

面向绿色物流的包装废弃物智能回收分拣系统 创新研发与实践探索

韦 崇

南京永化包装制品有限公司 江苏南京 210000

摘要: 在绿色物流驱动下,智能回收分拣系统应用于包装废弃物管理显得越来越重要。本文在仿真及现场数据验证的基础上搭建智能回收分拣系统并将多传感器融合及人工智能算法相结合,以提高包装废弃物分类精度及处理效率。模拟数据显示,该系统的分拣准确度在91.4%到94.7%之间,处理速度介于28.7件/分钟到31.5件/分钟,并且其能效表现明显优越于传统的回收系统。通过实地监测,系统的性能得到了进一步的确认,分拣的精确度从91.8%增加到了94.2%,处理速度从28.6件/分钟增加到31.3件/分钟,同时能源消耗也减少到了0.81Wh/件。试验证明,该智能回收分拣系统具有高精度,高效率 and 低能耗等特点,能有效地增强包装废弃物循环利用过程中的总体性能,从而为绿色物流目标的实现提供了技术支撑。

关键词: 智能回收分拣;绿色物流;包装废弃物;分拣精度

引言

在全球环境问题日趋严重的背景下,绿色物流逐渐受到了人们的普遍重视,成为可持续发展的一个重要途径。包装废弃物管理存在回收率不高,分拣效率不佳,环境污染严重等诸多难题,迫切需要先进技术辅助优化。智能回收分拣系统采用计算机视觉,传感器及人工智能技术,可提高废弃物回收效率和精度,促进绿色物流发展。文章旨在对智能回收分拣系统创新研发和实践应用进行论述,并对该系统在包装废弃物管理方面的技术运用进行展望。文章先介绍智能回收系统的构建条件与技术方案,随后探讨关键技术 with 实施效果,总结研究成果并展望未来发展方向

一、智能回收分拣系统概况

(一) 系统构建条件

设计智能回收分拣系统时,不仅要高效地处理包装废料,还要确保分类的高精度和分拣的高速度。该体系的建设需依靠先进的自动化设备,智能感知技术和较强的数据处理能力。绿色物流有关政策的促进以及环保产品市场需求的不断提高为本体系的开发提供有力支撑^[1]。该系统应具有环境影响小、满足可持续发展要求、通过提高资源回收率、降低废弃物环境污染、促进生态文明

作者简介: 韦崇(1979.11-),男,汉族,辽宁沈阳人,现居南京,研究方向:绿色包装生产管理与研发、绿色物流。

建设等特点。

(二) 技术与设备条件

智能回收分拣系统核心技术主要有包装废弃物的分类和处理,计算机视觉和传感器技术,自动化设备集成应用等。分类及处理技术利用各种传感器实现废弃物的智能识别及分类,同时计算机视觉及图像处理技术提高识别的准确性及效率。自动化设备及机器人技术使分拣过程更准确、效率更高,能处理废弃物种类繁多和工作环境多变等问题,符合绿色物流中高效低能耗系统要求。

二、主要影响因素与关键技术措施

(一) 主要影响因素

智能回收分拣系统所面临的重大挑战源于包装废弃物种类繁多,结构复杂。不同种类废弃物的材料,形态及重量各不相同,使得分类精度与效率很难得到统一保证^[2]。系统的运行环境,例如光线、温度和废物的积累状况,都可能对系统的整体性能产生影响。所以要想解决上述影响因素,就必须有高效感知技术,稳定硬件设备以及优化智能算法,才能确保系统能够在多种情况下高效地运行。

(二) 关键技术措施

为了攻克包装废弃物分类这一难点,该系统需采用多传感器融合技术对不同传感器数据进行协同处理,从而达到精准识别和分类的目的。基于人工智能分拣算法可以通过深度学习、模式识别等方法对分拣过程进行持续优化以提升分类精度^[3]。系统集成和智能控制技术的应用使各个模块能够高效地协同工作,进而提高了系统

的整体运行效率、减少了能耗、促进了系统在智能回收分拣中的平稳运行。

三、模拟分析与性能验证

(一) 仿真模型

本研究基于Simulink平台搭建智能回收分拣系统的动态仿真模型，选取四项核心性能指标：分拣精度 (Accuracy)、单位处理效率 (Throughput)、能耗强度 (Energy Intensity) 与系统响应时间 (Response Time)。模型以典型快递包装废弃物为输入，结合图像识别算法、机械臂作业曲线与系统逻辑响应控制，对整体系统运行状态进行周期性仿真与性能评估。

(二) 数值模拟参数

1. 分拣精度 (Accuracy)

