

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.11.045

融合电子鼻和视觉技术的鸡肉新鲜度检测装置研究

李玉花 史翰卿 熊赟葳 余思懿 王晨阳 邹修国

(南京农业大学人工智能学院, 南京 210031)

摘要:为实现鸡肉新鲜度的快速准确检测,设计了一种基于电子鼻和视觉数据融合的一体化检测装置。装置由控制系统、视觉系统和电子鼻系统3部分组成,可同时通过电子鼻传感器阵列检测鸡肉散发的气体浓度并由摄像机采集鸡肉视觉图像,控制板传输数据至 Jetson Nano 上位机进行特征提取、融合与分析。由该装置获取不同新鲜度鸡肉样本的气味和图像数据,采用主成分分析方法进行降维处理,再基于支持向量机建立鸡肉新鲜度分级模型,准确率可达98.7%。该装置具有准确率高、便携和稳定性强等特点,可为肉品新鲜度检测提供技术支持。

关键词: 鸡肉新鲜度; 检测装置; 电子鼻; 机器视觉; 数据融合

中图分类号: TP23

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)11-0433-08

OSID:



Research of Chicken Freshness Detection Device Based on Electronic Nose and Vision Technology

LI Yuhua SHI Hanqing XIONG Yunwei YU Siyi WANG Chenyang ZOU Xiuguo

(College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to realize the fast and accurate detection of chicken freshness, an integrated detection device based on electronic nose and vision technology was designed. The structure of the device was divided into three parts, including the control system, the vision system, and the electronic nose system. It simultaneously detected the concentration of gas emitted from chicken samples through the sensor array of the electronic nose, and obtained the visual images of chicken samples by the camera. The gas concentration data were firstly transmitted from the control board to the Jetson Nano board, and then was fused with the visual images for feature extraction and further analysis. Computational fluid dynamics techniques were used to simulate the velocity cloud and velocity vector diagrams of the device under suction conditions to verify the feasibility of gas flow. Based on the gas concentration and image data of chicken samples of different freshness obtained by the device, principal component analysis method was adopted for dimensionality reduction, and chicken freshness grading model was established using support vector machine method with an accuracy rate of 98.7%. The device has the characteristics of high accuracy, portability and stability, which can provide technical support for meat freshness detection.

Key words: chicken freshness; detection device; electronic nose; machine vision; data fusion

0 引言

鸡胸肉在生产与运输过程中,由于温度、酶和微生物等因素的影响,新鲜度会随着时间的推移不断降低,产生不良风味甚至腐败变质。食用不新鲜或

腐败变质肉会损害身体健康^[1],因此肉类的品质评价、等级标注及新鲜度评级检测对于保障食品安全具有重要意义。

早期鸡肉新鲜度检测方法主要分为两类:感官评测法或者利用理化和微生物分析方法测定 pH 值

收稿日期: 2022-07-03 修回日期: 2022-08-24

基金项目: 江苏省国际科技合作项目(BZ2021022)、江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ202001)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(21)3058)

作者简介: 李玉花(1987—),女,讲师,博士,主要从事动物表型及智能养殖技术(装置)研究,E-mail: lyhresearch@njau.edu.cn

通信作者: 邹修国(1979—),男,副教授,博士,主要从事动物表型及智能养殖技术(装置)研究,E-mail: zouxiuguo@njau.edu.cn

以及总挥发性碱性氮(TVB-N)、三甲胺(TMA)和生物胺含量等^[2]。前者受主观意识和经验知识影响大,后者操作繁琐、速度慢、具有破坏性。随着检测仪器技术的发展,目前已有许多快速无损检测技术出现,如计算机视觉、高光谱成像、计算机断层扫描(CT)和扫描磁共振成像(MRI)等。但计算机视觉方法易受光影变化影响,CT和MRI技术成本高且耗时长^[3],高光谱成像技术多局限于实验室研究^[4]。显然,设计多源感知信息融合装置更具优势,可缓解单一检测技术存在的缺陷。

电子鼻技术基于气体传感器阵列,模拟嗅觉系统,捕捉特征香气,通过气体浓度判断新鲜度等级,具有成本低、操作简单和精度高等优点^[5],一些学者进行了相关研究^[6-8]。但现阶段的电子鼻装置仍存在体积庞大、价格昂贵和采集时间较长等问题^[9]。视觉技术依据样本颜色、形状、大小和表面纹理等信息进行新鲜度检测^[10]。目前已有许多算法^[11-13]被提出,取得了较好的效果。

然而单项检测技术存在一定的局限性,单模态数据不能准确全面客观地评估肉类的新鲜度^[14]。电子鼻技术可检测芳香族化合物,但忽略了鸡肉的表面特征,且耗时较长。而视觉技术可提供肉类表面物理化学信息,却缺少对气味的描述,且易受光源影响。融合电子鼻和视觉技术将获得更为全面多元的多模态数据,从而提高结果的准确性和可靠性。本文设计一种基于视觉和电子鼻数据融合的鸡肉新鲜度检测装置,使用电子鼻传感器阵列采集鸡肉散发的气体浓度,同时通过视觉系统获取鸡肉图像信息,并使用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)^[15]对装置结构可行性进行仿真试验。

