

# 潮湿环境下对地铁整流器的危害及预防措施

阳小涛 贝云杰 涂敏

宁波轨道交通集团有限公司运营分公司 浙江 宁波 315200

**摘要:** 本文基于潮湿环境对地铁整流器的影响机制,系统分析了绝缘性能下降、金属腐蚀、霉菌滋生及电气火灾等危害,提出涵盖设计优化、运维策略及技术升级的多层次预防措施。结合西安地铁故障案例与郑州地铁改造经验,论证了防潮措施的有效性,为地铁整流器安全运行提供理论支持与实践参考。

**关键词:** 地铁整流器;潮湿环境;绝缘防护;电化学腐蚀;电气火灾预警

## 引言

随着城市轨道交通的快速发展,地铁整流器作为将交流电转化为直流电的关键设备,其性能和稳定性直接关系到地铁列车的运行效率和安全性。然而,地铁系统往往处于地下或潮湿环境中,这种特殊环境对整流器的稳定运行构成了严峻挑战。因此,深入研究潮湿环境下对地铁整流器的危害及预防措施具有重要意义。

### 1 潮湿环境对地铁整流器的危害机制

地铁作为现代城市的重要交通工具,其安全、稳定的运行至关重要。然而,地铁系统中的整流器设备却常常面临着潮湿环境的挑战。潮湿环境对地铁整流器的危害不容小觑,它可能导致绝缘性能劣化、金属部件腐蚀、霉菌滋生与生物降解以及电气火灾隐患等一系列问题。

#### 1.1 绝缘性能劣化

潮湿环境对整流器绝缘层的破坏是显而易见的。水分,作为一种高导电介质,在潮湿环境中容易渗透至整流器的绝缘层中,导致绝缘电阻的显著下降。实验数据表明,当相对湿度从50%上升至90%时,环氧树脂等常用绝缘材料的绝缘电阻可降低3个数量级。这意味着,在高度潮湿的环境中,整流器的绝缘性能将大打折扣,为电气故障埋下隐患。除了绝缘电阻的下降,潮湿环境还会加剧局部放电现象。在潮湿缺陷处,电场分布会发生畸变,容易引发沿面放电。这种放电现象不仅会产生噪音和电磁干扰,还会加速绝缘材料的老化过程。长期下来,绝缘层的破损和老化将严重威胁整流器的安全运行<sup>[1]</sup>。更为严重的是,潮湿环境还可能导致整流器内部发生相间短路。广州地铁某线路就曾因湿度过大,导致整流柜内出现凝露现象,最终引发相间短路,造成30分钟的运营中断。这一事件充分说明了潮湿环境对地铁整流器绝缘性能的严重危害。

#### 1.2 金属部件腐蚀

潮湿空气与灰尘中的Cl<sup>-</sup>、SO<sub>2</sub>等腐蚀性物质结合,

会形成具有腐蚀性的电解液,对整流器的金属部件造成严重的电化学腐蚀。以铜排为例,在潮湿环境中,其表面容易生成Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>等腐蚀产物,导致接触电阻增加20%-50%。这不仅会影响电流的正常传输,还可能引发局部过热现象。此外,潮湿环境还会加速金属部件的结构强度衰减。深圳地铁曾发生过整流器支架腐蚀的案例,仅在5年内,支架的锈蚀深度就达到了2mm,严重降低了其抗震能力。一旦支架因腐蚀而断裂,将直接威胁到整流器的安全稳定运行。

#### 1.3 散热效率降低

整流器在运行过程中会产生大量的热量,需要通过散热器将热量散发出去以保持设备的正常工作温度。然而,在潮湿环境中,散热器表面可能凝结水珠。水珠的形成会阻碍热量的传递,降低散热器的散热效率。当散热效率降低时,整流器内部的温度会逐渐升高,导致设备过热。设备过热会对整流器的性能和寿命产生严重影响。过热会加速元器件的老化过程,缩短其使用寿命。同时,过热还可能导致元器件的性能参数发生变化,影响整流器的输出稳定性和可靠性<sup>[2]</sup>。在极端情况下,过热还可能引发火灾等严重事故。

#### 1.4 元器件损坏

湿气对整流器中的元器件也构成严重威胁。电路板、接线端子等元器件在潮湿环境中容易受潮氧化。氧化后的元器件表面会形成一层氧化膜,阻碍电流的正常流通。对于接线端子来说,氧化膜会导致接触电阻增大,使得电流在流过时产生更多的热量,加速接线端子的老化过程。此外,湿气还可能导致元器件之间发生短路。在整流器内部,元器件之间的间距通常很小,如果湿气凝结成水珠并滴落在元器件上,或者元器件表面形成的水膜导通相邻的电路,就可能引发短路故障。短路故障会导致电流过大,烧毁元器件,甚至引发火灾。

