

导轨式胶轮车辆传动轴失效原因分析与优化设计

杨 怡 谭志成 康 飞 张 鑫 刘赛武

(比亚迪机电设备有限公司, 518118, 深圳)

摘 要 [目的] 导轨式胶轮车辆传动轴的结构可靠性对列车运行安全性至关重要。该车辆在某条城市轨道交通线路上进行冰雪试验时,多次出现传动轴断裂现象而导致失效。因此需分析传动轴失效原因,并对其进行优化设计。[方法] 从传动轴失效断面宏观检测及失效件材料理化检测两方面分析了传动轴断裂的原因。采用无线扭矩测试系统对该条线路五号站—六号站、五号站—七号站区间传动轴的实时载荷进行了测试,并分析其测试结果。优化了传动轴结构设计。对优化后的传动轴台架进行了强度测试,以及对优化后的传动轴进行了疲劳试验。[结果及结论] 传动轴断裂的原因为:十字轴的过载脆性断裂和双联轴套的疲劳断裂。两个区间的测试结果显示:传动轴的最大扭矩均出现在车辆打滑状态下,其实际扭矩虽小于设计的最大工作扭矩,但由于扭矩短时间内发生变化时,其受到的冲击能量远大于正常工况下的扭矩变化值。传动轴结构的优化措施为:增大十字轴的轴径,在十字轴圆弧过渡处增大倒圆角,进一步减小应力集中;通过在双联轴套上增加加强筋,提高双联轴套轴肩部的强度。优化后的传动轴台架强度测试表明,满足设计要求;优化后的传动轴疲劳试验表明,试验合格。

关键词 导轨式胶轮车辆; 传动轴; 失效原因; 优化设计
中图分类号 U270.332
DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.012

Failure Cause Analysis and Optimization Design of the Transmission Shaft for Guideway Rubber-tyred Vehicle

YANG Yi, TAN Zhicheng, KANG Fei, ZHANG Xin, LIU Saiwu
(BYD Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd., 518118, Shenzhen, China)

Abstract [Objective] The structural reliability of the transmission shaft of guideway rubber-tyred train is crucial to the safety of train operation. During the ice and snow test on a certain urban rail transit line, the guideway rubber-tyred train failed several times resulting from the fracture of the transmission shaft. Therefore, it is necessary to analyze the fracture causes of the transmission shaft and optimize its design. [Method] The causes of the fracture of the transmission shaft are analyzed from two aspects: macroscopic detection of the

failure shaft section, physical and chemical detection of the failure material. A wireless torque test system is used to test the real-time load of the transmission shaft between stations 5-6 and stations 5-7 on the line. The test results are analyzed, and the structure of the transmission shaft is optimized. The strength test on the optimized transmission shaft bench and the fatigue test on the optimized transmission shaft are carried out respectively. [Result & Conclusion] The causes of transmission shaft fracture are identified as the overload brittle fracture of cross shaft and fatigue fracture of double coupling bushing. The test results from the above two line sections show that all the maximum torques of the shaft occur when the vehicle is slipping. Though the actual torque of transmission shaft is less than the designed maximum working torque, the impact energy on the shaft is much larger than the torque change value under normal working conditions because the torque changes within a very short time. The measures that are taken to optimize the transmission shaft structure are as follows: increasing the shaft diameter of the cross shaft, increasing the chamfer angle of the cross shaft arc transition, and further reducing the stress concentration. The strength of the shaft shoulder of the double coupling bushing is increased by adding the reinforcing rib on it. The strength test on the optimized transmission shaft bench shows that it meets the design requirements and passes its fatigue test.

Key words guideway rubber-tyred vehicle; transmission shaft; failure cause; optimization design

导轨式胶轮车辆(见图1)是一种新型的低运量轨道交通车辆,已在重庆、深圳、长沙等多个城市投入运营。车辆走行轮和导向轮均采用橡胶轮胎,轨道为双列布置的混凝土梁或钢梁,两轨道中间设置导向系统。导轨式胶轮车辆传动轴是传动系统的主要部件,主要用于将牵引电机产生的牵引力或电制动力经变速箱传递至左右车轮,以保证整车动力系统正常运行。传动轴采用双联式胡克万向节(见图2)。目前,导轨式胶轮车辆传动轴尚无成熟的受

