

轨道线路绝缘性能提升与拉弧防治技术研究

黄 涛

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 401120

摘 要：本文聚焦轨道线路绝缘性能提升与拉弧防治技术。分析了轨道线路绝缘性能的基本概念、结构及影响因素，阐述了拉弧现象的基本原理、影响与检测监测技术。提出通过绝缘材料选择优化、绝缘结构设计改进及施工维护保养提升绝缘性能，同时从电弧抑制技术开发、弓网系统优化、运行策略与参数调整等方面探讨拉弧防治技术，为保障轨道线路安全稳定运行提供理论支持与技术参考。

关键词：轨道绝缘；拉弧现象；绝缘材料；接触网系统；防治技术

1 轨道线路绝缘性能分析

1.1 绝缘性能的基本概念

绝缘性能指材料或结构阻止电流通过的能力，在轨道线路里，它是保障电气系统安全稳定运行的核心要素。轨道线路涉及高压电力传输分配，绝缘性能差会引发电流泄漏，造成能源浪费与安全事故。从电学原理看，绝缘性能以绝缘电阻、介电常数、介质损耗等参数衡量。绝缘电阻反映材料对电流的阻碍作用，值越大绝缘性能越佳；介电常数描述材料在电场中的极化程度，不同材料介电常数不同，合适的介电常数能优化电气性能；介质损耗指交变电场下材料因内部电导和极化弛豫消耗的电能，损耗越小材料性能越稳定。在轨道线路中，绝缘性能意义重大。它能保障乘客与工作人员安全，防止触电；维持电气设备正常运行，减少故障损坏，延长设备寿命；还能影响供电质量和稳定性，减少电压波动与电磁干扰，确保列车运行可靠舒适。

1.2 轨道线路绝缘结构

轨道线路绝缘结构主要由接触网绝缘子、钢轨绝缘节、电缆绝缘等构成。接触网绝缘子安装在接触网支柱与导线间，兼具电气绝缘和机械支撑作用。常见类型有瓷绝缘子、玻璃绝缘子和复合绝缘子。瓷绝缘子机械强度和电气性能高，但重量大且易污闪；玻璃绝缘子有自爆特性，能及时发现内部缺陷，可抗冲击性弱；复合绝缘子结合两者优点，重量轻、强度高、耐污闪，应用广泛^[1]。钢轨绝缘节用于分割轨道电路，实现列车定位和信号传输，由绝缘套管、垫片等组成，装在钢轨接头处，其绝缘性能影响轨道电路正常工作，下降会导致短路，威胁列车运行安全。电缆绝缘保障电缆传输电能，轨道线路常用交联聚乙烯等材料，电气和耐热性能好，其厚度和质量影响绝缘性能与寿命，敷设使用中需防护，避免机械损伤和环境侵蚀。

1.3 影响绝缘性能的因素

影响轨道线路绝缘性能的因素多样，主要有环境、材料和机械因素。环境因素中，湿度是关键，空气湿度大时，绝缘材料表面易形成水膜，降低绝缘电阻，增加电流泄漏风险。温度也会影响绝缘性能，温度升高会使绝缘材料电阻率降低，介质损耗增大，加速老化。盐雾、酸雨等恶劣环境会腐蚀绝缘材料，破坏绝缘结构。材料因素直接影响绝缘性能，绝缘材料的种类、质量和性能决定其绝缘能力，不同材料电气和机械性能不同，需根据轨道线路要求选择。质量不合格的材料可能存在气泡、杂质等缺陷，降低绝缘强度，增加击穿风险。机械因素也不容忽视，轨道线路运行中，绝缘子等部件会受振动、冲击等机械力作用，长期振动可能导致内部材料松动、开裂，破坏绝缘结构，机械磨损也会使材料表面粗糙，降低绝缘性能。

2 轨道线路拉弧现象及其影响

2.1 拉弧现象的基本原理

拉弧现象是指在轨道线路中，当电气间隙的电压超过一定值时，空气被击穿，形成导电通道，产生电弧放电的现象。在轨道线路中，拉弧现象主要发生在接触网与受电弓之间、钢轨与电气设备之间等部位。当接触网与受电弓之间的接触压力不足、接触表面不平整或存在异物时，会导致接触电阻增大，局部温度升高。当温度升高到一定程度时，空气会被电离，形成等离子体，从而产生电弧。电弧一旦形成，会在电场力的作用下维持燃烧，并且会随着电流的变化而变化。拉弧的产生需要满足一定的条件，包括足够的电压、一定的电气间隙和合适的电场分布。在轨道线路中，列车的运行速度、电流大小、接触网与受电弓的相对位置等因素都会影响拉弧的产生和发展。

