

变截面钢桁梁人行桥人致振动及振动控制研究

陈建兵¹, 谢永靖¹, 李祖辉², 刘晨光¹

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 苏州中正工程检测有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要:为研究变截面钢桁梁人行桥人致振动舒适度及调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)的减振效果,以某京杭大运河钢桁梁人行桥为研究对象,采用有限元模拟和现场实测2种方式,研究钢桁梁人行桥人致振动响应。基于有限元模型,分析未安装TMD之前的桥梁振动响应,确定行人舒适度水平,讨论行人密度、阻尼比和人群激励频率等参数对其的影响,以此给出TMD设计参数,并分析了TMD质量比对减振效果的影响;对安装TMD之后的人行桥进行了现场实测,并在实测基础上,采用加速度时程和频谱分析对相应工况进行桥梁人致振动响应研究。研究表明:安装TMD之前,该桥加速度响应超过规范限值,需要考虑人致振动的影响;其加速度响应在一定范围内随着行人密度增长而增大,随着阻尼比的增大而减小;当行人步频接近桥梁某阶振动频率时,振动响应明显增大;安装TMD之后,该桥实测的人致振动响应有所降低,其响应规律与模拟结果较为一致。文中的研究成果可为变截面钢桁梁人行桥人致振动研究提供理论支持。

关键词:钢桁梁;人致振动测试;人致振动模拟;舒适度评价;调谐质量阻尼器;减振控制

中图分类号:TU997

文献标识码:A

Research on human-induced vibration and vibration control of variable cross-section steel truss girder pedestrian bridge

CHEN Jianbing¹, XIE Yongjing¹, LI Zuhui², LIU Chenguang¹

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2. Suzhou Zhongzheng Engineering Inspection Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: To study the comfort level of human-induced vibration of a variable section steel-truss pedestrian bridge and the vibration reduction effect of tuned mass damper (TMD), a steel truss girder pedestrian bridge on the Beijing Hangzhou Grand Canal was taken as the research object. Finite element simulation and on-site measurement were used to study the human-induced vibration response of the steel truss pedestrian bridge. Based on the finite element model, the vibration response of the bridge before installation of TMD was analyzed, the pedestrian comfort level was determined, and the influence of pedestrian density, damping ratio and crowd excitation frequency on the bridge was discussed. In this way, the TMD design parameters were given, and the influence of TMD mass ratio on the vibration reduction effect was analyzed. On site measurements were conducted on the pedestrian bridge after the installation of TMD, and based on which acceleration time history and frequency spectrum analysis were used to study the human-induced vibration response of the bridge under corresponding operating conditions. Comparison of the results shows that before installing the TMD, the acceleration response of the bridge exceeds the specification limit, and the effect of human-induced vibration should be considered. In a certain range, the acceleration response

收稿日期:2023-09-18; 修回日期:2023-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52208189)

作者简介:陈建兵(1968—),男,教授,主要从事桥梁结构理论研究。E-mail:szctt2009@163.com

通讯作者:谢永靖(1998—),男,硕士研究生,主要从事桥梁结构理论研究。E-mail:18897994057@163.com

increases with the increase of pedestrian density and decreases with the increase of damping ratio. The vibration response increases significantly when the pedestrian step frequency is close to a certain order of the vibration frequency of the bridge. After the installation of TMD, the measured human-induced vibration response of the bridge is reduced, and its response is consistent with the simulation results. The research results in this paper can provide theoretical support for the study of human-induced vibration of variable section steel truss bridge.

Key words: steel truss girder; human-induced vibration test; human induced vibration simulation; comfort evaluation; tuned mass damper; vibration control

0 引言

现代科技日新月异,人行桥正向着结构更加纤细和跨度更大的方向发展,加之钢结构材料的不断更新迭代,这样就使得如今的人行桥的质量越来越轻,刚度越来越小,其带来的结果是自振频率的减小和较低的质量阻尼,使得桥梁结构发生人致振动,这种振动直接影响了桥上行人的舒适度、结构的使用性和安全性^[1-2],从而导致这种“轻便”的人行桥在人群荷载激励作用下也更容易发生振动。2000年英国千禧桥^[3](Millennium Bridge)事件,使得全世界设计者不得不对人致振动造成的影响提高警惕。在此背景下,研究人致振动对结构的影响以及振动控制是十分有意义的。

目前,人行桥振动舒适度及振动控制研究主要包括结构动力响应分析、建立人行脚步动荷载模型、振动舒适度评价和减振措施等内容。人行脚步荷载模型是研究人行桥振动舒适度的基础,国内外规范均对此做出了相关规定。最早提出人行桥设计要考虑人行荷载的规范是英国 BS 5400 规范^[4]。BS5400 规范在第二部分荷载标准中给出了人行荷载作用的相关内容,并规定了具体的计算方法;现行具有普遍适用性的德国 EN03 规范^[5](以下简称《EN03》),通过划分不同的交通级别得到相应的人行荷载参数,结合桥梁自振频率和人行荷载模型计算得到振动加速度峰值,以此评价人行桥舒适度;杨勇等^[6]运用步行荷载模型对钢结构曲梁斜拱肋人行桥进行了人致振动舒适度评价。自振频率是结构动力响应的主要结果,也是衡量人行桥是否需要舒适度评价的依据。BACHMANN^[7]通过实测分别得到了钢筋混凝土人行桥和连续钢人行桥的基本侧向频率和竖向频率。刘枫等^[8]对人行悬索桥进行人致振动实测,通过设计不同的人行荷载工况得到峰值加速度,并结合规范判断舒适度等级。现今使用较为广泛的人行桥减振措施是通过安装调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)进行减振。HARTOG^[9]提出了 TMD 最优参数的计算式,这使得 TMD 被广泛应用于桥梁减振。华旭刚等^[10]通过 TMD 理论设计及减振实测,分析了 TMD 对大跨度双层曲线斜拉桥的减振效果和 TMD 减振优化;沈文爱等^[11]研究了多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass damper, MTMD)对大跨度人行悬索桥的减振效果;邹卓等^[12]分析了人行悬索桥设置不同参数对 TMD 减振效果的影响。

目前,针对变截面钢桁梁桥在人行荷载激励下的振动响应研究较少,同时,钢桁梁桥由于人致振动造成的安全问题频繁出现^[13],需要对其进行减振控制。本文以某京杭大运河人行钢桁桥为背景,采用有限元模拟未安装 TMD 情况下人行桥的振动响应,讨论不同参数对人行钢桁桥振动响应的影响,得到最优的减振方案;对安装 TMD 后的人行桥进行实测,选用不同的行人激励模型,对比分析实测与模拟结果的响应规律。

1 人行钢桁桥人致振动响应模拟

1.1 工程概况

某京杭大运河人行桥主桥为(50+120+50)m 连续变截面钢桁梁桥,桥梁全宽为 11.6 m,桥面宽为 10 m,两榀桁架间采用横梁、风撑连接,桁架结构采用 Q420qD 钢材,桥面板及横梁、风撑等结构采用 Q345qD 钢材,实测弹性模量为 2.06×10^8 kPa。桥梁与运河斜交 31.6° (右斜)。结构布置如图 1 所示,桥梁全貌如图 2 所示。