力分析方法^[1]。

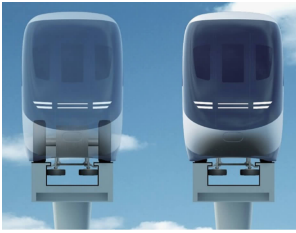


图1 导轨式胶轮车辆示意图

Fig. 1 Diagram of the guideway rubber-tyred vehicle

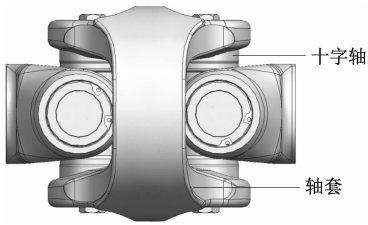


图2 双联式胡克万向节

Fig. 2 Double Hooke's universal joint

某导轨式胶轮车辆在冰雪试验时多次出现打滑和传动轴断裂的问题。本文针对该问题进行了分析,并提出了改进措施。

1 导轨式胶轮车辆传动轴失效原因分析

1.1 失效断面宏观检测

从十字轴的断口观察,裂纹扩散纹路明显,附近无明显塑性变形,纹路粗糙,呈现单向弯曲方向的冲击脆性特征,属于过载脆性断裂。

双联轴套的形貌显示:初始断裂位置位于轴套肩部内侧,断面呈现明显的贝壳纹线,疲劳扩展区比较粗糙,疲劳纹弧线较明显,属疲劳断裂。

1.2 失效件材料理化检测

1.2.1 元素分析

在失效零部件断面附近取样,分别对双联轴套及十字轴进行化学成分分析,结果显示失效零部件的各元素含量均符合 EN 10084:2008 的要求。

1.2.2 金相分析

对十字轴和轴套进行金相检测。十字轴断口处表面组织为回火针状马氏体和少量残余奥氏体,心部组织为回火板条状马氏体和贝氏体。轴套断口处组织为回火索氏体和少量贝氏体,无明显脱碳。两种部件的金相检测均符合 40Cr 的设计技术要求。

2 传动轴设计载荷与实时载荷测试

2.1 传动轴最大工作扭矩

传动轴的额定扭矩主要按动力源最大工作扭矩和路面最大附着力进行计算^[2]。按最大工作扭矩计算时,传动轴的额定扭矩 $T_{r,m}$ 为:

$$T_{r,m} = T_{m,max} i_{max} j \quad (1)$$

式中:

$T_{m,max}$ ——动力源最大扭矩;

i_{max} ——变速箱最大总速比;

j ——分动器占比。

按路面最大附着力计算时,传动轴的额定扭矩 $T_{r,a}$ 为:

$$T_{r,a} = Gr_k \Phi / i_0 \quad (2)$$

式中:

G ——满载时驱动轴上的负荷;

r_k ——车轮滚动半径;

Φ ——轮胎与路面的附着系数;

i_0 ——驱动桥总速比。

据式(1)一式(2), $T_{r,m}$ 为 2 625 Nm, $T_{r,a}$ 为 2 160 Nm。传动轴的额定扭矩取两种计算结果中较小值 $T_{r,min} = 2\ 160$ Nm。

采用式(3)计算传动轴的最大工作扭矩 T_d :

$$T_d = T_{r,min} K_d \quad (3)$$

式中:

K_d ——汽车传动系动载系数,取 2.2。

据式(3),计算得到 T_d 为 4 752 Nm。

2.2 传动轴实时载荷测试

2.2.1 测试方法

本次测试采用无线扭矩测试系统。该系统主要由应变片、发射机和接收机组成。试验前,将应变片和发射机布置在传动轴的轴套上,通过试验机对传动轴进行载荷-应变标定,多次加载后得到传动轴载荷-应变数据,将其拟合可得到对应的标定系数。将该系统运行过程中应变片的电压信号值代入标定曲线,经处理即可得到传动轴的实时载荷^[3]。

2.2.2 测试方案

本方案采取人工驾驶和 FAO(全自动运行)两种模式,测试了传动轴在不同车速下扭矩随时间的变化情况。

在 FAO 模式下,分别测试了导轨式胶轮车辆在某条城市轨道交通线路五号站—六号站、五号站—

七号站之间的多个往返工况,且列车最高运行速度为40 km/h。在人工驾驶模式下,测试方案分为20 km/h 匀速、100% 级位加速、紧急制动3种工况,且3种工况均为列车运行过程中具有代表性的工况。为保证打滑效果,选择在雪天且轨道梁结冰的情况下进行试验。

