文章编号：1006-1355(2019)02-0105-05+201

# 地铁小半径曲线段上列车车内振动测试与特性

刘福金，王安斌，谢莹松，戚柳飞

（上海工程技术大学 城市轨道交通学院，上海 201620）

**摘 要**：列车行驶在小半径曲线段上时的振动加速度一般大于在同种轨道结构直线段上的值。为了研究在小半径曲线段上行驶时列车车内振动的频谱特性，选择半径为350 m的地下隧道区间进行测试，该区间内分布着钢弹簧浮置板整体道床、科隆蛋扣件和DT-III型扣件3种轨道结构。分析采用双面胶带、螺钉等多种传感器安装方式对测量结果的影响，采用DASP V11软件测量一天中3个不同时段车厢地板垂向和横向振动加速度，并进行Z振级和X振级分析。结果表明：半径为350 m的曲线隧道内，钢弹簧浮置板整体道床、科隆蛋扣件和DT-III型扣件3个区段上车厢地板振动对应的垂向振级峰值频率分别为8 Hz和63 Hz，3.15 Hz、8 Hz和63 Hz，50 Hz和100 Hz；横向振级峰值频率为63 Hz，63 Hz，50 Hz和100 Hz；钢弹簧浮置板整体道床段和科隆蛋扣件段上车厢地板振动加速度大于其在DT-III 型扣件段上的值。本次测试可为小半径曲线段上列车振动噪声问题提供一些减振降噪措施选择方面的参考，同时可为在小半径曲线段上车厢地板振动特性问题的研究提供支持。

**关键词**：振动与波；地铁；小半径曲线；车内振动加速度；测试方法；频谱特性分析

**中图分类号**：U212.35；U270.1$^{+}$1 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2019.02.020

# Measurement and Characteristics Analysis of Interior Vibration of Metro Vehicles in Small Radius Curved Sections

*LIU Fujin*, *WANG Anbin*, *XIE Yingsong*, *QI Liufei*

（School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China）

**Abstract**: In the metro line, vibration acceleration of the train traveling in the small radius curved section is generally greater than that in the straight section. In order to study the spectral characteristics of the vibration in the metro train traveling in the small radius curved section, an underground tunnel section with a radius of 350 m is selected for testing. The steel spring floating board monolithic track bed, Cologne egg fasteners and DT-III fasteners are placed in the section respectively. The effects of various sensor mounting methods, such as double-sided tape and screws, on the measurement results are analyzed. The vertical and lateral vibration accelerations of the carriage floor at three different times of the day are measured using DASP V11 software, and Z-level and X-level analysis is performed. The results show that the peak frequencies of the vertical vibration level corresponding to the steel spring floating board monolithic track bed, Cologne egg fasteners and DT-III fastener segments are 8 Hz and 63 Hz,3.15 Hz、8 Hz and 63 Hz, 50 Hz and 100 Hz, respectively; The peak frequencies of the lateral vibration level are 63 Hz, 63 Hz, 50 Hz and 100 Hz, respectively.The vibration acceleration of the vehicle floor in the monolithic track bed section and Cologne egg fasteners section are larger than that in the DT-III fasteners sections. This test results provide some references for vibration and noise reduction measures, as well as some support for the study of the floor vibration characteristics for the small radius curved segments.

**Keywords**: vibration and wave; metro; small radius curve; interior vibration acceleration; test method; analysis of spectrum characteristics

地铁作为缓解城市交通系统运营紧张的一个重要组成部分，正日益受到广大市民的青睐。政府在大力倡导建设自己的地铁网络，并呼吁市民乘坐地铁出行，减少碳排放量；市民也在每天的工作出行中频繁地使用着地铁。因此，地铁建设在各大城市中日益兴盛。然而，由于地铁日复一日地工作，运行环境也在不断变化着，从而产生了困扰广大市民以及地铁公司技术人员的问题，那就是地铁振动与噪声问题。当振动高于某一限度时，将会严重影响乘客

收稿日期：2018-07-09
基金项目：上海市科学技术委员会专项资金资助项目（17930501100）
作者简介：刘福金(1991−)，男，江西省赣州市人，硕士研究生，主要研究方向为轨道交通振动噪声特性。
通信作者：王安斌，男，国家“千人计划”特聘专家，教授，博士生导师。
E-mail: wangab725@163.com

