

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.030

# 电子鼻鉴别白酒信号小波去漂移方法

殷勇 白玉 于慧春 郝银凤 王润博  
(河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023)

**摘要:** 为提高电子鼻长期鉴别的稳健性,提出了一种基于小波分析的电子鼻信号去漂移方法。对含漂移信号的电子鼻数据进行小波分解,获得分解系数;构造一种相对偏差阈值滤波函数对小波逼近系数进行阈值处理,获得修正的小波系数;运用小波逆变换对修正后的小波系数进行重构,得到去除漂移或少漂移的电子鼻信号。对6种白酒样本随机生成的5组样本训练集与对应的测试集进行去漂移处理与信号重构,提取去漂移处理前后的电子鼻信号积分值特征,并运用Fisher判别分析(FDA)和BP神经网络分别对5组数据集进行鉴别分析。FDA鉴别结果显示,无论是训练集还是测试集,5组样本的鉴别正确率由去漂移前的最高值45%提升至去漂移后的100%。BP神经网络鉴别结果显示,5组样本的鉴别正确率由去漂移前的最高值31.7%提升至去漂移后的98.3%。这说明所给出的去漂移方法在白酒电子鼻的鉴别中是稳健有效的。同时,也为电子鼻鉴别其他物品提供了一种可借鉴的去漂移方法。

**关键词:** 白酒; 鉴别分析; 电子鼻; 信号去漂移; 小波分析

**中图分类号:** TP212.2; TS207.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0219-05

## Drift Elimination Method of Electronic Nose Signals Based on Wavelet Analysis and Discrimination of White Spirit Samples

Yin Yong Bai Yu Yu Huichun Hao Yinfeng Wang Runbo  
(College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In order to enhance the long-term identification accuracy and robustness of e-nose, a drift elimination method of electronic nose (e-nose) signals based on wavelet analysis was proposed. Firstly, wavelet decomposition was used to decompose the e-nose data contained drift and generated decomposition coefficients. Secondly, a relative deviation threshold filtering function was constructed to threshold wavelet coefficients and then the corrected wavelet coefficients were obtained. Finally, the e-nose signals which had less or not drift signals were obtained by reconstructing the corrected coefficients. For six kinds of discriminated white spirit samples, five groups of training set samples and corresponding test set samples which were randomly generated were carried out the drift elimination processing and signal reconstruction by the proposed method. After the integral values (INV) selected as a feature of the original/reconstructed e-nose signals were extracted, Fisher discriminant analysis (FDA) and BP neural network were employed to deal with these feature arrays of the five groups of data patterns. The FDA results clearly showed that the highest correct identification rate of five groups of training set and test set samples was 45% before drift eliminating and up to all 100% after drift eliminating, respectively. Meanwhile, BP neural network results also showed that the highest correct identification rate of the five group samples was 31.7% before drift eliminating, and the correct identification rate was up to 98.3% after drift eliminating. The two kinds of identification results illustrated the proposed method was very effective and robust for white spirit samples identification. In addition, the drift elimination method also had the reference value for the identification of other food samples.

**Key words:** white spirit; discriminant analysis; electronic nose; drift elimination; wavelet analysis

引言

电子鼻被认为是挥发性样品检测最具发展潜力的一种分析仪器，在酒品检测中已有研究报道<sup>[1-3]</sup>。但是,现有的研究结果大多源于1~3个月以内的短期测试数据,气敏传感器的漂移影响往往被忽略掉,致使所建立的电子鼻检测模型不具长期稳健性,不适合后续长时间的检测样本分析(如1年以上的测量数据)。电子鼻中的气敏传感器往往会因老化、环境波动等因素而产生漂移现象,漂移问题的存在是电子鼻难以实现长期稳健检测的主因。因此,消除或降低漂移影响对电子鼻的检测非常重要<sup>[4-6]</sup>。