2.2 拉弧对轨道线路的影响

拉弧现象对轨道线路有着多方面的影响,主要包括对电气设备的损坏、对供电质量的影响和对列车运行安全的影响。拉弧产生的高温和强电流会对电气设备造成严重的损坏。电弧的高温会使接触网、受电弓等设备的金属部件熔化、烧蚀,导致设备结构破坏,缩短设备使用寿命。电弧产生的电磁力会对设备产生冲击,可能导致设备松动、变形,影响设备的正常运行^[2]。拉弧现象会对轨道线路的供电质量产生负面影响。拉弧会导致电压波动和电流畸变,使供电系统的稳定性下降。电压波动会影响列车的牵引和制动性能,导致列车运行不稳定。电流畸变会产生谐波,干扰通信信号和其他电气设备的正常运行。拉弧对列车运行安全构成严重威胁,拉弧产生的火花和烟雾可能会引发火灾,危及乘客和工作人员的生命安全。拉弧还可能导致接触网与受电弓之间的接触不良,使列车失去动力,甚至引发列车脱轨等重大事故。

2.3 拉弧检测与监测技术

为了及时发现和处理拉弧现象,保障轨道线路的安全运行,需要采用有效的拉弧检测与监测技术。目前,常用的拉弧检测方法包括光学检测法、声学检测法和电气检测法等。光学检测法是利用电弧产生的强光特性,通过光电传感器检测电弧的光信号,从而判断拉弧是否发生。这种方法具有响应速度快、检测精度高的优点,但容易受到外界光线的干扰。声学检测法是利用电弧产生的声音信号,通过麦克风等传感器采集声音信号,并进行分析和处理,以检测拉弧现象。该方法对环境噪声较为敏感,需要进行有效的降噪处理。电气检测法是通过检测电气参数的变化来判断拉弧是否发生,如检测电流、电压的突变等。这种方法能够直接反映电气系统的状态,但需要对电气参数进行精确的测量和分析。拉弧监测技术则是对拉弧现象进行实时、连续的监测,以便及时发现潜在的拉弧风险。现代轨道线路通常采用综合监测系统,将多种检测方法相结合,实现对拉弧现象的全方位监测。利用大数据分析和人工智能技术,对监测数据进行实时处理和分析,提前预测拉弧的发生,为运维人员提供决策支持。

3 轨道线路绝缘性能提升技术

3.1 绝缘材料的选择与优化

选择合适的绝缘材料是提升轨道线路绝缘性能的关键。在选择绝缘材料时,需要综合考虑材料的电气性能、机械性能、耐环境性能等因素。对于接触网绝缘子,应选择具有高绝缘强度、耐污闪性能好的材料。复合绝缘子由于其优异的性能,逐渐成为接触网绝缘子的主流选择。在复合绝缘子的制造过程中,可以通过优化

绝缘材料的配方和工艺,提高其绝缘性能和耐老化性能。对于电缆绝缘,应选择具有良好电气性能和耐热性能的材料。交联聚乙烯电缆绝缘具有较高的绝缘强度和耐热温度,能够满足轨道线路的要求。同时可以通过改进电缆的制造工艺,减少绝缘层中的杂质和气泡,提高电缆的绝缘质量。

3.2 绝缘结构的设计与改进

合理的绝缘结构设计能够有效提升轨道线路的绝缘性能。在设计接触网绝缘结构时,应充分考虑绝缘子的安装方式和电气间隙。通过优化绝缘子的排列方式和间距,提高绝缘子的电气绝缘性能。可以采用增加辅助绝缘措施,如在绝缘子表面涂覆防污闪涂料,提高绝缘子的耐污闪能力^[3]。对于钢轨绝缘节,应改进其结构设计,提高绝缘性能和可靠性。可以采用新型的绝缘套管和绝缘垫片,提高钢轨绝缘节的密封性和绝缘强度。同时加强对钢轨绝缘节的安装和维护管理,确保其安装质量和使用寿命。

3.3 施工与维护中的绝缘性能保障

在轨道线路的施工和维护过程中,需要采取有效的措施保障绝缘性能。在施工过程中,应严格按照施工规范进行操作,确保绝缘部件的安装质量。例如,在安装接触网绝缘子时,应保证绝缘子的清洁和干燥,避免绝缘子表面受到污染和损伤。在敷设电缆时,应注意保护电缆绝缘,避免电缆受到机械损伤。在维护过程中,应定期对绝缘部件进行检查和检测,及时发现和处理绝缘缺陷。例如,定期对接触网绝缘子进行清扫和检测,清除绝缘子表面的污垢和积尘,检测绝缘子的绝缘电阻和电气性能。对钢轨绝缘节进行定期检查,查看绝缘套管和绝缘垫片是否有破损和老化现象,及时进行更换。

4 轨道线路拉弧防治技术研究

4.1 电弧抑制技术的开发

为了切实有效地防治轨道线路中频繁出现的拉弧现象,开发先进的电弧抑制技术迫在眉睫。其中,采用电弧熄灭装置是一种常见且行之有效的技术手段。电弧熄灭装置的核心作用在于,当拉弧现象一旦产生,它能够迅速且果断地切断电路,从而快速熄灭电弧,避免拉弧进一步发展造成更严重的危害。以快速断路器为例,它配备了高精度的拉弧检测传感器,能够在极短的时间内,通常是毫秒级,精准地检测到拉弧信号。一旦检测到信号,快速断路器会立即启动切断动作,瞬间切断电流,有效防止电弧的持续燃烧。这种快速响应的特性对于保护轨道线路的电气设备至关重要,能够大大降低设备因电弧高温而损坏的风险。电弧抑制器也是一种重要