1 检测装置设计

1.1 装置整体结构及工作原理

装置融合了电子鼻系统和视觉系统,其整体结构如图1所示,能同时采集气体和视觉数据,并实时传输至上位机进行分析得出鸡肉新鲜度等级。

装置为上、中、下3层结构,上层放置上位机Jetson Nano接收数据,Jetson Nano为小型、低功率软硬一体开发板,支持定制图像分类与物体检测等模型的离线并行计算。中层为暗箱结构,内置摄像机、光源以及样本室。下层为电子鼻系统,包括气体传输模块、检测阵列以及NUCLEO-H7A3ZI控制板。装置内置可充电锂电池和可移动电源供电,便于替换与携带。装置外围尺寸(长×宽×高)为35 cm×30 cm×76 cm,整体结构如图2所示。

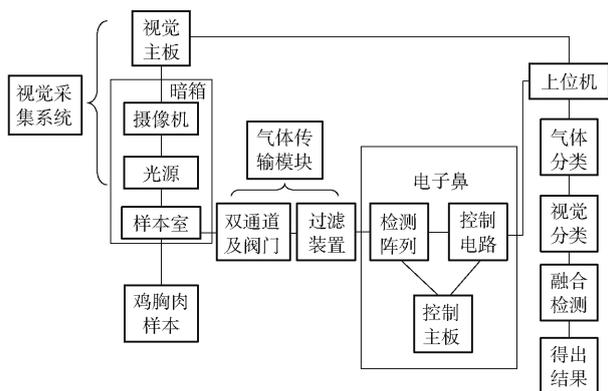


图1 装置整体结构框图

Fig. 1 Overall system block diagram

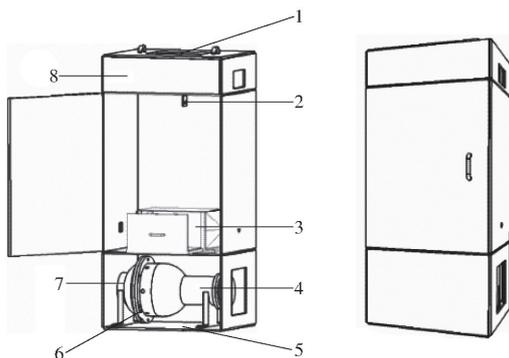


图2 装置三维结构示意图

Fig. 2 Overall device structure diagram

1. LCD 显示屏 2. 高清摄像头 3. 样本室以及环形光源
4. ES-3910 型气泵 5. NUCLEO-H7A3ZI 控制板 6. 传感器阵列
7. 电子鼻 8. Jetson Nano 上位机

1.2 硬件系统设计

1.2.1 样本室

设计了半封闭抽屉式样本室,尺寸26.0 cm×13.5 cm×11.2 cm,结构如图3所示。顶部材质为透明度91%的高透玻璃,以便箱体顶部相机可拍摄到清晰的鸡肉图像;其余部分采用黑色SLA(Stereolithography)树脂3D打印,减少光影对成像的影响。进、出气口采用棱台型结构便于气体流动,出气口通过软管连接气泵泵吸鸡肉散发的气体。

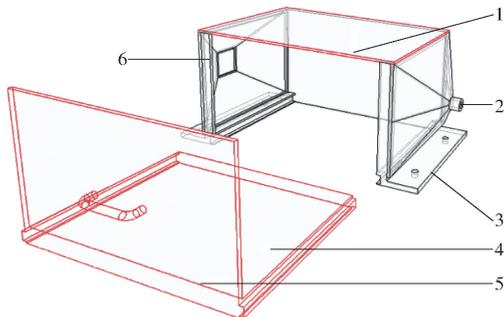


图3 样本室结构图

Fig. 3 Structure diagram of sample room

1. 高透玻璃 2. 出气口 3. 固定板 4. 样本盒放置处 5. 抽屉式结构 6. 进气口

1.2.2 电子鼻系统

电子鼻系统用来检测不同新鲜度等级鸡肉产生的气体浓度,其整体框架和三维结构如图 4、5 所示。主体采用 SLA 树脂 3D 打印,长度 32.4 cm,前圆柱直径 8.0 cm,后腔体直径 15.0 cm。外形为高度对称圆管型,以增强气体流动性,左侧为出气口,右侧为进气口,柱体内置有气流量为 15 L/min 的 ES-3910 型气泵吸取鸡肉产生的气体,通过软管和样本室相连接。软管中有双通道装置,通过阀门控制分别连接新鲜空气或样本室。传感器阵列为电子鼻的核心,其为高度对称的环形结构,嵌有 5 个半导体传感器,具体传感器型号如表 1^[16]所示。半导体传感器利用材料表面吸附及脱附气体分子引起半导体电导率的变化来检测气体^[17],检测精度受气体分子流动稳定程度影响,因此在左侧腔体内置有稳流板,以稳定气流流速。传感器阵列由 NUCLEO-H7A3ZI 控制,将电压数据通过 ADC 转换,利用蓝牙传输至上位机^[18]。