的乘坐舒适性[1]。

国内外很多学者对地铁车辆的振动特性开展过一系列的研究工作[1–6]，包括振动源、减振降噪技术等。Diana[7]通过实测得出车体中部地板振动加速度和车体端部振动加速度基本相同；盛涛、张善莉[8]等对软土质自由场地下方地铁直线段隧道内的轨道扣件进行三向振动加速度测试，分析了隧道内的振动频谱特性和传递规律。贾颖绚、杜林林[9]等在北京地铁5号线某曲线段对安装$DTVI_2$扣件和Vanguard扣件工况下列车运行引起的地面振动进行现场测试，同时建立相应三维动力学数值模型来分析曲线段地表振动。

研究发现，线路轨道结构相同时，列车客室在弯道处的振动量级明显高于直线段处，特别是小半径曲线段处的列车振动更为严重。本文将区别于前人对列车运行在直线段时客室振动特性及量级的研究，首先从振动加速度计安装方式的选择方面进行阐述，然后选取曲线半径为350 m的区间，而在这一区间分布着钢弹簧浮置板整体道床、科隆蛋扣件和DT-III型扣件对应的3种不同轨道结构形式，通过实地分时段多次测试某地铁线路A型车在隧道内运行时车厢地板垂向和横向振动加速度，从而得到小半径曲线段在不同轨道结构工况对应的车内地板垂、横向振动特性。

# 1 测试方案

## 1.1 测试设备

车厢地板振动加速度测试采用北京东方振动与噪声技术研究所的INV3062-C1多通道数据采集仪，并配套相应的DASP V11数据采集系统。此套采集设备适用于多学科门类的数据采集工作，操作灵活方便，采集仪自身具有信号发生器、模态分析仪、示波器和频率计等仪器所具备的功能，携带方便，同时配备一台工业笔记本用于实时显示数据采集变化情况。选择PCB的ICP压电式加速度传感器，垂向振动测量选用5 g量程，横向振动测量选用0.5 g量程，其灵敏度分别为100.3 mv/m/s²、1.067 mv/m/s²。此传感器具有强抗干扰、噪声小和低阻抗输出等优点，因此测试中性能稳定，数据具有高可信度。

## 1.2 振动加速度计的安装方式

对于地铁客室振动的研究方法主要分为：

(1) 计算机数值模拟；

(2) 实地测试；

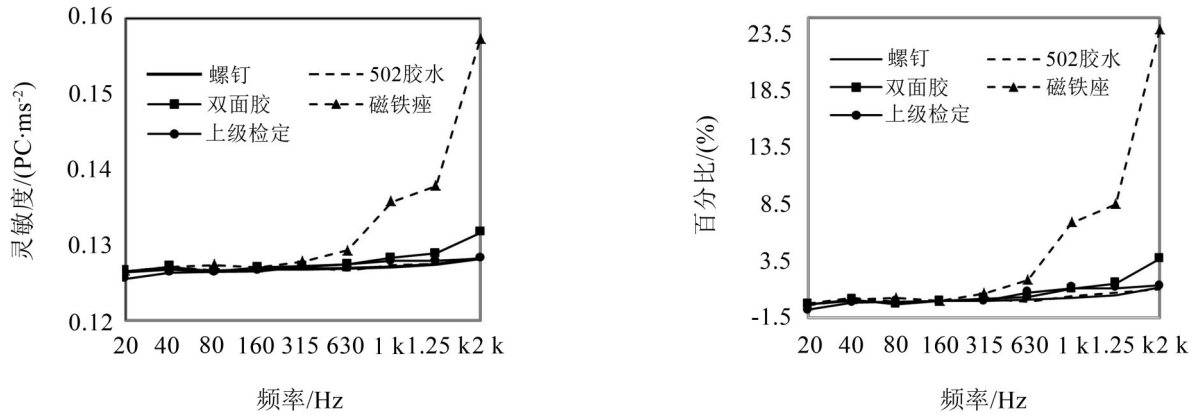
(3) 理论分析[10]。

振动传感器的安装方式可分为手持探针、蜂蜡、双面胶带、磁座、胶粘和螺栓等方式。目前常用的比较频繁的是双面胶带、磁座、胶粘和螺栓等4种。不同的安装方式会产生不同的安装刚度，这会造成整个传感器系统的自振频率发生变化。安装刚度越大，传感器系统的自振频率也越高，因而能满足更高的振动频带测量。文献[11]专门为振动传感器安装方式对传感器幅值灵敏度的影响进行了测试，测试结果见图1。