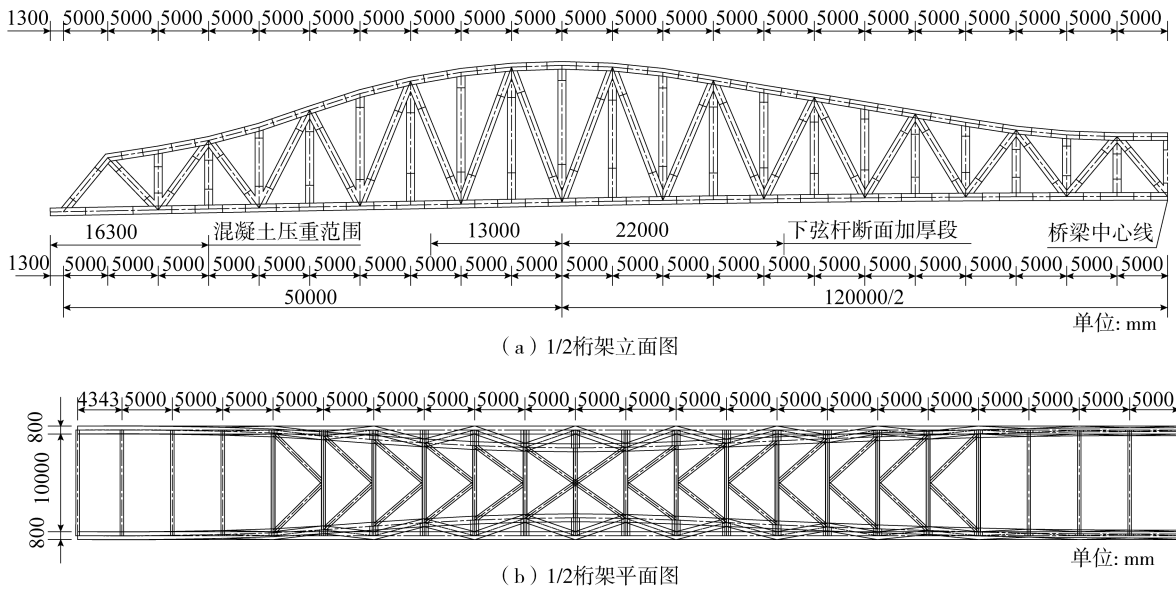


图 1 桥梁结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bridge structure

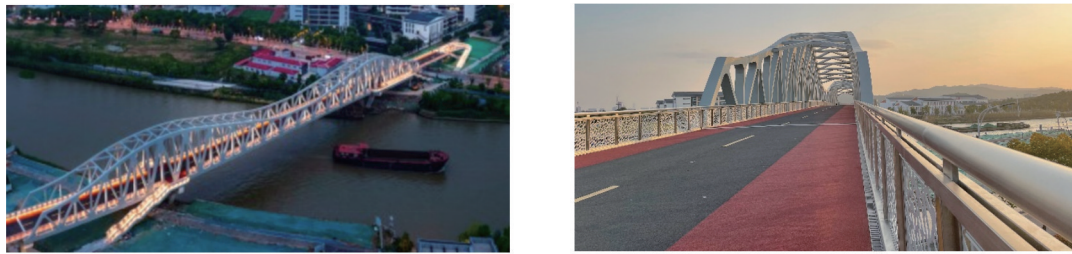


图 2 人行钢桁桥实拍全貌

Fig. 2 Overall view of the pedestrian steel truss bridge

1.2 结构动力特性

采用 Midas Civil 对未设置 TMD 的人行桥建立有限元模型如图 3 所示。模型支座采用弹性连接,其约束方向与实桥支座一致,并对其进行自振特性分析,得到前 4 阶振动频率和振型特点如表 1 所示,且与设计计算结果一致,其前 4 阶振型如图 4 所示。由表可知,桥梁 1 阶竖向振动频率为 1.85 Hz,不满足《EN03》规定的竖向频率大于 2.3 Hz 的要求,所以该人行桥在人致振动下容易产生过大的动力响应。

表 1 前 4 阶振型及其特点

Table 1 The first four vibration modes and their characteristics

模态	频率/Hz	振型特点
1 阶	1.85	1 阶正对称竖弯
2 阶	2.06	1 阶正对称侧弯
3 阶	2.70	桥面扭转,桁架 1 阶反对称
4 阶	2.73	桥面扭转,桁架 1 阶反对称

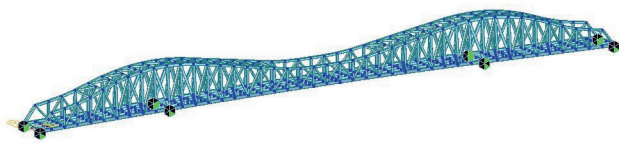


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

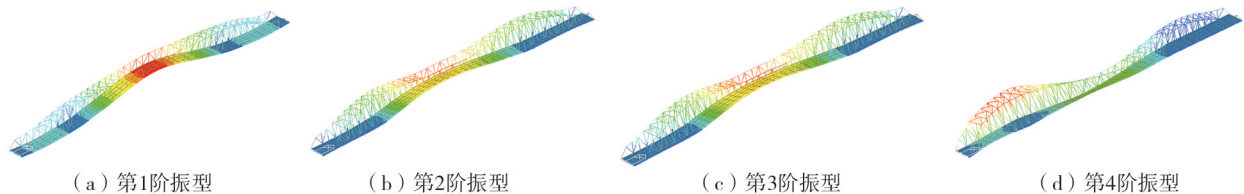


图 4 前 4 阶振型

Fig. 4 The first four vibration modes

1.3 参数对人致振动峰值加速度的影响

1.3.1 行人荷载的分析模型

在桥梁满载情况下,采用《EN03》规定的行人脚步荷载模型,其表达式为

$$P(t) = P \times \cos(2\pi f_s t) \times n' \times \psi \quad (1)$$

式中: $P \times \cos(2\pi f_s t)$ 为单个行人产生的荷载; P 为步频为 f_s 时的单人产生的荷载; f_s 为步频(计算桥梁自振频率时,假设步行频率等于人行桥基频); n' 为桥面板上单位面积的等效行人数量,桥面板面积 $S=B \times L$; ψ 为折减系数,其取值如图5所示。

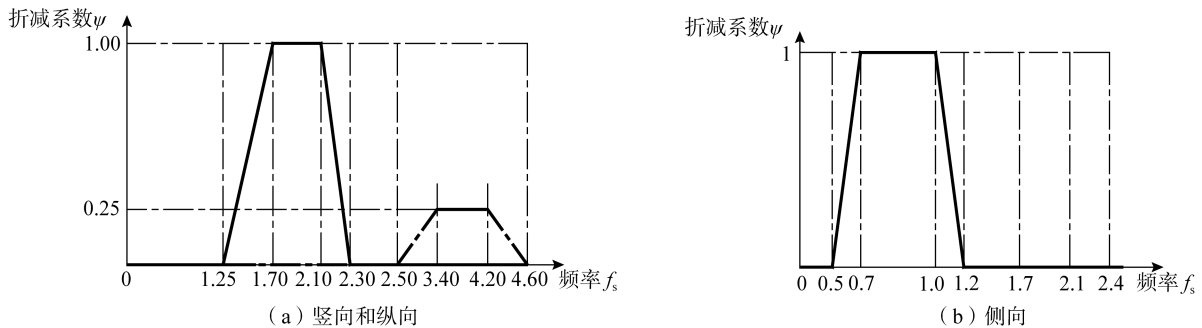


图5 折减系数 ψ

Fig. 5 Reduction coefficient ψ

单人产生的荷载的取值如表2所示。

表2 荷载取值

Table 2 Load value

荷载方向	单人荷载 F_p/N
竖向	280
纵向	140
侧向	35

桥面板面积 S 上的等效行人数 n' 计算式为

交通级别TC1~TC3(行人密度 $d < 1.0P/m^2$):

