

# 人行桥人致振动及 TMD 减振性能分析

张 阳,辛棚昭,赫中营

(河南大学 土木建筑学院,河南 开封 475004)

**摘要:**随着钢结构人行桥的建设和发展,该类型桥梁的振动及人行舒适性问题也愈来愈突出。笔者结合国内外人行桥设计规范,利用有限元分析软件,对某大跨径人行廊桥进行了人致振动时程模拟分析,并根据该廊桥的最大加速度响应时程曲线及模态分析结果,设置了相应的 TMD 减振系统,进行了减振效果分析和舒适度评价,表明 TMD 减振系统对人行桥具有较好的减振效果,对类似桥梁减振设计具有一定的借鉴意义。

**关键词:**人行廊桥;人致振动;TMD;舒适度评价

中图分类号:U 441.3

文献标志码:B

文章编号:1009-7767(2019)04-0076-06

## Analysis of Pedestrian Induced Vibration and the Damping Performance of TMD Structure of Footbridge

Zhang Yang, Xin Pengzhao, He Zhongying

随着新型轻质高强建筑材料及轻柔美观结构形式在人行桥中的应用,其结构基频降低、阻尼减小<sup>[1]</sup>,出现了人桥共振、抖振等现象。

国内外学者对该问题的研究主要集中在人行荷载分析、结构振动响应理论和舒适度评价<sup>[2]</sup>上。超出舒适度<sup>[3]</sup>范围采取的减振控制措施存在许多不确定性,使振动舒适度问题的研究变得更复杂。Helberg 等<sup>[4-7]</sup>对人在振动下的感受进行了研究;绘制出频率与振幅的关系图;人行激励下轻型楼梯振动响应;采用 TMD 控制作用在桥梁上的竖向振动问题,比较了 TMD 安装前后竖向位移结果,得出加入 TMD 具有很好的减振效果的结论。1995 年,我国发布了 CJJ 69—1995《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[8]</sup>,要求跨度较大的人行桥竖向自振频率不应小于 3 Hz。实践表明,当满足结构强度的要求时,却很难达到舒适度要求。笔者利用有限元软件模拟分析了设置 TMD 减振措施的某人行桥的人致振动特性、减振效果和舒适度。

### 1 现行相关设计规范比较

各国规范对人行桥的舒适度评价见表 1。

德国人行桥设计指南 EN03(以下简称 EN03 规范)吸取了历年以来的研究成果,考虑到根据行人密度不同对舒适性等级进行了划分。我国的 CJJ 69—1995《城

表 1 各国规范对人行桥的舒适度评价对比

规范名称	加速度限制/(m/s <sup>2</sup> )		说明
	横向	竖向	
瑞典国家规范 Bro 2004		0.5	竖向 3.5 Hz 以下验证
德国人行桥设计 指南 EN03	0.1	0.5	最好
	0.3	1.0	中等
	0.8	2.5	最差
英国规范 BS 5400		$0.5\sqrt{f_0}$ 3 Hz 时 0.87	竖向 5 Hz 以下验算
欧洲 EN1990 规范	0.2~0.4	0.7	竖向 5 Hz 以下、 横向 2.5 Hz 以下验算
国际标准化组织 ISO 10137	0.216	0.3	均方根加速度

注: $f_0$ 为桥梁基频,Hz。

市人行天桥与人行地道技术规范》中未给出相应的动力响应限值,对人行桥振动舒适度要求没有明确的规定。因此,在对人行桥振动舒适度进行评价时,建议采用 EN03 规范。

EN03 规定:当人行桥基频位于竖向 1.25~4.6 Hz、侧向 0.5~1.2 Hz 的频段时,人行桥振动的峰值加速度应根据行人密度采取规范建议的验算方法,按表 2 判别人行舒适度分级。

