

动车组牵引电机轴承温升故障分析及解决措施

朱彦^{1,2} 沈迪² 王田天¹

(1. 中南大学交通运输工程学院, 410018, 长沙; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春//第一作者, 正高级工程师)

摘要 针对某型动车组牵引电机轴承温升故障,从轴承结构、注脂量和频次、轴电压影响及脉动扭矩校核等方面进行调查,分析导致轴承损伤引发故障的原因。分析结果显示,在微弱电流、轴承高温运转等因素持续作用下,加速了润滑脂的老化,导致轴承润滑不良,严重时轴承出现白蚀裂纹,最终导致轴承疲劳失效。针对故障原因,提出优化润滑、增大绝缘层厚度、增加保护接地等解决措施。

关键词 动车组; 牵引电机; 轴承温升故障

中图分类号 U266.233.1⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.027

Analysis of Temperature Rise Fault of EMU Traction Motor Bearing and Solutions

ZHU Yan, SHEN Di, WANG Tiantian

Abstract In view of the temperature rise fault of traction motor bearing of certain type of EMU (electric multiple unit), investigation is carried out from the aspects including bearing structure, grease injection amount and frequency, influence of shaft voltage, pulsating torque check to find out the cause of bearing damage and the consequent faults. Analysis results show that under the continuous action of weak current, high temperature operation of bearing and other factors, the aging of lubricating grease is accelerated, resulting in poor lubrication of bearing. In serious cases, white corrosion fractures appear on the bearing, and finally lead to bearing fatigue failure. According to the fault causes, measures such as optimizing lubrication, increasing the thickness of insulation layer and increasing protective grounding are proposed.

Key words EMU; traction motor; bearing temperature rise failure

First-author's address School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, 410018, Changsha, China

自2018年以来,某型动车组牵引电机轴承先后发生了10余起温升异常故障报警,影响了列车的正常运行^[1]。拆解后发现,发生温升故障的轴承主要

为传动端轴承,且轴承滚动体表面出现了磨损和剥落^[2-3]。本文从轴承结构及注脂情况出发,对温升影响因素、轴电压及脉动扭矩等方面进行调查和分析,总结故障原因,进而提出解决方案。

1 轴承结构及注脂情况

某型动车组牵引电机轴承为绝缘轴承,采用双支点结构。如图1所示,传动端轴承选用6016绝缘深沟球轴承,非传动端轴承选用NU210绝缘圆柱滚子轴承。轴承品牌包括舍弗勒(FAG)、斯凯孚(SKF)和恩梯恩(NTN),轴承采用脂润滑、迷宫式密封结构。轴承及储油室内的润滑脂所处的空间相对密闭,可隔绝外界粉尘等杂质。

新造牵引电机出厂时,其轴承加注润滑脂。6016轴承注脂量为80.5 g。其中,注油通道注脂5.0 g、端盖注油室注脂15.0 g、端盖储油室注脂30.0 g、FAG及SKF轴承注脂22.0 g、轴承盖储油室注脂8.5 g。此外,废油脂腔的存脂量为80.0 g,泄油通道存脂量为23.0 g,合计103.0 g。当注脂较多时,随着牵引电机运行,润滑脂还会在外封环及端盖内侧迷宫处留存,最多留存量约为90.0 g。

在运用维修过程中需对轴承进行补脂。列车每行驶20万km,其单个轴承需补脂30.0 g。如图2所示:新润滑脂由注油嘴添加注入,经注油通道进入端盖注油室,再通过8个周向均布的孔进入端盖储油室,之后进入轴承;传动端轴承的废润滑脂由轴承盖储油室经泄油通道进入端盖废油脂腔,最后排出。

2 轴承温升故障影响因素分析

为查找轴承温升故障的原因,深入分析故障影响因素,将发生故障的牵引电机轴承分别送到2家专业检测机构进行交叉互检。其中一家机构检测分析认为,轴承润滑不良导致轴承油脂润滑性能下

