

不同轨道型式的地铁车辆-轨道耦合振动特性研究

贾小平^{1,2} 胡定祥¹ 李大地² 李家栋³ 杨 陈¹ 朱 程¹

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;
3. 南京地铁运营有限责任公司车辆分公司, 210012, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 对某地铁线路的轨道型式类型及占比进行统计, 对不同轨道型式下的车辆-轨道振动进行测试, 分析了轮轨系统的动态响应, 深入研究了普通道床 + ZX-2 扣件、普通道床 + 剪切扣件、普通道床 + 压缩扣件等典型轨道型式下轮轨耦合振动特性, 以及车轮多边形轮周对轮轨振动特性的影响。结果表明, 不同扣件刚度对轮轨振动特性的影响明显。其中: 采用普通道床 + ZX-2 扣件时, 轮轨间发生中低频轮轨力共振, 振动主频为 58 Hz, 振动能量增大; 采用普通道床 + 剪切扣件、普通道床 + 压缩扣件时, 轮轨未发生共振, 振动能量分配均衡; 多边形车轮转频倍频与轮轨系统的固有频率发生了共振, 振动能量显著增大。

关键词 地铁车辆; 轨道型式; 振动特性; 中低频轮轨力共振; 车轮轮周多边形; 钢轨波磨

中图分类号 U211.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.012

Research on Metro Vehicle-Track Coupling Vibration Characteristics of Different Track Types

JIA Xiaoping, HU Dingxiang, LI Dadi, LI Jiadong, YANG Chen, ZHU Cheng

Abstract Track types and proportion of certain metro line are counted, and vehicle-track vibration tests of different track types are carried out. Dynamic response of wheel-rail system is analyzed. Wheel-rail coupling vibration characteristics of typical track types including common track bed + ZX-2 fastener, common track bed + shear fastener, common track bed + compression fastener are studied in-depth, as well as influence of polygonal wheel on wheel-rail vibration characteristics. Results show that different fastener stiffness has evident influence on wheel-rail vibration characteristics. Among them, P2 force resonance occurs between wheel and rail when the common track bed + ZX-2 fastener is adopted, and the main frequency of vibration is 58 Hz, with vibration energy amplifying. When the common track bed + shear fastener or + compression fastener is adopted, wheel-rail resonance does not occur, and the vibration energy distribution is balanced. Polygonal wheel fre-

quency doubling frequency resonates with the wheel-rail system natural frequency, and the vibration energy increases significantly.

Key words metro vehicle; track type; vibration characteristics; P2 force resonance; wheel polygon; rail corrugation

First-author's address CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

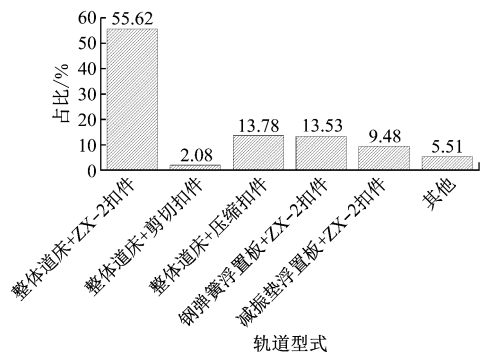
地铁线路铺设轨道时采用了大量的减振技术, 如广泛应用减振扣件、浮置板道床等, 以满足线路的减振降噪要求。目前, 大部分轨道减振产品不是采用大阻尼吸振, 而是采用降低刚度的方式进行隔振能量传播。不同的轨道型式, 其轮轨系统的参振质量、刚度及阻尼不尽相同, 振动特性复杂多变, 有些振动能量不能有效分散到轨道基础结构中, 导致轨道振动增加。振动甚至向上传递到车辆部件上, 加剧车辆的振动^[1]。车轮轮周多边形和钢轨波磨问题也日渐凸显, 噪声及异常振动频发, 转向架上部件断裂失效的情况明显增多, 这些问题都严重影响地铁车辆的安全运营。

