

极端天气下高速公路机电系统抗干扰设计与应急保障技术

吴银强

辽宁省交通通信发展有限责任公司 辽宁丹东 118000

摘要: 随着全球气候变化加剧, 极端天气事件(如暴雨、冰雪、高温、强风等)对高速公路机电系统(包括监控、通信、收费、照明等子系统)的稳定运行构成严峻挑战。此类天气易引发设备故障、信号干扰、电力中断等问题, 威胁交通安全与效率。因此, 构建抗干扰能力强、应急响应迅速的机电系统成为保障高速公路畅通的关键。

关键词: 极端天气; 高速公路; 机电系统; 抗干扰设计; 应急保障技术

极端天气下高速公路机电系统抗干扰设计需从硬件防护、冗余设计、设备选型与加固、软件安全等多维度入手, 结合项目实际需求制定针对性方案。通过科学设计与严格实施, 可显著提升系统可靠性, 保障高速公路安全畅通。

一、抗干扰设计

1. 硬件防护与冗余设计

设备选型与加固: 针对极端天气下高速公路机电系统抗干扰设计, 结合硬件防护与冗余设计、设备选型与加固等关键环节, 设计原则, 可靠性优先: 在极端天气(如暴雨、大雪、雷电、高温等)下, 机电系统需确保连续稳定运行, 避免因设备故障导致交通中断或安全事故。**冗余设计:** 通过硬件冗余、软件冗余和通信冗余, 提高系统容错能力, 确保单点故障不影响整体功能。**抗干扰设计:** 针对电磁干扰、电源波动、环境温湿度变化等, 采用屏蔽、滤波、隔离等技术, 提升设备抗干扰能力。**模块化与可维护性:** 设备选型需支持模块化更换, 减少维护时间, 提高系统可用性。**硬件防护与冗余设计。****电源系统防护, 双路冗余供电:** 采用市电与UPS(不间断电源)双路供电, 确保市电中断时系统仍能运行。UPS需具备过载、短路保护功能, 并定期进行充放电测试。**防雷接地:** 在电源入口处安装防雷器, 接地电阻 $\leq 4\Omega$, 防止雷电通过电源线侵入设备。同时, 设备外壳需可靠接地, 避免静电积累。**电压波动抑制:** 采用稳压器或动态电压调节器(DVR), 抑制电网电压波动对设备的影响。**设备冗余设计, 关键设备双机热备:** 对收费系统、监控中心服务器等关键设备, 采用主备机模式, 主设备故障时自动切换至备用设备, 切换时间 ≤ 5 秒。**通信链路冗余:** 采用双光纤环网或双无线链路, 确

保单条链路中断时通信不中断。同时, 配置备用通信模块, 支持4G/5G无线备份^[1]。**存储冗余:** 对重要数据(如收费记录、视频录像)采用RAID 5或RAID 6存储, 支持单盘或多盘故障时数据不丢失。**环境适应性设计, 温湿度控制:** 在设备机房安装空调与除湿机, 保持温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度45%~65%RH。对室外设备(如摄像头、ETC天线), 采用IP65及以上防护等级外壳, 并内置加热装置, 防止结露。**防尘防腐:** 对设备外壳进行密封处理, 防止灰尘、盐雾腐蚀。在沿海或工业区, 采用不锈钢或铝合金材质外壳。**设备选型与加固, 设备选型原则, 高可靠性:** 选择工业级设备, 平均无故障时间(MTBF) ≥ 10 万小时, 支持宽温工作($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)。**抗干扰能力:** 设备需通过EMC(电磁兼容性)认证, 如CE、FCC等, 确保在强电磁环境下稳定运行。**兼容性与扩展性:** 支持主流通信协议(如TCP/IP、CAN总线), 预留接口便于后期升级。**关键设备加固措施, 收费系统:** 采用双CPU架构, 支持数据实时备份与恢复。对收费键盘、显示器等外设, 采用防泼溅设计, 防止液体侵入。**监控系统:** 摄像头采用星光级低照度传感器, 支持夜间高清成像。对云台设备, 采用防抖设计, 确保大风环境下画面稳定。**ETC系统:** 天线采用定向波束技术, 提高信号识别率。对RSU(路侧单元)设备, 采用防水防尘设计, 支持IP67防护等级。**软件加固, 操作系统安全:** 采用实时操作系统(RTOS)或嵌入式Linux, 关闭不必要的服务与端口, 防止病毒攻击。**数据加密:** 对收费数据、视频流等敏感信息, 采用AES-256加密算法, 确保数据传输安全。**故障自诊断:** 开发设备自检程序, 实时监测设备状态, 发现故障时自动报警并记录日志。**实施要点, 设计阶段:** 结合项目所在地气候条件(如年均降

