

粗柄羊肚菌内生真菌多样性研究

何培新¹, 刘伟², 贺新生³, 耿卢婧¹

1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 中国科学院 水生生物研究所, 湖北 武汉 430072;
3. 西南科技大学 生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621002)

摘要:分离了不同发生地粗柄羊肚菌的内生真菌,并采用常规形态学技术结合 ITS 序列分析进行了鉴定.结果表明内生真菌具有多样性:从3个发生地采集的羊肚菌子实体中,共分离出属于14个分类单元的16个内生真菌菌株,其中15个菌株为子囊菌或其无性型,仅1个菌株(高山被孢霉)属于接合菌门.毛壳菌为3个发生地共有的内生真菌,*Lecanicillium fungicola* var. *aleophilum* 仅在四川绵阳和河南郑州采集的羊肚菌子实体中分离到,其他内生真菌均为发生地特异性种类.

关键词:粗柄羊肚菌;ITS序列分析;内生真菌;生物多样性

中图分类号:S567.3;TS201.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.001

Diversity of endophytic fungi in ascocarps of *Morchella crassipes*

HE Pei-xin¹, LIU Wei², HE Xin-sheng³, GENG Lu-jing¹

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430072, China;
3. College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China)

Abstract: The endophytic fungi in ascocarps of *morchella crassipes* from different sites were isolated and identified by morphological thechnology combined with sequence analysis of internal transcribed spacer (ITS) regions. The results indicated that the fungal endophytes in *M. crassipes* were diverse. From 3 sites 16 fungal strains belonging to 14 taxa were isolated and identified. Among which, 15 out of the 16 isolates were ascomycetes or their anamorphs, while only 1 isolate (*Mortierella alpina*) belonged to Zygomycota. *Chaetomium* fungi were isolated from samples of three origins and *Lecanicillium fungicola* var. *aleophilum* was isolated from sporocarps occurring in Mianyang, Sichuan province and Zhengzhou, Henan province, while the other isolates were specific for each sampling.

Key words: *Morchella crassipes*; ITS sequence analysis; endophytic fungi; biodiversity

0 引言

内生菌是生存于健康维管束植物、藻类、地衣和苔藓植物的活组织内部,不引起宿主生物明显不

利症状的细菌和真菌^[1-3].内生真菌是真菌生物多样性的的重要组成部分,发挥着多种生态作用^[1,4].很多内生真菌可以产生多种生物活性物质,具有抗菌、抗癌、抗氧化、抗病毒、免疫调节和杀虫等功效,

收稿日期:2014-04-07

基金项目:河南省科技创新杰出青年项目(134100510017);河南省科技攻关项目(122102110134)

作者简介:何培新(1970—),男,河南省民权县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为生物工程.

广泛应用于医药、农业等行业^[1,5]。蕈菌具有肉眼可见的大型子实体^[6],可以支持种类丰富的其他微生物的生存。然而,与植物内生真菌相比,蕈菌内生真菌报道较少。1955年,P. Watson^[7]首次采用组织分离的方法,从健康的乳菇(*Lactarius* spp.)和绿菇(*Russula* spp.)子实体分离出内生真菌 *Calcarisporium arbuscula*。关于羊肚菌(*Morchella* spp.)内生菌研究,沈洪等^[8]采用 PCR-DGGE 技术鉴定了羊肚菌内生细菌,但其内生真菌的研究鲜有报道。羊肚菌是广泛分布的一类属于子囊菌门的珍稀大型真菌,营养丰富,口味独特,并具有抗疲劳、抗肿瘤、调节机体免疫力等功效。百余年来,国内外学者对羊肚菌生物学和人工栽培技术进行了广泛而深入的研究^[9],然而其人工栽培问题仍未从根本上得到解决。深入进行相关生理、遗传、生态等基础理论研究,是最终解决羊肚菌人工栽培问题的关键。此外,虽然羊肚菌是食、药兼用真菌,但偶尔也会引发胃肠和神经型食物中毒,且中毒机理尚未研究透彻^[10-12]。鉴于此,本文拟通过对3种不同发生地粗柄羊肚菌内生真菌进行分离与鉴定来研究其多样性,以期对羊肚菌人工栽培及食物中毒机制的深入研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:分别于2006年4月16日在四川省绵阳市林地、2008年4月12日在河南省郑州市南郊林地、2012年4月24日河南省民权县灌溉渠采集到自然发生的羊肚菌子实体样本。经形态特征结合核糖体 DNA (rDNA) 转录间隔区 (ITS) 序列分析鉴定,采集到的羊肚菌均为粗柄羊肚菌 (*Morchella crassipes*)^[13]。

试剂:酵母粉和胰蛋白胨,均为生化试剂,北京双旋微生物培养基制品厂产;Tris 碱(分析纯)、EDTA(分析纯)和链霉素(生化试剂),上海生工生物工程有限公司产;琼脂糖和琼脂粉,均为生化试剂,西班牙 Biowest 公司产;葡萄糖,NaCl,冰乙酸,无水乙醇,NaOH,NaClO,均为分析纯,国药上海化学试剂公司产。

真菌基因组 DNA 抽提试剂盒 (Ezup)、PCR 扩增试剂盒 (Taq)、柱式 DNA 胶回收试剂盒 (UNI-Q-10)、T-载体 PCR 产物克隆试剂盒、染色剂和凝胶上样缓冲液,均购自上海生工生物工程有限公司;

ITS1 和 ITS4 特异扩增引物由上海生工生物工程有限公司合成;DL2000 DNA Marker 购自宝生物工程(大连)有限公司。

仪器:CF16RXII 高速冷冻离心机,日本株式会社日立制作所产;PCR 仪(P×2),美国 Thermo Electron 产;UV2000 紫外/可见分光光度计,上海凤凰光学科仪有限公司产;BioRad 3000 双恒电泳仪,美国 BioRad 公司产;BS200S 电子分析天平,北京赛多利斯天平有限公司产;ULTRA-LUM OMEGA 10 凝胶成像系统,美国 OMEGA 公司产;HH-4 电热数字恒温水浴锅,常州国华电器有限公司产;SPX-160B-2 恒温培养箱,上海福玛实验设备有限公司产;101A-1 电热恒温鼓风干燥箱,上海市实验仪器总厂产;DSX-280A 不锈钢手提式灭菌锅,上海申安医疗器械厂产;SN-CJ IFD 超净化工作台,苏净集团苏州安泰空气技术有限公司产;Zeiss A1 显微镜,德国 Zeiss 公司产。

1.2 内生真菌的分离

土豆-葡萄糖-琼脂(PDA)培养基(土豆200 g,葡萄糖20 g,琼脂15 g,自来水1 L)用于真菌的分离和培养。借鉴植物内生菌的分离方法,分离时对羊肚菌子实体进行严格的消毒。首先将新鲜子实体剔除土壤、植物残余和其他杂质,然后用无菌蒸馏水冲洗。消毒程序如下:样品先浸入70%乙醇中保持1~2 min,然后用NaClO(4%有效氯)消毒3~5 min,用70%乙醇冲洗30 s,最后用无菌蒸馏水冲洗3次,置洁净工作台自然干燥^[14]。消毒后,新鲜子实体用无菌小刀垂直剖开,刮取菌柄内部小块组织(约1 mm³)接种于PDA平板(每个平板4块),培养基添加150 μg/mL链霉素防止细菌污染。分离的平板于25℃倒置培养4~10 d。根据菌落特征,将不同真菌挖块转接PDA斜面,25℃培养满管后4℃保藏备用。对每批羊肚菌,取5个健康子实体进行内生真菌分离,每个子实体取10个菌柄内部组织块分离接种,共分离50个组织块。那些从接种块萌发生长,且至少出现2次的真菌认定为内生真菌。内生真菌的分离频率按公式 $CF(\%) = (N_{col}/50) \times 100\%$ 计算,其中 N_{col} 为萌发生长内生真菌的分离数量。

1.3 内生真菌的鉴定

内生真菌常规形态学鉴定参考的相关文献见表1。真菌分离物插片培养,采用显微镜观察微观特征并显微摄影。分子鉴定采用ITS序列分析技术。真菌培养、基因组DNA提取、ITS₁₋₅-ITS₂ rDNA序

列特异扩增、DNA 序列比对分析、进化树构建等参见文献[13]. 获得的基因序列提交到 GenBank, 认定后获得相应的基因号(表 1).

2 结果与讨论

2.1 粗柄羊肚菌内生真菌的多样性

表 1 给出从 3 个不同来源的粗柄羊肚菌子实体样本分离得到的 16 个内生真菌菌株. 图 1 为基于 ITS 序列分析构建的内生真菌系统发育聚类图. 图 2 为部分内生真菌在 PDA 平板上 25 °C 培养 10 d 的形态. 其中, 在实验条件下, M-jx、M-bb 和 M-huang 菌株不能产生任何有性和无性孢子, 因而仅通过 ITS 序列分析确定其分类地位. 其他菌株通过常规形态特征结合分子技术鉴定到种或属. 由表 1 和图 2 可知, 各内生真菌的宏观和微观特征与相应的经典分类鉴定文献的描述一致, 而且常规鉴定与 ITS 序列分析一致, 表明内生真菌分类鉴定的结果是科学的. 本研究结果揭示了粗柄羊肚菌内生真菌的多样性. 分别从四川绵阳、河南郑州和河南民权自然发生的羊肚菌样本分离到 4、6、6 种内生真菌, 分离频率 4% ~ 6%, 暗示内生真菌的孢子或菌丝在羊肚菌菌柄组织中分布较少. 16 个菌株分别属于 2 个门、6 个目. 其中 15 个菌株(占 93. 75%)为子囊菌或无性型, 与植物内生菌的结果一致^[1], 只有分离自河南郑州羊肚菌样本的 M-gf 菌株(高山被孢霉 *Mortierella alpina*)属于接合菌门. 从 3 种不同来源的羊

肚菌样本均分离到了毛壳菌(M-bf3, M-L 和 M-2A 菌株), 而从四川绵阳和河南郑州的样本均分离到了 *Lecanicillium fungicola* var. *aleophilum* (M-821 和 M-ys 菌株), 其他内生菌株为样本特异性种类.

2.2 内生真菌的发生与羊肚菌生活土壤存在的真菌类群相关

粗柄羊肚菌属于黄色羊肚菌类群, 广泛分布于北半球温带地区各种不同的自然环境中, 虽然仅在每年早春发生子实体几周^[9], 但其营养菌丝、菌核^[28]或菌丝束^[29]可能已经在地下与多种真菌共存几个月乃至几年. 正如本研究揭示的那样, 可在多种不同生境下生活的内生真菌, 如可腐生于土壤和纤维素基质的毛壳菌(*Chaetomium* spp.)^[30]或作为栽培双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*, 在四川绵阳和河南郑州栽培比较普遍, 在河南民权没有栽培)病原真菌的 *L. fungicola* var. *aleophilum*^[15], 在土壤中与粗柄羊肚菌菌丝体和菌核共存, 进而在羊肚菌结实时成为子实体内生真菌的几率较大.

2.3 内生真菌的深入广泛研究将会促进羊肚菌人工栽培技术的发展

植物内生真菌与其宿主植物之间的生态关系有寄生、共生和互生等多种类型^[1]. 内生真菌与粗柄羊肚菌之间的关系可能也比较复杂. 当羊肚菌子囊果衰老以后, 一些在其他生境作为菌生真菌或竞争性真菌的淡色生赤壳菌(*Bionectria ochroleuca*)^[25]、球毛壳菌(*Chaetomium globosum*)^[31]、黑附

表 1 不同发生地粗柄羊肚菌内生真菌分离物及其基因号、分类地位和分离频率

采样地	菌株号	基因号	种名	分离频率/%	参考文献
四川绵阳	M-821	JN195802	<i>Lecanicillium fungicola</i> var. <i>aleophilum</i>	6.0	[15]
	M-585	JN195805	<i>Plectosphaerella cucumerina</i> (无性型为烟色织孢霉 <i>Plectosporium tabacinum</i>)	4.0	[16]
	M-bh3	JN195803	毛壳菌 <i>Chaetomium</i> sp.	6.0	[17]
	M-jx	JN195796	炭角菌 <i>Xylaria</i> sp.	4.0	[18]
河南郑州	M-xf	JN195806	腐皮镰刀菌 <i>Fusarium solani</i>	4.0	[19]
	M-B	JN195798	虫草棒束孢 <i>Isaria farinosa</i>	4.0	[20]
	M-ys	JN195804	<i>Lecanicillium fungicola</i> var. <i>aleophilum</i>	6.0	[15]
	M-L	JN195801	毛壳菌 <i>Chaetomium</i> sp.	6.0	[17]
	M-bb	JN195799	<i>Eutypa microtheca</i>	4.0	[21]
	M-gf	JN195797	高山被孢霉 <i>Mortierella alpina</i>	6.0	[22]
河南民权	M-fen	JX504675	小麦赤霉病菌 <i>Fusarium graminearum</i> (有性型为玉蜀黍赤霉菌 <i>Gibberella zeae</i>)	4.0	[23]
	M-lian	JX504678	串珠镰刀菌 <i>Fusarium moniliforme</i> (有性型为 <i>Gibberella fujikuroi</i>)	4.0	[24]
	M-ban	JX504679	淡色生赤壳菌 <i>Bionectria ochroleuca</i> (无性型为粉红粘帚霉 <i>Clonostachys rosea</i>)	4.0	[25]
	M-2A	JX504677	球毛壳菌 <i>Chaetomium globosum</i>	6.0	[17]
	M-Lv	JX504676	链格孢 <i>Alternaria</i> sp.	4.0	[26]
	M-huang	JX504680	黑附球菌 <i>Epicoccum nigrum</i>	4.0	[27]

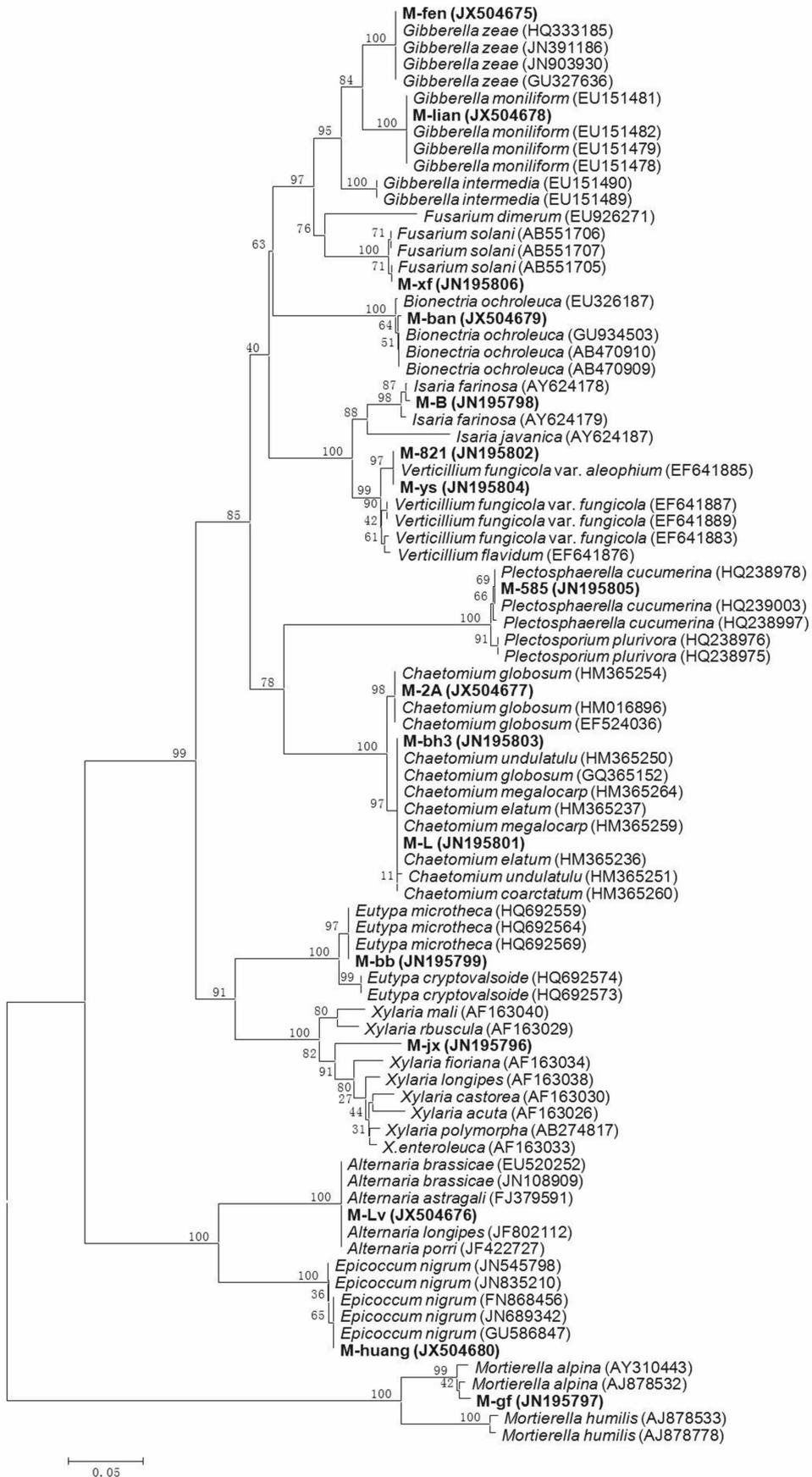
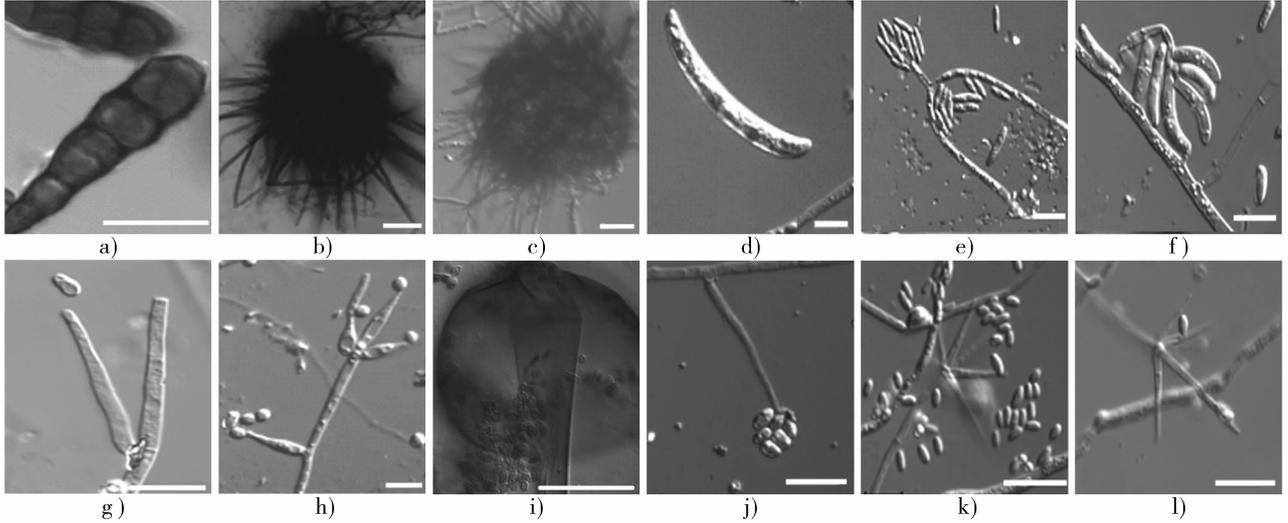


图 1 基于 ITS 序列分析构建的粗柄羊肚菌内生真菌系统发育聚类图



a)M-lv菌株的分生孢子, b)和c) M-L和M-2A菌株的近球状具毛子囊壳, d) M-fen菌株的大分生孢子, e)和f) M-lian和M-xf菌株的小分生孢子和小分生孢子梗, g)M-ban菌株的分生孢子梗和瓶梗, h)M-B菌株的分生孢子和分生孢子梗, i)M-gf菌株的孢子囊, j) M-585菌株的瓶梗和无隔分生孢子, k)和l) M-ys和M-821菌株的分生孢子梗、瓶梗和分生孢子; 图中的标尺代表10 μ m.

图2 部分内生真菌在PDA平板上25 °C培养10 d的形态图

球菌 (*Epicoccum nigrum*)^[32] 和 *L. fungicola* var. *aleophilum*^[15] 的增殖,可能会进一步缩短粗柄羊肚菌子实体的生存时间. 进一步深入研究内生真菌,特别是那些不同生境下普遍发生的内生真菌对羊肚菌生长发育的影响,将会促进羊肚菌人工栽培技术的发展.

2.4 内生真菌的发生与羊肚菌中毒间的关系

羊肚菌是世界著名的食药兼用真菌. 然而,不良食用有时会引起胃肠型和神经型食物中毒^[10-12]. 引起食物中毒的因子很可能是耐热毒素,在一些中毒事件中与羊肚菌子实体的不良储存有关^[12],然而,毒素的性质及其中毒机制仍没有研究清楚. 羊肚菌子实体不良储存会使一些有害内生真菌进一步增殖,可能会增加食物中毒的几率. 腐皮镰刀菌 (*Fusarium solani*) 的一些菌株为人类真菌病的病原因子^[33]. 球毛壳菌是引起大脑暗色丝孢霉病、肺炎、指甲和皮肤感染的病原体^[34]. 链格孢 (*Alternaria* spp.) 能产生几种对人和动物有害的毒素,与一些血液病和食道癌症等多种疾病相关^[35]. 黑附球菌已知能引起过敏性肺炎和真菌过敏性鼻炎^[36]. 羊肚菌有害内生真菌与极个别情况下的食物中毒之间的关系,有必要深入研究.

本研究采用基于人工培养的方法揭示了粗柄羊肚菌内生真菌的多样性. 由于该方法具有局限性,因此可能没有分离到所有的内生真菌. 那些不能在PDA培养基上生长,或生长非常缓慢的真菌将无法分离培养出来. 采用诸如变性胶梯度电泳、末

端限制性长度多态性等针对真菌基因组DNA的技术,将会更客观地揭示羊肚菌内生真菌的多样性.

3 结论

采用样本严格表面消毒后组织分离的方法,分离了不同时间采集的自然发生于四川省绵阳市、河南省郑州市和河南省民权县的粗柄羊肚菌子实体的内生真菌,并采取常规形态特征结合ITS序列分析的方法对内生真菌进行了分类鉴定. 研究结果揭示了羊肚菌内生真菌的多样性:共分离出属于14个分类单元的16个内生真菌菌株,其中15个菌株为子囊菌或无性型,仅1个菌株属于接合菌门. 研究结果对于羊肚菌人工栽培技术开发及深入理解有害内生真菌与羊肚菌食物中毒个例的关系带来了有益的启示.

参考文献:

- [1] Stone J K, Polishook J D, White Jr J F. Endophytic fungi [C]//Biodiversity of Fungi, Inventory and Monitoring Methods. New York: Elsevier Academic Press, 2004: 241.
- [2] Kharwar R N, Verma S K, Mishra A, et al. Assessment of diversity, distribution and antibacterial activity of endophytic fungi isolated from a medicinal plant *adenocalymma alliaceum* miers [J]. Symbiosis, 2011, 55: 39.
- [3] Hirsch G, Braun U. Communities of parasitic microfungi [C]//Winterhoff W Fungi in Vegetation Science, Dordrecht: Kluwer Academic, 1992: 225.
- [4] Rodriguez R J, White Jr J F, Arnold A E, et al. Fungal

- endophytes: diversity and functional roles [J]. *New Phytol*, 2009, 182: 314.
- [5] Verma V C, Kharwar R N, Strobel G A. Chemical and functional diversity of natural products from plant associated endophytic fungi [J]. *Nat Prod Commun*, 2009, 4(11): 1511.
- [6] Milles P G, Chang S T. *Mushrooms Biology* [M]. Singapore: World Scientific, 1997.
- [7] Watson P. *Calacarisporium arbuscula* living as an endophyte in apparently healthy sporophores of *Russula* and *Lactarius* [J]. *Trans Brit Mycol Soc*, 1955, 38 (4): 409.
- [8] 沈洪, 陈明杰, 赵永昌, 等. 羊肚菌内生细菌 DGGE 鉴定 [J]. *上海农业学报*, 2008, 24 (2): 58.
- [9] Pilz D, McLain R, Alexander S, et al. Ecology and management of morels harvested from the forests of Western North America [R]. General Technical Report, PNW - GTR - 710, Portland: Pacific Northwest Research Station, 2007.
- [10] Beug M W. An overview of mushroom poisonings in North America [J]. *Mycophile*, 2004, 45 (2): 4.
- [11] Pfab R, Haberl B, Kleber J, et al. Cerebellar effects after consumption of edible morels (*Morchella conica*, *Morchella esculenta*) [J]. *Clin Toxicol*, 2008, 46: 259.
- [12] Saviuc P, Harry P, Pulce C, et al. Can morels (*Morchella* sp.) induce a toxic neurological syndrome? [J]. *Clin Toxicol*, 2010, 48: 365.
- [13] 何培新, 刘伟. 粗柄羊肚菌分子鉴定及羊肚菌属真菌系统发育分析 [J]. *江苏农业学报*, 2010, 26(2): 395.
- [14] Petrini O, Sieber T N, Toti L, et al. Ecology, metabolite production and substrate utilization in endophytic fungi [J]. *Nat Toxins*, 1992(1): 185.
- [15] Zare R, Gams W. A revision of the *Verticillium fungicola* species complex and its affinity with the genus *Lecanicillium* [J]. *Mycol Res*, 2008, 112: 811.
- [16] Palm M E, Gams W, Nirenberg H I. *Plectosporium*, a new genus for *Fusarium tabacinum*, the anamorph of *Plectosphaerella cucumerina* [J]. *Mycologia*, 1995, 87: 397.
- [17] Von Arx J A, Guarro J, Figueras M J. The ascomycete genus *Chaetomium* [J]. *Nova Hedwigia Beiheft*, 1986, 84: 1.
- [18] Martin P. Studies in the Xylariaceae VIII: *Xylaria* and its allies [J]. *J South Afr Bot*, 1970, 30: 73.
- [19] Booth C. The Genus *Fusarium* [M]. Surrey: CMI, 1971.
- [20] Domsch K H, Gams W, Anderson T H. *Compendium of soil Fungi* [M]. London: Academic Press, 1980.
- [21] Trouillas F P, Pitt W M, Sosnowski M R, et al. Taxonomy and DNA phylogeny of diatrypaceae associated with *Vinifera* and other woody plants in Australia [J]. *Fungal Divers*, 2011, 49: 203.
- [22] Gams W. A key to the species of *Mortierella* [J]. *Persoonia*, 1977, 9: 381.
- [23] Nelson P E, Toussoun T A, Marasas W F O. *Fusarium Species: An Illustrated Manual for Identification* [M]. Pennsylvania: Pennsylvania State University Press, 1983.
- [24] Nelson P E. Taxonomy and biology of *Fusarium moniliforme* [J]. *Mycopathologia*, 1992, 117: 29.
- [25] Schroers H J, Samuels G J, Seifert K A, et al. Classification of the mycoparasite *Gliocladium roseum* in *Clonostachys* as *C. rosea*, its relationship to *Bionectria ochroleuca*, and notes on other *Gliocladium*-like fungi [J]. *Mycologia*, 1999, 91: 365.
- [26] Simmons E G. *Alternaria: An Identification Manual* [M]. Utrecht: CBS Fungal Biodiversity Centre, 2007.
- [27] Ghosh R N. *Epicoccum nigrum* link: a new report from Indian soils [J]. *Curr Sci*, 1961, 30 (2): 69.
- [28] Volk T J, Leonard T J. Cytology of the life-cycle of *Morchella* [J]. *Mycol Res*, 1990, 94 (3): 399.
- [29] Buscot F, Roux J. Association between living roots and ascocarps of "*Morchella rotunda*" [J]. *Trans Brit Mycol Soc*, 1987, 89: 249.
- [30] Aggarwal R, Sharma V, Kharbikar L L, et al. Molecular characterization of *Chaetomium* species using URP-PCR [J]. *Gene Mol Biol*, 2008, 31: 943.
- [31] Park J H, Choi G J, Jang K S, et al. Antifungal activity against plant pathogenic fungi of chaetoviridins isolated from *Chaetomium globosum* [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2005, 252: 309.
- [32] Madrigal C, Pascual S, Melgarejo F. Biological control of peach twig blight (*Monilinia laxa*) with *Epicoccum nigrum* [J]. *Plant Pathol*, 1994, 43: 554.
- [33] Zhang N, O' Donnell K, Sutton D A, et al. Members of the *Fusarium solani* species complex that cause infections in both humans and plants are common in the environment [J]. *J Clin Microbiol*, 2006, 44: 2186.
- [34] Teixeira A B A, Trabasso P, Moretti-Branchini M L, et al. Phaeohyphomycosis caused by *Chaetomium globosum* in an allogeneic bone marrow transplant recipient [J]. *Mycopathologia*, 2003, 156: 309.
- [35] Ostry V. *Alternaria* mycotoxins: an overview of chemical characterization, producers, toxicity, analysis and occurrence in foodstuffs [J]. *World Mycotox J*, 2008, 1: 175.
- [36] Bisht V, Singh B P, Arora N, et al. Antigenic and allergenic cross-reactivity of *Epicoccum nigrum* with other fungi [J]. *Ann Allergy Asthma Im*, 2002, 89: 285.

免疫学技术在食源性微生物检测中的应用综述

胡金强¹, 雷俊婷¹, 詹丽娟², 纵伟¹,
白艳红¹, 景建洲¹, 孙新城¹, 董彩文¹

(1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南农业大学 食品科学技术学院, 河南 郑州 450002)

摘要:对酶联免疫吸附技术、免疫层析技术、免疫磁珠分离技术、酶联荧光免疫分析技术、化学发光免疫分析技术以及免疫传感器技术在食品安全检测中的应用进行了综述,并指出食品中待检靶抗原的筛选与纯化、免疫学检测方法的合理应用,以及敏感性和特异性这2个相矛盾的方面的统筹提高等问题有待解决。

关键词:免疫学;食源性微生物;食品安全检测

中图分类号:TS201.6;TS207.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.002

Application review of immunology technology in detection for foodborne microorganism

HU Jin-qiang¹, LEI Jun-ting¹, ZHAN Li-juan², ZONG Wei¹,
BAI Yan-hong¹, JING Jian-zhou¹, SUN Xin-cheng¹, DONG Cai-wen¹

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

2. College of Food Science and Technology, He'nan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Applification of enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), immunochromatography (IC), immunomagnetic separation (IMS), enzyme-linked fluorescent immunoassay (ELFIA), chemiluminescence immunoassay (CLIA) as well as immunosensor (IS) in the detection of food safety has been summarized. Moreover, screening and purification of antigens to be detected in food, rational utilization, and sensibility and the unification of the two contradictory aspects of the method need to be resolved.

Key words: immunology; foodborne microorganism; food safety detection

0 引言

食品安全问题对各个国家的社会、经济发展以及消费者的身心健康有重要影响,是当今世界普遍关注的重大问题.因此,保障食品安全具有十分重

要的公共卫生意义.众所周知,食源性微生物常伴随食品原料的生产、加工、包装与贮运过程进入食品中,从而造成食品污染,影响消费者的饮食安全.若微生物含量超标,食品会在短期内变质,丧失食用价值,严重的还会产生毒素,对人体造成伤害.

收稿日期:2014-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(31201901);河南省教育厅科学技术重点研究项目(14A180025);郑州轻工业学院博士基金项目(2011BSJJ033)

作者简介:胡金强(1979—),男,河南省信阳市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为病原生物学、免疫学与食品安全.

免疫学技术发展至今,具有简便、快速、灵敏度高、特异性强等特点^[1],可检测细菌、病毒、真菌、各种毒素、寄生虫等,还可用于检测蛋白质、激素、其他生理活性物质、药物残留、抗生素等。免疫检测技术是世界粮农组织(FAO)向许多国家推荐的食源性微生物检测技术,也是21世纪最具竞争力与挑战性的检测分析技术。本文拟就国内外食源性微生物免疫学检测方法的研究进展进行综述。

1 酶联免疫吸附测定技术

酶联免疫吸附测定 ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) 是在酶联免疫技术的基础上发展起来的免疫测定技术。它的基本原理是将抗原或抗体吸附在固相载体表面,通过加入酶标抗体或抗原,进行抗原抗体反应,形成酶标免疫复合物,洗涤后,游离的酶标抗体或抗原被洗掉,再加入酶底物与免疫复合物结合显色,进而进行定性或定量测定。阪崎肠杆菌(ES)是一种对新生儿和免疫力低下人群的高危致病微生物,周鹤峰等^[2]通过制备 ES 高特异性单克隆抗体对其进行特异性间接 ELISA 检测,大幅降低检测成本,具有灵敏度高、稳定性强、特异性强、便捷等特点,为食品中 ES 的快速检测奠定了研究基础。

传统 ELISA 适用范围广,但在灵敏度、特异性方面不足。近年通过对其改进,在食源性微生物的快速、灵敏检测方面取得了许多显著成效^[3]。目前其检测灵敏度一般可达到 ng 级,若再与全自动酶标仪联合使用,ELISA 方法的特异性和灵敏度还能进一步提高^[4]。

2 免疫层析技术

免疫层析技术 IC (immunochromatography) 始于 M. Beggs 等^[5]设计的人绒毛促性腺激素免疫胶体金层析系统,是自 1990 年代发展起来的快速免疫分析技术。它结合免疫学和层析原理,借助毛细作用,样品得以在纤维膜上泳动,根据待测物与膜上特定区域配体的结合,通过酶反应或着色标记物的显色,在短时间(20 min)内能够直接观测。

2.1 荧光微球免疫层析技术

荧光微球免疫层析技术的原理是利用荧光微球表面修饰的羧基可共价结合抗体发出的荧光信号强而稳定的特点发展起来的新型检测技术,具有易于定量检测的特点。

解泉源等^[6]通过以下方法制备大肠杆菌

O157:H7 荧光微球免疫层析试纸条进行食源性微生物检测。先将荧光微球羧基化,用 EDC 介导共价偶联鼠源抗大肠杆菌 O157:H7 单克隆抗体,将喷涂在硝酸纤维素膜上的兔多抗和驴抗鼠抗体分别作为检测线(T线)和质控线(C线),进而确定免疫层析反应动态平衡时间,再利用双抗体夹心显色,测定吸光度,进而达到定量检测的目的。应用荧光微球免疫层析技术制备的试纸条能同时检测 4 株目标菌与 34 株不同种类的食源性微生物,目标菌仅与金黄色葡萄球菌有微弱交叉反应,特异性较好,并且具有操作简便、速度快的特点。

荧光微球具有相对稳定的形态结构,粒度均一、分散性好、稳定性好、发光效率高、重复性好,生物相容性较好^[7]。此外,发射光谱型标记物荧光微球因信号强度可随激发光增强而增强,在理论上可以有效降低层析方法的检测限^[8]。基于以上这些优点,荧光微球免疫层析技术在食源性微生物检测中得到快速发展。

2.2 胶体金免疫层析技术

免疫胶体金技术 GICA (immune colloidal gold technique) 是以胶体金作为示踪标记物应用于免疫反应的新型免疫标记技术^[9],可用于检测食品中常见的致病菌(大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、布氏杆菌、霍乱弧菌等)。

王玉金等^[10]通过 3 步建立大肠杆菌 O157:H7 的胶体金免疫层析快速筛查方法。首先制备单克隆抗体 4F8 胶体金标记物、包被单克隆抗体 1H2 和兔抗鼠 IgG 多抗;再通过对比试验,确定胶体金标记的最佳 pH 值、最适标记蛋白浓度、包被抗体的浓度;最后通过组装成品试纸条进行检测。目标菌与 9 种常见食源性微生物(非 O157:H7 大肠杆菌、伤寒杆菌、痢疾杆菌、变形杆菌、霍乱杆菌、副溶血性弧菌、肠球菌、黏质沙雷氏菌、肺炎克雷伯杆菌)同时检测无交叉反应,特异性强,检出限为 1×10^5 cfu/mL,灵敏度高。对不同种类食品样品进行人工增菌,检测灵敏度与纯菌液一致,准确度高。检测全过程仅需 10 min,速度快,并且无需结合、分离游离标记物,无需(或只需简单)仪器。王静等^[11]应用胶体金免疫层析技术检测大肠杆菌 O157,检测限为 1×10^5 cfu/mL,检测时间仅需 15 min。邵晨东等^[12]制备出检测沙门氏菌的试纸条,对沙门氏菌 O₉ 抗原的最小检出量 4×10^5 cfu/条。徐小婧等^[13]应用胶体金免疫层析技术制备的试纸条检测 T-2 毒素(食源性真菌产生的剧毒毒素),灵敏度可达 50 μg/L,检测时间

10 min,重复性好,便捷,适用于现场检测。

胶体金免疫层析技术具有简便、快速、灵敏、直观、无需仪器等特点^[14],并且能够通过肉眼直接判定结果^[15],因此被广泛应用于食源性微生物的快速检测,临场检测以及高通量检测。

2.3 纳米金技术

自从16世纪欧洲现代化学的奠基人、杰出的医师化学家 Paracelsus 制备出“饮用金”用来治疗精神类疾病以来,纳米金(nanogold)就开始受到重视。纳米金指金的微小颗粒,直径1~100 nm,具有高电子密度、介电特性和催化作用,能与多种生物大分子结合,且不影响其生物活性。由于易于制备和修饰,因此被广泛使用^[16-17]。

经过5个世纪的发展,纳米金标记技术(nanogold labelling technique)已经成为现代四大标记技术之一^[18]。其在食源性微生物检测中的应用集中于以纳米金为免疫标记物的检测技术,该技术本质是蛋白质等高分子被吸附到纳米金颗粒表面的包被过程。

金黄色葡萄球菌肠毒素B(SEB)是一种常见的影晌食品特别是乳品质量安全的高风险食源性微生物毒素,孙秀兰等^[19]采用离子液体保护的聚苯胺纳米金复合膜传感器对其进行检测:先制备聚苯胺修饰纳米金的复合膜 PANI/Au,再加入复合膜保护溶剂(离子液体1,3-二丁基-3-咪唑六氟磷酸盐)修饰。PANI/Au比传统纳米金离子能更有效地阻止金的聚合,且具有更高的分散性,聚苯胺导电膜可提高材料传导性以降低检出限,复合膜保护剂进一步稳定抗体,进而提高检测结果的稳定性。修饰的复合膜传感器克服了ELISA易出现假阳性的缺陷,乳品检测回收率在88%~119%之间。干宁等^[20]制备的食源性黄曲霉毒素B₁(AFB₁)新型纳米金电化学传感器,经验证可反复使用。另外,X. Chu等^[21]构建用于准确检测黄曲霉毒素的电化学传感器,进一步证明纳米金标记技术可用于食源性黄曲霉毒素的检测。

以纳米金为标记物的免疫分析快速检测技术虽然在开发过程中需投入较多资金和较长时间,但具有简单、快速、灵敏度高、特异性强、价廉、样品所需量少等优点^[22],并且根据纳米金颗粒的颜色变化,利用肉眼和紫外-可见吸收光谱就可进行定性定量分析^[23]。

3 免疫磁珠分离技术

免疫磁珠分离法是将磁性微球与免疫化学技

术结合起来的一种方法。该方法先用抗体包被的磁珠与样品混合,再用一个磁场装置收集磁珠。免疫磁珠分离法能快速地从食品成分中分离出靶细菌,克服选择性培养基的抑制作用。

闻一鸣等^[24]用免疫磁珠-选择性平板法检测单增李斯特菌。先用免疫磁珠对样品特异性筛选和富集,再联合选择性培养基进行微生物学鉴定,最后进行一步增菌。该方法克服了传统免疫磁珠分离法检测限较高以及传统选择性平板耗时较长的缺点,无需预增菌即可在数小时内完成对样品的检测。单增李斯特菌与3种常见食源性微生物(李斯特菌、金黄色葡萄球菌及副溶血弧菌)检测无交叉反应,特异性好,并且具有步骤简单、结果可靠的优点。

免疫磁珠分离技术被广泛认为是分离目标分析物敏感而简单的方法^[25]。免疫磁珠在病原微生物检测中具有富集微生物的作用,可以有效缩短检测时间^[26]。

4 酶联荧光免疫分析技术

酶联荧光免疫分析技术 ELFIA (enzyme-linked fluorescent immunoassay)是在酶联免疫吸附技术基础上发展起来的将酶系统与荧光免疫分析结合的微生物快速检测技术。它是利用理想的荧光底物代替生色底物,实现提高分析灵敏度,扩大测量范围以及减少试剂用量的目的。

林涛等^[27]通过以下2个步骤完成沙门氏菌的全自动荧光酶免疫分析仪(mini-VIDAS)和全自动微生物鉴定仪(VITEK 2 COMPACT)联用检测:先用VIDAS法初筛,再用VITEK法对阳性菌株生化鉴定,从而实现对食源性沙门氏菌的快速检测。该联用法针对7种不同食源性菌株检测,能准确鉴定出其中的沙门氏菌菌株,而非沙门氏菌菌株在初筛时即能被准确排除,准确度高。7种参考菌株初筛后显示阴性的样品48 h之内得出最终结果,显示阳性的样品4~6 h得出最终结果。联用法中VITEK法的使用能够避免检测结果的假阳性和假阴性,大幅提高准确度,其最低检出限为10³ cfu/mL,灵敏度高。对目标菌和124种水产品同时检测的结果与国标法完全一致,准确性好,并且还具有良好的通量高、自动化程度高的优点。

ELFIA具有快速、准确、高通量的优点。该技术能够同时进行2种不同项目的检测,48 h内对于阴性样品直接出具准确的报告^[28-29]。

5 化学发光免疫分析技术

化学发光免疫分析 CLIA (chemiluminescence immunoassay technique) 是将具有高灵敏度的化学发光测定技术与高特异性的免疫反应结合的新型免疫测定技术。

M. Magliulo 等^[30] 利用增强鲁米诺过氧化物酶发光体系电耦合照相系统 CCD (charge-coupled imaging device) 对发光信号进行检测. 可应用该系统同时检测 4 种常见食源性微生物 (大肠杆菌 O157 : H7、小肠结肠炎耶尔氏菌、鼠伤寒沙门氏菌以及李斯特单胞菌); 检测限在 $10^4 \sim 10^5$ cfu/mL 之间, 灵敏度高; 并且样品回收率在 90% ~ 120% 之间, 准确度高。

CLIA 技术具有特异性强、灵敏度高、线性范围宽、仪器简单、操作方便、无放射性污染等优点, 完全能够满足食品中病原微生物快速检测的要求. 此外, 该技术还为食品安全检测提供了一种超痕量的免疫检测手段, 在食品安全分析方面具有广阔的应用前景^[31]。

6 免疫传感器

免疫传感器基于抗原抗体特异性结合原理设计, 因其便捷、灵敏及可重复使用等优点而受到科研工作者的青睐. 免疫传感器的结构与传统的生物传感器相似, 可分为生物敏感元件、换能器和信号数据处理器 3 部分. 当待测物与分子识别元件特异性结合后, 所产生的复合物通过信号转换器转变为可以输出的电信号、光信号, 从而达到分析检测的目的。

许丽等^[32] 设计的食物致病菌快速检测一体化系统, 采用 TiO_2 纳米线束作为敏感元件以及高集成度芯片 AD5933 的阻抗设计, 电化学阻抗谱法测量阻抗变化量, 实现了对菌体的定量计算. 以大肠杆菌为例进行测试实验, 1 h 内即可检出食品中的大肠杆菌, 检出限达 4.5×10^2 cfu/mL, 灵敏度高. 该传感器能重复多次使用. 马静等^[33] 制备的大肠杆菌免疫传感器检出限为 1.0×10^2 cfu/mL, 检测时间仅为 20 min. S. H. Ohk 等^[34] 采用多重光纤免疫传感器同时检测即食用肉中的李斯特菌、大肠杆菌 O157 : H7 及沙门氏菌, 检出限达 1.0×10^3 cfu/mL, 此法可同时检测多个样品, 灵敏度高。

免疫传感器具有灵敏度高、仪器简单、方法灵活多样等优点, 已广泛应用食源性微生物检测领

域. 该法在未来数年内将向功能多样化、小型化、智能化与集成化、低成本、高灵敏度、高稳定性和高寿命的方向发展^[35]。

7 结语

免疫学检测技术具有快速、灵敏、专一的特点, 已在食源性疾病以及微生物检测方面得到了广泛的应用. 食品中污染的病原微生物或者毒素都可能直接或间接地成为抗原, 因此可应用免疫学方法对其进行定性和半定量分析, 从而实现对各种病毒害物质的控制和评估, 保证食品安全. 然而, 目前免疫学技术应用于食品安全检测中仍有一些问题需要解决, 例如, 食品中待检靶抗原的筛选与纯化、免疫学检测方法的合理应用, 以及敏感性和特异性这 2 个相矛盾的方面的统筹提高等. 随着对免疫学技术研究的不断深入和完善, 免疫学技术将在食源性致病菌的快速鉴定、检测, 中毒事件的甄别、处理、预防及病人的应急救治方面提供可靠的信息, 为人类的公共卫生、营养健康与疾病预防作出应有的贡献。

参考文献:

- [1] 赵杰文, 孙永海. 现代食品检测技术 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- [2] 周鹤峰, 邵敏, 李长福, 等. 检测阪崎肠杆菌间接 ELISA 方法的建立 [J]. 中国乳品工业, 2013, 41 (1): 51.
- [3] 李建科, 王峰, 夏凯. 苹果浓缩汁中耐热菌的间接 ELISA 快速检测方法 [J]. 中国农业科学, 2011, 44 (22): 4669.
- [4] 石良, 王锡昌, 刘源, 等. 食物过敏原免疫学检测技术研究进展 [J]. 分析测试学报, 2010, 29 (9): 981.
- [5] Beggs M, Novotny M, Sampedro S, et al. A self-performing chromatographic immunoassay for the qualitative determination of human chorionic-gonadotropin (HCG) in urine and serum [J]. Clin Chem, 1990, 36 (6): 1084.
- [6] 解泉源, 赖卫华, 刘春梅, 等. 大肠杆菌 O157 : H7 荧光微球免疫层析试纸条的研制 [J]. 食品科学, 2013, 34 (16): 353.
- [7] 吴伟兵, 王明亮, 景宜, 等. 单分散荧光微球的制备及其光学性能研究 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34 (3): 15.
- [8] 刘道峰, 邓省亮, 赖卫华, 等. 莱克多巴胺荧光微球免疫层析检测方法的建立 [J]. 食品与机械, 2012, 28 (1): 73.
- [9] 许艳丽, 鲍蕾, 吴振兴, 等. 免疫胶体金技术及其在真菌毒素检测中的应用 [J]. 中国酿造, 2010 (7): 13.
- [10] 王玉金, 杨书豪, 刘丽, 等. 大肠杆菌 O157 : H7 胶体金免疫层析快速检测法的建立 [J]. 河南科学, 2012, 30

- (7):874.
- [11] 王静,陈维娜,胡孔新,等. 大肠杆菌 O157 胶体金免疫层析快速筛查方法的建立[J]. 卫生研究,2006,35(4):439.
- [12] 邵景东,陈飞,肖国平. O₉ 群沙门氏菌胶体金检测试剂盒的研制[J]. 检验检疫科学,2005,15(3):30.
- [13] 徐小婧,王俊平,王霄雪,等. T-2 毒素胶体金免疫层析快速检测试纸条的研制[J]. 食品研究与开发,2013,34(17):96.
- [14] 刘自平,李静,吴春霞,等. 胶体金免疫层析技术快速检测蜂蜜中 5-羟甲基糠醛[J]. 食品与发酵工业,2013,39(7):200.
- [15] 夏敏,杜美红,贾瑜,等. 胶体金免疫层析技术测定食品中黄原胶[J]. 食品科学,2012,33(20):270.
- [16] Pavlov V, Xiao Y, Shlyahovsky B, et al. Aptamer-functionalized Au nanoparticles for the amplified optical detection of thrombin[J]. J Am Chem Soc,2004,126(38):11768.
- [17] Wang J B, Profitt J A, Pugia M J, et al. Au nanoparticle conjugation for impedance and capacitance signal amplification in biosensors[J]. Anal Chem,2006,78(6):1769.
- [18] 蒲小平,杨海麟,周楠迪. 基于生物条形码探针和金纳米颗粒的大肠杆菌 O157:H7 检测[J]. 食品科学,2011,32(8):177.
- [19] 孙秀兰,高博,张银志,等. 应用焦磷酸测序技术快速检测食品中沙门氏菌[J]. 食品科学,2013,34(2):182.
- [20] 干宁,王峰,刘飞,等. 饲料中黄曲霉毒素 B1 的纳米金修饰电化学免疫传感器研究[J]. 动物生产,2009,45(15):47.
- [21] Chu X, Fu X, Chen K, et al. An electrochemical stripping metalloimmunoassay based on silver-enhanced gold nanoparticle label [J]. Biosens Bioelectron, 2005, 20(9):1805.
- [22] Yuichi O, Kumiko K, Hisanori K, et al. Development of oligonucleotide lateral-flow immunoassay for multiparameter detection [J]. J Immunol Methods, 2001, 258:73.
- [23] 何建仁. 试论食品微生物检测技术新发展[J]. 科技资讯,2011(20):2.
- [24] 闻一鸣,李志清,童吉宇,等. 免疫磁珠富集技术联合选择性培养基快速检测单增李斯特菌[J]. 生物工程学报,2012,29(5):672.
- [25] Apaire-Marchais V, Kempf M, Lefrancois C, et al. Evaluation of an immunomagnetic separation method to capture *Candida* yeasts cells in blood[J]. BMC Microbiol,2008,8(157):1471.
- [26] 余楠,车小燕. 免疫磁珠技术在病原微生物检测中的应用前景[J]. 中华检验医学杂志,2011,34(3):280.
- [27] 林涛,兰敏,黄伟,等. 荧光酶免疫分析仪-微生物鉴定仪在水产品沙门氏菌检测中的应用[J]. 食品与发酵工业,2008,34(8):133.
- [28] 林涛,刘真真,杨雪娇,等. 全自动荧光酶免疫分析仪-国标法检测水产品中单核细胞增生李斯特氏菌的研究[J]. 中国卫生检验杂志,2008,18(4):655.
- [29] 林涛,刘真真,冯小军,等. 全自动荧光酶免疫分析仪检测冻肉产品中致病菌的研究[J]. 食品科技,2007(7):216.
- [30] Magliulo M, Simoni P, Guardigli M, et al. A rapid multiplexed chemiluminescent immunoassay for the detection of *Escherichia coli* O157:H7, *Yersinia enterocolitica*, *Salmonella typhi*, and *Listeria monocytogenes* pathogen bacteria[J]. J Agric Food Chem,2007,55(13):4933.
- [31] 张燕,杨金易,曾道平,等. 化学发光免疫分析技术及其在食品安全检测中的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2013,4(5):1421.
- [32] 许丽,董文钧,王学斌,等. 食物致病菌快速检测系统的设计与实现[J]. 传感技术学报,2012,25(2):151.
- [33] 马静,张伟尉,李闻,等. 基于纳米金固定大肠杆菌 O157:H7 酶免疫传感器的研究[J]. 中国卫生检验杂志,2007,17(12):2156.
- [34] Ohk S H, Bhunia A K. Multiplex fiber optic biosensor for detection of *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* from ready-to-eat meat samples[J]. Food Microbiol,2013,33(2):166.
- [35] 陈慧莲,陈伟锐. 电化学免疫传感器的发展概述[J]. 广州化工,2013,41(11):26.

热-机械处理大豆分离蛋白的 FT-IR 光谱特性

赵学伟¹, 贾涛², 张雪林¹, 王章存¹, 章银良¹, 姜春鹏¹

(1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州市质量技术监督检验测试中心, 河南 郑州 450006)

摘要:采用转矩流变仪在 30 °C 和 90 °C 对含水 60% 的大豆分离蛋白分别处理 2 min, 15 min, 30 min, 考察其 FT-IR 光谱特性的变化. 实验结果表明, 热-机械处理导致大豆分离蛋白分子中的 C—H 对称及非对称伸缩减弱甚至消失, C—H 伸缩振动和非对称伸缩向高位漂移, 蛋白二级结构中 α -螺旋和 β -转角含量降低, 同时伴有 β -折叠和无规则卷曲含量升高. 对于低水分大豆分离蛋白体系, 热-机械处理中的机械效应可能是导致其蛋白二级结构变化的主要因素.

关键词:大豆分离蛋白; 热-机械处理; FT-IR 光谱; 蛋白二级结构

中图分类号:TS201.2⁺1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.003

FT-IR spectroscopic characterization of soybean protein isolates after thermo-mechanical treatments

ZHAO Xue-wei¹, JIA Tao², ZHANG Xue-lin¹, WANG Zhang-cun¹,
ZHANG Yin-liang¹, JIANG Chun-peng¹

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

2. Zhengzhou Quality Technology Supervision Inspection and Testing Center, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Soybean protein isolate (SPI) with a moisture content of 60% was thermo-mechanically treated torque rheometer at 30 °C and 90 °C for 2 min, 15 min and 30 min respectively, and characterized by Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy. The results showed that after thermo-mechanical treatments, the symmetrical and asymmetrical stretching of C—H bonds in —CH₂ residues became weak and even disappeared the stretching vibration and asymmetrical stretching of C—H bonds drifted to higher position. The α -helix and β -turn decreased accompanying with β -sheet and random coil increased. For that lower moisture content SPI system, the mechanical effect during thermo-mechanical processing may be the major contributor to the transformation of secondary protein structure.

Key words: soybean protein isolate (SPI); thermo-mechanical treatment; FT-IR spectroscopy; secondary protein structure

0 引言

大豆分离蛋白(SPI)是较为常见的植物蛋白,

广泛用于食品及生物可降解材料的生产,加工可导致其发生分子水平上的变化,从而影响其营养价值和功能特性. 傅里叶转换红外光谱(FT-IR)是探测

蛋白分子水平变化的有效手段,具有样品用量较少、几乎不受蛋白质分子大小影响、没有光散射和荧光的影响及使动力学研究成为可能等优点.但蛋白体系中广泛存在的水在 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收对其准确定量造成很大影响,可以采用吹扫、差减及氘代等方法加以消除^[1].

前人研究了高压脉冲电场及热处理^[2]、高压^[3]、成膜过程^[4]、反向胶束提取^[5]、化学交联^[6]、水分含量变化($<30\%$)^[7]对 SPI 分子结构的影响.有些加工过程(如挤压组织化)中,物料在受热的同时,还受到较为明显的机械作用(包括剪切、拉伸等).关于热处理对 SPI 影响的研究较多,而对机械处理导致的 SPI 结构变化较少关注.张彩猛等^[8]研究了大豆蛋白溶液经受剪切处理后溶解性的变化.对于低水分(挤压组织化生产中,物料水分一般为 $30\% \sim 60\%$)大豆蛋白体系,其所经受的热-机械处理与 SPI 分子结构变化之间的关系尚不明确.

本文拟对含水量 60% 的 SPI 在 2 个设定温度下机械处理不同时间,通过 FT-IR 光谱分析,揭示热-机械处理对 SPI 分子结构的影响.

1 材料与方法

1.1 材料与设备

材料:SPI,郑州同创益生食品有限公司提供,调至含水量 60% .

设备:RM-400B 型 HAPRO 转矩流变仪,哈尔滨哈普电气技术有限公司产;NICOLET 5700 傅里叶红外光谱仪,美国 Nicolet 公司产.

1.2 实验方法

1.2.1 热-剪切处理 分别设定转矩流变仪的一区、二区、三区温度皆为 $30\ ^\circ\text{C}$ 与 $90\ ^\circ\text{C}$,转速 $80\ \text{r}/\text{min}$;加样量 $62.50\ \text{g}$;剪切时间 $2\ \text{min}$, $15\ \text{min}$, $30\ \text{min}$.处理结束取出后迅速将样品搓碎,装入密封袋内, $-20\ ^\circ\text{C}$ 密封保存待测.

1.2.2 FT-IR 测定 波长扫描范围为 $4\ 000 \sim 550\ \text{cm}^{-1}$,扫描次数 32,分辨率 $2\ \text{cm}^{-1}$,环境温度 $25\ ^\circ\text{C}$.在与样品测定完全相同的条件下于室温敞开状态收集空气背景.在相同条件下测定水的红外光谱以作差减.

1.2.3 图谱处理 采用 OMNIC 6.0 数据处理软件处理原谱,将水的吸收从样品光谱中减去.用 Peakfit 4.12 软件,在 $1\ 700 \sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ (酰胺 I 带)范围内进行 2 点基线校正,做二阶导数谱并同时采

用 Gauss 峰形进行拟合,估算出子峰的个数和位置^[9],手动调整各子峰的峰高和半峰宽,多次拟合使残差最小($r^2 \geq 0.999$).对 SPI 酰胺 I 带进行谱带指认,根据各峰的面积,计算出 SPI 各二级结构的相对百分含量.

2 结果与分析

2.1 热-剪切处理中 SPI 体系的温度及扭矩变化

设定温度分别为 $30\ ^\circ\text{C}$ 和 $90\ ^\circ\text{C}$ 下剪切 $30\ \text{min}$ 过程中 SPI 体系的温度与扭矩的变化如图 1 所示.设定温度为 $30\ ^\circ\text{C}$ 时,机械处理过程中物料温度在达到设定值后仍然缓慢升高,最后达到 $56.2\ ^\circ\text{C}$,这是机械处理中的摩擦生热所致.设定温度为 $90\ ^\circ\text{C}$ 时,温度快速达到设定值后基本维持恒定在 $95.7\ ^\circ\text{C}$.关于扭矩的变化,图 1 中的第 1 个峰是加料时压紧物料所致.扭矩随后缓慢降低,高、低温处理时最后扭矩分别为 $4.1\ \text{N} \cdot \text{m}$ 和 $9.4\ \text{N} \cdot \text{m}$.高温处理过程中的扭矩较低,这是由于较高温度时物料的黏度较低,相同转速下扭矩也就较低.这一点也体现在输入的机械能上,高温处理 $2\ \text{min}$, $15\ \text{min}$, $30\ \text{min}$ 时输入的机械能分别为 $11.9\ \text{kJ}$, $40.1\ \text{kJ}$, $76.6\ \text{kJ}$,而低温时分别为 $17.6\ \text{kJ}$, $80.8\ \text{kJ}$, $160.7\ \text{kJ}$.

