

地铁 B 型车轴端接地系统部件断裂原因分析及部件优化

郝梓超¹ 陈恩伟² 丁 凯² 赵心纶¹ 孙成林¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春;

2. 合肥工业大学机械工程学院, 230009, 合肥//第一作者, 工程师)

摘 要 以地铁 B 型车轴端接地线缆、接线端子、支架和线夹板组成的支架-线缆系统为研究对象, 针对部件断裂问题进行系统性的结构特征分析, 从支架结构、线缆固定方式等方面进行结构和部件分布的优化。基于支架-线缆系统的模态分析和谐响应分析, 研究线缆的最大振幅点, 对线缆的固定方式进行优化。优化后支架-线缆系统固有频率有所提高, 能够尽量避免支架-线缆系统同轮轨和轴箱发生共振, 提高了部件使用寿命。

关键词 地铁车辆; 支架-线缆系统; 部件断裂

中图分类号 U270.331⁺3; U264.7⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.016

Component Fracture Cause Analysis and Optimization of B-type Metro Vehicle Axial Grounding System

HAO Zichao, CHEN Enwei, DING Kai, ZHAO Xinlun, SUN Chenglin

Abstract The bracket-cable system composed of axial grounding cable, grounding terminal, bracket and wire splint of B-type metro vehicle is studied. The structural characteristics of the component fracture problem are systematically analyzed, the structure and component distribution are optimized from aspects such as bracket structure and cable fixing method. Based on the modal analysis and harmonic response analysis of the bracket-cable system, the maximum amplitude point of the cable is studied, and the fixing method of the cable is optimized. After optimization, the natural frequency of the system is improved and the resonance of bracket-cable system with wheel-rail and axle box is possibly avoided, thereby improving the service life of the components.

Key words metro vehicle; bracket-cable system; component fracture

First-author's address Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

经统计,在我国采用地铁 B 型车的 11 条线路中,已累计发生百余起车辆轴端接地系统的部件断裂故障。其中主要断裂故障为支架断裂、接地线缆断裂和接线端子断裂。轴端接地系统是车体与走行部的重要纽带,其可靠性不足将导致车体与轮轨之间环流过大、轴承电蚀、传感器过流烧毁等问题^[1-2]。

从相关外部因素研究来看,部件断裂主要是轮轨动态冲击载荷大、运营路线环境恶劣、轮对多边形等复杂情况导致的部件与轴箱发生共振^[3-4]而造成的。对此可通过改变断裂部件固有频率的方式来改善。从内部因素研究来看,部件断裂的主要因为自身强度不足。对此可通过优化部件结构的方式来改善^[5-6]。

本文基于地铁 B 型车轴端接地结构特点,建立支架-线缆系统,剖析该系统部件断裂的典型成因,通过调整支架-线缆系统内部的部件结构和分布,提高轴端接地结构的电气性能和机械性能;对支架-线缆系统进行模态分析和谐响应分析,为改善支架-线缆系统固有频率、避免其与轮轨轴箱发生耦合共振提供理论支持,也为车辆走行系部件接地可靠性的方案设计提供参考。

1 轴端接地结构

1.1 接地系统

地铁车辆通常采用将车体与转向架轴端接地装置串联电阻的方式,使牵引电流经轮对、钢轨形成保护接地回路,进而实现车体与钢轨共地。

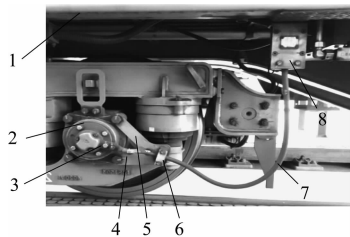
轴端接地装置是车辆保护接地系统中的重要保护装置,其中接地线缆承担了车辆轮轴以上所有部件与转向架之间接地回流的作用。轴端接地装置的碳刷组件可引导电流绕过轴承与轨道有效

接地。

1.2 支架-线缆系统结构

地铁列车行驶具有转弯多、爬坡多、起制动频繁等特点。在轴箱振动、涡流风场作用及固定约束力不足等外部激励的频繁作用下,接地线缆的部件会达疲劳极限而发生断裂。

图1为我国地铁B型车的典型转向架轴端接地接线结构。线缆连接转向架轴端接地装置和车体底架的接地电阻,形成接地回路,使车体与地面轮轨形成等电势。线缆在A点处采用接线端子与轴箱端盖刚性相连,另一端通过线夹板将线缆固定在车体底架上。当列车通过曲线段或爬坡时,车体与转向架之间相对运动较为频繁,A点与C点间存在相对位移,故AC段线缆无法完全固定,且需要设置一定的活动长度。此外,为满足接线区域端子不受应力的工艺要求,并确保线缆接线处的机械强度,故设置支架来固定接线区域。支架的长臂和短臂通过螺栓紧固在轴箱端盖上,线夹板在B点处将线缆夹紧固定在支架的悬臂上。



