

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.106



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 轨道交通钢弹簧隔振器损伤参数对动力响应的影响

付伟庆<sup>1</sup>, 狄会霖<sup>1</sup>, 赵亮<sup>1</sup>, 王建<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266525; 2. 青岛零一动测数据科技有限公司, 山东 青岛 266114)

**摘要:**城市轨道交通结构中, 弹簧隔振器在疲劳作用下会出现刚度减小、损伤和吊空现象, 作为隐蔽部件, 其损伤很难被巡检发现。严重的弹簧隔振器损伤或连续数量较大的隔振器损伤将影响行车安全, 但目前对轨道支承结构的研究主要针对扣件和轨枕, 对钢弹簧的研究较少。采用试验方法进行研究需要更换损伤后的弹簧, 对行车安全带来不利影响, 因此, 利用有限元模型, 设置不同损伤的钢弹簧进行研究。应用 ABAQUS 有限元软件, 建立车辆-轨道耦合模型, 选取某沿海城市地铁区段浮置板实测振动数据对模型进行验证。对钢弹簧损伤进行设置, 若采用全面试验, 设置所有工况组合, 则时间成本会大大增加, 因此采用均匀设计法对弹簧隔振器不同损伤数量、不同损伤程度和不同损伤位置工况进行参数试验设计, 通过模型模拟计算量化各损伤参数对浮置板振动响应的影响程度。结果表明: 对浮置板加速度和位移影响最大的是弹簧隔振器的损伤位置, 影响权重分别为 50% 和 49.3%; 其次是损伤数量, 影响权重分别为 28.4% 和 27.9%; 最后是损伤程度, 影响权重分别为 21.6% 和 22.8%。可见, 浮置板损伤位置对其振动响应最大, 其次是钢弹簧损伤数量, 最后是钢弹簧损伤程度。

**关键词:** 轨道交通; 弹簧隔振器; 车辆-轨道耦合模型; 均匀设计法; 损伤参数

**中图分类号:** U213.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0194-08

## The impact of damage parameters of rail transit steel spring isolators on dynamic response

FU Weiqing<sup>1</sup>, DI Huilin<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, P. R. China;  
2. 01DYNA (Qingdao) Test & Data Co., Ltd, Qingdao 266114, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** In the structural context of urban rail transit systems, spring isolators are susceptible to stiffness reduction, damage, and sagging due to fatigue effects. The presence of concealed components can render their detection challenging during routine inspections. A vehicle-track coupled model was established using the finite element software ABAQUS. The model was validated using actual vibration data from a specific section of the Shenzhen Metro's floating slab. A uniform design approach was adopted for the execution of parameter experi-

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(52178488)

作者简介: 付伟庆(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事结构振动控制与健康监测, E-mail: fuweiqing@qut.edu.cn。

Received: 2023-07-17

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52178488)

Author brief: FU Weiqing (1976-), PhD, professor, main research interests: structural vibration control and health monitoring, E-mail: fuweiqing@qut.edu.cn.

ments on spring isolators under various conditions, including different levels of damage in terms of quantity, severity, and location. Through model simulation, the quantitative impact of these damage parameters on the vibration response of the floating slab was determined. The calculation results indicate that the location of damage to the spring isolators exerts the greatest influence on the acceleration and displacement of the floating slab, with respective impact weights of 50% and 49.3%. The impact of the number of damaged isolators is 28.4% and 27.9%, while the impact of damage severity accounts for 21.6% and 22.8%. It can be seen that the damage location of the floating slab has the greatest influence on its vibration response, followed by the number of damaged steel springs, and finally the damage degree of steel springs.

**Keywords:** rail transit systems; spring isolators; vehicle-track coupled model; uniform design method; damage parameters

为了缓解城市人口增长带来的交通压力,很多城市开始大力发展轨道交通<sup>[1]</sup>。在地铁运营中,列车轮对与钢轨间摩擦带来的环境噪声问题愈发严重<sup>[2-4]</sup>。为减小运行过程中对周围环境的影响,许多地铁线路开始使用下设弹簧隔振器的浮置板结构,研究表明,该结构能够有效抑制振动的传递<sup>[5-6]</sup>,保证列车行驶的平稳性和安全性。随着地铁运营时间的增长,在列车动力荷载及自然条件作用下,钢弹簧的刚度会发生不同程度折减,甚至发生断裂(隔振器完全失效),破坏浮置板结构的完整性,使其减振性能大幅度削减。大大加剧了列车行驶对周围环境的振动影响,甚至影响行车安全。作为隐蔽部件,这种损伤很难被及时巡检发现,因此,有必要对其进行系统性研究。

