

刚性接触网悬挂瓷绝缘子破裂原因分析及对策

钱余生 蒋泽进

(合肥城市轨道交通有限公司运营分公司,230001,合肥//第一作者,工程师)

摘要 悬挂瓷绝缘子是刚性接触网系统主要绝缘部件。通过对深圳地铁2号线刚性悬挂瓷绝缘子在运营期间出现的绝缘子破裂故障进行归纳,分析该类故障可能出现的原因,为后续绝缘子在日常维护、故障分析方面提供参考。同时亦可对刚性接触网在结构设计、施工等方面提供意见参考。

关键词 刚性接触网;绝缘子;破裂;建议;运行质量

中图分类号 U225.4⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.035

Analysis of Rigid Catenary Suspension Insulator Rupture and Countermeasures

QIAN Yusheng, JIANG Zejin

Abstract Suspension insulator is a main insulation part in rigid catenary system. Through summarizing the rupture failures of the rigid suspension insulator on Shenzhen metro Line 2, the possible causes of the fault are analyzed, in order to provide reference for the follow-up daily maintenance and fault analysis of catenary insulators. At the same time, this research may provide reference for the structural design and construction of rail transit rigid catenary system.

Key words rigid catenary; insulator; rupture; suggestion; operational quality

Author's address Branch Operations, Hefei Urban Rail Transport Co., Ltd., 230001, Hefei, China

刚性接触网因其结构简单、性能稳定、对土建净空要求低、日常维护工作量少、无断线风险等优点,近年来在众多地铁线路中得到广泛应用。悬挂瓷绝缘子是刚性接触网系统的主要绝缘部件,如在深圳地铁2号线中该类瓷绝缘子占全线所有绝缘子部件的比例超过90%。悬挂瓷绝缘子的选取及定位点结构设计的好坏直接影响供电系统的运行安全。本文以深圳地铁2号线接触网两起悬挂瓷绝缘子破裂故障为案例,分析该类故障的可能原因,以便对后续线路在绝缘子的材料选取、结构设计、施工、日常维护等方面提供参考意见。

1 刚性接触网悬挂瓷绝缘子破裂原因分析

深圳地铁2号线是深圳地铁首条采用刚性接触网结构的线路,从2010年12月开通至今,接触网系统总体运行状态良好。在2011—2017年6年的运营过程中,因悬挂瓷绝缘子破裂引起了2起接触网跳闸事件,占线路接触网总跳闸故障的50%。悬挂瓷绝缘子破裂造成供电系统短路、列车停运,对线路运营安全,继而对企业 and 城市形象产生了较大影响。经对现场破裂绝缘子分析,这2起故障中,绝缘子内部均出现了明显的短路痕迹,内部铁件和水泥胶合剂均出现高温融化迹象,如图1所示。



a) 2012年5月事故



b) 2014年5月事故

图1 绝缘子故障实物图

通过对悬挂瓷绝缘子破裂原因的分析 and 绝缘子的负荷计算,经查阅相关资料 and 归纳总结后,认为引起该2起事故的可能原因是:①绝缘子钢脚铁件腐蚀;②绝缘子弯曲荷载不满足要求。下面就这2个可能原因进行分析。

1.1 绝缘子钢脚铁件腐蚀

经理论分析及查阅相关试验研究资料,长期在潮湿、污秽环境下绝缘子的钢脚会发生严重的腐蚀,其腐蚀主要形式为沿绝缘子瓷表面泄露电流腐蚀 and 钢脚局部电化学腐蚀。铁件腐蚀后生成三氧化二铁及氢气等生成物,其中,主要生成物的三氧化二铁,经计算,理论上1个单位体积的铁腐蚀后生成约2个单位体积的三氧化二铁。腐蚀后的生成物体积增大,引起铁件体积膨胀,造成绝缘子内部产生较大的膨胀力。同时,电化学腐蚀生成的部分气

