

铁道接触网电分段电弧产生规律及抑制技术优化

刘 飞

内蒙古东乌铁路有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

摘 要: 铁道接触网电分段电弧会烧蚀设备、引发供电故障、干扰铁路信号通信,严重影响牵引供电系统稳定与行车安全。本文基于弓网电弧形成机理,搭建改进Mayr-Cassie联合仿真模型,探究列车工况、设备结构及环境因素对电弧的影响规律。针对现有抑制技术的短板,从电气参数、设备结构、主动管控三方面优化方案,经仿真验证,优化技术可有效缩短燃弧时长、降低过电压与电磁干扰,为现场电弧防控提供可靠技术支持。

关键词: 铁道接触网电分段; 电弧产生规律; 抑制技术优化

引言: 电气化铁路高速、重载化发展下,接触网电分段作为供电分区衔接核心部件,受受电弓频繁过渡冲击,极易产生暂态电弧问题。当前主流电弧抑制技术存在适配性差、抑制效果有限、现场改造受限等缺陷,难以适配复杂多变的行车与环境工况。为解决电弧引发的设备损耗、供电波动及行车安全隐患,本文系统研究电弧演化规律,优化多维度抑制技术,旨在提升牵引供电系统运行稳定性与安全韧性。

1 铁道接触网电分段电弧基础理论与形成机理

1.1 接触网电分段结构与工作原理

(1) 关节式电分段利用锚段关节重叠区实现电气隔离,经隔离开关切换馈电,适用于站场、长大桥隧等长距离大电流场景;器件式分段绝缘器以机械断口配合导流滑道实现受电弓过渡,适用于咽喉区、渡线、联络线及隧道内等受限区段。关节式机械连续性好、支持高速通过、可越区供电,但占地大;器件式结构紧凑、易维护,但存在受力硬点、消弧能力弱、机械强度较低。二者共同实现供电分区柔性衔接^[1]。(2) 电分段通过机械断口与空气间隙隔离,列车运行时受电弓滑行过渡,完成供电臂间负载电流转移。切换瞬间弓网触点电压幅值与相位突变,形成动态电气过渡过程,为电弧孕育提供条件。(3) 列车过电分段时,受电弓与接触线短暂脱离与重新接触,接触压力、滑速及表面状态剧烈变化,接触电阻非线性波动,引发局部高温与微弧,构成电弧形成的初始动态边界。

1.2 电分段电弧产生基础理论

(1) 弓网分离瞬间,间隙电场强度超过空气击穿阈值,引发电子倍增与流注放电,形成起弧;外部电路持续注入能量维持燃弧,等离子体通道建立;当电流过零且介质恢复强度高于恢复电压时熄弧。起弧、燃弧、熄弧构成完整放电周期。(2) 弓网分离过程中,电场畸变

驱动电荷输运,电流收缩产生强磁场,焦耳热使弧柱温度达数千开尔文,热场改变气体密度与电导率,三场相互耦合,共同调控电弧形态与能量耗散路径。(3) 电分段电弧呈现高频、高幅值暂态电压与电流振荡,持续时间数毫秒至数十毫秒,释放能量集中于弧柱区域,通过热传导、对流及辐射向周围传递,构成对系统与设备的直接威胁。

1.3 电分段电弧主要危害特性

(1) 电弧高温使接触线表层铜材熔化、气化,形成凹坑与飞溅,同时灼蚀受电弓滑板,导致接触面粗糙度增大、材料流失,加速磨损并缩短使用寿命。(2) 电弧引发的操作过电压与涌流可导致保护装置误动、断路器跳闸,造成供电中断;过电压沿线路侵入牵引变电所,危及变压器、高压电缆等设备绝缘,诱发系统性故障^[2]。(3) 电弧辐射宽频电磁波,频段覆盖铁路信号频点与通信信道,产生传导干扰与辐射干扰,导致轨道电路异常、信号显示升级、无线通信误码率升高,威胁行车安全。

2 铁道接触网电分段电弧产生规律及影响因素仿真分析

2.1 电分段电弧仿真模型构建

(1) 基于弓网动态分离特性,选取改进Mayr-Cassie电弧模型为基础数学框架,该模型兼顾弧柱能量平衡与弧阻非线性时变特征,引入接触电阻、散热系数及时间常数等关键参数。根据实际弓网材料属性与电气参数,设定模型中的单位长度耗散功率、弧柱时间常数及静态伏安特性系数,确保模型对不同燃弧阶段的响应准确性。(2) 搭建接触网—受电弓—电分段一体化仿真模型,机械层面建立弓网多体动力学模型,模拟受电弓升降弓、滑行及过电分段时的振动位移;电气层面构建牵引供电等效网络,包含电分段断口、隔离开关、线路阻抗及负载,实现机械运动与电气暂态的实时耦合仿

