

GC—TOF MS 结合化学计量学用于安化黑茶的识别
Discrimination of Anhua dark tea by gas chromatography-time of
flight mass spectrometry combined with chemometrics

颜鸿飞^{1,2} 彭争光² 李蓉娟³ 陈 练^{1,2}
YAN Hong-fei^{1,2} PENG Zheng-guang² LI Rong-juan³ CHEN Lian^{1,2}
王美玲^{1,2} 付善良^{1,2} 戴 华¹ 张 帆^{2,4}
WANG Mei-Ling^{1,2} FU Shan-liang^{1,2} DAI Hua¹ ZHANG Fan^{2,4}

(1. 湖南出入境检验检疫局, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省检验检疫科学技术研究院, 湖南 长沙 410100;
3. 东港出入境检验检疫局, 辽宁 东港 118300; 4. 长沙环境保护职业技术学院, 湖南 长沙 410004)

(1. Hunan Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Changsha, Hunan 410004, China;
2. Hunan Academy of Science and Technology for Inspection and Quarantine, Changsha, Hunan 410004, China;
3. Donggang Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Donggang, Liaoning 118300, China;
4. Changsha Environmental Protection College, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:采用顶空固相微萃取联合气相色谱—飞行时间质谱 (GC—TOF MS) 对安化黑茶及其它产地黑茶中的挥发性成分进行检测, 对 41 种共有挥发性组分进行定性定量分析。应用化学计量学统计工具对数据进行变量筛选、主成分分析法 (PCA) 和偏最小二乘判别分析 (PLS-DA), 筛选出安化黑茶的 26 个显著性差异香气成分, 通过主成分得分投影图直观反映样本间的聚类趋势和分类信息, 对安化黑茶与不同产地黑茶样品及其它种类茶叶进行有效区分和识别, 找出 14 个对安化黑茶识别分类起着重要作用的挥发成分。结果表明, 基于茶叶中挥发性成分差异的 GC—TOF MS 分析结合化学计量学统计方法用于安化黑茶识别是可行的。

关键词:顶空固相微萃取; 气相色谱—飞行时间质谱; 主成分分析; 偏最小二乘判别分析法; 安化黑茶; 识别

Abstract: The volatile components in Anhua and other dark teas were analyzed by headspace solid phase microextraction (HS-SPME) combined with gas chromatography-time of flight mass spectrometry (GC-TOF MS). About 41 volatile compounds were analyzed qualitatively and quantitatively. A classification model and predict the authenticity obtained from variance analysis, principal component anal-

ysis (PCA) and partial least squares discriminate analysis (PLSDA). In addition, the 26 compounds significant impacting on the classification were screened out from Anhua dark tea. The straight forward classification trend of Anhua dark tea and other samples was visualized through projection score plots obtained by PCA. Effective classification and identification of Anhua dark tea, other origin dark tea and other kinds were carried out. The 14 important components for classification were found. The results showed that the developed GC-TOF MS method combined with chemometrics based on the volatile components in tea could be used to discriminate Anhua dark tea.

Keywords: gas chromatography-time of flight-mass spectrometry (GC-TOF MS); principal component analysis (PCA); partial least squares discriminate analysis (PLSDA); volatile components; Anhua dark tea; discriminate

湖南安化黑茶的独特品质和保健功能逐渐被人们所认同, 成为国内外茶叶市场的新贵, 深受广大消费者青睐^[1]。但黑茶生产门槛低, 一直没有完整的标准体系, 导致市场上的安化黑茶品质良莠不齐。部分茶商用外路劣质茶叶加工成冒牌“安化黑茶”进行销售, 既损害了消费者的利益, 也给安化黑茶质量和声誉带来了严重影响, 在一定程度上阻碍了湖南黑茶产业的国际化进程。因此, 有必要开发安化黑茶的识别表征技术, 以保护安化产区黑茶独特品质, 为安化黑茶的质量控制、品质量化及原产地保护提供一种科学的技术手段, 促进湖南黑茶产业的持续健康发展^[2]。

