

# 基于多模态识别与边缘计算的智能垃圾分类系统设计与实现

梁骞 王迎春\* 冯贵虹 陈铭 张梦锦 刘奕彤

沈阳工业大学, 中国·辽宁 沈阳 110870

**摘要:** 本文介绍了一款基于多模态融合识别算法的智能垃圾系统的设计与制作过程。针对传统垃圾分类效率低下、易出错等问题, 通过机械结构设计、视觉识别算法开发以及传感器技术应用, 实现了对生活垃圾的高效精准分类。该智能垃圾分类系统采用多层传送带差速分离垃圾, 结合摄像头、重量传感器和近红外光谱检测等多模态识别技术, 提高了复杂垃圾的识别准确率。同时, 运用低成本边缘计算方案降低设备硬件成本, 具有较好的应用前景和价值。

**关键词:** 智能系统; 多模态融合识别; 垃圾分类; 边缘计算; 算法

## Design and Implementation of Intelligent Garbage Classification System Based on Multimodal Recognition and Edge Computing

Liang Qian, Wang Yingchun\*, Feng Guihong, Chen Ming, Zhang Mengjin, Liu Yitong

Shenyang University of Technology, China Liaoning Shenyang 110870

**Abstract:** This paper introduces the design and production process of an intelligent garbage sorting bin based on multimodal fusion recognition algorithm. In view of the problems of low efficiency and error-prone traditional garbage sorting, realizes the efficient and accurate classification of domestic waste through mechanical structure design, visual recognition algorithm development and sensor technology application. The smart garbage bin uses multi-layer conveyor belts to separate differential garbage, combined with multi-modal recognition technologies such as cameras, weight sensors and near-infrared spectroscopy detection, to improve the identification accuracy of complex garbage. At the same time, the use of low-cost edge computing solutions to reduce the cost of equipment hardware has a good application prospect and value.

**Keywords:** Intelligent system; Multimodal fusion recognition; Waste sorting; Edge computing; Algorithm

## 0 引言

随着城市化进程的不断加快, 城市的躯体日益庞大, 人口不断增加, 其产生的“代谢产物”——生活垃圾也随之剧增。据统计, 全球每年产生的生活垃圾已超过 20 亿吨, 中国作为世界上人口最多的国家, 生活垃圾的清运量在 2022 年就已突破 3 亿吨<sup>[1]</sup>。面对如此庞大的垃圾数量, 传统的人工垃圾分类方式已经难以满足现代社会对垃圾处理效率和精度的要求。一方面, 人工分类速度慢, 劳动强度大; 另一方面, 随着人们生活水平的提高和消费观念的转变, 垃圾的种类和成分日益复杂, 一些具有回收价值或潜在危害的垃圾如果没有得到妥善分类和处理, 将对环境造成严重污染, 也会使大量可再生资源白白浪费。

近年来, 中国的智能垃圾分类研究已从单一技术探索发展为多技术融合的系统级创新, 形成了较为清晰的研究路线。过去五年间(2019-2025 年), 中国在智能垃圾分

类领域的技术研发取得了显著进展, 形成了以深度学习、计算机视觉、物联网(IoT)和机器人技术为核心的技术驱动体系。学术研究活跃, 专利申请数量可观, 初步构建了从前端识别到后端管理的智能化解决方案<sup>[2]</sup>。然而, 从实验室走向大规模城市级部署的过程中, 智能垃圾分类技术仍面临着巨大的现实鸿沟。主要体现在四个方面: 一是技术在复杂现实场景下的准确率和稳定性瓶颈; 二是高昂的全生命周期成本限制了其普及与可持续运营; 三是行业缺乏统一的技术标准与成熟的开源生态; 四是技术方案与社会管理、居民习惯的融合尚有不足<sup>[3]</sup>。

## 1 系统总体设计

智能垃圾系统整体采用多层结构设计, 从上到下依次为垃圾投入口、传送带系统、分类机构和垃圾桶。垃圾投入口位于顶部, 呈 110mm\*110mm 的正方形, 方便使用者投放垃圾。多层传送带系统是核心传输部分, 通过电机驱

动滚筒实现垃圾的传送。分类机构由两个舵机和云台组成，负责将垃圾准确投入对应的垃圾桶。垃圾桶则根据垃圾种类进行分类设置，包括可回收垃圾、厨余垃圾、有害垃圾和其他垃圾四类。

### 1.1 执行系统设计

(1) 传送带系统：负责将垃圾运送至识别区域，并通过差速分离确保单个垃圾被精准识别。该系统采用耐磨的食品级橡胶传送带，由直流电机驱动。

(2) 分类系统：由两个高精度舵机协同工作。一个舵机控制垃圾转向至对应垃圾桶上方，另一个舵机执行倾倒动作。整个机构安装在轻量坚固的铝合金云台上，保证了分类过程的稳定性和精确度。