$$n' = \frac{10.8\sqrt{\xi \times n}}{S} (P/m^2) \quad (2)$$

交通级别TC4~TC5(行人密度 $d \geq 1.0P/m^2$):

$$n' = \frac{1.85\sqrt{n}}{S} (P/m^2) \quad (3)$$

式中: ξ 为结构阻尼比; n 为受荷面积 S 上的行人数($n=S \times d$)。

式(1)和表2中的人群密度与交通级别根据《EN03》规定选取,如表3所示。

表3 行人交通级别和密度

Table 3 Pedestrian traffic level and density

交通级别	行人密度 d	特点
TC1	$d = 15P/(BL)$	行人十分稀少
TC2	$d = 0.2P/m^2$	行人稀少,可以自由的行走,可快步走
TC3	$d = 0.5P/m^2$	繁忙,行走不受限,但快步走有时被限制
TC4	$d = 1.0P/m^2$	十分繁忙,无法自由移动和快步走
TC5	$d = 1.5P/m^2$	异常繁忙,步行拥挤、行动不舒适

注: P 为人数; B 为桥面板; L 为桥长。

表3中,TC1~TC5为交通级别的荷载均采用谐波荷载模型,根据行人流量的密度,有2种不同的荷载模型可计算人行桥对行人密度的响应:①TC1~TC3的荷载模型:人流密度 $d < 1.0P/m^2$;②TC4~TC5的荷载模型:人流密度 $d \geq 1.0P/m^2$ 。

把人行荷载函数施加于图 3 所示的有限元模型上,并进行移动荷载时程分析,其荷载加载方向与振动方向同向,加载方式如图 6 所示。

通过时程分析法求解有限元模型中节点峰值加速度,并与《EN03》划定的舒适度评价标准(表 4)作比较,得到其舒适度等级。

行人密度是对桥梁振动影响的最主要参数,行人密度为人群的密集程度,会影响行人的步频、步速和步行方向,与行人过桥舒适度直接相关。在对比其他参数时,行人密度均取 1.0 人/m²。

在 1.2 节中有限元计算得到该桥 1 阶振动频率为 1.85 Hz,由表 2 可知该频率对应的折减系数 $\psi = 1$,在讨论步频参数对人致振动分析结果的影响时,步频范围^[13]取 1.5~2.2 Hz。在对比其他参数时,步频均取该桥 1 阶振动频率。

在进行除阻尼比以外的其它参数比较时,其阻尼比取值均采用《EN03》规范中钢结构人行桥规定的 0.40%。

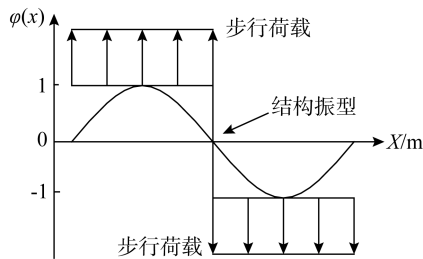


图 6 荷载模型加载方向
Fig. 6 Loading direction of the load model

表 4 EN03 舒适度评价标准
Table 4 EN03 comfort evaluation criteria

舒适度类别	舒适程度	竖向加速度限值/(m/s ²)
CL1	最好	[0,0.5)
CL2	中等	[0.5,1.0)
CL3	差	[1.0,2.5)
CL4	无法忍受	[2.5,+∞)

1.3.2 行人密度

桥梁振动加速度与行人密度有关,同时,行人舒适度等级也随着行人密集程度而变化。

模拟分析时,设定 6 种行人密度,分别取表 3 中的 5 种交通级别(其中 TC1 级别对应的行人密度为 0.007 人/m²)以及行人密度为 2.0 人/m²^[14-15]的满载交通级别,研究不同行人密度对桥梁振动加速度的影响。不同行人密度的峰值加速度计算结果如表 5 所示,其最大峰值加速度随行人密度的变化规律如图 7 所示。

表 5 不同行人密度下的最大峰值加速度
Table 5 Maximum peak acceleration under different pedestrian densities

行人密度/(人/m ²)	竖向振动峰值加速度/(m/s ²)
0.007	0.038
0.200	0.206
0.500	0.325
1.000	1.246
1.500	1.526
2.000	1.762

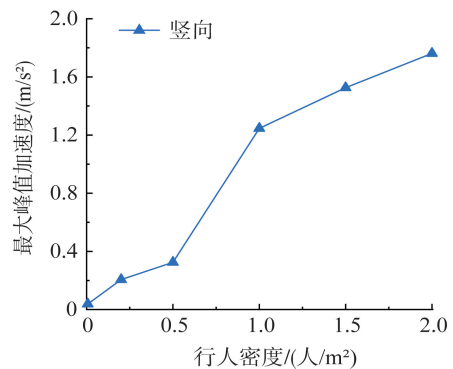


图 7 竖向峰值加速度随行人密度的变化规律
Fig. 7 The vertical peak acceleration varies with pedestrian density

荷载模型中频率 f_s 为该桥 1 阶自振频率,表 5 中加速度为桥梁 1 阶振动下的振动加速度。由图 7 可知,当行人密度小于 2.0 人/m² 时,随着行人密度的增大,该桥竖向加速度峰值呈线性增长,当行人密度大于 1.0 人/m² 时,竖向加速度峰值均大于 1.0 m/s²,舒适度等级为“差”。

不同的行人密度对结构动力特性有显著影响,同时,随着行人密度的增大,桥梁基频略微降低。当行人密度大于 1.0 m/s² 时,该桥的人致振动竖向加速度响应值大于 0.5 m/s²,超出了《EN03》规定的行人舒适度等级。因此,需要安装减振装置以改善桥梁振动舒适度。

1.3.3 结构阻尼比

桥梁振动可以视为有阻尼的简谐振动,所以桥梁在有阻尼存在的情况下,其动力响应在达到一定幅值后就会趋于稳定。同时,当人行频率接近桥梁某 1 阶自振频率时,桥梁会发生共振现象,但由于结构阻尼的存在,结构不会因破坏而发生重事故。

由于桥梁结构类型不同,其结构阻尼比范围也不同。在行人密度和步频不变的情况下,分别选取0.20%、0.25%、0.30%、0.35%、0.40%、0.50%、0.60%等7种阻尼比,计算阻尼比对结构峰值加速度的影响。其峰值加速度计算结果如表6所示,图8给出了阻尼比为0.30%、0.40%、0.60%情况下的竖向振动峰值加速度点的时程。

由表6可知,随着阻尼比的增大,结构振动加速度逐渐减小,阻尼比为0.20%时,加速度最大,其竖向峰值加速度为 1.994 m/s^2 ;阻尼比为0.60%时,加速度最小,其竖向峰值加速度为 0.875 m/s^2 。

结构阻尼比增大能更多耗散输入结构的能量,有助于减小人行桥振动响应^[14],当结构振动响应较大,行人舒适度等级不满足要求时,可通过增大结构阻尼(如安装阻尼器)等措施来改善行人舒适度^[16],但是在实际工程中,应兼顾考虑其经济实用性,一般钢结构人行桥,通常在0.20%~0.40%范围内确定最佳阻尼比,该范围也满足《EN03》的要求。

