文章编号：1006-1355(2019)01-0146-05

# 成渝高速铁路某高架桥段地面三向振动特性分析

彭也也[1]，贺玉龙[1]，梅昌艮[2]，周 青[1]

（1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院，成都 610031；
2. 四川理工学院 化学与环境工程学院，四川 自贡 643000）

**摘 要**：地面振动是高速铁路运营期的主要环境问题之一，为了研究高速铁路高架桥段地面振动的传播和衰减规律，选择成渝高速铁路某桥梁段进行了现场地面三向振动测试。在时域和频域内分析地面三向振动的时程特征和频谱特征，以及垂向振动、水平向振动随距离的传播特性。结果表明，在同一距离处，横向、纵向振动加速度幅值及有效值均大于垂向；三向振动随距离的增加，加速度幅值及有效值均呈衰减趋势；垂向和纵向振动中，高频成分衰减迅速，低频衰减速度较缓，而横向则是低频和高频均衰减迅速，但远场仍是以低频为主；三向振动远场优势频率均在10Hz左右；计权垂向振级高于水平向振级，未计权的水平向振级均大于垂向振级。

**关键词**：振动与波；高速铁路；高架桥；现场振动测试；三向振动

**中图分类号**：U238；O329 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2019.01.028

# Tri-directional Measurements and Analysis of the High-speed Train induced Ground-borne Vibration on a Viaduct of Chengdu-chongqing High-speed Railway

*PENG Yeye* [1], *HE Yulong* [1], *MEI Changgen* [2], *ZHOU Qing* [1]

( 1. Faculty of Geoscience and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. School of Chemistry and Environmental Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan China )

**Abstract :** Ground-borne vibration induced by the high speed railway operation is one of the major environmental problems. Previous studies mainly focus on the vertical vibration with the horizontal vibration ignored. In order to study the tri-directional ground-borne vibration of a bridge structure, a field measurement is carried out in a viaduct section of Chengdu-Chongqing high speed railway. First of all, the tri-directional vibration characteristics of time history and frequency spectrum are examined in time domain and frequency domain respectively. Then, the propagation characteristics of the weighted and plain root-mean-squares (RMS) of accelerations in the three directions are investigated. The results demonstrate that the weighted RMS of acceleration of the vertical vibration is greater than that of the horizontal vibration. However, the plain RMSs of accelerations of both the longitudinal and lateral vibrations are greater than that of vertical vibration. Therefore, the horizontal vibration should not be neglected when analyzing the propagation characteristics of the ground-borne vibration induced by high-speed railway. Moreover, the vertical weighted acceleration can play a dominant role when evaluating the environmental effect of high-speed railway vibration.

**Keywords :** vibration and wave; high-speed railway; viaduct; in-situ vibration measurement; tri-directional vibration

高速铁路在轨道不平顺、车轮表面不光滑及车辆轴重等激励下产生车辆-轨道-桥梁相互作用引起桥梁结构振动，并通过桥墩基础向周围岩土层传播，诱发附近岩土体及邻近建筑物二次振动，严重影响铁路沿线居民的工作、学习和生活。随着我国高速铁路的快速发展，由此产生的环境振动问题愈加突出。由于车辆-轨道-桥梁-桥墩-土体作用系统的复杂性，现场测试仍为重要的环境振动研究手段，并能为理论分析、建模预测等提供有效的验证。贺玉龙等[1]通过对京津城际铁路桥梁段列车运行时的环境

**收稿日期**：2018-03-20
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目（51478397）
**作者简介**：彭也也(1992–)，男，湖北省天门市人，硕士研究生，研究方向为轨道交通环境振动。
**通信作者**：贺玉龙(1975–)，男，博士，教授，主要研究方向为轨道交通环境振动与噪声。
E-mail: yulonghe@163.com

振动进行测试，分析了高架桥环境振动Z振级的衰减特性，并验证了各振动预测公式的适用情况。张光明等[2]通过对成灌铁路某桥梁段地面振动进行现场测试，研究了CRTS III型板式无砟轨道桥梁段Z振级的衰减规律。朱志辉等[3]通过比较车-桥-墩-桩-土耦合振动系统与车-桥系统及车-桥-墩系统的动力响应特性，分析了桥墩和桩基等下部结构对车桥耦合振动的影响，以及车桥耦合振动对周围场地土垂向和横向两向振动的影响。李小珍等[4]对某城际快速铁路在高架桥段引起的环境振动进行了现场实测，研究了车速等对横向和垂向振动大小的影响。毛昆明等[5]等通过测试分析了车速、车厢数量等对沪宁城际高架桥段垂向振动大小的影响。屈畅姿等[6]通过对武广高速铁路现场振动测试，分析了轴重、车速等对路堤段振动特性的影响。高广运等[7]采用薄层法对秦沈客运专线引起的地面垂向振动进行分析，并与实测结果进行了对比。

