

景观人行桥舒适性分析与振动控制设计

安丽勇, 张 凯, 韩 冰

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 人行桥的舒适性不仅关系到行人的过桥体验,还直接影响到桥梁的使用安全性和功能性,随着城市发展,对大跨度、轻柔景观人行桥的舒适性要求日益增长,基于实际工程案例,通过动力分析和TMD参数优化设计,确定了合理的TMD参数,提高了陵河景观人行桥的舒适性,验证了振动控制设计的有效性。涉及的分析与设计方法对于进行类似桥梁的舒适性提升和振动控制计算具有参考价值。

关键词: 舒适性分析;振动控制;阻尼器

中图分类号: U448.11;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0228-06

Comfort Analysis and Vibration Control Design of Landscape Pedestrian Bridge

AN Liyong, ZHANG Kai, HAN Bing

(CCCC-FHDI ENGINEERING CO., LTD., Guangzhou 510010, China)

Abstract: The comfort of pedestrian bridges is not only related to the crossing experience of pedestrians, but also directly affects the safety and functionality of bridge use. With the development of cities, the comfort requirements for long-span and gentle landscape pedestrian bridges are increasing. Based on actual engineering cases, the reasonable TMD parameters are determined through dynamic analysis and TMD parameter optimization design. The comfort of Linghe River Landscape Pedestrian Bridge is improved, and the effectiveness of vibration control design is verified. The involved analysis and design methods have reference value for the comfort improvement and vibration control calculation of similar bridges.

Keywords: comfort analysis; vibration control; damper

1 人行桥舒适性分析的重要性

随着国内城市建设的高质量发展,人行桥梁的品质化、高端化的特征日益明显,桥梁的景观属性占比越来越重,成为提升城市形象和居民生活质量的重要载体。相对于传统的人行桥,以景观造型为主的人行桥对造型的个性化、艺术化要求更高,结构造型呈现出复杂、大跨、轻柔的特点。为了实现造型上的独特要求,景观人行桥需要通过轻量化结构减少对周边环境的影响,从而更好的融入城市景观。

轻量化的结构普遍存在刚度偏低、阻尼较小的问题,结构自振频率容易与行人步频产生共振,引发人致振动舒适性问题,甚至威胁桥梁使用安全^[8]。

因此,景观人行桥人致振动特性分析与舒适性控制成为桥梁工程领域的研究热点。国内外学者围

绕这一核心问题开展了大量系统性研究,形成了丰富的理论成果与工程技术方案。

在减振技术创新方面,国外率先开展了调谐质量阻尼器(TMD)等被动减振装置的研发与应用研究。从早期单一调谐频率的TMD(STMD)参数优化,逐步发展到多频调谐质量阻尼器(MTMD)的鲁棒性设计,能更好地应对工程中的调频偏差问题^[15]。

国内研究以TMD等被动减振技术为核心,重点解决工程实践中的经济性与适用性问题。针对国内工程普遍存在的成本控制需求,学者们开展了TMD质量比的优化研究,明确了低质量比下TMD减振频带较窄的缺陷,提出通过合理提升质量比扩大调频偏差允许范围的优化建议,在保证减振效果的同时控制工程造价^[15]。

本文以实际工程为背景,在造价控制严格的情况下,结合实际不同使用环境下的人群密度,开展了不同质量比对减振效果的影响,在景观人行桥设计阶段即开展人致振动预判,同步优化结构形式与减

收稿日期: 2025-11-16

作者简介: 安丽勇(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

振方案,实现了景观效果与舒适性的协同优化。

2 依托案例景观人行桥概况

依托案例的景观人行桥位于海南陵水县,跨凌水河,本桥位是联系当地山、水、街、城四大节点的重要纽带。方案设计融入了当地的历史、人文和地理元素,设计主题为一“海丝驿”,以平面曲线和立面造型体现陵水在一路一带历史上的重要地位。桥位处规划航道等级为Ⅳ级,采用单孔单向通航的形式,单孔通航净宽为45 m,净高不小于8.0 m。