### 1.2 识别系统设计

(1) 视觉识别：采用 MaixCam Pro 摄像头采集垃圾图像，提取垃圾的外观特征。

(2) 质量分析：采用重量传感器检测垃圾重量，辅助判断垃圾的密度差异（如纸张 vs 金属）。

(3) 材质检测：采用近红外光谱传感器，通过光谱特征分析垃圾的材质类型（如 PET vs PE 塑料）。

### 1.3 边缘计算层

本地化处理：采用 STM32F407VET6 微控制器集成 AI 推理（MobileNetV3 轻量化模型）。

此处理模式可以实现低延迟高隐私，有效避免云端依赖，响应时间 <5 秒，适用于无网络场景（如社区、校园等）。

### 1.4 系统工作流程

(1) 上电：24V 电池供电，电源板输出稳定电压，主控板及各模块得电，STM32 启动初始化。

(2) 待机：系统处于低功耗状态。

(3) 垃圾投放与识别：用户投放垃圾，MaixCam Pro 摄像头拍摄图像并进行 AI 识别，主控根据识别结果控制相关动作，如驱动步进电机通过二级履带分离垃圾，并可通过指示灯或语音提示分类结果。

(4) 满载判断：红外测距传感器实时传输垃圾堆积高度数据，主控结合预设阈值判断是否满载。

(5) 状态提示：若判断为满载，主控触发本地蜂鸣器告警和红灯常亮，提醒相关人员处理。运行全程，保护机制保障系统稳定。

## 2 机械结构设计

### 2.1 传动机构设计

传动机构主要由传送带和电机构成，是智能垃圾分类

系统的关键部分，其主要功能是将垃圾传送至识别区域，并通过差速分离实现单个垃圾的精准识别与分类。传送带采用食品级橡胶材质，具有耐磨、耐油、耐老化等优点，能够适应各种复杂的垃圾环境。传送带的宽度为 300mm，长度为 800mm，能够满足不同尺寸垃圾的传输需求。电机选用直流有刷电机，额定电压 12V，额定电流 2A，最大扭矩  $5\text{N} \cdot \text{m}$ ，能够提供足够的动力驱动传送带运行。滚筒采用实心结构，直径 50mm，表面经过防滑处理，能够有效防止垃圾在传输过程中打滑。

### 2.2 分类机构设计

分类机构采用两个高扭矩、高精度的舵机结合云台的设计。舵机 1 负责控制垃圾的转向，将垃圾移动到相应的垃圾桶位置上方；舵机 2 负责垃圾的倾倒动作，将垃圾准确投入对应的垃圾桶中。云台采用铝合金材质，具有重量轻、强度高的特点，能够保证舵机在运行过程中的稳定性和精度。舵机的控制精度为  $\pm 1^\circ$ ，能够实现垃圾的精确分类。分类机构设计如图 1 所示。

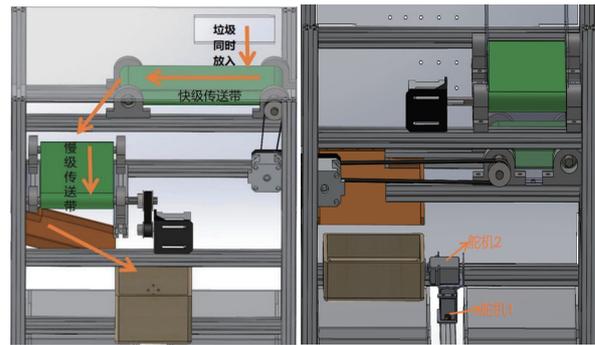


图1 分类机构示意图

## 3 硬件电路设计

硬件电路采用双电路板架构，电源板负责电能转换，主控板实现智能控制，达成垃圾识别分类、满载检测等功能。

### 3.1 电源板设计

输入 24V 锂电池组电压，利用 TPS5430DDAR 芯片将 24V 降压为 12V，为后续电路及外设供电。经次级降压，分别输出 7.4V（适配特定舵机）、5V（为摄像头、传感器供电，并作为 3.3V LDO 输入），再由 AMS1117-3.3 芯片将 5V 稳压至 3.3V，供主控芯片 STM32F407VET6 及核心电路使用。输入侧设 TVS 管、反接保护二极管、保险丝；输出侧各电压轨加滤波电容、TVS 管，同时对降压芯片做散热处理。

### 3.2 主控板设计

采用 STM32F407VET6 微控制器作为核心，整合感

知、执行与保护功能<sup>[4]</sup>：

(1) 感知模块：采用 MaixCam Pro 摄像头，通过 UART 串口与主控通信，利用内置 AI 算力实时采集并分类垃圾图像；采用红外测距传感器经 GPIO/ADC 接口连接主控，检测垃圾堆积高度，判断是否满载；