分拣精度定义为系统正确分类的废弃物数量占总处理数量的百分比，用如下公式表示：

$$A = \frac{N_{\text{correct}}}{N_{\text{total}}} \times 100\%$$

其中， N_{correct} 为正确识别并分拣的废弃物数量， N_{total} 为系统总处理数量。仿真中输入废弃物样本数为3000件，结合卷积神经网络识别模块，训练集识别准确率达到93.2%，最终分拣精度保持在**91.4%至94.7%**之间，反映了系统在多材质包装废弃物识别中的稳定性。

2. 单位处理效率 (Throughput)

单位处理效率指每分钟系统处理的废弃物数量，计算公式如下：

$$T = \frac{N_{\text{processed}}}{t}$$

其中， $N_{\text{processed}}$ 表示在时间 t (分钟) 内处理的总数量。仿真设定机器人协作臂平均分拣时间为1.8秒/件，理论最大处理能力为33.3件/分钟；结合实际动作干涉与传送带延迟因素，仿真效率为28.7~31.5件/分钟。

3. 能耗强度 (Energy Intensity)

能耗强度反映系统单位处理所消耗的能量，定义如下：

$$E = \frac{P \cdot t}{N_{\text{processed}}}$$

其中， P 为系统功耗 (单位：W)， t 为运行时间 (单位：h)， $N_{\text{processed}}$ 为处理数量。仿真设置系统平均功耗为450W，单位能耗范围为0.78~0.95 Wh/件，能效表现优于传统静态人工分拣系统 (约1.6 Wh/件)。

4. 系统响应时间 (Response Time)

响应时间是指系统从接收到识别信号到执行分拣动作所需的平均时间：

$$R = t_{\text{exec}} - t_{\text{detect}}$$

仿真设定图像识别响应时间为200ms，机器人启动响应时间为120ms，控制器延迟60ms，系统整体平均响应时间为378ms，满足工业实时性需求，特别适用于中速以上物流回收场景。

(三) 技术阶段划分

系统研发划分为三个阶段：仿真验证阶段、模块集成阶段与现场部署阶段。第一阶段聚焦系统建模与性能预测，第二阶段完成各核心技术 (识别、执行、控制) 协同测试，第三阶段则在绿色物流场景下实地部署并监测运行状态，为后续优化提供数据支持。

(四) 数值模拟分析

通过多轮参数测试和仿真数据输出，系统在不同负载条件下的性能如表1所示。仿真结果表明，系统在保持高分拣精度的同时，具备较优的处理效率和能耗控制能力。特别是在60%负载下表现最为稳定，适用于中大型快递回收站点。

表1 智能回收分拣系统仿真结果对比表 (不同负载条件)

负载强度	分拣精度 (%)	处理效率 (件/分钟)	能耗强度 (Wh/件)	响应时间 (ms)
40%	91.4	29.1	0.89	382
60%	93.6	30.7	0.82	374
80%	94.7	31.5	0.95	388

通过图1可见，系统性能随负载增加略有波动但整体稳定，处理效率与响应时间保持线性增长趋势，能耗控制在合理范围内，验证了本系统在高密度包装废弃物回收中的适应性与稳定性。

四、关键技术与施工方案

(一) 智能分拣技术

该系统的核心是对包装废弃物进行智能识别和精确分拣，利用深度学习驱动图像识别模型并将RGB和近红外图像相结合进行融合，实现对不同材质 (如塑料、纸箱、泡沫等) 的高精度判别。该系统是基于卷积神经网络 (CNN) 进行培训的，其识别的准确性始终保持在93%或更高。通过融合实时图像增强和多角度扫描的技术手段，该系统能够显著降低由于遮挡和重叠导致的识别误差。在仿真测试中，分拣精度能够达到最高的94.7%，从而为后续的分拣操作提供了一个可靠的决策依据。

(二) 自动化设备与控制技术

为了保证分拣效率和系统的响应速度，该平台将六轴协作机器人和高速分拣轨道整合在一起。该机器人末端执行器具有抓取力智能调节功能和适应多类包装物差异性的特点^[4]。该控制系统利用PLC和边缘AI协同控制架构实现了识别指令和机械操作之间毫秒级的响应，系统响应时间在实际模拟时被限制在378ms内。整套装置

具有远程调度的功能，能够在线监控运行状态，能耗指标及故障风险并自动调节。

（三）系统集成与优化技术

为了增强整体系统运行的稳定性和兼容性，该工程采用模块化结构整合而成，该系统由中控平台协调调度图像识别，运动控制和物流输送几个子系统构成。该集成方案与多类设备的接口标准兼容，方便了后期的扩充。模拟的数据显示，这种集成方法确保了在中到高负载（60%~80%）的情况下，分拣效率依然维持在一个稳定的水平。同时该系统支持多场景自适应调节，能够根据不同的垃圾种类和分拣策略对运行参数进行自动优化，提高了环境适应能力。

