

碳中和目标下新能源环卫机器人能源供给系统创新设计

杨秀 贾子境 田源 谭蓉玲 马健

天津仁爱学院，天津 301600

摘要：在“双碳”战略推动下，环卫装备新能源化成为实现城市绿色清洁的关键路径，而能源供给系统的续航能力、环保性与适配性，直接制约新能源环卫机器人的作业效能。本研究结合“碳路先锋——图像识别环卫机器人”项目实践，针对传统环卫装备能源系统存在的能耗高、续航短、污染残留等问题，从能源供给结构、储能技术优化、能源管理策略三个维度，设计“太阳能—锂电池—应急补能”三位一体的创新能源供给系统。通过集成高效太阳能转化模块、智能储能调控单元及低碳应急补能装置，实现能源供给的清洁化、长效化与智能化，同时结合机器人作业场景特性，构建能源供需动态匹配机制，为新能源环卫装备的低碳化升级提供实践参考。

关键词：碳中和；新能源环卫机器人；能源供给系统；太阳能—锂电池混合供电；智能能源管理

0 引言

随着我国“碳达峰、碳中和”目标的深化推进，公共领域装备的新能源替代成为交通运输业减排的重要突破口。《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》明确提出，2035年公共领域用车需全面实现电动化，其中环卫装备作为城市公共服务的核心组成部分，其新能源化转型已进入关键阶段^[1]。当前传统环卫装备多依赖柴油动力，不仅碳排放量大，且作业过程中易产生噪音与尾气污染；而现有新能源环卫装备的能源供给系统，普遍存在续航能力不足、能源转化效率低、适配复杂作业场景能力弱等问题，难以满足城市精细化清洁的全天候需求。

“碳路先锋——图像识别环卫机器人”项目以ESP32CAM技术为核心，集成视觉识别、远程操控与多场景作业功能，其能源供给系统的创新设计是项目落地的关键支撑。本文立足项目实践，聚焦碳中和目标下新能源环卫机器人的能源供给痛点，通过优化能源结构、创新储能技术、完善管理策略，构建适配环卫作业特性的高效能源供给体系，既解决传统能源系统的环保短板，又突破现有新能源系统的效能瓶颈，为环卫装备的低碳化、智能化发展提供技术路径。

1 新能源环卫机器人能源供给系统的设计需求与现存问题

1.1 设计需求分析

新能源环卫机器人作业场景广泛，覆盖城市主干道、背街小巷、学校园区等多元环境，

且需应对高温、阴雨、粉尘等复杂工况，这对其能源供给系统提出多方面核心需求^[2]。从契合碳中和目标角度，能源供给需实现全生命周期零碳排放，规避传统化石能源的污染残留，同时减少能源转化过程中的二次污染，满足清洁性要求；考虑到环卫作业多为全天候连续开展，单次作业时长通常需4—8小时，能源系统必须具备长效供电能力，防止因频繁充电导致作业中断，以达成续航性需求；又因机器人搭载机械手、负压机、红外线感应装置等多模块设备，不同作业模式下能耗波动较大，能源系统还需具备动态功率调节能力，适配多元负载，满足适配性需求。

1.2 现存问题梳理

当前新能源环卫装备能源供给系统存在明显短板，难以适配碳中和目标下环卫作业的高效低碳需求。多数新能源环卫车依赖单一锂电池供电，虽实现零排放，但受电池能量密度限制，续航能力普遍不足且充电时间长，难以支撑高强度作业，部分尝试集成太阳能板的装备，又因转化效率低、受光照条件制约大，未能形成稳定能源补充，导致整体能源结构单一^[3]。同时，现有系统缺乏智能储能管理机制，充电时易出现过充、过放现象，缩短电池使用寿命，且无法根据作业负载动态调整储能分配，像机械手抓取大型垃圾时功率需求骤增，常引发能源供给不稳定问题。此外，在连续阴雨、高温暴晒等极端天气或突发作业任务中，现有能源系统缺乏高效应急补能方案，一旦锂电池电量耗尽，会直接导致机器人停机，严重影响环卫作业效率。

2 碳中和目标下新能源环卫机器人能源供给系统创新设计

基于项目实践需求,本文设计“太阳能—锂电池—应急补能”三位一体的混合能源供给系统,通过多能源协同、智能调控与场景适配,实现能源供给的清洁化、长效化与可靠化。

2.1 能源供给结构创新:构建多能互补体系

2.1.1 高效太阳能转化模块设计

针对传统太阳能板转化效率低、受光照制约大的问题,项目采用“柔性太阳能板+追光调节”的集成设计。在机器人顶部及侧面铺设柔性单晶硅太阳能板,其光电转化率达22%以上,且具备抗弯折、耐粉尘特性,适配环卫作业的复杂环境;同时搭载小型化追光传感器与驱动电机,根据实时光照角度自动调整太阳能板朝向,较固定安装模式提升30%以上的能量捕获效率。此外,在太阳能板表面覆盖纳米防尘涂层,减少作业过程中粉尘堆积对转化效率的影响,确保阴天或弱光环境下仍能实现稳定能源输入。

