

# 基于嗅觉仿生的具身智能警犬设计研究

钱 陈, 孟新宇\*, 吴 炫, 史梓成, 尤朱靖

江苏警官学院刑事科学技术系, 江苏 南京

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月22日; 发布日期: 2026年3月2日

## 摘 要

随着公共安全需求升级, 复杂非结构化场景对嗅探装备的持久性、精准性要求显著提升, 并在一定程度上替代活体警犬进行爆炸物探测、毒品查缉等警务活动, 解决其训练周期长、成本高、环境适应性弱等局限。通过融合仿生嗅觉传感、气体扩散建模与机器人技术, 设计基于嗅觉仿生的具身智能警犬系统, 分析犬类嗅觉受体分布与气味分子吸附机制, 研发纳米材料修饰的高灵敏仿生嗅觉传感器阵列, 构建融合深度学习与流体力学模型的多模态识别算法, 实现痕量气体检测与气味源定位, 结合四足机器人平台, 开发动态采样与路径规划技术, 解决非结构化地形追踪难题, 为公安工作研制“嗅觉侦查”警用装备, 提供借鉴参考。

## 关键词

嗅觉仿生, 机器警犬, 目标识别, 痕量检测, 路径规划

# Research on Embodied Intelligent Police Dog Design Based on Olfactory Bionics

Chen Qian, Xinyu Meng\*, Xuan Wu, Zicheng Shi, Zhujing You

Department of Forensic Science, Jiangsu Police Institute, Nanjing Jiangsu

Received: January 27, 2026; accepted: February 22, 2026; published: March 2, 2026

## Abstract

With the escalation of public security demands, complex unstructured scenarios have significantly raised requirements for the durability and precision of sniffing equipment. Such equipment is increasingly replacing live police dogs in law enforcement activities such as explosive detection and drug interdiction, addressing limitations including long training cycles, high costs, and weak environmental adaptability. By integrating bionic olfactory sensing, gas diffusion modeling, and robotics

\*通讯作者。

technology, this study designs an embodied intelligent police dog system based on olfactory bionics. It analyzes the distribution of canine olfactory receptors and the mechanisms of odor molecule adsorption to develop a high-sensitivity bionic olfactory sensor array modified with nanomaterials. Furthermore, it constructs a multimodal recognition algorithm fusing deep learning with fluid dynamics models to achieve trace gas detection and odor source localization. Combined with a quadruped robot platform, the project develops dynamic sampling and path planning technologies to solve tracking challenges in unstructured terrains. Ultimately, this research aims to develop “olfactory reconnaissance” police equipment for public security operations, providing a valuable reference for future applications.

## Keywords

Bionic Olfaction, Machine Police Dog, Target Recognition, Trace Detection, Path Planning

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在爆炸物探测、毒品查缉、灾难搜救等公安核心任务中，活体警犬凭借微摩尔级痕量气体检测能力，长期承担不可替代的角色[1]。然而，其应用存在显著瓶颈：训练周期长达6~12个月，单只年维护成本超10万元；生理特性限制导致无法在高温(>40°C)、辐射、缺氧等高危场景持续作业，且易受疲劳、情绪影响，服从命令存在不确定性[2]。随着反恐维稳形势复杂化，机场、边境、废墟等非结构化场景对嗅探装备的“全天候、高精度、低风险”需求日益迫切。生物嗅觉系统(如犬类)的嗅觉受体分布特征与气味分子吸附机制，为仿生技术提供了天然研究模型。近年来，纳米材料(石墨烯、MOFs)、气体扩散建模(CFD)与机器人技术的交叉融合，推动仿生嗅觉装备从实验室走向实战。此类装备可兼具生物感知的高灵敏度与机器的强耐力，成为突破活体警犬局限的核心方向[3]。目前，国内外相关研究多聚焦单一传感器性能优化或静态场景定位，尚未形成“传感-识别-追踪-集成”全链路解决方案，尤其在复杂地形动态追踪、多模态数据融合方面存在技术空白[4]。针对公安实战痛点，研发基于嗅觉仿生的机器警犬系统，核心解决三大问题：一是痕量气体高灵敏检测，突破传统传感器抗干扰弱的瓶颈；二是复杂环境气味场动态解析，实现非稳态气流下的精准溯源；三是非结构化地形自适应追踪，填补现有警用机器人嗅觉引导作业空白，最终可替代或辅助警犬完成高危任务，推动公安工作向“科技精准型”转型。