目前漂移问题的解决方法主要有两种:一是基于多变量统计分析的方法,如用主成分分析<sup>[7-8]</sup>、独立成分分析<sup>[9]</sup>、偏最小二乘法<sup>[10]</sup>等将漂移信息从数据中剔除;二是采用非线性的补偿模型方法,如径向基函数神经网络<sup>[11]</sup>、自组织映射神经网络<sup>[12]</sup>等补偿方法。前者需要大量的检测数据作为先验信息,降低了实际应用的实效性;而后者不是真正意义上的去漂移方法,仅靠模型补偿漂移影响,容易遗失记忆信息(漂移信息)等问题<sup>[13]</sup>。

文献[14]指出,可运用小波滤波器来实现电子鼻信号降噪与压缩。尽管降噪不是去漂移,但受此降噪方法的启发,本文在综合基于小波分析软、硬阈值去噪<sup>[15]</sup>的基础上尝试气敏信号去漂移实践,由此提出一种基于小波分析的去漂移方法。

1 材料与方法

1.1 试验仪器

试验中所使用的电子鼻系统为实验室自行研制。该系统主要由气敏传感器阵列、测量室、数据采集装置、计算机判别分析软件等部分组成。气敏传感器阵列由14个SnO<sub>2</sub>型金属氧化物气敏传感器组成,即TGS800、TGS812、TGS813、TGS816、TGS821、TGS822、TGS824、TGS825、TGS826、TGS830、TGS831、TGS832、TGS880、TGS842。各型号传感器对应的典型敏感气体如表1所示。气敏传感器具有广谱响应特性,由预试验可知,这些传感器对6种白酒样品均能产生不同响应程度的气敏信号,因此该电子鼻的气敏信号可用来表征样品间的差异,实现白酒样品的鉴别。在此电子鼻系统中,每个气敏传感器的加热电压均为(5.0±0.05)V,回路测量电压为(10.0±0.01)V。另外,此系统还配有温、湿度传感器来测量环境温、湿度的变化,以期补偿环境对气敏传感器的影响,温湿度传感器的工作电压也为(10.0±0.01)V。

| 表 1 传感器与典型敏感气体对应表                         |                              |
|-------------------------------------------|------------------------------|
| Tab.1 Typical detection gas of 14 sensors |                              |
| 传感器型号                                     | 敏感特征                         |
| TGS800                                    | 对通风设备控制系统中的烟、汽油蒸汽具有很高的敏感度    |
| TGS812                                    | 对氢气、一氧化碳、甲烷、乙烷敏感             |
| TGS813                                    | 对天然气、液化气敏感                   |
| TGS816                                    | 对烷类等可燃气体敏感                   |
| TGS821                                    | 对氢气有高选择和敏感度                  |
| TGS822                                    | 对酒精、甲苯、二甲苯等有机溶剂较敏感           |
| TGS824                                    | 对氨气有高敏感度                     |
| TGS825                                    | 对硫化氢有高敏感度                    |
| TGS826                                    | 对氨气有高敏感度,对低浓度的氨气响应时间短        |
| TGS830                                    | 对 R-113、R-22、R-11、R-12 的响应较快 |
| TGS831                                    | 对 R-21、R-22 的响应较快            |
| TGS832                                    | 对 R-11、R-12、R-113 有高敏感度      |
| TGS880                                    | 对食品中易挥发的气体和蒸汽,及烹调过程中的气体敏感    |
| TGS842                                    | 对甲烷、丙烷、丁烷敏感,对杂质气体有较低的敏感度     |

1.2 试验材料

试验材料为6种白酒样品,含3个品牌,每个品牌都包含品质等级接近但不同的2种样品,分别为杜康三星、杜康五星、宋河三年、宋河五年、泸州醇三星、泸州醇四星6种白酒,每种样品准备120个试验样本。各样品的基本信息见表2。

| 表 2 试验材料的基本信息                                   |                  |       |               |
|-------------------------------------------------|------------------|-------|---------------|
| Tab.2 Basic information of white spirit samples |                  |       |               |
| 样品名称                                            | 主要原料             | 酒精度/% | 生产厂家          |
| 杜康五星                                            | 杜康泉水、高粱、小麦       | 50    | 洛阳杜康控股有限公司    |
| 杜康三星                                            | 杜康泉水、高粱、小麦       | 50    | 洛阳杜康控股有限公司    |
| 宋河五年                                            | 水、高粱、小麦、大米、糯米、玉米 | 50    | 河南省宋河酒业股份有限公司 |
| 宋河三年                                            | 水、高粱、小麦、大米、糯米、玉米 | 50    | 河南省宋河酒业股份有限公司 |
| 泸州醇四星                                           | 水、高粱、大米、小麦       | 52    | 泸州老窖股份有限公司    |
| 泸州醇三星                                           | 水、高粱、大米、小麦       | 52    | 泸州老窖股份有限公司    |