本文针对某城市地铁开展了车辆及轨道振动测试研究, 对比不同轨道型式下的轮轨振动特性, 对减振轨道对轮轨振动特性的影响进行深入分析, 以期研究车轮轮周多边形及轨道波磨影响积累宝贵的试验数据。

1 不同轨道型式的车辆与轨道动力学测试

1.1 轨道型式统计

轨道按减振级别可分为无减振路段、中等减振路段及高等减振路段, 其中: 无减振路段采用整体道床 + ZX-2 扣件组合; 中等减振路段采用整体道床 + 压缩型/剪切型减振扣件组合; 高等减振路段则采用浮置板轨道匹配 ZX-2 扣件。图 1 为某地铁线路减振轨道的分类及其占比情况。



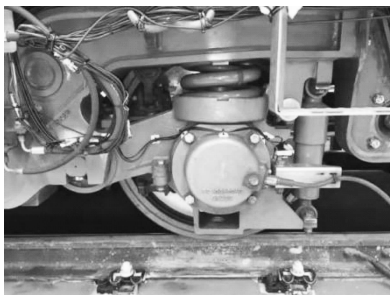
注:占比指该类型轨道型式铺设里程占有所有轨道型式铺设里程的比例。

图1 某地铁线路减振轨道分类及其占比

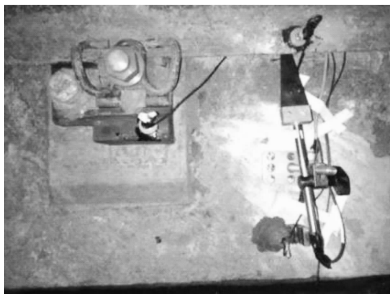
Fig. 1 Vibration-damping track types and proportion of certain metro line

1.2 车辆振动测试及轨道动态响应测试方案

选取两列车进行车辆振动测试,长期跟踪测试其车轮不圆度。在对比不同车轮状态(如镟新轮、多边形轮)转向架轮对轴箱、构架及轨道系统的振动基础上,分别进行时域、频域及时频域分析,以研究车辆-轨道系统(以下简称“轮轨系统”)的振动传递规律及特性^[2]。图2为对所选列车转向架轴箱、钢轨进行加速度测试和轨道位移测试的实景图。



a) 转向架轴箱的加速度振动测试



b) 钢轨的加速度及位移测试

图2 对转向架轴箱、钢轨进行加速度及位移测试

Fig. 2 Acceleration and displacement tests of bogie and rail

如图3所示,轨道动态响应系统由前端传感器、云智慧采集仪、工业路由器及移动终端等组成。其中:前端传感器包括位移传感器和加速度传感器;

移动终端由电脑等设备组成;云智慧采集仪可脱离外接设备独立离线工作,通过预设触发量自动采集列车通过时的数据并予以保存^[3]。

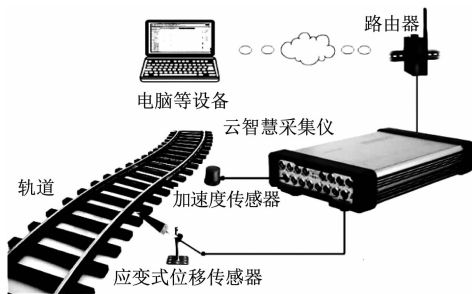


图3 轨道动态响应系统示意图

Fig. 3 Diagram of track dynamic response system

2 不同轨道型式下轮轨系统动态响应特性

2.1 车轮轮周多边形与车轮转频的关系

轮轨系统相互作用的激励主要源于车轮与钢轨的表面不平顺。表面不平顺主要包括车轮轮周多边形、擦伤、剥离等缺陷,以及钢轨波磨、轨缝接头不平顺、道岔不平顺等。对比分析多边形轮周车轮及镟修前后的车轮状态,得到镟修前和镟修后的车轮圆度如图4所示。