表 2 EN03 规范规定的舒适度分级

舒适度级别	舒适度	竖向加速度最大值/ (m/s <sup>2</sup> )	横向加速度最大值/ (m/s <sup>2</sup> )
CL1	最好	<0.50	<0.10
CL2	中等	0.50~1.00	0.10~0.30
CL3	最差	1.00~2.50	0.30~0.80
CL4	不能接受	>2.50	>0.80

## 2 调谐质量阻尼器系统的构成及参数优化

调谐质量阻尼器系统(TMD)由固体质量、弹簧和阻尼组成。将阻尼器系统自身的振动频率调谐至结构的主要振动频率,通过 TMD 与结构间的相互作用,实现能量从结构向质量阻尼器系统的转移,进而达到减小结构振动的目的<sup>[9-10]</sup>。

TMD 的参数主要包括质量比、频率比和阻尼比(或质量、刚度)。质量越大,减振效果越好;但过大的质量会给 TMD 的施工造成更大的困难,有时还会对正常使用性能产生一定的影响,因此建议调频装置的质量与控制模态的广义质量的比值  $\mu$  在 1%~5%。当确定质量比  $\mu$  后,即可依照减振目标来确定频率比  $\alpha_{opt}$  和阻尼比  $\xi_{opt}$ ,从而确定 TMD 的质量、刚度和阻尼等物理参数。以控制人行荷载激励作用下的加速度响应为例,说明 TMD 优化参数确定步骤:

- 1) 选定质量比  $\mu$ ,一般取  $0.01 < \mu < 0.05$ ;
- 2) 根据外荷载类型(谐波荷载)和减振响应类型

(加速度),确定最优频率比和最优阻尼比,并计算调谐装置的频率  $f_d = \alpha_{opt} f_s$ ,其中  $f_s$  为谐波荷载的频率,Hz。最优频率比和最优阻尼比计算公式如下:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{1}{1+\mu}}; \quad (1)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3}{8(1+\mu/2)}}。 \quad (2)$$

### 3) 计算 TMD 的物理参数

$$m_d = \mu M_j; \quad (3)$$

$$k_d = (2\pi f_d)^2 m_d; \quad (4)$$

$$c_d = 4m_d \pi f_d \xi_{opt}。 \quad (5)$$

式中: $m_d$ 为 TMD 系统的质量,t; $k_d$ 为 TMD 系统的刚度,kN/m; $c_d$ 为 TMD 系统的阻尼,kN·s/m; $M_j$ 为桥的自重,t。其中刚度可以通过弹簧提供;TMD 的阻尼可以采用黏滞阻尼器提供。

## 3 人行桥人致振动及舒适度分析

### 3.1 工程概况

某人行景观廊桥,整体采用廊、桥结合的布置形式,桥梁跨径(85+85)m,桥梁全宽 5m,根部梁高 5m,端部梁高 2.5m,中部桥墩采用矩形实体墩,桥台采用桩基础,边墩设计桩长 36m,中墩设计桩长 42m;廊道采用钢木结构,高度为 4.3m,柱、梁等主要构件为钢结构,钢柱焊接在桥顶面的钢板上,风雨廊建筑面积 850m<sup>2</sup>。人行景观廊桥总体布置见图 1,钢箱梁横断面布置见图 2。

