

隧道壁监测地铁运动状态与模型参数影响分析*

杨淑娟¹, 赵 亮¹, 张光槟¹, 付伟庆¹, 王 建²

(1. 青岛理工大学土木工程学院 青岛, 266520)

(2. 青岛零一动测数据科技有限公司 青岛, 266114)

摘要 针对城市地铁安全运行状态监测问题,提出了基于隧道壁动力响应反推轨道结构动力参数来识别地铁运行状态的方法。首先,针对马蹄形和圆形隧道,分别测试地铁行驶中隧道壁的动力响应;其次,建立马蹄形和圆形隧道-轨道基础有限元模型,对测试工况进行模拟以校验有限元模型的准确性;然后,利用有限元模型研究不同类型隧道、道床和峰期激振力对地铁运行状态识别效果的影响;最后,通过变参数分析,研究地铁浮置板弹簧隔振器发生不同损伤数量、程度和位置对隧道壁动态响应的影响规律。结果表明:相比马蹄形隧道,圆形隧道壁加速度峰值提高了 79.0%;采用浮置板道床可降低加速度峰值达 57.5%;不同时段隧道壁加速度响应表现出明显差异,高峰期时隧道壁加速度响应较大。该研究在工程上可对隧道壁监测地铁运行状态提供参考。

关键词 有限元模型;隧道壁响应;弹簧隔振器;参数分析

中图分类号 U231;TH311.3

引 言

由于对城市地铁安全运动状态进行监测十分必要^[1],故学者们在地铁安全运行方面主要进行了以下研究。王小韬等^[2]针对昆明地铁 4 号线建立车辆-轨道耦合模型,利用不同数量和位置处的钢弹簧断裂对耦合系统的影响来评价地铁的运行状况。Ling 等^[3]建立了地铁列车和板轨的三维模型,通过列车在不同扣件损伤情况下的响应特点对其运行状况进行评价。Nippani 等^[4]开发了一个深度学习软件集合,用于预测道路网络事故的发生。Kaczor 等^[5]开发了一种算法用来验证变频器控制系统的安全完整性等级。张昊^[6]从人员、设备、环境及管理 4 个方面对地铁运行状况进行监测。Zisis 等^[7]考察了火车火灾事故后铁路隧道的安全条件以及通风系统,为乘客安全疏散创造条件。王康等^[8]建立轨道交通车辆系统安全评价体系,对地铁运行状况进行监测。刘懿文等^[9]应用贝叶斯网络构建城市轨道交通事故风险图,采用影响强度和灵敏性分析识别关键风险因素。Aleksandar 等^[10]通过熵权法设定指标权重和模糊综合评价法输出地铁运行状况结果,用于优化地铁安全性能分析。张庆东等^[11]进行了武汉地铁运行舒适度的测试,其结果对地铁

线路设计和轨道结构减振具有指导意义。通过隧道壁响应监测地铁运行状态具有测试简便可靠和快速便捷等优点,其前提条件是已知隧道壁动力响应与地铁运行状态之间的关系,以及隧道设计参数对这一关系的影响规律。

笔者利用有限元软件 ABAQUS 建立隧道-轨道基础模型,通过实测数据与有限元模型计算结果对比,验证所建立模型的正确性。通过模型模拟计算,研究道床结构损伤对隧道壁动力响应的影响规律,以此判断地铁浮置板弹簧隔振器发生不同损伤的数量、程度和位置。该研究在工程上可对隧道壁监测地铁运行状态提供参考。

1 马蹄形与圆形隧道壁振动响应监测

1.1 监测仪器设置

使用分布式环境振源监测系统对隧道壁数据采集,主要包括前端硬件设备和云平台 2 部分。其中,隧道壁硬件设备安装需在地铁运行天窗期内完成。传感器为东华低频压电式加速度传感器,地铁振动以垂向为主,选用单轴加速度传感器。传感器具体参数如下:灵敏度为 1 000 mV/(m·s⁻²)、量程为 5 m/s²、频率为 0.2~1 000 Hz(±10%)、尺寸为 31.5 mm×

* 国家自然科学基金资助项目(52178488)

