

# 缩合型硅橡胶发泡配方优化及保温性能研究

方少明<sup>1,2</sup>, 程瑜<sup>2</sup>, 白宝丰<sup>2</sup>, 闫春绵<sup>2</sup>, 史波<sup>3</sup>, 郭东杰<sup>1,2</sup>

- (1. 郑州轻工业学院 河南省表界面科学重点实验室, 河南 郑州 450001;
2. 郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**采用正交试验,考察发泡剂用量、发泡助剂用量、固化剂用量对缩合型泡沫硅橡胶拉伸强度、断裂伸长率、表观密度性能指标的影响,得到发泡硅橡胶的最优配方为基胶100份、发泡剂3份、发泡助剂2份、固化剂2.5份.利用扫描电子显微镜、万能机械拉力机、导热系数测定仪对几个配方样品进行结构和性能测试,结果表明:最优配方的样品其力学性能适中,内部微小气室分布致密均匀,具备较为理想的隔热保温性能.

**关键词:**泡沫硅橡胶;正交试验;力学性能;保温性能

**中图分类号:**TQ333.93 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.001

## Optimization of foaming formulae and heat saving properties of hydroxyl-terminated silicone

FANG Shao-ming<sup>1,2</sup>, CHENG Yu<sup>2</sup>, BAI Bao-feng<sup>2</sup>, YAN Chun-mian<sup>2</sup>, SHI Bo<sup>3</sup>, GUO Dong-jie<sup>1,2</sup>

(1. He'nan Province Key Laboratory of Surface & Interface Science, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

3. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The effects of foaming agent, additive and curing agent content on tensile strength, rupture elongation and apparent density of foaming silicone were studied by the orthogonal experiment. The optimal formula for foaming silicone were 100 copies of base adhesives, 3 copies of foaming agents, 2 copies of additives, and 2.5 copies of curing agents. The related mechanical properties and thermal properties of the above four formulae were investigated by scanning electron microscopy (SEM), multifunctional tensile machine, and hot disc instrument. Results presented that the optimum formula had moderate mechanical properties, well defined and dispersed inner pores, and desired thermal insulation performance.

**Key words:** foam silicone; orthogonal experiment; mechanical property; heat saving property

收稿日期:2014-03-08

基金项目:973 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB239600,2011CB302106);教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(IRT1187);河南省重点攻关项目(132102210240);郑州轻工业学院博士科研项目(000346)

作者简介:方少明(1963—),男,河南省汝南县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为功能聚合物。

通信作者:郭东杰(1973—),男,河南省南阳市人,郑州轻工业学院特聘教授,博士,主要研究方向为智能材料。

## 0 引言

缩合型硅橡胶是由以聚二甲基硅氧烷为线性主链,羟基、烷氧基为末端官能团的羟基封端硅橡胶,与硅烷偶联剂发生缩合反应后形成的三维网状高分子弹性体<sup>[1-2]</sup>.与纯有机物成分的其他橡胶相比,硅橡胶弹性体的主体是无机的Si—O基团<sup>[3]</sup>,有机成分仅分布于侧链且含量较低,因此而具备不同于其他橡胶的独特物化性质<sup>[4]</sup>:因Si—O键不能支持燃烧,硅橡胶弹性体具备一定的自阻燃性能<sup>[5]</sup>;因O元素具备高度柔韧性<sup>[6]</sup>,硅橡胶弹性体具备较宽的机械性能调谐范围;因Si—O键的键能较大( $\sim 460.5$  kJ/mol),弹性体结构相对稳定,甚至可以承受300℃的高温.另外,硅橡胶绝缘、无毒、透明,故在航天航空、电子电器、生物医药等领域有广阔的应用空间<sup>[7]</sup>.

缩合型硅橡胶在室温下即可固化,便于成型和掺杂,与无机材料的兼容性也很好,可作为理想的内、外装饰保温材料<sup>[8]</sup>.但硅橡胶中无机成分含量过高,导热系数较其他橡胶大( $\sim 0.17$  W/m·K),表观密度略高( $\sim 0.92$  kg/dm<sup>3</sup>)<sup>[9]</sup>,且价格昂贵,限制了其应用.为解决上述缺陷,本文拟以小分子羟基封端硅橡胶为预聚体,正硅酸乙酯为偶联(固化)剂,有机锡络合物为催化剂,N,N-二亚硝基五亚甲基四胺为发泡剂H,经发泡得泡沫硅橡胶;采用正交试验法对发泡剂、发泡剂助剂及固化剂3个因素进行工艺优化试验,以期得到高度发泡、分布均匀、闭孔的泡沫硅橡胶弹性体.对发泡后的试样进行拉伸强度、断裂伸长率、表观密度、传热性能等测试,以对其结构性能进行综合评价.

## 1 材料与实验方法

### 1.1 主要原料及仪器

主要原料: $\alpha,\omega$ -二羟基聚二甲基硅氧烷、正硅酸乙酯、季戊四醇、二月桂酸二丁基锡、季铵碱,均为工业级,中蓝晨光化工研究设计院有限公司产;N,N-二亚硝基五亚甲基四胺(AR),天津市福晨化学试剂厂产;液体石蜡(AR),国药集团化学试剂有限公司产.

仪器:JSM-6490LV扫描电子显微镜(SEM),日本电子公司产;Tensor 27型傅里叶变换全反射衰减红外光谱仪(ATR-FTIR),德国Bruker公司产;CMT6104机械拉力机,深圳新三思公司产;Hot Disk

AB导热系数测定仪,瑞典凯戈纳斯公司产.

### 1.2 正交试验设计

硅橡胶发泡过程中涉及因素较多,在前期泡沫硅橡胶研究的积累基础上,确定3个对硅橡胶发泡过程影响可能最大的因素:发泡剂用量(A)、发泡助剂用量(B)、固化剂用量(C).选择发泡剂H,发泡助剂季戊四醇组成发泡体系,采用L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验(见表1)研究泡沫硅橡胶制备过程中上述3因素对样品的拉伸强度(T),断裂伸长率(E)和表观密度( $\rho$ )等性能的影响.

表1 硅橡胶发泡正交试验因素水平表

水平	A	B	C
1	3.0	1.0	2.0
2	4.0	1.5	2.2
3	5.0	2.0	2.5

注:基胶量为100份.

### 1.3 试样制备

按照表1中各物质比例,分别称取一定量 $\alpha,\omega$ -二羟基聚二甲基硅氧烷和正硅酸乙酯;加入二月桂酸二丁基锡于50℃下预聚,控制预聚时间得到不同黏度的硅橡胶预聚体;将预聚体胶、发泡剂H、季戊四醇及季铵碱充分混合均匀,迅速装入已升到预定温度(165℃)的平板硫化模具中,逐渐放压发泡;发泡结束后,自然冷却至室温,得泡沫硅橡胶试样.

### 1.4 表征及测试

将样品加工成薄片,表面喷金后用扫描电子显微镜(SEM)观察表面形貌.原料及样品在30℃下真空干燥12h后,用压膜法进行ATR-FTIR表征.硅橡胶泡沫材料与实心胶的表观密度均由间接方法测得,即准确测定试样的质量与体积,由表观密度计算公式得到.断裂强度和断裂伸长率按GB/T 528—1992,利用机械拉力机测试,将样品制成哑铃型标准试件,拉伸速度为30 mm/min.导热系数按照ASTMD 5470—1995标准,由导热系数测定仪测试.

## 2 结果与讨论

### 2.1 发泡配方优化

表2给出正交试验的结果.

表3给出正交试验方差分析的结果.由表3可见,对于拉伸强度,发泡助剂对拉伸强度影响很大,以水平3为最优;固化剂对拉伸强度的影响次之,以水平3最优;发泡剂的影响最小,以水平1最优,较

优配方为  $A_1B_3C_3$ . 对于断裂伸长率,发泡剂对泡沫硅橡胶的断裂伸长率影响较显著,以水平 1 最优;发泡助剂和固化剂的影响均不显著,分别为水平 2 最优、水平 3 居中,较优配方为  $A_1B_2C_2$ . 对于表观密度 3 个因素的影响都不显著,较优配方为  $A_2B_2C_3$ . 综合考虑,在 3 个较优配方中,发泡剂用量对泡沫硅橡胶的机械性能影响比较显著,均取水平 1,对表观密度的影响不显著,水平 1 居中;发泡助剂用量对拉伸强度的影响高度显著,取水平 3,对断裂伸长率和表观密度的影响都不显著;固化剂用量对表观密度有影响但不显著,以水平 3 最优,对拉伸强度来讲,也是以水平 3 最优,但对断裂伸长率来讲水平 3 居中,因此最优配方为  $A_1B_3C_3$ .

为验证正交试验优化配方的可信度,以未发泡硅橡胶为对比样品(I),正交试验中 3 个较优配方  $A_1B_3C_3$ ,  $A_1B_2C_2$  和  $A_2B_2C_3$  分别为 II, III, IV 号样品,开展硅橡胶发泡前后的物性研究.

## 2.2 SEM 分析

H 型发泡剂在发泡助剂的协助下,经高温分解产生氮气<sup>[10]</sup>. 这些氮气分散在硅橡胶预聚体中,形成一个个的小气泡,预聚体固化定型后可得泡沫硅橡胶. 为观察发泡前后硅橡胶的剖面气室结构及分布情况,课题选择性地对样品 I—IV 进行 SEM 形貌观察,结果见图 1. 图 1 中样品 I 展现出硅橡胶作为高分子材料所特有的凹凸不平粗糙剖面,没有明显孔洞<sup>[11]</sup>. 样品 II 中气室多为椭球形或球形闭孔结构,孔壁较薄,孔径均匀,尺寸基本上处于 400 ~ 500  $\mu\text{m}$  之间,没有发现明显缺陷气室. 该 SEM 结果与前述正交试验结果吻合,表明发泡助剂对改善发泡效果有显著贡献. 样品 III 中气室的形貌同图样品 II 类似,气室结构存在一定程度的缺陷,气室之间有通路存在,表明该样品的泡孔生成不稳定,发泡剂分解不连续. 样品 IV 中气室孔径较小,处于 200 ~ 300  $\mu\text{m}$  之间,分布密集,孔壁较厚. 其原因可能是:IV 号

样品的发泡剂用量较高,发泡助剂用量相对较少,从而导致发泡不完全,泡孔较小. 上述结果表明:H 型发泡剂和季戊四醇的协同作用可产生高度发泡的缩合型硅橡胶. 密度测试结果也证实了这一点:发泡前约 0.92  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,发泡后表观密度处于 0.385 6 ~ 0.434 5  $\text{g}/\text{cm}^3$  之间(见表 2),即发泡后体积增加了约 1.2 倍.

## 2.3 力学性能分析

泡沫硅橡胶内部微小气室的存在必然对其力学性能产生影响. 利用万能机械拉力机测试了硅橡胶发泡前后的拉伸强度和断裂伸长率,结果见图 2. 由图 2 可见,发泡后,泡沫硅橡胶的断裂伸长率变化较小,但抗拉伸强度数值大幅降低,由未发泡的 4.85 MPa 减少到发泡后的 2.67 MPa(II), 2.32 MPa(III), 2.76 MPa(IV). 4 个样品应力-应变曲线上均展现出良好的弹性区域和塑形区域,分别计算它们弹性区域的斜率,得样品的杨氏模量分别是:2.299 MPa(I), 1.064 MPa(II), 0.954 MPa(III), 0.884 MPa(IV). 显然,发泡后样品的力学性能明显降低,这是因为泡沫硅橡胶内部含有大量的微小气室,这些气室的存在降低了硅橡胶的模量和抗拉伸强度. 对比 4 个应力-应变曲线:III 号样品固化剂的用量不足以使基胶固化,且气室存在大量缺

表 2 正交试验结果

试验 编号	因素/份			指标		
	A	B	C	T/MPa	E/%	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	3.0	1.0	2.0	1.75	80.335	0.434 5
2	3.0	1.5	2.2	2.33	95.433	0.385 6
3	3.0	2.0	2.5	2.67	106.370	0.429 2
4	4.0	1.0	2.2	1.82	87.723	0.403 2
5	4.0	1.5	2.5	2.72	88.424	0.415 2
6	4.0	2.0	2.0	2.12	90.326	0.414 2
7	5.0	1.0	2.5	1.92	91.237	0.433 7
8	5.0	1.5	2.0	2.02	95.235	0.405 3
9	5.0	2.0	2.2	2.32	92.328	0.397 6

表 3 各指标的方差分析表

方差来源	T					E					$\rho$				
	$S_j^2$	f	$V_j$	F	显著性	$S_j^2$	f	$V_j$	F	显著性	$S_j^2$	f	$V_j(\times 10^{-4})$	F	显著性
A	0.04	2	0.02	9.16	(*)	213.90	2	106.90	10.25	(*)	0.12	2	0.06	0.06	—
B	0.49	2	0.25	105.10	**	95.36	2	47.68	4.57	—	5.80	2	2.90	2.77	—
C	0.22	2	0.11	47.01	*	67.85	2	33.92	3.25	—	13.83	2	6.92	6.22	—
误差	0.005		0.002			20.87		10.44			2.09		1.04		
主次因素	BCA					ABC					CBA				
较优水平	$A_1B_3C_3$					$A_1B_2C_2$					$A_2B_2C_3$				

注:—表示没有显著的影响,\*\*表示高度显著的影响,\*表示显著的影响,(\*)表示较为显著的影响.

陷,导致所制得的泡沫硅橡胶的抗拉伸强度较小;IV号样品中虽有较大的拉伸强度,但是断裂伸长率低,这是由于发泡剂用量过大、助剂用量过低致使发泡速率过慢所致;II号样品中的拉伸强度较大,模量、断裂伸长率适中,可满足实际应用中多方面的需求。

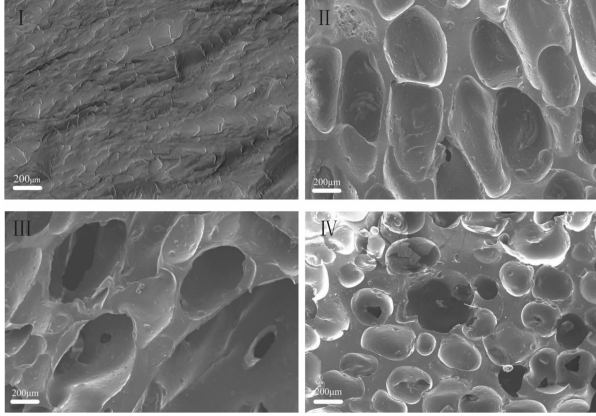


图1 SEM图片

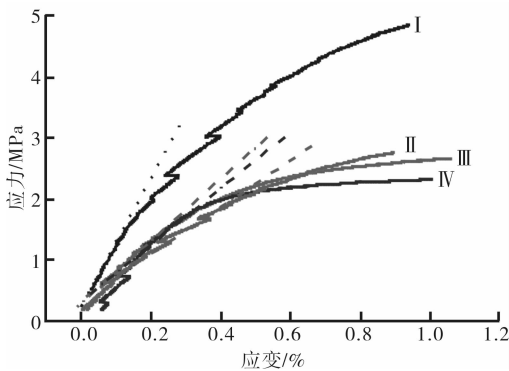


图2 样品的拉伸应力-应变曲线图

## 2.4 传热性能分析

鉴于泡沫硅橡胶内部存在无数个小气室,而空气又是热的不良导体,泡沫硅橡胶应该具备一定的保温性能,因此利用导热系数测定仪分别测试了样品的导热系数和比热。发泡前,硅橡胶的导热系数和比热为 $0.172 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $1.51 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ;发泡后,II,III,IV样品的导热系数和比热分别为 $0.056 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $0.083 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $0.062 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $0.458 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ,  $0.417 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ,  $0.424 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ,分别降低到原来的33.2%,48.1%,36.4%和30.0%,27.6%,28.0%。比较II,III,IV号样品的传热性能,II号样品具备最优的隔热系数和最小的比热,其原因可能是:II号样品内部微小气室孔壁薄、分布均匀。上述传热性能测试结果表明:泡沫硅橡胶的保

温效果与其内部的微小气室相关,多孔度高的闭孔泡沫硅橡胶具备更优良的保温性能。

## 3 结论

本文采用正交试验法,以发泡剂用量、发泡助剂用量、固化剂用量为考察因素,以拉伸强度、断裂伸长率和表观密度为考察指标,采用综合平衡法得到发泡硅橡胶的最优配方为 $A_1B_3C_3$ :基胶100份,发泡剂3份,发泡助剂2份,固化剂2.5份。

SEM电镜观察显示:最优方案的泡沫硅橡胶内部微小气室多为椭球形或球形闭孔结构,孔壁较薄,孔径均匀,尺寸基本上处于 $400 \sim 500 \mu\text{m}$ 之间;传热性能测试表明:发泡后,较优配方导热系数和比热分别降低到原来的33.2%,48.1%,36.4%和30.0%,27.6%,28.0%,显示了一定的保温性能。

## 参考文献:

- [1] 雷卫华,冯敏,陈立新,等.低发泡倍率硅橡胶海绵结构及性能的影响因素[J].特种橡胶制品,2011,32(2):40.
- [2] 黄文润.硅烷偶联剂及硅树脂[M].成都:四川科学技术出版社,2009.
- [3] Guo D J, Xiao S J, Liu H B, et al. Diffusion of hydrosilanes from the control layer to the vinylsilane-rich flow membrane during the fabrication of microfluidic chips [J]. Langmuir, 2005, 21(23):10487.
- [4] Freyer C, Maschberger A. Blowing agent compositions and compositions curable to give elastomeric silicone foams [P]. US:5332762A, 1994-07-26.
- [5] 李汉堂.有机硅材料的发展及其应用[J].有机硅材料,2006,20(4):212.
- [6] Ding Y, Jiao Z S, Guo D J, et al. Tunable cohesion and water lubrication of PEG-g-PMHS-c-PMVS copolymer membranes [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012, 395(5):199.
- [7] 孙彩亮,魏刚.国内硅橡胶泡沫材料的研究进展[J].弹性体,2009,19(5):55.
- [8] 何立瑜.框架建筑物的墙体防火设计探讨[J].新型建筑材料,1995(5):11.
- [9] 瞿浩峰,郭东杰.自保温防火柔性墙材及其制备方法 [P]. 中国:CN102432224A, 2012-05-02.
- [10] 岳玉全,郑之初,张世民.氮气泡沫驱发泡剂优选及油层适应性室内实验[J].2010,23(1):80.
- [11] Guo D J, Fu S J, Tan W, et al. A highly porous nafion membrane templated from polyoxometalates-based supramolecule composite for ion-exchange polymer-metal composite actuator [J]. Journal of Materials Chemistry, 2010, 20(45):10159.



# 掺铝 ZnO 花状纳米片的制备及气敏性能研究

田俊峰, 蔡立芳, 韩莉锋, 程书文

(郑州轻工业学院 河南省表界面科学重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:**采用水热法,以酒石酸为形貌控制剂、以乙酸锌和尿素为原料,在载波片上制备了掺铝 ZnO 纳米片;采用 XRD 和 SEM 对其结构和形貌进行表征,以研究掺铝 ZnO 纳米片对丙酮、正丁醇、甲醇、乙醇、异丙醇、DMF 6 种气体的气敏性能.结果表明,掺杂 3% 铝的 ZnO 材料晶粒尺寸最小,为花状和层状纳米片复合物,对丙酮的灵敏度较高.

**关键词:**氧化锌纳米片;气敏性能;铝掺杂

**中图分类号:**TG115 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.002

## Preparation and gas sensing property of Al-doped ZnO nanosheets

TIAN Jun-feng, CAI Li-fang, HAN Li-feng, CHENG Shu-wen

(He'nan Provincial Key Laboratory of Surface & Interface Science, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Al-doped ZnO nanosheets were prepared by the hydrothermal method, using tartaric acid as shape controlling agent and zinc acetate and urea as doping source. The products were characterized by XRD and SEM. The gas sensing properties of as-prepared products to acetone, methanol, ethanol, isopropanol, n-butanol and DMF were also studied, respectively. The results showed that 3% Al-doped product had a smaller grain size and a multilayered nanosheet and flower morphology. The as-synthesized nanomaterials had good response to acetone.

**Key words:** ZnO nanosheets; gas sensing property; Al-doped

## 0 引言

ZnO 是一种重要的半导体金属氧化物,禁带宽度为 3.37 eV,具有优良的光学和电学性能,在紫外线屏蔽材料、磁性材料、压电材料、图像记录材料、染料敏化太阳能电池和传感器等领域有广泛的应用.制备 ZnO 的方法主要有金属气相沉积法、溶胶凝胶法、电化学沉积法、气液固法(VLS)、模板法、水热法等,其中水热法因制备简单、条件温和、成本低、操作性强等,受到广泛关注<sup>[1]</sup>.材料的微观形貌对元件的气敏性有较大影响<sup>[2]</sup>,花状和片状结构材

料具有较大的气孔率,可增大材料与气体的接触面积.在反应体系中加入模板可以使晶体在模板的导向下生长,生成特殊的形貌;反应物在载玻片上生成产物,也可以实现一定的形貌控制.本文拟采用水热法,以酒石酸为形貌控制剂,在载玻片上制备花状和片状 ZnO 纳米片,对其进行铝掺杂,以研究掺杂量对 ZnO 气敏性能的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

试剂:乙酸锌、无水乙醇和乙二醇均为分析纯,

收稿日期:2013-12-10

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(12B430026);国家级大学生创新训练项目(201310462013)

作者简介:田俊峰(1980—),男,河南省濮阳市人,郑州轻工业学院讲师,主要研究方向为功能材料.

天津市风船化学试剂科技有限公司产;硝酸铝(分析纯),广东汕头市西陇化工厂产;酒石酸(化学纯),上海阿拉丁试剂有限公司产;尿素(分析纯),天津市科密欧化学试剂开发中心产。

仪器:样品物相分析利用德国 Bruker 公司 D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD),测试条件为:Cu 靶, $\lambda = 1.5406 \text{ nm}$ ,管电压 40 kV,管电流 40 mA,扫描步长为  $0.02^\circ$ ,扫描速度为  $0.1^\circ/\text{s}$ ,扫描范围为  $20^\circ \sim 80^\circ$ . 样品形貌采用日本 JEOL 公司的 JSM-7500F 型冷场发射扫描电镜,加速电压为 5 kV. 气敏性能测试用河南汉威 HW-30A 气敏测试系统。

### 1.2 ZnO 及掺铝 ZnO 纳米片的制备

取一载玻片,在 10 wt% 的 NaOH 溶液里浸泡 10 h,然后用无水乙醇和去离子水超声清洗数次,保存在乙醇溶液中备用。

将 2 mmol 乙酸锌和 0.2 mL 酒石酸溶于 40 mL 去离子水中,搅拌并超声 30 min 后,加入 6 mmol 尿素,搅拌 30 min,转移至 50 mL 水热反应釜中并放入一块载玻片。140  $^\circ\text{C}$  反应 15 h,自然冷却至室温,然后离心分离,用去离子水和无水乙醇各洗涤 3 次,80  $^\circ\text{C}$  真空干燥 5 h,得白色前驱体粉末,放入马弗炉中,400  $^\circ\text{C}$  灼烧 2 h,得到白色产物 ZnO. 铝掺杂的 ZnO 反应条件同上,以硝酸铝为铝源,铝与锌的摩尔比分别为 1%、3%、5%。

### 1.3 气敏元件制备

采用旋涂法制备气敏元件,具体过程为:将掺杂铝的 ZnO 纳米粉体与适量乙二醇混合并调成浆料,将浆料均匀涂在带有 Au 电极和 Pt 引线的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷管外. 室温干燥后,于马弗炉中 600  $^\circ\text{C}$  烧结 1 h,然后在 320  $^\circ\text{C}$  下老化 7 d. 采用静态配气法,测试材料的气敏性能,测试条件为:室温 25  $^\circ\text{C}$ ,湿度 60% ~ 70%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

图 1 所示为制备样品的 XRD 图谱. 由图 1 可见,31.7 $^\circ$ ,34.4 $^\circ$ ,36.2 $^\circ$ ,47.5 $^\circ$ ,56.6 $^\circ$ ,62.9 $^\circ$ ,68.0 $^\circ$  和 69.1 $^\circ$  处的衍射峰,分别对应于六方纤锌矿结构 ZnO 的(100),(002),(101),(102),(110),(103),(112)和(201)晶面,与标准卡片 JCPDS No. 36-1415 一致. 与纯 ZnO 相比,掺铝样品的衍射峰强度减弱,但没有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等杂质峰出现,这可能源于铝掺杂量少<sup>[3]</sup>.

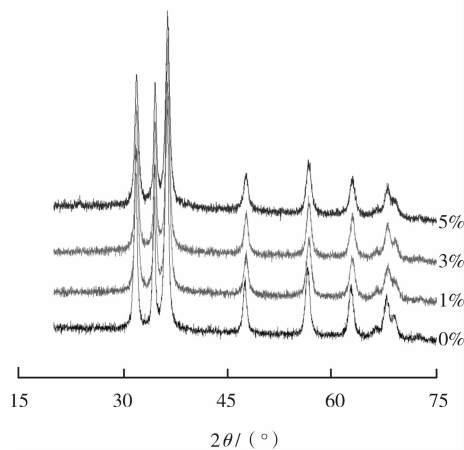


图 1 不同铝掺杂比例 ZnO 的 XRD 图谱

由谢乐公式计算得到,纯 ZnO 粉末的平均晶粒尺寸为 19.63 nm,掺铝 1%、3%、5% 的 ZnO 粉末的平均晶粒粒径分别为 16.32 nm, 13.85 nm, 17.66 nm. 由此可见,铝掺杂抑制了 ZnO 晶粒增长,使晶粒尺寸趋向变小,原因可能是:  $\text{Al}^{3+}$  的半径小于  $\text{Zn}^{2+}$ ,铝进入晶格内部分代替 Zn 后,使其晶粒尺寸变小<sup>[4]</sup>. 晶粒变小,比表面积增加,可以为测试气体提供更多的吸附空间,有助于提高气敏性能<sup>[5]</sup>.

### 2.2 SEM 分析

图 2 为掺 3% 铝的 ZnO 材料 SEM 图. 由图 2 可见,制备的纳米材料是片状和花状的混合物,花状粒子以纳米片为组成单元,呈现分级结构,纳米片厚度约为 20 nm. 散落的纳米片之间存在大量空隙,组成花状的纳米片之间也有空隙存在,这些空隙可以增大材料的活性面积,为测试气体提供更多的活性位点. 这种松散和多空隙的 ZnO 材料能够有效促进测试气体的扩散和传质,有利于气体的吸附和脱附,从而提高气敏性能<sup>[6]</sup>.

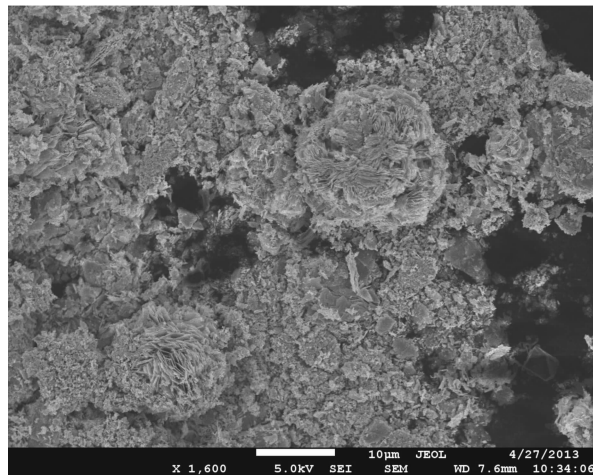


图 2 掺 3% 铝的 ZnO 材料的 SEM 照片

### 2.3 材料的气敏性能测试

图3为不同铝掺杂量 ZnO 材料对 0.01% 丙酮的温度灵敏度曲线. 由图3可见,纯 ZnO 的灵敏度较低,掺杂铝后其灵敏度有所提高,其中掺杂量为 3% 时灵敏度最大,其原因是 3% 铝掺杂的 ZnO 粒径最小,比表面积最大,有助于气体的吸附和传质,从而气敏性能得到提高<sup>[7]</sup>. 同时,材料的气敏性随温度升高先上升后下降,在 400 °C 达到最大,表明此时气体分子的吸附与脱附达到平衡,材料表面的气体吸附量最大,灵敏度也最大.

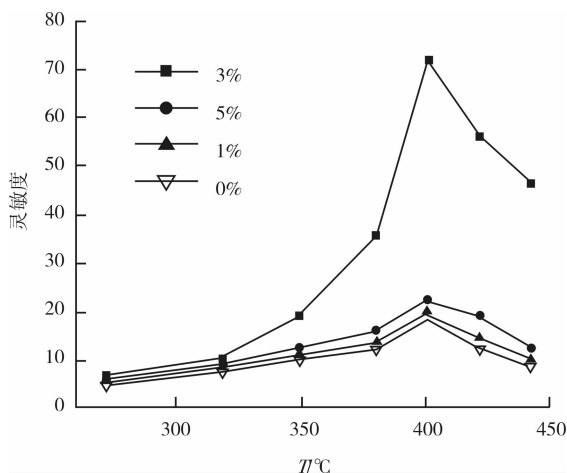


图3 不同铝掺杂量的 ZnO 材料对 0.01% 丙酮的温度灵敏度曲线

图4为不同铝掺杂量 ZnO 材料对 0.01% 不同测试气体的灵敏度图. 由图4可知,掺铝后,ZnO 材料对乙醇、丙酮、异丙醇和正丁醇的灵敏度均有不同程度的提高,其中 3% 铝掺杂的 ZnO 气敏性能最好,这与 XRD 分析结果一致. 各种材料对甲醇和 DMF 的灵敏度影响不大. 3% 铝掺杂的 ZnO 对正丁醇和丙酮具有较好的选择性.

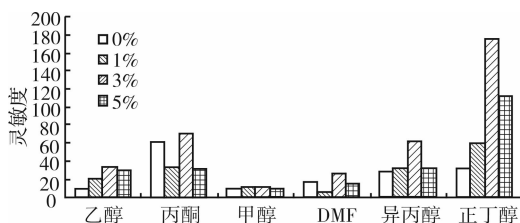


图4 不同铝掺杂量 ZnO 材料对 0.01% 不同测试气体的灵敏度图

虽然 3% 铝掺杂 ZnO 元件对正丁醇的灵敏度较高,但恢复和响应时间超过 20 s,不实用. 表 1 为掺

杂 3% 铝的 ZnO 材料对不同浓度丙酮的灵敏度和响应-恢复时间. 由表 1 可见,材料对丙酮的响应时间在 10 s 以内,恢复时间不超过 30 s,由此可见其有望成为测试丙酮气体的元件材料.

表 1 掺杂 3% 铝的 ZnO 材料对不同浓度丙酮的灵敏度和响应-恢复时间

测试项目	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$
响应时间/s	10	9	7	7	7
恢复时间/s	23	20	16	25	29
灵敏度	9.949	16.011	25.359	34.064	70.609

### 3 结论

以乙酸锌、硝酸铝和尿素为原料,酒石酸为形貌控制剂,在水热反应釜里放入载玻片,通过水热法制备了铝掺杂 ZnO 纳米粒子. 扫描电镜测试结果表明,材料为片状和花状的混合物,花状粒子由纳米片组成,呈现分级结构. 铝掺杂有助于提高 ZnO 的气敏性能. 其中掺杂 3% 铝的 ZnO 粒径最小,比表面积最大,气敏性能较好,在 400 °C 时对正丁醇和丙酮的灵敏度较好,对丙酮有较好的响应和恢复性能,有望成为检测丙酮的气敏材料.

### 参考文献:

- [1] 郑泳,张永爱,吴朝兴,等. 氧化锌纳米棒的制备及其光电性能的研究[J]. 人工晶体学报, 2011, 40 (3):645.
- [2] 刘程,刘颖,谢玉涛,等. Pt 掺杂 SnO<sub>2</sub> 花状纳米结构的合成及其气敏性能的研究[J]. 功能材料, 2011, 42 (1):139.
- [3] 余长林,杨凯,余济美,等. 稀土 Ce 掺杂对 ZnO 结构和光催化性能的影响[J]. 物理化学学报, 2011, 27 (2):505.
- [4] 桂阳海,李淑勉,徐甲强,等. 溶剂热法制备铝掺杂纳米 ZnO 及其气敏性能[J]. 化工新型材料, 2009, 37 (1):81.
- [5] 李博,刘顺强,刘磊,等. 杨桃状 ZnO 纳米片微球的制备及气敏性能的研究[J]. 无机化学学报, 2010, 26 (4):591.
- [6] 马小东,郭洪雯,吕璐,等.  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 负载 Ag 复合纳米材料的制备、表征及气敏性能[J]. 高等学校化学学报, 2012, 33(9):1915.
- [7] 于灵敏,范新会,岳苗,等. ZnO 纳米线气敏元件对单一气体浓度的判定研究[J]. 功能材料, 2011, 42 (1):136.

# La 添加量对 AZ91 镁合金力学性能的影响

刘建秀<sup>1</sup>, 刘小红<sup>1</sup>, 周亚军<sup>2</sup>, 郑禹<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 黄河科技学院 工学院, 河南 郑州 450063)

**摘要:**为提高汽车材料 AZ91 镁合金的综合力学性能,采用粉末冶金法在合金中加入纯金属 La 制备试件.使用金相电子显微镜、硬度测试仪、万能拉压试验机,研究 La 对 AZ91 镁合金试件金相组织、硬度及压缩性能的影响.实验结果表明:当 La 添加量为 1.2% 时,试件的力学性能达到最佳,硬度达到 67.1 HV,抗压强度达到 115.8 MPa,比 AZ91 镁合金基体分别提高了 20.0% 和 29.5%,而且此添加量对 AZ91 镁合金的晶粒细化效果最好.

**关键词:**粉末冶金;AZ91 镁合金;La 添加量;硬度;抗压强度;力学性能

**中图分类号:**TG146.22;TF12 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.003

## The influence of addition content of La on mechanics performance of AZ91 magnesium alloy

LIU Jian-xiu<sup>1</sup>, LIU Xiao-hong<sup>1</sup>, ZHOU Ya-jun<sup>2</sup>, ZHENG Yu<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Engineering, Huanghe Science & Technology College, Zhengzhou 450063, China)

**Abstract:** In order to improve the comprehensive mechanics performance of AZ91 magnesium alloy which was used as car's material, metal La was added in AZ91 magnesium alloy, and specimens were prepared by powder metallurgy method. The influence of La on microstructure, hardness and compression performance of AZ91 magnesium alloy specimens was studied using metallographic electronic microscope, hardness tester, universal tension and compression testing machine. The experimental results showed that when the addition amount of La was 1.2%, the specimens' mechanical performance was best; hardness 67.1 HV, compressive strength 115.8 MPa, which increased respectively by 20.0% and 29.5% compared with the AZ91 magnesium alloy substrate, and the grain refinement effect of AZ91 magnesium alloy was the best at the same time.

**Key words:** powder metallurgy; AZ91 magnesium alloy; addition La; hardness; compressive strength; mechanics performance

## 0 引言

镁合金具有质量轻、导热导电性好、电屏蔽性

优良等性能,在交通、通信、电器和航空航天等领域被广泛应用,并具有广阔的应用前景. AZ 系列镁合金因其优良的综合性能在制造业中得到广泛的应

收稿日期:2013-12-17

基金项目:河南省科技创新团队项目(10CXTD159)

作者简介:刘建秀(1962—),女,山西省洪洞县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为材料摩擦磨损及表面成形技术.

用。稀土元素能够提高镁合金的力学性能,但是当前关于稀土对粉末冶金法制备镁合金的研究较少,特别是纯La对AZ系列镁合金相组织和力学性能的影响缺乏系统性的研究。另外,目前国外发达国家已经实现了汽车零件全部粉末冶金制造,而国内的粉末冶金法还未普及<sup>[1]</sup>。鉴于镁合金生产符合当下“节能、减排、绿色”的要求,并且粉末冶金法具有高效、低成本等优势,本文拟采用粉末冶金的制备方法研究纯La对AZ91镁合金显微组织、力学性能的影响,为其工业制备提供实验性参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

材料: Mg粉(75 μm, 纯度≥99.9%), Al粉(75 μm, 纯度≥99.5%), Zn粉(49 μm, 纯度≥99.9%), 天津科密欧化学试剂有限公司产; La粉(75 μm, 纯度≥99.9%), 长沙天久金属材料有限公司产。

仪器: SYH-5型三维混料机, 启东汇龙混合设备有限公司产; XQM-L卧式真空球磨机, 长沙米琪仪器设备有限公司产; RJY-2000型真空热压烧结炉, 郑州机械研究所产; OLYMPUSB X51M电子显微镜, 日本电子公司产; HVS-1000型数显维氏硬度仪, 上海联尔试验设备有限公司产; CMT6203型微机控制电子万能试验机, 济南思达测试技术有限公司产。

### 1.2 方法

合金粉末按AZ91镁合金成分分配比进行称量后, 放入混料机中混料2 h, 混料机转速30 r/min; 而后放入真空球磨机中球磨2 h, 球磨机转速200 r/min。球磨后的合金粉末于550 °C<sup>[2]</sup>下, 在真

空热压烧结炉压制成Φ10 mm×20 mm的圆柱试件。试件制成后需进行粗磨、精磨、粗抛、精抛, 其间用酒精进行清洗。

对试件用含4%硝酸的酒精对试件腐蚀30 s后, 进行物理性能测试: 使用电子显微镜进行微观组织及形貌分析, 使用硬度仪进行硬度测试, 压缩性能测试采用电子万能试验机, 按GB/T 228—2002金属压缩标准进行, 压缩速度为1 mm/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织及硬度

图1为不同La含量的AZ91镁合金的500X显微形貌。根据Mg-Al二元相图, AZ91镁合金的组织由α-Mg、β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相和α+β共晶组织组成。随着稀土元素La含量的增加, 形成了多元复杂化合物(Al, Mg)<sub>11</sub>La<sub>3</sub><sup>[3]</sup>。由于(Al, Mg)<sub>11</sub>La<sub>3</sub>相的逐渐增加, 消耗了镁合金中的Al, 使得其附近的Al含量减少, 进而使(Al, Mg)<sub>11</sub>La<sub>3</sub>相附近的β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相逐渐减少, β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相由网状逐渐变成细小的点状和颗粒状分布于晶界上<sup>[4]</sup>; 而大部分La与Al结合生成的Al<sub>11</sub>La<sub>3</sub>呈针状进而增加了晶界相的分散; 针状的(Al, Mg)<sub>11</sub>La<sub>3</sub>相首先形成晶核并在α-Mg周围吸附, 起到钉扎作用, 阻碍α-Mg晶粒长大, 进而细化晶粒和强化基体。由图1可知, 随着La含量的逐渐增加, AZ91镁合金的晶粒度先降低后升高, 当La的含量为1.2%时, 合金的晶粒度最小, 显微组织最好。图2为不同La含量AZ91镁合金的硬度曲线图。由图2可知, 随着La含量的增加, 镁合金的硬度先增大后减小。当La含量为1.2%时, 镁合金的硬度达到最大值67.1 HV, 比AZ91基体提高了20%。

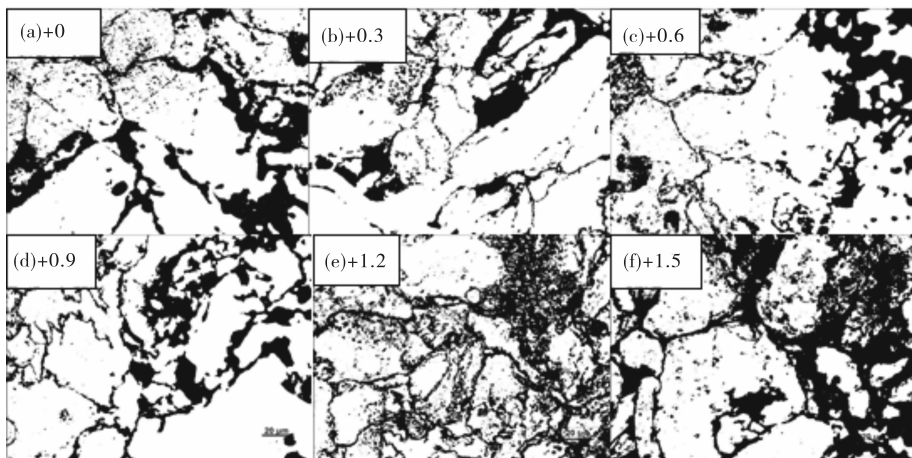


图1 不同La含量的AZ91镁合金在500倍显微镜下的组织形貌

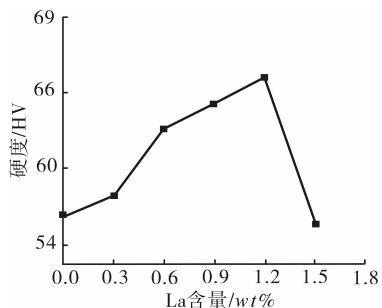


图2 不同La含量的AZ91镁合金硬度值曲线

## 2.2 压缩性能

图3为不同La含量AZ91镁合金的抗压强度曲线图。由图3可知,随着La含量的增加,镁合金的抗压强度呈现先升后降的趋势。当La含量为1.2%时,抗压强度达到最大值115.8 MPa,比未添加La的AZ91镁合金基体的抗压强度提高29.5%。实验结果表明,镁合金的压缩曲线与铸铁相似,试件破坏时断裂面与试样轴线成45°夹角;而且合金受到压缩破坏时裂纹扩展情况与文献[5]的结果相一致,从而证明:晶粒细化效果越好,则压缩实验破坏时裂纹的扩展趋势就越小,即晶粒能有效地阻碍裂纹扩展。

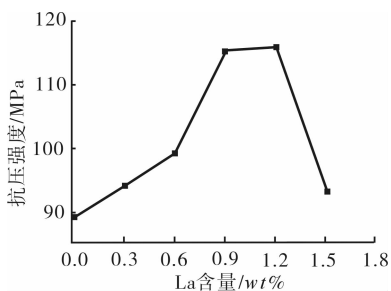


图3 不同La含量的AZ91抗压强度值曲线

压缩实验结果表明,镁合金的抗压强度与其晶粒度之间呈如下关系:晶粒尺寸越大,镁合金的抗压强度越小;晶粒尺寸越小,镁合金的抗压强度越大。这与镁合金室温下细晶强化的强化机制相一致。

## 3 结论

本文采用粉末冶金法,研究La添加量对AZ91镁合金试件金相组织、硬度和压缩性能的影响,结果表明:

1) La对粉末冶金法制备的AZ91镁合金具有晶粒细化作用,当La含量为1.2%时,镁合金的显微组织最好。

2) 当La含量为1.2%时,镁合金的硬度值达到最大,为67.1 HV,比未添加La的合金提高20.0%。

3) 当La含量为1.2%时,镁合金的抗压强度达到最大,为115.8 MPa,比未添加La的合金提高29.5%。

## 参考文献:

- [1] 谢丽英. 汽车用稀土镁合金应用前景广阔[J]. 稀土信息, 2008(9):20.
- [2] 周亚军, 杨汉嵩, 刘建秀. 烧结温度对粉末冶金法制备AZ91镁合金组织及性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(6):16.
- [3] 王瑞权, 陈云祥, 贺睿, 等. La对AZ81镁合金 $\beta$ 相组织及腐蚀性能的影响[J]. 铸造技术, 2011, 32(5):673.
- [4] 姚荣庆, 王瑞权. La对AZ81镁合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(7):35.
- [5] 王瑞权, 张大华, 李向威, 等. Mg-30Sr对AZ91D镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 铝镁通讯, 2009(1):27.

# 运用模拟 UV 数据的 KICA-SVR 模型 同时测定饮料中多种色素的含量

王国庆<sup>1</sup>, 弓丽华<sup>1</sup>, 王素方<sup>2</sup>, 孙晓丽<sup>1</sup>, 董春红<sup>3</sup>, 符德学<sup>3</sup>

- (1. 郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 河南出入境检验检疫局 技术中心, 河南 郑州 450003;
3. 焦作大学 怀药工程研究中心, 河南 焦作 454003)

**摘要:**在模拟水性饮料和实际饮料样品中加入不同种类和含量的色素,运用核独立成分分析(KICA)法提取样品的紫外-可见(UV)光谱数据中独立组分(IC)信息,以IC的系数矩阵进行支持向量回归(SVR)处理并建立UV-KICA-SVR模型,用于直接预测各种色素的含量.用此方法测定水性饮料中柠檬黄、日落黄、诱惑红、苋菜红、胭脂红和亮蓝6种色素的含量,相对标准偏差分别为1.5%,2.2%,2.0%,2.5%,2.6%和1.2%,检测限分别为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**关键词:**紫外-可见分光光度法;核独立成分分析;支持向量回归;色素含量

**中图分类号:**TS207.3;O65 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.004

## Simultaneous determination of multiple food colorants content in beverages based on KICA-SVR model of simulated UV data

WANG Guo-qing<sup>1</sup>, GONG Li-hua<sup>1</sup>, WANG Su-fang<sup>2</sup>, SUN Xiao-li<sup>1</sup>, DONG Chun-hong<sup>3</sup>, FU De-xue<sup>3</sup>

- (1. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Technology Center, He'nan Entry-Exit Inspection & Quarantine Bureau, Zhengzhou 450003, China;
3. Research Center of Huaiqing Chinese Medicine, Jiaozuo University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** By extraction of the independent components (IC) from the ultraviolet-visible (UV) spectrum of simulated mixtures of food colorants dissolved in water and beverage using kernel independent component analysis (KICA), the UV-KICA-SVR model were established by support vector regression (SVR) using the IC's coefficients. This model can be used to simultaneously determine multiple colorants, i. e. lemon yellow, sunset yellow, red temptation, amaranth, carmine, and brilliant blue, with the relative standard deviations (RSDs) are 1.5%, 2.2%, 2.0%, 2.5%, 2.6%, and 1.2%, respectively, the limits of detection (LOD) are  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively.

**Key words:** ultraviolet-visible spectrophotometry; kernel independent component analysis (KICA); support vector regression (SVR); colorants content

收稿日期:2013-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(21075113,21171150);河南省基础与前沿技术研究计划项目(122300410004)

作者简介:王国庆(1965—),男,河南省汤阴县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为化学计量学。

## 0 引言

我国食品添加剂使用卫生标准(GB 2760—2010)<sup>[1]</sup>列入的合成色素有胭脂红、苋菜红、日落黄、赤藓红、柠檬黄、新红、靛蓝、亮蓝等.其常用的检测方法大多为高效液相色谱(HPLC)法<sup>[2]</sup>、液相色谱-质谱联用(LC-MS)法、气相色谱(GC)法、气相色谱-质谱联用(GC-MS)法等,其优点是能够直接分离分析得到特定色素含量,但前处理过程复杂繁琐,仪器费用高.紫外-可见(UV)分光光度法<sup>[3-4]</sup>具有简便快捷、费用低廉的优点,但在测定多种色素共存于某些食品、饮料等介质时,由于不同色素的吸收峰经常严重重叠,存在背景干扰,故用常规方法同时检测多种色素的含量比较困难.支持向量回归(SVR)与UV分光光度法相结合,能够同时测定光谱重叠严重的多种色素,但无法得到或扣除检测物以外样品的背景干扰信息.本文拟在模拟水性饮料和实际饮料中添加不同种类和含量的色素,利用核独立成分分析(KICA)<sup>[5-6]</sup>的定性性能与支持向量回归(SVR)<sup>[7-8]</sup>的定量性能,对其UV测试数据进行KICA-SVR建模处理,实现UV-KICA-SVR同时检测饮料中柠檬黄、日落黄、诱惑红、苋菜红、胭脂红及亮蓝6种色素的含量.在实际样品的测量中,采用标准加入法<sup>[9]</sup>,以期消除基体效应的负面影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

仪器:Thermo Accela 高效液相色谱仪,PDA detector,美国 Thermo Fisher 公司产;TU-1901 双光束紫外分光光度计,北京普析通用公司产.

试剂:日落黄(BR),柠檬黄、胭脂红、亮蓝均为AR级,天津科密欧化学试剂有限公司产;诱惑红(AR),阿拉丁试剂上海有限公司产;苋菜红(BR),中国医药公司北京采购供应站提供;一次蒸馏水,自制.

饮料样品:A样橙味汽水、A样苹果味汽水、B样菠萝味汽水、B样苹果味汽水,均由某公司生产.

### 1.2 模拟溶液的配制及光谱测定

准确称取一定量的柠檬黄、日落黄、诱惑红、苋菜红、胭脂红及亮蓝,用蒸馏水溶解,制成 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的标准工作液.准确移取适量标准工作液于50 mL容量瓶中,蒸馏水稀释定容至50 mL,按照正交设计表与均匀设计表配制8水平、6因素、84次试验用的模拟混合样品系列.使用1.0 cm比

色皿测定各样品的UV光谱,波长扫描范围为300.0~800.0 nm,扫描间隔为1.0 nm.

### 1.3 饮料样品的光谱测定

取适量的饮料样品于烧杯中,超声除去 $\text{CO}_2$ 气体.对于色素含量较高的样品稀释到一定浓度再进行测定.以1.2所述方法测定其UV光谱,以蒸馏水作参比测定得到实际饮料样品的UV光谱数据.

### 1.4 饮料样品的标准加入及光谱测定

准确移取5 mL样品于50 mL容量瓶内,添加不同含量的色素,然后用蒸馏水定容;对于色素含量较低的样品,直接添加不同质量的色素于50 mL容量瓶内,用样品定容,制成添加不同色素含量的饮料样品,每种样品均配7组,共4种样品,28组.表1为每种样品中添加的不同色素的含量.采用1.3所述方法测定其UV光谱数据.

表1 每种样品中不同色素的添加量  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

组别	柠檬黄	日落黄	诱惑红	苋菜红	胭脂红	亮蓝
1	1	1	1	20	20	15
2	3	3	3	16	16	12
3	6	6	6	12	12	9
4	9	9	9	8	8	6
5	12	12	12	6	6	5
6	15	15	15	4	4	3
7	18	18	18	2	2	1

## 2 原理与算法

ICA<sup>[10-11]</sup>是一种统计信号处理技术,其功能是在信息损失最小的情况下,将重叠多变量信号(重叠信号)分解为一组统计上独立的组分(源信号).KICA是通过核函数将原始数据映射到高维特征空间后,利用典型相关分析(CCA)提取源信号的ICA方法.在核空间中,变量之间相互信赖性最小等同于变量的独立性最大,由于核函数的引入,使得KICA具有较强的鲁棒性<sup>[6]</sup>.

SVR算法的基本思想是通过一个非线性映射(核函数),将原始数据映射到高维特征空间,并在这个空间建立回归模型.由于核函数的引入,SVR可以得到在常规空间难以得到的模型特征,并且能够对线性和非线性过程建模<sup>[6-8]</sup>.

在对模拟水性基质样品中添加不同种类及含量的色素,测试得到模拟混合样品UV数据,进行KICA解析得到IC及其系数矩阵,利用IC系数矩阵进行SVR建模,可得到水性基质中多种色素同时测



定的定量模型. 在对实际饮料样品进行色素检测时,发现其中除含有被检测物质外还含有甜味剂、防腐剂和柠檬酸等其他物质. 对此可采用标准加入法,利用 KICA 提取色素成分和基质信息,将饮料样品 UV 数据中扣除基质信息后 IC 系数代入该定量模型,预测得到样品中不同种类色素的含量.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模拟水样 UV 数据的 KICA-SVR 建模

采用主成分分析法确定模拟混合样中吸光因子数为4,用 KICA 提取得到的4个 IC 轮廓如图1所示. 将 IC 数据矩阵与色素纯组分光谱矩阵作相关性分析,可知其中  $IC_1$  与亮蓝的相关系数为0.938 9,  $IC_2$  与日落黄、诱惑红、胭脂红的相关系数分别为0.868 9,0.827 8,0.810 3,  $IC_3$  与柠檬黄的相关系数为0.999 5,  $IC_4$  与苋菜红的相关系数为0.717 7. 6种色素经 KICA 处理后变为相对独立的4个 IC.

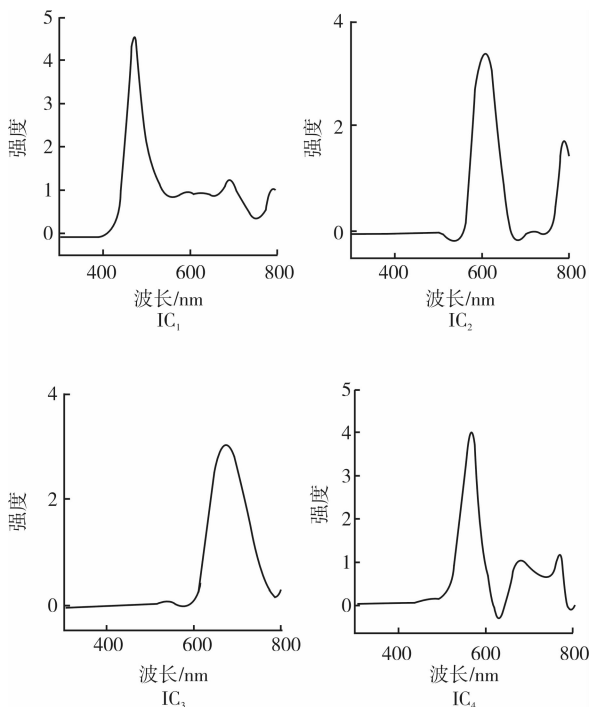


图1 KICA 处理6种色素模拟水样提取的独立组分光谱轮廓

计算得到84组 IC 的系数矩阵,从中均匀选取42组作为校正集,剩余的42组样品均匀选取21组作为交互检验集,另外21组作为预测集. 采用交互检验均方根误差 ( $RMSECV$ ) 作为交互检验的指标,以预测集的均方根误差 ( $RMSE$ ) 和预测值与实际值之间回线性归分析的相关系数 ( $R$ ) 来考查所建模型

的性能和预测效果. 表2给出了采用径向基核函数,设定  $\sigma = 220$ ,  $\varepsilon = 0$ ,  $\gamma = 1.0 \times 10^7$ , KICA-SVR 建模时  $RMSECV$ ,  $BMSE$  和  $R$  的结果.

由表2可以看出,模型的建模误差和预测集的误差均较小且总体上大小相当,预测结果与实际加入量具有很好的线性相关性,说明建立的模型具有较好的准确性.

模型预测得到的6种色素含量的相对标准偏差分别为柠檬黄1.5%,日落黄2.2%,诱惑红2.0%,苋菜红2.5%,胭脂红2.6%和亮蓝1.2%,说明 KICA-SVR 法测定6种色素的含量具有较好的稳定性.

表2 模拟水样 UV 数据的 KICA-SVR 建模效果

色素成分	$RMSECV$	$RMSE$	$R$
柠檬黄	0.004 6	0.047 3	0.999 9
日落黄	0.082 0	0.139 5	0.999 9
诱惑红	0.075 4	0.146 2	0.999 3
苋菜红	0.051 0	0.068 3	0.999 3
胭脂红	0.025 0	0.121 6	0.999 8
亮蓝	0.024 8	0.038 8	1.000 0

#### 3.2 饮料加入标准品 UV 数据的 KICA-SVR 处理

由 KICA 处理得到如图2所示的加入标准品后饮料5种 IC 轮廓.

通过相关性分析可得,加标饮料样品中  $IC_1$ ,  $IC_2$ ,  $IC_3$ ,  $IC_4$  与模拟水样中  $IC_4$ ,  $IC_2$ ,  $IC_1$ ,  $IC_3$  相关系数分别为0.952 4,0.992 5,0.963 7,0.984 4;  $IC_5$  则体现为背景信号. 在用 SVR 进行实际样品的含量预测时,将  $IC_5$  图光谱信息扣除即为饮料中不同色素产生的混合光谱.

#### 3.3 饮料样品中不同色素含量的同时测定

扣除饮料加标样品背景信号,调整 IC 系数矩阵与模拟水样相一致,代入相应的 KICA-SVR 模型预测得到饮料样品中不同色素含量. 本法预测结果与采用 HPLC 测试结果对比见表3.

表3 UV-KICA-SVR 模型预测实际样品中不同色素的含量及其 HPLC 测定结果  $mg \cdot L^{-1}$

组分	A样(橙味)		A样(苹果味)		B样(菠萝味)		B样(苹果味)	
	Pre <sup>a</sup>	HPLC <sup>b</sup>	Pre	HPLC	Pre	HPLC	Pre	HPLC
柠檬黄	4.39	4.53	4.89	4.17	5.35	5.82	5.56	5.07
日落黄	6.34	6.06	1.63	1.33	3.62	3.73	1.09	0.81
诱惑红	0.87	NA <sup>c</sup>	-0.24	NA	0.53	NA	-0.57	NA
苋菜红	0.41	NA	0.43	NA	0.34	NA	0.29	NA
胭脂红	0.44	NA	0.56	NA	0.49	NA	0.09	NA
亮蓝	0.49	NA	0.25	0.24	0.28	NA	0.41	0.46

注:a)UV-KICA-SVR 预测结果;b)采用 HPLC 测定结果;c)未检出.

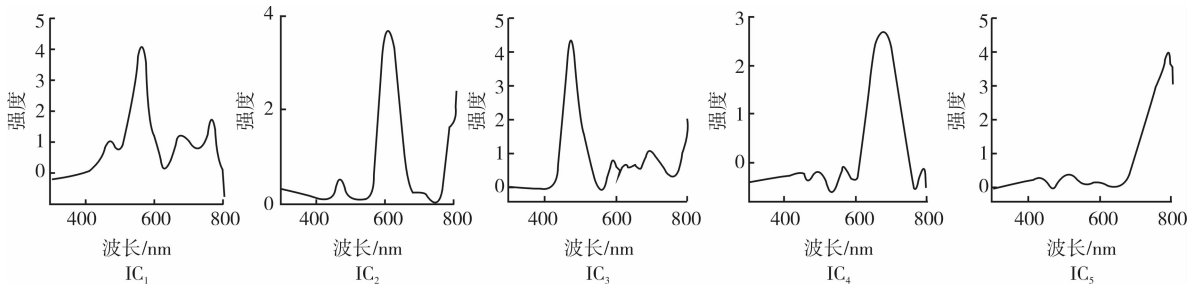


图2 KICA 处理饮料与加标饮料样品得到的独立组分光谱轮廓

由表3可以看出,采用本法预测饮料样品中色素含量时出现了个别负值(饮料中的诱惑红),这些负值应做未检出处理;而一些 HPLC 未检出的饮料样品本法有不同程度的含量预测,但绝对误差均小于  $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这可能是由于部分色素的 UV 光谱轮廓高度重叠使得与其相似的色素成分产生部分误报。本研究采用 UV 光谱检测得到的柠檬黄、日落黄、诱惑红、苋菜红、胭脂红和亮蓝 6 种色素检测限分别为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。GB 2760—2011 中规定的柠檬黄、日落黄和诱惑红最大使用限量为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 苋菜红最大使用限量为  $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 胭脂红最大使用限量为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 亮蓝最大使用限量为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这些色素在国家标准中规定的使用限量均较高,因此本方法预测结果的较小偏差不会影响到对某种色素含量是否超标的判断,能够满足饮料样品中多种色素含量快速分析筛查的要求。

## 4 结论

KICA 方法能够从混合光谱信号中直接提取 UV 光谱特征。在模拟水性饮料和实际饮料样品中加入不同种类和含量的色素,利用 KICA 处理样品 UV 数据得到 IC 及其系数矩阵,对系数矩阵进行 SVR 处理,得到 UV-KICA-SVR 模型直接预测各种色素的含量。用此方法测定水性饮料中柠檬黄、日落黄、诱惑红、苋菜红、胭脂红和亮蓝 6 种色素含量,相对标准偏差分别为 1.5%, 2.2%, 2.0%, 2.5%, 2.6% 和 1.2%, 检测限分别为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这表明:该方法能够对 6 种色素的含量进行准确快速预测,结果与 HPLC 分析总体上相当。

## 参考文献:

[1] GB 2760—2011 食品安全国家标准·食品添加剂使用

标准[S].