3 测试结果与分析

3.1 六号站—七号站测试结果

传动轴实时载荷测试在六号站—七号站区间进行,共采集10组测试数据,其中FAO和人工驾驶两种模式下各5组。图3为人工驾驶模式下传动轴的扭矩-时间、速度-时间关系曲线。由图3可见:车辆匀速行驶时传动轴扭矩较小且波动不大,车辆加速和减速时扭矩呈增大或减小的趋势,这符合传动轴的实际受力情况;采用100%满级位从10 km/h加速到35 km/h时,传动轴的扭矩由0增加到1 588 Nm;在140 s时对车辆施加制动,传动轴扭矩在很短时间(1 s)内迅速降低到-1 298 Nm,小于最大工作扭矩。

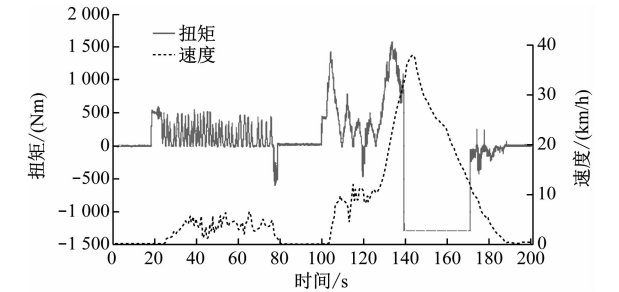


图3 人工驾驶模式下传动轴扭矩、速度随时间变化曲线(六号站—七号站)

Fig. 3 Time history of torque-speed of transmission shaft under manual driving mode (Station 6-Station 7)

3.2 五号站—七号站测试结果

本次测试项目增加了测试距离,在五号站—七号站区间进行,共测得4组数据。图4为车辆打滑状态下传动轴扭矩、速度随时间变化曲线。由图4可见:测试车辆出发80 s后出现打滑,并驶入防滑涂层,此时车辆产生撞击抖动,传动轴扭矩达到最大值,此后车辆发生间歇性抖动。

统计传动轴在不同模式下的最大扭矩、最小扭矩,以及扭矩变化幅值(最大扭矩与最小扭矩之差的1/2),如表1所示。

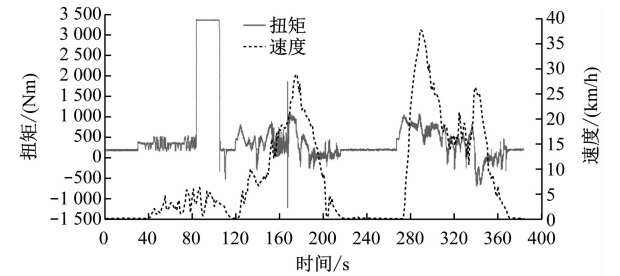


图4 车辆打滑状态下传动轴扭矩、速度随时间变化曲线(五号站—七号站)

Fig. 4 Time history of torque-speed of transmission shaft under the condition of vehicle slipping (Station 5-Station 7)

表1 传动轴扭矩统计表				
Tab. 1 Transmission shaft torque statistics				
列车控制模式	行车方向	最大扭矩/(Nm)	最小扭矩/(Nm)	扭矩变化幅值/(Nm)
人工驾驶	六号站—七号站	817.1	-561.0	689.05
		785.1	-524.8	654.95
		2 515.0	-650.9	1 582.95
		3 276.0	-1 288.0	2 282.00
	五号站—七号站	1 588.0	-1 298.0	1 443.00
		2 384.0	-2 263.0	2 323.50
FAO	七号站—六号站	1 469.0	-1 837.0	1 653.00
		3 628.0	-502.4	2 065.20
		3 024.0	-626.0	1 825.00
		2 639.0	-576.8	1 607.90
	七号站—五号站	2 067.0	-682.4	1 374.70
		1 666.0	-574.6	1 120.30

由表1可见:车辆正常行驶时传动轴扭矩变化平缓,且均在设计范围之内;当车辆出现打滑时,传动轴扭矩在短时内出现波动,尤其是在车辆从正常行驶过渡到打滑故障的瞬间,扭矩波动最大。