目前, 茶叶鉴别方法主要为感官评定和简单理化指标检

基金项目:湖南省科技计划项目 (编号: 2015JC328); 粮油深加工与品质控制湖南省 2011 协同创新项目资助 (编号: 湘教通 [2013]448 号)

作者简介:颜鸿飞, 男, 湖南出入境检验检疫局高级工程师, 硕士。
通信作者:张帆 (1985—), 女, 长沙环境保护职业技术学院副教授, 博士。E-mail: amily9281@163.com

收稿日期:2017—05—08

测方法,感官评定结果主观性强,易受个体感官差异、主观情绪、环境等因素的影响。同样,常规理化指标检测方法无法全面反映茶叶的整体特征,难以进行正确识别^[3]。随着高通量、高灵敏度、高分辨率的仪器分析技术的发展,为获得茶叶的全组分信息提供了可能。但现代科学分析技术在对样品进行多元分析的同时会产生大量的多参量高维数据,传统分析化学数据处理方法难以对海量多维化学量测数据进行充分的信息提取、挖掘与利用。因此,利用现代分析仪器获得样品组分信息,再结合化学计量学统计分析工具来进行数据分析以最大程度获取有用信息,在样品成分信息差异、地域特征和品质特性之间建立起有效关联,通过构建识别模式和特征标记物筛选方法,已经成为茶叶产地^[4-5]、种类^[6-7]、等级^[8-9]的鉴别与分类研究的重要模式。已有一些研究者通过分析茶叶中香气成分来进行分类^[10-11]和识别的研究^[12-13],但尚未见运用 HS—SPME 技术萃取香气物质结合化学计量学方法用于安化黑茶产地识别的研究报道。本研究采用自动顶空固相微萃取(HS—SPME)技术萃取安化黑茶的香气物质,利用气相色谱—飞行时间质谱联用仪(GC—TOF MS)同时测定安化黑茶香气全组分,采用方差分析筛选得到表征湖南安化黑茶香气品质的特征成分,结合最常用的两种化学计量学统计方法—主成分分析法(PCA)和偏最小二乘判别分析法(PLS-DA)将 GC—TOF MS 原始数据进行降维、特征量提取和建立分类模型,区分安化黑茶与其它产地黑茶及其它类别茶叶,找出对安化黑茶识别分类起着重要作用的挥发成分,为安化黑茶的产地识别和质量监控提供了新的研究方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

安化黑茶:44 个样品,购自湖南安化县茶厂;
其他茶叶:购自湖南茶叶市场,其中藏茶样品 4 个,普洱茶样品 10 个,乌龙茶样品 10 个,红茶样品 7 个和绿茶样品 5 个。

SPME 萃取头:2 cm,30/50 μm (DVB/CAR/PDMS)型,美国色谱科公司。

1.2 试验设备

气相色谱—飞行时间质谱仪:Pegasus 4D 型,美国力可公司;

样品前处理多功能全自动进样系统:Combi PAL 型,瑞士思特斯公司;

分析天平:ML204 型,瑞士梅特勒-托利多公司。

1.3 试验方法

1.3.1 顶空固相微萃取 参照文献[14],修改如下,称取茶叶样品 2.0 g 于 25 mL 固相微萃取瓶中,用带聚四氟乙烯瓶垫的钳口铝盖对萃取瓶进行封口密封,然后将萃取瓶置于样品前处理多功能全自动进样系统的样品架上。样品前处理多功能全自动进样系统操作步骤:首先将萃取瓶放入加热孔中 80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温振荡平衡 20 min 后,插入固相微萃取针,伸出萃取纤维头,在 600 r/min 搅拌下进行顶空萃取 1 h。固相微萃取吸附完成后,取出立即插入色谱进样口,温度 250 $^{\circ}\text{C}$ 下

