前国内外的研究侧重于 Dr. COM 原理分析和破解方法,而极少有利用 RRAS 和 NAT 在主机端实现共享接入的研究和实践.为了解决传统接入方案的不足,满足 Dr. COM 宽带认证环境下主机和移动终端共享接入 Internet 的需求,本文拟采用 RRAS 和 NAT 技术设计一个改进的 Internet 接入共享方案,并在 VMware 虚拟机平台上仿真某企业网络.

### 1 改进的 Internet 接入共享方案及仿真设计

某中小企业网络内部现有一定数量员工用计算机,另有 2 台配置较高的闲置服务器,该网络尚未接入 Internet.出于经费考虑,该企业要求利用闲置服务器作为企业内部路由器及 Internet 接入共享设备使用,实现内部网络所有主机都能访问 Internet,同时内部网络特定主机也能对外提供服务,并能实现在宽带认证环境下主机和移动终端仍能共享现有的宽带认证账号接入 Internet.

根据企业网络现状和联网需求,将 1 台闲置服务器作为企业内部路由器 R1,另 1 台服务器作为主机 1 使用.在主机 1 上运行一个用于 Internet 接入共享的虚拟机,即 Internet 接入共享主机 VM,同时可根据需要在企业内部网络上搭建无线路由器等设备,以便手机、笔记本等移动终端联网,笔者设计的网络拓扑结构,即改进后的 Internet 接入共享方案如图 1 所示.

其中,用 192.168.100.0/24 代表企业内部网络,用 192.168.12.0/30 代表企业内部路由器 R1 与运营商 ISP 路由器之间的企业核心网;企业内部网络中的主机通过企业内部路由器 R1 上的网络地址转换(NAT)访问 Internet,NAT 地址池为 202.196.1.0/28,即 202.196.1.1—202.196.1.14;用 202.196.8.0/24 模拟 Internet 中的某网络,Server1 代表 Internet 中的某台服务器,IP 地址为 202.196.8.189.

笔者利用虚拟机平台仿真该企业网络.由于所用虚拟机较多,若仅在单台物理主机上仿真,必然会占用物理主机的过多资源,建议在多台物理主机上运行不同角色的虚拟机<sup>[5]</sup>.本文为了方便起见,在单台物理主机上仿真主机 1、主机 2、企业内部路由器 R1、ISP 路由器、服务器 Server1.为了更直观识别各网络接口,分别重命名 R1、ISP 的本地连接 1、2 为 Out 接口、In 接口,各主要设备的接口描述、IP 地址/掩码、网关等设置,见表 1.

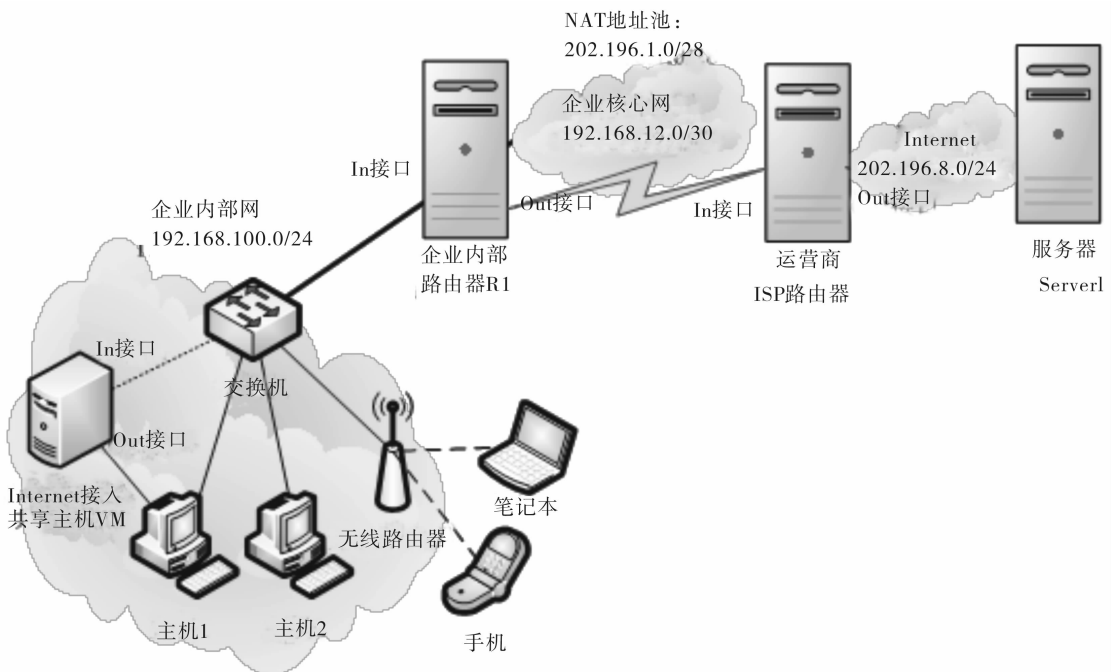


图 1 改进后的 Internet 接入共享方案

表1 各主要设备网络配置

主要设备	接口描述:IP/掩码	网关
主机 1	本地接口:192.168.100.1/24	192.168.100.254
主机 2	本地接口:192.168.100.2/24	192.168.100.254(默认方式)192.168.100.253(共享方式)
内部路由器 R1	In 接口:192.168.100.254/24 Out 接口:192.168.12.1/30	— —
ISP 路由器	In 接口:192.168.12.2/30 Out 接口:202.196.8.254/24	— —
服务器 Server1	本地接口:202.196.8.189/24	202.196.8.254
Internet 共享 主机 VM	In 接口:192.168.100.253/24 Out 接口:利用 VM NAT 动态获取	— 利用 VM NAT 动态获取
无线路由器	WAN 接口:192.168.100.252/24 LAN 接口:192.168.1.1/24	192.168.100.253 —
移动终端	从无线路由器动态获取	从无线路由器动态获取

企业网络内主机 1、主机 2 采用默认方案接入 Internet,需要在企业内部路由器 R1、ISP 路由器上分别配置并启用 RRAS;在 R1 上启用 NAT 并配置默认路由;在 ISP 路由器上配置到 NAT 地址池的静态路由;在 R1 上启用 DHCP 分配器;在 R1 上通过地址/端口映射对外开放内网中的某些网络服务.为了使得主机 2、移动终端等设备能共享主机 1 上现有的宽带认证账号接入 Internet,需要在 Internet 接入共享主机 VM 上启用 RRAS 和 NAT,改进后的共享接入方式如图 2 和图 3 所示.

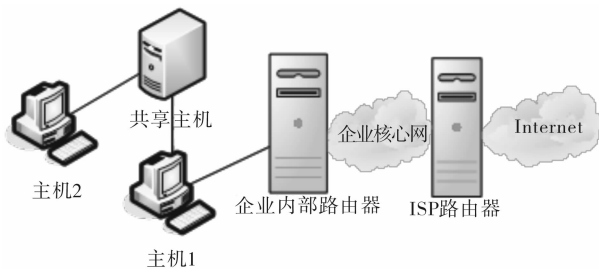


图2 主机2改进后的共享接入图

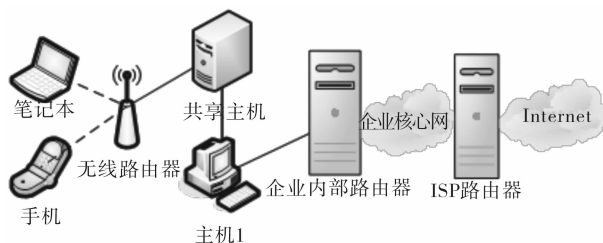


图3 移动终端改进后的共享接入图

## 2 具体实现

### 2.1 在 R1 上启用 RRAS 和 NAT 并配置默认路由

在 R1 上运行 rasmgmt. msc, 打开“路由和远程

访问”控制台,依次选择“配置并启用路由和远程访问”、“自定义配置”,选择“LAN 路由”和“NAT 和基本防火墙”;在 R1 上配置到 Internet 的默认路由,确保 R1 Out 接口右侧的网络互通,目标 0.0.0.0,掩码 0.0.0.0,网关 192.168.12.2;在 R1 上启用 NAT 的专用接口和公共接口,右击“NAT 和基本防火墙”,新增接口“link to LAN 1”、“link to ISP”,依次设置为“专用接口连接到专用网络”、“公共接口连接到 Internet”,并在公共接口上启用 NAT,地址池配置为 202.196.1.1—202.196.1.14.

### 2.2 在 ISP 路由器上启用 RRAS 并配置到 NAT 地址池的静态路由

在 ISP 路由器上运行 rasmgmt. msc, 打开“路由和远程访问”控制台,依次选择“配置并启用路由和远程访问”、“自定义配置”,选择“LAN 路由”;在 ISP 上配置到 NAT 地址池 202.196.1.0/28 的静态路由,确保 Internet 上的主机能访问到地址池,目标 202.196.1.0,掩码 255.255.255.240,网关 192.168.12.1.

### 2.3 在 R1 上启用 DHCP 分配器

为了确保公司内网计算机能动态获取到 IP 地址,可以在内网中部署 DHCP 服务器,也可以启用 DHCP 分配器<sup>[6]</sup>. 本方案在 R1 上启用 DHCP 分配器,右击“NAT 和基本防火墙”,打开“地址指派”选项卡,启用“使用 DHCP 分配器自动分配 IP 地址”,设置 IP 地址 192.168.100.0,掩码 255.255.255.0,点击“排除”,可以排除某些 IP 地址,例如网关 192.168.100.254 及预留的 IP 地址等.

### 2.4 在 R1 上对外开放内网中的某些网络服务

以对外开放主机 1 上的远程桌面为例. 在 R1 上,右击“Out 接口”,打开“服务和端口”选项卡,点



击“添加”,输入服务描述,例如 open pc01 remote desktop,公用地址选择在此地址池项 202.196.1.1,传入、传出端口均设置为 Windows 终端服务的端口 3389,专用地址设置为主机 1 通过 DHCP 分配器动态获取的 IP 地址(例如 192.168.100.70),如图 4 所示。



图 4 设置服务和端口

### 2.5 Internet 接入共享主机 VM 关键技术

VM 上启用 RRAS 和 NAT 的过程和路由器 R1 类似。建议在实际网络环境中仿真该操作,在物理主机 1 上登录 Dr.COM 宽带认证客户端,确保主机 1 能正常访问 Internet,并在主机 1 上运行一台基于 Windows Server 2003/2008 操作系统的虚拟机,即 Internet 接入共享主机 VM。在共享主机 VM 上添加 2 个网络接口卡(NIC),其中 NIC 1 网络连接类型设置为 NAT,重命名本地连接 1 为 Out 接口,其利用虚拟机内置 NAT 动态获取 IP、掩码、网关、DNS 等网络配置<sup>[7]</sup>。NIC 2 网络连接类型设置为桥接,重命名本地连接 2 为 In 接口,手工配置地址 192.168.100.253/24。由于共享主机 VM 的 NIC 1 选择的网络连接类型是 NAT,则无需登录宽带认证客户端就能共享主机 1 的 Internet 连接,并且在其上安装双网卡,主机 1 上的宽带认证客户端不会发出任何警告,也不会注销主机 1 上的 Internet 连接,这为移动终端、无线路由器共享接入 Internet 提供了条件。

## 3 测试结果

### 3.1 默认接入测试

在服务器 Server1 上启用网络服务(以 Telnet 为例)。通过 R1 上的 DHCP 分配器功能,主机 1 成功获取 192.168.100.0/24 子网内地址(例如 192.168.100.70),并能成功访问服务器 Server1 (202.196.8.189)上的 Telnet 服务(服务器 Server1 需提前启用 Telnet 网络服务)。在 Server1 上,运行 mstsc,输入 202.196.1.1,成功访问主机 1 上的远程桌面(主机 1 需要提前启用远程桌面)。主机 2 若启用 DHCP,也能成功获取 192.168.100.0/24 子网内地址(例如 192.168.100.107)。