目前，大部分学者进行的振动测试主要关注垂向振动，对横向振动测试不多，但也有学者注意到了三向振动测试的全面性及必要性。李小珍等[8]通过实测津秦客专250 km/h～385 km/h通过时的三向振动，研究了三向振动随距离的衰减特性及车速对振动加速度级的影响。陈建国等[9]等现场实测了京广铁路的振动情况，研究发现列车的速度对地面水平向振动的主要频率有影响，对垂向振动的主要频率影响不大；列车通过时，同一点位置的垂向振动大于其他两个水平向振动。

我国新建高铁多采用高架桥形式，列车在高架桥段高速运行时引起的地面振动亦不可忽视。为此，本文对成渝高速铁路某高架桥段地面三向振动进行了现场测试，以期为未来理论分析、建模等提供参考依据。

## 1　现场测试概况

测试选取成渝高速铁路某高架桥段，位于简阳市海螺乡，设计速度350 km/h，运营列车为CRH380D型动车组，列车车辆数分别为8节编组和16节编组，列车长度为215.3 m和428.1 m。为避免其它因素干扰振动测试，所选择的高架桥梁位于开阔的旱地中。现场测试布点如图1所示。

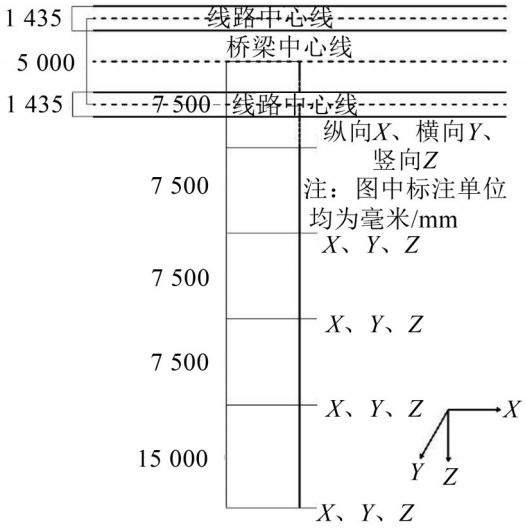



图1　现场测试布点图

以测试桥墩上方的桥梁中心线为原点建立直角坐标系，顺桥向为X轴（纵向），水平面垂直于桥梁方向为Y轴（横向），竖直向下为Z轴（垂向），地面振动测点沿Y轴方向共布置5个测点，分别距桥梁中心线7.5 m、15 m、22.5 m、30 m、45 m，在各个测点处均布置纵向、横向、垂向加速度拾振器。

测试采用东方振动和噪声技术研究所INV3062-C1(S)24位智能数据采集系统，垂向和水平向941B型拾振器（H、V），采样频率640 Hz。

## 2　地面三向振动幅值随距离的衰减

以内线（成都至重庆）16节车辆编组为例，列车实际运行速度为295 km/h左右。地面三向振动在各测点加速度最大值及有效值如表1所列。

通过表1可以看出：在同一距离处，横向、纵向加速度最大值及有效值均大于垂向；近场横向加速度最大值及有效值大于纵向，而远场横向加速度最大值及有效值均与纵向相当。

表1　不同距离处地面三向加速度最大值及有效值

| 距离/m | 加速度最大值及有效值/(mm·s$^{-2}$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 垂向 | | 纵向 | | 横向 | |
| | 最大值 | 有效值 | 最大值 | 有效值 | 最大值 | 有效值 |
| 7.5 | 76 | 15.3 | 127 | 27.5 | 171 | 36.6 |
| 15 | 39 | 10.6 | 76 | 20.5 | 103 | 26.3 |
| 22.5 | 27 | 6.8 | 45 | 11.0 | 65 | 15.4 |
| 30 | 16 | 4.6 | 38 | 9.5 | 35 | 9.2 |
| 45 | 14 | 3.9 | 25 | 7.8 | 29 | 7.6 |