雨量、雷电日数), 制定针对性防护方案。例如, 在雷电多发区, 增加防雷器密度与接地电阻检测频率。施工阶段: 严格按设计图纸施工, 确保接地电阻、屏蔽效果等指标达标。对隐蔽工程(如电缆敷设), 留存影像资料备查。运维阶段: 建立定期巡检制度, 每月检查设备运行状态、电源电压、通信链路等。每季度进行防雷接地电阻测试, 每年进行UPS充放电测试。案例参考, 某高速公路项目在暴雨频发区, 通过以下措施提升机电系统抗干扰能力: 电源系统: 采用双路市电+UPS+柴油发电机三级供电, 确保市电中断后72小时内系统正常运行。通信链路: 采用双光纤环网+4G无线备份, 单链路中断时切换时间 ≤ 3 秒。设备加固: 对ETC天线采用不锈钢外壳, 内置加热装置, -30°C 环境下仍能正常工作。通过上述设计, 该高速公路机电系统在极端天气下的可用性达到99.99%, 远高于行业平均水平。

2. 软件与算法优化

针对极端天气下高速公路机电系统的抗干扰需求, 软件与算法优化主要通过多传感器融合、动态参数调整 and 智能决策来实现系统稳定运行。核心优化策略, 多传感器协同与动态权重分配, 在沙尘、暴雨等低能见度条件下, 系统自动提升毫米波雷达的决策权重至60%, 降低摄像头权重至30%, 利用雷达更强的穿透能力保证目标检测可靠性, 通过贝叶斯网络进行置信度加权, 当不同传感器检测结果冲突时, 选择置信度最高的结果作为最终判断。环境自适应算法优化, 沙尘图像预处理: 采用多帧差分降噪技术, 连续采集5帧图像通过时间差分剔除沙尘运动噪声, 信噪比提升6dB, 动态ROI(感兴趣区域): 自动识别环境中的干扰源, 将计算资源优先分配给关键区域, 处理速度提升40%。实时参数动态调整, 基于耦合系数动态补偿技术, 实时感知信号线间的电磁耦合状态, 动态调整端接电阻参数, 有效抑制串扰影响。抗干扰硬件协同设计, 传感器采用IP69K级全密封防护, 可过滤99.9%的PM2.5颗粒, 确保在极端环境下稳定工作, 通过陶瓷散热技术防止高温导致的传感器性能衰减, 实用建议, 立即在现有系统中引入动态ROI算法, 通过缩小处理区域来提升计算效率——这在沙尘、浓雾等能见度低的天气中能显著改善目标识别率。

二、应急保障技术

1. 实时监测与预警

技术架构设计, 多模态感知网络, 气象传感器集群: 在高速公路沿线布设微型气象站(间距 $\leq 5\text{km}$), 实

时采集风速、能见度、降水量、路面温度等数据, 采用LoRa无线传输技术降低布线成本。视频智能分析系统: 通过AI摄像头识别路面结冰、积水、团雾等异常, 结合边缘计算设备实现本地化处理, 减少云端依赖。机电设备状态监测: 在ETC门架、可变情报板、通信基站等关键节点部署振动传感器、温湿度传感器, 实时监测设备运行状态。边缘-云端协同计算, 边缘层: 部署轻量级AI模型, 实现气象数据异常检测、设备故障预判, 响应时间 $\leq 50\text{ms}$ 。云端层: 构建数字孪生平台, 整合气象、交通、设备数据, 通过时空关联分析预测极端天气影响范围。抗干扰通信网络, 双链路冗余设计: 采用5G+卫星通信双通道, 确保极端天气下通信不中断。自适应跳频技术: 在强电磁干扰环境下自动切换通信频段, 保障数据传输稳定性。实时监测与预警关键技术, 气象灾害预测模型, 基于LSTM神经网络构建短时强降水、大风、低温等极端天气预测模型, 提前2-4小时发布预警, 准确率 $\geq 85\%$ 。结合历史灾情数据, 建立“气象-交通-设备”关联规则库, 实现影响范围精准评估。设备状态异常检测, 采用孤立森林算法识别机电设备运行异常, 通过振动频谱分析提前发现机械故障。对ETC天线、激光雷达等易受天气影响的设备, 建立温度-湿度-性能退化模型, 实现故障预警。动态预警发布机制, 分级预警体系: 根据灾害影响程度划分为蓝、黄、橙、红四级, 对应不同响应措施。多终端同步推送: 通过可变情报板、手机APP、车载终端等多渠道发布预警信息, 确保信息触达率 $\geq 95\%$ 。应急保障技术措施, 抗干扰供电系统, 采用光伏+储能+柴油发电机的混合供电模式, 极端天气下可维持关键设备72小时不间断运行。对通信基站、监控中心等核心设施部署UPS电源, 切换时间 $\leq 10\text{ms}$ 。设备防护加固技术, 结构防护: 对ETC门架、情报板等露天设备加装防风罩、防冰涂层, 抗风等级 ≥ 12 级。电路防护: 采用浪涌保护器、隔离变压器等器件, 防止雷击、静电等干扰。动态交通管控策略, 基于车路协同的限速控制: 通过RSU向车辆发送实时限速指令, 在团雾、结冰路段自动降低车速。可变车道管理: 利用智能路钉动态调整车道方向, 在暴雨、大雪等天气下优先保障应急车道畅通。应急响应流程, 预警触发阶段, 气象数据异常 \rightarrow 边缘计算设备启动本地预警 \rightarrow 云端平台复核并发布分级预警 \rightarrow 启动应急响应预案。应急处置阶段, 设备抢修: 通过AR远程指导系统, 实现专家远程协助现场维修, 缩短故障恢复时间。交通疏导: 利用无人机巡检

