

采用TMD的人行桥人致振动测试与减振研究

孙亦鸥

[悉地(苏州)勘察设计院有限公司, 江苏 苏州 215000]

摘要: 为研究大跨径钢桁架景观人行桥人致振动舒适度及其减振措施, 针对大跨度、低刚度、低阻尼的景观人行桥, 以人致振动加速度为优化目标, 修正理论模型后设计调谐质量阻尼器(TMD), 并结合单人/多人荷载模拟, 对安装TMD前后的桥梁竖向振动特性进行评价。同时以苏州市某主跨径120 m的3跨钢桁架人行桥为例, 采用数值模拟与现场实测得到其结构固有频率, 通过人致激励响应对该桥进行舒适度评估。结果表明, 布置TMD后, 该桥竖向振动加速度明显降低, 舒适度得到显著提升, 验证了该方法的可行性和合理性。

关键词: 人行桥; 调谐质量阻尼器; 人致振动舒适度; 舒适度等级; 振动加速度

中图分类号: U441+.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0088-05

Human-Induced Vibration Test and Vibration Reduction Research of Pedestrian Bridge Using TMD

SUN Yiou

[CCDI (Suzhou) Exploration and Design Consultant Co., Ltd., Suzhou 215000, China]

Abstract: To study the human-induced vibration comfort and vibration reduction measures of long-span steel truss landscape pedestrian bridges, for long-span, low-stiffness and low-damping landscape pedestrian bridges, the TMD is designed after correcting the theoretical model with the human-induced vibration acceleration as the optimization objective. Combined with single-person/multi-person load simulation, the vertical vibration characteristic of the bridge before and after equipped with TMD are evaluated. At the same time, taking a three-span steel truss pedestrian bridge with a main span of 120 m in Suzhou as an example, the natural frequency of its structure is obtained through numerical simulation and field measurement, and its comfort is evaluated through the human-induced excitation response. The result shows that after TMD is arranged, the vertical vibration acceleration of the bridge is significantly reduced, and the comfort is significantly improved, verifying the feasibility and rationality of the method.

Keywords: pedestrian bridge; tuned mass damper (TMD); human-induced vibration comfort; comfort level; vibration acceleration

0 引言

人行桥作为连接两岸、方便行人通行的重要基础设施, 其结构人致振动的舒适性日益受到人们的关注。近年来, 随着大跨度、轻质化人行桥的不断涌现, 以及人群荷载的复杂性和不确定性, 人行桥振动问题愈发突出^[1-3]。人行桥设计时应确保行人在通行过程中不能出现较大的振动, 因为异常振动可能引发行人恐慌, 特殊情况下可能造成安全隐患。因此, 人行桥设计时必须考虑采取有效的振动控制措施, 以保障人行桥的安全运营和行人舒适的体验。

目前人行桥振动舒适度研究主要集中在三方

面: 人行桥振动特性分析、人行桥振动舒适度评价指标、人行桥振动控制^[4-8]。

其中人行桥振动控制的基本思路为:

(1) 确定人行桥自振频率是否在敏感频率范围。德国规范^[9]认为, 当桥梁竖向振动频率在1.25~2.30 Hz范围时容易引发较大的人致振动, 认定这是敏感频率范围, 结构设计时应避免结构自振频率落入该敏感频率范围。我国现行规范^[10]规定: 为避免共振, 减少行人不安全感, 天桥上部结构竖向自振频率不应小于3 Hz。

(2) 人致振动响应分析。实践表明, 大跨轻质人行桥自振频率往往落入敏感频率范围, 若采用增大结构刚度的方式调频, 会导致桥梁截面过大, 结构变得厚重, 经济上不合理且不能充分利用空间^[11], 因此常通过限制频率响应值来满足振动舒适度要求, 即

