

基于线路跟踪试验的地铁车辆转向架服役性能研究^{*}杨利强¹ 杨 陈² 李龙涛²

(1. 徐州地铁集团有限公司, 220009, 徐州; 2. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210032, 南京)

摘 要 [目的]随着城市轨道交通的发展,地铁线路不断扩增,地铁车辆转向架的服役环境日益复杂,这对转向架的运行安全性和可靠性提出了新的要求,因此有必要研究地铁车辆转向架在复杂环境下的实际服役性能。[方法]选取深圳某条地铁线路的车辆转向架为研究对象,对其进行长期服役性能研究。通过全方位的线路跟踪试验,针对各种工况下的试验线路和试验条件,在一个镗轮周期内进行了多次测试。系统地收集了地铁车辆转向架在实际运行条件下的车轮状态、动力学性能、结构强度和振动特性,获得了车轮径跳分布、车轮不圆特征、等效锥度、滚动圆磨耗量等的演变趋势。通过布置测点,获取了转向架的振动加速度测试数据,并结合其车轮状态数据综合分析了转向架动力学性能的演变规律。通过在构架上布置8个关键动应力测点,分别对空载和高峰时期载客运行这2类工况下的关键位置动应力变化展开了观测。[结果及结论]因车轮径跳对车轮影响最大,须加强对车轮径跳的定期监测。电机吊座对接焊缝部位属于较危险位置,须对其定期监测维护。

关键词 地铁车辆; 转向架; 线路跟踪试验; 服役性能

中图分类号 U279.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.20241560

In-service Performance of Metro Vehicle Bogies Based on Line-tracking Tests

YANG Liqiang¹, YANG Chen², LI Longtao²

(1. Xuzhou Metro Group Co., Ltd., 220009, Xuzhou, China; 2. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210032, Nanjing, China)

Abstract [Objective] With the continuous development of urban rail transit and the ongoing expansion of metro lines, the service environment for metro vehicle bogies is becoming increasingly complex. This poses new challenges to the operational safety and reliability of bogies. Therefore, it is necessary to study the actual in-service performance of metro vehicle bogies under complex conditions. [Method] The vehicle bogies of a Shenzhen Metro line are selected as the research object and their long-term in-service performance study is carried out. Comprehensive line-tracking tests are conducted targeting test

lines and test scenarios under various working conditions, with multiple rounds of testing performed within a single wheel re-profiling cycle. Data are systematically collected on wheel conditions, dynamics performance, structural strength, and vibration characteristics of metro vehicle bogies under real operation conditions. Trends for wheel radial runout distribution, wheel out-of-roundness characteristics, equivalent conicity, and rolling circle wear are obtained. Vibration acceleration test data of bogies are acquired by placing test points, and the dynamics performance evolution law of bogies is comprehensively analyzed in conjunction with the wheel condition data. Additionally, eight key dynamic stress measurement points are arranged on the bogie frame to observe changes in critical stress locations under the unloaded and the peak passenger load two operating conditions. [Result & Conclusion] Since wheel radial runout has the greatest impact on wheels, periodic monitoring of wheel radial runout should be strengthened. The weld joint at the motor suspension bracket is identified as a high-risk location, requiring regular monitoring and maintenance.

Key words metro vehicle; bogie; line tracking test; service performance

近年来,我国的城市轨道交通发展规模大,发展速度快,地铁承担了重要的运输任务。地铁车辆转向架构架作为地铁列车组成中的关键核心部件,对地铁的安全运行等起着至关重要的作用^[1]。随着地铁服役环境的变化,车辆服役性能始终处于时变状态,这对地铁运行的安全性带来了全新的挑战^[2]。此外,车辆服役时间、运行工况、车辆性能监测技术平台的差异也给地铁车辆转向架性能预测带来了困难。

文献[3]提出了用以检测高速列车服役性能的检测体系。文献[4]提出了基于机器学习的高速列车动车组转向架服役性能研究方法。文献[5]调研统计了铁路货车转向架的服役数据,并根据实际情况提出了维护建议。文献[6-7]对高速列车动车组

^{*} 国家自然科学基金项目(52102441)

进行了服役性能跟踪,对动力学性能数据、重点故障部位运用状态及轮对磨耗状态进行了分析和处理。文献[8]结合现有数据和实车调研结果,对车体静强度、刚度、冲击及剩余疲劳寿命等进行了仿真分析,得出仿真与台架试验是综合判断车辆服役性能必要手段的结论。文献[9-17]对不同条件下的列车进行了动力学研究,得出各种平稳性指标并分析了影响车辆振动性能的具体原因。文献[18-20]侧重于车轮磨耗研究,研究了车轮多边形对地铁车辆转向架的强度影响和动力学影响,表明地铁车辆车轮的多边形磨耗会使车辆产生振动,会严重影响列车运行的平稳性和舒适性,也会对构架使用寿命产生一定影响。文献[21]提出在铁轨旁设置基于光热成像技术和声学诊断的综合监测设备,以实现车辆关键部件运行状态实时监测和故障诊断,为未来监测方法的实施提供了方向。根据上述文献调研可知,大多数学者目前并没有系统全面地研究地铁车辆转向架在服役环境下的车轮磨耗分析、动力学分析和应力演变规律,难以很好地指导地铁车辆转向架的设计和运维。

为了严格保障城市轨道交通车辆的运行安全,应对复杂服役环境下的车辆服役性能进行研究,并提前掌握针对地铁车辆转向架性能退化的应对措施。本文以深圳某地铁线路车辆转向架为研究对象,进行了线路跟踪试验,分析了与地铁车辆转向架相关的服役性能。

