

# 牛肉新鲜度的电子鼻检测技术<sup>\*</sup>

石志标<sup>1</sup> 佟月英<sup>2</sup> 陈东辉<sup>2</sup> 李扬<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学能源与机械工程学院, 吉林 132012; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025)

**【摘要】** 为了简单、快捷、准确地检测牛肉新鲜度,建立了电子鼻检测系统。根据牛肉产生的气味和传感器实验,合理地选用了气敏传感器阵列。为提高电子鼻传感器灵敏度,对购置的传感器进行了改进。利用生物嗅觉的研究成果,开发出仿生嗅觉鼻道结构。为了提高电子鼻系统小样本训练的识别率,提出了用支持向量机(SVM)算法识别牛肉新鲜度的方法。应用电子鼻系统对储藏7 d不同新鲜度的牛肉进行了识别实验,识别率达到99.25%。结果表明电子鼻检测牛肉新鲜度是可行的。

**关键词:** 牛肉 新鲜度 电子鼻 支持向量机

**中图分类号:** TS251; TP212

**文献标识码:** A

## Identification of Beef Freshness with Electronic Nose

Shi Zhibiao<sup>1</sup> Tong Yueying<sup>2</sup> Chen Donghui<sup>2</sup> Li Yang<sup>1</sup>

(1. College of Energy Resources and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

An electronic nose system was developed for detecting beef freshness. An array of gas sensor was selected correctly according to beef smell and sensor experiments. To enhance the sensitivity of electronic nose sensors, purchased sensors were improved. By using the research achievements of biological olfaction, a bionic nasal meatus was designed. In order to improve the recognition rate of the electronic nose system for small samples, appropriate recognition algorithm of support vector machine (SVM) was adopted. Identification experiments of different freshness of beef that had been stored for 7 days were carried out, and results showed that the recognition rate of this system is 99.25%, the feasibility of identifying beef freshness with electronic nose was confirmed.

**Key words** Beef, Freshness, Electronic nose, SVM

### 引言

肉品贮藏过程中,由于酶和细菌的作用,肉品中的蛋白质、脂肪及糖类发生分解变化而腐败变质,在腐败过程中,蛋白质分解产生氨和胺类等碱性含氮的有毒物质如酪胺、组胺、尸胺、腐胺和色胺等,统称为有毒胺。肉品的毒胺与腐败过程中同时分解产生的有机酸结合,形成盐基态氮而积聚在肉品当中,因其具有挥发性,被称为挥发性盐基氮。肉品中所含挥发性盐基氮的含量,随其腐败程度的加重而增加,

故挥发性盐基氮的含量也是衡量肉品质量的重要标志。牛肉样品随着贮藏时间的延长其新鲜度逐渐下降,其挥发性成分将发生明显变化,气味也有着显著区别。用电子鼻系统对不同储藏时间的牛肉样品进行检测,可以获得不同的气味指纹数据,从而获得样品新鲜程度的信息。

由于电子鼻检测牛肉新鲜度具有检测简单、快捷、样品用量少、成本低等特点,已引起许多研究者的关注。但目前的电子鼻与嗅敏生物嗅觉仍有很大差距,在电子鼻检测肉品新鲜度的研究中,检测灵敏

度、识别率等还没有达到满意的效果,其主要原因是电子鼻在硬件结构和识别算法上存在仿生特性差。王平等将生物嗅觉机理模型用于电子鼻系统的设计过程,采用了模拟生物嗅觉的识别算法<sup>[1]</sup>,使电子鼻系统具有了一定的仿生特性。从生物嗅觉原理出发设计电子鼻是电子鼻的研究发展方向<sup>[2]</sup>。硬件研究可以借鉴生物嗅觉的研究成果,即生物嗅觉只有气味附着于嗅体细胞,才能产生嗅觉机理,有味气体流过嗅体细胞越多、越浓,产生的嗅觉就越强烈<sup>[3]</sup>。从研究传感器和鼻道结构仿生入手,可提高电子鼻的灵敏度。在软件算法研究中,神经网络、主成分分析(PCA)、遗传算法、K-临近算法等相继应用到电子鼻识别算法中,但是这些方法具有一定局限性,比如局部最优问题、假定样本无穷、维数低等,使得其实际应用效果不佳。SVM 是在统计学习理论的基础上发展起来的一种新的机器学习方法,它基于结构风险最小化原则,尽量提高学习机的泛化能力,具有良好的推广性能和较好的分类精确性。另外,SVM 算法是一个凸优化问题,局部最优解一定是全局最优解,这些特点是其他算法所不具备的<sup>[4]</sup>。

