

文章编号:1006-1355(2021)01-0177-07

## 高架候车厅车致振动特性及减振控制研究

孟庆成<sup>1</sup>, 何翰林<sup>1</sup>, 张梦宇<sup>1</sup>, 马袁俊<sup>1</sup>, 齐欣<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 成都 610500;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**为评估某火车站高架候车厅结构车致振动特性及振动对于舒适度的影响,采用振动测试的方法对列车经过时该候车厅不同部位的振动进行现场实测。基于实测数据及数值模拟分析对比,得到该火车站结构不同部位对车致振动的响应特征,在此基础上结合国家标准进行舒适度评估;通过1/3倍频程谱分析,研究结构不同部位各频带范围的加速度振动级。对于加速度振动级超出标准限值的工况,采用数值模拟的方法进行多重调谐质量阻尼器减振系统的设计。结果表明:重载货运列车过站时,火车站高架候车厅的车致振动最大加速度振动极易超过75 dB的标准限值从而对舒适度产生影响;在该车站的研究中,通过对减振系统的优化设计,阐明合理设计的多重调谐质量阻尼器系统可以有效降低候车厅的振动响应,其振动加速度最大降幅达到73.9%,振动加速度级最大减值为19.9 dB。

**关键词:** 振动与波;车致振动;1/3倍频程;多重调谐质量阻尼器

**中图分类号:** X593; X839.1

**文献标志码:** A

**DOI编码:** 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.032

## Research of Vibration Characteristics and Vibration Control of Elevated Waiting Halls

MENG Qingcheng<sup>1</sup>, HE Hanlin<sup>1</sup>, ZHANG Mengyu<sup>1</sup>,  
MA Yuanjun<sup>1</sup>, QI Xin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University,  
Chengdu 610500, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract :** In order to evaluate the train-induced vibration characteristics of the structure of the elevated waiting hall and its influence on the comfort, the vibrations of different parts of the waiting hall, when the train is passing through, are measured. The measurement data and numerical simulation data are analyzed and compared mutually. The train-induced vibration response characteristics of different parts of the railway station are obtained. On this basis, the comfort of the railway station is evaluated according to the domestic standards. The vibration acceleration levels of frequency bands in different parts of the structure of the railway station are studied by 1/3 octave spectrum analysis. For the operation condition that the vibration acceleration level exceeds the standard limit, the design of the multi-tuned mass damper system is carried out by numerical simulation. The results show that when the heavy-duty freight train passes the station, the maximum vibration acceleration level of the train-induced vibration of the elevated train waiting hall can easily exceed the standard limit of 75 dB, which greatly reduces the passenger comfort. In the research of the station, through the optimization design of the damping system, it is shown that the multi-tuned mass damper system designed reasonably can effectively reduce the vibration response of the waiting hall. The maximum reduction of the vibration acceleration reaches 73.9 %, and the maximum reduction of the vibration acceleration level is 19.9 dB.

**Key words :** vibration and wave; vehicle-induced vibration; 1/3 octave; multi-tuned mass damper

目(51408498)

收稿日期:2020-04-02

**基金项目:** 四川省教育厅自然科学重点资助项目(16ZA0058);住房与城乡建设部科研开发资助项目(2016-K4-060);国家安监总局重大事故防治关键技术科技资助项目(sichuan-0012-2016AQ);西南石油大学青年教师“过学术关”资助项目(201599010026);西南石油大学科研启航计划资助项目(2015QHZ023);国家自然科学基金资助项目

**作者简介:** 孟庆成(1980-),男,吉林省辽源市人,工学博士,硕士生导师,主要研究方向为从事道路与桥梁及控制理论的研究工作。

E-mail: cdmengqc\_0\_0@163.com

**通信作者:** 何翰林(1995-),男,四川省广元市人,硕士研究生,主要研究方向为桥梁与隧道及控制方面的研究。

E-mail: 229494397@qq.com

随着我国铁路基础设施建设的迅猛发展以及铁路配套设施的不断完善,为了适应新型高速列车的配套需求,近年来在全国各地有大量的新客运火车站陆续建成并投入使用。这批新客运站的候车厅大多采用了高架跨线的结构布置方式(图1),从而在节约车站建筑用地的同时缩短了候车厅与站台的距离<sup>[1]</sup>。高架跨线结构布置方式的特点是候车厅悬空跨越铁路轨道。

