

运输导致地铁牵引电机轴承失效分析与防护

王雪岭, 李秀艳, 杜宏光, 元世斌, 厉呈臣, 李祝伟

(中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 064000)

摘 要: 地铁车辆普遍采用公路运输方式交付地铁公司, 运输过程中牵引电机轴承失效现象时有发生。详细分析轴承失效原因, 制定相应防护方案并进行验证, 改进运输方案后未再发生牵引电机轴承失效, 防护方案可靠。

关键词: 地铁车辆; 公路运输; 牵引电机; 轴承失效; 防护方案

中图分类号: U231; TH133.33 文献标识码: B
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.04.028

2015年8月, 中车唐山机车车辆有限公司(简称唐山公司)为福州地铁1号线地铁列车进行线路试验时, 发现列车走行部有周期性“咔、咔”的异音, 经低速运行检查, 初步判断异音来自01022车3轴牵引电机, 落修牵引电机检查监测, 发现传动端轴承有周期性异音并伴有轻微振动, 非传动端不明显。

该批地铁车辆是从唐山公司经汽车长途运输到泉州基地进行整备、交付的, 所以很有必要研究运输防护方案。

1 故障现象

拆解牵引电机发现, 传动端圆柱滚子轴承内圈滚道有4条按滚动体节距分布的凹痕(见图1), 表面粗糙发暗, 长度与圆柱滚子长度相近, 圆柱滚子表面未



图1 轴承内圈滚道凹痕

见异常; 非传动端深沟球轴承未进行破坏性分解, 轴承转动平稳、无异音。确定异音来自牵引电机传动端圆柱滚子轴承内圈滚道凹痕, 轴承失效。为安全起见, 对已经运抵泉州基地的4列地铁车辆及5列转向架共计144台牵引电机逐一排查, 发现有9台牵引电机传动端圆柱滚子轴承内圈滚道存在凹痕。

2 原因分析

地铁车辆和转向架为唐山公司总部制造, 发运前在唐山公司进行列车动态试验及轮对电机组跑合试验, 未发生异常情况。车辆运到泉州基地即进行编组调试发现电机故障, 由此可以确定轴承内圈凹痕产生于公路运输环节。

这种情况在其他地铁车辆供应商及地铁公司也时有发生^[1-2]。

2.1 轴承失效模式

GB/T 24611—2009/ISO 15243: 2004《滚动轴承损伤和失效术语、特征及原因》^[3]将滚动轴承失效模式分为疲劳、磨损、腐蚀、电蚀、塑性变形、断裂或开裂六大类, 对每种失效模式的特征、外观变化及成因进行了定义、描述和分类, 其中, 轴承内圈滚道出现按滚动体节距分布的凹痕有2种, 即贮运压痕和伪压痕, 分别从属不同的失效模式。

贮运压痕是滚动轴承塑性变形失效模式的一种, 是静止轴承所承受的静载荷或冲击载荷超过其静态承载能力而导致滚道承载区域产生的塑性变形。伪压痕是滚动轴承腐蚀失效模式中的摩擦腐蚀, 由轴承弹性接触面的微小运动或振动等所致, 也称微动腐蚀^[4], 与振动强度、润滑及载荷等因素有关。

滚动轴承失效是比较复杂的过程, 可能是一种或几种失效模式并存。

2.2 轴承载荷分析

公路运输地铁车辆时, 车体、转向架构架、轮对与运输车辆固定, 牵引电机轴承处于静止状态, 轴承所承受的静载荷为牵引电机转子质量及电机半联轴器的质量(见图2)。

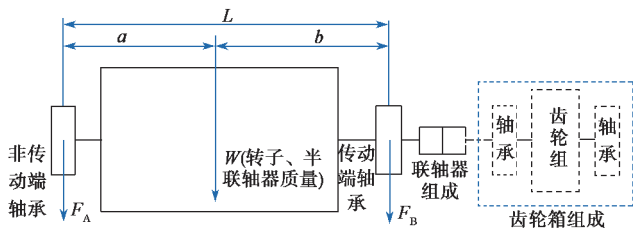


图2 轴承静载荷示意图

表1 牵引电机转子及轴承参数表

转子质量/kg	半联轴器质量/kg	轴承中心距/mm	非传动端轴承与转子重心距/mm	传动端轴承与转子重心距/mm	NU216ECM/C4VA3091 (SKF) 基本额定静载荷 C_0 /N	6315M/C4VL0241 (SKF) 基本额定静载荷 C_0 /N
150	13	382.5	150.5	232	166 000	76 500

经计算,非传动端轴承静载荷 F_A 为 968.88 N,传动端轴承静载荷 F_B 为 628.52 N,轴承所承受的静载荷远低于轴承本身的基本额定静载荷 C_0 ,不存在轴承静载荷过载问题。