收稿日期:2024-04-28;修回日期:2024-10-26

34 mm 和质量为 172 g。振动监控终端采集箱如图 1 所示,其内部由空气开关、变压器、4G 路由器、AD 转换器和采集控制器组成。

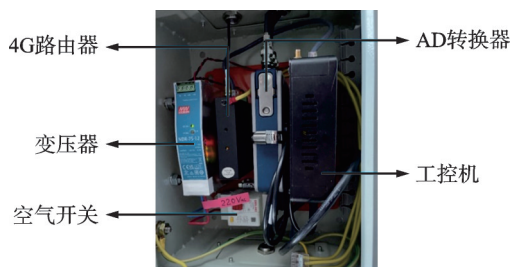


图 1 振动监控终端采集箱

Fig.1 Vibration monitoring terminal acquisition box

1.2 监测试验方案

在隧道壁安装加速度传感器,以获取列车在行驶过程中引起的隧道壁振动响应。选取沿海城市青岛的地铁某隧道为试验监测地点,该隧道包括马蹄形和圆形 2 种常用的隧道类型,隧道内运行的车辆为 B 型车。加速度传感器安装在距离轨顶标高 1.2 m 处的隧道壁上。分布式环境振源监测系统由前端硬件和云平台系统协同构成。前端硬件包括传感器与振动监控终端,负责数据的传感、采集以及与云端的通信。云平台系统通常位于机房内,集成了前端通信、数据分析、数据库管理和可视化客户端等模块,其主要职责涵盖对前端硬件系统的控制、采集数据的接收、自动化数据分析、数据库记录和报告生成功能,为振动噪声监测及治理提供全面技术支撑。测试时间为 05:00~24:00。

1.3 数据实时采集

将前端硬件设备安装完毕后,利用前端硬件系统和云平台系统对振动进行监测。其中,云平台用于远程控制传感器采集模块,设定一些相关的工作模式,同时也可以实现对采集数据进行存储和预处理。测试得到的数据根据不同时间段划分为高峰期、中峰期和低峰期。限于篇幅,仅提取部分高峰期隧道壁加速度时程曲线,如图 2 所示。可以看出,高峰期、中峰期和低峰期的加速度最大值分别为 0.040 8、0.028 8 和 0.02 m/s²,最小值分别为 -0.044 9、-0.032 3 和 -0.023 3 m/s²。可见,地铁行驶在隧道的不同时间段,对应的地铁运行峰期不同,高峰期车辆内部人员较多,整体质量增加,运行时引起的隧道壁振动也随之增大。

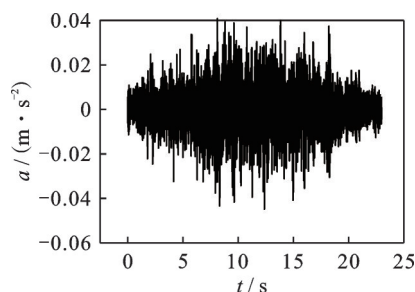


图 2 部分高峰期隧道壁加速度时程曲线

Fig.2 Acceleration time-history curves of the tunnel wall during partial peak periods

2 隧道-轨道基础有限元模型的建立与验证

2.1 材料参数与模型尺寸

利用有限元软件 ABAQUS 建立隧道-轨道基础模型,主要包括马蹄形隧道、圆形隧道和轨道基础。不同工况频谱峰值如表 1 所示。轨道基础高度为 0.18 m,隧道计算长度为 120 m,密度为 2 500 kg/m³,弹性模量为 33 500 MPa,泊松比为 0.2。圆形隧道外径为 6 m,内径为 5.4 m,衬砌厚度为 0.3 m。马蹄形隧道横向外径为 5.5 m,横向内径为 5.5 m,由 4 部分圆弧构成。

表 1 不同工况频谱峰值

Tab.1 Peak spectral values under different conditions

隧道类型	工况	频谱峰值
马蹄形	1	0.010 0
	2	0.010 2
	3	0.010 6
	4	0.012 0
	5	0.012 9
圆形	1	0.007 2
	2	0.010 2
	3	0.010 6
	4	0.011 2
	5	0.016 6

2.2 单元选择与网格划分

利用有限元软件 ABAQUS 对轨道基础、马蹄形隧道和圆形隧道进行建模,采用 C3D8R 六面体实体单元,其中:马蹄形隧道在不同圆弧段近似单元尺寸为 0.5,共划分 6 174 个结点,4 032 个单元;圆形隧道近似单元尺寸为 0.5,共划分 5 883 个结点,3 848 个单元。纵向按 2.5 m 划分,以保证模型的整体性。隧道网格划分如图 3 所示。

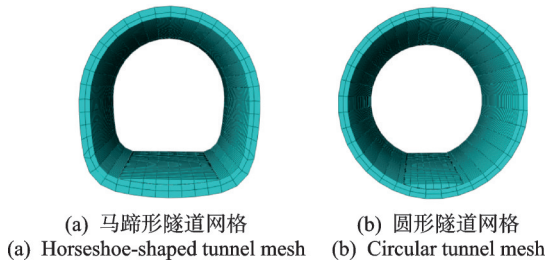


图 3 隧道网格划分

Fig.3 Tunnel mesh division

2.3 有限元模型验证

2.3.1 马蹄形隧道壁

提取马蹄形隧道的隧道壁加速度,并与有限元模型模拟结果进行对比。马蹄形隧道壁时程和频谱分析如图 4 所示。

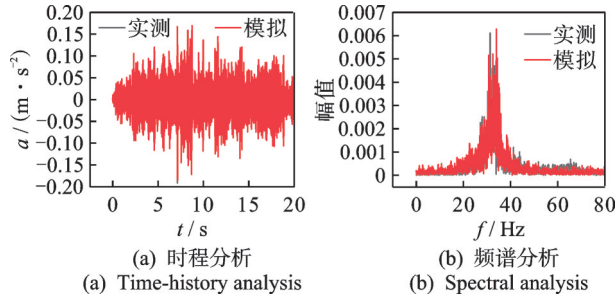


图 4 马蹄形隧道壁时程和频谱分析

Fig.4 Comparison of time-history and spectral analysis of horseshoe-shaped tunnel wall

