文章编号:1006-1355(2018)05-0146-05

高架钢弹簧浮置板轨道减振特性研究及参数优化

程 珊，刘林芽，王少锋

（华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心，南昌 330013）

摘 要:为探讨钢弹簧刚度和浮置板密度对高架钢弹簧浮置板轨道减振特性的影响规律，构建车辆-浮置板轨道-桥梁耦合模型，从时频域的角度对其进行分析，为钢弹簧浮置板轨道的设计参数的合理选择与组合优化提供理论依据。研究结果表明:在2 Hz～20 Hz范围内浮置板的振动水平随钢弹簧刚度的减小而增大。在16 Hz～125 Hz频率范围内，轨道中心线、翼缘、腹板、梁底的振动水平随着钢弹簧刚度的减小而减小，最大减幅达到13 dB。钢弹簧刚度的变化对传递函数的影响比较明显，弹簧刚度越小，浮置板到桥梁结构的竖向传递函数值越小。综合考虑，在设计浮置板轨道结构时建议将钢弹簧的刚度控制在6×10^6 N/m～8×10^6 N/m。浮置板密度的增大会在一定程度上减小系统的振动水平，实际设计中要合理设置浮置板密度，建议控制在2 800 kg/m^3～3 200 kg/m^3。

关键词:振动与波;轨道交通;浮置板轨道;减振特性;参数优化;高架箱型梁

中图分类号:U213.2;U441$^+$3 **文献标志码**:A **DOI编码**:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.05.026

Vibration Reduction Study and Parameter Optimization of Steel Spring Floating Slab Tracks in Metro Viaducts

CHENG Shan , LIU Linya , WANG Shaofeng

(Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract : To inquire the influence of the steel spring stiffness and density of the floating slab on the vibration damping characteristics of elevated steel spring floating slab tracks, the vehicle-train-bridge coupling model of a floating slab track (FST) is built and analyzed in time and frequency domains. The results show that the vibration level of the floating plate increases with the decrease of the steel spring stiffness in the frequency range of 2 Hz- 20 Hz. In the frequency range of 16 Hz-125 Hz, the vibration level at the centerline, the flange, the web and the beam bottom of the track decreases with the decrease of the stiffness of the steel spring, and the maximum value of the vibration level is reduced to 13 dB. The stiffness of the steel spring has an obvious effect on the transfer function. The value of the vertical transfer function from the floating plate to the bridge structure decreases with the decreasing of the stiffness of the steel spring. Considering the influence of the steel spring stiffness change on bridge structure vibration level and the transfer function value, it is suggested in the design of FST structures that the steel spring stiffness should be within 6×10^6 N/m-8×10^6 N/m. The increase of the floating plate density will reduce the vibration level of the system. In actual design, the floating plate density should be in the range of 2 800 kg/m^3-3 200 kg/m^3. These results may provide a theoretical basis for the reasonable selection and optimization of the steel spring FST parameters.

Keywords : vibration and wave; rail transit; floating slab track; vibration reduction characteristics; parameter optimization; elevated box girder

城市高架轨道交通以其高效能、准时快捷、低能耗、低污染、安全可靠等突出特点，已广泛运用于城市交通建设中，但高架轨道贯穿城市居民生活工作区，其所带来的环境振动和噪声污染问题越来越不可忽视。钢弹簧浮置板轨道能够减少由轨道传递到高架桥结构的振动能量，有效降低城市高架轨道交通的振动和二次噪声水平，在国内外得到广泛采用。但钢弹簧浮置板价格昂贵，为有效降低工程造价，在设计时优化钢弹簧浮置板轨道的参数就显得十分必要。

近年来，诸多学者已从理论解析、数值计算、实验测试等方面针对浮置板轨道结构的隔振性能进行

收稿日期:2017-11-09

基金项目:江西省创新团队资助项目(2015BCB24007);
江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2016-s248)

