

牛血清蛋白涂膜保鲜圣女果和小黄瓜的研究

章银良, 周文权, 张陆燕

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以牛血清蛋白为主要原料对圣女果和小黄瓜进行涂膜保鲜实验,在20~25℃下测定果蔬的失重率,烂果率,维生素C、总叶绿素、总类胡萝卜素含量以及可溶性固形物含量.结果表明:涂膜处理对圣女果和小黄瓜具有良好的保鲜效果,能够明显抑制果蔬营养物质的消耗,降低失水、烂果率,抑制其呼吸强度,货架期分别达到15 d和10 d.

关键词:牛血清蛋白;涂膜技术;圣女果;小黄瓜;果蔬保鲜

中图分类号:TS201.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.001

Study on the preservation of cherry tomatoes and cucumber by edible film of bovine serum albumin

ZHANG Yin-liang, ZHOU Wen-quan, ZHANG Lu-yan

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

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the preservation of cherry tomatoes and cucumber by edible film of bovine serum albumin. The weight-loss rate, rotten fruit rate, and the contents of soluble solids, vitamin C, chlorophyll and carotenoid were detected during storage at 20~25 °C. The results showed that coating with the edible films was significantly effective on decreasing the loss of fruit nutrition, water-loss rate, rotten fruit rate, inhibiting respiration. The shelf life was 15 d and 10 d respectively.

Key words: bovine serum albumin; edible film technology; cherry tomatoes; cucumber; preservation of fruits and vegetables

0 引言

果蔬可食性涂膜技术是指通过浸渍、涂刷、喷洒而在果蔬表面覆盖一层可食性薄膜,将果蔬与外界环境隔离,消除对果蔬质量具有危害作用的因子,同时抑制果蔬的蒸腾作用,但可吸收外界水分,使果蔬处于良好、稳定的湿度环境,以利于保持果蔬的新鲜度.该技术还可以有效地阻止果实与外界的气体交换,减少内源乙烯的生成,抑制呼吸代谢,

推迟衰老^[1].因此果蔬涂膜保鲜以其独特的优点越来越受到研究者关注.

目前果蔬涂膜保鲜的研究最重要的是对涂膜材料的研究,其中多糖类研究集中在壳聚糖、魔芋葡甘聚糖、普鲁兰多糖、交联木薯淀粉、瓜儿豆胶、卡拉胶和海藻酸等^[2-5],蛋白质类集中在大豆分离蛋白、玉米醇溶蛋白和卵白蛋白等^[6-8],还有多糖与蛋白质及其复合类,但还未见采用牛血清蛋白为涂膜材料的果蔬保鲜的研究.

收稿日期:2013-04-10

基金项目:河南省科技攻关项目(122102110055)

作者简介:章银良(1963—),男,浙江省上虞市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为食品品质控制与质量安全.

圣女果营养丰富,除了含有番茄的所有营养成分之外,其维生素含量是普通番茄的1.7倍。但番茄属于呼吸跃变型果实,成熟快,不耐储藏和运输。小黄瓜含水量高,在短期内极易发生萎焉和变黄,品质受到影响。传统果蔬贮藏方法有气调法和低温冷藏法等,虽效果可靠,但投资较大,费用高,难以操作。本文拟以牛血清蛋白为主要涂膜原料,研究涂膜对20~25℃下对圣女果和小黄瓜的保鲜效果,从而为果蔬的室温贮藏提供一种有效的方法。

1 实验

1.1 材料与仪器

材料:新鲜圣女果、小黄瓜,购于郑州超市;牛血清蛋白(市售Bovine albumin,BSA),分析纯,Sigma公司产;甘油,分析纯,天津市富宇精细化工有限公司产;亚硫酸钠,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司产;无水氯化钙,分析纯,广东汕头市西陇化工厂产;丙酮,分析纯,淄博百运化工有限公司产。

仪器:SP-754型紫外可见分光光度计,上海光谱仪器有限公司产;AL204型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产;WYT型手持糖量计,成都光学厂产;PHs-3C型精密pH计,上海雷磁仪器厂产;HJ-3恒温磁力搅拌器,国华仪器有限公司产;l01-2型电热恒温干燥箱,上海浦鸿仪器厂产。

1.2 实验方法

1.2.1 涂膜液的制备 准确称取2.0g牛血清蛋白、1.5g甘油、0.5g无水亚硫酸钠溶于100mL水中,在恒温磁力搅拌器上加热至70℃,恒温搅拌10min,然后调节溶液至pH=8.0,继续搅拌10min,将膜液冷却至室温备用。

1.2.2 涂膜方法 圣女果的涂膜方法:选择大小均匀、半熟且硬、无机械损伤、无霉斑的圣女果,清洗沥干。浸入已制备好的膜液中1min,取出后于通风处晾干,置于室温(20~25℃)保存。同时以未涂膜圣女果为参照。

小黄瓜的涂膜方法:选择瓜条饱满、顺直、粗细均匀、无机械损伤的黄瓜,清洗沥干。采用刷涂的方式对黄瓜进行涂膜,在刷涂的过程中用力要轻、均匀,在黄瓜表面均匀地涂上保鲜液,涂完后于通风处晾干,置于室温(20~25℃)保存。同时以未涂膜黄瓜为参照。

1.2.3 果蔬的感官评定 分别对圣女果和小黄瓜

的新鲜度、色泽、气味、质地等方面进行综合评价。

1.2.4 果蔬烂果率 烂果率=(总果数-表面完好的果实)/总果数×100%

1.2.5 果蔬失重率 失重率=(贮藏前质量-贮藏后质量)/贮藏前质量×100%

1.2.6 Vc含量的测定 测定采用紫外分光光度法^[9]。

1.2.7 叶绿素、类胡萝卜素的测定 参考W. P. In-skeep等^[10]的方法。取5g果实,分别加入20mL 80%的丙酮溶液,0.3g CaCO₃,研磨成匀浆,经离心、过滤后,分别在440nm,647nm,665nm下测定吸光度,以80%丙酮溶液为对照。叶绿素和类胡萝卜素含量/ $\mu\text{g} \cdot (\text{g湿基})^{-1}$ 按下式计算:

$$\text{叶绿素含量} = 17.95 \times Abs_{647} + 7.9 \times Abs_{665}$$

$$\text{类胡萝卜素含量} = 17.5 \times Abs_{440} +$$

$$4.2 \times Abs_{665} - 18.1 \times Abs_{647}$$

1.2.8 可溶性固形物含量的测定 采用手持糖量计法测定。从果蔬中挤出汁液1—2滴,仔细滴在检测镜上,迅速关上盖板,使果汁分布于棱镜的表面,朝向光源明亮处,视野内出现明暗分界线以及与之对应的读数,即果实的汁液所含可溶性固形物的百分率。

2 结果与分析

2.1 果蔬感官品质的变化

果蔬储藏初期,果实的组织比较坚硬,色泽鲜艳,气味浓郁。在室温条件下圣女果和小黄瓜保存10d以后,涂膜样品的色泽、气味、质地等品质明显好于未涂膜样品。涂膜圣女果贮藏10d后烂果率为5%,而未涂膜样品为25%;贮藏20d后,涂膜圣女果的烂果率为15%,未涂膜的样品烂果率为45%。小黄瓜经过10d的贮藏后,涂膜组的腐烂率为10%,涂膜的样品仍有较高的食用价值,而未涂膜样品的腐烂率为40%,基本已没有利用价值;在之后的贮藏过程中,未涂膜样品的腐烂率继续升高,贮藏20d后,烂果率高达85%,完全丧失了商品价值,而涂膜处理的小黄瓜烂果率仅为25%。这是因为在储藏过程中,果蔬中果胶酶的作用会促使果胶水解成为可溶性的果胶酸,同时随着水分的损失,细胞的膨压下降,组织软化;而可食性膜具有抑制果胶酶活性的作用,从而减缓了果实组织的软化及果胶物质的散失,同时又有效地抑制了环境中微生物对果蔬的作用,延缓了果蔬的腐烂过程。

2.2 果蔬失重率的变化

果蔬在储藏过程中机体的呼吸作用和蒸腾作用,使得自身水分损失,进而造成光泽暗淡、萎蔫、疲软的形态.因此防止果蔬失水是果蔬保鲜的重要任务之一.

图1为涂膜处理对圣女果和小黄瓜失重率的影响.从图1可以看出,果蔬的失重率随贮藏时间的延长而增大,经涂膜处理后的圣女果、小黄瓜的失重率明显低于对照组(不涂膜组)样品.贮存15 d后,涂膜圣女果失重率仅为4.13%,而未涂膜样品失重率为7.83%;涂膜小黄瓜失重率为9.24%,而未涂膜样品失重率为16.38%.这是因为圣女果和小黄瓜经涂膜后,在各自表面形成一层保护膜,抑制了呼吸作用和蒸发作用.

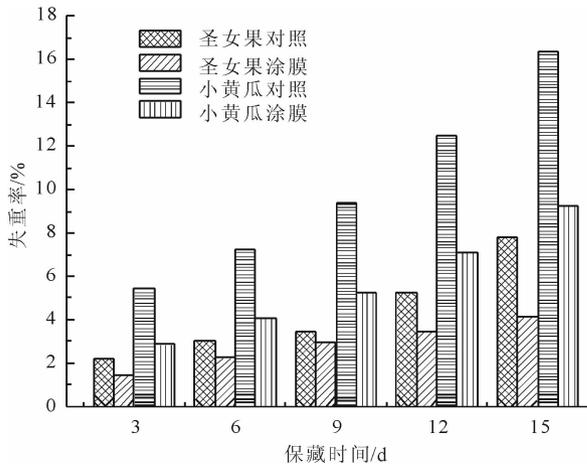


图1 涂膜处理对圣女果和小黄瓜失重率的影响

2.3 果蔬中Vc含量的变化

Vc是果蔬中一种非常重要的营养成分,同时又是人类必不可少的重要营养元素之一.图2为涂膜处理对圣女果和小黄瓜Vc含量的影响.由图2可以看出,随着贮藏时间的延长,圣女果和小黄瓜中Vc的含量都逐渐降低,但经过涂膜处理后的果蔬中Vc含量的降低幅度低于未经涂膜处理果蔬中Vc的降幅.圣女果和小黄瓜贮藏15 d后,Vc含量分别比对照组高出12.7 mg / 100g和6.31 mg / 100g,与新鲜果实相比Vc损失量相当于对照组的29.8%和52.9%.这一结果表明涂膜处理能够有效地降低氧气的通透性,使果实中的Vc得到最大程度的保留.这是因为果蔬中的Vc易被氧化分解而导致含量下降,经过保鲜剂处理的样品表面形成一层保护膜,能有效抑制果蔬内外的气体交换,从而减少Vc的损失.

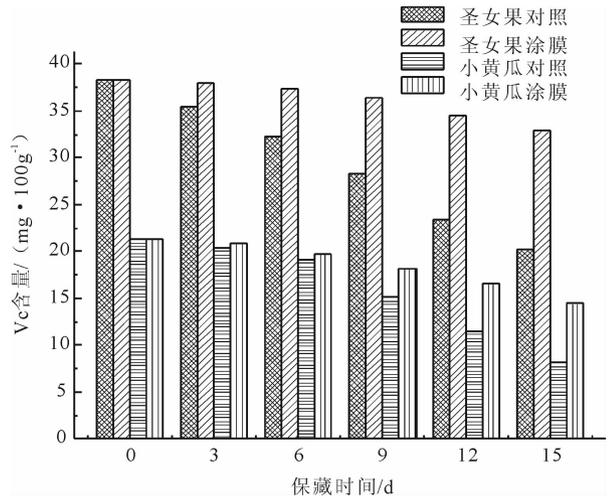


图2 涂膜处理对圣女果和小黄瓜Vc含量的影响

2.4 果蔬中总叶绿素、总类胡萝卜素含量的变化

图3—图4显示了果蔬在贮藏过程中总叶绿素和总类胡萝卜素含量的变化情况.对照组圣女果和小黄瓜在贮藏15 d后,总叶绿素损失率分别为61.9%和55.7%,总类胡萝卜素损失率分别为64.5%和58.6%,而涂膜圣女果和小黄瓜却能相对地维持较高的色素水平,其总叶绿素保存率均达64%以上,总类胡萝卜素保存率均达56%以上.这一结果表明涂膜处理能够很好地保持果蔬的新鲜度和色素的含量.

2.5 果蔬中可溶性固形物含量的变化

果蔬采摘后营养物质的积累虽已结束,但新陈代谢过程却还在进行.根据植物生理学原理,营养成分变化越小,则其保鲜期就越长^[11].图5为涂膜处理对圣女果和小黄瓜可溶性固形物含量的影响.

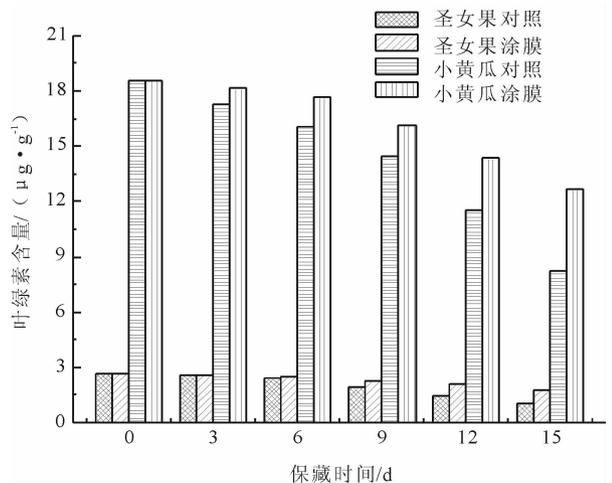


图3 涂膜处理对圣女果和小黄瓜总叶绿素含量的影响

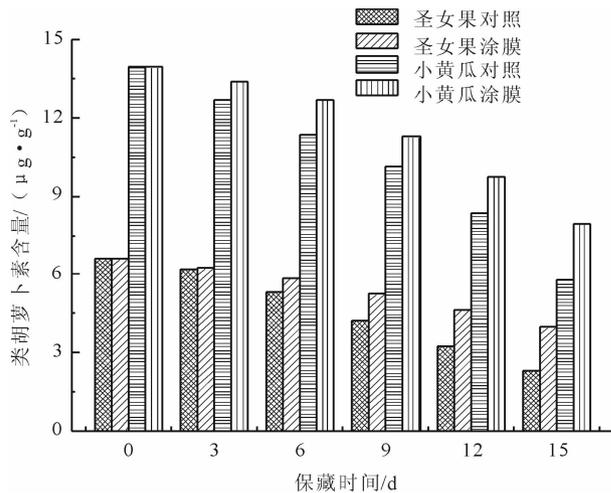


图4 涂膜处理对圣女果和小黄瓜总类胡萝卜素含量的影响

由图5可以看出,在贮藏过程中,圣女果和小黄瓜中可溶性固形物含量逐渐降低,贮藏15 d后,对照组圣女果和黄瓜可溶性固形物含量分别降到了2.5%和3.5%,而经涂膜处理的样品可溶性固形物含量分别为3.6%和5.2%,明显高于对照组,说明涂膜处理能够有效抑制果蔬的呼吸作用,从而减缓其新陈代谢过程,减少营养成分的消耗。

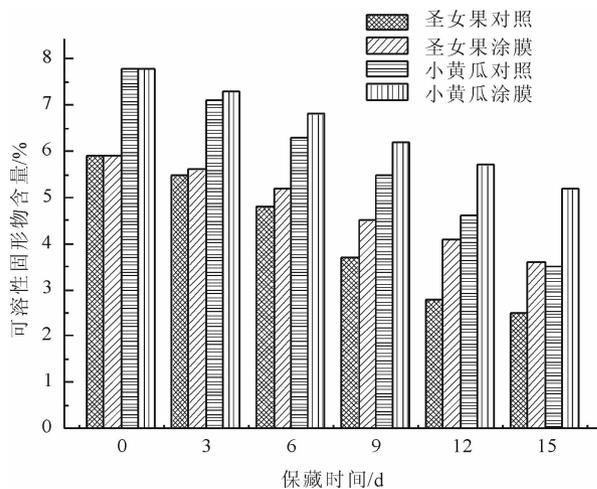


图5 涂膜处理对圣女果和小黄瓜可溶性固形物含量的影响

3 结论

本研究利用以牛血清蛋白为主要原料制备的保鲜膜液浸涂圣女果和小黄瓜后,在其表面形成一层半透性薄膜.实验结果表明,该膜能有效抑制果蔬的新陈代谢、呼吸作用,减少营养物质的损失,保持水分.经涂膜处理后的圣女果和小黄瓜在常温储藏条件下有较好的保鲜效果,货架期分别达到15 d和10 d.

参考文献:

- [1] 段丹萍,鲁丽莎,王海宏,等.果蔬涂膜保鲜技术研究现状与应用前景[J].保鲜与加工,2009(6):1.
- [2] 马赛箭,安超.普鲁兰多糖涂膜对苹果的保鲜研究[J].陕西农业科学,2011(4):11.
- [3] 闫子娇,张有林,于月英.魔芋葡甘聚糖涂膜对鲜切苹果保鲜的研究[J].农产品加工,2009(10):60.
- [4] 杨月,陆丹英,凌静等.交联木薯淀粉对蜜橘涂膜保鲜效果研究[J].食品科学,2011,32,(6):275.
- [5] 李宗磊,赵琪.壳聚糖/纳米材料复合涂膜用于猕猴桃保鲜的研究[J].中国资源综合利用,2011,29(11):24.
- [6] 林顺顺,李瑜,祝美云,等.大豆分离蛋白复合涂膜对鲜切马铃薯保鲜研究[J].食品与机械,2010,26(6):6.
- [7] 王海粟,赵婷,于佳弘,等.玉米醇溶蛋白膜的制备及其对黄金梨保鲜效果的研究[J].粮油食品科技,2011,11(6):43.
- [8] 岳喜庆,李健,赵中胜,等.卵白蛋白涂膜保鲜樱桃番茄[J].食品科技,2011,36(4):41.
- [9] 马宏飞,卢生有,韩秋菊,等.紫外分光光度法测定五种果蔬中维生素C含量[J].化学与生物工程,2012,29(8):92.
- [10] Inskeep W P, Bloom P R. Extinction coefficient of chlorophyll a and b in N,N-dimethylformamide and 80% acetone[J]. Plant Physiology, 1985, 77:483.
- [11] 张占路,王海鸥.可食性膜在樱桃番茄保鲜中的应用[J].无锡轻工大学学报,2002,21(2):156.

复合酶法生产红枣澄清汁工艺研究

赵光远, 常杨

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以红枣为原料,研究了采用酶解法制备红枣澄清汁的工艺参数.单因素和正交实验结果表明:采用复合酶较单一酶酶解红枣能有效提高红枣汁出汁率和可溶性固形物含量;复合酶加工红枣澄清汁的最佳工艺条件为:纤维素酶:果胶酶质量配比为1:3,加酶量为底物质量的0.020%,酶解时间为2 h,酶解温度为50 ℃.在此条件下,红枣汁的出汁率为84.0%,可溶性固形物含量为12.8%.

关键词:红枣澄清汁;酶解;纤维素酶;果胶酶

中图分类号:TS255.36 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.002

Study on the production of jujube clarified juice by complex enzymatic method

ZHAO Guang-yuan, CHANG Yang

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

Abstract: With jujube as raw materials, the process parameters of jujube clarified juice by enzyme hydrolysis method were studied. The single factor and orthogonal test results showed that using complex enzyme hydrolysis can effectively increase the rate of jujube juice and soluble solid content than using single enzyme. The optimum process conditions of compound enzyme processing jujube clarified juice was determined: the ratio of enzyme mixture (cellulase: pectinase) is 1:3, the amount of enzyme 0.020% of substrate weight, 2 h of operating time and 50 ℃ of enzymatic hydrolysis temperature. Under these conditions, juice yield of jujube juice is 84.0%, soluble solids content of jujube juice is 12.8%.

Key words: jujube clarified juice; enzymolysis; cellulase; pectinase

0 引言

红枣,又称大枣,为鼠李科植物的成熟果实,是我国著名特产^[1].红枣的营养极为丰富,是药食兼用品,素有“活性维生素丸”之称.近代医学研究发现,红枣具有健脾养胃、补中益气、滋肺强肾、缓解毒、抑制癌细胞增殖等保健功效^[2].但是红枣具有独特的质构特征,即存在大量果胶类物质和多糖,不宜直接压榨提汁^[3-4],常用的热水浸提、打浆法在加工中存在许多缺点.目前常用的一些浸提工

艺,浸提时间长,提取率低(50%左右)^[5].杨玉玲^[6]通过研究酶技术在果菜汁饮料生产中的应用,证明加入果胶酶、纤维素酶等酶后,在其共同作用下,可增加果菜的出汁率.何佳等^[7]在对果浆酶和果胶酶影响猕猴桃出汁率的研究中也发现,果胶酶可用于提高果汁出汁率和可溶性固形物含量.本文拟采用纤维素酶和果胶酶的复合酶对预处理后的红枣进行酶解,以枣汁的出汁率和可溶性固形物含量为指标,研究不同酶解条件对澄清型红枣汁的影响并优化获得最佳的酶解工艺条件.

收稿日期:2013-02-17

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD361307);河南省教育厅科技创新团队项目

作者简介:赵光远(1973—),男,河南省沁阳市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为果蔬深加工.

1 实验

1.1 材料与设备

冬枣,购自郑州果品市场;果胶酶/ $100\ 000\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1}$,纤维素酶/ $50\ 000\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1}$,江苏锐阳生物科技有限公司产;T6新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司产;MJ—25BM05C型搅拌机,广东美的公司产;雷磁 PHS—3C型酸度计,上海仪电科学仪器股份有限公司产;梅特勒 AL204 电子分析天平,梅特勒—多利托仪器(上海)有限公司产;HC—3618R 高速冷冻离心机,安徽中科中佳仪器股份有限公司产;阿贝折射仪,上海光学仪器五厂产;HH—4 型数显恒温水浴锅,金坛市科兴仪器厂产。

试剂均为分析纯。

1.2 实验方法

1.2.1 红枣澄清汁制备工艺流程 参照文献[5]进行如下改进:

红枣→清洗、去核→浸泡→打浆→酶解→灭酶→挤压出汁→二次酶解澄清→灭酶→离心取上清液→调配→杀菌→无菌灌装→成品

取去核红枣 150 g,按 1:6 料液比加水浸泡 2 h,连水一起打浆 2 min,取出枣浆。

1.2.2 单因素实验 每次称取 100 g 枣浆于 250 mL 烧杯中,用不同酶量、酶配比、温度、时间进行酶解,然后用 200 目绢布挤压出汁,测量鲜枣的出汁率和可溶性固形物含量。

以出汁率、可溶性固形物含量为指标,分别对质量比分别为 0.010%, 0.012%, 0.015%, 0.018%, 0.020% 的果胶酶,质量比分别为 0.003%, 0.004%, 0.005%, 0.006%, 0.007% 的纤维素酶,纤维素酶与果胶酶的质量比分别为 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3 的复合酶配比,质量比分别为 0.008%, 0.012%, 0.016%, 0.020%, 0.024% 的复合酶量,以及酶解温度(20 ℃, 30 ℃, 50 ℃),酶解时间(0.5 h, 1 h, 1.5 h, 2 h, 3 h)6 因素进行单因素实验,每次实验均设空白对照,进行 3 次平行实验。

1.2.3 复合酶解工艺确定 根据单因素实验结果,选择复合酶配比、复合酶量、酶解时间、酶解温度为因素,以可溶性固形物含量为指标,在 pH = 4.6 条件下选用 $L_9(3^4)$ 进行正交实验,确定最佳酶解工艺。

1.2.4 二次酶解澄清 酶解后的枣汁按 1.2 g/L 的酶量加入果胶酶进行二次酶解澄清。灭酶后离

心,取清液调配、100 ℃ 杀菌 10 min 后罐装。

1.2.5 测定方法 可溶性固形物含量测定依据 GB 12295—90《水果、蔬菜制品可溶性固形物含量的测定折射仪法》。出汁率测定参照文献[7],出汁率 = 酶解后压榨枣汁质量/酶解前枣汁质量 × 100%。

2 结果与讨论

2.1 纤维素酶添加量对红枣出汁率的影响

枣浆在 50 ℃ 水浴、pH = 4.6 条件下添加不同量的纤维素酶,酶解 2 h 后挤压出汁,测得对应加酶量的出汁率如图 1 所示。

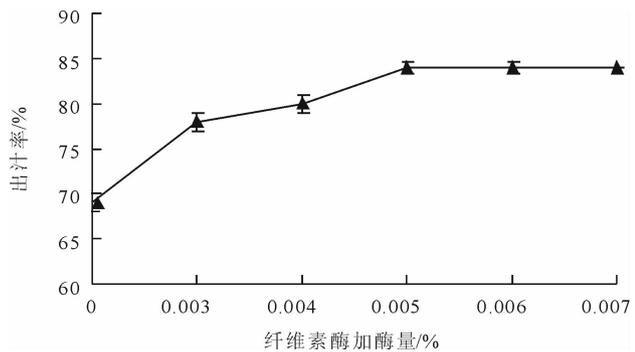


图 1 纤维素酶加酶量对鲜枣出汁率的影响

从图 1 可以看出,随着加酶量的增加,出汁率明显增加,当纤维素酶添加量为 0.005% 时,出汁率达到最大值 84.0%。

2.2 果胶酶添加量对红枣可溶性固形物含量的影响

枣浆在 50 ℃ 水浴、pH = 4.6 条件下添加不同量的果胶酶,酶解 2 h 后挤压出汁,测得对应加酶量下红枣汁可溶性固形物含量如图 2 所示。

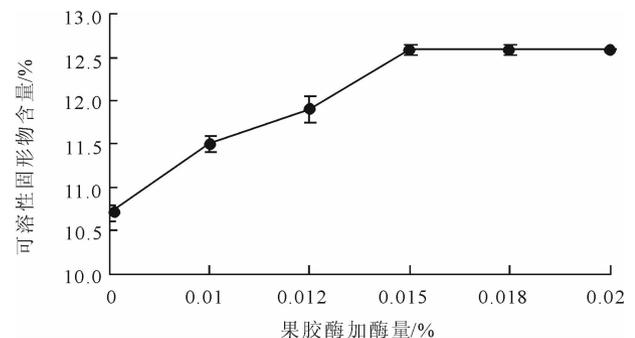


图 2 果胶酶量对枣汁可溶性固形物含量的影响

从图 2 可以看出,在一定范围内,随着加酶量的增加,可溶性固形物含量明显增加。当果胶酶添加量为 0.02% 时,可溶性固形物含量达到最大值 12.6%。

2.3 单一酶和复合酶对红枣汁出汁率和可溶性固形物含量的影响

枣浆在 50 ℃ 水浴、pH = 4.6 条件下添加相同量 (0.020%) 的纤维素酶、果胶酶和复合酶 (纤维素 0.005%, 果胶酶 0.015%), 分别酶解 2 h 后挤压出汁, 测得对应加酶条件下红枣汁出汁率和可溶性固形物含量如图 3 所示。从图 3 可以看出, 同等酶量下, 加入复合酶进行酶解的枣汁出汁率和可溶性固形物含量明显高于只加入单一酶的枣汁。

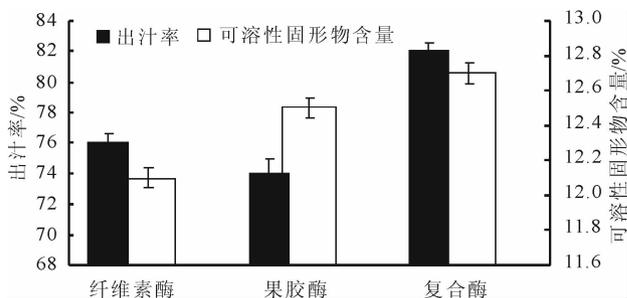


图 3 单一酶和复合酶对枣汁出汁率和可溶性固形物含量的影响

2.4 复合酶配比对红枣出汁率及可溶性固形物含量的影响

通过研究果胶酶和纤维素酶加酶量对红枣出汁率及可溶性固形物含量的影响, 确定以 0.020% 的复合酶酶量, 以纤维素酶与果胶酶的质量比分别为 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, 于 50 ℃ 水浴、pH = 4.6 条件下酶解 2 h 后挤压出汁, 测得对应酶配比下红枣出汁率和可溶性固形物含量如图 4 所示。由图 4 可知, 纤维素酶与果胶酶配比为 1:3 时, 红枣的出汁率和可溶性固形物含量均达到最大值。

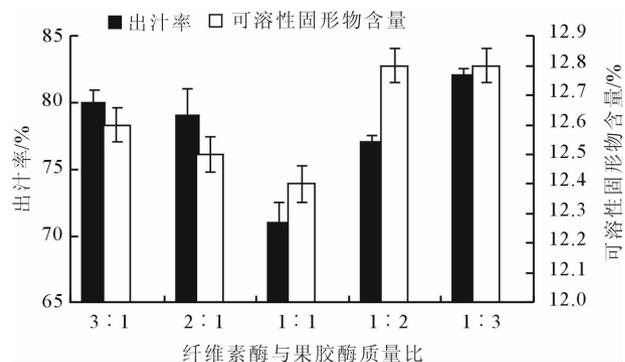


图 4 纤维素酶与果胶酶配比对红枣汁出汁率和可溶性固形物含量的影响

2.5 复合酶量对红枣出汁率及可溶性固形物含量的影响

纤维素酶和果胶酶以 1:3 质量配比, 以不同的

复合酶量加到枣浆中, 于 50 ℃ 水浴、pH = 4.6 条件下酶解 2 h 后挤压出汁, 测得枣汁出汁率和可溶性固形物含量如图 5 所示。

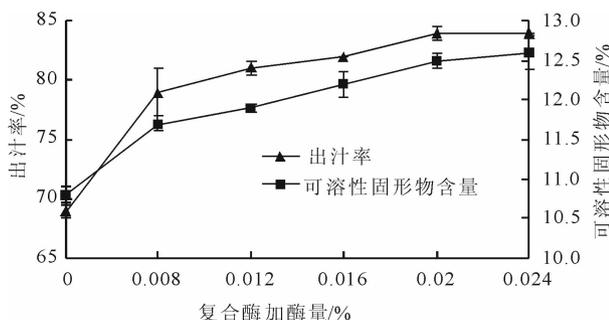


图 5 复合酶量对枣汁出汁率和可溶性固形物含量的影响

从图 5 可以看出, 当复合酶添加量为 0.020% 时, 枣汁的出汁率达到最大 84.0%, 可溶性固形物含量也达到最大 12.6%。之后, 随着复合酶量的增加, 出汁率及可溶性固形物含量不再增加。

2.6 复合酶酶解时间对红枣出汁率及可溶性固形物含量的影响

在枣浆中加入 0.020% 的复合酶 (纤维素酶: 果胶酶为 1:3), 于 50 ℃ 水浴、pH = 4.6 条件下酶解不同时间后挤压出汁, 测得枣汁出汁率和可溶性固形物含量如图 6 所示。

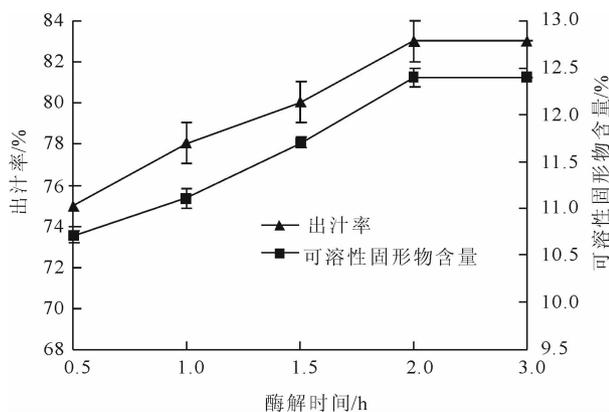


图 6 酶解时间对枣汁出汁率和可溶性固形物含量的影响

从图 6 可以看出, 酶解 2 h 时出汁率达到最大 84.0%, 2 h 以后出汁率基本维持稳定; 同时, 可溶性固形物含量在 2 h 时达到最大 12.4%。这说明在本实验条件下, 枣浆充分酶解需 2 h。

2.7 复合酶酶解温度对红枣出汁率及可溶性固形物含量的影响

纤维素酶与果胶酶以 1:3 质量配比, 加 0.020%

的复合酶于 pH = 4.6 的枣浆中,在不同温度下酶解 2 h 后挤压出汁,测得枣汁出汁率和可溶性固形物含量如图 7 所示。

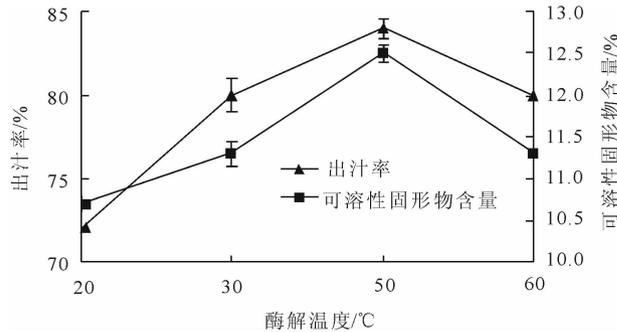


图 7 酶解温度对枣汁出汁率及可溶性固形物含量的影响

从图 7 可以看出,当酶解温度达到 50 °C 时出汁率和可溶性固形物含量最大,出汁率达 84.0%,可溶性固形物含量达 12.6%,之后随温度升高酶的活力损失也增大^[7],以致出汁率和可溶性固形物含量降低。

2.8 正交实验结果与分析

在单因素实验的基础上,选用 $L_9(3^4)$ 进行正交实验,在 pH = 4.6 时考察酶解温度(A)、酶解时间(B)、复合酶配比(C)和复合酶加入量(D)对枣汁酶解中可溶性固形物含量的影响,探究最佳酶解工艺。正交因素水平表见表 1,实验设计和结果见表 2。

表 1 正交实验的因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
A/°C	20	30	50
B/h	1	2	3
C(纤维素酶:果胶酶)	3:1	1:2	1:3
D/%	0.016	0.020	0.024

从表 2 可以看出,主次因素为 $D > C > B > A$,优化工艺条件为 $A_3B_2C_3D_2$ 。故酶用量是影响红枣汁可溶性固形物含量的主要因素,酶配比、酶解温度和酶解时间的影响较小。要提高出汁率和可溶性固形物含量,综合 2 个指标选取的最佳工艺为 $A_3B_2C_3D_2$,即为复合酶加入量为 0.020%,酶配比为纤维素酶:果胶酶 = 1:3,酶解温度 50 °C,酶解时间为 2 h。在此条件下,得到红枣汁出汁率为 84.0%,可溶性固形物含量为 12.8%。

3 结论

本文采用纤维素酶和果胶酶的复合酶对预处

表 2 红枣汁复合酶酶解条件正交实验结果

水平	因素				可溶性固形物含量/%
	A/°C	B/h	C	D/%	
1	1	1	1	1	10.8
2	1	2	2	2	12.3
3	1	3	3	3	11.5
4	2	1	2	3	10.9
5	2	2	3	1	12.1
6	2	3	1	2	11.7
7	3	1	3	2	12.8
8	3	2	1	3	11.4
9	3	3	2	1	11.4
k_1	11.53	11.50	11.30	11.43	
k_2	11.57	11.93	11.53	12.27	
k_3	11.87	11.53	12.13	11.27	
R	0.33	0.43	0.83	1.00	

理后的红枣进行酶解,以枣汁的出汁率和可溶性固形物含量为指标,研究不同酶解条件对澄清型红枣汁的影响并优化得到最佳的酶解工艺条件,得出如下结论:

1) 采用复合酶较单一酶酶解红枣能有效提高红枣汁的出汁率和可溶性固形物含量。

2) 正交实验结果表明,红枣汁酶解的最佳工艺参数为复合酶量 0.020%,酶配比 1:3,酶解时间 2 h,酶解温度 50 °C。在此条件下枣汁的出汁率为 84.0%,可溶性固形物含量为 12.8%。澄清后的枣汁清亮透明,具有典型的红枣色,无浑浊。

参考文献:

- [1] 曲泽洲,王永蕙. 中国果树志·枣卷[M]. 北京:中国农业出版社,1993.
- [2] 雷昌贵,陈锦屏,卢大新. 红枣的营养成分及其保健功能[J]. 现代生物医学进展,2006,6(3):56.
- [3] Park K K, Chun K S, Lee J M, et al. Inhibitory effects of 6-gingerol, a major pungent principle of ginger, on phorbol ester-induced inflammation, epidermal ornithine decarboxylase activity and skin tumor promotion in ICR mice[J]. Cancer Letter, 1998, 129(2):139.
- [4] Suth Y J, Lee J M. Chemoprotective properties of some pungent ingredients present in red pepper and ginger[J]. Mutat Res, 1998, 402(1,2):259.
- [5] 刘秀河. 枣汁提取的澄清工艺[J]. 食品工业科技, 1998(1):37.
- [6] 杨玉玲. 酶技术在果菜汁饮料生产中的应用[J]. 冷饮与速冻食品工业, 1998(3):14.
- [7] 何佳,张宏森,张海宁,等. 果浆酶和果胶酶对猕猴桃出汁率的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(8):76.

万山湖白酒微量香味成分用于 其他浓香型白酒质量初步判断的研究

刘延奇, 林辉

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以浓香型白酒万山湖的微量香味成分作为检测数据模型,结合白酒色谱骨架成分,选取己酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸、异戊醇、异戊醛为目标检测物,采用电子鼻检测验证浓香型白酒微量香味成分作为白酒质量判断基本依据的可行性,误差在5%以内。

关键词:浓香型白酒;微量香味成分;白酒质量快速检测

中图分类号:TS205.7;TS262.2 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.003

The pilot study on the quality testing of ordinary strong flavour Chinese spirits using the research results of trace flavoring components in white spirit named Wanshanhu

LIU Yan-qi, LIN Hui

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

Abstract: Based on the research results of the trace flavoring components in strong flavour Chinese spirit named Wanshanhu, a data model was defined combining the chromatogram structure components in the white spirits, the target objects are determined as ethyl hexanoate, ethyl lactate, acetic acid, isoamyl alcohol and isovaleric aldehyde. The feasibility of using the data model of the trace flavoring components in strong white spirits as quality criterion was tested through electric nose, and it is proved that the error was within 5%.

Key words: strong flavour Chinese spirit; trace flavoring component; Chinese spirit quality rapid detection

0 引言

中国白酒概括起来可以分为5种香型,即酱香型、浓香型、清香型、米香型和兼香型。白酒的香型是受酿酒微生物的种类、生产工艺以及发酵方式、贮酒容器、贮酒场地等因素影响的。白酒的特点来源于原料(包括生产用水)、糖化发酵剂、酿酒工艺和设备(包括酿酒及蒸酒、贮酒设备)。每一个香型

的酒都有其独特的工艺技术:茅台酒的石窖、高温曲、堆积;浓香酒的泥窖、续糟、混蒸混烧;清香酒的地缸、低温曲、清蒸清烧;董酒的小曲产酒、大曲增香的大小曲结合工艺;米香型的小曲糖化发酵、液态蒸馏;西凤酒的酒池贮存;豉香酒的浸泡肥肉贮存等。正是在长期发展中,各地根据特有自然地理、气候、物产及大众风俗、饮食习惯形成的独特酿酒工艺,才会有如此众多的酒类品种。

中国白酒的酒香十分丰富,因为呈香成分中含有清雅香气的乙酸乙酯、丁酸乙酯、庚酸乙酯、辛酸乙酯、异丁醇、异戊醇等,有些成分虽香味不大,但有溶解其他香气成分的定香作用,如乳酸、乳酸乙酯等,它们的含量及相互之间的配比不同,才构成了名优白酒不同风格^[1]。

白酒中含量最高的是乙醇和水(占总量的98%~99%),其他化合物仅占1.0%~2.0%。伴随着检测技术的发展,白酒风味物质的研究逐步兴起,从早期纸层析法到现在的气相色谱,从化合物的简单定性分析到复杂的定量测定,检测物也由低沸点的酸、酯等脂肪族化合物发展到高沸点的醇、醛、酮等各种芳香族化合物^[2]。研究表明,正是这些含量为1.0%~2.0%的醇、醛、酮、酸、缩醛、硫化物、呋喃类化合物、酚类化合物、吡醛类、含氮化合物及大量内酯类化合物使得白酒呈现出特有的风味。

白酒经过发酵、老熟等过程才有了完整的酒体,丰富的风味^[3],这是未经过发酵的勾兑酒所不能具备的,本文对万山湖酒厂(浓香型白酒)的典型风味物质进行分析,以其2012年酒类产品市场准入证年检及市面酒类产品抽检的数据为依据,进行白酒快速检测目标物的选取,以期用于其他浓香型白酒质量的初步判断。

1 实验

1.1 实验材料

万山湖白酒,酒精度42%,浓香型,在市场和窖藏车间分别取样。

市场出售产品随机取样10组,样品包装容器均为450 mL玻璃瓶。该酒厂窖藏车间为地上库房,由于四季温差较大(夏天可达35℃左右,冬季气温最低1~5℃),库房内使用了空气循环温度湿度控制系统,基本可以将温度控制在15~25℃,湿度基本可以控制在60%左右,所用容器为不锈钢罐。

根据窖藏时间不同,窖藏时间分别为3个月、6个月、9个月、12个月的产品各独立抽取样品10组,每组为450 mL。

1.2 实验仪器

气相色谱仪型号为FL9510,北京东西化工设备公司产;微量进样注射器:15 μL;柱温:170℃,气化室温度:190℃,检测器温度:190℃;燃烧气体:氢气40 mL/min;载气:氮气40 mL/min;进样量:0.5 μL;色谱柱:聚乙二醇(PEG20M)柱。

按照GB 601配制标准溶液。

1.3 实验方法

根据窖藏时间的不同,样品库中共计为5个样本集(市场售样,3个月、6个月、9个月、12个月窖藏产品),每个样本集中为10个样本,每个样本使用气相色谱仪进行2次平行测定,2次平行实验结果的差值不得大于平均值的5%,才可算作有效实验,以此2次有效实验的结果平均值作为该样本的检测结果。在同一窖藏时间水平上对同一样本集中的样本检测值进行比对分析。

2 结果与讨论

2.1 浓香型白酒的图谱及数据分析

综合各组样品的气相色谱图分析结果,选择浓香型白酒中普遍可以检出的几种微量香味成分列见表1。

表1 浓香型白酒典型微量香味成分含量表 %

成分名称	样本集				
	市售	3个月	6个月	9个月	12个月
己酸乙酯	1.441 1	1.435 9	1.411 9	1.691 4	1.521 3
乙酸乙酯	0.545 4	0.513 1	0.523 4	0.693 2	0.543 9
乳酸乙酯	0.280 2	0.271 8	0.280 6	0.280 7	0.293 1
乙酸	0.164 2	0.178 6	0.167 8	0.189 7	0.176 1
乳酸	0.043 5	0.051 3	0.048 7	0.056 9	0.049 2
异戊醇	0.361 6	0.358 4	0.349 3	0.313 0	0.303 1
乙醛	0.071 3	0.058 7	0.066 7	0.084 0	0.081 2
异戊醛	0.046 6	0.045 6	0.056 2	0.093 8	0.051 4

浓香型酒的微量香味成分主要由有机酸、酯类、高级醇和羰基化合物等组成。浓香型白酒香味浓烈,回味剧烈,其微量香味成分也比较明显,且含量差距较大。

1)酯类以己酸乙酯为主,其含量占微量香味成分总含量的1/3左右,其中己酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸乙酯的比例约为1:0.6~0.8:0.15。

2)酸类以乙酸、乳酸为主,其含量占微量香味成分总含量的1/4左右,乙酸、乳酸的比例约为1:0.4~1:0.45。

3)高级醇中异戊醇含量最高,醇类占微量香味成分总含量的1/5左右。

4)羰基化合物中乙醛、异戊醛含量较高,占微量香味组分的6%~8%,乙醛、异戊醛的比例约为1:0.95。它们与酯类香气作用,使香气丰满而带有特殊性,能提高浓香型白酒的香气品质。

2.2 用于浓香型白酒快速检测的微量香味成分的选择

2.2.1 微量香味成分的挥发性 表1中万山湖白酒中几种典型微量香味成分的挥发性,在实验室电子鼻设备的环境条件下(温度15~25℃,湿度58%~65%),可以以乙醇为参照物,比较如下:

乙醛>乙醇>乙酸>乙酸乙酯>异戊醇>异戊醛>己酸乙酯>丁酸乙酯>乳酸

乳酸是弱挥发性酸,比较柔和,能调和酒味.由于具有羟基和羧基,因而能和很多成分亲合,对酒的后味起着缓冲平衡作用,使酒质协调、减少烈性,但是在快速检测目标物的筛选过程中它就要被淘汰^[4].

2.2.2 窖藏时间对微量香味成分的影响 随着窖藏时间变化,对各类微量香味成分影响见图1—4.

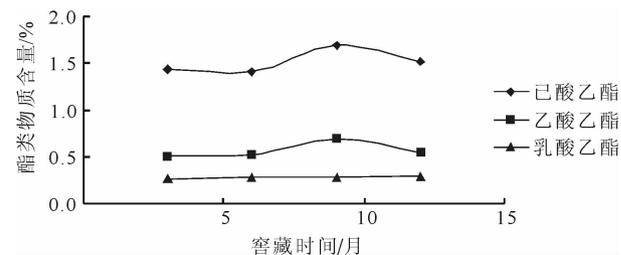


图1 窖藏时间与酯类物质含量的对应关系

从图1可以看出,己酸乙酯作为浓香型白酒的标志性香味成分,其含量远远高于其他酯类物质,且在气味感官上,己酸乙酯也是浓香型白酒的主体香味成分,它在浓香型白酒中占据整个酯类总量的很大比例,它的含量多少影响着浓香型白酒的整个呈香过程,起着举足轻重的作用.例如五粮液、剑南春、泸州特曲所含的己酸乙酯占总酯量的1/3~1/4^[5],并且己酸乙酯具有较低的气味界限值,因而使浓香型酒富有“喷香浓郁”之感,故选取己酸乙酯为浓香型白酒快速检测的目标物.在乳酸乙酯和乙酸乙酯之间选择的时候,要考虑到主体香与助香成分之间的相互作用,乳酸乙酯在高质量的浓香型白酒中具有举足轻重的调香作用,它可以调和浓香型白酒浓烈的口感,使其尾调比较顺滑^[6],故选择乳酸乙酯作为浓香型白酒快速检测的目标物.

从图2中可以看出,乙醛与异戊醛的含量相差不大,比例约为1:0.85,现在就要分析乙醛和异戊醛哪个更能代表白酒样品是否经过了陈酿而不是直接勾兑而成.从白酒的陈酿过程中发生的化学反

应可以得知,乙醛属于前期陈酿中就会出现物质,且在勾兑酒中也能检测的到,而异戊醛作为白酒陈酿过程中复杂化学反应的产物,且在白酒造假过程中也不会添加该物质,未经过陈酿不会出现该物质,故考察白酒是否经过陈酿发酵,可以选择异戊醛作为浓香型白酒快速检测的目标物.

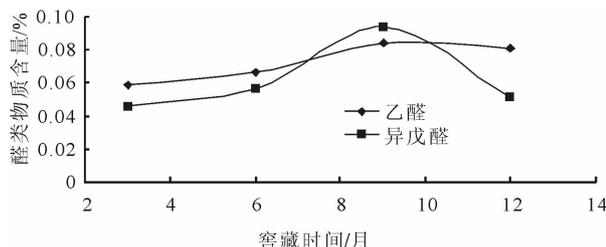


图2 窖藏时间与醛类物质含量的对应关系

从图3可以看出,乙酸的含量在浓香型白酒的陈酿过程中虽然有变化,程度却很小,乙酸对主体香气既起烘托作用,又起缓冲作用.由于它挥发又具刺激作用,所以适当含量能烘托酒的主体香,同时酸和醇的亲合性强,能形成酯,增加酒香,减少酒的刺激性,对白酒形成丰富完整的酒体有着不可忽视的作用,且作为酸类物质的代表,故将乙酸作为浓香型白酒快速检测的目标物.

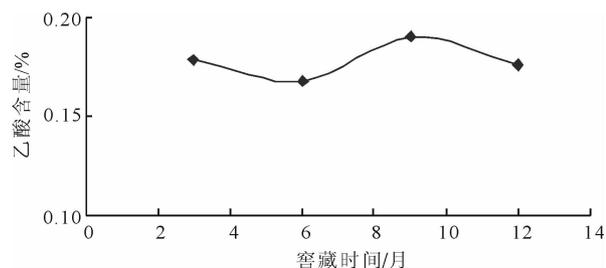


图3 窖藏时间与乙酸含量的对应关系

从图4中可以看出,在陈酿过程中,异戊醇的含量有所下降,这是因为醇酯之间有着复杂的化学反应,异戊醇也在转化成其他的异构体^[3].经过9个月左右的陈酿,异戊醇的含量趋于平稳,稳定在0.32%左右,对浓香型白酒酒体香型形成有着至关重要的作用.异戊醇具有甜味,黏性较强,起到调和酒体和平衡香气的作用,故选取异戊醇作为浓香型白酒快速检测的目标物.

3 实验初步验证

根据以上综合分析,己酸乙酯是浓香型白酒中十分突出的典型香味成分.而乳酸乙酯对保持酒体

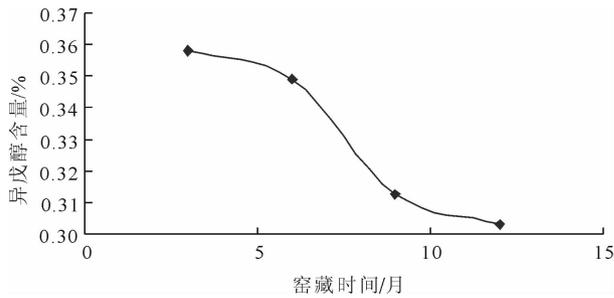


图4 窖藏时间与异戊醇含量的对应关系

的完整有重要作用:过少,酒体不完整;过多,造成主体香不突出.乙酸作为挥发性酸又起缓冲作用,由于它挥发又具刺激作用,所以适当含量能烘托酒的主体香,同时酸和醇的亲合性强,能形成酯,增加酒香,减少酒的刺激性.异戊醇具有甜味,黏性较强,起到调和酒体和平衡香气的作用;而异戊醛与乙醛的含量相近,且其是良好发酵的白酒必须具备的香味成分.可以试验性地提出以下结论:在浓香型白酒中,选取己酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸、异戊醇、异戊醛5种香味成分作为电子鼻快速检测鉴定白酒品质的目标物,其含量如表2所示.

表2 浓香型白酒快速检测目标物含量

成分	己酸乙酯	乳酸乙酯	乙酸	异戊醇	异戊醛
含量/%	1.500	0.280	0.170	0.320	0.050
含量/ (mg · (100 mL) ⁻¹)	320	150	10	180	20

在市场上随机选取流通份额较大的浓香型名优白酒各2组(每组6个样品),进行电子鼻检测,每个样本采集50 mL样品倒入200 mL烧杯中,用保鲜膜封口,放到水浴中加热到所需温度备用.电子鼻设定清洗时间为100 s,测定时间50 s,样品稀释浓度为0.2%时,样品预处理温度为30℃.目标检测物的数据列表见表3.

将表3所示电子鼻快速检测数据与前文中的目标物确定数据对比可得,由万山湖白酒得到的浓香型白酒数据,与以上几种名优白酒的重要微量香味成分的含量比例关系基本吻合,名优白酒中的几种目标物的含量要普遍略大于前文中得到的数据模型.

表3 名优白酒微量成分电子鼻检测数据

白酒名称 及酒精度	mg/100 mL				
	己酸乙酯	乳酸乙酯	乙酸	异戊醇	异戊醛
泸州老窖(52%)	341.56	161.34	8.45	189.89	23.48
板城烧锅(42%)	329.23	153.67	8.13	167.20	27.57
板城烧锅(48%)	321.23	159.74	8.59	170.36	25.84
板城烧锅(52%)	329.34	162.78	8.97	175.63	24.76
宋河粮液(46%)	334.67	149.45	9.23	179.45	21.31
宋河粮液(52%)	319.34	148.57	9.41	178.30	22.39

分析可知,虽然万山湖白酒也是经过发酵的,但是毕竟其生产条件和原料来源以及发酵技术和条件控制与名优白酒生产厂家有一定差距,酒体不甚完整,风味欠佳.但是经计算,各种香味成分的含量与暂定标准相比误差都在5%以内,故认为结论中得到的数据标准可试行于市面上白酒的初步质量认证.

4 结论

以万山湖浓香型白酒微量香味成分作为检测数据模型,结合白酒色谱骨架成分,选取己酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸、异戊醇、异戊醛为目标检测物,采用电子鼻检测验证浓香型白酒微量香味成分作为判断质量标准的可行性,误差在5%以内.所得目标检测物数据可试行于白酒质量的初步判断.

参考文献:

- [1] 柳军,范文来,徐岩,等.应用GC-MS分析比较兼香型和浓香型白酒中的香气化合物[J].酿酒科技,2008,35(3):103.
- [2] 张恩.浓香型洋河天之蓝和清香型二锅头大曲白酒特征香气成分研究[D].无锡:江南大学,2009.
- [3] 赖高淮.白酒理化分析检测[M].北京:中国轻工业出版社,2009:88-101,273-276.
- [4] Jung K H, Artigas F, Shin J Y. Personal, indoor, and outdoor exposure to VOCs in the immediate vicinity of a local airport [J]. Environmonit Assess, 2010(17):1404.
- [5] 周围,陈艳彬,韩舜愈.顶空-气相色谱法测定饮料中14种卤代烃残留量[J].食品科技,2009,34(9):297.
- [6] 孙洁,孙丽臻,李好转.评价白酒质量优劣的两项重要指标[J].酿酒科技,2011(8):123.