加速度峰值用来评价运动中的加速度最大绝对值,而加速度有效值又称为均方根值,反应一段时间内振动能量的大小。离散时间序列的有效值为

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N x^2 / N}$$

其中: x 为加速度数据; N 为加速度数据的个数。

实测的加速度最大值、最小值与有效值分别为 0.169、-0.186 和 0.035 m/s^2 ,模拟的加速度最大值、最小值与有效值分别为 0.170、-0.173 和 0.037 m/s^2 。可以看出,实测与有限元计算隧道壁加速度最大值误差为 0.5%,最小值误差为 1.3%,有效值误差为 4.6%。通过图 4(b)可以得到,实测频谱峰值为 0.006 112,有限元计算结果为 0.006 284,二者之间的误差为 2.8%。

2.3.2 圆形隧道壁

提取圆形隧道壁加速度数据,并与有限元模型模拟结果进行对比。圆形隧道壁时程和频谱分析如图 5 所示。实测隧道壁加速度最大值、最小值与有效值分别为 0.273、-0.277 和 0.045 m/s^2 ,模拟结果

分别为 0.269、-0.278 和 0.049 m/s^2 ,二者最大值误差为 1.4%,最小值误差为 0.3%,有效值误差为 8.7%。同时,实测频谱峰值为 0.007 308,有限元计算频谱峰值为 0.007 596,误差为 8.7%。以上对比表明,有限元模型计算与实测结果误差均小于 10%,证明所建立的马蹄形和圆形隧道-轨道基础模型的准确性。

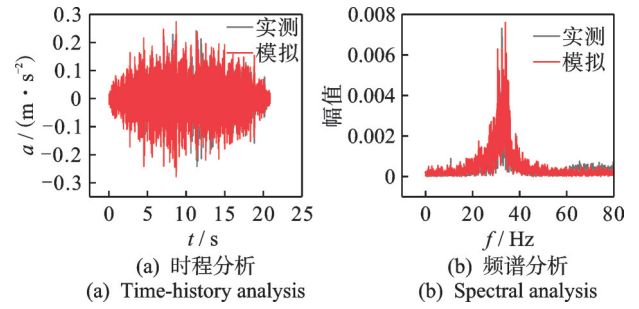


图 5 圆形隧道壁时程和频谱分析

Fig.5 Comparison of time-history and spectral analysis of circular tunnel wall

3 隧道壁监测地铁运行状态参数影响

利用有限元软件进行列车振动对隧道壁的影响分析,每种类型在隧道壁选取 20 个点进行模拟。限于篇幅,每种类型仅选取一个相同位置的特征点进行分析。模拟所用的激振力为通过力锤试验得到的列车荷载。

3.1 时域响应影响分析

3.1.1 隧道类型

以距离轨道高度为 1.2 m、沿纵向 60 m 处的隧道壁测点(以下称为测点 α)计算结果为例,分析 2 种隧道类型(马蹄形和圆形)下地铁运行引起的隧道壁响应特点。2 种隧道类型加速度时程对比如图 6 所示。根据图 6 计算可知:马蹄形隧道的加速度峰值和有效值分别为 0.239 1 和 0.042 7 m/s^2 ;圆形隧道的

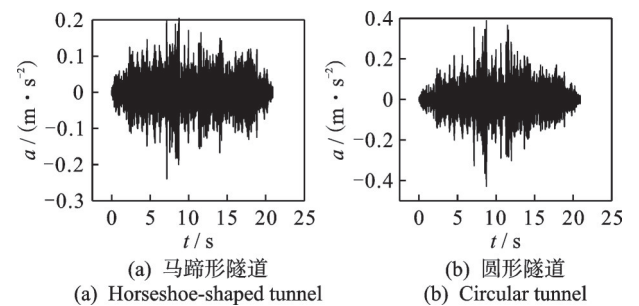


图 6 2 种隧道类型加速度时程对比

Fig.6 Comparison of acceleration time histories for 2 types of tunnels

加速度峰值和有效值分别为 0.427 9 和 0.067 8 m/s²; 地铁在圆形隧道中运行产生的隧道壁测点振动大于马蹄形隧道,加速度峰值和有效值分别增大了 79.0% 和 58.8%。