本文根据牛肉的气味组成和传感器实验,选择适合牛肉新鲜度检测的 5 只传感器,通过嗅敏生物嗅觉结构的研究,设计具有较高灵敏度的仿生嗅觉鼻道结构,利用 SVM 算法,建立基于电子鼻的牛肉新鲜度检测系统,并对储藏 7 d 不同新鲜度的牛肉进行识别实验。

## 1 电子鼻系统

### 1.1 电子鼻硬件

#### 1.1.1 电子鼻传感器

电子鼻中传感器应对一系列或一类的气体有广谱的响应,而不是对特定的某一气体响应,这对于扩大电子鼻的应用范围十分有利。事实上,目前绝大多数气体传感器缺乏专一性,故可以利用它们作为电子鼻的敏感元件。实践证明,多个传感器形成的阵列对于特定的气体具有专一性,并且能够识别远多于传感器数目的气体种类。电子鼻系统中,气体传感器阵列的特性影响着整个系统的工作性能,而气体传感器阵列的特性又是直接由阵列中单个气体传感器决定的,因此,针对问题的实际需要,从分析、比较单个气体传感器的性能指标入手,合理地选择气体传感器的种类,从而优选出满足应用需要的气体传感器阵列是设计电子鼻系统的首要任务。阵列中的单个气体传感器需要根据被分析气体的种类、浓度范围等反复比较才能决定。即使是这样,优选出来的传感器阵列也不一定是最佳的,这种阵列或

无法完成对气体的准确辨识,或存在着较大的信息冗余,从而造成不必要的资源浪费和计算繁杂性。

在电子鼻系统的设计中,传感器阵列的选择一直依靠经验和实验进行。由于气体传感器种类的多样性和单个气体传感器特性的千差万别,很难设计出理论上最优的传感器阵列。对牛肉新鲜度辨识来说,选择半导体气体传感器构成阵列,因为半导体气体传感器交叉灵敏度高,且结构和使用简单、成本低廉、应用广泛。针对牛肉产生的气味和实验筛选,选定对牛肉气味相对敏感的费加罗公司生产的 TGS2611、TGS2602、TGS2600、TGS2610、TGS2620 型二氧化锡( $\text{SnO}_2$ )低功耗传感器。

#### 1.1.2 电子鼻嗅觉结构

嗅觉结构的设计是为了让气体传感器的敏感元件更多地接触被测气体。为了能够使敏感元件与气味充分接触,采取了以下措施:①目前电子鼻采用的基本上是费加罗公司生产的半导体式气敏传感器,敏感元件外都有防护罩,影响了敏感元件与气味的充分接触。故去掉防护罩,使敏感元件暴露在气味中。由鼻道入口的滤网来代替传感器的滤网。②气体流道应当是口小腔大的形状,以便使进口处的气流速度大于内腔处的气流速度,以保证有充足的气味物质与敏感元件接触。③传感器应设置在鼻道中央,使有味气体能充分流经传感器。图 1 为电子鼻的仿生嗅觉鼻道结构。由样本室、鼻道、滤网、传感器阵列、真空泵等组成。