表6 不同结构阻尼比下的最大峰值加速度

Table 6 Maximum peak acceleration under different structural damping ratios

结构阻尼比/%	竖向振动峰值加速度/(m/s^2)
0.20	1.994
0.25	1.751
0.30	1.551
0.35	1.384
0.40	1.246
0.50	1.033
0.60	0.875

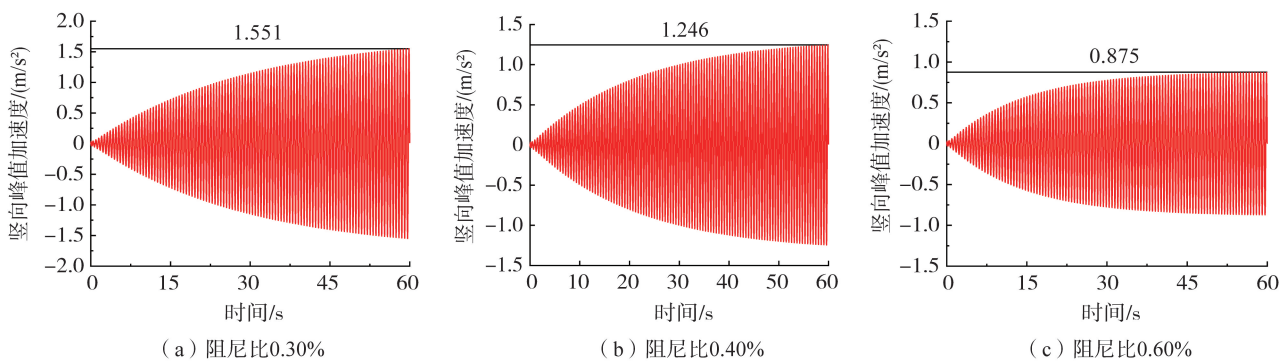


图8 不同阻尼比下的振动峰值加速度时程

Fig. 8 Vibration peak acceleration time history under different damping ratios

1.3.4 行人步频

在考虑整个桥梁的振动响应时,由于步行频率的变化,所引起的桥梁总体响应也会发生变化。一般情况下,行人行走较为舒适的频率区间^[17]为1.5~2.2 Hz。为了进一步分析行人步频对该桥结构振动加速度的影响,以1.5 Hz为步频最小值,按步长0.1 Hz递增进行计算,并提取了不同步频下的竖向加速度进行分析。

不同步频下的振动加速度时程曲线如图9所示。由图可知,桥梁竖向振动加速度与步频没有单一的线性关系,而是在区间内有增有减,当步频接近桥梁第1阶自振频率1.85 Hz时,振动响应最大,其竖向峰值加速度为 1.246 m/s^2 ,其舒适度等级为“差”级别;当步频远离第1阶自振频率时,结构振动响应较小,其舒适度等级为“最好”级别。

基于模型计算结果及相关研究^[18]可知,当该桥输入的步频与桥梁某阶振动频率高度相近时,其结构会发生明显振动,当其振动加速度超过规范限值(不大于 0.5 m/s^2)时,则需进行减振控制;当步频与桥梁某阶振动频率相差很大时,其结构振动响应相对较小,结构舒适度等级满足规范要求。

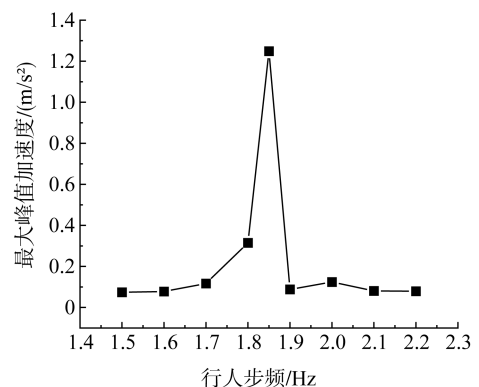


图9 不同行人步频下的最大峰值加速度

Fig. 9 Maximum peak acceleration under different step frequencies

2 人行钢桁桥减振控制

根据1.2节有限元分析结果和1.3节动力特性参数分析可知,当外部激励频率与桥梁第1阶的自振频率相同时,在大于 1.0 人/m^2 的行人密度作用下,该人行桥会产生显著的振动响应。所以需要对第1阶竖向振

动进行减振控制。现今较为普遍的减振控制措施是增加结构阻尼比,即对人行桥安装调谐质量阻尼器(TMD),使人行桥舒适度水平达到设计要求。

2.1 TMD 减振控制计算原理

TMD 是由固体质量、弹簧和内置阻尼组成的被动调谐装置,它的减振原理是将阻尼器系统固有频率调至结构的某个振动频率,通过两者的相互作用以达到减振效果。选取合适的 TMD 需要计算其最优频率和最佳阻尼比。

目前常用的 TMD 参数计算公式是 HARTOG^[9]建立的无阻尼体系的参数公式,其计算公式为

$$\lambda_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \tag{4}$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \tag{5}$$

$$k_{opt} = \lambda_{opt}^2 \omega_0^2 m_d \tag{6}$$

$$c_{opt} = 2\zeta_{d,opt} \omega_{opt} m_d = 2\zeta_{d,opt} \omega_0 m_d \tag{7}$$

式中: μ 为 TMD 质量与结构主质量的比值,建议取值为 0.5%~5.0%; λ_{opt} 为最优频率比; ζ_{opt} 为最优阻尼比; ω_0 为主结构固有频率(角频率); m_d 为 TMD 质量; k_{opt} 为最优刚度系数; c_{opt} 为最优阻尼系数。

2.2 TMD 设置方案及减振效果

由表 5 可知,人行桥在行人密度分别为 1.0、1.5、2.0 人/m²等 3 种情况下,其竖向振动加速度均不满足规范要求(<0.5 m/s²)。因此,需对其进行 TMD 减振控制。

在进行 TMD 减振设计前,分别选取 1.85 Hz(1 阶频率)的桥梁频率和 2.0%的质量比 μ ,根据前文模型分析结果可知,桥梁 1 阶振型参与质量为 1044 111 kg,代入式(4)~式(7)中,经计算,得到 TMD 的质量、最优刚度系数及最优阻尼系数,如表 7 所示。第 1 阶振型峰值加速度出现在跨中,结合现场情况,经对比分析,确定在中跨安装 10 个相同参数的竖向 TMD(尺寸为 1 200 mm×850 mm)和 2 个相同参数的横向 TMD(尺寸为 750 mm×700 mm)(设置横向 TMD 是为了防止人群密度过大或极端风荷载等对桥梁造成超出限值的水平振动,限于篇幅,本文仅对竖向振动响应进行减振分析),TMD 布置形式如图 10 所示,TMD 安装示意如图 11 所示。

在有限元模型中采用弹簧和线性阻尼器模拟 TMD,使用一般连接将 TMD 与桥梁节点相连,一般连接特性值采用表 7 中的参数。

表 7 TMD 参数
Table 7 TMD parameters

模态	数量/个	质量 m_d /kg	刚度 k_{opt} /(N/m)	阻尼系数 c_{opt} /(N·s/m)	控制方向
1 阶	10	2000	261 000	3 657	竖向
1 阶	2	1000	56 000	1 196	横向