由ISO 2631-1997[12]可知，人体对振动反应敏感的频率范围是1 Hz～400 Hz，而最为敏感的频率范围应是1 Hz～80 Hz。文献[11]结果表明，频率低于1 000 Hz时采用双面胶带安装方式比较合理；当频率高于1 250 Hz时采用螺钉安装方式较为合理。由于地铁车厢地板铺设有塑胶垫，同时也为了方便多次连续测量车厢地板振动加速度，故选择双面胶带+螺钉相结合的安装方式。

## 1.3 测点位置

根据文献[7]所得结论以及GB/T14412-200《机械振动与冲击加速度计的机械安装》和GB/T2298-2010《机械振动、冲击与状态监测 词汇》，测量中选




(a) 灵敏度幅值曲线 (b) 频响误差曲线

图1 安装方式对幅值灵敏度的影响

择列车中部3号车厢靠近中间的位置布置测点，这有利于后期数据分析比较，如图2所示。

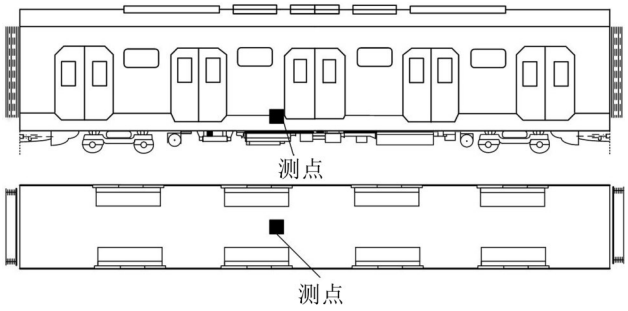



图2 车内振动测点布置图

本次测试中，振动加速度传感器安装在一个长方体铝块上，长宽高尺寸分别为3×3×4，单位为cm。在铝块的垂向和横向分别开一个螺纹孔用于安装振动加速度计，再把垂向另一面用双面胶带和布基胶带固定在车厢地板表面，测点处振动加速度传感器布置如图3所示。

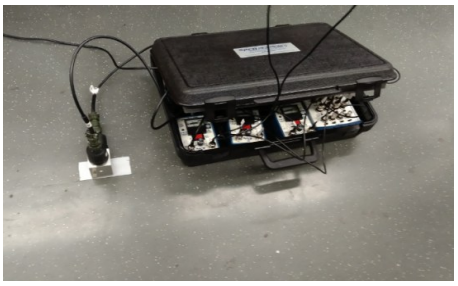


图3 振动传感器布置图

### 1.4 测试内容

选择在某地铁线路中曲线半径为350 m的隧道内进行本次车厢地板振动加速度测试，区间线路总长为1.4 km，在该路段分布着钢弹簧浮置板整体道床、科隆蛋扣件和DT-III型扣件对应的3种不同轨道结构形式。为了保证测试数据的全面性及正确性，选取了一天中的14:00－16:00、17:00－19:00和22:00－23:00 3个时间段进行车厢地板振动测试，3个时间段分别代表了运行过程中列车负载处于半载、满载和空载等情况，并且每个时间段都要求测量10次以上不同列车车次车内振动。

## 2 振动评价与数据处理方法

目前国际上采用最为广泛的评价振动强度参数是加速度，而加速度也通常会用加速度级$L_a$表示，单位为dB，其定义为

$$L_a = 20\lg\frac{a}{a_0} \tag{1}$$

式中：$a$为振动的加速度有效值；$a_0$为加速度参考值（$10^{-6}m/s^2$）。

在实际工作中，为了简化测量工作，同时也为了便于理解，通常人们会用振动加速度级有效值来评价振动对人体的效应，其定义为

$$VL = 10\lg\left(10^{\frac{V_AL_1+a_1}{10}} + \cdots + 10^{\frac{V_AL_i+a_i}{10}}\right) \tag{2}$$

式中：VL为振动计权加速度级（dB）；$V_AL_i$为每个频带的振动加速度级；$a_i$为各个频带的计权因子。

对于垂向振动，需采用Z振级进行评价，而横向振动则采用X振级进行评价。对随机信号进行分析时，有效值能反映振动能量的大小，能涵盖振动时间的全过程，因此最适合用来评价振动量级。式（2）中引入的Z振级和X振级1/3倍频程计权因子可参考文献[12]。为了找出所测多趟不同运行列车车厢地板的共同振动特性，利用算数平均值进行分析，即对所测多趟车的振动加速度级在1/3倍频程条件下对每一个中心频率的相应Z振级和X振级进行求和再平均，公式如（3）所示

$$M = \frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{n} \tag{3}$$

式中$M$表示算数平均值，$X_n$表示1/3倍频程各中心频率对应的加速度级，$n$（=1,2,3…）表示所测车次。

## 3 测试结果与分析

在地铁列车经过隧道内半径为350 m曲线段时进行车厢地板振动加速度测试，分别选在14:00至16:00、17:00至19:00和22:00至23:00 3个时间段测试，且每个时间段都测量了数趟不同车次运行列车，同时在该段线路中分布着钢弹簧浮置板整体道床、科隆蛋扣件和DT-III型扣件对应的3种轨道结构。