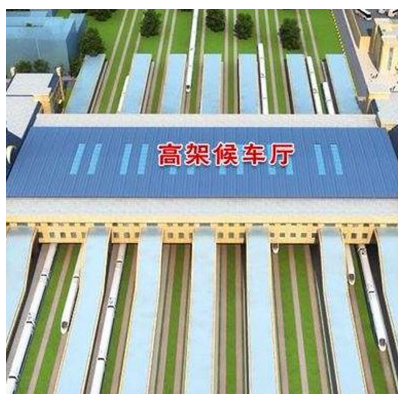


图1 高架跨线候车厅

与以往更加常见的线侧候车结构布置方式相比,高架跨线结构布置方式在结构跨度更大的同时,车站的结构构件也更接近铁路轨道,因此在列车通过时对列车产生的振动激励有更加直接的响应。车致振动由车轮与轨道冲击、轨道不平顺或车轮磨损、车轮偏心等因素激发,经由道床、土体、车站立柱以及车站梁板的受迫振动传递至车站结构产生振动响应<sup>[2]</sup>。对于车致振动的问题,Howarth等<sup>[3]</sup>提出了列车激励和建筑受迫振动之间的相关系数;谷尚玲<sup>[4]</sup>对武汉高架候车层楼板车致振动进行了实测和分析;赵凯等<sup>[5]</sup>使用三有限元方法分析了车致振动对沿线建筑物的影响,得到了高度不同、与铁路距离不同的建筑物的车致振动响应规律;王子玉<sup>[6]</sup>研究了车致振动对地铁沿线建筑物的影响,得出了结构跨度与动力响应的关系;M Adam等<sup>[7]</sup>、A Dijckmans等<sup>[8]</sup>、Said Elias等<sup>[9]</sup>分别用实验手段研究了壕沟、板桩墙、调谐质量阻尼器等减振手段对车致振动的减振效果;Patricia L J等<sup>[10]</sup>用实验手段验证了地铁车致室内振动的综合预测模型;崔聪聪等<sup>[11]</sup>采用有限元法研究了不同工况下候车厅楼板以及大跨度悬挑结构的振动响应规律。但是从已有研究来看,对于接近振动源的有人环境中的车致振动影响与振动控制的研究依然较少。

鉴于高架跨线结构布置的候车厅与轨道非常接近,过大的振动响应会大幅降低候车乘客的舒适性。另外,由于车站运营以及铁路时刻表都是长期规划,因此车致振动在车站运营过程中也会长期存在,具

有一定的持续性,建筑物结构构件在这种长期作用下可能会产生形变,造成引起结构构件开裂等问题。因此对车站车致结构振动进行评价并设计必要的振动控制措施具有工程意义<sup>[12]</sup>。

## 1 车致振动实测

此车站候车厅分为两个结构分区:如图2所示。分区一位于F轴至K轴,该区域下方有列车通过;分区二位于K轴至L轴,下方无列车通过,两区域主体结构构件分离,不会相互影响,因此实测测点均布置于分区一内。在分区一各跨楼板中心位置布置板上测点B1~B6,在分区一各柱顶布置柱端测点Z1~Z4,此外在列车站台外靠近道轨的土中埋置了一个场地测点。测点位置如图3所示。

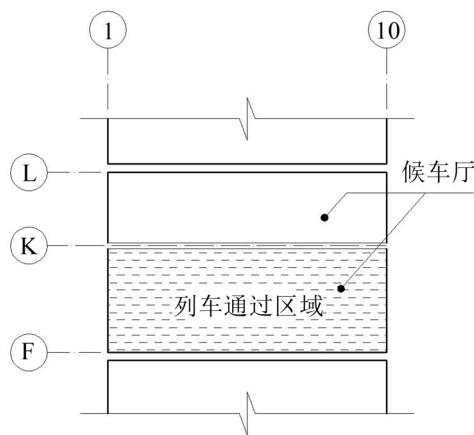
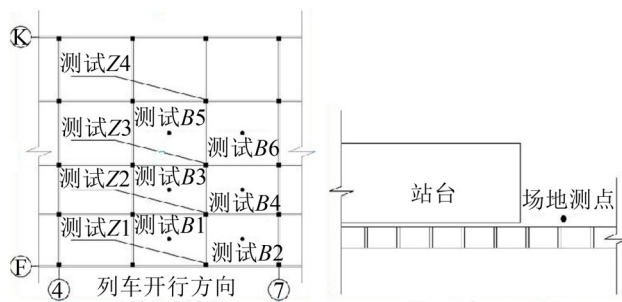