本景观人行桥总体平面呈S形布置,南北两端落地位置为方便使用在桥梁东西两侧分别设置坡道。其中主线全长约405.6 m,桥梁段长度为364.8 m,两端引道坡道长度为40.8 m。为满足造型和航道要求,桥梁主跨采用35+2×55+35 m的钢箱梁结构。受造型和投资规模的控制,桥梁结构尽量轻盈,结构高度尽量低,由于主桥跨度大,结构高度小,竖向刚度相对较小,需要进行人行舒适性控制设计。景观人行桥效果见图1。



图1 景观人行桥效果图

3 景观人行桥动力特性计算

3.1 空间有限元模型

本桥采用MIDAS Civil建立空间有限元模型进行动力特性和行人舒适度分析(见图2),采用Lanczos法进行特征值计算。模型中主梁、桥墩和基础等均采用空间梁单元模拟,装饰结构作为主梁荷载考虑;桩基础利用土弹簧单元模拟周围土抗力的影响;支座连接采用弹性连接和主从节点来模拟;相邻跨结构的影响通过节点荷载和弹性支撑来考虑。全桥共计350个节点,梁单元308个。

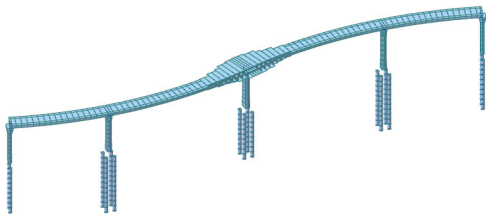


图2 主桥空间有限元模型

3.2 动力特性计算

根据结构基频公式^[5]: $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$,式中: f 为基频,Hz; k 为刚度,kN/m; m 为质量,kg。

结构的基频与结构质量的平方根成反比,结构质量越大,基频越小。因此,在分析桥梁动力特性时也考虑行人质量的影响,作为对比分析,根据文献^[2],行人质量按照1.5人/m²的标准考虑,单人重量为700 N。

经计算,主桥结构基频详见表1,竖向基频最小的前2个振型详见图3~图6。

表1 桥梁基频计算汇总表

振型阶数	不计行人质量		计入行人质量		振型特征
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	
1	0.542	1.844	0.526	1.900	左边第1个墩和中墩顺桥向振动
2	0.549	1.822	0.547	1.828	左边第1个墩顺桥向振动
3	0.600	1.666	0.599	1.670	右边第1个墩顺桥向振动
4	0.944	1.059	0.927	1.079	右边第1个墩横桥向振动
5	1.002	0.998	0.984	1.016	左边第1个墩横桥向振动
6	1.195	0.837	1.163	0.860	主梁一阶对称平弯
7	1.413	0.708	1.373	0.728	主梁二阶反对称平弯
8	1.801	0.555	1.671	0.599	主梁一阶反对称竖弯
9	2.231	0.448	2.187	0.457	主梁三阶对称平弯
10	2.368	0.422	2.368	0.422	右边第2个墩顺桥向振动
11	2.707	0.369	2.523	0.396	主梁二阶对称竖弯
12	2.854	0.350	2.854	0.350	左边第2个墩顺桥向振动
13	3.403	0.294	3.237	0.309	主梁三阶反对称竖弯
14	3.843	0.260	3.609	0.277	主梁四阶对称竖弯
15	3.939	0.254	3.742	0.267	主梁四阶反对称平弯

由以上分析可知,主桥前5阶均为下部结构的振型,从第6阶开始才出现主桥上部结构的振型。不考虑行人质量时,主桥第一阶横向基频为1.195 Hz;考虑行人质量时主桥第一阶横向基频为1.163 Hz,差异为2.6%,影响不是很明显,均略小与1.2 Hz。不考虑行人质量时,主桥竖向第一阶基频为1.801 Hz,第二阶基频为2.707 Hz;考虑行人质量时,主桥竖向第一阶基频为1.671 Hz,第二阶基频为2.523 Hz,差异分别为7.2%,6.8%,均小于3 Hz。