真。采用Matlab/Simulink与Simscape联合仿真平台,实现跨域协同计算。(3)依据实际线路参数设定仿真边界条件,包括接触线张力、受电弓静态接触压力、弓头等等效质量及阻尼系数;工况参数方面,以列车运行速度、牵引电流大小及供电电压等级为核心变量,结合历史实测数据进行参数校准,使模型初始状态与现场一致。

2.2 典型工况下电弧产生演化规律

(1)列车匀速过电分段时,起弧时刻集中在受电弓脱离供电臂出口端的瞬间,燃弧持续时间相对稳定,随速度提升燃弧时长呈缩短趋势;列车变速通过时,加速度变化导致弓网接触力波动加剧,起弧提前且燃弧时长离散性显著增大,变速工况下平均燃弧时长较匀速工况增加约20%~35%。(2)电弧电压包络线呈现陡峭上升趋势,其上叠加有高频振荡分量,峰值可达系统额定电压的2~3倍,电流波形随之畸变并产生高频谐波。燃弧初期,瞬时能量快速积累,中后期能量随弧柱电阻变化呈非线性增长。电流过零后,若介质恢复强度不足以承受恢复电压,则发生重燃,且重燃频次随供电回路电感增加而升高。(3)不同运行区间因线路参数、供电容量及列车运行图差异,电弧产生频次在站内咽喉区最高,区间线路次之,长大桥隧区段最低;强度分布上,重载列车出站加速阶段电弧强度峰值最大,轻载惰行阶段强度较小。

2.3 电弧产生关键影响因素分析

(1)列车速度提升使弓网分离相对速度增大,电弧拉长加快,弧柱散热增强,单次燃弧时长缩短但起弧概率上升;牵引负荷增大时,回路电流水平升高,电弧能量输入增加,烧蚀强度与过电压幅值均随负荷电流线性递增,负荷电流每增加100A,电弧峰值能量约提升12%~18%。(2)电分段抬升高度增加,弓网分离间隙加大,起弧所需击穿电压升高,起弧概率降低,但一旦起弧燃弧能量更大;关节角度过小导致受电弓过渡不顺,增加机械冲击起弧风险;绝缘结构采用双绝缘子布置较单绝缘子可有效约束电弧横向漂移,缩短燃弧路径。(3)环境温度升高使空气密度降低,击穿电压下降,起弧门槛降低;湿度增大时水分子吸收电弧热量,加速弧柱冷却,有利于熄弧但易诱发沿面闪络;雨雪天气下绝缘子表面湿润,泄漏电流增大,电弧易沿绝缘表面滑移,燃弧位置不定且重燃概率显著升高,雨雪工况燃弧时长约为干燥工况的1.5~2倍^[3]。

2.4 仿真结果有效性验证

(1)选取典型线路电分段区段,布设弓网接触力传感器、电弧光敏探测器及高频电压电流采集装置,同

步采集列车过电分段时的弓网振动、电弧光强及电气暂态波形。对原始数据进行滤波去噪、时间轴对齐及特征提取,剔除机车操作引起的异常扰动样本,确保实测数据集的有效性与代表性。(2)将相同工况下仿真输出与实测数据进行时域波形叠加对比,重点对比起弧时刻偏差、燃弧时长误差、峰值电压电流幅值误差及能量累积曲线吻合度。采用均方根误差与相关系数作为量化指标,实测数据与仿真结果相关系数达0.89以上,主要特征参数偏差控制在15%以内。(3)依据对比结果对模型进行闭环修正,调整电弧时间常数、散热系数及弓网接触阻尼等敏感参数,使仿真精度进一步提升。将修正后的模型扩展至多工况仿真,总结形成电弧产生规律结论体系,明确不同因素影响权重排序,为后续电弧抑制策略提供可靠的仿真支撑与量化依据。

3 铁道接触网电分段电弧抑制技术优化与效果验证

3.1 现有主流电弧抑制技术及缺陷分析

(1)被动抑制:阻容吸收装置依赖经验公式取值,未计及供电臂长度、短路容量及功率因数等时变参数,高频分量吸收效率偏低,重载时阻尼弱化。避雷器(MOA)响应约数十纳秒,但用于泄放雷电流,对持续数毫秒的工频续流过电压动作后恢复差,多次冲击后阀片老化、保护阈值漂移,防护裕度逐年衰减。(2)结构优化:延长关节式电分段重叠长度、降低抬升差或改进分段绝缘器,可减缓弓网分离冲击,但既有线路隧道净空、桥梁限界及锚段张力平衡严重制约改造幅度,多数区段仅能微调。弓网匹配优化侧重调节受电弓升弓扭矩与压力,但不同车型弓头等等效质量、阻尼固有频率差异大,单一参数难以覆盖动车组、机车及城际列车混跑需求,实际应用常顾此失彼^[4]。(3)主动管控:列车惰行或临时限速通过电分段,虽降低分离速度,但直接压缩通过能力,高峰时段每列车额外占用15~20秒追踪间隔,导致运行图延误累积;且策略依赖司机经验,对突发负荷或网压波动缺乏实时反馈,抑制效果不确定性显著,难以作为长效可靠手段。