限于篇幅，仅给出地面横向振动加速度时程曲线，如图2所示。

由表1，地面垂向振动加速度有效值在不同距离间的差值分别为：4.7 mm/s²、3.8 mm/s²、2.2 mm/s²、0.7 mm/s²。可见，近场测点垂向加速度值出现明显衰减，垂向加速度有效值衰减速率为0.304 mm/s²·m⁻¹，随距离的增加，衰减速度逐渐变缓。

地面纵向振动加速度有效值在不同距离间的差值分别为：7 mm/s²、9.5 mm/s²、1.5 mm/s²、1.7 mm/s²。纵向加速度有效值衰减速率为0.525 mm/s²·m⁻¹。

地面横向振动加速度有效值在不同距离间的差值分别为：10.3 mm/s²、10.9 mm/ s²、6.2 mm/s²、1.6 mm/s²。横向加速度有效值衰减速率为0.773 mm/s²·m⁻¹。

从地面三向振动加速度有效值的衰减速率看，横向加速度有效值衰减速率最大，纵向次之，垂向最小；随着距线路中心线距离的增加，三向加速度值均呈现明显减小趋势，衰减速率逐渐变缓。

## 3 三向振动主频随距离的变化

不同距离处地面三向振动最优频率及加速度值如表2所列。

### 3.1 垂向主频变化分析

由表2，随着距离的增加，垂向最优频率由30.4 Hz逐渐减小为9.6 Hz；从30 m到45 m，最优频率9.6 Hz的加速度值衰减很小，这表明垂向振动的高频成分均随着距离增大而衰减迅速，而低频成分随距离的衰减较缓，即低频振动比高频振动传播得更远。