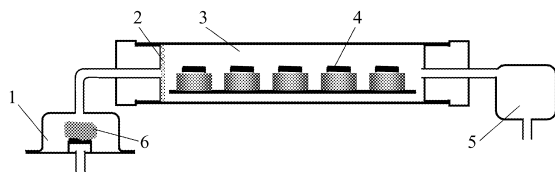


图 1 电子鼻的仿生嗅觉结构图

Fig. 1 Olfactory structures of electronic nose

1. 样本室 2. 滤网 3. 鼻道 4. 传感器 5. 真空泵 6. 样本

### 1.2 电子鼻系统识别算法及软件开发

#### 1.2.1 电子鼻系统识别算法

SVM 克服了传统机器学习方法的一些不足,具有泛化性好、小样本、全局最优等优点,目前已经得到了广泛的应用。由于气体具有易扩散和易混合的特点,在电子鼻识别过程中,存在训练样本少和分类器建立困难的问题,为此,采用 SVM 这一基于小样本统计学习理论建立非线性分类器的学习算法。

#### 1.2.2 电子鼻系统软件开发

系统软件算法采用 SVM 算法和 BP 神经网络算法。SVM 算法中,选择分类性能好且稳定的径向基函数<sup>[5]</sup>。BP 网络设置为 2 层结构,其中隐含层和输出层分别有 13 个和 3 个神经元。学习算法选用

L-M 算法,即训练函数选用 trainlm、学习函数选用 learnGdm。系统软件采用面向对象的程序设计语言 VC++ 和工程数学软件 Matlab 及 LIBSVM 软件包相结合的设计,图 2 为系统软件工作流程图。

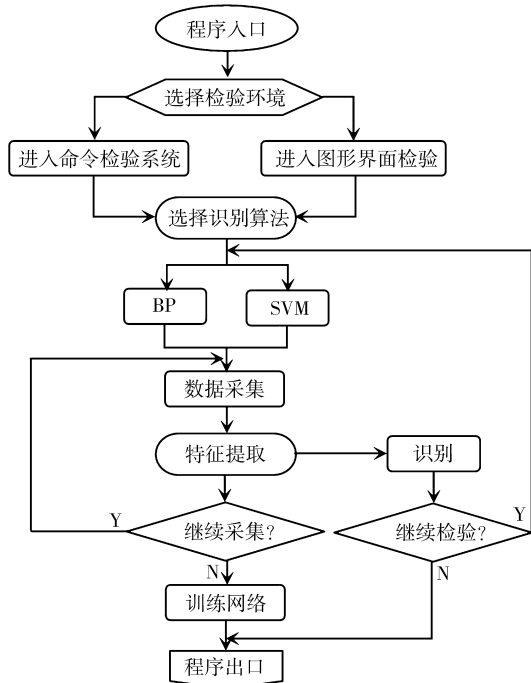


图 2 系统软件工作流程图

Fig. 2 Flow chart of software

## 2 实验

对于牛肉新鲜度的检测,一般是从感官性质、腐败分解产物的特性与数量、细菌的污染程度等 3 方面来进行,通常需要专家对牛肉进行感官评定和生化指标的实验室测定。目前生产中常用的生化指标实验室测定方法包括挥发性盐基氮(TVB-N)总量测定法和 pH 值检验法,TVB-N 测定肉品新鲜度是我国食品卫生法规规定的方法,已列为国家标准 GB2722—81,TVB-N 总量小于 15 mg/100 g 为新鲜牛肉,在 15~25 mg/100 g 之间为次鲜肉,大于 25 mg/100 g 为变质肉。孙永海等<sup>[6]</sup>进行了牛肉存储 0~7 d 的挥发性盐基氮含量检测,确定了特定实验条件下的牛肉新鲜度与牛肉存放时间的关系,0~2 d 为新鲜牛肉,3~6 d 为次鲜肉,7 d 以后为变质肉;申朝文<sup>[7]</sup>建立了肉新鲜度与存储天数之间的数学模型;Natale 等<sup>[8]</sup>采用由 8 个石英谐振式气体传感器以及 PCA、SOM 模式识别方法构成的人工嗅觉系统,可以检测鳕鱼、小牛肉的新鲜度;滕焯华等<sup>[9]</sup>采用 3 个金属氧化物气体传感器以及概率神经网络检测牛肉新鲜度;孙永海等<sup>[10]</sup>利用 5 个 TGS 系列半导体气敏传感器,采用遗传优化的组合 RBF 神经网络作为模式识别方法,对猪肉新鲜度进行了实验

