

# 低碳理念下高速公路机电设备节能改造与能效评估方法

王晓龙

辽宁省交通通信发展有限责任公司 辽宁沈阳 110000

**摘要:** 在低碳发展理念的推动下,高速公路机电设备节能改造与能效评估已成为交通基础设施绿色转型的重要环节。机电系统作为高速公路运营的核心,其能源消耗主要集中在照明、通风、监控及供电等环节,开展节能改造并建立科学的能效评估体系对实现碳减排目标具有现实意义。

**关键词:** 低碳理念;高速公路;机电设备节能改造;能效评估方法

为响应国家“双碳”目标,高速公路机电系统需通过节能改造与能效评估实现绿色转型。机电设备作为高速公路运营的核心,其能耗占运营总成本的30%–40%,节能潜力显著。

## 一、高速公路机电设备节能改造路径

### 1. 照明系统智能化升级

照明系统智能化升级技术路径,智能调光系统:通过雷达、车辆检测器实时感知车流,动态调节隧道灯光亮度(如陕西旬风高速实现40%–60%节电率)。LED灯具替换:将传统钠灯改为高效LED灯,高速隧道改造后亮度提升20%–53%。风光互补供电:盘兴高速采用光伏+风力发电,单台监控设备月省电720度。机电设备节能改造关键措施,智慧运维平台:利用AI和大数据实现设备状态监测,从被动维护转向主动预防。高杆灯光控改造:按需照明避免浪费,部分路段节电10%–20%。供配电系统优化:高速改造61万盏LED灯驱动电源,提升能效。

### 2. 供配电系统优化

供配电系统优化路径,集中智能管理,将沿线收费站、服务区等划分为集中供电区,通过自建变电所与大电网专线连接,实现远程自动化管理。节能改造技术路径,无功补偿技术,采用“自愈式”电容器,结合集中补偿与分散补偿,降低线路损耗30%以上。照明系统改造,推广LED光源与智能调光技术,如某高速改造后节能率达45%。应用“单灯补偿”技术,避免传统补偿装置对路灯系统的影响<sup>[1]</sup>。新能源整合,在电网薄弱区域试点风光互补供电,结合柴油发电机组形成混合能源系统。(1)无功补偿技术:供配电系统优化,设备升级:采用磁悬浮离心风机、稀土永磁电机等高效设备,降低

机械损耗。智能监控:通过电力监控系统实现全路段设备状态实时监测,提升运维效率。架构革新:应用开源鸿蒙系统统一设备通信协议,解决信息孤岛问题。集中补偿:在变电所低压母线集中安装电容器,补偿变压器及线路无功损耗。动态调节:采用无功功率参数或电压参数自动补偿装置,适应负荷波动。谐波治理:结合滤波单元的无功补偿模式,适用于谐波污染严重的场景。综合能效管理,能耗分析:通过数据可视化识别节能潜力,优化照明、通风等系统运行策略。智能控制:隧道照明根据交通量自动调光,服务区采用车辆运动检测节能。(2)变压器能效升级:供配电系统优化,智能化改造:通过物联网、云计算技术实现远程监控与自动化控制,减少人工依赖。集中管理:整合分散的变电站资源,统一调度降低运维成本。中压供电替代:采用6kV/10kV中压供电延长传输距离,减少线路损耗。变压器能效升级执行新能效标准:采用符合GB 20052–2020的1级、2级能效变压器,损耗降低10%–45%。技术创新:推广立体卷铁心结构、非晶合金材料等,提升变压器效率。政策支持:政府通过补贴、目录推荐等方式推动高效变压器应用。综合效益,节能降耗:如莆田高速通过智能照明和变压器改造,年节电超13%。成本节约:修旧利废、市场化购电等措施降低运营成本。(3)分布式能源接入:供配电系统优化,直流供电技术:采用台达10KV SST–DC系统,通过800V直流输出直接驱动隧道照明、风机等设备,效率达95%以上,传输距离超3公里,减少AC/DC转换损耗。智能管理:利用物联网技术实现远程集中监控,实时监测电压、电流等参数,并通过智能运维降低维护成本。分布式能源接入,光储充一体化:在服务区建设光伏车棚+储能系统,实现绿电自给,如山东高

速的智慧能源网系统，动态平衡光伏发电与市政电网需求。交直流混联：通过直流配电网直接为充电桩、监控设备供电，避免交直流转换损耗，年节电超119万千瓦时。政策与标准支持，国家鼓励在高速公路沿线布局光伏及储能设施，推动“源-荷”协同，如四川计划2025年实现光伏发电与日间用电平衡。