在服务器 Server1 上,运行 netstat-n,查看网络连接状态,如图 5 所示。

Proto	Local Address	Foreign Address	State
TCP	202.196.8.189:23	202.196.1.1:1221	ESTABLISHED
TCP	202.196.8.189:23	202.196.1.2:1088	ESTABLISHED
TCP	202.196.8.189:1048	202.196.1.1:3389	ESTABLISHED

图 5 Server1 网络连接状态

在企业内部路由器 R1 上,查看网络地址转换映射表,如图 6 所示。

测试结果表明,主机 1、主机 2 的内网专用地址已经通过企业内部路由器上启用的 NAT 转换为地址池中的公用地址,并已成功建立了到服务器 Server1 的 Telnet 连接(远程端口为 23);Server1 已经建立了到 202.196.1.1 的远程桌面连接(外部端口为 3389),公用地址 202.196.1.1 将映射为主机 1 的内网专用地址 192.168.100.70。

### 3.2 主机 2、移动终端共享接入测试

将主机 2 的默认网关指向 Internet 接入共享主机 In 接口的 IP 地址,即 192.168.100.253,主机 2 此时无需登录宽带认证客户端便可以访问 Internet。将无线路由器的 WAN 口接入到如图 2 所示的企业内部交换机上,并将 WAN 接口设置为企业内部网

通讯协议	方向	专用地址	专用端口	公用地址	公用端口	远程地址	远程端口	空闲时间
TCP	入站	192.168.100.70	3,389	202.196.1.1	3,389	202.196.8.189	1,048	0
TCP	出站	192.168.100.70	1,208	202.196.1.1	1,208	202.196.8.189	23	46
TCP	出站	192.168.100.107	1,083	202.196.1.2	1,083	202.196.8.189	23	36

图 6 网络地址转换映射表

# 云南-广东 $\pm 800$ kV 直流 系统无功控制策略研究

崔光照, 董振廷

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**在特高压直流输电系统中,为了实现无功控制减轻换流站谐波对交直流系统及主设备的危害,进而保证交直流系统无功交换满足系统要求的目的,以云南-广东 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程为例,分析了直流系统控制滤波器投切的电压控制、无功交换控制和谐波性能控制,提出了相关的控制逻辑优化策略:修改极控系统送给直流站控系统的电压,由参考电压改为实际电压,同时增加一个判断逻辑判断每极是否有效解锁,以避免所有滤波器投入来满足谐波性能需求;加入滤波器小组电流判断逻辑,以消除滤波器小组无功功率取值问题,避免系统过多投入滤波器. 试运行情况表明,该优化策略能够解决云广工程站控系统存在的缺陷,为其他特高压直流工程的设计提供有益的参考.

**关键词:**特高压直流输电;无功控制;交流滤波器;投切控制

中图分类号:TM732 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.021

## Strategy of reactive power control in Yunnan-Guangdong $\pm 800$ kV DC system

CUI Guang-zhao, DONG Zhen-ting

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

**Abstract:** In ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission system, in order to realize the function of the reactive power control to mitigate the harms of the harmonics produced by the converters to the system and the primary equipments, then to balance the reactive power exchanged between the AC and DC systems. Taking Yunnan-Guangdong  $\pm 800$  kV UHVDC transmission project as an example, the voltage control, reactive power control and harmonic performance control for the DC filter groups switching was analyzed, and certain strategies to optimize the control logic of the DC filter groups were presented: pole control system for the station control system of the reference voltage was changed to the current voltage, at the same time increase a logic judgement that used to determine each pole whether effective unlocked, in order to eliminate filter group reactive power values and avoid excessive input filter system. This optimization strategy can fully solve the problems of station control in Yunnan-Guangdong project and have good reference value for the following UHVDC transmission project.

**Key words:** ultra high voltage direct current (UHVDC); reactive power control; AC filter; switching control

收稿日期:2013-11-05

作者简介:崔光照(1957—),男,河南省洛宁县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为智能电器控制技术、系统工程、测试系统.

## 0 引言

伴随各类大型输电工程的不断建设,输电走廊资源日益匮乏. ±800 kV 直流输电工程的建设,不但可以使电网运行更加安全稳定,而且能够大大提高输电走廊的利用率、扩大输电规模. 云南-广东±800 kV 直流输电工程(以下简标云广工程)东起广东省穗东换流站,西至云南省楚雄换流站,全线长度1 418 km,额定输送功率5 000 MW,运行后对南方电网安全稳定运行起着重要作用<sup>[1]</sup>.

特高压直流工程运行过程中,逆变站和整流站都需要使用大量无功功率. 为了确保工程现场换流站运行安全可靠,需要将系统无功功率的补给保持在一定的范围内. 补给的无功功率过多或者过少,都会造成交流电压的波动,严重时会影响整个输电工程的运行. 直流系统无功功率控制对于保证直流工程中换流站所需无功功率,保持无功功率补给,具有重要的意义. 系统在额定功率运行过程中,整流站需要使用的无功功率占输送功率的42%~52%,逆变站使用的无功功率占输送功率的52%~60%. 以额定输送功率为6 400 MW的±800 kV特高压直流输电工程为例,整流站需要补给3 400~4 500 Mvar的无功功率,逆变站则需要补给3 200~4 500 Mvar的无功功率<sup>[2-3]</sup>.

对于±800 kV特高压直流输电工程而言,交流站控系统和直流站控系统的设计相比常规的高压直流输电工程更加复杂,功能也更加强大. 特高压直流输电系统在直流站控中实现了对双极层的控制以及对直流滤波器的控制和监视. 由于工程现场中每站共包含4个阀组,所以特高压直流输电工程中还增加了阀组控制系统<sup>[1]</sup>. 云广工程共有4组交流滤波器:双调谐滤波器DT11/24(A型)、双调谐滤波器DT13/36(B型)、HP3(C型)、SC(D型)<sup>[4]</sup>. 本文拟对云广直流系统用于控制滤波器投切的电压控制、无功交换控制和谐波性能控制进行分析,以提出控制逻辑优化策略.

## 1 电压控制

电压控制维持交流场母线电压在最小电压设置值 $U_{\min}$ 和最大电压参考值 $U_{\max}$ 之间的范围内<sup>[6]</sup>. 交流侧交流场母线电压小于 $U_{\min}$ ,系统自动投入滤波器小组,交流侧交流场母线电压大于 $U_{\max}$ ,系统自

动切除滤波器小组. 为了保证系统安全稳定的运行,交流侧交流场母线电压值达到设定级别时,系统自动切除滤波器组,最小滤波器组除外. 系统设定的级别为跳闸级别或者隔离级别<sup>[5]</sup>. 云广工程中电压控制时滤波器投切曲线如图1所示.

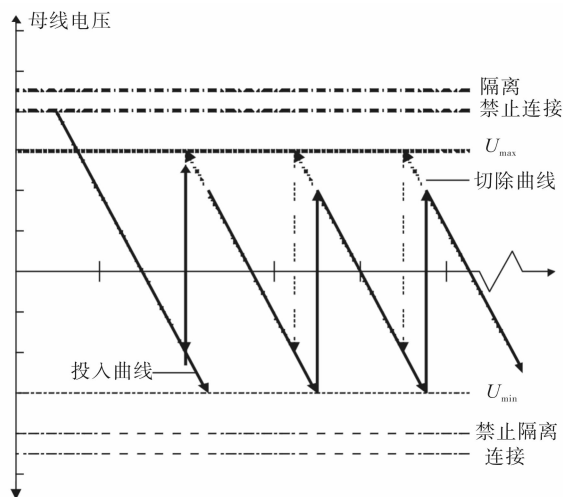


图1 电压控制投切曲线

在云广直流系统中,穗东换流站设定 $U_{\min} = 485 \sim 525$  kV,  $U_{\max} = 495 \sim 535$  kV. 楚雄换流站设定 $U_{\min} = 500 \sim 540$  kV,  $U_{\max} = 510 \sim 550$  kV.

## 2 无功交换控制

无功交换控制的目的是把交流系统与换流站交换的无功功率限定在一定范围内. 当设定为无功交换控制模式时,系统将依据交流系统与换流站之间无功功率交换的情况进行滤波器投切控制. 交流系统与换流站之间的无功功率交换表示为

$$Q_{\text{sys}} = Q_c - Q_{\text{fil}} \quad (1)$$

式中, $Q_c$ 为换流站换流器吸收的无功功率/Mvar, $Q_{\text{fil}}$ 为滤波器提供的无功功率/Mvar.

$$Q_{\text{fil}} = Q_{\text{filn}} \times U_{\text{ACa}}^2 / U_{\text{ACn}}^2 \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{filn}}$ 为交流滤波器小组功率额定值/Mvar, $U_{\text{ACa}}$ 为交流母线实际电压测量值/kV, $U_{\text{ACn}}$ 为交流母线电压额定值/kV.

根据公式①②,按照最低母线电压和最高母线电压分别计算出投入运行的滤波器实际提供的无功功率. 经计算楚雄换流站无功功率交换上限( $Q_{\max}$ )设定为-20~40 Mvar,下限( $Q_{\min}$ )设定为-220~-160 Mvar. 穗东换流站上限( $Q_{\max}$ )设定为-90~10 Mvar,下限( $Q_{\min}$ )设定为-310~-210 Mvar.

系统在投入滤波器时,正好换流变压器分接头同时启动.在这种情况下会导致点火角或熄弧角变化,换流变压器的无功消耗快速变小,系统无功值落在切除滤波器区域.为了防止出现这种情况,系统在投入滤波器时增加无功裕度  $Q_{mar}$ ,云广系统中将  $Q_{fi}$  的 15% ~ 20% 作为投入滤波器的裕度值.

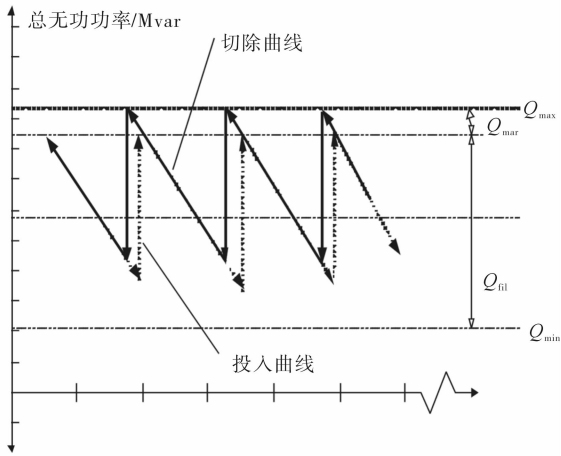


图 2 抑制滤波器频繁投切曲线

为防止滤波器频繁投切,同一个滤波器在一定的时间内投切次数超过设定值,ABB 公司自动把频繁投切的滤波器转换到手动控制.图 3,图 4 表示云广直流输电工程中换流站无功交换控制参数设定(图中白色柱表示无功出力,灰色柱表示无功裕度).

当系统采用无功交换控制时,倘若无功功率小于系统设定的下限值,则必须切除滤波器组,使系统

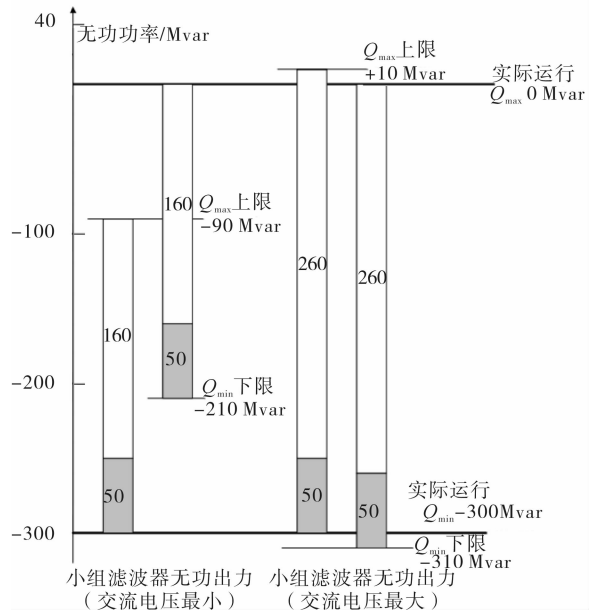


图 4 穗东换流站无功交换控制参数

补偿的无功功率保持在给定范围内,系统交换的无功功率与无功交换上限的差值大于无功交换下限时,即可投入滤波器.在电压变化的情况下,根据电压的高低动态地改变投入点.