作者简介:程珊(1990-)，女，安徽省安庆市人，硕士研究生，主要研究方向为铁路环境振动与噪声。
E-mail: 806756683@qq.com

了大量的科学研究。蒋崇达等[1]建立了钢弹簧浮置板轨道结构的双层梁动力学模型，通过瞬态分析模拟列车移动荷载作用下轨道的动力响应以及轨道系统参数对钢弹簧浮置板动力响应的影响。韦凯等[2]通过建立车辆-钢弹簧浮置板轨道耦合模型，计算分析了扣件刚度和阻尼对钢弹簧浮置板轨道随机振动的影响规律。韦红亮等[3]分别采用有限元和现场试验的方法研究了减振器刚度和间距的改变对高架钢弹簧浮置板轨道结构的振动特性的影响。但以上文献集中于定性分析，并未明确给定设计参数的具体取值范围，尤其是钢弹簧刚度与浮置板密度这两个影响减振效果的重要因素。

本文采用多体动力学与有限元联合仿真的方法，针对这两个参数的变化对高架钢弹簧浮置板轨道减振特性的影响进行研究。

1　计算模型

1.1　计算原理

采用有限元方法分析结构的动力响应，可以得到在移动荷载作用下结构随时间变化的节点位移、速度和加速度的响应，基本方程为

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{u}(t)\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{u}(t)\}+[\boldsymbol{K}]\{u(t)\}=\{F(t)\}$$

式中：$[\boldsymbol{M}]$、$[\boldsymbol{C}]$和$[\boldsymbol{K}]$分别为结构质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\{\ddot{u}(t)\}$、$\{\dot{u}(t)\}$、$\{u(t)\}$分别为结构振动加速度、速度和位移；$\{F(t)\}$为荷载向量。可采用Nemark方法对上述微分方程进行求解。

1.2　研究对象

本文以某城市32 m单箱单室简支混凝土箱梁钢弹簧浮置板轨道作为研究对象，梁高2.8 m，宽13 m，顶板厚度0.34 m，底板厚度0.3 m，腹板厚度0.4 m～0.45 m，翼缘板厚0.2 m～0.5 m。材料性能如表1所示，“桥梁-浮置板-钢轨”结构示意图如图1所示。采用梁单元beam188模拟CHN60型钢轨，网格大小为0.05 m；连接钢轨与浮置板的扣件采用间距为0.625 m的弹簧阻尼单元模拟；箱梁结构和浮置板均采用solid185实体单元进行模拟。

在1/2梁跨断面上，分别在钢轨、浮置板、轨道中心线、翼缘、腹板和底板设置拾取点，拾取列车经过时的加速度信号，如图2所示。

1.3　车辆-浮置板轨道-桥梁耦合模型

为了得到车辆通过时的轮轨力，基于多体动力学理论，利用Simpack软件建立车桥耦合空间动力学分析模型。地铁列车模型的结构参数及动力学参数参照实际地铁A型车选取，其中每一节地铁列车动力学分析模型可认为由1个车体，2个转向架（含4个轮对）等刚体组成，每一节车辆考虑了伸缩、横摆、浮沉、点头、侧滚、摇头6个自由度，轨道不平顺采用美国5级不平顺谱，车辆主要参数见表2。

将箱型梁有限元模型作为柔性体导入Simpack中，利用Simpack中柔性轨道模块实现桥梁模型和列车模型的共同求解。其中，将桥梁模型和列车模型分别作为两个系统，分别求解轮流迭代。车桥耦合模型之间通过轮轨接触离散点实现位移、速度、作用力的交换。车桥耦合模型如图3所示。

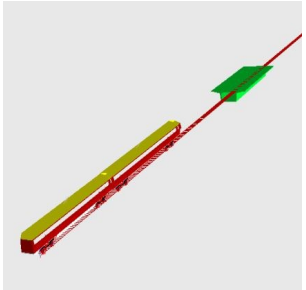

图3　车桥耦合模型

基于车桥耦合模型，采用联合仿真的方法，模拟轮轨之间的相互作用力。采用地铁A型车2节编组模拟加载，计算速度为80 km/h，得到的轮轨垂向作

表1　模型参数

	弹性模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})	阻尼比	泊松比
钢轨	2.1×10^{11}	7 800	0.02	0.3
浮置板	3.45×10^{10}	3 000	0.05	0.17
桥梁	3.35×10^{10}	3 000	0.05	0.167