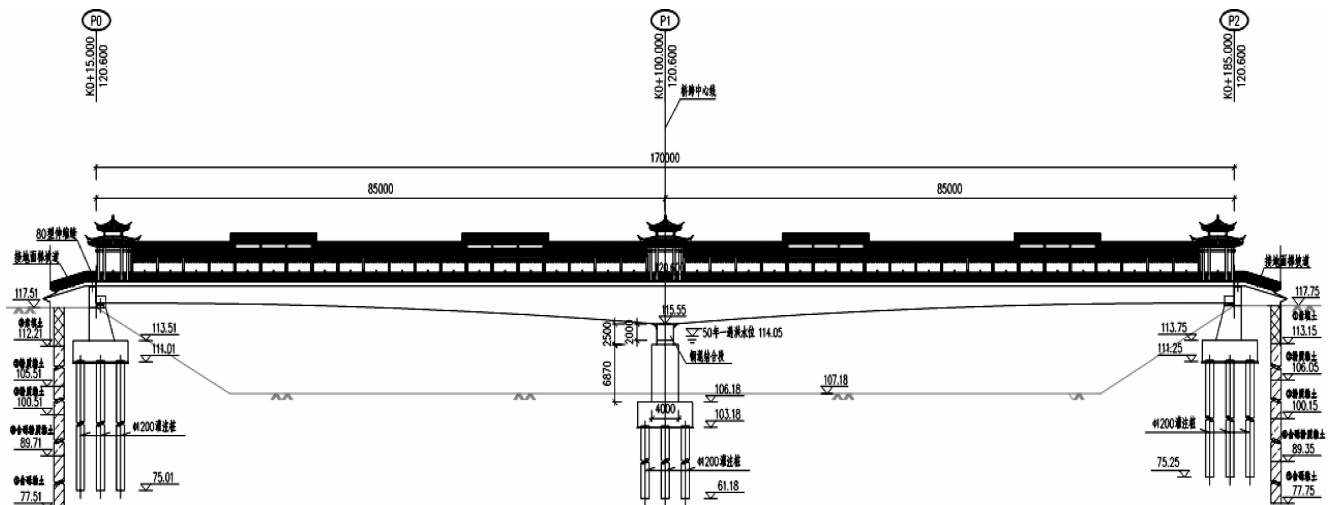


图 1 人行景观廊桥总体布置图

## 3.2 人行桥人致振动分析

### 3.2.1 人行桥有限元建模及分析流程

- 1) 模型的建立

施工阶段分析应考虑材料的时间依存特性和弹性收缩引起的应力损失及徐变时的收敛条件和迭代次数。边界条件采用一般支承。有限元计算模型见图 3。

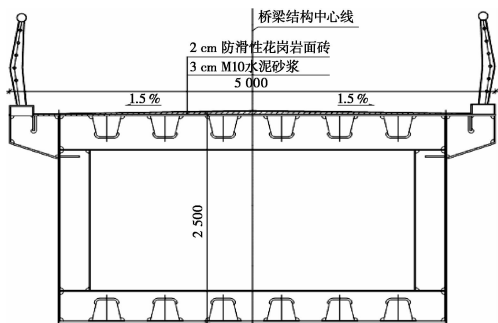


图2 钢箱梁横断面布置图

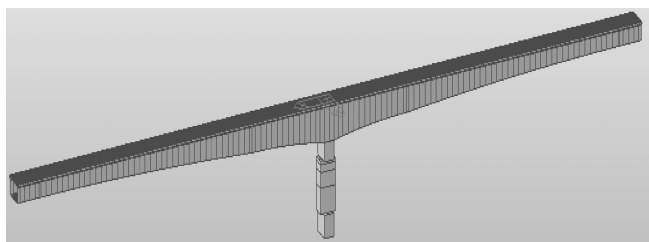


图3 有限元计算模型

## 2) 材料参数

人行桥材料参数见表3。

表3 人行桥材料参数

材料参数	弹性模量/ (kN/m <sup>2</sup> )	泊松 比	线膨胀系数/ (1/°C)	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )
混凝土 C40	3.25×10 <sup>7</sup>	0.2	1.00×10 <sup>-5</sup>	25
钢材 Q345	2.06×10 <sup>8</sup>	0.3	1.20×10 <sup>-5</sup>	76.98
钢材 Strand1860	1.95×10 <sup>8</sup>	0.3	1.20×10 <sup>-5</sup>	78.5
混凝土 C30	3.00×10 <sup>7</sup>	0.2	1.00×10 <sup>-5</sup>	25