收稿日期: 2025-06-10

作者简介: 孙亦鸥(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

对人行桥施加人群行走共振荷载时,结构最大加速度响应小于振动舒适度指标,则人行桥的振动舒适度满足要求。否则,应对结构进行优化或者安装减振设备。

(3)减振设计。根据结构特性设计并安装减振设备,使结构最大加速度响应满足要求。

目前新设计的人行桥单跨跨径逐渐增大,跨径超过 100 m 的人行天桥已经屡见不鲜。但跨径 100 m 以上人行天桥的人致振动测试与减振研究较少,而该跨径范围的人行天桥自振频率更容易落入敏感频率范围内。

本文以苏州市沧浪新城景观人行桥为研究对象,通过现场实测和有限元模拟,重点分析了安装 TMD(调谐质量阻尼器)后该人行桥在人行频率激励下的减振特性和效率,可供类似项目参考。

1 桥梁概况

苏州市沧浪新城跨运河通道北起世茂地块,南至京杭大运河友联运河段以南创业区。运河通道新建 1 座跨径组合为 50 m+120 m+50 m=220 m 的连续桁架人行桥,桥梁净宽 10 m。该桥采用横梁和风撑连接上下游两侧连续桁架。主桁架曲率半径为 37 m。共设置 4 对踏步,桥墩采用柱式墩,基础采用钻孔灌注桩,桥台采用重力式桥台。桥面采用工字钢+14 mm 钢板+环氧沥青铺装。天桥人群荷载按照《城市桥梁设计规范(2019 版)》(CJJ 11—2011)取用。

人行桥立面图、效果图见图 1、图 2。



图 1 人行桥立面图



图 2 人行桥效果图

2 人行桥振动特性

2.1 自振频率计算值

采用 MIDAS Civil 建立人行桥的有限元模型(见图 3),钢桁架采用梁单元,桥面板采用平面 4 点板单

元,附属设施采用荷载转化为质量的方式,对该桥进行结构动力特性分析,同时根据桥梁现场实测自振频率对该桥进行模型修正。计算结果表明,该桥竖向第 1 阶固有振动频率为 1.781 Hz,刚好落入德国规范^[9]规定的敏感频率范围内,同时小于我国现行规范^[10]规定的 3 Hz。

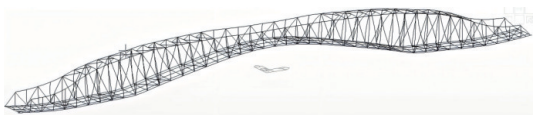
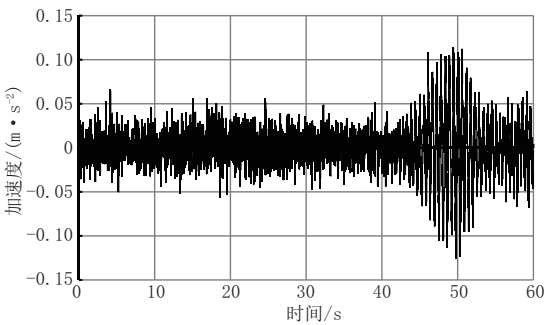