体累积在铁件与瓷体缝隙之间无法外溢,造成瓷体内部气压增大。因绝缘子瓷体膨胀系数低,当腐蚀加剧时,绝缘子内部压力加大,最终可能造成瓷体膨胀破裂。相关试验资料显示:绝缘子在清洁、干燥的情况下铁件腐蚀速度较缓慢;当绝缘子污秽、潮湿时,腐蚀就会加剧,潮湿环境下钢脚腐蚀速度大约为干燥环境下的 10~40 倍。当腐蚀累积到一定量时,可能造成绝缘子瓷体内部出现细微裂纹。裂纹会造成绝缘子内部绝缘性能降低,出现内部局部放电,使得瓷体内部温度过高、气压膨胀加剧,最终造成绝缘子破裂。经与绝缘子生产厂家沟通了解到,目前地铁中使用的瓷绝缘子,其生产制作一般参考铁路交流用绝缘子,而城市轨道交通和铁路在电流制式上有本质区别,将铁路交流用绝缘子用于城市轨道交通的直流系统中就会产生众多问题,例如直流对交流绝缘子造成的钢脚腐蚀、瓷体内部电子迁移造成绝缘下降等。因此本文认为,为避免绝缘子破裂这一安全隐患,有必要针对城市轨道交通的电流制式生产专用的直流绝缘子。直流电流对交流绝缘子钢脚腐蚀、离子迁移绝缘下降以及绝缘子破损有大量的案例。除了上文所述深圳地铁发生的 2 起事故,上海城市轨道交通线路、广州地铁线路也发生过类似的绝缘子破裂事故,破裂的绝缘子均长期处于漏水严重的位置,这些案例对钢脚腐蚀引起绝缘子破裂都是很好的例证。图 2 为故障绝缘子,其铁件表面已被大面积锈蚀。



图 2 故障绝缘子受蚀的钢脚铁件

1.2 绝缘子弯曲荷载不满足要求

经过对绝缘子在运行中理论荷载计算发现,运行中的悬挂绝缘子弯曲荷载无法满足汇流排在温升下伸缩的荷载要求。

1.2.1 绝缘子受力类型

定位绝缘子在运行中的机械荷载主要分为拉伸荷载和弯曲荷载,本文对这 2 种荷载进行受力分析。表 1 为深圳地铁 2 号线设计文件中悬挂绝缘子定标参数。

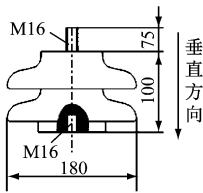
1.2.2 拉伸荷载

为了最大限度分析悬挂绝缘子的拉伸破坏荷载,本文以最大跨距作为分析样本,悬挂绝缘子在

垂直方向上承受的外力主要为接触悬挂的质量及受电弓抬升力,如图 3 所示。

表 1 悬挂绝缘子定标参数(设计文件)

序号	名称	技术要求
1	额定拉伸破坏负荷	不小于 50 kN
2	额定弯曲破坏负荷	不小于 9 kN



注:M16 代表直径为 16 mm 的螺栓;其它未标注数据单位均为 mm。

图 3 悬挂绝缘子垂直方向受力图

绝缘子垂直方向上承受的外力 F 为:

$$F = (g_1 + g_2)l - f_{抬} \tag{1}$$

式中:

- g_1 ——汇流排单位长度质量;
- l ——汇流排最大跨距;
- g_2 ——接触线单位长度质量;
- $f_{抬}$ ——受电弓抬升力。

式(1)中, g_1 取 6.0 kg/m, l 取 10 m, g_2 取 1.35 kg/m, $f_{抬}$ 取 0,可得到绝缘子在垂直方向上承受的最大外力为 0.72 kN。表 1 的设计文件中要求绝缘子的最小拉伸破坏负荷大于 50 kN,因此运行中悬挂绝缘子垂直方向上的拉伸负载满足使用要求。

1.2.3 弯曲荷载

为了最大限度分析绝缘子的弯曲荷载,本文假设了几个极限叠加条件:①以线路曲线半径最小的曲线段绝缘子作为分析样本;②拉出值使汇流排产生变形;③样本绝缘子相邻两端定位处线夹卡滞(死固定)。在上述 3 种极限叠加条件下,定位绝缘子受到的弯曲荷载主要有:因温度变化汇流排产生的伸缩力,受电弓和接触线相对运动时产生的摩擦力,曲线、拉出值因素对绝缘子产生的径向力。因此绝缘子的弯曲荷载 F 为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{2}$$

式中:

- F ——绝缘子的弯曲荷载;
- F_1 ——因温度变化汇流排对绝缘子产生的伸缩力;
- F_2 ——受电弓和接触线相对运动时产生的摩

擦力；
 F_3 ——因曲线、拉出值因素对绝缘子产生的径向力。
其中：
 F_1 的计算公式为：

$$F_1 = ES\varphi\Delta T \tag{3}$$

式中：
 E ——汇流排的弹性模量；
 S ——汇流排截面积；
 φ ——回流排线性膨胀系数；
 ΔT ——隧道内温度差值。
式(3)中, E 取 69 000 N/mm², S 取 2 214 mm²,
 φ 取 $2.4 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, ΔT 取 35 $^{\circ}\text{C}$,则可得 $F_1 = 128.3$ kN。