注:混凝土 C30 用于桥墩承台、桥台承台;混凝土 C30 桥墩、桥台。

## 3) 荷载工况

人行桥有限元模型中荷载工况见表4。

表4 人行桥有限元模型中荷载工况

名称	自重	二期恒载	整体升温	整体降温	梯度升温	梯度降温	风荷载	隔板加劲	预应力	雪荷载
类型	恒荷载	恒荷载	温度荷载	温度荷载	温度荷载	温度荷载	风荷载	恒荷载	预应力	雪荷载

## 4) 模态分析

采用时程分析函数方法,通过编辑在某一频率下的加速度时程函数,来确定行人激励下梁的节点加速度。

## 5) 确定最大加速度

计算人行桥最大加速度就是逐个计算振型竖向或

横向在规定行人密度或行人数  $n$  下的最大加速度响应。每个振型的最大加速度响应都应在舒适度容许值范围内。

设  $S$  阶等效模态幅值见公式(6):

$$P_s^* = \int_0^L P \cdot |\varphi(x)| dx = P \psi n \int_0^L P \cdot |\varphi(x)| dx \quad (6)$$

单自由度简谐荷载下共振幅值的最大加速度响应见公式(7):

$$a_{\max} = \frac{P_s^*}{M^*} \cdot \frac{1}{2\xi} \quad (7)$$

式中: $a_{\max}$  为最大加速度, m/s<sup>2</sup>;  $P_s^*$  为等效模态幅值;  $M^*$  为等效质量, t;  $\xi$  为阻尼比;  $\varphi(x)$  为振动频率函数;  $P$  为模态幅值。在设计阶段均可通过有限元模型的动力特性分析得到。

## 6) 舒适度检验

依据表2,设计工况和相应的计算响应模型与规范中的舒适度极限进行比较。如果在“不能接受”、“差”范围内,就需要采取措施改善人行桥的动力特性,包括质量的修正、频率的修改、结构阻尼的修改、刚度的增加等。

## 3.2.2 结构动力特性分析

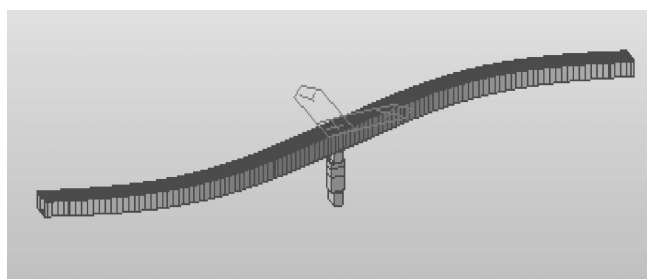
经有限元模态分析计算得到人行桥的前10阶自振频率和各阶振型,见表5和图4。

表5 人行景观廊桥前10阶频率与振型特点

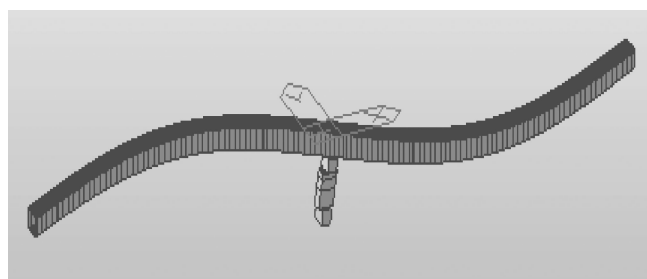
阶数	频率/Hz	振型特点
1	1.249 717	钢箱梁平弯
2	1.352 852	钢箱梁竖弯
3	1.412 179	钢箱梁平弯
4	2.061 664	钢箱梁竖弯
5	2.752 667	钢箱梁竖弯
6	3.185 849	钢箱梁平弯
7	4.450 300	钢箱梁平弯
8	5.933 631	钢箱梁竖弯
9	6.495 324	钢箱梁竖弯
10	6.680 750	钢箱梁平弯

笔者参照 EN03 规范规定的敏感频率范围。当人行桥的自振频率不在 EN03 规范的敏感频率范围时,那么该人行桥振动设计频率满足要求;当人行桥的自振频率在 EN03 规范的敏感频率范围时,就需要验证在人行荷载作用下的加速度响应是否满足舒适度标准。