解吸附 5 min,同时触发气相色谱—飞行时间质谱仪进行数据采集。固相微萃取头在下次使用前需在气相色谱进样口 280 $^{\circ}\text{C}$ 下加热老化至少 1 h。

1.3.2 GC—TOF MS 分析 色谱柱:Rtx-5MS 弹性石英毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);分析条件:参照文献[14]。

1.4 定性和定量方法

1.4.1 定性分析 由 GC—TOF MS 分析得到的质谱数据经工作站 ChromaTOF 软件与 NIST 11 LIB 标准谱库自动进行识别和匹配检索,仅选出匹配度 $\geq 80\%$ 的峰物质,生成质谱峰列表数据,再进一步结合分子量、结构式、质谱图等信息及有关文献报道来确定各出峰物质的成分。

1.4.2 定量分析 通过色谱工作站对总离子色谱图进行自动积分和峰面积计算,然后通过人工核对色谱峰积分效果仔细核对。若有积分不准确的情况,应修改积分参数后重新自动积分,以避免积分重复和不合理情况或者通过手工积分的方式取得各挥发性成分的可靠含量。设定积分阈值使相对含量 $<0.01\%$ 的峰不进行积分计算。相对峰面积采用峰面积归一化法进行计算,得到各物质组分的相对百分比含量。

1.5 数据处理方法

运用 IBM SPSS Statistics 19 和 SIMCA P 11.5 软件进行数据的变量筛选、主成分分析和偏最小二乘判别分析等统计分析。

2 结果与分析

2.1 安化黑茶香气成分特征分析

HS—SPME 萃取香气化合物后,经 GC—TOF MS 检测,采用 ChromaTOF 软件按 1.4 标准进行筛选,筛选得到的黑茶样品 41 个共有组分见表 1。其中,3,5-辛二烯-2-酮(E,E)、反,反-2,4-庚二烯醛、和 6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮等烯类化合物是形成安化黑茶独特发酵香味“菌花香”的重要物质成分^[15]。2-戊基呋喃、香叶基丙酮等对安化茯砖茶具有独特烘焙香或火功香味有重要贡献^[16]。为找出安化黑茶的特征香气成分,根据黑茶样品的产地来源将茶样中安化黑茶归为一类,其它产地黑茶归为另一类。以不同茶叶中的 41 个共有香气物质相对含量为变量,进行方差分析见表 1,安化黑茶与非安化黑茶主要的差异性成分为:2,6,10-三甲基十二烷、2-戊基呋喃、 α -松油醇、反-2-(2-戊基)呋喃、 β -紫罗酮、1,2,3-三甲氧基苯、3,5-辛二烯-2-酮(E,E)、甲基庚烯酮、2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛、反,反-2,4-庚二烯醛、香叶基丙酮、6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮、苯乙酮、7,9-二叔丁基-1-氧杂螺(4,5)癸-6,9-二烯-2,8-二酮、藜芦醚、2-甲基十七烷、2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮、 α -姜黄烯、2,3,5,8-四甲基癸烷、苯甲醛、藏花醛、2,3,5,6-四甲基吡嗪、紫罗烯、1,3-二叔丁基苯、3,7-二甲基-1,3,7-辛三烯。这些差异性香气成分共同构成了湖南安化黑茶独特的香气品质特征。