由式（1）可算得各列车车厢地板垂向和横向的振动加速度级La，用式（2）算得各列车车厢地板垂向和横向振动加速度级有效值VL，并且根据式（3）对各列车车厢地板垂向和横向振动加速度级La和有效值VL取平均值，分析结果如下。

表1为多趟运行列车车厢地板垂向振动Z振级和横向振动X振级总级值，已对同一时段所测多趟列车振级有效值进行了平均。

表1 车厢地板垂向与横向振动加速度级有效值

| | 不同时段 | 钢弹簧浮置板 | 科隆蛋 | DT-III |
|---|---|---|---|---|
| 垂向加速度/dB(Z) | 14:00－16:00 | 105 | 104 | 95 |
| | 17:00－19:00 | 105 | 103 | 94 |
| | 22:00－23:00 | 106 | 103 | 96 |
| 横向加速度/dB | 14:00－16:00 | 95 | 97 | 90 |
| | 17:00－19:00 | 93 | 95 | 91 |
| | 22:00－23:00 | 94 | 96 | 89 |

对于垂向振动来说，在3个测试时间段中，同种轨道结构线路段对应的车厢地板垂向振动Z振级总

级值相差在1 dB(Z)～2 dB(Z)，其中钢弹簧浮置板整体道床段的振动Z振级总级值要大于科隆蛋扣件段和DT-III型扣件段，并且3段的车厢地板振动Z振级总级值都大于94 dB(Z)。对于横向振动来说，科隆蛋扣件段的横向振动X振级总级值要大于钢弹簧浮置板整体道床段和DT-III型扣件段，并且3段的车厢地板振动X振级总级值都大于89 dB。

从表1可以看出，钢弹簧浮置板整体道床段和科隆蛋扣件段的车厢地板振动Z振级和X振级总级值都远大于DT-III型扣件段，且同种轨道结构垂向振动Z振级总级值大于横向振动X振级总极值。

图4为14:00至16:00时段车厢地板垂向振动加速度Z振级频谱图，已对多趟列车相同中心频率的振级进行了平均。

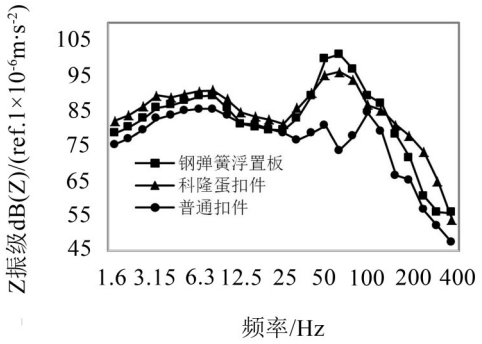



图4 14:00至16:00时垂向振动加速度级1/3倍频谱图

由图可知，列车运行在半径为350 m的曲线隧道上经过钢弹簧浮置板整体道床段时车厢地板垂向振动加速度级峰值为89 dB(Z)，其对应频率为8 Hz，峰值101 dB(Z)对应频率为63 Hz，且在63 Hz处峰值达到最大值；在科隆蛋扣件段车厢地板垂向振动加速度级峰值为89 dB(Z)，其对应频率为3.15 Hz，峰值91 dB(Z)对应频率为8 Hz，峰值96 dB(Z)对应频率为63 Hz，并在63 Hz处峰值达到最大；在DT-III型扣件段车厢地板垂向振动加速度级峰值为81 dB(Z)，其对应频率为50 Hz，峰值84 dB(Z)对应频率为100 Hz，而在100 Hz处峰值达到最大值。