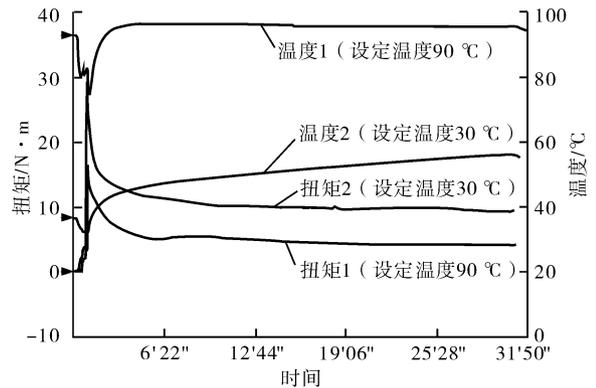


图 1 SPI 体系热-剪切处理中温度和扭矩的变化

仔细观察发现,对于高温处理,扭矩经历初始阶段的快速降低后有一个略为升高的过程.对于合成高分子材料,在高温处理一段时间后会发生较大幅度的扭矩增大或减小现象,一般认为是高分子发生交联或降解所致.对于蛋白质这样的生物大分子,存在发生交联的可能,但高温下蛋白分子水化导致体积膨胀^[10]可能是主要因素.

2.2 热-机械处理 SPI 的红外光谱

图 2 给出了 SPI 原样及经过 $15\ \text{min}$ 处理的样品

的红外吸收光谱,各峰值对应的振动形式见表1.由图2可见,样品在酰胺I带($1\ 700\sim 1\ 600\text{ cm}^{-1}$)、酰胺II带($1\ 600\sim 1\ 500\text{ cm}^{-1}$)有较强吸收,后者的吸收稍弱; $3\ 000\sim 3\ 600\text{ cm}^{-1}$ 的较宽范围内出现A—OH吸收带.处理前后多数吸收峰的强度无明显变化.例外的是, $2\ 917.5\text{ cm}^{-1}$ (—CH₂中C—H的对称伸缩)及 $2\ 848.3\text{ cm}^{-1}$ (非对称伸缩)处的吸收峰在处理 after 明显减弱,且高温处理产生的影响更大.低温机械处理2 min, $2\ 848.3\text{ cm}^{-1}$ 峰肉眼可辨;对其余处理,该峰皆消失.同时考虑到低温机械处理时对物料输入的机械能较少,则可推断热效应是影响—CH₂中C—H伸缩振动的主要因素.

$3\ 275.1\text{ cm}^{-1}$ (氢键)吸收峰在处理 after 略向低位漂移. $2\ 954.1\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰向高位漂移 $4\sim 17\text{ cm}^{-1}$,且低温处理的漂移更多一些; $2\ 917.5\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰向高位漂移 $2\sim 15\text{ cm}^{-1}$. $1\ 631.6\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 542.7\text{ cm}^{-1}$ 的峰位波数略有减小或基本不变. $1\ 457.8\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 081.3\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰分别向低位漂移 $4\sim 5\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\sim 3\text{ cm}^{-1}$; $1\ 400.2\text{ cm}^{-1}$, $1\ 313.0\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 242.4\text{ cm}^{-1}$ 的峰位基本不变.

2.3 热-剪切处理对SPI分子二级结构的影响

对酰胺I带进行分峰,根据各子峰与二级结构对应关系^[15],对本研究中SPI酰胺I带各子峰进行指认,结果为: $(1\ 618\pm 1.0)\text{ cm}^{-1}$ 为 β -折叠; $(1\ 631\pm$

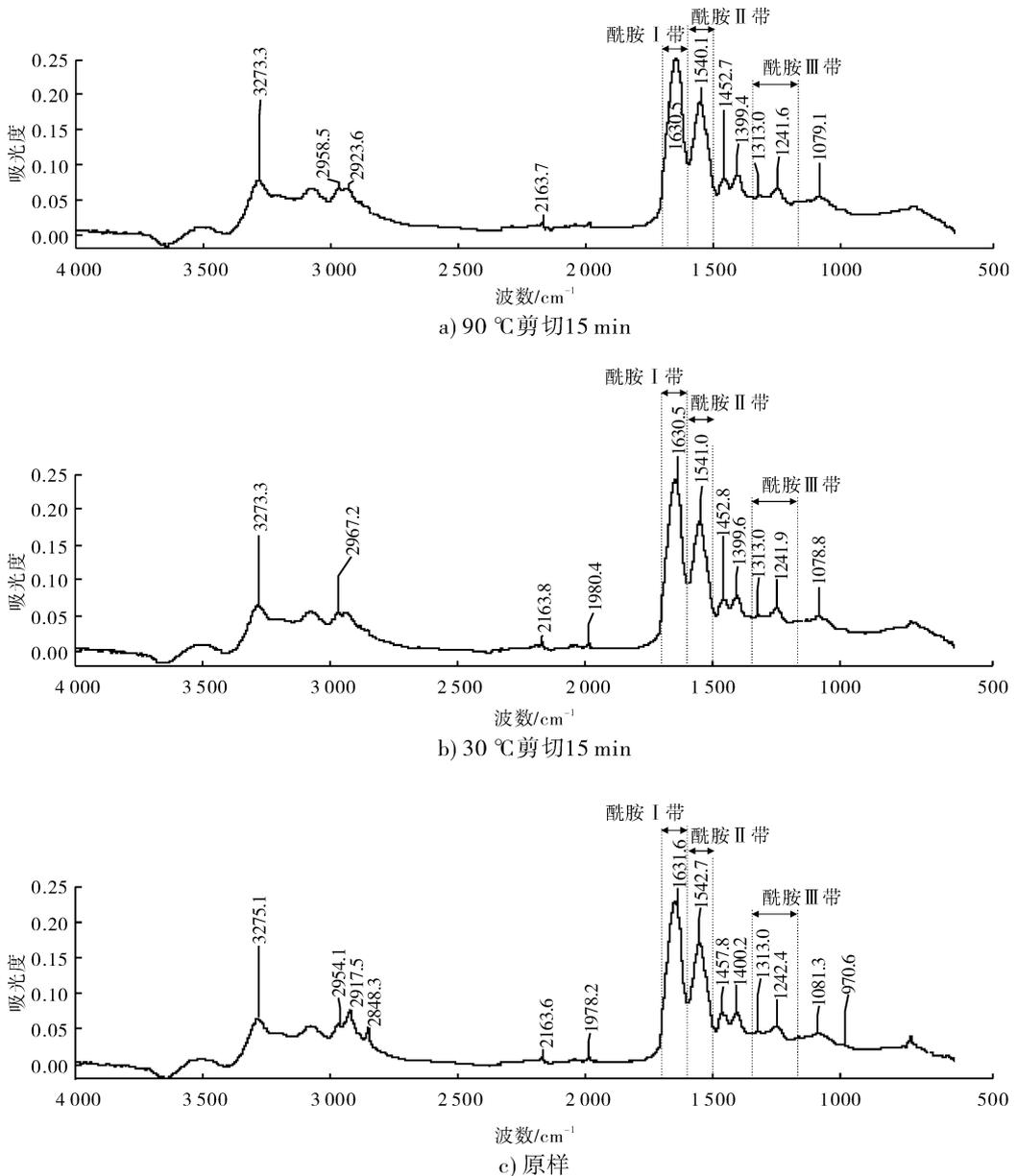


图2 SPI及其处理样品扣除水吸收后的红外光谱

表1 SPI 原样的吸收峰及其对应的化学结构

吸收峰/ cm^{-1}	对应的化学结构
3 275.1	蛋白中 O—H、N—H 以及结合水中 O—H 基团与氨基酸中的 C=O 所形成的分子内和分子间氢键 ^[11]
2 954.1	饱和结构中 CH_3 和 CH_2 基团的 C—H 伸缩振动 ^[1]
2 917.5	CH_2 中 C—H 的非对称伸缩 ^[12]
2 848.3	CH_2 中 C—H 的对称伸缩 ^[12]
1 631.6	C=O 伸缩振动 ^[13]
1 542.7	N—H 弯曲 ^[1]
1 457.8	C(O)—NH 或 C(O)—NH ₂ 中 C—H 变角振动 ^[1,14]
1 400.2	C—OH 振动 ^[1]
1 313.0	C—O、C—O—C 振动 ^[14]
1 242.4	C—N 伸缩 ^[5]
1 081.3	来自不同基团,如芳香环的平面外 C—H 弯曲、磷脂中 PO_2 或 P—OH 的伸缩 ^[12]

2.0) cm^{-1} 为 β -折叠; (1 643 \pm 2.0) cm^{-1} 为无规则卷曲; (1 655 \pm 3.0) cm^{-1} 为 α -螺旋; (1 669 \pm 2.0) cm^{-1} 为 β -转角; (1 683 \pm 1.0) cm^{-1} 为 β -转角。

热-机械处理导致 1 655.9 cm^{-1} 处的 α -螺旋峰向高波段迁移 0.6 ~ 1 cm^{-1} , 无规则卷曲吸收峰的波数略有增大, 其余的基本不变。

不同热-机械处理 SPI 分子各二级结构的含量百分比见表 2。由表 2 可见, 总体来说, 与原样相比, 热-机械处理引起 β -折叠和无规则卷曲结构含量升高, 同时伴有 α -螺旋和 β -转角的含量降低。其中 β -折叠和 β -转角的变化幅度较大, 说明热-机械处理导致 SPI 分子无规则结构增多, 不同类型的规则结构之间发生转换。有研究表明, 挤压处理导致 SPI 无规则卷曲增多、 α -螺旋减少, 某些挤压条件下 β -折叠增多, 但是 β -转角含量增大^[16], 这与本研究的结果基本一致。刘燕燕等^[2] 研究表明, SPI 蛋白溶液 90 $^{\circ}\text{C}$ 加热 30 min 时, α -螺旋、 β -折叠含量

表2 不同热-机械处理 SPI 各二级结构含量 %

不同处理	β -折叠	无规则卷曲	α -螺旋	β -转角
原样	30.61	21.91	21.18	26.31
30 $^{\circ}\text{C}$ /2 min	32.26	22.80	20.32	24.61
30 $^{\circ}\text{C}$ /15 min	32.42	22.28	20.48	24.81
30 $^{\circ}\text{C}$ /30 min	32.84	22.30	20.24	24.62
90 $^{\circ}\text{C}$ /2 min	31.71	22.28	20.78	25.23
90 $^{\circ}\text{C}$ /15 min	32.55	22.05	20.32	25.07
90 $^{\circ}\text{C}$ /30 min	32.19	22.13	20.64	25.03

减少, 而 β -转角含量增加, 这与本研究的结果相反。本研究的对象为低水分体系, 且在加热的同时进行机械处理, 这些可能是造成结果差异的主要原因。这种差异也可能说明机械效应和热效应在对 SPI 二级结构的影响上表现出不同的趋势。

相同温度不同处理时间之间, 二级结构的含量变化不大。高温处理导致 β -折叠升高、 β -转角降低的幅度比低温处理的略小。高温处理时热效应更为显著, 但此时物料的黏度低(参见图 1), 使得输入的机械能减少, 相应机械效应引起的二级结构变化减弱。为此, 考察了单位机械能耗(SME)与 SPI 二级结构变化之间的关系, 结果见图 3。由图 3 可见, 不同温度处理的样品, 其二级结构含量基本各自在一条趋势线上, 说明对于低水分 SPI 体系, 在进行热-机械处理时, SME 是影响其二级结构变化的主要原因。SME > 400 kJ/kg 时, 二级结构不再发生变化, 说明机械作用对 SPI 二级结构的影响也有一定的限度。

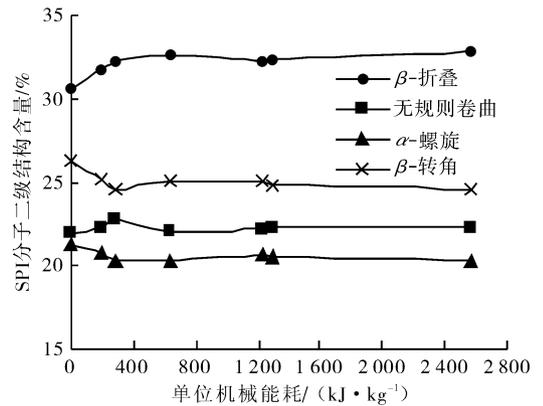


图3 SPI 分子二级结构含量与单位机械能耗的关系

3 结论

本文采用转矩流仪研究了不同温度、时间下对含水 60% 的 SPI 红外光谱特性的变化, 结果表明: 2 917.5 cm^{-1} 和 2 848.3 cm^{-1} 吸收峰对热-机械作用最敏感, 经处理后明显减弱或消失。热-机械处理导致 SPI 中 2 954.1 cm^{-1} 和 2 917.5 cm^{-1} 吸收峰向高位漂移。

热-机械处理导致 SPI 分子无规则结构增多, 不同类型的规则结构之间发生转换, 表现为 α -螺旋和 β -转角含量降低、 β -折叠含量增多。对于低水分 SPI 体系, 热-剪切处理中的机械作用可能是引起蛋白质二级结构变化的主要原因。

参考文献:

- [1] Wellner N, Belton P S, Tatham A S. Fourier transform IR spectroscopic study of hydration-induced structure changes in the solid state of α -gliadins [J]. *Biochem J*, 1996, 319:741.
- [2] 刘燕燕, 曾新安, 陈晓东. FTIR 分析脉冲电场和热处理后的大豆分离蛋白结构变化[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(9):2340.
- [3] Tang C H, Ma C Y. Effect of high pressure treatment on aggregation and structural properties of soy protein isolate [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42:606.
- [4] Muriel S, Isabelle K, Jacques C. Molecular basis of film formation from a soybean protein: comparison between the conformation of glycinin in aqueous solution and in films [J]. *Int J Biol Macromol*, 1998, 23:241.
- [5] Chen X, Ru Y, Chen F, et al. FTIR spectroscopic characterization of soy proteins obtained through AOT reverse micelles [J]. *Food Hydrocol*, 2013, 31:435.
- [6] Gonzalez A, Strumia M C, Igarzabal C I A. Cross-linked soy protein as material for biodegradable films: synthesis, characterization and biodegradation [J]. *J Food Eng*, 2011, 106:331.
- [7] Kealley C S, Rout M K, Dezfouli M R. Structure and molecular mobility of soy glycinin in the solid state [J]. *Bio-macromol*, 2008, 9(10):2937.
- [8] 张彩猛, 华欲飞, 孔祥珍. 高速剪切对醇法大豆浓缩蛋白溶解特征的影响 [J]. *大豆科学*, 2010, 29:853.
- [9] Surewicz W K, Mantsch H H. New insight into protein secondary structure from resolution-enhanced infrared spectra [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1988, 952(2):115.
- [10] Steinbach P J, Brooks B R. Protein hydration elucidated by molecular dynamics simulation [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1993, 90:9135.
- [11] Schmidt V, Giacomelli C, Soldi V. Thermal stability of films formed by soy protein isolate sodium dodecyl sulfate [J]. *Polym Degrad Stab*, 2005, 87:25.
- [12] Li C E, Chalmers J M, Griffiths P R. Applications of Vibrational Spectroscopy in Food [M]. New Jersey: Wiley, 2010.
- [13] Guerrero P, de la Caba K. Thermal and mechanical properties of soy protein films processed at different pH by compression [J]. *J Food Eng*, 2010, 100:261.
- [14] Liu Y Y, Zeng X A, Deng Z, et al. Effect of pulsed electric field on the secondary structure and thermal properties of soy protein isolate [J]. *Eur Food Res Technol*, 2011, 233:841.
- [15] Pelton J T and McLean L R. Spectroscopic methods for analysis of protein secondary structure [J]. *Analytical Biochem*, 2000, 277:167.
- [16] 康立宁. 大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

苹果-刺梨混合果汁饮料浑浊稳定性控制

赵光远, 梁晓童, 任莹莹

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:研究了苹果-刺梨混合果汁饮料生产工艺中的均质条件和稳定剂对其稳定性的影响. 结果表明,在果汁含量20%,甜味剂含量12 g/100 mL,酸味剂含量0.5 g/100 mL时,添加0.05%果胶,0.05% CMC,0.15%黄原胶构成的复合稳定剂可以达到较理想的稳定效果. 同时在均质压力25 MPa,均质温度60 °C的条件下进行1次均质,90 °C的水浴中杀菌10 min,得到的混合汁饮料具有苹果和刺梨独特的风味和色泽,饮料质地均匀,口感爽滑.

关键词:苹果;刺梨;混合果汁饮料;正交试验;浑浊稳定性

中图分类号:TS275.5 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.004

Study on the compound juice beverage turbid stability of apple and *Rose roxburghii tratt*

ZHAO Guang-yuan, LIANG Xiao-tong, REN Ying-ying

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

Abstract: The processing technology of a compound beverage using apple and *Rose roxburghii tratt* juices was studied. The influences of some stabilizers on the stability of this beverage were also investigated. The results showed that the optimum formula were as follows: fruit juice 20%, sweetener 12 g/100 mL, citric acid 0.5 g/100 mL. The compound stabilizer was composed of 0.05% pectin, 0.05% CMC, 0.15% xanthan gum. In this way, the stabilizer may achieve better stabilizing effect. Meanwhile under the conditions of homogeneous pressure 25 MPa, temperature 60 °C, sterilized at water bath of 90 °C for 10 min, the compound beverage had smooth taste, even texture, nice flavors and colors of apple and *Rose roxburghii tratt*.

Key words: apple; *Rose roxburghii tratt*; compound juice beverage; orthogonal test; turbid stability

0 引言

苹果富含酚类物质,但抗坏血酸(Vc)含量极少,而刺梨(*Rose roxburghii tratt*) Vc含量丰富,可达到2 000 mg/100 g干基以上^[1].从营养和医疗保健的角度综合权衡,选用苹果、刺梨制作混合果汁饮料,既综合了苹果和刺梨的功能性成分,可预防多种疾病,发挥其保健功能,刺梨中高含量的Vc又能够较好地防止混合果汁饮料加工过程中的褐变,达

到较好的澄清效果.该复合饮料不但可弥补单一汁液在营养上的缺陷,同时具有良好的风味,极具市场开发价值.

浑浊果汁饮料加工的一大难点是浑浊稳定性的控制.根据斯托克斯定律,果汁的浑浊稳定性同果汁中悬浮颗粒的尺寸、果汁的黏度、果汁溶液和颗粒的密度差有关^[2].此外,颗粒的电性质和形状也有一定程度的影响.目前,研究者多从控制果汁中悬浮颗粒尺寸和添加稳定剂等方面综合控制果

收稿日期:2014-03-28

基金项目:河南省科技攻关计划项目(082102110010)

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

汁和果汁饮料的浑浊稳定性,其中添加稳定剂的种类和数量是问题的关键。

本文拟以资源丰富、气味芳香的精品红富士苹果为原料^[3],加入有“三王水果”之称的刺梨,探讨利用苹果渣中的果胶,以及外加稳定剂、均质减小悬浮颗粒尺寸等方式来控制苹果-刺梨混合果汁饮料浑浊稳定性的技术。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

原料:精品红富士苹果,购自郑州某超市,常温贮藏;刺梨,购自南召水果批发市场;白砂糖(一级),市售;柠檬酸(食用级),丰原生化股份公司产;黄原胶,果胶,CMC,均为食用级,上海励成食品工业有限公司产。

仪器:WSC-S测色色差计,上海精密科学仪器有限公司产;飞利浦榨汁机,广州市光之彩电气家居有限公司产。

1.2 实验方法

1.2.1 苹果-刺梨混合汁饮料工艺流程

刺梨+水混合打浆^a→加入苹果打浆榨汁
 → $\left[\begin{array}{l} \text{果渣} \rightarrow \text{加入水}^b \rightarrow \text{果渣汁} \\ \text{果汁} \rightarrow \text{灭酶} \rightarrow \text{添加甜味剂、酸味剂、稳定剂及水} \end{array} \right]$
 →均质→90℃杀菌10min→成品

苹果、刺梨的比例为45:1。第1次加水量(a)为苹果质量的7%,第2次加水量(b)为苹果质量的60%。甜味剂为白砂糖,酸味剂为柠檬酸(食用级),稳定剂为黄原胶,果胶,CMC(均为食用级)。

1.2.2 浊度保留率 样品在4000 r/min下离心15 min,在660 nm处分别测离心前后样品的吸光值,按下式计算其浊度保留率作为考察果汁饮料稳定性的指标:

$$\text{浊度保留率}/\% = \frac{OD_2}{OD_1} \times 100\%$$

其中, OD_1, OD_2 分别代表离心前后的吸光值。

1.2.3 果汁饮料贮藏前后色差的比较 果汁饮料贮藏1周前后的色差用色差计来测定,颜色用 L^*, a^*, b^* 表示。 L^* 越大果汁越亮,反之越暗; a^* 越大果汁越红,反之越蓝; b^* 越大果汁越黄,反之越绿。果汁颜色变化 ΔE 的计算公式如下^[4]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

其中,1和2分别表示贮藏前、后的参数值; ΔE 越大则表示果汁颜色变化越大。

2 结果与讨论

2.1 混合果汁饮料均质条件的确定

苹果汁饮料加工过程中,影响其稳定性的工艺流程主要在均质环节,而均质效果主要受均质温度、均质压力及均质次数3个因素的影响。在确定果汁含量20%,甜味剂含量12 g/100 mL,酸味剂含量0.5 g/100 mL的基础上,本文对混合果汁的均质条件进行研究,以延长其储藏稳定性。

2.1.1 均质条件的初步确定 设计表1所示的正交表^[7]对均质条件进行初步确定,正交试验结果见表2,正交试验的方差分析结果见表3。

笔者之前的单因素试验表明,均质时均质压力和温度越高,均质效果越好,2次均质比1次均质效

表1 均质条件因素水平表

水平	因素		
	第1次均质压力A/MPa	第2次均质压力B/MPa	均质温度C/℃
1	0	15	40
2	15	20	50
3	20	25	60

表2 均质条件正交试验结果

实验号	水平			浊度保留率/%
	A	B	C	
1	1	1	1	17.70
2	1	2	2	18.85
3	1	3	3	22.20
4	2	1	2	18.90
5	2	2	3	24.56
6	2	3	1	19.93
7	3	1	3	21.78
8	3	2	1	19.27
9	3	3	2	20.06
k_1	19.58	19.46	18.97	
k_2	21.13	20.89	19.27	
k_3	20.37	20.73	22.85	
R	1.55	1.43	3.88	
因素主→次	C→A→B			
最优组合条件	$A_2B_2C_3$			

表3 均质条件正交试验方差分析结果

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	p值
A	3.588 6	2	1.794 3	4.656 4	0.176 8
B	3.694 0	2	1.847 0	4.793 1	0.172 6
C	27.939 0	2	13.969 5	36.251 9	0.026 8
误差	0.770 7	2	0.385 3		
总和	35.992 3				

果好,浊度保留率越高.但表2的结果表明,合理的均质组合条件为 $A_2B_2C_3$,并不是均质温度和压力最高的均质效果最好.这可能是因为均质后果汁饮料颗粒变小,相应地颗粒间的黏度也减小的缘故.

由表3可见,均质温度对果汁饮料浊度保留率的影响更显著.

2.1.2 通过贮藏进一步确定均质条件 果汁饮料在储藏过程中很容易发生沉淀分层及褐变的现象,因为对果汁饮料进行均质,虽然可以增加颗粒的悬浮性,但是会降低果汁的黏度.所以需要在2.1.1结果的基础上进一步通过贮藏(时间30 d)来确定均质条件.正交试验结果和方差分析见表4和表5.

由表4可见,储藏条件下考察均质条件时,各因素对均质结果的影响依次为:第1次均质压力、均质温度、第2次均质压力,确定均质最优组合条件为 $A_1B_3C_3$.

由表5可见,第1次均质压力对果汁饮料的储藏稳定性有较显著的影响.

表4 储藏条件下考察均质条件正交试验结果

实验号	水平			浊度保留率/%
	A	B	C	
1	1	1	1	37.12
2	1	2	2	39.04
3	1	3	3	42.37
4	2	1	2	32.84
5	2	2	3	34.10
6	2	3	1	30.86
7	3	1	3	32.30
8	3	2	1	30.00
9	3	3	2	32.54
k_1	39.51	34.09	32.66	
k_2	32.60	34.38	34.81	
k_3	31.61	35.26	36.26	
R	7.90	1.17	3.60	
因素主→次	A→C→B			
最优组合条件	$A_1B_3C_3$			

表5 储藏条件下考察均质条件正交试验方差分析结果

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	p值
A	111.079 0	2	55.539 5	73.528 7	0.013 4
B	2.223 5	2	1.111 7	1.471 8	0.404 6
C	19.646 7	2	9.823 3	13.005 1	0.071 4
误差	1.510 7	2	0.755 3		
总和	134.459 8				

2.2 果汁中稳定剂加入量的确定

在果汁饮料中添加适当的稳定剂可提高其稳定性,防止贮存中的分层现象,同时采用复配稳定剂可以起到协同增效的作用,其稳定效果优于单一稳定剂.考虑到浑浊苹果汁中的悬浮颗粒是由带正电的核和外面包裹着带负电的果胶所组成,以及它整体带负电荷的特点,选取2种带负电的胶(果胶D和CMC E)和1种黏度较大的胶(黄原胶F)^[6],对其加入量的因素与水平见表6.

以浊度保留率为考察指标的正交试验结果见表7,方差分析见表8.

由表7可见,稳定剂的加入对果汁饮料稳定性的影响因素依次为:黄原胶、果胶、CMC.稳定剂的加

表6 稳定剂的因素水平表

水平	因素		
	D/%	E/%	F/%
1	0.05	0.03	0.05
2	0.10	0.05	0.10
3	0.15	0.07	0.15

表7 稳定剂正交试验结果

实验号	水平			浊度保留率/%
	D	E	F	
1	1	1	1	66.0
2	1	2	2	97.0
3	1	3	3	90.9
4	2	1	2	75.8
5	2	2	3	88.8
6	2	3	1	44.3
7	3	1	3	76.2
8	3	2	1	50.0
9	3	3	2	65.2
k_1	84.6	72.6	53.4	
k_2	69.6	78.6	79.3	
k_3	63.8	66.8	85.3	
R	20.8	11.8	31.9	
因素主→次	F→D→E			
最优组合条件	$D_1E_2F_3$			

表8 稳定剂正交试验方差分析结果

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	p值
D	693.055 6	2	346.527 8	350.815 5	0.002 8
E	208.862 2	2	104.431 1	105.723 3	0.009 4
F	1 721.895 6	2	860.947 8	871.600 7	0.001 1
误差	1.975 6	2	0.987 8		
总和	2 625.788 9				

入使得果汁饮料的黏度增加,不易分层或产生沉淀,果汁饮料的浊度保留率自然也就增加.添加稳定剂量的最优组合条件为 $D_1E_2F_3$,验证实验表明,此时浊度保留率为 96.5%.

由表 8 可见,相对来说,黄原胶对果汁饮料稳定性的影响比较显著.

正交试验各样品的色差测定结果见表 9.

表 9 正交试验的色差结果

试验号	储藏前			储藏后			ΔE
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	
对照	44.93	1.54	12.63	44.12	2.78	12.81	1.492 012
1	45.08	1.65	13.07	43.48	2.76	13.43	1.980 328
2	45.20	1.73	12.50	44.85	3.23	11.67	1.749 686
3	44.85	1.67	12.78	43.45	2.54	13.56	1.823 541
4	45.44	1.72	12.99	44.26	2.88	12.38	1.790 559
5	45.69	1.59	13.45	43.78	2.45	13.29	2.100 786
6	45.66	1.64	12.54	43.82	2.32	13.06	2.029 384
7	45.30	1.50	12.08	44.02	2.53	12.83	1.806 045
8	45.26	1.60	12.58	43.32	2.97	12.04	2.435 590
9	45.68	1.63	11.25	43.90	2.98	12.16	2.412 260

由表 9 可见,与未添加稳定剂的对照组相比,添加稳定剂的各项试验组 ΔE 均有明显增加,其中试验号 2 的 ΔE 的变化最小.这表明添加稳定剂后果汁的颜色变化较大,这是因为添加稳定剂后果汁的黏度增加,果汁饮料的色泽变得柔和,亮度变暗的缘故.但 ΔE 的变化并非越大越好,有可能 ΔE 变化越大果汁饮料褐变程度越大.相对于添加稳定剂的试验号来说, ΔE 变化越小越好.

3 结论

本文研究了苹果-刺梨混合果汁饮料生产工艺中的均质条件和稳定剂对其稳定性的影响.结果表明,在果汁含量 20%,甜味剂含量 12 g/100 mL,酸味剂含量 0.5 g/100 mL 时,稳定剂最佳配比为:0.05% 果胶,0.05% CMC,0.15% 黄原胶.在均质压力为 25 MPa,均质温度为 60 °C 的条件下进行 1 次均质,90 °C 的水浴中杀菌 10 min,得到的苹果-刺梨混合汁饮料产品具有良好的苹果和刺梨的独特风味,质地均匀,口感爽滑,呈现柔和的淡黄色,同时合理利用了果渣.

参考文献:

- [1] 董李娜,潘苏华.刺梨的研究进展[J].江苏中医药,2007,39(8):78.
- [2] 赵光远,李娜.影响苹果汁浑浊稳定性的因素[J].食品科技,2007(7):147.
- [3] 刘汉成,易发海.我国苹果的比较优势与国际竞争力分析[J].农产品贸易,2002,30:45.
- [4] Sapers G M, Douglas Jr F W. Measurement of enzymatic browning at cut surfaces and in juice of raw apple and pear fruits[J]. J Food Sci, 1987, 52(5): 1258.
- [5] 潘丽军,陈锦权.实验设计与数据处理[M].吉林:东北大学出版社,2008.
- [6] 刘忆冬,颜海燕,杨松峰.复合果汁饮料的生产工艺研究[J].现代食品科技,2008(4):367.

南极磷虾甲壳素的脱色工艺研究

陈雪姣¹, 姜启兴¹, 许艳顺¹, 崔阳阳¹, 刘富俊², 肖成立², 夏文水¹

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122;

2. 辽宁省大连海洋渔业集团公司, 辽宁 大连 116113)

摘要:以甲壳素的白度为指标,研究了南极磷虾甲壳素的脱色条件,通过对比实验,确定 H_2O_2 为脱色剂;通过单因素试验和正交试验,确定最佳脱色工艺条件为: H_2O_2 浓度 12%,脱色温度 65 °C,脱色时间 3 h, pH = 8 ~ 9,在该条件下,南极磷虾甲壳素脱色后的白度可达到 70.

关键词:南极磷虾壳;甲壳素;脱色;白度

中图分类号:TS254.9 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.005

Study on the decolorization technology of chitin from Antarctic krill shell

CHEN Xue-jiao¹, JIANG Qi-xing¹, XU Yan-shun¹, CUI Yang-yang¹,
LIU Fu-jun², XIAO Cheng-li², XIA Wen-shui¹

(1. College of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Dalian Ocean Fishery Group of Liaoning Province, Dalian 116113, China)

Abstract: The decolorization conditions of chitin from Antarctic krill shells were studied. According to the comparative experiment, H_2O_2 was defined as the decolorant. Through single-factor and orthogonal experiment, the optimum decolorization conditions of chitin from Antarctic krill were as follows: the concentration of H_2O_2 was 12%, the decolorization temperature was 65 °C, processing time was 3 h and pH was in 8 ~ 9. The proven experiment showed that whiteness after decolorization of chitin from Antarctic krill shells could reach above 70 under this condition.

Key words: Antarctic krill shell; chitin; decolorization; whiteness

0 引言

南极磷虾又名大磷虾或南极大磷虾,隶属节肢动物门、甲壳纲、磷虾目,是地球上数量最大、繁衍最成功的单种生物资源之一。南极磷虾资源蕴藏量巨大,估计在 6.5 亿 ~ 10 亿吨之间,是可供人类利用的海洋动物资源中蕴藏量较为丰富的一种,也是人类重要的后备蛋白库^[1]。南极磷虾营养丰富,除

富含蛋白外,还含有人体所必需的全部氨基酸,富含亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸,以及钙、钾、镁、镉等多种矿物质元素,且类胡萝卜素含量较高^[2-3]。目前,国内研究更多关注南极磷虾肉中蛋白、脂溶性成分等的分离和应用^[4],国外的研究则侧重于对酶、脂肪酸等的分离纯化及其性质分析^[5-6],对南极磷虾壳资源的研究较少。而虾壳大多作为废弃物丢弃,亟需有效的开发利用,例如虾壳

收稿日期:2014-04-11

基金项目:“十二五”国家“863”计划项目(2011AA090801)

作者简介:陈雪姣(1988—),女,安徽省蚌埠市人,江南大学硕士研究生,主要研究方向为食品加工与保藏。

通信作者:夏文水(1958—),男,江苏省高淳县人,江南大学教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为食品加工与保藏。

中的甲壳素.

甲壳素(Chitin)又名几丁质、甲壳质,学名为(1,4)-2-乙酰氨基-2-脱氧- β -D-葡萄糖($C_8H_{13}NO_5$)_n.每年地球上甲壳素的生物合成量约为100亿吨,是产量仅次于纤维素的第二大可再生资源,也是除蛋白质外数量最大的含氮天然有机高分子^[7].甲壳素及其衍生物性能独特、组织相容性良好、可生物降解,其开发应用已涉及工业、农业、国防、化工、环保、食品、医药、美容、纺织等诸多领域^[8].本文拟以南极磷虾壳为原料,经微生物发酵脱除蛋白质和钙后得到颜色较深的粗甲壳素,然后对其脱色工艺进行研究,以期获得更具应用和商业价值的高白度南极磷虾甲壳素.

1 材料与方法

1.1 材料与设备

材料:南极磷虾冷冻虾砖,由辽宁省大连海洋渔业集团提供,于-18℃的低温冰箱中贮藏备用;南极磷虾加工下脚料,虾砖在4℃解冻,经采肉机重复采肉3次后得到虾壳,置-18℃低温下贮藏备用.枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*),江南大学食品学院食品加工与配料中心实验室保藏菌种;HCl, NaOH, H₂O₂, KMnO₄, CH₃COOOH, NaClO, 草酸,均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司.

设备:FE20 pH计,梅特勒-托利多(上海)有限公司产;YCR-18采肉机,上海华夏渔业机械仪器工贸公司产;JB 5374-91电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产;电热恒温鼓风干燥箱,上海跃进医疗器械厂产;DKZ-450B型电热恒温振荡水槽,上海森信实验仪器有限公司产;ZK-82BB真空干燥箱,上海实验仪器厂有限公司产;CR-400便携式彩色色差计,柯尼卡美能达(日本)控股株式会社产.

1.2 实验方法

1.2.1 南极磷虾粗甲壳素的提取工艺流程 南极磷虾下脚料在枯草芽孢杆菌产酶脱蛋白和植物乳杆菌产酸脱钙发酵后,经过0.8 mol·L⁻¹的HCl和NaOH脱去发酵残渣残留的蛋白质和碳酸钙,多次水洗过滤,滤渣真空干燥,得到南极磷虾粗甲壳素.

1.2.2 南极磷虾甲壳素脱色剂的选择 准确称取南极磷虾粗甲壳素5 g于100 mL的三角锥形瓶中,分别选择10%和20%的H₂O₂,1%和3%的KMnO₄,3%的CH₃COOOH,5%和10%的NaClO作

脱色剂,以1:15(W/V)的料液比在50℃恒温水浴4 h后过滤,用水将滤渣冲洗干净,其中用KMnO₄脱色的甲壳素冲洗前需要用草酸进行中和,然后滤渣在50℃下真空干燥.采用彩色色差计测定粗甲壳素的白度,白度值越高说明脱色效果越好.每个样品平行测定3次.

1.2.3 南极磷虾甲壳素脱色的单因素试验^[9] 以脱色效果(甲壳素白度)为指标,研究H₂O₂的浓度、脱色温度、脱色时间和pH 4个因素对粗甲壳素脱色效果的影响.

1)分别配制4%,8%,12%,16%,20%的H₂O₂,准确称取5 g粗甲壳素放入100 mL的三角瓶中,1:15的料液比,pH为8~9,65℃下脱色3 h,双层纱布过滤、水洗,重复3次,在50℃下真空干燥后测定其白度;每个样品平行测定3次,考察不同H₂O₂浓度对脱色效果的影响.

2)准确称取5 g粗甲壳素放入100 mL的三角瓶中,12%的H₂O₂,1:15的料液比,pH为8~9,分别于35℃,45℃,55℃,65℃,75℃下脱色3 h,按照上述步骤测定其白度,考察不同温度对脱色效果的影响.

3)准确称取5 g粗甲壳素放入100 mL的三角瓶中,12%的H₂O₂,1:15的料液比,pH分别为4~5,5~6,6~7,7~8,8~9,65℃下脱色3 h,按照上述步骤测定其白度,考察不同pH对脱色效果的影响.

4)准确称取5 g粗甲壳素放入100 mL的三角瓶中,12%的H₂O₂,1:15料液比,pH为8~9,65℃下分别脱色1 h,2 h,3 h,4 h,5 h,按照上述步骤测定其白度,考察不同脱色时间对脱色效果的影响.

1.2.4 南极磷虾甲壳素脱色工艺优化 选用3水平3因素进行正交试验L₉(3⁴),以甲壳素白度为指标,得到最佳脱色工艺条件,并进行方差分析和验证实验.

1.2.5 白度测定 用彩色色差计测定干燥后所得的甲壳素样品的白度(W_H).以标准白板为基准($a=0.03, b=0.01, L=91.23$),其中:L表示亮度,L值越大亮度越大;a表示有色物质的红绿偏向,正值

表1 正交试验因素水平表

水平	因素		
	H ₂ O ₂ 浓度 A/%	脱色温度 B/℃	脱色时间 C/h
1	8	45	2
2	12	55	3
3	16	65	4

越大偏向红色的程度越大,负值越大偏向绿色的程度越大;b表示有色物质的黄蓝偏向,正值越大偏向黄色的程度越大,负值越大偏向蓝色的程度越大.甲壳素样品的白度根据亨特白度公式^[10] $W_H = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2}$ 进行计算.

2 结果与分析

2.1 脱色剂的选择

参考相关文献^[11-12],对4种常见的脱色剂(H_2O_2 , $KMnO_4$, CH_3COOOH , $NaClO$)及浓度进行比较选择,脱色效果见表2.

由表2可见,在这常见的4种脱色剂7种浓度中,以15% H_2O_2 脱色效果最好,所得甲壳素白度最高.虽然 $KMnO_4$ 氧化能力强,但是 MnO_4^- 体积较大,难以进入甲壳素分子中,因此脱色效果差. H_2O_2 和 CH_3COOOH 都是以 O_2^{2-} 形式起作用,但 CH_3COOOH 价格较高,分解时产生浓烈的乙酸气味,污染水及空气;而 H_2O_2 价格低廉,分解后的产物是水.故本实验选用 H_2O_2 作脱色剂进行后续研究.

表2 不同脱色剂与浓度下甲壳素的脱色效果

脱色剂	浓度/%	白度
H_2O_2	10	60.7 ± 0.5
	15	62.1 ± 0.5
$KMnO_4$	1	31.0 ± 0.8
	3	33.9 ± 0.5
CH_3COOOH	3	50.4 ± 0.5
$NaClO$	5	21.8 ± 0.4
	10	28.5 ± 0.5

2.2 南极磷虾甲壳素脱色的单因素影响

2.2.1 H_2O_2 浓度对脱色效果的影响 H_2O_2 浓度对脱色效果的影响见图1.

由图1可见, H_2O_2 浓度从4% ~ 12%, 随着 H_2O_2 浓度的不断增加,甲壳素白度逐渐提高,脱色效果明显,表明脱色效果与 H_2O_2 浓度呈正相关;在 H_2O_2 浓度 > 12% 后甲壳素白度基本稳定.产生这种现象的原因可能是由于 O_2^{2-} 等离子间的反应接近饱和, H_2O_2 浓度的增加不会再影响脱色效果.鉴于 H_2O_2 浓度太高会增加脱色成本,因而,选择12%的 H_2O_2 浓度进行脱色较为合适.

2.2.2 脱色温度对脱色效果的影响 脱色温度对脱色效果的影响见图2.

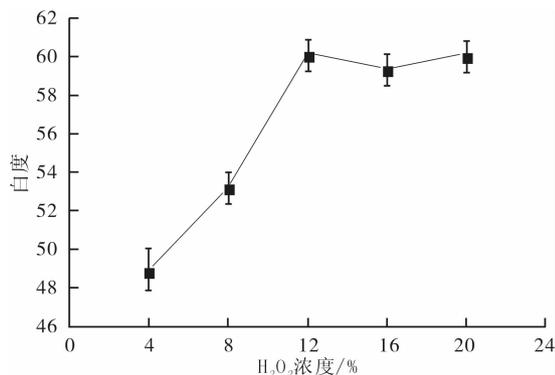


图1 H_2O_2 浓度对脱色效果的影响

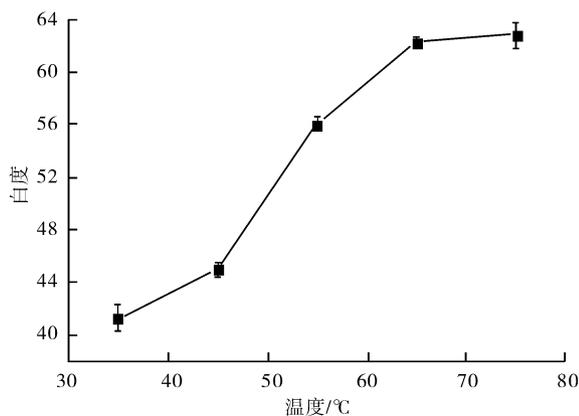
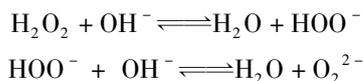


图2 脱色温度对脱色效果的影响

由图2可见,在35 ~ 45 °C时脱色效果变化不明显,这可能是由于在低温环境下, H_2O_2 反应速度较慢;而在45 °C以上时,随着温度升高, H_2O_2 的分解反应速度加快,产生大量气体,脱色效果快速提高.65 °C以后再提高温度对脱色效果的提高效应不明显.这可能是由于温度过高时, H_2O_2 受热分解加剧,从而降低了 H_2O_2 的浓度,与温度提高反应速度的效应相抵消,从而反应速度基本保持不变.从生产实际考虑,可选65 °C为适宜脱色的温度.

2.2.3 pH 对脱色效果的影响 pH对脱色效果的影响见图3.

由图3可见,pH值也显著影响南极磷虾甲壳素的脱色效果.pH在4 ~ 9之间,脱色效果较为明显,且一直呈线性增加的趋势,这可能是因 H_2O_2 分解反应^[12]为



碱性环境能够促进 H_2O_2 的分解,加快 O_2^{2-} 的产生速度.因此,南极磷虾甲壳素的脱色宜在碱性

条件下进行.而且碱性环境也有利于去除粗甲壳素残留的蛋白质,所以 pH 选择 8~9,不另作正交试验的考察因素.

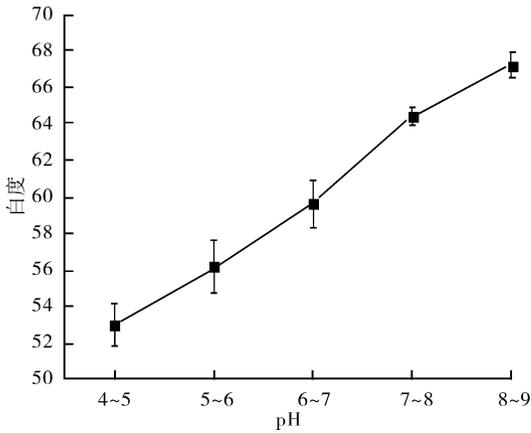


图3 pH对脱色效果的影响

2.2.4 脱色时间对脱色效果的影响

脱色时间对脱色效果的影响见图4.

由图4可见,在脱色初始阶段,随着脱色时间的延长,甲壳素白度快速增大,脱色效果显著提高,反应明显,当脱色时间达到3h后,甲壳素白度变化不大,表明脱色反应已基本完成,再延长脱色时间也无显著变化.

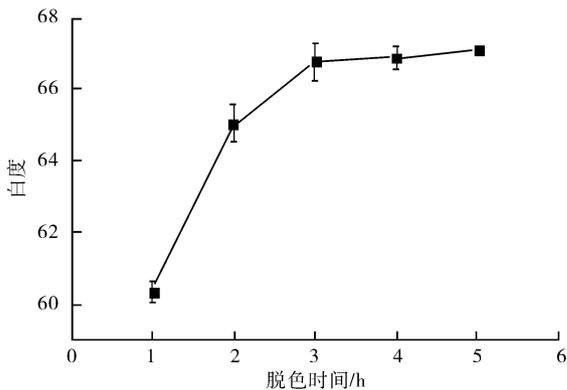


图4 脱色时间对脱色效果的影响

2.3 正交试验优化南极磷虾甲壳素脱色工艺

正交试验结果见表3.方差分析结果见表4.

由表3可见,各因素对磷虾甲壳素脱色效果的影响由大至小排序依次为: H_2O_2 浓度、脱色时间和脱色温度.优化得到的甲壳素脱色工艺条件为 $A_3B_3C_2$ 即 H_2O_2 浓度16%,脱色温度为 $65\text{ }^\circ\text{C}$,脱色时间为3h.为验证该工艺的准确性,进行了2次重复验证试验,白度分别为73.6和73.0,说明试验结果真实准确.但是考虑到工业成本,在选择 H_2O_2 浓

度为12%而其他条件不变时,甲壳素白度也能达到70左右,所以最终脱色工艺条件确定为 H_2O_2 浓度12%,脱色温度为 $65\text{ }^\circ\text{C}$,pH为8~9,脱色时间为3h.

表3 正交试验结果

试验号	因素			白度
	A	B	C	
1	1	1	1	37.5
2	1	2	2	46.8
3	1	3	3	40.3
4	2	1	2	56.7
5	2	2	3	44.2
6	2	3	1	64.6
7	3	1	3	50.4
8	3	2	1	63.1
9	3	3	2	72.9
k_1	41.53	48.20	55.07	
k_2	55.17	51.37	58.80	
k_3	62.13	59.27	44.97	
R	20.60	11.07	13.83	

表4的方差分析表明,在 $F_{0.05}(2,2) = 19$ 显著性水平下,这3个因素对脱色效果的影响都显著,且相对而言, H_2O_2 浓度对脱色效果影响最明显.所以 H_2O_2 浓度的控制是提高发酵脱蛋白的一个关键因素.

表4 方差分析

项目	偏差平方和	自由度	F比	$F_{0.05}(2,2)$ 临界值	$F_{0.01}(2,2)$ 临界值	显著性
H_2O_2 浓度	658.762	2	69.769	19.000	99.000	*
脱色温度	194.909	2	20.643	19.000	99.000	*
脱色时间	307.309	2	32.547	19.000	99.000	*
误差	9.44	2				

3 结论

本文以甲壳素的白度为指标,研究了南极磷虾甲壳素的脱色条件,通过对 H_2O_2 , $KMnO_4$, $NaClO$, CH_3COOOH 这4种脱色剂的脱色效果进行比较,选用 H_2O_2 作为南极磷虾粗甲壳素的脱色剂.

在单因素试验的基础上,通过正交试验优化了 H_2O_2 脱色的工艺条件.结果表明各因素影响南极磷虾粗甲壳素脱色效果由大至小依次为: H_2O_2 浓度、脱色时间和脱色温度.优化后的脱色工艺条件为: H_2O_2 浓度12%,脱色温度为 $65\text{ }^\circ\text{C}$,pH=8~9,脱色

(下转第34页)

以卤代糖为原料合成糖苷的方法述评

张改红, 王楠, 白冰, 杨静

(郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:综述了近年来以溴代糖、氟代糖和碘代糖作为糖基供体合成糖苷的方法. 指出这些卤代糖作为糖基供体的优点是合成的产物为纯净的O-苷, 收率高, 主要为 β -构型; 缺点是反应条件苛刻, 需严格无水、避光条件, 重金属盐催化剂比较贵而且有很大的毒性, 溴代糖在常温下极不稳定, 不易长期保存. 因此, 探索新型的卤代糖衍生物、实现立体专一性的合成糖苷, 探索绿色合成条件、避免使用重金属盐, 是该领域未来研究的方向.

关键词:卤代糖; 糖苷合成; 重金属盐

中图分类号:TS264.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.006

Review of the synthesis of glycosides from glycosyl halide

ZHANG Gai-hong, WANG Nan, BAI Bing, YANG Jing

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

Abstract: The recent advances in organic synthesis of glucosides from glycosyl halide were summarized, including glycosyl bromide, glycosyl fluoride, glycosyl iodide as glycosyl donors. The advantage of these glycosyl halides as glycosyl donor is that the synthetic product is pure O-glycosides with high yield, mainly for the β -configuration. The disadvantage is the harsh reaction conditions, which are strictly anhydrous, light avoiding, expensive heavy metal salt catalyst and great toxicity. Glycosyl bromide was unstable at room temperature and not easy for long-term preservation. Thus, exploration of novel glycosyl halide derivatives, implementation of stereo-selectively synthesis, exploration of green synthesis conditions, and avoiding the use of heavy metal salts, are the future research direction in this field.

Key words: glycosyl halide; glycosides synthesis; heavy metal salt

0 引言

糖苷类化合物是植物在生长过程中形成的一种次级代谢产物, 具有良好的稳定性, 在一定条件下可以释放出相应的香味化合物^[1]. 糖苷类潜香物质的研究是开发性质稳定、能够在使用过程中均匀释放香气的新型香料的重要途径. 此类潜香物质的应用能够在加工、储存过程中避免香味物质的挥发, 但在加热条件下能发生裂解, 释放出相应的致

香成分, 从而达到稳定释放香气的目的, 适用于高温加工工艺生产, 在食品、烟草和医药等领域具有良好的应用前景.

糖苷是指具有环状结构的醛糖或酮糖中的半缩醛羟基被烷氧基或酚氧基所取代的产物. 糖苷键分裂后产生的糖部分称为糖基, 非糖部分则称为配基, 如果配基部分也是糖, 那样的糖苷一般称为低聚糖或寡糖^[2]. 目前糖苷的合成主要有化学法、酶法以及两者联用, 以化学法为主. 糖自身结构中存

收稿日期: 2014-02-17

基金项目: 河南省教育厅科学技术重点研究项目(14A550017); 郑州轻工业学院博士基金项目(2010BSJJ018)

作者简介: 张改红(1980—), 女, 河南省郑州市人, 郑州轻工业学院讲师, 博士, 主要研究方向为烟草化学.

在着多个羟基(—OH)和缩醛结构,使得糖苷合成具有复杂性,特别是葡萄糖六元环上各个基团的多样性,大大增加了其化学合成的难度.目前一般采用保护-偶联-脱保护的策略来合成糖苷类化合物^[3].糖苷合成中,主要采用卤代糖、硫代糖、三氯乙酰亚胺酯糖、全乙酰糖、原酸酯糖、葡萄糖、磷酸酯糖等作为糖基供体,本文主要针对卤代糖在合成糖苷衍生物方面的新方法进行评述.

1 溴代糖作为糖基供体

在糖苷的合成中,使糖基具有足够的反应活性是糖化学工作者首先遇到的问题.1901年,W. Koenigs等^[4]通过乙酰化的糖和溴化氢反应,生成了乙酰溴代糖.—Br具有良好的离去性能,因此在糖的异头碳上产生了C⁺,使得糖基具有足够的活性,并且由于邻基参与,很容易和其他的亲核试剂发生S_N2亲核取代反应,生成β-糖苷以及寡糖.此方法对糖类化合物具有较好的通用性,被称为Koenigs-Knorr方法,由于常用催化剂为Ag₂CO₃或Ag₂O,也被称为银盐法.典型的催化剂有Ag₂CO₃, AgOTf, AgClO₄, Ag₂O, CF₃CO₂Ag和Hg(CN)₂^[5-10].这些催化剂在反应中起着除酸的作用,为了避免使用上述重金属盐催化剂,有时采用路易斯酸(InCl₃^[11], FeCl₃^[12]).反应中的水通常被分子筛和干燥剂除去.该法经过几十年的发展,现已成为化学合成糖苷类化合物的经典方法之一.

S. J. Ma等^[13]为了研究从茶叶中分离出来的天然产物结构,合成了7,8-二氢-α-紫罗兰醇-β-D-吡喃葡萄糖苷,具体反应过程(见图1)如下: Hg(CN)₂为催化剂,4Å分子筛为载体,无水CH₃CN和N₂条件下,室温反应36 h,得2组非对映异构体,总收率42%.通过柱层析将2组非对映异构体分离,之后经NH₃/CH₃OH脱去乙酰基得到最终产物.

J. Mastelić等^[8]用Koenigs-Knorr-Zemplén法合成了天然存在的苜蓿醇(9a)、薄荷醇(±)(9b)、龙脑

苜蓿醇(+)(9c)、百里香酚(9d)、香芹酚(9e)、丁香酚(9f)的糖苷衍生物(见图2),收率19.5%~52.2%.通过一维和二维同核和异核间的¹H NMR和¹³C NMR谱图确定所合成的糖苷为β-D-构型,另外通过β-糖苷酶的水解进一步证实了所合成的糖苷为β-构型.中间体四乙酰基β-D-吡喃葡萄糖苷可通过GC-MS分析.薄荷醇四乙酰基β-D-吡喃葡萄糖苷的一对非对映异构体可通过HP-101柱分离.醇和酚作原料时用新鲜制备的、干燥的粉末状Ag₂O作催化剂,酚钠作原料时采用Ag₂CO₃作催化剂.用粉状的无水CaSO₄作吸水剂,用乙醚作溶剂(丁香酚钠用THF作溶剂),避光条件下搅拌反应24 h.

S. A. Patov等^[14]为了研究单萜烯醇糖苷的生理活性,用Koenigs-Knorr法以Ag₂CO₃为催化剂合成了龙脑苜蓿醇、马鞭草烯醇、桃金娘烯醇糖苷(见图3),收率35%~58%.所合成的单萜烯醇糖苷与天然存在的糖苷具有相同的结构.反应结束后,未反应的单萜通过水蒸气蒸馏除去.产物通过硅胶柱层析并不断改变CHCl₃/CH₃OH比例来纯化.产物收率低的原因在于醇的位阻较大.

黎其万等^[15]以Ag₂CO₃为催化剂,以THF为溶

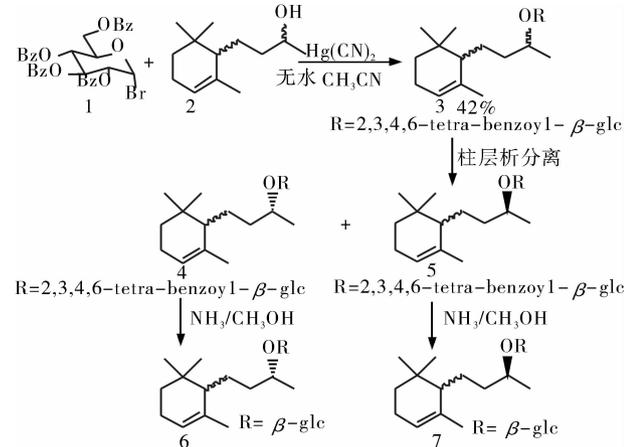


图1 7,8-二氢-α-紫罗兰醇-β-D-吡喃葡萄糖苷合成路线

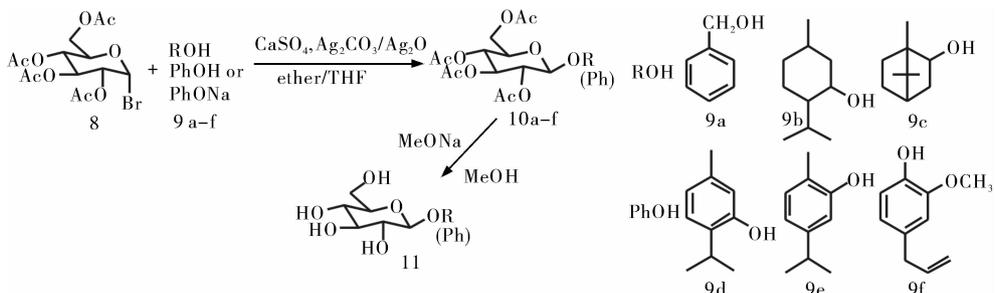


图2 Koenigs-Knorr-Zemplén法合成天然糖苷衍生物路线

剂,麦芽酚与 α -溴代四乙酰化葡萄糖经糖苷化、脱乙酰基得麦芽酚-3-O- β -D-葡萄糖苷(见图4),收率60.8%,产物无需纯化即可进行脱乙酰化反应.通过IR,¹HNMR和¹³CNMR确证葡萄糖苷为 β -构型.由于麦芽酚羟基有一定酸性,黎其万等^[15]又尝试以KOH催化糖甙化反应也获得成功,但收率较低(36.2%).

解万翠^[16]选择适宜的糖基和糖苷配基,采用改进的Koenigs-Knorr法(以新制备的加硅胶担待剂的银盐作催化剂)化学合成了香叶基- β -D-吡喃葡萄糖苷、薄荷基- β -D-吡喃葡萄糖苷、顺-3-己烯基- β -D-吡喃葡萄糖苷(见图5),收率中等.以香叶基- β -D-吡喃葡萄糖苷的合成例,反应收率为51%,脱乙酰化一步的收率为92%.