图 3 主桥自振频率计算模型

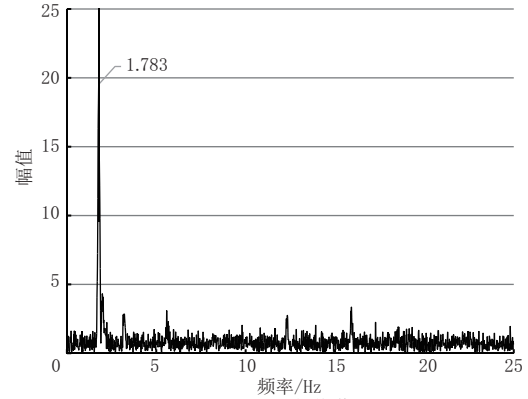
2.2 自振频率实测值

将加速度传感器布置在主跨跨中位置,采集 1 min 时长的随机环境激励,通过快速傅里叶变换(FFT),得到该桥 1 阶竖向自振频率为 1.783 Hz。

跨中加速度时程曲线和 FFT 幅值谱见图 4。



(a) 加速度时程曲线



(b) FFT 幅值谱

图 4 跨中加速度时程曲线和 FFT 幅值谱

随机环境激励模态下结构动力特性的实测值与理论计算值对比分析见表 1。

表 1 结构动力特性的实测值与理论计算值对比分析

实测基频/Hz	计算基频/Hz	偏差/%
1.783	1.781	0.11

由表 1 可知,该桥实测值与模型修正后的理论计算值偏差率为 0.11%,表明该有限元分析模型能够较为真实地反映该桥实际的动力特性。

根据德国 EN03 人行桥设计指南^[12],该人行桥的竖向自振频率落在敏感频率范围 1.25~2.30 Hz 之内,

需要进一步确定人致振动响应是否满足振动舒适度要求。

3 人致激励响应

3.1 人致激励响应实测值

通过跨中布置加速度传感器,采集3人同频行走的加速度响应,现场测试方法采用常规方式^[6]。经过多次反复试验,确保行人激励的频率能够达到结构固有振动频率,采样时长设置为60 s。人致激励加速度响应振动试验结果见图5。

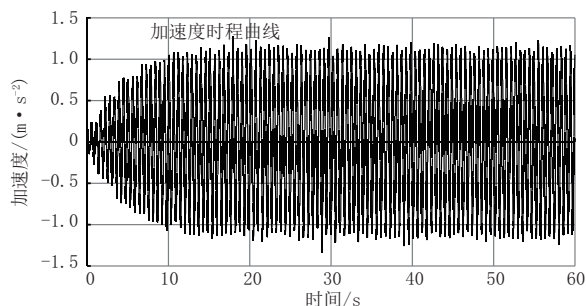


图5 人致激励试验加速度响应

试验时现场实测桥梁振动最大加速度值为 1.571 m/s^2 。根据德国EN03人行桥设计指南^[12],该桥的实测结果达到了CL3级,人致振动不满足规范要求。

3.2 人致激励响应计算值

3.2.1 单人步行荷载

对于单人步行动力荷载,国际桥梁与结构工程协会提出的计算式为^[13]:

$$F_p(t) = G \left[1 + \sum_{i=1}^3 a_i \sin(2i\pi f_s t - \Phi_i) \right] \quad (1)$$

式中: F_p 为行人激励荷载; t 为时间; G 为行人体重(一般取值 70 kN); f_s 为行人的步频。

3.2.2 人群荷载

在结构设计中,多人步行荷载的模拟通常基于单人步行力的组合叠加原理。根据等效荷载理论,当考虑 N 人的人群荷载时,可以将其简化为 N_p 个完全同步行人所产生的荷载,两者之间的换算关系通过同步概率系数来体现^[14]:

$$P_s = N_p / N \quad (2)$$

在桥梁工程的设计过程中,当面临大量行人同时通行时,由于个体行走频率和步态相位的随机性,行人荷载可能产生相互抵消的效果。为简化计算,国际上广泛采用的《德国EN03人行桥设计指南》提出了等效人群荷载的概念,即利用部分步调完全一致的行人代替实际随机行走人群的荷载效应,从而在保证结构安全性和舒适度的前提下优化设计

方法。

针对行人密度的不同,该指南采用谐波荷载模型进行振动分析,并将人群划分为不同工况(TC1~TC5)。其等效计算依据人群密度采用以下公式^[15]:

稀疏人群(密度 $<1.0 \text{ 人/m}^2$)的计算式为:

$$N_p = 10.8 \sqrt{N} \xi \quad (3)$$

密集人群(密度 $>1.0 \text{ 人/m}^2$)的计算公式为:

$$N_p = 1.85 \sqrt{N} \quad (4)$$

式中: ξ 为振型阻尼; N 为人数。

根据德国EN03人行桥设计指南,人行桥的舒适度标准主要通过加速度进行评估。建议的人行桥振动加速度限值见表3。根据这些标准,针对本桥的人行舒适度类别,应达到CL1类的要求。这意味着其最大竖向加速度应控制在 0.5 m/s^2 以内;最大横向加速度应控制在 0.1 m/s^2 以内。