### 3 谐波性能控制

换流站换流阀消耗的无功功率随直流场功率的变化而变化.系统消耗的无功功率增加,交流侧产生谐波同时增加,所需要滤波器数目相应增加,反之,所需滤波器数目减少.根据直流电压和直流场配置模式,不同电流级别下配置不同滤波器个数,从而滤除交流侧谐波.

云广直流输电系统中,谐波性能控制滤波器投切不考虑阀组运行方式,只考虑全压、80% 降压、70% 降压 3 种运行模式下功率水平.直流场实时电压实时折算功率法可用于滤波器数目的配置.根据直流场电压大小分为 70%, 70% ~ 80%, 80%, 80% ~ 100%, 100% 这 5 种谐波性能配置模式,使滤波器的配置在全压恢复过程中符合谐波变化规律.

功率传输方向为云南至广东.极电压标幺值 > 0.98 时,站控系统判为 100% 全压运行;极电压标幺值为 0.82 ~ 0.98 时,站控系统判为 80% ~ 100% 电压恢复过程;极电压标幺值为 0.78 ~ 0.82 时,站控系统判为 80% 降压运行;极电压标幺值为 0.72 ~ 0.78 时,站控系统判为 70% ~ 80% 电压恢复过程;极电压标幺值 < 0.72 时,站控系统判为 70% 降压运行<sup>[6]</sup>.表 1 为相同滤波器配置功率对比.

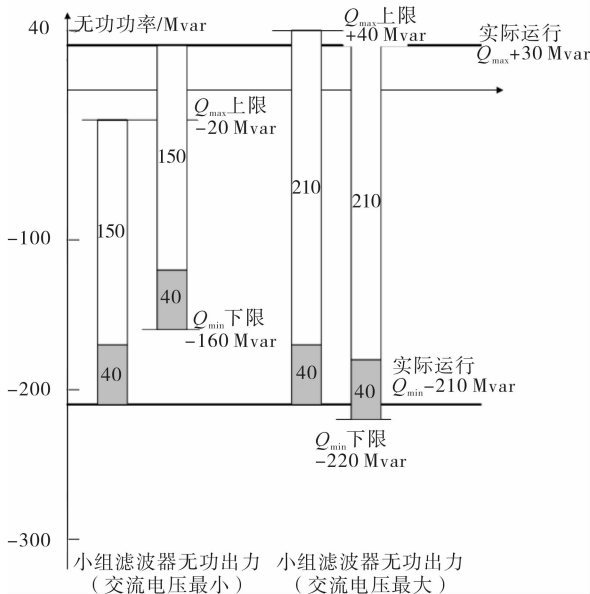


图 3 楚雄换流站无功交换控制参数

表1 相同滤波器配置功率对比

滤波器配置	Ud80	Ud70	Ud80/Ud70
1A+1B	5.0	5.0	
1A+1B+1C	15.0	10.0	1.5
2A+1B+1C	22.5	15.0	1.5
2A+2B+1C	27.5	20.0	1.4
3A+2B+1C	32.5	22.5	1.4
3A+3B+1C	40.0	27.5	1.5
4A+3B+1C	45.0	32.5	1.4
4A+3B+2C	50.0	37.5	1.3
4A+4B+2C	55.0	40.0	1.4
4A+4B+2C+1D	62.5	45.0	1.4
4A+4B+2C+2D	70.0	47.5	1.5
4A+4B+2C+3D	75.0	50.0	1.5
4A+4B+2C+4D	80.0	55.0	1.5
4A+4B+2C+5D	85.0	60.0	1.4
4A+4B+2C+6D	90.0	65.0	1.4
平均值			1.4

注:A表示DT11/24型滤波器,B表示DT13/36型滤波器,C表示HP3型滤波器,D表示SC型滤波器;Ud80表示80%降压模式,Ud70表示70%降压模式。

电压在72%~78%恢复过程中,电压变化量约为6%,取10%进行计算。从表1可知功率平均比值 $K=1.4$ ,将功率折算到80%电压水平,并使折算功率线性减小,设计功率折算公式为

$$P = P_{act} \times [1 + (K - 1) \times (0.8 - U_d) / 0.1]$$

其中, $P_{act}$ 表示折算前功率/Mvar, $U_d$ 表示电压百分值, $P$ 表示折算后功率/Mvar。

## 4 滤波器投切控制优化

### 4.1 高压侧注流滤波器投入分析及优化

笔者对穗东高压侧注流试验中所有滤波器投入进行分析,进而提出优化策略。极控系统经过控制总线把换流变压器阀侧电压发送到直流站控系统。但极控系统发送的是阀侧电压参考值(只要此阀组没有故障,在闭锁状态下,此值便发送给直流站控),而不是换流变压器阀侧电压实际值。此值经过测量系统计算,经极控控制总线发送到直流站控,直流站控双极层进行计算得到一个很大的功率值。谐波性能控制是根据直流功率配置滤波器,而且把电容器也考虑在内。在这种状态下,若给高压侧注入很大电流,将导致所有滤波器都投入以满足谐波性能需求。为了避免这种情况的发生,必须在极控或直流站控系统中加入相应的处理,修改极控系统送给直流站控系统的电压,由参考电压改为实际电压。同时增加一个判断逻辑,其功能是判断每极是否有效解锁(见图5)。

### 4.2 交流滤波器小组无功计算优化

在运行阶段,发生了系统多次投入滤波器的问题。经过分析,发现是直流站控系统判断滤波器小组无功功率计算逻辑有问题。交流滤波器小组无功功率计算逻辑见图6。

从以下程序可以看出,当信号电源丢失后,滤波器小组和滤波器大组隔离刀闸处于未定义状态,此时滤波器小组无功值取0,有可能导致系统多投入滤波器。

在这种故障状态下,加入滤波器小组电流判断逻辑,可以有效消除滤波器小组无功功率取值问题。

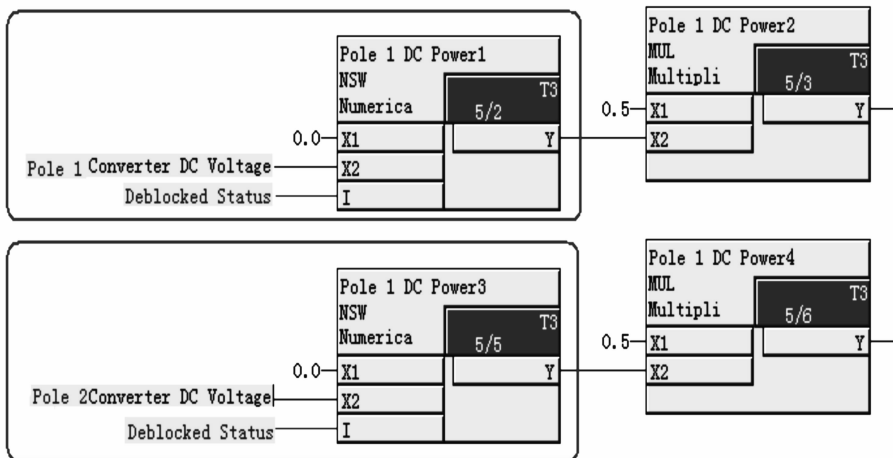


图5 优化后的判断逻辑图

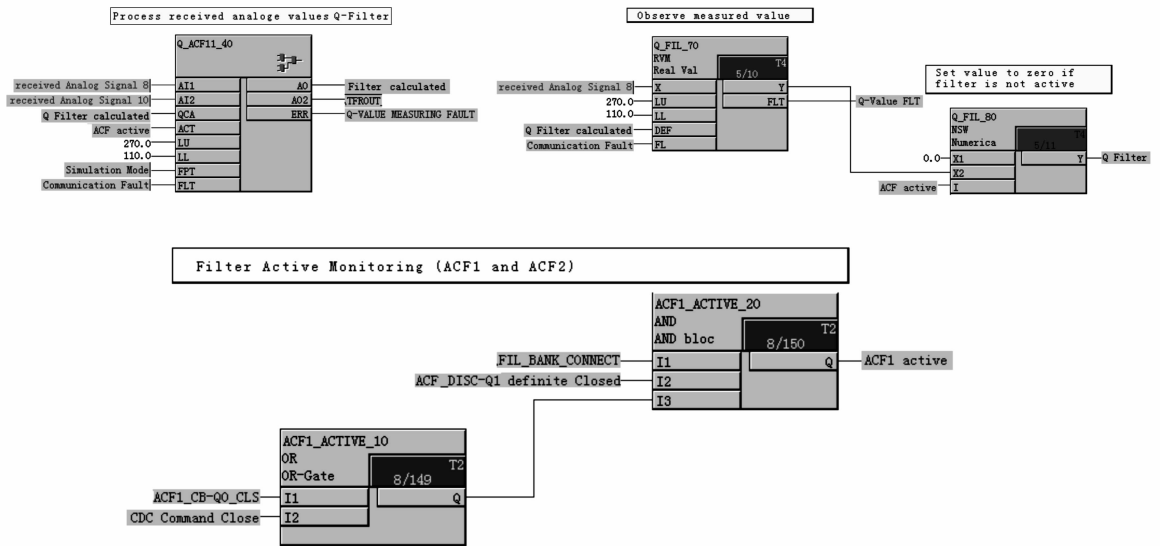


图 6 交流滤波器小组无功功率计算判断逻辑图

当小组滤波器三相电流有效值大于门槛值时,无论滤波器大组开关和滤波器小组开关处于何种状态,系统仍判定该滤波器小组为投入状态.仿真实验表明,加入滤波器小组电流判断逻辑后,交流侧电压在 20 ms 后达到稳定值.

## 5 结语

特高压直流输电系统主要通过无功单元的投切实现无功控制.系统在满足换流站谐波和无功条件的同时,投切策略设计还应考虑不同类型无功单元投切的均衡性,这样可以避免对某些滤波器组过分使用.

本文分析了云广特高压直流工程中的电压控制、无功交换控制和谐波性能控制,并对云广直流输电工程在软件设计方面暴露出来的一些问题进行了详细的分析,提出了针对性的解决办法.由于云广直流输电工程采用单极双阀组串联结构,阀组之间相互影响和相互联系更加紧密,所以部分滤波

器控制逻辑仍存在优化空间.

## 参考文献:

- [1] 张爱玲,姚致清,涂仁川,等.云广特高压直流输电工程站控系统的设计缺陷及改进分析[J].电力系统保护与控制,2011,39(4):117.
- [2] 赵婉君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 张望,郝俊芳,曹森,等.直流输电换流站无功功率控制功能设计[J].电力系统保护与控制,2009,37(14):72.
- [4] 田庆.云广特高压直流输电工程穗东站交流滤波器电阻谐波过流保护误动作分析[J].高压电器,2012,48(2):7.
- [5] 戴国安,周君文,王亚非.特高压直流无功控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2008,36(14):48.
- [6] 戴国安,王柏恒,刘文,等.一种高压直流输电全压恢复过程中谐波性能控制的方法[P].中国:CN101895111B,2013-06-12.

# 基于增量式光电编码器电机测速系统的设计

丁卫东<sup>1</sup>, 朱卫民<sup>2</sup>, 曹玲芝<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 河南省计量科学研究院, 河南 郑州 450008)

**摘要:**采用光电编码器作为电机测速元件,设计了基于增量式光电编码器电机测速系统. 该系统中,光电编码器的输出脉冲经斯密特触发器整形后,由单片机进行采集、计算,测得的电机旋转速度和方向由LCD进行显示,测速周期由键盘进行设定,测速算法采用M/T法. 该系统测量精度高,可实时显示,适用于运行时振动较小的电机测速.