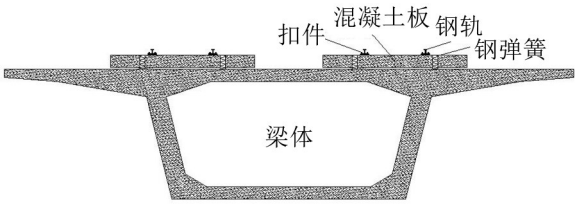

图1　“桥梁-浮置板-钢轨”结构示意图

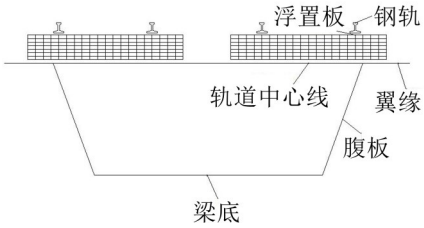

图2　拾取点分布图

表2　地铁A型车主要参数

参数	车体质量/kg	转向架质量/kg	轮对质量/kg	车辆定距/m	轴距/m	车长/m
数值	50 878	2 721	1 900	15.7	2.5	22.8

用力如图4所示。

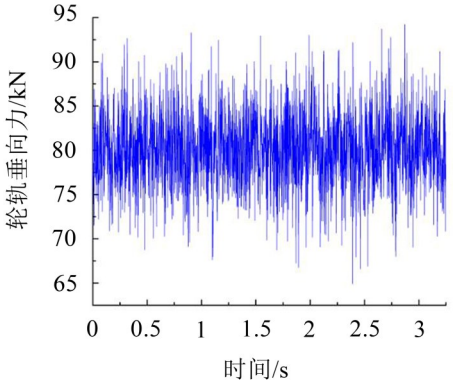

图 4 轮轨激振力

2 桥梁振动特性及参数分析

2.1 参数变化对桥梁振动响应的影响分析

对各拾取点的振动时程进行1/3倍频程分析，采用加速度振级的方式分析钢弹簧刚度和浮置板密度变化对轨道和高架桥结构振动水平分布的影响。采用振动加速度级 L_{va} 对振动水平进行评价，计算方法如下式

$$L_{va}a_0 = 20\lg a_{\mathrm{rms}}$$

式中：L_{va} 为振动加速度级，单位为dB；a_0 为基准加速度，取 10^{-6} m/s^2；a_{rms} 为1/3倍频程中心频率对应的振动加速度有效值，单位为m/s^2。

2.1.1 钢弹簧刚度的影响分析

钢弹簧刚度在 6×10^6 N/m～1.2×10^7 N/m范围内变化时，各输出点的振动加速度振级如图5所示。

由图5可以看出：

(1) 在2 Hz～20 Hz范围内浮置板的振动水平总体上随钢弹簧刚度的减小而增大，从频域角度分析表明浮置板轨道通过增大自身的振动水平来减小对高架桥振动能量的输入。在40 Hz～200 Hz范围内钢弹簧刚度变化对浮置板振动水平几乎没有影响。

(2) 在16 Hz～125 Hz频率范围内，轨道中心线、翼缘、腹板、梁底的振动水平随着钢弹簧刚度的减小而减小，减小值最大达到13 dB。

2.1.2 钢弹簧密度的影响分析

浮置板密度在2 800 kg/m^3～3 400 kg/m^{3}范围内变化时，各输出点的振动加速度振级如图6所示。

由图6可以看出：钢轨、浮置板、桥梁的振动水平随着钢弹簧密度增大而减小。密度由2 800 kg/m^{3}增大到3 400 kg/m^{3}时，在10 Hz～20 Hz频率范围内浮置板的振动水平降低约3 dB。