### 3. 通风与监控系统节能

高速公路机电设备节能改造路径，通风系统节能，变频控制技术：通过调整风机转速匹配实际需求，避免阀门节流损耗，节能效果显著（风压与转速平方成正比）。智能联动：结合环境参数（如CO浓度、车流量）动态调节通风量，如“冀鸿”系统实现火灾时自动排风。监控系统节能，能耗监测：部署私有云平台，分类统计设备用电量（如照明、消防），通过AI分析异常耗电。智能巡检：利用边缘计算替代人工巡检，实时监测设备状态并自动报警，降低运维成本。协同优化，数据互通：统一设备管理模型（如鸿蒙系统），实现通风与监控数据共享，提升响应效率。动态策略：根据监控反馈的车流、环境数据，自动调整通风与照明强度，如隧道内车流减少时降低亮度。

## 二、能效评估方法体系

### 1. 评估方法体系构建

评估方法体系框架，评估方法体系以“低碳节能”为核心目标，融合全生命周期管理理念，涵盖数据采集、指标量化、模型构建、结果分析及优化反馈等环节，形成闭环管理流程。具体框架包括：数据采集层：通过物联网传感器、智能监控系统等实时采集机电设备运行数据，如能耗、故障率、环境参数等，确保数据全面性和准确性。指标量化层：将低碳理念转化为可量化的评估指标，如单位能耗碳排放量、设备能效比等，为后续分析提供基础。模型构建层：采用层次分析法（AHP）确定指标权重，结合模糊综合评价法处理数据不确定性，构建多维度评估模型。结果分析层：通过模型计算得出能效评估结果，识别高能耗设备及节能潜力点，为优化决策提供依据。优化反馈层：根据评估结果制定节能措施，如设备升级、运行策略调整等，并持续跟踪优化效果，形成动态改进机制。关键评估方法，层次分析法（AHP）：通过构建层次结构模型，将复杂问题分解为目标层、准则层和方案层，结合专家打分确定指标权重，确保评估的科学性和客观性。模糊综合评价法：针对机电设备运行中的不确定性因素，如设备老化、环境

变化等，采用模糊数学理论进行量化处理，提高评估结果的准确性。数据包络分析法（DEA）：通过比较同类设备的投入产出效率，识别低效设备，为资源优化配置提供依据。全生命周期成本分析法（LCCA）：综合考虑设备采购、安装、运行、维护及报废等阶段的成本与效益，评估其长期节能潜力。评估指标选取原则，科学性：指标需反映机电设备能效的本质特征，符合低碳理念要求。可操作性：指标数据应易于获取，计算方法简单可行<sup>[2]</sup>。全面性：涵盖设备能耗、碳排放、运行效率、维护成本等多方面。动态性：指标需随技术进步和政策调整不断更新，保持评估的时效性。指标权重确定，采用层次分析法（AHP）结合专家打分法确定指标权重。具体步骤如下：构建层次结构模型：将评估目标分解为一级指标和二级指标，形成递阶层次结构。构造判断矩阵：针对每一层次，通过两两比较确定各指标的相对重要性，构造判断矩阵。计算权重向量：采用特征根法计算判断矩阵的最大特征根及对应的特征向量，归一化后得到各指标的权重。一致性检验：计算一致性比例（CR），若 $CR < 0.1$ ，则通过一致性检验，否则需调整判断矩阵。指标评分标准，根据指标特性，制定如下评分标准：定性指标：如设备利用率、故障率等，采用百分制评分，根据实际值与标准值的偏离程度打分。定量指标：如单位能耗碳排放量、设备能效比等，采用标准化处理，将实际值转化为0-1的评分值。环境适应性指标：根据设备在极端环境下的运行表现，分为优、良、中、差四个等级，分别对应100分、80分、60分、40分。

### 2. 评估模型应用

模型构建步骤，数据预处理：对原始数据进行去噪、归一化处理，采用PCA（主成分分析）降维。模型选择：短期预测：ARIMA时间序列模型，预测未来24小时能耗。长期优化：混合整数线性规划（MILP）模型，求解设备调度最优解。参数校准：采用遗传算法优化模型参数，确保预测误差率 $< 5\%$ 。模型应用案例，照明系统优化：问题：某高速公路隧道照明年均能耗120万kWh，碳排放量960吨。解决方案：采用LED+智能调光系统，通过模型预测车流量变化，动态调整照明亮度。效果：能耗降低40%，年减排384吨CO<sub>2</sub>，投资回收期3.2年。通风系统节能：问题：传统通风系统能耗占隧道总能耗的35%。解决方案：构建CFD模型优化风道设计，结合VSD（变频调速）技术。效果：通风能耗降低25%，年节约电费18万元。供配电系统升级：问题：变压器空载

