

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240681

钢桁架人行桥舒适度分析与TMD减振设计

王富平^{1,2}

(1. 甘肃省交通科学研究院集团有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 甘肃省桥梁隧道健康监测与安全评估技术重点实验室, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 大跨度人行桥很难满足我国现行规范对人行桥竖向自振频率不小于3 Hz的要求, 为了研究人行桥人致振动及舒适度评价标准, 以某景区一座钢桁架人行景观桥为实例, 利用MIDAS Civil软件建立有限元模型, 对该桥进行动力特性分析。参照德国EN03规范, 在不同行人密度下对桥梁结构进行加速度响应分析和舒适度评价, 并通过优化调谐质量阻尼器TMD(Tuned Mass Damper, TMD)的参数, 分析TMD的安装位置和数量对结构加速度响应的影响, 确定合理的减振方案。结果表明: 随着TMD质量比的增大, 结构竖向加速度峰值减小, 减振比增大, 但减振效果并不是随着质量比的增大呈线性增长, 当质量比大于2%时, 减振效果已趋于平缓; 结合工程实际, 当质量比采用1%、跨中设置2个TMD时, 结构舒适度达到“很舒适”等级, 能有效控制人致振动。研究结果对同类型人行天桥的设计具有一定参考价值。

关键词: 人行桥; 人致振动; 有限元模型; 舒适度评价; 减振设计

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0027-05

Comfort Analysis and TMD Damping Design of Steel Truss Footbridge

WANG Fuping^{1,2}

(1. Gansu Transportation Science Research Institute Group Co., Ltd, Lanzhou 730030, China; 2. Gansu Key Laboratory of Health Monitoring and Safety Assessment Technology of Bridge and Tunnel, Lanzhou 730030, China)

Abstract: Large-span footbridges are difficult to meet the requirements of current norms in China that the vertical natural frequency of footbridges should not be less than 3Hz. In order to study the human-induced vibration and comfort evaluation criteria of footbridges, taking a steel truss pedestrian landscape bridge in a scenic area as a case, a finite element model is established by using MIDAS Civil software for the analysis on the dynamic characteristics of the bridge. According to the German EN03 norm, the acceleration response analysis and comfort evaluation are carried out for the structure under different pedestrian densities. And by optimizing the parameters of tuned mass damper (TMD), the influence of TMD installation position and quantity on the acceleration response of the structure is analyzed, and the reasonable damping scheme is determined. The results show that with the increase of TMD mass ratio, the peak value of vertical acceleration of the structure decreases and the damping ratio increases. However, the damping effect does not increase linearly with the increase of mass ratio. When the mass ratio is greater than 2%, the damping effect has tended to be gentle. Combined with the engineering practice, the comfort of structure reaches a “very comfortable” level when the mass ratio is 1% and two TMD are set in mid-span, which can effectively control the human-induced vibration. The research results can provide some reference values for the design of similar footbridges.

Keywords: footbridge; human-induced vibration; finite element model; comfort evaluation; damping design

0 引言

随着社会经济发展和城镇化建设的加快,越来越多的景区中开始修建人行景观桥,这类桥梁往往具有跨度大、自重轻、自振频率小等特点^[1]。根据我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—

1995)^[2]的规定,人行天桥上部结构的竖向自振频率不应小于3 Hz,遵循避开敏感频率法,但对于竖向基频小于3 Hz的情况没有做出具体要求,显然大跨度人行桥难以满足此类规定的要求^[3-4]。目前,德国、英国和法国的相关规范均采用了限制结构动力响应法^[5],即当基频不满足要求时,可通过限制最大加速度峰值来评价天桥的行人舒适度。Brownjohn等^[6]对某座人行天桥进行了实测,研究了在不同行人荷载激励下桥梁结构的实际振动特性;法永生等^[7]采用

收稿日期: 2024-06-25

作者简介: 王富平(1993—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

考虑人行桥竖向与横向振动耦合的综合评价方法,提出了适用于评估人行桥振动特性的舒适度指标;陈政清等^[8]通过建立人行桥的振动分析理论模型,提出了适用于人行天桥的人致振动理论及动力设计方法;王振宇等^[9]、操礼林等^[10]通过建立随机人群模型,分析了人行桥的振动响应特性。