**关键词:**增量式光电编码器;电机测速系统;微控制单元

**中图分类号:**TM930 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.022

## Design of motor speed-measuring system based on the incremental photoelectric encoder

DING Wei-dong<sup>1</sup>, ZHU Wei-min<sup>2</sup>, CAO Ling-zhi<sup>1</sup>

(1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. He'nan Province Institute of Metrology, Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** The motor speed measuring system based on incremental photoelectric encoder was designed using photoelectric encoder as the component for motor rotating speed. In this system, the output pulse of photoelectric encoder was reshaped by Schmitt triggers, then MCU gathered the signal and calculated the rotating speed value, the motor rotating speed and direction were displayed by the LCD, measurement cycles were set by keyboard and speed measurement algorithm used M/T method. The measurement system had the characteristics of high precision and real-time display, suitable for motor speed-measuring at runtime with smaller vibration.

**Key words:** incremental photoelectric encoder; motor speed-measuring system; micro control unit

## 0 引言

随着现代化科技的发展,电机作为一种执行装置,在自动化控制、计量检定等领域的应用越来越广泛.转速是各类电机的重要物理量,需要对电机转速进行实时监测,工程实践对电机测速范围和精度的要求也在逐步提高.增量式光电编码器与电机

同轴,通过光电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲.输出的2组方波脉冲A相和B相的相位差90°,可方便地计算电机转速,判断旋转方向,且抗干扰能力强,可靠性高,适合长距离传输.本文拟基于增量式光电编码器设计电机测速系统,以提高系统测量精度.

收稿日期:2013-11-19

作者简介:丁卫东(1987—),男,山西省神池县人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为电机应用.

通信作者:曹玲芝(1965—),女,河南省焦作市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为现代测工技术.

# 1 系统结构与原理

测速系统结构如图 1 所示。

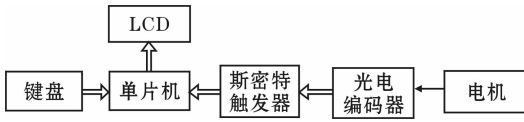


图 1 系统结构图

光电编码器与电机同轴,将电机旋转量转化为脉冲输出,经过斯密特触发器进行脉冲整形,单片机采集脉冲后换算为电机转速值,并由 LCD 显示,由键盘进行采样周期设定,实现人机交互。

增量式光电编码器由光栅盘、发光二极管、光敏传感器、转轴、转换电路、电源及信号线连接座组成。光栅盘是在一定直径的圆板上等分地开通若干个长方形孔。光栅盘与电机同轴,电机旋转带动光栅盘同速旋转,发光二极管发光,光敏传感器通过光栅盘的长方形孔接收光信号,生成正弦波,经转换电路输出脉冲。光电编码器输出脉冲的频率即反映电机的当前转速,输出 2 路相位差为 90° 的脉冲信号来判定电机转动方向。图 2 所示为增量式光电编码器原理图,图 3 所示为增量式光电编码器的输出信号波形。

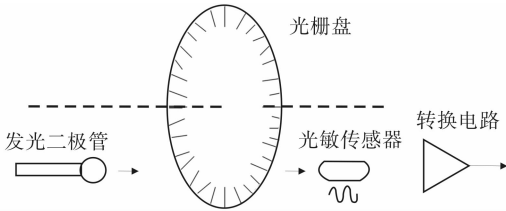


图 2 增量式光电编码器原理图

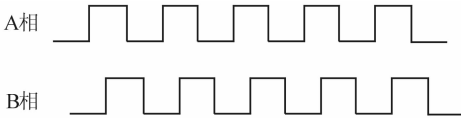


图 3 增量式光电编码器的输出信号波形

斯密特触发器是一种阈值开关电路,有 2 个阈值电压,分别称为正向阈值电压和负向阈值电压。斯密特触发器属于电平触发型电路,不依赖边沿陡峭的脉冲,这种电路多被设计用于阻止输入电压出现微小变化而引起输出电压的改变。当输入电压  $V_i$  上升到  $VT+$  电平时,触发器翻转,输出负跳变;过了一段时间输入电压回降到  $VT+$  电平时,输出并不回到初始状态,而需输入  $V_i$  继续下降到  $VT-$  电平时,

输出才翻转至高电平(正跳变),因而出现输出电压变化滞后的现象,这是斯密特触发器的一个重要特性。斯密特触发器的这种电压滞后特性常被用来将正弦波、三角波整形为方波,也可以对脉冲进行波形整形,使脉冲的上升沿或下降沿变得陡直,从而有效滤除干扰,使脉冲波形变得平整。所以系统采用斯密特触发器对增量式光电编码器的输出脉冲进行整形,整形原理如图 4 所示。

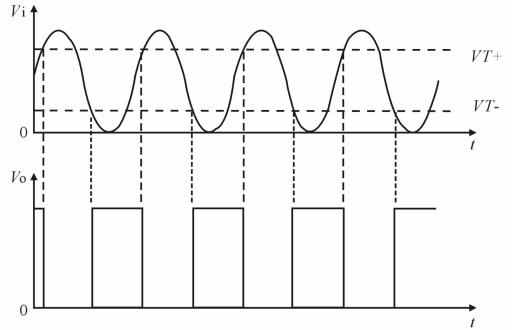


图 4 斯密特触发器整形原理图

系统测速方法采用 M/T 法,电机转速公式为

$$n = 60 M_1 f / k M_2 \tag{1}$$

式中,  $n$  表示电机转速/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $f$  表示参考时钟频率/Hz;  $M_1$  表示在采样周期  $T$  内采集的增量式光电编码器输出脉冲数加 1;  $M_2$  表示  $T + \Delta T$  内采集的参考时钟的脉冲数;  $k$  为增量式光电编码器光栅盘的线数。

测速原理如图 5 所示。

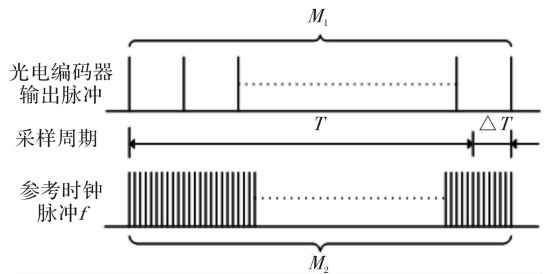


图 5 M/T 法原理图

在测速过程中,单片机在斯密特触发器输出脉冲信号的上升沿或下降沿同步对参考时钟脉冲和斯密特触发器输出脉冲进行计数,采样周期  $T$  结束后,在下一个上升沿或下降沿到来时同时结束对参考时钟脉冲和斯密特触发器输出脉冲的计数,即对光电编码器输出信号的计数值为整数,因此只会产生参考时钟脉冲  $\pm 1$  的误差。



## 2 系统硬件设计

系统中电源电压为直流电压,增量式光电编码器、LCD12864M 液晶模块、单片机 STC12C5A60S2、斯密特触发器芯片 74LS14 需 +5 V 的供电电压,所以系统电源为 5 V.

硬件连线图如图 6 所示.

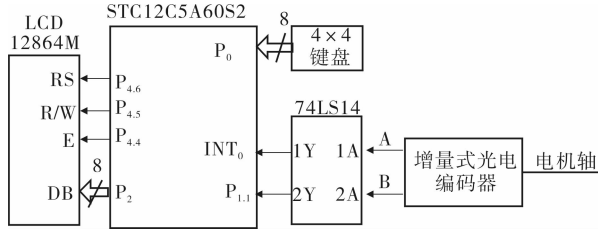


图 6 硬件连线图

4 × 4 键盘上拉 10 kΩ 电阻接单片机的 P<sub>0</sub> 口. LCD12864M 的 DB<sub>0</sub>—DB<sub>7</sub> 分别接 P<sub>2.0</sub>—P<sub>2.7</sub>, RS, R/W, E 分别接单片机 P<sub>4.6</sub>, P<sub>4.5</sub>, P<sub>4.4</sub> 脚. 光电编码器与步进电机同轴, 输出 A, B 2 路脉冲, 系统所用光电编码器是推挽式输出, 2 路脉冲上拉 5 kΩ 左右电阻, 分别连接 74LS14 的 1A, 2A 口, 74LS14 的输出口 1Y, 2Y 分别接单片机中断口 INT<sub>0</sub>, I/O 口 P<sub>1.1</sub>. 由 A 路进行中断计数, 中断时判断 B 路当前高低电平, 可判别电机正反转.

## 3 软件流程

程序流程如图 7 所示. 按键定义为数字键 0—9, “.” 为小数点, “C” 为清除键, 用于采样周期  $T$  值输入. “设置” 键用于初值设定起始, “确定” 键表示  $T$  值设定完毕, 设置过程 LCD 全程显示. 如图 5 所示, 单片机在采样周期  $T$  结束后的下一个中断(即  $T + \Delta T$  时间内)完成数据采集, 根据式①计算得电机转速值, 由 LCD12864M 进行显示, 重复上述过程对电机速度进行实时检测显示.

## 4 误差分析

### 4.1 理论误差分析

测速绝对误差

$$\Delta = \left| \frac{60M_1f}{KM_2} - \frac{60M_1f}{K(M_2 \pm 1)} \right| = \frac{60M_1f}{K} \left| \frac{\pm 1}{M_2(M_2 \pm 1)} \right| \quad (2)$$

测速相对误差

$$\delta = \Delta / (60M_1f / KM_2) = \left| \frac{\pm 1}{M_2 \pm 1} \right| \times 100\% \quad (3)$$

由 ②③ 式可知, 测速误差很小, 可以忽略.

### 4.2 试验结果

对 57 × 80 两相步进电机进行测速, 电机驱动采用 2 细分. 试验结果如表 1 所示.

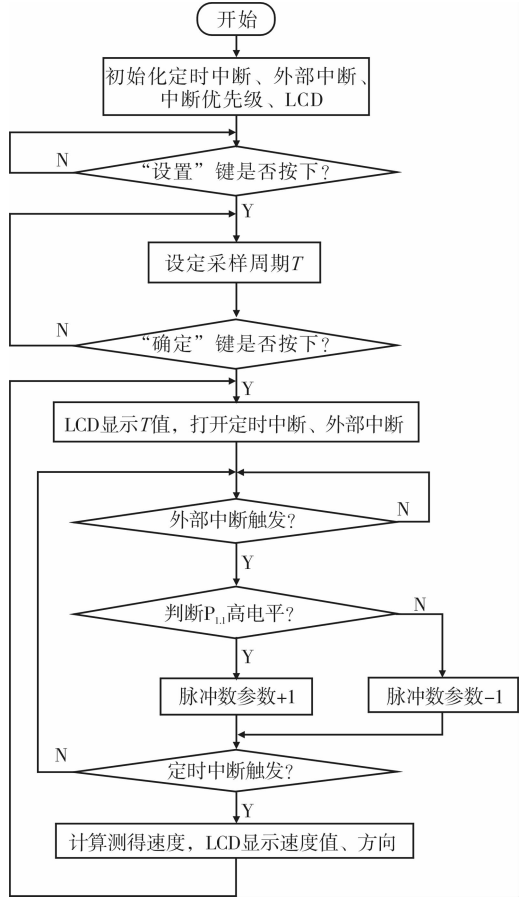


图 7 程序流程图

表 1 驱动器 2 细分的测试结果  $r \cdot \text{min}^{-1}$

电机速度 设定值	测量值	
	电机非固定	电机固定
10.0	101.905	77.750
20.0	66.205	57.750
30.0	158.181	129.250
40.0	61.781	50.733
50.0	50.027	50.000
60.0	65.250	60.000
80.0	80.087	80.000
100.0	100.108	100.000
120.0	120.126	120.000
150.0	150.053	150.000
180.0	180.027	180.000
200.0	200.000	200.000

# 电力直流电源产品老化监控系统的设计与实现

胡小东, 郑培轩, 李捷, 赵晓丹

(国家电网许继集团 许继电源有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:**以 ATmega64 芯片为电路核心,设计了电力直流电源产品老化监控系统.该系统开发平台利用工业平板电脑作为主控机,采用功能单元模块化结构,通过 RS485 接口总线控制数据采集和各功能单元驱动,实现对老化产品各种参数的采集及监控.实际应用证明,该系统具备控制效果好、可靠性高、控制灵活等优点.