1.3 测试方法与结果

每个样本测量前,传感器阵列先对测量环境进行测试(简称空采),以获得各传感器的基值信号(电压值),空采时间为20s。然后再进行样本动态测量,动态采集时间为1200s。样本取样量为5mL,用蒸发皿将样本放于电子鼻的测量室内进行测量。样本测量结束后对各气敏传感器进行复原,使各传感器恢复到基值状态,以便下一个样本的测量,复原时间为960s。每个样本动态测量时,数据

采集间隔设为 1 s,这样每个样本在 1 200 s 的采集时间内共采集 1 200 个数据。另外,在每个样本测量过程中,对应的温、湿度信息由温、湿传感器一并测量。间断性测试试验进行了 14 个月,具体时间为 2014 年 12 月至 2016 年 1 月,期间每种样品在测试日均进行测量,且为交替测试。

## 2 小波去漂移方法

小波去漂移的思想是:气敏信号与漂移信息对应于不同的小波系数,漂移信息对应于较小的小波系数,而气敏信息则对应于较大的小波系数。因此,该方法可描述为:首先利用小波变换分解电子鼻测试数据以获得小波系数;其次,通过构建阈值函数来处理不同的小波系数,以实现去漂移信息的目的;最后,对处理后的小波系数进行重构,即可获得无漂移或少漂移信息的气敏信号。

### 2.1 小波分解

在小波分析中,由于 Daubechies (db) 小波具有正交紧支撑性、功率互补性、双正交性等优点,所以常选 db 小波作为小波基函数。Symlets (sym) 小波是在 db 小波基础上发展而来的,与 db 小波相比,sym 小波还具有更优良的对称性,从而在分解或者重构信号时避免了信号的失真,所以 4 阶 sym 小波被选作基函数<sup>[16]</sup>。另外,由于小波分解尺度过大时,一些有用的信息可能会丢失,结合模拟计算试验,选取了 3 尺度进行分解。前期研究发现,漂移信息属低频信号,隐藏于低频系数集中,所以,在后面的去漂移方法研究中,将低频的逼近系数集作为处理对象。

### 2.2 阈值函数构建与去漂移方法

#### 2.2.1 阈值函数构建

文献[15]在用小波分析研究心电信号去噪方法时指出,阈值去噪方法简单且计算量小,并引入了软、硬阈值函数:

硬阈值函数

$$\hat{w}_{ij} = \begin{cases} w_{ij} & (|w_{ij}| \geq \lambda) \\ 0 & (|w_{ij}| < \lambda) \end{cases} \tag{1}$$

软阈值函数

$$\hat{w}_{ij} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{ij})(w_{ij} - \lambda) & (|w_{ij}| \geq \lambda) \\ 0 & (|w_{ij}| < \lambda) \end{cases} \tag{2}$$

式中  $w_{ij}$ ——小波分解系数

$\hat{w}_{ij}$ ——阈值调整后的对应系数

$\text{sgn}(\cdot)$ ——符号函数

$\lambda$ ——设置的阈值

由式(1)、(2)可知,硬阈值函数将大于阈值的

系数保留而将小于阈值的系数置零;而软阈值函数将小于阈值的系数置零,将大于阈值的系数进行收缩。但是,在气敏信号中,若把较小的小波系数均置零,则会导致重构信号的光滑性不能得以保障;当小波系数较大时,若采用收缩处理,又致使处理过的系数与原系数之间总存在恒定的偏差,这将直接影响重构信号与真实信号的逼近程度,给重构信号带来不可避免的误差。所以,软、硬阈值函数在处理气敏信号时均存在局限性。