F_2 的计算公式为：

$$F_2 = f_{\text{滑}} \Phi \tag{4}$$

式中：
 Φ ——接触线与碳滑板的摩擦因素。
 $f_{\text{滑}}$ 取 140 kN, Φ 取 0.5,由式(4)可得 $F_2 = 70$ N。

F_3 的计算公式为：

$$F_3 = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{(2l)^3} \times 48EI \tag{5}$$

式中：
 ΔL_1 ——曲线段汇流排弯曲对绝缘子产生的径向变形量,单位,mm；
 ΔL_2 ——拉出值对绝缘子产生的径向平均变形量,单位,mm。
 I ——汇流排横截面对弯曲中性轴的惯性矩,单位,mm⁴。
式(5)中, E 取 69 000 N/mm², ΔL_1 取 143 mm,
 ΔL_2 取 96 mm, I 取 334.16×10^4 mm⁴, l 取 10 m,则可得 $F_3 = 332$ N。

由式(2)可求得,绝缘子的弯曲荷载 $F = 128.4$ kN。
表 1 的设计文件中要求绝缘子的最小弯曲破坏负荷需大于 9 kN,而运营中绝缘子弯曲荷载在极限条件下为 128.4 kN,因此合同对绝缘子弯曲负载的要求远远不能满足运营实际需求。

从对悬挂绝缘子荷载分析发现,在极限情况下,悬挂绝缘子拉伸荷载可以满足线路要求,但是悬挂绝缘子弯曲荷载设计值远远小于线路极限值,该现象需引起高度关注。在刚性接触网系统中,因

接触网悬挂装置为刚性悬挂结构,悬挂绝缘子在运行中无法伸缩、移动,为了满足汇流排在温度变化下的自由伸缩,设计要求汇流排与定位线夹之间要有一定的间隙,以便确保汇流排能够自由伸缩。但是在实际运行中,线路曲线半径较大、拉出值偏大、汇流排表面腐蚀、施工缺陷等问题往往会造成汇流排与定位线夹之间产生卡滞,使得悬挂绝缘子弯曲负荷过大,从而导致绝缘子受力破损。

1.2.4 定向分析

绝缘子弯曲破坏过程如下:线夹与汇流排卡滞→温度变化→汇流排温升力超出绝缘子弯曲破坏值→绝缘子拉断破损。对其相关理论参数的分析如下。

1) 刚性接触网锚段终端处汇流排温度升高引起的偏移量如表 2 所示。其中的计算条件参阅了设计文件,分别为:选取的锚段长度为 250 m,中心锚结装置设在锚段的中心,取 25 $^{\circ}\text{C}$ 作为接触网正常状态下的安装温度。

表 2 终端处汇流排温升引起的偏移

温度/ $^{\circ}\text{C}$	偏移量/mm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	偏移量/mm
5	60	25	0
10	45	30	15
15	30	35	30
20	15	40	45

2) 汇流排与定位线夹发生卡滞时,绝缘子在各温度下的弯曲荷载如表 3 所示,其中取 25 $^{\circ}\text{C}$ 为接触网正常状态下安装温度。

表 3 各温度下绝缘子的弯曲荷载

温度/ $^{\circ}\text{C}$	弯曲荷载/kN	温度/ $^{\circ}\text{C}$	弯曲荷载/kN
5	70.68	25	0
10	53.01	30	17.67
15	35.34	35	35.34
20	17.67	40	53.01

3) 某组悬挂绝缘子机械破坏负荷试验结果为:1[#]、2[#]、3[#]、4[#]样品的弯曲荷载分别为 28.2 kN、48.0 kN、36.7 kN 和 39.7 kN,均满足 ≥ 90.0 kN 的规定。该破坏参数取自淄博道麦逊绝缘子有限公司 2015016 编号产品的试验报告。