为研究不同隧道壁测点高度的振动响应特点,笔者将 2 种隧道类型划分为 5 种测点高度,如表 2 所示。不同工况加速度时程对比如图 7 所示。

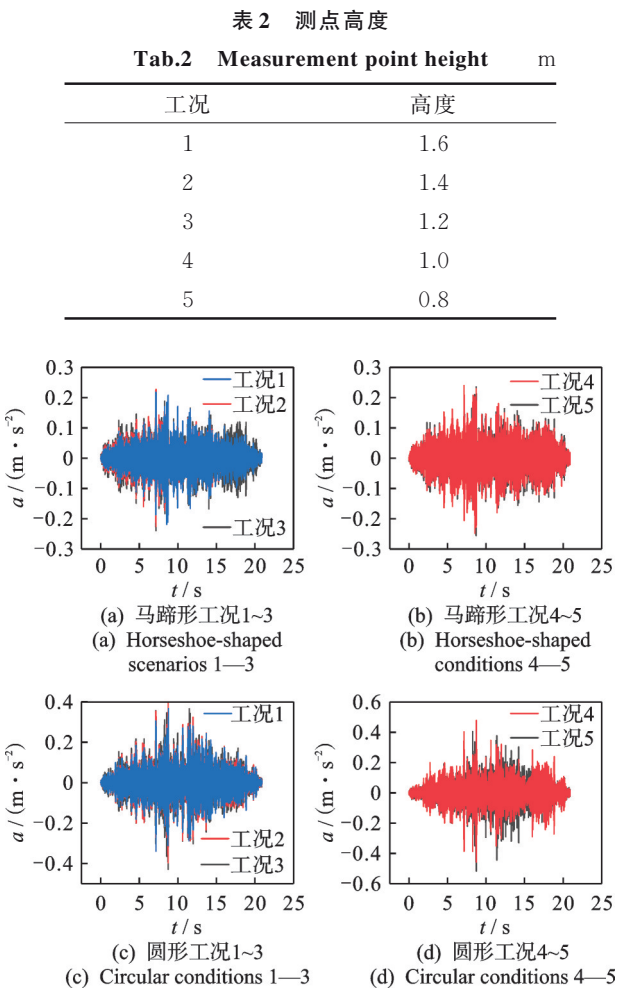


图 7 不同工况加速度时程对比

Fig.7 Comparison of acceleration time histories under different condition

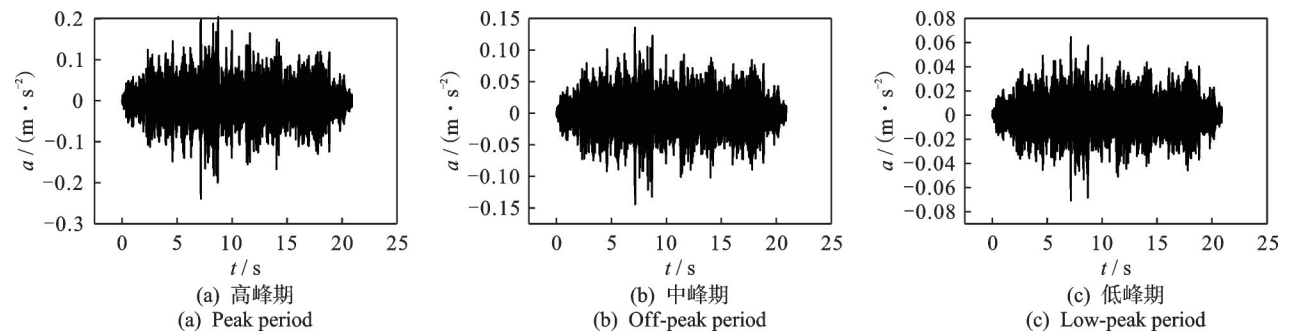


图 8 不同运行峰期加速度时程对比

Fig.8 Comparison of acceleration time histories during different operation peaks

不同工况下加速度峰值及有效值如表 3 所示。

表 3 不同工况下加速度峰值及有效值

Tab.3 Peak and effective values of acceleration under different conditions

m/s²

隧道类型	工况	峰值	有效值
马蹄形	1	0.218 6	0.038 7
	2	0.227 4	0.040 4
	3	0.239 1	0.042 7
	4	0.247 9	0.047 7
	5	0.255 6	0.048 1
圆形	1	0.365 7	0.059 3
	2	0.412 1	0.064 0
	3	0.427 9	0.067 8
	4	0.478 1	0.069 1
	5	0.517 4	0.069 3

由图 7 和表 3 可知:马蹄形隧道的测点高度每减少 0.2 m,加速度峰值分别增大 4.0%、9.4%、13.4% 和 16.9%,加速度有效值分别增大 4.4%、10.3%、23.2% 和 24.3%;圆形隧道的测点高度每减少 0.2 m,加速度峰值分别增大 12.7%、17.0%、31.5% 和 41.5%,加速度有效值分别增大 7.9%、14.3%、16.5% 和 16.9%。在相同的隧道壁高度处,圆形隧道加速度峰值相较于马蹄形提高了 50% 以上,加速度有效值提高 40% 以上。

3.1.2 激振力类型

地铁列车运行存在高峰期、中峰期和低峰期,不同峰期对应的荷载不同。分别选取对应荷载进行模拟计算,得到不同荷载类型对隧道壁响应的影响规律。选取测点 α 进行加速度时程和有效值对比,不同运行峰期加速度时程对比如图 8 所示。