本文以某景区的一座钢桁架人行桥实际工程为实例,通过建立有限元模型,计算了该桥的动力特性,在不同行人密度下对结构进行加速度响应分析和舒适度评价,并通过TMD参数优化,分析了TMD安装位置和数量对结构加速度响应的影响,对该桥进行了减振设计。研究结果可为同类型人行天桥的设计提供参考依据,具有重要的工程意义。

1 工程概况及动力特性

1.1 工程概况

某景区的人行景观桥采用了下承式简支钢桁架结构,桥梁跨径84 m,桥宽5.5 m,设置有两榀桁架,共14个节间,节间长度6 m,主桁高6 m,主桁中心距为5 m;桥面采用钢桥面板,结构均采用Q355钢材。天桥的桥型立面如图1所示,构件材料特性见表1所列。

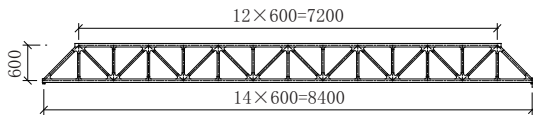


图1 桥型立面图(单位:cm)

表1 构件材料特性

名称	截面形状	截面面积/ (10 ² cm ²)	抗弯惯性矩/ (10 ⁴ cm ⁴)
上弦杆	箱型	4.24	22.68
桥门架	箱型	2.46	8.36
下弦杆	箱型	3.84	19.32
腹杆	工字型	2.34	10.52
下横梁	工字型	2.28	15.48
上横梁	工字型	1.40	4.04
平联	工字型	1.33	2.11

1.2 结构动力特性

利用MIDAS Civil软件建立全桥的有限元模型。主桁杆件及平联采用梁单元,桥面板采用板单元;主梁梁端按简支体系考虑,对一端横向和纵向位移均施加约束,另一端只约束横向位移;阻尼器通过弹簧和线性阻尼器特性模拟;全桥共设84个节点,242个单元。全桥的有限元模型如图2所示。采用Lancaos方法,对结构进行模态分析,得到前6阶振型如图3

所示,动力特性如表2所列。

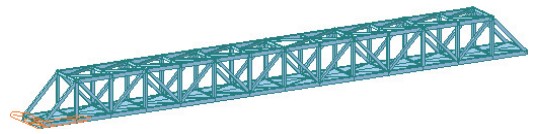


图2 有限元模型

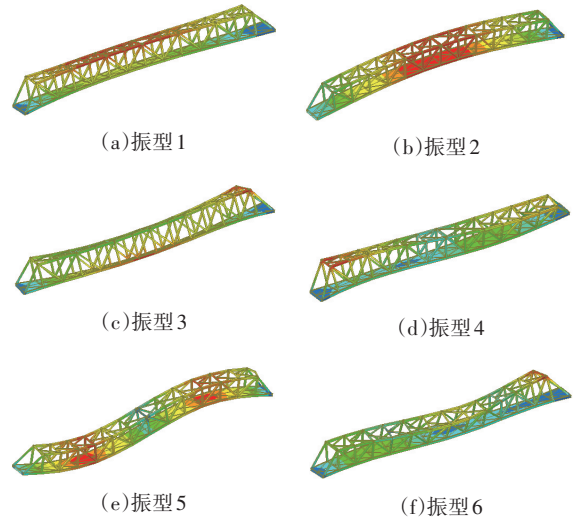


图3 前6阶振型

表2 结构动力特性

模态号	频率/Hz	振型特征
1	2.09	一阶正对称侧弯
2	2.15	一阶正对称竖弯
3	3.76	一阶正对称扭转
4	5.17	二阶反对称侧弯
5	6.87	二阶反对称竖弯
6	9.01	三阶反对称侧弯