1 线路跟踪试验方案

选取深圳某地铁线路车辆转向架为研究对象,对其进行长期服役性能研究。该线路列车示意图如图1所示。该线包括弯道、坡道、道岔等工况,试验条件包含了该车型的全部运行工况,测试列车在试验条件下运行获取的数据可以满足分析问题的需求,测试结果具有代表性。该列车设计速度为100 km/h,为6节编组A型地铁列车。为掌握转向架的长期服役性能,在1个镟轮周期内多次进行测试。

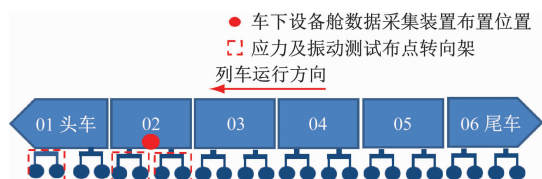


图1 深圳某地铁线路列车示意图

Fig. 1 Diagram of a Shenzhen Metro line train

地铁车辆转向架的服役性能主要包括车轮状态、动力学性能、结构强度和振动特性4个方面。影响这些性能的主要因素包括轨道不平顺、车轮径跳、等效锥度导致的轮轨激励。对此,地铁车辆转向架服役性能测试首先应测试车轮的状态(如径跳、磨耗及等效锥度等),将测试结果作为基础数据,再利用这些数据进行下一步的动应力试验和振动测试。

测试具体包括以下4个步骤:

步骤1 进行车轮圆周、车轮型面磨耗跟踪测试,分析车轮的型面磨耗、圆周磨耗发展规律,以及踏面修型装置对车轮径跳、等效锥度的影响。

步骤2 测试轴箱、构架端部、电机吊座、电机、车体的振动加速度,掌握在实际线路中装车状态下转向架的振动特性。

步骤3 测试构架关键部位的动应力水平,根据 Miner 累积损伤理论和每个测点对应的焊接接头类型,分析对应测点的累积损伤,计算等效应力幅,评估转向架构架的疲劳寿命。

步骤4 整合数据,综合评估该地铁车辆的服役性能,为后续进行设计、维护等提供数据支撑。

2 车轮状态分析

在地铁列车运行过程中,车轮磨耗是常见的问题,主要是由于轮轨激励所致。车轮磨耗会导致车轮等效锥度、车轮圆周等发生变化,进而影响车辆各种服役性能甚至威胁列车运行安全。为研究深圳某地铁线路车辆的车轮圆周、型面磨耗演变规律,以及踏面修型装置对车轮径跳磨耗的影响,对车轮进行了跟踪测试,建立了车轮磨耗随里程的演变规律。

2.1 车轮径跳分布

测试列车的第1节、第2节、第3节车厢不带踏面清扫装置,第4节、第5节、第6节车厢带踏面清扫装置。对该车车轮径跳进行测试,不带踏面清扫装置车辆的车轮径跳演变规律如图2所示,带踏面清扫装置车辆的车轮径跳演变规律如图3所示。图2d)和图3d)中,虚线表示车轮径跳均值变化规律。由图2、图3可知:根据该列车第4节、第5节、第6节车厢(带踏面清扫装置)径跳演变规律,踏面清扫装置的使用可以降低车轮径跳的增长速度,在列车运行至23.51万车km时,最大的车轮径跳为0.33 mm,远低于该列车第1节、第2节、第3节车厢(不带踏面清扫装置)的车轮径跳。

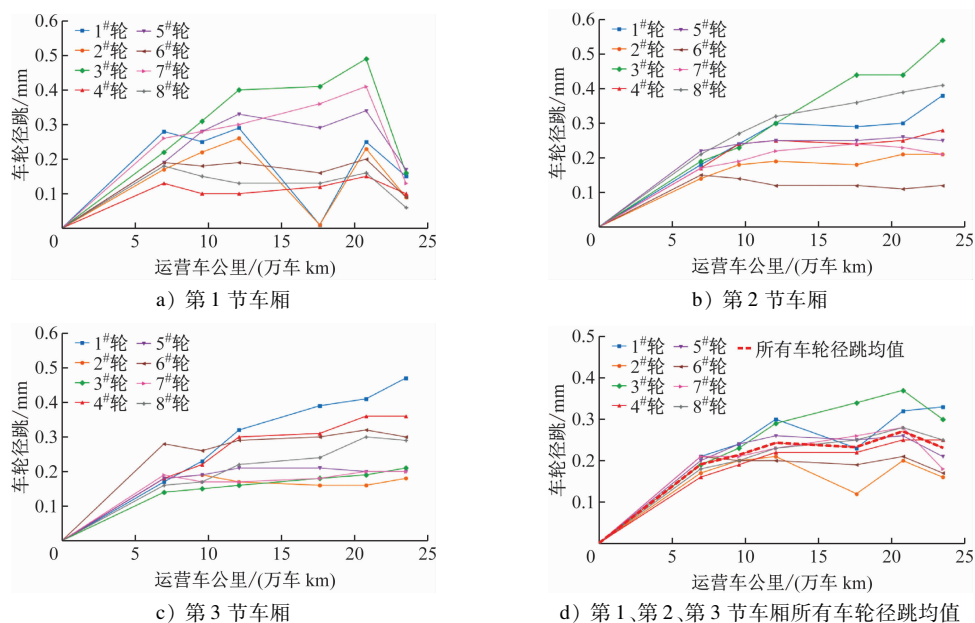


图2 不带踏面清扫装置车辆的车轮径跳演变规律

Fig. 2 Evolution law of wheel radial runout of cleaning vehicles without tread cleaning