2.2 主成分分析

方差分析只能对两大类型茶样香气成分差异的总体情况进行评估,无法对各香气成分在各茶叶样品的分布规律及

表 1 安化黑茶的共有香气物质

Table 1 Common aroma components identified in Anhua dark tea

序号	香气物质	保留时间/min	相对含量/%	P 值	序号	香气物质	保留时间/min	相对含量/%	P 值
1	反-2-(2-戊基)呋喃	13.533	0.801~2.302	0.000 0	21	1,2,3-三甲氧基苯	34.150	0.131~3.792	0.000 0
2	苯甲醛	17.433	0.198~3.603	0.016 6	22	2,3,5,8-四甲基癸烷	34.667	0.132~3.945	0.011 7
3	甲基庚烯酮	18.550	0.535~8.144	0.000 1	23	十五烷	35.183	0.145~1.460	0.071 2
4	2-戊基呋喃	18.833	0.945~5.976	0.000 0	24	1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	36.200	0.113~0.619	0.442 7
5	3,7-二甲基-1,3,7-辛三烯	19.150	0.196~6.436	0.028 7	25	紫罗烯	36.333	0.031~0.320	0.024 7
6	反,反-2,4-庚二烯醛	19.750	0.274~9.398	0.000 3	26	2,6,10-三甲基十二烷	36.800	0.045~0.668	0.000 0
7	苯乙酮	22.617	0.121~1.848	0.003 4	27	alpha-紫罗酮	39.233	0.113~1.706	0.064 5
8	3,5-辛二烯-2-酮(E,E)	22.700	0.744~8.678	0.000 1	28	香叶基丙酮	40.083	0.140~5.254	0.000 5
9	2,3,5,6-四甲基吡嗪	23.517	0.104~3.722	0.024 5	29	2,6,10,14-四甲基十七烷	40.350	0.166~1.973	0.080 9
10	顺-A,A-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	23.667	0.062~1.757	0.747 3	30	α -姜黄烯	41.467	0.019~0.203	0.011 2
11	6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮	24.400	0.084~3.193	0.003 0	31	β -紫罗酮	41.650	0.269~1.927	0.000 0
12	N-乙基琥珀酰亚胺	25.817	0.140~3.672	0.206 2	32	十七烷	41.750	0.151~1.485	0.052 9
13	2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮	26.350	0.040~0.755	0.009 5	33	2-甲基十七烷	41.767	0.104~3.865	0.006 7
14	藜芦醚	26.400	0.113~2.567	0.004 1	34	正十九烷	42.133	0.102~0.955	0.532 0
15	反式-2-壬醛	27.017	0.150~0.647	0.313 5	35	δ -杜松烯	43.200	0.101~0.633	0.238 6
16	alpha-松油醇	28.683	0.075~1.284	0.000 0	36	去氢白菖烯	43.250	0.010~0.104	0.393 8
17	藏花醛	29.167	0.219~0.690	0.018 5	37	二氢猕猴桃内酯	43.650	0.441~2.543	0.200 0
18	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛	30.150	0.205~0.951	0.000 3	38	雪松烯	46.533	0.055~3.617	0.017 5
19	1,3-二叔丁基苯	31.583	0.014~0.341	0.027 6	39	6,10-二甲基-2-十一烷酮	54.450	0.056~0.904	0.718 7
20	十四烷	33.450	0.108~2.052	0.749 4	40	咖啡因	54.933	0.171~3.506	0.073 7
					41	7,9-二叔丁基-1-氧杂螺(4,5)癸-6,9-二烯-2,8-二酮	57.083	0.047~0.291	0.003 6

特征进行比较分析,为此需要进一步进行多变量分析处理。主成分分析作为最常用的多元统计方法可将高维数据投影到较低维空间,用较少的综合指标反映原始指标从而解析出主要影响因素,还可根据主成分得分图分析各类样本的分布规律用于品种分类^[17]、产地溯源^[18]和品质分级^[19]等研究。本试验以安化黑茶的 26 个显著性差异香气成分的峰面积相对百分比作为变量,建立数据矩阵,运用 SIMCA P 11.5 进行 PCA 分析,安化黑茶和其它产地黑茶样品在第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)上的主成分得分投影图(图 1),能够直观地反映样本间的相似或差异性。由图 1 可知,安化黑茶和其它产地黑茶样品二维空间中的分布呈现出一定程度的类别聚集趋势,但分布较为分散,存在部分样品相互交叉重叠,两个类别样品并没有完全分离,识别效果不太理想。由表 2 可知,主成分的特征值大于 1 的有 8 个,但累积贡献率不足 80%,前 3 个主成分的累积方差贡献率为 50.492%,这可能使得主成分分析方法在本应用中存在信息量提取不足、特征向量方向不确定等问题,难以实现对安化黑茶、其它产地黑茶的有效区分。