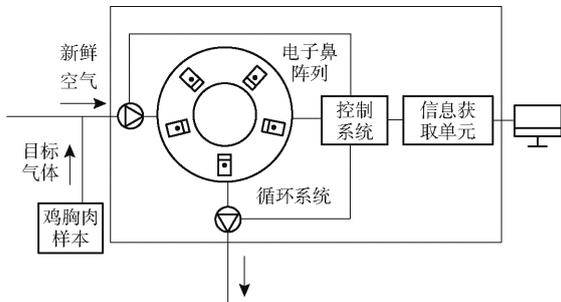


图 4 电子鼻框架图

Fig. 4 Block diagram of electronic nose

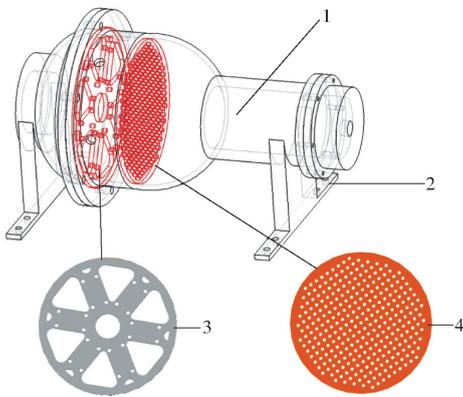


图 5 电子鼻三维结构图

Fig. 5 Structure diagram of electronic nose

1. ES-3910 型气泵 2. 固定结构 3. 传感器阵列 4. 稳流板

表 1 传感器列表

Tab. 1 List of sensors

传感器序号	检测的气体	型号	检测精度/%
Sensor 1	VOC、硫化氢、氨气	TGS2602	0.000 1 ~ 0.003 0
Sensor 2	硫化氢	MQ-136	0.005 ~ 0.500
Sensor 3	氨气	MQ-137	0.000 5 ~ 0.010 0
Sensor 4	氨气、硫化氢	MQ-135	0.003 ~ 0.030
Sensor 5	甲醛	MQ-138	0.005 ~ 0.100

1.2.3 视觉系统

视觉系统在装置第 2 层暗箱内,结构如图 6 所示。箱体内壁贴有黑色不透明的摄影布,以减少复杂背景的干扰。暗箱正面为门结构,可以通过把手便捷打开进行暗箱内部操作,关闭时内部形成封闭式整体,基本隔绝外界光源影响。选用 12 W 环形 LED 光源(外径 26 cm,内径 20 cm)安装于箱体顶部,使样本表面光照均匀。暗箱顶部置有 600 万像素海康威视 MV-CA060-10GC 型摄像机,镜头采用 MVL-HF1628M-6MP 型工厂自动化镜头,并安装与该镜头相适配的 CPL 偏振镜以减少反射光对成像的影响。相机属性设置为感光度 640,曝光时间 1/25 s,光圈 F1.6。镜头底部和样品之间的距离设定为 40 cm,图 7 为镜头焦距选择图。测试表明,在 22.11 mm 焦距下选择 40 cm 物距可获得清晰的图像。内置有 5 V 锂电池为摄像机供电。

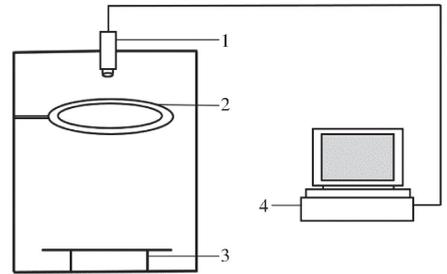


图 6 暗箱结构图

Fig. 6 Structure diagram of dark box

1. 摄像机 2. 环形光源 3. 样本室 4. 上位机

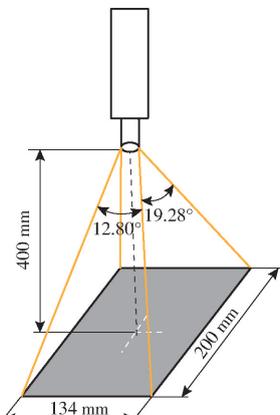


图 7 镜头焦距选择示意图

Fig. 7 Lens focal length selection diagram

1.3 软件设计

1.3.1 传感器数据传输

传感器阵列传输模拟数据至 NUCLEO-H7A3ZI 控制板,通过 ADC 转换为 5 个 16 位二进制数据,该数据转换电压公式为

$$V = \frac{3.3D}{66536r} \quad (1)$$

式中 V ——气体浓度电压, V

D ——二进制转化成的十进制数据

r ——分辨率

1.3.2 采集分级交互界面

上位机配有交互设计界面,如图8所示。上方左侧窗口显示拍摄图像画面以及选择的待测图像,右侧窗口为感兴趣区域(Region of interest, ROI)提取窗口,可显示待测图像提取的ROI,同时可进行滤波等预处理操作并显示结果。下方左侧窗口实时显示气体数据和曲线,中间窗口显示对应拟合曲线数据以及拟合原始曲线。图像和气体均可选择提取不同特征值进行单独预测或融合预测,预测模型采用支持向量机分类器,最终结果于右下方显示。

