

# 桑枝多糖黏度特性的研究

纵伟<sup>1</sup>, 霍智文<sup>1</sup>, 颜新培<sup>2</sup>, 赵光远<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;  
2. 湖南省蚕桑科学研究所, 湖南 长沙 410127)

**摘要:**采用布氏黏度计对桑枝多糖的黏度进行测定,分别考察温度、剪切速率以及 pH 值对桑枝多糖黏度的影响,结果表明:桑枝多糖溶液为假塑性流体,随着温度的升高其黏度逐渐降低且两者的关系符合阿累尼乌斯模型,温度和浓度对其黏度的综合影响可用数学模型  $\eta = -5.9245 \exp(2.48/RT - 0.1238C + 3.421 \times 10^{-4}C^2)$  进行预测,适用范围温度 20~80℃,浓度 1%~8%;剪切速率对其黏度的影响可用幂律模型  $\eta = M\gamma^n$  进行拟合,黏度随剪切速率的增加而降低,酸和碱均使桑枝多糖溶液黏度下降,中性条件下黏度值最高,说明桑枝多糖是中性多糖。

**关键词:**桑枝多糖;黏度;模型拟合

**中图分类号:**TS201.2<sup>+</sup>3;S888.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.001

## Study on viscosity properties of morus alba polysaccharide

ZONG Wei<sup>1</sup>, HUO Zhi-wen<sup>1</sup>, YAN Xin-pei<sup>2</sup>, ZHAO Guang-yuan<sup>1</sup>

(1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;  
2. Sericultural Research Institute of Hunan Province, Changsha 410127, China)

**Abstract:** The morus alba polysaccharide viscosity were measured using Brookfield viscometer, the effect of temperature, shear rate and pH value on the viscosity of morus alba polysaccharide were investigated. The results showed that morus alba polysaccharide solution was a pseudoplastic fluid, as the temperature increase the viscosity decreased gradually, and the relationship between temperature and viscosity was in line with Arrhenius model. The available mathematical model of temperature and concentration on the comprehensive effect of morus alba polysaccharides solution viscosity could predict by using  $\eta = -5.9245 \exp(2.48/RT - 0.1238C + 3.421 \times 10^{-4}C^2)$ , the scope of application was temperature 20~80℃, concentration 1%~8%; the effects of shear rate on viscosity could be fitting by Power law model  $\eta = M\gamma^n$ , viscosity decreased with increasing shear rate; The morus alba polysaccharide was a neutral polysaccharide when viscosity decreased under overly acid or alkali and the highest viscosity under neutral condition.

**Key words:** morus alba polysaccharide; viscosity; model fitting

## 0 引言

桑树是药食兼用的植物<sup>[1]</sup>, 现代药理研究表

明, 桑叶、桑葚和桑枝均具有多种生物活性, 桑枝中的多糖具有降血糖、调节免疫和抗氧化等药理活性<sup>[2]</sup>. 多糖是高分子物质, 其高级结构复杂, 水溶液

收稿日期:2013-06-24

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD36B07);2012年郑州市科技创新团队项目

作者简介:纵伟(1965—),男,安徽省萧县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为功能食品。

有明显的黏稠性<sup>[3-5]</sup>,对于桑枝多糖的液态产品而言,其黏度特性对产品的加工具有重要影响.鉴于目前对于桑枝多糖黏度特性的研究还较少,本文拟对此进行研究,为桑枝多糖的进一步研发提供理论依据.

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

桑枝购于河南省宛西制药股份有限公司,粉碎,备用;石油醚、无水乙醇、氯仿、正丁醇、盐酸、氢氧化钠,均为分析纯,河南华丰化学试剂公司产.

EG—923KF9—NW型微波炉,美的电器有限公司产;RE—52AA型旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂产;RRHP—100型万能高速粉碎机,浙江省永康市红太阳机电有限公司产;T6型新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司产;NDJ—1D型布氏旋转黏度计,南京皓海科学仪器仪表有限公司产;CoolSafeTM型真空冷冻干燥机,SCANVAC公司产;PHS—3C型酸度计,上海理达仪器厂产.

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 桑枝多糖的制备

**1.2.1.1 桑枝多糖的提取** 在桑枝粉中加10倍体积的石油醚,水浴回流2h脱脂,然后加水微波浸提(微波功率400W,微波时间6min,固液体积比1:20)2次,合并2次提取液,真空浓缩后加乙醇至醇体体积浓度达到80%,充分搅拌,4℃下放置12h,5000r/min离心10min,取沉淀,真空冷冻干燥后得桑枝粗多糖.

**1.2.1.2 桑枝多糖的纯化** 采用Sevage与酶法联用对桑枝粗多糖脱蛋白:酶用量2.5%(质量比),酶解温度60℃,酶解时间2.5h,pH=7,结合3次Sevage法;之后用活性炭对其脱色:活性炭用量1.0%(质量比),脱色时间20min,脱色温度50℃,pH=7;最后选取SephadexG—100柱层析进一步纯化,得精制桑枝多糖(纯度91%).

**1.2.2 温度对桑枝多糖黏度特性的影响** 在桑枝多糖质量浓度为0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%,0.6%,0.7%和0.8%的条件下,分别研究不同温度(20℃,40℃,60℃和80℃)对桑枝多糖溶液黏度特性的影响,建立不同温度对不同浓度桑枝多糖黏度影响的数学模型.

**1.2.3 剪切速率对桑枝多糖黏度特性的影响** 将不同质量浓度(0.1%~0.8%)的桑枝多糖溶液置于20℃恒温水浴中,分别测定剪切速率为5r/min,10r/min,20r/min和50r/min下桑枝多糖溶液的

黏度.

**1.2.4 pH值对桑枝多糖黏度特性的影响** 分别配制质量浓度为0.1%~0.8%的桑枝多糖溶液,将pH值分别调节为3,5,7,9和11,在20℃和剪切速率为50r/min下用布氏黏度计测定其黏度的变化.

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度对桑枝多糖黏度特性的影响

温度对桑枝多糖黏度特性的影响见图1.

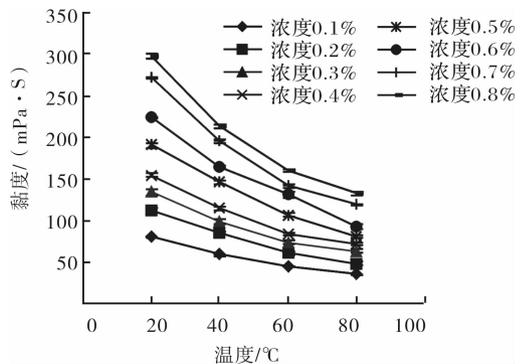


图1 温度对桑枝多糖黏度特性的影响

由图1可知,桑枝多糖溶液的黏度随温度的升高而逐渐下降,且浓度越高,黏度下降的趋势越明显.同一浓度时,温度越低,多糖溶液黏度越大.

据H. M. Jens等<sup>[6]</sup>对溶液流变学特性的研究报道,Arrhenius模型能较好地反映温度对黏度的影响:

$$\ln \eta = \ln N - E_a / RT$$

式中, $\eta$ 为流体黏度系数/(mPa·s); $N$ 为频率因子(常数)/(mPa·s); $E_a$ 为流体活化能/(kJ·mol<sup>-1</sup>);气体常数 $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ;  $T$ 为绝对温度/K.

做以 $1/T$ 为横坐标, $\ln \eta$ 为纵坐标的直线,从斜率可求出黏流活化能 $E_a$ 值.对不同浓度的桑枝多糖溶液作Arrhenius曲线图(见图2).对图2所示各关系进行回归分析,求得回归方程的活化能 $E_a$ 与拟合值 $R^2$ ,从而得到不同浓度下桑枝多糖溶液温度与黏度的关系,结果见表1.

由表1可知, $E_a$ 值随着浓度的升高而增大,且由Arrhenius模型得知 $E_a$ 值越大,温度对黏度的影响越大,也就是桑枝多糖对温度的变化越敏感.这一结果与图1的结论一致,即高浓度的桑枝多糖溶液黏度受温度影响较大,相关系数 $R^2 > 0.9700$ ,进一步验证了Arrhenius模型的拟合值与实测值吻合.

良好.

据 D. Mohmut 等<sup>[7]</sup> 报道,不同温度下不同浓度的溶液其黏度模型大致有 3 种模式:

$$\eta_1 = K(C^A) \exp(E_a/RT); \quad (1)$$

$$\eta_2 = K \exp(E_a/RT + CA); \quad (2)$$

$$\eta_3 = K \exp(E_a/RT + AC + BC^2) \quad (3)$$

式中,  $C$  为百分比浓度;  $K, A, B$  均为无单位常数.

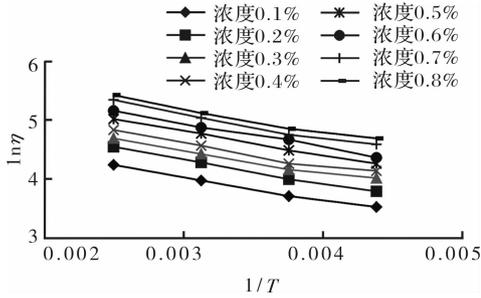


图2 Arrhenius 方程拟合温度与黏度关系

表1 Arrhenius 方程对黏度与温度关系的拟合

浓度 / %	拟合曲线	$E_a / (kJ \cdot mol^{-1})$	相关系数 $R^2$
0.1	$y = -0.2445x + 5.2739$	2.0328	0.9952
0.2	$y = -0.2462x + 5.1219$	2.0469	0.9946
0.3	$y = -0.2552x + 5.1219$	2.1217	0.9824
0.4	$y = -0.2618x + 5.2739$	2.1766	0.9763
0.5	$y = -0.2884x + 5.5465$	2.3977	0.9989
0.6	$y = -0.2891x + 5.7067$	2.4035	0.9916
0.7	$y = -0.3145x + 5.8498$	2.6221	0.9818
0.8	$y = -0.3249x + 5.9300$	2.7015	0.9856

利用数据处理软件 SPSS 分别对式①②③进行逐步回归分析,求得各参数及回归系数见表 2.

表2 温度和浓度对桑枝多糖黏度的综合影响

模型	$K / (mPa \cdot s)$	$A$	$B$	$E_a / (kJ/mol)$	$R^2$
$\eta_1 = K(C^A) \exp(E_a/RT)$	-12.9913	0.2794	—	2.48	0.8761
$\eta_2 = K \exp(E_a/RT + CA)$	-9.7651	0.0892	—	2.48	0.9321
$\eta_3 = K \exp(E_a/RT + AC + BC^2)$	-5.9245	-0.1238	$3.421 \times 10^{-4}$	2.48	0.9765

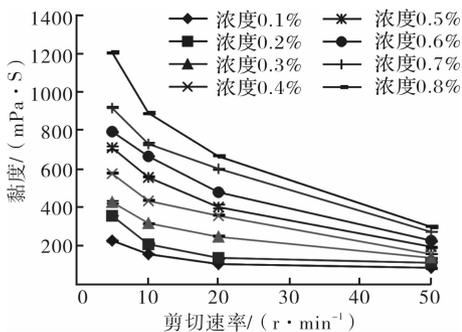


图3 剪切速率对桑枝多糖黏度特性的影响

从表 2 可看出,用③式拟合回归系数最高,达 0.976 5,说明数学模型  $\eta = -5.9245 \exp(2.48/RT - 0.1238C + 3.421 \times 10^{-4}C^2)$  可准确反映出温度和浓度对桑枝多糖黏度的综合影响. 该模型的适用范围是温度 20 ~ 80 °C, 浓度 1% ~ 8%.

### 2.2 剪切速率对桑枝多糖黏度特性的影响

剪切速率对桑枝多糖黏度特性的影响见图 3.

由图 3 可知,桑枝多糖溶液的黏度随着剪切速率的提高而下降(这种现象称为剪切稀化现象),由此可知桑枝多糖溶液为假塑性流体. 其原因是由于桑枝多糖为一种无规则的大分子网状结构,黏度较大,随着剪切速率的增加,这些紧密结构受到破坏,被拉直或被打开,聚合度降低,从而导致其黏度降低.

据 A. F. Zailer 等<sup>[8]</sup> 报道,幂律模型(Power's law model)可表征剪切速率对溶液黏度的影响,即发生剪切稀化现象后黏度随剪切速率变化曲线在对数坐标下近似为直线. 幂律模型方程如下:

$$\eta = M\gamma^n$$

式中,  $M$  为稠度系数,  $\gamma$  为剪切速率  $(r \cdot \min^{-1})$ ,  $n$  为流型指数.

对方程两边求对数得

$$\ln \eta = \ln M + (n - 1) \ln \gamma$$

幂律方程变为以  $\ln \gamma$  为横坐标,以  $\ln \eta$  为纵坐标的一阶线性方程,用方程式模拟各体系的黏度随剪切速率的变化,结果如图 4 所示. 通过求得  $M$  值和  $n$  值(见表 3),可以得到不同浓度下桑枝多糖溶液的基本流体性质.

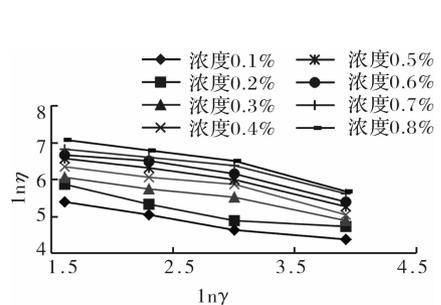


图4 幂律方程模拟桑枝多糖溶液黏度随剪切速率的变化

表3中,流型指数 $n$ 决定流体的类型;稠度系数 $M$ 是液体黏稠度的度量值, $M$ 值越大,液体越黏稠。 $n$ 值是假塑性程度的量度:当 $n=1$ 时,流体为牛顿型流体;当 $n<1$ 对应于剪切稀化,则流体为假塑性流体;当 $n>1$ 对应于剪切稠化,则流体为胀塑性流体。由表3可知,桑枝多糖溶液的流型指数 $n=0.5474\sim 0.4019$ ,可确定桑枝多糖溶液为假塑性流体(其黏度随剪切速率的增大而减小的一种非牛顿流体)。

表3 幂律模型方程体系黏度变化曲线的模型参数

浓度/%	$M$	$n$	$R^2$
0.1	444.566 7	0.547 4	0.972 0
0.2	705.142 6	0.499 9	0.922 3
0.3	976.622 3	0.508 0	0.977 5
0.4	1 541.636 8	0.444 1	0.933 7
0.5	1 932.945 0	0.433 1	0.961 3
0.6	2 165.269 3	0.448 0	0.943 3
0.7	2 324.127 5	0.483 2	0.936 4
0.8	3 424.120 7	0.401 9	0.960 6

### 2.3 pH值对桑枝多糖黏度特性的影响

pH值对桑枝多糖黏度特性的影响见图5。

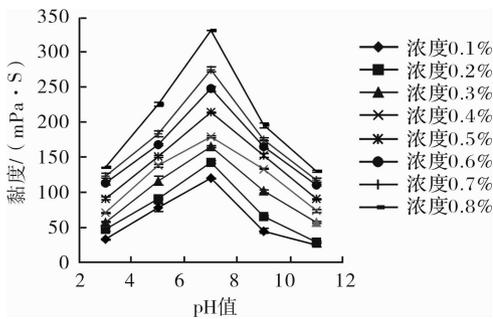


图5 pH值对桑枝多糖黏度特性的影响

由图5可知,pH值是影响桑枝多糖黏度特性的一个重要因素。当 $pH<7$ 时,其黏度随着pH值的升高而增加;当 $pH>7$ 时,其黏度随着pH值的升高而降低;且在 $pH=5\sim 7$ 时其黏度较大,偏碱或偏酸都会使其黏度降低。推测这可能是由于过酸或过碱的环境都会使桑枝多糖的高级分子结构受到破坏,导致氢键断裂,发生水解作用,生成小分子的糖,从而降低多糖的分子量,使其黏度受到影响。这同时也进

一步证明了桑枝多糖为中性多糖。

## 3 结论

采用布氏黏度计对桑枝多糖的黏度进行测定,分别考察温度、剪切速率以及pH值对桑枝多糖黏度的影响,数学模型 $\eta = K\exp(-E_a/RT)$ 可反映桑枝多糖溶液温度对其黏度的影响,桑枝多糖溶液的黏度随温度的升高而降低,随浓度的升高而升高。

随剪切速率的增大而降低,呈现剪切稀化现象。通过综合实验分析,确定桑枝多糖溶液为假塑性非牛顿流体,其流变学特性符合幂律模型方程 $\eta = M\gamma^n$ 。

数学模型 $\eta = -5.9245\exp(2.48/RT - 0.1238C + 3.421 \times 10^{-4}C^2)$ 可反映桑枝多糖溶液温度和浓度对其黏度的综合影响,此模型的适用范围是:温度 $20\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ ,浓度 $1\%\sim 8\%$ 。

过酸或过碱都会导致桑枝多糖溶液黏度下降,中性条件下黏度值最高,说明桑枝多糖是中性多糖。

### 参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中国药典(二部)[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [2] 那立欣,王庆利. 复方中药多糖的药理与研究状况[J]. 哈尔滨医药,2008,28(4):62.
- [3] 王会晓,闵婉平,石勇,等. 红枣多糖黏度特性的研究[J]. 食品科技,2011,36:2.
- [4] 郑良,卢晓黎. 银耳溶液在不同影响因素下的黏度特性[J]. 食品科学,2003,24(8):41.
- [5] 陈芳,李建科,徐昶. 新型微生物多糖——韦兰胶的流变特性影响因素研究[J]. 食品科学,2007,28(9):49.
- [6] Jens H M, Andrea B A, Jon T, et al. Development of a rheological prediction model for food suspensions and emulsions[J]. J Food Eng,2013,115(4):481.
- [7] Mohmut D, Tugba A, Meryem G. Optimization of gum combination in prebiotic instant hot chocolate beverage model system in terms of rheological aspect; mixture design approach[J]. Food Biopro Tech,2013,6(3):783.
- [8] Zailer A F, Vania R N T, Eduardo B O. Rheology and fluid dynamics properties of sugarcane juice[J]. Biochem Eng J,2011,53(12):260.

# 响应面分析法优化黑小麦 全麦面包工艺配方研究

孙元琳<sup>1</sup>, 陕方<sup>2</sup>, 宋俞<sup>3</sup>, 张陇清<sup>1</sup>, 熊鹏飞<sup>1</sup>

(1. 运城学院 生命科学系, 山西 运城 044000;

2. 山西省农科院 农产品综合利用研究所, 山西 太原 030031;

3. 山西省农科院 棉花研究所, 山西 运城 044000)

**摘要:**以面包比容和感官评分为评价指标,采用单因素试验分析了黑小麦全麦粉、水、酵母、蔗糖添加量对面包品质的影响.通过响应面设计对黑小麦全麦面包的工艺配方进行优化,确定其最佳工艺配方,实验结果表明:以混合粉为基重,黑小麦全麦粉添加量为23%,水52%,酵母1.3%,蔗糖21%.采用优化工艺配方制作的全麦面包比容为5.21 cm<sup>3</sup>/g,综合评分为85.37.与普通面包相比,黑小麦全麦面包风味独特、质地柔软、老化速率明显降低,面包货架期延长,外观性状和内在品质均得到较大程度的改善.

**关键词:**黑小麦;全麦面包工艺配方;响应面分析法

**中图分类号:**TS213.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.002

## Optimization of process formula of wholemeal bread made of black-grained wheat by response surface analysis

SUN Yuan-lin<sup>1</sup>, SHAN Fang<sup>2</sup>, SONG Yu<sup>3</sup>, ZHANG Long-qing<sup>1</sup>, XIONG Peng-fei<sup>1</sup>

(1. Department of Life Science, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China;

2. Institute of Farm Products Comprehensive Utilization, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China;

3. Cotton Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Yuncheng 044000, China)

**Abstract:** The process formula of wholemeal bread by mixing black-grained whole-wheat flour with bread flour was studied. Using specific volume of bread, sensory quality scores as evaluation indexes, the effect of black-grained whole-wheat flour, water, yeast, sugar proportion on the quality of bread were investigated by single-factor experiments, and the process formula was optimized by response surface analysis (RSA). The optimum formula was as follows: 23% black-grained wholemeal flour, 52% water, 1.3% yeast and 21% sugar. The bread made at the optimum conditions exhibited the specific volume of 5.21 cm<sup>3</sup>/g and sensory quality score of 85.37. Compared with the ordinary bread, the wholemeal bread had good taste and soft texture with reduced staling rate and prolonged shelf life and its appearance properties and inherent quality improved greatly.

**收稿日期:**2013-08-03

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31101244);山西省自然科学基金项目(2012011031-1);山西省高校优秀青年学术带头人项目;山西省高校大学生创新创业训练项目(2013340);运城学院院级产学研合作项目(CY-2012013)

**作者简介:**孙元琳(1971-),女,山西省运城市人,运城学院教授,博士,主要研究方向为谷物资源综合利用与开发.

**Key words:** black-grained wheat; process formula of wholemeal bread; response surface analysis

## 0 引言

黑小麦是禾本科一年生栽培谷物,其籽粒可呈紫色、蓝色、紫黑色、深褐色或接近于黑色<sup>[1]</sup>。黑小麦属于优质特色谷物资源,具有独特的营养和保健功能,主要用于制作馒头、面包、麦片、挂面等传统食品,已成为一类重要的黑色食品资源<sup>[2]</sup>。

长期以来,我国消费者主要以精米、白面制品作为主食,对谷物营养与健康方面的关注较少。随着营养相关的慢性疾病高发,人们的健康意识不断增强,越来越多的消费者开始注重营养平衡与合理膳食。

近年来,全麦粉、糙米等全谷物食品发展迅速,这对世界粮食消费方式的变革与发展产生了深远影响<sup>[3-4]</sup>。全谷物食品富含膳食纤维、维生素、矿物质、类胡萝卜素、酚酸等功能成分,这些生物活性物质主要富集于籽粒的外皮层,通过协同增效作用产生多种营养功效<sup>[5]</sup>。

研究表明<sup>[6-8]</sup>,长期摄入全谷物食品对II型糖尿病、肥胖、心血管疾病以及结肠癌等慢性疾病具有预防作用。因此,开发黑小麦全麦食品,对改善膳食结构、预防慢性代谢性疾病、推动特色谷物资源的开发利用有着极其重要的意义。

本文将黑小麦全麦粉与面包专用粉配粉后制作黑小麦全麦面包,以面包比容和感官评分为评价标准,运用响应面分析法对其工艺配方进行优化,以期在黑小麦特色谷物资源的有效增值和综合利用提供理论依据。

## 1 实验

### 1.1 试剂与仪器

黑小麦,产自山西省运城市;面包专用粉,山东菏泽华瑞食品有限公司产;即发干酵母,哈尔滨马利酵母有限公司产;高效面包蓬松改良剂,上海歆意食品配料有限公司产;白砂糖、精制盐,市售。

HS30A型双动力和面机、FX-10型面包醒发箱,广东恒联食品机械有限公司产;电热食品烤炉,南方机械有限公司产;FA1004B型电子天平,上海精密科学仪器有限公司产。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 面包制作工艺

原辅料称量、混匀→调制面团→发酵(30℃,相对湿度RH=80%,1h)→分割(每个面团500g)→滚圆→整形、装模→醒发(35℃,RH=80%,40min)→烘烤(18min,温度:上火180℃、下火190℃)→脱模→冷却→成品

**1.2.2 指标测定** 面包比容/(cm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>)测定:面包体积采用菜籽置换法,面包比容=体积/质量。

面包感官评定:参照中国农科院《面包烘焙品质评分标准》。面包在室温下冷却1h后,由8位食品专业学生对面包进行面包感官质量评定,结果取平均值。总分100分,评分指标为:面包体积35分,表面色泽5分,表皮质地与面包形状5分,面包心色泽5分,平滑度10分,纹理结构25分,弹性10分,口感5分。

面包综合评分:总分100分,其中面包比容占15%(总分15分),比容6.0mL/g为满分,比容每少0.1mL/g扣0.5分;感官评分占85%(总分85分),由面包感官评定分数乘以0.85。

面包老化实验:将所制作的面包自然冷却后,装入塑料袋中密封,分别测定面包在贮存1d,2d,3d,4d,5d时面包心的水分。

面包水分测定:依据GB/T 5009.3—2003,采用105℃恒重干燥法。

**1.2.3 单因素试验** 以面包专用粉和黑小麦全麦粉的总质量为基重,保持改良剂0.8%和盐1.0%的比例不变,以面包比容和感官评分为指标,分别考察不同比例的黑小麦全麦粉、水、酵母粉、蔗糖等因素对黑小麦全麦面包品质的影响,具体单因素试验设计见表1。

表1 黑小麦全麦粉面包制作单因素试验 %

因素	水平	工艺配方
全麦粉比例	15,20,25,30,35	水52,酵母粉1.2,蔗糖20
水比例	46,48,50,52,54	全麦粉20,酵母粉1.2,蔗糖20
酵母粉比例	0.8,1.0,1.2,1.4,1.6	全麦粉20,水52,蔗糖20
蔗糖比例	16,18,20,22,24	全麦粉20,水52,酵母粉1.2

**1.2.4 响应面试验设计** 在单因素试验的基础上,选取黑小麦全麦粉、酵母粉、水、蔗糖4个因素,以面

包综合评分为响应值,采用响应面分析法对黑小麦全麦面包工艺配方进行4因素3水平中心组合试验,利用Design-Expert软件进行数据处理和回归分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 黑小麦全麦粉添加量对面包品质的影响

黑小麦全麦粉添加量对黑小麦全麦面包品质的影响结果见图1.

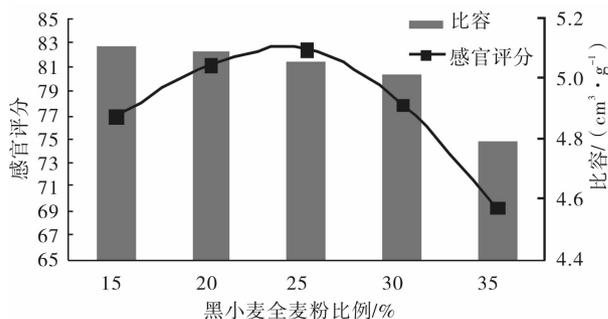


图1 黑小麦全麦粉添加量对黑小麦全麦面包品质的影响

由图1可知,随着黑小麦全麦粉添加比例的增加,全麦面包的比容呈逐渐减小的趋势.这是由于黑小麦粉为中等筋力小麦,添加到高筋面包粉中会使混合粉筋力减弱的缘故.此外,随着全麦面粉添加量的增加,面团中麸屑含量增多,在调面过程中弱化了面团筋力<sup>[9]</sup>,面团持气力减弱,无法充分膨胀,导致面包在焙烤过程中不能形成蓬松的结构,进而影响了产品的比容.虽然比容略有下降,但由于使用了改良剂,当全麦粉添加量在15%~30%时,成品的比容下降趋势很小.图1显示,加入适量的黑小麦全麦粉不但不影响面包的感官品质,还能在一定程度上增加其风味口感.这是由于全麦粉中的麸皮具有较强的吸水性,促进了面包的持水力,使产品质地更加柔软;但添加量>30%时,面团麸皮含量过多,面团持气力减弱,使面包内部出现大的孔洞,表皮粗糙塌陷,内部的纹理结构变粗糙,感官评分有所下降.因添加比例在20%~30%时,黑小麦全麦面包的口感较好,且体积较好,所以后续响应面试验采用全麦粉添加量为20%,25%和30%这3个水平.

#### 2.1.2 酵母粉添加量对黑小麦全麦面包品质的影响

酵母添加量对全麦面包品质的影响结果见图2.

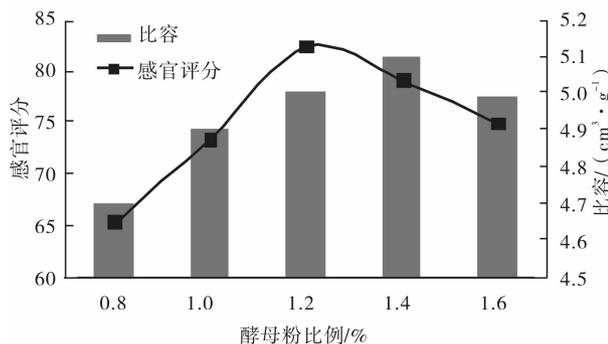


图2 酵母添加量对黑小麦全麦面包品质的影响

由图2可以看出,随着酵母添加量的增加,全麦面包的感官品质和比容均呈现先上升后下降的趋势.酵母的用量对面包的口感及体积起着重要的作用.若添加量过少,则面包发酵效果差,内部质地密实,体积较小;若添加量过多,面团产气量增多,面团内的气孔壁膜迅速变薄,当酵母的产气过程与面团的面筋网络形成过程不能同步时,会导致面团成熟过度,持气性变劣,轻者面包内部的组织纹理会出现孔洞,重者导致成品面包表面开裂、塌陷,外观体积呈下降趋势,且添加量过多,会有较浓的面包酵母味,影响口感.只有当酵母添加量适当时,酵母的产气与面团的持气力同时达到最大时,烘焙的面包弹性最大,同时其内部组织、体积及表皮颜色最理想.图2显示酵母添加量为1.2%~1.6%时,全麦面包的感官评分和比容较为理想.因此,后续响应面试验采用酵母添加量为1.2%,1.4%和1.6%这3个水平.

#### 2.1.3 加水量对黑小麦全麦面包品质的影响

加水量对黑小麦全麦面包品质的影响结果见图3.

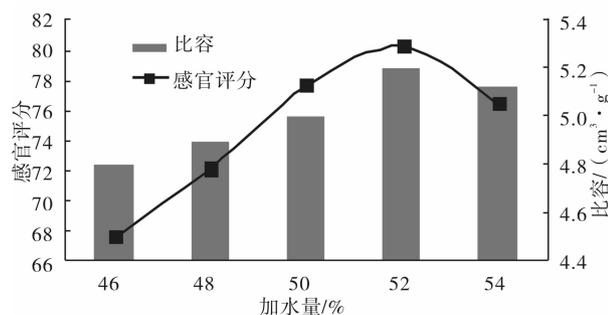


图3 加水量对黑小麦全麦面包品质的影响

由图3可知,随着水量的增加,黑小麦全麦面包的感官评分和比容呈先上升再下降的趋势.这是由于面团筋的形成是一个吸水溶胀的水化过程<sup>[10]</sup>.若加水量过少,面团发硬,面筋形成不足,且酵母没有适宜的环境进行发酵,不利于产气,从而使面包体积减小;适量的加水量,促使面团筋力增强,并产生较好的发酵和产气效果,使面包体积膨大,并具有理想的内部质地和纹理;若加水量过多,面团的强度变得过于柔软,面筋蛋白容易遭到破坏,持气能力下降,导致面包比容降低,同时,面筋弹性变差,内部组织产生较大的孔洞,使感官品质有所下降.

试验结果表明,加水量与混合面粉的质量比在50%~54%时,黑小麦全麦面包的感官品质和比容较好.因此,后续响应面试验确定加水量为50%,52%和54%这3个水平.

#### 2.1.4 蔗糖添加量对黑小麦全麦面包品质的影响

蔗糖添加量对黑小麦全麦面包品质的影响结果见图4.

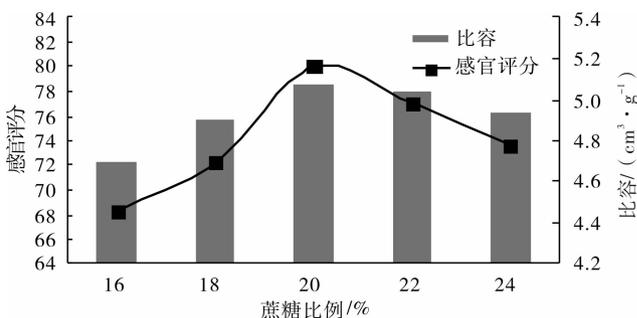


图4 蔗糖添加量对黑小麦全麦面包品质的影响

由图4可知,随着蔗糖添加量的增加,全麦面包的感官评分和比容均呈现先上升后下降的趋势.这是因为蔗糖作为酵母营养物质的来源,能够促进酵母发酵产气,提高面团气体保持力,并使面包表面呈现理想的棕褐色,产生好的风味.此外,蔗糖还可以强化水分的保持,抑制面包水分蒸发,使面包质地柔软.但糖含量过高会抑制酵母发酵,使发酵速度减慢,抑制了面团筋的形成,面筋得不到充分扩展,使产品体积小、组织粗糙.同时,添加量过多,会使全麦面包口感过甜甚至发腻,表皮易粘连和塌陷,造成面包感官评分和比容下降.

图4显示砂糖添加量为20%~24%时,感官评分和比容较为理想.因此后续响应面试验确定砂糖

添加量为20%,22%和24%这3个水平.

## 2.2 最佳工艺条件的确定

### 2.2.1 试验因素和水平的选取

综合以上单因素试验分析结果,选取黑小麦全麦粉添加量(*A*)、酵母添加量(*B*)、水添加量(*C*)、蔗糖添加量(*D*)这4个因素,对黑小麦全麦面包工艺配方进行4因素3水平中心组合试验,试验因素及水平见表2.

表2 响应面分析因素和水平表

水平	因素			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
-1	20	1.2	50	20
0	25	1.4	52	22
1	30	1.6	54	24

### 2.2.2 多元二次响应面回归模型的建立与分析

采用响应面分析方法研究上述4个因素的交互作用对黑小麦全麦面包工艺配方的影响.以*A*,*B*,*C*,*D*为自变量,综合评分作为响应值进行响应面分析,试验设计与结果见表3.

### 2.2.3 模型的建立及显著性检验

利用 Design-Expert 软件对表3试验数据进行多元回归拟合,得到各因子对响应值的二次多项回归模型为

$$Y = 83.13 + 3.39A + 1.18B + 0.77C - 0.62D - 1.45AB - 1.40AC - 0.15AD - 0.64BC - 0.96BD + 1.46CD - 4.25A^2 - 0.92B^2 - 0.73C^2 - 0.61D^2$$

对回归模型作显著检验和方差分析,结果见表4.该模型的  $F = 9.96$ ,  $P < 0.0001$ ,说明模型回归效果极显著.模型的相关系数  $R^2 = 0.9029$ ,表明模型与试验拟合较好,自变量与响应值之间关系显著,该二次方程模型可靠,可用其分析、预测黑小麦全麦面包的工艺配方.

由表4可知,各因素对黑小麦全麦面包感官质量影响的主次顺序为:黑小麦全麦粉添加量 > 酵母量 > 加水量 > 蔗糖量.*A*,*B*对黑小麦全麦面包的感官质量有着显著影响,*A*-*B*,*A*-*C*,*C*-*D*交互项的影响显著( $P < 0.05$ ). $A^2$ 对感官质量的影响达到极显著水平.

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合,通过响应面分析可求得最佳参数以及各参数之间的相互作用.通过软件分析,得到黑小麦全麦面包的最佳工艺配方为:以混合粉为基重,黑小麦全麦粉添加量 23.21%,水 52.04%,酵母

1.33%,蔗糖 20.86%。在此条件下,黑小麦全麦面包比容为 5.3 cm<sup>3</sup>/g,综合评分为 86.51。考虑到实际可操作性,将优化参数修正为:黑小麦全麦粉添加量 23%,水 52%,酵母 1.3%,蔗糖 21%。按此优化配方制作的黑小麦全麦面包比容为 5.21 cm<sup>3</sup>/g,综合评分为 85.37。这与预测值基本一致,进一步验证了回归模型的可靠性,可用于指导生产实践。

### 2.3 面包贮藏期间的水分变化

面包在贮存过程中,面包心的水分会向面包表面迁移,使面包心水分散失,这是导致面包老化的重要因素之一。比较了采用优化工艺配方制作的黑小麦全麦面包与普通面包在贮存过程中面包心水分的变化趋势,结果如图 5 所示。

表 3 响应面分析试验设计与结果

序号	A	B	C	D	综合评分
1	-1	0	0	-1	81.24
2	0	0	0	0	74.92
3	0	0	-1	-1	78.76
4	0	0	0	0	73.45
5	-1	-1	0	0	84.46
6	1	-1	0	0	68.47
7	-1	1	0	0	81.47
8	0	0	1	1	73.58
9	0	-1	1	0	76.02
10	0	0	1	-1	83.23
11	0	1	0	-1	80.34
12	1	0	0	-1	77.45
13	0	0	-1	1	73.18
14	1	0	-1	0	69.34
15	0	-1	0	-1	70.62
16	0	1	1	0	84.45
17	-1	0	1	0	80.67
18	1	0	1	0	74.45
19	1	0	0	1	68.69
20	0	-1	0	1	71.42
21	0	1	0	1	76.54
22	0	0	0	0	80.65
23	1	1	0	0	72.04
24	0	0	0	0	84.77
25	0	0	0	0	80.32
26	-1	0	0	1	77.63
27	-1	0	-1	0	65.64
28	0	-1	-1	0	68.74
29	0	1	-1	0	70.26

表 4 响应面二次回归方程的方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性 P
模型	950.75	14	67.91	9.96	<0.000 1
A	275.07	1	275.07	40.34	<0.000 1
B	33.54	1	33.54	4.92	0.042 4
C	14.09	1	14.09	2.07	0.171 1
D	9.36	1	9.36	1.37	0.259 5
A-B	33.55	1	33.55	4.92	0.042 4
A-C	31.28	1	31.28	4.59	0.049 0
A-D	0.34	1	0.34	0.050	0.826 5
B-C	6.59	1	6.59	0.97	0.341 1
B-D	14.73	1	14.73	2.16	0.162 3
C-D	34.08	1	34.08	5.00	0.041 0
A <sup>2</sup>	495.21	1	495.21	72.63	<0.000 1
B <sup>2</sup>	22.98	1	22.98	3.37	0.086 3
C <sup>2</sup>	14.48	1	14.48	2.12	0.165 7
D <sup>2</sup>	10.05	1	10.05	1.47	0.243 5
残差	102.27	15	6.82		
失拟	62.09	10	6.21	0.77	0.660 4
纯误差	40.18	5	8.04		

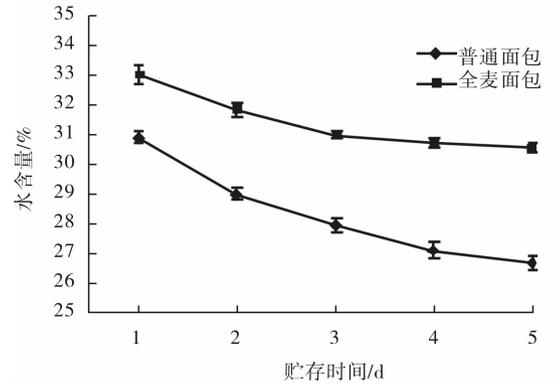


图 5 黑小麦全麦面包在贮存期间的水分含量变化

图 5 显示,2 种面包面包心的水分含量在贮存过程中均逐渐降低,说明随着贮存时间延长,面包会逐渐失水、老化。但在贮存期间全麦面包水分含量始终高于普通面包,且失水速率低于普通面包,表明其持水力较强,能有效延缓面包老化,延长面包货架期。这主要得益于全麦粉中的膳食纤维能提高面包持水性,抑制面包心水分的散失,使其质地柔软、老化速率下降<sup>[11]</sup>。

此外,采用优化工艺配方制作的黑小麦全麦面包在表面状态、外观形状、内部质地结构等方面均

有明显改善,面包表皮色泽鲜亮,风味独特,内部组织呈均匀的蜂窝状,且柔软、富有弹性。

### 3 结论

本文以面包比容和感官评分为评价指标,通过单因素和响应面优化试验确定了黑小麦全麦面包的最佳工艺配方为:以混合粉为基重,黑小麦全麦粉添加量 23%,水 52%,酵母 1.3%,蔗糖 21%。采用优化工艺配方制作的全麦面包比容为  $5.21 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,综合评分为 85.37,品质得到了明显改善。

面包贮存过程中面包心水分含量变化趋势表明:相比普通面包,黑小麦全麦面包具有较强的持水力,老化速率明显降低,面包货架期延长。

#### 参考文献:

- [1] 孙善澄,刘少翔.黑粒高营养小麦种植与加工利用[M].北京:金盾出版社,2003.
- [2] 胡秋辉,陈历程,吴莉莉,等.黑小麦营养成分分析及其深加工制品前景展望[J].食品科学,2001,22(12):50.
- [3] 王瑞元.大力推进全谷物营养健康食品的发展[J].现代面粉工业,2011,25(4):1.
- [4] 屈凌波.谷物营养与全谷物食品的研究开发[J].粮食

与食品工业,2011,18(5):7.

- [5] 谭斌,谭洪卓,刘明,等.全谷物食品的国内外发展现状与趋势[J].中国食物与营养,2009(9):4.
- [6] Dongowski G, Huth M, Gebhardt E, et al. Dietary fiber-rich barley products beneficial affected the intestinal tract of rats[J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132:3704.
- [7] Mellen P B, Walsh T F, Herrington D M, et al. Whole grain intake and cardiovascular disease; a meta-analysis[J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2008, 18:283.
- [8] Andersson U, Rosen L, Ostman E, et al. Metabolic effects of whole grain wheat and whole grain rye in the C57BL/6J mouse[J]. Nutrition, 2010, 26:230.
- [9] Hu G H, Huang S H, Cao S W, et al. Effect of enrichment with hemicellulose from rice bran on chemical and functional properties of bread[J]. Food Chem, 2009, 115(3):839.
- [10] Wang J, Rosella C M, Benedito de Barber C. Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality[J]. Food Chem, 2002, 79(2):221.
- [11] 郑学玲,李利民,姚惠源,等.小麦麸皮及面粉戊聚糖对面团特性及面包烘焙品质影响的比较研究[J].中国粮油学报,2005,20(2):21.

# 红曲色素液体发酵研究

马歌丽, 孙浩, 韩甜甜, 孙佳佳, 程战士, 路红娜

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**对红曲霉产红曲色素的液体发酵培养基组成和发酵条件进行了研究. 结果表明红曲霉发酵产红曲色素的最佳培养基组成为:葡萄糖 30 g/L, 硝酸钠 15 g/L, 硫酸锌 0.05 g/L 和硫酸锰 0.05 g/L, 培养基初始 pH=3, 装液量为 30 mL/250 mL, 培养时间为 120 h. 在此条件下, 红曲霉发酵产红曲色素的色价达到 16.91 U/mL.

**关键词:**红曲霉;红曲色素;发酵条件;正交试验

**中图分类号:**TS264.4;Q815 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.003

## Liquid fermentation research of monascus pigment

MA Ge-li, SUN Hao, HAN Tian-tian, SUN Jia-jia, CHENG Zhan-shi, LU Hong-na

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

**Abstract:** The fermentation medium and conditions for monascus pigment production by *monascus* were studied. The results showed that the optimal medium composition for producing monascus pigments was as follows: glucose 30 g/L, NaNO<sub>3</sub> 15 g/L, ZnSO<sub>4</sub> 0.05 g/L and MnSO<sub>4</sub> 0.05 g/L, medium initial pH = 3, liquid volume 30 mL/250 mL, incubation time 120 h. Under these conditions, color value of *monascus* producing monascus pigment reached 16.91 U/mL.

**Key words:** *monascus*; monascus pigment; fermentation condition; orthogonal experiment

## 0 引言

红曲色素是红曲霉在生长代谢过程中产生的多种天然色素的混合物,是红曲霉菌的次级代谢产物.作为一种天然着色剂,红曲色素广泛用于肉制品、清酒、酱油、腐乳、糕点、糖果、冷饮等食品,也可用于医药和化妆品;此外,红曲色素还具有抑菌、防腐、降血脂、降血压、抗肿瘤、抗疲劳、预防动脉硬化等医疗保健作用<sup>[1-5]</sup>.

根据红曲霉菌培养方式的不同,红曲色素的生产方法分为固态发酵和液态发酵2种.固态发酵法

劳动强度大、生产周期长、生产效率低且产品质量稳定性差,不适宜大规模工业生产<sup>[6-8]</sup>.近年来,人们开始探索采用液态发酵法生产红曲色素<sup>[9-11]</sup>,但此法生产的红曲色素色价较低,从而制约其工业化生产.目前,提高红曲霉液体发酵生产红曲色素产量的主要途径有筛选高产红曲霉菌株、探索最佳发酵工艺条件和研究最佳提取工艺等<sup>[12-13]</sup>.本研究主要通过单因素和正交试验,考察摇瓶发酵培养基组成、初始 pH、培养时间和装液量对红曲霉产红曲色素的影响,以期得到红曲霉发酵产红曲色素的最佳摇瓶发酵条件,为红曲霉大规模工业生产红曲色素

提供工艺参数和理论指导。

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

**1.1.1 菌种** 红曲霉,郑州轻工业学院生物工程实验室选育。

**1.1.2 培养基** 斜面培养基:土豆 200 g/L,葡萄糖 20 g/L,琼脂粉 15 g/L;种子培养基:蔗糖 30 g/L,蛋白胨 30 g/L,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.5 g/L,  $\text{MgSO}_4$  0.5 g/L, pH = 5.5 ~ 6.0;基础发酵培养基:葡萄糖 50 g/L,蛋白胨 20 g/L,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.0 g/L,  $\text{MgSO}_4$  1.0 g/L,  $\text{ZnSO}_4$  0.1 g/L,  $\text{MnSO}_4$  0.1 g/L, pH = 5.5 ~ 6.0。

**1.1.3 主要试剂** 蔗糖、葡萄糖,分析纯,国药集团化学试剂有限公司产;可溶性淀粉,分析纯,北京康普汇维科技有限公司产;乳糖,生化试剂,北京鸿润宝顺科技有限公司产;琼脂粉,分析纯,北京索莱宝科技有限公司产;蛋白胨,分析纯,生工生物工程(上海)股份有限公司产;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,均为分析纯,广东汕头市西陇化工厂产。

**1.1.4 仪器** CP214 型电子天平,奥豪斯仪器(上海)有限公司产;SHP-250 型智能生化培养箱,上海鸿都电子科技有限公司产;SW-CJ-1F 型单人双面净化工作台,苏州净化设备有限公司产;SHP-3 型循环水式多用真空泵,郑州杜甫仪器厂产;TDL-5A 型台式低速离心机,北京天诚沃德生物技术有限公司产;QYC-211 型全温振荡培养箱,上海福玛实验设备有限公司产;DGX-9053B 型电热恒温鼓风干燥箱,上海福玛实验设备有限公司产;LX-C35L 型立式自动电热压力蒸汽灭菌锅,合肥华泰医疗设备有限公司产;UV-2600 型分光光度计,上海尤尼柯仪器有限公司产;PB-10 型酸度计,北京赛多利斯科学仪器有限公司产。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 红曲霉的培养和发酵** 菌种活化:选取保藏于冰箱中的红曲霉斜面菌种,接至固体斜面培养基上,于 30 ℃ 恒温培养 5 d。

种子培养:选取活化好的红曲霉孢子接种至装液量为 50 mL/250 mL 三角瓶的种子培养基中,于 30 ℃, 200 r/min 摇床培养 2 d。

摇瓶发酵:将种子液以 10% 的接种量接至装液量为 30 mL/250 mL 三角瓶的发酵培养基中,于 30 ℃, 200 r/min 摇床培养 6 d。

**1.2.2 红曲色素色价的测定** 取 10 mL 培养液,于 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液适当稀释,以蒸馏水为空白,测 505 nm 处吸光值. 色素色价( $U \cdot \text{mL}^{-1}$ )为

$$U = \frac{A_{505}}{V} \times n$$

式中,  $A_{505}$  为 505 nm 处吸光值(数值在 0 ~ 2.5 范围),  $V$  为上清液体积/mL,  $n$  为稀释倍数。

**1.2.3 菌体生物量的测定** 取 10 mL 种子培养液,真空抽滤,菌体和滤纸一起置于 70 ℃ 烘箱中烘干至恒重,总重与滤纸之差即为菌体干重。

## 2 结果与讨论

### 2.1 红曲霉生长曲线及种子液中红曲色素产量

将接种红曲霉孢子悬液的种子培养基于 30 ℃, 200 r/min 摇床上培养,每隔 12 h 取样 10 mL,测菌体生物量. 红曲霉生长曲线见图 1。

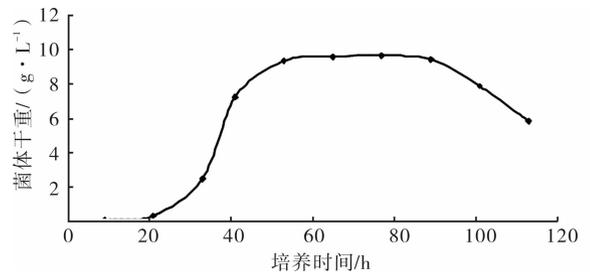


图 1 红曲霉生长曲线

据微生物生长速率的不同,可将其分为调整期、对数期、稳定期和衰亡期 4 个典型时期. 由图 1 可见,红曲霉的调整期为 0 ~ 32 h,对数生长期为 33 ~ 49 h,稳定期为 50 ~ 88 h,在 88 h 以后进入衰亡期. 在对数生长期,菌体处于生长繁殖旺盛阶段,能够很快适应生长环境,因此选择 48 h 为种龄进行接种。

测定红曲霉生长曲线时发现,随着培养时间的延续,种子液中已有色素产生,因此测定生物量的同时也测定了种子液中红曲色素的色价,红曲色素色价随种子培养时间的变化如图 2 所示。

由图 2 可见,在种子培养 52 ~ 76 h 后,种子液中红曲色素产量急速增加,在种子培养 77 ~ 112 h 之间,红曲色素的产量增长缓慢,处于稳定期. 对比图 1 和图 2 可知,红曲色素产量的累积明显滞后于红曲霉菌种的生长繁殖. 在红曲霉的对数生长期,红曲色素产生很少;红曲霉产红曲色素主要是在红

曲霉生长的稳定期,这说明红曲色素属于红曲霉的次级代谢产物。

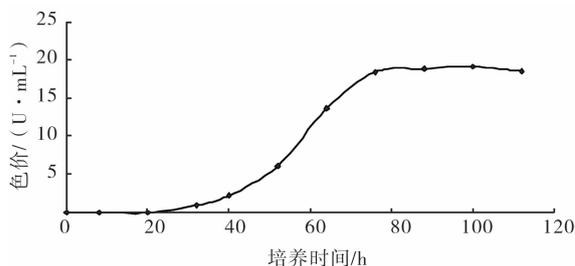


图2 种子液中红曲色素色价随培养时间的变化

## 2.2 碳源对红曲霉产红曲色素的影响

分别选取50 g/L蔗糖、可溶性淀粉和乳糖代替葡萄糖作为基础发酵培养基中的唯一碳源,碳源对红曲霉产红曲色素的影响见图3。

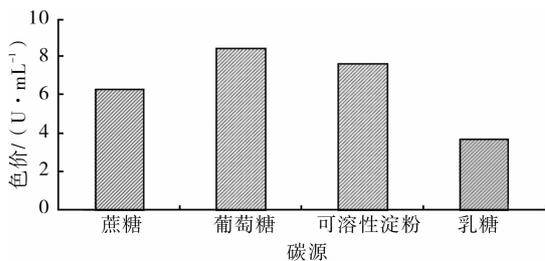


图3 碳源对红曲霉色素产量的影响

碳源是发酵培养基中重要的组分之一,是微生物生长代谢的碳架和能量来源。由图3可见,以葡萄糖为唯一碳源时,红曲霉产红曲色素产量最高,达到8.58 U/mL,可溶性淀粉次之,蔗糖和乳糖作为碳源时,色素产量较低。因此确定葡萄糖为最佳碳源。

以葡萄糖为唯一碳源,改变培养基中葡萄糖的浓度分别为10 g/L,30 g/L,50 g/L,70 g/L和90 g/L,葡萄糖浓度对红曲霉产红曲色素的影响见图4。

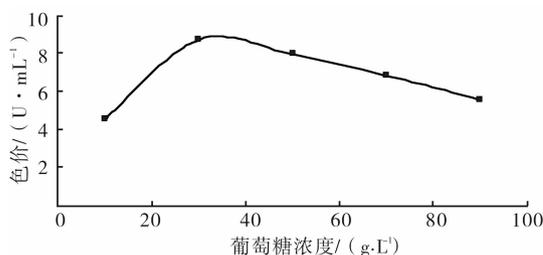


图4 葡萄糖浓度对红曲霉色素产量的影响

由图4可知,葡萄糖浓度为30 g/L时,红曲霉的红曲色素产量最高,为8.72 U/mL。葡萄糖浓度<30 g/L时,培养基中糖含量较少,不能满足微生物

生长代谢需要,红曲霉生长缓慢,色素产量较低;葡萄糖浓度>30 g/L时,培养基中糖含量较高,导致培养基黏度增大,溶氧量下降,从而抑制红曲霉的生长,色素产量下降。因此确定葡萄糖浓度为30 g/L。

## 2.3 氮源对红曲霉产红曲色素的影响

以30 g/L葡萄糖为碳源,分别选取20 g/L硫酸铵和硝酸钠代替蛋白胨,作为基础发酵培养基中的唯一氮源,氮源对红曲霉产红曲色素的影响见图5。

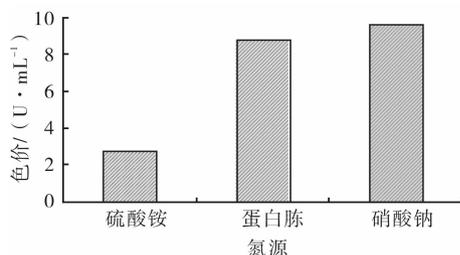


图5 氮源对红曲霉色素产量的影响

在红曲霉发酵过程中,氮不仅是构成红曲霉细胞蛋白质和核酸的主要元素,也是红曲色素和菌体合成色素所需酶的重要组成部分。由图5可知,硝酸钠为氮源时,红曲霉的红曲色素产量最高,为9.57 U/mL,蛋白胨次之,硫酸铵为氮源时色素产量最低。因此确定硝酸钠为最佳氮源。

以30 g/L葡萄糖为碳源,硝酸钠为氮源,改变培养基中硝酸钠的浓度分别为10 g/L,30 g/L,50 g/L,70 g/L和90 g/L,硝酸钠浓度对红曲霉产红曲色素的影响见图6。

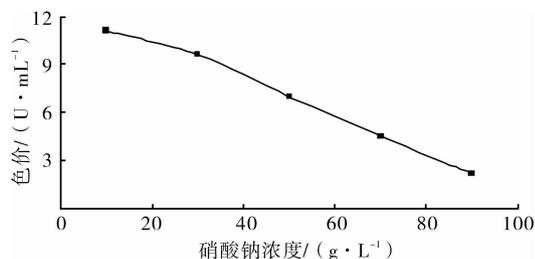


图6 硝酸钠浓度对红曲霉色素产量的影响

由图6可见,硝酸钠浓度为10 g/L时,红曲色素产量最高,为11.07 U/mL;随着硝酸钠浓度增大,红曲色素产量逐渐下降。其原因可能是硝酸钠属于无机氮源,当培养基中无机盐含量较高时,微生物细胞外渗透压升高,细胞失水,菌体生长受到抑制,导致红曲霉的色素产量下降。因此确定硝酸钠浓度为10 g/L。

## 2.4 无机盐对红曲霉产红曲色素产量的影响

以添加 30 g/L 葡萄糖和 10 g/L 硝酸钠、不添加任何无机盐的发酵培养基为对照,在发酵培养基中分别添加 1.0 g/L 磷酸二氢钾、1.0 g/L 硫酸镁和 0.1 g/L 硫酸锌 + 0.1 g/L 硫酸锰,无机盐对红曲霉产红曲色素的影响见图 7。

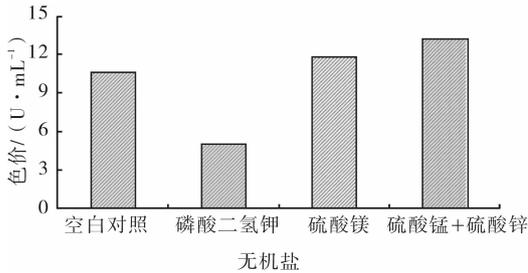


图 7 无机盐对红曲霉色素产量的影响

无机盐是微生物生长代谢中必不可少的营养物质,不仅可以作为某些微生物的能源物质,还可以作为酶活性中心的组成部分,维持生物大分子和细胞结构的稳定性,调节并维持细胞渗透压的平衡,控制细胞的氧化还原电位等。由图 7 可见,添加 0.1 g/L 磷酸二氢钾对红曲霉合成红曲色素表现出一定的负效应,而添加 1.0 g/L 硫酸镁和 0.1 g/L 硫酸锌 + 0.1 g/L 硫酸锰对红曲色素的合成均有一定的促进作用,且后者的作用更显著,此时红曲色素色价为 13.16 U/mL。

## 2.5 培养基初始 pH 对红曲霉产红曲色素的影响

在 30 g/L 葡萄糖和 10 g/L 硝酸钠的基础上,调节发酵培养基的初始 pH 分别为 1.5, 3, 5, 7, 9, 培养基初始 pH 对红曲霉产红曲色素的影响见图 8。

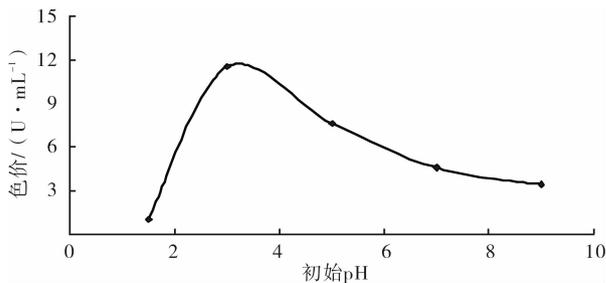


图 8 培养基初始 pH 对红曲霉色素产量的影响

pH 对微生物生长繁殖和产物合成的影响有以下几个方面: 1) 影响酶活性,当 pH 抑制菌体中某些酶的活性时,会阻碍菌体的新陈代谢; 2) 影响微生物细胞膜所带电荷的状态,改变细胞膜的通透

性,进而影响微生物对营养物质的吸收和代谢产物的排泄; 3) 影响培养基中某些组分和中间代谢产物的解离,从而影响微生物对这些物质的利用; 4) 引起菌体代谢过程不同,使代谢产物的质量和比例发生改变。另外, pH 还会影响到代谢产物的稳定性。由图 8 可见,培养基初始 pH 很低时,红曲霉产色素量极低; pH = 3 时,色素色价最高,为 11.54 U/mL; pH > 3 时,色素色价逐渐降低,且 pH = 7 ~ 9 时,色素产量基本稳定。因此确定发酵培养基的初始 pH = 3。

## 2.6 正交试验

根据上述单因素试验结果,选择葡萄糖(A)、硝酸钠(B)、硫酸锌 + 硫酸锰(C)和培养基初始 pH(D)这 4 个因素,每个因素选 3 个水平,进行 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交试验。正交试验方案与结果见表 1。

表 1 正交试验结果

序号	A/ (g · L <sup>-1</sup> )	B/ (g · L <sup>-1</sup> )	C/ (g · L <sup>-1</sup> )	D	色价/ (U · mL <sup>-1</sup> )
1	1(20)	1(5)	1(0.05)	1(2.5)	8.52
2	1	2(10)	2(0.1)	2(3)	3.44
3	1	3(15)	3(0.15)	3(3.5)	10.24
4	2(30)	1	2	3	1.68
5	2	2	3	1	4.92
6	2	3	1	2	16.56
7	3(40)	1	3	2	2.12
8	3	2	1	3	8.03
9	3	3	2	1	7.36
K <sub>1</sub>	22.20	12.32	33.11	20.80	
K <sub>2</sub>	23.16	16.39	12.48	22.12	
K <sub>3</sub>	17.51	34.16	17.28	19.95	
R <sub>j</sub>	5.65	21.84	20.64	2.17	
主次顺序	B > C > A > D				
最佳组合	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>				

从表 1 可见,影响红曲霉产红曲色素的因素主次顺序为 B > C > A > D,即硝酸钠是影响红曲霉产红曲色素的主要因素,其次是无机盐、葡萄糖和培养基初始 pH。最佳组合为 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub>,即葡萄糖 30 g/L,硝酸钠 15 g/L,硫酸锌和硫酸锰各 0.05 g/L,培养基初始 pH = 3,此时红曲色素的色价最高,为 16.56 U/mL。

## 2.7 培养时间对红曲霉产红曲色素的影响

采用优化后的发酵培养基,培养基初始 pH = 3,按 10% 接种量将种子液接至发酵培养基中,30 ℃,200 r/min 培养,每隔 24 h 取样,测定上清液中红曲

色素的色价,培养时间对红曲色素产量的影响见图9.