分子生物学技术在堆肥微生物研究中的应用综述

张蔓¹, 魏明宝^{1,2}, 马闯^{1,2}, 张宏忠^{1,2}, 赵继红^{1,2}

(1. 郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南省表界面科学重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:对常用的16S/18S rRNA/DNA序列分析、变性梯度凝胶电泳、DNA单链构象多态性分析、限制性片段长度多态性分析、随机扩增多态性DNA分析、扩增的限制性片段长度多态性分析等分子生物学技术的特点及其在堆肥微生物研究中的应用进行了述评,提出堆肥微生物研究应结合传统的分离培养方法,多种技术互补使用,以便取得更科学的结果。

关键词:堆肥;微生物;分子生物学技术

中图分类号:Q71;Q75;Q785 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.004

Review of application of molecular biotechnology in compost microorganism research

ZHANG Man¹, WEI Ming-bao^{1,2}, MA Chuang^{1,2}, ZHANG Hong-zhong^{1,2}, ZHAO Ji-hong^{1,2}

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

2. He'nan Provincial Key Lab of Surface and Interface Science, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The molecular biotechnology characteristics and application in compost microorganism research were reviewed, including 16S/18S rRNA/DNA sequence analysis, DGGE, SSCP, RFLP, RAPD and AFLP technology. In the future research of compost microorganism, we will complementarily use the traditional separation method and combine molecular biotechnology to achieve a better science result.

Key words: compost; microorganism; molecular biotechnology

0 引言

人类在生产和生活中产生了大量有机固体废弃物,主要包括农作物秸秆、畜禽粪便、生活垃圾、城市污泥等。堆肥具有良好的环境效应、生物处理的可持续性和实现废弃物的循环利用等特点,被许多国家和地区广泛接受,成为处理有机固体废弃物的有效方法之一^[1]。堆肥是利用自然界广泛存在的

微生物(细菌、真菌、放线菌等)或商业菌株,有控制地促进可被生物降解的有机物转化为稳定的腐殖质HS的生物化学过程^[2],本质是群落结构迅速演替的多个微生物群体共同作用的动态过程^[3-4]。堆肥接种高效微生物菌剂,能够迅速提高堆温,有效增加微生物数量,加快有机物料分解速度,促进堆肥产品的腐熟、稳定,减少臭气的产生,促进氮素的积累,提高堆肥效率^[5-8],研究堆肥微生物对于揭示

收稿日期:2013-03-26

基金项目:河南省重大公益项目(101100910300);国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题(2012ZX07204-001)

作者简介:张蔓(1989—),女,河南省周口市人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为固体废弃物处理。

堆肥过程中物质转化规律和工艺优化有非常重要的意义。

近年来,国内外学者对堆肥微生物进行了一系列理论和实践研究。由于堆肥原料性质和微生物群落结构复杂多样,随温度的改变,微生物处于动态变化。另外,传统方法主要采用一定配比的培养基和固定的培养温度,通过分离纯化和培养选育,对微生物的种群与群落多样性进行研究,忽略了气候变化和生物相互作用的影响,具有明显的人工选择性^[9]。许多研究已经证实,自然界中90%以上微生物要求的营养条件非常严格或是难以培养,通过传统的分离方法鉴定的微生物只占环境微生物总数的0.1%~10%,因此,利用传统纯培养方法难以快速、准确、定量地反映堆肥不同阶段微生物群落结构的演替规律和微生物多样性的原始状态及动态变化^[10],具有很大局限性^[11]。经历了百余年的发展和完善,利用传统纯培养法从环境中直接分离鉴定菌种的科研工作已接近极限^[12]。

分子生物学以研究分子水平生命本质为目的,以核酸和蛋白质等生物大分子的结构及其在遗传信息和细胞信息传递中的作用为研究对象,是当前生命科学中发展最快并与其他学科广泛交叉和渗透的重要前沿领域^[13]。分子生物学技术的发展,弥补了传统方法的不足,为堆肥微生物的研究开辟了新的途径,也为堆肥复合菌系的选育、堆肥过程的控制提供了行之有效的手段。当然分子生物学技术也具有一定的缺陷,利用其分析环境样品,得到的结果难免有所偏差。本文拟对分子生物学技术在堆肥微生物研究方面取得的进展进行综述,以期正确运用这些技术提供参考。

1 16S/18S rRNA/DNA 序列分析技术在堆肥微生物研究中的应用

16S/18S rRNA/DNA 序列分析技术是由环境微生物样品总 DNA 的提取、引物与探针的设计、聚合酶链式反应(PCR)扩增、遗传指纹技术、16S rRNA 基因(rDNA)克隆文库的构建、序列测定、序列分析与系统树构建、核酸杂交等一系列技术组成。在实际的研究与应用中,可以根据研究对象和目的的不同单独或组合使用以上技术^[13]。

1.1 16S/18S rRNA/DNA 序列分析技术及其应用

利用 16S/18S rRNA/DNA 序列分析技术不需要

对微生物进行分离培养,能够动态地研究微生物群落的多样性,真实反映微生物的生存状态。随着核酸序列数据库的不断补充和完善,可以实现对复杂环境微生物快速、微量、准确、简便的分类和检测。1983年,C. R. Woese 等^[14]利用该技术定义并建立了古菌界,将生物界重新划分为3主干6界系统。目前,该技术在堆肥微生物研究方面被广泛应用。使用该技术的关键在于:首先要有足以代表实际生存环境的微生物组成的基因组 DNA;其次是有数量足够多的克隆子,以反映环境样本实际的微生物组成情况,构建 16S/18S rRNA 基因文库,最后进行 16S/18S rDNA 序列分析。

采用 16S/18S rRNA/DNA 序列分析技术,不仅能对分子特性进行研究,而且能够用于数量检测、预测自然进化关系以及物种分类。P. Partanen 等^[3]对生产性和中试阶段的生活垃圾堆肥中的细菌多样性进行了研究,通过对得到的超过 1 500 条近全长 16S rRNA 序列进行分析,发现其中超过 500 条序列在所检测样品中只出现一次,另外,尽管大多数序列与堆肥中已发现的微生物序列相似,但是仍有部分细菌系统发育型是首次被检测到,经过统计学分析,预测在生活垃圾堆肥中可能存在超过 2 000 种不同的细菌系统发育型;且中试阶段和生产性阶段的生活垃圾堆肥微生物在属水平上比较相似,而在种和菌株水平上差异较大。

1.2 变性梯度凝胶电泳技术及其应用

DGGE 技术由 Fischer 等最早于 1979 年在检测 DNA 片段中的点突变时提出。1993 年 G. Muyzer 等^[15]将该技术应用于微生物生态学研究,证实了其在研究自然界微生物群落的遗传多样性和演替规律方面所具有的独特优越性。DGGE 技术无需培养,不受培养基的影响,可以快速、可靠、可重复地同时分析多个样品,非常适用于堆肥这种复杂环境中的微生物分析,已引起越来越多研究者的重视^[16]。目前,该技术被广泛应用于河流、活性污泥、生物膜、土壤、堆肥^[17-21]等环境样品的微生物多样性检测及群落结构演替分析,已成为研究堆肥化过程中微生物多样性重要的分子生态技术之一^[22]。该技术不仅适用于通过普通培养方法得到的微生物,还能够分离到难以或无法用常规方法培养的细菌或厌氧菌,以及混合微生物群落中含量很低的 DNA 序列,揭示堆肥化过程中好氧和厌氧的、可分离培养和目前不

可分离培养的微生物的动态及多样性。

目前,将 DGGE 技术与其他技术(传统微生物培养技术、构建 rDNA 克隆文库、PCR 等)相结合,能够发挥各种技术的优势,在堆肥微生物的研究中有着广泛的应用。王伟东等^[4]将 DGGE 和平板计数法相结合对堆肥化过程中微生物的区系动态变化进行了研究。结果表明:在堆肥化过程中,微生物数量总的趋势是细菌的数量最多,放线菌次之,真菌的数量最少,在堆肥前后中温微生物、高温放线菌、高温真菌的数量也有明显变化,通过 DGGE 分析表明,发酵过程中细菌的种类发生了明显的更迭现象。

将 PCR 与 DGGE 相结合的 PCR-DGGE 技术,可以通过图谱特征来分析系统中微生物的群落变化规律,克服了传统微生物研究方法的局限性,目前已被广泛应用于环境样品的研究中^[23-26]。党秋玲等^[27]以生活垃圾为原料进行好氧堆肥,多阶段强化接种功能微生物菌剂,利用 PCR-DGGE 方法并结合聚类分析和 Shannon-Weaver 指数变化来研究堆肥过程中多阶段强化接种对细菌群落多样性的影响,结果表明,多阶段接种堆肥能有效提高堆体降温期和二次发酵期的温度,并提高半纤维素、纤维素和木质素的降解率。

DGGE 与单链构象多态性(SSCP)技术相比,2种技术能够提供的信息相似,但在描述某些过程方面存在细微差异,DGGE 对细菌群落结构变化更敏感。叶凝芳等^[28]针对细菌群落的 16S rDNA V3 区,采用 DGGE 和 SSCP 技术,分别分析蔬菜类废物中温好氧降解过程中的细菌群落,比较 2 种技术对微生物群落结构和动态变化的解析水平,结果表明,细菌群落结构在中温好氧降解过程中有显著变化,随降解时间的延长总体呈现从简单到复杂的趋势;主成分分析结果表明,细菌群落结构的演替与好氧降解过程不同阶段生物物质组成具有相关性。

受 DNA 提取方法、PCR 条件和效率等因素的影响,DGGE 技术也存在其局限性:一般只有在总的微生物群落中占 1% 以上的种群才能被检测出来,弱勢菌群不能检测到,只能分离较小的 DNA 片段,较长的片段分离率下降,限制了用于系统发育分析和探针的序列信息数量。

2 分子标记技术在堆肥微生物研究中的应用

16S/18S rRNA/DNA 序列分析技术虽然能够对

环境中各种微生物进行量化,但是需要的测序工作量大,时间周期长且不经济,而且要求要有足够的克隆子数才能准确反映环境中的微生物群落的真实组成情况。分子标记技术可用于监测微生物群落结构及其动态变化过程,近年来被广大科研工作者引入到微生态研究中,发挥了巨大的作用。

广义的分子标记是指可遗传并可检测的 DNA 序列或蛋白质,狭义的分子标记概念只指 DNA 标记,目前被广泛采纳^[29]。DNA 分子水平上的遗传标记可以揭示生物的遗传多态性。将 DNA 限制性片段长度多态性作为遗传标记的思想由 D. Botstein 等^[30]首次提出,至今,联合 PCR 技术已经发展了十多种基于 DNA 多态性的分子标记技术。本文主要阐述以下几种分子标记技术在堆肥微生物研究中的应用。

2.1 DNA 单链构象多态性分析及其应用

SSCP 技术主要用于各种点突变,短核苷酸序列的缺失或插入等突变的检测。该技术由 M. Orita 等^[31]于 1989 年首次提出,并由 D. H. Lee 等^[32]首次应用于微生物群落组成的分析。之后,F. Schwieger 等^[33]对该技术进行了改进,提高了其图谱带型的分辨率和可读性,使之更适合较为复杂的微生物群落结构的分析。该技术简便、快速、灵敏、适于大样本筛查,且不需要特殊仪器,目前已在堆肥微生物检测^[34]中得到了广泛应用。

M. Orita 等^[31]在研究中将 SSCP 用于检查 PCR 扩增产物的基因突变,从而建立了 PCR-SSCP 技术,简便性和灵敏性进一步提高,该技术目前在堆肥微生物研究中已有广泛应用,且操作简便,价格低廉。章戴荣^[35]在研究中将 PCR-SSCP 技术应用于检测堆肥细菌和真菌随时间的变化,结果表明:在堆肥过程中,细菌和真菌构成的微生物群落发生了很大变化,前期细菌的优势地位在 15 d 后被真菌取代,因此,提高堆肥效率的措施应当重点放在堆肥后期。N. Abid 等^[36]通过使用 PCR-SSCP 技术研究实验室规模的反应器中活性污泥堆肥过程中微生物的群落演替,结果表明:细菌群落比真核生物群落具有更高的多样性,在堆肥 60 d 后,堆肥中微生物群落趋于稳定,且堆肥危害植物的毒性明显消失。

然而,PCR-SSCP 技术也有其局限性:随着分析片段长度增加,分析灵敏度降低;大于 500 bp 的片段则只能检出 10% ~ 30% 的变异,且该技术仅限于

对样品中优势菌群的分析,有些单链 DNA 可以形成不止一个稳定的构象,造成对微生物多样性的过高估计.选择合适的引物,扩增合适长度的 DNA 片段,可以弥补灵敏性方面的不足^[37-38].

2.2 限制性片段长度多态性分析及其应用

限制性片段长度多态性(RFLP)技术利用限制性内切酶对 DNA 进行切割,产生长短、数目不同的限制性切割片段,进而利用电泳技术或特定探针杂交对 DNA 样品的限制性内切酶切割产物进行分析,根据 DNA 序列的限制性片段长度多态性分析微生物种群的遗传多样性,或经过多个探针的比较确定生物的进化和分类关系.喻曼等^[39]用 RFLP 技术研究了农业固体废物堆肥过程中的微生物多样性及其动态变化,结果表明:在不同发酵期接种黄孢原毛平革菌(*P. chrysosporium*)对堆肥进程的影响不同.接种黄孢对堆肥细菌群落的影响显著且迅速,二次接种可以很好地巩固一次接种的效果.利用该技术简单快捷,自动化程度高,准确率高,但存在的问题是图谱的谱带比扩增 DNA 的谱带要多,因此会过高估计群落成员数.

RFLP 技术在牧草的个体识别、遗传图谱的绘制、目的基因定位、检测群体内或群体间序列差异程度^[40-43]、辅助育种等方面的研究中有着广泛的应用,利用该技术有利于培育优良品种,提高牧草的产量、品质和生态效益.陈金华等^[44]利用 DGGE 和 RFLP 方法初步研究了桑粒肩天牛幼虫肠道微生态系统,结果显示:桑粒肩天牛幼虫肠道微生物非常丰富,2种方法都能有效反应肠道微生物的多样性状况,且 RFLP 分辨率更好.

末端限制性片段长度多态性 T-RFLP 是由 RFLP 技术发展起来的一种高通量指纹技术,该技术将酶切产物电泳后进行荧光检测,得到末端限制性片段的多样性,进而研究微生物群落的结构、组成及其动态变化,还可以研究微生物的系统发育及种属鉴定.该技术目前在微生物生态学中广泛应用. U. M. E. Schütte 等^[45]对 T-RFLP 在微生物群落结构研究中的应用进展进行了综述:虚拟 PCR 和限制性内切酶工具以互联网为基础,极大地方便了 T-RFLP 技术对引物和限制性内切酶的选择,使用该方法的缺陷在于利用自动测序仪完成 T-RFLP 价格昂贵.

2.3 随机扩增多态性 DNA 分析及其应用

随机扩散多态性 DNA(RAPD)技术建立在 PCR 技术基础上,利用一系列碱基顺序随机排列的、不同的寡聚核苷酸单链为引物,对所研究的基因组 DNA 进行 PCR 扩增. RAPD 技术继承了 PCR 技术效率高、样品用量少、灵敏度高、检测容易等优点,同时又有其独到之处^[46]:操作程序技术简单,不需要特殊的仪器设备,不需 DNA 探针,只需少量 DNA 样品,用一个引物就可扩增出许多片段,成本较低,多态性丰富,因此,非常适合对微生物种群进行快速检测.已有研究表明, RAPD 技术具有很好的种群特异性,能够用于微生物遗传多样性的研究^[47]. 陈杰娥等^[48]利用 RAPD 方法分析了厌氧氨氧化污泥驯化过程中的微生物遗传性质,发现不同反应器内的微生物遗传变异较大,通过对比分析,找到了效果更好的驯化途径.

RAPD 技术在微生物的分类鉴定方面有其显著的优越性:在 *Frankia* 菌中,16S rRNA 扩增、扩增核糖体 DNA 限制性分析(ARDRA)、重复基因外回纹序列-聚合酶链式反应(REP-PCR)等均以属间甚至原核生物普遍存在的高度保守序列为基础设计引物,比较变异程度和同源相关性,进而评价系统发育和鉴别物种.由于产物同源保守性强,给种内或亚种的区分鉴别带来问题. RAPD 由于不需要设计特异的引物,一次可获得大量 DNA 多态性片段,为在同一属(或群)下分类鉴别提供了有效可行的办法^[46].

RAPD 分析中存在的最大问题是重复性较低,工作量大,容易受各种因素的影响.随着分子技术的发展,在实际使用中,它的缺点将被克服或通过其他方法加以弥补和完善.

2.4 扩增的限制性片段长度多态性分析及其应用

扩增的限制性片段长度多态性(AFLP)技术是基于 PCR 技术扩增基因组 DNA 的限制性片段的分子标记技术.使用该技术,可以在预先不知道 DNA 序列信息的情况下同时进行多数 DNA 酶切片的 PCR 扩增.反应程序主要包括 3 个基本步骤:制备模板 DNA、扩增酶切片段和凝胶电泳分析.

AFLP 分析技术结合了 RFLP 和 PCR 技术,因此,它除了具备重复性强、可信度高等优点外,还具有 RFLP 技术可靠性和 PCR 技术高效性的特点,方便、快速,目前被认为是 DNA 指纹图谱技术中多态

性最为丰富的一项技术^[49]。作为一种检测遗传多样性、构建高密度遗传图谱以及定位克隆目的基因的理想分子标记技术,AFLP技术在细菌的分类和鉴定、真菌的分类和基因标定、菌株之间亲缘关系、微生物的遗传多样性^[50-53]等方面有广泛的应用,并将在鉴定与评估堆肥微生物种质资源、评估堆肥微生物种群内与菌群间的多样性水平和描述种下水平的遗传关系方面发挥重要作用。

3 其他技术在堆肥微生物研究中的应用

在环境微生物的研究中,生物芯片技术主要应用于对环境中原微生物的检测和快速诊断^[54]。目前,生物芯片技术主要包括基因芯片、蛋白质芯片和芯片实验室三大领域,基因芯片是其中最重要的一种。由于芯片技术仅通过一次杂交实验就可得出多种目的核酸的基因信息,具有快速、高通量、平行化等其他技术无法比拟的优点,现已广泛应用于临床诊断和食品卫生监督等研究领域,为细菌、病毒、真菌等病原体的种类鉴定、功能基因及耐药性检测等提供了一个强有力的工具^[55]。可以将基因芯片技术应用于堆肥中的特定微生物种群的检测,如监测某些功能微生物在堆肥过程中的动态变化,也可用于检测堆肥产品中可能存在的病原微生物,从而对堆肥质量进行监控,为堆肥的安全使用提供保障。

流式细胞术 FCM 应用于对液体中的细胞或其他生物微粒逐个进行多参数快速(10^3 细胞/s)定量分析和分选,检测环境微生物的类群结构,具有自动、快速、客观、直接和同时检测多参数的优点,可以很好地避免显微术人工计数的主观性偏差,弥补传统培养方法的局限性^[56]。许多研究者成功地使用 FCM 技术对简单的人工培养的微生物细胞群或诸如活性污泥等复杂的微生物自然群落进行了分析^[57]。

另外,扩增性 rDNA 限制性酶切片段分析 ARDRA、基因工程 GE 等技术,也有着广阔的应用前景,但目前在堆肥微生物学中应用还不是很多。

4 结语

随着堆肥技术的广泛应用,对准确、快捷、简便的堆肥微生物研究技术的需要更加迫切。分子生物学技术能够突破菌株分离和培养的限制,直接对堆

肥微生物总 DNA、微生物群落多样性的动态变化进行研究,为寻找适当的微生物菌剂,优化堆肥工艺提供理论指导。另外,传统的分离培养方法和分子生物学技术,在目前应用于堆肥微生物多样性和群落结构变化规律研究中,都存在自身的缺陷,因此,如果能够根据需要,将新技术与传统培养方法相结合,多种技术相互配合,互为补充进行菌种的分离鉴定,将能够提供更加直观、全面、准确的信息,得到更加科学合理的结果。

参考文献:

- [1] Zhu N, Deng C, Xiong Y, et al. Performance characteristics of three aeration systems in the swine manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3):319.
- [2] 韦元雅,宋鹏,陈五岭,等.堆肥法处理城市有机垃圾研究综述[J]. *上海环境科学*, 2008, 27(5):214.
- [3] Partanen P, Hultman J, Paulin L, et al. Bacterial diversity at different stages of the composting process[J]. *BMC Microbiology*, 2010, 10(1):94.
- [4] 王伟东,王小芬,朴哲,等.堆肥化过程中微生物群落的动态[J]. *环境科学*, 2007, 28(11):2591.
- [5] 顾文杰,张发宝,徐培智,等.复合微生物菌剂对市政污泥堆肥中有机物质的影响[J]. *广东农业科学*, 2011(12):71.
- [6] 王玉军,窦森,崔俊涛,等.复合菌剂对农业废弃物堆肥过程中理化指标变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5):1354.
- [7] 徐智,张陇利,张发宝,等.堆肥反应器中2种微生物接种剂的堆肥效果研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(11):3409.
- [8] Xi B D, Liu H L, Zeng G M, et al. Composting MSW and sewage sludge with effective complex microorganisms[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 14(2):264.
- [9] Howeler M, Ghiorse W C, Walker L P. A quantitative analysis of DNA extraction and purification from compost[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2003, 54(1):37.
- [10] 张洪勋,王晓谊,齐鸿雁.微生物生态学研究方法进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(5):988.
- [11] Amann R I, Ludwig W, Schleifer K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation[J]. *Microbiological Reviews*, 1995, 59(1):143.
- [12] Vaz-moreira I, Egas C, Nunes O C, et al. Culture-dependent and culture-independent diversity surveys target differ-

- ent bacteria: A case study in a freshwater sample[J]. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2011, 100(2): 245.
- [13] 曾光明, 黄国和. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] Woese C R, Gutell R, Gupta R, et al. Detailed analysis of the higher-order structure of 16S-like ribosomal ribonucleic acids[J]. *Microbiological Reviews*, 1983, 47(4): 621.
- [15] Muyzer G, De Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, 59(3): 695.
- [16] 牛俊玲, 高军侠, 李彦明, 等. 堆肥过程中的微生物研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(6): 185.
- [17] 屠腾, 李蕾, 毛冠男, 等. 利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性[J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3505.
- [18] 孙庆华, 柏耀辉, 赵翠, 等. DGGE, T-RFLP, LH-PCR 对两种活性污泥的微生物种群多样性分析的比较[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(8): 1365.
- [19] 王华金, 朱能武, 李冲, 等. 微生物燃料电池阳极生物膜微生物群落的 PCR-DGGE 分析[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1431.
- [20] 吕新, 陈丽华, 李玥仁. 4 种不同土壤微生物 DNA 提取方法对 DGGE 分析微生物群落的影响[J]. *福建农业学报*, 2012, 27(4): 367.
- [21] Cherif H, Ayari F, Ouzari H, et al. Effects of municipal solid waste compost, farmyard manure and chemical fertilizers on wheat growth, soil composition and soil bacterial characteristics under Tunisian arid climate[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45(2): 138.
- [22] Muyzer G. DGGE/TGGE a method for identifying genes from natural ecosystems[J]. *Current Opinion in Microbiology*, 1999, 2(3): 317.
- [23] Bonito G, Isikhuemhen O S, Vilgalys R. Identification of fungi associated with municipal compost using DNA-based techniques [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(3): 1021.
- [24] Hansgate A M, Schloss P D, Hay A G, et al. Molecular characterization of fungal community dynamics in the initial stages of composting[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, 51(2): 209.
- [25] Calli B, Mertoglu B, Roest K, et al. Comparison of long-term performances and final microbial compositions of anaerobic reactors treating landfill leachate[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(4): 641.
- [26] Wang G H, Jin J, Liu J J, et al. Bacterial community structure in a Mollisol under long-term natural restoration, cropping and bare fallow history estimated by PCR-DGGE [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(2): 156.
- [27] 党秋玲, 李鸣晓, 席北斗, 等. 堆肥过程多阶段强化接种对细菌群落多样性的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(9): 2689.
- [28] 叶凝芳, 吕凡, 何晶晶, 等. DGGE 和 SSCP 解析蔬菜类废物好氧降解过程细菌群落结构及演替的比较[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 1132.
- [29] 王爱杰, 任南琪. 环境中的分子生物学诊断技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [30] Botstein D, White R L, Skolnick M, et al. Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms [J]. *American Journal of Human Genetics*, 1980, 32(3): 314.
- [31] Orita M, Iwahana H, Kanazawa H, et al. Detection of polymorphisms of human DNA by gel electrophoresis as single-strand conformation polymorphisms [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1989, 86(8): 2766.
- [32] Lee D H, Zo Y G, Kim S J. Nonradioactive method to study genetic profiles of natural bacterial communities by PCR-single-strand-conformation polymorphism [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, 62(9): 3112.
- [33] Schwieger F, Tebbe C C. A new approach to utilize PCR-single-strand-conformation polymorphism for 16S rRNA gene-based microbial community analysis [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(12): 4870.
- [34] 米文秀, 谢冰, 徐亚同. PCR-SSCP 技术用于脱臭微生物群落结构的研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(7): 1992.
- [35] 章戴荣. 利用 PCR-SSCP 技术分析猪粪堆肥微生物群落动态[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.
- [36] Abid N, Chamkha M, Godon J, et al. Involvement of microbial populations during the composting of olive mill wastewater sludge [J]. *Environmental Technology*, 2007, 28(7): 751.
- [37] Duthoit F, Godon J J, Montel M C. Bacterial community dynamics during production of registered designation of origin Salers cheese as evaluated by 16S rRNA gene single-strand conformation polymorphism analysis [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(7): 3840.
- [38] Sliwinski M K, Goodman R M. Spatial heterogeneity of crenarchaeal assemblages within mesophilic soil ecosystems as revealed by PCR-single-stranded conformation

- polymorphism profiling [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(3):1811.
- [39] 喻曼,许育新,曾光明,等. RFLP 法研究接种对农业废物堆肥微生物多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):396.
- [40] Bauchan G R, Campbell T A, Hossain M A. Comparative chromosome banding studies of nondormant alfalfa germplasm[J]. Crop Science, 2003, 43(6):2037.
- [41] Isobe S, Klimenko I, Ivashuta S, et al. First RFLP linkage map of red clover (*Trifolium pratense* L.) based on cDNA probes and its transferability to other red clover germplasm[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2003, 108(1):105.
- [42] Ekuere U, Dosdall L, Hills M, et al. Identification, mapping and economic evaluation of QTLs encoding root maggot resistance in[J]. Crop Science, 2005, 45(1):371.
- [43] Pesaro M, Widmer F. Identification and specific detection of a novel Pseudomonadaceae cluster associated with soils from winter wheat plots of a long-term agricultural field experiment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(1):37.
- [44] 陈金华,王中康,贺闽,等. DGGE 和 RFLP 方法分析桑粒肩天牛幼虫肠道微生物多样性[J]. 生物技术通报, 2008(6):115.
- [45] Schütte U M E, Abdo Z, Bent S J, et al. Advances in the use of terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) analysis of 16S rRNA genes to characterize microbial communities[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 80(3):365.
- [46] 徐晓飞,林炜铁,彭智辉,等. RAPD 技术及其在微生物学方面的应用[J]. 生命的化学, 2001(5):436.
- [47] Abbasi P A, Miller S A, Meulia T, et al. Precise detection and tracing of *Trichoderma hamatum* 382 in compost-amended potting mixes by using molecular markers[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(12):5421.
- [48] 陈杰娥,贾晓珊,徐昕荣. 应用 RAPD 方法分析厌氧氨氧化污泥驯化过程中的微生物遗传性质[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6):961.
- [49] 王世伟,齐小辉,刘军,等. AFLP 技术在微生物分类鉴定、基因标定及遗传多样性方面的应用[J]. 生物技术, 2003, 13(5):42.
- [50] Velappan N, Snodgrass J L, Hakovirta J R, et al. Rapid identification of pathogenic bacteria by single-enzyme amplified fragment length polymorphism analysis[J]. Diagnostic microbiology and infectious disease, 2001, 39(2):77.
- [51] Zhong S, Steffenson B. Identification and characterization of DNA markers associated with a locus conferring virulence on barley in the plant pathogenic fungus *Cochliobolus sativus*[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2002, 104(6-7):1049.
- [52] 何月秋, Leung H, Zeigler R S, 等. 稻瘟病菌变异菌株的 AFLP 分析[J]. 菌物系统, 2002, 21(3):363.
- [53] 冯瑞华. 用 AFLP 技术和 16S rDNA PCR-RFLP 分析毛茛蓴根瘤菌的遗传多样性[J]. 微生物学报, 2000, 40(4):339.
- [54] 刘国传,陆琳,汪琳,等. 致病微生物检测生物芯片图像去噪方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2):351.
- [55] 高兴,王景林. 基因芯片技术在病原细菌检测中的应用[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30(2):100.
- [56] 朱海霞. FCM 检测低能 N^+ 注入对活性污泥微生物菌群的影响[D]. 郑州:郑州大学, 2007.
- [57] Zilles J L, Peccia J, Noguera D R. Microbiology of enhanced biological phosphorus removal in aerated-anoxic orbital processes[J]. Water Environment Research, 2002, 74(5):428.

节杆菌 Z3 粗酶液降解白肋烟烟碱条件优化

张文龙^{1,2}, 张相辉³, 寇霄腾¹, 王广超¹, 帖金鑫¹, 马林¹

- (1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 吉林烟草工业有限责任公司, 吉林 延吉 133000;
3. 黑龙江烟草工业有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:以节杆菌 Z3 (*Arthrobacter* Z3) 为产酶菌株, 通过正交实验, 对烟碱脱氢酶降解白肋烟烟碱条件进行了研究. 实验结果表明, 最佳发酵条件为: 酶液添加量 50%, 发酵温度 33 °C, 发酵时间 9 h, 烟丝含水率 70%. 此条件下烟碱降解率为 49.32%, 使白肋烟烟碱含量达到了烤烟水平. 这表明, 粗酶液能显著降低白肋烟中的烟碱.

关键词:白肋烟; 烟碱降解; 发酵条件; 节杆菌 Z3

中图分类号:TS44⁺4 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.005

Conditions optimization of *Arthrobacter* Z3 crude enzyme solution degradate nicotine in the Burley tobacco

ZHANG Weng-long^{1,2}, ZHANG Xiang-hui³, KOU Xiao-teng¹,
WANG Guang-chao¹, TIE Jin-xin¹, MA Lin¹

- (1. College of Food and Bioengineering Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Jilin Tobacco Industry Co., Ltd., Yanji 133000, China;
3. Heilongjiang Tobacco Industry Co., Ltd., Harbin 150001, China)

Abstract: Using the *Arthrobacter* Z3 as enzyme production strains, the conditions of nicotine dehydrogenase degradation Burley nicotine was studied by orthogonal experiment. The results showed that the best fermentation conditions were: 50% of the added amount of the enzyme solution, fermentation temperature 33 °C, fermentation time 9 h, tobacco shreds moisture content 70%. Under these conditions nicotine degradation rate was 49.32% and Burley nicotine content reached the same level of flue-cured tobacco. The crude enzyme fluid can significantly reduce nicotine in Burley tobacco.

Key words: Burley tobacco; nicotine degradation; fermentation condition; *Arthrobacter* Z3

0 引言

国产白肋烟烟碱含量高、劲头大, 上部烟表现

尤为明显, 这给白肋烟在中式卷烟中的应用带来了很大困难. 近年来, 国内外开展了应用微生物及其酶降解烟草中烟碱的相关研究. R. Gutierrez 等^[1]从

收稿日期: 2013-01-31

作者简介: 张文龙(1984—), 男, 河南省许昌市人, 郑州轻工业学院硕士, 吉林烟草工业有限责任公司助理工程师, 主要研究方向为烟草工艺.

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

干烟叶表面分离出一种能够降解烟碱的菌株,经鉴定为阴沟肠杆菌(*Enterobacter cloacae*) E-150。在含烟碱(<5 g/L)的培养基中(34 ℃, pH=7 条件下)进行发酵的过程中,该菌降解烟碱的能力得到诱导。A. Tashiro 等^[2]从 44 个含有烟碱的土壤和废水中获得了 57 种细菌,这些菌在 2 周内能降解浓度为 1.0×10^{-3} g/mL 的烟碱。F. Mesnard 等^[3]在 *Nicotiana plumbaginifolia* 细胞悬浮培养液中加入等量(R)-烟碱和(S)-烟碱,发现前者比后者降解更迅速。王革等^[4]从烟叶上分离获得了 3 株降解烟碱和蛋白质能力较强的菌株。马林等^[5]已经成功将尼古丁脱氢酶基因(ndh)构建到 PET-17B 质粒载体中,并在大肠杆菌中实现高活性表达,该工程菌产酶能力是野生菌的 25 倍,这为开展工业化使用尼古丁脱氢酶降解尼古丁提供了可能。本文拟对节杆菌 Z3 粗酶液降解白肋烟烟碱条件进行优化,旨在提高白肋烟在卷烟叶组配方中的有效利用。

1 实验

1.1 材料与设备

节杆菌 Z3 菌株,郑州轻工业学院烟草工业生物技术重点实验室分离;白肋烟原料,黑龙江卷烟厂提供;CaCl₂·2H₂O, K₂HPO₄·3H₂O, (NH₄)₂SO₄, MnSO₄·H₂O, MgSO₄·7H₂O, KH₂PO₄ 等(AR),天津大茂化学试剂厂产;牛肉膏、琼脂粉、蛋白胨等(生化试剂),北京奥博星生物技术责任有限公司产;豆粉(食品级),完达山乳业股份有限公司产。

SW-CJ-1FD 净化工作台,苏州净化设备有限公司产;LDZX-30KBS 型立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂产;GL-22M 型高速冷冻离心机,赛特湘仪离心机仪器有限公司产;HZQ-F160 型全温振荡培养箱,太仓市实验设备厂产;JY92-2 型超声波细胞破碎机,宁波新芝科器研究所产;T6 新世纪型紫外可见分光光度计,北京普析仪器有限公司产;感量 0.000 1 g 分析天平,北京赛多利斯天平有限公司产;直径 1 cm 石英比色皿。

1.2 实验方法

1.2.1 培养基配制^[6] 活化培养基:牛肉膏 5 g,琼脂粉 20 g,蛋白胨 10 g, NaCl 5 g,用蒸馏水定容至 1 L, pH 值为 7.2~7.4, 0.1 MPa, 121 ℃ 灭菌 25 min。

斜面培养基:营养肉汤 18 g(牛肉膏 5 g,蛋白胨

10 g,氯化钠 5 g),琼脂粉 20 g,烟碱 2 mL,调节 pH=7.0, 121 ℃ 灭菌 20 min。

液体发酵培养基: K₂HPO₄·3H₂O 1.3 g, (NH₄)₂SO₄ 0.1 g, KH₂PO₄ 0.4 g, 酵母粉 0.1 g, 烟碱 0.4 g, 微量元素 1 mL(2 g MgSO₄·7H₂O, 0.4 g MnSO₄·H₂O, 0.2 g CaCl₂·2H₂O, 用 0.1 mol/L HCl 溶解并定容至 100 mL),用蒸馏水定容至 100 mL, 摇匀,调节 pH=7.0, 0.1 MPa, 121 ℃ 灭菌 25 min。

1.2.2 粗酶液提取 斜面培养基接入液体种子培养基活化后,将新鲜培养的种子液以 6% 的接种量接入发酵培养基中, 30 ℃, 220 r/min 振荡培养 9 h。培养结束后,发酵液于 4 ℃, 8 500 r/min 冷冻离心 18 min, pH=6.85 的磷酸盐缓冲液清洗 3 次,离心得菌体细胞沉淀, 4 ℃ 保存备用。

1 000 mL 上述所得细胞加 120 mL K₂HPO₄-KH₂PO₄ 缓冲液(50 mmol/L, pH=6.85)超声波破碎,超声波条件为功率 45%, 超声 5 s, 间歇 8 s, 总时间 120 s。在 4 ℃, 8 500 r/min 条件下冷冻离心 18 min, 上清液即为粗酶液。

1.2.3 烟末制备方法 在 80 ℃ 条件下对发酵过的烟丝进行烘烤除酶,将除酶后的烟丝粉碎,过 40 目筛,取筛网下部分。

1.2.4 白肋烟烟丝烟碱含量的测定 烟碱测定采用紫外分光光度法^[7]。

2 结果与讨论

2.1 不同粗酶液添加量对白肋烟烟碱降解的影响

粗酶液添加量(以烟丝质量计)分别为:30%, 40%, 50%, 60%, 70% 对白肋烟烟丝进行发酵,测量其烟碱降解率,结果如图 1 所示。

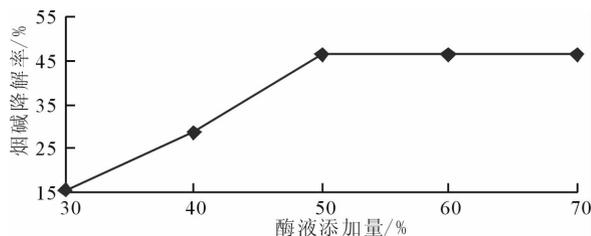


图 1 不同酶液添加量白肋烟烟碱的降解率

由图 1 可以看出,酶液添加量达到 50% 时,白肋烟烟碱降解率为 46.51%, 50% 以后基本稳定,烟碱降解率提高较少,出于成本考虑,取 50% 份为较优单因素酶液添加量。

2.2 不同发酵时间对白肋烟烟碱降解的影响

分别在3 h,6 h,9 h,12 h,18 h的发酵时间下对白肋烟烟丝进行发酵,测量其烟碱降解率,结果如图2所示。

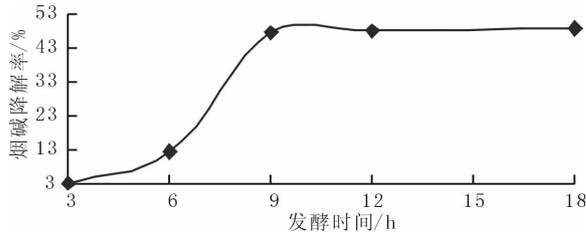


图2 不同发酵时间的白肋烟烟碱降解率

由图2可以看出,用节杆菌Z3对白肋烟进行发酵达到12 h时,烟碱降解率为48.30%,12 h以后烟碱降解得很少.从各方面考虑,发酵时间12 h为较优单因素发酵时间。

2.3 不同发酵温度对白肋烟烟碱降解的影响

分别在27℃,30℃,33℃,36℃,39℃条件下,对白肋烟烟丝进行发酵,测量其烟碱降解率,结果如图3所示。

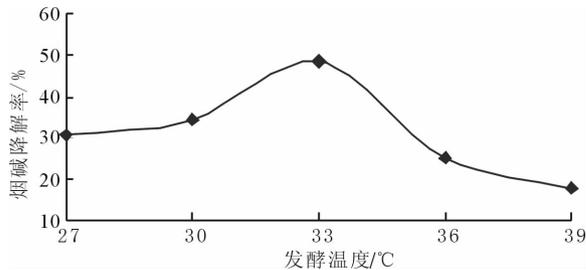


图3 不同发酵温度白肋烟烟碱的降解率

由3可以看出,33℃是最好的发酵温度,白肋烟烟碱降解率为48.62%,温度过低或过高都会导致烟碱脱氢酶失活,从而影响烟碱降解.因此33℃为较优单因素发酵温度。

2.4 烟丝水分对白肋烟烟碱降解的影响

分别在20%,30%,40%,50%,60%,70%的烟丝水分下,对白肋烟进行发酵处理,测量其烟碱降解率,结果如图4所示。

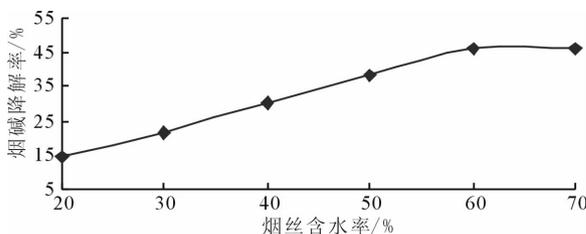


图4 烟丝不同水分条件下白肋烟烟碱的降解率

由图4可以看出,烟碱降解率随着烟丝含水率的增加而增加,造成这种现象的原因可能是,水分越大,烟碱脱氢酶越容易对烟碱发生作用:当烟丝含水率达到70%时,白肋烟烟碱降解率为46.1%;烟丝含水率达到70%以后,白肋烟烟碱降解率基本稳定.烟丝含水率过高会影响烟丝的质量,因此选烟丝含水率70%为较优单因素。

2.5 发酵条件各因素优化正交实验

根据不同酶液添加量(A)、不同发酵时间(B)、不同温度(C)和不同烟丝含水率(D)对白肋烟烟碱降解率的影响,进一步确定白肋烟烟碱降解率的最优条件.选用 $L_9(3^4)$ 正交设计方案对各因素的实施水平进行实验,结果见表1,正交实验方差分析见表2。

表1 *Arthrobacter* sp. 发酵条件优化正交实验结果

实验序号	A/%	B/h	C/℃	D/%	烟碱降解率/%
1	40	9	30	50	30.41
2	40	12	33	60	28.65
3	40	18	36	70	25.11
4	50	9	33	70	49.32
5	50	12	36	50	33.75
6	50	18	30	60	45.11
7	60	9	36	60	36.65
8	60	12	30	70	40.06
9	60	18	33	50	42.51
K_1	28.057	38.793	38.527	35.557	
K_2	42.393	34.153	39.827	36.470	
K_3	39.407	37.557	31.503	37.830	
R	14.336	4.640	8.324	2.273	
较优水平	A_2	B_1	C_2	D_3	

由表1和表2可知,各因素较优组合为 $A_2B_1C_2D_3$,此条件下降解率达49.32%,即酶液添加量为50%,发酵时间9 h,发酵温度33℃,烟丝含水率为70%.方差分析表明酶液添加量对烟碱降解率影响较大,达到显著水平。

表2 *Arthrobacter* sp. 发酵条件优化正交实验方差分析

方差来源	偏差平方和	自由度	F比
A	422.023	2	20.327*
B	20.762	2	1.000
C	99.468	2	4.791
D	20.718	2	0.998
误差	20.720	2	

2.6 对不同等级白肋烟进行发酵

按 2.5 优化条件对白肋烟鹤峰 B₃F, C₃F, 阿根廷 C₁, 恩施 C₂F 烟丝进行发酵处理, 测其烟碱降解情况, 结果见表 3.

表 3 优化发酵条件下不同品种白肋烟烟碱降解率

产地	等级	烟碱初始含量/%	烟碱降解率/%
湖北鹤峰	B ₃ F	4.2	47.36
湖北鹤峰	C ₃ F	3.1	48.03
阿根廷	C ₁	3.3	47.44
湖北恩施	C ₂ F	3.5	47.83

由表 3 可以看出, 白肋烟烟碱降解率最高达到 48.03%, 使白肋烟烟碱含量达到了烤烟水平, 说明烟碱脱氢酶对白肋烟的烟碱有良好的降解效果.

3 结论

以节杆菌 Z3 (*Arthrobacter* Z3) 为产酶菌株, 通过正交实验, 对烟碱脱氢酶降解白肋烟烟碱条件进行研究, 应用烟碱脱氢酶降解白肋烟烟碱的最佳条件为: 酶液添加量为 50%, 发酵温度 33 ℃, 发酵时间为 9 h, 烟丝含水率 70%, 烟碱降解率高达 49.32%. 本实验表明, 烟碱脱氢酶对白肋烟烟碱的降解效果明显, 改变了白肋烟烟碱含量高、劲头大、

难以在中式卷烟中应用在的特点, 为白肋烟在中式卷烟中更好地应用提供了参考.

参考文献:

- [1] Gutierrez R. Nicotine degradation by bacteria *Enterobacter cloacae* as nicotine Degradation (Spain) [J]. *Anales de Instituto Nacional Investigaciones Agrarias Serie Agricola*, 1983, 22:85.
- [2] Tashiro A, Yuji K, Yonemura C, et al. Pure isolation of nicotine-degradin microbes [J]. *Kyushu Kyoritsu Daigaku Kenkyu Hokoku Kogakubu*, 1996, 20:147.
- [3] Mesnard F, Girard S, Fliniaux O, et al. Chiral specificity of the degradation of nicotine by *Nicotiana glauca* cell suspension cultures [J]. *Plant Science*, 2001, 161:1011.
- [4] 王革, 王颖琦, 李松, 等. 微生物发酵烟叶降解尼古丁、蛋白质 [J]. *烟草科学研究*, 2001 (2):66.
- [5] 马林, 曾晓鹰, 张峻松, 等. 烟碱脱氢酶基因的原核表达及酶学特性研究 [J]. *中国烟草学报*, 2007, 13 (4):60.
- [6] 马林, 张峻松, 张文龙, 等. 产烟碱脱氢酶菌株节杆菌 Z3 的发酵条件研究 [J]. *烟草科技*, 2007, 51 (10):60.
- [7] 闫克玉. *烟草化学* [M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2002:114.

叶片结构与叶丝结构关系模型研究

余娜¹, 夏艺丰¹, 朱文魁², 罗登炎³, 李华杰³, 洪伟龄³

(1. 上海烟草集团有限责任公司 上海卷烟厂, 上海 200082;

2. 中国烟草总公司 郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001;

3. 福建中烟工业公司 技术中心, 福建 厦门 361004)

摘要:采用 PYMJY 叶面积仪测量烟叶叶片面积, 根据叶片结构对叶丝结构的影响规律, 建立了叶片结构与叶丝结构关系模型. 结果表明: 该模型能较好地预测不同结构叶片切后叶丝尺寸分布, 预测自然状态和掺配叶片切后叶丝尺寸分布的计算值与实测值相关系数分别为 0.995 0 和 0.998 1; 利用该模型可为优化打叶过程片烟尺寸分布、提升打叶复烤环节原料保障水平提供有效途径.

关键词: 叶片结构; 叶丝结构; 关系模型

中图分类号: TS452 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.006

Study on the model of relation of tobacco lamina structure and cut tobacco structure

YU Na¹, XIA Yi-feng¹, ZHU Wen-kui², LUO Deng-yan³, LI Hua-jie³, HONG Wei-ling³

(1. Shanghai Cigarette Factory, Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

2. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China;

3. Technology Center of China Tobacco Fujian Industrial Corporation, Xiamen 361004, China)

Abstract: Based on equality in area before and after tobacco cutting, using PYMJY platometer to measure tobacco lamina area and according to the law of cut tobacco structure influenced by tobacco lamina structure, the model of relation between tobacco lamina with cut tobacco structure was set up. The results showed: The model could predict preferably cut tobacco distribution from different tobacco lamina, the correlation coefficient of predicted and measured value was respectively 0.995 0 from natural tobacco lamina and 0.998 1 from mixed tobacco lamina. The model could support method conducting on optimizing cut lamina structure in threshing re-drying product.

Key words: tobacco lamina structure; cut tobacco structure; model of relation

0 引言

打叶复烤是将烟叶的叶、梗进行分离和复烤而

得到一定尺寸分布的片烟原料的工艺. 烟丝结构是影响卷烟物理指标的主要因素, 而烟丝结构与成丝前来料片烟结构密切相关, 因此从打叶复烤环节优

收稿日期: 2013-03-01

基金项目: 国家烟草专卖局标准项目(国烟科[2010]165号)

作者简介: 余娜(1986—), 女, 四川省内江市人, 上海卷烟厂助理工程师, 硕士, 主要研究方向为烟草工艺.

通信作者: 朱文魁(1979—), 男, 河南省永城市人, 郑州烟草研究院工程师, 博士, 主要研究方向为烟草工艺技术.

化输出的原料片烟结构,是提升原料保障水平的有效途径之一.明确叶片结构与叶丝结构的关系,是打后片烟结构优化的关键.近年来,国内外学者对叶片结构与叶丝结构的关系开展了大量研究.W. Jakob Stephen^[1]发现,3目以上的叶丝主要来源于9.525 mm之上的叶片.Monty White^[2]发现增加6.35 mm以下叶片的比例会导致1.3 mm以下烟丝比例的增加.袁行思^[3]发现,当叶片尺寸在5 mm见方以下时,随着尺寸的缩小,产生1.5 mm以下短丝的比例增长极快,当叶片尺寸在10~5 mm见方范围时,增长速度有所减缓,大于15 mm见方以后更加趋于平缓,特别是0.8 mm以下的短丝变化极小.目前,文献所报道关于叶片结构与叶丝结构的关系多为定性研究.本文拟通过实验,在一定切丝条件下,采用图像分析法测量片烟面积,研究单等级片烟结构对叶丝结构的影响规律,建立叶片结构与叶丝结构的关系模型,以期打叶复烤优化叶片结构进而获得良好的卷烟物理指标提供依据.

1 实验

1.1 材料与仪器

2009年龙岩C2F片烟,2009年楚雄C3F片烟.

PYMJY叶面积仪(标偏5.06%),昆明船舶设备集团有限公司产;Retsch AS400筛分仪,德国Retsch公司产,筛网孔径为5.60 mm,4.75 mm,4.00 mm,3.35 mm,2.80 mm,2.00 mm,1.40 mm和0.70 mm,筛分条件^[4]为处理量100 g,转速230 r/min,时间4 min;PL3001—S型电子天平(感量0.01 g),瑞士Mettler公司产;RH460/GD—710—D恒温恒湿箱,澳大利亚PTY公司产;LC—233烘箱,Espec环境仪器(上海)有限公司产;QS—II微型切丝机,郑州天宏自动化技术有限公司产.

1.2 方法

在生产线上取松散回潮后龙岩C2F片烟4 kg,置于恒温恒湿室($RH = 65\%$, $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$)平衡48 h,待含水率达14%并稳定后用PYMJY叶面积仪测量每片叶片面积,将叶片按面积区间500~1 000 mm²,1 000~1 500 mm²,1 500~2 000 mm²,2 000~2 500 mm²,2 500~3 000 mm²进行分组,待每个面积区间叶片质量均达到400 g后,每个区间用四分法得到100 g样品,共5个样品,对5个样品分别测量面积后在微型切丝机上进行切丝,切后叶丝置于

恒温恒湿箱($RH = 60\%$, $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)48 h,待含水率达12%并稳定后,进行筛分.

将楚雄C3F片烟400 kg在实验线松散回潮,其中100 kg作为自然状态叶片,用质量控制振动筛对其余300 kg叶片进行筛分,筛分成>25.4 mm的叶片80 kg和<25.4 mm的叶片220 kg 2部分,将<25.4 mm和>25.4 mm叶片分别按1:1和7:3进行掺配,将<25.4 mm叶片、1:1掺配叶片、7:3掺配叶片、自然状态叶片各100 kg分别在实验线上切丝,每次取片烟400 g为1个样品,共3个样品,切后叶丝100 g为1个样品,共3个样品.

2 叶片结构与叶丝结构模型推导

以某特定结构的叶丝为例,将该叶丝按尺寸从小到大排列,叶丝频数与其尺寸的对应关系见图1.

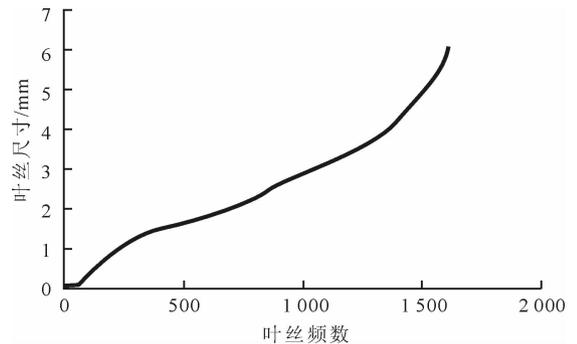


图1 叶丝频数与尺寸关系

由图1可知,叶丝频数与其尺寸的关系曲线近似为幂函数形式,若假定叶丝频数满足

$$r_i = ai^{\frac{1}{m}}$$

式中, i 为频数; r_i 为叶丝对应尺寸; a, m 为常数.采用多批叶丝样品进行检验,结果也表明叶丝频数与尺寸关系可用上述幂函数表示.

对叶丝尺寸进行积分,乘以叶丝宽度(切丝宽度一定),则可得到叶片累积面积

$$S = \frac{ml}{a^m(1+m)} r_i^{1+m}$$

式中, S 为叶丝尺寸为 r_i 的来料叶片累积面积, l 为叶丝宽度.当 r_i 为叶丝最大尺寸时,则来料叶片总面积

$$S_r = \frac{ml}{a^m(1+m)} r_{\max}^{1+m}$$

其中, r_{\max} 为叶丝最大尺寸.

对于单等级片烟,片烟密度 ρ 与厚度 h 视为常量,则叶丝某一尺寸 r_i 下的累积质量百分比为

$$y = \frac{M}{M_T} = \frac{S\rho h}{S_T\rho h} = \left(\frac{r_i}{r_{\max}}\right)^{1+m}$$

化为对数形式,有

$$\lg y = n \lg r_i - n \lg r_{\max} \quad (1)$$

其中, n, r_{\max} 可定义为叶丝结构特性参数.

B. Mandelbrot 等^[5] 根据分形理论指出,多分散破碎颗粒系统的粒度分布如果是分形的,则应满足

$$N(>x) = Cx^{-D}$$

式中, D 为分维数, N 代表颗粒等效直径 $> x$ 的个数, x 为某一确定的等效直径, C 为比例常数.

那么,颗粒密度函数为

$$n(x) = \lim_{\delta x \rightarrow 0} - \frac{\Delta N(>x)}{\Delta x} = - \frac{dN(>x)}{dx}$$

其中, $n(x)$ 是粒度在 x 到 $x + dx$ 区间的颗粒数.

假定打后烟叶的片烟某一确定的等效直径为 x , 面积形状系数为 C_s , 则等效直径 $> x$ 的累积面积为

$$F(>x) = \int_r^{R_{\max}} C_s x^2 n(x) dx = C_s C \frac{D}{2-D} (X_{\max}^{2-D} - x^{2-D})$$

式中, X_{\max} 为最大尺寸.

片烟累积总面积为

$$F_T = C_s C \frac{D}{2-D} X_{\max}^{2-D}$$

等效直径小于尺寸 x 的累积面积百分比

$$f = \frac{F(<x)}{F_T} = \left(\frac{x}{X_{\max}}\right)^{2-D} = \left(\frac{s_i}{s_{\max}}\right)^{\frac{2-D}{2}} \quad (2)$$

将式(2)用对数形式表示为

$$\lg f = v \lg s_i - v \lg s_{\max} \quad (3)$$

式中, $F(<x)$ 为小于面积 x 的累积面积; s_i 为等效直径 x 所对应的片烟面积; f 为片烟面积小于 s_i 的累积百分比; s_{\max} 为片烟最大面积; v, s_{\max} 可定义为

片烟结构特性参数.