图2 车站高架候车厅布置



(a) 候车厅楼板测点布置 (b) 场地测点布置

图3 测点布置

测试采用磁电式速度传感器的实测数据作为数据源,采用16通道动态信号测试分析系统对采集到的数据进行操作和处理。在运营状态下,该车站过站的列车种类有快速客运列车、特快客运列车、空载货运列车以及重载货运列车,现场测试工作对这些列车造成的振动响应均进行了数据采集和分析,由于其他种类的列车各项采集数据均远小于重载货运列车的采集数据以及篇幅限制,下文仅以重载货运列车通过车站时的数据作为分析对象。

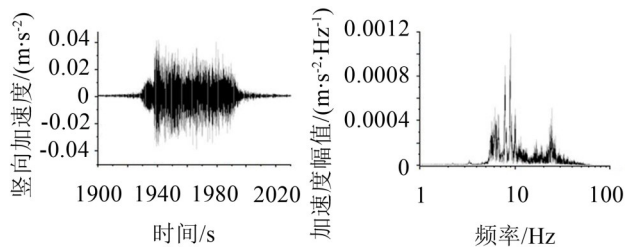
根据采集数据结果,分别提取了三列重载货运

列车通过时的数据作为工况1至工况3,各工况的加速度时域曲线及频域曲线如图4(a)至图4(i)所示,各工况时域振动峰值如表1所示,经分析可得到如下结果:

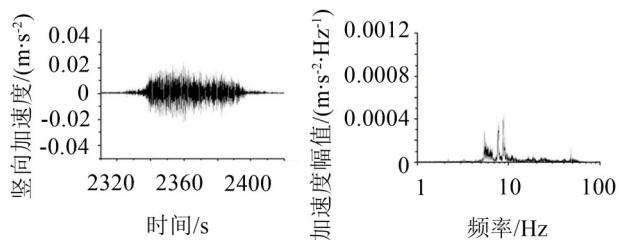
表1 各工况振动加速度峰值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )

测点	工况1	工况2	工况3
场地测点	0.042	0.044	0.033
测点Z2	0.023	0.029	0.019
测点B4	0.098	0.079	0.085
测点B2	0.073	0.071	0.052

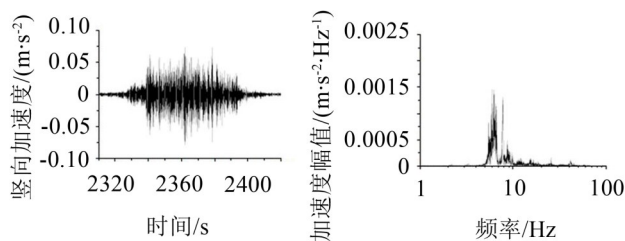
(1) 从图4(a)至图4(i)可以看出,重载货运列车通过时各测点的加速度时域曲线分布均呈现出头尾小中间大的“纺锤形”特征。



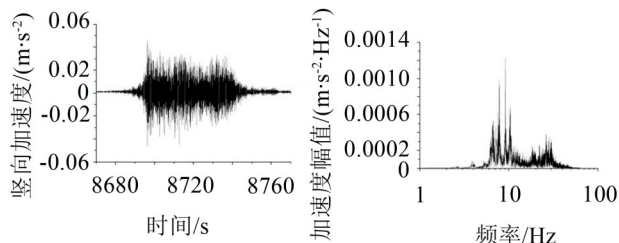
(a) 工况1场地测点时域曲线和频域曲线



(b) 工况1测点Z2时域曲线和频域曲线

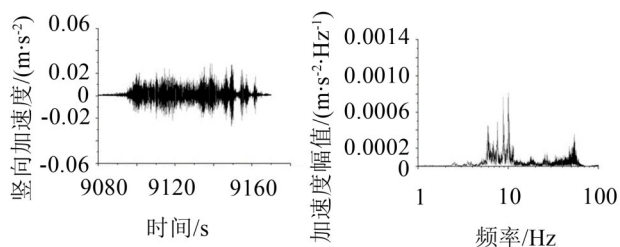


(c) 工况1测点B2时域曲线和频域曲线

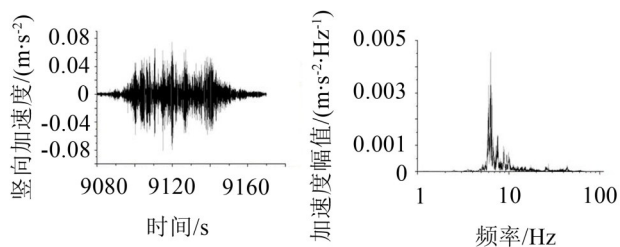


(d) 工况2场地测点时域曲线和频域曲线

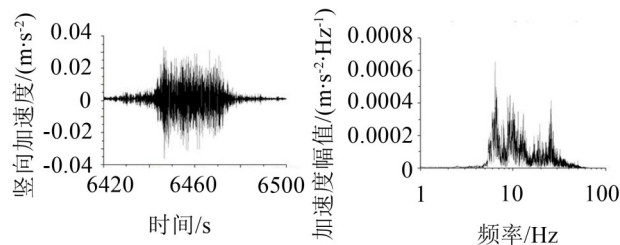
(2) 从图4(a)、图4(b)、图4(d)、图4(e)、图4(g)、图4(h)的对比中可以看出列车的振动响应在经过车站地面传递至车站结构柱的过程中,出现了十分显著