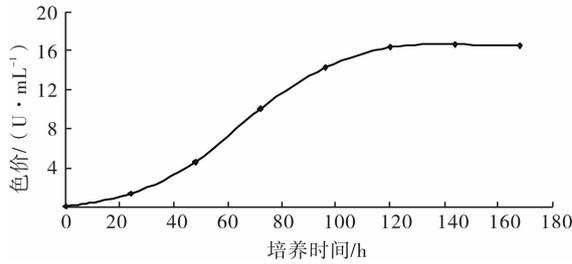


图9 培养时间对红曲霉色素产量的影响

从图9可见,随着培养时间的增加,红曲色素产量也逐渐升高.培养时间在24 h~120 h时,红曲色素产量增加迅速;当培养时间>120 h后,由于发酵培养基中的营养物质逐渐减少,不能满足菌体生长和合成色素的需要,红曲色素产量增加缓慢.因此,确定红曲霉液体发酵产红曲色素的培养时间为120 h.

### 2.8 装液量对红曲霉产红曲色素的影响

培养基初始 pH=3,调节发酵培养基的装液量分别为 20 mL/250 mL, 30 mL/250 mL, 40 mL/250 mL, 50 mL/250 mL 和 60 mL/250 mL,按10%的接种量将种子液接种到发酵培养基中,30 ℃,200 r/min 培养120 h,测定上清液中红曲色素的色价.装液量对红曲霉产红曲色素的影响见图10.

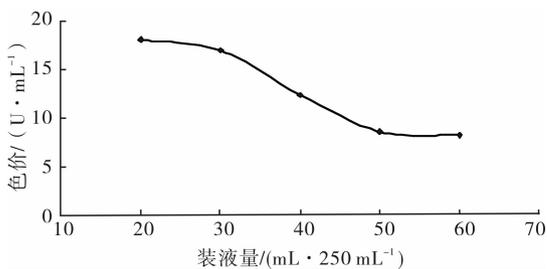


图10 装液量对红曲霉色素产量的影响

由图10可见,随着装液量的增加,红曲霉红曲色素产量下降.红曲霉为好氧菌,而装液量主要影响发酵培养基中的溶氧量,当发酵培养基中的接种量相同时,随着培养基装液量的增加,发酵液中单位体积的溶氧量下降,导致红曲色素产量下降.装液量为20 mL/250 mL时色素单位产量最高,但综合

考虑到总产量,选择装液量为30 mL/250 mL,此时红曲色素色价达16.91 U/mL.

## 3 结论

本文对红曲霉产红曲色素的液体发酵培养基组成和发酵条件进行了研究.通过单因素试验和正交试验,得到红曲霉发酵产红曲色素的最佳培养基配方:葡萄糖30 g/L,硝酸钠15 g/L,硫酸锌0.05 g/L,硫酸锰0.05 g/L,培养基初始 pH=3;用此发酵培养基装液量为30 mL/250 mL,于30 ℃,200 r/min 摇床培养120 h时,红曲霉发酵产红曲色素的色价可达16.91 U/mL.

### 参考文献:

- [1] 赵树欣,张建玲.红曲抑菌物质研究的现状与展望[J].中国酿造,2011,30(3):5.
- [2] 赵燕,温辉梁,胡晓波.红曲色素及其在食品工业中的应用[J].中国食品添加剂,2004(4):90.
- [3] 成晚霞,陈泽雄.红曲抗肿瘤活性研究进展[J].中国现代中药,2011,13(3):43.
- [4] 黄晓彦,毛宁,陈松生.红曲霉发酵产物抗疲劳作用的研究[J].食品科学,1998,19(9):9.
- [5] Jeun J, Jung H, Kim J H, et, al. Effect of the monascus pigment threonine derivative on regulation of the cholesterol level in mice[J]. Food Chem, 2008, 107: 1078.
- [6] 崔莉,张德权,张培正.红曲色素的研究现状分析[J].食品科技,2008,33(8):115.
- [7] 王金宇,董文斌,陶璐,等.红曲霉固态发酵产红曲色素的条件研究[J].食品科技,2010,35(2):199.
- [8] 孙春禄.固态发酵红曲色素的稳定性研究[J].肉类工业,2009(3):29.
- [9] 王广峰.红曲色素液体深层发酵工艺研究[J].食品科技,2007,32(10):57.
- [10] 郭红珍,王秋芬,马立芝.液态发酵产红曲色素的研究[J].食品工业科技,2008,29(3):154.
- [11] 游玢娟,鄢东.采用响应曲面法优化红曲色素液态发酵条件[J].中国调味品,2011,36(8):24.
- [12] 石文娟,谭俊,储炬,等.红曲色素高产菌株的高通量选育[J].中国酿造,2012,31(7):25.
- [13] 李明起,陈运中.红曲色素提取工艺条件的实验研究[J].肉类工业,2011(4):40.

# 嗜酸氧化亚铁硫杆菌浸取 印刷线路板中铜的多点添加策略

梁国斌, 刘维平, 唐江宏

(江苏理工学院 化学与环境工程学院, 江苏 常州 213001)

**摘要:**考察了嗜酸氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)对废弃印刷电路板(PCBs)中铜回收的影响. 由于PCBs添加时间和浓度显著影响菌体生长及铜浸取率,因而通过多点添加PCBs的策略促进铜浸取并减少对细胞生长的抑制. 结果表明,PCBs添加量为18 g/L(4 g/L于48 h,6 g/L于96 h和8 g/L于144 h)时,经过240 h培养,铜浸取率达80%,说明该策略有效和可行.

**关键词:**铜浸取;印刷电路板;嗜酸氧化亚铁硫杆菌;多点添加;氧化还原势

**中图分类号:**Q939.97 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.004

## Multiple point's addition strategy of leaching copper from wastes printed circuit boards with *Acidithiobacillus ferrooxidans*

LIANG Guo-bin, LIU Wei-ping, TANG Jiang-hong

(College of Chemistry and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** The effect of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on copper recovery in wastes printed circuit boards (PCBs) was investigated. PCBs addition times and amounts adversely inhibited bacterial growth and thus lowered copper leaching capacity, therefore multiple point's addition strategy could improve leaching copper and reduce inhibition of cell growth. The results showed that when multiple PCBs additions 18 g/L (4 g/L at 48 h, 6 g/L at 96 h and 8 g/L at 144 h) were developed, copper extraction reached 80% after 240 h cultivation. The suggesting strategy of copper leaching from waste PCBs was feasible and effective.

**Key words:** leaching copper; printed circuit boards (PCBs); *Acidithiobacillus ferrooxidans*; multiple point's addition; redox potential

## 0 引言

随着科技进步和市场需求增加,电子产品更新换代的周期越来越短且生产量持续增大,由此产生的电子垃圾增长速度高达每年22%<sup>[1]</sup>. 据统计我国家电的保有量超过10亿台<sup>[2]</sup>,而且国际上大量的电子垃圾正流入我国<sup>[3]</sup>. 作为电子产品主要部件的印

刷电路板(PCBs)中,除了含有塑料和难熔氧化物以外,还有大量金属,其含量高达30%左右<sup>[4-5]</sup>. 因此,对PCBs进行处理不仅是环境问题也是资源再生利用的前沿研究热点<sup>[6]</sup>. 目前传统的处理方法有火法回收、湿法回收和机械回收<sup>[7-9]</sup>,但都存在着不可避免的二次污染问题,难以达到无害化处理效果,且不能回收全部有价金属<sup>[10]</sup>.

收稿日期:2013-09-03

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(10KJB610002)

作者简介:梁国斌(1975—),男,陕西省安康市人,江苏理工学院副教授,博士,主要研究方向为环境生物技术.

微生物浸取 PCBs 中的金属,工艺简单、操作方便、成本低,具有明显的环境友好性<sup>[11]</sup>,其关键技术已在生物冶金等领域有成熟的产业化应用<sup>[12]</sup>. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) 是最常用于淋滤 PCBs 中金属的菌株<sup>[13-14]</sup>. 研究表明,PCBs 中金属浸出率与菌株生长状况密切相关<sup>[15]</sup>,PCBs 添加过程中会对菌株产生伤害作用<sup>[16]</sup>. 因而,优化 PCBs 添加方式对提高金属浸出率也至关重要. 为此,本文拟系统考察 PCBs 添加时间和添加方式对菌体生长和铜浸取的影响,通过优化 PCBs 添加方式提高铜浸出率,以期能为生物淋滤 PCBs 产业化提供理论依据和实践参考.

## 1 实验

### 1.1 主要试剂与仪器

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , 均为分析纯,国药集团上海化学试剂有限公司产;琼脂,分析纯,上海中科昆虫生物技术开发有限公司产;浓硫酸,磷酸,分析纯,天津市东丽区天大学试剂厂产;乙醇,分析纯,开封开化有限公司试剂厂产;考马斯亮蓝 G—250,超纯,牛血清白蛋白,生物试剂,Amresco 产.

AL204 型电子天平,梅特勒—托利多仪器有限公司产;YM—50L 型不锈钢立式电热蒸汽消毒器,上海三申医疗器械有限公司产;Phs—3C 型 pH 计,上海精密科学仪器有限公司产;HYG—II A 回转式恒温摇瓶柜,上海欣蕊自动化设备有限公司产;SPX—150B 生化培养箱,上海跃进医疗器械厂产;420—BS 型电热恒温培养箱,上海博泰实验设备有限公司产;XSP—8CA 型光学显微镜,上海光学五厂产;LG10—2.4A 型高速离心机,北京医用离心机厂产;HS—840—U 洁净工作台,苏州安泰空气技术有限公司产;CARY—50 型紫外分光光度计,American Varian Pty Ltd 产.

### 1.2 实验菌株

以常州市江边污水厂污泥为菌株来源,以二价铁 ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 为能源物质,通过筛选分离获得嗜酸氧化亚铁硫杆菌,将其命名为 (*A. ferrooxidans*-JSTU-02).

### 1.3 培养基

嗜酸氧化亚铁硫杆菌 (*A. ferrooxidans*-JSTU-02) 采用 9K 培养基进行培养<sup>[15]</sup>.

液体培养基组成:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  为 3.0 g/L,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  为 0.5 g/L,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为 0.5 g/L,  $\text{KCl}$

为 0.1 g/L,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  为 0.01 g/L, 调节  $\text{pH} = 1.5$ , 121 °C 灭菌 15 min, 冷却后加入经紫外灭菌 30 min 的  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (45 g/L).

固体培养基:在上述液体培养基中加入质量体积百分比为 3% 的琼脂粉.

### 1.4 实验方法

**1.4.1 PCBs 的来源和预处理** PCBs 从常州某电子产品店获得,运到实验室前没有经过物理或化学分离,PCBs 被压碎并且用研磨机研磨成 100 ~ 200  $\mu\text{m}$  筛度级的超细粉.

**1.4.2 菌种的筛选分离及培养** 将污泥分别接种到液体培养基上进行富集培养. 待培养基变浑浊后,用梯度稀释法在相应固体培养基上进行涂布培养,并反复划线培养,直至相差显微镜下观察到菌体形态一致. 由细菌的形态、生理生化特性以及基于 16S rRNA 基因序列同源性构建的系统发育树比较结果,鉴定该细菌为 *A. ferrooxidans*.

分批培养和种子培养时培养基组分相同,种子在旋转摇床中于 180 r/min 和 30 °C 条件下培养至对数期 (菌体浓度  $\approx 1 \times 10^7$  细胞/mL 时), 8 000 r/min 离心 15 min, 去上清液,细胞用酸性蒸馏水洗涤 2 次后于 4 °C 冰箱中保存,备用.

**1.4.3 耐金属菌株驯化** 配制含 40 mmol/L, 80 mmol/L, 120 mmol/L, 160 mmol/L, 200 mmol/L  $\text{Cu}^{2+}$  的 9K 培养基. 首先将种子培养液按 10% ( $v/v$ ) 接种至含 40 mmol/L  $\text{Cu}^{2+}$  的 9K 培养基中培养至对数期,然后依次进行继代培养,直至转接到含 200 mmol/L  $\text{Cu}^{2+}$  的新鲜培养基并培养至对数期,得到的湿菌体放冰箱保存,备用. 驯化时培养温度 30 °C, 摇床转速 200 r/min, 初始  $\text{pH} = 1.5$ .

**1.4.4 铜浸取实验** 所有铜浸取实验在 250 mL 摇瓶中进行,其中含 50 mL 培养基,培养温度 30 °C, 转速 200 r/min, 时间 240 h, 接种量 10 mL (*A. ferrooxidans* 浓度为  $1.0 \times 10^7$  菌群单位/mL).

对照实验:调节新鲜 9K 培养基 (无菌) 初始  $\text{pH} = 1.5$ , 并加入不同浓度 PCBs (4 g/L, 6 g/L, 8 g/L, 10 g/L 和 12 g/L), 培养 240 h 后,测定溶液中铜含量.

PCBs 单点添加实验:将不同浓度 PCBs (4 g/L, 6 g/L, 8 g/L, 10 g/L 和 12 g/L) 在不同培养时间里 (0 h, 48 h, 96 h, 144 h 和 192 h) 一次性加入培养基中,培养 240 h 后,测定培养液中铜含量.

PCBs 多点添加实验:基于 PCBs 单点添加基础

上,进一步考察 PCBs 不同组合下多点添加对细胞生长和铜浸取率的影响.

**1.4.5 菌体量的测定** 将含有氧化亚铁硫杆菌的 50 mL 培养液在 8 000 r/min 离心 8 min, 去上清液, 称重记录质量, 放入研钵, 倒入液氮研磨至粉末状使菌体破碎, 取出研磨后的菌体, 加水定容至 50 mL, 离心, 取上清液. 采用考马斯亮蓝法测定上清液中的蛋白质含量<sup>[17]</sup>. 由于蛋白质含菌体量的 10%, 因此菌体量(g/L)用下式计算: 菌体量 = 蛋白质质量/10%.

#### 1.4.6 PCBs 中金属成分及培养液中铜测定

PCBs 中金属成分及含量测定: 2.0 g PCBs 超细粉溶解于 100 mL 王水中, 待溶液温度降至室温时, 调整体积到 100 mL, 原子分光光度法测定金属含量.

培养液中铜浓度测定: 取 5 mL 浸取液, 滤纸过滤以除去固体颗粒, 8 000 r/min 离心 15 min 除去菌细胞, 收集上层清液用作铜浓度测定.

## 2 结果与分析

### 2.1 PCBs 中金属成分与含量分析

本研究所选用 PCBs 中金属成分与含量测定结果主要是铜(14.6%), 锌(5.6%), 铅(3.1%), 镍(2.4%), 铝(1.4%)和铁(1.2%), 及少量的贵金属(如金和银), 以上金属占 PCBs 组成约 28%, 其余主要是聚合物和陶瓷. 可见, PCBs 中主要金属为铜, 因而本文主要研究 *A. ferrooxidans* 浸取 PCBs 中的铜.

### 2.2 单点添加 PCBs 对细菌生长和铜浸取率的影响

单点添加 PCBs 时, *A. ferrooxidans* 菌体细胞生物量和铜淋滤效果见表 1. 由表 1 可见, PCBs 添加量越高, 对细胞生长的抑制越严重, 进而导致铜浸取率越低. 这说明 PCBs 粉末对细胞具有一定毒性, PCBs 添加量过高, 会伤害细胞正常代谢而抑制细胞生长, 不利于铜的浸取. 同时, PCBs 添加时间也明显影响铜的浸取. *A. ferrooxidans* 培养初期(<48 h), 菌体处于对数快速生长阶段, 菌体浓度相对较低, 此时加入 PCBs 会明显影响细胞生长; 随着培养时间延长, 菌体浓度增加达到静止期, PCBs 对细胞伤害下降, 铜的浸取率则相应增加; 培养后期(192 h)加入 PCBs, 菌体活力下降及淋滤时间相对较短, 导致铜浸取率也较低. 总的来说, 培养 48 h 添加 4 g/L PCBs, 96 h 添加 6 g/L PCBs 及 144 h 添加 8 g/L

PCBs, 细胞生长所受抑制程度较小, 铜浸取率则较高. 此外, 对照实验表明, 在无菌酸性 9K 培养基中加入不同浓度 PCBs 粉末, 经过 240 h 淋滤后铜浸取效率很低. 这说明铜淋滤率主要取决于微生物生长状况, 与低酸化学法浸取关系不大.

表 1 单点添加 PCBs 对菌体生长和铜浸取率的影响

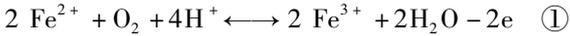
PCBs /(g · L <sup>-1</sup> )	添加时间 /h	蛋白质浓度 /(mg · L <sup>-1</sup> )	铜浸 取率/%
4	0(对照)	0	15 ± 0.1
	0	39 ± 0.3	80 ± 0.2
	48	48 ± 0.2	87 ± 0.2
	96	55 ± 0.4	91 ± 0.2
	144	60 ± 0.4	94 ± 0.3
	192	62 ± 0.5	88 ± 0.2
6	0(对照)	0	13 ± 0.1
	0	36 ± 0.2	78 ± 0.1
	48	45 ± 0.3	84 ± 0.2
	96	53 ± 0.3	87 ± 0.2
	144	58 ± 0.3	92 ± 0.3
	192	60 ± 0.4	84 ± 0.2
8	0(对照)	0	10 ± 0.1
	0	32 ± 0.1	76 ± 0.1
	48	40 ± 0.2	82 ± 0.2
	96	47 ± 0.3	84 ± 0.2
	144	54 ± 0.3	89 ± 0.3
	192	59 ± 0.5	83 ± 0.2
10	0(对照)	0	8.6 ± 0.1
	0	30 ± 0.1	70 ± 0.1
	48	37 ± 0.1	77 ± 0.1
	96	44 ± 0.2	80 ± 0.2
	144	51 ± 0.3	84 ± 0.2
	192	57 ± 0.4	77 ± 0.1
12	0(对照)	0	7.4 ± 0.1
	0	27 ± 0.1	66 ± 0.1
	48	35 ± 0.1	72 ± 0.1
	96	41 ± 0.1	75 ± 0.2
	144	49 ± 0.2	79 ± 0.3
	192	56 ± 0.3	70 ± 0.1

### 2.3 多点添加 PCBs 对细菌生长和铜浸取率的影响

在单点添加基础上, 考察多点添加 PCBs 对细胞生长和铜浸取的影响, 结果见表 2. 由表 2 可见, 与 2 点添加相比, 尽管 3 点添加(48 h 添加 4 g/L PCBs, 96 h 添加 6 g/L PCBs 和 144 h 添加 8 g/L PCBs)的铜浸取率略有降低, 但其 PCBs 添加量明显增加. 因而, 综合考虑 PCBs 添加量和铜浸取率, 选

取3点添加方式效果更佳。

研究表明, *A. ferrooxidans* 主要通过间接方式生物浸取电子废弃物中的金属。首先, 菌体中  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化为  $\text{Fe}^{3+}$  的过程中会释放电子, *A. ferrooxidans* 利用这些电子产生的能量进行生长代谢;  $\text{Fe}^{3+}$  氧化 PCBs 中的金属 Cu 为  $\text{Cu}^{2+}$ , 同时  $\text{Fe}^{3+}$  被还原为  $\text{Fe}^{2+}$ , 又进一步促进细胞生长, 反应如下:



采用菌体生长前期添加低浓度 PCBs 和生长后期添加高浓度 PCBs 的多点添加方式, 一方面, 菌体生长所受抑制程度最小, 同时  $\text{Fe}^{3+}$  连续氧化 PCBs 中的金属 Cu 为可溶性  $\text{Cu}^{2+}$ , 这样形成一个循环, 既保证了菌体生长, 也保证了 PCBs 中铜的浸取率。

表2 多点添加 PCBs 对菌体生长和铜浸取率的影响

试验号	PCBs ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )			蛋白质浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	铜浸取率/%
	48 h	96 h	144 h		
1	4	6	0	$45 \pm 0.2$	$83 \pm 0.2$
2	4	0	8	$46 \pm 0.2$	$85 \pm 0.3$
3	0	6	8	$50 \pm 0.2$	$84 \pm 0.3$
4	4	6	8	$43 \pm 0.2$	$80 \pm 0.2$

## 2.4 *A. ferrooxidans* 浸取 PCBs 时淋滤液 pH 值和氧化还原电势动态变化

由于 *A. ferrooxidans* 需要在强酸环境下生长代谢, 同时 PCBs 粉末中的铜浸取前须在强酸环境下将其溶解; 此外, 细菌浸取 PCBs 中铜的能力与淋滤液中氧化还原势密切相关, 因而本研究在多点 PCBs 添加基础上, 进一步测定淋滤过程中培养液 pH 值和氧化还原势的动态变化情况, 结果如图 1, 图 2 所示。由图 1 可见, 培养液初始  $\text{pH} = 1.5$ , 当 48 h, 96 h 和 144 h 加入 PCBs 时, 淋滤液 pH 值相应增大, 之后随着淋滤进行, pH 呈下降趋势, 表明 PCBs 中含有碱性成分而直接导致淋滤液 pH 升高。由图 2 可知, PCBs 加入之前 ( $< 48 \text{ h}$ ), 由于  $\text{Fe}^{2+}$  不断被氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ , 期间菌体也快速增长, 进一步使  $\text{Fe}^{3+}$  生成速度加快,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  比增加, 培养液氧化还原电势不断上升。然而, 当 48 h, 96 h 和 144 h 加入 PCBs 后,  $\text{Fe}^{3+}$  被快速用于氧化 PCBs 中的金属铜, 使得  $\text{Fe}^{3+}$  浓度下降、 $\text{Fe}^{2+}$  浓度上升,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  比下降, 导致淋滤液氧化还原势降低。由于  $\text{Fe}^{2+}$  会进一步氧化形成  $\text{Fe}^{3+}$ , 淋滤后期  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  比维持相对恒定水平, 确保了菌体生长和 PCBs 中铜的浸取。

总之, 对于 *A. ferrooxidans* 生物法浸取 PCBs 中铜而言, 随着 PCBs 添加和淋滤进行, 淋滤液的 pH 值相应上升, 进而影响菌体生长和 PCBs 粉末溶解, 同时氧化还原电势下降也会造成铜浸取能力下降。有研究表明, 生物浸取 PCBs 中铜的另一种常用菌嗜酸氧化硫硫杆菌 (*Acidithiobacillus thiooxidans*) 以单质硫为能源物质进行生长代谢, 同时将其氧化为硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), 使培养液的 pH 始终维持在较低水平。因而未来重点将考察 *A. thiooxidans* 和 *A. ferrooxidans* 混合培养来提高 PCBs 中铜的浸取率。

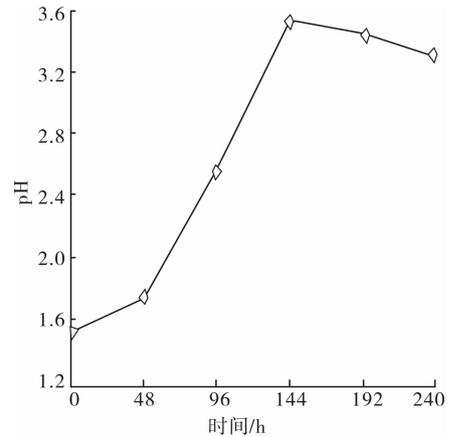


图1 *A. ferrooxidans* 浸取 PCBs 时淋滤液 pH 值变化

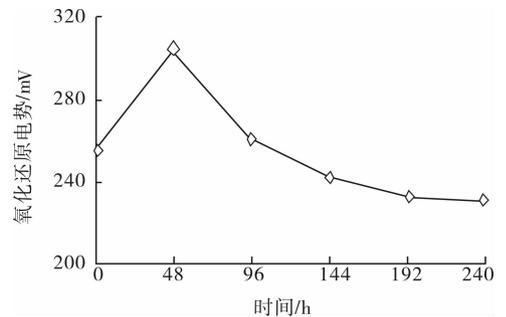


图2 *A. ferrooxidans* 浸取 PCBs 时淋滤液氧化还原电势动态变化

## 3 结论

本文考察了 *A. ferrooxidans* 生物法浸取 PCBs 中铜时, PCBs 添加方式对菌体生长和铜浸取率的影响。结果表明, PCBs 添加时间和添加量均明显影响菌体生长和铜的浸取, 培养初期和后期不适宜进行 PCBs 中铜浸取。采用培养前期添加低浓度和对数期添加高浓度 PCBs 的多点添加策略, 添加量  $18 \text{ g/L}$

(4 g/L 于 48 h, 6 g/L 于 96 h 和 8 g/L 于 144 h), 可减少对菌体生长抑制同时又促进铜的浸取. 此外, PCBs 添加会导致培养液 pH 升高和氧化还原电势下降, 通过混合菌培养可能是解决问题的一个主要途径.

#### 参考文献:

- [1] Ni H G, Zeng E. Law enforcement and global collaboration are the keys to containing e-waste tsunami in China[J]. *Environmental Science Technology*, 2009, 43:3991.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2009)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [3] Windmer R, Krapf D S, Khetriwal M. Global perspectives on e-waste[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2005(25):436.
- [4] Lee J C, Song H T, Yoo J M. Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea[J]. *Resource Conservation Recycle*, 2007, 50:380.
- [5] Ludwig C, Hellweg S, Stucki S. Municipal Solid Waste Management: Strategies and Technologies for Sustainable Solutions[M]. Berlin: Springer, 2003:320-322.
- [6] Robinson B H. E-waste: an assessment of global production and environmental impacts[J]. *Science Total Environment*, 2009, 408:183.
- [7] Shuey S A, Taylor P. Review of pyrometallurgical pretreatment of electronic scrap[J]. *Mining Engineering*, 2005(4):67.
- [8] Menad N, Björkman B, Allain E G. Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap[J]. *Resource Conservation Recycle*, 1998, 24:65.
- [9] Veit H M, Pereira C C, Bernardes A M. Using mechanical processing in recycling printed wiring boards[J]. *JOM*, 2002, 54:45.
- [10] Tsydenova O, Bengtsson M. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment[J]. *Waste Manage*, 2011, 31:45.
- [11] Cui J R, Zhang L F. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review[J]. *J Hazard Mater*, 2008, 158:228.
- [12] Zhou H B, Zeng W M, Yang Z F, et al. Bioleaching of chalcopyrite concentrate by a moderately thermophilic culture in a stirred tank reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100:515.
- [13] Kim D J, Ralph D E, Ahn J G, et al. Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. *Waste Manage*, 2008, 28:333.
- [14] 赵伟, 陈晨, 王玉光, 等. *Acidithiobacillus thiooxidans* 浸出印刷线路板中金属的研究[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2010, 32(11):158.
- [15] Wang J W, Bai J F, Xu J Q, et al. Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172:1100.
- [16] Sadia I, Munir A A, Shahida B N, et al. Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria[J]. *Hydrometallurgy*, 2007, 88:180.
- [17] Bradford M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72:248.

# 黄瓜细菌性萎蔫病菌分子诊断研究

王楠<sup>1,2</sup>, 张改红<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>

(1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 华东理工大学 生物工程学院/生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237)

**摘要:**从田间黄瓜细菌性萎蔫病植株分离获得病原菌,比对其近源种的16S rDNA序列,确定该病原菌为嗜维管束欧文氏菌(*Erwinia tracheiphila*),并设计出特异引物ET-P1/ET-P2. 经过对该引物的PCR扩增条件优化,扩增出一条794 bp的黄瓜细菌性萎蔫病菌特异条带,检测灵敏度达100 fg/ $\mu$ L,可准确扩增出黄瓜发病植株和根围土壤中的DNA片段.

**关键词:**黄瓜细菌性萎蔫病;嗜维管束欧文氏菌;特异性引物;分子诊断技术

**中图分类号:**TS255.2;S432.42 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.005

## Study on molecular diagnosis of cucumber bacterial wilt

WANG Nan<sup>1,2</sup>, ZHANG Gai-hong<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

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

2. College of Bioengineering, State Key Laboratory of Bioreactor Engineering,

East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The pathogen was obtained by separating the cucumber bacterial wilt plant, and by comparing with the closely-related species 16Sr DNA sequence, it was identified as *Erwinia tracheiphila* and specific primers ET-P1/ET-P2 was designed. A 794 bp cucumber bacterial wilt special band can be amplified by optimizing the PCR amplification of ET-P1/ET-P2 primers with the detection sensitivity of 100 fg/ $\mu$ L, and can amplify the DNA of bacterial wilt cucumber and rhizosphere soil. The molecular diagnosis technology of cucumber bacterial wilt.

**Key words:** cucumber bacterial wilt; *Erwinia tracheiphila*; specific primer; molecular detection technique

## 0 引言

细菌性萎蔫病是由欧文氏菌属(*Erwinia*)引起的葫芦科病害,黄瓜、西瓜、甜瓜、南瓜等植株都易受该病菌侵染,黄瓜和甜瓜较其他植株更易发病.该病原菌在2种危害黄瓜的害虫——黄瓜色条叶甲

虫和十一星根萤叶甲虫的肠道中存活越冬,当携带病原菌的黄瓜色条叶甲虫危害植株时,会损伤植株组织并排出粪便,病原菌则通过损伤植株的组织液侵入维管束,在木质部大量繁殖,从而阻碍植株的水分疏导,被感染的茎蔓只能提供正常茎蔓1/5的水分,最终阻碍植株的水分运输系统,引起大面积

收稿日期:2013-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(30871664);国家重点实验室专项经费(2060204)

作者简介:王楠(1983—),女,江苏省徐州市人,郑州轻工业学院助教,主要研究方向为植物病害生物防治.

通信作者:王伟(1963—),男,黑龙江省双城市人,华东理工大学教授,博士,主要研究方向为植物病害生物防治及微生物农药创制.

凋萎<sup>[1-2]</sup>. M. A. Sasu 等<sup>[3]</sup>报道,欧文氏菌属除了通过昆虫侵蚀植株传播外,还会通过花粉进行传播.该病害近年来发病严重,给黄瓜生产造成极大危害.发病初期叶片上出现小的黄色病斑,可愈合成长条斑,叶子变成黄褐色至深褐色,接着出现深绿色水渍状病斑,植株迅速干枯死亡.该病害在发病初期与瓜类枯萎病症状类似,难以区分病症特征,给黄瓜病害的早期鉴定和防治带来极大困难.控制该病害的有效方法之一是加强检疫,防止病原菌的扩大传播.近年来利用分子生物学手段对病原菌进行分类及鉴定的应用逐渐增多<sup>[4-5]</sup>,国内外对欧文氏菌属系统发育研究已有很多报道<sup>[6-7]</sup>,但是针对 *Erwinia tracheiphila* 尚未见单独的检测报道.本文拟对黄瓜细菌性萎蔫病菌进行分离培养,分析 16S rDNA 序列,设计出特异引物,建立一种能够在发病初期针对植株或根围土壤快速检测病害种类的技术,以便及时采用有针对性的防治措施控制病害的发生和传播<sup>[8-9]</sup>.

## 1 实验

### 1.1 材料

菌株:从来自上海、海南、北京 3 地区(编号分别为 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>)发病黄瓜果实和茎基部分离获得的 15 株分离物中选出 3 个黄瓜细菌性萎蔫病代表性菌株;其他供试植物病原菌菌株为从不同地方收集、纯化并经回接实验所得,以及其他组织赠予所得,种名、来源及数量见表 1.

试剂:所用试剂均为 AR 级,上海生物工程公司生产.

### 1.2 黄瓜细菌性萎蔫病菌的分离纯化

从田间大棚采集新鲜黄瓜细菌性萎蔫病发病植株茎蔓和果实,分离病原菌.分离方法采用平板划线法,获得纯培养,并进行回接实验<sup>[10]</sup>.

### 1.3 黄瓜细菌性萎蔫病菌基因组 DNA 的提取

**1.3.1 病原菌 DNA 的提取** 挑取病原菌单菌落接种于液体 Luria-Bertani (LB) 培养基,37 °C 培养过夜,吸取 1.5 mL 菌液离心,沉淀加入 567 μL TE 缓冲液(10 mmol/L Tris-HCl, 1 mmol/L EDTA pH = 8.0),30 μL 10% 十二烷基磺酸钠(SDS),轻轻颠倒混匀于 37 °C 水浴 1 h,加入 100 μL 5 mol/L NaCl 溶液,80 μL 十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)/NaCl 溶液,轻轻颠倒混匀于 65 °C 水浴 10 min,等体积苯酚/氯仿/异戊醇抽提 1 次,等体积氯仿/异戊醇抽提

表 1 其他供试植物病原菌菌株

菌株	寄主	来源	数量
<i>Acidovorax avenae</i>	黄瓜	上海	3
<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	土壤	上海	3
<i>Agrobacterium. rhizogenes</i>	土壤	上海农科院	2
<i>Botrytis cinerea</i>	黄瓜	上海	3
<i>B. cinerea</i>	草莓	日本	3
<i>B. cinerea</i>	番茄	上海	4
<i>Cladosporium cucumerinum</i>	黄瓜	山西	2
<i>Colletotrichum orbiculare</i>	黄瓜	上海	2
<i>Col. orbiculare</i>	西瓜	山东	4
<i>Col. lindemuthianum</i>	菜豆	上海农科院	2
<i>Col. gloeosporioides</i>	草莓	海南	1
<i>Col. sansevieriae</i>	草莓	日本	3
<i>Corynespora cassiicola</i>	黄瓜	沈阳	4
<i>Curvularia lunata</i>	小麦	上海农科院	2
<i>Fusarium oxysporium</i>	黄瓜	上海	2
<i>F. oxysporum</i>	甜瓜	上海农技中心	2
<i>F. oxysporum</i>	西瓜	河北农科院	4
<i>F. graminearu</i>	小麦	上海交大	4
<i>Fulvia fulva</i>	番茄	上海交大	4
<i>Mycosphaerella meloni</i>	西瓜	上海	2
<i>Pseudomonas solanacearum</i>	番茄	上海	4
<i>P. fluorescens</i>	未知	上海	4
<i>P. syringae pv. lachrymans</i>	黄瓜	北京	1
<i>P. syringae pv. syringae</i>	丁香	美国	1
<i>P. syringae pv. tomato</i>	番茄	美国	1
<i>P. syringae pv. tagetis</i>	万寿菊	美国	1
<i>Pythium aphanidermatum</i>	番茄	郑州	2
<i>Ralstonia solanacearum</i>	茄子	上海交大	2
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	黄瓜	上海交大	2
<i>S. sclerotiorum</i>	西瓜	上海	2
<i>S. sclerotiorum</i>	番茄	上海农技中心	2
<i>Sphaerotheca fuliginea</i>	黄瓜	上海农技中心	2
<i>Verticillium dahliae</i>	草莓	北京	1
<i>V. dahliae</i>	草莓	上海	2
<i>V. albo-atrum</i>	未知	上海	2
<i>Xanthomonas campestris</i>	黄瓜	北京	2

1 次,加入 0.1 倍体积 3 mol/L NaAc (pH = 5.2) 和等体积异丙醇,轻轻颠倒混匀 -20 °C 沉淀 1 h, 12 000 r/min 离心 5 min,弃上清,70% 乙醇洗涤,离心,风干.加入 100 μL TE,加终浓度为 20 μg/mL RNaseA,以水解溶液中的少量 RNA, -20 °C 保存备用<sup>[11]</sup>.

**1.3.2 发病组织 DNA 的快速提取** 采用 H. Wang 等<sup>[12]</sup>的方法:取新发病的黄瓜组织,每 mg 组织加入 20 μL 0.5 mol/L NaOH,充分研磨后移至 1.5 mL EP

管,12 000 r/min 离心 5 min,取 5  $\mu$ L 上清液,加 495  $\mu$ L 0.1 mmol/L Tris-HCl (pH = 8.0),充分混匀,取 1  $\mu$ L 进行 PCR 反应。

**1.3.3 发病植株根围土壤 DNA 的提取** 按照本实验室优化后的 DNA 提取方法,提取发病植株根围土壤微生物 DNA。

**1.4 黄瓜细菌性萎蔫病菌 16S rDNA 的 PCR 扩增及测序**

采用细菌 16S rDNA 通用引物 27F (5'-AGAGT-TTGATCCTGGCTCAG-3'), 1492R (5'-GGTTACCTT-GTTACGACTT-3')。PCR 反应体系:10  $\times$  PCR buffer 2.5  $\mu$ L,2.5 mmol/L MgCl<sub>2</sub> 2  $\mu$ L,2.5 mmol/L dNTP 各 1  $\mu$ L,20  $\mu$ mol/L 引物 27F/1492R 各 0.25  $\mu$ L, *Taq* 酶 1.25 U,模板 1  $\mu$ L。反应程序:94  $^{\circ}$ C 预变性 3 min,94  $^{\circ}$ C 变性 1 min,55  $^{\circ}$ C 退火 1 min,72  $^{\circ}$ C 延伸 2 min,30 个循环,72  $^{\circ}$ C 延伸 7 min。反应结束取 5  $\mu$ L 样品进行琼脂糖凝胶电泳,UVP 凝胶成像系统观察、照相,扩增产物由上海生工测序。

**1.5 黄瓜细菌性萎蔫病菌 16S rDNA 序列分析**

双向测序所得 2 个单向序列有重叠的部分,利用软件 DNASTar v7.10 中的 EditSeq,CLUST X 2.1,拼接成完整的 16S rDNA 基因组序列。用 Bioedit v7.00 软件对本研究中所测定的 16S rDNA 序列以及从 Genbank 中搜索的近种序列,分析其同源性,利用 DNASTar v7.10 中 MegAlign 进行比对,再用 PAUP 4.0 以 NJ 法构建系统发育树。

**1.6 特异引物设计**

根据黄瓜细菌性萎蔫病菌 16S rDNA 序列,比对近缘种及其他瓜类病原菌的序列同源性,用 DNA Star 设计出特异性引物 ET-P1/ET-P2 (ET-P1:5'-AAGTCGAGCGGTAGCACAGGGTAG-3', ET-P2:5'-ACACGCGTCAAGGGCACAAC-3')。

**1.6.1 引物 ET-P1/ET-P2 退火温度的选择** 根据 ET-P1/ET-P2 的碱基序列,初步估算退火温度为 60  $^{\circ}$ C,为提高检测灵敏度和特异性,需进一步考察退火温度并尽量提高退火温度,在 60  $^{\circ}$ C ~ 72  $^{\circ}$ C 设计梯度 PCR 程序。

**1.6.2 引物 ET-P1/ET-P2 的 PCR 扩增** 引物 ET-P1/ET-P2 检测黄瓜细菌性萎蔫病菌的 PCR 反应体系:10  $\times$  PCR buffer 2.5  $\mu$ L,2.5 mmol/L MgCl<sub>2</sub> 2  $\mu$ L,2.5 mmol/L dNTP 各 2  $\mu$ L,10  $\mu$ mol/L 引物 ET-P1/ET-P2 各 0.5  $\mu$ L,模板 1  $\mu$ L。反应程序为:94  $^{\circ}$ C 预变性 5 min;94  $^{\circ}$ C 变性 1 min,60  $^{\circ}$ C 退火 1 min,72  $^{\circ}$ C 延伸 1 min,共 30 个循环,72  $^{\circ}$ C 延伸

7 min。反应结束取 5  $\mu$ L 样品进行琼脂糖凝胶电泳,UVP 凝胶成像系统观察、照相。

## 2 结果与分析

### 2.1 27F/1492R 对黄瓜细菌性萎蔫病菌 16S rDNA 的扩增

采用 16S rDNA 通用引物 27F/1492R 对供试 3 株病原菌基因组 DNA 扩增,得到约 1 500 bp 条带,克隆该片段并进行测序分析。扩增结果如图 1 所示,其中 M:DL2000 Marker;1:阴性对照;2—3:样品 1<sup>#</sup>;4—5:样品 2<sup>#</sup>;6—7:样品 3<sup>#</sup>。

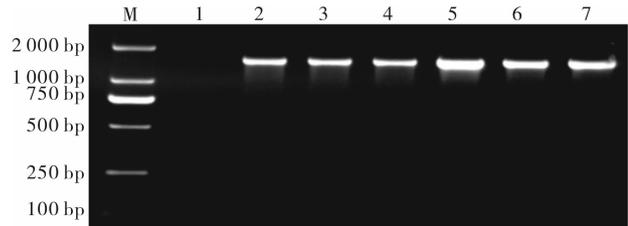


图 1 引物 27F/1492R 对黄瓜细菌性萎蔫病菌的扩增图

### 2.2 黄瓜细菌性萎蔫病菌 16S rDNA 序列分析

测序结果显示,3 株所测黄瓜细菌性萎蔫病菌同源性分别是:样品 1<sup>#</sup>和样品 2<sup>#</sup>同源性为 99.6%,样品 1<sup>#</sup>和样品 3<sup>#</sup>同源性为 99.8%,样品 2<sup>#</sup>和样品 3<sup>#</sup>同源性为 99.4%。用 DNAMAN 软件将所测的 3 株病原菌的序列和 GeneBank 报道的欧文氏杆菌属 16S rDNA 序列进行 BLAST 分析,结果表明,这 3 个菌株与欧文氏菌属的 *Erwinia tracheiphila* (Y13250, EU490598)同源性最高,达 98%。

### 2.3 黄瓜细菌性萎蔫病菌 16S rDNA 聚类分析

将该 3 株病原菌与欧文氏菌属其他相关种的 16S rDNA 进行多序列比对分析和构建发育树(见图 2),结果表明这 3 个菌株在发育树上和 *Erwinia tracheiphila* 聚在一起,支持度为 95%。

### 2.4 引物 ET-P1/ET-P2 的退火温度优化

设计从 60 ~ 72  $^{\circ}$ C 的梯度进行 PCR 扩增,结果如图 3 所示,其中 M:DL2000 Marker;1—12 分别为 60  $^{\circ}$ C,60.3  $^{\circ}$ C,61.1  $^{\circ}$ C,62.8  $^{\circ}$ C,63.8  $^{\circ}$ C,65.3  $^{\circ}$ C,66.7  $^{\circ}$ C,68.1  $^{\circ}$ C,69.6  $^{\circ}$ C,70.9  $^{\circ}$ C,71.7  $^{\circ}$ C,72  $^{\circ}$ C。由图 3 可见,60 ~ 62.8  $^{\circ}$ C 之间有明亮的条带,而在 64  $^{\circ}$ C 之后条带变淡,至 69.6  $^{\circ}$ C 条带已很弱。为保持检测灵敏性及特异性,选择退火温度为 63  $^{\circ}$ C。

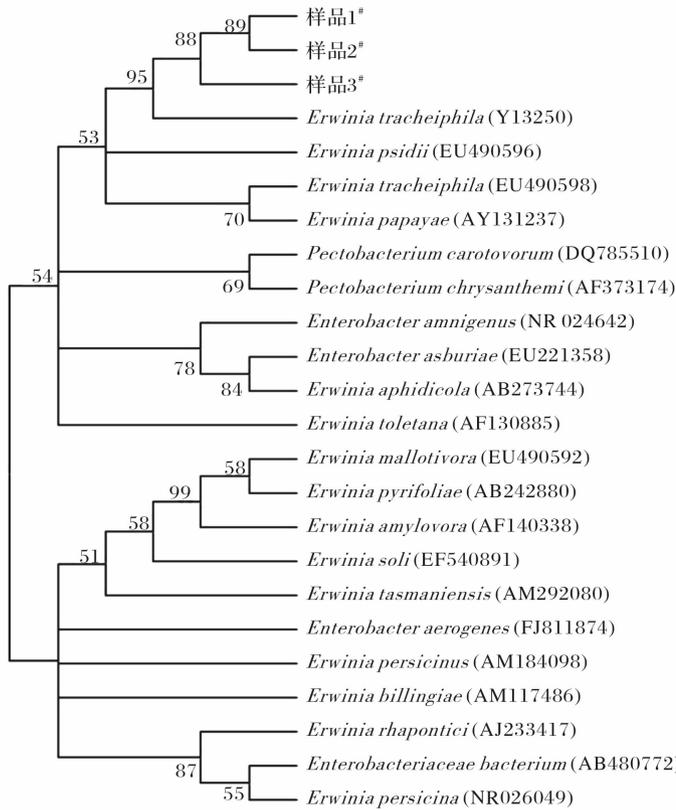


图 2 黄瓜细菌性萎蔫病菌的 16S rDNA 聚类分析树状图(NJ 法)

### 2.5 引物 ET-P1/ET-P2 的特异性检测

引物 ET-P1/ET-P2 对病原细菌和病原真菌的扩增图分别如图 4 和图 5 所示. 图 4 中 M: DL2000 Marker; 1—4: 黄瓜细菌性萎蔫病菌; 5—6: 胡萝卜欧文氏菌; 7—8: 青枯病菌; 9—10: 黄瓜果斑病菌; 11—12: 黄单胞杆菌; 13: 丁香假单胞菌丁香致病型; 14: 丁香假单胞菌万寿菊致病型; 15: 丁香假单胞菌甜菜致病型; 16: 丁香假单胞菌黄瓜致病型; 17: 丁香假单胞菌番茄致病型; 18—19: 发根农杆菌; 20—21: 根癌农杆菌. 图 5 中 M: DL2000 Marker; 1—4: 黄瓜细菌性萎蔫病菌; 5: 黄瓜灰霉病菌; 6: 黄瓜菌核病菌; 7: 黄瓜黑星病菌; 8: 黄瓜枯萎病菌; 9: 黄瓜褐斑病菌; 10: 黄瓜炭疽病菌; 11: 黄瓜白粉病菌; 12: 番茄菌核病菌; 13: 番茄灰霉病菌; 14: 番茄叶霉病菌; 15: 西瓜菌核病菌; 16: 甜瓜果腐病菌; 17: 甜瓜枯萎病菌; 18: 西瓜蔓枯病菌; 19: 瓜果腐霉病菌; 20—21: 菜豆炭疽病菌; 22: 西瓜枯萎病菌; 23: 禾谷链孢菌; 24: 新月弯孢菌. 可见, 引物 ET-P1/ET-P2 从供试黄瓜细菌性萎蔫病菌中扩增出约 800 bp 特异条带, 克隆该片段并测序分析得到 794 bp DNA 片段, 而其他的 20 个病原菌及近似菌株均无该条带, 表明该引物能将黄瓜细菌性萎蔫病菌与其他病原菌特异检测区分.

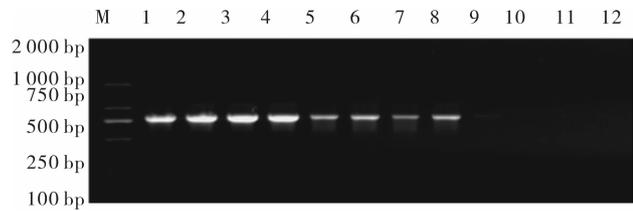


图 3 引物 ET-P1/ET-P2 温度梯度 PCR 的扩增图

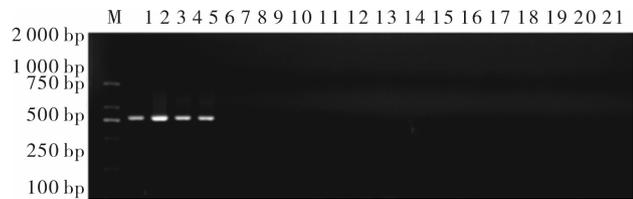


图 4 引物 ET-P1/ET-P2 对病原细菌的扩增图

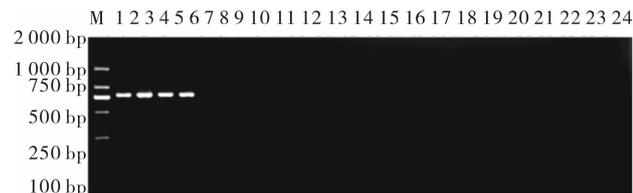


图 5 引物 ET-P1/ET-P2 对病原真菌的扩增图

### 2.6 引物 ET-P1/ET-P2 的灵敏度测定

提取黄瓜细菌性萎蔫病菌 DNA 后, 用核酸定量

仪测定基因组 DNA 浓度,并依次稀释到不同浓度,用优化后 PCR 体系扩增其灵敏度如图 6 所示,其中 M:DL2000 Marker;1:10 ng;2:1 ng;3:100 pg;4:10 pg;5:1 pg;6:100 fg;7:10 fg;8:1 fg;9:100 ag. 可见,引物 ET-P1/ET-P2 扩增后的灵敏度可达到 100 fg. *Erwinia tracheiphila* 通过植株伤口组织等部位侵入维管束,短时间内可在病菌浓度很低的情况下对田间生产造成严重危害. 本检测方法能够从田间早期发病植株和根围土壤中成功检测该病原菌.

## 2.7 黄瓜细菌性萎蔫病发病组织及田间土壤的快速检测

田间大棚采集黄瓜萎蔫病植株的茎蔓、果实和根围土壤,同时采集部分健康黄瓜植株组织,按 1.3 中的方法提取发病植株组织和根围土壤的基因组 DNA,用引物 ET-P1/ET-P2 检测,PCR 扩增结果如图 7 所示,其中 M:DL2000 Marker;1:阴性对照;2:阳性对照;3:健康组织;4—5:黄瓜萎蔫病发病组织;6:健康植株组织;7—10:黄瓜萎蔫病发病植株根围土壤;11—16:健康植株根围土壤. 可见,在发病黄瓜植株和根围土壤中均能检测到 *Erwinia tracheiphila* 特异条带,而健康植株则为阴性,这表明该检测方法能够成功对黄瓜萎蔫病植株和根围土壤进行田间检测和快速诊断.

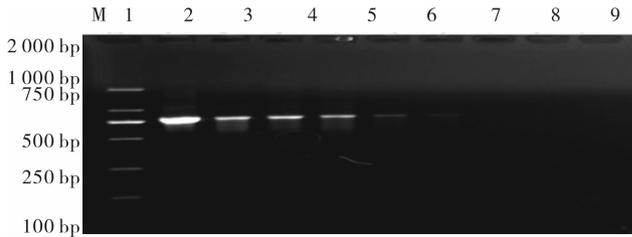


图 6 引物 ET-P1/ET-P2 扩增黄瓜萎蔫病菌灵敏度检测结果



图 7 引物 ET-P1/ET-P2 检测黄瓜萎蔫病发病组织及根围土壤的 PCR 扩增结果

## 3 结论

从全国各地采集症状似黄瓜萎蔫病的发病黄

瓜茎蔓、果实,采用传统分离方法得到 15 株病原菌,选取 3 株进行研究. 通过提取病原菌 DNA、进行 16S rDNA 扩增和序列分析,比对鉴定该病原菌为嗜维管束欧文氏菌 (*Erwinia tracheiphila*),设计的引物 ET-P1/ET-P2 可从该病原菌中扩增出 794 bp 的特异条带,检测灵敏度达 100 fg/ $\mu$ L,可从发病植株组织和根围土壤中实现检测.

## 参考文献:

- [1] Staub J E, Peterson C E. Comparisons between bacterial wilt resistant and susceptible gynoecious cucumber lines and  $F_1$  progeny[J]. Hort Science, 1986, 21: 1428.
- [2] 耿建芬, 于凌春, 张乃琴. 黄瓜细菌性萎蔫病的发生与防治[J]. 莱阳农学院学报, 2002, 18(2): 147.
- [3] Sasu M A, Seidl-Adams I, Wall K. Floral transmission of *Erwinia tracheiphila* by cucumber beetles in a wild cucurbita pepo[J]. Environmental Entomology, 2010, 1(39): 140.
- [4] Monstein H J, Nikpour-Badr S, Jonasson J. Rapid molecular identification and subtyping of *Helicobacter pylori* by pyrosequencing of the 16S rDNA variable v1 and v3 regions[J]. FEMS Microbiology Letters, 2001, 199(1): 103.
- [5] 王敏. 马铃薯软腐病菌的 16S rDNA 的 PCR 检测[J]. 中国马铃薯, 2007, 21(4): 206.
- [6] 王建荣, 回文广, 赵廷昌, 等. 哈密瓜细菌性果斑病菌快速检测方法的建立[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2495.
- [7] 贾迎, 李亚利. 采用 16S rDNA 鉴定甜瓜细菌性叶斑病菌[J]. 植物保护, 2007, 33(3): 65.
- [8] Lydon J, Konga H, Blackwood C, et al. The genetic characterization of *Pseudomonas syringae* pv. *tagetis* based on the 16S-23S rDNA intergenic spacer regions[J]. Biological Control, 2005, 32: 356.
- [9] 燕艳, 陈健, 燕昌江, 等. 利用分子生物学技术鉴定土壤微生物的方法[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(3): 129.
- [10] 李德葆, 周雪平, 许建平, 等. 基因工程操作技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996: 94-98.
- [11] LaMontagne M G, Michel Jr F C. Evaluation of extraction and purification methods for obtaining PCR-amplifiable DNA from compost for microbial community analysis[J]. Journal of Microbiological Methods, 2002, 49: 255.
- [12] Wang H, Qi M Q, Cutler A J. A simple method of preparing plant samples for PCR[J]. Nucleic Acids Research, 1993, 17(21): 4153.

# 浓香型烟叶分切烟片的综合质量研究

陈伟<sup>1</sup>, 张玉<sup>2</sup>, 王根发<sup>1</sup>, 祁林<sup>2</sup>,  
张书伟<sup>1</sup>, 李永峰<sup>1</sup>, 郭春生<sup>2</sup>, 张峻松<sup>2</sup>

(1. 河南中烟工业有限责任公司 技术中心, 河南 郑州 450000;  
2. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**为研究浓香型烟叶分切烟片对其综合质量的影响,选取河南襄县浓香型烟叶 NC89 为研究对象,对其全烟片及分切烟片的常规化学成分及香味物质含量进行了测定,并分别对其进行了感官评价.结果表明:NC89 烟叶的常规化学成分及香味物质分布不均匀,不同分切区位对感官质量的香气质、香气量、浓度、余味、劲头、杂气影响极显著.分切烟叶质量综合得分顺序为:叶尖 1/3(285.12) > 叶中 1/3(274.48) > 全叶片(267.47) > 叶基 1/3(263.43).

**关键词:**浓香型烟叶;分切烟片;化学成分与感官品质相关性分析;主成分分析

**中图分类号:**TS411 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.006

## Study on the comprehensive quality evaluation of different leaf parts in robust flavor style flue-cured tobacco

CHEN Wei<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, WANG Gen-fa<sup>1</sup>,  
QI Lin<sup>2</sup>, ZHANG Shu-wei<sup>1</sup>, LI Yong-feng<sup>1</sup>, GUO Chun-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Jun-song<sup>2</sup>

(1. Center of Technology, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

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

**Abstract:** In order to study the influence of different leaf parts on robust flavor style flue-cured tobacco comprehensive quality, the main variety NC89 of Xiang county in He'nan province was chosen for the research, the conventional chemical ingredients and flavoring substances content of the whole leaves and different leaf parts were measured, and their sensory quality were evaluated respectively. The results showed that the conventional chemical ingredients and flavoring substances distribution of NC89 was uneven, the effect of different cutting location on the quality of aroma quality, aroma, concentration, aftertaste, strength and offensive odor was significant. Cut tobacco quality composite scores were as follows: tip 1/3 (285.12) > leaves 1/3 (274.48) > full blade (267.47) > leaf base 1/3 (263.43).

