

转向架轴端接地端子裂纹原因分析及解决措施*

聂显鹏 宋庆伟 李春来 王绪英 徐石磊 王 晗 杨 壮

(中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春)

摘 要 [目的] 由于地铁运营线路条件的不断变化, 轮轨之间的异常振动情况时有发生, 这将会导致转向架轴端的悬挂部件断裂, 影响列车运行安全。因此, 需要针对轴端悬挂部件的断裂机理进行研究。[方法] 以某线路地铁列车转向架轴端接地线缆的接地端子为例, 通过线路测试及数据分析, 分析了接地端子的断裂原因, 提出了错频设计的解决措施, 并通过线路试验验证了所提解决措施的可行性。[结果及结论] 所提解决措施可使接地端子处的应力由 90 MPa 降至约 30 MPa, 显著改善了接地端子的受力状态, 提高了接地端子的疲劳寿命。

关键词 地铁; 转向架; 接地端子

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.043

Analysis of Cracking Causes at Grounding Terminals of Bogie Axle-end and Resolution Measures

NIE Xianpeng, SONG Qingwei, LI Chunlai, WANG Xuying, XU Shilei, WANG Han, YANG Zhuang (CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] Due to continuous changes in the operating conditions of metro lines, abnormal vibrations between wheel and rails occasionally occur, leading to fractures in the suspension components at the bogie axle-end and affecting the safety of train operation. Therefore, it is essential to conduct research on the fracture mechanisms of the axle-end suspension components. [Method] Taking the grounding terminals of bogie axle-end grounding cables of a metro train as an example, through line testing and data analysis, the reasons for grounding terminal fractures are analyzed, resolution measures involving mis-frequency design is proposed, and the feasibility is verified through on-site testing. [Result & Conclusion] The proposed resolution measures can reduce the stress at the grounding terminals from 90 MPa to approximately 30 MPa, significantly improving the stress state of the grounding terminals and enhancing their fatigue life.

Key words metro; bogie; grounding terminal

随着城市轨道交通领域的不断发展, 地铁列车的服役里程逐渐增加, 而其外部运营环境及线路条件也随之发生着变化, 转向架承载部件裂纹、断裂故障不断发生且呈日趋增多的趋势^[1-5]。某线路地铁列车转向架投入运营后, 出现了多起转向架轴端接地线缆的接地端子(以下简称“接地端子”)裂纹故障, 影响列车的行车安全。本文通过在线路上进行试验测试, 对接地端子裂纹产生的原因进行了分析, 并通过结构优化降低轴端支架的固有模态, 提升接地端子的疲劳寿命。本文研究可为转向架轴端悬挂部件的设计提供工程经验及理论基础。

1 接地端子裂纹原因分析

1.1 裂纹情况

某线路地铁列车于 2018 年开始上线运行, 车辆运营约 1 万 km 后, 接地端子的圆弧位置处陆续出现裂纹。后续对其他列车进行普查, 共计发现接地端子存在类似故障 10 余处。

1.2 理化分析

对断裂的接地端子进行理化检验。分析结果表明, 接地端子的化学成分、金相组织均满足相关材料标准要求, 接地端子断口属于多源疲劳断口, 在靠近端子接头两侧边缘断口上的放射台阶棱线高度差较大。这说明该接地端子在工作状态下可能承受了横向弯曲应力, 并最终导致出现裂纹。

1.3 振动测试分析

为了掌握列车运行工况及接地端子的工作状态, 在列车运行线路上对转向架进行了振动测试, 在轴箱、接地端子、线缆支架等零件上布置了应力测点及加速度传感器。通过对测试所得加速度数据进行分析发现, 接地端子、轴端支架的应力主频集中于 70 ~ 120 Hz 范围内, 且该频带不随列车运行

* 国家自然科学基金项目(52002344)