表3 用加速度来确定舒适级别

舒适级别	舒适度	加速度限制值 $a_{\text{limit}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	
		竖向	横向
CL1	最好	<0.5	<0.1
CL2	中等	$0.5 \sim 1.0$	$0.1 \sim 0.3$
CL3	最小	$1.0 \sim 2.5$	$0.3 \sim 0.8$
CL4	不能接受	>2.50	>0.8

这些加速度限值的设定旨在确保行人在过桥时能够获得良好的舒适体验,减少由于振动引起的不适感,从而提高桥梁的使用安全性和舒适度。设计时应充分考虑这些标准,在结构设计和减振措施中采取相应的方法,以实现舒适度的要求。

3.2.3 人行荷载模拟

人行荷载对桥梁的振动影响与人流密度直接相关。本文基于德国EN03人行桥设计指南的建议,选取人群密度为 0.7 人/m^2 进行计算,该取值与结构的第1阶竖向振动模态相适配。所分析的桥梁人行区长度为 220 m ,宽度为 10 m ,据此推算桥上最大行人数量为 1540 人。设定行人的步频 $f_s = 1.781 \text{ Hz}$,其竖向激励荷载的变化趋势见图6。

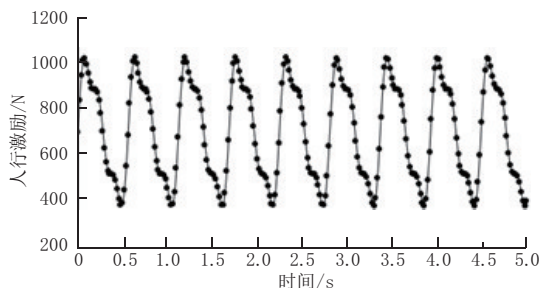


图6 竖向人行激励时程曲线

3.3 人致激励响应对比

人致激励响应计算值与实测值偏差为0.51%,从实测数据看,3人同频激励已产生较为明显的人桥共振现象(见表4)。

表4 用加速度来确定舒适级别

加速度/(m·s ⁻²)		偏差/%
计算值	实测值	
1.563	1.571	0.51

4 TMD减振设计与应用

4.1 TMD减振设计

本桥采用TMD(调谐质量阻尼器)进行控制。TMD由质量块、弹簧和阻尼器组成,通过调整其参数,使其频率与主结构的固有频率相同或接近,从而在共振时吸收振动能量。TMD的减振效果主要取决于其质量、刚度和阻尼参数的合理设计。

TMD设计首先需要确定主结构的动力特性,包括固有频率 f_n 、质量 m 和阻尼比 ζ 。这些参数可以通过模态分析或实测获得。TMD的设计参数包括质量 m_d 、频率 f_d 、刚度 k_d 和阻尼比 ζ_d ,其计算式为:

$$m_d = \mu \cdot m \tag{5}$$

$$f_d = f_n \cdot \frac{1}{1 + \mu} \tag{6}$$

$$k_d = (2\pi f_d)^2 \cdot m_d \tag{7}$$

$$\zeta_d = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \tag{8}$$

$$c_d = 2\zeta_d \cdot \sqrt{m_d \cdot k_d} \tag{9}$$

式中: μ 为质量比,通常取1%~5%; m 为TMD主结构的模态质量; c_d 为TMD阻尼系数。

在该桥梁的动力性能优化中,结构的等效质量比设定为2%。为降低人行荷载引起的振动,优化调整后在桥梁中部布设了10个TMD,总质量达到20 t。TMD设计参数见表5,布置方式见图7。