运输过程中的冲击载荷十分复杂,很难进行精准计算,但运输线路一般为高速公路、省道、县道等路况较好的铺装路面,运输车辆限速行驶,冲击载荷经过汽车减振系统、减振铁鞋、地铁车辆的一系悬挂后得到有效缓冲,一般来说不足以导致轴承冲击载荷过载。

电机供应商也是采用公路运输方式运送电机,只是在电机传动轴端安装固定杆(见图3),这种固定杆只有两点固定,对于消除冲击载荷意义不大,但从未发生轴承内圈凹痕现象。

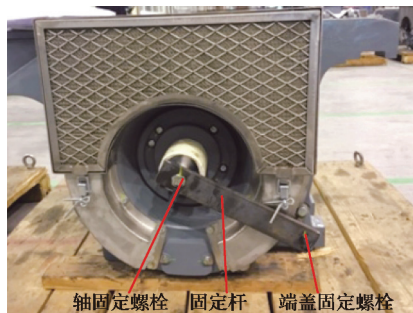


图3 牵引电机运输防护

牵引电机两端轴承都承受静载荷和冲击载荷,而只是圆柱滚子轴承失效,由此认为,轴承内圈滚道凹痕并非由轴承静载荷或冲击载荷过载导致。

2.3 运输过程轴承摩擦分析

地铁车辆运输时牵引电机转子不能转动,运输车辆加减速、转向、变更车道、颠簸等可以引起牵引电机转子微小的轴向和横向摆动,这种情况下两端轴承所受的影响不同。

牵引电机静止状态下,转子的重量全部压在轴承下部的滚动体和轴承内圈承载区上。当电机转子发生轴向摆动时,转子带动轴承内圈相对于轴承外圈、滚动体发生微小位移,对于圆柱滚子轴承来说,轴承内圈与滚动体间产生往复的滑动摩擦(见图4),这种滑

动摩擦是轴承产生摩擦腐蚀的主要因素。

$$F_A = 9.8 \times W \times b / L \quad (1)$$

$$F_B = 9.8 \times W \times a / L \quad (2)$$

式中: W 为电机转子与半联轴器质量之和; L 为轴承中心距; a 为非传动端轴承与转子重心距; b 为传动端轴承与转子重心距。

动摩擦是轴承产生摩擦腐蚀的主要因素。

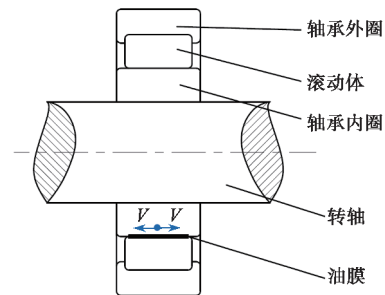


图4 圆柱滚子轴承示意图

转子重量对轴承下部承载区长时间压迫和频繁地滑动摩擦,导致轴承内圈与滚动体间的油膜破坏,润滑恶劣,形成恶性循环,这是圆柱滚子轴承摩擦腐蚀的次要因素。

与圆柱滚子轴承不同的是,转子发生轴向摆动时,深沟球轴承是在轴承内圈、滚动体之间产生滚动摩擦(见图5),转子重量的压迫虽然也对油膜产生破坏,但滚动体的转动也会促成油膜生成,因而深沟球轴承产生摩擦腐蚀的概率很小。

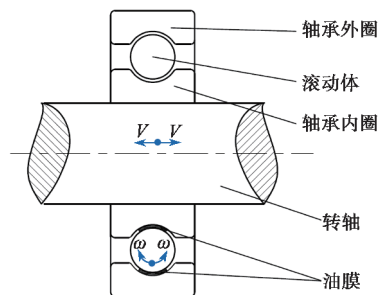


图5 深沟球轴承示意图

列车运行通过弯道或道岔时牵引电机转子也会轴向摆动,轴承内圈是在滚动状态下位移,是滚动摩擦;由于滚动体、保持架对油脂的搅拌作用,油膜在破坏与生成之间达到一个动态平衡,轴承极少产生摩擦腐蚀失效。

运输车辆启动或紧急刹车时,牵引电机转子向后或向前横向摆动,如图6、图7中所示 V 方向,此时不论是圆柱滚子轴承还是深沟球轴承,轴承内圈与滚动体间为滚动摩擦,轴承不会产生摩擦腐蚀