由图 8 计算得到高峰期、中峰期和低峰期的加速度峰值分别为 0.239 1、0.144 2 和 0.070 8 m/s²,有效值分别为 0.042 7、0.028 和 0.014 m/s²。同一天内高峰期地铁运行引起的隧道壁振动响应的加速度峰

值相对于中峰期高 65.8%，加速度有效值高 52.5%。中峰期地铁运行引起的隧道壁振动加速度峰值相对于低峰期高 1.1 倍，加速度有效值高 1.0 倍。

3.2 频域响应影响分析

3.2.1 隧道类型

同样选取测点 α 进行对比分析。模型模拟计算得到测点加速度数据，经过采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, 简称 FFT)，得到不同隧道类型频谱对比如图 9 所示。可以看出，马蹄形和圆形隧道壁的频谱峰值分别为 0.016 6 和 0.010 2。地铁运行时，马蹄形和圆形隧道壁振动频谱峰值出现位置相差不大，马蹄形隧道峰值出现在 30 Hz 附近，圆形隧道峰值出现在 34 Hz 附近，且圆形隧道频谱峰值比马蹄形隧道提高了约 62.7%。

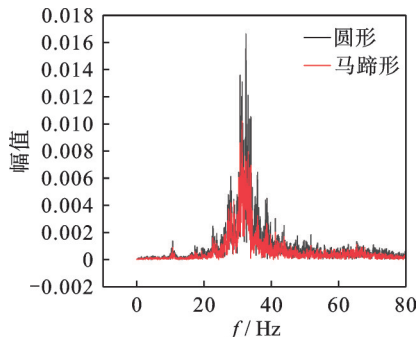


图 9 不同隧道类型频谱对比

Fig.9 Spectral comparison of different tunnel types

限于篇幅，工况 1~3 的高度频谱对比如图 10 所示。

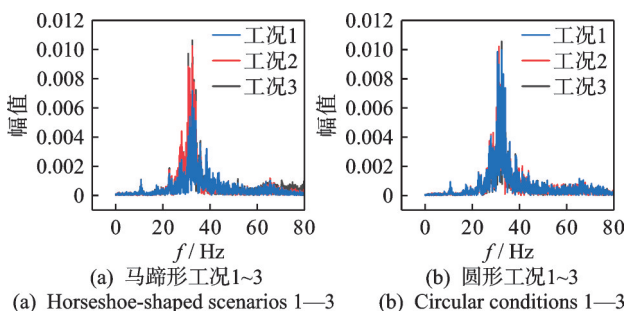


图 10 工况 1~3 的高度频谱对比

Fig.10 Comparison of height conditions spectral of scenarios 1—3

由图 10 和表 3 可知，马蹄形隧道高度每减少 0.2 m，频谱峰值分别增大 2.0%、6.0%、20.0% 和 29.0%；圆形隧道高度每减少 0.2 m，频谱峰值分别增大 41.6%、47.2%、55.6% 和 130.6%。

3.2.2 道床类型

图 11 为 2 种道床类型频谱对比。由图 11 知，普通道床和浮置板道床隧道壁频谱峰值分别为 0.018 5

和 0.010 2，且二者频谱峰值位置均在 30 Hz 附近，浮置板道床频谱峰值比普通道床低约 81.4%，这表明浮置板道床能显著降低地铁运行振动响应。

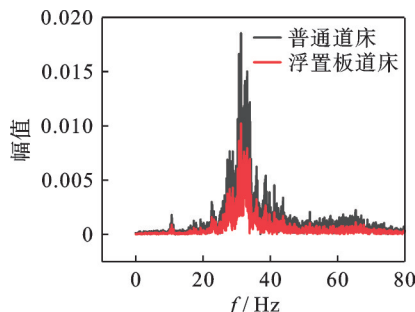


图 11 2 种道床类型频谱对比

Fig.11 Spectral comparison between 2 types of track beds

3.2.3 激振力类型

针对不同运行峰期激振力类型，将测点加速度经过 FFT，得到不同运行峰期下激振力频谱对比如图 12 所示。

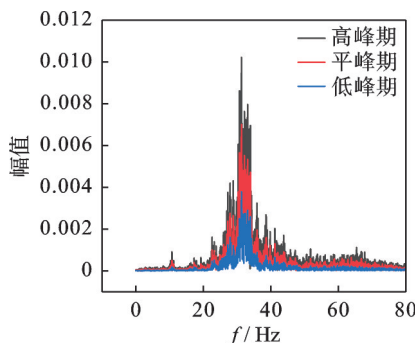


图 12 不同运行峰期下激振力频谱对比

Fig.12 Spectral comparison under different operational peak excitation forces

由图 12 可知，高、中和低峰期隧道壁频谱峰值分别为 0.010 2、0.007 0 和 0.003 8。在不同峰期对应激振力类型，隧道壁振动的频谱峰值出现位置基本相似，位于 30 Hz 附近。高峰期对应频谱峰值相对中峰期高 45.7%，中峰期对应的频谱峰值相对低峰期高 84.2%。