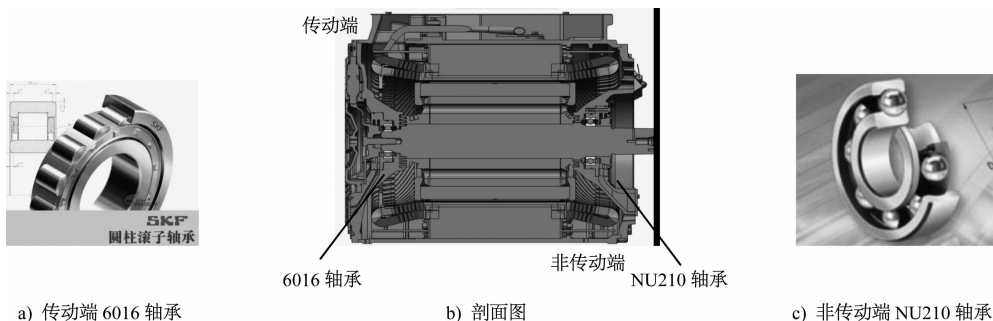
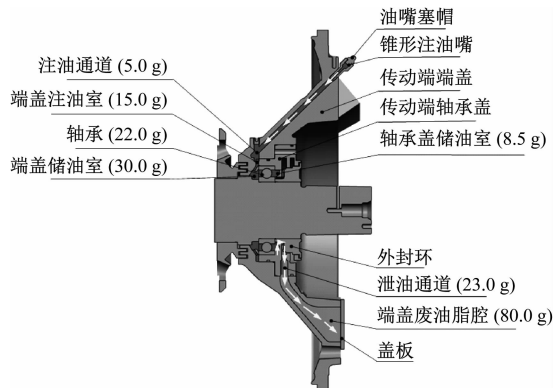


图1 某型动车组牵引电机轴承示意图

Fig. 1 Diagram of traction motor bearing of an EMU



注:括号内数值为存脂量;箭头方向为注脂及排脂方向。

图2 传动端 6016 轴承的注脂及排脂示意图

Fig. 2 Diagram of grease injection and discharge of 6016 bearing at the drive end

降,加剧轴承各金属部件间的异常接触和磨损,最终发展为碾皮和剥离等轴承损伤;另一家机构检测分析发现,剥落表面存在 WEC(白色腐蚀裂纹),且 WEC 同润滑不良、电蚀、重载及高交变应力等因素有关。

对此本文将对注脂量及废油脂腔清理效果进行验证,进一步分析轴承温升故障的原因。

2.1 注脂量及废油脂腔清理效果验证

轴承润滑不良可能由注脂不充分和废油脂清理不到位导致,故对新油脂注脂量和废油脂腔清理效果进行验证。

2.1.1 新油脂注脂量验证

参照新造轴承及检修加注润滑脂标准,对传动端轴承分别加注 30.0 g、45.0 g、60.0 g 润滑脂,以验证每次补脂后润滑脂的流向及轴承内润滑脂的替换情况。验证结果表明:随着注脂量的增大,新油脂穿过轴承替换旧油脂的量增加;注脂量达到 60.0 g 时,新润滑脂能进入轴承内部约 95% 的部位,可替换轴承内 90% 以上的旧油脂。

2.1.2 废油脂腔清理验证

参照新造轴承及检修组装加注润滑脂标准,按 30.0 g、45.0 g、60.0 g 对电机润滑系统传动端轴承加注润滑脂,并在多次注脂后验证废油脂腔清理效果。验证结果表明:随着注脂量增加,注脂次数减少,清理废油脂腔次数先下降再上升;注脂量为 45.0 g 时的清理废油脂腔次数最少。

2.2 温度数据调查

牵引电机轴承温度传感器设置在电机端盖上,且温度探头与轴承未直接接触。调查发现,当端盖迷宫结构发生磨损时,轴承温度快速升高,最终引发报警。为研究轴承故障发生前期的温度变化趋势,对同车 4 个轴位的在线温度报警电机、预防性更换电机及高级修故障电机进行温度分析。