**关键词:**电力直流电源产品老化监控系统;RS485 接口总线;ATmega64 芯片

**中图分类号:**TP277 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.023

## Design and implementation of aging monitoring system of power supply products of DC power

HU Xiao-dong, ZHENG Pei-xuan, LI Jie, ZHAO Xiao-dan  
(Xuji Power Co., Ltd., State Grid Xuji Group, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Taking the ATmega64 chip as the core of the circuit, the DC power supply aging monitoring system was designed. The system developed platform using industrial tablet computer as the main control machine, the functional unit of modular structure, driven by the RS485 interface bus and each functional unit to realize acquisition and monitoring of various parameters of the aging products. The practical application showed that the system had the advantages of good control effect, high reliability, flexible control.

**Key words:** aging monitoring system of power supply products of DC power; RS485 interface bus; ATmega64 chip

## 0 引言

在现场应用中,电力直流电源产品的可靠性是客户最重视的要素,是产品重要的性能指标之一.为了在出厂前及早发现不合格产品的隐性缺陷,需要对产品进行长时间的高温加载老化测试,根据老化测试的浴盆曲线,产品中的元器件在几十个小时的极限工作环境下可以达到常温下 1 000 多个小时的测试效果,使产品度过早期失效期,充分暴露生产工艺、元器件质量引起的电路隐性缺陷,从而使

产品进入相对稳定的长时间偶然失效期<sup>[1]</sup>.

传统老化方式的做法是:接入电源,并启动老化装置;按老化要求进行连续加电,定时进行人工记录;对异常情况采用人工观察老化装置报警灯状态的方法.传统老化方式存在以下弊端:1)需要 24 小时不间断有人值守;2)需要人工记录数据,对于老化异常数据不能实时记录,异常状态定位不清,不利于老化数据分析和统计;3)数据记录缺乏一致性<sup>[2]</sup>.以上 3 点会影响到产品故障的有效跟踪,不利于产品质量的进一步提高.为了适应老化

收稿日期:2013-08-01

作者简介:胡小东(1978—),男,内蒙古自治区赤峰市人,国家电网许继集团许继电源有限公司工程师,主要研究方向为高频开关电源、电动汽车充电机.

过程的批量化,同时兼顾系统的响应速度,本文拟采用 RS485 网络将单片机控制的多个产品老化架组成监控网络平台以实现产品老化状态自动巡检记录、报警信息自动记录定位、自动输出打印老化报表、老化数据条件检索、火灾手机短信告警等功能。

## 1 系统结构

图 1 所示为老化箱监控系统结构图,上位机采用 PC 工控机,负责对整个系统进行监控,对监控数据进行显示处理,并向下位机发送各种操作控制命令及参数设定.本系统共有 8 个巡检模块,每个巡检模块最多可同时检测 10 台直流电源产品,因此可以同时监测 80 台产品的老化数据.巡检模块、烟雾报警单元、温度检测控制单元将检测到的老化数据、报警信息、环境温度信息通过 RS485 转给 RS232 集线器,由集线器进行地址分配并通过串行通信发送给工控机,再由上位机软件对检测数据进行解析,显示老化产品的工作数据、当前报警信息和环境温度曲线,并存储每台老化产品的数据,生成历史报表储存在数据库中.上位机软件还向操作员提供良好而方便的人机交互界面,操作员通过该界面,可以设置系统的老化时间、老化温度,并在发生故障和老化结束时进行动态提示。

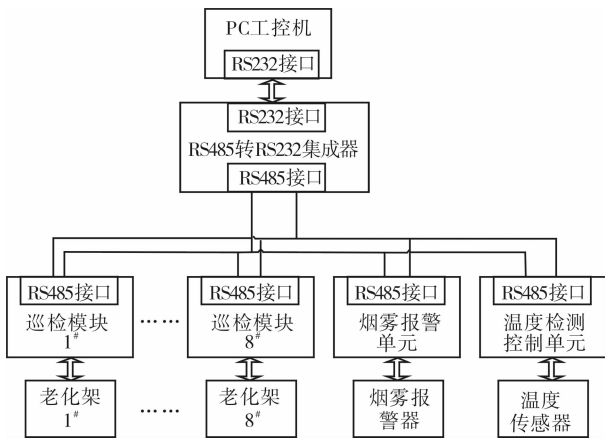


图 1 老化箱监控系统结构图

## 2 系统硬件设计

### 2.1 巡检模块

巡检模块在老化系统中主要完成 2 个方面的工作:一方面通过串行异步方式与上位机通信,接收上位机发来的通信通道切换控制命令,驱动光继电器

的开关;另一方面通过 RS485 通信方式实现与每个老化架中 10 个老化产品的逐个通信,向上位机传递采集数据.硬件框图如图 2 所示。

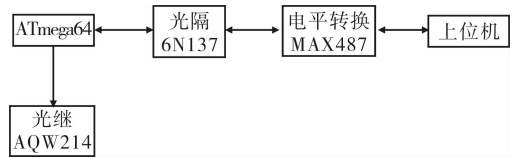


图 2 巡检模块硬件框图

巡检模块以 ATmega64 作为电路核心,ATmega64 是基于增强的 AVR RISC 结构的低功耗 8 位 CMOS 微控制器,数据吞吐率高达 1 MIPS/MHz,具有 64 K 的系统内可编程 Flash,2 K 的 EEPROM,4 K 的内部 SRAM,53 个通用 I/O 口线,可以通过 SPI 实现系统内编程,还可用于访问片上调试系统,编程的 JTAG 接口与 IEEE 1149.1 标准兼容<sup>[3]</sup>. ATmega64 集成 2 路 RS485 控制器,要实现 RS485 总线与上位机通信,需要外接 MAX487 总线收发器进行电平转换,RS485 控制器引脚 RXD<sub>0</sub>,TXD<sub>0</sub> 与收发器 MAX487 并不直接相连,而是通过高速光耦 6N137 构成隔离电路后再与 MAX487 相连,这样可以很好地实现 RS485 总线上各节点的电气隔离<sup>[4]</sup>。

### 2.2 烟雾报警单元

烟雾报警单元由烟雾报警器、开入信号采集模块、开出信号控制模块和 GSM Modem 组成.若产品老化过程中有烟雾产生,烟雾报警器会发出声音报警信号,延时一定时间后,如果报警信号仍然存在,开入信号采集模块将开始处理烟雾报警器的报警开出信号,驱动开出信号控制模块实现节点信号开出,从而断开老化架主回路接触器,自动切断所有老化架的供电电源,同时由上位机软件控制 GSM Modem 对指定 SIM 卡用户发送报警短信,提示操作人员进行紧急处理.烟雾报警单元硬件框图如图 3 所示。

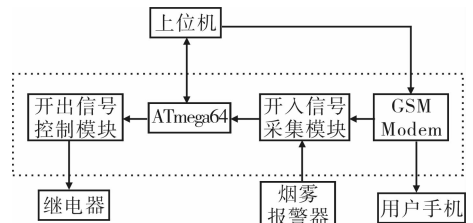


图 3 烟雾报警单元硬件框图

本单元应用电路仍以 ATmega64 作为核心,采用 RS485 总线与上位机通信,开入信号采集模块采

用 24 V 直流电源供电,利用 TLP217 光电耦合器件转换为 5 V 信号,直接进入单片机的输入口;开出信号控制模块输出回路采用并行输出端口控制有接点的继电器. 为了实现数字电路与模拟电路的隔离,提高系统抗干扰能力,每路输出均通过 TLP127 组成一级模拟光电隔离,在光耦输出端增加驱动芯片 ULN2004 对每路信号进行放大,以提高开关量输出的带载能力.

本单元烟雾报警器选择离子/光电联合烟雾报警器,报警时具有干接点继电器输出功能. 离子烟雾报警器对微小的烟雾粒子感应比较灵敏,而光电烟雾报警器对稍大的烟雾粒子感应较灵敏,采用该联合报警器可以弥补使用单个烟雾报警器感应功能上的不足,达到各种烟雾均衡检测的目的.

GSM Modem 简称为短信猫,是一种使用移动通信系统的调制解调器,它就像一部手机一样通过 SIM 卡注册到运营商,当 GSM Modem 连接上位机时,上位机可以通过它与移动网络进行通信,用户还可以通过它来接收和发送彩信或短信. 本单元短信报警的设计就是基于上述功能实现的,当老化过程中发生烟雾报警时,对多名用户进行短信群发,通知操作人员处理紧急事故.

### 2.3 温度检测控制单元

温度检测控制单元主要由单片机控制模块、温度检测传感器、风机启动继电器及其驱动模块组成. 以 ATmega64 为核心的单片机控制模块具有采集老化温度信息、与上位机通信传递温度信息及接收上位机控制命令驱动风机继电器启动等功能. 温度检测传感器选用 DALLAS 公司的一线式单线数字温度传感器 DS18B20,测温范围  $-55 \sim +125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在  $-10 \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$  时精度为  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,支持多点组网功能,在本系统中可实现多点测温. 该传感器不需要任何外围元件,简化了电路组成成本,测量结果会以 9—12 位数字量方式串行传送至单片机. 由于单片机的输出功率有限,输出电流很小,不能直接驱动风机启动继电器,考虑到系统的抗干扰性和可靠性,选择芯片 ULN2004 作为继电器驱动芯片,以提高输出电路的带载能力. 温度检测控制单元硬件框图如图 4 所示.

## 3 系统软件设计

本系统的上位机监测软件采用 VC++ 开发而成,运行于 Windows XP 系统,采用 MS SQL Server

2000 数据库记录采集数据. 上位机软件完成用户权限管理、老化参数设定、监控数据采集显示、报表输出、报警监控、老化故障记录等功能<sup>[5-6]</sup>.

上位机采用多线程方式通过巡检模块对多组老化架中的不同老化模块同时进行数据采集与处理,缩短了采样周期,提高了故障点的及时采出率. 另有温度采集线程与烟雾报警线程根据不同的周期进行信息采集、判断、显示与处理. 系统主要执行单元的软件流程如图 5 和图 6 所示. 首先通过键盘设定各执行单元的参数,然后系统进行初始化自检,上位机软件根据参数设定情况调用各执行单元子程序,保证系统在上位机的统一调度下协调一致地完成老化监控任务.

## 4 系统验证

本系统设计完成后,2011 年已经成功应用于薛家岛示范充换电站工程. 该系统实现了对工程中充

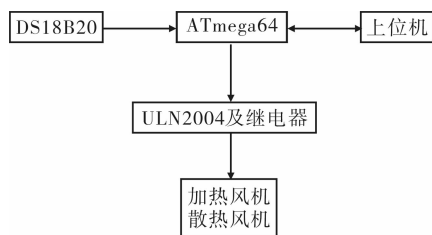


图 4 温度检测控制单元硬件框图

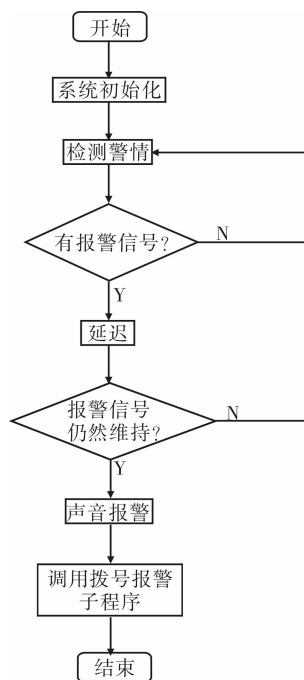


图 5 烟雾报警单元软件流程图

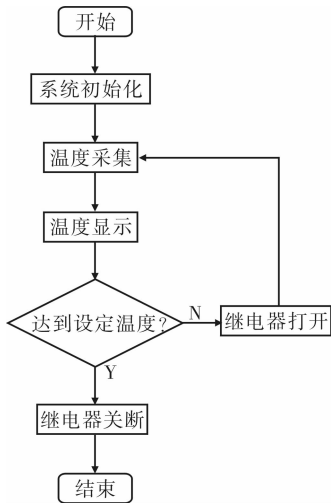


图6 温度检测控制单元软件流程图

换电站内所需的100台分箱充电机和220台整车充电机的老化状态监测、控制和老化数据自动记录等。运行过程中采样数据正确率、老化温度控制范围、各项报警功能和系统可靠性等指标均达到了预期的效果。

## 5 结语

本文以ATmega64芯片为核心,设计了电力直

流电源产品老化监控系统。系统采用RS485总线作为主要通信方式,采用功能单元模块化结构,各模块挂在RS485总线上,易于系统的实现与扩展;上位机使用PC工控机,以图形方式方便直观地对各个节点进行监控,保证了系统可靠运行。实际应用证明该系统具备控制效果好、可靠性高、控制灵活等优点。

## 参考文献:

- [1] 金家峰. 产品早期失效与老化筛选[J]. 铁路通信信号工程技术, 2008(6): 29.
- [2] 赖应杰, 骆德汉. 基于RS485总线的电源老化测试系统的设计[J]. 家电科技, 2009(12): 51.
- [3] 海涛. ATmega系列单片机原理及应用——C语言教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 张宏伟, 路康, 袁超. 基于LonWorks现场总线的智能小区监控系统设计[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(4): 98.
- [5] 彭荣涛, 林玛丽. 提高老化测试设备系统控制稳定性的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2010, 39(3): 26.
- [6] 王中武. 电源老化测试系统[J]. 电子质量, 2005(6): 22.