注:1—底架;2—轴箱;3—接线点A;4—支架短臂;5—支架长臂;
6—线夹板固定点B;7—线缆;8—底架线夹板固定点C。

图1 地铁B型车典型转向架轴端接地接线结构

Fig.1 Typical bogie axial grounding structure of B-type metro vehicle

2 典型断裂现象分析及初步优化

支架-线缆系统部件断裂问题成因复杂。只有从轴端线缆固定方式、接线端子压接方式、线缆布线等多方面综合考量,才能满足列车全寿命周期运行可靠性要求。

支架与轴箱螺栓的连接部分可近似看作悬臂梁的固定支座。支架的长臂和短臂均为悬臂结构。在列车运行过程中,悬臂结构不仅无法完全约束线缆,而且支架悬臂末端还会在多因素的激励作用下发生振动。此时,在力臂的放大作用下,A点处及支架的固定点处承受了更大的应力,容易达到疲劳极限而发生部件断裂。

由上述分析可知,轴端接地处部件断裂问题本质上是支架-线缆系统的薄弱部位抗疲劳性能不足和共振问题。如图2所示,在转向架侧梁增加固定点的初步优化方案仅关注了接地线缆弯曲半径大小及防水弯等车辆布线工艺要求,却忽略了对部件结构强度及抗疲劳性能方面的分析和考量。因此,需要结合仿真分析合理确定线缆在转向架上的约束位置,以提高支架-线缆系统的使用寿命。

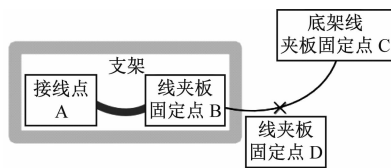


图2 支架-线缆系统结构初步优化方案

Fig.2 Primary optimization scheme of bracket-cable system structure

3 支架-线缆系统结构的深度优化

3.1 支架-线缆系统模态仿真

本研究通过 ANSYS Workbench 仿真软件建立模型,求解支架-线缆系统的模态,分析其共振频率和主振型。针对支架的悬臂梁结构特点,分析线缆的振动幅值点,通过提高线缆接线区域适当位置的约束力,减小线缆振动和支架所受应力,进而有效解决支架及接地线缆连接部件断裂问题。

以 SolidWorks 软件绘制的支架-线缆系统简化模型如图3所示。将简化模型导入 ANSYS Workbench 软件中,并结合实际工况对支架-线缆系统仿真模型进行加载固定约束、设置材料参数、划分网格等操作。在仿真模型中:在远离线缆的支架侧面施加固定约束;忽略固定线缆与支架的线夹板,简化为支架与线缆绑定接触;忽略线缆的绝缘层,将线缆等效为纯铜芯线缆。表1为支架-线缆系统各部件的材料参数。

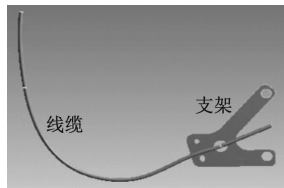


图3 支架-线缆系统简化模型

Fig.3 Simplified model of bracket-cable system

仿真计算可得支架-线缆系统的各阶频率。图4为支架-线缆系统前6阶模态的仿真结果。其中图4c)为支架扭转模态,其余均为线缆轴向模态。

表 1 支架-线缆系统各部件的材料参数

Tab. 1 Material parameters of each component of bracket-cable system

部件	材料	弹性模量/ MPa	体积质量/ (kg/m ³)	泊松比
线缆	镀锡退火铜	8 × 10 ⁴	8 890	0.36
支架	耐候钢	2 × 10 ⁵	7 850	0.27