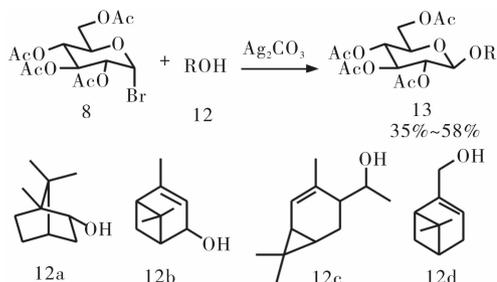


图3 单萜烯醇糖苷的合成路线

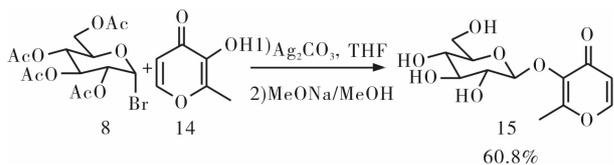


图4 麦芽酚-3-O- β -D-葡萄糖苷合成路线

B. W. Xin等^[17]利用6-(4-卤代苯基)-3(2H)-吡嗪酮的银盐与2,3,4,6-四-O-乙酰基-1-溴-1-脱氧- α -D-吡喃葡萄糖发生Koenigs-Knorr反应,合成了3-O-(2,3,4,6-四-O-乙酰基- β -D-吡喃葡萄糖-1-基)-6-(4-卤代苯基)吡嗪,再用干燥的氨气在0~-5℃下处理脱乙酰基保护基得相应的3-O-(β -D-吡喃葡萄糖-1-基)-6-(4-卤代苯基)吡嗪(见图6).

谢子朋等^[18]为合成酚酸取代的葡萄糖苷类天然产物,用Koenigs-Knorr法,以溴代葡萄糖为起始物,与4-苄氧基苄醇反应成苷,脱乙酰基后,得到4-苄氧基苄醇- β -D-吡喃葡萄糖苷(见图7).通过优化工艺减低了Ag₂CO₃的用量(反应物的10倍量),也得到了较好的产率(69%).

T. Murakami等^[19]发现了反应条件相对温和、价格低廉、毒性小的有效方法来制备1,2-反式- β -吡喃葡萄糖苷(见图8).从葡萄糖五苯甲酸酯出发经由异头碳卤化物(碘化物、溴化物),分离或原位生成后(全苯甲酸酯化的葡萄糖与三甲基卤化硅

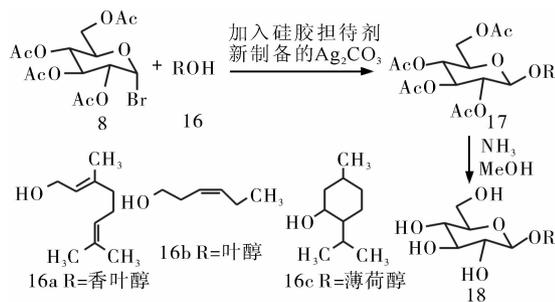


图5 改进的Koenigs-Knorr法合成糖苷路线

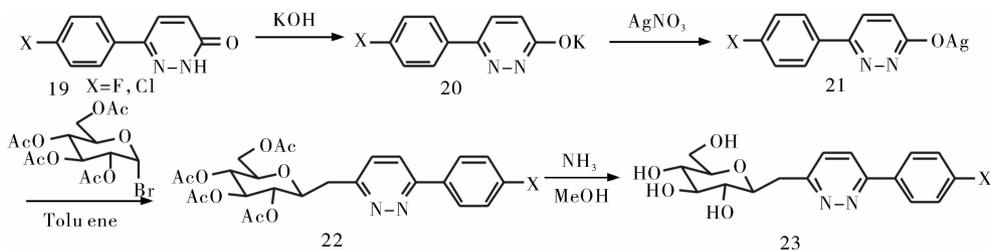


图6 3-O-(β -D-吡喃葡萄糖-1-基)-6-(4-卤代苯基)吡嗪合成路线

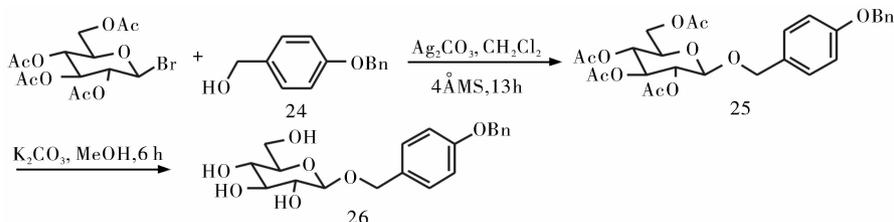
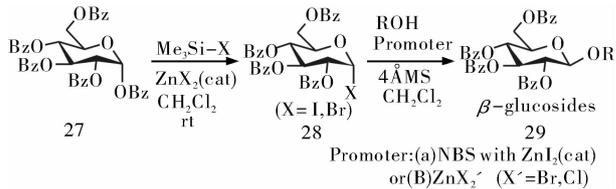


图7 4-苄氧基苄醇- β -D-吡喃葡萄糖苷合成路线

图8 1,2-反式- β -吡喃葡萄糖苷合成路线

反应),再在 ZnX_2 ($X = Cl, Br$) 或 $NBS-ZnI_2$ 催化下与各种醇反应,高收率生成相应的 1,2-反式- β -葡萄糖苷.这表明上述催化剂有可能取代银盐和汞盐用于 Koenigs-Knorr 糖苷化反应中.

溴代糖作为糖基供体,通常会有邻位乙酰基参与反应,生成 1,2-反式产物,立体选择性较好.对于烷基醇的糖苷化反应多用重金属(银盐或汞盐)、路易斯酸等作为催化剂.对于酚类的糖苷化反应则多用相转移催化法,使用相转移催化剂 Bu_4NBr 等.

2 氟代糖作为糖基供体

T. Mukaiyama 等^[20]在 1981 年首次引入氟代糖作为糖基供体,用 $SnCl_2-AgClO_4$ 作为亲氟催化剂制备糖苷.与其他的卤代糖相比,氟代糖作为糖基供体的显著优点是具有较好的热稳定性和化学稳定性,可通过蒸馏甚至是硅胶柱层析的方法进行提纯.氟代糖可以很方便地由其他糖基供体制得,如硫代糖^[21].通常活化氟代糖的催化剂有 $SnCl_2-AgClO_4$, $Hf(OTf)_4$ ^[22]等.

K. Sasaki 等^[23]报道葡萄糖吡喃氟化物和醇在含有质子酸的离子液体中,在温和的条件下反应生成相应的糖苷,收率中等到高.糖苷化的立体选择性受到离子液体的严重影响,其中以 1-正己基-3-甲基咪唑三氟甲磺酸盐($C_6mim[OTf]$)和 1-(3-氰丙基)-3-甲基咪唑三氟甲磺酰亚胺盐($CNC_3mim[N Tf_2]$)为反应介质时,主要得到 β -构型的产物(见图 9).

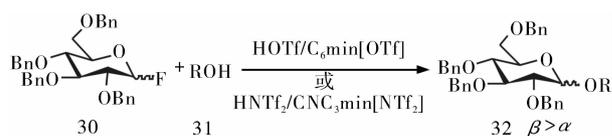
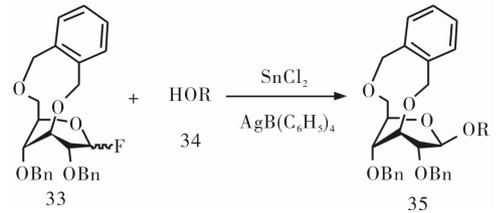


图9 氟代糖和醇在含质子酸的离子液体中合成糖苷

Y. Okada 等^[24]报道了一个不依赖邻基参与的完全 β -选择性的糖苷化反应,设计并合成了 3-O 和 6-O 之间的桥被锁定在轴向位置上的糖基氟化

物,该氟化物可以高效地和各种醇在 $SnCl_2-AgB(C_6F_5)_4$ 催化体系中进行 β -糖苷化反应(见图 10).此反应中真正的催化剂可能是原位产生的 $SnB(C_6F_5)_4Cl$. 100% 的 β -选择性是由于在原位产生的 $HB(C_6F_5)_4$ 的催化下, α -异构体异构化为 β -异构体.这种新颖的糖基化反应为糖苷的设计合成提供了一个新思路.

图10 完全 β -选择性的糖苷化反应

氟代糖虽有较好的热稳定性和化学稳定性,但其活性通常较低,需要使用一些亲氟催化剂来催化反应的发生,如 $SnCl_4-Ag(OTf)_4$, $TMSOTf$ 等.鉴于氟代糖具有一定的稳定性,其也被用于合成一些复杂产物.

3 碘代糖作为糖基供体

通常认为碘代糖极不稳定,不适合用作糖基供体,但是近来有研究报道用碘代糖作为糖基供体^[25].碘代糖比相应的溴代糖和氯代糖有更高的反应活性并且在中性条件下更易发生亲核取代反应^[26],同时碘代糖在反应时间、反应效率和立体选择性方面也有很多优势^[27].

J. A. Perrie 等^[28]报道碘代糖与一系列一级和二级醇的糖苷化反应:先用 NIS 和 I_2 作催化剂,0~20 $^{\circ}C$ 之后用三甲基硅烷三氟甲磺酸酯作催化剂, β -糖苷收率 60%~83% (见图 11).各种非重金属盐也能有效地催化反应,但与不太活泼的二级醇反应生成大量的 α -产物.

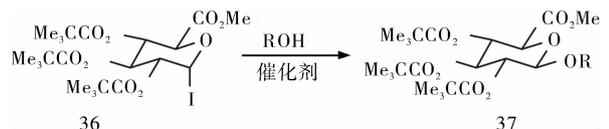


图11 碘代糖与一级和二级醇的糖苷化反应

Y. J. Ko 等^[29]制备出新型的 2-O-碘乙酰基吡喃葡萄糖碘化物作为糖基供体,此碘化物可有效地与醇反应生成 2-O-碘乙酰基-1,2-反式糖苷,收率和立体选择性均较好(见图 12).2-O-碘

乙酰基可被硫脲选择性脱去而不影响其他的保护基和异头碳的构型,高收率生成2-羟基-1,2-反式糖苷。

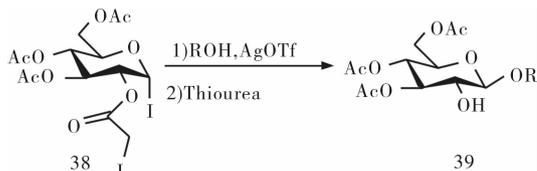


图12 2-O-碘乙酰基吡喃葡萄糖碘化物
为糖基合成糖苷

碘代糖作为糖基供体的报道相对较少,但是碘代糖活性较高,所以反应条件通常更加温和,对于一些含有敏感基团的底物可以选用碘代糖.并且碘代糖上羟基的保护基不同时,碘代糖的活性也会有所差别,因此可以通过选择不同的保护基团调控碘代糖的活性。

4 展望

综上所述,卤代糖作为糖基供体在糖苷合成过程中发挥着重要作用,尤其是氟代糖和碘代糖的应用扩大了卤代糖的应用范围.卤代糖作为糖基供体的优点是合成的产物为纯净的O-苷,收率高,主要为 β -构型;缺点是反应条件苛刻,需严格无水、避光条件,重金属盐催化剂比较贵而且有很大的毒性,溴代糖在常温下极不稳定,不易长期保存.结合近几年的文献报道可以看到,这类研究逐渐向环境友好的方向发展.今后的研究目标为:1)探索新型的卤代糖衍生物,实现产物立体专一性的合成;2)探索更加绿色的反应条件,尽量避免重金属盐的使用。

参考文献:

- [1] 谢剑平.烟草香料技术原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [2] 吴东儒.糖类的生物化学[M].北京:高等教育出版社,1987.
- [3] Kaeothip S, Yasomane J P, Demchenko A V. Glycosidation of thioglycosides in the presence of bromine: mechanism, reactivity, and stereoselectivity [J]. J Org Chem, 2012, 77: 291.
- [4] Koenigs W, Knorr E. Ueber einige derivate des traubenzuckers und der galactose [J]. Chem Ber, 1901, 34: 957.
- [5] 孟广宇, 曾世通, 刘珊, 等. β -紫罗兰醇- β -D-葡萄糖苷的合成及热解性质 [J]. 食品科学, 2012, 33: 21.
- [6] Yajima A, Oono Y, Nakagawa R, et al. A simple synthesis

of four stereoisomers of roseoside and their inhibitory activity on leukotriene release from mice bone marrow-derived cultured mast cells [J]. Bioorg Med Chem, 2009, 17: 189.

- [7] Turnbull W B, Harrison J A, Kartha K P R, et al. Observations on chemical and enzymatic approaches to α -2,3-sialylated octyl β -lactoside [J]. Tetrahedron, 2002, 58: 3207.
- [8] Mastelić J, Jerković I, Vinković M, et al. Synthesis of selected naturally occurring glucosides of volatile compounds: Their chromatographic and spectroscopic properties [J]. Croat Chem Acta, 2004, 77: 491.
- [9] Xue J L, Cecioni S, He L, et al. Variations on the SnCl_4 and $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{Ag}$ -promoted glycosidation of sugar acetates: a direct, versatile and apparently simple method with either α or β stereocontrol [J]. Carbohydr Res, 2009, 344: 1646.
- [10] Maslov M A, Morozova N G, Chizhik E I, et al. Synthesis and delivery activity of new cationic cholesteryl glucosides [J]. Carbohydr Res, 2010, 345: 2438.
- [11] Mukherjee D, Ray P K, Chowdhury U S. Synthesis of glycosides via indium(III) chloride mediated activation of glycosyl halide in neutral condition [J]. Tetrahedron, 2001, 57: 7701.
- [12] Koto S, Hirooka M, Tashiro T, et al. Simple preparations of alkyl and cycloalkyl α -glycosides of maltose, cellobiose, and lactose [J]. Carbohydr Res, 2004, 339: 2415.
- [13] Ma S J, Watanabe N, Yagi A, et al. The (3R,9R)-3-hydroxy-7,8-dihydro- β -ionol disaccharide glycoside is an aroma precursor in tea leaves [J]. Phytochem, 2001, 56: 819.
- [14] Patov S A, Puneov V V, Kuchin A V, et al. Synthesis of certain monoterpene glycosides [J]. Chem Nat Compd, 2006, 42: 431.
- [15] 黎其万, 黄唯平. 麦芽酚及麦芽酚-3-O- β -D-葡萄糖苷的合成 [J]. 合成化学, 2004, 12: 391.
- [16] 解万翠. 糖苷类香料前体合成及其应用研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2004.
- [17] Xin B W, Sun C J, Cao X R, et al. The Synthesis and Characterization of 3-O-(β -D-glucopyranos-1-yl)-6-(4-halophenyl) pyridazines [J]. Chin J Synthetic Chem (合成化学), 2003, 10(4): 356.
- [18] 谢予朋, 赵毅民. (4-苄氧基苄基)-2,3-二-O-苄基- β -D-吡喃葡萄糖苷的合成 [J]. 化学通报, 2006(2): 119.
- [19] Murakami T, Sato Y, Shibakami M. Stereoselective glycosylations using benzoylated glycosyl halides with inexpensive promoters [J]. Carbohydr Res, 2008, 343: 1297.
- [20] Mukaiyama T, Murai Y, Shoda S. An efficient method for

烟棒粉碎过筛的应用研究

胡嘉维, 石齐林, 管传莉, 刘刚

(广东省金科再造烟叶有限公司, 广东 汕头 515100)

摘要:针对目前烟草行业存在烟棒运用难、平均使用率低的问题,研究了石油醚提取物含量、水提浸膏品质和致香成分与烟棒粉碎过筛的关系.通过对烟棒样品进行机械粉碎过筛,比较各筛分物的比例及其形态,并结合各筛分物的石油醚提取物含量,将其筛分物合并为15目以上、15—60目、60目以下3段筛分物,保证了各段筛分物品质的均匀性.比较3段筛分物感官评吸质量和GC-MS分析结果,发现15—60目筛分物的品质最好,其次是60目以下的筛分物,两者的品质均好于粉碎未过筛的烟棒样品,可以较好地运用于生产中.

关键词:烟棒粉碎过筛;石油醚提取物;水提浸膏;致香成分

中图分类号:TS49 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.007

Applied research of tobacco rod crushing and screening

HU Jia-wei, SHI Qi-lin, GUAN Chuan-li, LIU Gang

(Guangdong Golden Leaf Technology Development Co., Ltd., Shantou 515100, China)

Abstract: In order to solve the problems such as the difficulty in the utilization of tobacco rods and the lower use rate, the need for more use of the tobacco powder stick. That relationship of petroleum ether extract content, quality of water extract, aroma component and size of tobacco powder were studied. Experiments conducted by mechanically crushing and sieving the tobacco powder stick samples, comparing the proportion of screening material and form, combining with petroleum ether extract content of each substance screening, combining screening to three segments more than 15 projects, 15 to 60 mesh, 60 mesh sieve, each segment to ensure the uniformity of the quality of the screening goods. Then by comparing the three sections of the screening material quality sensory evaluation it was found that the quality of 15 to 60 mesh screening material was the best, followed by 60 mesh screening material, both of which are better than the quality of the tobacco powder stick samples which were not sieved crushed. They may preferably be used in production.

Key words: tobacco rod crushing and screening; petroleum ether extract; water extract; aroma component

0 引言

烟棒由卷烟生产中产生的烟草粉末及细烟梗(即烟草叶脉)压制形成,具有较高的密度与硬度,

在再利用过程中无法直接使用,需要经过预处理使之还原成为烟草粉末方可进行再利用^[1].

众所周知,烟草行业内存在烟棒运用难、平均使用率低的问题.烟棒作为造纸法再造烟叶的原料

收稿日期:2013-12-20

基金项目:国家烟草专卖局重大专项(110201201022(ZZ-03))

作者简介:胡嘉维(1984—),男,云南省昆明市人,广东省金科再造烟叶有限公司高级工程师,硕士,主要研究方向为烟草工艺.

之一^[2],来源相对复杂,目前在造纸法再造烟叶原料中所占的使用比例较少.为了进一步提高原料利用率,保证产品的稳定性,需要对烟棒的组成进行分析并归类,然后根据各类组分的品质差异决定各组分的用途,从而达到烟棒的精细化应用.目前,国内外对烟棒应用的研究非常少见,现有对烟棒的预处理方式均为使用机械破碎,关平等^[3]将烟棒机械破碎至直径小于10 mm,用于水提浸膏的制备.但是并没有对烟棒里面的物质进行进一步的分类,而烟棒的组成成分复杂,因此需要对烟棒机械粉碎物作进一步筛选,使得烟棒的品质及使用价值得到提高.本文将烟棒破碎后以筛分的方式将构成烟棒各组分分离,对筛分出的各组分进行石油醚提取物、水提浸膏感官评价、致香成分分析等研究,以探索烟棒中各组分的可用性.

1 材料与方法

1.1 原料与药品

原料:不同产地烟棒样品A,烟棒样品B,烟棒样品C,烟棒样品D,烟棒样品E,烟棒样品F,烟棒样品G;基片,广东金叶技术开发有限公司提供.

药品:石油醚(AR级),广东光华科技有限公司产;无水硫酸钠(AR级),北京市法杰德化工试剂公司产;萘(GR),寿光市鲁科化工有限责任公司产;无水乙醇(AR),天津市津东天正精细化学试剂厂产;重蒸二氯甲烷、去离子水.

1.2 设备

索式抽提装置,郑州兴华玻璃仪器厂产;ORB粉碎机,青岛奥贝机械有限公司产;DHG-9246A烘箱,上海恒勤仪器设备有限公司产;BUCHI R-220 Rotavapor 旋转蒸发器,瑞士步琪公司产;JD500-3天平(感量0.001 g),沈阳龙腾电子有限公司产;BE-TH-225DB 恒温恒湿箱,东莞贝尔试验设备有限公司产;QS-5A 实验室专用切丝机,开封市捷利器材厂产;标准筛,青岛精科仪器试剂有限公司产;LK-1000A 手提式粉碎机,新昌县城关红利数控制造厂产;YCT-M6/PN008037 气相色谱/质谱联用仪,北京亚兴泰机电设备有限公司产.

1.3 方法

1.3.1 烟棒筛分 分别取一定量烟棒样品A,B,C,D,E,F,G,投入烟棒粉碎机进行粉碎处理.然后称取烟棒粉碎物500 g,分别过15目、30目、45目、60目、80目筛,取各烟棒机械粉碎物进行筛分并统计结果,收集筛分后的物料待后续实验使用.从中

选择具有代表性的烟棒样品,进行下一组实验.

1.3.2 石油醚提取物的测定^[4-6] 根据行业标准对烟棒样品15目以上、15—30目、30—45目、45—60目、60—80目、80目以下与未筛分粉碎物,称取试样(2.000±0.001)g置于滤纸筒中,用脱脂棉轻轻塞住,放入干燥箱,于(80±1)℃干燥2 h.再将滤纸筒放入索氏提取器的提取管,在接收瓶中加入石油醚试剂至接收瓶容积的2/3处,连接好提取器,接通冷凝水,在(75±1)℃的水浴上加热,控制石油醚的回流次数在6~10次,回流时间8 h.待提取完成后,将接收瓶取下,置于(80±1)℃恒温干燥箱烘干2 h,通过测量接收瓶前后的质量之差,计算试样的石油醚提取物含量^[2].对各目数筛分物进行归类,进行下一组实验.

计算试样中石油醚提取物的质量分数,以2次平行测定的算术平均值为测定结果,精确至0.1%.

1.3.3 水提浸膏品质评价 实验以对应烟棒未筛分粉碎物为对照,取烟棒粉碎筛分物与未筛分粉碎物各200 g,采用常规制备水提浸膏方式,提取3次.将3次的提取液混合,然后使用400目滤网进行过滤,再将滤液浓缩到25 °Bé的水提浸膏,计算得率.取一定量的水提浸膏,涂在基片上,制成实验烟支,恒温恒湿后进行感官评吸^[7],考察不同粒径的烟棒样品对抽吸品质的影响.

1.3.4 致香成分分析 按照烟草行业标准,取烟棒样品各目数筛分物与对应烟棒未筛分粉碎物,使用手提式粉碎机粉碎至60目以下,进行致香成分分析^[8].

称取粉碎过筛后的样品26 g,放入事先折好的纸盒内,在恒温恒湿箱中(平衡条件温度22℃,湿度60%)平衡12~24 h后待检.采用同时蒸馏萃取法,加入350 mL蒸馏水,取30 mL CH₂Cl₂萃取溶剂,萃取时间2 h,水浴温度60℃.萃取液干燥过夜后,从冷冻柜取出,平衡至室温后导入样品浓缩瓶.打开旋转蒸发器电源开关,设置水浴温度为40℃(CH₂Cl₂沸点为39.8℃),待水温升到40℃时打开控制电源开关预热数分钟.将压力值设为560 MPa,旋转速度设为60~65 r/min,打开冷凝水开始浓缩.每个样品准确定量至1 mL后,装入样品瓶中,使用GC-MS仪器分析检测.

气相色谱/质谱条件:进样口温度250℃;程序升温:50℃(1 min) $\xrightarrow{8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 160℃(2 min) $\xrightarrow{8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 260℃(15 min);进样量1 μL;分流比

20:1;传输线温度 280 ℃;电离方式 EI;电离能量 70 eV;离子源温度 230 ℃;四级杆温度 160 ℃;质量范围 35~455 amu;载气 He, 1.0 mL/min;溶剂延迟时间 2 min;使用选择离子和全扫描同时扫描模式,选择的离子:萘 128.

结果采用内标法计算,致香成分含量为内标校正峰面积相对含量,在不考虑仪器信号响应差异的情况下,即相对校正因子为 1 的时候,数值的单位为 $\mu\text{g/g}$.

2 结果与讨论

2.1 烟棒筛分情况

将烟棒样品 A, B, C, D, E, F, G 进行过筛,计算 15 目以上、15—30 目、30—45 目、45—60 目、60—80 目、80 目以下筛分物的百分比,其结果见表 1.

由表 1 可见,不同烟棒经过机械粉碎过 15 目、30 目、45 目、60 目、80 目筛,30—45 目和 45—60 目的筛分物或 30—60 目筛分物含量占据较多.不同的烟棒样品的各目数筛分物的含量有较大差异,根据烟棒样品筛分物含量较多的 3 段进行归类:

1) 烟棒样品 A, B, D, F 主要集中在 30—45 目、45—60 目及 80 目以下,所占百分比分别为 77.63%、75.98%、81.48%、83.95%;

2) 烟棒样品 C, G 主要集中在 30—45 目、15—30 目及 45—60 目,所占百分比为 66.63%、72.89%.

3) 烟棒样品 E 主要集中在 45—60 目、80 目以下及 30—45 目,所占百分比为 79.99%.

根据以上结果,从 1) 中任选一种烟棒样品 B,从 2) 中任选一种烟棒样品 G,从 3) 中选择烟棒样品 E 进入下一组实验.

此外,还发现 7 种烟棒样品的 15 目以上组分的大致形态主要为颗粒状和片状,呈现颗粒状的主要是一些切碎的烟梗以及未粉碎完全的颗粒,呈现片

状的可能是梗丝、烟叶碎片等,从 15 目以下开始都为粉末状物质.

2.2 石油醚提取物的测定结果

统计烟棒各筛分物的石油醚提取物占样品的百分比,其结果见图 1.

图 1 显示,随着筛网目数的增高,各烟棒机械粉碎筛分物石油醚提取物都呈现出了梯形的趋势:烟棒样品 15 目以上、15—30 目筛分物石油醚提取物含量呈现递增的趋势,30—45 目或 45—60 目筛分物出现了峰值,60—80 目、80 目以下筛分物含量出现递减的趋势.推测原因,可能是因为在这 7 种烟棒样品中,15 目以上、15—30 目筛分物中含有一部分烟梗等杂质,60—80 目、80 目以下筛分物可能含有一些杂质.

结合上述结果,将烟棒各目数筛分物分为 3 段,考虑到 15 目以上筛分物有部分颗粒状物质,将其作为一段.15—30 目、30—45 目、45—60 目数据比较接近,因此合并为 15—60 目作一段.60 目—80 目、80 目以下合并为 60 目以下作为一段,并将未筛分的烟棒粉碎物作为对照,进行下一步实验.

2.3 水提浸膏品质评价结果

依照实验 1.3.3 设计,计算烟棒水提浸膏得率,并将水提浸膏制成实验烟支后,进行感官评吸,其结果见表 2—表 4.

由表 2—表 4 可知,在得率方面,烟棒样品 B, G, E 中,15—60 目的水提浸膏得率最高,其次是 60 目以下、对照组、15 目以上筛分物.在感官评吸方面,15—60 目筛分物较对照组的香气质、香气量均有提升,15 目以上筛分物主要体现在杂气方面较差,60 目以下筛分物主要体现在刺激性较大.烟棒样品 B, G, E 水提浸膏得率和感官评吸效果三者情况较一致,因此从烟棒样品 B, G, E 中随机选择出一种烟棒样品 B,进行下一组实验.

表 1 烟棒各筛分物比例

编号	烟棒样品 A	烟棒样品 B	烟棒样品 C	烟棒样品 D	烟棒样品 E	烟棒样品 F	烟棒样品 G	%
15 目以上	5.47	4.59	12.20	1.38	0.36	1.29	10.58	
15—30 目	8.29	6.95	18.47	2.10	0.55	1.96	19.05	
30—45 目	52.09	36.79	34.95	34.86	21.60	44.44	41.71	
45—60 目	13.16	20.19	13.21	24.02	30.08	20.36	12.13	
60—80 目	7.61	11.67	7.64	13.89	17.39	11.77	5.86	
80 目以下	12.38	19.00	12.43	22.60	28.31	19.15	9.54	
合计	99.00	99.19	98.90	98.85	98.29	98.97	98.87	

注:烟棒粉碎物在筛分过程中会有一定损失,合计百分比在 98.29%~99.19% 之间.

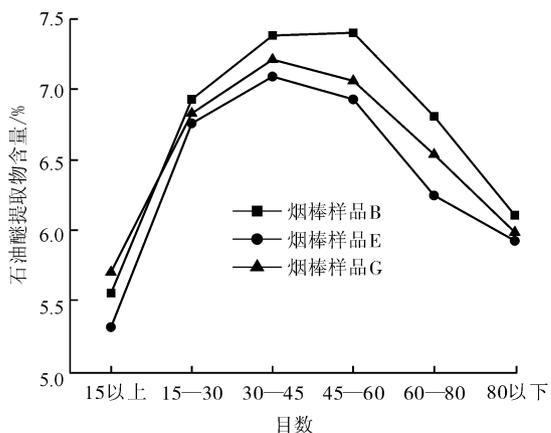


图1 烟棒样品各筛分物石油醚提取物百分含量

表2 烟棒样品B水提浸膏得率与感官评吸结果

编号	得率/%	感官评吸结果
对照	48.25	香气质稍差,香气量充足,刺激性稍欠,杂气稍显
15目以上	46.67	香气质、香气量稍欠,刺激性较大,杂气较重
15—60目	50.53	香气质较好,香气量较足,烟气稍显细腻,杂气较轻
60目以下	48.92	香气质稍好,烟气稍显细腻,刺激性略大,杂气稍显

表3 烟棒样品G水提浸膏得率与感官评吸结果

编号	得率/%	感官评吸结果
对照	51.27	香气质稍差,香气量充足,烟气粗糙,微有刺激,杂气稍显
15目以上	50.23	香气质、香气量稍欠,烟气粗糙,刺激性较大,杂气稍显
15—60目	53.76	香气丰富,香气量较足,烟气较细腻,微有杂气
60目以下	52.55	香气质稍好,香气量充足,刺激性略大,杂气较重

表4 烟棒样品E水提浸膏得率与感官评吸结果

编号	得率/%	感官评吸结果
对照	51.30	香气质感较差,香气量充足,烟气略显粗糙,微有杂气
15目以上	49.93	香气质、香气量稍欠,吃味较差,刺激较大,杂气稍显
15—60目	52.76	香气质较好,香气量较足,烟气稍显细腻,刺激、杂气较小
60目以下	51.59	香气质稍好,香气量充足,刺激性略大,微有杂气

2.4 致香成分分析结果

将烟棒样品B的未筛分烟棒粉碎物作为对照,对30目以上、30—60目、60目以下筛分物进行致香成分分析,其分析结果见表5。

由表5可知,15—60目筛分物的香气物质要多于60目以下筛分物,而15目以上筛分物的香气物质最少,进一步验证了实验1.3.3感官评吸结果。

3 结论

本文将烟棒破碎后以筛分的方式将构成烟棒的各组分离,对筛分出的各组进行石油醚提取

表5 烟棒样品B筛分物致香成分分析 $\mu\text{g/g}$

序号	保留时间/min	化合物名称	对照	30目以上	30—60目	60目以下
1	2.67	3-羟基-2-丁酮	0.09	0.06	0.12	0.11
2	2.86	1,1-二乙氧基乙烷	0.11	0.10	0.16	0.12
3	3.07	吡啶	0.22	0.20	0.25	0.19
4	3.12	吡咯	0.12	0.13	0.13	0.05
5	3.36	3-甲基-2-丁烯-1-醇	0.04	0.03	0.07	0.02
6	4.15	糠醛	3.27	2.69	3.37	2.52
7	4.33	2-甲基丁酸	0.14	0.09	0.19	0.08
8	4.47	糠醇	0.64	0.73	0.63	0.58
9	5.44	1-(2-呋喃基)-乙酮	0.17	0.13	0.19	0.13
10	6.67	苯酚	0.12	0.08	0.13	0.08
11	7.00	2,4-庚二烯醛 A	0.09	0.10	0.10	0.07
12	7.07	4-吡啶甲醛	0.71	0.52	0.64	0.62
13	7.21	1H-吡咯-2-甲醛	0.13	0.12	0.15	0.11
14	7.90	苯乙醛	2.73	2.66	3.36	3.33
15	8.22	1-(1H-吡咯-2-基)-乙酮	1.02	0.81	1.13	0.81
16	8.38	3-甲基苯甲醛	0.09	0.04	0.12	0.08
17	9.59	戊二酸二甲酯	0.09	0.12	0.15	0.00
18	9.81	氧化异佛尔酮	0.10	0.09	0.11	0.09
19	9.93	2,6-壬二烯醛	0.14	0.09	0.15	0.13
20	10.14	1,4-二甲氧基苯	0.11	0.13	0.05	0.23
21	10.85	藏花醛	0.15	0.14	0.17	0.20
22	11.10	2,3-二氢苯并呋喃	0.08	0.04	0.09	0.06
23	11.23	胡薄荷酮	0.12	0.11	0.14	0.10
24	11.53	己二酸二甲酯	0.23	0.23	0.24	0.21
25	12.84	2-甲氧基-4-乙炔基苯酚	0.93	0.56	1.29	1.13
26	13.50	4-乙酰茴香醚	0.49	1.16	0.58	0.11
27	13.55	丁香酚	0.81	0.25	1.01	0.62
28	13.66	茄酮	10.68	8.52	11.49	11.82
29	13.86	α -二氢大马酮	0.16	0.02	0.36	1.47
30	14.02	β -大马酮	5.93	6.2	5.81	5.11
31	15.05	香叶基丙酮	1.89	1.56	2.04	1.54
32	15.68	β -紫罗酮	0.81	0.72	1.07	0.86
33	16.71	二氢猕猴桃内酯	1.72	1.63	2.10	1.74
34	22.17	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	1.97	1.74	2.66	2.09
35	23.26	14-甲基十五酸乙酯	13.61	19.65	19.56	17.15
36	23.81	棕榈酸	27.92	20.02	29.85	25.51
37	24.17	棕榈酸乙酯	9.77	8.20	11.42	12.34
38	24.22	14-甲基棕榈酸乙酯	1.44	1.93	1.66	1.16
39	25.55	9,12,15-十八碳三烯酸甲酯	25.75	26.55	24.10	24.15
40	25.83	十八酸甲酯	15.82	12.72	18.31	17.22
41	27.43	乙酰基柠檬酸三丁酯	1.15	1.07	1.79	0.66
42	28.08	二十酸甲酯	0.91	1.17	0.93	0.17
43	28.72	金合欢基丙酮 B	0.68	1.04	0.71	0.40
合计			133.15	124.15	148.58	135.17

注:以上部分为变化较明显致香成分数据。

物、水提浸膏感官评价、致香成分分析等研究,结果显示:

1)按照各筛分物的比例及形态,结合石油醚提取物含量,将烟棒中各筛分物划分为15目以上、15—60目、60目以下3段,保证了各段筛分物品质的均匀性。

2)在烟棒水提浸膏得率、感官抽吸品质方面,15—60目筛分物优于60目以下筛分物,前两者较机械粉碎未过筛的对照样均好,15目以上筛分物的最差。

3)致香成分分析显示,15—60目筛分物所含致香物质种类、含量最丰富,实用价值最高。

参考文献:

[1] 杨振,孙百华,王淑琴.用于加工小直径烟棒的烟尘压

棒机[P].中国:201320207796.9,2013-04-23.

[2] 于建军.卷烟工艺学[M].北京:中国农业出版社,2009.

[3] 关平,陈远祥.一种烟灰棒在造纸法再造烟叶中的应用方法[P].中国:201110365718.7,2012-06-20.

[4] 曹红云,蒋次清,王岚,等.烟草中石油醚提取物测定的方法改进及不同因素对石油醚提取物的影响[J].云南大学学报:自然科学版,2010,32(S1):32.

[5] 邵金良,黎其万,刘宏程,等.烟草中石油醚提取物测定方法改进[J].中国烟草科学,2010,31(1):41.

[6] YC/T 176—2003,烟草及烟草制品石油醚提取物的测定[S].

[7] YC/T 138—2003,烟草及烟草制品感官评价方法[S].

[8] 李峰.烟草和烟用香精中致香成分检测方法研究[D].广州:华南理工大学,2010.

(上接第24页)

时间为3h.在此条件下进行脱色,白度可达70以上,得到的甲壳素颜色洁白。

参考文献:

[1] Tou J C, Jaczynski J, Chen Y C. Krill for human consumption: nutritional value and potential health benefits[J]. Nutrition Reviews, 2007, 65(2):63.

[2] Yoshitomi B. Utilization of antarctic krill for food and feed[J]. Developments in Food Science, 2004, 42:45.

[3] 孙雷,周德庆,盛晓风.南极磷虾营养评价与安全性研究[J].海洋水产研究,2008,29(2):57.

[4] 任艳.南极磷虾蛋白加工利用的初步研究[D].青岛:中国海洋大学,2009.

[5] Sjö Dahl J, Emmer Å, Karlstam B, et al. Separation of proteolytic enzymes originating from Antarctic krill (*Euphausia superba*) by capillary electrophoresis[J]. Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applica-

tions, 1998, 705(2):231.

[6] Gigliotti J C, Davenport M P, Beamer S K, et al. Extraction and characterisation of lipids from Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Food Chemistry, 2011, 125(3):1028.

[7] 蒋挺大.壳聚糖[M].北京:化学工业出版社,2001.

[8] 程倩,吴薇,籍保平.微生物发酵法提取甲壳素的国内外研究进展[J].食品科技,2012(3):40.

[9] 朱新鹏.蚕蛹甲壳素脱色工艺研究[J].食品工业科技,2011,32(2):230.

[10] 刘玉龙.白度颜色的最新定量评价[J].科技情报开发与经济,2005,15(16):261.

[11] 李端华,周小华.蚕蛹甲壳素的脱色方法与机理探讨[J].应用化学,2004,21(3):309.

[12] 高乐平,杜予民,余华堂.过氧化氢甲壳素脱色反应条件与分子量研究[J].武汉大学学报:理学版,2002,48(4):453.

烟梗表面基团分析

杜鹏¹, 车靖¹, 王海滨², 周瑾¹

(1. 广东省金叶科技开发有限公司, 广东 汕头 515100;

2. 河南中烟工业有限责任公司技术中心, 河南 郑州 450000)

摘要:采用常规方法切丝考察微波膨胀处理对烟梗表面基团的影响. 采用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和X-射线光电子能谱(XPS)对样品进行了表征. FT-IR 实验结果表明,微波处理后的烟梗表面羟基、羧基和—CN 键的含量均显著增加,传统梗丝与新型梗丝并无明显不同;XPS 实验表明,微波膨胀后碳元素更多以酚羟基、醚键和羧基的形式存在,4个样品中氧元素的存在形式没有变化,但是膨胀梗中羟基含量比原梗明显增加,此外,膨胀烟梗表面还发现了含氮基团.

关键词:烟梗;微波膨胀;结构表征;表面基团

中图分类号:TS411 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.008

Analysis of surface functional groups on tobacco stem

DU Peng¹, CHE Jing¹, WANG Hai-bin², ZHOU Jin¹

(1. Guangdong Golden Leaf Technology Development Co., Ltd., Shantou 515100, China;

2. Center of Technology, China Tobacco He'nan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The effect of microwave expansion on the surface functional groups of tobacco stem by conventional stem cutting method was studied. The stem was characterized by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The FT-IR result showed that: after microwave treatment, the percentage of surface hydroxyl, carboxyl and —CN increased significantly. There was no significantly different between traditional cut stem and novel cut stem during FT-IR tests. The XPS result showed that phenolic hydroxyl, ether, carboxy were three forms of carbon in microwave expansion stem. The forms of oxygen in all samples were similar, and expanded stem had higher content of hydroxyl than original stem. In addition, there were many nitrogen groups in the surface of the expanded stem molecule.

Key words: tobacco stem; microwave expansion; characteristics; surface functional group

0 引言

在卷烟配方中掺兑适量膨胀梗丝,可有效降低烟叶消耗量和烟气焦油量. 烟梗的常规处理主要包含以下工序:润梗、贮梗、蒸梗、切梗丝、梗丝膨胀、风选、贮存等^[1]. 微波加热通过向物质内部辐射微波电磁场,物质吸收微波能量转变为自身的热^[2].

研究发现,采用微波膨胀烟梗方法制成的膨胀梗较常规烟梗明显增粗,因而具有更强的吸收料液的性能,同时成丝率提高,填充能力增强,并且在改善吸味品质、增加烟香以及谐调叶组配方等方面有明显效果^[1]. 利用微波直接膨胀复烤梗,再经切丝制成新型膨胀梗丝的研究应用在国内尚处于起步阶段,具有广阔的市场前景.

收稿日期:2013-12-13

作者简介:杜鹏(1987—),男,江西省宜春市人,广东省金叶科技开发有限公司工程师,主要研究方向为烟梗膨胀技术和分切成型技术.

傅里叶变换红外光谱(FT-IR)是一种广泛用于表面基团定性和半定量的分析手段,根据 FT-IR 谱图中不同波数峰的位置和面积,可以分析样品表面官能团的种类和数量^[3]. X 光电子能谱(XPS)利用 X-射线激发样品电子能量谱,主要用于分析样品表面元素及其价态,是表面分析中较为有效、应用广泛的分析技术之一^[4].

目前国内外对烟梗表面活性基团的研究还未见报道,本文拟采用微波预处理的方式对烟梗进行膨胀处理,并将微波膨胀烟梗方法制成的新型梗丝与常规工艺生产的膨胀梗丝的表面基团进行对比分析,以期为进一步研究应用微波膨胀烟梗提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

烟梗、传统梗丝,云南某卷烟厂提供;微波烟梗膨胀设备,自制;SQ38A 曲刃水平滚刀式切丝机,昆明烟机集团二机有限公司产;WQ822 型烟梗洗梗机,SJ13C 加料机,SH8 型流化床干燥机,秦皇岛烟草机械有限责任公司产;Nicolet iS5 傅里叶变换红外光谱仪、K-Alpha X-射线光电子能谱仪,美国 Thermo Fisher 公司产.

1.2 样品制备

1.2.1 膨胀梗的制备 将净化处理过的烟梗回潮到符合膨胀工艺要求的状态(含水率 15% 左右),在过热蒸汽和微波的共同作用下,烟梗膨胀并定型;烟梗脱水膨胀定型后,调整过热蒸汽温度,在高温、缺氧条件下保持一段时间,使其在选定温度下的物质充分挥发,而获得释味水平较低的烟梗.

1.2.2 新型梗丝的制备 按预设的工艺流程及工艺参数进行生产,工艺流程见图 1,工艺参数见表 1.

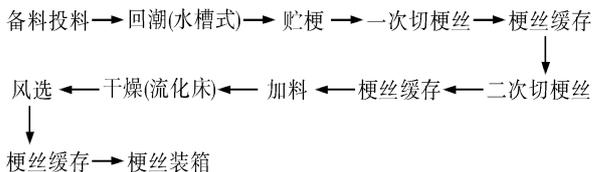


图 1 工艺流程图

1.3 表面基团的测定

FT-IR 光谱在红外光谱仪上进行测定,样品采用 KBr 压片,扫描范围 4 000 ~ 400 cm^{-1} . XPS 测定: 单色化 Al K α 射线源,所得谱图以 C1s (284.6 eV) 吸收为标准进行校正,在 XPS 谱图中纵坐标代表电子计数,横坐标为电子结合能(Binding Energy). 各结合能的归属参照文献^[5-7].

表 1 工艺参数

工序	工艺要求	质量指标
回潮(水槽式)	水温(60 ± 2) °C	出料含水率(30 ± 2) %
贮梗	> 8 h	—
一次切梗丝	刀门压力 0.60 MPa	梗丝厚度(0.7 ± 0.02) mm
二次切梗丝	刀门压力 0.25 MPa	梗丝厚度(0.3 ± 0.02) mm
干燥(流化床)	—	出料含水率(13.0 ± 0.5) %
装箱	—	含水率(13.0 ± 0.5) %

2 结果与分析

2.1 FT-IR 分析

表 2 为主要红外光谱数据,从表 2 可知,4 种样品的表面均含有—OH,—CH,—C=O,—C—N,—C—O 基团. 原梗中 3 393.00 cm^{-1} 以及膨胀梗 3 419.99 cm^{-1} 处的谱带可归属于烟梗表面 O—H, COOH 和化学吸附水的 O—H 伸缩振动,膨胀梗中这一吸收峰相对强度相比原梗有了一定增强,这意味着经微波催化氧化作用后,烟梗表面含羟基和羧基的量有较大幅度的增加. 原梗 1 418.87 cm^{-1} 和膨胀梗 1 384.19 cm^{-1} 处的谱带归属于—C—N 伸缩振动峰,峰相对强度的变化表明,微波作用可以增加表面—C—N 基团数量,微波与烟梗作用具有多个活性位点. 从红外光谱数据表可以发现,传统梗丝与新型梗丝同一谱带强度没有显著变化,说明两者表面基团的类别和含量相近.

表 2 样品的主要红外光谱数据 cm^{-1}

样品	ν -OH	ν -CH	ν -C=O	ν -C—N	ν -C—O
原梗	3 393.00 _s	2 915.14 _s	1 602.97 _m	1 418.87 _w	1 097.68 _m
膨胀梗	3 419.99 _{vs}	2 926.39 _m	1 617.33 _s	1 384.19 _{vs}	1 096.77 _s
传统梗丝	3 357.75 _s	2 915.14 _m	1 595.13 _m	1 430.62 _w	1 050.68 _m
新型梗丝	3 373.41 _s	2 889.00 _w	1 591.22 _m	1 403.20 _w	1 090.37 _s

注:表中 vs (极强),s(强),m(中),w(弱).

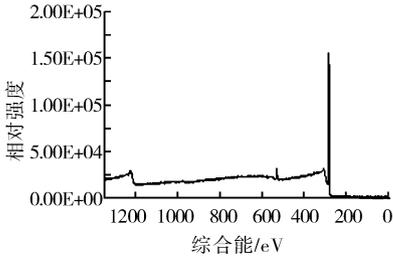
2.2 X-射线光电子能谱(XPS)分析

图 2 为原梗的 XPS 图谱及分峰图,其中 a)~d) 的蚀刻时间为 30 s. 从图 2 可知,原梗表面含有的基团与 C1s 图谱结合能相对应的官能团为—C—C 或—C—H(284.5 eV),—C—O(285.4 eV),—C=O(287.8 eV);与 O1s 图谱结合能相对应的官能团为—OH(535.2 eV),—C—O—C—(533.0 eV),—C=O(531.4 eV).

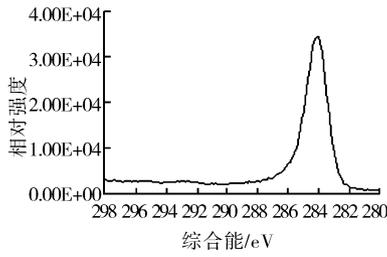
图 3 为膨胀梗的 XPS 图谱及分峰图,其中 a)~f) 的蚀刻时间 30.015 s. 从图 3 分析膨胀梗表面含有的基团,与 C1s 图谱结合能相对应的官

能团为—C—C 或—C—H (284.5 eV), —C—O—C— (286.5 eV) 及—COO— (288.6 eV), 293 eV ~ 296 eV 为 K 离子峰, 这在原梗表面没有发现; 与 O1s 图谱结合能相对应的官能团为—OH

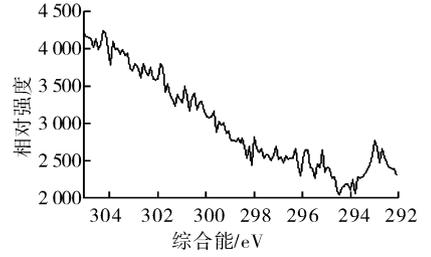
(533.4 eV)、—C—O—C— (532.2 eV) 及—C=O (531.5 eV); 与 N1s 图谱结合能相对应的官能团为—C—NH—C—或—C=N (399.2 eV) 及—NH₂ (399.8 eV)。



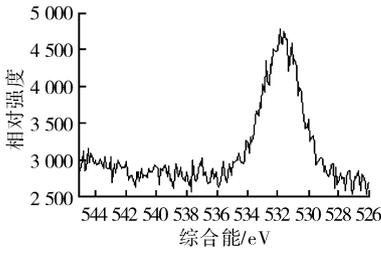
a) 样品的全谱扫描



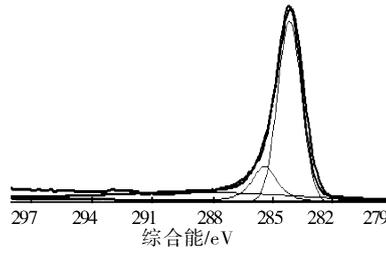
b) 样品的Cl1s扫描谱图



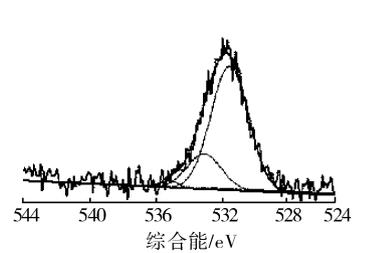
c) 样品的K2p扫描谱图



d) 样品的O1s扫描谱图

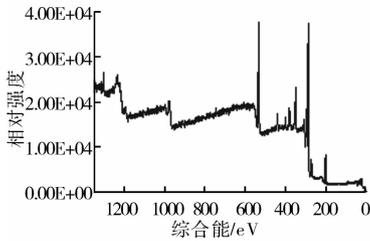


e) 样品的Cl1s分峰图

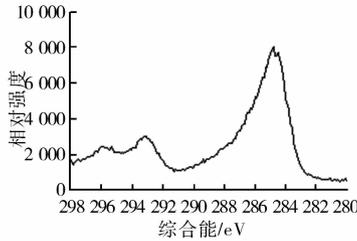


f) 样品的O1s分峰图

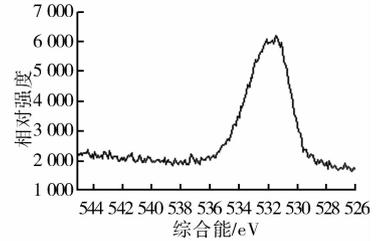
图2 原梗的XPS图谱及分峰图



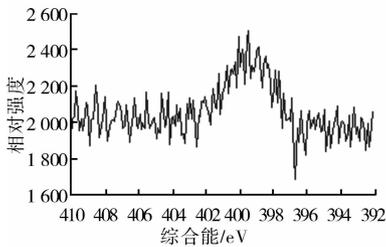
a) 样品的全谱扫描



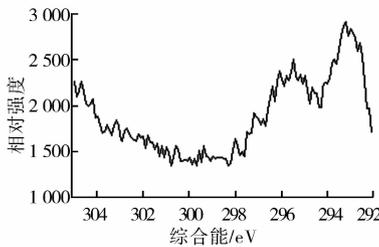
b) 样品的Cl1s扫描谱图



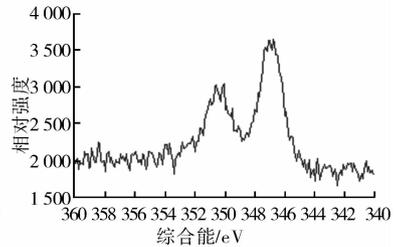
c) 样品的O1s扫描谱图



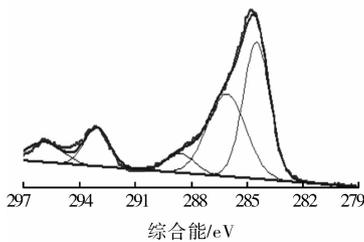
d) 样品的N1s扫描谱图



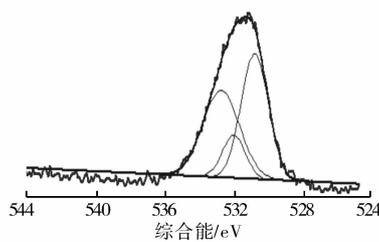
e) 样品的K2p扫描谱图



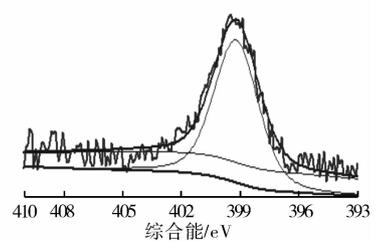
f) 样品的Ca2p扫描谱图



g) 样品的Cl1s分峰图



h) 样品的O1s分峰图



i) 样品的N1s分峰图

图3 膨胀梗的XPS图谱及分峰图

图 4 为传统梗丝的 XPS 图谱和分峰图,其中 a)~d) 的蚀刻时间 30 s. 从图 4 分析传统梗丝表面含有的基团,发现样品表面 K 离子含量明显升高,与 C1s 图谱结合能相对应的官能团为—C—C 或—C—H (291.5 eV),—C—O—C—(293.4 eV) 及—COO—(295.7 eV);与 O1s 图谱结合能相对应的官能团为—OH (543.2 eV),—C—O—C—(541.5 eV) 及—C=O(539.8 eV).

图 5 为新型梗丝的 XPS 图及分峰图,其中 a)~d) 的蚀刻时间 30 s. 从图 5 分析新型梗丝表面含有的基团,样品表面 K 离子含量较高,与 C1s 图谱结合能相对应的官能团为—C—C 或—C—H (287.4 eV),—C—N (288.3 eV),—C—O—C—(291.6 eV) 及—COO—(294.8 eV);与 O1s 图谱结合能相对应的官能团为—OH (539.5 eV),—C—O—C—(537.1 eV) 及—C=O(534.6 eV).

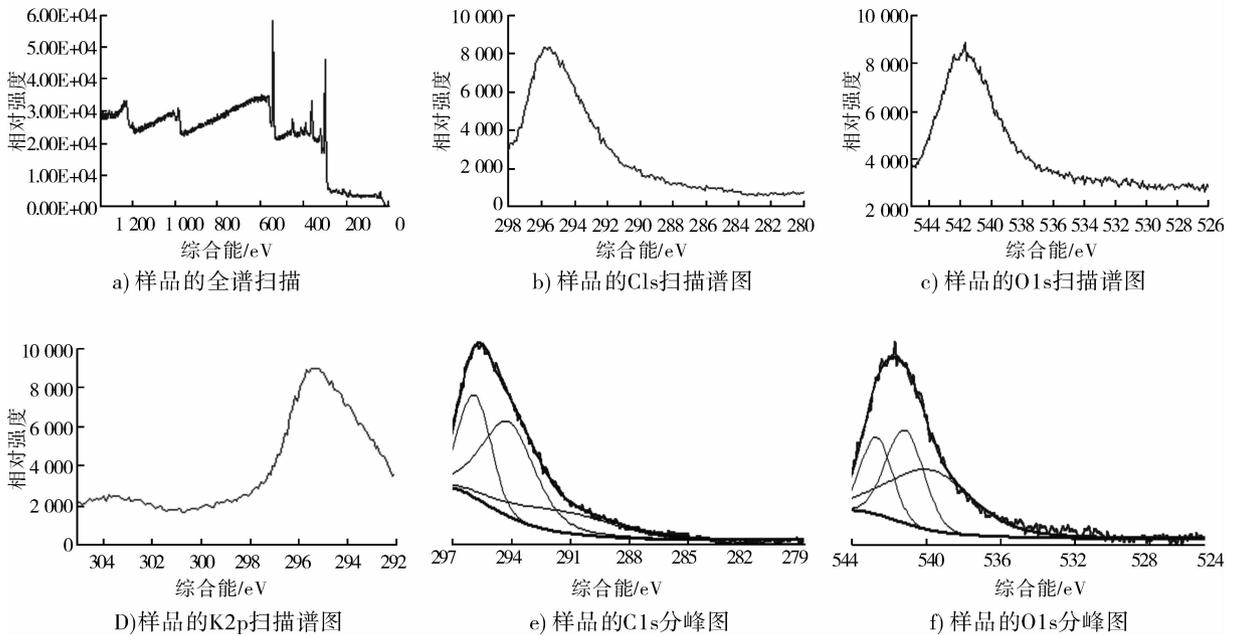


图 4 传统梗丝的 XPS 图谱及分峰图

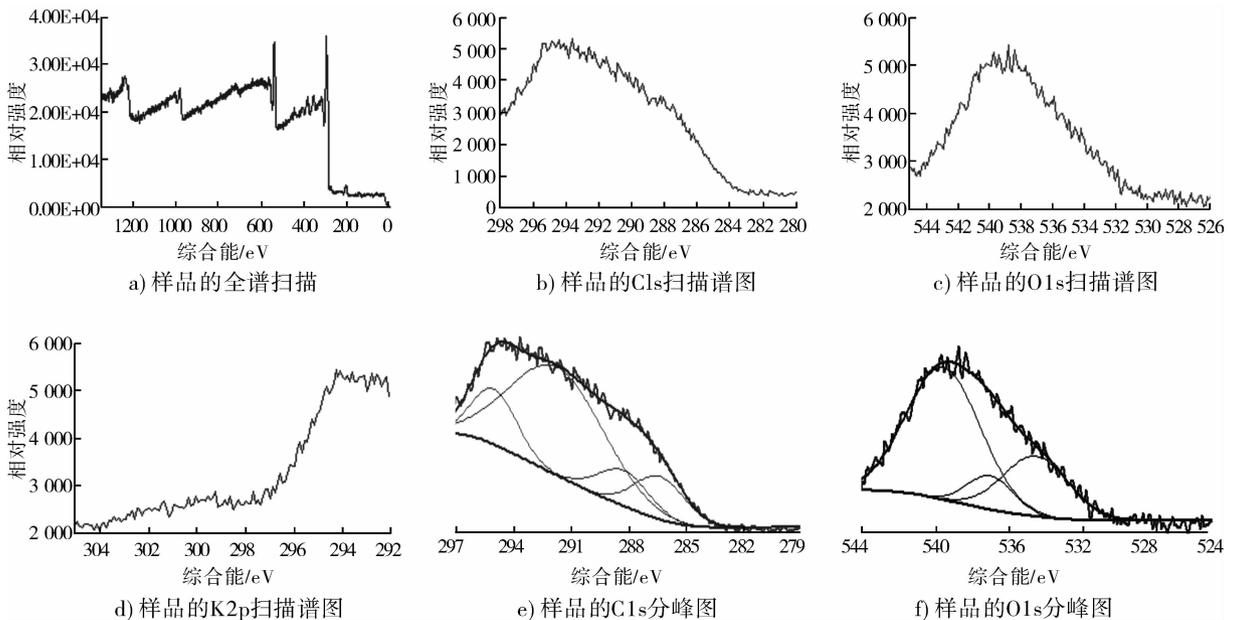


图 5 新型梗丝的 XPS 图谱及分峰图

不同元素在梗表面的存在形式分析结果如表3所示,在膨胀梗、传统梗丝以及新型梗丝的表面均发现大量K离子,而在原梗表面没有K离子.杨涛等^[8]研究表明,膨胀前后烟梗中K离子含量没有显著变化,分析原因可能是烟厂使用水中含有钾盐为主的助燃剂,且微波膨胀后烟梗内部空间及细胞间隙增大,在洗梗、回潮等工序中易残留K离子.对C1s峰分峰谱图分析,膨胀梗—C—O含量相比原梗显著增加,说明其表面的酚羟基或醚键较多;原梗中含有部分的羰基,而膨胀梗表面没有,出现羧基.新型梗丝与传统梗丝相比碳元素的存在形式并没有显著区别,但传统梗丝表面含有很高比例的羧基,这可能是传统梗丝陈化时间较长,在陈化过程中发生了化学反应.对O1s峰分峰谱图分析,4种样品中氧元素的存在形式相近,原梗表面氧元素大都以羰基形式存在,膨胀梗中羟基含量相比原梗有了显著提高,新型梗丝中氧元素更多以羟基形式存在.此外,膨胀梗表面还发现了一定含氮基团.

