

# 高速公路机电系统节能降耗技术实践路径

周桂宇

广西交通投资集团梧州高速公路运营有限公司平南分公司, 广西 贵港 537300

**[摘要]**在国家“双碳”政策背景下,高速公路机电系统节能减排已成为绿色交通发展的必要课题之一。文章着重剖析高速公路机电系统的能耗状况下存在的主要问题包括供配电、照明以及运行维护方面的问题,重点论述了高效节能照明、智能供配电、设备自动控制等关键技术,并提出加强技术改进和完善管理措施相融合的方法策略。研究证明,在建立能耗监管平台,开展智能管控,普及可再生能源的应用下可以实现节能减排的目的,从而节约运营费用,提高能源利用率,对于高速公路的可持续性发展有着很大的借鉴意义。

**[关键词]**高速公路;机电系统;节能降耗;实践路径

DOI: 10.33142/sca.v9i2.19110

中图分类号: U45

文献标识码: A

## Practice Path of Energy-saving and Consumption Reducing Technology for Highway Electromechanical System

ZHOU Guiyu

Pingnan Branch of Guangxi Communications Investment Group Wuzhou Expressway Operation Co., Ltd., Guigang, Guangxi, 537300, China

**Abstract:** Under the background of the national "dual carbon" policy, energy conservation and emission reduction of highway electromechanical systems have become one of the necessary issues for the development of green transportation. The article focuses on analyzing the main problems of energy consumption in the electromechanical system of highways, including power supply and distribution, lighting, and operation and maintenance issues. It emphasizes key technologies such as efficient and energy-saving lighting, intelligent power supply and distribution, and equipment automatic control, and proposes methods and strategies to strengthen technical improvement and improve management measures. Research has shown that establishing an energy consumption monitoring platform, implementing intelligent control, and promoting the application of renewable energy can achieve the goal of energy conservation and emission reduction, thereby saving operating costs and improving energy utilization efficiency. This has great reference significance for the sustainable development of highways.

**Keywords:** highway; mechanical and electrical systems; energy-saving and consumption reduction; practical path

### 引言

在全世界面临的能源短缺以及全球变暖形势越来越严重的今天,节能降耗与保护环境已经成为各行各业的重中之重,在此情况下,高速公路作为一种快速便捷的出行工具,在提高人民生活质量的同时也带动着整个国家经济发展。但是高速公路运行过程中所使用的机电设备例如照明系统、通风设备、交通控制设备以及充电装置等都会消耗大量的能源造成严重的能源浪费和环境污染现象。所以,应用最新的节能减排的技术提高高速公路系统整体的能耗水平,减少二氧化碳排放显得尤为必要。而高速公路机电系统就是公路系统的神经系统,包含了供电和配电网、照明、收费、监控、通信、通风等众多的子系统模块,其消耗了多少能量也就决定了公路系统运营的成本以及产生的污染大小程度。

### 1 高速公路机电系统概述与能耗特征

高速公路机电系统主要包含供电系统、照明系统、监控和通信系统、通风系统、充电桩等子系统。其中供电系

统给整个机电系统供电,属于能源分配的基础架构;照明系统保证夜晚和隧道行驶的安全性,但是也是耗电量最大的部分;监控和通信系统对路况进行收集传输,设备数量多并且24h不间断工作;通风系统负责隧道内的空气对流,在长隧道中消耗较大;充电桩是近几年由于新能源车普及增加的新耗能单位。而从能耗比例上来说,照明系统特别是隧道照明是最主要的部分。例如在特长隧道,照明能量消耗达到隧道机电能量消耗的一半以上。因为隧道要全天候亮灯,加上进口处、过渡区、主体段的照度不一样,使得单位距离耗电量远远大于一般路段照明,供电系统本身损失虽小,但它的工作状态关系到整个系统的末端电器产品耗电量的多少,监控及通讯设备单个产品的功率较低,但是数量众多而且覆盖面较广,累计下来的总耗电量也是相当大。