为克服软、硬阈值的缺点,本文将软阈值和硬阈值综合起来考虑,给出了一种相对偏差阈值函数

$$\hat{w}_{ij} = \begin{cases} w_{ij} & \left( \left| \frac{w_{ij} - w_j}{w_j} \right| \geq \alpha \right) \\ w_j & \left( \left| \frac{w_{ij} - w_j}{w_j} \right| < \alpha \right) \end{cases} \tag{3}$$

式中, $w_j$ 为所分析气敏传感器测试的所有训练集样本信号在第  $j$  个小波分解频点上的均值,它随着样本个体及小波系数集中列的改变而改变。

式(3)的阈值处理思想是,当分解系数相对于均值较大时,传感器采集信号明显体现了气敏信息,分解系数不处理,克服了软阈值函数中原始信号与重构信号存在着恒定偏差的现象;当分解系数相对于均值较小时,认为包含了漂移信息,分解系数用均值代替,这不仅可剔除漂移系数,还可保障重构信号的光滑性。由于  $w_j$  随着样本个体及小波系数集中列的改变而改变,在确定式(3)中  $\alpha$  值时,保证其泛化能力是非常重要的。因  $\alpha$  受样品类别、样本数量、传感器类型等因素影响,很难用明确的计算公式给出,所以采用试凑法来确定  $\alpha$  值。

#### 2.2.2 去漂移处理

针对此检测用阵列及 6 种白酒样品,经仿真试凑计算,发现当  $\alpha = 0.075 5$  时能获得较好的处理结果。基于此  $\alpha$  值的电子鼻中各气敏传感器测试数据的去漂移处理过程描述如下:

(1)对各气敏传感器信号进行 4 阶的 sym 小波 3 尺度分解,得到不同传感器对所有样本测量信号的分解逼近系数集 cA3。考虑到 sym 小波函数的特点,这里选取每个样本 1 200 个采样数据中的前 1 024 个数据进行处理。

(2)取  $\alpha = 0.075 5$ ,按式(3)对逼近系数集 cA3 进行修正,得到修正系数。

(3)对修正系数进行逆小波变换,得到重构信号。这里,每个传感器对每个样本的重构数据变为 1 024 个。

由于电子鼻中每个传感器产生的漂移信号不相

同,且每一种样品中的成分也不相同。因此,将每一种样品的数据分别按传感器型号对应处理。以1个泸州醇四星样本为例,每个气敏传感器都对应于1200个试验数据,选取前1024个数据按照上述去漂移处理过程分别对每个传感器进行去漂移处理,分别得到14个气敏传感器对应于1个泸州醇四星样本的重构信号,每个传感器重构信号为1024个数据。

图1给出了去漂移前后TGS-813对杜康三星样品不同测量日期测试结果的变化描述。图中,纵坐标为电压测量值(V),横坐标为样本测试的时间段,用“年-月”表示,如“2015-04”表示2015年4月。图中的每个离散符号表征了1个样本的动态测试结果,对应的数值为样本动态响应信号的积分值。

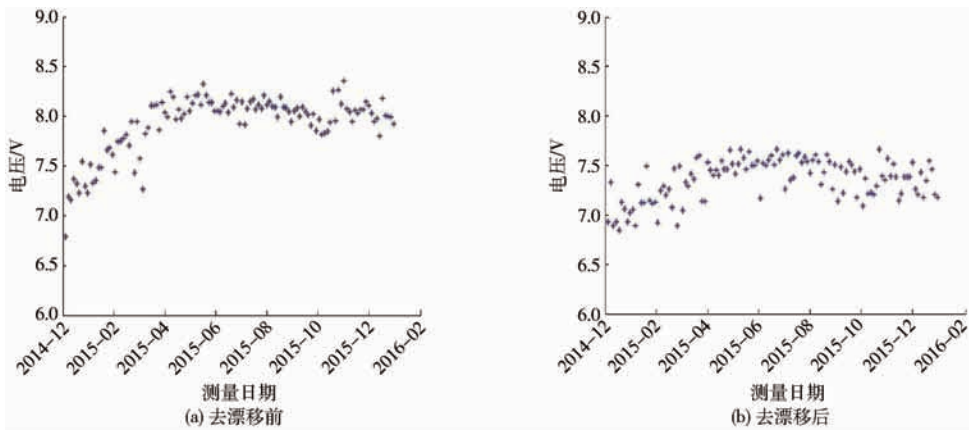


图1 去漂移前后TGS-813对杜康三星样品不同测量日期测试结果的变化描述

Fig.1 Changing representation of TGS-813 signals to Dukangsanxing samples before and after drift elimination