(2) 执行模块：步进电机驱动模块接收主控信号，控制步进电机带动二级履带实现多垃圾分离；舵机由 STM32 的 IO 口直接控制，实现辅助动作。

(3) 保护模块：所有外部接口加装 TVS 二极管，抵御 ESD 和浪涌；电机驱动信号线串联电阻并配合 RC 滤波；模拟信号线增加 RC 低通滤波；配置复位电路和看门狗，防止软件异常。

## 4 视觉算法设计

### 4.1 多模态数据融合算法

为了提高垃圾识别的准确率，本文采用了多模态数据融合算法，将摄像头采集的图像信息、重量传感器的数据以及近红外光谱传感器的信息进行融合。具体实现步骤如下：

(1) 图像预处理：对摄像头采集的图像进行灰度化、滤波、边缘检测等操作，提取垃圾的轮廓和特征点。

(2) 重量数据归一化：将重量传感器采集的重量数据进行归一化处理，使其与图像数据具有相同的量纲。

(3) 近红外光谱数据处理：对近红外光谱传感器采集的数据进行基线校正、平滑处理和特征提取，提取垃圾的光谱特征<sup>[5]</sup>。

(4) 数据融合：将处理后的图像数据、重量数据和光谱数据进行融合，构建多模态特征向量。

(5) 分类识别：将多模态特征向量输入到训练好的分类模型中，进行垃圾种类的识别。

### 4.2 数据增强与预处理

数据增强是提高模型泛化能力，进行数据预处理的重要手段之一<sup>[6]</sup>。本文采用了以下数据增强方法：

(1) 随机翻转：对图像进行水平翻转和垂直翻转，增加数据集的多样性。

(2) 随机旋转：对图像进行随机角度的旋转，使模型能够适应不同角度的垃圾图像。

(3) 随机裁剪：对图像进行随机裁剪，模拟垃圾在实际场景中的不完整情况。

(4) 随机遮挡：对图像进行随机区域的遮挡，提高模型对遮挡垃圾的识别能力。

### 4.3 深度学习模型选择与训练

(1) 模型选择：经过对比分析，选择了 MobileNetV3

作为基础模型，搭配 XGBoost 算法进行融合优化，以实现垃圾图像的高效分类。MobileNetV3 是一种轻量级深度学习模型，具有计算效率高、模型尺寸小的特点，非常适合在嵌入式设备上运行。XGBoost 是一种基于梯度提升的机器学习算法，具有良好的分类性能和较高的精度。通过将 MobileNetV3 提取的图像特征与 XGBoost 算法进行融合，能够充分发挥两者的优势，提高垃圾识别的准确率<sup>[7]</sup>。

(2) 模型训练过程：模型训练使用了公开的垃圾图像数据集，包括 TrashNet、Garbage Patch 等。同时，为了提高模型对实际场景的适应能力，还收集了大量实地拍摄的垃圾图像，并对数据集进行了扩充和标注。训练过程中，采用交叉验证的方法对模型进行评估和优化，通过调整学习率、正则化参数等超参数，提高模型的准确率和泛化能力<sup>[8]</sup>。

## 5 系统测试与分析

在系统测试与分析阶段，从多个维度对智能垃圾分类系统进行了全面评估。首先在分类准确率测试方面，该智能垃圾分类系统对常见垃圾的分类准确率达到 95% 以上，这表明其在垃圾识别与分类任务上具备优异的性能，能够精准地区分不同种类的垃圾，为后续的垃圾处理工作提供了可靠的基础。其次在效率测试中，从垃圾投入口到分类完成，平均处理时间约为 5 秒，这一快速的处理速度能够满足实际使用场景中对垃圾分类效率的要求，有效提高了垃圾处理流程的周转率，减少了使用者等待的时间成本，使垃圾分类变得更加便捷高效。最后在稳定性测试环节，智能垃圾分类系统在连续运行过程中未出现明显的故障或性能下降情况，证明其具有良好的稳定性和可靠性，能够在长时间的运行中持续保持高效、精准的工作状态，为城市垃圾分类和环境保护提供稳定有力的支持。该智能垃圾分类系统在分类准确率、效率以及稳定性方面均表现出色，具备了实际应用和推广的条件。

## 6 结语

### 6.1 结论

本文设计并实现了一款智能垃圾分类系统，通过创新的机械设计结构、精心构思的电路设计和先进的视觉算法，实现了对生活垃圾的高效精准分类。该智能垃圾分类系统具有以下特点和优势：采用多模态数据融合技术，结合图像、重量和近红外光谱等多种信息，提高了垃圾识别的准确率；运用轻量化深度学习模型和优化的电路设计，降低了设备硬件成本，使其更易于推广和应用；系统集成度高，稳定性好，能够满足实际使用场景对垃圾分类效率和准确