目前,针对轨道交通结构支承部件的损伤研究主要包括扣件和轨枕。陈宪麦等<sup>[7]</sup>利用 ABAQUS 建立扣件弹条有限元模型,研究其损伤对扣件压力的影响。魏纲等<sup>[8]</sup>建立车辆-轨道耦合分析模型,分析扣件失效数量对列车和衬砌的影响。Kaewunruen 等<sup>[9]</sup>通过建立有限元模型,分析了在冲击荷载作用下不同程度损伤的轨枕性能和破坏模式。Hu 等<sup>[10]</sup>研究了渗水型隧道中道床积水对轨枕的损伤情况,并总结了相关公式。魏新江等<sup>[11]</sup>基于结构动力学理论和二维模型设置钢弹簧的不同损伤,对浮置板的振动响应进行分析,但基于车轨三维模型对损

伤进行研究,但未考虑轨道不平顺的影响。

学者们对作为隐蔽结构的弹簧隔振器损伤研究较少。笔者应用 ABAQUS 有限元软件建立车辆-轨道耦合模型,选取某沿海城市地铁区段浮置板实测振动数据对模型进行验证,采用均匀设计法对弹簧隔振器不同损伤数量、程度和位置工况进行参数试验设计,模拟计算得到不同损伤参数对浮置板振动响应的影响程度。

## 1 模型建立与实测验证

### 1.1 车辆-轨道模型建立

轨道交通结构模型的建立主要包括车辆和浮置板结构两部分。深圳地铁采用地铁 B 型车,为了增加有限元计算的效率,可将车辆简化为多刚体系统。在车辆建模中,考虑输出和车体相关的数据,车体和转向架均采用离散刚体;而轮对则暂时不考虑除参考点以外的其他数据,且在不考虑温度因素的情况下,解析刚体的计算效率比离散刚体高,故轮对采用解析刚体。车辆一、二系悬挂均采用弹簧-阻尼单元进行模拟,建立的车辆、转向架和轮对模型如图 1 所示。

浮置板结构模型主要包括钢轨、扣件、道床和弹簧隔振器。在模型建立过程中,钢轨和道床均采用实体,扣件和弹簧隔振器均采用弹簧-阻尼单元进行模拟,各部件参数如表 1 所示。

表 1 轨道及车辆参数表

Table 1 Track and parameters vehicle

钢轨			浮置板			
弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	
2.11×10 <sup>5</sup>	0.3	7 800	3.25×10 <sup>4</sup>	0.25	2 500	
扣件		弹簧隔振器		车体质量/kg	转向架质量/kg	轮对质量/kg
垂向刚度/(kN/mm)	垂向阻尼/(kN·s/m)	垂向刚度/(kN/mm)	垂向阻尼/(kN·s/m)			
6×10 <sup>7</sup>	50	6×10 <sup>6</sup>	30	27 000	1950	1 500
车体点头惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	转向架点头惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	车辆定距/m	一系悬挂刚度/(kN/m)	二系悬挂刚度/(kN/m)	一系悬挂阻尼/(kN·s/m)	二系悬挂阻尼/(kN·s/m)
1.32×10 <sup>6</sup>	1 290	12.6	1 300	2 500	15	50

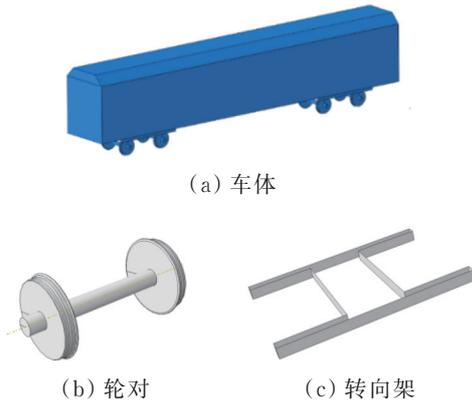


图 1 车体有限元模型

Fig. 1 Finite element model of vehicle body

在各个部件的接触设置中,轮对和轨道的接触设置尤为重要,在垂向平面内,车辆子系统与轨道子系统之间的耦合作用通过轮轨接触实现,轮轨垂向作用力由赫兹非弹性接触理论确定,其大小为

$$P(t) = \left( \frac{1}{G} \delta Z(t) \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: $G$ 为轮轨接触常数, $m/N^{2/3}$ ;  $\delta Z(t)$ 为轮轨间的弹性压缩量, $m$ 。