- [2] 黄永辉,余清,林钦,等.超高效液相色谱法同时测定碳酸饮料中的 22 种食品添加剂[J].分析测试学报,2011,30(8):877.
- [3] 刘冷,李建晴,郭芬,等.紫外分光光度法同时测定柠檬黄和日落黄[J].光谱实验室,2007,24(3):423.
- [4] 李必斌,张海霞,潘连富.紫外-可见吸收光谱法定性定量测定食用合成色素[J].中国卫生检验杂志,2001,11(1):58.
- [5] 王国庆,丁青竹,孙雨安,等.独立成分分析及其在化学信号处理中的应用[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2007,22(87):11.
- [6] Wang G Q, Sun Y A, Ding Q Z, et al. Estimation of source spectra profiles and simultaneous determination of poly-component in mixtures from ultraviolet spectra data using kernel independent component analysis and support vector regression [J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 594 (1): 101.
- [7] 陈念贻,陆文聪,叶辰洲,等.支持向量机及其他核函数在化学计量学中的应用[J].计算机与应用化学,2002,19(6):691.
- [8] 董进义,孟晓玲,王国庆.连续小波变换-支持向量机回归-紫外分光光度法测定多组分 B 族维生素含量[J].河南师范大学学报:自然科学版,2006,34(1):82.
- [9] Mamián-López M B, Poppi R J. Standard addition method applied to the urinary quantification of nicotine in the presence of cotinine and anabasine using surface enhanced Raman spectroscopy and multivariate curve resolution[J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 760:53.
- [10] Hyvariene A, Oja E. Independent component analysis: algorithms and applications [J]. Neural networks, 2000, 13: 411.
- [11] Monakhova Y B, Kolesnikova S S, Mushtakova S P. Independent component analysis algorithms for spectral decomposition in UV/VIS analysis of metal-containing mixtures including multiminer food supplements and platinum concentrates [J]. Analytical methods, 2013, 5 (11):2761.

# 均匀试验优化黑蒜提取液的抗氧化活性

刘瑞山, 梁治军, 周文权, 齐强强

(河南省淼雨饮品股份有限公司, 河南 焦作 454191)

**摘要:**以 DPPH 自由基清除率为指标,利用均匀试验考察了提取温度、时间、pH 和底物质量比对黑蒜提取液抗氧化活性的影响.结果表明,pH 对黑蒜提取液抗氧化活性具有显著影响( $p < 0.05$ ).黑蒜提取液制取的最佳工艺条件为:提取温度 40 °C,提取时间 30 min,pH = 3.0,黑蒜与去离子水的质量比(g : mL)为 1 : 25,此时对 DPPH 自由基的清除率为 92.65%,与理论值的相对误差 3.59%.

**关键词:**黑蒜;抗氧化活性;均匀试验

**中图分类号:**TS202.3   **文献标志码:**A   **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.005

## Antioxidant activity optimization of black garlic extract based on uniform design

LIU Rui-shan, LIANG Zhi-jun, ZHOU Wen-quan, QI Qiang-qiang  
(He'nan Miaoyu Beverage Co., Ltd., Jiaozuo 454191, China)

**Abstract:** With DPPH radical-scavenging rate as the indicator, the effects of temperature, time, pH value and substrates mass ratio on the antioxidant activity of black garlic extract were studied by using the uniform design. The result showed that the pH value had a significant influence ( $p < 0.05$ ) on the antioxidant activity of black garlic extract, and the optimal extracting conditions were temperature 40 °C, retention time 30 min, pH = 3.0 and mass ratio of black garlic to deionized water 1 : 25 (g : mL). Under these conditions, the DPPH radical-scavenging rate was 92.65%, which had a relative error of 3.59% to the theoretical value.

**Key words:** black garlic; antioxidant activity; uniform design

## 0 引言

大蒜,又名独蒜、胡蒜,是百合科葱属草本植物的地下鳞茎.大蒜作为传统烹饪和药用材料已有几千年的使用历史,具有良好的抗菌、抗病毒、降血糖、解毒、降血脂、抗癌、抗肿瘤等生物活性功能<sup>[1-5]</sup>,能够增加机体中血浆抗凝血活性,防止动脉粥样硬化<sup>[6]</sup>.

大蒜的功能特性取决于其独特的活性化合物,

尤其是有机硫化物<sup>[7-8]</sup>.当大蒜组织被破碎后,由于细胞结构遭到破坏,细胞液中的蒜氨酸酶(S-烷基-L-半胱氨酸亚砷酶)与细胞质中的蒜氨酸(S-烯丙基半胱氨酸亚砷)相遇,在蒜氨酸酶的催化作用下,蒜氨酸转化为大蒜素(二烯丙基硫代亚磺酸酯),大蒜素不稳定,又进一步转化为大蒜辣素(二烯丙基二硫化物)、大蒜新素(二烯丙基三硫化物)和阿霍烯等多种有机硫化物<sup>[9-11]</sup>.

大蒜经过一定条件的发酵处理后,整个蒜瓣都

收稿日期:2014-01-09

作者简介:刘瑞山(1975—),男,河南省漯河市人,河南省淼雨饮品股份有限公司工程师,主要研究方向为食品工程及应用.

呈现出黑色,因此被称为黑蒜或发酵黑蒜.经过发酵后的黑蒜酸甜适口,口感柔软类似果脯,食后没有吃生大蒜所特有的辣味和臭味,而且生理功能大大提高.据报道,黑蒜具有极强的抗氧化能力,黑蒜乙醇提取液的超氧化物歧化酶(SOD)活力、过氧化氢清除能力和多酚含量分别是新鲜大蒜提取液的13倍、10倍和7倍,具有较强的抗氧化能力<sup>[12]</sup>.本文拟以水为提取溶剂,利用均匀试验设计研究提取温度、时间、pH以及质量比对黑蒜提取液抗氧化活性的影响,以期在黑蒜的进一步研究及开发提供一定的理论依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

大蒜,市售;DPPH 自由基(1,1-二苯基-2-苦肟基自由基),分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司产.

HS-800型恒温恒湿箱,南京泰斯特试验设备有限公司产;HH-S6型数显恒温水浴锅,河南金博仪器制造有限公司产;UV-2102PC紫外可见分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司产;PHS-3C精密pH计,上海精密科学仪器有限公司产;AL104电子分析天平,梅特勒-托利多仪器上海有限公司产.

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 黑蒜的制备

原料挑选→浸泡清洗→通风晾干→装盘→65℃,相对湿度70%发酵60d→杀菌消毒→包装→成品

**1.2.2 单因素试验** 将黑蒜提取液样品依次分为温度组、时间组、pH组和质量比组,其不同制备条件如下.

1)温度组:分别准确称取5g黑蒜于250mL三角瓶中,按质量比1:20(g:mL)加入去离子水,用6mol/L的NaOH调整溶液pH为6.0,密封后分别置于20℃,30℃,40℃,50℃,60℃,70℃,80℃和90℃恒温水浴锅中提取60min.提取结束后将样品迅速置于冰水中冷却,然后进行抽滤,滤液置于冰箱中冷藏备用.

2)时间组:分别准确称取5g黑蒜于250mL三角瓶中,按质量比1:20(g:mL)加入去离子水,用6mol/L的NaOH调整溶液pH为6.0,密封后置于60℃恒温水浴锅中提取10min,30min,60min,

90min,120min,150min,180min和210min.提取结束后将样品迅速置于冰水中冷却,然后进行抽滤,滤液置于冰箱中冷藏备用.

3)pH组:分别准确称取5g黑蒜于250mL三角瓶中,按质量比1:20(g:mL)加入去离子水,分别用4mol/L的HCl溶液和6mol/L的NaOH调整溶液pH为3.0,4.0,5.0,6.0,7.0,8.0,9.0,10.0,11.0和12.0,密封后置于60℃恒温水浴锅中提取60min.提取结束后将样品迅速置于冰水中冷却,然后进行抽滤,滤液置于冰箱中冷藏备用.

4)质量比组:分别准确称取5g的黑蒜于250mL三角瓶中,按质量比1:10,1:15,1:20,1:25和1:30(g:mL)加入去离子水,用6mol/L的NaOH调整溶液pH为6.0,密封后置于60℃恒温水浴锅中提取60min.提取结束后将样品迅速置于冰水中冷却,然后进行抽滤,滤液置于冰箱中冷藏备用.

**1.2.3 DPPH 自由基清除能力的测定** 以DPPH自由基清除率作为黑蒜提取液抗氧化活性的评价指标,其测定参考S. H. Kim等<sup>[13]</sup>的方法.取1mL样品溶液和4mL0.2mmol/L的DPPH酒精溶液,剧烈摇晃使其充分混合均匀,置于室温避光条件下反应30min.然后在517nm条件下测定吸光度值,记为 $A_s$ .相同操作条件下,以1mL去离子水代替样品溶液,作为控制组,测定其在517nm条件下的吸光度值,记为 $A_c$ .黑蒜提取液对DPPH自由基清除率用以下公式计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100$$

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

DPPH 自由基是一种含发色团的化合物,可以直接与抗氧化活性物质所提供的氢原子提取形成稳定的DPPH-H分子,从而达到清除自由基的目的<sup>[14]</sup>.单因素试验中黑蒜提取液的抗氧化活性变化如图1—图4所示.

由图1—图4可见,温度组,黑蒜提取液对DPPH 自由基的清除率随提取温度的升高而增大;时间组,在前60min内,黑蒜提取液的抗氧化活性随时间延长而显著增强,对DPPH 自由基的清除率由15.53%增加到56.37%,此后则随提取时间的延长而缓慢增大;pH组,黑蒜提取液在酸性环境中具

有较高的抗氧化活性,而当  $pH > 7.0$  时,随着  $pH$  的增大,黑蒜提取液的抗氧化能力急剧下降,并在  $pH \geq 10.0$  时失去抗氧化能力;质量比组,当黑蒜与去离子水的质量比为  $1 : 10$  ( $g : mL$ ) 时,提取液的抗氧化活性最强.

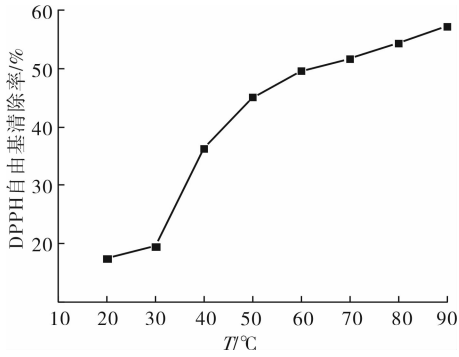


图1 温度对黑蒜提取液抗氧化活性的影响

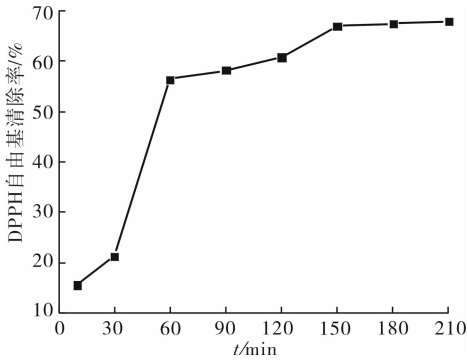


图2 时间对黑蒜提取液抗氧化活性的影响

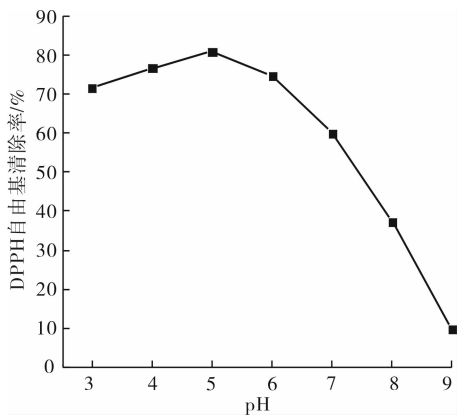


图3 pH对黑蒜提取液抗氧化活性的影响

## 2.2 均匀试验

**2.2.1 均匀试验因素水平设计** 综合以上单因素实验结果,以 DPPH 自由基清除率为检测指标,以温度  $X_1$ , 时间  $X_2$ , pH 值  $X_3$  和黑蒜与去离子水质量比  $X_4$  为因素的  $U_6^*(6^4)^{[15]}$  均匀试验因素水平见表 1.

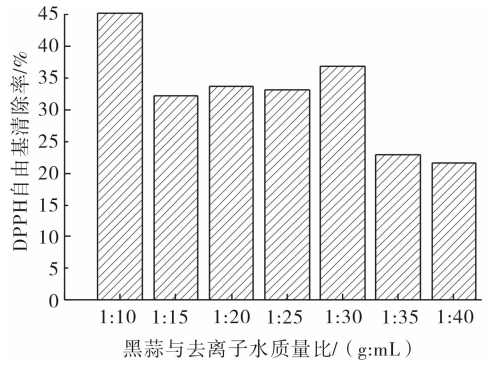


图4 质量比对黑蒜提取液抗氧化活性的影响

表1  $U_6^*(6^4)$  均匀试验因素水平表

水平	$X_1/^\circ C$	$X_2/min$	$X_3$	$X_4/(g : mL)$
1	40(1)	60(2)	5(3)	1 : 35(6)
2	50(2)	120(4)	8(6)	1 : 30(5)
3	60(3)	180(6)	4(2)	1 : 25(4)
4	70(4)	30(1)	7(5)	1 : 20(3)
5	80(5)	90(3)	3(1)	1 : 15(2)
6	90(6)	150(5)	6(4)	1 : 10(1)

**2.2.2 均匀试验结果** 根据均匀试验表,分别在相应条件下得到黑蒜提取液样品,并测定其对 DPPH 自由基的清除率 ( $Y$ ), 试验结果见表 2.

**2.2.3 软件分析** 采用 Mathematics 4.0 软件对均匀试验结果进行分析,得到的结果见表 3 和表 4.

表2 均匀试验结果

试验号	$X_1/^\circ C$	$X_2/min$	$X_3$	$X_4/(g : mL)$	$Y/\%$
1	40	60	5	1 : 35	47.61
2	50	120	8	1 : 30	15.58
3	60	180	4	1 : 25	78.32
4	70	30	7	1 : 20	32.99
5	80	90	3	1 : 15	83.93
6	90	150	6	1 : 10	11.57

表3 均匀试验分析结果参数表

方程项目	估计值	标准误差	$T$ 值	$P$ 值
1	42.43	12.110 9	3.834	0.162 4
$X_1 \times X_2$	-0.000 5	0.000 4	-1.392	0.396 6
$X_3$	-15.583	0.731 9	-21.289	0.029 9
$X_4$	8.342 2	0.926 8	9.001	0.070 4
$X_4^2$	0.172 3	0.019 8	-8.717	0.072 7

首先按一元线性方程回归分析,发现 4 个因素对自由基清除率的影响都不显著,一次考虑删去最不显著的单因素 ( $X_1, X_2$ ), 然后继续进行回归分析,结果表明, pH 对黑蒜提取液抗氧化活性具有显著影响 ( $p < 0.05$ ), 影响抗氧化活性的主次顺序依次为:

pH 值 > 质量比 > 温度 > 时间.

表4 均匀试验分析结果方差分析表

项目	自由度	偏差平方和	均方差	F 值	P 值
模型	4	4 751.17	1 187.79	135.721	0.064 279 4
误差	1	8.751 72	8.751 72		
总体	5	4 759.92			

回归方程:  $Y = 42.43 - 0.000 5X_1 \times X_2 - 15.583X_3 + 8.342 2X_4 - 0.172 3X_4^2$ . 在测试条件范围内, 经过计算后最佳优化条件为: 提取温度 40 °C, 提取时间 30 min, pH = 3.0, 黑蒜与去离子水质量比(g : mL) 为 1 : 25. 此时黑蒜提取液抗氧化活性最强, 对 DPPH 自由基的理论清除率为 96.10%. 经试验验证在此优化条件下得到的黑蒜提取液对 DPPH 自由基的清除率为 92.65%, 与理论值的相对误差 3.59%, 远超过各试验值. 说明均匀试验优化后的最优条件制备黑蒜提取液具有最强的抗氧化活性, 优化结果可靠.

### 3 结论

不同因素对黑蒜提取液的抗氧化活性影响不同. 单因素试验表明, 黑蒜提取液的抗氧化活性随提取温度的升高和时间的延长而逐渐增强; 酸性环境有利于黑蒜提取液的抗氧化活性, 而碱性环境则抑制其抗氧化活性, 当 pH ≥ 10 时, 则完全抑制黑蒜提取液的抗氧化活性; 当黑蒜与去离子水质量比(g : mL) 为 1 : 10 时, 黑蒜提取液的抗氧化活性最强. 均匀试验表明, pH 对黑蒜提取液抗氧化活性具有显著影响 ( $p < 0.05$ ), 影响黑蒜提取液抗氧化活性的因素顺序是 pH > 质量比 > 温度 > 时间; 黑蒜提取液抗氧化活性的最佳工艺条件为: 提取温度 40 °C, 提取时间 30 min, pH = 3.0, 黑蒜与去离子水的质量比(g : mL) 为 1 : 25, 且在此条件下验证黑蒜提取液的抗氧化活性的最强.

### 参考文献:

[1] Khoo Y, Aziz Z. Garlic supplementation and serum cholesterol: a metaanalysis [J]. J Clin Pharm Ther, 2009, 34:133.

- [2] Pal R, Vaiphei K, Sikander A, et al. Effect of garlic on isoniazid and rifampicin-induced hepatic injury in rats [J]. World J Gastroenterol, 2006, 12:636.
- [3] Shinkawa H, Takemura S, Minamiyama Y, et al. S-allyl-cysteine is effective as a chemopreventive agent against porcine serum-induced hepatic fibrosis in rats [J]. Osaka City Med, 2009, 55: 61.
- [4] 何荣海, 马海乐. 大蒜辣素超声辅助提取的试验研究 [J]. 食品科学, 2006, 27(2):147.
- [5] 陆广念, 朱志雄, 宋晓敏. 常见蔬菜抗氧化活性与总酚含量的研究 [J]. 食品科技, 2009, 34(9): 68.
- [6] Ackermann R T, Mulrow C D, Ramirez G, et al. Garlic shows promise for improving some cardiovascular risk factors [J]. Arch Int Med, 2001, 161:813.
- [7] Chowdhury R, Dutta A, Chaudhuri S R, et al. In vitro and in vivo reduction of sodium arsenite induced toxicity by aqueous garlic extract [J]. Food Chem Toxicol, 2008, 46:740.
- [8] 周广勇, 缪冶炼, 陈介余, 等. 黑大蒜贮藏中主要成分和自由基清除能力的变化 [J]. 中国食品学报, 2010, 10(6):64.
- [9] Das I, Saha T. Effect of garlic on lipid peroxidation and antioxidation enzymes in DMBA-induced skin carcinoma [J]. Nutrition, 2009, 25:459.
- [10] 陆茂松, 闵吉梅, 王夔. 大蒜有机硫化物的研究 (II) [J]. 中草药, 2002, 33(12):1059.
- [11] Rivlin R S. Historical perspectives on the use of garlic [J]. J Nutr, 2001, 131:954.
- [12] Sato E, Kohno M, Hamano H, et al. Increased antioxidative potency of garlic by spontaneous short-term fermentation [J]. Plant Foods Hum Nutr, 2006, 61:157.
- [13] Kim S H, Jung E Y, Kang D H, et al. Physical stability, antioxidative properties, and photoprotective effects of a functionalized formulation containing black garlic extract [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2012, 117:104.
- [14] 章银良, 周文权. 均匀试验优化酪蛋白-木糖美拉德提取产物的抗氧化活性 [J]. 食品工业, 2013, 13(1):27.
- [15] 潘丽军, 章银良. 试验设计与数据处理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.

# 盐胁迫下甜瓜种子萌发及幼苗生长特性研究

杜磊<sup>1</sup>, 王长彪<sup>2</sup>

(1. 运城学院 生命科学系, 山西 运城 044000;

2. 山西省农业科学院 生物技术研究中心, 山西 太原 030031)

**摘要:**以新世纪、美浓1号、新密11号、青边皇后、莎白3号、新玉露6个甜瓜品种为考察对象,研究了0 mmol/L, 50 mmol/L, 100 mmol/L, 150 mmol/L, 200 mmol/L, 250 mmol/L, 300 mmol/L共7种不同浓度盐胁迫下甜瓜种子萌发及幼苗生长特性,结果显示:低浓度盐胁迫( $\leq 50$  mmol/L)可促进甜瓜种子萌发和幼苗生长发育;100~200 mmol/L盐浓度胁迫最能反映不同甜瓜品种萌发期和苗期耐盐性差异;盐胁迫抑制的只是种子发芽的过程,对最终发芽率影响不大;随着盐胁迫浓度增加,甜瓜种子的发芽速度、发芽指数、活力指数、幼芽伸长生长速度均显著下降,幼苗生长也明显受到抑制,株高显著降低,地上部干重积累和侧根数目显著减少;耐盐指数分析结果显示,6种甜瓜的耐盐能力从大到小依次为美浓1号、新密11号、莎白3号、青边皇后、新世纪和新玉露。

**关键词:**甜瓜;盐胁迫;耐盐指数

中图分类号:Q945 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.006

## Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of melon

DU Lei<sup>1</sup>, WANG Chang-biao<sup>2</sup>

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

2. Biotechnology Research Center, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** Using 6 melon varieties "xinshiji", "meinong No. 1", "xinminshi No. 11", "qingbianhuanghou", "shabaiNo. 3" and "xinyulu". As materials, with 0 mmol/L, 50 mmol/L, 100 mmol/L, 150 mmol/L, 200 mmol/L, 250 mmol/L, 300 mmol/L NaCl concentrations as treatments, the research investigated the effects of different salt concentrations on melon seed germination and seedling growth and development. The results showed that: concentration  $\leq 50$  mmol/L promoted the germination and the growth of seedling. With the increase of NaCl concentration, germination process was delayed. Relative germination index, relative vitality index, radicle growth, seedling height, shoot dry weight, lateral root number were all decreased as NaCl concentration increased. The results of salt-resistance index showed that salt-tolerant ability of 6 melon varieties from big to small was "meinong No. 1", "xinminshi No. 1", "shabai No. 3", "qingbianhuanghou", "xinshiji", "xinyulu".

**Key words:** melon; salt stress; salt-resistance index

收稿日期:2013-12-01

基金项目:山西省基础研究计划项目(2009021032-1);国家青年科学基金项目(30900911)

作者简介:杜磊(1982—),男,山西省运城市人,运城学院助教,主要研究方向为作物遗传育种。

通信作者:王长彪(1975—),男,山西省晋中市人,山西省农业科学院助理研究员,主要研究方向为基因组学及生物信息学。

## 0 引言

土壤盐碱化和淡水资源短缺,使得开发利用盐碱地和盐碱水浇灌成为农业发展的重大课题.甜瓜作为一种重要的经济作物,耐盐性较强,通常当土壤总盐量在 1.14% 以下时甜瓜仍能正常生长<sup>[1]</sup>.多数植物萌发期和幼苗期耐盐能力最弱,因此盐碱地和盐碱水浇灌种植作物面临的首要问题是作物能否很好地立苗,这将直接决定作物的产量和品质,而立苗的初始阶段是种子萌发<sup>[2-3]</sup>.目前植物萌发期和幼苗期耐盐能力研究主要集中在粮食作物和蔬菜作物,甜瓜这方面的研究报道较少,本文拟以 3 个台湾引进的优良甜瓜品种和新疆地区种植面积较大的 3 个品种为材料,研究盐胁迫下甜瓜种子萌发及幼苗生长特性,以期为甜瓜的耐盐育种及利用盐碱地和盐碱水浇灌种植甜瓜提供理论基础.

## 1 材料与方方法

### 1.1 材料与仪器

材料:美浓 1 号、新玉露、新世纪、新蜜 11 号、莎白 3 号、青边皇后甜瓜种子,山西金鼎种业有限公司提供;NaCl,AR,天津市化学试剂一厂产.

仪器:LX-C50L 不锈钢立式压力蒸汽灭菌锅,华泰医疗设备有限公司产;SN-CJ IFD 超净工作台,苏州安泰空气技术有限公司产;SPX-160 B-2 恒温培养箱,上海福玛实验设备有限公司产;AL204/01 电子天平,梅特勒-托利多仪器公司产.

### 1.2 试验方法

萌发期盐胁迫采用双层滤纸培养法在培养皿上进行.分别挑选饱满、长势一致的种子在 1% (质量比) HgCl<sub>2</sub> 溶液中消毒 5 min,之后用灭菌去离子水反复冲洗干净,加入适量灭菌去离子水,28 °C 恒温箱中浸泡 3~4 h;在培养皿底部放入单层滤纸,将浸泡后的种子每培养皿均匀摆放 50 粒,再在种子上盖 1 层滤纸,加入适量灭菌的 0 mmol/L, 50 mmol/L, 100 mmol/L, 15 mmol/L, 200 mmol/L, 250 mmol/L, 300 mmol/L NaCl 溶液,添加量以上层滤纸湿润、倾斜时皿底无溶液为宜,并置于 28 °C 恒温培养箱中进行暗培养;为保持盐处理浓度不变,每天 3 次采用称重法补充水分;每种浓度盐处理 3 个重复.处理后第 2 d 开始记录每天发芽总数和新增发芽数,第 3 d 计算发芽势,第 7 d 计算发芽率,第 8 d 计算幼芽胚根长.

苗期盐胁迫依然分别挑选饱满、长势一致的种子,28 °C 恒温箱中浸种催芽后,种植在盛有珍珠岩和蛭石的塑料盆中,每盆种植 2 株,每个品种 30 株.每天浇灌 1/2 Hoagland 营养液,幼苗三叶一心时,用 1/2 Hoagland 营养液配制的不同浓度盐溶液进行处理.每天浇灌足量盐溶液以保持盐浓度恒定.盐胁迫处理 10 d 后开始测定株高、侧根数和地上部分干重.

### 1.3 试验测定指标

萌发期测相对发芽率、相对发芽指数和相对活力指数;苗期测相对株高、相对侧根数和相对地上部分干重.以胚根伸出种皮 2 mm 作为发芽标准.

发芽势 = 前 3 d 发芽的种子数/种子总数 × 100% ;

发芽率 = 前 7 d 发芽的种子数/种子总数 × 100% ;

发芽指数:  $GI = \sum G_t/D_t$ ,式中  $G_t$  为在  $t$  日的发芽率,  $D_t$  为相应的发芽日数;

活力指数:  $VI = GI \times S$ ,式中  $S$  为幼芽的生长量(平均胚根长);

株高:用米尺测量,以根茎部到生长点为准;

侧根数:统计长度大于 5 cm 的侧根;

地上部分干重:随机取 15 株进行测定,在 105 °C 下杀青 30 min 后再在 75~80 °C 烘干称至恒重,称其干重,重复 3 次求平均值;

相对值计算:处理值/对照值 × 100%<sup>[4-5]</sup>.

### 1.4 耐盐指数计算

本文采用的衡量甜瓜耐盐能力的指标为:相对发芽率( $RGR$ )、相对发芽指数( $RGI$ )、相对活力指数( $RVI$ )、相对株高( $RSH$ )、相对侧根数( $RLR$ )和相对地上部分干重( $RDW$ ).耐盐指数

$$k = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n (RGR + RGI + RVI + RSH + RLR + RDW)$$

其中,  $m$  为统计指标数,  $n$  为盐浓度梯度个数.耐盐指数越大,耐盐能力越强<sup>[6]</sup>.

### 1.5 数据分析

采用 SPSS 17.0 软件进行数据分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 盐胁迫对甜瓜种子萌发的影响

各个甜瓜品种种子盐胁迫 3 d 时的相对发芽势如图 1 所示.由图 1 可见,各品种相对发芽势均随着



盐浓度的升高而逐渐下降. 但盐胁迫 7 d 时测得的 6 个品种甜瓜种子在不同盐浓度处理下的相对发芽率分别稳定在 88% , 94% , 98% , 89% , 85% 和 83% 左右, 说明随着时间的推移, 各处理方式下种子累积发芽率逐渐趋于一致, 盐胁迫对甜瓜种子累积发芽率的影响较小.

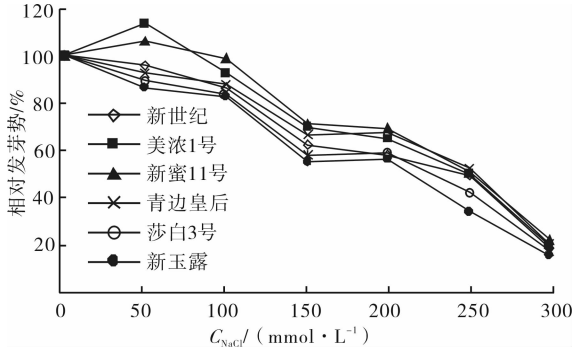


图1 不同浓度盐胁迫下各个甜瓜品种相对发芽势

从图 1 还可知美浓 1 号和新蜜 11 号在 50 mmol/L 浓度的盐处理下种子发芽速度都高于空白对照(0 mmol/L), 说明低盐浓度对其种子萌发有促进作用, 这与多数耐盐植物的研究相符<sup>[7-9]</sup>.

*GI* 和 *VI* 分别反映了种子萌发的速度和质量, *GI* 值大, 表明发芽速度快, 而 *VI* 值大, 表明发芽快而且长势好. 不同浓度盐胁迫下各个甜瓜品种 *RGI* 与 *RVI* 如图 2 和图 3 所示. 由图 2 和图 3 可见, 在盐浓度为 50 mmol/L 时, 大部分品种种子 *RGI* 和 *RVI* 均大于空白对照, 说明低浓度盐分对甜瓜幼根生长有促进作用. 之后随着盐浓度的增加, 各品种种子 *RVI* 和 *RGI* 均呈下降趋势, 且 *RVI* 的下降幅度较大, 说明盐胁迫下 *RVI* 反应更敏感.

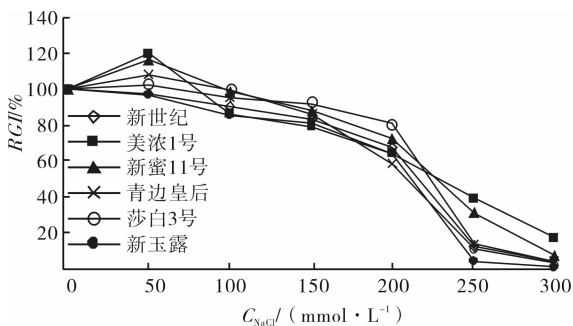


图2 不同浓度盐胁迫下各个甜瓜品种 *RGI*

甜瓜种子萌发期实验表明, 各个浓度盐胁迫条件下, 6 个品种甜瓜的最终发芽率(7 d) 均变化不大, 只是其种子发芽过程受到盐胁迫抑制, 且 50 mmol/L NaCl 处理对甜瓜种子萌发有促进作用,

50 mmol/L 以上 NaCl 浓度下甜瓜种子的发芽速度逐渐降低, *RGI*, *RVI*, 幼芽伸生长均呈下降趋势; 抑制程度同盐胁迫浓度、盐胁迫时长及甜瓜品种抗盐能力相关. 同时, 通过盐胁迫下对甜瓜种子萌发期发芽势、发芽率、*GI* 和 *VI* 的综合观察, 发现 100 ~ 200 mmol/L 盐浓度最能反映不同甜瓜品种萌发期耐盐性差异.

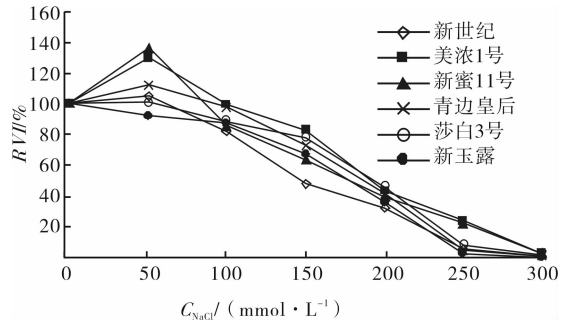


图3 不同浓度盐胁迫下各个甜瓜品种 *RVI*

## 2.2 盐胁迫对甜瓜幼苗生长发育影响

不同浓度盐胁迫下 10 d 后各个甜瓜品种 *RSH* 如图 4 所示. 由图 4 可见, 低盐浓度时 ( $\leq 50$  mmol/L), 美浓 1 号和新蜜 11 号 2 个品种的 *RSH* 大于对照, 说明低浓度盐分对这 2 个品种甜瓜的生长有促进作用, 之后随着盐浓度增大, 所有品种甜瓜幼苗高度逐渐降低, 且当处理浓度  $> 100$  mmol/L 时, 盐处理和空白对照间差异随着浓度增大逐渐提高. 当 NaCl 浓度为 300 mmol/L 时, 每个甜瓜品种种子均可破壳露白, 但是不伸长, 生长停止.

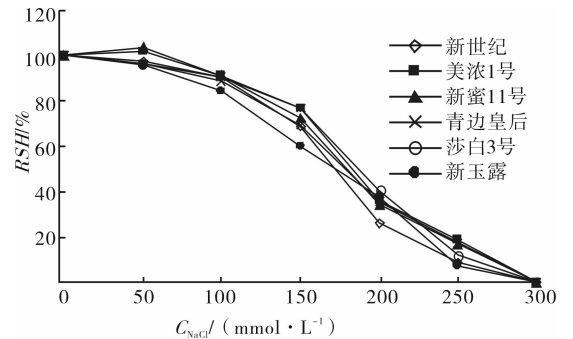


图4 不同浓度盐胁迫下各个甜瓜品种 *RSH*

不同浓度盐胁迫下 10 d 后各个甜瓜品种 *RDW* 如图 5 所示. 由图 5 可见, 甜瓜幼苗地上部干物质积累量随 NaCl 浓度的增加而减少, 美浓 1 号和新蜜 11 号甜瓜幼苗在低浓度 ( $\leq 50$  mmol/L) 盐胁迫下表现出地下部干重增加趋势, 但随 NaCl 浓度的增加每个品种甜瓜幼苗地下部干重逐渐降低. 不同盐浓

度胁迫下各个品种相对地上部干物质积累量的变化趋势与  $RSH$  基本相似,结果如图 5 所示。

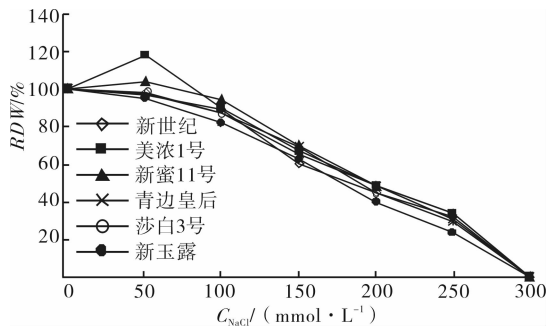


图 5 不同浓度盐胁迫下各个甜瓜品种  $RDW$

不同浓度盐胁迫下 10 d 后各个甜瓜品种  $RLR$  如图 6 所示。由图 6 可见,随着盐胁迫浓度的增加,各个品种甜瓜  $RLR$  显著减少,且在盐胁迫浓度为 50 mmol/L 时,美浓 1 号和新蜜 11 号  $RLR$  显著多于空白对照。盐浓度从 50 mmol/L 递增到 200 mmol/L 时,各品种  $RLR$  显著下降。当盐浓度为 250 mmol/L 时,新世纪、青边皇后、莎白 3 号和新玉露 4 个品种的侧根数为 0,而当盐浓度为 300 mmol/L 时,各品种均停止生长,无侧根。

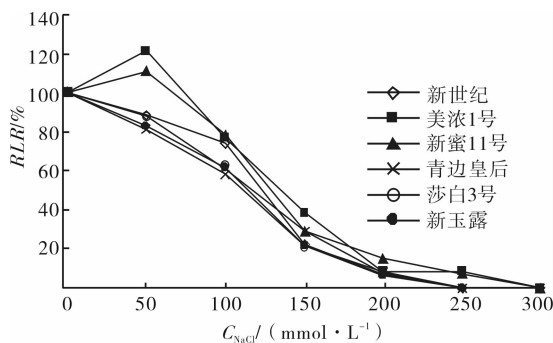


图 6 不同浓度盐胁迫下各个甜瓜品种  $RLR$

甜瓜苗期盐胁迫实验结果表明,盐胁迫条件下,幼苗生长明显受到抑制,幼苗高度显著降低,地上部干重积累和侧根数目显著减少。值得注意的是,低浓度盐胁迫( $\leq 50$  mmol/L)条件下,6 个品种甜瓜幼苗生长同空白对照相比均差异不显著,盐浓度为 100 mmol/L 时,同 50 mmol/L 相比虽然各个数值变化明显,但是依然能够看出甜瓜对于盐胁迫表现出一定的适应和调节能力,而盐浓度高于 100 mmol/L 时,盐胁迫明显超过了其适应和调节能力,导致本实验观测的各个相对数据均表现出不同程度的急剧下降。通过盐胁迫下对甜瓜幼苗株高、地上干物重和侧根数等数据的综合观察,发现 100 ~

200 mmol/L 盐浓度最能反映不同甜瓜品种幼苗期耐盐性差异,与萌发期的结论一致。

### 2.3 耐盐指数

前人研究指出,甜瓜相对耐盐性在萌发期、幼苗期和成株期可能会不同<sup>[10-11]</sup>,因此本文对其耐盐指数的计算分为 3 部分,依据萌发期  $RGR$ ,  $RGI$  和  $RVI$  3 个数据计算;依据幼苗期  $RSH$ ,  $RLR$  和  $RDW$  3 个数据计算以及依据以上所有 6 个数据进行计算,所得结果见表 1。由表 1 可见,萌发期耐盐能力从大到小依次为美浓 1 号、新蜜 11 号、青边皇后、莎白 3 号、新世纪、新玉露;幼苗期耐盐能力从大到小依次为美浓 1 号、新蜜 11 号、莎白 3 号、青边皇后、新世纪、新玉露;萌发期和苗期综合分析,耐盐能力从大到小依次为美浓 1 号、新蜜 11 号、莎白 3 号、青边皇后、新世纪、新玉露。以上结果表明在 3 种情况下美浓 1 号和新蜜 11 号均为相对耐盐,而新世纪和新玉露均为相对盐敏感。同时也说明甜瓜相对耐盐性在萌发期、幼苗期虽然可能会不同,但是其耐盐或盐敏感的性质不会改变,此结论同张玉鑫等<sup>[12-13]</sup>的研究结果相符。

表 1 6 个甜瓜品种的耐盐指数

品种	萌发期	苗期	萌发期和苗期综合
新世纪	0.309	0.264	0.573
美浓 1 号	0.357	0.294	0.651
新蜜 11 号	0.353	0.288	0.641
青边皇后	0.329	0.264	0.593
莎白 3 号	0.324	0.269	0.594
新玉露	0.297	0.253	0.550

### 3 结论

本文以美浓 1 号、新玉露、新世纪、新蜜 11 号、莎白 3 号和青边皇后等 6 个甜瓜品种为材料,研究了不同浓度盐胁迫下甜瓜种子萌发及幼苗生长特性,实验结果如下。

1) 低浓度盐胁迫( $\leq 50$  mmol/L)可促进甜瓜种子萌发和幼苗生长发育。

2) 在萌发期,随着盐胁迫浓度增加,甜瓜种子的发芽速度逐渐降低, $RGI$ ,  $RVI$ , 幼芽伸长生长均呈下降趋势,同时发现在不同浓度盐胁迫下,各个品种甜瓜的最终发芽率(7 d)比较稳定,表明盐胁迫抑制的只是种子发芽的过程。

3) 苗期盐胁迫条件下,幼苗生长明显受到抑

(下转第 61 页)

# 复合生物酶液处理低次烟叶制备烟用香料

许春平, 杨琛琛, 王铮, 缪光耀

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**为探讨使用复合酶液处理低次烟叶制备烟用香料的方法及评价反应产物的效果,采用单因素法分别对复合纤维素酶和木瓜蛋白酶的用量进行了优化.以混合酶解液为主要氮源,将红糖、丙二醇和乙醛作为主要碳源,通过美拉德反应制备烟用香料;采用气相色谱-质谱联用法分析产物化学成分,并评价其感官效果.结果表明:1)每g烟末复合纤维素酶与木瓜蛋白酶的最佳用量分别为1 000 U/g和5 500 U/g. 2)反应产物对于降低卷烟烟气刺激性、协调香味等具有较明显的效果. 3)用GC-MS分析得到38种主要挥发性成分,其中包括3-羟基- $\beta$ -大马酮、巨豆三烯酮、2,5-二甲基吡嗪和紫罗兰酮等对烟草香气品质贡献较大的化合物.

**关键词:**低次烟叶;酶解;美拉德反应;烟用香料;复合生物酶液

**中图分类号:**TS49 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.007

## The preparation of tobacco flavor from discarded tobacco leaf by multi-bioenzyme

XU Chun-ping, YANG Chen-chen, WANG Zheng, MIAO Guang-yao

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

**Abstract:** To investigate the application of multi-bioenzyme to treat discarded tobacco leaf for making flavor and checking product performance, the concentration of cellulose and protease were optimized firstly. After enzymolysis, brown sugar, propanediol and acetaldehyde were added to the concentrated hydrolysate solutions for Maillard reaction to prepare the flavor. The components of the flavor was tested by using GC-MS analysis, and its sensory effects were evaluated. The result showed: 1) The optimal conditions were cellulase 1 000 U/g, protease 5 500 U/g. 2) The flavor could reduce irritation and coordination fragrance. 3) GC-MS analysis showed that 38 main volatile components in the flavor, including 3-hydroxy- $\beta$ -damascenone, megastigmatrienone, 2,5-dimethyl pyrazine, and ethyl octanoate, gave more contribution to the tobacco flavor substances.

**Key words:** discarded tobacco leaf; enzymolysis; Maillard reaction; tobacco flavor; multi-bioenzyme

## 0 引言

我国烟草种植面积和产量均居世界首位,在烟草加工过程中约有25%的烟末和低次烟叶不能用于卷烟生产<sup>[1]</sup>.通过研究美拉德反应的反应条件和

原料,并将其应用到烟用香料的生产中,可提高烟叶的利用率<sup>[2]</sup>.然而,传统方法使用的反应原料大多以单糖、二糖或者某些单糖的混合物作为反应的羰基源,以单一氨基酸或某几种氨基酸的混合物为反应的氮源,因此所得产物的增香效果一般,无法

收稿日期:2013-09-06

基金项目:国家人社部“留学人员科技项目择优支持计划”(豫留学函[2010]16号)

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

满足今天卷烟的增香需求. 酶解液中含有更为丰富的羰基源, 有利于在美拉德反应的产物中体现出烟叶的本香, 所得的反应产物能够与烟香更加协调, 提高增香效果, 同时也有利于提高低次烟叶的综合利用率<sup>[3]</sup>. 鉴于此, 本文拟以复合纤维素酶和木瓜蛋白酶处理低次烟叶, 以混合酶解液为主要氮源, 将红糖、丙二醇和乙醛作为主要碳源, 通过美拉德反应制备烟用香料; 采用气相色谱-质谱联用法(GC-MS)分析产物的化学成分, 并评价其感官效果, 以期为提高美拉德反应产物的增香效果提供参考.

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

材料: 吉林长春晒红烟 Y23, 产自吉林长春, 等级为 3 级, 蛋白质含量 15%, 还原糖含量 4.23%, 瑞升烟草技术(集团)有限责任公司提供, 40 °C 烘干、粉碎过 80 目筛; 纤维素复合酶, 阿玛诺田野酶制剂商贸有限公司产; 木瓜蛋白酶, 北京索莱宝科技有限公司产; 酒石酸钾钠、氢氧化钠、氢氧化钾均为 AR 级, 天津市瑞金特化学品有限公司产; 无水亚硫酸钠、1,2-丙二醇均为 AR 级, 天津市科密欧化学试剂有限公司产; 磷酸、苯酚、乙醛纯度均大于等于 85.0%, 开封化学试剂总厂产; 3,5-二硝基水杨酸(AR), 上海科丰化学试剂有限公司产; 酪氨酸(AR), 北京奥博星生物技术责任公司产.

仪器: HS-4 恒温水浴锅, 上海医疗器械五厂产; UV1700PC 紫外-可见分光光度计, 上海凤凰光科学仪器有限公司产; PL203 电子分析天平(感量: 0.001 g), 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产; DGX-9143 电热恒温鼓风干燥箱, 上海福玛设备有限公司产; CF-16RX II 冷冻离心机, HITACHI 日立集团产; QL-866 涡旋混合仪, 海门市其林贝尔仪器制造有限公司产; PB-10 pH 计, 德国赛多利斯股份公司产; 6890 气相色谱仪/5973 质谱仪, 安捷伦科技有限公司产; JYT-5 QYC200 恒温振荡摇床, 上海福玛实验设备有限公司产.

### 1.2 方 法

**1.2.1 纤维素复合酶浓度的优化** 分别称取 1 g 烟末和 10 mL 蒸馏水放于 50 mL 三角瓶中, 搅拌均匀, 加入不同浓度的纤维素复合酶, 用 1 mol/L  $H_3PO_4$  溶液和 1 mol/L KOH 溶液调 pH 为 5.0, 于 50 °C 水浴中反应 4 h, 之后进行灭酶处理. 在 8 000 r/min 条件下离心 15 min, 取 1 mL 上清液置于

100 mL 容量瓶中, 以蒸馏水定容, 4 °C 放置待测<sup>[3]</sup>. 通过二硝基水杨酸法(DNS 法)检测待测液中还原糖的浓度以确定复合纤维素酶的用量<sup>[4]</sup>. 以葡萄糖浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线, 标准曲线方程为  $y = 1.5135x - 0.0471$  ( $R^2 = 0.998$ ). 分别取低次烟叶处理后的待测液 2.00 mL, 加入 2.00 mL DNS 显示剂<sup>[5]</sup>, 按标准液的处理方法测定吸光度, 从标准曲线上查出对应的浓度并计算总糖含量.

**1.2.2 木瓜蛋白酶浓度的优化** 在 50 mL 三角瓶中分别加入 1 g 烟末和 10 mL 蒸馏水, 搅拌后分别加入不同浓度的木瓜蛋白酶, 再将溶液的 pH 调至 7.5 左右, 放入恒温水浴锅中 50 °C 反应 10 h; 待反应完全后进行灭酶处理. 冷却至室温后, 以 8 000 r/min 离心 10 min, 取 1 mL 上清液置于 100 mL 容量瓶中, 以蒸馏水定容. 以水解液中的酪氨酸浓度代表蛋白质的降解程度<sup>[6]</sup>.

以酪氨酸浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线<sup>[7]</sup>, 标准曲线方程为  $y = 0.0111x - 0.0167$  ( $R^2 = 0.998$ ). 取 1 mL 各待测液, 按照上述检测方法于 680 nm 处测定吸光度. 通过标准曲线查出对应的酪氨酸浓度, 得到蛋白质的降解程度.

**1.2.3 低次烟叶酶解液的制备** 将烟叶粉碎, 过 100 目筛. 按质量比 1:12 (烟末:水)加入蒸馏水, 充分浸泡 1 h; 加热至 100 °C 后保持 20 min, 然后降温冷却至 50 °C 左右; 用  $H_3PO_4$  调 pH 为 5.0, 每 g 烟末加入 1 000 U 纤维素复合酶酶解 4 h; 用 KOH 调 pH 为 7.0, 每 g 烟末加入 4 500 U 蛋白酶, 继续酶解 8 h; 待反应结束后在 100 °C 下加热 10 min, 灭酶处理, 冷却至 25 °C; 过滤除杂, 真空浓缩至可溶性固形物含量为 40% 左右<sup>[8]</sup>.

**1.2.4 美拉德反应制备烟用香料** 按照质量比 20:25:1.5:70 (红糖:固形物:乙醛:丙二醇)称取各物质, 混合均匀, 并将该混合物的 pH 调为 7.5, 电油锅加热至 125 °C 左右, 充分反应 3 h, 自然冷却至室温<sup>[9-10]</sup>.

**1.2.5 卷烟样品的制备** 分别按照 1:1 和 1:2 (蒸馏水:烟用香料)的比例配制香料. 称取一定量的配方烟丝, 将上述 2 种配制好的烟用香料按烟丝质量的 5% 添加到配方烟丝中, 用喷雾器均匀喷洒, 以没有添加该香料的烟丝作为空白对照. 然后分别将喷好的烟丝放在温度 ( $22 \pm 1$ ) °C 和湿度 ( $60 \pm 2$ )% 的恒温恒湿箱中平衡 48 h. 使用手动卷烟器卷制样品卷烟.

**1.2.6 卷烟加香评吸** 卷烟评吸由郑州轻工业学院调香实验室 15 位评吸人员,按照国标 GB/T 5606.4—2005<sup>[11]</sup>对 3 组卷烟的感官品质进行评吸.感官指标为光泽(5 分)、香气(32 分)、谐调(6 分)、杂气(12 分)、刺激性(20 分)、余味(25 分).所使用的烟丝为配方烟丝.

### 1.2.7 美拉德反应产物的前处理及 GC-MS 分析

准确移取 10 mL 香料样品于微量萃取器中,加入 5 mL  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,摇匀,时间约 3 min,使两相充分接触.130 r/min 摇床机械振荡 10 min,静置分层后分离  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  相,60 °C 浓缩至 1 mL,进行 GC-MS 分析.分析条件如下:

色谱柱:HP-5MS(50 m×0.25 mm×0.25  $\mu\text{m}$ )毛细管柱;升温程序:50 °C(1 min),5 °C/min,250 °C(5 min);载气:He;进样温度:250 °C;进样模式:不分流进样;流速:1 mL/min;传输线温度:250 °C;离子源:EI 源;电子能量:70 eV;扫描范围:50 ~ 650 amu.

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维素复合酶浓度优化

以纤维素复合酶浓度为横坐标、还原糖浓度为纵坐标,在坐标图上反映出不同纤维素复合酶浓度下还原糖浓度的变化情况,如图 1 所示.由图 1 可知,还原糖浓度的变化与纤维素复合酶量的变化呈正相关.在一定范围内,随着纤维素复合酶使用量的增加,还原糖浓度呈上升趋势.当每 g 烟末纤维素复合酶的用量为 1 000 U 时,还原糖浓度趋于最大值.再继续增加纤维素酶量,还原糖浓度逐渐趋于平稳,并维持在 0.31 mg/mL 左右.因此,综合考虑,选择每 g 烟末纤维素复合酶的用量为 1 000 U.

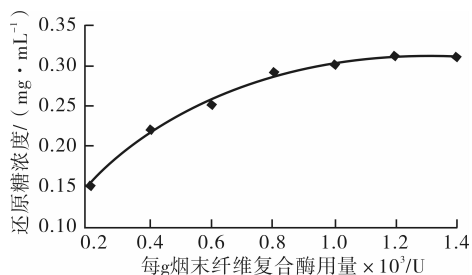


图 1 纤维素复合酶浓度优化曲线

### 2.2 木瓜蛋白酶浓度优化

烟草蛋白质被蛋白酶部分水解为氨基酸,可通过分光光度计测定水解液中酪氨酸浓度的变化来判断蛋白质的降解程度.以蛋白酶浓度为横坐标、

酪氨酸浓度为纵坐标作图(见图 2).由图 2 可知,蛋白酶浓度与酪氨酸正相关,即与蛋白质的降解程度正相关.随着蛋白酶浓度的增加,酪氨酸浓度呈先上升后平稳的趋势.在每 g 烟末木瓜蛋白酶的使用量为 5 500 U 时,酪氨酸浓度基本达到最大,为 39.00 mg/L.综合考虑,选择每 g 烟末木瓜蛋白酶的使用量为 5 500 U.

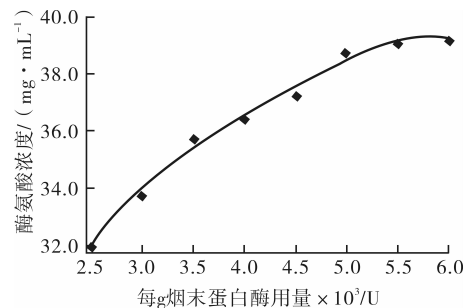


图 2 蛋白酶浓度优化曲线

### 2.3 卷烟样品感官评吸对比

对 3 种卷烟样品进行感官质量评价,其中卷烟 I 号为未添加烟用香料的成品卷烟(空白对照),卷烟 II 号为添加蒸馏水与烟用香料比例为 1:1 的成品卷烟,卷烟 III 号为添加蒸馏水与烟用香料比例为 1:2 的成品卷烟.结果见图 3.由图 3 可以看出,使用由低次烟叶生物酶解制备的烟用香料后,卷烟在香气、谐调、杂气、刺激性及余味方面均有一定程度的提升.综合来看,卷烟 II 号的效果较好.

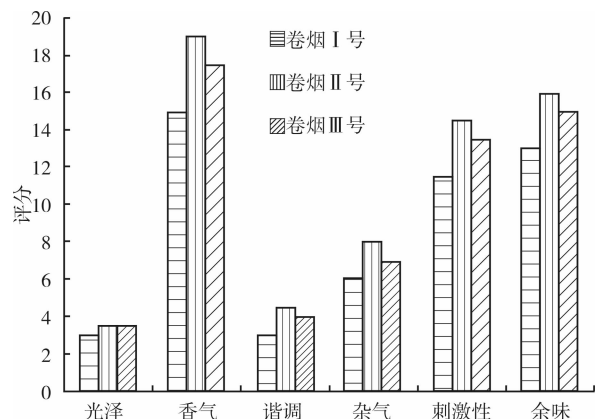


图 3 卷烟样品评吸得分示意图

### 2.4 美拉德反应产物的 GC-MS 分析结果

美拉德反应产物的 GC-MS 分析结果见表 1.该香料中的主要香味成分有 38 种,包括酯类 10 种、酮类 8 种、杂环类 8 种、醛类 3 种、烃类 3 种、醇类 2 种、醚类 2 种、酚类 1 种和有机酸 1 种.其中酮类占总量的 18.83%,含氮杂环类占 53.71%,有机酸类

占 4.06%。这些产物对卷烟的感官质量可起到不同程度的作用,例如,酮类物质如 3-羟基- $\beta$ -大马酮和巨豆三烯酮为烟草中的主要致香成分,两者的相对百分含量达到 1.56%,可以增强烟草的成熟气息;含氮杂环类化合物如吡啶、吡咯、吡嗪等物质,大多由美拉德反应生成,可赋予卷烟特征以烘烤香、花香、果香,对烟草的香味具有较好的修饰作用,

表 1 美拉德反应产物中的主要挥发性香味成分

序号	保留时间/min	成分	相对含量/%
1	5.11	1,2-丙二醇	0.32
2	5.43	4,6-二甲基嘧啶	5.19
3	7.04	1-甲氧基-2-丙醇	0.34
4	7.11	甲基环戊烯醇酮	0.52
5	7.30	二丙二醇单甲醚	0.44
6	7.48	4-异丙基甲苯	4.62
7	7.87	苯乙醛	0.21
8	8.53	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	3.16
9	9.71	2-苄基(苯甲基)异氰化	0.19
10	9.98	十五烷	0.03
11	10.05	(R)-3-羟基丁酸甲酯	1.56
12	11.04	2-乙氨基-2-(3-甲氧基苯基)环己酮	1.25
13	11.19	香叶醛	0.23
14	11.88	2,5-二甲基吡嗪	5.32
15	12.21	己酸乙酯	0.45
16	12.96	庚酸乙酯	0.74
17	13.46	新烟碱	33.46
18	14.18	2-环己基哌啶	2.05
19	14.69	茴香脑	0.17
20	15.84	植酮	0.07
21	16.20	丁香酚	0.61
22	17.59	N,N-二甲基-4-氨基苯甲醛	0.19
23	18.40	3-羟基- $\beta$ -大马酮	0.68
24	18.65	乙酸苯乙酯	1.10
25	18.99	紫罗兰酮	0.26
26	19.07	黄藤内酯	0.24
27	20.03	(-)-可替宁	6.54
28	20.16	辛酸乙酯	0.20
29	21.17	菠萝酮	10.06
30	21.49	十八碳三烯酸乙酯	0.25
31	23.37	叶酸	4.06
32	23.50	新植二烯	1.40
33	26.12	1-甲基-4-羧酸-5-(3-吡啶基)-2-吡咯烷酮	5.11
34	28.68	3-乙基-5-(2-乙基丁基)十八烷	0.64
35	29.35	邻苯二甲酸二异辛酯	6.13
36	29.60	苯甲酸苄酯	1.05
37	30.80	巨豆三烯酮	0.88
38	34.53	肉桂酸苄酯	0.28

丰满烟香;有机酸类物质可减轻刺激,使烟气变得醇和;其他少量的醇类、醛类、醚类等物质,也可以对烟气起到一定的修饰作用。因此,以烟叶酶解液为原料进行美拉德反应,所产生的烟用香料不仅能够保留烟草原有的香味,且能进一步改善卷烟的香气品质。

### 3 结论

通过优化分析得每 g 烟末纤维素复合酶的用量为 1 000 U,木瓜蛋白酶的用量为 5 500 U。感官评吸结果表明,由低次烟叶生物酶解制备的烟用香料,具有较明显的减轻杂气、降低刺激性、增加香气和协调香味的作用。对其进行 GC-MS 分析,得到主要的挥发性成分 38 种,其中包括 3-羟基- $\beta$ -大马酮、巨豆三烯酮、2,5-二甲基吡嗪和紫罗兰酮等对烟草香气具有辅助效果的风味化合物。研究结果表明,通过该法制备烟用香料,其生产过程简单,能够改善烟气品质,具有较好的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 饶国华,赵谋明,林伟锋,等.中国低次烟叶资源综合利用研究[J].资源科学,2005,27(5):120.
- [2] 余金恒,许明忠,黄锋林,等.烟用香精香料物质研究进展[J].河南农业科学,2011,40(2):16.
- [3] 文冬梅,伍锦鸣,赵谋明,等.烟叶末在酶解和美拉德反应过程中风味变化规律的研究[J].食品工业科技,2012,33(12):176.
- [4] 尹建雄,卢红,谢强,等.3,5-二硝基水杨酸比色法快速测定烟草水溶性总糖、还原糖及淀粉的探讨[J].云南农业大学学报,2007,22(6):829.
- [5] 许尧兴,姚晓红.两种测定程序对饲用 $\alpha$ -半乳糖苷酶活性检测结果的比较[J].浙江农业学报,2004,16(6):349.
- [6] 马林.利用生物技术改变烟叶化学组分提高其吸食品质和安全性的研究[J].郑州工程学院学报:自然科学版,2001,22(3):40.
- [7] 李建成.生物化学实验原理和方法[M].北京:北京大学出版社,1994:168-170.
- [8] 李小斌,吕志峰,王科杰,等.加酶技术提高烟叶感官质量的研究[J].中国烟草科学,2007,28(6):9.
- [9] 庞登虹,李丹,熊国玺,等.酶法处理烟叶碎片制备烟草浸膏[J].江南大学学报:自然科学版,2009,8(5):607.
- [10] 唐胜,沈光林,饶国华,等.利用烟末酶解液制备烟用美拉德反应香精的研究[J].食品工业科技,2011,32(4):268.
- [11] GB/T 5606.4—2005,卷烟·第4部分:感官技术要求[S].

