

分类号: TP2  
学号: 20222009027

密级: 公开  
单位代码: 10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于电子鼻技术的密集烤房烟叶烘烤状态检测 研究

学位申请人	杨晨羲
指导教师	朱荣光
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	机械工程
研究方向	机械电子工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子  
2025年5月

分类号：  
学号：20222009027

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于电子鼻技术的密集烤房烟叶烘烤状态检测 研究

学位申请人	杨晨羲
指导教师	朱荣光 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	机械工程
研究方向	机械电子工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子  
2025年5月

**Research on the detection of tobacco curing state in bulk curing barn  
based on electronic nose technology**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

By

**Yang Chen-yi**

**(Mechatronic Engineering)**

Dissertation Supervisor: Prof. Zhu Rong-guang

May,2025



# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：杨晨柔

时间：2025年5月18日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：杨晨柔

时间：2025年5月18日

导师签名：杨晨柔

时间：2025年5月18日

## 摘要

烘烤作为决定烤烟生产加工质量的关键环节，其工艺参数的调节依赖于对烟叶烘烤状态的准确评估。在生产实践中，一般根据烘烤状态的变化程度，将烟叶烘烤状态划分变黄前期、变黄后期、定色前期、定色后期和干筋期。目前，烟叶烘烤状态仍依靠人工主观判断，检测效率较低且容易出现烟叶状态与工艺不匹配的现象。因此，需要寻找一种快速检测烟叶烘烤状态的技术手段，为烟叶烘烤的智能化调控提供技术支撑。气相色谱-质谱 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) 分析表明，不同烘烤状态下烤房气体组分存在差异，利用电子鼻获取烤房气体组分的变化信号，可实现对烟叶烘烤状态的判别。因此，本研究提出利用电子鼻结合机器学习和深度学习算法识别密集烤房烟叶烘烤状态，以期实现快速、准确的烟叶烘烤状态判别。首先，开发密集烤房烟叶烘烤状态检测电子鼻装置，并基于人体鼻腔结构特点改进气室。然后，利用该装置采集不同烘烤状态下的烟叶信息，分别构建基于时频特征的机器学习模型和基于注意力机制的深度学习模型，并优选出最佳烟叶烘烤状态检测模型。最后，利用 Matlab App Designer 结合最优模型开发检测软件，并验证其检测性能。主要研究内容包括：

(1) 设计开发用于密集烤房烟叶烘烤状态检测的电子鼻装置。确定密集烤房烟叶烘烤状态检测电子鼻装置的工作流程和总体设计方案，并根据检测需求对电子鼻装置的关键模块进行设计与选型。主要包括气敏传感器的选型、仿生气室的设计、检测气路的设计与选型以及主控模块的设计。并根据设计要求完成装置搭建，实现电子鼻信息的采集与保存。

(2) 基于因素试验和流体仿真技术进行仿生气室参数优化。以仿生气室为研究对象，结合单因素试验确定影响传感器表面流速的气室参数，即传感器表面间隙、入口流量、入口间隙、出口间隙和导流曲线。然后，设计五因素四水平的正交试验 L16 ( $4^5$ )，以传感器表面流速最大为目标进行极差分析，确定气室参数的最优组合方案为传感器表面间隙 3 mm，入口流量 2.5 L/min，入口间隙 3 mm，出口间隙 5 mm，导流曲线为二次曲线。

(3) 基于机器学习结合时频特征验证电子鼻检测烟叶烘烤状态效果。利用电子鼻装置采集不同烘烤状态下烟叶气味信息，经基线矫正后进行信号分析和时频特征提取。采用 DT-RFE、PCA、PSO 等特征降维方法对特征进行降维，并利用 SHAP 对特征重要性进行解释。然后，结合单一时频特征和机器学习方法建立烟叶烘烤状态检测模型，通过比选得到 DT-RFE-RF 模型。随后，将时频融合特征输入优选模型，模型测试集准确率为 94.44%，证明利用电子鼻检测烟叶烘烤状态可行。