钢轨和轮对的接触主要设置法向接触和切向接触,法向接触设置为Hertz非线性接触,确定力与压缩量的关系后,通过力-位移的关系表格导入接触设置中。切向接触设置为罚接触,摩擦系数设置为0.3。在轨道结构有限元模型建立过程中,共设置两个分析步,第1步为静力通用分析步,使其车辆在重力作用下进入稳定状态,第2步为显示动力分析步,设定恒定车速,使其沿轨道匀速行驶。

采用有限元模型建模过程中,扣件、隔振器的建模均采用弹簧阻尼单元进行模拟,通过设置连接器的刚度、阻尼属性进行模拟;浮置板长度采用标准浮置板长度模拟,长度为24.97 m,浮置板厚度为0.34 m,建模设置连续3跨;混凝土与地基采用完全固定。

根据深圳地铁运营情况考虑,轨道不平顺采用美国六级谱,根据高低不平顺的功率谱密度,构造出轨道不平顺时域曲线,通过修改inp文件中钢轨顶端坐标来实现轨道的高低不平顺。建立好的浮置板模型如图2所示。

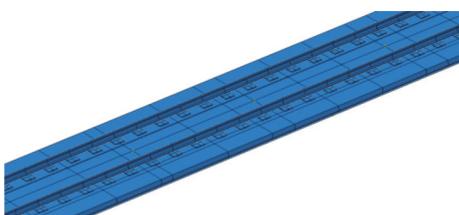


图 2 浮置板结构模型

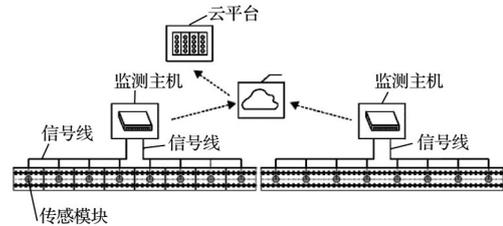
Fig. 2 Floating slab structure model

## 1.2 振动响应实测试验

选取某沿海城市地铁区段浮置板布置传感器,进行列车不同运行时段浮置板垂向加速度时程数据的采集、上传和下载,数据可对浮置板结构有限元模型验证提供支撑。测试地段为一个标准浮置板长度的直线路段,与有限元模型中的参数基本一致。

### 1.2.1 设备安装

实测试验中数据采集使用智能传感模块,该模块可以对浮置板的垂向、横向、纵向加速度进行采集,并且具备自触发功能。传感模块布置在浮置板重心所在的纵向轴线上,用冲击钻在道床上钻孔,并利用膨胀螺栓将传感模块固定于道床上。传感模块之间先通过信号线相连,然后再通过信号总线与主机相连,主机通过4G路由器将采集到的加速度数据发送至云平台。设备布置示意图与现场安装示意图如图3所示。



(a) 设备布置示意图



(b) 设备现场安装图

图 3 设备布置示意图与现场安装图

Fig. 3 Equipment layout diagram and on-site installation drawing

### 1.2.2 数据采集

通过云平台对传感模块的采样参数进行设置,分别设置采样频率为512 Hz,为了减少数据空包,设置采样方式为触发采集。在云平台中选择相关项目号、日期后,可以将数据下载到PC端(如图4所示)。其中采样频率在采样参数模块进行设置,采样方式在工作模式模块进行设置。

### 1.3 模型实试验证

通过对监测区段车速的监测,该路段列车基本处于匀速阶段,车速为65 km/h。利用建好的有限元模型修改车速,进行计算,提取空载(23点)、正常(9点)和满载(7点)时段浮置板端部和跨中位置处垂向加速度,与实测数据进行分析对比,绘制加速度时程曲线,如图5所示。提取有限元模型计算与



图 4 数据采集下载

Fig. 4 Data acquisition and downloading

实测数据中浮置板的垂向加速度最大值和最小值,如表 2 所示。

从表 2 可以看出,车辆空载时浮置板不同位置有限元计算和实测加速度最大值误差为 8.33%,最小值误差为 0.66%;车辆正常运行时不同位置最大值误差为 5.45%,最小值误差为 1.39%;车辆满载时段浮置板不同位置加速度最大值误差为 7.15%,最小值误差为 3.73%。有限元模拟计算与实测数据得到数据均较为接近,验证所建立模型的正确性。