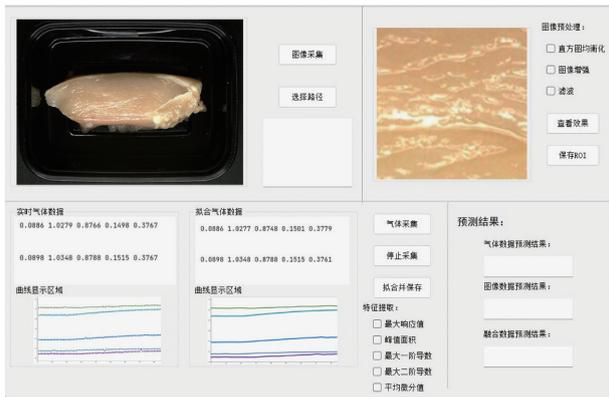


图8 交互设计界面

Fig. 8 Interactive interface design

2 装置试验

2.1 样本室 CFD 仿真试验

2.1.1 网络划分

为验证气体流动可行性,根据三维建模结构对样本室中气体流通区域进行 CFD 仿真^[19]。在 ANSYS Fluent 仿真软件中进行建模和网络划分,并进行网络独立性验证,最终确定边界层调节设置是以气室部分为边界,最后网格数为 216 582^[20]。检查质量总体大于 0.3,满足计算要求。

2.1.2 模型构建以及边界条件设置

采用 Fluent 软件进行数值求解,选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[21],压力离散方式为 Standard,压力速度耦合迭代采用 SIMPLE 算法,迭代次数为 800。

设置入口风速为 20 m/s,在 Fluent 软件中进行数值模拟计算,最终边界条件设置如表 2 所示。

2.2 鸡肉检测试验

2.2.1 试验材料

试验开始时间为 2022 年 1 月 12 日,在温度 26℃、相对湿度 30%、空气质量良好的实验室环境内进行,电子鼻废气出气口通往室外。鸡肉样本为

表 2 边界条件设置

Tab. 2 Boundary condition settings

参数	数值/形式
模拟状态	稳定态
模型	层流式
空气密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.225
动态粘度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.83×10^{-5}
入口状态	速度入口
出口状态	压力出口

市场采购的 40 份新鲜冷冻鸡胸肉,切成 100 份平整、尺寸为 10.0 cm × 5.0 cm 的鸡胸肉片,放置于尺寸为 17.0 cm × 11.0 cm × 7.0 cm 的样本盒中。放入 2℃ 冷藏室内冷藏^[22-23],存储图如图 9 所示。放置 1、4、7 d (对应新鲜度等级分别为 1、2、3) 后进行数据采集,每次采集时间为 200 min,其中每个样本气体采集频率为每秒单个传感器采集 5 组数据,采集时间为 20 s,共 100 组数据。数据传输至上位机并进行分析及新鲜度检测。



图9 冷藏室鸡胸肉存储图(部分)

Fig. 9 Storage diagram of chicken breast in refrigeration room (part)

2.2.2 数据采集

(1) 气体数据采集

先打开传感器预热 20 min,保证传感器进入正常工作状态。同时打开气泵抽取新鲜空气净化腔体残留气体,等待显示器显示传感器数值稳定后,记录稳定数值。从冷藏室取出放置于样本盒中的待测样本,打开盒盖将样本盒置于样本室内,关闭抽屉,控制阀门使得气泵泵吸样本室内气体,观察显示数值,20 s 后将样本取出,控制阀门抽取新鲜空气约 40 s 至传感器数值稳定至初始值附近再取出下一份样本进行试验。

(2) 图像数据采集

打开内置光源和摄像机,调整摄像机参数至画面高亮且清晰度高,将样本放置于摄像机正下方,在

获取气体数据的同时控制上位机拍摄鸡肉图像。

2.3 分类预测

2.3.1 数据预处理

将采集到的气体数据进行预处理获得拟合曲线。单次检测得到的气体数据(电压)如表 3 所示(以第 3 新鲜度等级鸡肉样本为例),气体数据拟合曲线如图 10 所示。

表 3 气体数据

Tab.3 Gas data

V

数据 序号	传感器型号				TGS2602
	MQ-135	MQ-136	MQ-137	MQ-138	
1	0.146	1.029	0.795	0.139	0.298
2	0.158	1.030	0.799	0.139	0.299
3	0.160	0.035	0.799	0.140	0.299
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
97	0.619	1.706	1.700	0.773	0.888
98	0.622	1.710	1.703	0.780	0.906
100	0.633	1.716	1.706	0.783	0.915

