

铁路牵引供电综合自动化系统稳定性优化与抗干扰技术研究

刘伟强

通号（郑州）电气化局集团有限公司 宁夏 中卫 755100

摘 要：铁路牵引供电综合自动化系统是保障电气化铁路安全、稳定、高效运行的核心基础设施，系统的运行稳定性和抗干扰能力，直接关系到铁路供电可靠性与行车运营安全。本文从硬件、软件算法、数据通信三个层面完成系统稳定性优化研究，通过核心设备冗余配置、硬件电路防护改造、接地系统优化提升硬件运行可靠性。在此基础上，针对现场典型干扰类型，分别开展电磁干扰、瞬态电弧干扰、杂散电流干扰的抑制与治理技术研究，并设计极端工况下的自适应抗干扰控制策略，构建多维度、全方位的抗干扰防护体系。

关键词：铁路；牵引供电；综合自动化系统；稳定性优化；抗干扰技术

引言

随着国内电气化铁路路网规模持续扩大与列车运行密度的不断提升，牵引供电系统的运行负荷持续增高，对供电自动化系统的稳定性、可靠性与抗干扰能力提出了更为严苛的要求。牵引供电综合自动化系统承担着数据采集、实时测控、故障保护、状态监测等关键功能，是实现牵引供电系统智能化、自动化运行的核心载体，其运行状态直接决定铁路供电系统的整体安全水平。

1 铁路牵引供电自动化系统稳定性优化技术研究

1.1 硬件系统稳定性优化

（1）核心设备冗余配置优化方案，摒弃传统单一设备承载核心运行任务的模式，结合牵引供电自动化系统的运行逻辑和功能层级，对测控单元、数据采集模块以及通信核心设备开展分级冗余配置设计。根据系统不同功能模块的重要程度，区分关键控制环节和普通监测环节，合理搭配热冗余和冷冗余相结合的配置方式^[1]。通过完善设备切换逻辑，保障主设备出现性能波动或运行故障时，备用设备可以无缝接替运行任务，彻底消除单设备故障带来的系统运行中断风险，大幅提升核心硬件架构的容错能力和运行可靠性。（2）硬件电路抗老化与抗过载优化设计，聚焦设备内部电路长期运行产生的元器件老化、参数漂移以及瞬时过载损坏问题。针对牵引供电场景电压电流波动频繁、工作时长不间断的特点，对电路核心元器件进行选型升级，筛选耐高温、耐疲劳、抗波动的优质元器件。同时优化电路布局结构，调整电路走线间距和功率分配模式，增设缓冲防护结构，弱化瞬时负荷冲击对电路的损伤。通过常态化的电路性

能适配优化，延缓元器件老化速率，提升整体电路对复杂工况的适配能力和耐受能力。（3）设备安装与接地系统优化，围绕现场安装环境适配和电气安全稳定性展开优化调整。严格依据牵引供电设备运行安装标准，规范各类硬件设备的安装固定方式、安装间距和防护布局，规避设备振动偏移、环境积尘受潮引发的接触不良问题。同时优化整体接地网络结构，统一接地规范，完善接地回路的完整性，降低接地电阻失衡、回路不畅带来的电位偏移问题。可靠的接地体系不仅可以稳定设备运行电位，还能辅助疏导各类杂散电气信号，从安装基础层面保障硬件设备长期平稳运行。

1.2 软件与算法稳定性优化

（1）系统测控算法精度优化与延时补偿改进，是提升系统基础运行稳定性的核心环节。优化针对传统算法的运算缺陷进行调整，优化数据采集滤波处理逻辑，剔除现场无规律干扰信号带来的无效数据，保留真实有效的工况参数。在此基础上建立动态延时补偿机制，根据系统实时运行负荷、数据传输速率以及程序运算耗时，自适应调整运算时序和指令输出时机。有效抵消系统固有延时和工况变动带来的控制偏差，让系统测控数据更加贴合现场实际运行状态，全面提升测控环节的精准度和实时性。（2）传统保护逻辑判别条件较为固化，无法适配牵引供电系统多变的运行工况，对于轻微故障、瞬时故障以及复合故障的识别能力较差，容易出现故障漏判、错判的情况。优化梳理各类供电故障的电气特征和运行表现，细化不同故障类型的判别阈值和判定条件，摒弃单一参数判定的传统模式，采用多参数联动综合判定的逻辑模式。同时简化冗余的保护动作流程，梳理