(上接第89页)

络192.168.100.0/24可用的地址,例如192.168.100.252/24,网关指向192.168.100.253;将无线路由器的LAN接口保持默认设置不变,例如192.168.1.1/24;在无线路由器上设置SSID及无线网络安全密钥、路由器管理口令等必需参数。在移动终端(例如笔记本电脑、手机等)开启WIFI功能,搜索到相应SSID信号后,输入相应无线网络安全密钥,便可获取到无线路由器LAN 192.168.1.0/24内可用的地址,此时移动终端无需登录宽带认证账号便可共享接入Internet。

## 4 结论

本文在传统Internet接入方案的基础上,提出了基于RRAS服务和NAT技术而无需购置专用硬件路由器的Internet接入共享方案,并利用虚拟机平台仿真了某企业网络,成功解决了企业内网接入Internet,内网对外开放某些网络服务以及Dr.COM宽带认证环境下在主机端启用Internet接入共享等问题。这种接入方式具有软硬件容易扩充、组网灵

活、联网成本低廉、运行稳定可靠等优点,尤其适用于中小型企业。本文也为工程技术人员利用虚拟机平台研究Internet接入共享提供了有益的参考。

## 参考文献:

- [1] 兰勇, 张博. 私有IP地址环境中的嵌入式设备实时控制技术[J]. 测控技术, 2011, 30(4): 67.
- [2] 刘向东, 李志洁, 王德高, 等. NAT原理实验的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(1): 58.
- [3] 姚敦红, 石元泉. 基于动态命令树算法的路由器仿真软件设计[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 194.
- [4] 黄桂敏, 朱晓姝. 基于UDP协议穿透NAT设备的对等网络模型研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(2): 317.
- [5] 崔建涛, 王文冰, 邓璐娟. 基于虚拟机的OSPF动态路由协议的研究[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2012, 27(3): 15.
- [6] 韩丽, 崔建涛. DHCP中继代理在虚拟机上的实现[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(2): 163.
- [7] 张素智, 崔建涛, 梁树军. Windows Server 2003配置与管理[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2008.

# 离散时滞异结构混沌系统的广义投影同步

毛北行, 李亮

(郑州航空工业管理学院 数理系, 河南 郑州 450015)

**摘要:**针对离散时滞异结构混沌系统广义投影同步问题,基于Lyapunov稳定性理论,得到了在选取适当控制律的情况下,离散时滞异结构系统是投影同步的结论,并通过数值算例证明了该方法的有效性.

**关键词:**广义投影同步;离散时滞异结构;混沌系统;Lyapunov稳定性理论

**中图分类号:** O545    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.024

## Generalized projective synchronization of discrete time-delayed different structure chaotic systems

MAO Bei-xing, LI Liang

(Department of Mathematics and Physics, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of generalized projective synchronization of discrete time-delayed different structure chaotic systems, based on Lyapunov stability theory, the conclusion was obtained that discrete time-delayed different structure chaotic systems were projective synchronization under the case selection of appropriate control law. Numerical simulation examples of chaotic system verified the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** generalized projective synchronization; discrete time-delayed different structure; chaotic systems; Lyapunov stability theory

## 0 引言

自 Pecora 和 Carroll 于 1990 年代提出混沌系统完全同步的方法以来,混沌同步研究取得了巨大的进展,例如:完全同步、相同步、耦合同步、滞后同步、广义同步、投影同步等<sup>[1-6]</sup>. 1999 年, R. Mainieri 等<sup>[7]</sup>通过对耦合部分线性系统的研究指出,耦合的主从系统状态下的输出不仅相位是锁定的,而且各对应状态的振幅还按某一比例关系演化,这类混沌

同步现象称为投影同步.

另一方面,虽然人们对混沌系统做了大量研究,但大多数工作仅考虑了相同结构的混沌同步,异结构混沌系统的同步还没有被引起足够的关注.混沌系统敏感地依赖初值条件,对于异结构混沌系统,初值条件任何微小的变化都可能引起系统之间动态行为的巨大差异.所以,对异结构混沌系统的研究具有更强的实用性.文献[8-9]研究了异结构混沌系统的广义投影同步问题,但其结果都基于对

收稿日期:2013-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51072184);国家自然科学基金数学天元基金项目(11226337);郑州航空工业管理学院青年基金项目(2012113004)

作者简介:毛北行(1976—),男,河南省洛阳市人,郑州航空工业管理学院副教授,硕士,主要研究方向为切换系统与混沌同步.

连续时间系统的讨论,离散时间系统的异结构混沌系统的同步研究报道目前还比较少见. 鉴于此,本文拟针对离散时滞异结构混沌系统广义投影同步问题,基于 Lyapunov 稳定性理论,给出控制律的设计方案,并用数值例子表明该方案的有效性.

### 1 离散异结构混沌系统的投影同步

考虑如下离散混沌系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(x(k)) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{g}(y(k)) + \mathbf{u}(k) \end{cases}$$

其中,  $\mathbf{x}(k)$ ,  $\mathbf{y}(k)$  分别代表主、从系统;  $\mathbf{u}(k)$  为待设计的控制器. 如果存在一个常数  $\alpha (\alpha \neq 0)$ , 且满足  $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}(k) - \alpha \mathbf{y}(k)\| = 0$ , 则称系统达到了广义投影同步,  $\alpha$  为比例因子.

假定驱动系统为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{f}(x(k)) = \\ \mathbf{Ax}(k) + [\mathbf{f}(x(k)) - \mathbf{Ax}(k)] &= \\ \mathbf{Ax}(k) + \mathbf{h}(x(k)) \end{aligned} \quad (1)$$

设计响应系统如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k+1) &= \mathbf{g}(y(k)) = \\ \mathbf{By}(k) + [\mathbf{g}(y(k)) - \mathbf{By}(k)] + \mathbf{u}(k) &= \\ \mathbf{By}(k) + \mathbf{s}(y(k)) + \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

**定理1** 若满足  $\lambda_{\max}[(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K})] < 1$ , 在控制器

$$\mathbf{u}(k) = \alpha^{-1} \mathbf{h}(x(k)) + (\alpha^{-1} \mathbf{A} \alpha - \mathbf{B}) \mathbf{y}(k) + \alpha^{-1} \mathbf{K}(x(k) - \alpha \mathbf{y}(k)) - \mathbf{s}(y(k)) \quad (3)$$

的作用下,系统 (1) 与 (2) 是广义投影同步的.

**证明** 定义误差  $\mathbf{e}(k) = x(k) - \alpha \mathbf{y}(k)$ , 设计控制器为 (3), 则

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(k+1) &= x(k+1) - \alpha \mathbf{y}(k+1) = \\ \mathbf{Ax}(k) + \mathbf{h}(x(k)) - \alpha(\mathbf{By}(k) + \mathbf{s}(y(k)) + \mathbf{u}(k)) &= \\ \mathbf{Ax}(k) + \mathbf{h}(x(k)) - \alpha(\mathbf{By}(k)) - \alpha \mathbf{s}(y(k)) - \mathbf{h}(x(k)) - \mathbf{A} \alpha \mathbf{y}(k) - \mathbf{K}(x(k) - \alpha \mathbf{y}(k)) + \alpha \mathbf{By}(k) + \alpha \mathbf{s}(y(k)) &= (\mathbf{A} - \mathbf{K}) \mathbf{e}(k) \end{aligned}$$

构造 Lyapunov 函数  $\mathbf{V}(k) = \mathbf{e}^T(k) \mathbf{e}(k)$ , 则其一阶差分为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{V}(k) &= \mathbf{V}(k+1) - \mathbf{V}(k) = \\ \mathbf{e}^T(k+1) \mathbf{e}(k+1) - \mathbf{e}^T(k) \mathbf{e}(k) &= \\ \mathbf{e}^T(k) [(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K}) - \mathbf{I}] \mathbf{e}(k) &\leq \\ \{\lambda_{\max}[(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K}) - 1]\} \mathbf{e}^T(k) \mathbf{e}(k) \end{aligned}$$

选取适当的  $K$  值, 总可以使矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}[(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K})] < 1$ , 从而  $\Delta \mathbf{V}(k) < 0$ , 故

系统是广义投影同步的.

### 2 离散时滞异结构混沌系统的投影同步

考虑如下离散时滞混沌系统

$$\begin{cases} x(n+1) = f(x(n-m)) \\ y(n+1) = g(y(n-m)) + u(n) \end{cases}$$

假定驱动系统为

$$\begin{aligned} x(n+1) &= f(x(n-m)) = \\ \mathbf{Ax}(n-m) + \mathbf{h}(x(n-m)) \end{aligned} \quad (4)$$

设计响应系统如下:

$$\begin{aligned} y(n+1) &= g(y(n-m)) = \\ \mathbf{By}(n-m) + \mathbf{s}(y(n-m)) + \mathbf{u}(n) \end{aligned} \quad (5)$$

**定理2** 若满足  $\lambda_{\max}[(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K})] < 1$ , 在控制器

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= \alpha^{-1} \mathbf{h}(x(n-m)) + (\alpha^{-1} \mathbf{A} \alpha - \mathbf{B}) \cdot \\ \mathbf{y}(n-m) + \alpha^{-1} \mathbf{K}(x(n-m) - \alpha \mathbf{y}(n-m)) - \mathbf{s}(y(n-m)) \end{aligned} \quad (6)$$

的作用下,系统 (3) 与 (4) 是广义投影同步的.

**证明** 定义误差  $\mathbf{e}(n) = x(n) - \alpha \mathbf{y}(n)$ , 设计控制器为 (6), 则

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(n+1) &= x(n+1) - \alpha \mathbf{y}(n+1) = \\ \mathbf{Ax}(n-m) + \mathbf{h}(x(n-m)) - \alpha(\mathbf{By}(n-m) + \mathbf{s}(y(n-m)) + \mathbf{u}(n)) &= \\ \mathbf{Ax}(n-m) + \mathbf{h}(x(n-m)) - \alpha(\mathbf{By}(n-m)) - \alpha \mathbf{s}(y(n-m)) - \mathbf{h}(x(n-m)) - \mathbf{A} \alpha \mathbf{y}(n-m) - \mathbf{K}(x(n-m) - \alpha \mathbf{y}(n-m)) + \alpha \mathbf{By}(n-m) + \alpha \mathbf{s}(y(n-m)) &= \\ (\mathbf{A} - \mathbf{K}) \mathbf{e}(n-m) \end{aligned} \quad (7)$$

构造 Lyapunov 函数

$$\mathbf{V}(n) = \mathbf{e}^T(n) \mathbf{e}(n) + \sum_{i=1}^m \mathbf{e}^T(n-i) \mathbf{e}(n-i)$$

则其一阶差分为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{V}(n) &= \mathbf{V}(n+1) - \mathbf{V}(n) = \\ [\mathbf{e}^T(n+1) \mathbf{e}(n+1) - \mathbf{e}^T(n) \mathbf{e}(n)] + [-\mathbf{e}^T(n-m) \mathbf{e}(n-m) + \mathbf{e}^T(n) \mathbf{e}(n)] &= \\ \mathbf{e}^T(n+1) \mathbf{e}(n+1) - \mathbf{e}^T(n-m) \mathbf{e}(n-m) \end{aligned}$$

将 (7) 代入上式可得

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^T(n-m) [(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K}) - \mathbf{I}] \mathbf{e}(n-m) &\leq \\ \{\lambda_{\max}[(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K})] - 1\} \mathbf{e}^T(n-m) \mathbf{e}(n-m) \end{aligned}$$

选取适当的  $K$  值, 总可以使矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}[(\mathbf{A} - \mathbf{K})^T(\mathbf{A} - \mathbf{K})] < 1$ , 从而  $\Delta \mathbf{V}(k) < 0$ , 故系统是广义投影同步的.

