

城市轨道交通车辆运行平稳性测试方法与评价^{*}

李朋¹ 张胜龙² 罗鹏² 杨立伟³ 王文斌² 刘畅²

(1. 北京城市快轨建设管理有限公司, 100027, 北京; 2. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 100081, 北京;

3. 天津智能轨道交通研究院有限公司, 301700, 天津//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:为了提高城市轨道交通车辆运行的安全性,需要对车辆运行平稳性进行测试与评价。方法:简述了城市轨道交通轮轨力测量方法,以及车辆运行稳定性测试与评价方法。以北京某地铁线路三期工程的测试车辆为研究对象,采用轮测法对该测试车辆运行安全性特征参数进行了测试,并在车内安装振动加速度传感器进行车辆运行平稳性指标测试。结果及结论:车辆运行安全性特征参数与线路的线型关系较大。车辆通过直线段时,其安全性特征参数与速度关系不大,其数值较小且较为稳定;车辆通过曲线段时,其安全性特征参数均会增大,且其最大值出现在车辆出入曲线段附近。车辆运行平稳性指标与速度关系较大,随着速度逐渐上升,车辆平稳性指标增加。在速度基本稳定的前提下,车辆运行平稳性指标与线型也有一定关系,且在车辆进出曲线段时会有些许突变。在北京某地铁线路三期工程测得的脱轨系数、轮重减载率及轮轴横向力等车辆运行安全性特征参数,以及车辆运行平稳性指标等车辆动力学整体性能均满足规范要求。

关键词 城市轨道交通; 车辆运行平稳性; 测试方法; 评价
中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.10.011

Testing Methods and Evaluation of Urban Rail Transit Vehicle Operational Stability

LI Peng, ZHANG Shenglong, LUO Peng, YANG Liwei, WANG Wenbin, LIU Chang

Abstract Objective: To enhance the safety of URT (urban rail transit) vehicle operation, it is necessary to conduct testing and evaluation of vehicle operational stability. Method: The measurement methods of wheel-rail force in URT and the testing and evaluation methods for vehicle operational stability are briefly introduced. Taking the test vehicles from a Beijing Subway line phase III project as research object, wheel measurement method is employed to test the safety characteristic parameters of the test vehicles during operation, and vibration ac-

celeration sensors are installed inside the vehicles to test the operational stability indicators. Result & Conclusion: The safety characteristic parameters of vehicle operation are significantly influenced by line types. During straight-line segments, the safety characteristic parameters show little correlation with speed, maintaining relatively small and stable values. However, these parameters increase when the vehicle passes through curved segments, with the maximum values occurring near the entrances and exits of curved segments. The vehicle operational stability indicators are closely related to speed, increasing gradually as speed rises. With speed generally stable, vehicle operational stability indicators are also related to line types, showing slight variations when the vehicle enters or exists curved segments. The safety characteristic parameters of vehicle operation, including derailment coefficient, wheel load reduction rate, transverse wheel forces obtained from the above phase III project, and the vehicle overall dynamics performance including vehicle operation stability, all meet the requirements specified in regulations.

Key words urban rail transit; vehicle operational stability; testing method; evaluation

First-author's address Beijing Urban Rapid Rail Construction Management Co., Ltd., 100027, Beijing, China

1 城市轨道交通轮轨力测量方法

列车轮对和轨道滚动接触所产生的轮轨关系是城市轨道交通最重要的研究对象之一。轮轨力是轮轨关系的基础,轮轨力的正常与否关系到车辆行驶的安全性。异常的轮轨力不仅会造成轨道变形和磨损,极端条件下可能还会造成车辆失稳引起车辆脱轨或倾覆^[1]。车辆动力学响应的评价指标主要包括平稳性、脱轨系数、轮重减载率和轮轴横

^{*} 北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金项目(L221001);中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2022YJ235, 2023YJ092);铁科院(北京)工程咨询有限公司基金项目(2022ZXJ001)