统计轴承故障发生前期 1 年内电机的定子及轴承温度数据,并进行同车对比。对比结果表明,头车和尾车的 3 轴及 4 轴电机定子与轴承温度普遍偏高,8 车和 9 车(中间车)的定子温度偏差不大。

选取发生温升故障的电机轴承(某车组 1 车 3 轴)和正常电机轴承在实验室进行轴承温度对比试验,得到故障轴承与非故障轴承电机温度曲线,如图 3 所示。由图 3 可见:轴承温度与定子温度具有较强的关联性;温度逐渐趋于稳定后,轴承温度不超过 100 ℃;轴承故障前期,绝对温度和温度差无明显上升趋势,轴承温度随定子温度升高而升高;故障轴承温度未有明显升高,且未超过报警温度。

2.3 轴承状态检查

2.3.1 在线更换电机轴承拆解情况

对某型动车组头车和尾车的 3 轴和 4 轴牵引电机检修后行驶里程超过 80 万 km 的 28 台牵引电机进行更换并对轴承进行拆解。拆解发现:在 FAG 的轴承中,损伤轴承占比高达 92%,且相应行驶里程为 120 万~145 万 km;在 SKF 的轴承中,损伤轴承

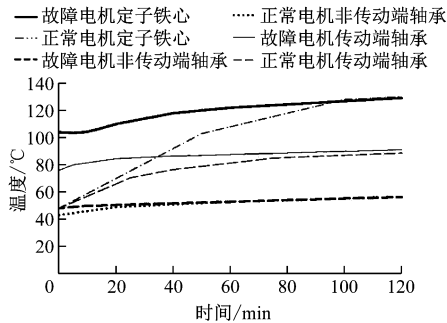


图 3 故障轴承与非故障轴承电机温度曲线

Fig. 3 Temperature curve of failure bearing and non-failure bearing motors

占 50% (其中,行驶里程为 80 万~100 万 km 的轴承占 12%,行驶里程为 100 万~120 万 km 的轴承占 88%)。

SKF 轴承的绝缘层厚度为 0.1 mm。出现损伤的 8 套 SKF 轴承故障主要表现为:7 套轴承外圈出现搓衣板纹路,2 套轴承滚动体出现剥落,2 套轴承外圈出现剥落,但保持架未发现异常;其余 8 套为正常轴承,除滚动体表面发暗外,无其他异常,对应行驶里程大多为 80 万~90 万 km。

FAG 轴承的绝缘层厚度为 0.2 mm。出现损伤的 11 套 FAG 轴承中:滚动体全部出现剥落,5 套轴承外圈出现剥落,1 套轴承外圈出现搓衣板纹路,6 套轴承保持架出现剥落;内圈未发现异常。仅有 1 套正常轴承,对应行驶里程为 135.8 万 km,无异常。

由于动车组行驶里程超过 80 万 km,故在头车与尾车的 3 轴及 4 轴牵引电机检修后,对其进行了更换。更换下来的电机轴承多数存在不同程度的损伤。SKF 轴承损伤的形貌主要为滚动体发暗和外圈搓衣板纹路,FAG 轴承损伤的形貌主要为滚动体、外圈、保持架剥落。

2.3.2 高级修轴承状态检查

对同期入厂高级修的 5 列动车组牵引电机轴承状态进行了检查。牵引电机均装用 FAG 轴承。在 160 台电机中,有效样本为 152 台,其余 8 台因前期更换过,故行驶里程较短,为无效样本。拆解发现,有 25 套故障轴承,占轴承总数的 16.4%。通过对 2016—2020 年该型动车组牵引电机装用的轴承情况进行统计发现,2016 年及 2017 年装用的轴承以 FAG 轴承为主。这可能是在线运营中 FAG 轴承故障率较高的原因之一。

通过对牵引电机 25 套故障轴承进行拆解发现,轴承损伤的电机主要集中在头车及尾车的 3 轴及 4

轴,8 车及 9 车(中间车)的 3 轴及 4 轴。这些轴承占故障轴承总数的 84%。其中,头车及尾车 3 轴及 4 轴的故障轴承有 13 套,占故障轴承总数的 52%;8 车及 9 车的 3 轴及 4 轴故障轴承有 8 套,占故障轴承总数的 32%;其他中间车电机轴承故障 4 起。故障轴承的装车位置统计如表 1 所示,中间车其他车轴承损伤情况如表 2 所示。