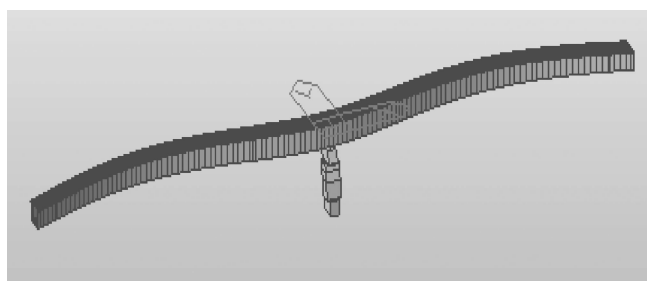
笔者选取的人行廊桥,横向1阶频率没有落在 EN03 规范的敏感频率范围内,可以不考虑横向人致振动的影响。但竖向2阶频率落在了 EN03 规范的敏感频率



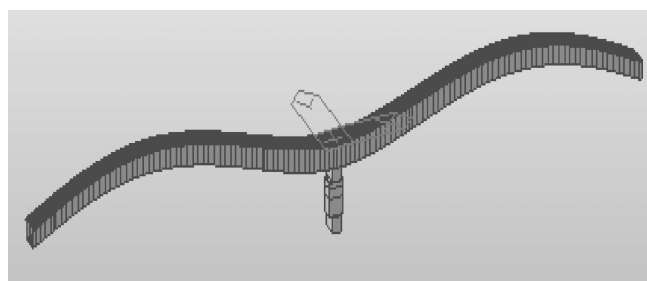
a)1阶振型



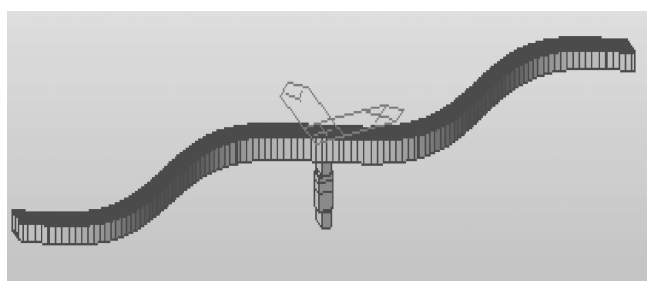
b)2阶振型



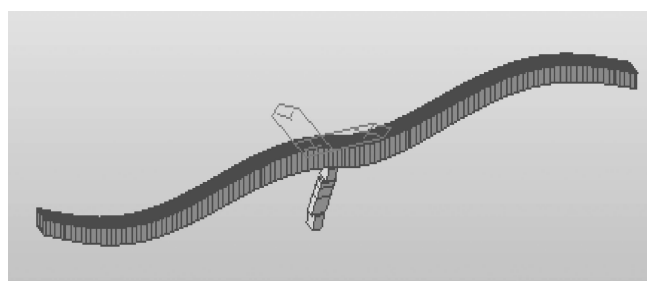
c)3阶振型



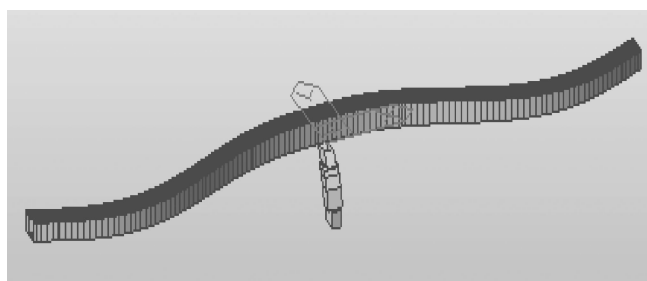
d)4阶振型



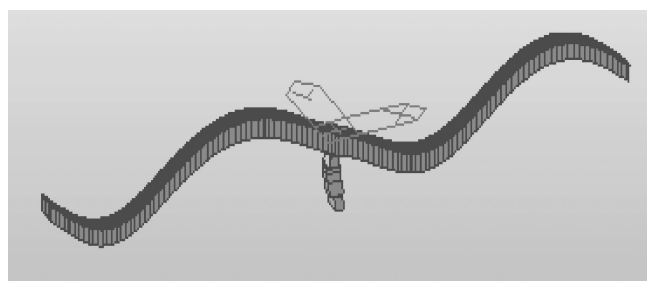
e)5阶振型



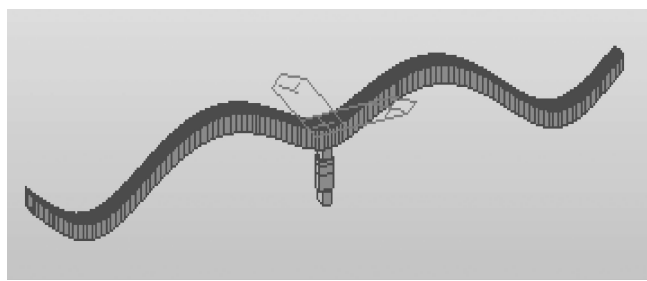
f)6阶振型



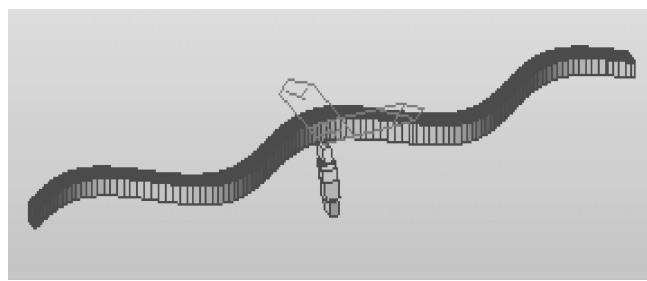
g)7阶振型



h)8阶振型



i)9阶振型



j)10阶振型