(4) 利用深度学习结合注意力机制建立烟叶烘烤状态检测模型。首先基于预处理后的电子鼻数据建立多种检测烟叶烘烤状态的深度学习模型，优选得到 1DCNN-GRU 模型。进一步引入 DCDPA 注意力机制对其进行改进，并与自注意力机制和原始模型进行比较，得到 1DCNN-GRU-DCDPA 模

型效果最佳，测试集准确率为 96.30%，精准率为 96.53%，召回率为 96.35%，F1-score 为 96.39%。

(5) 烟叶烘烤状态检测软件开发。以上文优选出的烟叶烘烤状态检测模型为基础，依靠开发工具 Matlab App Designer 完成检测软件的开发和图形化设计。主要包括电子鼻数据读取、数据预处理、特征提取、特征降维和模型调用与检测等功能。结合测试数据对软件各功能模块进行测试，测试结果表明，优选的深度学习模型对烟叶烘烤状态检测的准确率为 92.00%。

**关键词：**无损检测；电子鼻；烟叶；烘烤状态

## Abstract

As a key link to determine the quality of flue-cured tobacco production, the adjustment of roasting parameters depends on the accurate evaluation of the state of tobacco curing. In the production practice, according to the change degree of curing state, the curing state of tobacco leaves is generally divided into early yellowing, late yellowing, early fixed color, late fixed color and dry gluten stage. At present, the curing state of tobacco leaves still depends on the subjective judgment of workers, and it is easy to appear the phenomenon of process mismatch, which will affect the processing quality of tobacco leaves. Therefore, it is necessary to find a technical means to quickly detect the curing state of tobacco leaves and provide technical support for the intelligent control of tobacco leaves. GC-MS analysis showed that there were differences in the gas components of the curing barn under different curing conditions. The electronic nose was used to obtain the change signal of the gas components of the curing barn, which could realize the discrimination of the curing state of tobacco leaves. In this study, electronic nose technology combined with machine learning and deep learning algorithm was proposed to identify the curing state of tobacco leaves in dense curing rooms, in order to achieve rapid and accurate identification of tobacco curing state. Firstly, an electronic nose device for tobacco curing state detection in dense curing room was developed, and the air chamber was improved according to the structure characteristics of human nasal cavity. Then, the device is used to collect tobacco leaf information under different baking states, and a machine learning model based on time-frequency features and a deep learning model based on attention mechanism are constructed respectively, and the best tobacco leaf baking state detection model is selected. Finally, Matlab App Designer is used to develop the detection software combined with the optimal model, and its performance is verified. The main research contents include:

(1) An electronic nose device for detecting the curing state of tobacco leaves in bulk curing barn was designed and developed. The overall design scheme and main workflow of the electronic nose device for detecting the tobacco curing stage of the bulk curing barn were determined, and the key modules of the electronic nose device were designed and selected according to the detection requirements. It mainly includes the selection of gas sensor, the design of bionic gas chamber, the design and selection of detection gas path, and the design of main control module and circuit. At the same time, the device is built according to the design requirements, and the main control program is developed to realize the collection and preservation of electronic nose information.

(2) Based on factor test and fluid simulation technology, the parameters of bionic gas chamber are optimized. Taking the bionic air chamber as the research object, combined with the single factor test, the air chamber parameters that affect the change of the flow velocity on the surface of the sensor are selected,

namely the sensor surface clearance, inlet flow, inlet clearance, outlet clearance and diversion curve. Then, the orthogonal test L16 (4<sup>5</sup>) with five factors and four levels was designed, and the range analysis was carried out with the maximum flow rate of the sensor surface as the goal. The optimal combination scheme of the gas chamber parameters was determined as the sensor surface gap of 3 mm, the inlet flow rate of 2.5 L/min, the inlet gap of 3 mm, the outlet gap of 5 mm, and the diversion curve was a quadratic curve.

