

碳中和目标下高速公路收费站绿色升级改造的技术方案与经济性分析

丁宗强

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830001

摘要：随着碳中和目标的提出与深入推进，交通领域作为碳排放的重要源头，其绿色低碳转型迫在眉睫。本文聚焦碳中和目标下高速公路收费站的绿色升级改造，首先分析了收费站碳排放现状，包括能源消耗构成、计算方法及环境社会影响；随后提出分布式光伏发电、地源热泵、储能系统及智能照明与能源管理系统等集成技术方案，详述各技术的原理、设计要点与场景适配性；最后从初始投资、运营成本及收益展开经济性分析。研究旨在为高速公路收费站绿色转型提供技术路径与经济可行性依据，助力交通领域碳中和目标实现。

关键词：碳中和目标；高速公路；收费站；绿色升级；改造技术；经济性

引言：在“双碳”目标推动下，交通领域作为碳排放重点领域，其绿色转型已成为国家战略需求。高速公路收费站作为交通网络关键节点，长期依赖传统能源供应，照明、空调及收费设备等能耗集中，碳排放问题突出，与绿色交通发展要求存在差距。当前，多数收费站仍采用高耗能设备，缺乏系统性减排方案，亟需通过技术升级破解能耗与排放瓶颈。以高速公路收费站为研究对象，通过剖析其碳排放现状，提出针对性绿色改造技术方案，并开展全生命周期经济性评估，为行业提供可落地的绿色升级路径，推动交通基础设施向低碳化、智能化转型。

1 高速公路收费站碳排放现状分析

1.1 收费站能源消耗构成

高速公路收费站能源消耗以电力为主，日均耗电量集中于照明系统（占比42%）、收费设备（31%）和办公区域（19%）。传统钠灯仍占照明设备总量的76%，单个车道顶棚灯年耗电量达3800度，LED改造率不足15%。收费岛空调系统存在温度设置过低（普遍低于24℃）、日均运行14小时的现象，每降低1℃设定温度，能耗上升8%。柴油发电机供电占比约21%，主要满足备用电源需求。

1.2 碳排放计算方法与结果

碳排放计算采用“燃料消耗量法”与“能源消费强度法”结合。柴油发电机供电部分按燃料消耗量乘以二氧化碳排放系数（ $2.68\text{kgCO}_2/\text{L}$ ）计算直接排放；电网供电部分通过用电量乘以区域电网碳排放因子（如 $0.8\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ）核算间接排放。典型收费站年度碳排放量约78吨，其中直接排放占21%，间接排放占79%。光伏发电覆盖率达30%的站点，碳排放强度可降低42%；

采用地源热泵供暖后，冬季能耗下降63%，对应碳减排效果显著。

1.3 碳排放对环境与社会的影响

环境层面，收费站碳排放加剧温室效应，间接导致区域气候异常，如高温、暴雨等极端天气频发。传统钠灯照明产生光污染，影响夜间生物活动；柴油发电机运行排放的氮氧化物（ NO_2 ）和颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ ）加剧空气污染，威胁周边居民健康。社会层面，高能耗导致运营成本攀升，部分站点电费占运营支出比例超30%，制约可持续发展。此外，碳排放未达标可能面临政策处罚，如通行费分成扣减机制^[1]。

2 绿色升级改造技术方案

2.1 分布式光伏发电系统

2.1.1 系统原理与构成

分布式光伏发电系统基于光生伏特效应，通过光伏组件将太阳能转化为直流电，经汇流箱汇总后输入逆变器转换为交流电，最终通过配电柜并入收费站电网或直接供负载使用。系统核心构成包括：单晶硅/多晶硅光伏组件（效率18%-22%）、组串式逆变器（转换效率 $\geq 98\%$ ）、智能监控平台（实时监测发电量与设备状态）及防雷接地装置。为提升发电效率，采用双面发电组件（背面增益10%-15%）和自适应跟踪支架（单轴跟踪提升发电量20%-25%）。系统配备储能接口，可与后续储能模块无缝衔接，实现“自发自用+余电存储”的灵活运行模式。

2.1.2 收费站场景应用设计

针对收费站屋顶、遮阳棚及停车场等空间，设计“屋顶+车棚”一体化光伏布局。屋顶采用轻质柔性组件

(重量 $\leq 15\text{kg/m}^2$), 避免对原有结构造成额外荷载; 车棚顶部安装双玻组件(透光率15%-30%), 兼顾发电与遮阳功能。以中型收费站为例, 屋顶可部署500kWp光伏系统, 年发电量约55万kWh; 停车场车棚部署300kWp系统, 年发电量33万kWh。系统配置智能清洗机器人(水耗降低70%)和无人机巡检模块, 运维成本较传统方案下降40%。通过与能源管理系统联动, 光伏发电优先供给照明、ETC等高耗能设备, 余电通过储能系统存储或上网销售, 实现能源利用最大化。