表5 TMD参数

质量/t	调频频率/Hz	弹簧刚度/(kN·m ⁻¹)	阻尼系数/(kN·s·m ⁻¹)	数量/个
2	1.781	261.5	3.202	10

每个TMD的几何尺寸为1 200 mm(长)×850 mm(宽)×550 mm(高),通过角焊缝方式与主钢梁牢固连接,以确保其稳定性。

对安装TMD后的人行桥进行人致激励,其固有频率识别结果见图8;人致激励荷载下的加速度响应见图9。

由图8可见,安装TMD后,人行桥自振频率实测

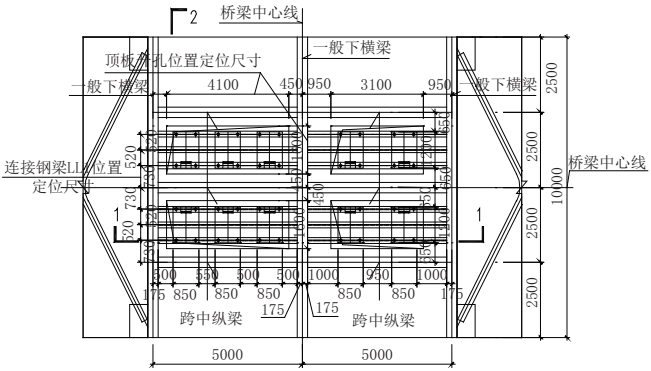


图7 TMD平面布置图(单位:mm)

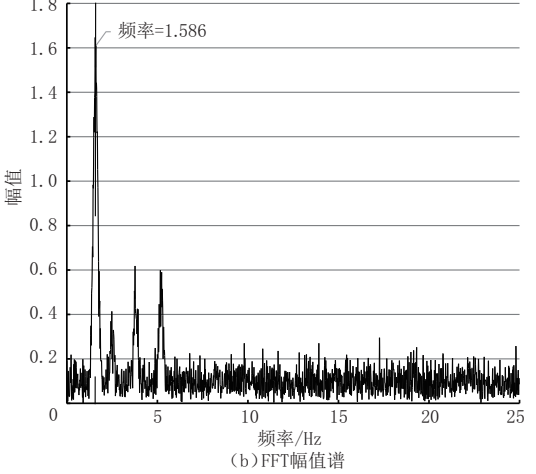
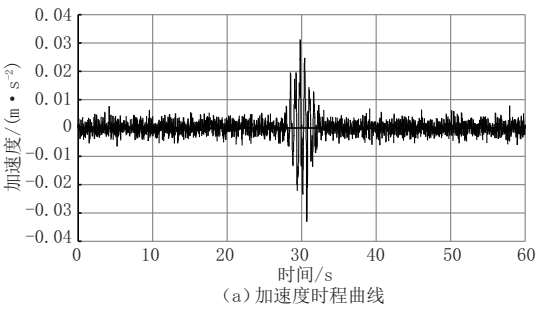


图8 有TMD控制时跨中加速度时程曲线和FFT幅值谱

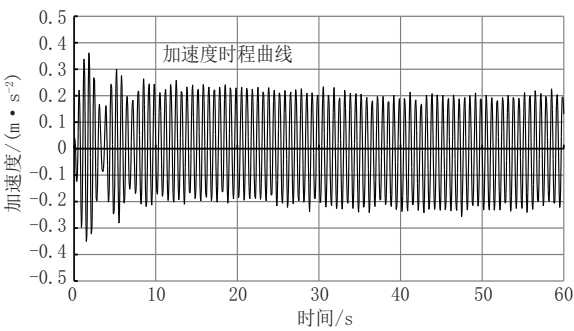


图9 有TMD控制时人致激励加速度响应

值由1.783 Hz减小至1.586 Hz,说明TMD作为附加质量安装到人行桥后,人行桥的质量增大,导致结构固有频率减小,与理论分析结果一致。

4.2 减振效果分析

TMD的减振效果通常采用减振率表示,计算公式为:

$$\delta = \frac{\alpha_{\text{无控}} - \alpha_{\text{有控}}}{\alpha_{\text{无控}}} \times 100\% \quad (10)$$

将图5、图9的动力响应结果进行对比可见,安装TMD后的桥梁竖向振动特性得到显著改善。具体表现为:

加速度峰值从 1.571 m/s^2 大幅降至 0.368 m/s^2 ,降幅达76.6%;舒适度等级由原先的CL3级(最小)优化为CL1级(最好)。

这一改进充分验证了TMD系统对提升人行桥振动舒适度的有效性,完全满足设计目标要求。

5 结 语

(1)该人行桥在未安装TMD时,人行荷载引发共振,竖向振动峰值加速度达 1.571 m/s^2 (CL3级),超出规范限值。

(2)安装TMD后,振动峰值降至 0.368 m/s^2 (降幅76.6%),舒适度提升至CL1级,且该方案经济高效,不影响桥梁使用,兼具振动控制、经济性和规范性优势。