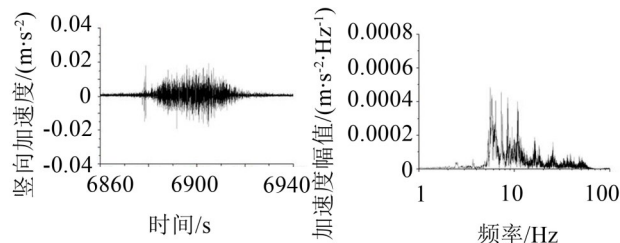
(e) 工况2测点Z2时域曲线和频域曲线



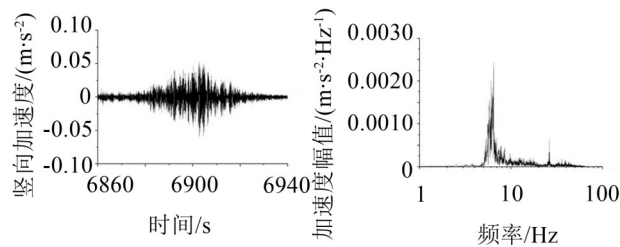
(f) 工况2测点B2时域曲线和频域曲线



(g) 工况3场地测点时域曲线和频域曲线



(h) 工况3测点Z2时域曲线和频域曲线



(i) 工况3测点B2时域曲线和频域曲线

图4 实测时域和频域曲线

的衰减,三列重载货运列车引起的场地振动波传递至车站柱端时,加速度时域曲线上的振动峰值分别有35%至45%的衰减。从频域曲线上可以看出,场地土体的振动在6 Hz以及25 Hz的频率上存在两个峰值区,振动经场地土体缓冲传递至柱端后,柱端各频率的加速度幅值与场地土相比均有大幅的降低,这种缓冲作用在高频段尤为明显,在25 Hz附近的区域已经看不到明显的峰值。



(3) 从图4(b)、图4(c)、图4(e)、图4(f)、图4(h)、图4(i)的对比中可以看出振动波由柱端传递至楼板时与楼板产生共振,由频域曲线可以看出,在5 Hz~10 Hz的范围内,楼板振动的加速度幅值与柱端相比有明显的放大,这说明5 Hz~10 Hz附近为该结构楼板的共振频率区间。

## 2 动力分析

### 2.1 有限元模型

为了对车站的动力响应进行有限元分析,使用Midas/Gen有限元分析软件建立了车站的整体有限元模型,由该模型可以看出,该车站结构被两条沉降缝划分为三个独立的结构分区(见图5),列车过站时仅从中间部分即B区下方通过,由于沉降缝的存在,B区楼板的振动不会被传递至A区和C区,因此有限元模型的动力分析仅针对B区进行(见图6)。

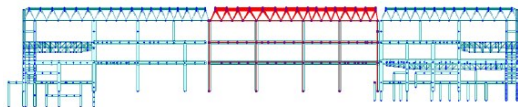


图5 某车站有限元模型

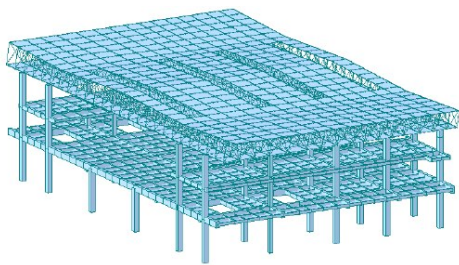


图6 某车站局部有限元模型

### 2.2 有限元动力时程分析

将实测车致振动激励作为时程荷载函数导入Midas/Gen软件,在车站B区局部有限元模型柱底各节点处导入实测车致振动激励,动力分析结束时间设为75秒,时间步长设为0.01秒,选用直接积分法进行计算,经动力时程分析,得到该车站楼板结构的动力响应。

有限元分析结果显示,该车站楼板结构占比最大的振型为竖向振动,响应频率在5 Hz~10 Hz之间。从有限元时程分析的加速度时域曲线和频域曲线中可以看出,在重载货运列车过站时,楼板振动在6 Hz附近出现卓越频率,而中高频段的振动由于土体的缓冲作用被大幅衰减,最高衰减幅度可达90%。与实测结果吻合度较高,见图7(a)至图7(c),因此仅对B区进行有限元数值分析可以有效模拟该车站候车厅的结构振动。