图4 人行景观廊桥前10阶振型图

范围内,仅对竖向 2 阶进行加速度响应分析。

### 3.3 人致振动舒适度分析

#### 3.3.1 计算荷载参数取值

针对第 2 阶竖弯模态,进行结构时程响应分析。主要计算荷载参数取值见表 6。

表 6 主要计算荷载参数取值

荷载形式	荷载幅值折 减系数取 1	荷载频率/ Hz	人群密度/ (kN/m <sup>2</sup> )	桥面 总人数	等效完全 同步人数
均布荷载	竖向 280	1.352 852	1.5	1 275	100

#### 3.3.2 人致振动加速度响应结果分析

笔者以加速度为指标,采用峰值加速度数值来判断桥梁的舒适度。利用有限元模拟得到行人激励下梁的节点加速度时程结果。该人行桥梁 4 分点处加速度响应时程曲线见图 5。

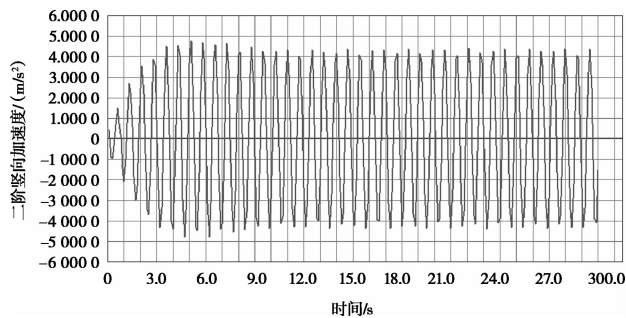


图 5 4 分点 2 阶竖向加速度

由图 5 可知,2 阶竖向加速度为 4.765 m/s<sup>2</sup>。按照 EN03 规范中舒适度等级为 CL4,属于不能接受的范围,需要对人行桥加入 TMD 进行减振设计。