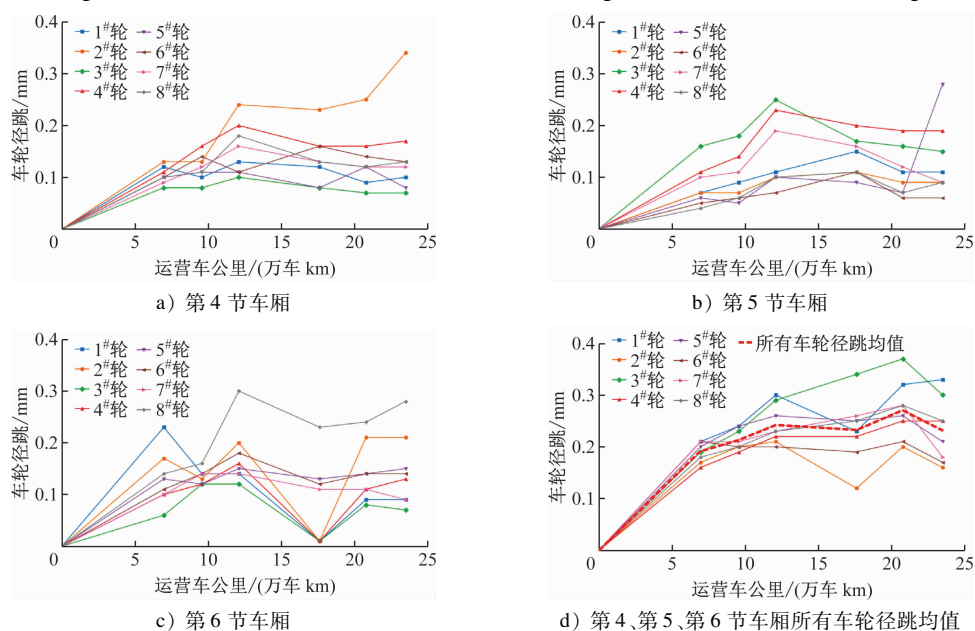


图3 带踏面清扫装置车辆的车轮径跳演变规律

Fig. 3 Evolution law of wheel radial runout of cleaning vehicles with tread cleaning

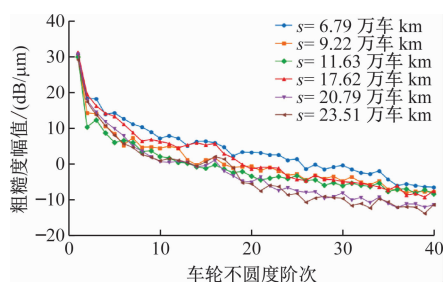
2.2 车轮不圆特征

设列车运营车公里为 s , 车轮的粗糙度分布形状基本相同(即不圆特征基本不变)。选取了6个运营车公里值, 车轮粗糙度幅值演变规律如图4所示。由图4可知: 车轮粗糙度幅值随着 s 的增加而增加, 车轮不圆特征也随之越来越明显; 随着 s 的增加, 车辆车轮总体并未产生明显的高阶多边形。

2.3 车轮等效锥度、滚动圆磨耗量

将实测车轮型面与标准轨进行轮轨接触分析,

根据国际铁路联盟 UIC 519:2004《等效锥度的测定方法》标准的规定, 利用轮对横移量 $y = \pm 3 \text{ mm}$ 作为区间计算等效锥度, 在6个不同运营车公里取值下对各车轮的3 mm 等效锥度变化规律进行分析, 得到各车轮的3 mm 等效锥度变化规律, 如图5所示。由图5可知: 运营车公里为9.58万车 km 时, 车轮3 mm 等效锥度达到最大值; 运营车公里为23.51万车 km 时, 车轮3 mm 等效锥度达到最小值; 3 mm 等效锥度数值均不大, 均值在0.5以内。



注:纵轴正值代表磨损量较大;纵轴负值代表磨损量很小,不圆特征不明显。

图4 车轮粗糙度幅值演变规律

Fig. 4 Evolution law of wheel roughness amplitude

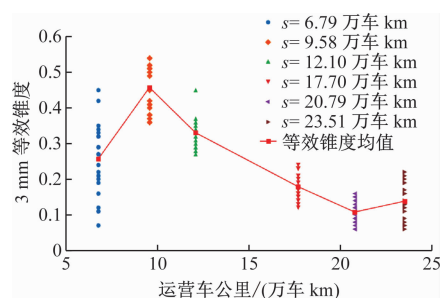
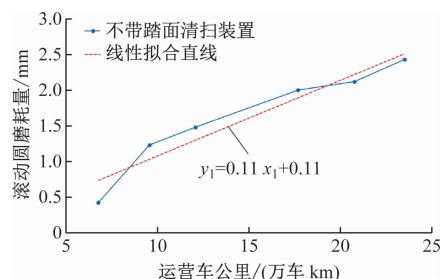


图5 不同运营车公里取值下车轮3 mm等效锥度变化规律
Fig. 5 Variation law of 3 mm equivalent conical taper for wheels under different values of train operating mileage

进一步以测试列车为例测试踏面清扫装置对磨损量的影响。不带踏面清扫装置时车轮的滚动圆磨耗量变化趋势如图6所示,带踏面清扫装置时车轮的滚动圆磨耗量变化趋势如图7所示。由图6、图7可知:踏面清扫装置一定程度上加剧了滚动圆磨耗;通过拟合曲线可以看出, $y_2 = 0.14 \text{ mm/万车 km}$,略大于 $y_1 (0.11 \text{ mm/万车 km})$ 。