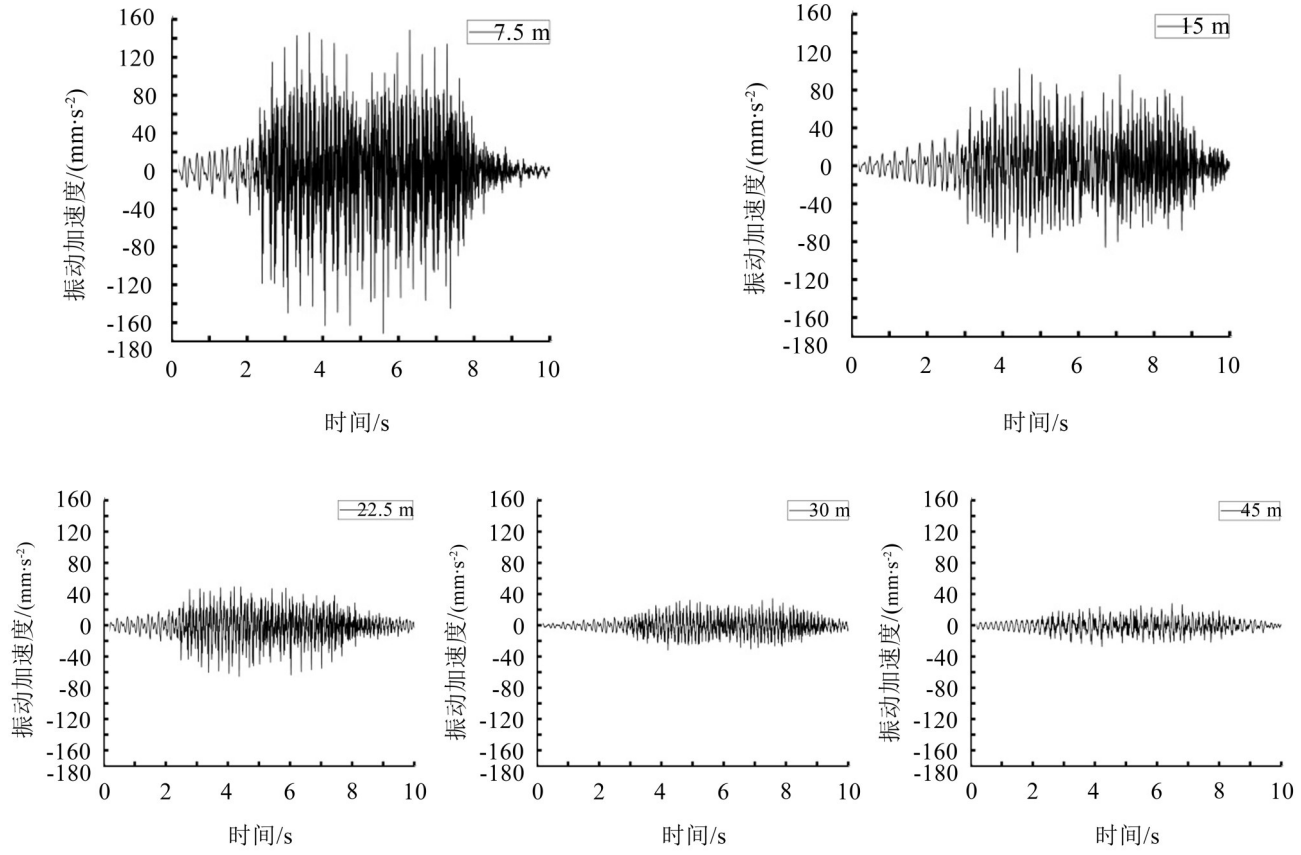



图2 横向振动加速度时程曲线

表2 不同距离处地面三向振动最优频率及加速度值

| 距离/m | 最优频率/Hz及加速度值/(mm·s⁻²) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 垂向 | | 纵向 | | 横向 | |
| | 最优频率 | 加速度值 | 最优频率 | 加速度值 | 最优频率 | 加速度值 |
| 7.5 | 30.4 | 10.04 | 68.8 | 12.78 | 64 | 24.74 |
| 15 | 30.4 | 7.33 | 32 | 9.56 | 30.4 | 21.18 |
| 22.5 | 33.6 | 5.45 | 30.4 | 8.88 | 9.6 | 13.96 |
| 30 | 9.6 | 3.86 | 9.6 | 4.54 | 9.6 | 7.9 |
| 45 | 9.6 | 3.72 | 9.6 | 7.45 | 6.4 | 6.64 |

### 3.2 水平向主频变化分析

随着距离的增加，纵向最优频率由68.8 Hz逐渐减小为9.6 Hz，但从30 m到45 m，最优频率9.6 Hz的加速度值出现反弹现象。横向最优频率则由64 Hz逐渐减小为6.4 Hz。

限于篇幅，仅给出地面横向振动加速度频谱曲线，如图3所示。

由图3可知，随着距离的增加，横向优势频率64 Hz的加速度值由7.5 m处的24.74 mm/s$^2$衰减至45 m处的0.61 mm/s$^2$，衰减量为24.13 mm/s$^2$；同时，另一优势频率9.6 Hz的加速度值由7.5 m处的21.98 mm/s$^2$衰减至45 m处的5.49 mm/s$^2$，衰减量达16.49 mm/s$^2$。这表明横向优势频率随距离的变化规律与垂向和纵向存在一定差异，横向振动的高频和低频成分均衰减较快。