## 2 均匀设计法与损伤参数设计

不同参数的变化会影响最终损伤情况,但变化的因素和数值较多,需要一个试验设计方法,以实现利用少量试验反映出更多参数的影响,均匀设计法

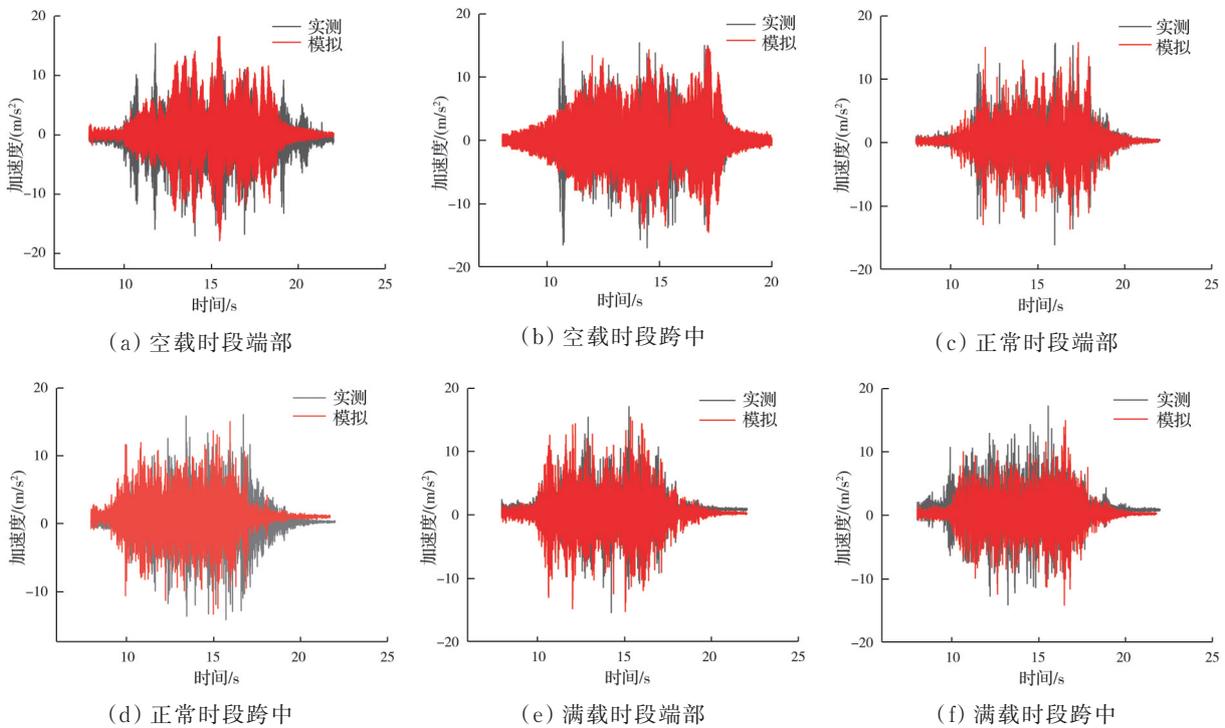


图 5 不同时段浮置板模拟与实测加速度时程曲线

Fig. 5 Simulated and measured acceleration time-history curves of floating slab under different time periods

表 2 浮置板加速度和位移值

Table 2 Acceleration and displacement values of floating slab

列车荷载	浮置板位置	数值来源	加速度最大值/(m/s <sup>2</sup> )	误差/%	加速度最小值/(m/s <sup>2</sup> )	误差/%
空载	端部	实测	15.36	1.17	-15.07	1.33
		模拟	15.54		-14.87	
	跨中	实测	15.04	0.66	-15.96	8.33
		模拟	14.94		-14.63	
正常	端部	实测	16.70	5.45	-16.07	4.54
		模拟	15.79		-15.34	
	跨中	实测	16.01	3.94	-15.14	1.39
		模拟	15.38		-14.93	
满载	端部	实测	17.14	3.73	-16.37	7.15
		模拟	16.50		-15.20	
	跨中	实测	17.04	6.28	-16.08	5.97
		模拟	15.97		-15.12	

可以满足这个需求。

### 2.1 均匀设计法

弹簧隔振器损伤对浮置板振动响应的影响分析需要确定各损伤类型和参数值。如果类型和数量设定过少,就不能全面分析隔振器损伤对浮置板动态响应的影响;如果设定试验工况过多,将造成计算时间成本的无限增加。因此应该选用合适的试验设计方法,通过有限的试验次数更好地模拟得到更多损伤规律。

均匀设计法由方开泰等<sup>[12]</sup>提出,该设计方法利用试验点在试验范围内均匀散布进行设计,设计的试验具有全面性、均衡性等优点,其可用于因素数

和水平数较多的试验,能节省大量计算时间。与正交设计不同,均匀设计考虑了试验点在试验范围内的均匀散布,可以得到不同试验点下更多的信息,尤其是针对因素和水平较多的试验<sup>[13-15]</sup>。