由于片烟形态的不规则,且成丝过程存在造碎及折叠、跑片等诸多因素影响,难以直接从几何学角度进一步推导出片烟结构与成丝后叶丝结构的关系,因此,本文拟通过关联叶丝、片烟结构特性参数 n, r_{\max}, v, s_{\max} 建立片烟结构与成丝后叶丝结构的相关关系.

3 结果与讨论

3.1 叶片结构与叶丝结构关系模型建立

C2F 的 5 个区间叶片结构分别在微型切丝机切丝,叶丝测试结果见表 1.

将各面积区间叶片测试结果带入方程(3)求出 v, s_{\max} , 根据式(1)可求出对应叶丝结构特性参数 n, r_{\max} , 结果见表 2. 对表 2 的数据进行分析,结果如图 2 所示.

从图 2 中可发现,通过对 C2F 叶片切丝数据进行拟合,满足以下关系

$$r_{\max} = a_1 s_{\max}^{b_1} \quad (4)$$

$$n = a_2 (s_{\max} v)^{b_2} \quad (5)$$

式中, a_1, a_2, b_1, b_2 为反映片烟与叶丝结构特性参数关系的公共参量,在特性片烟原料及特定切丝条件下,其为定值.

$$\begin{cases} \lg y = n \lg r_i - n \lg r_{\max} \\ \lg f = v \lg s_i - v \lg s_{\max} \\ r_{\max} = a_1 s_{\max}^{b_1} \\ n = a_2 (s_{\max} v)^{b_2} \end{cases}$$

对特定片烟原料,通过测定该原料 2 个面积区间片烟(由于试验条件和设备的限制,上述 2 个区间定为 > 25.4 mm 和 < 25.4 mm)的 s_{\max}, v 及 2 个区间切丝后叶丝的 r_{\max}, n , 由式(4)(5)可确定公共参数

表 1 各面积区间片烟切后叶丝筛下累积质量百分比

%

筛网孔径/mm	500 ~ 1 000 mm ²	500 ~ 1 500 mm ²	500 ~ 2 000 mm ²	500 ~ 2 500 mm ²	500 ~ 3 000 mm ²
5.60	95.07	91.54	88.51	84.63	80.65
4.75	90.48	84.21	77.11	72.96	69.19
4.00	74.79	67.16	60.04	56.17	52.57
3.35	71.58	63.76	57.00	53.03	49.46
2.80	64.11	56.52	50.40	46.71	43.33
2.00	44.83	38.60	34.15	31.23	28.76
1.40	20.27	17.55	15.65	14.28	13.02
0.70	2.36	1.92	1.85	1.73	1.51

表2 C2F 不同面积区间切丝特性参数

面积区间 /mm ²	v	S_{\max} /mm ²	R^2	n	R_{\max} /mm	R^2
500 ~ 1 000	2.956 8	965.79	0.926 2	0.73	6.00	1
500 ~ 1 500	2.471 3	1 350.01	0.991 9	0.84	6.22	1
500 ~ 2 000	1.946 9	1 882.54	0.994 5	0.92	6.39	1
500 ~ 2 500	1.813 8	2 307.89	0.996 5	0.97	6.65	1
500 ~ 3 000	1.708 8	2 847.55	0.998 2	1.00	6.94	1

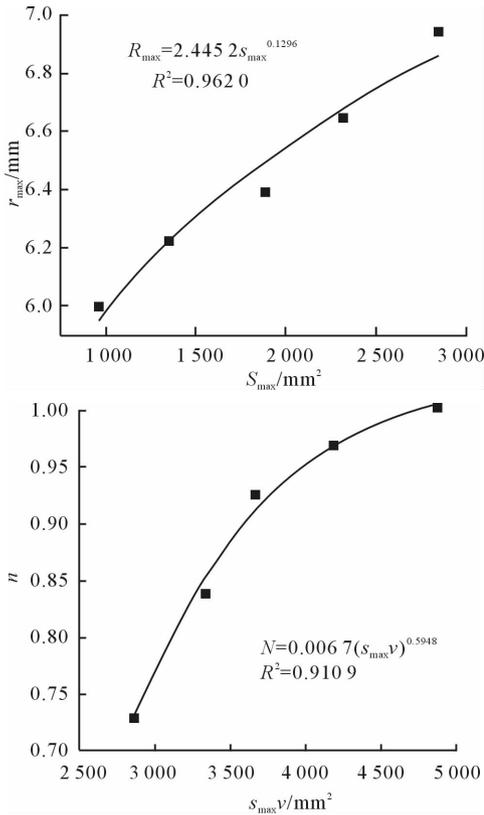


图2 C2F 各面积区间叶片切丝特性参数之间关系

a_1, a_2, b_1, b_2 ; 对该原料其他任意区间片烟, 可以根据其片烟结构特征参数, 求取叶丝结构特征参数, 进而确定其尺寸分布。

3.2 模型验证

楚雄 C3F 片烟自然状态叶片结构测量结果如图 3 所示. 1:1 掺配叶片是指由叶片结构 < 25.4 mm 与 > 25.4 mm 的叶片组成, 其比例为 1:1. 其中 7:3 掺配叶片指由叶片结构 < 25.4 mm 与 > 25.4 mm 的叶片组成, 其比例为 7:3. 不同叶片结构切丝后测试结果见表 3.

将 < 25.4 mm, 1:1 掺配叶片求解得相关参数, 将 7:3 掺配叶片与自然状态叶片作为验证样品. < 25.4 mm, 1:1 掺配叶片样品的测试数据带入相关方程式, 求出 C3F 切丝特性参数(见表 4).

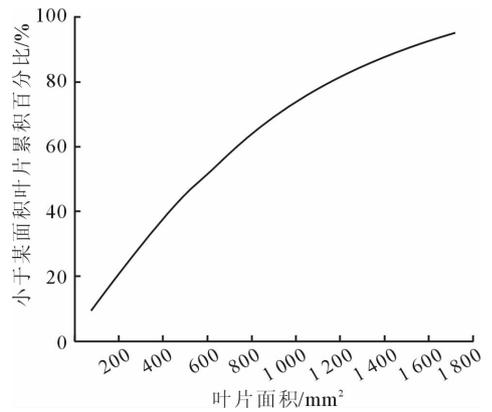


图3 C3F 叶片面积分布

表3 不同叶片结构切后叶丝筛下

筛网孔径/mm	累积质量百分比			自然状态叶片 %
	< 25.4 mm	1:1 掺配叶片	7:3 掺配叶片	
5.60	90.97	79.63	89.16	77.08
4.75	84.91	71.54	82.69	68.49
4.00	74.55	60.34	73.29	57.93
3.35	65.67	51.58	63.89	48.41
2.80	56.46	43.79	53.23	40.10
2.00	37.95	28.29	35.72	25.80
1.40	16.87	12.23	15.11	10.98
0.70	1.73	1.37	1.51	1.36

表4 C3F 不同面积区间对应叶丝特性参数

不同结构片烟	v	s_{\max}	R^2	n	r_{\max}	R^2
< 25.4 mm	0.843 8	901.25	0.972 4	0.647 6	6.33	0.986 9
1:1 掺配片烟	0.827 6	1 600.31	0.961 2	0.820 2	7.31	0.991 8

由自然状态叶片、7:3 掺配叶片可求出对应叶丝尺寸分布, 将计算值与实测值进行比较, 结果如图 4 所示. 从图中可看到, 用模型求出的自然状态叶片和掺配叶片切后叶丝尺寸分布计算值与实测值吻合程度较好, 相关系数分别为 0.995 0 和 0.998 1, 表明模型能较好地预测不同结构叶片切后叶丝尺寸分布。

4 实例分析

利用该模型, 可解析得各范围尺寸片烟成丝后叶丝尺寸分布. 以 C3F 1:1 掺配叶片原料为例, 根据所测叶片面积, 将叶片按质量比划分为 5 个区间, 计算分析 5 个不同面积区间片烟切后叶丝筛下累积质量分布, 结果见表 5.

由模型计算得到的累积分布, 进一步分析了每

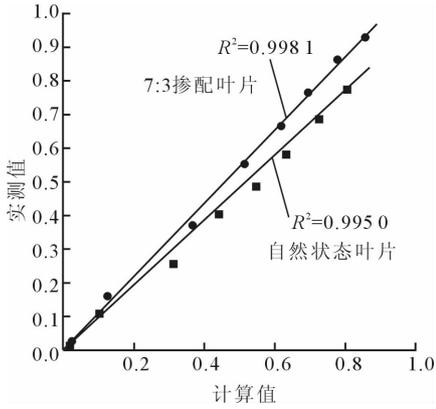


图4 C3F自然状态叶片、7:3掺配叶片切后叶丝尺寸分布计算值与实测值比较

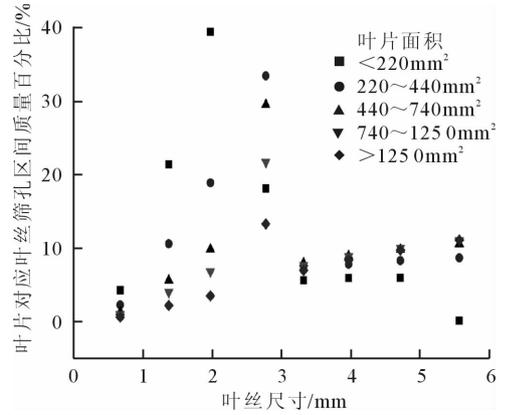


图5 叶丝尺寸分布与叶片面积的关系

一面积区间叶片切后叶丝的分布情况,结果如图5所示.从图5可见叶片结构对叶丝结构的影响规律.叶丝结构分布在2.00~4.75mm有利于获得理想的卷烟物理指标及稳定性^[6],由表5及图5可知,可适当增加220~740mm²的叶片比例以获得在此尺寸范围较大的叶丝比例;<1.4mm的叶丝比例越大,端部落丝量和空头率也越大^[7],因此,可适当减少<220mm²的叶片比例.

表5 1:1掺配叶片各部分所对应切后叶丝累积质量百分比 %

筛网孔径 /mm	< 220 /mm ²	220 ~ 440 /mm ²	440 ~ 740 /mm ²	740 ~ 1 250 /mm ²	> 1250 /mm ²
5.60	100.00	96.24	82.69	70.11	54.80
4.75	100.00	87.70	72.22	59.17	43.82
4.00	94.16	79.53	62.52	49.29	34.21
3.35	88.35	71.84	53.68	40.54	25.97
2.80	82.84	64.77	45.83	32.98	19.12
2.00	64.81	31.41	16.40	11.39	5.93
1.40	25.46	12.61	6.66	4.72	2.55
0.70	4.14	2.14	1.16	0.85	0.49

通过对叶片面积的测量,利用叶片结构与叶丝结构关系模型预测叶片对应叶丝的尺寸分布,可为制定在线叶片结构检测标准提供依据.监测叶片结构的波动情况,对保证成丝到卷包过程中叶丝结构所涉及物理指标合格具有重要意义,可根据一定尺寸范围的叶丝含量选择增减相应大小叶片比例,为打叶复烤优化叶片结构提供依据.

5 结论

本文采用PYMJY叶面积仪测量烟叶叶片面积,根据叶片结构对叶丝结构的影响规律,建立了叶片结构与叶丝结构关系模型.该模型能较好预测不同结构叶片切后叶丝尺寸分布,预测自然状态和掺配叶片切后叶丝尺寸分布计算值与实测值相关系数分别为0.9950和0.9981.该模型可得到完整叶片各部分所产生的叶丝尺寸分布,从而建立了叶片结构与叶丝结构的定量关系,为打叶复烤上优化叶片结构以获得良好的卷烟物理指标提供依据.

参考文献:

- [1] Jakob Stephen W. Strip cut filler optimization program [EB/OL]. (2002-02-01) [2013-02-05]. <http://legacy.library.ucsf.edu/tid/lww69a00>.
- [2] Monty White. Translation of uncut to cut particle size [EB/OL]. (2002-02-01) [2013-02-05]. <http://legacy.library.ucsf.edu/tid/cac14d00>.
- [3] 袁行思.关于卷烟生产原料消耗问题的解析[J].烟草科技,1991(2):7.
- [4] 申晓锋,李华杰,李善莲,等.烟丝结构表征方法研究[J].中国烟草学报,2010,16(2):20.
- [5] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. New York:W H Freeman and Company,1982.
- [6] 堵劲松,申晓锋,李跃锋,等.烟丝结构对卷烟物理指标的影响[J].烟草科技,2008(8):8.
- [7] 李善莲,申晓锋,李华杰,等.烟丝结构对卷烟端部落丝量的影响[J].烟草科技,2010(2):5.

烤烟非挥发酸与其感官质量的相关性分析

陈志燕^{1,2}, 李小兰², 王政¹, 周晓², 曾德芬², 郭春生¹, 张峻松¹

(1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 广西中烟有限责任公司 技术中心, 广西 南宁 530001)

摘要:采集不同烟区的72份烟叶样本,对其非挥发酸含量进行测定,通过简单相关性分析、灰色关联度分析和典型相关分析3种方法研究烤烟不同非挥发酸含量对评吸质量的影响.结果表明:随着脂肪酸含量增加,香气量、透发性、柔细度、甜度会显著提高,而杂气、刺激性和余味会显著降低;二元酸、草酸、苹果酸、柠檬酸和总非挥发酸含量与感官质量成一定的负相关;烟叶中各非挥发酸含量对香气质、劲头、浓度、香气量、透发性的4项评吸指标影响最大;烟草不饱和脂肪酸、苹果酸、柠檬酸、总非挥发酸含量与香气量、浓度、劲头关系密切,随着不饱和脂肪酸含量的增加和柠檬酸含量的减少,烟叶香气量和浓度明显增加.

关键词:非挥发酸;烤烟感官质量评价;灰色关联度分析;典型相关分析

中图分类号:TS41⁺¹ **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.007

Correlation analysis between non-volatile acids with sensory quality in flue-cured tobacco leaf

CHEN Zhi-yan^{1,2}, LI Xiao-lan², WANG Zheng¹, ZHOU Xiao²,
ZENG De-fen², GUO Chun-sheng¹, ZHANG Jun-song¹

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

2. Technology Center, China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd., Nanning 530001, China)

Abstract: The non-volatile acids and sensory quality were determined using 72 tobacco samples of different tobacco-growing areas, the effect of different non-volatile acid content on the smoking quality was studied through the methods of correlation analysis, gray correlation analysis and canonical correlation analysis. The results showed that with the increase of fatty acid content, the aroma quantity, sending sexual, tender degrees, sweetness would significantly increase, and the mixed gas, stimulation and aftertaste would be significantly reduced; Dicarboxylic acid, oxalic acid, malic acid, citric acid, and total non-volatile acid overall formed certain negative correlation with sensory quality; Non-volatile acids had strong influence on tobacco aroma quality, strength, concentration and aroma; There were close relationship among unsaturated fatty acid, malic acid, citric acid, total volatile acid content and aroma quantity, concentration, strength. Aroma quantity and concentration significantly increased when the unsaturated fatty acids significantly increased and citric acid decreased significantly.

Key words: non-volatile acid; flue-cured tobacco sensory quality evaluation; grey correlation analysis; ca-

收稿日期:2013-05-11

作者简介:陈志燕(1970—),女,广西省容县人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为烟草化学.

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

nonical correlation analysis

0 引言

烟叶化学成分是决定烟叶质量的内在因素. 烟叶化学成分与烟叶质量关系的研究一直是烟草化学家关注的主题. 非挥发性有机酸是烟草及卷烟制品内在成分的重要组成部分, 约占烟草干重的10%~12%^[1]. 烟草中的非挥发性酸不但可中和烟气, 减少刺激性, 而且可显著增强吸味, 其种类和含量直接影响着卷烟的吸味品质^[2-3].

国外对烟草中的非挥发酸研究较早, A. P. Swain等^[4]采用正己烷萃取、甲酯化和气相色谱法定量分析了晒烟中的肉豆蔻酸、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸. A. William等^[5]利用硫酸-甲醇甲酯化, 以气相色谱进行检测, 分析了草酸、丙二酸、反丁烯二酸、琥珀酸、苹果酸、柠檬酸6种非挥发酸. 国内对烟草中的有机酸分析研究起步较晚, 刘百战等^[1]将云南烤烟样品直接甲酯衍生化后用气相色谱对高级脂肪酸和多元酸进行分析. 但烤烟非挥发酸与评吸质量关系的研究未见相关报道. 本文选取不同烟区和不同等级的72份烤烟烟叶进行不同非挥发酸含量的测定和感官质量评价, 通过相关性分析、灰色关联度分析和典型相关分析考察烤烟不同非挥发酸含量和评吸质量的相互关系, 旨在为不同非挥发性酸在卷烟配方中的应用提供依据, 减少加香加料的盲目性, 进一步稳定和提升卷烟产品品质.

1 实验

1.1 材料和设备

从云南、广西、湖南、重庆和贵州等烟区收集2011年产烟叶样品72个; 硫酸、甲醇、二氯甲烷(AR), 天津市科密欧化学试剂有限公司产; 己二酸(>99%), FLUKA公司产; 草酸、丙二酸、丁二酸、月桂酸、十三碳酸、苹果酸、十五酸、棕榈酸、柠檬酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸(>97%), ACROS公司产.

Agilent 6890型气相色谱仪, 安捷伦科技有限公司产; PL203型电子天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司产; DHG-9145A型电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司产; HS-4型水浴锅, 上海医疗器械五厂产.

1.2 非挥发酸测定方法^[2]

用电子天平准确称取1.0000g烟末样品, 置于100 mL平底烧瓶内, 再准确加入40 mL 10% 硫酸/甲醇溶液, 加入1 mL 己二酸内标溶液, 烧瓶上接冷凝管, 80℃水浴回流2 h后, 冷却至室温. 取回流液体10 mL于100 mL分液漏斗中, 加入20 mL饱和食盐水混匀, 每次用10 mL二氯甲烷萃取, 萃取3次合并萃取液, 加入3.5 g无水硫酸钠干燥过夜. 取适量萃取液于色谱小瓶中, 再将色谱瓶放置于Agilent 6890气相色谱仪的自动进样器中进行气相色谱分析, 然后采用内标法和工作曲线对有机酸性成分进行定量分析.

1.3 感官评吸方法

将单料烟(烟叶样品切丝、卷制成烟支)和卷烟放入温度(22±1)℃, 相对湿度(60±2)%的恒温恒湿箱内平衡48 h后, 由广西中烟有限责任公司技术中心组织相关专家按国标要求进行感官评价^[6]. 评价指标包括香气量、浓度、劲头、柔细度、透发性、刺激性、余味、干燥度和甜度.

1.4 统计分析方法

采用SPSS17.0统计软件进行简单相关性分析. 采用DPS7.05统计软件进行典型相关分析和灰色关联度分析.

2 结果与讨论

2.1 非挥发酸含量与感官质量的简单相关性分析

非挥发酸含量与感官质量的简单相关分析结果见表1. 由表1可知, 饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸除了对香气质和劲头作用不大外, 对其他各指标都有显著性改善, 随着饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸含量增加, 香气量、透发性、柔细度和甜度显著提高, 而杂气、刺激性和余味显著降低; 二元酸和草酸含量增加会使评价总分、香气量、透发性、柔细度和甜度降低, 同时增加杂气、刺激性和余味; 苹果酸和柠檬酸含量与香气量、透发性、浓度、劲头和评吸总分的得分显著负相关, 并且苹果酸与香气质也显著负相关; 总非挥发酸整体上与各感官指标均呈一定的负相关, 由相关系数可知, 总非挥发酸对香气量、浓度和劲头的影响较大.

2.2 非挥发酸含量与评吸质量的灰色关联分析

非挥发酸含量与感官品质灰色关联矩阵见表2.

表1 烟叶非挥发酸含量与评吸质量评价指标的简单相关系数

非挥发酸	香气质	香气量	杂气	刺激性	透发性	柔细度	甜度	余味	浓度	劲头	评吸总分
饱和脂肪酸	0.23	0.56**	-0.68**	-0.59**	0.66**	0.66**	0.68**	-0.68**	0.34*	0.03	0.67**
不饱和脂肪酸	0.07	0.44**	-0.49**	-0.41*	0.50**	0.48**	0.47**	-0.46**	0.34*	0.11	0.49**
二元酸	-0.22	-0.28*	0.37**	0.41**	-0.38**	-0.44**	-0.39**	0.45**	-0.12	0.13	-0.37**
草酸	-0.21	-0.29*	0.30**	0.34**	-0.33**	-0.29*	-0.29*	0.30**	-0.16	0.03	-0.30**
苹果酸	-0.27*	-0.38**	0.23	0.19	-0.31**	-0.17	-0.14	0.20	-0.58**	-0.61**	-0.31**
柠檬酸	-0.18	-0.31**	0.17	0.14	-0.28*	-0.16	-0.10	0.18	-0.48**	-0.44**	-0.25*
总非挥发酸	-0.28*	-0.40**	0.26*	0.22	-0.34**	-0.21	-0.18	0.24*	-0.57**	-0.57**	-0.34**

注:*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$.

表2 非挥发酸含量与感官品质灰色关联矩阵

非挥发酸	香气质	香气量	杂气	刺激性	透发性	柔细度	甜度	余味	浓度	劲头	评吸总分
饱和脂肪酸	0.782 3	0.735 3	0.719 8	0.688 5	0.736 0	0.696 1	0.683 2	0.694 8	0.740 2	0.764 5	0.725 7
不饱和脂肪酸	0.769 4	0.724 8	0.713 8	0.684 6	0.732 4	0.688 3	0.672 5	0.677 3	0.745 4	0.792 6	0.716 8
二元酸	0.784 7	0.679 7	0.656 4	0.630 0	0.671 5	0.637 3	0.645 9	0.626 1	0.711 1	0.783 5	0.668 4
草酸	0.784 8	0.678 5	0.661 4	0.630 4	0.673 4	0.641 5	0.649 1	0.639 8	0.706 0	0.759 6	0.670 6
苹果酸	0.795 6	0.716 4	0.708 4	0.700 5	0.717 2	0.703 9	0.703 9	0.693 4	0.702 5	0.727 8	0.708 9
柠檬酸	0.782 3	0.695 6	0.697 8	0.678 8	0.689 3	0.676 5	0.677 5	0.667 8	0.712 1	0.745 3	0.697 3
总非挥发酸	0.796 9	0.710 5	0.702 3	0.688 8	0.705 5	0.692 0	0.694 3	0.683 6	0.703 8	0.735 8	0.701 7

从表2可以看出,饱和脂肪酸与评吸质量评价指标关联度最大的4项依次为香气质、劲头、浓度、透发性;不饱和脂肪酸与评吸质量评价指标关联度最大的4项依次为劲头、香气质、浓度、透发性;二元酸和草酸与评吸质量评价指标关联度最大的4项依次为香气质、劲头、浓度、香气量;苹果酸与评吸质量评价指标关联度最大的4项依次为香气质、劲头、透发性、香气量;柠檬酸与评吸质量评价指标关联度最大的4项依次为香气质、劲头、浓度、杂气;总非挥发酸与评吸质量评价指标关联度最大的4项依次为香气质、劲头、香气量、透发性。以上分析表明,烟叶中非挥发酸含量对评吸质量评价指标中香气质、劲头、浓度、香气量、透发性的影响最大。

2.3 非挥发酸含量与评吸质量的典型相关分析

将饱和脂肪酸(X_1)、不饱和脂肪酸(X_2)、二元酸(X_3)、草酸(X_4)、苹果酸(X_5)、柠檬酸(X_6)和总非挥发酸(X_7)作为第1组变量,将香气质(Y_1)、香气量(Y_2)、杂气(Y_3)、刺激性(Y_4)、透发性(Y_5)、柔细度(Y_6)、甜度(Y_7)、余味(Y_8)、浓度(Y_9)、劲头(Y_{10})和评吸总分(Y_{11})作为第2组变量进行典型相关分析,共得到7组典型变量,典型相关系数显著性检验见表3。由表3知,第1组典型相关系数达到显著水平。非挥发酸含量与评吸质量的典型变量关系见表4。非挥发酸含量与评吸质量的观察值与典型变量的相关系数见表5。观察值的变动能由典型变

量解释的比例见表6。

由表3可知,非挥发酸含量与感官评吸指标的第1组典型相关,典型变量的线性组合主要反映了烟草饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸、二元酸、草酸、苹果酸、柠檬酸、总非挥发酸和香气质、香气量、杂气、刺激性、透发性、柔细度、甜度、余味、浓度、劲头、评吸总分的相关关系,典型变量 U_1, V_1 的典型相关系数为 0.863 8,可知 U_1, V_1 为高度的正相关。由表4知,典型变量(U_1, V_1)的组成是

$$\begin{aligned}
 U_1 &= -0.364 7 X_1 - 1.885 1 X_2 - 2.042 2 X_3 - \\
 &\quad 10.173 3 X_4 - 73.083 8 X_5 - \\
 &\quad 14.609 4 X_6 + 88.995 6 X_7 \\
 V_1 &= -0.450 5 Y_1 - 0.122 6 Y_2 - 0.369 1 Y_3 - \\
 &\quad 0.031 2 Y_4 + 0.706 7 Y_5 - 0.210 8 Y_6 + \\
 &\quad 1.321 1 Y_7 - 0.698 4 Y_8 - 0.664 0 Y_9 - \\
 &\quad 0.614 7 Y_{10} + 0.047 1 Y_{11}
 \end{aligned}$$

表3 非挥发酸含量与评吸质量的典型相关系数显著性检验

编号	相关系数	Wilk's	卡方值	dF	P值
1	0.863 8	0.078 1	156.841 8	77	0.000 1
2	0.655 7	0.307 6	72.512 9	60	0.129 0
3	0.459 3	0.539 5	37.949 5	45	0.762 6
4	0.407 1	0.683 8	23.377 4	32	0.866 1
5	0.328 2	0.819 6	12.233 9	21	0.933 1
6	0.221 5	0.918 6	5.224 5	12	0.950 1
7	0.184 5	0.965 9	2.131 0	5	0.830 7

表4 非挥发酸含量与评吸质量的典型变量

组1	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7				
U_1	-0.364 7	-1.885 1	-2.042 2	-10.173 3	-73.083 8	-14.609 4	88.995 6				
组2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}
V_1	-0.450 5	-0.122 6	-0.369 1	-0.031 2	0.706 7	-0.210 8	1.321 1	-0.698 4	-0.664 0	-0.614 7	0.047 1

表5 非挥发酸含量与评吸质量的观察值与典型变量的相关系数

组1	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7				
U_2	-0.147 5	-0.355 9	-0.138 0	-0.021 7	0.891 2	0.681 0	0.841 0				
组2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}
V_2	-0.190 9	-0.316 5	-0.100 3	-0.029 1	-0.187 3	0.006 7	0.011 5	-0.019 2	-0.660 6	-0.831 4	-0.202 1

表6 观察值的变动能由典型变量解释的比例

组1	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	总值				
U_3	0.021 8	0.126 7	0.019 0	0.000 5	0.794 2	0.463 7	0.707 3	0.304 7				
组2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	总值
V_3	0.036 4	0.100 1	0.010 1	0.000 8	0.035 1	0.000 0	0.000 1	0.000 4	0.436 4	0.691 3	0.040 9	0.122 9

由表5可知,由 U_2 和观察值 X_i 相关系数 r_{ui} 可知,它与二元酸中度负相关,与苹果酸、总非挥发酸高度正相关,与柠檬酸中度正相关,饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸和草酸的相关系数 r_{ui} 的绝对值 <0.3 ,与 U_2 的相关性极弱,所以 U_2 代表了烟草中二元酸、苹果酸、柠檬酸、总非挥发酸含量的综合水平。 V_2 与香气量存在较高的负相关,相关系数为 -0.3165 ,与浓度存在中度负相关,相关系数为 -0.6606 ,与劲头存在高度负相关,相关系数为 -0.8314 。所以 V_2 可看成是感官品质中香气量、浓度、劲头的综合性状。从表6可以看出,第1组典型变量 U_3 可以解释30.47%的组内变异;而典型变量 V_3 可以解释12.29%的组内变异。

综上所述,分析结果表明烟草不饱和脂肪酸、苹果酸、柠檬酸、总非挥发酸含量与香气量、浓度、劲头关系密切。随着烟草中不饱和脂肪酸含量的增加,香气量、浓度和劲头显著增大;随着烟草中苹果酸、柠檬酸、总非挥发酸含量的增加,香气量、浓度和劲头明显减小。典型分析结果与简单相关分析结果一致。

3 结论

本文应用简单相关、灰色关联度和典型相关分析法对非挥发酸含量与烟草品质的相关性进行了研究。简单相关分析表明,随着脂肪酸和不饱和脂肪酸含量增加,香气量、透发性、柔细度、甜度会显著提高,而杂气、刺激性和余味会显著降低;二元酸

和草酸增加会使评价总分、香气量、透发性、柔细度和甜度降低,同时会增加杂气、刺激性、余味;苹果酸和柠檬酸与香气量、透发性、浓度、劲头和评吸总分的得分显著负相关,并且苹果酸与香气质也呈显著负相关。灰色关联度分析表明,烟叶中各非挥发酸含量对香气质、劲头、浓度、香气量、透发性的4项评吸指标影响最大。典型相关分析表明,不饱和脂肪酸、苹果酸、柠檬酸、总非挥发酸含量与香气量、浓度、劲头关系密切。随着不饱和脂肪酸含量增加和柠檬酸含量减少,烟叶香气量和浓度明显增加。综合结果表明,非挥发酸含量对感官指标中的香气量、浓度和劲头影响较大。

参考文献:

- [1] 刘百战,徐亮,詹建波.云南烤烟中非挥发性有机酸及某些高级脂肪酸的分析[J].中国烟草科学,1999(2):28.
- [2] Resnik F E. Chromatography of organic acids in cured tobacco[J]. Anal Chem,1955,27(6):928.
- [3] 申进朝,洗可法.烟草中有机酸分析研究进展[J].烟草科技,2003(8):29.
- [4] Swain A P, Stedman R L. Analytical studies on the higher fatty acids of tobacco[J]. JAOAC,1962,45(3):536.
- [5] William A, Hendel J G. Nonvolatile organic acids of flue cured tobacco as affected by production practices[J]. Tob Sci,1989,33:91.
- [6] GB/T 16447—1996,烟草和烟草制品调节和测试的大气环境[S].

云南烟区烟叶致香物质与土壤养分的关系分析

王超¹, 程昌新¹, 杨应明¹, 罗华元¹, 董石飞¹,
李觅¹, 王玉², 常寿荣¹

(1. 红云红河烟草(集团)有限责任公司, 云南 昆明 650202;
2. 云南瑞升烟草技术(集团)有限公司, 云南 昆明 650106)

摘要:应用统计分析方法研究了云南烟区359份烟叶样品致香物质与土壤养分的关系,结果表明:致香物质在烟叶中的平均含量排序为酮类>酯类>醇类>酚类>呋喃类>醛类>氮杂环类;烟叶致香物质与有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量呈极显著或显著正相关关系.典型相关分析表明,在一定范围内,随着土壤养分有机质、碱解氮、速效钾和速效磷含量的增加,云南烟区烟叶致香物质中的酮类、醇类、醛类和氮杂环类含量呈现增加的趋势.

关键词:烤烟;土壤养分;致香物质;云南烟区

中图分类号:TS41⁺¹ **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.008

Relationship between tobacco aroma functional substance and soil nutrient in the Yunnan tobacco growing area

WANG Chao¹, CHENG Chang-xin¹, YANG Ying-ming¹, LUO Hua-yuan¹, DONG Shi-fei¹,
LI Mi¹, WANG Yu², CHANG Shou-rong¹

(1. Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Kunming 650202, China;

2. Yunnan Reascend Tobacco Technology (Group) Co., Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: With statistics analysis method, the relationship was studied between the aroma functional substance and soil nutrient in Yunnan tobacco growing area of 359 tobacco samples. The results showed that: Content sequence for aroma functional substance of tobacco leaves was as follows: ketones > esters > alcohols > phenols > furans > aldehydes > nitrogen-heterocyclic compounds. The significant and obvious positively positive correlation between aroma functional substance with the soil nutrient for organic matter, alkali solution nitrogen, available phosphorus and available potassium. The classical correlation analysis confirmed that: in a certain range, with soil nutrient for organic matter, alkali solution nitrogen, available phosphorus and available potassium increased in Yunnan tobacco growing area, the aroma functional substances for ketones, alcohols, aldehydes and nitrogen-heterocyclic compounds had increasing trend.

Key words: flue-cured tobacco; soil nutrient; aroma functional substance; Yunnan tobacco growing area

收稿日期:2013-04-07

基金项目:国家烟草专卖局重点科技攻关项目(110200902073);红云红河烟草(集团)资助项目(HYHH2012YL02)

作者简介:王超(1967—),男,云南省昆明市人,红云红河烟草(集团)有限责任公司高级工程师,主要研究方向为烟叶原料工艺及质量评价.

通信作者:常寿荣(1963—),男,云南省昆明市人,云南瑞升烟草技术(集团)有限公司高级农艺师,主要研究方向为烟叶原料综合评价.

0 引言

烟叶致香物质含量与其香气质量密切相关,致香物质含量极微,但对烟叶及烟制品的香味、吃味影响较大,进而影响卷烟抽吸品质^[1],因此,通过分析烟叶致香物质含量可以对烟叶品质进行比较客观准确的评价^[2]. 以往的研究多是关于烤烟致香物质^[3-5]、加工工艺和施肥^[6-9]对致香物质的影响,不同产区致香物质与化学成分的关系^[10-11]以及对植烟土壤养分质量的评价^[12-15]等方面,有关烟叶致香物质与土壤养分之间的定量关系分析还较少见报道. 因此,本文选择云南主要烤烟生产区域烟叶样品,研究影响烟叶致香物质的若干土壤养分指标,为作好植烟土壤营养平衡,进而提高烟叶质量和工业可用性等提供参考依据.

1 实验

1.1 烟叶样品的采集

检测的烟叶样品来自2011年云南烟区,包括昆明的石林、宜良、禄劝、嵩明、寻甸,曲靖的陆良、师宗、宣威、会泽、麒麟,红河的弥勒、泸西、蒙自、开远、建水、石屏,保山的腾冲、施甸、龙陵、隆阳,文山的砚山、丘北、广南,大理的巍山、宾川、祥云,共采集有代表性的359个红大品种烤后烟叶样品(C3F). 将烟样粉碎,过60目筛后备用.

1.2 土壤样品成分检测

应用GPS定位,在取样单元内,采取5点取样法,总共采集了337个土壤样品. 土样登记编号后风干、磨细、过筛、混匀、装瓶备分析测定之用. 测定项目包括土壤pH值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、交换性镁、交换性钙、氯、有效硼和有效硫的含量,共10项,各项土壤养分的检测均按常规方法进行^[16].

1.3 致香物质的测定

称取30.0 g烟末样品,放入洁净的蒸馏萃取装置一端的1 000 mL圆底烧瓶中,加入适量的氯化钠和蒸馏水,用控温电热套加热,装置的另一端为盛有100 mL CH₂Cl₂的浓缩瓶,水浴加热,同时蒸馏萃取一定时间后,加入1 mL内标乙酸苯乙酯溶液(0.423 7 mg/mL),将其浓缩至1.0 mL,转移至色谱瓶中,进行主要致香物质成分分析.

1.3.1 气相色谱-质谱分析 主要采用GC, GC-MS分析,经人工解析并与标准质谱图对照和检索,确定各分离组分的化学结构.

色谱条件:色谱柱 HP-5MS(60 m × 0.25 mm i. d. × 0.25 μm d. f.);进样口温度 280 °C;进样量 1 μL;分流比 10:1;载气 He, 1.0 mL/min;升温程序为 50 °C 保持 2 min,以 4 °C/min 的速率升温至 270 °C 并保持 20 min.

质谱条件:传输线温度 280 °C;EI 源电子能量 70 eV;电子倍增器电压 1 635 V;质量扫描范围 30 ~ 550 amu;离子源温度 230 °C;四极杆温度 150 °C.

1.3.2 香味物质提取量的计算方法 使用 Nist02 标准图库对其定性,假定相对校正因子(相对于内标)为 1,对各种香味物质按照下式进行定量计算:

$$\text{香味物质提取量}/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{\text{香味物质峰面积} \times \text{内标质量} \times 1\,000}{\text{内标峰面积} \times \text{烟样质量} \times (1 - \text{含水率})}$$

1.4 数据分析

采用 SPSS 16.0 以及 DPS 8.01 等软件对实验数据进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 云南烟区烟叶致香物质的描述性统计

云南烟区烟叶致香物质描述性统计结果见表 1. 由表 1 可知,酮类、醇类、醛类、酯类、酚类、呋喃类和氮杂环类含量分别平均为 113.69 μg/g, 44.5 μg/g, 20.62 μg/g, 53.66 μg/g, 43.81 μg/g, 22.07 μg/g 和 15.25 μg/g;变异系数除酚类(60.36%)和脂类(38.77%)较大外,其余均 < 30%;就峰度系数来说,醇类 < 0,为平阔峰,其余致香物质均 > 0,为尖峭峰,但是除酚类的数值较大外,其余系数均较小,接近于正态分布;就偏度系数来说,所有致香物质均为正值,为右偏峰.

表 1 云南烟区烟叶致香物质的描述性统计 μg/g

致香基团	平均	最小值	最大值	标准差	变异系数	峰度系数	偏度系数
酮类	113.69	63.15	177.62	21.18	18.63	0.10	0.47
醇类	44.50	24.85	69.85	10.00	22.48	-0.23	0.56
醛类	20.62	13.26	35.79	4.65	22.57	0.93	1.00
酯类	53.66	16.52	116.14	20.80	38.77	0.07	0.69
酚类	43.81	12.34	146.45	26.44	60.36	3.26	1.71
呋喃类	22.07	15.00	36.25	4.24	19.21	0.65	0.83
氮杂环类	15.25	8.61	29.74	4.13	27.08	0.74	0.93

2.2 云南烟区烟叶致香物质与土壤养分的相关分析

云南烟区烟叶致香物质与土壤养分间的相关分析结果见表 2.

表2 烟叶致香物质与土壤养分间的相关分析

指标	酮类	醇类	醛类	酯类	酚类	呋喃类	氮杂环类
pH 值	0.119 3	0.083 8	-0.039 6	-0.104 0	-0.006 5	-0.110 6	0.156 6
有机质	0.607 1**	0.525 8**	0.411 5**	0.234 3*	0.288 3**	0.353 1**	0.343 0**
碱解氮	0.616 3**	0.526 7**	0.449 3**	0.316 5**	0.463 4**	0.302 5**	0.361 6**
速效磷	0.504 1**	0.467 1**	0.447 6**	0.184 7	0.423 8**	0.441 3**	0.396 9**
速效钾	0.586 7**	0.371 8**	0.277 3**	-0.039 1	0.163 1	0.204 3*	0.311 9**
交换性镁	-0.021 7	0.063 9	-0.003 9	-0.020 7	-0.067 3	0.159 3	0.09 8
交换性钙	0.012 4	0.001 4	-0.011 4	0.049 0	-0.141 6	0.027 4	-0.071 9
氯	0.172 7	0.137 2	0.089 3	-0.075 3	0.001 2	0.034 1	0.034 2
有效硼	0.066 8	0.009 3	0.047 5	0.126 0	0.091 8	0.070 5	0.078 9
有效硫	0.049 5	0.038 4	0.057 0	-0.154 1	-0.066 3	0.113 7	0.085 5

注:*表示显著相关;**表示极显著相关。

由表2可知:烟叶致香物质酮类与土壤养分有机质、碱解氮、速效磷、速效钾呈极显著相关关系,相关系数分别为0.607 1,0.616 3,0.504 1和0.586 7;醇类与有机质、碱解氮、速效磷、速效钾呈极显著相关关系,相关系数分别为0.525 8,0.526 7,0.467 1和0.371 8;醛类与有机质、碱解氮、速效磷、速效钾呈极显著相关关系,相关系数分别为0.411 5,0.449 3,0.447 6和0.277 3;酯类与碱解氮呈极显著相关关系,相关系数为0.316 5,与有机质呈显著相关关系,相关系数为0.234 3;酚类与有机质、碱解氮、速效磷呈极显著相关关系,相关系数分别为0.288 3,0.463 4和0.423 8;呋喃类与有机质、碱解氮、速效磷呈极显著相关关系,相关系数分别为0.353 1,0.302 5和0.441 3,与速效钾呈显著相关关系,相关系数为0.204 3;氮杂环类与有机质、碱解氮、速效磷、速效钾呈极显著相关关系,相关系数分别为0.343 0,0.361 6,0.396 9和0.311 9。

2.3 云南烟区烟叶致香物质与土壤养分的典型相关分析

云南烟区烟叶致香物质与土壤养分的典型相关分析结果见表3。由表3可知:烟叶致香物质与土壤养分的典型相关系数中,第I个典型变量相关系数达到了极显著水平($\lambda_1 = 0.797 2^{**}$),第II个典型变量相关系数也达到了显著水平($\lambda_2 = 0.495 1^*$),后面的5个典型相关系数未达到显著水平,因此,前2组典型变量具有统计学意义。

由于原始变量的测量单位不同,不宜直接进行比较,本文采用标准化的典型系数给出典型相关模型 m_i 和 l_i ,并计算原始变量与典型变量之间的相关系数 r_i ,烟叶致香物质与土壤养分的典型变量和与典型变量有关性状的相关系数结果见表4。由表4

可知,典型变量 I 的构成为

表3 烟叶致香物质与土壤养分的典型相关系数的显著性检验

典型相关系数(λ)	卡方值(χ^2)	自由度(df)	P 值(α)
0.797 2**	163.073 6	70	0.000 1
0.495 1*	72.236 5	54	0.049 3
0.451 6	46.927 3	40	0.207 9
0.377 0	26.397 3	28	0.551 2
0.287 7	12.603 5	18	0.814 6
0.211 1	4.825 7	10	0.902 5
0.089 4	0.721 7	4	0.948 6

注:*表示显著相关;**表示极显著相关。

表4 典型变量和与典型变量有关性状的相关系数

性状	典型变量 I		典型变量 II	
	m_i	r_{μ_i}	m_i	r_{μ_i}
pH 值	0.122 5	0.154 2	0.223 0	-0.196 6
有机质	0.329 2	0.786 1	-0.308 3	-0.151 8
碱解氮	0.364 5	0.784 5	0.510 5	0.155 0
速效磷	0.301 7	0.610 8	0.655 8	0.476 8
速效钾	0.345 4	0.746 1	-0.654 3	-0.441 5
交换性镁	-0.007 2	-0.039 2	0.162 0	0.166 4
交换性钙	-0.045 2	0.040 5	-0.353 3	-0.369 2
氯	-0.019 6	0.243 0	-0.398 9	-0.354 3
有效硼	0.015 1	0.060 0	0.119 1	0.228 3
有效硫	-0.003 9	0.054 4	0.100 0	-0.095 2
致香物质	l_i	r_{μ_i}	l_i	r_{μ_i}
酮类	0.983 0	0.992 1	-0.763 0	0.074 6
醇类	0.180 9	0.804 7	-0.170 3	0.300 2
醛类	0.090 3	0.657 9	-0.658 8	0.373 3
酯类	0.018 4	0.280 9	0.024 0	0.448 1
酚类	-0.108 0	0.571 6	1.193 2	0.728 0
呋喃类	-0.110 2	0.519 5	0.699 7	0.401 8
氮杂环类	-0.107 1	0.619 8	0.443 9	0.435 5

$$\mu_1 = 0.1225X_1 + 0.3292X_2 + 0.3645X_3 + 0.3017X_4 + 0.3454X_5 - 0.0072X_6 - 0.0452X_7 - 0.0196X_8 + 0.0151X_9 - 0.0039X_{10}$$

$$v_1 = 0.9830Y_1 + 0.1809Y_2 + 0.0903Y_3 + 0.0184Y_4 - 0.1080Y_5 - 0.1102Y_6 - 0.1071Y_7$$

典型变量 II 的构成为

$$\mu_2 = 0.2230X_1 - 0.3083X_2 + 0.5105X_3 + 0.6558X_4 - 0.6543X_5 + 0.1620X_6 - 0.3533X_7 - 0.3989X_8 + 0.1191X_9 + 0.1000X_{10}$$

$$v_2 = -0.7630Y_1 - 0.1703Y_2 - 0.6588Y_3 + 0.0240Y_4 + 1.1932Y_5 + 0.6997Y_6 + 0.4439Y_7$$

在达到极显著水平的第 1 对典型变量(μ_1, v_1)中,由于 μ_1 与土壤养分有机质、碱解氮、速效钾和速效磷存在较高的相关关系,相关系数分别为 0.786 1, 0.784 5, 0.746 1 和 0.610 8,而由于 v_1 与烟叶致香物质酮类、醇类、醛类和氮杂环类含量存在较高的相关关系,相关系数分别为 0.992 1, 0.804 7, 0.657 9 和 0.619 8,这一线性组合反映出在一定范围内,就云南部分烟区来说,随着土壤养分有机质、碱解氮、速效钾和速效磷含量的增加,烟叶致香物质酮类、醇类、醛类和氮杂环类含量呈现增加的趋势。

在达到显著水平的第 2 对典型变量(μ_2, v_2)中,

由于 μ_2 与速效磷含量存在较高的相关关系,相关系数为 0.476 8,与速效钾、交换性钙和氯含量存在较高的负相关关系,相关系数分别为 -0.441 5, -0.369 2 和 -0.354 3,而由于 v_2 与烟叶酚类和酯类存在较高的正相关关系,相关系数分别为 0.728 0, 0.448 1,这一线性组合反映出在一定范围内,随着土壤养分速效磷含量的提高,速效钾、交换性钙和氯含量的降低,烟叶致香物质酚类有提高的趋势。

从典型冗余分析可以看出,第 1 组典型变量可以解释 16.27% 的组内变异,并解释 13.44% 的另一组变异;第 2 组典型变量可以解释 9.41% 的组内变异,并解释 7.29% 的另一组变异。

2.4 云南烟区烟叶致香物质与土壤养分的灰色关联分析

本研究将土壤养分指标作为比较数列,烟叶致香物质作为参考数列,并对各分析数据进行无量纲化处理,云南烟区烟叶致香物质与土壤养分的灰色关联度分析结果见表 5 和表 6。

通过对土壤养分与烟叶致香物质的灰色关联度分析,可将土壤养分对烟叶致香物质的贡献大小进行排序,与酮类、醇类关联度最大的是碱解氮、有机质和速效钾,与醛类关联度最大的是有机质、速效磷和速效钾,与酯类关联度最大的是碱解氮、有机

表 5 烟叶致香物质与土壤养分间的灰色关联分析

关联矩阵	酮类	醇类	醛类	酯类	酚类	呋喃类	氮杂环类
碱解氮	0.838 3	0.794 0	0.786 6	0.781 4	0.788 8	0.759 1	0.745 3
有机质	0.837 2	0.792 5	0.793 0	0.777 2	0.777 8	0.766 7	0.754 5
速效钾	0.820 3	0.783 9	0.787 6	0.750 2	0.773 4	0.767 5	0.760 6
速效磷	0.806 8	0.778 6	0.792 7	0.757 6	0.781 0	0.777 8	0.781 5
有效硫	0.778 6	0.749 4	0.779 9	0.750 4	0.785 9	0.759 0	0.761 2
pH 值	0.760 5	0.736 7	0.734 6	0.730 6	0.748 8	0.706 9	0.732 3
氯	0.756 1	0.728 8	0.745 9	0.727 3	0.747 2	0.720 0	0.705 4
有效硼	0.752 9	0.728 8	0.731 1	0.741 9	0.738 6	0.745 1	0.732 3
交换性钙	0.751 1	0.722 0	0.748 2	0.754 9	0.748 2	0.727 4	0.729 6
交换性镁	0.743 3	0.739 9	0.747 9	0.741 6	0.756 9	0.743 0	0.731 7

表 6 烟叶致香物质和土壤养分指标的灰色关联度序列

致香物质	化学成分指标序列
酮类	碱解氮 > 有机质 > 速效钾 > 速效磷 > 有效硫 > pH 值 > 氯 > 有效硼 > 有效钙 > 有效镁
醇类	碱解氮 > 有机质 > 速效钾 > 速效磷 > 有效硫 > 有效镁 > pH 值 > 氯 > 有效硼 > 有效钙
醛类	有机质 > 速效磷 > 速效钾 > 碱解氮 > 有效硫 > 有效钙 > 有效镁 > 氯 > pH 值 > 有效硼
酯类	碱解氮 > 有机质 > 速效磷 > 有效钙 > 有效硫 > 速效钾 > 有效硼 > 有效镁 > pH 值 > 氯
酚类	碱解氮 > 有效硫 > 速效磷 > 有机质 > 速效钾 > 有效镁 > pH 值 > 有效钙 > 氯 > 有效硼
呋喃类	速效磷 > 速效钾 > 有机质 > 碱解氮 > 有效硫 > 有效硼 > 有效镁 > 有效钙 > 氯 > pH 值
氮杂环类	速效磷 > 有效硫 > 速效钾 > 有机质 > 碱解氮 > 有效硼 > pH 值 > 有效镁 > 有效钙 > 氯

质和速效磷,与酚类关联度最大的是碱解氮、有效硫和速效磷,与呋喃类关联度最大的是速效磷、速效钾和有机质,与氮杂环类关联度最大的是速效磷、有效硫和速效钾。总之,与云南烟区烟叶致香物质关联度最大的土壤养分为碱解氮、有机质、速效钾和速效磷等。

3 结论

本文选择云南主要烤烟生产区域 359 份烟叶样品,研究了烟叶致香物质与若干土壤养分指标的关系,主要结论如下:

1) 致香物质在烟叶中的平均含量排序为酮类 > 酯类 > 醇类 > 酚类 > 呋喃类 > 醛类 > 氮杂环类。

2) 烟叶致香物质与有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量呈极显著或显著正相关关系。

3) 典型相关分析表明,在一定范围内,随着土壤养分有机质、碱解氮、速效钾和速效磷含量的增加,云南烟区烟叶致香物质中的酮类、醇类、醛类和氮杂环类含量呈现增加的趋势。

值得注意的是,烤烟致香物质还与基因型和生态因素有密切的关系,基因型决定了烤烟香气的遗传基础^[17],生态因素决定烟叶的香气类型和风格。今后的研究还应考虑生态因素、品种等影响要素,才能更准确地揭示土壤养分指标与烤烟致香基因的关系。

参考文献:

- [1] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 84-205.
- [2] Weeks W W. Chemistry of tobacco constituents influencing flavor and aroma[J]. Recent Advances in Tobacco Science, 1985(11): 175.
- [3] 王绍坤, 罗华元, 王玉, 等. 不同烤烟品种主要挥发性香气物质含量的比较与分析[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(4): 10.
- [4] 周冀衡, 杨虹琦, 林桂华, 等. 不同烤烟产区烟叶中主要挥发性香气物质的研究[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 30(1): 20.
- [5] 赵铭钦, 陈秋会, 陈红华. 中外烤烟烟叶中挥发性香气物质的对比分析[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 875.
- [6] 韩冰, 刘惠民, 谢复炜, 等. 卷烟主流烟气中挥发和半挥发性成分分析[J]. 烟草科技, 2009(10): 32.
- [7] 孔浩辉, 郭璇华, 沈光林. 卷烟烟丝热裂解产物香味成分分析[J]. 烟草科技, 2009(5): 38.
- [8] 武雪萍, 钟秀明, 秦艳青, 等. 芝麻饼肥与化肥不同比例配施对烟叶香气质量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1554.
- [9] 刘国顺, 叶协锋, 王彦亭, 等. 不同钾肥施用量对烟叶香气成分含量的影响[J]. 中国烟草科学, 2004, 25(4): 1.
- [10] 胡小曼, 李佛琳, 杨焕文, 等. 丽江烟区烤烟烟叶致香物质和常规化学成分及其相关性研究[J]. 云南农业大学学报, 2011, 26(S2): 41.
- [11] 赵铭钦, 陈秋会, 赵明山, 等. 南阳地区生态条件对不同基因型烤烟品种烟叶化学成分和香气物质含量的影响[J]. 中国烟草学报, 2008, 14(1): 37.
- [12] 李丹丹, 毕庆文, 许自成, 等. 湖北兴山烟区土壤养分和烟叶质量特点分析[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(3): 455.
- [13] 张秋菊, 江厚龙, 刘国顺, 等. 植烟土壤养分的空间变异性研究[J]. 河南农业大学学报, 2011, 45(1): 116.
- [14] 罗建新, 石丽红, 龙世平. 湖南主产烟区土壤养分状况与评价[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 31(4): 376.
- [15] 袁家富, 徐祥玉, 赵书军, 等. 恩施烟区土壤养分状况调查[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(S1): 93.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 25-49.
- [17] 史宏志, 刘国顺. 烟草香味学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 4-13.

滤棒质量指标均值控制域的统计分析

谭奇忠¹, 齐延鹏¹, 何蓉¹, 黎洪利¹, 黄治¹, 刘菊清², 刘华¹

(1. 川渝中烟 重庆烟草工业有限责任公司, 重庆 400060;
2. 重庆宏声集团 滤嘴材料厂, 重庆 400064)

摘要:为改善滤棒过程控制精度,在实验研究基础上,对测试数据分组后进行统计分析,确定滤棒质量指标的均值控制域.结果表明:采用数据分组的方法可有效降低随机效应的影响;利用CPK值和回归分析可以确定滤棒质量指标控制域;控制域范围内的滤棒质量显著优于滤棒质量的整体水平.

关键词:滤棒质量指标;控制域;统计分析

中图分类号:TS411.1 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.009

Statistical analysis of the average quality control domain of filter rod

TAN Qi-zhong¹, QI Yan-peng¹, HE Rong¹, LI Hong-li¹, HUANG Zhi¹, LIU Ju-qing², LIU Hua¹

(1. Chongqing Subsidiary Company of China Tobacco, Chuanyu Industrial Corporation, Chongqing 400060, China;
2. Filter Rods Company, Chongqing Hongsheng Corporation, Chongqing 400064, China)

Abstract: To improve the process control accuracy of filter rod, a large number of test data was obtained by experiments, statistical analysis was carried out after grouping test data and CPK value was introduced to define the quality control domain of filter rod. The results showed that the method using data packets could effectively reduce the random effects; CPK value and regression analysis could be used to determine the filter rod quality indicator control domain; The filter rod quality within control domain was significantly better than the overall level.