## 3 楼板振动评价

### 3.1 评价标准

在行业标准JGJ/T170—2009《城市轨道交通引起的建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》<sup>[13]</sup>中,明确规定了城市轨道交通沿线建筑物室内振动的限值,按照标准的振动噪声影响区域分类,该车站可视为交通干线两侧区域,分类至4类区域。在标准中,与该区域类别相对应的建筑物室内振动限值为昼间75 dB、夜间72 dB。

在标准中,建筑物室内振动的评价标准为Z计权振级最大值 $VL_{max}$ ,即1/3倍频程中心频率上经Z计权因子修正后的最大振动加速度级(简称分频最大振级)。标准还规定了,当布设多个测点时,取各个测点分频最大振级的平均值 $\overline{VL}$ 作为评价标准。因此下文采用JGJ/T170—2009中规定的Z计权因子对该车站的最大振动加速度级进行修正,并计算其平均值 $\overline{VL}$ 。测点B1~B6测得的三种工况下的最大加速度振动级和其平均值如表2所示。

表2 各工况最大加速度振动级/dB

测点	工况1	工况2	工况3
测点B1	90.6	93.5	95.5
测点B2	91.0	92.1	95.3
测点B3	92.2	93.7	94.7
测点B4	92.5	94.3	96.7
测点B5	88.8	91.9	93.4
测点B6	89.4	92.9	94.5
均值 $\overline{VL}$	90.8	93.2	95.2

从表2可知,在三种工况下,站房楼板的加速度振级分别为90.8 dB、93.2 dB及95.2 dB,远超标准规定的振动限值,为保证乘客得到良好的候车体验,该建筑应该采取有效的消能减振措施,对候车厅的振动响应进行控制。

### 3.2 1/3倍频程振动加速度级计算方法

采用1/3倍频程对测试频段范围进行频带划分,分析列车过站时引起车站结构的振动加速度级。

$$a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f_i}^{f_u} a_n^2} \quad (1)$$

式中: $N$ 为该频带内采样点数量, $f_i$ 为该1/3倍频带内最低频率, $f_u$ 为该1/3倍频带内最高频率, $a_n$ 为每个采样点实测加速度值。