速度的变化而变化,属于轮轨接触系统的固有模态。

选取测试列车轴端的轴箱加速度数据进行分析,并与接地端子及线缆支架的应力频谱对比后可知,轴箱的振动频率也集中于70~120 Hz范围内,说明接地端子和轴端支架的振动是由轴箱振动传递所导致的。

1.4 频率来源分析

通过对比试验数据和线路异常振动区间发现,轴箱的振动主频70~120 Hz均分布于普通道床线路上,说明该频率成分与列车运行速度无关,是列车在普通道床上运行时特有的振动特征。

1.5 能量传递路径分析

为分析能量传递路径(能量传递路径1——由轴箱传递至接地端子;能量传递路径2——由轴箱传递至线缆支架和线夹板,经过线缆后传递至接地端子)对接地端子应力的影响,在滚振试验台上对接地端子安装系统进行台架扫频试验。在普通道床线路上,当激励频率为70~120 Hz时,对比分析线缆的接地端子应力响应情况。

当激励频率为70~120 Hz时,接地端子应力为34.82 MPa;当无线缆支架固定时,接地端子应力仅为13.95 MPa,说明接地端子应力主要受线缆支架的振动传递影响,即路径2的影响最大。当接地端子在线缆支架上固定时,激励频率为80~95 Hz所对应的接地端子应力幅值明显增大,说明线缆、夹线板和支架组成的系统在该频率范围内存在固有模态。

通过上述分析可以判断,当列车在普通道床上运行时,列车在激励频率为70~120 Hz范围内存在振动现象,该频带与安装系统(支架、夹线板、线缆及接地端子)90 Hz左右的固有模态发生了共振,这是导致接地端子出现裂纹的主要原因。

2 解决措施

通过对裂纹原因进行分析,发现共振是裂纹发生的主要原因,故从通过错频设计改变系统模态的方向考虑,设计了2种短悬臂线缆支架,并将其与文献[6]中的3种变截面线缆支架进行对比,研究不同结构类型线缆支架对接地端子疲劳寿命的影响。不同结构类型线缆支架照片如图1所示。在滚振试验台进行扫频试验,分析接地端子在70~120 Hz激励频率下的应力响应。线缆支架通过工装固定在转向架的轴端,并用驱动轮模拟车轮的多边形状

态,提供振动激励。不同结构类型线缆支架对接地端子应力的影响如图2所示。台架试验结果表明,短悬臂线缆支架结构方案可以显著降低接地端子过渡圆弧位置的应力。

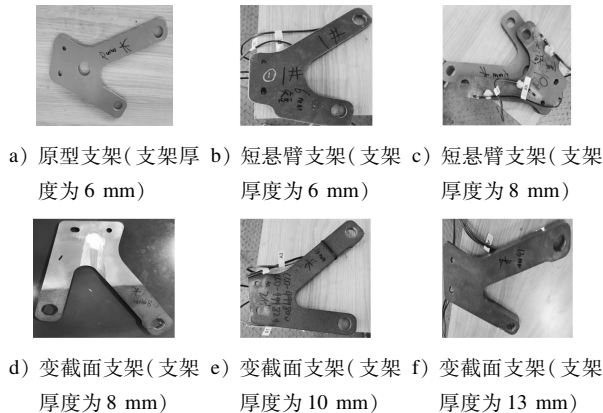


图1 不同结构类型的线缆支架照片

Fig. 1 Pictures of cable supports with different structural types

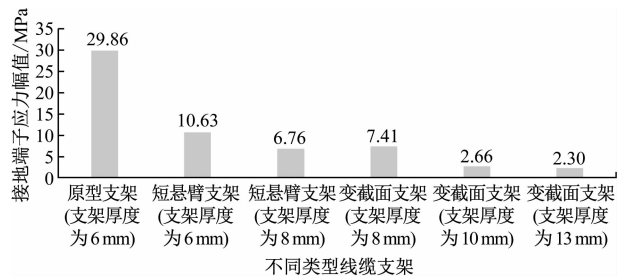


图2 不同结构类型线缆支架对接地端子应力的影响

Fig. 2 Effect of different structural type cable supports on grounding terminal stress

