

公路机电系统雷电防护与接地检测技术

行志强¹ 黄国俊¹ 彭贵富¹ 孙增博²

1. 云南航天工程物探检测股份有限公司 云南省昆明市 650217

2. 陕西西阎城际铁路有限公司 陕西省西安市 710054

摘 要:公路机电系统是保障现代交通高效、安全运行的核心基础设施,涵盖监控、通信、收费、照明及供电等关键设备。然而,由于系统设备多处于露天环境且高度电子化,雷电灾害已成为威胁其稳定性的主要因素之一。基于此,本文重点阐述公路机电系统雷电危害机理以及防雷保护的重要性,围绕实际工程案例,探讨综合防护体系的设计与实施要点,提升交通基础设施的抗雷击能力和运营可靠性。

关键词:公路机电系统;防雷保护;接地检测

公路机电系统作为保障公路安全高效运行的核心,涵盖监控、通信等关键设备。然而,其多处于露天环境且高度电子化,易受雷电损害。雷电危害形式多样,破坏机理复杂,可能导致设备损坏甚至重大安全事故^[1]。随着我国高速公路网络扩大和智能化提升,机电系统作用凸显,其防雷安全保障愈发重要。在此背景下,深入研究公路机电系统雷电防护与接地检测技术,对于保障交通基础设施安全运行意义重大。

1 公路机电系统雷电危害机理分析

公路机电系统作为保障公路安全高效运行的核心组成部分,涵盖监控、通信、收费、照明及供电等关键设备。由于这些设备多处于露天环境,且高度集成化和电子化,使其极易受到雷电的直接或间接损害^[2]。雷电危害主要表现为直击雷、感应雷和雷电波侵入三种形式,其破坏机理复杂,可能导致设备损坏、系统瘫痪甚至重大安全事故,因此深入分析其危害机理至关重要。

直击雷的危害最为直接且破坏性极强,当雷电直接击中监控杆、通信塔或收费站顶棚等外露设备时,会产生数十至数百千安的巨大雷电流。这种高电流可引发多重危害:首先,瞬间高温会导致金属构件熔化、爆炸或结构变形;其次,高电压可能击穿绝缘层,烧毁摄像头、交换机等电子设备。

感应雷的危害虽不如直击雷直观,但其影响范围更广。当雷电未直接击中设备但在附近发生时,会通过电磁感应或静电感应在导线或设备内部产生瞬态过电压。电磁感应在金属回路中感应出千伏级高电压,烧毁 PLC、传感器等弱电设备;静电感应则使设备金属部件积聚电荷,放电时形成浪

涌,损坏未屏蔽的电路^[3]。

雷电波侵入是另一种常见危害形式,主要通过供电线路、信号线或金属管道等导体侵入系统内部。电源线路易受雷击影响,过电压可能沿供电线路进入设备,烧毁 UPS 或配电箱;信号线路因距离较长,更易引入雷电浪涌,损坏光端机、交换机等网络设备。同时,雷电流通过接地网扩散时,不同设备接地点的电位差会引发共模干扰,破坏精密电子电路,加剧系统故障风险。

2 某公路机电系统雷电防护与接地检测技术的应用实践

2.1 公路机电系统概况

某高速公路是连接两省的重要交通干线,全长 158 公里,沿线设有 8 个收费站、3 个服务区和 2 个隧道群。该路段地处多雷暴区域,年平均雷暴日达 65 天。项目机电系统清单如见表 1。

表 1 项目机电系统

系统类别	设备类型	数量	安装位置
监控系统	高清摄像机	128	沿线、收费站
通信系统	光端机	56	通信站
收费系统	ETC 门架	28	收费站
供配电系统	UPS 电源	35	变电所

2.2 雷电防护系统设计

本项目采用“分区防护、多级保护”的设计理念,雷电防护系统架构图如图 1 所示。

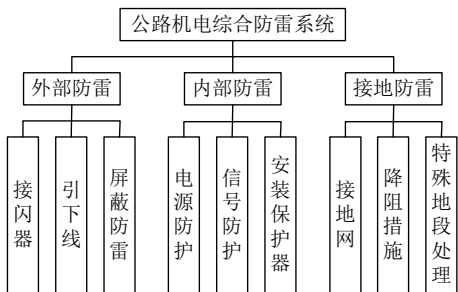


图1 雷电防护系统架构图

2.2.1 外部防雷系统

该工程外部防雷系统采用多层级防护策略，重点针对收费站、通信塔和监控立杆等关键设施进行专项防护。在接闪器布置方面，根据各设施的结构特点采用差异化设计方案：8个收费站的顶棚共安装12套提前放电避雷针，采用不锈钢材质，安装高度超出顶棚最高点1.5米，确保保护范围全覆盖；3处通信塔顶部设置总长480米的环形避雷带，采用 $\Phi 12\text{mm}$ 热镀锌圆钢制作，与塔体结构可靠连接；全线128套监控立杆均加装不锈钢接闪杆，杆顶安装高度不低于0.3米。引下线系统统一采用 50mm^2 多股铜绞线，沿建筑物外墙或结构柱敷设，间距严格控制在18米以内，所有引下线全程采用PVC绝缘套管保护，并在距地面1.8米处设置明显警示标识。为确保雷电流有效泄放，所有接闪装置与引下线的连接均采用放热焊接工艺，连接电阻值小于 0.03Ω 。