$$VL = 20 \lg \frac{a}{a_0} + Z_f \quad (2)$$

式中: $a_0$ 为基准加速度值,在国家标准中取值为 $1 \times 10^{-6}$ , $Z_f$ 为该1/3倍频带中心频率处的Z计权因子。

根据以上计算方法,采用MATLAB开发了1/3

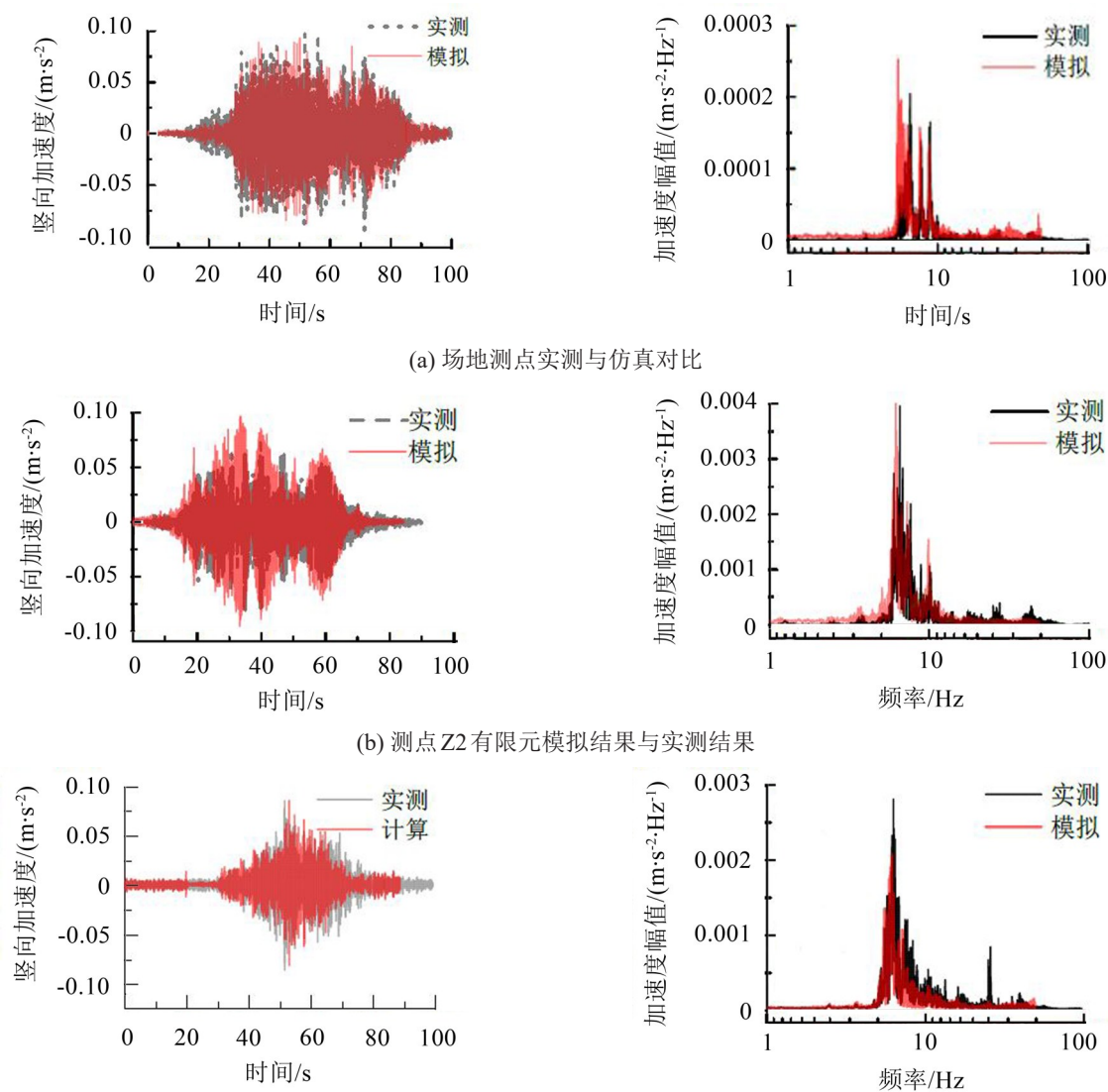


图7 实测与仿真时域曲线与频域曲线对比

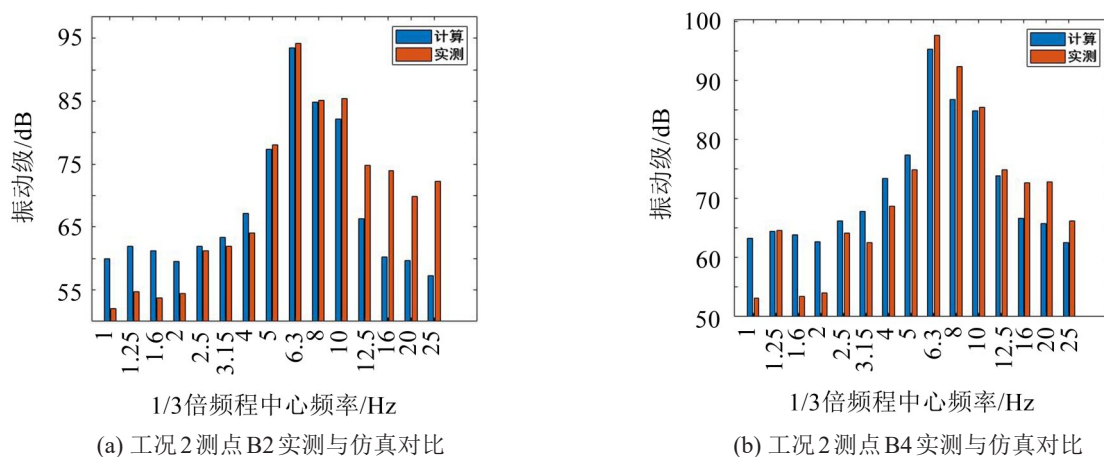


图8 实测与仿真1/3倍频程曲线对比

倍频程Z计权振动加速度级的计算程序,对结构振动进行评价。

### 3.3 数值仿真结果分析

根据程序计算结果,可以得到各测点的1/3倍频

程振动加速度级图8,从图8可知,在以6.3 Hz为中心频率的1/3倍频带处,该车站楼板加速度振动级出现峰值,有限元分析结果与实测结果吻合度较高,说明有限元模型可以有效评价该车站的建筑物室内振动,且可以作为该车站振动控制的分析有效依据。