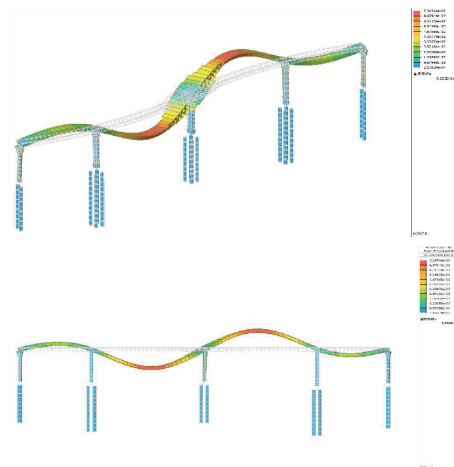


图3 不考虑行人质量桥梁第八阶振型

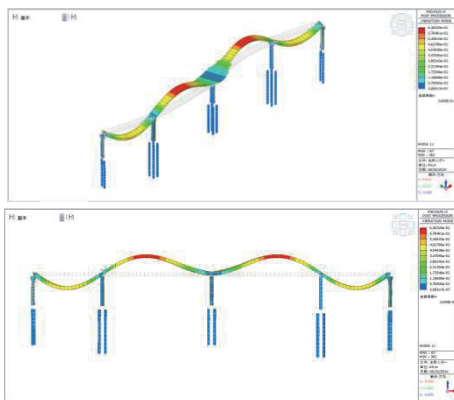


图4 不考虑行人质量桥梁第十一阶振型

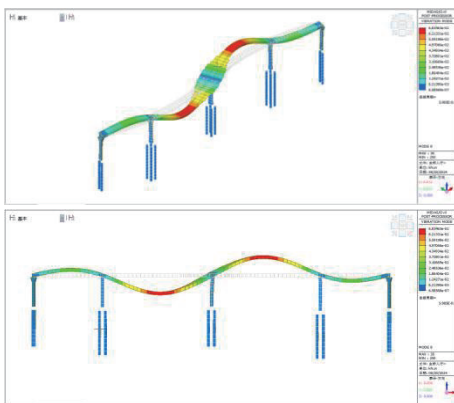


图5 考虑行人质量桥梁第八阶振型

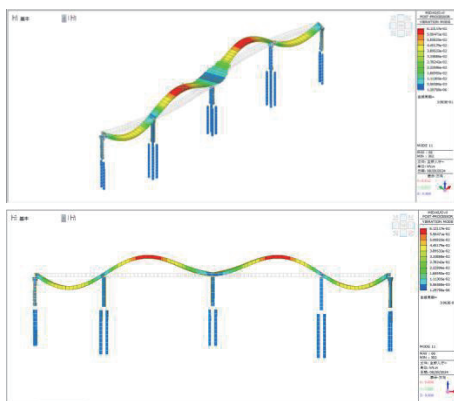


图6 考虑行人质量桥梁第十一阶振型

结合结构动力分析,考虑行人质量的频率略小于不考虑行人质量的频率,差异在8%以内,与桥梁基频公式一致。本项目在上述两种情况下主桥第6阶横向基频位于0.5~1.2 Hz,主桥第8阶和第11阶竖向频率均位于1.25~3.0 Hz区间,根据《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》的要求,侧向和竖向基频不满足要求,可能会引起人行桥的人致振动,因此需要对上述3个振型进行针对性的人行舒适性分析。