3 钢弹簧刚度变化对浮置板传递函数特性影响分析

振动的传递规律与轨道的结构形式、几何尺寸、

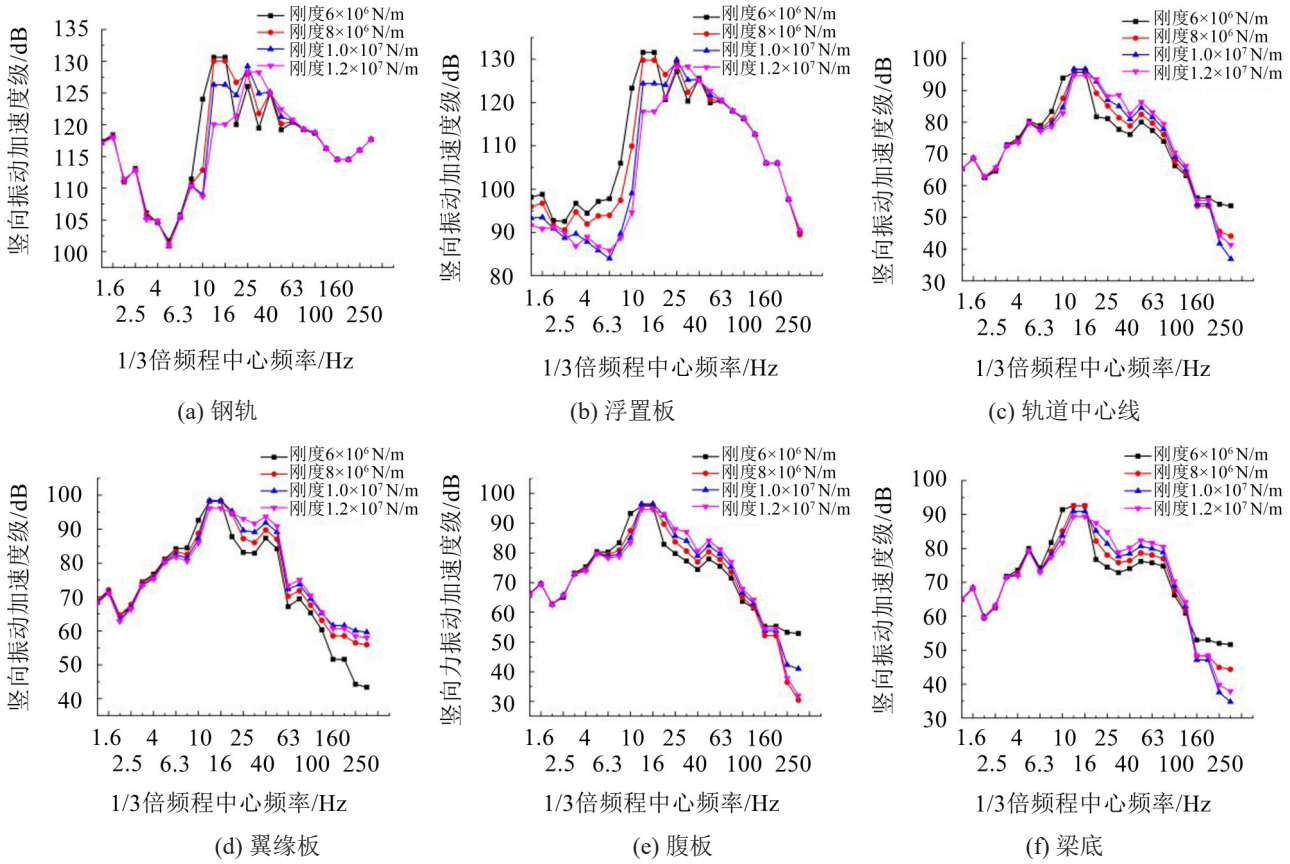

图 5 钢弹簧刚度对高架轨道振动水平的影响

材料特性、结构振动的频率等诸多因素有关，是结构的固有特性。传递函数是结构固有特性的一种模型描述方式。传递函数建立在系统频域描述基础上，直接由系统的输入—输出关系获得其数学描述形式，如下

$$H(\omega)=\frac{\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}Y(t)e^{-j2\pi\omega t}\,dt}{\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}X(t)e^{-j2\pi\omega t}\,dt}=\frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$$