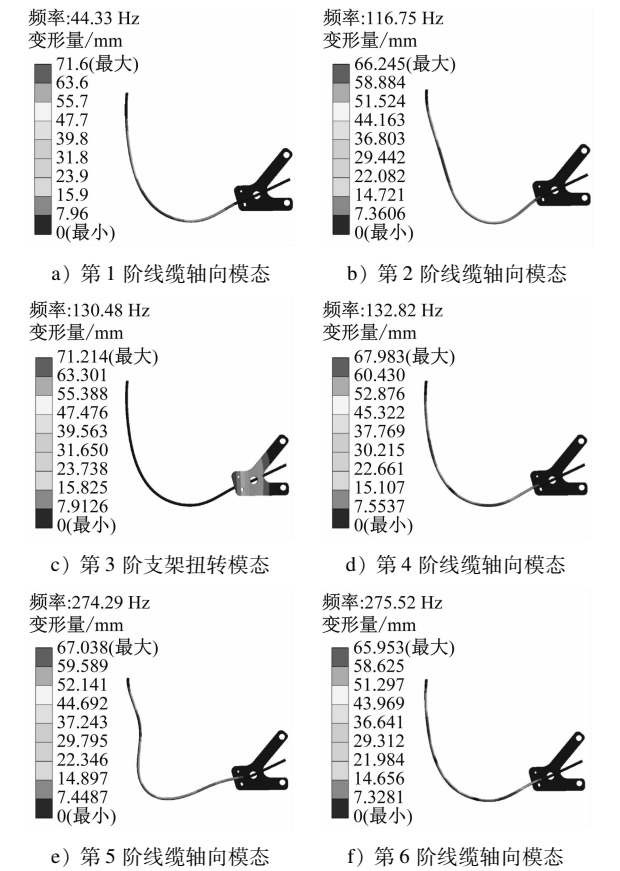


图 4 支架-线缆系统前 6 阶模态的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of bracket-cable system for the first 6 order modals

表 2 为前 6 阶模态的固有频率和振型。分析表 2 可知:线缆振型中,横向一变与横向二变类似,垂向二变与垂向三变类似;从支架-线缆系统的固有频率来看,第 3 阶与第 4 阶接近,第 5 阶与第 6 阶接近;又由于第 3 阶与第 4 阶分别为线缆和支架的变形频率,故如外界激励频率接近 130 Hz,则会同时激发线缆的垂向二变和支架的扭转一变,进而引起更大的振动。由此可知,确定在列车运行过程中的线缆振动幅值最大点并对其进行约束,就能有效地抑制振动。

3.2 线缆固定的优化

对支架-线缆系统模态分析后,使用 Designas-

表 2 支架-线缆系统的固有频率及振型

Tab. 2 Natural frequency and vibration modes of bracket-cable system

阶数	固有频率/ Hz	振型	振型描述
1 阶	44.3	线缆垂向一变	线缆垂直于支架端面的变形,最大变形量接近线缆中间位置
2 阶	116.8	线缆横向一变	线缆平行于支架端面的变形,线缆的最大变形量接近底架处
3 阶	130.5	支架扭转一变	支架的扭转变形
4 阶	132.8	线缆垂向二变	线缆垂直于支架端面的变形,靠近底架和线夹板处的变形最大
5 阶	274.3	线缆横向二变	类似第 2 阶
6 阶	276.0	线缆垂向三变	类似第 4 阶

essment 模块的后处理功能,将各界模态按照比例叠加,即可得出线缆在摆动过程中的振幅最大点,如图 5 所示。

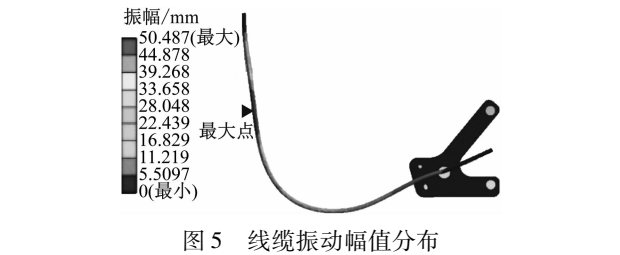


图 5 线缆振动幅值分布

Fig. 5 Distribution of cable vibration amplitude

二次优化即对最大点增加固定约束,其他约束条件不变。对二次优化后的模型进行模态分析,仿真结果如图 6 及表 3 所示。

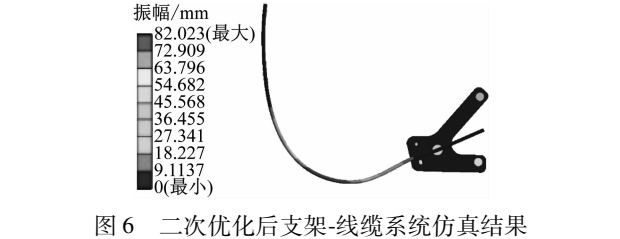


图 6 二次优化后支架-线缆系统仿真结果

Fig. 6 Simulation results of bracket-cable system after secondary optimization

对比二次优化前后的仿真结果可得:支架的扭转一变频率均为 130.5 Hz,说明二次优化前后的单独支架固有频率不受固定点位置的影响;支架-线缆系统的固有频率有所变化,但是其主振型没有变化,说明增设固定点不会影响支架-线缆系统的振型;二次优化后,当激励频率接近 130.0 Hz 时,支架