#### 3.3.3 舒适度评价和振动控制研究

针对上述人行廊桥模拟分析得到的舒适度处于 CL4 范围之内,有必要采取相应的减振措施。考虑影响减振效果的因素有:阻尼器的相同作用位置(最大加速度节点处)、不同质量比及不同阻尼比。分别在节点 33、节点 89 下部加 2 个节点,用刚性连接与节点连接,而下部的 2 个节点间加入 TMD 减振系统,4 分点各布置 1 个,分别为 TMD1 和 TMD2(见图 6)。

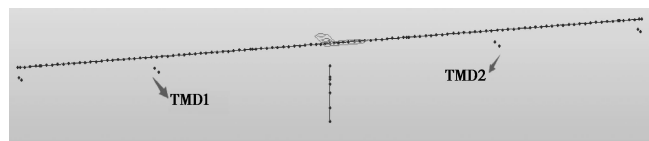


图 6 TMD 系统布置

分别考虑质量比为 0.5%、1%、3%、5% 4 种工况,不同质量比的 TMD 参数见表 7。分析 TMD 对结构减振效果的影响。

表 7 TMD 参数

TMD 参数	质量比			
	0.5 %	1 %	3 %	5 %
模态频率/Hz	1.352 852	1.352 852	1.352 852	1.352 852
圆频率/(rad/s)	8.500 217	8.500 217	8.500 217	8.500 217
结构总质量/t	914.1	914.1	914.1	914.1
TMD 质量/kg	4 570.5	9 141	27 423	45 705
最优频率比	0.997	0.995	0.985	0.975
最优阻尼比	0.611 6	0.610 84	0.607 8	0.604 8
TMD 系统的频率/Hz	1.324 534	1.346 087 7	1.308 592	1.320 248
TMD 刚度/(kN/m)	326.941	653.2	1 853.886	3 145.101
TMD 阻尼/(kN·s/m)	47.284	94.450	274.087	458.607

对设置 TMD 阻尼器之后的有限元模型施加相同荷载,并按同样的步骤进行时程分析,得到不同阻尼比下的 2 阶加速度时程曲线见图 7。表 8 为设置 TMD 阻尼器前后减振效果对比。

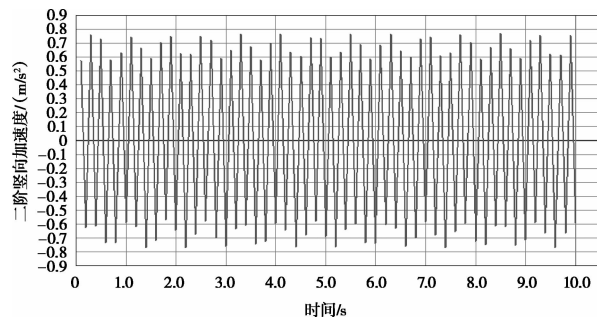
表 8 减振效果对比

质量比	原设计		设置 TMD 阻尼器后	
	加速度幅值/ (m/s <sup>2</sup> )	评价 等级	加速度幅值/ (m/s <sup>2</sup> )	评价 等级
0.5 %	4.865	差	0.770 4	中等
1 %	4.865	差	0.715 7	中等
3 %	4.865	差	0.716 2	中等
5 %	4.865	差	0.705 2	中等