（四）实施阶段的技术难题与解决方案

系统着陆时的主要技术难点是复杂包装物识别错误、协作臂动作路径干扰和控制指令延迟。为了解决前述的问题，项目团队采纳了“图像加传感器”的双层识别策略，旨在增强识别的鲁棒性；对机械动作设计时的轨迹规划进行了优化以避免重复路径的产生；在控制系统的层次上，利用边缘计算模块来降低数据传输的延迟^[5]。现场布放前经过多轮次仿真调优后，使得系统满足真实环境下稳定运行的准则，保证绿色物流回收作业可持续和高效。

五、系统实施与效果评估

（一）现场监测数据

为验证系统在实际应用环境中的运行表现，研究团队在某快递回收站部署智能分拣系统，并在连续5日内进行全天候数据采集与监测，指标涵盖分拣精度、单位处理效率、能耗强度和系统响应时间。数据采集时间为每天上午9:00至11:00的高峰段，通过传感器自动记录并导出数据。监测结果如表2所示，系统各项指标波动均处于可控范围内，说明其具备较强的运行稳定性和环境适应性。图2展示了四项关键指标的时间变化趋势，可为后续运行优化提供基础数据支撑。

表2 系统现场运行性能指标日均值表

日期	分拣精度 (%)	处理效率 (件/分钟)	能耗强度 (Wh/件)	响应时间 (ms)
第一天	91.8	28.6	0.88	382
第二天	92.5	29.4	0.86	378
第三天	93.1	30.1	0.84	375
第四天	93.8	30.9	0.82	373
第五天	94.2	31.3	0.81	371

（二）实施效果评价

从表2所展示的实际测量数据中，可以观察到系统在真实环境下的表现与仿真阶段高度吻合，分拣的精

度从91.8%逐渐增加到94.2%，证明深度学习算法对真实包装废弃物情景具有适应性和精度稳定性。随着时间的推移，单位的处理效率也在逐日增长，从28.6件/分钟增加到31.3件/分钟，这证明了协作臂轨迹优化和输送调度算法在减少作业冲突和加快作业节奏方面的有效性。系统的能量消耗强度逐渐降低，从0.88Wh/件减少到0.81Wh/件，这表明该系统的能效表现出色，并具有显著的绿色节能属性。响应时间限定为371~382ms，满足了工业级的实时分拣要求。该系统在确保高精度分拣前提下取得较好的作业效率及节能表现，充分显示出智能回收分拣系统对绿色物流场景下的技术适应性及推广潜力。后续可以根据用户反馈及数据迭代对算法参数进行进一步改进，增强多场景部署的效果。

结论

本文通过对智能回收分拣系统的仿真与现场数据监测，验证了其在绿色物流中的应用效果。仿真结果表明，系统能够在不同负载下保持较高的分拣精度和处理效率，分拣精度稳定在91.4%至94.7%之间，处理效率在28.7件/分钟至31.5件/分钟之间，能效表现优于传统分拣系统。现场监测数据显示，系统分拣精度和效率均有所提升，分拣精度由91.8%提高至94.2%，处理效率由28.6件/分钟提升至31.3件/分钟，且能耗强度稳定降低至0.81Wh/件。通过多传感器融合和人工智能算法优化，系统在复杂环境中展现出了较高的适应性和稳定性。本研究证明，智能回收分拣系统在包装废弃物回收中的应用具有可行性，并能显著提高回收效率与资源利用率，为绿色物流提供技术支持。

参考文献

- [1]成灶平, 丛培栋, 马良.政府不同奖惩措施下消费者参与快递包装回收行为演化研究[J].运筹与管理, 2024, 33(3): 218-225.
- [2]林成宏, 彭竣朝, 师艳阳, 等.智能垃圾分拣与处理控制系统的研究[J].自动化应用, 2023, 64(6): 96-99.
- [3]张曦, 李占英, 徐子健.基于S7-1200的小型生活垃圾分拣系统[J].自动化技术与应用, 2023, 42(9): 6-8.
- [4]无.欧盟委员会正式发布关于包装和包装废弃物法规(PPWR)的提案[J].纸和造纸, 2023, 42(1): 54-54.
- [5]Gülen, Selenbüke, Akkoy S, Avar E. Determining the Amount of Packaging Waste and Evaluation of Recycling it within the Scope of Circular Economy (The Case of Bitlis Province/Türkiye[J].Social Sciences Studies, 2024, 10(7).