2.3 偏最小二乘判别分析

偏最小二乘法判别分析法作为一种新型的多元统计数据分析方法,具有主成分分析、典型相关分析和多元回归分

表 2 主成分的方差贡献率

Table 2 Variance contribution rates of the principal components

主成分	特征值	各因子贡献率/%	累积贡献率/%
1	7.336	28.214	28.214
2	3.459	13.304	41.518
3	2.333	8.974	50.492
4	1.796	6.907	57.399
5	1.540	5.925	63.324
6	1.212	4.660	67.984
7	1.159	4.456	72.440
8	1.072	4.122	76.562

析等多种功能,可以消除相互重叠的数据信息,尤其是当自变量个数大于观察量个数时,其数据分析结果更加准确可靠。为寻找更为有效的安化黑茶识别分析方法,本研究尝试利用 PLS—DA 的分析方法进行判别分析。PLS-DA 分析同样将安化黑茶的 26 个显著性差异香气成分的相对峰面积百分比作为变量,建立数据矩阵,根据已知的茶叶信息将样本预先分为 3 个类别即类别 1(安化黑茶)、类别 2(其它产地黑茶)和类别 3(其它类别茶叶包括绿茶、红茶、乌龙茶),进行偏

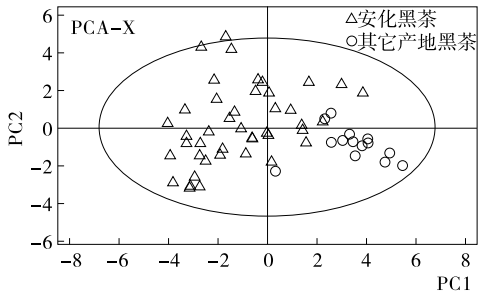
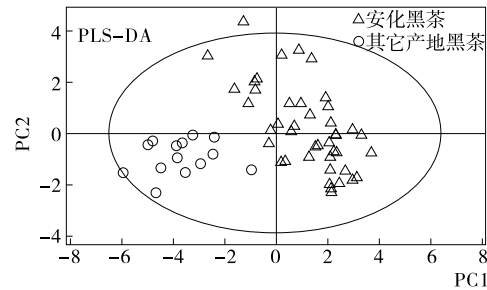


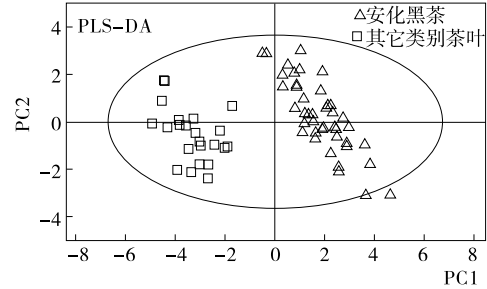
图 1 黑茶样品的主成分得分投影图

Figure 1 Projection score plots of dark tea samples by PCA

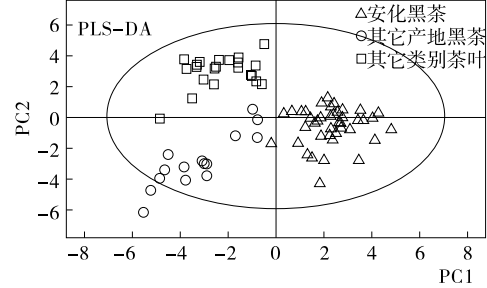
最小二乘法判别分析, 所得 OPLS-DA 图, 见图 2。通过每个样本点在 PLS-DA 得分图上的相对位置和分布情况来显示样本的分类信息, 从而达到样品识别的目的。图 2(a) 直观显示了安化黑茶与其它产地黑茶较为集中地分布在各自特征区域, 基本可以将所有样本分为两组, 基本以 $PC1 = -2$ 为界显著分开, 两个类别的茶叶基本分离, 实现对安化产地黑茶与其它产地黑茶的较好识别。同样使用该方法对类别 1 (安化黑茶)、类别 3 (其它类别茶叶) 进行了识别分析 [见图 3 (b)], 发现两类茶叶样本完全分离, 类别聚集更加明显, 可以将所有样本分为两组, 基本以 $PC1 = -1$ 为界显著分开, 表明