2.1.2 高容量锂电池储能模块优化

选用磷酸铁锂电池作为核心储能单元,其具备高安全性、长循环寿命(循环次数超2000次)与低衰减率特性,契合环卫机器人长期作业需求。电池组采用模块化设计,总容量根据作业时长需求设定为10~15kWh,同时集成电池管理系统(BMS),实时监测电池电压、温度与SOC(State of Charge)状态,避免过充过放;针对环卫作业的高温工况,在电池舱内设置被动散热片与主动风冷装置,当温度超过45℃时自动启动散热,确保电池工作温度稳定在25~40℃的最优区间,提升能源利用效率^[4]。

2.1.3 低碳应急补能装置集成

为应对极端天气或突发任务导致的能源短缺,系统增设“高功率充电宝+可拆卸电池组”的应急补能方案。高功率充电宝容量为2kWh,支持快充模式,可在30分钟内为机器人补充30%的电量,适用于短时间应急供电;可拆卸电池组采用标准化接口设计,当锂电池电量耗尽时,可快速更换备用电池组,更换过程仅需5分钟,大幅缩短停机时间。两类应急补能装置均采用低碳材料制造,且支持后期回收利用,符合碳中和全生命周期环保要求。

2.2 储能调控技术创新:实现智能动态匹配

2.2.1 负载自适应功率分配策略

结合新能源环卫机器人作业特性,以ESP32CAM控制器为核心构建基于负载需求的动态功率分配机制。该控制器可实时采集机械手、负压机、视觉识别APP等各功能模块的能

耗数据,依据负载变化动态调整能源输出。当机械手执行大型垃圾抓取任务,需高功率支撑时,系统自动将锂电池输出功率提升至1.5kW,精准匹配高负载作业需求;当机器人处于巡航或视频监测等低能耗状态时,输出功率则降至300W,同时优先启用太阳能板供电,将锂电池储能留存作为备用能源。此策略实现能源供给与作业负载的精准适配,有效避免能源浪费,较传统恒定功率模式降低15%~20%的能耗,提升能源利用效率。

2.2.2 能源供需预测与优化调度

为提升新能源环卫机器人能源供给的前瞻性与稳定性,系统引入机器学习算法,构建能源供需预测与优化调度机制。该算法以机器人历史作业数据为基础,包括作业路线的环境特征、不同工况下的负载变化规律及各时段光照强度波动情况,通过数据训练与模型迭代,可精准预测未来2小时内的能源供需趋势^[5]。例如,当算法预测未来1小时光照强度将显著下降,太阳能供电能力减弱时,系统会提前启动充电程序,将锂电池SOC状态充至80%以上,储备充足电能;当通过路线监测发现作业区域存在较长阴影段,太阳能捕获量不足时,会自动调整储能分配比例,增加锂电池供电占比。这种预测性调度模式,能提前规避能源供给缺口,有效避免作业中能源中断问题,大幅提升能源系统运行稳定性。

2.3 场景适配设计:强化作业环境兼容性

2.3.1 恶劣天气能源供给保障

为应对高温与阴雨等恶劣天气对新能源环卫机器人能源供给系统的影响,需从防护设计与功能联动两方面构建保障机制。针对高温作业场景,在太阳能板与锂电池舱之间增设高效隔热层,通过阻隔外部热量传导,减少高温环境对太阳能转化效率及锂电池储能性能的负面影响;同时优化负压机与抽风散热机的联动控制逻辑,当环境温度监测值超过35℃时,抽风散热机自动启动并同步为电池舱与机器人作业模块降温,在保障能源系统稳定运行的同时,实现能源的多功能复用,避免额外能耗损耗。针对阴雨天气,对太阳能板表面、电池接口等关键部件采用IP67防水等级设计,有效抵御雨水侵蚀,防止短路故障;此时系统自动切换至锂电池优先供电模式,通过实时监测电池电量,当SOC(剩余电量)低于20%阈值时,无需人工干预即可自动触发应急补能装置,快速补充电量,确保阴雨天气下能源供给不中断,保障环卫作业连续开展。