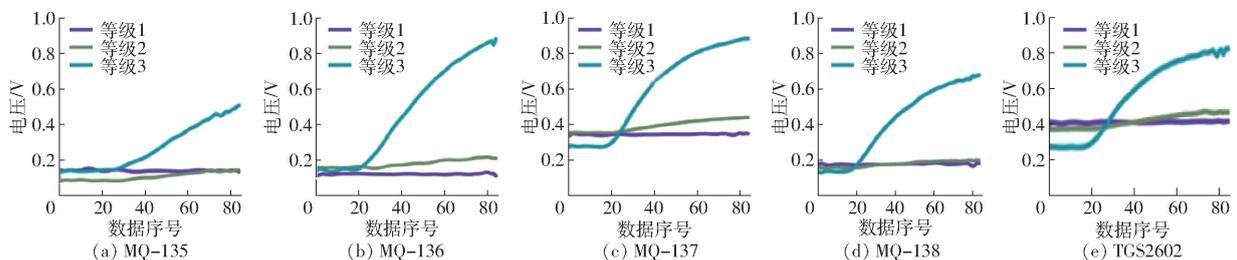


图 10 气体数据拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of gas data

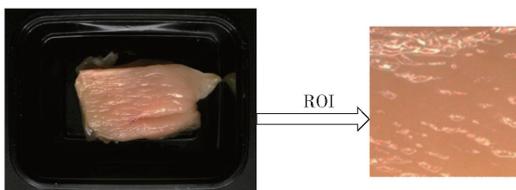


图 11 鸡胸肉拍摄图像和 ROI 图像

Fig. 11 Chicken breast image and ROI image

设数据集为 m 个 d 维数据

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$$

(1) 计算样本均值的公式为

$$u = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j \quad (2)$$

(2) 计算样本协方差矩阵公式为

$$S = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (x_j - u)(x_j - u)^T \quad (3)$$

(3) 对协方差矩阵进行特征值分解,选取 S 的前 t 个最大特征值对应的特征向量构成新的特征矩阵 U 。

2.3.3 新鲜度分级模型

经典分类算法有 K 近邻 (K-nearest neighbor, KNN)、朴素贝叶斯 (Naive Bayes model, NBM)、随

对鸡肉图像进行 γ 矫正后提取 ROI 图像存储至计算机。鸡胸肉图像以及提取的 ROI 图像如图 11 所示。

2.3.2 数据降维

提取图像颜色特征 6 个 (RGB 和 HSI), 纹理特征 24 个 (从 0° 、 45° 、 90° 和 135° 分别提取对比度、逆差距、熵、自相关、矩阵平方和角二阶矩), 共得到 30 维特征。5 个气体传感器, 各提取 4 个特征 (最大响应值、峰值面积、最大一阶导数和最大二阶导数), 共得到 20 维特征。将图像和气味数据提供的特征进行级联, 构成 50 维的特征向量。由于气体传感器之间往往具有交叉敏感性, 仅在变量层面上分析会忽略变量之间的潜在联系。因此运用 PCA (主成分分析) 方法^[24] 进行特征降维, 将原始数据变换为一组各维度线性无关的数据^[25]。本文算法中 PCA 特征向量提取方法步骤如下:

机森林 (Random forests, RF) 以及支持向量机 (Support vector machine, SVM)^[26] 等。KNN 算法的基本原理是如果一个样本在特征空间中的 k 个最近邻样本的大多数属于某一个类别, 则该样本也属于这个类别^[27]。朴素贝叶斯算法以贝叶斯定理为基础并假设特征条件之间相互独立。随机森林算法采用 Bagging 的集成学习思想, 在决策树的训练过程中采用随机特征选择。SVM^[28] 是在统计学及最优化的基础上构建学习机和实现分类, 它的基本思想是在特征空间找最佳的分类超平面。SVM 主要用来研究两分类问题, 对于多分类问题, 目前常用的构造方法有一对一方法和一对多方法, 其中一对多方法是最早也是目前应用最广泛的方法^[29]。本文采用以上几种分类器进行对比试验。