1.3 原因分析

设计时要求,在汇流排温度变化时,刚性接触网定位装置可以在定位线夹中能自由伸缩。但是

在实际运营中,部分定位处汇流排与线夹出现严重卡滞,该情况在日常检修中已多次发现。其主要原因是线夹与汇流排夹口的间隙较小,在汇流排和定位线夹的接触面发生破损、腐蚀、变形,以及拉出值曲率较大等情况时,容易出现机械卡滞。靠近中心锚结处的定位装置由于汇流排温升引起的偏移量较小,且 T 型头与安装底座、绝缘子与槽钢、线夹与汇流排之间装配尺寸有较小的冗余调节量,因而能够卸载大部分偏移及温升力;但是,在关节处的定位装置,由于汇流排温升引起的偏移量较大,很难通过上述方式得到有效补偿。当汇流排与线夹存在卡滞时,绝缘子受到较大的弯曲荷载,易发生破裂。在潮湿、漏水严重区域,汇流排表面腐蚀较严重,加重了汇流排与定位线夹之间的卡滞。深圳地铁 2 号线目前尚未发生大面积悬式绝缘子破损,本文认为其原因在于隧道内常年温度在 $15 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,温差较小,对比表 3 和表 4,汇流排温升荷载分布在绝缘子弯曲破坏荷载之内。此外,深圳地铁定位装置检修频率较高,能够及时发现并处理汇流排与线夹之间的卡滞,大大降低因汇流排与线夹之间的卡滞造成绝缘子破裂的风险。

2 预防绝缘子破裂的对策及建议

本文认为,深圳地铁 2 号线发生的 2 起绝缘子破裂事故,可能由绝缘子钢脚铁件腐蚀、弯曲荷载不满足要求共同作用引起的。弯曲荷载不达标是绝缘子破裂的主要原因,因为这 2 起故障绝缘子的破裂断面均垂直线路方向,断面较平整(见图 1),若主要原因为钢脚腐蚀,则绝缘子破裂的断面应为不规则破裂。绝缘子铁件内部化学腐蚀及弯曲荷载不达标问题可归为材料选取问题,悬挂绝缘子荷载不符合极限温度要求的问题可归为结构设计缺陷。如果这 2 种问题继续存在,后续可能还会发生类似的悬挂绝缘子破裂故障,则需引起运营单位、设计单位等相关方的高度重视。

2.1 刚性接触网设计建议

1) 悬挂瓷绝缘子的选取。地铁用瓷绝缘子一定要选用直流专用绝缘子,同时绝缘子在设计制造时要满足防钢脚腐蚀、防离子迁移、防钢脚与瓷体结合部分渗水等要求。具体可参考高压配送电直流绝缘子的选取方法。

2) 优化定位装置的结构设计。通过与绝缘子生产厂家的技术交流,厂家反馈目前绝缘子尺寸达

不到满足 128.4 kN 弯曲荷载的要求,除非加大现有绝缘子的结构尺寸。而加大现有绝缘子尺寸增加需要加大隧道净空,从而将增加土建成本。建议优化现有定位装置的结构形式,可尝试采用可旋转式定位装置抵消汇流排温升应力,其结构形式如图 4 所示。

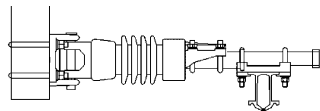


图 4 可旋转式定位装置

3) 优化拉出值布置。在无外力状态下,汇流排与定位线夹之间的最小间隙约为 2 mm 左右。该间隙是为了确保汇流排在温度变化状态下能够自由伸缩,确保汇流排与定位线夹之间不会出现卡滞现象。而目前的线路设计过程中一般只考虑拉出值是否满足行车限界要求,未对定位点拉出值进行合理控制,从而导致部分定位处拉出值曲率较大,造成汇流排与定位线夹出现卡滞。本文认为通过在线路设计过程中优化拉出值布置,可显著减小汇流排与定位线夹之间卡滞力,确保汇流排能够在线夹内自由伸缩。

2.2 刚性接触网施工建议

1) 在施工中尽量避免定位装置安装在隧道接缝处。隧道漏水大多从隧道接缝处渗出,定位装置若安装在隧道接缝处,则隧道渗水易沿着定位装置流向绝缘子,从而造成绝缘子污秽、受潮。

2) 严禁有缺陷的定位线夹和汇流排上线运行。有缺陷的定位线夹或汇流排易造成二者接触时的卡滞,汇流排无法自由伸缩。

2.3 日常维护建议

1) 若定位装置处于漏水处,需及时进行堵漏或对定位装置进行移位,避免隧道渗水长期滴至悬挂绝缘子上引起绝缘子钢脚腐蚀。

2) 对环境潮湿、污秽严重的区域,应增加对绝缘子清洁或更换的频率。

3) 严禁有缺陷的定位线夹和汇流排上线运行。

4) 在拉出值、导高调整中尽量避免相邻定位点值相差较大,减小汇流排卡滞。

5) 应加大锚段关节附近定位装置的检修频率,防止温升变化过大。

6) 应加大设备的检修频率,一旦发现线夹卡滞要及时处理。

(下转第 154 页)