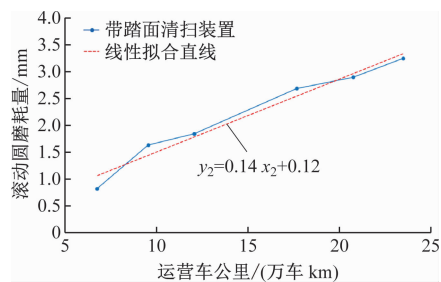
注: x_1 —不带踏面清扫装置测试列车的运营车公里; y_1 —不带踏面清扫装置测试列车车轮的滚动圆磨耗量。

图6 不带踏面清扫装置时车轮的滚动圆磨耗量变化趋势

Fig. 6 Variation trend of rolling cylindrical wear amount on wheels without tread cleaning

3 构架动力学性能分析

为了测试转向架的振动特征,在轴箱、构架端



注: x_2 —带踏面清扫装置测试列车的运营车公里; y_2 —带踏面清扫装置测试列车车轮的滚动圆磨耗量。

图7 带踏面清扫装置时车轮的滚动圆磨耗量变化趋势

Fig. 7 Variation trend of rolling cylindrical wear amount on wheels with tread cleaning

部、齿轮箱、电机等关键部位布置加速度传感器(拖车无电机测点),获取运行过程中的振动加速度测试数据,并结合其车轮状态数据综合分析转向架的动力学性能演变规律。转向架构架加速度测点布置如图8所示。在车辆服役跟踪过程中,为捕捉真实振动环境,分别针对空载和高峰时期载客运行2类工况开展转向架的动力学性能分析。

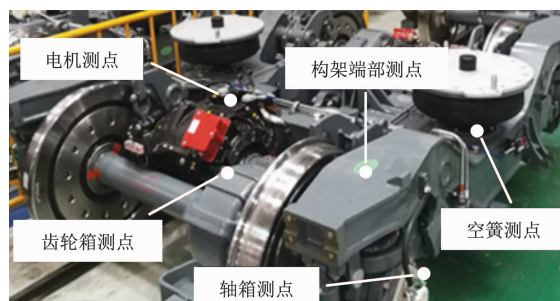


图8 转向架构架加速度测点布置图

Fig. 8 Layout diagram of bogie frame acceleration measuring points

3.1 振动传递演变规律

选择3个不同时间段对拖车和动车进行测试,每次测试均包含空载和高峰时期载客运行2类工况。以轴箱和构架端部测点为例,轴箱测点全程RMS(均方根值)如图9所示,构架端部测点全程RMS如图10所示。由图9、图10可知:3次测试中,相同类型测点的RMS基本一致,且总体呈小幅增加趋势。

将以上数据进行加速度谱密度分析,以各测点垂向为例,分析各测点的PSD(加速度谱密度)。根据IEC 61373:2010《铁路应用-机车车辆设备-冲击与振动试验》规定的PSD限值进行对比分析,以PSD幅值为纵坐标、频率为横坐标建立对数坐标