3 试验结果与分析

3.1 CFD 仿真结果

对样本室抽气状态进行模拟计算, 选取样本室中心水平方向 $Y = 0.02$ m 截面, 可反映空气通过鸡肉样本流动状况, 选取样本室中心竖直方向 $Z =$

0.02 m 截面,能够反映水平气流整体流动状况。在 CFD-Post 中对结果进行后处理,得到吸气状态下速度云图和速度矢量图,如图 12 所示。

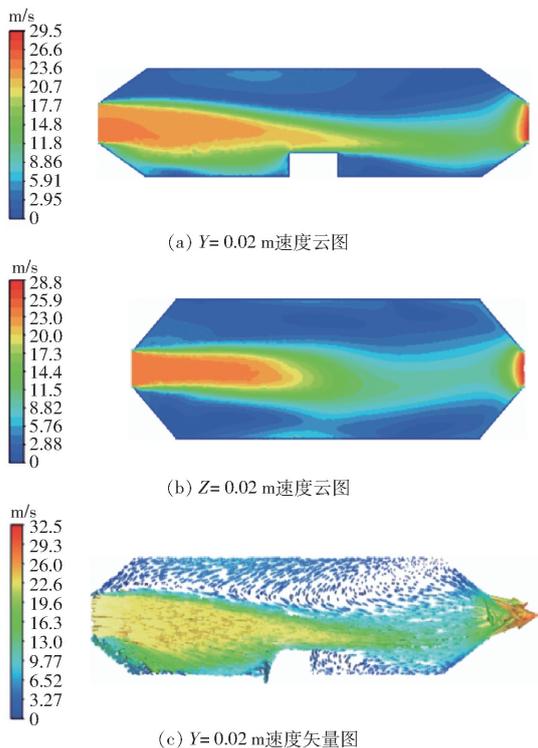


图 12 吸气状态下不同截面气流速度场模拟结果

Fig. 12 Simulation results of airflow velocity field in different sections under suction

泵气状态下,左侧连接新鲜空气,右侧连接气泵,做到较为充分地传输鸡胸肉散发的气体至电子鼻中进行检测。由图 12a、12b 可以看出,由于放置了鸡肉样本导致空气流通面积变小,通过鸡胸肉部位的空气流速变慢,且与底座之间存在间隙,间隙处

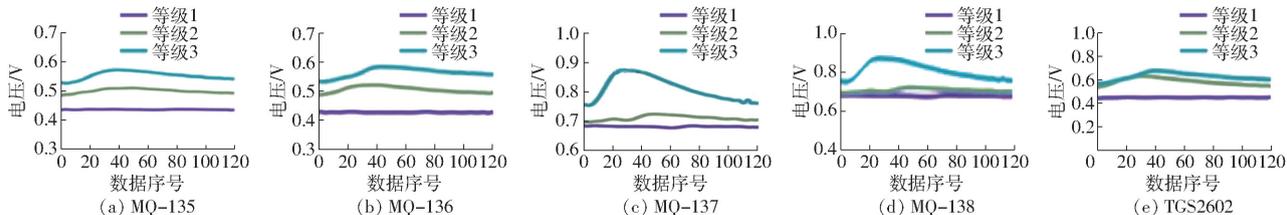


图 14 循环系统试验气体拟合曲线

Fig. 14 Gas fitting curves of circulating system

3.3 有无高透玻璃结果对比

样本室顶部为高透玻璃,便于拍摄图像且可减少光线反射影响。透过高透玻璃拍摄的鸡肉样本图像存在一定的颜色偏差,通过 γ 矫正后与去掉高透玻璃拍摄的图像相差较小(图 15 给出了两者的对比,左侧为未校正拍摄图像,右侧为矫正过后图像),分类结果偏差约为 0.01%,在误差范围内。

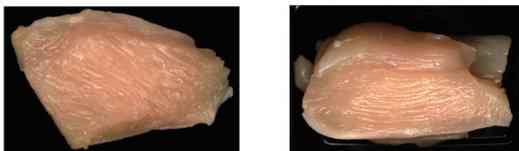


图 15 无高透玻璃(左)和透过高透玻璃(右)拍摄的图像
Fig. 15 Comparison of images taken without (left) and with (right) high permeability glass

3.4 新鲜度分级预测结果

采用 4 种分类器对 PCA 降维后数据进行建模

几乎无气流,气流速度降至 15 m/s,对于气体流通影响较小,气体出口处区域流速相对稳定,分布相对均匀。由图 12c 可以看出,在入口和出口处气体流速达到 20 m/s 较高水平,且气流相对稳定。

将气流场仿真结果转换成输出流线图,气体流通区域内的气流运行情况如图 13 所示。可以看出在气体入口和出口同一高度的气体流动相对平稳且速度达到 20 m/s,整体流动状态清晰,氨气传感器附近的气流运行方向一致,便于精准检测气体浓度。

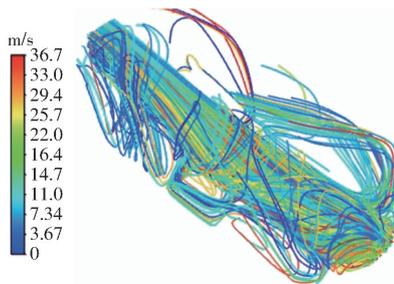


图 13 Y=0.02 m 截面气体流线图

Fig. 13 Gas streamline diagram of section Y=0.02 m

3.2 电子鼻循环系统测试结果

电子鼻内部设计了循环系统便于控制样本采集的时间分配,在每次采集完单个鸡肉样本气体数据后,抽取新鲜空气清洗内部残留气体直至显示数据接近于初始值且趋于稳定,则可以开始下一份样本的检测。测试选取 30 份样本,将每份样本放置于样本室中,采集气体数据 20 s,单个传感器每秒采集 2 组数据,取出样本后抽取新鲜空气约 40 s,数据稳定在初始值附近时可测试下一份样本。循环系统测试样本气体数据拟合曲线如图 14 所示。

