

智慧技术赋能下高速零碳服务区建设路径与实践

张 伟¹ 高 亮¹ 陈金良¹ 李旭阳² 邓昌龙³

1.中电建（广东）中开高速公路有限公司 广东 中山 528400

2.中电建盘州低热值煤发电有限公司 贵州 六盘水 553000

3.中国电建集团江西省电力设计院有限公司 江西 南昌 330006

【摘 要】：在“双碳”战略背景下，高速公路服务区作为交通基础设施的重要节点，其绿色低碳转型成为行业发展的必然趋势。智慧技术与零碳技术的深度融合，为服务区实现全生命周期“碳中和”提供了核心支撑。本文以广东中开高速火炬服务区为研究对象，系统梳理智慧技术赋能零碳服务区的建设路径，从技术体系、管控机制、实践成效三个维度展开分析。通过绿色建筑、可再生能源利用、智慧管控平台等关键技术的集成应用，验证了“1+N+1”模块化建设思路的可行性，并量化分析其经济、环境、生态及社会效益。研究表明，智慧技术的深度赋能可实现服务区能源供给零排放、运营管理高效化、示范效应规模化，为我国交通行业低碳转型提供可复制、可推广的实践范式。

【关键词】：智慧技术；零碳服务区；建设路径；碳中和；示范实践

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.004

1 引言

1.1 研究背景

随着全球气候治理进程加快，我国提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的战略目标，交通运输行业作为碳排放重点领域（占全国总排放量约10%），其绿色低碳转型迫在眉睫。高速公路服务区作为交通网络的重要枢纽，具有占地面积广、能源消耗大、服务功能全的特点，传统服务区“高能耗、高排放、低效率”的运营模式已难以适应“双碳”战略要求。近年来，国家密集出台政策推动交通零碳发展：《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出建立碳排放监测平台、建设零碳交通示范区；《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030年）》将城乡建设与交通低碳零碳技术攻关列为重点任务；中国交通运输协会发布《高速公路零碳服务区评价技术规范》，为行业建设提供了标准依据。在此背景下，集成智慧技术与零碳技术的新型服务区建设成为摆脱传统困境的关键路径。

2 理论基础与核心概念界定

2.1 核心概念

零碳服务区指在全生命周期内，通过可再生能源利用、节能技术应用、碳汇抵消等手段，实现净碳排放量为零的高速公路服务区，其核心特征是能源供给绿色化、运营管理低碳化、污废处理资源化。智慧技术涵盖云计算、大数据、物联网、人工智能、区块链等现代信息技术，在服务区场景中表现为智慧能源管控、智能停车充电、碳排放实时监测等应用形态。

2.2 相关理论支撑

生命周期评价理论用于核算服务区全生命周期的碳排放总量，包括建材生产、施工建设、运营维护、拆除回收等阶段，为碳中和目标实现提供量化依据。碳汇理论通过绿化植物光合

作用吸收二氧化碳，抵消服务区运营过程中产生的碳排放，形成“减排+增汇”的双路径碳中和模式。智慧管控理论以数据为核心，通过感知层、网络层、平台层、应用层的分层架构，实现服务区能源、环境、服务等要素的实时监测与智能调度。

3 智慧技术赋能零碳服务区建设路径

基于火炬服务区“1+N+1”模块化建设思路，结合智慧技术与零碳技术的融合应用，构建以下四大核心建设路径。

3.1 智慧化能源供给体系建设

可再生能源多元集成：通过光伏、储能、充电系统的协同联动，实现能源自给自足。智慧技术赋能体现在利用AI算法优化边坡、屋顶、停车场等区域的光伏组件安装角度，结合实时光照数据动态调整，提升发电效率；基于大数据分析预测用电负荷，通过0.25MW/0.5MWh储能系统存储光伏盈余电能，夜间自动释放，实现“峰谷互补”；充电网络智慧管理32个充电枪接入智慧平台，支持预约充电、动态调价、功率优化分配，提升充电效率与用户体验。全区域采用LED节能灯具，结合人体感应、光线感应技术，实现“人来灯亮、人走灯灭”，降低无效能耗；厨房厨具100%用电，通过智慧能耗监测平台实时监控设备用电量，优化使用流程，减少能源浪费。

3.2 智慧化污废与资源循环体系建设

南、北区各配置300m³/d污水处理系统，结合物联网传感器实时监测水质、水量，通过智能算法调节处理参数，确保出水达标；中水回收智能调度100m³地理式中水存储罐与智慧喷淋系统联动，根据绿化需水量、天气情况动态分配中水，解决“喷淋系统无法完全消耗中水”的问题。垃圾房配置智能分类设备，通过图像识别技术引导用户正确分类，结合重量传感器统计垃圾产生量，为减量措施制定提供数据支持；建立“垃圾—回收—再利用”智慧追溯体系，通过区块链技术记录垃圾处