系,轴箱垂向测点 PSD 平均值如图 11 所示,构架端部垂向测点 PSD 平均值如图 12 所示。由图 11、图

12 可知:3 次测试中,相同类型测点的频率-PSD 幅值基本一致。

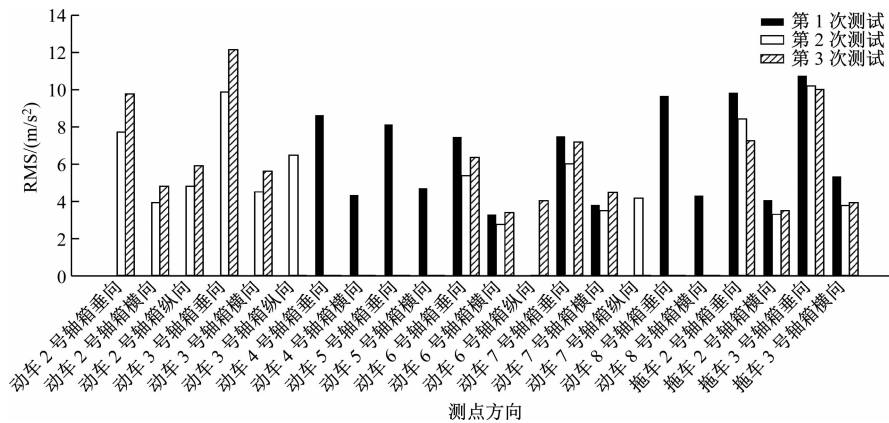


图 9 轴箱测点全程 RMS

Fig. 9 RMS value of axle box measuring points through whole process

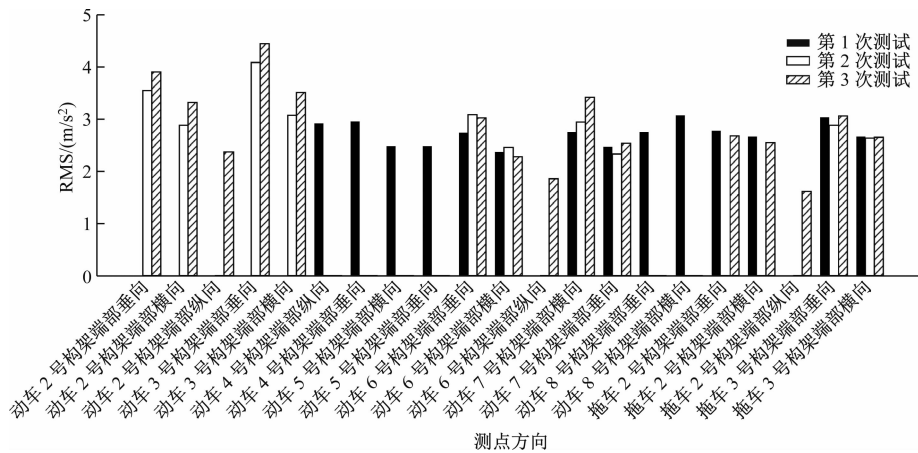


图 10 构架端部测点全程 RMS

Fig. 10 RMS value of frame-end measuring points through whole process

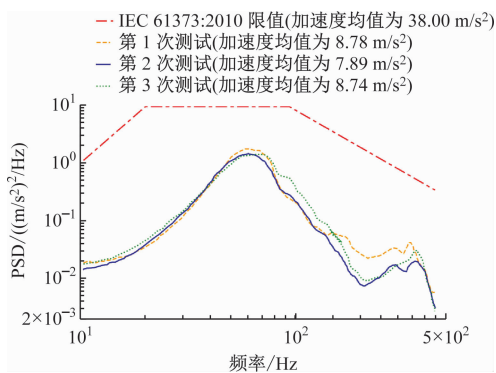


图 11 轴箱垂向测点 PSD 平均值

Fig. 11 Average PSD value of axle box vertical measuring points

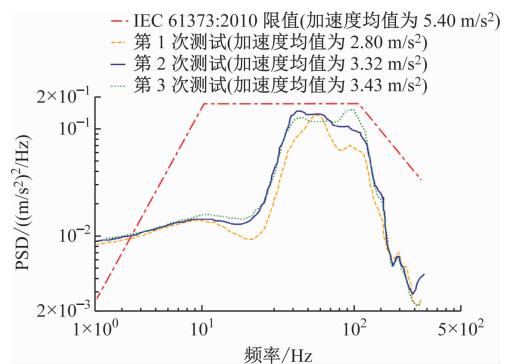


图 12 构架端部垂向测点 PSD 平均值

Fig. 12 Average PSD value of frame-end vertical measuring points

3.2 车辆平稳性评估

地铁车辆平稳性受振动加速度影响较多,良好

的平稳性可以提供舒适的乘车环境,同时也可保障列车运行安全。

3.2.1 车体平稳性评估

选取空簧座附近的振动加速度数据,对车体进行平稳性综合分析,根据平稳性系数大小来反映车体总体振动规律。平稳性系数依据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》进行计算。当平稳性系数小于 2.50 时,表明车体平稳性能为“优秀”,大于 3.00 时表明车体平稳性能为“不合格”。动车车体平稳性系数计算结果如表 1 所示。3 次测试中,动车车体的横向平稳性与垂向平稳性系数均低于优秀限值(2.50),且没有明显增加趋势。

表 1 动车车体平稳性系数计算结果

Tab. 1 Calculation results of EMU carbody stationarity coefficient

方向	测试编号	最大平稳性系数	平均平稳性系数	评估结果
横向	第 1 次测试	2.28	1.28	优秀
	第 2 次测试	2.25	1.28	优秀
	第 3 次测试	2.26	1.31	优秀
垂向	第 1 次测试	1.27	1.30	优秀
	第 2 次测试	2.28	1.30	优秀
	第 3 次测试	2.29	1.32	优秀

3.2.2 构架横向稳定性评估

动车构架横向稳定性评估结果如表 2 所示。通过对构架端部横向振动加速度(0.5 ~ 10.0 Hz 滤波)进行分析,根据横向加速度最大值来反映车体总体振动规律。根据 GB/T 5599—2019,加速度峰值达到或超过 0.8g(g 为重力加速度)时,则判定转向架横向失稳。对 3 次的测试的构架横向振动加速度最大值数据进行汇总,得出规律如下:动车构架横向稳定性均在限值 0.800 g 范围内,稳定性能较好,这与图 5 得到的等效锥度普遍偏低的结论有较好的映射关系。

表 2 动车构架横向稳定性评估结果

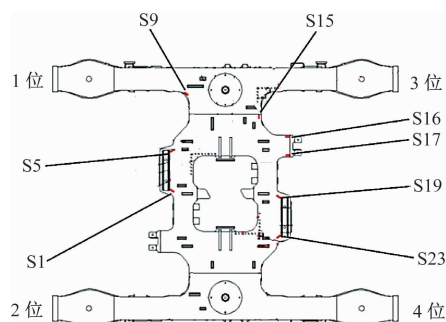
Tab. 2 Evaluation results of EMU frame lateral stability assessment

测试编号	最大加速度/ g	评估结果
第 1 次测试	0.42	合格
第 2 次测试	0.46	合格
第 3 次测试	0.41	合格

4 构架动应力数据分析

在构架上选取关键位置,布置了 8 个动应力测

点,动应力测点分布如图 13 所示。在车辆服役跟踪过程中,为捕捉真实应力环境,分别对空载和高峰时期载客运行 2 类工况进行试验。



注:S1、S5、S19、S23—电机吊座对接焊缝测点;S9—纵梁圆过渡处母材测点;S15—横纵梁对接焊缝测点;S16、S17—齿轮箱吊座对接焊缝测点。

图 13 动应力测点分布图

Fig. 13 Distribution diagram of dynamic stress measuring points

4.1 等效应力幅值计算

等效应力幅是指按等损伤原则和 Miner 累积损伤理论将应力幅值谱等效为恒幅应力(焊缝 200 万次,母材 1 000 万次)。选取 16 级雨流计数法,试验时的损伤值 D_{sy} 为:

$$D_{sy} = \sum_{i=1}^{16} \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^{16} \frac{n_i \sigma_{1a,i}^m}{C_1} \quad (1)$$