## 4 MTMD减振系统设计与分析

由于在重载货运列车过站时,该车站建筑室内振动超出评价标准的限值,且该车站处于正常运营状态,在该车站原有结构基础上进行调整从而改变结构刚度的方法较难实施,因此考虑采用多重调谐质量阻尼器(MTMD)作为该车站的减振措施。MTMD是由多个或多组调谐质量阻尼器(TMD)组成的消能减振系统,在系统中,每个质量调谐阻尼器都是由质量、弹簧、阻尼构成。将可调谐阻尼器的固有振动频率调节至主结构受控振型频率时,其惯性质量与受控振型产生谐振,以吸收结构的振动能量,从而达到减小结构振动的效果。MTMD系统由多个TMD组成,与单个TMD相比,MTMD系统可以具有更宽的频带控制范围和更高的鲁棒性<sup>[14-16]</sup>。

对MTMD系统进行设计时,可以首先确定阻尼器系统与主振系统的质量比 $\mu$ ,从而得出该质量比之下阻尼器系统的最优同调条件以及最优阻尼条件,根据最优同调条件及最优阻尼条件可以得到某一质量比对应的阻尼器系统的最优刚度及最优阻尼系数:

最优同调条件:

$$\gamma = \frac{\omega_n}{\Omega_n} = \frac{1}{1+\mu} \quad (3)$$

式中: $\gamma$ 为MTMD系统与主振动系统的固有频率比, $\omega_n$ 和 $\Omega_n$ 分别为MTMD系统与主振动系统的固有频率, $\mu$ 为MTMD系统与主振动系统的固有质量比。

最优阻尼条件:

$$\zeta = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (4)$$

式中: $\zeta$ 为MTMD系统与主振动系统的最优阻尼比。

MTMD系统质量:

$$m = \mu M \quad (5)$$

MTMD系统最优弹簧刚度:

$$k = \mu \gamma^2 K \quad (6)$$

MTMD系统最优阻尼系数:

$$c = 2\mu\zeta\sqrt{KM} \quad (7)$$

式中: $K$ 为主振动系统的刚度, $M$ 为主振动系统的质量。

由前文可知,当重载货运列车从该车站通过时,车站建筑物室内振动超出国家标准中所规定的限值。运用有限元软件对该车站结构进行模态分析后,可以得知,该车站结构的车致振动响应以竖向振型为主,该振型参与质量大于结构总质量的90%,振型频率为6.35 Hz,因此,将该振型参与质量作为MTMD系统设计参数中的系统总质量,按照MTMD

系统质量与系统总质量之比0.1进行MTMD系统的设计工作。

从振型模态图9中可以看到,车致振动的振幅在跨内呈抛物线型,且最大振幅出现在跨中位置,故在设计MTMD系统时将每组MTMD的质心布置于楼板跨中以得到最有效的消能减振效果。通过最优同调条件及最优阻尼条件公式计算,每跨楼板所需MTMD系统总质量为29.4吨;MTMD系统弹簧刚度为36 857 kN/m;MTMD系统阻尼系数为352 kN·s/m。通过楼板的静力承载能力计算,放置于楼板上的每组MTMD系统由12个TMD构成,每个TMD均布置于楼板跨中位置,见图10。

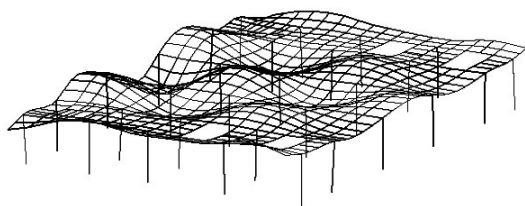


图9 车站某阶振型模态图

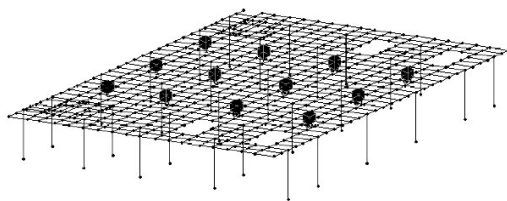


图10 MTMD系统布置示意图

通过计算及有限元模拟分析,可以得到如表3和表4所示结果。

加入MTMD系统前后,在有限元模拟中,测点B4的各工况的振动加速度峰值如表3所示,其中工况1的振动加速度峰值由0.046 m/s<sup>2</sup>下降至0.012 m/s<sup>2</sup>,减振幅度为73.9%,各工况1/3倍频程中心频率的振动加速度级峰值如表4所示,各工况1/3倍频程中心频率的振动加速度级减值分别为17.4 dB、19.9 dB、18.3 dB,加入MTMD系统使得该车站振动水平大幅降低,减振后工况1、2均满足标准限值要求,只有工况3略超标准限值75 dB,稍微增加MTMD系统的质量比即可满足要求。有限元模拟结果