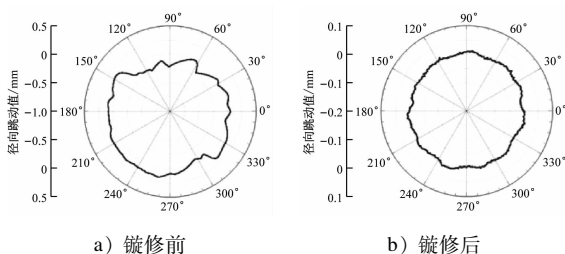


图4 车轮镟修前后车轮圆度测试结果对比

Fig. 4 Comparison of wheel roundness test results before and after reprofile

车轮转频 f 是车轮在单位时间内的旋转次数,若服役车轮轮周存在 n 阶多边形,则车轮在转动过程中在单位时间内会产生 nf 次的振动激励。设列车速度为 v (单位为 km/h),车轮半径 d (单位为 mm),则:

$$fn = \frac{v/36}{2\pi d}n \quad (1)$$

2.2 整体道床+ZX-2扣件下的轮轨振动特性

列车通过整体道床+ZX-2扣件时钢轨的加速度响应(100 Hz低通滤波结果)如图5所示。其中,加速度为正值时表示振动方向向上。在轮轨接触

瞬间,钢轨的竖向位移达到最大值,此时对应的钢轨竖向振动频率为 58 Hz。图 6 为同一时刻轴箱的竖向振动加速度时频响应。从图 5、图 6 可看出:轮轨接触瞬间产生了同相耦合振动,即:当车轮轮周多边形转频倍频与轮轨耦合振动频率接近时,轮轨接触系统产生中低频轮轨力(又称“P2 力”)共振,导致轴箱加速度变大,振动能量增加。

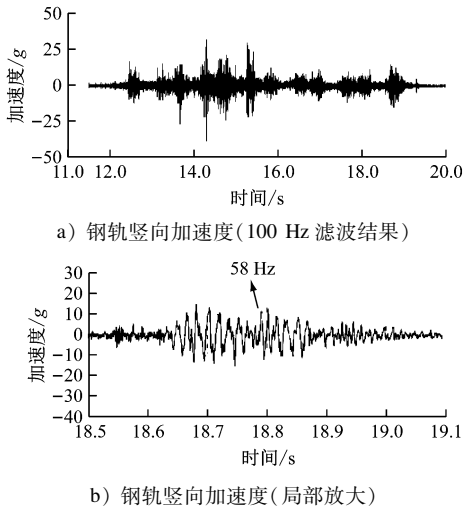


图 5 整体道床 + ZX-2 扣件下钢轨加速度响应曲线

Fig. 5 Rail acceleration response curve with common track bed + ZX-2 fastener

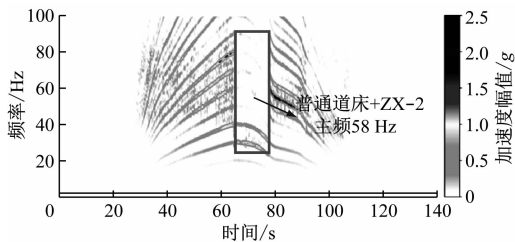


图 6 整体道床 + ZX-2 扣件下轴箱竖向加速度时频

Fig. 6 Time-frequency of axle box vertical acceleration with common track bed + ZX-2 fastener

2.3 整体道床 + 剪切扣件下轮轨动态响应特性

图 7 为列车通过整体道床 + 剪切扣件轨道时钢轨的位移-加速度响应曲线。在轮轨接触瞬间,钢轨竖向加速度振动主频在 65 Hz 左右,其轴箱加速度在对应时刻的主频并不明显(如图 8 所示),可以看出,此时轮轨未发生耦合振动。