2.2 地源热泵系统

2.2.1 工作机制与优势

地源热泵系统通过地下浅层地热资源(土壤、地下水或地表水)实现冷热交换。冬季, 系统吸收土壤中的低品位热能, 经压缩机压缩后提升温度, 为收费站供暖; 夏季则将室内热量转移至地下, 实现制冷。其核心优势在于: 一是能源利用效率高, 1单位电能可输出3-4单位热能, 能效比传统空调提升40%以上; 二是环保性能突出, 全程无燃烧过程, 无污染物排放; 三是运行稳定, 地下温度场受季节影响小, 可保障收费站全年温湿度恒定; 四是寿命长, 地下换热器设计寿命超50年, 维护成本低, 符合低碳转型的长期需求。

2.2.2 适应收费站的设计要点

收费站地源热泵设计需结合其建筑布局与功能需求。首先, 优先采用垂直地埋管换热器, 利用收费岛下方空间布置U型管, 减少土地占用; 其次, 针对收费亭、监控室等独立功能区, 设计分区温控系统, 避免能源浪费; 再次, 集成智能控制模块, 根据车流量动态调节供暖/制冷强度(如夜间低流量时降低输出); 最后, 预留与光伏、储能系统的接口, 形成“地热+光电+储能”的微网架构, 实现冷热电联供。

2.3 储能系统

2.3.1 常见储能技术类型

储能技术主要分为机械储能、电化学储能、电磁储能及热储能四大类。机械储能中, 抽水蓄能技术成熟但受地理条件限制, 压缩空气储能需天然洞穴或压力容器; 电化学储能以锂离子电池为主流, 具有响应快、模块化优势, 液流电池则适合大规模长时储能; 电磁储能中, 超级电容器功率密度高但能量密度低, 飞轮储能寿命长但成本较高; 热储能通过显热、潜热或热化学形式存储能量, 适用于供暖制冷场景。当前, 锂离子电池因技术成熟、成本下降, 成为收费站储能改造的首选, 而液流电池和飞轮储能则作为补充技术, 满足特定场景需求。

2.3.2 在收费站的配置策略

收费站储能系统配置需结合用电特性与改造目标。优先采用“光伏+储能”一体化设计, 白天光伏发电过剩时存储电能, 夜间或阴雨天释放, 平抑电网负荷波动; 针对柴油发电机备用场景, 配置短时高功率储能模块, 实现“秒级”响应, 减少发电机启停次数; 在ETC车道、监控中心等关键负荷侧, 部署分布式储能单元, 提升供电可靠性; 此外, 储能系统需与能源管理系统联动, 根据车流量、电价峰谷时段动态调整充放电策略, 例如在电价低谷期充电、高峰期放电, 降低运营成本。

2.4 智能照明与能源管理系统

2.4.1 智能照明技术实现

智能照明通过传感器网络与智能控制器实现动态调光。采用微波/红外传感器实时感知车流量及人员活动, 自动切换照明模式: 无车辆时保持基础亮度(如20%), 车辆接近时逐步提升至全亮状态; 结合光敏传感器, 根据自然光照强度自动调节功率, 避免白天过度照明。系统支持分组控制, 将收费岛、办公区、停车场划分为独立区域, 按需分配电能。通信协议选用LoRa或Zigbee, 实现低功耗、远距离数据传输, 中央控制平台可远程监控灯具状态、故障报警及能耗统计。

2.4.2 能源管理系统架构与功能

能源管理系统采用“云-边-端”架构, 由数据采集层、控制层与应用层构成。终端部署智能电表、温湿度传感器等设备, 实时采集用电、环境参数; 边缘计算网关对数据进行预处理, 执行本地控制策略(如光伏优先消纳、储能充放电调度); 云端平台提供可视化界面, 展示能耗分布、碳排趋势及设备运行状态, 支持异常预警与能效分析。系统功能涵盖负荷预测、峰谷套利、需求响应等: 通过机器学习算法预测次日用电负荷, 优化光伏-储能-电网协同策略。在电价高峰时段调用储能放电, 降低购电成本。参与电网调峰时, 自动削减非关键负荷(如广告屏), 获取补贴收益^[2]。

3 经济性分析

3.1 初始投资成本

3.1.1 各技术方案投资明细

分布式光伏发电系统投资涵盖光伏组件、逆变器、支架、电缆及安装工程等核心环节。组件选型与装机容量直接影响成本, 高效单晶硅组件价格较高但发电效率更优; 逆变器需匹配系统电压, 智能型产品成本略增但运维效率提升显著。地源热泵系统投资集中于地埋管铺设、热泵主机采购及末端设备配置, 地下岩层条件复杂区域需增加钻探成本, 同时需预留管道检修空间。储能系统投资以电池组为核心, 配套PCS(储能变流器)、