向力,其中脱轨系数、轮重减载率及轮轴横向力等指标均需要通过轮轨力计算得到。

轮轨关系中的力学问题极为复杂,轮轨型式的轨道交通列车运行均依靠轮轨之间的接触实现。轮轨间的作用力在空间上可分为轮轨垂向力、横向力及纵向力。其中:轮轨垂向力主要由静态自重和轮轨间动态的冲击力组成,静态自重基本维持不变,轮轨间动态的冲击力随线路状态变化产生的冲击变化而改变^[2];轮轨横向力和垂向力影响着列车的脱轨可能性和轮对疲劳度,还影响着轨道的变形

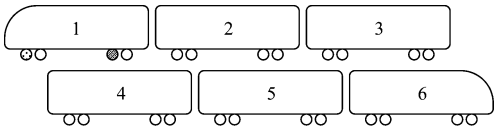
和磨损^[3]。因此,对于车辆运行安全性的研究重点主要围绕轮轨垂向力和横向力展开。

采用测力轮对测量轮轨力的直接方法主要包括轴测法和轮测法两种方式:轴测法是通过将应变片粘贴在车轴的某个特定位置上来测量动态应变以得到轮轨力,而轮测法是通过将应变片粘贴在车轮的辐条或辐板上来测量某个特定部位变形以得到轮轨力。目前国外典型轮轨力的测量方法^[4-6]见表1。

表 1 国外典型轮轨力的测量方法
Tab.1 Typical foreign wheel-rail force measurement methods

国家	轮轨力检测方法	特点
德国	轴测法	设备简便,费用相对较低,适用于窄频带测量
英国	多辐条式轮测法	测试精度较高,试验成本亦较高,测力轮对与实际轮对差别较大,需专门制作
美国	辐板式轮测法	可使用实际轮对制作,成本相对较低
日本	辐板式轮测法	需通过辅助设备提供精确的轮对转角信号,且对轮轨接触点位置变化时的影响难以修正
俄罗斯	间接测量法	通过测量转向架上的一系簧变形进行轮轨力测量

轴测法因其测量点所在位置距被测试点(轮轨接触点)较远,需对其进行转化处理才能变为需要的信息^[4];轮测法因其测量点所在位置距被测试点(轮轨接触点)更近,虽较轴测法制作复杂,但其精度更高,测量结果更准确^[5-6]。就现阶段而言,轮测法是所有测量轮轨力方法中最直接、准确的方法。



注:⊙为测力轮对;⊗为装有速度传感器的轮对。

图 1 测力轮对及速度传感器安装位置示意图

Fig. 1 Installation position diagram of force testing wheelsets and speed sensors

2 车辆运行平稳性测试方法与评价

2.1 车辆运行稳定性测试方法

在车辆动力学响应-运行稳定性测试中,采用轮测法对车辆运行安全性特征参数进行测试。测力轮对的原始轮对采用与车辆同型号的曲辐板轮对,测力桥路采用 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》中的离散桥。在第 1 节车厢的 1 轴安装测力轮对,测力轮对的两侧轴向端部分别安装滑环式集流装置,通过该装置将轮轨力信号引至车内数据采集单元;在第 1 节车厢的 3 轴上安装速度传感器获取车辆速度信号。测力轮对及速度传感器安装位置如图 1 所示。

根据测得的轮轨垂向力和横向力数据,依据交办运[2019]17 号《城市轨道交通初期运营前安全评估技术规范第 1 部分:地铁和轻轨》(以下简称“交办运[2019]17 号文”)车辆动力学响应-运行稳定性测试,对脱轨系数、轮重减载率和轮轴横向力等安

全性特征参数进行评判。交办运[2019]17 号文中相关安全性特征参数的评判标准见表 2。

表 2 交办运[2019]17 号文中相关安全性特征参数的评判标准

Tab. 2 Evaluation criteria for relevant safety characteristic parameters in JBY [2019] Document No. 17