3 鉴别结果与分析

3.1 训练集与测试集构造

分别从每种白酒样品120个样本中随机选取100个样本来构造训练集,共600个样本,剩下的20个样本形成测试集,共120个样本。用同样的随机取样方法,共生成5组样本训练集及其对应的测试集,以考察α取值的泛化性以及研究结果的稳健性。

运用前述去漂移处理方法分别对5组样本训练集与对应的测试集进行去漂移处理,得到5组训练集的电子鼻重构信号与测试集重构信号。对于每个传感器,每组训练集重构信号为600×1024的数据矩阵,对应的测试集重构信号为120×1024的数据矩阵。

3.2 特征提取

电子鼻信号中,有关特征提取的方法很多。考虑到积分特征是电子鼻信号的总体表征<sup>[17]</sup>,因此选择积分值(INV)作为电子鼻信号重构前后的特征值。为了与重构信号1024个数据对应,重构前的数据也选取前1024个数据进行特征提取。INV特

选用积分值表征样本测试结果的原因是:描述样品在不同测试日期测试结果的变化趋势时,很难用1200个动态数据来表征1个样本;再者,积分值反映了1个样本动态响应的总体结果,所以可用积分值来表征1个样本的测试结果。

由图1a可以看出,测试结果具有明显的漂移现象。2015年5—9月测试值较大,主要是环境温、湿度的影响。因此,为了减少温湿度的影响,每个样本的测试结果均为样本的实际测试值减去相应的基值。在后续的分析中,所用数据均是去基值后的数据。

对比图1可以看出,传感器试验数据经去漂移处理后,漂移现象得到了明显抑制。

征值的计算式为

I = \sum\_{i=1}^N x\_i \Delta t \tag{4}

式中 I——INV 积分值  
x<sub>i</sub>——1个传感器对1个样本的第i个采集值或重构值  
Δt——相邻2个数值的间隔时间,取1s  
N——数据个数,取1024

另外,为了进一步补偿环境温、湿度的影响,把每个样本测试过程中对应的温、湿度积分值也分别作为模式识别系统的输入值,起到模型补偿作用。因此,电子鼻信号重构前后每组训练集特征矩阵均为600×16的数据阵,对应的测试集特征矩阵均为120×16的数据阵。

3.3 Fisher 鉴别分析

对6种白酒样品去漂移前后训练集特征矩阵进行FDA分析,发现去漂移前6种白酒样品根本无法鉴别开来,5组训练集的最高鉴别正确率仅为45%,但去漂移后,5组训练集及其对应的测试集均能完全得以鉴别,鉴别正确率达100%。图2为第1组数据集FDA鉴别结果。5组数据集的FDA分析结

果表明,所提出的去漂移方法不仅有效,还确保了 FDA 鉴别模型的稳健性。

3.4 BP 神经网络鉴别分析

由于神经网络的输入为 16 个传感器的特征值(包含不处理的温、湿度传感器),输出为 6 种白酒样品,所以神经网络输入层神经元个数为 16,输出

层神经元个数为 6。当隐层神经元传递函数选为 tansig 函数、输出层神经元传递函数选为 logsig 函数、训练函数选为 trainlm 函数时,运用训练集数据训练神经网络,并通过试凑法可确定隐层神经元个数为 27 时,分类效果最佳。因此 BP 神经网络的结构为  $16 \times 27 \times 6$ 。