(3) Based on machine learning combined with feature engineering, the effect of electronic nose in detecting tobacco curing stage was verified. The electronic nose device was used to collect the odor information of tobacco leaves under different curing stages, and the signal analysis and time-frequency feature extraction were carried out after baseline correction. DT-RFE, PCA, PSO and other feature dimension reduction methods were used to reduce the dimension of features, and SHAP was used to explain the importance of features. Combined with machine learning methods, a tobacco curing stage detection model was established. The DT-RFE-RF model was obtained by comparison and selection, and then the time domain and frequency domain features were fused. Compared with the original fusion features, the accuracy of the model test set was 94.44%, which proved that the electronic nose technology was feasible to detect the tobacco curing stage.

(4) The detection model of tobacco curing stage was established by using deep learning method combined with attention mechanism. Firstly, based on the preprocessed electronic nose data, a variety of deep learning models for detecting the curing stage of tobacco leaves were established. Through comparison and selection, the 1DCNN-GRU model was selected, and the accuracy of the test set was 90.74%. The DCDPA attention mechanism is further introduced to improve the 1DCNN-GRU model. Compared with the self-attention mechanism and the original model, the 1DCNN-GRU-DCDPA model has the best effect. The accuracy rate of the test set is 96.30%, the precision rate is 96.53%, the recall rate is 96.35%, and the F1-score is 96.39%.

(5) Tobacco curing stage detection software development. Based on the detection model of tobacco curing stage optimized in (4), the development and verification of the detection software of tobacco curing stage in bulk curing barn were carried out. Relying on the development tools Matlab and Matlab App Designer to complete the development and graphical design of the detection software. It mainly includes electronic nose data reading, data preprocessing, feature extraction, feature dimension reduction, model call and detection. Through the test sample data, the function of each module of the software function is tested and its detection performance is tested. The test results show that the accuracy of the deep learning model for the detection of tobacco leaf curing stage is 92.00%.

**Key words:** Nondestructive detection; Electronic nose; Tobacco; Curing state

# 目录

摘要.....	I
<b>Abstract</b> .....	III
目录.....	V
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 无损检测技术用于烘烤状态检测的研究现状.....	2
1.2.2 电子鼻气室设计研究现状.....	4
1.2.3 基于电子鼻技术的分类方法研究现状.....	5
1.3 研究目标与内容.....	6
1.3.1 研究目标.....	6
1.3.2 研究内容.....	7
1.3.3 技术路线.....	8
1.4 本章小结.....	9
第2章 密集烤房烟叶烘烤状态电子鼻检测装置硬件设计.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 电子鼻装置总体设计.....	10
2.2.1 工作需求分析.....	10
2.2.2 硬件总体设计.....	11
2.3 气敏传感器阵列选型.....	11
2.3.1 不同烘烤状态烤房气体成分分析.....	11
2.3.2 气敏传感器选型.....	13
2.4 电子鼻气室仿生结构设计.....	14
2.4.1 仿生气室设计.....	14
2.4.2 仿生气室对比分析.....	16
2.5 电子鼻检测气路的设计与选型.....	18
2.5.1 检测气路设计.....	18
2.5.2 微型气泵的选型.....	19
2.5.3 气流控制单元选型.....	20

2.5.4	气流净化单元选型 .....	20
2.6	电子鼻主控模块 .....	21
2.7	电子鼻总体结构 .....	22
2.8	本章小结 .....	23
第 3 章	密集烤房烟叶烘烤状态检测电子鼻仿生气室参数优化 .....	24
3.1	引言 .....	24
3.2	电子鼻气室结构单因素仿真 .....	24
3.2.1	单因素试验设计 .....	25
3.2.2	不同结构气室模型处理 .....	26
3.2.3	不同结构气室网格划分 .....	26
3.2.4	单因素试验结果与分析 .....	28
3.3	电子鼻气室仿生结构多因素仿真 .....	31
3.3.1	正交试验原理 .....	32
3.3.2	多因素试验设计 .....	32
3.3.3	不同参数气室预处理 .....	33
3.3.4	多因素试验结果与分析 .....	34
3.4	本章小结 .....	36
第 4 章	基于机器学习结合时频特征的烟叶烘烤状态识别模型构建 .....	37
4.1	引言 .....	37
4.2	样品采集与电子鼻数据采集 .....	37
4.2.1	烟叶烘烤状态判别样品获取 .....	37
4.2.2	密集烤房气体样本电子鼻信息采集 .....	38
4.3	电子鼻数据处理与数据集划分 .....	39
4.3.1	电子鼻数据预处理 .....	39
4.3.2	电子鼻时频特征提取与降维 .....	39
4.3.3	样品数据集划分 .....	41
4.4	建模方法与评价指标 .....	41
4.4.1	分类识别机器学习方法 .....	41
4.4.2	分类识别模型评价标准 .....	42
4.5	结果与讨论 .....	43
4.5.1	烟叶烘烤电子鼻信号分析 .....	43
4.5.2	电子鼻时域和频域特征的降维 .....	44
4.5.3	基于频域和时域特征的烟叶烘烤状态分类模型建立 .....	47
4.5.4	基于融合特征的烟叶烘烤状态检测模型比较 .....	51