### 2 机电系统能耗现状与问题分析

#### 2.1 供配电系统能耗管理问题

高速公路电力供应系统长期以来存在着维护水平不

高、依赖于经验和绿色化转型升级压力巨大的现状。伴随着各种配电房以及机电设施增多,供电稳定的要求越来越强,传统的依靠人工进行巡视以及事后维修的方法已经不能够适应精准化的管理需求了。主要体现如下几点:电网电能质量较差,谐波含量高、功率因数偏低、三相不平衡现象较为普遍。G75 兰海高速公路新七道梁隧道运行已近二十年时间了,在这期间其供电系统中出现电损耗严重、谐波污染大、功率因数较低等诸多问题。通过检测数据显示在治理之前就达到了功率因数只有 0.81 的情况。除此之外,在变压器空载运行以及无功补偿设备故障、电缆线路老化损失增大等问题也比较普遍,使得整个供电系统有效利用率较低。

### 2.2 照明系统运行能耗问题

传统的照明灯具受定时器控制,在不同时间段要反复调节,遇到雨雪天还需人工启动;而车道上方的照明灯具是依赖于工作人员开关,工作繁琐、效率低。如此操作很不及时精准,车辆进出不便,甚至会形成一些不必要的“无效照明”,白白消耗电力资源。传统隧道照明设备基本都采用“常亮式”的模式,不管白天黑夜多少车辆过隧道,光照强度恒定不变,不能够有针对性地对光照情况进行合理调节,造成大量的“无效照明”“过度照明”。而且传统隧道照明还有突发性的光线改变所带来的安全隐患等问题。当车驾驶者在行驶过程中进入洞前的一瞬间,洞外环境亮度突变造成的眼睛暂时无法调节的现象即为“白洞效应”。这种现象会使驾驶员出现短暂性的“失明”,造成行车事故风险增大。

### 2.3 运维管理与节能控制不足

当前高速公路机电设备维护管理工作普遍表现为精细化水平低、节能管控措施不足。一是机电设备种类繁多、覆盖面宽,手动巡查难以做到覆盖到位,发现问题及解决问题慢;二是各个子系统之间相互脱钩,照明、通风、监控等系统各自独立运作,不能随交通流量大小以及周围环境的变化而调整。据统计,贵州高速集团在“十四五”期间累计共对机电故障进行处置多达 26 万笔,反映出运维管理任务十分繁重,需要通过智能化手段提高工作效率的同时,更是因为缺少对于能耗情况的实时监控以及分析而导致对节能状况诊断与优化决策缺乏参考的数据支撑,导致大量节能潜力得不到开发。

## 3 机电系统节能降耗关键技术

### 3.1 高效节能照明技术

在照明耗能大、调控不细的情况下的高效节能照明技术主要有用新型光源代替、智能化控制、低位照明等方式。LED 光源替代是最本质的节能措施,在此基础上智能调光控制利用“按需照明”的方式进一步深挖潜能。两微公司所设计的隧道自适应节能照明装置利用了光传感器收集光照亮度值,以 PLC 控制器来确定最佳照明方案,用 0~

10 伏或者 PWM 的形式进行亮度连续变化,解决了隧道内外亮度差异大的问题,可以达到节省 30%~50%的能量消耗。南平工程实施的照明智能升级项目,使用了精确度高的光线环境探测装置,其测光偏差低于 5lux,整体省电量达 25%;江西井冈山隧道运用自行研制的隧道自助节电照明装置,以雷视一体机对隧道内外光线强度及车辆通行量等要素进行即时监控,用多层次联动式灯光调控方式使照明设备根据外界环境情况的变化及时做出相应调节动作,从而实现对整个隧道照明系统的节能控制,节省能源约 57%。如(表 1)。

表 1 高效节能照明技术对比

技术类型	技术原理	适用场景	节能效果	投资成本	典型案例
LED 光源替代	高光效半导体发光	全线照明改造	节电 50%~60%	中等	井冈山隧道
智能调光控制	按需照明/环境光自适应	隧道/收费站	节电 20%~50%	较低	两微高速、南平公司
低位照明技术	护栏嵌入式安装	隧道/匝道	节能 25%	中等	部分新建隧道
自然光引入	导光管/光过渡设计	隧道洞口段	节能 15%~20%	较高	部分试点工程