研究,准确率达 95%;柴春祥等<sup>[11]</sup>利用 5 个半导体式气敏传感器,对猪肉的新鲜度进行了检测研究,在不同实验条件下,猪肉挥发性成分发生变化,电子鼻可检测到这些变化。

### 2.1 实验样本

实验样本均为长春皓月集团公司生产的牛肉。从屠宰线下线后 5 h 内取出牛肉样品,迅速运往实验室,取样方法参考 GB/T 9695.19—2008。在实验室超净工作台上将样品取出,用无菌刀具切割成约 40 mm×40 mm×4 mm 小薄片样本,共制作 20 个实验样品,放入恒温箱,在温度 20℃、相对湿度 60% 的条件下储存。

### 2.2 实验过程

用电子鼻系统实验时,实验装置处于空气清洁、温度为(20±1)℃、相对湿度为(60±1)% 的实验室中,用一长管将一端连于真空泵出气口,另一端放到室外,将实验室中有味气体排到室外,保持室内空气清洁,防止气味干扰,以提高测试的准确性以及便于传感器的清洗和还原。实验开始,启动电子鼻系统,调用系统软件,进行系统预热和对系统进行进样(测试环境空气)清洗,直到各个传感器达到稳定状态,表现为响应曲线平直,即基线(baseline)稳定。将牛肉样本放入样本室中,开始信号采集,15 s 后取出样本,传感器进行脱附清洗。设定采样时间为 60 s,采样间隔为 1 s,最大值为特征值,图 3 为传感器阵列响应曲线。图 4 为 1~7 d 每个传感器输出的平均特征值直方图。每天对每个样本测试一次,共测试 7 d,实验结束时共 140 组数据。在 140 组样本(共 7 类)中,为了节约训练成本,希望训练样本数尽可能少。用最少的训练样本数 7 组和 14 组样本作为训练样本,其余为测试样本(133 和 126 组)。分别用两种算法进行训练、分类及性能评估。

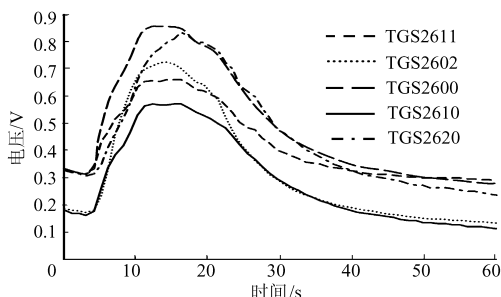


图 3 传感器响应曲线

Fig. 3 Response curves of sensors

## 3 结果与分析

从图 3 实验样本 5 个传感器响应曲线和图 4 传感器响应特征值棒图可以看出,每个传感器对牛肉

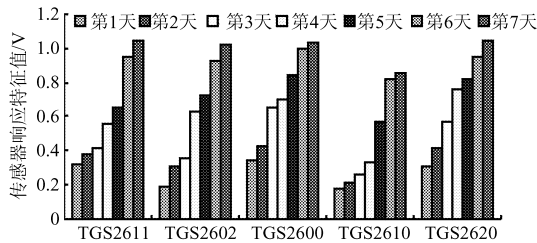


图 4 传感器响应特征值棒图

Fig. 4 Eigenvalue bar graph of sensors response

散发的气味都有响应,但响应特性却不同,这正是利用传感器交差敏感性的特点建立了嗅觉指纹。这与生物嗅觉细胞对气味的反应类似,生物嗅觉系统可以通过对多个嗅细胞产生嗅觉信号的整合来识别气味。

