

城市轨道交通

广州地铁 5 号线直线电机故障
原因分析及处理

陈智华

(广州地铁集团有限公司 运营总部, 广东 广州 510380)

摘 要: 通过收集广州地铁 5 号线直线电机运营数据以及拆检直线电机, 分析直线电机故障主要原因, 并提出相应的整改措施和处理对策, 对直线电机后续维修、二次研制及地铁运营前期联调提供参考。

关键词: 直线电机; 线圈; 槽楔; 击穿; 惰行; 广州地铁 5 号线

中图分类号: U231; TM359.4 文献标识码: B
文章编号: 1000-128X(2015)05-0088-03
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.05.024

1 问题提出

广州地铁 5 号线(简称 5 号线)2009 年 12 月 28 日开通, 其采用直线电机车辆, 牵引传动系统由三菱公司提供。该车型共有 360 台直线电机, 从 2010 年 1 月开始, 直线电机陆续出现故障, 并在 2013 年呈井喷现象, 全年更换直线电机达 101 台, 占电机总数的 28%, 故障率远高于其他轨道交通通用旋转牵引电机故障率, 对正线运营造成较大冲击。

2 故障现象及原因分析

5 号线直线电机从 2010 年至 2013 年, 共计更换直线电机 149 台, 前期出现过电源插头松脱、烧损的情况, 但案例很少, 后期大面积出现的故障主要集中在三方面: 一是线圈端部短路, 二是中部线圈击穿, 三是槽楔下沉。

2.1 直线电机线圈端部短路

线圈端部短路, 故障点如图 1 所示。5 号线开通至今, 线圈端部短路共计 7 台, 同样选用直线电机的 4

号线, 也曾出现过该故障, 在 2008~2009 年期间共计烧损 13 台。根据现场调查情况, 结合原厂三菱公司的意见, 导致线圈端部短路的原因有:

- ①线圈固定杆与横向支撑杆支撑线圈重量。两者之间采用焊接方式, 没有考虑绝缘措施, 车辆运行过程中直线电机振动, 横向支撑杆与线圈固定杆产生细微位移, 发生摩擦, 导致接触部位磨损, 绝缘开裂。
- ②直线电机没有外壳保护。线圈与环境空气直接接触, 受风沙雨雾等环境因素影响较大, 同时直线电机工作时温升大, 导致了绝缘材料绝缘老化和开裂, 水汽容易进入到线圈内部, 绝缘电阻降低。
- ③直线电机产生的磁场是直线移动, 在车辆运行过程中, 绕组端部上的横向支撑杆就会切割磁力线而产生感应电压, 横向支撑杆、线圈固定杆和机体间形成回路, 产生感应电流。当绝缘材料开裂, 破损点不断地摩擦, 出现打火花现象, 往复循环, 造成此处绕组绝缘的损坏, 绕组短路。

2.2 直线电机中部线圈击穿

直线电机因中部线圈击穿的故障, 2012 年更换了 30 台, 2013 年则更换了 64 台, 线圈击穿成为直线电机主要故障之一。为了查找线圈击穿的原因, 对一台损坏的直线电机进行了分解。分解前把电机清洗干净, 并烘干水汽, 然后测量

表 1 分解前介质损耗测量结果

电压 /V	介质损耗 /%	电容 /pF
500	204.19	75 426
1 000	468.90	89 690
1 500	587.82	124 416
2 000	587.82	124 416
1 500	587.82	124 416
1 000	587.82	124 416
500	587.82	124 416

直线电机各参数, 测量结果如下: 三相直流电阻约为 162 mΩ, 绕组绝缘电阻 0 mΩ, 介质损耗及电容检测如表 1 所示。

按照三菱公司试验大纲, 1 000 V 时介质损耗小于 5%, 测量结果说明绝缘已严重老化, 绕组绝缘电阻击穿。为掌握更详细数据, 把线圈并头拆除, 逐个线圈测量对地耐压, 检查线圈绝缘状态, 测量结果如表 2。

表 2 分解前单个线圈耐压测量结果

位置	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组	6 组	7 组	8 组
击穿电压	13 000	13 000	13 000	8 000	12 000	7 000	7 000	4 000
位置	9 组	10 组	11 组	12 组	13 组	14 组	15 组	16 组
击穿电压	9 000	8 000	接地	3 500	8 000	4 500	4 800	10 000
位置	17 组	18 组	19 组	20 组	21 组	22 组	23 组	24 组
击穿电压	4 500	5 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000