### 3.2 智能供电与能耗监测技术

智能化供电及配电技术以电能管理和用电监控提高供电系统的效率。在智慧公路系统中的电能质量问题方面存在大量谐波、低功率因数以及严重的三相不平衡现象等,研制了由 SVC 与 APF 组成的电能质量管理装置。此技术已经应用到 G75 兰海高速新七道梁隧道中,在实际运行中功率因数由原来的 0.81 升到了 0.99,可以节约电费 2%左右,具有很大的经济效益。河南交投自主开发的智能供电配电系统形成“前端感知终端+后台管理系统”的一体式结构,设置了 2000 多个智能监控点进行实时的数据收集,并通过数字孪生技术形成三维可视化管理平台,在此基础上利用人工智能算法搭建起故障预测模型,能够及时发现设备存在的异常并加以分析预警,以预防可能发生的故障,并能完成隔离开关远方的操作,自动调节控制室内温湿度等。

### 3.3 机电设备节能控制与自动化技术

机电设备节电控制技术包括变频调速、联控、巡检等。通风系统是仅次于照明的第二大耗能模块,用变频调速技术可依据隧道内的 CO 含量、烟雾含量进行及时调节风机转速从而防止风机持续性高负荷空运转;智能联控通过对视频事件检测系统的接入达到对全网信息集中管控以及智能预警功能增强 10 倍的效果;贵州高速公路集团全线实施机电智慧运维平台的应用,共处置机电隐患 26 万余项,首创隧道用电管理模式,在五年间共节省了 1 个亿的电费开支,省出的电费更是超过了 7000 万。张扁高速公路所推行的智能化照明控制系统的改造,通过运用光敏电

阻、以太网通讯以及智能管理系统，使照明能够根据外部情况进行智能化调整，预计每年可以节约电量 1.75 万 kWh，节约成本 1 万元左右。

## 4 节能降耗技术实践路径

### 4.1 建立能耗监测与管理平台

能源监管及管理系统是开展智能化高速公路机电设备精确节能的前提基础。对供电、照明、通风等各种类型机电设备运行状态以及电耗情况实时进行监测、传送、处理，为节能分析判断、方案拟定以及成效判定提供可靠的数据支持，促使其能耗管理由大体控制到精确管理过渡，同时在运维上要建立全线能耗量监控体系，采用在各站区、服务区域、隧道、箱变等重要位置的供电支路加设智能仪表及物联感知器的方式来达到对每一个耗电量区域动态观察的目的。湖南高速集团在 14 个运营分公司推广使用能耗管理系统，在 2024 年 1 月已经连接了 7302 块计量电表，每天产生大量百万级别的数据记录，使能耗分析有充足的数据支持，在功能方面，系统最大的作用是通过其强大的大数据、AI 算法挖掘出更为丰富和深入的数据内容及智能化的应用。江苏交控能碳管理平台基于大数据+AI 技术对发电、用电、碳排放数据深度解析，准确定量计算碳排放量，给公司的能源管理和决策提供有力的数据参考<sup>[1]</sup>。安科瑞 AcrelEMS-HIM 高速公路综合能效系统则是借助电力综合看板、全线监控功能等将高速公路全程几十个变电站以拓扑图的形式展示出来，在每个节点处点击可以直接打开相应的变电站画面，整个高速公路变电站一清二楚。

### 4.2 推进节能技术改造与设备升级

节能减排技术改造是最有效的提高机电系统节能降耗措施之一，应该分系统、分批次进行，与设备全寿命周期管理以及大中修周期相结合进行实施，以减少封闭式施工对交通的影响。照明系统的改造首先应选择使用 LED 智能照明方式。江西井冈山隧道的经验证明，通过对自主开发的隧道智能节能照明系统的应用，在隧道内安装雷达测速仪及摄像机等设施实时采集隧道内外亮度值及车流量情况，并应用多变量动态调光控制策略进行灯光强度调节的方式能够使得整体电耗降低达 57%。除了隧道照明之外，还有收费站顶棚照明以及路段照明都存在很大的节能空间。两徽项目公司在收费站进行智能照明改造，在光照度检测仪基础上配合采用 PLC 控制技术，“有车灯光亮起、无车辆灯光关闭”，达到按需照明的效果，节约电费的同时减少了夜间行驶时带来的眩光问题，做到节约成本、保障安全双重效益提升<sup>[2]</sup>。供电改造要重视解决好电能质量问题，在智慧公路普遍存在谐波高、功率因素低、电压不平衡等情况下，安装 SVC 和 APF 配套装置的电能质量处理装置，能够提高功率因素，减少谐波影响。G75 兰海高速公路新七道梁隧道的应用试验显示，实际测试结