分析,100 份样本 3 个新鲜度等级,共获取 300 份样本数据,采用 5 折交叉验证。对样本平滑处理

后剔除异常样本,实际建模使用样本数为 238 个,验证样本数为 59 个。试验结果表明,SVM 分类器预测准确率最高,为 98.7%,而 NBM、KNN 和 RF 算法的准确率分别为 98.3%、94.3% 和 93.6%。图 16 给出了 SVM 算法的分类结果混淆矩阵图,其中 1、2、3 分别表示 3 个新鲜度等级,TPR 和 FNR 分别是真正率和假正率。该试验验证装置具有可行性。

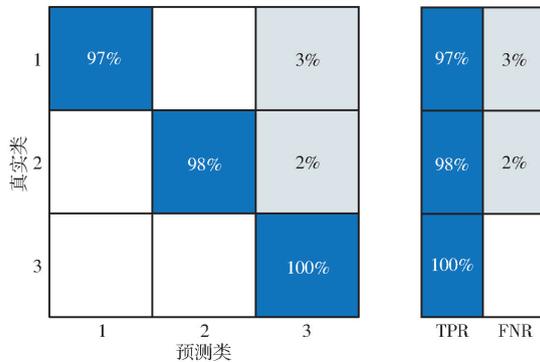


图 16 SVM 分类结果混淆矩阵图

Fig. 16 Confusion matrix of classification results of SVM

综上最终装置实物图如图 17 所示,上层为上位机 Jetson Nano 及 LCD 显示器,中层为视觉检测暗箱,下层放置电子鼻系统,可同时进行视觉与气体检测,整体装置造价成本低、检测准确度高且便于携带。

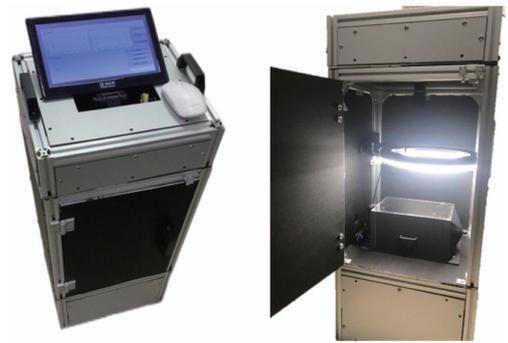


图 17 装置实物图

Fig. 17 Physical drawings of device

4 结论

(1)设计了一套电子鼻和视觉技术融合的一体化检测装置,包含样本室结构、硬件设计和软件设计,该装置能够同时检测气体浓度以及获取图像数据并实时显示波动曲线及原始图像。