从表 2 可以发现, 直线电机两个端部耐压值较高, 达到 13 000 V, 但越靠中部的线圈, 耐压值就越低, 第 11 组线圈击穿, 第 12 组 3 500 V, 同时观察硅钢片, 发现槽壁光滑, 两端挂漆甚微, 缝隙无绝缘漆, 线圈表面玻璃丝带发软。由

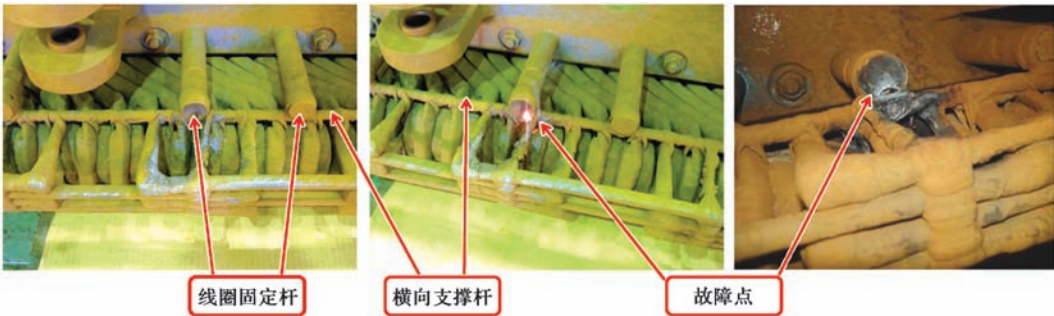


图 1 线圈端部短路故障点

此推测，原厂浸漆工艺有所欠缺。线圈外包发暗，绝缘发黑，云母层发黑、脆化，绝缘严重老化，槽楔玻璃布层发干、发毛且有松动情况，说明直线电机工作温升很大。

根据设计文件，5号线直线电机绝缘浸渍漆采用三菱公司进口环氧酸酐200级无溶剂绝缘浸渍漆。2010年3月27日，三菱公司在车辆上测得直线电机的有效电流（Root Mean Square，RMS）最大为175 A，按照实测电流，仿真计算出直线电机温升值为180~190 K，已接近绝缘浸渍漆限定值200 K。2010年6月7日，三菱公司提交“关于降低直线电机温度的方案”中提及：整车设计时，在超载工况（AW3）载荷条件下，文冲→浔口区间直线电机RMS电流为173 A，温升为191 K。说明三菱公司当初设计并没有考虑“冗余”的问题，即5号线直线电机设计功率稍小。

在2010年3月~2011年7月，三菱公司共计提供了3份关于直线电机的相关报告，均建议车辆在运行过程中增加惰行工况，以达到节能减排和直线电机降温的目的。根据三菱公司提供的数据，2010年3月27日，在中山八一西场区间测得4344车直线电机的RMS电流为206 A，如图2所示；但仿真计算，在有惰行的工况下，直线电机RMS电流仅为152 A，如图3所示。据此认为：车辆在自动驾驶ATO运行模式中，反复施加牵引和再生制动，直线电机经常处于通电状态，致使RMS电流增加，直线电机温升大与ATO运行模式中没有惰行有关联。