图 5 为同一型号气敏传感器在同一种气体环境下,有防护罩和无防护罩时的嗅觉响应曲线,从图中可以看出,有防护罩和无防护罩的传感器灵敏度不同,即有防护罩和无防护罩的传感器放在同一气味环境下,有味气体到达敏感元件的气味浓度不同,所以传感器响应相差较远。

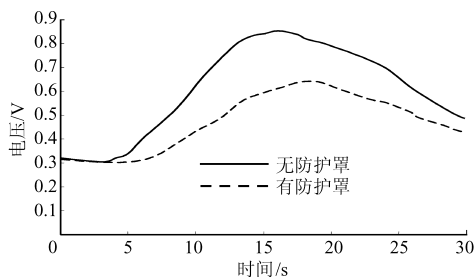


图 5 传感器有无防护罩响应曲线

Fig. 5 Response curves of sensors with or without shield

从图 4 传感器响应特征值可以看出,1~7 d 每个传感器都有反应,说明鼻道结构能使牛肉气味到达每个传感器的敏感元件处,从而使传感器产生电信号。这与生物产生嗅觉类似,嗅觉灵敏度与鼻道结构、嗅细胞在鼻道的位置有很大关系。只有气味分子达到嗅细胞才能产生嗅觉,到达嗅细胞的气味浓度越大,就越容易产生嗅觉。这也是不同生物其嗅觉灵敏度不同的主要原因之一。

为了比较训练样本数对识别的影响和 BP 网络与 SVM 识别率的差别以及识别率的稳定性,用相同训练样本(7 组和 14 组)数据和相同测试样本(133 组和 126 组)数据分别对两种算法进行 100 次

重复训练和测试识别实验,识别结果如表 1 所示。100 次重复识别实验中,训练样本为 7 组时,BP 算法平均识别率 72.83%,SVM 算法识别率 96.24%,高于 BP 算法平均识别率 23 个百分点。训练样本 14 组时,BP 算法平均识别率 85.66%,SVM 算法识别率 99.25%,高于 BP 算法平均识别率 14 个百分点。训练样本数从 7 组增加到 14 组,BP 识别率增加 13 个百分点,SVM 识别率增加 3 个百分点。分析表明 SVM 算法小样本识别率远远高于 BP 算法,且样本数越少 SVM 算法比 BP 算法越有优势。

表 1 SVM 算法和 BP 算法的识别结果

Tab. 1 Identification results of SVM and BP algorithm

训练样本数/组	BP 算法			SVM 算法
	最高识别率	最低识别率	平均识别率	识别率
7	90.23	51.88	72.83	96.24
14	96.99	63.16	85.66	99.25

训练样本为 7 组时,BP 算法最高识别率 90.23%,最低识别率 51.88%,最高识别率与最低识别率相差 38 个百分点。训练样本 14 组时,BP 算法最高识别率 96.99%,最低识别率 63.16%,最高识别率与最低识别率相差 34 个百分点。分析表明 BP 网络识别率不稳定,离散性较大,而 SVM 算法识别率高且稳定。

## 4 结论

(1) 所选传感器 TGS2611、TGS2602、TGS2600、TGS2610、TGS2620 组成的阵列,满足检测牛肉新鲜度要求。

(2) 改进后的无防护罩传感器对气味的敏感程度大大提高。

(3) 仿生嗅觉鼻道结构设计合理,具有较高的嗅觉灵敏度。

(4) 电子鼻系统 SVM 识别算法识别率高、稳定,适合于牛肉新鲜度检测,优于其他识别算法。

(5) 电子鼻系统对储藏 7 d 不同新鲜度的牛肉识别率达到 99.25%。

## 参 考 文 献

- 胡卫军,王平,杨成忠,等. 仿生光学人工鼻及其呼吸气体检测的实验研究[J]. 中国生物医学工程学报,2006,25(1): 51~56.  
Hu Weijun, Wang Ping, Yang Chengzhong, et al. The experimental research on mimetic optical artificial nose sensor system and detection of respiration odor[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2006, 25(1):51~56. (in Chinese)
- Shi Zhibiao, Yu Tao, Zhao Qun. The algorithm comparison of the electronic nose in identifying the liquor[J]. Journal of