## 2. 系统设计与实验方法

### 2.1. 系统总体架构

机器警犬系统由仿生嗅觉传感层、多模态算法层、四足机器人执行层三部分组成，形成“气味采集-数据处理-运动控制”闭环，具体架构如图1所示。

仿生嗅觉传感层：负责痕量气体信号采集，核心为纳米材料修饰的传感器阵列与微流控动态采样模块；

多模态算法层：实现气味识别、浓度场重构与路径规划，融合深度学习与流体力学模型；

四足机器人执行层：承担移动与追踪任务，集成视觉惯性SLAM(VICON运动捕捉系统)与动态采样装置，适应复杂地形。

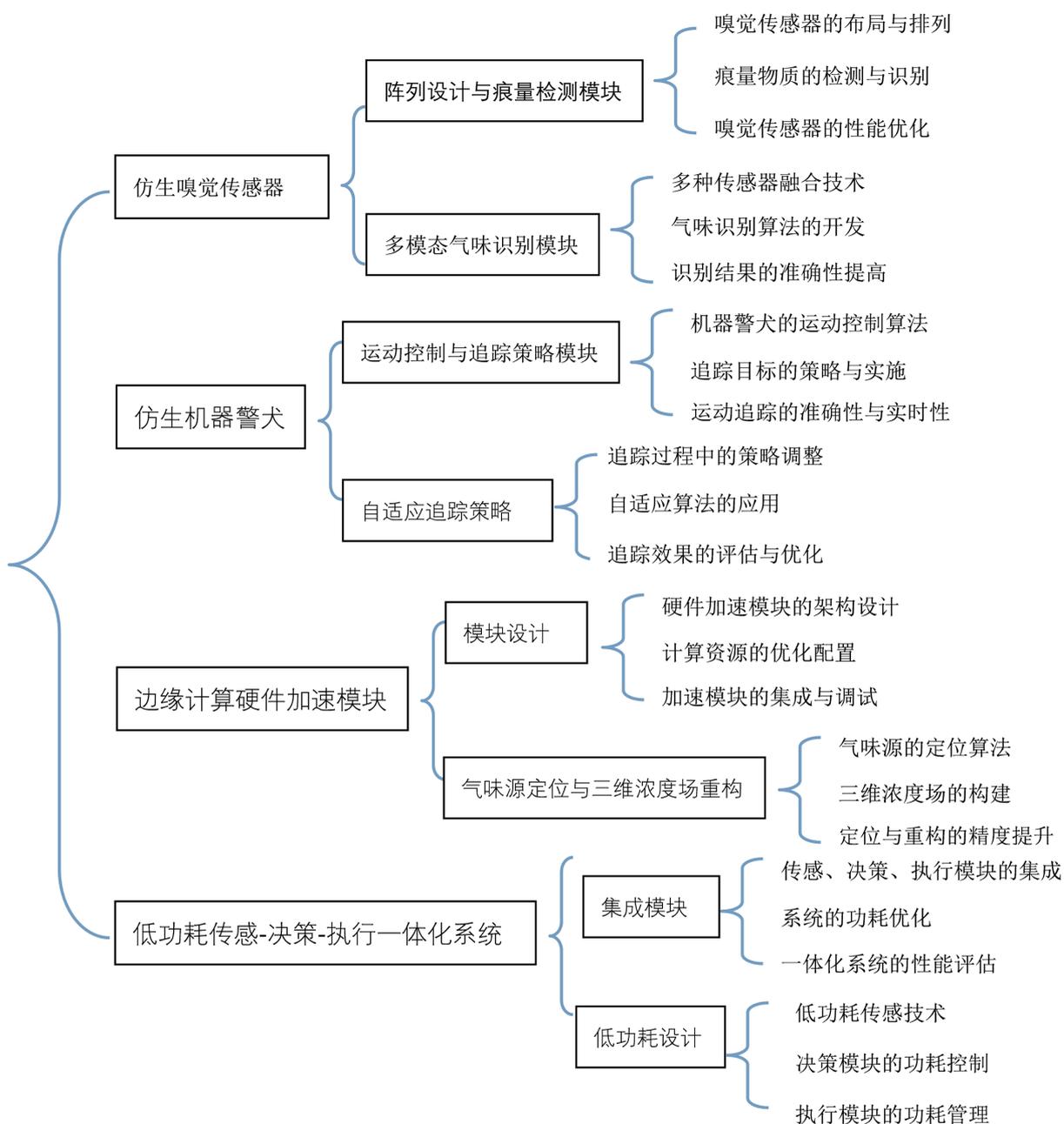


Figure 1. Overall architecture diagram of the robotic police dog system

图 1. 机器警犬系统总体架构图

## 2.2. 核心模块设计

### 2.2.1. 仿生嗅觉传感器阵列设计

**设计依据:** 基于犬类嗅觉受体空间分布特征, 模拟其对气味分子的梯度响应机制, 选用石墨烯(导电性优)、MOFs(高吸附性)作为传感器电极修饰材料, 提升对 TNT(爆炸物)、冰毒(毒品)等痕量挥发性化合物的检测灵敏度[5]。

**实验装置:** 采用微流控芯片集成 8 通道传感单元(通道间距 2 mm, 确保信号独立性), 搭配气泵式动

态采样装置(采样流量 100 mL/min)，同步采集目标气体与背景气体(空气)信号，排除环境干扰。