3.2 多维度电弧抑制技术优化方案设计

(1)针对阻容吸收装置,首先根据线路实测阻抗频谱,将电阻值优化为50~200Ω可调档位、电容值取0.5~2.0μF组合,按轻载、中载、重载三级负荷区间自动切换;同时在RC支路串联小型空心电感(约5~20μH)以抑制振荡电流峰值,改善阻尼波形,使吸收回路与线路特征阻抗匹配度提升至85%以上,确保全负荷域内过电压平抑效果稳定。(2)电分段结构参数优化方面,在满足受电弓动态包络线要求下,将抬升高度由常见35~50mm

精确下调至25~30mm,以缩短弓网分离间隙,降低击穿概率;关节交叉角度优化设定为 $12^{\circ}\pm 2^{\circ}$,确保过渡区接触线高度平滑变化;关节端部加装弧形铜合金导流板,引导电弧沿导流板向侧向漂移,避免电弧定点烧蚀接触线,同时增加熄弧路径长度。(3)基于运行工况的主动协同控制策略,构建起弧风险实时评估模型,输入变量包括列车即时速度、牵引电流、接触压力波动幅值及环境温度湿度,模型输出优化建议速度及保护装置预动作信号(如投入附加电容或短接部分电阻),使抑制措施随工况动态调节,实现“感知—决策—执行”闭环,提高应对突发扰动的自适应能力。

3.3 优化方案仿真对比试验

(1)优化后仿真结果表明,匀速工况下燃弧时长均值由优化前的12.5ms缩短至7.2ms,缩短约42%;变速工况燃弧时长离散性降低,能量累积峰值由86J降至52J,衰减率达39.5%,且电弧功率曲线上升沿变缓,表明优化方案有效削减了燃弧初期能量注入速率。(2)过电压倍数由优化前的2.8倍额定电压降至1.7倍,过电流冲击幅值降低约38%;电磁干扰方面,150kHz~30MHz传导干扰幅值降低9.6dB,30~300MHz辐射场强降低11.2dB,信号系统误码率由优化前 2.3×10^{-4} 降至 4.5×10^{-5} ,改善效果显著^[5]。

(3)三类优化方案对比:阻容参数优化见效快、成本低,但抑制深度有限,适用于中等负荷区段;结构优化效果最为显著,但受限于现场条件,仅适于新线建设或大修同步实施;协同控制策略灵活性强,但依赖传感网络精度与算法可靠性。综合三者联合应用时,各指标改善幅度均优于单一方案叠加,但需统筹实施优先级。

3.4 工程应用可行性与优化建议

(1)阻容参数优化仅需更换柜内元器件,每处投资约6~8万元,可利用常规4小时天窗完成;结构优化涉及悬挂调整与腕臂更换,单处投资约25~35万元,需结合年度大修计划分段推进;协同控制需增配电压电流互感器、边缘计算终端及通信模块,单处约15~20万元,可分

期部署,总体工程可行。(2)现场应用时,阻容装置须加强防潮散热管理,每季度进行参数校验;结构优化后应进行弓网动态拉出值复测,确保过渡区无硬点;协同控制策略投入前需与调度集中系统、微机联锁系统联合调试,避免控制指令冲突。运维应建立电弧事件台账,结合在线监测数据定期评估抑制效果,动态调整切换档位。(3)面向雨雪冰冻、大风等极端复杂工况,未来可探索主动吹弧磁场技术,利用电磁力快速拉断电弧;同时结合大数据分析挖掘电弧特征与多因素关联规则,推动抑制策略由被动响应向预测预控升级,构建覆盖全工况的电弧综合防控体系,持续提升供电系统安全韧性。

结束语

本文系统揭示了铁道接触网电分段电弧的产生机理与多因素影响规律,完成了传统电弧抑制技术的缺陷梳理与多维度方案优化。仿真结果证实,电气、结构、协同控制联合优化可显著削弱电弧危害,改善弓网供电环境。研究成果具备良好的工程落地性与运维价值,后续可结合磁场吹弧、大数据预测技术持续迭代,构建全工况电弧防控体系,为电气化铁路安全高效运营提供长效保障。

参考文献

- [1]魏文赋,罗远飞.高速铁路锚段关节电分段电弧动态演化规律研究[J].铁道学报,2024,46(05):88-95.
- [2]高国强,董凯利.电气化铁路分段绝缘器电弧故障特性与抑制策略[J].电气化铁道,2023,34(04):23-28.
- [3]罗远飞,杨智帆.高速铁路电分段电弧电热损伤特性及优化抑制技术[J].电工技术学报,2024,39(12):278-286.
- [4]周悦,母婷佑,鲁超.复杂工况下铁道接触网电分段电弧动态建模与特性分析[J].铁道科学与工程学报,2025,22(02):712-720.
- [5]顾立新.电气化铁路枢纽电分段燃弧隐患治理与技术优化[J].铁道工程学报,2024,41(06):78-83.