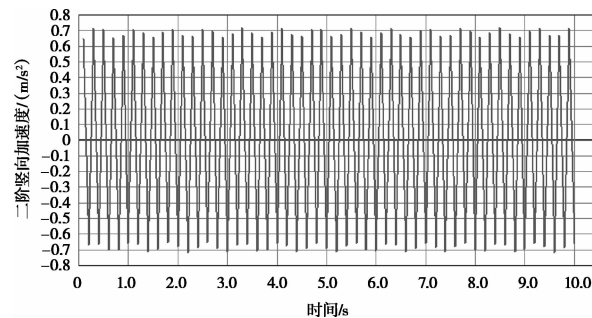
由表 8 可知,设置 TMD 阻尼器后该人行廊桥舒适度得到改善。

## 4 结语

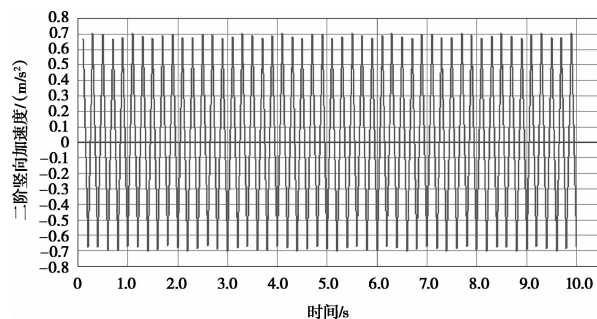
笔者参照德国人行桥设计 EN03 指南,对大跨径人行廊桥进行人致振动分析及舒适度研究,通过有限元分析,该人行桥会发生竖向振动,使行人产生不舒适的感觉。其中第 2 阶竖向模态频率为 1.352 852 Hz,舒适度评价等级为“差”。在增加 TMD 阻尼器后,第 2 阶竖向模态的舒适度评价提高至“中等”,表明 TMD 阻尼系统具有很好的减振效果。MET



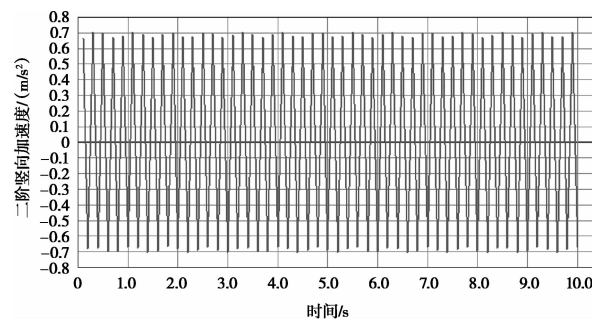
a)TMD 质量比为 0.5 %时



b)TMD 质量比为 1 %时



c)TMD 质量比为 3 %时



d)TMD 质量比为 5 %时

图 7 设置 TMD 的人行廊桥结构加速度时程曲线

## 参考文献:

- [1] 胡晓锋,胡世德. 调频质量阻尼器参数设计优化算法[J]. 同济大学学报,1999,27(2):141-144.
- [2] 李东,法永生,孙翠华. 某人行桥人致振动分析及其舒适度评价[J]. 建筑结构,2008,38(6):50-53.
- [3] 傅科奇,胡佐平,王成树. 大跨径人行桥人致振动舒适度分析[J]. 公路交通技术,2015(3):40-45.
- [4] HELBERG W,SPERLING E. Critical appraisal of riding properties of railway vehicles[J]. Org. Fortschr eisenbahnwesens,96, 1941.
- [5] REIHER H,MEISTER F J. The sensitiveness of the human body to vibrations[J]. Forschung,1931,2(11):381-386.
- [6] KERR S,BISHOP N. Human induced loading on flexible staircases[J]. Engineering structures,2001,23(1):37-45.
- [7] HO-CHUL KWON,MAN-CHEOL KIM,IN-WON LEE. Vibration control of bridges under moving loads[J]. Computers&structures,1998,66(4):473-480.
- [8] 北京市市政工程研究院. 城市人行天桥与人行地道技术规范: CJJ 69-1995[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,1995.
- [9] 张晶,王志强,范进,等. 调谐质量阻尼器(TMD)在大跨斜拉桥减震控制中的应用[J]. 工业建筑,2007(Sup1):346-349.
- [10] 孙利民,闫兴非. 人行桥人行激励振动及设计方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(8):996-999.

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 河南省科技发展计划项目(182300410150,162102210173);  
开封市科技发展计划项目(1601037);河南省交通厅项目  
(2016Y2)

作者简介: 张阳,男,在读硕士研究生,主要从事桥梁抗震与振动研究。