# 烟用水基胶中二甘醇二苯甲酸酯的气相色谱-质谱联用法测定

樊亚玲<sup>1,2</sup>, 王大锋<sup>1,2</sup>, 何育萍<sup>1,2</sup>, 吕娟<sup>2</sup>,  
曹洁穹<sup>1,3</sup>, 何媛<sup>2</sup>, 彭军仓<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. 陕西中烟工业有限责任公司 技术中心, 陕西 宝鸡 721000;
3. 陕西中烟工业有限责任公司 宝鸡卷烟厂, 陕西 宝鸡 721000)

**摘要:**分别采用正己烷、环己烷、乙醚、异辛烷进行了烟用水基胶中二甘醇二苯甲酸酯萃取实验,并采用选择离子监测模式下的气相色谱-质谱联用法测定其含量.实验结果表明:以正己烷为萃取溶剂,胶样中加入1 mL水,萃取体积10 mL,振荡40 min时萃取效果较好;测定方法线性相关系数为0.999 4,检出限为0.04  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,RSD为4.98%、回收率为97%~101%.

**关键词:**烟用水基胶;二甘醇二苯甲酸酯;气相色谱-质谱联用法

**中图分类号:**TS41<sup>+</sup>1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.008

## Determination of di(ethylene glycol) dibenzoate in water-based emulsion adhesives for cigarette with GC-MS method

FAN Ya-ling<sup>1,2</sup>, WANG Da-feng<sup>1,2</sup>, HE Yu-ping<sup>1,2</sup>,  
LYU Juan<sup>2</sup>, CAO Jie-qiong<sup>1,3</sup>, HE Yuan<sup>2</sup>, PENG Jun-cang<sup>2</sup>

- (1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Technology Center, China Tobacco Shaanxi Industrial Co., Ltd., Baoji 721000, China;
3. Baoji Cigarette Factory, China Tobacco Shaanxi Industrial Co., Ltd., Baoji 721000, China)

**Abstract:** In order to determine the content of di(ethylene glycol) dibenzoate (DEDB) in water-based emulsion adhesives for tobacco, the adhesives were extracted separately with n-hexane, cyclohexane, ethyl ether, 2,2,4-trimethylpentane, and determined by GC-MS under selected ion monitoring mode. The results showed that oscillating time 40 min and extraction volume 10 mL were preferable duration for n-hexane extraction by adding 1 mL water into the sample; the calibration curves of the DEDB exhibited good linear relations ( $R^2 = 0.9994$ ), the limits of detection 0.04  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , RSD = 4.98%, and the recoveries ranged from 97% ~ 101%.

**Key words:** water-based emulsion adhesives for cigarette; di(ethylene glycol) dibenzoate; GC-MS

收稿日期:2014-01-02

作者简介:樊亚玲(1975—),女,陕西省西安市人,郑州轻工业学院硕士研究生,陕西中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草理化。

通信作者:彭军仓(1973—),男,陕西省宝鸡市人,陕西中烟工业有限责任公司高级工程师,主要研究方向为烟草理化。

## 0 引言

近几年,由于邻苯二甲酸酯类增塑剂被证实是环境激素类物质,长期接触可导致人体内分泌紊乱、生殖机能失常等问题<sup>[1-2]</sup>,因此,国内外对其使用条件及范围制定了相应的法规<sup>[3-5]</sup>,进行严格控制.胶黏剂企业为了提高胶黏剂的性能,正在寻找和研究一些与邻苯类增塑剂性能相似的新型增塑剂以替代传统的邻苯类增塑剂<sup>[6]</sup>.

二甘醇二苯甲酸酯(简称DEDB),又称一缩二乙二醇二苯甲酸酯,具有较好的相溶性、耐寒性、热稳定性、抗静电、抗污染性、低挥发性和低毒性,有关研究表明,其增塑性能可以替代邻苯二甲酸二辛酯和邻苯二甲酸二丁酯<sup>[7]</sup>.早期关于DEDB的测定方法有层析法和气相色谱法<sup>[8]</sup>,但关于运用气相色谱-质谱(GC-MS)联用法测定的研究尚未见报道.目前行业关于烟用水基胶主要从增塑剂、单体残留、有毒溶剂、重金属等方面进行研究<sup>[9-12]</sup>,本文拟建立烟用水基胶中DEDB的GC-MS测定分析方法,以期对烟用水基胶生产和使用企业进行水基胶的质量检测及其质量稳定性的控制提供一种方法.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

材料:烟用水基胶(以下简称胶样),陕西中烟工业有限责任公司提供;正己烷(色谱纯),美国Sigma Aldrich Fluka公司产;二甘醇二苯甲酸酯(纯度 $\geq 99.0\%$ ),中国标准物质中心产;苯甲酸苄酯(纯度 $\geq 99.9\%$ ),德国Dr. Ehrenstorfer公司产;环己烷(色谱纯),上海安谱科学仪器有限公司产;乙醚、异辛烷(AR),上海国药集团化学试剂有限公司产.

仪器:Clarus 600气相色谱-质谱联用仪,美国PE公司产;KQ-700DB数控超声清洗器,昆山市超声仪器有限公司产;HY-8型振荡仪,常州国华电器有限公司产;Milli-Q超纯水仪,美国Millipore公司产;ME414S电子天平(感量0.000 1 g),德国Sartorius公司产;TGL-16aR高速离心机,上海安亭科学仪器厂产.

### 1.2 样品处理与分析

以正己烷为萃取溶剂,配制苯甲酸苄酯内标(IS)浓度为50 mg/L的萃取液.

称取0.3 g胶样(精确至0.1 mg)于50 mL具塞三角瓶中,加入1 mL蒸馏水,混合均匀后准确加入10 mL萃取液,振荡萃取40 min,取适量萃取液于离

心管中离心10 min,取上层清液进行GC-MS分析.分析条件如下:

色谱柱:PTE-5MS毛细管柱(30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu$ m);载气:He;流量:1.2 mL/min;进样口温度:280  $^{\circ}$ C;分流比:10:1;进样量:1  $\mu$ L;程序升温:80  $^{\circ}$ C(1 min) $\xrightarrow{20^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 220  $^{\circ}$ C $\xrightarrow{10^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 280  $^{\circ}$ C(20 min);传输线温度:280  $^{\circ}$ C;电离方式:EI源;电离能量:70 eV;离子源温度:230  $^{\circ}$ C;溶剂延迟:3.5 min;扫描范围:35~500 amu;全扫描模式定性,SIM模式定量;DEDB的特征离子( $m/z$ ):51,77,105和149;定量离子( $m/z$ ):105.

### 1.3 GC-MS分析的工作曲线、检出限与定量限

准确称取DEDB 50 mg于50 mL容量瓶中,用正己烷溶解并定容至刻度,配成1 mg/mL的标准储备液;分别取5  $\mu$ L,50  $\mu$ L,100  $\mu$ L,250  $\mu$ L,500  $\mu$ L和1 000  $\mu$ L标准储备液于10 mL容量瓶中,准确加入适量的内标溶液,用正己烷定容至刻度,配制浓度分别为0.5  $\mu$ g/mL,5  $\mu$ g/mL,10  $\mu$ g/mL,25  $\mu$ g/mL,50  $\mu$ g/mL,100  $\mu$ g/mL的系列标准工作溶液.以各目标物的色谱峰面积与内标峰面积之比对其浓度进行线性回归分析,得到各目标物的标准曲线回归方程及相关系数 $R^2$ .将最低浓度的标准工作溶液重复测定10次,计算标准偏差,以3倍标准偏差为方法的检出限,以10倍标准偏差为方法的定量限.

## 2 结果与讨论

### 2.1 萃取条件的选择和优化

**2.1.1 萃取溶剂的选择** 烟用水基胶中DEDB微溶于水,溶于一般有机溶剂.本研究选择正己烷、环己烷、乙醚和异辛烷4种有机溶剂,在相同条件下分别对胶样中的DEDB进行萃取,不同萃取溶剂萃取的DEDB含量为:正己烷2.57 mg/g,环己烷2.50 mg/g,乙醚2.79 mg/g,异辛烷1.96 mg/g(DEDB测定结果均为2次结果的平均值,下同).可见,乙醚萃取效率最高,正己烷次之,异辛烷最差,从实验操作的安全性考虑,选择正己烷作为萃取溶剂.

**2.1.2 DEDB萃取方式的选择** 在其他条件一定的情况下,分别对胶样进行振荡和超声萃取,并测定胶样中DEDB含量,结果分别为2.42 mg/g和1.05 mg/g.可见,振荡萃取优于超声萃取.这表明,萃取效果的优劣与介质有关,同时与被萃取物质的性质和结构有关.超声波萃取主要是利用超声波的空化作用来增大物质分子的运动频率和速度,从而



增加溶剂的穿透力.而水基胶中的主要成分是高聚物大分子,且与增塑剂 DEDB 具有良好的相容性,超声波空化作用渗透的萃取溶剂与增塑剂的作用力小于振荡产生的增塑剂与高分子间的作用力,振荡优于超声,故选取振荡萃取方式.

**2.1.3 稀释胶样的加水量** 由于烟用水基胶分子量大,有些样品黏度较高,萃取前先加入适量的蒸馏水使胶样得到稀释和分散,萃取会更加充分.在其他条件一定的情况下,实验分别加入 0 mL,1 mL,2 mL,3 mL,4 mL 的蒸馏水,考察不同加水量对 DEDB 萃取效果的影响,结果如图 1 所示.由图 1 可见,加水量在 1 mL 时萃取效果最佳,大于 1 mL 后萃取效果降低.增塑剂一般具有极性基团和非极性基团,可能因为插入胶样高分子间的增塑剂在聚醋酸乙烯酯吸水溶胀后被正己烷萃取完全,又因增塑剂与高分子具有良好的相容性,在水量增加到一定量后,增塑剂与高分子间的相互作用力增强,相应其与正己烷的相互作用力减弱,从而导致萃取结果的下降,故选取 1 mL 加水量.

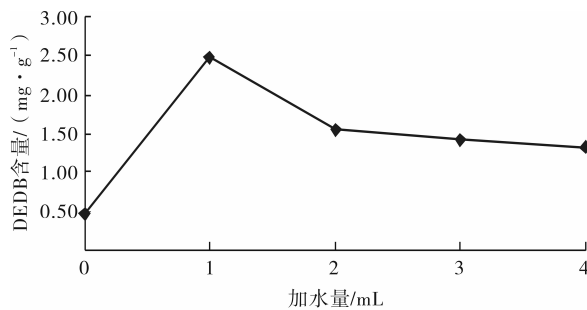


图 1 不同加水量对胶样中 DEDB 萃取效果的影响

**2.1.4 DEDB 萃取体积的选择** 在其他条件一定的情况下,对同一胶样分别加入 5 mL,10 mL,15 mL,20 mL 和 30 mL 的萃取液,不同体积萃取液的萃取效果如图 2 所示.由图 2 可见,当萃取体积在 10 mL 以后,胶样中的 DEDB 含量趋于稳定,故选择萃取液体积为 10 mL.

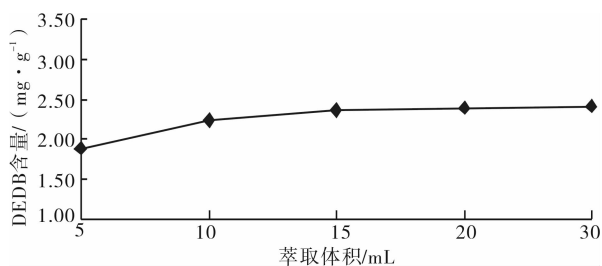


图 2 不同萃取体积的 DEDB 含量

**2.1.5 DEDB 萃取时间的选择** 在其他条件一定的情况下,对同一胶样分别萃取 10 min,20 min,30 min,40 min,50 min 和 60 min,所得结果如图 3 所示.由图 3 可见,当萃取时间在 40 min 以后,萃取效果趋于稳定,故选择萃取时间为 40 min.

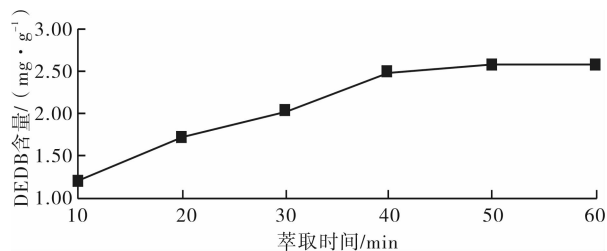


图 3 不同萃取时间的 DEDB 含量

## 2.2 色谱条件的优化

**2.2.1 DEDB 的质谱定性** 标准工作溶液和胶样中 DEDB 的 TIC 色谱图如图 4 所示.由图 4 可见,胶样中的 DEDB 与标准工作溶液中的 DEDB 保留时间一致,均为 13.73 min.设定定性离子  $m/z = 77$ ,定量离子  $m/z = 105$ ,可得样品和标样中目标化合物定量,定性离子丰度比分别为 1.62 和 1.60,两者基本一致.保留时间结合离子丰度比可以用来对 DEDB 进行定性.

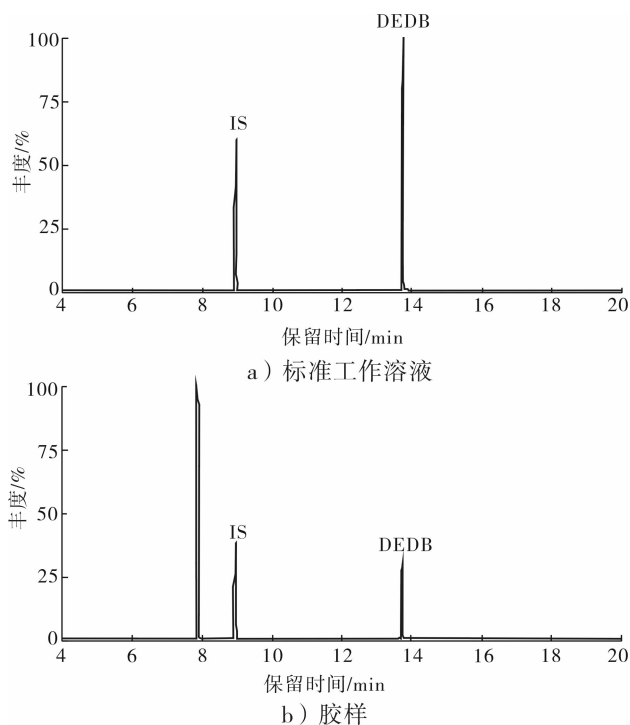


图 4 标准工作溶液和胶样中 DEDB 的 TIC 色谱图

**2.2.2 测试条件的优化** 在同一实验条件下,考察了进样口温度对分析结果的影响.温度分别为

200 ℃, 220 ℃, 240 ℃, 260 ℃ 和 280 ℃, GC-MS 分析结果表明, 进样口温度在 280 ℃ 时, 色谱峰型比较尖锐, 灵敏度高, 说明此时样品汽化完全, 因此确定进样口温度为 280 ℃。

同理, 实验考察了柱箱初始温度、升温速率等因素对组分分离度的影响。结果表明, 随着初始温度的升高, 组分的分离基本不受影响, 综合考虑分析时长和组分峰的响应, 确定初始温度为 80 ℃。分别对升温速率为 8 ℃/min, 10 ℃/min, 15 ℃/min 和 20 ℃/min 时其对组分分离度的影响进行考察, 结果表明, 随着升温速率的增大, 样品分离度亦基本不受影响, 样品分析所需的时间缩短, 综合考虑分析效率, 最终确定升温程序为: 80 ℃ (1 min)  $\xrightarrow{20\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$  220 ℃  $\xrightarrow{10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$  280 ℃ (20 min)。

### 2.3 方法学考察

**2.3.1 工作曲线、检出限与精密度** 根据 1.3 所述方法得到 GC-MS 分析 DEDB 含量的回归方程为  $Y = 0.01491X + 0.02898$ , 相关系数  $R^2 = 0.9994$ 。可见, 目标物在 0 ~ 100 μg/mL 范围内线性关系良好, 定量限为 0.14 μg/mL, 检出限为 0.04 μg/mL, 适合于烟用水基胶中目标物的测定。

**2.3.2 重复性和回收率** 对胶样中 DEDB 含量平行测定 5 次, 结果分别是: 2.69 mg/g, 2.45 mg/g, 2.62 mg/g, 2.40 mg/g, 2.46 mg/g。根据测定结果计算, 其相对标准偏差  $RSD$  为 4.98%, 说明方法的重复性较好。

对已知组分含量的胶样分别加入高、中、低 3 个水平的标样进行实验分析, 计算回收率, 结果见表 1。由表 1 可知, 样品的加标回收率在 97% ~ 101% 之间, 说明用上述方法测定, 其结果比较准确, 适合烟用水基胶中 DEDB 成分的测定。

### 2.4 实际样品中 DEDB 的测定

应用上述方法对 7 种烟用水基胶中 DEDB 的含量进行测定, 结果见表 2。由表 2 可见, 烟用搭口胶和包装胶中均检测出 DEDB 物质, 烟用接嘴胶中未检出 DEDB 物质。

表 1 DEDB 添加水平对回收率的影响

添加水平	样品量/g	加标量/mg	原值 / (mg · g <sup>-1</sup> )	测定值 / (mg · g <sup>-1</sup> )	回收率/%
低浓度	0.315 1	0.40	2.53	3.81	101
中浓度	0.315 6	0.70	2.53	4.67	97
高浓度	0.315 2	1.00	2.53	5.67	99

## 3 结论

本文建立了测定烟用水基胶中二甘醇二苯甲

酸酯的 GC-MS 方法: 以正己烷为萃取溶剂, 胶样中加入 1 mL 水, 萃取体积 10 mL, 振荡萃取 40 min 时效果最好。该方法线性相关系数为 0.999 4, 检出限为 0.04 μg/mL, 相对标准偏差为 4.98%, 回收率 97% ~ 101%, 适用于烟用水基胶中 DEDB 的测定。

表 2 实际样品中 DEDB 的测定结果 mg/g

样品编号	名称	DEDB
1	搭口胶	2.48
2	包装胶	5.91
3	接嘴胶	—
4	搭口胶	4.30
5	搭口胶	—
6	接嘴胶	—
7	包装胶	—
8	丙纤胶	—

### 参考文献:

- [1] 林国良, 陈登龙, 黄宝铨, 等. 邻苯二甲酸酯类增塑剂替代品的研究进展[J]. 塑料助剂, 2007(5): 1.
- [2] 杨斌, 陈超英, 吴达, 等. 气相色谱/质谱联用法测定烟用水基型乳胶中的邻苯二甲酸酯[J]. 烟草科技, 2011(7): 48.
- [3] 崔军. 二甘醇二苯甲酸酯的合成研究进展[J]. 精细化工原料及中间体, 2012(2): 16.
- [4] 石万聪. 增塑剂的毒性及相关法规[J]. 塑料助剂, 2010(3): 43.
- [5] 巩玉红. 邻苯二甲酸酯类增塑剂替代品及现状分析[J]. 山东化工, 2011, 40(3): 75.
- [6] 王颖. 二甘醇二苯甲酸酯的合成研究[J]. 沈阳教育学院学报, 2005, 7(2): 108.
- [7] 张含平. 二甘醇二苯甲酸酯的合成研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [8] 李凌阁, 许绍东, 周绍海, 等. 一缩二乙二醇双苯甲酸酯增塑剂的气相色谱分析[J]. 化学通报, 1989(2): 40.
- [9] 贺春霞. 烟用水基胶中两类有害物质的分析研究与应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2010.
- [10] 姬厚伟, 刘建, 叶冲, 等. 静态顶空-气相色谱质谱法测定烟用水基胶中残余的乙酸乙烯酯[J]. 烟草科技, 2011(11): 32.
- [11] 李国智, 杨仁礼, 师建全, 等. 烟用水基型乳胶中苯系物的 GC/MS/SIM 测定[J]. 烟草科技, 2011(11): 32.
- [12] 廖惠云, 张映, 熊晓敏, 等. 微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定水基胶中的铅和砷[J]. 烟草科技, 2011(12): 34.

# 卷烟厂卷接包设备柔性连接系统研究

王雁<sup>1,2</sup>, 崔大勇<sup>2</sup>, 姚二民<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. 昭通卷烟厂, 云南 昭通 657000)

**摘要:**针对卷烟厂异型包装机组因采用人工端盘而导致烟支的损伤程度较大、装盘机卸盘机故障多、维修量大、配件费用高等问题,设计了卷接包设备柔性连接系统.该系统以YF17一对三烟支存储系统,取代原使用的装盘机、卸盘机、手工作业方式,实现卷烟机和包装机的柔性连接,减少了手工操作环节,保障了烟支质量;同时利用存储器缓冲、调节流量解决因卷接、包装设备生产速度不匹配带来的问题,实现了连续速度跟踪.

**关键词:**卷烟机;包装机;柔性连接系统

**中图分类号:**TS43 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.009

## Study on flexible connection system of cigarette machine and packaging machine for cigarette factory

WANG Yan<sup>1,2</sup>, CUI Da-yong<sup>2</sup>, YAO Er-min<sup>1</sup>

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

2. Zhaotong Cigarette Factory, Zhaotong 657000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high degree of damage in the cigarette manufacturing process, higher failure rate of loading machine and unloading machine, higher cost of parts in heterotypic packaging unit of cigarette factory, a system with flexible connection cigarette machine and packaging machine was designed. This system took storage system with YF17, a pair of three tobacco support application as the core to replace the original use of the loading machine, unloading machine, manual work, to achieve flexible connection cigarette machines and packaging machines, reduce the manual link and protect the quality of cigarettes; at the same time using the memory buffer and adjusting the flow, the packaging equipment production speed mismatch was solved and continuous speed tracking was obtained.

**Key words:** cigarette machine; packaging machine; flexible connection system

## 0 引言

昭通卷烟厂卷包车间在使用荷兰ITM异型包装机组进行卷烟包装时,烟支供给方式一直采用装盘机、卸盘机和手工作业方式.在烟支供给过程中,

装盘机、卸盘机、人工端盘对烟支的损伤程度较大,往往出现烟支质量触皱、变形等问题.且装盘机、卸盘机故障多,维修量大,配件费用高,降低了卷烟机和包装机的整体效率,而占用过多人力资源又增加了生产成本,在产品质量精益求精的时代,这种烟

收稿日期:2013-12-05

作者简介:王雁(1977—),女,云南省昭通市人,郑州轻工业学院硕士研究生,昭通卷烟厂经济师、助理工程师,主要研究方向为烟草工程.

支供给方式显然已经不适应可持续发展的要求<sup>[1-5]</sup>。本文拟设计一种卷接包设备的柔性连接系统,通过对 YF17 一对三烟支储存输送装置进行改造,实现储存输送装置柔性连接,以提升企业生产过程的自动化水平。

## 1 生产现状调查

针对装盘机、卸盘机和手工作业方式对烟支的损伤,首先对昭通卷烟厂原使用的一组荷兰制造的 ITM 异型包装机烟支触皱变形、故障率、维修时间、配件费用等进行了统计(3个月每周2次),统计数据见表1。

表1 异型包装机生产过程损耗统计

生产 时序	产量 /箱	手工触皱 变形量/kg	故障次数 /(次·d <sup>-1</sup> )	维修时 间/min	配件费 用/元
1	15.0	3.52	9	180	5 080
2	20.0	4.73	5	30	270
3	13.5	2.91	8	300	3 040
4	8.0	1.58	7	90	880
5	25.0	5.73	3	100	180
6	12.3	2.92	1	20	0
7	17.2	3.74	6	260	2 600
8	16.5	3.55	2	40	100
9	17.0	3.75	10	500	7 850
10	20.5	4.86	4	240	560
11	18.7	3.98	2	150	420
12	19.0	3.59	3	100	0
13	12.5	2.68	8	450	1 550
14	17.8	3.96	5	260	470
15	21.2	4.58	5	300	6 050
16	15.6	3.52	4	260	2 650
17	22.7	4.63	4	200	750
18	23.8	4.69	3	100	480
19	17.9	3.98	9	500	5 650
20	18.3	3.86	4	160	875
21	15.6	3.45	1	20	0
22	17.8	3.53	3	120	758
23	19.8	4.75	5	420	3 250
24	18.9	3.98	4	150	1 200
合计	424.6	92.47	115	4 950	44 663

表1统计数据显示,不考虑机器生产产生的废烟,当卷烟厂卷烟产量为424.6箱时,其装盘机、卸盘机和手工作业方式烟支触皱变形就达到92.47 kg,废烟单耗为0.22 kg/箱,约占集团及工厂“创优对标”废烟考核指标0.32 kg/箱的69%;此外,故障次数为115次,维修时间4 950 min,产生的配件费用

44 663元,不能达到工厂“优质、高效、低耗”的目标。

采用DPS软件对异型包装机生产过程中的损耗数据进行相关性分析,结果见表2。

表2 异型包装机生产损耗的相关性分析

相关系数	产量	手工触皱 变形量	故障 次数	维修 时间	配件 费用
产量	1.000 0	0.95**	-0.300 0	-0.030 0	-0.150 0
手工触皱变形量	0.95**	1.000 0	-0.240 0	0.030 0	-0.090 0
故障次数	-0.300 0	-0.240 0	1.000 0	0.74**	0.73**
维修时间	-0.030 0	0.030 0	0.74**	1.000 0	0.72**
配件费用	-0.150 0	-0.090 0	0.73**	0.72**	1.000 0

注:\*表示 $p < 0.05$ ,\*\*表示 $p < 0.01$ 。

由表2结果可以看出,产量与手工触皱变形量、故障次数与维修时间、故障次数与配件费用、维修时间与配件费用间均存在极显著的正相关关系,即随着产量的增加,手工触皱变形量增加;随着故障次数的增加,维修时间增加;随着故障次数的增加,维修费用增加;随着维修时间的增加,维修费用增加。因此,实现 YF17 一对三烟支储存输送装置连接,满足烟支储存输送功能,提升企业生产过程的自动化水平对产量的提升具有十分重要的作用。

## 2 改进系统方案设计

根据 YF17 和包装机的相对位置进行设计实验,具体方案如下:提升机出口连接设计为90°水平转弯装置,设计物料下落器A带高位输送装置连接包装机 ITM-26<sup>#</sup>,分料下落器带高位输送装置连接包装机 ZB42/A-26<sup>#</sup>,物料下落器B带高位输送装置连接包装机 ZB42/B-26<sup>#</sup>,并实现自动化控制功能。连接设计方案见图1。

### 2.1 卷包一对三柔性连接装置设计

**2.1.1 高架输送器设计** 烟支储存输送装置由一对一变为一对三,输送距离增大,且受到设备空间布置的局限,需要设计90°弯道高架输送器、直线高架输送器和S型高架输送器进行连接,满足烟支输送要求。90°高架输送器和S型高架输送器采用大半径圆弧转弯,能够在烟支输送到转弯处时降低离心力的影响,保证烟支层排列整齐。90°高架输送器与提升机左提升带共用一条链板输送带,由同一台减速电机驱动。S型高架输送器和直线输送器均采用链板输送带输送,各用1台减速电机驱动。3个电机的速度均由各自的轴模块控制,由PLC通过PROFIBUS总线系统对伺服系统进行控制。设计方案示意图见图2。

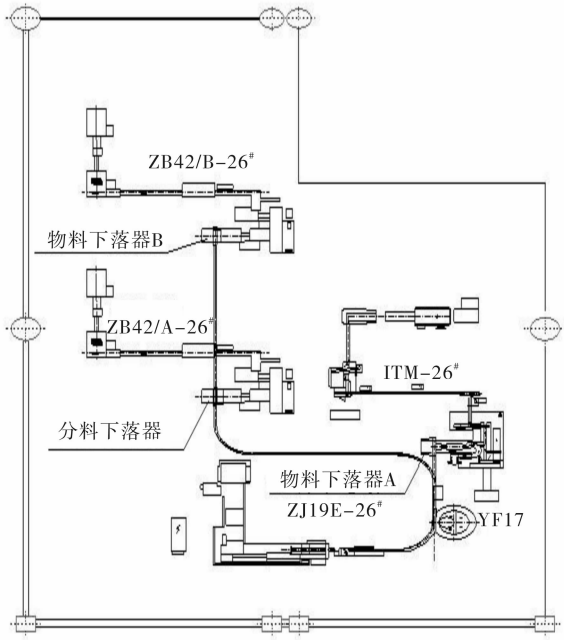


图1 柔性连接设计方案

**2.1.2 下降通道设计** 通过对 YF17 下降通道工作原理和构造进行分析,在下降通道处设计一个分料口通向烟支储存器.在下降通道左侧设计了2个分料口,上分料口用于连接 ZB42 包装机;下分料口用于连接 ITM 包装机.下降装置与存储器连接的斜向通道改为垂直通道,下落口设计长度为300 mm的垂直通道,以缩短下降通道的距离,降低因垂直下落所造成的烟支压力过大的程度.下降通道传动方式采用

上下2条平皮带作为烟支的输送带,这2条输送带用同一台减速电机驱动,上下2条输送带分别设置一个张紧器,使输送通道在运行过程中始终保持一定的张紧力.下降通道设计示意图见图3.落料器采用自由下落的方式将烟支输送至包装机烟库,无需任何传动.落料器中间加设了一个菱形,减少烟支填充量以减小下层烟支受到的压力.设计的落料器可以实现同包装机烟道入口对接,具体设计见图4.

### 2.2 电气控制系统结构设计

在烟支输送过程中,由于卷烟机与包装机存在速度差,为避免同步停机,在下降通道烟支存储库内设置一个模拟量传感器,控制垂直通道输送带及存储器螺旋钢带的运动,适时减少(存储器存入烟支)或增加(存储器输出烟支)进入包装机烟库的烟支量,检测烟层高度,适时地监测烟层变化,通过 PLC 伺服控制系统来调节烟支的流量<sup>[6-9]</sup>.控制系统采用 PROFIBUS 现场总线技术进行设计,可编程控制器、ET200S 分布式 I/O、绝对值编码器、驱动系统以总线方式互连,构成 PROFIBUS 总线控制系统.在可编程控制器上配置的 ETHERNET 通信模块,用于与上层信息系统相连.电气控制系统结构示意图见图5.

### 3 实际应用效果分析

上述改进系统在昭通卷烟厂投产后,针对设备运行情况,对烟支触皱变形、故障率、维修时间、配件

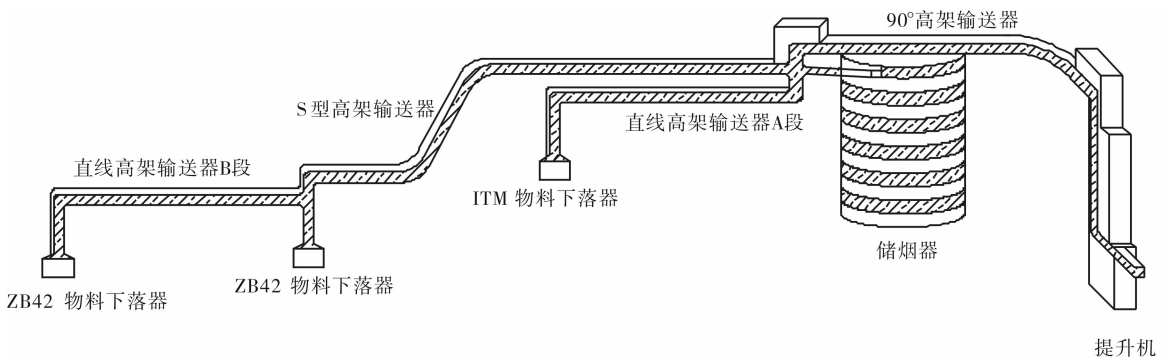


图2 设计方案示意图

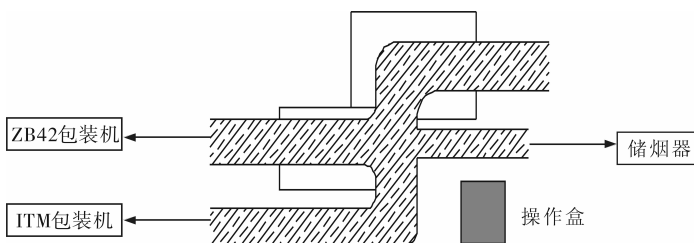


图3 下降通道设计示意图

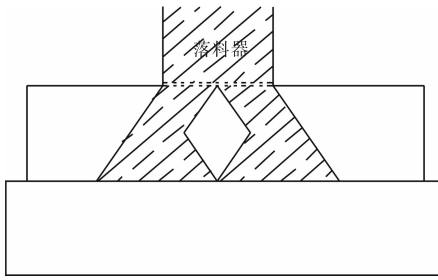


图 4 落料器示意图

费用等进行了统计(3个月每周2次)的统计数据表明,不考虑机器生产产生的废烟,装盘机、卸盘机和手工作业方式烟支触皱变形由原来的 92.47 kg 下降到 0.016 2 kg,废烟单耗由原来的 0.22 kg/箱降为 0.000 036 kg/箱,故障次数由原来的 115 次减少到 2 次,维修时间由原来的 4 950 min 缩短到 55 min,产生的配件费用由原来的 44 663 元降低到 425 元,说明本系统改造具有明显效果。

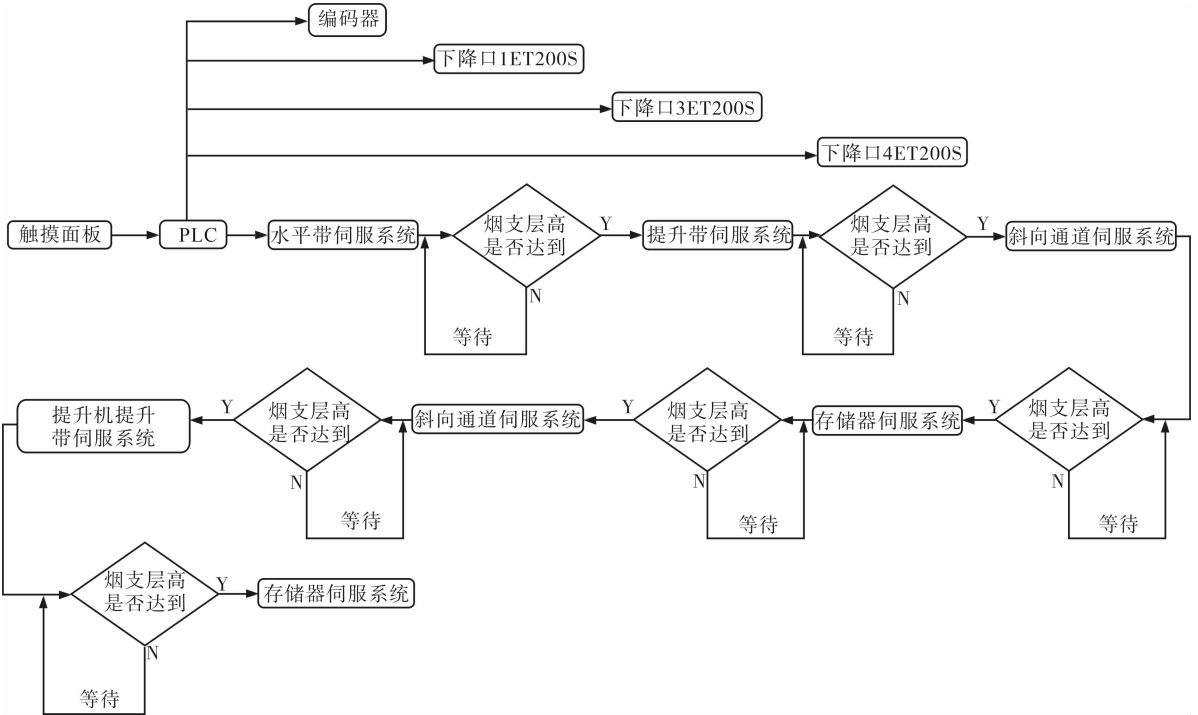


图 5 电气控制系统结构示意图

### 4 结语

本文设计了一种 YF17 一对三卷包柔性连接装置,将 1 台卷烟机和 1 台 ITM 包装机、2 台 ZB42 包装机柔性地连接起来,取代原有的装卸盘机,实现烟支缓存、平稳输送,提高了设备的利用率和卷烟卷制包装生产的自动化水平。该设计在理念上突破了国内通行的 1 台卷烟机对应 1 台包装机的连接方式,实现了 1 台卷烟机对应 3 台包装机实现储存输送的目标,解决了卷烟机和包装机生产能力不匹配问题。这对国内烟草企业充分利用资源,减少重复投资具有十分重要的指导作用,对烟草企业类似设备连接方法具有很强的借鉴意义。

### 参考文献:

[1] 袁宏志. 烟机行业的现状与出路[J]. 烟草科技, 2001

(10):20.

[2] 姚二民, 储国海. 卷烟机械[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.  
 [3] 国家烟草专卖局. 卷烟生产工艺规范[M]. 北京: 中央文献出版社, 2003.  
 [4] 林明, 苏静. 统计过程控制(SPC)在卷烟生产过程中的应用[J]. 中国科技信息, 2012(1): 89.  
 [5] 江新奇. SPC 技术在烟草行业生产中的作用和意义[J]. 科技创业家, 2012(19): 172.  
 [6] 李刚, 叶文宇, 林凌. TMS320F206DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.  
 [7] 黄晓勇, 周雪军. 对国产 YF11 烟支存储与输送系统电路的改进[J]. 烟草科技, 2000(12): 25.  
 [8] 康瑛. 几种适用于超高速卷烟生产线的卷烟储存输送系统[J]. 烟草科技, 2002(3): 26.  
 [9] 张道东. 用 PLC 改造滤棒储存输送系统[J]. 烟草科技, 2001(3): 19.

# 基于疑似目标区域判定方法的 卷烟透明包装缺陷检测

李力<sup>1,2</sup>, 黄玉彦<sup>2</sup>, 乔茜华<sup>2</sup>, 王永华<sup>2</sup>

(1. 河南中烟工业有限责任公司 南阳卷烟厂, 河南 南阳 473000;

2. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对GD, BE等主流卷烟包装机缺少散包烟盒的检测和剔除功能的问题, 基于疑似目标区域判定方法设计开发出一套检测装置: 通过对烟盒表面进行高度测定, 对检测信息进行模拟信息动态计算, 进而实现对卷烟产品质量的判断. 该检测装置安装简单, 调整方便, 性能可靠, 可有效减少因机械振动造成的误检, 提高卷烟包装质量.

**关键词:**包装机; 透明纸包装; 疑似判定; 缺陷检测

**中图分类号:** TS411.1    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.010

## Detection of cigarette transparent packaging defect based on judgment method of suspected target region

LI Li<sup>1,2</sup>, HUANG Yu-yan<sup>2</sup>, QIAO Xi-hua<sup>2</sup>, WANG Yong-hua<sup>2</sup>

(1. Nanyang Cigarette Factory, China Tobacco He'nan Industry Co., Ltd., Nanyang 473000, China;

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

**Abstract:** Aiming at the problem of GD, BE and other mainstream cigarette packaging machines missing the function of defect detection and defect elimination, a set of detection device was designed based on judgment method of suspected target region. By measuring height of the cigarette case surface and simulation information dynamic calculation of detection information, and the cigarette products quality judgment was realized. The detection device had the advantages of simple installation, convenient adjustment, reliable performance. It could effectively reduce the false detection caused by the mechanical vibration and effectively improve the quality of cigarette packaging.

**Key words:** packing machine; transparent paper packaging; suspected determination; defect detection

## 0 引言

出现散包质量问题, 属于C类质量缺陷<sup>[1]</sup>, 必须在生产过程中予以剔除. 现阶段GD, BE等主流卷烟包装机对上述问题缺失缺陷检测和次品剔除功能:

在卷烟小盒透明包装生产过程中, 盒外透明纸

**收稿日期:** 2013-11-21

**作者简介:** 李力(1982—), 男, 河南省南阳市人, 南阳卷烟厂助理工程师、设备诊断师, 主要研究方向为卷包设备管理、工业控制与自动化.

**通信作者:** 王永华(1963—), 男, 河北省武安市人, 郑州轻工业学院教授, 主要研究方向为先进工业自动化技术集成、信息化工业测控电器与系统、工业控制网络与系统.

包装机设备生产率为400~450包/min,仅依靠人工检测,其速度不能满足生产要求.因此,增强包装机的散包检测与剔除功能十分必要.本文拟用基于疑似目标区域判定方法解决该问题.

## 1 质量缺陷产生过程

GD, BE等包装机组的小盒透明纸包装机,其输送的设计速度在400包/min以上.在小盒透明包装工序中,透明纸在转塔中包裹住小盒,经烙铁热封后进入输出通道,进行二次加热使透明纸收缩,合格品进入下道工序,不合格品直接剔除<sup>[2]</sup>,工序流程见图1.

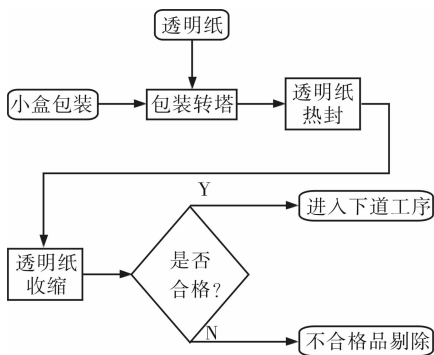


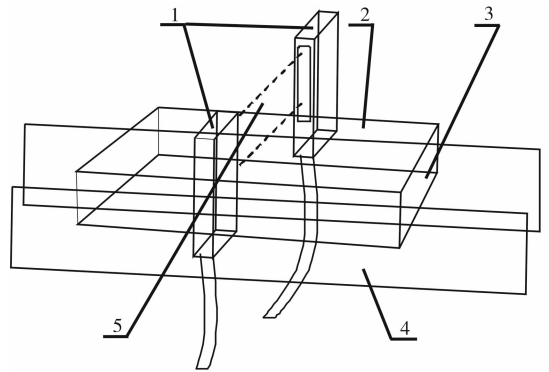
图1 透明纸包装成型工序图

散包的形成原因主要有2类:1)透明纸自身质量问题.由于原辅材料由多家供应商提供,材料仓储时间不一,透明纸残留静电不一致,在传送过程中造成透明纸粘连、折皱.2)机械调整问题.各传送轮张力调节不均匀,纸张在输送过程中受到轴向力的影响而中间鼓起,在进行包装时,鼓起无法消除,引起纸张出现折皱<sup>[3]</sup>.以上两类原因均属于技术性因素,无法在原生产条件下解决,因此只能对缺陷产品剔除以保证产品质量.

## 2 缺陷检测原理

由于折皱、散包,表面透明纸会出现与合格烟包不同的高度差,通过检测烟盒表面的高度,可对缺陷烟包进行判定.在小盒透明包装机顶升装置出口两侧安装对射式区域检测光纤传感器,该位置纵向移动量为0mm,抗干扰性强,可利用的检测角度为10~20°,能够对表面高度为0.5mm以上的烟包类型进行检测.对射式光纤传感器的安装示意图如图2所示.当小盒表面高度<3mm时,判定为合格产品;当高度>5mm时,判定为缺陷产品;当高度为

3~5mm时,进行疑似目标区域判定,对连续检测数值作动态计算:计算结果若仍然>5mm,则判定为缺陷产品;当高度≤5mm,判定为机械抖动或传感器信号干扰,如果多次处于该状态,设备将停机并报警.为适应不同工作环境影响,5mm的判定标准可在灵敏度设置中进行调整.



1. 区域检测对射式光纤传感器 2. 透明纸  
3. 小盒卷烟 4. 安装支架 5. 检测区域

图2 光纤传感器安装示意图

## 3 检测装置

选用带区域检测功能的光纤传感器(模拟量信号输出)作为检测元件,控制装置包括S7-200 PLC和工业触摸屏,如原机预留有总线接口,可采用总线控制技术<sup>[4]</sup>,加入原机工业控制网络.包装机主轴编码器角度信号输入至PLC中,当小盒卷烟经过光纤传感器时,记录编码器的开始角度及结束角度;当处于检测角度区间时,PLC对光纤传感器输入的模拟量数据进行计算;当判定为缺陷烟包时,缺陷烟包进入原机手动剔除窗口,触发剔除信号,完成剔除动作.

人机界面通过西门子PPI协议或自由口通信协议与PLC进行通信<sup>[5]</sup>,设置显示剔除开关、检测角度设置、剔除角度设置、移位步数设置以及好坏烟包统计等功能.剔除开关可手动关闭剔除功能、检测角度设置小盒卷烟通过传感器的开始及结束角度、剔除角度设置缺陷烟包位于剔除窗口时的角度、移位步数设置检测窗口与剔除窗口相隔的烟包数.

## 4 疑似目标区域判定处理方法

参考PLC模拟量输入量化方法<sup>[6]</sup>,光纤高度检



测传感器量程为 0 ~ 10 mm, 输出信号为 0 ~ 10 V, 模拟量输入模块的量程为 0 ~ 10 V, 转换后的数字量为 0 ~ 27 648, 模拟量输入模块输入通道为  $AIW_0$ . 则透明纸表面高度

$$H = 10 \times AIW_0 / 27\ 648 \quad (1)$$

式中,  $H$  为透明纸表面高度/mm,  $AIW_0$  为 PLC 模拟量输入值/mm.

根据①式将输入的模拟量信号转换为具体的高度值. 在实际生产中, 由于机械振动等因素,  $AIW_0$  的后 3 位数字会无规律波动, 不可避免会影响到检测精度. 要解决此问题, 需要对高度检测算法进行二次优化, 进一步保持模拟量输入的的稳定状况. 在检测窗口区从  $AIW_0$  取输入值, 采集 10 次数值, 求出多次采样的极差, 再进行高度换算. 由于 S7 - 200 PLC 的指令处理较快, 模数转换时间短, 且模拟量读数灵敏度较高<sup>[7]</sup>, 与 400 包/min 的机速相比, 可以采用多次采样的极差方法来处理输入值. 极差是总体各单位的标志值中最大标志值与最小标志值之差. 极差越大, 薄膜表面离散程度越大; 反之, 离散程度越小.

举例来说, 10 次采样值如下: 16 848, 16 832, 16 808, 16 840, 16 864, 16 856, 16 872, 16 880, 16 824, 16 848. 根据如下公式

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

式中,  $R$  为极差数值,  $X_{\max}$  为采样值最大值,  $X_{\min}$  为采样值最小值.

最大值 16 880 与最小值 16 808 之极差为 72, 求极差后放到变量存储区中, 每次读取时间为 ms 级, 符合设备运行要求. 经过极差处理后, 当  $AIW_0$  中的值在后 2 位跳变时, 经处理后的模拟量数值只是个位在跳变, 且是逐个跳变. 调试结果表明, 采集数

据稳定性又提高了一个数量级, 因此可以更加准确地排除机械抖动等因素造成的误检, 保证检测精度.

## 5 应用效果

GD, BE 等包装机组安装本套检测装置后, 可在包装机不停机的情况下准确检测剔除透明纸散包、严重折皱等类型缺陷产品. 通过现场测试, 散包及 3 mm 以上透明纸折皱质量缺陷检测准确率为 94% 以上. 对安装前 2013 年 1—3 月份及安装后 2013 年 5—7 月份每班缺陷反馈进行统计, 散包类型质量缺陷由安装前的平均每班 8 ~ 10 包减少为 0 包. 该检测装置安装方便, 可实现自动调整, 维护量小, 降低了人员劳动强度, 对提高设备的加工能力提供了保障.

### 参考文献:

- [1] GB 5606.3—2005, 卷烟·第 3 部分: 包装、卷制技术要求及贮运[S].
- [2] 黄德良, 杨文雷, 刘蔚业. ZB25 型包装机组[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [3] 王向伟, 迟车仁. GDX2 香烟包装机盒包薄膜平整度影响因素的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 56.
- [4] 王永华, Vermer A. 现场总线技术及应用教程[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 88 - 92.
- [5] 刘强, 罗中良. S7 - 200 系列的 PLC 自由端口通信编程方法[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2005, 20(2): 71.
- [6] 廖常初. S7 - 300/400PL 应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 34 - 35.
- [7] 廖常初. PLC 编程及应用[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.

# 基于核酸适体生物传感器的 便携式循环伏安测试系统

姜利英, 胡杰, 陈青华, 王芬芬, 岳保磊

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对现场电化学测试中电化学工作站携带不便、供电困难等问题,设计了一种基于核酸适体生物传感器的便携式循环伏安测试系统.该系统采用实验室研发制备的核酸适体生物传感器设计了锁定放大电路、恒电位电路及相敏检测程序,可实现微弱信号提取,从而有效克服电路系统噪声.实验结果表明,该系统能实现循环伏安测试,具有较高的信噪比,测试精度达到 $1\ \mu\text{A}$ ,省电、操作简单,能够满足现场快速准确地进行循环伏安测试的需要.

**关键词:**核酸适体生物传感器;循环伏安测试系统;锁定放大电路;恒电位电路

**中图分类号:**TP216 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.011

## A portable cyclic voltammetry measurement system based on aptamer-based biosensor

JIANG Li-ying, HU Jie, CHEN Qing-hua, WANG Fen-fen, YUE Bao-lei

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

**Abstract:** Aiming at the problem of inconvenience to carry and difficulty with power in-field electrochemical measurement, a portable cyclic voltammetry measurement system was designed based on aptamer-based biosensor developed by our laboratory. For overcoming the noise in the circuits effectively, a lock-in amplifier, potentiostat and program for phase sensitive detection were designed to extract weak signal. Experiment results showed that the system could implement cyclic voltammetry, which had higher SNR (signal noise ratio), the measurement precision of which could reach  $1\ \mu\text{A}$ . It had features of power saving, and simple operation, which could meet the requirement of in-field cyclic voltammetry measurement.

**Key words:** aptamer-based biosensor; cyclic voltammetry measurement system; lock-in amplifier; potentiostat

## 0 引言

核酸适体是通过生物技术筛选出来,能与目标分子进行特异性结合、具有识别作用的功能化 DNA

或者 RNA 寡核苷酸序列,它具有亲和力强、选择性强、稳定性好、易于修饰等优点,被广泛应用于目标物为蛋白质、小分子等的灵敏度检测.近年来,随着电化学技术的发展,基于核酸适体的电化学传感器

收稿日期:2014-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(61002007);河南省科技创新人才计划项目(124100510001)

作者简介:姜利英(1981—),女,河南省郾城市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为生物传感器及检测微系统.

广泛应用于基因诊断、药物检测、环境监测、食品工业、药物筛选等领域,对此类传感器的设计成为研究热点.循环伏安法是一种重要的电化学测试方法,有电化学谱之称,已经广泛应用于无机物和有机物电极过程的研究,以及高分子化学和生物化学中多电子传递过程的表征.它的基本方法是将三角波电压施加在电极上,通过测量电极上流出的电流,记录不同时刻的电压和电流值,并绘出一条  $V-I$  曲线.目前在实验室进行循环伏安测试普遍使用电化学工作站,这是一种大型多功能电化学测试系统,在实验室中进行各种电化学实验和研究非常方便高效,但在野外考察及现场取样研究中,电化学工作站存在携带不便、供电困难等问题.鉴于此,本文拟结合核酸适体生物传感器的研究进展,针对现场循环伏安检测的需要,以单片机 STC12C5A32S2 为主控芯片,以 HD240128 为显示器,设计一种基于核酸适体生物传感器的便携式循环伏安测试系统,以实现现场循环伏安测试功能.

## 1 核酸适体生物传感器原理

核酸适体生物传感器由生物识别单元和转换器单元构成,生物识别单元的主要部分是核酸适体,它与目标分析物相互作用使溶液组分发生变化,转换器把溶液组分的变化信息转换成定量的电子信号.核酸适体能与目标分子进行特异性结合,因此搭建电子测量系统来提取核酸适体传感器的信息,能对待测物质进行准确的定性定量检测.笔者所在实验室研究了核酸适体传感器电极的设计加工技术,提出利用薄膜技术在绝缘基材上小批量制备电极等方法<sup>[1]</sup>.本文利用实验室开发制备的核酸适体生物传感器,设计便携式循环伏安测试系统.

## 2 测试系统设计

测试系统主要由核酸适体生物传感器、恒电位电路、电流取样电路、锁定放大电路和液晶显示器等组成,框图如图 1 所示. STC 单片机配合 RC 低通电路和电平变换电路生成三角波电压循环施加在核酸适体生物传感器的电极上,通过恒电位电路建立稳定的电势参考点,电流取样电路取出电极上的电流信号,使用锁定放大电路去除信号中的噪声,经 AD 转换后送入单片机,单片机把数字化的激励电压值和电流值组成点的坐标,在液晶显示器上实时绘出循环伏安曲线<sup>[2-3]</sup>.

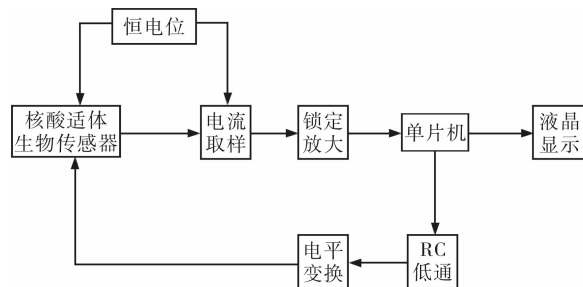


图 1 系统框图

### 2.1 基于三电极的恒电位电路及电流取样电路

**2.1.1 三电极体系** 本文采用三电极电化学测量体系,即在工作电极和辅助电极的基础上,附加一个参比电极.工作电极是作为研究对象的电极,研究其上的反应、电流变化等,辅助电极是给工作电极做电流回路而设置的,参比电极为激励电压提供一个稳定的电势参考点.当激励电压施加于工作电极和辅助电极之间时,电极和溶液之间的化学反应导致 2 个电极之间的实际电压并不等于激励电压.故让激励施加在工作电极和参比电极之间,而不直接施加到工作电极和辅助电极之间,通过设计恒电位电路,让工作电极和参比电极之间的电压严格等于施加的激励电压,然后测量从工作电极和辅助电极流出的电流,以保证循环伏安测试是准确的<sup>[4]</sup>.

**2.1.2 恒电位电路及电流取样电路** 恒电位电路和电流取样电路如图 2 所示,运放  $OP_1$  和  $OP_2$  构成恒电位电路,运放  $OP_3$  构成电流取样电路.由于溶液并不是完全绝缘的,其阻抗为  $M\Omega$  级别,而激励电压的存在会导致溶液发生化学反应而使阻抗发生变化.在工作电极 WE 与参比电极 RE 之间,以及参比电极 RE 与辅助电极 CE 之间都用一个可变电阻  $R_p$  来等效,在运放  $OP_1$  的反向端加入激励电压  $U_{in}$ ,使  $OP_1, OP_2$  2 个运放工作,  $OP_1$  接成反向比例放大器,并让反馈电阻和输入电阻相等,则有

$$U_a = -U_{in}$$

$OP_1$  的反馈回路上的  $OP_2$  起到了电压跟随器的作用,由此得出

$$U_{RE} = U_a$$

即

$$U_{RE} = -U_{in}$$

$OP_3$  是电流取样电路,由于后面还要对信号做锁定放大,而且取样电阻过大会导致热噪声严重,所以此处取样电阻选取较小,使用  $100\ \Omega$  的金属膜电阻.该电路输出信号为

$$U_o = -100I$$

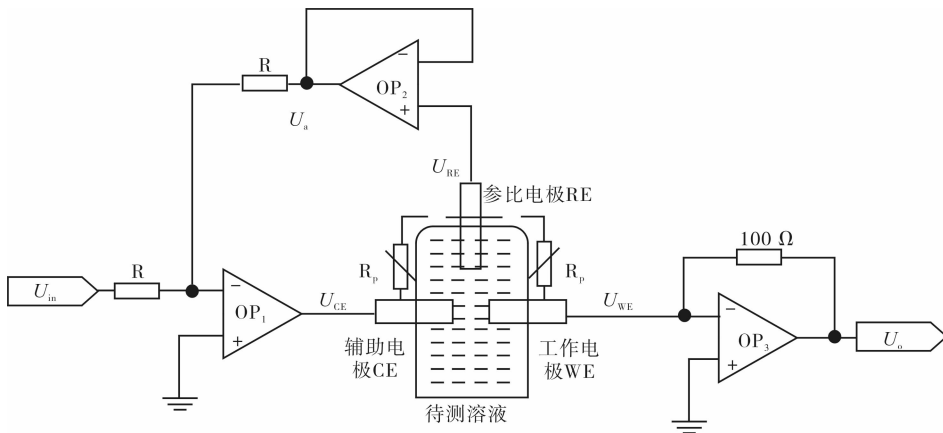


图 2 恒电位电路和电流取样电路

同时由于 OP<sub>3</sub> 的同相端和反向端虚地, 所以

$$U_{WE} = 0$$

$$U_{WE} - U_{RE} = -U_{RE} = U_{in}$$

即工作电极与参比电极之间的电压严格等于施加的激励电压, 从而实现恒电位功能. 采用 SGOP77 超低失调电压运算放大器搭建恒电位系统, 其最大输入失调电压仅 25 μV, 输入失调电流仅 0.3 nA. 经实验证明, 激励电压在 -3.00 ~ 3.00 V 范围变化时, 工作电极与参比电极之间电压跟激励电压相差不超过 0.01 V.

## 2.2 锁定放大电路

**2.2.1 锁定放大法原理** 锁定放大过程即用调制器将待测微弱直流或缓变信号变换成高频交流信号, 对其放大后再解调恢复出原始信号. 该过程滤除了原信号中的低频噪声 (1/f 噪声), 同时避免了直流通道的直流漂移偏差. 锁定放大去噪原理如图 3 所示, 图中虚线是 1/f 噪声和白噪声的功率谱密度, 待测信号的频谱在直流 (ω = 0) 处, 其 1/f 噪声尤为显著, 利用调制将待测信号频谱搬移到高频后进行选频放大, 就不会将 1/f 噪声和低频漂移一同放大, 再用相敏解调器 (PSD) 将其频谱迁移回直流 (ω = 0) 处, 最终用低通滤波器 (LPF) 滤除噪声, 得到高信噪比的放大信号. 锁定放大器框图如图 4 所示, 其核心是相敏解调器<sup>[5]</sup>. 相敏解调器由乘法器 (鉴相器) 和低通滤波器构成, 其原理框图如图 5 所示, x(t) 是调制和 AC 放大后的信号, r(t) 是载波信号.