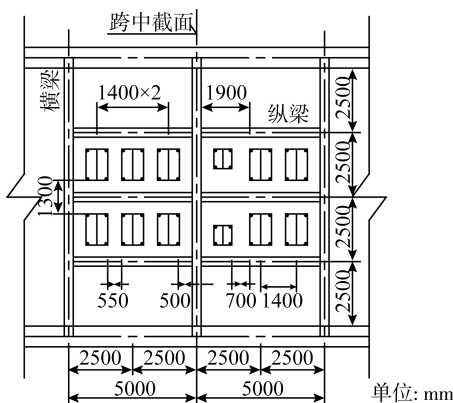


图 10 TMD 布置图
Fig. 10 Layout of TMD



图 11 TMD 现场安装示意图
Fig. 11 Schematic diagram of TMD on-site installation

表 8 为 3 种行人密度下的 TMD 的减振计算结果,图 12 给出了减振前后的 3 种行人密度加速度时程。由表可知,减振前,人行桥峰值加速度均大于 1 m/s²,其舒适度等级均为“差”,减振后,3 种行人密度作用下

的人行桥峰值加速度均大幅度降低,其减振率达到93%以上,减振后的峰值加速度远小于 0.5 m/s^2 ,其舒适度等级达到“最好”。因此,设置TMD后结构的人致振动舒适度水平满足规范要求。

表8 不同行人密度下的TMD减振前后加速度对比

行人密度/(人/m ²)	峰值加速度/(m/s ²)		减振率/%
	减振前	减振后	
1.0	1.246	0.085	93.18
1.5	1.526	0.105	93.12
2.0	1.762	0.121	93.13

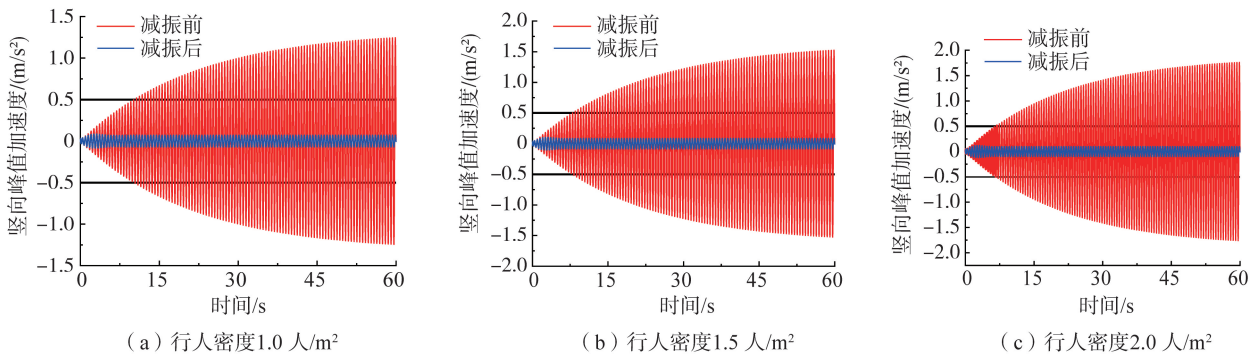


图12 TMD减振前后加速度时程对比

Fig. 12 Comparison of acceleration time history before and after TMD damping

2.3 TMD减振效果分析

在进行减振设计时,TMD的质量并不是越大越好,增大质量比可以减小振动响应,但同时还要兼顾其经济性。为了研究不同质量比对减振前后峰值加速度的影响,保持 1.5 人/m^2 的行人密度不变的情况下,在前文2%质量比的基础上,另选取0.5%、1.0%、1.5%、2.5%这4种质量比进行对比分析,经计算,得到其TMD参数如表9所示。

表10为5种质量比下的TMD减振结果,减振后,其舒适度水平均为“最好”;当行人密度为 1.5 人/m^2 时,TMD质量比大于2.0%,减振率较前者无显著变化,所以选择小于等于2.0%的质量比较为合理。

表9 不同质量比下的TMD参数

质量比/%	质量 m_d /(kg)	刚度 k_{opt} /(N/m)	阻尼系数 c_{opt} /(N·s/m)	控制方向
0.5	500	70 030	522	竖向
1.0	1000	138 679	1466	竖向
1.5	1500	205 974	2674	竖向
2.5	2500	336 624	5670	竖向

表10 5种质量比下的TMD减振结果对比

质量比/%	峰值加速度/(m/s ²)		减振率/%
	减振前	减振后	
0.5		0.214	85.98
1.0		0.149	90.24
1.5	1.526	0.122	92.01
2.0		0.105	93.12
2.5		0.094	93.84

据此,在不同行人密度作用下,选取2.0%的质量比均可以使桥上行人的舒适度水平达到“最好”,这也符合0.5%~5.0%的建议取值^[9]。通过分析不同质量比的TMD减振效果可得,TMD减振率随质量比的增加而增加,且减振效果显著。但在实际情况中,需要考虑经济性和运输便利,实际设计的TMD各项参数往往不能达到理论计算得到的参数。

3 人行钢桁桥人致振动实测

3.1 振动测试设备及测点布置

人行桥振动测试为行人激励测试,使用传感器分别采集桥梁的竖向、顺桥向及侧向振动的加速度信号,

并通过东华 DHDAS 动态信号分析系统对加速度信号进行频谱分析,得到人行桥在行人激励下的振动加速度。为避免干扰,测试过程中封闭全桥;实时监测当日气温、风速和桥下通航情况。

测试设备采用东华 DH5907N 无线桥梁模态测试分析系统和 DH5922D(32 通道)动态信号测试分析系统 2 种,分析系统包括控制主机和传感器。其中,速度传感器有双向和三向 2 种型号,加速度传感器为单向。为确保数据精确度,传感器灵敏度均设置为高灵敏度,其时程范围、单位等按传感器所给标准设定。

测试规定人行桥自南向北为顺桥向,传感器放置距离从主桥端点开始计算。全桥纵向共设置 6 个测试截面见图 13(a),分别为南侧边跨 $L/4$ 截面、 $L/2$ 截面、 $3L/4$ 截面及中跨 $L/4$ 截面、 $L/2$ 截面、 $3L/4$ 截面;横桥向,中跨 $L/2$ 截面测点布置在桥梁中轴线及两侧边缘(距离桁架内侧边缘 30 cm 处),中跨 $3L/4$ 截面测点布置在桥梁中轴线,其它截面布置在桥梁中轴线和一侧边缘(上游,距离桁架内侧边缘 30 cm 处)。传感器测点布置如图 13 所示。其中,1~4 号为双向传感器;5~7 号为三向传感器;8~17 号为加速度传感器;横向布置截面如图 13(c)、(d)所示;传感器安装如图 14 所示。