图5为14:00至16:00时段车厢地板横向振动加速度X振级频谱图，已对多趟列车相同中心频率的振级进行了平均。

由图可知，列车在半径为350 m的曲线隧道上运行经过钢弹簧浮置板整体道床段时车厢地板横向振动加速度级峰值为68 dB，其对应频率为63 Hz，在2 Hz处时取得最大值86 dB；在科隆蛋扣件段的峰值为63 dB，其对应频率为80 Hz，在2 Hz处时达到最大值88 dB；在DT-III型扣件段的峰值为55 dB，其对应的频率为50 Hz，峰值60 dB对应频率为100 Hz，最大值83 dB出现在2 Hz处。

图6为17:00至19:00时段车厢地板垂向振动加速度级频谱图，已对多趟列车相同中心频率的振级进行了平均。

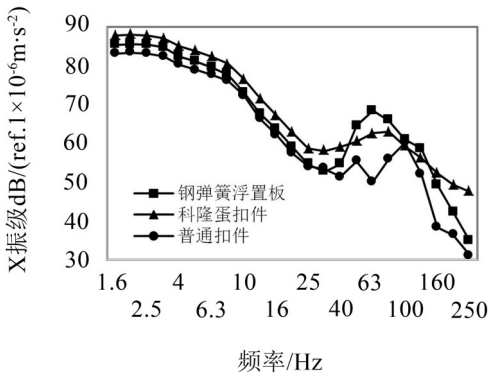



图5 14:00至16:00时横向振动加速度级1/3倍频谱图

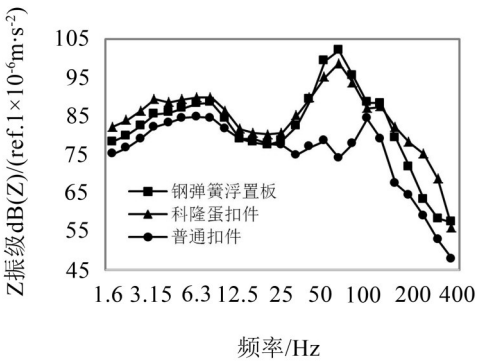



图6 17:00至19:00时垂向振动加速度级1/3倍频谱图

由图可知，列车在半径为350 m的曲线隧道上经过钢弹簧浮置板整体道床段时的车厢地板垂向振动加速度级峰值为88 dB(Z)，对应频率为8 Hz，峰值102 dB(Z)对应频率是63 Hz，而最大峰值位于63 Hz处；在科隆蛋扣件段的峰值为89 dB(Z)，对应频率为3.15 Hz，峰值90 dB(Z)对应频率为8 Hz，峰值99 dB(Z)对应频率为63 Hz，且在63 Hz处峰值达到最大值；在DT-III型扣件段的峰值为78 dB(Z)，对应频率为50 Hz，峰值84 dB(Z)对应频率是100 Hz，而在100 Hz处峰值取最大值。

图7为17:00至19:00时段车厢地板横向振动加速度X振级频谱图，已对多趟列车相同中心频率的振级进行了平均。

由图可知，列车在半径为350 m的曲线隧道上经过钢弹簧浮置板整体道床段时车厢地板横向振动加速度级峰值为73 dB，对应频率为63 Hz，且在2 Hz处振级达到最大值87 dB；在科隆蛋扣件段的峰值为68 dB，对应频率为63 Hz，在2 Hz处取得最大值89 dB；在DT-III型扣件段的峰值为58 dB，对应频率是50 Hz，峰值为56 dB对应频率是100 Hz，而在频率为2 Hz处取得最大值82 dB。