**Key words:** robust flavor style flue-cured tobacco; different leaf part; the correlation analysis between chemical composition and sensory quality; principal component analysis

收稿日期:2013-05-21

基金项目:河南中烟工业有限责任公司科技项目(HNZY012012347)

作者简介:陈伟(1972—),女,河南省淮滨市人,河南中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草化学。

通信作者:张峻松(1971—),男,河南省项城市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为烟草化学与分析、香精香料。

## 0 引言

烟草及其制品品质主要是由其内在化学成分的组成含量所决定的,烟草化学成分的变化极其复杂,不同类型的烟草之间化学成分存在较大差异<sup>[1-2]</sup>.同一叶片不同区位所受的光照条件不同,导致其不同叶片区位的内在质量、化学成分、物理指标等均有较大的差异,从而造成其在卷烟配方的配伍性方面也有较大不同,这对烟叶原料的加工、利用、质量彰显及其配伍性形成了较大的制约作用<sup>[3]</sup>.

长期以来,国内外学者更多关注烟株不同部位烟叶化学成分的差异,而对同一叶片不同区位的理化特性、感官品质和卷烟配方的可用性方面研究较少.符再德等<sup>[4]</sup>对张家界桑植浓香型特色烤烟不同等级烟叶的各分切部位及全叶进行了热分析,并对常规化学成分、挥发性成分进行了检测,给出了分切段烟叶的品质特征;H. R. Burton 等<sup>[5]</sup>把叶片分成41个片段,对不同片段中的亚硝酸胺、硝酸盐、亚硝酸盐和生物碱含量进行了检测,并对组分之间的相关性进行分析.目前未见对浓香型分切烟片的化学成分与感官品质间相关性分析的研究,本文拟选取河南襄县浓香型烟叶 NC89 为研究对象,对其全烟片及分切烟片的常规化学成分及香味物质含量进行测定,并分别对其进行感官评定,采用 SPSS 统计软件对分切烟叶的综合质量进行评价,旨在揭示叶片不同区位内在质量的差异性,使品质中等烟叶得到充分利用,提高烟叶的可利用率.

## 1 实验

### 1.1 材料和仪器

烟叶产地:河南许昌襄县汾陈乡,品种 NC89,等级 C<sub>3</sub>F.

SKALAR 流动分析仪,荷兰 SKALAR 公司产;同时蒸馏提取器,郑州市科技玻璃仪器厂产;GC 6890/MS 5973N 型气-质联用分析仪,美国 Agilent 公司产.

### 1.2 实验方法

**1.2.1 烟片分切方法** 将整片烟叶按照两刀三段进行平均分切,分别得到叶尖、叶中和叶基3个均匀分切部分.

**1.2.2 样品香味成分的分析** 采用同时蒸馏萃取方法(SDE)对各样品中的香味物质进行提取处理.利用 GC/MS 的 NIST08 谱库对烟样中各香味成分进行定性分析.采用内标法对烟样中22种重要的香味成分进行定量分析<sup>[6]</sup>.

**1.2.3 烟片常规化学成分的测定** 分别利用行业标准 YC/T 159—2002<sup>[7]</sup>,YC/T 160—2002<sup>[8]</sup>,YC/T 161—2002<sup>[9]</sup>,YC/T 162—2002<sup>[10]</sup>规定方法,对4个烟片分切样品中的水溶性总糖、水溶性还原糖、总植物碱和总氮的含量进行测定<sup>[11]</sup>.

**1.2.4 样品的感官评价方法** 分别对4个烟片分切样品切丝后,手工制成卷烟;然后置于(60±2)%相对湿度,(22±2)℃的恒温恒湿箱内,单层平放48h,平衡水分至(12±1)%<sup>[12]</sup>.由河南中烟技术中心评委从香气质、香气量、浓度、柔细度、余味、杂气、刺激性、劲头等方面进行感官评价<sup>[13]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 分切烟片的香味成分、常规化学成分和感官品质分析结果

对 NC89 品种烟全烟片及分切烟片进行感官评吸、常规化学成分和香味成分分析,测定结果见表1和表2.

由表1可知:NC89 烟叶中的去新植二烯香味成分含量、总糖、还原糖、糖碱比大小依次为叶尖1/3 > 叶中1/3 > 全叶片 > 叶基1/3,两糖比各分区含量较为接近.这说明烤烟中去新植二烯香味成分含量,总糖、还原糖含量及糖碱比在同一叶片的不同点位分布不均匀且从叶尖到叶基依次减小.烟草中的香味成分和糖份有助于提高卷烟的香气,改善余味,与 NC89 品种全烟片及分切烟片的评吸结果基本一致.

NC89 烟叶的总氮含量、总碱含量为:叶基1/3 >

表1 NC89 品种全烟片及分切烟片的香味成分含量和常规化学含量均值

材料类别	去新植二烯香味成分/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	总糖/%	还原糖/%	总氮/%	总碱/%	总糖/还原糖	氮/碱	糖/碱
全叶片	186.51	31.30	27.20	1.31	2.85	1.15	0.46	10.98
叶尖1/3	198.89	35.70	31.60	1.25	2.50	1.13	0.50	14.28
叶中1/3	187.71	33.90	29.60	1.29	3.04	1.15	0.42	11.15
叶基1/3	179.78	29.90	26.70	1.48	3.10	1.12	0.48	9.65

表2 NC89品种全烟片及分切烟片的评吸分数均值

材料类别	香气质	香气量	浓度	柔细度	余味	杂气	刺激性	劲头	燃烧性	灰色	总分
全叶片	6.5	6.5	7.0	6.5	6.0	6.0	6.5	7.0	7.0	7.0	66.0
叶尖1/3	7.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.0	7.0	7.0	67.0
叶中1/3	7.0	6.0	6.0	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	7.0	7.0	66.5
叶基1/3	6.5	6.5	6.5	6.5	6.0	6.5	6.5	7.5	7.0	7.0	66.5

全叶片 > 叶中 1/3 > 叶尖 1/3; 氮碱比为: 叶尖 1/3 > 叶中 1/3 > 全叶片 > 叶基 1/3, 说明总氮、总碱在同一叶片的不同点位分布也是不均匀的, 且从叶尖到叶基依次增大. 总氮、总碱可以提高卷烟浓度和劲头, 评吸结果表明香气量、浓度、劲头从叶尖到叶基基本呈逐渐增大的规律.

## 2.2 烟叶分区位对香味成分、常规化学成分和感官品质的显著性分析

利用 SPSS17.0 软件对全叶片及分切叶片中的各指标进行单因素方差分析, 考察分切区位对各指标的影响, 结果见表 3 和表 4. 由表 3 可知, NC89 烟叶不同分切部位之间的香味成分含量和常规化学成分的差异是极显著的 ( $P < 0.05$ ), 说明同一叶片中不同区位之间的香味成分含量和常规化学成分分布是有显著差异的, 亦表明不同区位的浓香型烟叶内在品质有较大的不同. 由表 4 可知, 不同分切区位对感官质量的香气质、香气量、浓度、余味、劲头、杂气有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 而对柔细度、刺激性、燃烧性、灰色、总分影响不显著 ( $P > 0.05$ ).

## 2.3 烟叶分区位对香味成分、常规化学成分和感官品质的主成分分析

对 NC89 全烟片及分切烟片进行主成分分析, 结果见表 5 和表 6. 由表 5 可知, 只有前 4 个特征值  $> 1$ , SPSS 提取了前 4 个主成分. 其方差占有所有主成分的方差分别为 40.13%, 25.08%, 17.97%, 16.54%, 前 4 个主成分的方差贡献率为 95.74%. 因此, 前 4 个主成分已能基本描述分切叶片的总体质量特征.

由表 6 可知, 第 1 主成分表达式  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_8, X_9, X_{13}$  的系数较大, 即第 1 个主成分基本上反映了去新植二烯香味成分总量、总糖、还原糖、总氮、糖碱比、香气质和余味的综合指标; 第 2 主成分表达式  $X_{11}, X_{12}, X_{15}, X_{17}, X_{18}, X_{19}$  的系数较大, 即第 2 个主成分基本上反映了浓度、柔细度、刺激性、燃烧性、灰色、总分的综合指标; 第 3 主成分表达式  $X_5, X_{10}$  的系数较大, 可以看成是反映总碱、香气量的综合指标; 第 4 主成分表达式  $X_6, X_7, X_{14}, X_{16}$  的系数较大, 可以看成是反映两糖比、氮碱比、杂气、劲头的综合

表3 各区位香味成分含量和常规化学成分的方差分析

评价指标	平方和	df	均方	F	显著性
去新植二烯香味成分总量	376.445	3	125.482	2.510E8	0.000
总糖	40.577	3	13.526	38 644.381	0.000
还原糖	30.895	3	10.298	205 966.667	0.000
总氮	0.062	3	0.021	1 098.550	0.000
总碱	0.279	3	0.093	280.868	0.000
两糖比	0.001	3	0.000	15.323	0.012
氮碱比	0.013	3	0.004	12.390	0.017
糖碱比	18.019	3	6.006	147 846.296	0.000

表4 各区位感官质量的方差分析表

评价指标	平方和	df	均方	F	显著性
香气质	0.551	3	0.184	58.800	0.001
香气量	0.351	3	0.117	37.467	0.002
浓度	1.001	3	0.334	106.8	0.000
柔细度	0.000	3	0.000	0.000	1.000
余味	0.451	3	0.150	48.133	0.001
杂气	0.338	3	0.113	51.571	0.001
刺激性	0.000	3	0.000	0.000	1.000
劲头	0.338	3	0.113	27.769	0.004
燃烧性	0.000	3	0.000	0.000	1.000
灰色	0.000	3	0.000	0.000	1.000
总分	1.378	3	0.459	1.629	0.317

表5 NC89品种全烟片及分切烟片的影响因子的总方差解释表

成分	特征值	方差贡献率	累计方差贡献率
1	8.02	40.13	40.13
2	5.01	25.08	65.21
3	3.59	17.97	83.19
4	3.30	16.54	95.74
5	0.039	0.19	99.93
6	0.008	0.04	99.97
7	0.004	0.02	100.00

指标.

综合  $F_1, F_2, F_3$  和  $F_4$  这 4 个主成分, 可定义分切烟叶质量综合指数为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

应用主成分分析方法计算出前4个主成分得分以及分切烟叶质量综合指数的得分,结果如表7所示。

表6 主成分矩阵(初始因子载荷矩阵)

评价指标	主成分			
	1	2	3	4
去新植二烯香味成分总量( $X_1$ )	0.928	0.052	-0.305	-0.206
总糖( $X_2$ )	0.984	-0.131	0.009	-0.123
还原糖( $X_3$ )	0.989	-0.133	-0.057	0.014
总氮( $X_4$ )	-0.804	0.033	-0.010	0.592
总碱( $X_5$ )	-0.528	-0.233	0.799	-0.145
两糖比( $X_6$ )	0.058	0.251	0.481	-0.836
氮碱比( $X_7$ )	0.078	0.429	-0.619	0.637
糖碱比( $X_8$ )	0.888	0.081	-0.452	0.032
香气质( $X_9$ )	0.923	-0.172	0.330	0.073
香气量( $X_{10}$ )	-0.161	0.591	-0.776	0.149
浓度( $X_{11}$ )	-0.389	0.577	-0.569	-0.436
柔细度( $X_{12}$ )	0.141	0.864	0.440	0.201
余味( $X_{13}$ )	0.923	-0.161	0.339	0.075
杂气( $X_{14}$ )	0.435	-0.222	0.257	0.832
刺激性( $X_{15}$ )	0.141	0.864	0.440	0.201
劲头( $X_{16}$ )	-0.380	0.527	-0.098	-0.752
燃烧性( $X_{17}$ )	0.141	0.864	0.440	0.201
灰色( $X_{18}$ )	0.141	0.864	0.440	0.201
总分( $X_{19}$ )	0.583	0.789	-0.178	-0.073

表7 主成分得分及综合指数得分

材料类别	$F_1$ 得分	$F_2$ 得分	$F_3$ 得分	$F_4$ 得分	$F$ 综合得分
全叶片	288.18	86.95	-64.58	-43.08	267.47
叶尖1/3	313.33	86.35	-69.67	-44.90	285.12
叶中1/3	295.80	84.49	-63.40	-42.41	274.48
叶基1/3	279.77	85.77	-61.77	-40.34	263.43

根据主成分分析结果可知:去新植二烯香味成分总量、总糖、还原糖、香气质和余味(即 $F_1$ )为叶尖1/3 > 叶中1/3 > 全叶片 > 叶基1/3;柔细度、刺激性、燃烧性、灰色(即 $F_2$ )得分基本一致,分切对这几项指标影响不大;总碱、香气量(即 $F_3$ )为叶基1/3 > 叶中1/3 > 全叶片 > 叶尖1/3;两糖比、杂气(即 $F_4$ )为叶基1/3 > 叶中1/3 > 全叶片 > 叶尖1/3。

NC89烟叶不同分切部位的综合质量评价为叶尖1/3(285.12) > 叶中1/3(274.48) > 全叶片(267.47) > 叶基1/3(263.43),即通过分切烟叶的综合质量会有所提升,分切后叶尖1/3的质量最好,叶中1/3次之,叶基1/3部位最差。

### 3 结论

本文系统分析了NC89烟叶全烟片及分切烟片中的香味、常规化学成分及感官质量的差异性,得出如下结论:1)单因素方差分析表明,同一叶片中不同区位之间的香味成分含量和常规化学成分分布有显著差异,不同分切区位对感官质量的香气质、香气量、浓度、余味、劲头、杂气影响极显著。2)以各指标为因素的分切叶片的主成分分析结果显示,分切烟叶质量综合得分叶尖1/3(285.12) > 叶中1/3(274.48) > 全叶片(267.47) > 叶基1/3(263.43),即通过分切烟叶的综合质量会有所提升,分切后叶尖1/3的质量最好,叶中1/3次之,叶基1/3部位最差。

### 参考文献:

- [1] 周冀衡. 发展特色烟叶是重点骨干品牌和优质烟区实现共赢的合作平台[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(6):70.
- [2] 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中国烟草在新形势下的战略选择[J]. 中国烟草学报, 2008, 14(1):42.
- [3] 左天觉. 烟草的生产、生理和生物化学[M]. 朱尊权, 译. 上海:上海远东出版社, 1993:441-445.
- [4] 符再德, 张其龙, 张晖, 等. 张家界桑植浓香型烤烟烟叶分切研究[J]. 烟草科技, 2012(5):51.
- [5] Burton H R, Dye N K, Bush L P. Distribution of tobacco constituents in tobacco leaf tissue I tobacco-special nitrosamines, nitrate, nitrite and alkaloids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(6):1050.
- [6] 于川芳, 李晓红, 罗登山, 等. 玉溪烤烟外观质量因素与其主要化学成分之间的关系[J]. 烟草科技, 2005(1):527.
- [7] YC/T 159—2002, 烟草及烟草制品水溶性糖的测定连续流动法[S].
- [8] YC/T 160—2002, 烟草及烟草制品总植物碱的测定连续流动法[S].
- [9] YC/T 161—2002, 烟草及烟草制品总氮的测定连续流动法[S].
- [10] YC/T 162—2002, 烟草及烟草制品氯的测定连续流动法[S].
- [11] 闫克玉, 王建民, 屈剑波, 等. 河南烤烟呼吸质量与主要理化指标的相关分析[J]. 烟草科技, 2001(1):529.
- [12] 蔡宪杰, 王信民, 尹启生. 烤烟外观质量指标量化分析初探[J]. 烟草科技, 2004(6):37.
- [13] 窦玉青, 汤朝起, 王平, 等. 闽西、赣中不同香型烤烟主要化学成分对吸食品质的影响[J]. 烟草科技, 2009(11):15.

# 非挥发性有机酸与卷烟主流烟气 总粒相物 pH 关系研究

邱宝平<sup>1</sup>, 李强<sup>2</sup>, 刘晓旭<sup>1</sup>, 郭连民<sup>1</sup>,  
祁林<sup>2</sup>, 郭鹏<sup>1</sup>, 陈亮<sup>1</sup>, 张峻松<sup>2</sup>

(1. 红塔辽宁烟草有限责任公司, 辽宁 沈阳 110002;  
2. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**以国内具有代表性的卷烟为研究对象,分别对卷烟样品的非挥发性有机酸含量和卷烟主流烟气粒相物 pH 进行了测定,通过数学分析研究了非挥发性有机酸含量对烟气粒相物 pH 的影响. 主流烟气粒相物 pH 值评价指标与有机酸的关联分析结果表明,苹果酸、十五酸、油酸对主流烟气粒相物 pH 值相对影响较大. 对影响主流烟气粒相物 pH 值的 11 种非挥发性有机酸的主成分分析结果表明,亚油酸,油酸,苹果酸,棕榈酸,草酸和亚麻酸对主流烟气粒相物 pH 值相对影响较大. 综上可得,苹果酸和油酸对主流烟气粒相物 pH 值具有较大影响.

**关键词:**卷烟主流烟气总粒相物;非挥发有机酸;主成分分析

**中图分类号:**TS41<sup>+</sup>3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.007

## Study on the relationship between non-volatile organic acids and total particulate matter pH of cigarettes smoke

QIU Bao-ping<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, LIU Xiao-xu<sup>1</sup>, GUO Lian-min<sup>1</sup>,  
QI Lin<sup>2</sup>, GUO Peng<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, ZHANG Jun-song<sup>2</sup>

(1. Hongta Liaoning Tobacco Co., Ltd., Shenyang 110002, China;

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

**Abstract:** The content of non-volatile organic acids and total particulate matter (TPM) pH value of representational brands of domestic cigarette samples were measured and the mathematical analysis about the effect of organic acid on the mainstream smoke total particulate matter pH value was carried out. The results showed that the malic acid, n-pentadecanoic acid and oleic acid had significant influence on the pH of total particulate matter in cigarette smoke. In the 11 kinds of non-volatile organic acids, linoleic acid, oleic acid, malic acid, palmitic acid, oxalic acid and linolenic acid had a great influence on the pH of total particulate matter in cigarette smoke. In conclusion, malic acid and oleic acid exert a greater influence on the pH of total particulate matter in cigarette smoke.

**Key words:** total particulate matter of cigarettes mainstream smoke; non-volatile organic acid; principal

收稿日期:2013-08-18

作者简介:邱宝平(1973—),男,辽宁省铁岭市人,红塔辽宁烟草有限责任公司工程师,主要研究方向为卷烟产品配方与质量控制.

通信作者:张峻松(1971—),男,河南省项城市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为烟草化学.

component analysis

## 0 引言

非挥发性有机酸是烟草的重要组成部分,种类繁多,总含量一般为 8% ~ 12%<sup>[1-3]</sup>. 烟草中有机酸大多与碱金属结合成盐,一部分与生物碱结合,少部分呈游离态存在<sup>[4]</sup>. 有机酸对卷烟的吸食舒适度有相当重要的影响,如中和烟气、减少刺激性、影响烟气的吃味特征<sup>[5-6]</sup>,因此烟草中非挥发性有机酸的分析研究对判断烟气是否醇和,对评定烟叶的品质、指导烟叶生产和叶组配方等具有重要作用<sup>[7-8]</sup>. 而烟气 pH 值则表达了卷烟燃烧时有机和无机组分的酸碱平衡状态,能够影响烟气强度、刺激性,同时影响卷烟的吸品质.

本文拟对主流烟气颗粒物 pH 与卷烟非挥发性有机酸之间的关系进行研究,为改善和调控卷烟主流烟气颗粒物 pH 值提供数据支撑,从而有助于卷烟原料的选择及其吸味品质的控制.

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

样品来源:国内烤烟型卷烟共 42 种,涵盖了一类卷烟 16 种、二类卷烟 19 种、三类卷烟 7 种.

异丙醇、二氯甲烷、无水硫酸钠、氯化钠,AR,天津市致远化学试剂有限公司产;草酸、丙二酸、丁二酸、月桂酸、十三碳酸、苹果酸、柠檬酸、十五酸、棕榈酸、硬脂酸,AR,中国医药集团上海化学试剂公司产;油酸(>99%),东京化成工业株式会社产;亚油酸、亚麻酸(>99%),ACROS 公司产.

LM5 + 实验室吸烟机,德国 Borgwaldt-KC 公司产;EL204 型电子天平,梅特勒-托利多上海有限公司产;Agilent7820A 气相色谱仪,美国安捷伦公司产;ST-07B 型多功能粉碎机,上海树立仪器仪表有限公司产;HH-4 型数显恒温水浴锅,金坛市科析仪器有限公司产;HZQ-F160 型恒温振荡培养箱,太仓市实验设备厂产;DGH-9145A 型电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司产.

### 1.2 方法

**1.2.1 样品准备** 从成品卷烟中取出烟丝,用粉碎机粉碎成烟末,封闭于密封袋中,按中华人民共和国行业标准 YC/T 32-2000 烘箱法测定其含水率.

**1.2.2 卷烟中非挥发性有机酸含量测定**<sup>[9]</sup> 准确称取 1 g 样品,置于 100 mL 平底烧瓶内,加 40 mL 10% 硫酸/甲醇溶液,加 1 mL 己二酸内标溶液,烧瓶上接冷凝管,80 °C 水浴回流 2 h,冷却至室温. 取回流液体 10 mL 于 100 mL 分液漏斗中,加入 20 mL 饱和食盐水混匀,每次用 10 mL 二氯甲烷萃取,萃取 3 次合并萃取液,加入 3.5 g 无水硫酸钠干燥过夜. 取适量萃取液用针筒式微孔滤膜过滤器过滤后置于 1 mL 色谱瓶中,进行气相色谱分析.

气相色谱条件如下:色谱柱 HP-INNOWAX (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);载气为氦气;进样口温度 280 °C;程序升温为 50 °C (2 min)  $\xrightarrow{4\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$  220 °C (20 min);柱流速 29.134 cm/s;柱流量 1.2 mL/min;分流比 5:1.

检测器(FID)温度 280 °C;氢气 35 mL/min;空气 400 mL/min;尾吹 20 mL/min.

**1.2.3 卷烟主流烟气颗粒物 pH 的测定** 卷烟样品、剑桥滤片在温度 (22 ± 1) °C,相对湿度 (60 ± 2)% 条件下平衡 48 h 以上. 直线型吸烟机在 ISO 抽吸方式下抽吸卷烟样品,每只滤片捕集 5 支卷烟颗粒物,每份卷烟样品共捕集 20 支卷烟颗粒物.

全部抽吸完毕后,清除抽吸 5 口,使主流烟气自由沉积 30 s. 脱脂棉擦拭捕集器,将剑桥滤片和脱脂棉一同放入 150 mL 广口三角瓶中,然后加入 50 mL 异丙醇,50 mL pH = 7.00 的蒸馏水,在温度 25 °C,振荡频率 120 r/min 条件下振荡萃取 0.5 h,取出三角瓶室温静置 0.5 h 后过滤,用离子酸度计测定滤液的 pH 作为卷烟主流烟气颗粒物 pH.

## 2 结果与讨论

### 2.1 非挥发性有机酸和主流烟气颗粒物 pH 值测定结果

卷烟样品中非挥发性有机酸含量的测定结果见表 1. 卷烟样品主流烟气颗粒物 pH 的测定结果见表 2.

### 2.2 卷烟非挥发性有机酸与主流烟气颗粒物 pH 值的关联分析

**2.2.1 灰色关联分析** 将卷烟主流烟气颗粒物 pH 值作为参考数列、非挥发性有机酸作为比较数列,并将数据进行均值化转换,进行灰色关联分析,相关

表1 卷烟样品中非挥发性有机酸的含量

卷烟序号	草酸	丙二酸	丁二酸	苹果酸	十五酸	棕榈酸	柠檬酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸
1#	18.21	1.34	0.32	53.84	0.02	2.46	8.08	0.61	0.88	1.70	3.48
2#	16.13	1.36	0.33	57.25	0.03	2.48	8.28	0.59	0.86	1.57	3.51
3#	18.53	1.30	0.42	61.88	0.03	2.30	8.97	0.54	0.75	1.51	3.13
4#	17.09	1.42	0.39	60.84	0.03	2.31	10.61	0.56	0.87	1.62	3.40
5#	24.84	1.70	0.96	46.13	0.05	1.82	19.93	0.51	1.04	1.45	2.20
6#	24.09	1.63	0.98	44.13	0.05	1.78	18.96	0.50	0.97	1.34	2.25
7#	21.72	1.79	0.62	63.37	0.05	2.30	12.45	0.75	0.95	1.88	3.14
8#	20.79	1.76	0.53	70.93	0.05	2.14	24.26	0.66	0.91	1.32	2.76
9#	20.79	1.76	0.53	70.93	0.05	2.14	24.26	0.66	0.91	1.32	2.76
10#	15.12	0.96	0.51	56.40	0.03	2.22	6.64	0.54	0.87	1.54	3.27
11#	17.31	1.46	0.44	57.66	0.04	2.67	9.04	0.68	1.03	1.84	4.10
12#	16.36	1.83	0.68	58.22	0.04	2.66	8.13	0.67	1.01	1.79	4.14
13#	16.64	1.10	0.88	57.29	0.05	2.55	8.37	0.65	1.00	1.57	3.37
14#	17.14	1.90	0.26	64.39	0.05	2.72	9.47	0.70	1.00	1.77	4.01
15#	15.76	1.25	0.37	53.44	0.05	2.42	6.82	0.57	0.96	1.64	3.49
16#	16.91	1.24	0.42	57.07	0.04	2.64	7.55	0.73	1.05	1.69	3.86
17#	18.68	1.37	0.47	63.03	0.04	2.92	8.34	0.81	1.16	1.87	4.26
18#	17.27	1.53	1.03	58.02	0.04	2.58	8.18	0.67	1.08	1.87	4.32
19#	19.23	1.25	0.41	60.56	0.05	2.84	7.68	0.72	1.10	1.86	3.90
20#	17.93	0.96	0.53	60.02	0.05	2.70	8.67	0.71	1.03	1.74	3.78
21#	16.60	1.07	0.44	56.18	0.05	2.52	7.97	0.61	0.89	1.48	3.61
22#	17.75	1.56	0.37	64.49	0.04	2.48	9.61	0.60	0.87	1.62	3.84
23#	17.01	1.57	0.36	60.57	0.04	2.53	8.60	0.62	0.92	1.66	3.81
24#	18.12	1.15	0.42	60.38	0.05	2.95	7.81	0.70	1.11	1.84	4.20
25#	17.47	1.52	0.36	58.75	0.05	2.96	8.85	0.72	1.10	2.01	4.36
26#	17.31	1.12	0.35	54.08	0.04	2.66	8.36	0.64	0.97	1.61	3.10
27#	16.84	1.56	0.34	60.55	0.05	2.91	9.29	0.72	1.10	1.87	4.41
28#	18.86	1.29	0.52	63.76	0.04	2.38	10.99	0.57	0.94	1.67	3.17
29#	18.56	1.30	0.61	68.25	0.05	2.75	9.64	0.66	1.05	1.91	3.94
30#	17.34	1.16	0.91	64.09	0.05	2.48	9.67	0.60	0.94	1.72	3.56
31#	20.33	1.65	0.44	68.73	0.05	2.76	9.38	0.67	1.23	2.20	4.71
32#	19.63	1.78	0.42	69.95	0.05	2.79	9.96	0.70	1.13	2.06	4.52
33#	18.34	1.74	0.45	62.71	0.05	2.87	9.46	0.71	1.14	2.02	4.41
34#	16.70	1.56	1.49	55.59	0.04	2.42	8.28	0.54	0.82	1.62	3.62
35#	17.15	1.58	0.42	60.13	0.04	2.65	8.16	0.63	1.00	1.77	3.86
36#	15.21	1.14	0.39	57.19	0.04	2.55	7.27	0.61	0.92	1.62	3.86
37#	16.66	1.18	0.40	52.02	0.05	2.61	7.50	0.61	1.06	1.64	3.54
38#	17.08	1.41	0.28	56.56	0.04	2.85	8.76	0.70	1.15	1.71	4.23
39#	16.50	1.26	0.28	56.43	0.04	2.75	8.36	0.66	1.08	1.55	3.88
40#	18.35	1.43	0.33	62.32	0.06	2.55	10.90	0.60	0.84	1.60	3.75
41#	17.67	1.33	0.45	63.03	0.04	2.45	10.41	0.57	0.95	1.66	3.61
42#	16.08	1.39	0.35	58.99	0.04	2.24	9.98	0.53	0.83	1.55	3.45

表2 卷烟样品主流烟气颗粒物 pH 测定结果

卷烟序号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#
主流烟气颗粒物 pH	6.200	6.139	6.149	6.289	6.291	6.200	6.020	6.131	5.900	6.002	6.074	6.142	6.112	6.148
卷烟序号	15#	16#	17#	18#	19#	20#	21#	22#	23#	24#	25#	26#	27#	28#
主流烟气颗粒物 pH	6.101	6.009	6.013	6.118	6.082	6.055	6.038	6.014	6.125	6.007	6.141	6.050	6.140	6.142
卷烟序号	29#	30#	31#	32#	33#	34#	35#	36#	37#	38#	39#	40#	41#	42#
主流烟气颗粒物 pH	6.036	6.039	6.070	6.107	6.102	6.100	6.012	6.077	6.069	6.020	6.014	6.088	6.068	6.158

分析结果见表3。由表3可知,主流烟气颗粒物 pH 值评价指标与苹果酸、十五酸和油酸的关联系数分别达0.837 8, 0.827 8 和0.814 4,其他有机酸的关联系数分别为:硬脂酸0.795 3,亚油酸0.794 9,柠檬酸0.792 0,都<0.80 且相差不大。故苹果酸、十

表3 主流烟气颗粒物 pH 值与非挥发有机酸的关联序

因素代号	因子	关联系数
$X_4$	苹果酸	0.837 8
$X_3$	丁二酸	0.789 6
$X_5$	十五酸	0.827 8
$X_7$	柠檬酸	0.792 0
$X_8$	硬脂酸	0.795 3
$X_9$	油酸	0.814 4
$X_1$	草酸	0.770 1
$X_{10}$	亚油酸	0.794 9
$X_6$	棕榈酸	0.756 0
$X_{11}$	亚麻酸	0.763 7
$X_2$	丙二酸	0.754 1

注:最大差值  $\Delta_{max} = 4.787 68$

表4 卷烟样品影响因子的总方差解释表

组分	初始特征值		
	总体	方差/%	累积方差/%
1	4.513	41.029	41.029
2	2.613	23.752	64.781
3	1.188	10.796	75.578
4	0.845	7.682	83.260
5	0.698	6.343	89.603
6	0.436	3.964	93.568
7	0.353	3.211	96.779
8	0.192	1.747	98.526
9	0.079	0.719	99.245
10	0.046	0.416	99.662
11	0.037	0.338	100.00

五酸和油酸对主流烟气颗粒物 pH 值相对影响较大。

**2.2.2 主成分分析** 通过SPSS软件对42份卷烟样品中非挥发性有机酸含量与主流烟气颗粒物 pH 值进行主成分分析,分析结果见表4和表5。将表4方差分析进行旋转处理,得到旋转后3个主成分的方差贡献率分别为36.65%,25.06%和13.87%。

由表5可知,影响主流烟气颗粒物 pH 值的非挥发性有机酸可分为3类:

1)包括硬脂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸和亚麻酸,为影响主流烟气颗粒物 pH 值的主要因素,其影响权重分别是6.83%,7.45%,7.53%,7.59%和7.24%,总权重为0.367;

2)包括草酸、丙二酸、十五酸和柠檬酸,其影响权重分别是7.25%,5.95%,4.78%和7.08%,总权重为0.250 6;

3)有机酸为苹果酸,其影响权重为0.1387。因此,影响主流烟气颗粒物 pH 值的主要非挥发酸是苹果酸、亚油酸、油酸等。

表5 主成分矩阵(初始因子载荷矩阵)

非挥发性有机酸	组分		
	1	2	3
草酸	-0.115	0.865	-0.225
丙二酸	0.0832	0.710	0.257
丁二酸	-0.133	0.300	-0.665
苹果酸	0.220	0.300	0.794
十五酸	0.387	0.570	-0.161
棕榈酸	0.862	-0.346	0.269
柠檬酸	-0.446	0.844	0.036
硬脂酸	0.790	0.142	0.313
油酸	0.871	0.220	-0.144
亚油酸	0.877	0.040	0.152
亚麻酸	0.837	-0.310	0.310

### 3 结论

本文采用气相色谱仪和气质联用仪对国内42个卷烟中非挥发性有机酸含量及其主流烟气粒相物pH进行了定量测定,并对其进行了统计分析.主流烟气粒相物pH值评价指标与有机酸的关联分析结果显示,苹果酸、十五酸、油酸对主流烟气粒相物pH值相对影响较大.对影响主流烟气粒相物pH值的非挥发酸进行主成分分析结果显示,在测定的11种非挥发有机酸当中,苹果酸、亚油酸、油酸、棕榈酸、草酸和亚麻酸对主流烟气粒相物pH值相对影响较大.综上可得,苹果酸和油酸对主流烟气粒相物pH值具有较大影响.

#### 参考文献:

- [1] 肖协忠. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997.
- [2] 陈章玉, 罗莉丽, 武怡. 烟气中有机酸的分析[J]. 色谱, 2001(4): 374.
- [3] 韩冰, 刘惠民, 谢复炜. 卷烟主流烟气中挥发和半挥发性成分分析[J]. 烟草科技, 2009(10): 32.
- [4] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [5] 陈章玉, 缪明明, 孔维松. 基质固相分散-高效液相色谱法同时测定烟草中的有机酸[J]. 中国烟草学报, 2007, 13(1): 11.
- [6] 杨式华, 王保兴, 许国旺, 等. 烟草中挥发性和非挥发性有机酸的快速测定[J]. 分析科学学报, 2008, 24(1): 167.
- [7] 周正红, 高孔蒙, 张水华. 烟草中化学成分对卷烟色香味品质的影响及其研究进展[J]. 烟草科技, 1997(2): 22.
- [8] 张迎春, 郭国宁, 岳海波. 卷烟主流烟气的相物相和总粒相物中有机酸的分析研究[J]. 分析科学学报, 2010, 26(5): 567.
- [9] 金永明, 张明福, 刘百战. 烟草中多元酸和高级脂肪酸的分析[J]. 烟草科技, 2002(4): 21.

# HXD 气流干燥对卷烟综合质量的影响

张俊岭<sup>1</sup>, 李书芳<sup>1</sup>, 李晓<sup>2</sup>, 朱国成<sup>1</sup>, 纪晓楠<sup>2</sup>

(1. 河南中烟工业有限责任公司 许昌卷烟厂, 河南 许昌 461000;

2. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**对比分析了隧道式燃油烘丝机(HXD)气流干燥与 CO<sub>2</sub> 膨胀 2 种生产方式及 HXD 气流干燥叶丝不同掺配比例对配方烟丝质量和卷烟综合质量的影响. 结果表明:掺配 HXD 气流干燥处理的膨胀叶丝能提高配方烟丝的整丝率,降低碎丝率,叶丝结构较合理,弹性较好;在实验牌号卷烟中,2 种生产方式生产的膨胀叶丝掺配比例相同时,HXD 气流膨胀叶丝卷烟感官质量较好,最佳掺配比例为 15%.

**关键词:**HXD 气流干燥;CO<sub>2</sub> 膨胀;卷烟综合质量

中图分类号:TS452<sup>+</sup>.3 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.008

## Effects of HXD pneumatic drying on cigarette comprehensive quality

ZHANG Jun-ling<sup>1</sup>, LI Shu-fang<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>2</sup>, ZHU Guo-cheng<sup>1</sup>, JI Xiao-nan<sup>2</sup>

(1. Xuchang Cigarette Factory, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

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

**Abstract:**The effect of HXD pneumatic drying, CO<sub>2</sub> expansion and different HXD expanded cut tobacco blending ratios on cigarette comprehensive quality was studied. The results showed that expanded cut tobacco with HXD pneumatic drying could increase whole cut rate and reduce small stands rate of the blends, cut tobacco structure and elasticity were better; In the test brands, sensory quality of cigarette with HXD expanded cut tobacco was better when blending ratios were the same; the optimum blending ratio of HXD expanded cut tobacco was 15%.

**Key words:**HXD pneumatic drying; CO<sub>2</sub> expansion; cigarette comprehensive quality

## 0 引言

CO<sub>2</sub> 膨胀烟丝因其技术成熟,已经被各卷烟企业广泛应用<sup>[1-3]</sup>,但它也存在着造碎大、整丝率低等缺点,不少科技工作者对膨胀设备的改进及如何提高膨胀后烟丝的利用率进行了探索<sup>[4-6]</sup>. 隧道式燃

油烘丝机(HXD)气流干燥因具有良好的叶丝在线膨胀效果,叶丝填充值高,近些年正成为研究热点<sup>[7-16]</sup>. HXD 气流膨胀能否直接替代 CO<sub>2</sub> 膨胀烟丝,业界还没有定论,因此本研究拟就 2 种处理方式对烟丝质量的影响进行系统全面的比较,并确定合适的掺配比例,旨在为卷烟企业的设备改造与工艺

收稿日期:2013-06-24

基金项目:河南中烟科技攻关项目(2012004)

作者简介:张俊岭(1967—),男,河南省许昌县人,河南中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草加工技术.

通信作者:李晓(1967—),女,河南省南召县人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为烟草工艺.

改进提供参考。

# 1 实验

## 1.1 材料与仪器

A 牌号卷烟配方烟丝及相关卷烟材料,河南中烟工业有限责任公司产。

许昌卷烟厂 HXD 气流干燥生产线和 CO<sub>2</sub> 膨胀烟丝生产线;KBF240 型恒温恒湿箱,德国宾得公司产;QTM8 型综合测试台,斯茹林公司产;HP6890 气相色谱仪,美国安捷伦公司产。

## 1.2 实验方法

**1.2.1 样品制作** 取 1 000 kg 某批次加料切丝膨胀烟丝,采用 HXD 气流干燥处理,该批次剩余物料用常规 CO<sub>2</sub> 膨胀进行正常处理. HXD 气流干燥膨胀丝按不同比例(13%,15%,17%,19%,21%,23%) 在 A 牌号卷烟叶组配方中进行掺配,CO<sub>2</sub> 膨胀叶丝的掺配比例为 15%,其他组分按正常比例掺配加香卷制。

**1.2.2 样品检测** 检测 2 种干燥方式对膨胀叶丝整丝率、碎丝率、整丝率转化率等指标的影响;掺配后检测配方烟丝物理质量、卷烟物理质量指标及卷烟烟气指标并进行感官质量评吸。

**1.2.3 样品取样点** 样品的取样点如图 1 所示。

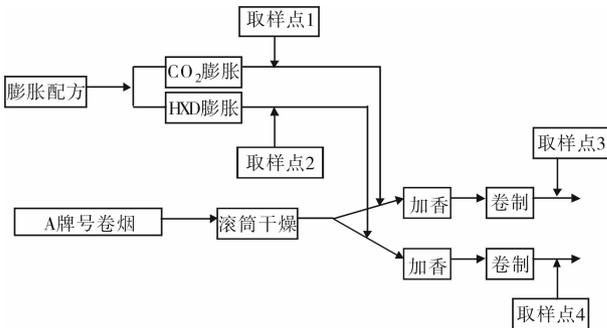


图 1 取样点示意图

检测内容:取样点 1 和 2 的含水率、填充值、烟丝结构、弹性进行测试;取样点 3 和 4 的烟支质量、吸阻、硬度、内在质量、烟气指标测试. 样品检测标准依照国标和行业标准,评吸使用行业通用的评价表<sup>[17-24]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 2 种方式处理叶丝的物理质量指标对比分析

HXD 气流干燥与 CO<sub>2</sub> 膨胀 2 种方式处理叶丝

的物理质量检测结果如图 2 所示。

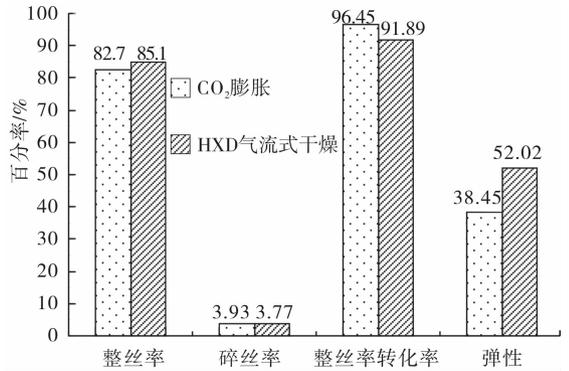


图 2 HXD 气流干燥与 CO<sub>2</sub> 膨胀烟丝物理检测数据对比

由图 2 可知,与 CO<sub>2</sub> 膨胀处理的叶丝相比, HXD 气流干燥处理后烟叶丝的整丝率提高了 2.4%,碎丝率略有降低,叶丝弹性提高了 13.57%,叶丝结构(CO<sub>2</sub> 膨胀处理的叶丝经过一次筛分)合理,弹性较好,但整丝率转化率相对较低。

### 2.2 HXD 气流干燥叶丝不同掺配比例对产品质量的影响

#### 2.2.1 掺配后配方烟丝物理质量指标对比分析

掺配 HXD 气流干燥叶丝与 CO<sub>2</sub> 膨胀处理叶丝后,配方烟丝物理质量检测结果见表 1。

由表 1 可知,在相同的掺配比例(15%)下, HXD 气流干燥处理的配方烟丝 A<sub>2</sub> 的填充值和碎丝率均低于 CO<sub>2</sub> 膨胀处理配方烟丝 A<sub>0</sub>,整丝率则高于 A<sub>0</sub>. 而 A<sub>1</sub>—A<sub>5</sub> 配方烟丝的整丝率先降低后升高,但均高于 A<sub>0</sub>;整丝率转化率逐渐降低,且均低于 A<sub>0</sub>;填充值由低到高,但均低于 A<sub>0</sub>。

LSD 检验结果显示, A<sub>1</sub>—A<sub>6</sub> 与 A<sub>0</sub> 配方烟丝整丝率的差异均达到了极显著水平,说明添加 HXD 气流干燥叶丝能够明显提高配方烟丝的整丝率. 除 A<sub>3</sub> 样品外,其他添加 HXD 气流干燥烟丝样品与 A<sub>0</sub> 碎丝率差异也达到了极显著水平,说明添加 HXD 气流干燥烟丝能够降低配方烟丝的碎丝率. HXD 气流干燥烟丝低掺配比例下,整丝率转化率虽略有降低,但差异并未达到显著水平;掺配比例 > 15% 时,配方烟丝的填充值变化不显著. 相同掺配比例(15%)下, A<sub>2</sub> 和 A<sub>0</sub> 的整丝率和碎丝率差异为极显著,而其他检测指标差异均不显著,因此 HXD 气流干燥烟丝结构更加合理。

表1 掺配后配方烟丝物理指标检测结果

样品编号	含水率/%	整丝率/%	碎丝率/%	整丝率转化率/%	填充值/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )
A <sub>0</sub>	13.28	82.57	2.61	90.47	4.78
A <sub>1</sub>	13.29	86.7**	1.98**	90.02	4.61**
A <sub>2</sub>	13.31	84.6**	2.33**	89.94	4.72
A <sub>3</sub>	13.41**	83.33**	2.56	89.62	4.69
A <sub>4</sub>	13.51**	84.46**	2.2**	89.29*	4.72
A <sub>5</sub>	13.26	84.02**	2.31**	87.66**	4.78
A <sub>6</sub>	13.36**	86.49**	2.3**	87.36**	4.76

注:表中所列数据为3组平行实验的均值;A<sub>0</sub>表示CO<sub>2</sub>膨胀叶丝掺配比例为15%的配方烟丝,A<sub>1</sub>—A<sub>6</sub>分别表示HXD气流干燥后膨胀叶丝掺配比例为13%,15%,17%,19%,21%,23%的配方烟丝;与A<sub>0</sub>比较,经LSD检验, $P < 0.05^*$ , $P < 0.01^{**}$ 。

**2.2.2 掺配后卷烟物理质量对比分析** 掺配HXD气流干燥叶丝及CO<sub>2</sub>膨胀处理叶丝后,卷烟物理质量检测结果见表2。

表2 掺配后卷烟物理质量检测结果

样品编号	单支质量/g	吸阻/MPa
B <sub>0</sub>	0.896	1.147
B <sub>1</sub>	0.897	1.072
B <sub>2</sub>	0.900	1.102
B <sub>3</sub>	0.907	1.116
B <sub>4</sub>	0.908	1.132
B <sub>5</sub>	0.911	1.144
B <sub>6</sub>	0.875	1.104

注:表中所列数据为3组平行实验的平均值;B<sub>0</sub>表示CO<sub>2</sub>膨胀叶丝掺配比例为15%的卷烟,B<sub>1</sub>—B<sub>6</sub>分别表示HXD气流干燥后膨胀叶丝掺配比例为13%,15%,17%,19%,21%,23%的卷烟。

由表2可知,添加HXD气流干燥叶丝的卷烟随着掺配比例的提高其吸阻逐渐提高,但总是低于添加CO<sub>2</sub>膨胀烟丝的卷烟。

**2.2.3 掺配后卷烟烟气指标对比分析** 掺配HXD气流干燥叶丝及CO<sub>2</sub>膨胀叶丝后,卷烟烟气指标对比分析检测结果见表3。

由表3可知,随着HXD气流干燥膨胀叶丝掺配比例的提高,卷烟焦油量变化趋势不明显;CO量变化趋势为先降低后升高,当HXD气流干燥后膨胀叶丝掺配比例 $< 15\%$ 时CO释放量减小且差异极显著。

**2.2.4 掺配后卷烟感官质量对比分析** 掺配HXD气流干燥叶丝及CO<sub>2</sub>膨胀烟丝后,卷烟感官质量对比分析结果见表4。

表3 掺配后卷烟烟气指标检测结果

样品编号	焦油/( $\text{mg} \cdot \text{支}^{-1}$ )	CO/( $\text{mg} \cdot \text{支}^{-1}$ )
B <sub>0</sub>	12.4	16.2
B <sub>1</sub>	12.5	15.7**
B <sub>2</sub>	12.4	15.8**
B <sub>3</sub>	12.6	16.2
B <sub>4</sub>	12.7*	16.7**
B <sub>5</sub>	12.1*	16.5*
B <sub>6</sub>	12.3	15.6**

注:与B<sub>0</sub>比较,经LSD检验, $P < 0.05^*$ , $P < 0.01^{**}$ 。

表4 掺配后卷烟感官质量对比分析结果

样品编号	感官质量评价
B <sub>0</sub>	以B <sub>0</sub> 为基础
B <sub>1</sub>	香气风格基本不变,香气透发性增强,细腻程度下降,烟气浓度增加,刺激性增大
B <sub>2</sub>	香气风格基本不变,香气质较好,细腻程度提高,甜润感增强
B <sub>3</sub>	香气风格略有变化,细腻程度稍有降低,刺激性增大,略有杂气,甜润感减轻
B <sub>4</sub>	香气风格略有变化,烟气浓度降低,香气质、细腻程度、余味变差,刺激性、杂气较大,甜润感下降
B <sub>5</sub>	香气风格有变化,各项指标均有所下降,干燥感增强,甜润度较低
B <sub>6</sub>	香气风格变化,烟气浓度明显降低,香气质、烟气细腻程度较差,刺激性、杂气增大,余味变差,甜润感较弱

由表4可知,与添加CO<sub>2</sub>膨胀处理叶丝的卷烟相比,添加HXD气流干燥叶丝的卷烟在掺配比例为15%时,香气风格基本不变,香气质和细腻程度有所提高,回甜感增加,而在掺配其他比例时,总体质量均有下降。因此添加15%HXD工艺处理的膨胀烟丝对A牌号卷烟产品香气风格影响不明显,为最佳掺配比例。

### 3 结论

本文对比分析了HXD气流干燥与CO<sub>2</sub>膨胀2种生产方式及HXD气流干燥叶丝不同掺配比例对配方烟丝质量和卷烟综合质量的影响。结论如下:

1)与CO<sub>2</sub>膨胀处理的叶丝相比,HXD气流干燥处理后的叶丝结构合理,叶丝弹性较好,整丝率转化率较低。添加HXD气流干燥烟丝可以提高配方烟丝的整丝率、降低碎丝率,当添加量 $> 15\%$ 时配方烟丝的填充值变化不显著,低掺配比例下对卷烟整丝率转化率影响不大。

2)随着HXD气流干燥叶丝掺配比例的提高,卷烟吸阻逐渐提高,且吸阻总是低于添加CO<sub>2</sub>膨胀烟丝的卷烟;HXD气流干燥烟丝掺配比例<17%时,卷烟焦油量变化不显著;掺配比例<15%时,CO释放量减小且差异极显著。就所试验的A牌号卷烟而言,在相同掺配比例下,掺配HXD气流干燥处理膨胀叶丝的卷烟感官质量优于CO<sub>2</sub>膨胀处理卷烟。

3)在所研究的A牌号卷烟中可以采用HXD气流膨胀叶丝替代CO<sub>2</sub>膨胀叶丝,其最佳掺配比例为15%。

#### 参考文献:

- [1] 崔伟,李洪涛,王海滨,等.提高CO<sub>2</sub>膨胀烟丝内在质量的技术研究[J].食品与机械,2012,28(5):216.
- [2] 赖伟玲.CO<sub>2</sub>膨胀前后生物碱变化研究[J].分析测试学报,2005,24(11):355.
- [3] 吴桂兵,张楚安,蔡冰,等.CO<sub>2</sub>膨胀烟丝分类加工应用研究[J].烟草科技,2007(12):5.
- [4] 许龙.提高CO<sub>2</sub>膨胀烟丝的整丝率研究[J].工业设计,2011(1):89.
- [5] 张志刚.570 kg/h CO<sub>2</sub>叶丝膨胀线工艺技术系统研究[J].中国烟草科学,2004,25(1):14.
- [6] 范爱军.CO<sub>2</sub>叶丝膨胀线制冷系统故障分析与对策[J].河南科技,2010(1):74.
- [7] 廖惠云,郝喜良,甘学文,等.HXD工艺条件对烟草香味物质影响的应用研究[J].中国烟草学报,2007,13(4):1.
- [8] 徐如彦,毛多斌,许学坤,等.HXD工艺条件对烟丝香味成分的影响研究[J].安徽农学通报,2008,14(21):103.
- [9] 郝廷亮,周显升,贾玉国,等.HXD烘丝过程中在制品化学成分变化的研究[J].中国烟草学报,2007,13(4):6.
- [10] 杨斌,白俊海.HXD前后烟丝中烟碱及部分香味成分的变化[J].烟草科技,2006(1):18.
- [11] 席年生,胡建新,陈建军,等.HXD叶丝进料状态对其综合质量的影响[J].烟草科技,2006(8):5.
- [12] 姚光明,王文辉,尹献忠,等.烟丝结构对烟丝填充值和卷接质量的影响[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2003,18(4):62.
- [13] 马宇平.HXD在线膨胀工艺参数和膨胀率与卷烟质量的关系[J].烟草科技,2004(7):4.
- [14] 林天勤,吴永生.HXD进料阶段烟丝流量控制方式改进[J].烟草科技,2010(6):39.
- [15] 张大波,刘志平,李跃锋,等.HXD运行参数与工作段气流初始温度相关性的回归分析[J].烟草科技,2004(9):12.
- [16] 席年生,张大波,李跃锋,等.HXD蒸气喷射量对叶丝膨胀效果及卷烟内在质量的影响[J].烟草科技,2005(3):3.
- [17] YC/T 152—2001,卷烟烟丝填充值的测定[S].
- [18] YC/T 289—2009,卷烟配方烟丝结构测定[S].
- [19] YC/T 186—2004,卷烟烟丝弹性的测定方法[S].
- [20] YC/T 178—2003,烟丝整丝率、碎丝率的测定方法[S].
- [21] GB/T 22838.5—2009,卷烟吸阻和滤棒压降[S].
- [22] GB/T 19609—2004,卷烟用常规分析用吸烟机测定总颗粒物 and 焦油[S].
- [23] GB/T 23356—2009,卷烟烟气气相中一氧化碳的测定·非散射红外法[S].
- [24] GB/T 5606.4—2005,卷烟(第4部分):感官技术要求[S].

# 烤后烟叶 SSR 反应体系的优化研究

王广超<sup>1,2</sup>, 马林<sup>1</sup>, 康文功<sup>1</sup>, 张锐<sup>1</sup>, 帖金鑫<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业学院 烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 山东中烟工业有限责任公司 滕州卷烟厂, 山东 滕州 277500)

**摘要:**以烤烟 RG11 品种为原料,研究烤后烟叶简单重复序列(SSR)分析中聚合酶链式反应(PCR)体系各主要因素及其之间的相互作用对 SSR 扩增的影响,结果表明:烤后烟叶 SSR-PCR 反应最佳体系为 20  $\mu\text{L}$  体系中含 35 ng 模板 DNA,1.5 U TaqDNA 聚合酶,2.375 mmol/L  $\text{MgCl}_2$ ,0.6 mmol/L dNTPs 和 0.4  $\mu\text{mol/L}$  引物.

**关键词:**烤后烟叶;简单重复序列;DNA 体系优化;聚合酶链式反应

**中图分类号:**TS424;Q789 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.009

## The optimization research of flue-cured tobacco SSR reaction system

WANG Guang-chao<sup>1,2</sup>, MA Lin<sup>1</sup>, KANG Wen-gong<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, TIE Jin-xin<sup>1</sup>

(1. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Tengzhou Cigarette Factory, China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Tengzhou 277500, China)

**Abstract:** Using flue-cured tobacco varieties RG11 as raw materials, the influence of simple sequence repeat(SSR) amplification on flue-cured tobacco SSR analysis of polymerase chain reaction (PCR) system of the main ingredients and among was studied, and the results showed that flue-cured tobacco SSR-PCR for 20  $\mu\text{L}$  system, including template DNA 35 ng, 1.5 U TaqDNA polymerase, 2.375 mmol/L  $\text{MgCl}_2$ , 0.6 mmol/L dNTPs, 0.4  $\mu\text{mol/L}$  primer.

**Key words:** flue-cured tobacco; simple sequence repeat (SSR); DNA system optimization; polymerase chain reaction (PCR)

## 0 引言

在卷烟工业生产中,烟叶品种的稳定性直接影响卷烟质量的稳定性.如何保证烟叶原料品种准确性一直都是烟草工业生产中较为棘手的问题,传统的种质鉴定仅限于对烟叶的一些表型评价,受环境和人为因素影响较大.随着 DNA 分子标记技术的不断

发展,采用 DNA 指纹图谱技术可以从 DNA 水平上对烟草品种进行快速准确的鉴定.

SSR (simple sequence repeat), 即简单重复序列,是由 S. Moore 等<sup>[1]</sup>在 1991 年建立的分子标记技术,也称微卫星标记. SSR 以 PCR (polymerase chain reaction) 为基础,得到的遗传信息量大,多态性好<sup>[2]</sup>. 该技术根据串联重复序列两端的保守序列设计引

收稿日期:2013-01-29

作者简介:王广超(1987—),男,河南省周口市人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为烟草生物技术.

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.

物,由于不同品种基因组串联重复序列重复次数的不同,扩增产物大小不一,从而达到区分不同品种的目的. G. Bindler 等<sup>[3]</sup>利用 684 对 SSR 引物在 16 个烟草品种中的扩增结果建立了第一张烟草 SSR 图谱. H. S. Moon 等<sup>[4]</sup>分析了 100 对 SSR 引物对 5 个烟草品种基因组 DNA 扩增结果,共可获得 56 张 SSR 图谱. C. S. V. Rao 等<sup>[5]</sup>利用 SSR 确定了 30 个烤烟品种遗传变异,通过遗传相似系数分析,观察到几乎所有研究所用的植物都是多形态的,SSR 标记为密切相关的烟草种类的区分做了充分解释. G. Bindler 等<sup>[6]</sup>利用新功能性微卫星标记得到烟草基因组的高分辨率遗传图谱,其中包含 2 317 个微标记和 2 363 个位点,平均距离映射的微卫星标记间距小于 2 万个碱基对或 1.5 cm.

本研究以烤后烟叶为基础原料提取其 DNA,探讨影响烤后烟叶 SSR 扩增的各种因素,建立能够稳定扩增烤后烟叶基因组的体系,以期对烤后烟叶的品种鉴别奠定一定基础.

## 1 实验

### 1.1 材料与试剂

烟叶品种 RG11,由云南红云红河烟草(集团)有限责任公司提供. SSR 引物序列来自 *Solanum lycopersicum* consortium (ITGSP, <http://solgenomics.net/>),由生工生物工程(上海)有限公司合成,引物编号 PI20306,引物序列为:F:5'-CCGAGTCTGTTTT-GGTG-3', R: 5'-GCGAGCATCTCTCATTTTC-3'; Taq 酶、250 bp DNA ladder marker 购自宝生物工程(大连)有限公司;dNTP 购自美国 Promega 公司;PCR 所用 TapDNA 聚合酶等均购自宝生物工程(大连)有限公司. 其他化学试剂均为国产分析纯.

0.75 × CTAB 提取缓冲液:pH = 8.0,含 7.5 g/L CTAB,1.4 mol/L NaCl,0.1 mol/L Tris,0.02 mmol/L EDTA2Na,2% PVP 和 2% β-巯基乙醇;2 × CTAB 提取缓冲液:含 20 g/L CTAB,1.4 mol/L NaCl,0.1 mol/L Tris,0.02 mmol/L EDTA2Na,2% PVP 和 2% β-巯基乙醇;CTAB 沉淀缓冲液:pH = 8.0,含 5 g/L CTAB,0.01 mol/L EDTA,0.5 mol/L Tris,0.04 mol/L NaCl.

### 1.2 主要仪器

Vetiti 型 PCR 仪,Applied Biosystems 产;DYY-6C 电泳仪,北京市六一仪器厂产;MicroCL17 型离心

机,Thermo electron corporation 产;T6 新世纪紫外分光光度计,北京普析通用有限责任公司产;Mini Bis Pro 型凝胶成像分析系统,以色列 DNR 凝胶成像系统有限公司产.