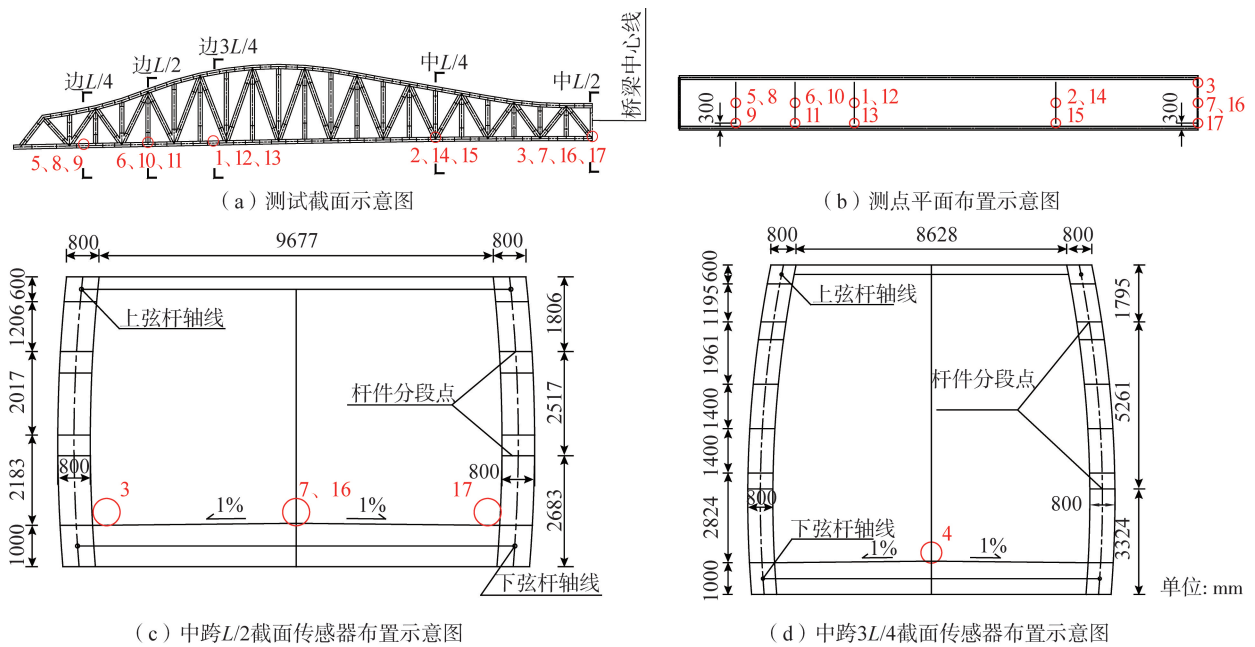


图 13 测试截面和传感器分布图

Fig. 13 Test section and sensor distribution diagram

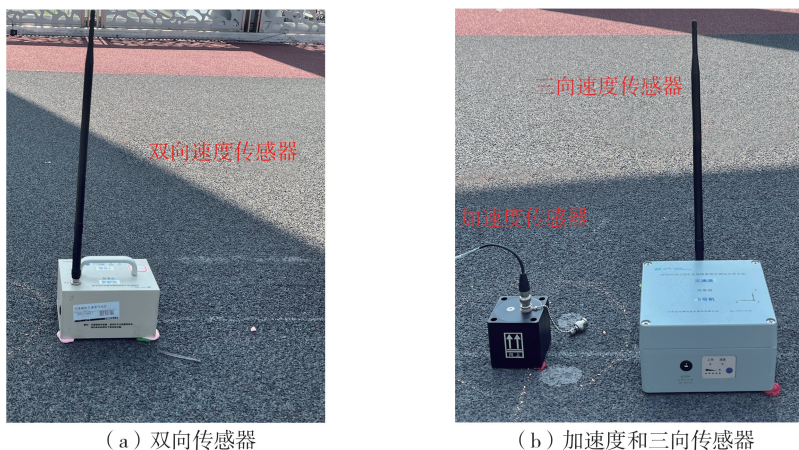


图 14 传感器安装示意图

Fig. 14 Sensor installation schematic diagram

3.2 实测工况设置

人行激励实测是在设置 TMD 之后,按行人步行、奔跑及跳跃 3 种激励方式进行,测试人员按照节拍器设置的频率前进,其中,原地跳跃激励的持续时间为 35 s,跳跃激励频率为 2.5 Hz;奔跑激励频率为 3.0 Hz;行走激励频率分别为 1.5、1.8、2.0、2.2 Hz。现场测试如图 15 所示。



图 15 人致振动工况实测现场

Fig. 15 Measured on site of human-induced vibration conditions

3.3 实测结果

实测的行人激励工况和峰值加速度结果如表 11 所示。3 种典型工况的频谱时程(FFT)如图 16 所示。

表 11 行人激励工况实测的竖向振动峰值加速度

Table 11 Measured vertical vibration peak acceleration in pedestrian excitation conditions

m/s²

序号	工况描述	测试情形	加速度传感器									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1 人 1.5 Hz 步行通过	沿中线	0.046	0.031	0.040	0.029	0.055	0.032	0.049	0.036	0.062	0.045
2	3 人 1.5 Hz 步行通过	一列沿中线	0.056	0.034	0.040	0.026	0.060	0.050	0.058	0.041	0.075	0.049
3	8 人 1.5 Hz 步行通过		0.061	0.041	0.050	0.035	0.066	0.057	0.061	0.053	0.082	0.057
4	14 人 1.5 Hz 步行通过		0.072	0.058	0.064	0.052	0.086	0.063	0.076	0.068	0.095	0.070
5	3 人 3.0 Hz 奔跑通过	一排沿中线	0.102	0.082	0.132	0.074	0.135	0.091	0.127	0.114	0.197	0.148
6	14 人 1.8 Hz 步行通过	两列沿中线	0.045	0.037	0.116	0.032	0.117	0.088	0.104	0.070	0.173	0.092
7	14 人 2.0 Hz 步行通过		0.049	0.043	0.098	0.042	0.095	0.075	0.087	0.066	0.116	0.080
8	14 人 2.2 Hz 步行通过		0.065	0.055	0.067	0.043	0.106	0.079	0.098	0.049	0.085	0.077
9	14 人 3.0 Hz 奔跑通过		0.267	0.219	0.341	0.196	0.392	0.251	0.380	0.315	0.386	0.307
10	14 人 1.5 Hz 步行通过	两排沿中线	0.074	0.065	0.077	0.063	0.100	0.071	0.084	0.060	0.093	0.079
11	14 人 1.8 Hz 步行通过		0.101	0.093	0.156	0.088	0.131	0.097	0.119	0.062	0.143	0.106
12	14 人 2.0 Hz 步行通过		0.098	0.069	0.101	0.064	0.116	0.075	0.095	0.065	0.116	0.090
13	1 人原地跳跃	边跨跨中	0.027	0.023	0.064	0.045	0.032	0.028	0.025	0.021	0.025	0.022
14	1 人原地跳跃	中跨跨中	0.021	0.012	0.026	0.017	0.029	0.020	0.051	0.042	0.106	0.094
15	3 人原地跳跃	边跨跨中	0.036	0.031	0.078	0.063	0.053	0.041	0.038	0.027	0.032	0.028
16	3 人原地跳跃	中跨跨中	0.028	0.017	0.030	0.021	0.033	0.024	0.068	0.044	0.150	0.120
17	8 人原地跳跃		0.044	0.028	0.047	0.031	0.046	0.030	0.097	0.081	0.187	0.162
18	14 人原地跳跃		0.067	0.046	0.063	0.059	0.050	0.038	0.166	0.096	0.216	0.202

由表 11 可知,结构振动加速度响应在一定条件下与测试人数和步频呈正相关。对于行走工况,当频率相同时,振动响应随测试人数的增加而增大,相对于行走工况,奔跑工况的加速度响应更显著;当测试人数相同时,振动响应随步频的增大而增大;对于跳跃工况,当测试位置相同时,振动响应也随测试人数的增加而增大。