表3 样品的XPS分析

原子类型	分峰数	基团	原梗	膨胀梗	传统梗丝	新型梗丝
C1s	C _I	—C—C,—C—H	57.07	52.70	20.09	15.65
	C _{II}	—C—O	15.91	40.07	44.15	55.54
	C _{III}	—C=O	27.02	—	—	—
	C _{IV}	—COO—	—	7.23	35.76	16.24
	C _V	—C—N	—	—	—	12.57
O1s	O _I	—C=O	77.75	47.32	54.20	25.85
	O _{II}	—C—O—C—	20.18	14.50	27.90	12.23
	O _{III}	—OH	2.07	38.18	17.90	61.92
N1s	N _I	—C—NH—C,C=N	—	43.30	—	—
	N _{II}	—NH ₂	—	56.70	—	—

3 结论

本文采用FT-IR定性分析微波膨胀前后烟梗表面基团的变化,结果显示,微波处理后的烟梗表面羟基、羧基和—CN键的含量均有显著增加,传统梗丝与新型梗丝并无明显不同;通过XPS可以获得梗及梗丝样品表面基团种类和数量等信息,微波膨胀后碳元素更多以酚羟基、醚键和羧基的形式存在,4个样品中氧元素的存在形式没有变化,但是膨胀梗中羟基含量比原梗明显增加,此外,膨胀烟梗表面还发现了含氮基团.实验结果表明,对于同一个烟梗样品,在使用不同方法测定其表面官能团数量和种类时存在一定的差别.

参考文献:

- [1] 何炬,刘维涓,师健全,等.微波膨胀烟梗质量研究[J].烟草科技,2006(2):9.
- [2] 金燕,蒋文举,江霞,等.微波加热对活性炭表面基团及其对SO₂吸附性能的影响[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(4):35.
- [3] 李娜,朱健,查庆芳.活性炭表面基团的定性和定量分析[J].高等学校化学学报,2012,33(3):548.
- [4] 吴正龙,刘洁.现代X光电子能谱(XPS)分析技术[J].现代仪器,2006(1):50.
- [5] 陆家和,陈长彦.表面分析技术[M].北京:电子工业出版社,1998.
- [6] Kozłowski M. XPS study of reductively and non-reductively modified coals[J]. Fuel,2004,83(3):259.
- [7] 徐秀峰,张蓬洲.用XPS表征氧、氮、硫元素的存在形态[J].煤炭转化,1996,19(1):73.
- [8] 杨涛,李敏,李姗姗,等.微波膨胀过程中烟梗及其制备的颗粒的物理化学变化[J].烟草科技,2008(2):33.

烟草烷烃含量研究

康文功¹, 胡军², 帖金鑫¹, 张锐¹, 余翔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. 中国烟草总公司 郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:利用超声提取-GC-MS测定有代表性的不同品种、不同部位、相同烟区不同品种及相同品种不同地区的烟草中烷烃含量,并进行比较。结果表明:影响烟草烷烃含量多少的因素有品种、部位以及产地等。不同种烟叶烷烃含量香料烟最高,其次是白肋烟,烤烟含量最低;同种烟叶上部烟叶的烷烃总量最大,其次是中部叶,下部叶的烷烃含量最低。

关键词:超声提取-GC-MS;烟叶;烷烃含量

中图分类号:TS41+1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.009

The alkane content study of tobacco samples

KANG Wen-gong¹, HU Jun², TIE Jin-xin¹, ZHANG Rui¹, YU Xiang¹, MA Lin¹

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

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

Abstract: Using the ultrasonic extraction-GC-MS method, the paraffin content of these tobaccos were determined and compared which is typical for different varieties and different parts or different varieties in same region or same variety and different regions. The results showed that factors affecting the paraffin content in tobacco were: varieties, location and origin. Different kinds of tobacco alkane content, in which the highest was the aromatic tobacco, followed by the burley tobacco, the lowest content was the flue-cured tobacco. The same kind of tobacco amount of alkane content, in which the upper leaves in tobacco leaf was the largest, followed by central leaf, the alkane content of lower leaf was the lowest.

Key words: ultrasonic extraction-GC-MS; tobacco leaves; alkane content

0 引言

保润性能是衡量烟草品质的一个重要指标^[1],烟叶含水率不仅决定了烟草制品的加工性能,而且对感官质量也有重要影响,是影响卷烟香味和抽吸舒适度的重要因素,因而烟草生产中水分的控制成为重要技术环节^[2-3]。目前,卷烟含水率的控制多是

通过添加保润剂来实现,但是效果不明显,存在烟丝水分散失比较快、主流烟气的刺激性大、干燥感明显及口腔痰多等共性问题,因此,寻找新型烟草保润剂^[4-5]和烟草烷烃保润性能的研究尤为重要。烷烃作为烟叶表面的蜡质的主要化学成分,占烟叶干质量的1/1 000左右,烟草中含量较大的烷烃主要集中于C₂₅-C₃₅之间,占烟叶烷烃总质量的95%

收稿日期:2013-11-08

基金项目:国家烟草专卖局卷烟增香保润重大专项项目(422012AA0370)

作者简介:康文功(1988—),男,河南省信阳市人,郑州轻工业学院硕士研究生,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生物技术和卷烟工艺。

以上^[6-7]. 目前研究发现,植物中烷烃主要分布于叶片或者果实的表面,会在其表面形成一层蜡质类的屏障,蜡质层不仅为维持叶片或者果实的内部环境提供保障,减弱紫外线对植物的损害,而且可以减少植物中自由水的损失^[8]. A. F. M. Oliveira 等^[6]研究卡廷加群落和塞拉多群落中植物表面蜡质及抗水损失的效率,发现正构烷烃是非常好的减弱水损失的屏障. 2012年, E. P. Parsons 等^[7]研究收获后辣椒的水分损失情况,发现水分损失含量与烷烃在蜡质中的百分含量呈明显负相关,其中 $n\text{-C}_{27}\text{H}_{56}$, $n\text{-C}_{29}\text{H}_{60}$, $n\text{-C}_{31}\text{H}_{64}$ 的存在能够降低角质层的渗透性. 本文将选取有代表性的烟叶品种,分别对不同类型、不同部位、相同烟区不同品种、相同品种不同地区的烟叶烷烃含量进行分析比较,以期对烟叶烷烃含量与保润性能的相关性研究提供理论依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

正戊烷、正己烷、石油醚(30~60℃)、石油醚(60~90℃)、二氯甲烷(AR),天津市风船化学试剂科技有限公司产;标准品:正构烷烃混标($n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ ~ $n\text{-C}_{40}\text{H}_{82}$),单标 $n\text{-C}_{27}\text{H}_{56}$, $n\text{-C}_{29}\text{H}_{60}$, $n\text{-C}_{30}\text{H}_{62}$, $n\text{-C}_{31}\text{H}_{64}$, $n\text{-C}_{32}\text{H}_{66}$, $n\text{-C}_{33}\text{D}_{68}$,内标(IS) $n\text{-C}_{17}\text{D}_{36}$ 和 $n\text{-C}_{30}\text{D}_{62}$ (纯度为99.8%),美国 Supelco 公司产;实验烟叶均由上海卷烟厂提供(见表1).

KQ-700DB 型数控超声仪(最大功率700W),昆山市舒美超声仪器有限公司产;BSA224/BSA124分析天平,德国 Sartorius 公司产;GC-MS 联用仪,德国赛默飞世尔科技有限公司产.

1.2 实验方法

利用超声提取-GC-MS 测定烟草中烷烃含量^[9]. 初烤烟叶去梗,在烘箱中于40℃下干燥2h,用研磨机将其粉碎,过40目筛,密封于封口袋中.按照YC/T 31-1996的方法测定烟粉含水率,然后分别按照同时蒸馏萃取的方法提取烟草中的烷烃,在1L圆底烧瓶中加入25g烟粉和350mL蒸馏水,于100mL圆底烧瓶中加入60mL CH_2Cl_2 . 对盛有烟样的烧瓶采用电热套加热(温度控制在150℃),对盛有 CH_2Cl_2 的烧瓶采用65℃水浴加热,同时蒸馏提取2.5h. 提取结束后,在 CH_2Cl_2 提取液中加入6g无水 Na_2SO_4 ,放置冰箱中过夜. 提取前于样品中加入1mL $n\text{-C}_{17}\text{D}_{36}$ (1 $\mu\text{g}/\text{mL}$)和0.5mL $n\text{-C}_{30}\text{D}_{62}$ (100 $\mu\text{g}/$

表1 29种烟草样品

序号	烟区	品种	部位	产地
1	长江中下游	鄂烟1号	上部	湖北恩施
2	长江中下游	鄂烟1号	中部	湖北恩施
3	黄淮烟区	中烟100	上部	河南洛阳
4	东南烟区	K326	上部	福建上杭
5	西南烟区	云-85	上部	云南保山
6	西南烟区	云-85	中部	云南保山
7	西南烟区	云-85	下部	云南保山
8	西南烟区	云-87	上部	云南保山
9	黄淮烟区	NC89	上部	山东临沂
10	黄淮烟区	NC89	中部	山东临沂
11	黄淮烟区	NC89	下部	山东临沂
12	北方烟区	吉烟9号	上部	辽宁开原
13	北方烟区	吉烟9号	中部	辽宁开原
14	北方烟区	吉烟9号	下部	辽宁开原
15	黄淮烟区	NC-55	上部	山东潍坊
16	黄淮烟区	NC-55	中部	山东潍坊
17	长江中下游	云-87	上部	湖北利川
18	长江中下游	云-87	中部	湖北利川
19	长江中下游	云-87	下部	湖北利川
20	西南烟区	红大	上部	四川会理
21	西南烟区	红大	中部	四川会理
22	西南烟区	红大	下部	四川会理
23	西南烟区	云-87	中部	云南普洱
24	西南烟区	云-87	下部	云南普洱
25	西南烟区	云-85	上部	贵州安顺
26	西南烟区	云-85	中部	贵州安顺
27	西南烟区	云-85	下部	贵州安顺
28	长江中下游	K326	上部	湖北十堰
29	长江中下游	K326	下部	湖北十堰

mL)作为内标. 将提取液旋转浓缩至0.5mL,过Si固相萃取柱,用2.5mL正己烷洗脱非极性部分,洗脱液经氮吹至1.5mL左右,过0.45 μm 有机相滤膜后进行GC-MS分析. 分析条件如下:

色谱柱:DB-5 MS(30m \times 0.25mm \times 0.25 μm)毛细管色谱柱;载气:He,99.999%;流速:1.0 mL/min;进样口温度:280℃;进样量:1 μL ;进样模式:分流进样;分流比:10:1;升温程序:60℃(1min) $\xrightarrow{5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$ 200℃ $\xrightarrow{2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$ 250℃ $\xrightarrow{5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$ 300℃(10min).

离子源:电子轰击(EI);电子能量:70eV;离子源温度:250℃;传输线温度:300℃;分析器:四级杆质量分析器;扫描模式:全扫描;质量扫描范围:40~500 amu;溶剂延迟:4.5min.

2 结果与分析

2.1 不同类型烟草中烷烃含量的差异

图1为不同类型烟草中烷烃总含量的差异,结果显示:香料烟含量最高,其次是白肋烟,烤烟含量最低.

2.2 不同部位烟草中烷烃含量的差异

图2给出了云南蒙自县云-87,湖北恩施鄂烟1号,山东临沂NC89,四川会理的红大,云南保山云-85中不同部位烟叶中烷烃总量的差异:从总体上来看上部烟叶的烷烃总量最大,其次是中部叶,下部叶的烷烃含量最低.

2.3 相同烟区不同品种烟草烷烃含量的差异

图3给出了在西南烟区的云-87,云-85,红花大金元,K326这4种烟草的烷烃总含量的差异.其中红花大金元的烷烃含量最大,K326的烷烃含量略低于红花大金元的含量,其次是云-85,云-87的烷烃含量最低.由此可见,在外界环境相同的情况下,品种对烟草中烷烃的含量有很大影响.

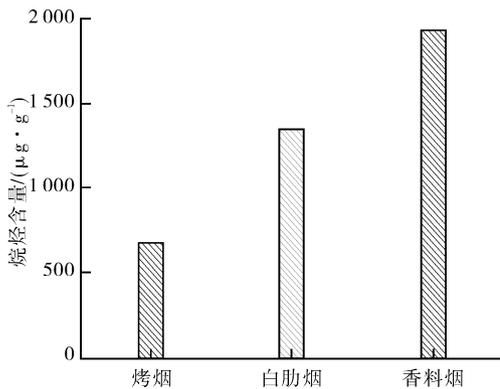


图1 不同类型烟草中烷烃含量的差异

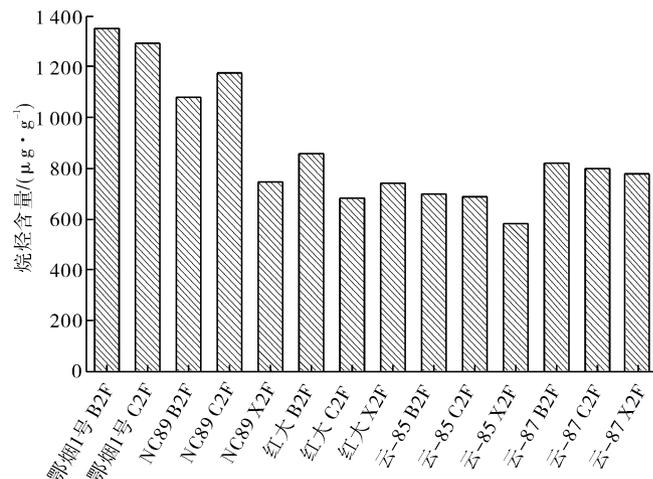


图2 不同部位烟草中烷烃总含量的差异

2.4 相同品种不同地区烟草烷烃含量的差异

图4给出了不同产地的云-87中烷烃总量的差异:河南内乡地区云-87烟叶中所含烷烃总量最多,四川凉山、福建武平、辽宁建平和湖北利川这4个地区云-87烷烃含量相近,烷烃含量最少的是云南保山地区云-87.表2给出了6个地区的云-87烟叶烷烃总量与自然环

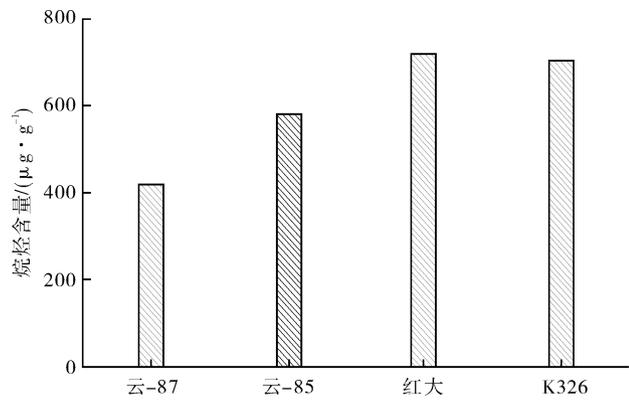


图3 相同产地不同品种烟草中烷烃总含量的差异

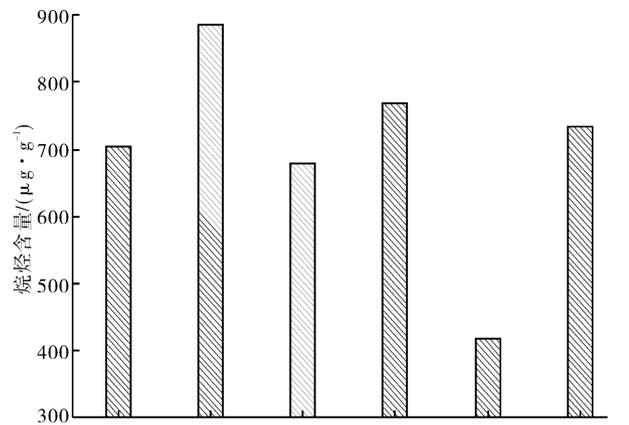


图4 不同产地云-87中烷烃总含量的差异

表2 6个地区的云-87烟叶烷烃总量与自然环

地区	海拔/m	降雨量/mL	日照时间/h	烷烃总量 / (μg·g ⁻¹)
辽宁建平	500	400	2 300	703
河南内乡	201	560	2 003	886
湖北利川	1 000	1 200	1 626	678
四川凉山	2 386	660	2 678	769
云南保山	1 560	1 760	2 386	418
福建武平	460	1 043	1 919	733

区是降雨量最高的地区,雨水对烟叶表面的洗刷可能导致该地区烟叶的烷烃含量较低;河南内乡的烷烃含量最高,主要是因为河南内乡的降雨量较低,对烟叶表面的洗刷较弱,而且该地区海拔是最低的,这也可能影响该地区烟草中烷烃的含量.相同品种烟叶在不同地区烷烃含量的差异,说明生长环境对烟叶中烷烃含量产生巨大影响.

3 结论

本文研究了不同烟草中的烷烃含量的差异,结果表明,影响烟草烷烃含量多少的因素有品种、部位以及产地等.不同种烟叶烷烃含量香料烟最高,其次是白肋烟,烤烟含量最低;同种烟叶上部烟叶的烷烃总量最大,其次是中部叶,下部叶的烷烃含量最低.通过分析不同类型、品种、部位以及产地的烟叶,确定其烷烃含量的高低,有助于在拟定叶组配方的基础上,选择保润性能更好的烟叶,来提高和改善卷烟的吸食品质,给消费者带来更佳的舒适感.

参考文献:

- [1] 曾世通,刘洋,刘珊.烟叶保润性能的影响研究[J].烟草科技,2011(8):62.
- [2] 王瑞新.烟草化学[M].北京:中国农业出版社,2003:6-15.
- [3] 肖文平,许增龙,陈冉.卷烟水分对吸味的影响试验研究[J].云南烟草,2002(1):39.
- [4] Grice K, Lu Hong, Zhou Youping, et al. Biosynthetic and environmental effects on the stable carbon isotopic compositions of anteiso-(3-methyl) and iso-(2-methyl) alkanes in tobacco leaves [J]. *Phytochemistry*, 2008, 69(16):2807.
- [5] 刘市全.保润剂的研究与应用进展[J].上海烟业,1998(1):10.
- [6] Oliveira A F M, Meirelles S T, Salatino A. Epicuticular waxes from caatinga and cerrado species and their efficiency against water loss [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2003, 75(4):431.
- [7] Parsons E P, Popovskiy S, Lohrey G T, et al. Fruit cuticle lipid composition and fruit post-harvest water loss in an advanced backcross generation of pepper (*Capsicum* sp.) [J]. *Physiologia Plantarum*, 2012, 146:15.
- [8] Eglinton G, Hamilton R J. Leaf epicuticular waxes [J]. *Science*, 1967, 156:1322.
- [9] 刘菲,赵明月.超声提取-GC/MS法测定烟叶中的烷烃[J].烟草科技,2013(1):58.

茶叶添加量对再造烟叶卷烟 烟气酚类有害物质的影响

牛津桥¹, 晋照普¹, 郭贞贞², 张超帅²

(1. 上海烟草集团有限责任公司 北京卷烟厂, 北京 101121;

2. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:将茶叶作为添加物,以涂布的方式,按不同比例制作成再造烟叶,并将其加入叶组中制成卷烟样品.用吸烟机捕集卷烟的烟气,收集主流烟气的总粒相物,用同时蒸馏萃取法(SDE)对收集的烟气粒相物的剑桥滤片进行萃取,然后用GC-MS定性、定量分析烟气化学成分.结果表明,与对照样相比,添加茶叶后烟气中主要酚类有害成分含量有不同程度的降低,含10%,12%茶叶的卷烟样品中主要酚类有害成分含量分别降低了37.4%和36.8%,且对吸食品质有所改善.

关键词:茶叶;再造烟叶;卷烟烟气;酚类有害成分

中图分类号:TS41⁺¹ 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.010

Effects of the adding amount of tea on reconstituted tobacco leaf harmful components of phenols in cigarette smoke

NIU Jin-qiao¹, JIN Zhao-pu¹, GUO Zhen-zhen², ZHANG Chao-shuai²

(1. Beijing Cigarette Factory, Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Beijing 101121, China;

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

Abstract: Reconstituted tobacco containing different proportion of tea, by using the coating method, were mixed to tobacco and produce blended tobacco cigarettes. Cigarette smoke was trapped with the smoking machine, the total particulate matter of the mainstream smoke was collected, the filters which contained particulate matter of the smoke was extracted through the simultaneous and extraction method (SDE), and then analyzed qualitatively and quantitatively using the GC-MS. Compared with the blank control sample, the results showed that the content of harmful components of phenols in cigarette smoke decreased in different degrees, i. e., the total harmful component of 10% and 12% cigarette samples decreased 37.4% and 36.8% respectively, and its smoking quality was improved.

Key words: tea; reconstituted tobacco leaf; cigarette smoke; harmful component of phenols

0 引言

随着吸烟与健康问题日益受到世人的关注,吸烟有害健康已成为共识.卷烟烟气中对人体造成危害的主要成分可能是自由基、亚硝胺和酚类化合物

等^[1],这些成分能导致人体组织和细胞的氧化,诱发癌症等疾病^[2].茶叶中含有茶多酚(TP)等多酚类物质,具有很好的抗氧化和清除自由基等功效,对多种疾病具有一定的预防和治疗作用^[3],将其添加在卷烟或滤嘴中,可以有效降低卷烟烟气中焦油、

烟碱、自由基及亚硝胺等有害物质含量^[4-6]。因此将茶植株上的茎叶或其提取物添加在卷烟或滤嘴中,既可以降低吸烟对身体的毒害作用,提高卷烟安全性,又能改善卷烟的抽吸品质^[7-8]。

再造烟叶具有填充值高、燃烧性能好、焦油释放量低等特性,是卷烟降焦的有效手段之一,在国外烟草行业使用较为广泛。近年来,随着卷烟降焦工程的推动,国内烟草企业也积极开展造纸法再造烟叶的生产研究,并取得了一定的进展。但是国产再造烟叶内在化学成分谐调性方面与进口再造烟叶相比还有一定差距^[9-10]。

本文从改善卷烟吸味、延伸茶叶产业链出发,结合目前卷烟降害增香的实际要求,采用涂布方式制成含茶叶的功能型再造烟叶,将茶叶再造烟叶应用于卷烟配方,考察茶叶对卷烟烟气酚类有害物质含量的影响,为开发功能型卷烟提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

茶叶,信阳毛尖(前期实验研究结果表明信阳毛尖对降低有害物质作用较明显);再造烟叶片基、浓缩液及叶组配方,河南中烟工业有限公司提供;其他化学试剂为色谱纯。Borgwaldt KC LM5 + 吸烟机,美国 Borgwaldt KC 公司产;GC6890 - MS5793N 型 GC-MS,美国 Agilent 公司产;KBF 恒温恒湿箱,德国 Binder 公司产。

1.2 实验方法

1.2.1 茶叶再造烟叶卷烟制备^[7] 采用涂布法,制作成含不同茶叶比例的再造烟叶卷烟。

1.2.2 样品的制备^[7] 按 GB/T16450—2004 的标准方法收集卷烟烟气颗粒物。用同时蒸馏萃取

(SDE)法收集剑桥滤片化学成分。

1.2.3 样品烟气测定^[8] 采用 GC-MS 检测,利用 NIST02 标准谱库对质谱图进行检索,并进行人工解析得到各组分的相对含量。

2 结果与讨论

2.1 茶叶再造烟叶对卷烟吸食品质的影响

前期实验研究表明,添加 12% 左右的茶叶比例较合适,按 1.2.1 制备茶叶含量分别为 10%, 11%, 12%, 13%, 14% 的再造烟叶叶组卷烟样品,经过感官评吸^[11],结果表明 10%, 12% 的茶叶添加量对卷烟吸食品质有较好的影响(见表 1)。

表 1 含不同比例茶叶的再造烟叶叶组卷烟样品感官质量评吸结果

卷烟样品	评吸结果
空白对照烟样	烟气浓度适中,细腻柔和,成团性较好,较谐调,木质气略有,甜润度适中,喉部略有刺激
含 10% 茶叶烟样	烟气浓度适中,香气质较好,甜味微增,烟气细腻稍欠柔和,透发性较好,较谐调,木质气变化不大
含 12% 茶叶烟样	木质气稍降,甜润度增强,茶香透发,修饰原有烟香,喉部刺激性减轻,谐调性较好,风格突出

由表 1 可见,与空白对照烟样相比,添加 10% 茶叶组降低了烟叶的刺激性,但是茶叶香气不明显;添加 12% 茶叶组既吸收了烟叶的刺激性,又透出茶香。与空白对照烟样相比,添加茶叶可以明显改善卷烟香气质,且与烟香有较好的谐调性,并赋予卷烟独特的茶香。

2.2 茶叶再造烟叶卷烟中酚类有害物质的分析

图 1—图 3 为不同叶组的 GC-MS 总离子流图。

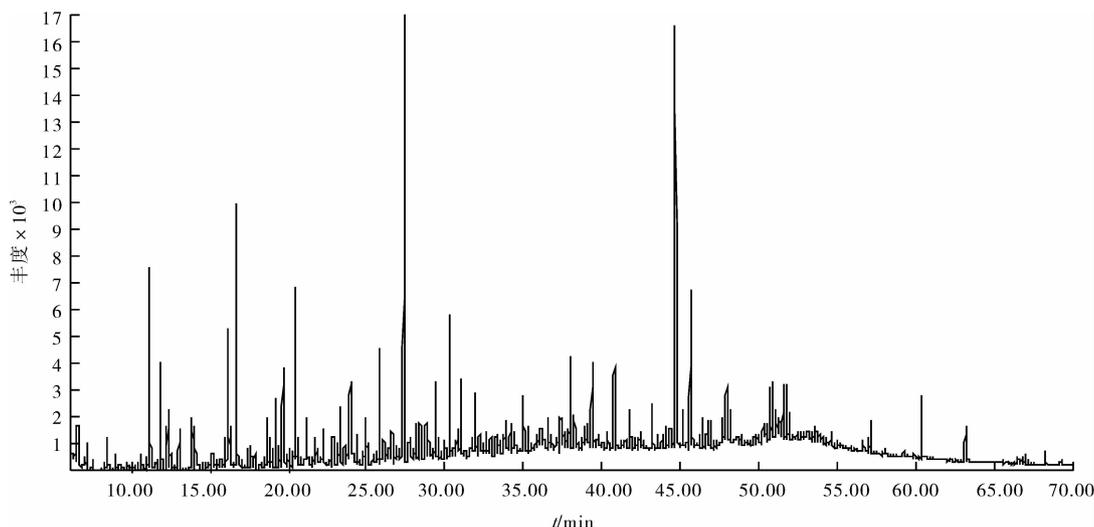


图 1 空白对照烟样色谱图

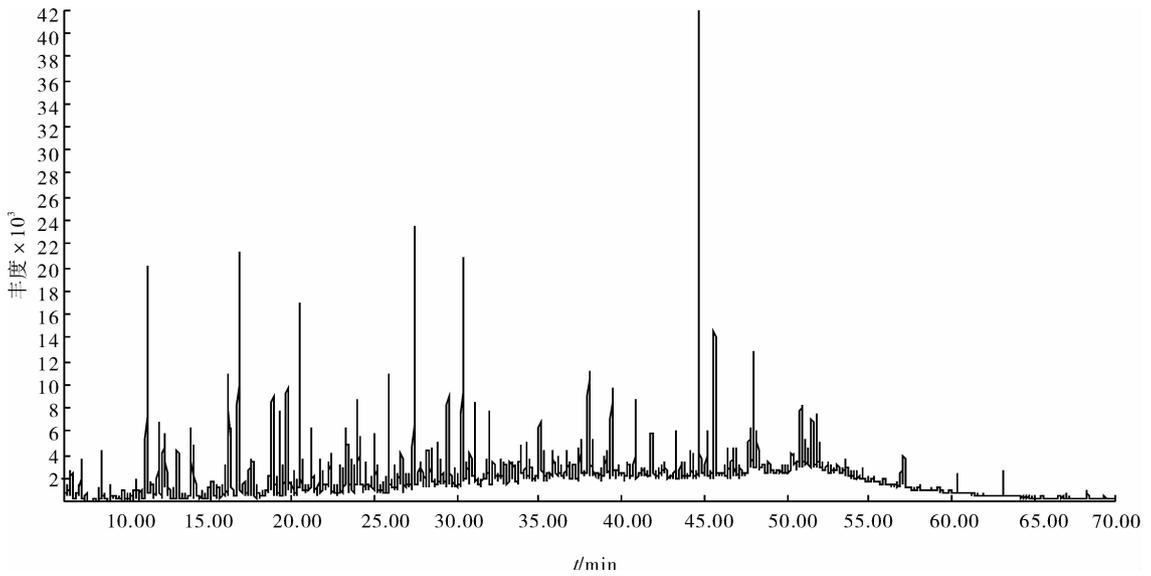


图2 添加10%茶叶烟样色谱图

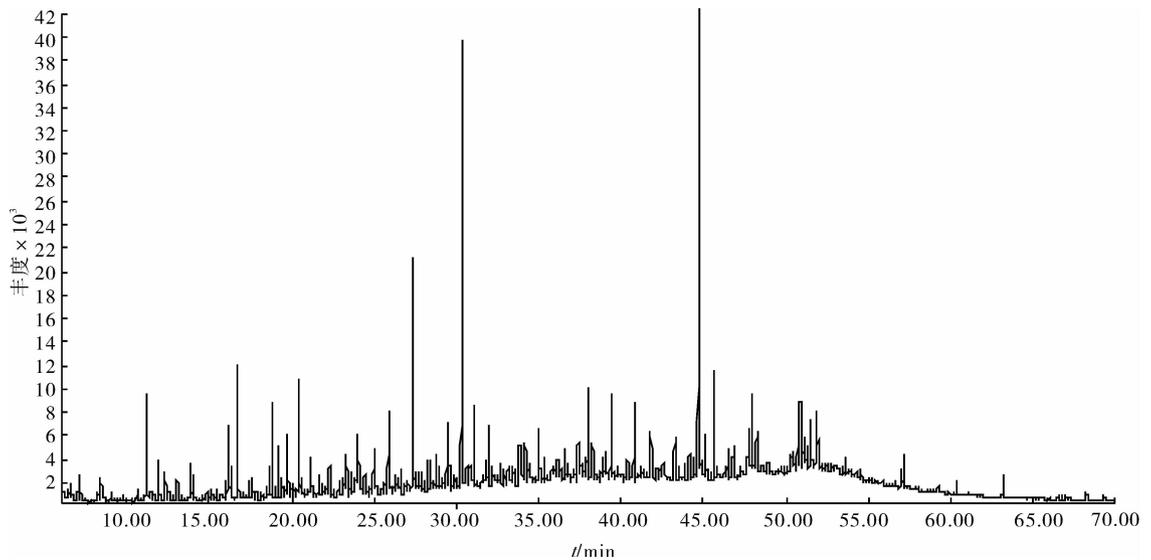


图3 添加12%茶叶烟样色谱图

利用 GC-MS 对 1.2.2 中制备得到的烟气样液进行定性、定量检测分析,各化学成分的定性定量分析结果见表 2。

由表 2 可见,与空白对照烟叶组相比:含 10% 茶叶卷烟样品有害成分总量降低了 37.4%,其中苯酚、4-乙炔苯酚、3,4-二甲基苯酚的含量降低较多,降低率达到 97.9%,22.5% 和 26.5%;含 12% 茶叶卷烟样品有害成分总量降低了 36.8%,并且主要有害成分降低率较高,其中苯酚、2-甲基苯酚、4-甲基苯酚、4-乙基苯酚、3,4-二甲基苯酚分别降低 52.2%,40.9%,39.1%,40.1% 和 45.2%,效果明显;而 2,6-二甲氧基苯酚增加较多,(E)-2-

甲氧基-4-(1-丙烯基)苯酚也有明显增加,这可能与茶叶添加量有关,也可能与茶叶及烟叶中化学成分在烟支抽吸过程中高温下发生的综合反应有关。但是增加的有害物质在烟气中的总量占比都非常少,因此含茶叶组卷烟比空白叶组卷烟有害成分分别有不同程度的降低,减害效果明显。

3 结论

本文采用涂布方式制成含茶叶的功能型再造烟叶,考察茶叶添加量对再造烟叶卷烟烟气酚类有害物质含量的影响,得出如下结论。

1) 对含不同比例茶叶的再造烟叶组卷烟和

表2 含茶叶的再造烟叶组与空白叶组有害物质对比

化合物	对照样	含 10% 茶叶烟样		含 12% 茶叶烟样	
		含量	变化率%	含量	变化率%
苯酚	27.16	0.57*	-97.9	13.00*	-52.2
2-甲基苯酚	8.83	7.52*	-14.8	5.21*	-40.9
4-甲基苯酚	21.40	19.10	-10.7	13.04*	-39.1
4-乙基苯酚	8.51	6.59*	-22.5	5.10*	-40.1
3,4-二甲基苯酚	6.65	4.89*	-26.5	3.65*	-45.2
2,4,6-三甲基苯酚	3.17	3.49	22.1	3.25	2.5
2,6-二甲氧基苯酚	2.03	3.48*	71.9	3.58*	76.7
(E)-2-甲氧基-4-(1-丙烯基)苯酚	3.31	3.87	16.9	3.88*	17.2
合计	86.55	54.2	-37.4	54.66	-36.8

注:表中含量值为3组平行实验的平均值,*表示 $P \leq 0.05$ 。

空白对照卷烟进行感官质量评吸,结果显示:添加10%,12%茶叶的烟样烟香谐调性较好,有效改善了卷烟的吸食品质。

2)对含不同比例茶叶的再造烟叶和空白对照卷烟的烟气进行GC-MS分析,共检测到8种有害物质,其含量较空白对照组分别有不同程度的降低,添加10%,12%茶叶的样烟有害成分总量分别降低了37.4%和36.8%,其中苯酚含量分别降低97.9%和52.2%,效果明显。

3)综合结果表明,使用含有茶叶的再造烟叶研发的卷烟产品,可有效降低吸烟过程中产生的有害成分的含量,同时可以有选择性地增加致香成分,提高卷烟品质。

4)由于GC-MS阈值设置或操作原因,卷烟烟气中邻苯二酚、对苯二酚化合物没有被考察到,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 黄天辉,孟冬玲,张祥民.气相色谱法分析卷烟烟气中有害成分的研究进展[J].理化检验·化学分册,2010,46(8):975.
- [2] 赵保路.吸烟、自由基和癌[J].自然杂志,1989,12:453.
- [3] 朱永兴.茶的功效及运用[J].中国茶叶加工,2010(3):43.
- [4] 徐建荣,王峰吉,林凯.茶叶再造薄片感官评价及其卷烟应用[J].江西农业学报,2010,22(12):61.
- [5] 姚二民,张峻松,梁永林.茶叶对降低吸烟危害的应用研究[J].茶叶科学,2009,29(2):127.
- [6] 姜绍通,罗建平,潘丽军.茶多酚降低卷烟烟气毒性的研究[J].食品科学,2001,22(11):60.
- [7] 晋照普,牛津桥,宋豪,等.茶叶再造烟叶对卷烟烟气挥发性香气成分的影响[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(1):38.
- [8] 姚二民,宋豪,李晓,等.茶叶再造烟叶对卷烟烟气成分的影响[J].茶叶科学,2012,32(4):319.
- [9] 蔡冰,王建新,陈祖,等.刚造纸法再造烟叶致香成分的分析[J].烟草科技,2002(6):19.
- [10] 汪华文.造纸法薄片在卷烟中的应用效果分析[J].烟草科技,2000(8):15.
- [11] GB5606.4—2005,卷烟·第4部分:感官技术要求[S].

一种改进型无刷直流电机控制 微粒群优化算法

孙玉胜, 薛贺杰

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对无刷直流电机在基速以下运行时抗干扰能力较弱的特点,设计了一种改进型微粒群优化算法(PSO),即通过改变学习因子和惯性权重来优化模糊控制器的量化因子、比例因子和控制规则。仿真结果表明,运用该算法调节时间短、超调量小、抗干扰能力强,能够实现无刷直流电机在较宽速度范围内的稳定运行。

关键词:无刷直流电机;微粒群优化算法;模糊控制;学习因子;惯性权重

中图分类号:TM33 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.011

An improved particle swarm optimization algorithm used in brushless DC motor

SUN Yu-sheng, XUE He-jie

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

Abstract: Aiming at overcoming the weak anti-jamming capability when brushless DC motor of electric vehicle runs under the base speed range, an improved particle swarm optimization (PSO) algorithm was designed, that is, by changing the learning factor and inertia weight to optimize quantitative factors, scale factor and control rules of the fuzzy controller. The simulation results verified that the algorithm had features of short control time, small overshoot, high anti-interference, so it could made the brushless DC motor achieve stable operation state over a wide speed range.

Key words: brushless DC motor; particle swarm optimization algorithm; fuzzy control; learning factor; inertia weight

0 引言

无刷直流电机(BLDCM)具有结构简单、易于维护、调速性能好等优势,在许多领域得到了广泛应用。传统的电机调速一般采用模糊PID或模糊PI控制技术,因其参数易调整且结构简单^[1]。但随着控制系统的复杂程度日益增加,尤其是对于多变量关联的时变非线性系统,传统模糊PID控制器控制参

数缺乏自调整能力、鲁棒性差等缺点日益凸显^[2]。

实验证明,模糊控制器在控制规则优化、参数在线调节等方面存在着难以克服的缺陷,对控制器的性能有不良影响。对于类似电机控制的时变系统,当系统特性发生变化之后,必须对比例因子和量化因子进行实时动态调整才能实现控制系统的稳定运行。所以如何对模糊PID控制器相关参数进行优化,以满足无刷直流电机控制系统的要求,成

收稿日期:2014-04-27

作者简介:孙玉胜(1964—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为微控制器应用、电机电器及控制。

为研究人员关注的热点,目前研究较多的有遗传算法、频域法等.其中,遗传算法效果较好,但存在收敛速度慢、运算量庞大等缺点.微粒群优化算法 PSO (particle swarm optimization) 是近年来提出的一种新型智能算法,具有均衡、灵活的寻优能力,且收敛速度快、易于实现.本文拟设计一种改进型微粒群优化算法,对模糊控制器参数进行在线优化,通过 Matlab/Simulink 建立无刷直流电机的调速模型,并通过仿真实验证明该系统的实用价值.

1 无刷直流电机控制模型

由图 1 所示无刷直流电机等效电路可得无刷直流电机三相定子电压平衡方程

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_n \\ U_n \\ U_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U_a, U_b, U_c 为三相定子电压; I_a, I_b, I_c 为三相定子电流; E_a, E_b, E_c 为三相定子反电势; L 为每相绕组自感; M 为两相定子绕组互感; P 表示微分算子 ($P = d/dt$).

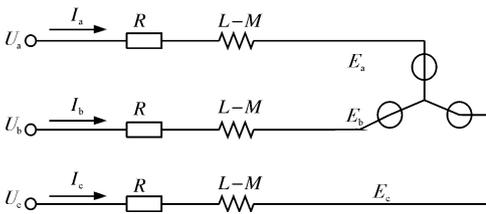


图 1 无刷直流电机等效电路

由基尔霍夫定律可知

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (2)$$

$$MI_a + MI_b = -MI_c \quad (3)$$

将式(2)(3)带入公式(1),可化简得到电机的电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_n \\ U_n \\ U_n \end{bmatrix}$$

图 2 为无刷直流电机双闭环调速系统结构图,速度环采用经改进型微粒群算法优化的模糊 PID 控

制器,电流环采用滞环调节器.转速环在外侧作为主环,电流环在内侧作为副环.

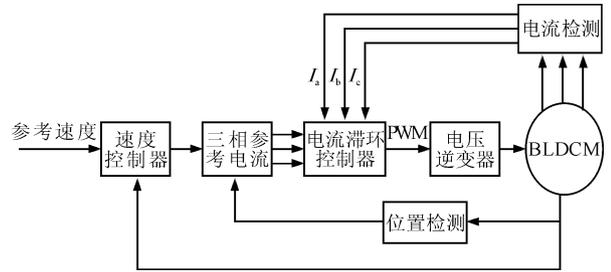


图 2 无刷直流电机双闭环调速系统结构

2 基于微粒群优化算法的控制方案

传统控制方案中应用较多的是模糊 PID 或 PI 控制方案,它们一般基于速度、电流进行控制,即通过模糊控制器对速度环偏差进行调节.将检测到的速度环偏差 e 及其变化率 ec 模糊化之后得到 $\Delta Kp, \Delta Ki, \Delta Kd$,作为 PID 控制器的修正量, PID 的比例、积分、微分参数可分别由其初始值 Kp_0, Ki_0, Kd_0 和修正量相加得到^[2].

但在实际应用中,对于类似电机控制的多变量复杂时变非线性系统,模糊 PID 控制器无法满足控制要求,因其控制规则缺乏自学习能力、控制参数无法随环境变化自动调整.实验证明,隶属度函数的底宽、模糊规则的选择、比例因子与量化因子之间的关系,都会对模糊控制器尤其是无刷直流电机这种时变参数非线性控制系统的动态性能造成很大的影响^[3].

所以,本文设计了一种改进型微粒群优化算法,对模糊控制器的相关参数进行实时优化.

2.1 传统的微粒群优化算法

PSO 算法是由 J. Kennedy 和 R. C. Eberhart 于 1995 年提出的一种演化计算方案. PSO 算法中,每个待优化问题的潜在解都被认为是 D 维搜索空间的一个粒子,粒子以某一速度在搜索空间飞行,并依据自身历史经验及本种群其他粒子的经验信息进行位置、速度的调整.每个粒子均有一个经目标函数确定的适应度值,微粒性能的优劣程度由适应度值来确定^[4].

初始化 PSO 得到一组随机解,然后通过迭代计算整个种群的最优解.每一次迭代过程中,微粒均通过跟踪 2 个极值点来进行自身位置、速度的更新,2 个极值点分别是自身最优极值点 P_i 和种群最优极值点 P_g .

传统 PSO 算法的数学描述为:由 m 个粒子构成的种群在 D 维搜索空间飞行,搜索进程中,每个粒子通过参考自身最优极值点和种群最优极值点进行自身位置、速度的更新. PSO 算法在运行过程中,微粒的 2 个极值点会不断更新,结束时输出 P_g .

假设第 i 个粒子当前位置 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$, 速度 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$, $1 \leq i \leq m, 1 \leq d \leq D$, 粒子自身最优极值点 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$, 本种群最优极值点为 $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})$ [5].

微粒的位置、速度计算公式如下:

$$\begin{aligned} v_{id}^{k+1} &= v_{id}^k + c_1 \varepsilon (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - x_{gd}^k) \quad (4) \\ x_{id}^{k+1} &= x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{aligned}$$

式④中, c_1, c_2 分别表示微粒的自我学习因子和社会学习因子,通常取正常数 2; $\varepsilon, \eta \in U[0, 1]$. 学习因子使粒子不仅能够自我学习,而且能向种群内最优粒子学习,因此每一粒子均能自动向自身最优解及全局最优解靠近.

2.2 改进的微粒群优化算法

传统微粒群优化算法具有收敛速度快、概念简单的优点,但也存在易分散、精度低等问题. 若 V_{\max} 、学习因子等参数设置较大,微粒群算法可能无法找到最优解,因而难以收敛;当收敛时,由于种群中所有粒子均趋向于最优解,搜索过程趋于同一化,从而影响后期收敛速度,且收敛至一定精度时无法再进行优化 [6]. 综上,本文提出了分段学习因子和时变权重相结合的改进型 PSO 算法,以进一步提高传统 PSO 算法的优化能力.

1) 分段学习因子对 PSO 算法的影响. 公式④中 c_1, c_2 决定了微粒自身历史经验与种群经验对微粒搜索过程的影响程度,反映了微粒相互之间的信息交流. 若 c_1, c_2 取恒定值时,通常置为常数,两者均取 2 时,一般能取得较好的效果;若 c_1, c_2 同步时变时,会降低算法最优解的质量;若 c_1, c_2 异步时变时,两者随时间异步变化,可在搜索初期使全局搜索能力增强,后期有效促进粒子收敛于全局最优解.

设置学习因子时,若 c_1 过大,粒子会倾向于在局部范围内进行搜索;若 c_2 较大,粒子会快速收敛于局部极值点. 所以,在搜索初期可设置 c_1 较大、 c_2 较小,以使所有粒子分散至整个空间中,从而使粒子位置趋于多样性. 迭代过程中, c_1 线性递减、 c_2 线性递增,后期使 c_1 较小、 c_2 较大,以使粒子收敛于全局极值点的能力增强.

2) 时变权重对 PSO 算法的影响. 惯性权重很大程度上决定了算法的性能,它可分为固定权重和时

变权重,两者的特点各不相同.

固定权重通常取 0 ~ 1 之间的数,它可使粒子在搜索过程中一直拥有相同的搜索能力. 当固定权重设置较大时,微粒可向新区域进行搜索,增强了全局搜索与开发性能. 当固定权重设置较小时,可强化微粒对当前区域的搜索能力. 种群较小时需要加强对新区域的搜索能力,否则算法容易收敛,此时要将固定权重设置大一点;种群较大时,为使每个微粒个体能够专注于搜索自身周围区域,需设置较小的固定权重值 [7].

时变权重表示在迭代计算中随时间对惯性权重进行线性递减,在搜索初期可使种群在较大惯性权重下,快速定位至最优解区域;在后期设置较小的惯性权重值,利用优秀的局部搜索能力发现全局最优解. 相对于传统微粒群算法,具有时变权重的微粒群算法能够加快收敛速度、增强优化性能.

本文设计的改进型 PSO 优化算法速度更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = w v_{id}^k + c_1 \varepsilon (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - x_{gd}^k)$$

上式中时变权重

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{Iter - \max} \times Iter$$

其中, w_{\min}, w_{\max} 值为常数,分别表示惯性权重的最小值和最大值; $Iter$ 表示当前迭代次数, ($Iter - \max$) 表示最大迭代次数.

综上,本文在搜索进程中,一部分迭代计算使用固定学习因子,另一部分使用时变学习因子. 在面向不同的寻优、尤其是多峰值搜索对象时,可以灵活调节粒子的自身经验和种群经验信息,从而使微粒能够较为快速、精确地向全局最优解收敛.

对种群中每一微粒的评价,都要通过对电机控制系统进行实验来检验. 调用 Fitness 函数计算每一微粒的适应度值 $fitness$, 函数输入量为系统的速度环偏差. 若得到的适应度值好于当前最优极值点,则立即更新微粒的极值. 种群中每个个体的适应度值都会在数组中记录,将所有适应度值与 P_g 比较,若所有粒子的适应度值最优解好于全局最优解,则将该微粒的适应度值置为全局最优解,并记录该微粒的序号.

3 仿真结果与分析

笔者在 Matlab/Simulink 中建立了无刷直流电机的调速系统模型,以进行系统特性分析.

仿真系统中,无刷直流电机各参数设置如下:

三相定子绕组电阻 $R = 1 \Omega$, 定子相绕组自感 $L = 0.019 \text{ H}$, 互感 $M = -0.0065 \text{ H}$, 转动惯量 $J = 0.006 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转矩常数 $K_T = 0.0185$, 反电势常数 $K_e = 0.4435$, 阻尼系数 $B_v = 0.0002$, 极对数 $p = 1$, 额定速度 $n = 2000 \text{ r/min}$, 直流供电电源为 200 V , 仿真时间 $t = 0.3 \text{ s}$.

本文分别搭建了基于传统 PSO 算法优化和基于改进型 PSO 算法优化的模糊 PID 调速模型, 2 种方案的转速、电流响应波形如图 3 所示.

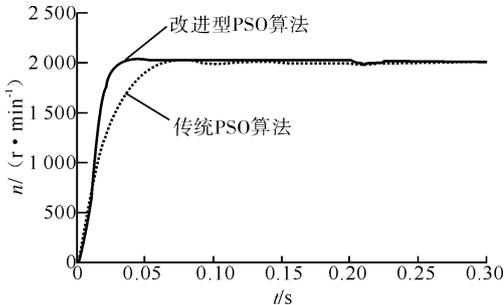


图3 基于传统 PSO 算法和改进型 PSO 算法的转速响应曲线

由图3可以看出,在传统 PSO 优化算法控制模式下,当 $t = 0.135 \text{ s}$ 时系统进入稳态;而在改进型 PSO 算法优化控制模式下, $t = 0.06 \text{ s}$ 系统即进入稳态,大大减少了调节时间.并且传统 PSO 算法超调量比较大,而改进型 PSO 算法基本无超调量,即改进型 PSO 优化算法能够有效减少系统超调量.当 $t = 0.2 \text{ s}$ 加载 1 N/m 的负载时,改进型 PSO 算法控制方案的转速波动相对较小,且很快进入稳定状态.

基于传统和改进型 PSO 算法的 A 相电流响应曲线如图 4 所示.由图 4 可以看出,在传统 PSO 算法优化控制模式下,电机启动初期峰值电流达 45 A ,在 0.135 s 进入稳态;而在改进型 PSO 算法控制模式下,启动初期峰值电流仅有 20 A , 0.1 s 即进入稳态.即改进型 PSO 算法响应速度快、且能够有效减少对电网电压的干扰.

所以,相比传统 PSO 算法优化模糊 PID 控制方案,改进型 PSO 算法优化控制方案具有调节时间短、超调量小、抗干扰能力强的优点.

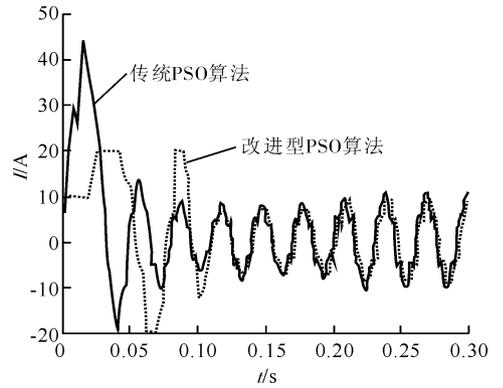


图4 基于传统 PSO 算法和改进型 PSO 算法的 A 相电流响应曲线

4 结语

针对传统 PSO 优化算法易分散、精度低的缺点,本文设计了将分段学习因子和时变权重相结合的改进型 PSO 算法,用以优化模糊 PID 控制.仿真结果表明,运用改进型 PSO 优化算法具有响应速度快、超调量小、抗扰动能力强的优点,在一些复杂变量控制场合,如无刷直流电机控制等,具有较好的实用价值.

参考文献:

- [1] 付光杰,杨帛润,高俊莹.基于改进粒子群算法的无刷直流电机控制研究[J].组合机床与自动化加工技术,2013(3):95.
- [2] 赵建勇,许林荣,徐交建.无刷直流电动机双模式控制[J].微特电机,2012,40(9):46.
- [3] 李凤祥,朱伟进.无刷直流电机双模控制技术研究与应用[J].电机与控制学报,2013,17(3):70.
- [4] 张焕琪.基于微粒群算法优化的模糊 PID 的无刷直流电机调速控制系统的研究[D].济南:山东大学,2011.
- [5] 包广清,刘家兵.基于粒子群优化模糊控制器无刷直流电机控制[J].电气自动化,2009,31(2):30.
- [6] 任志斌,王业占,梁建伟.基于粒子群优化设计的直流无刷电机控制系统研制[J].微电机,2011,44(8):64.
- [7] 蔡钟山,张认成,杨建红.沥青砂浆车液压系统的辨识与 PID 参数整定[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2011,26(5):27.

平行耦合微带线超宽带带通滤波器设计

杜海明, 乔幸帅, 赵红梅

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:将平行耦合微带线设计方法与微波仿真软件 ADS2009 相结合, 针对超宽带室内定位系统设计了带通滤波器. 该设计将多级平行耦合微带线进行级联, 解决滤波器频带窄、纹波特性差、插入损耗大等问题. 选取高度、间隔和长度 3 个参数对滤波器进行优化与仿真, 实物测量结果为插入损耗小于 3 dB, 带外抑制高于 10 dB. 与软件仿真结果相比, 该设计结构简单、性能优良, 可满足超宽带室内定位接收系统的需要.

关键词:超宽带; 带通滤波器; 平行耦合微带线

中图分类号: TM571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.012

Design of ultra wideband bandpass filter based on parallel coupled microstrip line

DU Hai-ming, QIAO Xing-shuai, ZHAO Hong-mei

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

Abstract: Combining the design method of parallel coupled microstrip lines with microwave simulation software ADS2009, a bandpass filter was designed for the UWB (ultra wideband) indoor positioning system. By taking advantage of cascading multilevel parallel coupled microstrip lines, some problems of the filter were settled, such as the narrow bandwidth, the bad ripple characteristics and the big insertion loss, etc. The three parameters of height, spacing and length were selected as the object of optimization and simulation of the filter, the measurement results of the material object are as follows: the insertion loss was less than 3 dB, the out band rejection was higher than 10 dB. Comparing the measured results with the simulation results, the design method had the advantages of simple structure and superior performance and met the needs of the UWB indoor positioning system.

Key words: ultra wideband (UWB); bandpass filter; parallel coupled microstrip line

0 引言

近年来,随着无线通信技术的发展,超宽带技

术受到越来越多研究人员的关注.超宽带通信因其所具有的高速率、低功耗、高保密性及其抗干扰能力强等特点^[1],展示出广阔的应用前景.2002年,美

收稿日期: 2014-03-02

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目(112300410144); 郑州轻工业学院青年骨干教师项目(2013XGGJS011); 郑州轻工业学院博士基金项目(2013BSJJ026)

作者简介: 杜海明(1977—),男,河南省灵宝市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为信号处理与检测.

通信作者: 赵红梅(1976—),女,河南省辉县人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为超宽带无线通信技术、阵列信号处理.

国联邦通信委员会(FCC)解除了超宽带技术在民用领域的限制,极大地激发了相关应用的研究和产业化进程,各种超宽带器件的研发也逐渐增加.滤波器作为射频前端关键器件之一,具有选频功能,可分离不同频率的信号,其作用是抑制不需要的频率信号,保证所需频率信号通过.因此,滤波器性能的优劣直接影响通信系统的质量.

要满足超宽带室内定位系统中接收机射频前端的需要,就要设计带通滤波器.在接收机系统中,设置一个带通滤波器在特定频段范围内以极低的损耗对天线的接收信号进行选取,为整个系统提供第一道抗干扰防线,其输出信号进入低噪声放大器.在低噪声放大器后另接一个带通滤波器,主要作用是确保所需频段的选取并抑制镜像频率,充分减小不必要的干扰,使系统性能满足设计要求.

目前针对超宽带定位系统所设计的滤波器,其带宽大多在 FCC 所限定的 3.1 ~ 10.6 GHz 之间^[2-4],不能满足超宽带室内定位系统中接收机的带宽要求,而且结构非常复杂.较为简单的平行耦合结构滤波器^[5-6],其频段主要集中在 2 ~ 3 GHz,但带宽较窄,同样不能够满足要求.鉴于此,本文拟针对超宽带室内定位接收系统的需要,设计一个中心频率为 7.3 GHz、带宽为 1.2 GHz 的带通滤波器,采用微带线工艺,以增强滤波器的高频性能,并提升接收系统的可靠性.

1 平行耦合微带线滤波原理

当频率接近或达到 GHz 时,分立元件已经不再适合构成滤波器,这时滤波器多由分布参数元件构成.