失效。

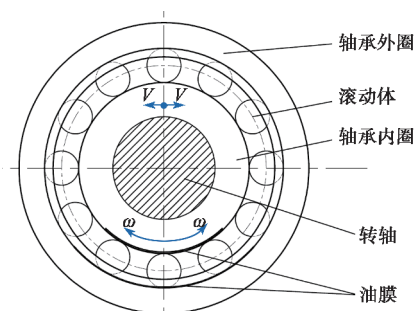


图6 圆柱滚子轴承示意图

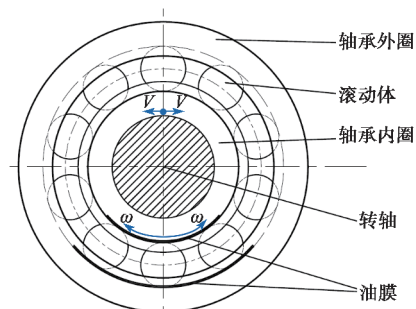


图7 深沟球轴承示意图

综上所述,采用汽车运输地铁车辆时,运输车辆颠簸、变更车道、转弯等引起电机转子轴向摆动,轴承内圈与滚动体间滑动摩擦导致轴承摩擦失效,是圆柱滚子轴承内圈滚道产生凹痕的主要原因。静载荷、冲击载荷使轴承内圈与滚动体间的油膜破坏,润滑恶劣,加剧轴承内圈与滚动体间滑动摩擦,是轴承内圈滚道产生凹痕的次要原因。

3 电机防护方案

3.1 传统防护方案的缺陷

传统的防护方案是解开牵引电机与变速箱之间的弹性联轴器,在电机侧半联轴器安装压板,通过2个拉杆与牵引电机端盖固定,再用拴紧器对电机端及变速箱端联轴器绑扎,控制牵引电机转子的振动(见图8)。



图8 传统防护方案

此方法虽能起到对电机轴承的保护作用,但也存在一些问题:

①受车下空间限制,操作不方便。车辆运输前拆开联轴器,安装防潮护套、压板,车辆到达目的地再恢复传动连接。

②对牵引电机转子轴向摆动不易控制。在消除约

27 mm 的联轴器窜动量后再消除深沟球轴承的轴向游隙,需反复调整、紧固,无法对电机转子定量控制。

③防护成本高。联轴器连接螺栓拆卸后按要求需要全部换新,每列地铁列车增加防护成本约1.8万元。

3.2 新防护方案

针对轴承失效原因重新制订相应的电机轴承防护方案(见图9)。

1) 控制牵引电机转子的轴向摆动

制作带顶紧锁固螺栓的专用工艺轴承盖,运输时把牵引电机非传动端轴承盖更换为工艺轴承盖,用M8的顶紧螺栓将牵引电机转子顶向传动端,从而限制转子的轴向摆动。

2) 控制牵引电机转子的横向摆动和径向跳动

用尼龙拴紧器在牵引电机输出轴颈交叉缠绕,以牵引电机定子两侧吊耳为固定点,拉紧电机输出轴轴颈,限制转子的横向移动和径向跳动,减小或消除对轴承的径向冲击。

车辆运输到目的地后恢复牵引电机非传动端轴承盖,拆除传动端拴紧器。

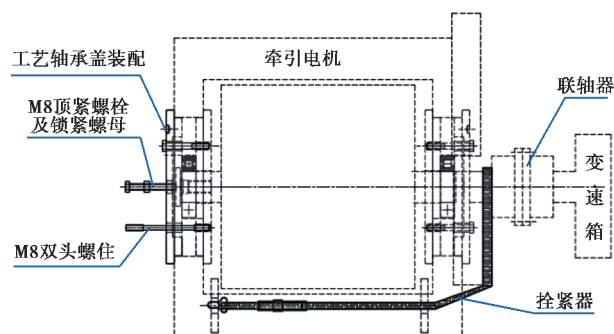


图9 新电机防护方案

此方案的操作要点:

①拆卸牵引电机非传动端轴承盖时不可一次性拆除全部安装螺栓,首先拆下2个螺栓后安装2个M8双头螺栓,防止轴承盖螺栓拆除后内侧轴承内盖松动、位移造成无法恢复,然后拆下其余的安装螺栓,取下轴承盖。

②拆下的牵引电机轴承盖装入专用塑料袋,防止丢失、污染。

③安装工艺轴承盖。将工艺轴承盖套入2个M8双头螺栓,安装2个螺栓和拆下双头螺栓后再安装其余的安装螺栓。

④旋入M8顶紧螺栓,顶紧力矩为10 N·m,锁紧螺母,力矩为40 N·m。

⑤电机轴承盖恢复。地铁车辆到达目的地恢复牵引电机轴承盖。

⑥注意电机防护未解除禁止推行地铁车辆。

4 方案验证

2016年3月,按新防护方案,由唐山公司向石家庄地铁公司运输地铁车辆,全程约467 km,(下转第118页)