### 2.2 隔振器损伤试验设计

采用均匀设计法对弹簧隔振器多损伤因素相互作用下浮置板的振动响应影响进行试验设计,选定列车车速为80 km/h。考虑损伤数量、损伤程度和损伤位置3种因素组合,每个因素下设置5种损伤,采用均匀设计表 $U_{20}(5^3)$ 形式进行试验设计。按弹簧隔振器刚度的折减进行损伤程度定义,试验设计结果如表3所示,浮置板隔振器的位置如图6所示。

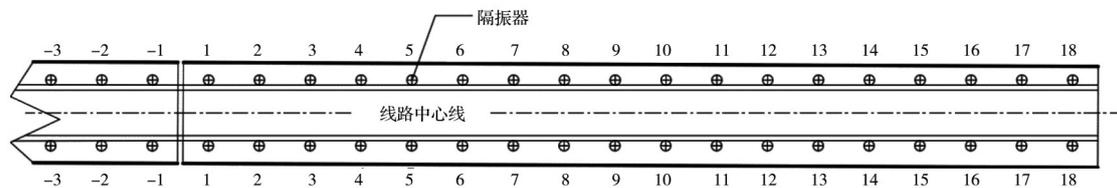


图6 弹簧隔振器位置

Fig. 6 Spring isolator positions

表3 损伤试验设计表

Table 3 Experimental design for damage tests

试验编号	损伤位置 $u$	损伤数量 $t$	损伤程度 $\alpha/\%$	损伤弹簧编号
1	相邻浮置板端部	1对	30	-1
2	相邻浮置板端部	3对	20	-1、1、2
3	相邻浮置板端部	4对	90	-2、-1、1、2
4	相邻浮置板端部	5对	50	-2、-1、1、2、3
5	同一浮置板端部	1对	90	1
6	同一浮置板端部	2对	50	1、2
7	同一浮置板端部	3对	70	1、2、3
8	同一浮置板端部	5对	20	1、2、3、4、5
9	浮置板1/4位置	2对	30	4、5
10	浮置板1/4位置	2对	70	4、5
11	浮置板1/4位置	4对	30	3、4、5、6
12	浮置板1/4位置	4对	70	3、4、5、6
13	浮置板跨中位置	1对	20	9
14	浮置板跨中位置	2对	50	8、9
15	浮置板跨中位置	3对	30	8、9、10
16	浮置板跨中位置	5对	90	6、7、8、9、10
17	浮置板3/4位置	1对	70	14
18	浮置板3/4位置	3对	90	13、14、15
19	浮置板3/4位置	4对	20	12、13、14、15
20	浮置板3/4位置	5对	50	12、13、14、15、16

### 2.3 浮置板振动响应

考虑弹簧隔振器的损伤情况,引入损伤系数 $\alpha$ ,

用 $K_s$ 表示损伤后的弹簧刚度大小,即 $K_s=(1-\alpha)K_h$ , $K_h$ 表示无损伤弹簧刚度。

按表3损伤设计工况,利用实测验证后车辆-轨道耦合模型对不同损伤浮置板响应进行模拟计算。图7和图8为部分浮置板垂向加速度和位移时程曲线,表4为各损伤工况加速度和位移响应峰值。

应用SPSS统计分析软件,以弹簧隔振器损伤位置、损伤数量和损伤程度为自变量,对表4中各响应峰值进行线性回归分析和显著性检验,显著性水平取0.05,结果如表5和表6所示。表中 $u$ 为弹簧隔振器的损伤位置, $t$ 为损伤数量, $\alpha$ 为损伤程度。

由表5可知,所有参数回归系数显著性水平Sig.均小于0.05,说明选取的3个因素与隔振器损伤后浮置板的垂向加速度存在显著关系,各损伤因素回归系数数值大小关系为 $u>t>\alpha$ 。表明弹簧隔振器损伤位置对浮置板垂向加速度峰值影响最显著,其次是损伤数量,最后是损伤程度。

由表6可知,所有参数回归系数显著性水平Sig.均小于0.05,说明选取的3个因素与隔振器损伤后浮置板的垂向位移存在显著关系,各损伤因素的回归系数数值大小关系为 $u>t>\alpha$ 。表明弹簧隔振器损伤位置对浮置板垂向位移峰值影响最显著,损伤数量和损伤程度影响基本相同,处于同一水平。