表 1 故障轴承的装车位置统计

Tab. 1 Loading position statistics of failure bearings					
车辆号	轴号	故障数量/起	车辆号	轴号	故障数量/起
1	3	2	9	3	3
1	4	2	9	4	2
6	2	1	11	3	1
8	1	1	14	1	1
8	3	1	16	3	5
8	4	2	16	4	4

表 2 中间车其他车轴承损伤情况

Tab. 2 Bearing damage of other middle compartments					
车组号	轴	内圈	滚动体	外圈	保持架
车组 1	6 车 2 轴	无异常	2 个滚动体剥落	无异常	无异常
车组 1	8 车 1 轴	无异常	14 个滚动体剥落	剥落	剥落
车组 2	11 车 3 轴	无异常	7 个滚动体剥落	轻微搓衣板纹路	无异常
车组 2	14 车 1 轴	无异常	1 个滚动体剥落	搓衣板纹路	无异常

2.3.3 其他车组高级修轴承状态检查

对 15 列同期入厂其他高级修动车组牵引电机轴承进行检测,其中 10 列动车组完成全检,5 列动车组完成一部分。通过对牵引电机轴承的拆解检查发现,动车组头车及尾车 3 轴及 4 轴,以及 8 车及 9 车 3 轴及 4 轴的电机故障较多。

2.4 在线润滑脂检测

对该型动车组头车及尾车 3 轴及 4 轴牵引电机传动端轴承开展专项注脂、取样检测分析。收集 44 份在线运行的 11 列该型动车组 8 车及 9 车 3 轴及 4 轴牵引电机废油脂腔的润滑脂样品(其中 6 份样品因润滑脂量少而无法进行检测),完成有效润滑脂检测 38 份。润滑脂中的铁、铜质量分数检测结果如图 4 及图 5 所示。由图 4 及图 5 可知,当该型动车组行驶里程达 100 万 km 以上时,在 8 车及 9 车 3 轴及 4 轴的 13 台电机中,8 台电机的润滑脂中铁、铜

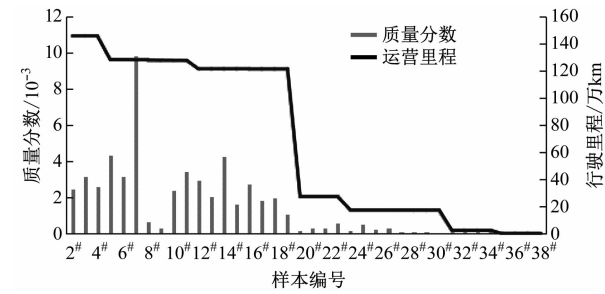


图 4 铁质量分数检测结果

Fig. 4 Iron mass fraction test results

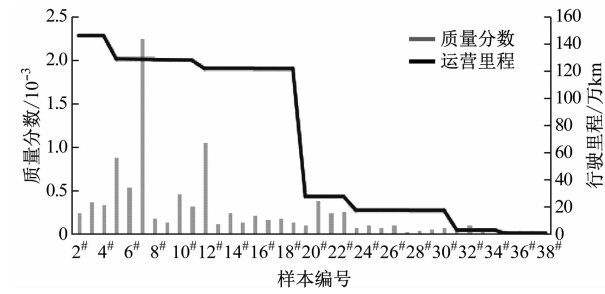


图 5 铜质量分数检测结果

Fig. 5 Copper mass fraction test results

质量分数均超过经验值,电机数占比高达 61.5%。由此可推论,当润滑脂中的铁、铜含量过高时,电机

发生故障的风险较大。

2.5 轴电压的在线测试及影响分析

2.5.1 在线测试情况

电机轴承外圈同电机机座及转向架构架相连,电机轴承内圈通过电机转轴、联轴节、齿轮箱同轴端轮对相连,同时转向架构架与车体保护接地装置均连接钢轨。受钢轨回流不畅影响,车体存在运行回流,车体电流通过保护接地回到变电所。对于无保护接地轴端布置的电机,由于保护接地回路较长,回路电感较大,故抬升了电机外壳对钢轨的电压,即电机轴电压增大。