安全性特征参数	评判标准
脱轨系数	<0.8
轮重减载率	≤ 0.6
轮轴横向力	$\leq 10\text{ kN} + P_0/3$

注: P_0 为静轴重,单位 kN。

2.2 车辆运行平稳性评价

车辆动力学响应-平稳性测试参照 GB/T 5599—2019 的相关要求,采用振动加速度传感器,将其布置于第 1 节车厢 1、2 位转向架中心偏向车体一侧 1 000 mm 的车内地板上。

车辆运行平稳性评价依据交办运[2019]17 号文的有关规定进行。车辆运行平稳性指标 W 见式(1),该指标应小于 2.5。

$$W = 7.08^{10} \sqrt{\frac{A^3}{f} F(f)}$$

(1)

式中:

- A ——振动加速度,单位 g ;
- f ——振动频率,单位 Hz ;
- $F(f)$ ——频率修正系数,见表 3。

表 3 频率修正系数

Tab.3 Frequency correction coefficient		
振动类型	f/Hz	$F(f)$
垂向振动	$0.5 \sim < 5.9$	$0.325f^2$
	$5.9 \sim 20.0$	$400/f^2$
	> 20.0	1
横向振动	$0.5 \sim < 5.4$	$0.8f^2$
	$5.4 \sim 26.0$	$600/f^2$
	> 26.0	1

3 车辆运行平稳性测试结果分析

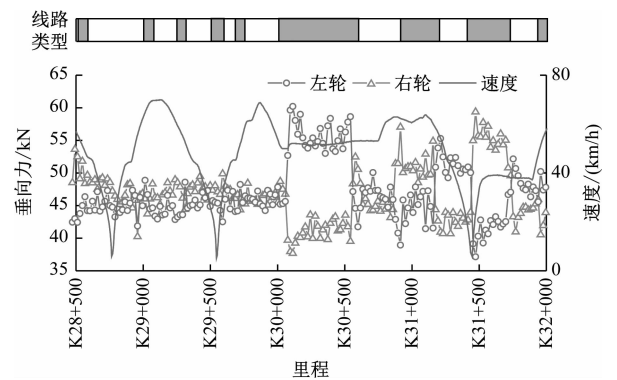
本次测试选取北京某地铁线路的三期工程,测试段线路均为地下线,设计速度为 80 km/h。测试时间为 2021 年 11 月 20 日,处于该段线路正式开通运营之前。测试列车为 6 辆编组的 3 动 3 拖 B1 型车辆,实际静轴重约 45 kN,采用 ATO(列车自动运行)模式。

将与测试列车车辆同型号的原始曲辐板轮对改装为测力轮对,并对测试列车进行运行平稳性测试。车辆轮轨垂向力、横向力随里程变化曲线如图 2—图 3 所示。由图 2—图 3 可见:

- 1) 在直线段车辆加、减速过程中车辆轮轨垂向力和横向力均无明显变化,其中轮轨垂向力基本上保持在 42.5 ~ 50.0 kN 范围内,两侧轮轨垂向力平均值基本保持在 46.5 kN 左右,这与车辆静轴重为 45.0 kN 时接近,轮轨横向力基本保持在 6.0 kN 以下,说明直线段列车运行速度对轮轨力影响较小。
- 2) 当列车运行经过曲线段时,轮轨垂向力变化较为明显;曲线内、外两侧轮轨垂向力变化规律基本相反,且均具有先骤变而后略微回落保持稳定的特征。其中:曲线外侧轮轨垂向力逐渐上升,最大值约为 60.0 kN;曲线内侧轮轨垂向力明显降低,最小值约为 37.5 kN;曲线内、外两侧轮轨垂向力最值

均处于进入曲线的初始区域;曲线两侧轮轨垂向力平均值在经过曲线段时无明显变化,仍处于车辆静轴重 45.0 kN 附近。

3) 当列车运行经过曲线段时,轮轨横向力变化明显;曲线内外两侧轮轨横向力明显上升且变化规律基本一致,均具有先骤变而后保持稳定的特征。其中:曲线外侧轮轨横向力最大,约为 30 kN;而曲线内侧轮轨横向力略低于外侧,其最大值约为 20 kN;曲线内、外两侧轮轨横向力最值均处于进入曲线的最大超高区域。



