

# 接触网电气接触点电弧特性及其抑制方法

刘 炜

大秦铁路股份有限公司太原供电段 山西晋中 030600

**摘要:** 接触网电气接触点电弧是电气化铁路供电系统中的关键问题, 其特性及抑制方法直接影响系统运行的可靠性和安全性。本文系统研究了接触网电气接触点电弧的形成机理、物理与化学特性以及对系统的影响, 分析了电气参数、环境因素和材料与结构对电弧特性的作用规律。并且, 深入探讨了传统电弧抑制技术如快速断电和机械优化, 以及新型抑制方法如纳米涂层和智能控制技术的应用效果。通过比较传统与新型方法的优劣, 提出了多技术融合的优化策略。研究表明, 综合优化电气控制、材料设计和环境适应性能够有效抑制电弧, 提升接触网系统的性能。本文的研究为电气化铁路电弧问题的解决提供了理论依据和技术参考, 为推动铁路供电系统的高效、绿色发展奠定了基础。

**关键词:** 接触网; 电气接触点; 电弧特性; 抑制方法; 纳米涂层; 智能控制; 电气化铁路

## 一、引言

### (一) 研究背景与意义

接触网作为电气化铁路的核心供电系统, 承担着向列车提供稳定电能的重要任务。电气接触点是接触网与受电弓之间的关键连接部位, 其运行状态直接影响供电质量与系统安全性。然而, 在实际运行中, 接触点因高速滑动、振动以及环境因素, 易产生电弧现象。电弧不仅导致接触点材料损耗、电气性能下降, 还可能引发系统故障, 严重威胁铁路运行安全。并且, 电弧引发的电磁干扰对通信与信号系统构成潜在风险, 加剧了系统维护的复杂性。因此, 深入研究接触网电气接触点电弧特性及其抑制方法, 具有重要的理论价值与工程意义。

### (二) 研究目标与论文结构

本研究旨在系统分析接触网电气接触点电弧的形成机理、物理特性及其影响因素, 探索有效的电弧抑制方法, 为提升接触网系统可靠性提供理论依据与技术支持。具体而言, 本文将通过理论分析与文献综述, 揭示电弧的基本特性与影响机制。并且, 基于现有技术, 提出针对性的抑制策略, 并对其效果进行比较与优化。最终, 本研究期望为接触网电弧问题的解决提供科学参考, 推动电气化铁路技术的进步。

论文结构安排如下: 首先介绍接触网电弧的基本特性, 阐明其形成机理与影响。然后, 分析电气参数、环境因素与材料结构对电弧特性的作用。接着, 系统探讨传统与新型电弧抑制方法, 并提出优化方案。最后, 总结研究成果并展望未来研究方向。通过此结构, 本文力

求全面、深入地探讨接触网电弧问题, 为相关领域的研究与应用提供指导。

## 二、接触网电气接触点电弧的基本特性

### (一) 电弧的形成机理

接触网电气接触点电弧是受电弓与接触网导线在动态接触过程中, 因电气或机械因素导致的放电现象。其形成机理主要源于接触点间隙的电场击穿。当受电弓与接触网导线发生短暂分离或接触不良时, 接触点间隙中的电场强度迅速升高。一旦电场强度超过空气的击穿阈值, 间隙中的气体分子被电离, 产生等离子体通道, 从而形成电弧。并且, 电流的持续流动为电弧提供能量, 使其得以维持。

电弧的形成还与多种外部条件密切相关。例如, 列车高速运行导致的振动与接触压力波动, 易造成接触点间隙的动态变化。电流强度、电压等级以及接触点材料特性也会影响电弧的触发与稳定。尤其在高电流条件下, 电弧的形成概率显著增加。而且, 环境因素如湿度与粉尘可能改变间隙的绝缘性能, 进一步促进电弧的产生。因此, 电弧形成是一个复杂的多物理场耦合过程, 涉及电场、热场以及材料特性的交互作用。深入理解其机理, 为后续特性分析与抑制方法设计奠定了理论基础。

### (二) 电弧的物理与化学特性

电弧作为一种高温等离子体放电现象, 具有独特的物理与化学特性。在物理特性方面, 电弧的温度极高, 中心区域可达6000至10000开尔文。这种高温源于电子与离子的高速碰撞, 导致能量以热能与光能形式释放。

并且,电弧具有较高的电导率,能够维持稳定的电流通道。其电压-电流特性呈现非线性,表现为随电流增加,电弧电压略有下降的趋势。此外,电弧的形态与稳定性受接触点速度与间隙距离影响。在高速滑动接触中,电弧常呈现拉伸或断续状态,伴随强烈的电磁辐射。

