

高速公路交通工程机电系统施工技术分析

王平易

云南云岭高速公路交通科技有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：云南地区处于云贵高原地区，地形较为复杂，气候也比较多样，高速公路机电系统施工面临问题比较复杂，采取适应性技术措施和创新管理方法，能显著提高机电系统施工质量与运营可靠性。在本文中，将以云南地区为背景，分析高速公路交通工程机电系统的施工技术与管理策略，旨在为同类地区的高速公路机电工程建设提供参考。

【关键词】：高速公路；机电系统；施工技术；施工管理；云南地区

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.036

高速公路交通工程机电系统能够确保公路安全、高效，涵盖供配电、照明、监控、通信、收费等多个子系统，云南地区的特殊情况让机电系统施工面临比平原地区更加复杂的特殊挑战，不仅体现在设备选型与安装工艺上，更贯穿于施工组织、质量控制与后期维护的全过程。结合云南具体环境，开展机电系统施工技术的本土化、精细化研究十分关键。

1 高速公路交通工程机电系统基本特征——以云南省为例

随着“交通强国”战略的深入推进与云南省“3815”战略发展目标的实施，云南高速公路网正以前所未有的速度向高原山区延伸，全省高速公路通车里程目前已突破一万公里，其中桥隧比普遍超过50%，部分项目如宁香高速公路全线桥隧比高达82.76%，特长隧道与隧道群大量出现，机电系统通常涵盖监控、通信、收费、供配电、照明、通风及消防等子系统，其施工并非简单的设备拼装，而是一个与土木工程深度交叉、与地理环境紧密互动的复杂系统工程。

在云南，这一复杂性被高原特殊环境放大，首先，剧烈的海拔落差与地形切割导致线路起伏大，供电半径长、电压质量不稳定问题突出；其次，复杂的喀斯特地质与活跃的地震带（如西昭高速项目涉及的Ⅱ级地震断裂带）对管线敷设、设备基础的稳固性构成严峻考验；再次，多变的气候（如滇东南的潮湿多雾、高海拔地区的昼夜温差）对电子设备的防护等级与耐久性提出了更高要求。对于云南地区来说，高速公路机电系统安装基本特征受到自然地理条件、工程环境等因素影响，有明显不同于平原地区特征，可能会对施工产生约束作用，但是也可能带来技术创新。

1.1 地理、气候环境

云南大多数地区地形呈现山地高原特征，高速公路不可避免的需要经过高山险谷，决定机电系统安装特征，一是空间分布高离散性，二是环境条件极端异质性，一条百公里高速公路却可能经过隧道管理站、变电所、通信基站、外场监控设备等诸多节点，且分布于海拔落差千米以上气候带上，如隧道入口潮湿多雨，但是山腹地区设备洞室当中则可能需要散热，需要

机电设备防潮、耐热，以适应环境，安装基础和密封工艺等都需要以此为依据。

1.2 供电与信号传输困难

桥隧比较高也是云南地区比较典型特征，隧道（特别是长隧道群）往往会给机电系统带来较大的负担，安装起来也比较困难，一是供电距离过长、保障质量困难，隧道内大量风机和照明设备，且因远离市政电网，往往需要设计多级降压变电所，带来的线损、电压降比较明显，电缆截面、无功补偿装置安装位置和容量都有要求；二是信号传输衰减大、可靠性要求高，隧道是一个半封闭的金属腔体，对无线电波有强烈的屏蔽效应，使得无线通信、广播、应急电话等系统的信号覆盖必须依靠大量漏缆或天线进行中继，安装点位密集，线路复杂，另外，监控视频、传感器数据需要通过工业环网长距离回传，对光缆的布防路由、接续损耗及通信设备的抗电磁干扰能力提出了极高要求。

1.3 安装基础和施工协同难度高

高速公路机电施工处于项目建设链条的末端，但其安装基础（如隧道内的预埋槽道、手孔、桥架，路基段的管道、人井）却需在土建阶段同步完成，云南复杂的施工环境下，土建工程的工期压力、地质条件突变（如突泥涌水）常常导致预埋件定位偏差、管道堵塞或损坏，机电安装单位进场后，面临着大量的界面修复与整改工作，施工协同难度极大，机电施工单位必须提前介入设计，进行复核和优化。