4 景观人行桥舒适性分析

4.1 主桥侧向舒适性分析

结合步行谐波荷载公式^[4],本桥横向舒适性分析取考虑行人质量的主桥第6阶振型进行分析。

侧向谐波荷载^[4]为 $p_h(t) = 35\cos(2\pi f_s t) \times \Psi \times \frac{n'}{S}$

行人密度 $d < 1.0$ 人/ m^2 时, $ph(t)=0.165\cos(7.3073t)$ 。

该谐波荷载作用下侧向加速度最大位置处节点的加速度时程曲线见图7。

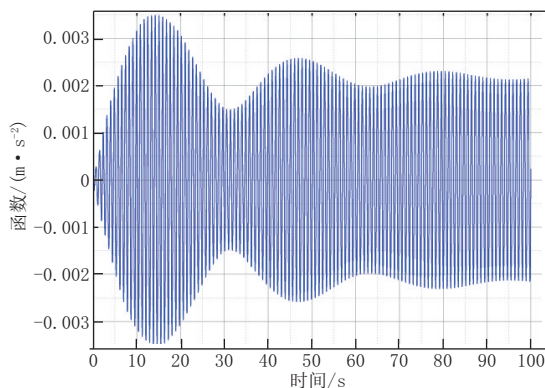


图7 侧向加速度时程曲线($d < 1.0$ 人/ m^2)

行人密度 $d \geq 1.0$ 人/ m^2 时, $ph(t)=0.491\cos(7.3073t)$ 。

该谐波荷载作用下侧向加速度最大位置处节点的加速度时程曲线见图8。

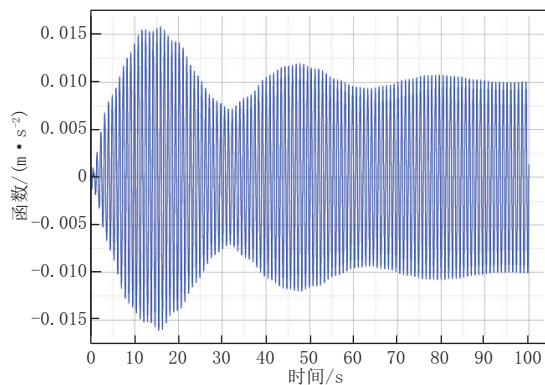


图8 侧向加速度时程曲线($d \geq 1.0$ 人/ m^2)

最大行人密度下,主桥侧向最大加速度为0.015 8 m/s^2 ,舒适等级达到CL1级^[4],满足要求。

4.2 主桥竖向舒适性分析

结合步行谐波荷载公式,本桥竖向舒适性分析取不考虑行人质量的主桥第8阶和考虑行人质量

的第11阶振型进行分析。
竖向谐波荷载^[4]为 $p_v(t) = 280\cos(2\pi f_s t) \times \Psi \times \frac{n'}{S}$
行人密度 $d < 1.0 \text{ 人/m}^2$ 时, $ph(t) = 7.150\cos(11.316 t)$ 。
该谐波荷载作用下,第8阶竖向振型对应的最不

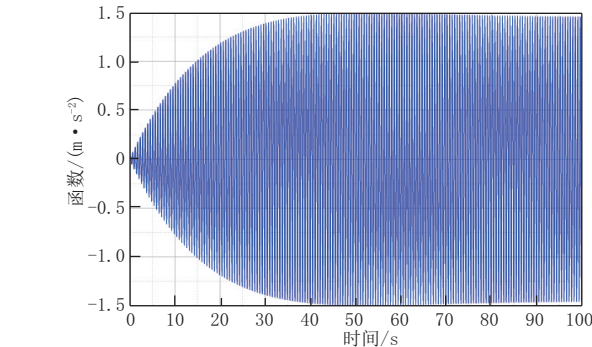


图9 最不利位置竖向加速度时程曲线(第八阶振型 $d < 1.0 \text{ 人/m}^2$)