带通滤波器的基本单元是由 2 条相距很近的微带线构成的平行耦合节,如图 1 所示^[5].当 2 条没有屏蔽的传输线紧靠在一起时,由于传输线之间电磁场的互相作用,在传输线之间会产生功率耦合,这种传输线就称为耦合传输线.根据传输线理论,每条单独的微带线都可以等价为小段串联电感和并联电容,当微带线的长度为滤波器中心频率所对应波长的 1/4 时,该结构的微带线便具备了带通滤波器的特性.这种单独耦合节单元虽然具有典型的带通滤波器的特性,但是单个带通滤波单元难以具有良好的滤波器响应及陡峭的通带到阻带的过渡特性.因此,通常将 $N+1$ 个平行耦合节级联来构成更为实用的带通滤波器,如图 2 所示.图中平行耦合的

部分即为级联的耦合节组成的带通滤波器,而两端不参与耦合的单独的微带线是为连接测试用的 SMA 接头所设计的匹配单元,其特性阻抗 $Z_0 = 50 \Omega$,长度同样满足滤波器中心频率所对应波长 $1/4$ 的要求. Z_{0o} 与 Z_{0e} 为微带线的奇模、偶模通过公共接地板发生耦合效应而产生的奇模特性阻抗和偶模特性阻抗^[6],可表示为

$$Z_{0o} |_{i,i+1} = Z_0 [1 - Z_0 J_{i,i+1} + (Z_0 J_{i,i+1})^2] \quad (1)$$

$$Z_{0e} |_{i,i+1} = Z_0 [1 + Z_0 J_{i,i+1} + (Z_0 J_{i,i+1})^2] \quad (2)$$

$$J_{0,1} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_0 g_1}}, J_{i,i+1} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_i g_{i+1}}}, J_{n,n+1} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_n g_{n+1}}}$$

其中, Δ 为带通滤波器的相对带宽, g 为标准低通滤波器参数,下标 i 和 $i+1$ 表示图 2 所示的耦合单元.

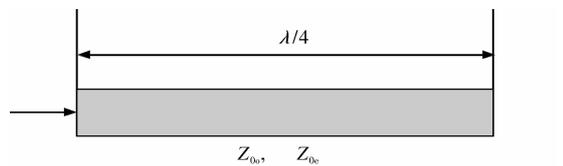


图1 带通滤波器基本单元示意图

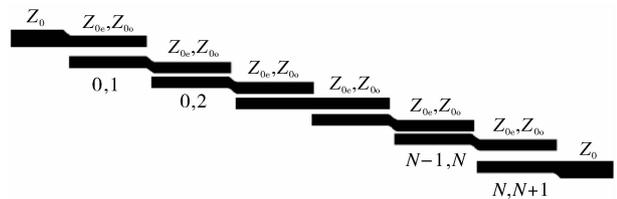


图2 级联耦合微带线带通滤波器示意图

2 平行耦合带通滤波器设计

笔者将平行耦合微带线滤波器设计方法与微波仿真软件 ADS2009 相结合,提出一种更加简捷的带通滤波器的设计方法,并采用参数优化的方法得到符合实际需求的滤波器参数.设计流程如图 3 所示^[7].

2.1 滤波器参数的计算

1) 所设计的滤波器的指标为:中心频率 7.3 GHz,带宽 1.2 GHz,带内衰减小于 3 dB,带内波纹 0.1 dB,微带线特性阻抗 $Z_0 = 50 \Omega$.根据以上参数查“切比雪夫滤波器衰减特性表”可得滤波器级数 N (带通滤波器单元为 $N+1$ 个),由“切比雪夫滤

“器件元件参数表”还可知具有带内波纹 0.1 dB 的 5 阶(6 个带通滤波器单元)切比雪夫标准低通滤波器参数如下: $g_0 = g_6 = 1, g_1 = g_5 = 1.1468, g_2 = g_4 = 1.3712, g_3 = 1.9750$.

2) 由公式①②可计算得到滤波器的奇模和偶模特性阻抗(见表 1),相移都为 90° .

3) 选取电路板材料为 RT/duroid 5880,微带线的参数为:基板的相对介电常数为 2.2,磁导率为 1,封装高度为 1.0×10^{33} mm,基板厚度为 0.787 mm,损耗角正切为 0.0009,表面粗糙度为 0 mm,导体厚度为 0.035 mm,导体电导率为 5.88×10^7 ,计算时采用的频率为 7.3 GHz.

根据表 1 数据与电路板材料及微带线参数,利

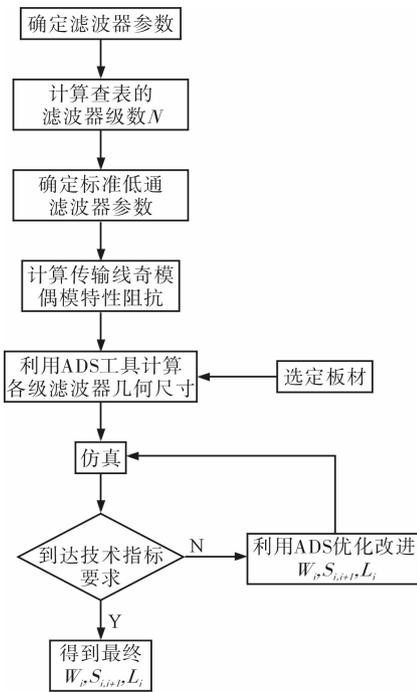


图 3 微带线带通滤波器设计流程

用 ADS 软件的 LineCalc 计算功能^[8],得到各节的物理参数(宽度 W ,间隔 S 和长度 L)见表 2.

2.2 滤波器的仿真与优化

在 ADS 仿真软件中搭建好微带线带通滤波器仿真原理图,如图 4 所示.以表 2 参数设定滤波器尺寸、介质参数和扫频参数,然后进行仿真.仿真结果见图 5.

由图 5 可以看出,中心频率并没有达到设计要求的 7.3 GHz,存在一定的偏移,且通带内的带宽也不满足 1.2 GHz 的要求,这是由于设计时没有考虑边缘场效应的特性而引起的.基于此,笔者利用 ADS 的优化功能,通过优化滤波器各节的 W, S, L 参数来改善滤波器的特性.

首先在 ADS 中建立优化电路,每次优化仿真后记录并分析结果,以便与优化前的结果进行对比.如果优化结果不能满足设计指标的要求,则需要改变优化参数的取值范围,待 S 参数曲线达到设计目标后停止优化.

表 1 奇模和偶模特性阻抗 Ω

耦合节	偶模特性阻抗	奇模特性阻抗
1	84.985	37.535
2	62.415	41.825
3	59.075	43.385
4	59.075	43.385
5	62.415	41.825
6	84.985	37.535

表 2 滤波器各耦合节物理参数 mm

滤波器参数	1	2	3	4	5	6
W	1.4739	2.1405	2.2394	2.2394	2.1505	1.4739
S	0.0999	0.4040	0.6130	0.6130	0.4040	0.0999
L	7.7716	7.5646	7.5292	7.5292	7.5646	7.7716

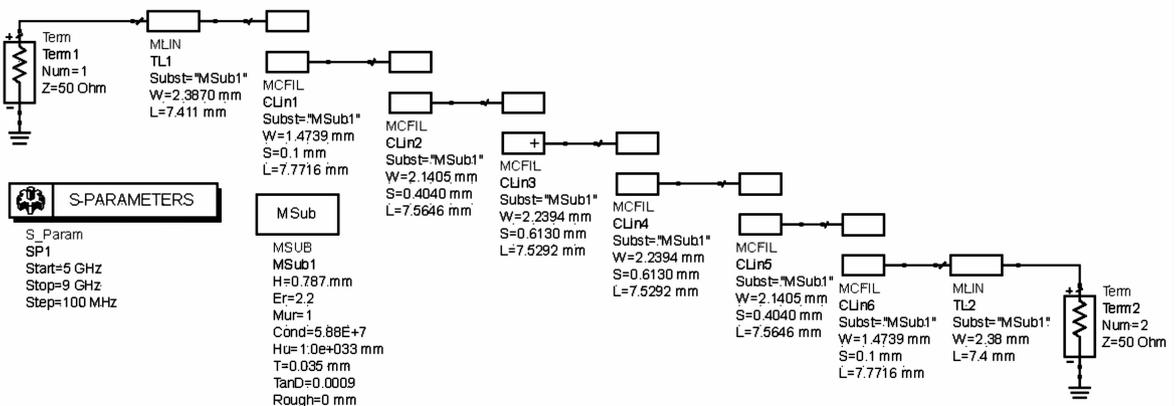


图 4 微带线带通滤波器仿真原理图

在优化过程中可以只对各节耦合微带线的线长、线宽及间隙3个参数进行部分调整,总结出各个参数与滤波器各项性能之间的关系,这样在优化过程中,可以有针对性地调整参数.例如微带线的线长主要影响滤波器的中心频率,在针对中心频率偏移问题时,就可固定其他参数而只针对线长进行优化.同理,对于其他的问题也同样可选取特定参数进行优化.这样不仅降低了优化的复杂度,也节省了优化时间.

经过反复优化后,得到最终参数为: $L_1 = 7.1 \text{ mm}$, $L_2 = 7.1 \text{ mm}$, $L_3 = 7.1 \text{ mm}$, $W_1 = 1.2 \text{ mm}$, $W_2 = 2.15 \text{ mm}$, $W_3 = 2 \text{ mm}$, $S_1 = 0.20 \text{ mm}$, $S_2 = 0.35 \text{ mm}$, $S_3 = 0.65 \text{ mm}$;优化后仿真结果如图6所示.带内的最大衰减为 -1.12 dB ,带内中心频率为 7.3 GHz ,带宽 1.2 GHz ,带外抑制高于 10 dB ,符合设计要求.

优化过程中,滤波器的物理参数与滤波器的特性参数的关系表现为:长度主要影响滤波器中心频率,长度越小中心频率越大,反之中心频率越小;带内衰减主要受间隔的影响,相邻耦合节间的间隔越

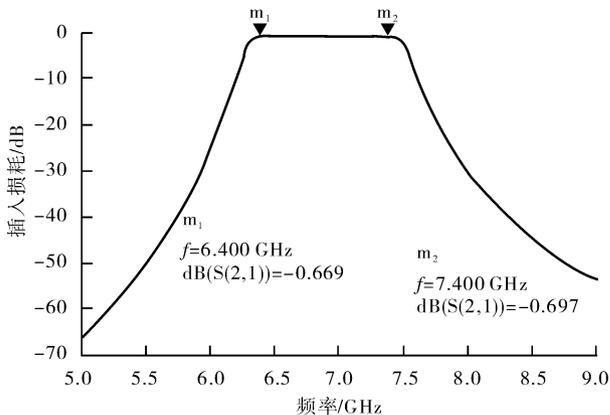


图5 优化前的滤波器仿真结果

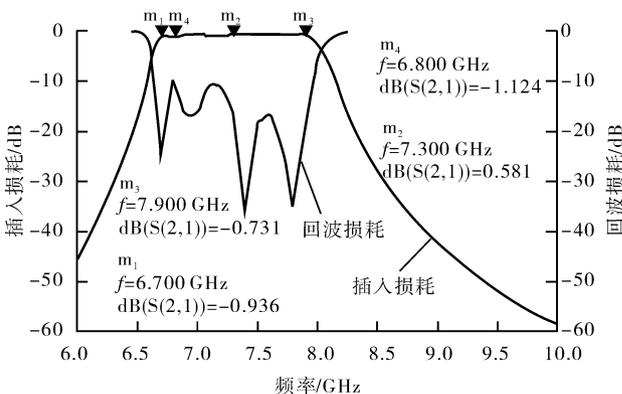


图6 优化后的滤波器仿真结果

大,带内平坦性越好,衰减越小;整个通带的带宽及带外衰减情况,由宽、间隔、长度3个参数共同作用.另外,设计过程中也需要注意一些问题,间隔不能过小,一般不能低于 2 mm ;相邻耦合节的宽度差距不能太大,否则仿真结果会严重恶化,将不再具备带通滤波器的特性.

2.3 滤波器参数实测结果

利用安捷伦矢量网络分析仪 N5230A 对滤波器进行实测,结果见图7和图8.将图7中的测试结果与图6中的仿真结果相比较,可以看出:中心频率和带宽都与仿真时的结果基本吻合,满足设计要求,只有通带内的衰减和仿真结果略有偏差,与要求的 3 dB 有一点差距,这可能与测试环境、制作工艺等有关.因为该滤波器工作频段非常高,很容易受到外界辐射的干扰.在制作工艺方面,由于微带线参数都在 mm 级,要做到特别精确有一定难度,且板材介电系数也可能存在偏差,这些因素都会引起实物测量结果出现偏差.



图7 带通滤波器 S21 参数实测结果

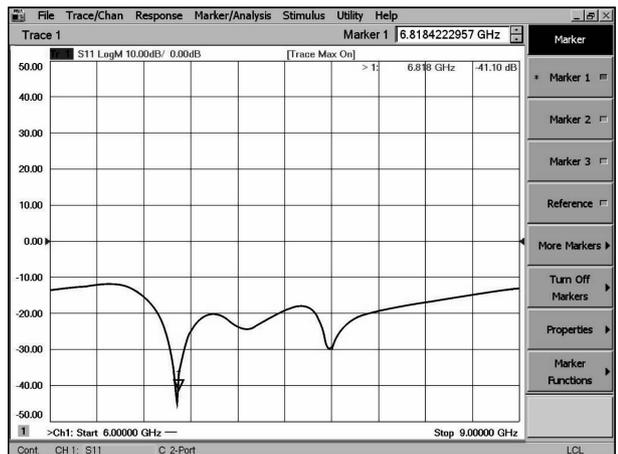


图8 带通滤波器 S11 参数实测结果

3 结论

本文将平行耦合微带线滤波器设计方法和微波仿真软件 ADS2009 相结合,针对 UWB 定位接收系统设计了一个结构简单,中心频率 7.3 GHz,带宽为 1.2 GHz 的平行耦合微带线带通滤波器.通过对该滤波器的仿真和实测,结果为:插入损耗小于 3 dB,带外抑制高于 10 dB.这表明所设计的滤波器可以作为 UWB 定位接收系统射频前端的核心器件,能够有效接收所需频段的信号,降低系统噪声.而且,这种滤波器设计方法简单、快捷,提高了滤波器设计的效率,对其他滤波器的设计有很好的借鉴作用.但在滤波器设计结构简单的同时其抗干扰能力有些削弱,因此,今后研究的重点就是在此方法的基础上设计一种结构不同、性能优良、抗干扰能力强的滤波器.

参考文献:

[1] 张中兆,沙学军.超宽带通信系统[M].北京:电子工

业出版社,2010.

- [2] 官雪辉,陈鹏,刘海文,等.超宽带滤波器的研究现状与进展[J].华东交通大学学报,2011(1):11.
- [3] 郑艺媛.无线通信领域超宽带滤波器的现状和发展趋势[J].微波学报,2012(S2):338.
- [4] 蔡鹏.超宽带带通滤波器的设计理论及其小型化研究[D].上海:上海大学,2006.
- [5] 张福洪,张振强,马佳佳.基于 ADS 的平行耦合微带线带通滤波器的设计及优化[J].电子器件,2010(4):39.
- [6] 李奇威,郭陈江,张兴华.平行耦合微带线带通滤波器的设计与优化[J].电子设计工程,2012(4):18.
- [7] 郑冬,王志刚.基于 ADS 的平行耦合带通滤波器的设计[J].电子产品世界,2010(10):30.
- [8] 黄玉兰.ADS 射频电路设计与典型应用[M].北京:人民邮电出版社,2010.

(上接第 29 页)

glucosylation of hydroxy compounds using glucopyranosyl fluoride[J]. Chem Lett,1981,3:431.

- [21] Tsegay S, Williams R J, Williams S J. Synthesis of glycosyl fluorides from thio-, seleno-, and telluroglycosides and glycosyl sulfoxides using aminodifluorosulfonium tetrafluoroborates[J]. Carbohydr Res,2012,357:16.
- [22] Manabe S, Ito Y. Hafnium(IV) tetratriflate as a glycosyl fluoride activation reagent[J]. J Org Chem,2013,78:4568.
- [23] Sasaki K, Matsumura S, Toshima K. A novel glycosidation of glycosyl fluoride using a designed ionic liquid and its effect on the stereoselectivity[J]. Tetrahedron Lett,2004,45:7043.
- [24] Okada Y, Asakura N, Bando M, et al. Completely β -selective glycosylation using 3,6-O-(*o*-Xylylene)-bridged axial-rich glucosyl fluoride[J]. J Am Chem Soc, 2012, 134:6940.
- [25] Gu X Y, Chen L, Wang X, et al. Direct glycosylation of

bioactive small molecules with glycosyl iodide and strained olefin as acid scavenger[J]. J Org Chem,2014,79:1100.

- [26] Baldoni L, Marino C. Facile synthesis of per-O-tert-Butyldimethylsilyl- β -d-galactofuranose and efficient glycosylation via the galactofuranosyl iodide[J]. J Org Chem, 2009,74:1994.
- [27] Schombs M, Park F E, Du W, et al. One-pot syntheses of immunostimulatory glycolipids[J]. J Org Chem,2010,75:4891.
- [28] Perrie J A, Harding J R, King C, et al. Glycosidation with a disarmed glycosyl iodide: promotion and scope[J]. Org Lett,2003,5(24):4545.
- [29] Ko Y J, Shim S B, Shin J H. Facile synthesis of 2-O-Iodoacetyl protected glycosyl iodides: useful precursors of 1,2-Linked 1,2-trans-glycosides[J]. Org Lett, 2009, 11(3):609.

一种有源功率校正的单相交直流变换电路设计

吴必瑞, 谢善娟, 郑乃清

(宁德师范学院 物理与电气工程系, 福建 宁德 352100)

摘要:针对传统的交直流变换电路存在功率因数较低、易产生电网污染等问题,设计了一种以 Boost 电路为主电路、以 MSP430 单片机为微处理器的新型的单相交直流变换电路. 该设计采集电压、电流信号,通过 MSP430 执行双闭环运算,采用有源功率因数校正技术产生 PWM 波,控制变换电路中 MOSFET 管的通断,同时实现交流侧功率因数校正. 测试数据表明,该系统电路设计能够输出 36 V 的稳定电压,负载调整率最低可达到 0.334%,功率因数调整可达到 0.96 以上,可满足性能指标要求,且具有较高的控制精度.

关键词:单相交直流变换电路;功率因数校正;MSP430;PWM 控制

中图分类号:TM86 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.013

Design of single-phase AC/DC inverter of active power factor correction

WU Bi-rui, XIE Shan-juan, ZHENG Nai-qing

(Department of Physics & Electrical Engineering, Ningde Normal University, Ningde 352100, China)

Abstract: Aiming at the low power factor and the pollution of power grid of conventional AC/DC converter, a Boost circuit, of which AC/DC converter was based on MSP430 was designed. The design, adopting monitors voltage and current signal, through the implementation of double closed loop operation MSP430, using the active power factor correction (APFC) technology to produce PWM wave, controlled on-off conversion circuit MOSFET, and at the same time realized the active power factor correction. The test data showed that this conversion circuit could output the stability voltage of 36 V. Load adjustment rate could reach 0.334%, the lowest power factor adjustment could reach above 0.96. It could meet the requirements of the performance index and had higher control precision.

Key words: single-phase AC/DC inverter; power factor correction; MSP430; PWM control

0 引言

随着电力电子装置越来越多地使用,谐波大量产生,而传统的交直流(AC/DC)变换电路由二极管或晶闸管构成,若电网中注入大量谐波和无功,则会构成电网污染. 国际电工委员会早在 1988 年就对谐波标准进行了修正,传统的变换电路因谐波超标,已逐步被取代^[1]. 变换器的无源滤波技术,多采

用 LC 等无源器件,体积大、功耗高. 采用有源功率因数校正(APFC),能使 AC/DC 变换电路的网络功率因数接近 1,不会产生谐波电流^[2]. 文献[3]采用功率因数调整芯片 UC3854 实现高功率因数电源系统设计,能实现高达 0.8~1 的功率因数调节和稳定的电压输出,但外围电路设计较复杂,电源输出参数的可控程度较低. 另一种功率因数调整和电压稳定输出的控制电路主要由误差放大器、乘法器、除

收稿日期:2014-02-22

基金项目:福建省科技计划项目(2011H0018);宁德师范学院服务海西建设项目(2011H202,2012H307)

作者简介:吴必瑞(1981—),男,福建省宁德市人,宁德师范学院讲师,硕士,主要研究方向为电气自动控制系统.

法器、脉宽调制器、震荡发生器和推挽式输出驱动电路构成,可用单片机或硬件电路实现功率因数的调整,但电路硬件设计和调试均比较复杂^[4-5].文献[6-8]采用全控 PWM 整流电路,但控制电路中电流闭环系统构造复杂,对实现电路的功率因数调节有消极影响,且硬件电路设计较复杂,电路调试难度相对较大.

鉴于此,文中拟以 Boost 电路为主电路,以 MSP430 单片机为微处理器,采用 APFC 技术设计单相 AC/DC 变换电路,以解决传统交直流变换电路普遍存在的功率因数较低、易产生电网污染等问题.

1 系统的组成与功能

APFC 是指通过控制开关器件,使输入电流波形跟踪输入电压波形,即通过有源电路使输入侧功率因数提高.相对于采用电感和电容的无源功率因数校正技术,虽然 APFC 电路略微复杂一些,但功率因数的改善非常明显.单相 AC/DC 变换电路控制原理如图 1 所示,通过 APFC 控制 MOSFET 使输入电流波形跟随输入电压波形.图中直流变换器输出电压 u_c 与设定电压 U_c^* 作差值运算后,经 PID 调节,与输入交流电经整流后的输入电压 u_d 作乘法运算,构成电压外环.乘法器的输出电流 I^* 作为电流环的给定值,与电感电流 i_F 作差值运算后,经过 PID 调节,构成电流内环,输出 PWM 信号,控制 MOSFET 的通断.变换器输出电压 u_c 与设定的电压 U_c^* 作差值运算的目的是判断两者的电压是否相同,乘法器的输出电流 I^* 作为电流内环给定信号,目的是使电感电流 i_F 与电压波形 u_d 相位一致.由 Boost 直流变换器的工作原理可知,电路电感 L 中的电流有连续和断续 2 种工作模式,控制电流环中的 PWM 信号即开关 MOSFET 的驱动信号也有 2 种产生方式:一种是电感电流临界连续的控制方式,另一种是电感电流连续的控制方式.

2 主要器件的选择与参数计算

2.1 整流桥的选择

本文设计的隔离变压器输出交流电压为 24 V,整流桥的电流最大可达 6 A,为了得到较好的直流量,选择整流桥的耐压为 100 V 以上,正向电流 ≥ 8 A.

2.2 电感的选择

电感决定输入侧高频纹波电流的大小,且它的值与纹波电流的大小有关.电感值由输入侧的交流电流峰值决定.由于最大的峰值电流出现在电压最小、负载最大时,所以有

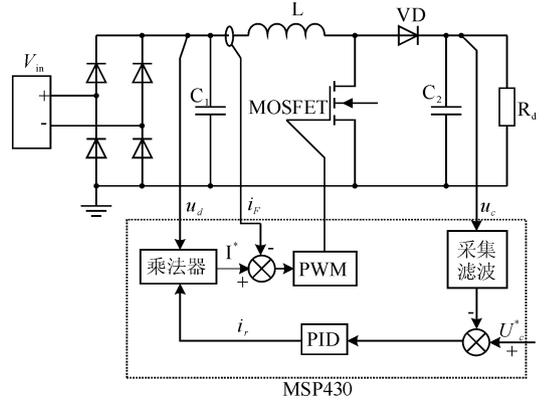


图 1 单相 AC/DC 变换电路控制框图

$$I_{L(pk)} = \frac{\sqrt{2} \times P_{out}}{V_{in(min)}} = \frac{\sqrt{2} \times 72}{20} = 5.303 \text{ A}$$

本文设计的变换电路输入电流峰值为 4.42 A,出现在交流电压为 20 V 时.假如容许 20% 的电流脉动,则有

$$\Delta I = 0.2 \times I_{L(pk)} = 1.06 \text{ A}$$

在升压型转换器中,最大纹波电流发生在占空比为 50% 时,即升压比 $M = \frac{V_o}{V_{in}} = 2$ 时.电感值是由半波整流最低输出电压时的电流峰值、占空比和开关频率决定的,其关系式如下:

$$I_{pk} \text{ 时的占空比 } D = \frac{V_o - V_{in(pk)}}{V_o} = \frac{36 - 26}{36} = 0.28,$$

$V_{in(pk)} = 20$ 输入电压为最低;

$$L = \frac{V_{in(pk)} \times D}{f_s \times \Delta I} = \frac{20 \times 0.27}{20 \times 10\,000 \times 0.9} = 3 \text{ mH},$$

设计中取 $L = 500 \mu\text{H}$.

2.3 输出电容的选择

输出电容的大小由输出电压的波动程度决定.在 MOSFET 管导通时,负载的输出电流靠输出电容放电维持.设 MOSFET 管导通时的电压变化为 ΔU ,假设负载流过的电流在此期间恒定,则电容电压和负载电压下降量

$$\Delta U = \frac{1}{C} I \alpha T$$

式中, α 为占空比, T 为周期/s.根据上式即可确定输出电容的大小, ΔU 与 I 和 α 均有关.考虑到输出电容是由容许的输出最大纹波电压来决定的,电容的容量应满足

$$C \geq \frac{I_{omaz} \alpha_{max} T}{\Delta U}$$

式中, I_{omaz} 为输出电流的最大值.估算出电容选择需大于 3 300 μF ,在本设计中电容选择 4 700 μF .

2.4 功率管的选择

功率 MOSFET 具有导通电阻低、负载电流大等优点。栅极驱动器的负载能力必须足够大,以保证在系统要求的时间内完成对栅极等效电容的充放电。经计算,流经 MOSFET 管的电流理论平均值约为 5 A。所以 MOSFET 应选用平均电流 > 10 A、电压 < 50 V 的管子,实际选用 IRF540N。

2.5 升降压二极管的选择

采用肖特基二极管代替二极管,能降低开关工作频率,减小开关损耗,提高电源的效率。考虑正向导通的压降及反向的恢复时间,本设计选用 MUR1660C 肖特基二极管。

3 硬件电路设计

3.1 主电路设计

主电路原理如图 2 所示,交流变压器的输出信号经过整流桥后,变成 24 V 的直流电,故采用 Boost 升压斩波电路实现 36 V 的电压输出以及功率因数

的校正。变换电路的电压采集,采用电阻分压的原理获得。电流采集是采用通过 0.05Ω 的无感阻获得的电压,经 INA138 进行高精度的放大输出后用于 AD 采集。相比采用霍尔传感器采集信号,图 2 所示的原理大大提高了设计电路的性价比。

3.2 控制电路和驱动电路设计

驱动电路原理图如图 3 所示。驱动芯片采用 IR 公司的 6 输出高压 IR2130 驱动器,IR2130 用来驱动 N 沟道 MOSFET 或 IGBT 管,最高电压可达到 600 V。IR2130 内部具有电流保护电路,具有启动关断输出通道功能。笔者在单片机与驱动电路之间增加光耦隔离电路,以防止信号干扰。

4 软件设计

整个程序的编写采用 C 语言,主要包括主程序、AD 中断服务子程序、定时器下溢中断服务子程序、捕获中断服务子程序、保护中断服务子程序、延迟子程序等。主程序软件流程如图 4 所示。

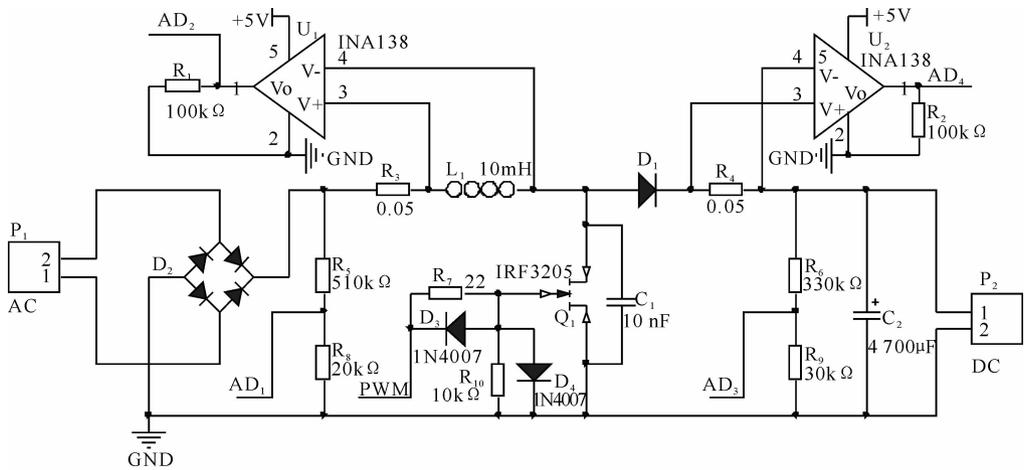


图 2 主电路原理图

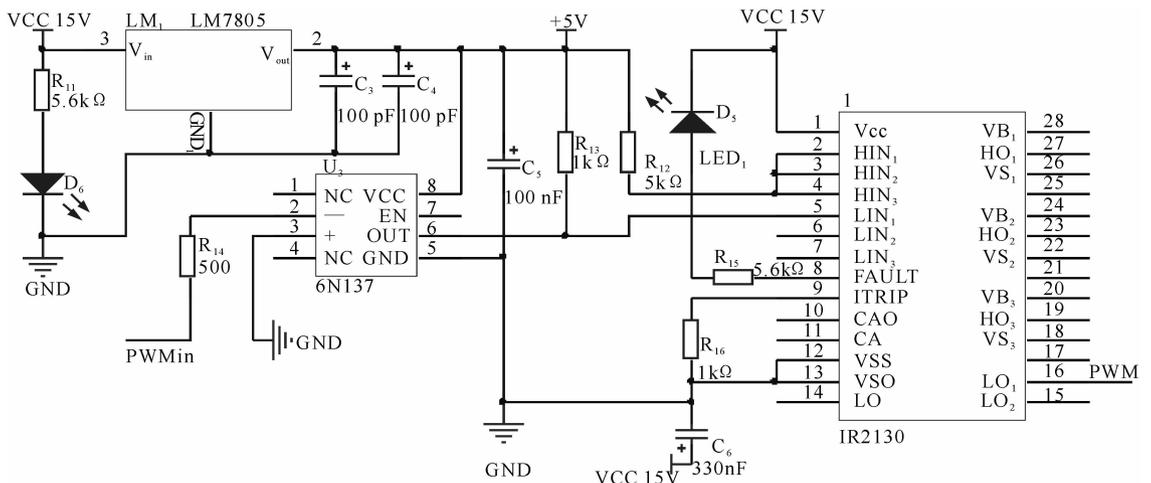


图 3 驱动电路原理图

笔者采用 MSP430 内置的 ADC12 模块,实现 4 路信号的模数转换.其 A/D 采样子程序流程见图 5.

5 测试结果与分析

为了验证本设计的运行效果,采用泰克 DPO2014 数字示波器和福禄克 F18B 数字万用表,通过软件硬件的联调,对所设计电路的负载调整率和电压调整率进行测试,进而得出功率因数的测试结果(见表 1,表 2).由表 1,表 2 可知,设计的电路工作稳定,具有输入输出短路保护功能,满足性能指标的要求.

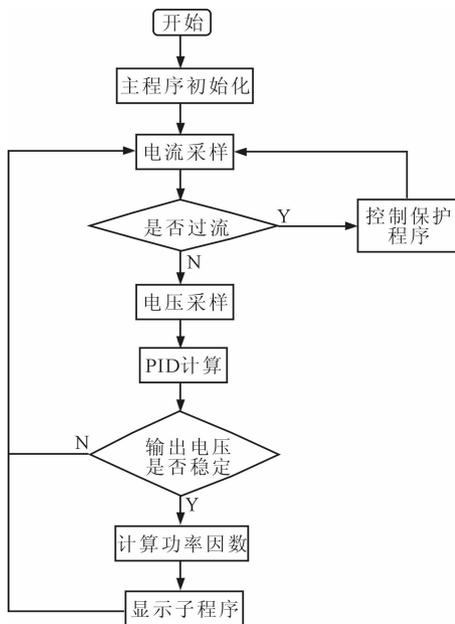


图 4 主程序软件流程图

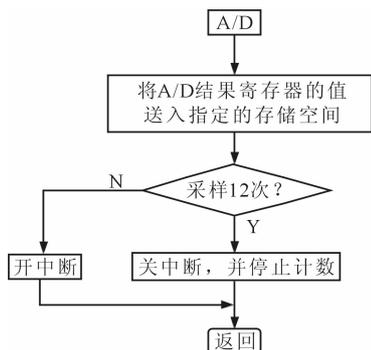


图 5 A/D 子程序流程图

表 1 调整率测试结果

输入电压/V	输出电流/A	输出电压/V	调整率/%
24.0	0.2	35.9	负载调整率为 0.334%
24.0	2.0	36.02	
20.0	2.0	36.0	电压调整率为 0.55%
30.0	2.0	36.2	

表 2 功率因数测试结果

输入电压/V	输出电压/V	输出电流/A	功率因数
24.0	36.0	2.0	0.96

6 结语

本文设计了一种以 Boost 电路为主电路,以 MSP430 单片机为微处理器的有源功率校正的单相交直流变换电路.实验表明,由于使用 MSP430 单片机为控制器件,使得硬件电路简单、器件少、体积小,降低了成本.测试结果显示,该系统电路设计能够输出 36 V 的稳定电压,负载调整率最低可达到 0.334%,具有输入短路保护和输出短路保护功能,功率因数调整可达到 0.96 以上.当输出电流大于额定值时,会自动启动保护动作,立即关闭电源,从而满足了性能指标的要求,且具有较高的控制精度.此外,由于网侧输入电压的功率因数较高,故可减少谐波对电网的影响,提高工作效率.

参考文献:

- [1] 张厚升,张晓斌,吴小华.单相 Boost 功率因数校正器的优化设计[J].电力电子技术,2005,39(3):36.
- [2] 马庆安,李群湛,邱大强.基于直接功率控制的单相 AC/DC 变流器控制器设计[J].电工技术学报,2012,27(7):251.
- [3] Giri F,Abouloifa A,Lachkar I,et al. Formal framework for nonlinear control of PWM AC/DC boost rectifiers controller design and average performance analysis[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2):323.
- [4] 张厚升.基于 UC3854 的高功率因数校正器设计[J].电力自动化设备,2007,27(1):80.
- [5] 王久和,李华德,王立明.电压型 PWM 整流器直接功率控制系统[J].中国电机工程学报,2006,26(18):54.
- [6] 曹晓冬,谭国俊,王从刚.一种低开关频率 PWM 整流器的满意预测控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(27):69.
- [7] Rodriguez J,Pontt J,Cesar A. Predictive current control of a voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(1):495.
- [8] 韩愚拙,林明耀,郝立.电压型 PWM 整流器三状态直接功率控制策略[J].电工技术学报,2013,28(5):208.

基于 PSIM 的光伏发电最大功率跟踪技术仿真

顾冬冬, 金楠, 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:利用 PSIM 软件设计了光伏发电最大功率跟踪(MPPT)仿真模型. 该模型功率主电路采用 BUCK 变换器,检测电路用于测量光伏电池板电压和电流信号,控制电路使用动态链接库(DLL)模块控制主电路开关管通断,编译后的 DLL 文件直接与 PSIM 链接进行仿真. 该模型可快速有效地跟踪光强、温度变化,具有建模简单、仿真速度快等优点.

关键词:PSIM 仿真;光伏发电;最大功率跟踪;动态链接库

中图分类号:TM615 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.014

The simulation of photovoltaic power generation maximum power point tracking technology based on PSIM

GU Dong-dong, JIN Nan, CUI Guang-zhao

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

Abstract: Maximum power point tracking (MPPT) simulation model of photovoltaic power generation system was designed using PSIM software, in MPPT simulation model, the power circuits adopt BUCK converter, the signal detecting circuits measured voltage and current values of photovoltaic cells, the control circuits used dynamic link library (DLL) module to control the power switch module, the compiled DLL files could be linked to PSIM directly. The model could track irradiation and temperature rapidly, and it had the advantages of modeling simple and quick simulation.

Key words: PSIM simulation; photovoltaic power generation; maximum power point tracking (MPPT); dynamic link library (DLL)

0 引言

太阳能作为一种可再生的清洁能源,正在发展成为世界能源组成中的重要部分. 光伏发电技术利用光伏电池的光电效应将光能直接转换成电能,是利用太阳能的重要方式之一. 利用电力电子技术和控制理论可实现光伏发电最大功率跟踪 MPPT (maximum power point tracking)、提高光伏发电效率. 目前,国内外已提出多种 MPPT 方法^[1-2]. 其中,

扰动观察法和电导增量法由于被测参数少、结构简单、易于实现等特点,应用较广泛. 扰动观察法是先比较相邻 2 次采样的光伏电池输出功率,通过提高或降低工作电压寻找光伏电池最大功率工作点. 电导增量法通过测量比较光伏电池电导增量和瞬时电导实现 MPPT^[3].

目前,常用的电力电子仿真软件有 Saber, PSpice, Matlab, PSIM (power simulation) 等. 其中, Saber 功能最强,可仿真电力电子元件、电路和系统,

收稿日期:2013-12-27

基金项目:郑州市科技攻关项目(112PPTGY249-6);郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(01010)

作者简介:顾冬冬(1991—),女,山东省济宁市人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为新能源发电.

仿真结果真实性好, 数据处理量大, 但仿真速度慢、价格昂贵、使用较复杂, 不利于推广, 目前多在大型企业应用. PSpice 的仿真波形与电路实验波形十分接近, 对设计电路拓扑有重要意义, 但求解收敛性差, 仿真闭环系统时很难收敛. Matlab 有丰富的库函数供用户直接调用, 用户可根据需要建立、扩充库函数, 对控制部分有简捷、高效的建模方式和强大的建模能力, 但循环运算效率低、封装性不好. PSIM 软件是电力电子系统专用仿真软件, 能够以理想化元件模型建模, 提供功率级电路和控制电路元件模型, 采用较为简单的梯形法求解系统方程, 具有仿真速度快、用户界面友好等特点^[4], 其 DLL 模块可用于功率电路和控制电路, 允许用户使用代码编程, 具有灵活、高效的特点, 能够实现 MPPT 算法仿真研究. 本文拟将 PSIM 软件应用于新能源发电 MPPT 系统的分析与设计, 以达到可方便地验证所建立数学模型正确性和控制策略合理性的目的.

1 光伏发电 MPPT 原理

光伏电池利用 P-N 结接收太阳光照, 其产生的光伏特效应直接将光能转换成电能. 光伏电池单元的外特性模型可看成恒流源与二极管并联回路. 光伏电池输出电流可表示为^[5]

$$I_L = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{qU_D}{AkT}\right) - 1 \right] \quad \text{①}$$

其中, I_L 为光伏电池的输出电流/A, I_{ph} 为光生电流/A, I_o 为光伏电池内部等效二极管 P-N 结反向饱和电流/A, q 为电子电荷/C, U_D 为光伏电池等效二极管端电压/V, A 为光伏电池内部 P-N 结曲线常数, k 为波尔兹曼常数, T 为光伏电池所处环境绝对温度/K.

根据式①, 不同温度和照度条件下, 光伏电池功率 - 电压特性曲线见图 1. 其中虚线是最大功率线, P_{max} 是输出的最大功率. 图 1a) 表明随着光照强度增强, 曲线向上平移; P_{max} 增大; 图 1b) 表明随着温度升高, 光伏电池开路电压减小. 温度对开路电压影响较大, 短路电流只是略有增加, P_{max} 减小; 温度恒定时, P_{max} 与光照强度成正比; 光强恒定时, P_{max} 与温度成反比.

由此可知, 光伏电池输出特性受外界条件影响, 在特定的输出电压下, 输出功率最大, 这一时刻为最大功率点. MPPT 使光伏电池工作点随外界环境的改变进行适当调整, 使光伏电池始终处于输出最大功率的工作状态.

光伏发电 MPPT 仿真模型结构见图 2, 光伏电池板产生的直流电能经 BUCK 电路向蓄电池充电. 光伏电池板输出电压、电流值经检测电路送至控制算法模块, 该模块利用 DLL 技术执行算法, 控制主电路开关管通断, 实现光伏发电 MPPT. 当需要改进 MPPT 算法时, 只需根据新算法进行改编, 将生成的 DLL 文件链接到 PSIM 中, 这种通过创建自定义 DLL 模块实现仿真的方法更加方便、灵活.

2 MPPT 算法实现

目前比较常用的 MPPT 算法^[6]中, 扰动观察法具有跟踪效率高, 易于实现的特点, 是最常用的 MPPT

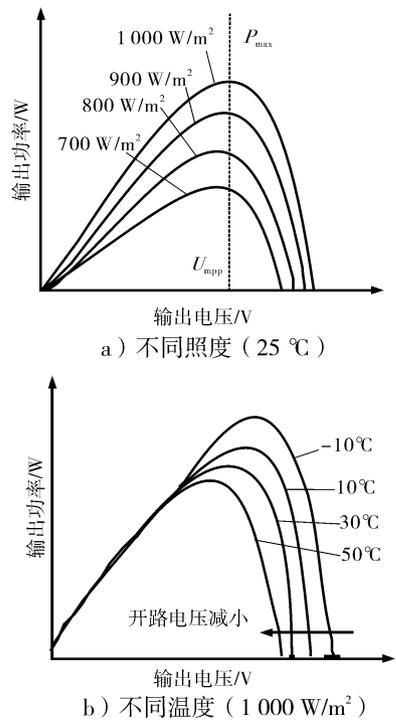


图 1 光伏电池功率 - 电压特性曲线

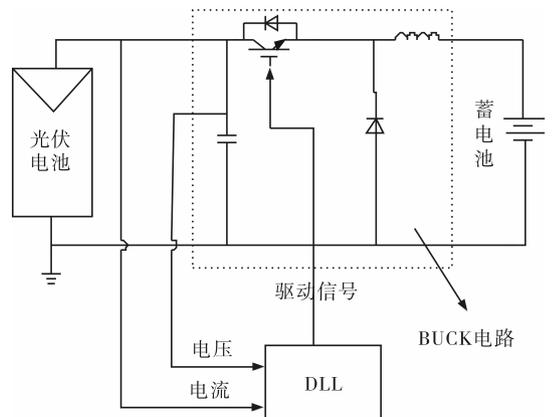


图 2 光伏发电 MPPT 仿真模型结构

方法. 其具体流程见图3. 该方法工作原理如下: 假设系统处于稳定运行状态, 首先检测计算该状态下光伏电池输出电压 U_{k-1} 和输出功率 P_{k-1} , 在此基础上, 对光伏电池进行正向电压 ΔU 扰动, 再次确定光伏电池输出功率 P_k . 若输出功率增加, 光伏电池工作于图1a)中最大功率线左侧, 可继续增加正向扰动电压; 若所测输出功率降低, 光伏电池工作于最大功率线右侧, 则应反向增加扰动电压, 使工作点左移. 通过调节光伏电池工作电压 U_0 , 保证光伏电池稳定工作在最大功率点附近, 实现MPPT.

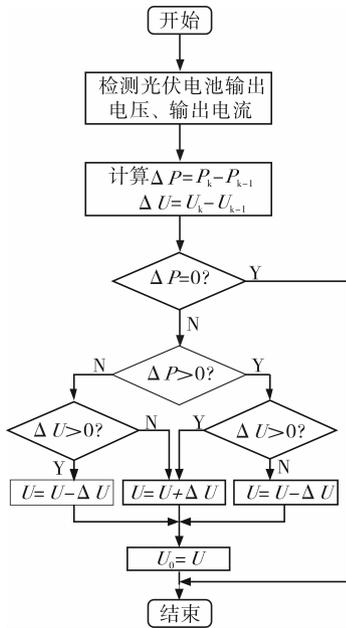


图3 扰动观察法MPPT流程图

3 光伏发电 MPPT 仿真模型设计

PSIM 是电力电子领域^[7]、电机驱动控制领域和功率转换系统专用仿真软件, 仿真速度快, 用户界面友好. PSIM 由 SIMCAD 和 SIMVIEW 两个软件组成. PSIM 提供太阳能、风能模块直接供用户使用, 仿真时只需更换或改进部分功能模块, 不但节省控制方案的设计周期, 还可快速验证所设计的控制算法, 充分利用计算机仿真的优越性.

PSIM 中 DLL 模块可链接由 Microsoft Visual C++ 编译生成的 DLL 文件. DLL 模块接收检测信号后, 实现控制算法, 将计算所得控制量返回仿真电路. 通过修改系统参数或人为加入不同扰动因素, 比较不同温度、光照条件下系统的动、静态性能; 或者模拟相同实验条件, 验证不同控制策略的优劣, 为新能源发电最大功率跟踪系统的分析和设计提供有效的手段和工具.

图4 为该系统 PSIM 仿真模型. 该模型中, 仿真时间为 0.1 s, 步长间隔为 1 μs. 温度设置为 25 °C, 光照强度在 1 000 W/m² 和 800 W/m² 之间阶跃变化, 模拟实际运行时光强的不稳定性, 观察 MPPT 效果. 该模型采用 DLL 模块, 根据输入信号确定参考电压, 实现扰动观察, 与三角波比较生成 PWM 信号控制系统输出最大功率. 仿真模型设计方法如下.

3.1 Visual C++ 程序设计

设计步骤如下: 使用文件—新建—工程—Win32 Dynamic-Link Library 新建空 DLL 工程; 使用

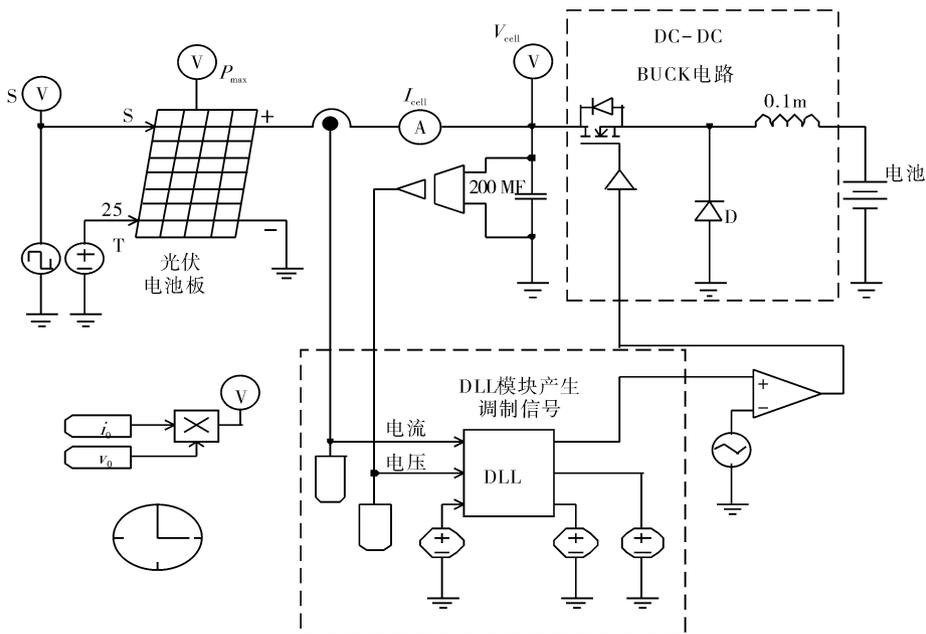


图4 系统PSIM仿真模型

工程一增加到工程一文件,选择已编写的 MPPT 代码文件,加入到工程;组建一配置一添加 Win32 Release;使用组建一全部重建,即可产生 DLL 文件。

3.2 PSIM 模型设计

设计步骤如下:1)配置光伏电池参数,采用 PSIM 自带的光伏电池板物理模型,参考温度 25 °C,参考光照强度为 1 000 W/m² 时,开路电压 21.1 V,短路电流 3.8 A,最大功率点处电压 17.1 V,最大功率点处电流 3.5 A;2)配置主电路参数,电感 0.1 mH,滤波电容 200 μF,开关频率 100 kHz;3)DLL 模块设计,选用三输入三输出 DLL 模块,输入信号为光伏电池输出电流和电压,使用 Elements-Other-Function Blocks-DLL Block 放置 DLL 模块;4)使用 Options-Set Path 将 DLL 文件所在目录设置为搜索路径或当前路径,双击 DLL 模块,设置其 File name 与 DLL 文件名相同。

图 5 为使用 DLL 模块的 MPPT 仿真波形图。实际温度 25 °C,在光强为 1 000 W/m² 时,光伏电池输出电流为 3.74 A;光强为 800 W/m² 时,输出电流为 3.0 A。输出电压在仿真开始 1.5 ms 后稳定在 15.5 V 左右。输出功率在 57.4 ~ 45.9 W 范围内跟随光强阶跃变化。经分析可知,在光强变化时,光伏电池输出功率可有效跟踪最大功率且输出电压稳定。

4 结论

本文利用 PSIM 软件设计了光伏发电最大功率跟踪(MPPT)仿真模型,运用该模型可有效追踪光照强度、温度等外界条件的变化,验证了扰动观察方法的有效性。该模型具有建模简单、仿真速度快等优点。DLL 模块的使用使 MPPT 仿真更加方便、灵活。当采用不同 MPPT 方法时,只需修改检测模块和相应程序,充分发挥 PSIM 的优势,缩短开发周期,提高研发效率,对新能源发电最大功率跟踪技术的研究有重要意义。

参考文献:

[1] De Brito M A G, Galotto L, Sampaio L P, et al. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3):1156.

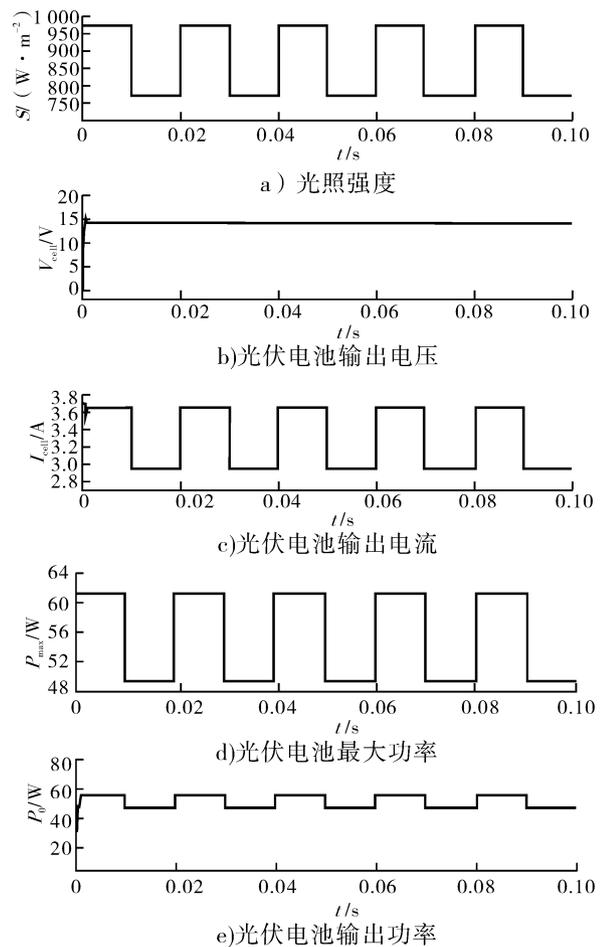


图 5 PSIM 仿真波形图

[2] 郑必伟,蔡逢煌,王武.一种单级光伏并网系统 MPPT 算法的分析[J].电工技术学报,2011,26(7):90.

[3] Sera D, Mathe L, Kerekes T, et al. On the perturb and observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 3(3):1070.

[4] 野村宏,藤原宪一郎,吉田正伸.使用 PSIM 学习电力电子技术基础[M].西安:西安交通大学出版社,2009:7-8.

[5] 赵争鸣,陈剑,孙晓璞.太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术[M].北京:电子工业出版社,2012:37-30.

[6] 舒杰,王亮平,张先勇,等.光伏并网最大功率跟踪的改进型扰动控制[J].电力电子技术,2011,45(9):64.

[7] 杨小亮,刘洁,姜素霞,等.基于 PSIM 的并联有源电力滤波器仿真研究[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2009,24(5):92.

激光制导炮弹导引头的抗高过载方法研究

李俊伟, 张丽敏, 朱晓凯

(中国电子科技集团公司 第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要:针对激光制导炮弹导引头光学系统及后端处理电路无法承受高过载的问题,设计了由橡胶垫和胶状物组合的立体减振装置,对处理电路采取封装固化等措施,从结构设计上提高抗高过载能力.经仿真分析及试验验证,该方法可使导引头受到的冲击减小到5.1 kg,变形值亦在其许可范围之内,可满足系统的抗高过载要求.

关键词:激光制导炮弹导引头;高过载;立体减振

中图分类号:TN957.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.015

Study on laser-guided projectile seeker against high overload

LI Jun-wei, ZHANG Li-min, ZHU Xiao-kai

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

Abstract: In order to solve the problem that the optical system of laser-guided projectile seeker and back-end processing circuit of laser-guided projectile can not against high overload, the stereoscopic vibration absorber composed of rubber pad and jelly was designed. The structure against high overload was also designed, such as packaging and solidifying the processing circuit. The simulation analysis and experiment validation showed that the design could decrease the impact effectively to 5.1 kg, and the deformation was also acceptable, so the design could meet the requirements of vibration isolation and shock resistance of the system.

Key words: laser-guided projectile seeker; high overload; stereoscopic vibration absorbing

0 引言

激光制导炮弹以其命中精度高、成本低、发射简单而逐渐成为武器界的新宠.激光制导炮弹发射时,弹上载荷承受着瞬时、高能、强冲击,最大过载在10 kg以上,如此大的高过载有可能造成导引头中光学系统的损坏.如何解决炮弹发射过程中弹载设备承受的高过载一直是设计难点,国内已经有对这方面的研究,但对激光制导炮弹核心部件光学系统的抗高过载方法却鲜有详细的论述.为确保导引头正常工作,需要采取一定的措施对其进行抗高过载设计.除了选用高强度材料、对结构件进行封装

固化等措施来提高导引头的抗高过载能力外,改善导引头内部组件的受力环境,即增加减振缓冲装置是常用且有效的抗高过载的手段:通过设计合理的减振缓冲装置,减缓导引头内部组件受到的冲击,从而达到保护器件的目的^[1-3].本文将依据实际工程经验,从理论分析、隔振缓冲措施选择、仿真及试验等方面着手,建立一种激光制导炮弹导引头光学系统及其后端处理电路抗高过载的方法.

1 导引头的抗过载设计

1.1 导引头系统特点

该新型炮弹采用筒式结构,弹载设备通过骨架

收稿日期:2014-01-14

作者简介:李俊伟(1980—),男,河南省周口市人,中国电子科技集团公司第二十七研究所工程师,主要研究方向为电子设备结构与仿真分析.

与外筒相连,导引头固定在骨架前端.如图 1 所示,导引头由光学系统、处理电路及壳体组成.光学系统处于导引头的最前端,也是整个弹体的最前端,通过固定装置安装到壳体上;处理电路在壳体内部,通过螺钉固定在壳体上.

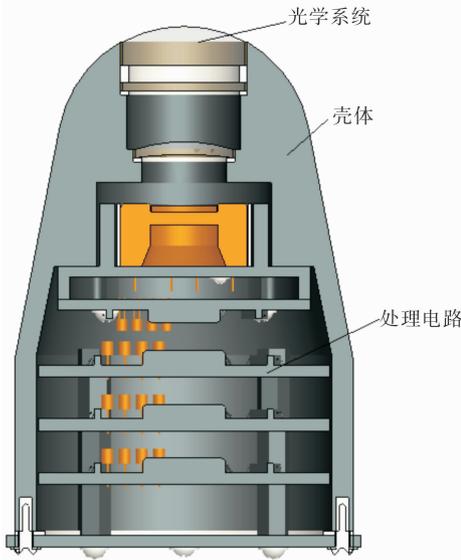


图 1 导引头示意图

在炮弹发射过程中,导引头随外筒施加的高过载做强迫运动,承受很大的冲击力,这些载荷在作用过程中都是变化的,其中轴向载荷最大^[4].导引头在发射过程中轴向载荷如图 2 所示.

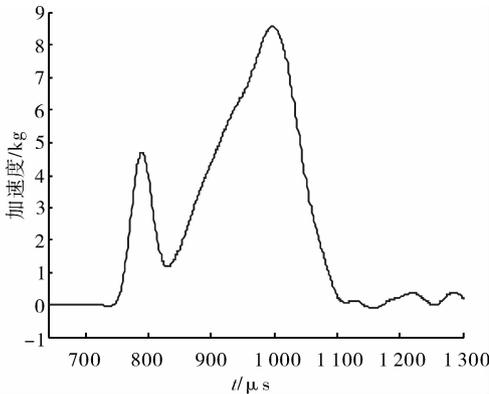


图 2 轴向载荷曲线图

1.2 光学系统的抗过载设计

光学系统承受的过载与相对位移不能太大,若直接安装在壳体内,镜片无法承受发射时的高过载,因此,需增加减振缓冲装置.减振缓冲装置的设计要兼顾减振缓冲效率和位移的矛盾,在保证减振效果的前提下,尽可能减小冲击变形,避免光学系统产生过大的相对位移,影响成像效果,进而影响

系统精度^[5].

减振装置有很多种,如橡胶垫、碟形弹簧、胶状物等,在各类减振装置中:橡胶垫具有良好的缓冲和阻尼性能,其应力应变特性有利于设备的缓冲减振,但载荷能力较小,减振缓冲效果一般;碟形弹簧为压缩弹簧,承受的冲击载荷很大,但是质量较大,轴向空间占用大,胶状物只能起到缓冲的作用.由于光学系统各镜片之间间距很小,变形量要控制在 0.1 mm 以内,所以根据光学系统结构特点、受力环境及精度要求,本文采用橡胶垫和胶状物相结合的方式:在镜片底部增加吸能和滞回性能良好的泡沫硅橡胶垫,在镜片与壳体之间填充胶状物,形成立体减振装置,其中泡沫硅橡胶垫的厚度根据精度要求进行选择,胶状物的选择要考虑缓冲效果以及炮弹飞行过程中的温度变化,其结构组成如图 3 所示.