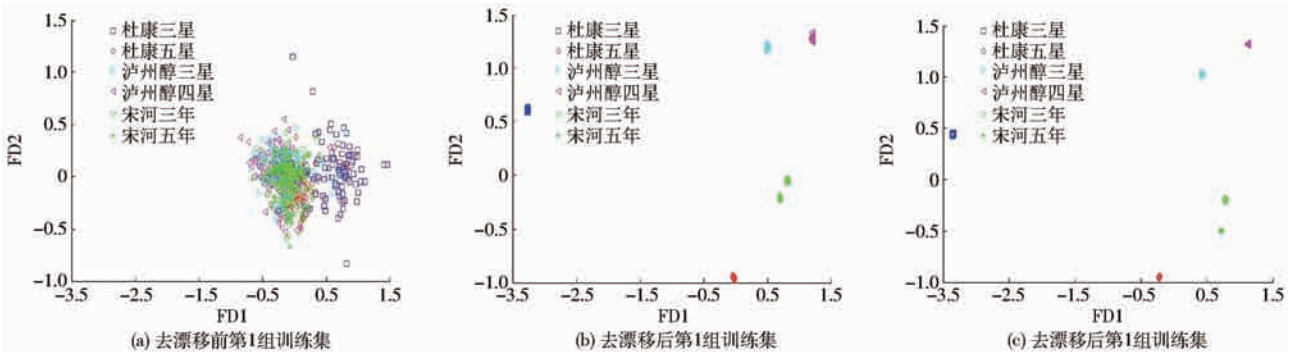


图 2 第 1 组数据集 FDA 鉴别结果

Fig.2 FDA results of the first group data set

采用上述网络结构及神经元传递函数,对 5 组训练集及其相应的测试集进行 BP 神经网络分析,结果发现:去漂移前 5 组训练集均不能有效鉴别,最高鉴别正确率为 31.7%;但去漂移后 5 组训练集均能完全鉴别开来,鉴别正确率为 100%。对应的 5 组测试集也达到了较为满意的鉴别结果,最低鉴别正确率为 98.3%,如表 3 所示。BP 神经网络分析结果再次表明所给出的去漂移方法不仅有效,还使所建的 BP 神经网络鉴别模型具有稳健性。

表 3 5 组测试集 BP 神经网络鉴别结果

Tab.3 BP neural network results of five groups of test sets

| 测试集组号   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5   |
|---------|-----|------|------|------|-----|
| 鉴别正确率/% | 100 | 98.3 | 99.2 | 98.3 | 100 |

4 结束语

电子鼻中气敏传感器存在漂移现象,致使电子鼻不具长期稳健的检测能力。为了能对 6 种白酒样品的长期测试数据进行正确的鉴别分析,给出了一种基于小波分析的电子鼻信号去漂移方法,有效实现了电子鼻信号的去漂移处理。在分别提取了电子鼻信号去漂移前后积分值特征的条件下,运用 FDA 和 BP 神经网络方法对 6 种白酒样品进行了鉴别分析,结果显示去漂移后的鉴别正确率显著提高,FDA 鉴别正确率由 45% 提高到 100%,BP 神经网络的鉴别正确率由 31.7% 提高到 98.3%。说明所提出的电子鼻信号去漂移方法是有效的,同时也为电子鼻鉴别其他物品时提供了一种可借鉴的去漂移方法。

参 考 文 献

1

ROMAIN A C, NICOLAS J. Long term stability of metal oxide-based gas sensors for e-nose environmental applications: an overview[J]. Sensors and Actuators B, 2010,146(2): 502 – 506.

2

PADILLA M, PERERA A, MONTOLIU I, et al. Drift compensation of gas sensor array data by Orthogonal Signal Correction[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2010,100(1): 28 – 35.

3

ZHANG L, TIAN F, LIU S, et al. Chaotic time series prediction of E-nose sensor drift in embedded phase space[J]. Sensors and Actuators B, 2013,182: 71 – 79.

4

ZIYATDINOV A, MARCO S, CHAUDRY A, et al. Drift compensation of gas sensor array data by common principal component analysis[J]. Sensors and Actuators B, 2010,146(2): 460 – 465.

5

HOLMBERG M, WINQUIST F, LUNDSTRÖM I, et al. Drift counteraction for an electronic nose[J]. Sensors and Actuators B, 1996, 36(1 – 3): 528 – 535.