2.2.2 内部防雷系统

电源系统防雷作业中，采用三级SPD防护系统，具体如下表1所示。

表2 SPD配置参数表

防护等级	型号	通流量	保护水平	安装位置
一级	FLP-100	100kA	$\leq 4\text{kV}$	变电所
二级	LSP-40	40kA	$\leq 2.5\text{kV}$	机房入口
三级	CSP-20	20kA	$\leq 1.5\text{kV}$	设备前端

在信号系统防护方面，针对视频传输系统，在128个监控点的输入输出端共安装256套BNC接口SPD，采用串联式安装方式，通流容量达到10kA，限制电压不超过50V，确保视频信号稳定传输。网络系统防护方面，在56个通信站的核心交换机和各终端设备之间部署168套RJ45接口SPD，具备100Mbps传输速率和5kA通流能力，有效抑制感应雷造成的浪涌冲击。对于通信光缆系统，特别加强了金属加强筋的接地处理，在光缆入户端、接头盒等关键位置设置专用接地端子，接地电阻控制在 4Ω 以内。所有信号SPD

均采用导轨式安装，便于维护更换，并配备远程监控接口，可实时监测工作状态。这些措施共同构成了完整的内部防雷保护网络，将雷击对机电系统电源与通信系统的干扰降至最低。

2.3 接地系统实施

该项目采用联合接地方式，将机电系统的工作接地、保护接地和防雷接地统一连接至同一接地装置，确保各系统电位均衡。接地系统采用环形接地网为主、垂直接地极为辅的结构形式，水平接地体选用 $40\times 4\text{mm}$ 镀锌扁钢，埋深不小于0.8米；垂直接地极采用 $50\times 50\times 5\text{mm}$ 镀锌角钢，长度2.5米，间距5米呈放射状布置。在35个变电所、8个收费站和3个服务区等重点区域，接地网采用网格状布置，网格尺寸不大于 $10\text{m}\times 10\text{m}$ ，确保雷电流快速均匀泄放。

针对特殊地质条件采取了专项处理措施。在2处隧道口区域，由于岩石地质导致土壤电阻率高达 $210\Omega\cdot\text{m}$ ，采用36套离子接地极系统，每套由3根2.5米长的铜管组成，内填长效电解盐，配合12吨降阻剂使用，使接地电阻降至 3.8Ω 以下。对于8处高电阻率区段，除增加接地极密度外，还增设了 $8\text{m}\times 5\text{m}$ 的局部接地网格，网格节点采用放热焊接，连接电阻小于 0.01Ω 。所有接地装置连接处均进行防腐处理，采用三层防腐结构：底层为导电防腐漆，中间层为防腐胶带，外层为沥青防护。接地引下线与水平接地体的连接采用专用接地夹，确保接触面积不小于 200mm^2 。

接地系统施工前采用温纳四极法进行土壤电阻率详细测量，绘制电阻率分布图指导施工；施工中每完成一个区域即进行接地电阻测试，采用三极法测量并记录原始数据；施工完成后进行整体验收测试，测试点间距不大于50米，共设置286个测试点。所有接地装置均设置永久性标识，并在竣工图中明确标注位置和测试数据，为后续运维提供依据。系统运行一年后复测，接地电阻变化率小于5%，证明接地系统稳定可靠。

2.4 检测技术应用

使用Fluke 1625接地测试仪与采用三极法测量对接地情况进行测试，具体情况如表3所示。

表3 接地电阻检测数据

检测点	实测值(Ω)	修正值(Ω)	合格判定
1# 收费站	3.2	4.16	合格
3# 通信站	2.8	3.64	合格
5# 变电所	4.5	5.85	不合格

由此可知, 5# 变电所接地电阻超标 (5.85Ω)。针对这种情况, 工作人员立即制定整改方案, 安排专业人员增打 6 根垂直接地极。整改后再次检测, 接地电阻符合标准。

3 结语

公路机电系统雷电防护与接地检测技术至关重要。通过对其危害机理的分析, 明确了防护重点; 强调技术应用的重要性, 凸显其在安全、经济等方面的价值。某高速公路的实践表明, 科学合理的雷电防护系统设计与接地系统实施, 结合有效的检测技术应用, 能及时发现并解决接地电阻超标等问题, 保障系统稳定运行。因此, 公路机电系统运维管理

人员应持续重视防雷技术, 加强检测维护, 以适应智能交通发展需求, 为公路安全运营提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 高磊. 高速公路机电系统过电压保护及雷电防护设计探讨 [J]. 交通世界, 2024(25):174-176.
- [2] 杨顺翔. 高速公路机电设施雷电破坏及其处理措施 [J]. 甘肃科技, 2021, 37(4):49-50+87.
- [3] 张晨. 高速公路机电系统雷电灾害风险评估 [J]. 河南科技, 2020, 39(28):121-123.