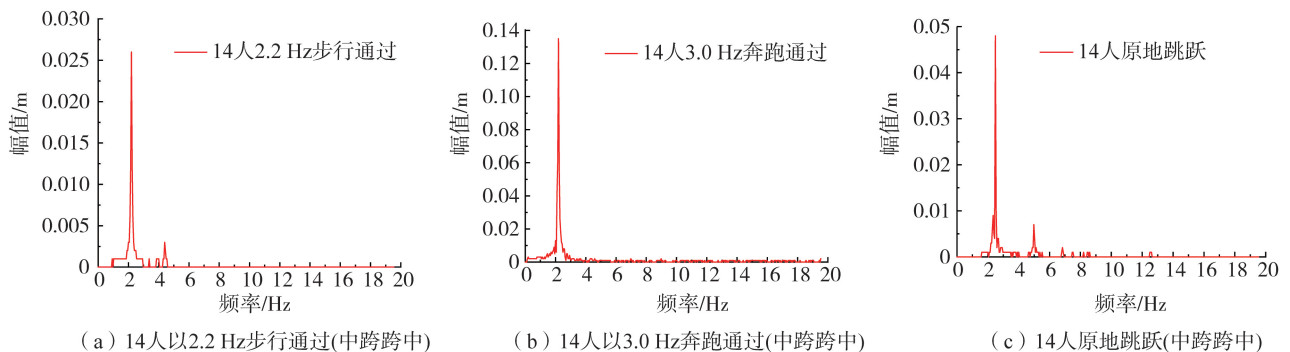


图 16 3 种典型工况的 FFT 频谱

Fig. 16 FFT frequency spectra of three typical working conditions

当 14 人以 3.0 Hz 奔跑通过工况下,其实测最大竖向振动加速度大于其他工况,其加速度为 0.392 m/s²,小于 0.5 m/s²,达到了“最好”等级,满足行人舒适度要求,也说明了所安装的 TMD 降低了人行桥的动力响应,进一步验证了 TMD 设置方案的合理性。

3.4 行人激励荷载模型

不同的行人不会产生相同的步行力,即使是单个行人,每走一步也会产生不同的步行力^[19],因此,行人激励荷载也有所区分。

对于步行(奔跑)通过工况,采用 JGJ/T 441—2019《建筑楼盖振动舒适度技术标准》^[20]中规定的行走激励荷载模型,其表达式为

$$F(t) = \sum_{i=1}^3 \gamma_i P_p \cos(2\pi i f_s t + \varphi_i) \tag{8}$$

式中: $F(t)$ 为人行走激励荷载; P_p 为行人重量,可取 0.7 kN(JGJ/T 441—2019《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》^[20]建议值为 0.7 kN,根据现场参与实测人员的体重统计取为 0.7 kN); γ_i 为第 i 阶荷载频率的动力因子, $\gamma_1 \sim \gamma_3$ 分别取 0.5、0.2、0.1; f_s 为步行频率(Hz); φ_i 为第 i 阶荷载频率对应的相位角, $\varphi_1 \sim \varphi_3$ 分别取 0、 $\pi/2$ 、 $\pi/2$ 。

对于跳跃工况,参考刘军进等^[21]对楼盖竖向激励进行的振动试验研究和陈隽等^[22]对跳跃荷载功率谱模型的研究,采用图 16 作为跳跃激励工况的荷载模型。其计算如式(9)所示:

$$F(t) = \begin{cases} \frac{2aP_0}{t_1} t & 0 \leq t < \frac{t_1}{2} \\ aP_0 \left[1 - \frac{2}{t_1} \left(t - \frac{t_1}{2} \right) \right] & \frac{t_1}{2} \leq t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t \leq T \end{cases} \tag{9}$$

式中: P_0 为激励人员的体重(根据现场参与实测人员的体重统计取为 0.7 kN); a 为跳跃动力系数; T 为跳跃周期; b 为落地持时系数。

根据文献[17]结果,处于慢频跳跃(<2.0 Hz)时, $a = 3.0$, $b = 0.55$;处于中频(2.4~2.8 Hz)及快频(>2.8 Hz)跳跃时,可统一取 $a = 4.0$, $b = 0.45$,其跳跃激励模型如图 17 所示。

在有限元模型中,步行(奔跑)通过工况是根据行人数量和步行频率,建立荷载模型并将其施加在行走路线的桥面梁节点上;跳跃工况是根据工况实测位置,将图 17 荷载模型施加在对应节点上。

3.5 实测结果与有限元结果对比

建立与表 11 中的工况对应的行人激励模型。计算各工况的加速度峰值,并与实测相对比,其结果见表 12。

表 12 行人激励工况模拟与实测最大竖向加速度对比

Table 12 Comparison of simulated and measured maximum vertical accelerations in pedestrian excitation conditions

序号	工况描述	测试情形	竖向峰值加速度/(m/s ²)		差值率/%
			实测值	计算值	
1	1 人 1.5 Hz 步行通过	沿中线	0.062	0.057	-8.06
2	3 人 1.5 Hz 步行通过	一列沿中线	0.075	0.088	17.33
3	8 人 1.5 Hz 步行通过		0.082	0.102	24.39
4	14 人 1.5 Hz 步行通过		0.095	0.126	32.63
5	3 人 3.0 Hz 奔跑通过	一排沿中线	0.197	0.218	10.66
6	14 人 1.8 Hz 步行通过	两列沿中线	0.173	0.178	2.89
7	14 人 2.0 Hz 步行通过		0.116	0.127	9.48
8	14 人 2.2 Hz 步行通过		0.106	0.101	-4.72

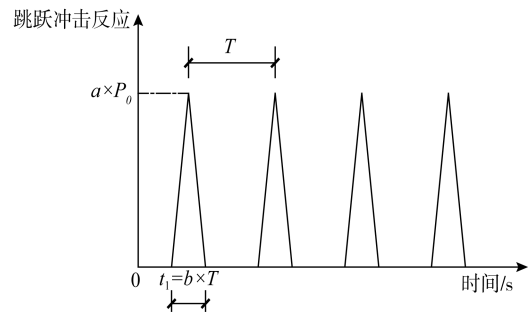


图 17 有节奏跳跃的激励模型

Fig. 17 Excitation model of rhythmic jumping

续表

序号	工况描述	测试情形	竖向峰值加速度/(m/s ²)		差值率/%
			实测值	计算值	
9	14人 3.0 Hz 奔跑通过		0.392	0.421	7.40
10	14人 1.5 Hz 步行通过	两排沿中线	0.100	0.101	1.00
11	14人 1.8 Hz 步行通过		0.156	0.168	7.69
12	14人 2.0 Hz 步行通过		0.116	0.126	8.62
13	1人原地跳跃	边跨跨中	0.064	0.046	-28.13
14	1人原地跳跃	中跨跨中	0.106	0.111	4.72
15	3人原地跳跃	边跨跨中	0.078	0.103	32.05
16	3人原地跳跃	中跨跨中	0.150	0.159	6.00
17	8人原地跳跃		0.187	0.211	12.83
18	14人原地跳跃		0.216	0.285	31.94

由表 12 可知,根据实测工况模拟计算所得到的加速度峰值均小于 0.5 m/s²,满足行人舒适度要求,达到了“最好”等级,其最大竖向振动加速度发生在 14 人以 3.0 Hz 奔跑通过工况,与实测结果一致。