### 1.3 方法

**1.3.1 基因组 DNA 的提取** 基因组 DNA 的提取采用改良 CTAB 法<sup>[7]</sup>,利用琼脂糖凝胶电泳及紫外分光光度计检测 DNA 完整性及浓度,样品稀释至 50 ng/μL, -20 °C 保存备用.

**1.3.2 体系优化实验设计** 参照文献[8]初步设计 SSR-PCR 反应为 20 μL 体系,含模板 DNA 35 ng,1.5 U Taq DNA 聚合酶,1.5 mmol/L MgCl<sub>2</sub>,350 μmol/L dNTPs,0.25 μmol/L 引物. 首先采用单因素试验确定各因素的最佳参数,再设计正交试验对反应体系进一步优化. 反应程序为:94 °C 预变性 5 min;然后 94 °C 变性 45 s,55 °C 退火 45 s,72 °C 延伸 45 s,34 个循环后延伸 5 min,4 °C 保存.

## 2 结果与分析

### 2.1 模板用量对 SSR 扩增的影响

在保持其他反应因子不变的条件下,改变模板用量对 SSR 扩增的影响如图 1 所示,其中第 1—9 泳道的模板用量分别为 5 ng,15 ng,25 ng,35 ng,45 ng,55 ng,65 ng,75 ng,85 ng;M 泳道为 Mark. 由图 1 可知,每个模板梯度均能扩增出条带,说明模板用量在一定范围内对 SSR-PCR 影响不大,从第 4 泳道开始,扩增条带变得清晰并且稳定. 因此,为保证结果可重复性的同时节省模板材料,笔者选择 25 ~ 55 ng 为最适的模板用量范围.

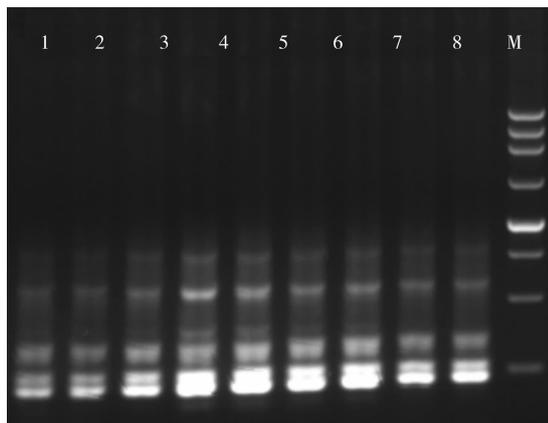


图 1 模板用量对 SSR 扩增的影响

## 2.2 $Mg^{2+}$ 浓度对 SSR 扩增的影响

$Mg^{2+}$  浓度对 SSR 扩增的影响如图 2 所示。

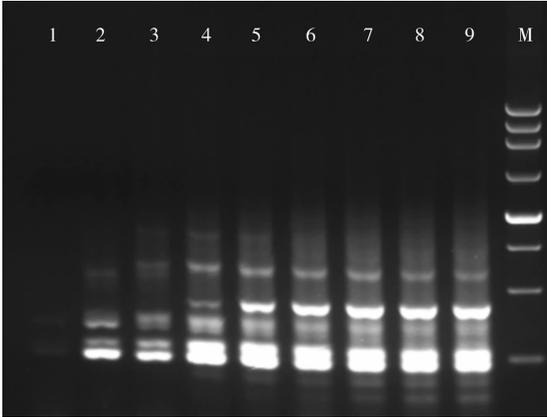


图 2  $Mg^{2+}$  浓度对 SSR 扩增的影响

其中,第 1—9 泳道的  $Mg^{2+}$  浓度分别为 0.875 mmol/L, 1.125 mmol/L, 1.375 mmol/L, 1.625 mmol/L, 1.875 mmol/L, 2.125 mmol/L, 2.375 mmol/L, 2.625 mmol/L, 2.875 mmol/L; M 泳道为 Mark。

在 SSR 反应体系中, $Mg^{2+}$  浓度对反应体系的扩增效率影响较大: $Mg^{2+}$  浓度太低会限制 Taq 酶的激活,影响扩增效果; $Mg^{2+}$  浓度较高,则会使扩增的严谨性及匹配度下降,导致扩增结果不稳定和失真。由图 2 可知,保持其他反应因子不变的条件下,在 5—9 泳道  $Mg^{2+}$  浓度范围内,扩增效果较好,带纹较清晰。因此,选定 1.875 ~ 2.625 mmol/L 为  $Mg^{2+}$  浓度的最佳应用范围。

## 2.3 dNTPs 浓度对 SSR 扩增的影响

dNTPs 浓度对 SSR 扩增的影响如图 3 所示。

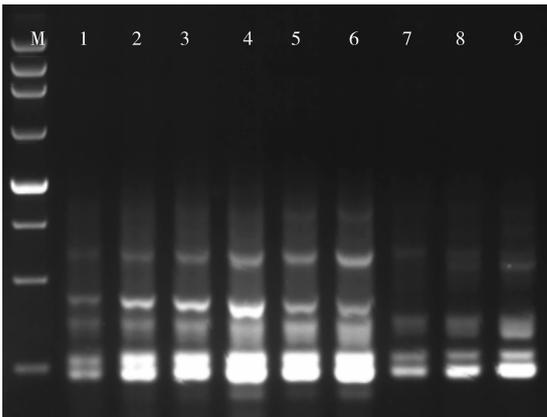


图 3 dNTPs 浓度对 SSR 扩增的影响

其中, M 泳道为 Mark, 第 1—9 泳道的 dNTPs 浓度分别为 0.200 mmol/L, 0.300 mmol/L, 0.400 mmol/L, 0.500 mmol/L, 0.600 mmol/L, 0.700 mmol/L, 0.800 mmol/L, 0.900 mmol/L, 1.000 mmol/L。dNTPs 在 SSR 反应中作为底物,其浓度过低,反应速率会下降,导致扩增出的带纹弱并且不清晰;dNTPs 浓度过高,会与大量的  $Mg^{2+}$  螯合,致使用来激活 Taq 酶的  $Mg^{2+}$  较少,影响酶的活性。由图 3 可知,在 2—6 泳道的 dNTPs 浓度范围内,扩增较为清晰。因此,选定 0.300 ~ 0.700 mmol/L 为 dNTPs 浓度的最佳应用范围。

## 2.4 引物浓度对 SSR 扩增的影响

引物浓度对 SSR 扩增的影响如图 4 所示。

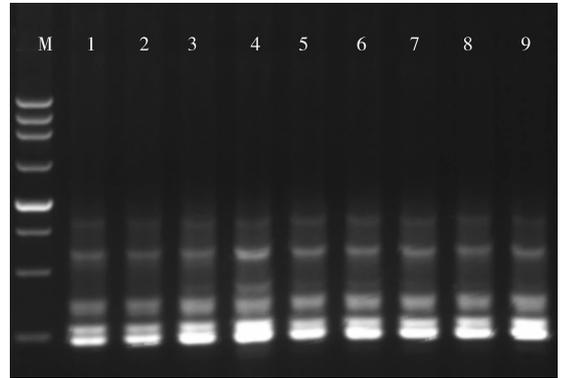


图 4 引物浓度对 SSR 扩增的影响

其中, M 泳道为 Mark; 第 1—9 泳道的引物浓度分别为 0.200  $\mu$ mol/L, 0.300  $\mu$ mol/L, 0.400  $\mu$ mol/L, 0.500  $\mu$ mol/L, 0.600  $\mu$ mol/L, 0.700  $\mu$ mol/L, 0.800  $\mu$ mol/L, 0.900  $\mu$ mol/L, 1.000  $\mu$ mol/L。引物浓度对 SSR 反应的影响较大:引物浓度低时,由于存在竞争机制,模板与引物的结合率低,许多结合位点不能够被检测扩增出来,致使扩增带纹较浅,不能真实反映结果;引物浓度高时,会产生模板与引物的非特异性扩增,造成扩增假象。由图 4 可知,在 3—6 泳道的引物浓度范围内,都有较清晰地扩增条带。因此,选定 0.400 ~ 0.700  $\mu$ mol/L 为烤烟引物浓度的最佳应用范围。

## 2.5 Taq 酶用量对 SSR 扩增的影响

Taq 酶用量对 SSR 扩增的影响如图 5 所示。其中, M 泳道为 Mark; 第 1—9 泳道的 Taq 酶用量分别为 0.50 U, 0.75 U, 1.00 U, 1.25 U, 1.50 U, 1.75 U, 2.00 U, 2.25 U, 2.50 U。Taq 酶用量增加并不能明显提高扩增产物的量,但减少 Taq 酶用量扩增出来

的条带会变得很弱. 因此, 1.25 ~ 2.50 U 为 Taq 酶用量的最佳范围.

## 2.6 不同退火温度对 SSR 扩增的影响

退火温度对 SSR 扩增的影响如图 6 所示. 其中第 1—8 泳道的退火温度分别为 54 °C, 55 °C, 56 °C, 57 °C, 58 °C, 59 °C, 60 °C, 61 °C; M 泳道为 Mark. 由图 6 可见, 以第 7 泳道的效果最好, 所以确定最适退火温度为 59 °C.

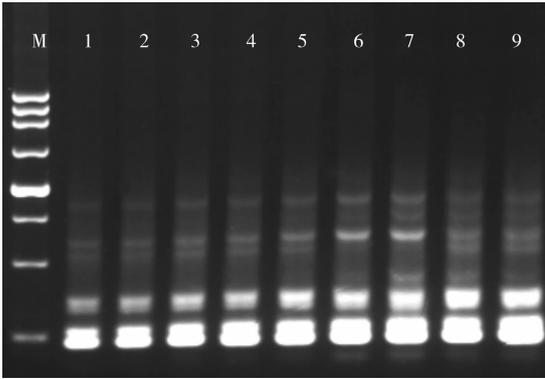


图 5 Taq 酶用量对 SSR 扩增的影响

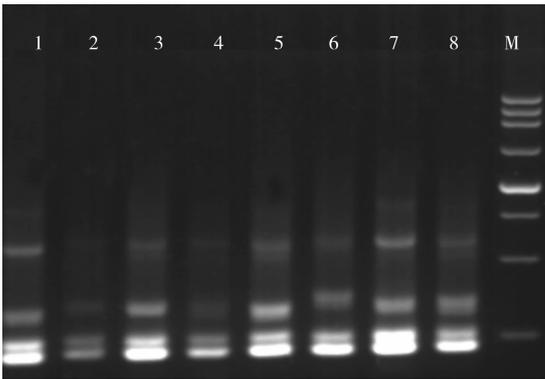


图 6 退火温度对 SSR 扩增的影响

## 2.7 SSR-PCR 反应体系的正交优化

在单因素试验确定模板用量、 $Mg^{2+}$  浓度、dNTPs 浓度、引物浓度和 Taq 酶用量的基础上, 进行 5 因素 4 水平的  $L_{16}(4^5)$  正交试验, 试验水平设计和试验结果分别见表 1 和图 7.

图 7 中第 1—16 泳道分别代表正交试验表中的 16 组数据, M 泳道为 Mark. 由图 7 可知, 第 7, 8 组实验扩增的条带完整、清晰、亮度高容易分辨, 其中第 7 组试验的扩增效果最好. 因此, 烤后烟叶 SSR 反应体系最佳组合为: 20  $\mu$ L 反应体系中含 DNA 模板 35 ng,  $Mg^{2+}$  浓度 2.375 mmol/L, dNTPs 浓度 0.6 mmol/L, 引物浓度 0.40  $\mu$ mol/L, Taq 酶用量 1.5 U.

表 1 SSR 反应体系正交试验表

试验号	模板/ng	$Mg^{2+}$ 浓度/ (mmol · L <sup>-1</sup> )	dNTPs/ (mmol · L <sup>-1</sup> )	引物/ ( $\mu$ mol · L <sup>-1</sup> )	Taq 酶/ U
1	1(25)	1(1.875)	1(0.300)	1(0.400)	1(1.25)
2	1	2(2.125)	2(0.400)	2(0.500)	2(1.50)
3	1	3(2.375)	3(0.500)	3(0.600)	3(1.75)
4	1	4(2.625)	4(0.600)	4(0.700)	4(2.00)
5	2(35)	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3(45)	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4(55)	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

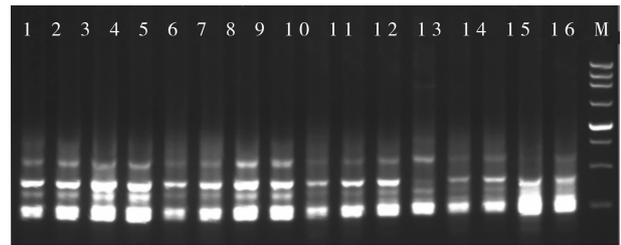


图 7 SSR 反应体系正交试验

## 3 结论

本文通过对烤后烟叶简单重复序列 DNA 反应体系的优化研究, 建立了一个适合烤烟的稳定的 SSR-PCR 反应体系, 主要结论如下:

1) 单因素的优化研究表明, 在 20  $\mu$ L 的反应体系中, 各因素的最佳浓度范围为: 模板 DNA 25 ~ 55 ng,  $Mg^{2+}$  浓度 1.875 ~ 2.625 mmol/L, dNTPs 浓度 0.300 ~ 0.700 mmol/L, 引物浓度 0.400 ~ 0.700  $\mu$ mol/L, Taq 酶用量 1.25 ~ 2.50 U.

2) 考虑到 PCR 反应体系中各因素之间的相互作用, 通过正交试验得到 SSR-PCR 最佳反应体系条件为: 20  $\mu$ L 反应体系中含 DNA 模板 35 ng,  $Mg^{2+}$  浓度 2.375 mmol/L, dNTPs 浓度 0.6 mmol/L, 引物浓度 0.4  $\mu$ mol/L, Taq 酶用量 1.5 U.

(下转第 58 页)

# 烟支通风率控制参数研究

黄晓飞<sup>1,2</sup>, 姚二民<sup>2</sup>

(1. 广西中烟工业有限责任公司 柳州卷烟厂, 广西 柳州 545005;

2. 郑州轻工业学院 食品与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**通过对影响烟支通风率的控制参数进行单因素试验,结合3因素3水平曲面响应分析法,研究了各工艺参数对烟支通风率的影响.结果表明,烟支质量、接装纸的动摩擦系数、接装纸的无胶区面积对烟支通风率影响显著.在生产通风率为48.0%的卷烟时,烟支质量为0.88 g,接装纸的动摩擦系数为0.36,接装纸的无胶区面积为165 mm<sup>2</sup>,此时,烟支通风率控制最优.试验建立的回归方程模型有效且显著,可用于指导机台操作人员进行通风率稳定性的控制.

**关键词:**烟支通风率;动摩擦系数;烟支质量;响应曲面法

**中图分类号:**TS411 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.010

## Research of controlling parameters of cigarette ventilation rate

HUANG Xiao-fei<sup>1,2</sup>, YAO Er-min<sup>2</sup>

(1. Liuzhou Cigarette Factory, Guangxi Tobacco Industry Co., Ltd., Liuzhou 545005, China;

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

**Abstract:** By the single factor test on the controlling parameter which influences the ventilation rate of cigarette, combined with the response surface methodology with three factors at three levels, the influence of process parameters on the ventilation rate of cigarette was studied. The results showed that the cigarette weight and the coefficient of kinematic friction of tipping paper, as well as the no-glue area of tipping paper, had significant influence on the ventilation rate of cigarette. When process parameters as follows: ventilation rate 48.0%, cigarette weight 0.88 g, coefficient of kinematic friction of tipping paper 0.36 and no-glue area of tipping paper 165 mm<sup>2</sup>, the optimal control effect was obtained. The regression equation model that established in test was effective and significant, it could guide control the stability of the ventilation rate.

**Key words:** cigarette ventilation rate; the coefficient of dynamic friction; cigarette weight; response surface method

## 0 引言

卷烟接装纸打孔是目前各卷烟企业广泛采用的一种降焦减害方式.烟支通风率是接装纸打孔后

卷烟的一项重要考量指标,它主要影响卷烟的烟气浓度,人们在吸食卷烟时,外部气流通过孔洞对主流烟气进行稀释,使吸入人体的焦油量相对减少.因此,打孔卷烟的开发过程中,在保证卷烟香气的

收稿日期:2013-05-06

作者简介:黄晓飞(1979—),男,广西壮族自治区柳州市人,广西中烟工业有限责任公司柳州卷烟厂助理工程师,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为卷烟工艺及工艺管理.

同时,应尽可能提高烟支通风率,以保证人们吸食满足感的同时降低对人体的危害性。

目前烟草行业对烟支通风率的研究,多集中在通风率对卷烟焦油、烟气成分、烟香等的影响<sup>[1-4]</sup>,主要用于产品的研发与设计,而针对实际生产过程中通风率稳定性的控制,影响通风率参数的设置及调整,为保证通风率符合指标要求需对设备进行的调整与改造等方面的研究较少见。有研究表明,烟支质量与通风率呈正相关关系,据此,本文通过卷烟通风率单因素试验,同时利用响应曲面法对实际生产过程中影响烟支通风率的控制参数——烟支质量、接装纸的动摩擦系数(以下文中简称动摩擦系数)和接装纸的无胶区面积进行综合分析,以期实现不同通风率条件下的最优控制参数组合,为生产控制和参数的设置提供操作指导。

## 1 实验

### 1.1 材料与设备

A 牌号配方烟丝,广西中烟工业有限责任公司产;透气度(500 ± 50) CU 打孔接装纸,广西甲天下水松纸有限公司产;OM—II 综合测试台,北京欧美利华科技有限公司产;MC—1 摩擦系数测试仪,济南钟驰测试技术有限公司产;Protos70 卷烟机,常德烟草机械有限责任公司产;接装纸上胶辊,柳州创志环保设备有限责任公司产。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 样品的制备** 1) 各项参数控制稳定后,按实验次序每次进行一组实验并取样,每次取样 4 000 支,作为实验样品。

2) 根据《GB/T 16447—2004/ISO 3402:1999 烟草及烟草制品·调节和测试的大气环境》要求进行样品平衡。

**1.2.2 样品的检测方法** 按照《GB 22838.15—2009/ISO 9512:2002 卷烟和滤棒物理性能的测定》要求进行通风率的检测。

**1.2.3 工艺参数的选择** 在固定配方烟丝的前提下,通过改变烟支的质量、接装纸的动摩擦系数、无胶区面积 3 个工艺变量,以烟支通风率作为依据,确定最佳的通风率控制参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 卷烟通风率的单因素试验

**2.1.1 烟支质量对卷烟通风率的影响** 本文研究

的目的是寻求烟支质量对通风率影响的极限点,即在某个烟支质量点烟支通风率将保持基本不变。根据前人经验数据及实际工作需求,在机速 7 000 支/min,动摩擦系数 0.35,无胶区面积 160 mm<sup>2</sup> 的条件下,研究烟支质量对烟支通风率的影响,结果见图 1。

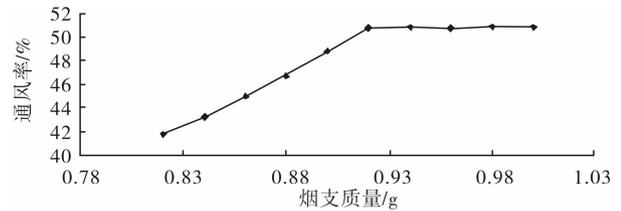


图 1 烟支质量对通风率影响的折线图

由图 1 可见,烟支通风率随着烟支质量的增加呈上升趋势,当烟支质量 > 0.91 g 后通风率趋于稳定,烟支通风率在 0.82 g ~ 0.91 g 区间内的增加幅度较大,因此烟支质量选择为 0.91 g。

**2.1.2 动摩擦系数对烟支通风率的影响** 接装纸胶面的摩擦起毛程度会影响烟支通风率。首先,毛絮过多将会堵塞卷烟纸的孔洞,导致通风率降低;其次,根据抛锚效应,摩擦起毛程度越大,需要的胶水量越少,可以提高通风率。因此,研究打孔卷烟纸起毛程度对烟支通风率的控制尤为必要,而摩擦起毛程度可以通过动摩擦系数来表征。在机速 7 000 支/min,烟支质量 0.91 g,无胶区面积 160 mm<sup>2</sup> 的条件下,研究动摩擦系数对烟支通风率的影响,结果见图 2。

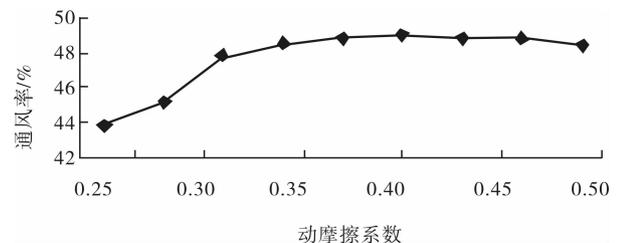


图 2 动摩擦系数对通风率的影响折线图

由图 2 可见,烟支通风率随着动摩擦系数的增加而增加。当动摩擦系数 > 0.35 后,烟支通风率趋于稳定,因此动摩擦系数选择为 0.35。

**2.1.3 无胶区面积对烟支通风率的影响** 在恒定打孔卷烟纸(孔径、孔数相同),机速 7 000 支/min,动摩擦系数 0.35,烟支质量 0.91 g 的条件下,研究无胶区面积对卷烟通风率的影响,结果见图 3。

由图 3 可见,烟支通风率随着无胶区面积的增

加而增加,当无胶区面积 > 165 mm<sup>2</sup> 后,烟支通风率趋于稳定,因此无胶区面积选择为 165 mm<sup>2</sup>。

### 2.2 曲面响应法优化各控制参数

在以上单因素试验的基础上,运用 Box-Behnken 设计,对影响烟支通风率的 3 个因素,采用 3 因素 3 水平的中心组合试验设计,利用 Minitab 分析软件进行试验设计及分析,编码设计、计算结果及方差分析分别见表 1,表 2 和表 3。

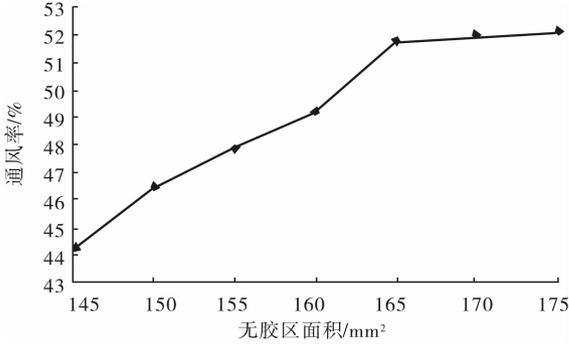


图 3 无胶区面积对通风率的影响折线图

表 1 Box-Behnken 试验设计因素水平及编码表

编码水平	无胶区面积 $X_1/\text{mm}^2$	烟支质量 $X_2/\text{g}$	动摩擦系数 $X_3$
-1	160	0.85	0.30
0	165	0.91	0.35
1	170	0.97	0.40

2.2.1 试验各因素对烟支通风率的影响分析 以通风率为评价指标(Y),利用 Minitab 分析软件对表 2 结果进行分析,从试验结果得到以下回归方程:

$$Y = 49.125 + 2.954X_1 + 0.834X_2 + 0.408X_3 - 20.78X_1^2 - 4.143X_2^2 + 0.888X_3^2 - 0.271X_1X_2 + 0.376X_1X_3 + 1.188X_2X_3$$

表 2 Box-Behnken 试验设计和结果

试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	烟支通风率/%
1	-1	-1	0	38.92
2	1	-1	0	45.01
3	-1	1	0	41.34
4	1	1	0	46.35
5	-1	0	-1	44.68
6	1	0	-1	50.19
7	-1	0	1	44.93
8	1	0	1	51.94
9	0	-1	-1	46.01
10	0	1	-1	45.10
11	0	-1	1	44.27
12	0	1	1	48.10
13	0	0	0	49.52
14	0	0	0	48.85
15	0	0	0	49.00

表 3 响应值方差分析表

来源	自由度	平方和	修正平方和	均方和	F	P	显著性
回归	9	76.696	164.692	18.2991	139.39	0.000	**
线性	3	69.800	76.696	25.5653	194.75	0.000	**
无胶区面积	1	5.563	69.800	69.8001	531.71	0.000	**
烟支质量	1	1.333	5.563	5.5628	42.37	0.001	**
动摩擦系数	1	81.495	1.333	1.3329	10.15	0.024	*
平方	3	12.719	81.495	27.1649	206.93	0.000	**
无胶区面积 * 无胶区面积	1	65.862	12.719	15.9475	121.48	0.000	**
烟支质量 * 烟支质量	1	2.913	65.862	63.3650	482.69	0.000	**
动摩擦系数 * 动摩擦系数	1	6.501	2.913	2.9132	22.19	0.005	**
交互作用	3	0.295	6.501	2.1670	16.51	0.005	**
无胶区面积 * 烟支质量	1	0.565	0.295	0.2946	2.24	0.194	
无胶区面积 * 动摩擦系数	1	5.642	0.565	0.5648	4.30	0.093	
烟支质量 * 动摩擦系数	1	0.656	5.642	5.6418	42.98	0.001	**
残差误差	5	0.410	0.656	0.1313			
失拟	3	0.247	0.410	0.1366	1.11	0.507	
纯误差	2	76.696	0.247	0.1233			
合计	14	69.800	164.692	18.2991	139.39	0.000	

注: \*\* 表示高度显著,  $P < 0.01$ ; \* 表示显著,  $P < 0.05$ 。

由表 3 可见,回归模型的回归项  $P < 0.05$ ,说明模型总体有效.从拟合总效果来看,本试验的失拟值  $> 0.05$ ,说明试验并没有失拟现象,可以利用该方程代替真实的试验进行数据分析.由显著性可以看出:无胶区域面积和烟支质量高度显著,动摩擦系数显著,各参数所对应的平方项也高度显著,所以,3 个参数对卷烟通风率均有显著影响.

**2.2.2 各影响因素及交互作用对烟支通风率的影响** 各影响因素及交互作用对通风率的影响见图 4—图 6.图 4 表明无胶区域面积与动摩擦系数的交互作用对烟支通风率的影响程度相对较弱;图 5 中无胶区域面积参数的曲面更陡,说明其对烟支通风率的影响比烟支质量更显著;图 6 表明烟支质量对通风率的影响高于动摩擦系数.

**2.2.3 最佳响应量的工艺条件优化及效果验证** 为确定最佳工艺参数,利用 Minitab 软件对方程进行最优解,根据 A 牌号卷烟通风率指标 48.0% 的要求,

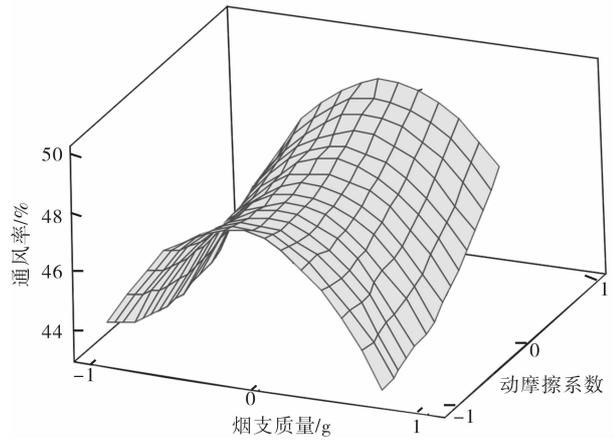


图 6 烟支质量与动摩擦系数对卷烟通风率的响应曲面图

最优解对应的各参数值为烟支质量 0.88 g,接装纸的动摩擦系数 0.36,接装纸的无胶区域面积 165 mm<sup>2</sup>.在该参数条件下进行了 3 次效果验证实验,卷烟通风率平均值为 47.3%,与理论值基本一致,说明试验回归方程可靠.

### 3 结论

本文通过对影响烟支通风率的控制参数进行单因素试验,结合 3 因素 3 水平曲面响应分析法,研究了各工艺参数对烟支通风率的影响.结果表明,烟支质量、接装纸的动摩擦系数、接装纸的无胶区域面积 3 个控制参数,均对卷烟通风率有显著影响,其中,接装纸的无胶区域面积影响最大,烟支质量其次.根据 A 牌号卷烟通风率 48.0% 的指标要求,控制烟支质量为 0.88 g,接装纸的动摩擦系数为 0.36,接装纸的无胶区域面积为 165 mm<sup>2</sup>,能够实现指标的最优控制,说明得到的回归方程模型能够有效指导生产车间进行烟支通风率指标控制的操作.此模型还可以为以后卷烟通风率指标的设置及过程控制提供一定的理论参考.

#### 参考文献:

- [1] 魏玉玲,徐金和,廖臻,等.卷烟材料多因素对卷烟通风率及过滤效果的影响[J].烟草科技,2008(11):9.
- [2] 李翔,尚平平,赵乐,等.接装纸透气度和滤棒吸阻对卷烟烟气细胞毒性的影响[J].烟草科技,2010(11):32.
- [3] 吴志英,李力,李东亮,等.卷烟单支重量、吸阻、通风率与感官质量的关系分析[J].中国烟草科学,2010,31(2):49.
- [4] 冯文,廖臻,徐世涛,等.接装纸激光、静电打孔方式对卷烟烟气影响的对比研究[J].云南大学学报,2010,32(S1):115.

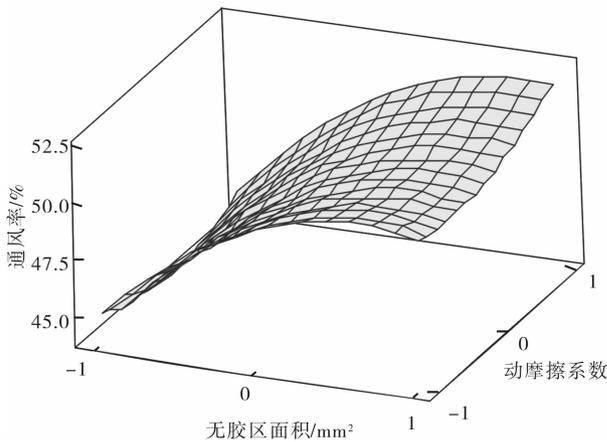


图 4 无胶区域面积与动摩擦系数对卷烟通风率的响应曲面图

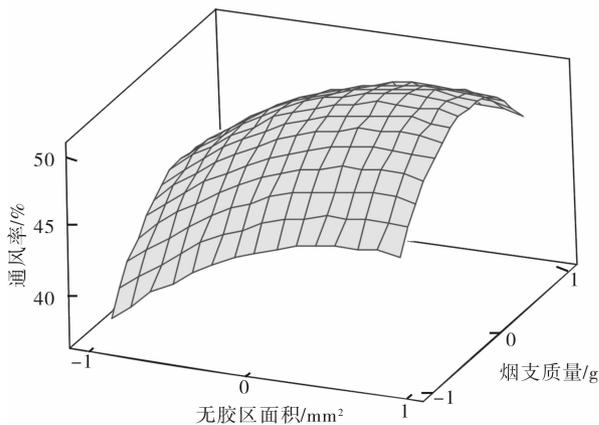


图 5 无胶区域面积与烟支质量对卷烟通风率的响应曲面图

# 基于用户兴趣的协同过滤推荐算法研究

张素智, 苏龙飞

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对现有系统过滤算法在用户兴趣、数据稀疏性方面的不足,提出一种基于用户兴趣的协同过滤推荐算法.该算法引入用户兴趣权重,建立用户-项目评价矩阵,通过聚类分析进行相似性计算,最终得到推荐结果.实验结果表明,本算法能有效地利用用户兴趣,提高推荐质量.

**关键词:**协同过滤;用户兴趣相似度;个性化推荐

**中图分类号:**TP301.6 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.011

## Collaborative filtering recommendation algorithm based on user interest

ZHANG Su-zhi, SU Long-fei

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

**Abstract:** In view of the problem with insufficient of the users interest, data sparsity in filter algorithm system, a collaborative filtering recommendation algorithm based on users interest was proposed. The algorithm introduced the user interest weights, established evaluation user-item matrix, through cluster analysis, makes similarity calculation and finally got the recommended results. The experimental results showed that the algorithm could effectively use the interest of user, and improve the quality of recommendation.

**Key words:** collaborative filtering; the user interest similarity; personalized recommendation

## 0 引言

Web技术的快速发展使电子商务在大众生活中的应用越来越广泛.随着人们对信息需求量的增加,各网络服务商研究的重点开始转向根据用户自身已有的网络信息来推荐其感兴趣的资源.其推荐算法在推荐系统中是重中之重.

目前的推荐算法有:基于人口统计学、混合推荐、基于内容、基于知识和协同过滤等算法.传统的协同过滤算法最大的缺陷在于没有关注用户兴趣是在不断地发生变化,而片面地强调用户间访问行为的相似性.在实际应用中,在不同的时间段内用

户对商品信息的需求是大不相同的.

本文拟研究协同过滤推荐算法,其基本思路是通过汇集用户最近邻居,综合其对 User-Item 矩阵评价,通过推荐算法给用户最合适的推荐,它根据群体用户的评价和反馈向当前活动用户进行推荐,通过发现用户与用户之间、资源项目与项目之间存在的关系,来向当前用户推荐其可能感兴趣或有价值的资源对象项目<sup>[1]</sup>.

## 1 传统的协同过滤算法

目前应用比较普遍的推荐算法是基于用户的协同过滤算法.其核心是对比目标用户和“最近邻

收稿日期:2013-09-05

基金项目:国家自然科学基金项目(61201447)

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

居”对项目的评价,寻找相似性规律.

### 1.1 建立用户信息

评价矩阵  $R^{[2]}$  为  $m \times n$  阶矩阵,  $m$  为用户数量,  $n$  为项目的数量,  $R = [r_{ij}]$ , 元素  $r_{ij}$  表示用户  $i$  对项目  $j$  的兴趣评分. 表 1 为用户 - 项目兴趣评分矩阵. 通过对比,  $R_{ij}$  值与平均绝对偏差 (MAE) 相反, 其值越大, 说明用户对项目的兴趣度越高.

表 1 用户 - 项目兴趣评分矩阵

用户	$I_1$	...	$I_j$	...	$I_R$
$U_1$	$R_{1,1}$	...	$R_{1,j}$	...	$R_{1,R}$
$U_2$	$R_{2,1}$	...	$R_{2,j}$	...	$R_{2,R}$
...	...	...	...	...	...
$U_i$	$R_{i,1}$	...	$R_{i,j}$	...	$R_{i,R}$
...	...	...	...	...	...
$U_m$	$R_{m,1}$	...	$R_{m,j}$	...	$R_{m,R}$

### 1.2 用户相似度计算

用户  $i$  与用户  $j$  的相似性计算步骤如下: 1) 计算获得用户  $i, j$  评分的所有项目; 2) 通过相似性计算用户  $i$  与用户  $j$  之间的相似度, 记为  $sim(i, j)$ . 计算相似性的算法一般有以下 3 种:

#### 1) 余弦相似性

把用户  $i$  与用户  $j$  在  $n$  维项目上的评分记为  $I$  和  $J$ , 则它们之间的相似性为

$$sim(i, j) = \cos(I, J) = \frac{I \cdot J}{\|I\| \times \|J\|}$$

分子为  $i$  和  $j$  在  $n$  维项目上评分的积, 分母为  $i$  和  $j$  在  $n$  维项目上评分向量模的积.

#### 2) 相关相似性 (Pearson 相似性)

训练用户  $i$  和用户  $j$  共同评分过的项目集, 使用 Pearson 相关系统  $P_{ij}$  表示, 用户  $i$  与用户  $j$  之间的相似性通过相关系数度量

$$sim(i, j) = \frac{\sum_{a \in I_{ij}} (R_{i,a} - \bar{R}_i)(R_{j,a} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum_{a \in I_{ij}} (R_{i,a} - \bar{R}_i)^2} \sqrt{\sum_{a \in I_{ij}} (R_{j,a} - \bar{R}_j)^2}}$$

#### 3) 修正的余弦相似性<sup>[3]</sup>

在本方法中不考虑不同用户的兴趣评分问题, 用修正的余弦相似性度量方法改善上述缺陷, 减去用户对项目的平均评分. 把用户  $i$  和用户  $j$  共同评分过的项目集合设为  $I_{ij}$ ,  $I_i$  和  $I_j$  分别表示用户  $i$  和用户  $j$  在  $n$  维项目上评分, 则用户  $i$  与用户  $j$  之间的相似性

$$sim(i, j) = \frac{\sum_{a \in I_{ij}} (R_{i,a} - \bar{R}_i)(R_{j,a} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum_{a \in I_i} (R_{i,a} - \bar{R}_i)^2} \sqrt{\sum_{a \in I_j} (R_{j,a} - \bar{R}_j)^2}} \quad \textcircled{1}$$

### 1.3 推荐的产生

1) 用户对任意项目  $n$  的偏爱度

设用户  $i$  的最近目标邻居集合为  $U_i$ , 则用户  $i$  对项目  $j$  的预测评分为<sup>[4]</sup>

$$p_{i,j} = \bar{R}_i + \frac{\sum_{n \in U_i} sim(i, n) * (R_{i,j} - \bar{R}_n)}{\sum_{n \in U_i} sim(i, n)}$$

2) Top - N 推荐

分别计算用户  $i$  对不同项目的兴趣度后, 取兴趣度权值最高的、并且不在用户兴趣已评分的项目集中的  $N$  个项作为 Top - N 推荐<sup>[5]</sup>.

综上所述, 传统的相似性算法由于本身的缺陷, 当用户评分数据数据量稀疏的时候并不能有效地做出判断, 计算用户之间的相似性. 但是, 修正的余弦相似性度量算法可以有效地解决这一问题, 与传统算法相比, 其用户的兴趣度评分并不影响其相似性计算, 能更加有效、准确地得出结果.

## 2 基于用户兴趣的协同过滤推荐算法

本算法定义用户和项目分别为  $i$  和  $j$ , 用户  $i$  对项目  $j$  的评分设为  $P(i, j)$ .  $i$  的用户集为  $U_i$ ,  $j$  的用户集为  $U_j$ ,  $i$  为  $U_i$  中的元素. 通过比较计算当  $i$  对于  $U_j$  所占阈值超过正常平均值, 则说明用户  $i$  对项目  $j$  的兴趣度高, 否则相反. 因此定义  $P(i, j)$  来衡量用户  $i$  对项目  $j$  的感兴趣程度<sup>[6]</sup>, 即

$$P(i, j) = \frac{\sum_{n \in U_j} sim(i, j)}{|U_j|}$$

本算法引入用户兴趣权重, 以便更好地记录、区分用户兴趣. 通过分析用户长期记录文件, 将用户兴趣分类, 之后计算用户单个兴趣所占总类比例, 赋予权值.

改进的推荐算法流程图见图 1.

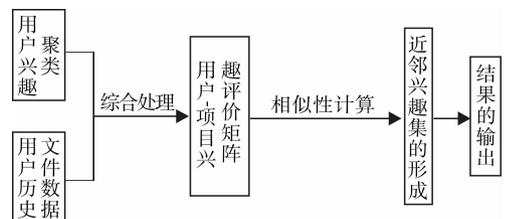


图 1 基于用户兴趣的协同过滤推荐算法流程图

改进的算法步骤如下:

- 1) 使用修正的余弦相似性, 计算用户兴趣的相似度权值;
- 2) 根据用户邻居数, 计算用户 Top - N 推荐;

3) 设定用户  $U_i$ , 根据 Pearson 公式计算用户兴趣度  $P(i, j)$ , 聚类用户兴趣值;

4) 分析用户邻域, 利用 XQ, 计算 User - Item 兴趣矩阵;

5) 输入矩阵  $R$ , 选择 User 和邻居, 定义为  $I, J$ ;

6) 将矩阵转换为数据库;

7) 利用相似性公式 ① 修正余弦;

8) 由步骤 5) 计算出用户的相似性, 通过反向化简得到用户评分值;

9) 通过公式预测  $i$  对  $j$  的评分值

$$p_{i,j} = \bar{R}_i + \frac{\sum_{n \in U_i} \text{sim}(i, n) * (R_{i,j} - \bar{R}_n)}{\sum_{n \in U_i} \text{sim}(i, n)}$$

10) 由步骤 7) 评分预测公式来预测用户  $i$  对项目  $j$  的评分, 进行 Top -  $N$  推荐。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验数据集和度量标准

实验采用 MAE 公式<sup>[7]</sup>

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - Q_i|}{N}$$

计算上述算法的推荐质量. 此公式计算结果与推荐成反比, 结果越高, 推荐质量越差. MAE 与用户邻居数量的多少有非常大的关联. 由公式可知,  $N$  越大, 用户邻居数越多, 所得 MAE 越小, 结果越明显. 但是, 邻居数量超过一定阈值, 则会对结果准确率产生不良影响. 所以邻居数的选取非常重要. 本实验数据选取 30—40 为最佳范围。

本实验选取家庭用户日常上网浏览记录为测试集. 为尽可能获取用户兴趣度, 构建用户的兴趣矩阵, 使用训练集作为用户兴趣矩阵, 本实验采集用户一个季度的网路日志文件进行分析处理, 其中用户浏览记录 1 800 条, 浏览网站 500 个, 评论数 400 条。

### 3.2 结果分析

根据实验数据, 采用改进的推荐算法分析计算, 建立兴趣模型, 进行 Top -  $N$  推荐, 综合比较用户推荐和满意程度, 使用 MAE 算法对改进的基于用户兴趣的协同过滤推荐算法和传统的协同过滤推荐算法进行比较, 结果见图 2。

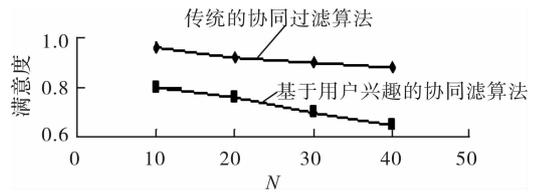


图2 算法实验结果

由图 2 可知, 基于用户兴趣的协同过滤推荐算法 MAE 值较传统的要小很多, 因此可得出结论: 改进的推荐算法准确率明显高。

## 4 结论

本文针对传统的协同过滤技术不能很好地反映用户兴趣情况, 无法解决数据稀疏性等问题, 研究了基于用户兴趣的协同过滤推荐算法. 该算法首先调取用户历史文件信息进行汇总, 然后建立用户兴趣模型, 在兴趣模型基础上建立用户 - 项目矩阵. 本文引入用户兴趣权重, 使用改进的推荐算法, 通过聚类缩小用户兴趣范围进行推荐. 实验结果表明, 本算法可以优化推荐系统的准确性, 可更有效地利用用户兴趣, 解决系统数据稀疏性问题。

### 参考文献:

- [1] 徐红, 彭黎, 郭艾戴. 基于用户多兴趣的协同过滤策略改进研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21: 75.
- [2] 彭玉. 基于用户个人特征的多内容项目协同过滤推荐[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [3] Sarwar B, Karypis G, Konstan J, et al. Item-based collaborative filtering recommendation algorithms[C]//Proceedings of the Tenth International World Wide Web Conference, [s. l.]: Springer, 2001: 285 - 295.
- [4] 蔡浩, 贾宇波, 黄成伟. 结合用户信任模型的协同过滤推荐方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(35): 148.
- [5] 严冬梅, 鲁城华. 基于用户兴趣度和特征的优化协同过滤推荐[J]. 计算机应用研究, 2012, 29: 497.
- [6] 刘旭东, 陈德人, 王惠敏. 一种改进的协同过滤推荐算法[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2010, 32(4): 31.
- [7] Zhang B Q. A collaborative filtering recommendation algorithm based on domain knowledge[J]. Computer Engineering, 2005, 31(21): 7.

# 协同过滤在知识推荐中的应用

马彩娟<sup>1</sup>, 曹林芬<sup>2</sup>

(1. 河南财经政法大学 数学与信息科学系, 河南 郑州 450002;

2. 河南师范大学 数学学院, 河南 新乡 453007)

**摘要:**将电子商务中的协同过滤推荐算法改进之后应用到知识推荐系统中,通过计算学习者的学习目标、学习背景和认知能力等信息的相似性进行用户聚类,然后使用协同过滤算法对相同聚类簇内的用户进行学习资源的推荐.实验结果表明,该方法可提高推荐的准确度和推荐效率,增强学习者满意度;传统协同过滤推荐中的新用户问题、实时性问题在知识推荐过程中也同样存在,具体解决方法将作为未来研究的主要内容.

**关键词:**知识推荐;聚类;协同过滤;个性化在线学习

**中图分类号:**TP311 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.012

## Application of collaborative filter in knowledge recommendation

MA Cai-juan<sup>1</sup>, CAO Lin-fen<sup>2</sup>

(1. College of Math and Information Science, He'nan University of Economics and Law, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Math, He'nan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** To introduce modified collaborative filtering recommendation algorithm to knowledge recommendation system, the user cluster was carried out by calculating the similarity of learning objectives, background and cognitive competence between the different learners and then completing recommendation using collaborative filtering algorithm in the user cluster. The results showed that this method could improve the accuracy and efficiency of recommendation, and could meet user's needs. In the process of knowledge recommendation, it also exists new user problem, real-time problem similar to traditional collaborative filtering recommendation. The specific solution method will be the main content of future research.

**Key words:** knowledge recommendation; user cluster; collaborative filter; on-line adaptive learning

## 0 引言

推荐系统主要目的在于解决用户与对用户有用的信息之间错失的问题,即帮助用户找到对自己有用的信息.在线学习的推荐系统,需要充分考虑学习者的学习目的和认知程度,并对学习者的学习状态进行跟踪和及时更新,才能够为学习者提供更

加个性化的学习内容,提高推荐的准确度<sup>[1]</sup>. P. Brusilovsky<sup>[2]</sup>开发了自适应网络学习系统,解决了传统的“以一对多”的学习方式. Y. Shang等<sup>[3]</sup>主要从学习者的学习习惯、背景知识等信息出发,构建了IDEAL学习系统.姜强等<sup>[4]</sup>从用户学习风格和认知水平2主要因素构建用户模型,实现了用户模型动态变化.杨现民等<sup>[5]</sup>提出一种新的泛在环境下进

收稿日期:2013-03-21

基金项目:河南省科技厅重点科技攻关项目(112102210199)

作者简介:马彩娟(1983—),女,河南省叶县人,河南财经政法大学硕士研究生,主要研究方向为智能推荐.

行学习资源信息建模的方法. 以上的知识推荐方法缺点在于: 对学习资源模型的创建只基于某个方面; 学习资源对象建模复杂; 对用户反馈信息重视不足. 目前的个性化学习研究中, 基于电子商务中的推荐算法实现知识推荐的尝试还不多, 已经存在的研究有采用内容过滤的知识推荐和基于知识相似度的推荐<sup>[6-7]</sup>. 本文拟将电子商务中的协同过滤技术改进后应用于知识推荐, 根据学习者的信息实现个性化推荐.

## 1 学习者模型构建

### 1.1 学习者聚类推荐模型

偏好相似的学生总是对学习资源体现出相似的需求, 因此可以通过聚类算法形成相似的学生簇, 对同一群内的学生, 根据他们对学习资源做出的评价结果进行资源推荐, 大大减少资源组织的繁琐, 提高学习资源的复用率、学生学习的自适应性和学习效率. 本文构建的知识推荐算法就是通过学生在学习过程中的操作行为和资源评价, 充分考虑用户的学习目标、学习风格、知识背景和认知能力, 对学习资源进行特征聚类, 然后使用协同过滤算法, 向学习者推荐新的符合学习者偏好的资源对象. 学习者聚类推荐模型见图 1.

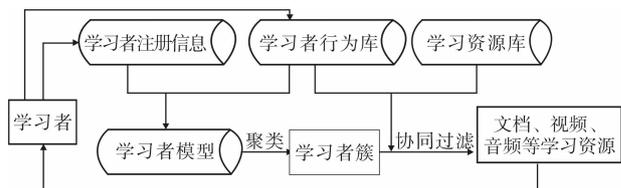


图 1 学习者聚类推荐模型图

### 1.2 学习者特征提取

根据 CELTS - 11 学习者模型规范<sup>[8]</sup>制订学习者注册信息, 内容包括学习者个人信息、学业信息、偏好信息、绩效信息等; 根据对学习资源推荐的重要性, 选择学生学习目标、学习背景、认知程度、学习风格 4 个指标, 使用向量空间建立学习者模型

$$\text{user}M(u) = [v_1(t), v_2(b), v_3(c), v_4(s)] \quad (1)$$

其中,  $t, b, c, s$  分别表示学习者的学习目标、学习背景、认知程度和学习风格属性指标; 而  $v_1, v_2, v_3, v_4$  分别表示 4 个属性指标对应的取值. 此学习者模型既可以基于学习者的特征进行个性化推荐, 又方便学习者聚类, 成为实现学习资源的共享和重用的基础.

每个学习者的学习风格不尽相同. 基于信息加工、感知、输入、理解 4 个方面, 可以将学习者分为 4 组 8 种类型, 具体可参考所罗门学习风格度量表. 这 4 个组分别是活跃型与沉思型、感悟型与直觉型、视觉型与言语型、序列型与综合型. 依据学习者学习行为的记录数据 (如用户查阅学习资料的类型、学习时间、浏览次数等信息), 使用文献 [4] 提供的学习风格估算规则和算法推断学习者的学习风格.

学习目标和背景可以以问卷的形式对学习资源进行调查获取<sup>[9]</sup>. 学习目的: A) 简单了解概念, B) 一般掌握考试, C) 深入掌握应用; 学习背景: A) 无, B) 简单了解, C) 要点不理解, D) 基本理解, E) 掌握很好.

认知程度可以根据学习者学习活动中的知识项测试结果估算. 评价等级  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\} = \{\text{优秀, 良好, 中等, 及格, 较差, 很差}\}$ .  $v_1 = \{S(u) \mid 90 < S(u) < 100\}$ ,  $v_2 = \{S(u) \mid 80 < S(u) < 90\}$ ,  $v_3 = \{S(u) \mid 70 < S(u) < 80\}$ ,  $v_4 = \{S(u) \mid 60 < S(u) < 70\}$ ,  $v_5 = \{S(u) \mid 40 < S(u) < 60\}$ ,  $v_6 = \{S(u) \mid 0 < S(u) < 40\}$ ,  $S(u)$  为用户  $u$  的知识项测试分数值 (0—100 分).

### 1.3 用户聚类

在提取学习者个人及学习相关信息之后, 根据式①为每个学习者创建一个学习者模型, 通过欧几里得距离来计算学习者对象之间的距离

$$d_2(u_x, u_y) = \|u_x - u_y\|_2 = \left[ \sum_{k=1}^p |u_{xk} - u_{yk}|^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

其中,  $u_x$  和  $u_y$  分别表示 2 个不同的学习者,  $u_{xk}$  和  $u_{yk}$  分别表示学习者的属性特征指标 (学习目标、学习背景、认知程度) 的取值,  $d_2(u_x, u_y)$  为 2 个学习者之间的距离.

通过凝聚的层次聚类法采用自底向上的策略对用户进行聚类, 将相似学习者形成一个聚类簇. 簇间合并遵循的距离准则为最小距离簇合并原则. 凝聚的层次聚类过程如图 2 所示.

为了表示不同的属性指标在距离计算中的重要性, 可以为每个属性取值添加一个权重  $W_k$ , 由专家或者老师指定<sup>[10]</sup>, 使用加权的欧几里得距离形式

$$d_2(u_x, u_y) = \|u_x - u_y\|_2 = \left[ \sum_{k=1}^p w_k |u_{xk} - u_{yk}|^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

簇间合并的最小距离度量方法为

$$d_{\min}(C_i, C_j) = \min_{u_x \in C_i, u_y \in C_j} \|u_x - u_y\|$$

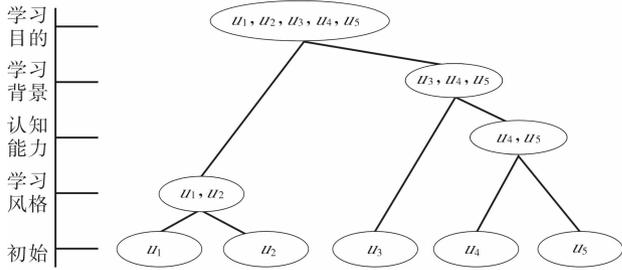


图2 凝聚的层次聚类

其中,  $C_i$  和  $C_j$  为 2 个聚类簇,  $u_x$  和  $u_y$  分别为聚类簇  $C_i$  和  $C_j$  中的学习者对象,  $\|u_x - u_y\|$  表示对象之间的距离.

### 1.4 用户 - 知识项评价矩阵

协同过滤的思想是, 基于存储于数据库中的用户历史行为数据, 预测用户对目标项目的行为. 基于这种思想, 将学习者对知识项的评价数据形成学习者知识项二维评价表 (见表 1, 表中  $R_{i,j}$  表示用户  $i$  对知识项  $j$  的评价值, 其中  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ . 具体评价值  $R_{i,j}$  可以根据需要用 3—5 个整数等级值或者 1—5 之间的实数表示). 此评价表中的学习者评价数据只是提取聚类之后与目标学习者相似的学习者评价数据.

表1 用户 - 知识评价表

用户	$I_1$	$I_2$	...	$I_j$	...	$I_n$
$U_1$	$R_{1,1}$	$R_{1,2}$	...	$R_{1,j}$	...	$R_{1,n}$
$U_2$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	...	$R_{2,j}$	...	$R_{2,n}$
...	...	...	...	...	...	...
$U_i$	$R_{i,1}$	$R_{i,2}$	...	$R_{i,j}$	...	$R_{i,n}$
...	...	...	...	...	...	...
$U_m$	$R_{m,1}$	$R_{m,2}$	...	$R_{m,j}$	...	$R_{m,n}$

## 2 协同过滤推荐

通过将目标用户的历史选择以及行为数据值和其他用户的历史行为值进行比较, 基于用户的协同过滤找出与目标用户具有相似兴趣的用户, 形成邻居用户 ( $NU$ ), 然后根据邻居用户对目标项目的兴趣程度预测目标用户的偏好并决定推荐结果. 学习者的邻居, 通过计算与目标用户在同一个聚类簇内的其他用户的评价矩阵与目标用户的评价矩阵的相似度值来衡量, 根据需要找出相似度值最大的若干个. 余弦相似性计算不同学习者相似性的公式为

$$usim(u_x, u_y) = \frac{\overline{u_x} \cdot \overline{u_y}}{\|u_x\| \times \|u_y\|} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{u_x,i} \cdot R_{u_y,i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n R_{u_x,i}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n R_{u_y,i}^2}}$$

其中,  $R_{u_x,i}, R_{u_y,i}$  分别表示用户  $u_x$  和用户  $u_y$  对项目  $i$  的评分.

目标学习者对目标知识项的兴趣度值计算公式为

$$P_{u_x,j} = \overline{R_{u_x}} + \frac{\sum_{u_y \in NU} usim(u_x, u_y) \times (R_{u_y,j} - \overline{R_{u_y}})}{\sum_{u_y \in NU} usim(u_x, u_y)}$$

其中,  $usim(u_x, u_y)$  表示当前用户  $u_x$  与某一邻居用户  $u_y$  的相似度,  $\overline{R_{u_x}}$  表示用户  $u_x$  对所有项目的评价平均值,  $NU$  是当前用户  $u_x$  的邻居用户. 选择兴趣度值最大的前  $N$  项作为推荐结果, 其值为用户  $u_x$  评价过的项目的平均值与邻居用户对目标项目  $j$  的评价值.

## 3 实验

### 3.1 实验设计

本文以 Java 语言程序设计课程为例, 为学习者安排一项关于数组的学习任务, 学习资源包括介绍数组的文本资料、学习视频、学习资料对应的案例以及测试题目. 模拟实验中, 通过问卷调查, 了解学习者学习目标和背景之后, 按照学习目标、学习背景和认知程度的不同将学习者聚集为 3 类: 1) B - B -  $v_5$  类, 学习目的为考试, 有简单学习背景而认知程度为  $v_5$  等级的学习者聚类人数为 60 人; 2) B - C -  $v_4$  类, 学习目的为考试, 要点不理解而认知程度为  $v_4$  等级的学习者聚类人数为 100 人; 3) C - D -  $v_2$  类, 学习目的为应用, 要点基本理解但深度不够而认知程度为  $v_2$  等级的学习者聚类人数为 40 人. 在此课程中, 将学习者聚类指标的权值分别指定为: 学习目的  $W_1 = 0.5$  为最大, 认知程度  $W_2 = 0.35$  为其次, 学习背景  $W_3 = 0.15$  为最小, 在这里将学习风格的权值设为 0, 因为在此实验中, 学习风格影响的是学习不同类型学习项的先后顺序.

使用文中的推荐算法进行知识推荐, 学习者按照推荐的结果完成知识项的学习并对知识项进行评价. 在此评价结果基础上, 将推荐算法预测的评

价结果与学习者评价进行对比来衡量推荐结果的有效性和准确性,学习者对资源学习项评分预测的准确度指标可以通过  $RMSE$  来度量.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I'_i)^2}{n}}$$

其中,  $I_i$  为学习者对知识项  $i$  的实际评分,  $I'_i$  是算法预测评分,  $n$  为知识项的个数.

### 3.2 实验结果分析

为了获得推荐结果的满意度,通过问卷形式对模拟实验的学习者进行调查,以获取学习者对推荐知识项学习之后的感受,并将推荐算法使用聚类之前的协同过滤和实验聚类之后的协同过滤的推荐结果进行对比. 3种学习者聚类的推荐结果分别如图3—图5所示. 由此可以看出: 1)对学习者的目的、背景、认知能力聚类之后,利用协同过滤方法所做的推荐准确度更高; 2)目的和认知能力较高的学习者,对于推荐结果的满意度相对较低.