式中:

n_i ——第 i 级应力幅值的循环次数;

N_i ——加载第 i 级幅值下材料疲劳失效的循环次数;

$\sigma_{1a,i}$ ——第 i 级名义应力;

m ——应力-寿命曲线的斜率,评估焊缝时, m 取 3.5;评估母材时, m 取 5.0;

C_1 ——应力-寿命曲线的材料参数。 C_1 为常数,与材料特性、加载方式等有关,需要根据具体材料来确定。

该构架设计使用寿命为 450 万车 km,故计算地铁车辆构架安全运行 450 万车 km 时对应的等效应力幅 σ_{aeq} 。设 σ_{aeq} 作用 N 次产生的损伤值为 D_{ss} ,可得:

$$D_{ss} = \frac{N_{gd} \sigma_{aeq}^m}{C_1} \quad (2)$$

式中:

N_{gd} ——应力-寿命曲线拐点对应的循环次数;一般情况下,焊缝取 200 万次,母材取 1 000 万次。

已知实测应力谱的运营车公里为 s_1 , 1 个应力谱产生的损伤为 D_{sy} ; 设产生 D_{ss} 的安全运营车公里为 s_2 ($s_2 = 450$ 万车 km), 则:

$$\frac{D_{ss}}{s_2} = \frac{D_{sy}}{s_1} \quad (3)$$

将式(1)、式(2)带入式(3), 可得式(4):

$$\sigma_{\text{aeq}} = \left[\frac{s_2}{s_1 N_{\text{gd}}} \sum n_i \sigma_{1a,i}^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

若测点的 σ_{aeq} 小于相应的疲劳许用应力, 则表示在该状态下构架能够运行 450 万车 km。不同测点的疲劳许用应力如表 3 所示。

表 3 不同测点的疲劳许用应力

Tab. 3 Allowable fatigue stress at different measuring points

测点类型	疲劳许用应力/MPa
母材	135
焊趾(未打磨)	70
焊趾(打磨)	110

3 次测试所得的各应变测点等效应力幅值对比如图 14 所示, 可看出: 等效应力幅最大值集中在电机吊座对接焊缝(S19)处; 3 次测试的等效应力幅逐渐增加, 但均小于许用应力幅值(见表 3)。

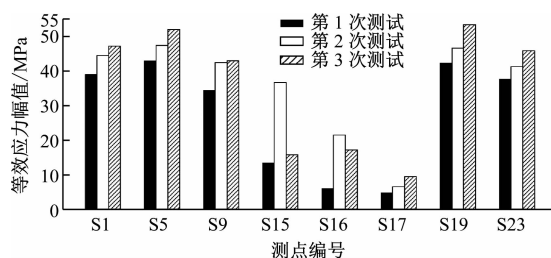


图 14 各应变测点等效应力幅值对比

Fig. 14 Comparison of equivalent stress amplitude at each strain measuring point

4.2 动应力较大测点主频分析

等效应力幅较大的测点为 S1、S5、S19、S23, 且都在电机吊座附近。分析 S1 测点的数据, 发现动应力无明显特定主频, 说明构架在大部分区间没有共振的情况发生。

根据动应力分析发现, 局部路段应力较大, 取应力较大的区间数据进行分析。发现电机吊座处的应力测点 S1 在某些区间存在比较明显的 55 ~ 60 Hz 主频, 结合列车运行速度, 可发现该区间主要是高速运行区间。

该区段的列车运行速度 $v = 92$ km/h, 而该车辆车轮存在 6 阶不圆, $v = 92$ km/h 下的车轮不圆粗糙

度如图 15 所示。将 v 进行单位换算, 92 km/h 即为 25.56 m/s, 该测试车辆车轮直径为 0.84 m, 进一步计算可得到对应 6 阶不圆的频率为 58.11 Hz。由此可知: 车轮 6 阶不圆对应的频率与 $v = 92$ km/h 下的车轮主频 55 ~ 60 Hz 相对应, 因此造成局部应力增大的主要原因为车轮 6 阶不圆产生的激励。

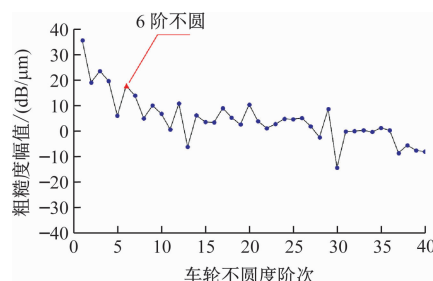


图 15 $v = 92$ km/h 下的车轮不圆粗糙度

Fig. 15 Wheel off-round roughness when $v = 92$ km/h

5 结语

本文对深圳某地铁线路车辆转向架进行了线路跟踪试验, 获取了地铁车辆转向架在运行条件下的服役性能数据, 经分析得到以下结论:

1) 随着 s 的增加, 车轮径跳总体缓慢增长, 清扫装置能显著减缓径跳发展; 轮对粗糙度随 s 增大而增大, 但未见明显高阶多边形特征。

2) 轴箱与构架振动均方根值随 s 轻微上升, 车体平稳性保持优良, 构架横向稳定性与车轮等效锥度具有较好对应关系。

3) 列车运行过程中, 转向架应力主频能量较低, 测点等效应力幅值均小于疲劳限值, 且整体变化不大; 电机吊座和下盖板焊缝处等效应力幅最大, 且随径跳增加略有上升; 局部 55 ~ 60 Hz 主频为列车运行速度相关频率, 且此情况仅出现在高速区间, 非构架模态激发。

针对上文的研究及结论, 得出以下维护建议:

1) 车轮径跳维护管理。从车轮状态分析可知, 车轮径跳对车轮影响最大, 须加强车轮径跳的定期监测, 特别是在中后期里程段, 需要针对径跳增长趋势进行跟踪分析。按需选择安装踏面清扫装置, 能显著改善车轮径跳变化, 但会稍微增大滚动圆磨耗量。

2) 构架振动与车体平稳性。构架整体振动 RMS 和车体平稳性无明显变化, 但仍须定期监测构架振动, 降低振动累积影响。

3) 应力监测与优化。构架总体动应力水平较大测点出现在电机吊座对接焊缝部位, 总体应力水

平随 s 增加而增加。该部位属于较危险位置,需要定期监测维护。

展望未来,应关注以下内容:

1) 尽管踏面清扫装置可有效减缓车轮径跳的增长,但其作用机制和长期效果仍需系统评估,后续可考虑结合多列车、多工况的数据进一步分析径跳演化规律与干预效果。

2) 构架应力测点数量应再充足一些,不仅需要关注应力较大测点,也应考虑其余中等风险的测点。

3) 建议建立覆盖车轮、构架、振动和应力的长期运行数据库,构建多指标综合评估体系,实现对转向架及车体结构的全生命周期健康管理,提升地铁车辆的运维效率与安全保障能力。

参考文献

- [1] 宿欢欢. 地铁车轮服役性能改善及微观组织调控研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2022.
SU Huanhuan. Research on study on service performance improvement and microstructure regulation of metro wheels [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2022.
- [2] 梅康. 城轨列车转向架构架服役性能特征及评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
MEI Kang. Research on service performance characteristics and evaluation methods of bogie frames for urban rail vehicles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [3] 林建辉, 易彩, 张卫华, 等. 高速列车服役性能研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 83.
LIN Jianhui, YI Cai, ZHANG Weihua, et al. Study on high-speed train service performance [J]. Engineering Sciences, 2015, 17(4): 83.
- [4] 吴炳福. 基于机器学习的高铁转向架服役性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
WU Bingfu. Study on service performance of high speed railway bogies based on machine learning [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [5] 姜瑞金, 邹德顺. 铁路货车摆动式转向架服役性能演变规律研究[J]. 铁道车辆, 2018, 56(10): 1.
JIANG Ruijin, ZOU Deshun. Research on the service performance evolution law of swing motion bogies for railway freight cars [J]. Rolling Stock, 2018, 56(10): 1.
- [6] 白彦超, 安超, 李明高, 等. 高速动车组服役性能跟踪研究[J]. 机车电传动, 2017(5): 9.
BAI Yanchao, AN Chao, LI Minggao, et al. Service performance tracking research on high-speed EMUs [J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(5): 9.
- [7] 石怀龙, 屈升, 张大福, 等. 高速动车组线路动力学响应特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(10): 30.
SHI Huailong, QU Sheng, ZHANG Dafu, et al. Dynamic response performance analysis of high-speed trains on track [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(10): 30.
- [8] 苗晓雨, 王新锐, 杨亚军, 等. 既有铁路货车服役性能研究[J]. 铁道机车车辆, 2024, 44(3): 146.
MIAO Xiaoyu, WANG Xinrui, YANG Yajun, et al. Study on service performance of existing railway wagons [J]. Railway Locomotive & Car, 2024, 44(3): 146.
- [9] 代亮成. 铁道车辆关键悬挂部件服役性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
DAI Liangcheng. Study on service performance of key suspension components of railway vehicles [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [10] YUAN Z, CHEN X, LI C, et al. The influence of operation variables on stress spectrum of high-speed train bogie frames [J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(2): 499.
- [11] 潘洪亮, 唐少强, 邱宇, 等. 中低速磁浮列车的运行品质及运行平稳性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 12.
PAN Hongliang, TANG Shaoqiang, QIU Yu, et al. Research on operation quality and stability of medium-low speed maglev train [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 12.
- [12] 李朋, 张胜龙, 罗鹏, 等. 城市轨道交通车辆运行平稳性测试方法与评价[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 61.
LI Peng, ZHANG Shenglong, LUO Peng, et al. Testing methods and evaluation of urban rail transit vehicle operational stability [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(10): 61.
- [13] 赵思琪, 徐井芒, 马前涛, 等. 有轨电车侧向通过3号道岔的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 24.
ZHAO Siqi, XU Jingmang, MA Qiantao, et al. Dynamics performance analysis of tram lateral passing through No. 3 turnout [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 24.
- [14] 徐力, 杨陈, 顾忠华. 车轮磨耗对CR200J型动车的拖车及控制车动力学性能的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 144.
XU Li, YANG Chen, GU Zhonghua. Impact of wheel wear on dynamics performance of CR200J EMU trailer and control cars [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 144.
- [15] 刘寅虎, 唐永明, 杨震寰, 等. 制动装置推出刚度对轨道交通车辆振动性能的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(6): 49.
LIU Yinhu, TANG Yongming, YANG Zhenhuan, et al. Influence of brake device push-out stiffness on vibration performance of rail transit vehicle [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(6): 49.
- [16] 胡定祥, 徐步震, 贾小平, 等. 转盘式转向架车辆动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 218.
HU Dingxiang, XU Buzhen, JIA Xiaoping, et al. Dynamics performance analysis of turntable bogie vehicles [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 218.
- [17] 郭宇轩, 杨建伟, 王金海. 体悬式驱动系统对高速列车动力学特性的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 22.
GUO Yuxuan, YANG Jianwei, WANG Jinhai. Influence of body-suspended drive system on dynamic characteristics of high-speed train [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 22.
- [18] 王彤基. 车轮多边形磨耗对高速动车组轮对强度影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
WANG Tongji. Research on the influence of wheel polygon wear on the wheelset strength of high-speed EMUs [D]. Lanzhou:

- Lanzhou Jiatong University, 2024.
- [19] 张军, 赵嘉明. 车轮多边形对轴箱振动特性的影响分析[J]. 大连交通大学学报, 2024, 45(6): 66.
ZHANG Jun, ZHAO Jiaming. Analysis of the influence of wheel polygon on axle box vibration characteristics[J]. Journal of Dalian Jiatong University, 2024, 45(6): 66.
- [20] 肖乾, 杨逸航. 道岔打磨对车轮磨耗下列车动力学影响[J]. 铁道工程学报, 2025, 42(3): 12.
XIAO Qian, YANG Yihang. Influence of turnout grinding on vehicle dynamics with wheel wear[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2025, 42(3): 12.
- [21] 张建华. 光热成像技术在城市轨道交通车辆智能运维中的应用研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 233.
ZHANG Jianhua. Research on application of photothermal imaging technology in urban rail transit vehicle intelligent operation and maintenance[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 233.
- [22] 权光辉, 王晖. 城轨车辆长期服役过程中关键部件疲劳寿命性能研究[J]. 铁道车辆, 2023, 61(6): 54.
QUAN Guanghui, WANG Hui. Study on the fatigue life of key components of urban rail vehicles in long-term service[J]. Rolling Stock, 2023, 61(6): 54.
- [23] 顾明. 基于线性累积损伤理论的地铁车辆转向架构架服役寿命预测研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(增刊1): 55.
GU Ming. Service life prediction of metro vehicle bogie frame based on linear cumulative damage theory[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(S1): 55.
- [24] 孙铭远. 地铁车辆转向架构架模态分析与载荷识别研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
SUN Mingyuan. Study on modal analysis and load identification of bogie frame of metro vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiatong University, 2023.
- [25] 张晖. 基于地铁车辆的内轴箱转向架动力学性能研究及悬挂参数优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
ZHANG Hui. Dynamic performance research and suspension parameter optimization of inner axle box bogies based on metro vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiatong University, 2023.
- [26] 郑长国, 于森, 马天逸, 等. 城轨车辆转向架端部支架结构强度及随机振动疲劳分析[J]. 内燃机与配件, 2023(5): 52.
ZHENG Changguo, YU Miao, MA Tianyi, et al. Structural strength and random vibration fatigue analysis of bogie end support of urban rail vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(5): 52.
- [27] 卢序鑫, 张西洋, 马天宇, 等. 某 B 型地铁车辆转向架构架静强度与疲劳强度分析[J]. 焊接技术, 2023, 52(1): 29.
LU Xuxin, ZHANG Xiyang, MA Tianyu, et al. Analysis of static strength and fatigue strength of the bogie frame of a type B metro car[J]. Welding Technology, 2023, 52(1): 29.
- [28] 董晓华, 吴兴文, 赵明花, 等. 地铁车辆转向架构架模态匹配方法研究[J]. 机械, 2022, 49(7): 20.
DONG Xiaohua, WU Xingwen, ZHAO Minghua, et al. Investigation on the modal matching method for a metro bogie[J]. Machinery, 2022, 49(7): 20.
- [29] 张晓哲, 黎荣, 蔡子一, 等. 基于故障相关关系的地铁车辆转向架维修决策方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 211.
ZHANG Xiaozhe, LI Rong, CAI Ziyi, et al. Research on decision-making method for metro vehicle bogie maintenance based on fault correlation[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(6): 211.
- [30] 李建, 邹开, 周小江, 等. 地铁车辆转向架构架模态试验和仿真分析[J]. 机车车辆工艺, 2021(3): 41.
LI Jian, ZOU Kai, ZHOU Xiaojiang, et al. Modal test and simulated analysis of bogie frame for metro vehicles[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2021(3): 41.
- [31] 肖权益. 地铁车辆主动径向转向架控制策略及动力学优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
XIAO Quanyi. Study on control strategy and dynamic optimization of active radial bogies for metro vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiatong University, 2021.
- [32] 张远维. 地铁车辆转向架悬挂部件疲劳强度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHANG Yuanwei. Study on fatigue strength of suspension parts of metro vehicle bogies[D]. Chengdu: Southwest Jiatong University, 2021.
- [33] 李富强, 郭鹏飞, 王培东. 轨道交通车辆转向架结构设计研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2020(6): 25.
LI Fuqiang, GUO Pengfei, WANG Peidong. Structural design for the bogies of rail vehicles[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2020(6): 25.
- 收稿日期:2024-12-31 修回日期:2025-04-08 出版日期:2025-07-10
Received:2024-12-31 Revised:2025-04-08 Published:2025-07-10
· 第一作者:杨利强,正高级工程师,wangdawei335@126.com
通信作者:杨陈,高级工程师,yc_tj2013@163.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 189 页)

- XIA Yimin, JI Zhiyong, YAO Pingping. Analysis and research of three dimensional temperature field and thermal stress field of high-speed electric multiple units brake disc[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2009, 30(3): 75.
- [20] ARUNACHALAM A P S, IDAPALAPATI S. Material removal analysis for compliant polishing tool using adaptive meshing technique and Archard wear model[J]. Wear, 2019, 418: 140.

- 收稿日期:2023-06-18 修回日期:2023-08-26 出版日期:2025-07-10
Received:2023-06-18 Revised:2023-08-26 Published:2025-07-10
· 第一作者:孙宁远,工程师,sunningyuan33@163.com
通信作者:朱文良,讲师,zhuwenliang@sues.edu.cn
· ©《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