### 3 数值算例

笔者以 Chen 系统和 Liu 系统为例,通过数值算例验证本文方法的有效性.

设 Chen 系统为驱动系统

$$x = [x_1(k), x_2(k), x_3(k)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -35 & 35 & 0 \\ -7 & 28 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

$$h(x(k)) = [0, -x_1x_3, x_1x_2]^T$$

设 Liu 系统为响应系统

$$y = [y_1(k), y_2(k), y_3(k)]^T$$

$$s(y(k)) = [0, -y_1y_3, y_1^2]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.5 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.193 & 10.578 & -0.437 \\ 1.193 & 10.578 & -0.437 \\ 1.193 & 10.578 & -0.437 \end{bmatrix}$$

不妨取比例因子  $\alpha = 0.5$ , 系统的初始值分别设定为

$$[x_1(0), x_2(0), x_3(0)] = [0.23, 0.23, 0.23]$$

$$[y_1(0), y_2(0), y_3(0)] = [35, 7.41, 13.9]$$

系统误差定义为  $e_i = x_i - y_i (i = 1, 2, 3)$ , 则在选取控制律 ⑧\* 的作用下, 算例中 Chen 系统和 Liu 系统是混沌同步的, 其系统误差曲线如图 1 所示. 由图 1 可知, 3 条曲线在  $t = 5.75$  s 后实现了同步.

### 4 结论

本文研究了离散异结构混沌系统的广义投影同步问题以及离散时滞异结构混沌系统广义投影同步问题, 给出了控制律的设计方案, 最终得到选取适当的可调参数  $K$ , 即可实现驱动系统与响应系统投影同步这一结论.

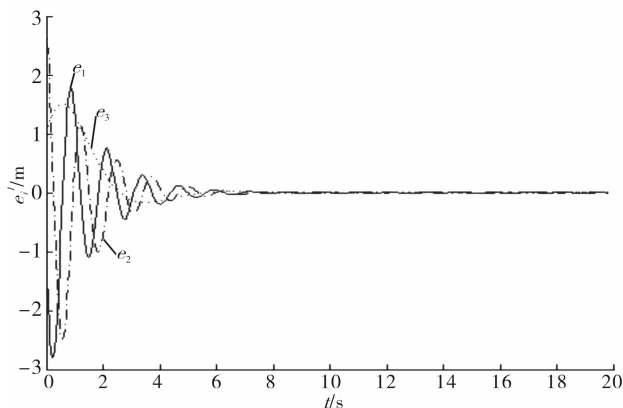


图 1 驱动响应系统误差曲线

### 参考文献:

- [1] 涂俐兰, 柯超, 丁咏梅. 随机扰动下一般混沌系统的  $H_\infty$  同步[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 8031.
- [2] 李秀春, 谷建华, 王云岚, 等. 一类带有未知参数的受扰混沌系统的观测器同步[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 5051.
- [3] 杨东升, 张化光, 李爱平, 等. 基于模糊模型的不同结构的混沌系统同步[J]. 物理学报, 2007, 56(6): 1335.
- [4] 毛北行, 孟晓玲. 一类离散复杂网络混沌系统的输出耦合滑膜同步控制[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2013, 28(2): 103.
- [5] 李建芬, 李农. 一类混沌系统的修正函数投影同步[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 5071.
- [6] 毛北行, 程春蕊, 卜春霞. Lurie 混沌系统的修正函数投影同步[J]. 数学杂志, 2013, 33(4): 717.
- [7] Mainieri R, Rehacek J. Projective synchronization in three-dimensional chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(15): 3042.
- [8] 王宇野, 许红珍. 异结构不确定混沌系统的广义投影同步[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 355.
- [9] 曾强洪, 朱石坚, 楼京俊, 等. 异结构混沌系统的广义投影同步研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(15): 102.

\* 控制律 ⑧:

$$u(k) = \begin{bmatrix} 0.597x_1 - 6.55y_1 + 5.29x_2 + 3.6y_2 - 0.22x_3 + 0.11y_3 \\ -0.5x_1x_2 - y_1y_3 + 0.597x_1 + 11.45y_1 + 5.29x_2 + 4.35y_2 - 0.22x_3 + 0.11y_3 \\ 0.5x_1x_2 + y_1y_2 + 0.597x_1 - 0.3y_1 + 5.29x_2 - 2.65y_2 - 0.22x_3 + 0.11y_3 \end{bmatrix}$$



# 手足口病传播的数学模型与数值模拟

李春

(郑州轻工业学院 数学与信息科学学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**根据手足口病的传播特征,建立了该疾病传播的连续数学模型,并对其进行了稳定性分析,得到了疾病消亡或持续的条件.根据所获得的数据,对模型进行了数值模拟,证明了该模型的正确性.

**关键词:**手足口病传播模型;平衡点;阈值;数值模拟

**中图分类号:** O242.1;R18 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.06.025

## Mathematical model and numerical simulation of hand foot and mouth disease spread

LI Chun

(College of Mathematics and Information Science, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** According to the propagation characteristics of hand foot and mouth disease, a continuous mathematical model of the spread of the disease was established. Its stability was also analyzed, and the control or continuous condition of the disease were obtained. Based on the obtained data, the numerical simulation was carried out according to the model. It illustrated the correctness of propagation model of the disease.

**Key words:** hand foot and mouth disease spread model; equilibrium point; threshold; numerical simulation

## 0 引言

手足口病是一种常见的传染性疾病,至今尚无疫苗可有效防治.经过多年的观察与研究,其传播特征已被掌握<sup>[1]</sup>.该疾病主要传染群体一般为年龄低于5岁的婴幼儿人群,对于年龄超过5岁的人群,即使接触传染源,得病的几率也很低.手足口病是具有潜伏期的一种传染病,具有潜伏期的传染病模型是一种常见的数学模型,借助轨道稳定和复合矩阵可以研究该类传染病动力学模型解的稳定性问题.文献[2]研究了具有常数输入的SEIR模型,并研究了该模型的稳定性,对指数输入的模型没有研究.文献[3]研究了具有指数输入的且具有饱和接触率的SEIR模型及模型的稳定性,具有标准发生

率的模型还需进一步研究.鉴于此,本文拟建立手足口病传播的数学模型,研究模型的稳定性,通过实际数据进行数据分析,验证该模型的正确性.

## 1 数学模型的建立

本文做如下假设.

1) 将人群分为 $S, E, I, R$ 共4类,其中 $S(t)$ 表示 $t$ 时刻易感者人群数量, $E(t)$ 表示 $t$ 时刻处于潜伏期的人群数量, $I(t)$ 表示 $t$ 时刻已经感染并发病的人群数量, $R(t)$ 表示 $t$ 时刻康复者人群数量.一些易感者由于年龄增长不会再感染手足口病而直接进入康复者类,曾经感染过该病的患者一经治愈便不再感染此病而进入康复者类,新生儿全部进入易感者类.模型基本框架如图1所示.

收稿日期:2013-10-27

基金项目:河南省科技计划项目(112300410156);郑州轻工业学院校内基金项目(2011XJJ014)

作者简介:李春(1979—),男,河南省鹤壁市人,郑州轻工业学院讲师,主要研究方向为微分方程.

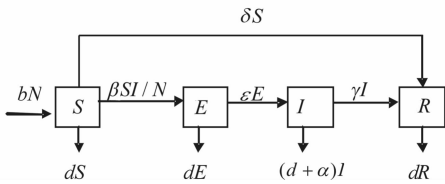


图 1 SEIR 模型基本框架

$R_0 > 1$ , 则疾病将持续.

### 3 数值模拟与分析

由于日前国家卫生部官网还没有关于手足口病的详细数据,故笔者对安徽省卫生厅的官方网站公布的2008年5月4日—5月11日每日感染和治愈的数据进行参数分析与估计<sup>[5]</sup>,并依此进行数据分析和数值模拟.详细数据见表1.

表 1 2008 年 5 月 4—11 日安徽省手足口病病情发展统计表

日期	总病例数/例	治愈人数/人	日病人数/人	日治愈人数/人	日治愈率	死亡人数/人
5月4日	584 0	364 2	319 8	—	—	22
5月5日	654 5	316 6	337 9	524	0.163 8	22
5月6日	728 3	378 0	350 3	614	0.187 8	22
5月7日	798 8	432 8	360 6	602	0.171 8	24
5月8日	872 9	492 7	380 2	545	0.151 1	24
5月9日	930 4	553 6	376 8	609	0.160 2	24
5月10日	982 4	617 5	364 9	639	0.169 6	24
5月11日	102 65	688 5	338 0	710	0.196 4	24

由于手足口病多发于5岁以下儿童,潜伏期一般为3~5 d,一般7~10 d可以治愈,所以为计算方便,笔者假设潜伏期为4 d,8.5 d可以治愈,由此得到平均患病周期  $\frac{1}{\gamma} = 8.5$ , 即  $\gamma = 0.117$ , 平均潜伏期  $\frac{1}{\varepsilon} = 4$ , 即  $\varepsilon = 0.25$ . 由表1计算出因病死亡率  $\alpha = 0.003$ , 根据文献[6]可以计算出接触率  $\beta = 1.7$ . 笔者根据安徽省统计局<sup>[7]</sup>的数据计算得2008年安徽省新生儿出生率  $b = 0.013$ , 自然免疫率参数  $\delta = 0.1$ , 进而可计算出  $s(t)$ ,  $e(t)$  以及  $i(t)$  的初始值分别为  $s(0) = 0.87$ ,  $e(0) = 0.000\ 032$ ,  $i(0) = 0.000\ 085$ ; 阈值  $R_0 = 1.4 > 1$ . 根据定理1和定理2, 模型③的解应该趋于正平衡解, 即地方病平衡点. 利用 DEDiscover 软件可计算得到模型③的数值解, 计算时设计步长为0.1 d, 时间  $t = 0 \sim 500$  d, 部分数据计算结果见表2.

模拟该系统中  $s(t)$ ,  $e(t)$ ,  $i(t)$  的变化趋势, 如图2—图4所示, 可见图形的变化趋势与理论的结论一致, 即  $R_0 > 1$  疾病将持续.

- 2) 采用标准发生率  $\beta SI/N$ .
- 3) 采用指数输入率  $bN$ .
- 4) 参数说明:  $b$  为出生率系数,  $d$  为死亡率系数,  $\alpha$  为因病死亡率系数, 其数学模型为<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} S' = bN - dS - \beta SI/N - \delta S \\ E' = \beta SI/N - \varepsilon E - dE \\ I' = \varepsilon E - (\gamma + \alpha + d)I \\ R' = \gamma I + \delta S - dR \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $N(t) = S(t) + E(t) + I(t) + R(t)$ , 则  $N' = (b - d)N - \alpha I$ .