4.6 本章小结 .....	52
第 5 章 基于深度学习结合注意力机制的烟叶烘烤状态识别模型构建 .....	53
5.1 引言 .....	53
5.2 电子鼻数据采集与处理 .....	53
5.2.1 电子鼻数据采集 .....	53
5.2.2 电子鼻数据处理 .....	53
5.3 深度学习方法与评价指标 .....	53
5.3.1 LSTM 检测模型构建 .....	54
5.3.2 1DCNN 检测模型构建 .....	54
5.3.3 1DCNN-GRU 检测模型构建 .....	55
5.3.4 1DCNN-GRU-DCDPA 模型构建 .....	57
5.4 结果与讨论 .....	58
5.4.1 基于不同深度学习的烟叶烘烤状态分类模型对比 .....	59
5.4.2 基于 DCDPA 注意力机制的烟叶烘烤状态分类模型比较 .....	61
5.5 本章小结 .....	63
第 6 章 基于电子鼻技术的烟叶烘烤状态检测软件设计与验证 .....	64
6.1 引言 .....	64
6.2 烟叶烘烤状态检测软件设计 .....	64
6.2.1 软件设计需求分析 .....	64
6.2.2 软件开发工具 .....	64
6.2.3 软件功能需求分析 .....	65
6.2.4 软件检测功能设计与实现 .....	66
6.3 烟叶烘烤状态检测软件测试 .....	67
6.3.1 数据读取与预处理功能测试 .....	67
6.3.2 电子鼻特征提取与降维功能测试 .....	68
6.3.3 模型选择与状态检测功能测试 .....	69
6.4 烟叶烘烤状态检测软件性能评估 .....	69
6.5 本章小结 .....	70
第 7 章 结论与展望 .....	71
7.1 结论 .....	71
7.2 展望 .....	72
参考文献 .....	73
致谢 .....	78
作者简介 .....	79

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

烟草作为一种重要的嗜好性作物，每年可为我国创造万亿余元的税利收入，在我国经济领域占据重要地位。根据加工方式差异，烟草可分为烤烟、晾烟和晒烟三大类，受国内消费水平提升和烟叶收购价格变化影响，烤烟烟叶的产量逐年上升，已发展成主导品类。统计数据显示，2023年全国烟叶年产量229.67万吨，其中烤烟烟叶产量219.12万吨，占全国烟叶年产量的95.41%<sup>[1]</sup>，充分彰显其主导地位。2015-2023年全国烟叶及烤烟年产量如图1-1所示。