6

WENZEL M J, BROWN A M, JOSSE F, et al. Online drift compensation for chemical sensors using estimation theory[J]. IEEE Sensors Journal, 2011,11(1): 225 – 232.

7

ARTURSSON T, EKLOV T, LUNDSTROM I, et al. Drift correction for gas sensors using multivariate methods[J]. Journal of Chemometrics, 2000,14(5 – 6): 711 – 723.

8

史波林,赵镭,支瑞聪,等. 西湖龙井茶品质的智能嗅觉识别[J]. 农业机械学报,2012, 43(12): 130 – 135.  
SHI Bolin, ZHAO Lei, ZHI Ruicong, et al. Quality recognition of Xihu Longjing tea based on intelligent olfactory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (12): 130 – 135. (in Chinese)

University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

15 LEE S H, YI B J, KIM S H, et al. Analysis on impact propagation of docking platform for spacecraft[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA, 2001, 1: 413 – 420.

16 黎邦隆, 宋福磐. 关于冲力情况下的高斯最小约束原理[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 1995, 22(4): 23 – 28.  
LI Banglong, SONG Fuqing. On Gauss' principle of least constraint for impulsive motion[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 1995, 22(4): 23 – 28. (in Chinese)

17 姚文莉, 戴葆青. 广义坐标形式的高斯最小约束原理及其推广[J]. 力学与实践, 2014, 36(6): 779 – 785.  
YAO Wenli, DAI Baoqing. The principle of generalized coordinate form of Gauss's minimal constraint and its extension[J]. Mechanics and Practice, 2014, 36 (6): 779 – 785. (in Chinese)

18 金国光. 变胞机构结构学, 运动学及动力学研究[R]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.  
JIN Guoguang. Research on structure theory, kinematics and dynamics of metamorphic mechanism[R]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)

19 畅博彦, 刘艳茹, 金国光. 3PUS – S(P) 变胞并联机构逆动力学分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 317 – 323.  
CHANG Boyan, LIU Yanru, JIN Guoguang. Inverse dynamics of 3PUS – (SP) paraller metamorphic mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 317 – 323. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 223 页)

9 KERMIT M, TOMIC O. Independent component analysis applied on gas sensor array measurement data[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(2): 218 – 228.

10 王虎玄, 胡仲秋, 龙芳羽, 等. 苹果汁中鲁氏接合酵母早期污染的电子鼻识别研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 209 – 214.  
WANG Huxuan, HU Zhongqiu, LONG Fangyu, et al. Research on identification of spoilage in apple juice caused by zygosaccharomyces rouxii at early stage using electronic nose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 209 – 214. (in Chinese)

11 ZUPPA M, DISTANTE C, PERSAUD K C, et al. Recovery of drifting sensor responses by means of DWT analysis[J]. Sensors and Actuators B, 2007, 120(2): 411 – 416.

12 ZIYATDINOV A, CHAUDRY A, PERSAUD K, et al. Common principal component analysis for drift compensation of gas sensor array data[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Olfaction and the Electronic Nose, 2009, 1137: 566 – 569.

13 刘涛, 黄智勇. 一种基于多重自组织图的电子鼻漂移抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1287 – 1292.  
LIU Tao, HUANG Zhiyong. Drift counteraction method for electronic nose based on multiple self-organizing maps [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1287 – 1292. (in Chinese)

14 ZANCHETTIN C, LUDERMIR T B. Wavelet-filter for noise reduction and signal compression in an artificial nose[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(1): 246 – 256.

15 罗强. 基于小波分析的心电信号去噪研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006: 20 – 21.

16 查显杰, 傅容珊, 戴志阳, 等. 小波基函数选择对 SAR 干涉图去噪的影响[J]. 遥感信息, 2008(2): 17 – 20.  
ZHA Xianjie, FU Rongshan, DAI Zhiyang, et al. The influence on SAR interferograms noise reduction due to the selection of wavelet base faction[J]. Remote Sensing Information, 2008(2): 17 – 20. (in Chinese)

17 YIN Y, CHU B, YU H, et al. A selection method for feature vectors of electronic nose signal based on wilks  $\Lambda$ -statistic[J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2014, 8(1): 29 – 35.