4 隧道壁监测弹簧隔振器损伤状态分析

4.1 隔振器损伤数量

等效列车荷载是以集中荷载每隔 7.5 m 的方式施加 17 次。定义隔振器损伤程度为刚度的折减比例，隔振器损伤程度为 90%。弹簧隔振器的垂向刚度为 6 000 kN/m，垂向阻尼为 30 kN·s/m。根据文

献[12-13],计算得到在弹簧损伤的情况下作用在基础底部的荷载。图13为隔振器布置示意图,直接用折减后的荷载模拟弹簧损伤。以9号位置为参考中心,当一端损伤2、3和4个钢弹簧时,分别对应78、678和5 678位置处弹簧发生损伤。当两端损伤2和4个钢弹簧时,此时8和10、7和8以及10和11这3处位置弹簧发生损伤。

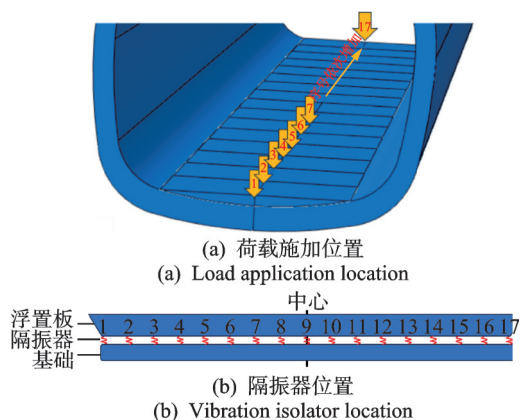


图13 隔振器布置示意图

不同工况下隔振器损伤数量如表4所示。限于篇幅,工况1~3的浮置板隔振器不同损伤位置加速度时程对比如图14所示。

表4 不同工况下隔振器损伤数量

Tab.4 Damaged quantity of vibration isolators under various conditions

工况	1	2	3	4	5
隔振器	一端损	一端损	一端损	两端损	两端损
损伤数量	伤2个	伤3个	伤4个	伤2个	伤4个

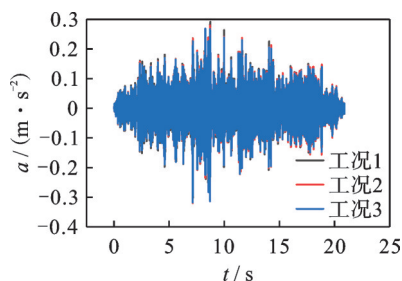


图14 工况1~3的浮置板隔振器不同损伤位置加速度时程对比

Fig.14 Comparison of acceleration time histories for different damage positions in floating slab isolators of scenarios 1—3

根据图14可知,工况1~5的加速度峰值依次为0.307 9、0.320 2、0.329 0、0.334 0和0.434 1 m/s^2 ,加速度有效值依次为0.054 9、0.055 4、0.057 6、0.067 4

和0.074 0 m/s^2 。数据表明,一端弹簧损伤增加,隧道壁加速度响应减小;两端弹簧损伤增加,隧道壁加速度响应则增大。相比一端损伤2个弹簧,一端损伤3、4个弹簧时,峰值分别增加4.0%和6.9%;两端损伤从2个增至4个,峰值增加30.0%,有效值增加9.8%。综上,弹簧两端损伤比一端损伤对隧道壁振动影响更严重。

浮置板隔振器不同损伤位置频谱对比如图15所示。可见,一端损伤4个隔振器相对于一端损伤2个隔振器,隧道壁频谱峰值增大7.0%。两端损伤4个隔振器相对于两端损伤2个隔振器,隧道壁加速度频谱峰值增大9.4%。

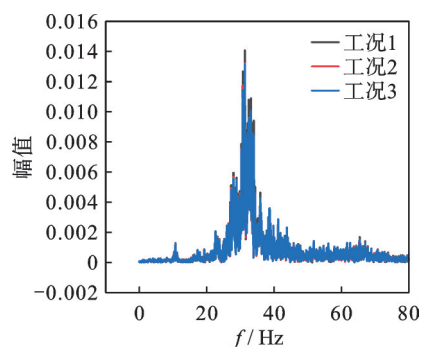


图15 浮置板隔振器不同损伤位置频谱对比

Fig.15 Comparison of operational frequency spectra for different damage locations in floating slab isolators

4.2 隔振器损伤程度

在图13中的8和9位置模拟弹簧隔振器损伤,设弹簧隔振器刚度折减90%、70%、50%、30%和20%这5种损伤工况,不同工况损伤程度如表5所示。

表5 不同工况损伤程度

Tab.5 Scenarios with different degrees of damage %

工况	1	2	3	4	5
损伤程度	90	70	50	30	20

工况1~3浮置板隔振器不同损伤程度加速度时程对比如图16所示。由图16可知,工况1~5的加速度峰值分别为0.334 0、0.317 6、0.298 6、0.279 9和0.253 9 m/s^2 ,加速度有效值分别为0.0674、0.064 1、0.057 6、0.051 4和0.045 5 m/s^2 。这表明随着隔振器弹簧损伤加重,隧道壁振动加速度峰值和有效值均增大。相较于损伤程度20%、30%、50%、70%和90%损伤下,加速度峰值分别增大10.2%、17.6%、25.1%和31.5%,加速度有效值分别增大13.0%、26.6%、40.9%和48.1%。

