

广州地铁 4 号线直线电机常见故障分析

苗俭威

(广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510380)

摘要: 直线电机(LIM)车辆在广州地铁运用以来, 列车直线电机多次出现烧损、槽楔下沉以及绝缘电阻过低的故障。分析了广州地铁 4 号线车辆直线电机典型故障案例, 探讨了直线电机运行过程中的一些常见故障原因, 提出了提高直线电机运行可靠性的措施。

关键词: 4 号线车辆; 地铁; 直线电机; 故障分析
中图分类号: U231; TM359.4 **文献标识码:** B
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.04.030

0 引言

广州地铁 4 号线(以下简称 4 号线)是我国首条使用直线电机技术的轨道交通路线, 为城市南北走向, 属于比较典型的规划引导型(TOD)线路。直线电机车辆在广州投入运行以来, 充分发挥了直线电机爬坡能力强、转弯半径小等优点, 同时也遇到了一些问题, 列车发生过多故障。本文主要对直线电机槽楔下沉、电机多部位烧损、绝缘电阻过低故障进行分析, 并提出改善措施以提高直线电机的运行可靠性^[1]。

1 故障统计

直线电机车辆于 2005 年在广州投入运营, 线路总长度 43.65 km, 途经 16 个站。4 号线直线电机数量为 240 台, 运营至今出现多次槽楔下沉、电机烧损、绝缘电阻过低等故障。故障分布图如图 1 所示。

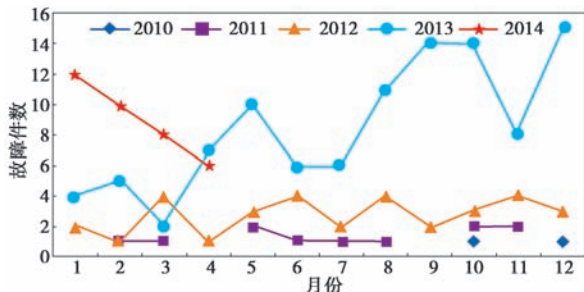


图 1 直线电机故障分布示意图

从图 1 的走势图来看, 跟踪分析直线电机故障的表象, 评估直线电机系统状态, 研究提出解决或者缓解直线电机持续故障的对策与方案是十分必要的^[2]。

2 直线电机常见故障现象

2.1 槽楔下沉故障

2014 年以来, 已完成更换 40 余台槽楔下沉严重的电机(槽楔深小于 1 mm 或松动严重), 占直线电机故障的 21.5%。槽楔脱落后电机线圈将失去防护, 线圈也随着下沉, 若线圈刮碰感应板, 电机将短路, 并可能由于机械碰撞而导致更加严重的事件。槽楔下沉现象如图 2 所示。



图 2 槽楔下沉现象

2.2 电机烧损故障

目前, 直线电机烧损故障较多, 其中以电机导线连杆与线圈连接处烧损和电机底部线圈烧损为主, 如图 3、图 4 所示。



图 3 导线连杆与线圈连接处烧损



图 4 电机底部线圈烧损

2.3 绝缘电阻过低故障

4 号线运营至今共有 33 台电机由于绝缘过低而更换（除个别异物入侵导致的绝缘破损），故障率达 13.75%。2007 年至今已有 50 余台电机因为绝缘值偏低而更换。

通过统计及对直线电机进行实测阻值普查，发现 43.2% 电机绝缘阻值为 0，16.7% 电机绝缘阻值大于 0 小于 1 MΩ，3.6% 电机绝缘大于 1 MΩ 小于 10 MΩ。4 号线直线电机绝缘电阻过低故障大都由直线电机上部导线连杆与线圈连接处出现短路或者绝缘材料脱落及老化所导致，同时与列车的运行工况、客流高峰时段、正线位置及区间等因素密切相关。

3 直线电机常见故障原因分析

3.1 槽楔下沉原因分析

槽楔下沉原因可能有以下几个原因：

①槽楔自身问题，如材料强度不够或尺寸偏小。槽楔材料是影响槽楔变形的一个重要因素，槽楔下沉多是由材料强度不达标所造成的。机车车辆在快速运行中伴随振动和冲击，电机本身也存在电磁振动，如果槽楔的强度达不到设计要求，振动冲击会使得槽楔燕尾槽与下边缘的结合处产生较大的损耗。当槽楔边缘的磨损达到一定程度，槽楔就产生下沉。槽楔自身的尺寸偏小，也会造成类似槽楔松动下沉。