人致振动模拟计算结果显示,设置 TMD 后,人行桥振动响应与测试人数和测试频率呈线性关系。测试频率相同时,加速度响应随着人数增加而增大,这与实测结果得到的规律基本一致。模拟计算得到的部分最大加速度位置与实测略有偏差,主要是因为有限元模拟分析过程只能考虑部分外界因素对桥梁振动的影响。同时,行人荷载模型会按有限元工况严格加载,具有较好的数值稳定性,但实测过程中,测试人员难以保持一致的行走频率进行测试,因此模拟和实测的部分最大振动响应位置稍有偏差。

综上所述,人致振动模拟得到的竖向峰值加速度基本能包络实测结果。其规律也与实测较为一致。在实际工程中,人致振动模拟可作为实测的参考对象,为行人舒适度评价及振动控制提供依据。

4 结论

本文通过对某京杭大运河变截面钢桁梁人行桥人致振动响应及 TMD 减振分析,得出以下主要结论:

1) 有限元模拟结果表明,该桥竖向振动加速度响应超过了规范限值,人致振动问题较为显著,需要采取减振控制措施。

2) 桥梁振动加速度与行人密度密切相关,当行人密度较低时,行人舒适度水平能保持“最好”;随着行人密度的增加,桥梁振动响应增大,桥上行人的舒适度等级会超过规范限值。

3) 当行人步频接近自振频率时,结构振动响应较为显著;当行人步频远离自振频率时,两者发生共振的可能性减小,因此,结构振动响应也较小。

4) 结构阻尼比增大有助于耗散由行人输入人行桥的能量,人行桥的振动响应会相应降低并逐渐达到稳定状态,行人因人行桥共振产生剧烈振动而感觉不适的现象会有所减缓。

5) 安装 TMD 后,人致振动模拟得到的竖向峰值加速度基本能包络实测结果,且加速度振动响应均满足舒适度要求,其 TMD 减振效果明显;当行人数量相同时,运动激励引起的振动响应随步频的增加而增大,且与现场实测结果得出的加速度响应规律较为吻合。

参考文献:

- [1] 陈得意. 人行桥人致振动舒适度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
CHEN Deyi. A study on pedestrian-induced vibration comfortability of footbridge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [2] 张博皓, 宋志刚, 浦炜钦. 冷弯型钢活动板房的横向人致结构振动分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(1): 207-213.
ZHANG Bohao, SONG Zhigang, PU Weiqin. Transverse human induced structural vibration analysis of cold-formed steel movable slab house [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(1): 207-213. (in Chinese)
- [3] DALLARD P, FITZPATRICK J, FLINTA, et al. The London millennium footbridge [J]. Structural Engineer, 2001, 79(22): 17-33.

- [4] BS 5400, Steel, Concrete and Composite Bridges-Part2: Specification for Loads; Appendix C; Vibration serviceability requirements for foot and cycle track bridges[S]. London: UK British Standards Association, 1978.
- [5] Hivoss HlvOss (Human-induced vibration of steel structures). EN03(2007) design of footbridges guideline[S]. Germany: Research Found for Coal & Steel, 2008.
- [6] 杨勇, 乐小刚, 曾炯坤, 等. 广州海心桥人致振动研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(4): 70-76.
YANG Yong, YUE Xiaogang, ZENG Jiongkun, et al. Study of human-induced vibration of Haixin Bridge in Guangzhou[J]. World Bridges, 2023, 51(4): 70-76. (in Chinese)
- [7] BACHMANN H. Vibration problems in structures: Practical guidelines[M]. Basel, Switz.: Birkäuser Verlag, 1995.
- [8] 刘枫, 秦格, 马明, 等. 人行悬索桥人致振动分析与实测研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 72-82.
LIU Feng, QIN Ge, MA Ming, et al. Analysis and test of human induced vibration of pedestrian suspension bridge[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 72-82. (in Chinese)
- [9] HARTOG J P D. Mechanical vibrations[M]. New York: Dover Publications, 1985.
- [10] 华旭刚, 温青, 陈政清, 等. 大跨度双层曲线斜拉桥人致振动减振优化与实测验证[J]. 振动工程学报, 2016, 29(5): 822-830.
HUA Xugang, WEN Qing, CHEN Zhengqing, et al. Design and experimental validation of structural vibration control of a curved twin-deck cable-stayed bridge subject to pedestrians[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(5): 822-830. (in Chinese)
- [11] 沈文爱, 曾东望, 朱宏平. 基于 MTMD 的大跨度人行悬索桥人致振动控制[J]. 计算力学学报, 2022, 39(2): 178-184.
SHEN Wenai, ZENG Dongyun, ZHU Hongping. Vibration control on of long-span pedestrian suspension bridge based on MTMD system[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022, 39(2): 178-184. (in Chinese)
- [12] 邹卓, 宋旭明, 李璋, 等. 基于 TMD 的自锚式人行悬索桥人致振动控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2574-2582.
ZOU Zhuo, SONG Xuming, LI Zhang, et al. Study of pedestrian-induced vibration of self-anchored suspension footbridge based on TMD[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2574-2582. (in Chinese)
- [13] 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.
CHEN Zhengqing, HUA Xugang. Vibration and dynamic design of footbridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)
- [14] 周健华, 黄友钦, 刘爱荣. 斜拱曲梁桥人致振动舒适度与减振研究[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊 1): 214-220.
ZHOU Jianhua, HUANG Youqin, LIU Airong. Walking comfort analysis and vibration control of bridge with curved beam and inclined arch[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(Sup. 1): 214-220. (in Chinese)
- [15] 张彦玲, 王灿, 张旭, 等. 不同吊杆形式悬索桥人致振动分析及舒适度评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2644-2652.
ZHANG Yanling, WANG Can, ZHANG Xu, et al. Human-induced vibration analysis and pedestrian comfort evaluation for suspension footbridge with different hunger systems[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2644-2652. (in Chinese)
- [16] 颜学渊, 王璇, 曹晨, 等. 复合型阻尼器研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(3): 54-70.
YAN Xueyuan, WANG Xuan, CAO Chen, et al. State of the art of composite damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(3): 54-70. (in Chinese)
- [17] 聂建国, 陈宇, 樊健生. 步行荷载作用下单跨人行桥振动的均方根加速度反应谱法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 109-116, 130.
NIE Jianguo, CHEN Yu, FAN Jiansheng. RMS acceleration response spectrum method for single-span footbridges under pedestrian load[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9): 109-116, 130. (in Chinese)
- [18] 陈舟, 颜全胜, 贾布裕, 等. 行走激励下人行桥振动响应简化计算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(3): 483-489.
CHEN Zhou, YAN Quansheng, JIA Buyu, et al. Simplified calculation on the vibration response of a footbridge under human walking loads[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(3): 483-489. (in Chinese)
- [19] BASSOLI E, GAMBARELLI P, VINCENZI L. Human-induced vibrations of a curved cable-stayed footbridge[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 146: 84-96.
- [20] JGJ/T 441—2019 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
JGJ/T 441—2019 Technical standard for human comfort of the floor vibration[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [21] 刘军进, 肖从真, 潘宠平, 等. 跳跃和行走激励下的楼盖竖向振动反应分析[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 108-110, 73.
LIU Junjin, XIAO Congzhen, PAN Chongping, et al. Investigation on response of floor vibration under jumping and walking excitation[J]. Building Structure, 2008, 38(11): 108-110, 73. (in Chinese)
- [22] 陈隽, 熊杰程. 跳跃荷载的功率谱模型研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9): 56-65.
CHEN Jun, XIONG Jiecheng. Power spectral density model for human jumping load[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(9): 56-65. (in Chinese)