我国的《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995)^[2]规定天桥竖向固有频率不得小于3 Hz,但对横向频率没有具体要求;德国规范*Design of Footbridges Guideline*(EN03—2007)^[11]规定,当竖向频率位于1.25~2.3 Hz的范围、横向频率位于0.5~1.2 Hz的范围时,须进行舒适度评价。根据上述动力特性计算结果,结构第一阶竖向自振频率为2.15 Hz,进入了竖向频率敏感范围,而横向频率均未进入横向频率敏感范围,故只需对第一阶竖向自振频率进行舒适度评价,而无须对横向频率进行舒适度评价。

2 人致振动及舒适度分析

2.1 行人荷载定义

当行人在天桥上行走时,其荷载、步频等都是随机的,是一个复杂的过程,为了满足工程设计要求、简化结构计算,往往需等效为一种“确定性模型”。德国EN03规范将人群荷载的竖向作用等效为均布

谐波荷载^[11],如式(1)所示。

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

式中: $p(t)$ 为行人荷载,N; t 为时间,s; P 为步频为 f_s 时单个行人产生的荷载幅值,竖向振动时取280 N,横向振动时取35 N; f_s 为行人步频,Hz,假定与天桥的竖弯自振频率相等; n' 为等效行人密度,人/m²; ψ 为折减系数,在《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》中给出了相关规定,如图4所示。

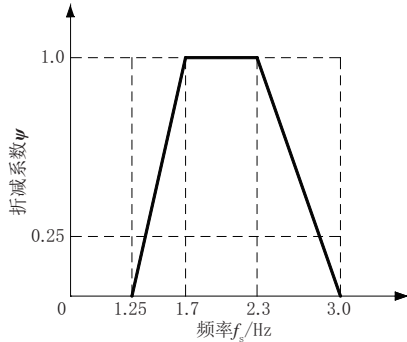


图4 折减系数 ψ

加载面积为 S 时,等效行人密度 n' 取值如式(2)所示。

$$n' = \begin{cases} \frac{10.8\sqrt{n\xi}}{S} & d < 1.0 \text{人/m}^2 \\ \frac{1.85\sqrt{n}}{S} & d \geq 1.0 \text{人/m}^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ξ 为阻尼比; S 为加载面积,m²; n 为加载面积 S 上的行人密度,人/m²; d 为行人密度,人/m²。

参考德国EN03规范,将行人密度划分为5个等级($d=0.03、0.2、0.5、1.0、1.5$ 人/m²)。在不同行人密度等级下,得到的行人荷载模型如表3所列。

表3 行人荷载模型

行人密度 $d/$ (人·m ⁻²)	等效行人密度 $n'/$ (人·m ⁻²)	行人荷载模型
0.03	0.007 2	$p(t) = 2.02\cos(4.18\pi t)$
0.2	0.018 6	$p(t) = 5.22\cos(4.18\pi t)$
0.5	0.029 5	$p(t) = 8.25\cos(4.18\pi t)$
1.0	0.100 9	$p(t) = 28.26\cos(4.18\pi t)$
1.5	0.123 6	$p(t) = 34.61\cos(4.18\pi t)$

2.2 舒适度分析

舒适度是指行人在上桥时会感觉不适的加速度限值,德国EN03规范通过考虑人体承受上限设定,根据不同加速度响应划分出的舒适度等级^[11]如表4所列。

将表3中的不同行人荷载分别施加于有限元模型上,进行加速度时程分析。取1/4跨截面和1/2跨截面作为控制截面,得到第一阶竖向振动模态下1/4

表4 EN03规范舒适度等级

单位:m/s²

舒适级别	舒适度	竖向加速度限值	横向加速度限值
CL1	很舒适	<0.5	<0.1
CL2	中度舒适	0.5~1.0	0.1~0.3
CL3	不舒适	1.0~2.5	0.3~0.8
CL4	不可忍受	>2.5	>0.8