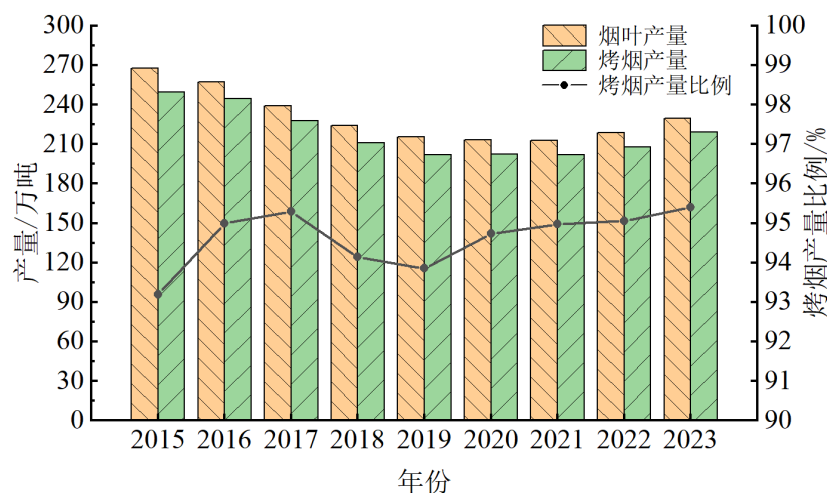


图 1-1 2015-2023 年全国烟叶和烤烟产量

Fig.1-1 The annual output of tobacco leaves and flue-cured tobacco in China from 2015 to 2023

烘烤作为烤烟生产加工的关键环节，其目标是实现烟叶脱水干燥的物理过程和内部生理生化变化过程的协调统一<sup>[2]</sup>。随着装烟密度大、便于自动化控制的密集烤房的推广应用，烟叶烘烤已逐步实现基于预设工艺曲线的程序化作业。因福建翠碧一号烟叶结构致密、烘烤特性差<sup>[3]</sup>，需要对《GB/T 23219-2008 烤烟烘烤技术规程》<sup>[4]</sup>规定的三段式烘烤工艺做适应性调整，结合《福建翠碧一号烘烤技术规范》和烟技员操作要求，将翠碧一号的烘烤状态进一步细分为5个阶段，即变黄前期、变黄后期、定色前期、定色后期和干筋期。各烘烤状态所需温度参数及其持续时间存在显著差异，精准判别烟叶烘烤状态已成为保障烟叶烘烤品质的先决条件。但目前烟叶烘烤状态仍依靠人工判断，存在劳动强度大、主观性强等问题，导致烟叶实时状态与工艺曲线难以动态匹配，影响烟叶中

致香物质的转化与累积，进而影响烤后烟叶质量和农户收益。因此，需要寻找一种快速检测烟叶烘烤状态的技术手段，为烟叶烘烤工艺的智能化调控提供技术支持。

目前，烟叶及其他烘烤制品的状态检测方法主要包括：基于外在表征的感官鉴定技术、气相色谱技术<sup>[5]</sup>、机器视觉技术<sup>[6]</sup>、近红外光谱技术<sup>[7]</sup>和高光谱技术<sup>[8][9]</sup>等。基于外在表征的感官鉴定技术极其依赖经验，而准确判断则依靠实验仪器和理化分析方法，但这些技术手段依靠的设备需要稳定的环境，且操作复杂、检测效率低，不利于推广应用。

电子鼻作为一种模拟生物嗅觉工作原理的新颖检测技术，具有快速响应、无损分析、灵敏度高等特点，广泛应用于农产品品质的快速分析与检测<sup>[10]</sup>。尤其在烟叶加工领域，该技术通过捕捉气体指纹信息，为烟叶分级和烘烤过程检测提供了新的解决方案。现有电子鼻系统主要由气敏传感器阵列、反应气室、检测气路和主控单元组成，为减少高湿、多尘等环境因素的干扰，需要对其各单元进行合理设计。

本文为实现密集烤房中烟叶烘烤状态的快速检测，以翠碧一号烟叶为研究对象，将仿生技术和硬件设计相结合，开发用于检测密集烤房烟叶烘烤状态的电子鼻装置。随后，基于特征工程，得到代表不同烟叶烘烤状态的时频特征子集，并以此建立机器学习模型，验证电子鼻检测烟叶烘烤状态的效果。接着，利用深度学习进行训练，结合注意力机制，得到用于烟叶烘烤状态检测的方法与模型，并开发密集烤房烟叶烘烤状态检测的应用软件，为烟叶烘烤状态的快速检测提供技术支持和解决方案。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 无损检测技术用于烘烤状态检测的研究现状