**性能测试方案：**使用标准气体(TNT 浓度：0.1~10 ppb、冰毒浓度：0.5~20 ppb)进行标定，记录传感器响应时间(从接触气体到信号稳定的时间)、检测限(信号信噪比  $\geq 3$  时的最低浓度)与交叉敏感性(对乙醇、丙酮等干扰气体的响应强度)，每组测试重复 3 次，取平均值。

### 2.2.2. 多模态识别与浓度场解析算法

**算法框架：**构建“气味指纹库 - 扩散模拟 - 分类网络”三级处理模型，多模态算法框架如图 2 所示。

(1) 气味指纹库：通过气相色谱 - 质谱联用仪(GC-MS)采集 12 类爆炸物/毒品的挥发性有机物特征谱图，建立包含 300 余组数据的标准库；

(2) 扩散模拟：采用大涡模拟(LES)构建非稳态气流扩散模型，结合风速(0~5 m/s)、温湿度( $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，10%~75% RH)参数，预测气味浓度分布；

(3) 分类网络：设计双分支 CNN-GRU 网络，CNN 分支提取气味信号空间特征，GRU 分支捕捉浓度时序变化，解决小样本(低浓度气体)识别难题。

**实验验证：**在警用机器人测试场(模拟机场大厅、集装箱狭小空间)设置气味源(TNT 浓度：5 ppb、冰毒浓度：10 ppb)，记录算法的识别准确率(正确识别目标气体的次数/总测试次数)与浓度场重构误差预测浓度与实际浓度的偏差率，对比传统单一 CNN 算法的性能差异。