跨截面和1/2跨截面的加速度时程曲线分别如图5和图6所示,加速度峰值如表5所列。

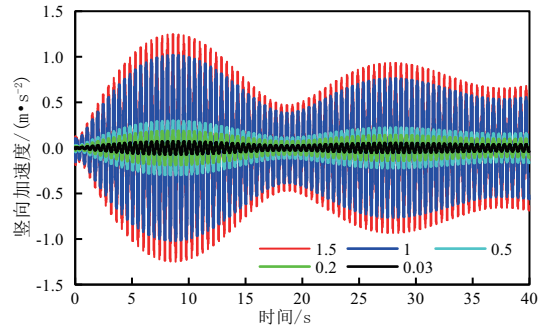


图5 1/4跨截面加速度时程曲线

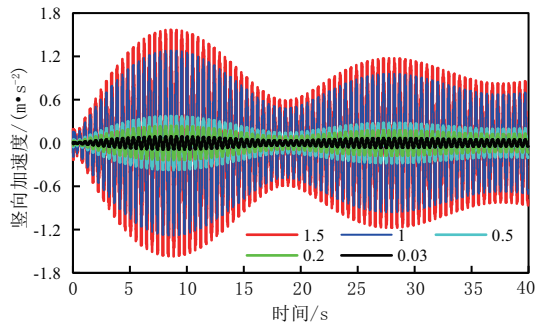


图6 1/2跨截面加速度时程曲线

表5 1/4跨截面和1/2跨截面加速度峰值

位置	行人密度 $d/$ (人·m ⁻²)	加速度峰值/ (m·s ⁻²)	舒适度
1/4跨截面	0.03	0.07	CL1
	0.20	0.19	CL1
	0.50	0.30	CL1
	1.00	1.02	CL3
	1.50	1.25	CL3
1/2跨截面	0.03	0.09	CL1
	0.20	0.24	CL1
	0.50	0.37	CL1
	1.00	1.28	CL3
	1.50	1.57	CL3

由图5和图6可知:随着行人密度的增大,加速度增大;当行人密度一定时,最大加速度发生在自振位移最大处。由表5可知,当行人密度大于1.0人/m²时,1/4跨和1/2跨截面的舒适级别都达到了“不舒适”等级,不满足规范设计要求,因此须对该桥第一阶竖向振动模态进行减振设计。

3 TMD 参数分析及减振设计

3.1 TMD 参数分析

调谐质量阻尼器的工作原理是将阻尼器的自振频率调整至与主结构需要控制的振动频率相接近,当主结构发生振动时,TMD 会随之振动,并产生一个作用于主结构相反的作用力,从而使主结构的振动得以衰减,达到控制主结构振动的目的。可见,选取合理的TMD 参数,对TMD 的减振效果起着至关重要的作用。Den Hartog^[12]以主结构受到简谐荷载激励的稳定状态为目标,提出了针对TMD 参数的优化方法,如式(3)和式(4)所示。

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (3)$$

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

式中: μ 为TMD 与主结构的质量比; f_{opt} 为最优频率比; ζ_{opt} 为最优阻尼比。

根据最优频率比和最优阻尼比,可得到TMD 的最优刚度和最优阻尼系数,如式(5)和式(6)所示。

$$k_{opt} = (f_{opt}\omega_0)^2 m_d \quad (5)$$

$$c_{opt} = 2f_{opt}\zeta_{opt}\omega_0 m_d \quad (6)$$

式中: k_{opt} 为最优刚度,N/m; c_{opt} 为最优阻尼系数,N·s/m; ω_0 为主系统自振频率,Hz; m_d 为TMD 的质量,kg。

根据前述对加速度时程曲线的分析,结构最大加速度发生在1/2跨截面处,故为简化计算,在TMD 最优参数分析时,将单个TMD 设置于1/2跨截面位置,待最优参数确定后,再进行TMD 的数量及位置设计。