2 高速公路交通工程机电系统施工技术

为了应对云南省各项挑战，高速公路工程施工中已经有了一些关键性技术创新，大多集中在安装工艺、智能控制等方面（见表1）。

表1 云南典型高速公路机电系统应用创新技术经济性分析

项目名称	创新技术	建设期成本节约	运营期年化效益
宣会高速公路	隧道“准无人值守智能微站”（预制化、集成化）	约4384.89万元（降低约21.67%）	人工成本节约约1371.6万元/年
“智慧高速”	系列专用工具、	累计节约419.6万元	提升运维效

机电安装”推广项目	智慧运维管理系统		率,降低故障率
永昌高速公路(大理段)	小间距LED屏、智慧收费亭、一体化机房	未明确量化,但通过设计优化提高了项目的经济效益	设备稳定性提升,维护便捷性增强

2.1 “模块化+预制化”集成安装技术

该技术手段有效化解作业面分散、现场施工条件差、工期紧张等问题,实现“工厂化生产、模块化组装、现场整体吊装”等目标。传统的隧道变电站、消防泵房需要现场砌筑房建、逐一安装设备、进行繁杂的接线与调试,工期长、质量受现场环境制约,云南省交通规划设计研究院公司研发的“智能变电微站”、“智能消防微站”采用标准的集装箱式模块化设计,所有高低压配电设备、PLC控制柜、消防水箱、泵组及管道均在工厂内完成预制、集成、接线和初步调试,形成一个功能完整的“机电盒子”;抵达现场后,仅需进行基础找平、模块就位、外部管线对接和系统联调即可投入使用。宣会高速工程中,建设周期大幅缩短,单个站点施工时间减少约60%。

另外,对于隧道内频繁出现的电缆支架、消防管道支架安装,云南建投研发了“隧道桥架支架安装简易工具”、“消防管道沟槽作业支撑装置”等专用机具,针对隧道内空间受限、高空作业多的特点设计,能够实现快速定位、打孔和安装,将原本需要多人配合作业的工序简化,显著提升了安装效率与精度,为实现隧道机电的“流水化施工”创建良好前提。

2.2 智能联动监控技术

云南高速公路隧道往往以群的形式出现,对监控系统提出了从“单点控制”到“区域协同”要求,施工自然关注能实现智能分析与联动控制的神经系统。

一是网络架构,为保证隧道群内海量数据(视频、车检、CO/VI、火灾报警等)的实时、无误传输,设计物理双环网(或自愈环网),施工中,需特别注重光缆的敷设保护,在隧道两侧分别布设主干光缆,并确保所有关键节点(区域控制器、本地控制器)以双链路接入环网,环网交换机、协议转换器的安装点位与供电需具备充分的冗余。

二是现场部署与调试,将前馈式智能通风模型、组态模型等软件算法与硬件系统深度融合,如施工调试阶段,需要根据隧道的具体长度、纵坡、交通预测流量,在监控软件中“组态”出不同的通风控制策略,火灾报警发生时,系统应能自动执行预设的“专家级预案”,如上游车道信号灯变红、情报板发布警示信息、启动指定分组的射流风机按特定模式排烟、打开疏散指示和应急照明等。施工技术人员必须与软件工程师相互配合,在现场对各类预案进行模拟触发测试,确保所有子系统的响应时序精确到秒级,联动逻辑可靠。

2.3 智慧运维管理技术

运维并不是在高速公路工程投入运营之后才进行的工作,

而是要在施工安装阶段就已经做好准备,关键点是硬件安装和数据基因置入同步。具体来说,云南省在此方面研发“运营维护管理系统”,并为每台关键配电设备植入智能“芯”(通常是集成了设备身份ID与状态监测传感器的智能终端),施工安装设备的同时,施工人员就需要按照规范,将设备的唯一编码、型号规格、安装位置、出厂参数、接线图、供应商信息等“数字孪生”数据录入管理系统数据库;在此之后,设备接线、调试记录、首次验收数据也同步更新,工程交工之时,一套完整的、可追溯的设备电子档案就已建立,改变传统“事后补录”缺陷。

除此之外,罗八高速项目中,传统LCD屏优化为小间距LED屏、将收费亭升级为智慧收费亭,包含了施工接口标准化、布线简化(如采用集成了多种设备的智慧亭减少外部线缆)、远程诊断功能预留等智慧运维的施工准备;模块化机房的施工,将高密度布线、冷热通道隔离、动环监控传感器的安装标准化,为后期远程运维创造了物理条件。