实际测试过程中发现,车辆会出现较明显的抖动,此时传动轴扭矩在5 s内变化明显。提取传动轴测试数据中5 s内扭矩最大变化值,见表2。由表2可见:传动轴扭矩在5 s内从3 628 Nm迅速降低到-400 Nm,扭矩最大变化幅值达到4 028 Nm。图5为FAO模式下七号站—六号站传动轴5 s内扭矩变化值-时间关系曲线。由图5可见:在初始时刻,传动轴扭矩在-502~1 500 Nm范围内波动;在188~193 s范围内,传动轴扭矩由250 Nm增加到

表 2 传动轴 5 s 内的扭矩变化值

Tab.2 Torque variation of the transmission shaft within 5 seconds

列车控制模式	行车方向	最大扭矩/(Nm)	最小扭矩/(Nm)	扭矩变化值/(Nm)
人工驾驶	六号站—七号站	670.0	-500.0	1 170.0
		785.1	0	785.1
		2 515.0	0	2 515.0
		2 400.0	-1 288.0	3 688.0
	五号站—七号站	1 588.0	-1 298.0	2 886.0
		1 300.0	-2 263.0	3 563.0
FAO	七号站—六号站	1 469.0	-1 800.0	3 269.0
		3 628.0	-400.0	4 028.0
		3 024.0	-626.0	3 650.0
		2 639.0	-576.8	3 215.8
	七号站—五号站	2 067.0	0	2 067.0
		1 666.0	-380.0	2 046.0

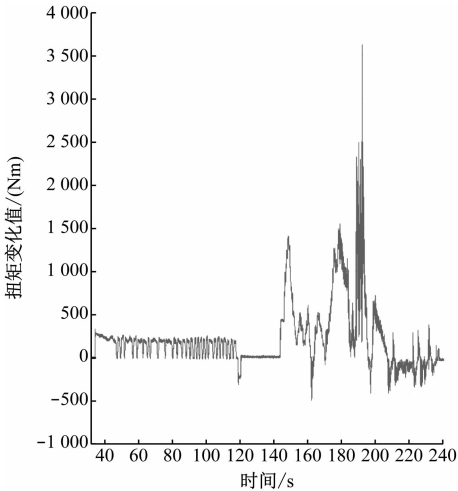


图 5 FAO 模式下七号站—六号站传动轴 5 s 内扭矩变化值-时间关系曲线

Fig.5 Time history-torque variation of the transmission shaft (Station 7-Station 6) within 5 seconds under FAO mode

3 628 Nm,其中大部分时间扭矩在 2 300 Nm 附近;传动轴扭矩达到最大值后,又迅速在 5 s 内降低到 -400 Nm,说明扭矩增加后,车辆施加了电制动,此时传动轴受到了电制动时的反向扭矩。此处数据说明车辆出现了打滑,传动轴扭矩最大变化值为 4 028 Nm,最大变化幅值为 2 014 Nm,虽小于正常工况下的数值,但由于扭矩是在较短时间内发生变

化,其所受到的冲击能量远大于正常工况下的扭矩变化幅值。

4 传动轴优化与测试

4.1 传动轴试验方法优化

该车采用钢梁和水泥梁作为行驶轨道,遇到冰雪天气时,若不采取防滑措施容易出现打滑,导致传动轴受力增大。针对打滑问题,主要对轨道表面进行优化,设置防滑涂层。同时优化车辆的牵引和制动控制程序,增加防滑设计。原方案下传动轴强度试验中的额定扭矩根据路面摩擦系数确定,若车辆出现打滑冲击,路面实际摩擦系数应大于所取值。因此,新方案根据动力输出对传动轴的额定扭矩进行计算。考虑到轨道车辆的特殊性,将安全系数由 2.2 调整到 2.5,将强度试验载荷调整为 5 400 Nm。

疲劳试验采用 QT/C 29082—2019《汽车传动轴总成技术条件及台架试验方法》中非对称循环加载的方案,其载荷根据路面摩擦系数计算。第一阶段模拟正常运行工况,最大扭矩为 2 160 Nm,最小扭矩为 648 Nm,扭矩变化幅值为 756 Nm,疲劳试验要求 200 万次不发生损坏。第二阶段模拟故障载荷工况,最大扭矩在正常工况的基础上增加安全系数 1.6,其值为 3 456 Nm;考虑到打滑时传动轴可能出现反转,最小扭矩取负值,其值为 -1 037 Nm,扭矩变化幅值为 2 247 Nm,疲劳试验要求 40 万次不发生损坏。