②运行环境问题，如电机线圈温升和振动过大。温度的上升会使电机槽内的绝缘漆软化，绝缘漆粘着性能减弱甚至失去作用。叠加线路年久失修，线路振动大时，容易使得槽楔脱落。

③铁心安装不平或铁心刚度不够，产生变形从而形成较大电磁拉力。通过试验检测发现直线电机中部气隙小于两端，而槽楔下沉现象也主要出现在电机中部，同电机中部绕组绝缘漆附着少与故障点高度契合，可以推断槽楔下沉实际为电机中部变形大、气隙小、电磁拉力大，槽楔在铁心和感应板磁拉力作用下产生下沉。

其中 4 号线直线电机槽楔下沉的主要原因为温度上升之后导致绝缘漆脱落，加之长时间的振动冲击，

老化磨损槽楔边缘，使其慢慢下沉。通过拆解故障电机发现：靠近电机两端铁心槽中，铁心槽壁附着有绝缘漆，而在靠近中部的槽中，基本上没有绝缘漆附着，如图 5 所示。



图 5 拆解电机绝缘漆分布示意图

3.2 电机烧损问题原因分析

电机烧损的原因有以下几个方面：

①导线连杆与线圈连接处烧损大都由于电机线圈绝缘层开裂，导致水分或污垢沿着裂缝渗入线圈，线圈对地短路而发生烧损。

②直线电机底部线圈烧损多是由于电机底部发热不均，且电机长期承受在高频振动状态下，引起电机线圈绝缘材料出现龟裂，若天气返潮或下雨，水气渗入将导致电机烧损。

③另外，电机温升较高也是烧损的一个主要原因，电机长时间运行导致绝缘老化，从而会导致电机烧损。

图 6 为对 4 号线直线电机温度进行测量后所绘制的图形，可以看到在其运行区间内，最高运行温度会高达 147.4℃。

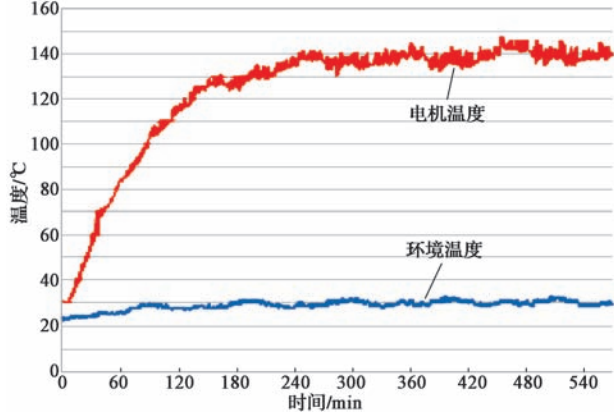


图 6 4 号线电机温度变化曲线

3.3 绝缘阻值偏低原因分析

通过对单台故障直线电机的拆解检测发现，出现的绝缘阻值低的表象都指向直线电机中部。根据当前

轨道交通 VVVF 变压变频牵引电机的设计要求，其绝缘性能采用耐热性等级分级，当前主流的变频牵引电机的绝缘等级为 200，因此，牵引电机绕组绝缘的耐热性是衡量与表征电机绝缘性能的最为关键的参数，直线电机存在的脱漆、发黑、脆化这些表象，同温度对绝缘材料的影响导致的结果具有相似性。因此，可以得到以下基本推论：直线电机的绝缘性能同直线电机的实际运行温升存在异常具有密切的关联性^[3]。

直线电机温升跟电机的控制方式、运行工况、负载大小、气隙、效率、功率因数等具有直接的关联。表 1 给出了抽样回库测量的直线电机不同位置的温度。

表 1 直线电机返厂温度测试 ℃

电机位置	底部					框架硅钢片内面					框架外框		
	1	2	3	4	5	A	B	C	D	E	I	II	III
A 车第 1 转向架	80	113	125	121	96	75	128	130	133	77	80	87	76
A 车第 2 转向架	104	121	130	126	106	108	134	138	137	97	83	93	80
B1 车第 1 转向架	97	114	122	118	91	101	126	128	124	91	82	90	81
A1 车第 2 转向架	91	110	122	113	91	91	114	128	110	97	79	92	77

4 直线电机故障改进措施

4.1 槽楔改进措施

①使用高强度、耐高温、耐磨的玻璃布板，槽楔尺寸严格按照铁心槽楔尾尺寸制作，这样才能防止电机在运行过程中槽楔松动。

②在槽楔和槽内绕组之间增加一层膨胀板，这种材料在浸漆烘干受热后膨胀，把槽内的间隙填满，可有效防止槽内产生间隙，并使电机槽内线圈、槽楔形成一个坚实的整体，防止电机在运行过程中槽楔松动脱落。