(a) 安化黑茶与其它产地茶叶的 OPLS-DA 分析



(b) 安化黑茶与其它类别茶叶的 OPLS-DA 分析



(c) 安化黑茶、其它产地及其它类别茶叶的 OPLS-DA 分析

图 2 茶叶样品 OPLS-DA 分析结果图

Figure 2 OPLS-DA analysis of tea samples

第一个主成分对于区分这两个类别茶叶起了主要的区分作用。此外, 还运用该模型同时对 3 类茶叶进行了识别分析 [见图 2(c)], 从样品点的分布趋势来看, 3 个类别的茶叶相对集中地聚集在各自独立的特征区域, 呈现出较好的类聚效应, 可以将所有样本分为 3 个组别, 各组别分布区域界限较明显。以 $PC1 = 0$ 为界明显分开, 类别 1 集中分布在 $PC1 > 0$ 的区域, 类别 2 和类别 3 集中分布在 $PC1 < 0$ 的区域, 第一个主成分起了主要的区分作用。另外, 类别 3 与另外两个类别茶叶也存在一定的分布特征区域, 有较好的分离效果。基本上以 $PC2 = 1$ 为界明显区分开来, 类别 1 和类别 2) 较为集中分布在 $PC2 < 1$ 的区域, 类别 3 较为集中分布在 $PC2 > 1$ 的区域, 说明第二个主成分起了主要的区分作用。所以只要将未知样品经上述方法处理得到其投影得分值及模型空间内的分布区域和位置, 就可对其种类进行识别。以上结果表明, 本研究采用 OPLS-DA 的分类识别效果明显优于主成分分析结果, 可用于安化黑茶的产地识别及分类。

2.4 成分变量重要性分析

进一步运用 PLS-DA 对类别 1 (安化黑茶)、类别 2 (其它产地黑茶) 两类样本进行变量重要性评分, 分析计算出 PLS-DA 变量重要性因子 (Variable important for the projection, VIP) 分值, 可以量化 PLS-DA 的每个变量对分类的贡献, VIP 值越大, 变量在两个类别中的差异越显著, 得到 VIP 值 > 1 的理化成分有 14 个, 按照分值大小顺序依次为 2, 6, 10-三甲基十二烷、 α -松油醇、2-戊基呋喃、 β -紫罗酮、反 2-(2-戊基) 呋喃、1, 2, 3-三甲氧基苯、甲基庚烯酮、3, 5-辛二烯-2-酮 (E, E)、香叶基丙酮、2, 6, 6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛、反, 反-2, 4-庚二烯醛、6-甲基-3, 5-庚二烯-2-酮、2, 3, 5, 8-四甲基癸烷和 2, 3, 5, 6-四甲基吡嗪。

3 结论

采用顶空固相微萃取结合 GC-TOF MS 分析茶叶中挥发性成分, 利用主成分分析法与偏最小二乘判别法实现了不同茶叶的识别区分, 获得了对分类判别贡献较大的 14 个挥发性成分。结果表明, 基于茶叶中挥发性成分差异的 GC-TOF MS 分析结合化学计量学统计方法用于湖南安化黑茶识别是可行的。筛选出的差异性挥发性成分在安化黑茶中的分布规律及扩展该分析方法的应用领域有待进一步分析和研究。

参考文献

[1] 黄皓, 翁昆. 我国地理标志产品和茶叶产品保护的现状[J]. 中国茶叶加工, 2010(1): 8-11.
[2] 周宇清, 龚 贺, 邓放明. 湖南省茶叶安全现状与溯源系统建设研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 240-242
[3] 叶子弘, 言思敏, 崔海峰, 等. 茶叶原产地检测方法及其应用[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(3): 245-252.
[4] 马奕颜, 郭波莉, 魏益民, 等. 植物源性食品原产地溯源技术研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 246-250.
[5] 林听, 沙岭杰, 兰珊珊, 等. 在普洱茶产地溯源中化学计量学工具的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(9): 3 646-3 653.