表3 测点B4模拟最大振动加速度/(m·s<sup>-2</sup>)

	工况1	工况2	工况3
减振前	0.046	0.049	0.049
减振后	0.012	0.014	0.015

表4 模拟最大加速度振动级均值/dB

	工况1	工况2	工况3
减振前	90.6	93.5	93.9
减振后	73.2	73.6	75.6



说明设计合理的MTMD系统对楼板减振具有明显的效果。

## 5 结 语

(1) 当车站候车厅采用高架跨线结构布置时,车辆过站容易引起候车厅楼板结构的振动,这种振动主要集中在中低频段,可根据加速度振动级对楼板振动进行评价。

(2) 在整体结构是由多个独立的结构分区组合而成的情况下,只取受外部激励影响的结构分区建立局部有限元模型,输入实测外部激励进行动力学分析和消能减振系统的设计的方法是有效可行的。

(3) 在原结构上增设MTMD系统对候车厅楼板有良好的减振效果,MTMD系统的固有频率应接近系统振动的卓越频率,质量比应合理选择以达到有效减振而且不造成浪费的目的,MTMD系统应尽量布置于结构振幅最大处。通过合理设计,MTMD系统可以有效降低结构的振动水平,在该车站的研究中,振动加速度最大降幅为73.9%,振动加速度级最大减值19.9 dB。

### 参考文献:

- [1] 王昊,倪剑,殷广涛. 中国铁路枢纽发展回顾与展望[J]. 城市交通,2015,13(5):15-23.
- [2] 夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报,2004,1(11):44-51.
- [3] HVC HOWARTH, MJ GRIFFIN. The relative importance of noise and vibration from railways[J]. Applied Ergonomics, 1990, 2(21): 129-134.
- [4] 谷尚玲. 基于现场实测的大跨度高架车站振动舒适度研究[J]. 工程技术研究,2019,4(8):198-200.
- [5] 赵凯,王秋哲,毛昆明. 地铁运行引起建筑物振动的三维有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报,2019,39(2):209-216.
- [6] 王子玉. 地铁车辆段环境振动现场试验与仿真分析[D]. 南昌:华东交通大学,2018.
- [7] M ADAM, O VON ESTORFF. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches[J]. Computers and Structures, 2005, 1(83): 11-24.
- [8] A DIJCKMANS, A EKBLAD, A SMEKAL, et al. Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 2(84): 55-69.
- [9] S ELIAS, V MATSAGAR. Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers[J]. Annual Reviews in Control, 2017, 9(44): 129-156.
- [10] PATRICIA L J, FERNANDEZ R, LOPES, JF RUIZ, PA COSTA, et al. Vibrations inside buildings due to subway railway traffic. Experimental validation of a comprehensive prediction model[J]. Science of The Total Environment, 2016, 11(568): 1333-1343.
- [11] 崔聪聪,雷晓燕,张凌. 综合交通枢纽车致振动响应特性研究[J]. 噪声与振动控制,2017,37(6):144-150+172.
- [12] 李小珍,刘全民,张迅,等. 铁路高架车站车致振动实测与理论分析[J]. 西南交通大学学报,2014,49(4):612-618.
- [13] 国家住房和城乡建设部. JGJ/T170-2009 城市轨道交通引起的建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [14] 李黎,黄尚斌,张卉. 结构振动控制中MTMD的基本特性研究[J]. 工程力学,2000,2(2):90-96.
- [15] 汪正兴,任文敏,苏继宏,等. 多重调谐质量阻尼器参数优化的一种改进算法及其应用[J]. 工程力学,2005,22(5):26-30.
- [16] VN DINH, B BASU. Passive control of floating offshore wind turbine nacelle and spar vibrations by multiple tuned mass dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 1(22): 152-176.

(上接第144页)

(4) 工程上计算隔振效果时,低频段采用阻抗法,中高频段采用有限元法,该方法既简单,又实用,机组实测基座加速度响应与计算结果对比,误差满足工程要求。

### 参考文献:

- [1] 陆金铭. 船舶动力装置原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [2] 何琳,帅长庚. 振动理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [3] 胡以怀. 船用柴油机推进系统[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013.
- [4] 中国船级社. 钢质海船入级规范 第3篇 轮机[S]. 2018.
- [5] 李豫川,翁泽宇,唐杰,等. 柔性基础双层隔振系统隔振效果评价的研究[J]. 噪声与振动控制,2018,38(6): 72-177.
- [6] 严济宽,柴敏,陈小琳. 振动隔离效果的评定[J]. 噪声与振动控制,1997,17(6),22-31.