2.8 技术专家远程会诊

车门智能化系统对车门的动态跟踪监控信息、基本状态信息和故障信息等数据进行远程传输。其中,动态跟踪监控信息主要包括运行车门的准确位置,经纬度或线路公里标。

对于车门出现的一些疑难杂症问题,线路运营方可以通过车门智能化系统邀请相关技术专家远程对设备故障进行异地会诊。由于车门智能化系统各类信息和数据齐全,从而提高了诊断的准确性和实时性,同时也有利于专家、诊断资源等的共享。

2.9 大数据分析功能

由于数据中心收集了大量的车门工作数据,通过这些数据的统计和分析,既可以支撑线路运营方的相关工作,也可以通过这些数据指导车门系统的技术提升。

3 车门智能诊断技术的应用

目前车门智能化系统已在广州地铁 5 号线和 3 号线北延伸段、北京地铁八通线、南京地铁 4 号线、成都地铁 4 号线、天津地铁 1 号线东延伸段、杭州地铁 4 号线等线路的部分车辆上使用。

据调研,2015 年 6 月起至 2016 年 6 月止,广州地铁 5 号线 117118 车全车完成了车门智能化改造,并实现了车门的远程监测与故障智能诊断;2017 年 3 月开始,该线车辆由原来的定期检修进入状态修实验阶段。据在 2017 年 3~12 月的应用情况统计,车门的故障诊断准确率达 98%。

2017 年 9 月开始,该车门智能化系统在广州地铁 3 号线的 081082、085086、091092 车上得以应用,其中 081082 全车安装了智能诊断系统,并进行状态维修试点。

2016 年 8 月,南京地铁 4 号线 001002 车和 003004 车共 12 个车门安装了城市轨道交通车辆车门系统远程监测与故障智能诊断系统,通过后台大数据分析及专家系统实现了车门的故障智能诊断,以及车门亚健康状态的预测和预警。

4 结语

城市轨道交通车辆的车门智能诊断技术有如下特点及优势:① 发生故障前可及时发现故障的早期征兆,通过采取相应措施可避免、减缓、减少重大事故的发生。② 发生故障后能自动纪录故障发生过程的完整信息,进行故障原因分析,避免同类故障再次发生。这有助于充分了解车门系统性能,为改进维修水平提供有力技术支撑。③ 能揭示车门故障的原因、程度、部位,为车门系统智能维护检修提供科学依据,延长设备寿命周期,降低维修费用,降低运营维护成本。

截至目前,广州地铁 5 号线和 3 号线安装的车门智能诊断系统已安全运营近 3 年,系统运行稳定。随着智能技术的发展和不断进步,城市轨道交通车辆车门系统可进一步充分利用智能化所带来的优势,为城市轨道交通车辆的日常维保、故障处理和高效运作提供更大的便利。

参考文献

- [1] 孙晨,吴视东,汪会志. 地铁车门故障诊断专家系统软件设计[J]. 科技视界,2014(33): 9.
- [2] 刘述芳. 城市轨道交通关键设备智能运维系统初步建构[J]. 设备管理与维修,2018(3): 22.
- [3] 余博. 面向运维的城轨列车在途监测若干关键技术研究与应用[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [4] 刘绍凯. 轨道交通车辆远程故障诊断系统的研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [5] 徐霖. 城市列车客室车门系统故障诊断方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [6] 王东良. 对城市轨道交通列车客室车门系统故障诊断方法的探析[J]. 科技创新导报,2018(18): 128.
- [7] 倪明. 轨道交通门智能诊断系统的研究与设计[J]. 电工材料,2018(2): 37.
- [8] 高伟. 智慧门系统的智能监控设计与开发[D]. 南京理工大学,2013.

(收稿日期:2019-03-27)

(上接第 150 页)

参考文献

- [1] 张洪军. 直流绝缘子钢脚腐蚀的研究[J]. 电瓷避雷器,1996,153(21): 21.
- [2] 金毅,蔡炜. 直流绝缘子耐腐蚀性能分析[J]. 电瓷避雷器,2004,201(5): 17.
- [3] 王丽芳,马智强. 直流绝缘子配方的研究[J]. 电瓷避雷器,

2007,216(2): 16.

- [4] 骆晓龙,张晋寅,张源斌. 直流盘形悬式绝缘子离子迁移测试系统的研制[J]. 高压电气,2015,51(2): 94.
- [5] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006:12.
- [6] 深圳市地铁集团有限公司. 深圳地铁 2 号线工程接触网安装工程首期施工承包合同[R]. 深圳:深圳市地铁集团有限公司,2009.

(收稿日期:2018-06-05)