利位置处节点的加速度时程曲线见图9。
该谐波荷载作用下,第11阶竖向振型对应的最不

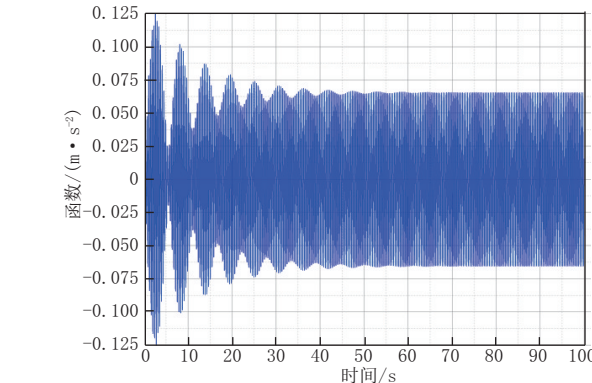


图10 最不利位置竖向加速度时程曲线
(第十一阶振型 $d < 1.0 \text{ 人/m}^2$)

利位置处节点的加速度时程曲线见图10。
行人密度 $d \geq 1.0 \text{ 人/m}^2$ 时, $ph(t) = 21.212\cos(11.316 t)$ 。
该谐波荷载作用下,第8阶竖向振型对应的最不

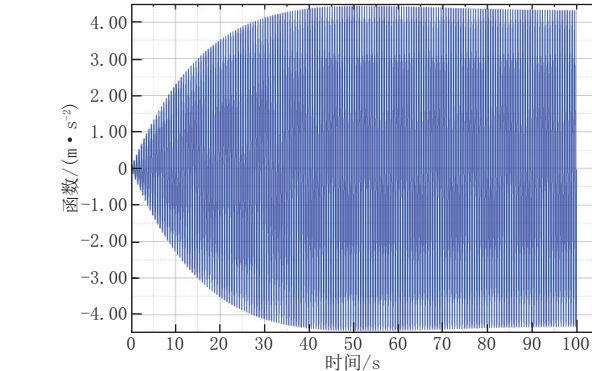


图11 最不利位置竖向加速度时程曲线(第八阶振型 $d > 1.0 \text{ 人/m}^2$)

利位置处节点的加速度时程曲线见图11。
该谐波荷载作用下,第11阶竖向振型对应的最不

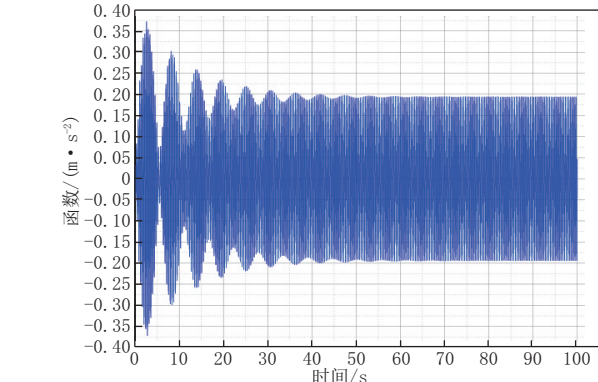


图12 最不利位置竖向加速度时程曲线
(第十一阶振型 $d > 1.0 \text{ 人/m}^2$)

最大行人密度下,主桥第8阶振型下竖向最大加
速度为 4.442 m/s^2 ,舒适等级达到CL3级^[4],不满足要
求;主桥第11阶振型下竖向最大加速度为 0.372 m/s^2 ,
舒适等级达到CL1级,满足要求。

4.3 主桥舒适性分析的结论

主桥横向基频略小于 1.2 Hz ,结合舒适性分析,
结构侧向不利位置最大横向加速度为 0.015 m/s^2 ,
达到《城市人行天桥和人行地道技术规范(征求意见

稿)》要求的CL1级舒适度,舒适度为最佳,满足规范
要求,不需要进行振动控制。
主桥第8阶振型(第一阶竖向振型)在不考虑
行人质量时,主跨最不利位置竖向加速度最大为