(下转第 65 页)

量也增大,且合格率降低,所以选择合适的拉膜速度能够提高包装机的实际工作效率。

5 结论

分析了山核桃仁包装机拉膜机构工作过程中袋膜输送出现跑偏的原因,从理论上阐述了袋膜纠偏的可行性,并设计了有针对性的小袋山核桃仁包装机拉膜机构纠偏模型。针对袋膜输送过程中产生的时变参数,提出了纠偏模糊控制方案,建立了相应的隶属函数模型和模糊控制规则,并利用 LabVIEW 软件进行输出效果测试,结果表明通过纠偏模糊控制得到的偏移量变化曲线,基本没有超调量且稳定性高。利用改进的山核桃仁包装机在不同条件下进行分组试验,验证了仿真结果的正确性,该纠偏模糊控制系统的纠偏精度最高达到 0.52 mm,使包装效果得到明显改善。

参考文献

[1] 吕秋菊,沈月琴,高宇列,等.山核桃产业的发展过程、动因及展望[J].浙江农林大学学报,2012(1):97-103.

[2] 陶菲,邵海燕,陈杭君,等.不同包装对山核桃脂肪氧化的影响[J].农业工程学报,2008(9):303-305.

[3] 朱德泉,曹成茂,丁正耀,等.山核桃坚果热风干燥特性及其工艺参数优化[J].农业工程学报,2011(7):364-369.

[4] 彭祺,边威,王佳丽,等.不同加工工艺对临安山核桃营养成分的影响[J].食品工业科技,2013(20):173-175,189.

[5] 赵美宁,王芳.鲜奶无菌包装机中的袋牵引装置及控制[J].食品与机械,2006,22(4):70-71,80.

[6] 刘义伦,廖伟,时圣鹏,等.宽幅铝板带热连轧跑偏控制的张力调节模型与仿真[J].锻压技术,2011(2):152-155.

[7] 刘海生,张俊,李茜,等.全自动立式颗粒包装机传动系统及横封机构的改进与仿真[J].食品与机械,2015,31(4):94-96,137.

[8] 阎龙,江伟,史耀耀.复合材料布带缠绕纠偏控制系统设计[J].宇航学报,2012(8):1171-1176.

[9] LIU Hong-yu,XU Ze-ning. The design of check control system of strip steel deviation correction and the heat structure coupling analysis on relative sensor[J]. Sensors & Transducers, 2013, 156(9):123-129.

[10] 彭杭,文晟,张铁民,等.三列中封全自动制袋机拉膜跑偏的有限元分析[J].包装工程,2014(5):41-45,72.

[11] KOU Xue-qin, GU Li-chen. Application of PID control based on rbf neural network in electro-hydraulic servo system for steel strip deviation[J]. Advanced Materials Research, 2012, 468-471:434-438.

[12] 万苏文.基于热合包装机的纠偏控制系统设计[J].包装工程,2014(5):54-57.

[13] 杨开平,史耀耀,何晓东,等.复合材料布带缠绕智能纠偏控制技术[J].航空学报,2011(7):1318-1325.

[14] 刘持平,卢世坤.输送带跑偏原因、对策和纠偏技术的发展[J].煤矿机械,2009(3):7-9.

[15] 孙智慧,岳亚东,刘晔.卷带包装材料连续供送恒张力控制系统的设计[J].农业机械学报,2006(8):208-210.

[16] LUO Wei-ping. An intelligent control system for edge position deviation of narrow fabrics[J]. Advanced Materials Research, 2012, 461:606-610.