式中：$X(t)$和$Y(t)$分别为系统的输入和输出；$X(\omega)$和$Y(\omega)$分别为系统的输入和输出的傅立叶变换；$H(\omega)$为系统的频率特性，即系统的传递函数。

对于高架钢弹簧浮置板轨道系统，选取浮置板上的振动加速度为输入，选取箱梁翼缘、腹板、梁底等处加速度作为输出，来获得不同位置的传递函数。

图7给出了浮置板上的拾取点与翼缘、腹板、梁底拾取点之间的竖向传递函数。

由图7可以看出：从浮置板到翼缘板、腹板、底板的竖向传递函数值均小于0.01，说明浮置板轨道大大降低了钢轨振动向桥梁的传递。钢弹簧刚度的变化对传递函数的影响比较明显，钢弹簧刚度越小，浮置板到翼缘、腹板、底板的竖向传递函数值越小。综合考虑上文钢弹簧刚度变化对桥梁结构振动水平的影响以及对传递函数的影响，在设计浮置板轨道

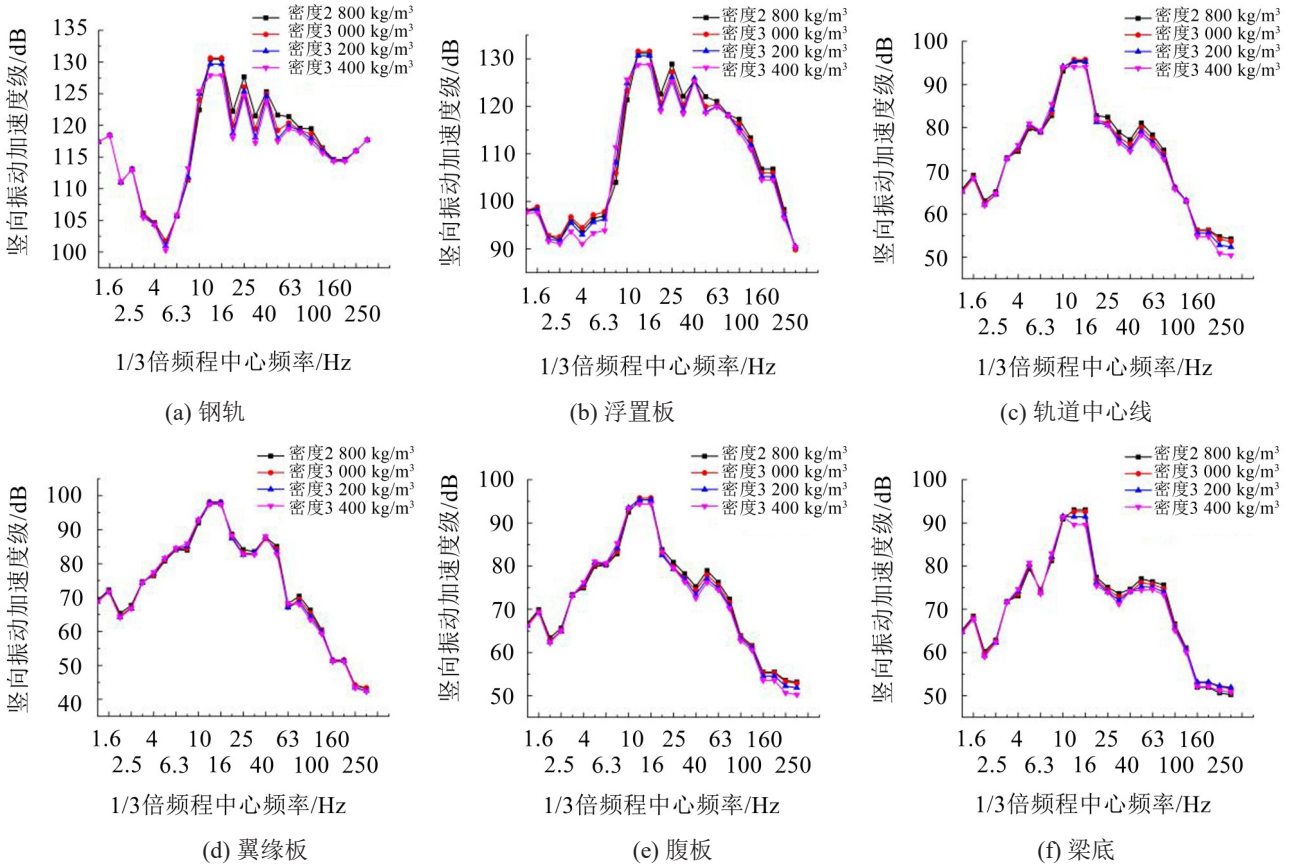

图6 浮置板密度对高架轨道振动水平的影响

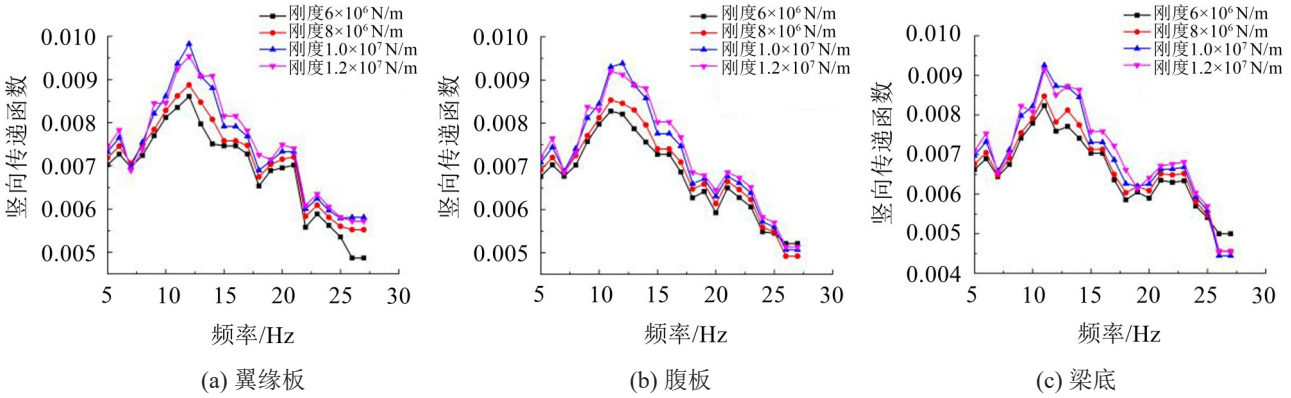

图7 浮置板到桥梁的竖向传递函数曲线

结构时建议将钢弹簧的刚度控制在6×10^6 N/m～8×10^6 N/m比较合适。