## 4 结语

本文将电子商务中的协同过滤推荐算法改进之后应用到知识推荐系统中,通过计算学习者的学习目标、学习背景和认知能力等信息的相似性进行用户聚类,然后使用协同过滤算法对相同聚类簇内的用户进行学习资源的推荐. 实验结果表明,该方

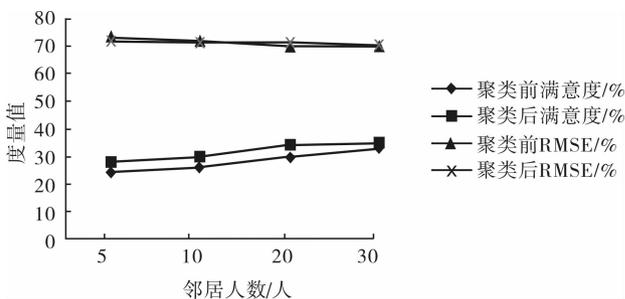


图3 B - B -  $v_5$  推荐结果

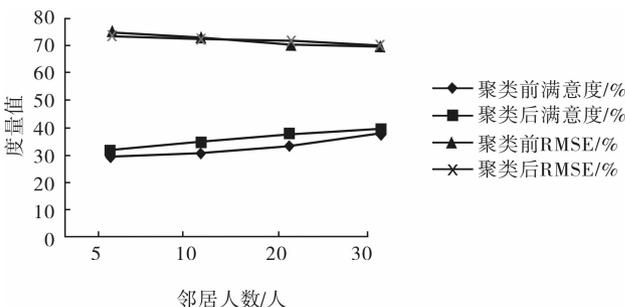


图4 B - C -  $v_4$  推荐结果

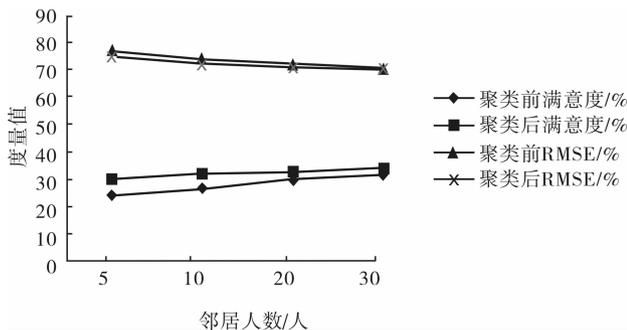


图5 C - D -  $v_2$  推荐结果

法可提高推荐的准确度和推荐效率,增强学习者满意度. 对于此推荐方法,下一步需要解决的问题是: 1)协同过滤中所面临的新用户问题,即如果一个学习者从未对任何学习资源进行过评价,协同过滤的过程就无法完成; 2)对于不同科目的学习来说,学习者聚类指标的权值不应该完全相同,因为在有些科目里学习目的是最重要的聚类指标,而在有些科目里学习背景是最重要的,可以通过添加学习者多维评价过程来实现; 3)根据学习者评价结果实时更换学习项,给学习者推荐新的更符合偏好的知识项.

### 参考文献:

- [1] 石琳,王刊良. 网上购物与网上学习中的个人化推荐系统的比较[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(S1):1030.
- [2] Brusilovsky P. From adaptive hypermedia to the adaptive web[J]. Communications of the ACM,2002,45(5):30.
- [3] Shang Y, Shi H C, Chen S S. An intelligent distributed environment for active learning[J]. ACM Journal of Educational Resources in Computing,2001,1(2):308.
- [4] 姜强,赵蔚,杜欣,等. 基于用户模型的个性化本体学习资源推荐研究[J]. 中国电化教育,2010(5):106.
- [5] 杨现民,余胜泉. 泛在学习环境下的学习资源信息模型构建[J]. 中国电化教育,2010(9):72.
- [6] 庄景明,王明文,叶茂盛. 基于内容过滤的农业信息推荐系统[J]. 计算机工程,2012,38(11):38.
- [7] 周明建,廖强. 基于属性相似度的知识推送[J]. 计算机工程与应用,2011,47(32):135.
- [8] 现代远程教育技术标准化委员会(CLTSC). CELTS-11学习者模型规范[EB/OL]. (2002-02-06)[2013-01-06]. <http://www.edu.cn/html/keyanfz/yuanchengjiaoyu.shtml>.
- [9] 刘宇,解月光. 动态学生模型与智能支持服务研究[J]. 中国电化教育,2006(10):94.
- [10] 李雄飞,董元方,李军,等. 数据挖掘与知识发现[M]. 北京:高等教育出版社,2010.

# 基于锚节点等边三角形分布的 质心定位算法研究

邹东尧, 孙辉, 郑道理, 吕赫

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对正六边形网格定位算法定位误差不均匀和正方形网格定位算法冗余节点过多等问题,提出了一种新的基于锚节点等边三角形分布的质心定位算法.该算法运用网格划分理论,验证这种网格划分的合理性;通过实验,探索各项参数对于这种新算法的影响.仿真结果表明,该算法在结构简单、硬件投入和功耗相对较少的情况下,提高了节点定位的精确度.但该算法在锚节点数量和计算量上都有所增加,有待下一步改进.

**关键词:**无线传感网络;等边三角形分布;质心定位;节点定位

**中图分类号:**TP393 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.013

## Research of centroid localization algorithm based on the anchor nodes equilateral triangular distribution

ZOU Dong-yao, SUN Hui, ZHENG Dao-li, LV He

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

**Abstract:** Aiming at the problems of error unevenness in regular hexagon grid location algorithm and nodes redundancy in the square grid positioning algorithm, a new centroid localization algorithm based on the anchor nodes equilateral triangular distribution was proposed. The algorithm used the theory of meshing to verify the rationality of the grid and explored the effects of parameter on this new algorithm through experiments. The simulation results showed that the algorithm in the case of simple structure, relatively small hardware investment and power consumption, improved node localization accuracy. However, the number of anchor nodes and computation have increased in this algorithm, subject to future improvements.

**Key words:** wireless sensor network; equilateral triangle distribution; centroid localization; node localization

## 0 引言

随着无线通信技术、嵌入式计算技术以及传感器技术的飞速发展与日渐成熟,无线传感器网络的研究与应用越来越受到人们的关注.无线传感器网

络是由大量具有感知、计算和通信能力的微型传感器以无线形式构成的自组织网络,它通过节点间的分工协作,实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的数据,并对这些数据进行处理,从而获得详尽而准确的信息,最后传送给用

户<sup>[1]</sup>. 无线传感器网络具有低功耗、低成本、自组织的能力,能够根据环境的变化自动进行配置,具有动态可重构性等特点,可广泛应用于军事领域、精细农业、环境监测<sup>[2]</sup>、智能家居、城市交通等方面. 作为无线传感网络应用领域重要共性支撑技术之一的节点定位技术成为研究的焦点. 定位算法从定位手段上分为2大类:基于测距的定位算法(range-based)和无需测距的定位算法(range-free). 虽然基于测距的定位算法的三边测量法、三角测量法、极大似然估计法<sup>[3]</sup>等能够实现较精确定位,但对无线传感器节点的硬件要求高. 出于硬件成本、能耗等考虑,人们提出了无需测距的定位算法,如质心算法、DV-HOP算法、Amorphous算法、APIT算法等<sup>[4]</sup>,它们不需要测量节点间的绝对距离或方位,可降低对节点硬件的要求.

此外,无线传感网络的传感节点通常是由电池供电,由于其工作环境的特殊性,供电电池一般情况下不可充电. 因此,高效率地使用传感节点和有限的电池能源对传感器网络来说十分关键. 这样不仅能够有效地降低网络成本,同时也可以大大延长整个网络的使用寿命. 为此,人们提出了正方形的网格划分方法<sup>[5]</sup>,但是由于其重叠覆盖面积大,具有冗余节点多的弊端,增加了硬件成本和功耗,后来人们提出了正六边形的网格划分方法<sup>[6]</sup>,这种网格划分方法能够用最少的节点实现对给定区域的无缝覆盖,有效降低硬件成本和功耗. 但是这种网格划分造成了锚节点分布的不均匀,从而影响了定位的精度:有的区域锚节点密度高,定位精度高;有的区域锚节点密度低,定位精度低.

综合定位精度、硬件成本、能耗等方面的考虑,本文拟提出一种新的基于锚节点等边三角形分布的质心定位算法,以期减少冗余节点,解决正六边形网格划分锚节点分布不均匀的问题.

## 1 网格划分理论

### 1.1 理论基础

在无线传感网络区域内、在节点传感半径有限的情况下,用较少的节点实现对给定区域的无缝覆盖,实质上就是使该区域内的每个节点所覆盖的有效面积达到最大,尽量减少辐射圆的重叠部分,充分利用每一个圆面积.

利用几何证明可以得出<sup>[7]</sup>:3个半径相同的圆

两两相交,用圆心做顶点的三角形是正三角形;当其边长是圆半径的 $\sqrt{3}$ 倍时,圆域的面积最大,相交部分最小,如图1所示. 这是3个圆两两相交构成的无缝拓扑面积最大的情况.

无线传感网络节点的传感覆盖范围是以节点为圆心、以 $R$ 为传感半径的圆. 依据这个理论,对传感网络的节点进行布置. 假设一给定的区域 $S(L * W)$ 内,把传感器节点按照如图2a)的方式进行排列,圆代表传感半径为 $R$ 的辐射圆.

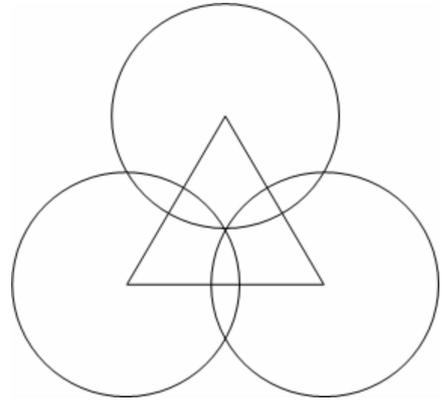
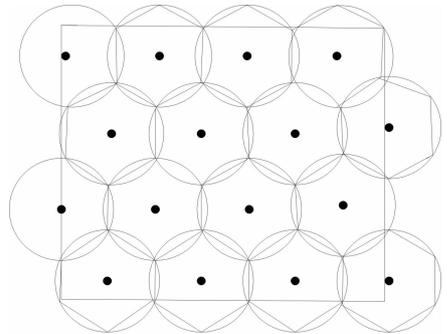
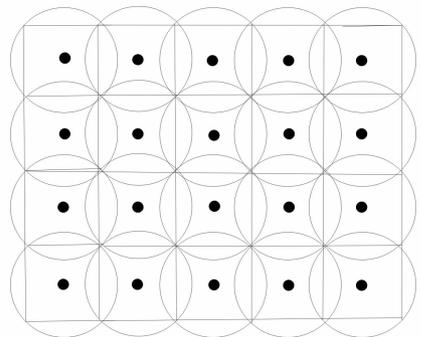


图1 半径相同的圆两两相交



a) 正六边形网格划分



b) 正方形网格划分

图2 网格划分示意图

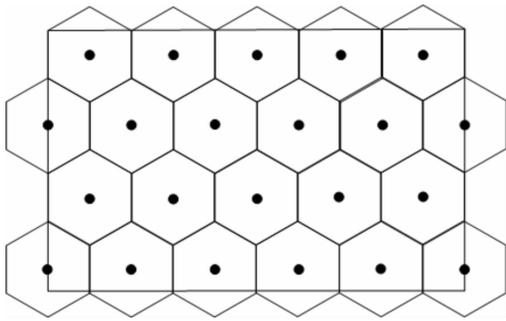


图3 正六边形网格划分

由以上理论可知,相邻传感节点之间的距离都是传感半径的 $\sqrt{3}$ 倍.相邻节点以 $R$ 为半径的辐射圆相交,每3个圆两两相交于一点,相交部分最小;它们的圆心,也就是传感节点构成长为 $\sqrt{3}R$ 的等边三角形.此时,每个辐射圆的面积得到最大利用,并且实现了对给定区域 $S(L * W)$ 的无缝覆盖.

### 1.2 网格划分

在图2a)所示的网格划分中,把圆相交的部分用线段代替,即用正六边形替换圆形,如图3所示.

圆形简化成正六边形,这种形状接近于圆形理想功率的覆盖区域,且在正六边形之间无缝隙也无重叠部分,非常适合于区域规划与网格划分.按照这样的方法对监测区域进行网格划分,只要确定传感器节点的传感半径,就可以使用最少的节点实现对目标区域的监测.

根据以上理论将锚节点设置为正六边形拓扑结构对待测区域的目标进行位置检测,建立平面坐标系如图4所示.

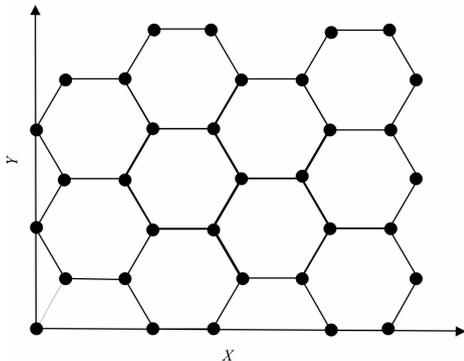


图4 正六边形网格划分坐标图

显然,靠近正六边形顶点的区域锚节点相对密集,靠近正六边形中心的区域锚节点相对稀疏.这样,当未知节点靠近正六边形顶点时定位误差相对较小,当未知节点靠近正六边形中心时定位误差就

会较大.为了解决这一问题,本文提出将锚节点的分布设置为正三角形,如图5所示.

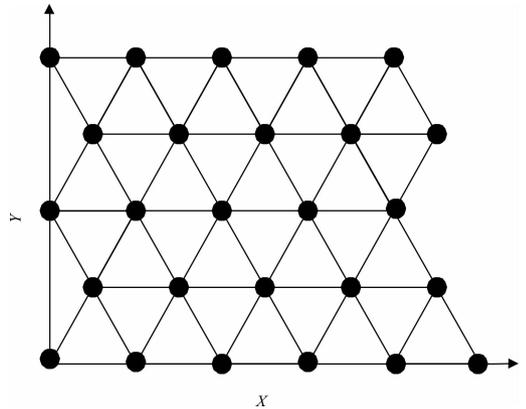


图5 等边三角形网格划分坐标图

按照这种方法,锚节点均匀地分布在待测区域内,能够有效地解决锚节点按照正六边形分布进行定位造成误差不稳定的弊端.

## 2 算法实现

### 2.1 锚节点的分布

锚节点的分布如图6所示.锚节点的坐标是已知的,假设锚节点 $P_i (i = 1, 2, 3 \dots)$ 的坐标分别为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3) \dots (X_i, Y_i), (x, y)$ 是盲节点坐标.

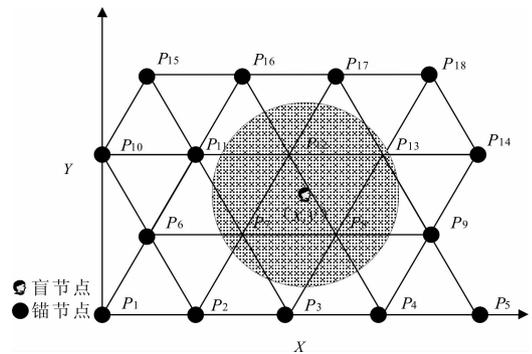


图6 锚节点正三角形拓扑结构图

### 2.2 基于锚节点正三角形分布的质心定位算法

该定位算法的实质是,在某一特定区域,盲节点遍历判断该区域内的所有锚节点是否在以盲节点为圆心、以搜索半径 $R$ 为半径的圆内:如果是,则将该锚节点保存起来;如果不是,则放弃.然后计算保存起来的锚节点坐标的算术平均值,即为盲节点的坐标<sup>[8]</sup>.

以盲节点 $(x, y)$ 为圆心,以搜索半径 $R$ 为圆半

径做圆,如图7所示.那么,  $P_7, P_8, P_{12}, P_{13}$  即为选中的锚节点,此时盲节点的位置坐标可估计为  $(X, Y)$ , 其中

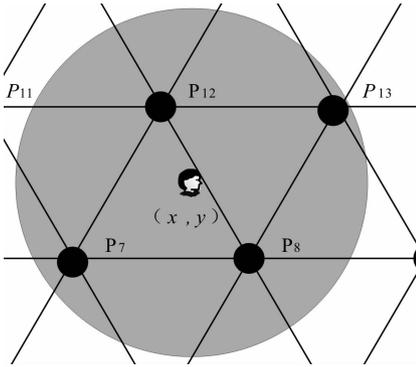


图7 搜索半径  $R$  内的锚节点

$$\begin{cases} X = (X_7 + X_8 + X_{12} + X_{13}) / 4 \\ Y = (Y_7 + Y_8 + Y_{12} + Y_{13}) / 4 \end{cases}$$

为不失一般性,假设所做圆内锚节点数为  $M$ , 且其坐标为  $(X_i, Y_i) (i = 1, 2, 3, \dots, M)$ , 那么此时盲节点的坐标可以表示为

$$\begin{cases} X = \sum_{i=1}^M X_i / M \\ Y = \sum_{i=1}^M Y_i / M \end{cases}$$

### 3 仿真实验

为了进一步了解各项参数对这种定位算法的影响,利用 Matlab 建立一个  $100 \times 100$  的仿真环境,其中,锚节点按照边长为 1 的正三角形拓扑结构分布.假设盲节点按照  $y = 5 \sin\left(\frac{\pi x}{5}\right) + 45$  的轨迹在待测区域中运动,采样间隔  $N$  的值设定为 0.2,对每个采样点求估计位置,即可得到该函数的近似运动轨迹.搜索半径  $R$  取不同时得到的定位误差有所差异,如图8所示.由上述实验结果可以看到,当  $R = 0.5$  时,定位误差比较大,甚至出现了采样点缺失的情况.这是因为锚节点是按照单位 1 的距离设置的,当  $R$  值取 0.5 时,某些采样点周围可能没有锚节点,这就会造成定位时该采样点缺失.另外,当  $R$  取值从 1 变为 10 时,定位的精确度有了明显的提高;但当  $R$  的取值从 10 变为 20 时,虽然定位精度也有所提高,但是已经没有前者明显.  $R$  的取值与定位误差的关系如图9所示.

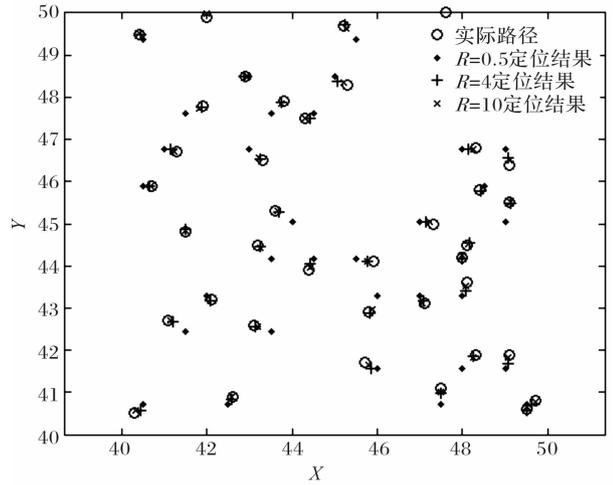


图8  $R$  取不同值时定位结果比较

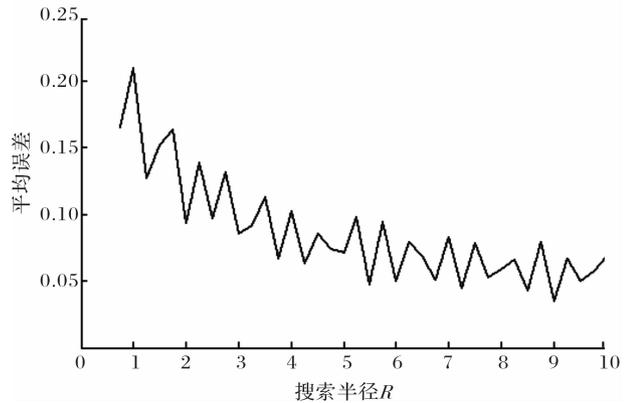


图9 搜索半径  $R$  与平均误差的关系

理论上,当  $R$  无限增大时,盲节点的估计距离就无限接近实际距离.但在实际应用中,过多的锚节点设置需要投入更多的成本、消耗更多的能源.当  $R$  增大时,平均误差先是骤减,而后趋于平缓.实际应用时,只需根据需要,测定合适的  $R$  值即可.

此外,锚节点密度对实验的影响与搜索半径  $R$  的取值的影响实质是相同的,增大锚节点的密度实际上就是增大搜索半径,减小锚节点密度实际上就是减少搜索半径.事实上,在给定的区域内,如果锚节点的辐射范围确定,那么锚节点的数量也是确定的,此时再讨论锚节点的密度问题是无意义的,这里不再赘述.

### 4 结论

针对正六边形网格定位算法定位误差不均匀

和正方形网格定位算法冗余节点过多等问题,提出了一种新的基于锚节点等边三角形分布的质心定位算法.运用该算法,克服了正六边形网格质心定位算法定位误差不稳定的弊端,当选取合理的搜索半径时,能够得到较高的定位精度.该算法简单,降低了设计难度,减少了硬件投入和能耗,适用于对硬件要求不高的定位环境.与正六边形网格质心定位算法相比,该算法的缺陷是增加了额外的锚节点,且在判断盲节点是否在搜索半径内时须与给定区域内所有的锚节点进行比对,这无疑大大增加了计算量.这两方面仍需改进.

#### 参考文献:

- [1] 高珩,马玉红,鲍鹏.无线传感网络常用定位算法分析[EB/OL].(2009-06-08)[2013-02-05].<http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200906-231>.

- [2] Whitehouse K, Culler D. Calibration as parameter estimation in sensor networks[C]//Proc ACM WSNA 2002, Atlanta:[s. n.],2008;59-67.
- [3] 朱明辉,张会清.基于 ZigBee 网络 RSSI 的室内无线定位技术[J].现代电子技术,2010(17):45.
- [4] 郭瑞星.基于 ZigBee 的无线传感网络 RRRI 定位算法的改进与实现[D].太原:太原理工大学,2011.
- [5] 阎中江,龚红焱,沈中,等.基于网格扫描的 WSN 节点定位算法[J].计算机工程,2011,37(21):69.
- [6] 翟正怡,张轮.无线传感网络正六边形网格划分方法[J].电脑知识与技术,2007(19):89.
- [7] 汪学清,杨永田.无线传感器网络中连通与覆盖问题的研究[J].计算机工程与应用,2006(36):136.
- [8] 万国成.基于 ZigBee 协议的无线区域定位系统的研究[D].武汉:湖北工业大学,2011.

(上接第 42 页)

#### 参考文献:

- [1] Moore S S, Sargeant L L, King T J, et al. The conservation of dinucleotide microsatellites among mammalian genomes allows the use of heterologous PCR primer pairs in closely related species [J]. Genomics, 1991, 10(3):654.
- [2] 蒋彩虹,王元英,孙玉. SSR 和 ISSR 标记技术应用进展[J].中国烟草科学,2007,28(2):1.
- [3] Bindler G, Van der Hoeven R, Gunduz I, et al. A microsatellite marker based linkage map of tobacco [J]. Theor Appl Genet, 2007, 114:341.
- [4] Moon H S, Nicholson J S, Lewis R S. Use of transferable *Nicotiana tabacum* L. microsatellite markers for investiga-

- ting genetic diversity in the genus *Nicotiana* [J]. Genome, 2008, 51:547.
- [5] Rao C S V, Prasad S B C, Anand P, et al. Molecular diversity analysis of non fcv tobacco varieties using SSR markers [J]. IJSID, 2011, 1(2):192.
- [6] Bindler G, Plieske J, Bakaher N, et al. A high density genetic map of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) obtained from large scale microsatellite marker development [J]. Theor Appl Genet, 2011, 123:219.
- [7] 杨友才,周清明,尹晗琪.烟草种质资源 AFLP 分析中 DNA 模板的制备[J].亚热带植物科学,2005,34(2):1.
- [8] 赵世浩,周清明,荆春林,等.正交设计优化烟草 SSR 反应体系[J].湖南农业科学,2007(6):48.

# 基于FP-Growth算法的毕业生管理系统应用

张红荣

(宿迁市广播电视大学 电子信息工程系, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:**将频繁项集挖掘算法中的FP-Growth算法应用到毕业生信息管理系统中,算法采用FP树对事务数据集进行压缩存储,然后再利用FP树得到所有的频繁项集.该系统可从大量的毕业生信息出发,找出就业信息与教育信息之间的关系,从而为决策者提供指导或数据支持.

**关键词:**频繁模式树增长算法;关联规则;毕业生管理系统

**中图分类号:**TP29 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.014

## The application of the management system for graduates based on FP-Growth algorithm

ZHANG Hong-rong

(Department Electronic Information Engineering, Suqian Radio & Television University, Suqian 223800, China)

**Abstract:** The FP-Growth algorithm of frequent itemsets mining algorithm was applied to the graduate information management system. The FP tree of transaction data set to compress and stored in this algorithm, and then re-uses FP tree to get all the frequent itemsets. The system could find out the relationship between the employment information and education information, based on a large number of graduates information, so as to provide guidance or data support.

**Key words:** FP-Growth algorithm; association rule; management system for graduates

## 0 引言

职业学校担负着为地方培养专业技术人才的任务,专业设置是否合理、所培养的学生是否满足企业用工的需求,这是所有的职业学校所关心的问题.从大量毕业生的就业信息出发,找出有利于学校专业设置、课程设置的信息,是学校迫切的要求.

目前,对于三年制和五年制高职毕业生的管理主要通过奥蓝学生管理信息系统来实现.该系统主要由就业处的相关管理人员使用,通过该系统可以对学生就业信息进行直观的了解,同时更加快捷地与省就业指导中心核对生源信息及就业信息.但无

法自动生成本地就业率,无法对专业对口情况进行统计,无法对毕业生的就业信息有更深一步的了解.虽然在系统中提供了招聘信息,但是更多的是针对某地区的学生,很少有针对本地毕业生的招聘信息.由于没有专门的毕业生入口,毕业生也无法查看这些招聘信息.

近年来,随着毕业生人数的增加,学校积累了大量的毕业生就业信息,但这些信息很少被学校重视,仅作为每年统计就业率和考核班主任的重要数据.其实,这些数据的背后隐藏着大量有用的信息,需有效地管理这些数据,将数据资源的利用提高到知识创新的高度和层面.本文拟基于关联规则及其

收稿日期:2013-09-01

作者简介:张红荣(1976—),女,吉林省蛟河市人,宿迁市广播电视大学高级讲师,主要研究方向为数据挖掘与数据库技术.

挖掘,将 FP - Growth 算法(即频繁模式树增长算法)应用于毕业生管理信息系统,以期从大量的毕业生信息出发,找出就业信息与教育信息之间的关系,从而为决策者提供指导或数据支持。

## 1 关联规则及其挖掘过程

关联规则是由 Agrawal, Imielinski 和 Swami 在 1993 年华盛顿召开的一次关于数据管理的会议上首次提出来的<sup>[1]</sup>。从那以后,很多学者对关联规则的挖掘算法进行了深入的研究。

关联规则是描述数据库中数据项之间存在的潜在关系的规则。若  $X$  和  $Y$  是不相交的项集,即  $X \cap Y = \emptyset$ ,蕴涵式  $X \rightarrow Y$  称为关联规则, $X, Y$  分别称为关联规则  $X \Rightarrow Y$  的前提和结论<sup>[2]</sup>。关联规则的支持度就是项集  $X \cup Y$  的支持度,它用于衡量关联规则在整个数据集中的频繁程度;关联规则的置信度等于项集  $X \cup Y$  的支持度  $\div$  项集  $X$  的支持度,它用于衡量关联规则的可信程度。

关联规则挖掘的任务就是在数据集中挖掘出所有的强关联规则。根据强关联规则的定义,可以将整个关联规则挖掘的过程分为 2 步:

- 1) 根据给定的最小支持度,在数据集中找出所有大于等于最小支持度的项集,即频繁项集;
- 2) 根据给定的最小置信度,在频繁项集中进行搜索,找出强关联规则。

关联规则挖掘是在海量数据上进行的,频繁项集的产生需要访问数据库中所存储的大量数据,不断地进行 I/O 操作。而关联规则的产生则不需要扫描数据库,计算的代价相对来说要小得多,因此,迅速高效地在数据集中找出所有的频繁项集是数据挖掘的核心问题。

## 2 FP - Growth 算法

FP - Growth 算法是由韩家炜等人于 2000 年提出出来的一种新的频繁项集挖掘算法。该算法采用 FP 树对事务数据集进行压缩存储,然后再利用 FP 树得到所有的频繁项集。

### 2.1 基本思想

FP - Growth 算法的基本思想是: 1) 通过扫描事务数据库,得到频繁 1 - 项集,并将频繁 1 - 项集按支持数从大到小排序; 2) 再扫描事务数据库,构造 FP 树,将所有的事务压缩存储到一棵 FP 树中; 3) 对 FP 树采用分而治之的思想,为每个节点构造

相应的条件 FP 树,从而找到所有的频繁项集<sup>[3]</sup>。

### 2.2 算法实现

为了实现 FP - Growth 算法,笔者专门定义了 FP\_Growth 类:

```
class FP_Growth
{
public:
    FP_Growth(void);
    ~FP_Growth(void);
    void ReadFile(string fname);
    void SortFilterData(vector<int> & indata);
    void BuildFPtree();
    void SetMinSupport(int minsup);
    void SetMaxItemNumber(int maxItemnum);
    void FindItem(int value, vector<Item * > & vit, Item * startitem);
    void BuildHeadTable(Item * startitem);
    void Mining(vector<Item * > & result);
    Item * root;
private:
    HeadTable * h;
    string filename;
    int maxitemnumber;
    int minsupport;
    vector<int> numbertable;
    const int maxcharperline;
    int searchinchildre(Item * pitem, int value);
    void SubMining(int value, vector<Item * > & result);
    void MergePath(vector<Path > & path, int value, vector<int > & result);
};
```

对事务数据库利用 FP - Growth 算法进行关联规则挖掘,取支持度为 30%。

## 3 基于 FP - Growth 算法的毕业生管理信息系统

### 3.1 数据准备

毕业生管理信息系统中存储了大量的毕业生数据,为了能够从中找出隐含的、潜在的规则,需要对这些数据进行预处理。预处理过程主要有 2 步。

- 1) 数据整合。将毕业生的基本信息与就业信息进行整合,从毕业生的简历中提取出技能大赛、班级干部、学生会成员等方面的信息。整合后的信息量很大,考虑到学生的姓名、出生日期、民族、联系人、通信地址等属性与本次讨论的问题联系不大,

可以直接去掉. 整合后的部分数据见图1,从中可找出性别、参加社会实践、在校期间担任学生会干部或班长、参与技能训练对就业的影响.

学号	性别	技能大赛	社会实践	学生会干部班长	岗位	收入
071301350101	女	参加	参加	无	技术人员	2000
071301350106	男	无	参加	班长	推销员	2500
071301350112	女	无	无	无	普通工人	1500
071301350201	男	市二等奖	参加	无	技术人员	2600
071301350207	男	无	无	无	普通工人	1600
071301350237	男	市一等奖	参加	无	技术人员	2700
071301350302	女	无	参加	学生会主席	管理人员	3000
071301350305	男	训练	参加	无	技术人员	2000
071301350406	男	省二等奖	参加	无	教师	2600

图1 整合后的毕业生部分数据

2)数据变换. 采用针对布尔型数据进行关联规则挖掘的算法,需要对采集到的数据进行量化处理<sup>[4]</sup>. 有些属性很容易量化,性别可以用1代表男,0代表女;社会实践也可以用1代表参加过社会实践,0代表未参加过. 但有些属性(如毕业生的基本工资)就需要先分段,然后再进行相应的量化. 这里,以2000元为标准,2000元以下属于低收入,用0来表示;而2000元以上属于高工资,用1表示. 对于技能大赛,采用的量化方法是:凡是进行训练、参加比赛的,无论是否获奖,都用1表示. 对于学生会干部或班长的量化,采用的方式是:只要担任职务,无论是主席,还是其中的工作人员,都统一用1表示. 经过量化后,得到图2所示的部分数据.

学号	性别	技能大赛	社会实践	学生会干部班长	岗位	提升空间	收入
071301350101	0	1	1	0	1	0	1
071301350106	1	0	1	1	1	1	1
071301350112	0	0	0	0	0	0	0
071301350201	1	1	1	0	1	0	1
071301350207	1	0	0	0	0	0	0
071301350237	1	1	1	0	1	0	1
071301350302	0	0	1	1	1	1	1
071301350305	1	1	1	0	1	0	1
071301350406	1	1	1	0	1	0	1

图2 量化处理后的部分数据

### 3.2 系统实现

FP-Growth算法只需要扫描2次数据库,就可以得到全部的频繁项集,效率相对比较高. 本文采用FP-Growth算法挖掘就业信息与教育信息之间的关系<sup>[5]</sup>,挖掘界面见图3.

由图3可以看出:规则1说明,参与技能大赛的同学,无论是否参加比赛、是否获奖,他们工作后的收入都比较高. 分析后发现,这类学生的自学能力和动手能力比较强,因此,工作后的收入比较高. 规则2,3说明在校期间担任过学生干部的学生就业后



图3 采用FP-Growth算法的关联规则挖掘界面

收入比较高,提升的空间比较大. 对规则进一步分析发现,这部分学生组织能力、社交能力比较强,工作在管理层的比较多,提升空间比较大. 规则4说明女性工资收入比较低.

通过以上的挖掘,可以得到以下结论:学校应该注重学生综合能力的培养,多开展一些有意义的活动,让更多的学生参与到活动中,在活动中锻炼自己. 同时,学校应该将技能训练全面铺开,让更多的学生参与其中,通过技能训练,提高动手能力,提高自学能力,以便今后能够更好地适应工作岗位的需求.

## 4 结论

本文通过对关联规则及其挖掘过程的分析,将FP-Growth算法应用于毕业生管理系统,方便了学校对毕业生信息的管理,增进了学校与企业、毕业生与用人单位之间的沟通和联系. 更重要的是,通过数据挖掘技术从大量的毕业生就业信息中挖掘出隐藏的具有一定指导意义的信息来指导职业教育的专业建设和课程改革.

### 参考文献:

- [1] 孙吉贵,刘杰,赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008,19(1):48.
- [2] 刘海蓉,闫仁武. 一种改进的加权关联规则挖掘算法[J]. 现代电子技术,2011(12):59.
- [3] 邵峰晶,于忠清,王金龙,等. 数据挖掘原理与算法[M]. 北京:科学出版社,2009:91-123.
- [4] 包从剑,施化吉,黄欢. 基于B/S与C/S混合模式的图书馆管理系统[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2009,24(6):117.
- [5] 安颖. 基于Apriori算法的兴趣集加权关联规则挖掘[J]. 北京联合大学学报:自然科学版,2008,22(4):44.

# 基于数字语音卡的呼叫中心系统的设计与实现

芮跃峰

(郑州航空工业管理学院 实验室管理处, 河南 郑州 450046)

**摘要:**为了解决当前呼叫中心系统成本高和开发周期长的问题,设计了一种基于数字语音卡的呼叫中心系统.该系统基于计算机电话集成技术,以 Microsoft .NET 为平台,SQL Server 2005 为后台数据库,C#语言为开发工具,采用 .NET 三层架构设计.实验结果表明,该系统具有良好的扩展性,缩短了开发周期、节约了开发成本.

**关键词:**数字语音卡;呼叫中心;计算机电话集成;.NET 三层架构

**中图分类号:**TP39 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.015

## Design and implementation of call center system based on digital voice card

RUI Yue-feng

(Laboratory Management Office, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** In order to solve the high cost and long development cycle of the current call center system, a general framework call center system using digital voice card was designed. The system based on the computer telephone integration (CTI) technology, taking Microsoft .NET as the platform, SQL Server 2005 as the background database, C# language as a development tool, and using the three layer structure of .NET. The experimental results showed that the system, with its good scalability, shorten development cycle and reduce development cost.

**Key words:** digital voice card; call center; computer telephone integration; the three layer structure of .NET

## 0 引言

呼叫中心又称客户服务中心,是一种基于计算机电话集成(CTI)技术、与企业连为一体的完整的综合信息服务系统.早期的呼叫中心应用就是今天的热线电话、咨询电话,由受过专门训练的话务员接听处理来电客户的各类问题(如咨询、投诉、建议等).现代呼叫中心充分利用现代通信与计算机技术、自动呼叫分配系统(ACD)等,自动灵活地处理各种不同的电话呼入呼出业务和服务.

呼叫中心系统有 2 种解决方案:交换机方案和

语音板卡方案.交换机方案通过交换机将用户的呼叫接入到后台的坐席终端,同时通过 CTI 服务器对交换机进行控制.基于语音卡的呼叫中心系统则是利用专用的计算机语音板卡来代替传统的交换机,其基本思想是在微机平台上集成各种功能的语音处理卡,完成通信接口、语音处理、传真处理、坐席转接等功能,再结合外部的计算机网络实现各种应用系统的需求<sup>[1]</sup>.

语音卡方案具有投资少、配置灵活、扩展容易等特点,采用这种方案成本较低,增加新的资源和业务非常容易,适合中小型的呼叫中心系统.各行

收稿日期:2013-05-11

作者简介:芮跃峰(1982—),男,河南省漯河市人,郑州航空工业管理学院助教,主要研究方向为管理信息系统、Web 开发技术.

业对呼叫中心的需求大多属于中小规模,适合采用语音卡方案。目前各行业、各部门的呼叫中心系统都是单独进行开发,软件开发的重复工作量大、利用率低、开发周期长。由于呼叫中心系统的功能需求都很相似,集中于自动语音应答、自动呼叫分配、客户管理、知识库、坐席管理这几个模块,因此本文拟建立一个通用架构的基于数字语音卡的呼叫中心系统,使应用系统开发更为灵活,可以根据不同的行业需要扩展业务系统,为客户提供便捷、快速的服务,以有效降低企业成本。

## 1 呼叫中心系统功能

本系统集中应用数据库、数字语音自动应答、呼叫处理、计算机网络等技术,通过语音卡与计算机之间的硬件接口和软件系统有机地联系起来,构成一个完整的统一体,形成信息交换平台。呼叫中心系统所要实现的主要功能有:

1) 自动语音应答(IVR)。自动语音应答实际上是一个自动的业务代理。通过 IVR 系统,客户拨一特定电话号码进入该系统后,会得到系统的各种语音提示,方便快捷地帮助用户实现查询或其他服务目的。

2) 自动呼叫分配(ACD)。根据客户所选的业务种类和坐席技能级别,将进行自动语音应答(IVR)的话路转接到人工座席上,客户将和座席员进行一对一的交谈,座席员解答客户的咨询或输入客户的信息。

3) 客户管理(CRM)。系统将根据客户的来电号码自动从数据库中取出相关的客户资料并显示在界面上,可以对客户资料、客户咨询和回访进行管理,如果产生销售机会,话务员将按照客户的需求填写订单,转给销售部门,并进行跟进。系统可以根据来电客户的客户编码和密码或主叫号码等,识别客户身份。

4) 知识库(FAQ)。收集各种产品的常见问题和服务中用户经常遇到的问题,给出主要问题的应答策略,为话务员在处理业务问题时提供一个标准的回答方式,方便及时地对客户咨询进行答复。

5) 坐席人员管理。对呼叫中心工作人员进行管理,主要包括呼叫中心人员资料管理(如姓名、年龄、电话、住址等)以及呼叫中心人员权限的管理,根据人员类型分配,如系统管理员、班长座席(管理座席)、专家坐席(解答专业性问题),确定不同的人

员权限级别。

6) 数据导入导出。能导入和导出 Excel 形式的客户信息和销售数据。

## 2 呼叫中心系统设计及技术分析

### 2.1 基于语音卡的呼叫中心系统设计

系统采用数字语音卡加 CTI 服务器的形式搭建呼叫中心系统,通过 CTI 服务器底板的 PCI 插槽与语音卡配合完成呼叫中心的组建,系统结构见图 1。

由 1 台计算机作为服务器,在该服务器上安装语音卡,并运行呼叫中心软件系统。CTI 服务器、座席电脑通过交换机接入网络,外线由 PSTN 公网到 CTI 服务器外线语音卡。语音卡通过计算机与电信网相连,提供录音、放音、收码、自动拨号、振铃检测与控制摘挂机、信令检测、转接内线、监控录音、传真、数据传输、主叫号侦测等服务功能<sup>[2]</sup>。

CTI 服务器是一台与语音板卡相连的计算机,是整个呼叫中心系统的核心,提供座席管理功能,并结合后台的业务应用系统、数据库查询等提供综合的用户服务应用<sup>[3]</sup>。同时,CTI 服务器屏蔽了交换机与计算机之间复杂的通信协议,向上提供统一的编程接口,使开发人员能够方便地开发呼叫中心的各类应用。CTI 模块从语音卡取得数据,由软件实现人工座席支持,并取得座席分机状态,提供排队策略以实现座席工作量的平均分配。语音卡通过与电话网的接口和电信网相连,电话网有不同类型的通信终端,如电话机、传真机、手机等,以满足不同的客户需求。

呼叫处理的基本流程是:用户拨打服务热线,呼叫通过语音卡、CTI 服务器控制 IVR 系统后播放欢迎词及语音引导词;如客户需要人工服务,则 CTI-Server 提出人工服务请求,根据排队策略选择坐席,并将坐席信息通知 CTI-Server,CTI-Server 实现数据与语音同步,将呼叫的主叫号、被叫号以及拨入用户在 IVR 中通过电话按键输入的数据送到座席电话对应的计算机上,提供给座席重要的用户信息。

### 2.2 基于语音卡的呼叫中心系统技术分析

呼叫中心系统分为 2 个部分:呼叫中心底层(CTI 中间件)和业务系统。呼叫中心底层(CTI 中间件)和业务系统采用模块化设计,呼叫中心底层和业务系统相互独立,可以根据不同的行业需要开发业务系统。

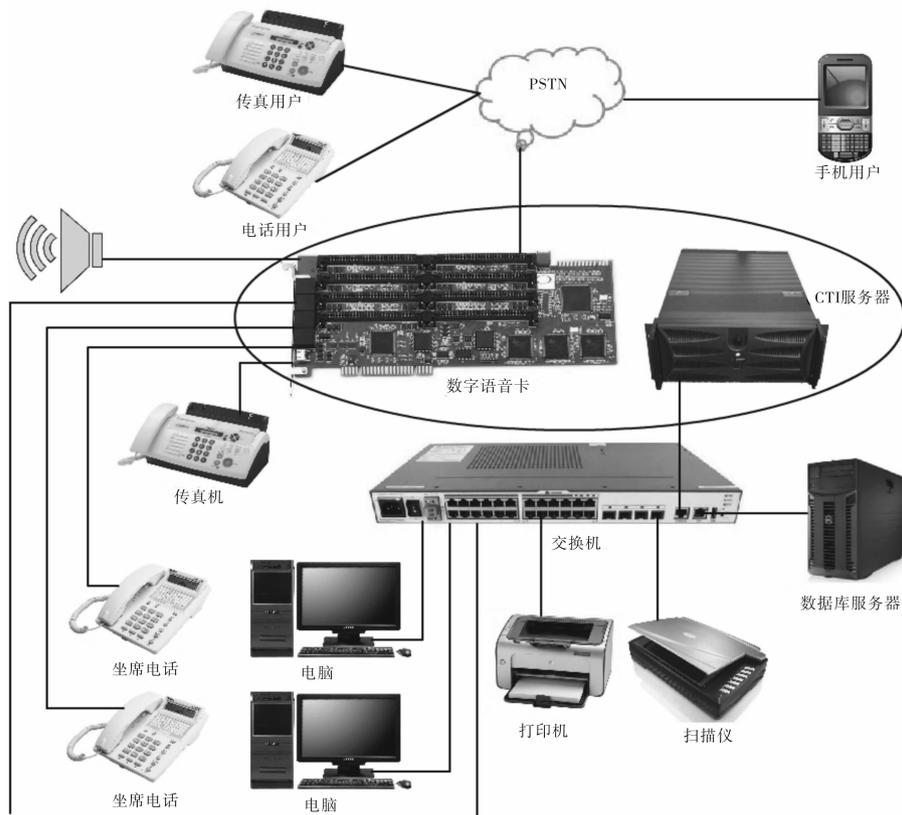


图 1 呼叫中心系统结构图

呼叫中心底层主要功能是完成各种 CTI 应用中的交换控制和语音通话的功能,如呼叫的建立、拆线、呼叫转接、挂断、录放音等具体的物理上的动作<sup>[4]</sup>. IVR 功能、自动呼叫分配功能、呼叫管理、坐席管理等功能在这一层实现. CTI 支持板卡和交换机接入,支持自动屏幕弹出、主叫号码分析、统一呼叫排队、数据与话音同步转移、话务可在 IVR 与座席、座席与座席之间任意切换,同时支持 Linux 和 Windows 操作系统.

语音卡生产厂商随卡提供了一套完整的 DLL 形式的 API 接口函数,通过这些函数,可以很方便地开发语音处理程序. 语音卡的编程架构分为 3 个部分,第 1 部分是初始化数字语音系统和各个通道等,这些函数仅在应用程序初始化的时候调用 1 次. 第 2 部分是事件处理,对实时的情况进行处理,编程架构采用流行的事件驱动方式进行编程,即用户应用程序需要创建一个线程,在这个线程中,不断地调用事件函数,如果有事件返回,就处理事件,然后继续调用该函数. 第 3 部分是程序结束处理,包括关闭语音卡,在应用程序退出前,调用语音卡的相应函数,清理系统,并恢复电话线路的状态.

业务系统主要包括满足具体应用的业务:登录

服务、数据服务和管理配置服务. 数据服务用来为上层软件开发商或者最终用户提供一些常用的与底层应用平台密切相关的一些数据库功能服务,比如导入和导出 Excel 数据表、FTP 上传和下载数据、查询检索数据库中的用户或产品信息等. 管理配置用来为其他软件开发商或者最终用户提供各种管理配置的功能,包括对底层板卡参数的配置和对软件系统的各种系统参数的配置.

### 3 业务系统的技术实现

业务系统包括坐席端与中心数据库. 其中坐席端又可分为班长坐席与普通坐席. 普通坐席主要完成接听客户来电、记录客户资料及通话内容并及时处理客户疑问等功能. 班长坐席主要完成对普通坐席的监控、公共信息的发布、客户资料的统计分析和报表的查询<sup>[5]</sup>. 业务系统以 Microsoft. NET 为平台,SQL Server 2005 为后台数据库支持,C#语言为开发工具,采用. NET 三层架构.

#### 3.1 .NET 三层架构的搭建

1) 搭建模型层 Model,业务层 BLL 和数据层 DAL. 添加应用程序配置文件 App. config,并添加数据库连接字符串 `connectionString = "Data Source = .`

```
\\SQLEXPRESS;Initial Catalog = CallCenter;Integrated
Security = True"
```

2)在 Model 层中添加如下代码对数据库中的字段进行封装。

```
public System. Int32 Id { get; set; }
public System. Int32 Name { get; set; }
public System. Int32 Id_name { get; set; }
public System. Int32 Ext { get; set; }
public System. Int32 Id_type { get; set; }
public System. Int32 Password { get; set; }
public System. String TelPhone { get; set; }
public System. String MobilePhone { get; set; }
public System. String Email { get; set; }
```

3)在 DAL 层创建数据库连接帮助类文件 SqlHelper. cs,通过 SqlHelper. cs 可以从配置文件获得连接字符串、获得数据表对象、执行增删改以及查询单个单元格。

### 3.2 MD5 加密算法

系统登录模块在 BLL 层判断用户名是否存在,如果用户名存在,比较用户输入的密码和数据库中的密码是否一致。在这里使用 MD5 加密算法,通过 GetMD5()方法计算用户输入密码的 MD5 值,和数据库中保存的 MD5 值进行比较。

```
public static string GetMD5(string sDataIn)
{
    MD5CryptoServiceProvider md5 = new
MD5CryptoServiceProvider();
    byte[] bytValue, bytHash;
    bytValue = System. Text. Encoding. UTF8. GetBytes( sDataIn);
    bytHash = md5. ComputeHash( bytValue);
    md5. Clear();
    string sTemp = "";
    for (int i = 0; i < bytHash. Length; i++)
    {
        sTemp + = bytHash [ i]. ToString( " X"). PadLeft
(2, '0');
    }
    return sTemp. ToLower();
}
```

### 3.3 数据导入导出的方法

向数据库中导入 Excel 文件的基本逻辑是:首先遍历 Excel 每一行,对每一行创建一个 Model 对象,然后读取各列的值为 Model 赋值,最后将 Model 插入数据库。执行将 Model 插入数据库操作时,需要调用 NPOI 中的 dll 方法。NPOI 是 POI 项目的。NET

版本。POI 是一个开源的 Java 读写 Excel, Word 等微软 OLE2 组件文档的项目。使用的对象主要位于 NPOI. HSSF. UserModel 空间下,主要有 HSSFWorkbook, HSSFSheet, HSSFRow, HSSFCell, 对应的接口为位于 NPOI. SS. UserModel 空间下的 IWorkbook, ISheet, IRow, ICell, 分别对应 Excel 文件、工作表、行、列。

导出 Excel 文件的基本逻辑是:首先创建 Workbook 对象,创建工作表,然后在工作表中添加行和列,最后设置行和列的内容。

### 3.4 知识库系统

当用户打电话查询某一信息时,坐席向用户提供信息查询,系统能够按需求检索信息显示在座席终端屏幕上,并将用户信息显示出来,话务员可以按用户的要求向用户进行解答。它不仅为呼叫中心提供知识积累,也同时为客户代表提供迅速的知识检索功能,使呼叫中心为客户提供更好的语言服务打下良好的基础<sup>[6]</sup>。

知识库系统采用。NET 三层架构,每一层都相互独立。知识库采用开口音查询、标题查询、知识树查询、全文检索的复合检索方式。

## 4 结语

基于 CTI 技术,本文探讨了采用数字语音卡的呼叫中心系统的架构方案,对系统的组成结构以及软件开发进行了技术分析,重点分析了业务系统开发的关键技术和实现方法。实践表明,本系统的设计具有良好的可复用性和扩展性,降低了整体解决方案的成本。

### 参考文献:

- [1] 刘卫涛. 基于 CTI 技术的电信语音增值业务平台的设计与实现[D]. 桂林:广西师范大学,2009.
- [2] 姚妮,张林林,朱付保. 欠费信息语音自动呼叫和自助查询系统的设计与实现[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(6):55.
- [3] 杜玲玲. 基于 CTI 技术的社区呼叫中心的应用开发[J]. 计算机工程与设计,2009(24):5729.
- [4] 胡保锁. 基于语音板卡的 CTI 中间件的研究与设计[D]. 北京:北京邮电大学,2008.
- [5] 车书. 基于中间件的坐席软件系统的设计与实现[J]. 福建电脑,2008(3):148.
- [6] 许伟. 呼叫中心知识库系统的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2008.

# 基于改进 Zernike 矩的图像识别

黄敏, 马亚琼, 宫秋萍

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对图像旋转和尺度变换所引起的图像重采样和重量化的问题,提出了 Zernike 矩的改进方法.该方法先对图像中的目标区域进行形状归一化,再对 Zernike 矩进行归一化.实验数据表明,改进后的 Zernike 矩不仅具有旋转不变性,而且还具有改进前不具备的比例不变性.基于最小距离分类器对待识别目标进行分类的结果表明,改进的 Zernike 矩具有较高的识别率,其不足是不适用目标图像背景复杂的情况.

**关键词:**Zernike 矩;图像识别;旋转不变性;尺度变换

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.016

## Image recognition based on improved Zernike moments

HUANG Min, MA Ya-qiong, GONG Qiu-ping

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

**Abstract:** Aiming at the resampling and requantization error caused by image rotation and scaling transformation, the improved Zernike moment method was proposed, that is, first the target area in the image was normalized shapely, and then the Zernike moments were normalized. The experimental data showed that the improved Zernike moments not only had rotation invariance, but also had the scale invariance which didn't have before improved. The classification results of the target to be identified based on the minimum distance classifier showed that the improved Zernike moments had a higher recognition rate. Its shortcomings are not applicable to the complex situations of target image background.

**Key words:** Zernike moment; image recognition; rotation invariance; Zernike polynomial; scaling invariance

## 0 引言

图像识别是模式识别研究领域的一个重要分支,它根据从图像中抽取的图像特征来对目标进行分类.图像特征一般包括色彩、纹理、形状等.形状特征不受目标背景、颜色和纹理变化的影响,且性能比较稳定,因而被广泛应用在识别技术中.目前基于形状的认识方法大多围绕形状的轮廓特征和区域特征进行.对形状轮廓特征的描述方法主要有高斯参数曲线、样条拟合曲线、直线段描述以及傅里叶描述子等,但这些方法在图像识别中使用时具

有局限性,识别效果并不理想<sup>[1]</sup>.对形状区域特征的描述方法主要有区域的面积、形状纵横比、形状无关矩等.M. K. Hu<sup>[2]</sup>利用归一化中心矩的线性组合构造的度量形状特征的7个不变矩具有旋转、平移和尺度不变特性,对图像识别起到很大的推动作用.后来人们研究发现正交矩具有抗噪声能力强、抽样性能好、具有绝对的独立性等优点,并且没有信息冗余现象,适用于图像的描述和识别<sup>[3]</sup>.1980年 M. R. Teague<sup>[4]</sup>根据正交多项式理论提出了 Zernike 正交矩,它能够构造图像的任意高阶矩,具有良好的旋转不变性且计算简单,是目前广泛应用

的一种形状描述子. 与其他矩相比, Zernike 矩在噪声灵敏度、信息冗余度和图像描述能力等方面具有最好的性能. 本文拟采用 Zernike 矩对图像进行识别, 提出 Zernike 矩的一种改进方法, 以使 Zernike 矩在实际应用中更具有普遍性.

## 1 Zernike 矩

Zernike 矩是一种特殊的复数矩, 是基于称为 Zernike 多项式的正交化函数, Zernike 多项式构成了一个完备正交集, 它的正交性使得 Zernike 矩相互独立, 因而在特征表达方面具有较大的优越性<sup>[5]</sup>.

### 1.1 Zernike 多项式

Zernike 在 1934 年提出了一组定义在单位圆上的正交多项式<sup>[6]</sup>, 即 Zernike 正交多项式, 其表达形式为

$$V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho)e^{jm\theta}$$

其中,  $n, m$  为 Zernike 正交多项式的阶数,  $n$  为非负整数,  $m$  为正整数或负整数, 且两者必须满足  $n - |m| = \text{even}, n \geq m$  的条件限制;  $\rho$  为原点到点  $(x, y)$  的矢量长度;  $\theta$  为矢量  $\rho$  和  $x$  轴逆时针方向的夹角;  $R_{nm}(\rho)$  为实值的径向多项式, 由下式给出:

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s [(n-s)!] \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!}$$

### 1.2 Zernike 矩的定义

Zernike 矩是指图像函数  $f(x, y)$  在正交多项式  $\{V_{nm}(x, y)\}$  上的投影. 重复率为  $m$  的  $n$  阶 Zernike 矩定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{nm}^*(x, y) dx dy$$

极坐标下 Zernike 矩的定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta$$

在实际应用中所处理的图像通常为数字图像, 需将 Zernike 矩的实部和虚部分别离散化. 又因为 Zernike 多项式在单位圆内是正交的, 需将所考虑的图像转化为单位圆内的极坐标形式, 为此, Mukundan 和 Ramakrishnan 在其研究论文中给出了如下变换<sup>[7]</sup>: 对任一  $N \times N$  的图像  $f(x, y)$ , 令坐标原点位于图像中心. 对任一像素  $(x, y)$ , 引入参数  $\eta$  和  $\sigma$ , 唯一对应于该像素, 其定义为

$$\eta = \max(|x|, |y|) \tag{1}$$

若  $\eta = |x|$ , 则

$$\sigma = 2(\eta - x)y / |y| + xy / \eta$$

若  $\eta = |y|$ , 则

$$\sigma = 2y - xy / \eta$$

从 ① 式中可以看出,  $\eta$  的取值从 1 到  $N/2$ ,  $\sigma$  的取值从 1 到  $8\eta$ , 由参数  $\eta, \sigma$  可定义极坐标

$$\rho = 2\eta / N \quad \theta = \pi\sigma / (4\eta)$$

经以上变换可得 Zernike 矩  $Z_{nm}$  的实部  $C_{nm}$  和虚部  $S_{nm}$  的表达式

$$C_{nm} = \frac{2n+2}{N^2} \sum_{\eta=1}^{N/2} R_{nm}(2\eta/N) \sum_{\sigma=1}^{8\eta} \cos \frac{\pi m \sigma}{4\eta} f(\eta, \sigma)$$

$$S_{nm} = -\frac{2n+2}{N^2} \sum_{\eta=1}^{N/2} R_{nm}(2\eta/N) \sum_{\sigma=1}^{8\eta} \sin \frac{\pi m \sigma}{4\eta} f(\eta, \sigma)$$

### 1.3 Zernike 矩的不变性分析

Zernike 矩是基于区域的形状描述子, 且它的基于正交的径向多项式, 与其他形状描述子相比, 不但具有旋转不变性, 在经过变换后, 还具有平移和比例不变性.

**1.3.1 平移不变性** 已知二维图像  $f(x, y)$ , 其  $(p+q)$  阶标准矩定义为

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy$$

根据标准矩公式可求得图像的重心坐标  $(\bar{x},$

$\bar{y})$ , 其中  $\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$ .

对图像  $f(x, y)$  做变换

$$f_1(x, y) = f(x + \bar{x}, y + \bar{y})$$

即将图像的重心平移到原点, 则变换后的  $f_1(x, y)$  对平移具有不变性.

**1.3.2 尺度不变性** 对图像进行  $\alpha$  倍的缩放, 根据标准矩的公式可知变化前后的矩值相差一个倍数因子  $\alpha^{p+q+2}$ . 为解决该问题, 定义一个尺度因子  $a = \sqrt{\beta/m_{00}}$ , 使图像面积大小归一化等于预先定好的值  $\beta$  ( $\beta$  是一个预定义的常量,  $m_{00}$  是目标的面积), 并对图像进行变换

$$g(x, y) = f\left(\frac{x}{a} + \bar{x}, \frac{y}{a} + \bar{y}\right)$$

从而得到平移、尺度归一化的目标, 对变换后的目标计算 Zernike 矩, 即可得到具有平移和尺度不变性的特征<sup>[8]</sup>.

**1.3.3 旋转不变性** 当图像旋转角度  $\alpha$  后, 由 Zernike 矩的定义可得旋转图像的 Zernike 矩  $Z_{nm}^*$  与原图像的 Zernike 矩  $Z_{nm}$  之间的关系为

$$Z_{nm}^* = Z_{nm} e(-jm\alpha) \tag{2}$$

由式 ② 可以看出, 旋转前后图像的 Zernike 矩只有相位的对应变化, 而不存在幅值上的差别, 因

此可以把  $|Z_{nm}|$  作为目标的旋转不变性特征<sup>[9]</sup>.