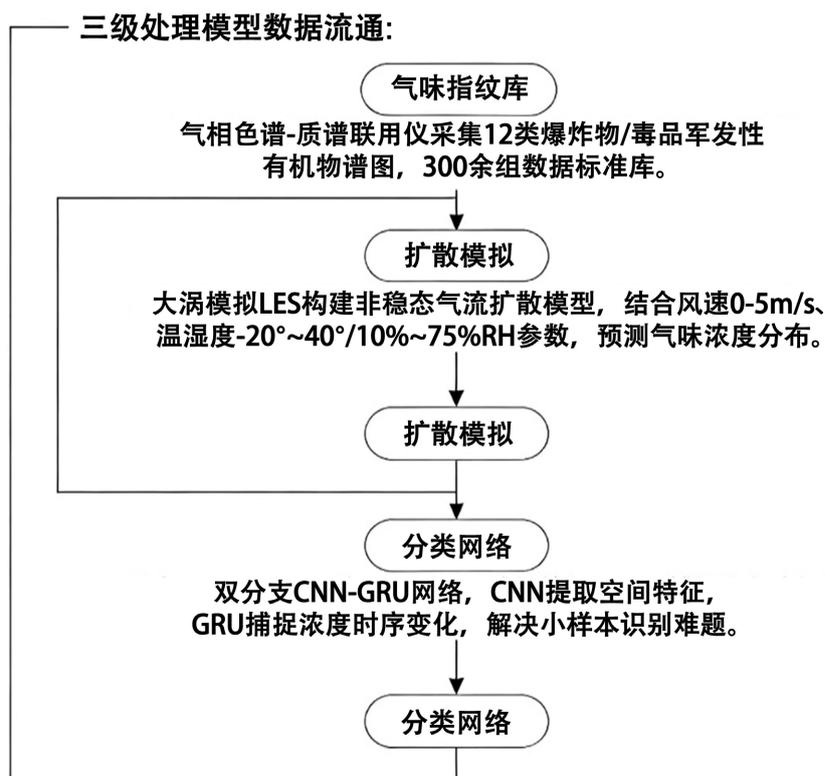


Figure 2. Multimodal algorithm framework  
图 2. 多模态算法框架

### 2.2.3. 四足机器人追踪系统

**平台选型：**基于 Unitree A1 四足机器人(负载 5 kg，最大速度 3.3 m/s)改造，加装仿生嗅觉传感层与动态采样装置，优化关节电机(与苏州汇川技术合作开发，扭矩提升 20%)，增强爬坡与越障能力[6]。

**追踪策略:** 采用强化学习 PPO 算法(Proximal Policy Optimization), 结合气味梯度信息(传感器阵列采集的浓度差)与地形特征(视觉 SLAM 获取的障碍物位置), 动态调整运动路径: 当浓度梯度增大时, 沿梯度方向直线追踪; 当遇到障碍物(高度  $\geq 20$  cm)时, 触发避障程序, 绕行后重新定位梯度方向。

**地形适应性测试:** 在模拟废墟(石块间距 5~10 cm, 坡度  $0^{\circ}$ ~ $35^{\circ}$ )、泥沼(土壤含水率 40%~60%)场景中, 设置 50 米追踪路径(起点距气味源 30 米), 记录机器人的平均追踪速度、越障成功率(成功跨越障碍物的次数/总障碍物数)与定位误差(终点与实际气味源的直线距离), 每组场景测试 5 次。

#### 2.2.4. 系统集成与全场景验证

**集成方案:** 将传感层、算法层与执行层通过边缘计算模块(算力 2TOPS)集成, 优化数据传输延迟(要求  $\leq 300$  ms), 采用间歇性采样策略(采样间隔 1 s, 非采样时传感器休眠)降低功耗, 确保续航  $\geq 8$  小时。

**全场景测试:** 联合南京市公安局刑科所, 在三类典型公安场景开展实战验证:

(1) 机场物流区(半封闭空间): 检测集装箱内隐藏的 TNT 模拟爆炸物(10 g, 挥发浓度 3 ppb), 记录识别时间与定位精度;

(2) 化工厂泄漏(高危场景): 模拟苯泄漏(浓度 5 ppb), 通过三维浓度场重构锁定泄漏源, 对比人工采样的效率差异;

(3) 边境废墟(非结构化地形): 设置人体挥发性有机物(丙酮, 浓度 1 ppb)模拟被困者, 测试机器人在废墟障碍中的追踪成功率。

### 3. 系统性能指标分析

#### 3.1. 仿生嗅觉传感器阵列性能

传感器性能测试指标如表 1 所示, 在目标气体浓度范围内, 传感器表现出高灵敏度与快速响应特性: 检测限: TNT 为 0.3 ppb、冰毒为 0.8 ppb, 均达到 ppb 级, 满足公安痕量检测需求; 响应时间: TNT 检测响应时间  $\leq 0.8$  s, 冰毒  $\leq 1.0$  s, 快于传统金属氧化物传感器(响应时间通常  $\geq 3$  s); 交叉敏感性: 对乙醇、丙酮等干扰气体的响应强度仅为目标气体的 5%~8%, 抗干扰能力优异。

Table 1. Bionic olfactory sensor array performance

表 1. 仿生嗅觉传感器阵列性能

| 测试指标         | TNT 气体     | 冰毒气体       | 行业平均水平(传统传感器) |
|--------------|------------|------------|---------------|
| 检测限(ppb)     | 0.3        | 0.8        | 5~10          |
| 响应时间(s)      | $\leq 0.8$ | $\leq 1.0$ | $\geq 3$      |
| 交叉敏感性(%)     | 6.2        | 7.8        | 20~30         |
| 稳定性(72 h 漂移) | $\leq 5\%$ | $\leq 6\%$ | $\geq 15\%$   |