若有

$$x(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \theta)$$

$$r(t) = V_r \cos(\omega_0 t)$$

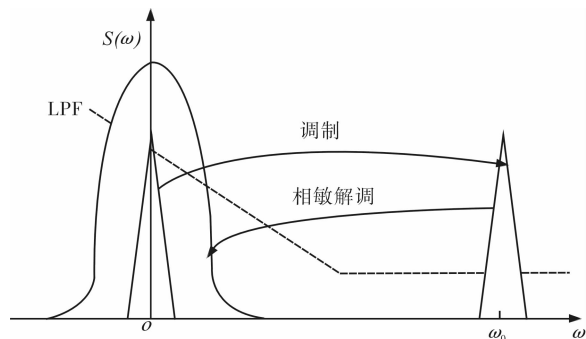


图 3 锁定放大去噪原理

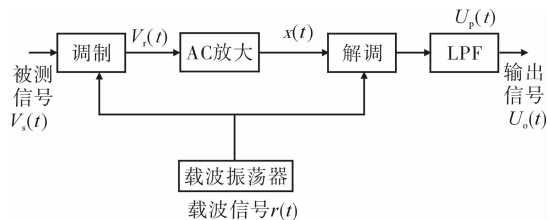


图 4 锁定放大器框图

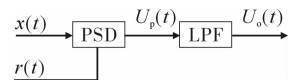


图 5 相敏解调原理框图

则经过鉴相器后的信号为

$$u_p(t) = x(t) \times r(t) =$$

$$0.5 V_s V_r \cos\theta + 0.5 V_s V_r \cos(2\omega_0 t + \theta)$$

该信号经低通滤波器后将和频分量滤除, 得到输出为

$$u_o = 0.5 V_s V_r \cos\theta$$

该输出不仅正比于待测信号的幅度, 而且正比于调制信号和参考信号的相位差, 在 θ = 0 时, 输出达到最大值, 并能恢复出待测信号, 其幅值为

$$V_s = 2 \frac{u_o}{V_r}$$

**2.2.2 电路设计** 实现锁定放大的主要电路如图6所示. 由AD9833和STC单片机构成的直接数字频率合成(DDS)正弦波信号发生器可以提供载波, 为避开低频( $1/f$ )噪声并兼顾带通滤波器MAX7490的中心频率范围(0.001 ~ 40 kHz), 选取该正弦载波频率为10 kHz. 模拟乘法器AD633将被测信号和该载波相乘, 实现调制功能, 再经MAX7490和SGOP77实现选频放大, 由AD633再次和载波相乘实现相干解调, 输出经8阶开关电容椭圆低通滤波器MAX7400得到放大的高信噪比被测信号. 由于用乘法器AD633而不是专用的相位检测器来进行解调, 所以还需要对解调得到的信号进行软件处理才能最终实现相敏解调. 从MAX7400得到的信号送入STC单片机的AD输入口( $P_{1.7}$ )形成数据, 经软件处理后找出相位差为0的待测信号值, 最终实现相敏检波功能.

图6中左侧AD633将待测信号频谱的中心频率搬移到10 kHz处, MAX7490是4阶开关电容滤波器, 它被设置成带通滤波器的形式, 带通滤波的中心频率取决于其外部时钟频率, 两者关系为

$$\text{中心频率} = \text{时钟频率} / 100$$

故选取1 MHz有源晶振接在AD9833的MCLK输入管脚上, 得到带通滤波中心频率为

$$f_0 = 1M / 100 = 10 \text{ kHz}$$

从而选出需要放大的信号. 右侧AD633将放大后的调制信号频谱搬移回直流处, 经MAX7400进一

步提高信噪比, MAX7400能实现的低通滤波截止频率范围是1 ~ 10 kHz, 与MAX7490类似, 其截止频率 $f_c$ 由时钟CLK决定, 即

$$f_c = \frac{clk}{100} \quad (1)$$

当CLK管脚接外部有源晶振时, MAX7400使用外部时钟源; 当CLK管脚通过电容接地时, MAX7400使用内部时钟源, 振荡频率 $clk$ 由电容 $C$ /pF的大小决定:

$$clk = \frac{38 \times 10^3}{C} \quad (2)$$

文中使用内部时钟源, 取 $C = 10 \text{ pF}$ , 由(1)(2)两式得

$$f_c = 38 \text{ Hz}$$

该截止频率能较好地滤除调制和解调过程中引入的高频噪声, 锁定待测信号频带, 得到的信号经AD转换后送入单片机做软件处理, 判断出相位零点, 并还原出真正的待测信号值.

## 2.3 软件设计

**2.3.1 系统软件结构** 单片机控制整个工作流程, 并负责生成三角波和处理采样数据以实现相敏解调, 正弦载波和AD转换都通过配置专用芯片或专用寄存器得到<sup>[6]</sup>. 系统软件流程如图7所示.

**2.3.2 相敏解调的软件实现** 由前述相敏解调原理可知, 调制信号和载波相位差等于0时, 解调得到的信号达到最大值. 通过程序控制, 在每个载波周期内采样锁定放大器的输出信号, 得到大量数据, 程序通过比较算法找出这些数据在该载波周期内

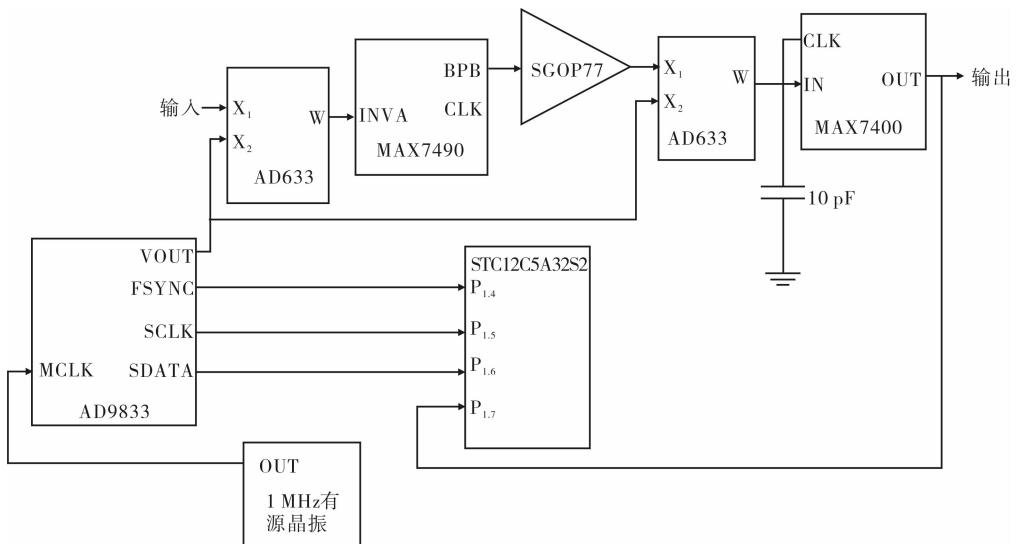


图6 锁定放大电路

的最大值,再依据取样电路和锁定放大电路中运放的总放大倍数,即可换算出待测电流值,实现相敏解调.相敏解调软件流程与比较算法流程如图8所示.

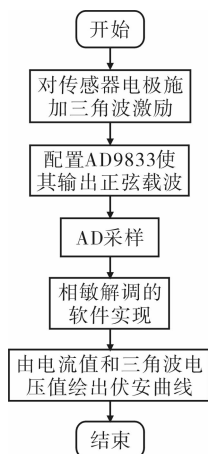


图7 系统软件流程图

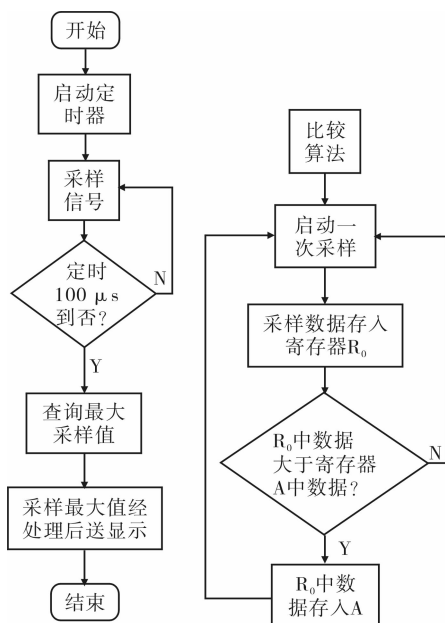


图8 相敏解调软件与比较算法流程图

**2.3.3 三角波、正弦载波和实时显示** 三角波是通过设置STC单片机的脉冲宽度调制(PWM)功能寄存器生成一定占空比的PWM脉冲波形,通过占空比延时循环改变让该PWM波经RC低通滤波器和比例运放得到的.比例运放的同相端接1V恒定电压,构成电平变换器,让三角波可以双向电位扫描.改变延时可以改变扫描速度,改变占空比大小可以改变电压幅度.

通过配置DDS芯片AD9833的频率寄存器可生

成10 kHz的正弦载波,AD9833与单片机之间使用串行外设接口(SPI)总线协议进行通信,其频率控制字计算公式为

$$M = f_{\text{out}} \times 2^{28} / f_{\text{CLK}} \quad (3)$$

文中外部时钟频率是1 MHz,需要输出10 kHz正弦波,代入③式计算出频率控制字为28F5C2,将其按照先低14位、再高14位的顺序写入AD9833的频率寄存器,并设置控制寄存器的模式位使其输出正弦波即可.编写程序时注意SPI协议对通信时序的约束.

使用T6963控制器的液晶显示器HD240128制伏安曲线,T6963是按照字节(8个像素点)来分配地址的,每个地址控制8个像素点,所以只能直接操作8点的像素集合而不能直接操作单独的像素点,需要先设计一个画点函数,以实现像素点的任意操作.为适应HD240128的屏幕大小,还需将测量数据缩小一定倍数再予以显示<sup>[7]</sup>.

## 3 系统验证

### 3.1 锁定放大性能测试

采用实验室制备的核酸适体生物传感器,在其电极上滴加50 mmol/L的铁氰化钾溶液进行循环伏安测试,并设置三角波扫描范围是-0.5~0.4 V,初始电位是-0.5 V,扫描速度为0.05 V/s,扫描段数是2.

通过在电路板上设置跳线以及改写相应的处理程序,让信号分别经过普通放大电路和锁定放大电路,并让两者放大倍数相同,分别测试使用2种放大电路的结果如图9所示.由图9可见,使用锁定放大电路及软件相敏解调后,系统较好地抑制了低频噪声和电阻热噪声,信噪比相对于普通放大电路提高了10 dB左右,说明较为准确地提取出了待测信号.

### 3.2 本系统和电化学工作站循环伏安测试曲线的对比

使用相同的核酸适体传感器,并设置三角波扫描范围是-0.5~0.4 V,初始电位是-0.5 V,扫描速度为0.05 V/s,扫描段数是2.在电极上滴加50 mmol/L的 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 溶液,分别用本系统和电化学工作站CHI660进行循环伏安测试.清洗电极后,滴加25 mmol/L  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 溶液,再分别用2种系统进行循环伏安测试,结果如图10所示.

由图10可知,该系统相较于CHI660电化学工作站在抗噪性能上还是有一定差距的,以CHI660为

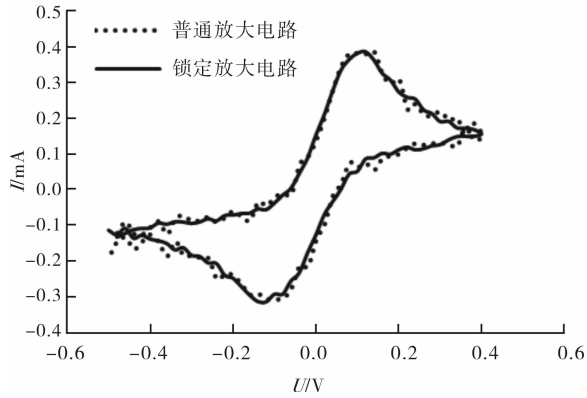


图9 锁定放大电路和普通放大电路测试结果对比

标准数据,本系统数据的平均相对误差小于1%,平均绝对误差小于 $1 \mu\text{A}$ ,而CHI660的精度是 $1 \text{ pA}$ ,远小于 $1 \mu\text{A}$ ,故本系统的测试精度在 $1 \mu\text{A}$ 以内。

由 $25 \text{ mmol/L}$ 和 $50 \text{ mmol/L}$ 溶液的测试曲线对比可以看出,该系统虽然信噪比和测试精度低于电化学工作站,但也能较为准确地反映出循环伏安曲

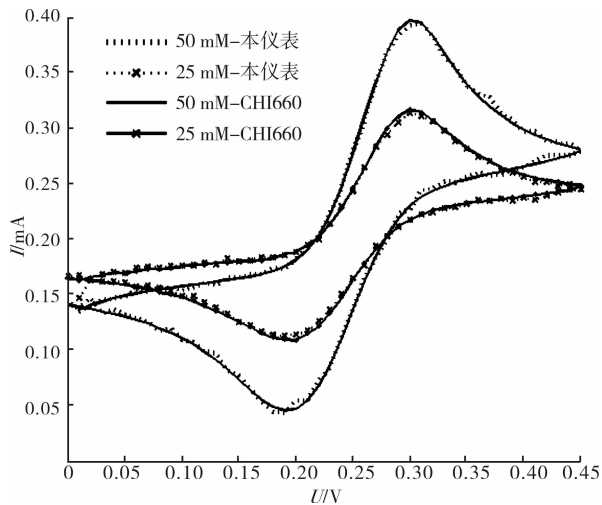


图10 本系统和CHI660电化学工作站测试结果对比

线的峰值随溶液浓度变化的情况.借助核酸适体生物传感器,对于科研人员现场分析特定物质的浓度有一定意义。

## 4 结论

本文针对现场电化学测试中电化学工作站携带不便、供电困难等问题,设计了一种基于核酸适体生物传感器的便携式循环伏安测试系统.经过反复实验,证明该系统可以快速、准确地实现循环伏安测试,且具有较高的信噪比,测试精度达到 $1 \mu\text{A}$ ,配合核酸适体生物传感器可以分析不同浓度溶液的循环伏安曲线,轻便省电.该系统在环境考察和现场电化学检测中具有明显的优势和很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 刘腾飞,杨代凤,邓金花,等.核酸适体的筛选制备及分析应用[J].生物技术通报,2013(4):40.
- [2] 罗兰英,田学隆,周平,等.心电电极除颤过载恢复性能测试系统[J].仪器仪表学报,2011,32(9):1982.
- [3] 冯巧玲,裴永占.电子式电流互感器数据采集系统的设计[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(3):83.
- [4] 朱健铭,陈真诚,金星亮,等.基于DSP技术的便携式无创血糖检测仪[J].电子测量与仪器学报,2009,23(6):108.
- [5] 姚毓升,解永平,文涛.三电极电化学传感器的恒电位仪设计[J].仪表技术与传感器,2009(9):23.
- [6] 王俊.电化学分析系统中 $\text{pA} \sim \mu\text{A}$ 微电流测量[J].电子测量与仪器学报,2011,25(11):972.
- [7] 马忠梅.单片机的C语言应用程序设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.

# 积分滑模变结构双馈风力发电机控制

金博, 邱道尹

(华北水利水电大学 电力学院, 河南 郑州 450045)

**摘要:**针对电网故障对双馈风力发电机网侧变换器的影响,采用滑模变结构控制方法,提出了增加功率前馈补偿的积分滑模变结构控制策略.该策略根据网侧变换器的数学模型,通过对网侧变换器采用电网电压定向矢量的控制,实现交流侧单位功率因数和直流环节电压控制.仿真结果表明,该策略提高了系统响应速度,克服了参数变化和外电压波动的影响.

**关键词:**双馈风力发电机;变换器控制;前馈控制;积分滑模变结构控制

**中图分类号:**TK83   **文献标志码:**A   **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.012

## Integral sliding mode current control for double-fed wind power generator

JIN Bo, QIU Dao-yin

(Institute of Electric Power, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** In view of the influence of fault on the grid of double-fed wind power generator for grid side converter, using sliding mode variable structure control method, integral sliding mode variable structure control strategy was put forward to increase power feedforward compensation. According to the mathematical model of grid side converter, the control of the grid side converter used voltage oriented vector to realize the unity-power-factor for the alternating current side and the voltage control in the DC loop. Simulation results showed that this method improved the response speed of the system, overcame the effect and the voltage variable parameter.

**Key words:** double-fed wind power generator (DFIG); converter control; forward feedback control; integral sliding mode control (SMC)

## 0 引言

风能是一种无污染可替代的能源,利用风力发电可以减少环境污染,节省煤炭、石油等常规能源,在一定程度上推动着世界经济的持续发展.变速恒频双馈感应发电机(VSCF-DFIG)采用当今风力发电行业的前沿技术,具有变流器容量小、有功无功独立调节、柔性并网等优点,已成为目前兆瓦级变速恒频风力发电系统的主流机型<sup>[1]</sup>.

在DFIG变速恒频风力发电系统中,变换器是一个关键环节,三相电压型交流-直流-交流双向脉宽调制PWM(pulse width modulation)变换器具有很好的传输性能,可以调节直流母线电压,实现双向能量流动,还可以任意调节功率因数,具有网侧电流谐波小的特性,在双馈风力发电系统中应用广泛<sup>[2]</sup>.传统的用增大交流-直流-交流变换器中滤波电容容量的方法来稳定直流母线电压,在现实的大功率风力发电中是不可取的.因为相比系统中其

收稿日期:2013-11-27

作者简介:金博(1989—),女,河南省南阳市人,华北水利水电大学硕士研究生,主要研究方向为模式识别与智能控制.

通信作者:邱道尹(1961—),男,江苏省丹阳市人,华北水利水电大学教授,主要研究方向为图像识别与智能控制.



他元器件,大容量电解电容的寿命要短几个数量级.文献[3]以动态功率平衡为出发点,采用电压前馈补偿的方法来进一步提高母线抗扰动的能力.鉴于控制系统复杂的结构,此种方法的实用性有待进一步提高.为实现可靠解耦,文献[4-5]提出了采用滑模控制代替常规的PI控制,这种方法不仅控制简单,而且容易实现,还可以获得优良的动、静态性能.鉴于此,本文拟在给出网侧变换器主电路,对其施加基于 $d$ 轴电网电压定向的DFIG矢量控制的基础上,采用增加功率前馈补偿的积分滑模变结构的控制策略,并与PI控制进行比较,以期达到更好的控制效果.

### 1 网侧变换器系统及控制

双馈风力发电机原理如图1所示.

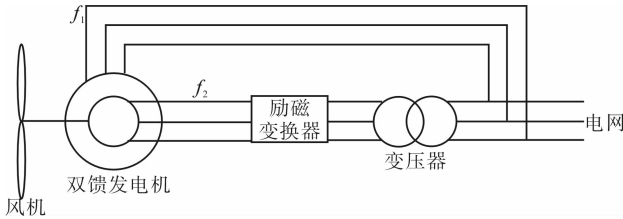


图1 变速恒频双馈异步发电机原理图

图中 $f_1$ 为定子输出频率, $f_2$ 为励磁电流频率.为实现发电机的有功、无功功率的解耦控制,鉴于双馈发电机在三相坐标系下的数学模型是一个时变、非线性、强耦合系统<sup>[6]</sup>,所以,建立同步旋转坐标系下的双馈电机数学模型,并且采用基于 $d$ 轴电网电压定向的矢量控制技术<sup>[7]</sup>非常重要.

#### 1.1 网侧变换器数学模型

图1中励磁变换器网侧PWM型变换器的主电路如图2所示.

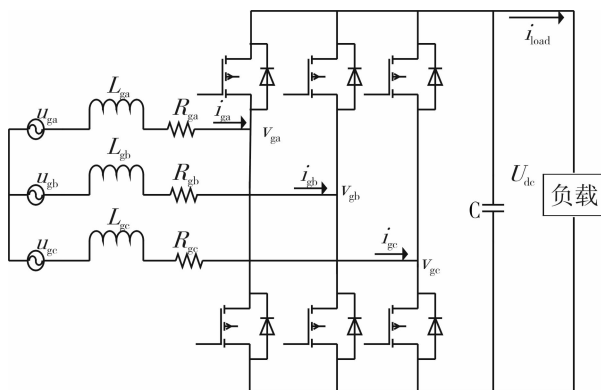


图2 网侧PWM变换器的主电路

图2中,三相输入电流分别为 $i_{ga}, i_{gb}, i_{gc}$ ;三相电网的相电压分别为 $u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}$ ;变化器交流侧的三相电压分别为 $v_{ga}, v_{gb}, v_{gc}$ ;变化器直流侧电压为 $U_{dc}$ ;直流侧母线电容为 $C$ ;直流侧负载电流为 $i_{load}$ .主电路中的每相进线电抗器的电感分别为 $L_{ga}, L_{gb}, L_{gc}$ ;每相线路(包括电抗器)电阻分别为 $R_{ga}, R_{gb}, R_{gc}$ .网侧变换器通过转子绕组与转子侧相连的变换器用负载来替代.

#### 1.2 基于 $d$ 轴电网电压定向的DFIG矢量控制系统

由图2可知,经过3转2坐标变换,在 $d-q$ 轴坐标系中,通过改变 $i_d$ 可实现对直流环节电压的控制, $d$ 轴电流分量参考值 $i_d^*$ 反应了直流环节电压的大小.当输入、输出功率达到平衡时, $i_d^*$ 趋于稳定.通过控制 $q$ 轴电流分量 $i_q$ 可以控制网侧变换器对于无功功率的吸收<sup>[8]</sup>.为了提高网侧电流的响应速度,减小直流母线电压的波动,笔者在传统PI控制的基础上,电流内环采用积分滑模变结构控制策略(见图3),电压外环采用PI的双闭环控制方式<sup>[9]</sup>.

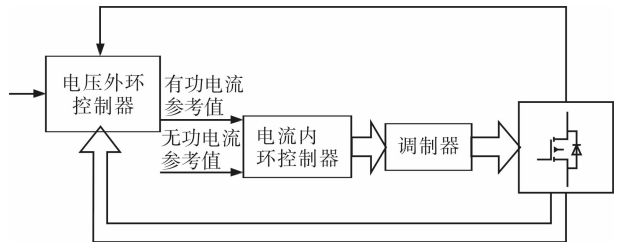


图3 网侧变换器双闭环控制结构示意图

基于电网电压定向的矢量控制原理是将同步速旋转坐标系内的 $d$ 轴定向于电网电压矢量 $u_s$ 方向<sup>[10]</sup>,则电网电压的 $d, q$ 分量可分别表示为 $\begin{cases} u_d = u_s \\ u_q = 0 \end{cases}$ ,其中 $u_s$ 为电网电压相量的幅值,令电网电压矢量 $U_g = u_{gd} + ju_{gq}$ ,当坐标系的 $d$ 轴定向于电网电压矢量时,则有 $u_{gd} = |U_g| = U_g, u_{gq} = 0$ ,其中 $u_g$ 为电网相电压幅值,故

$$\begin{cases} L_g \frac{di_{gd}}{dt} = R_g i_{gd} - U_g - \omega_1 L_g i_{gq} + v_{gd} \\ L_g \frac{di_{gq}}{dt} = -R_g i_{gq} - \omega_1 L_g i_{gd} - v_{gq} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_{gd} + S_q i_{gq}) - i_{load} \end{cases} \quad (1)$$

## 2 积分滑模变结构控制系统设计

传统的矢量控制是基于同步旋转坐标  $d, q$  轴, 并分别对电流进行双闭环控制, 将交叉耦合项作为前馈的补偿项<sup>[11]</sup>. 本文对转子同步旋转坐标系的  $d, q$  轴分别设计基于积分滑模变结构控制(SMC)的电流内环控制器<sup>[10]</sup>, 将在电流内环 SMC 控制器加上的持续扰动  $\Delta u_{gd}, \Delta u_{gq}$  作为前馈补偿量, 以降低 SMC 设计的复杂性, 将多输入、多输出对象降阶为 2 个一阶系统<sup>[12]</sup>:

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + (L_r - L_m^2/L_s) (di_{dr}/dt)$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + (L_r - L_m^2/L_s) (di_{qr}/dt)$$

双馈式风力发电机 SMC 控制系统如图 4 所示.

针对同步旋转坐标系下  $d, q$  轴电流内环滑模控制器设计方案一致的原理, 以转子电流  $q$  轴 SMC 的设计为例进行研究, 依据前馈式补偿原理, 以  $u_{qr}$  作为输入变量,  $i_{qr}$  作为状态变量, 在电流内环加上前馈干扰项  $\Delta u_{qr}$ , 将针对控制对象的方程①转化为一阶状态空间表达式

$$di_{qr}/dt = (-R_r/\sigma) i_{qr} + (1/\sigma) u_{qr} + (-\Delta u_{qr}/\sigma) \quad ②$$

其中, 漏磁系数  $\sigma = L_r - L_m^2/L_s$ .

网侧控制的目标是维持母线电压的稳定, 电流内环的控制目标是使电流的实际值尽量维持在电流给定值附近, 并尽量使其误差很小. 定义电流跟踪误差为

$$e(t) = i_{qr}(t) - i_{qr}^*(t) \quad ③$$

式中,  $i_{qr}^*$  是给定的参考电流值.

SMC 控制抖振现象的存在, 大大降低了系统控制精度和稳定性. 基于此, 本文在传统的滑模控制中引入了积分滑模变结构控制来解决上述问题<sup>[2]</sup>.

将电流跟踪误差积分, 并将其积分部分增加到原始的滑模面切换函数中, 即

$$s(t) = e(t) + c \int_0^t e(t) \quad ④$$

其中,  $s$  为滑模面的切换函数,  $c > 0$ .

滑模控制设计主要包括滑模面的设计与控制律的设计. 本文采用指数趋近率的办法加以控制<sup>[13]</sup>, 来保证状态变量在趋近于滑模面时的动态性能指标, 即在式

$$ds/dt = -\beta \text{sign}[s] - ks \quad \beta > 0, k > 0$$

中同时增大  $k$  和减小  $\beta$ , 可以减轻在趋近滑模面时所引起的抖振现象. 将式 ②③④ 联立, 可得

$$(di_{qr}/dt) + c(i_{qr} - i_{qr}^*) = -\beta \text{sign}[s] - ks$$

变结构控制(VSC)是一种开关型控制<sup>[14]</sup>, 该控制策略的系统结构并不固定, 而是在动态过程中根据系统当前的状态(如偏差及其各阶导数等)有针对性地不断变化, 迫使系统按照预定滑动模态的状态轨迹运动. 消除抖振是需要解决的问题, 可采用边界层控制法, 通过控制边界层发展影响其结构, 从而控制边界层分离<sup>[15]</sup>. 当滑模面趋于稳定时, 即可减小甚至消除抖振. 边界层法需要设定一个边界层, 本研究以饱和函数  $\text{sat}[s]$  代替符号函数(开关函数)  $\text{sign}[s]$ , 这里

$$\text{sat}[s] = \begin{cases} s/\varepsilon & |s| \leq \varepsilon, \varepsilon < 0 \\ \text{sign}[s] & |s| > \varepsilon, \varepsilon > 0 \end{cases}$$

边界层厚度为  $[-\varepsilon, \varepsilon]$ , 当边界层厚度减小时, 可以看到, 虽然控制效果增强, 但振颤也相应增强<sup>[16]</sup>. 运用积分型切换函数可以消除边界层带来的变量稳态误差<sup>[17]</sup>. 因此, 当状态变量到达滑模面附近后, 可以采用等效控制来进行描述. 针对带有不确定性和

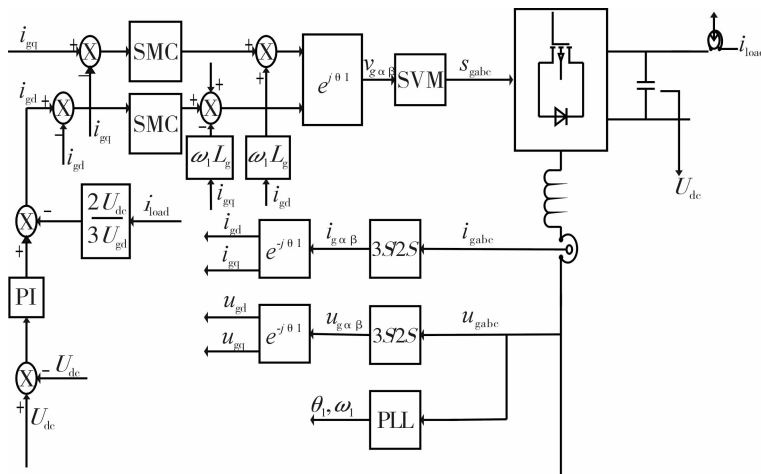


图 4 双馈式风力发电机 SMC 控制系统结构

外加干扰的系统,可采用上述基于指数趋近率的函数进行切换<sup>[18-19]</sup>.

### 3 仿真结果与分析

笔者对网侧变换器的整流和逆变状态分别进行了仿真,DFIG参数(绕组折算后)如下:额定功率为1 000 kW,定子额定电压为680 V/50 Hz,同步转速为1 000 r/min,极对数为3,  $R_1 = 0.38 \Omega$ ,  $R_2 = 0.31 \Omega$ ,  $L_1 = 0.04 \text{ H}$ ,  $L_2 = 0.038 \text{ H}$ ,  $L_m = 0.036 \text{ H}$ ,转动惯量为  $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ .

实验数据为:由于负载运行状态的变化,在0.5 s时变换器的状态由整流变为逆变.本文采用二阶微分估计器,参数为  $\alpha_0 = 8$ ,  $\alpha_1 = 15$ ,  $\alpha_2 = 2$ .图5和图6分别为交流侧与直流侧的电压和电流曲线.从图5可以看出,电压和电流相位角为0的时候,网侧变换器工作模式为整流;反之,当相位角相差  $180^\circ$  时,变换器工作模式为逆变.从图6可以看出,当变换器的状态发生变化时,采用积分滑模结构控制比PI控制效果更迅速,而且直流侧母线电压具有更强的鲁棒性.

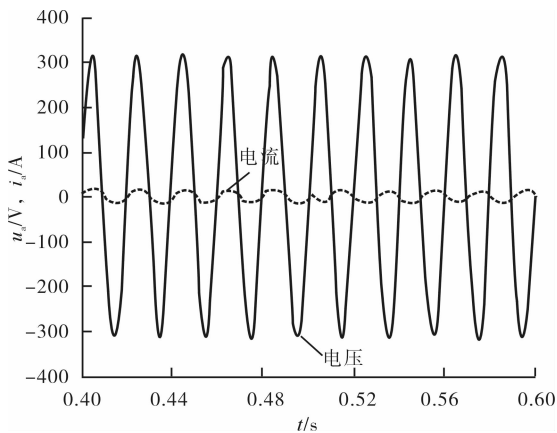


图5 交流侧电网电压与电流曲线图

电压扰动时直流母线电压和有功电流变化曲线分别如图7和图8所示.由图7和图8可知,电压波动下,积分滑模控制对其控制仿真过程如下:开始时系统稳定运行,交流侧输入电压在0.5 s时变化跌落14%,到0.5 s就立刻恢复到原来状态.可见,积分滑模控制与传统的PI控制相比,针对外部电压波动时具有更强的鲁棒性.

### 4 结论

本文采用滑模变结构控制方法,提出了增加功

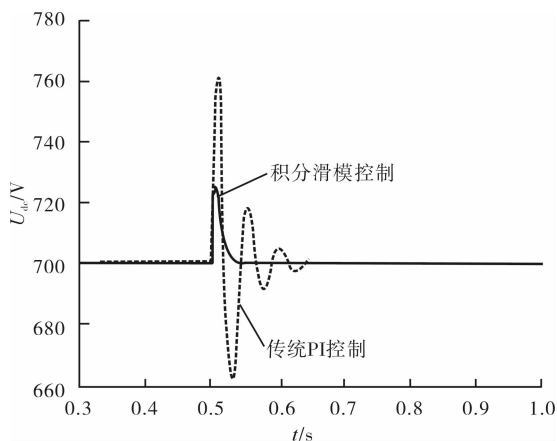


图6 直流母线电压变化曲线

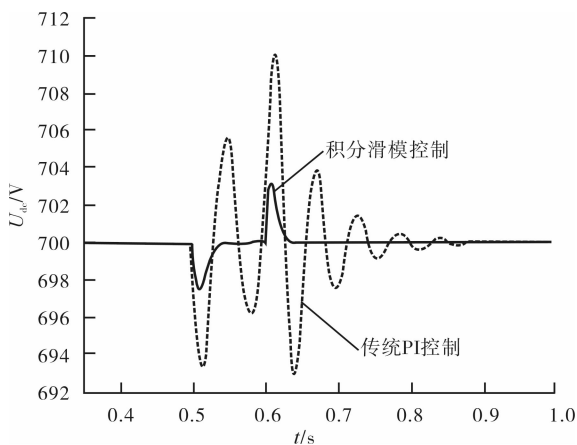


图7 电压扰动时直流母线电压曲线

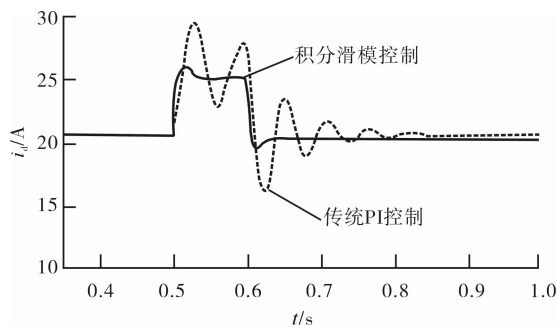


图8 电压扰动时有功电流变化曲线

率前馈补偿的积分滑模变结构控制策略.该策略根据网侧变换器的数学模型,通过对网侧变换器采用电网电压定向矢量的控制,实现交流侧单位功率因数和直流环节电压控制.通过分析可知,电网直流母线两端电压稳定性取决于电流的调节速度.PI控制的动态降落量远远高于滑模控制的动态降落量;而且当扰动结束后其恢复时间也很长,电流回落到稳态的时间更久.故在抗外界扰动的鲁棒性上,SMC

控制性能明显优于 PI 控制。

通过积分滑模控制能更快地实现电流和电压的追踪,维持母线电压稳定,但是滑模控制本身存在抖振问题,如何结合滑模优化控制,进一步增强其稳定性,将是下一步工作的重点。

#### 参考文献:

- [1] 李俊峰,高虎. 2008 中国风电发展报告[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008:45-61.
- [2] 杨文强,蔡旭,姜建国. 矢量控制系统的积分型滑模变结构速度控制[J]. 上海交通大学学报,2005,39(3):426.
- [3] 王锋,姜建国. 风力发电机用双 PWM 变换器的功率平衡联合控制策略研究[J]. 中国机电工程学报,2006(22):134.
- [4] 邓富金,蔡旭. 基于内模控制的双闭环 PWM 整流器[J]. 电力电子技术,2008,42(6):60.
- [5] 全吉男,王聪,韩春艳. 三相电压型 PWM 整流器的内模解耦控制[J]. 电力电子技术,2007,41(7):14.
- [6] Utkin V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1993,40(1):23.
- [7] David A S. Wind turbine technology-fundamental concepts of wind turbine engineering[M]. New York: ASME,1994:313-315.
- [8] Raj C T, Strivastava S P, Agarwal P. Realization on PSO based induction motor design via SPEED/PC-IMD[C]//International Conference on Advanced Computer Control, Singapore:IEEE Press,2009:65-69.
- [9] Shi Y H, Eberhart R. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[C]//IEEE International Congress on Evolutionary Computation, Piscataway: IEEE Service Center,2001:101-106.
- [10] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//IEEE Proceedings of International Conference on Neural Networks, Piscataway: IEEE Service Center,1995:1942-1948.
- [11] 赵栋利,郭金东,许洪华. 变速恒频双馈风力发电机有功、无功解耦控制研究与实现[J]. 太阳能学报,2006,27(2):174.
- [12] 张志英,赵萍,李银凤,等. 风能与风力发电技术[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2010:45-55.
- [13] Lanzafame R, Messina M. Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory [J]. Renewable Energy, 2007,32(14):2291.
- [14] Boldea I, Tutelea L, Serban I. Variable speed electric generators and their control: an emerging technology [J]. Journal of Electrical Engineering,2002,1(3):20.
- [15] Chen C L, Lee T Y. Impact analysis of transmission capacity constraints on wind power penetration and production cost in generation dispatch[C]//IEEE International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, Taipei: [s. n. ],2007.
- [16] 田宏奇. 滑模控制理论及其应用[M]. 武汉:武汉出版社,1995:164-166.
- [17] De Giorgi M G, Ficarella A, Tarantino M. Assessment of the benefits of numerical weather predictions in wind power forecasting based on statistical methods[J]. Energy, 2011(36):3968.
- [18] 王丰饶. 滑模变结构控制[M]. 北京:机械工业出版社,1995:45-47.
- [19] Utkin V I, Lee H. The chattering analysis[C]//12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Portoroz: IEEE,2006:2014-2019.

# 基于扰码技术降低 OFDM 系统 PAPR 的新算法

谢鹏, 全海燕, 黄海波

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**针对传统选择映射算法需要额外传输边带信息的不足,提出一种预留子载波-选择映射联合算法:通过对正交频分复用 OFDM 信号的子载波进行分组,将 0 幅度预留子载波嵌入到各分组的特定位置后对分组进行位移,由此把边带信息嵌入到预留子载波的位置上,最后选择峰均功率比 PAPR 最优的一路传输. 仿真结果表明,该算法不仅不需要额外传输边带信息,同时有效地降低了 OFDM 系统的 PAPR 和复杂度,提高了系统频带利用率.

**关键词:**正交频分复用系统;峰均功率比;选择映射;预留子载波;扰码技术

**中图分类号:**TN911.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.013

## A new algorithm to reduce PAPR of OFDM system based on scramble technology

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

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

**Abstract:** Aiming at the problem that the tradition selective mapping (SLM) algorithm needs transmit side information, a new algorithm - reserved subcarriers-SLM algorithm was proposed, which used the technology of grouping for the subcarriers of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals. Meanwhile, it inserted side information into the location of reserved subcarriers after shifting the groups by rows, then select the lowest PAPR groups to send. The simulation results showed that the proposed algorithm didn't need transmit side information, at same time the peak-to-average power ratio (PAPR) and complexity of the system could be effectively reduced, the bandwidth utilization was improved.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system; peak-to-average power ratio (PARR); selective mapping (SLM); reserved subcarriers; scramble technology

## 0 引言

正交频分复用 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 技术作为无线宽带及下一代移动通信的关键技术,以其高效的频谱利用率与抗码间干扰强等特点,在数字通信领域得到广泛的应用<sup>[1]</sup>. 然而,OFDM 系统在信号传输过程中会出现较

高的峰均功率比 PAPR (peak-to-average power ratio), 峰值过高超出了发送端功率放大器的线性动态范围时,将会产生信号的非线性失真,导致系统性能严重下降<sup>[2]</sup>.

目前 OFDM 系统抑制峰均比的算法有信号畸变技术、编码技术以及扰码类技术 3 类<sup>[3-4]</sup>. 其中信号畸变类技术的特点是对传输信号进行幅度畸变,

收稿日期:2013-12-03

作者简介:谢鹏(1987—),男,江西省赣州市人,昆明理工大学硕士研究生,主要研究方向为 OFDM 关键技术.

通信作者:全海燕(1970—),男,云南省昆明市人,昆明理工大学副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为信号处理.

降低信号波形的瞬时功率值,由于信号波形的畸变将导致信号频谱发生畸变,产生带内信号失真和带外频谱弥散,从而使误码率性能恶化;编码类技术能有效降低系统的 PAPR,但是由于可以用于编码的序列有限,因此该方法不适用于 OFDM 系统.目前,对选择映射法的研究主要集中在降低运算复杂度上,对提高选择映射法频带效率的研究却较少.本文针对传统选择映射法需要额外传输边带信息的不足,提出一种不需要额外传输边带信息的新算法,即预留子载波-选择映射 RSS-SLM(reserved subcarriers-selected mapping)算法,以期解决传统选择映射 SLM(selected mapping)算法需要额外传输边带信息的缺点,且能有效地降低系统的 PAPR 以及复杂度.

### 1 PAPR 定义与 SLM 算法原理

#### 1.1 PAPR 定义

一个 OFDM 基带模拟信号可以表示为<sup>[5]</sup>

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi f_k t} \quad 0 \leq t \leq T$$

其中,  $T$  为 OFDM 符号周期,  $N$  为子载波数, 频域符号  $X = \{X_k, k = 0, 1, \dots, N-1\}$ ,  $X_k$  表示第  $k$  个子载波上的调制数据, 第  $k$  个子载波的载波频率  $f_k = k/T$ .

OFDM 信号的峰均功率比是指: 在单个 OFDM 符号周期内, 信号的峰值功率与平均功率的比值. 连续时间信号  $x(t)$  的 PAPR 定义为

$$PAPR[x(t)] = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} (|x(t)|^2)}{P_{av}}$$

其中,  $P_{av}$  为信号  $x(t)$  的平均功率.

在 OFDM 系统中, 一般采用峰均功率比的互补累积分布函数 CCDF(complementary cumulative distribute function) 来衡量 PAPR 的分布, 即

$$P\{\max_{0 \leq k < N} r_k > r\} =$$

$$1 - P\{\max_{0 \leq k < N} r_k < r\} = 1 - (1 - e^{-\lambda})^N$$

其中,  $\lambda = r^2, r \geq 0$ .

#### 1.2 SLM 算法基本原理

SLM 算法<sup>[6-7]</sup>的基本原理是: 在有  $N$  路子载波的一个 OFDM 符号周期内, 输入信号  $X = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$ ,  $K$  组随机相位为  $P_k = [p_{k0}, p_{k1}, \dots, p_{kN-1}]$ . 将信号  $X$  与  $K$  组的相位因子相结合, 得到  $K$  组备选信号  $X_k = [X_0 P_{k0}, X_1 P_{k1}, \dots, X_{N-1} P_{kN-1}]$ . 再对这  $K$  组备选信号  $X_k$  进行 IFFT 处理后, 选择 PAPR 值最小的那一路备选信号作为输出信号进入线性放大器进行传输.

### 2 RSS-SLM 算法

传统的 SLM 算法在每个符号周期内不仅要传输 PAPR 值最小的备选信号, 同时还要传输额外的边带信息, 因而降低了频带利用率. 基于上述问题, 本文提出了一种 RSS-SLM 算法.

本算法的原理如图 1 所示: 把 OFDM 系统中若干幅度为 0 的预留子载波插入到  $N$  路子载波信号的特定位置, 对插入预留子载波后的  $N$  路子载波信号进行矩阵变换和分组, 再对分组后信号的每个分组进行随机行位移, 则每个分组的相位因子信息嵌入到该分组的位移量上, 如果该组的位移量是偶数, 则该组的所有矩阵元素乘以  $-1$ . 最后在备选信号中选择 PAPR 性能最优的一路进行传输.

预留子载波的插入原则是: 预留子载波的位置必须在矩阵的第 1 行的特定列. 假如矩阵分组成若干  $4 \times 4$  的分组矩阵, 则预留子载波的位置为该分组矩阵的(1,1)位置, 如图 2a) 所示,  $A$  表示预留子载波, 其余数字表示第  $i$  路子载波信号, 下标表示位移前该子载波信号所在矩阵的行数. 根据生成的随机位移量对分组进行随机位移, 例如第 1 组的位移量为 2 时, 则位移后的矩阵如图 2b) 所示. 根据算法的

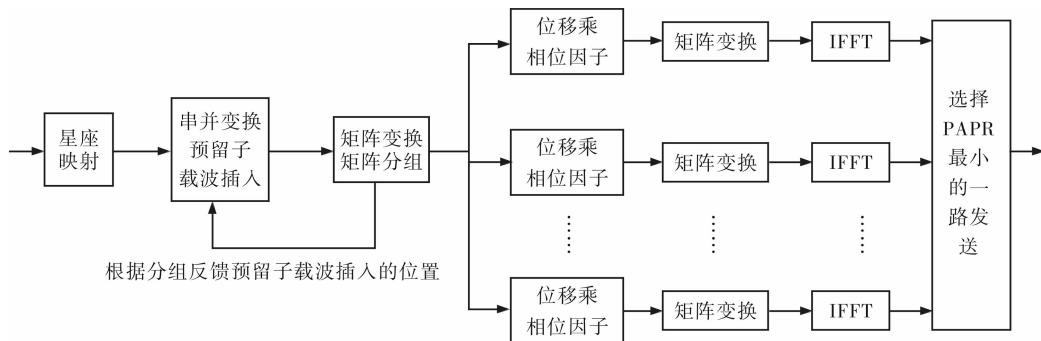


图 1 RSS-SLM 算法原理图

规则,该组的位移量是偶数,则该组的所有元素乘以  $-1$ . 通过上述处理步骤,改变子载波原有的相位组合,生成一种扰码,最后在备选信号中选择 PAPR 性能最优的一路进行传输. 在接收端只要能提取出位移量,就能准确还原出原始信息.

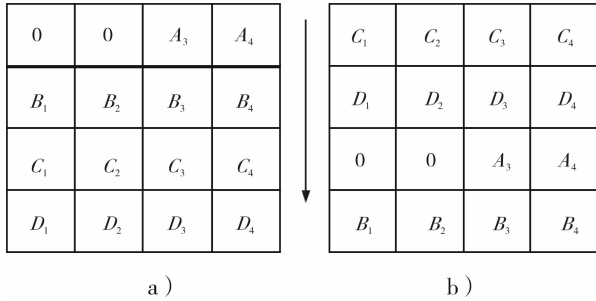


图2 预留子载波插入与位移示意图

本算法的具体实现步骤如下:

1) 将一个 OFDM 符号周期内的  $N$  行子载波信号记为  $\mathbf{X}$ , 把  $\mathbf{X}$  分成  $R \times M$  的矩阵信号  $\mathbf{X}_{R \times M}$ . 再对  $\mathbf{X}_{R \times M}$  按列平均分成  $S$  组, 则第  $i$  组表示为  $\mathbf{X}_{i, R \times M/S}$ , 其中  $1 \leq i \leq S$ .

2) 把 0 幅度预留子载波插入到  $S$  个分组中第 1 行的前 2 列中, 即  $\mathbf{X}_{i, R \times M/S}^{1,1} = \mathbf{X}_{i, R \times M/S}^{1,2} = 0$ . 矩阵中的其他点用来存储要传输的信息.

3) 生成一组随机矩阵  $\mathbf{P}_{k \times s}$  作为位移参数, 其中  $k$  为随机位移序列的条数, 且  $p(k, s) < R$ .

4) 将分组后的每组信号矩阵  $\mathbf{X}_{i, R \times M/S}$  根据位移参数作行位移, 位移量为  $\mathbf{P}_{k \times s}(j, i)$ . 如果该组的位移量是偶数, 则对该组的所有元素乘以  $-1$ .

5) 将完成步骤 4 后的信号  $\mathbf{X}_{R \times M}$  转换成  $N$  路的信号  $X$ , 并对其计算 PAPR.

6) 按照要求重复步骤 4 和步骤 5, 计算出  $K$  路备选信号的 PAPR, 并选择 PAPR 值最小的那一路备选信号作为输出信号进行传输.

在接收端, 对进行完 FFT 处理后的信号按照步骤 1 进行分组, 假定 FFT 完成后的信号为  $Z$ , 则分组后的信号为  $Z_{i, R \times M/S}$ . 在第  $i$  组信号  $Z_{i, R \times M/S}$  中, 将该组的前 2 列作行功率运算, 则该组的位移量为该组中功率最小行的行数, 从而提取出该组的位移量, 再根据各组的位移参数信息解调出最终的信息.

### 3 仿真结果及分析

本算法在 Matlab 平台下仿真, 具体仿真参数如下: 信道噪声为加性高斯白噪声 (AWGN). 采用正交相移键控 (QPSK) 进行调制, 子载波数  $N = 128$ , 采样因子为 1, 相位因子为 1 或  $-1$ , OFDM 符号数为

10 000, 矩阵行数  $R = 4$ , 矩阵列数  $M = 32$ , 备选信号条数  $K = 8$ . 仿真结果如图 3—图 5 所示.

传统的 Grouping-SLM 算法中分组数  $S$  过低将导致 PAPR 性能降低<sup>[6]</sup>, 但是在 RSS-SLM 算法中由于采用了行位移技术, 在分组数  $S$  较少的情况下有良好的 PAPR 性能. 从图 3 可以看出, Grouping-SLM 算法中分组数  $S = 8$  的 PAPR 性能不及 RSS-SLM 算法中  $S = 4$  的 PAPR 性能, 在 RSS-SLM 算法中, 分组数的增加对 PAPR 值下降的影响并不明显, 但分组较少可以减少系统的复杂度.

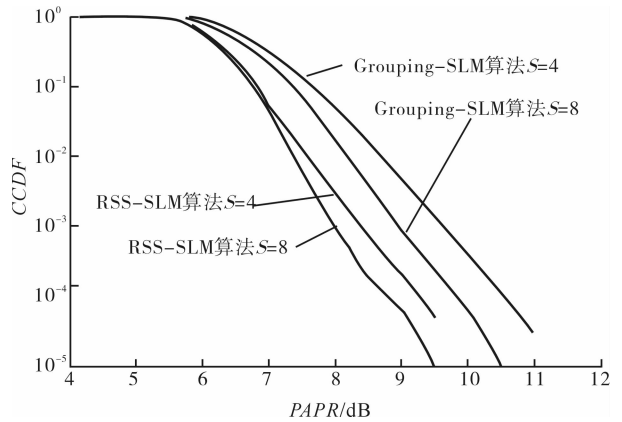


图3 Grouping-SLM 算法与 RSS-SLM 算法不同分组数对 PAPR 的影响

图 4 是原始信号、典型的 Grouping-SLM 算法、RSS-SLM 算法和典型 SLM 算法在分组数等于 4 时 PAPR 性能的比较. 从图 4 中可以看出, RSS-SLM 算法的 PAPR 比原始信号下降了 3 dB. 由于分组后采用行位移技术, RSS-SLM 算法的 PAPR 比 Grouping-SLM 算法下降了 1.5 dB. RSS-SLM 算法虽然与传统 SLM 算法相比在降 PAPR 性能上有 1 dB 的差距, 但

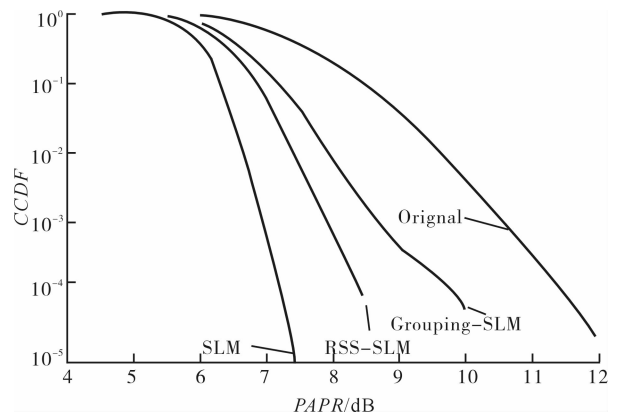


图4 原始信号、典型的 Grouping-SLM 算法、RSS-SLM 算法和典型 SLM 算法在分组数等于 4 时 PAPR 性能比较

是该算法无需额外传输边带信息,可大大提高子载波的利用率,因而在实际应用中更有优势.

图5为RSS-SLM算法与传统SLM算法之间误码率的比较.从图5中可以看出,RSS-SLM算法的误码率与传统SLM算法相同,说明该算法能够准确地提取嵌入到预留子载波上的边带信息并解码.

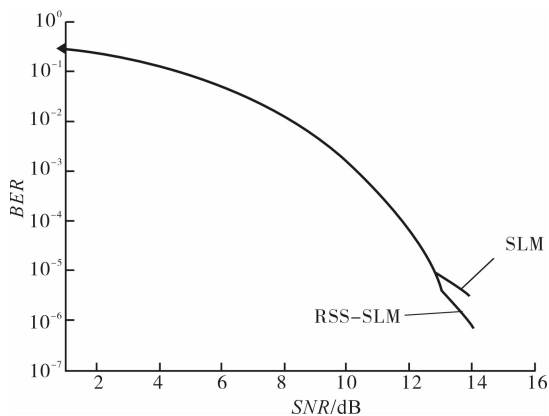


图5 RSS-SLM算法与传统SLM算法之间误码率的比较 BER性能比较

从仿真结果可以看出:RSS-SLM算法对分组后的信号采用随机位移作为辅助扰码技术,能显著地降低OFDM系统的PAPR.利用编码把边带信息嵌入到预留子载波的位置信息上,从而省去了边带信息的额外传输,提高了系统的频带利用率,且保持了系统较高的稳定性.

## 4 结语

针对传统的SLM算法需要额外传输边带信息的缺点,本文提出了一种RSS-SLM算法.该算法把边带信息嵌入到预留子载波的位置信息上,解决了传统SLM算法需要额外传输边带信息的缺点.采用

分组随机位移,能使系统在低分组数的情况下有良好的PAPR性能.理论分析以及仿真结果表明,RSS-SLM算法不仅能显著降低OFDM系统的PAPR,提高系统的频带利用率,且使系统保持较高的稳定性.在计算复杂度上,RSS-SLM算法与传统的SLM算法的运算量相同.如何降低算法的运算复杂度,将是今后的研究重点.

## 参考文献:

- [1] 陈东华.高速移动信道中的OFDM载波频偏估计[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2012,27(5):99.
- [2] Han S H, Lee J H. An overview of peak-to average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2):56.
- [3] Armstrong J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering[J]. Electronics Letters, 2002, 38(5):246.
- [4] James A D, Jonathan J. Peak-to-mean power control in OFDM, Golay complementary sequences, and reed-muller codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(7):2397.
- [5] Muller S H, Huber J B. A comparison of power reduction schemes for OFDM [C]//Proc IEEE Globecom '97, Phoenix, AZ, 1997:1-5.
- [6] Wang J, Lee J, Park J, et al. Combining of cyclically delayed signals: A low-complexity scheme for PAPR reduction in OFDM systems [J]. IEEE Transmission Broadcast, 2010, 56(4):577.
- [7] Jeon H B, No J S, Shin D J. A low-complexity SLM scheme using additive mapping sequences for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Transmission Broadcast, 2011, 57(4):866.



# 典型通信频率的低压电力线通信噪声特性研究

黄鹏飞<sup>1</sup>, 谢涛<sup>1</sup>, 刘爱莲<sup>1</sup>, 李英娜<sup>1</sup>, 曹敏<sup>2</sup>, 李波<sup>2</sup>,  
毕志周<sup>2</sup>, 赵振刚<sup>1</sup>, 李川<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;  
2. 云南电力实验研究院(集团)有限公司 电力研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:**针对学生宿舍区、教学实验区和居民区3个典型的电力环境,使用低压电力线噪声采集设备采集噪声数据,处理得到10~500 kHz噪声功率谱,进而分析电力线噪声幅值随典型通信频率及在不同时段的变化趋势。结果表明:噪声幅值随频率的升高而降低,低频段噪声对电力线通信影响较大,在用电高峰时段噪声幅值会有10~35 dB $\mu$ V的波动。因此,就抗干扰程度而言,载波频带为100~450 kHz的美国标准比载波频带为3~148.5 kHz的欧洲标准更适合电力载波通信传输。

**关键词:**低压电力线通信;通信频率;信道噪声;功率谱;噪声幅值

**中图分类号:**TM73 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.014

## Research on the noise characteristics of typical communication frequency in low-voltage power line communication

HUANG Peng-fei<sup>1</sup>, XIE Tao<sup>1</sup>, LIU Ai-lian<sup>1</sup>, LI Ying-na<sup>1</sup>, CAO Min<sup>2</sup>, LI Bo<sup>2</sup>,  
BI Zhi-zhou<sup>2</sup>, ZHAO Zhen-gang<sup>1</sup>, LI Chuan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Test and Research (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** The low-voltage power line noise acquisition equipment was used to collect noise data in three power environments including the student dormitory, teaching experimentation area and residential area, processing to get 10~500 kHz noise power spectrum was gotten variation tendency of the power line noise amplitude with typical communication frequency and different periods were analyzed. The results showed that: noise amplitude will decrease with the increase of the frequency; Low-frequency noise has a greater impact on the power line; During power peak periods, noise amplitude will fluctuate 10~35 dB $\mu$ V. Therefore, as far as noise level, the America standard carrier frequency band of 100~450 kHz was more suitable for power line carrier communication than the European standard carrier frequency band of 3~148.5 kHz.

**Key words:** low-voltage power line communication; communication frequency; channel noise; power spectrum; noise amplitude

收稿日期:2013-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(KKGD201203004)

作者简介:黄鹏飞(1984—),男,河南省平顶山市人,昆明理工大学硕士研究生,主要研究方向为电力载波通信、无线通信。

通信作者:李川(1971—),男,四川省成都市人,昆明理工大学教授,博士研究生导师,主要研究方向为检测技术与自动化装置。

## 0 引言

随着国家对智能电网建设力度的不断加大,电力事业取得了迅速发展,电力线载波通信在楼宇自动化、保安监控、远程抄表等众多领域得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>. 电力线载波通信技术是一种以电力线作为通信媒介来传输数据、语音、图像等多媒体业务信号的新型通信技术<sup>[4-5]</sup>. 目前,国内外还没有制定统一的载波通信频率标准,现有通信频率方案众多,且电力线不是专门用来传输通信数据的,其信道有负载多、噪声谐波干扰强、信道衰减大等不利于数据传输的特性<sup>[6-8]</sup>. 其中噪声干扰是制约电力线载波通信的关键因素,会对载波通信的通信频率产生很大影响,随着电力传输环境的变化,载波通信中心频率也会发生改变. 因此,要保证载波通信质量,必须对通信频率下的噪声特性加以研究. 2011年,张龙等<sup>[9]</sup>针对大多数用电设备产生的谐波干扰基本集中在150 kHz及以下频段的现象,提出可通过将载波通信频率从目前主流的120 kHz向480 kHz提升来有效避开电力线的干扰频段,提高载波通信质量.

目前,国内外的文献资料对于低压电力线载波通信信道噪声特性的研究,大多是在理论分析的层面,本文则针对学生宿舍区、教学实验区和居民区3个用电环境,对典型通信频率下的低压电力线通信信道噪声特性进行研究,掌握电力线信道噪声随通信频率的变化规律,以期改善载波通信质量.