Key words: filter rod quality indicator; control domain; statistical analysis

0 引言

滤棒作为烟支卷制的重要材料,对卷烟内在质量、物理质量均影响显著^[1],滤棒压降、硬度的波动是影响卷烟焦油量波动和卷制质量的主要因素^[2].减少滤棒质量、圆周、压降、硬度的波动,提高滤棒质量稳定性是滤棒质量控制的关键.在传统滤棒质量的控制中,主要针对各个指标单独进行控制,而

忽视了滤棒各质量指标之间的相关性,且实际生产过程中,原料、设备、人员、环境多方面因素的影响使得滤棒质量指标之间的相关性变得极为模糊.本文拟通过统计大量实际生产过程中滤棒质量指标的数据,采用数据分组的方法,减少随机因素对指标相关关系的影响,确定滤棒指标相互影响的回归方程,从而确定滤棒质量、圆周、三醋酸甘油酯的控制域,优化滤棒质量的控制方法,以提高滤棒质量

收稿日期:2012-07-20;修回日期:2013-01-23

作者简介:谭奇忠(1968—),男,重庆市石柱县人,重庆烟草工业有限责任公司工程师,硕士,主要研究方向为卷烟工艺、质量管理.

通信作者:齐延鹏(1978—),男,山东省泰安市人,重庆烟草工业有限责任公司工程师,硕士,主要研究方向为卷烟工艺、质量管理.

稳定性.

1 实验

1.1 材料与设备

材料:重庆宏声集团滤嘴材料厂产 144 mm 醋酸纤维滤棒.

设备:德国 HOUNI KDF2 滤棒成型机,法国索定公司 D51 综合测试台,德国 Bingder 公司 KBF240 恒温恒湿箱,美国 METTLER PG503 电子天平,Agilent technologies 公司 6890N GC-MS.

1.2 方法

1.2.1 取样方法 相同操作人员,在同一台滤棒成型机上,待生产稳定后,每隔 10 min 在成型机出口取样,每次取样 200 支.取样后放入恒温恒湿箱按照文献[3]的方法平衡 48 h,平衡后抽取 50 支进行滤棒三醋酸甘油酯添加量的测定,另取 30 支进行滤棒物理指标的测定.

1.2.2 测定方法 滤棒按照文献[3]规定的方法测定滤棒的质量、圆周、压降、硬度.按照文献[4]的方法测定滤棒三醋酸甘油酯含量.

2 结果与讨论

2.1 实验结果

按照上述方法,共进行 129 组滤棒取样,分别测定各组滤棒的质量、压降、圆周、硬度以及三醋酸甘油酯含量等质量指标,计算其平均值和标准偏差.为了寻找各质量指标之间的相互关系,按照文献[5]的方法利用 SPSS 软件对质量指标之间的相关性进行分析,结果见表 1.

表 1 滤棒质量指标间的相关性分析

编号	影响指标	受影响指标	相关性
1	质量	压降	$R=0.31$ 不相关
2	质量	硬度	$R=0.37$ 不相关
3	三醋酸甘油酯含量	压降	$R=0.14$ 不相关性
4	三醋酸甘油酯含量	硬度	$R=0.17$ 不相关
5	圆周	压降	$R=-0.40$ 不相关
6	圆周	硬度	$R=-0.14$ 不相关
7	质量、圆周	压降	$R^2=0.44$ 弱相关
8	质量、圆周	硬度	$R^2=0.24$ 不相关
9	质量、圆周	压降	$R^2=0.43$ 弱相关
10	质量、圆周	硬度	$R^2=0.21$ 不相关

以可控的滤棒质量、圆周、三醋酸甘油酯含量 3 个指标分别研究其对滤棒压降、硬度指标的影响,

发现仅有滤棒质量、圆周对滤棒压降有较弱的影响,进行回归分析和最小二乘分析,结果显示它们之间有一定的相关性,但是其相关性并不显著.而根据相关研究^[6],滤棒的质量对滤棒压降和硬度有较强的正相关关系,三醋酸甘油酯与滤棒硬度也有一定正相关关系^[7],滤棒圆周与滤棒压降也呈现显著负相关关系.本文系对实际生产过程中的大量测试数据的统计学分析,存在原料、设备、环境导致的随机性影响,这可能是导致与上述试验性结论产生一定差异的原因.因此下面采用数据分组的方法进行分析,探讨其真实的关系.

2.2 分组统计分析

2.2.1 数据分组 为降低系统随机性对统计数据的影响,使数据能够反映指标之间的相关关系,分别按照不同的质量目标值分组统计滤棒压降响应均值和滤棒吸阻响应均值,按照圆周中心值 ± 0.01 mm 统计滤棒压降响应均值,按照三醋酸甘油酯添加量中心值 ± 0.5 mg/支统计滤棒硬度响应均值,建立影响指标的中心值与相应指标均值的对应关系(见表 2),以减少随机性原因导致相关性关系的不确定性.

2.2.2 分组后数据相关性分析 通过对分组后的数据进行相关性分析(见表 3),发现各质量指标之间的相关性要显著好于分组前,表现出较明显的正相关或负相关关系.根据文献[6-7]的研究结论,在数据的研究范围内,可以认为滤棒质量与滤棒压降、三醋酸甘油酯含量与滤棒硬度、滤棒圆周与滤棒压降均为线性相关关系.因此可以利用线性回归分析确定线性回归方程来分析影响指标与受影响指标之间的数学关系,从而进一步确定影响指标的控制范围.

根据表 3 中各影响指标与受影响指标之间的相关关系,可以分析各影响因素对其他质量指标的影响程度,检验或确认各质量指标均值控制的中心值,并可以根据受影响指标设计值,按照过程能力指数 $CPK \geq 1.67$ 的要求,计算确定滤棒质量、圆周及三醋酸甘油酯含量的控制域.图 1 为滤棒质量对压降的影响,可以看出滤棒质量对压降的影响较为显著.图 2 为三醋酸甘油酯含量对滤棒硬度的影响,可以看出三醋酸甘油酯含量对硬度的影响程度相对较小,对滤棒硬度影响产生的极差约为 0.6%.

2.2.3 滤棒质量均值控制域的确定 根据滤棒压降、硬度的设计值,由表 3 的回归方程可以计算出滤棒质量、圆周和三醋酸甘油酯含量的控制中心值;根

表2 滤棒质量指标分组数据相关性分析

质量影响			圆周影响		三醋酸甘油酯影响	
质量域中心值/mg	压降响应/Pa	硬度响应/%	圆周域中心值/mm	压降响应/Pa	添加域中心值/(mg·支 ⁻¹)	硬度响应/%
778	3 373	88.7	23.84	3 815	47	89.2
787	3 550	88.0	23.86	3 825	49	89.5
791	3 481	87.8	23.92	3 550	50	89.7
799	3 619	90.1	23.99	3 677	51	89.2
800	3 638	87.9	24.00	3 658	52	89.5
801	3 589	88.7	24.01	3 619	53	89.3
802	3 599	90.3	24.02	3 658	54	89.1
803	3 530	88.5	24.03	3 579	55	89.2
804	3 570	89.6	24.04	3 619	56	89.5
805	3 599	89.6	24.05	3 619	57	89.8
806	3 589	89.4	24.06	3 658	58	89.9
807	3 599	89.3	24.07	3 599	59	89.9
808	3 619	89.2	24.08	3 609	60	89.8
809	3 628	89.5	24.09	3 570		
810	3 619	89.7	24.1	3 589		
811	3 599	89.3	24.11	3 560		
812	3 638	89.8	24.12	3 628		
813	3 628	89.4	24.13	3 570		
814	3 638	89.7	24.14	3 560		
815	3 638	89.8	24.16	3 570		
816	3 628	89.3				
821	3 589	90.3				
823	3 550	89.8				
825	3 697	90.7				

表3 滤棒质量指标相关关系及回归方程

编号	影响指标	受影响指标	相关系数	回归方程
1	质量	压降	$R = 0.72$	$Y = 4.188 2X + 213.515 3$
2	质量	硬度	$R = 0.68$	$Y = 0.015 42X + 76.823 45$
3	圆周	压降	$R = -0.77$	$Y = -664.033X + 19 590.4$
4	三醋酸甘油酯含量	硬度	$R = 0.60$	$Y = 0.042 16X + 87.229 93$

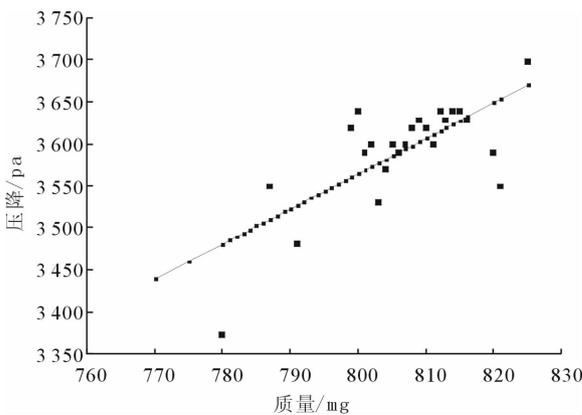


图1 滤棒质量对压降的影响

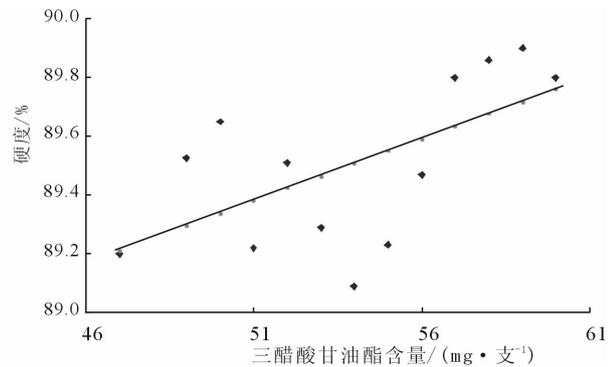


图2 三醋酸甘油酯对滤棒硬度的影响

据滤棒压降、硬度的允差值和实际标准偏差,按过程能力指数 $CPK \geq 1.67$ (过程能力达到优)的要求,可以计算出允许压降和硬度产生的最大中心偏移值;根据表3的回归方程的斜率,可以计算出滤棒质量、圆周、三醋酸甘油酯含量的控制允差值(见表4).此中心值和允差值即该项指标均值最大控制域.而实际控制域应考虑各因素的同时影响,如滤棒压降受滤棒质量和滤棒圆周的共同影响,假设实际生产过程中按照50%的比例进行分配,相应质

表4 滤棒质量指标控制域的选择

目标指标	设计值	允差值	实测标准偏差	允许中心偏移值(CPK=1.67)	控制指标	最大控制域	
						中心值	允差值
压降/Pa	3 650	±200	66	±89	滤棒质量/mg	820	±21.4
					滤棒圆周/mm	24.00	±0.13
硬度/%	90	±3	1.14	±1.09	滤棒质量/mg	855	±70.7
					三醋酸甘油酯含量(mg·支 ⁻¹)	65.7	±25.8

量、压降2 指标允许中心偏移值变为最大值的1/2, 实际控制域应选择滤棒质量均值控制在(820 ± 10.7) mg 范围内, 圆周均值控制在(24.00 ± 0.07) mm范围内。

2.2.4 应用效果对比 根据各因素对滤棒质量的影响程度和实际控制水平, 计算出一组指标实际控制域, 分别是滤棒质量均值(820 ± 10.7) mg, 圆周(24.00 ± 0.07) mm, 三醋酸甘油酯含量(65 ± 5) mg/支。首先对统计的129 组实验数据, 进行滤棒压降合格率和硬度合格率的筛选对比, 结果表明处于控制域范围内的产品不合格率, 较整体不合格率显著降低(见表5); 在此基础上, 再按照该控制域范围进行控制, 抽取30 组产品进行实验验证, 其产品不合格率同样较未应用控制域的有明显改善(见表6)。

表5 实验数据控制域应用效果对比情况 %

目标指标	不合格百分比	控制域内不合格率	改善情况
压降	2.36	0.86	-1.50
硬度	1.94	0.43	-1.51

表6 应用控制域进行过程控制前后产品不合格率对比情况

目标指标	均值	均值最大值	均值最小值	不合格比例/%	改善情况/%
压降	3 667 Pa	3 707 Pa	3 599 Pa	1.22	-1.14
硬度	89.92%	91.5%	89.2%	0.11	-1.83

3 结论

滤棒质量指标可以分为可控指标和受影响指

标2 类, 这2 类指标之间存在着一定相关关系。在正常生产条件下, 滤棒质量由于受到有些未知的随机效应的影响, 2 类指标之间的相关性表现的不够明确。通过根据可控指标进行梯度分组, 计算组内受影响指标均值, 再根据此均值进行相关性分析和线性回归, 可以确定2 类指标的相关关系和回归曲线, 根据关注质量指标的设计值和允差, 以及期望的CPK 值, 由回归曲线可以计算出可控指标的控制域。实验验证表明, 应用控制域进行过程控制的产品其不合格率较未采用控制域控制的产品不合格率显著降低。

参考文献:

- [1] 陈良元, 王瑞华, 李善莲. 2006—2007 年烟草工艺学科研究发展报告[J]. 中国烟草学报, 2006, 14(5): 74.
- [2] 常纪恒, 赵荣, 余振华, 等. 滤棒成型工艺参数与质量稳定性的关系[J]. 烟草科技, 2007(1): 5.
- [3] GB/T 22838, 卷烟和滤棒物理性能的测定[S].
- [4] 王军, 冯剑, 杨俊, 等. SPME-GC-MS-SIM 滤棒中三醋酸甘油酯的测定[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(12): 196.
- [5] 刘大海, 李宁, 晁阳. SPSS 15.0 统计分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [6] 刘诗健. 滤棒重量与压降、硬度的关系研究[J]. 企业技术开发, 2000(10): 8.
- [7] 李书芳, 李浩亮, 林继成, 等. 不同甘油酯添加量对滤棒物理特性指标影响[J]. 硅谷, 2010(24): 24.

基于粗糙集的改进 Q 学习算法

过金超, 刘杰, 崔光照

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对 Q 学习算法容易出现错误的时间间隔重叠和高估 Q 值的情况,进而导致收敛速度慢、学习性能下降的问题,提出了一种改进的 Q 学习算法,即粗糙集 Q 学习算法.该算法通过有效处理不完备信息和不确定性知识,使 Q 值所引起的误差最小化,进而减少 Q 值的高估,提高学习性能.基于 2 种算法的机器人自主导航实验结果表明,粗糙集 Q 学习算法有更高的学习效率和更强的避障能力.

关键词:Q 学习算法;粗糙集;机器人导航

中图分类号:TP242.6;TP181 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.010

An improved Q-learning algorithm based on rough set

GUO Jin-chao, LIU Jie, CUI Guang-zhao

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

Abstract: Q-learning algorithm has a fundamental flaw, that is, prone to error intervals overlap, and thus overestimation of the correct Q-value. These are likely to lead to low convergence speed and continuous decline in the performance of Q-learning, an improved Q-learning algorithm was proposed, that was rough sets Q-learning algorithm. The algorithm can be able to minimize the overestimation caused by Q-values and improve performance of learning through effectively deal with incomplete information and uncertain knowledge. Navigation experiments based on these two algorithms were conducted, the results showed that rough sets Q-learning algorithm had higher efficiency of learning and stronger ability of obstacle avoidance than Q-learning algorithm.

Key words: Q-learning algorithm; rough set; robot navigation

0 引言

强化学习是一种非常有效的机器学习方法,在智能机器人系统应用非常广泛^[1].它是一种无监督学习模式,通过试探行动-评价的迭代从环境中获得知识,进而在该环境中选择最优动作.因为外部环境信息提供得较少,强化学习的学习效率比较低,因此学者们一直致力于提出新的算法以对其进

行改进.

Watkins 于 1989 年提出了 Q 学习算法,它在强化学习的发展过程中具有里程碑的意义^[2].文献 [3] 利用 Q 学习算法进行了移动机器人自主导航实验,证明该算法具有可行性,但是标准 Q 学习算法收敛速度慢,学习效率较低.在 Watkins 之后,1996 年 J. Peng 提出了多步 Q 学习算法^[4],利用将来无限多步的信息进行更新当前 Q 函数,因此要对大量的

收稿日期:2013-01-20

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

状态-动作对进行更新.当状态-动作对空间规模较大时,计算量很大,学习效率并不高.

本文在Q学习算法基础上,提出一种改进的Q学习算法,即粗糙集Q学习算法,将该算法在机器人导航中实验验证,以期为强化学习开创新的发展空间.

1 Q学习算法

1.1 Q学习算法流程

Q学习算法流程如图1所示^[5].Q学习算法是无模型强化学习方法,机器人在系统中不需预测将来的未知状态.策略是指在状态 s 中采取行动 a 的概率的函数.回报预测是行动和状态的一种函数,其表达式为

$$R(s, a) = E[\sum \gamma^t r_t + 1 | s_0 = s, a_0 = a]$$

其中, $\gamma(0 \leq \gamma \leq 1)$ 是折扣因子, r_t 为 t 时刻的立即回报.

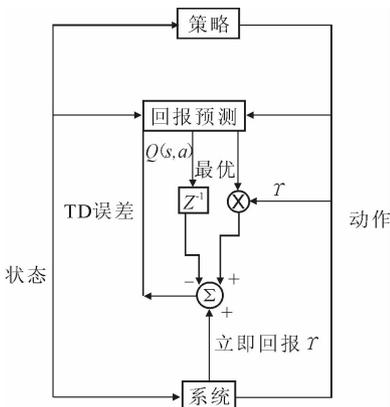


图1 Q学习算法流程

从图1可以看出,回报预测有预测状态和预测行动2个输出.前者与 γ 相乘,图中用 \otimes 来表示,得到的结果与 $Q(s, a)$ 相减得到 $[\gamma \max Q(s', a') - Q(s, a)]$,其结果再与立即回报 r 相加,最终得到 $r + [\gamma \max Q(s', a') - Q(s, a)]$.回报预测和当前状态会影响策略模块,从而影响下一个状态,最终得到

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$$

1.2 Q学习算法存在的问题

机器人在初始状态 s 下,Q学习算法会根据某种策略选择一个动作 a ,得到下一个状态 s' ,同时获得立即回报 r ,于是有

$$Q(s, a) = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') \quad (1)$$

在某一状态 Q 值提出一个动作选择策略,在其对应状态选择一个 $Q(s, a)$ 最大时的动作 a .反复应用①式将产生最大化预期的累积折扣奖励的动作策略,但是此结果只有当 Q 值被精确地存储时才成立.若设当前被储存的 Q 值为 Q^a ,它意味着某种隐含的目标值 Q' 被一个噪声项 Y_s^a 破坏, Y_s^a 的近似值由②式给出

$$Q^a(s', a') = Q'(s', a') + Y_s^a \quad (2)$$

该噪声被一系列均值为0的随机变量模式化,它会导致①式左边的某种错误,设随机变量 $Z_r = r + \gamma \max_a Q^a(s', a') - [r + \gamma \max_a Q'(s', a')] = \gamma [\max_a Q^a(s', a') - \max_a Q'(s', a')]$

有关以上分析的一个关键观察是:零均值噪声 Y_s^a 可能很容易导致正平均值 Z_r .此情况可能导致一些 Q 值太小,一些太大.但是Q学习算法总是采用最大的 Q 值,如果一些 Q 值大小接近,并且错误的间隔有重叠现象,那么其中的一个很可能高估某个行动正确的 Q 值^[6].这种高估会使Q学习算法的性能不断下降,以致智能机器人系统不能学到最佳策略.

2 粗糙集Q学习算法

粗糙集理论由Pawlak在1982年提出,它能对各种不完备信息和不确定性知识进行有效的分析,并对其进行推理,从而发现隐含的知识和规律,为智能机器人系统在未知环境下的导航及其他应用提供较为完善的理论基础^[7].粗糙集理论包含2方面的内容,即有决策分析与无决策分析.前者包括决策分析、规则提取、故障诊断;后者包括从大量信息中发现知识,离散信息系统的数据库约简以及对得到的不确定性知识和不完备信息的处理.

在Q学习算法中, Q 值容易出现高估的情况,会严重的影响学习性能.因而,本文基于粗糙集理论的无决策分析和有决策分析对Q学习算法做了2点改进以提高其学习性能.

1) 减去来自最大 $Q(s', a')$ 的 $(1 - \gamma)v'$.这有助于使高估值接近标准值,减少 Q 值的误差. $\gamma(0 \leq \gamma \leq 1)$ 是折扣因子, v' 是粗糙包含的平均值,其计算公式为

$$v' = \frac{1}{|B|} \sum_{B_j(x) \in B} v(B_j(x), B * D)$$

其中, $v(B_j(x), B * D) = \frac{|B_j(x) \cap B * D|}{|B * D|}$.

2) 用 γ^n 代替 γ . 这有助于减少 Q 值的高估.

上述 2 点均有助于提高算法的学习性能,从而得到粗糙集 Q 学习算法,其变换式为

$$Q(s, a) = Q(s, a) + v' [r + \gamma^n [\max_{a'} Q(s', a') - (1 - \gamma) v'] - Q(s, a)]$$

式中, n 是情节的数量.

以下给出粗糙 Q 学习算法的主要描述.

输入: 状态 $s \in S$, 动作 $a \in A(s)$, 初始化的 $Q(s, a)$, α, γ, π 为任意一个策略(非贪婪型).

输出: 每个状态 - 动作对的最优动作值 $Q(s, a)$.

```

for( $i = 0$ ;  $i \leq \#$  of episodes;  $i++$ ) do
  Initialize  $s$ 
  Choose  $a$  from  $s$ , using policy derived from  $Q$ 
  Repeat(for each step of episode):
    Take action  $a$ ; observe reward,  $r$ , and next state,  $s'$ 
     $Q(s, a) = Q(s, a) + v' [r + \gamma^n [\max_{a'} Q(s', a') - (1 - \gamma) v'] - Q(s, a)]$ 
     $s \leftarrow s'$ ;  $a \leftarrow a'$ ;
  until  $s$  is terminal
end
end

```

3 仿真实验及分析

TeamBots 是基于 Java 的一款机器人仿真软件, TBSim 为 TeamBots 中的仿真模块, 本文采用 TBSim 来进行机器人导航实验. 实验环境如图 2 所示, R (机器人所在位置) 为起始点, D (正方框) 为目标点, 圆点部分为环境中的障碍物.

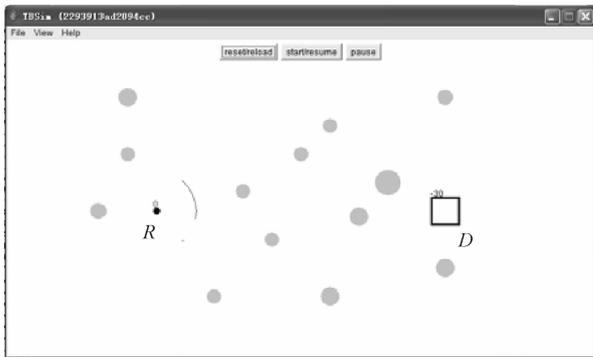


图 2 实验环境

实验环境建好之后, 分别将 Q 学习算法和粗糙集 Q 学习算法在平台上进行实现, 然后进行导航实验. 对于机器人来说, 环境是未知的, 障碍物亦是未

知的, 机器人需要通过这 2 种算法的学习来实现从起始点到目标点的无碰撞路径的寻找. 定义机器人从起始点到目标点的过程为机器人的一个学习周期. 因 2 种算法的学习效率是不一样的, 为了测试 2 种算法的学习效率, 实验设定同样的参数以更好地比较其性能, 即 $\alpha = 0.6, \gamma = 0.8$, 学习周期均为 100, 并且设置同样的实验环境. 2 种不同算法下, 机器人经过 100 个学习周期得到不同的实验结果, 如图 3 和图 4 所示, 其中曲线(目标点左侧)为机器人的路径.

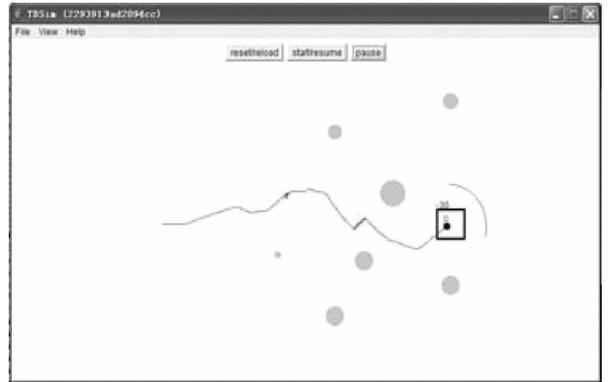


图 3 Q 学习算法导航示意图

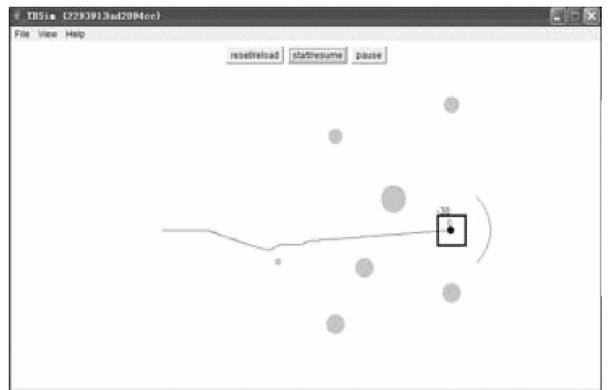


图 4 粗糙集 Q 学习算法导航示意图

图 3 的路线比较弯曲, 路径较长一些; 图 4 的路线接近直线, 路径较短一些. 这说明粗糙集 Q 学习算法较 Q 学习算法能进行更好的自主学习导航, 所以粗糙集 Q 学习算法比 Q 学习算法收敛速度更快, 学习效率更高.

为了测试 2 种算法在导航实验中机器人的避障能力, 实验设置 2 种相同的仿真环境, 学习周期设置为 300. 将 2 种算法在仿真平台上实现, 得到如图 5 所示的实验结果.

由图 5 可以看出, 在学习周期均为 300 的情况

下,2种算法的避障能力差异很大.在0—300周期内,粗糙集Q学习算法的碰撞次数一直远远低于Q学习算法.这说明粗糙集Q学习算法较Q学习算法有更好的避障能力.

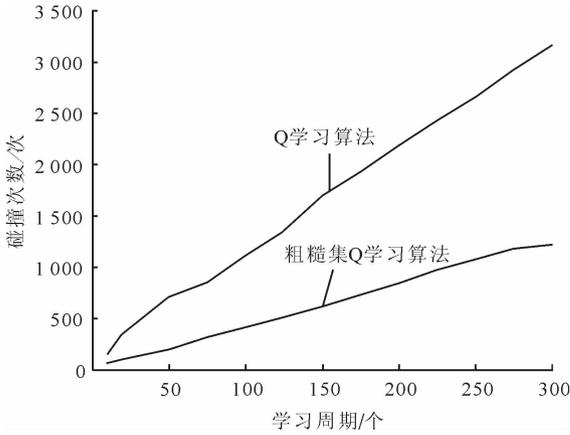


图5 机器人碰撞曲线图

4 结论

本文针对Q学习算法容易高估Q值进而导致收敛速度慢这一问题,将Q学习算法与粗糙集理论结合,提出了一种改进的Q学习算法,即粗糙集Q学习算法.粗糙集Q学习算法充分利用了粗糙集理论,它能有效地处理不完备信息和不确定性知识,减小了Q值的高估,使高估值更接近标准值,进而加快了收

敛速度,提高了学习效率.将2种算法在仿真实验中进行机器人自主导航的性能比较,结果表明,粗糙集Q学习算法较Q学习算法有更高的学习效率,更好的避障能力.

参考文献:

- [1] Yu H Z, Bertsekas D P. Q-learning and policy iteration algorithms for stochastic shortest path problems [EB/OL]. (2012-04-18) [2013-01-05]. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10479-012-1128-z/fulltext.html>.
- [2] 王雪松,程玉虎.机器学习理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [3] James F Peters, Christopher Henry. Approximation spaces in off-policy Monte Carlo learning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007(20):667.
- [4] Peng J, Williams R J. Incremental multi-step Q-learning [J]. Machine Learning, 1996, 22(1/3):283.
- [5] Pandey D, Pandey P. Approximate Q-learning: An introduction [C]//2010 Second International Conference on Machine Learning and Computing, Washington DC: IEEE Computer Society, 2010.
- [6] 邱玉霞.进化计算与粗糙集研究及应用[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [7] 高庆吉.基于粗糙集理论的移动机器人自主导航研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006:15-16.

区域交通协调控制中基于时段的相位差计算方法

支俊, 姚妮, 夏永泉, 甘勇

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:在区域协调控制的基础上,对低峰期、平峰期和高峰期不同方案的相位差计算进行研究.采用将高峰期分为子区间,并根据实时采集的车流量动态进行相位差计算的策略,改进了高峰期的传统相位差计算方法.仿真结果表明,该相位差计算方法实用有效,可应用于区域交通控制中不同情况的相位差计算.

关键词:交通控制;区域协调;相位差;交叉口

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.011

A phrase difference computation approach for area traffic control system based on period of time

ZHI Jun, YAO Ni, XIA Yong-quan, GAN Yong

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

Abstract: The calculation method of phase difference for three schemes of low traffic flow, normal traffic flow and high traffic flow was studied based on regional coordination control. The tradition phase difference calculation method was improved using the strategy which divided high traffic flow into subinterval and phase difference calculation was carried out according to acquisition of the number of cars. The simulation results showed that this method was effective, it can be used for phase difference calculation at different conditions in regional traffic control.

Key words: traffic control; area coordination; phrase difference; intersection

0 引言

城市道路交通区域协调控制的对象是城市或城市内某个区域所有交叉口的交通信号.以前倾向于孤立地考虑单点、干线和网络控制3种控制方式,往往把单纯的网络信号控制系统看成区域交通控制系统.正确的区域交通信号控制系统概念是:把城区内的全部交通信号的监控,作为一个指挥控制

中心管理下的一套整体的控制系统,是对单点信号、干线信号和网络信号的综合控制^[1-2].

信号周期、绿信比和相位差是区域交通协调控制中的3个重要因素,信号周期长度和绿信比是造成单交叉口停车延误的重要因素,而相位差是实现交叉口之间协调控制,减少区域总停车次数和停车延误的关键因素^[3].主干道上各个交叉口协调控制时最重要的参数是相位差,求解相位差的模型主要

收稿日期:2012-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61163017);河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2010GGJS-114)

作者简介:支俊(1973—),女,浙江省嵊州市人,郑州轻工业学院讲师,主要研究方向为智能交通系统.

有2类:一类是以车流在主干道上行驶的平均延误和停车次数最小为目标;另一类是以车流在主干道上行驶的通过带宽度最大为目标.其最终目的都是使车辆在主干道上行驶时停车延误最小、停车次数最少^[4].本文将基于区域协调控制算法,对相位差的计算进行分析和改进,并通过仿真验证其效果.

1 区域协调控制算法

区域协调控制算法是以公有周期为基础来调节控制周期、绿信比、相位差三要素,即在子区所有路口执行完一个公有周期后,系统依据该公有周期的路口车流量计算出下一个公有周期时长及与其对应的路口绿信比方案、绝对相位差值.区域协调控制流程如图1所示.

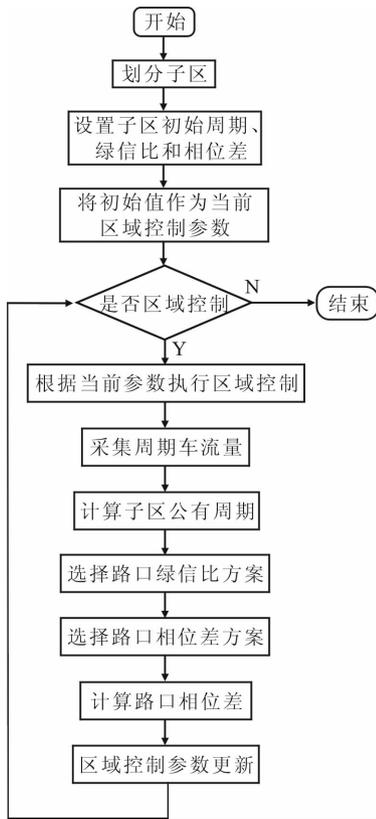


图1 区域协调控制流程

仿真流程如下:

- 1)根据路口交通流量的历史现状数据与交通网的环境、几何条件和路口间的互联指数为城区路口划分子区;
- 2)对子区的几何特征、车流特征进行区域协调控制仿真,通过仿真的性能评价指标判断进行区域协调控制是否有效以及采用区域协调控制交通效

率的改善度是多少;

3)对仿真有效的子区,指定子区的周期参数 $C_{min}, C_{max}, C_s, C_x$, 各路口的4个基本绿信比方案参数,各路口的5个基本相位差方案参数和其他初始化参数,下传到路口信号机;

4)对各有效子区执行区域协调控制;

5)路口信号机根据检测的车流信息,计算出路口每周期每车道的饱和度和综合流量,返回到区域控制主机;

6)区域控制主机把饱和度最大的路口作为周期参考路口,周期参考路口的信号周期作为子区内的公共周期,如果公有周期改变,下传到子区内的各个路口信号机;

7)信号机根据综合流量和饱和度信息选择合适的相位差方案和绿信比方案,并根据绿信比调节配时方案各相位的绿灯时间;

8)子区内任何关键参数的变动都详细记录在交通信号控制系统数据库中,作为系统运行的历史数据,为基于时段的区域协调控制提供有效的参考.

2 相位差计算方法

各子区的内部以及子区间的相位差都要事先确定,存储在区域控制主机中,并下传到路口信号机.内部相位差和外部相位差均包含5种不同的方案.在一个子区内,预先指定子区内的关键交叉路口,关键交叉口的相位差为0,其他交叉口的相位差以这个交叉口为参考点.相位差以 s 为单位进行计算,与周期没有直接关系,不会因周期时长的改变而改变^[5-6].周期的变化是随着道路交通需求和交通流特性而变化的,最直观的是车队平均速度的变化,而车队平均速度的变化将直接影响相位差的大小.为此,需对相位差进行修正,找出相位差和周期长的函数关系,修正函数为

$$P' = P \cdot [1 + A \cdot g(C)]$$

式中, P' 是修正后的相位差; P 是基本相位差; A 是修正系数,可正可负; $g(C)$ 是周期长 C 的函数. $g(C)$ 与 C 的函数关系为

$$g(C) = \begin{cases} 1 & C_{min} < C \leq 0.7C_{max} \\ (10/3)(1 - C/C_{max}) & 0.7C_{max} < C < C_{max} \end{cases}$$

相位差的大小和方向的变化由系数 A 的数值和符号决定, A 的符号决定相位差增大还是减小, A 的数值大小决定相位差改变的幅度.

相位差方案的选择方法如下:每个信号周期都要对相位差进行判断,实时选择,5种方案中的第1方案,仅适用于信号周期时长恰好等于 C_{\min} 的情况;第2方案,仅适用于信号周期满足 $C_s < C < C_s + C_s/8$ 的情况,是初始的相位差方案;余下的3个方案适用于 $C_s + C_s/8 < C < C_{\max}$ 的情况,根据实时检测到的综合流量值进行方案选择.

2.1 交通流量低峰期的相位差计算

城市交通在低峰期的时候,各子区在最小周期 C_{\min} 下运行,子区内各交叉口采用第1种相位差方案,根据车流的不同特征,通过2种执行办法进行处理:

1) 如果路口形成不了连续的车流,区域协调控制的效果不明显,采用路口各自为政的单元感应控制,可提高各单独路口的控制效率,尤其是小城市,低峰期车辆稀少,可以采用黄闪控制.

2) 如果交通流有明显的方向性,但流量不大,可在第2种相位差方案的基础上进行修正得到合理的相位差,形成以主干道双向绿波带控制为主,其他车道为辅的区域协调控制策略.只是子区的信号周期较小,相位差也较小^[7].

2.2 交通流量平峰期的相位差计算

在子区范围内能取得双向车流行驶较好的情况下,信号周期是中等的信号周期时长 C_s 以及略长于 C_s 的信号周期 C_x ,即当 $C_s < C < C_x$ 满足时,采用第2种相位差方案,实现区域内双向绿波协调控制^[8].

1) 设当前子区周期为 C ,在短时间内,子区内的平均车速比较稳定,设子区内的平均车速为 v ,子区内的关键路口为 O . O 就是子区内相位差的基准点,子区内其他路口的相位差,都以 O 点为基准计算.任取子区内2个相邻路口 A 和 B ,设 A, B 路口的间距为 S_{AB} .

2) 由双向绿波的基本要求可知,如果 A, B 2个路口要实现完全双向绿波,需满足 A, B 间的距离 $S'_{AB} = K \times v \times C/2 (K \in N)$, $v \times C/2$ 是理想距离.如果 K 为奇数, A, B 异步协调;如果 K 为偶数, A, B 同步协调.如果 $S_{AB} = S'_{AB}$,可实现 A, B 间的双向绿波.

3) 事实上, A, B 之间的实际距离不可能正好是理想距离 $v \times C/2$ 的整数倍,所以必须对 B 路口的相位差做一定的调整,以达到较好的相位差协调效果.任一路口 B 和关键路口 A 的相位差关系如图2所示.

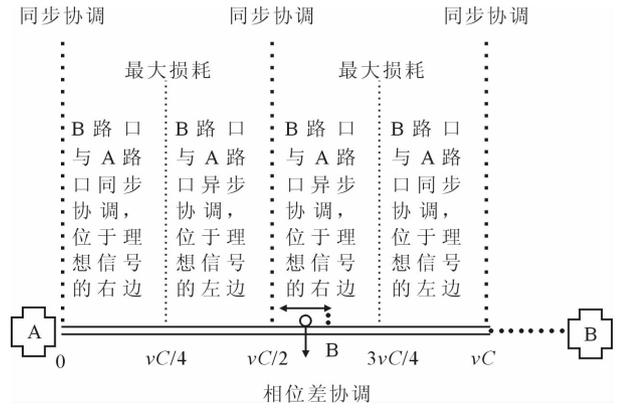


图2 路口间的位置关系图

2.3 交通流量高峰期的相位差计算

把子区周期区间3等分形成3个区间,根据子区内平均车速、当前路口和其参考路口的间距,由这3个周期值和上面的相位差算法,可计算得到3种不同的相位差值和有效协调时间.使用子区周期线性地表示子区平均车速,能够较准确地反应平均车速随车流的变化.设标准的平均车速为 v_0 (低峰或平峰期),子区在最大信号周期时平均车速达到最小,为 v_{\min} .车速相对于信号周期的函数关系式为

$$v = v_0 + C_x \frac{v_0 - v_{\min}}{C_{\max} - C_x} - \frac{v_0 - v_{\min}}{C_{\max} - C_x} C$$

$$C \in (C_x, C_{\max}]$$

式中, v 为当前周期下的车速, v_0 为标准的平均车速, v_{\min} 为最大周期时的平均车速, C_x 为临界周期, C_{\max} 为最大周期, C 为当前信号周期.

由于子区中各交叉口所处地理位置不同,交通负荷和几何特性也不同,对于同一个相位差方案而言,各交叉口以及各进口道的协调控制效果可能有所不同.为了比较各方案对这些进口道控制的有效性,在方案选择中,进行相位差有效度的计算,只考虑具有重要地位的进口道和最高的交通负荷这2个因素.

有效度通过关键进口道有效协调时间与关键进口道相位时长的比值表示,设相位差方案下各关键进口道的有效度为 P_i ,因为每个相位差相应的有效协调时间已经计算出来,相位时长取当前配时方案关键车道的相位时长,可计算出各个关键进口道的有效度.

相位差方案的选择方法如下:每个信号周期开始的时候,首先计算每个关键进口车道在每个相位差方案下的有效度,然后选择每个相位差方案下有

效率最大的关键进口道,再把每一被选出的进口车道的有效度乘以该进口车道的饱和度,此乘积之和最高的相位差方案为被选中的方案。

根据计算出的有效度 P_i 和进口道上实时检测计算得到的饱和度 DS_i ,各相差方案协调下的交叉口通行能力计算公式为

$$O_j = \sum_{i=1}^x P_i \times DS_i$$

式中,相位差方案标号 $j = 3,4,5$; P_i 为各关键进口车道的有效度; S_i 为各关键进口车道的饱和度; i 为关键车道编号; x 为关键车道总数. 取3种相位差方案的最大值 $O_{\max} = \max(O_3, O_4, O_5)$, 对应的相位差就是当前配时方案要选择的相位差方案。

3 仿真结果

相位差方案的设置, 主要根据路网结构以及上面所设置的路口关系和路口距离, 通过相位差优化计算模块分别求出各路口相对于子区内关键路口的相位差, 作为区域优化控制的相位差选择方案. 仿真结果以包含4个路口为例, 以路口4为基准, 各路口的相位差方案见表1. 利用以上相位差计算结果, 分别采用传统相位差计算方法和本文方法利用仿真软件对区域控制模型和算法进行仿真测试, 得到仿真结果见表2.

表1 子区1相位差计算结果

方案	路口1 相位差方案			路口2 相位差方案			路口3 相位差方案			路口4 相位差方案		
	理想信号	位置	相位差/s									
1号	同步协调	右边	1	同步协调	右边	1	同步协调	右边	0	同步协调	右边	36
2号	同步协调	右边	36	同步协调	右边	91	异步协调	左边	45	异步协调	右边	61
3号	同步协调	右边	39	同步协调	右边	102	异步协调	左边	51	异步协调	右边	68
4号	同步协调	右边	44	同步协调	右边	114	异步协调	左边	57	异步协调	右边	76
5号	同步协调	右边	51	同步协调	右边	127	异步协调	左边	63	异步协调	右边	85

表2 区域控制方案仿真结果部分数据

	开始时间	结束时间	延误时间/s	排队长度/辆	停车次数/次
本文方法	2011-11-12 11:03	2011-11-12 11:13	311 291	5 403	4 927
	2011-11-12 11:13	2011-11-12 11:23	337 465	5 702	4 940
	2011-11-12 11:23	2011-11-12 11:33	315 628	5 264	4 645
	2011-11-12 11:33	2011-11-12 11:43	355 366	5 933	4 964
	2011-11-12 11:43	2011-11-12 11:53	355 151	6 084	4 933
	2011-11-12 11:53	2011-11-12 12:03	310 844	5 724	4 821
	2011-11-12 12:03	2011-11-12 12:13	376 853	6 224	4 951
	2011-11-12 12:13	2011-11-12 12:23	343 264	5 631	4 973
	2011-11-12 12:23	2011-11-12 12:33	341 471	5 311	4 887
	2011-11-12 12:33	2011-11-12 12:43	341 273	5 712	4 782
2011-11-12 12:43	2011-11-12 12:53	340 859	5 174	4 922	
传统方法	2011-7-21 11:01	2011-7-21 11:11	338 801	5 584	5 217
	2011-7-21 11:11	2011-7-21 11:21	335 379	5 564	5 162
	2011-7-21 11:21	2011-7-21 11:31	326 599	5 441	5 113
	2011-7-21 11:31	2011-7-21 11:41	331 865	5 615	5 145
	2011-7-21 11:41	2011-7-21 11:51	320 543	5 384	5 046
	2011-7-21 11:51	2011-7-21 12:01	337 912	5 610	5 173
	2011-7-21 12:01	2011-7-21 12:11	343 053	5 763	5 226
	2011-7-21 12:11	2011-7-21 12:21	350 381	5 802	5 236
	2011-7-21 12:21	2011-7-21 12:31	350 445	5 752	5 314
	2011-7-21 12:31	2011-7-21 12:41	344 551	5 639	5 195
2011-7-21 12:41	2011-7-21 12:51	338 031	5 627	5 177	

表1中,1号方案对应于平峰期的相位差计算,2号方案对应于平峰期相位差计算,3—5号方案对应于高峰期相位差计算.从表1数据可以看出,低峰期和高峰期的总相位差分别为38 s和233 s,通行效率较高,高峰期的3种方案分别为260 s,291 s和326 s,按照传统的计算方法为326 s,将高峰期划分为区间进行控制可以提高车辆的通行效率.

由表2可知,利用传统相位差方法的车辆总延误时间为286 053 s,车辆总排队长度为4 763辆,车辆总停车次数为4 443次;利用本文方法车辆总延误时间为249 172 s,车辆总排队长度为4 156辆,车辆总停车次数为4 190次.通过以上性能比较可以认为,在区域协调控制中,采用本文相位差计算方法比采用传统的相位差计算方法在车辆延误、排队长度以及停车次数的控制效果,可以分别平均提高12.89%,12.74%和5.69%.

4 结论

本文针对低峰期、平峰期和3种高峰期共5种不同的时段,采用不同的相位差计算方法进行了研究,对不同相位差的计算进行了逐一分析.采用将高峰期分为子区间,根据实时采集的车流量进行动态相位差计算的策略,改进了高峰期的相位差计

算方法,给出了计算结果.本文相位差计算方法可以应用在单点交叉口控制方式、主干线控制方案和区域控制方式中,在某些城市的交通控制系统中应用,得到了较好的效果,具有一定的可靠性.

参考文献:

- [1] 柴千.城市智能交通信号控制系统的设计与开发[J].浙江大学学报:工学版,2010,44(7):1241.
- [2] 杨立荣.城市道路交通流微观仿真系统研究与实现[D].成都:西南交通大学,2009.
- [3] Sakda Panwai, Hussein Dia. Comparative evaluation of microscopic car-following behavior[J]. Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(3): 314.
- [4] 高云峰,胡华,杨晓光.线控制相位差概率模型研究[J].公路交通科技,2006,23(8):106.
- [5] 张红斌.城市道路交叉口组合信号控制研究与仿真实现[D].北京:北京交通大学,2008.
- [6] 李晓红.市干线交通信号协调优化控制及仿真[D].大连:大连理工大学,2007.
- [7] 丁晓红.市智能交通信号控制与仿真系统研究[D].上海:上海交通大学,2006.
- [8] 郑培余,宗勇,姚绍文.一种交通信号控制系统分布式相位差优化和调整策略[J].交通与计算机,2004,22(2):3.

基于几何矩的自适应手势跟踪算法研究

周荣强, 全海燕, 熊志伟, 张天飞

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650093)

摘要:在 Mean-Shift 算法基础上,提出了一种新算法:用肤色检测与寻找最大连通域相结合的方法来自动选取跟踪的手势;采用图像几何矩替代 Mean-Shift 矢量,可以有效地跟踪到手势目标而且可以实现跟踪窗尺度随手势目标大小、角度及形状的改变而改变.实验结果表明,本算法成功地对动态且有形变的手势进行了实时跟踪,并且捕捉到其运动轨迹.算法平均每 s 约处理 27 帧图像,可以满足实时性要求.

关键词:手势跟踪;Mean-Shift 算法;连通域;肤色检测;几何矩

中图分类号:TP311 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.012

Research of self-adaption gesture tracking algorithm based on the geometric moment

ZHOU Rong-qiang, QUAN Hai-yan, XIONG Zhi-wei, ZHANG Tian-fei

(College of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: A new algorithm was proposed which based on the Mean-Shift algorithm. This algorithm can automatically select tracking gestures by combining skin color detection with seeking maximum connected domain; it using image geometric moment to alternate the Mean-Shift vector, and can also effectively track gesture target and achieve the size of tracking window changing along with the gesture's change of size, angle and shape. The experimental results showed that the algorithm can successfully track the dynamic and deformable gestures and capture its trajectory in real time. This algorithm processes about 27 frames per-second, and can meet the real-time requirements.

Key words: gesture tracking; Mean-Shift algorithm; connected domain; skin color detection; geometric moment

0 引言

手势是一种自然而直观的人际交流模式,是包含信息量最多的人体语言之一,且具有很强的视觉效果,因而手势完全可以作为一种有效的手段应用于人机交互.手势识别的研究可以应用于计算机辅助哑语教学、虚拟人的研究、电影制作中的特技处

理、医疗研究、游戏娱乐等诸多方面^[1-2].

基于视觉的手势识别要求必须先准确地检测到目标手势,然后再对其进行动态跟踪.目标跟踪方法多种多样,其中 Mean-Shift 算法因其计算复杂度低、鲁棒性好而成功地应用于计算机视觉目标跟踪^[3-5].文献[6]采用卡尔曼滤波更新目标模型.文献[7]选用一种新的颜色模型用于单颜色目标跟

收稿日期:2013-01-13

基金项目:云南省自然科学基金项目(2009ZC048M);昆明理工大学校人才培养基金项目(KKZ3201103022)

作者简介:周荣强(1986—),男,山东省潍坊市人,昆明理工大学硕士研究生,主要研究方向为信号处理与模式识别.

踪,但不能实现跟踪窗自适应的变换.文献[4]采用将跟踪窗口增减 10% 的方法实现跟踪窗自适应变化,但是有研究指出这种方法不可行.文献[8]用尺度空间理论实现跟踪窗的自适应的变化,但是其计算量较大,对弱目标效果不理想.仔细分析 Mean-Shift 算法不难发现,其存在以下问题:初始化跟踪目标时需要手动标定;尺度不变的跟踪窗容易使有尺度变化的目标丢失.本文将提出一种利用肤色检测与最大连通域相结合来自动选取跟踪目标,利用图像几何矩来不断更新跟踪窗尺度的算法.

1 Mean-Shift 跟踪算法

Mean-Shift 算法是一种无参数概率密度核函数迭代算法,即先算出当前点的偏移均值,移动该点到其偏移均值,然后以此为新的起点,继续移动,直到满足给定的条件,迭代结束^[6,9-10].

Mean-Shift 算法通过比较目标特征与候选特征的最大相似性来实现目标跟踪.目前所用的相似性度量为 Bhattacharyya 系数(假设 \hat{q}_u 代表初始目标特征的概率密度估计, $\hat{q}_u(y)$ 代表候选目标特征的概率目标估计),即

$$\hat{\rho}(y) \equiv \rho[\hat{p}(y), q] = \sum_{u=1}^m \sqrt{\hat{p}_u(y)\hat{q}_u}$$

可以将 Bhattacharyya 系数理解为 2 个 m 维单位向量夹角的余弦值.对 $\rho[\hat{p}_u(y), \hat{q}_u]$ 进行泰勒级数展开,然后对展开结果进行求导等一系列的化简后,即可得到偏移后的坐标

$$\hat{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\hat{x}_i - \hat{y}_0}{h}\right\|^2\right)\omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\hat{x}_i - \hat{y}_0}{h}\right\|^2\right)\omega_i} \quad (1)$$

其中, $g(x)$ 为核函数, ω_i 表示权重, h 表示跟踪窗的窗宽,当满足 $\|\hat{y}_1 - \hat{y}_0\| < \varepsilon$ 时, ε 为给定的正数, \hat{y}_1 就可认为是目标新的位置.

2 手势跟踪的几何矩算法

2.1 基于肤色检测与最大连通域的手势目标选择

1) 肤色检测. 由于 RGB 颜色空间不适用于肤色检测,因此本文首先将输入的初始帧(如图 1 所示)由 RGB 颜色空间转化到 HSV 颜色空间,然后利用肤色检测方法对其进行处理^[11],将手势大致分割出来,肤色检测结果如图 2 所示.

2) 最大连通区域的确定. 图像经过肤色检测

后,不仅是检测出手势来,还有许多小的噪声或者干扰,所以首先对图 1 进行膨胀腐蚀以尽量减少噪声点的干扰,结果如图 3 所示.由图 3 可知,图像噪声相对较少,手势区域面积最大,因此可以用寻找最大连通域的方法将手势用方框标示出来,本文采用 8 邻域确定其连通性.图 4 中用矩形框标示出的图像的最大连通域即为需要的手势目标,此处获取的手势目标可以作为手势跟踪的初始目标.

3) 反向投影图. 反向投影图是由输入图像某一位置上的像素值对应直方图上的一个特征值代替该像素值而得到的.用统计学术语表示,反向投影图像素点的值是观测数组在某个分布(如直方图)下的概率,可以表示为

$$bp(x_i) = \sum_{u=1}^m \hat{q}_u \delta[b(x_i - u)] \quad (2)$$

其中, $b(x_i)$ 表示在 x_i 这个位置上像素对应的直方图的第 $b(x_i)$ 个特征,直方图共有 m 个特征, \hat{q}_u 表示第 u 个特征的值.

2.2 基于几何矩的自适应跟踪窗

上述 Mean-Shift 算法中的式(1)的分子和分母实际上分别可以看作是图像的一阶矩和零阶矩.图像的 $p + q$ 阶矩定义为

$$M_{pq} = \sum_{j=0}^H \sum_{i=0}^W w(i, j) x_i^p y_j^q \quad (3)$$

此时用 Mean-Shift 算法确定手势中心就可以表示为



图 1 初始帧

图 2 肤色检测



图 3 膨胀腐蚀结果

图 4 连通域确定手势

$$x = \frac{M_{10}}{M_{00}} \quad y = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (4)$$

其中, M_{10}, M_{01} 表示一阶矩, M_{00} 表示零阶矩.

为了实现跟踪窗的窗宽随手势自适应地缩放, 需要计算图像的二阶中心矩, 定义为

$$MC_{pq} = \sum_{j=0}^H \sum_{i=0}^W w(i, j) (x_i - x_0)^p (y_j - y_0)^q \quad (5)$$

$$p + q = 2 \quad p, q \in N$$

式③和式⑤中, H, W 为第 n 帧图像手势区域跟踪窗 D_n 的高和宽; $w(i, j)$ 表示权重函数; (x_i, y_i) 为肤色特征像素坐标, (x_0, y_0) 为第 n 帧图像的手势区域中心 $C_n(x_0, y_0)$ 的坐标^[12-13].

因为手势区域与矩形框相比更接近于椭圆, 所以用椭圆框定手势区域, 那么只要计算出椭圆的长轴和短轴的长度以及椭圆的偏转方向即可(此时椭圆的偏转方向也就是椭圆长轴与水平方向的夹角). 由于二阶矩集可以把图像描述为具有特定大小与方向且以图像质心为中心的椭圆, 因此可以按照下列各式进行计算^[14]:

$$\eta_{pq} = \frac{MC_{pq}}{M_{00}^2} \quad p + q = 2 \quad p, q \in N \quad (6)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2\eta_{11}}{\eta_{20} - \eta_{02} + \sqrt{4\eta_{11}^2 + (\eta_{20} - \eta_{02})^2}}\right) \quad (7)$$

$$a = 4 \times \sqrt{\eta_{20}c^2 + 2\eta_{11}cs + \eta_{02}s^2} \quad (8)$$

$$b = 4 \times \sqrt{\eta_{20}s^2 - 2\eta_{11}cs + \eta_{02}c^2} \quad (9)$$

其中, $s^2 = (\sin\alpha)^2, c^2 = (\cos\alpha)^2, cs = \cos\alpha\sin\alpha$.