表 3 二次优化后支架-线缆系统模态分析

Tab.3 Modal analysis of bracket-cable system after secondary optimization			
阶数	固有频率/ Hz	振型	振型描述
1 阶	80.6	线缆垂向一变	线缆垂直于支架端面的变形,最大变形量接近线缆中间位置
2 阶	130.5	支架扭转一变	支架的扭转变形
3 阶	221.0	线缆横向一变	线缆平行于支架端面的变形,线缆的最大变形量接近底架处
4 阶	243.6	线缆垂向二变	线缆垂直于支架端面的变形,靠近底架和线夹板处的变形最大
5 阶	497.3	线缆横向二变	类似第 3 阶
6 阶	500.0	线缆垂向三变	类似第 4 阶

和线缆两者的共振频率不再相同,说明二次优化避免了系统部件共振,减少了疲劳现象的发生;二次优化后,除支架固有频率没有变化外,线缆的共振频率都有所提高。由上述分析可见,在合适位置增设固定点,对于避免共振及提高支架-线缆系统的抗疲劳强度有重要意义。

3.3 线缆固定的细节优化

在现有结构中,受支架悬臂梁自身的结构特性影响,活动线缆及支架悬臂末端区域应力集中。通过改变支架厚度和形状及其他断裂部件结构虽然能提高部件自身强度,却无法从根本上解决应力集中问题。因此,在初步优化方案基础上,为兼顾转向架结构强度和功能的实现,应避免采用悬臂梁的支架结构来固定线缆的接线区域,故基于支架-线缆系统模态仿真来优化增设线夹板安装点的情况,如图 7 所示。可见,在转向架结构设计时需要综合考量轴端接地线缆固定方案的可靠性。

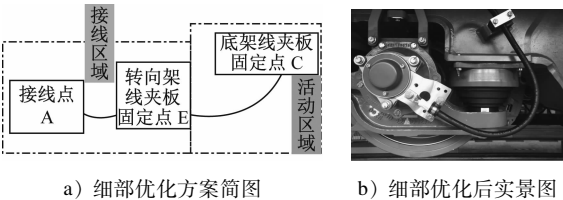


图 7 支架-线缆系统结构细部优化方案

Fig.7 Detailed optimization scheme of bracket-cable system structure

4 结语

本文针对 B 型地铁车辆轴端接地部件断裂问题,构建支架-线缆系统仿真模型,基于机械结构点,分析了典型部件断裂问题的成因,并提出了接地线缆固定的优化方案。经分析,由于部件分布和接线方式不合理导致应力无法释放,且支架-线缆系统部件与轮轨、轴箱等发生共振,从而导致部件疲劳断裂。通过对支架-线缆系统的模态和振动模式进行仿真分析,识别出接地线缆振幅最大点,通过在振幅最大点增加线缆约束点,提高支架-线缆系统的固有频率且不影响其振型,从而避免发生共振。

参考文献

[1] 陈志文. 地铁车辆接地回流方案对比研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
CHEN Zhiwen. Comparative study ongrounding reflux schemes of metro vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[2] 卢庆, 慕芳, 王哲, 等. 地铁车辆接地回流性能动态分析与优化[J]. 机车电传动, 2022(2): 121.
LU Qing, QI Fang, WANG Zhe, et al. Dynamic analysis and improvement of grounding return performance of metro vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(2): 121.

[3] 杨晶, 马晓龙, 王洪权, 等. 地铁车辆轴箱接地端子异常开裂原因分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 103.
YANG Jing, MA Xiaolong, WANG Hongquan, et al. Causes analysis of abnormal grounding terminal cracking of metro vehicle axle box[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 103.

[4] 刘涛, 马梦林, 谢丹. 基于模态贡献量的转向架接地轴端异常振动分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(2): 10.
LIU Tao, MA Menglin, XIE Dan. Abnormal vibration analysis of the bogie earthing shaft end based on modal contribution method [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(2): 10.

[5] 田庆涛, 田占伟, 吴群芳, 等. 城轨车辆轴端接地线缆故障分析与处理[J]. 铁道车辆, 2020, 58(8): 29.
TIAN Qingtao, TIAN Zhanwei, WU Qunfang, et al. Analysis of the trouble in the grounding cables at the end of axles of urban rail vehicles and the disposition [J]. Rolling Stock, 2020, 58(8): 29.

[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:2022-08-31)