综上,单因素下弹簧隔振器损伤位置对浮置板垂向振动响应影响最显著,其次是损伤数量和损伤程度,且加速度和位移峰值影响规律基本一致。

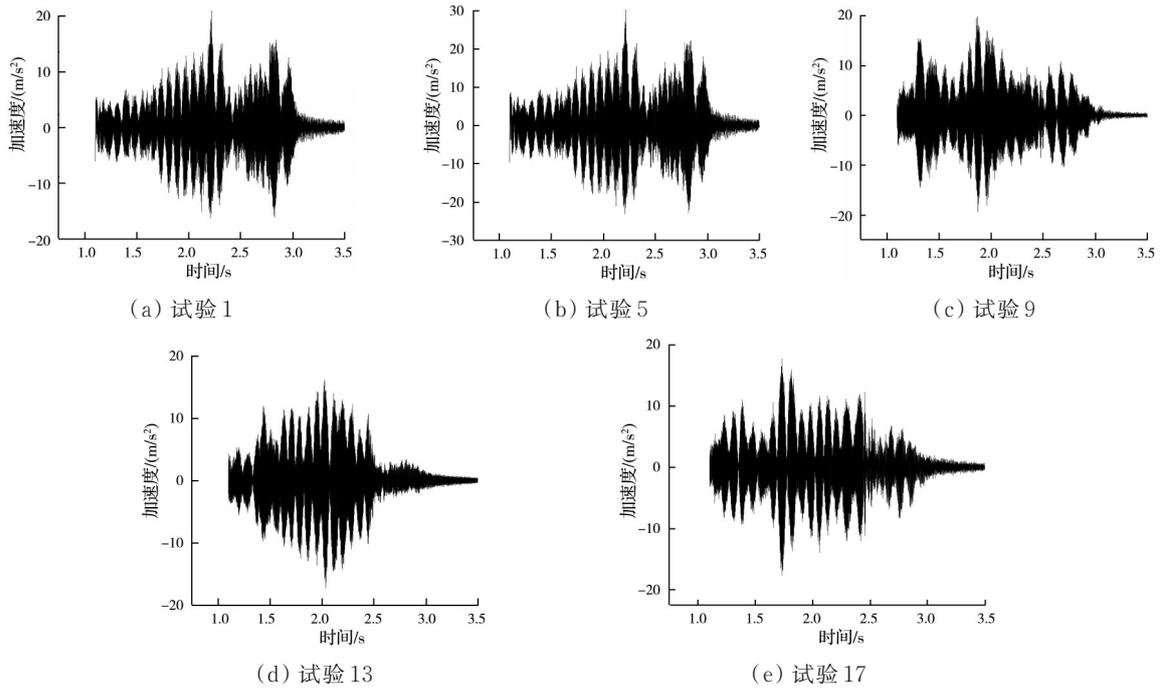


图 7 不同损伤位置下浮置板加速度时程曲线

Fig. 7 Acceleration time-history curves of the floating slab under different damage locations

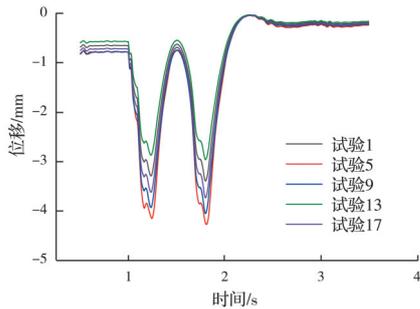


图 8 不同损伤位置下浮置板位移时程曲线

Fig. 8 Displacement time-history curves of the floating slab under different damage locations

### 3 损伤因素影响综合量化评价

在评价研究中,一般采用权重来衡量某因素相对其他因素的重要程度,是各因素共同作用下对某因素影响程度的综合评价。采用主成分分析法,用获得的总方差解释对各影响因素进行权重值计算。该过程分 2 个步骤,第 1 步是得到各影响因素的初始权重,第 2 步是对权重进行标准化处理。

#### 3.1 加速度影响分析

应用 SPSS 统计分析软件,采用因子分析法和主成分分析法计算 3 个损伤因素对浮置板垂向加速度峰值影响的权重值。利用 SPSS 得到了 KMO 和巴特利特的检验表,如表 7 所示。其中 KMO 值为 0.603,大于 0.5,巴特利特球形度检验的显著性水平为 0,小于 0.05,说明数据较为适合因子分析。

然后对解释总方差中的方差贡献率(表 8)进行计算,得到各影响因素在线性组合中的系数。

表 4 浮置板加速度和位移响应峰值

Table 4 Peak acceleration and displacement responses of the floating slab

试验编号	加速度/(m/s <sup>2</sup> )	位移/mm
1	20.93	3.39
2	21.70	3.51
3	32.24	4.42
4	33.81	4.58
5	30.29	4.37
6	29.87	4.29
7	31.49	5.42
8	34.17	4.72
9	19.79	4.05
10	26.45	4.20
11	28.24	4.52
12	28.75	4.57
13	17.24	2.96
14	19.32	3.55
15	18.78	3.35
16	21.11	4.05
17	17.73	3.40
18	21.22	4.59
19	19.75	3.53
20	22.82	4.51