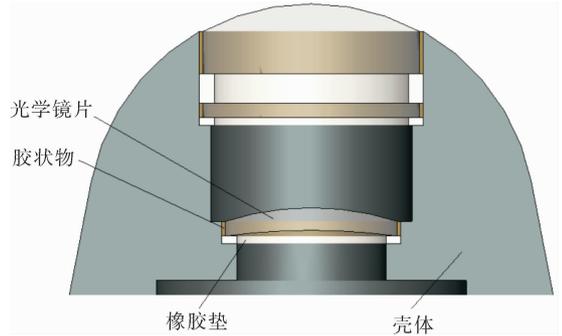


图 3 立体减振装置结构示意图

1.3 处理电路的抗过载设计

笔者从器件选取、电路板装配及防护对处理电路进行抗过载设计,措施如下:

- 1) 电子器件尽量选用贴片器件,采用胶脂固封,以减轻自身质量,减小体积,提高抗振、抗冲击能力^[6];
- 2) 电路板采取螺柱叠压方式装配,电路板之间用环氧树脂固封,防止各部件之间产生相对位移,加强电路板的强度和抗冲击性能;
- 3) 处理电路固封后通过螺钉安装在后盖板上,后盖板与壳体固连,两者之间采用橡胶垫减振,以提高处理电路的整体抗振能力.

2 有限元分析和试验

2.1 有限元分析

本文采用有限元分析软件 ANSYS 对导引头的抗过载性能进行仿真分析,结果如图 4 和图 5 所示.将导引头三维模型导入 ANSYS 软件,为方便计

算,将光学系统简化为集中质量处理;壳体作为不计变形的刚性基础;橡胶垫及胶状物采用超弹性三维实体单元;处理电路采用整块的聚四氟乙烯材料替代。橡胶垫与镜片之间采用绑定连接;胶状物与镜片之间采用不分离接触类型,即允许镜片在小范围内无摩擦地滑动。为提高计算效率,在不影响整体分析结果的基础上,分析模型去除内部螺纹孔等特征。由于导引头直接承受加速度载荷做强迫运动,故本文采用大质量法,将加速度载荷转化为力载荷进行计算。载荷作用时间为 1.3 ms,最大加速度出现在 1 ms,峰值为 8 kg。从图 4 和图 5 可知,在 8 kg 轴向加速度冲击下,整机最大应力为 267 MPa,出现在导引头尾部的盖板上;最大变形为 0.06 mm,出现在导引头第一片镜片上;两者均在许可的范围之内。

通过对分析结果后处理,可以得到导引头加速度响应和立体减振装置的变形规律。图 6 为导引头光学系统加速度响应与加速度载荷的对比曲线,可以看出,加速度响应的最大值为 5.1 kg,在系统许可范围之内,说明隔振缓冲装置起到了保护器件的作用。

2.2 抗过载试验

对导引头中光学系统采用立体减振设计,对处理电路进行封装固化,增加橡胶垫减振设计等措施进行装配,并在某靶场进行了实弹试验。试验证明:该导引头光学系统结构稳固,未出现镜片破碎及损毁现象,处理电路功能正常,减振效果良好,系统工作稳定。

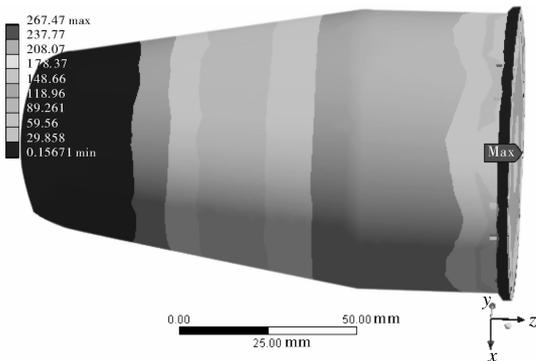


图 4 导引头轴向应力图

3 结语

本文给出了一种解决激光制导炮弹导引头抗高过载方法:针对系统的结构特点和受力环境,对导

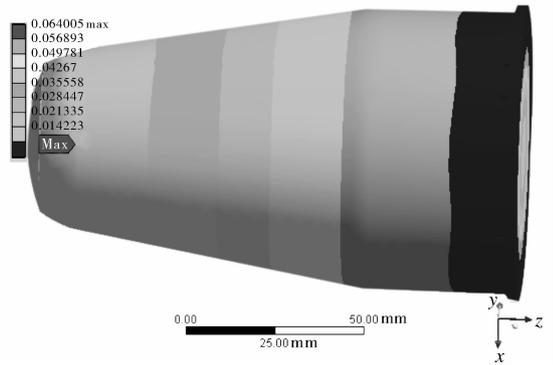


图 5 导引头轴向变形图

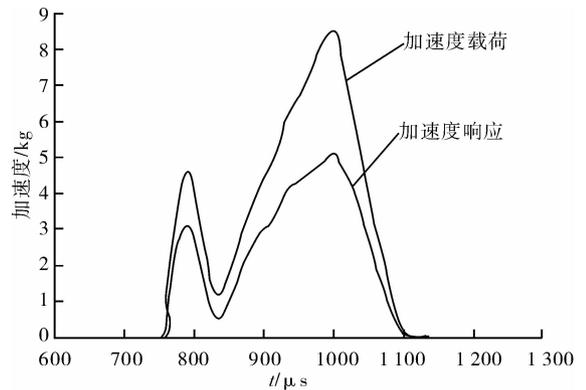


图 6 加速度时间曲线

引头光学系统设计了由橡胶垫和胶状物相结合的立体减振装置,并对处理电路采取封装固化等措施,从结构设计上提高抗高过载能力。软件 ANSYS 仿真计算及实弹试验表明,该方法可使导引头受到的冲击减小到 5.1 kg,变形值亦在其许可范围之内,满足系统的减振抗冲要求。

参考文献:

- [1] 钱立志. 弹载任务设备抗高过载方法研究[J]. 兵工学报, 2007(8): 1017.
- [2] 宁全利, 刘晨涛, 汪卫华. 某特种弹天线结构动态响应分析[J]. 弹箭与制导学报, 2004(3): 382.
- [3] 刘俊, 石云波, 马游春. 高过载测试中缓冲材料的试验分析[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(5): 381.
- [4] 朱兵. 制导炮弹电子系统冲击动力学研究[D]. 合肥: 国防科学技术大学, 2008.
- [5] 王正平. 冲击载荷下减振系统的优化设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
- [6] 徐鹏, 祖静, 李乐. CPLD 芯片抗高 g 值冲击性能分析[J]. 振动与冲击, 2007(1): 148.

某单兵搬运雷达天线座结构设计

朱晓凯, 李俊伟, 张丽敏

(中国电子科技集团公司 第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要:研究了一种拆装方便并可单兵搬运的新型俯仰-方位天线座:采用转台式方位座和可重复拆装俯仰转台,从而满足拆分后单体质量要求.通过有限元方法分析天线座结构时忽略螺钉、销钉、平键等连接件,关键部位采用理论公式校核以保证其连接强度.结果表明,天线座结构合理,力学性能满足使用要求.

关键词:雷达天线座;强度;刚度;结构设计;单兵搬运

中图分类号:TN957.8 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.016

Structure design of antenna pedestal of single soldier carrying radar

ZHU Xiao-kai, LI Jun-wei, ZHANG Li-min

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

Abstract: The structure of a new type of elevation-azimuth antenna pedestal which is convenient in disassembly or assembly and can be carried by single soldier was studied. Rotary table azimuth rotating pedestal and repeatably assembled pitching turntable were used in order to meet the mass requirement of every part disassembled. While the structure of the antenna pedestal was analyzed by using the finite element method, some joints like screws, pins and flat keys were neglected and the key joints were checked by theoretical formula to ensure its connection strength. The results showed that the structure of the antenna pedestal was reasonable and its mechanical property also met the use requirements.

Key words: antenna pedestal of radar; strength; rigidity; structure design; single soldier carrying

0 引言

某地面雷达天线口径为2 m,最大工作风速为9级,要求拆装方便,拆成单体后各部分质量不超过30 kg,可单兵搬运.鉴于天线自重及风载荷的影响,目前可单兵搬运雷达天线的口径一般不超过1 m,工作风速不超过6级.为保证在如此苛刻的条件下雷达仍能正常工作,必须对天馈系统和天线座进行优化设计.天馈系统采用质量轻、刚性好的碳纤维复合材料作为主要原料,质量可比传统的铝合金材

料减轻一半以上,从而满足搬运要求^[1].天线座作为雷达负载关键的基础装置,其机械性能直接影响雷达整机的性能指标.本文将在保证强度和刚度的前提下,对天线座进行减重设计.

1 总体结构形式及设计特点

根据使用条件和性能要求,本雷达采用俯仰-方位型天线座,天线座为分体结构,可拆成 ≤ 30 kg的模块.拆分的原则有:尽量减少模块数量、各模块之间装配方便、各模块拆分后可单独密封储存等.

收稿日期:2014-01-14

作者简介:朱晓凯(1984—),男,河南省禹州市人,中国电子科技集团公司第二十七研究所工程师,主要研究方向为电子设备结构设计.

天线座结构布局如图1所示。

1.1 方位座设计

小型天线方位座的结构形式主要有立轴式和转台式。本文选用转台式结构,通过能承受轴向、径向以及倾覆载荷的带齿4点接触球轴承直接与方位底板和俯仰底板相连。与立轴式相比,转台式可以省略粗大的方位轴、减小轴向尺寸、降低雷达重心、增强天线座的稳定性^[2-3]。方位座结构如图2所示。方位底板位于方位座中部,紧贴方位轴承,可进一步减小设备重心与安装面的距离。中部滑环、编码器从安装面下方穿出,其保护罩不必承受外力,可有效减轻质量。电机、行星减速机先组装成一体,再从上方安装到俯仰底板上,以方便拆装。

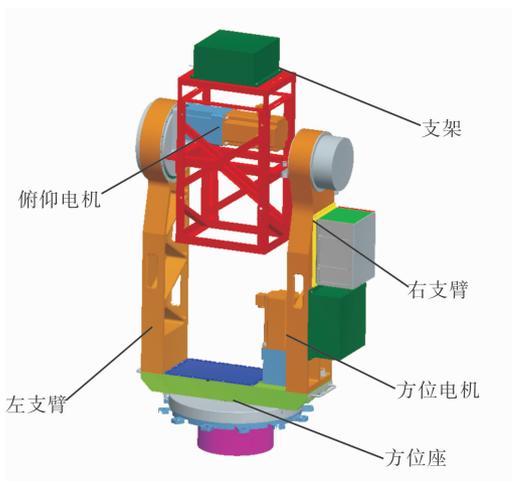


图1 天线座总体结构

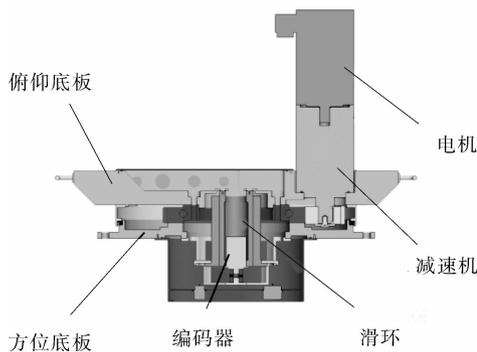


图2 方位座结构布局

1.2 俯仰转台设计

俯仰转台大多采用U形支臂的形式,也可以采用双悬臂式或电动推杆调节形式。本系统由于俯仰角度范围较大,且要求拆装方便,故选用U形支臂的结构。天馈系统、高频箱等通过支架安装在左、右支臂俯仰轴上,其重心位置尽量靠近回转中心,以

减小不平衡力矩。U形支臂为分体结构,左、右支臂分别安装在方位座俯仰底板上,通过销钉连接以保证装配精度。电机安装在支架上方,随支架及俯仰轴一起转动,这种结构外形紧凑,安装方便,且俯仰轴不承受扭转力。

2 天线座结构优化及受力分析

要天线座的强度满足9级风不破坏的环境要求,就要校核主要零部件及安装螺栓的强度是否满足要求。天线座的刚度直接影响雷达系统的精度,刚度不足还会导致伺服系统不稳定^[4]。因此,结构设计时,应确保设备具有足够的强度和刚度,同时,还要尽量减轻系统质量,减小惯量,使天线座结构达到最优。

2.1 结构优化

合理选择安全裕度,在保证刚度和强度的情况下尽量减轻质量(如选择尽量小的方位轴承);选择优质合金钢材料,减小俯仰轴和传动齿轮尺寸和质量;通过设计人字形加强筋提高支臂刚度;在保证工艺性的前提下尽量减小非受力面厚度;通过计算机辅助设计分析,进一步优化产品结构,调整截面尺寸,减小天线座质量。

2.2 计算机辅助分析

在天线座结构设计过程中,由于结构复杂,很难用简单的解析数学模型代替。而采用ANSYS等有限元分析软件,通过将连续体划分为有限个规则单元,可以求得连续体力学问题的数值解,从而提高产品研制水平^[5]。对于复杂的结构,如果采用较精确的计算模型,节点数和单元数将十分庞大,影响计算速度。为提高计算效率,分析时应适当简化。本文在连接处加载Bonded(粘接)约束进行模拟,忽略螺钉、销钉等局部应力对整体应力的影响,并采用公式计算的方式保证其连接强度。

根据风力、风力矩以及惯性力矩公式,可以估算出天线座所承载荷并添加到天线座支架上,对天馈系统和高频箱则采用质点代替^[6];方位座安装面按完全固定处理。载荷施加完成后,分别进行静力分析和模态分析,以验证设备的刚度和强度以及动态特性。分析结果如图3—图5所示。图3和图4分别为9级风工况下天线座变形云图和应力云图。图5为天线座第I阶模态振型图。从图中可知,天线座在工作状态下,最大变形约为0.85 mm,最大应力约为70 MPa,满足天线座刚度和强度要求。天线座的

I 阶频率为 19.3 Hz, 远大于伺服系统带宽 5 Hz. 由于左右支臂应力较小, 具有较大的减重空间. 天线 4 个安装孔变形值分别为 0.73 mm, 0.39 mm, 0.55 mm 和 0.27 mm, 左、右安装孔水平距离约为 400 mm, 由此计算出天线座变形引起的方位角度误差约为 0.089° , 小于方位座 0.2° 的变形误差要求. 因此, 仍有对结构进行适当优化的空间. 将左、右支臂壁厚各减小 2 mm, 质量各减小约 3 kg 后重新对模型进行受力分析, 分析结果表明改进结构亦满足使用要求.

2.3 局部受力分析

对于有限元分析中忽略的螺栓、销钉、平键等

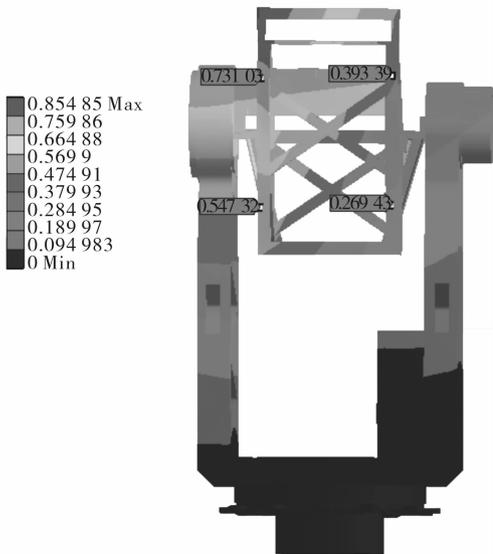


图 3 天线座变形云图

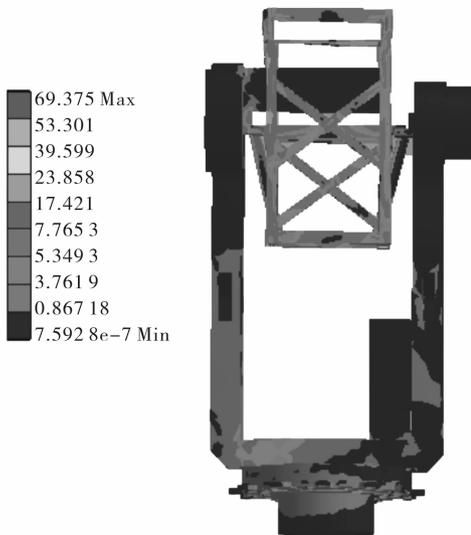


图 4 天线座应力云图

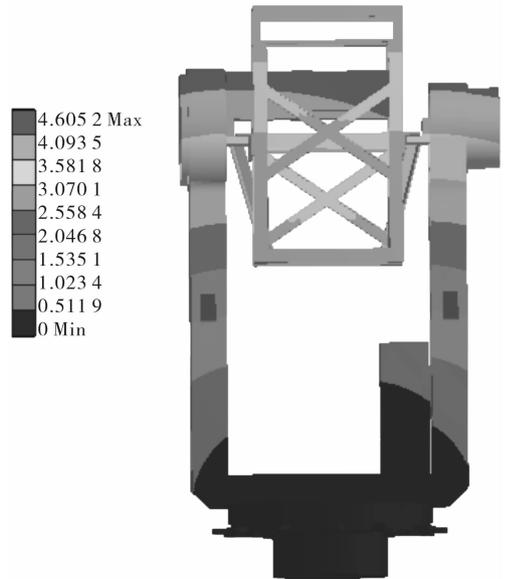


图 5 天线座第 1 阶模态振型图

关键部位可采用理论公式进行受力分析^[7]. 如天线支架与左、右俯仰轴采用 4 个 M12 螺栓连接, 支架及负载自重约 500 N, 风力 $F = 992$ N, 旋转力矩 $T = 350$ N·m, 倾覆力矩 $M = 198$ N·m, 安装尺寸及受力如图 6 所示.

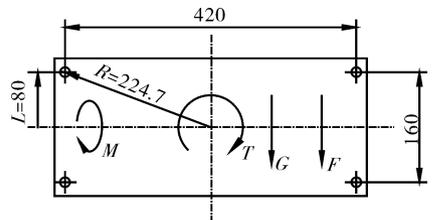


图 6 天线支架安装尺寸及受力图/mm

为保证接合面在支架及负载重力下不产生相对滑动, 每个螺栓所需的预紧力约为 $F'_1 = 1\ 500$ N. 为保证接合面在风载荷下不产生相对滑动, 每个螺栓所需的预紧力约为 $F'_2 = 2\ 976$ N. 为保证接合面在旋转力矩作用下不产生相对滑动, 每个螺栓所需的预紧力约为 $F'_3 = 4\ 673$ N. 螺栓在倾覆力矩作用下最大工作拉力 $F'_4 = 743$ N.

尽管最大风载荷与重力方向不一致, 旋转力矩和倾覆力矩最大值也不会同时出现, 但考虑天线座受力情况复杂, 可简单地将这 4 种力相加, 作为螺栓所受总拉力, 这样也可以预留足够的安全裕度. 螺栓所受总拉力 $F' = 9\ 892$ N.

螺栓强度校核条件为

$$\sigma = \frac{4 \times 1.3F'}{\pi d^2} \leq [\sigma]$$

式中, d 为螺栓小径, M12 螺栓为 10.106 mm; $[\sigma]$ 为螺栓许用拉应力, 8.8 级螺栓安全系数取 3 时许用拉应力为 267 MPa.

螺栓危险截面上最大应力 $\sigma = 160 \text{ MPa} < 267 \text{ MPa}$, 满足设计要求.

销钉强度校核条件为

$$\tau = \frac{4F}{\pi d^2} \leq [\tau]$$

平键强度校核条件为

$$\sigma = \frac{2T}{kld} \leq [\sigma]_p$$

式中, F 为销钉承受的力, T 为平键传递的扭矩, d 为销钉直径, k 为键与毂槽的接触高度, l 为键的接触长度, d' 为安装键的轴的直径, $[\tau]$ 为许用剪应力, $[\sigma]_p$ 为许用挤压应力.

3 结论

本文设计了一种天线口径相对较大的可单兵搬运雷达天线座. 通过 ANSYS 分析计算, 得出以下结论:

1) 螺钉、销钉、平键等连接件的强度理论已十分成熟, 可在分析时忽略此类零件, 而在关键部位采用理论校核的方式保证其连接强度.

2) 本雷达天线座结构设计合理, 其力学性能满足使用要求, 分析结果可作为设计优化的理论依据.

参考文献:

- [1] 彭天志. 复合材料在雷达天馈系统结构设计中的应用[J]. 纤维复合材料, 2008(2): 18.
- [2] 吴凤高. 天线座结构设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986: 9-12.
- [3] 张腊梅. 某地面雷达天线座设计[J]. 电子机械工程, 2007, 23(5): 27.
- [4] 陈君. 舰载搜索雷达天线座结构设计探讨[J]. 机械工程师, 2011(1): 128.
- [5] 廖伯瑜. 现代机械动力学及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 24-25.
- [6] 陈玉振, 周勤. 基于 ANSYS 的雷达结构强度分析[J]. 电子机械工程, 2011, 27(1): 50.
- [7] 陈铁鸣. 机械设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 31-60.

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.

履带起重机臂架稳定性分析

王耿华¹, 常大帅², 罗国富¹, 李睿³

- (1. 郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002;
2. 徐州重型机械有限公司, 江苏 徐州 221000;
3. 洛阳矿山机械工程设计研究院有限责任公司, 河南 洛阳 471039)

摘要:针对履带起重机大量采用高强度钢,其刚度和抗失稳能力随之降低的问题,研究了起重机臂架稳定性的影响因素.利用有限元软件 ANSYS 建立了臂架模型,对其进行静态分析及特征值屈曲分析,以特征值屈曲模态形状作为初始缺陷,对臂架进行非线性屈曲分析.通过对计算结果进行分析,发现风载荷和回转惯性力对臂架的稳定性影响相对较小,偏摆力是导致臂架失稳的主要因素.

关键词:履带起重机臂架;有限元模型;非线性屈曲分析;稳定性

中图分类号:TH213.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.017

Stability analysis of the crawler crane jib

WANG Geng-hua¹, CHANG Da-shuai², LUO Guo-fu¹, LI Ke³

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. Xuzhou Heavy Machinery Company, Xuzhou 221000, China;
3. Luoyang Mining Machinery Engineering Designing Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract: The influential factors were studied on the stability of crane jib for the increase of strength, at the same time stiffness and buckling resistance decrease in view of a large number of adoption of high strength steel in crawler crane. The jib model was established based on the finite element software ANSYS, the static state and the eigenvalue buckling were analyzed and the nonlinear buckling analysis was carried out on the jib on the basis of eigenvalue buckling mode shape as initial defects. It was found that the wind load and horizontal inertial force influence on the stability of the boom was relatively small, while the deflection force was the main factor that causes the unstability of the jib.

Key words: crawler crane jib; finite element model; nonlinear buckling analysis; stability

0 引言

履带起重机是一种依靠履带装置移动行走,起重作业部分安装在履带式底盘上的流动式起重机,具有方便移动的特点,广泛应用于物料起重、装卸及运输作业,特别是在装卸作业设备中,是最重要

的起重设备之一^[1-3]. 起重机往往要通过增加臂长来扩大作业范围和增大作业幅度,但随之带来的是结构刚性减小的问题;另一方面,由于起重机臂架非线性变形的影响,容易引起自身结构失稳,从而导致起重事故,这严重制约着起重机臂架长度的增加以及工作能力的进一步提升.

起重机臂架是格构式构件,组成杆件众多,结构复杂,并且其结构组成构件的超静定次数过多,结构稳定性影响因素无法准确判断,手工计算困难,且难以建立合理的简化模型^[4]。因此,起重机臂架格构式构件的稳定性问题是起重机臂架稳定性分析的难点。随着有限单元法的广泛应用,上述稳定性问题得到了较好的解决^[5]。可以实现在作较少简化的情况下进行精确的临界载荷值计算,然后在此基础上进行稳定性影响因素分析。

随着有限元技术的发展,出现了非线性有限单元法,并得到了很大的发展。自1960年代对非线性有限单元法开始研究以来,到了1970年代,该领域涌现了一批研究成果^[6-7]。杨秀娟^[8]采用有限元数值模拟法,计算了高度分别为64 m和80 m的特大型起重桅杆在顶端钢丝绳斜拉条件下,其吊重的线弹性临界屈曲载荷;考虑大型桅杆起吊时会产生较大位移的情况,用非线性有限元法计算了桅杆处于几何非线性状态时的极限载荷值以及最大应力值。张家华等^[9]针对上海科技城单层网壳结构的设计需要,分别进行了该工程2种非线性稳定方案的分析。但以上这些研究主要集中在网壳和桥梁等结构,在起重机行业应用还较少。目前,国内大型履带起重机正处于研制发展阶段,稳定性影响因素方面研究的理论和方法较少,因此,对其稳定性影响因素进行深入研究,对促进履带起重机的发展具有重要意义。

本文将某160 t履带起重机臂架结构为例,采用有限元软件ANSYS建立臂架的有限元模型,对起重机81 m主臂架,16 m幅度工况进行静态分析、特征值屈曲分析,找出影响起重机臂架稳定性的主要因素,以期为提高起重机臂架稳定性,提高设计效率,开发新型起重机提供重要参考。

1 臂架的结构及稳定性理论分析

臂架是履带起重机的主要承载结构件,为多节组装桁架结构,通过调整节数可改变其长度。臂架系统一般主要由主臂、副臂、撑杆、桅杆和拉板等组成^[10]。其下端铰装于转台前部,顶端用变幅钢丝绳滑轮组悬挂支承,这样可改变其倾角。起升机构有主、副两卷扬系统组成,其中主卷扬系统用于主臂吊重,副卷扬系统用于副臂吊重。

为了充分发挥起重机的工作能力,同时满足大起升高度和大作业幅度的要求,广泛采用主臂和副臂相组合的方式。根据结构的不同,副臂一般有固

定式副臂和塔式副臂2种:固定式副臂主要侧重于实现大作业幅度和大起升高度,而塔式副臂侧重于提高大起升高度时的起重量^[11]。除此之外,履带起重机臂架又出现了新的组合方式。原有的结构形式中,固定式副臂和塔式副臂都是通过变幅索具固定于主臂端部,这种结构形式需要增加撑杆和变幅索具等辅助构件。而新型臂架结构副臂通过过渡节直接与主臂端部连接,这就省去了撑杆和索具等辅助结构,在减轻自重的同时,有利于改善主臂的受力条件。本文所研究的臂架结构如图1所示。

图1所示160 t履带起重机的主臂架长81 m,工作幅度为16 m,起重量为18.5 t,其组成机构为:9 m长的底节臂、9 m长的顶节臂,以及1根3 m的中间节、3根6 m的中间节、2根9 m的中间节和2根12 m的中间节。臂架弦杆屈服点屈服极限 $\sigma_s = 780$ MPa,起升载荷动载系数为1.3,起升冲击系数为1.1,臂架自重14.13 t,臂架弦杆抗拉强度 $\sigma_b = 840$ MPa。主臂截面几何尺寸及材料属性如表1所示(泊松比均为0.3)。

根据起重机设计规范,其拉伸、压缩、弯曲许用应力可分为以下2种情况进行计算^[12]:

1)对于 $\sigma_s/\sigma_b < 0.7$ 的钢材,其基本许用应力

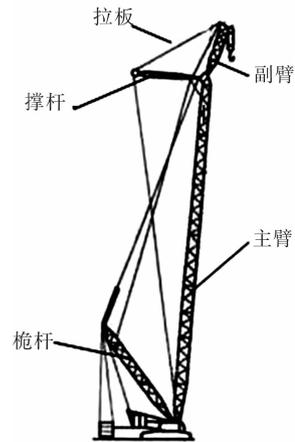


图1 履带起重机臂架示意图

表1 主臂截面几何尺寸及材料属性

主臂构件	材料	直径×厚度/mm	弹性模量/ $\times 10^5$ /MPa	屈服极限/MPa	抗拉极限/MPa
主弦杆	FGS78WV钢	114.3×8	2.12	780	840
腹杆1	20钢	76×6	2.06	245	410
腹杆2	20钢	60×3	2.06	245	410
加强板	Q390		2.06	390	490
变幅绳			1.30		

$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$, 其中 n 为与载荷组合形式相关的强度安全系数, 本文根据起重机设计规范选为 1.34.

2) 对于 $\sigma_s/\sigma_b \geq 0.7$ 的高强度钢, 其基本许用应力

$$[\sigma] = \frac{0.5\sigma_s + 0.35\sigma_b}{n} \quad (1)$$

通过式①分别计算出: 主臂主弦杆的许用应力为 510.4 MPa, 主臂腹杆 1 和腹杆 2 的许用应力为 182.8 MPa, 主臂加强板的许用应力为 273.5 MPa.

履带式起重机在工作过程中会产生支架变形以及变幅油缸压缩等情况, 在不考虑这些影响因素的情况下, 在最大工作幅度下起吊载荷达到额定值时, 变幅平面内臂架端部垂直于臂架轴线方向上的静位移 f_L 和臂架长度 L_C 有如下关系^[13]:

$$f_L \leq 0.1(L_C/100)^2 \quad (2)$$

当 $L_C \geq 45$ m 时, 式②中系数 0.1 可适当增大.

在一定工作幅度条件下, 起升一定的载荷, 臂架端部施加大小为额定载荷 5% 的水平侧(切)向力时, 回转平面内臂架端部水平(侧向)静位移 Z_L 和臂架长度 L_C 有如下关系:

$$Z_L \leq 0.07(L_C/100)^2 \quad (3)$$

由式②可计算出 81 m 臂架端部位移在变幅平面的许用值是 6 561 mm; 由式③可计算出在回转平面的许用值是 4 592.7 mm.

2 臂架有限元模型的建立与计算分析

在实际建模过程中, 需要对模型作合理的简化, 简化的原则是不影响计算精度, 简化后的模型应满足以下要求^[14]: 具有足够的准确性; 具有良好的经济性; 兼顾准确性和经济性.

按照上述简化原则和要求, 根据履带式起重机臂架结构特点进行初步分析, 对其有限元模型可作以下简化: 臂架与臂架之间的连接形式为焊接, 在对整个臂架进行分析时, 认为焊缝均符合标准要求, 忽略焊缝对结果的影响; 将履带架、车架及转台等均视为刚体; 将起重机臂架作为独立部分进行分析, 认为其变形与起重机的其他结构部分无关; 认为臂架材料均质, 不存在制造偏差; 弹性模量为常数, 不考虑温度等影响^[15]. 在上述简化的基础上定义变截面梁、加强板和变幅绳分别为 Beam188 单元、SHELL181 单元和 Link180 单元, 建立起起重机臂架的有限元模型如图 2 所示^[16], 模型由 22 713 个节

点和 14 239 个单元构成.

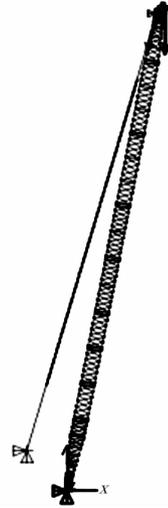


图 2 起重机 81 m 主臂有限元模型

约束和加载方式: 臂架的工况有变幅平面工况和回转平面工况 2 种. 在变幅平面内, 臂架底部通过销轴与起重机平台相连, 臂根处可认为是固定单铰, 其边界条件具体为 $U_x = 0, U_y = 0, U_z = 0$; 起重机变幅钢丝绳下铰点处的边界条件为 $U_x = 0, U_y = 0, U_z = 0$. 在回转平面内, 臂架主要受回转方向力的作用, 臂架根部一侧简化为固定铰支座, 其边界条件为 $U_x = 0, U_y = 0, U_z = 0$; 另一侧简化为可动铰支座 $U_x = 0, U_y = 0$.

2.1 静态分析

当起重机臂架长度为 81 m, 幅度 $R = 16$ m 时, 起升冲击系数 $\varphi_1 = 1.1$, 动载系数 $\varphi_2 = 1.3$, 提升倍率 $n = 2$, 额定起重量 $Q = 18.5$ t, 臂架自重 $G_0 = 14.13$ t. 起重绳拉力 $T = 120\,250$ N, 变幅绳拉力 $S = 753\,157$ N, 偏摆力 $P_a = 9\,065$ N.

图 3 为臂架静态分析结果云图. 从图 3a) 可以看出, 81 m 臂架的最大应力为 430.291 MPa, 计算结果小于应力许用值 510.4 MPa, 说明强度满足要求; 由图 3b) 可看出, 臂架头部的最大位移量为 2 056 mm, 小于位移许用值.

2.2 线性特征值屈曲分析

进行线性特征值屈曲分析, 可以得到理想线弹性结构的理论屈曲强度. 这种基于理想情况的线性失稳分析有 2 个明显优点: 一是计算过程相对比较经济(快速); 二是进行线性失稳分析所得模态形状可用于作为非线性屈曲分析的初始缺陷^[17].

在 ANSYS 通用后处理器中可查阅特征值屈曲

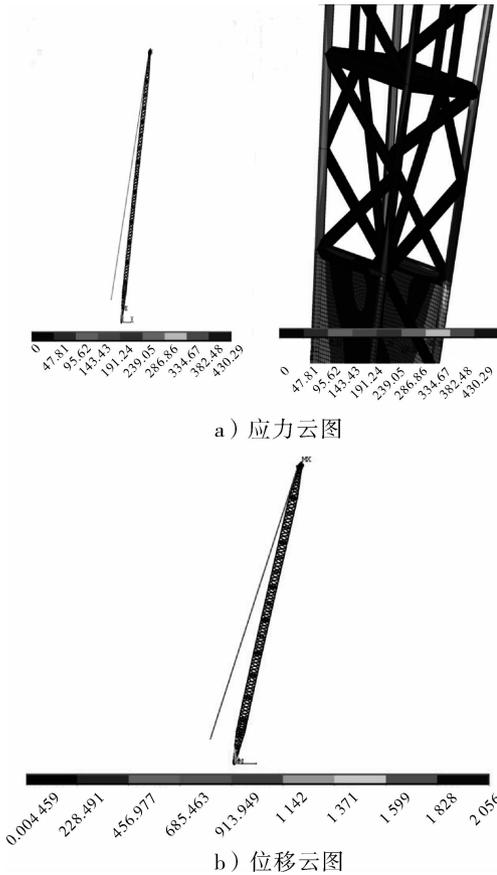


图3 81 m 主臂架静态分析结果云图

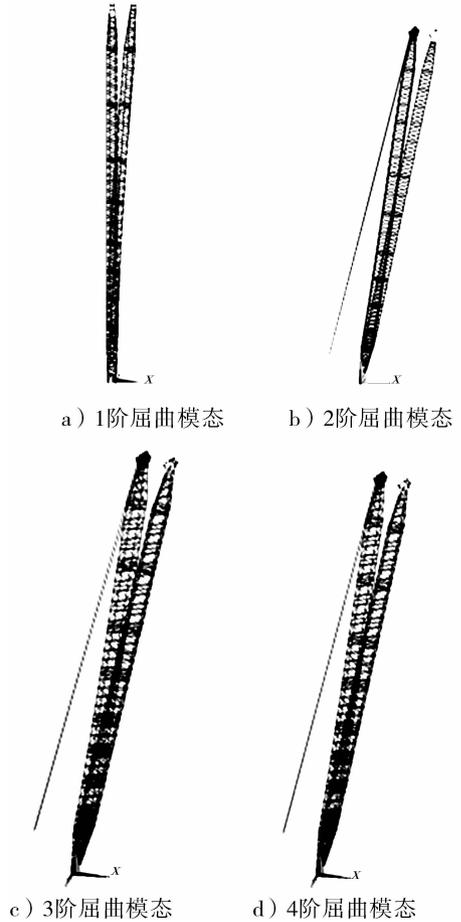


图4 特征值屈曲分析的1—4阶模态形状

分析结果,结果包含载荷系数、屈曲模态形状和与之相对应的应力分布情况等.81 m 臂架线性特征值屈曲分析结果如图4和图5所示,由图4a)和b)可以看出,最容易发生屈曲的是在回转平面,其次是变幅平面.表2给出了线性特征值屈曲分析的前6阶特征值.

表2 特征值屈曲分析的1—6阶模态的特征值

阶	时间/频率	载荷步	子步	累积
1	5 045.9	1	1	1
2	10 298	1	2	2
3	10 478	1	3	3
4	10 582	1	4	4
5	10 642	1	5	5
6	11 668	1	6	6

2.3 非线性屈曲分析

进行非线性屈曲分析的目的就是找到第一个极限点(结构不稳定前的最大载荷).在进行非线性屈曲时,需要施加一个很小的初始载荷(例如小的力)或一个初始几何缺陷,而线性特征值屈曲分析结果所得到的屈曲模态形状即可作为这个初始

缺陷.

非线性屈曲分析结果如图5和图6所示.从图5可知臂架头部的总位移值为2 856 mm,既小于变幅平面的许用位移值,又小于回转平面的许用位移值.从图6可知臂架的最大应力值为503.828 MPa,小于主弦杆的许用应力510.4 MPa,发生最大应力的位置为臂架右下方主弦杆离臂架根部3.4 m附近.

3 臂架稳定性影响因素分析

图7—图12分别为无偏摆力载荷、无风载荷和无回转惯性力时臂架非线性屈曲分析的应力和位移云图.

根据上述有限元分析结果,分别提取受力值和位移量,其最大数值如表3所示.

从表3中可以得出,对臂架稳定性影响最大的是偏摆力,占32.0%,其次是回转惯性力,占20.4%,风载对臂架的稳定性影响相对较小,只占4.8%.

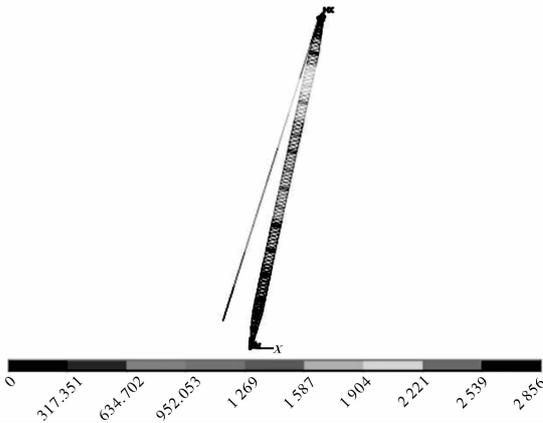


图5 非线性屈曲分析位移云图

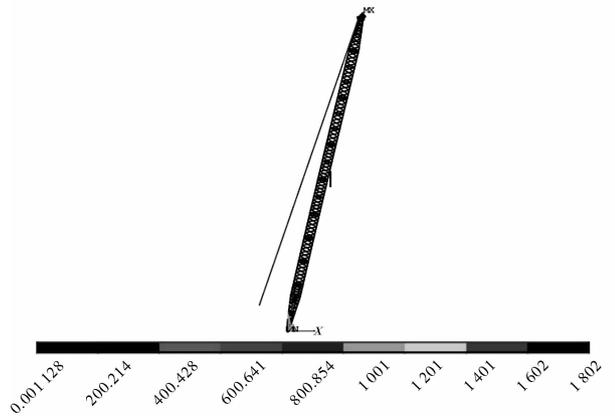


图8 无偏摆力时臂架非线性屈曲分析位移云图

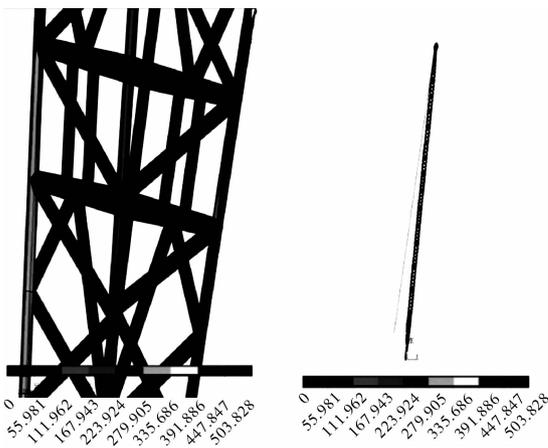


图6 非线性屈曲分析应力云图

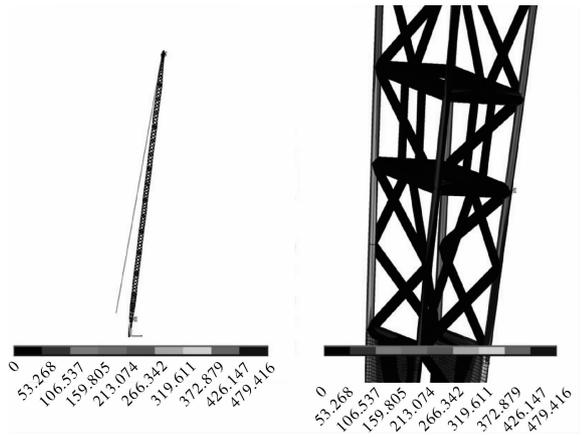


图9 无风载荷时臂架非线性屈曲分析应力云图

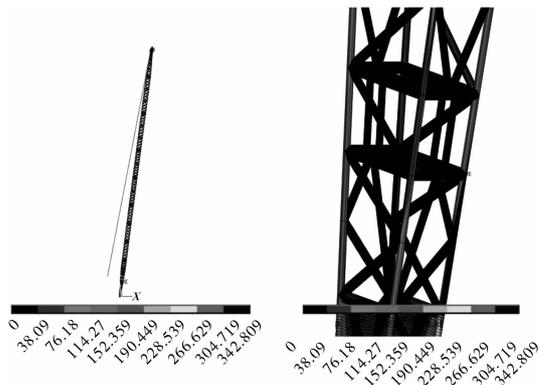


图7 无偏摆力时臂架非线性屈曲分析应力云图

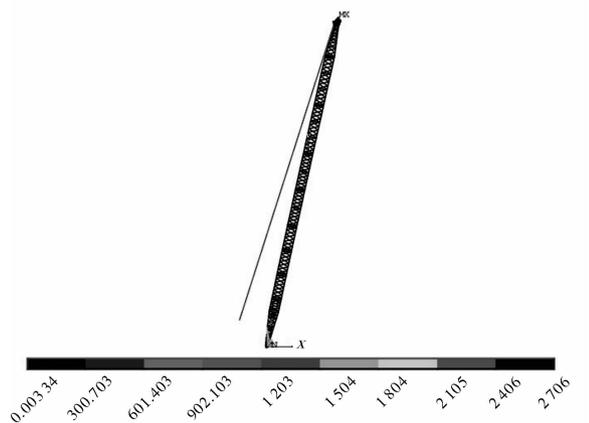


图10 无风载荷时臂架非线性屈曲分析位移云图

表3 臂架非线性屈曲分析结果

载荷	应力/MPa	位移/mm	应力百分比/%
全部载荷	503.828	2856	
无偏摆力	342.809	1802	32.0
无风载	479.416	2706	4.8
无回转惯性力	400.866	2206	20.4

4 结论

本文以某160 t履带起重机臂架为例,对起重机的81 m主臂架进行了稳定性分析,先建立了臂架的有限元模型,分别对该臂架有限元模型进行了静态分析、线性特征值屈曲分析和非线性屈曲分析;然

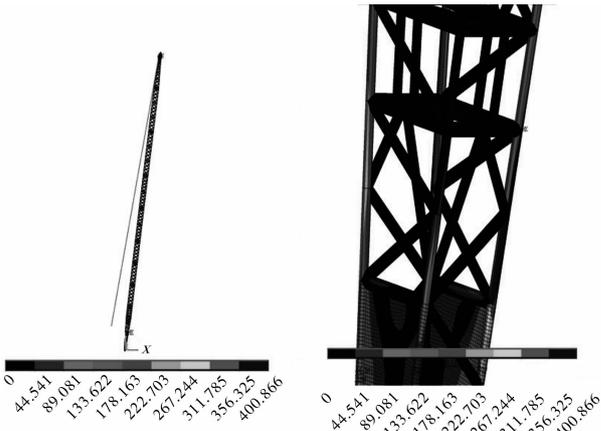


图 11 无回转惯性力时臂架非线性屈曲分析应力云图

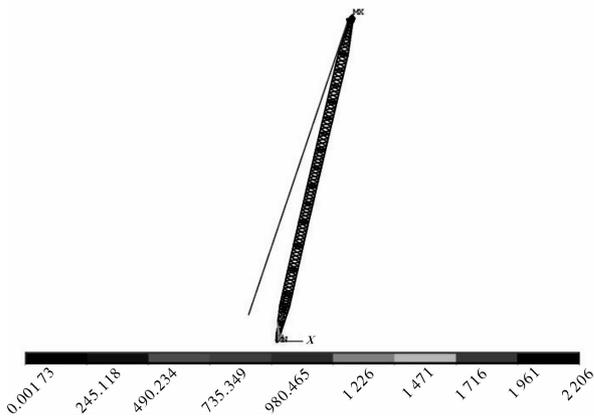


图 12 无回转惯性力时臂架非线性屈曲分析位移云图

后,对臂架有限元计算结果进行分析对比,发现影响臂架稳定性的部分因素中风载荷和回转惯性力对臂架的稳定性影响相对较小,偏摆力是导致臂架失稳的主要因素。

参考文献:

[1] 王欣,高顺德,屈福.国内外大型起重机的发展状况[J].建筑机械,2005(2):28.

- [2] 王凤萍,程磊,孙影.国内外履带式起重机的现状及发展趋势[J].工程机械,2006(6):39.
- [3] 吴学松.中国吊装舞台上的履带式起重机[J].建筑机械化,2007(7):8.
- [4] 刘光栋,罗汉泉.杆系结构稳定[M].北京:人民交通出版社,1988:15-38.
- [5] 王凯,周慎杰.80吨履带起重机桁架式臂架系统的有限元分析[D].济南:山东大学,2005:88-90.
- [6] 楚中毅,陆念力,车仁炜,等.一种梁杆结构稳定性分析的精确有限元法[J].哈尔滨建筑大学学报,2002,35(4):25.
- [7] Meek J L, Xue Q. A study on the instability problem for 3D frame [J]. Computer Methods Appl Mech Engrg, 1998, 158:235.
- [8] 杨秀娟.特大型起重机桅杆吊装过程的稳定性数值模拟分析[J].石油大学学报,2004,28(6):90.
- [9] 张家华,王国俭.“生命始于卵”创意实现技术——上海科技城太空城单层网壳结构非线性屈曲分析[J].工程设计CAD与智能建筑,2000(3):22.
- [10] 全国起重机机械标准化技术委员会.起重机设计规范释义与应用[M].北京:中国标准出版社,2008.
- [11] 夏皮罗 H I.普通起重机和桅杆起重机[M].北京:科学出版社,2008.
- [12] GB/T 3811—2008.起重机设计规范[S].
- [13] 《起重机设计手册》编写组.起重机设计手册[M].北京:机械工业出版社,1980.
- [14] 王欣,马青,腾儒民,等.应用 Ansys 计算履带起重机臂架弹性稳定性的简化模型[J].起重运输机械,2009(11):15.
- [15] 李育文,候枫,李建国.最大载荷半径时 2000CL 挖掘机动力臂应力和变形计算[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2004,19(1):18.
- [16] 杨改云,郭长江.基于 ANSYS 的电力机车转向架静力分析[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2008,23(1):52.
- [17] 韩庆华,伊越,刘锡良.焊接组合梁腹板屈曲后性能的曲壳有限元分析[J].钢结构,1999,14(1):48.

基于 DEM 的干燥微细粒群松散及分层的研究

黄志杰, 童昕

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:应用离散单元法模拟和分析筛分过程,基于密实度的概念来分析结构参数与松散的关系,基于分层细粒比的概念来研究进料速率对分层的影响.结果表明,最佳松散效果的结构参数为:筛丝直径 0.75 mm,筛孔尺寸 0.7 mm,筛面倾角 25°;最佳分层效果的进料速率为 4e+04 颗/s.

关键词:离散单元法;干燥微细粒群;进料速率;密实度;分层细粒比;筛面结构参数

中图分类号:TD45 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.018

Study on the loose and laminate of dry fine particle with DEM

HUANG Zhi-jie, TONG Xin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract:The numerical simulation researches about the process of vibrating screen had been done using the EDM (discrete element method). The relationship of loose and structural parameters based on the concept of density was analyzed. The influence of feeding rate on the laminate based on the concept of the fine particle ratio was analyzed. The result showed, the best parameters are: wire diameter is 0.75 mm, aperture is 0.7 mm, the inclination is 25°; the best feeding rate on best stratification is 4e+04 p/s.

Key words:discrete element method (DEM); dry fine particle; feeding rate; density; fine particles ratio; structural parameter

0 引言

振动筛是在输送物料的过程中通过施加振动使粒群松散、分层、触筛、透筛最终达到物料分离的机械设备^[1-2].这4个过程经历时间都极短,几乎是在同时发生的,它们相互作用共同影响着振动筛的筛分效率.筛分效率是评价振动筛的重要指标^[3],它的主要影响因素有振动参数、结构参数与工艺参数^[4].筛分是极其复杂的过程,由于缺少有效的技术手段,大多数研究者都是从筛分的整体过程研究参数对筛分效率的影响.离散单元法 DEM (discrete

element method)是在岩土工程领域发展起来的一种模拟岩土块体、颗粒群力学过程的数值方法^[5].该方法可以细致地模拟各离散单元的相互作用,适用于模拟离散组合体的接触或碰撞过程.对于颗粒,离散单元法可以模拟颗粒群流动^[6],模拟颗粒之间的碰撞运动^[7],可以得到每一时刻颗粒的相互作用力、速度、位移等.离散单元法很好地应用在研究筛分的4个重要环节中的松散与分层,可细化研究筛分过程,对分析筛分的本质有着重大的意义.本文拟通过 DEM 模拟筛分过程的松散,研究结构参数对松散的影响及进料速率与分层的关系.

收稿日期:2014-01-08

基金项目:福建省重大科技专项专题(2006HZ00003-2);国家自然科学基金项目(51175190)

作者简介:黄志杰(1990—),福建省莆田市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助设计与工程.

通信作者:童昕(1964—),河南省息县人,华侨大学教授,博士研究生导师,主要研究方向为计算机辅助设计与工程.

1 仿真实验条件

在仿真过程中,建立了三维DEM筛分模型模拟颗粒的筛分过程,如图1所示,筛箱长度为160 mm,高度为80 mm,宽度为8 mm.其中,筛面的振动形式为正弦平动,为减少计算量,确定网格尺寸比所有颗粒中最大直径长1.4倍^[8].

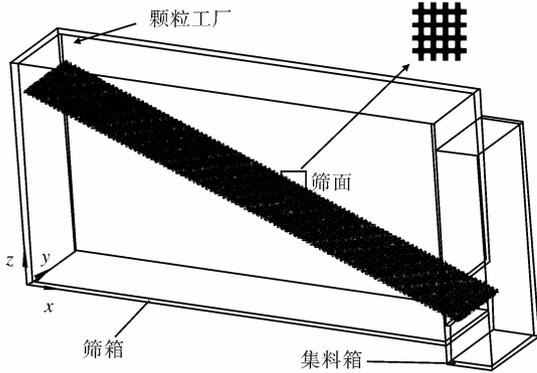


图1 振动筛筛分模型

仿真中,DEM模型采用三维球体干接触模型,不考虑颗粒表面粘连时,法向力采用Hertz接触理论计算,切向力采用Mindlin-Deresiewicz接触理论处理.工业用沙粒属于干燥微细颗粒,而筛分过程的仿真是一个快速的过程,其碰撞过程的变形及磨损很小,可以忽略不计,故Hertz-MD接触模型是比较切合实际的.

对照工业用沙的粒径分布,发现沙粒的粒径近似服从双峰正态分布,故仿真颗粒的分布选用2个正态分布.仿真时,设置颗粒的平均粒径分别为0.50 mm和1.00 mm,标准差都为0.55.不同次的模拟产生颗粒尺寸不同,但符合正态分布.模拟条件见表1.

2 结构参数与松散之间的关系

定义筛分料层中松散区域内所有颗粒的体积之和占该区域总体积的百分数为密实度作为研究松散的特征量.

表1 模型条件概要

属性	参数	颗粒	筛面
物料属性	泊松比	0.30	0.29
	剪切模量/MPa	23	79 920
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 678	7 861
碰撞属性	恢复系数	0.10	0.20
	静摩擦系数	0.545	0.500
	滚动摩擦系数	0.01	0.01

2.1 筛丝直径与物料松散的关系

参照高精度金属筛网的国家标准(GB 5330—85)中对网孔及筛丝直径的规定,设计6组模拟仿真实验,筛丝直径大小分别为0.3 mm,0.5 mm,0.75 mm,1.0 mm,1.2 mm,1.5 mm.模拟实验中保持其他模拟仿真实验条件不变,只改变筛丝直径大小,从而改变开孔率,得到筛丝直径与物料密实度的变化关系,如图2所示(松散区域底部离筛面的高度分别为2 mm,4 mm,6 mm,8 mm和10 mm).

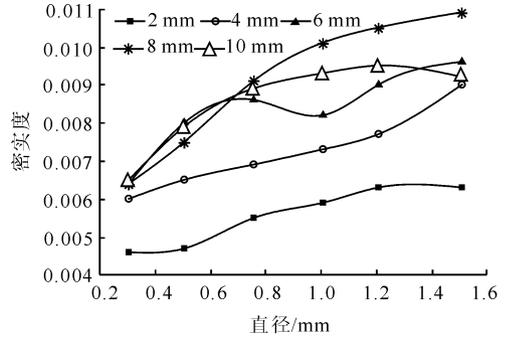


图2 筛丝直径与物料密实度的关系

由图2可见,松散区域内物料的密实度随着筛丝直径的增大而整体上逐渐增加,这主要是由于随着筛丝直径的增大,开孔率减小,颗粒的透筛概率降低,颗粒与筛面接触碰撞的机会增多,在各个分层区域内的颗粒数增多,物料的密实度就相应地增大;物料密实度随着松散区域下限高度的增加而逐渐增大,说明物料能够充分被抛起;当筛丝为0.75 mm时,松散区域下限高度6 mm,8 mm,10 mm的密实度几乎相同,此时筛面上的物料比较均匀,分布松散较好,且离筛网比较近的松散区域的密实度也相对较大,从而也能保证物料和筛网充分接触.从中可以得出结论:筛丝直径大小的增加有利于物料的聚集,筛丝直径在0.75 mm左右的料层颗粒群松散效果较好.

2.2 筛孔尺寸与物料松散的关系

参照高精度金属筛网的国家标准(GB 5330—85)中对网孔及筛丝直径的规定,所取的筛孔尺寸分别为0.4 mm × 0.4 mm,0.5 mm × 0.5 mm,0.6 mm × 0.6 mm,0.8 mm × 0.8 mm,0.9 mm × 0.9 mm,1.0 mm × 1.0 mm.共设计6组模拟仿真实验,以研究筛孔尺寸对颗粒群松散的影响,得到筛孔尺寸与物料密实度的变化关系如图3所示.

由图3可得如下规律:随着筛孔尺寸的增加,靠近筛网的物料密实度有一个先增大后减小的过程.对于筛网宽度不变,筛孔尺寸增加,有效筛分面积

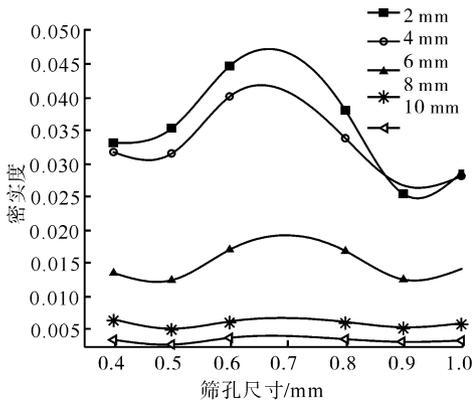


图3 筛孔尺寸与物料密实度的关系

相应地增加,颗粒透筛的机会增多,在筛上颗粒群数量变小,料层变薄,单位料层的颗粒含量减少,物料的密实度也就变小.筛孔尺寸 < 0.8 mm,靠近筛网的区域的物料密实度最大,说明物料最聚集,并在筛孔为 0.7 mm 处达到峰值,之后物料密实度随着松散区域下限高度的增加而逐渐减小,并在较高的松散区域下限高度下趋于稳定.

2.3 筛面倾角与物料松散的关系

仅改变筛面倾角的大小,保持其他参数不变,共设计 6 组模拟仿真实验,筛面倾角分别为 10°, 15°, 25°, 30°, 35°, 40°,以研究筛面倾角对颗粒群松散和分层的影响,得到筛面倾角与物料密实度关系如图 4 所示.

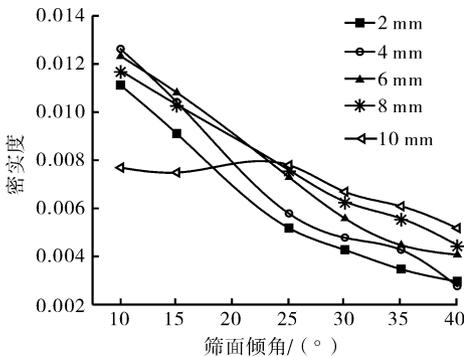


图4 筛面倾角与物料密实度的关系

由图 4 可知:物料密实度随着筛面倾角的增大整体上趋于直线下降,越靠近筛面的松散区域内物料的密实度越小.当筛面倾角较小 (< 10°) 时,物料的密实度取得最大值,说明筛上物料在单位料层区域内整体的颗粒数多,颗粒群较为聚集,这是由于筛面倾角较小,颗粒在筛面上运动时间长,而且沿筛长方向的运动速度慢,就很容易使得物料在筛面上聚集;当筛面倾角较大 (> 35°) 时,物料的密实度很小,说明此时的筛上物料层区域内的颗粒少,这

主要是筛面倾角大导致颗粒沿筛面方向的运动分量较大,加上运动速度又快,导致料层厚度过薄.注意到当筛面倾角为 25° 左右时,松散区域下限高度 6 mm, 8 mm, 10 mm 的密实度几乎相同,此时筛面上的物料比较均匀,分布松散较好,且离筛网比较近的松散区域的密实度也相对较大,从而也能保证物料和筛网充分接触.此时料层厚度比较合适,料层颗粒群松散效果较好.