- Bionic Engineering, 2008, 5(3):253~257. (in Chinese)
- 3 石志标,左春桢,李宇彤. 鼻腔结构影响人体嗅觉反应的数值模拟[J]. 生物物理学报, 2004, 20(4):329~333.  
Shi Zhibiao, Zuo Chuncheng, Li Yutong. Simulation on the human olfaction reacts affected by nasal cavity structure[J]. Acta Biophysica Sinica, 2004, 20(4):329~333. (in Chinese)
  - 4 岑涌,钟萍,罗林开. 基于GA-SVM的企业财务困境预测[J]. 计算机工程, 2008, 34(7):223~225.  
Cen Yong, Zhong Ping, Luo Linkai. Prediction financial distress of firms based on GA-SVM[J]. Computer Engineering, 2008, 34(7):223~225. (in Chinese)
  - 5 周平,刘俭英,文友先. 基于支持向量机的鸭蛋破损检测技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1):195~197,204.
  - 6 孙永海,赵锡维,鲜于建川. 基于计算机视觉的冷却牛肉新鲜度评价方法[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1):104~107.  
Sun Yonghai, Zhao Xiwei, Xianyu Jianchuan. Appraising method for freshness of chilled beef based on computer vision technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1):104~107. (in Chinese)
  - 7 张军,李小昱,王为,等. 电子鼻检测鲢鱼新鲜度的试验参数优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4):129~132,142.  
Zhang Jun, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Optimization of experiment parameters for using electronic nose to evaluate freshness of silver carp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):129~132,142. (in Chinese)
  - 8 Natale C Di, Macagnano A, Amico A D, et al. An electronic nose for food analysis[J]. Sensors and Actuators B, 1997, 44(1~3): 521~526.
  - 9 滕炯华,袁朝辉,王磊. 基于气敏传感器阵列的牛肉新鲜度识别方法研究[J]. 测控技术, 2002, 21(7):1~3.  
Teng Jionghua, Yuan Zhaohui, Wang Lei. Study degree of beef freshness with identification method based on gas sensitive sensors array[J]. Measurement & Control Technology, 2002, 21(7):1~3. (in Chinese)
  - 10 孙永海,孙钟雷,李宇. 基于遗传组合网络的肉用人工嗅觉系统[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(5):1 209~1 213.  
Sun Yonghai, Sun Zhonglei, Li Yu. Meat artificial olfactory system based on composite GA-RBF network[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(5):1 209~1 213. (in Chinese)
  - 11 柴春祥,杜利农,范建伟,等. 电子鼻检测猪肉新鲜度的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(9):444~447.  
Chai Chunxiang, Du Linong, Fan Jianwei, et al. Identification of pork freshness by electronic nose[J]. Food Science, 2008, 29(9):444~447. (in Chinese)
- 

(上接第 179 页)

- 8 冯斌,汪懋华. 基于计算机视觉的水果大小检测方法[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1):73~75.  
Feng Bin, Wang Maohua. Detecting method of fruit size based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1):73~75. (in Chinese)
- 9 应义斌,成芳,马俊福. 基于最小矩形法的柑桔横径实时检测方法[J]. 生物数学学报, 2004, 19(3):352~356.  
Ying Yibin, Cheng Fang, Ma Junfu. Real-time size inspection of citrus with minimum enclosing rectangle method[J]. Journal of Biomathematics, 2004, 19(3): 352~356. (in Chinese)
- 10 林开颜,吴军辉,徐立鸿. 基于计算机视觉技术的水果形状分级方法[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6):71~74.  
Lin Kaiyan, Wu Junhui, Xu Lihong. Separation approach for shape grading of fruits using computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6):71~74. (in Chinese)