单个因子的初始权重是指因子分析后各个因子在总体评价中的重要程度。利用表 5 中主成分线性组合系数与表 8 中“提取平方和”的“方差百分比”

表5 浮置板加速度峰值显著性检验

Table 5 Significance test for peak acceleration of the floating slab

自变量	回归方程显著性检验		回归系数显著性检验		
	R <sup>2</sup>	Sig.	回归系数值	T检验	Sig.
常量	0.838	0		3.775	0.002
<i>u</i>			0.780	7.746	0
<i>t</i>			0.408	4.060	0.001
$\alpha$			0.216	2.150	0.047

表6 浮置板位移峰值显著性检验

Table 6 Significance test for peak displacement of the floating slab

自变量	回归方程显著性检验		回归系数显著性检验		
	R <sup>2</sup>	Sig.	回归系数值	T检验	Sig.
常量	0.751	0		7.898	0
<i>u</i>			0.547	4.373	0
<i>t</i>			0.497	3.982	0.001
$\alpha$			0.426	3.409	0.004

表7 KMO和巴特利特检验

Table 7 KMO and Bartlett's test

KMO取样适切性量数	巴特利特球形度检验	
	自由度	显著性
0.603	3	0

表8 总方差解释表

Table 8 Total variance explained

成分	初始特征值			提取平方和		
	总计	方差百分比/%	累计/%	总计	方差百分比/%	累计/%
1	1.15	35.00	35.00	1.05	35.00	35.00
2	1.07	33.33	68.33	1.07	33.33	68.33
3	1.05	31.67	100.00	1.05	31.67	100.00

注:提取方法为主成分分析法。

值进行计算,并对各权重进行标准化处理,得到各因素的初始权重。标准化是将总和不为1的因素做加权平均,使其总和为1,能够更加直观地看到各因子的影响程度大小,计算公式为

$$w_i = \frac{w_i'}{\sum_{i=1}^3 w_i'} \quad (2)$$

式中: $w_i'$ 为某一个因素的初始权重,即第*i*个因素的初始权重; $w_i$ 为某一因素标准化后的权重,即第*i*个因素的标准权重。

将各因素的初始权重按式(1)进行标准化处理,得到各因素的初始权重和标准化后的权重值,如表9所示。

由表9可以看出,弹簧隔振器损伤位置对浮置板垂向振动响应影响最明显,权重为50%,损伤数量和损伤程度影响权重值分别为28.4%和21.6%,

为相对次要因素。统计分析结果能够较好地与试验结果相对应,能够体现实验中出现的情况。

表9 各损伤因素初始权重和标准化后对加速度影响权重

Table 9 Initial weights and normalized impact weights of various damage factors on acceleration

权重	损伤位置	损伤数量	损伤程度
初始权重	0.725	0.412	0.313
标准化后权重	0.500	0.284	0.216

### 3.2 位移值影响分析

同样对弹簧隔振器损伤后的数据进行上述处理,得到KMO值为0.585,巴特利特球形度检测显著性水平小于0.05,适合做因子分析。对浮置板垂向位移峰值数据做因子分析,得到各影响因素的初始权重和标准化后的权重值,如表10所示。

表10 各损伤因素初始权重及标准化后对位移影响权重

Table 10 Initial weights and normalized impact weights of various damage factors on displacement

权重	损伤位置	损伤数量	损伤程度
初始权重	0.715	0.405	0.330
标准化后权重	0.493	0.279	0.228

利用因子分析和主成分分析法,得到各损伤因素对浮置板位移峰值的影响权重值,其中弹簧隔振器的损伤位置对浮置板垂向位移响应影响最明显,权重为49.3%,损伤数量和损伤程度分别为27.9%和22.8%,为相对次要因素。

## 4 结论

1)应用ABAQUS有限元软件建立车辆-轨道耦合模型,选取某沿海城市地铁区段实测振动数据验证所建立模型的正确性,该模型可用于模拟弹簧隔振器不同疲劳损伤下浮置板结构的振动响应。

2)考虑弹簧隔振器不同损伤因素,设计了3因素5水平均匀设计试验表,计算得到不同损伤浮置板垂向加速度和位移响应时程曲线及其峰值,统计分析得到单损伤因素下隔振器损伤位置对浮置板振动响应影响最显著,其次是损伤数量和损伤程度。