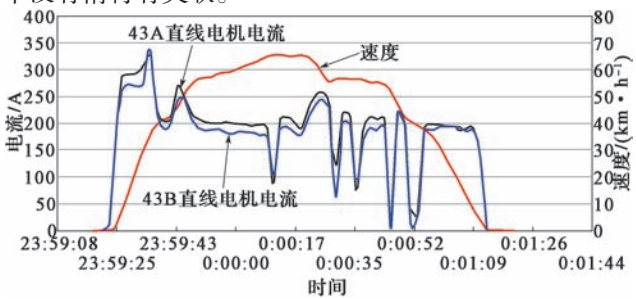


图2 中山八一西场区间实测电流值

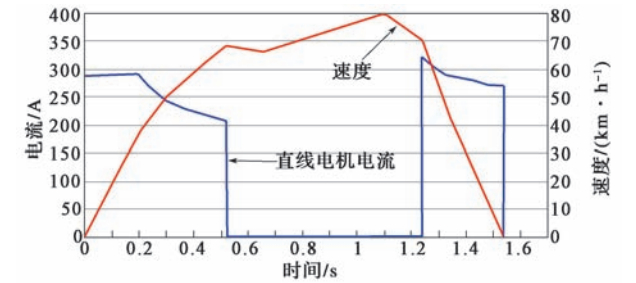


图3 中山八一西场区间仿真电流值

根据三菱公司提供的《关于现车试验结果》报告，直线电机中部铁心与2个端部铁心的温升差最大有60 K。导致这种温差的原因有两方面：一是直线电机采用自然风冷，车辆在运行过程中能引起空气气流，气流有利于两个端部散热，但中部，由于铁心与感应板的距离较小（小于10 mm），对中部散热不利；二是直线

电机绕组采用双层层叠设计，但2个端部前7个凹槽只有单层线圈，所以端部发热量也相对减少。因此，直线电机出现中部温度偏高，而两端温度稍低的状况。

综合上述分析，设计功率偏小、直线电机浸漆工艺不严格、自然风冷和运营工况过载时间长等因素，致使直线电机中部温升长期偏大，且接近极限值200 K，绝缘材料快速老化，致使直线电机出现大量的击穿故障。

2.3 槽楔下沉

5号线2013年更换的101台直线电机中，有34台是因为槽楔故障而更换的，主要表现为槽楔与齿的底部几乎平齐，还有的槽楔开翘、脱落等，如图4所示，这样槽楔就失去了对线圈的紧固作用，不仅造成线圈与槽之间的摩擦，引起线圈对地击穿，严重时还存在槽楔脱落的风险，危及行车安全。

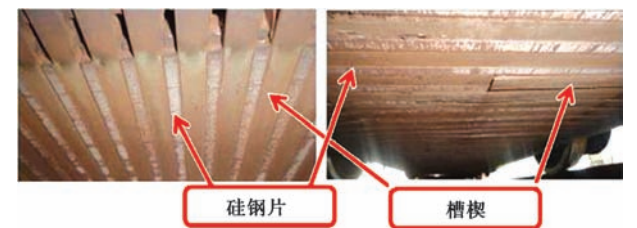


图4 槽楔下沉情况

直线电机铁心与感应板的距离即气隙是直线电机的关键参数，气隙过大，则能耗增大，气隙太小则容易碰损直线电机。为了严格保证气隙值，线路上装有在线检测设备，当车辆经过时，利用激光测距传感器，自动测量气隙距离，以保证车辆运行的安全。正常时，硅钢片底部与槽楔有3 mm的距离，如图5所示，槽楔下沉时，部分距离只有0.5 mm。

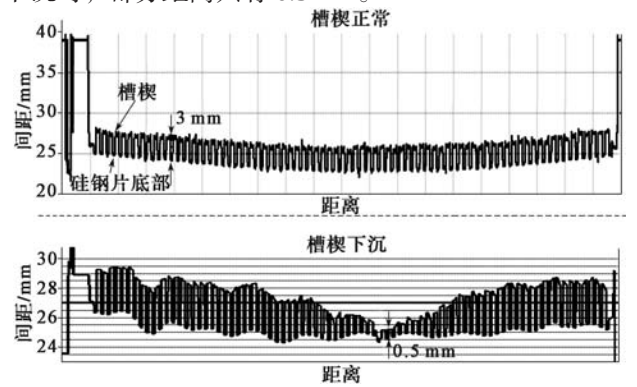


图5 在线测量设备槽楔与硅钢片底部测量结果对比

中部槽楔下沉尤为严重，这也与直线电机中部温升大有关系。另外，直线电机铁心燕尾设计存在问题，燕尾和槽楔贴合面不够大，如图6所示，燕尾单边深

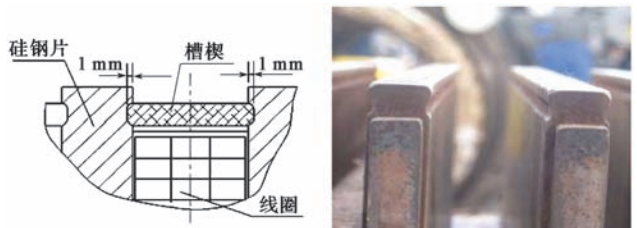


图6 直线电机燕尾设计