#### (1) 机器视觉技术

在不同烘烤状态下，烘烤物料会呈现出不同的外在表征，通过机器视觉技术，可实时提取物料表面的颜色、纹理等特征信息，结合检测模型可精准判断烘烤状态。杨海青等<sup>[11]</sup>基于烟叶不同烘烤状态下的图像构建了一种改进的残差神经网络算法，结果显示对原叶期、渐黄期、定色前期、定色期和干筋期的平均预测准确率可达 98%。Miguel Condori 等<sup>[12]</sup>搭建一套烘烤炉内烟叶图像采集系统，采用 HSV 色彩空间的图像处理方式，确定 H 通道的时间导数近似为零时为变黄期的稳定条件，S 通道标准差的时间导数近似为零时为定色期和干筋期的稳定条件，实验结果表明，基于图像控制的烘烤炉相较传统炉，节约了 20% 的烘烤时间。李增盛等<sup>[13]</sup>通过提取烟叶烘烤图像中的纹理特征和颜色特征，利用相关性分析进行特征筛选，将筛选出与烟叶烘烤状态相关性最强的颜色特征和纹理特征输入机器学习算法，实现了 10 烘烤状态的识别与分析，测试集准确率为 93.27%。

闫九福等<sup>[14]</sup>利用 CNN 网络提取烟叶烘烤过程图像中的颜色和纹理特征, 结合 LSTM 网络建立分类模型对 10 个烟叶烘烤状态进行识别, 验证集准确率为 98.70%。邢玉清等<sup>[15]</sup>将烟叶烘烤图像中的颜色、纹理和温湿度特征输入小波核 ELM, 实现了 6 烘烤状态的识别。Zhao 等<sup>[16]</sup>设计一款烟叶图像采集装置, 并根据技术规范选择 10 阶段烘烤工艺, 结合轻量化深度神经网络实现了烟叶烘烤状态的判别, 测试集准确率为 90.35%。

机器视觉技术结构简单、搭建方便, 能获取外观的颜色、纹理等特征信息, 但其视野有限, 且需要留有一定的安装距离, 影响烤房的空间利用率。

### (2) 近红外光谱技术

烟叶烘烤状态的改变与其内部水分、淀粉和可溶性糖等的动态变化密切相关。通过获取样品中 O-H 键、C-O 键和 C-H 键的特征光谱响应, 即可实现对上述关键成分的定量分析, 进而反映烟叶烘烤进程的变化。Wei 等<sup>[17]</sup>结合近红外光谱和深度学习技术, 搭建烘烤中烟叶水分、淀粉、蛋白质和可溶性糖的在线检测系统。结果显示, 对比偏小二乘法 (PLS) 和支持向量机 (SVM) 等传统模型, CNN 的预测性能更优, RP 最高, RMSEP 最低, 具有良好的预测能力, 可为烟叶工艺决策提供参考。宾俊等<sup>[18]</sup>结合自适应进化极限学习机 (SaE-ELM) 和近红外光谱技术, 对烟叶烘烤过程中的含水率、叶绿素和淀粉含量实施动态监测, 模型预测结果表现出极强相关性,  $R^2$  均大于 0.90, 能有效预测烟叶烘烤中物质的变化规律, 可为烟叶烘烤状态调整提供参考。