综合表2和图3，随着距离的增大，不管是垂向、纵向还是横向，振动优势频率均由高频向低频变化，远场振动均表现为低频占优。

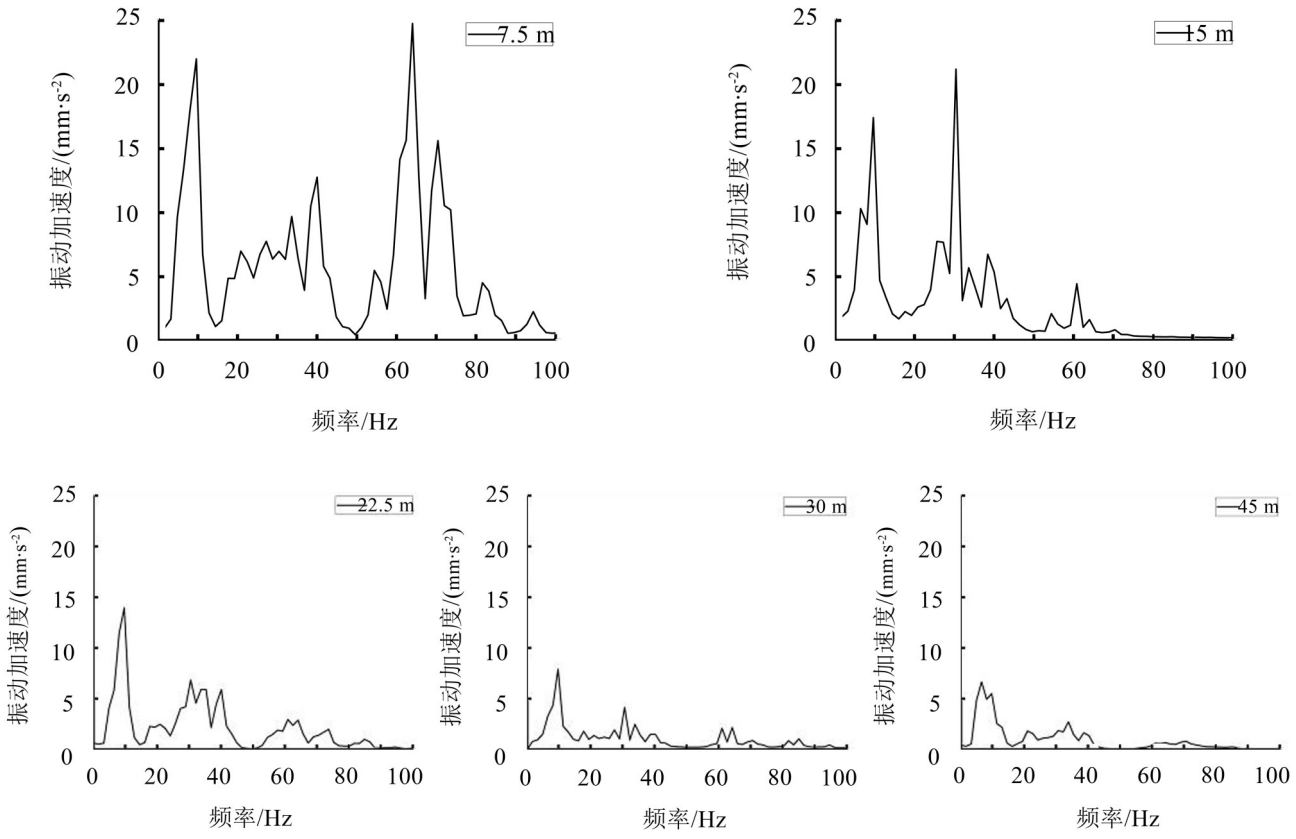



图3 不同距离处横向频谱图

## 4 三向振动加速度级对比分析

### 4.1 未计权三向加速度级对比分析

未计权三向加速度级如图4所示。

图4表明，未计权三向加速度级中，横向最大，纵向次之，垂向最小，不管在近场还是远场，水平向未计权加速度级均大于垂向。横向与纵向及垂向未计权加速度级间的差值分别为0 dB～3.1 dB和5.8 dB～7.3 dB，均小于8 dB，因此不能随意忽略某向振动。在近场，三向振动未计权加速度级均衰减较快，远场三向振动衰减速率有所减缓。近场横向加速度级大于纵向，但在30 m至45 m之间，二者已基本相等。因此，从振动能量传播方面来说，地面三向振动均不可忽略。

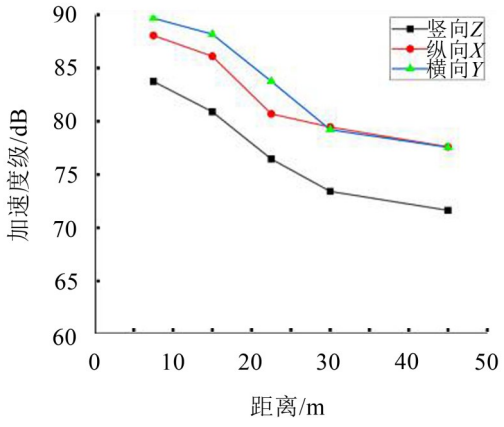



图4 未计权三向加速度级

### 4.2 计权后三向加速度级对比分析

根据GB/T 13441.1-2007（ISO 2631-1:1997）给出的1/3倍频程下基本频率计权[10]，对垂向振动采用

$W_k$计权，纵向、横向振动采用$W_d$计权，结果如图5所示。

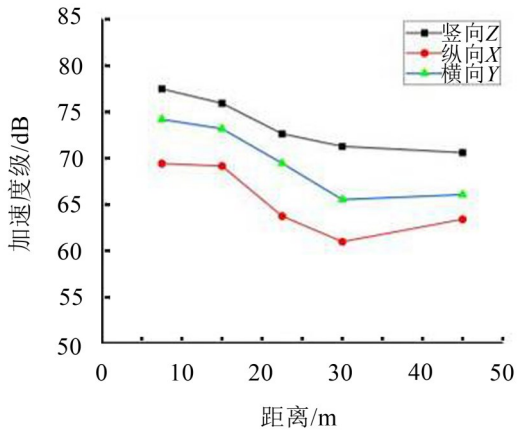



图5 计权后三向加速度级

图5表明，垂向计权加速度级在整个测试区间内均大于纵向和横向，垂向比水平向加速度级高2.8 dB～5.7 dB。这表明即使经过计权后，纵向和横向振动也不能随意忽略。