损耗占系统总损耗的15%。解决方案：采用非晶合金变压器，通过模型计算最佳负载率。效果：空载损耗降低70%，年节约电费12万元。模型验证方法，交叉验证：将数据集分为训练集（70%）、验证集（15%）、测试集（15%）。误差分析：计算均方根误差（RMSE）、平均绝对百分比误差（MAPE）。敏感性分析：识别对结果影响最大的参数（如车流量、温度）。实施路径与保障措施，技术路径，短期（1-2年）：完成设备能效普查，建立基础数据库。中期（3-5年）：部署物联网监测系统，实现数据实时采集。长期（5年以上）：构建AI驱动的能效优化平台，实现预测性维护。管理措施，组织保障：成立由业主、设计院、施工单位组成的能效管理小组。资金保障：申请绿色建筑认证补贴，争取碳交易收益。培训保障：开展BIM、LCA等软件操作培训，提升员工技能。

### 3. 评估流程设计

评估流程需逻辑清晰、可操作性强，分为以下步骤：评估准备阶段，目标设定：明确评估范围（如特定路段或设备类型）与低碳目标（如减少碳排放量或提升能效百分比）。数据收集：整理设备技术参数、历史运行数据及环境信息（如气候条件）。团队组建：跨部门协作，包括能源专家、工程师及环境评估人员，确保专业性与全面性。实施评估阶段，现场检查：实地勘察设备运行状态，记录能耗数据（如用电量、燃料消耗）及维护记录。数据分析：运用能效指标量化法计算关键指标，结合LCA评估全生命周期环境影响。例如，分析通风系统在夏季的能耗峰值，识别改进潜力。模拟优化：通过动态监测数据构建模型，预测不同优化策略的效果（如调整照明亮度或升级变频器）。报告编制与建议阶段，报告撰写：汇总评估结果，包括能效得分、碳排放清单及改进建议。报告需结构化，突出低碳亮点与问题点。建议提出：针对识别的问题，制定具体措施，如设备升级（替换高耗能设备为节能型号）、运行优化（调整工作模式）或管理改进（加强维护计划）。建议需兼顾可行性与成本效益。反馈与改进阶段，实施跟踪：定期复查改进措施的执行情况，通过持续监测验证能效提升效果。流程优

化：根据反馈调整评估方法，例如引入更先进的智能分析工具，提升评估精度与响应速度。

### 三、政策实施建议

#### 1. 政策制定层面

完善标准体系：制定统一的能效评估标准，明确设备能效等级和准入要求，推动行业规范发展。强化激励机制：对采用高效机电设备的项目给予税收优惠或补贴，鼓励企业主动升级技术。加强监管力度：建立能效考核机制，将评估结果纳入企业信用评价，确保政策落地。

#### 2. 技术应用层面

推广智能技术：应用物联网和大数据分析，实现设备远程监控和智能调度，减少人为能耗浪费。优化设备选型：优先选择可再生能源设备（如太阳能供电系统），降低对传统能源依赖。开展试点示范：在重点路段建设低碳机电示范工程，积累经验后逐步推广至全网。

#### 3. 管理优化层面

提升人员素质：组织能效管理培训，增强运维团队对评估工具和低碳技术的应用能力。建立反馈机制：定期收集评估数据，分析政策效果并动态调整策略，形成闭环管理。促进跨部门协作：联合环保、能源等部门，整合资源共同推进低碳目标实现。

总之，构建低碳理念下的高速公路机电设备能效评估体系，需政策引导、技术创新与管理优化相结合。通过系统性评估方法，可精准识别能耗瓶颈，为低碳转型提供科学依据。未来应持续完善政策框架，强化技术应用，推动行业向高效、绿色方向发展。

### 参考文献

[1] 江婷, 谢宗业, 蔡进, 等. “双碳”背景下交通机电检测技术的发展研究[J]. 交通节能与环保, 2025, 21(2): 193-197. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2025.02.038.

[2] 赵丽萍. “双碳”目标下高速公路服务区充电桩配置规模测算[J]. 中国公路, 2023, (1): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3897.2023.01.007.