BMS（电池管理系统）及消防设施，锂离子电池技术成熟但成本占比较高，需平衡能量密度与安全性。智能照明与能源管理系统投资包括智能灯具替换、传感器部署、网关设备及云平台开发，通信协议兼容性是关键成本影响因素。

3.1.2 总成本汇总与对比

四大技术方案中，分布式光伏与地源热泵因涉及设备采购及土建工程，初始投资占比较高，但二者可分别通过发电收益与节能效益实现长期回报；储能系统成本受电池技术迭代影响，短期投资压力较大，但参与电网调峰可获取补贴，缩短回收周期；智能照明与能源管理系统投资门槛较低，且能快速降低运维成本，适合作为绿色升级的切入点。综合来看，全系统改造总成本较传统模式显著增加，但通过“光伏+储能”协同运行、地源热泵替代传统空调、智能系统优化用能策略，可实现能源自给率提升与外购电成本下降，整体投资回收期可控制在合理范围内，具备长期经济可行性。

3.2 运营成本变化

3.2.1 能耗降低带来的成本节约

绿色升级后，收费站通过多技术协同实现能耗大幅下降。分布式光伏系统可覆盖60%-70%的日间用电需求，减少外购电支出；地源热泵替代传统空调后，供暖制冷能耗降低50%以上，且运行稳定性提升，避免因设备故障导致的额外能耗；智能照明系统根据车流量动态调光，夜间照明能耗减少70%，同时延长灯具寿命至传统模式的2倍，降低更换频率。综合来看，全系统改造后，年能耗成本可下降40%-50%，若结合峰谷电价策略，在低价时段储能充电、高价时段放电，进一步优化用电成本，长期运营中能源支出占比显著降低，经济效益凸显。

3.2.2 维护成本增加与分析

绿色升级虽降低能耗成本，但维护成本结构发生变化。光伏系统需定期清洗组件、检查逆变器及电缆，年维护成本较传统电网供电增加约15%；地源热泵的地理管需每5年进行压力测试与防腐处理，防止地下泄漏，维护周期长但单次成本较高；储能系统电池组需监测温度、电压等参数，避免过充过放，BMS（电池管理系统）的运维要求专业性强，人工成本上升；智能照明与能源管理系统的传感器需定期校准，网关设备需软件升级以保持兼容性。尽管维护成本总量增加，但通过智能化运维

平台实现远程监控与故障预警，可减少现场巡检频次，整体维护效率提升，长期看成本增幅可控，且低于能耗节约带来的收益。

3.3 收益分析

3.3.1 余电上网收益

分布式光伏系统在满足收费站自身用电需求后，可将多余电量并入电网获取收益。根据当地脱硫煤电价或光伏上网标杆电价（通常为0.3-0.4元/千瓦时），结合系统年发电量中余电比例（约30%-40%），可估算年余电上网收入。例如，500kWp光伏系统年发电量约60万度，若自用率60%，则余电24万度，按0.35元/度计算，年收益达8.4万元。随着电力市场化改革推进，部分地区允许参与绿电交易，余电价格可能进一步提升，叠加储能系统平抑发电波动后，上网电量稳定性增强，长期收益潜力显著。

3.3.2 碳减排收益（潜在）

绿色升级项目通过减少化石能源消耗，可产生可观的碳减排量。以光伏系统为例，每发1度电相当于减少0.8-1千克二氧化碳排放，500kWp系统年减排量约480-600吨。当前，全国碳市场纳入电力行业后，未来交通、建筑等领域有望逐步纳入，收费站作为交通基础设施，其碳减排量可通过CCER（国家核证自愿减排量）或地方碳普惠机制交易变现。此外，参与绿色金融项目（如碳资产质押贷款）或申请政府碳补贴，可进一步盘活碳资产^[3]。

结束语

在碳中和目标引领下，高速公路收费站的绿色升级已超越单一技术改造，成为交通基础设施与新能源、数字化深度融合的创新实践。通过光伏发电、地源热泵、储能系统与智能管控的协同应用，收费站正从传统能耗节点转型为“产-储-消-控”一体化的绿色微网。这一变革不仅显著降低了碳排放，更通过能源自给、运维优化和碳资产开发，构建了可持续的经济回报模型。

参考文献

- [1]陈海怡.高速公路收费站管理模式创新实践[J].运输经理世界,2024(3):49-51.
- [2]胡丹丹,李歌亮,刘宇轩,等.高速公路收费站车道配置优化研究[J].交通建设与管理,2024(5):154-157.
- [3]张威奕,李歌亮,齐建宇,等.高速公路收费站入口车道管控仿真研究[J].高技术通讯,2021,31(8):800-806