各保护模块的联动关系,明确不同故障等级对应的动作策略。让系统可以精准区分正常负荷波动与真实设备故障,在出现故障时能够快速完成故障定位和层级判定,输出合理的保护动作指令,既可以及时切除故障隐患,也能避免过度保护造成的供电中断问题,大幅提升系统保护控制的合理性与稳定性。(3)系统容错、自修复与异常冗余机制设计,是保障软件系统长期可靠运行的重要兜底手段。容错机制的优化主要针对程序运行过程中的偶然异常数据和运算错误进行兼容处理,避免单次数据异常导致整个程序模块暂停运行。自修复机制可以实现系统异常模块的自主检测与重启复位,在监测到软件模块运行异常后,自动完成故障隔离和功能恢复,无需人工干预。异常冗余机制则为核心软件功能配备备用运算链路,当主运算链路出现卡顿或失效时,自动切换至备用链路完成数据运算和指令输出。多重软件防护机制相互配合,能够大幅降低软件软性故障对牵引供电系统运行的影响,全面提升软件系统的抗干扰能力和持续运行稳定性。

1.3 数据与通信稳定性优化

(1)牵引供电数据传输协议优化,立足牵引供电业务的运行特性调整传统传输机制。原有通用协议适配性较为宽泛,没有针对供电高频采样数据、保护紧急指令等差异化业务做针对性优化,容易出现数据优先级混乱、传输冗余量大的问题。通过重构协议的数据封装与解析逻辑,区分实时控制数据、监测日志数据、故障录波数据的传输优先级^[2]。精简无效传输字段,压缩数据传输冗余开销,同时优化数据时序校准机制,保障跨设备、跨模块的数据传输时序统一,避免数据错位丢失引发的系统判断偏差。(2)通信链路抗中断与抗拥堵优化策略,主要用于提升复杂工况下通信网络的持续通行能力。依托链路状态实时感知技术,动态监测网络带宽负荷与链路运行状态,在网络流量趋近饱和时,自动限制低优先级数据的传输占用比例,保障核心控制指令优先通行。同时搭建多路径通信备用机制,当主通信链路受到干扰出现波动或短时中断时,系统可以自主切换至备用链路维持数据传输。这套优化方式可以有效缓解网络拥堵问题,降低通信中断概率,全方位强化牵引供电自动化系统的数据通信稳定性能。

2 牵引供电系统抗干扰关键技术研究

2.1 电磁干扰抑制技术

(1)屏蔽防护优化技术是抵御外部电磁干扰最基础的物理防护手段。传统屏蔽方式多采用统一规格的屏蔽结构,无法适配不同设备、不同区域的电磁干扰强

度差异。优化工作主要围绕屏蔽材质选型和屏蔽结构布局展开升级。结合牵引供电现场的电磁频段特征,选用屏蔽效能更强、适配性更好的防护材料,对测控装置外壳、二次线缆通道以及精密模块区域实施全方位屏蔽包裹^[3]。同时完善屏蔽体的整体闭合性,处理设备接口与线路穿孔位置的屏蔽缺口,减少电磁信号的渗透路径,从物理层面阻挡外部电磁场侵入设备内部电路。(2)滤波降噪与谐波抑制技术主要用于消除供电线路传输过程中叠加的杂散干扰信号。列车动态取流与负荷频繁变化,会让供电线路产生大量谐波分量与高频噪声信号。这类信号会混入正常工作信号中,干扰设备的正常运算与判断。通过优化无源滤波与有源滤波的配合方式,针对不同频次的谐波信号开展分层治理。有效削弱线路中的畸变电流与电压波动,净化供电波形质量,保证输送至自动化设备的电力信号平稳纯净,降低谐波噪声带来的设备运行扰动。(3)电磁耦合干扰隔离技术主要用于解决线路之间电磁互感耦合引发的串扰问题。现场各类电力线缆与信号线缆排布密集,不同线路之间极易通过电磁耦合产生相互干扰。技术优化重点调整强弱电线路的敷设间距与走线方式,弱化线路之间的互感效应。同时增加专用隔离器件阻断耦合传导路径,实现动力回路与信号回路的电气隔离。该方式可以有效避免强电侧的电磁波动传导至弱电控制回路,彻底降低耦合干扰对自动化系统测控精度的不良影响。