[17] 张洪涛,段发阶,胡亮,等.线阵 CCD 薄膜测宽装置关键技术[J].哈尔滨工业大学学报,2009(5):110-112.

[18] QU Shao-cheng, TIAN Yao, CHEN Chan. Fuzzy PID control for intelligent smartcar system with CCD camera[J]. Key Engineering Materials, 2011, 467-469:433-436.

[19] 何晓东,史耀耀,秦现生.复合材料布带缠绕纠偏模糊控制技术研究[J].西北工业大学学报,2014(3):464-469.

[20] 吴晓强,李亚莉,周红杰,等.基于模糊 PID 的茶叶烘干机恒温控制系统研究[J].食品与机械,2015,31(4):111-113,255.

[21] 董全成,冯显英.基于自适应模糊免疫 PID 的轧花自动控制系统[J].农业工程学报,2013(23):30-37.

[22] 曹成茂,吴正敏,梁闪闪,等.茶叶杀青机双模糊控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2016(7):259-265.

[23] 徐耀良,赵万剑,王博,等.自适应模糊控制在纠偏控制器中的应用[J].控制工程,2013(2):313-316,323.

[24] GULER H, ATE E. The comparison of manual and LabVIEW based fuzzy control on mechanical ventilation[J]. Proc. IMech EPart H: Journal of Engineering in Medicine, 2014, 228(9):916-925.

[25] 舒华,舒怀林.基于 LabView 的 PID 神经网络控制器设计与仿真[J].系统仿真学报,2006(10):2918-2920.

(上接第 37 页)

[6] 张龙,潘家荣,朱诚.基于近红外光谱的不同发酵类型茶叶判别[J].食品科学,2012,33(20):149-152.

[7] 蔡健荣,吕强,张海东.利用近红外光谱技术识别不同类别的茶叶[J].安徽农业科学,2007,35(14):4083-4084.

[8] 陈全胜,江水泉,王新宇.基于电子舌技术和模式识别方法的茶叶质量等级评判[J].食品与机械,2008,24(1):124-126.

[9] 安泉鑫,陈莉,庞林江,等.近红外光谱技术在食品中的应用进展[J].食品与机械,2012,28(5):329-342.

[10] 戴素贤,谢赤军.七种高香型乌龙茶香气成分的主成分分析[J].华南农业大学学报,1999,20(1):113-117.

[11] 叶国注,江用文,尹军峰,等.板栗香型绿茶香气成分特征研究[J].茶叶科学,2009,29(5):385-394.

[12] 叶国注,袁海波,江用文,等. Bayes 逐步判别法在绿茶板栗香化学识别上的应用[J].茶叶科学,2009,29(1):27-33.

[13] 张雪波,肖世青,杜先锋,等.基于主成分分析法的安溪铁观音

香气质量评价模型的构建[J].食品科学,2012,33(22):225-230.

[14] 颜鸿飞,王美玲,白秀芝,等.湖南茯砖茶香气成分的 SPME-GC-TOFMS 分析[J].食品科学,2014,35(22):176-180.

[15] 王华夫,李名君,刘仲华,等.茯砖茶在发花过程中的香气变化[J].茶叶科学,1991,11(增刊):81-86.

[16] 王增盛,施兆鹏,刘仲华,等.论黑茶品质及风味形成机理[J].茶叶科学,1991,11(增刊):1-9.

[17] 刘彬球,陈孝权,吴晓刚,等. PCA 和 PLS-DA 用于晒青毛茶级别分类研究[J].茶叶科学,2015,35(2):179-184.

[18] 袁王伟,张永志,付海燕,等.茶叶中同位素与多元素特征及其原产地 PCA-LDA 判别研究[J].核农学报,2013,27(1):47-55.

[19] 程权,杨方,李捷,等.全二维气相色谱—飞行时间质谱结合聚类分析与 Fisher 判别分析对铁观音品质等级的评价研究[J].分析测试学报,2015,34(5):525-531.