3 线路验证

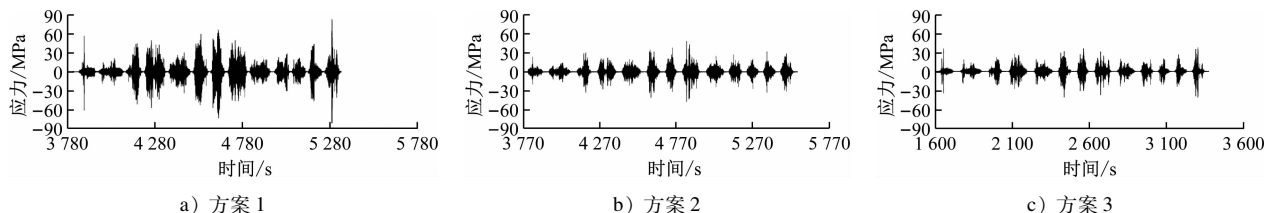
综合台架试验结果,将原型支架结构作为对照组,选择支架厚度为6 mm和8 mm两种短悬臂结构线缆支架开展线路验证试验,即:方案1——原型支架(支架厚度为6 mm);方案2——短悬臂支架(支架厚度为6 mm);方案3——短悬臂支架(支架厚度为8 mm)。为对比不同方案的应用效果,试验分为3次进行。测试内容包括接地端子应力、线缆支架应力,以及接地端子、线缆支架和轴箱系统的振动情况。

3.1 接地端子应力分析

3种方案的接地端子应力对比如图3所示。由图3可知:方案1的接地端子应力大于方案2和方案3的接地端子应力,且方案2与方案3的接地端子应力水平相当。3种方案的接地端子应力主频对

比如图 4 所示。方案 1 的接地端子应力主频约为 90 Hz。方案 2 的接地端子应力主频约为 80 ~ 200

Hz,无显著主频。方案 3 的接地端子应力主频约为 180 Hz,其次为 90 Hz。



注:应力以拉为正,以压为负;余类同。

图 3 3 种方案的接地端子应力对比

Fig. 3 Comparison of ground terminal stress in three schemes

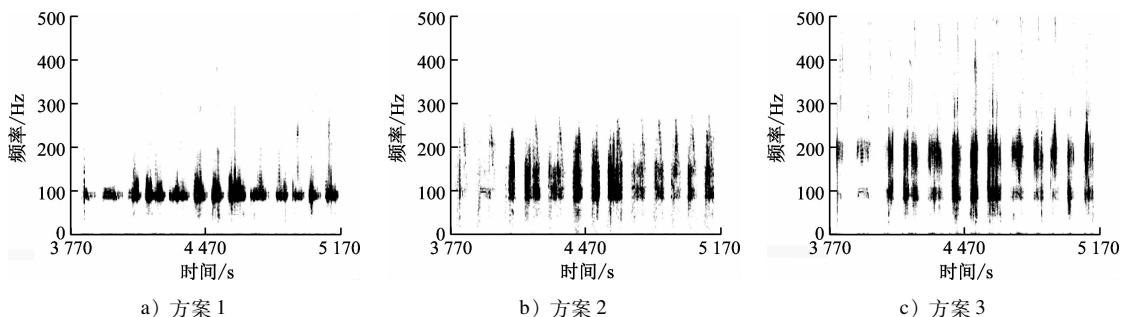


图 4 3 种方案的接地端子应力主频对比

Fig. 4 Comparison of main frequencies of grounding terminal stress in three schemes

3.2 线缆支架应力分析

3 种方案的线缆支架应力对比如图 5 所示。方案 1 的线缆支架应力最大值为 88 MPa, 远大于方案 2 和方案 3 的线缆支架应力。3 种方案的线缆支架应力主频对比如图 6 所示。3 种方案的接地线支