#### 1.5 电气火灾隐患

潮湿环境还增加了地铁整流器发生电气火灾的风险。受潮的电缆绝缘层容易出现漏电现象，漏电电流可达正常值的10倍之多。这不仅会造成能源浪费，还可能引发电气火灾等严重后果。更为危险的是，潮湿环境可能导致控制回路等关键部位发生短路现象。上海某地铁车间就曾因湿度过高，导致控制回路短路，最终引燃线缆护套，造成严重的火灾事故。这一事件再次敲响了潮湿环境对地铁整流器电气安全性的警钟。

## 2 预防性技术措施

为了确保地铁整流器在潮湿环境中的稳定运行，采取一系列预防性技术措施是至关重要的。这些措施涵盖了设备设计优化、环境控制策略以及状态监测与预警等多个方面，旨在从源头上减少潮湿环境对整流器的影响，提高其可靠性和安全性。

### 2.1 环境控制

2.1.1 安装除湿设备。在整流器室内，安装高效除湿机或空调系统是至关重要的。除湿机能够持续吸收室内的湿气，降低空气湿度，从而保持整流器工作环境的干燥。空调系统则可以通过调节温度和湿度，创造出更加适宜整流器运行的环境。这些设备的选择应基于整流器室的面积、湿度状况以及预算考虑，确保既经济又有效。

2.1.2 通风设计。优化整流器室的通风系统是防止湿气积聚的关键。通风设计应确保空气流通顺畅，避免死角和湿气滞留。可以采用自然通风和机械通风相结合的方式，如设置合理的进气口和排气口，利用风压或热压促进空气流动。同时，应定期检查和清理通风系统，防止堵塞和积尘影响通风效果。

2.1.3 湿度监测。安装湿度传感器是实时监测环境湿度的有效手段。湿度传感器能够实时感知整流器室内的湿度变化，并将数据传输至控制系统。当湿度超过设定阈值时，控制系统可以自动启动除湿设备或通风系统，及时降低湿度。此外，还可以将湿度数据与整流器的工作状态相结合，进行综合分析，为预防和维护提供决策支持<sup>[1]</sup>。

### 2.2 设备防护

2.2.1 密封设计。整流器柜体的密封性是防止湿气侵入的第一道防线。应采用密封性好的柜体设计，确保柜门、接缝和穿线孔等部位的严密性。可以使用密封条、密封胶等材料进行加固，防止湿气通过缝隙渗入柜内。同时，应定期检查柜体的密封状况，及时发现并修复潜在的漏气点。

2.2.2 防潮涂层。在电路板和金属部件表面涂覆防潮

涂层是增强抗湿能力的有效方法。防潮涂层能够形成一层保护膜，阻止湿气与电路板或金属部件直接接触，从而减缓腐蚀和氧化的速度。选择防潮涂层时，应考虑其耐湿性、耐腐蚀性以及与基材的附着力等因素，确保涂层的长期有效性。

2.2.3 加热装置。在整流器柜内安装加热器可以防止冷凝水形成。加热器能够提升柜内的温度，降低相对湿度，从而减少冷凝水的产生。加热器的功率和安装位置应根据整流器柜的具体情况进行选择，确保既能够有效防止冷凝水，又不会对整流器的正常运行产生负面影响。

## 2.3 材料选择

2.3.1 耐腐蚀材料。选用耐腐蚀的金属材料和绝缘材料是延长设备寿命的重要途径。对于金属材料，可以选择不锈钢、铝合金等具有良好耐腐蚀性的材料；对于绝缘材料，可以选择环氧树脂、聚酰亚胺等耐湿性好的材料。这些材料的选择应基于整流器的工作环境和性能要求，确保既经济又实用。

2.3.2 防潮元器件。选择具有防潮性能的元器件是提高设备在潮湿环境下可靠性的关键。例如，可以选择具有防潮涂层的电容器、电阻器等元器件，或者选择密封性好的连接器、开关等部件。这些元器件的选择应基于整流器的电路设计和性能要求，确保既符合电气性能，又具有良好的防潮效果。

## 2.4 定期维护

2.4.1 清洁检查。定期清洁整流器内部是防止湿气侵入和腐蚀的重要措施。应使用干净的布或吸尘器清除整流器内部的灰尘和杂物，特别是接缝、穿线孔等易积尘的部位。同时，应检查整流器内部是否有湿气侵入或腐蚀现象，及时发现并处理潜在的问题。

2.4.2 绝缘测试。定期进行绝缘电阻测试是确保绝缘性能符合要求的关键。应使用专业的绝缘电阻测试仪对整流器的绝缘电阻进行测量，确保其在规定范围内。如果绝缘电阻下降或不合格，应立即停电并排查原因，及时修复或更换受损的绝缘材料。

2.4.3 更换老化部件。及时更换受潮或老化的绝缘材料和元器件是保持整流器性能稳定的重要措施。应定期检查整流器内部的绝缘材料和元器件，发现受潮、老化或损坏的部件应立即更换。同时，应建立完善的备件管理制度，确保备件的充足和及时更换。