2.4 整体道床 + 压缩扣件下轮轨动态响应特性

图 9 为列车通过整体道床 + 压缩扣件轨道时钢轨的位移-加速度响应曲线。在轮轨接触瞬间,钢轨加速度无单一主频,对应时刻轴箱加速度在 100 Hz 以下无频率集中(见图 10),轮轨系统未发生耦合振动。

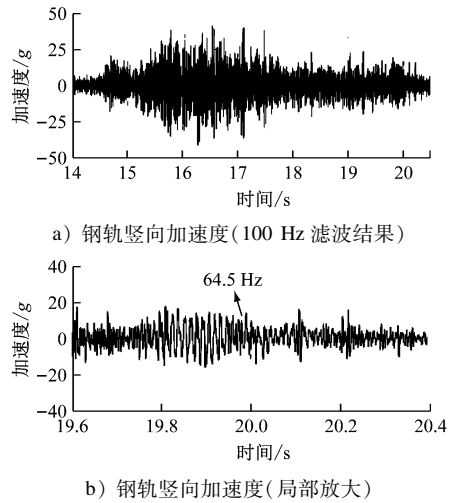


图 7 整体道床 + 剪切扣件下钢轨的加速度响应

Fig. 7 Rail acceleration response with common track bed + shear fastener

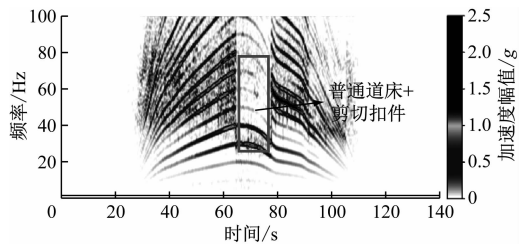


图 8 整体道床 + 剪切扣件下轴箱竖向加速度时频

Fig. 8 Time-frequency of axle box vertical acceleration with common track bed + shear fastener

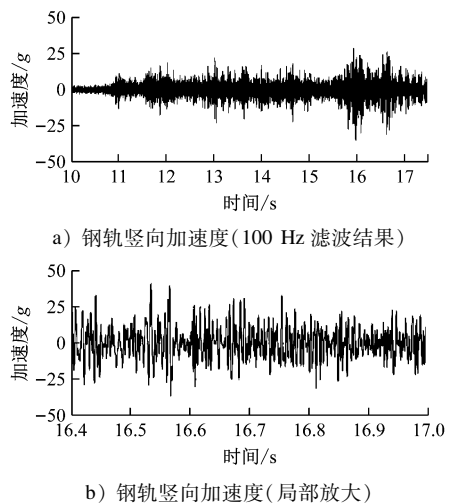


图 9 整体道床 + 压缩扣件下的钢轨竖向加速度时频

Fig. 9 Time-frequency of rail vertical acceleration with common track bed + compression fastener

3 轮轨耦合振动对车轮轮周多边形和钢轨波磨的影响

在多边形轮周车轮运行过程中,轮轨耦合振动

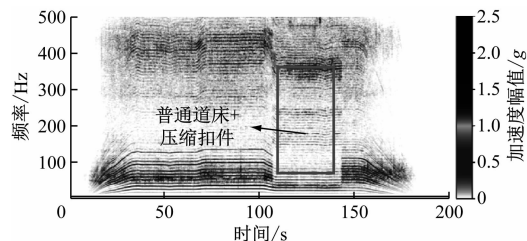


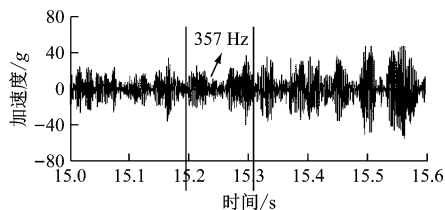
图10 整体道床+压缩扣件下轴箱竖向加速度时频

Fig. 10 Time-frequency of axle box vertical acceleration with common track bed + compression fastener