性的要求；红外线满载检测功能能够实时监测垃圾桶的容量状态，及时提示垃圾清理人员进行清理，提高了垃圾处理的效率和便捷性。

本智能垃圾分类系统的核心创新在于通过多模态感知与机电协同的低成本方案，有效解决了传统方案的痛点。具体而言：

(1) 技术融合上，系统创新性地融合视觉、重量与近红外光谱数据，通过多模态信息互补，显著提升了对透明塑料、玻璃等复杂垃圾的识别精度与整体鲁棒性，克服了单一视觉识别易受环境干扰的局限。

(2) 系统设计上，实现了算法与机械结构的深度协同。例如，依据重量数据判断垃圾密度，并驱动特制的差速传送带利用物理特性（如摩擦系数）进行分拣。这种设计以简单的机械控制替代高成本的机械臂，在保证分拣效果的同时，大幅降低了制造成本与维护难度。

(3) 成本与部署上，采用边缘计算结合轻量化模型，在降低对高性能硬件和云端网络依赖的同时，将总成本控制在同类产品的 60% 以下，并扩展了其在户外、无网络等特殊场景的适用性<sup>[9]</sup>。

该项目仍存在一些有待改进的地方。例如，对于一些特殊形状或材质的垃圾，识别准确率还有待进一步提高；在复杂环境条件下，系统的抗干扰能力需要加强。在未来的工作中，将继续优化视觉识别算法，探索新的传感器技术和数据融合方法，进一步提高智能垃圾箱的性能和应用范围，为城市垃圾分类和环境保护做出更大的贡献。

## 6.2 展望

关于智能垃圾分类的研究，未来仍存在很大的发展空间。

### 6.2.1 潜在应用价值

(1) 市政环卫智能化升级：智能垃圾分类系统可作为城市垃圾分类中转站的核心设备，替代传统人工分拣模式。

(2) 社区环保教育载体：搭载语音交互功能的智能垃圾分类系统可实时反馈分类结果，并播放环保知识动画，提升居民分类准确率。

(3) 特殊场景适应性扩展：如针对医疗垃圾处理，增加射线检测模块，精准识别针管、手术刀等危险品，满足《医疗废物分类目录》要求。

### 6.2.2 未来研究进化方向

未来基于多模态感知增强，涌现更多研究方向，主要有：

(1) 新增传感器：集成射频识别（RFID）标签追踪混合垃圾来源，结合金属探测传感器实现电子元件自动

分离。

(2) 环境自适应：开发基于气象数据的补偿算法，消除雨雾等天气对视觉识别的影响（如引入 TOF 深度相机，增强遮挡场景鲁棒性）。

(3) 边缘计算性能突破：低功耗优化使设备在待机状态下功耗降至 0.5W 以下。

(4) 人机交互创新：通过摄像头识别用户手势动作，提供可视化分类指引（如挥手显示垃圾类别提示等）；根据分类错误类型播放定制化语音提醒（如“请将湿垃圾沥干后再投放”等）<sup>[10]</sup>。

## 参考文献：

[1] 卢鸣. 环卫行业现状与智能垃圾分类前景分析[J]. 网络新媒体技术, 2019,8(01):9-17.

[2] 梁蕊, 陈冠益, 颜蓓蓓等. 城市生活垃圾智能分类技术研究与应用进展[J]. 中国环境科学, 2022,42(01):227-238.

[3] 周冯琦, 张文博. 垃圾分类领域人工智能应用的特征及其优化路径研究[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2020,41(04):5-7.

[4] 黄国维. 基于深度学习的城市垃圾桶智能分类研究[D]. 安徽理工大学, 2019.

[5] 秦鹏, 罗梦贞, 刘亮龙等. 基于人工智能的近红外光谱图像分类研究[J]. 激光杂志, 2025,46(09):141-146.

[6] 宋铁. 基于机器视觉的家庭智能分类垃圾桶设计研究[D]. 东华大学, 2019.

[7] 袁培森, 欧阳柳江, 翟肇裕等. 基于 MobileNetV3 Small-ECA 的水稻病害轻量化识别研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(01):253-262.

[8] 宁凯, 张东波, 印峰等. 基于视觉感知的智能扫地机器人的垃圾检测与分类[J]. 中国图象图形学报, 2019,24(08):1358-1368.

[9] C.J.Abate, 君谦. 什么是 tinyML?[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021,21(08):1-3.

[10] 苏文华, 王昕, 桂笛等. 现代城市分类垃圾桶设计探讨[J]. 工程建设与设计, 2021,(20):80-82.

基金项目：2025 年“大学生创新训练计划”省级项目。

作者简介：梁骞（2004-），男，满族，天津市，学生，研究方向：工业工程与环境保护。

王迎春（1971-），女，布依族，贵州贵阳，副教授，工学博士，研究方向：智能制造与系统优化。