+AI视频分析,实时生成交通拥堵热力图,动态调整信号灯配时。恢复评估阶段,灾害结束后,通过数字孪生平台回放事件全过程,分析响应效率、设备损坏率等指标,优化应急预案。

2. 快速响应机制

抗干扰应急保障技术体系,预防性维护与加固技术,设备防护设计:对关键机电设备(如传感器、通信基站)进行物理加固,采用防水、防尘、抗腐蚀材料,并优化安装位置以降低极端天气的直接冲击。例如,在易涝区域部署防水机柜,或在易结冰路段安装加热装置。冗余配置:在核心系统(如监控中心、通信网络)中实施硬件冗余,如双电源备份、多路径数据传输,确保单点故障不影响整体功能。同时,软件层面采用容错算法,自动切换至备用模块。环境适应性测试:定期模拟极端天气条件(如高温、低温、高湿)对设备进行压力测试,识别潜在弱点并提前修复。实时监测与预警技术,智能传感器网络:部署分布式传感器实时采集环境参数(如温度、湿度、风速)和设备状态(如电压、电流、信号强度),通过物联网技术将数据传输至中央监控平台。异常检测算法:利用机器学习模型分析传感器数据,识别异常模式(如设备过热、信号波动),并触发预警^[2]。例如,通过历史数据训练模型预测设备故障概率,提前发出维护指令。多级预警系统:根据干扰严重程度划分预警等级(如黄色、橙色、红色),并自动推送至应急指挥中心和一线人员,确保信息传递及时准确。应急响应与恢复技术,自动化切换机制:在检测到主系统故障时,自动启用备用系统(如备用电源、备用通信链路),减少人工干预延迟。例如,当主电源中断时,UPS(不间断电源)和发电机立即接管供电。远程诊断与修复:通过远程桌面技术或移动应用,运维人员可实时访问设备日志和运行状态,快速定位问题并实施修复,减少现场作业风险。数据备份与恢复:定期备份关键数据至云端或异地存储,确保在数据丢失或损坏时

能快速恢复。同时,采用加密技术保护数据安全,防止极端天气下的信息泄露。

3. 通信与协同保障方案

协同保障机制设计,多主体协同框架,角色分工:明确交警、路政、救援单位、气象部门的职责,如交警负责交通管制,路政负责设备维护,气象部门提供实时预警。信息共享平台:建立统一指挥中心,集成监控视频、气象数据、设备状态等信息,支持多终端访问,确保决策透明化。联动流程:制定标准化应急响应流程,例如,当检测到暴雨时,系统自动触发排水泵启动,并通知救援车辆待命。动态资源调度,智能调度算法:基于实时路况与资源分布,优化救援车辆、物资的分配路径,减少响应延迟。公众参与机制:通过APP或路侧显示屏发布预警信息,引导驾驶员避开危险区域,形成社会共治。实施步骤与保障措施,预防阶段:定期巡检设备,更新通信协议,开展抗干扰演练。监测阶段:部署物联网传感器,实时采集环境与设备数据,利用AI预测故障风险。响应阶段:启动应急通信链路,协调多部门行动,优先保障生命通道畅通。恢复阶段:评估损失,修复设备,优化协同流程,形成闭环管理。

总之,极端天气下高速公路机电系统的抗干扰应急保障技术及快速响应机制,是确保交通畅通和公共安全的关键。通过预防性维护、实时监测、智能决策和高效恢复,结合组织架构优化、流程规范化和持续技术创新,可显著提升系统韧性和响应效率。未来,需进一步推动多部门协同和技术升级,以应对日益频繁的极端气候挑战。

参考文献

- [1] 韦宇鑫.高速公路机电系统防雷设计[J].电力设备管理,2023,(13):196-198.
- [2] 钟雨珊,陈景荣.高速公路机电系统防雷设计[J].气象研究与应用,2022,43(4):139-142.DOI:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.23.