理全流程，确保资源化率达标。南、北区雨水回收模块接入智慧平台，实时监测降雨量、储水量，自动控制收集泵运行，收集的雨水经净化后用于绿化浇灌，替代自来水消耗。

3.3 智慧化碳排放监测与管控体系建设

部署能量传感器、碳排放监测仪、环境监测设备等终端，覆盖能源消耗、碳排放、空气质量、绿化碳汇等核心指标，实现数据实时采集；数据传输层采用 5G+物联网技术，确保数据传输高速、稳定，延迟控制在毫秒级。平台采用物联设备层—数据传输层—大数据平台层—应用表现层四层架构，集成碳排放管理、能源管理、停车管理等 8 大功能模块，见表 1。

表 1 火炬服务区智慧管控平台功能模块表

功能模块	核心技术支撑	主要功能	应用成效
碳排放管理系统	LCA 算法、大数据分析	全生命周期碳排放核算、减排跟踪	实时掌握碳排放在线数据，支撑碳中和决策
智慧能源管理系统	负荷预测算法、AI 调度	光伏/储能/充电协同、能耗监测优化	能源自给率提升至 100%，绿电供应全覆盖
智能停车管理系统	视频识别、车位引导	车位预约、反向寻车、动态计费	停车效率提升 30%，用户满意度提高
充电桩管理系统	功率分配算法、移动支付	预约充电、功率优化、故障预警	充电平均等待时间缩短至 15 分钟以内
智能安防管理系统	视频监控、AI 识别	异常行为监测、消防预警	安全事故发生率为 0
智慧路灯管理系统	光线感应、人体感应	智能亮灯、亮度调节	路灯能耗降低 40%
移动门户	小程序、APP	服务预约、信息查询、投诉反馈	日均活跃用户超 500 人次
综合运营中心平台	数字孪生、可视化技术	全局态势监控、应急指挥调度	运营管理效率提升 50%

求解速度较同类产品大幅提升，支持实时监控、数据统计、趋势分析、预警报警等功能，为管理者提供“一站式”决策支持；基于 LCA 理论，平台自动核算全生命周期碳排放量，生成碳排放清单与减排建议，实现“精准控碳”。



图 1 可视化管理平台

3.4 智慧化绿色建筑与碳汇体系建设

采用加气块隔墙与中空玻璃，结合 BIM 技术优化建筑布局，提升自然采光、通风效率，减少空调使用；通过智慧平台监控建筑围护结构热损耗，为保温隔热优化提供数据支持。

38033 m²绿地配置植物生长传感器，实时监测植被健康状况、碳吸收量，结合智慧灌溉系统精准补水施肥，提升碳汇能力；建立绿化碳汇核算模型，通过平台自动计算碳汇量，作为碳中和的重要抵消途径。

4 火炬服务区实践案例分析

4.1 项目概况

火炬服务区位于中开高速中山段 K7+400 处，是深中通道接中开高速的首个服务区，采用中置式布局，总用地 120.18 亩，总建筑面积 7676.63 m²，规划大车位 102 个、小车位 256 个。项目作为交通运输部第一批零碳试点项目，于 2024 年 8 月 8 日实现光伏并网发电，截至 10 月 17 日累计发电 44.60 万千瓦时，日均发电 6463 千瓦时，已初步实现运营阶段零碳排放。

4.2 核心创新点

能源供给零排放创新集成光伏、储能、节能技术，构建“绿电自给自足”体系，实现能源供给二氧化碳零排放，形成可复制的技术体系与专利成果。平台求解速度领先同类产品，实现碳排放、能源、服务等多维度数据的实时整合与智能分析，管理效率提升 50%以上。智慧服务区融合 AI、大数据、物联网技术，打造“零碳+智慧”双特色示范样板，涵盖智慧停车、充电、服务等全场景，引领行业发展方向。

表 2 火炬服务区 50 年全生命周期碳排放核算表

生命周期阶段	碳排放来源	碳排放量 (吨 CO ₂)	抵消途径	净碳排放量 (吨 CO ₂)
建材生产阶段	加气块、钢材、水泥等	2860	-	2860
施工建设阶段	机械能耗、运输能耗	520	施工期绿化碳汇 (临时植被)	480
运营阶段	能源消耗、污水排放	12600	光伏绿电替代 (减排 12600 吨)+绿化碳汇 (年均 180 吨×50 年=9000 吨)	-9000
拆除回收阶段	拆除机械能耗、废弃物处理	380	建材回收利用 (减排 320 吨)	60
合计	-	16360	-	0 (碳中和)