选取该型动车组 16 车 4 轴、11 车 4 轴和 9 车 3 轴的电机进行轴电压测试。测量点选取电机外壳与电机轴之间。试验区间为徐州东站—南京南站(列车设计时速为 300 km),按照两种工况分别进行测试:工况一,在 16 车 3 轴增加保护接地,并将原 9 车 1 轴的保护接地移至 9 车 3 轴;工况二,保护接地采用现车配置,仅 11 车 4 轴设保护接地。轴电压测试数据见表 3。根据增加保护接地的电机轴电压对比测试结果,有保护接地的转向架电机轴电压有较大改善。

表 3 轴电压测试数据

Tab. 3 Shaft voltage test data

轴位	保护接地情况	启动时的轴电压/V		恒速运行时的轴电压/V		制动时的轴电压/V	
		最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
16 车 4 轴	新增保护接地	53	-59	69	-65	48	-55
	无保护接地	104	-100	119	-118	122	-128
9 车 3 轴	新增保护接地	81	-83	57	-56	77	-79
	无保护接地	119	-119	145	-155	146	-167
11 车 4 轴	保护接地	107	-119	66	-67	120	-117

根据经验,对于绝缘层厚度 0.2 mm 的轴承,在 1 kHz 的 AC 1500 V 电压下,若通过轴承的电流密度小于 0.1 A/mm²,则不会对轴承寿命造成明显的影响(不考虑 WEC)。本次轴电压测试值在上述范围内。工况二(16 车 4 轴及 9 车 3 轴新增保护接地)测试时,轴电压最大值较未增加时降低约 50%,与中间动车轴电压相当。这说明新增保护接地可有效降低轴电压。

给该型动车组头车及尾车的 1 位转向架设置 2 个保护接地,2 位转向架无保护接地,其余动车每个转向架均设置保护接地,受电弓车的 1 轴及 4 轴设

置保护接地。动车组的接地布置图如图 6 所示。动车组前半列的接地示意图见图 7。

2.5.2 轴电压影响分析

根据对轴承耐受电压的计算评估,在 200 V、10 kHz,以及 1 500 V、1 kHz 的情况下,轴承滚动体接触电流密度均小于 0.1 A/mm²(经验值)。对比实车轴电压测试数据,满足牵引电机轴承的使用要求。根据轴电压的测试结果,无保护接地装置的电机轴电压较高,但未超过电机轴承的耐压限值。