3 进料速率对分层的影响

定义某一时刻,在分层区域内的某一粒径的细颗粒数与筛上物料中同一粒径细颗粒数的百分数为分层细粒比做为研究分层的特征量.在振动筛分中,筛面物料层的厚度影响着颗粒群的分层与透筛,与筛分效率之间存在重要的关系.对于筛面宽度确定的筛分机,物料层的厚度及处理量与进料速率的大小也有着密切的关系.进料速率影响筛面上料层的厚度,进料速率过快,料层厚度大,导致松散差,不宜透筛,进而导致了筛分效率差.进料速率过慢,料层厚度太薄,虽然松散好但是物料抛掷强度过大,导致许多颗粒飘浮在筛箱中未能接触筛面,也不利于筛分效率的提高^[9-10].设计 6 组模拟仿真实验,选取的进料量分别为 0.6e + 04 颗, 1.2e + 04 颗, 1.8e + 04 颗, 2.4e + 04 颗, 3e + 04 颗, 3.6e + 04 颗, 进料速率相应地分别为 1e + 04 颗/s, 2e + 04 颗/s, 3e + 04 颗/s, 4e + 04 颗/s, 5e + 04 颗/s, 6e + 04 颗/s,以保证各组实验在 0.6 s 时过筛完所有的颗粒.每次模拟仿真实验只改变单一参数,而其他参数保持不变.得到进料速率与区域分层细颗粒比与区域下限高度的变化关系,如图 5 所示(其中分离粒径分别为 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm).

由图 5 可知,当进料速率为 1e + 04 颗/s 时,在区域下限高度 4 mm 左右取得较大的分层细颗粒比,这主要是由于进料速率小,颗粒群料层薄,促进了细颗粒的上抛,导致在中间高度位置 4 mm 左右分层细颗粒比达到最大;当进料速率增加时(如图 5 c), d 所示),物料的分层细颗粒比随着区域下限高度的增加呈直线下降,这主要是由于进料速率大导致了靠近筛网的整体颗粒数增多,料层厚度过大细颗粒不宜被抛起.注意到,进料速率为 5e + 04 颗/s 时分层细颗粒比随高度的下降率最大,且接近筛网的区域(下限高度为 2 mm 左右)的分层细颗粒比达

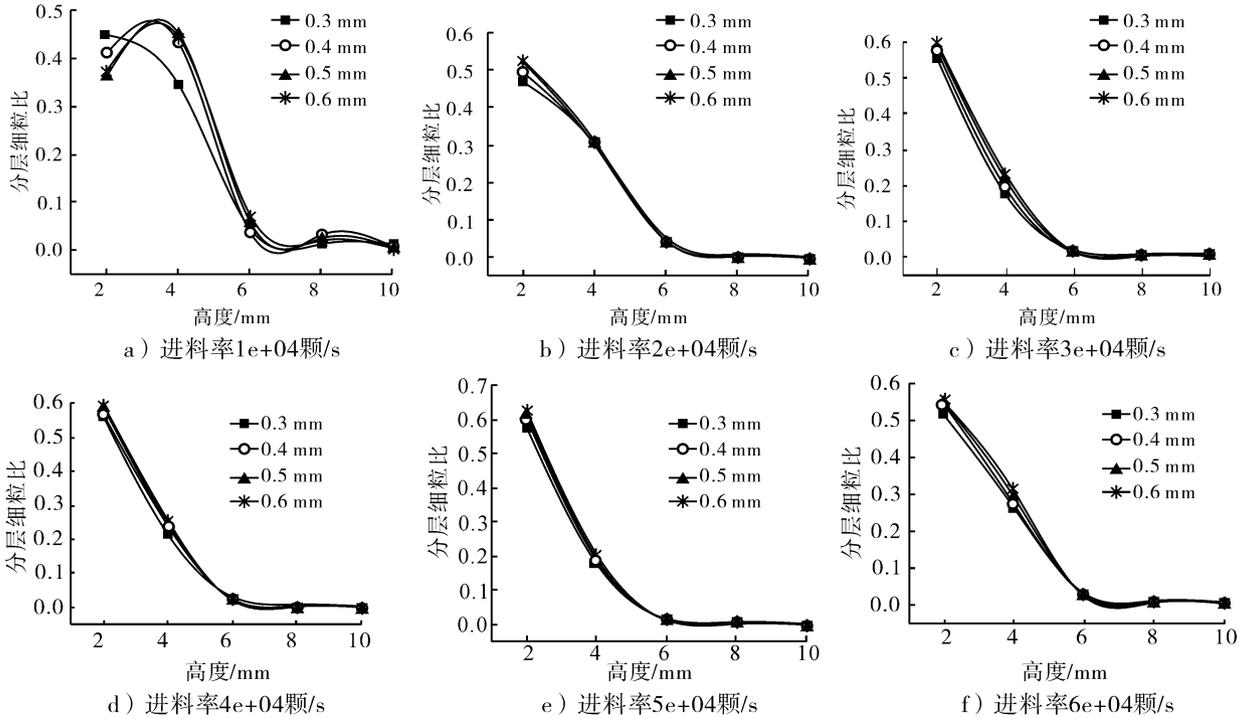


图5 分层细粒比与分层区域下限高度的关系

到最大,说明此时主要细颗粒都集中在2~4 mm高度中,增加了细颗粒与筛面的接触机会,达到较好的筛分效率。

4 结论

本文应用DEM模拟和分析筛分过程,基于密实度的概念来分析结构参数与松散的关系,基于分层细粒比的概念来研究进料速率对分层的影响,得出如下结论。

1)最佳松散效果的结构参数为:筛丝直径0.75 mm,筛孔尺寸0.7 mm,筛面倾角25°。

2)进料速率直接影响筛分过程物料层的厚度,进而影响物料的分层。最佳分层效果的进料率为 $4e+04$ 颗/s。这一结果与工业上进料速率为 $4e+04$ 颗/s时筛分效率最佳的结论相符合。

参考文献:

[1] 闻邦椿,刘树英,何勃.振动机械的理论及动态设计方法[M].北京:机械工业出版社,2000:27-28.

[2] 赵跃民,刘初升.干法筛分理论及应用[M].北京:北京科学出版社,1999:16-25.

[3] 何宝祥,沈惠平.基于筛分特性分析的并联运动筛优化控制[J].机械设计与制造杂志,2012(4):210.

[4] 王红兵,张露霞.探析影响直线振动筛筛分效果的若干因素[J].现代制造技术与装备,2008(4):29.

[5] 刘光焕,童昕,辛成涛.振动筛筛分过程的数值模拟及其进展[J].金属矿山,2008,36(9):104.

[6] 赵永志,程易,金涌.颗粒移动床内不稳定运动的计算颗粒动力学模拟[J].化工学报,2007,58(9):2216.

[7] 王淑彦,刘永建,董群,等.提升管内颗粒团聚行为的离散颗粒模拟[J].化工学报,2010,61(3):565.

[8] 刘光焕.振动筛筛分过程的数值模拟[D].厦门:华侨大学,2008.

[9] Soldinger M. Influence of particle size and bed thickness on the screening process[J]. Minerals Engineering,2000,13(3):297.

[10] LI J. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening-effect of particle bed depth[J]. Food and Bio-products Processing,2002,80(2):109.

网络认证客户端通用穿透网关的设计与实现

李健勇, 张静杰, 李建春, 黄道颖

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:网络认证客户端通过监控非绑定 Internet 接入网卡的活动来实现主机路由限制,从而控制外向内网的延伸.基于此,利用虚拟机的网络桥接和 NAT 服务设计了网络认证客户端通用穿透网关方案,实现了网络认证客户端环境下主机外网和内网间的连接.本设计由单网卡或双网卡宿主机配置、微软的 3 种宿主操作系统和 3 款不同公司的虚拟机产品互相组合,可形成适应不同应用需求的多种通用穿透网关方案,具有很强的灵活性和实用性.

关键词:网络认证客户端;通用穿透网关;路由;虚拟机

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.019

Design and implementation of generic penetration gateway of network authentication client

LI Jian-yong, ZHANG Jing-jie, LI Jian-chun, HUANG Dao-ying

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

Abstract: Network authentication client realizes the restrictions of host routing and the control of extension of Internet and Intranet by monitoring the activities of non-binding Internet access network interface cards. A generic penetration gateway method by utilizing the network bridge and NAT service of virtual machines was proposed. The connection of Internet and Intranet can be realized under the network authentication client environment. Moreover, by composing the host with single or double network cards, three host operating systems of Microsoft and three virtual machine systems designed by different companies, various generic penetration gateway schemes can be generated to meet the needs of different applications. So the proposed method is very flexible and practical.

Key words: network authentication client; generic penetration gateway; routing; virtual machine

0 引言

为了控制网络访问,Internet 服务提供商 ISP (Internet server provider) 采用多种网络接入认证方式.这些认证方式归结起来有以下 3 种:数字证书^[1]、Web 网页认证^[2]和网络认证客户端^[3].前 2

种方式通过在前端设置 NAT 路由器进行 WAN 连接,后端 LAN 中任意一台主机通过认证后,LAN 中的其他主机即可访问 Internet^[4].这 2 种方式在服务器端常会设置登录的时限,超过时限后需要重新认证.网络认证客户端是运行在主机上的一个应用程序,根据不同的网络接入媒介及后台运行的认证计

收稿日期:2014-04-27

基金项目:国家自然科学基金项目(60974005);河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A520379)

作者简介:李健勇(1969—),男,河南省孟州市人,郑州轻工业学院副教授,硕士,主要研究方向为网络控制、计算机网络.

费系统,不同的ISP采用了不同的技术来实现网络认证流程,其共性是这些客户端软件都实时监控主机网卡的状态,定时与位于ISP后台的服务器通信,根据ISP后台的计费策略和主机当前活动网卡的状态决定主机与网络连接的开关.直接通过联通、电信等传统ISP接入的用户,ISP多采用PPPoE协议认证连接.而一些大型企业、事业团体类ISP则常用锐捷计费系统^[3]、Dr.COM认证计费网关等产品来管理用户的网络接入认证.由于流量信息具有不确定性,所以网络认证客户端惯常的做法不是限制网络带宽,而是限制主机的连接数.随着各类网络应用服务的不断丰富,认证客户端的方式极大地限制了终端用户的网络扩展需求,给终端用户带来不便.

针对网络认证客户端路由转发的限制,本文拟利用Virtual PC 2007,VMware Workstation 10.0.2,VirtualBox 4.3.10这3种虚拟机的网络服务组件中的网络桥接和NAT功能,设计一种通用的网络认证客户端的穿透网关方案,并通过虚拟机系统进行测试,以验证该方案的通用性、灵活性和实用性.

1 宿主系统软硬件配置

1.1 宿主操作系统

虚拟机宿主操作系统的选择由用户对用作穿透网关的计算机角色安排和网络认证客户端的运行平台来确定.

1)专用穿透网关.专用穿透网关需要不间断运行,选择Windows Server类操作系统比较合适,前提是网络认证客户端有对应的Windows Server操作系统的支持版本.

2)兼用穿透网关.在一些小型网络(如家庭使用环境)中,一般用某一台计算机兼作穿透网关.这时需根据使用这台计算机的用户之要求来确定宿主操作系统,目前,常用的操作系统为Windows XP,Windows 7和Windows 8.1等版本.本文以此为穿透网关的宿主系统来讨论.

1.2 网络接口

考虑到穿透网关要承担局域网LAN和广域外网WAN之间所有的通信工作,宿主操作系统网络接口最好选用带宽在100 M以上的有线网卡.根据接口网卡的数目,可分为宿主机单网卡和双网卡2种配置方案.

1)在单网卡配置方案中,LAN和WAN共享了网卡的带宽,在轻载的外网访问需求或WAN的实

际带宽低于网卡带宽一半的情况下,本方案硬件成本低,是最佳选择.2)在双网卡配置方案中,LAN和WAN的数据传输相互独立,独享各自网卡的带宽.此方案中2个网卡的传输速率要保持一致,单独提高其中一块网卡的传输速率并不能增加内外网之间的带宽.本方案能满足高速WAN的访问需求,可用于高吞吐量的外网访问中.

1.3 虚拟机

1.3.1 软件选型 虚拟机软件种类繁多^[6],其中Virtual PC 2007适合用在Windows XP上,虽然微软不推荐在Windows 7上使用,但经过验证,Virtual PC 2007也可以很好地在Windows 7上工作,微软早已不再对Virtual PC 2007进行更新,但Virtual PC 2007仍能在Windows 7之前的操作系统正常工作.目前,VMware Workstation的最新版本是10.0.2,它可以支持Windows XP,Windows 7和Windows 8.1等操作系统,其功能最强大.VirtualBox作为Oracle公司的开源项目,到4.3.10版本已经做到界面友好、功能丰富了.以上3种虚拟机软件中,VMware Workstation为注册收费软件,其他2种虚拟机软件免费.从长远考虑,VirtualBox更为经济且有后续支持,是一个不错的选择,但具体选用何型用户还要根据使用偏好来确定.

1.3.2 网络接口设置 以上3种虚拟机软件中,对运行穿透网关的虚拟机的网络设置大体相同,都需要在虚拟机中设置2块网卡,第1块采用NAT方式,第2块采用桥接方式,直接连接到宿主系统的物理网卡上.为表述方便,第1块NAT方式的虚拟网卡命名为“WAN口”,第2块桥接方式的虚拟网卡命名为“LAN口”.WAN口的IP地址由虚拟机网络组件中的DHCP服务提供,Virtual PC 2007中,这个地址为形如192.168.XXX.XXX的C类私网地址;VMware Workstation中相对复杂一些,这个地址由VMware Workstation中一个Virtual Network Editor来设置,默认的DHCP的地址范围也在192.168.XXX.XXX范围内,但是可通过这个工具把这个地址范围修改到A类私网地址10.0.0.0~10.255.255.0或B类私网地址172.16.0.0~172.131.255.0中.在VirtualBox中,网络组件DHCP为NAT网卡提供A类私网地址.

若宿主系统中只有1块物理网卡,该网卡在通过网络认证客户端软件认证许可后可连接到Internet,同时,由虚拟机网络组件将其用NAT方式接入

虚拟机中的 WAN 口上. 而虚拟机的 LAN 口也只能桥接到这块物理网卡上, 宿主系统对外表现为单一物理网卡上具有 2 个 IP 地址.

若宿主系统中有 2 块物理网卡, 虚拟机网络组件将自动选择认证客户端软件认证许可网卡并用 NAT 方式接入虚拟机的 WAN 口, 而虚拟机的 LAN 口就必须连接到另一块物理网卡上. 这项选择工作在 Virtual PC 和 VirtualBox 中比较直观, 但在 VMware Workstation 中需要用 Virtual Network Editor 来设置 VMnet0, 以便桥接到另一个物理网卡上.

1.3.3 虚拟机内操作系统 要搭建穿透网关, 需要路由软件的支持, 这类软件在 Windows, Linux 平台下都有多种选择. 考虑到宿主操作系统选用 Windows 系列, 虚拟机内操作系统选自带路由管理功能的 Windows Server 来实现. Windows Server 在计算机开机阶段启动路由服务, 开机后无需用户登录系统进行设置, 使用方便.

Windows Server 从早期的 2003 已经发展到了今天的 2012 R2. 随着功能的不断增强, 系统推荐内存和磁盘空间占用也从 2003 的 128 M^[5] 和 1.8 G^[6] 到 2012 R2 的 512 M^[7] 和 9 G 多. 虚拟机内操作系统的选择要结合宿主系统的硬件水平、专用网关或兼用网关来确定.

2 网络拓扑结构

如 1.2 所述, 根据局域网内网访问外网的网络负载要求, 可以选择宿主主机单网卡或双网卡 2 种配置方案. 在双网卡配置方案中, 又可分为使用无线路由器方案和使用交换机/集线器方案.

2.1 宿主主机单网卡网络拓扑方案

图 1 所示宿主主机单网卡网络拓扑图中, 需要将无线路由器 WAN 口的 IP 地址和宿主主机中虚拟机内 LAN 口的 IP 地址设置在同一网段, 该网络号不能与虚拟机中自动由虚拟机网络 NAT 组件中的 DHCP 服务所指定的网络号相同.

无线路由器 LAN 端的内网各网络设备要通过无线路由器内的 NAT 来实现与其 WAN 口的连接.

若宿主系统中有多块物理网卡, 也可选用图 1 所示的单网卡网络结构. 但需要注意的是, 在 1.3.2 中所述的 LAN 口的物理网卡应该选择认证客户端软件所绑定的 Internet 连接网卡.

2.2 宿主主机双网卡网络拓扑方案 1

宿主主机双网卡网络拓扑方案 1 如图 2 所示, 方

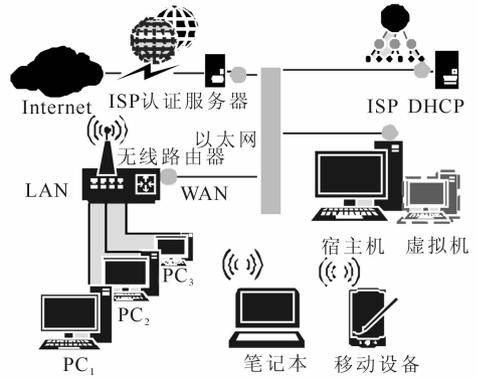


图 1 宿主主机单网卡网络拓扑方案

案中无线路由器的 WAN 口要直接与宿主主机中虚拟机 LAN 口所对应的物理网卡连接.

在图 1 方案中, 并未给出无线路由器的 WAN 口和宿主主机物理网卡的以太网连接具体网络设备, 原因是有可能在以太网中已经存在多余的交换机或集线器端口, 这时直接连接到该端口即可. 如果不存在这个端口, 则需要增添 1 个交换机或集线器来实现两者的连接.

在图 2 方案中, 无线路由器的 WAN 口和宿主主机物理网卡的连接可以采用同样的方法来完成. 更为简便的方法是制作 1 根两端分别按 T568A 和 T568B 标准的交叉网线来连接.

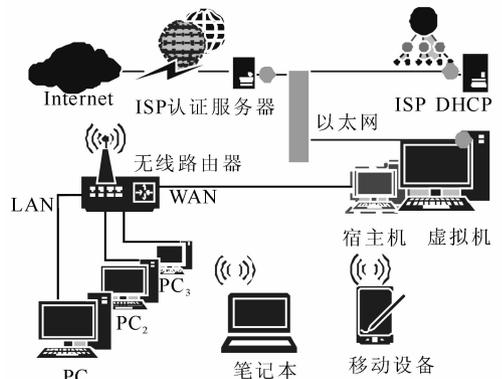


图 2 宿主主机双网卡网络拓扑方案 1

2.3 宿主主机双网卡网络拓扑方案 2

宿主主机双网卡网络拓扑方案 2 如图 3 所示, 与前 2 个方案不同, 本方案中采用交换机或集线器来连接宿主主机中虚拟机的 WAN 口所对应的物理网卡. 这样, 虚拟机的 WAN 口可以直接与内网中的各个网络设备通信, 无需再经过无线路由器的 NAT 转换.

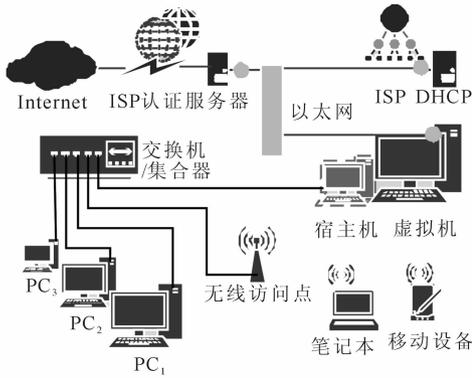


图3 宿主机双网卡网络拓扑方案2

3 虚拟机穿透网关设计

3.1 虚拟机的网络服务组件

1) Virtual PC 2007 的网络服务组件名为 Virtual Machine Network Services 的网络功能服务. 在虚拟机中最多可以设置 4 个网络接口.

2) VMware Workstation 10.0.2 的网络服务组件非常繁杂, 通过在宿主系统安装 5 个服务实现网络接口卡的桥接、NAT、仅主机、自定义和 LAN 区段等模式, 在网络设置中增加了 VMware Bridge Protocol 网络功能服务. 虚拟机在网络接口数量的配置上不受限制.

3) VirtualBox 4.3.10 在宿主机新增的网络功能服务为 VirtualBox Bridged Networking Driver. 和 Virtual PC 2007 一样, 在虚拟机中最多可以添加 4 个网络接口.

虚拟机组件的网络传送活动不受认证软件的监控, 利用虚拟机的网络组件中的 NAT 服务来实现对网络认证客户端的穿透是本设计实现的核心技术要点.

3.2 路由和远程访问服务安装

在图1—图3所示的3种网络拓扑方案中, 虚拟机内部的设置完全相同. 在 Windows Server 中, NAT 功能是包含在路由和远程访问服务中的. 因此, 需要在相应的 Windows Server 中安装路由和远程访问服务. 在安装 NAT 功能时, 需要指定虚拟机的 WAN 口为连接 Internet 的网络接口.

3.3 DHCP 服务和 DNS 服务

在图1和图2所示方案中, DHCP 服务由无线路由器提供, DNS 服务可以在无线路由器中直接设定为 ISP 所提供的 DNS 服务器地址. 其优点是直接利用了硬件设备的服务, 虚拟机中只需实现 NAT 服

务即可, 方案简单.

在图3方案中, DHCP 服务必须由虚拟机提供, 需要在 Windows Server 中安装 DHCP 服务. DHCP 服务安装时要注意设置的 DHCP 地址池应该和虚拟机 LAN 口在同一网段. DNS 服务器的地址可在 DHCP 的网络选项中指定, 内容由 ISP 提供. 如果有特殊的管理需求, DNS 服务也可以通过在虚拟机中增添 DNS 角色来完成. 这样 DHCP 中的 DNS 网络选项就应该指向虚拟机的 LAN 口的 IP 地址.

4 系统测试

4.1 虚拟机安装测试

选择在宿主操作系统为 Microsoft 公司的 Windows XP SP3 32 位, Windows 7 SP1 32 位和 64 位, Windows 8.1 32 位和 64 位上安装 Virtual PC 2007, VMware Workstation 10.0.2 和 VirtualBox 4.3.10 共 3 款虚拟机软件, 结果见表 1.

表1 Windows 平台下虚拟机安装测试结果

Windows 平台	VPC	VMware	VirtualBox
Windows XP SP3 32 位	成功	成功	成功
Windows 7 SP1 32 位	成功	成功	成功
Windows 7 SP1 64 位	成功	成功	成功
Windows 8.1 32 位	失败	成功	成功
Windows 8.1 64 位	失败	成功	成功

4.2 虚拟机内操作系统安装测试

在上述 3 款虚拟机中安装 Windows Server 2003 32 位, Windows Server 2008 32 位和 64 位, Windows Server 2012 R2. 结果见表 2.

Windows Server 2012 R2 为 64 位版本, 微软公司不再为 Server 2012 R2 提供 32 位版本.

4.3 内网固定终端和移动终端接入测试

在表 1 和表 2 所示的宿主操作系统中安装 3 种虚拟机, 分别在虚拟机中安装 4 种 Windows Server 操作系统, 配置 Windows Server 的路由和远程访问服务和 DHCP 服务, 宿主机网络认证客户端选用 Dr. COM.

表2 虚拟机中 Windows Server 安装测试结果

Server 类别	VPC	VMware	VirtualBox
Server 2003 32 位	成功	成功	成功
Server 2008 32 位	成功	成功	成功
Server 2008 64 位	失败	成功	成功
Server2012 R2	失败	成功	成功

测试结果表明,内网有线连接的固定 PC 和无线路由连接的笔记本,以及多种品牌的智能手机均能正常上网.

5 结论

采用本文提出的虚拟机环境下网络认证客户端穿透网关设计方案,在 Windows XP, Windows 7, Windows 8.1 等宿主操作系统运行 Virtual PC 2007, VMware Workstation 10.0.2 和 VirtualBox 4.3.10 等虚拟机. 虚拟机中采用 Windows Server 2003, Windows Server 2008 和 Windows Server 2012 R2 等服务器操作系统搭建穿透网关. 测试结果表明: 1) 使用单网卡 PC 机, 宿主机安装 Windows XP 操作系统, 采用 Virtual PC 2007 虚拟机中安装 Windows Server 2003 的方案对系统硬件条件要求最低、安装最简便, 但随着 Microsoft 公司对 Windows XP 的支持结束, XP 的安全性前途未知, 所以这种方案具有一定的风险; 2) 在宿主操作系统为 Windows 8.1 上安装 VMware Workstation 10.0.2 虚拟机且在其中运行 Windows Server 2012 R2 对硬件要求最高、设置最复杂, 但使用时界面最友好、管理最方便.

参考文献:

- [1] 刘伟, 姜童, 寇登峰. 一种新型的信息网络安全接入认证模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(6): 89.
- [2] 袁博, 范亮. WLAN 场景的 IPv6 宽带接入认证技术[J]. 邮电设计技术, 2013(7): 23.
- [3] 福建星网锐捷网络有限公司. 产品与解决方案[EB/OL]. (2013-05-21) [2014-03-22]. <http://www.ruijie.com.cn/>.
- [4] 丛日权, 商宏图, 左坚, 等. Windows Server 2003 网络架构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] Microsoft Corporation. Determining Hardware Requirements for Windows Server 2003 [EB/OL]. (2003-03-28) [2011-04-23]. [http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc782423\(ws.10\).aspx](http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc782423(ws.10).aspx).
- [6] 刘艳红, 李健勇, 李建春. 基于虚拟机的网络架构课程实验平台的构建[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(3): 63.
- [7] Microsoft Corporation. 安装 Windows Server 2012 [EB/OL]. (2012-02-01) [2014-04-08]. <http://technet.microsoft.com/zh-cn/library/jj134246.aspx>.

基于四叉树的大规模地形的生成算法

张娜, 殷知磊

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:提出了一种基于四叉树的多分辨率地形模型生成算法. 该算法将视点相关、地势起伏等因素纳入细节层次的评价标准中, 并在地形生成的过程中根据节点细分和渲染的规律, 提出了合适的裂缝消除方法. 地形绘制采用了视景裁剪、背面裁剪、三角扇形和静态数据预存等优化显示技术. 实验结果表明, 该算法能够快速实现大规模地形的实时可视化.

关键词:三维地形; 四叉树; 视点相关; 多分辨率模型

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.020

An algorithm for large-scale terrain generation based on quadtree

ZHANG Na, YIN Zhi-lei

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

Abstract: An algorithm for multi-resolution terrain model generation based on quadtree was put forward. This algorithm took elements as view-dependent and terrain relief into the evaluation standards for level of detail and raised appropriate methods to remove cracks in the course of terrain generation according to the law of node partition and rendering. In drawing terrain, optimized display technologies were used such as frustum culling, backface culling, triangle fan and static data storage. Test results showed that this algorithm could rapidly realize the real-time visualization of large-scale terrain.

Key words: three-dimensional terrain; quadtree; view-dependent; multi-resolution model

0 引言

三维地形场景实时绘制在虚拟现实、地理信息系统、仿真系统等领域应用广泛. 对于地形可视化的研究, 现已能够构建实时交互的三维场景. 但是, 客观存在的地理环境很复杂, 使得数据信息具有无限性, 且计算机软硬件技术的发展是有限的, 因而要实现交互的地形绘制必须进行视点相关的模拟. 目前, 小规模的地形绘制已没有什么困难. 对于大规模的、复杂的地形, 渲染时需处理的数据量庞大, 超出普通计算机 CPU 的计算能力, 地形数据在地形绘制时也不能一次性载入内存, 需依据可视范围

(由视点的位置和视线方向确定)及一定的调度策略, 动态地在计算机的内存、外存间调入调出数据. 因而就必须对三维地形模型进行合理的设计, 并优化地形数据的组织形式和调度策略. 近年来, 国内外学者对此进行了广泛研究, 并提出了许多地形可视化算法^[1-6]. 文献[1]基于外存有效组织大规模地形数据, 并在运行时通过调度策略减少载入内存数据量以完成地形绘制, 算法效率较低. 文献[2]给出视相关连续细节层次(LOD)方法, 解决了绘制同一区域块时在不同 LOD 间切换而产生的跳变问题, 但不能很好地解决地形块间的裂缝问题. 文献[3-5]通过使用高效的外存组织及预存取策略减少数

收稿日期: 2013-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61201447)

作者简介: 张娜(1977—), 女, 河南省郑州市人, 郑州轻工业学院讲师, 硕士, 主要研究方向为计算机图形图像处理.

据的输入与输出,实现了实时绘制,但地形块的不同 LOD 间平滑性过渡不够好. 文献[6]采用 GC (Geometry Clipmap) 方法对大规模地形进行高效绘制,该方法将高程纹理地形缓存在一组嵌套规则网格中(即压缩),运行时刻需将所需数据在内存中实时解压以完成地形实时绘制,但算法实现比较复杂. 在对前人算法研究和比较的基础上,本文拟提出一种基于四叉树结构的、视点相关的多分辨率大规模地形生成及绘制算法,并采用多项技术对地形绘制进行优化,以期实现大规模地形模型的快速实时生成.

1 多分辨率地形模型

多分辨率几何模型是指不同区域(部分)具有不同细节层次的模型^[7],其基本思想是用不同 LOD 来构造或近似模拟场景. 当与视点的距离不同时,场景模型(整体或局部分辨率依赖视点变化)的 LOD 可以不同,并随视点的移动做相应的变化,同时根据地表特征的变化,场景模型在突变处和缓变处也可采用不同 LOD. 在不影响场景视觉效果的前提下,采用 LOD 技术可以提高大规模地形的绘制速度. 当前生成地形的算法多数建立在数字高程模型 (DEM) 数据的基础上,且因规则网格表示的 DEM 与树结构具有天然的一致性,故可用四叉树这种数据结构来表示地形模型.

1.1 四叉树地形模型

四叉树结构是按照空间区域将 4 个象限递归分割的一种数据结构,常被用来进行空间数据的组织. 利用四叉树数据结构建立多分辨率地形模型的主要思想为:对 DEM 地形数据行列进行不同精度的等间距网格采样(采样数目为 $(2^n + 1) \times (2^n + 1)$),并由地形块的大小和所在 LOD 层次数来决定采样数据间距. 采样的结果形成了四叉树中一层节点,且每个节点对应整个地形的一块区域. 本文按照自上而下的方式构造四叉树地形模型,即对整个地形模型进行层次划分,并在划分过程中计算节点的误差. 具体构造过程:整个地形作为四叉树的根节点,先把四叉树根节点 4 等分划分为子块,之后检查划分得到的各个子块分辨率(即计算对应四叉树上节点的误差值)是否达到了要求,满足要求的子块不再向下划分,否则把此子块再 4 等分为更小的子块,一直如此递归下去,直到所有划分得到的子块都满足分辨率要求为止. 多分辨率四叉树数据结构如图

1 所示,图 1a) 中每个地形块对应四叉树上的 1 个节点,四叉树的每个非叶子节点有 4 个等分父节点对应区域的子节点. 若得到的子节点误差大于限定的阈值,依次对 4 个子节点所在区域继续进行划分,直到每个子节点的误差小于给定的阈值. 在这里,相邻数据块(地形块)间共享边界行和列,且通过对高分辨率的数据块隔行隔列采样获得低分辨率的数据块.

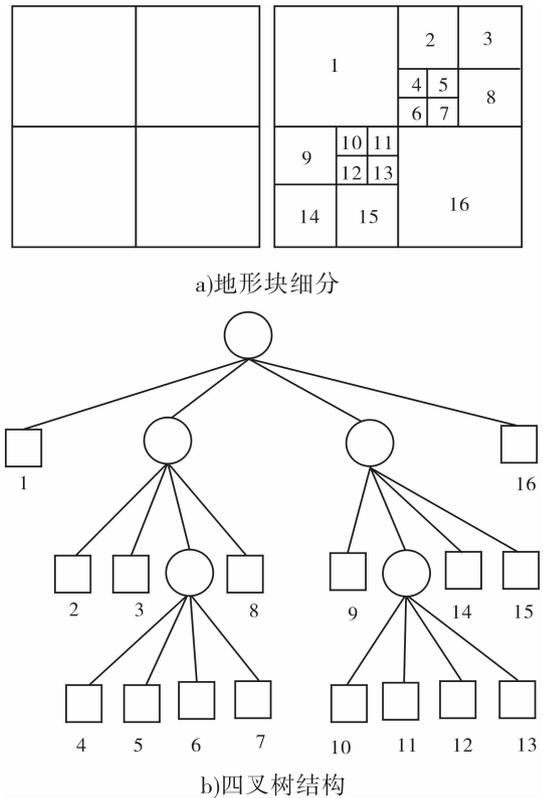


图 1 多分辨率四叉树数据结构

1.2 地形模型误差计算

基于四叉树数据结构进行多分辨率地形绘制时,为提高绘制效率,应尽可能地避免不必要的节点细分,以减少数据冗余. 对于是否细分节点,通常可通过 2 个因素来确定:节点距视点的距离;地形自身的粗糙程度.

一般情况下,越靠近人的视点,地形的细节程度越高;反之则越低. 距视点相同距离时,对应四叉树节点的地形块越大,该地形块具有的细节程度越高;反之则越低. 从中可得到如下公式:

$$\frac{l}{d} < C_1 \tag{1}$$

其中, l 为节点的中心点到视点的距离; d 为节点的大小(即节点所对应的地形块的宽度); C_1 是细分程

度调整因子. C_1 值减小,表示要描述的地形细节减少;反之,则细节增多.当需处理的节点的数据信息符合①式时,则该节点进一步细分.

绘制地形时,地形的粗糙度也对最终渲染效果有一定影响.越复杂的地形,需要的描述细节越多;反之,越简单的地形,需要的描述细节越少.图2表示一个四叉树节点及其子节点的粗糙程度信息. $\Delta H_1-\Delta H_6$ 分别表示节点中心点(节点中心点与2个对角线中点插值产生2个误差)和4个边中点是否被剖分时产生的6个高度误差值, $\Delta H_7-\Delta H_{10}$ 表示4个子节点的粗糙度.粗糙程度的评价公式为

$$\frac{1}{r} < C_2 \tag{2}$$

其中, r 为10个误差值($\Delta H_1-\Delta H_{10}$)中最大的1个; C_2 为一个可以调节的参数, C_2 值越大,地形细节越多.

依据公式①和②,对距视点距离和地形粗糙程度进行综合考虑,得到评价公式

$$f = \frac{l}{d \times r \times C_1 \times C_2}$$

上式表示的节点细分误差评价标准充分考虑了视点相关性和地形粗糙度2个因素.这一评价标准计算简单、形式直观,且系统的性能可通过改变参数来进行灵活的调整.

1.3 地形模型裂缝消除

在四叉树地形算法中当相邻地形块间具有不同LOD时,LOD高的地形块比LOD低的地形块具有更多的高程信息,所以当两者共享同一条边时常会产生裂缝问题.关于消除地形裂缝问题的方法,常用的有减边法和加边法,与加边法相比,减边法能更快捷、高效地消除裂缝,且容易实现.为了提高绘制效率,本文采用减边法消除相邻地形节点间的裂缝(见图3).图3a)中,节点Q和节点M的交接点C和B处会产生裂缝.通过将节点Q的细分标志改为FALSE(即减少细分的边),可消除节点相邻边上交接点B处的裂缝.因一个节点的细分标志为不分割时,其子节点的细分标志也应为不分割,所以要进一步消除交接点C处的裂缝,需把节点Q的子节点E和F的细分标志也改为FALSE.同样地,子节点H的细分标志也需要改为FALSE.这样,如图3b)所示,相邻节点间的裂缝就完全消除了.

为了减少四叉树节点的计算量,本文算法采用地形分块技术.若仅根据上述节点评价标准对节点进行强制细分,对相邻节点的状态不去考虑,相邻

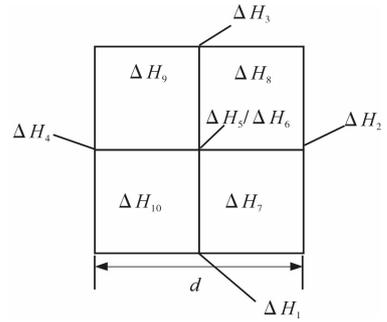


图2 四叉树节点的粗糙程度信息

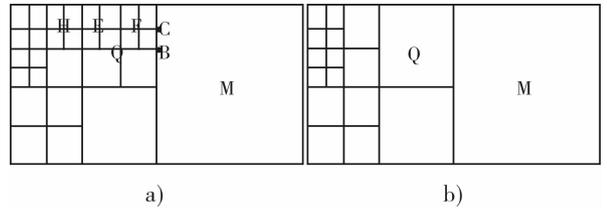


图3 节点减边消除裂缝示意图

地形节点间仍会产生裂缝现象.因而,除了符合节点评价标准外,细分节点时还需确保邻接节点间的分辨率之差小于等于1,这需要另外遵循条件:若满足节点误差评价标准要求,且相邻的4个节点(即上下左右节点)都已参与细分;则当前节点可参与细分;否则直接绘制当前节点.

2 算法流程及优化

2.1 算法基本流程

多分辨率四叉树网格地形模型生成及地形绘制算法流程如图4所示.首先对分块地形依据视景体裁剪确定视域内的地形块,之后根据视点和限定的误差阈值对四叉树节点进行误差判断来细分节点,再采用相应方法消除地形块间的裂缝,最后通过遍历节点生成误差范围内的四叉树结构地形模型.地形绘制采用背面裁剪和三角扇形技术,并选择与四叉树叶节点相应的纹理图像进行纹理映射.

2.2 视景体裁剪

基于四叉树算法绘制地形时,为提高绘制速度,只绘制位于可视范围内的地形节点,即裁剪屏幕显示区域外的节点.裁剪掉不在视线范围内的节点就是对参与绘制的地形块节点的可见性进行选择.剔除节点时,首先将场景中的不可见部分利用裁减算法去除,再利用四叉树算法对剩余可见部分动态建模.这样,视景体内部的地形节点在场景显示时能够被看到,不在视景体内的节点会被裁减掉.

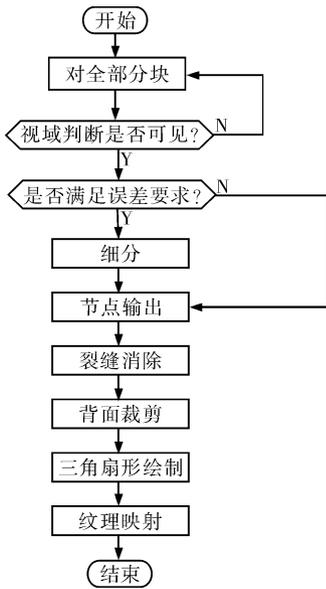


图 4 算法流程图

四叉树上每个节点对应一块具体的有尺寸地形区域,因而需要根据地形节点和视景体的空间位置关系情况进行节点的可见性选择.地形节点与视景体的空间位置关系有包含、相交、分离 3 种.执行四叉树算法时,首先根据根节点是否在可视范围中(即完全包含于或部分包含于视景体中),判断是否对其细分.如果根节点位于可见范围中,就将根节点划分成 4 个子节点,之后,重复这个过程,迭代地向下细分节点,直到根据细分标准不能继续细分时,这一递归过程终止.对于那些不在可视区域的节点,算法将其直接忽略掉,并按三角扇形方式输出那些判断为可见但不能再被细分的节点.

2.3 背面裁剪

进行三维地形漫游时,通常视点方向几乎平行于地面,显示场景中近一半的多边形因背向视点方向而不可见,勿需绘制,这就需要采用背面裁剪技术.背面裁剪是在绘制地形前,将与视点方向背离的多边形剔除掉,只绘制面向视点的多边形,以此来减少绘制的多边形数目.删减多边形时,计算视点方向与多边形表面法向量的夹角,当夹角大于 90°时,剔除该多边形;否则绘制该多边形.

2.4 静态信息的预先计算

为了进一步提高地形绘制的速度,在算法实施前,预先计算出一些能够确定的静态数据并保存起来.本文依据由视相关参数(节点距视点距离及节点误差调节因子等)预先计算出的各地形节点是否需再细分的状况,对四叉树上的数据节点进行预处

理.若某个节点需继续细分,则四叉树上该节点标识成可用状态;若不需进一步细分,则标识成不可用状态;节点若没有访问到,则标识为不确定状态.此外,可以预先计算好场景中光照的法向量.

2.5 三角扇形绘制

三角扇形是指多个三角形互相连接,共享同一个节点.绘制地形时,因四叉树所具有的一些固有特性使得在算法中非常适合使用三角扇形优化技术.

OPENGL 在绘制具有三角扇形特征的三角形时,可采用快速的优化方法进行绘制,而勿需将各个三角形都绘制一遍.在采用四叉树结构算法对地形细分后,四叉树上的每个节点都具有三角扇形特征.一个节点绘制时,因与其邻接之节点的状态都是已确定的,故可加快算法的绘制速度.绘制时的具体操作是:将节点的中心点作为中点,以节点的左上角点作为起始点,沿顺时针方向依次遍历每个角点及边点.遍历到的每个角点都需要绘制,而对于边点是否要绘制则要根据邻接节点状态来判断:如果邻接节点为可用状态,则该边点应绘制;否则就不绘制.

3 实验结果

本文在 Windows XP 下使用 VC++ 6.0 和 OPENGL 进行仿真实验.实验所使用的硬件设备的主要配置为:P4 2.4G CPU,2G 内存,GetForce4 显卡.文中选择了多个 DEM 数据对不同算法进行了测试对比.表 1 给出了当地形数据未采用 LOD 技术、采用 LOD 技术和 LOD 技术+优化技术(背面裁剪)3 种不同算法时的网格简化率和相应的绘制速度.

由表 1 可知,若 DEM 网格数据量大于 1 025 × 1 025 后,在普通 PC 机器上绘制大规模地形时,地形画面的绘制速度明显下降.对比 LOD 技术和 LOD +

表 1 不同网格点 DEM 数据采用不同算法的简化率及绘制速度比较

DEM 数据	原始地形 绘制速度 (f · s ⁻¹)	LOD 技术		LOD + 优化技术 (背面裁剪)	
		网格简化 率/%	绘制速度 (f · s ⁻¹)	网格简化 率/%	绘制速度 (f · s ⁻¹)
257 × 257	90	63.1	105	69.7	99
513 × 513	60	66.2	85	73.3	80
1 025 × 1 025	34	70.4	57	76.4	54
2 049 × 2 049	25	79.7	45	84.6	42
4 097 × 4 097	18	84.2	37	87.7	35

优化技术(背面裁剪)2种方法可以看出,使用背面剔除算法后增加了地形网格的简化率,但因地形网格绘制前需判断视线与网格法向量间的关系,故影响了地形绘制的效率,但就综合情况来看,它的效率与传统的四叉树 LOD 技术相差不多。

本文使用 LOD + 优化技术(背面裁剪)算法不仅使得三维地形网格简化很多,并且能够得到画面流畅的绘制地形。图5为本文算法基于 $4\ 097 \times 4\ 097$ 的 DEM 数据所生成的多分辨率三维地形网格模型。在上述软硬件条件下,依据所得到的三维地形模型能够实现较大范围地形的实时动态显示,平均绘制帧速率在 35 f/s, 满足了系统的实时性要求。

4 结论

本文在已有的地形模型生成算法基础上,提出

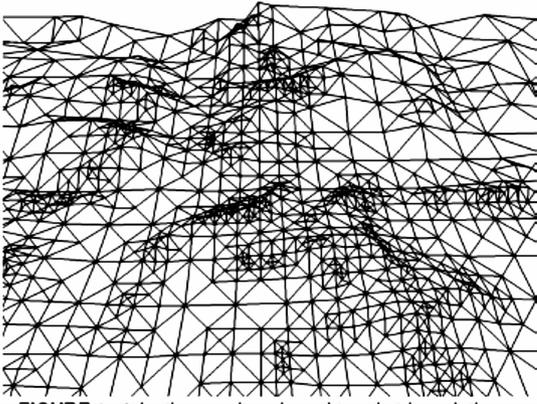


图5 多分辨率地形网格模型

了一种基于四叉树结构的多分辨率大规模地形生成算法。该算法采用高效的地形生成方法,并通过使用一些系统关键优化技术,提高了地形的实时绘制速度。实验结果表明,该算法实现简单、速度快,能够满足用户对大规模地形的实时可视化的要求。

参考文献:

- [1] Lindstrom P, Pascucci V. Terrain simplification simplified: a general framework for view-dependent out-of-core visualization [J]. IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(3): 239.
- [2] Hoppe H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering [C] // Proceedings of Visualization '98, NC: IEEE, 1998: 35.
- [3] 李胜, 冀俊峰, 刘学慧, 等. 超大规模地形场景的高性能漫游 [J]. 软件学报, 2006, 17(3): 535.
- [4] Cignoni P, Ganovelli F, Gobbetti E, et al. Planet-sized batched dynamic adaptive meshes (P-BDAM) [C] // Proceedings of the 14th IEEE Visualization, Seattle: IEEE, 2003: 147.
- [5] 谭力恒, 魏迎梅. 基于区块自适应网格的全球地形快速绘制算法 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(1): 146.
- [6] Losasso F, Hoppe H. Geometry clipmaps: terrain rendering using nested regular grids [J]. ACM Transaction on Graphics, 2004, 23(3): 769.
- [7] 李晨辉, 王长波. 基于层次划分的大规模 LOD 地形绘制 [J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2010, 36(4): 351.

一种基于预处理共轭梯度法的 给水管网水力计算方法

王美香

(郑州旅游职业学院 基础部, 河南 郑州 450009)

摘要:提出了一种新的给水管网水力计算方法.该方法对给水管网系统的节点流量连续性方程进行重新构造,用改进的 Cholesky 分解方法对重新构造的矩阵进行三角分解,然后使用预处理共轭梯度法求解.经用供水管网模型进行验证并与 EPANET 软件的计算结果进行比较,结果表明:该算法共迭代 5 次,用时 0.102 s,与 EPANET 混合节点-环方法的求解精度和速度非常接近,且弥补了 EPANET 软件的应用缺陷,可用于求解大型城市的给水管网系统.

关键词:给水管网水力计算方法;预处理共轭梯度法;Cholesky 分解;混合节点-环方法

中图分类号:0022;TU991 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.021

A calculation method of water distribution network hydraulic based on preconditioned conjugate gradient method

WANG Mei-xiang

(Foundation Department, Zhengzhou Tourism College, Zhengzhou 450009, China)

Abstract: A calculation method of water distribution network hydraulic was proposed. The nodes flow continuity equation of water distribution system was reconstructed, the reconstructed matrix was decomposed triangularly by a modified Cholesky decomposition method, and thus it was suitable for the use of preconditioned conjugate gradient method. It was tested by the model of water distribution network (WDN) hydraulic. Compared with calculation result of EPANET software, the proposed algorithm does total iteration five times in 0.102 s, which closed to the result of mixed node-ring method used in EPANET software in the aspect of accuracy and speed. The proposed algorithm overcame the defects of EPANET software, which could be used to solve large-scale urban water supply network system.

Key words: calculation method of water distribution network (WDN) hydraulic; preconditioned conjugate gradient method; Cholesky decomposition; mixed node-ring method

0 引言

随着城市化进程的加快,供水问题成为当前影响我国经济社会可持续发展的问题之一,实现供水

管理的科学化和现代化是解决供水问题的有效途径.给水管网水力计算一直都是给水管网研究领域的重要课题^[1-3],因为水力计算是管网规划、设计及动态运行管理的科学依据^[4-6].特别是,供水管网的

收稿日期:2014-03-04

作者简介:王美香(1981—),女,河南省商水县人,郑州旅游职业学院讲师,硕士,主要研究方向为数学最优化理论及应用.

优化调度,更需要一种快速的水力计算方法来提高调度的实时性.根据求解的未知量是管段流量还是节点水压,水力计算算法可分为解环方程组法、解管段方程组法和解节点方程组法.其中,解环方程组法仅限于解决方程个数较少的手工列表计算;解管段方程组法计算过程太复杂,工程实际中极少使用^[7].目前常用的计算软件 EPANET,采用混合节点-环方法求解给定时间点给水管网水力状态的节点流量连续性和管段水头损失. EPANET 是由美国环保总署开发的主要用于有压给水管网系统(包括水库、水泵、水池、泵站等)的水力水质计算软件^[8-9],它可以对有压给水管道的特性以及水质特性变化进行长时间动态仿真模拟,具有管网水力计算、工况运行模拟、基本信息管理、仿真运行管理等功能,运用 EPANET 可以实现给水管网模型基本图形录入的可视化操作.该软件计算速度快、准确性高,但其结果显示有局限性,运行结果1次只能看到1个属性信息,且该软件仅限于教学和科研使用,尚不能商用.鉴于此,本文基于预处理共轭梯度法,运用解节点方程组法将非线性问题转化为线性问题,然后通过计算机编程用迭代法求解,从而达到对给水管网系统进行快速水力计算的目的.

1 给水管网水力特性

给水管网系统是一类规模巨大且运行工况复杂多变的网络系统,通常将其简化、抽象和标识为便于使用图形和数据表达与分析的应用系统,包括给水管网系统中各组成部分的拓扑连接关系、工程属性、水力特性等,常称为给水管网模型^[10].本文应用预处理共轭梯度法求解给水管网模型相关问题.

经过简化,可将给水管网系统问题转化为数学问题,最终将计算结果应用到实际中去.通常,简化应满足宏观等效原则和可容忍小误差原则.简化后的给水管网需要进一步抽象成为仅由管段和节点组成的管网模型,用图论中的关联矩阵来刻画,记为 $\mathbf{A} = (a_{ij})$.考虑设定了初始方向的给水管网图,则关联矩阵中的每个元素 a_{ij} 可表示为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若管段 } j \text{ 与节点 } i \text{ 关联,} \\ & \text{且节点 } i \text{ 为管段 } j \text{ 的起始端点} \\ -1, & \text{若管段 } j \text{ 与节点 } i \text{ 关联,} \\ & \text{且节点 } i \text{ 为管段 } j \text{ 的终止端点} \\ 0, & \text{若管段 } j \text{ 与节点 } i \text{ 不关联} \end{cases}$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n_j, j = 1, 2, \dots, n_p$.显然,对于较大规模的城市给水管网,相应的给水管网图是一个稀疏图,其关联矩阵是一个 $n_j \times n_p$ 的稀疏矩阵.类似地,可建立其环路矩阵.

给水管网的水力特性是指管网模型中节点和管段传递、输送流量和能量的特性,其理论基础是质量守恒定律、能量守恒定律和动量守恒定律.通常分析给水管网水力特性时,仅考虑质量守恒定律和能量守恒定律.笔者将采用解节点方程法来获得给水管网系统的水力特性参数.

综合考虑节点流量连续性方程组、环能量方程组和管段压降方程组,则可以用向量方式将给水管网水力特性方程组简写为

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{q} + \mathbf{Q} = 0 \\ \mathbf{L}\mathbf{h} = 0 \\ \mathbf{h} = \mathbf{S}\mathbf{q}^n \end{cases}$$

其中, \mathbf{A} 是给水管网图的关联矩阵,管段流量向量 $\mathbf{q}^T = (q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_{n_p})^T$,节点流量向量 $\mathbf{Q}^T = (Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ \dots \ Q_{n_j})^T$, \mathbf{L} 是给水管网图的环路矩阵,管段压降向量 $\mathbf{h}^T = (h_1 \ h_2 \ h_3 \ \dots \ h_{n_R})^T$,管段摩阻系数对角阵 $\mathbf{S} =$

$$\begin{pmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & s_{n_R} \end{pmatrix}, (\mathbf{q}^n)^T = (q_1^n \ q_2^n \ q_3^n \ \dots \ q_{n_p}^n)^T \text{ 中的}$$

指数 n 由所采用的水头损失公式而定.为了更好地推导给水管网的水力计算方程,记 $\mathbf{M} = \mathbf{S}\mathbf{q}^{n-1}$,则 $\mathbf{h} = \mathbf{M}\mathbf{q}$, $\mathbf{q} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{h}$,因此解节点方程法的主要公式又可以写成

$$\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{h} = \mathbf{A}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{H} = \mathbf{Q}$$

显然,上式是以节点水头为自变量的节点方程,而且是线性表达式,在实际求解过程中须采用迭代方式实现,即上述方程的求解过程是一个迭代过程,需要拟定管段的初始流量,但不需要拟定节点的初始水头.从迭代的角度来说,如果初始流量分配不当,可能会增加迭代次数,但一般不会导致不收敛.因为在实际的给水系统中,当给定某种工况时,一定存在一种确定的供水状态,即节点水头是存在的、确定的.

2 预处理共轭梯度法给水管网水力计算

无约束最优化问题一直都是学术界的研究热

点之一^[11-14],共轭梯度法及其各种改进算法都属于无约束最优化问题的求解方法^[15-17].共轭梯度法最早是由计算数学家 M. R. Hestenes 等^[18]于1950年代初为求解线性方程组 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ ($x \in R^n$) 而提出的.当 \mathbf{A} 为对称正定阵时,上述线性方程组等价于最优化问题 $\min_{x \in R^n} \frac{1}{2} x^T \mathbf{Ax} - \mathbf{b}^T x$. 由此, M. R. Hestenes 等^[18]

的方法也可视为求二次函数极小值的共轭梯度法.1964年, R. Fletcher 等^[19]将此方法推广到非线性优化,得到了求一般函数极小值的共轭梯度法.共轭梯度法是一种实用的线性方程组迭代求解方法:先用解节点方程法把复杂的非线性的管网稳态方程组转化为比较简单的线性表达式,然后用迭代法求解.这是一种适合计算机实现的管网水力计算方法.

在公式①中,当未知量全为节点水压时,方程组的系数矩阵 $\mathbf{AM}^{-1}\mathbf{A}^T$ 是一个 $N_j \times N_j$ 的对称正定阵,且具有弱主对角优势.对于大型给水管网,该系数矩阵是稀疏的,通常其非零元占元素总数不到5%.数值计算领域的研究表明^[19]:对于高阶的此类方程组,由于其系数具有大型稀疏特点,且对称正定,适合采用预处理共轭梯度法来求解;对于一般病态的大型稀疏矩阵,共轭梯度法只需远小于 N (N 为矩阵阶数) 次迭代就可以得到满足精度要求的数值解;如果矩阵病态较严重,则可以使用预处理方法改善其条件,加快迭代的收敛速度.当未知量中既含有节点水头又含有节点流量时,就必须构造一个类似于①的方程组,使其系数矩阵为对称正定阵.

2.1 给水管网水力特性方程组系数矩阵的对称正定预处理

设给水管网模型中流量已知而水头未知的节点集合为 $J(D)$, 节点个数为 C_D ; 流量未知而水头已知的节点集合为 $J(UD)$, 节点个数为 C_{UD} . 设节点集合 $J(D)$ 的关联矩阵、节点水头和节点流量分别为 $\mathbf{A}_D, \mathbf{H}_D$ 和 \mathbf{Q}_D , 节点集合 $J(UD)$ 的关联矩阵、节点水头和节点流量分别为 $\mathbf{A}_{UD}, \mathbf{H}_{UD}$ 和 \mathbf{Q}_{UD} . 则节点流量连续性方程组又可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{A}_D \mathbf{q} + \mathbf{Q}_D = 0 \\ \mathbf{A}_{UD} \mathbf{q} + \mathbf{Q}_{UD} = 0 \end{cases}$$

由于 $\mathbf{q} = \boldsymbol{\beta} \mathbf{h}$, 且 $\boldsymbol{\beta}$ 是一个 $N_p \times N_p$ 阶的对角阵, 则

$$\begin{cases} \mathbf{A}_D \boldsymbol{\beta} \mathbf{h} + \mathbf{Q}_D = 0 \\ \mathbf{A}_{UD} \boldsymbol{\beta} \mathbf{h} + \mathbf{Q}_{UD} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

管段能量方程 $\mathbf{A}^T \mathbf{H} = \mathbf{h}$ 也可以改写为

$$\mathbf{h} = \mathbf{A}^T \mathbf{H} = \mathbf{A}_D^T \mathbf{H}_D + \mathbf{A}_{UD}^T \mathbf{H}_{UD} \quad (3)$$

将式③代入方程组②可得

$$\mathbf{A}_D \boldsymbol{\beta} \mathbf{A}_D^T \mathbf{H}_D + \mathbf{A}_D \boldsymbol{\beta} \mathbf{A}_{UD}^T \mathbf{H}_{UD} + \mathbf{Q}_D = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_{UD} \boldsymbol{\beta} \mathbf{A}_D^T \mathbf{H}_D + \mathbf{A}_{UD} \boldsymbol{\beta} \mathbf{A}_{UD}^T \mathbf{H}_{UD} + \mathbf{Q}_{UD} = 0 \quad (5)$$

在方程④中,当未知向量 \mathbf{H}_D 已知时,方程⑤中的未知量为 \mathbf{Q}_{UD} .在给水管网水力计算的每次迭代求解过程中,都将生成形如式④⑤的线性方程组.

记 $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_D \boldsymbol{\beta} \mathbf{A}_D^T \in R^{C_D \times C_D}$, $\mathbf{b} = -(\mathbf{A}_D \boldsymbol{\beta} \mathbf{A}_{UD}^T \mathbf{H}_{UD} + \mathbf{Q}_D) \in R^{C_D}$, $\mathbf{x} = \mathbf{H}_D \in R^{C_D}$, 则方程组④可以改写为

$$\tilde{\mathbf{A}} \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

在规模较大的市政给水管网系统中,通常 C_D 都较大,因此系数矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 是一个大型稀疏矩阵,其条件数非常大.为保证处理后的方程组仍具有对称正定性,需要寻求预处理对称正定阵 $\mathbf{M} = \mathbf{W} \mathbf{W}^T$, 其中 \mathbf{W} 为非奇异矩阵,使得

$$\tilde{\mathbf{A}} \mathbf{x} = \mathbf{b} \Leftrightarrow (\mathbf{W}^{-1} \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{W}^{-T}) \mathbf{W}^T \mathbf{x} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{b}$$

即求解

$$\hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{b}} \quad (5)$$

其中, $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{W}^{-1} \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{W}^{-T}$, $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}^T \mathbf{x}$, $\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{b}$, 且 $\hat{\mathbf{A}}$ 的条件数得到较大改善.经过预处理后的给水管网水力计算特性方程组可在较少的迭代次数内收敛.所以,预处理矩阵 \mathbf{M} 的选取是给水管网快速水力计算的关键,这是一个矩阵分解的问题.