以上各式中 η, α, a 与 b 分别为中心距的归一化矩、椭圆长轴与水平方向的夹角、椭圆的长轴与椭圆的短轴. 通过式⑥—⑨可以不断更新跟踪窗的大小, 从而实现跟踪窗随手势自适应地缩放. 跟踪窗的自适应缩放可以更加精确地跟踪到手势区域, 减少由于跟踪窗尺度不变而使手势区域跟踪部分丢失或完全丢失的情况. 图5为 Mean-Shift 算法固定窗宽跟踪到的手势区域, 从图中可以看出手势尺寸与跟踪窗的比例极不协调; 图6为采用本文方法跟

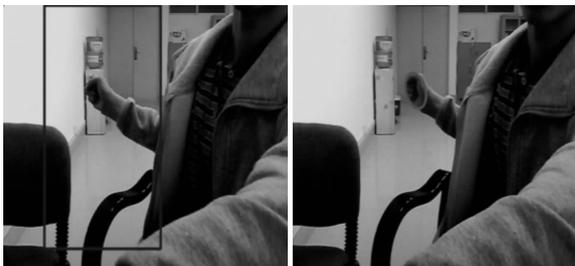


图5 固定窗宽

图6 自适应窗宽

踪到的手势目标区域, 从图中可知本文提出的方法使得跟踪窗随手势尺寸的变化而变化.

2.3 基于几何矩的手势跟踪算法

根据算法原理, 笔者提出如下基于几何矩的自适应手势跟踪算法的具体步骤.

步骤1: 第1帧图像预处理. 在预处理过程中通过用2.1节中1)所描述的寻找最大连通域的方法, 确定手势目标区域的范围 D_1 以及区域中心 $C_1(x_0, y_0)$.

步骤2: 计算第 $n+1$ 帧图像的反向投影图. 将第 $n+1$ 帧图像的 RGB 颜色空间转化为 HSV 颜色空间, 按照手势肤色特征, 根据式②计算本帧图像的反向投影图.

步骤3: 将第 n 帧图像确定的手势区域以及手势中心初始化为第 $n+1$ 帧图像的手势区域及手势中心, 即 $D_n \rightarrow D_{n+1}, C_n(x_0, y_0) \rightarrow C_{n+1}(x_0, y_0)$.

步骤4: 更新第 $n+1$ 帧图像的手势中心. 根据初始的手势区域 D_{n+1} 以及手势中心 $C_{n+1}(x_0, y_0)$, 计算第 $n+1$ 帧图像的零阶矩与一阶矩, 用式④更新手势区域中心为 $C_{n+1}(x, y)$.

步骤5: 验证是否满足手势目标区域中心收敛的条件. 将 $C_{n+1}(x, y) \rightarrow C_{n+1}(x_0, y_0)$, 并判断 $C_{n+1}(x, y)$ 是否满足收敛条件 $\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} < \varepsilon$ 或最大的迭代值 \max_iter (本实验 \max_iter 取值为10), 如果不满足条件则返回第4步, 如果满足条件则认为找到手势目标区域中心, 进入第6步.

步骤6: 更新第 $n+1$ 帧图像中手势目标区域的跟踪窗口尺度. 用式⑤计算手势区域的二阶中心距, 并将计算结果代入式⑦计算手势目标区域的倾斜角 α (即跟踪窗的方向), 用式⑧和式⑨计算手势目标区域的长轴 a 和短轴 b , 可得跟踪窗口的大小 D_{n+1} .

步骤7: 读取下一帧图像, 如果视频终止, 则结束; 否则转到第2步跟踪下一帧图像.

3 实验结果与分析

本实验中, 视频的每帧图像分辨率为 640 像素 \times 480 像素, 软件环境为 Win7, VS2010; 硬件环境为 CPU Intel(R) Core(TM)2 @ 2.10 GHz 2.10 GHz, 内存 2 G.

实验1: 为验证本文采用肤色检测与最大连通域相结合来确定初始目标的方法的有效性, 分别用 Mean-Shift 算法与本文算法对实时视频中的手势区

域进行初始跟踪.图7给出了2种方法的初始化跟踪结果.



图7 Mean-Shift 算法与本文算法的初始跟踪结果对比

由图7可知,通过 Mean-Shift 算法选定的矩形区域同通过本文算法选定的椭圆区域结果非常接近,说明本文提出的采用肤色检测与最大连通域相结合确定初始目标的方法是有效的.

本文算法查找最大连通域的时间,5次实验依次为0.00834s;0.00876s;0.00884s;0.00849s;0.00806s.5次实验中,查找最大连通域所用的最长时间为0.00884s,最短时间为0.00806s,平均耗时为0.00850s,说明本文算法初始化跟踪手势目标时具有很强的实时性.

实验2:为进一步验证本文算法的实用性,分别用 Mean-Shift 算法与本文算法对视频中做各种角度、大小、形变的手势进行动态跟踪.图8给出了2种方法的动态跟踪结果对比.

由图8可知,Mean-Shift 算法中目标跟踪窗不能根据目标尺度及目标旋转方向的改变而改变,因此视频中的手势在旋转、缩放或手型改变时,目标跟踪窗的大小不变,导致在手势跟踪时容易丢失一部分手势目标甚至丢失全部手势目标而导致跟踪失败,进而影响后续的手势识别;而本文所提算法利用图像几何矩有效地实现了目标跟踪窗的尺度随手势区域方向的变化、尺度的变化、形状的变化而自适应地缩放,因而本算法更适合手势跟踪领域.

本文算法每帧图像的处理时间,5次实验依次为0.03476s,0.03847s,0.03516s,0.03870s,0.03616s,本文算法处理每帧图像所用最长时间为0.03870s,最短时间为0.03476s,平均时间为0.03665s.这说明本算法平均每s可处理27帧图



图8 Mean-Shift 算法与本文算法的动态跟踪结果对比

像左右,能够应用于实时视频处理.

实验3:利用本文算法对手势运动轨迹进行实时跟踪并将轨迹显示在跟踪帧中,实验结果见图9.

由图9可知,本文算法通过对手势运动轨迹的跟踪可以实现手写数字等.可以在此基础上做进一步的研究,如对手写数字的识别以及通过手势控制电脑实现类似触摸屏的功能等.

4 结论

本文提出了一种基于几何矩的自适应跟踪窗的手势跟踪算法.该算法结合肤色检测算法与最大连通域检测算法,选取跟踪手势目标,并通过计算目标区域的几何矩,更新所跟踪手势目标窗的大小和方向,实现手势目标的自适应跟踪.实验结果表明:

1)该算法能有效地跟踪手势目标的平移、旋转和尺度大小改变等动态变化,有效地实现对手势目



图9 手势运动轨迹

标的自适应跟踪。

2) 本文提出的算法平均每 s 可处理 27 帧图像左右, 可以满足实时性要求。

由于本文在跟踪手势目标时, 采用了肤色的信息对手势区域进行跟踪, 如果有其他接近肤色的物体时, 本算法的跟踪效果会受到影响, 所以后期的研究工作是寻找一个函数或者一系列函数能够描述手势的特征, 并将手势特征融合到本文算法中, 这样可以进一步增加本文算法的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] 任海兵, 祝远新, 徐光佑, 等. 基于视觉手势识别的研究综述[J]. 电子学报, 2000, 28(2): 118.
- [2] 张秋余, 胡建强, 张墨逸. 基于区域生长的 Mean-Shift 动态变形手势跟踪算法[J]. 模式识别与人工智能, 2010, 23(4): 580.
- [3] Fukunaga K, Hostetler L. The estimation of the gradient of

a density function, with applications in pattern recognition [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1975, 21(1): 32.

- [4] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564.
- [5] Comaniciu D, Meet P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603.
- [6] Peng N S, Yang J, Liu Z. Mean shift blob tracking with kernel histogram and hypothesis testing[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(5): 605.
- [7] Jeong M H, You B J, Oh Y, et al. Adaptive Mean-Shift tracking with novel color model[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Piscataway: IEEE, 2005: 1329 - 1333.
- [8] 张恒, 李立春, 于起峰. 尺度方向自适应 Mean-Shift 跟踪算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1133.
- [9] Birchfield T, Rangarajan S. Spatiograms versus histograms for region-based tracking[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego: IEEE, 2005: 1158 - 1163.
- [10] Nummiaro K, Koller Meier E, Van Gool L V. An adaptive color-based particle filter[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(1): 992.
- [11] 陈锻生, 刘政凯. 肤色检测技术综述[J]. 计算机学报, 2006, 29(2): 194.
- [12] 殷涛, 葛元, 王杯泉. 基于几何矩的字母手势识别算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(18): 127.
- [13] 桑茂栋, 赵耀. 基于几何矩的抵抗 RST 攻击的数字图像水印[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 76.
- [14] 李秀明, 石照耀. 基于不变矩的椭圆(圆)识别方法[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(11): 1136.

基于手机文本的移动增强现实系统

方莹

(商丘师范学院 计算机与信息技术学院, 河南 商丘 476000)

摘要:针对如何将文字识别技术应用到移动增强现实中的问题,将OCR识别技术与增强现实技术相结合,开发了基于手机文本的移动增强现实的原型系统.系统尝试了在智能移动终端上实现真实场景与虚拟增强信息的融合显示,利用快速、稳定的文字识别技术实现文字特征的识别,将二叉树与链表相结合精炼文本的关键信息,并在智能手机显示端叠加相应的增强信息.经实验验证,该方法能在智能终端上实时地对文本进行增强显示,不依赖服务器、易于携带、通用性高.

关键词:增强现实;光学字符识别;智能手机;文字识别

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.013

Mobile augmented reality system based on smart phone texts

FANG Ying

(School of Computer & Information Technology, Shangqiu Normal College, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Aiming at the application of the text recognition technology to the mobile augmented reality, a prototype system based on the mobile augmented reality of the smart phone was developed, which combined the OCR technology with the augmented reality technology. This system tried to achieve the integrated display of real scene and virtual enhancing information on the smart mobile devices. It can identify the text features using the fast, stable character recognition technology, refine the key information about the text using the combination of binary tree and lists, and superimpose the enhancing information correspondingly in the smart phone. The experiment results showed that the proposed method could achieve real-time enhancement according to the displaying text in the smart phone, and was not dependent on servers, easy to carry, versatile to play.

Key words: augmented reality; optical character recognition; smart phone; text recognition

0 引言

增强现实AR技术^[1]以计算机生成的虚拟物体为主体,将虚拟物体与真实环境相结合,使得虚拟物体从感官上成为周围真实环境的组成部分,为真实的场景环境提供信息扩展和增强技术^[2].光学字符识别OCR经过近一个世纪的发展,已成为当今模

式识别领域中最活跃的研究内容之一^[3-4].在办公自动化领域,作为智能信息采集手段的印刷图文OCR技术已得到广泛应用,市场上已有多种实用系统(OCR扫描输入系统、银行打印票证输入复核系统等),已取得了良好的经济效益和社会效益^[5].但这些系统多是运行在电脑上的,随着智能手机的广泛应用,开发适合移动手机性能和特点的OCR系统

是当前一个新的研究领域。

人类的文明通过书籍代代相传,很多人的生活都离不开阅读.但是成千上万的硬生生的文字容易让人枯燥,看后也会很快忘记.将文字与生动的媒体信息(如图片、音频和视频等)关联在一起,在智能手机上形成生动的画面,达到使文字阅读变得生动,更好地帮助人们理解和记忆文字的目的,是具有重大实用价值和社会意义的工作。

本文将设计一种基于文字关键信息的移动增强现实系统,分析研究其关键技术,并在移动智能手机上进行验证。

1 系统结构

系统总体功能框图如图1所示:采用高性能的智能手机作为移动终端,以手机自带的高精度摄像头作为图像采集源,采集图像实时的关键帧,传送给字符识别模块进行字符识别,识别后输入关键信息提取模块,提取关键信息并建立有效的关键信息到增强信息的索引,再叠加相应的增强信息到真实环境中去。

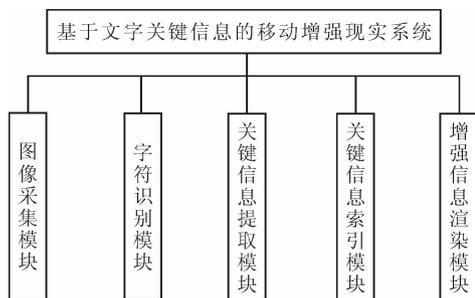


图1 系统模块图

2 系统识别原理

OCR技术通过摄像、拍照或扫描等光学输入方式获取车牌、报纸、票据和书籍等材料上的文字信息,最终转换为计算机可以识别的数字文字信息.目前OCR技术在数字图书馆、办公自动化和城市交通管理中已经取得了广泛应用。

2.1 OCR图像文字识别算法

OCR字符识别技术是一个系统的技术集(各组成部分见图2)。其中,作为输入部分的图像采集实现的主要功能是获得高质量的文本图像,从数据源提高图像的输入正确率.最初采集到的图像是低质量的文本图像,需经过一系列的预处理(主要包括灰度化、二值化、去噪声、倾斜校正等操作)以供后

续模块使用。

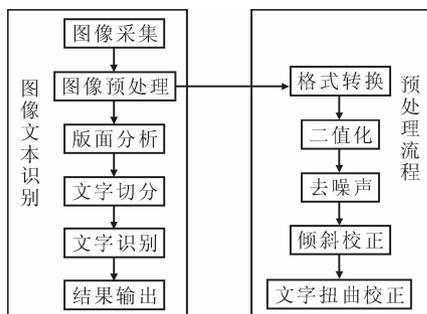


图2 OCR识别原理框图

由于OCR系统对图像处理的质量要求较高,例如在二值化和去噪声中不恰当的处理会导致文字笔划的断裂,这将严重影响OCR识别的正确率.同时OCR对图像的倾斜也很敏感,因此图像的倾斜校正处理也至关重要.版面分析用于处理复杂版面的文本图像,主要完成对整幅图像中文字区域、图像区域和表格等区域的划分,划分出来的不同区域将采取不同的方式做识别处理.文字切分用于将文本图像中的单个文字切割出来,形成单个字符图像,其后还需要对字符图像进行细化和归一化处理.文字切分通常是影响OCR识别正确率的重要因素.文字识别部分将单个字符图像与文字特征数据库做模式识别处理.校对处理部分主要是根据文本的语义信息判断字符识别结果是否正确,并进行纠错,校对之后的文本将作为OCR识别的最终结果输出。

目前,OCR字符识别技术逐渐趋于成熟,在诸多领域中已取得成功的应用.相比于英文识别,汉字字符识别的难度更大,但目前汉字字符识别技术已经能够达到非常好的效果^[6].清华大学在OCR识别软件的开发方面走在中国的前列,其开发的OCR Version5在文本图像质量好的情况下,OCR识别简体汉字正确率可以达到99.67%,可满足商用的要求.由此可见,将现有的OCR字符识别技术与增强现实技术结合,在具有一定处理能力的智能手机上开发基于文本识别的移动增强现实应用系统,应能够满足实际应用的需要。

2.2 关键信息的提取

关键信息是指用户想查询的某个概念或某方面内容的关键词,可由一个或多个关键词组成,关键词之间可形成有机的联系.通过考证关键词在现实世界特定领域中各方面的属性,系统对关键词做了2种划分:词空间和类空间.某个领域的所有关键

词构成词空间,形式如一棵复杂树^[7],而树的根节点代表包含该领域关键词的类(图3显示类与关键词的关系).类也是一类关键词,不同领域的类之间形成平行链表结构(形式如图4所示),表明不同领域的类可以平行访问,同一个类的关键词可以平行访问,这种关系有利于关键词与索引库中的关键信息进行匹配.

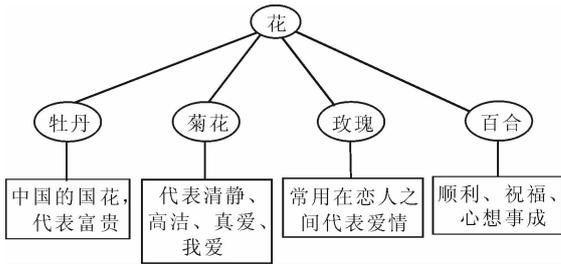


图3 类与关键词的关系

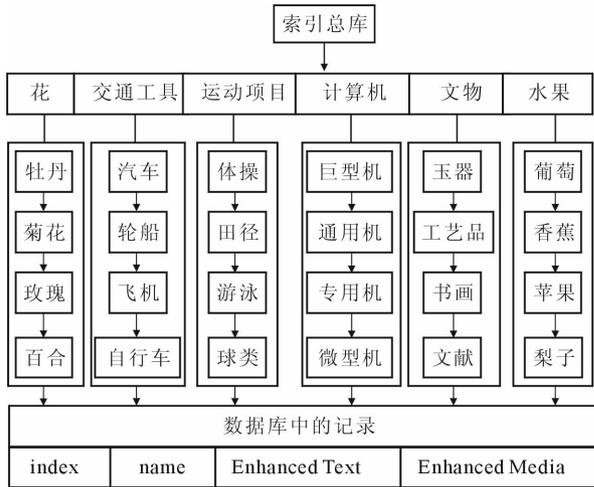


图4 关键词索引总图

确定了关键词的词空间和类空间划分后,下一步工作是从OCR识别出的语句中找到关键信息,并提取出关键信息中隐含的关键词.这里需要做2部分工作:一是分析原文结构,包括预处理、关键词划分、关键词依赖关系分析;二是关键词过滤.过程如下.

对OCR识别的文本进行自然语言处理.1)预处理:主要工作是将连续书写的句子切分成单个词,并确定词性、抽取关键词、词概念类划分等.文献^[8]将表示句法组成的基本结构模板与表示上下文环境特征的转换规则2类知识结合起来识别基本名词短语,抽取文本的原始词,生成词汇表.本文正是借鉴了该方法,提取那些对文本内容作用大的词汇(如名词、动词)并插入到关键信息表.2)关键词

划分:从关键信息表中进行关键词划分,目的在于确定各级关键词是属于某个概念的关键词还是代表某一类的关键词.3)关系分析:分析关键信息表中是否存在关键词之间依赖关系,确定各关键词是否属于同一类,或者一个关键词是否为另外一个关键词的子类.

过滤关键信息表中的关键词.1)通过关键词索引总表过滤:查找过滤掉不属于关键词索引总表中的词,确定剩下的关键词所属的类关系.2)建立关键词的增强树:根据关键词在索引树的结构,判断该词是否是类,若是,则建立该领域的增强树.关键词的索引库中设置了从大概概念的词库平行结构到子树分词词库链表等词库结构信息表.再通过查找索引表,读取关键词的链表连接到具体的数据库,建立一个对该段文字进行增强的带有音频、视频的多子树.该多子树的叶子节点都存储了具体的文本介绍信息,音频和视频信息存储在数据库中.如果是单独的类下面的关键词,就返回该关键词的增强信息在数据库中的索引号.

当对每段文本进行增强时,返回的信息为某个关键词在关键词索引库中的索引位置,下一步系统将根据索引号查找数据库(如图4所示),访问该关键字的增强信息.如果返回的是一棵增强树的指针,则确定该关键词在树中的位置,并从数据库中取出各个子树的关键词的增强信息,将其保存到相应子树的叶子节点.当要增强显示时,从左至右分别对各个子树关键词进行增强.这样做的目的是体现概念附属的子树的关系,并实现对该类下包含的相关领域进行增强说明,让用户除了理解大的类概念还能理解所包含领域比较细节的概念.因此在增强显示树建立成功以后开始对关键词进行视频和音频增强显示,并叠加相应的文本框以辅助提示,用以加深对概念的理解.同时,当该关键词增强显示完后,将对该关键词的同一增强树的相同属性的概念都进行一遍增强显示,以增强与相关概念的区别.

2.3 增强渲染

增强信息渲染模块从关键信息索引模块找到当前所提取关键信息所对应的增强信息在服务器数据库中的记录(见表1).从记录中读取当前场景需要叠加的多媒体信息(包括图片、动画、音频、视频和3D模型)在服务器中的存储路径.将该路径下的需要增强的媒体信息在当前文本场景下进行叠

加渲染,让生动的多媒体信息增加用户对文字的理解.

3 实验

3.1 实验环境

实验用到的软硬件平台为:手机型号为 SAMSUNG S5830,CPU 为高通 MSM7227 800 M,RAM 为 150 M,OS 为 Android 2.2.

无线网络环境采用局域网 WiFi,其传输速度比 3G 快很多.

3.2 实验效果

为了测试基于文本识别的移动增强现实的性能,对 4 段文字分别进行了增强测试.每段文字都进行了识别的内容测试和增强显示结果的测试.根据系统测试的结果,能快速、正确地识别文字内容得出关键词;高效地渲染用户需要的增强信息.系统实验效果如图 5,图 6 所示.图 5 是开启移动增强现实系统开始对文本段落进行增强显示.图中的扫描文字的方框是进行 OCR 识别的区域.

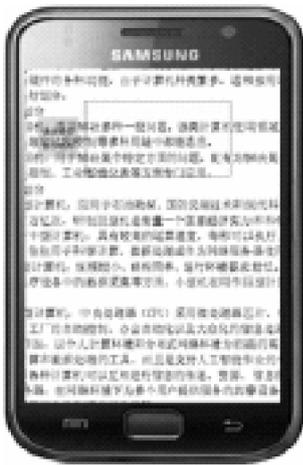


图 5 基于文字识别的移动增强现实系统初始框图

图 6a),b),c),d)分别显示了对提取到的关键信息“通用机”、“专用机”、“巨型机”、“微型机”进行图片增强显示和简短的文字增强介绍的情况.如图 6a)中对提取到的关键词“通用机”加入表 1 第 1 行给定的介绍性文字“适用解决多种一般问题.该类计算机使用领域广泛、通用性较强,在科学计算、数据处理和过程控制等多种用途中都能适应.”及相应的图片文件(位于“D:/image/General Computer.jpg”).其余 3 幅图片类似.



图 6 对 4 种机型文字的增强效果图

为量化系统性能,测试对文字进行增强的响应时间和增强显示结果的正确率即响应精度,结果见表 1.

表 1 系统性能测试数据表

文字	响应时间/s	响应精度/%
100 段文字	1.12	96.5
500 段文字	1.16	94.2

由表 1 可见,系统对文字进行增强的响应时间比较稳定,即使在测试文本段增多的情况下都能在 1 s 左右进行响应.对文字的增强显示的结果精确率也比较高,基本能正确显示相对应的增强媒体.即使增加文本段到 500 段,同时增多要匹配的媒体信息,但正确率仍保持在 94% 以上.

实验展示出系统的应用非常贴近实际场景,能消减用户面对一大堆枯燥文字的烦恼,使阅读变得生动,更容易理解和记忆.响应时间和增强显示的精度方面都是比较理想的,在用户能接受的范围内,具备很好的商用前景.

4 结论

本文将 OCR 识别技术与增强现实技术相结合,开发了一个基于手机文本的移动增强现实的原型系统.测试结果表明,该方法具有较强的鲁棒性和实用性,能正确地叠加用户需要的增强信息.在枯燥的文本环境下,通过叠加一些生动的视频、音频或者图片能有效地改善阅读的效果.该原型系统目前只能对相对简单的文字进行增强显示,在后续的开发中还需要结合自然语言处理中的分词方法,自动提取关键词来实现对大规模复杂文字关键信息的提取和实现对相应关键信息的增强渲染.

参考文献:

- [1] Azuma R, Baillet Y, Behringer R, et al. Recent advances in augmented reality[J]. Computer Graphics and Applications, 2001, 21(6):34.
- [2] Zaeh M, Vogl W. Interactive laser-projection for program-

ming industrial robots[C]//Proc Fifth IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, New York:ACM,2006:125-128.

- [3] Thomas B, Close B, Donoghue J, et al. ARQuake: an outdoor/indoor augmented reality first person application [C]//Proc of 4th International Symposium on Wearable Computers, Atlanta:Springer Verlag,2000.
- [4] 朱怀中.基于 Android 的手机 OCR 识别技术设计与实现[J].电子科技,2012,25(9):45.
- [5] 周源,白顺科.基于上下文语义词库的 OCR 识别方法[J].中国制造业信息化,2008,37(23):62.
- [6] 丁晓青,郭繁夏.中文 OCR 技术的最新进展[J].电子出版,1995(12):18.
- [7] Nister D, Stewenius H. Scalable recognition with a vocabulary tree [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, Washington D C:IEEE,2006.
- [8] 俞士汶.现代汉语语法信息词典详解[M].北京:清华大学出版社,1998:111-358.

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。

基于 Android 的手机通讯录 管理系统的研究与实现

笪林梅

(江苏财经职业技术学院 计算机系, 江苏 淮安 223003)

摘要:针对传统手机通讯录管理的数据少、浏览和查询不便等缺陷,研究开发了基于 Android 的手机通讯录管理系统. 该系统使用 Java 语言,在 Eclipse 集成开发平台上实现,数据库设计采用 SQLite. 本系统能够快速、便捷地实现通讯录的显示、添加、删除、修改和查询等操作,具有良好的应用前景.

关键词:Android;手机通讯录;Java;Eclipse

中图分类号:TP315.69 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.014

Research and implementation of mobile phone address book management system based on Android

DA Lin-mei

(Department of Computer, Jiangsu Vocational and Technical College of Finance & Economics, Huaian 223003, China)

Abstract: Aiming at the limited data and inconvenience of browse and query of the traditional mobile phone address book management, the mobile phone address book management system based on Android was developed. This system used Java language, and was realized in the Eclipse integrated development platform. The database design of the system used SQLite. The system can quickly and conveniently realize address book display, add, delete, modify and query operations. It has a good application prospect.

Key words: Android; mobile phone address book; Java; Eclipse

0 引言

随着智能手机的逐渐普及,人们对手机应用的需求更加广泛. Android 的兴起,给智能手机业务开发带来了新鲜的血液. Android 的优势在于:源代码开放,便于开发人员更清楚地把握业务的实现细节;基于 Java 语言,使得 Android 应用开发更加容易;底层基于 Linux,容易移植到各种嵌入式平台中^[1].

通讯录管理是手机应用的重要部分,通过它可

以得到准确快捷的通讯录信息. 传统手机中通讯录管理存在着数据少、浏览和查询不便等缺点. 目前,基于 Android 操作系统的手机得到广泛应用,虽然 Android 自带了功能强大的、具有多种管理功能的通讯录管理系统,但是,手机用户对通讯录管理功能的需求越来越高,尽可能快速地添加、显示、修改、删除、查询通讯录数据,使通讯录管理更加方便、灵活是手机用户的迫切要求. 据调查,目前有较多的开发者已开发出基于 Android 的通讯录管理系统. 本文的研究目标在于:开发功能全面、用户体验丰

富、使用方便的通讯录管理系统,进一步满足部分 Android 手机用户的需求。

1 系统设计

1.1 Android 的系统架构

Android 系统采用分层架构,从上到下依次为应用层、应用框架层、系统运行库层和 Linux 内核层。其中,应用层是 Android 自带的核心应用程序,如联系人管理、电子邮件、短信、日历、浏览器、地图等,这些程序都是基于 Java 语言的。应用框架层提供了包括视图系统、内容提供器,以及窗口、活动、通知、位置、资源、电话和包管理器等部分组件,是 Android 应用程序开发的基础^[2]。

1.2 系统技术

本系统是基于 Android 技术,在 Windows 7 环境下,使用 Java 语言,在 Eclipse 集成开发平台上实现的。数据库设计采用 Android 系统集成的嵌入式关系型数据库 SQLite。

Android 的开发工具包(Android SDK)作为 Android 的软件包以及软件框架、硬件平台、操作系统等建立应用软件的开发工具的集合,能够完成手机通讯录系统人机交互的设计和良好界面的开发。

Eclipse 是一个开放源代码的 Java 可扩展开发平台。在本系统开发过程中,通过插件组件构建开发环境。ADT 是 Android 在 Eclipse 上的开发工具,安装 ADT 可以为 Android 系统开发提供开发工具的升级或变更。

SQLite 的主要设计目标是嵌入式软件,能够支持多种主流操作系统,处理速度快。在本系统开发中,使用 SQLite 来存储结构化数据。

为了简化界面设计,本系统采用目前比较流行的界面设计方法,即将界面描述部分的程序代码抽取到程序外部的 XML 描述文件中。在系统设计中,需要定义包含 Activity 在内的组件及相应的函数并使用 Intent 实现屏幕间的移动。Activity 是 Android 的呈现层,显示可视化的用户界面,接收与用户交互所产生的界面事件。系统包括多个 Activity,Intent 可以实现不同 Activity 之间的切换和数据传递。Intent 即意图,它是动作的完整描述,包含了 Activity 与其他组件之间交互的数据信息^[3]。

1.3 系统功能

据手机功能的调查数据显示,九成以上消费者

都使用手机通讯录工具。随着手机通讯录功能的不断加强与完善,手机通讯录对于人们的意义,已不仅仅是单纯地显示电话号码,而是向着个性化、人性化的方向发展。今后的发展趋势就是从通讯录发展为名片夹,即管理包含联系人的手机号码、QQ、地址、电子邮件、备注等多项内容。

Android 手机通讯管理系统的主要功能包括:添加、显示、修改、删除、查询、呼叫、发送短信、发邮件、备份数据、还原数据等。

1.4 系统业务流程

Android 手机通讯管理系统是一个集 Web、数据库、移动终端为一体的应用程序。它的业务流程是:用户进入手机通讯管理系统后,会看到联系人列表主菜单,其中包括添加联系人、搜索联系人、退出菜单项。

该系统的主要用户是 Android 手机用户。对于用户而言,通讯录上按钮是用户向系统输入操作请求的输入设备,GUI 是用于向用户输出信息的输出设备。系统的业务流程如图 1 所示。

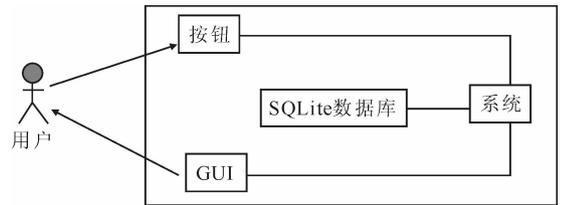


图 1 系统业务流程图

2 Android 通讯录管理的实现

本文以联系人浏览功能、添加联系人和查找联系人为例介绍系统功能的实现。

2.1 联系人浏览功能

在通讯录系统登录界面输入正确的用户名和密码后,进入系统并显示联系人列表界面,该列表由 ListView 控件生成。打开数据库(如果数据库不存在则创建数据库,并创建数据表),查找数据库中的所有联系人,把联系人姓名和移动电话号码这 2 项填充到 ListView 的 adapter 中。每 1 行显示 1 个联系人的姓名和手机号码,联系人的显示顺序是根据插入数据库的顺序显示的。点击某个联系人会进入查看联系人界面,可以查看联系人的详细信息,对联系人进行编辑、删除、拨打电话和发送短信等操作。

点击 MENU 按钮时,就会显示主菜单项,其中

包括添加、查找、删除、菜单和退出。

点击添加菜单,会进入添加联系人界面,可以输入联系人相关信息,完成联系人添加功能;点击查找菜单,会进入联系人查找界面,可以进行联系人查找,搜索想要找的联系;点击菜单,会出现显示所有、删除所有、备份数据、删除数据、更新、返回等详细信息;点击退出菜单,则会退出该系统。系统主菜单如图 2 所示。



图 2 系统主菜单

关键代码如下:

```
public ArrayList getAllUser(boolean privacy) {
    ArrayList list = new ArrayList();
    Cursor cursor = null;
    if(privacy) {
        cursor = dbInstance.query(DB_TABLENAME,
            new
            String[] { "_id", " name ", " mobilephone ", " office-
            phone ", " familyphone ", " address ", " othercontact ", "
            email ", " position ", " company ", " zipcode ", " remark ", "
            imageid" },
            "privacy = 1", null, null, null, null);
    } else {
        cursor = dbInstance.query(DB_TABLENAME,
            new
            String[] { "_id", " name ", " mobilephone ", " office-
            phone ", " familyphone ", " address ", " othercontact ", "
            email ", " position ", " company ", " zipcode ", " remark ", "
            imageid" },
            "privacy = 0", null, null, null, null);
    }
}
```

2.2 添加联系人模块

添加联系人界面使用 EditText 控件来添加联

系人所有信息,处于可编辑状态,手机号和座机号的 EditText 设定为只能输入数字。添加完信息后点击确定按钮,触发确定按钮,点击监听事件,从而对数据库中该联系人的信息进行添加并添加到数据库中,然后自动返回联系人浏览界面。点击取消按钮会返回联系人浏览界面。添加联系人界面如图 3 所示。



图 3 添加联系人界面

关键代码如下:

```
public long insert(User user) {
    ContentValues values = new ContentValues();
    values.put("name", user.username);
    values.put("mobilephone", user.mobilePhone);
    values.put("officephone", user.officePhone);
    values.put("familyphone", user.familyPhone);
    values.put("address", user.address);
    values.put("othercontact", user.otherContact);
    values.put("email", user.email);
    values.put("position", user.position);
    values.put("company", user.company);
    values.put("zipcode", user.zipCode);
    values.put("remark", user.remark);
    values.put("imageid", user.imageId);
    values.put("privacy", user.privacy);
    return dbInstance.insert(DB_TABLENAME, null,
    values);
}
```

2.3 查找联系人模块

采用 SQL 模糊查询,可以只输入联系人姓名或号码中的一部分,在 SQL 语句中联系人姓名的前后添加“%”,即可查找到所有包含该部分的联系人,并在 ListView 中显示所有联系人的姓名和手机号

码. 按姓名查找联系人界面如图 4 所示.



图 4 按姓名查找联系人界面

关键代码如下:

```
public ArrayList getUsers( String condition, boolean privacy) {
    ArrayList list = new ArrayList();
    String strSelection = "";
    if(privacy) {
        strSelection = " and privacy = 1";
    } else {
        strSelection = " and privacy = 0";
    }
    String sql = "select * from " + DB_TABLENAME
+ " where 1 = 1 and ( name like '%" + condition +
"%'" +
    " or mobilephone like '%" + condition + "%'
or familyphone like '%" + condition + "%' " +
    " or officephone like '%" + condition +
"%' )" + strSelection;
    Cursor cursor = dbInstance.rawQuery(sql, null);
    while( cursor.moveToNext() ) {
        HashMap item = new HashMap();
        item.put( "_id", cursor.getInt( cursor.getColumnIndex( "_id" ) ) );
        item.put( " name", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " name" ) ) );
        item.put( " mobilephone", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " mobilephone" ) ) );
        item.put( " officephone", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " officephone" ) ) );
        item.put( " familyphone", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " familyphone" ) ) );
        item.put( " address", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " address" ) ) );
```

```
        item.put( " othercontact", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " othercontact" ) ) );
        item.put( " email", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " email" ) ) );
        item.put( " position", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " position" ) ) );
        item.put( " company", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " company" ) ) );
        item.put( " zipcode", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " zipcode" ) ) );
        item.put( " remark", cursor.getString( cursor.getColumnIndex( " remark" ) ) );
        item.put( " imageid", cursor.getInt( cursor.getColumnIndex( " imageid" ) ) );
        list.add( item);
    }
    return list;
}
```

3 结语

Android 平台因其优异的性能和开放性,在智能手机上日益得到广泛应用. 本文针对现有手机通讯录系统数据少、浏览和查询不便等缺陷,设计了基于 Android 的通讯录管理系统. 系统开发采用 Java 语言,在 Eclipse 平台上实现,数据库设计采用 SQLite. 该系统交互性好、操作简便、易于扩展,具有良好的手机应用前景.

参考文献:

- [1] 韩超,梁泉. Android 系统原理及开发要点详解[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] 方传蔚,谢维波. 基于 Android 的短信加密研究与实现[J]. 通信技术,2012,45(6):14.
- [3] 弋改珍,解争龙,张琨. 基于 Android 的火车时刻表查询系统设计与实现[J]. 现代电子技术,2012, 35(4):41.
- [4] 舒后,王国伟. 基于 Android 系统的手机交通查询软件的设计与实现[J]. 北京印刷学院学报,2011, 19(4):68.
- [5] 夏帮贵. 基于 Android 平台的移动学习系统[J]. 西华大学学报:自然科学版,2011,30(5):81.
- [6] 刘卫国,姚显禹. Android 与 J2EE 平台间即时通信的研究与实现[J]. 计算机系统应用,2008(12):118.

新三维混沌系统电路仿真及错位同步电路实现

吴艳敏, 方洁, 黄春

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:提出了一个新的三维混沌系统,该系统含有5个参数,每个状态方程均含有非线性乘积项.利用Multisim电路仿真软件验证了系统的混沌行为及物理可实现性;设计了非线性控制器以实现驱动系统与响应系统的错位投影同步;通过调整可变电阻实现了混沌系统状态变量按照不同比例因子的错位投影同步.错位同步电路运行结果表明:所设计的同步策略方法简单,物理可实现性高,可有效提高保密通信的安全性.

关键词:混沌系统;混沌同步;电路实现;错位同步

中图分类号:TM132 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.015

The dislocated projective synchronization circuitry realization and circuitry simulation of a new three-dimensional chaotic system

WU Yan-min, FANG Jie, HUANG Chun

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

Abstract: A new three-dimensional chaotic system was reported. This new system contains five system parameters and each equation contains nonlinear term. The chaotic behavior and physical realization of this system were verified by multisim circuit simulation software. A nonlinear controller was designed to realize the dislocation projective synchronization of the drive system and the response system. The dislocation projective synchronization which chaotic system state variables change according to different scale factors was achieved by adjusting the variable resistor. The results of the dislocation synchronization circuit showed that this synchronization strategy was simple and physical realizability was high. It could effectively improve the security of confidential communications.

Key words: chaotic system; chaotic synchronization; circuitry realization; dislocated projective synchronization

0 引言

混沌是非线性动力学系统特有的一种运动形式,是自然界普遍存在的复杂现象.随着对混沌研究的深入和实际工程需要的增加,各种非线性混沌系统被相继提出,并得到了广泛的研究,如 Lorenz

系统, Rossler 系统, Chen 系统, Lü 系统, Liu 系统^[1-5],及其他新的混沌系统^[6-8].自1990年L. M. Pecora等^[9]发现了混沌信号可以实现同步,从而为混沌保密通信提供了可能之后,就掀起了混沌同步控制研究的热潮.文献[10]给出了一种错位修正函数投影同步方法,并将其应用于保密通信,取得了

良好效果. 文献[11]提出了一种混沌系统的统一投影同步方法,并以多卷波混沌系统和超混沌 Qi 系统为例进行了数值仿真. 文献[12]给出了四维超混沌 Qi 系统的错位投影同步,并将该同步方案应用到保密通信中. 上述文献关于混沌系统本身特性的研究以及控制与同步的研究虽然很多,但大多是理论分析和数值计算,实际电路实现的研究报道并不多. 混沌及混沌同步的电路实现因其具有工程应用前景和实证价值而处在更加显著的地位. 因此发现和构造新混沌系统,继而进行混沌电路及混沌同步电路实现,为混沌系统在电气电子测量等工程领域的进一步应用奠定了基础.

本文拟提出一个新的三维混沌系统,利用 Multisim 电路仿真软件验证系统的混沌行为,研究该系统的错位投影同步,设计非线性控制器,实现 2 个初值不同的新系统的错位投影同步,通过电路实验结

果实证新三维混沌系统的存在性及错位同步方案的可行性.

1 新三维混沌系统的电路仿真

新三维混沌系统的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = -ax - by + yz \\ \dot{y} = -cx + dy - xz \\ \dot{z} = -rz + xy \end{cases} \quad (1)$$

其中, x, y, z 为系统的状态变量; a, b, c, d, r 为系统的控制参数. 当参数 $a = 35, b = 3, c = 10, d = 17, r = 5$ 时, 系统(1)表现为混沌运动,存在一典型的混沌吸引子,其 Matlab 数值仿真图如图 1 所示.

考虑采用线性电阻、线性电容、运算放大器 LM741、模拟乘法器 AD633 来实现系统(1)的电路,其中运算放大器用来进行电路的加减运算,模拟乘法器用来实现三维混沌系统中的非线性项. 考虑到

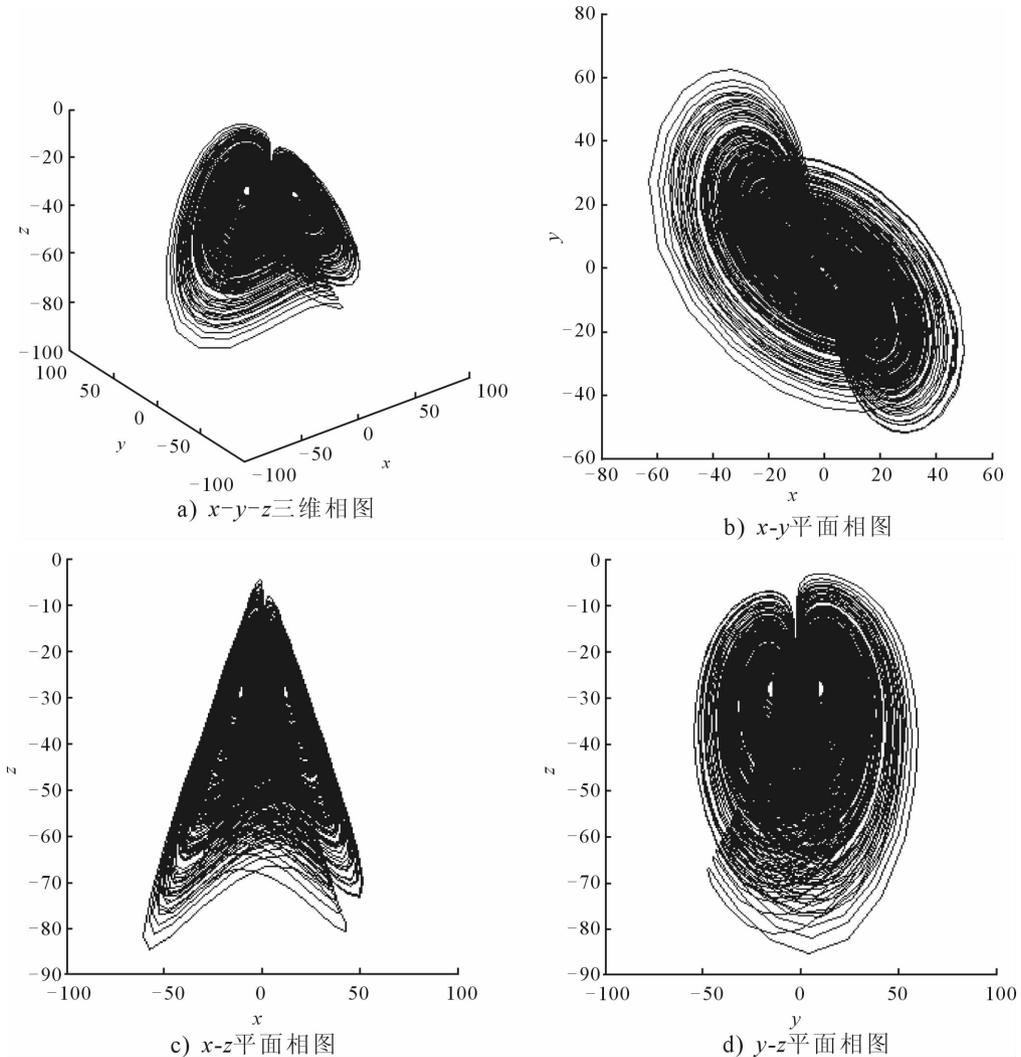


图 1 系统(1)的混沌吸引子之 Matlab 数值仿真图

LM741 的允许电压仅为 $\pm 18\text{ V}$, AD633 的允许电压仅为 $\pm 10\text{ V}$, 而系统状态变量则处于一个较大的动力学变化范围, 超出合理的电压提供范围, 为了有效地进行电路实验, 把混沌信号的输出电平调为原来的 $1/50$, 即设 $u = 50x, v = 50y, w = 50z$; 又由于系统变量的变换不影响系统的状态及性能, 从而再令 $u = x, v = y, w = z$, 则系统①转化为

$$\begin{cases} \dot{x} = -ax - by + 50yz \\ \dot{y} = -cx + dy - 50xz \\ \dot{z} = -rz + 50xy \end{cases} \quad (2)$$

新三维混沌系统①的电路实现问题相应地转化为系统②的电路实现问题. 系统②的电路实现方案如图 2 所示. 图 2 电路由 3 个通道组成, 分别完成 3 个状态变量 (x, y, z) 的积分功能. 电路包含 3 个模拟乘法器, 用于实现系统②中的 3 个非线性项. 9 个运算放大器及辅助电路分别用于完成加、减、电压反转和积分功能. 根据电路理论以及各个元件的特性, 得其电路方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{R_4}{R_1 R_5 C_1} x - \frac{R_4}{R_3 R_5 C_1} y + \frac{R_4}{R_2 R_5 C_1} yz \\ \dot{y} = -\frac{R_{11}}{R_8 R_{12} C_2} x + \frac{R_{11}}{R_9 R_{12} C_2} y - \frac{R_{11}}{R_{10} R_{12} C_2} xz \\ \dot{z} = -\frac{R_{17}}{R_{15} R_{18} C_3} z + \frac{R_{17}}{R_{16} R_{18} C_3} xy \end{cases} \quad (3)$$

③式与②比较系数, 可得

$$\begin{aligned} a &= \frac{R_4}{R_1 R_5 C_1} & b &= \frac{R_4}{R_3 R_5 C_1} & 50 &= \frac{R_4}{R_2 R_5 C_1} \\ c &= \frac{R_{11}}{R_8 R_{12} C_2} & d &= \frac{R_{11}}{R_9 R_{12} C_2} & 50 &= \frac{R_{11}}{R_{10} R_{12} C_2} \\ r &= \frac{R_{17}}{R_{15} R_{18} C_3} & 50 &= \frac{R_{17}}{R_{16} R_{18} C_3} \end{aligned}$$

模拟乘法器 AD633 的输出比例系数设置为 $1\text{ V}/1\text{ V}$, 电源供电电压为 $\pm 15\text{ V}$. 电路的时间响应频率可以通过按相同比例调节 3 个电容 $C(i = 1, 2, 3)$ 实现. 参数 a, b, c, d, r 的大小可通过改变 R_1, R_3, R_8, R_9 和 R_{15} 的电阻值进行调节. 令 $C_1 = C_2 = C_3 = 1\ \mu\text{F}, R_1 = R_6 = R_7 = R_9 = R_{13} = R_{14} = R_{15} = R_{19} = R_{20} = 1\ \text{k}\Omega, R_5 = R_{12} = R_{18} = 100\ \text{k}\Omega, R_2 = 700\ \Omega, R_3 = 11.67\ \text{k}\Omega, R_4 = 35\ \text{k}\Omega, R_8 = 1.7\ \text{k}\Omega, R_{10} = 340\ \Omega, R_{11} = 17\ \text{k}\Omega, R_{16} = 100\ \Omega, R_{17} = 5\ \text{k}\Omega$. 即可得出相应系数 $a = 35, b = 3, c = 10, d = 17, r = 5$.

用 Multisim 电路仿真软件对该电路进行仿真, 通过示波器观察到的状态变量时序图如图 3 所示 (纵轴和横轴坐标分别为 $500\text{ mV}/\text{div}$ 和 $100\text{ ms}/\text{div}$), 混沌吸引子如图 4 所示 (纵轴和横轴坐标分别为 $1\text{ V}/\text{div}$ 和 $500\text{ mV}/\text{div}$).

对比图 1 和图 4 可知, 电路仿真结果与 Matlab 数值仿真结果完全吻合, 说明了新三维混沌系统的

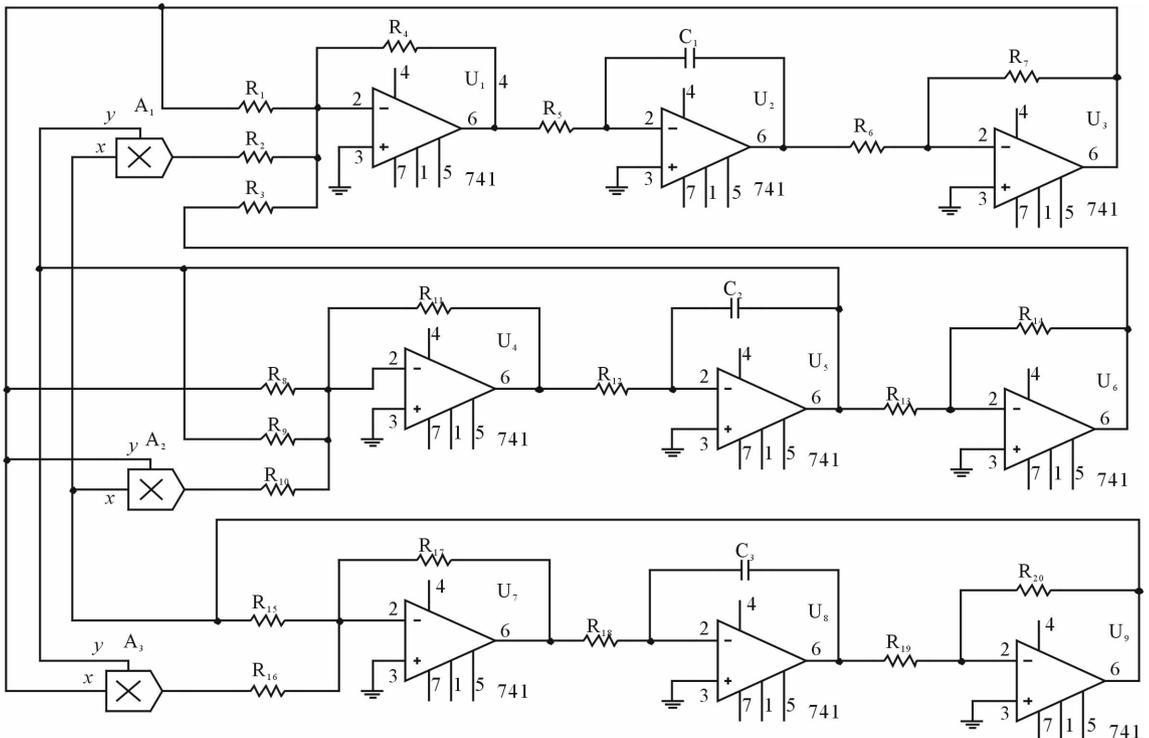
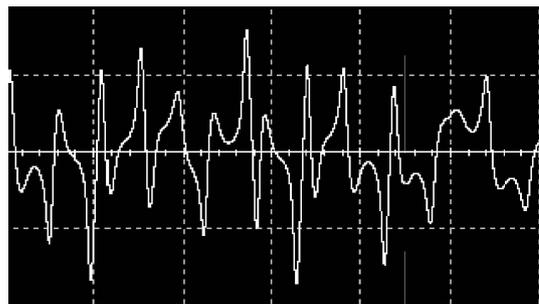
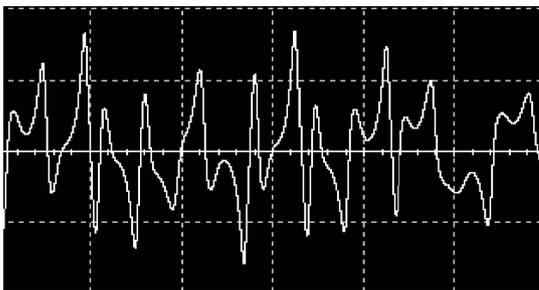


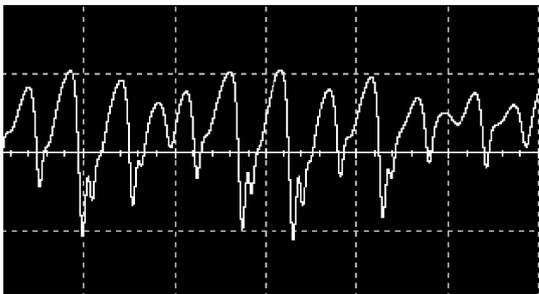
图 2 新三维混沌系统的电路图



a) x序列的时域波形

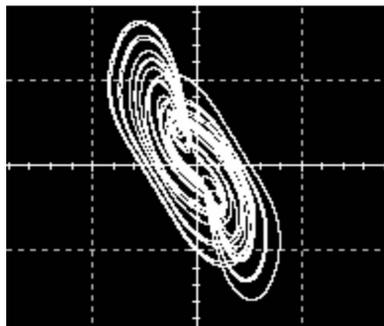


b) y序列的时域波形

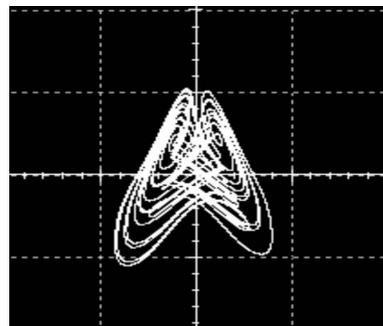


c) z序列的时域波形

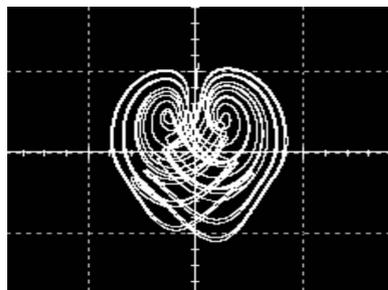
图3 新三维混沌系统的时域波形



a) x-y相图



b) x-z相图



c) y-z相图

图4 新三维混沌系统的混沌吸引子数值仿真图

物理可实现性.

2 新三维混沌系统的错位投影同步

2.1 新三维混沌系统错位投影同步方案

错位同步,是指同步变量中的各分量并无一一对应关系,而是错位发生同步,即驱动系统的第*i*个状态分量与响应系统的第*j*个状态分量随着时间的增长而趋于一致,这种新的同步方案为混沌保密通信提供了一种新的途径和思路.