4.442 m/s^2 ,舒适等级达到CL3级,不满足要求,需要
进行振动控制设计。
主桥第11阶振型(第二阶竖向振型)的频率接近
 3 Hz ,考虑行人质量时主跨最不利位置的竖向加

速度最大值为 0.372 m/s^2 ,达到《城市人行天桥和人行
地道技术规范(征求意见稿)》要求的CL1级舒适度,
舒适度为最佳,满足规范要求。

因此只需针对主桥第8阶振型进行振动控制设
计即可。

4.4 振动控制设计及TMD参数优化

4.4.1 人行桥振动控制方法

人行桥振动的控制有三种方式:控制上桥人数、
提高结构刚度和增加结构阻尼^[2]。

经过试算,通过控制上桥人群密度为 0.2 人/m^2
时,主桥主跨最不利位置竖向加速度最大为 0.67 m/s^2 ,
舒适等级达到CL2级,达到规范规定的合格要求。
此时,桥上人流很稀少,需要在桥梁两端严格控制上
桥人数。结合中国的实际国情,考虑人行桥的属性,

如此严格地控制上桥人数是不合适的,特别是在节假日、休闲时间,景观桥往往会吸引更多的人前往,如果控制人数,会引起不好的社会舆论。图 13 为主梁最大竖向加速度包络图。

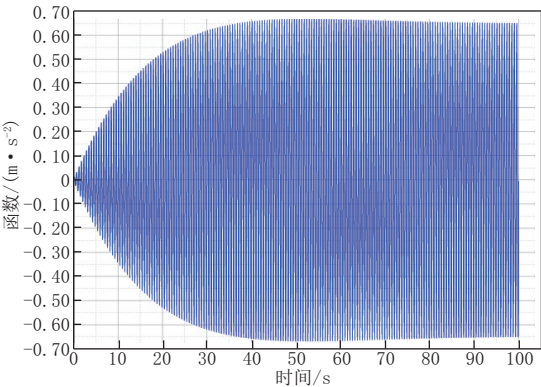


图 13 主梁最大竖向加速度包络图 ($d\leq0.2$ 人/ m^2)

结合文献^[1]的分析,提高结构刚度往往是一种很不经济的做法,特别是结构跨度增大的情况下,为满足基频,提高刚度势必带来自重的增加,引起造价的成倍增加。通过试算,本项目若通过提高结构自身刚度实现基频满足规范要求,结构刚度需要提高 2 倍,梁高由现有的 1.6 m 增加至 3.0 m,用钢量增加约 120 t (增加约 20%),整个桥梁的经济性和景观性就降低很多。

增加结构阻尼是目前减振领域应用最普遍的方法,常用的阻尼器有调谐质量阻尼器(TMD)、调谐液体阻尼器(TLD)和单独使用黏滞阻尼器等。其中,TMD 以其原理简单、减振效果好、造价低得到了广泛的使用。

4.4.2 TMD 参数及舒适性分析结果

调谐质量阻尼器系统是工程结构中常用的消能减振装置,它由固体质量、弹簧和阻尼器/阻尼材料组成。调谐质量阻尼器系统有它自身的振动频率和阻尼,通过改变质量或刚度调整阻尼器子系统的自振频率使其接近主结构的基本频率,当主结构受振动时,子结构就会产生一个与结构振动方向相反的惯性力作用在结构上,使主结构的振动反应衰减。子结构在减振控制过程中通过自身质量块的运动来减少主结构的振动。

不同的 TMD 质量与控制模态广义质量比的减振效果不同,质量越高,减振效果越好,但造价和对原结构的影响越大。本次选择不同的质量比 1%、2% 和 3% 分别进行试算^[2],以便确定最优的 TMD 参数,具体计算结果见表 2。