未计权的振动加速度是客观量，反映了振动幅值绝对值大小，而计权后的加速度是主观量，反映了人体对于振动的响应。在研究高速铁路运营引起的振动能量随距离的衰减时，应考虑三向振动；而在进行高速铁路振动的环境影响评价时，可以垂向振动为主，水平向振动为辅。

## 5 结 语

通过对成渝高铁高架桥段地面三向振动现场测试结果进行时域和频域分析，得到以下结论。

（1）地面三向振动加速度幅值及有效值均随距离的增大而衰减；三向振动能量近场主要集中在6 Hz～72 Hz范围内，高频振动较低频振动衰减快，三向振动在远场优势频率均趋向于10 Hz左右；

（2）地面横向、纵向振动未计权加速度级均较垂向振动大，但三者之间的差值均小于8 dB，从振动能量传播方面来说，三向振动均不宜忽略；

（3）地面垂向计权加速度级大于纵向和横向，但横向与垂向计权加速度级相差不大，建议在进行高速铁路振动的环境影响评价时，以垂向振动为主，水平向振动为辅。

**参考文献：**

[1] 贺玉龙，周青，杨立中. 350 km/h高速铁路高架桥环境振动的测试分析[J]. **噪声与振动控制**，2012，32(1)：170-173.

[2] 张光明，贺玉龙，梅昌艮，等. CRTSIII型板式无砟轨道桥梁段环境振动测试分析[J]. **噪声与振动控制**，2014，34(3)：144-147.

[3] 朱志辉，余志武，蒋丽忠，等. 高速铁路桥梁及场地土交通振动分析[J]. **振动工程学报**，2012，25(5)：548-555.

[4] 李小珍，刘全民，张迅，等. 高架轨道交通附近自由地表振动试验研究[J]. **振动与冲击**，2014，33(16)：56-61.

[5] 毛昆明，陈国兴，张杨，等. 沪宁城际铁路高架桥段CRH动车组运行引起的地面振动现场测试与分析[J]. **防灾减灾工程学报**，2012，32(3)：267-273.

[6] 屈畅姿，王永和，魏丽敏，等. 武广高速铁路路基振动现场测试与分析[J]. **岩土力学**，2012，33(5)：1451-1456.

[7] 高广运，李志毅，冯世进，等. 秦沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J]. **岩土力学**，2007，28(9)：1817-1827.

[8] 李小珍，张志俊，冉汶民，等. 桥上列车高速运行引起的地面振动试验研究[J]. **西南交通大学学报**，2016，51(5)：815-823.

[9] 陈建国，夏禾，陈树礼，等. 运行列车引起的周围地面振动规律研究[J]. **工程力学**，2010，27(1)：98-103.

[10] 中华人民共和国国家标准. GB/T 13441.1-2007机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第1部分：一般要求[S]. 北京：中国标准出版社，2007.

（上接第120页）

[3] 陈霞，李志东，陈理君，等. 轮胎噪声室内测试系统及双功能消声室的设计[J]. **橡胶工业**，2009，56(3)：182-186.

[4] 王小微，葛剑敏. 室内转鼓法中不同转鼓面对于轮胎噪声影响分析[J]. **噪声与振动控制**，2018，38(Z1)：627-630.

[5] 张鹏. 国内外高速公路沥青路面典型病害及养护技术对比研究[D]. 西安：长安大学，2015.

[6] 张守城. 橡胶沥青混凝土路面的降噪性能研究[J]. **公路**，2010(11)：207-209.

[7] 魏建军. 多孔隙低噪声沥青路面降噪机理的研究[J]. **黑龙江工程学院学报**，2004，18(1)：11-19.

[8] 朱振华. 半消声室内轮胎噪声测试方法研究[J]. **轮胎工业**，2013，33(6)：376-380.

[9] 陈燕. 轮胎噪声室内转鼓法与室外滑行法测试结果的相关性研究[J]. **轮胎工业**，2017，37(6)：374-377.

[10] 刘先锋. 车内低频路面噪声分析与控制[J]. **噪声与振动控制**，2015，35(4)：89-137.

[11] JEFF S C C, LIN H H, CHEN Y Y, et al. Study of tire noise for vehicle noise control[A]. SAE Technical paper series: SAE 2005 noise and vibration conference and exhibition[C]. Michigan, 2005: 2415.

[12] 朱位秋. 随机振动[M]. 北京：科学出版社，2017.