③采用真空浸漆 + 旋转烘焙，提高槽楔与铁心的一体化程度，从而减小电机温升改善槽楔安装环境，以减少槽楔下沉的故障。

④选用高质量绝缘材料，考虑增加槽满率，减小电机运行温升，以减少槽楔下沉的故障。

⑤改进直线电机槽楔检查工艺，在架大修作业中把槽楔检查作为关键点检查，例如使用木棒敲击槽楔，以判断槽楔与电机线圈粘贴是否牢固。严格把关电机架修质量，通过自检、互检、质检等手段，确保架修电机维修质量^[4-5]。

4.2 电机烧损故障的改善措施

针对目前电机烧损部位大多集中在电机导线连杆与线圈连接处和电机底部线圈，对前者的改善措施是在其连接处进行涂胶处理，如图 7 所示。

通过涂胶改造后的电机装车后，跟踪发现此连接处发生烧损故障明显减少，至今 4 号线未再出现过此种烧损故障，仅 5 号线发生过 2 例。



图 7 连接处涂胶改造

而电机底部线圈由于硅钢片的遮挡，无法进行涂胶处理，可采用以下 2 种方法进行改进。

①采用真空浸漆 + 旋转烘焙，提高线圈一体化程度，保证散热，减小电机运行时的温升。

②增加绕组端部绑扎强度，除原电机绕组最外端部的绑扎外，在绕组端部靠近机体的部位增加支撑杆，将每个线圈捆绑固定在支撑架上，这种处理方法可降低绕组因自身重量引起中间段的弓字变形，减少绕组对槽楔的压力。如图 8 所示。

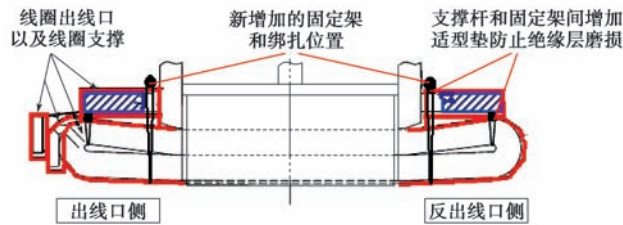


图 8 增加绑扎示意图

目前上述改进方案已在维修直线电机中实施，通过跟踪装车情况发现故障问题有所改善。

4.3 绝缘性能的提升方案

绝缘提升方案目前已在实施，在目前的委外维修直线电机上，已开始采用加强槽绝缘、端部绝缘处理、多次真空压力浸漆工艺来提高整体绝缘性能。

①线圈弯折处采用烧结薄膜进行绝缘加强，如图 9 所示。

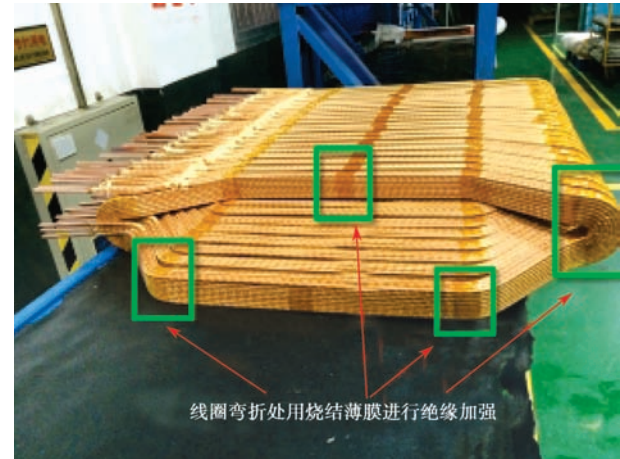


图 9 线圈弯折处绝缘加强

此烧结薄膜是一种高附着性自粘双玻璃丝包薄膜，可提高多复合绝缘绕组线的附着性能，避免了产品在绕制线圈时开裂失去附着性而损坏绝缘性能的现象，满足了使用要求。本技术适用于牵引电机等大型电机、电器产品的多复合绝缘绕组线圈，可以增强线圈折弯处的绝缘。通过跟踪电机运行情况发现，经过绝缘加强的电机的故障较少，已达到初步的预期效果。