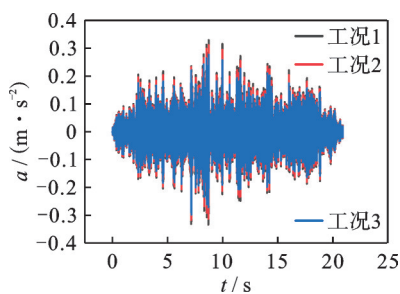


图 16 工况 1~3 浮置板隔振器不同损伤程度加速度时程对比
Fig. 16 Comparison of acceleration time histories for different degrees of damage in floating slab isolators of scenarios 1—3

经 FFT 得到工况 1~3 浮置板隔振器不同损伤程度频谱对比,如图 17 所示。由图 17 可知,随着弹簧损伤程度的增加,频谱中频谱峰值出现的位置基本一致,但频谱峰值逐渐增大。相对于损伤程度 20%,当损伤程度分别为 30%、50%、70% 和 90% 时,隧道壁频谱峰值分别增大 13.9%、28.4%、43.2% 和 50.8%

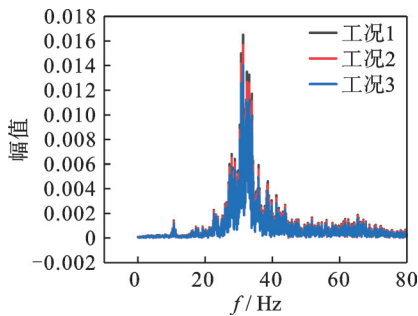


图 17 工况 1~3 浮置板隔振器不同损伤程度频谱对比
Fig. 17 Comparison of frequency spectra for different degrees of damage in floating slab isolators of scenarios 1—3

4.3 隔振器损伤位置

设置弹簧损伤刚度折减 90%,损伤数量均为 2,损伤位置为一端近、一端远、两端近、两端远,分别对应 7 和 8、3 和 4、8 和 10、5 和 13 位置处弹簧发生损伤。不同工况损伤位置如表 6 所示。

表 6 不同工况损伤位置

Tab.6 Scenarios with different locations of damage

工况	1	2	3	4
损伤位置	一端近	一端远	两端近	两端远

浮置板隔振器不同损伤位置加速度时程对比如图 18 所示。由图 18 可知,工况 1~4 加速度峰值分别为 0.319 0、0.259 2、0.399 3 和 0.255 2 m/s²,加速度有效值分别为 0.057 6、0.048 5、0.069 9 和

0.045 2 m/s²。随着位置距离增加,当一端损伤发生时,远距端比近距端隧道壁振动加速度峰值减小 23.1%,有效值减小 15.8%;当两端损伤发生时,远距端比近距端隧道壁振动加速度峰值减小 39.8%,加速度有效值减小 56.5%。在近距端发生损伤时,两端损伤影响更大;在远距端发生损伤时,一端损伤影响较大。

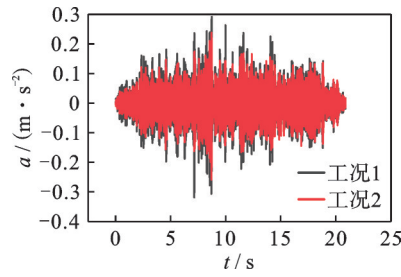


图 18 浮置板隔振器不同损伤位置加速度时程对比
Fig. 18 Comparison of acceleration time histories for different damage locations in floating slab isolators

工况 1~2 的浮置板隔振器不同损伤位置频谱对比如图 19 所示。由图 19 可知,随着位置距离增加,当一端损伤发生时,远距端隧道壁振动频谱峰值比近距端减小了 13.7%;当两端损伤发生时,远距端隧道壁振动频谱峰值比近距端减小了 47.2%。

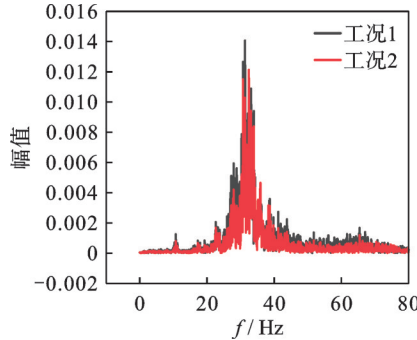


图 19 工况 1~2 的浮置板隔振器不同损伤位置频谱对比
Fig. 19 Comparison of frequency spectra for different damage locations in floating slab isolators of scenarios 1—2