假定TMD 质量比 μ ,行人密度 d 取1.5人/m²,得到不同质量比下1/2跨截面的加速度峰值及减振比如图7和图8所示。

由图7、图8可知,随着质量比的增大,加速度峰值减小,减振比增大,但减振效果并不是随着质量比

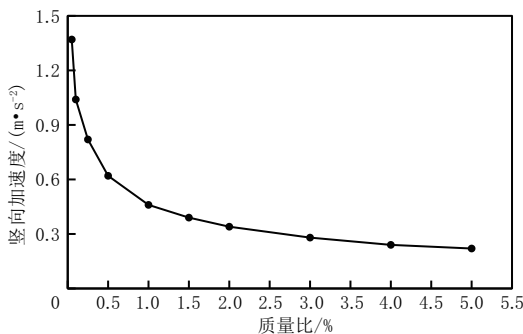


图7 不同质量比下1/2跨截面加速度峰值

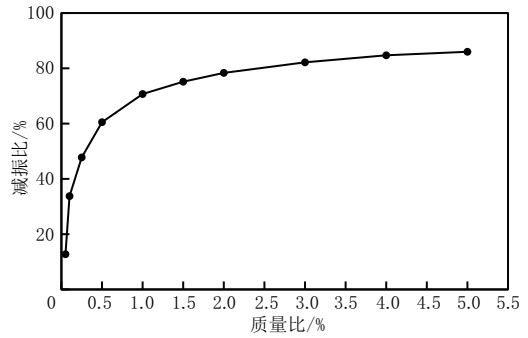


图8 不同质量比下1/2跨截面加速度减振比

的增大呈线性增长,当质量比大于2%时,减振效果已趋于平缓。在实际工程中,若TMD 的质量过大,会增加安装难度和工程造价,也会对结构的承载力不利,所以设计时既要满足人致振动要求,也要兼顾工程实际。当质量比为1%时,1/2跨截面的加速度峰值为0.47 m/s²,减振比达70.1%,此时舒适度等级为“很舒适”,故选用TMD 质量比为1%,此时TMD 的最优参数如表6所列。

表6 TMD 最优参数

质量/kg	频率/Hz	刚度/(N·m ⁻¹)	阻尼系数/(N·s·m ⁻¹)
3 955	2.13	667 886	6 201

3.2 减振设计

为分析TMD 的安装位置和数量对结构竖向加速度响应的影响,行人密度 d 取1.5人/m²,采用表6中的TMD 参数,共设置4种方案,计算各方案下1/2跨截面的加速度峰值和减振比,如表7所列。由表7可知,当采用方案2,即在跨中设置2个TMD 时,加速度峰值为0.32 m/s²,减振比达79.6%,舒适度等级为“很舒适”;当采用方案3和方案4时,加速度峰值分别为2.17、1.82 m/s²,比未设置TMD 时加速度峰值更大,对结构的舒适度反而更不利。故在实际工程中,应根据结构的振型形状,将阻尼器设置在振型位移最大处,才能达到减振的预期效果。

表7 TMD 设置方案

方案	安装方案	加速度峰值/(m·s ⁻²)	减振比/%
1	跨中截面1个	0.47	70.1
2	跨中截面2个	0.32	79.6
3	1/8跨截面和7/8跨截面各1个	2.17	-38.2
4	1/4跨截面和3/4跨截面各1个	1.82	-15.9

在本次减振设计中,拟在1/2跨截面设置2个TMD (TMD 具体参数见表6),结果显示在不同行人密度下,设置TMD 前后的1/4跨截面和1/2跨截面处的加速度峰值如表8所列,加速度时程曲线如图9和

图10所示(限于篇幅,仅给出行人密度 $d=1.5$ 人/ m^2 下的时程曲线)。

表8 设置TMD前后1/4跨截面和1/2跨截面加速度峰值

位置	行人密度 d (人· m^{-2})	加速度峰值/($m \cdot s^{-2}$)		舒适度
		设置TMD前	设置TMD后	
1/4跨截面	0.03	0.07	0.01	CL1
	0.20	0.19	0.04	CL1
	0.50	0.30	0.06	CL1
	1.00	1.02	0.21	CL1
	1.50	1.25	0.25	CL1
1/2跨截面	0.03	0.09	0.02	CL1
	0.20	0.24	0.05	CL1
	0.50	0.37	0.08	CL1
	1.00	1.28	0.26	CL1
	1.50	1.57	0.32	CL1