## 2 Zernike 矩的改进

由于在离散情况下, 数字图像的旋转和尺度变换会造成图像的重采样与重量化, 从而使图像的旋转和尺度不变性不能保持严格不变. 为得到较好的不变特性, 需对 Zernike 矩进行改进. 本文考虑采用先对图像中的目标区域进行形状归一化, 再对 Zernike 矩进行归一化的处理方法<sup>[10]</sup>. 改进 Zernike 矩的特征提取流程图见图 1.

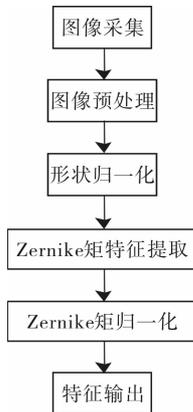


图 1 改进 Zernike 矩的特征提取流程图

### 2.1 图像的预处理

采用中值滤波去除噪声并保留图像的边缘细节, 将真彩色图像转化为 256 级的灰度图像, 选择合适的阈值进行二值化处理, 使目标图像与背景分割.

### 2.2 Zernike 矩的改进方法

1) 将目标图像转换到极坐标下的单位圆内, 即以目标的重心作为极坐标的圆心, 再以目标区域内圆心与最外像素点之间的距离作为半径, 从而使目标区域内的像素重采样到单位圆内.

2) 计算目标的 0 阶几何矩, 即

$$m_{00} = \sum_x \sum_y f(x, y)$$

3) 在单位圆内计算各阶 Zernike 矩:

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(x, y)$$

4) 利用  $m_{00}$  归一化 Zernike 矩:

$$Z''_{nm} = \frac{Z_{nm}}{m_{00}}$$

5) 求  $Z''_{nm}$  的模值  $|Z''_{nm}|$ , 将其作为目标的修正矩不变性特征.

接下来对改进后的 Zernike 矩进行测试, 以某车标图像为例.

先对此图像进行预处理, 再将处理后的图像分

别旋转  $30^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ . 由于经过归一化后提取的 Zernike 矩特征  $|Z''_{00}|$  和  $|Z''_{11}|$  对所得的每幅图像而言都相同, 故两者不能作为测试特征. 在实验中, 选取二到四阶共 7 个 Zernike 矩作为目标提取特征, 计算结果见表 1.

通过比较实验数据发现, 旋转图像的同类改进 Zernike 矩基本保持不变; 而对于缩放图像, 除改进 Zernike 的各别阶矩值偏差稍大以外, 其他情况偏差不大, 与原 Zernike 矩相比具有一定的尺度不变性, 从而也证明了该改进矩的可行性.

表 1 旋转图像的改进 Zernike 矩

Zernike 矩	旋转度数 / ( $^\circ$ )			
	0	30	75	90
$ Z''_{20} $	0.404 7	0.404 6	0.404 6	0.404 7
$ Z''_{22} $	0.008 4	0.008 2	0.008 3	0.008 4
$ Z''_{31} $	0.030 7	0.031 0	0.030 7	0.030 7
$ Z''_{33} $	0.006 8	0.006 9	0.006 9	0.006 8
$ Z''_{40} $	0.146 2	0.146 1	0.146 1	0.146 2
$ Z''_{42} $	0.072 0	0.071 9	0.072 0	0.072 0
$ Z''_{44} $	0.025 6	0.025 6	0.025 6	0.025 6

将图 2 等比例缩放 0.8 倍, 1.5 倍和 2.0 倍, 计算相应的改进 Zernike 矩, 结果见表 2.

表 2 缩放图像的改进 Zernike 矩

Zernike 矩	缩放倍数 / 倍			
	0.8	1.0	1.5	2.0
$ Z''_{20} $	0.402 9	0.404 7	0.407 2	0.408 4
$ Z''_{22} $	0.008 4	0.008 4	0.008 3	0.008 3
$ Z''_{31} $	0.030 7	0.030 7	0.030 7	0.030 6
$ Z''_{33} $	0.006 8	0.006 8	0.006 8	0.006 8
$ Z''_{40} $	0.148 6	0.146 2	0.142 9	0.141 3
$ Z''_{42} $	0.072 4	0.072 0	0.071 3	0.070 9
$ Z''_{44} $	0.025 8	0.025 6	0.025 4	0.025 3

计算以上各缩放图像的原始 Zernike 矩, 结果见表 3.

表 3 缩放图像的 Zernike 矩

Zernike 矩	缩放倍数 / 倍			
	0.8	1.0	1.5	2.0
$ Z_{20} $	935.018	1 468.0	3 323.0	5 925.2
$ Z_{22} $	19.502	30.311	67.893	120.433
$ Z_{31} $	71.308	111.470	250.292	444.530
$ Z_{33} $	15.887	24.812	55.451	98.255
$ Z_{40} $	344.753	530.195	1 166.4	2 049.9
$ Z_{42} $	168.076	261.056	581.687	1 029.2
$ Z_{44} $	59.891	92.928	207.240	366.763

### 3 应用实例

假设图像库中有迷你、马自达、雪佛莱、奥迪、宝马、福特 6 类标准车标图像. 对图像库中的图像分别进行旋转和尺度变换操作,根据 Zernike 矩的定义计算它们的各阶 Zernike 矩  $Z_{nm}$ ,以本文提出的改进矩方法对  $Z_{nm}$  进行归一化处理并求其模值得到新的特征向量  $|Z''_{nm}|$ ,计算同一类图像的特征向量的平均值,用得到的特征值来表示该类图像,实验结果见表 4.

在停车场采集 36 幅与 6 类标准图像相关的车标

表 4 各类图像的特征值

图像	$ Z''_{20} $	$ Z''_{22} $	$ Z''_{31} $	$ Z''_{33} $	$ Z''_{40} $	$ Z''_{42} $	$ Z''_{44} $
迷你	0.531 9	0.099 3	0.108 9	0.011 8	0.251 3	0.143 4	0.069 3
马自达	0.405 3	0.008 3	0.030 7	0.006 8	0.145 3	0.071 8	0.025 6
雪佛兰	0.509 4	0.080 8	0.038 2	0.005 1	0.206 8	0.089 0	0.054 6
奥迪	0.184 4	0.011 2	0.006 3	0.017 0	0.196 3	0.131 1	0.116 3
宝马	0.385 1	0.058 2	0.044 7	0.001 2	0.167 5	0.068 6	0.016 8
福特	0.552 7	0.132 0	0.019 8	0.010 1	0.253 2	0.297 7	0.059 8

表 5 改进 Zernike 各阶矩对目标图像的识别率

特征值	$ Z''_{20} $	$ Z''_{22} $	$ Z''_{31} $	$ Z''_{33} $	$ Z''_{40} $	$ Z''_{42} $	$ Z''_{44} $
识别率/%	97.2	100	100	91.7	94.4	100	100

### 4 结论

针对图像旋转和尺度变换所引起的图像重采样和重量化的问题,提出了 Zernike 矩的改进方法. 该方法在处理数字图像时不仅具有旋转不变特性而且还具有良好的尺度不变性. 车标图像识别实验结果表明,该改进 Zernike 矩有较高的识别率,且大多数阶的 Zernike 矩都能对车标图像进行完全正确的分类. 但此方法仍存在一些缺点,它只适用于图像信息比较明显的情况,当目标图像背景较复杂时,图像的识别率会有所降低. 因此,有待进一步完善算法以提高其适用性.

#### 参考文献:

[1] 杨国锋,王欢,黄敏,等. 基于修正不变矩的车标识别研究与实现[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2013,28(2):91.  
 [2] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariant [J]. IRE Trans Information Theory, 1962 (8):179.  
 [3] 简丽琼. 基于 Hu 矩和 Zernike 矩的文字识别[J]. 科技

信息,2009(17):454.  
 [4] Teague M R. Image analysis via the general theory of moments[J]. Journal of the Optical Society of America, 1980,70(8):920.  
 [5] 王耀明. Zernike 矩及它们的应用[J]. 上海电机学院学报,2008,11(1):44.  
 [6] Zernike F. Beugungstheorie des schneidenverfahrens und seiner verbesserten form der phasenkontrastmethode [J]. Physica,1934(1):689.  
 [7] 田秋红,刘成霞,杜晓. 基于 Zernike 矩和 BP 网络的道路交通标志识别方法研究[J]. 浙江理工大学学报, 2012,29(2):235.  
 [8] 李春生,简丽琼. 基于 Zernike 矩的图像不变性识别研究[J]. 科技信息,2012,9:57.  
 [9] 商立群,杜亚娟. Hu 矩和 Zernike 矩在图像识别中的应用[J]. 西安科技学院学报,2000,20(1):53.  
 [10] 白雪飞. 改进后的 Zernike 矩在文物图像检索中的应用[J]. 计算机应用与软件,2007,24(3):135.  
 [11] 李亚标,王宝光,李温温. 基于小波变换的图像纹理特征提取方法及其应用[J]. 传感技术学报,2009, 22(9):1308.

图像作为待识别目标,对它们进行预处理操作使其转化为二值图像,求其各阶改进 Zernike 矩值,然后采用最小距离分类器方法对待识别的图像进行识别. 最小距离分类器<sup>[11]</sup>是一种简单的线性分类方法:对于待分类的模式  $x$ ,计算其到各模式类均值  $m_i$  的欧氏距离平方  $\|x - m_i\|^2$ ,然后把  $x$  分到所得结果最小的那类中,最终得到改进 Zernike 各阶矩对待识别图像的识别率(见表 5).

从表 5 可以看出,改进 Zernike 矩有些阶的识别率可达到 100%,而对于另一些阶,即使不能完全正确识别目标,其识别率也是相对较高的.

# 基于 SOM 网络的三维人脸表情识别

李淑红, 尹小娟, 句全

(河南财经政法大学 计算机与信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对二维人脸表情数据所含信息量有限,在光照、姿态变化的情况下识别性能较差等缺点,提出了基于 SOM 网络的三维人脸表情识别方法.该方法用均值和方差来描述人脸表面的凹凸情况,以此作为进一步描述人脸表情变化的特征数据.仿真实验结果表明,采用 SOM 网络的分类效果和识别效果,均优于 AdaBoost 算法.

**关键词:**三维人脸表情识别;形状描述;自组织神经网络

**中图分类号:**TP391.41 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.017

## 3D facial expression recognition based on self organizing mapping network

LI Shu-hong, YIN Xiao-juan, JU Quan

(College of Computer and Information Engineering, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** It is well known that the two-dimensional facial expression data contains limited information, and the poor performance of the facial expression recognition under the condition of changing illumination and posture. In order to overcome these shortcomings of the 2D facial expression, In this paper, we propose and explore a novel method to recognize human facial expression in 3D based on Self Organizing Map (SOM). In the method, the mean and variance are used to describe the convex and concave surface of the face which become the facial expression change characteristics datas. The simulation experimental results showed that the effect of using the classification and recognition of SOM network was superior to the AdaBoost algorithm.

**Key words:** 3D facial expression recognition; shape description; self organizing mapping(SOM) network

## 0 引言

人的面部表情即人脸表情是人类在进行交流时所采用的最有效、最自然和最直接的一种途径,也是人机交互应用中很重要的一种信息资源<sup>[1]</sup>.基于图像的人脸表情识别是以一种非接触式的方式来完成识别工作的,这一点对于实现自然、和谐的人机交互至关重要<sup>[2]</sup>.目前,基于二维的人脸表情识别已经成为包括情感计算、人机交互、计算机视

觉、模式识别等在内的相关研究领域的一个重要发展方向.但是在光照、姿态变化的情况下,二维人脸表情识别性能将急剧下降<sup>[3-5]</sup>.

三维图像获取设备的发展使得三维人脸表情识别成为可能,在已获得数据的前提下,三维人脸图像数据比二维图像数据信息量更大、鲁棒性更强,几乎不受光线影响,而且三维人脸数据具有的几何形体使三维人脸可以更好地克服姿态变化的影响,所以将三维人脸表情数据图像用于人脸表情

识别可以得到更好的效果<sup>[6-8]</sup>. 由于三维人脸数据维数较高,而 SOM (self organizing mapping) 网络可以将任意维数的输入信号模式转变为低维的离散映射,并以拓扑有序的方式自适应这个变换. 故本文拟在突破二维人脸表情识别数据的局限性的同时,采用三维人脸表情数据,并选用拓扑直观的 SOM 网络进行识别,以期在提高表情识别率的同时有效降低数据复杂度.

## 1 三维人脸描述及表情特征提取

SOM 网络又被称为自组织映射神经网络. 它的自组织体现在它能够通过无监督学习和没有指导的训练改变权重,将无序的系统状态变成有序系统状态<sup>[9]</sup>. SOM 网络适合用在那些数据关系不是很紧密的情况下,它通过自身训练,自动对输入模式进行聚类.

### 1.1 三维人脸描述

由于人脸表情变化时会引起人脸表面的凹凸情况发生变化,所以当表情不一样时,人脸表面的凹凸情况也不一样. 基于此,可以用人脸的凹凸变化情况来描述人脸表情.

三维面中的一点  $p$  与其邻近点  $p_i$  之间的关系见图 1.

图中,  $p_i$  是满足  $p_i - p$  的长度约等于半径  $r$  的三维面上的所有点,  $p$  与  $p_i$  组成一个环. 那么,  $p_i - p$  与点  $p$  处的法线  $N_p$  之间的夹角即为

$$\theta = \arccos\left(\frac{(p_i - p) \cdot N_p}{|p_i - p| \cdot |N_p|}\right)$$

其中,  $N_p$  是点  $p$  处的法线,  $\theta$  是  $N_p$  与边  $p_i - p$  组成的角, 范围为  $0^\circ \sim 180^\circ$ .

$$mean(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$$

$mean(\theta) > 90^\circ$ , 则表明半径为  $r$  的球面是凸面; 反之, 如果  $mean(\theta) < 90^\circ$ , 则表面这个面是凹面.

为了更好地描述三维图像的表面情形, 用公式  $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2$  求取角的方差, 来确定图像表面凹凸变化的差别.

### 1.2 三维人脸表情特征提取

目前基于三维数据的人脸表情识别的算法大致可以分为 3 种, 即基于局部或整体或者是两者相结合的方法. 基于局部特征提取的人脸表情识别方法实际上就是利用人脸面部中重要部位的特征进行分类识别.

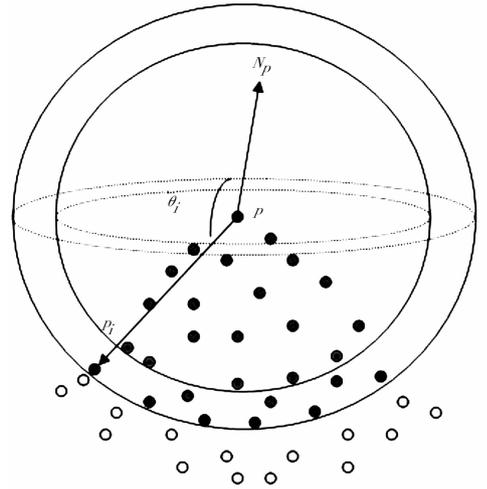


图 1 点  $p$  与其周围邻近点之间的关系

由于鼻子是人脸的主要特征之一, 又处于人脸的中心位置, 所以选取鼻尖为人脸特征提取的参照点. 进行三维人脸图像数据描述的步骤如下.

1) 对 FRGC 3D 人脸数据库中矫正过的三维人脸, 以鼻尖为基准点, 其中矫正过的三维人脸鼻尖点所处坐标为  $p_0(0, 0, 0)$ , 如图 1 所示. 求距离鼻尖环半径为 5 mm 的第 1 个环面上其他数据点  $p_i$  与鼻尖点  $p$  的凹凸关系, 用  $\theta$  表示, 求第 1 个环面上的  $mean(\theta)$  和  $\sigma^2$ .

2) 用同样的方法求半径为 5 mm 的第 2 个环面上点  $p_i$  与鼻尖点  $p$  的凹凸关系, 以此类推. 共求 10 个环面上的点与  $p$  的凹凸关系, 最终得出一个 20 维的有关均值和方差的矩阵.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验数据准备

FRGC 3D 人脸数据库是 2002—2004 年间通过激光扫描得到的, 是具有不同姿态与表情的人脸数据库. FRGC 3D 人脸库具体见表 1.

表 1 FRGC 3D 人脸表情数据库

类别	图像	人数	数据集
训练集	943	275	FRGCv1
测试集	4007	466	FRGCv2

本研究课题的仿真实验训练样本集, 是从 FRGC 3D 人脸表情数据库的训练部分中抽取的 136 张包括笑和平静(平静也可以称为中性表情)的图像数据, 用本文有关人脸描述和特征提取的方法进行特征提取.

### 2.2 AdaBoost 分类器表情识别

为了能更直观地说明 SOM 网络用在三维人脸表情识别中的性能,本仿真实验用相同的实验数据分别在 AdaBoost 分类器和 SOM 网络这 2 种不同的分类器上进行表情识别.

对比实验所用的 AdaBoost 分类器是将 3 个弱分类器最近邻 (NN)、朴素贝叶斯 (NB) 及 LDA 用 AdaBoost 针对多态分类问题的算法进行分类. 这 3 种弱分类器针对人脸模型特征识别的平均识别率分别为 84.6% ,88.8% 和 87.8%. 实验结果见表 2.

表 2 AdaBoost 对人脸表情的识别结果 %

分类算法	平静	笑
NN	90.2	91.2
NB	89.0	90.2
LDA	88.8	89.7

从表 2 可以看出,经过 AdoBoost 算法后,3 个弱分类器分类效果都有不同程度的加强. 经过 Ada-Boost 训练后 3 个弱分类器特征提取表情的识别率分别平均为 90.7% ,89.6% 和 89.3%.

### 2.3 SOM 网络表情识别

SOM 网络是一种无监督的学习,通过自我训练对输入的数据进行自动聚类. 用它进行三维人脸表情识别步骤如下:

1) 将 data 格式的三维人脸表情数据训练集加

载到 Matlab 下并且标准化;

2) 用标准化后的三维人脸表情训练数据集对 SOM 神经网络进行训练;

3) 记录 SOM 训练输出节点集及它们代表的人脸表情类别;

4) 将测试三维人脸数据集输入到训练好的 SOM 网络中,找出 SOM 网络的获胜节点  $M'$  和训练时的  $M$ , 比较后给出分类.

对 FRGC 3D 人脸表情数据库中的训练部分的 136 张图像数据进行特征提取,并进行 SOM 网络训练. 为使在结果中查找 BMU 描述更方便,对 136 张图像数据进行编号,训练结果如图 2 所示.

图 2 中, a) 图是 u-matrix 显示方式,测度条上面高值代表的颜色表示聚类的边界,低值表示聚集在一起的一类. 从 u-matrix 图中可以看到,通过训练, SOM 将输入数据聚为 2 类,在本实验中即是将笑与平静 2 类人脸表情聚到不同的 2 类中; b) 图是通过标签标识成不同类别的,从图中可以看出,平静和笑被标出分别对应着不同的类别; c) 图是三维网格图,通过三维空间展示,可清楚地看出 SOM 将笑与平静分成 2 类. 从 SOM 网络的实验结果可以看出, SOM 网络对训练样本的 136 张人脸表情数据中笑和平静的聚类结果很理想.

为了测试 SOM 网络对人脸表情的识别性能,上

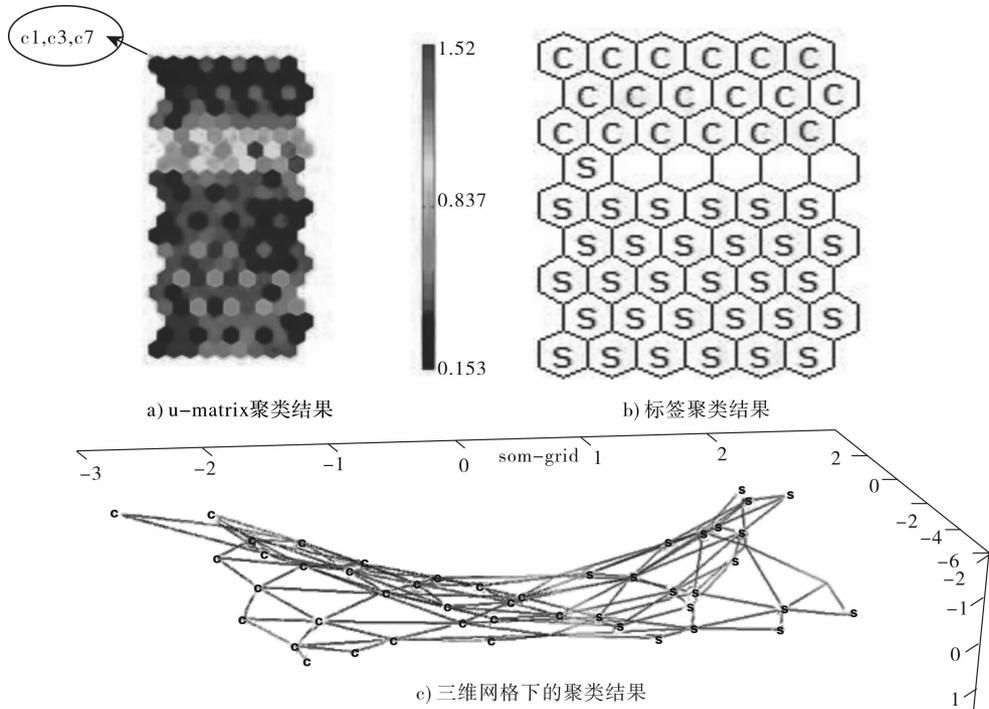


图 2 SOM 网络人脸表情聚类结果

述聚类过后还需要用测试样本集对其分类效果进行测试. 测试实际上就是找到其最佳匹配单元 BMU, 然后对比匹配结果.

通过 `find()` 函数找到每个神经节点所对应的获胜节点 BMU, 如图 2a) 所示, `u-matrix` 图的第 1 个胞体对应着平静表情下的序号为 (1, 3, 7) 的图像数据训练结果. 然后输入测试集进行测试, 通过找到其所对应的 BMU 得出测试集表情所属的类别.

本实验是对 FRGC 3D 人脸表情数据库中完全不同于训练集的人脸图像分别进行测试, 平静表情数据 50 个, 笑表情数据 50 个, 测试结果见表 3.

表 3 SOM 网络识别结果

测试集	笑	平静	识别率/%
笑	49	1	98
平静	3	47	94

## 2.4 实验结果分析

将 SOM 网络与 AdaBoost 算法相比较, 在对相同特征数据进行分类识别的情况下, AdaBoost 对人脸表情识别结果与 SOM 网络对人脸表情识别效果进行比较 (如图 3 所示). 从图 3 可以得出, 无论是从分类效果还是从最终的识别效果上看, SOM 网络都优于 AdaBoost 迭代分类.

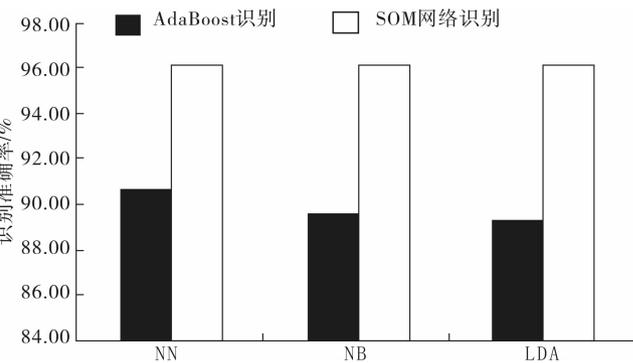


图 3 AdaBoost 与 SOM NB 网络性能比较

## 3 结语

本文将三维人脸表情数据用于表情识别, 将物体表面凹凸情况的三维物体描述方法用于描述三维人脸表情, 同时采用 SOM 网络这种拓扑直观的分

类器对人脸表情进行分类, 从而使人脸表情识别率得到提高.

虽然三维表情识别在精度方面还存在瑕疵, 但比起二维表情数据, 无论是在数据信息量方面, 还是在抗光照和姿态方面, 三维表情数据都有很强的鲁棒性, 值得研究者重视三维人脸表情的识别. 因此, 后续工作的重点应放在对三维人脸表情特征的描述以及 SOM 训练上.

## 参考文献:

- [1] Essa I A, Pentland A P. Coding, analysis, interpretation, and recognition of facial expressions[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7):757.
- [2] Fukui K, Yamaguchi O. Facial feature point extraction method based on combination of shape extraction and pattern matching[J]. Systems and Computers in Japan, 1998, 29(6):49.
- [3] Ekman P, Friesen W V, Hager J C. Facial action coding system[J]. A Human Face, 2002, 23(5):301.
- [4] Bartneck C. Integrating the occ model of emotions in embodied characters[C]//Workshop on Virtual Conversational Characters: Applications, Methods and Research Challenges, Melbourne, Citeseer: [s. n.], 2002.
- [5] Hui K, Wang C. Clustering-based locally linear embedding[C]//ICPR, [s. l.]: IEEE, 2008: 1-4.
- [6] Rish I. An empirical study of the naive Bayes classifier[C]//Proceedings of LICA Workshop on Empirical Methods in Artificial Intelligence, [s. l.]: IEEE, 2001: 41-46.
- [7] Chua C S, Han F, Ho Y K. 3D human face recognition using point signature[C]//International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, [s. l.]: IEEE, 2000: 233-238.
- [8] Darr H, Mayshar Y, Benvenisty N. Overexpression of NANOG in human ES cells enables feeder-free growth while inducing primitive ectoderm features[J]. Development, 2006, 133(6):1193.
- [9] Teuvo Kohonen. Self-organizing Maps[M]. New York: Springer Verlag, 1997.

# 基于视频的道路信息采集与发布系统

张杰, 樊霄艳, 邓卓

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对如何实时地对道路车流量进行监控并判定交通实时状况的问题,设计了一种基于视频的道路车流量信息采集与发布系统.该系统采用改进的高斯平均法对路面背景提取和更新,利用背景差分 and 特征提取突出计算车辆个数,提高了车流量统计的效率,具有应用价值.

**关键词:**高斯平均法;背景差分;车流量统计;交叉口拥堵

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.018

## A road information acquisition and release system based on video

ZHANG Jie, FAN Xiao-yan, DENG Zhuo

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

**Abstract:** Aiming at how to monitor road traffic flow with real-time intelligent and determine the real-time traffic conditions, a road traffic flow information acquisition and release system based on video was designed. Using improved Gaussian method, the road background was extracted and updated, then the vehicle number was calculated by background subtraction and feature extraction which improved the efficiency of traffic flow statistics and had application value.

**Key words:** Gaussian method; background subtraction; traffic flow statistics; intersection congestion

## 0 引言

随着我国交通事业的飞速发展和汽车数量的迅猛增加,交通拥挤影响出行的问题日趋严重.如何实时智能地对道路车流量进行监控,从而及时了解交通情况,为有计划的出行提供决策依据,成为一个亟待解决的问题.

尽管人们可以利用导航仪或广播电台获得路况等信息,但出行者不能实时了解所需路线的状态信息.如果拥有一个实时道路信息采集与发布系统,出行者便能够根据自己的意愿了解某个路口的畅通情况,从而选择适合自己的最佳行车路线,这对开车上班族或者时间有限的出行者来说都是非常有意义的.

在智能交通系统中,数据采集模块占有重要地位.视频检测技术在交通信号控制系统中主要应用于交叉口车流量<sup>[1]</sup>、分向流量、车速和排队长度的检测.基于视频的车流量检测技术适应性强且容易维护,检测方法主要包括光流法、灰度等级法、背景差分法<sup>[2]</sup>、帧差法<sup>[3]</sup>、边缘检测法等.光流法实时性较差;灰度等级法的灰度阈值容易受环境和光线变化影响;帧差法提取的运动目标不完全;边缘检测法对于路面边缘不明显的情况,其检测结果不理想甚至会出现错误;背景差分法利用当前输入帧和背景模型差来获取运动目标,然后对处理过的图像进行特征提取,从而达到计算车辆数量的目的,是最常用的视频<sup>[4]</sup>车辆检测方法,其优点是算法简单、处理速度快,且差分结果能直接反应运动目标的位

置、形状、大小等,实时性较强。目前,基于视频的车辆检测技术已开始应用于智能交通监控系统<sup>[5]</sup>,但很多视频监控系统存在人力资源不足、效率不高、不能实时监控等弊端,应用于路面道路交通流判定拥堵的系统较少。交警部门往往采用铺设物理线圈来监测车流量,但此法破坏路面,损耗很高。而且虚拟线圈多用于检测和识别,没有真正实现实时监控。

鉴于此,本文基于卫星导航系统和移动通信网络(GSM)设计一种道路信息采集与发布系统,以简单快捷地引导用户的出行;以Matlab仿真软件为实验平台验证该系统的有效性。

## 1 道路信息的数字化传送

### 1.1 检测区域的设定

为了降低定位和跟踪的复杂度,提高系统的检测准确度,在交通场景中设定一个虚拟的检测区域,只有进入检测区域的车辆才被检测。

路面信息采集用视频监控方式进行,将实时采集的信息发送至数据处理中心,数据处理中心对数据源进行处理后再传送到信息发布平台。

从信息发布平台获取的信息包括停车线前绿灯时刻的车辆数量变化趋势及车辆通过交叉口的速度、未通过交叉口的车辆在即时红灯时刻的数量信息、是否畅通适合行驶等。

### 1.2 信息的传输流程

本文设计的道路信息采集与发布系统,主要由用户终端、路面采集系统、路况信息处理中心、信息发布平台4大部分组成。系统结构如图1所示。

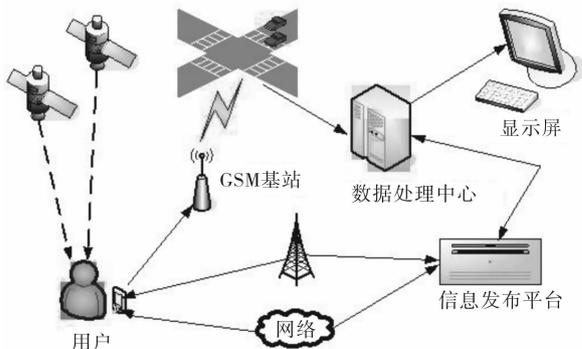


图1 道路信息采集与发布系统结构图

视频监控点布设在城市的十字路口、关键地理位置等路段。监控点将采集的道路信息生成视频数据通过有线网络传输至数据处理中心,然后对原始数据进行过滤、去噪、匹配等处理,得到道路交通信

息。数据处理中心是整个道路信息采集与发布系统的核心,主要完成系统数据的处理、参数解算、数据融合等。

用户通过接收卫星信号实时获得定位信息。用户申请路况服务时,主要查询某条道路、某个路口或者所在位置的畅通状态。路况数据处理中心综合处理数据源,同时通过显示屏直观地看到路况信息,并将处理结果通过信息发布平台发送至用户。信息发布平台将数据处理重新生成的道路交通状况、交通事故等交通信息,通过移动通信网络发送给用户,也可以通过公共平台向公众传播。

### 1.3 移动终端

驾驶者在移动终端上根据选择所在区域向区域主控中心发出查询申请。系统通过定位系统得知汽车的定位信息,通过数据中心提供实时路况信息以供驾驶者选择出行路线。系统将即时的路况信息和具体行车路径发送到驾驶者的移动终端。移动终端与区域信息发布平台通信流程如图2所示。

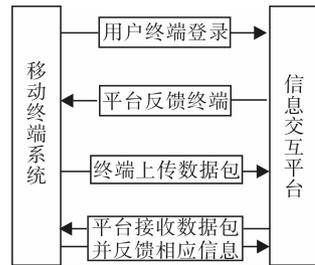


图2 移动终端与交互平台通信图

移动定位系统与通信系统在信号覆盖率很低的情况下,移动终端信息发布平台仍能满足完全、实时接收信号的要求。

## 2 车辆视频的处理

### 2.1 车辆图像的预处理

车辆图像通常都是彩色图像,需通过预处理将彩色图像转变为灰度图像,以加快处理速度和统一多种颜色的车辆。这样,不同车辆图像在特征提取和识别时才具有可比性。

获取在停车线前面的车辆的视频帧图像,首先对采集到的视频图像进行灰度变换及图像去噪等预处理。由于背景图像不是一成不变的,会受到外界因素的影响,所以,需要利用高斯平均法对车辆图像进行路面背景提取和更新,使提取的路面背景图像能够很好地适应不同的情况。然后利用背景差

分法突出目标车辆,通过特征提取对车流量进行计数.最后对时间组内的车流量进行统计,根据制定的道路畅通标准进行判定.车辆视频处理和车流量检测流程见图3.

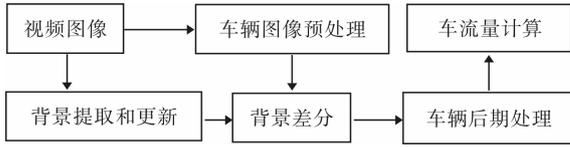


图3 车流量检测流程图

采用加权平均值法将图像灰度化,用  $g$  表示灰度化后的灰度值,其转换公式如下:

$$g = W_r R + W_g G + W_b B$$

其中,  $W_r = 0.299$ ,  $W_g = 0.588$ ,  $W_b = 0.113$ .

在摄像头采集车辆图像的过程中,由于设备的噪声干扰,不可避免地会造成图像质量下降,可采取中值滤波的方法去除噪声.本文采用  $3 \times 3$  方形窗口进行滤波,能很好地消除图像中孤立噪声点的干扰,还能有效地保护边界信息.

## 2.2 路面信息的背景提取和更新

路面背景图像是背景差分法的基础,它的获取是否理想,直接关系到最终对车辆进行计数的准确性.因此路面背景图像中不应该包含运动物体,这就需要从已有的包含运动车辆的图像中提取出一个没有运动车辆的道路背景图像,即初始背景.由于道路上一般总是存在着运动车辆,初始背景很难用相机直接拍摄得到,为此,可通过对一定数量的视频帧进行训练得到初始路面背景.这里选择具有运动车辆的图像序列中的50帧,利用帧平均法获得没有运动车辆的路面背景图像.经对一段视频进行试验,得到路面背景图像见图4.

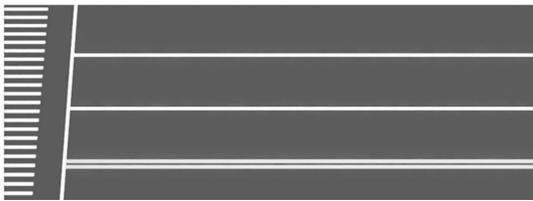


图4 路面背景图像

为使提取的路面背景图像能够很好地适应不同的情况,需要随着外界条件的变化对路面不断更新.首先确定需要更新的区域:用当前帧图像与前一帧图像做差分,将差分结果与选定的阈值做比较,大于阈值的为车辆的运动区域,背景可保持;而

小于阈值的则是车辆运动区域外的部分,路面背景需更新.

均值法是最简单的方法,即对一定数量帧的图像求平均值,该方法的增量形式如下:

$$B_j(x, y) = \frac{1}{j} I_j(x, y) + \frac{j-1}{j} B_{j-1}(x, y)$$

式中,  $B_j(x, y)$  表示第  $j$  帧背景,  $I_j(x, y)$  表示第  $j$  帧图像,  $B_{j-1}(x, y)$  表示第  $j-1$  帧背景.可以看出,均值法有利于工程实现,但是随着帧数的增加,当前帧的权重  $1/j$  变小.

故采取一种改进的高斯平均法,如下式:

$$B_j(x, y) = \alpha I_j(x, y) + (1 - \alpha) B_{j-1}(x, y)$$

式中,学习率  $\alpha$  可取从0到1的定数,一般在背景生成的稳定性和对环境变化的适应性之间做权衡.根据试验,取  $\alpha = 0.12$ ;  $B_j(x, y)$  为背景图像在  $(x, y)$  处的像素值;  $I_j(x, y)$  为第  $j$  帧图像.

## 3 基于车流量的拥堵判定

本文通过对交通路口等待信号灯的车辆进行计数来判定道路的拥堵状况,但由于实际情况中光线的变化,路边树木、建筑、车辆自身的阴影,以及摄像机抖动这些因素,均会影响到计数的准确性,在研究中应避免或去除这些因素的影响.通过比较前人在相关内容上的研究,选用背景差分法来对车辆计数.将采集到的车辆图像的每一帧都与一个不含运动车辆的静止参考帧做差值运算,从而突出目标图像,再通过分析与处理对车辆进行计数.

为了进一步地突出车辆目标并加快图像处理的速度,首先对车辆图像亮度做相应调整,再将其进行二值化处理,以得到鲜明区分目标的二值图.设图像  $f(x, y)$ , 其灰度级范围为  $[12Z, Z]$ , 在  $Z_1$  和  $Z_2$  之间选择一个合适的灰度阈值  $t$ , 则二值化后的图像为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) < t \\ 0 & f(x, y) \geq t \end{cases}$$

为更好地进行特征提取,需要对车辆图像进行形态学处理,即膨胀与腐蚀.先用膨胀将图像的裂缝桥接起来,再用腐蚀消除二值图像中不相关的细节.经过上述处理后的图像见图5.

车流量计算的基本思路是:将采集的图像进行处理之后,利用 Matlab 对连通对象进行标注,数出矩阵中不为0的联通区域的个数,即为测量道路上车辆的个数.利用上述思想对所处理的车辆图像进

行计数,所得结果为10.

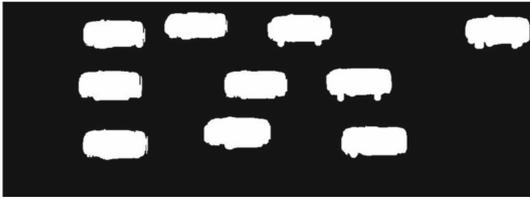


图5 处理后的道路图像

通过对绿灯通行的时间组  $t$  内停车线前的图像帧组车辆数  $N_{ix} \{N_{i1}N_{i2}N_{i3} \dots N_{im}\}$  以及绿灯变红灯时刻继续等待绿灯的车辆数  $N$  的统计,若  $N_{ix} \geq 12$  的数据组为  $N_i \{N_{i1}N_{i2}N_{i3} \dots N_{im}\}$  在数据组内达到 65%,并且此时  $N \geq 12$  为条件,即

$$\begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{im} i}{\sum_{i=1}^n x} \geq 65\% & N \geq 12 \end{cases}$$

若满足条件则判定为 0,表示此路口不适合畅通出行;若不满足则判定为 1,表示此路口适合畅通出行.

### 4 测试结果

对采集到的车辆视频进行计数,并将车流量计数结果与实际车流量情况进行比较,结果见表 1. 从表 1 可以看出,车流量检测准确率均达 90% 以上,但是仍然存在一定的误差,产生误差的主要原因是车辆重叠和车辆并行,导致系统检测误判.

表1 车流量检测结果比较

时间段	实际流量/辆	检测流量/辆	准确率/%
$T_1$	18	17	94.40
$T_2$	17	17	100
$T_3$	14	13	92.80
$T_4$	15	15	100
总流量	64	62	96.80

表 2 对其他几种车辆检测方法的检测计数结果予以比对. 视频获取环境为同一交叉口,实际车辆为 64 辆,以 Matlab 仿真软件为实验平台. 从表 2 可以看出,灰度等级法、帧差法和边缘检测法相对误差数比较大,采用改进的背景差分方法所得到的误差数最小.

对一段视频进行检测,在规定时间内所监测到的车流量的动态变化如图 6 所示. 从图 6 可以看出,大多数车辆在绿灯通行时刻都在监测范围之

内,车辆数量在 9 ~ 18 辆区间之内. 其中 > 13 辆的时间段为图中直线之上的数据,此次监测中,车流量比为 67%,并且  $N = 15$ . 所以判定结果为 1,即此路口适合畅通出行.

表2 不同方法车流量检测计数结果对照辆

检测方法	检测车辆数	误差数
灰度等级法	47	17
背景差分法	61	3
帧差法	54	10
边缘检测法	52	12
本文方法	62	2

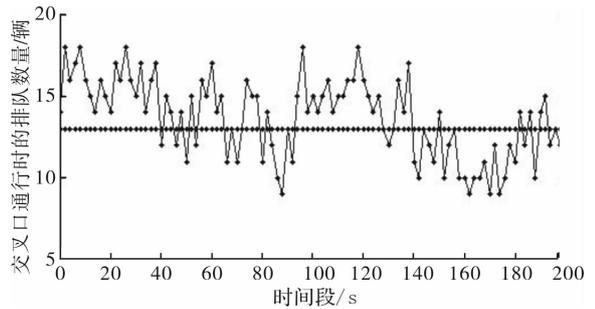


图6 车流量的动态变化

### 5 结论

针对城市道路拥堵给驾驶者带来的诸多不便,本文设计了道路信息采集与发布系统. 该系统采用改进的高斯平均法对路面背景提取和更新,利用背景差分 and 特征提取突出计算车辆个数,从而提高了车流量统计的效率,给驾驶者带来了有价值的参考信息. 实际的测试和比较表明,该系统具有实际的应用价值.

#### 参考文献:

[1] 郭怡文,袁飞虎. 基于背景差分的多车道车流量检测系统[J]. 电光与控制,2010,17(9):90.  
 [2] 董春利,董育宁. 基于视频的车辆检测与跟踪算法综述[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版,2009,29(2):88.  
 [3] 畅芬叶,王志利. 交叉口及路段拥挤界定研究[J]. 太原理工大学学报,2012,43(4):523.  
 [4] 郭锋,王秉政,陈燕. 道路交通视频的车辆跟踪算法[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(3):74.  
 [5] 赵小明,王新新. 一种基于机器视觉的视频交通流检测系统[J]. 信息与电子工程,2011,9(2):258.

# 非线性最优滤波采样计算方法述评

郭凌云<sup>1</sup>, 赵文丽<sup>2</sup>, 丁国强<sup>1</sup>, 张志艳<sup>2</sup>

- (1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;
2. 河南省轻工业职工大学 机电工程系, 河南 郑州 450002)

**摘要:**基于贝叶斯估计理论基础,从减小最优滤波算法计算量、提高计算效率的角度综述了 Gauss-Hermite 滤波、扩展 Kalman 滤波、Sigma 点 Kalman 滤波算法中的确定性采样计算方法以及粒子滤波算法中随机样本点粒子计算方法,指出:针对粒子滤波算法中采样函数设计、重采样技术、高斯近似法与粒子滤波法的有效融合来设计研究新型高效高精度粒子最优滤波算法,将成为未来 Bayesian 最优滤波理论方法研究的重要领域和发展方向,而构建区间粒子最优滤波理论算法不失为粒子滤波理论算法研究的新思路。

**关键词:**贝叶斯滤波;卡尔曼滤波;确定性采样;随机性采样;粒子滤波

**中图分类号:**TN957.51 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.019

## Review of sampling-data analysis methods in nonlinear optimum filtering algorithm

GUO Ling-yun<sup>1</sup>, ZHAO Wen-li<sup>2</sup>, DING Guo-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-yan<sup>1</sup>

- (1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. Department of Machinery and Electrical Engineering, Light Industry Vocational University of He'nan Province, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:**Based on the Bayesian parameters estimation theory, prospecting from the reducing amount of calculation and improving computational efficiency, the deterministic sampling methods such as the Gauss-Hermite filtering, extended Kalman filtering, and Sigma-points Kalman filtering algorithms and the random sampling methods of particles filtering algorithms were reviewed, the research field and development direction of Bayesian optimal theory were presented, which could design the new efficient and high-precision particle filtering algorithm from the sampling function design, resampling technique and Gauss approximate method. At the same time, designing the box particle filtering algorithms became the new idea of the particle filtering algorithm.

**Key words:** Bayesian filtering; Kalman filtering; deterministic sampling; random sampling; particle filtering

收稿日期:2013-05-21

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1204603);郑州轻工业学院博士基金项目(2011BSJJ00048)

作者简介:郭凌云(1981—),女,河南省商丘市人,郑州轻工业学院助理实验师,主要研究方向为计算机仿真技术。

通信作者:丁国强(1975—),男,河南省南阳市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为机电一体化测控系统集成与网络化。

## 0 引言

利用非线性最优滤波理论算法对系统状态参数进行最优实时估计,在诸如导航制导、控制系统等许多领域都有广泛的应用.一般处理方法是:根据获得的非线性系统动态模型方程和量测方程模型,利用 Bayesian 最优概率推理理论,集中估计处理系统的状态向量. Bayesian 最优滤波理论根据包含噪声的序列观测向量,通过实时更新系统状态或者参数的条件概率密度函数,充分利用所有的观测信息和系统已知信息,给出解决系统状态参数计算问题的基本思路与框架,例如 Kalman 最优滤波算法就是 Bayesian 最优估计理论的实现算法之一,其后验概率密度函数需要包含系统状态参数的全部统计信息,在 Bayesian 最优滤波理论框架下的 Kalman 最优滤波算法是这一问题的完整解决方法.但在实际应用中, Bayesian 最优估计方法需要计算无穷维积分,这是不现实的.在 Bayesian 最优估计理论算法设计中更多采用的是次优滤波算法,如针对 Kalman 最优滤波算法的次优滤波算法实现中的一阶扩展 Kalman 滤波(first order extend Kalman filter, EKF)算法,一般称之为扩展 Kalman 滤波算法和估计精度较高的二阶扩展 Kalman 滤波(second order extend Kalman filter, SOEKF)算法.但是扩展 Kalman 最优滤波算法需要计算高阶 Jacobin 矩阵,这在很多应用场合中是非常复杂的,很多情况下会导致估计出现偏差甚至发散.于是寻求计算效率高、滤波精度满足实际系统要求的新型最优估计算法便成为人们不断寻求新的非线性最优滤波算法的动力源泉.如引入 Gauss-Hermite 逼近法、Unscended Transformation 法<sup>[1-2]</sup>等采样计算方法,从而使现代非线性最优滤波理论获得了巨大的发展.这些方法在实现策略、使用范围等方面都是对系列的 EKF 实现算法的有益扩展,滤波计算性能也得到较大提高.本文拟在分析 Bayesian 基本滤波理论的基础上,对基于采样计算的 Gauss-Hermite 算法、Unscended Transformation Kalman 算法、粒子滤波算法和最新的区间粒子滤波算法,就理论基础、应用范围及相互间的联系进行综述,并指出最新的粒子最优滤波算法发展的新趋势.

## 1 Bayesian 最优滤波理论

Bayesian 最优滤波理论框架中非线性系统状态

或者参数估计,是由在统计推理基础上表达系统状态参数的时变状态方程和量测方程构建的系统状态空间模型,对待估计计算的系统状态参数做出递推推理,在这里以离散形式表示非线性系统状态空间模型为

$$\begin{cases} X_k = F_k(X_{k-1}, W_k) \\ Z_k = H_k(X_k, V_k) \end{cases}$$

式中,  $\{X_k, k \in N\}$  是系统的状态向量,  $F_k: R^{n_x} \times R^{n_w} \rightarrow R^{n_x}$ ,  $H_k: R^{n_x} \times R^{n_v} \rightarrow R^{n_z}$  是非线性函数;  $\{W_k, k \in N\}$ ,  $\{V_k, k \in N\}$  是独立同分布的噪声向量序列.

Bayesian 最优滤波理论就是利用非线性系统模型的全部已知信息构建系统状态参数条件概率密度函数  $p(X_k | Z_{1:k})$ , 其中  $Z_{1:k} = \{Z_i, i = 1, 2, \dots, k\}$  是已知的观测向量序列. 通过递推推理计算得到准确的  $p(X_k | Z_{1:k})$ , 进而可以得到非线性系统估计问题的状态参数最优估计值.

假设已知  $k-1$  时刻状态参数后验概率分布函数, 利用非线性系统方程的条件转移概率函数可获得  $k$  时刻的先验分布, 即 Bayesian 最优滤波的时间更新操作:

$$p(X_k | Z_{1:k-1}) = \int p(X_k | X_{k-1}) p(X_{k-1} | Z_{1:k-1}) dX_{k-1}$$

利用  $k$  时刻最新观测量  $Z_k$  和 Bayesian 估计准则更新先验概率分布函数, 获得  $k$  时刻的后验概率分布, 也就是 Bayesian 最优滤波的观测更新操作:

$$p(X_k | Z_{1:k}) = \frac{p(Z_k | X_k) p(X_k | Z_{1:k-1})}{p(Z_k | Z_{1:k-1})}$$

其中  $p(Z_k | Z_{1:k-1}) = \int p(Z_k | X_k) p(X_k | Z_{1:k-1}) dX_k$  是归一化常数函数.

经过时间更新和观测更新递推步骤的多次迭代计算, Bayesian 最优滤波计算可以准确获得状态参数的最优数值解, 但是在给定当前观测量  $Z_{1:k}$  条件的情况下, 计算非线性方程期望值的多维积分计算过程, 使得 Bayesian 最优滤波的递推迭代变得不可能实现. 仅在线性加性高斯噪声条件下可以获得精确的解析解.

在 Bayesian 最优滤波框架中, 除非线性系统状态参数的先验概率密度函数为高斯分布, 系统过程噪声和观测噪声满足加性高斯分布, 由于高斯分布的一阶矩和二阶矩包含了概率分布的全部信息, 所

以能够估计计算系统状态参数条件均值  $\hat{X}_k = E[X_k | Z_{1:k}]$  及协方差阵  $P_{XX}$ , 从而递推计算状态后验概率分布  $p(X_k | Z_{1:k})$ , 其实现过程就是 Kalman 最优滤波算法<sup>[2]</sup>. 但是在很多情况下, 系统噪声向量序列和观测噪声向量序列并不能满足 Gauss 噪声分布, 在此情况下非线性 Kalman 最优滤波算法就失效了.

## 2 次优滤波方法的采样计算策略

Kalman 滤波实现算法仅是针对系统状态参数为高斯分布情形实现的一类 Bayesian 最优滤波, 实际场合中非线性非高斯系统是更为广泛存在的情况, 此时只能采用近似次优滤波算法. 若对系统模型方程和观测方程中的过程噪声、观测噪声做出高斯分布假定, 在 Bayesian 最优滤波理论框架下使用 Kalman 滤波计算步骤获得非线性系统状态参数的最优滤波解, 则可以统称为 Gauss 近似法, 其中对非线性函数线性化近似处理的, 如近似精度采用一阶或者高阶, 则可以获得扩展 Kalman 最优滤波算法和 Sigma-Point Kalman 滤波法 SPKF (有时称之为 unscented transformation Kalman filtering, UKF). 而序贯 Monte Carlo (SMC) 法完全放弃 Kalman 最优滤波计算步骤, 利用多点采样粒子 (sampling particles) 的概率统计特性, 以逼近状态后验概率密度函数方法, 从而实现滤波计算过程.

### 2.1 Gauss-Hermite 数值积分逼近法

Gauss-Hermite 数值积分法是一类无限积分的数值逼近计算方法, 利用 Gauss-Hermite 多项式公式逼近一个无限积分, 获得其积分计算结果近似数值. 若预测当前状态的条件转换概率为高斯分布, 则可以采用 Gauss-Hermite 插值多项式实现近似计算:

$$\int F(Z) \exp\{-Z^2\} dz \approx \sum_{i=1}^M \omega_i F(Z_i)$$

上述计算利用了 Hermite 多项式的  $M$  个积分采样点及其权值实施 Gauss-Hermite 数值积分计算, 这样积分计算的结果, 其数值代数精度可以达到  $2M - 1$ , 这些积分采样点位于  $n$  维超球上面, 其中高阶项位于  $n$  维超球的边缘, 以附加项形式出现. 对于不大于  $2M - 1$  阶次的被积函数  $F(Z)$ , Gauss-Hermite 数值积分是精确成立的. 文献[3]利用 Gauss-Hermite 数值积分逼近法能够有效改善正交 Kalman 非线性滤波算法特性, 提高算法计算效率. 在容积 Kalman 滤波算法中利用 Gauss-Hermite 数值积分实现容积

数值积分逼近, 直接计算非线性系统函数的均值和方差, 可以有效改善算法的计算精度<sup>[4-5]</sup>.

### 2.2 Extended Kalman 最优滤波的线性化逼近法

EKF 方法<sup>[5]</sup>是在 Gauss 噪声假设条件基础上对相应 Gauss 随机变量作 Taylor 级数展开

$$Y = G(X) =$$

$$G(\bar{X}) + \nabla_c \theta_X + \frac{1}{2!} \nabla_c^2 \theta_X^2 + \frac{1}{3!} \nabla_c^3 \theta_X^3 + \dots$$

Taylor 级数展开式做一阶截断就可以获得 EKF 中均值和方差计算数值, 即

$$\bar{Y} \approx G(\bar{X})$$

$$P_Y \approx \nabla_c P_X \nabla_c^T$$

这里实际上是用前面步骤获得的采样均值作为线性化参考点来实现非线性系统函数的线性化处理, 利用该结论将非线性系统模型线性化后就可以采用 Bayesian 最优滤波理论的 Kalman 最优滤波算法来实现系统状态参数的最优滤波计算, 这就是 EKF 滤波算法的基本实现思想. EKF 算法中线性化参考点的准确程度会对滤波性能产生很大影响.

EKF 最优滤波算法在线性化过程中对 Taylor 级数展开式的一阶截断线性化处理, 其均值和方差计算结果仅有一阶的精度, 若分别取前二阶或者更高阶项, 则其最优滤波数值就有二阶或者更高阶滤波精度, 但是其 Jacobean 矩阵将会变得非常复杂, 甚至难以求解, 其计算效率远远不能满足实际系统的快速性计算要求. 蒙特卡洛仿真结果表明 SOEKF 滤波性能比 EKF 滤波性能好<sup>[6]</sup>, 但更高阶 EKF 滤波与二阶滤波相比, 性能并没有很大的提高, 因此, 超过二阶滤波的高阶滤波一般都不采用该方法, 只有当系统非线性度较强时才采用二阶滤波.

滤波计算中观测更新后的系统状态参数比预测状态参数会更接近真实值, 观测更新若能利用新观测信息, 则可以获得更为精确的计算结果, 这就是迭代 EKF 最优滤波算法, 它同时还可以改进线性化参考点位置. 迭代 EKF 法通过重复利用观测信息改善线性化轨迹, 为获得最优滤波性能提供了一条有效途径<sup>[7-8]</sup>. 但是这些方法都没有考虑系统状态及噪声的随机分布性, 仅在当前状态、估计值点上作线性变换. 这些措施都会使转换后的变量均值和方差计算引入误差, 甚至有可能导致滤波器发散失效. 如何有效计算 EKF 算法中的均值和方差计算, 改善 EKF 算法性能, 已成为目前 EKF 算法研究的一个重要方向.

### 2.3 Sigma-points 确定性采样点逼近法

为了提高高斯次优滤波算法计算的准确性、一致性及有效性,人们提出了一类确定性采样法对非线性变换采样点的变换逼近算法. 对于非线性系统函数,在 Gauss-Hermite 数值积分逼近算法基础上,在随机变量的先验分布上取其前  $n$  个积分采样点,称之为 Sigma-points 采样点,利用不同的数学方法确定各采样点的对应权值,获得确定性采样最优滤波算法. 如 unscented transformation Kalman 最优滤波<sup>[9]</sup>、UKF 算法和中心差分 Kalman 滤波<sup>[10-11]</sup> (central difference Kalman filter, CDKF) 算法等新型 Kalman 最优滤波实现算法.

**2.3.1 UKF 最优滤波算法** UKF 算法中的 Sigma 点,是取自 Gauss-Hermite 数值逼近多项式中  $M$  个采样点中的前  $2n + 1$  个点,其余的高阶采样点对估计计算结果的影响较小,但是通过对 Unscented Transformation 中的 3 个参数的适当选择可以消除其对计算结果的影响,对 Sigma 点及对应权值选取 Sigma 点能够捕获随机变量  $X$  重要统计特性,此时 Sigma 点选取问题便转化为优化问题:

$$\begin{aligned} & \min_{\langle \chi, \omega \rangle} C(\langle \chi, \omega \rangle, n, p(X)) \\ & \text{s. t. } \zeta(\langle \chi, \omega \rangle, n, p(X)) = 0 \end{aligned}$$

这里  $\langle \chi, \omega \rangle$  是全部 Sigma 点及其权值集合;函数  $\zeta(\cdot)$  表示约束条件; $C(\cdot)$  是代价函数,包含要求的统计特性; $\zeta(\cdot)$  是必须满足的条件,在 UKF 算法中一阶矩和二阶矩是必须具有的统计特性, $\zeta(\cdot)$  条件表示为

$$\begin{aligned} \zeta_1(\langle \chi, \omega \rangle, n, p(X)) &= \sum_{i=1}^n \omega_i \chi_i - \bar{X} \\ \zeta_2(\langle \chi, \omega \rangle, n, p(X)) &= \sum_{i=1}^n \omega_i (\chi_i - \bar{X})(\chi_i - \bar{X})^T - P_X \end{aligned}$$

而代价函数  $C(\cdot)$  则需要根据非线性系统实际计算需要,如要求降低高阶矩估计误差  $C(\cdot)$  可选为三阶矩  $\zeta_3(\cdot)$  或者四阶矩  $\zeta_4(\cdot)$ ;如要尽量减少 Sigma 点数目,则利用  $C(\cdot) = n$  计算式.