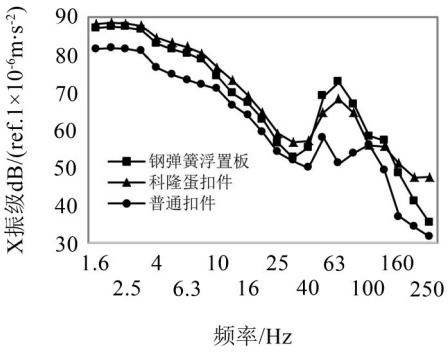



图 7　17:00至19:00时横向振动加速度级1/3倍频谱图

图8为22:00至23:00时段车厢地板垂向振动加速度级频谱图，已对多趟列车相同中心频率的振级进行了平均。

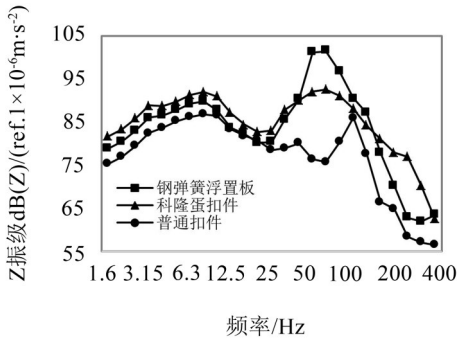



图 8　22:00至23:00时垂向振动加速度级1/3倍频谱图

由图可知，列车在半径为350 m曲线隧道上经过钢弹簧浮置板整体道床段时车厢地板垂向振动加速度级峰值为90 dB(Z)，对应频率是8 Hz，峰值101 dB(Z)对应频率是63 Hz，且在频率63 Hz处峰值取最大；在科隆蛋扣件段峰值为89 dB(Z)，其对应频率是3.15Hz，峰值92dB(Z)对应频率是8Hz，峰值93 dB(Z)对应频率是63 Hz，而在63 Hz处达到最大；在DT-III型扣件段峰值为80 dB(Z)，其对应频率是40 Hz，峰值86 dB(Z)对应频率是100 Hz，在频率100 Hz处取最大值。

图9为22:00至23:00时段车厢地板横向振动加速度级频谱图，已对多趟列车相同中心频率的振级进行了平均。由图可知，列车在半径为350 m曲线隧道上经过钢弹簧浮置板整体道床段时车厢地板横向振动加速度级峰值为67 dB，对应频率是63 Hz，并在频率2 Hz处取得最大值；在科隆蛋扣件段的峰值为63 dB，对应频率是63 Hz，在2 Hz处取得最大值；在DT-III型扣件段峰值为61 dB，对应频率是100 Hz，而在2 Hz处达到最大值。

## 4　结 语

本文提出了一种测量地铁车厢地板振动加速度的振动加速度传感器安装方式，即双面胶带+螺钉。

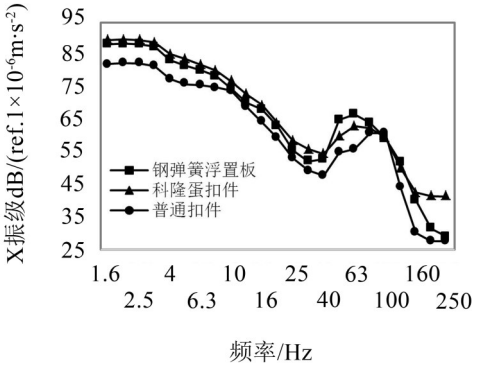



图 9　22:00至23:00时横向振动加速度级1/3倍频谱图

此方式分别结合了双面胶带和螺钉的优点，操作简便，可重复进行。

利用这种新方式在半径为350 m的曲线隧道上测试，得到如下结论：

(1) 在同一区间上，在钢弹簧浮置板整体道床段和科隆蛋扣件段时的车厢地板垂向振动Z振级和横向振动X振级都明显大于在DT-III型普通扣件段。由此可知，在同一种条件下，DT-III型扣件的减振性能要优于钢弹簧浮置板整体道床和科隆蛋扣件。

(2) 对于垂向振动加速度，在钢弹簧浮置板整体道床段车厢地板振动在频率8 Hz和63 Hz处都出现了峰值，而在钢弹簧浮置板段的自振频率出现在7.5 Hz～8 Hz，所以测试结果具有很高可信度，同时表明双面胶带+螺钉的安装方式可行性强；在科隆蛋扣件段时在3.15 Hz、8 Hz和63 Hz处分别出现峰值；在DT-III型扣件段时在50 Hz和100 Hz处出现峰值。

(3) 对于横向振动加速度，在钢弹簧浮置板整体道床段车厢地板在63 Hz出现了峰值；在科隆蛋扣件段峰值出现在63 Hz处；在DT-III型扣件段时在50 Hz和100 Hz处也都出现了峰值；振级最大值出现在2 Hz。

(4) 测试结果有助于科研人员了解在小半径曲线段车厢地板的振动加速度频谱特性，同时也为改善在小半径曲线段上时车厢地板的振动加速度频谱特性及处理振动噪声问题提供参考。

**参考文献：**

[1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京：科学出版社，2007.

[2] 徐博，周劲松，赵阳阳，等. 地铁车辆车体局部结构振动控制研究[J]. **铁道车辆**，2015，53(2)：1-4.

[3] 张玉梅，肖新标，温泽峰，等. 低地板车结构传声及车内噪声特性研究[J]. **噪声与振动控制**，2014，34(4)：1-4.

[4] 郭金莹，王勇，石怀龙. 地铁车辆地板共振机理分析及解决方案[J]. **机械**，2013，40(9)：6-9.

（下转第201页）