为研究新三维混沌系统①的错位同步,令系统①为驱动系统,则受控的响应系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -ax_1 - by_1 + y_1z_1 + u_1 \\ \dot{y}_1 = -cx_1 + dy_1 - x_1z_1 + u_2 \\ \dot{z}_1 = -rz_1 + x_1y_1 + u_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中, u_1, u_2 和 u_3 是使系统①和系统③实现错位投影同步的非线性控制函数. 系统①是三维混沌系统,

驱动系统①与响应系统④的广义错位投影同步共有 $(3! - 1) = 5$ 种,设为 $n_i(i=1,2,3\cdots)$,利用数字1,2,3分别代表2个混沌系统的对应状态变量,则5种状态变量错位组合分别是

- $n_1(1,1), (2,2), (3,3)$
- $n_2(1,1), (2,3), (3,2)$
- $n_3(1,2), (2,1), (3,3)$
- $n_4(1,3), (2,2), (3,1)$
- $n_5(1,2), (2,3), (3,1)$

如果驱动系统①和响应系统④分别对应的状态变量组合为(1,1),(2,2),(3,3),则为混沌系统完全同步,不能形成系统状态变量的错位. 这里以第5种 n_5 为例,其余种类可以用类似方法进行分析. 定义错位投影同步误差为

$$\begin{cases} e_1 = y_1 - \alpha x \\ e_2 = z_1 - \alpha y \\ e_3 = x_1 - \alpha z \end{cases} \quad (5)$$

式中,参数 $\alpha (\alpha \neq 0)$ 为错位投影同步比例因子.

得到误差系统动力学方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -cx_1 + dy_1 - x_1z_1 + \alpha ax + \alpha by - \alpha yz + u_2 \\ \dot{e}_2 = -rz_1 + x_1y_1 + \alpha cx - \alpha dy + \alpha xz + u_3 \\ \dot{e}_3 = -ax_1 - by_1 + y_1z_1 + \alpha rz - \alpha xy + u_1 \end{cases} \quad (6)$$

定理 1 选择非线性控制器

$$\begin{cases} u_1 = by_1 - y_1z_1 - \alpha rz + \alpha xy + \alpha az \\ u_2 = cx_1 + x_1z_1 - \alpha ax - \alpha by + \alpha yz - \alpha dx - ke_1 \\ u_3 = -x_1y_1 - \alpha cx + \alpha dy - \alpha xz + \alpha ry \end{cases} \quad (7)$$

其中,反馈控制增益 $k > d$,则系统①与系统④的状态向量实现错位投影同步.

证明 将⑦式代入⑥式,则有

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -(k-d)e_1 \\ \dot{e}_2 = -re_2 \\ \dot{e}_3 = -ae_3 \end{cases} \quad (8)$$

由于 $k > d, a > 0, r > 0$,显然 e_1, e_2, e_3 均以指数速率迅速趋于 0. 可见,在非线性控制器⑦的作用下,实现了驱动系统①与响应系统④的错位投影同步.

2.2 新三维混沌系统的错位同步电路实现

将非线性控制器⑦代入响应系统④中,得响应系统的表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -ax_1 - \alpha(rz - xy - az) \\ \dot{y}_1 = dy_1 - \alpha(ax + by - yz + dx) - k(y_1 - \alpha x) \\ \dot{z}_1 = -rz_1 - \alpha(cx - dy + xz - ry) \end{cases} \quad (9)$$

根据上述控制规则和理论,为了设计驱动系统①与响应系统④的错位投影同步电路,需先设计驱动系统和响应系统的电路原理图. 前面已对驱动系统进行了电路设计,并且为了有效地进行实验,把驱动系统状态变量调为原来的 50 倍 ($u = 50x, v = 50y, w = 50z$),这里同样需要将响应系统的状态变量调为原来的 50 倍,即 $u_1 = 50x_1, v_1 = 50y_1, w_1 = 50z_1$,再令 $u_1 = x_1, v_1 = y_1, w_1 = z_1$,响应系统⑨转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -ax_1 - \alpha(rz - 50xy - az) \\ \dot{y}_1 = dy_1 - \alpha(ax + by - 50yz + dx) - k(y_1 - \alpha x) \\ \dot{z}_1 = -rz_1 - \alpha(cx - dy + 50xz - ry) \end{cases} \quad (10)$$

在非线性控制器⑦式作用下,响应系统⑩的错位投影同步电路如图 5 所示. 电路同样由反相加法器、积分器、反相器和乘法器 4 部分组成. 其中的运算放大器型号仍为 LM741,乘法器型号仍为 AD633,1V/1V,电源电压值仍为 ± 15 V. 所有电阻都采用精密可调电阻,根据式⑩可计算图中各电阻的值,计算方法同驱动系统.

图 5 中, $\frac{R_{25}}{R_{24}} = \frac{R_{38}}{R_{37}} = \frac{R_{51}}{R_{50}} = \alpha$ 为错位同步比例因

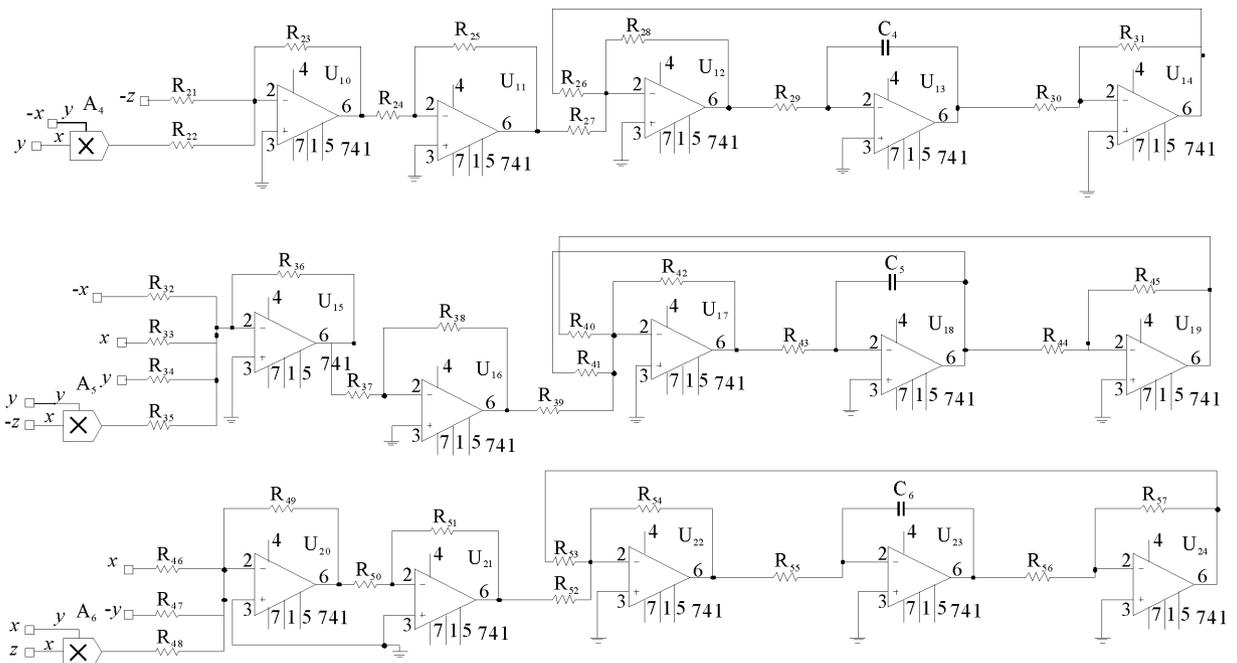


图 5 控制器⑦作用下响应系统⑩的电路图

子, $\frac{R_{42}}{R_{40}}$ = 反馈控制增益 $k \geq 17$, 各电阻阻值分别取为: $R_{21} = R_{24} = R_{26} = R_{30} = R_{31} = R_{33} = R_{37} = R_{41} = R_{44} = R_{45} = R_{50} = R_{56} = R_{57} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{27} = R_{28} = 35 \text{ k}\Omega$, $R_{29} = R_{43} = R_{55} = 100 \text{ k}\Omega$, $R_{22} = 600 \text{ }\Omega$, $R_{23} = 30 \text{ k}\Omega$, $R_{32} = 2.6 \text{ k}\Omega$, $R_{34} = 17.3 \text{ k}\Omega$, $R_{35} = 1.04 \text{ k}\Omega$, $R_{36} = 52 \text{ k}\Omega$, $R_{39} = 17 \text{ k}\Omega$, $R_{40} = 850 \text{ k}\Omega$, $R_{46} = 11 \text{ k}\Omega$, $R_{47} = 5 \text{ k}\Omega$, $R_{48} = 2.2 \text{ k}\Omega$, $R_{49} = 110 \text{ k}\Omega$, $R_{52} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{53} = 2 \text{ k}\Omega$, $R_{54} = 10 \text{ k}\Omega$.

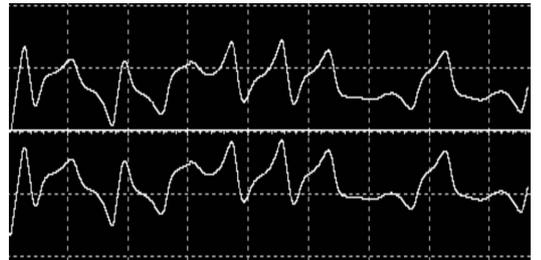
当 $R_{25} = R_{38} = R_{51} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{42} = 17 \text{ k}\Omega$ 时, $\alpha = 1$, $k = 20 > d$. 调节变阻器 R_{25} , R_{38} , R_{51} 的大小可改变 α 的值, 调节电阻器 R_{42} 的大小可改变 k 的值. 当 $k = 20 > d$, α 取不同的值(1, -1, 4)时, 系统的错位同步电路实现结果如图 6 和图 7 所示. 图 6 为其时序图, 图 7 为其相图(图中均以 $x-y_1$ 变量为例, $y-z_1$ 和 $z-x_1$ 与 $x-y_1$ 相同, 不再重复). 改变 R_{42} 的值, 取 $k = 7 < d$, $\alpha = 1$ 时, 其错位同步电路结果如图 8 所示, 其中 a) 为时序图, b) 为相图.

由图 6—图 8 可以看出: 所设计的新三维混沌系统错位同步电路在反馈控制增益 $k > d$ 时, 驱动系统①与响应系统④的状态变量实现了错位投影同步.

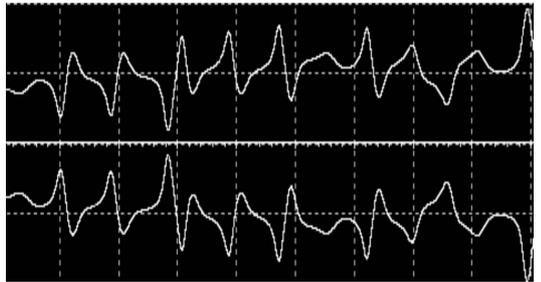
3 结论

本文提出了一个新的混沌系统, 根据电路理论推导出其切实可行的电路参数, 利用 Multisim 电路仿真软件进行了仿真实验, 实验结果验证了系统的混沌行为及可实现性. 研究了该系统的错位投影同步, 设计了非线性控制器, 搭建了 2 个系统的错位投

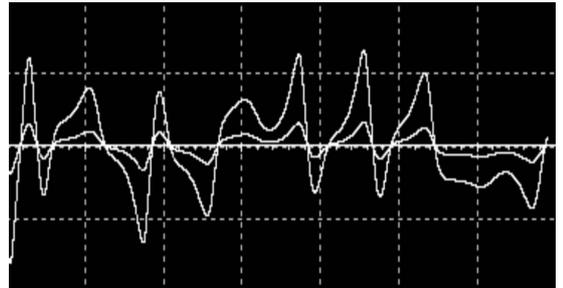
影同步电路, 给出了实现错位同步的电路参数的调节范围. 文中的错位同步控制方法和电路设计具有一定的普适性, 且方法简单易于实现, 大大提高了保密通信的安全性.



a) $\alpha = 1$

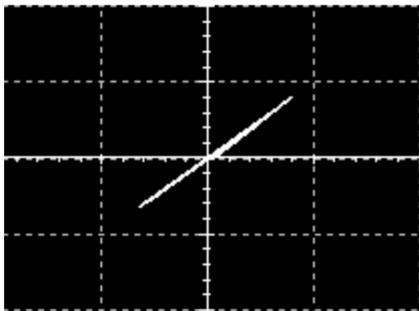


b) $\alpha = -1$

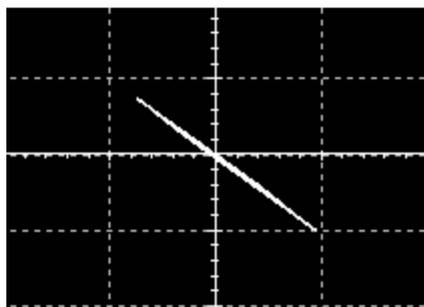


c) $\alpha = 4$

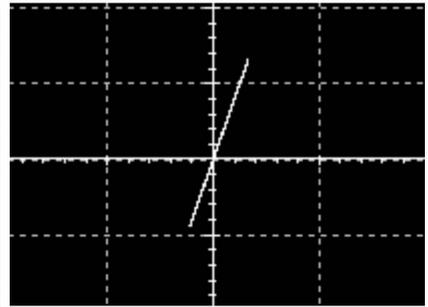
图 6 $k = 20 > d$, α 取值不同时的 $x-y_1$ 状态变量错位同步时序图



a) $\alpha = 1$



b) $\alpha = -1$



c) $\alpha = 4$

图 7 $k = 20 > d$, α 取值不同时的变量错位同步相图

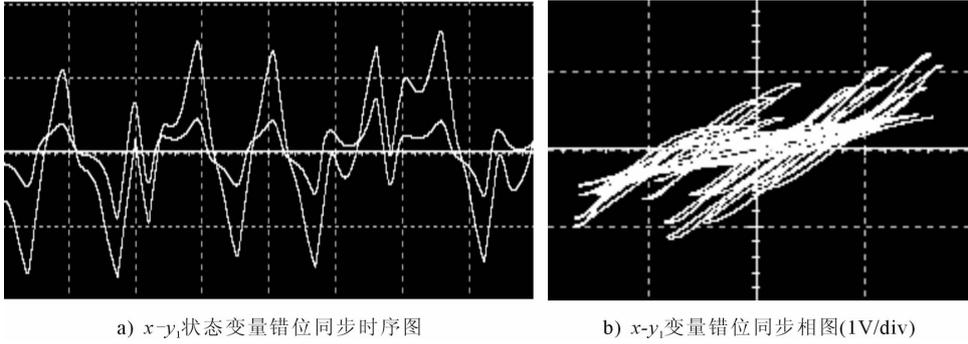


图8 $k=7 < d, \alpha=1$ 时的错位同步结果

参考文献:

- [1] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20(3):130.
- [2] Rossler O E. An equation for continuous chaos[J]. Physics Letters A, 1976, 57(5):397.
- [3] Chen G R, Ueta T. Yet another chaotic attractor[J]. Int J Bifurc Chaos, 1999, 9(7):465.
- [4] Lü J H, Chen G R, Cheng D Z, et al. Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system[J]. Int J Bifurc Chaos, 2002, 12(12):2917.
- [5] Liu C X, Liu K. A new chaotic attractor chaos[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 22:1031.
- [6] 仓诗建, 陈增强, 袁著祉. 一个新四维非自治超混沌系统的分析与电路实现[J]. 物理学报, 2008, 57(3):1493.
- [7] 陈向荣, 刘崇新, 王发强, 等. 分数阶 Liu 混沌系统及其电路实验的研究与控制[J]. 物理学报, 2008, 57(3):1416.
- [8] 罗小华, 礼花青, 代祥光. 一类多涡卷混沌吸引子及电路设计[J]. 物理学报, 2008, 57(12):7511.
- [9] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8):821.
- [10] 方洁, 谢泽会, 王红英. 一个新混沌系统的修正函数投影同步[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2011, 26(1):70.
- [11] 李农, 李建芬. 混沌系统的统一投影同步[J]. 物理学报, 2011, 60(11):1.
- [12] 闵富红, 王思荣. 超混沌 Qi 系统的错位投影同步及其在保密通信中的应用[J]. 物理学报, 2010, 59(11):7657.

具有多胞型摄动的时滞系统鲁棒稳定性

杨录山¹, 尚展垒², 王东署³

- (1. 解放军信息工程大学 理学院, 河南 郑州 450001;
2. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:通过定义一个参数依赖的 Lyapunov 泛函, 结合利用逆凸组合技术和一个矩阵不等式松散方法, 得到了保守性小且计算复杂度低的鲁棒稳定性判据. 算例表明新的判据显著地改进了已有的结果.

关键词:多胞型摄动; 时滞系统; 鲁棒稳定性; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.016

Robust stability of delayed systems with polytopic-type uncertainties

YANG Lu-shan¹, SHANG Zhan-lei², WANG Dong-shu³

- (1. College of Science, Information Engineering University of the People's Liberation Army, Zhengzhou 450001, China;
2. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
3. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By defining a parameter-dependent Lyapunov functional, using a reciprocally convex combination technique and a relax method of linear matrix inequality (LMI), a robust stability criterion with less conservatism and less complexity was obtained. Some numerical examples showed that the new criterion was better than the existing results.

Key words: polytopic-type uncertainty; delayed systems; robust stability; linear matrix inequality (LMI)

0 引言

由于客观事物的运动规律是复杂多样的, 在诸如神经网络、电路信号系统、生态系统等许多领域, 总是不可避免地存在着时间延迟现象, 而且它通常是导致系统不稳定和性能变差的重要根源^[1-5]. 同时, 由于数学建模、电器元件、跟踪测量等因素的制约, 现实工程中没有准确无误的模型与参数, 都会出现相应的摄动^[6-7]. 在参数摄动的情况下如何保证系统的稳定性, 这是近年来许多学者研究的重要课题, 带有多胞型摄动的时滞线性系统的二次稳定

性是其中的问题之一. 汤红吉等^[6]讨论了具有多胞型摄动的线性切换系统的渐近稳定性. 文献[1-2]分别利用自由权矩阵方法, 给出了时滞线性系统的稳定性判据. 但是, 由于交叉积项的上界估计相对保守, 文献[1-2]所得结果的保守性有待改进. 本文拟针对这一问题进行研究, 给出带有多胞型摄动的线性系统二次稳定的充分条件: 通过定义一个参数依赖的 Lyapunov 泛函, 结合利用逆凸组合技术和一个矩阵不等式松散方法, 得到保守性小且计算复杂度低的鲁棒稳定性判据, 并以线性矩阵不等式 LMIs (linear matrix inequality) 的形式给出, 以便于

收稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61174085)

作者简介: 杨录山 (1963—), 男, 河北省阳原县人, 解放军信息工程大学副教授, 主要研究方向为微分动力系统.

求解.

1 问题的提出

考虑线性时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}x(t - d(t)) & t > 0 \\ x(t) = \varphi(t) & t \in [-h, 0] \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x(t) \in R^n$ 表示系统的状态, \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是系统矩阵, 时变的时滞 $d(t)$ 满足条件 $0 \leq d(t) \leq h$ 和 $\dot{d}(t) \leq \mu$, 这里的 h 和 μ 都是常数.

与文献[1-2]一样, 本文中假定系统矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 都含有多胞型的不确定性, 它们可以表示为某些已知顶点矩阵的凸组合. 即

$$(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \in \Omega$$

且

$$\Omega = \left\{ (\mathbf{A}, \mathbf{B}) : (\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \sum_{j=1}^r \xi_j (\mathbf{A}_j, \mathbf{B}_j), \sum_{j=1}^r \xi_j = 1, \xi_j \geq 0 \right\} \quad (2)$$

其中的 \mathbf{A}_j 和 \mathbf{B}_j 都是常数矩阵.

注1 文献[1]要求 $|\dot{d}(t)| \leq \mu$, 文献[2]则要求 $\mu < 1$, 本文没有这些限制.

利用自由权矩阵方法, 文献[1-2]分别给出了系统(1)的稳定性判据. 这些判据都可表示为一组线性矩阵不等式. 但是, 由于交叉积项的上界估计相对保守, 文献[1-2]得到结果的保守性还有待改进; 同时, 由于引入了很多的自由变量, 文献[1-2]得到的结果计算复杂度相对较高. 基于近期的研究成果和线性矩阵不等式技术, 笔者将给出系统(1)的一个新的稳定性判据.

2 主要结果

取 Lyapunov 泛函为

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} + \mathbf{U} - \mathbf{R} & \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{R} - \mathbf{S} & \mathbf{S} & h \mathbf{A}^T \mathbf{R} \\ * & -2\mathbf{R} - (1 - \mu)\mathbf{U} + \mathbf{S} + \mathbf{S}^T & \mathbf{R} - \mathbf{S} & h \mathbf{B}^T \mathbf{R} \\ * & * & -\mathbf{Q} - \mathbf{R} & 0 \\ * & * & * & -\mathbf{R} \end{bmatrix} < 0 \quad (4)$$

$$\Phi_{ij} = \begin{bmatrix} \Phi_{ij}^{(11)} & \Phi_{ij}^{(12)} & \mathbf{S}_i & h \mathbf{A}_j^T \mathbf{R}_i \\ * & -2\mathbf{R} - (1 - \mu)\mathbf{U}_i + \mathbf{S}_i + \mathbf{S}_i^T & \mathbf{R}_i - \mathbf{S}_i & h \mathbf{B}_j^T \mathbf{R}_i \\ * & * & -\mathbf{Q}_i - \mathbf{R}_i & 0 \\ * & * & * & -\mathbf{R}_i \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{ij}^{(11)} = \mathbf{A}_j^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{A}_j + \mathbf{Q}_i + \mathbf{U}_i - \mathbf{R}_i \quad \Phi_{ij}^{(12)} = \mathbf{P}_i \mathbf{B}_j + \mathbf{R}_i - \mathbf{S}_i$$

$$V(x_t) = x^T(t) \mathbf{P} x(t) + \int_{t-d(t)}^t x^T(s) \mathbf{U} x(s) ds + \int_{t-h}^t x^T(s) \mathbf{Q} x(s) ds + h \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) \mathbf{R} \dot{x}(s) ds d\theta$$

利用逆凸组合技术^[7], 可得如下引理.

引理1 对于固定的系统矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} , 系统(1)是渐近稳定的, 如果存在对称矩阵 $\mathbf{P} > 0, \mathbf{Q} \geq 0, \mathbf{U} \geq 0, \mathbf{R} > 0$ 和矩阵 \mathbf{S} , 使得(3)(4)式成立(见脚注①).

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{S} \\ * & \mathbf{R} \end{pmatrix} \geq 0 \quad (3)$$

注2 利用自由权矩阵方法, 文献[1-2]给出了系统(1)的渐近稳定性条件. 而引理1是利用逆凸组合方法得到的, 它不仅涉及较少的自由变量, 而且保守性也更小.

基于引理1, 笔者引入参数依赖的 Lyapunov 泛函, 即可得到如下定理.

定理1 系统(1)是鲁棒稳定的, 如果存在对称矩阵 $\mathbf{P}_j > 0, \mathbf{Q}_j \geq 0, \mathbf{U}_j \geq 0, \mathbf{R}_j > 0$ 和矩阵 $\mathbf{S}_j (j = 1, 2, \dots, r)$, 使得

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}_j & \mathbf{S}_j \\ * & \mathbf{R}_j \end{pmatrix} \geq 0 \quad (5)$$

$$\Phi_{ij} + \Phi_{ji} < 0 \quad (6)$$

成立 ($1 \leq i \leq j \leq r$), 注释见脚注②.

证明 取引理1中的矩阵 $\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}, \mathbf{R}$ 和 \mathbf{S} 有如下的形式:

$$\mathbf{X}(\xi) = \sum_{j=1}^r \xi_j \mathbf{X}_j \quad (7)$$

其中 \mathbf{X} 代表 $\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}, \mathbf{R}$ 和 \mathbf{S} 中任一个. 将(2)和(7)代入(4)得:

$$\Phi = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \xi_i \xi_j \Phi_{ij}$$

因为

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=i}^r \xi_i \xi_j \Phi_{ij} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=i}^r \xi_i \xi_j (\Phi_{ij} + \Phi_{ji})$$

所以,当⑥成立时则必有④成立. 类似地,由⑤可以得到③.

注3 为导出系统①的鲁棒稳定性条件,文献[1]利用系统方程引入了自由矩阵 $T_j(j = 1, 2, 3, 4)$; 而文献[2]则引入了新的矩阵变量 $Y_{ij}(1 \leq i, j \leq r)$. 但在推导⑥式时,却没有引入任何新的自由变量. 因此,所得到的新判据中计算复杂度较低.

注4 当 μ 未知或者 $\mu \geq 1$ 时,只需令 $U = 0$ 和 $U_j = 0$,引理1和定理1仍然适用.

3 数值算例

例1 文献[1]考虑如下具有多胞型摄动的时滞系统

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & -0.12 + 12\rho_m \\ 0 & -0.465 - \rho_m \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & -0.12 - 12\rho_m \\ 0 & -0.465 + \rho_m \end{pmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = \begin{pmatrix} -0.1 & -0.35 \\ 0 & 0.3 \end{pmatrix}$$

其中, $\rho_m = 0.035$. 在保证系统鲁棒稳定的前提下,针对不同的 μ ,可由文献[1,3]和定理1得到相应的时滞上界(见表1). 由表1可知,定理1的保守性相对较小.

表1 对于不同的 μ , 可得到的 h 的最大值

算例	μ 已知		μ 未知
	0.5	0.9	
文献[3]	0.465	0.454	0.454
文献[1]	0.559	0.559	0.559
定理1	0.593	0.593	0.593

例2 文献[2]考虑如下具有多胞型摄动的时滞系统:

$$A_1 = \begin{pmatrix} -0.2 & 0 \\ 0 & -0.09 \end{pmatrix} \quad A_2 = \begin{pmatrix} -2 & -1 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} -1.9 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} -0.1 & 0 \\ -0.1 & -0.1 \end{pmatrix} \quad B_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_3 = \begin{pmatrix} -0.9 & 0 \\ -1 & -1.1 \end{pmatrix}$$

在保证系统鲁棒稳定的前提下,针对不同的 μ ,可由文献[2,3]和定理1得到相应的时滞上界(见表2). 由表2也可看出,定理1显著地提升了现有的结果.

表2 对于不同的 μ , 可得到的 h 的最大值

算例	μ		
	0.1	0.5	0.9
文献[3]	3.355	1.808	0.967
文献[2]	3.374	1.838	1.072
定理1	3.402	2.114	1.657

4 结语

本文研究了具有多胞型不确定性的时滞系统鲁棒稳定性问题. 分别运用逆凸组合技术和参数依赖的 Lyapunov 泛函给出了解决问题的充分条件. 与原有结果相比,新的判据具有保守性小、计算复杂度低等特点,更加易于检验. 数值计算结果进一步证实了本文所得稳定性判据的优越性.

参考文献:

[1] He Y, Wang Q G, Xie L, et al. Further improvement of free-weighting matrices technique for systems with time-varying delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(2): 293.

[2] Lin C, Wang Q G, Lee T H. A less conservative robust stability test for linear uncertain time-delay systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(1): 87.

[3] Fridman E, Shaked U. Delay-dependent stability and H_∞ control: Constant and time-varying delays[J]. International Journal of Control, 2003, 76(1): 48.

[4] 孙文安, 孙希明, 赵军. 具有多胞型摄动的线性切换系统的渐近稳定性[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2004, 25(8): 723.

[5] 吕灵芝, 段广仁, 吴爱国. 滞后细胞神经网络的鲁棒无源分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(4): 1007.

[6] 汤红吉, 韩彦武, 张小丽. 一类不确定离散时滞系统的鲁棒镇定[J]. 南通大学学报: 自然科学版, 2007, 6(3): 6.

[7] Park P, Wan Ko J, Jeong C. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. Automatica, 2011, 47: 235.

基于 Hamilton 能量理论的 含 STATCOM 的非线性控制器设计

魏云冰, 杨位杰

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对含有静止同步补偿器(STATCOM)的单机无穷大系统,对其同步发电机建立实用的数学模型.从能量的观点出发,应用能量函数理论构造 Hamilton 能量函数,设计了 STATCOM 接入点电压与发电机励磁非线性控制器.该控制器直接使用系统能量作为储存函数,在平息系统扰动能力和快速稳定性上比其他常规控制器的控制性能优越.设计中完整地保留了系统的非线性控制结构,不需要线性化处理,比各种线性化设计方法具有更好的调节能力和鲁棒性.仿真结果表明,该控制器在系统遭受三相短路故障的情况下,能够比常规 PID 控制更有效地抑制干扰,更快地满足发电机励磁与 STATCOM 接入点电压的暂态稳定性.

关键词:静止同步补偿器;Hamilton 能量函数;单机无穷大系统;非线性控制

中图分类号:TM714.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.017

Design of nonlinear controller of STATCOM based on Hamilton energy theory

WEI Yun-bing, YANG Wei-jie

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

Abstract: The practical mathematic model of synchronous generator was established in the static synchronous compensator(STATCOM) of single machine infinite bus power system. Based on Hamilton energy theory, the new nonlinear controller was designed between the STATCOM which was installed in bus voltage of system and synchronous machine excitation. This controller directly uses the energy as the storage function. Compared with other nonlinear controllers, this controller has the advantage of the fast stability and the capability of quelling the disturbance. Since the nonlinear control structure retains all in this design, it does not need the linearization. The proposed STATCOM controller is more robust than linear control method. The simulation results showed that the proposed controller could faster meet generator excitation and STATCOM access point voltage transient stability than conventional PID control under the subjection to the three-phase short circuit fault.

Key words: static synchronous compensator; Hamilton energy function; single machine infinite bus system; nonlinear control

收稿日期:2013-03-03

作者简介:魏云冰(1970—),男,江苏省徐州市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为电机故障检测与智能决策.

0 引言

静止同步补偿器(STATCOM)是采用自换相电力半导体桥式变流器进行发生和吸收无功功率的动态补偿装置.在柔性交流输电(FACTS)系统中采用多电平、多重化和PWM技术等措施后,STATCOM可大大减少补偿电流的谐波含量. STATCOM以其平滑的无功调节、快速的动态特性成为电力系统动态无功补偿装置的发展方向,受到国内外科研与工程领域的广泛关注^[1-3].但是,STATCOM系统具有非线性、强耦合、参数时变等特性,用传统的控制方法很难达到满意的控制效果.为此,研究性能更优的控制策略以提高STATCOM的补偿性能具有很强的工程实用价值^[4-5].

近年来,Hamilton理论在非线形控制上优势明显,Hamilton能量系统理论越来越受到电力工作者的重视,并进行了广泛的研究^[6-7].文献[8-10]运用Hamilton函数构建了满足电力系统稳定性系统.本文拟应用Hamilton能量理论对包含STATCOM的单机无穷大电力系统进行系统稳定控制器设计.

1 Hamilton系统控制器模型

一般的非线性系统形式可描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases}$$

其中, $\mathbf{x} \in R^n$ 表示系统的状态向量; $\mathbf{f}:R^n \rightarrow R^n$ 和 $\mathbf{g}:R^n \rightarrow R^{n \times m}$ 均为连续可微的函数向量; $\mathbf{u}, \mathbf{y} \in R^m$ 分别是系统的输入与输出向量; $\mathbf{h}:R^n \rightarrow R^p$ 为光滑函数.设 x^* 为系统的渐近稳定平衡点,满足 $\mathbf{f}(x^*) = \mathbf{0}$.整个系统的Hamilton函数为 $\dot{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}$,将Hamilton

系统扩展成为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \end{cases} \quad (1)$$

其中,状态变量 $\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$; Hamilton函数 $H(\mathbf{x})$ 是半正定函数,表示系统能量; \mathbf{u} 是控制输入信号; \mathbf{y} 为控制输出信号. $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 分别是满足如下条件的反对称结构矩阵和非负对称阻尼, $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x}), \mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^T(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0}, \forall \mathbf{x}$, Hamilton系统满足以下功率平衡等式:

$$\dot{H} = -\frac{\partial^T H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{u}^T \mathbf{y}$$

其中, $\mathbf{u}^T \mathbf{y}$ 表示系统的外置能量供应系统; $-\frac{\partial^T H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}$ 表示系统中电阻元件的能量耗散;当 $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ 时,有

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (2)$$

$$\dot{H} = -\frac{\partial^T H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \leq \mathbf{0} \quad (3)$$

若 x^* 是 $H(\mathbf{x})$ 的极小值点,则 x^* 是式(2)的一个平衡点,再由式(3)知式(2)在平衡点 x^* 是稳定的,并且当式(1)是零状态可检测时,存在控制策略

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$$

其中, \mathbf{K} 为正定矩阵,使非线性动态系统在平衡点 x^* 处渐近稳定.

证明 对于Hamilton函数 $H(\mathbf{x})$,在上式的作用下

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}\mathbf{K}\mathbf{g}^T] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$$

所以

$$\begin{aligned} \dot{H}(\mathbf{x}) &= \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \dot{\mathbf{x}} = \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right)^T (-\mathbf{R}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \\ &\quad \left(\mathbf{g}^T \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right)^T (-\mathbf{K}) \left(\mathbf{g}^T \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

由 \mathbf{R} 是半正定矩阵, \mathbf{K} 是正定矩阵可知 $\dot{H}(\mathbf{x}) \leq 0$,故 H 是闭环反馈系统(4)的一个Lyapunov函数.由不变集原理可知,在控制率 \mathbf{u} 的作用下,受控非线性动态系统(1)在平衡点 x^* 处渐近稳定.

2 包含STATCOM的非线性控制策略

2.1 同步发电机的数学模型

在电力系统中,包含STATCOM的单机无穷大系统如图1所示.该系统在传输线中装有STATCOM,原动机的输入机械功率 P_m 为常数,该发电机采用三阶模型;STATCOM采用一阶延时可控无功电流源模型,并假设输出电流与接入点电压的频率一致.令 d 轴始终与接入点电压向量同相, q 轴超前 90° ,则STATCOM输出电流只含 q 轴分量,具有STATCOM的单机无穷大系统的非线性方程为

$$\begin{cases} \delta = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0 P_m}{M} - \frac{\omega_0 P_e}{M} - D \frac{\omega - \omega_0}{M} \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-E_q + U_f) \end{cases}$$

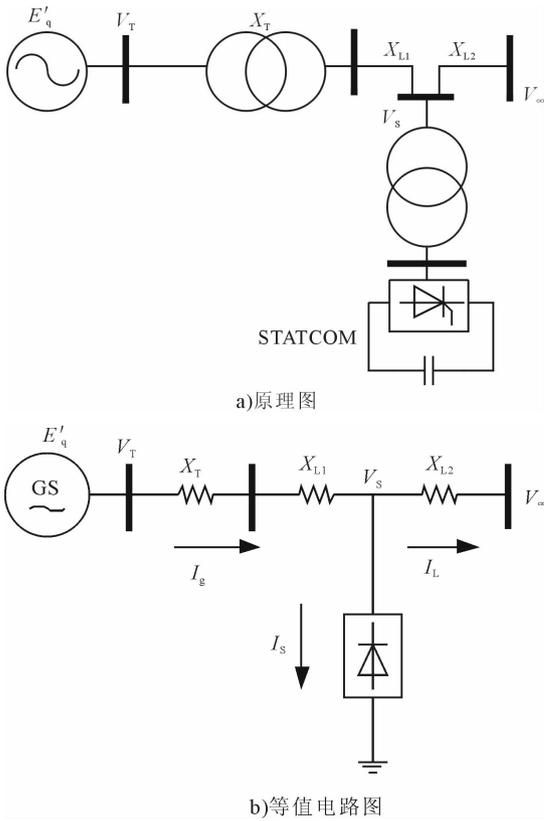


图1 具有 STATCOM 的单机无穷大系统

其中, δ 是发电机转子角 /rad; ω 是发电机转子角速度 / (rad · s⁻¹); $\omega_0 = 2\pi f$ 为同步角速度 / (rad · s⁻¹); D 为发电机阻尼系数; M 是转动惯量; U_f 为励磁电压 / pu; P_e 为输入机械功率 / pu; E_q 是电磁功率 / pu; E_q 是 q 轴空载电势 / pu; E'_q 是 q 轴暂态电势 / pu; T'_{d0} 是励磁绕组的时间常数 / s.

发电机送入单机无穷大系统的有功功率方程为

$$P_e = \frac{V_\infty E'_q}{X'_{d\Sigma}} \sin\delta$$

其中, X'_d 是 d 轴暂态电抗. 又因为

$$i_d = \frac{E_q - V_\infty \cos\delta}{X_{d\Sigma}}$$

其中, X_d 是 d 轴电抗. 根据

$$E_q = E'_q + (X_d - X'_d) i_d$$

有关系式

$$E_q = \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} E'_q - \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma}} V_\infty \cos\delta$$

最后, 发电机的转子运动方程可描述为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{M} P_m - \frac{\omega_0}{M} \frac{V_\infty E'_q}{X'_{d\Sigma}} \sin\delta - D \frac{\omega - \omega_0}{M} \\ \dot{E}'_q = -\frac{X_{d\Sigma}}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{X_d - X'_d}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}} V_\infty \cos\delta + \frac{1}{T'_{d0}} U_f \end{cases} \quad (5)$$

选取控制变量: $a = V_\infty / X'_{d\Sigma}$, $b = X_{d\Sigma} / X'_{d\Sigma}$, $U = U_f$, $c = (X_d - X'_d) V_\infty / X'_{d\Sigma}$, 令 $x_1 = \delta$, $x_2 = \omega - \omega_0$, $x_3 = E'_q$, 则式 (5) 可转化为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

其中

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ [(P_m - aE'_q \sin\delta)\omega_0 + Dx_2] / M \\ a\cos\delta + abE'_q / c \end{bmatrix}$$

$$g(x) = [0 \quad 0 \quad 1/T'_{d0}]^T$$

2.2 基于 Hamilton 函数的励磁控制器设计

由以上分析可以看出, 单机无穷大同步电机的转子运动方程可写为

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{E}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 \\ -\frac{1}{M} & -\frac{D}{M^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c}{aT'_{d0}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -(P_m - aE'_q \sin\delta)\omega_0 \\ M(\omega - \omega_0) \\ a\cos\delta + \frac{ab}{c} E'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T'_{d0}} \end{bmatrix} U_f \quad (6)$$

将式 (6) 写成向量形式为:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x} + g(x)U_f$$

其中

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial \delta} \\ \frac{\partial H}{\partial \omega_r} \\ \frac{\partial H}{\partial E'_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_m + aE'_q \sin\delta \\ M(\omega - \omega_0) \\ a\cos\delta + \frac{ab}{c} E'_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$J(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1/M & 0 \\ -1/M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & D/M^2 & 0 \\ 0 & 0 & c/(a_1 T'_{d0}) \end{bmatrix}$$

$$g(x) = [0 \quad 0 \quad 1/T'_{d0}]^T$$

所以能量函数为

$$H(\delta, \omega_r, E'_q) =$$

$$\frac{1}{2} M x_2^2 - P_m x_1 - aE'_q \cos x_1 + \frac{ab}{2c} x_3^2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \begin{bmatrix} aE'_q \cos\delta & 0 & a\sin\delta \\ 0 & M & 0 \\ -a\sin\delta & 0 & ab/c \end{bmatrix}$$

当满足条件

$$\begin{cases} aE'_q \cos\delta > 0 \\ \frac{b}{c}(a^2E'_q \cos\delta) + a^2 \sin^2\delta > 0 \end{cases}$$

时,矩阵 $\nabla^2 H(\delta, \omega, E'_q)$ 为正定矩阵. 所以,在稳态平衡点 $(\delta_s, 0, E'_q)$ 的邻域

$$N = \left\{ (\delta, \omega, E'_q) \mid \frac{b}{c}(a^2E'_q \cos\delta) + a^2 \sin^2\delta > 0 \right\}$$

内, $\nabla^2 H(\delta, \omega, E'_q)$ 是正定的,函数 $H(\delta, \omega, E'_q)$ 有极小值. 则系统的控制策略为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & -Kg^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} = \\ & -\frac{K}{T'_{d0}}(a \cos\delta + \frac{a_1 b}{c} E'_q) \end{aligned} \quad (9)$$

3 数字仿真分析

为了验证以上控制规律的正确性及有效性,用图1所示具有 STATCOM 的单机无穷大系统进行动态仿真.

发电机及单机无穷大系统参数设置为: $D = 1, H = 7.6, x_d = 0.825, x'_d = 0.14, X_T = 0.1, X_{L1} = 0.56, X_{L2} = 0.24, T'_{d0} = 10, V_\infty = 1, P_m = 0.9, k_1 = 0.1, k_2 = 0.05, f_0 = 50 \text{ Hz}$.

仿真及试验条件如下:

- 1) 系统不安装 STATCOM;
- 2) 系统安装 STATCOM 并用常规 PID 控制;
- 3) 系统安装 STATCOM 并用非线性优化控制.

故障设置为 $t = 0.2 \text{ s}$ 时在长距离中点发生三相短路故障, $t = 0.25 \text{ s}$ 时故障解除.

记录 STATCOM 在接入点电压变化的动态特性曲线如图2所示,发电机转子角特性曲线如图3所示. 从图2,图3可以看出,如果不安装 STATCOM,

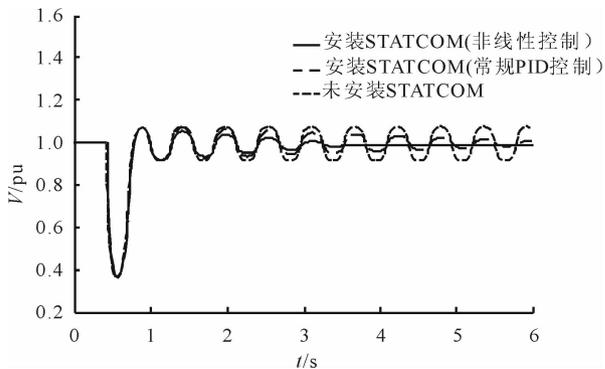


图2 STATCOM 接入点电压仿真曲线

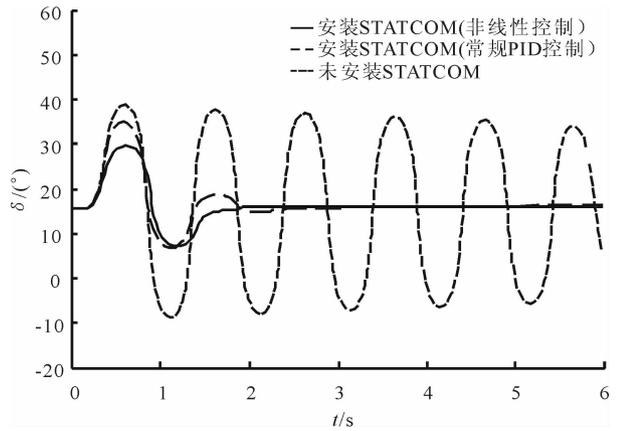


图3 发电机转子角特性曲线

系统发生严重振荡,长时间无法平息,而在安装了 STATCOM 之后,在2种控制方式下,系统都能很快地平息振荡,恢复稳定;在非线形控制下,系统的动态性能比PID控制要好. 仿真结果表明,所设计的控制器在故障发生后迅速保持系统稳定方面有很好的控制作用.

4 结论

本文利用 Hamilton 能量理论所具有的动态系统非线性控制特性,建立了单机无穷大系统下的含 STATCOM 的非线性控制系统模型,设计并验证了基于 Hamilton 能量理论的 STATCOM 的非线性控制器,在设计发电机励磁和 STATCOM 控制器过程中完全保留了原动态系统的非线性特性,且没有用到任何线性化方法. 仿真结果表明,在线路发生三相短路故障时,利用 Hamilton 能量理论所设计的非线性控制器对无功进行控制,能够快速恢复系统的动态稳定性,与传统的 PID 控制方法相比,该控制器能够更有效地提高电力系统的稳定性.

参考文献:

[1] Ram A. FACTS system studies[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(12):17.

[2] Padiyar K R, Prabhu N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3):1398.

[3] 许湘莲, 邹云屏, 丁凯. 基于相移级联多电平逆变器的 SVG 研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(6):59.

[4] 刘燕, 康积涛, 李晨霞, 等. 含有 STATCOM 的电力系统次同步谐振研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(5):38.

小波分析在谐波电能计量中的应用

胡智宏, 杜晓冉

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对近年来由于电力系统非线性负载日益增多而导致的电网谐波污染问题,为了提高电能表计量的准确度,提出了基于 Mallat 算法的小波变换方法.该算法利用其多分辨率分析的特点来提取信号中各阶次谐波,通过小波重构来实现各频带内谐波参数的测量及对谐波变化的准确跟踪观测. Matlab 仿真结果验证了该方法的可行性和高效性.

关键词:谐波电能计量;小波变换;Mallat 算法;时频分析

中图分类号:TM711 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.018

Application of the wavelet transform analysis method in harmonic energy measurement

HU Zhi-hong, DU Xiao-ran

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

Abstract: Aiming at the problem that more and more nonlinear loads of power system lead to the pollution of electrical network harmonic, the wavelet transform method was put forward based on Mallat arithmetic in order to improve accuracy of measuring. This method picked up every existent harmonic of the signal by using its multi-resolution analysis, realized the measurement of harmonic parameters within each band and tracked observation of harmonic change. The simulation results proved that the method was feasible and effective.

Key words: harmonic energy measurement; wavelet transform; Mallat algorithm; time-frequency analysis

0 引言

电力系统运行时,由于变频器、变流器、开关电源等非线性设备的广泛应用,电网中被注入了大量谐波电流,从而造成电压、电流严重畸变,不仅影响仪表的正常工作,同时也给系统中一些设备的运行带来很大危害.只有对电网中谐波分量进行快速、准确、合理的检测,确切掌握谐波的实时状况,才能实现复杂工业现场的电能准确计量.

快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)算

法是常用的谐波检测方法^[1],适合用来进行稳态谐波的检测.但实际电力系统中普遍存在大量非平稳、时变信号,而 FFT 算法不能同时在时域和频域以任意精度逼近被测信号,因此对于准确把握谐波出现时刻是无能为力的.小波分析作为一种信号的时间尺度分析方法^[2],能够在时域和频域同时对信号进行局部化分析,对于波动谐波和快速变化谐波的检测有很大的优越性^[3],在电力系统信号分析方面具有广泛的应用前景.鉴于此,本文应用小波变换的方法对谐波电流、电压信号进行分析,采用

收稿日期:2013-03-03

作者简介:胡智宏(1974—),男,甘肃省天水市人,郑州轻工业学院副教授,硕士,主要研究方向为电子信息及嵌入式系统应用.

Daubechies 40 (Db40) 小波基分离出信号中的基波和各次谐波,以期有效地减少相邻谐波间对电力参数测量精度的干扰,同时结合谐波功率检测公式,以实现谐波电能的高精度计量。

1 小波变换与 Mallat 算法

小波函数的定义是:把某一基本小波的函数 $\psi(t)$ 做位移 b 后,在不同尺度 a 下与待分析信号 $f(t)$ 作内积:

$$(W_{\psi}f)(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

小波变换具有多分辨率分析的特点,可将含有谐波的电网信号分解成不同频率的段信号,将低频段信号视为基波分量,高频段信号视为谐波分量,进而得到各次谐波信息^[4]。小波变换相当于有限长的带通滤波器,尺度因子 a 决定其带通特性。一旦不同频率的谐波划分到不同的频带中,就可以把不同频率的谐波分离出来。

Mallat 算法^[5]是信号的塔式多分辨率分析与综合的算法。其分解算法相当于把输入信号通过滤波器 h 或 g ,再对滤波器输出进行抽样,取其偶数部分,使获得信号的分辨率为原始信号的 $1/2$;其重构算法相当于先对近似信号与细节信号进行插值,相邻 2 个数值之间插入 1 个 0,再分别通过滤波器 h 和 g ,最后把 2 个滤波器的输出相加。该算法不需要知道尺度函数和小波函数的具体结构,仅根据滤波器系数就可以实现对信号的快速分解和重建^[6]。

2 功率检测

在谐波情况下,电网信号电压、电流、功率分别为

$$u(t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \sin(i\omega t)$$

$$i(t) = \sum_{j=1}^{\infty} I_j \sin(j\omega t - \Psi_j)$$

$$u(t)i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} 2U_i I_i \sin(i\omega t) \sin(i\omega t - \Psi_i) + \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^{\infty} 2U_i I_j \sin(i\omega t) \sin(j\omega t - \Psi_j)$$

上式中,第 1 项为同次谐波的功率分量,第 2 项为非同次谐波功率分量^[7]。由于正弦、余弦函数在整周期内的积分和均为 0,第 2 项在 1 个周期内的平均功率为 0,第 1 项在 1 个周期内的平均值为

$$\overline{P_T} = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \cos \Psi_i$$

因此,谐波下的有功功率可以用平均瞬时功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt =$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} u(t)_n i(t)_n \cos \Psi_n = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

来计算。同理,谐波下的无功功率可以表示为

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} u(t)_n i(t)_n \sin \Psi_n = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2)$$

对谐波有功功率、谐波无功功率进行积分,即可实现谐波有功电能和谐波无功电能的计量。

3 谐波电能计量方案

谐波电能计量的关键是准确地提取出电网信号中各次谐波电压和电流信号。利用 Mallat 多尺度分解算法实现谐波信号的频带分解,将不同频率的谐波划分到不同的频带中,分解的频带个数由分解尺度决定。对各频带分解系数重构依次提取出各个频带内的谐波时域信号,从而实现各个频带内电力谐波参数的测量,并跟踪观测各频带内的谐波状况,结合谐波功率检测公式来实现谐波电能计量。原始信号处理流程如图 1 所示。

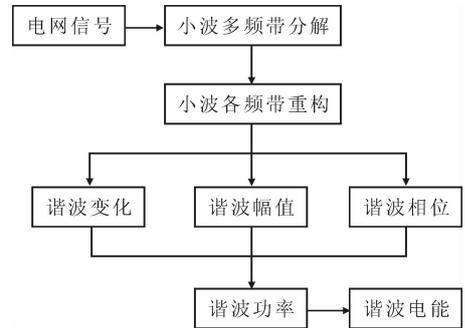


图 1 原始信号处理流程图

4 仿真分析

本文采用 Db40 小波函数进行谐波电能计量仿真分析,设仿真信号的基波频率为 50 Hz,采样频率 $f_s = 1\ 600$ Hz,仿真信号长度取 20 个基波周期,即 640 个采样点。在 Matlab 7.0^[8]中构建含有 1, 3, 7, 11 次谐波的时变电压信号

$$u(t) =$$

$$\begin{cases} 100\sin(2\pi ft) & 0 < t < 5T \\ 100\sin(2\pi ft) + 20\sin(6\pi ft) & 5T < t < 10T \\ 100\sin(2\pi ft) + 15\sin(14\pi ft) & 10T < t < 13T \\ 100\sin(2\pi ft) + 20\sin(6\pi ft) + 10\sin(22\pi ft) & 13T < t < 20T \end{cases}$$

采用3层 Mallat 小波变换,使信号基频落在最低子频带 0~100 Hz 的中心,各频带范围分别为 0~100 Hz,100~200 Hz,200~400 Hz 和 400~800 Hz. 图2为电压信号经多分辨率分解后依次重构出的谐波波形. 横坐标为采样区间,纵坐标为信号幅值/V.

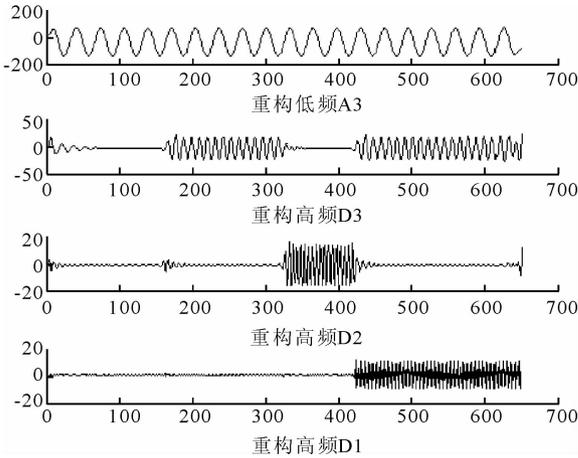


图2 电压信号的重构波形

图2中 A3 对应 0~100 Hz 低频部分重构的结果, D1—D3 分别对应 400~800 Hz, 200~400 Hz, 100~200 Hz 高频部分重构的结果. 由图2可以看出:基波覆盖整 20 个采样周期,3 次谐波信号存在于第 5—10 周期和第 13—20 周期,7 次谐波信号产生于第 10 个周期并结束于第 13 个周期,11 次谐波信号则从第 13 周期开始叠加. 说明 Db 小波能记录信号发生突变的准确时刻,并能跟踪观测各频带内的谐波变化.

当电压和电流非同次时会导致功率为 0, 电流也取 1, 3, 7, 11 次谐波叠加信号,同时令非同次谐波分别具有不同的滞后相位.

$$i(t) =$$

$$\begin{cases} 10\sin(2\pi ft + 15^\circ) & 0 < t < 5T \\ 10\sin(2\pi ft + 15^\circ) + 2\sin(6\pi ft + 30^\circ) & 5T < t < 10T \\ 10\sin(2\pi ft + 15^\circ) + 1.5\sin(14\pi ft + 45^\circ) & 10T < t < 13T \\ 10\sin(2\pi ft + 15^\circ) + 2\sin(6\pi ft + 30^\circ)G + \sin(22\pi ft + 60^\circ) & 13T < t < 20T \end{cases}$$

对电流信号进行 3 层小波变换处理,重构出各频带的谐波信号,波形如图 3 所示. 横坐标为采样区间,纵坐标为信号幅值/A.

对重构的电流信号进行幅值、相位求解,对比电流信号直接采用 FFT 变换得到的参数信息,结果如表 1 所示(WT 意为 wavelet transform,小波变换).

由表 1 数据可知,对于时变谐波电流信号,FFT 由于只能从整个频域进行观察,给出的是非平稳信号的整体效果,因而测量误差较大,精度较低;而采用小波变换方法得到的测量幅值、相位和理论值基本一致,相对误差仅为千分级别,并且有效地降低了不同频率间的干扰. 根据图 1、图 2 中电压、电流波形在不同时段的具体情况,通过公式①②算出功率并积分求和,从而得到谐波的有功电能和无功电能,如表 2 所示.