注:■代表曲线段,□代表直线段,图 3—图 7 同。

图 2 车辆轮轨垂向力随里程变化曲线

Fig.2 Curve of vehicle wheel-rail vertical force changing with mileage

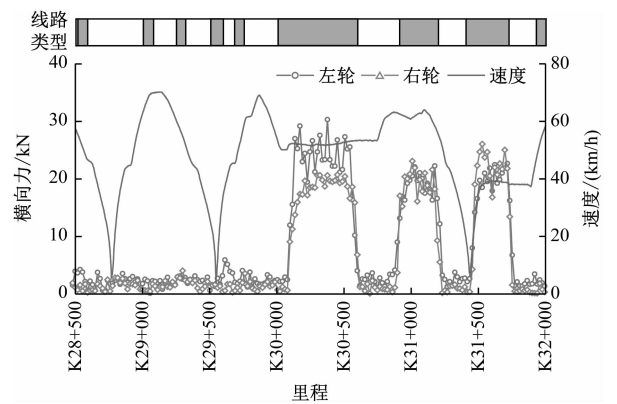


图 3 车辆轮轨横向力随里程变化曲线

Fig.3 Curve of vehicle wheel-rail transverse force changing with mileage

图 4—图 6 为车辆脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力随里程变化曲线。由图 4—图 6 可见:

- 1) 直线段列车加、减速过程中脱轨系数、轮重减载率及轮轴横向力均未明显变化,脱轨系数保持在 0.1 以内,轮重减载率保持在 0.15 以下,轮轴横向力保持在 3 kN 以内。这说明直线段列车运行速