由上述计算可知,通过对比减振效果、工程造价以及 TMD 安装对原结构的影响等角度分析,TMD 质

表 2 不同质量比的 TMD 对应减振效果计算结果

项目	无 TMD	TMD 质量与控制模态广义质量比			
		0.50%	1%	2%	3%
最大加速度	4.442 0	0.544 8	0.393 9	0.281 2	0.226 8
减振率		87.7%	91.1%	93.7%	94.9%
造价/万元		7.4910	14.98	29.96	44.95

量比取 0.5% 时,结构最大加速度大于规范 CL3 级对应的要求,结构舒适度不满足要求;TMD 质量比大于 1% 时,结构最大加速度都能够规范对舒适度的要求;经对比,质量比为 1% 时其经济性最优越,因此取质量比 1% 来确定 TMD,其具体的各项参数如下:

TMD 质量为 2 273.4 kg, TMD 刚度 $k_{opt} = \lambda_{opt}^2 \omega_0^2 m_d = 285\,357.4\text{ N/m}$, TMD 阻尼系数为 $c_{opt} = 2\zeta_{d,opt} \omega_{opt} m_d = 3\,073.1\text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。

TMD 设置在主跨跨中,对结构进行舒适性分析,主跨跨中第 8 阶和第 11 阶振型下最大竖向加速度分为 $0.393\,9\text{ m/s}^2$ 和 $0.337\,9\text{ m/s}^2$,均达到 CL1 级,舒适性最佳,满足规范要求。

图 14 为主梁最大竖向加速度包络图(第 8 阶)。图 15 为主梁最大竖向加速度包络图(第 11 阶)。

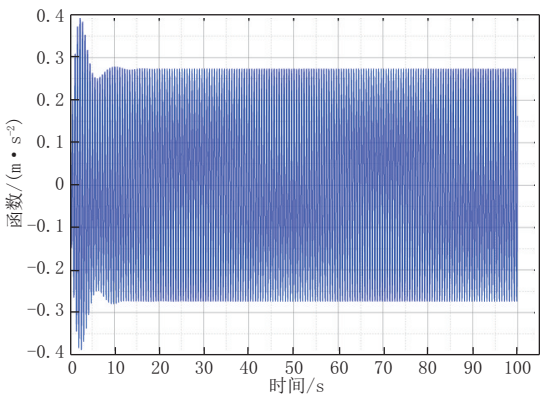


图 14 主梁最大竖向加速度包络图 (第 8 阶)

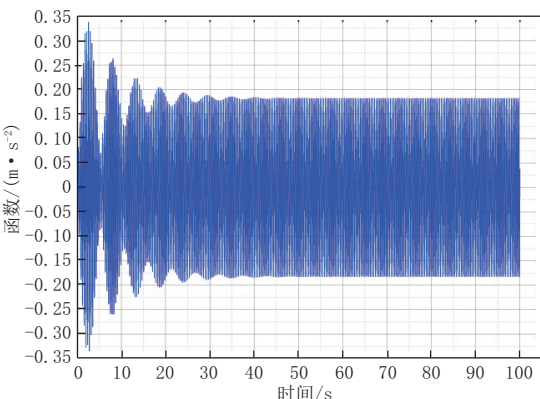


图 15 主梁最大竖向加速度包络图 (第 11 阶)

5 结 语

根据本文的计算分析,景观人行桥基频接近规

范限制值时,虽然不满足规范,但折减系数 Ψ 接近0,结构舒适性也能够满足要求,无需额外增加减振措施,有效的控制了项目的成本。

针对第8阶竖向振型,在最大行人密度下人致振动产生的最大竖向加速度为 4.442 m/s^2 ,超过了人行舒适度可接受的范围。设计过程中,通过对比分析控制上桥人数、提高结构刚度、增设调谐质量阻尼器(TMD)三种减振方案的经济性与适用性,通过综合研判后选用TMD被动减振方案,并通过多组参数试算确定最优参数,最终选取质量比1%的TMD方案,使主桥竖向最大加速度降至 0.393 9 m/s^2 ,达到CL1级最佳舒适度标准;且TMD重量仅2.3 t,对项目的造价几乎没什么影响,实现了减振效能与成本控制的最优匹配。