牵引电机轴存在的电压使轴承有微弱电流流过。持续的微电流通过轴承会导致轴承内润滑脂状态发

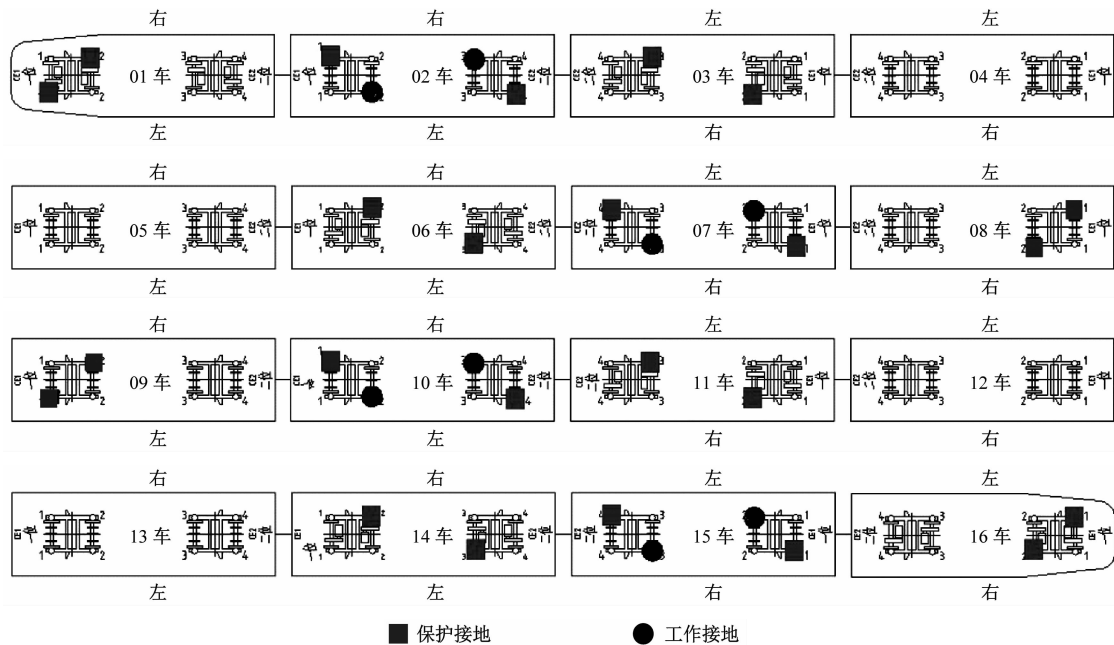


图6 动车组的接地布置图

Fig.6 Grounding layout diagram of EMU

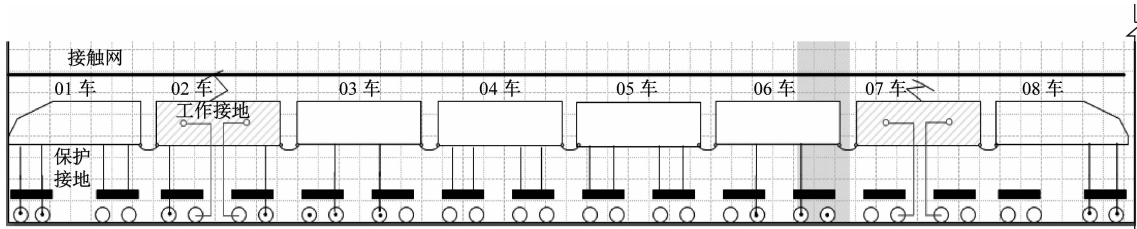


图7 动车组前半列的接地示意图

Fig.7 Grounding diagram of the first half compartments of EMU

生变化,使润滑脂变硬、变黑,加速润滑脂老化。

3 轴承寿命计算

3.1 脉动扭矩

针对该型动车组牵引电机运行过程中出现 100 Hz 脉动扭矩,通过轴承寿命计算进行分析。按实测试验工况和标准工况考虑,不同工况下的电机运行时转子动态加速度及时间占比如表 4 所示。

考虑脉动扭矩条件下,在列车起动加速及制动阶段,振动值明显增加。通过轴承寿命计算,可得出如下结论:①按 GB/T 21563—2018 振动量级核算,轴承基本额定寿命为 430 万 km;②考虑加减速产生的振动量级,轴承基本额定寿命为 237 万 km。可见,轴承计算寿命满足使用要求。车组未发生牵引电机轴承温度报警故障,说明实际线路条件满足电机轴承的使用要求。

表 4 不同工况的电机运行时转子动态加速度及时间占比

Tab.4 Rotor dynamic acceleration and time ratio of motor under different working conditions

工况	试验转速/ (r/min)	转子轴向加速 度/(m/s ²)	转子水平加速 度/(m/s ²)	转子垂向加速 度/(m/s ²)	时间占比/%
实测试验工况	0→3 383(加速)	14.7	16.7	28.6	10
	5 075(恒速)	2.4	2.5	4.4	80
	3 383→0(减速)	6.6	8.0	16.5	10
标准工况	4 100	4.7	2.5	5.4	100