(3)针对大跨度、低刚度、低阻尼的景观人行桥,建议以振动加速度为优化目标,修正理论模型后设计TMD,并结合单人/多人荷载模拟,有效提升舒适度。基于单桥试验和理论分析所得研究成果,可为同类桥梁提供参考,但更广泛的适用性需进一步验证。

参考文献:

[1] 叶涛,李亚平,肖海波.钢结构人行桥自振频率影响因素及其分析

[J].城市道桥与防洪,2021(2):48-50.

[2] DALLARD P, FITZPATRICK T, FLINT A, et al. London Millennium Bridge: Pedestrian-induced lateral vibration[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(6): 412-417.

[3] FUJINO Y, PACHECO B M, NAKAMURA S, et al. Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(9): 741-758.

[4] 陈隽.人致荷载研究综述[J].振动与冲击,2017,36(23):1-9.

[5] SHAHABPOOR E, PAVIC A, RACIC V, et al. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 387: 207-225.

[6] 焦晋峰,王金龙,闫晓彦,等.大跨简支钢桁梁人行桥人致振动测试与减振控制研究[J].太原理工大学学报,2023,54(6):1083-1092.

[7] LIU K, LIU L, ZHU Q, et al. Dynamic testing and numerical simulation of human-induced vibration of cantilevered floor with tuned mass dampers[J]. Structures, 2021, 34: 1475-1488.

[8] 李智海,陈得意,吴刚杰.考虑振动-噪声联合烦恼率的人行桥舒适度研究[J].振动工程学报,2024:1-11.

[9] Design of Footbridges Guideline:EN 03[S].Aachen:Research Found for Coal and Steel.

[10] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].

[11] 张慧新,邵明洁.钢结构景观人行桥振动舒适度优化设计[J].城市道桥与防洪,2024(10):115-118.

[12] 林天然.人行景观桥人致振动舒适度分析[J].市政技术,2021(6):60-62;68.

[13] 王军,杨波,王泽银.大跨度钢桁架人行天桥减震控制研究[J].城市道桥与防洪,2021(11):182-184.

[14] 张志强,马斐,李爱群,等.大跨钢结构楼盖人群荷载响应分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011(3):517-523.

[15] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

(上接第68页)

[6] 王虎.沥青路面高性能裂缝处治材料研发及应用[D].重庆:重庆交通大学,2020.

[7] 彭华,尹健,池漪,等.沥青路面裂缝修补材料性能评价指标及方法[J].铁道科学与工程学报,2014,11(4):90-95.

[8] 邱晓静.半刚性基层沥青路面裂缝微创注浆修复技术的关键工艺[J].交通节能与环保,2025,21(4):230-233.

[9] 张军辉,王华磊,顾凡.道路非开挖注浆材料研究现状与展望[J].中国公路学报,2025,38(6):209-233.

[10] 陈卫锋.微创注浆修复技术在半刚性基层沥青路面修复中的应用研究[J].交通节能与环保,2025,21(3):141-144.

[11] 孙奔,应鹏,朱瑶之.半刚性基层沥青路面裂缝非开挖注浆修补技术应用研究[J].上海公路,2023(4):22-25;31.

[12] 杨振海,蔡文龙,许欢等.沥青路面半刚性基层裂缝非开挖注浆修补技术应用研究[J].湖南交通科技,2020,46(2):9-31;100.

[13] 朱新春,周金强,朱连照,等.高速公路沥青路面裂缝非开挖注浆技术创新应用[J].中国公路,2023(15):52-55.

[14] 钟世英,亓进科,丛波日,等.改性聚氨酯注浆材料性能研究[J].四川建筑科学研究,2025,51(5):84-90.

[15] 吕桂洁,潘友强,李款,等.新型改性聚氨酯注浆材料的性能及应用[J].新型建筑材料,2025,52(7):21-25.