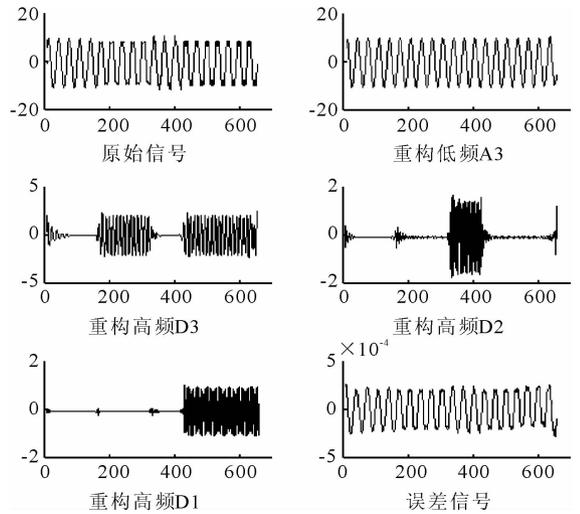


图3 电流信号的重构波形

表 1 电流信号幅值、相位仿真结果

参数	基波	3 次谐波	7 次谐波	11 次谐波
理论幅值	10 A	2 A	1.5 A	1 A
FFT 幅值	9.926 A	1.875 A	1.237 A	0.668 A
WT 幅值	9.999 A	1.994 A	1.508 A	1.013 A
理论相位	15°	30°	45°	60°
FFT 相位	18.36°	43.17°	77.32°	49.58°
WT 相位	15.01°	29.96°	45.03°	60.12°

表 2 信号有功、无功电能仿真数据

谐波次数	有功电能/W		无功电能/W		相对误差/%
	理论值	仿真值	理论值	仿真值	
1	154.560	154.557	41.440	41.439	0.005
3	3.464	3.455	2.000	1.995	0.259
7	1.273	1.278	1.273	1.279	-0.392
11	0.250	0.252	0.433	0.436	-0.800
总量	159.547	159.542	45.145	45.149	0.009

考虑到边界效应影响,故取第 2T—18T 内的数据计算谐波电能,相对误差取有功电能、无功电能误差值中较大者. 仿真结果表明,小波变换可以有

效提取出各阶次谐波信号,且基于小波变换的电能计量方法精确度较高,适合非平稳谐波的电能计量.

5 结论

本文利用小波分析对信号多分辨率分析处理的特性,提出了基于 Mallat 算法的小波变换方法.通过仿真验证,小波多分辨率分析方法能够有效地提取出谐波信号中各阶次谐波,小波重构则可以实现各频带内电力谐波参数的精确测量,也可以跟踪观测各频带内的谐波变化,同时结合谐波功率检测方法和电能计量原理,实现谐波电能准确、高效的计量.

参考文献:

[1] 潘绍明,罗功坤,劳有兰.基于快速傅里叶变换的电力

谐波分析和程序实现[J].广西工学院学报,2012(1):10.

- [2] 樊启斌.小波分析[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
- [3] 谷文静,金涛.基于小波变换的电力系统谐波分析研究[J].电气技术,2012(8):36.
- [4] 伍超.基于小波变换的谐波检测方法研究[J].黑龙江科技信息,2010(10):24.
- [5] 张斌,孙静.基于 Mallat 算法和快速傅里叶变换的电能质量分析方法[J].电网技术,2007,31(19):35.
- [6] 李弼程,罗建书.小波分析及其应用[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [7] 刘文松,流韶华,王芸波.谐波电能计量技术[J].中国电力教育,2010(35):255.
- [8] 葛哲飞,沙威.小波分析理论与 Matlab R2007 实现[M].北京:电子工业出版社,2007.

(上接第 78 页)

- [5] Pablo G G, Aurelio G C. Control system for a PWM based STATCOM [J]. IEEE Trans on Power, 2000, 15(4):1252.
- [6] Eacobar G, Schaft A J van der, Ortega R. A Hamiltonian viewpoint in the modeling of switching power converters [J]. Automatic, 1999, 35(3):445.
- [7] Xi Z, Cheng D. Passivity-based stability and control of the Hamiltonian control systems with dissipation and its applications to power system[J]. International Journal of Con-

trol, 2000, 73(18):1686.

- [8] 马进,席在荣.基于 Hamilton 能量理论的发电机汽门与励磁非线性稳定控制器的设计[J].中国电机工程学报,2002,22(5):88.
- [9] 陆冬良,张秀彬.基于 Hamilton 能量整形的多机电力系统励磁控制[J].电力系统保护与控制,2011,39(5):45.
- [10] 石坊,王杰.基于 Hamilton 能量函数的发电机励磁与 TCSC 协调控制[J].电力系统保护与控制,2012,40(15):24.

电子式电流互感器数据采集系统的设计

冯巧玲, 裴永占

(郑州轻工业学院, 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:以 STM32F107RB 微控制器为控制核心,采用无源支柱式方案,设计了电子式电流互感器数据采集系统,该系统将信号通过电缆传至低压侧,以提高电子电路部分可靠性;根据多通道数据采集的思想,放大器采用集成芯片 LMP2014MT 对小信号进行不同增益的放大,以减小 AD 转换的量化误差,提高采集精度;硬件设计采用功能强大的 STM32 控制 AD 转换,传送信号至合并单元.该系统简化了采集器电子电路,在提高精度的同时增强了电路稳定性.

关键词:电子互感器;AD 转换器;STM32;数据采集系统

中图分类号:TM452 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.019

Design on data acquisition system of electronic current transformer

FENG Qiao-ling, PEI Yong-zhan

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

Abstract: With the STM32F107RB as the controller, and the scheme of passive pillar type as the design scheme, the data acquisition system of electronic current transformer was designed. The signal was transmitted to low voltage side through the cable to improve the reliability of electronic circuit. On the grounds of multi-channel data acquisition, integrated chip of LMP2014MT was taken as amplifier to amplify the small signal by different gains, so that the quantification error of AD conversion was reduced to improve the precision of the acquisition. Hardware design used powerful STM32 to control AD conversion and then to transmit signal to merging unit. This system can simplify electronic circuit and improve the precision while strengthening the stability of circuit.

Key words: electronic transformer; AD converter; STM32; data acquisition system

0 引言

电力技术的发展促使电力系统中设备和技术更新换代、优化升级,不断向智能电网的方向发展^[1],用于测量和保护的电子式电流互感器因具有轻巧、无磁饱和、绝缘简单、无谐振等明显的优势,正在得到广泛的关注和应用^[2].但一些试运行的实践也发现,互感器的电子电路部分易受恶劣的电磁环境干扰,且供电部分一般采用激光供电,可靠性

差,电路有低功耗的限制且维修麻烦^[3],这在一定程度上影响了电子式电流互感器的推广使用.

无源支柱式设计是把采集单元放在低压侧,传感头和采集单元间用屏蔽电缆连接.与有源式设计相比,无源式设计可以提高电子回路的抗干扰性和供电可靠性.多通道数据采集的设计,是直接放大 6 路信号后进行 AD 转换,在微控制器中直接选取精确的数据,回避对放大增益再设置的步骤,从而简化采集过程.本文拟采用 STM32F107RB 微控制器

收稿日期:2013-03-08

作者简介:冯巧玲(1960—),女,河南省郑州市人,郑州轻工业学院教授,硕士,主要研究方向为电力系统谐波分析与抑制.

为控制核心,采用无源支柱式的设计方案和多通道采集的思想设计高精度的数据采集系统,以期在小信号的情况下有效地消除量化误差,提高采集精度.

1 电子式电流互感器采集器工作原理

电子式电流互感器传感头采用 Rogowski 线圈,即罗氏线圈,是在截面均匀的环状非磁性骨架上均匀缠绕的空心线圈^[4]. 当有电流流过线圈环内的一次导线时,线圈两端产生感应电动势,其原理见图 1.

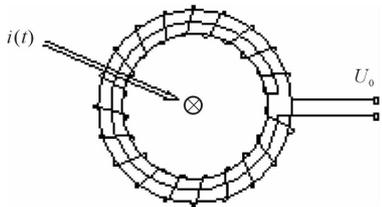


图 1 罗氏线圈测量原理图

感应电动势为

$$e(t) = - \frac{d\Psi(t)}{dt} = -k \frac{di(t)}{dt} \tag{1}$$

其中, Ψ 为磁链; k 为罗氏线圈的互感系数,它决定于线圈的结构参数; i 为被测电流. 由式 ① 可知,感应电动势 $e(t)$ 与电流变化率成正比. 对式 ① 进行积分,即可得出电流 $i(t) = - \frac{1}{k} \int e(t) dt$.

2 信号调理电路

罗氏线圈感应出的电压 U_0 不能直接进行 AD 转换,需要对信号进行放大和积分滤波. 信号调理电路如图 2 所示. R_1, R_2, R_3 和集成运放组成同相比例运算电路,放大倍数由 R_3, R_2 的比值决定. 积分电路由理想积分器外加一电阻组成. 实际应用中,由于理想积分器偏置电压的存在,会导致信号增益过大饱和,对此可在电容上并联一个电阻加以限制,并在积分电路之前加 RC 低通滤波电路.

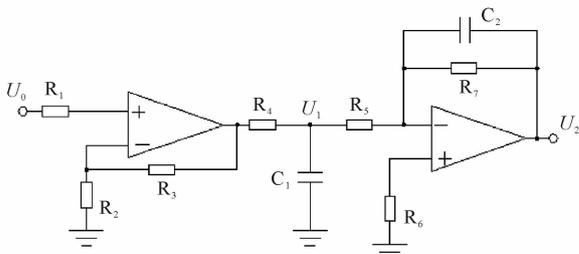


图 2 信号调理电路

由图 2 可得:

$$U_1(t) = \frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_2} + U_0(t)$$

$$U_1(t) = -R_5 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} - \frac{R_5}{R_7} U_2(t)$$

即

$$\frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_2} U_0(t) = -R_5 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} - \frac{R_5}{R_7} U_2(t)$$

当 $R_5 \ll R_7$ 时, $\frac{R_5}{R_7} U_2(t) \approx 0$, 则

$$\frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_2} U_0(t) = -R_5 C_2 \frac{dU_2(t)}{dt}$$

即

$$U_2(t) = - \frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_2 R_5 C_2} \int U_0(t) dt \tag{2}$$

把式 ① 代入式 ② 可得

$$U_2(t) = - \frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_2 R_5 C_2} \times (-\kappa i(t)) = \kappa \frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_2 R_5 C_2} i(t) \tag{3}$$

由式 ③ 可以看出, $U_2(t)$ 和 $i(t)$ 是同相位的线性关系.

3 多通道数据采集的实现

互感器输出的信号分为保护信号和测量信号 2 种,两者对数据的要求不同. 保护信号一般要求有 40 ~ 50 倍的过载能力,而测量信号要求达到 0.2 s 的精度^[5]. 与传统的独立测量的方式相比,多通道数据采集器可以同时满足测量和保护两种要求.

在实际应用中,由于采集回路 AD 转换器件的特性所限,罗氏线圈感应的小信号直接进行模数转换会有较大的量化误差. 所以小信号需要针对不同的电压,采用不同的放大增益,即多通道数据采集. 这可在 AD 转换精度一定的条件下近一步提升采集信号的精度.

信号量程切换设计的文献中多是利用单片机或可编程门阵列对信号模数转换的结果进行分析,然后控制运算放大器外接不同电阻实现信号的衰减与放大,或用可编程增益放大器 PGA 放大. 这种利用单片机对采样结果先进行分析再确定放大增益的方法复杂且实时性不高. 本设计采用无源支柱式方案,电子电路工作在低压侧,供电可靠性好,电子电路设计比较灵活. 所以采用几种不同的固定增益放大器放大信号,以免除对采样结果先分析再调整增益的过程,增强实时性. 笔者设计多通道信号

按 16, 8, 4, 1 和 1/8, 1/32 倍的增益分别放大, 同时进行 AD 转换, 由微控制器选择精度较高的数据, 从而实现了小信号的测量和过载保护. 其硬件结构如图 3 所示.

图 3 中信号放大器选用集成芯片 LMP2014MT. 该芯片集成了 4 个具有高精度性的放大器, 可利用专利技术测量和纠正偏移电压, 能保证温度及长时间运行的稳定性. 此外, 芯片具有较高的共模抑制比和电源抑制比, 不会出现传统放大器的 $1/f$ 电压和电流噪声, 是要求高精度、高稳定性应用的一种良好选择. 图 3 中的 AD 转换器是集成 6 个 16 位独立 ADC 的 ADS8364 芯片. 芯片具有并行输出、 $6 \times$ FIFO 和 6 个 AD 转换通道, 采样速率最高为 250 kSPS, 供电电压 $-0.3 \sim 6$ V, 模拟输入范围为电源电压 ± 0.3 V.

STM32F107RB 是一款资源丰富、功能强大的微控制器, 拥有许多优良的性能: 采用 32 位处理器内核, 工作频率最高可达 72 MHz; 采用哈佛结构, 硬件除法, 包括乘法指令在内的许多指令都是单周期的; 拥有 2 通道 12 位的 DA 转换器, 可以支持模拟信号的输出.



图 3 硬件结构图

4 软件流程

软件采用 C 语言编写, 采样数据的读取和传输均采用设置相应中断优先级的方式. 微控制器内嵌有向量中断控制器, 因为不再需要软件去判断中断源, 中断延时大大缩短, 中断的嵌套也是在硬件水平上实现的, 不需要软件代码来实现. 数据读取软件流程如图 4 所示. ADS8364 采用由微控制器 MCO 引脚提供的 4 MHz 外部时钟, 每个转换过程占用 20 个时钟周期, 在 4 MHz 情况下每个转换过程需要 $5 \mu\text{s}$. 通过设置 BYTE 位为 0, 采用 16 并行传输数据模式; 转换的数据输出采用周期模式, 即对 6 个通道同时转换, 将数据按顺序传输到输出端, 该设置通过把 A_2 和 A_1 接到 V_{cc} , 把 A_0 接到数字地以实现输出模式的设定.

数据需要 2 次读取, 第 1 次读取的数据包含通道地址信息, 可以用来判断放大增益通道, 确定增益值. 数据通过中断程序被微控制器读取, 将读取

的数据与相应的阈值比较, 超出阈值说明数据超出 AD 转换量程, 数据不可靠, 继续判断下一通道数据, 直到选出低于阈值的数据. 把选用的比较精确的数据利用除法器除以通道相对应的增益, 还原数据, 并遵循 IEC61850—9—2 规约对数据进行组帧编码, 输送到合并单元.

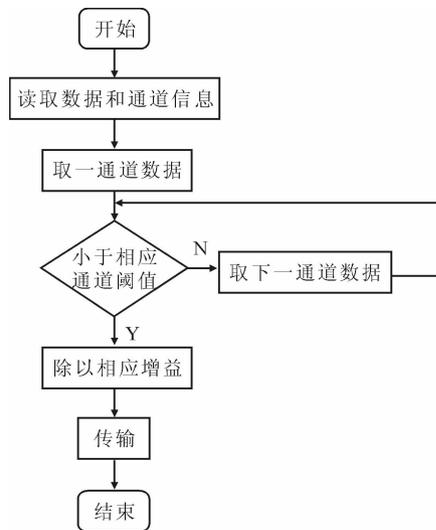


图 4 数据读取软件流程

5 结论

本文采用新型的集成芯片 LMP2014MT 和微控制器 STM32F107RB, 在采用无源支柱式方案采集信号的基础上设计了电子式电流互感器数据采集系统. 该系统充分利用了新型芯片和微控制器的优势, 简化了采集器电子电路, 从而在提高精度的同时增强了电路的稳定性. 该设计为未来电子式电流互感器的改进提出了新的思路.

参考文献:

- [1] 孔祥玉, 赵帅, 贾宏杰, 等. 智能电网中电力设备及其技术发展分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 21.
- [2] 李九虎, 须雷, 罗苏南, 等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 江苏电机工程, 2007, 26: 80.
- [3] 贺要峰, 王玉学, 刘丙申, 等. 罗氏无源支柱式电子式电流互感器设计方案及应用研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(11): 80.
- [4] 尚秋峰, 刘艳峰. 方形骨架 Rogowski 线圈的性能分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 476.
- [5] 牟涛, 周丽娟, 周水斌, 等. 高精度电子式电流互感器采集器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 141.

大型超市火灾危险性数值模拟

朱磊

(郑州市公安消防支队, 河南 郑州 450000)

摘要:以某大型超市为例,运用 CFAST 软件,针对有无喷淋 2 种工况,研究了影响人员安全疏散的烟气层温度和高度.结果表明:自动喷水灭火系统可以有效地降低烟气层的温度和高度,在无喷淋的情况下,可用安全疏散时间小于必需安全疏散时间,人员无法正常安全疏散;在有喷淋的情况下,烟气层的温度和高度没有达到影响人员安全疏散的危险状态,可用安全疏散时间大于必需安全疏散时间,人员能够正常安全疏散.

关键词:超市火灾;性能化防火;数值模拟;可用安全疏散时间

中图分类号:X928.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.020

Numerical simulation of fire risk of large-scale supermarket

ZHU Lei

(Zhengzhou Fire Detachment, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Taking a supermarket as example, the temperature and height of smoke were studied according to whether the sprinkler was functioning using CFAST software. The results showed that the automatic sprinkler system could effectively reduce the smoke layer temperature and height, the *ASET* (available safety egress time) was less than *RSET* (required safety egress time) when the sprinkler was not functioning, occupants can not evacuate safely. When the the sprinkler was functioning, smoke layer temperature and height did not meet the dangerous state of the occupant safe evacuation, the *ASET* was greater than *RSET*, hence, occupants could evacuate safely from the supermarket.

Key words: supermarket fire; performance-based fire; numerical simulation; *ASET*

0 引言

近年来,随着我国经济的快速发展和人民生活水平的提高,大型超市的数量不断增多,这些大型超市普遍特点是:1)经营面积大,可燃物品数量多,火灾荷载大,一旦着火,燃烧速度快,火焰温度高,且有些物品具有一定的毒性;2)建筑物外墙开口面积小、数量少,火灾发生时烟气不易排出,烟气层下降速度较快;3)安全出口数量少,人员密度比较大,疏散条件差,不利于人员安全疏散;4)空间比较高,

货物集中,火灾一旦发生会迅速过渡到全面发展阶段^[1].基于大型超市的这些特点,火灾一旦发生,若没有有效的防火措施,易造成重大的人员伤亡和财产损失,因此,研究大型超市的火灾危险性及其防护措施非常重要.

近年来,搜集大量真实的火灾案例并将其作为评估建筑物火灾安全疏散设计方案优劣的方法被普遍采用,但此种方法工作繁琐、统计量巨大,受其他因素的影响较大.因此,需要寻求一种更为简便有效的评估方法,于是借助经验公式、数值模拟的

性能化防火设计方法应运而生^[2-4]. 性能化防火设计方法是以火灾安全工程学的思想为指导,以火灾危险分析为中心的建筑防火设计方法,在国内外得到了广泛的应用. 目前我国消防部门也在积极开展这方面的研究. 鉴于此,本文拟以某大型超市为例,运用性能化防火设计方法来研究超市火灾危险性,分析火灾中烟气和温度的变化情况,以确保有较多的可用安全疏散时间,从而使火灾发生时人员可安全疏散.

1 模拟场景设置

1.1 人员安全疏散准则

人员安全疏散时间是评估是否达到防火安全目标的主要判据之一. 本文采用一种能满足充分必要条件的安全疏散时间判据,如图1所示. 可用安全疏散时间(ASET)是指从起火时刻到火灾对人员构成危险状态的时间,必需安全疏散时间(RSET)是指从起火时刻到人员疏散至安全区域的时间(包括探测报警时间、人员准备时间和人员运动时间),保证建筑物内人员安全疏散的关键是 $RSET < ASET$ ^[5-6].

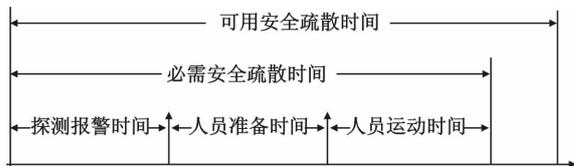


图1 人员安全疏散时间判据

1.2 火灾参数设定

本文采用美国国家标准研究所(NIST)建筑火灾研究实验室(BFRL)开发的区域模型软件 CFAST 模拟某大型超市的火灾情况. 火灾区域模拟方法通常是:将火灾房间分为上下2个区域,即上部的热烟气区和下部的冷空气区,并且假设2个区域内的参数是均匀的;针对2个区域分别列出质量守恒方程和能量守恒方程,每个方程式都可以依据质量流量和能量流量来表达.

该超市为单层建筑,其设计参数如下:房间进深40 m;房间开间60 m;室内净高4.5 m;墙壁、顶棚材料为石膏;地板材料为混凝土;安全出口有2个,宽度均为1.5 m,高度均为2.2 m.

燃烧是一种复杂的物理/化学过程,对其进行数值模拟需要设定的参数比较多,而合理地确定参

数非常重要. 设定火灾主要是确定火灾发展曲线,目前普遍采用2种设定方法:一是采用定常火源,即把火源功率设定为一个具体的常数,不随时间变化;另一种是把火灾设定为 t^2 增长模型,即 $Q = \alpha t^2$,其中, Q 为火源的热释放速率/kW; α 为火灾增长速率/(kW · s⁻¹); t 为时间/s. 火灾增长模型可以分为慢速、中速、快速、超速4种. 这是一种常用的火灾发展模型,用来描述火灾过程热释放速率随时间的变化趋势. 根据 NFPA(美国防火协会)的分类,超市内可燃物的热释放速率是“快速火”的增长方式,即 $\alpha = 0.0469$,并且当温度达到一定值的时候,水喷淋系统启动. 喷头采用常用的类型,响应温度为68 ℃,安装位置距顶棚0.5 m,24个喷头等间距布置,即平均每个喷头的保护面积为100 m². 具体的初始条件和边界条件设置见表1.

表1 参数设定值

火源	火源位置	中心
	火焰高度	0.5 m
	燃烧热	50 000 kJ/kg
	初始可燃物温度	20 ℃
喷头	火焰的辐射分数	0.3
	启动温度	68 ℃
	响应时间指数	100 (m · s) ^{1/2}
	安装个数	24个

2 数值模拟

根据火灾调查的结果可知,火灾中人员死亡原因多数归结于高温的烟气,因此对烟气层的温度和高度进行分析非常重要. 本文设定了2种工况,一种为有喷淋的情况,另一种为无喷淋或喷淋无法正常工作的情況.

2.1 烟气层温度和高度对比分析

通过运用 CFAST 模拟计算可以得出,没有安装自动喷水灭火系统的烟气层温度在160 s左右就达到了80 ℃,最高温度达到190 ℃左右,严重影响人员的安全疏散;而安装了自动喷水灭火系统的烟气层温度最高为80 ℃左右,对人员安全疏散影响不大. 这是因为在温度达到68 ℃时,自动喷水灭火系统启动,能够有效地降低烟气层的温度. 2种工况下烟气层温度对比情况如图2所示.

同理,2种工况下烟气层高度对比情况如图3所示. 由图3可以看出,在没有安装自动喷水灭火系统的超市中,烟气层下降的速度比安装了自动喷水

灭火系统的超市要快很多.并且,没有安装自动喷水灭火系统的超市烟气层可以下降到1 m以下,而安装了自动喷水灭火系统的超市中,烟气层下降到2.8 m左右即不再继续下降,这是因为自动喷水灭火系统能够有效地控制烟气的产生.

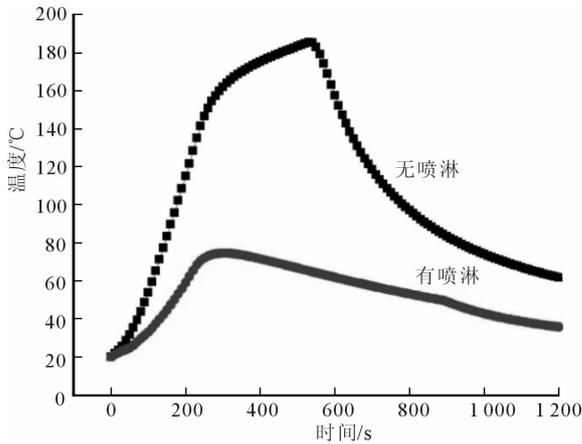


图2 2种工况下烟气层的温度对比

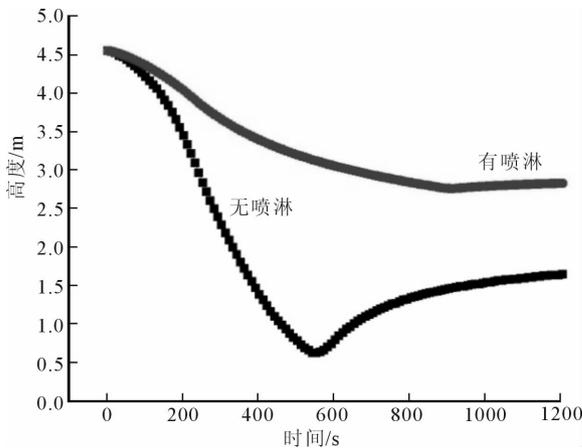


图3 2种工况下烟气层的高度对比

2.2 人员安全疏散计算

根据国内外普遍采用的火灾危险临界条件的判定依据,当上部烟气层的温度达到180℃或烟气层的高度下降到人眼高度1.6 m时,即认为会对人员造成严重的伤害,人员安全疏散失效^[7-8].根据模拟的结果,在无喷淋的情况下,温度达到180℃的时间为450 s,烟气层降到1.6 m的时间为380 s,因此,为了保守起见,设定 $ASET = 380$ s.

设超市设计可容纳人数为1 000人,假设2个安全出口疏散的人数相等,通行系数取1.2人/(s·m),则:人流速度=通行系数×有效宽度=1.2×(1.5-0.4)=1.32人/s;疏散的时间=500/1.32=379 s,探测报警时间为20 s,人员运动准备时间为

30 s,由此计算出 $RSET = 429$ s.

在有喷淋作用的情况下,烟气层的最高温度为80℃,烟气层的高度下降到2.8 m,低于火灾危险判据的180℃和1.6 m,没有达到火灾危险临界条件,即认为人员能够正常安全疏散.而在无喷淋作用的情况, $ASET = 380$ s, $RSET = 429$ s,即: $ASET$ (可用安全疏散时间) $< RSET$ (由需安全疏散时间).因此,该工况下人员无法正常安全疏散,该超市的疏散设计无法满足设定火灾条件下的安全要求.

3 结论

本文以某大型超市为例,通过CFAST数值模拟,针对有无喷淋2种工况,对影响人员安全疏散的烟气层温度和高度进行了研究,得出如下结论:自动喷水灭火系统可以有效地降低烟气层的温度和高度——在无喷淋设备的情况下,人员无法安全疏散至室外;而在有喷淋设备的情况下,烟气层的温度和高度没有达到影响人员安全疏散的危险状态,人员可以正常地进行安全疏散.由此可见,大型超市中安装自动喷水灭火系统并保证其能够正常工作,将在很大程度上保证当火灾发生时,超市人员的正常安全疏散.据调查,目前部分超市中自动喷水灭火系统不能够正常工作,这是严重的消防隐患,需引起消防部门及超市消防管理人员的重视.

参考文献:

- [1] 杨光,付燕平,田宏.大型仓储式超市火灾危险性及其人员安全疏散分析[J].工业安全与环保,2006,32(1):49.
- [2] 陈劲松.仓储式超市的疏散设计和建筑防火性能化设计的必要性[J].安徽建筑,2007(5):26.
- [3] 欧明辉,叶志冬,林洁.采用疏散剩余时间计算模拟法评估建筑物火灾中人员疏散安全[J].消防技术与产品信息,2013(2):44.
- [4] 张村峰,李元洲,霍然,等.水喷淋作用下烟气层稳定性的判据研究[J].中国科学技术大学学报,2006,36(12):1325.
- [5] 王军,姚斌,张和平,等.某大型超市火灾危险性评估研究[J].火灾科学,2004,13(3):196.
- [6] 范维澄,孙金华,陆守香.火灾危险性评估方法学[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 霍然,胡源,李元洲.建筑火灾安全工程导论[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1999.
- [8] 李引擎.建筑防火性能化设计[M].北京:化学工业出版社,2005.

傍山软基高填方路堤边坡稳定性及加固效果分析

郭力群¹, 戴俊涛^{1,2}, 陈亚军¹, 彭兴黔¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 厦门市市政工程设计院有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要:以福建省某路基工程傍山软基高填方路堤边坡为例,采用有限元软件 GeoStudio,结合极限平衡法和有限元法,对该路堤边坡的稳定性进行动态分析,结果表明:该方法在评价傍山软基高填方路堤边坡稳定性上是有效的,尤其是当安全系数临近 1.0 时,可以结合有限元模拟的应变变形更准确地判断路堤边坡稳定性,为今后类似路堤边坡工程的稳定性评价提供有益参考。

关键词:傍山软基高填方;路堤边坡稳定性;有限元法;极限平衡法;数值模拟

中图分类号:TU413.62 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.021

Analysis of the high fill embankment stability and strengthening effects for mountain-side soft clay foundation

GUO Li-qun¹, DAI Jun-tao^{1,2}, CHEN Ya-jun¹, PENG Xing-qian¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Xiamen Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: With one section of a subgrade engineering project in Fujian, the mountain-side soft foundation of high fill embankment as example, by finite element software GeoStudio, which combined with the limit equilibrium and finite element modeling, a dynamic analysis was performed on the mountain-side soft foundation of high fill embankment. The results showed that the method was effective in the stability evaluation of the mountain-side soft foundation of high fill embankment slope, especially when the safety coefficient closes to 1.0, the finite element simulation of the strain deformation can be combined to determine more accurately embankment slope stability, which can provide a reference for the similar slope stability evaluation in future.

Key words: mountain-side soft clay foundation of high fill embankment; embankment slope stability; finite element method; limit equilibrium method; numerical simulation

0 引言

目前评价边坡稳定性主要有 2 种方法,即定量

法和定性法^[1],其中定量法是边坡稳定性评价的发展趋势.定量评价法包括以极限平衡理论为基础的安全系数法和以有限元理论为基础的应变变形法,

收稿日期:2013-03-24

基金项目:福建省区域重大专项(2011Y3005)

作者简介:郭力群(1970—),男,福建省泉州市人,华侨大学副教授,硕士,主要研究方向为岩土工程和矿山开采。

实际工程中往往只采取单一的方法对边坡稳定性进行评价^[2-6]. 对于结构简单的边坡, 单一的评价方法能满足要求, 但对于像傍山软基高填方路堤这样的复杂边坡, 单一的评价方法就不能准确地评价其稳定性了, 需要结合不同方法进行综合评价. 随着计算技术的提高, 国内外在对复杂边坡稳定性进行评价时, 已逐步采用有限元模拟、极限平衡法等方法, 以提高边坡稳定性评价的准确性^[7-10]. 本文拟综合极限平衡法和 GeoStudio 有限元软件模拟的应变变形 2 种方法, 对傍山软基高填方路堤边坡稳定性进行动态评价, 以期为类似复杂边坡工程稳定性评价提供有益参考.

1 工程概况

福建省某一填方高度达 17 m 的傍山软基路堤边坡, 其路基一侧位于承载力高的山坡上, 另一侧位于下伏较厚淤泥质土层的软基上. 承载力在路基横断面方向上存在明显差异, 且软基部分的淤泥质土层在横断面方向外倾坡度较大, 这对路堤边坡的稳定性和路基沉降控制非常不利. 原设计方案仅采用变间距水泥搅拌桩对软基进行处理, 桩间距为 0.9 m 和 1.1 m, 正方形布桩, 桩径 0.5 m, 桩长 8 m 左右, 以全风化岩为持力层. 路堤填筑接近 11 m 高

时, 监测数据显示靠近软基一侧路堤坡脚处深层水平位移速率超过预警值 5 mm/d, 且临近坡脚的水田地面隆起明显, 呈现滑坡前的征兆, 经研究需采取加固措施. 加固方案为反压护道加预应力锚索抗滑桩, 加固模型如图 1 所示.

2 地质条件

在勘察深度以内, 地基土自上而下分为 4 层: ①粉质黏土(半挖半填土层), 以灰黄、黄色等为主, 稍湿~湿, 密实, 工程性质较好, 承载力较高; ②淤泥质土, 青灰色, 饱和, 流塑, 具有高压缩性和高灵敏度, 厚度 3.5~7.5 m; ③全风化岩角砾晶屑凝灰岩, 灰色, 中密状; ④强风化角砾晶屑凝灰岩, 灰、灰褐、灰黄、土黄色.

其中, 淤泥质土层具有含水量高、孔隙率大、低密度、高压缩性、低透水性等特性, 而且在横断面方向有明显的外倾坡度, 是控制路基稳定和路基变形的主要土层. 各土层主要参数如表 1 所示.

3 搅拌桩处理后的路堤边坡稳定性分析

GeoStudio 软件是一款专业的工程软件, 其中 SLOPE 模块和 SIGMA 模块可以进行边坡工程稳定性

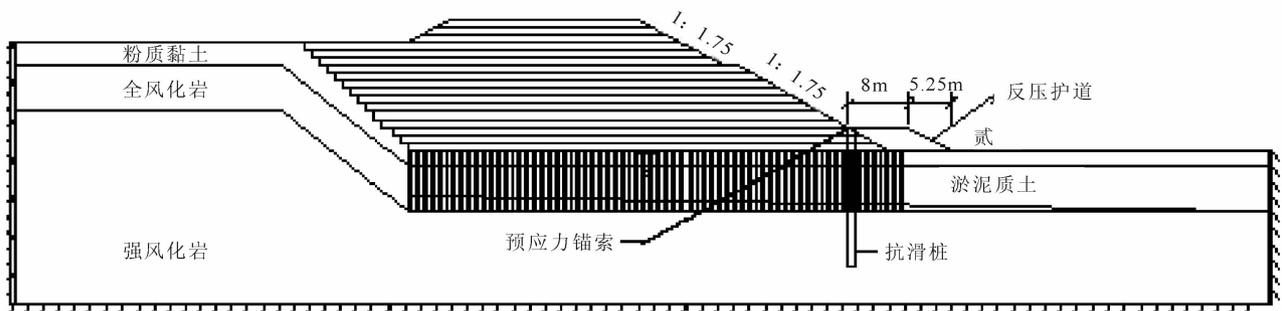


图 1 路堤边坡加固模型

表 1 各土层主要物理参数

序号	土层名称	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e_0	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/^\circ$	渗透系数 $K/(10^{-6} cm \cdot s)$
①	粉质黏土	23.5	2.05	0.652	9.76	[27.1] (20.6)	[30.0] (21.1)	100~120
②	淤泥质土	62.8	1.59	1.770	1.62	[32.3] {11.4} (17.8)	[24.4] {0.7} (4.0)	1.3~3.7
③	全风化岩	20.0	2.00	0.606		{60.3}	{12.3}	350

注:[]表示三轴固结排水剪指标,{ }表示三轴固结不排水剪指标,()表示直剪快剪指标.

分析,但两者的原理不同^[10-11]. SLOPE 模块专门用于边坡稳定性分析,其理论基础为极限平衡理论; SIGMA 模块用于分析岩土应力应变,其理论基础为有限元理论. 因此,可结合两者的计算结果,综合评价边坡的稳定性.

3.1 路堤边坡稳定性的 SLOPE 分析

在分析路堤边坡稳定性前,首先确定天然边坡的稳定状态,经 SLOPE 计算得其安全系数为1.730,处于稳定状态. 在路堤填筑过程中,天然边坡的稳定性是在不断增强的,因此只需要考虑新形成的路堤边坡的稳定性. 图2是经搅拌桩处理的路堤边坡 SLOPE 示意图,模型左右两侧范围大小为其填土高度的3倍,路基土层厚度取1倍填土高度,土体采用摩尔-库伦模型,其安全系数随填土高度的变化情况如图3所示.

从图3可以看出,4种方法的计算结果存在差异,这是因为4种不同方法满足要求的条件和所做的假设条件不同. 其中只有 Morgenstern-Price 法是严格意义上的条分法^[12],因为该方法既满足力平衡又满足力矩平衡,且滑动面是任意形状.

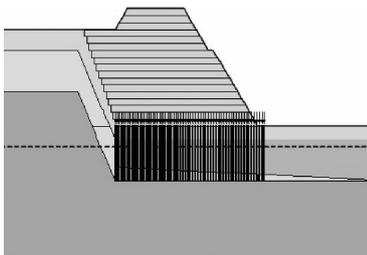


图2 搅拌桩处理的路堤边坡 SLOPE 模型

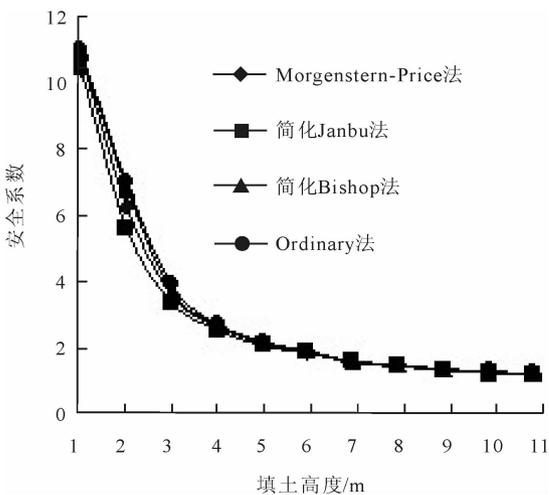


图3 安全系数与填土高度关系曲线

因此,本文以 Morgenstern-Price 法计算结果为准,将其他3种方法作为参考. 由图3可知,填土高度为10 m时,路堤边坡的安全系数为0.987,考虑时间固结因素,可认为处于临界状态;填高至11 m时,路堤边坡的安全系数为0.922,由安全状态变为非稳定状态.

3.2 路堤边坡稳定性的 SIGMA 分析

为了进一步分析路堤边坡稳定性,可以通过有限元 SIGMA 模块对其应变变形进行分析, SIGMA 模型如图4所示. 淤泥质土采用修正剑桥模型,其余土层采用弹塑性模型,模型左右两侧只固定水平位移,模型底部为完全固定边界.

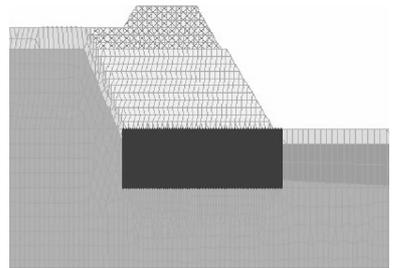


图4 搅拌桩处理的路堤边坡 SIGMA 模型

为分析路堤边坡在填筑过程中应变变形与稳定性的关系,在路基的底面选取相应的监测点:2个沉降点,分别为路中和路肩;路堤边坡处的深层水平位移监测点. 图5为路中和路肩沉降随填筑高度变化的关系曲线,图6为路肩深层水平位移随填筑高度的变化曲线.

从图6可以看出,填筑高度达到11 m时,最大深层水平位移速率达到5.98 mm/d,超过规范允许值5 mm/d,具有边坡破坏的明显征兆,与之前采用

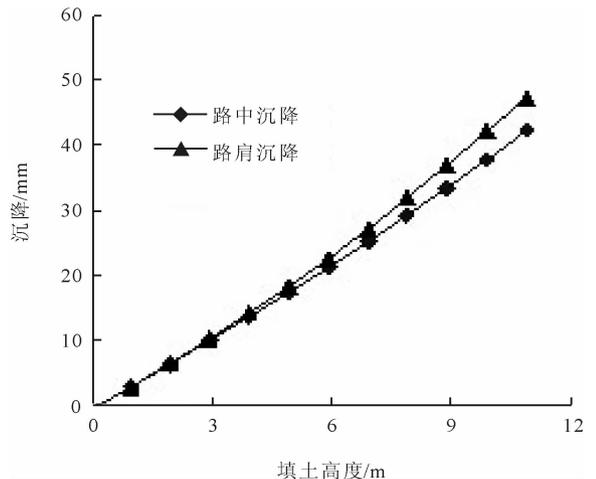


图5 路基沉降与填土高度关系曲线

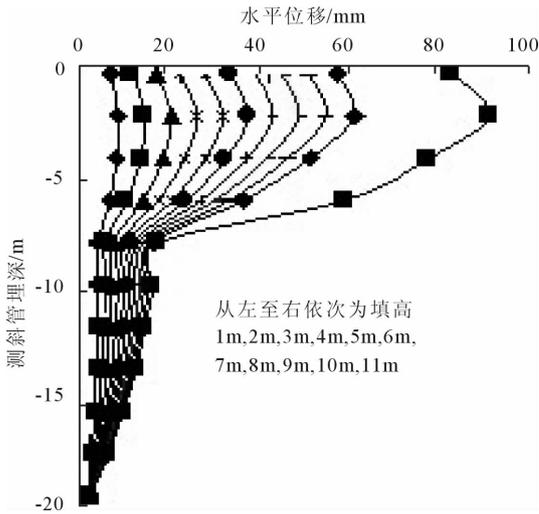


图6 深层水平位移与填土高度关系曲线

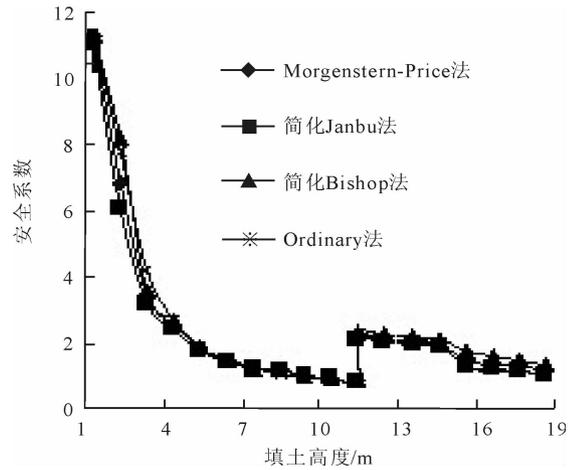


图8 加固后路堤边坡安全系数与填土高度关系曲线

安全系数分析的结果一致。

4 路堤边坡加固效果分析

4.1 路堤边坡加固效果的 SLOPE 分析

路基经搅拌桩处理后,其稳定性仍不能满足要求,必须对已经填筑的路堤边坡进行加固,以满足工程安全性要求.从工期、成本效益等方面进行比较分析后,确定加固方案为反压护道加预应力锚索抗滑桩.其中抗滑桩采用 C35 混凝土,直径 1.8 m,桩间中心距 3.6 m,抗滑桩抗剪承载力为 3 000 kN.预应力锚索采用高强度低松弛钢绞线,每束锚索设计抗拔力为 800 kN,单根锚索总长度为 30 m,锚固段长度为 12 m.考虑运营期间的车辆荷载对路堤边坡稳定性的影响,取 1 m 填土高度作为车辆荷载.加固后路堤边坡 SLOPE 模型如图 7 所示,路堤边坡安全系数随填土高度变化情况如图 8 所示.

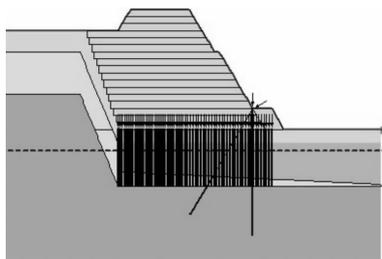


图7 路堤边坡加固后的 SLOPE 模型

从图 8 可以看出,路堤边坡经加固后,其稳定性大幅度增强:当填高至 11 m 时,其安全系数为 2.207;当填高至 17 m 时,其安全系数为 1.333;考虑车辆荷载后,安全系数为 1.242,仍能满足规范要求.

4.2 路堤边坡加固效果的 SIGMA 分析

从应变变形来分析路堤边坡的加固效果.图 9 为路堤边坡在 SIGMA 模块中的计算模型,图 10 为加固后路基沉降曲线图,图 11 为加固后路肩处深层水平位移曲线图.

从图 11 可以看出,经加固后的路堤边坡,其深层水平位移得到有效的控制,这是因为在抗滑桩和

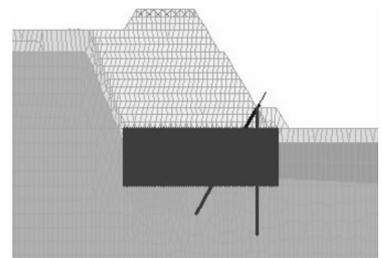


图9 加固后的路堤边坡 SIGMA 模型

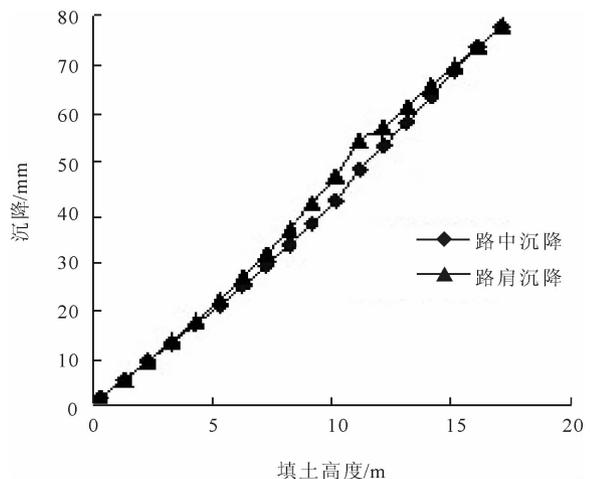


图10 路基沉降与填土高度关系曲线

预应力锚索的共同作用下,坡脚处深层水平位移被有效约束,最大水平位移明显减小,其随填土高度变化情况如图 12 所示。

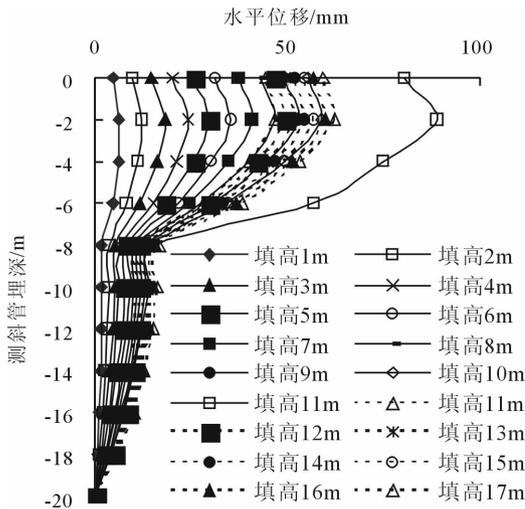


图 11 深层水平位移与填土高度关系曲线
注:实线为未加固的数据,虚线为加固后的数据

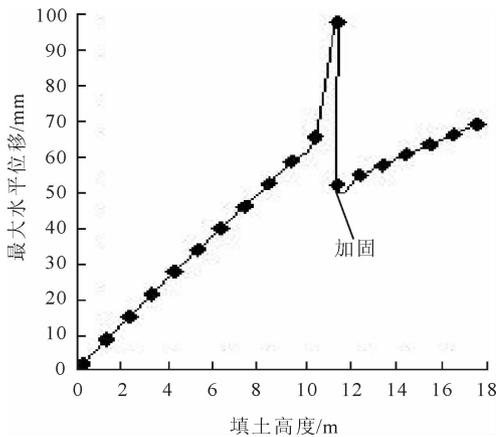


图 12 最大深层水平位移与填土高度关系曲线

从图 10—图 12 可以看出,路堤经加固后,沉降和深层水平位移的变化都在规范允许范围内。

5 结论

傍山软基高填方路堤边坡在填筑过程中,其稳定性是在不断变化的,是动态问题. 本文采用有限元软件 GeoStudio, 结合极限平衡法和有限元法, 对该路堤边坡的稳定性进行动态分析, 得出如下结论:

1) 傍山软基高填方路堤由于自身的特点, 在评价其边坡稳定性时, 应避免采用单一的评价方法, 宜结合极限平衡法的安全系数和有限元模拟的应变变形综合考虑. 尤其是当安全系数临近 1.0 时, 可以结合有限元法模拟的应变变形, 从而更准确地判断路堤边坡稳定性。

2) 对路基沉降、深层水平位移的模拟分析, 可用于同施工过程中获得的实测结果进行对比, 实时控制路堤边坡稳定性, 以实现信息化设计和施工。

参考文献:

- [1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] Giffitns D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite element[J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387.
- [3] 周林,何晓明. 襄十高速公路边坡稳定性分析与加固[J]. 武汉工业学院学报, 2006, 25(3):76.
- [4] 陈涛,郭院成,谢春庆. 平坦地地上山区高填方路堤变形及稳定性分析[J]. 郑州大学学报:工学版, 2009, 30(3):39.
- [5] 蔡庆娥,马建勋. 某公路边坡稳定性的二维有限元分析[J]. 岩土工程界, 2003, 7(3):62.
- [6] 余蓓,郑玉元,戚德印. 岩质高边坡稳定性的有限元分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2011, 26(2):94.
- [7] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7):577.
- [8] 赵群,蔡红涛. 有限元与极限平衡法在土坡稳定性分析中的综合应用[J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11(4):267.
- [9] 曾亚武,田伟明. 边坡稳定性分析的有限元法与极限平法的结合[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2):5355.
- [10] 孙增奎,童海涛. 岩质边坡稳定性分析中极限平衡法与有限元法的比较[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(2):98.
- [11] 曾繁文. 基于 GEO-Studio 软件对排土场边坡稳定性的分析[J]. 科技信息, 2013(2):182.
- [12] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Journal of Terramechanics, 1966, 3(1):74.

T型方钢管相贯节点轴压性能 有限元研究与试验验证

王江, 陈誉

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:利用通用有限元软件 ABAQUS 对 T 型方钢管相贯节点进行了建模及非线性有限元计算. 将试件的破坏模式、变形过程、极限承载力与试验进行了校核. 研究表明:试件在轴向压力作用下,发生弦杆相贯面凹陷和侧壁鼓凸的现象;试件在加载全过程具有较强的变形能力; β 值越小,试件的应力强化越时显,延性也越小;试件极限承载力随着 β 值的增大而增大;有限元模拟与试验吻合度较高.

关键词:T 型方钢管相贯节点;有限元分析;轴压性能

中图分类号:TU392.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.022

Finite element analysis and experimental verification of axial properties of square hollow section T-joints

WANG Jiang, CHEN Yu

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

Abstract: A finite element model simulating the behavior of square hollow section (SHS) T-joints was established and nonlinear finite element was calculated by ABAQUS software. The failure mode, deformation process and ultimate capacity of SHS T-joints were validated by comparing with experimental results. The results showed that, under the effect of axial pressure, chord flange failure and web bulking failure occurred. The specimens have stronger deformation capacity during the whole loading process. As the value of β decreases, the stress strengthening and the ductility of specimens increase. As the value of β increases, the ultimate capacity increases. The finite element simulating is similar to the test result.

Key words: SHS T-joints; finite element analysis; axial property

0 引言

近年来,钢管结构在世界范围内的应用越来越广泛.方钢管相贯节点系统研究开始于1960年代的英国,随后欧洲开始进行大量试验研究,1980年代

以后中国、澳大利亚也开始出现相贯节点的研究成果^[1].

T型方钢管节点是一种常见的节点形式,随着 β 值的变化,可能发生弦管侧壁压跛、弦管表面冲剪、相贯处弦管表面变形过大以及焊缝破坏等现

收稿日期:2013-04-03

基金项目:福建省自然科学基金项目(2012J01219)

作者简介:王江(1989—),男,福建省厦门市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为钢结构.

象. 国内外学者对钢管相贯节点的极限承载力做了大量的试验和分析,建立了关于节点极限承载力系统的计算公式^[4-6]. 以往的研究,对T型方钢管相贯节点的研究年代较早,对节点的应力分布及塑性拓展情况的分析较少. 鉴于此,本文拟从基本的平面节点入手,对T型方钢管相贯节点进行非线性有限元分析,对其承载力性能、破坏模式、应力分布等进行研究,将计算结果与试验结果进行比较,并且将极限承载力模拟值与现有规范的计算值进行比较,以校验该有限元分析方法的可行性以及规范公式的准确性.

1 有限元模型

1.1 节点几何尺寸

试件尺寸见图1,相应的尺寸见表1,其中两侧及上部的端板采用边长为200 mm,厚度为15 mm的Q235钢板. 试件支管与主管边长比值 $\beta = b_1/b_0$. 有限元分析采用ABAQUS软件中的二十节点六面体二次减缩积分单元(C3D20R)进行建模和计算.

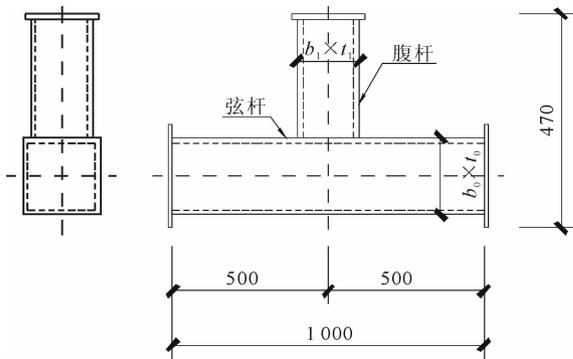


图1 试件尺寸示意图/mm

表1 试件尺寸

试件名称	b_0/mm	t_0/mm	b_1/mm	t_1/mm	β 值	τ 值
N08	150	6	80	5	0.53	0.83
N10	150	6	100	5	0.67	0.83
N12	150	6	120	5	0.80	0.83

1.2 材料特性

试件的材料特性由不同尺寸Q235钢管的材料试验得到^[5],详见表2. 材料服从Von-Mises屈服准则. 分析时考虑几何非线性和材料非线性,用自动步长增量法计算节点的极限承载力,采用基于静力的完全牛顿方法求解,没有考虑焊缝和残余应力对节点极限承载力的影响. 定义塑性材料参数时,采用等向硬化弹塑性模型.