注：运营阶段光伏绿电替代减排量=年均用电量×碳排放系数×50 年；绿化碳汇量=绿地面积×单位面积碳汇强度×50 年（参考《造林项目碳汇计量与监测指南》）。

5 智慧技术赋能零碳服务区的综合效益分析

5.1 经济效益

光伏年均发电量约 236.9 万千瓦时，按商业电价 672.5 元/MWh 计算，年均节约电费约 159.3 万元；智慧管控平台减少

人工巡检、调度成本，年均节约运营费用约 30 万元；资本金内部收益率 7.00%（利率 3.6%，不含碳交易收益），投资回收期约 12 年，符合基础设施项目投资回报预期。未来可通过出售碳减排量获得额外收益；作为全国首批零碳试点项目，提升企业社会形象，吸引更多客流与商业合作，带动服务区营收增长。

表 3 火炬服务区环境效益量化表

环境指标	传统服务区 (基准值)	火炬服务区 (实际值)	改善幅度	智慧技术 贡献度
化石能源消耗 (吨标煤/年)	860	0	100%减排	100% (绿电替代)
二氧化碳排放 (吨/年)	2150	0	100%减排	60% (监测管控)
施工现场湿作业比例	80%	4%	减少 95%	-
污染物排放(废气/废水/噪声)	基准值 100	≤10	减少 90% 以上	40% (智能处理)
生活垃圾无害化处理率	85%	100%	提升 15 个百分点	30% (分类引导)

回收利用原址表土层土，移植保护高大树木，维持场地生态连续性；38033 m²绿地形成“绿色屏障”，提升区域生物多样性，改善微气候。绿化率近 40%，年均碳汇量约 180 吨 CO₂，50 年累计碳汇 9000 吨，有效抵消全生命周期碳排放。

5.2 社会效益

作为全国首批、广东唯一的公路水路零碳试点项目，为行业提供“智慧+零碳”融合建设的标准范式，目前已吸引多地交通部门考察学习。智慧停车、预约充电、移动服务等功能优化用户体验，日均服务客流较传统服务区提升 25%。项目形成零碳技术体系与智慧管控平台专利，培养一批“零碳+智慧”复合型人才，推动行业技术进步。

6 面临的挑战与优化展望

6.1 当前挑战

中水回收利用率仍需提升，光伏组件长期运行后的清洁维

护与效率衰减问题需解决，智慧平台与不同品牌设备的兼容性有待优化。初期建设投资较高，碳交易市场尚未完全成熟，间接收益难以量化。零碳服务区全生命周期评价标准、智慧技术应用规范仍需完善，行业内缺乏统一的考核指标体系。

6.2 优化展望

引入数字孪生技术，构建服务区虚拟仿真模型，实现能源流、物质流、碳排放的可视化模拟与优化；应用 AIoT 技术提升中水利用效率，通过图像识别监测绿化需水量，动态调整喷淋方案；探索光伏组件清洁机器人、无人机巡检等技术，降低运维成本。构建“零碳服务区+碳交易+商业运营”一体化模式，通过出售碳汇、开展零碳科普教育等增加收益；推广“光伏+储能+充电”特许经营模式，吸引社会资本参与项目建设与运营。基于火炬服务区实践经验，参与制定《高速公路零碳服务区建设技术指南》，明确智慧技术应用要求、碳排放核算方法、评价指标体系；推动行业标准与国家“双碳”政策衔接，争取更多政策支持与资金补贴。

7 结论

智慧技术与零碳技术的深度融合是高速公路服务区实现碳中和目标的核心路径。广东中开高速火炬服务区通过“1+N+1”模块化建设思路，构建了智慧化能源供给、资源循环、碳排放管控、绿色建筑四大体系，实现了 50 年全生命周期碳中和。实践证明，智慧技术通过数据驱动优化能源与资源配置，提升利用效率；通过实时监测与智能调度，降低碳排放与运营成本；通过标准化平台建设，实现示范效应规模化。火炬服务区作为全国首批零碳试点项目，其建设路径与实践经验为我国交通行业低碳转型提供了重要参考。未来需进一步推动技术迭代、商业模式创新与标准体系完善，让“智慧+零碳”成为高速公路服务区的主流建设模式，为实现交通领域碳达峰、碳中和目标贡献力量。

参考文献：

- [1] 张吉祥,李友清,梅敏.高速公路零碳服务区绿色建造[J/OL].公路,2025,(11):111-115[2025-11-21]
- [2] 王京宁.建筑低碳化与零碳设计研究——以某高速公路服务区为例[J].建设科技,2025,(16):47-50.
- [3] 王亮,朱昆,杨晓辉,等.基于信息间隙决策理论的高速零碳服务区微能网调度[J].江西电力,2025,49(01):38-42.
- [4] 陈良奇,王江峰,娄聚伟,等.我国高速公路零碳服务区现状与发展综述[J].建筑节能(中英文),2024,52(10):80-87+141.