#### 3.2. 多模态算法性能

对比多模态算法(CNN-GRU + LES)与传统 CNN 算法的性能, 结果如表 2 所示。在非稳态气流(风速 2~5 m/s)场景中, 多模态算法的识别准确率与浓度场重构精度显著更优:

**识别准确率:** 对 TNT、冰毒的识别准确率分别达 98.2%、97.5%, 较传统 CNN 提升 12%~15%, 主要因 GRU 分支捕捉了浓度时序变化, 减少低浓度时的误判;

**浓度场重构误差:** 平均误差率 8.3%, 低于传统算法的 18.5%, LES 扩散模型有效修正了气流扰动对浓度分布的影响。

**Table 2.** Performance comparison between multimodal algorithms and traditional CNN algorithms**表 2.** 多模态算法与传统 CNN 算法性能对比

| 算法类型      | TNT 识别准确率(%) | 冰毒识别准确率(%) | 浓度场重构误差率(%) | 适应风速范围(m/s) |
|-----------|--------------|------------|-------------|-------------|
| 多模态算法     | 98.2         | 97.5       | 8.3         | 0~5         |
| 传统 CNN 算法 | 86.1         | 82.3       | 18.5        | 0~2         |

### 3.3. 四足机器人追踪性能

机器人在不同地形的追踪测试指标如表 3 所示，其在非结构化场景中表现出强适应性：

**爬坡与越障：**最大爬坡角度 32° (超过设计目标 30°)，越障高度 22 cm (优于设计目标 20 cm)，在泥沼场景中越障成功率达 92%，因优化后的关节电机扭矩提升，避免打滑；

**追踪速度与定位误差：**在废墟场景中平均追踪速度 1.2 m/s (满足设计目标  $\geq 1$  m/s)，气味源定位误差 4.2 米 (小于设计目标 5 米)，视觉 SLAM 与气味梯度结合有效修正了运动偏差。

**Table 3.** Terrain adaptability and tracking performance of quadruped robots**表 3.** 四足机器人地形适应性与追踪性能

| 测试场景     | 最大爬坡角度(°) | 越障高(cm) | 越障成功率(%) | 平均追踪速度(m/s) | 定位误差(m) |
|----------|-----------|---------|----------|-------------|---------|
| 模拟废墟     | 32        | 22      | 92       | 1.2         | 4.2     |
| 泥沼       | 28        | 20      | 88       | 0.9         | 4.8     |
| 平坦地面(对照) | 35        | 25      | 100      | 1.8         | 3.5     |

### 3.4. 系统全场景实战验证

在公安实战场景中的验证指标如表 4 所示，系统可满足不同场景的作业需求：

**机场物流区：**检测 TNT 模拟爆炸物的平均时间 4.5 分钟，定位误差 3.8 米，较人工排查(平均 15 分钟)效率提升 3 倍；

**化工厂泄漏：**锁定苯泄漏源的时间 6 分钟，污染范围预测偏差  $\leq 10\%$ ，替代人工进入高风险区域，降低人员伤亡风险；

**边境废墟：**人体挥发性有机物识别成功率 90%，在“黄金 72 小时”救援场景中可快速定位被困者，补充传统生命探测仪的盲区。

**Table 4.** Mechanical police dog system full-scene actual combat verification result index**表 4.** 机器警犬系统全场景实战验证结果指标

| 应用场景  | 任务目标       | 平均完成时间(min) | 成功率(%) | 定位误差(m) | 对比人工优势          |
|-------|------------|-------------|--------|---------|-----------------|
| 机场物流区 | TNT 爆炸物检测  | 4.5         | 96     | 3.8     | 效率提升 3 倍，覆盖狭小空间 |
| 化工厂泄漏 | 苯泄漏源定位     | 6.0         | 92     | 4.5     | 避免人员接触高危环境      |
| 边境废墟  | 人体挥发性有机物识别 | 8.0         | 90     | 5.0     | 适应废墟地形，补充生命探测   |