## 1 低压电力线噪声的采集

低压电力线的传输环境有别于其他通信信道,其拓扑结构和物理特性都与传统的通信传输介质不同. 与国外载波通信环境相比,我国的低压电力网络信道特性更复杂,通信环境也更为恶劣,主要体现在网络结构复杂、存在各种干扰和噪声、连接负载多且经常发生变化<sup>[10-13]</sup>,这都会严重影响载波通信质量. 实际环境中,低压电力线噪声通常可分为有色背景噪声、窄带噪声、与工频异步的周期性脉冲噪声、与工频同步的周期性脉冲噪声和随机脉冲噪声,前三者为背景噪声,后两者为脉冲噪声<sup>[6,14-16]</sup>. 对上述噪声的采集,通常由低压电力噪声采集设备完成,该设备主要包括两模块:1)高精度高速数字化仪TCD100. 该仪器可保证信号采集的精确性,并使噪声分析的频率分辨率精确到5 kHz间隔以内. 2)噪声耦合单元(即高通滤波器). 它提

供噪声分析所需的测试信号以及信号采集所需的市电触发信号,有10 V<sub>pp</sub>和2 V<sub>pp</sub>2个测试档可供选择,本文采用10 V<sub>pp</sub>测试档. 耦合单元原理如图1所示.

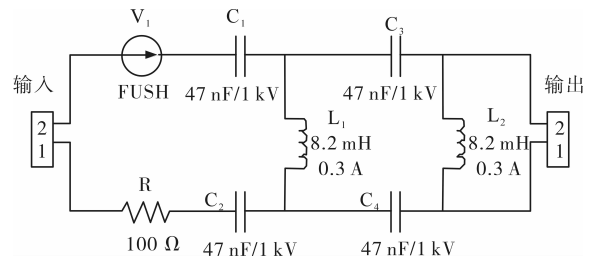


图1 噪声耦合单元原理图

该设备对所接入电力环境中的噪声进行采样, TCD100的采样率为100 MSa/s,能够分析的频谱范围是10~500 kHz.

## 2 低压电力线通信频率选择

电网中负荷情况复杂,负载变化幅度大,噪声种类多且信号强,信号很容易产生反射、驻波、谐振等现象,因而电力线载波通信信道具有很强的频率选择性. PLC窄带通信频率范围的标准<sup>[17-18]</sup>主要有美国联邦通信委员会制定的载波频带为100~450 kHz的美国标准、欧洲电工标准化委员会制定的载波频带为3~148.5 kHz的欧洲标准,中国电力行业对国内低压电力线载波通信使用频率范围规定为40~500 kHz. 国内外诸多企业根据不同的频率标准所采用的载波通信频率方案也各不相同<sup>[18-19]</sup>,东软公司产品信号频率选用的是270 kHz,近年来开始研究132 kHz,产品性能相对成熟,但信道噪声干扰对载波通信的影响较大,传输速率不高;青岛鼎信公司产品的传输速率比较高,但中心频率选取过高(421 kHz),超过了欧洲标准,影响其国际化进程. 因此,研究不同频率下信道的噪声特性对载波通信应选用何种通信频率有一定的指导意义. 本文参照国内市场载波产品通信频率的使用情况,选取一组较为主流的通信频率(即60 kHz, 86 kHz, 120 kHz, 132 kHz, 270 kHz, 392 kHz, 421 kHz和480 kHz)来对低压电力线的噪声特性进行分析.

## 3 低压电力线噪声数据分析

低压电力线的传输环境复杂,不同用电环境的噪声强度有很大差别<sup>[20-21]</sup>,并且具有时变性. 本文选取学校学生宿舍区、教学实验区和居民区3个环境,进行连续3 d噪声数据采集,得出噪声功率谱最

大幅值的平均值.

1)学生宿舍区. 在学生宿舍区进行3次连续24 h的噪声数据采集,在Matlab中经FFT变换仿真得出噪声功率谱,然后针对不同输入频率求出每一时间点电力线的噪声功率谱最大幅值,再综合几次采集的数据得到噪声功率谱最大幅值的平均值(见表1),11:00时的噪声时域波形如图2所示.

表1 学生宿舍区24 h噪声幅值 dB $\mu$ V

时间/h	中心频率/kHz							
	60	86	120	132	270	392	421	480
1	96.2	90.0	85.3	86.1	77.0	73.4	73.3	72.9
2	99.7	91.9	87.5	88.2	77.7	74.4	73.6	72.5
3	85.2	81.4	78.3	77.2	70.5	67.7	66.9	65.7
4	88.9	85.4	82.2	81.3	74.9	71.9	71.2	70.2
5	86.4	81.9	79.0	77.9	71.6	68.4	67.9	66.5
6	85.2	81.9	78.9	78.1	71.8	68.5	67.8	66.2
7	83.4	80.1	77.8	76.2	70.1	66.9	67.0	65.8
8	86.0	82.3	78.9	78.0	71.7	68.3	67.5	66.8
9	91.7	85.6	82.0	81.6	75.1	71.8	71.2	69.9
10	87.9	82.8	79.9	78.9	72.4	69.2	68.7	67.2
11	87.8	82.9	79.8	78.8	72.2	69.2	68.6	67.2
12	96.9	88.8	84.4	84.9	75.8	72.7	72.6	75.6
13	96.9	88.6	84.4	84.0	75.2	72.3	72.9	75.0
14	95.3	87.2	82.4	83.2	74.5	71.0	70.7	71.9
15	97.3	88.1	84.5	84.7	76.9	72.9	72.8	74.9
16	95.7	87.9	84.2	85.2	74.7	71.2	72.1	74.4
17	96.8	88.7	84.1	85.8	74.9	71.9	72.3	75.0
18	94.6	86.9	82.6	84.0	75.3	71.6	73.3	75.3
19	96.1	87.5	83.7	83.9	75.3	71.7	72.7	74.7
20	96.8	90.1	82.6	83.8	76.3	72.7	73.8	74.9
21	101.4	97.2	92.2	91.1	81.9	78.7	78.3	76.9
22	105.5	99.0	95.5	96.5	86.2	82.7	82.4	79.8
23	101.9	96.1	94.3	93.4	82.6	79.1	78.4	77.3
24	104.4	99.0	95.1	94.6	80.8	77.4	76.4	76.1

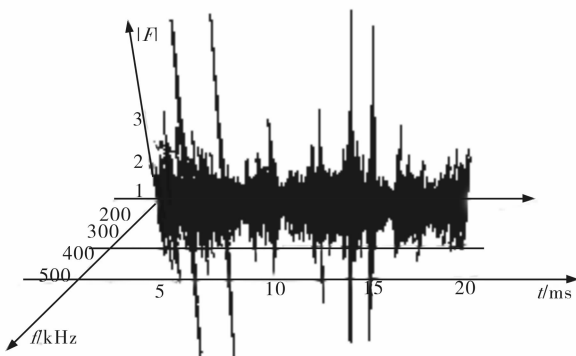


图2 学生宿舍区11:00时噪声波形图

由表1和图2可得出:学生宿舍区噪声幅值在整体上呈随频率升高而降低的趋势,132 kHz及以下频率所对应的噪声幅值基本都在80 dB $\mu$ V以上,270 kHz及以上频率所对应的噪声幅值基本都在80 dB $\mu$ V以下,前者高出后者约10~30 dB $\mu$ V;各频率对应的噪声幅值在时段3:00~11:00都处于90 dB $\mu$ V及以下,但在剩余时段噪声幅值会有10~15 dB $\mu$ V的增加;在学生宿舍区用电低谷时段2:00~11:00,噪声幅值处于低谷区,在用电高峰时段12:00~2:00,噪声幅值有所升高,132 kHz及以下频率尤为明显,其中时段12:00~20:00相对平滑,而在用电情况变化较大的20:00~2:00,噪声幅值会产生10 dB $\mu$ V左右的波动.

2)教学实验区. 在0:00~6:00时段,教学实验区基本处于封闭状态. 经数据采集分析得知,此时段各频率对应的电力线噪声功率谱最大幅值基本处于75 dB $\mu$ V以下的稳定区域. 因此,使用TCD100对教学实验区7:00~23:00进行3次噪声数据采集,得到噪声功率谱最大幅值的平均值见表2,11:00的噪声时域波形如图3所示.

由表2和图3可得出:教学实验区噪声幅值随频率的升高而降低,132 kHz及以下频率所对应的噪声幅值比270 kHz及以上频率所对应的噪声幅值高约10~15 dB $\mu$ V;各频率对应的噪声幅值在23:00~9:00之间都处于80 dB $\mu$ V以下,但在剩余

表2 教学实验区7:00~23:00噪声幅值 dB $\mu$ V

时间/h	中心频率/kHz							
	60	86	120	132	270	392	421	480
7	73.2	71.8	68.3	68.1	62.5	60.4	59.9	58.1
8	75.2	72.0	68.4	68.9	61.9	58.6	58.0	57.1
9	80.1	76.7	74.0	72.9	66.6	63.0	62.9	61.7
10	103.2	98.4	95.6	95.1	88.5	85.7	84.2	83.9
11	98.1	92.0	89.4	88.7	86.3	79.2	78.6	77.5
12	95.2	90.4	87.2	86.6	80.2	76.9	71.4	73.6
13	97.9	92.3	88.9	88.0	81.4	78.2	77.5	76.4
14	104.0	98.9	95.6	94.6	88.2	84.9	84.3	83.2
15	100.9	96.5	92.9	92.1	85.7	82.4	81.7	80.7
16	100.8	96.4	92.8	91.9	85.3	82.1	81.5	80.3
17	100.4	95.8	92.1	91.2	84.8	81.5	80.9	79.7
18	100.7	96.4	93.0	91.9	85.5	82.1	81.5	80.4
19	101.4	96.0	92.6	91.6	85.0	81.8	81.1	80.0
20	86.5	82.0	79.1	78.6	71.9	68.8	68.1	66.7
21	89.0	83.7	80.1	79.4	73.1	69.8	69.2	68.5
22	85.4	79.4	76.2	75.1	68.1	65.4	64.9	63.3
23	73.6	70.4	67.4	66.6	60.2	57.5	57.1	54.9

时段噪声幅值有 10 ~ 20 dB $\mu$ V 的增加,其中在 7:00 ~ 9:00 时段,噪声幅值呈上升趋势,在教学实验区用电高峰时段 10:00 ~ 19:00,噪声幅值明显偏高,且在 10:00 ~ 14:00 会有 10 dB $\mu$ V 的起伏,14:00 ~ 19:00 处于平稳区,19:00 以后的噪声幅值处于下降趋势,下降幅度约 25 dB $\mu$ V.

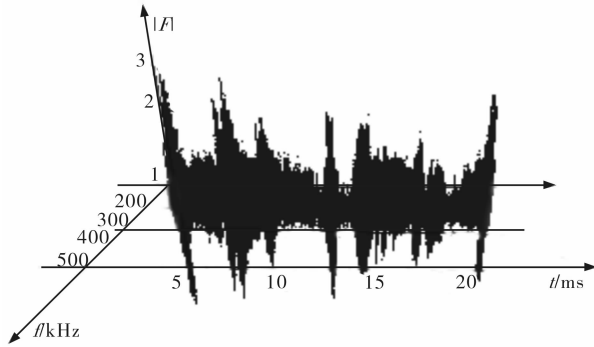


图3 教学实验区 11:00 时噪声波形图

3)居民区.在居民区进行3次连续24 h的噪声数据采集,得到噪声功率谱最大幅值的平均值见表3,11:00的噪声时域波形如图4所示.

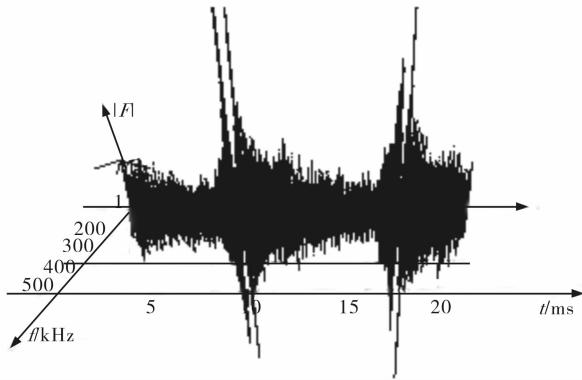


图4 居民区 11:00 时声波形图

由表3和图4可得出:居民区噪声幅值有随频率的升高而降低的趋势,132 kHz及以下频率所对应的噪声幅值基本都在80 dB $\mu$ V以上,270 kHz及以上频率所对应的噪声幅值除时段7:00 ~ 23:00外都在80 dB $\mu$ V以下,前者高出后者约10 ~ 35 dB $\mu$ V;各频率对应的噪声幅值在23:00 ~ 7:00处于100 dB $\mu$ V以下,但在剩余时段噪声幅值有10 ~ 20 dB $\mu$ V的增加.在7:00 ~ 21:00噪声幅值整体呈稳中有升的趋势,在居民用电高峰时段8:00 ~ 9:00,12:00 ~ 14:00和19:00 ~ 21:00,噪声幅值会有15 dB $\mu$ V左右的波动.

4)不同环境噪声幅值比较.选取频点60 kHz和

132 kHz,对学生宿舍区、教学实验区和居民区3个不同环境的噪声幅值在7:00 ~ 23:00时段的变化情况进行比较,结果如图5所示.

表3 居民区24 h噪声幅值 dB $\mu$ V

时间/h	中心频率/kHz							
	60	86	120	132	270	392	421	480
1	92.2	88.7	80.1	80.0	75.4	74.3	71.4	70.3
2	92.4	87.1	79.7	78.9	75.1	71.9	71.2	70.3
3	90.5	89.3	78.7	77.1	75.8	72.5	71.7	70.7
4	92.1	88.1	77.1	76.1	74.8	72.2	71.8	70.9
5	91.2	84.1	78.9	78.1	71.9	75.0	72.2	71.5
6	91.0	84.2	80.7	79.8	71.2	71.8	71.2	69.9
7	93.8	88.7	86.3	83.3	77.3	73.9	73.2	72.3
8	105.3	98.9	93.2	91.2	87.5	84.2	83.9	82.4
9	97.3	90.9	87.0	86.7	85.2	82.8	76.2	74.8
10	97.5	94.3	89.6	88.9	87.0	83.0	79.8	80.1
11	98.4	95.0	91.7	90.8	86.8	81.2	81.4	79.5
12	99.6	96.9	89.2	89.1	86.5	82.3	80.3	79.2
13	109.3	101.0	97.5	96.2	95.2	88.5	86.0	85.3
14	99.7	97.5	92.6	88.4	87.5	84.1	83.6	80.3
15	99.4	94.4	92.9	90.0	86.7	84.6	80.0	78.4
16	98.1	95.5	91.6	90.8	89.4	85.8	83.5	81.5
17	99.7	93.5	92.6	91.4	90.5	88.1	83.6	80.3
18	100.4	93.8	92.6	90.4	90.9	89.6	84.9	81.9
19	109.8	96.8	93.8	93.1	92.8	91.5	90.9	81.8
20	112.1	103.9	98.8	95.9	95.5	94.2	90.6	84.4
21	101.5	96.9	94.8	93.3	92.4	86.0	84.8	80.9
22	98.7	92.5	91.6	88.4	85.5	79.1	78.6	75.3
23	94.9	86.7	80.4	79.1	77.0	69.7	68.9	68.0
24	93.7	87.4	79.9	79.8	75.5	70.2	71.7	70.3

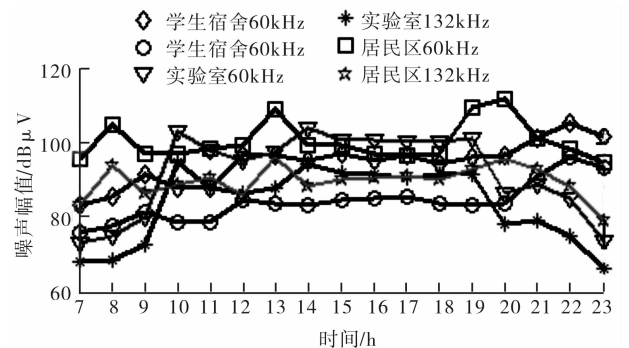


图5 不同环境噪声幅值变化图

由图5可看出,3个不同环境的噪声幅值都有随频率升高而降低的趋势,时段9:00 ~ 18:00处于相对平稳区;同频率同时刻居民区、学生宿舍区和教学实验区的电力线噪声幅值依次升高,但在10:00 ~ 18:00,教学实验区的噪声幅值反而比其他2个环境高出5 ~ 10 dB $\mu$ V,说明此时段为教学实验

区的用电高峰时段.

## 4 结论

本文对学校学生宿舍区、教学实验区及居民区3个较为典型的用电环境进行噪声数据采集,实验表明:随着频率的升高,电力线中噪声幅值会随之降低,降低幅度范围为20~30 dB $\mu$ V,在本文所选用频率中,各环境132 kHz以下频率对应的噪声幅值高出其他频率噪声幅值的范围为10~35 dB $\mu$ V,各用电环境噪声幅值高峰区及产生较大波动的区域分布相对集中在各用电高峰时段12:00~2:00,9:00~22:00和7:00~22:00.由此可见,就抗干扰程度而言,载波频带为100~450 kHz的美国标准比载波频带为3~148.5 kHz的欧洲标准更适合电力载波通信传输.

### 参考文献:

- [1] 郑雪,乐健,蔡伟,等.电力线载波通信元件阻抗模型研究综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(6):135.
- [2] 刘海涛,张保会,郑涛.低压电网信道频率响应模型的研究[J].电工技术学报,2004,19(11):66.
- [3] 戚佳金,陈雪萍,刘晓胜.低压电力线载波通信技术研究进[J].电网技术,2010,32(5):161.
- [4] 邹志威,陈启美,左雯.跻身未来的电力线通信(一):回顾与展望[J].电力系统自动化,2003,27(3):72.
- [5] 罗春风,文劲宇,杨慧敏,等.基于OFDM电力线载波通信系统同步新方法[J].电力系统保护与控制,2010,38(17):28.
- [6] 郭昊坤,吴军基,衡思坤,等.低压电力线通信信道噪声建模及仿真[J].电力系统保护与控制,2012,40(13):61.
- [7] 张世平,张绍卿,李德胜.基于全通滤波器的IIR陷波器在抑制电力线通信中的谐波干扰的研究[J].电工技术学报,2003,18(3):107.
- [8] 耿焯,李永辉.低压电力线通信的信道特性分析及模

型研究[J].电力系统通信,2004(4):19.

- [9] 张龙,蒋跃明.PL系列电力线载波芯片通信频率提升方法[C]//2011第22届中国电工仪器仪表产业发展论坛暨展会,新产品与新技术,苏州:[s.n.],2011:82-85.
- [10] 陈凤,郑文刚,申长军,等.低压电力线载波通信技术的应用[J].电力系统保护与控制,2009,37(22):188.
- [11] Katayama M, Yamazato T, Okada H. A mathematical model of noise in narrowband power line communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(7):1267.
- [12] 肖勇,房莹,张捷,等.低压电力线载波通信信道特性研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(20):20.
- [13] 周陶涛,马正新,王剑,等.低压电力线通信性能测试分析与路径选择[J].电工技术学报,2008,23(8):126.
- [14] 马强,陈启美,李勃.跻身未来的电力线通信(二):电力线信道分析及模型[J].电力系统自动化,2003,27(4):72.
- [15] 吴军基,郭昊坤,孟绍良,等.电力线通信信道背景噪声建模研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(23):6.
- [16] 房曙光.低压电力线通信信道特性[J].继电器,2007,35(22):53.
- [17] 曹惠彬.电力线通信(PLC)技术综述[J].电力系统通信,2004,25(1):1.
- [18] 吕英杰,邹和平,赵兵.国内低压电力线载波通信应用现状分析[J].电网与清洁能源,2010,26(4):33.
- [19] 刘继军.国内电力载波通信芯片技术及市场[J].电器工业,2010(12):61.
- [20] Chan M H L, Donaldson R W. Amplitude, width, and interarrival distributions for noise impulses on intrabuilding power line communication networks[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1989, 31(3):320.
- [21] 张有兵,何海波,吴昕,等.低压电力线载波通信中信道模型的研究[J].继电器,2002,30(5):20.

# 微博话题检测 SP&HC 聚类算法分析

甘勇, 姜森, 杨佳佳

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对微博网站中具有较大的文本信息量、采用凝聚层次聚类算法不适合、Single-Pass 聚类算法检测结果不准确等问题,提出一种将这2种算法相结合的 SP&HC 聚类算法:利用 Single-Pass 聚类算法进行大量微博文本的简单聚类,收集一些小幅度、高凝聚力的主题话题,使得形成的主题话题在内容上和数量上得到极大的精简,直到使得主题话题能达到层次聚类算法的要求;运用层次聚类算法对主题话题进行相似话题聚类,直到符合预设值的条件.实验结果证实了 SP&HC 聚类算法在召回率和准确率上的综合性能优于前2种算法.

**关键词:**微博;热点话题;层次聚类算法;Single-Pass 聚类算法;SP&HC 聚类算法

**中图分类号:**TP18;TP393.092 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.015

## The SP&HC clustering algorithm analysis of micro-blog topic detection

GAN Yong, JIANG Sen, YANG Jia-jia

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

**Abstract:** Aiming at the problem that micro-blog had large amount of information, the coalescing hierarchical clustering algorithm was not suitable and Single-Pass clustering algorithm results was not accurate, a new algorithm SP&HC integrating hierarchical clustering algorithm and Single-Pass clustering algorithm were put forward. It used Single-Pass clustering algorithm to make the large number of micro-blog text become into the simple clustering, in order to collect some small amplitude and high cohesive theme topic. This greatly streamlined the content and quantity of the topic, until making the theme topic hierarchical clustering algorithm to achieve the requirements; then it used hierarchical clustering algorithm to carry out a similar topic clustering, until that conditions met defaults. The simulation experiment results showed that the performance on recall and accuracy of the algorithm was better than the first two algorithms.

**Key words:** micro-blog; hot topic; hierarchical clustering algorithm; Single-Pass clustering algorithm; SP&HC clustering algorithm

## 0 引言

微博客,即 micro-blog,简称微博,是一种基于用户关系的信息分享、传播及获取平台<sup>[1]</sup>.微博作为

计算机网络快速发展的产物,其信息量大、传播速度快、信息分布多样等特点,使微博已经成为人们日常生活交流、交友和关注社会事件的重要渠道.在微博用户的界面上显示着人们所关注的一些信

收稿日期:2013-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(61272038)

作者简介:甘勇(1965—),男,湖南省株洲市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为分布式计算机系统、计算机网络.

息动态,如新发布的事件、转发或评论信息等,并且这些动态被不断地更新.这些不断更新的事件<sup>[2]</sup>比较零碎且重复性较强,微博用户只能从中得知所关注的这个人的状态,却不能了解其他用户的情况,微博话题检测正好解决了这个问题.

目前,国内外关于微博话题检测的相关研究多采用 Single-Pass 聚类算法或凝聚式层次聚类算法,但是这2种算法并不完美,有着其各自的优缺点,在综合分析这2种算法的基础上,本文拟设计一种优于这2种算法的综合算法,以使其能够有效地聚合 Single-Pass 增量聚类和凝聚式层次聚类算法的优点,并通过实验数据对比,来验证新算法的综合性能.

## 1 传统的微博话题检测算法

话题检测在话题语义分析的基础上可以分为 Web 文本挖掘与抽取数据<sup>[3-4]</sup>.话题的检测包含了新事件话题检测、在线的话题检测、层次的话题检测和事件回顾的话题检测等<sup>[5]</sup>.

### 1.1 Single-Pass 聚类算法

Single-Pass 聚类算法是采用增量式方法,其开始时并没有建立话题簇,而是根据后来文本输入信息来确定是否建立话题簇.用户输入文本信息后,系统会将该输入的文本信息与以往的话题进行比较,并提前设置一个参数值即阈值.如果两者的相似度低于提前设置的阈值,则该话题为第一次出现的话题;如果相似度高于提前设置的阈值,则表示该用户输入的文本信息在微博话题中已经有了相关内容,则该新输入的话题应该归并入相关该话题簇.

Single-Pass 聚类算法虽然逻辑简单、效率高,但是受文本输入先后的影响较大,前期输入的文本质量及提前设置的阈值都会影响后来输入文本的归类判断的准确率.

### 1.2 层次聚类算法

层次聚类算法包含2种类型,即凝聚式层次聚类(简称 HAC)和分裂式层次聚类. HAC 是一种自下而上的集群,分裂式层次聚类是一种自上而下的分区集群,层次聚类示意图如图1所示. HAC 是通过不断更新建立相似度矩阵,并对矩阵里相似度最大的2个文本进行凝聚式聚类,直到其达到预设的阈值.

HAC 算法虽然能够实现由最底层的文本和话

题类向最高层的文本和话题类进行精确地凝聚,但数据计算量将随着文本和信息量的增加呈指数增长.

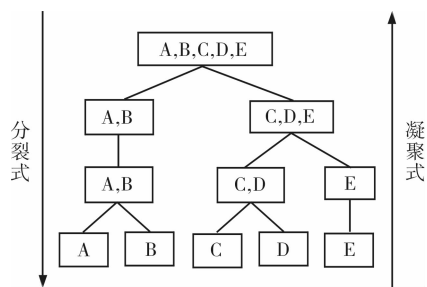


图1 层次聚类示意图

## 2 改进的 SP&HC 聚类算法<sup>[6]</sup>

### 2.1 算法概述

由于微博网站中具有较大的文本信息量,所以在实际的操作中直接采用 HAC 算法并不适合,但是如果采用 Single-Pass 聚类算法虽然可以快速检测出话题,但是检测结果并不准确.所以本文根据 HAC 和 Single-Pass 聚类这2个算法各自的特点,提出一种新的微博话题检测算法即 SP&HC (single-pass & hierarchical agglomerative clustering) 聚类算法.

SP&HC 聚类算法的主要思想是:首先利用 Single-Pass 聚类算法进行大量微博文本的简单聚类,从而收集一些小幅度、高凝聚力的主题话题,这样使得形成的主题话题在内容上和数量上得到极大的精简,直到使得主题话题能达到层次聚类算法的要求,然后运用层次聚类算法对主题话题进行相似话题聚类,直到符合预设值的条件.

### 2.2 算法的流程设计

该算法的流程共包含为3个环节:1)构建微博文本的空间向量模型;2)对话题进行管理,计算相关话题之间的相似度,并根据这些相似度来判断新加入的话题是应该归并入某一话题,还是应该建立新的话题;3)对话题进行合并,根据话题之间的相似度的值而建立的相似矩阵,将相似度最大的2个文本合并成新的话题类,来代替原来的文本,并不断循环从而得出最终话题. SP&HC 聚类算法的流程如图2所示.

### 2.3 算法的详细设计

**2.3.1 文本的模型化设计** 微博话题检查文本的模型化设计主要包括5个步骤:文本的查重、文本的

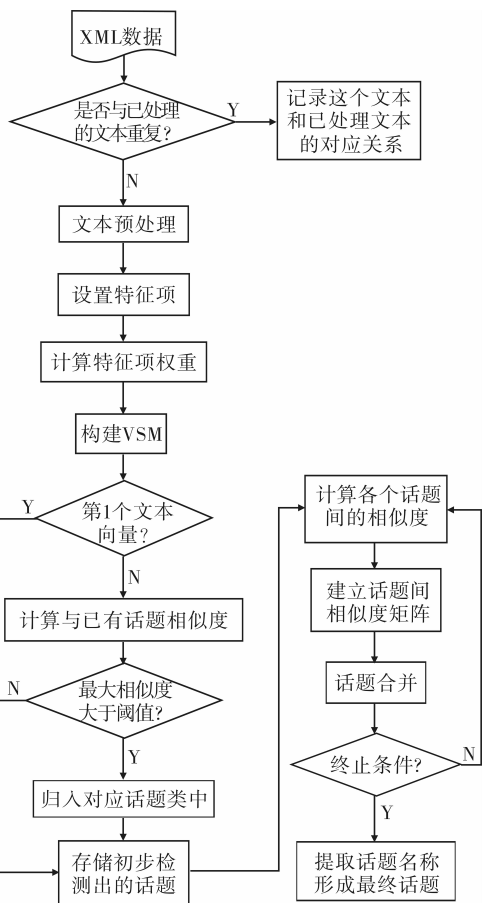


图2 SP&amp;HC 聚类算法流程图

预处理、设置文本的特征项、计算特征的权重和构建文本 SVM 模型。

1) 查重是为了避免已经处理过的文本信息再次被处理;

2) 文本的预处理采用文本词法和设置停用词表的方法进行文本断词和处理;

3) 特征项的设计是将经停用词过滤后的所有无重复的词都设置为特征项;

4) 权重计算采用任姚鹏等<sup>[7]</sup>提出的 TF-IDF 函数

$$w_{ij} = \frac{\sqrt{t_{ij}f_{ij}} \times \log\left(\frac{N}{m_{ij}} + 0.01\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \left[\sqrt{f_{ij}} \times \log\left(\frac{N}{m_{ij}} + 0.01\right)\right]^2}}$$

其中,  $w_{ij}$  表示特征项权重,  $t_{ij}$  表示特征项,  $f_{ij}$  表示特征项中出现的次数,  $\log(N/m_{ij} + 0.01)$  表示反文档出现的频率;

5) 构建 SVM 模型, 将文本向量转变成空间向量, 过程为

$$\vec{D}_1 = (w_{i1}t_{i1}, w_{i2}t_{i2}, \dots, w_{ij}t_{ij}) \quad 1 \leq j \leq M$$

其中  $M$  代表特征项总数。

**2.3.2 话题的相似度计算设计** 改进算法的微博话题相似度计算采用余弦法则

$$\text{sim}(\vec{D}_a, \vec{D}_b) = \cos(\vec{D}_a, \vec{D}_b) = \frac{\vec{D}_a \times \vec{D}_b}{|\vec{D}_a| \times |\vec{D}_b|}$$

其中  $\vec{D}_a$  和  $\vec{D}_b$  表示的是文本向量  $a$  和向量  $b$  的模。

**2.3.3 话题合并设计** 微博话题进行合并设计是将 2 个微博话题凝聚为 1 个新的话题, 并为该新话题命名的过程。话题合并设计方法是将相似度计算时的特征项进行合并, 特征权重取其平均值。新话题命名采取去词的方法, 将权重最大的那个话题设为原话题, 然后去掉停用词原序排列即可。

### 3 实验结果与分析

为了检测 SP&HC 聚类算法在微博话题检测中是否具有优势, 能否提高微博话题检测的性能及正确率, 对 SP&HC 聚类算法在微博话题检测中的应用进行对比实验。

实验严格按照 TDT 会议对话题检测而专门制定的 TDT 话题评测规则进行, 主要从以下 3 个指标进行对比考核: 召回率、准确率、 $F$  值。

召回率 ( $R$ ): 对于某一个话题属性, 系统能够正确识别出来的话题文本数 ( $D$ ) 占系统应该识别出来的话题文本总数 ( $T$ ) 的比重。

$$R = \frac{D}{T} \times 100\%$$

正确率 ( $P$ ): 对于某一个话题属性, 系统能够正确识别出来的话题文本数 ( $D$ ) 占系统已经识别出来的话题文本数 ( $U$ ) 的比重。

$$P = \frac{D}{U} \times 100\%$$

$F$  值: 描述  $R$  与  $P$  综合性能的指标, 是反应话题跟踪技术整体性能的重要标准。

$$F = \frac{2PR}{P + R} \times 100\%$$

实验设备: 惠普 Compaq dx2390 服务器, 英特尔 Pentium (R) Dual-core E5200 2.5 GHz 处理器, 2 046 M 内存, Microsoft Windows XP Professional (5.1, 版本 2600) 操作系统, 网络带宽 10 M。

实验通过用传统的 Single-Pass 增量聚类、HAC 以及 SP&HC 聚类算法, 分别对在网页随机采集和



抽取的 16 543 个 XML 文件进行话题检测对比,得到实验结果的评测值(见表 1)。

由表 1 可见,Single-Pass 聚类算法和 HAC 算法虽然可以很快完成话题检测,但是其准确率及综合性相对较差,而 SP&HC 聚类算法虽然在时间效率上还有待提高,但是其在召回率、准确率及综合性方面都明显优于前 2 种,SP&HC 聚类算法能够提高微博话题检测的综合性。

表 1 话题检测评测结果平均值

算法	R/%	P/%	F 值/%	t/s
SP&HC 聚类	81.43	81.57	81.50	109
Single-Pass 聚类	57.93	62.84	60.29	34
HAC	64.37	56.88	60.39	41

## 4 结语

本文通过对 Single-Pass 聚类算法和 HAC 算法的优缺点的对比分析,提出了两者相结合的微博话题检测 SP&HC 聚类算法。实验结果表明,SP&HC 聚类算法可适应于微博话题检测、兼容两者的优点,能够提高微博话题检测的召回率、准确率等综合性

(上接第 22 页)

制,株高显著降低,地上部干重积累和侧根数目显著减少。盐浓度低于 100 mmol/L 时,甜瓜对于盐胁迫表现出一定的适应和调节能力,盐浓度高于 100 mmol/L 时,其 *RSH*, *RDW* 和 *RLR* 均显著减少。

4) 100 ~ 200 mmol/L 浓度下的盐胁迫最能反映不同甜瓜品种萌发期和幼苗期耐盐性差异。

5) 3 种不同的耐盐指数分析方法显示,虽然甜瓜相对耐盐性在萌发期、幼苗期可能会不同,但是其耐盐或盐敏感的性质不会改变。6 种甜瓜的综合耐盐能力从大到小依次为美浓 1 号、新蜜 11 号、莎白 3 号、青边皇后、新世纪和新玉露。

## 参考文献:

- [1] 马克奇,陈年来,王鸣. 甜瓜优质栽培理论与实践[M]. 北京:中国农业出版社,2001:44-45.
- [2] 赵可夫,李法曾. 中国盐生植物[M]. 北京:科学出版社,1999:41.
- [3] Al-Khateeb S A. Effect of salinity and temperature on germination, growth and ion relations of *Panicum turgidum* Forssk[J]. Bioresour Technol,2006,97(2):292.
- [4] 孙璐,周宇飞,汪澈,等. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学,2012,45(9):1714.

能. 虽然 SP&HC 聚类算法在时间效率上还有待提高,但是 SP&HC 聚类算法对微博热点话题检测的研究有较大的贡献。

## 参考文献:

- [1] 百度百科. What is Micro-blog? [EB/OL]. (2010-05-20) [2013-11-22]. <http://baike.baidu.com/subview/1567099/11036874.htm?fr=aladdin>.
- [2] 张旭洁,刘宗田. 事件本体构建中几个关键问题的研究[D]. 上海:上海大学,2013.
- [3] 王娜,李明. Web 文本挖掘的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2005.
- [4] 关冕,马军. Web 论坛结构化数据抽取技术研究[D]. 济南:山东大学,2010.
- [5] 洪宇. 基于语义结构和时序特征的话题检测与跟踪技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [6] 孙胜平,张真继. 中文微博客热点话题检测与跟踪技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- [7] 任姚鹏,陈立潮,张英俊,等. 结合语义的特征权重计算方法研究[J]. 计算机工程与设计,2010,31(10):2381.
- [5] 李宏,邓江宇,程平. NaCl 胁迫对盐桦种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 新疆农业科学,2010(3):54.
- [6] 张建锋,李秀芬,宋玉民,等. 盐分胁迫对林木种子发芽率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2004(3):32.
- [7] 朱世杨,张小玲,罗天宽,等. 花椰菜种质资源萌发期耐盐性综合评价[J]. 核农学报,2012,26(2):380.
- [8] 孙永媛,肖凯,王冬梅,等. 不同小麦品种苗期的耐盐性鉴定及其相关生理参数研究[J]. 河北农业大学学报,2010,33(6):84.
- [9] 崔江慧,谢登磊,常金华. 高粱材料耐盐性综合评价方法的初步建立与验证[J]. 植物遗传资源学报,2012,13(1):35.
- [10] Sivritepe N. The effects of NaCl priming on salt tolerance in melon seedlings grown under saline conditions[J]. Scientia Horticulturae,2003,97:229.
- [11] Sivritepe H O. The effects of NaCl pre-treatments on salt tolerance of melons grown under long-term salinity[J]. Scientia Horticulturae,2005,106(4):568.
- [12] 张玉鑫. NaCl 胁迫对甜瓜种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2005:20.
- [13] Aragao C A. Evaluation of melon cultivars under salt stress[J]. Revista caatinga,2009,22(2):21.

# RSSI 曲线拟合的误差分析与分段方法

邹东尧, 郑道理, 李晨

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对接收信号强度(RSSI)测距算法常用 Shadowing 模型在一些实际测距中固定节点受到地形等环境因素影响致使其使用受限的问题,提出了一种基于多项式分段拟合的 RSSI 测距算法.该算法利用最小二乘拟合函数法,将采样的有限个 RSSI 数据分段拟合成连续的三次多项式函数,以便更准确地模拟特定环境下的 RSSI 衰减情况.利用该算法进行实验和仿真,寻求合适的分段数和分割点,结果表明:用 2 段法进行拟合可将平均误差由 2.25 m 降低至 0.877 8 m.

**关键词:**接收信号强度;曲线拟合;最小二乘法;分段拟合

**中图分类号:**TN98 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.016

## Error analysis and ranging algorithm of RSSI polynomial piecewise fitting

ZOU Dong-yao, ZHENG Dao-li, LI Chen

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

**Abstract:** Aiming at the problem that the Shadowing model commonly used of received signal strength indicator(RSSI) ranging algorithm was limited due to the effect of environmental factors such as the terrain in practice, a RSSI ranging algorithm was proposed based on piecewise polynomial fitting. This method, using of least-squares fitting function, fitted the sampling of a finite number of RSSI data to a continuous piecewise cubic polynomial function, which could simulate more accurately RSSI attenuation under specific circumstances. Using this algorithm and simulation experiments to seek appropriate number of segments and split points, the results showed that the average error was decreased from 2.25 m to 0.877 8 m using two-piecewise fitting method.

**Key words:** received signal strength indicator(RSSI); curve fitting; least squares method; piecewise fitting

## 0 引言

无线传感网络定位被广泛运用于物联网技术中<sup>[1]</sup>, WSN 定位分为基于测距和非测距 2 种,其中基于测距算法包括 RSSI, TOA, TDOA 和 AOA 等<sup>[2-3]</sup>. 由于 RSSI 测距技术不需要额外的通信负担,可直接从接收信号的强度中获取距离信息,因

此降低了对节点的硬件要求,压缩了成本,更适合于大规模传感器网络.在 RSSI 技术中常用来分析信号强度分布的模型有:自由空间传播损耗模型(Free-Space)<sup>[4]</sup>和对数-常态分布模型(Shadowing)<sup>[5]</sup>. Free-Space 是基于信号在理想空间环境下的损耗模型,因此在实际运用中,常利用 Shadowing 模型进行分析.但由于特定环境下信号会受到反射

**收稿日期:**2013-12-06

**基金项目:**河南省科技厅科技攻关项目(112102210321);河南省产学研合作项目(122107000022);河南省教育厅科技攻关项目(2010B510023)

**作者简介:**邹东尧(1973—),男,河南省许昌市人,郑州轻工业学院副教授,主要研究方向为物联网定位、分布式网络.

和多径效应等影响,其损耗分布并不完全符合 Shadowing 模型<sup>[6-7]</sup>。

为了进一步改进 RSSI 测距精度,本文拟提出一种基于多项式分段拟合的 RSSI 测距算法,使之可以更真实地模拟特定环境下信号的衰减曲线,以期显著提高系统的测距精度。

## 1 RSSI 原理及最小二乘法曲线拟合

### 1.1 信号衰减模型

常用 Shadowing 模型分析无线信号的强度与传输距离的关系:

$$[P_r(d)]_{\text{dBm}} = d[P_r(d_0)]_{\text{dBm}} - 10 n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \times X_{\text{dBm}}$$

其中,  $P_r(d)$  表示距离发射端为  $d$  时接收端接收到的信号强度即 RSSI 值/dBm;  $d$  为发射端与接收端之间的距离/m;  $P_r(d_0)$  为参考距离处接收到的信号功率/dBm;  $d_0$  为参考距离/m;  $n$  为与环境有关的路径损耗指数;  $X_{\text{dBm}}$  为高斯随机变量,平均值为 0。可以看出, RSSI 值是随距离  $d$  的增加而减小的,且每一个 RSSI 值只映射一个距离值,因此可以利用已测定 RSSI 的值进行距离推算,从而实现测距。在实际应用中,通常取  $d_0 = 1$  m,简化的模型公式为

$$[P_r(d)]_{\text{dBm}} = [-A]_{\text{dBm}} - 10 n \lg(d) \quad (1)$$

其中,  $-A$  为无线收发节点相距 1 m 时接收节点接收到的 RSSI 值。  $A$  和  $n$  都是经验值,同具体使用的硬件节点和无线信号传播的环境密切相关,因此在不同的实际环境下  $A$  和  $n$  参数不同,其测距模型不同。当  $n = 3$ ,  $A$  取值不同时简化模型的信号衰减曲线如图 1 所示。

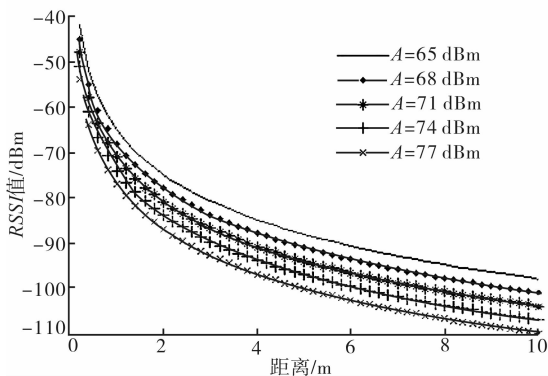


图 1 简化的 Shadowing 模型曲线

### 1.2 RSSI 数据处理

接收端在同一位置会收到多个不同 RSSI 值,一

般处理中用多次测量的均值来代替<sup>[8]</sup>。但由于无线信号传播中会受到各种因素的干扰,所接收到的 RSSI 值服从高斯分布,高斯分布函数为

$$F(x) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}}$$

每个采样点为了保证数据的精确性都要利用高斯滤波处理,采用高斯滤波法滤除 RSSI 的小概率、大干扰事件值,然后求几何均值,最终得到波动较小的数值。具体过程为: 1) 同一地点连续采样  $N$  次得到的  $N$  个 RSSI 值,放入向量  $\mathbf{gauss}[]$  中; 2) 利用  $\mathbf{gauss}[]$  中的 RSSI 数值先后求均值  $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{gauss}[i]$  和方差  $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mathbf{gauss}[i] - \mu)^2$ ; 3) 根据均值  $\mu$  和方差  $\sigma^2$  确定 RSSI 的选值范围  $0.6 \leq \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}} \leq 1$  (这里选取临界值为 0.6); 4) 利用选值范围滤除不符合条件的小概率数值,计算修正后的 RSSI 均值,即高斯滤波的结果。高斯滤波可以解决实际环境中信号传播易受干扰的问题,但是只能消除那些小概率短时的扰动,对于环境中的多径传输和反射等问题其效果并不明显。

### 1.3 最小二乘法曲线拟合

曲线拟合中的最小二乘原理: 对给定的数据点  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 在取定的函数类  $\Phi$  中, 求函数  $f(x) \in \Phi$ , 使误差公式  $e = \sum_{i=0}^m [f(x_i) - y_i]^2$  中平方和  $e$  最小。

最小二乘法曲线拟合步骤为:

1) 设采样点数为  $m$ , 采样点为  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $x_i$  处的 RSSI 值为  $y_i$ )。

2) 设拟合函数  $P(x)$  由线性无关的连续函数  $g_0(x), g_1(x), \dots, g_s(x)$  线性表示为

$$P(x) = a_0 g_0(x) + a_1 g_1(x) + \dots + a_s g_s(x)$$

其中  $a_1, a_2, \dots, a_s$  为系数。

3) 构造偏差平方和函数  $J(a_1, a_2, \dots, a_s)$ , 且

$$J = \sum_{i=0}^m [P(x_i) - y_i]^2$$

4) 构造关于  $a_1, a_2, \dots, a_s$  的线性方程组: 求函数  $J$  的最小值的必要条件, 也即求解偏导数为 0 时的  $a_1, a_2, \dots, a_s$ , 则函数  $P(x) = a_0 + a_1 g_1(x) + \dots + a_s g_s(x)$  即为求得的偏差平方和最小的拟合函数。常用平均误差和均方误差来评价拟合函数的精准度, 平均误差和均方误差分别表示为

$$E_1 = \frac{\sum_{i=0}^m (y_i - P(x_i))}{m} \tag{2}$$

$$E_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^m (y_i - P(x_i))^2}{m}} \tag{3}$$

## 2 算法分析

### 2.1 分段拟合的必要性

由于 Shadowing 模型是信号的理想模型,对周围环境的其他干扰因素没有考虑在内.尤其当信号传输范围超过一定距离后,衰减情况严重偏离 Shadowing 模型.同时考虑到信号在较远距离上的衰减速度变缓(如图 1 所示),此时对信号强度估计的很小偏差即会造成距离上较大的误差,严重影响到距离的估计.因此,为了增加测距距离和提高测距精度,对 RSSI 曲线拟合进行分段处理来改进算法就显得非常必要.另外 Shadowing 模型拟合的结果是对数类型的函数,在硬件或软件实现中也会增加设计和计算难度.进行分段拟合时,相应的分段点的选取也会影响到整体的估计结果,本文在利用 Matlab 分析各种拟合算法对测距精度的影响基础上,再寻求最优的分段数和分段方法.

### 2.2 算法步骤

本文提出的算法步骤如下.

1)实地采集 RSSI 数据.在同一地点采集 50 次实验数据,然后进行高斯滤波,去除小概率大干扰的信号,取平均值为最终数据.高斯滤波减少了小概率、大干扰事件对整体测量的影响,提高了测距信息的准确性.

2)利用 Shadowing 模型拟合函数曲线.首先根据拟合误差判定是否需要分段拟合进行精度的提高,若该模型的误差能够满足具体测距需求,则无需进行分段处理,否则进行下一步骤.其次若采用需分段拟合方式,则可利用该模型的函数曲线进行分段分析.

3)分析衰减曲线,根据衰减程度选择段数.由于信号的衰减曲线呈现对数下降,在下降后期逐渐平缓,该阶段的拟合函数若有较小偏差就会被严重扩大.衰减曲线的这一特征决定了测距远近不同对拟合函数的要求也不相同.例如图 1 所示:若测距距离在 2 m 之内,此段函数下降速度快,RSSI 值与距离关系的区分度高,其拟合函数使用 1 段即能满足需求;

若在 6 m 之内,在 2 ~ 6 m 范围内的函数衰减幅度大致相同,适合 2 段分析法;若将测距范围扩展为 10 m,则在 6 ~ 10 m 范围内的衰减趋势相同,适合 3 段分析.为了对比不同段数对测距结果的影响程度,本文分别就 1 ~ 4 段对曲线函数进行拟合,同时考虑到计算量问题最终选择出合适的分段数.

4)分析衰减曲线,根据平滑程度和拟合误差选择分段点.步骤 3)的分段方法根据衰减曲线平缓趋势只能大致确定分段点处,为了寻求最优分段处,本文采用浮动分段处来计算不同分段点时的测距误差,从而找到误差最小的分段方式.

## 3 实验分析与验证

### 3.1 数据采集

实验选取带有 IEEE 802.15.4 通信标准的 CC2530 智能主板作为收发设备. CC2530 内嵌 RF 无线模块,当处于接收状态时可根据接收到的数据包直接计算出 RSSI 值.

选择室外无遮挡物的开阔地,固定参考节点位置并选择发送模式,发射功率设定为 4 dBm,有效通信半径为 10 m 左右.移动未知节点,并记录 RSSI 值及其与固定节点的距离,为了减小天线的非全向性对采样结果的影响采样点设置如图 2,把相同距离上 4 点经过高斯滤波的采样值相加求平均值,记录如表 1.

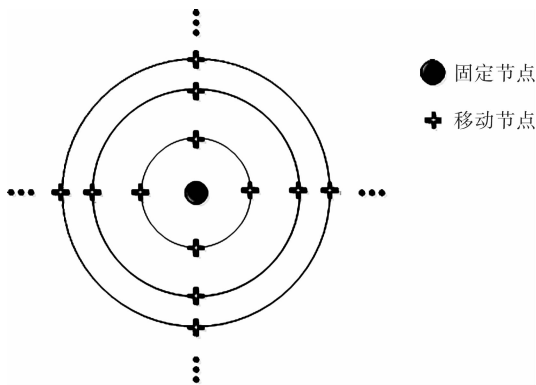


图 2 采样点设置

### 3.2 Shadowing 模型拟合

利用表 1 所测得的 23 点数据拟合 0 ~ 10 m 范围内 RSSI 的衰减函数,首先使用常用的 Shadowing 模型拟合.

根据公式 ① 设拟合函数为

$$P(x) = a_1 - 10a_2 \lg(x)$$

利用最小曲线拟合得到系数  $a_1 = -78.2, a_2 =$

2.31, Shadowing 模型拟合函数为

$$P(x) = -78.2 - 23.1 \lg(x)$$

表1 实验数据

距离/m	RSSI/dBm	距离/m	RSSI/dBm
0.14	-56.1	2.10	-87.0
0.20	-61.0	2.53	-90.1
0.24	-64.0	3.10	-91.0
0.30	-67.0	3.50	-93.3
0.40	-69.0	4.50	-95.0
0.50	-72.0	5.05	-96.6
0.73	-74.0	5.48	-93.0
0.97	-76.0	6.70	-96.1
1.08	-78.0	7.50	-96.0
1.27	-80.0	7.57	-97.0
1.40	-87.0	9.24	-97.7
1.62	-83.4		

拟合曲线如图3所示. 根据公式②③求出拟合误差: 平均误差为1.6280, 均方误差为3.9460.

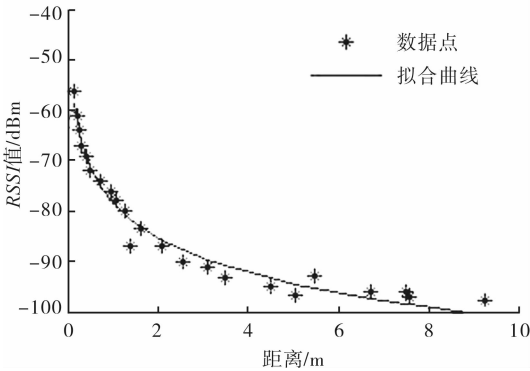


图3 Shadowing 模型拟合结果

由图3可知随着距离增加, 误差越大, 实际数据偏离模型曲线越严重, 当超过一定距离时 Shadowing 模型已经不再适用.

3.3 最小二乘多项式拟合

无线信号在实际传输中, 总会受到环境中各种因素的干扰. 不同的应用环境受到的干扰不相同, 即使同一信号在同一环境中不同位置的衰减程度也有差别, 多径效应也会造成在有些区域信号的衰减并不随距离增加而增大<sup>[9]</sup>. 各种因素对信号传输的影响使得实际信号的衰减情况与 Shadowing 模型曲线相差很大. 由于固定节点周围环境一般变化不大, 因此利用多项式函数进行拟合可以弥补 Shadowing 模型的不足.

设拟合函数为3阶多项式为

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

1) 整体拟合. 将表1中数据进行整体三次多项式最小二乘拟合, 得到多项式系数为  $a_0 = -59.8$ ,  $a_1 = -19.8$ ,  $a_2 = 3.5$ ,  $a_3 = -0.197$ . 拟合函数为

$$P(x) = -59.8 - 19.8x + 3.5x^2 - 0.197x^3$$

平均误差为1.7760, 均方误差为2.3780.

2) 分2段拟合. 为保持曲线平滑分割点尽量选择变化幅度相对较小的点, 如图3所示, 选取前13点为第1段, 后20点为第2段, 分别对2段进行拟合得到函数为

$$P(x) = \begin{cases} -53.28 - 45.43x + 25.18x^2 - 5.38x^3 & 0 < x < 2.1 \\ -71 - 10.85x + 1.61x^2 - 0.08x^3 & 2.1 \leq x \leq 10 \end{cases}$$

平均误差为1.2963, 均方误差为1.6897.

3) 分3段拟合. 选取变化幅度较小的点为分割点, 将数据分为3段. 第1段: 0.14 ~ 0.97 m; 第2段: 0.97 ~ 3.5 m; 第3段: 3.5 ~ 9.24 m. 结果为

$$P(x) = \begin{cases} -42.2 - 124x + 169x^2 - 79.4x^3 & 0.14 < x \leq 0.97 \\ -40.7 - 54.5x + 21.3x^2 - 2.91x^3 & 0.97 < x \leq 3.5 \\ -72.7 - 9.84x + 1.43x^2 - 0.07x^3 & 3.5 < x \leq 10 \end{cases}$$

平均误差为0.9549, 均方误差为1.4243.

4) 分4段拟合. 将数据分为4段. 第1段: 0.14 ~ 0.4 m; 第2段: 0.4 ~ 2.1 m; 第3段: 2.1 ~ 4.5 m; 第4段: 4.5 ~ 9.24 m. 结果为

$$P(x) = \begin{cases} -41.8 - 109.48x + 26.55x^2 + 193x^3 & 0.14 \leq x < 0.4 \\ -68.2 + 1.24x - 15.72x^2 + 5.19x^3 & 0.4 \leq x < 2.1 \\ -59.32 - 21.8x + 4.93x^2 - 0.41x^3 & 2.1 \leq x < 4.5 \\ -138.96 + 20.33x - 2.99x^2 + 0.14x^3 & 4.5 \leq x \leq 10 \end{cases}$$

平均误差为0.7329, 均方误差为1.4200.

由 Shadowing 模型拟合、整体拟合、分段(2段、3段、4段)拟合这3种拟合方式的平均误差可知, Shadowing 模型拟合的精度比整体拟合的精度高, 但比2段拟合精度低; 随着分割段数的增加, 拟合的精度会不断提高, 但精度提高的代价是计算量的大幅

增加,故选取2段拟合.

### 3.4 最优分割点的选取

以上实验中将数据进行分段拟合,其分割点的选取采用变化幅度相对较小的点.为了精确找到最优分割点使得算法误差最小,使用2段拟合法,变换分割点并计算相应拟合误差,结果如图4所示.由图4可知定位误差随分割点距离的增加先减小后增大.分割点选在0.7~1.5 m范围内时误差较小,其中平均误差和均方误差的最小点在距离为1.4 m处,此时平均误差为0.877 8 m.

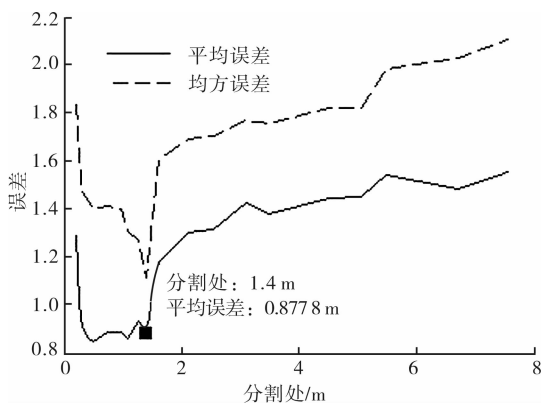


图4 2段拟合的分割点与误差情况

## 4 结语

本文根据一些WSN中固定节点环境相对特殊和稳定的特点,利用分段的最小二乘多项式拟合固定节点附近的RSSI衰减情况.通过实地采集数据和

仿真实验,分别比较了Shadowing模型和各种分段的拟合的误差.最后用2段法进行拟合,并寻找到最优分割点,在此分割点上分段,仿真结果证明,采用该算法可将平均误差由Shadowing模型的2.25 m降低至0.877 8 m.因此,可满足大多数WSN基于距离定位的需求.

### 参考文献:

- [1] 任秀丽,韩静晶.基于无线传感网的海洋监测节点定位算法[J].计算机应用,2012,32(10):2692.
- [2] 薛皓,万江文,冯仁剑.基于TinyOS的TDOA测距误差修正方法[J].北京邮电大学学报,2008,31(1):22.
- [3] 邹东尧,孙辉,郑道理,等.基于锚节点等边三角形分布的质心定位算法研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(5):54.
- [4] 王焱,单欣欣,姜伟.无线传感网络中移动节点定位技术研究[J].传感器技术学报,2011,24(9):1326.
- [5] 方震,赵湛,郭鹏,等.基于RSSI测距分析[J].传感技术学报,2007,20(11):2526.
- [6] 章坚武,张璐,应瑛,等.基于ZigBee的RSSI测距研究[J].传感技术学报,2009(2):285.
- [7] 万国峰,钟俊,杨成慧.改进的RSSI测距和定位算法[J].计算机应用研究,2012,29(11):4157.
- [8] 陈良泽.用矩阵运算实现曲线拟合中的最小二乘法[J].传感器技术,2001,20(2):30.
- [9] 何林娜.数字移动通信技术[M].北京:机械工业出版社,2010:7-8.

# 基于多阈值算法融合的图像分割

吕红力

(温州大学 数学与信息科学学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:**针对一种阈值分割算法很难对不同类型的图像进行有效地分割的问题,提出一种多阈值算法融合的方法.该方法通过不同的算法得到一组阈值,由迭代的方式将它们有机地组合,并定义一个回报函数,来选取最优阈值.实验结果表明,该方法针对不同类型的图像能够选择最优的阈值进行有效的分割,消除了使用者必须具有先验知识的障碍,省去了人工选择分割方法的麻烦.

**关键词:**图像分割;阈值算法融合;回报函数

**中图分类号:**TN911.73 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.017

## Image segmentation based on multi-threshold fusion

LYU Hong-li

(College of Mathematics and Information Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that one kind of threshold segmentation algorithms was difficult for different images for effective segmentation, a multi-threshold algorithm fusion method based on introducing several common threshold segmentation algorithms was presented. This method got a set of thresholds by different algorithms and got a combination of them by organic iterative manner, and defined a reward function to select the optimal threshold. The experiment results showed that this method could be used for different types of image to get optimal threshold value for effective segmentation, eliminate the barriers which the user must have prior knowledge and eliminate the trouble of manually selecting segmentation method.

**Key words:** image segmentation; threshold algorithm fusion; reward function

## 0 引言

阈值分割是一种应用非常广泛的图像处理技术,在图像分割应用中具有非常重要的地位<sup>[1]</sup>. 阈值分割方法有很多种,可以分为6大类<sup>[2]</sup>:基于聚类的方法、基于直方图的方法、基于熵的方法、基于目标属性的方法、基于形态学的方法、空间和局部方法.新的研究成果也不断出现,多是在原有算法的基础上进行改进,如基于最大类间方差方法的改进的Otsu图像多阈值分割方法<sup>[3]</sup>;或者是引入新的

概念和方法,如引入模糊理论的基于FCM和随机游走的地层图像分割方法<sup>[4]</sup>.

大多数的分割算法都是针对某一特定类型的图像而提出的,虽然能取得较好的图像分割效果,但往往不适用于其他类型图像.迄今为止,还没有一种算法是通用的.这种状况给应用带来了很大的障碍,因为使用者必须具备一定的经验才能够正确的选取分割算法.因此,本文拟提出一种多阈值融合的算法,以期针对不同类型的图像能够选择最优阈值进行有效分割,从而减少使用者的经验障碍.