3)利用因子分析法和主成分分析法得到考虑多损伤因素共同作用下浮置板垂向加速度和位移峰值影响权重值。其中损伤位置对加速度和位移响应峰值影响权重值为50%和49.3%;损伤数量影响权重值为28.4%和27.9%;损伤程度影响权重值为21.6%和22.8%。损伤位置对加速度影响最大,损伤程度影响最小;损伤位置对位移响应峰值影响最大,损伤程度影响最小。

4)在对地铁浮置板的钢弹簧检查维修过程中,

建议多注意浮置板端部钢弹簧的检查,其次是浮置板1/4跨位置处的钢弹簧,最后是跨中位置处的钢弹簧。

### 参考文献

- [1] 包叙定. 我国城轨交通发展的现状、问题与展望[J]. 城市轨道交通, 2018(10): 16-21.  
BAO X D. Present situation, problems and prospect of urban rail transit development in China [J]. China Metros, 2018(10): 16-21. (in Chinese)
- [2] 李小珍, 辛莉峰, 王铭, 等. 车-桥耦合振动2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 126-138.  
LI X Z, XIN L F, WANG M, et al. State-of-the-art review of vehicle-bridge interactions in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 126-138. (in Chinese)
- [3] ZHU S Y, WANG J W, CAI C B, et al. Development of a vibration attenuation track at low frequencies for urban rail transit [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(9): 713-726.
- [4] YANG J J, ZHU S Y, ZHAI W M, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel [J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 485-499.
- [5] 邹锦华, 李碧坤, 陈伟, 等. 交通荷载作用下钢弹簧浮置板隔振道路设计参数研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 124-134.  
ZOU J H, LI B K, CHEN W, et al. Design parameters study of vibration isolation road of steel spring floating slab under traffic load [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 124-134. (in Chinese)
- [6] 段桂平, 邢海灵. 钢弹簧浮置板轨道减振效果实验室检验评价方法研究[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(4): 252-255, 259.  
DUAN G P, XING H L. Research on laboratory measurement and evaluation method of vibration reduction performance of steel spring floating tracks [J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(4): 252-255, 259. (in Chinese)
- [7] 陈宪麦, 屈郑嘉, 陈文韬, 等. 地铁DTVI2扣件弹条力学特性及断裂研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(11): 2813-2822.  
CHEN X M, QU Z J, CHEN W T, et al. Study on mechanical properties and fracture of DTVI2 fastener elastic bar [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(11): 2813-2822. (in Chinese)
- [8] 魏纲, 董北北, 蒋吉清, 等. 扣件失效对地铁整体道床动力性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 1154-1162.  
WEI G, DONG B B, JIANG J Q, et al. Influence of fastener failure on dynamic performance of metro monolithic track system [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(4): 1154-1162. (in Chinese)
- [9] KAEWUNRUEN S, NGAMKHANDONG C, LIM C H. Damage and failure modes of railway prestressed concrete sleepers with holes/web openings subject to impact loading conditions [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 840-848.
- [10] HU M, YANG R S. Hydraulic damage characteristics of cracks adjacent to sleepers of concrete slab [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121226.
- [11] 魏新江, 史文超, 蒋吉清, 等. 钢弹簧损伤对地铁列车-浮置板轨道振动性能的影响[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 228-234.  
WEI X J, SHI W C, JIANG J Q, et al. Effects of steel spring damage on vibration performance of metro train-floating slab track system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11): 228-234. (in Chinese)
- [12] 方开泰, 刘民千, 周永道. 试验设计与建模[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.  
FANG K T, LIU M Q, ZHOU Y D. Design and modeling of experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 韩智强, 左新黛, 周勇军, 等. 基于主成分-逐步回归的大跨弯连续刚构桥冲击系数计算[J]. 公路交通科技, 2022, 39(1): 72-80.  
HAN Z Q, ZUO X D, ZHOU Y J, et al. Calculation of impact coefficient of long-span curved continuous rigid frame bridge based on principal component-stepwise regression [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(1): 72-80. (in Chinese)
- [14] 侯交叉, 康旭, 徐凯, 等. 基于拟水平正交实验法的磨料水射流切割性能研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(3): 95-98.  
HOU J Y, KANG X, XU K, et al. Study on cutting performance of abrasive water jet based on quasi horizontal orthogonal experiment [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(3): 95-98. (in Chinese)
- [15] 梁一凡, 赛庆毅, 王玄. 基于均匀设计法的高比转速离心风机研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 7-13.  
LIANG Y F, SAI Q Y, WANG X. Study on high specific speed centrifugal fan based on the uniform design test [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(1): 7-13. (in Chinese)