4 结 语

（1）在2 Hz～20 Hz范围内浮置板的振动水平总体上随钢弹簧刚度的减小而增大，在40 Hz～200 Hz范围内钢弹簧刚度变化对浮置板振动水平几乎没有影响。在16 Hz～125 Hz频率范围内，轨道中心线、翼缘、腹板、梁底的振动水平随着钢弹簧刚度的减小而减小，减小值最大达到13 dB。

（2）钢轨、浮置板、桥梁的振动水平随着钢弹簧密度增大而减小。浮置板密度的增大还可使轮轨相互作用显著减小，延长钢轨使用寿命，但考虑到施工、造价等问题，因此实际设计中要合理设置浮置板密度，建议控制在2 800 kg/m^3～3 200 kg/m^{3}比较合适。

（3）钢弹簧刚度的变化对传递函数的影响比较明显，钢弹簧刚度越小，浮置板到桥梁的竖向传递函数值越小。

参考文献：

[1] 蒋崇达，雷晓燕. 城市轨道交通钢弹簧浮置板轨道动力特性分[J]. **城市轨道交通研究**，2013，16（3）：34-41.

[2] 韦凯，豆银玲，杨麒陆，等. 钢弹簧浮置板轨道的随机振动分析及参数优化[J]. **华中科技大学学报**（自然科学版），2017，45（8）：115-119.