2.4 契合地形的施工和调试技术

针对云南的特殊环境,专项施工和调试十分关键,如在陡峭边坡或桥梁上安装大型可变情报板、雷达测速仪等外场设备时,其基础施工必须进行专项地基承载力评估与抗风振设计;设备安装后的防雷接地电阻必须低于规范要求,在高土壤电阻率地区,可能需要采用增设降阻剂、深井接地等特殊工艺;对于长距离供电电缆敷设,采用可调节式电缆放线架,能有效防止电缆在复杂地形敷设时因拖拽造成的机械损伤;电缆沟支架安装中,使用简易校正工具,能快速保证支架的平直度与间距,为后续整齐规范布线打下基础。

施工之后的调试是保证施工质量的重要条件,高原环境下,需重点关注因海拔升高导致的电气设备散热能力下降、低压电器启弧电压变化等问题,对通风设备的启动电流、照明回路的电压进行长时间满载测试,确保其在极端工况下的稳定性。

3 高速公路交通工程机电系统施工管理

施工技术之外,科学施工管理是保障性条件,云南省实践中,可以采取下述管理策略。

3.1 设计施工一体化和精细化界面管理

改变设计与施工脱节的旧模式,鼓励机电施工单位早期介入,施工图设计阶段,施工单位即从安装工艺、设备选型、管线综合排布的角度提出优化建议,减少设计变更,如协同设计单位对隧道内错综复杂的风水管线进行BIM综合排布,提前发现碰撞点,优化安装空间;建立详细的工程界面清单与移交标准,在土建工程进行到关键节点时(如隧道二衬浇筑前、路基路槽交验前),组织机电与土建单位联合验收预埋件,明确整改责任与时限,将界面问题解决在过程中,避免后期大规

模返工。

3.2 实施全过程、数字化的质量控制

建立从材料设备进场到系统联调的全过程质量控制链条，所有进场设备、线缆、配件均需进行严格报验，核对技术参数是否符合高原特殊要求，推广使用施工过程移动检查 APP，质检人员将现场安装的工艺照片、测试数据（如接地电阻、绝缘电阻）实时上传至管理平台，实现质量痕迹的可追溯；调试阶段，制定详细的单机调试、子系统调试、系统联调大纲，每一项调试结果均需有书面记录和双方签字确认，确保每个环节的质量责任落到实处。

3.3 强化安全、成本与进度的协同管控

针对机电施工高空、涉电、交叉作业多的特点，实行网格化安全管理，每个作业点明确安全责任人，利用智慧工地系统，对有限空间作业（如人井、隧道内高空车作业）进行在线审批与监控；成本控制上，通过采用预制化模块、专用工具提升工效，直接节约人工与工期成本；通过精细化电缆配盘和敷设方案，减少材料损耗；进度管理则采用动态控制，根据土建工程

的实际进展，滚动调整机电施工的人材机计划，利用施工晴雨表合理抢抓旱季黄金施工期，确保关键线路不受阻滞。

4 结语

综合而言，云南高原山区特殊的地理与气候环境，带来了高速公路机电系统施工独特的技术形态与管理需求，通过模块化预制安装技术应对复杂环境下的高效建造难题，通过智能联动监控技术保障隧道群运营安全，通过智慧运维前置施工实现资产的全周期数字化管理，是破解当地施工困局的有效途径，这些关键技术与管理方法的形成，不仅源于对客观挑战的回应，更得益于本地企业、科研机构持续的产学研用创新（如已通过评价的“智慧高速机电安装”项目及“准无人值守”解决方案）。各种“新质生产力”在交通领域的深化，无人机巡检、光伏储能一体化、人工智能辅助决策等新技术将进一步与机电系统施工融合，云南的经验表明，只有坚持技术创新与管理优化双轮驱动，实现机电系统与土木工程的深度融合、硬件安装与数字赋能的同步进行，才能在高山峡谷间铸就真正安全、可靠、智慧的高速公路“神经系统”，为交通强国建设贡献“云南样板”。

参考文献：

- [1] 于崧张宁.高速公路交通机电工程施工过程中的质量控制分析[J].2025.
- [2] 王德鹏.高速公路交通机电工程设备技术研究[J].工程施工与管理,2025(12).
- [3] 黄波.通信系统在高速公路机电工程中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(003):000.
- [4] 黄壮.高速公路交通机电工程施工过程中的质量控制[J].越野世界,2025(2).
- [5] 温从瑜.智慧高速公路机电工程专项施工关键技术[J].交通世界,2025(20).
- [6] 马春.高速公路交通机电工程施工过程中的质量控制研究[J].科海故事博览,2025(32).
- [7] 毛海.高速公路交通机电工程施工过程中的质量控制[J].产品可靠性报告,2024(2):111-113.