架主频均集中于 250 Hz 以下。方案 1 的接地支架应力主频约为 90 Hz。方案 2 的接地支架应力主频约为 80 ~ 250 Hz,较为分散。方案 3 的接地支架应力主频约为 188 Hz,其次为 90 Hz。

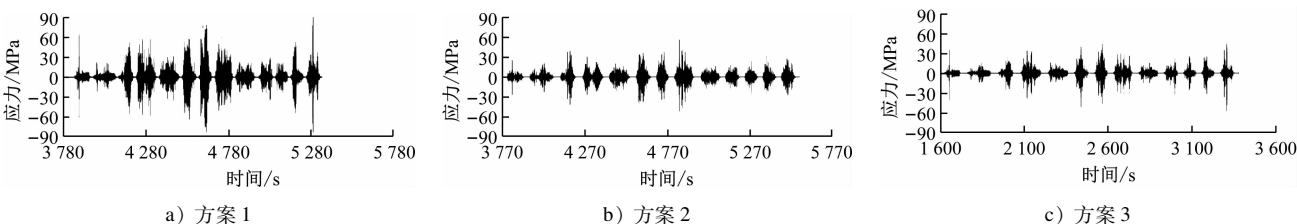


图 5 3 种方案的线缆支架应力对比

Fig. 5 Comparison of cable support stress in three schemes

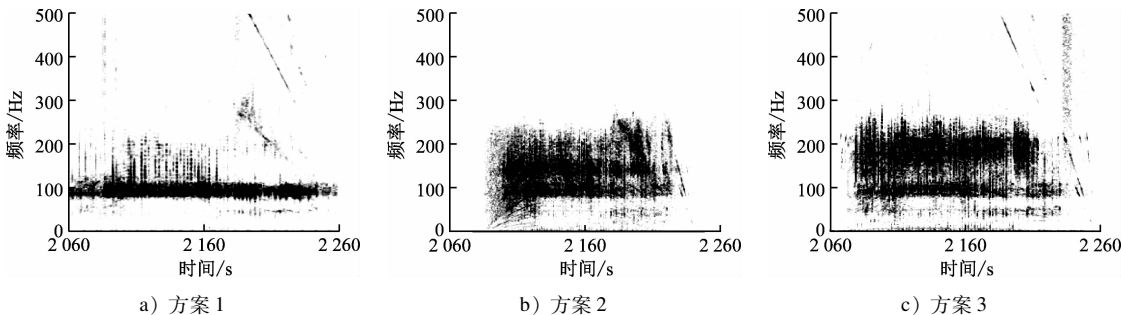


图 6 3 种方案的线缆支架应力主频对比

Fig. 6 Comparison of main frequencies of cable support stress in three schemes

3.3 线路原因分析

通过对测试数据进行分析后发现,更换为改进结构的线缆支架后,部分区间接地端子及线缆支架的应力幅值仍较大,线路上仍存在异常振动情况,例如 25 m 钢轨接头冲击、线路单点冲击和钢轨波磨。冲击工况下 2 种方案的线缆支架应力响应如图 7 所示。方案 2 和方案 3 虽然改变了线缆支架的厚度,提高了其结构模态频率,避免了线缆支架和接地端子间发生共振,但由于这二者属于悬臂结构,在轨缝接头、波磨等冲击下,仍会产生自身的固有模态振动,线缆支架应力最高可达 50 MPa。

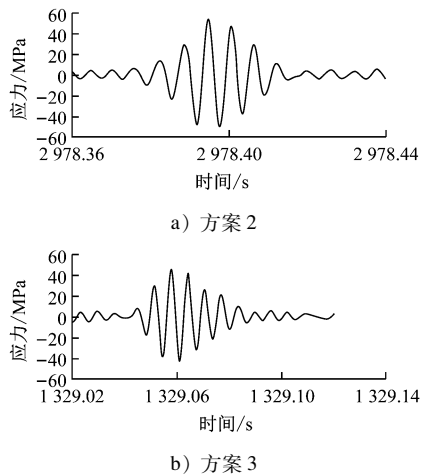


图 7 冲击工况下 2 种方案的线缆支架应力响应
Fig.7 Stress response of cable support under impact conditions in two schemes