UKF 中选取 Sigma 点是为了捕获  $p(X)$  前两阶矩统计特性,其计算式中的 3 个参数确定了确定性采样点 Sigma 的特性: $\alpha$  决定 Sigma 点在以  $\bar{X}$  为球心的超球面上分布,  $0 < \alpha < 1$ , 以此来减小可能的高阶项影响,防止协方差矩阵变为非正定矩阵; $\beta$  是标度因子, $\kappa$  是表征  $X$  先验分布信息的,用来控制高阶项对逼近结果的影响,并且能够有效减小估计误差的大小. Sigma 点 UT 变换过程如图 1 所示<sup>[12]</sup>,图中

$$\begin{aligned} \chi_i &= [\bar{X}\bar{X} + (\alpha \sqrt{P_X})_i, (i=1, \dots, n_X)\bar{X} - \\ & (\alpha \sqrt{P_X})_i, (i=n_X, \dots, 2n_X)] \end{aligned} \quad (1)$$

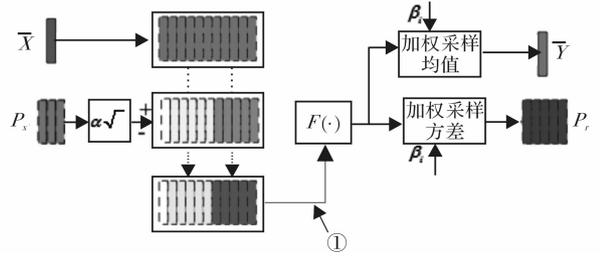


图 1 Sigma 采样点变换过程示意图

**2.3.2 中心差分 Kalman 滤波方法** CDKF 方法<sup>[13]</sup>是基于 Stirling 插值多项式逼近理论提出的一种改进的 EKF 线性化处理 and UKF 中 Sigma 点特殊采样点计算的混合算法,它利用中心差分计算代替 Taylor 级数展开式中的一二阶级数:

$$\begin{aligned} \nabla_G &\approx \frac{G(X + h\delta_X) - G(X - h\delta_X)}{2h} \\ \nabla_G^2 &\approx \frac{G(X + h\delta_X) - G(X - h\delta_X) - 2G(X)}{h^2} \end{aligned}$$

考虑多维随机向量间的耦合情形,可以通过线性变换作随机解耦. 其 Sigma 点集及对应权值确定方法中,不需要独立确定 3 个参数,仅需要 1 个插值步长  $h$  参数,其值一般取  $\sqrt{3}$ , 物理意义明确.

理论上可以证明 SPKF 最优滤波算法具有二阶或二阶以上精度,滤波性能优于 EKF 方法;并且 UKF 没有计算复杂的雅可比矩阵实现线性化处理过程,不要求非线性系统函数的可微性,从而计算效率得到很大提高,应用范围更加广泛. 但是在大多数非线性滤波应用问题中,后验概率密度函数不一定都能满足高斯分布,显然 Gauss 次优滤波算法也不能适用,需要进一步考虑其他非线性滤波方法,如粒子滤波理论算法等.

### 3 粒子滤波中随机样本点的直接逼近法

粒子滤波 (particles filtering, PF) 算法<sup>[4]</sup> 基于 Monte Carlo 随机采样方法,对系统噪声及状态参数向量先验分布不作高斯分布假定. 不同于 Kalman 最优滤波算法计算框架,它采用一组随机样本点直接逼近状态参数后验概率密度函数,其随机样本点及相应权值集合可表达为

$$\{(X_{k,i}, w_{k,i}) \mid i = 1, 2, \dots, r\}$$

基于随机样本点集合的后验概率密度函数可表达为

$$p(X_k | Z_{1:k}) = \sum_{i=1}^r \omega_{k,i} \delta(X_k - X_{k,i})$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^r \omega_{k,i} = 1$$

式中  $X_{k,i}$  为条件概率密度函数的随机采样点。

PF 最优滤波算法是利用一定数量随机样本点逼近后验概率密度函数的, 计算负担很重, 计算效率较低。另外 PF 算法中普遍存在着采样粒子退化问题, 围绕增加粒子多样性和选择重要性分布函数来降低粒子退化数量, 提高计算效率等方面对其展开多方面研究非常重要。

### 3.1 选取重要性概率密度函数

理论上是从函数  $p(X_k | Z_{1:k})$  中获得重要性概率密度函数的, 但是求解  $p(X_k | Z_{1:k})$  和估计系统状态参数一样, 几乎不能得到解析解。幸运的是, 对各样本点权值数值并不要求其确切数值, 仅需要在一定比例程度上求得其大小, 这就促使人们采取一定的数学方法近似后验概率密度函数就可以满足粒子滤波算法要求。因此选取易于采样的概率密度函数  $Q(X_k | Z_{1:k})$  来采集  $N$  个样本值点组成粒子集合, 选择重要性概率密度函数标准是使得粒子权值  $\{\omega_{k,i}\}_{i=1}^N$  方差最小, 抽取样本值点的对应权值为

$$\omega_{k,i} \propto \frac{p(X_{k,i})}{Q(X_{k,i})}$$

假定在  $k - 1$  时刻, 有一组采样点集  $\{(X_{k-1,i}, \omega_{k-1,i}) | i = 1, 2, \dots, N\}$ , 在 Bayesian 最优滤波理论框架中 PF 最优滤波算法中的权值可以递推计算:

$$\omega_{k,i} \propto \omega_{k-1,i} \cdot \frac{p(Z_k | X_{k,i})p(X_{k,i} | X_{k-1,i})}{q(X_{k,i} | Z_{1:k})}$$

式中,  $X_{k,i}$  为函数  $Q(X_k | Z_{1:k})$  上的随机样本点。

从重要性概率密度函数  $Q(X_k | Z_{1:k})$  中生成采样粒子, 并随着测量值的依次到来递推求得相应的权值, 它至少包含所有函数  $p(\cdot)$  的支持点, 即存在常数  $M < \infty$ , 对定义域内任意  $X$ , 满足  $p(X) < M \cdot Q(X)$ , 并且函数  $Q(\cdot)$  是尽可能逼近函数  $p(\cdot)$  的, 最终以粒子加权和描述后验滤波概率密度来得到状态参数的最优滤波结果。

在实际应用中, 一般将先验性概率密度函数  $p(x_k | x_{k-1})$  作为重要性概率密度函数, 经过数步迭代操作后, 会导致重要性权值方差太大, 有效粒子数目减小, 出现粒子权值退化现象, 从而不能准确描述  $p(X_k | Z_{1:k})$ , 这就促使人们寻求新的重要性采

样概率密度函数来解决权值退化问题。EKF 粒子滤波器<sup>[13]</sup> (extended Kalman particle filter, EKPF) 是利用  $k$  时刻观测量和 EKF 计算获得的  $k - 1$  时刻粒子在  $k$  时刻的均值和方差数值构造高斯分布函数, 并将其作为新的重要性概率密度函数, 再从该函数中抽取相应的粒子, 这就是重采样粒子操作步骤, 图 2 所示为粒子采样计算过程示意图。大量应用实验表明该方法有效改善了粒子滤波器性能。鉴于 EKF 算法中 Jacobin 矩阵计算的复杂性及高阶截断存在误差缺陷, 可以采用 SPKF 算法代替 EKF 构成新的具有更好性能的 Sigma 点粒子滤波器<sup>[14]</sup> (Sigma-point particle filter, SPPF)。

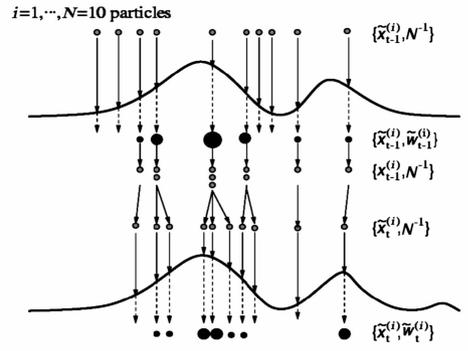


图 2 粒子采样 - 重采样过程示意图

### 3.2 重采样

粒子滤波迭代计算过程中随着迭代次数增多, 采样粒子权值方差持续加大, 可能仅有少数有效采样粒子权值较大, 大部分失效的粒子权值将会趋于零值, 仅有的符合滤波计算要求的少数粒子不能充分描述后验概率密度函数, 这就是粒子权值退化现象, 解决这一问题的最好办法是重采样。重采样的思路是通过粒子及其权值表达的概率密度函数, 有选择性地重新采样, 即除去权值较低的无效粒子, 增加权值较高的有效粒子数目。重采样策略包括固定时间间隔重采样与依据粒子权值的动态重采样。动态重采样是根据当前有效粒子数目或最大与最小权值比来判断是否需要重采样。常用的重采样方法包括多项式 (multinomial resampling) 重采样、残差重采样 (residual resampling)、分层重采样 (stratified resampling) 与系统重采样 (systematic resampling) 等。从最优重要性概率密度函数表达式来看, 产生下一个预测粒子, 依赖于已有粒子和最新观测信息, 这对于设计重要性概率密度函数具有重要的指导作用, 即应该有效利用最新的观测信息, 在易于采样实现的基础上, 将更多的

粒子移动到似然函数值较高的区域,如图3所示。

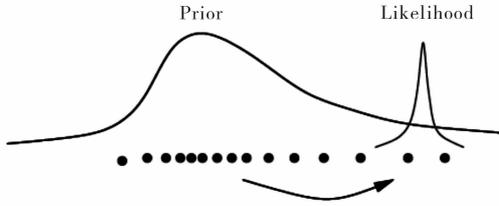


图3 移动粒子至高似然区域

重采样计算虽能在一定程度上解决滤波性能退化问题,但它却同时带来粒子多样性丧失、高权值粒子过分聚集等问题。而平滑采样法(SSM)则能通过给重采样后的粒子附加独立偏差及增加采样前粒子数目来缓解这一问题<sup>[12]</sup>。其他重采样策略也能解决滤波性能降低问题,如局部线性化法、拒绝采样法、辅助粒子滤波、内核平滑以及MCMC法等<sup>[15]</sup>。

### 3.3 计算负担问题

粒子最优滤波算法需要大量的样本点来逼近系统转台参数的后验概率密度分布,当系统状态维数较高时,样本点粒子数目迅速增加,导致计算量很大、滤波计算效率低下,其中的大部分粒子采样效率也很低。有人在特殊情况下把状态变量分割为2部分,即 $X_k = (X_k^1, X_k^2)$ ,仅对其中的 $X_k^1$ 部分实施粒子最优滤波计算,而 $X_k^2$ 可被解析边缘化,使用普通滤波方法(如KF,HMM等)对其进行最优滤波计算,这类算法称为Rao-Blackwellisation法<sup>[16]</sup>,它可以有效降低采样空间维数,减少样本粒子数目,提高粒子滤波计算效率。

也有文献尝试把自适应策略引入粒子滤波计算过程,以适时调整滤波计算中的粒子数目,同样可以达到降低计算量的目的,这类方法称为自适应粒子滤波器(adaptive particle filter, APF)<sup>[17]</sup>。APF滤波中实时计算样本粒子集合的 $\hat{p}(X_k | Z_{1:k})$ 与实际的 $p(X_k | Z_{1:k})$ 间的Kullback-Leibler距离,自动调整用于逼近 $p(X_k | Z_{1:k})$ 样本粒子数目。但是无论是Rao-Blackwellisation方法还是APF方法,在减少计算量的同时,都能改善PF中粒子枯竭的现象。

## 4 结论

Bayesian最优滤波理论框架中以对EKF方法改进为出发点的确定性采样次优Gauss最优滤波算法在计算量变化不大的基础上,能够显著提高滤波估计的计算精度,扩展最优滤波算法的适应范围。

相对于EKF算法,SPKF算法有效地提高了状态参数估计计算的准确性和稳定性,并且不需要计算Jacobean矩阵和Hessian矩阵,尤其适于实施并行处理算法,甚至能够适用于不连续系统,拓展最优滤波算法的适用范围。因此SPKF算法在目标跟踪、导航制导等随机信号处理以及语音识别和增强等领域逐渐取代EKF算法,得到广泛应用;随着计算性能的提高,粒子PF算法的大容量计算已经不成为问题了,粒子最优滤波算法不再局限于状态参数的高斯分布情形,处理精度能够获得无限提高。目前,针对粒子滤波算法中采样函数设计、重采样技术、高斯近似法与粒子滤波法的有效融合,设计研究新型高效高精度粒子最优滤波算法已成为未来Bayesian最优滤波理论方法研究的重要领域和发展方向。

另外,粒子滤波方法计算量太大是其大规模应用的主要瓶颈,在实际应用中只有当基于解析近似的滤波器不能满足设计要求时才有必要考虑粒子滤波<sup>[17]</sup>。目前人们考虑的Set-valued滤波方法<sup>[18-19]</sup>是利用状态参数期望值及分布区域边界的有效传递实现递推估计计算;另外,随着区间分析技术的发展,摒弃传统的样本点集合概念代之以区域块作为采样集合,构建一种区间粒子(Box Particles Filtering, BPF)最优滤波理论也不失为一种全新的滤波思路,这些思路都在启示并开辟粒子滤波算法研究的新途径。

### 参考文献:

- [1] Rudolph van der Merwe. Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models [D]. Portland: School of Science & Engineering at Oregon Health & Science University, 2004.
- [2] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering, 1960, 82: 35.
- [3] Chen Jinguang, Li Jie, Gao Xinbo. Improved quadrature Kalman filter with large number [J]. Journal of Information & Computational Science, 2010, 7(5): 1097.
- [4] 穆静,蔡远利. 迭代容积卡尔曼滤波算法及其应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 7(33): 1454.
- [5] Arulampalam M S, Maskell S. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2): 174.
- [6] Phanenf R J. Approximate nonlinear estimation [D]. Cam-

- bridge:MIT,1968.
- [7] Julier S J,Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004,92(3):401.
- [8] 刘勇,徐世杰,刘鹏,等. 基于改进型两步卡尔曼滤波的相对导航方法[J]. 中国空间科学技术, 2011(3):20.
- [9] 王小旭,梁艳,潘泉,等. 带有色量测噪声的非线性系统 Unscented 卡尔曼滤波器[J]. 自动化学报, 2012, 38(6):986.
- [10] 张俊根,姬红兵. IMM 迭代扩展卡尔曼粒子滤波跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2010,5(32):1117.
- [11] Oudjane N,Musso C. Progressive correction for regularized particle filters information fusion [C]//Proceedings of Third International Conference FUSION, Paris:FUSION, 2000:10-17.
- [12] Gordon N,Salmond D. Novel approach to nonlinear and non-Gaussian Bayesian state estimation[C]//IEEE Proceedings on Radar and Signal Processing, UK:[s. n.], 1993, 140:107-113.
- [13] Andrieu C,Doucet A. Joint Bayesian model selection and estimation of noisy sinusoids via reversible jump(MCMC Signal Processing)[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing,1999,47(10):2667.
- [14] Fox D. KLD-sampling: Adaptive particle filters[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2001(14):713.
- [15] Casella G. Rao-Blackwellisation of sampling schemes[J]. Biometrika,1996,83(1):81.
- [16] Calafiore G. Reliable localization using set-valued nonlinear filters[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part A: Systems and Humans, 2005, 35(2):189.
- [17] Wu Y,Hu D. A numerical-integration perspective on Gaussian filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006,54(8):2910.
- [18] Gning A,Ristic B,Mihaylova L,et al. Introduction to the box particle filtering[J]. Signal Processing Magazine, 2013,30(4):166.
- [19] Schikora M, Gning A, Mihaylova L, et al. Box-particle PHD filter for multi-target tracking [C]//15th International Conference on Information Fusion, Singapore:FUSION,2012:106-113.

# 建筑材料养护室的远程监控系统设计

孙君曼<sup>1</sup>, 贾岩<sup>2</sup>, 冯波<sup>2</sup>, 杨智灵<sup>2</sup>, 李存英<sup>2</sup>, 石宣喜<sup>3</sup>

- (1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;
2. 河南省产品质量监督检验院, 河南 郑州 450004;
3. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对建筑材料养护室养护环境要求,选用 DS18B20、干簧液位传感器与 AT89S52 结合,实现了底层养护池低功耗、低成本、高扩展性、结构简单、抗干扰能力强的控制器,运用 MCGS 组态技术,实现了多个试件养护现场的网络动态监控.该系统具有良好的人机对话、组态图形清晰直观化特点,可实现参数采集、实时监控、超限报警、存储、在线查询分析、打印管理等多种功能.

**关键词:**建筑材料养护室;MCGS 组态;DDE;远程监控系统

**中图分类号:**TP29      **文献标志码:**A      **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.020

## Design of network remote monitor system for curing room of building material maintenance

SUN Jun-man<sup>1</sup>, JIA Yan<sup>2</sup>, FENG Bo<sup>2</sup>, YANG Zhi-ling<sup>2</sup>, LI Cun-ying<sup>2</sup>, SHI Xuan-xi<sup>3</sup>

- (1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. He'nan Province Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Zhengzhou 450004, China;
3. Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the maintenance environment requirement for curing room of building material specimen, DS18B20, reed liquid level sensor and AT89S52 were adopted to consist the controller with low power consumption, low cost, high expansibility, simple structure and strong anti-jamming capability, as well as excellent adaptability to the complex environment. This system realized the network dynamic monitoring of specimen curing site using MCGS configuration software, and it characterized by good human-machine conversation, and clear and visualized configuration figure. Data acquisition, real-time control, overrun alarm, storage, online query analysis and print management can be conducted for a variety of monitoring parameters.

**Key words:** curing room of building materials maintenance; MCGS configuration; DDE; remote monitoring system

## 0 引言

随着我国基础建设的快速发展,对高质量水泥产品和混凝土制品等建筑材料的需求日益增大,也

对建筑材料的产品质量及生产效率提出了更高的要求.做好建材产品的质量检验,确保检验工作的科学性和准确性,必须要有高质量的检验设备.水泥是水硬胶凝材料,它的水硬化速度和强度发展

速度与周围环境的温、湿度有直接关系,因此养护温度和湿度对水泥、混凝土试样强度的形成和发展有非常重要的作用,直接关系到检验数据的精确性.为此,国家标准 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》及 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法》都对水泥产品和混凝土制品等建筑材料试样的养护条件做了严格的规定:标准养护温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $>95\% \text{RH}^{[1]}$ .

我国建筑材料标准养护实验室目前大多用人工进行养护室的温湿度参数测量与控制,不仅劳动强度大、效率低,而且温湿度参数波动大,无法用其做到精确控制.因此,研制一套适合我国建筑行业现状、自动化程度高、性能稳定可靠且节约能源的建材养护设备,以满足质监部门、生产企业及工程建设的需要是非常必要的.

随着传感器技术发展及单片机技术在智能控制技术领域的应用,监控系统功能日益强大,逐渐向多功能、远程、适时性、智能化发展.以单片机为核心的控制器系统因为价格便宜、便于开发,在各种监控系统中得到广泛应用,给建材试样标准养护室温湿度智能监控系统的设计提供了可行性.而现行市场上能提供此环境的产品以标准养护箱为主,养护箱容量太小,且大规模应用成本太高.鉴于此,本文以51单片机为底层控制器,结合MCGS组态技术,设计了建筑材料养护室远程监控系统.

## 1 监控系统总体架构

为了改善目前养护室人工养护低效、控制精度差等现状,笔者研制了一套远程自动监控系统.该系统采用图1所示监控层、现场智能节点控制子系统层网络结构体系,对多种建材试件养护室环境中的重要参数(如各结构点温度、环境温度、湿度等)进行检测监控,可对多个不同建材试件养护环境进行远程自动优化集成监控.

本文利用组态软件强大的优点开发上层监控软件<sup>[2]</sup>,并调用Matlab平台下的扩展优化控制算子,以使整个系统能够适应不同现场环境控制,增强可移植性.现场底层采用高精度检测元件进行不同参数的现场适时检测,经底层高性能智能节点处理,实现实时控制等动作并传输到上位机,上位机监控软件可实现对底层的功能操作.通过计算机可修改给定值及常用参数,并能实时读取测量值、给定值、输出值,记录历史数据,很好地实现现场重要参数的测量,报警、提示、记录等功能<sup>[3]</sup>.

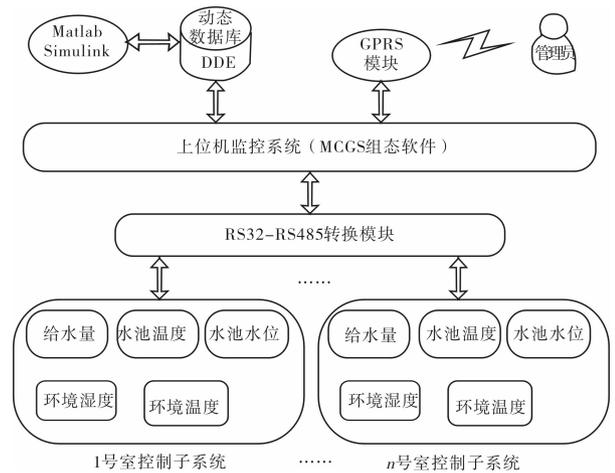


图1 监控系统结构图

## 2 底层水泥试件养护池控制器设计

养护室底层控制器的设计,遵循低成本、模块化和可扩展化路线.从单片机、显示器到存储器和传感器,都选择了市场上通用性最好的产品.考虑硬件电路时,预留了管脚空间,可灵活进行功能扩展;设计软件时,融入模块化、通用化思想,遵循模块内数据关系紧凑、模块间数据关系松散的原则,将各功能模块组织成模块化的软件结构.每个功能子程序化,主程序只是对各个功能的标志位进行判断,依照标志位来决定程序的走向,不用的模块进入休息状态,以最大限度地降低功耗.该系统底层控制器以51单片机为核心,分为硬件设计和软件设计2个部分.

### 2.1 底层控制节点硬件电路设计

温度传感器DS18B20可以收集温度信息,并将其转化为数字信号,串行输入AT89S52. AT89S52处理收集到的温度信号,通过数码管显示温度信息,并通过计算以判断温度是否过高或者过低.如果温度过高,则控制冷凝器的继电器工作,使养护室温度降下来;如果温度过高,则控制加热棒的继电器工作,使养护室温度升高,进而使养护室温度保持在适度范围之内.同时,温度过高或者过低,都会带动相应的声光指示信号工作.另一方面,干簧液位传感器能够将液位信息反映为电路的通、断,通过增加外围电路,液位信息可以反映为单片机相应引脚电平为高或者低.单片机采集引脚上的电平信息,经过计算判断液位的高或低.当液位过高时,相应声光报警部件工作,同时水会通过水槽自动排出;当液位过低时,相应的声光部件工作,同时单片

机控制水泵的继电器工作,向养护池内注水,注水一段时间之后停止.总之,使养护池液位始终保持在最高液位和最低液位之间.

由于主控室与现场控制器之间的距离较远,使用RS232总线不能够满足要求,所以计算机与现场控制器的通信采用RS485总线方式.

系统的主要任务是完成温度、液位数据的采集,并进行显示、控制.其硬件总体结构框图如图2所示.

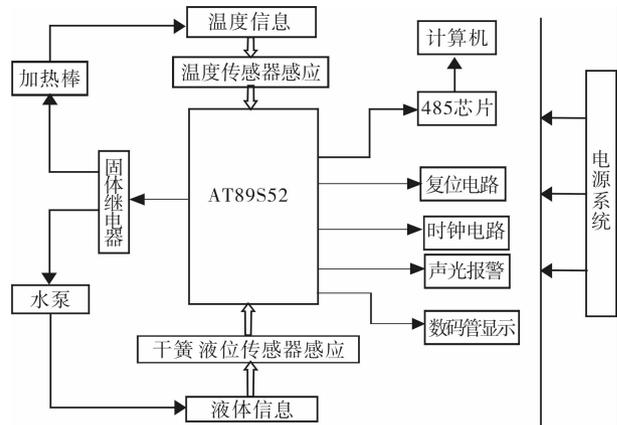


图2 硬件总体结构框图

### 2.2 底层控制节点软件设计

为了便于编写、调试、修改和扩展,本设计系统程序的编制采用了模块化的程序结构,整个控制系统软件由多个独立的子程序模块组成.

图3所示为程序流程图,主要包括主程序模块、数据采集模块、数据处理显示模块等.主模块构建

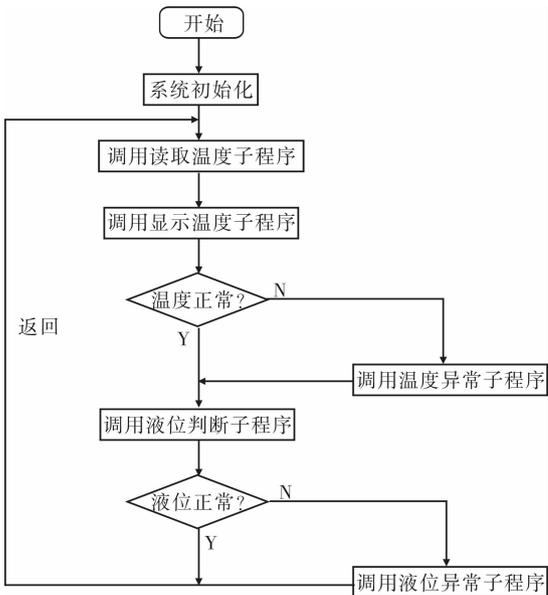


图3 主程序模块的程序流程图

整体软件模块框架,合理调配子模块运行及初始化工作;通过数据采集模块,可以将主控参数数字量采集并储存到存储器中;数据处理模块通过数字滤波程序对采集到的数据进行一系列的处理并显示.

### 2.3 底层控制节点调试

本文使用PROTEUS对设计的电路进行仿真调试,将硬件电路在PROTEUS中连接好,按照设计总电路图连接各个硬件,通过单片机汇编语言进行编程,通过KEIL软件将源程序转换成目标程序来进行仿真,生成\*.hex文件.最后,从PROTEUS中将程序导入单片机,便能进行实时仿真.实验表明,底层控制器能很好地完成现场参数控制.

## 3 监控层系统软件设计

### 3.1 组态软件设计

上位机监控系统部分采用工控组态软件MCGS, MCGS集控制技术、人机界面技术、图形技术、数据库、通信技术于一体,包括动态显示、历史趋势记录、报警、控制策略组件等,能提供友好的用户界面,使用户在不用编代码的情况下生成需要的应用软件.组态软件是一种很简捷实用的监控方式,它不需要编写复杂的程序,脚本程序都很简单,这极大地避免了编程的麻烦.它有一整套比较完备的设备连接系统,可以与下位机串口通信,把工业现场的数据实时传送给数据库中所设置的对应变量的,而数据的动态变化将在工业环境示意图中显示出来.此外,对数据对象报警属性的设置可以发出数据实时值超限报警信号,并通过脚本程序自动进行报警处理.水泥养护室远程监控系统如图4所示.各个窗口显示的画面是对应一个监控室系统所需监控的参数的实时显示.

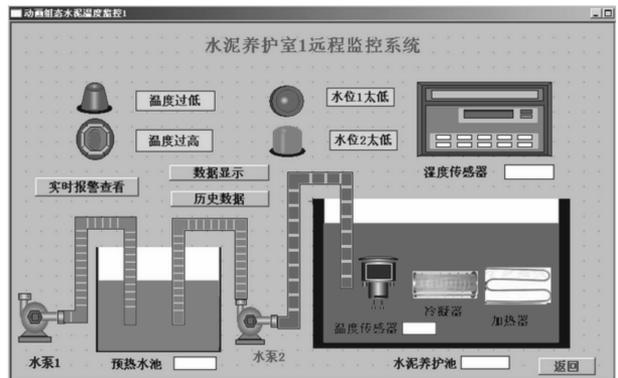


图4 水泥养护室远程监控系统界面

监控组态的工作首先是建立实时数据库,其前

提是在完成连续控制图、梯形逻辑图的设计后,将相关的回路点、信号点、寄存器点、报警点等点名存入实时数据库. 界面组态中最重要的是控制画面设计,用 ACTIVE 图库提供的绘图工具和丰富的图形等元素,来形成特定的人机界面. 操作画面具体包括主窗口流程图、报警参数设置窗口、实时数据显示窗口、实时曲线显示窗口、历史数据显示窗口等,见图 5.

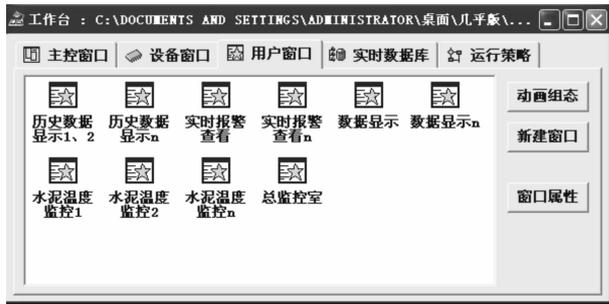


图 5 用户监控数据窗口

组态监控软件功能是进行综合分析并及时发出控制指令:监控系统根据监测到的环境数据,按照设定好的控制策略,发出控制指令,调节环境参数的变化,从而保证温度、湿度、水位都在要求范围之内. 实时准确检测养护室的环境参数:监控系统将实时监测并采集养护室有关的温度、水位等参数,通过组态将养护室的设备图形连同相关的环境参数显示在画面上,并且可将参数以列表或分组等形式显示. 报警管理与自动调节功能:管理各种报警信号,从而使环境参数可靠性及稳定性大大提高;报警相关的显示功能使用户定义的显示画面与每个点联系起来,当报警发生时,操作员可立即访问该报警点的详细信息,进而通过脚本程序的编写控制水泵的流动和加热器、冷凝器的开关,使环境参数自动恢复到指定范围内. 历史记录运行参数:监控系统的实时数据库将维护环境参数的历史记录,监控系统还另外设有专门的报警事件日志,用以记录报警/事件信息和操作员的变化等;根据需要,系统可以将历史数据显示为瞬时值,也可以显示为某一段时间内的平均值,此外历史数据还可以由以网络为基础的多种应用软件所应用.

### 3.2 通信软件设计

通信软件部分设计分为 2 部分,即基于底层智能节点的 Modbus 通信和基于无线通信接口模块的 GPRS 无线通信. Modbus 通信是直接连接上位机和下位机进行远程数据传输的,它使系统间的组网变

得相对简单,并且工作稳定可靠;GPRS 无线通信软件则实现远程数据的无线传输,主要针对远程数据的查询和报警数据的自动发送,可以很好地实现整个系统的实时性<sup>[4-6]</sup>.

### 3.3 Matlab 环境下控制算法研究

MCGS 组态软件提供了强大的人机界面和通信功能,且开发周期短,但其计算能力不强,难以实现复杂的控制算法. 而 Matlab 拥有丰富的多学科工具箱,强大的工程计算、图像图形处理、控制算法研究等功能,因此,在监控系统软件的开发中应协同应用组态软件和 Matlab. 以组态软件作为系统主控界面开发工具,进行动态工艺图显示、先进算法参数设置、实时数据采集等操作;以 Matlab 作为后台应用程序,实现控制系统分析、控制系统设计曲线绘制等功能. 这样,有利于发挥组态软件和 Matlab 各自的优势,使得编程更加高效灵活,功能更加强大.

## 4 结论

本文设计选用 DS18B20、干簧液位传感器与 AT89S52 为底层控制器,结合 MCGS 组态技术,设计了建筑材料养护室远程监控系统. 其直观生动的画面,主控参数的适时上传存储,使检验人员从繁重的工作中得到解脱. 通过监控计算机实现监测信息的采集、报警和处理,能够迅速、全面、准确地获取系统的各种特征量,完成建材试件环境参数的实时监测. 同时,监控计算机得到的数据,供检验人员浏览、查询,用于对系统进行控制,满足了系统监测的要求.

### 参考文献:

- [1] Mahlia T M I, Abdulmuinb M Z, Alamsyah T M I, et al. Dynamic modeling and simulation of a palm wastes boiler[J]. Energy, 2003, 28: 1235.
- [2] 马国华. 监控组态软件及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 16-18.
- [3] 孙君曼, 方华京, 孙慧君, 等. 基于推技术的网络化监控报警系统[J]. 计算机工程, 2008(4): 257.
- [4] 王书根, 王振松, 刘晓云. Modbus 协议的 RS485 总线通讯机的设计及应用[J]. 自动化与仪表, 2011(5): 25.
- [5] 李志军, 狄晶晶. 基于 MCGS 的固定式局部水基灭火系统性能评估装置研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(2): 94.
- [6] 甘勇, 刘新新, 贾春利. 基于 ZigBee 和 TC35i 的远程监控防盗系统的设计[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2012, 27(1): 58.

# 基于 WSN RFID 技术的水泥样品 无线测控装置设计

贾岩<sup>1</sup>, 邵雷<sup>2</sup>, 冯波<sup>1</sup>, 杨智灵<sup>1</sup>, 程晓天<sup>1</sup>, 王前<sup>1</sup>

(1. 河南省产品质量监督检验院, 河南 郑州 450004;

2. 河南黄河水文科技有限公司, 河南 郑州 450004)

**摘要:**为实现水泥样品的智能化管理,采用 WSN RFID 技术,以 MSP430F149 单片机为核心,配以状态监控模块、无线通信模块、声光指示报警模块,设计了水泥无线测控装置. 该装置具有实时测控样品的状态、自动识别水泥样品、存储检验数据和超限报警的功能,能实现水泥实验室样品管理的实时监控和可追溯.

**关键词:**射频识别技术;无线传感网;水泥样品管理;无线测控装置

**中图分类号:**TP393 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.021

## Design of cement sample wireless measurement and control device based on WSN RFID technology

JIA Yan<sup>1</sup>, SHAO Lei<sup>2</sup>, FENG Bo<sup>1</sup>, YANG Zhi-ling<sup>1</sup>, CHENG Xiao-tian<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>

(1. He'nan Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Zhengzhou 450004, China;

2. He'nan the Yellow River Hydrological Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** In order to realize intelligent management of cement samples, cement wireless measurement and control device was designed using WSN RFID technology, with the MSP430F149 as the core equipped with state monitoring module, wireless communication module, sound-light alarm module. The system realized real-time monitoring of the status of samples, automatic recognition of cement samples, storage test data and overrun alarm, and traceability and real-time monitoring of cement laboratory sample were achieved.

**Key words:** radio frequency identification (RFID) technology; wireless sensor network (WSN); cement sample management; wireless measurement and control device

## 0 引言

国标《通用硅酸盐水泥》要求水泥封存样品密闭存储 90 d,对密封状态、标示信息管理提出了严格要求. 目前水泥样品管理多采用封样桶外贴样品信息封条的方式,放入样品库货架后,建立台账记录,

人工查找样品并做出库登记. 这种方式存在查找样品困难、工作效率低、样品管理不规范、易出现样品遗失、变异、数据易被窃取和篡改等问题.

随着 RFID (radio frequency identification), WSN (wireless sensor network) 技术在智能信息技术领域应用的普及,其功能日益向多样化、远程、智能化发

收稿日期:2013-07-30

基金项目:国家质检总局科技计划(质量技术监督领域)项目(2012QK135)

作者简介:贾岩(1970—),女,北京市人,河南省产品质量监督检验院高级工程师,主要研究方向为电子技术应用.

展.目前,以单片机为核心的控制系统被广泛应用,但尚无开发水泥样品管理测控技术装置的报道.鉴于此,本文拟研制适合水泥样品管理要求、自动化程度高并具有创新性的无线测控装置,以实现水泥实验室样品管理的实时监控和可追溯.

## 1 总体结构设计

为完善水泥实验信息化管理,提高样品管理工作效率,防止样品遗失变异,实时监控样品的参数和状态,笔者将 WSN RFID 技术应用于水泥样品管理,研制出水泥样品无线测控装置,以取代传统的样品管理形式.

作为水泥样品控制系统的组成部分,水泥样品无线测控装置放置在封样桶内密封盖上,实时检测样品桶的状态(移动、触动、桶盖非法打开),然后上传信息至数据接收端并接收指令信息,通过接收端完成与站房计算机之间的通信.

水泥样品无线测控装置总体结构设计如图 1 所示.该装置能够按照事先设定的条件主动发射信号,包括将自身编码、密封状态、环境温湿度以及样品信息等,这些信息通过数据接收端读取,解码后上传计算机.当出现水泥样品桶失去联系、被人非法移动或桶盖被非法打开等情况时,可向计算机报警,以适当的方式告知用户.收到用户的查找样品指令后,相应的无线测控装置的 LED 灯按指定的频率闪烁并发出蜂鸣声,引导用户寻找该样品,并向上位机反馈结果,告知是否已被查找到.

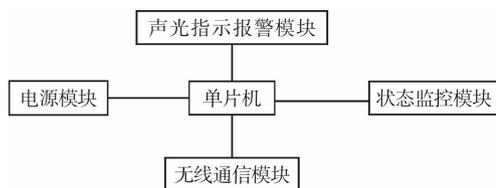


图 1 总体结构设计图

## 2 硬件电路设计

本装置硬件电路设计以 MSP430F149 单片机为核心,由状态监控模块、无线通信模块、声光指示报警模块和电源模块组成.状态监控模块用于采集样品即时状态信息;无线通信模块用于状态监控模块与其他模块之间的信息传输;声光指示报警模块用于状态监控模块的状态显示以及状态监控模块监测信息超出设定值时实施报警.

### 2.1 单片机系统

水泥样品无线测控装置设计采用的 MSP430F149 单片机在 3.3 V 电压,8 MHz 时钟条件下运行, RAM 在节电模式下耗电为 0.1  $\mu\text{A}$ ,等待模式下耗电仅为 0.7  $\mu\text{A}$ ,具有功耗较低的特点,运算速度能满足需要,可在低消耗中更有效地完成大量数据的采集工作<sup>[1]</sup>.由于水泥样品封存时间为 90 d,置于样品桶中的 RFID 传感标签必须依靠电池供电,因此采用 MSP430F149 单片机是合适的. MSP430F149 采用 16 位 RISC 结构,具有丰富的寻址方式,片内数据存储器数量较多,有较高的处理速度和运算能力(8 M 晶体驱动,其指令运行速度能够达到 8 MI/s)<sup>[2]</sup>,可满足水泥样品无线测控装置的设计要求.

### 2.2 无线通信模块

RFID 系统应用比较普遍的几个频段,包括低频(135 kHz 以下)、高频(13.56 MHz)、超高频 UHF(860~960 MHz)以及微波(2.4 GHz 以上),各个频段的识别距离、传输速度以及环境敏感度等特性都有区别<sup>[3-4]</sup>.无线通信模块电路使用 ISM 免许可的 2.4 GHz 全球开发频段,最高工作速率 2 Mb/s,高效 GFSK 调制,采用 126 频道,可满足多点通信和跳频通信的需要.它的传输距离相对较远,设计距离为空旷地带(30 m),且不受传输方的影响,支持双向通信<sup>[5]</sup>.模块内置 CRC 检错和点对多点通信地址控制,采用低功耗 3.3 V 工作,PCB 蛇形天线设计.

### 2.3 状态监控模块

状态监控模块电路如图 2 所示,状态监控模块包括 3 轴 MEMS 陀螺仪、3 轴 MEMS 加速度计及一个可扩展的数字运动处理器 DMP(digital motion processor);可用 I2C 接口连接一个第三方的数字传感器,扩展之后就可输出一个 9 轴的信号.3 轴陀螺仪采集旋转载体在 3 个方向的旋转角速度,进行数字积分后转换为运动物体在某一瞬间相对某一基准的角位置数字信号<sup>[6]</sup>,可测范围设定为  $\pm 250/\text{s}$ (dps),加速度计可测灵敏度为  $\pm 2\text{ g}$ .当设备运动时,产生 INT6560 中断信号发给单片机系统.总线频率可达 400 kHz,能满足一般的数据传输需求,状态监控模块使用 3.3 V 的直流电源,功耗较低.

### 2.4 电源模块

由于水泥样品封存时间为 90 d,置于样品桶中的无线测控装置必须依靠电池供电.低功耗单片机和包括锂电池的电源模块构成的卡片式采集系统,

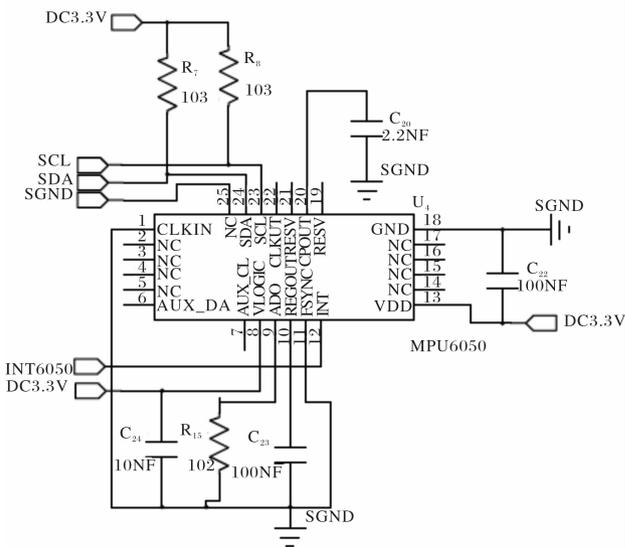


图2 状态监控模块电路图

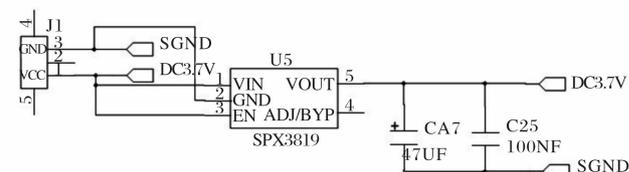


图3 电池电源模块电路图

完成对水泥样品桶的信息采集. 电池电源模块电路如图3所示, 电源模块的电源部分使用 SPX3819 芯片. 贴片封装, 体积小, 压降小, 低噪声 LDO 电源, 电源模块可提供 3.3 V 的工作电源, 模块电池设计为可充电模式, 能反复使用, 解决了使用成本高的问题.

### 3 软件设计

该装置使用与 MSP430 系列单片机匹配的 EW430 - EV - web - 5402 开发环境, 有优越的程序编辑、编译、下载、调试环境, 软件程序采用模块化设计, 结构清晰. 设计程序模块有 NRF24L01 无线收发处理协议程序、MPU6050 运动处理协议程序、声光指示报警程序、数据存储查询程序等, 主程序流程图见图4所示.

软件设计从用户实用的角度出发, 对设备人为操作的过程感应, 根据桶盖是否打开、是否授权移动判断、是否有非法操作, 进而判断是否向计算机报警. 准确分析样品的状态, 可以避免自然现象干扰引起的误报警, 也可以根据动作向用户提供所需

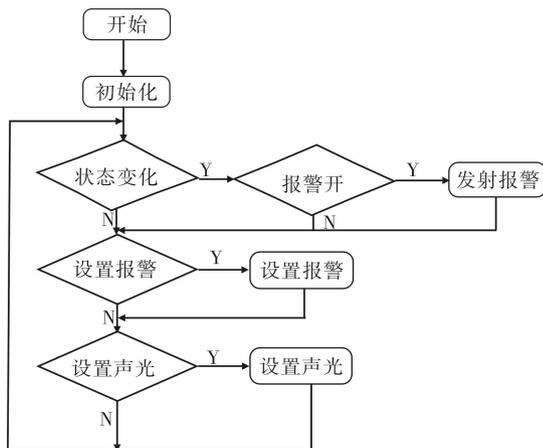


图4 主程序工作流程图

的数据. 实时监控设备的运行参数, 及时提醒用户设备检测出的异常、低电、到期等信息; 随时响应用户的查询命令. 由于多装置(目标设计 400 个)共处同一个环境, 稳定可靠的通信协议是必须的. 笔者采用多通道多地址动态的请求数据发送方式, 避免多设备组网冲突, 设备发送完成后自动退出数据发送通道.

### 4 测试结果

目前水泥样品无线测控装置设计已实现, 通过产品测试软件测试了装置的工作情况. 无线测控装置测试软件界面的左半部分为封样信息表的输入修改界面. 右半部分为操作项: 写表项将封样信息表写入装置; 读表项为查询装置中的封样信息; 呼叫项为搜寻装置, 实现声光指示; 状态项查询装置状态信息, 如低电压报警, 非法移动或非法打开等情况.

与华中科技大学机械科学与工程学院开发的具有电压报警功能和低功耗设计的有源 RFID 标签<sup>[7]</sup>、北方交通大学机电学院设计的 RFID 低功耗电子标签<sup>[8]</sup>相比, 本文设计的水泥样品无线测控装置不仅具有电压报警功能和低功耗设计, 而且针对水泥样品管理实际情况, 以状态监控模块、无线通信模块、声光指示报警模块集成化设计, 实现了主动发射自身编码(地址)、密封状态和样品参数信息的信号, 监控水泥样品桶非法移动或非法打开等状态, 声光指示在非法状态或搜索时发出蜂鸣声并闪烁等功能.

## 5 结论

本文结合 WSN 无线传感技术、RFID 技术,遵循低成本、低功耗路线,设计了水泥样品无线测控装置.该装置以 MSP430F149 单片机为核心,配以状态监控模块、无线通信模块、声光指示报警模块,进行集成化设计,电源设计可充电模式,能反复使用,解决了使用成本高的问题.水泥样品无线测控装置能够迅速、全面、准确地获取水泥样品的状态,自动识别水泥样品,存储检验数据,超限报警,从而实现了水泥实验室样品管理的实时监控和可追溯.

### 参考文献:

[1] 刘洪刚,陈永奇,张连凯.基于 MSP430F149 的高精度压力数据采集系统的设计和实现[J].传感器世界,2013,14(4):28.

- [2] 张洋.基于无线传感器网络的电力变压器温度监测系统[D].南京:南京理工大学,2012.
- [3] 郑和喜,陈湘国,郭泽荣,等.WSN RFID 物联网原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2010.
- [4] 熊卫东.基于物联网的冷链食品安全监控系统的设计与实施[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2011,26(3):96.
- [5] 高飞,薛艳明,王爱华.物联网核心技术——RFID 原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2011.
- [6] 赵文宏,徐乐俊,宋闻,等.基于 MEMS 陀螺仪的轨迹球研究[J].传感器与微系统,2012,31(5):79.
- [7] 王涛,段杰,史铁林.带电压报警功能的低功耗有源 RFID 标签设计[J].工业控制计算机,2013,26(8):121.
- [8] 戴欣,邓湘,刘浩.RFID 低功耗电子标签和手持阅读器开发[J].电子技术应用,2013,39(6):21.

## 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。

# EPS的相位超前补偿及模糊自适应PID控制

贾满满

(商丘师范学院 物理与电气信息学院, 河南 商丘 476000)

**摘要:**为了减小助力电动机的转矩波动,实现助力电动机电流的准确跟踪,提出了基于二维模糊控制器的相位超前补偿及模糊自适应PID控制策略.仿真结果表明,该方法减小了系统超调量,响应时间缩短,输出响应平稳,具有很好的动态跟踪性能和稳态精度,有效提高了系统的抗干扰能力和鲁棒性.

**关键词:**电动助力转向系统;模糊自适应PID控制;相位超前补偿;电流跟踪

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.022

## Phase-lead compensation and fuzzy self-adaptive PID control of EPS

JIA Man-man

(College of Physics and Electrical Information, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

**Abstract:** In order to achieve the exact tracking of the motor current, decrease the torque's wave motion of the direct motor, the control strategy of the two-dimensional fuzzy controller of phase-lead compensation and fuzzy self-adaptive PID control were proposed. The simulation results showed that the controller reduced the overshoot and shorted the response time. With stable output response and good dynamic performance and steady-state precision, it improved the system of anti-interference ability and robustness.

**Key words:** electric power steering system; fuzzy self-adaptive PID control; phase-lead compensation; electric current tracking

## 0 引言

电动助力转向(electric power steering, EPS)系统是一种依靠电动机提供辅助转矩的动力转向系统,有助于满足人们对驾驶轻便性、操纵稳定性和安全性的要求. EPS助力大小由电子控制单元(ECU)控制,进而控制电动机的输出力矩,从而实现转向助力.因而,助力特性直接影响整车的转向性能,理想的助力特性应能充分协调转向轻便性与路感的关系<sup>[1-2]</sup>. EPS系统内部存在时变性等不确定因素,而普遍采用的PID控制存在参数固定不变、不能在线自调整等问题.鉴于此,本文拟采用模糊

自适应PID控制策略,使PID控制参数能够在线自整定,以期有效地改善系统的自适应性,达到电机输出电流对目标电流准确跟踪的目的.由于系统存在惯性和阻尼,转矩传感器实际检测到的转矩与驾驶输入转矩之间有一定的相位延迟;传感器噪声和路面干扰也会导致目标电流跟踪效果不佳.为了提高EPS控制的快速响应性,本文对转矩传感器检测到的转矩信号进行相位超前补偿处理.

## 1 系统组成及工作原理

一个EPS系统通常由扭矩传感器、车速传感器、电子控制单元ECU、电动机、减速机构等组成.

收稿日期:2013-06-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50237020)

作者简介:贾满满(1983—),女,河南省商丘市人,商丘师范学院助教,主要研究方向为控制理论与应用.

当转动方向盘时, ECU 根据方向盘转矩和车速查助力特性曲线表确定电机电流信号, 产生相应的助力转矩<sup>[3-4]</sup>. EPS 动态结构模型如图 1 所示.

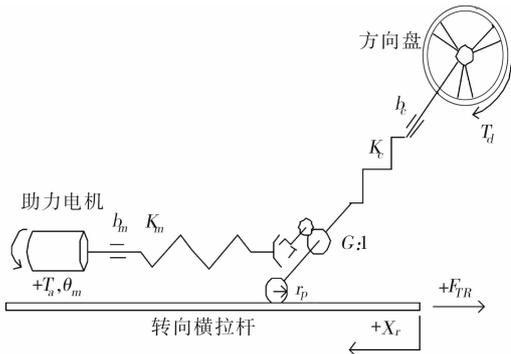


图 1 电动助力转向系统动态结构模型

简化后的 EPS 系统由转向盘转向柱子系统、助力电机子系统和齿轮齿条子系统组成. 忽略各种非线性摩擦和负载阻尼系数, 根据牛顿运动定律建立各部分的运动方程, 联立后得到整个 EPS 系统的模型为

$$\begin{aligned}
 J_c \ddot{\theta}_c &= -b_c \dot{\theta}_c - K_c (\theta_c - x_r / r_p) + T_d \\
 m \ddot{x}_r &= -b \dot{x}_r + K_c / r_p (\theta_c - x_r / r_p) - F_{TR} + \\
 &\quad K_m G / r_p (\theta_m - G x_r / r_p) \\
 J_m \ddot{\theta}_m &= -b_m \dot{\theta}_m - K_m (\theta_m - G x_r / r_p) + T_m
 \end{aligned}$$

其中, 扭矩传感器测量的是扭杆形变, 其动力学方程为

$$T_c = K_{sen} (\theta_c - x_r / r_p)$$

EPS 系统通过控制助力电机电枢电流来控制助力转矩, 电机输出转矩、电机电流和电机助力转矩的表达式分别为

$$\begin{aligned}
 T_m &= K_a i_a \\
 R i_a + L \dot{i}_a &= V_a - K_b \dot{\theta}_m \\
 T_a &= K_m (\theta_m - G x_r / r_p)
 \end{aligned}$$

式中,  $J_c$  和  $J_m$  分别代表方向盘转向柱系统转动惯量和电动机子系统转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ ;  $\theta_c$  和  $\theta_m$  分别为方向盘的转动角度和助力电机子系统的转动角度;  $K_c$  和  $K_m$  分别代表转向柱刚度和电动机子系统管柱刚度/ $(\text{Nm} \cdot \text{r}^{-1})$ ;  $x_r/m$  和  $m/\text{kg}$  是转向横拉杆的位移和质量;  $b_c/(\text{Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{r}^{-1})$ ,  $b/(\text{Nm} \cdot \text{r}^{-1})$  和  $b_m/(\text{Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{r}^{-1})$  分别代表方向盘转向柱子系统阻尼系数、转向横拉杆子系统阻尼系数和电动机子系统阻尼系数;  $r_p$  为转向小齿轮半径/m;  $G$  为齿轮传动比;  $F_{TR}$  是转向横拉杆作用力/N;  $T_d, T_m, T_a$

和  $T_c$  分别是方向盘输入转矩、电机输出转矩、电机助力转矩和扭矩传感器测量值/ $(\text{N} \cdot \text{m})$ ;  $K_{sen}$  为扭矩传感器系数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{r}^{-1})$ ;  $K_a, K_b, R, L, i_a$  和  $V_a$  分别为电动机扭矩常数/ $(\text{V} \cdot \text{s})$ 、反电动势常数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$ 、电动机电阻/ $\Omega$ 、电感/ $\mu\text{H}$ 、电枢电流/A 和电压/V.

设系统状态变量  $x = [\theta_c, x_r, \theta_m, \dot{\theta}_c, \dot{x}_r, \dot{\theta}_m]^T$ , 输入变量  $u = [T_d, F_{TR}, V_a]^T$ , 输出变量  $y = [T_a, T_c, x_r, \theta_m]^T$ , 对建立的 EPS 系统模型进行处理后得到 EPS 系统状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_c}{J_c} & \frac{K_c}{J_c r_p} & 0 & -\frac{b_c}{J_c} & 0 & 0 \\ \frac{K_c}{m r_p} & M & \frac{G K_m}{m r_p} & 0 & -\frac{b}{m} & 0 \\ 0 & \frac{K_m G}{J_m r_p} & -\frac{K_m}{J_m} & 0 & 0 & N \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_c} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_a}{J_m R} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_m G}{r_p} & K_m & 0 & 0 & 0 \\ K_{sen} & -\frac{K_{sen}}{r_p} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = 0$$

$$\text{式中, } M = -\frac{K_c + K_m G^2}{m r_p^2}, N = -\frac{K_a K_b + b_m R}{J_m R}.$$

## 2 控制器的设计

本文设计的 EPS 控制器主要包括 2 部分, 即电动机电流模糊自适应 PID 控制和相位超前补偿.

### 2.1 模糊自适应PID控制策略

模糊自适应PID控制系统采用二维模糊控制器,控制系统主要由参数可整定PID和模糊推理系统组成.模糊自适应PID控制器是在常规PID控制器的基础上,以偏差 $e$ 和偏差变化率 $ec$ 作为系统输入,采用模糊推理方法实现参数 $k_p, k_i, k_d$ ,以满足不同时刻偏差 $e$ 与偏差变化率 $ec$ 对PID参数自调整的要求<sup>[5-6]</sup>.利用模糊控制规则对PID参数进行自整定便构成了模糊自适应PID系统,其结构如图2所示.

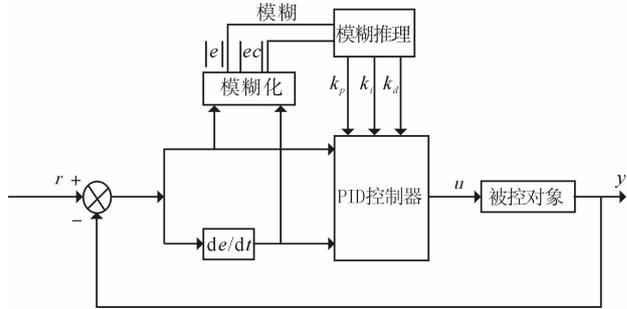


图2 模糊自整定PID控制器结构

参数 $k_p, k_i, k_d$ 与偏差绝对值和偏差变化率绝对值的二元连续函数分别为

$$k_p = f_1(|e|, |ec|)$$

$$k_i = f_2(|e|, |ec|)$$

$$k_d = f_3(|e|, |ec|)$$

模糊自适应PID在整定中通过连续检测 $|e|$ 和 $|ec|$ ,根据模糊控制规则对参数 $k_p, k_i, k_d$ 进行在线校正,以满足在不同偏差 $|e|$ 与偏差变化率 $|ec|$ 时,对控制系统参数的不同要求,从而保证EPS系统有良好的动态及静态性能.模糊自适应PID控制器的参数整定原则如下:

1) 当偏差 $|e|$ 较大时,为使EPS系统具有较好的跟踪性能,应取较大的 $k_p$ 与较小的 $k_d$ ,同时为避免系统响应出现大的超调量,应对积分加以限制,通常取 $k_i = 0$ .

2) 若 $e \times ec > 0$ ,说明误差在向绝对值增大的方向变化.当偏差 $|e|$ 和偏差变化率 $|ec|$ 为中等大小时,系统处于跟随阶段,为了减小系统响应的超调量, $k_p, k_i$ 和 $k_d$ 的取值都不能太大,需要 $k_p$ 值较小, $k_i$ 和 $k_d$ 的值适中,以提高系统的响应速度.

3) 若 $e \times ec < 0$ ,说明误差在向绝对值减小的方向变化,若偏差 $|e|$ 较小,为提高系统的稳定性能, $k_p$ 和 $k_i$ 的值均应取得大些,为避免系统在设定值时出现振荡, $k_d$ 的值取中等大小;若偏差 $|e|$ 较大,则应

实施控制,减小误差绝对值,可取中等的 $k_p$ ,同时取较小的 $k_i$ 和中等的 $k_d$ 值,以提高EPS系统动态性能和稳定性能.

根据模糊自适应PID参数的整定原则,结合电动助力转向系统的特点,建立对 $k_p, k_i, k_d$ 参数整定的模糊控制规则,见表1—表3.表中输入变量 $e$ 的变化范围为 $[-3 \ 3]$ ,输入变量 $ec$ 的变化范围为 $[-60 \ 60]$ ,将它们分为7个模糊等级,分别为NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB.输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的取值范围分别为 $[0 \ 50], [0 \ 2], [0 \ 0.2]$ ,同样分为NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB这7个模糊等级.