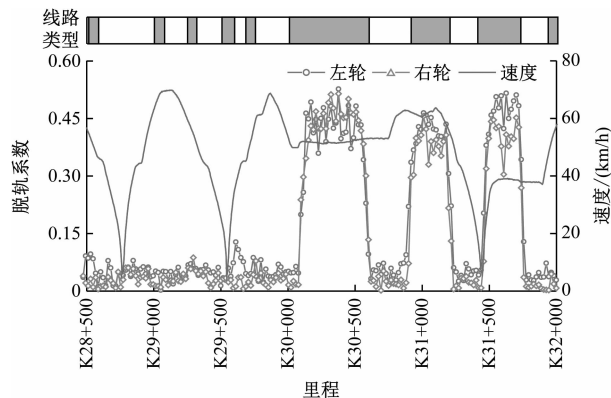


图4 车辆脱轨系数随里程变化曲线

Fig. 4 Curve of vehicle derailment coefficient changing with mileage

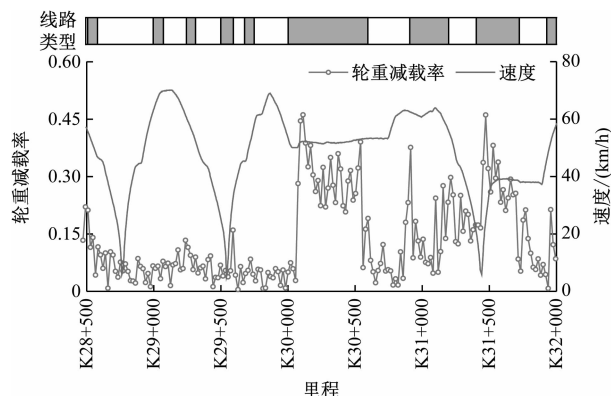


图5 车辆轮重减载率随里程变化曲线

Fig. 5 Curve of vehicle wheel weight load reduction rate changing with mileage

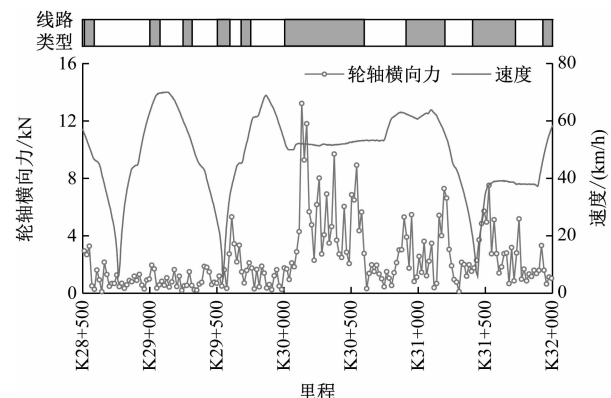


图6 车辆轮轴横向力随里程变化曲线

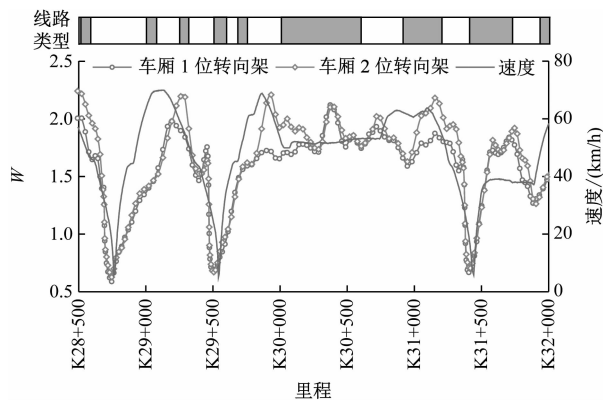
Fig. 6 Curve of vehicle wheel axle transverse force changing with mileage

度对脱轨系数、轮重减载率及轮轴横向力影响较小,即列车在设计速度内运行对其安全性特征参数无明显影响。

2) 列车运行经过曲线段时,两侧车轮脱轨系

数、轮重减载率及轮轴横向力均明显上升;曲线内、外两侧车辆脱轨系数大小及其变化规律基本一致,且具有先骤变而后保持稳定的特征,车辆最大脱轨系数达到0.55左右,且均位于进入曲线段的最高区域。车辆轮重减载率和轮轴横向力具有先骤变而后在一定范围内波动的特征,且波动范围均较大,其中轮重减载率波动到达了0.15左右,轮轴横向力波动到达了8.0 kN左右。曲线段内车辆轮重减载率最高达到0.45,且在进入曲线的初始区域到达。轮轴横向力最高可达到13.5 kN,且无明显区域特征。由此可见,列车在整个行驶过程中脱轨系数、轮重减载率及轮轴横向力等安全性特征参数均保持在规范要求范围内。

图7为列车运行过程中 W 随里程变化曲线。由图7可见:在直线段列车加、减速过程中 W 存在明显变化,随着列车运行速度的提升, W 会迅速增大,这说明直线段列车运行速度对平稳性影响较大。

图7 W 随里程变化曲线Fig. 7 Curve of W changing with mileage

列车运行经过部分曲线段时,其运行速度并非稳定,但在 $K30+000-K31+000$ 范围内速度基本稳定,且在经过曲线线路的过程中存在进出曲线段平稳性指标骤变的现象。列车在 $K31+500-K32+800$ 范围内速度基本稳定,且其由曲线段进入直线段的过程中平稳性指标存在骤变现象。由此可见,列车在整个行驶过程中平稳性指标均保持在规范要求范围内。

4 结语

1) 车辆运行安全性特征参数与线路的线型关系较大。列车通过直线段时,其安全性特征参数与速度关系不大,其数值较小且较为稳定;列车通过

曲线段时,其安全性特征参数均会增大,且其最大值出现在列车出入曲线段附近。

2) 车辆运行平稳性指标与速度关系较大,随着速度逐渐上升,车辆平稳性指标增加。在速度基本稳定的前提下,车辆运行平稳性指标与线型也有一定关系,且在列车进出曲线段时会有些许突变。

3) 在北京某地铁线路三期工程测得的脱轨系数、轮重减载率及轮轴横向力等车辆运行安全性特征参数,以及车辆运行平稳性指标等车辆动力学整体性能均满足规范要求。

参考文献

[1] 朱涛,肖守讷,阳光武. 载荷识别研究进展及其运用于铁道轮-轨载荷研究概述[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 29.
ZHU Tao, XIAO Shoune, YANG Guangwu. State-of-the-art development of load identification and its application in study on wheel-rail forces[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 29.