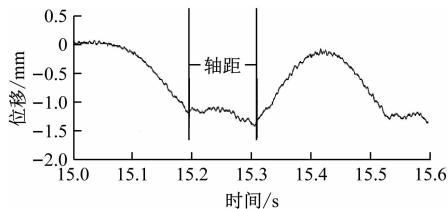
加剧,快速形成轮轨间的不均匀磨耗。特别是当振动为周期性的谐振时,轮轨表面因长期磨损产生周期性磨耗,主要表现为车轮轮周多边形磨耗和钢轨波浪形磨耗。

地铁线路全部采用ATO(列车自动运行)模式运行。虽然轨道的类型较多,不同型式轮轨的振动特性各有不同,但对于特定的轨道型式而言,因其振动特性固定不变,在周期性、特定频域下的轮轨耦合振动将加剧轮轨的周期性不均匀磨耗。

图11为实测某地铁B型车辆通过钢轨时,钢轨竖向加速度出现拍振,图11b)中的位移为负值时表示钢轨向下发生位移。如图11所示,在2.3 m轴距范围内钢轨振动存在2个拍振信号,轮轨接触点为周期信号节点,拍振频率为375 Hz。究其原因,是由于是2个轮对间钢轨第二阶竖向弯曲模态所致,此频率与钢轨波磨频率一致。



a) 钢轨垂向加速度出现拍振



b) 钢轨位移

图11 两轴距间钢轨垂向加速度拍振信号

Fig. 11 Beat signal of rail vertical acceleration between two wheel bases

4 结语

1) 多边形轮周的车轮引起车轮转频倍频与轮

轨在50~100 Hz振动频率共振,造成镟修前车轮(多边形轮周的车轮)在50~100 Hz频段时轴箱振动发生能力集中。车辆镟修后,消除了车轮轮周的多边形,共振现象也随之消失,振动能量大幅减小。

2) 扣件刚度对轮轨耦合振动的影响明显。对于普通道床+ZX-2扣件型式轨道,其轮轨发生P2力耦合共振,耦合振动主频在58 Hz附近,此时振动能量显著增大;而对于普通道床+剪切扣件、普通道床+压缩扣件型式,其轮轨未发生P2力耦合共振。从振动能量分布角度看,采用了压缩扣件的轮轨振动能量分配较为均衡,可避免能量集中。

3) 轮对轴箱在300~400 Hz的高频振动由钢轨波磨引起。轴间距为2.3 m的转向架的钢轨竖向加速度主频为375 Hz,与钢轨二阶竖弯模态频率、钢轨波磨频率均一致。

本文研究了轮轨耦合振动特性,不同轨道型式下轮轨耦合振动机理比较复杂,振动的特性差别很大,特定轨道系统下轮轨振动加剧,对车辆和轨道结构产生了较大影响。可进一步开展基于减振轨道系统与地铁车辆系统耦合振动理论的分析研究,细化研究轨道中扣件、轨枕、道床的质量、刚度、阻尼、模态等参数和车辆中轮对、构架、车体模态及悬挂参数动态特性对轮轨耦合振动特性的影响。突破传统设计思维,以新型轮轨耦合振动边界条件为基础,建立以车辆和轨道振动、噪声为控制指标的正向设计流程。

参考文献

- [1] 刘维宁,马蒙.地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M].北京:科学出版社,2014.
LIU Weining, MA Meng. Prediction, evaluation, and control of environmental impact of metro train vibration[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 李大地.南京地铁4号线转向架动力学测试报告[R].南京:中车南京浦镇车辆有限公司,2017.
LI Dadi. Nanjing Metro Line 4 bogie dynamics test report (research report of traction power state key laboratory)[R]. Nanjing: CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 2017.
- [3] 马广轩.南京地铁4号线轨道动力学与动态响应测试报告[R].南京:中车南京浦镇车辆有限公司,2017.
MA Guangxuan. Test report on track dynamics and dynamic response of Nanjing Metro Line 4 (test report of China Orient Institute of Noise & Vibration)[R]. Nanjing: CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 2017.

(收稿日期:2021-08-05)