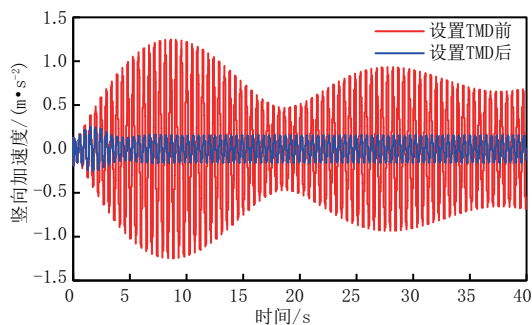


图9 设置TMD前后1/4跨截面加速度时程曲线($d=1.5$ 人/ m^2)

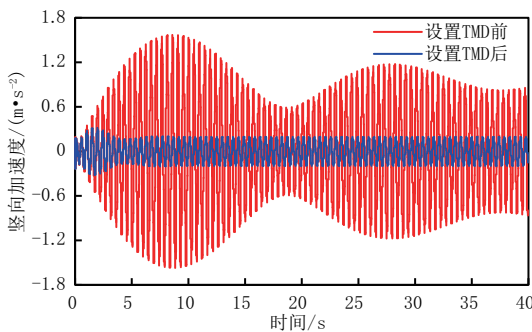


图10 设置TMD前后1/2跨截面加速度时程曲线($d=1.5$ 人/ m^2)

通过对比设置TMD前后的加速度结果可知,当设置TMD后,结构舒适度在不同行人密度下均达到“很舒适”等级,可见设置TMD对改善人行桥的人致振动具有很好的效果。

4 结语

以某景区一座钢桁架人行景观桥为背景,利用MIDAS Civil软件建立了有限元模型,计算了该桥的结构自振特性,得到主要结论如下。

(1)景区人行桥的竖向自振频率无法满足我国现行规范要求,故参考德国EN03规范,通过在不同行人密度下对结构进行加速度响应分析和舒适度评价可知,当行人密度大于1.0人/ m^2 时,1/4跨和1/2跨截面的舒适级别都达到了“不舒适”等级,需进行减振设计。

(2)对TMD阻尼器进行参数优化得到:随着质量比的增大,结构竖向加速度峰值减小,减振比增大,但减振效果并不是随着质量比的增大呈线性增长;当质量比大于2%时,减振效果已趋于平缓。最终结合工程实际,确定了满足工程需要的TMD最优参数。

(3)采用TMD进行减振设计,分析TMD安装位置和数量对结构竖向加速度响应的影响,最终确定了TMD设置方案。根据最终的TMD设置方案,对比分析不同行人密度下设置TMD前后的结构加速度响应,舒适度均达到了“很舒适”级别,说明设置TMD能有效控制人行桥上的人致振动。

参考文献:

- [1] 田颖,董玉将,张浩. 钢结构人行桥的人致振动舒适度分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 610-615.
- [2] CJJ 69—1995, 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [3] 李晓玮,何斌,施卫星. TMD减振系统在人行桥结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊1): 245-250.
- [4] Zhang S, Xu L, Qin J. Vibration of Lightweight Steel Floor Systems with Occupants: Modelling, Formulation and Dynamic Properties[J]. Engineering Structures, 2017(147): 652-665.
- [5] 谢旭,钟婧如,张鹤,等. 人-桥竖向耦合振动计算方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 108-114.
- [6] Brownjohn J M W, Pavic A, Omenzetter P. A Spectral Density Approach for Modeling Continuous Vertical Forces on Pedestrian Structures due to Walking[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(1): 65-77.
- [7] 法永生,李东,孙翠华. 人行桥随机人行荷载下的振动分析及其舒适度评价的新方法[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 119-123.
- [8] 陈政清,刘光栋. 人行桥的人致振动理论与动力设计[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊2): 148-159.
- [9] 王振宇,陈得意,杜磊,等. 基于随机行走模型的人致人行桥振动响应分析[J]. 科学与技术工程, 2021, 21(31): 13536-13544.
- [10] 操礼林,曹栋,于国军,等. 考虑行人同步率的随机行走人群模型[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 495-501.
- [11] EN03—2007, Design of Footbridges Guideline[S].
- [12] Den Hartog J.P. Mechanical Vibrations[M]. New York: McGraw-Hill, 1956.