注:标准工况以 GB/T 21563—2018 标准中的中振动量级作为输入。

3.2 润滑脂寿命

分析润滑脂寿命可知:在各工况下润滑脂寿命均满足轴承的 20 万 km 再润滑周期要求;温度对再润滑周期影响最大,载荷次之。进一步计算分析可知,润滑脂虽能满足目前执行的注脂周期要求,但润滑脂在电机轴承磨损、轴承通过微弱电流及轴承运转温度高等长期累积作用下会加速老化,降低润滑性能。

4 结论及解决措施

4.1 故障原因

通过对电机轴承运用载荷、注脂周期、温度及故障里程等方面的评估可知,轴承的注脂周期、轴承计算寿命及电机轴电压测试均满足设计要求,但无保护接地装置的轴电压幅值较大,且头车 3 轴及 4 轴的电机轴承温度较高,加速了润滑脂老化。结合两家专业检测机构的分析及行业内专家评审意见,某型动车组头车、尾车、8 车及 9 车的 3 轴及 4 轴牵引电机轴承故障率高的原因是:在微弱电流、轴承高温运转等因素持续作用下,加速润滑脂的老化,导致轴承润滑不良,严重时轴承出现白色腐蚀裂纹,最终导致轴承疲劳失效。

4.2 解决措施

根据上述原因分析,采取如下解决措施。

4.2.1 优化润滑方案

对动车组所有动车牵引电机驱动端轴承执行新的再润滑方案:列车每行驶 20 万 km,注脂 45 g;列车每行驶 80 万 km,清理废油脂腔;修订完善二级修卡片,列车每行驶 60 万 km,清理废油脂腔。

4.2.2 增加保护接地

根据高级修电机轴承检查情况及轴电压测试结果,对该型动车组两端头车的二位转向架增加保护接地,将 8 车及 9 车 1 位转向架中的 1 轴保护接地装置移至 3 轴。

4.2.3 增加绝缘层厚度

采用增加轴承绝缘层厚度方式,减小因电流通过轴承造成轴承及润滑脂的损伤,达到延长电机轴承使用寿命的目的。

参考文献

- [1] 高继德, 辉小斌. CRH₃ 型高速动车组牵引电动机轴承故障分析[J]. 中国铁路, 2013(增刊 1): 64.
GAO Jide, HUI Xiaobin. Fault analysis of traction motor bearing of CRH₃ high-speed EMU [J]. Chinese Railways, 2013 (S1): 64.
- [2] 惠新伟, 王文庆, 石永进, 等. 动车组牵引电机轴承 WEC 失效原因分析及解决方法 [EB/OL]. (2022-03-22) [2022-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1148.th.20220321.1218.002.html>.
HUI Xinwei, WANG Wenqing, SHI Yongjin, et al. Analysis and countermeasures of WEC fault of traction motor bearing of EMU [EB/OL]. (2022-03-22) [2022-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1148.th.20220321.1218.002.html>.
- [3] LAI Junbiao, 孙玉飞, 李万嘉. 滚动接触疲劳中白蚀裂纹 (WEC) 形成机理的研究及轴承过早失效根本原因的确定 [J]. 国外轴承技术, 2017(3): 1.
LAI Junbiao, SUN Yufei, LI Wanji. Research on the formation mechanism of white corrosion cracking (WEC) in rolling contact fatigue and determination of the root cause of premature failure of bearings [J]. Foreign Bearing Technology, 2017(3): 1.

(收稿日期: 2022-10-10)

(上接第 120 页)

- HE Qianying. TSSM based modeling and verification of VBTC MA unit in VOBC[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [2] 王露, 王长林. 区域控制器移动授权的统一建模语言 (UML) 建模与验证[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(7): 40.
WANG Lu, WANG Changlin. Establishment and verification of UML model based on limit movement authority of ZC system[J].

Urban Mass Transit, 2014, 17(7): 40.

- [3] 卢楠, 庞彦知, 李少鹏. 城市轨道交通区域控制器布置数量研究[J]. 铁路计算机应用, 2015, 24(4): 53.
LU Nan, PANG Yanzhi, LI Shaopeng. Research on layout number of zone control in urban transit [J]. Railway Computer Application, 2015, 24(4): 53.

(收稿日期: 2022-07-31)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821