本桥通过结构动力特性计算,通过系统的TMD参数优化及多减振方案的经济性对比,在保障桥梁轻盈景观造型、满足最佳舒适性要求的前提下,将减振系统造价控制在合理区间,成功实现了“轻盈结构形式—优异减振效果—合理成本管控”的三维协同优化目标。研究成果不仅精准契合本项目严格的造价控制要求,也为后续大跨、轻柔景观人行桥在振动控制设计中,科学统筹结构性能、景观效果与成本投入提供了可直接借鉴的工程经验与技术路径。

本文的TMD减振效果分析是基于理想环境条件,未计入风荷载作用及减振装置长期使用后的性能衰减对控制效果的影响,实际工程应用中需进一步开展长期监测与性能评估。

参考文献:

[1] 沈晔,葛春辉.人行桥自振频率的分析与计算[J].特种结构,2004,

21(1):53-55.

[2] 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.

[3] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].

[4] CJJ 69—20XX 城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)[S].

[5] 陈政清,樊伟,李寿英,等.结构动力学[M].北京:人民交通出版社,2021.

[6] JGJ/T 441—2019 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S].

[7] 朱前坤,李宏男,杜永峰,等.不同新购步速下人行桥振动舒适度定量化评估[J].工程力学,2016,33(10):97-104.

[8] 魏建东,刘忠玉,阮含婷.与人群有关的桥梁垮塌事故[J].中外公路,2005,25(6):78-82.

[9] 袁旭斌.人行桥人致振动特性研究[D].上海:同济大学,2006.

[10] 李红利,陈振清.人-桥竖向动力相互作用效应理论与试验研究[J].土木工程学报,2014(6):78-87.

[11] 陈振清,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):148-159.

[12] 张景,王俊峰,夏桂云.人群激励下钢桁架人行桥动力分析[J].公路与汽运,2019(2):106-109.

[13] 李慧乐,夏禾.基于车桥耦合随机振动分析的钢桥疲劳可靠度评估[J].工程力学,2017,34(2):69-77.

[14] 郑凯锋.独特的伦敦千年桥及其加固方案和全桥结构仿真分析研究[J].国外桥梁,2001(1):1-5.

[15] 盖盼盼,戴军,徐赵东,等.一种大跨桥梁涡激振动TMD减振效果评估方法[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(5):1923-1932.

[16] Pablo Reboredo Gasalla. Human-Induced Vibration on Lightweight Footbridges[C]//Annual Conference of The Australian Acoustical Society% Annual Conference of the Australian Acoustical Society, 2024.

[17] Zhaolan Wei, Mengting Lv, Siyin Wu, et al. Lateral Vibration Control of Long-Span Small-Radius Curved Steel Box Girder Pedestrian Bridge with Distributed Multiple Tuned Mass Dampers[J]. Sensors, 2022, 22: 4329.

(上接第150页)

[11] 刘谦,向岩.山区中小型高铁车站站前广场总体布局的设计与探讨[J].建筑技术开发,2022,49(17):21-24.

[12] 袁野.中小型高铁站站前广场紧凑式布局与交通组织探讨[J].上海建设科技,2021(4):29-33.

[13] 宋凯丽,赵可昕.东直门轨道交通枢纽综合体站前广场复合化设计研究[J].建筑技艺,2016(12):108-110.

[14] 应君,张一奇.高铁客站站前广场景观设计初探:以沪杭高铁海宁西站设计为例[J].山东林业科技,2013,43(6):81-83;71.

[15] 戴复东.现代骨、传统魂、自然衣:建筑与室内创作探索小记[J].室内设计与装修,1998(6):36-40.

[16] 戴复东.现代骨、传统魂、自然衣的探索:河北省遵化市国际饭店建筑创作漫记[J].建筑学报,1998(8):36-39.