# 1 阈值分割方法

在数字图像处理中,阈值分割是一种分离目标和背景的图像分割方法. 设灰度图像为  $f(x, y)$ , 其灰度范围为  $[0, L - 1]$ , 其中  $L = Z^k$ ,  $k$  为图像像素比特数. 假设根据一定的准则找到一个阈值  $T$ , 把  $f(x, y) > T$  的点设置为 1, 把  $f(x, y) \leq T$  的点设置为 0, 则分割后的图像  $g(x, y)$  可由下式表示

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > T \\ 0 & f(x, y) \leq T \end{cases}$$

一般来说, 找到恰当的阈值  $T$  往往依赖图像的直方图形状和图像的内容. 很多文献针对不同的问题, 提出了不同解决办法, 然而, 没有单一的方法可以解决所有的问题.

## 1.1 迭代阈值分割法<sup>[5]</sup>

迭代阈值分割算法是基于逼近的思想, 它首先选择一个近似的阈值  $T$  作为初始阈值, 利用阈值  $T$  把图像分为 2 个区域  $R_1$  和  $R_2$ , 对区域  $R_1$  和  $R_2$  中的所有像元素计算平均灰度值  $u_1$  和  $u_2$ . 选择新的分割阈值  $T = (u_1 + u_2)/2$ , 重复上述图像分割步骤直到  $u_1$  和  $u_2$  不再变化, 最终得到的  $T$  即为分割阈值.

## 1.2 最大类间方差法<sup>[6]</sup> (OTSU 法)

OTSU 法于 1978 年被提出, 是在判决分析最小二乘法原理的基础上推导得出. 对图像  $I$ , 灰度为  $i$  的像素总数为  $n_i$ , 灰度范围为  $[0, 1, \dots, L - 1]$ , 则像素总和为  $N = \sum_{i=0}^{L-1} n_i$ .

各灰度出现的概率为

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad i = 0, 1, 2, \dots, L - 1$$

其中,  $\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1$ .

把图像中的像素点用近似阈值  $T$  分成 2 类  $C_0$  和  $C_1$ ,  $C_0$  由灰度值在  $[0, T]$  之间的像素组成,  $C_1$  由灰度值在  $[T + 1, L - 1]$  之间的像素组成,  $C_0$  和  $C_1$  的概率分别为

$$p_0 = \sum_{i=0}^T p_i \quad p_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} p_i = 1 - p_0$$

$C_0$  和  $C_1$  的平均灰度分别为

$$u_0 = \frac{1}{p_0} \sum_{i=0}^T ip_i \quad u_1 = \frac{1}{p_1} \sum_{i=T+1}^{L-1} ip_i$$

整幅图像的平均灰度为

$$u = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i = p_0 u_0 + p_1 u_1$$

让  $T$  在  $[0, L - 1]$  内依次取值, 使类间方差  $\sigma_B^2 = p_0(u_0 - u)^2 + p_1(u_1 - u)^2$  最大的  $T$  便是 OTSU 方法的分割阈值.

## 1.3 最小误差阈值分割法<sup>[7]</sup> (Kittler 法)

最小误差分割法源于 Bayes 最小误差分类准则, 令  $t$  表示灰度值, 值为  $t$  的像素在目标和背景中出现的概率记为  $P_0, P_1$ , 则目标和背景灰度概率分布为

$$p_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(t - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

其中,  $i = 0, 1; \mu_i, \sigma_i$  为灰度分布的均值和标准差. 于是, 总分类错误率为

$$P(t) = P_0 p_0(t) + P_1 p_1(t)$$

其中,  $P_0 + P_1 = 1$ . 将此式对  $t$  取微分, 并令微分式子等于 0, 结果是  $P_0 p_0(t) = P_1 p_1(t)$ , 对该式两边取对数后整理得

$$\frac{(t - \mu_0)^2}{\sigma_0^2} + \ln\sigma_0^2 - 2\ln P_0 = \frac{(t - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \ln\sigma_1^2 - 2\ln P_1$$

通过求解上式, 可以得最优阈值  $T_{opt}$ . 但是参数  $\mu_i$  和  $\sigma_i$  未知, 运算困难. J. Kittler 等<sup>[8]</sup> 给出一个解决方法, 其基本思想是最优阈值应该为使得目标和背景的错分概率最小的阈值, 同时给出便于计算的误差分割概率的判别准则函数  $J(t)$ , 准则函数越小, 图像的分割误差也就越小, 分割效果就越好. 准则函数为

$$J(t) = 1 + 2[P_0(t)\ln\sigma_0(t) + P_1(t)\ln\sigma_1(t)] - 2[P_0(t)\ln P_0(t) + P_1(t)\ln P_1(t)]$$

式中,

$$P_0(t) = \sum_{i=0}^t H(i) \quad P_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} H(i)$$

$$\sigma_0^2(t) = \frac{\sum_{i=0}^t [i - \mu_0(t)]^2 H(i)}{P_0(t)}$$

$$\sigma_1^2(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} [i - \mu_1(t)]^2 H(i)}{P_1(t)}$$

$$\text{其中, } \mu_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^t iH(i)}{P_0(t)}, \mu_1(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} iH(i)}{P_1(t)},$$



$H(i)$  表示灰度值  $i$  出现的频率. 最优阈值就是使得准则函数  $J(t)$  取得最小值的阈值.

## 2 多阈值方法融合的算法

通常一种方法都有特定的环境使用, 很难找到一种通用的阈值分割算法, 对于融合不同空间或全局的方法似乎很具有挑战性. 本文作为一个尝试, 提出多阈值融合的算法. 被选择的基阈值的方法及方法的个数可以是不同的, 一般来说要求基算法有较好的性能. 理论上所选取方法的个数越多, 效果就会越好, 但至少为 2 个. 假设由  $n$  个不同的算法得到  $n$  个阈值  $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 设  $T_i$  的权重为  $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 令  $T^* = \sum_{i=1}^n w_i T_i$ , 其中  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . 设图像  $I$  经过平滑、归一化处理后的图像为  $I^*$ , 图像  $I$  使用阈值  $T^*$  分割后得到二值化图像为  $B$ , 令  $M = 1 - I^*$ .

定义一个相异性度量:  $F_{\text{dissimi}} = \sum \sum |B - M|$ .

定义回报函数:  $r = \frac{1}{F_{\text{dissim}} + \delta}$ , 其中  $\delta$  为一个较小的正常量.

回报函数大小反映原始图像  $I$  与二值化图像之间的相似性,  $r$  越大代表对应的阈值越优. 算法的主要步骤如下:

步骤 1: 输入一个图像  $I$ .

步骤 2: 对图像  $I$  平滑归一化, 得到图像  $I^*$ ,  $M$ .

步骤 3: 初始化权重  $w_1, w_2, \dots, w_n$  和迭代次数  $N$ .

步骤 4: 针对图像  $I$ ,  $n$  个不同的算法用于计算阈值, 分别记为  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , 令  $T_i^* = \sum_{j=1}^n w_j^i T_j$ .

( $\sum_{j=1}^n w_j^i = 1, w_j^i \geq 0$ , 第  $i$  次迭代的权重记为  $w_1^i, w_2^i, \dots, w_n^i$ ), 由此得到  $N$  组不同的合阈值, 记  $T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*$ . 用其对图像  $I$  进行分割得到的二值化图像分别  $B_1, B_2, \dots, B_N$ .

步骤 5: 利用回报函数公式, 分别计算对应于  $T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*$  的回报值  $r_1, r_2, \dots, r_N$ , 其中  $r_i$  对应  $T_i^*$ , 并取  $r_{\max} = \max(r_i)$ , 则  $r_{\max}$  对应的阈值  $T^*$  为最优阈值.

步骤 6: 利用  $T^*$  对图像  $I$ , 输出分割结果.

## 3 实验结果

在 Matlab (R2010a) 上对本文所提出的多阈值融合方法进行仿真. 为了简化运算,  $\delta$  取值为 0.001, 迭代次数为 500, 并对 3 张图片进行测试, 采用传统分割视觉效果较好的 Kittler 法和本文方法的分割效果如图 1 所示.

从图 1 的分割结果来看, 本文方法取得了较好的结果. 图 1a) 中, Kittler 方法不能得到正确的分割结果, 而本文方法比较有效. 图 1b) 的图像细节比较复杂, Kittler 方法丢失了较多的细节, 而本文方法细节保存完好. 图 1c) 的下方目标和背景的灰度变化不大, Kittler 方法在图像下方分割失败, 而本文方法效果明显.

为了进一步分析, 给出一个错误度量  $\gamma$ , 其定义为

$$\gamma = \frac{H(I_B, I_C)}{n_p}$$

其中,  $H(I_B, I_C)$  为汉明距离比,  $I_B$  为二值图像,  $I_C$  为 Ground-truth 图像,  $n_p$  为  $I_C$  的像素总和. 将本文方法与迭代法、Otsu 法、Kittler 法的错误度量进行比较, 结果见表 1. 从表 1 可见, 本文方法错误率比较低.

表 1 4 种方法错误度量比较

图片	迭代法	Otsu 法	Kittler 法	本文方法
原图 a	0.063 1	0.056 7	0.054 3	0.052 1
原图 b	0.185 3	0.177 4	0.213 2	0.154 3
原图 c	0.081 2	0.079 5	0.072 1	0.068 1

本文提出的方法能解决单一算法不能适用于不同类型图像的问题, 因为本文方法得到的阈值是基于多种阈值算法之上, 针对不同类型的图像通过组合迭代的方法总能找到最优的阈值, 得到的结果不会差于所选基方法中最优的一个. 这也为机器自动阈值分割提供了一种方法, 省去了人工选择分割方法的麻烦.

## 4 结语

本文提出一种基于多阈值融合的方法, 通过不同的算法得到一组阈值, 由迭代的方式将它们有机地组合, 并定义一个回报函数, 来选取最优阈值, 集中多种阈值算法的优点, 可以根据不同的图像自动的选取适应的阈值, 取得了较好的效果. 但是本文仅仅是作为一个简单的尝试, 毕竟设计一个适用于



图 1 Kittler 法与本文方法分割结果对比

多种图像类型的方法是很具有挑战的. 与单一的阈值分割技术相比虽成功的机会比较大, 但是也有计算量大等问题.

参考文献:

[1] 王志明. 数字图像处理与分析[M]. 北京: 清华大学版, 2012: 98 - 99.

[2] Sezgin M, Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004(1): 146.

[3] 丁锐, 刘甲甲, 李柏林, 等. 改进的 Otsu 图像多阈值分

割方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 214.

[4] 陈圣国, 孙正兴, 周杰. 基于 FCM 和随机游走的地层图像分割方法[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 526.

[5] 张德丰. 详解 MATLAB 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 252 - 253.

[6] 胡颖, 崔伟峰. Otsu 多阈值分割算法的研究[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2010, 25(2): 79.

[7] 赵荣椿, 赵忠明, 赵歆波. 数字图像处理与分析[M]. 北京: 清华大学版, 2013: 348 - 350.

[8] Kittler J, Illingworth J. Minimum error thresholding[J]. Pattern Recognition, 1986, 19(1): 41.

# 基于 Android 的植物叶片图像病害检测

夏永泉, 王会敏, 曾莎

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对目前农业智能系统开发平台多基于 Windows Mobile 操作系统, 开源性、免费性和人机交互性等方面较差等问题, 提出了基于 Android 平台的一种最大类间差法和 Canny 算子结合的植物叶片图像病害检测方法. 该方法首先用自适应中值滤波对叶片图像进行平滑处理, 再对图像进行灰度变换, 然后用最大类间差法对图像进行二值化, 最后基于 Canny 算子对图像进行边缘检测. 实验结果表明, 该方法实现了 Android 平台下的图像检测, 能有效减少边缘噪声, 并且能够有效提取叶片图像病害部分的边缘, 具有很好的鲁棒性、有效性和准确性.

**关键词:**Android 终端; 植物叶片图像; 病害检测; 最大类间差法; Canny 算子; 自适应中值滤波

**中图分类号:**TP391.41 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.018

## Plant leaf image disease detection based on Android

XIA Yong-quan, WANG Hui-min, ZENG Sha

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

**Abstract:** Aiming at the poor performance of agricultural intelligence development platform in open source, free charge and human-computer interaction based on Windows Mobile, under Android platform, a method of leaf image disease detection based on maximum between-cluster variance and Canny operator was proposed. Firstly, adaptive median filter was used to smooth leaf images. Secondly, the images were processed by grey scale transformation. Then, the transformed images were segmented to bi-value images by adopting a method based on maximum between-cluster variance. Finally, the bi-value images images were processed by edge detection based on Canny operator. Experimental result showed that this method achieved leaf image disease detection under Android platform. The method which could reduce marginal noise and extract the edge of leaf image disease effectively provided robustness, effectiveness and correctness.

**Key words:** Android terminal; plant leaf image; disease detection; maximum between-cluster variance; Canny operator; adaptive median filter

## 0 引言

近年来, 中国的农业专家及科研人员基于 PC (personal computer) 机、个人数字助理 PDA (personal

digital assistant) 和手持个人计算机 HPC (hand PC) 等应用终端, 运用均值滤波<sup>[1]</sup>等图像处理技术, 对花生、玉米、小麦等农作物的病害等农业智能系统及其通用开发平台进行了大量的研究<sup>[2]</sup>. 但这些应

收稿日期: 2013-12-03

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

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

用终端价格昂贵、功能简单,对网络环境的依赖性也很强<sup>[3]</sup>,适用性很低,导致其很难被推广.除此之外,现在大多基于 Windows Mobile 操作系统<sup>[4]</sup>开发的农业智能系统,开源性、免费性和人机交互性等方面都较差.

随着 Google 公司发布 Android 操作系统,智能手机在全世界的发展以及中国在 3G 网络覆盖工程上的推进,3G 智能手机在中国得到了迅速的发展<sup>[5]</sup>. Android 智能 3G 手机集通话、上网等多种功能于一体,价格低廉,而且不需要再次投入;同时,开源、免费、支持语音、视频、触屏等新的人机交互技术的 Android 操作系统,不但为软件设计者提供了更灵活的开发空间,而且为研究开发开源、免费以及操作更具人性化的农业智能系统提供了很好的开发平台,使基于 Android 的植物叶片病害诊断系统的设计成为可能.利用图像处理技术进行叶片图像病害检测是一种有效方法,若能用智能终端拍摄病害图片,通过图像处理以及信息反馈得到诊断结果,用户便能及时诊断病害,从而提高农业技术含量和经济效益.

为使农业病虫害的识别和诊断专业技术走向普通农户,本文拟提出一种基于 Android 的植物病害叶片的图像检测方法,构建开源、免费的通用开发环境,并以花生褐斑病为例,在 Android 系统平台下实现对叶片图像的病害检测,以期同类的系统开发和移植提供有益参考.

## 1 病害图像检测

### 1.1 自适应中值滤波平滑处理

Android 系统可以通过拍照或者浏览存储卡照片进行图像获取. Android 系统上的摄像头捕获的照片可能为 720 p 甚至更高的像素,噪声很多,一般需将这些照片处理为数据处理量允许接受的大小.自适应中值滤波的实现可以分为 3 步: 1) 对图像中各区域的噪声进行检测; 2) 根据各区域受噪声污染状况确定滤波窗口的尺寸大小; 3) 对检测出的噪声点进行滤波处理. 自适应中值滤波的算法流程如图 1 所示. 其中,  $S_{xy}$  是当前处理的滤波窗口大小;  $Z_{\min}$ ,  $Z_{\max}$ ,  $Z_{\text{med}}$  分别是  $S_{xy}$  滤波窗内的灰度最小值、灰度最大值和灰度中值;  $Z_{xy}$  是坐标  $(x, y)$  处的灰度值;  $S_{\max}$  是  $S_{xy}$  滤波窗允许的最大值.

### 1.2 灰度化处理

通过智能终端获取的叶片图像主要是 24 位真彩色 BMP 图像,彩色图像的每个像素需要用  $R, G, B$

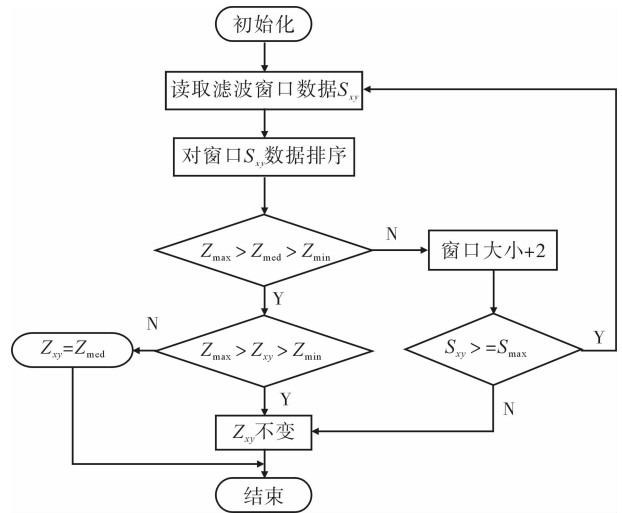


图 1 自适应中值滤波的算法流程图

3 个分量字节表示. 而 256 色的灰度 BMP 图像, 1 个像素只需要用 1 个字节来表示. 将 24 位真彩色图像转换为灰度图像后, 图像缩小为原来的 1/3. 图像灰度化不但节约存储容量, 而且也大大减小计算量, 因此一般将彩色图像转换成灰度图像. 转换公式为

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

其中,  $R, G, B$  分别为彩色图像中红、绿、蓝 3 个分量的灰度值,  $Y$  为转换后灰度图像的灰度值.

### 1.3 最大类间差法 (OTSU) 二值化

对任意一副图像, OTSU 一般采用统计方法获得阈值. 首先求前景点数和背景点数的平均值方差以及 2 个类的各自均方差, 然后再找出使 2 个方差比达到最大的阈值, 即为该图像的最近阈值<sup>[6]</sup>.

按阈值  $k$  将灰度级为  $L$  的图像分为  $C_0(0, 1, \dots, k)$  和  $C_1(k+1, k+2, \dots, L-1)$  2 类,  $C_0$  和  $C_1$  的出现概率分别为

$$\omega_0 = P_r(C_0) = \sum_{i=0}^k p_i$$

$$\omega_1 = P_r(C_1) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i = 1 - \omega_0$$

$C_0$  和  $C_1$  的均值分别为

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^k i p_i}{\omega_0}$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=k+1}^{L-1} i p_i}{\omega_1} = \frac{\sum_{i=k+1}^{L-1} i p_i}{1 - \omega_0}$$

$C_0$  和  $C_1$  的类方差分别为

$$\sigma_0 = \sum_{i=0}^k \frac{(i - \mu_0)^2 p_i}{\omega_0}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sum_{i=k+1}^{L-1} (i - \mu_1)^2 P_i}{\omega_1}$$

当定义的类型方差使得  $\sigma_a^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2$  最大时,此时前景点和背景点分离状态最佳,由此确定阈值  $k$  的大小.

#### 1.4 Canny 算子边缘检测

Canny 算子的实现步骤<sup>[7]</sup>为平滑图像、计算梯度的幅值和方向、非极大值抑制、双阈值方法检测.

1) 平滑图像:选用一维高斯函数  $G_s(x)$  构造滤波器,分别按行和列对原始图像  $f(x,y)$  进行卷积操作,得到平滑后图像  $L(x,y)$ .

$$G_s(x) = \frac{\exp(-x^2/(2\sigma^2))}{2\pi\sigma^2}$$

$$L(x,y) = [G_s(x)G_s(y)] \times f(x,y)$$

这个表达式与高斯函数的一阶导数<sup>[8]</sup>近似.其中,  $\sigma$  是高斯函数中的标准差,用来控制平滑程度.

2) 计算梯度幅值和方向<sup>[9]</sup>:对梯度计算采用求偏导的方法. Canny 算子通过  $2 \times 2$  邻域一阶偏导的限差分来计算平滑后图像  $L(x,y)$  的梯度幅值  $P(x,y)$  以及梯度方向  $Q(x,y)$ .

$$P(x,y) = \sqrt{k_x^2(x,y) + k_y^2(x,y)}$$

$$Q(x,y) = \arctan[k_x(x,y), k_y(x,y)]$$

$$f_x = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.5 \\ -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad f_y = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ -0.5 & -0.5 \end{bmatrix}$$

其中,  $k_x$  和  $k_y$  分别是滤波器  $f_x$  和  $f_y$  对原图像  $f(x,y)$  沿行、列作用的结果.

3) 非极大值抑制:在邻域的 8 个方向,用  $3 \times 3$  窗口对  $P(i,j)$  的所有元素,沿梯度方向进行梯度幅值插值计算.将邻域中心元素  $P(i,j)$  的每个点与沿梯度方向的 2 个梯度幅值插值相比较,如果  $P(i,j)$  的值小于 2 个插值,则将  $P(i,j)$  对应的边缘标志位赋值 0.

4) 双阈值方法检测:高阈值  $H_{th}$  和低阈值  $L_{th}$  对经过非极大值抑制的梯度幅值进行处理,赋 0 值给梯度小于阈值的像素灰度,分割后得到阈值边缘图像  $Q(i,j)$  和  $K(i,j)$ ,在  $Q(i,j)$  中连接边缘轮廓.连接到端点时,在  $K(i,j)$  中寻找其中的弱边缘点,填补  $Q(i,j)$  中的边缘空隙.

## 2 实验结果

### 2.1 软件设计与开发环境

本文设计的系统流程如图 2 所示,系统软件构

架如图 3 所示.

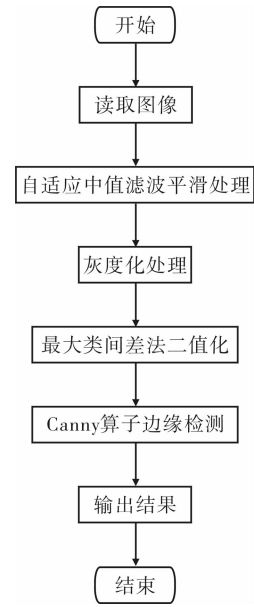


图 2 系统流程图

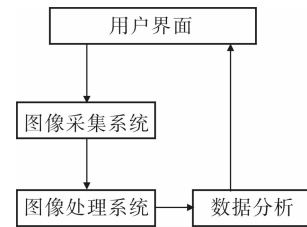


图 3 软件构架

开发环境在 Windows 操作系统下,由 JRE (Java runtime environment) + ADT-bundle (Android development tools) 构建.其中, JRE 是 Java 运行环境, ADT-bundle 是集成了 Eclipse 和 Android SDK 的开发工具包<sup>[10]</sup>. Eclipse 是 Android 应用程序开发 IDE (integrated development environment); Android SDK 是由 Google 提供的完全开放源代码的 Android 软件开发工具包.本实验选择 Android 4.0 系统.

### 2.2 病害检测结果

本文测试花生褐斑病,采集的原始图像如图 4 所示,处理后的图像如图 5—图 7 所示.实验结果显示:在 Android 平台下实现对花生病害叶片的图像检测是可行的.本实验中,在光线较好、背景较简单的情况下获取的病害叶片,处理效果比较理想,稳定性和准确性较好.但在光线不好、发生抖动、模糊的情况下获取的病害叶片,图像检测效果可能会降低.整体上来说,系统不受网络的限制,设计合理、

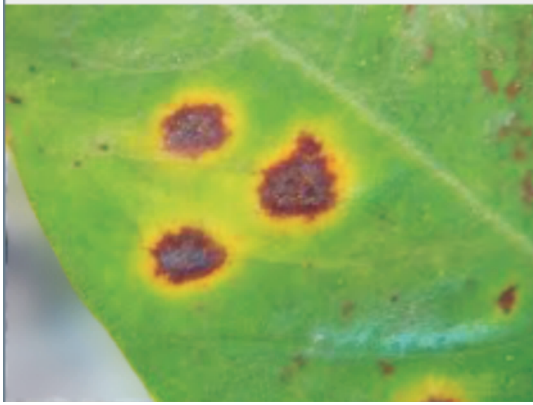


图 4 原始图像



图 7 边缘检测后的图像

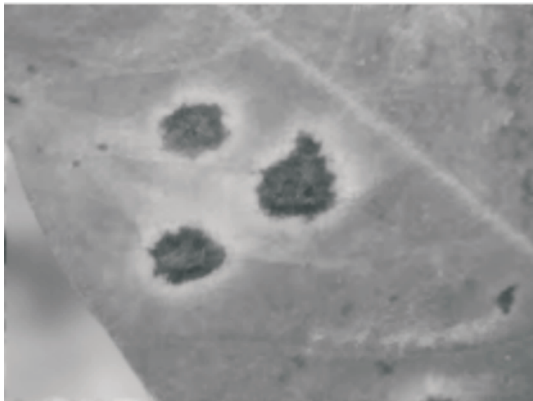


图 5 滤波及灰度化后的图像



图 6 二值化图像

便携,界面操作简单,但会受到光照强度、背景复杂程度等条件的影响,可靠性还待加强.

### 3 结论

本文提出了一种基于 Android 终端的植物病害叶片的图像检测方法. 利用 OTSU 能够有效地计算出使直方图呈现双峰性图像时的最佳阈值,以便于

对图像进行二值化处理,最后运用 Canny 算子来检测叶片病害图像边缘,大大改善了叶片病害图像的边缘提取效果. 实验结果表明基于 OTSU 和 Canny 算子的图像检测方法对于直方图呈现双峰性的图像具有很好的效果,能有效减少边缘噪声,并且能够有效提取叶片图像病害部分的边缘,具有很好的鲁棒性、有效性和准确性.

#### 参考文献:

- [1] 夏永泉,徐洁,崔伟. 均值滤波中邻域均值的快速计算[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2008,23(3):57.
- [2] 刘晴蕊,何东健,张宏鸣,等. 苹果病害智能诊断方法研究与设计[J]. 农机化研究,2011(4):82.
- [3] 李志达. 基于互联网的农业专家系统发展研究[J]. 农业科技与装备,2011(6):143.
- [4] 李伟,芦东昕,柳长安. 基于 Windows Mobile 的智能终端上自动化测试研究[J]. 计算机工程与设计,2006,27(21):111.
- [5] 关富英,龙世彤,黄婧. 3G 时代农村移动信息服务研究[J]. 科技情报开发与经济,2011,21(4):140.
- [6] 左奇,史忠科. 一种基于数学形态学的实时车牌图象分割方法[J]. 中国图象图形学报,2003,8(3):281.
- [7] 宋莹,陈科,林江莉,等. 基于图像分块的边缘检测算法[J]. 计算机工程,2010,36(14):202.
- [8] 陈燕龙,祝成虎. 基于 Canny 算子的边缘检测改进算法[J]. 计算机应用与软件,2008,25(8):57.
- [9] 李牧,闫继红,李戈,等. 自适应 Canny 算子边缘检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报,2007,28(9):52.
- [10] 尚明华,秦磊磊,王风云,等. 基于 Android 智能手机的小麦生产风险信息采集系统[J]. 农业工程学报,2011(5):188.

# 数据仓库技术在青干统计系统中的应用

朱付保, 徐显景, 霍晓齐

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对传统青干管理工作中存在数据分散、数据规则不统一、数据信息化水平低等问题,提出了基于数据仓库技术的青干工作信息年度统计系统的设计方案.系统采用组件式开发技术,按照C/S体系结构搭建系统框架,采用MVC架构模式实现程序的表现层、控制层和模型层的分离,并运用数据仓库的数据组织理念使数据的信息化水平和基于数据的多维分析能力都得到极大提高.以河南省为应用实例,验证了该系统设计方案的合理性和有效性.

**关键词:**数据仓库技术;数据集成与共享;数据融合;青干统计系统

**中图分类号:**TP315 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.019

## Application of data warehouse technology in the statistical system of young cadre

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

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

**Abstract:** Aimed at the problem existed in the previous management system of young cadres, such as scattered data, no unified data rules and low level of information, a design scheme of statistical system based on the technology of data warehouse was proposed. The system used component-based development techniques and C/S architecture to build the system framework, and used MVC architectural pattern to achieve the separation of presentation layer, control layer and the model layer. The level of information and the capability of multidimensional data analysis had been greatly improved by applying the concept of data warehouse. He'nan Province as an application example proved that the design of the system was reasonable and effective.

**Key words:** data warehouse technology; data integration and sharing; data fusion; statistical system of young cadre

## 0 引言

中国的电子政务经过十几年的建设,取得了一定成就.但是,由于起点低、技术水平相对滞后等问题而出现的“信息孤岛”和“黑洞”现象,严重影响了

信息化的整体成效,对信息资源的共享产生了极大的阻碍<sup>[1]</sup>.计算机处理技术在各部门中得到了广泛应用,这些系统为组织工作的信息化管理和服务带来了显著的效益,但同时在实际运用中也产生了大量的分散于各部门的数据信息,这些数据信息集成

收稿日期:2013-11-22

基金项目:河南省科技攻关计划项目(122102210492)

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

能力差且难以对数据从整体上进行更为有效的分析. 面对大量繁杂而分散的数据资源, 如何安全有效地管理和重组数据, 提炼出统计综合数据信息, 以供政府部门和社会各界利用, 成为目前各行业所面临的一个比较难于解决而又亟待解决的问题<sup>[2]</sup>. 数据仓库技术的产生和发展, 为处理大量繁杂且分散的数据提供了一种新的理论和方法指导, 它是在传统数据库技术的基础上发展起来的, 是现代计算机系统信息处理技术的热点之一, 它的出现给决策支持系统的发展注入了新的活力<sup>[3]</sup>. 针对河南省青干工作管理的实际情况和数据仓库发展所提供的方法指导及相关技术支持, 本文拟设计实现基于数据仓库技术的青干工作信息年度统计系统, 以期提高组织部门工作效率、深化数据分析利用水平、增强辅助决策能力, 并为类似系统的设计开发提供有益参考.

## 1 数据仓库技术

著名的数据仓库之父 W. H. Inmon 对数据仓库 (data warehouse) 的定义描述为: 它是一个面向主题、相对稳定、集成、反映历史变化的数据集, 用于支持管理决策<sup>[4]</sup>. 数据仓库是一项基于数据管理和利用的综合性技术和解决方案, 它不同于传统的用于事务处理的数据库, 数据仓库将来源各异的数据经过加工处理形成有规律的信息, 以供决策者分析使用. 数据仓库既是一种体系结构和富有哲理性的方法, 也是一种技术<sup>[5]</sup>.

数据仓库与传统的面向应用进行数据组织的数据库不同, 数据仓库中的数据是面向主题进行组织的, 主题作为数据归类的标准, 每个主题对应一个客观的分析领域. 传统数据库中的大量历史数据缺乏组织性, 没有统一的格式标准, 数据杂乱且不稳定, 难以求解复杂的半结构化的决策问题<sup>[6]</sup>. 数据仓库中的数据是从繁杂分散的业务数据库或其他数据源中抽取出来的, 因此数据在入库之前必须要经过统一和综合形成集成化的数据. 数据仓库内的数据主要是供企业决策分析之用, 其反映的是一段相当时期内历史数据的内容而非日常事务处理产生的最新的、专有的数据, 这些数据来源于多个数据库, 经过加工和集成进入数据仓库后极少或根本不进行修改更新<sup>[7]</sup>. 数据仓库中数据的稳定性是针对应用而言的, 即用户进行数据分析处理时不进行数据更新, 但是必须随时间的变化导入新的数据

内容来反映最新的状态. 数据仓库技术是一种帮助用户进行决策的技术, 传统的数据库技术只能保存当前的信息, 对于历史数据却不能保存, 这就不利于用户进行决策. 相反数据仓库技术是专门保存历史数据的, 它能够帮助用户实现科学高效的决策<sup>[8]</sup>.

数据仓库并没有严格的数学理论基础, 也没有成熟的基本模式, 且更偏向于工程, 具有强烈的工程性<sup>[9]</sup>. 数据仓库技术在具体应用中从工作过程方面来分析包括数据接收、数据融合、数据净化、数据迁移、数据仓库的组织和数据信息采掘等方面. 在青干工作管理领域, 涉及到大量的数据采集与分析工作, 数据的采集、上报、接收和分析是基本的业务流程. 同时, 对于青干统计数据而言, 又具有数据复杂、数据源分散的特点, 面对分散的数据信息, 采用数据仓库技术可以有效的实现多源数据的融合和基于融合数据的多维度分析.

## 2 系统体系结构

青干工作信息年度统计系统采用组件式开发技术, 以 Microsoft Visual Studio 2010 为开发平台, 运行环境为安装 .NET Framework 4.0 的 Windows 系列操作系统.

### 2.1 系统架构设计

河南省青干工作信息年度统计系统旨在搭建一个覆盖全省 18 个地市的信息采集与共享平台. 通过该平台, 地市级组织部门完成信息的采集存储与上报工作, 省级组织部门则可以实现多源信息的集成与组织管理. 通过综合对比 C/S 和 B/S 体系结构的优劣势, 结合具体的业务特点和用户需求, 系统采用 C/S 体系结构, 并运用 MVC 三层框架模式进行设计以实现程序的表现层、控制层和模型层的分离, 使系统结构清晰、可扩展性强、可维护性好.

系统的设计在结合数据仓库技术实现多源数据有效集成的基础上严格按照青干管理工作的业务背景和用户需求开发实现. 参照数据仓库的数据管理与组织理念以及具体的业务需求, 将系统分为上报端和综合端: 上报端部署在地市级组织部门, 各上报端拥有自己的子数据库系统, 用于本地数据存储管理; 综合端部署在省级组织部门, 拥有一个作为数据仓库来存储管理各分散数据源数据的数据库系统. 上报端和综合端之间实现统一的数据交换接口, 用于完成数据信息的集成共享. 上报端实



现信息的采集与上报,综合端实现信息的接收,并在接收到的数据的基础上做详尽的、有针对性的分析统计.数据仓库法需要将各个数据源的数据信息抽取到数据仓库中,此后所有的操作都直接在数据仓库上进行<sup>[10]</sup>.因此,该系统设计在数据进入数据仓库之前对数据实施抽取、清洗和转换等一系列操作,保证数据入库时的兼容性、准确性和一致性.具体系统架构如图1所示.

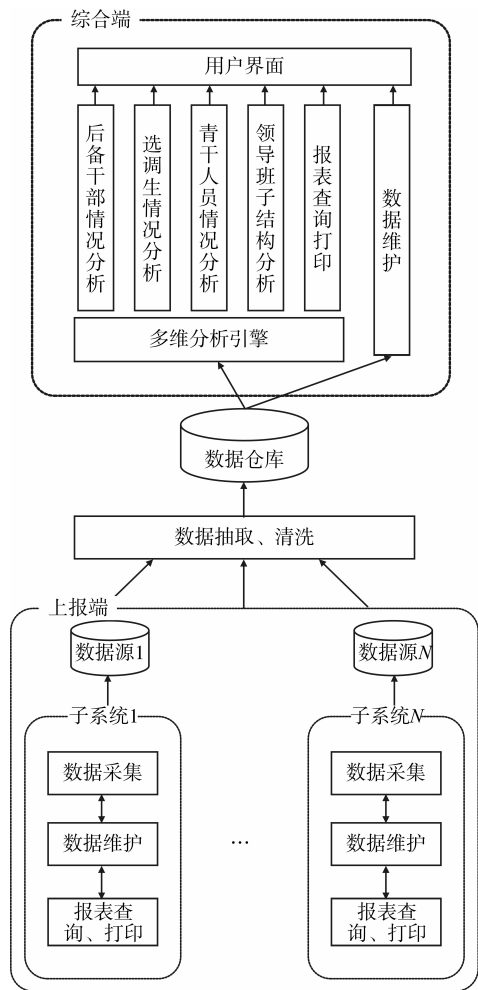


图1 系统架构图

## 2.2 数据组织

根据系统业务特点,系统采用关系型数据库和系统配置文件共同组织和管理数据,数据主要由基础数据、人员情况统计数据 and 系统配置数据3部分组成,各部分间的关系如图2所示.基础数据主要包括用户单位类别、人员类别、统计信息类别等基础信息;人员情况统计数据包括青干班学员情况统计、选调生情况统计、后备干部的情况统计和领导班子结构情况统计的数据;系统配置数据包括使用单位信息、数据字典和用户信息等数据.

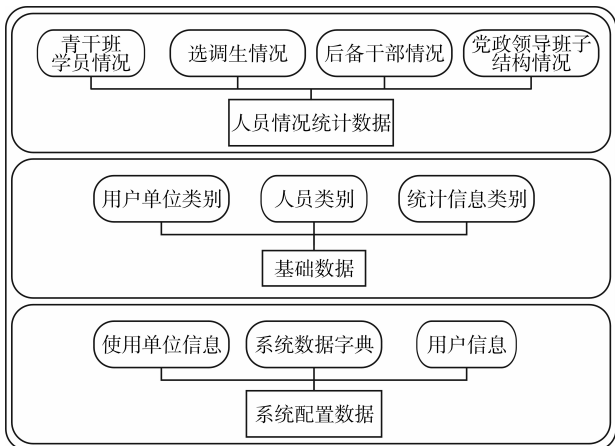


图2 系统数据库主要组成关系

## 3 系统功能结构

### 3.1 数据的抽取、清洗

建立青干工作信息年度统计系统的关键步骤就是要把数据从各子系统数据源中提取出来,为此必须经过抽取和清洗,在保证入库数据完备有效后才能把它加载到综合端数据仓库中.根据系统的具体特点,确定了如下抽取和清洗的原则:

1) 从子系统数据源中抽取数据.首先,基于数据仓库数据面向主题进行组织的理念,在抽取数据时主要针对抽取那些符合当前业务需求的数据,对于综合端系统做决策无关的数据则不予抽取.然后,将抽取得到的数据临时保存到1个中间数据库或通过应用程序将数据保存到特定的数据文件中.

2) 将所抽取数据进行清洗.数据清洗主要考虑3方面问题:①不完整的数据,这一类数据主要是一些必要信息的缺失,如选调生信息中本年度录用总数、累计实有总数、本年度提拔总数等.对于这一类数据,过滤出来之后按缺失的内容分别写入不同文件中提交给用户,要求在数据补全之后再写入数据仓库中.②错误的的数据,这一类数据的产生主要是由业务系统不健全造成的,具体表现在系统在接收用户数据输入后没有进行完备而有效的判断直接写入本地数据库造成的,比如数值数据输入的是字符串数据、日期格式字段存储的日期格式不正确、不规范等问题.对于这一类错误在进行清洗的过程中也要反馈给提交方,待数据修正之后再行抽取入库处理.③表间数据的完整性,如后备干部基本情况表中某一级别的单位后备总人数要与后备干部年龄情况表中的各年龄段人数之和保持一

致,如在清洗过程中发现不一致情况,需要校正之后方可再次抽取入库.

### 3.2 上报端数据输出

上报端子系统将所需数据采集并存储到本地数据库系统中,本地子系统可以对数据进行分析,同时要提供一个对外进行数据传递共享的接口,以便将本地数据源数据集成到综合端系统的数据仓库中,完成最终的数据集成化管理. 数据输出业务流程如图 3 所示.

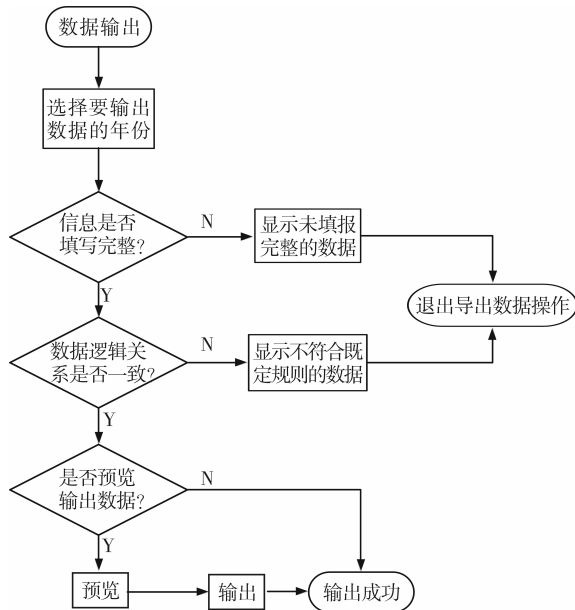


图 3 数据输出业务流程图

### 3.3 综合端数据入库

系统综合端作为系统的核心,更侧重于对多源数据的集成处理和科学分析. 导入数据是实现数据信息集成入库的重要操作,入库的数据信息来源于各地市组织部门上报的年度数据,也是实现综合端各项数据统计分析的重要数据来源. 数据入库有严格的准入要求,在确保导入数据文件为协议文件之后还要对数据进行抽取、净化和装入等一系列操作,以保证数据以正确的格式装载入库,具体的业务流程如图 4 所示.

### 3.4 多维数据分析设计

多维数据分析又称联机分析处理. 它是以海量数据为基础进行的复杂分析. 多维分析支持分析人员从不同的角度、快速灵活地对数据库中的数据进行多角度查询和分析,并将查询和分析结果以直观易懂的形式展示给分析人员. 联机分析处理的基本操作有切片、切块、旋转和钻取. 图 5 为“时间、单位

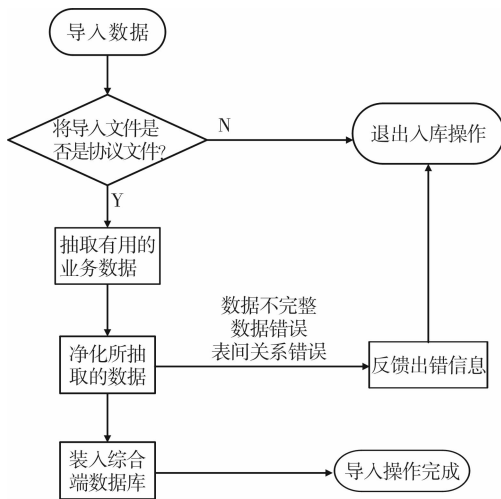


图 4 数据入库业务流程图

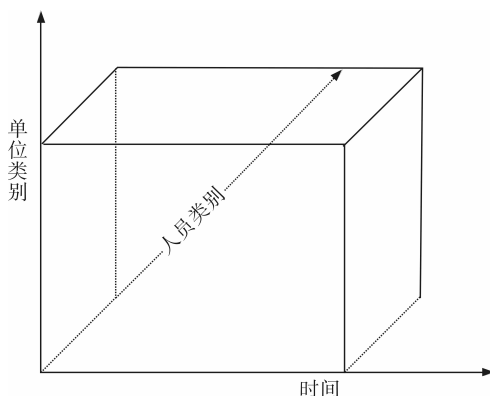


图 5 三维模型

类别、人员类别”三维立方体,可以在其上做分析操作.

1)切片处理. 从三维模型的其中某一维度上选择一维成员. 例如在单位维上选定的 1 个一维成员是 XX 市市直机关,进而得到单位类别维上的 1 个切片. 这个切片上的数据表明的是 XX 市市直机关各类人员信息情况.

2)切块操作. 切块操作是在切片处理的基础上进行的,目的是进一步来确定各维成员区间得到的片段体,该片段体由多个切片叠加起来的. 例如片段体可以通过选择时间维度上的某个时间段来确定.

3)旋转操作. 旋转的目的是改变各维度的位置关系,进而使分析人员可以从多角度来分析数据信息. 例如将横向的时间维和单位类别维进行旋转交换,可形成横向维单位类别和纵向维时间的报表.

4)钻取操作. 钻取包含向下钻取和向上钻取,

钻取的深度与维所划分的层次相对应. 如果某一维度是有层次的,则可以运用钻取. 向上钻取是在某一维度上将低层次的数据向高层次的汇总数据概括,而向下钻取则是从汇总数据向细节数据深入进行观察. 例如部门类别维上可以从大的部门类别向较小类别钻取.

以后备干部情况统计模块为例,在各数据源数据入库之后,综合端系统可以根据数据库中的数据对辖区内各单位某一时段的后备干部情况有一个全方位的统筹分析,同时也可以以变换维度的方式来对比分析. 系统所做的统计分析具有多层次、多维度的特点,以便分析人员能够最充分的了解基础数据中蕴含的各种有用信息.

该系统数据采集与上报是以年度为单位进行的,综合端的数据仓库中存储的是各部门历年上报的信息,系统的统计分析不仅可以实现横向的部门间对比,同时也方便对同一组织部门的历年数据进行纵向对比,为准确决策提供科学的数据依据.

## 4 结语

本系统的设计和开发参照需求分析,遵循 MVC 分层设计理念,选用成熟的框架和优秀的集成开发工具. 该系统是数据仓库技术在青干统计业务中的一个有益的尝试,使青干管理业务中的统计分析更加方便有效、形象直观. 系统自正式运行以来,已逐步在河南省委组织部青干处和河南省各省辖市的组织部门中投入使用,各单位的信息已通过采集、存储最终上报到省委组织部的综合端系统中.

系统的使用极大的提高了青干管理工作的信息化水平,提高了管理效率. 经使用表明,系统运行稳定,使用方便,不仅能满足当前管理工作的需要,还具有良好的通用性和可扩充性特点,对于类似的系统设计与开发有一定的参考价值.

## 参考文献:

- [1] 杨兴凯,刘畅. 政府信息资源集成方法研究综述[J]. 电子政务,2013(5):81.
- [2] 赵英莲,田友滨. 数据仓库技术在统计中的应用[J]. 中国统计,2001(5):12.
- [3] 杜媛媛. 数据仓库技术在财政决策支持系统中的应用研究[J]. 科技广场,2013(6):64.
- [4] 陈力勇. 基于数据仓库 OLAP 在决策支持系统中的应用研究[J]. 信息安全与技术,2012(6):54.
- [5] 杨彬彬,郑晓薇. 基于数据仓库技术的教育评价决策系统的实现[J]. 计算机工程与设计,2006,27(15):2854.
- [6] 冯美荣,王宗彦. 数据仓库技术在政府决策支持系统中的应用研究[J]. 太原理工大学学报,2008,39(5):482.
- [7] 白志刚. 数据仓库技术及其实现[J]. 统计与预测,2002(4):56.
- [8] 王小兵,白云飞,刘彪. 数据仓库在城市环境信息系统中的应用[J]. 信息系统工程,2013(7):79.
- [9] 宋中山. 数据仓库技术研究与应用[J]. 计算机工程与应用,2003,39(33):181.
- [10] 文必龙,叶静. 基于角色的数据交换模式设计[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2010,25(6):108.

# CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统单元件改进的性能研究

李亚强, 龚毅, 彭锦晨

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**通过加入回热器和旁通阀,对带有双节流阀的 CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统进行了改进,通过对改进前后系统性能参数的理论分析和计算,得出结论:一定的工况下存在一个最佳高压侧压力( $P_{h,opt}$ ),它与气冷器出口温度( $T_3$ )、蒸发温度( $T_e$ )的关系为: $P_{h,opt} = 0.2643 T_3 - 0.0089 T_e - 70.2554$ ;回热器的加入在低于  $P_{h,opt}$  的压力区内对系统性能有较大的提升,旁通阀的加入从理论计算来看对系统性能影响很小.

**关键词:**CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统;高压侧压力;系统性能参数

**中图分类号:**TK124 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.020

## Performance analysis of CO<sub>2</sub> transcritical refrigeration system units' improvement

LI Ya-qiang, GONG Yi, PENG Jin-chen

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

**Abstract:** By adding the internal heat exchanger and bypass valve, the transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration system with dual throttle valve was improved. Through the theoretical analysis and calculation of system performance parameters, it was concluded that: There was an optimum high-pressure  $P_{h,opt}$ , the relationship between the optimum high-pressure ( $P_{h,opt}$ ), the gas cooler outlet temperature ( $T_3$ ) and the evaporation temperature ( $T_e$ ) was:  $P_{h,opt} = 0.2643 T_3 - 0.0089 T_e - 70.2554$ ; there was a larger increase in the region lower than the optimum high-pressure when the internal heat exchanger was used, there was little impact on system performance when the bypass valve was used from a theoretical calculation view.

**Key words:** CO<sub>2</sub> transcritical refrigeration system; high side pressure; coefficient of system performance

## 0 引言

制冷剂 CO<sub>2</sub> 从 1990 年代以来受到了广泛的应用和研究,从最初的作为载冷剂用于二次系统,到作为低温级制冷剂用在复叠系统中,发展到现在的 CO<sub>2</sub> 跨临界系统,应用和研究进展迅速.跨临界系统

在热泵、汽车空调和冷冻冷藏中展现出强大的发展潜力,在日本热泵应用中,已经发展到商业应用阶段,在欧洲汽车空调和超市冷冻冷藏方面已经有很多成功的应用案例<sup>[1]</sup>.但是 CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统相比传统工质的亚临界制冷循环效率较低,这主要有 2 个方面的原因: 1) 由于 CO<sub>2</sub> 在气冷器内处于超临

收稿日期:2013-12-04

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAJ01A10-07)

作者简介:李亚强(1990—),男,河南省义马市人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为制冷系统的应用.

通信作者:龚毅(1954—),男,江苏省南通市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为制冷空调新技术及企业技术创新.

界状态,冷却过程伴随较大的温度滑移,相对于常规蒸气压缩制冷循环的等压等温冷凝过程,它的等效冷凝温度要远高于常规制冷剂的冷凝温度,所以CO<sub>2</sub>跨临界系统放热过程中不可逆损失更高;2)由于CO<sub>2</sub>跨临界制冷循环的节流膨胀过程是直接由超临界流体节流到两相流,在整个节流膨胀过程中存在较大的压差和相变过程,相比传统亚临界循环的节流膨胀过程不可逆损失更高,这在对CO<sub>2</sub>跨临界系统的焓分析的文献中有所体现,气冷器与节流机构的焓损百分比最大<sup>[2]</sup>.因此针对CO<sub>2</sub>跨临界制冷系统以上焓损较大的部分,需要进行系统元件的改进和热力循环的优化,从而提高系统制冷效率COP,降低总当量变暖影响TWEI,使得CO<sub>2</sub>跨临界制冷系统在能效方面更具有竞争力,成为真正可以长久使用的制冷剂.

对于提高CO<sub>2</sub>跨临界制冷循环能效的问题,国内外有大量的理论和实验研究.在系统元件的改进方面,主要体现在提高单个元件的效率:压缩机<sup>[3]</sup>、换热器<sup>[4]</sup>、膨胀设备<sup>[5]</sup>等,单个元件的优化对整个系统能效的提升无疑是十分重要的,单个元件的焓损降低了,系统的总焓损也会相应地降低.在热力循环的优化方面,主要体现在:单级压缩改进为2级压缩(中间冷却)可以提高压缩机容积效率降低功耗<sup>[6]</sup>;使用膨胀机回收膨胀过程中的损失的能量从而可以提高10%~50%的系统效率<sup>[7-8]</sup>;使用两相喷射器来替代膨胀阀可以回收膨胀过程中损失的部分动能用来提高压缩机入口压力,从而间接提高压缩机效率,可以提高15%左右系统性能<sup>[9]</sup>;使用回热器可以降低制冷剂蒸发器入口焓值,增大制冷剂蒸发器前后焓差,从而可以在同等的制冷量下降低通过蒸发器制冷剂流量,减小了节流损失,但同时也会增大压缩机吸气温度,导致压缩机出口温度增加,功耗增加,有试验研究发现使用回热器能够提升10%的系统COP<sup>[10-11]</sup>.在控制策略方面,研究主要集中在最佳高压侧压力的控制,因为对于CO<sub>2</sub>跨临界系统,超临界状态下CO<sub>2</sub>的放热过程温度和压力是相互独立的,存在一个最佳高压侧压力,这就需要研究不同系统构造下运行工况变化对系统最佳高压侧压力的影响,发现规律从而得出控制策略<sup>[12]</sup>.对系统跨临界与亚临界运行转换温度的研究主要是:一定的环境温度下是运行在亚临界循环时效率高还是运行在跨临界循环时效率高;环境温度和制冷负荷变化时,系统如何及时做出响应,使得系统始终保持高效<sup>[13]</sup>.本文拟对CO<sub>2</sub>跨临界制冷系

统进行单元改进,并通过理论分析和计算,对改进后的系统与基准系统进行对比.

## 1 系统结构的改进设计

图1为加入回热器和旁通阀的CO<sub>2</sub>跨临界制冷系统试验台系统流程图,图2为对应的P-h图.从压缩机出来的高压超临界CO<sub>2</sub>在气冷器内冷却到温度 $t_3$ (2—3),然后通过开闭截止阀1,2,3来选择是否通过回热器(3—4),通过高压膨胀阀进入储液器(4—5),然后气液分离(5—6,5—9),分离的气态制冷剂通过旁通阀节流到蒸发器出口(9—10),分离的液态制冷剂通过电子膨胀阀进入蒸发器(6—7),在蒸发器内吸热蒸发制取冷量(7—8),然后和旁通阀出口蒸气混合((8,10)—11),有选择地通过回热器(11—1)进入压缩机压缩(1—2)完成循环.系统采用带有变频器的都凌CD180H跨临界活塞式压缩机;气冷器和蒸发器均采用52道扁管作为流道中间夹杂百叶窗波纹翅片的微通道换热器,换热器配置了变频风机,气冷器侧风机通过变频调节达到设定温度,蒸发器侧风机通过变频调节制冷负荷的变化;高压膨胀阀、电子膨胀阀和旁通阀采

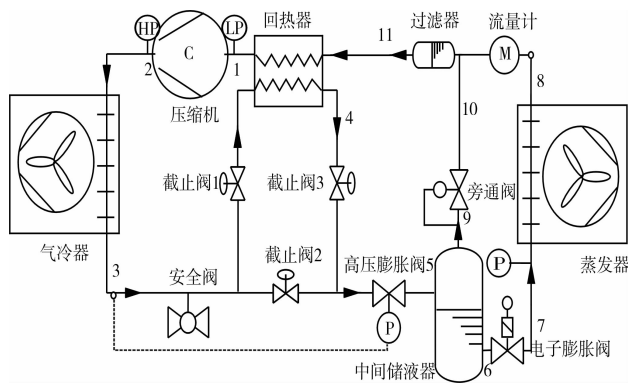


图1 改进的CO<sub>2</sub>跨临界试验台流程图

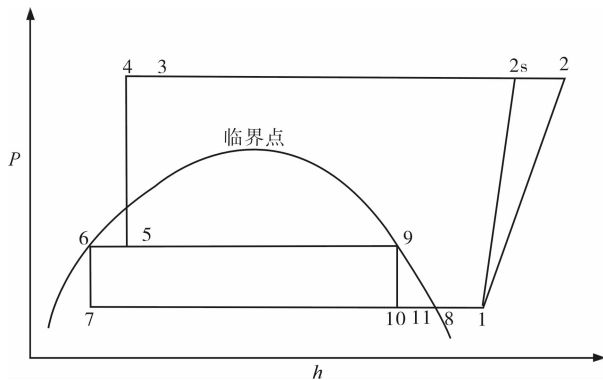


图2 改进系统对应的P-h图

用丹佛斯的可自动或手动调节的阀门,调节高压膨胀阀的开度可以控制高压侧压力,调节电子膨胀阀可以调节蒸发温度和过热度,调节旁通阀可以控制中间储液器的压力变化;回热器采用同轴套管式换热器,气冷器侧工质流经的内管为镍白铜材质,蒸发器侧工质流经的外管为不锈钢材质;另外还有数据采集部分和电控部分构成整个制冷系统.系统可以运行在跨临界或者亚临界循环下,本文主要针对跨临界循环进行分析研究.

## 2 改进系统相关参数的理论计算

对 CO<sub>2</sub> 跨临界系统相关参数进行计算,依照以下假设:1)系统各部件处于稳定运行状态,制冷剂流体处于稳定流动状态;2)忽略制冷剂在管路的热损失和压降及在换热器中的压降;3)膨胀节流过程均为等焓过程;4)储液器内气液分离完全;5)忽略压缩机的热损失;6)蒸发器出口状态为饱和蒸气.

### 2.1 压缩机参数的计算

压缩机频率 50 Hz 时转速为 1 450 r/min,质量流量为

$$m = \rho_1 \cdot \eta_v \cdot v_{th} \cdot N/60$$

其中,容积效率  $\eta_v = 1.127 - 0.140 2 \cdot P_h/P_e - 0.002 871 \cdot (P_h/P_e)^2 - 0.000 39 \cdot T_{in,sup} - 9.105 \times 10^7 \cdot T_{in,sup} \cdot P_h/P_e$ ,  $P_e$  和  $P_h$  分别为压缩机吸排气压力,  $T_{in,sup}$  为压缩机吸气过热度,  $v_{th}$  为一次压缩理论排气量,计算公式为

$$v_{th} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{10^3}\right)^3 \cdot \left(\frac{l}{10^3}\right) \cdot n$$

其中,缸径  $d = 23$  mm,行程  $l = 12.5$  mm,缸数  $n = 2$  个.

压缩机功耗为

$$w_{comp} = \frac{m(h_2 - h_1)}{\eta_m \cdot \eta_e} = \frac{m(h_{2s} - h_1)}{\eta_{is} \cdot \eta_m \cdot \eta_e}$$

其中,机械效率  $\eta_m$  为 0.92,电机效率  $\eta_e$  为 0.84,等熵效率  $\eta_{is} = 0.725 6 - 0.017 59 \cdot P_h/P_e - 0.001 53 \cdot P_h/P_e + 0.000 118 1 \cdot T_{in,sup} + 0.000 024 38 \cdot T_{in,sup}^2 - 8.827 \times 10^7 \cdot T_{in,sup}/p_e$ .

### 2.2 气冷器和蒸发器参数的计算

气冷器单位时间排出热量为

$$q_c = m(h_2 - h_3)$$

系统单位时间制冷量为

$$q_e = m_e(h_8 - h_7)$$

### 2.3 高压膨胀阀、电子膨胀阀和旁通阀参数的计算

高压膨胀阀膨胀过程

$$m \cdot h_4 = m \cdot h_5$$

电子膨胀阀膨胀过程

$$m_e \cdot h_6 = m_e \cdot h_7$$

旁通阀膨胀过程同样也为等焓过程

$$m_b \cdot h_9 = m_b \cdot h_{10}$$

储液器气液分离过程

$$m = m_b + h_e$$

$$m \cdot h_5 = m_b \cdot h_9 + m_e \cdot h_6$$

其中,  $h_6, h_9$  分别为储液器压力下的饱和 CO<sub>2</sub> 液体与饱和 CO<sub>2</sub> 液体气体的焓值;  $m_e, m_b$  分别为通过电子膨胀阀和旁通阀的制冷剂流量.

### 2.4 回热器参数的计算

回热器作为内部换热器作用是完成低压侧(蒸发器出口)与高压侧(气冷器出口)制冷剂的换热,因为高压侧 CO<sub>2</sub> 处于超临界区临界点附近,比热有很大的波动,所以对于回热器的效率计算不能简单地用温度差,需要根据焓差计算.