通过分析及试验验证发现,采用改进结构的线缆支架可以显著提高接地端子的疲劳寿命。对于线路维护而言,需要控制钢轨接头的冲击、波磨深度等因素,避免轮轨振动带来的冲击激发改进结构线缆支架的固有模态,从而保证接地端子和线缆支架的疲劳寿命。

4 结语

本文对转向架轴端接地端子裂纹产生的原因进行了分析。研究结果表明,线路的冲击振动导致轴箱的振动主频为 70 ~ 120 Hz。该频带与轴端接地端子安装系统(支架、夹线板、线缆及接地端子)的固有模态重叠,引发系统共振,导致接地端子出现裂纹,最终通过错频设计的理念,同时提高系统固有模态的方法,提高了接线端子的使用寿命。

线路上部分区间的异常振动会提升接地端子的应力水平。由此可知,若不提高运营线路的维护

标准,接地端子及线缆支架仍然存在共振的可能。建议在后续转向架的设计过程中,需要注意:转向架构架的端部、轴端部位应避免安装悬臂结构的零部件;在无法采用错频设计的前提下,可以考虑通过降低结构应力设计零部件结构;结合我国高速动车组的运营经验,构建适用于地铁线路的运用维护标准。

参考文献

[1] 宋庆伟,姜朝勇,王绪英,等. B 型地铁转向架构架优化设计分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(1): 47.
SONG Qingwei, JIANG Chaoyong, WANG Xuying, et al. Optimal design and analysis for B-type metro bogie frame[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(1): 47.

[2] 李卓,周劲松,张学铭,等. 地铁车辆轴箱吊耳动态分析和优化[J]. 计算机辅助工程, 2012, 21(1): 27.
LI Zhuo, ZHOU Jinsong, ZHANG Xueming, et al. Dynamic analysis and optimization of lifting lug fixed to axle box of metro vehicle [J]. Computer Aided Engineering, 2012, 21(1): 27.

[3] 董磊,程建会,付德龙. 地铁车辆构架裂纹故障分析[J]. 铁道车辆, 2016, 54(8): 5.
DONG Lei, CHENG Jianhui, FU Delong. Crack fault analysis in metro bogie frames[J]. Rolling Stock, 2016, 54(8): 5.

[4] 王永亮. ZMA120 型高速地铁车辆转向架结构介绍与故障分析[J]. 机电信息, 2015(30): 144.
WANG Yongliang. Structure introduction and fault analysis of ZMA120 high-speed metro vehicle bogie[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(30): 144.

[5] 陈小南. 广州地铁三号线北延段列车接近传感器支架裂纹原因分析及对策[J]. 机电信息, 2016(15): 54.
CHEN Xiaonan. Cause analysis and countermeasures of cracks in the bracket of train proximity sensor in the north extension section of Guangzhou Metro Line 3[J]. Mechanical and Electrical Information, 2016(15): 54.

[6] 林勤,李国栋,张宇峥,等. 某地铁转向架轴端电缆支架裂纹原因分析及优化设计[J]. 铁道车辆, 2020, 58(10): 13.
LIN Qin, LI Guodong, ZHANG Yuzheng, et al. Analysis of causes of cracks of axle end cable supports on bogies for a certain type metro and optimization design[J]. Rolling Stock, 2020, 58(10): 13.

· 收稿日期:2021-11-17 修回日期:2022-01-17 出版日期:2024-02-10
Received:2021-11-17 Revised:2022-01-17 Published:2024-02-10

· 第一作者:聂显鹏,正高级工程师,niexianpeng1521@126.com
通信作者:李春来,正高级工程师,lichunlai1@crrecg.cc

· ©《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