5 结 论

1) 测试了地铁常用的马蹄形和圆形隧道壁振动响应,利用有限元软件进行隧道—轨道基础建模。通过有限元分析,研究了发生损伤的隔振器数量、程度、位置对隧道壁测点加速度响应的影响规律。对比实测与有限元计算结果发现,有限元计算误差较小,证明有限元模拟方法的准确性。

2) 分析隧道壁测点的加速度时域响应发现,圆形隧道壁的加速度响应相比马蹄形隧道壁增大了 79.0%。测点距离轨道顶高的高度每减少 0.2 m,马

蹄形隧道的加速度峰值分别增大4.0%、9.4%、13.4%和16.9%,圆形隧道的加速度峰值分别增大了12.7%、17.0%、31.5%和41.5%。地铁在浮置板道床运行引起的隧道壁振动相对于普通道床,加速度峰值降低57.5%。地铁高峰期加速度幅值谱的峰值相较于低峰期有成倍增长。

3) 通过分析隧道壁振动加速度频域响应发现,相比马蹄形隧道,圆形隧道测点加速度频谱峰值提高62.7%。隧道测点距离轨道顶高的高度每减少0.2 m,马蹄形隧道的频谱峰值分别增大2.0%、6.0%、20.0%和29.0%,圆形隧道的频谱峰值分别增大41.6%、47.2%、55.6%和130.6%。相比普通道床,采用浮置板道床可有效降低加速度幅值谱的峰值达81.4%。高峰期加速度幅值谱的峰值相较于低峰期成倍增长。

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 Xuding. The current status, issues, and prospects of urban rail transit development in China[J]. Urban Mass Transit, 2018(10): 16-21. (in Chinese)
- [2] 王小韬, 赵子诚, 周文涛, 等. 浮置板断簧条件下的列车-轨道耦合系统动力特性分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 1-8.
WANG Xiaotao, ZHAO Zicheng, ZHOU Wentao, et al. Dynamic characteristic analysis of train-track coupled system under the condition of floating slab track bed broken spring[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(10): 1-8. (in Chinese)
- [3] LING L, LI W, SHANG H, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behavior of rail fastenings[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(9): 1211-1231.
- [4] NIPPANI A, LI D Y, JU H T, et al. Graph neural networks for road safety modeling: datasets and evaluations for accident analysis[C]//2023 Datasets and Benchmarks Track. [S.l.]: NeurIPS, 2023: 52009-52032.
- [5] KACZOR G M, MACHNO M. Hazard and risk analysis of railway vehicle control systems according to safety integrity levels[J]. Transport Problems, 2023, 18(1): 179-192.
- [6] 张昊. 北京地铁运营安全风险评价体系研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [7] ZISIS T, VASILOPOULOS K, SARRIS I. Numerical simulation of a fire accident in a longitudinally ventilated railway tunnel and tenability analysis[J]. Applied

Sciences, 2022, 12(11): 31-36.

- [8] 王康, 董四辉. 轨道交通车辆系统安全评价云模型[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 51-56.
WANG Kang, DONG Sihui. Cloud model for safety evaluation of rail transit vehicle systems[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 29(9): 51-56. (in Chinese)
- [9] 刘懿文, 朱琳, 刘志钢, 等. 基于贝叶斯网络的城市轨道交通运营安全风险及防控研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 162-167.
LIU Yiwen, ZHU Lin, LIU Zhigang, et al. Research on urban rail transit operation safety risk and prevention and control based on Bayesian network[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 162-167. (in Chinese)
- [10] ALEKSANDAR B, SANDRA K A. A novel entropy-fuzzy pipreciadea model for safety evaluation of railway traffic[J]. Symmetry, 2020, 12(14): 1-23.
- [11] 张庆东, 吴巧云, 荆国强, 等. 多振源激励下武汉站振动实测与舒适度研究[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(4): 808-813.
ZHANG Qingdong, WU Qiaoyun, JING Guoqiang, et al. Vibration measurement and comfort study of Wuhan railway station under multi vibration sources[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(4): 808-813. (in Chinese)
- [12] 付伟庆, 狄会霖, 赵亮, 等. 轨道交通钢弹簧隔振器损伤参数对动力响应的影响[J/OL]. 土木与环境工程学报: 1-9. [2025-08-26]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.tu.20231017.0937.002>.
FU Weiqing, DI Huilin, ZHAO Liang, et al. Influence of damage parameters of steel spring vibration isolators on dynamic response in rail transit[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-9. [2025-08-26]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.tu.20231017.0937.002>. (in Chinese)
- [13] 狄会霖. 弹簧隔振器损伤对轨道交通浮置板振动影响分析与识别方法[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.



第一作者简介:杨淑娟,女,1974年10月生,博士、副教授。主要研究方向为智能建造、岩土工程及工程项目管理。曾发表《土岩深基坑微型钢管桩承载性能试验研究》(《科学技术与工程》2020年第20卷第30期)等论文。

E-mail: yangshujuan@qut.edu.cn

通信作者简介:付伟庆,男,1976年10月生,博士、教授。主要研究方向为结构振动控制与健康监测技术。

E-mail: fuweiqing@qut.edu.cn