2.2 瞬态干扰与电弧干扰抑制技术

(1)瞬态干扰抑制技术主要针对系统运行中突发的电压尖峰和瞬时电流冲击进行治理。传统防护手段多依靠单一的稳压器件进行被动防护,应对高强度、高频次的瞬态冲击时防护效果有限,无法持续保障设备安全稳定运行。本次技术优化以主动抑制与被动防护结合的模式为主,优化系统瞬态吸收防护结构,升级适配牵引供电工况的瞬态抑制器件。同时调整电路电压缓冲机制,对线路突发的电压升降波动进行平缓处理,削弱瞬态能量的冲击力度,避免瞬时高压击穿精密元器件,杜绝瞬态干扰引发的系统短时失效问题。(2)电弧干扰是牵引供电场景特有的高强度干扰类型,电弧燃烧过程中会持续辐射宽频电磁信号,同时产生不规则的电压畸变,持续扰乱周边自动化设备的信号传输与数据采集工作。电弧干扰抑制技术从干扰源头和传播路径双向开展优化,通过优化接触网供电工况适配策略,弱化列车运行过程中电弧产生的条件,从源头减少电弧放电频次^[4]。针对已经产生的电弧干扰信号,增设针对性的高频抑制结构,过滤电弧辐射的杂散电磁信号。(3)优化二次设

备信号采集的甄别逻辑,提升系统对电弧干扰无效信号的识别和过滤能力,让设备可以自动屏蔽电弧带来的异常数据波动,保留真实有效的运行参数。通过多重技术手段相互配合,能够最大程度削弱瞬态干扰和电弧干扰对牵引供电自动化系统的负面影响,切实强化系统运行的稳定性与抗干扰性能。

2.3 杂散电流干扰防控与治理技术

(1) 杂散电流的防控治理核心在于约束电流流向,减少无序扩散现象的发生。传统治理方式手段较为单一,大多依靠简单的接地疏导结构,无法适配复杂的动态负荷工况,治理效果存在明显局限性。相关技术优化首先从源头管控入手,优化牵引回流系统的整体结构,完善回流通道的完整性与导通性能。通过降低回流路径的整体电阻,提升牵引电流的回流效率,让绝大部分工作电流可以沿既定路径有序回流,从根本上减少电流外泄的总量,大幅削弱杂散电流的生成基础。(2) 在源头管控的基础上,针对性增设杂散电流阻隔防护结构。利用绝缘防护技术对容易产生电流外泄的设备区段和线路区段进行隔离处理,阻断杂散电流向自动化设备区域扩散的传播路径,避免无序电流侵入二次测控和通信设备回路。同时优化电位均衡体系,统一设备区域电位基准,缓解杂散电流引发的局部电位偏移问题,规避电位差造成的信号采样偏差和设备运行异常。

2.4 极端工况下系统抗干扰自适应控制策略

自适应控制策略以系统实时运行状态和环境干扰强度为调节依据,摒弃一成不变的固定控制参数。系统可以通过内部监测模块持续采集供电负荷波动幅度、电磁干扰强度以及线路运行状态等基础数据。依托内置的运算逻辑实时判别当前工况的恶劣程度,自主完成控制参数的动态修正^[5]。系统能够在普通运行工况下保持常规

防护模式,保障设备运行效率,在检测到极端工况时自动升级抗干扰等级,强化信号滤波、数据纠错和链路防护能力。这套控制策略还具备工况恢复后的自主复位功能,在极端干扰工况消退之后,系统可以逐步回落控制参数,回归常规运行状态,避免长期高强度防护带来的资源浪费和运行延迟。动态自适应的调控模式能够精准匹配不同极端干扰场景的防护需求,弥补传统固定控制策略的适配短板,全方位提升牵引供电自动化系统在各类极端复杂工况下的抗干扰水平与运行可靠性。

结束语

总之,整套优化技术体系能够显著降低各类故障与干扰对牵引供电自动化系统的影响,有效提升系统测控精度、故障处理能力与持续运行水平,完全适配复杂多变的铁路牵引供电运行工况,有效解决了工程现场存在的部分稳定性与抗干扰难题,可为后续牵引供电自动化系统升级改造、运维标准优化、抗干扰体系建设提供重要的理论依据和技术参考。

参考文献

- [1] 王春明. 普速铁路接触网供电系统的故障诊断与智能维护策略 [J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025,(2):076-079.
- [2] 宋俊鹏. 牵引供电综合自动化实训系统技术分析 [J]. 流体测量与控制,2025,6(2):44-46.
- [3] 沈鹏. 城际铁路工电供综合智能运维平台研究与设计 [J]. 中国铁路,2025,(4):126-131.
- [4] 潘运,熊国江. 基于正交试验设计的配电网自动化终端优化配置 [J]. 电网与清洁能源,2026,42(4):62-71.
- [5] 王永泽,杨斌,谢汉生,等. 铁路客运站综合能源系统关键技术应用研究 [J]. 铁路节能环保与安全卫生,2021,11(1):27-31.