2.3.2 狹窄区域作业能源适配

针对新能源环卫机器人需在背街小巷、校

园楼道等狭窄区域作业的场景，能源供给系统从轻量化设计与线路优化两方面着手，提升对狭窄空间的适配性。在重量控制上，采用柔性太阳能板与模块化锂电池组组合方案，柔性太阳能板具备薄型化、可弯曲特性，锂电池组则通过材料选型与结构优化减轻重量，两者总重严格控制在30kg以内，大幅降低机器人整体负载，避免因能源系统过重影响转向、穿梭等灵活操作，确保在狭窄通道内可顺畅调整作业姿态。在线路布局上，摒弃传统外部布线方式，将能源传输线路与控制线路集成于机器人底盘内部预留的线路槽中，通过密封防护与固定处理，不仅减少线路暴露在外面临的缠绕、碰撞损坏风险，还避免线路凸起对狭窄空间通行造成阻碍，从结构设计层面保障狭窄区域作业时能源供给的稳定性与连续性，满足精细化环卫作业需求。

3 系统性能验证与环保效益分析

3.1 性能验证

基于“碳路先锋”新能源环卫机器人项目原型机的多场景测试数据，所设计的创新能源供给系统展现出突出性能优势。在晴朗天气工况下，系统搭载的柔性太阳能板日均发电量可达3-4kWh，能覆盖机器人20%-30%的作业能耗需求，有效降低锂电池供电压力，使锂电池续航时间从传统设计的6小时延长至8小时以上，满足全天候连续作业的基础续航需求。即便在连续阴雨、光照不足的天气中，仅依靠锂电池独立供电，续航时间仍能稳定维持在6小时，若配合应急补能装置，可快速补充电量，实现全天无间断环卫作业。此外，系统搭载的动态功率分配策略，通过适配不同作业模式的能耗需求，使机器人能源利用率较传统系统提升25%，同时减少电池过充过放与功率骤变损耗，经测算可将电池使用寿命延长1-2年，进

一步提升系统综合运行效益。

3.2 环保效益

从碳中和目标导向出发，该新能源环卫机器人能源供给系统的环保效益可从多维度体现。在碳减排层面，相较于传统柴油环卫车每百公里约20kg的碳排放量，该系统依托新能源供给模式，实现全生命周期碳排放降低95%以上，按单台机器人年均作业1000小时的常规工况测算，每年可减少约1.2吨碳排放，大幅降低环卫作业的碳足迹。在能源清洁化层面，系统中太阳能供电占比提升至20%-30%，有效减少对电网电能的依赖，若按当前电网中40%的可再生能源占比计算，相当于每年额外减少0.3吨碳排放，进一步强化低碳属性。在资源循环层面，系统采用的磷酸铁锂电池与应急补能装置均具备高回收价值，其中电池材料回收率达90%以上，可有效避免传统废弃电池造成的土壤、水体污染，实现能源系统全生命周期的环保闭环。

4 结束语

本文结合“碳路先锋——图像识别环卫机器人”项目实践，设计的“太阳能-锂电池-应急补能”三位一体能源供给系统，有效解决了新能源环卫装备的续航短板、能耗高与适配性弱等问题，通过多能源协同、智能调控与场景适配，实现了能源供给的清洁化、长效化与可靠化，为碳中和目标下环卫装备的新能源化升级提供了可行路径。未来研究可进一步优化两方面内容：一是提升太阳能转化效率，探索钙钛矿太阳能电池等新型材料的应用，将转化效率提升；二是深化智能化管理，结合5G与物联网技术，构建多机器人协同能源调度系统，实现区域内能源的优化分配。通过持续技术创新，推动新能源环卫机器人在“无废城市”建设与低碳城市发展发挥更大作用。

参考文献：

- [1] 易安琪, 张淋, 陈振城, 等. 新能源汽车模块化现状和未来发展探究 [J]. 大众科技, 2023, 25(10): 165-168.
- [2] 赵斌良, 杨维豪, 夏靖武, 等. 基于大数据分析下最低能耗设计的新能源环卫车技术应用 [J]. 汽车电器, 2024, (04): 15-18.
- [3] 史大鹏. 新能源环卫车作业机构动力部件趋势 [C]// 四川省汽车工程学会, 成都市汽车工程学会. 四川省第十七届汽车行业学术年会论文集. 成都壹为新能源汽车有限公司, 2023: 296-298.
- [4] 梁巍. 锂电池电动汽车储能系统及控制策略研究 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12(07): 2359-2360.
- [5] 李海杰. 锂电池技术在储能领域的应用与发展趋势研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (02): 189-191.

作者简介：杨秀（2004.9—），女，汉，江苏新沂市人，本科，研究方向：信息与智能工程。

项目信息：天津市大学生创业训练计划项目，环保卫士—图像识别环卫机器人。