在化学特性方面,电弧高温引发接触点材料与周围气体的化学反应。接触网导线多采用铜或铜合金,受电弓滑板常使用碳基材料。电弧作用下,铜表面可能发生氧化,形成氧化铜,降低导电性能。并且,碳滑板在高温下易发生烧蚀,释放碳氧化物与微粒。这些化学反应不仅改变材料表面形貌,还可能在接触点间隙中形成导电颗粒,加剧电弧的发生。而且,电弧引发的气体电离与解离,会产生臭氧与氮氧化物,对环境造成一定影响。因此,电弧的物理与化学特性共同决定了其对接触网系统的破坏作用。

### (三) 电弧对接触网系统的影响

电弧对接触网系统的运行可靠性与安全性构成显著威胁。首先,电弧高温导致接触点材料快速磨损。铜导线与碳滑板在反复电弧作用下,表面出现烧蚀坑与裂纹,缩短了使用寿命。并且,材料磨损加剧接触不良,进一步增加电弧发生的频率,形成恶性循环。其次,电弧引发的能量损耗不可忽视。电弧通道中的部分电能转化为热能与光能,降低了供电效率。在高功率牵引系统中,这种损耗尤为明显。

此外,电弧产生的电磁干扰对铁路信号与通信系统造成不利影响。电弧放电过程中伴随宽频电磁辐射,可能干扰列车控制系统的正常运行。而且,电弧引发的瞬态过电压可能对接触网的绝缘部件造成冲击,增加系统故障风险。在极端情况下,持续的强烈电弧可能导致接触网导线熔断或受电弓滑板断裂,直接威胁列车运行安全。因此,电弧的影响不仅局限于接触点局部,还涉及整个供电系统的稳定运行。

为应对电弧的负面效应,需从材料优化、电气控制以及环境适应性等方面入手,设计有效的抑制措施。并且,准确把握电弧的特性与影响规律,有助于制定针对性的技术方案,提升接触网系统的整体性能。综合来看,电弧问题不仅是电气化铁路技术领域的重点难题,也是推动铁路高效运行的关键研究方向。

## 三、电弧特性影响因素分析

### (一) 电气参数的影响

电气参数是影响接触网电气接触点电弧特性的核心因素。电流强度直接决定电弧的能量水平。研究表明,

高电流条件下,电弧的温度与持续时间显著增加,导致更严重的材料烧蚀与能量损耗。并且,电流的波动性也会影响电弧的稳定性。在列车加速或制动时,电流瞬态变化可能引发电弧的频繁触发。电压等级同样对电弧特性产生重要影响。接触网系统通常采用25千伏交流或直流供电,高电压使接触点间隙更容易被击穿,从而促进电弧的形成。

接触点间隙的动态变化与电弧特性密切相关。间隙距离过小时,电弧可能因接触点快速闭合而熄灭;间隙过大时,电弧的拉伸导致其不稳定性增强。并且,供电系统的频率特性也会对电弧产生影响。在交流系统中,电弧可能因电流过零点而短暂熄灭,但高频振荡可能延长电弧持续时间。因此,优化电流与电压的稳定控制,合理设计供电系统参数,是减轻电弧影响的重要途径。

### (二) 环境因素的影响

环境因素对接触网电弧特性的影响不容忽视。湿度是关键的环境变量之一。高湿度条件下,空气中的水分子降低间隙的绝缘强度,增加电弧触发的概率。并且,湿气可能在接触点表面形成液膜,导致局部短路或电弧的异常放电。温度变化同样影响电弧特性。在低温环境中,接触点材料的机械性能可能下降,增加接触不良的风险;高温则可能加速材料的老化与氧化。

风速与粉尘也对电弧特性产生显著作用。高速运行的列车产生的气流可能改变接触点间隙的气体流动状态,影响电弧的形态与稳定性。并且,粉尘颗粒的沉积可能改变接触点表面的电学特性,增加电弧发生的可能性。特别是在沙尘暴或污染严重的地区,粉尘引发的电弧问题尤为突出。此外,降雨或冰雪天气会进一步恶化接触点的运行环境,导致电弧的频繁发生。因此,环境因素的复杂性要求接触网系统具备较强的适应能力。优化设计时需充分考虑不同气候条件下的电弧特性,以提升系统运行的稳定性。

### (三) 材料与结构的影响

接触点材料的物理与化学特性直接影响电弧的发生与演变。接触网导线通常采用铜或铜合金,因其具有良好的导电性与机械强度。然而,铜材料在电弧高温下易发生氧化与烧蚀,表面形成氧化层后导电性能下降。受电弓滑板多采用碳基材料或金属-碳复合材料。碳滑板耐磨性较好,但在电弧作用下易产生烧蚀微粒,加剧电弧的持续性。并且,材料的热导率与熔点也会影响电弧的破坏程度。高热导率材料可快速散热,减弱电弧的局部高温效应;高熔点材料则能更好地抵抗烧蚀。