的电弧抑制技术，它通过巧妙地改变电路的电气参数，如电感、电容等，来抑制电弧的产生和发展。当电弧抑制器接入电路后，它能够调整电路的阻抗特性，使得在可能出现拉弧的条件下，电路的电气环境不利于电弧的形成和维持，从而达到防治拉弧的目的。另一种电弧抑制技术聚焦于采用新型的接触网和受电弓材料。研发具有良好导电性能和耐磨性能的材料是关键。例如，采用碳纤维复合材料制作受电弓滑板。碳纤维复合材料具有高强度、低密度的特点，同时其导电性能优良，能够显著减少接触网与受电弓之间的接触电阻。而且，这种材料出色的耐磨性使得受电弓滑板在与接触网长期摩擦过程中，磨损程度大大降低，从而减少了因接触不良而产生的拉弧概率，延长了受电弓滑板和接触网的使用寿命。

4.2 弓网系统优化

弓网系统的优化是防治拉弧现象不可或缺的重要措施。弓网系统作为轨道线路中电力传输的关键环节，其接触质量直接影响着拉弧现象的发生频率。优化弓网系统的接触压力和接触几何形状，能够从根本上提高接触网与受电弓之间的接触质量，进而有效减少拉弧的产生。接触压力的稳定对于弓网系统的良好运行至关重要。可以通过调整接触网的张力和弹性来实现这一目标。增加接触网的张力能够使其更加紧绷，减少因外界因素导致的晃动，从而保证与受电弓接触的稳定性。合理调整接触网的弹性，使其在列车运行过程中能够根据受电弓的压力变化做出适当的调整，始终保持接触压力在合适的范围内。在优化受电弓方面，需要对其结构和参数进行精心设计。优化受电弓的悬挂系统，提高其跟随性和稳定性，确保在列车运行过程中，受电弓能够始终紧密跟随接触网的起伏变化，保持良好的接触状态。另外，采用主动控制技术是弓网系统优化的重要发展方向。通过在弓网系统中安装高精度的传感器，实时监测弓网系统的接触状态，如接触压力、接触电阻等参数。然后，根据监测结果，利用先进的控制算法自动调整受电弓的运行参数，如升弓高度、弓头角度等，进一步提高弓网系统的性能，最大程度地减少拉弧现象的发生。

4.3 运行策略与参数调整

合理的运行策略和参数调整在防治轨道线路拉弧现

象方面发挥着关键作用。在列车运行过程中，必须根据轨道线路的实际情况，科学合理地控制列车的运行速度和加速度。轨道线路的地形、线路条件以及供电系统的能力等因素都会影响拉弧现象的发生。因此，应根据不同路段的特点，制定相应的速度限制和加速度控制策略，避免列车在高速运行时频繁启动和制动^[4]。供电系统的参数调整对于改善弓网系统的运行条件同样重要，电压和电流是供电系统的关键参数，它们的波动会直接影响弓网系统的接触质量。通过优化供电系统的控制策略，采用先进的电压调节装置和电流稳定技术，能够使供电电压保持稳定，减少电压波动对弓网系统的影响。采用智能供电技术是未来发展的趋势，智能供电系统能够实时获取列车的运行状态和弓网系统的实际情况，如列车的位置、速度、受电弓的接触压力等信息。然后，利用大数据分析和人工智能算法，根据这些信息实时调整供电参数，如电压、电流的频率和相位等，提高供电质量和稳定性，从根本上减少拉弧现象的发生，保障轨道线路的安全稳定运行。

结束语

轨道线路绝缘性能提升与拉弧防治技术对于保障轨道线路的安全、稳定运行至关重要。本文从绝缘性能和拉弧现象两方面展开研究，提出了一系列提升绝缘性能和防治拉弧的技术措施。未来，随着轨道线路技术的不断发展，还需进一步深入研究绝缘材料和拉弧防治技术，不断优化弓网系统，提高运行策略的科学性，以更好地应对日益复杂的轨道线路运行环境，确保轨道交通的安全高效运行。

参考文献

- [1]李思祎.城市轨道交通车辆段出入段线处钢轨绝缘节打火灼烧研究[J].现代城市轨道交通,2024(5):144-150.
- [2]田庆涛,苑丰彪,田占伟,等.轨道交通装备电线路绝缘试验标准分析与应用研究[J].铁道车辆,2023,61(6):166-172.
- [3]王爱民,林圣,李俊逸,等.城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J].高电压技术,2020,46(4):1379-1386.
- [4]王雅程,高迪.城市轨道交通杂散电流测试及控制措施研究[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2024,23(4):85-90.