表2 钢材材料特性

钢管尺寸/mm	屈服强度 σ_y/MPa	弹性模量 E/MPa	泊松比
150 × 150 × 6	327	2.06 × 10 ⁵	0.3
120 × 120 × 5	334		
100 × 100 × 5	350		
80 × 80 × 5	402		

1.3 边界条件及加载方式

边界条件及加载方式如图2所示,弦管两侧的端板下部采用面约束,按铰接支座考虑,左侧约束 U_1, U_2, U_3 自由度,右侧约束 U_1, U_2 自由度. 加载方式为位移加载,其中位移的取值为 U . 在加载过程中荷载是以面荷载的形式作用在腹杆上部的端板,使用耦合约束将上部端板与端板的中心点建立刚性连接,使上部端板共同承担点位移.

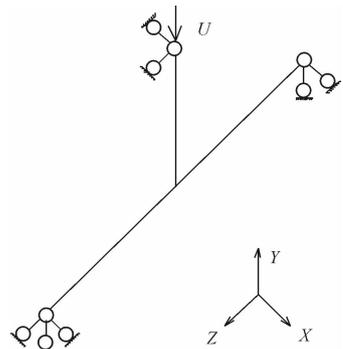


图2 试件边界条件及加载方式

1.4 网格划分

网格划分采用结构化网格,控制单元边长,在相贯区域将网格加密. 选择采用C3D20R单元,其位移求解的结果较为精确,并能有效地防止剪力自锁现象. 网格划分详见图3.

2 有限元结果及验证

2.1 破坏模式分析

通过ABAQUS模拟得出的3个试件破坏现象均相同,如图4a)所示. T型方钢管相贯节点在轴压作用下,主要发生弦杆相贯面凹陷以及弦杆侧壁鼓凸,腹杆无明显破坏现象. 通过与文献[6]中的试验现象作对比,可以发现有限元模拟与试件实际破坏现象较为吻合. 弦杆相贯面凹陷,属于板件面外受力,可以采取在弦杆相贯处焊接加强板的方式减缓弦杆相贯面的凹陷;弦杆侧部鼓凸,属于板件面内失稳,可以在弦杆侧壁产生鼓凸位置焊接内衬板或内加劲肋,增加侧壁的刚度,从而减缓侧壁的鼓凸. 在

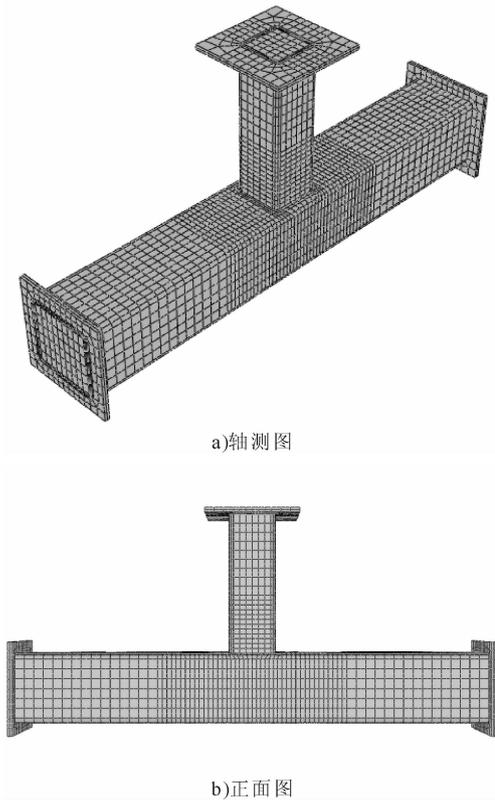


图 3 试件网格划分

弦杆灌入混凝土,可以很好地克服弦杆相贯面凹陷以及侧壁鼓凸.

2.2 试件塑性扩展及应力分布

图 5 为试件塑性区域发展的示意图. 由图 6 可知,在加载初期,弦杆应力较大,并且相贯面首先进入塑性;当荷载达到一定程度时,腹杆的根部也开始进入塑性;随着荷载的加大,弦杆进入塑性的区域不断扩大,由相贯处向 2 个端部及侧壁扩散,而腹杆的应力分布基本保持一致.

在加载过程中,腹杆远离相贯处的区域,应力较小且分布均匀,腹杆根部应力较大;弦杆靠近相贯处及支座部位,应力较大. 弦杆的应力比腹杆大,应力最大值也发生在弦杆,故试件的破坏模式以弦杆破坏为主.

2.3 荷载 - 位移曲线

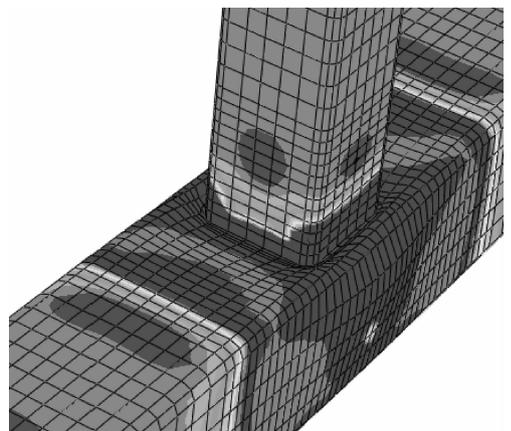
图 6 给出了 3 个试件的荷载 - 位移曲线模拟值与试验值的对比图,纵坐标 N 为腹杆的轴力,横坐标 Δ 为试件的整体位移,位移规定向下为正,向上为负.

对比曲线模拟值与试验值的结果,可以看出:节点由屈服至破坏,具有较好的塑性;模拟曲线初始刚度大于试验值;有限元能良好地计算试件的轴压极限承载力,试件 N08 与 N10 模拟值略大于试验

值,N12 模拟值略小于试验值;不同 β 值,试件的模拟曲线也不相同,N08 试件在塑性阶段表现出明显应力强化,N10 应力强化不明显,而 N12 在塑性阶段出现了下降段. β 值越小,试件应力强化的能力越强,延性也越好. 可以看出,试件 N10 与 N12 有荷载的极值,并可以作为该试件的极限承载力;N08 由于应力强化的影响,在塑性阶段荷载有略微的提升,最后趋于平稳,故将最后的稳定数值作为该试件的极限承载力.

2.4 承载力比较

表 3 为我国《钢结构设计规范》GB 50017—2003^[7]、Eurocode3^[8] 以及 I1W Static Draft Nov07^[9] 对方钢管 T 型相贯节点进行轴压极限承载力的计算. 通过对试件极限承载力模拟值与表 3 承载力规范计算值的对比,可以看出模拟值与 I1W 规范的计算结果最为接近; Eurocode3 规范与《钢结构设计规范》计算值较为保守,并且与模拟值相差较大. 由表 3 可知,随着 β 值的增大,试件的极限承载力增大.



a)模拟



b)试验

图 4 破坏现象

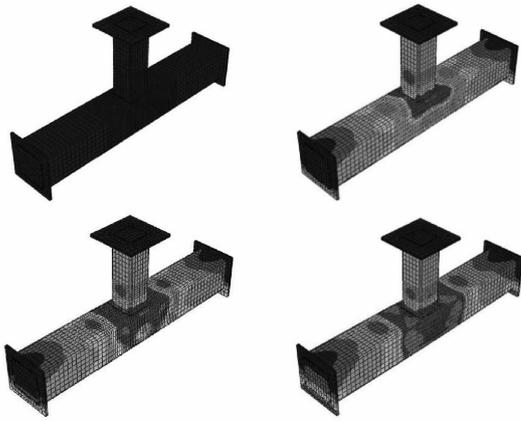


图5 试件塑性发展示意图

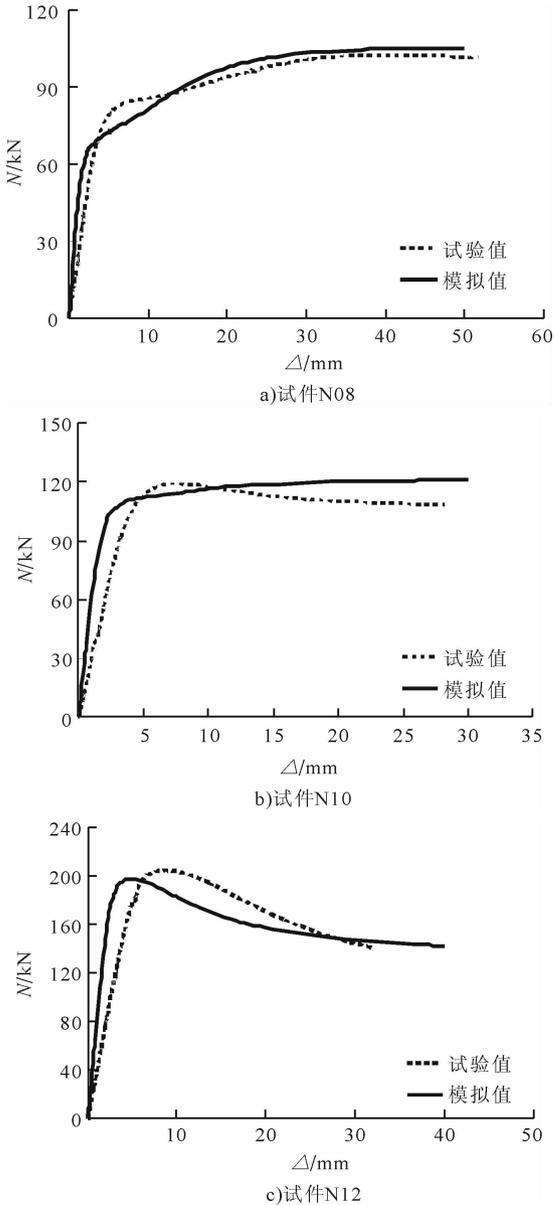


图6 荷载-位移曲线

表3 试件极限承载力计算值与模拟值对比表

试件名称	《钢结构设计规范》计算值	Eurocode3 计算值	IIW Static Draft Nov07 计算值	极限承载力模拟值 / kN
N08	45.82	52.71	95.84	105.14
N10	72.36	90.05	128.65	120.79
N12	123.42	159.57	199.47	197.68

3 结论

本文运用有限元软件 ABAQUS 对 T 型方钢管相贯节点轴压进行建模和计算,并与相应的试验结果进行对比,得出以下结论:

1) 试件在轴向压力作用下,破坏模式为弦杆相贯处凹陷,弦杆侧壁发生鼓凸.破坏发生在弦杆相贯部位,腹杆无明显破坏现象,工程中应对弦杆采取加固措施.

2) 试件从屈服到破坏的全过程,具有较强的塑性变形能力, β 值越小,试件在塑性阶段的应力强化现象越明显,试件的延性也越好.

3) 试件极限承载力随着 β 值的增大而增大,极限承载力的模拟结果与 IIW 规范最为接近.

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

参考文献:

- [1] 陈以一,陈扬骥. 钢管结构相贯节点的研究现状[J]. 建筑结构,2002,32(7):52.
- [2] 陈誉,刘飞飞. 反对称 Pratt 桁架中斜腹杆受压大偏心 N 形圆钢管节点静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(3):30.
- [3] 陈誉,张钻湖. 平面 X 型圆钢管混凝土节点平面外受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(3):39.
- [4] 陈誉,张钻湖. 主管灌混凝土平面 X 形圆钢管节点受压承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(1):72.
- [5] GB/T 228—2002,金属材料室温拉伸试验方法[S].
- [6] 王江.T 型轴压试验报告[D]. 厦门:华侨大学,2012.
- [7] GB 50017—2003,钢结构设计规范及条文说明[S].
- [8] Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part 1—8: Design of Joint[S].
- [9] IIW Static Draft Nov07, IIW Static Design Procedure for Welded Hollow Section Joints-Recommendations[S].

非奇异 H -矩阵的一组新判据

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:从矩阵本身元素出发,就某些论断进行适当改进,给出了非奇异 H -矩阵新的判别方法. 数值例子表明,新判据比原有结果有更大的适用范围.

关键词:非奇异 H -矩阵;严格对角占优;不可约对角占优;非零元素链

中图分类号:O151.21 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.023

Some new criterion for nonsingular H -matrices

CUI Run-qing, YAN Xue-hua

(School of Mathematics and Informatics Science, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: New judging method of non-singular H -matrices was given through appropriately improving some results based on the matrix itself elements. Numerical examples showed that new criterion had greater advantages than the original results.

Key words: nonsingular H -matrix; diagonal dominance; irreducibility dominant matrix; nonzero elements chain

0 引言

H -矩阵的应用非常广泛,在计算数学和矩阵理论的研究中也很重要,因此判别一个矩阵是否为 H -矩阵非常重要. 国内外学者对此做了大量探讨和研究,也给出了一些判别方法^[1-8],但是目前实用而简便的判定方法仍较为少见. 本文拟从矩阵本身元素出发,对某些论断作适当改进,结合不等式的放缩技巧,得出非奇异 H -矩阵一组新的判别方法,并将其推广到不可约情形和具非零元素链情形.

1 预备知识

为了简洁叙述,本文约定下列符号:用 $C^{n \times n}$ 表示 n 阶复方阵,设 $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$,如果 $|a_{ii}| \geq$

$R_i(A) = \sum_{j \neq i} |a_{ij}|, i = 1, 2, \dots, n$ ($R_i(A)$ 简称为 R_i , 一般假定 $R_i \neq 0, i \in N$), 则称 A 为(行或)对角占优矩阵. 如果 $|a_{ii}| > R_i(A), i = 1, 2, \dots, n$, 则称 A 为(行)严格对角占优矩阵^[1].

定义 1^[2] 设 $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$, 若存在正对角矩阵 D , 使得 AD 为严格对角占优矩阵, 则称 A 为广义对角占优矩阵(或称 A 为非奇异 H -矩阵).

设 $N = (1, 2, \dots, n)$, 且有

$$N_1 = \{i \in N: 0 < |a_{ii}| \leq R_i(A)\}$$

$$N_2 = \{i \in N: |a_{ii}| > R_i(A)\}$$

显然有 $N_1 \cup N_2 = N$. $N_1 = \emptyset$ 时, A 显然为非奇异 H -矩阵; 事实上, 若 A 为非奇异 H -矩阵, 则 A 至少有一个严格对角占优行^[3], 故本文假设 $N_1 = \emptyset, N_2 = \emptyset$. 另外, 若 $N_1(N_2)$ 为单点集, 规定 $\sum_{j \in N_1, j \neq i} \dots =$

$0, i \in N_1 (\sum_{j \in N_2, j \neq i} \cdot = 0, i \in N_2)^{[3]}$. 设

$$R_i^* = \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j}{|a_{jj}|} + \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \quad \forall i \in N_2 \quad (1)$$

显然有 $0 < R_i^* \leq R_i, \forall i \in N_2$.

定义 2^[4] 具非零元素链对角占优矩阵 $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ 是指 A 满足以下 3 个条件:

- 1) $|a_{ii}| \geq R_i(A), i = 1, 2, \dots, n$;
- 2) $K = \{k \in N; |a_{kk}| > R_k(A)\} \neq \emptyset$;
- 3) 对于 $i \in N$, 若 $i \notin K$, 则必存在如下的非零元素序列 $a_{i i_1}, a_{i_1 i_2}, \dots, a_{i_k k}$.

定义 3^[5] 设 $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ 不可约, 如果 $|a_{ii}| \geq R_i(A), i = 1, 2, \dots, n$, 至少有一个严格不等式成立, 则称 A 为非奇异 H -矩阵.

引理 1^[3] 设 $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$, 若

$$|a_{ii}| > \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| + \sum_{j \in N_2} \frac{|a_{ij}| R_j(A)}{|a_{jj}|} \quad \forall i \in N_1$$

则 A 为非奇异 H -矩阵.

引理 2^[6] 严格对角占优、不可约对角占优都是广义对角占优矩阵.

引理 3^[6] 设 $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$ 为广义对角占优矩阵, 则 A 为非奇异, 且 A 的主对角元素皆非零.

引理 4^[7] $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$, 且具非零元素链的对角占优矩阵, 则 A 为非奇异 H -矩阵.

2 主要结论

定理 1 设 $A = (a_{ij}) \in C^{n \times n}$, 若

$$|a_{ii}| M > \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| M + \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} \quad \forall i \in N_1 \quad (2)$$

其中 $M = \max_{j \in N_2} \left\{ \frac{R_j}{|a_{jj}|} \right\}$, 则 A 为非奇异 H -矩阵.

证明 一般情况总假定 $a_{ii} \neq 0, R_i \neq 0, i \in N$. 若 $R_i = 0$, 只需考虑 a_{ii} 的余子矩阵.

令

$$G_i = \frac{1}{\sum_{j \in N_1} |a_{ij}|} (|a_{ii}| M - \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| \cdot M - \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}) > 0 \quad i \in N_1 \quad (3)$$

$$g_i = \frac{1}{\sum_{j \in N_1} |a_{ij}|} (R_i^* - \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| M -$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}) > 0 \quad i \in N_2 \quad (4)$$

由 (2)(4) 可得, $0 < g_i, 0 < G_i$, 并且一定存在充分小的 $\varepsilon > 0$ 满足

$$0 < \varepsilon < \min_{i \in N} \{g_i, G_i\} \quad (5)$$

构造正对角矩阵 $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$, 其中

$$d_i = \begin{cases} M + \varepsilon & i \in N_1 \\ R_j^* / |a_{jj}| & i \in N_2 \end{cases}$$

设 $B = (b_{ij}) = AD$, 则 $b_{ij} = a_{ij} \cdot d_j, i, j \in N$, 下面只需证明 $B = AD$ 是严格对角占优矩阵即可.

$\forall i \in N_1, |b_{ii}| = |a_{ii}| (M + \varepsilon)$, 有

$$\sum_{j \in N_1, j \neq i} |b_{ij}| = \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| (M + \varepsilon) +$$

$$\sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} = \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| M +$$

$$\sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| \varepsilon + \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}$$

由 (3)(5) 可知, 上式可变为

$$\sum_{j \in N_1, j \neq i} |b_{ij}| < \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| M +$$

$$\sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| \varepsilon + |a_{ii}| \varepsilon + \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}$$

$$\sum_{j \in N_1, j \neq i} |b_{ij}| < \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| M +$$

$$\sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \frac{1}{\sum_{j \in N_1} |a_{ij}|} (|a_{ii}| M - \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| M -$$

$$\sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}) + \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} <$$

$$|a_{ii}| M + |a_{ii}| \varepsilon = |b_{ii}|$$

$$\forall i \in N_2, |b_{ii}| = |a_{ii}| \frac{R_i^*}{|a_{ii}|} = R_i^*$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq i} |b_{ij}| = \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| (M + \varepsilon) +$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}$$

当 $\sum_{j \in N_1} |a_{ij}| = 0$, 即 $a_{ij} = 0, \forall i \in N_2$ 时,

$$R_i(B) = \sum_{j \in N_2, j \neq i} |b_{ij}| = \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} <$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} = R_i^*$$

当 $\sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \neq 0$, 即 $a_{ij} \neq 0, \forall i \in N_2$ 时,

$$R_i(B) = \sum_{j \in N_2, j \neq i} |b_{ij}| = \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| (M + \varepsilon) +$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}$$

由④⑤可得

$$R_i(\mathbf{B}) < \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| M + \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| g_i +$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} = R_i^* = |b_{ii}|$$

可见 $\forall i \in N, |b_{ii}| > R_i(\mathbf{B})$ 即 \mathbf{B} 是严格对角占优矩阵,因而 \mathbf{A} 是广义对角占优矩阵,即为非奇异 H - 矩阵. 证毕.

定理 2 设 $\mathbf{A} = (a_{ij}) \in \mathbf{C}^{n \times n}$ 不可约,若

$$|a_{ii}|^2 \geq R_i(\mathbf{A}) \mathcal{Q} \left(\sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| + \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \right) \quad \forall i \in N_1 \tag{6}$$

且至少有一个严格不等式成立,其中

$$\mathcal{Q} = \max_{i \in N_1, j \in N_2} \left\{ \frac{|a_{ii}|}{R_i(\mathbf{A})}, \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} \right\}$$

则 \mathbf{A} 为非奇异 H - 矩阵.

证明 构造正对角矩阵 $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots,$

$$d_n), \text{其中 } d_i = \begin{cases} \frac{|a_{ii}|}{R_i(\mathbf{A})} & i \in N_1 \\ R_j^* / |a_{jj}| & i \in N_2 \end{cases}.$$

显然 \mathbf{D} 为正对角矩阵,设 $\mathbf{B} = (b_{ij}) = \mathbf{AD}$, 则 $b_{ij} = a_{ij} \cdot d_j, i, j \in N$. 下面只需证明 $\mathbf{B} = \mathbf{AD}$ 是严格对角占优矩阵即可.

$\forall i \in N_1$ 时,有

$$|b_{ii}| - R_i(\mathbf{B}) = |a_{ii}| \frac{|a_{ii}|}{R_i(\mathbf{A})} - \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| \frac{|a_{jj}|}{R_j(\mathbf{A})} - \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}$$

当 $\sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \neq 0$ 时,由⑥可知

$$|b_{ii}| - R_i(\mathbf{B}) \geq |a_{ii}| \frac{|a_{ii}|}{R_i(\mathbf{A})} -$$

$$\mathcal{Q} \left(\sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| + \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \right) \geq 0$$

当 $\sum_{j \in N_2} |a_{ij}| = 0$ 时,由⑥可知

$$|b_{ii}| - R_i(\mathbf{B}) = |a_{ii}| \frac{|a_{ii}|}{R_i(\mathbf{A})} -$$

$$\sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| \frac{|a_{jj}|}{R_j(\mathbf{A})} \geq |a_{ii}| \frac{|a_{ii}|}{R_i(\mathbf{A})} -$$

$$\mathcal{Q} \sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| \geq 0 \tag{7}$$

$\forall i \in N_2$ 时,有

$$|b_{ii}| - R_i(\mathbf{B}) = R_i^* - \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \frac{|a_{jj}|}{R_j(\mathbf{A})} -$$

$$\sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|}$$

由①可知

$$|b_{ii}| - R_i(\mathbf{B}) = \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j}{|a_{jj}|} + \sum_{j \in N_1} |a_{ij}| -$$

$$\sum_{j \in N_1} |a_{ij}| \frac{|a_{jj}|}{R_j(\mathbf{A})} - \sum_{j \in N_2, j \neq i} |a_{ij}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} \geq 0$$

综上所述, $\forall i \in N, |b_{ii}| \geq R_i(\mathbf{B})$. 且⑦中至少有一个严格不等号成立,又因 \mathbf{A} 不可约,保证了 $\mathbf{B} = \mathbf{AD}$ 不可约,从而 $\mathbf{B} = \mathbf{AD}$ 是不可约对角占优矩阵,所以 \mathbf{A} 为非奇异 H - 矩阵.

定理 3 设 $\mathbf{A} = (a_{ij}) \in \mathbf{C}^{n \times n}$, 若有

$$|a_{ii}|^2 \geq R_i(\mathbf{A}) \mathcal{Q} \left(\sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{ij}| + \sum_{j \in N_2} |a_{ij}| \right) \quad \forall i \in N_1$$

成立,且至少有一个严格不等号成立,对于每一不等式成立的 i 存在非零元素链 $a_{i j_1} \cdot a_{j_1 j_2} \cdots a_{j_{k-1} j_k} \neq 0$ 满足 $|a_{kk}|^2 \geq R_k(\mathbf{A}) \mathcal{Q} \left(\sum_{j \in N_1, j \neq i} |a_{kj}| + \sum_{j \in N_2} |a_{kj}| \right)$, $\forall i \in N_1$, 则 \mathbf{A} 为非奇异 H - 矩阵.

证明 构造正对角矩阵 $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots,$

$$d_n), \text{其中 } d_i = \begin{cases} \frac{|a_{ii}|}{R_i(\mathbf{A})} & i \in N_1 \\ R_j^* / |a_{jj}| & i \in N_2 \end{cases}.$$

显然 \mathbf{D} 为正对角矩阵,设 $\mathbf{B} = (b_{ij}) = \mathbf{AD}, b_{ij} = a_{ij} \cdot d_j, i, j \in N, \mathbf{AD}$ 不改变 \mathbf{A} 的非零元素链性质,由定理 2 的证明过程可以看出, \mathbf{B} 为具非零元素链对角占优矩阵,由引理 3 可知,则 \mathbf{B} 为非奇异 H - 矩阵. 因而存在正对角矩阵 \mathbf{D}_1 , 使得 $\mathbf{BD}_1 = \mathbf{ADD}_1$ 为严格对角占优矩阵. 而 \mathbf{DD}_1 显然为正对角矩阵,故 \mathbf{A} 也为非奇异 H - 矩阵.

3 数值例子

$$\text{设 } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0.9 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \\ 0.9 & 0.9 & 0.7 & 0.8 \\ 0.1 & 0.1 & 0.9 & 0.1 \\ 0.3 & 0.1 & 0.2 & \frac{6}{9} \end{pmatrix}, \text{ 从而有}$$

$$N_1 = \{2\} \quad N_2 = \{1, 3, 4\}$$

$$|a_{11}| = 0.9 \quad R_1 = 0.4 \quad \frac{R_1}{|a_{11}|} = \frac{4}{9}$$

$$R_1^* \approx 0.257 \quad \frac{R_1^*}{|a_{11}|} \approx 0.289$$

$$|a_{22}| = 0.9 \quad R_2 = 2.4$$

$$|a_{33}| = 0.9 \quad R_1 = 0.3 \quad \frac{R_3}{|a_{33}|} = \frac{1}{3}$$

$$R_1^* \approx 0.234 \quad \frac{R_3^*}{|a_{33}|} = 0.26$$

$$|a_{44}| = \frac{6}{9} \quad R_4 = 0.6 \quad \frac{R_4}{|a_{44}|} = 0.9$$

$$R_1^* \approx 0.300 \quad \frac{R_4^*}{|a_{44}|} = 0.45$$

构造正对角矩阵

$$D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n) = (0.289, 0.9 + \varepsilon, 0.26, 0.45)$$

$$\text{取 } \frac{1}{10^3} = \varepsilon < \min_{i \in N} \{g_1 = 0.7, g_3 = 0.701, g_4 =$$

$0.713, G_2 = 0.0108\}$, 当 $i = 2$ 时, 有

$$|a_{22}| M = 0.9 \times 0.9 = 0.81 > \sum_{j \in N_1, j \neq 2} |a_{2j}| M +$$

$$\sum_{j \in N_2} |a_{2j}| \frac{R_j^*}{|a_{jj}|} = 0.257 + 0.182 + 0.36 = 0.799$$

即 A 满足本文定理 1 的条件, $B = AD$ 是严格对角占优矩阵, 即 A 为非奇异 H -矩阵.

但是, $i = 2$ 时, 应用引理 1 可得

$$|a_{22}| = 0.9 < \sum_{j \in N_1, j \neq 2} |a_{2j}| + \sum_{j \in N_2} |a_{2j}| \frac{R_j(A)}{|a_{jj}|} = 0.9 \times \frac{4}{9} + 0.7 \times \frac{1}{3} + 0.8 \times 0.9 \approx 1.353$$

引理 1 失效, 所以本文定理 1 比引理 1 的适用性更为广泛.

4 结论

从本文证明过程不难看出, 定理 1 和引理 1 互不包含, 定理 1 允许非严格对角占优可达 $n - 1$ 行, 而且可以程序化, 这就为矩阵的非奇异性的判定开辟了一条新的路径, 也有助于 M -矩阵的相关研究. 在此基础上, 将其推广到不可约情形和具非零元素链情形, 也具有十分重要的实际意义.

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] 黄廷祝. 非奇异 H -矩阵的简捷判据[J]. 计算数学, 1993(3):318.
- [4] 程云鹏, 张凯院, 徐仲. 矩阵论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002:377 - 378.
- [5] Varge R S. On recurring threoms on diagonal dominance[J]. Linear Algebra Appl, 1976(13):1.
- [6] 谢冬秀, 雷纪纲, 陈桂芝. 矩阵理论及方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012:233 - 235.
- [7] 胡家赣. 线性方程组的迭代解法[M]. 北京: 科学出版社, 1991:134 - 135.
- [8] 田素霞. 广义严格对角占优的判定方法[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(1):106.

一类离散复杂动力学网络系统的混沌同步控制

孟晓玲, 毛北行

(郑州航空工业管理学院 数理系, 河南 郑州 450015)

摘要:研究了一类离散的复杂网络的混沌同步问题,基于 Lyapunov 稳定性理论,得到了离散复杂网络是混沌同步的,数值例子说明了该方法的有效性.

关键词:混沌同步;离散复杂网络;离散系统

中图分类号: O482.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.024

Chaos synchronization control of a class of discrete complex dynamic network system

MENG Xiao-ling, MAO Bei-xing

(Department of Mathematics and Physics, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Chaos synchronization of a class of discrete complex network was studied. Based on Lyapunov stability theory, the conclusion was drawn that discrete complex network was chaos synchronization. The results proved the effectiveness of the method.

Key words: chaos synchronization; discrete complex network; discrete system

0 引言

自然界和人类社会存在大量的复杂网络(如 Internet、电力系统、生物网络、社会网络等),复杂网络的混沌同步是网络动力学研究的热点问题,而且复杂网络的同步控制在信息通信、物理学、生命科学等许多领域有着广泛的应用空间.为此,学者们针对不同的网络控制系统设计了许多行之有效的同步方法,实现了离散复杂动力学网络的混沌同步^[1-7].文献[8]研究了时变时滞耦合2个不同离散复杂网络的自适应广义同步问题,文献[9]基于滑模控制方法实现了规则网络的混沌同步,但离散的复杂网络系统同步控制方面的结果还非常少见.

本文拟利用 Lyapunov 稳定性理论研究一类离散复杂网络系统的同步控制问题,说明在选取适当的控制律的前提下,多个混沌系统构成的离散复杂动力学网络是混沌同步的,数值算例说明了该方法的有效性.

1 离散复杂网络的混沌同步

考虑如下系统:

$$\begin{cases} \Delta x_i(k) = x_{i+1}(k) & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \Delta x_n(k) = f(x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T \in R^n$ 为系统的状态变量; f 为非线性函数; $\Delta x_i(k), \Delta x_n(k)$ 表示一阶差分.

收稿日期:2013-03-02

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);河南省科技厅基础与前沿技术研究计划项目(122300410390);郑州航空工业管理学院青年基金项目(2012113004)

作者简介:孟晓玲(1976—),女,安徽省安庆市人,郑州航空工业管理学院讲师,硕士,主要研究方向为复杂网络混沌同步.

选取 m 个混沌系统 ① 作为节点构成规则网络, 其第 j 个节点所满足的状态方程表示为

$$\begin{cases} \Delta x_i^j(k) = x_{i+1}^j(k) & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \Delta x_n^j(k) = f(x_1^j(k), x_2^j(k), \dots, x_n^j(k)) + \xi_j(k) + \\ u_j(k) = f(x_1^j(k), x_2^j(k), \dots, x_n^j(k)) + \\ \alpha \sum_{l=1}^m G_{jl} x_n^l(k) + u_j(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\xi_j(k) = \alpha \sum_{l=1}^m G_{jl} x_n^l(k)$ 为连接节点之间的耦合函数; α 为网络内部节点之间的耦合强度; G_{jl} 表示耦合矩阵 G 的矩阵元, 其具体表示因网络的连接类型而异, 表征网络的拓扑结构; u_j 为控制输入。

定义网络各节点混沌系统的状态变量之间的误差为

$$e_i^j(k) = x_i^{j+1}(k) - x_i^j(k) \quad j = 1, 2, \dots, m-1$$

则有

$$\begin{aligned} \Delta e_i^j(k) &= e_i^j(k+1) - e_i^j(k) = \\ & [x_i^{j+1}(k+1) - x_i^j(k+1)] - [x_i^{j+1}(k) - x_i^j(k)] = \\ & [x_i^{j+1}(k+1) - x_i^{j+1}(k)] - [x_i^j(k+1) - x_i^j(k)] = \\ & \Delta x_i^{j+1}(k) - \Delta x_i^j(k) = x_{i+1}^{j+1}(k) - x_{i+1}^j(k) = e_{i+1}^j(k) \\ \Delta e_n^j(k) &= e_n^j(k+1) - e_n^j(k) = \\ & [x_n^{j+1}(k+1) - x_n^j(k+1)] - [x_n^{j+1}(k) - x_n^j(k)] = \\ & [x_n^{j+1}(k+1) - x_n^{j+1}(k)] - [x_n^j(k+1) - x_n^j(k)] = \\ & \Delta x_n^{j+1}(k) - \Delta x_n^j(k) = \Delta f_j + \Delta \xi_j + u_{j+1} - u_j \end{aligned}$$

其中

$$\Delta f_j = f(x_1^{j+1}(k), x_2^{j+1}(k), \dots, x_n^{j+1}(k)) - f(x_1^j(k), x_2^j(k), \dots, x_n^j(k))$$

$$\Delta \xi_j = \xi_{j+1}(k) - \xi_j(k)$$

针对网络中每相邻的 2 个节点混沌系统构造一个滑模面, 由此构造的 $m-1$ 个滑模面为

$$S_j(k) = (\Delta + \eta)^{n-1} e_1^j(k) \quad j = 1, 2, \dots, m-1$$

其中, 常量 $\eta > 0$, Δ 表示差分, 利用二项式定理

$$\begin{aligned} S_j(k) &= (\Delta + \eta)^{n-1} e_1^j(k) = \\ & \sum_{k=0}^{n-1} C_{n-1}^k \Delta^{n-1-k} \eta^k e_1^j(k) = \\ & \binom{n-1}{0} e_n^j + \binom{n-1}{1} \eta e_{n-1}^j(k) + \dots + \\ & \binom{n-1}{n-2} \eta^{n-2} e_2^j(k) + \binom{n-1}{n-1} \eta^{n-1} e_1^j(k) \end{aligned}$$

进一步得到 S_j 的差分关系式为

$$\Delta S_j(k) = \binom{n-1}{0} \Delta e_n^j(k) + \binom{n-1}{1} \eta \Delta e_{n-1}^j(k) +$$

$$\begin{aligned} & \dots + \binom{n-1}{n-2} \eta^{n-2} \Delta e_2^j(k) + \binom{n-1}{n-1} \eta^{n-1} \Delta e_1^j(k) = \\ & \binom{n-1}{0} [\Delta f_j + \Delta \xi_j + u_{j+1}(k) - u_j(k)] + \\ & \binom{n-1}{1} \eta e_n^j(k) + \dots + \binom{n-1}{n-2} \eta^{n-2} e_3^j(k) + \\ & \binom{n-1}{n-1} \eta^{n-1} e_2^j(k) \end{aligned}$$

定理 1 在下述控制器下, 驱动系统 ① 与响应系统 ② 是混沌同步的。

$$\begin{aligned} u_{j+1} &= u_j - \Delta f_j - \Delta \xi_j - \binom{n-1}{1} \eta e_n^j - \dots - \\ & \binom{n-1}{n-2} \eta^{n-2} e_3^j - \binom{n-1}{n-1} \eta^{n-1} e_2^j - S_j(k) - S_j(k+1) \end{aligned}$$

证明 构造 Lyapunov 函数 $V(k) = \sum_{j=1}^{m-1} S_j^2(k)$,

则

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= \sum_{j=1}^{m-1} \{ S_j^2(k+1) - S_j^2(k) \} = \\ & \sum_{j=1}^{m-1} \{ S_j(k+1) [S_j(k+1) - S_j(k)] + \\ & [S_j(k+1) - S_j(k)] S_j(k) \} = \\ & \sum_{j=1}^{m-1} \{ S_j(k+1) \Delta S_j(k) + \Delta S_j(k) S_j(k) \} = \\ & \sum_{j=1}^{m-1} \{ S_j(k+1) \binom{n-1}{0} [\Delta f_j + \Delta \xi_j + u_{j+1}(k) - \\ & u_j(k)] + \binom{n-1}{1} \eta e_n^j(k) + \dots + \\ & \binom{n-1}{n-2} \eta^{n-2} e_3^j(k) + \binom{n-1}{n-1} \eta^{n-1} e_2^j(k) \} + \\ & \{ \binom{n-1}{0} [\Delta f_j + \Delta \xi_j + u_{j+1}(k) - u_j(k)] + \\ & \binom{n-1}{1} \eta e_n^j(k) + \dots + \binom{n-1}{n-2} \eta^{n-2} e_3^j(k) + \\ & \binom{n-1}{n-1} \eta^{n-1} e_2^j(k) \} S_j(k) \end{aligned}$$

设计控制输入:

$$\begin{aligned} u_{j+1} &= u_j - \Delta f_j - \Delta \xi_j - \binom{n-1}{1} \eta e_n^j - \dots - \\ & \binom{n-1}{n-2} \eta^{n-2} e_3^j - \binom{n-1}{n-1} \eta^{n-1} e_2^j - S_j(k) - S_j(k+1) \\ \Delta V(k) &= \sum_{j=1}^{m-1} - \{ S_j(k+1) [S_j(k+1) + S_j(k)] + \end{aligned}$$

$$[S_j(k+1) + S_j(k)]S_j(k)$$

$$\Delta V = \sum_{j=1}^{m-1} -[S_j(k+1) + S_j(k)]^2 < 0$$

从而可得驱动系统①与响应系统②是混沌同步的。

2 数值算例

已知

$$\Delta x_1(k) = x_2(k) \quad \Delta x_2 = x_3(k)$$

$$\Delta x_3 = ax_3(k) + dx_2(k) + cx_1(k) - x_3^2(k)$$

$$a = -0.45 \quad c = 0.8 \quad d = -1.1$$

$$f(x_1(k), x_2(k), x_3(k)) =$$

$$-0.45x_3(k) - 1.1x_2(k) + 0.8x_1(k) - x_3^2(k)$$

$$\text{耦合矩阵 } G_{jl} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \text{网络的耦合强}$$

度 $\alpha = 0.05$ 。

如果选取

$$u_{j+1} - u_j = -\Delta f_j - \Delta \xi_j - S_3(k+1) - S_3(k)$$

则上述系统是混沌同步的。

3 结语

本文利用 Lyapunov 稳定性理论研究了一类离散复杂网络的同步控制问题,将滑模控制方法推广到 m 个混沌系统构成的离散复杂动力学网络的同

步研究,数值算例表明,只要选取适当的控制律,则离散复杂网络驱动系统与响应系统是混沌同步的。

参考文献:

- [1] 吕翎,李钢,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.
- [2] 吕翎,孟乐,郭丽,等. 激光时空混沌模型的加权网络投影同步[J]. 物理学报,2011,60(3):5061.
- [3] 吕翎,李钢,孟乐,等. 单项链式网络的激光混沌同步[J]. 中国激光,2010,37(10):2533.
- [4] Niu Y, Ho D W C. Robust observer design for Ito stochastic time-delay systems via sliding mode control[J]. Systems Control Letters,2006,55(10):781.
- [5] 付宏睿,俞建宁,张建刚. 复杂网络的混沌同步及一种新的保密通信系统[J]. 河北师范大学学报:自然科学版,2011,35(5):473.
- [6] 李德奎,李玉龙,张建刚,等. 混合时滞驱动响应动力学网络的函数投影同步[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2011,32(6):64.
- [7] 赵岩岩,蒋国平. 一类输出耦合时延复杂动态网络故障诊断研究[J]. 物理学报,2011,60(11):2061.
- [8] 王建安. 时变时滞耦合两个不同复杂网络的自适应广义同步[J]. 物理学报,2012,61(2):5091.
- [9] 吕翎,李雨珊,韦琳玲,等. 基于滑模控制法实现规则网络的混沌同步[J]. 物理学报,2012,61(12):5041.

再制造手机维修闭环供应链风险性分析

沙全友¹, 崔银飞², 栾梦恺³

- (1. 郑州航空工业管理学院 教务处, 河南 郑州 450015;
2. 富士康科技集团 iPEG 华中品质保证部, 河南 郑州 450015;
3. 北京师范大学 数学科学学院, 北京 100875)

摘要:为了找出再制造闭环供应链的薄弱环节并对其进行改进,以分析风险种类为出发点,构建了影响其可靠性的风险指标体系,结合 AHP 法和熵权法得出各风险指标的权重,进而求出影响力程度,减少了专家评价的主观性,为提高再制造闭环供应链可靠性奠定了基础。

关键词:再制造;闭环供应链;手机维修;风险分析

中图分类号: O29; TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.025

Risk analysis of cellphone maintain closed-loop supply chain in remanufacturing

SHA Quan-you¹, CUI Yin-fei², LUAN Meng-kai³

- (1. Dean's Office, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;
2. iPEG Central China Quality Assurance of Foxconn Technology Group, Zhengzhou 450015, China;
3. School of Mathematical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to improve the weak chain of closed-loop supply in remanufacturing, on the basis of risk type analysis, a risk index system of reliability was structured. The weight of various risk index was obtained through combining AHP with entropy weight method, therefore, the influence degrees was calculated and the subjectivity of expert's evaluation was reduced. It laid the foundation of improving closed-loop supply chain risk in remanufacturing.

Key words: remanufacturing; closed-loop supply chain; cellphone maintain; risk analysis

0 引言

闭环供应链 CLSC 是在传统的正向供应链上加入逆向反馈过程(即逆向供应链)而形成的一个完整的供应链体系^[1-4]。面向再制造的闭环供应链的研究起步比较晚,但近几年许多国内外学者在这方

面投入了大量的精力,包括网络设计、回收渠道、定价及协调机制及库存管理的研究等,并取得了很重要的成果^[5-11]。但由于面向再制造的闭环供应链系统设计节点企业过多,联系复杂,与外界不停地进行能量和信息交换,影响其失效的原因错综复杂,目前对其风险性的研究尚没有固定的模式和方

收稿日期:2013-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(70971120);河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2009GGJS-098);河南省教育厅科技攻关项目(2010B120012);郑州市创新型科技人才队伍建设工程(10LJRC183)

作者简介:沙全友(1973—),男,四川省西昌市人,郑州航空工业管理学院副教授,博士,主要研究方向为稳健设计、过程建模、SSME。

法,需要进一步研究. 鉴于此,本文以再制造手机维修闭环供应链中的逆向供应链风险性为研究对象,以分析风险种类为出发点,建立相应的风险指标体系,用熵权与层次分析法 AHP^[12-16] 对各风险指标的重要度进行评估排序,从而计算出各节点企业受到风险冲击时对供应链风险的影响,进而给出优化建议.

1 手机维修闭环供应链运作模式

手机维修过程的闭环供应链运作模式如图 1 所示. 手机维修业务是由 2 个委托代理商完成的,公司间的信息传递是一种两两传递的分散式信息传递模式,手机在公司间的传递活动由交通运输工具完成. 具体来说,手机维修闭环供应链不仅包括“供应商—生产商—销售商—消费者”的正向物流,还包括“消费者—生产商(或维修公司)—物流公司”的逆向物流.

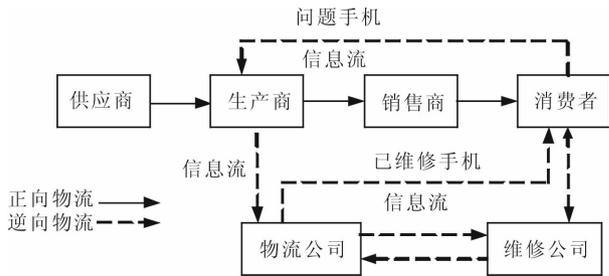


图 1 手机维修闭环供应链

2 手机维修方案综合评价的指标体系

手机维修方案的综合评价指标体系由 3 层评价模型构成,包括总目标层、准则层和指标层,如图 2 所示. 其中,准则层分别为物流公司、维修公司、生产商,分别用 U, P, S 表示. 物流公司的评价指标用一个四元组表示,即 $U ::= (U_1, U_2, U_3, U_4)$, 其中, U_1 表示运输风险, U_2 表示诚信风险, U_3 表示信息风险, U_4 表示道德风险. 修理公司的评价指标用一个四元组表示,即 $P ::= (P_1, P_2, P_3, P_4)$, 其中, P_1 表示管理风险, P_2 表示违约风险, P_3 表示供应风险, P_4 表示信用风险. 生产商的评价指标用一个四元组表示,即 $S ::= (S_1, S_2, S_3, S_4)$, 其中, S_1 表示资金风险, S_2 表示库存风险, S_3 表示技术风险, S_4 表示文化风险.

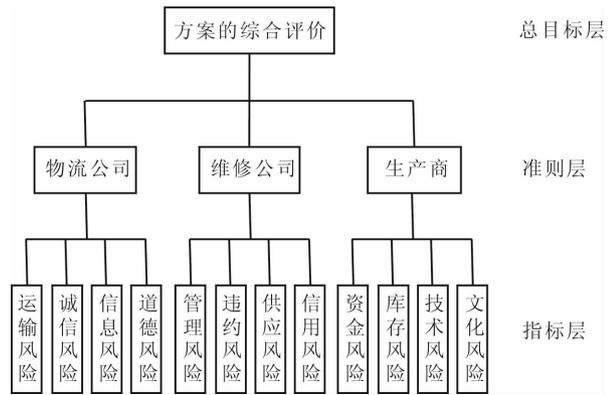


图 2 手机维修方案的综合评价指标体系

3 手机维修闭环供应链风险性分析

基于手机维修方案的综合评价指标体系,本文以某品牌手机为例,分析维修闭环供应链风险性,为减少该品牌手机的风险提出指导性建议.

3.1 构造判断矩阵

根据专家对客观事实的推理判断,分别构造当前层次对上一层次各个因素的判断矩阵,每一个具有向下隶属关系的元素(被称作准则)作为判断矩阵的第 1 个元素(位于左上角),隶属于它的各个元素依次排列在其后的第 1 行和第 1 列. 根据层次结构模型,建立 4 个判断矩阵并计算相对权重,用 1—9 标度法确定的矩阵、最大特征值及其相对权重(见表 1). 这 4 个判断矩阵列归一化后结果见表 2.

3.2 确定权重

先求表 2 列归一化矩阵每行几何平均值,见公式 ①,然后将 m_i 归一化,得到权重,见公式 ②.

$$m_i = n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ij}} \tag{1}$$

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \tag{2}$$

根据公式 ①②,求出权重值如式 ③.

$$\begin{cases} w_{ups} = (0.6687 & 0.0882 & 0.2430) \\ w_u = (0.2304 & 0.0591 & 0.5722 & 0.1384) \\ w_p = (0.5665 & 0.0706 & 0.1057 & 0.2572) \\ w_s = (0.4472 & 0.2900 & 0.0550 & 0.2078) \end{cases} \tag{3}$$

对式 ③ 权重进行一致性检验,经计算得出 $C.R = 0.005844, 0.096641, 0.046207, 0.09005$, 可看出,所有单排序的 $C.R < 0.1$,故认为每个判断矩阵的一致性都是可以接受的.

表1 手机维修判断矩阵

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	
U	(1)	1	7	3												
P	(2)	1/7	1	1/3												
S	(3)	1/3	3	1												
U_1	(4)				1	6	1/5	2								
U_2	(5)				1/6	1	1/6	1/3								
U_3	(6)				5	6	1	4								
U_4	(7)				1/2	3	1/4	1								
P_1	(8)								1	7	5	3				
P_2	(9)								1/7	1	1/2	1/3				
P_3	(10)								1/5	2	1	1/4				
P_4	(11)								1/3	3	4	1				
S_1	(12)												1	2	5	3
S_2	(13)												1/2	1	6	2
S_3	(14)												1/5	1/6	1	1/7
S_4	(15)												1/3	1/2	7	1

表2 手机维修判断矩阵列归一化

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	
U	(1)	21/31	7/11	9/13												
P	(2)	21/31	1/11	1/13												
S	(3)	7/31	3/11	3/13												
U_1	(4)				3/20	3/8	8/45	3/11								
U_2	(5)				1/40	1/16	4/27	1/22								
U_3	(6)				3/4	3/8	8/9	6/11								
U_4	(7)				3/40	3/16	2/9	3/22								
P_1	(8)								7/8	7/13	10/21	36/55				
P_2	(9)								1/8	1/13	1/21	4/55				
P_3	(10)								7/40	2/13	2/21	3/55				
P_4	(11)								7/24	3/13	8/21	12/55				
S_1	(12)												3/4	6/11	5/19	21/43
S_2	(13)												3/8	3/11	6/19	14/43
S_3	(14)												3/20	1/22	1/19	1/43
S_4	(15)												1/4	3/22	7/19	7/43

3.3 运用熵权法修正权重

因 AHP 法主观性过强,故笔者使用熵权法对 AHP 求得的权重进行修正,以尽量减少主观思维的干扰.权重修正过程如下.

1)计算评价指标的熵

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \tag{4}$$

其中, $k = 1/\ln n$.

2)计算评价指标的熵权

$$\lambda_j = (1 - H_j) / \sum_{j=1}^n (1 - H_j) \tag{5}$$

3)结合 AHP 法得到的权重 w_j ,计算指标的综合权重

$$\lambda'_j = \lambda_j \cdot w_j / \sum_{j=1}^n \lambda_j w_j \tag{6}$$

根据 ④⑤⑥,求出修正后的权重值为

$$\begin{cases} \lambda'_{ups} = (0.652\ 2, 0.075\ 6, 0.269\ 2) \\ \lambda'_u = (0.352\ 0, 0.024\ 6, 0.521\ 3, 0.102\ 0) \\ \lambda'_p = (0.473\ 5, 0.204\ 0, 0.050\ 0, 0.272\ 5) \\ \lambda'_s = (0.335\ 7, 0.366\ 9, 0.35\ 6, 0.261\ 8) \end{cases}$$

3.4 影响力程度求解

影响力程度是指第 i 个节点企业的第 j 个指标发生故障时导致供应链发生故障的影响力,用 S_{ij} 表示.通过对 S_{ij} 大小排序,可以找出供应链的薄弱环节,从而对供应链进行优化.影响力程度

$$S_{ij} = \lambda'_{ups} \times \lambda'^T_k \tag{7}$$

其中, $k = u, p, s$.

根据公式⑦, S_{ij} 的计算结果如表3所示. 由表3可知, 将 S_{ij} 按大小排序, 物流公司发生信息风险时对供应链的影响程度是 $S_{13} = 0.3416$, 发生运输风险时对供应链影响程度 $S_{11} = 0.2306$, 其影响程度相对较大. 因此, 在对供应链进行优化时, 应优先考虑减少这2个风险的发生.

表3 各因素影响力度

行	$\lambda'_{ups} = 1$	$\lambda'_{ups} = 2$	$\lambda'_{ups} = 3$
λ'_k	0.2306	0.0358	0.0904
	0.0161	0.0154	0.0988
	0.3416	0.0038	0.0096
	0.0669	0.0206	0.0705

3.5 优化建议

由表3可知, 要提高供应链抵抗风险的能力, 需优先考虑减小物流公司的信息风险和运输风险.

在逆向物流业务中, 信息两两传递. 各公司数据库相互独立, 不会与其他公司分享信息. 但是由于委托—代理公司模式可能会出现信息不对称的问题, 或者信息在传递途中出现阻塞、停滞. 基于种种原因, 为了保护各公司的共同利益, 需要建立一个信息共享平台, 使各合作企业充分认识到信息共享的必要性和利害关系, 开诚布公地反映合作出现的问题, 以便及时进行沟通, 对信息做出快速反应, 及时迅速地制订修理计划和准备方案, 进而快速解决问题.

在供应链运作过程中, 运输是物资流动的主要因素, 是供应链的主要载体. 该品牌手机维修闭环供应链由于采用协同运输方式, 提高了车辆实载率, 降低了运输成本. 但是, 协同运输也增加了相应的风险: 如能力风险, 合作企业能力不足导致货物不能按时保质地送至目的地; 欺诈风险, 合作者违背合约, 侵犯合作者利益窃取对方的资源; 突发风险, 自然灾害和意外交通事故的发生. 为了尽量减少协同运输产生的风险: 在选择合作商时, 应做信用评级, 选择信用度较高的合作者; 完善操作规程, 并进行规范化管理; 实行信息化管理, 使每天的运输情况透明化; 同时加强合作者间的沟通.

4 结语

本文在研究手机维修闭环供应链运作模式的基础上, 建立了手机维修方案综合评价风险指标体系, 并结合 AHP 法和熵权法得出各个风险指标的权重, 进而求出影响力程度, 减少了专家评价的主观

性. 但是, 由于多数企业的供应链结构极为复杂, 影响供应链的风险因素也随之增多, 又加之风险因素可以进一步细化成多个目标, 使整个评价过程复杂化. 为了更加科学地评价各级指标对供应链风险性的影响, 下一步的研究需要进一步完善评价方法.

参考文献:

- [1] 黄永, 达庆利. 基于制造商竞争和产品差异的闭环供应链结构选择[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(3): 576.
- [2] 高举红, 李晓君. 汽车行业闭环供应链超网络均衡研究[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 169.
- [3] 孙浩, 达庆利. 随机环境下考虑需求替代的闭环供应链决策模型[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2238.
- [4] 黄慧君, 杜兰. 闭环供应链 MIS 系统规划研究[J]. 科技管理研究, 2011(5): 198.
- [5] 郭伟, 鹿红娟, 邵宏宇, 等. 基于再制造的闭环供应链研究现状及发展[J]. 西安电子科技大学学报: 社会科学版, 2011, 21(2): 11.
- [6] 罗慧凌. 不确定需求下的再制造闭环供应链模型[J]. 科技管理研究, 2012(2): 95.
- [7] 唐燕, 李健, 张吉辉. 面向再制造的闭环供应链云制造服务平台设计[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1554.
- [8] 李新军, 达庆利. 再制造条件下闭环供应链效益分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 170.
- [9] 陈娟, 季建华, 李美燕. 基于再制造的单双渠道下高残值易逝品闭环供应链管理[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(3): 354.
- [10] 易余胤. 基于再制造的闭环供应链博弈模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(8): 28.
- [11] 陈国华, 张根保, 任显林, 等. 基于故障树分析法的供应链可靠性诊断方法及仿真研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(10): 2034.
- [12] 杜彦斌, 曹华军, 刘飞, 等. 基于熵权与层次分析法的机床再制造方案综合评价[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(1): 84.
- [13] 李旭宏, 李玉民, 顾政华, 等. 基于层次分析法和熵权法的区域物流发展竞争态势分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(3): 398.
- [14] 卢雷, 肖文杰. 基于熵权模糊层次分析法的球载雷达系统安全性评估[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(5): 65.
- [15] 贾跃, 宋保维, 赵向涛, 等. 基于熵权的作战方案优化模糊层次分析法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(11): 2965.
- [16] 王健, 肖文杰, 王树文, 等. 用熵权模糊层次分析法的球载雷达模拟训练系统效能评估[J]. 电光与控制, 2009, 16(9): 70.