(2)使用 CFD 技术对吸气状态下的样本室内气体流动进行模拟,通过速度云图、速度矢量图以及气体流线图证明了样本室内可以获得相对较大速率以及稳定的气体流。

(3)基于该装置进行试验,提取图像及气体浓度信息特征,进行 PCA 降维后利用 SVM 建立新鲜度分级模型,准确率最高可达 98.7%,证明装置具有可行性。

参 考 文 献

- [1] FENGOU L C, TSAKANIKAS P, NYCHAS G. Rapid detection of minced pork and chicken adulteration in fresh, stored and cooked ground meat[J]. *Food Control*, 2021, 125(6):108002.
- [2] LI H, CHEN Q, ZHAO J, et al. Nondestructive detection of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in pork meat by integrating hyperspectral imaging and colorimetric sensor combined with a nonlinear data fusion[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2015, 63(1):268–274.
- [3] TAHERI-GARAVAND A, FATAHI S, SHAHBAZI F, et al. A nondestructive intelligent approach to real-time evaluation of chicken meat freshness based on computer vision technique[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(4): e13039.1–e13039.10.
- [4] ANTEQUERA T, CABALLERO D, GRASSI S, et al. Evaluation of fresh meat quality by hyperspectral imaging (HSI), nuclear magnetic resonance (NMR) and magnetic resonance imaging (MRI): a review[J]. *Meat Science*, 2020, 172: 108340.
- [5] WILSON A D, OBERLE C S, OBERLE D F. Detection of off-flavor in catfish using a conducting polymer electronic-nose technology[J]. *Sensors*, 2013, 13(12): 15968–15984.
- [6] RAFAELA S A, MURILO H F, LUIZA A M, et al. Electronic nose based on hybrid free-standing nanofibrous mats for meat spoilage monitoring[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 353: 131114.
- [7] SURYANI D A, MOHAMMAD H T, ANAK A S, et al. Gas sensor array to classify the chicken meat with *E. coli* contaminant by using random forest and support vector machine[J]. *Biosensors and Bioelectronics*: X, 2021, 9: 100083.
- [8] MA Hongli, WANG Tao, LI Bolong, et al. A low-cost and efficient electronic nose system for quantification of multiple indoor air contaminants utilizing HC and PLSR[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 350: 130768.
- [9] TAHERI-GARAVAND A, FATAHI S, OMID M, et al. Meat quality evaluation based on computer vision technique: a review[J]. *Meat Science*, 2019, 156:183–195.
- [10] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Rapid and non-destructive detection of chicken adulteration in minced beef using visible near-infrared hyperspectral imaging and machine learning[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 170: 8–15.
- [11] 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)
- [12] LARSEN A B L, HVIID M S, JORGENSEN M E, et al. Vision-based method for tracking meat cuts in slaughter houses[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 366–372.
- [13] FEDOROV F S, YAQIN A, KRASNIKOV D V, et al. Detecting cooking state of grilled chicken by electronic nose and computer vision techniques[J]. Food Chemistry, 2021, 345(4): 128747.
- [14] LIU Cunchuan. Fusion of electronic nose and hyperspectral imaging for mutton freshness detection using input-modified convolution neural network[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132651.
- [15] 邹修国, 祝忠钰, SU Steven, 等. 基于 MCU 和 CFD 的鸡舍氨气检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 338–345.
- ZOU Xiuguo, ZHU Zhongzheng, SU Steven, et al. Design and test of ammonia detection device in broiler chamber based on MCU and CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 338–345. (in Chinese)
- [16] 李培, 牛智有, 朱明, 等. 基于 SPME-GC-MS 和电子鼻的鱼粉挥发性物质分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 397–405.
- LI Pei, NIU Zhiyou, ZHU Ming, et al. Analysis of volatile compounds in fish meal based on SPME-GC-MS and electronic nose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 397–405. (in Chinese)
- [17] SIEGMUND B, PFANNHAUSER W. Changes of the volatile fraction of cooked chicken meat during chill storing: results obtained by the electronic nose in comparison to GC-MS and GC olfactometry[J]. Zeitschrift für Lebensmittel-untersuchung und -Forschung A, 1999, 208(5–6): 336–341.
- [18] 孙红, 梁媛媛, 田男, 等. 鲜切果品新鲜度可见/近红外快速检测装置设计与实验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 393–398.
- SUN Hong, LIANG Yuanyuan, TIAN Nan, et al. Design of freshness detection device for fresh-cut fruit using visible/near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 393–398. (in Chinese)
- [19] ZOU Xiuguo, WANG Chenyang, LUO Manman, et al. Design of electronic nose detection system for apple quality grading based on computational fluid dynamics simulation and k-nearest neighbor support vector machine[J]. Sensor, 2022, 22(8): 2997.
- [20] 林勇, 鲍恩财, 叶成智, 等. 层叠式笼养肉鸭舍冬季环境测试及通风窗位置优化模拟[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 218–225.
- LIN Yong, BAO Encai, YE Chengzhi, et al. Winter environment test and ventilation window location optimization of cascading cage-rearing laying duck house[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 218–225. (in Chinese)
- [21] WANG C, LI H, WAND J, et al. CFD simulation and optimization of a pneumatic wheat seeding device[J]. IEEE Access, 2020, 8: 214007–214018.
- [22] 李鑫星, 董保平, 杨铭松, 等. 基于 SVM 核机器学习的三文鱼新鲜度检测系统[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 376–384.
- LI Xinxing, DONG Baoping, YANG Mingsong, et al. Detection system of salmon freshness based on SVM kernel-based machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 376–384. (in Chinese)
- [23] BOOTHE D D, ARNOLD J W. Electronic nose analysis of volatile compounds from poultry meat samples, fresh and after refrigerated storage[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 82(3): 315–322.
- [24] SCHOLKOPFT B, MULLERT K R. Fisher discriminant analysis with kernels[C] // Proceedings of the 1999 IEEE Signal Processing Society Workshop Neural Networks for Signal Processing IX, Madison, 1999: 23–25.
- [25] JEON H, OH S. Hybrid-recursive feature elimination for efficient feature selection[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3211.
- [26] RIFKIN R, CLAUTAU A. In defense of one-vs-all classification[J]. Journal of Machine Learning Research, 2004, 5: 101–141.
- [27] ZHANG Shichao, LI Xuelong, ZONG Ming, et al. Efficient KNN classification with different numbers of nearest neighbors [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(5): 1774–1785.
- [28] NICK G, MATTHIAS S. Support vector machines[J]. The Stata Journal, 2016, 16(4): 917–937.
- [29] GAMBOA J, SILVA A, ARAUJO I, et al. Validation of the rapid detection approach for enhancing the electronic nose systems performance, using different deep learning models and support vector machines[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 327: 128921.