由于①中前3个方程不含有  $R$ , 故可考虑其等价模型

$$\begin{cases} S' = bN - dS - \beta SI/N - \delta S \\ E' = \beta SI/N - \varepsilon E - dE \\ I' = \varepsilon E - (\gamma + \alpha + d)I \end{cases} \quad (2)$$

将②进行归一化处理, 令  $s = S/N$ ,  $e = E/N$ ,  $i = I/N$ , 可得其等价模型

$$\begin{cases} s' = b - (b + \delta)s - \beta se + \alpha si \\ e' = \beta si - (b + \varepsilon)e + \alpha ei \\ i' = \varepsilon e - (\gamma + \alpha + b)i + \alpha i^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $0 \leq s + e + i \leq 1$ , 易证③的正向不变集  $D = \{(s, e, i) \mid 0 \leq s + e + i \leq 1\}$ . 这里  $s(t)$ ,  $e(t)$ ,  $i(t)$  分别表示易感者比例、处于潜伏期的人群比例、已感染该疾病并已经发病者比例.

## 2 平衡点及其稳定性分析

定义  $R_0 = \frac{\beta b \varepsilon}{(\varepsilon + b)(\delta + b)(\gamma + \alpha + b)}$ .

定理1 当  $P_0$  是全局渐进稳定的, 系统③总存在无病平衡点  $P_0(\frac{b}{\delta + b}, 0, 0)$ , 且  $R_0 < 1$ <sup>[4]</sup>.

定理2 当  $R_0 > 1$  时, 系统③存在惟一正平衡点  $P^*$ , 且  $P^*$  在  $D$  内全局渐进稳定<sup>[4]</sup>.

由定义及定理1和定理2可知,  $R_0 = 1$  是区别疾病消亡和持续的阈值, 当  $R_0 < 1$ , 疾病将消亡; 而当

表2 数值模拟部分结果

$t/d$	$e(t)$	$i(t)$	$s(t)$
0.000 0	$8.500 0 \times 10^{-5}$	$3.200 0 \times 10^{-5}$	0.870 0
0.100 0	$8.756 7 \times 10^{-5}$	$3.372 0 \times 10^{-5}$	0.861 5
0.200 0	$9.027 1 \times 10^{-5}$	$3.548 2 \times 10^{-5}$	0.853 1
0.300 0	$9.311 1 \times 10^{-5}$	$3.729 1 \times 10^{-5}$	0.844 8
0.400 0	$9.608 5 \times 10^{-5}$	$3.914 7 \times 10^{-5}$	0.836 6
499.600 0	0.014 1	0.026 6	0.082 2
499.700 0	0.014 1	0.026 6	0.082 2
499.800 0	0.014 1	0.026 6	0.082 2
499.900 0	0.014 1	0.026 6	0.082 2
500.000 0	0.014 1	0.026 6	0.082 2

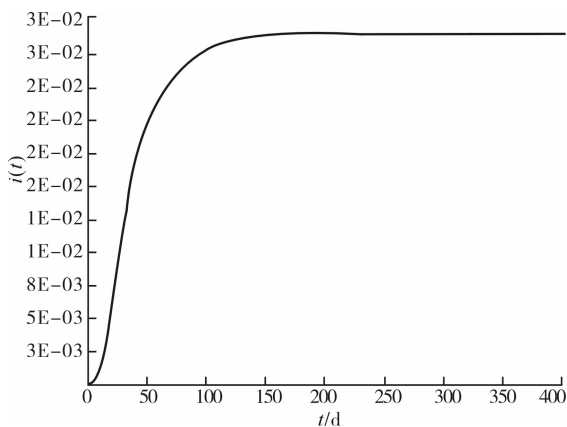


图4  $R_0 > 1$  时函数  $i(t)$  的变化趋势

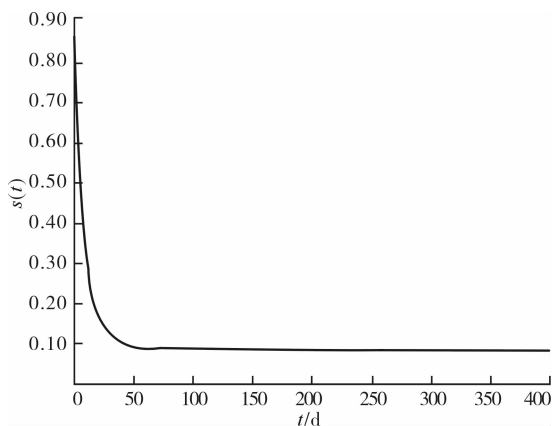


图2  $R_0 > 1$  时函数  $s(t)$  的变化趋势

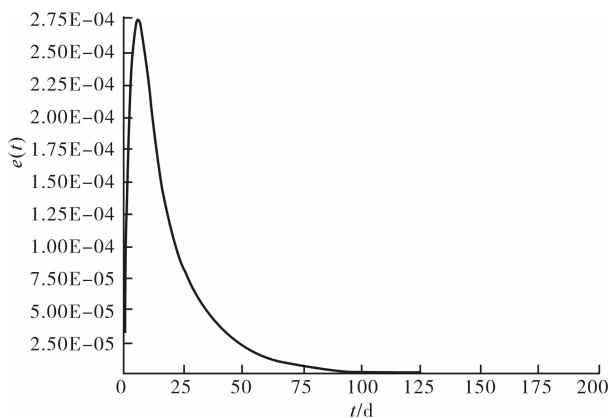


图5  $R_0 < 1$  时函数  $e(t)$  的变化趋势

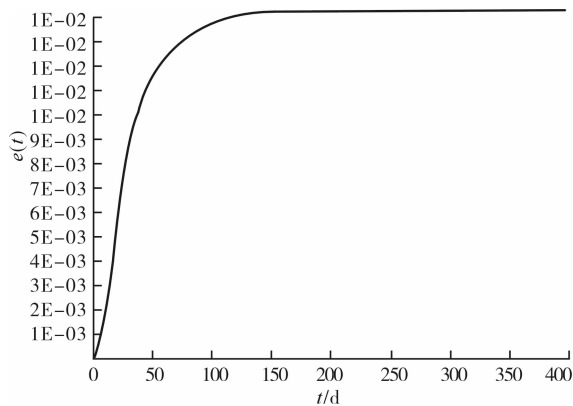


图3  $R_0 > 1$  时函数  $e(t)$  的变化趋势

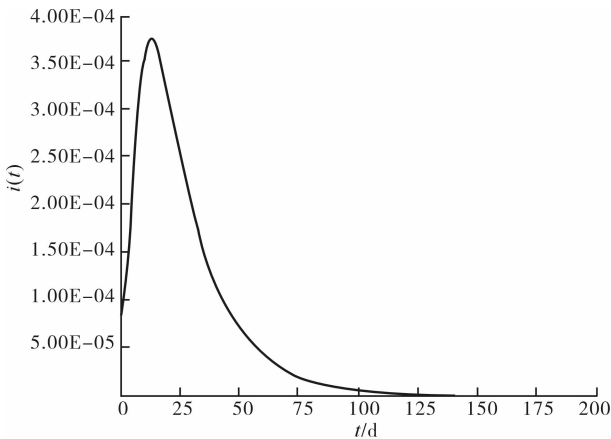


图6  $R_0 < 1$  时函数  $i(t)$  的变化趋势

而当改变参数值使得  $R_0 < 1$  时,系统③应趋近于无病平衡点,如取  $b = 0.013, \delta = 0.3, \alpha = 0.003, \gamma = 0.117, \varepsilon = 0.25, \beta = 1.7$ , 计算得  $R_0 = 0.504 < 1$ , 利用 DEDiscover 软件得到函数  $e(t), i(t), s(t)$  的曲线如图 5—7 所示, 图像进一步验证了定理 1 的理论结果。

## 4 结论

本文对已有的理论结果进行了数值模拟, 通过对实际数据的分析得到参数值, 进而得到了各个函数的图像, 从图像的结果中可以看出理论结论与实

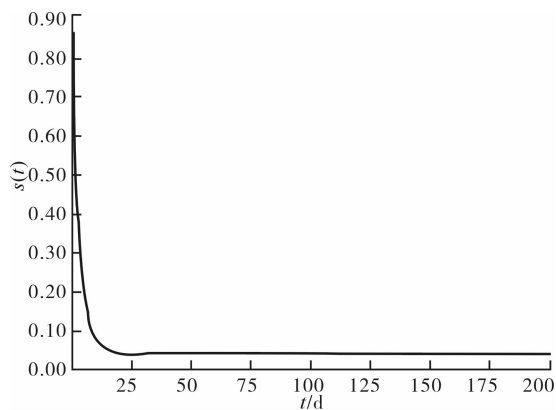


图7  $R_0 < 1$  时函数  $s(t)$  的变化趋势

际结果的一致性,进一步说明了该模型是正确的,为研究该疾病的变化趋势提供了理论参考.由于所获得的数据较少,还不能完整地描述手足口病的传播特征,比如还需考虑该疾病的周期性,在将来有疫苗的情况下,还需要研究具有脉冲接种的模型,并通过数值模拟得到接种疫苗的临界值,这将是下一步的研究重点.

#### 参考文献:

[1] Nong Guang-Min. Autopsy findings in children with hand,

foot and mouth disease[J]. New England Journal of Medicine, 2012, 367: 91.

[2] Li M Y, Wang L C. Global Stability in Some SEIR Epidemic Models[M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 2002: 295 - 311.

[3] Zhang J, Ma Zhien. Global dynamic behavior of the SEIR epidemic model with the saturating contact rate[J]. Mathematical Biosciences, 2003, 185(1): 15.

[4] 李春,李继光.一类仅在年龄低于  $M$  的人群中传播的 SEIR 传染病模型[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2010, 25(1): 120.

[5] 安徽省卫生厅. 疾病报告统计[EB/OL]. [2008-05-15] (2013-01-20). <http://www.ahwst.gov.cn/chn200909261727166/article.jsp?articleId=871028>.

[6] Freedman H I, Tang M X, Ruan S G. Uniform persistence and flows near a closed positively invariant set[J]. J Dynam Diff Equat, 1994(6): 583.

[7] 安徽省统计局. 安徽省 2002—2008 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2011-02-28] (2013-01-20). [http://www.ahstj.gov.cn/tjj/web/tjnj\\_view.jsp?strCollId=13787135717978521&\\_index=1](http://www.ahstj.gov.cn/tjj/web/tjnj_view.jsp?strCollId=13787135717978521&_index=1).

(上接第 97 页)

将电机固定,电机速度设定为 25.0 r/min,将电机驱动细分值设定为 2 细分、4 细分和 8 细分时,测得的结果分别为 190.635 r/min, 25.000 r/min 和 25.000 r/min.

试验结果表明:测量主要误差来源是电机的振动.电机被固定、步进电机驱动器细分越大,电机振动越小,测量结果越准确.在电机振动不剧烈的情况下,系统对电机测量准确、可靠.

## 5 结语

本文设计的基于增量式光电编码器电机测速,光电编码器的输出脉冲经斯密特触发器整形后,由单片机进行采集、计算,测得的电机旋转速度和方向由 LCD 进行显示,测速周期由键盘进行设定,测速算法采用 M/T 法.整个系统控制电路的体积小,操作简单方便.电机在振动剧烈的情况下,会影响

系统对电机速度的检测,该系统适用于运行时振动较小的电机的速度测量.

#### 参考文献:

[1] 姜庆明,杨旭,甘永梅,等.一种基于光电编码器的高精度测速和加速度的方法[J].微计算机信息, 2004, 20(6): 48.

[2] 焦东升,张秀彬,应俊豪.基于正交编码器高精度测速方法的研究[J].微型电脑应用, 2010, 26(10): 13.

[3] 宋刚,秦月霞,张凯,等.基于普通编码器的高精度测速方法[J].上海交通大学学报, 2002, 36(8): 1169.

[4] 刘照红,李丽娟.开关电源的共态噪声及抑制措施[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2001, 16(4): 14.

[5] 王瑜,王斌.基于 STC 系列微控制器的电机数字测速系统设计[J].电气技术, 2012(3): 69.

[6] 徐煜明.步进电机速度控制的研究与实现[J].工矿自动化, 2007(2): 82.