满足上述要求的对称正定阵 \mathbf{M} 的预处理方法较多^[20-21].在给水管网水力特性方程组中,其系数矩阵为正定矩阵,而 Cholesky 分解方法和改进的 Cholesky 分解方法是专门针对正定矩阵的三角分解提出的,其优点是不用选取主元,不会产生因中间量放大使计算不稳定的显现.本文预处理后的系数矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 是对称正定的,因此,将采用改进的 Cholesky 分解方法来实现.

设 $\mathbf{M} = \mathbf{W} \mathbf{W}^T$, 其中 \mathbf{W} 是基于改进的 Cholesky 分解方法得到的下三角矩阵.取 $\mathbf{M} \approx \tilde{\mathbf{A}}$, 则有 $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{W} \mathbf{W}^T) \mathbf{W}^{-T} = \mathbf{I}$, 即 $\text{cond}_2(\hat{\mathbf{A}}) \approx 1$, $\text{cond}_2(\mathbf{M}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{A}}) \approx 1$, 此时条件数得到较大改善,几乎趋于最小.

注意到 $\tilde{\mathbf{A}}$ 是大型稀疏矩阵, \mathbf{W} 具有与 $\tilde{\mathbf{A}}$ 相同的稀疏特性.

2.2 基于预处理共轭梯度法的给水管网水力特性方程组求解

根据公式⑤的描述,设 $r(x) = \mathbf{b} - \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{x}$, 则给水管网水力计算问题可以等价地转换为无约束多维最

优极值问题:

$$\min r(x) \quad x \in R^{C_D}$$

由线性方程组的共轭梯度法迭代求解理论可知,对于上述无约束多维最优极值问题,最多仅需 C_D 次迭代便可求得方程组的解。

基于预处理共轭梯度法求解给水管网水力特性方程组⑤的方法如下:

1)任意给定初始值 $\tilde{x}^{(0)} \in R^{C_D}$, 迭代终止精度 $\varepsilon > 0$, 最大迭代次数 $MAX \leq C_D$;

2) $r^{(0)} = b - \tilde{A}\tilde{x}^{(0)}$, 由 $Mh_0 = r^{(0)}$ 解出 h_0 , 并令 $p_0 = h_0$, 即 $p_0 = h_0 = M^{-1}r^{(0)}$;

3)对 $k=0, 1, 2, \dots$, 依次计算

$$\alpha_k = \frac{h_k, r^{(k)}}{A p_k, p_k} \quad x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k p_k$$

由于

$$0 = (\tilde{p}_k, \tilde{A}\tilde{p}_i) = (W^T p_k, W^{-1}\tilde{A}W^{-T}W^T p_i) =$$

$$(W^T p_k, W^{-1}\tilde{A}p_i) = (W^{-T}W^T p_k, \tilde{A}p_i) = (p_k, \tilde{A}p_i)$$

所以 $\{p_0, p_1, p_2, \dots\}$ 是 \tilde{A} 的正交组, 互为共轭的方向向量, 计算残差 $r^{(k+1)} = r^{(k)} - \alpha_k \tilde{A}p_k$, 由 $Mh_{k+1} = r^{(k+1)}$ 解出 $h_{k+1} = M^{-1}r^{(k+1)}$, 计算

$$\beta_{k+1} = \frac{(h_{k+1}, r^{(k+1)})}{(h_k, r^{(k)})} \quad p_{k+1} = h_{k+1} + \beta_{k+1} p_k$$

若 $r^{(k)} = 0$, 或 $(p_k, \tilde{A}p_k) = 0$, 或 $k = MAX \leq C_D$, 或 $\|r^{(k)}\|_2 < \varepsilon$ 时, 计算终止, 此时有 $x^{(k)} = x^*$ 为方程组 $\tilde{A}x = b$ 的最终数值迭代解。

3 数值算例

为了验证本文提出算法的有效性, 以一个具有 760 个节点、880 条管段和 3 个水源的给水管网模型为例进行分析。模型的拓扑结构示意图如图 1 所示。

计算过程各参数设置如下: 设定某时段的总供水量为 $162\ 513\ 0\ m^3$, 并预分配各节点的流量, 水源 A 和 水源 B 的流量分别为 $800\ m^3$ 和 $1\ 289\ m^3$, 相应地面标高为 $9.6\ m$ 和 $6.43\ m$, 水源 C 的地面标高为 $14\ m$, 其出厂压力给定为 $36\ m$ 。为了使用 EPANET 软件进行计算, 需要在 EPANET 中将水源 A 和 B 分别设定为普通节点。2 种计算方法中迭代误差均设置为 $20\ m^3/h$ 。经计算后, 本文算法共迭代 5 次, 计算时间 $0.102\ s$, EPANET 共迭代 5 次, 计算时间 $0.1\ s$ 。2 种方法对节点自由水头和管段水力坡降计算结果的相对误差均小于 0.005 。因此, 本文算法是可行的, 在迭代次数与计算时间上均与 EPANET 相差不大。

4 结论

本文设计了一种基于预处理共轭梯度法的给水管网水力计算的数值求解方法。数值算例结果表明, 本文提出的算法具有较好的实时性和准确性, 在迭代次数与计算时间上均与 EPANET 相差不大,

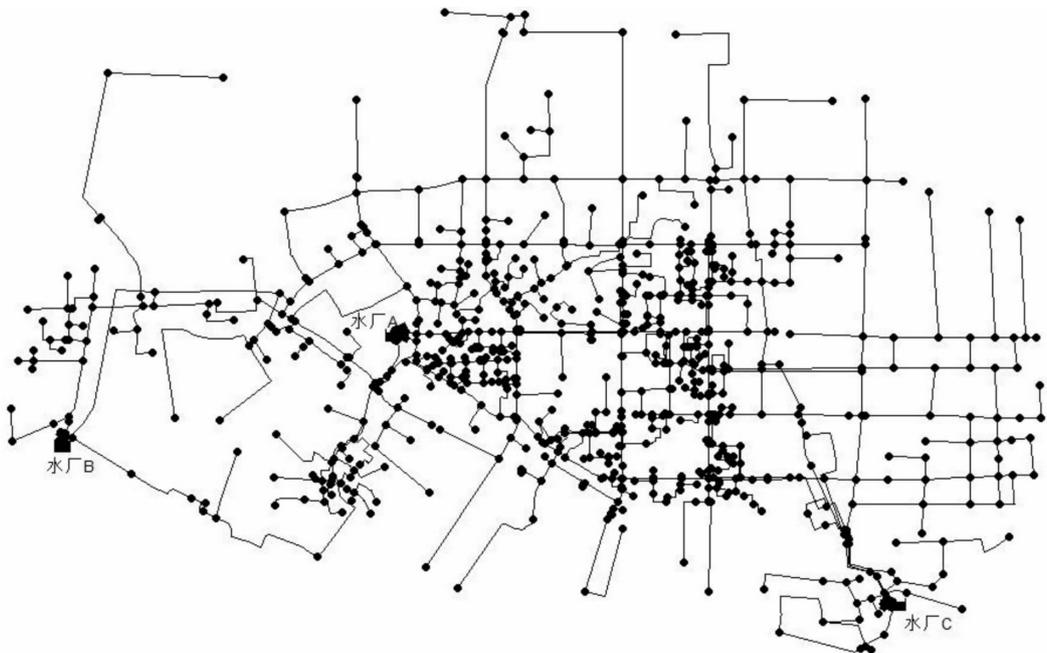


图 1 拓扑结构示意图

可用于大型城市给水管网系统给水管网规划、给水管网改造等水力计算与分析. 本算法能否进一步优化、能否应用于电网系统,还有待深入研究.

参考文献:

- [1] Basha H A, Malaeb L N. Eulerian-Lagrangian method for constituent transport in water distribution networks [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007(10):1155.
- [2] 陆际汉. 给水管网平差精确算法——水力比拟法[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(24):62.
- [3] 陈喆, 俞国平. 给水管网双向流管段水力计算分析[J]. *苏州科技学院学报:工程技术版*, 2012, 25(3):9.
- [4] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] 段焕丰. 城市供水系统动态建模技术研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [6] 王国栋, 俞国平. 管段重要性指数在水力模型校核中的应用[J]. *苏州科技学院学报:工程技术版*, 2007, 20(1):53.
- [7] 彭永臻, 崔福义. 给水排水工程计算机应用[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] Rossman L A, Boulos P, Altman T. Discrete volume-element method for network water-quality models [J]. *Water Resour Plann Manage*, 1993, 119(5):505.
- [9] Rossman L A. EPANET 2 User's Manual [M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory (U. S. Environmental Protection Agency), 2000.
- [10] 严煦世, 刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- [11] Nocedal J, Wright S J. Numerical Optimization [M]. New York: Springer Verlag, 2006.
- [12] Andrei N. New accelerated conjugate gradient algorithms as a modification of Dai-Yuan's computational scheme for unconstrained optimization [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2010, 234(12):3397.
- [13] Andrei N. Open problems in conjugate gradient algorithms for unconstrained optimization [J]. *Bulletin of the Malaysian Mathematical Sciences Society*, 2011, 34(2):319.
- [14] Hu C M, Wan Z. An extended spectral conjugate gradient method for unconstrained optimization problems [J]. *British Journal of Mathematics & Computer Science*, 2013, 3(2):86.
- [15] Du S Q, Chen Y Y. Global convergence of a modified spectral FR conjugate gradient method [J]. *Appl Math Comput*, 2008, 202:766.
- [16] Yu G H, Guan L T, Wei Z X. Globally convergent Polak-Ribire-Polyak conjugate gradient methods under a modified Wolfe line search [J]. *Appl Math Comput*, 2009, 215(8):3082.
- [17] An X M, Li D H, Xiao Y H. Sufficient descent directions in unconstrained optimization [J]. *Comput Optim Appl*, 2011, 48:515.
- [18] Hestenes M R, Stiefel E L. Methods of conjugate gradients of solving linear systems [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1952, 5(2):409.
- [19] Fletcher R, Reeves C. Function minimization by conjugate Gradients [J]. *Computer Journal*, 1964(7):149.
- [20] 李庆杨. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [21] 吴勃英. 数值分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.

燃煤锅炉烟气氨法脱硝实时监测系统

张涛, 贺蕾, 张彦

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为监测火电厂锅炉烟气氨法脱硝过程中的氨气泄漏情况,利用 GSM, Internet 和 ZigBee 等多种技术,设计了一个集采集、报警、查询为一体的监测系统,实现了用无线传感器网络对氨法脱硝系统运行环境进行分布式液氨泄漏监测. 该系统能有效提高氨法脱硝现场的安全性,具有低功耗、低单位成本和组网灵活等优点.

关键词: ZigBee; 脱硝; 实时监测系统; 氨气泄漏; 燃煤锅炉烟气

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.022

Real-time monitoring system of denitration by using ammonia coal-fired boiler flue gas

ZHANG Tao, HE Lei, ZHANG Yan

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

Abstract: To monitor the ammonia leak in the process of denitration by using ammonia in thermal power plant, a real-time monitoring system integrated collect data, send alarm signal and query information was proposed using some communication technologies such as GSM, Internet, ZigBee, etc. The wireless sensor network was used to implement distributed monitoring of ammonia leakage in the system of denitration by using ammonia. The system effectively improved the safety of the process of denitration by using ammonia. Moreover, it had some merits such as low power consumption, low cost and flexible networking, etc.

Key words: ZigBee; denitration; real-time monitoring system; ammonia leakage; coal-fired boiler flue gas

0 引言

目前,大型火电厂脱除锅炉烟气中氮氧化物(NO_x)所采用的方法主要是氨法脱硝,使氨和 NO_x 发生化学反应,生成 N_2 和 H_2O ,以达到降低环境污染的目的. 由于氨气属于危险性气体,一旦泄漏,会对环境造成污染,并对周围人群造成伤害. 因此,采用氨法脱硝的系统其运行安全不容忽视,为了保证氨法脱硝系统正常运行,需要对系统中发生的异常

情况及时响应,通常是采用氨气检测传感器对系统中氨气的浓度进行实时监测,为此需要设计一个具有多点监测、数据汇总分析和泄露报警等功能的运行环境监测系统.

ZigBee 是一种无线网络技术,是为监控、安全系统、建筑自动化等工程应用而设计的无线通信技术^[1]. 它能够在数千个微小的传感器之间进行通信、相互协调. 这些传感器使用很少的能量,以接力的方式通过无线通信将数据从一个传感器传到另

收稿日期:2013-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61374014);河南省教育厅科学技术研究重点项目(12A510027)

作者简介:张涛(1979—),男,河南省信阳市人,郑州轻工业学院讲师,硕士,主要研究方向为智能传感技术.

一个传感器. 基于 ZigBee 技术的无线网络还具有自组织和自愈、功耗低、抗干扰性强、成本低、高安全性和高可靠性特点^[2]. 本文拟设计一种基于 ZigBee 技术的监测系统, 来实时监测燃煤锅炉烟气氨法脱硝系统的运行状态.

1 系统组成

基于 ZigBee 技术的氨法脱硝实时监测系统由监测节点、信息接收节点、监控查询系统等部分组成, 如图 1 所示.

其中, 监测节点以 CC430F5137 单片机为收发控制通信模块, 由电池提供工作电源, 可以灵活分布安装. 监测节点具有氨气浓度感知功能, 能将采集到的气体信号经过放大电路放大到合适大小, 经 A/D 转换后由无线微控制器进行处理. 当检测到一定浓度的氨气时发出控制信号, 通过该节点设备上的声光报警器发出报警信号, 同时采用 2.4 GHz 的无线频段发送报警信号给信息接收节点. 该监测节点还具有位置标识的功能, 当它与放置在室内的信息接收节点通信时, 能主动将自己的位置信息发送给信息接收节点.

信息接收节点通过 RS485 接口将监测节点发送过来的氨气浓度和位置等信息转发给监控中心, 然后由监控中心的控制台实时显示.

监控查询系统由在线数据库和查询服务器组成, 能够实时显示风机系统的信息. 用户可以通过

Internet 和 GSM 网络对相关的数据进行远程查询. 一旦监测到有异常情况发生, 工作人员可以及时采取相应的措施.

监测节点是整个系统的基础, 所有的监测节点与信息接收节点通过 ZigBee 技术组建成近距离无线网络. 监测节点不仅可以及时发出氨气泄漏报警信息, 还可以向监控中心发送运行报警信息, 既为现场工作人员的人身安全提供了保障, 又可以方便实施生产指挥与调度.

2 监测节点设计与仿真

2.1 硬件设计

监测节点由数据采集单元、处理与通信单元和供电单元等组成.

数据采集单元负责采集监测数据信息, 由传感器、运放、A/D 转换器组成. 本系统使用半导体型气体传感器 TGS - 2444, 该传感器体积小、耗电低, 响应时间 < 20 s. 信号的放大采用 ADS1110 芯片内部的可编程运算放大器, 并通过 ADS1110 芯片进行 A/D 转换.

处理与通信单元实现数据的存储、分析、处理和发送功能, 采用 TI 公司的 CC430F5137 单片机来实现. CC430 系列中集成了具有 RF 收发器的超低功耗 MCU 系统级芯片, 器件具有功能强大的 MSP430 的 16 位精简指令集 CPU, 16 位移寄存器,

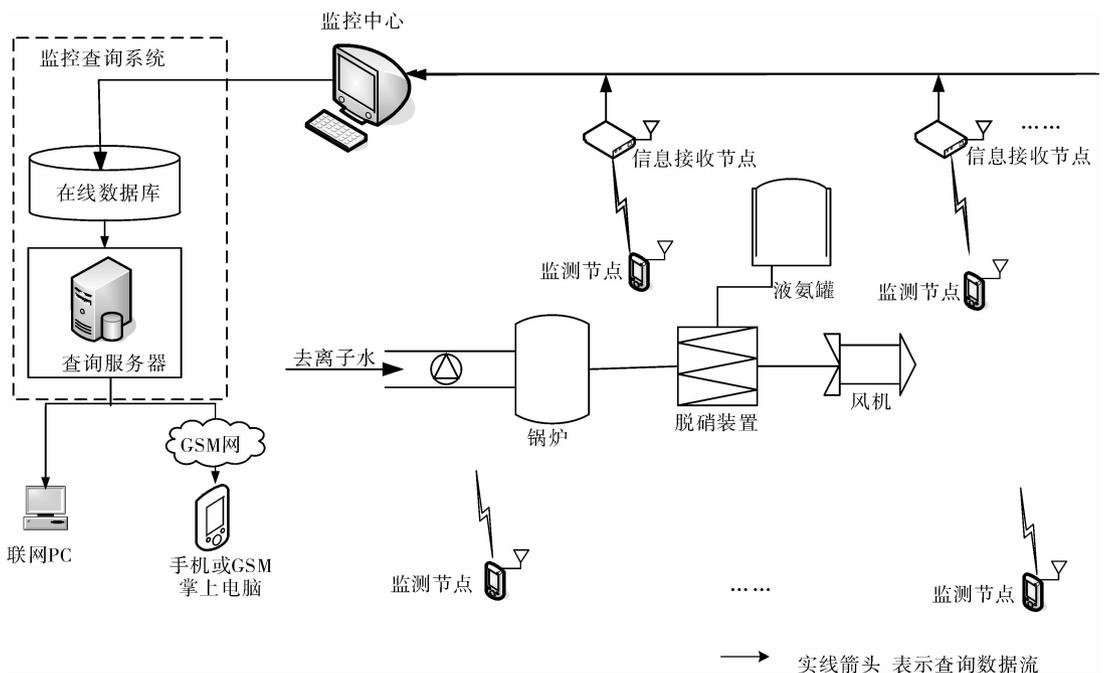


图 1 系统组成示意图

以及常数发生器,以得到最高的代码效率.工作电压 1.8~3.6 V,CPU 工作时的功耗 160 μ A/MHz,具有低功耗、低成本的特点.

供电单元选取 2 节 5 号 AA 电池,为了延长节点设备的生存时间,在系统中还集成了升压直流转直流(DC/DC)芯片 NCP1400,通过该芯片的转换作用,即使电池电压下降至 1.6 V,工作电压为 2.7~3.6 V 的 CC430 单片机仍能正常工作.

2.2 软件设计

2.2.1 节点协议栈结构

监测节点和信息接收节点之间通过协议栈进行相互通信^[3],协议栈结构如图 2 所示.其中,媒体接入控制层和物理层采用 IEEE 802.15.4 协议标准,应用层和网络层采用 ZigBee 技术规范.媒体接入控制层为无线信道的访问提供 CSMA/CA 共享机制同时保证点到点或点到多点的通信链路的可靠性^[4];物理层提供无线信号的调制、发送和接收功能;应用层由应用支持层、ZigBee 设备对象、制造商所定义的应用对象以及用户应用程序组成;网络层完成一跳邻居设备的发现和相节点信息的存储,负责网络拓扑结构的建立和维护网络连接,同时实现设备之间的路由发现、路由维护和信息转发的功能.管理平台主要负责节点设备的能量、任务的管理,与各层协议都相关,按照功能可分为能量管理平台和任务管理平台.能量管理平台用于网络中节点能量的管理,任务管理平台用于调度协议栈任务和用户任务.

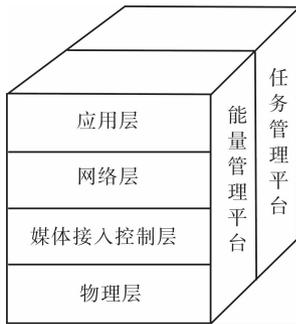


图 2 节点协议栈结构

本系统具有低功耗的特点,这是通过从节点硬件和协议栈 2 个方面降低系统能耗而实现的.从硬件方面分析,采用 16 位低功耗单片机 CC430F5137,降低了功耗和处理器的费用,该模块提供了内置的休眠计时器,休眠电流仅为 2.8 μ A,通过加强调度机制、增加休眠时间降低了系统功耗.此外,传感器电源的供电电路设计对于传感器模块的能量消耗

也非常重要.TGS-2444 传感器具有较小的工作电流,可以采用微处理器的通用输入/输出 GPIO 口进行直接驱动,当使用传感器采集信息时,只需将 GPIO 口设置为输入方式,即可进一步减少传感器模块的能量消耗.从协议栈方面分析,每一层都要根据各层的功能和特点设计不同的节能策略.例如,网络层采用的路由协议不仅要选择能量消耗小的消息传输路径,而且要从整个网络的角度来考虑选择使用能耗均衡的路由^[5].

2.2.2 监测节点设备的程序流程

节点上电后,监测节点设备程序流程如图 3 所示,执行步骤如下:

- 1) 进行系统初始化,包括初始化 ZigBee 协议栈和初始化外围部件.
- 2) 协议管理系统引导程序通过调用初始化函数启动 ZigBee 协议栈,节点设备将作为协调器或监测节点启动.
- 3) 协议栈通过调用链接请求函数将网络事件反馈给应用程序,返回协议管理系统.
- 4) 如果与其他节点完成链接,协议管理系统通过调用任务创建函数加载用户任务,由任务管理器调用.
- 5) 如有中断请求执行中断处理函数,中断处理函数控制监测节点设备的声光报警器发出警报,同时将监测数据发送给消息接收节点设备.当消息队列中有 ZigBee 设备进行绑定、设备发现、服务发现等消息时,也调用相应中断处理函数做出响应^[6].

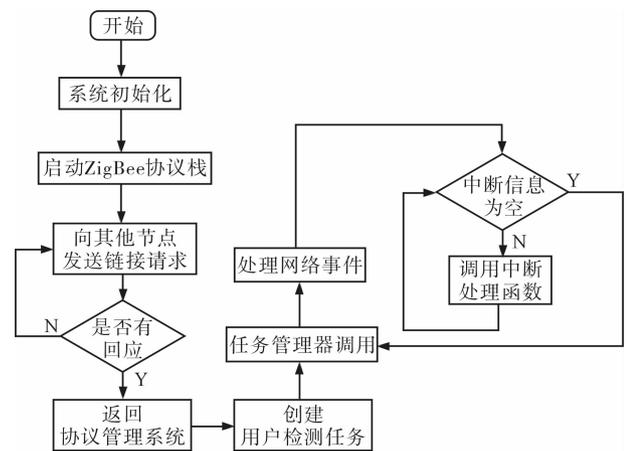


图 3 监测节点设备程序流程图

系统以固定数据格式传送数据,接收节点接收数据后按照固定格式对数据进行解析.

基于 SSH2 和 jQuery 的大学生校园 综合服务平台的设计与实现

赵晓君, 崔建涛, 邓璐娟, 陈浩然

(郑州轻工业学院 软件学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对用传统方式开发的大学生校园综合服务平台难以维护和扩展、用户体验不够好等问题,提出一种以 MyEclipse 8.5 为开发工具,数据库为 MySQL,将 SSH2 和 jQuery 这 2 种框架整合应用于系统开发的方案.该方案视图层由 JSP 和 jQuery 框架实现,业务逻辑层由 Struts2 和 Spring 框架整合实现,数据持久层由 Hibernate 和 Spring 框架整合实现.实践证明,该方案提高了系统的开发效率,增强了系统的可维护性和可扩展性,提升了用户体验.

关键词: Struts2; Hibernate; Spring; jQuery; 校园综合服务平台

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.023

Design and implementation of integration service platform of college campus based on SSH2 and jQuery

ZHAO Xiao-jun, CUI Jian-tao, DENG Lu-juan, CHEN Hao-ran

(College of Software Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the questions that the campus integrated service platform developing in traditional way was difficult to maintain, and extend and the user experience was not good enough, a developing scheme integrated SSH2 and jQuery was proposed using MyEclipse 8.5 as development tool and MySQL. In this scheme, view layer was implemented by the JSP and jQuery framework, business logic layer was implemented by Struts2 and Spring framework, data persistence layer was implemented by Hibernate and Spring Framework. The results showed that the scheme improved the efficiency of the system, enhanced the maintainability and scalability of the system and the user experience.

Key words: Struts2; Hibernate; Spring; jQuery; integration service platform of college campus

0 引言

如何培养出具有创新思维、动手能力强的大学生是社会共同关注的话题,据调查,大多数高校学生在大学 4 年期间课余时间多呆在宿舍,电脑成为

他们不可或缺的工具.因此,如何利用电脑让他们思维变得更加主动、激发他们的创造力成为一个亟待解决的重要问题.大学生校园综合服务平台能够通过网络解决这一问题.该平台使大学生可以在网上发表自己的想法,与其他同学进行交流,参加学

收稿日期: 2013-12-26

基金项目: 河南省科技攻关项目(142102210078);河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A520358);国家级大学生创新实验项目(201210462038)

作者简介: 赵晓君(1979—),女,河南省南阳市人,郑州轻工业学院讲师,硕士,主要研究方向为计算机应用技术.

校社团以及校园内的其他各种活动,不仅能够激发学生们的创造力,使其在各种活动中得到锻炼,同时可以更好地服务学生,帮助学生解决各种问题。

目前,国内很多高校都在建设校园综合服务平台,有的重点高校已经建成.通过该平台,使校园内的教学信息、社团信息、校园活动信息、学生信息等能够得到共享,实现真正的数字化校园,促进学生之间更好地交流.该平台采用的技术主要有以Java为基础的JSP+Servlet+JavaBean、SSH框架开发,基于.NET平台的ASP.NET Web开发和基于PHP的Web开发等.但采用这些传统方式开发的大学生校园服务平台,用户体验不够好,而且系统难以维护,很难扩展新的功能,满足不了大学生不断增长的网路需求.本设计拟采用SSH2(Struts2+Spring+Hibernate)^[1-6]和jQuery^[7-8]2个框架整合实现,以期提高系统的可维护性和可扩展性,提升用户体验。

1 系统设计

1.1 系统主体功能

大学生校园综合服务平台的服务内容即是系统的主体功能,它包括:注册登录、个人信息管理、用户说说、用户日志、用户照片、校园格子铺、校园失物招领、校园招聘、校园投票问卷调查、校园社团等所有涉及学生在校园进行的活动。

1.2 功能模块划分

系统模块结构如图1所示。

注册登录模块包括快速注册、详细注册和登录功能;个人信息管理模块中,用户登录后可以修改自己的详细信息,上传自己的头像,还可以管理自己发表的说说、日志和照片;信息共享模块包括用户说说、用户日志、用户照片的发布和上传;中心广场模块包括校园格子铺、校园失物招领、校园招聘、校园投票问卷调查等;社团模块包括社团简介、社团公告、社团活动、社团管理、网上创建社团、申请加入社团等。

系统权限设计为:用户必须先注册,登录成功才能进入主页.系统用户分为普通用户、社团管理员、管理员和超级管理员,社团管理员拥有社团管理的权限,超级管理员和管理员均有权对社团申请进行审核,超级管理员有权对管理员进行管理。

1.3 系统框架结构

本系统使用MyEclipse 8.5作为开发工具,采用

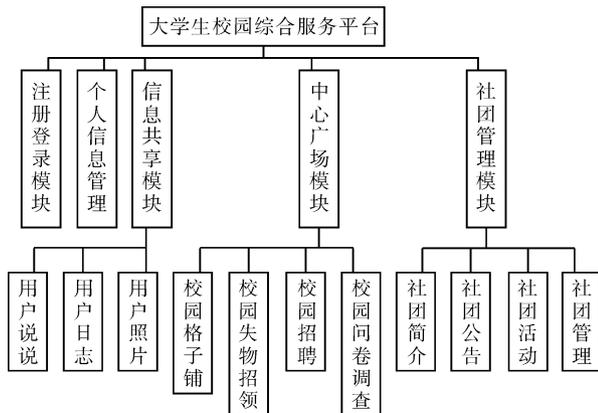


图1 系统模块结构图

SSH2集成框架实现,降低了模块间的耦合度,提高了代码的可重用性、可维护性和可扩展性.数据库采用MySQL,同时利用jQuery框架实现了后台数据到前台页面的无缝连接,做到了页面的局部更新,使得系统具有很好的用户体验。

系统分3层,即视图层、业务逻辑层和数据持久层.系统框架结构如图2所示.视图层采用JSP+jQuery实现,JSP用于获取用户的需求,jQuery用于实现和用户的异步交互;业务逻辑层由Spring和Struts2整合实现,Struts2根据用户请求调用相应Action控制器^[9],Action调用Service实现业务逻辑处理;数据持久层由Spring和Hibernate整合实现,Service调用DAO实现对数据库的操作,DAO通过调用Hibernate API对持久化对象进行操作,Hibernate将DAO对持久化对象的操作映射为对数据库中数据的操作,最终实现对数据库中数据的增删改查.其中,Spring负责创建管理业务逻辑层和数据持久层中所有的类对象。

在该系统中,对象的调用流程如图3所示。

2 系统实现

2.1 JSP和jQuery实现视图层

视图层使用jQuery主要实现注册时判断用户名是否已注册、生成验证码、上传头像和信息自动完成等功能.jQuery可以自动获取客户端信息,并向服务器发出异步请求,服务器端接收请求后,进行相应的处理,并将处理结果以响应的形式发给客户端,客户端接收到响应数据后,会调用相应的回调函数对响应数据进行处理,并使其显示在当前页面上.在整个过程中,用户无需等待。



图2 系统框架结构图



图3 系统框架对象调用流程图

以注册时验证用户名是否已被注册为例:对输入用户名的文本框进行事件绑定,当鼠标从该文本框移出时,立即调用 verifyName() 函数,在该函数中,获取文本框中输入的用户名赋值给 username,向服务器发送异步请求,请求 verify. action 查询用户名 username 是否已被注册。

设置函数 callback(), 用于处理服务器返回的数据. 发送异步请求的代码为:

```
$.get("verify.action?user.username="+username,null,callback);
```

服务器接收到请求后,采用 SSH2 框架进行处理,查询数据库表 users 中是否存在此 username 的记录,并将处理结果返回给客户端. 客户端接收到服务器的响应信息后,调用 callback() 函数进行处理,在该函数中,对服务器返回的数据进行判断,并将结果显示在当前页面上. callback() 函数部分代码如下:

```
function callback(data) {
    var $d = eval(data);
    if ($d) {
        $(".form_input_check").html("恭喜,该账号可用").css("color","green");
    } else {
        $(".form_input_check").html("该账号已存在,请直接登录!").css("color","red");
    }
}
```

2.2 Spring 和 Struts2 实现业务逻辑层

Struts2 实现了视图层和业务逻辑层的无缝连接,核心控制器 FileterDispatcher 获取用户请求后,根据配置文件 struts.xml 调用相应的 Action 业务控制器来处理请求. Action 业务控制器会调用相应的 Service 对象进行业务逻辑处理,Service 对象进行业务处理,并调用数据持久层的 DAO 对持久化对象操作以实现数据库的操作,然后将处理的结果返回给 Action,Action 再将结果返回. 根据配置文件 struts.xml 和 Action 的返回结果决定将某个视图页面返回给用户,或者调用下一个 Action 业务控制器。

Spring 和 Struts2 整合之后,Action 业务控制器和 Service 对象都由 Spring 的 IOC 容器生成和管理,因此,Action 和 Service 作为 Bean 被配置在 ApplicationContext.xml 中. struts.xml 进行 Action 配置时 class 属性应为 ApplicationContext.xml 中相应 Action Bean 的 id.

以修改个人资料为例:用户在修改个人资料页面上修改自己信息,通过表单向服务器提交请求 userInfo_modify. action, 服务器接收请求后,根据 struts_user.xml, 找到 userInfo_modify. action 对应的 userAction 对象,调用其方法 userInfo_modify(), userAction 调用 userService 对象,userService 调用 userDAO 对象最终实现个人资料更新,并将处理结果逐级返回给 userAction 对象,userAction 对象再将结果返回,根据 struts_user.xml, 当 userAction 返回结果为 success 时,调用下一个业务控制器 showmsg. action 显示更新后的个人资料. 修改个人资料过程的时序图如图 4 所示。

上例中, userAction 对象、userService 对象和 userDAO 对象都由 Spring 的 IOC 容器生成,被配置在 ApplicationContext.xml 中,通过依赖注入, Spring 将 userDAO 注入到 userService 中,再将 userService 注入到 userAction 中. ApplicationContext.xml 部分代码如下:

```
<bean id="userAction" class="cn.edu.zzuli_home.action.UserAction" scope="prototype">
    <property name="userService" ref="userService"></property>
    <property name="sendMail" ref="send-
```

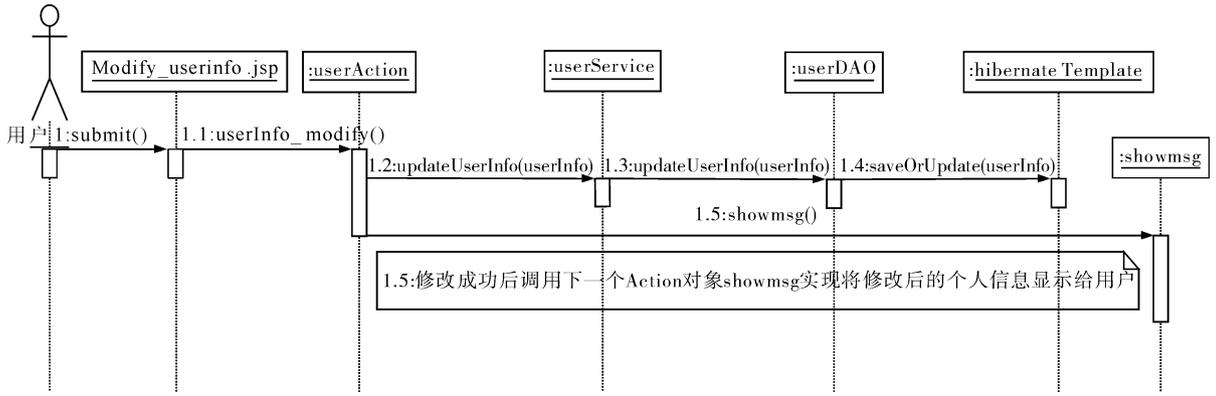


图4 修改个人资料过程时序图

```
Mail" > </property >
</bean >
```

struts_user.xml 部分代码如下:

```
< action name = " userInfo_modify " class = "
userAction" method = " userInfo_modify " >
< result name = " success " type = " redirectAc-
tion " > showmsg </ result >
</ action >
```

2.3 Spring 和 Hibernate 实现数据持久层^[10]

本系统数据库中有 17 个表,用来存储系统中所有数据信息;数据库连接采用连接池的方式,以提高数据库的使用效率。

Hibernate 将数据库中的表映射为相应的 POJO (plain object Java object) 和映射文件^[11],DAO 通过调用 Hibernate API 对持久化对象进行操作,Hibernate 将 DAO 对持久化对象的操作映射为对数据库中表的操作。

Spring 和 Hibernate 整合后,Hibernate API 对象、DAO 都由 Spring 的 IOC 容器生成和管理,Hibernate 不再有配置文件,Hibernate 的数据源信息、Hibernate API 对象、DAO 都被配置在 Spring 的配置文件 ApplicationContext.xml 中。

以修改个人资料为例:先将数据库中 userInfo 表映射为持久化类 UserInfo 和映射文件 UserInfo.hbm.xml,该表中存储用户的详细信息;在 userDAO 对象调用 hibernateTemplate 对象的方法 saveOrUpdate(userInfo),实现将持久化对象 userInfo 中数据更新到数据库表 userInfo 中对应记录。

这里 dataSource, sessionFactory, hibernateTemplate 等对象都是由 Spring 的 IOC 容器生成和管理,被配置在 ApplicationContext.xml 文件中,通过依赖

注入,dataSource 被注入到 sessionFactory 中,sessionFactory 被注入到 hibernateTemplate 中,hibernateTemplate 被注入到 userDAO 中。

ApplicationContext.xml 部分代码如下:

```
< ! -- apache. dbcp 连接池的配置 -- >
< bean id = " dataSource " class = " org. apache.
commons. dbcp. BasicDataSource "
destroy - method = " close " >
< property name = " driverClassName " value
= " com. mysql. jdbc. Driver " > </ property >
< property name = " url " value = " jdbc:
mysql://localhost:3306/zuzulihome
? useUnicode = true& characterEncod-
ing = UTF - 8 " > </ property >
< property name = " username " value = " root "
> </ property >
< property name = " password " value = " ad-
min " > </ property >
< ! -- 最大活动连接数 -- >
< property name = " maxActive " value = " 100 "
> </ property >
< ! -- 最大可空闲连接数 -- >
< property name = " maxIdle " value = " 30 " >
</ property >
</ bean >
```

3 结语

本文根据大学生校园综合服务平台系统的需求,将 SSH2 和 jQuery 这 2 个框架整合应用于系统的实现过程.该平台目前已经由河南省软件评测中心测试通过.实践证明,将 SSH2 和 jQuery 这 2 个框

架整合应用于系统开发中实现了用户请求的异步交互,解决了页面局部更新问题,提高了系统运行效率,增强了用户体验;实现了视图层、业务逻辑层和数据持久层的完全分离,所有的对象均由 Spring IOC 容器生成和管理,极大地降低了代码之间的耦合性,大大提高了系统的可维护性、可扩展性,最终提高了系统的开发效率。

参考文献:

- [1] 王宝龙,李子扬,李晓辉. 基于 SSH 框架和 DWR 技术的减灾卫星运行管理系统建设[J]. 计算机工程与设计,2010,31(23):5096.
- [2] 张志峰. Web 框架技术(Struts2 + Hibernate + Spring3) 教程[M]. 北京:清华大学出版社,2013:1-32.
- [3] 李雷孝,刘晓军,刘利民,等. 基于 SSH 整合框架的科研项目管理系统的设计与实现[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2012,33(1):210.
- [4] 张建军,刘虎,倪芳英,等. 基于 SSH 整合架构的研究与应用[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2012,35

(6):39.

- [5] 郭广军,朱昭君,王剑波. 基于 SSH 架构的课程作业与成绩管理系统[J]. 微电子学与计算机,2010,27(8):157.
- [6] 陈农心,凌财进. 基于 SSH2 的新型网上信访平台的设计与实现[J]. 制造业自动化,2011,33(3):175.
- [7] 陈峰敏,罗田,李颖智,等. Ajax 原理与系统开发[M]. 北京:清华大学出版社,2009:1-23.
- [8] 王芳,汪进,王家群,等. 基于 SSH 架构的风险监测系统的设计与实现[J]. 核科学与工程,2010,30(4):355.
- [9] 董卓亚. 基于 Struts2 Ajax 校验的资源管理系统槽位端口添加方案[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(4):86.
- [10] 冯润民. 基于 SSH 的高校学生管理系统设计与实现[J]. 计算机工程,2009,35(6):280.
- [11] 湛湘倩,狄文辉,孙冬. 基于 SSH 框架与 AJAX 技术的 Java Web 应用开发[J]. 计算机工程与设计,2009,30(10):2590.

(上接第 99 页)

2.3 仿真结果与分析

笔者模拟了不同氨气浓度情况下监测节点发送报警消息所需时间. 结果显示,当氨气浓度分别为 1%,2%,5%,10% 时,监测节点报警耗时分别为 436.6 μ s,424.4 μ s,433.0 μ s,417.0 μ s. 由此可见,监测节点能够快速发送数据,系统具有较好的实时性和安全性.

3 结语

本文设计了一种基于 ZigBee 技术的燃煤锅炉烟气氨法脱硝运行环境的实时监测系统,实现了对脱硝系统运行时氨气浓度实时监测的集成化和网络化,并能实现远程监测、智能化运行故障与运行状况的监测分析,具有完善的安全机制. 实验运行情况表明,该系统安全可靠,运行稳定,具有功耗低、成本低和组网灵活等特点,为电力安全生产提供了可靠的安全性和工作便利性,是一个可行的应

用方案.

参考文献:

- [1] 高守玮,吴灿阳. ZigBee 技术实践教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [2] IEEE Std 802.15.4 TM-2003 Part 15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [S].
- [3] 张洁颖,孙懋珩,王侠. 基于 RSSI 和 LQI 的动态距离估计算法[J]. 电子测量技术,2007,30(2):142.
- [4] 刘强,崔莉,陈海明. 物联网关键技术与应用[J]. 计算机科学,2010,37(6):1.
- [5] 金海,刘文超,韩建亭,等. 家庭物联网应用研究[J]. 电信科学,2010,26(2):10.
- [6] Bose I, Pal R. Auto-ID: Managing anything, anywhere, anytime in the supply chain [J]. Communication of the ACM,2005,48(8):100.

数字图书馆信息分级保密研究

杨清兰

(郑州轻工业学院 图书馆, 河南 郑州 450002)

摘要:利用 RSA 密码算法和对称加密算法研究数字图书馆信息分级加密算法. 在该算法中, 对于核心级信息(一级信息), 采用 RSA 密码算法进行加密和解密; 对于内部级信息(二级信息), 采用 RSA 及对称密码算法进行加密和解密. 一级管理员可以解密一级信息和二级信息, 而二级管理员只能解密二级信息, 其他人无法解密. 这种分级保密措施不仅适应数字图书馆不同用户的保密需求, 而且便于对信息进行分级管理, 具有可用性和有效性.

关键词:数字图书馆; RSA; 信息安全; 信息分级保密

中图分类号: TP309; G250.76 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2014.03.024

Study on hierarchical encryption of information of digital library

YANG Qing-lan

(Library, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Using RSA encryption algorithm and symmetric encryption algorithm, the hierarchical encryption algorithm for different levels of information of digital library was proposed. In this algorithm, the core information (first level information) was encrypted and decrypted using RSA, and the inside information (second level information) was encrypted and decrypted using RSA and symmetric algorithm. The first level manager could decrypt the first level information and the second level information, but the second level manager could only decrypt the second level information. None but the first level manager or the second level manager could decrypt. This kind of hierarchical management could not only satisfy the security requirements for different users of digital library, but also facilitate the hierarchical management of different levels of information for digital library. The hierarchical encryption scheme had the availability and effectiveness.

Key words: digital library; RSA; information security; hierarchical encryption on information

0 引言

随着图书信息内容不断增加以及计算机网络和通信技术的不断发展及推广, 图书馆的数字化建设已经成为图书馆建设的一个重要内容和发展方向. 但是, 鉴于网络和信息安全问题日益受到重视,

数字图书馆的安全建设已提上了日程, 从而成为重要的研究课题.

目前, 数字图书馆信息安全具有保密性、完整性、可用性、广泛性和动态性 5 个特点^[1]. 针对这些特点, 很多学者进行了研究. 文献[1]从技术、管理手段和法规政策 3 个方面给出了数字图书馆信息安

收稿日期: 2014-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61272525)

作者简介: 杨清兰(1973—), 女, 河南省邓州市人, 郑州轻工业学院助理馆员, 主要研究方向为图书馆学、数字图书馆等.

全解决对策. 文献[2]采用基于身份的加密和数字签名,确保传递的图书电子文档的保密性和完整性. 文献[3]针对网络威胁,如非授权访问、信息泄露或丢失、数据完整性、拒绝服务攻击等,提出利用身份认证、加密解密、网络防火墙等技术手段来解决数字图书馆信息安全问题. 文献[4]指出要从技术和管理2方面加强数字图书馆信息安全防护,并强调在技术上加强环节管理,注重信息资源建设中的安全保护、信息处理存储过程的安全防护、服务传播过程中的信息保护,要求制定灾难恢复计划. 最近,刘超等^[5-6]也对国内数字图书馆的信息安全问题进行了分析,并提出相应的解决对策.

2007年,杨木锐^[7]针对数字图书馆信息安全的保密性特点,给出了数字图书馆信息内容保密等级划分策略. 认为应通过对数字图书馆信息进行保密等级划分,确定机密信息的保护级别,并建议根据图书馆不同用户的安全需求,构建安全体系,力图有效保证信息的保密性. 文献[7]根据国家秘密的密级划分,结合数字图书馆信息的特点,将图书馆数字信息划分为3个等级:核心级(如图书管理员密码、押金情况等)、内部级(如数字化的国家级重点文献、孤本、善本等)、公开级(如图书馆概况、馆藏信息等). 为叙述方便,在本文中,记核心级信息为“一级信息”,相应的管理员为“一级管理员”;记内部级信息为“二级信息”,相应的管理员为“二级管理员”.

另外,为防止一级信息、二级信息和公开信息被篡改,可采用数字签名技术^[8]对一级信息、二级信息的密文和公开信息进行数字签名. 数字签名技术也可用于对一级管理员和二级管理员之间的通信内容进行认证. 为恢复已经遭到篡改的信息,应提前做好已有一级信息、二级信息和公开信息的备份工作. 一旦检测出这些信息遭到篡改,可以启动数据备份恢复工作. 相关的数字签名技术^[9]和文件备份恢复技术已经相当成熟,鉴于此,本文拟实现数字图书馆信息分级保密管理,以适应不同用户的安全需求.

1 数字图书馆信息分级保密算法

利用RSA密码系统^[10]给出数字图书馆信息分级保密算法. 这种分级加密应该具有如下的安全性要求: 1) 加密和解密算法应采用安全的密码体制

(如RSA、椭圆曲线密码体制、对称密码体制等)进行设计,从而保证算法具备可靠的安全性. 2) 加密和解密算法应具有分级特点. 即一级管理员可以对一级信息和二级信息进行加密和解密,二级管理员只能对二级信息进行加密和解密,其他人员无法解密.

1.1 密钥的生成

一级管理员执行如下步骤:

- 1) 一级管理员随机选取4个大素数 p_1, q_1, p_2, q_2 ,并计算 $n_1 = p_1q_1p_2q_2, n_2 = p_2q_2$.
- 2) 随机选取正整数 e_1 ,满足 $\gcd(e_1, \varphi(n_1)) = 1$,其中 $\varphi(n_1)$ 是欧拉函数.
- 3) 计算 d_1 ,使得 $e_1d_1 = 1 \pmod{\varphi(n_1)}$,若 $d_1 \leq \varphi(n_2)$,则重新回到步骤2).
- 4) 计算 $e_2 = e_1 \pmod{\varphi(n_2)}, d_2 = d_1 \pmod{\varphi(n_2)}$.
- 5) 销毁 $p_1, q_1, p_2, q_2, \varphi(n_1), \varphi(n_2)$,保留 (e_1, n_1) 作为一级管理员公开密钥,而将 (d_1, n_1) 作为相应的解密密钥,由一级管理员秘密保存. 同时,一级管理员将 $(e_2, n_2), (d_2, n_2)$ 秘密发送给二级管理员.

二级管理员一旦接收到 (e_2, n_2) 和 (d_2, n_2) ,将 (e_2, n_2) 作为公开密钥,而将 (d_2, n_2) 作为解密密钥秘密保存.

1.2 加密和解密过程

加密和解密过程分2类情形:一级管理员的加密和解密,二级管理员的加密和解密.

- 1) 一级加密和解密. 即利用一级管理员的公钥和密钥对一级信息进行加密和解密的过程.

假定待加密的数据 $m \in Z_{n_1}$. 为对消息 m 进行加密,任何人都可以利用公钥 (e_1, n_1) 对 m 进行加密,即计算密文 $c = m^{e_1} \pmod{n_1}$. 一级管理员可对图书管理员密码、读者个人基本信息、押金情况等一级信息进行一级加密,而将相应的密文 c 存在计算机中. 若想进一步保证一级信息的完整性,可以采用数字签名技术对密文再进行数字签名,并存储相应的签名信息.

为对一级加密的密文 c 进行解密,一级管理员可以针对密文 c 解密计算 $m = c^{d_1} \pmod{n_1}$.

下面证明一级加密和解密的正确性. 事实上,若 $\gcd(m, n_1) = 1$,则根据Euler定理可知 $m^{\varphi(n_1)} = 1 \pmod{n_1}$,从而 $m^{l\varphi(n_1)+1} \equiv m \pmod{n_1}$,其中 l 为任意整数. 若 $\gcd(m, n_1) \neq 1$,则由于 $m < n_1$, m 不可能同时是 p_1, q_1, p_2, q_2 的倍数. 假定 $m = cp_1$, c 是整数且与

$q_1 p_2 q_2$ 互素. 则由 Euler 定理有 $m^{\varphi(q_1 p_2 q_2)} \equiv 1 \pmod{q_1 p_2 q_2}$, 则对于任意整数 l , 有

$$m^{l\varphi(q_1 p_2 q_2) \varphi(p_1)} \equiv 1 \pmod{q_1 p_2 q_2} \Rightarrow$$

$$m^{l\varphi(n_1)} \equiv 1 \pmod{q_1 p_2 q_2} \Rightarrow$$

$$m^{l\varphi(n_1)} = 1 + kq_1 p_2 q_2 (k \text{ 为某整数}) \Rightarrow$$

$$m^{l\varphi(n_1)} m = m + kcn_1 \Rightarrow m^{l\varphi(n_1)+1} = m \pmod{n_1}$$

类似地, 可以证明, 对于 $m = cp_i q_j$, 或 $m = cp_i q_j p_f$ ($i \neq f$), 或 $m = cp_i q_j q_f$ ($j \neq f$), 其中 $i, j, f \in \{1, 2\}$, $m^{l\varphi(n_1)+1} = m \pmod{n_1}$ 总是成立.

因此, 可知存在整数 w , 使得 $c^{d_1} \equiv m^{e_1 d_1} \pmod{n_1} \equiv m \pmod{n_1}$, 由此可证明一级加密和解密算法正确.

需要注意的是, 对于一级加密所使用的密钥 (d_1, n_1) , 应由一级管理员秘密保存. 为保证密钥存储的安全性, 一级管理员可将密钥存储在大脑以及安全的智能卡中. 也可以把密钥再次加密, 并进行秘密分割, 分别存入多个服务器或终端之中.

2) 二级加密和解密, 即利用二级管理员的公钥和密钥对二级信息进行加密和解密的过程.

首先, 二级管理员需要随机选取一个安全的对称加密密钥 key , 假定 $key \in Z_{n_2}$. key 作为对称密钥, 需要二级管理员秘密保存. 为此, 二级管理员首先需要利用 RSA 加密算法对 key 进行加密, 利用公钥 (e_2, n_2) 计算密文 $c_{key} = key^{e_2} \pmod{n_2}$, 并在计算机中保留 c_{key} , 而销毁 key .

二级管理员用对称密钥 key 和对称加密算法对二级信息 m 进行对称加密. 为此, 二级管理员首先由 c_{key} 恢复对称密钥, 即利用 RSA 解密算法计算对称密钥 $key = c_{key}^{d_2} \pmod{n_2}$. 然后, 二级管理员利用对称加密算法和对称密钥对二级信息 m 进行加密. 采用的对称加密算法为美国数据加密标准算法 DES (data encryption standard), 得到密文 $c_m = \text{DES}(key, m)$.

当需要对密文 c_m 进行二级解密时, 二级管理员首先由 c_{key} 恢复对称密钥, 即利用 RSA 解密算法计算对称密钥 $key = c_{key}^{d_2} \pmod{n_2}$, 然后利用 DES 解密密文 $m = \text{DES}^{-1}(key, c_m)$, 最后, 二级管理员销毁 key .

为保证密钥 (d_2, n_2) 存储的安全性, 二级管理员可将密钥存储在大脑或安全的智能卡中. 也可以把密钥再次加密, 并进行秘密分割, 分别存入多个服务器或终端之中. 另外, 在上述的二级加密和解密中, key 以 RSA 密文 c_{key} 的形式存储, 在 RSA 安全性的保证下, key 具有较好的安全性. 但是, 为保证 key 和二级信息具有更好的安全性, 二级管理员可以定

期更换 key , 并利用 key 更新对二级信息的加密.

一级管理员通常拥有最高权限, 不仅可以解密浏览一级信息, 还可以解密浏览二级信息. 然而, 由于二级管理员通常为数字图书馆一般工作人员, 笔者限定二级管理员只能解密浏览二级信息. 本文提出的分级加密和解密算法刚好满足这个要求.

事实上, 根据二级加密过程可知, 一级管理人员可以通过解密二级管理员保留的密文 c_{key} 恢复对称密钥, 即一级管理员可以计算 $key = c_{key}^{d_1} \pmod{n_2}$. 可以证明这种 RSA 解密算法的正确性. 这是因为

$$e_1 d_1 = 1 \pmod{\varphi(n_1)}$$

即存在某个整数 h , 使得 $e_1 d_1 = 1 + h\varphi(n_1)$, 注意到 $e_2 = e_1 \pmod{\varphi(n_2)}$, $d_2 = d_1 \pmod{\varphi(n_2)}$, 则对等式 $e_1 d_1 = 1 + h\varphi(n_1)$ 两边同时取 $\pmod{\varphi(n_2)}$, 可得 $e_1 d_1 \pmod{\varphi(n_2)} = e_2 d_1 \pmod{\varphi(n_2)} = e_2 d_2 \pmod{\varphi(n_2)} = 1$. 则可验证:

$$c_{key}^{d_1} \pmod{n_2} \equiv key^{e_2 d_1} \pmod{n_2} \equiv key^{e_2 d_2} \pmod{n_2} \equiv key$$

所以, 一级管理人员可以通过解密二级管理员保留的密文 c_{key} 恢复对称密钥.

一级管理人员在恢复 key 后, 可以利用 DES 解密二级密文, 从而获得二级信息 $m = \text{DES}^{-1}(key, c_m)$.

下面证明二级管理人员无法解密一级信息. 一级信息的密文为 $c = m^{e_1} \pmod{n_1}$. 由于二级管理人员仅仅掌握二级密钥 (e_2, n_2) , (d_2, n_2) . 而 $e_1 d_1 = 1 \pmod{\varphi(n_1)}$, $d_2 < d_1$, 故 $e_1 d_2 \neq 1 \pmod{\varphi(n_1)}$. 因此 d_2 无法用作一级信息密文的解密密钥. 同时, 由于二级管理人员不掌握一级解密密钥 d_1 , 不知道 n_1 的完全分解, 鉴于 RSA 的安全性, 故其无法解密在模数 n_1 下的一级密文 c .

2 算法安全性与有效性分析

本文通过利用 RSA 加密和解密算法, 以及对称加密算法 DES, 给出数字图书馆信息分级加密算法的构造.

笔者已分析证明了一级管理员可以解密浏览一级信息和二级信息, 而二级管理员只能解密浏览二级信息. 由于其他人员不掌握密钥, 因而无法解密. 在一级加密和解密中, 采用了 RSA 算法, 仅用于对少量的一级信息进行加密和解密, 无需过多的计算. 在二级加密和解密过程中, RSA 算法仅用于对对称密钥 key 进行加密和解密, 无需大量的计算耗

费;DES算法用于对大量的二级信息进行加密和解密,而相对于公钥算法而言,对称算法DES恰好适用于对大量数据进行加密和解密,从而保证二级加密和解密的有效性.

目前,RSA和DES已在商业和相关行业中获得广泛应用,其安全性和有效性已经得到了普遍认可.RSA算法的安全性主要基于大数分解的困难性.目前,还未发现对RSA密码体制1 024 bit或更大的模数进行有效分解的算法.而在本文所采用的RSA算法中,所采用的RSA模数 n_1 和 n_2 分别为2 048 bit和1 024 bit,因此其具有较好的安全性.同时,文中RSA算法仅用于对少量一级信息或对称密钥key进行加密和解密,而非用于对大量的明文进行加密和解密.因此,文中采用的RSA算法所耗费的计算量并不大,其在实践中具有有效性.DES算法具有极高的安全性,到目前为止,除了用穷举搜索法对DES算法进行攻击外,还没有发现其他更有效的办法.在DES算法中,根据国际标准,目前,对于一般的安全要求,可以取key为64 bit的密钥.由于DES算法具有多轮重复性,因此它很容易利用硬件技术来实现,并具有有效性.

3 结语

本文根据数字图书馆不同用户的安全需求及保密性需要,将数字图书馆信息划分3个等级:一级信息、二级信息和公开信息.对于公开级信息,无需进行保密.为保障数字图书馆系统的安全运行和管理,对一级和二级信息,需要进行秘密保护.采用RSA加密算法对一级信息进行加密和解密,而对于大量的二级信息,先采用RSA对二级对称密钥进行

加密,然后用对称密钥对二级信息进行加密和解密.一级管理员可以解密浏览一级信息和二级信息,而二级管理员只能解密浏览二级信息.根据RSA对解密密钥的安全依赖,其他人无法解密.这种分级管理不仅适应数字图书馆不同用户的安全需求,而且便于不同级别用户对保密信息进行分级管理.

参考文献:

- [1] 李媛.近五年来数字图书馆信息安全问题研究综述[J].图书馆学研究,2005(12):10.
- [2] 杨清兰.基于身份的数字签名在数字图书馆中的应用[J].郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(2):100.
- [3] 张海波,黄铁军.数字化图书馆信息安全保障体系的研究[J].现代图书情报技术,2004(S1):1.
- [4] 王召龙,许军振.数字图书馆的信息安全[J].济南职业学院学报,2005(4):69.
- [5] 刘超.数字图书馆的信息安全分析[J].现代情报,2009,29(6):72.
- [6] 郑德俊,任妮,熊健,等.我国数字图书馆信息安全管理现状[J].现代图书情报技术,2010(7/8):27.
- [7] 杨木锐.数字图书馆信息安全保障体系研究[D].长春:东北师范大学,2007.
- [8] 宋维平.RSA密码体制的数字签名[J].长春理工大学学报:自然科学版,2005,28(2):120.
- [9] 张先红.数字签名原理及技术[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [10] Rivest R L, Shamir A, Adelman L. A method for obtain digital signatures and public-key cryptosystem[J]. Communications of the ACM,1978,21(2):120.