近红外光谱技术能够检测烟叶内部成分的变化情况, 但烟叶在烘烤过程会因失水而出现皱缩, 光谱采集距离不固定, 难以保证信号采集质量。

### (3) 电子鼻技术

Song 等<sup>[19]</sup>利用电子鼻技术结合气相色谱-质谱法 (GC-MS) 检测铁观音的烘烤过程, 电子鼻和 GC-MS 结果表明不同烘烤程度茶叶的挥发性成分存在显著差异, 电子鼻结合随机森林分类模型, 对不同烘烤程度茶叶分类的准确率大于 98.44%。向昊等<sup>[20]</sup>结合电子鼻和 GC-MS 技术对不同烘烤温度和时间下的铁观音状态进行检测, 利用偏小二乘回归分析揭示了传感器与香气物质的内在关系, 结合主成分分析、费舍尔判别及智能算法可实现对不同烘烤条件和烘烤程度茶叶的识别。Radi 等<sup>[21]</sup>利用自制电子鼻对烘烤过程中咖啡的香气进行检测, 通过记录烘烤过程中的温湿度数据, 将咖啡粒颜色与比色计测量, 得到咖啡的气味曲线是咖啡颜色的函数, 利用 PCA 分析电子鼻获取的咖啡香气, 可以得到烘烤初始和最终阶段的特异气味曲线。Santina Romani 等<sup>[22]</sup>利用 PCA 对电子鼻获取的咖啡气味数据进行降维, 比较多层感知器和一般回归神经网络两种人工神经网络方法对咖啡烘烤程度的预测, 结果显示, ANN 与电子鼻的耦合为咖啡烘烤自动化提供可能, GRNN 的预测具有更高的可靠性。王莹等<sup>[23]</sup>利用电子鼻技术结合顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (HS-SPME/GC-MS) 对兴隆咖啡烘烤过程中的挥发性物质进行研究, 结果显示, 电子鼻能分辨出不同烘烤程度咖啡香气的差异, 且传感器阵列中的 4 个传感

器对 8 种不同烘烤程度的咖啡的响应值有明显差异性。

利用电子鼻技术对烘烤过程中的挥发性物质进行检测,结合模型可以实现烘烤状态的判别,但利用电子鼻检测烟叶烘烤状态的研究鲜有报道。

综上所述,利用无损技术检测烘烤状态具有良好的检测效果,但密集烤房具有装烟密集度大、环境封闭等特点,难以为机器视觉和近红外光谱技术提供足够的工作空间与合适的环境,而电子鼻技术利用气体信息反映待测对象的烘烤变化情况,无需对原有烤房做任何改动,对工作环境无较高要求,更适用烟叶烘烤的实际情况。

## 1.2.2 电子鼻气室设计研究现状

### (1) 均匀流场气室设计

均匀流场设计的目标是让电子鼻中的每个传感器能同时接受相同浓度和速度的气流冲刷,以消除气味浓度和传感器位置之间的联系。Scott 等<sup>[24]</sup>利用流体力学分析技术对传感器位置和腔室结构进行优化,并通过设计分流结构,使各个传感器的响应保持一致。Qian 等<sup>[25]</sup>将传统电子鼻技术与挥发性有机化合物(VOCs)富集技术相结合,设计一种新颖预浓缩系统和保形传感器室,通过 FLUENT 仿真分析验证腔室的连通性和扩散性。Lorena Villarreal 等<sup>[26]</sup>在原始多边形气室基础上,添加换气装置,实现气室内传感器均能分配到等流量、等浓度的待测气体。

均匀流场设计通过引流结构,可以保证传感器均匀接触待测气体,但复杂的引流机构会造成较大的速度损失,影响检测效率。

### (2) 仿生气室设计

Chang 等<sup>[27]</sup>基于成人鼻腔结构特征和内部流动特性,设计一种前小后大的锥形仿生气室系统,用以检测马铃薯块茎感染软腐病挥发性物质的变化,其中气室设计时利用正交试验确定了气室的入口直径、腔室直径和高度三个结构参数;Wang 等<sup>[28]</sup>基于哺乳动物鼻结构特点,设计一款适用于酒类识别的手持式电子鼻仿生气室,通过仿真模拟和试验,在白酒识别中,仿生气室识别率高于普通气室。杜文斌等<sup>[29]</sup>设计一款用于检测草莓农残的仿生电子鼻气室,整体呈长方体,具有两个进气口和一个出气口,利用负压使气体充满整个腔室,并结合 CFD 技术验证气室结构。Shi 等<sup>[30]</sup>设计一款大腔室小入口的仿生气室用于饲养环境监测,气室内部中空,传感器前后布置,气流经多孔 PCB 板继续向后流动。

仿生气室是基于生物鼻腔结构,结合待测对象特点,设计的一种新颖气室,具有良好的气体流动性和检测效率。

### (3) 对称气室设计

Viccione 等<sup>[31]</sup>设计一款径向对称的电子鼻气室,传感器均匀安置在气室外侧,通过