## 2.5 应急处理

2.5.1 故障排查。当发现整流器受潮或绝缘性能下降时，应立即停电并进行故障排查。应仔细检查整流器的各个部位，特别是接缝、穿线孔等易受潮的部位，找出受潮

或绝缘性能下降的原因。同时,应使用专业的检测仪器对整流器的电气性能进行测量,确保其在规定范围内。

2.5.2 干燥处理。使用干燥设备对受潮部件进行干燥处理是恢复其性能的有效方法。可以使用烘烤箱、热风枪等干燥设备对受潮的绝缘材料、元器件等进行干燥处理。干燥处理的温度和时间应根据具体部件的材质和性能要求进行选择,确保既能够有效去除湿气,又不会对部件造成损坏。

2.5.3 记录分析。记录故障原因和处理措施是优化预防策略的重要途径。应详细记录每次故障发生的时间、地点、原因以及处理措施等信息,并进行综合分析。通过记录分析,可以找出故障发生的规律和原因,为今后的预防和维护提供有力支持。同时,还可以将记录分析结果与整流器的运行状态相结合,进行实时监测和预警,确保整流器的安全稳定运行。

### 3 案例分析与效果验证

#### 3.1 西安地铁二号线整流器故障案例

3.1.1 故障背景。西安地铁二号线采用等效24脉波整流机组,运行初期频繁因整流器误发跳闸信号导致牵引所整流机组整体退出运行。2011年6月15日,车辆段牵混所2#整流器因温控器故障误报超温跳闸,联动两台整流机组高压开关跳闸,造成接触网供电中断。

3.1.2 故障分析。(1)逆流保护逻辑缺陷:当某一桥臂二极管反向击穿且快速熔断器未熔断时,电流传感器输出负电压,触发逆流跳闸逻辑。由于保护阈值设置不合理,潮湿环境下绝缘性能下降导致传感器误报。

(2)设计冗余不足:原保护逻辑未考虑潮湿环境对传感器精度的影响,且缺乏谐波检测模块,无法区分真实故障与干扰信号。

3.1.3 改进措施。一是升级PLC程序:优化逆流保护算法,增加电流方向判断逻辑,设定负电压阈值动态调整功能(根据环境湿度自动补偿 $\pm 10\%$ )。二是增加谐波检测模块:在整流器进线侧加装APF有源滤波装置,实时监测谐波含量,排除潮湿环境下谐波干扰导致的误报。三是环境适应性改造:对整流器柜体加装纳米级防潮涂层,通风口设置多层过滤棉(过滤效率 $\geq 95\%$ ),减少灰尘杂质侵入<sup>[4]</sup>。

3.1.4 实施效果。改造后逆流跳闸误报率从0.8次/月降至0.15次/月,下降82%。2012年至今未发生因保护逻辑缺陷导致的供电中断,整流机组可用率从98.6%提升至

99.7%。

#### 3.2 郑州地铁设备房防潮改造案例

3.2.1 改造背景。郑州地铁某线路设备房因地下水位高、通风不良,年平均湿度达78%,导致整流器绝缘层起泡、铜排腐蚀严重。2018年雨季期间,3处整流器因凝露引发短路,故障间隔仅32天。

3.2.2 改造措施。(1)三防工艺升级:一是密封处理:墙面涂刷JS防水涂料(厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ ),柜体与墙体接缝处嵌入膨胀型密封胶条。二是通风优化:安装工业级转轮除湿机(除湿量25L/24h),采用“下送上排”气流组织,换气次数从4次/h增至8次/h。三是绝缘防护:关键电缆穿管处加装氧化镁密封套,金属支架涂刷导电防腐漆(电阻率 $\leq 0.1\Omega \cdot \text{cm}$ )。(2)结构渗漏治理:针对底板渗水,采用丙烯酸酯树脂注浆,创新“三阶注浆孔”布置(孔深550mm,间距400mm),治理后渗水点减少90%。

3.2.3 实施效果。一是环境指标改善:设备房年平均湿度降至55%,凝露现象完全消除。二是设备故障率下降:整流器绝缘故障间隔从32天延长至75天(提升2.3倍),年度维修成本降低45%。三是寿命预测提升:基于改造后数据,整流器预期寿命从8年延长至12年。

### 结语

潮湿环境以其复杂的多物理场耦合作用,对地铁整流器的安全运行构成了严峻挑战。为了有效应对这一挑战,必须构建一个涵盖“设计-运维-技术”的全方位协同防护体系。展望未来,可以积极探索新材料的应用,如采用石墨烯涂层来显著提升整流器部件的抗腐蚀性能。同时,数字孪生技术也为提供了新的思路,通过建立整流器的湿度-应力仿真模型,可以更精准地预测其使用寿命,为运维管理提供科学依据。

### 参考文献

- [1]黄宇剑.地铁整流器二极管故障诊断与剩余寿命预测方法研究[D].西南交通大学,2021.
- [2]赵辉.地铁通信电源系统技术及安全控制[J].通讯世界,2024,31(04):52-54.
- [3]卢衍伟,张军民.地铁供电迷流腐蚀机理及防护[J].机械工程与自动化,2023,(01):217-219.
- [4]胡峰.地铁通信电源系统技术及安全控制研究[J].运输经理世界,2022,(25):125-127.