在对模糊自适应PID控制器输出信息进行模糊判决时,偏差的论域取为 $[-e \ e]$ ,偏差所取的模糊

表1  $\Delta k_p$ 的模糊控制规则表

$ec$	$e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	NM	NM	NS	ZE
NM	PB	PB	PM	NM	NS	ZE	PS
NS	PM	PS	PS	PS	ZE	PS	PM
ZE	ZE	NB	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NM	NS	PS	PM	PB	PB
PM	NS	NS	ZE	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

表2  $\Delta k_i$ 的模糊控制规则表

$ec$	$e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NS	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB

表3  $\Delta k_d$ 的模糊控制规则

$ec$	$e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NS	PM	PM	PS	ZE
NM	NB	NB	NM	PM	PS	ZE	NS
NS	NM	NS	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	PB	PS	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NB
PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZE	NS	NM	NM	PB	PB	NB

集合的论域为 $(-n \cdots 0 \cdots n)$ ;偏差变化率的基本论域取为 $[-ec \quad ec]$ ,偏差变化率所取的模糊集合的论域为 $(-n \cdots 0 \cdots n)$ . 其中  $e, ec$  为误差大小的精确量,  $n$  表示在  $0 \sim e(0 \sim ec)$  范围内连续变化的误差离散化后分成的档数<sup>[7]</sup>. 为进行模糊化处理, 必须结合偏差量化因子  $ke$  和偏差变化率量化因子  $kec$ , 将输入量由基本论域转化到模糊集的论域, 则偏差量化因子  $ke$  和偏差变化率量化因子  $kec$  分别为

$$ke = n/e$$

$$kec = n/(ec)$$

$ke$  对动态性能的影响是,  $ke$  大则调节死区小, 上升速率大. 如果  $ke$  取得过大, 系统将产生较大的超调, 调节时间长, 甚至产生振荡, 使 EPS 系统稳定性降低.  $kec$  对动态性能的影响是:  $kec$  大则系统的动态反应较迟钝;  $kec$  小则反应快, 上升率变大. 如果  $kec$  过小, 会引起系统较大的超调, 使调节时间长, 严重时 EPS 系统甚至不能稳定工作.  $ke, kec$  对系统稳态性能的影响是:  $ke$  增加, 稳态误差将减小;  $kec$  增大, 稳态时误差变化率也将减小.

### 2.2 串联相位超前补偿器

由于传感器噪声和路面干扰的存在, 会导致目标电流跟踪效果不佳, 为了防止方向盘抖动影响驾驶员的手感, 设计了超前校正补偿器对系统进行控制. 图 3 为相位补偿前后  $G(S) = Tc(s)/Td(s)$  幅频特性对比, 由图 3 可知相位补偿后转矩传感器检测到的转矩信号与驾驶员实际输入的转矩信号相位基本相同, 从而提高了系统的快速响应性. 图 4 为相位超前补偿前后转矩传感器测量值对比, 由图 4 可知, 相位补偿前转矩传感器的输出呈现高频的波动, 这表明电机内部也有高频波动, 这种波动对系统稳定性和电机寿命都有影响. 相位补偿后, 抑制了

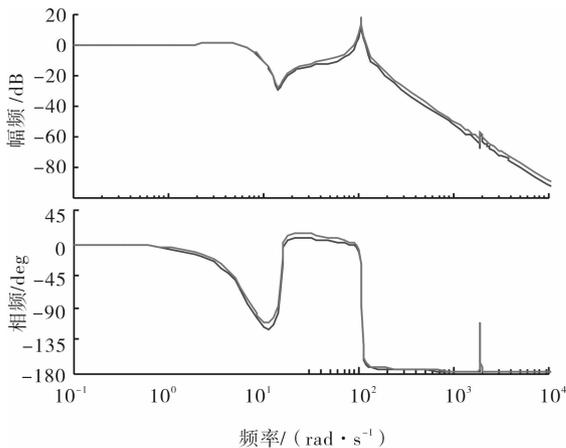


图 3 超前相位补偿后波特图

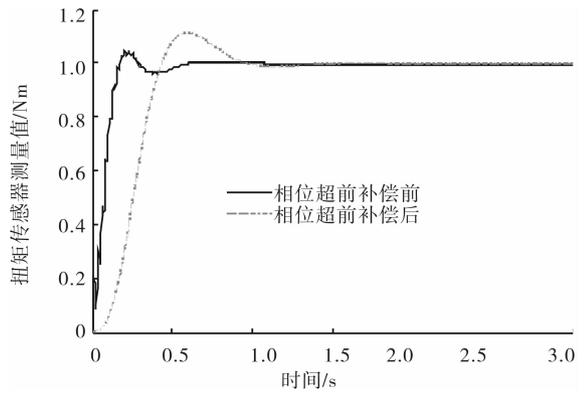


图 4 相位超前补偿前后转矩传感器测量值

转矩传感器的波动, 有效地消除了转矩传感器所引起的噪声, 减小了助力电动机的转矩波动和方向盘抖动.

### 3 仿真结果与分析

用 Matlab 中的 Simulink 工具箱进行仿真, 模糊控制器的输入输出变量的隶属度函数均采用三角形隶属度函数, 模糊推理方法采用 Mandani 推理法, 反模糊法采用重心法. 仿真中, 为了改善闭环系统的动态性能和稳态性能的要求, 对控制器的模型进行相位超前补偿处理, 采用的相位校正模块为  $G_c = 1 + aTs / (1 + Ts)$  ( $a > 1$ ), 建立 EPS 系统的仿真模型如图 5 所示.

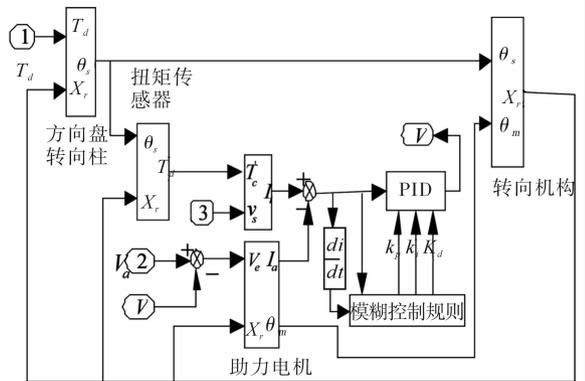


图 5 相位超前补偿及模糊自适应 PID 的电动助力转向系统控制结构框图

助力电机电流的跟踪响应如图 6 所示, 仿真结果表明, 这种控制器能够实现助力电机输出电流对目标电流的准确跟踪. 助力电机电流的阶跃响应仿真如图 7 所示, 仿真结果表明, 基于相位超前补偿及模糊自适应 PID 控制的 EPS 系统助力性能优于带有串联补偿器的 PID 控制的 EPS 系统, 系统超调量减小, 响应时间缩短, 输出响应平稳, 具有很好的动

态跟踪性能和稳态精度。

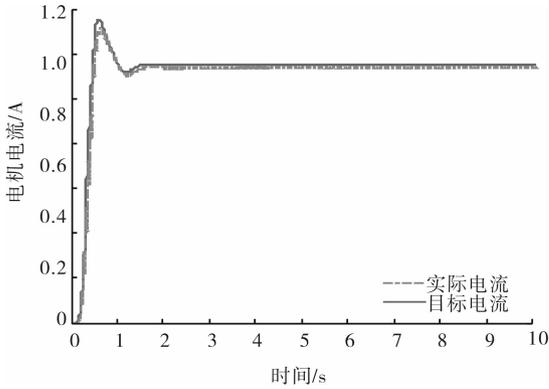


图6 相位超前补偿及模糊自适应PID控制的电机电流跟踪响应曲线

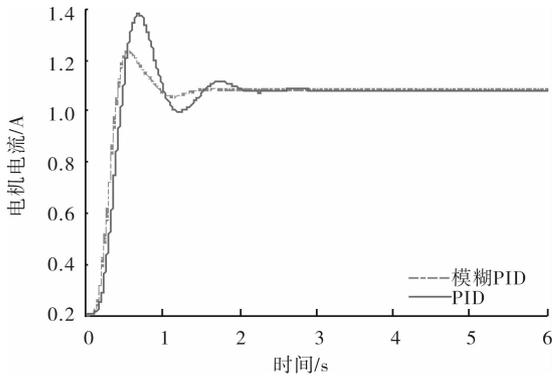


图7 相位超前补偿及模糊自适应PID控制的电机电流阶跃响应曲线

## 4 结论

本文提出了基于二维模糊控制器的相位超前补偿及模糊自适应PID的控制策略.对EPS助力电机电流进行跟踪.仿真结果表明,此方法的控制效果在稳态和动态性能上都要优于普通PID控制.这种控制方法能有效去除各种噪声,具有较强的抗干扰能力和系统鲁棒性;能对助力电机电流进行准确跟踪,消除助力电机转矩波动和转向盘抖动,从而有效地改善了驾驶员的手感.

### 参考文献:

- [1] 赵林峰,陈无畏,秦炜华,等.低附着路面条件的EPS控制策略[J].机械工程学报,2011,47(2):109.
- [2] 詹长书,马振江,徐宁.电动助力转向系统仿真及控制策略研究[J].北京理工大学学报,2012,32(7):681.
- [3] 向丹,迟永滨,李武波,等.电动助力转向系统控制策略及其仿真研究[J].控制工程,2013,20(2):254.
- [4] 赵万忠,施国标.基于实时小波去噪方法的EPS电流跟踪控制[J].北京理工大学学报,2008,30(3):227.
- [5] 赵林峰,陈无畏,刘罡.电动助力转向系统全工况建模及试验验证[J].农业机械学报,2009,40(10):1.
- [6] 赵景波,贝绍轶,陈龙.汽车EPS回正工况模糊PID控制及试验[J].郑州大学学报:工学版,2011,32(5):112.
- [7] 刘金琨.先进PID控制及其Matlab仿真[M].北京:电子工业出版社,2003:49-59.

# S频段多次谐波群岛式滤波器仿真设计

韩来辉

(中国电子科技集团公司 第27研究所, 河南 郑州 450047)

**摘要:**提出了一种基于HFSS仿真软件的S频段波导滤波器设计方法,其组合方式是将2个群岛式波导低通滤波器相迭加.仿真结果证明:该波导滤波器通带电压驻波比小、插入损耗低且同时具有宽的、良好的匹配通带和宽的、高衰减的阻带特性,对S频段发射机寄生输出的2,3次谐波抑制制度大于35 dB,尤其对S频段4次谐波有不小于80 dB的抑制制度.

**关键词:**波导;低通滤波器;谐波滤波器;群岛式滤波器

**中图分类号:**TP29   **文献标志码:**A   **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.023

## Simulation design of S band harmonic filter with wide-band waffle-iron

HAN Lai-hui

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

**Abstract:** It is composed of two wave-guide waffle-iron harmonic filters. HFSS proves that designed filter with the voltage standing wave ratio and the insertion loss band is low, the design makes the power-handling capacity of filter is high and the filter reliability is well, the filter can be applied to various reconnaissance equipments with harmonic. It isn't only controlling secondary and thrice harmonic but also controlling fourth harmonic, especially it can cut down 80 dB fourth harmonic.

**Key words:** wave-guide; low-pass filter; harmonic filter; waffle-Iron filter

## 0 引言

随着现代微波通信尤其是卫星通信和移动通信的快速发展,系统对通道选择性要求越来越高<sup>[1-2]</sup>.此外,微波高功率发射机输出功率也越来越高,这对于发射机和天伺馈系统滤波器的设计提出了更高的要求.波导滤波器因其具有损耗低、功率容量大、温度特性好等特点,成为大功率滤波器的首选<sup>[3]</sup>.波导滤波器作为通信系统的重要组成部分,其性能决定了信号的质量,因而研究高性能的滤波器具有重要意义.

对于航天测控地面系统,S频段发射机既要输出功率高,又要具有良好的频谱纯度以避免干扰其

他频段设备正常工作.目前,输出链路多采用片膜式波导滤波器,由于高次模的影响,第2个通带很近,频带高端阻带特性差,很难对高次谐波起到抑制作用.而多个谐波滤波器级联的方式,既增加输出链路的损耗和体积,又给滤波器之间的匹配带来困难.鉴于此,本文拟利用高频三维有限元仿真软件HFSS<sup>[4]</sup>,设计一个由2个群岛滤波器相迭合成的S频段多次谐波滤波器,以期对S频段发射机寄生的2,3,4次谐波起到一定的抑制作用.

## 1 群岛式滤波器的设计原理

群岛式滤波器也称为块模式滤波器,它是由在标准矩形波导的宽边上开许多纵向槽和横向槽以

收稿日期:2013-05-08

作者简介:韩来辉(1979—),男,黑龙江省大庆市人,中国电子科技集团公司第27研究所工程师,主要研究方向为微波技术.

形成凸起的一些金属块所构成,其形状就像一个个“维夫”饼干铁模子,统称为群岛式滤波器. 群岛式滤波器是由开有纵向槽的低通波状波导滤波器演变而来. 波状低通波导滤波器由宽度相同、高度不同的矩形波导所构成,高度高的波导用来模拟串联电感,高度低的波导用来模拟并联电容,但由于矩形波导具有截止效应,波导的截止频率以下的频率不能通过,故具有低端截止的特性. 群岛式滤波器兼有波纹低通滤波器的特点,具有匹配良好的宽通带和高衰减的宽阻带,且可使许多高次模受到抑制,故常用作大功率滤波器. 当  $l/b' \leq 1$  和对任意的值  $\delta = b'/b$  时,群岛式波导滤波器就不能按折波导滤波器的设计方法,可以采用波导 T 形接头等效电路的设计方法<sup>[5]</sup>,其中群岛式滤波器的一个单节的底半部及其等效电路如图 1、图 2 所示. 表示短线与特性阻抗  $Z_0$  的主传输线相串联的接头的等效电路取自马克维茨的图<sup>[6]</sup>.

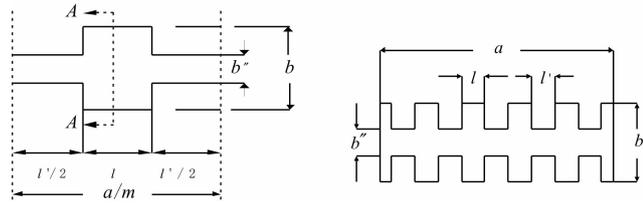


图 1 群岛式滤波器单节和剖面图

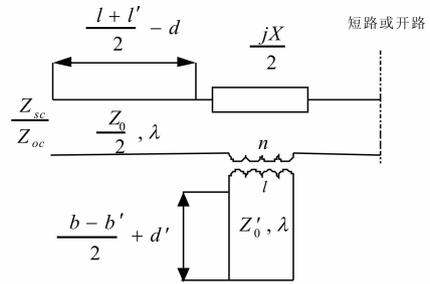
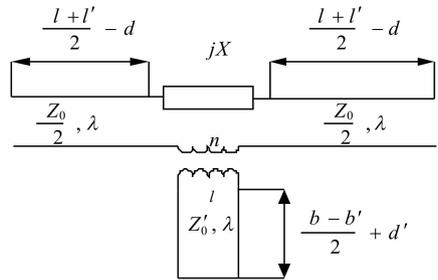
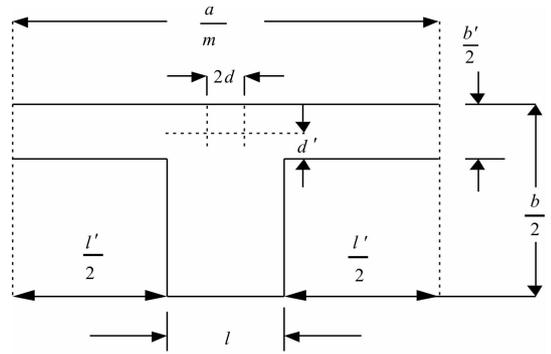


图 2 群岛式滤波器整节及其等效电路

这个滤波器单节的归一化镜像阻抗为

$$\frac{Z_1}{Z_0} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{Z_{sc} Z_{oc}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + \cot \frac{\varphi}{2} \left( \frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' \right)}{1 - \tan \frac{\varphi}{2} \left( \frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' \right)}} \quad (1)$$

式中,  $Z_0$  是 T 形接头主传输线的特性阻抗,  $Z'_0$  为串联短截线的特性阻抗. 同时它的镜像衰减常数  $\gamma = \alpha + j\beta$  与平分后的节的开路阻抗  $Z_{oc}$  和短路阻抗  $Z_{sc}$  有关,传播常数即

$$\tanh \frac{(\alpha + j\beta)}{2} = \sqrt{\frac{Z_{sc}}{Z_{oc}}} = \sqrt{\frac{\frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' + \tan \frac{\varphi}{2}}{\frac{X}{Z_0} + n^2 \frac{Z'_0}{Z_0} \tan \varphi' - \cos \frac{\varphi}{2}}} \quad (2)$$

式中

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{l+l'}{2} - d \right) \quad (3)$$

$$\varphi' = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{b-b'}{2} + d' \right) \quad (4)$$

设计时,在应用③④式时,  $\varphi/\varphi' \approx 1$ ,此时传输常数为实数,对串联 T 形接头等有效电路的元器件值,计算和查表可得出一节阻带的衰减,进而通过选择  $m$  值达到设计要求. 在尺寸选择时,波导整个宽度上“群岛”数  $m$  必须为整数.

## 2 设计实例

设计要求:设计一个 S 频段波导谐波滤波器,要求其寄生 2 次、3 次、4 次谐波滤波器,通带频率为 2.025 ~ 2.12 GHz,带内插入损耗  $IL < 0.2$  dB,输入

根据计算,除满足滤波器设计要求的群岛数  $m$ ,还要利用高频仿真软件进行建模优化拟合,确定计算 S 参数所需的每个单节的尺寸,然后级联出滤波器的尺寸,并在此基础上优化,最终得到满足设计要求的滤波器.

端驻波比 < -20 dB. 对 2, 3, 4 次谐波抑制度 > 30 dB.

由设计要求可知,阻带特性为通带的 4 倍频,现在很难查到这方面的资料和设计成功的案例,因此使用单个滤波器或群岛式滤波器很难达到设计要求. 由于群岛式滤波器本身具有宽的、良好的通带特性,宽的、高的衰减阻带特性,因此可以考虑采用 2 个群岛式滤波器相迭加的设计方案:第一个群岛式滤波器采用 5 节的方式,主要对通带频率的 2 次谐波起到抑制作用,设计采用通带频率 2 ~ 3 GHz,阻带频率 4 ~ 6 GHz;第 2 个滤波器采用 10 节的方式,主要对设计通带频率的 3 次和 4 次谐波起到抑制作用,设计采用通带频率 2 ~ 6 GHz,阻带频率 6 ~ 9 GHz;2 个滤波器通过 1/4 波长阻抗变换器相串联,以达到理想的匹配效果. 具体设计方法如下.

1) 一个低通群岛式滤波器通带为 2 ~ 3 GHz(设计要求 2.025 ~ 2.12 GHz,故在其通带内),通带损耗 < 0.2 dB,输入端口驻波比 < -20 dB,阻带为 4 ~ 6 GHz.

首先,按照设计要求采用标准 BJ22 波导结构,  $a = 109.2 \text{ mm}$ ,  $b = 54.6 \text{ mm}$ ,  $m = 5$ .

由②可知,传播常数为实数,且  $\varphi/\varphi' \approx 1$ , 则

$$(l + l')/2 - d = \lambda/2 \tag{5}$$

$$\lambda_{\infty}/4 = d' + (b - b')/2 \tag{6}$$

采用三维高频仿真 HFSS 软件设置  $b'$  和  $l$ , 由⑥式确定  $d'$ ; 由镜像阻抗特性得①式分母为 0, 确定  $l'$ ; 通过 HFSS 软件对变量  $b'$  和  $l$  进行多次优化, 得到所需的参数值, 优化后的模型其通带特性、传输特性如图 3 所示.

2) 一个低通群岛式滤波器通带为 2 ~ 6 GHz(设计要求 2.025 ~ 2.12 GHz, 故在其通带内), 通带损耗 < 0.2 dB, 输入端口驻波比 < -20 dB, 阻带为 6 ~ 9 GHz. 按照设计要求, 采用标准 BJ22 波导结构,  $a = 109.2 \text{ mm}$ ,  $b = 54.6 \text{ mm}$ ,  $m = 10$ .

设计方法同上, 通过 HFSS 软件设置变量  $b'$  和  $l$  并进行多次优化, 得到所需参数值. 模型的通带特性和传输特性图 4 所示.

将 2 个群岛式滤波器通过 1/4 波长阻抗变换器相串联, 采用 HFSS 仿真软件进一步仿真优化, 组合滤波器仿真结果如图 5 所示. 由仿真结果可见通带插入损耗 < 0.1 dB, 输入端驻波比 < 30 dB, 对 2, 3, 4, 次谐波均有抑制, 其中 2 次谐波的抑制度 > 35 dB,

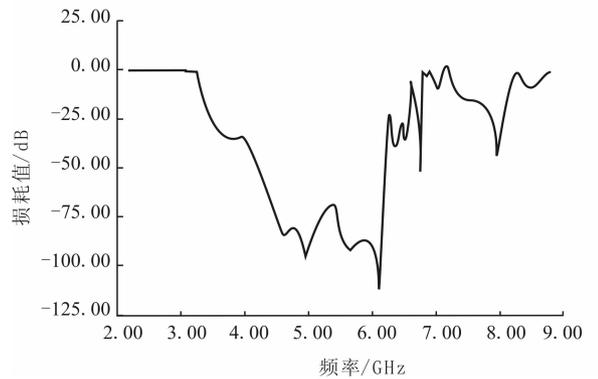
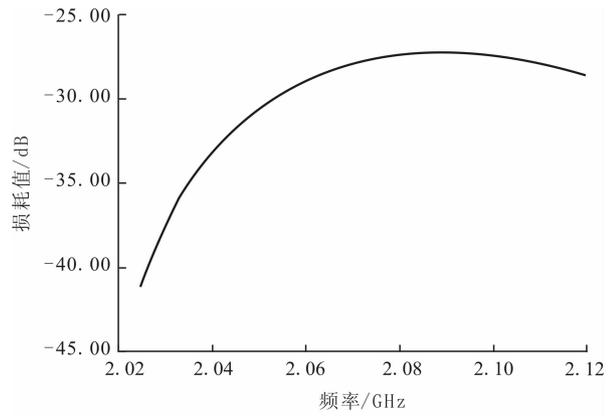


图 3 第 1 节输入输出驻波曲线和传输曲线

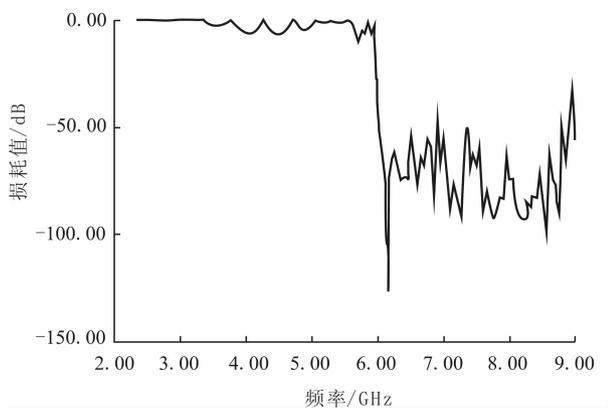
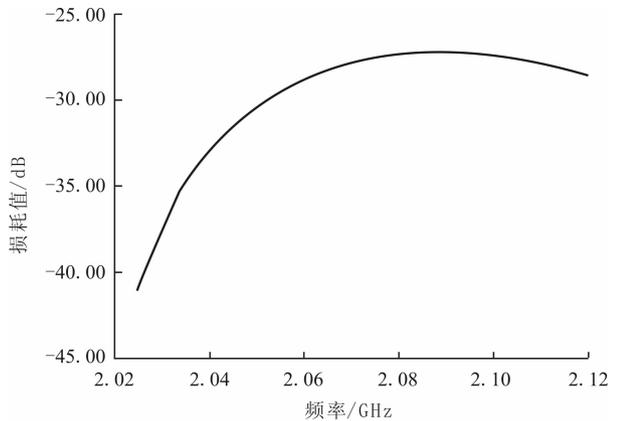


图 4 第 2 节输入输出驻波曲线和传输曲线

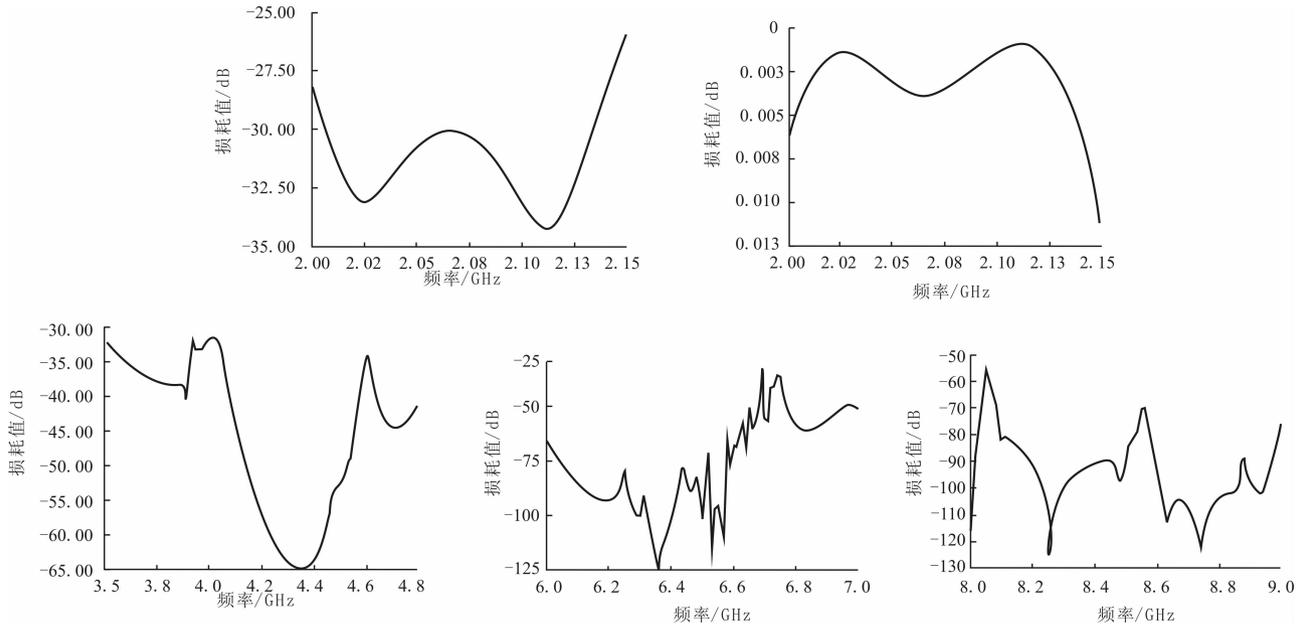


图5 滤波器级联输入输出驻波曲线和传输曲线

对3次谐波抑制度 > 70 dB, 特别是对4次谐波抑制度 > 80 dB, 满足设计要求.

### 3 结语

本文将2个都具有宽的良好匹配的通带特性和宽的高衰减的阻带特性的群岛式滤波器相迭加, 利用高频三维有限元仿真软件 HFSS 设计了一个 S 频段多次谐波滤波器. 仿真结果表明, 滤波器特性满足设计要求, 具有通带特性好、插入损耗小、驻波系数小等特点, 同时对多次谐波均能达到很高的抑制作用, 尤其对远端的4次谐波的抑制度达到 80 dB. 相比其他形式的波导滤波器, 该设计具有宽的、良好的通带特性和宽的、高衰减的阻带特性, 在通信和航天测控地面发射设备中有广泛的应用前景.

### 参考文献:

- [1] 崔博华, 苏桦, 荆玉兰. 微波滤波器的技术与展望[J]. 科技传播, 2011(7):173.
- [2] Boria V E, Gimeno B. Waveguide filter for satellites[J]. Microwave Magazine, 2007, 8(5):60270.
- [3] Sharp E D. A high-power, wide-band waffle-iron filter [J]. Microwave Theory and Techniques, 1963, 11(2):111.
- [4] 曲永志, 李德志, 马延爽. 基于 HFSS 的微调谐腔体带通滤波器设计[J]. 电子信息技术, 2012, 38(3):62.
- [5] [英]卡梅伦, [加]库德赛, [加]曼索. 通信系统微波滤波器——基础、设计与应用[M]. 李松林, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [6] 林为干. 微波网络[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.

# 具有输入时滞的不确定时滞系统的积分控制

侯晓丽

(郑州轻工业学院 数学与信息科学系, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对具有输入时滞的不确定时滞系统,利用 Lyapunov 稳定性定理和一个特殊的引理,设计了带记忆的积分控制器,使得系统在有限时间内渐近稳定,并给出时滞依赖的稳定性判据.数值算例表明了该设计方法的有效性.

**关键词:**不确定时滞系统;输入时滞;积分控制

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.024

## Integral control for uncertain time-delay system with input delay

HOU Xiao-li

(Department of Mathematics and Information Science, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** For uncertain time-delay system with input delay, the integral controller with memory was designed by using Lyapunov stability theory and a special lemma, which made the system asymptotically stable in finite time and the delay-dependent stability criterion was also given. A numerical example showed the effectiveness of the proposed design method.

**Key words:** uncertain time-delay system; input delay; integral control

## 0 引言

在建材、化工、生物、电气等许多应用领域中普遍存在时滞系统(如水泥窑煅烧过程、玻璃熔窑的传热过程、传染病的传播过程等),时滞的种类有很多,如输入时滞、量测时滞、传输时滞等.时滞的存在会导致系统不稳定或使得闭环系统的性能变差,而不确定性的存在会使得系统变得更加不稳定.因此,不确定时滞系统的鲁棒稳定性分析及鲁棒镇定问题一直是控制理论研究的热点<sup>[1-4]</sup>.

对于带有输入时滞的系统,大部分学者通过状态变换  $z(t) = x(t) + \int_{t-\tau}^t e^{A(t-\tau-v)} Bu(v) dv$  来消除输入延迟带来的影响,然后研究其自适应控制或滑模

控制. N. Bekiaris-Liberis 等<sup>[5]</sup> 研究了前馈系统的依赖时滞的自适应控制; D. Paesa 等<sup>[6]</sup> 研究了一类系统的自适应观测器设计问题; 吴立刚等<sup>[7]</sup> 对模型具有非匹配不确定性的具有状态和输入时滞的系统,通过状态变换将问题转化为带有未知扰动的一般时滞系统,设计自适应率,研究其滑模控制器设计; 李圣涛等<sup>[8]</sup> 针对网络系统不确定上界很难获得的问题,提出了一种自适应率以适应系统的不确定上界,据此设计一滑模控制器来控制具有输入时滞的 TCP 网络系统.但是模型变换容易给最初的系统引入附加的动态,且使得系统的极点增多、控制成本增加.

鉴于此,本文针对带有输入时滞的系统,不做状态变换,仅利用系统过去的状态设计积分控制

收稿日期:2013-06-30

基金项目:河南省基础与前沿技术研究项目(122300410117);河南省教育厅项目(2009A120005;2010B120013)

作者简介:侯晓丽(1973—),女,河南省邓州市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为不确定时滞系统的鲁棒控制与自适应控制.

器,结合状态反馈控制器设计泛函,以使系统能在有限时间内渐近稳定,且所得的渐近稳定充分条件是时滞依赖的.

### 1 系统描述及主要结果

考虑具有如下形式的不确定时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A + \Delta A(t)]x(t) + [A_1 + \Delta A_1(t)]x(t - \tau) + B_1u(t) + B_2u(t - \tau) \\ x(t) = \Phi(t) \quad u(t) = \Psi(t) \quad \forall t \in [-\tau, 0] \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x(t) \in R^n$  为系统状态,  $u(t) \in R^m$  为控制输入;  $A, A_1, B_1, B_2$  为已知的具有适当维数的实常数矩阵;  $\Delta A(t), \Delta A_1(t)$  代表系统参数的时变不确定性;  $\tau$  为已知的实常数; 初始条件中的  $\Phi(t), \Psi(t)$  是  $[-\tau, 0]$  上的连续函数.

假设参数不确定性为范数有界的,即存在适当维数的常值矩阵  $E_1, E_2, H_1, H_2$ , 使得

$$\Delta A(t) = E_1F(t)H_1 \quad \Delta A_1(t) = E_2F(t)H_2$$

这里  $F(t) \in R^{i \times j}$  为未知的时变函数矩阵,其元素可测且满足  $F^T(t)F(t) \leq I \quad \forall t$ .

引理 1<sup>[9]</sup> 设  $a(t) \leq b(t)$ , 则

$$\left\| \int_a^b f(s) ds \right\|^2 \leq (b - a) \int_a^b \|f(s)\|^2 ds$$

先考虑下面的没有不确定性的时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t - \tau) + B_1u(t) + B_2u(t - \tau) \\ x(t) = \Phi(t) \quad u(t) = \Psi(t) \quad \forall t \in [-\tau, 0] \end{cases} \quad (2)$$

令

$$u(t) = Kx(t) + \int_{-\tau}^0 Rx(t + s) ds \quad (3)$$

其中  $K, R$  为相容维数的矩阵,

定理 1 对于系统 (2), 在控制器 (3) 作用下, 若存在正定对称矩阵  $P, G$  及相容维数的矩阵  $Q, N, Y$ , 使得下述不等式成立, 则系统是渐近稳定的, 且  $K = YX^{-1}$ .

$$\begin{pmatrix} W & A_1X + B_2Y & B_1X & B_2X \\ * & -G + \tau^2D & 0 & 0 \\ * & * & -Q & 0 \\ * & * & * & -N \end{pmatrix} < 0 \quad (4)$$

其中  $W = AX + B_1Y + (AX + B_1Y)^T + XGX + \tau^2XMX, M = R^TQR, D = R^TNR$ .

证明 对系统 (2), 把控制器 (3) 代入得

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ax(t - \tau) + B_1Kx(t) + B_1 \int_{-\tau}^0 Rx(t + s) ds +$$

$$B_2Kx(t - \tau) + B_2 \int_{-\tau}^0 Rx(t - \tau + s) ds = (A + B_1K)x(t) + (A_1 + B_2K)x(t - \tau) + B_1 \int_{-\tau}^0 Rx(t + s) ds + B_2 \int_{-\tau}^0 Rx(t - \tau + s) ds$$

令  $V_0 = x^T Px + \int_{t-\tau}^t x^T(s) Gx(s) ds$ , 则沿着系统

① 对  $t$  求导可得

$$\begin{aligned} \frac{dV_0}{dt} &= 2x^T P\dot{x} + x^T(t)Gx(t) - x^T(t - \tau)Gx(t - \tau) \\ &= 2x^T P(A + B_1K)x + 2x^T P(A_1 + B_2K)x(t - \tau) + 2x^T PB_1 \int_{-\tau}^0 Rx(t + s) ds + 2x^T PB_2 \int_{-\tau}^0 Rx(t - \tau + s) ds + x^T(t)Gx(t) - x^T(t - \tau)Gx(t - \tau) \\ &\leq 2x^T P(A + B_1K)x + 2x^T P(A_1 + B_2K)x(t - \tau) + 2\|x^T PB_1 Q^{-1/2}\| \left\| \int_{-\tau}^0 Q^{1/2} Rx(t + s) ds \right\| + 2\|x^T PB_2 N^{-1/2}\| \left\| \int_{-\tau}^0 N^{1/2} Rx(t - \tau + s) ds \right\| + x^T(t)Gx(t) - x^T(t - \tau)Gx(t - \tau) \\ &\leq 2x^T P(A + B_1K)x + 2x^T P(A_1 + B_2K)x(t - \tau) + \|x^T PB_1 Q^{-1/2}\|^2 + \left\| \int_{-\tau}^0 Q^{1/2} Rx(t + s) ds \right\|^2 + \|x^T PB_2 N^{-1/2}\|^2 + \left\| \int_{-\tau}^0 N^{1/2} Rx(t - \tau + s) ds \right\|^2 + x^T(t)Gx(t) - x^T(t - \tau)Gx(t - \tau) \\ &\leq 2x^T P(A + B_1K)x + 2x^T P(A_1 + B_2K)x(t - \tau) + x^T PB_1 QB_1^T Px + \tau \int_{-\tau}^0 x^T(t + s) Mx(t + s) ds + x^T PB_2 NB_2^T Px + \tau \int_{-\tau}^0 x^T(t - \tau + s) Dx(t - \tau + s) ds + x^T(t)Gx(t) - x^T(t - \tau)Gx(t - \tau) \end{aligned}$$

其中,  $Q, N$  是相容维数的可逆矩阵.

令  $V_1 = \int_0^\tau \int_{t-\theta}^t x^T(s) Mx(s) ds d\theta$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \int_0^\tau [x^T(t)Mx(t) - x^T(t - \theta)Mx(t - \theta)] d\theta = \tau x^T(t)Mx(t) - \int_{-\tau}^0 x^T(t + s)Mx(t + s) ds \end{aligned}$$

令  $V_2 = \int_0^\tau \int_{t-\theta}^t x^T(s - \tau) Dx(s - \tau) ds d\theta$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \int_0^\tau [x^T(t - \tau)Dx(t - \tau) - x^T(t - \theta - \tau)Dx(t - \theta - \tau)] d\theta = \tau x^T(t - \tau)Dx(t - \tau) - \int_{-\tau}^0 x^T(t - \end{aligned}$$

$$\tau + s)Dx(t - \tau + s) ds$$

取  $V = V_0 + \tau V_1 + \tau V_2$ , 则可得

$$\frac{dV}{dt} \leq 2x^T P(A + B_1 K)x + 2x^T P(A_1 + B_2 K)x(t - \tau) + x^T P B_1 Q B_1^T P x + \tau^2 x^T(t) M x(t) + x^T P B_2 N B_2^T P x + \tau^2 x(t - \tau) D x(t - \tau) + x^T(t) G x(t) - x^T(t - \tau) G x(t - \tau)$$

把上述不等式右边写成矩阵形式, 通过 Schur 补引理, 再在矩阵两边分别左乘矩阵  $diag\{P^{-1}, I, I, I\}$ , 右乘矩阵  $diag\{P^{-1}, I, I, I\}$ , 令  $X = P^{-1}, Y = KP^{-1}$ , 可得不等式 ④ 的左边, 当不等式 ④ 成立时, 可得  $\dot{V} < 0$ , 故系统在有限时间内渐近稳定.

当系统存在不确定性时, 有下面的结论成立.

**定理 2** 对于系统 ①, 在控制器 ③ 作用下, 若存在正定对称矩阵  $P, G$  及相容维数的矩阵  $Q, N, Y$ , 实常数  $\lambda_1, \lambda_2$ , 使得下述不等式成立, 则系统是渐近稳定的, 且  $K = YX^{-1}$ .

$$\begin{pmatrix} \Pi & A_1 X + B_2 Y & P B_1 & P B_2 & P E_1 & P E_2 \\ * & -G + \tau^2 D + \lambda_2 H_2^T H_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -Q & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -N & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\lambda_1 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\lambda_2 \end{pmatrix} < 0 \quad \text{⑤}$$

其中

$$\Pi = AX + B_1 Y + (AX + B_1 Y)^T + XGX + \tau^2 XMX + \lambda_1 XH_1^T H_1 X$$

## 2 数值算例

对形如 ① 的系统, 取

$$A = \begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 1 & -3 \end{pmatrix} \quad A_1 = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -0.8 & -1 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \quad B_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta A(t) = \Delta A_1(t) = \begin{pmatrix} 0.4 \sin 3t & 0 \\ 0 & 0.4 \cos 3t \end{pmatrix}$$

$$\text{取 } E_1 = E_2 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{pmatrix}, H_1 = H_2 =$$

$$\begin{pmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{pmatrix}, K = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \text{则在}$$

控制器

$$u(t) = Kx(t) + \int_{-\tau}^0 R x(t+s) ds$$

作用下, 利用 Matlab 的 LMI 工具箱, 解不等式 ⑤ 可得: 存在正定对称矩阵

$$P = \begin{pmatrix} 0.1884 & -0.0956 \\ -0.0956 & 0.1034 \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} 0.1495 & -0.0902 \\ -0.0902 & 0.0667 \end{pmatrix}$$

及正的实常数  $\lambda_1 = 0.0403, \lambda_2 = 0.0163$ , 使得不等式 ⑤ 成立, 即使得系统渐近稳定.

## 3 结论

本文针对具有状态时滞和输入时滞的不确定系统, 没有做状态变换, 而是利用系统过去的状态设计积分控制器, 以弥补单纯的状态反馈控制所带来的不足. 在该控制器作用下, 系统渐近稳定, 且所得稳定判据是时滞依赖的, 最后通过数值算例验证了该方法的正确性及控制策略的有效性.

## 参考文献:

- [1] Niu Y, Daniel W C. Robust stabilization of uncertain input delay systems by sliding mode control for uncertain stochastic systems with time varying delay [J]. Automatic, 2005, 41: 873.
- [2] Huang C C, Tang T T. Spin line tension control in melt spinning by discrete adaptive sliding mode controllers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100 (5): 3816.
- [3] Mirkin B, Gntman P O. Adaptive output-feedback tracking; the case of MIMO plants with unknown time-varying state delay [J]. System & Control Letters, 2009, 58 (1): 62.
- [4] Dandach S H, Fidan B, Dasgupta S, et al. A continuous time linear adaptive source localization algorithm, robust to persistent drift [J]. System & Control Letters, 2009, 58 (1): 7.
- [5] Bekiaris-Liberis N, Krstic M. Delay-adaptive feedback for linear feed forward systems [J]. System & Control Letters, 2010, 59(5): 277.
- [6] Paesa D, Banos A, Sagues C. Optimal reset adaptive observer design [J]. System & Control Letters, 2011, 60 (10): 877.
- [7] 吴立刚, 凌明祥, 王常虹, 等. 自适应滑模控制具有状态和输入时滞的不确定系统 [J]. 电机与控制学报, 2005, 9(5): 443.
- [8] 李圣涛, 刘晓华. 奇异时滞系统对时滞参数的自适应控制 [J]. 计算技术与自动化, 2008, 28(3): 1.
- [9] Kim Jin-Hoon. Delay and its time-derivative dependent robust stability of time-delayed linear systems with uncertainty [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 46(5): 789.

# 考虑投资收益的双险种 二项风险模型的破产概率

王亚兰, 成军祥

(河南理工大学 数学与信息科学学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**在经典风险模型的基础上,考虑到投资收益的情况,讨论了保费收取次数和索赔过程均为二项分布的双险种风险模型,得到了模型的破产概率表达式及 Lundberg 不等式。

**关键词:**投资收益;双险种;二项风险模型;破产概率

**中图分类号:**O29;F840 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.05.025

## Ruin probability in the binomial model for two-type-risk insurance with investment

WANG Ya-lan, CHENG Jun-xiang

(College of Mathematics and Information Science, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** According to the actual situation, the two-type-risk model with the arrival of the term policies and the occurrences of the claim happen as binominal process by considering the investment income was discussed based on the classical model. Then the formula of ultimate ruin probability and the Lundberg inequality were derived.

**Key words:** investment income; two-type-risk insurance; binominal risk model; ruin probability

## 0 引言

保险业的发展要求我们不断地研究、推广和扩展经典风险模型<sup>[1]</sup>,只有这样,才能对保险公司的经营起到重要指导作用。在许多研究中,很多人将经典风险模型就单一方面的影响因素加以推广,引入利率<sup>[2]</sup>或者引入干扰<sup>[3]</sup>。如:文献[4]中的风险模型仅考虑了保费的收取,只能衡量短期的风险水平;文献[5]中的风险模型虽然考虑了长期的投资行为,即公司在每个阶段都进行了投资,但只考虑了一个险种下的风险情况,不够全面。鉴于此,本文

在前人研究<sup>[6-10]</sup>的基础上,综合多种因素,把风险模型推广到投资收益下的双险种二项风险模型,以期对风险模型的评估和预测起到一定的理论指导作用。

## 1 模型的建立

**定义1** 设  $U \geq 0$ , 给定概率空间  $(\Omega, f, p)$ ,  $n \geq 0$ . 令

$$U(n) = u + cM(n) + f \cdot r(n) - X(n) - Y(n) \quad \textcircled{1}$$

收稿日期:2013-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11201124)

作者简介:王亚兰(1987—),女,河南省信阳市人,河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为应用概率统计与金融数学。

其中,  $X(n) = \sum_{i=1}^{N_1(n)} X_i, Y(n) = \sum_{i=1}^{N_2(n)} Y_i, r(n) = \sum_{k=1}^n I_k$ .

过程  $\{U(n), n \geq 0\}$  称为投资收益下的双险种二项风险模型. 其中:

1)  $u > 0, c > 0, u$  为初始状态资本金,  $c$  为保险公司单位时间收取的保费;

2)  $M(n)$  为到时刻  $n$  为止的保单到达数, 服从参数为  $p$  的二项分布, 即

$$P(M(n) = k) = C_n^k p^k q^{n-k}$$

3)  $f$  为用于投资的基金, 根据初始资本金的大小、单位时间内的保费收入及预测的赔付额大小而定;

4)  $r(n)$  为前  $n$  次的总投资收益率,  $I_n$  为第  $n$  次的投资收益率,  $\{I_n, n = 1, 2, 3, \dots\}$  为取值于  $(-\infty, +\infty)$  上的独立同分布随机序列, 记为  $I$ , 假定

$$E[I] = \eta \quad \text{Var}[I] = \delta^2 \quad (2)$$

5)  $\{X_i, i = 1, 2, 3, \dots\}, \{Y_i, i = 1, 2, 3, \dots\}$  是取值于  $(0, +\infty)$  的独立同分布随机变量序列.  $X_i$  为险种 1 第  $i$  次索赔额,  $Y_i$  为险种 2 第  $i$  次索赔额, 假定

$$\begin{aligned} E[X_i] &= u_1 & E[Y_i] &= u_2 \\ D[X_i] &= \delta_1^2 & D[Y_i] &= \delta_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

6)  $\{N_1(n), n = 1, 2, 3, \dots\}$  为  $[0, n]$  内险种 1 的赔付次数, 服从参数为  $p_1$  的二项分布, 即

$$P(N_1(n) = k) = C_n^k p_1^k q_1^{n-k}$$

7)  $\{N_2(n), n = 1, 2, 3, \dots\}$  为  $[0, n]$  内险种 2 的赔付次数, 服从参数为  $p_2$  的二项分布, 即

$$P(N_2(n) = k) = C_n^k p_2^k q_2^{n-k}$$

8) 记盈余过程为

$$\begin{aligned} S(n) &= cM(n) + f \cdot r(n) - X(n) - Y(n) = \\ &cM(n) + f \cdot \sum_{k=1}^n I_k - \sum_{i=1}^{N_1(n)} X_i - \sum_{i=1}^{N_2(n)} Y_i \end{aligned} \quad (4)$$

为保证公司的稳定经营, 通常要求  $E[S(t)] \geq 0$ , 即

$$cp + f\eta - u_1p_1 - u_2p_2 > 0 \quad (5)$$

由此定义相对安全负荷系数

$$\rho = \frac{cp + f\eta}{u_1p_1 + u_2p_2} - 1 > 0$$

定义 2 破产时刻

$$T = \inf\{n \geq 1; U(n) < 0\}$$

最终破产概率

$$\Psi(u) = P\{T < \infty / U(0) = u\}$$

## 2 模型的相关性质

性质 1 1) 盈余过程  $\{S(n), n = 1, 2, 3, \dots\}$  具有平稳独立增量性; 2)  $E[S(n)] = (cp + f\eta - u_1p_1 - u_2p_2)n > 0$ .

性质 2  $E[S(n)] \geq 0$  时,  $\lim_{n \rightarrow \infty} U(n) = \infty, \text{a. s.}$

证明 根据强大数定理, 可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{U(n)}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u}{n} + \lim_{n \rightarrow \infty} \left[ \frac{cM(n)}{n} \right] + \lim_{n \rightarrow \infty} \left[ \frac{fr(n)}{n} \right] -$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_1(n)} X_i}{N_1(n)} \frac{N_1(n)}{n} \right] - \lim_{n \rightarrow \infty} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_2(n)} Y_i}{N_2(n)} \frac{N_2(n)}{n} \right]$$

将式 ②③ 代入, 上式化简为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{U(n)}{n} = cp + f\eta - u_1p_1 - u_2p_2$$

为了确保保险公司正常经营, 再根据式 ⑤ 得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{U(n)}{n} > 0, \text{a. s.}$$

所以

$$\lim_{n \rightarrow \infty} U(n) = \infty, \text{a. s.}$$

## 3 重要引理

引理 1 对于盈利过程  $\{S(n), n = 1, 2, 3, \dots\}$ , 存在一个函数  $g(r)$ , 使得

$$E[\exp(-rS(n))] = e^{ng(r)}$$

证明 根据式 ②③④ 得

$$\begin{aligned} E[\exp(-rS(n))] &= \\ E[\exp\{-r(cM(n) + f \cdot \sum_{k=1}^n I_k - \sum_{i=1}^{N_1(n)} X_i - \sum_{i=1}^{N_2(n)} Y_i)\}] &= \end{aligned}$$

$$E[\exp(-rc)M(n)] E[\exp(-rf \sum_{k=1}^n I_k)] \cdot$$

$$E[\exp(r \sum_{i=1}^{N_1(n)} X_i)] E[\exp(r \sum_{i=1}^{N_2(n)} Y_i)] =$$

$$\exp n[-rf\eta + In(pe^{-rc} + q)(p_1M_X(r) + q_1) \cdot (p_2M_Y(r) + q_2)]$$

令

$$g(r) = -rf\eta +$$

$$In(pe^{-rc} + q)(p_1M_X(r) + q_1)(p_2M_Y(r) + q_2)$$

则有  $E[\exp(-rS(n))] = e^{ng(r)}$  成立.

证毕.

引理 2 方程  $g(r) = 0$ , 存在唯一正解  $r = R$ .

证明  $g(r) = 0$ .

根据引理 1, 对  $g(r)$  求导得

$$g'(r) = -f\eta + \frac{-cpe^{-rc}}{pe^{-rc} + q} + \frac{p_1 E[Xe^{rX}]}{p_1 M_X(r) + q_1} + \frac{p_2 E[Ye^{rY}]}{p_2 M_Y(r) + q_2} \quad (6)$$

再对  $g'(r)$  求导得

$$g''(r) = \frac{(c^2 pe^{-rc})(pe^{-rc} + q) + (cpe^{-rc})(-cpe^{-rc} + q)}{(pe^{-rc} + q)^2} + \frac{p_1 E[X^2 e^{rX}][p_1 M_X(r) + q_1] - p_1^2 (E[Xe^{rX}])^2}{[p_1 M_X(r) + q_1]^2} + \frac{p_2 E[Y^2 e^{rY}][p_2 M_Y(r) + q_2] - p_2^2 (E[Ye^{rY}])^2}{[p_2 M_Y(r) + q_2]^2} \quad (7)$$

将  $r = 0$  代入式 (6) 得

$$g'(0) = -f\eta - \frac{cp}{p + q} + \frac{p_1 u_1}{p_1 + q_1} + \frac{p_2 u_2}{p_2 + q_2} = -f\eta - cp + u_1 p_1 + u_2 p_2$$

根据式 (5) 得

$$g'(0) < 0$$

将  $r = 0$  代入式 (7) 得

$$g''(0) = cp(c + 1)q + \frac{p_1 E[X^2](p_1 + q_1 - p_1)}{(p_1 + q_1)^2} + \frac{p_2 E[Y^2](p_2 + q_2 - p_2)}{(p_2 + q_2)^2} = cp(c + 1)q + \frac{p_1 E[X^2]q_1}{(p_1 + q_1)^2} + \frac{p_2 E[Y^2]q_2}{(p_2 + q_2)^2} > 0$$

所以,曲线  $g(r)$  在  $[0, +\infty]$  上为凸函数. 因此,  $g(r) = 0$  至多有 2 个解. 又因为  $r = 0$  时,  $g'(0) < 0$  且当  $r \rightarrow \infty$  时,  $g(r) \rightarrow \infty$ , 所以  $g(r) = 0$  有且只有 1 个正解, 记为  $R$ , 称为调节系数.

### 4 破产概率表达式

**定理 1** 对于模型 (1), 其最终破产概率为

$$\Psi(u) = \frac{e^{-Ru}}{E[\exp -RU(T) | T < \infty]}$$

其中,  $R$  为调节系数.

**证明** 对  $\forall n \geq 0$  和  $r > 0$ , 由累进均值法则得

$$E[e^{-rU(n)}] = E[e^{-rU(n)} | T < n]P\{T < n\} + E[e^{-rU(n)} | T \geq n]P\{T \geq n\} = e^{-rn} E[e^{-rcM(n)}] E[e^{-rf \sum_{k=1}^n I_k}] E[e^{rX(n)}] E[e^{rY(n)}] = e^{-r(u+f\eta)} [(pe^{-rc} + q)(p_1 M_X(r) + q_1)(p_2 M_Y(n) + q_2)]^n \quad (8)$$

式 (8) 右端第 1 项 (记为  $I_1$ ) 中,  $U(n)$  可写为

$$U(n) = u + cM(n) + f \sum_{k=1}^n I_k - X(n) - Y(n) \quad (9)$$

$$U(T) = u + cM(T) + f \sum_{k=T}^n I_k - X(T) - Y(T) \quad (10)$$

式 (9) 与式 (10) 相减得

$$U(n) = U(T) + c(M(n) - M(T)) + f \sum_{k=T}^n I_k - (X(n) - X(T)) - (Y(n) - Y(T))$$

易知

$T: M(n) - M(T), X(n) - X(T), Y(n) - Y(T), \{I_k\}_{n=T}^n, R(T)$  是相互独立的.

将式 (10) 代入  $I_1$  得

$$I_1 = E[e^{-rU(T)} | T < n] E[e^{-rc(M(n)-M(T))} | T < n] \cdot E[e^{-rf \sum_{k=T}^n I_k} | T < n] \cdot E[e^{r(X(n)-X(T))} | T < n] E[e^{r(Y(n)-Y(T))} | T < 0] \cdot P\{T < n\} = E[e^{-ru(T)} | T < n] P\{T < n\} [(pe^{-rc} + q)(-rf\eta)(M_X(r) + q_1)(M_Y(r) + q_2)]^{n-T}$$

选择  $r = R$ , 式 (8) 变为

$$e^{-Ru} = E[e^{-RU(T)} | T < n] P\{T < n\} + E[e^{-RU(T)} | T \geq n] P\{T \geq n\} \quad (11)$$

令  $n \rightarrow \infty$ , 式 (11) 右端第 1 项变为

$$E[e^{-RU(T)} | T < \infty] P\{T < \infty\}$$

若能证明当  $n \rightarrow \infty$  时, 式 (11) 右端第 2 项为 0, 则定理得证. 以下为证明过程.

式 (8) 右端第 2 项记为

$$I_2 = E[e^{-RU(n)} | T \geq n] P\{T \geq n\}$$

记

$$\alpha = cp + f\eta - u_1 p_1 - u_2 p_2$$

$$\beta^2 = c^2 npq + \eta f^2 \delta^2 + n(p_1 u_1^2 + p_1 q_1 u_1^2) + n(p_2 u_2^2 + p_2 q_2 u_2^2)$$

则

$$E[U(n)] = E[u + S(n)] = u + n(cp + f\eta - u_1 p_1 - u_2 p_2) = u + n\alpha$$

$$Var[U(n)] = Var[u + cM(n) + fr(n) - X(n) - Y(n)] = n\beta^2$$

由于  $\alpha > 0$ , 考察  $\Delta = u + n\alpha - \beta n^{\frac{2}{3}}$ , 只要  $n$  充分大, 它便是正的. 利用  $U(n)$  和  $\Delta$  大小关系将式 (11) 右端第 2 项拆为 2 项, 有

$$E[e^{-RU(n)} | T > n, 0 \leq U(n) \leq \Delta] \cdot P\{T > n, 0 \leq U(n) \leq \Delta\} + E[e^{-RU(n)} | T > n, U(n) > \Delta] \cdot P\{T > n, U(n) > \Delta\} \leq P\{0 \leq U(n) \leq \Delta\} + e^{-R\Delta}$$

由契比雪夫不等式得

$$\begin{aligned}
 p\{0 \leq U(n) \leq \Delta\} &= p\{0 \leq U(n) \leq \\
 u + n\alpha - \beta n^{\frac{2}{3}}\} &= p\{0 \leq U(n) \leq \\
 E[U(n) - \beta n^{\frac{2}{3}}]\} &\leq \\
 p\{|U(n) - E[U(n)]| \geq \beta n^{\frac{2}{3}}\} &= \\
 \frac{Var(U(n))}{\beta^2 n^{\frac{4}{3}}} &= n^{-\frac{1}{3}}
 \end{aligned}$$

故当  $n \rightarrow \infty$  时,式 ⑩ 右端为 0. 所以式 ⑩ 中,令  $n \rightarrow \infty$ ,有

$$e^{-Ru} = E[e^{-RU(T)} | T < \infty] P\{T < \infty\}$$

$$\text{即 } \Psi(u) = \frac{e^{-Ru}}{E[e^{-RU(T)} | T < \infty]}.$$

**定理 2** 对于模型 ① 的最终破产概率满足 Lundberg 不等式

$$\Psi(u) \leq e^{-Ru}$$

**证明** 当  $T < \infty$  时,  $U(T) < 0$ ,故

$$E[\exp(-RU(T)) | T < \infty] \geq 1$$

所以

$$\Psi(u) \leq e^{-Ru}$$

## 5 结论

针对当前保险公司所涉及的保险内容日益广泛的现状,在前人研究的基础上,推出了带投资收益的双险种二项风险模型.但是,员工工资、广告宣传、设备维护或更新,同样需要公司进行支付,因此

综合考虑上述因素对破产概率的影响将是今后工作的重点.

### 参考文献:

[1] Grandell J. Aspect of Risk Theory[M]. New York:Springer Verlag,1997.

[2] 刘春生,赵清贵.单险种风险模型的另一种推广[J].重庆文理学院学报,2010,29(1):17.

[3] 黎锁平,刘琪.考虑投资和干扰具有随机保费的离散风险模型[J].高校应用数学学报,2009,24(1):9.

[4] 蔡高玉,耿显民.一类随机保费下的风险模型[J].应用数学与计算数学学报,2007,21(1):27.

[5] 乔克林,候致武.考虑投资的双复合二项风险模型的破产概率[J].延安大学学报:自然科学版,2011,30(3):32.

[6] 徐俊科,刘再明,宋华.一类带投资收益风险模型的罚金折现期望[J].经济数学,2007,24(3):234.

[7] 成军祥,张馨芳.变破产下限广义双 Poisson 风险模型的破产概率[J].河南理工大学学报:自然科学版,2010,29(6):848.

[8] 龚日朝,杨向群.复合二项风险模型的破产概率[J].数学理论与应用,2001,21(2):96.

[9] 夏亚峰,张向平.考虑退保的带投资相依风险模型[J].甘肃科学学报,2012,24(1):144.

[10] 戴洪帅,刘再明,沈亮.带随机投资收益的多险种风险过程的破产概率[J].数学理论与应用,2006,26(4):48.