接触点的结构设计同样对电弧特性产生重要影响。受电弓与接触网导线的接触面积、压力分布以及滑动速度均与电弧的触发密切相关。接触压力不足可能导致间隙增大，增加电弧发生的概率；过高的压力则可能加剧机械磨损。并且，接触网的几何结构，如导线张力与平直度，也会影响电弧的稳定性。优化滑板与导线的匹配设计，可有效降低电弧的发生频率。此外，表面处理技术，如镀层或纳米涂层，能够改善材料的抗电弧性能，从而延长接触点使用寿命。

#### 四、电弧抑制方法研究

##### (一) 传统电弧抑制技术

传统电弧抑制技术通过优化电气控制与机械设计减少接触网电气接触点电弧。快速断电技术是常用方法，检测到电弧时迅速切断电流，阻止电弧持续。在直流系统中，此方法能有效降低电弧能量。并且，传统技术常采用并联电容器或电感器平滑电流波动，吸收过电压，维持接触点稳定性。

机械设计优化也广泛应用，例如调整受电弓弹簧刚度与阻尼，稳定接触压力，减少振动引发的接触不良。并且，接触网导线张力与平直度优化可降低动态间隙变化。选用耐磨耐高温材料如铜合金导线与碳基滑板，能减缓电弧烧蚀。然而，传统技术在高湿度或极端温度等复杂工况下效果有限，难以满足高速铁路需求。

##### (二) 新型电弧抑制方法

新型电弧抑制方法得益于材料科学与智能控制技术进步。在材料方面，纳米涂层技术通过施加耐高温、抗氧化涂层提升抗电弧性能。并且，金属-陶瓷复合滑板兼具导电性与耐烧蚀性，延长接触点寿命，降低维护成本。

智能控制技术表现突出。实时电弧检测系统通过传感器捕捉光辐射或电压异常，快速触发抑制机制。并且，人工智能预测控制可根据运行状态动态调整供电参数，预防电弧。例如，优化脉宽调制技术降低电弧触发概率。此外，电磁屏蔽装置能减弱电弧电磁干扰。环境适应性设计如防潮防尘结构，也降低环境因素影响。这些方法在实验中效果显著，为接触网高效运行提供支持。

##### (三) 抑制方法的比较与优化

传统方法如快速断电与机械优化成本低、技术成熟，适合推广。并且，其电气调控直接，响应迅速。但抑制效果受复杂工况限制。新型方法如纳米涂层与智能控制效果更佳，适应性强。并且，智能化特性实现电弧预防

与动态调控。然而，新型方法成本高，部分技术未成熟，如纳米涂层稳定性需验证。

优化策略可融合两者优势，例如结合快速断电与智能监测实现精准抑制。并且，采用复合材料滑板并优化接触压力可提升效果。未来需聚焦多技术集成，开发低成本高耐久材料，制定差异化抑制方案，以提升接触网可靠性并支持铁路可持续发展。

#### 五、结论与展望

##### (一) 研究总结

本文系统研究了接触网电气接触点电弧特性与抑制方法，揭示了电弧形成机理、物理化学特性及影响因素。并且，分析了传统技术如快速断电与机械优化，以及新型技术如纳米涂层与智能控制的抑制效果。研究提出多技术融合策略，强调材料、控制与结构协同作用。这些成果为电弧问题解决提供理论与技术参考。并且，研究表明抑制需考虑工况、成本与可靠性，推动电气化铁路效率与安全性提升。

##### (二) 未来研究方向

未来研究可深入电弧微观机理，解析等离子体演变规律。并且，开发低成本高耐久抗电弧材料，促技术应用。智能控制系统集成化与标准化是重要方向，统一监测抑制平台可提升效率。针对我国复杂环境，需研究高寒、高湿等条件下的专用结构与策略。并且，结合大数据与人工智能构建预测模型，提高抑制精准性。这些方向将推动电弧抑制技术进步，助力铁路绿色智能化发展。

#### 参考文献

- [1] 刘尚文. 智能产品服务系统优化设计技术研究及工程应用 [D]. 电子科技大学, 2024. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2024.000358.
- [2] 尹博文. 一种新型管道机器人的设计研究 [D]. 辽宁工业大学, 2023. DOI: 10.27211/d.cnki.glngc.2023.000284.
- [3] 宝光辉. 全驱动灵巧手的电气系统设计与控制方法研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2023. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2023.001150.
- [4] 高鹏, 李洋, 吕忠. 低压电气接地故障引燃特性及痕迹特征研究 [J]. 消防科学与技术, 2022, 41 (11): 1599-1604.
- [5] 张保峰, 梁鹏, 杨鹏, 等. 基于故障树法的飞机阻力伞警示灯误报故障研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58 (10): 110-112. DOI: 10.16107/j.cnki.mmte.2022.0606.