果表明功率因素由 0.81 提高到 0.99，可以节约电费成本 2% 以上，设备投资回收期大致为 3~5 年左右。并且针对运行时间较长负载较小的变压器实施节能型替换后还可以进一步降低空载损耗。监控系统的升级可以使用超低功耗设施及太阳能供电方案。而对于一些偏远路段以及难以获取电源点位处的监控设备则可采取太阳能加上储能设备的方式，再加装低功耗高清摄像头以及无线传输模块来进行信号传输，从而大大降低了电缆的布线成本以及后续的电费开支。利用物联网技术完成对设备运行状态的远程监控，维护人员不用到现场就可以了解该设备的状态，故障处理时间大大提前至少 50% 的时间。对于通风系统的改造主要实施的是对风机的变频控制，在隧道里面布置 COVI 探测器，依据当前环境中的有害物质含量来自动调整风机运转速度，防止风机一直高负荷地转而造成空转，在此基础上，采用软启动的方法可以减轻电机负载，延长风机寿命 2~3 年（见表 2）。

表 2 机电系统节能改造项目汇总

改造系统	改造内容	关键技术	预期节电率	实践案例	效益数据
照明系统	LED 灯具更换+智能控制	单灯控制器/动态调光算法	50%~60%	井冈山隧道	综合能耗下降 57%
供电系统	无功补偿+谐波治理	SVC/APF 组合装置	2%~3%	G75 新七道梁隧道	功率因数 0.81→0.99
通风系统	风机变频改造	变频器/COVI 联动	20%~30%	多座长大隧道	-
能耗监测	监测平台建设	数字孪生/AI 预警	间接效益	河南连霍高速	单位能耗显著降低

### 4.3 完善节能管理机制与运维保障

技术作工具，管理是保障。健全节能管理制度应围绕下面几项开展：一要完善能耗定额、考核制度，把节能指标细化至每一路段、每一路站，并且定期考核，并与绩效奖金相结合；二要实行合同能源管理，以社会资金带动公路节能改造，减少一次性投入，三要加强运维人员专业培训，提高其节能意识以及技术水平；四是要建设智慧化的能耗监控系统，对公路能耗进行实时监测，数据实时上传并进行计算分析。AcrelEMS-HIM 高速公路综合能效管理系统可以做到电力综合显示屏、全程可视化监控、在线监测、巡检报表、事故回溯、用户授权等应用功能，为精准化运维提供精确数据源。贵州高速集团基于“养护云”系统开展养护全生命周期管理，相比“十三五”养护支出减少近 20%，节省费用 2.18 亿元<sup>[3]</sup>。河南交投高速公路智慧能源管理系统符合国家电网“五遥”，即远程遥控、实时遥测、远程遥信、远程遥控、远程遥调五个要求，“全链路状态监控、智能告警及控制、能耗核算及指导”，具有良好的经济效益和社会效益，可作为高速公路能源管理的典型案例进行推广借鉴。

## 5 结语

公路机电系统的节电减排是一个复杂的工程,要依靠科技和管理两方面的力量来推动。应用高效照明、智能化供电、设备自动控制系统等关键技术并配合建立能耗监控系统及加强管理,可以大大节约机电系统的成本,提高其能源利用率。实践表明,在高速公路上积极运用先进的节能减排新技术,提高公路系统的能效水平,减少公路系统的二氧化碳排放量,是十分重要的。通过采取高效的照明装置、通风装置、交通信号装置、充电桩,还有健全能源管理机制、制定绿色标准等措施就可以达到节电减排的目的。未来,随着人工智能、物联网、大数据等新技术的应用,高路机电系

统向着更加智能化、节能环保化、高效能的方向迈进,在助力交通领域实现“双碳”目标上发挥应有的作用。

### [参考文献]

- [1]钱国森.高速公路机电系统智能化升级的关键技术研究[J].汽车周刊,2025(8):219-221.
- [2]周亮.高速公路机电系统节能减排技术研究与应用[J].汽车画刊,2024(12):258-260.
- [3]李敬泉.浅谈高速公路机电系统设备管理的创新措施[J].黑龙江交通科技,2023,46(10):155-157.

作者简介:周桂宇(1998.10—),男,汉,籍贯:广西平南,本科,研究方向:高速公路机电。