回热过程的换热量为

$$q_{ihe} = h_3 - h_4 = h_1 - h_{11}$$

为定义换热器效率,引入回热器最大可能换热量

$$q_{pot} = \min\{h_3 - h(P_h, T_{11}), h(P_e, T_3) - h_{11}\}$$

其中,  $h(P_h, T_{11})$  为气冷器出口制冷剂通过回热器可能达到的最低温度(蒸发器侧回热器入口温度)时的焓值;  $h(P_e, T_3)$  为蒸发器侧制冷剂通过回热器可能达到的最高温度(气冷器侧回热器入口温度)时的焓值;  $T_3$  为气冷器出口温度;  $h_{11}$  为气冷器侧回热器入口状态焓,即旁通阀出口制冷剂和蒸发器出口制冷剂混合后的状态焓,计算公式为

$$m \cdot h_{11} = m_b \cdot h_{10} + m_e \cdot h_8$$

回热器效率  $\varepsilon$  为实际换热量与最大换热量之比

$$\varepsilon = q_{ihe}/q_{pot}$$

由以上公式可得系统制冷效率

$$COP = \frac{q_e}{w_{comp}} = \frac{m_e(h_8 - h_7)}{m(h_{2s} - h_1)/(\eta_{is} \cdot \eta_m \cdot \eta_e)}$$

分析可得,对系统效率影响较大的可变基本参数有  $P_h, T_3$ .

## 3 改进前后系统性能的计算对比

### 3.1 基准 CO<sub>2</sub> 跨临界循环系统性能参数的计算

基准 CO<sub>2</sub> 跨临界循环(无回热器无旁通阀)系统性能参数计算的目的在于发现循环中最佳  $P_h, T_3$  和蒸发温度  $T_e$  变化对系统性能的影响,以及  $T_3$  和  $T_e$  对最佳  $P_h$  的影响.

图3为  $T_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 32\text{ }^\circ\text{C}$  时系统  $COP$  随  $P_h$  的变化趋势. 从图3中可以看出,系统  $COP$  随  $P_h$  的不断增大先迅速达到一个最大值然后缓慢下降,这种现象是由  $\text{CO}_2$  在超临界状态下(气冷器内)冷却温度和压力相互独立的特性造成的. 这种变化趋势可以通过分析  $\text{CO}_2$  跨临界循环  $P-h$  图作出解释,在图4中等温线代表恒定的气冷器出口温度,循环1—2"—3"—4"—1, 1—2'—3'—4'—1 和 1—2—3—4—1 相比,依次改变的只是等量的压力. 可以看出,随  $P_h$  的等量增加,系统功耗的增加 ( $h_{2'}-h_2$  与  $h_{2''}-h_2$ ) 也是等量增加,这是因为等熵线的斜率恒为定值,而系统制冷量的增加 ( $\Delta h'$  与  $\Delta h''$ ) 则是先迅速增大然后逐渐减小,这是因为跨临界区域内等温线斜率的绝对值随压力的增加呈现先变小后变大的趋势,并且是越临近临界温度,变化程度越剧烈. 这样就表现出在一定的的气冷器出口温度下,随  $P_h$  不断增加,功耗增加速度不变,而制冷量增加速度先变大后变小,存在一个最大制冷量增加速度,对应的压力即为最佳  $P_h$ ,如图5所示.

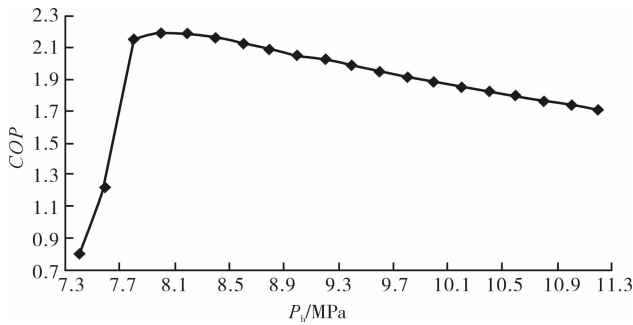


图3  $T_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 32\text{ }^\circ\text{C}$  时基准  $\text{CO}_2$  跨临界循环系统  $COP$  随  $P_h$  的变化趋势

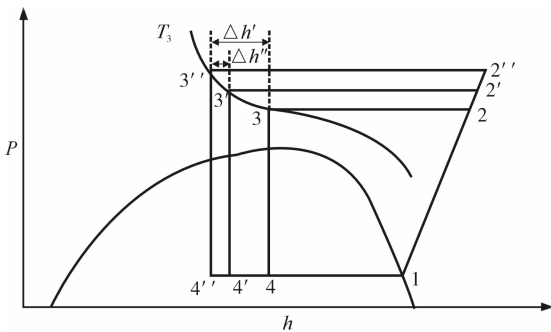


图4 基准  $\text{CO}_2$  跨临界循环  $P-h$  图

从以上可以得出,对于  $\text{CO}_2$  跨临界制冷系统的运行,  $P_h$  必须要有严格的控制,实际运行中应控制在最佳值附近,尽量避免过低于最佳值,因为过低的  $P_h$  使得系统性能下滑得非常厉害. 同样还可以得

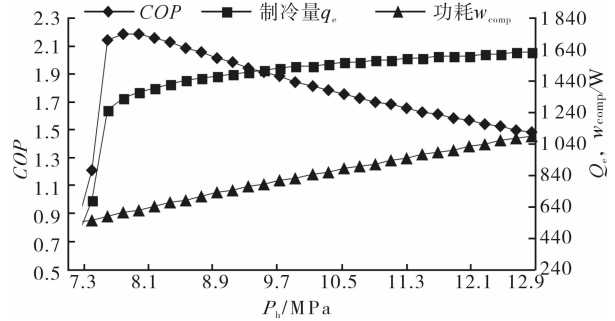


图5  $T_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 32\text{ }^\circ\text{C}$  时基准  $\text{CO}_2$  跨临界循环系统  $COP$ ,  $w_{\text{comp}}$  和  $q_e$  随  $P_h$  的变化趋势

出,提高  $P_h$  能够增加系统  $w_{\text{comp}}$ ,但也要注意,随  $P_h$  的提高,  $w_{\text{comp}}$  的增加速率在不断地降低.

对于制冷系统而言,增大冷凝温度或者降低蒸发温度都会降低系统性能,这点对于  $\text{CO}_2$  跨临界制冷系统也不例外. 图6为不同气冷器温度下的最佳  $P_h$  及相应的  $COP$ . 从图6中可以看出,最佳高压侧压力  $P_{h,\text{opt}}$  随气冷器出口温度的增加几乎呈线性增加,而相应的  $COP$  则是迅速下降,系统  $COP$  的下降速度随气冷器出口温度的不断升高有所降低. 气冷器出口温度  $T_3$  每增加  $1\text{ }^\circ\text{C}$  会引起系统  $P_{h,\text{opt}}$  增加  $0.27\text{ MPa}$ ,系统  $COP$  降低  $4\%$ .

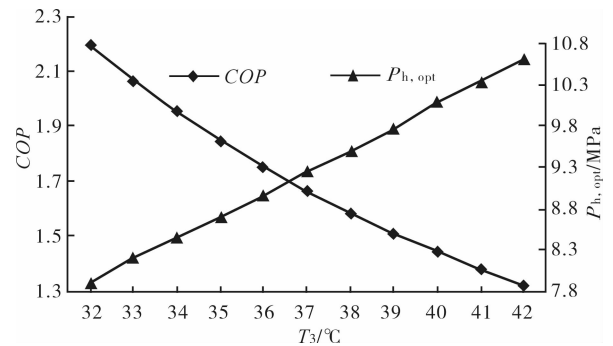


图6 不同气冷器出口温度下的  $P_{h,\text{opt}}$  及相应的  $COP$

图7为不同  $T_e$  下的  $P_{h,\text{opt}}$  及相应的  $COP$ . 从图7中可以看出,  $T_e$  对系统  $P_{h,\text{opt}}$  影响很小,  $T_e$  从  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  上升到  $10\text{ }^\circ\text{C}$  时  $P_{h,\text{opt}}$  仅降低了  $0.2\text{ MPa}$ ,不及气冷器变化  $1\text{ }^\circ\text{C}$  所引起的变化量;还可以看出,随  $T_e$  的升高,系统  $COP$  不断地增加,并且增加速度也在缓慢增加.  $T_e$  平均每增加  $1\text{ }^\circ\text{C}$  会引起  $P_{h,\text{opt}}$  降低  $0.02\text{ MPa}$ (由于计算时压力取值原因,图7中  $P_{h,\text{opt}}$  随  $T_e$  阶段性下降,并不能代表其本质的变化趋势),系统  $COP$  增加  $5.8\%$ . 因此对于  $\text{CO}_2$  跨临界制冷系统在一定的制冷工况下,应当尽量提高其气冷器和蒸发

器的换热性能、减小换热温差、提高  $T_e$ 、降低气冷器出口温度,从而提高系统性能。 $T_e$  相比气冷器出口温度对系统性能的影响大些(最佳工作压力下),所以充分利用  $\text{CO}_2$  低温下优良的换热性能结合微通道换热器最大限度地减小换热温差更重要,有研究发现  $\text{CO}_2$  制冷系统相比其他传统制冷剂制冷系统蒸发器侧温差能够降低  $3 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这对  $\text{CO}_2$  跨临界制冷系统性能提升是非常有利的。

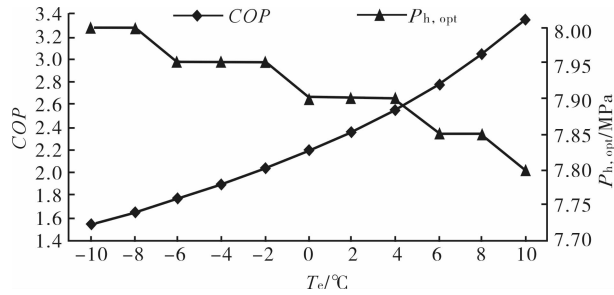


图7 不同蒸发温度下的  $P_{h,opt}$  及相应的  $COP$

根据以上计算拟合可得  $P_{h,opt}$  与  $T_3$  和  $T_e$  之间的关系为

$$P_{h,opt} = 0.264 3T_3 - 0.008 9T_e - 70.255 4$$

与其他作者所获得的表达式

$$P_{h,opt} = (2.78 - 0.015 7 \cdot T_e) \cdot T_3 + (0.381 \cdot T_e - 9.34)^{[14]}$$

$$P_{h,opt} = 4.9 + 2.256 \cdot T_3 - 0.17 \cdot T_e + 0.002 \cdot T_e^3^{[15]}$$

$$P_{h,opt} = 2.6 \cdot T_e + 19.29^{[16]}$$

作对比,结果如图8和图9所示。图8为  $T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  时4种关系式下  $P_{h,opt}$  的对比,图9为  $T_3 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$  时的4种关系式下  $P_{h,opt}$  的对比,可以得出以上理论计算所得关系式与文献[14]的关系式最为相近,同时也验证了理论计算的正确性。由拟合所得关系式可知  $P_{h,opt}$  仅与  $T_3$  和  $T_e$  有关,而回热器和旁通阀的加入并不改变这  $T_3$  和  $T_e$ ,因此  $P_{h,opt}$  对于改进的系统是依然适用的。

### 3.2 带有回热器的 $\text{CO}_2$ 跨临界循环系统性能参数的计算

回热器作为内部换热器,交换低压侧和高压侧之间的热量,在增加制冷量的同时也会增加压缩机功耗,在增加压缩机出口温度的同时也能够有效避免液体制冷剂进入压缩机。在制冷系统实际运行过程中,回热器的换热效率是随工况发生变化的,气冷器出口温度与蒸发器出口温度之间温差越大,换热效率越高,因此计算中假定换热器的效率从  $0\% \sim 100\%$ 。

图10为不同回热器效率下的  $P_{h,opt}$  及相应的

$COP$ 。可以看出,随回热器效率的增加,系统  $COP$  也不断增加,并且增速也在不断提高,当回热器效率为  $0.5$  时,相比无回热器时系统  $COP$  提升  $2\%$ ,系统  $P_{h,opt}$  降低  $0.1 \text{ MPa}$ 。

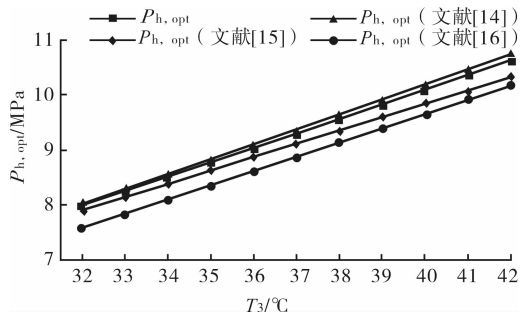


图8  $P_{h,opt}$  随  $T_3$  变化的对比

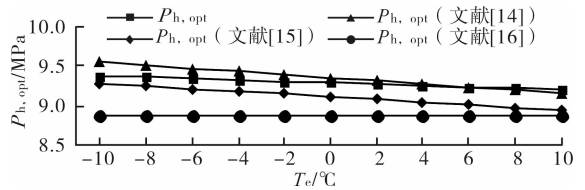


图9  $P_{h,opt}$  随  $T_e$  变化的对比

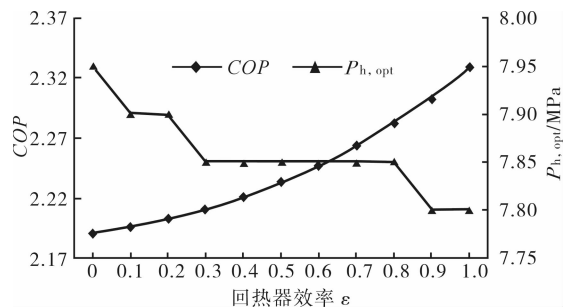


图10  $T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$  时不同回热器效率下系统的  $P_{h,opt}$  及相应的  $COP$

图11为一定压力范围内回热器效率分别为  $0$  和  $0.5$  时系统  $COP$ ,  $w_{comp}$  和  $q_e$  的对比。可以发现,回热器的加入使得  $w_{comp}$  和  $q_e$  有几乎恒定的增加,系统  $COP$  在低于  $P_{h,opt}$  的压力区提升较大,在高于  $P_{h,opt}$  的压力区提升很小;另外,对比发现回热器效率为  $0.5$  时相比无回热器时压缩机出口温度高了  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;在  $T_3$  较高时,例如  $T_3 = 42 \text{ }^\circ\text{C}$  时,运行在最佳压力  $10.4 \text{ MPa}$  下压缩机出口温度高达  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此在  $P_h$  过高时,应当限制回热器的使用,否则过高的压缩机出口温度会影响到压缩机的寿命。



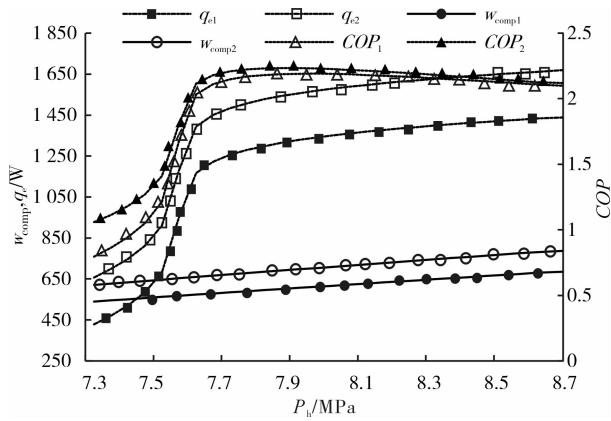


图 11  $T_e = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3 = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 回热器效率为 0 和 0.5 时系统 COP,  $w_{\text{comp}}$ ,  $q_e$  的对比

### 3.3 带有回热器和旁通阀的 CO<sub>2</sub> 跨临界循环系统性能参数的计算

对于 CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统,旁通阀的加入在增加蒸发器前后制冷剂焓差的同时也降低了通过蒸发器的制冷剂流量,对制冷量的影响具有两面性.经过旁通阀的 CO<sub>2</sub> 饱和蒸气节流到蒸发压力与蒸发器出口制冷剂汇合,能够起到降低压缩机吸气过热度的作用,从而降低压缩机功耗,旁通阀在实际应用中配合回热器使用或者配合蒸发器出口有一定过热度时使用.

从图 12 系统有无旁通阀的对比.可以看出,加入旁通阀后,系统的性能不仅没有提升而且在整个压力范围内有 1% 左右的下降,几乎可以忽略不计.可以推断在加入旁通阀后通过蒸发器的制冷剂流量的减少占了主导因素.有对比实验研究发现,加入旁通阀后系统的  $w_{\text{comp}}$  和 COP 能够同时提升 9% 和 7%<sup>[17]</sup>,实际运行中在不影响系统性能的情况下,蒸发器质量流量的减少有利于蒸发器内压降的降低以及制冷剂在蒸发器内的均匀分布,这种优势

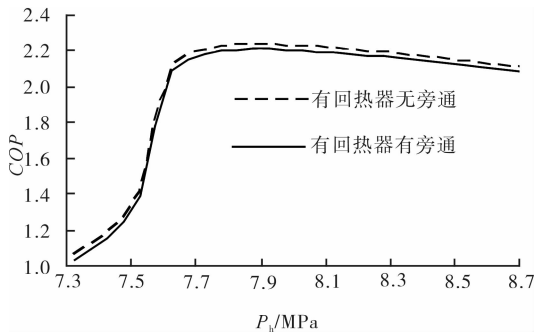


图 12  $T_e = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3 = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0.5$  时系统有无旁通阀的系统性能对比

对于微通道蒸发器更为重要,据此可以推断加入旁通阀能提高蒸发器换热效率,减少换热温差,从而提高系统性能.

## 4 结论

本文通过加入回热器和旁通阀对 CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统进行改进,然后进行了相关理论分析计算,得出以下结论.

1) CO<sub>2</sub> 跨临界制冷系统性能影响较大的 3 个参数:高压侧压力、气冷器出口温度、蒸发温度.

2) 一定的工况下存在一个最佳高压侧压力,本文根据计算拟合出了最佳高压侧压力与蒸发温度和气冷器出口温度的关系式  $P_{h,\text{opt}} = 0.264\ 3\ T_3 - 0.008\ 9\ T_e - 70.255\ 4$ ,并验证了其正确性.

4) 回热器的加入对系统性能有一定的提升,尤其在低于  $P_{h,\text{opt}}$  的压力区内,对  $P_{h,\text{opt}}$  也起到轻微的降低作用.

5) 理论计算方面,旁通阀的加入对系统性能影响几乎忽略不计,它对于蒸发器换热效率的提升有待进一步研究.

### 参考文献:

- [1] Lorentzen G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant [J]. International Journal of Refrigeration, 1994, 17 (5): 292.
- [2] Tao Y B, He Y L, Tao W Q. Exergetic analysis of transcritical CO<sub>2</sub> residential air-conditioning system based on experimental data [J]. Applied Energy, 2010, 87 (10): 3065.
- [3] Sánchez D, Torrella E, Cabello R, et al. Influence of the superheat associated to a semihermetic compressor of a transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration plant [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(4): 302.
- [4] Kim S C, Kim M S, Hwang I C, et al. Performance evaluation of a CO<sub>2</sub> heat pump system for fuel cell vehicles considering the heat exchanger arrangements [J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 1195.
- [5] Li M, Ma Y, Guan H, et al. Development and experimental study of CO<sub>2</sub> expander in CO<sub>2</sub> supercritical refrigeration cycles [J]. International Journal of Green Energy, 2004, 1 (1): 89.
- [6] Srinivasan K. Identification of optimum inter-stage pressure for two-stage transcritical carbon dioxide refrigeration cycles [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2011, 58(1): 26.

- [7] Zhang B, Peng X, He Z, et al. Development of a double acting free piston expander for power recovery in transcritical CO<sub>2</sub> cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(8): 1629.
- [8] Yang J L, Ma Y T, Liu S C. Performance investigation of transcritical carbon dioxide two-stage compression cycle with expander[J]. Energy, 2007, 32(3): 237.
- [9] Lee J S, Kim M S, Kim M S. Experimental study on the improvement of CO<sub>2</sub> air conditioning system performance using an ejector [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(7): 1614.
- [10] Aprea C, Maiorino A. An Experimental evaluation of the transcritical CO<sub>2</sub> refrigerator performances using an internal heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(6): 1006.
- [11] Torrella E, Sánchez D, Llopis R, et al. Energetic evaluation of an internal heat exchanger in a CO<sub>2</sub> transcritical refrigeration plant using experimental data [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1): 40.
- [12] Chen Y, Gu J. The optimum high pressure for CO<sub>2</sub> transcritical refrigeration systems with internal heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(8): 1238.
- [13] Ge Y, Tassou S. Control optimisation of CO<sub>2</sub> cycles for medium temperature retail food refrigeration systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1376.
- [14] Liao S, Zhao T, Jakobsen A. A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(9): 831.
- [15] Sarkar J, Bhattacharyya S, Ramgopal M. A transcritical CO<sub>2</sub> heat pump for simultaneous water cooling and heating: Test results and model validation [J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(1): 100.
- [16] Kauf F. Determination of the optimum high pressure for transcritical CO<sub>2</sub>-refrigeration cycles [J]. International Journal of Thermal Sciences, 1999, 38(4): 325.
- [17] Elbel S, Hrnjak P. Flash gas bypass for improving the performance of transcritical R744 systems that use micro-channel evaporators [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(7): 724.

## 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。

# 管排数对球突翅片管式换热器传热特性的影响

冯丽华, 吴学红, 吕彦力

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**通过数值对比研究了不同管排数对球突翅片管式换热器的换热和流动特性的影响. 结果表明:随着管排数的增加, 热量/压降( $Q/\Delta P$ )和  $COP$  值逐渐减少, 2排管的  $Q/\Delta P$  和  $COP$  值最大. 在  $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$  范围内, 2排管平均  $Nu$  数分别比3, 4, 5排管增大11.1%, 21.7%, 23.2%. 流场图显示, 不同管排数均因球突增强了扰动, 而强化了换热, 但4, 5排管的温度场几乎无变化, 说明管排数的增加并不能增强换热. 综上2排管换热综合性能较好.

**关键词:**球突翅片管式换热器; 管排数; 强化传热

中图分类号:TK124 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.021

## The effect of tube row number on heat transfer characteristics of the dimpled fin tube heat exchanger

FENG Li-hua, WU Xue-hong, LYU Yan-li

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

**Abstract:** The effect of different tube row number on heat transfer and pressure drop characteristics of dimpled fin tube heat exchanger was investigated. The results showed that: the ratio of heat transfer rate and pressure drop ( $Q/\Delta P$ ) and  $COP$  decreased with the increase of tube row number,  $Q/\Delta P$  and  $COP$  of two-row tube was the biggest. Compared with the three, four, five-row tube, average  $Nu$  number of two-row tube increased by 11.1%, 21.7%, 23.2% at  $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$ , respectively. The flow field indicated that the arrangement of the dimple could intensify flow turbulence, which enhanced the heat transfer, but when the number of tube rows are 4 and 5, the temperature field changed little, which indicated that the heat transfer didn't change significantly when the number of tube rows increased. So the comprehensive performance of two row tube rows was better.

**Key words:** dimpled fin tube heat exchanger; tube row number; enhanced heat transfer

## 0 引言

加工等行业中,特别是空调制冷行业.由于翅片管式换热器的热阻主要集中在空气侧,因而强化空气侧的换热非常重要.强化翅片是提高整个换热器性

翅片管式换热器广泛应用于空调、化工、食品

收稿日期:2013-12-09

基金项目:国家自然科学基金项目(21076200);河南省省院合作项目(092106000013);郑州市领军人才项目(131PLJRC640)

作者简介:冯丽华(1988—),女,河南省西平县人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为强化传热.

通信作者:吕彦力(1955—),男,河南省确山县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为制冷与低温设备节能技术.

能很有效的方法。

在通道内有关球突的研究, P. Ligrani 等<sup>[1]</sup> 研究了一面是球突凹坑、一面是凸起的通道内流体的结构特点及这些凸起对局部流体结构的影响, 并与一面是球突凹坑、一面是光滑壁面做了对比。S. Y. Won 等<sup>[2]</sup> 用试验方法研究了 3 种不同球突高度对流体特性的影响。S. Chang 等<sup>[3]</sup> 介绍了不同雷诺数  $Re$  下, 不同凹凸排列方式球突翅片的传热性能。S. D. Hwang 等<sup>[4-5]</sup> 研究了在矩形通道内单面凸起和双面凸起排列的换热特性。S. Isaev 等<sup>[6]</sup> 分析了  $Re$  和通道高度与球突直径比值对球突流动和换热的影响。S. Chang 等<sup>[7]</sup> 实验研究对比了 2 个有无球突的粗糙通道的  $Nu$  数、压降系数和热性能因子。这些文献得出球突结构能够产生二次流的结论。因而近些年学者将球突结构运用到翅片管式换热器中, 关于球突翅片, 主要研究有: G. Mahmood 等<sup>[8]</sup> 研究了在一定  $Re$  范围内, 球突表面流体随不同的通道高度与球突直径的比值变化特性。樊菊芳等<sup>[9]</sup> 运用适体坐标下同位网格 Simple 算法对具有浅椭圆球突翅片表面进行了数值模拟和特性分析。Q. Fan 等<sup>[10]</sup> 数值模拟了几何尺寸对球突翅片换热的影响。M. A. Elyyan 等<sup>[11]</sup> 指出开缝球突翅片通过产生湍流尾流从而强化换热, 但是也产生了较高的阻力损失。宋伟明等<sup>[12]</sup> 在空冷器单排管蛇形翅片表面有规律地布置一些球突, 指出球突个数相同时, 又排布置优于顺排。吴学红等<sup>[13-15]</sup> 数值模拟了球突翅片的传热流动特性, 得出球突翅片是一种性能优良的翅片的结论, 并开发了一种新型结构。苟秋平等<sup>[16]</sup> 对半球突开缝翅片传热特性进行了数值研究。

从以上文献可知, 大多数研究是关于球突结构、尺寸方面的, 而对于管排数对换热器性能的影响研究较少, 因而本文将主要就不同管排数对球突翅片换热特性影响的相关数值进行研究, 分析其传热和流动特性差异。

## 1 物理模型和计算方法

### 1.1 物理模型和计算区域

本文研究的模型如图 1 所示, 取相邻翅片的中心之间的区域作为计算区域, 入口延伸 1.5 倍的翅片长度, 以保证入口流速分布均匀, 出口延伸 8 倍的翅片长度, 以保证出口处流体无回流。

本文分别计算了 2, 3, 4, 5 排管球突翅片的传热

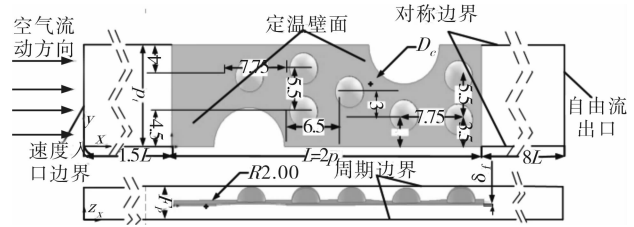


图 1 球突翅片的物理模型及计算区域/mm

特性, 其中翅片间距  $F_p$  为 5 mm, 横向管间距  $P_1$  为 13 mm, 纵向管间距  $P_1$  为 22 mm, 翅片厚度  $\delta_t$  为 0.2 mm, 管外径  $D_c$  为 10 mm。

在计算时采用不可压缩、稳态、常物性的湍流模型, 动量和能量方程采用二阶迎风格式进行离散, 压力和速度的耦合计算选用 Simple 算法, 忽略黏性耗散、辐射换热。残差、连续性方程、湍流参数和动量方程的收敛标准为  $10^{-6}$ , 能量方程的收敛标准为  $10^{-8}$ 。

### 1.2 控制方程和边界条件

控制方程:  $\text{div}(\rho v \varphi) = \text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad} \varphi) + S_\varphi$ 。其中,  $\varphi$  为通用变量;  $\Gamma_\varphi$  为广义扩散系数;  $S_\varphi$  为广义源项, 与  $\varphi$  值相对应。控制方程的各变量如表 1 所示, 其中

$$G_k = \frac{\eta_t}{\rho} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right\}$$

表 1 控制方程各变量

物理量及方程	$\varphi$	$\Gamma_\varphi$	$S_\varphi$
质量	1	0	0
x 方向动量	u	$\eta + \eta_t$	$-\partial P / \partial x$
y 方向动量	v	$\eta + \eta_t$	$-\partial P / \partial y$
z 方向动量	w	$\eta + \eta_t$	$-\partial P / \partial z$
湍动能	k	$\eta + \eta_t / \sigma_k$	$\rho G_k - \rho \varepsilon$
$\varepsilon$ 方程	$\varepsilon$	$\eta + \eta_t / \sigma_\varepsilon$	$\frac{\varepsilon}{k} (c_1 \rho G_k - c_2 \rho \varepsilon)$
能量方程	T	$\frac{\eta}{Pr} + \frac{\eta_t}{\sigma_T}$	0

边界条件: 管壁温度  $35^\circ\text{C}$ , 空气进口温度  $25^\circ\text{C}$ , 换热管为铜管, 翅片材料为铝; 入口边界条件: 给定速度和温度, 出口为充分发展阶段, 上下面即  $z$  轴方向为周期性边界条件, 左右面即  $y$  轴方向为对称边界条件。翅片表面的温度分布由翅片的导热与空气对流换热的耦合求解得到。计算结果的处理方法见文献[16]。

## 2 结果与分析

### 2.1 传热和阻力特性分析

本文以  $Q/\Delta P$  和  $Q/(\Delta P + v)$  为换热器换热性能的评价标准,其中  $Q$  为换热量,  $\Delta P$  为进出口压降,  $v$  为体积流量,  $Q/(\Delta P + v)$  可以定义为  $COP$ , 它表征换热量与功之间的比值. 图 2 给出了 2,3,4,5 排管的  $Q/\Delta P$  的变化图,从图 2 中可以看出,随着管排数的增加,  $Q/\Delta P$  逐渐降低,但随着  $Re$  的增大,降低的幅度逐渐减小. 从图 3 可以看出  $Q/(\Delta P + v)$  的趋势也是随着  $Re$  的增大而逐渐减小的,而且在  $Re$  较大时,2,3,4,5 排管基本趋于一致;就同一管排数而言,随着迎面风速的增大它们的值逐渐减少. 这 2 个参数值越大表明换热越好,显然 2 排管的换热性能最好,然后依次为 3,4,5 排管.

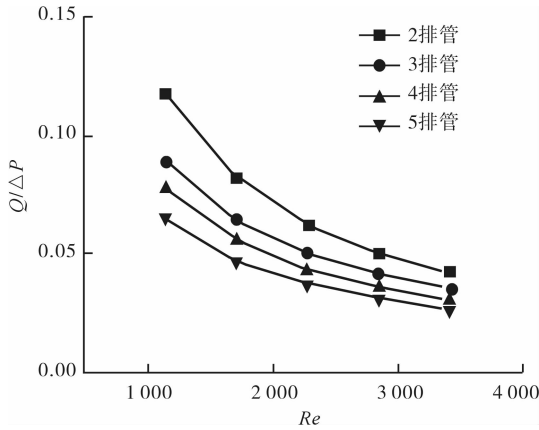


图 2 不同排管数的  $Q/\Delta P$  变化

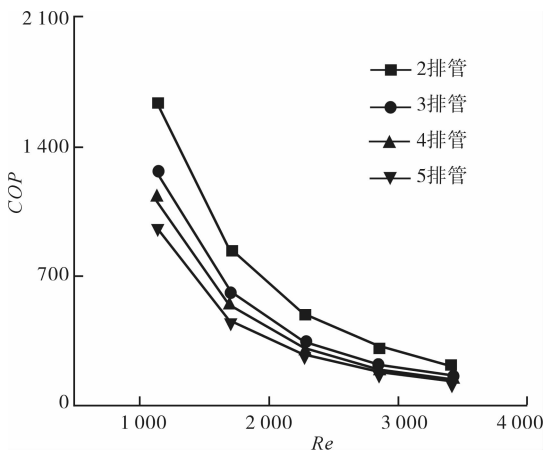


图 3 不同排管数  $COP$  变化

图 4 给出了努谢尔特数 ( $Nu$ ) 的变化趋势图,同样该值越大表明换热能力越好,在  $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$  范围内,2 排管平均  $Nu$  数分别比 3,4,5 排管增大 11.1% ,21.7% ,23.2% ,这说明管排数的增加

虽然增大了换热面积,但是空气侧的阻力也相对增大,导致空气侧换热性能下降. 而 4 排管与 5 排管的  $Nu$  基本相同,这说明风速随着管排的增加而减少的量较小,所以空气侧的换热性能变化不明显.

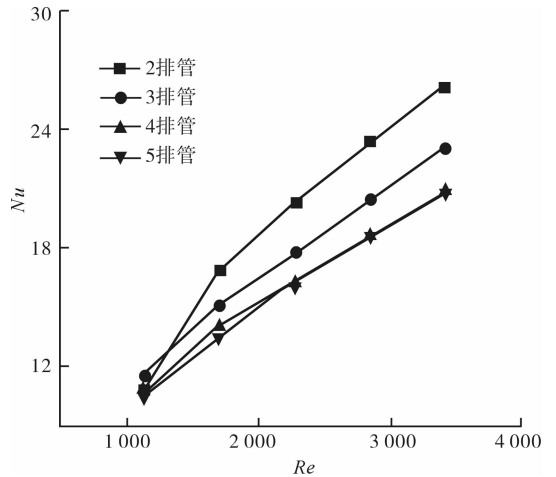


图 4 不同排管数的  $Nu$  变化

### 2.2 流场分析

本文选择了速度为 2 m/s 时 2,3,4,5 排管的流场,如图 5 所示. 从图 5 中可以看出,在管后都会形成一个涡,不利于换热,因而在布置球突时应该改变此处的来流方向,增强扰动. 文献[12]提出,叉排布置好于顺排布置,因为此种布置增强了扰动,从而强化换热,而且随着管排数的增加出口温度逐渐增大,这说明总的换热量是增加的. 由上面的计算结果看出,随着管排数的增加,  $Q/\Delta P$  是逐渐降低的,这说明增加的换热量不足以弥补阻力增加. 图 6 给出了不同排管数在速度为 2 m/s 时的  $y-z$  面的流场图. 从图 6 中可以看出, a), b), c), d) 在球突凹处都产生了马尾辫一样的流动,说明球突增强了扰动,强化了换热,而 c), d) 的温度场基本相同,表明换热基本不增加,因而管排数的增加并不能增强换热.

## 3 结论

本文就管排数对球突翅片管式换热器的换热特性的影响进行了研究,对计算结果分析可以得出以下结论.

- 1)  $Q/\Delta P$  和  $COP$  的值随着管排数的增加而逐渐降低,2 排管的  $Q/\Delta P$  和  $COP$  值最大,其次依次为 3,4,5 排管.
- 2) 在  $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$  范围内,2 排管平均  $Nu$  数分别比 3,4,5 排管增大 11.1% ,21.7% ,23.2% ;

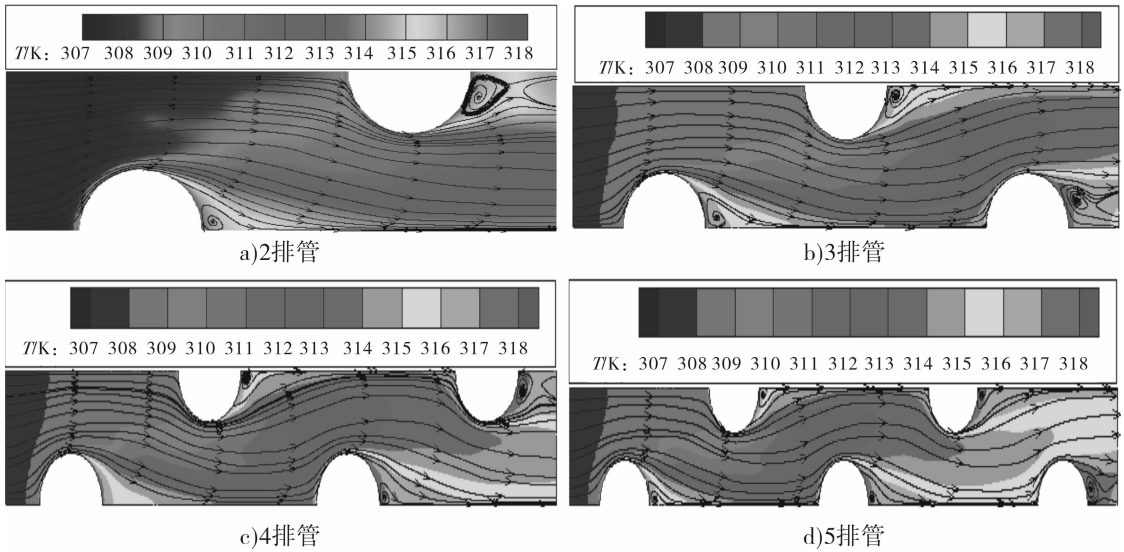


图 5 不同排管数在速度为 2 m/s 时的流场图

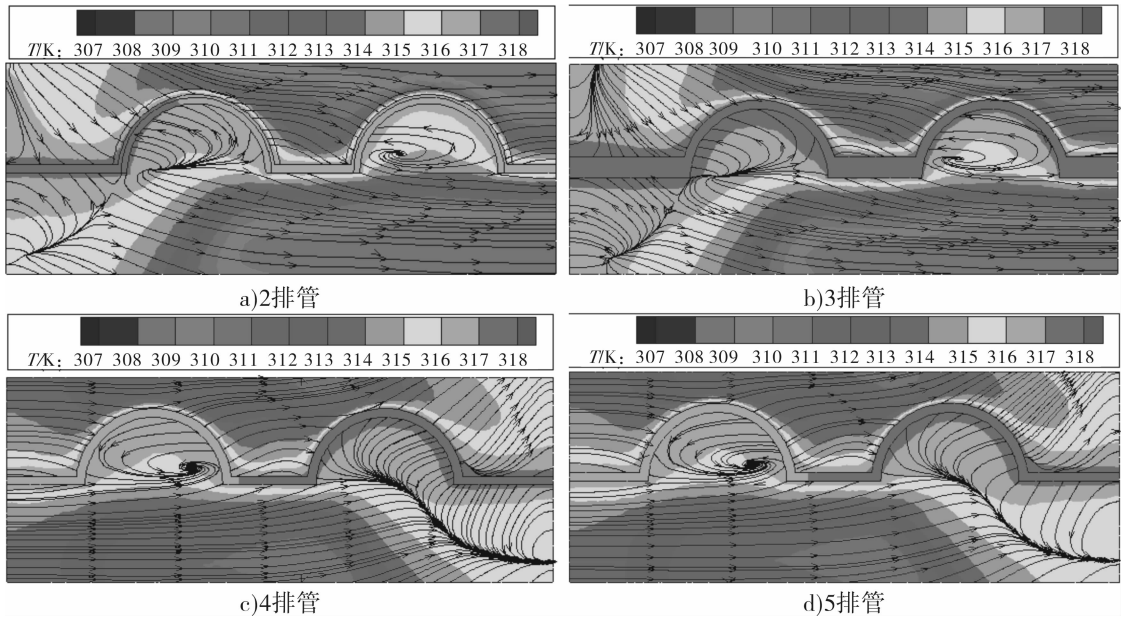


图 6 不同排管数在速度为 2 m/s 时的 y - z 面流场图

4 排管和 5 排管的平均  $Nu$  数基本相同,说明风速随着管排的减少而增加的量较小,所以空气侧的换热性能变化不明显。

3) 流场图显示,2,3,4,5 排管在球突凹处均产生了马尾辫一样的流动,使得扰动增加从而增强了换热,而 4,5 排管的温度场基本相同,表明换热基本不增加,因而管排数的增加并不能增强换热。

综上 2 排管换热综合性能最好。

参考文献:

[1] Ligrani P, Mahmood G, Harrison J, et al. Flow structure and local nusselt number variations in a channel with

dimples and protrusions on opposite walls [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44 (23): 4413.

[2] Won S Y, Zhang Q, Ligrani P M. Comparisons of flow structure above dimpled surfaces with different dimple depths in a channel [J]. Physics of fluids, 2005, 17: 45.

[3] Chang S, Chiang K, Yang T, et al. Heat transfer and pressure drop in dimpled fin channels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 33(1): 23.

[4] Hwang S D, Kwon H G, Cho H H. Heat transfer with dimple/protrusion arrays in a rectangular duct with a low reynolds number range [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 916.

# 变绳长三维吊车系统动力学模型构建

吕志

(商丘师范学院 物理与电气信息学院, 河南 商丘 476000)

**摘要:**建立了桥式起重机变绳长三维吊车系统的动力学数学模型. 该模型在桥式起重机设立坐标系时,选取系统目标控制变量作为坐标系的变量值,运用运动学基本原理分析小车的坐标位置,通过拉格朗日方程建立模型. 该模型不仅将模型变量与控制目标变量对应起来,而且将系统的三维运动以及由这些运动导致的抓斗摆角的变化考虑其中. 仿真结果表明,模型具有简单、直观、效果好等特性.

**关键词:**桥式起重机;变绳长三维吊车系统;动力学模型;Matlab

**中图分类号:**TH21 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.022

## Dynamic model establishment of the variable rope length cable 3D crane system

LYU Zhi

(School of Physics and Electrical Information Engineering, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

**Abstract:** A dynamic mathematical model of the variable rope length cable 3D crane system of bridge crane was proposed based on Matlab. It in the process of building coordinate system, chose the goal control variables as the variable of the coordinate system, analysed the coordinates of the location and was based on Lagrange equations. The variable of model was not only linked with the variable of control, but the changing of grabbing buckets' place caused by crane system was considered. The simulation results showed that the dynamic mathematical model was simple and tracking quickly.

**Key words:** bridge crane; variable rope length cable 3D crane system; dynamic model; Matlab

## 0 引言

桥式起重机是机械工程领域中一个重要的运载工具,广泛应用于各种工业场所,桥式起重机系统是一种典型的欠驱动机械系统<sup>[1-3]</sup>. 吊车系统在吊运过程中,货物不可避免地要出现摆动现象,尤其是在外部环境干扰较大的情况下更是如此. 这种摆动将给生产带来危害与不利,如损坏货物、伤害地面工作人员、降低生产效率等. 针对起重机的这一现象,国内外学者对其防摆与定位控制做了大量

研究. 为了对其进行准确防摆与定位控制,建立精确、计算简便而又能便于理解的数学模型是十分必要的.

根据工业领域的不同要求,起重机工作的复杂程度也不尽相同,一般可分为三维运动、二维运动和一维运动3种运动状态. 其中三维运动是工业领域中要求最多、最普遍存在的一种,同时也是最复杂的一种起重机系统. 为了便于研究,很多学者都将起重机的三维模型通过给定绳长简化处理为一维模型和二维模型,因此对变绳长三维吊车系统建

立精确、便于理解和计算的数学模型是十分重要的.

在对起重机建模方面有突出贡献的国外学者如 H. Park 等<sup>[3]</sup>利用拉格朗日方程建立了二维桥式吊车的非线性模型;H. H. Lee<sup>[4]</sup>通过分析系统的物理模型并对其受力分析推导出了吊车系统的三维数学模型,为后人在建模方面开辟了思路,在起重机系统控制研究方面打下了基础.高炳团<sup>[5]</sup>利用拉格朗日方程完成了对龙门吊车系统的三维建模,然而在建模时仅考虑了便于对模型的简化,未将控制思想考虑在内.

本文拟建立桥式起重机的数学模型,同时考虑系统之后的控制问题,以利于控制的实现与理解<sup>[6]</sup>;然后对建立的起重机模型进行数字仿真实验,以便与文献<sup>[5]</sup>仿真结果进行比较,验证其一致性、正确性.

## 1 桥式起重机变绳长吊车系统的数学建模

### 1.1 起重机系统概述

起重机系统是一个典型的欠驱动机械系统,系统本身与外部环境变化等因素的影响使变绳长吊车系统更加复杂.主要体现在吊车系统中钢丝绳的柔性,使抓斗与重物易产生摆动现象,加之各种因素的影响,如风速变异、系统之间摩擦的不稳定性,使抓斗与重物的摆动现象更加难以分析.

为了便于分析,对桥式起重机变绳长吊车系统的运动进行抽象考虑,可得到如图 1 所示的物理模型.图 1 中,负载通过绳索与天车相连, $l$  表示绳索的长度.小车在作用力  $f_x$  作用下沿  $x$  方向运动,在作用力  $f_y$  作用下沿  $y$  方向运动,这样通过控制天车水平方向上的运动就可以实现对悬挂的负载水平方向上的控制.此外,负载在作用力  $f_l$  的作用下进行升降运动即改变绳长的运动.

在工作过程中,天车的运动和绳索的升降都会引起负载的摆动,负载摆动的大小和方向可通过  $\theta_x$  和  $\theta_y$  来表示.易知在三维桥式吊车系统中  $f_x, f_y, f_l$  是控制输入量,  $x, y, l, \theta_x, \theta_y$  是目标控制的状态量,显然此系统是控制输入量少于目标控制状态量的激励不足的欠驱动系统.为了分析其本质,必须对该变绳长吊车系统做简化处理,同时由于 Matlab 语言识别能力与人的习惯识别能力有差别,现给定建模过程中需要引用的模型参数的 Matlab 语言符号和其对应的识别与理解的通用符号,以及基于实际

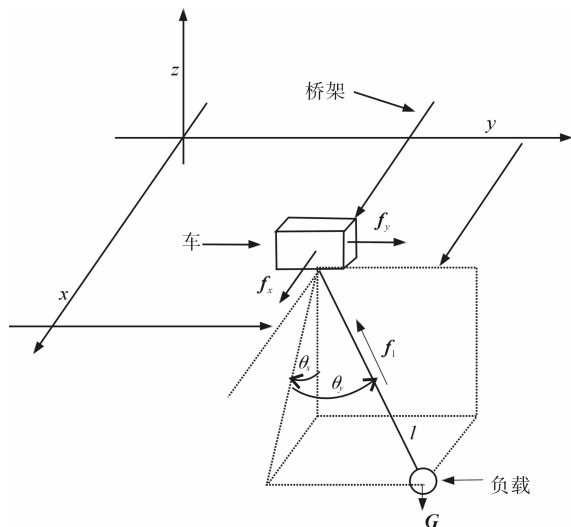


图 1 桥式起重机模型图

样机比例缩小的系统参数值,被简化后的系统参数量及其符号和物理意义如下:

小车及导轨质量  $x$  方向分量  $M_x = 100 \text{ kg}$ ;

小车及导轨质量  $y$  方向分量  $M_y = 100 \text{ kg}$ ;

$m$  为抓斗及重物质量;

$x$  为抓斗水平  $x$  方向位移;

$\dot{x}$  为抓斗水平  $x$  方向速度;

$\ddot{x}$  为抓斗水平  $x$  方向加速度;

$y$  为抓斗水平  $y$  方向位移;

$\dot{y}$  为抓斗水平  $y$  方向速度;

$\ddot{y}$  为抓斗水平  $y$  方向加速度;

$l$  为钢丝绳伸长度;

$\dot{l}$  为钢丝绳起升速度;

$\ddot{l}$  为钢丝绳起升加速度;

$\theta_x$  为抓斗  $x$  方向摆角;

$\dot{\theta}_x$  为抓斗  $x$  方向摆角速度;

$\ddot{\theta}_x$  为抓斗  $x$  方向摆角加速度;

$\theta_y$  为抓斗  $y$  方向摆角;

$\dot{\theta}_y$  为抓斗  $y$  方向摆角速度;

$\ddot{\theta}_y$  为抓斗  $y$  方向摆角加速度;

$f_x$  为系统受  $x$  方向力;

$f_y$  为系统受  $y$  方向力;

$f_l$  为系统受钢丝绳方向力;

$g$  为重力加速度.

### 1.2 起重机系统的运动学分析

欠驱动桥式起重机系统是由小车沿纵梁  $y$  在  $y$  方向上的水平运动、小车沿横梁  $x$  在  $x$  方向上的水平运动、钢丝绳沿垂直方向上的运动和抓斗以小车



为支点的三位摆动组成的复杂系统(如图1所示)。选取系统定位目标控制变量作为坐标系的变量值,建立起桥式起重机的动力学数学模型。该方法不但考虑了模型变量与控制目标变量的对应,而且考虑了系统三维运动以及由这些运动导致的钢丝绳长及抓斗摆角变化情况。

对起重机系统建立相应的坐标系,设抓斗及重物质量为  $m$ ,其坐标位置为  $(x, y, z)$ ,小车及轨道质量由  $M_x, M_y$  组成,其坐标位置  $(x_M, y_M, 0)$ 。由系统运动学推导出,系统受到的外力有驱动力  $f_x, f_y$  钢丝绳起升力  $f_l$ 。

由图1所示的坐标系可知,抓斗重物的位置坐标和小车的位置坐标分别为

$$\begin{aligned} x_m &= x & y_m &= y & z_m &= -l\cos\theta_x\cos\theta_y \\ x_M &= x - l\sin\theta_x\cos\theta_y & y_M &= y - l\sin\theta_x\cos\theta_y & z_M &= 0 \end{aligned}$$

对负载物重和小车进行运动学分析,分别对上式进行求导可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= \dot{x} & \dot{y}_m &= \dot{y} \\ \dot{z}_m &= -\dot{l}\cos\theta_x\cos\theta_y + l\sin\theta_x\cos\theta_y\dot{\theta}_x + l\sin\theta_y\cos\theta_x\dot{\theta}_y \\ \dot{x}_M &= \dot{x} - \dot{l}\sin\theta_x\cos\theta_y - l\dot{\theta}_x\cos\theta_x\cos\theta_y + l\dot{\theta}_y\sin\theta_x\cos\theta_y \\ \dot{y}_M &= \dot{y} + \dot{l}\sin\theta_y + l\dot{\theta}_y\cos\theta_y & \dot{z}_M &= 0 \end{aligned}$$

以上方程即为起重机完整的运动学方程,它将起重机抓斗坐标及相对小车的摆角等,系统目标控制的输出变量与系统直接控制的输入变量及小车坐标联系起来,基于系统的耦合作用,通过控制小车这些输入变量,间接地控制抓斗这一输出变量。

### 1.3 起重机系统的动力学分析

欠驱动桥式起重机系统是控制输入量少于系统被控输出量的非完整性约束的机械系统。系统只能利用其内部主、被动关节的动力学耦合作用,通过恰当的控制策略使欠驱动系统实现期望运动,因此系统的输入与输出不能建立一一对应的关系。基于此,本文采用拉格朗日力学的方法建立动力学模型,也就是基于起重机运动时的能量来进行。这种方法仅需计算起重机的动能和势能,因而与牛顿-欧拉方程的方法相比更加简洁,而且还能够充分反映起重机的动力学结构特征。

拉格朗日的普遍形式为

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k$$

其中,  $T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2$  为质点系的动能,  $q_k$  为质点系的广义坐标,  $k$  为质点系的自由度系数,  $Q_k$  为广义力。

于是变绳长吊车系统的动能可表示为

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}(M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2) + \frac{1}{2} m v_m^2 \\ T_m &= \frac{1}{2} m [\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (-l\cos\theta_x\cos\theta_y)^2] \\ T_M &= \frac{1}{2} M_x (\dot{x} - \dot{l}\sin\theta_x\cos\theta_y - l\dot{\theta}_x\cos\theta_x\cos\theta_y + \\ & \quad l\dot{\theta}_y\sin\theta_x\sin\theta_y)^2 + \frac{1}{2} M_y (\dot{y} + \dot{l}\sin\theta_y + l\dot{\theta}_y\cos\theta_y)^2 \end{aligned}$$

整理可得

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}(M_x + m)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}(M_y + m)\dot{y}^2 + \frac{1}{2} m \dot{l}^2 + \\ & \quad \frac{1}{2} M_y l^2 \dot{\theta}_y^2 \cos^2\theta_y - M_x (\dot{l}\sin\theta_x\cos\theta_y + l\dot{\theta}_x\cos\theta_x\cos\theta_y - \\ & \quad l\dot{\theta}_y\sin\theta_x\sin\theta_y) \dot{x} + M_y (\dot{l}\sin\theta_y + l\dot{\theta}_y\cos\theta_y) \dot{y} \end{aligned}$$

由图1取  $(x, y, l, \theta_x, \theta_y)$  组成系统的广义坐标系对系统进行分析,可建立三维吊车系统的拉格朗日方程组

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} = f_x \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}}\right) - \frac{\partial T}{\partial y} = f_y \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{l}}\right) - \frac{\partial T}{\partial l} = f_l - mg\cos\theta_x\cos\theta_y \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_x}\right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_x} = -mgl\sin\theta_x\cos\theta_y \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_y}\right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_y} = -mgl\cos\theta_x\sin\theta_y \end{cases}$$

因此系统动力学模型可表描述为

$$\begin{cases} f_x = (M_y + m)(\ddot{x} - M_x l\cos\theta_x\cos\theta_y\ddot{\theta}_x + \\ \quad M_x l\sin\theta_x\sin\theta_y\ddot{\theta}_y - M_x \sin\theta_x\cos\theta_y\ddot{l} + \\ \quad 2M_x l\cos\theta_x\sin\theta_y\dot{\theta}_x\dot{\theta}_y - 2M_x \cos\theta_x\cos\theta_y\dot{\theta}_x\dot{l} + \\ \quad 2M_x \sin\theta_x\sin\theta_y\dot{\theta}_y + M_x l\sin\theta_x\cos\theta_y\dot{\theta}_y^2 + \\ \quad M_x l\sin\theta_x\cos\theta_y\dot{\theta}_x^2) \\ f_y = (M_y + m)\ddot{y} + M_y \ddot{l}\sin\theta_y + M_y l\dot{\theta}_y\cos\theta_y + \\ \quad 2M_y l\dot{\theta}_y\cos\theta_y - M_y \dot{\theta}_y^2\sin\theta_y \\ f_l = M_x \ddot{x}\sin\theta_x\cos\theta_y + M_y \ddot{y}\sin\theta_y + (M_x + M_y)\ddot{l} - \\ \quad M_x l\dot{\theta}_x^2\cos^2\theta_y - M_y l\dot{\theta}_y^2\sin^2\theta_y\ddot{x}\cos\theta_x\cos\theta_y + \\ \quad l\ddot{\theta}_x\cos^2\theta_y - 2l\dot{\theta}_x\dot{\theta}_y\sin\theta_x\cos\theta_y + \\ \quad 2l\dot{\theta}_x\cos^2\theta_x + g\sin\theta_x\cos\theta_y = 0 \\ \ddot{x}\sin\theta_x\sin\theta_y - \ddot{y}\cos\theta_y - l\ddot{\theta}_y - 2l\dot{\theta}_y - \\ \quad l\dot{\theta}_x^2\sin\theta_x\cos\theta_y - g\sin\theta_y\cos\theta_x = 0 \end{cases}$$

根据欠驱动机械特性:对于定义在空间位形流形  $Q$  上的一个动力学系统方程,设  $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = (\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n, \dot{\mathbf{q}}_1, \dots, \dot{\mathbf{q}}_n)$  为定义在切空间集合  $M = T(Q)$  上的局部坐标,  $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$  分别表示系统坐标向量、速度向量、加速度向量. 假设系统存在  $1 \leq m < n$  个独立的控制输入,也就是说其具有小于自由度数目的控制输入. 可将  $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n)$  分解为  $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)$ ,  $\mathbf{q}_1 \in R^m, \mathbf{q}_2 \in R^{n-m}$ , 向量  $\mathbf{q}_1$  表示有驱动自由度, 向量  $\mathbf{q}_2$  表示无驱动自由度.

以上方程即为桥式起重机的动力学方程, 同时动力学方程组也可用数学矩阵模型来表示:

$$\mathbf{M}_1(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{M}_2(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{F}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_3(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{M}_4(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{F}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

其中, 向量  $\mathbf{q}_1$  表示有驱动自由度; 向量  $\mathbf{q}_2$  表示无驱动自由度;  $\mathbf{u}$  表示系统控制输入;  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{M}_i (i = 1, 2, 3, 4)$  是对称、正定的惯性矩阵, 分别为

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} M_x + m & 0 & -M_x \sin\theta_x \cos\theta_y \\ 0 & M_y + m & M_y \sin\theta_y \\ M_x \sin\theta_x \cos\theta_y & M_y \sin\theta_y & M_x + M_y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} -M_x l \cos\theta_x \cos\theta_y & M_x l \sin\theta_x \sin\theta_y \\ 0 & M_y l \cos\theta_y \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} -M_x l \cos\theta_x \cos\theta_y & 0 & 0 \\ M_y l \sin\theta_x \sin\theta_y & M_y l \cos\theta_y & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} -M_x l^2 \cos^2\theta_y & 0 \\ 0 & -M_y l^2 \end{bmatrix}$$

从方程矩阵模型中可以看出, 方程(1)定义了3个完全驱动自由度的线性动力学方程, 方程(2)定义了2个无驱动自由度的动力学方程, 其中包括加速度函数项. 由于系统中存在着2个无驱动自由度, 对于机械系统整体而言, 是欠驱动的机械系统. 由(2)可知该系统就存在2个对于加速度的完全不可积约束, 该系统为二阶非完整系统.

## 2 仿真实验

通过选取系统目标控制变量作为坐标系的变量值建立的数学模型方程, 不仅将模型变量与控制目标变量对应起来, 而且还将系统的三维运动以及由这些运动导致的抓斗摆角的变化考虑其中. 为了验证这一方法得到的数学模型的正确性, 使结果和模型更具可行性, 本文选用 Matlab 中的 Simulink 模块工具进行仿真实验. 在对系统仿真过程中, 设定

参数为: 各个部分的等效质量  $M_x = 100 \text{ kg}, M_y = 50 \text{ kg}, m = (100 \sin(x) + 100) \text{ kg}$ ; 输入量  $f_x, f_y$  为单位阶跃力;  $f_l$  输入量为 0; 系统初始状态为  $(x, \dot{x}, y, \dot{y}, l, \dot{l}, \theta_x, \dot{\theta}_x, \theta_y, \dot{\theta}_y) = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$ .

将设定好的各个参数输入搭建好的系统模型中, 运行仿真系统, 经过调试, 实验可得到该模型系统的仿真结果图, 见图 2—图 4.