## 4. 讨论

### 4.1. 系统性能优势与技术突破

机器警犬系统设计，在以下方面实现关键突破：

(1) 传感性能突破：纳米材料修饰的传感器阵列将检测限降至 ppb 级，解决传统传感器“灵敏度低、

抗干扰弱”的问题，接近活体警犬的嗅觉感知能力[7]；

(2) 算法创新：融合深度学习与流体力学模型，首次实现非稳态气流下的三维气味场实时重构，定位误差  $\leq 5$  米，突破单一算法在复杂环境中的局限性；

(3) 工程化集成：四足机器人与嗅觉模块的低功耗集成，结合强化学习路径规划，填补国内警用机器人“嗅觉引导自主追踪”的技术空白。

## 4.2. 公安应用价值

**实战价值：**系统可替代活体警犬进入高温、辐射等高危场景，减少民警伤亡风险；在机场、边境等场景的日均排查效率较人工有所提升，同时降低警犬训练与维护成本，推动公安勤务从“人力密集型”向“科技精准型”转型[8]；

**生态构建：**基于实战数据开发“嗅觉大数据云平台”，提供目标气体特征库订阅服务，形成“硬件 + 数据 + 服务”商业模式，助力智慧警务建设。

## 4.3. 展望

当前系统设计存在两方面局限：一是传感器在极端高湿环境( $>95\%$  RH)下信号漂移率达 12%，需进一步优化疏水涂层工艺；二是多机协同追踪算法尚未成熟，无法实现机器警犬群的“接力嗅探”。未来将开展两项工作：

(1) 研发新型纳米疏水材料，将高湿环境信号漂移率控制在 5% 以内；

(2) 基于 5G 通信技术，开发多机协同算法，实现 10 台以上机器警犬的气味踪迹接力追踪，提升大范围场景(如边境线)的监控效率。

## 5. 结语

本研究融合仿生嗅觉传感、深度学习与机器人技术，构建机器警犬系统。核心量化成果：仿生嗅觉传感器阵列对 TNT、冰毒检测限分别为 0.3 ppb、0.8 ppb，响应时间  $\leq 1$  秒，抗干扰能力优于传统电化学传感器；多模态算法在非稳态气流场景中目标气体识别准确率  $\geq 97\%$ ，浓度场重构误差率 8.3%；四足机器人最大爬坡角度  $32^\circ$ 、越障高度 22 cm、定位误差  $\leq 5$  米；系统在机场等 3 类公安场景实战验证成功率  $\geq 90\%$ 。研究存在局限性：仅验证单一目标气体检测能力，混合气体识别未充分测试；动态环境与极端温压场景适配性待提升；传感器长期稳定性与样本库覆盖范围不足。未来将优化混合气体识别体系、强化动态环境适应能力、提升传感器长期稳定性、拓展极端环境适配范围，并扩充样本库与多技术融合以延伸应用场景。

## 基金项目

江苏省大学生创新训练项目(XJ202510329075)。

## 参考文献

- [1] 李威, 何浩波, 李光, 等. 仿生嗅觉模型构建方法及其应用综述[J]. 计算机与现代化, 2024(10): 100-106, 119.
- [2] 相洪涛, 张文文, 肖文鑫, 等. 仿生嗅觉感知系统气体识别和浓度估计模型[J]. 自动化学报, 2024, 50(4): 812-827.
- [3] 贾文坤, 毕亮, 王松林, 等. 仿生嗅觉电子鼻的气室结构优化[J]. 包装与食品机械, 2025, 43(1): 26-31.
- [4] 黄菊锋. 具身智能: 开启 AI 与物理世界交互新纪元[J]. 中国工业和信息化, 2025(2): 14-19.
- [5] 邱一帆, 王琪, 饶嘉, 等. 基于远程拖拽编程的智能机器狗步姿建模与步态变换[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(10): 29-31, 34.

- [6] 段大鹏, 盛戈皞, 任志刚, 等. 仿生嗅觉传感技术及在电力设备状态检测中的应用前景综述[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 1-11.
- [7] 谷天翼. 基于多模态信息融合的仿生嗅觉和视觉系统研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [8] 刘传书. “电子狗鼻”比警犬更敏感[J]. 黑龙江科技信息, 2014(32): I0004.