[3] 韦红亮，练松良，周宇. 高架钢弹簧浮置板轨道减振特性分析[J]. **同济大学学报**(自然科学版)，2012,40（9）：1342-1348.

[4] 高世兵. 钢弹簧浮置板减振轨道在城市地铁中的应用[J]. **铁道工程学报**，2008,25（3）：88-91.

[5] 刘维宁，丁德云，李克飞，等. 钢弹簧浮置板轨道低频特征试验研究[J]. **土木工程学报**，2011,44（8）：118-125.

[6] XU Q Y, YAN B, LOU P, et al. Influence of slab length on dynamic characteristics of subway trainsteel spring floating slab track-tunnel coupled system[J]. **Latin American Journal of Solids and Structures**, 2015, 12 (4): 649-674.

[7] 郭亚娟，杨绍普，郭文武. 钢弹簧浮置板轨道结构的动力特性分析[J]. **振动、测试与诊断**，2006，26（2）：146-150.

[8] 丁德云，刘维宁，李克飞，等. 钢弹簧浮置板轨道参数研究[J]. **中国铁道科学**，2011，32（1）：30.

[9] 冯读贝，杨吉忠，余志祥，等. 减振轨道对高架桥低频振动特性的影响[J]. **铁道建筑**，2015，（12）：7-11.

[10] JUN YUAN, YONG CHAO ZHU, MINZHE WU. Vibration Characteristics and Effect iveness of Floating Slab Track System Floating Slab Track System[J]. **Journal of Computers**, 2009, 4(12).

[11] 郑小康. 地铁高架桥上浮置板轨道的减振研究[D]. 北京：北京交通大学，2010.

（上接第80页）

（3）加筋柱壳验证试验结果与本文方法预报结果基本一致，频谱曲线基本重合，进一步验证了本方法的有效性，另一方面，也从实验角度验证了声振传递函数的不变性；

（4）加筋柱壳验证试验表明，结构低频段响应对辐射噪声总级贡献较大，控制结构低频振动能较好地减小其辐射噪声。

参考文献：

[1] 陈明，王斌，曹为午. 水下复杂壳体结构在多源激励下的振动及声辐射特性研究[J]. **声学学报**，2009(6)：498-505.

[2] 陈美霞，骆东平，陈小宁，等. 复杂双层壳体声辐射性能分析[J]. **声学学报**，2004，29(3)：209-215.

[3] 汤渭霖，何兵蓉. 水中有限长加肋圆柱壳体振动和声辐射近似解析解[J]. **声学学报**，2001，26(1)：1-5.

[4] 商德江，何祚镛. 加肋双层圆柱壳振动声辐射数值计算分析[J]. **声学学报**，2001，26(3)：193-201.

[5] 黎胜，赵德有. 用有限元/边界元方法进行结构声辐射的模态分析[J]. **声学学报**，2001，26(2)：174-179.

[6] 何祚镛，何元安，王曼. 近场声全息技术应用有关物理问题研究[J]. **声学学报**，2007，32(2)：137-143.

[7] 何元安，姜军. 基于声强测量的近场声全息及其在水下声源声辐射分析中的应用[J]. **声学学报**，1996，21(4)：297-305.

[8] 何元安，杨德森. 水下结构辐射噪声估算方法实验研究[J]. **船舶力学**，1999，3(2)：58-62.

[9] 李贤徽. 基于子空间投影的声辐射多频分析算法[J]. **声学学报**，2010(3)：321-328.

[10] 白振国，张占阳，俞孟萨，等. 三弹性圆柱壳体多重耦合声辐射计算方法[J]. **声学学报**，2016，41(3)：398-408.

[11] PILON A R, LYRINTZIS A S. An improved kirchhoff method for jet aeroacoustics[J]. **AIAA Journal**, 36(5): 783-790.

[12] 金广文，何琳. 水下双层圆柱壳体结构辐射噪声实时预报方法研究[J]. **声学学报**，2010(4)：427-433.