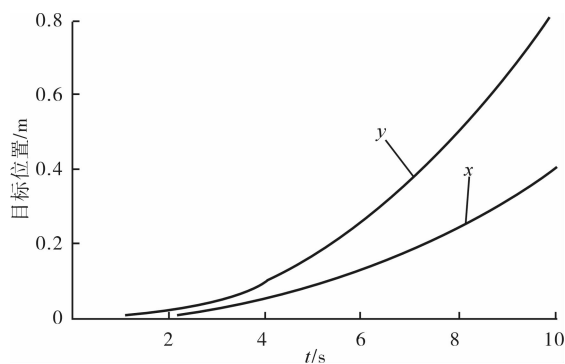


图 2 小车位置曲线

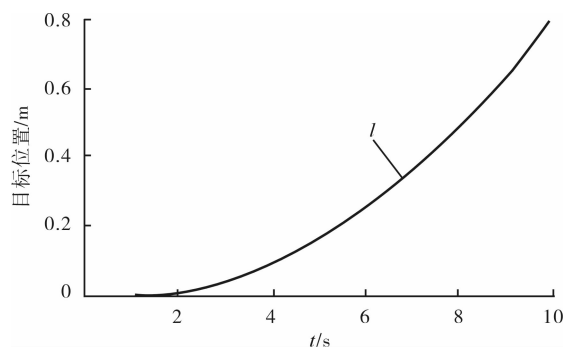


图 3 绳长曲线

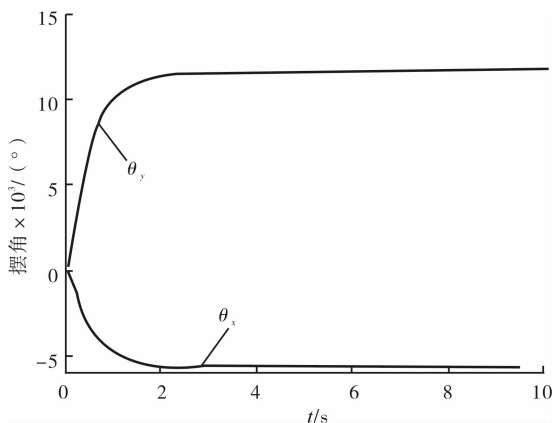


图 4 负载摆角

从仿真结果可以看出: 在给定的条件下, 小车位置在  $x$  方向和  $y$  方向都将缓慢增加, 而且根据工厂的现状, 起重机系统中主梁的质量要大于小车的

质量,因而  $y$  方向位置增加较慢;抓斗及负载的摆角在短暂变化后逐渐趋向一个稳定值,而且质量小的最终的摆动角度较大. 仿真结果与预先分析的结果相符合,因此可证明建立的该数学模型方程具有可行性.

### 3 结论

本文利用选取系统目标控制变量作为坐标系的变量值,运用运动学基本原理分析出小车的坐标位置,然后通过拉格朗日方程,建立起桥式起重机的动力学数学模型,其本质和特性与文献[5]直接利用拉格朗日方程所建立起的数学模型的本质特性具有一致性. 本文所建立的数学模型,在反应起重器抓斗与重物的定位与摆动过程中更具有直观性,更能体现所研究的目标变量,为以后更精确地控制起重器抓斗与重物的定位和防摆奠定了基础,该模型具有简单、直观、效果好等特性.

(上接第90页)

- [5] Hwang S D, Kwon H G, Cho H H. Local heat transfer and thermal performance on periodically dimple-protrusion patterned walls for compact heat exchangers[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 5357.
- [6] Isaev S, Kornev N, Leontiev A, et al. Influence of the reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(1): 178.
- [7] Chang S, Liou T M, Lee T H. Thermal performance comparison between radially rotating ribbed parallelogram channels with and without dimples[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(13): 3541.
- [8] Mahmood G, Ligrani P. Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, reynolds number, and flow structure[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(10): 2011.
- [9] 樊菊芳,何雅铃,陶文铨. 球突翅片表面的数值模拟和特性分析[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(11): 1921.

### 参考文献:

- [1] 王晓军,邵惠鹤. 基于模糊的桥式起重机的定位和防摆控制研究[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(4): 936.
- [2] 王克琦. 桥式起重机的定位和防摆控制研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(8): 1799.
- [3] Park H, Chwa D, Hong K. A feedback linearization control of containers cranes: varying rope length[J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2007, 5(4): 379.
- [4] Lee H H. Modeling and control of a three-dimensional overhead crane[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1998, 120: 471.
- [5] 高丙团. 龙门吊车系统的动力学建模[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(2): 50.
- [6] 吕志. 基于部分解耦与模糊控制的变绳长三维吊车系统防摆与定位控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.
- [10] Fan Q, Yin X. 3-D numerical study on the effect of geometrical parameters on thermal behavior of dimple jacket in thin-film evaporator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(14): 1875.
- [11] Elyyan M A, Tafti D K. A novel split-dimple interrupted fin configuration for heat transfer augmentation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(5): 1561.
- [12] 宋伟明,孟继安,李志信. 空冷器球突翅片换热与不可逆性分析[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2010(7): 1104.
- [13] 吴学红,崔帅,苟秋平,等. 球突翅片的传热流动特性及等效热阻数值分析[J]. *工业加热*, 2012, 41(1): 43.
- [14] 吴学红,崔帅,罗志明,等. 球突翅片传热性能优化设计[C]//中国工程热物理年会,东莞:[s. n.], 2012.
- [15] 吴学红,苟秋平,吕彦力,等. 半球突开缝翅片传热特性模拟及(火积)分析[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(1): 153.
- [16] 苟秋平,吴学红,吕彦力,等. 复合翅片传热与流动特性的数值模拟[J]. *热科学与技术*, 2011, 10(4): 317.

# X型插板焊接方管节点 轴压承载力的有限元分析

黄勇, 陈誉

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:**以X型插板焊接方管受压节点的试验数据为基础,运用ABAQUS软件对节点进行了模拟分析,校验了节点轴压极限承载力、应变分布和破坏模式等方面的非线性有限元建模方法.研究结果表明:在承受轴压作用时,节点焊缝附近的插板局部屈曲,平面外失稳而倾斜;插板板厚相对于方管的较小,工程中应采取增加插板厚度或在插板两边设置加劲肋等加强措施;节点的塑性变形能力较差,使得破坏呈脆性.

**关键词:**X型插板焊接方管节点;有限元分析;轴压极限承载力

**中图分类号:**TU392.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.023

## Finite element analysis of axial ultimate capacity of X-type branch plate-to-square hollow section connection

HUANG Yong, CHEN Yu

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

**Abstract:** A finite element model simulating the experiment on X-type branch plate-to-square hollow section connection was generated by ABAQUS and validated by comparing the axial ultimate capacity, strain distribution and failure mode with experimental results. The result showed that under the effect of axial pressure, plate local buckled near the weld, the plate tilted because of out-of-plane instability; it should be avoided that due to the fact the thickness of plate was relatively smaller than chord joints should be strengthened by increasing plate thickness or installing rib stiffener on both sides of plate in engineering; X-type branch plate-to-square hollow section connections had weak plastic deformation capacity from plasticity.

**Key words:** X-type branch plate-to-square hollow section connection; finite element analysis; axial ultimate capacity

## 0 引言

管板节点由钢板与钢管连接而成,与相贯节点相比,因加工简单、造价低廉,所以在输电塔、航站

楼和车站等大跨空间结构中得以广泛应用<sup>[1-4]</sup>.随着经济的发展,为了满足建筑美学的要求,钢结构中出现了钢板平面与钢管轴向成一定夹角的斜插板焊接管节点.

收稿日期:2013-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51278209)

作者简介:黄勇(1986—),男,贵州省毕节市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为钢结构.

对于插板管节点的极限承载力,近年来国内外学者做了大量的试验分析,取得了丰硕的研究成果<sup>[5-8]</sup>,但对于X型斜插板焊接方管节点的轴压性能,尚未见过多的相关报道. 本文将运用非线性有限元分析的方法,以基本的平面节点建模,对X型插板焊接方管节点的破坏模式、应变分布和轴压性能等进行研究,通过试验结果与模拟结果比较,校验得到可行的有限元分析方法,以期后续对X型斜插板焊接方管节点轴压性能的模拟分析提供依据.

## 1 有限元模型

本文的有限元分析采用 ABAQUS 软件的 C3D20R 单元来进行建模和计算.

### 1.1 约束和加载

节点简图如图 1 所示,节点尺寸如下:编号为 GX5490,钢管规格为 120 mm × 120 mm × 5 mm,插板规格为 100 mm × 100 mm × 4 mm,  $\theta = 90^\circ$ ,  $t_0 = 5$  mm,  $t_1 = 4$  mm,  $\tau = 0.8$ .

边界条件如图 2 所示,节点的下端板视为固定支座,上端板为自由端. 采用位移加载,位移限值取最大试验位移值. 试验过程中,上端板施加面荷载,承载面与加载中心使用耦合约束的方式,构件为刚性连接,使加载面共同承担点位移.

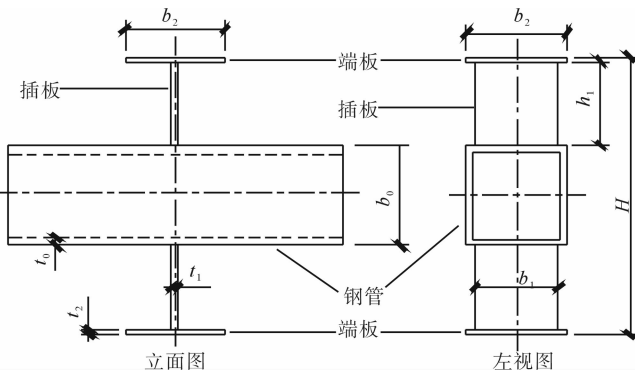


图 1 X型插板焊接方管节点

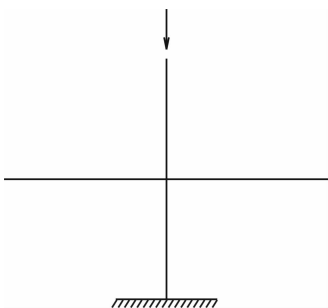


图 2 节点的边界条件和加载方式

### 1.2 材料属性

节点所用钢材的弹性模量和屈服强度通过材料性试验<sup>[9]</sup>得到,各特征值如下:钢材类型为 Q235,屈服强度为 335 MPa,弹性模量为 206e5 MPa,强化模量为 206e3 MPa,泊松比为 0.3,材料屈服准则为 Von-Mises. 分析节点的极限承载力时,用自动步长增量法计算,并考虑几何非线性和材料非线性的影响;求解时采用基于静力的完全牛顿法,考虑焊缝但未考虑残余应力对插板方管节点轴压性能的影响. 定义材料塑性时,采用的模型为等向硬化弹塑性,即保证应力 - 应变曲线始终是向上倾斜的,强化模量取弹性模量的 1/100.

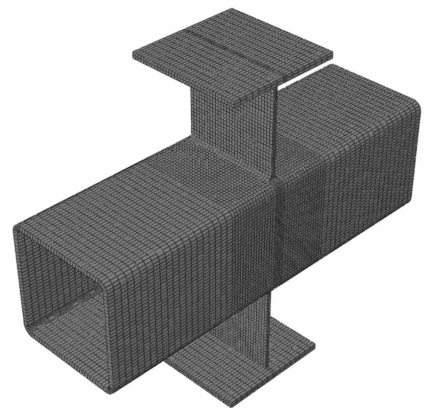
### 1.3 网格划分

本文采用结构化网格,划分时控制单元边长. 采用 C3D20R 单元,以防止剪力自锁现象,网格划分见图 3.

## 2 模拟结果与验证

### 2.1 破坏模式

X型插板焊接方管节点的破坏模式见图 4. 节点在端部位移荷载作用下,插板因平面外失稳而倾



a) 轴测图



b) 正面图

图 3 节点有限元模型网格划分

斜,主管无可见变形,破坏呈脆性.由图 4a),b)对比可见,有限元模拟结果与节点破坏模式基本吻合,但有限元模拟设定上端板自由,而试验加载过程中上下端板均受约束,导致节点破坏模式的模拟上端板存在一定的转动,使节点破坏模式的模拟上端板存在一定的转动,使节点破坏模式与有限元模拟结果存在偏差,但这不影响节点的轴压性能研究,可见有限元还是能较真实地模拟节点破坏模式的.



图 4 节点的破坏模式

### 2.2 应力分布及发展

X 型插板焊接方管节点在轴向荷载作用下的应力云图如图 5 所示,浅色表示高应力分布区域,深色表示低应力区域或者未产生应力的区域.

加载过程中,插板应力靠近焊缝处分布不均匀,而远离焊缝的区域分布比较均匀;方管应力靠近焊缝区域较大,而远离焊缝区域应力基本为 0. 由于焊缝区域几何突变,出现应力集中现象,所以最大应力发生在焊缝区域的插板和管壁上.

荷载较小时,节点域应力基本均匀分布,应变强度随荷载的变化也比较均匀,荷载较大时,应变强度分布不再均匀,加载后期应力在节点域进行重分布,节点焊缝端部几何突变的位置出现应力集中现象,节点因板件局部屈曲平面外失稳倾斜而失效.

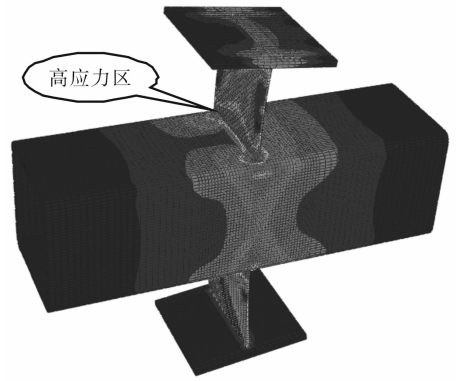


图 5 节点的应力分布云图

### 2.3 荷载 - 位移曲线

节点的荷载 - 位移曲线见图 6,纵坐标表示端板处的轴压力,横坐标为端板沿插板方向的位移.位移取向下为正,向上为负.由图 6 可见: 1) 曲线几乎无水平发展段,节点具有较差的塑性变形能力,这与节点因插板平面外失稳破坏相一致; 2) 有限元能较好地计算节点的轴压极限承载力; 3) 试验值略大于有限元分析结果.

比较试验曲线和模拟曲线可知,两者存在一定的偏差.这是因为:试验时节点是直接置于钢梁支座上,未受其他任何约束,但是模拟时是视为固定支座来处理的,使得有限元模型的边界条件强于试验中的约束条件,导致弹性阶段节点的位移试验值略大于模拟值.

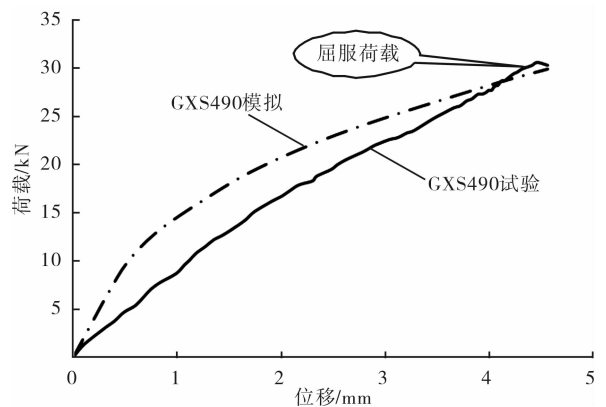


图 6 节点的荷载 - 位移曲线

## 3 结论

本文以 X 型插板焊接方管节点的轴压试验数据为基础,运用 ABAQUS 软件对节点进行模拟分 (下转第 108 页)

# 对轴向冲击圆柱壳局部屈曲及整体失稳的数值模拟分析

赵广臣

(太原理工大学 阳泉学院, 山西 阳泉 045000)

**摘要:**使用有限元程序 LS-DYNA 对不同加载情况圆柱壳的动力响应进行数值模拟,得到圆柱壳未发生局部屈曲点处的应变.数值模拟结果与实验符合较好.数值模拟所得到的未发生局部屈曲处应变表明:当壳发生局部屈曲时,整个壳的未屈曲部位处于塑性状态,随后壳会发生弹性卸载,并发生弹性振动,直至静止.

**关键词:**圆柱壳屈曲;数值模拟;整体失稳;轴向冲击

**中图分类号:** O34      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.024

## Computer simulation on dynamical buckling and whole collapse of cylindrical shell under axial impact

ZHAO Guang-chen

(Institute of Yangquan, Taiyuan University of Technology, Yangquan 045000, China)

**Abstract:** The computer simulation on dynamic buckling and whole collapse of cylindrical shell under different axial impact was carried out using LS-DYNA. The numerical results and the experimental results showed good agreement. The strains of the points which were located in the middle of the local buckling cylindrical shells were obtained. The strains showed that the local buckling cylindrical shells were in the plastic stage and generated elastic vibration subsequently until standstill.

**Key words:** cylindrical shell buckling; computer simulation; whole collapse; axial impact

## 0 引言

轴向冲击下的金属圆柱壳一般有稳定的动力渐近屈曲并且行程较长,这样的特性符合能量吸收结构和材料选择的一般原则,所以轴向冲击下的圆柱壳的屈曲行为一直是人们关注的问题. A. L. Florence 等<sup>[1]</sup>确立了柱壳在轴向冲击下发生屈曲的阈速度概念,利用放大函数法得到的阈速度和屈曲半波数与实验符合较好. N. Jones 等<sup>[2]</sup>对轴向冲击下的柱壳进行了深入研究,提出了动力渐进屈曲和动

力塑性屈曲的概念. R. Wang 等<sup>[3]</sup>在柱壳动力塑性屈曲方面进行了研究,提出了第 2 临界速度的概念. D. Karagiozova<sup>[4-5]</sup>的研究表明,当本构关系是应变率敏感性的,圆柱壳只会发生动力渐进屈曲,尽管一些实验结果支持了这一观点,但仍需要进一步验证.至今,动力渐进屈曲和动力塑性屈曲的发生条件和机理还不是十分清楚.一般认为:在低速撞击下( $V_0 < 5$  m/s)金属圆柱壳会发生动力渐进屈曲;在高速冲击作用下,圆柱壳则会发生动力塑性屈曲和动力渐进屈曲.显然冲击速度对壳的屈曲是有

影响的. 另外壳的材料特性对壳的屈曲模态也有影响, 圆柱壳的动力屈曲还需要做更多的研究. 施连会等<sup>[6-7]</sup>利用哈密顿原理和相邻平衡准则推导出了圆柱壳非轴对称弹性动力屈曲控制方程, 利用差分方法求解了包含双特征参数的动力屈曲控制方程; 运用有限元特征值分析方法对应力波作用下圆柱壳塑性轴对称动力失稳问题进行了研究; 通过引入圆柱壳动力失稳时的波前约束条件实现了此类问题的有限元特征值解法. 数值模拟技术在轴向冲击圆柱壳屈曲行为应用越来越重要, 显式有限元技术例如 LS-DYNA 的数值分析方法得到了日益广泛的应用, 在很大程度上代替了实验研究. 但应用 LS-DYNA 程序对轴向冲击圆柱壳进行计算的文献大多是假设壳只发生轴对称屈曲从而只得到了轴对称的屈曲模态<sup>[8-9]</sup>. 本文拟使用有限元程序 LS-DYNA 对不同加载情况圆柱壳的动力响应进行数值模拟, 以期得到与实验结果具有一致性的屈曲模态及圆柱壳未发生局部屈曲点处的应变.

## 1 有限元分析的力学模型

本文使用 LS-DYNA 完成冲击载荷的初始速度为  $V_0$  的质量块冲击的圆柱壳屈曲的数值模拟. 其中, 圆柱壳上下端的约束条件均为自由, 圆柱壳的单元类型为 SHELL, 冲击质量块和底座选取为实体单元, 圆柱壳自身接触定义为自动单面接触且摩擦系数为 0, 底座与圆柱壳的接触、冲击质量块与圆柱壳的接触定义为自动面面接触且摩擦系数为 0.25. 考虑到壳长或者加载条件不同时, 实际接触刚度会有差别, 本文所采用的数值模型的接触刚度也作了相应的修正. 圆柱壳所采用矩形单元大小为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ , 经过试算, 采用更小的单元尺寸除了计算时间更长, 圆柱壳的屈曲模态或者失稳模态没有变化. 底座和冲击质量块的材料采用刚体, 圆柱壳的本构关系采用 LS-DYNA3 号材料模型, 圆柱壳的密度为  $7\ 850\text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $210\text{ GPa}$ , 强化模量为  $763\text{ MPa}$ , 屈服应力为  $285\text{ MPa}$ . 本文数值模拟通过调节冲击质量块的初始冲击速度  $V_0$  与实验中的不同冲击高度  $H$  来匹配, 数值模拟中的圆柱壳几何尺寸及所加载荷与实验都是相同的. 实验中的试件为无缝圆柱壳, 外径为  $44\text{ mm}$ , 壁厚为  $1.0\text{ mm}$ , 试件的长度  $L$  分别为  $440\text{ mm}$ ,  $660\text{ mm}$  和  $880\text{ mm}$ . 对于不同长度的圆柱壳, 冲击高度  $H$  分别采用  $1\ 000\text{ mm}$  和

$3\ 000\text{ mm}$ , 初始冲击速度  $V_0 = 4.47\text{ m/s}$  和  $7.75\text{ m/s}$ . 数值模拟实验各试件长度与工况见表 1.

表 1 数值模拟实验各试件长度与工况

试件编号	$L/\text{mm}$	$V_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$H/\text{mm}$
1	440	4.47	1 000
2	440	7.75	3 000
3	660	4.47	1 000
4	660	7.75	3 000
5	880	4.47	1 000
6	880	7.75	3 000

圆柱壳的轴向冲击实验是采用 DHR-9401 落锤式冲击加载试验机对不同长度的钢制圆柱壳进行冲击加载的. DHR-9401 落锤式冲击加载试验机总高度为  $13.47\text{ m}$ , 有效落程为  $12.6\text{ m}$ , 最大冲击速度为  $15.7\text{ m/s}$ , 最大冲击动能为  $29\ 500\text{ J}$ . 该落锤结构合理, 制作精细, 能量耗散极小, 锤体下落平稳, 动力重复性好, 冲击速度误差  $< 0.2\%$ . 落锤质量可在  $1.9 \sim 240\text{ kg}$  内调整, 与不同高度匹配, 可满足中低速大冲击能量的撞击试验要求.

## 2 数值模拟与实验结果对比

利用上述有限元模型对表 1 中各种实验工况下圆柱壳的屈曲响应进行数值模拟, 得到的圆柱壳屈曲模态与实验所得到圆柱壳屈曲模态进行对比, 结果如图 1 所示.

由图 1 可以看出, 本文用来模拟轴向冲击圆柱壳屈曲行为所采用的有限元模型是有效的, 所得结果是可靠的. 为了得到发生局部屈曲圆柱壳未屈曲部位的响应状态, 本文得到了有限元模型发生局部屈曲试件中部的轴向应变和曲线(见图 2). 可以看出, 发生局部屈曲试件的未屈曲部位的响应状态可以分为 3 个阶段: 弹塑性变形阶段、弹性卸载阶段和弹性振动阶段. 通过比较试件 1, 试件 3 与试件 5 中部轴向应变曲线可知, 对于相同加载工况的不同长度圆柱壳, 较长壳轴向的塑性残余变形更大. 通过对比试件 1 与试件 2 的中部轴向应变曲线可知, 对于同一个圆柱壳, 当加载速度较大时, 未屈曲部位的塑性残余变形也较大, 试件 5 与试件 6 中部轴向应变曲线对比也可以得到同样的结果.

## 3 结论

本文采用三维有限元模型对中低速轴向冲击钢制圆柱壳的屈曲行为进行了数值模拟, 得到与实验结果吻合良好的屈曲模态, 说明本文所采用的三维



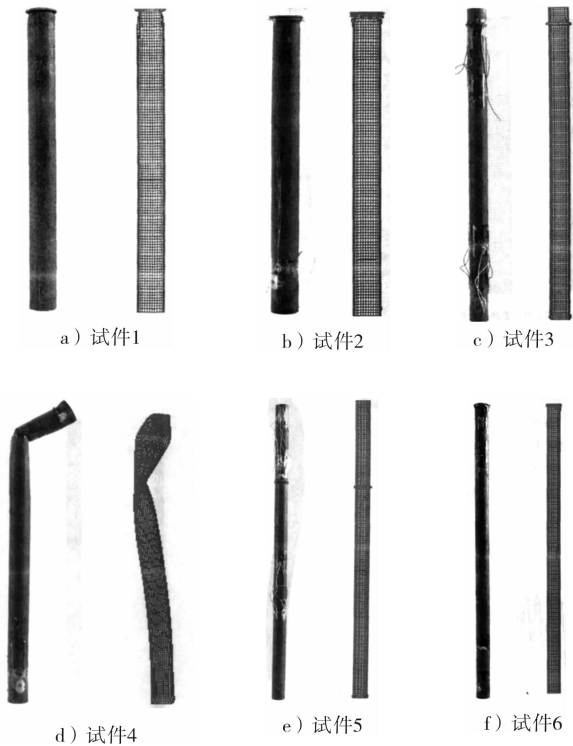


图1 试件1—6实验(左)与数值模拟(右)圆柱壳屈曲模态对比

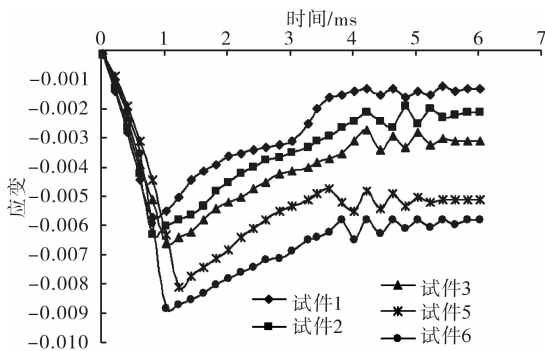


图2 局部屈曲试件中部轴向应变

有限元模型是有效和可靠的. 本文通过数值模拟结果得到的发生局部屈曲圆柱壳中部未屈曲部位的应变时程曲线表明, 当壳发生局部屈曲时, 整个壳的未屈曲部位处于塑性状态, 随后壳会发生弹性卸载, 并发生弹性振动, 直至静止. 最终的残余塑性应变和圆柱壳的长度及加载条件有关.

参考文献:

[1] Florence A L, Goodier J N. Dynamic plastic buckling of cylindrical shells in sustained axial compressive[J]. ApplMech, 1968, 35(1):80.

[2] Jones N. Structural Impact[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

[3] Wang R, Han M B, Huang Z P, et al. An experimental study on the dynamic axial plastic buckling of a cylindrical shell[J]. Int J Impact Engng, 1983(1):249.

[4] Karagizova D. Inertia effects on some crashworthiness parameter for cylindrical shell under axial impact[J]. International Journal of Crashworthiness, 2001, 6(4):561.

[5] Karagizova D, Jones N. Influence of stress waves on the dynamic progressive and dynamic plastic buckling of cylindrical shells[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 37(38-39):6723.

[6] 施连会, 王安稳. 轴向压应力下圆柱壳弹性动力屈曲数值解法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(10):105.

[7] 郑波, 王安稳. 轴向应力波作用下圆柱壳塑性轴对称动力屈曲[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(3):271.

[8] 崔艳, 韩志军, 路国运, 等. 刚性块轴向冲击圆柱壳动力屈曲的计算机模拟[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(5):1105.

[9] 杨卫奇, 张善元, 路国运, 等. 圆柱壳轴向冲击屈曲数值仿真及其应力波效应分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(23):6204.

# Lurie 复杂网络混沌系统的滑模变结构控制

毛北行<sup>1</sup>, 李新芳<sup>2</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 数理系, 河南 郑州 450015;

2. 河南机电高等专科学校 基础部, 河南 新乡 453003)

**摘要:**研究了 Lurie 复杂网络混沌系统的滑模变结构控制问题,构造了 2 类 Lurie 的驱动响应动态网络模型. 基于 Lyapunov 稳定性理论说明了 Lurie 混沌系统在滑模变结构方法下是同步的.

**关键词:**Lurie 复杂网络混沌系统;滑模变结构控制;Lyapunov 稳定性理论

**中图分类号:**0482.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.025

## Sliding mode variable structure control of Lurie complex network chaos system

MAO Bei-xing<sup>1</sup>, LI Xin-fang<sup>2</sup>

(1. Department of Mathematics and Physics, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;

2. Department of Basic, He'nan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** The problem of sliding mode variable structure control of Lurie complex network chaos systems was studied. Two drive-response dynamical modes of Lurie complex networks was founded. It was proved that Lurie chaotic systems was synchronized using sliding mode control synchronization approach based on Lyapunov stable theory.

**Key words:** Lurie complex network chaos system; sliding mode variable structure control; Lyapunov stable theory

## 0 引言

混沌同步一直是非线性科学领域的热点研究问题之一,自 L. M. Pecora 和 T. L. Carroll 于 1990 年代提出混沌系统的完全同步方法以来,混沌同步研究取得了巨大的进展,例如完全同步、相同步、耦合同步、滞后同步、广义同步、投影同步等<sup>[1-8]</sup>. 近年来,混沌同步的应用从物理学迅速扩展到自动化控制、复杂网络以及保密通信等领域.

Lurie 系统包含控制系统中多种非线性环节,能

够概括工程问题中的许多实际问题,因而其研究引起了国内外学者的广泛兴趣. 文献[9]研究了一类 Lurie 系统的自适应混沌同步;文献[10]研究了 Lurie 系统的脉冲控制问题,该方法所需的代价小、性能可靠;文献[11]基于单向耦合原理研究了 Lurie 系统的修正函数投影同步问题. 滑模变结构控制作为控制系统的一种综合方法,是解决连续与离散、线性与非线性、时变与定常、确定与不确定系统相关问题的有力工具,在机器人控制、飞机自适应控制、卫星姿态控制、机电系统控制以及电力系统控

收稿日期:2013-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51072184);国家自然科学基金数学天元基金项目(11226337);航空基金项目(2013ZD55006);郑州航空工业管理学院青年基金项目(2012113004)

作者简介:毛北行(1976—),男,河南省洛阳市人,郑州航空工业管理学院副教授,主要研究方向为复杂网络与混沌同步.

制等方面都发挥了很大的作用. 文献[12]研究了一类非线性输入的受扰复杂网络控制系统的滑模控制问题,但关于 Lurie 复杂网络混沌系统的滑模控制的研究结果还不多见. 鉴于此,本文研究 Lurie 复杂网络混沌系统的滑模变结构控制问题,构造 2 类 Lurie 驱动响应动态网络模型,并基于 Lyapunov 稳定性理论说明 Lurie 混沌系统在滑模变结构方法下是同步的.

## 1 主要结果

考虑一类 Lurie 复杂网络混沌系统

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^N a_{ij}\mathbf{x}_j(t) \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{x}_i(t)$  为网络第  $i$  个节点的状态向量,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $\mathbf{C}$  为适当维数的常数矩阵的矩阵元;  $f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t))$  为非线性函数;  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  表示响应网络的非线性耦合配置矩阵;  $\sigma_i$  反映了网络的拓扑结构和节点的耦合强度.

其对应的响应系统为

$$\dot{y}_i(t) = f(\mathbf{C}y_i(t)) + \hat{\sigma}_i \sum_{j=1}^N a_{ij}y_j(t) + u_i(t) \quad (2)$$

其中,  $u_i(t)$  为加在第  $i$  个节点上的控制器,  $\hat{\sigma}_i$  是对  $\sigma_i$  的估计值.

**定理 1** 设计控制律  $u_i(t) = -\eta_i \text{sign}(s_i^T) + f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) - f(\mathbf{C}y_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^N a_{ij}\mathbf{x}_j(t) - K_i e_i(t)$  和自适应律  $\dot{\hat{\sigma}}_i = -(a_{ij}y_j(t))^T s_i(t)$ , 构造切换函数  $s(t) = e_i(t) + K_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau$ , 系统 (1) 与 (2) 是滑模变结构混沌同步的, 其中  $\eta_i > 0$ .

**证明** 定义系统误差为  $e_i(t) = y_i(t) - x_i(t)$ , 则其导数为

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= \dot{y}_i(t) - \dot{x}_i(t) = \\ & f(\mathbf{C}y_i(t)) - f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) + \\ & \hat{\sigma}_i \sum_{j=1}^N a_{ij}y_j(t) - \sigma_i \sum_{j=1}^N a_{ij}\mathbf{x}_j(t) + u_i(t) \end{aligned}$$

选取切换函数  $s(t) = e_i(t) + K_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau$ , 系统满足滑模运动需满足条件

$$s(t) = e_i(t) + K_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau = 0 \quad (3)$$

$$\dot{s}(t) = \dot{e}_i(t) + K_i e_i(t) = 0 \quad (4)$$

由 (3)(4) 可得

$$\dot{e}_i(t) = -K_i e_i(t) \quad (5)$$

选取  $K_i > 0$ , 很容易得到系统 (5) 渐稳.

设计控制律  $u_i(t) = -\eta_i \text{sign}(s_i^T) + f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) - f(\mathbf{C}y_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^N a_{ij}\mathbf{x}_j(t) - K_i e_i(t)$  和自适应律

$$\dot{\hat{\sigma}}_i = -(a_{ij}y_j(t))^T s_i(t), \text{构造 Lyapunov 函数}$$

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N s_i^T(t) s_i(t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_i(t) \hat{\sigma}_i^T(t)$$

对其求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^N s_i^T(t) [\dot{e}_i(t) + K_i e_i(t)] + \sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_i \dot{\hat{\sigma}}_i^T = \\ & \sum_{i=1}^N s_i^T(t) [\hat{\sigma}_i \sum_{j=1}^N a_{ij}y_j(t) - \eta_i \text{sign}(s_i^T(t))] + \\ & \sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_i \dot{\hat{\sigma}}_i^T = - \sum_{i=1}^N \eta_i s_i^T(t) \text{sign}(s_i^T(t)) = \\ & - \sum_{i=1}^N \eta_i |s_i^T| < 0 \end{aligned}$$

考虑 Lurie 复杂网络

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^N g(\mathbf{x}_j(t)) \quad (6)$$

其中  $g(\mathbf{x}_j(t))$  为系统网络耦合的非线性函数.

其对应的响应系统为

$$\dot{y}_i(t) = f(\mathbf{C}_i y_i(t)) + \hat{\sigma}_i \sum_{j=1}^N g(y_j(t)) + u_i(t) \quad (7)$$

**定理 2** 设计控制律  $u_i(t) = -\eta_i \text{sign}(s_i^T) + f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) - f(\mathbf{C}y_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^N g(\mathbf{x}_j(t)) - K_i e_i(t)$

和自适应律  $\dot{\hat{\sigma}}_i = -(g(y_j(t)))^T s_i(t)$ , 构造切换函数  $s(t) = e_i(t) + K_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau$ , 系统 (6) 与 (7) 是滑模变结构混沌同步的, 其中  $\eta_i > 0$ .

**证明** 定义系统误差为  $e_i(t) = y_i(t) - x_i(t)$ , 其导数为

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= \dot{y}_i(t) - \dot{x}_i(t) = \\ & f(\mathbf{C}y_i(t)) - f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) + \hat{\sigma}_i \sum_{j=1}^N g(y_j(t)) - \\ & \sigma_i \sum_{j=1}^N g(\mathbf{x}_j(t)) + u_i(t) \end{aligned}$$

构造切换函数

$$s(t) = e_i(t) + K_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau$$

$$\dot{s}(t) = \dot{e}_i(t) + K_i e_i(t)$$

设计控制律  $u_i(t) = -\eta_i \text{sign}(s_i^T) + f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) - f(\mathbf{C}y_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^N g(\mathbf{x}_j(t)) - K_i e_i(t)$  和自适应律

$\dot{\hat{\sigma}}_i = -(g(y_j(t)))^T s_i(t)$ , 构造 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N s_i^T(t) s_i(t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_i(t) \hat{\sigma}_i^T(t)$$

对其求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^N s_i^T(t) [\dot{e}_i(t) + K_i e_i(t)] + \sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_i \dot{\hat{\sigma}}_i^T = \\ &= \sum_{i=1}^N s_i^T(t) [\hat{\sigma}_i \sum_{j=1}^N g(y_j(t)) - \eta_i \text{sign}(s_i^T(t))] + \\ &= \sum_{j=1}^N \hat{\sigma}_i \dot{\hat{\sigma}}_i^T = - \sum_{j=1}^N \eta_i s_i^T(t) \text{sign}(s_i^T(t)) = \\ &= - \sum_{i=1}^N \eta_i |s_i^T| < 0 \end{aligned}$$

## 2 数值算例

以下述系统为例:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^3 a_{ij} \mathbf{x}_j(t) \\ \sigma_i &= 1/2 \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

$$f(\mathbf{C}\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 10(x_2 - x_1) \\ 28x_1 - x_1x_3 - x_2 \\ x_1x_2 - 8/3x_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{其中, } \mathbf{A} = (a_{ij}) = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

含有 3 个节点的非线性耦合响应动态网络描述为

$$\dot{y}_i(t) = f(\mathbf{C}\mathbf{y}_i(t)) + \hat{\sigma}_i \sum_{j=1}^3 a_{ij} y_j(t) + u_i(t)$$

设计控制律  $u_i(t) = -\eta_i \text{sign}(s_i^T) + f(\mathbf{C}\mathbf{x}_i(t)) -$

$f(\mathbf{C}\mathbf{y}_i(t)) + \sigma_i \sum_{j=1}^N a_{ij} \mathbf{x}_j(t) - K_i e_i(t)$  和自适应律

$\dot{\hat{\sigma}}_i = -(a_{ij} y_j(t))^T s_i(t)$ , 构造切换函数  $s(t) =$

$e_i(t) + K_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau$ , 系统 ① 与 ② 是滑模变结构混沌同步的, 其中  $\eta_i = 1/2, i = 1, 2, 3$ .

## 3 结语

本文基于 Lyapunov 稳定性理论和混沌同步相

关理论, 研究了 2 类 Lurie 复杂网络混沌系统的滑模变结构控制问题, 给出了切换函数的构造、控制器与自适应律. 研究表明, Lurie 混沌系统在滑模变结构方法下是同步的, 数值算例说明了该方法的有效性.

## 参考文献:

- [1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems [J]. Phys Rev Lett(S0031-9007), 1990, 64(8):821.
- [2] Pecora L M, Carroll T L. Driving systems with chaotic signals[J]. Phys Rev A(S0277-786X), 1991, 44(4):2374.
- [3] Yoo W J, Ji D H, Won S C. Synchronization of two different non-autonomous chaotic systems using fuzzy disturbance observer[J]. Physics Letters A, 2009, 374(11):1354.
- [4] Fallahi K, Leung H. A chaos secure communication scheme based on multiplication modulation [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(2):368.
- [5] 吕翎, 李纲, 张檬, 等. 全局耦合网络的参数辨识与时空混沌同步[J]. 物理学报, 2011, 60(9):5051.
- [6] 李建芬, 李农. 一类混沌系统的修正函数投影同步[J]. 物理学报, 2011, 60(8):5071.
- [7] 毛北行, 孟晓玲, 卜春霞. 一类模糊不确定时滞 Lurie 系统基于观测器的混沌同步问题[J]. 河南科学, 2013, 32(2):130.
- [8] 毛北行, 孟晓玲, 张理涛. 一类离散复杂网络混沌系统的输出耦合滑膜同步控制[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2013, 28(2):103.
- [9] 何汉林, 涂建军, 熊萍. 一类 Lurie 混沌系统的全局渐近同步[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(2):38.
- [10] 毛北行, 王东晓, 卜春霞. Lurie 混沌系统的脉冲控制同步[J]. 华中师范大学学报:自然科学版, 2012, 46(3):297.
- [11] 毛北行, 程春蕊, 卜春霞. Lurie 混沌系统的修正函数投影同步[J]. 数学杂志, 2013, 33(4):717.
- [12] 邓玮, 孙君曼, 崔光照, 等. 基于非线性输入控制实现受扰混沌系统同步[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4):837.

# 非奇异 $H$ -矩阵的新判据

崔润卿, 闫学华

(河南理工大学 数学与信息科学学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**针对判别一个矩阵是否为非奇异  $H$ -矩阵的实用而简便的判定条件较少的问题,从矩阵本身元素的性质出发,通过构造正对角矩阵,综合利用不等式的放缩技巧和非奇异  $H$ -矩阵的充分必要条件,推广和改进了一些判定定理,进而扩大了非奇异  $H$ -矩阵的判定范围.数值算例表明,新判据比原有结果有更广的应用范围.

**关键词:**非奇异  $H$ -矩阵; $\alpha$ -对角占优矩阵;广义严格  $\alpha$ -对角占优矩阵

**中图分类号:**O151.21 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.026

## New conditions for nonsingular $H$ -matrix

CUI Run-qing, YAN Xue-hua

(School of Mathematics and Information Science, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of fewer practical decision condition whether a matrix is nonsingular  $H$ -matrix, based on the properties of matrix element itself, by constructing positive diagonal matrix and comprehensive utilization of inequality techniques and sufficient and necessary conditions of nonsingular  $H$ -matrix, some of the judgement theorem were expanded and improved. And the scope of judging nonsingular matrices was also expanded. The numerical example showed that the new criterion had wide range of application than the original results.

**Key words:** nonsingular  $H$ -matrix;  $\alpha$ -diagonally dominant matrix; generalized strictly diagonally dominant  $\alpha$ -matrix

## 0 引言

非奇异  $H$ -矩阵在数值分析、数学物理、控制论等众多学科中有广泛应用,因此对非奇异  $H$ -矩阵的判定一直是学者们所关注的研究课题.然而,判别一个高阶矩阵是否为非奇异  $H$ -矩阵是很困难的.为此,近年来,国内外许多学者对非奇异  $H$ -矩阵的性质和判定做了大量研究,也取得了一些重要成果.本文在文献[1-15]的基础上,结合  $\alpha$ -对角占优矩阵、广义严格  $\alpha$ -对角占优矩阵的相关性质,

选取不同的正对角矩阵,综合利用不等式的放缩技巧,讨论非奇异  $H$ -矩阵的判定准则,以期得出一些新的判定范围更广的条件,从而改进和推广有关结果.

## 1 预备知识

为了简洁叙述,本文约定下列符号:用  $\mathbf{C}^{n \times n}$  表示  $n$  阶复方阵,设  $\mathbf{A} = (a_{ij}) \in \mathbf{C}^{n \times n}$ , 如果  $|a_{ii}| \geq \sum_{j \neq i} |a_{ij}|, i = 1, 2, \dots, n$  ( $\Lambda_i(\mathbf{A})$ ) (简称为  $\Lambda_i$ , 一

收稿日期:2014-03-03

基金项目:河南省高等教育教学改革研究省级立项项目(2012SJGLX125)

作者简介:崔润卿(1966—),男,河南省偃师市人,河南理工大学副教授,主要研究方向为矩阵分析.

般假定  $\Lambda_i \neq 0, i \in N$ , 则称  $A$  为(行) 对角占优矩阵, 记作  $A \in D_0$ . 如果  $|a_{ii}| > \Lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 则称  $A$  为(行) 严格对角占优矩阵<sup>[1]</sup>, 记为  $A \in D$ .

**定义 1**<sup>[2]</sup> 设  $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ , 若存在正对角矩阵  $X$ , 使得  $AX$  为严格对角占优矩阵, 则称  $A$  为广义严格对角占优矩阵, 或称为非奇异  $H$ - 矩阵, 记为  $A \in D^*$ .

因为非奇异  $H$ - 矩阵的主对角元素非零, 且当  $\Lambda_i(A) = 0$  (或  $C_i(A) = 0$ ) 时, 对任意的  $d > 0$ , 都有  $|a_{ii}| > d\Lambda_i(A) = 0$  (或  $|a_{ii}| > dC_i(A) = 0$ ), 总之对于指标总有行(或列) 占优. 因此本文总假定所涉及矩阵满足  $|a_{ii}| > 0, \Lambda_i(A) \neq 0, C_i(A) \neq 0$ , 对任意的  $i \in N$ .

**定义 2**<sup>[3]</sup> 设  $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ , 如果存在  $\alpha \in [0, 1]$ , 使得对任意的  $i \in N$ , 有  $|a_{ii}| > [\Lambda_i(A)]^\alpha [C_i(A)]^{1-\alpha}$ , 则称  $A$  为严格  $\alpha$ - 对角占优矩阵, 记作  $A \in D(\alpha)$ .

**定义 3**<sup>[3]</sup> 设  $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ , 若存在正对角矩阵  $X$ , 使得  $AX \in D(\alpha)$ , 则称  $A$  为广义严格  $\alpha$ - 对角占优矩阵, 记为  $A \in D^*(\alpha)$ .

**注 1** 在定义 2 和定义 3 中, 若  $A \in D(\alpha)$  (或  $D^*(\alpha)$ ), 则当  $\alpha = 1$  时, 有  $A \in D$  (或  $D^*$ ); 当  $\alpha = 0$  时, 有  $A^T \in D$  (或  $D^*$ ). 总之,  $A$  为非奇异  $H$ - 矩阵<sup>[4]</sup>. 所以本文只考虑  $\alpha \in (0, 1)$  的情况.

本文引入以下记号:

$$N_1 = \{i \in N : |a_{ii}| > \Lambda_i(A)\}$$

$$N_2 = \{i \in N : 0 < |a_{ii}| \leq \Lambda_i(A)\}$$

$$N_3 = \{i \in N : C_i(A) > |a_{ii}| > \Lambda_i(A)\}$$

$$N_4 = \{i \in N : |a_{ii}| \geq C_i(A), |a_{ii}| > \Lambda_i(A)\}$$

当  $N_3 \neq \emptyset$  时, 令

$$m_i = \frac{|a_{ii}|}{\Lambda_i(A)} \quad g_i = \frac{C_i(A)}{|a_{ii}|}$$

$$M = \max_{i \in N_3} \left\{ \frac{\Lambda_i(A)}{|a_{ii}|} \right\} \quad \forall i \in N_3$$

显然  $m_i > 1, g_i > 1, \forall i \in N_3$ . 且  $N = N_1 \cup N_2, N_1 = N_3 \cup N_4$ . 若  $N_2 = \emptyset$ , 则  $A \in D$ , 进而  $A \in D$  是非奇异  $H$ - 矩阵. 又因为非奇异  $H$ - 矩阵  $A \in D$ , 至少存在 1 行是严格对角占优的. 所以当  $N_1 = \emptyset$  时,  $A \in D$  一定不是非奇异  $H$ - 矩阵. 由此可以总假定  $N_1 \neq \emptyset, N_2 \neq \emptyset$ .

**引理 1**<sup>[3]</sup> 设  $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ , 若  $N_1 = N_4 \neq \emptyset$  且存在  $\alpha \in (0, 1)$ , 使

$$\sum_{i \in N_2} \frac{(\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} \left(1 + \sum_{j \in N_1} \frac{\Lambda_j(A)}{|a_{ij}|}\right)}{|a_{ii}|^\alpha + (\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha}} < 1 \quad (1)$$

则  $A$  是非奇异  $H$ - 矩阵.

**引理 2**<sup>[3]</sup> 设  $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}, N_3 \neq \emptyset, \alpha \in (\max_{i \in N_3} \log_{m_i g_i} g_i, 1)$ , 使得

$$\sum_{i \in N_2} \frac{\Lambda_i(A)(C_i(A))^{1-\alpha}}{|a_{ii}|^\alpha + (C_i(A))^{1-\alpha} \left(\sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|\right)} < 1$$

则  $A$  是非奇异  $H$ - 矩阵.

**引理 3**<sup>[5]</sup> 若  $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ , 则  $A$  为广义严格对角占优矩阵的必要条件是  $A$  为广义严格  $\alpha$ - 对角占优矩阵.

## 2 主要结论

**定理 1** 设  $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ , 并存在  $\alpha \in (0, 1)$  使得

$$\sum_{i \in N_2} \frac{(\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} (1 + (n - n_2)M)}{|a_{ii}|^\alpha + (\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha}} < 1 \quad (2)$$

则  $A$  是非奇异  $H$ - 矩阵.

**证明** 令

$$\tau = \sum_{i \in N_2} \frac{(\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} (1 + (n - n_2)M)}{|a_{ii}|^\alpha + (\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha}} \quad (3)$$

则  $\tau < 1$ , 再设

$$d_i = \sum_{i \in N_2} \frac{(\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} (1 + (n - n_2)M)}{|a_{ii}|^\alpha + (\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha}} + \frac{1 - \tau}{n_2} \quad i \in N_2 \quad (4)$$

其中,  $n_2$  是指标集  $N_2$  所含元素个数, 则  $\sum_{i \in N_2} d_i = 1$ . 显然  $0 < d_i < 1, \forall i \in N_2$  由 (4) 式可得

$$\begin{aligned} & d_i (|a_{ii}|)^\alpha + (\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} > \\ & (\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} (1 + (n - n_2)M) \\ & d_i |a_{ii}|^\alpha > (\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} \cdot \\ & (1 + (n - n_2)M) - d_i (\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|)(C_i(A))^{1-\alpha} > \\ & (C_i(A))^{1-\alpha} [(\max_{j \neq i} |a_{ij}|) + (\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(n - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & n_2)M - d_i(\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|)] > \\
 & (C_i(\mathbf{A}))^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \left[ \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \frac{\Lambda_j(\mathbf{A})}{|a_{ij}|} + (\max_{j \neq i} |a_{ij}|) - \right. \\
 & \quad \left. d_i(\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|) \right] > \\
 & (C_i(\mathbf{A}))^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \left[ \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \frac{\Lambda_j(\mathbf{A})}{|a_{ij}|} + d_j(\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|) - \right. \\
 & \quad \left. d_j(\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|) \right] + \\
 & \quad \left[ (\max_{j \neq i} |a_{ij}|) - d_i(\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|) \right] > \\
 & (C_i(\mathbf{A}))^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \left[ \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \frac{\Lambda_j(\mathbf{A})}{|a_{ij}|} + d_j(\max_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}|) + \right. \\
 & \quad \left. (\max_{j \neq i} |a_{ij}|)(1 - d_j + d_i) \right] \\
 & \text{由 } \sum_{j \in N_2} d_i = 1 \text{ 可知} \\
 & |a_{ii}|^{\frac{1}{\alpha}} d_i > (C_i(\mathbf{A}))^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \left[ \left( \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \right) + \right. \\
 & \quad \left. d_j \left( \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \right) \right] \quad \forall i \in N_2 \quad \textcircled{5}
 \end{aligned}$$

令

$$x_i = \begin{cases} M & \text{当 } i \in N_1 \\ d_i & \text{当 } i \in N_2 \end{cases}$$

构造正对角矩阵  $\mathbf{X} = \text{diag}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 并令  $\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{X} = (b_{ij}) \in \mathbf{C}^{n \times n}$ , 根据集合  $N_1$  的定义, 可知  $\forall \alpha \in (0, 1)$ , 都有  $|a_{ii}| > [\Lambda_i(\mathbf{A})]^\alpha [C_i(\mathbf{A})]^{1-\alpha}$ , 于是有如下 2 种情况.

当  $i \in N_1$  时, 有

$$\begin{aligned}
 & [\Lambda_i(\mathbf{B})]^\alpha [C_i(\mathbf{B})]^{1-\alpha} = [M \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| + \\
 & \quad \sum_{j \in N_2} (|a_{ij}| d_j)]^\alpha (M \sum_{j \neq i} |a_{ij}|)^{1-\alpha} < \\
 & \left[ \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| + \sum_{j \in N_2} (|a_{ij}|) \right]^\alpha (M \sum_{j \neq i} |a_{ij}|)^{1-\alpha} < \\
 & \left[ \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| + \sum_{j \in N_2} (|a_{ij}|) \right]^\alpha \left( \sum_{j \neq i} |a_{ij}| \right)^{1-\alpha} \leq \\
 & \quad |a_{ii}| M = |b_{ii}|
 \end{aligned}$$

当  $i \in N_2$  时, 由 ⑤ 式可得

$$\begin{aligned}
 & |a_{ii}|^{\frac{1}{\alpha}} x_i = |a_{ii}|^{\frac{1}{\alpha}} d_i > \\
 & (C_i(\mathbf{A}))^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \left[ M \left( \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \right) + d_j \left( \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \right) \right] \\
 & |a_{ii}| x_i^\alpha > (C_i(\mathbf{A}))^{1-\alpha} \left[ M \left( \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \right) + \right. \\
 & \quad \left. d_j \left( \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \right) \right]^\alpha \\
 & |a_{ii}| (d_j)^\alpha (d_j)^{1-\alpha} > \\
 & (d_j)^{1-\alpha} (C_i(\mathbf{A}))^{1-\alpha} \left[ M \left( \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \right) + \right. \\
 & \quad \left. d_j \left( \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \right) \right]^\alpha
 \end{aligned}$$

即可得

$$|b_{ii}| = |a_{ii}| d_i > [R_i(\mathbf{B})]^\alpha [C_i(\mathbf{B})]^{1-\alpha} \quad i \in N_2$$

综上所述

$$|b_{ii}| > [R_i(\mathbf{B})]^\alpha [C_i(\mathbf{B})]^{1-\alpha}$$

$$i \in N = N_1 \cup N_2$$

根据定义 2 及 ③ 式可知  $\mathbf{B} \in \mathbf{D}(\alpha)$ , 即  $\mathbf{A} \in \mathbf{D}^*(\alpha)$ . 再由引理 3 可得  $\mathbf{A}$  是非奇异  $H$ -矩阵.

### 3 数值算例

例 1 设

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 4 & 1 \\ 1 & 8 & 2 & 0 \\ 1 & 0.5 & 6 & 1 \\ 1 & 3.5 & 1 & 5 \end{pmatrix}$$

则有

$$N_3 = \{3\} \quad N_4 = \{2\} \quad N_2 = \{1, 4\}$$

$$\Lambda_1(\mathbf{A}) = 9 \quad a_{11} = 7 \quad C_1(\mathbf{A}) = 3$$

$$\Lambda_2(\mathbf{A}) = 3 \quad a_{22} = 8 \quad C(\mathbf{A}) = 8$$

$$\frac{\Lambda_2(\mathbf{A})}{|a_{22}|} = \frac{3}{8}$$

$$\Lambda_3(\mathbf{A}) = \frac{5}{2} \quad a_{33} = 6 \quad C_3(\mathbf{A}) = 7$$

$$\frac{\Lambda_3(\mathbf{A})}{|a_{33}|} = \frac{5}{12}$$

$$\Lambda_4(\mathbf{A}) = 5 \quad a_{44} = 5 \quad C_4(\mathbf{A}) = 2$$

取  $\alpha = \frac{3}{4} \in (0, 1)$ , 根据 ② 式则有  $\tau =$

$0.9513 < 1$ . 由定理 1 可知  $\mathbf{A}$  是非奇异  $H$ -矩阵.

注意  $N_3 = \{3\} \neq \emptyset, N_4 = \{2\} \neq \emptyset$ , 即  $\mathbf{A}$  满足引理 1 的条件, 但是计算 ① 无论  $\alpha$  可取什么值, 总有

$$\frac{\frac{19}{6} \times (3)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}}{7^\alpha + (3)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}} + \frac{\frac{133}{48} \times (2)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}}{7^\alpha + (2)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}} > 1$$

因此该矩阵不能用引理 1 进行判定, 所以定理 1 比引理 1 有更广泛的应用范围.

上述数值算例表明, 文中定理 1 和引理 1 是互不包含的. 同时在例 1 中, 矩阵不满足文献[6]中定理 2 的条件, 不满足文献[7]中定理 1 和定理 2 的条件, 不满足文献[8]中定理 1 的条件, 因此无法由文献[6-8]中相应定理进行判定. 上述数值算例也有效说明了由  $\alpha$ -对角占优矩阵、广义严格  $\alpha$ -对角占优矩阵相关性质出发, 通过构造正对角矩阵, 综合利用不等式的放缩技巧和非奇异  $H$ -矩阵的充分必

要条件,推广和改进了一些判定定理,进而扩大了非奇异  $H$ -矩阵的判定范围.当然,由实际问题转化而来的矩阵的阶数越来越高,怎样迅速判别一个高阶矩阵是否为非奇异  $H$ -矩阵,将是下一步研究工作的重要课题.

**参考文献:**

[1] 陈公宁. 矩阵理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007:225-227.  
 [2] 范迎松,陆全,徐仲. 非奇异  $H$ -矩阵的一组判定条件[J]. 高校应用数学学报,2011,26(4):474.  
 [3] 李敏,孙玉祥. 非奇异  $H$ -矩阵的新判定准则[J]. 工程数学学报,2012,29(5):715.  
 [4] Huang T Z, Li W, Lei G Y. Contributions to nonsingular  $H$ -matrices[J]. ZAMM-Zeitschrift fur Angewandte Mathematik and Mechanik,2000,80(1):493.  
 [5] Sun Y X. An improvement on a theorem by Ostrowski and its applications[J]. Northeastern Mathematical Journal, 1991,7(4):497.  
 [6] 侯进军,李斌.  $H$ -矩阵的一组新判定[J]. 应用数学学报,2009,31(2):266.

[7] 徐仲,陆全. 判定广义严格对角占优矩阵的一组充分条件[J]. 工程数学学报,2001,18(3):11.  
 [8] 虞清. 非奇异  $H$ -矩阵判定的新条件[J]. 工程数学学报,2008,25(4):749.  
 [9] 黄廷祝. 非奇异  $H$ -矩阵的简捷判据[J]. 计算数学, 1993(3):318.  
 [10] Varge R S. On recurring threoms on diagonal dominance [J]. Linear Algebra Appl,1976(13):1.  
 [11] 崔润卿,闫学华. 非奇异  $H$ -矩阵的一组新判据[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(3):98.  
 [12] 李敏,孙维娜,张雪.  $\alpha$ -双对角占优矩阵的等价表征及应用[J]. 北华大学学报:自然科学版,2012,12(4):396.  
 [13] 宋岱才,赵晓颖.  $\alpha$ -链严格对角占优矩阵的一个充要条件[J]. 辽宁石油化工大学学报,2011,31(3):81.  
 [14] 王再玉,赵鸣霖. 广义  $\alpha$ -对角占优矩阵与非奇异  $H$ -矩阵的判别[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2011(3):171.  
 [15] 秦建国,谢栋梁,王静娜. 一类可以对角化的矩阵[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(2):106.

(上接第98页)

析,得到了以下结论.

1) 节点在轴压作用下,焊缝区域进入塑性后插板局部屈曲,平面外失稳倾斜导致节点失效.

2) 节点主要因为插板失效而破坏,插板相对于管壁较弱,工程中可以适当增加插板厚度或采取在插板两边设置加劲肋等加强措施.

3) 节点从开始进入塑性到最后破坏,在很小的时间段内完成,并且未产生较大的位移增量,具有较差的塑性变形能力,破坏呈脆性.

4) 该模型能较好地模拟节点破坏模式、应力分布和极限承载力,模拟结果均较好地与试验结果吻合,所以可用作斜插板焊接方管节点参数分析的基础.

**参考文献:**

[1] 赵熙元. 钢管结构设计[J]. 钢铁技术,1997(1):47.  
 [2] 陈以一,陈扬骥. 钢管结构相贯节点的研究现状[J].

建筑结构,2002,32(7):227.  
 [3] 吴耀华,吴文奇. 钢管在结构工程中的应用与发展[J]. 钢结构,2005,20(2):44.  
 [4] 魏琳,陈誉. 圆支管-H型钢主管T型节点轴压承载力的有限元分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(1):80.  
 [5] Thornton W A. Bracing connections for heavy construction [J]. Eng J AISC,1984,21(3):139.  
 [6] 刘红军,李正良. 特高压钢管输电塔插板连接K型节点的受力性能及承载力研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.  
 [7] 舒兴平,彭欢佳,袁智深. K形管板节点极限承载力研究[J]. 建筑结构,2012,42(2):93.  
 [8] Andrew P Voth, Jeffrey A Packer. Numerical study and design of skewed X-type ranch plate-to-circular hollow section connections[J]. Journal of Construction Steel Research,2011,68(1):1.  
 [9] GB/T 228—2002,金属材料室温拉伸试验方法[S].