4.2 传动轴结构优化

为实现传动轴更好的抗冲击能力,减小疲劳裂纹的产生,必须减小结构局部应力^[4-5]。

1) 增大十字轴的轴径,在十字轴圆弧过渡处增大倒圆角,进一步减小应力集中。对优化后的十字轴强度进行仿真分析。图 6 为十字轴应力云图。由图 6 可见:优化后十字轴最大应力为 405.7 MPa,较优化前提升了 70%。

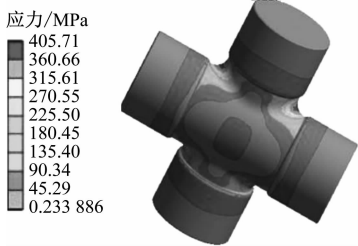


图 6 优化后的十字轴应力云图

Fig.6 Stress cloud diagram of optimized cross shaft

2) 通过在双联轴套上增加加强筋,以提高双联轴套轴肩部的强度。对双联轴套进行疲劳寿命仿真分析。优化后的双联轴套应力云图见图7。由图7可见:双联轴套的最大应力为275.2 MPa,满足设计要求。

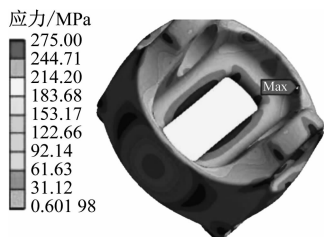


图7 优化后的双联轴套应力云图

Fig. 7 Stress cloud diagram of optimized double coupling bushing

4.3 台架测试

按照第4.1节中的方法,对优化后的传动轴台架进行了强度测试,满足设计要求。对优化后的传动轴进行疲劳试验,在完成两阶段测试后台架未出现损坏,表明试验合格。

5 结语

通过上述分析,确定了传动轴失效的主要原因因为疲劳断裂。运用无线扭矩测试方法研究了传动轴在不同工况下的载荷动态特性。试验结果表明,在车辆发生打滑时,传动轴受到较大冲击,影响了传动轴寿命。

通过传动轴受力分析,对其设计载荷参数进行了修正,并对设计工况进行了完善。对传动轴结构进行了优化,对存在应力集中的部位进行了加强,提升了传动轴的强度和耐久寿命。针对车辆打滑问题,对轨道梁结构进行了优化,同时对车辆增加

了防滑设计。

参考文献

- [1] 徐衡. 汽车传动轴断裂分析及其改进[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(2): 98.
XU Heng. Fracture analysis and improvement of automobile transmission shaft [J]. Machine Design & Research, 2017, 33(2): 98.
- [2] 孟林昆, 李鹏. 载货汽车传动轴最大工作扭矩计算方法[J]. 汽车实用技术, 2016(4): 26.
MENG Linkun, LI Peng. Truck drive shaft maximum torque calculation method [J]. Automobile Applied Technology, 2016(4): 26.
- [3] 范童柏, 任尊松, 王文静, 等. 动车组制动盘螺栓载荷测试及疲劳损伤研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(14): 80.
FAN Tongbai, REN Zunsong, WANG Wenjing, et al. Study on bolt load test and fatigue damage of brake discs of EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14): 80.
- [4] 杨震立, 蓝盈照. 大型货车传动轴总成的强度分析及改进[J]. 机械设计与制造, 2013(4): 56.
YANG Zhenli, LAN Yingzhao. Strength analysis and improvement of large trucks drive shaft assembly [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(4): 56.
- [5] 张冰战, 牛占占, 邵丽君. 实测载荷谱下传动轴疲劳寿命研究[J]. 机械设计与制造, 2020(10): 119.
ZHANG Bingzhan, NIU Zhanzhan, TAI Lijun. Fatigue life research of transmission shaft based on testing load [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(10): 119.

· 收稿日期:2023-05-22 修回日期:2023-06-28 出版日期:2024-03-10
Received:2023-05-22 Revised:2023-06-28 Published:2024-03-10
· 通信作者:杨怡,工程师,894628748@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第64页)

- [7] YOO C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3): 225.
- [8] LEUNG E H Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(2): 129.
- [9] 丁勇春, 王建华. 深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 155.

DING Yongchun, WANG Jianhua. Influence of deep excavation on deformation of elevated bridge foundations and countermeasures [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 155.

· 收稿日期:2021-09-15 修回日期:2021-10-26 出版日期:2024-03-10
Received:2021-09-15 Revised:2021-10-26 Published:2024-03-10
· 通信作者:刘涛,工程师,lc0230@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license