[2] 王常龙. 高速直辐板测力轮对标定方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
WANG Changlong. Study on calibration method of high speed straight spoke instrumented wheel-set[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[3] 洪溢颺,林建辉. 地面连续测量轮轨垂向力的方法[J]. 电子测试, 2012(6): 43.
HONG Yiyang, LIN Jianhui. Research on testing wheel-track vertical force continuously on earth[J]. Electronic Test, 2012

(6): 43.

[4] 杨潇. 基于轮轴应力的轮轨力检测方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YANG Xiao. The reserch on measurement of wheel rail force based on axle stree instrumented wheelset[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[5] 李谷,张志超,祖宏林,等. 高速铁路典型轨道病害下轮轨力响应特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(6): 30.
LI Gu, ZHANG Zhichao, ZU Honglin, et al. Experimental study on wheel-rail force response characteristics under typical track defects of high speed railway[J]. China Railway Science, 2019, 40(6): 30.

[6] 宋韦哲. 标准动车组轮轨载荷特征及线路激扰研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
SONG Weizhe. Research on wheel/rail force characteristics and line disturbance of standard EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

[7] 廖涛,徐井芒,周文涛,等. 国外有轨电车小半径曲线轮轨动力学及减磨优化分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(9): 103.
LIAO Tao, XU Jingmang, ZHOU Wentao, et al. Analysis on small radius curve wheel-rail dynamics and anti-friction optimization of trams abroad[J]. Modern Urban Transit, 2021(9): 103.

[8] 郑晓龙,鲍玉龙,徐昕宇,等. 悬挂式单轨车桥耦合动力分析[J]. 现代城市轨道交通, 2020(5): 49.
ZHENG Xiaolong, BAO Yulong, XU Xinyu, et al. Vehicle and bridge coupling dynamic analysis on suspension monorail[J]. Modern Urban Transit, 2020(5): 49.

(收稿日期:2023-03-08)

铁科院投资建设的首个境外光伏发电项目顺利并网发电

为贯彻落实国家“碳达峰、碳中和”的重大决策部署,落实中国国家铁路集团有限公司“十四五”铁路科技创新发展规划,中国铁道科学研究院集团有限公司(以下简称“铁科院”)坚持以绿色低碳发展理念为引领,以铁科院新能源技术发展中心为平台,探索分布式光伏发电、高效储能、直流配电、柔性用电、能源管理于一体的“光-储-直-柔-管”模式,优化用能结构,形成光伏在轨道交通应用的全套解决方案,提供基于企业用能需求的光伏方案设计服务。

2023年正逢“一带一路”倡议提出10周年之际,铁科院联合老中铁路公司,积极推动中老铁路沿线闲置土地发展新能源产业,分阶段投资建设光伏电站,推动中老铁路绿色低碳发展。选取老中铁路万象南机务段闲置土地,建设1.1MW分布式光伏电站先行示范段,现已正式并网发电。该光伏电站运行平稳,日均发电量约5000kWh。铁科院新能源技术发展中心还为该项目量身定制了一套中老铁路能源管理系统,可实现对沿线光伏电站运行情况的全面信息化管理,以及负荷用能管理和储能管理等。该项目是在“双碳”战略背景下,推动中老铁路高质量发展的一次有益实践。

铁科院将在继续做好中老铁路万象南机务段光伏电站示范项目运行及维护工作的同时,加紧推进中老铁路沿线集中式光伏电站的可行性研究及建设,推进光伏电站接入牵引供电系统研究,做好关键核心技术攻关,为中老铁路高质量运营提供技术支撑。

(供稿:铁科院新能源技术发展中心)