造。目前全部列车 SIV 已整改完成,运行情况良好。

表 3 各部件温度测试统计及温升计算表

时间	进风口	充电机 模块右	充电机 模块左	逆变器 模块右	逆变器 模块左	三相电抗 器表面	单相电抗 器表面	单相电抗 器绕组	变压器 表面	变压器 绕组
12: 50	20.3	35.3	38.2	38.6	41.1	39.5	38.9	37.5	60.5	68.0
13: 20	20.9	40.2	43.6	44.8	46.0	48.2	59.1	55.9	116.2	110.5
13: 50	21.6	43.6	48.2	49.2	51.3	55.3	68.9	62.1	130.2	129.2
14: 20	22.5	48.7	52.8	52.1	55.8	59.1	78.2	67.8	141.5	145.0
14: 50	23.7	49.2	55.1	52.9	58.2	63.8	80.0	72.4	148.3	147.2
15: 20	23.8	50.7	56.8	53.2	60.4	65.2	82.1	74.6	149.2	149.9
15: 50	23.8	50.8	56.9	53.1	60.5	65.7	83.4	75.4	150.4	150.8
16: 20	23.7	50.8	56.9	53.1	60.5	65.7	83.5	75.8	150.3	151.5
温升值 /K		27.1	33.2	29.4	36.8	42.0	59.8	52.1	126.6	127.8

5 结语

宁波轨道交通 2 号线一期列车 SIV 散热风扇频繁出现故障是由散热风扇电机选型不当、选用的风扇电机长期工作在低速模式温升过高和相关的出厂测试方法不严谨导致的。目前经过重新选用新型成熟可靠的散热风扇电机后,此问题已经得到解决,运营至目前未再发生此类故障。

参考文献:

- [1] 中车株洲电力机车研究所有限公司. 宁波轨道交通 2 号线一期列车辅助系统电气原理图 [Z]. 株洲: 中车株洲电力机车研究所有限公司, 2014.
- [2] 李发海, 朱东启. 电机学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

作者简介: 张燕平 (1987—), 男, 工程师, 从事轨道交通车辆技术管理工作。

(上接第 115 页) 其中高速公路 447 km, 限速 60 km/h 行驶, 国道及城市道路约 20 km, 限速 30 km/h 行驶。车辆抵达现场缓慢推行车辆, 牵引电机无异音及异常振动。

2016 年 10 月, 由唐山公司向泉州基地运输地铁车辆, 全程约 2 087 km, 其中高速公路 2 067 km, 限速 60 km/h 行驶, 国道及城市道路约 20 km, 限速 30 km/h 行驶。

车辆抵达泉州基地缓慢推行车辆, 牵引电机无异音及异常振动。

落修任意 2 台牵引电机, 以 1 500 r/min 进行空转试验, 检测电机振动及噪声情况, 2 台牵引电机轴承无异音, 振动值符合 IEC 60349-2 标准^[5] 要求, 电机运转正常, 检测结果见表 2。

表 2 试验电机轴承振动检测记录 mm/s^2

电机号	轴承	标准	水平	垂直	轴向
1# 电机	圆柱滚子轴承	3.5	0.8	0.6	0.3
	深沟球轴承	3.5	0.4	0.4	0.4
2# 电机	圆柱滚子轴承	3.5	0.4	0.4	0.2
	深沟球轴承	3.5	0.3	0.4	0.2

拆解电机, 检查轴承内圈无凹痕。

从 2016 年起按此方案运输的福州、厦门及石家庄

地铁车辆合计 558 辆, 未发生牵引电机轴承失效, 防护方案可靠。

5 结语

公路运输地铁车辆是目前车辆供应商广泛采用的运输方式, 方便、快捷、经济, 为保证车辆运输安全, 按新防护方案运输, 可减少运输环节对牵引电机轴承的损伤。

参考文献:

- [1] 郭磊, 钟博, 李长俊. 地铁牵引电机轴承异响故障排查 [J]. 电机技术, 2013 (5): 59-61.
- [2] 李宽宏. 成都地铁牵引电机轴承异响故障分析 [J]. 科技传播, 2015(19): 41-49.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滚动轴承损伤和失效术语、特性及原因: GB/T 24611—2009/ISO 15243: 2004 [S].
- [4] 王多多. 电机轴承的非运转性失效 [J]. 电机与控制应用, 2015 (6): 63-68.
- [5] 国际电工委员会. 电力牵引 - 铁路和道路车辆用旋转电机 - 第 2 部分: 电子变流器馈电交流电机: IEC 60349-2 [S]. 2010.

作者简介: 王雪岭 (1965—), 男, 高级工程师, 从事城轨车辆制造工艺技术工作。