②槽绝缘。对线圈槽的两侧采用绝缘加强方式，采用 Nomex 纸直接包裹至线圈两侧，然后外部用玻璃丝带包裹，Nomex 纸是一种间位芳纶，也称芳纶 1313。其耐热性好，强度高，广泛应用于电机绝缘中，用于槽绝缘及绕组防护性绝缘，如图 10 所示。

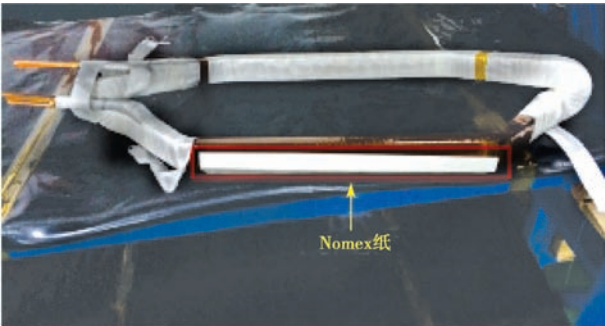


图 10 Nomex 纸包裹线圈

经过 Nomex 纸包裹后的线圈耐高温、阻燃，具有较好的电气、机械性能。4 号线前期进行了 25 列车直

线电机绝缘普查，电机干燥情况下所有列车电机的绝缘电阻均大于 20 MΩ，绝缘情况良好。

5 结语

本文以广州地铁 4 号线车辆为依据，探讨直线电机运行过程中的一些常见故障。重点分析了直线电机较为典型的故障案例，跟踪分析直线电机故障的表象，针对性地提出了故障改进方案，以提高直线电机运行的可靠性。

参考文献：

[1] 郑沃奇. 广州地铁四号线直线电机车辆牵引系统 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(1): 62-65.
[2] 王景宏. 采用直线电机牵引的广州地铁车辆 [J]. 机车电传动, 2006(6): 47-52.
[3] 刘刚. 广州地铁 5 号线直线电机列车牵引速度传感器故障分析与研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2013(8): 155-160.
[4] 游高祥. 广州地铁 6 号线直线电机车辆技术及与 4 号线和 5 号线车辆的差别 [J]. 机车电传动, 2012(2): 49-53.
[5] 张江江. 广州地铁 4 号线直线电机车辆紧急制动优化研究 [J]. 机车电传动, 2010(6): 60-66.

作者简介：苗俭威（1990—），男，硕士，研究方向为电力传动及其控制技术，现从事城市轨道交通车辆检修技术管理工作。

广告索引

- 深圳市宝创科技有限公司（封 2- 前插 1）
- 无锡东电化兰达电子有限公司（前插 2）
- 广州金升阳科技有限公司（前插 3）
- 咸阳亚华电子电器有限公司（前插 4）
- 湖南中车时代电动汽车股份有限公司（前插 5-6）
- 舟山市普陀庆丰铁路通信仪表厂（前插 7）
- 中铁检验认证株洲牵引电气设备检验站有限公司（前插 8-9）
- 株洲庆云电力机车配件工厂有限公司（前插 10）
- 汕头华兴冶金设备股份有限公司（前插 11）
- 宁夏银利电气股份有限公司（前插 12）
- 株洲中车时代电气股份有限公司（中插 1）
- 湖南中车时代通信信号有限公司（中插 2）
- 株洲中车时代电气股份有限公司半导体事业部（中插 3）
- 株洲中车时代装备技术有限公司（中插 4-5）
- 襄阳中车电机技术有限公司（中插 6-7）

- 宝鸡中车时代工程机械有限公司（中插 8）
- 宁波中车时代传感技术有限公司（中插 9）
- 株洲中车时代电气股份有限公司铁道事业部（中插 10）
- 株洲时代新材料科技股份有限公司（中插 11）
- 株洲时代电气绝缘有限责任公司（中插 12）
- 2017 第十二届中国国际轨道交通展览会（内页末页）
- 上海意兰可电力电子设备有限公司（后插 1）
- 深圳通业科技股份有限公司（后插 2）
- 雷莫电子（上海）有限公司（后插 3）
- 温州市龙电绝缘材料有限公司（后插 4）
- 上海鹰峰电子科技有限公司（后插 5）
- 北京石竹科技股份有限公司（后插 6）
- 珠海金电电源工业有限公司（后插 7）
- 2017 东盟轨道交通国际峰会（后插 8）
- 湖南省宁乡县中南散热器有限公司（后插 9）
- 安徽省康利亚股份有限公司（后插 10）
- 江苏瑞铁轨道交通装备股份有限公司（封 3）
- 深圳市中电华星电子技术有限公司（封 4）