

大跨异形钢人行景观桥舒适度分析及控制

赵佳骏

(中国铁建大桥工程局集团有限公司设计研究院, 浙江 杭州 311200)

摘要: 随着城市建设的不断深入和民众生活质量的稳步提升,大跨异形钢人行景观桥在城市景观塑造中的作用逐渐彰显。为满足人行桥的景观特性,此类桥大多采用大跨度钢结构并且结构较为轻薄,由此导致结构基频较低,易引发人与桥梁之间的共振,人行舒适度问题也引起了更多关注。通过对一大跨钢人行景观桥动力特性分析,运用理论计算与有限元模拟等方法,对桥梁的舒适度进行深入研究,并提出相应的控制措施,旨在为同类桥梁的设计与建设提供参考依据,确保行人在桥上行走时具有良好的体验。

关键词: 钢结构人行桥;大跨;变截面钢箱梁;人致振动;舒适度;调频质量阻尼器

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0169-05

Analysis and Control of Comfort of Long-span Special-shaped Steel Landscape Footbridge

ZHAO Jiajun

(Design Institute of China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: With the continuous advancement of urban development and the steady improvement of the life quality of the people, the long-span special-shaped steel landscape footbridges are gradually playing a more prominent role in urban landscape shaping. To satisfy the landscape characteristics of footbridges, the most of the bridges are the long-span steel structures, and the structures are relatively thin and light. As a result, the fundamental frequency of the structure is lower, which easily triggers the resonance between human and the bridge. Therefore, the issue of pedestrian comfort has also attracted more attention. Through the analysis on the dynamic characteristics of a long-span steel landscape footbridge, the methods of theoretical calculations and finite element simulation are used to further study the comfort of the bridge, and the corresponding control measures are proposed in order to provide the reference basis for the design and construction of the similar bridges, and to ensure the pedestrians with the good experience on the bridges.

Keywords: steel structural footbridge; long-span; variable cross-section steel box girder; human-induced vibration; comfort; TMD

0 引言

随着城市化进程的加速,景观人行桥作为连接城市空间、缓解交通压力的重要基础设施,其设计与建设备受关注^[1]。近年来,钢结构人行桥因其轻量化、造型美观的特点广泛应用于城市中,但其低刚度和低阻尼特性,使得结构固有频率接近行人步频,容易引发人桥共振现象^[2-3]。这种现象不仅影响行人舒适性,还可能带来安全隐患^[4]。

现有规范如《德国人行桥设计指南》(EN03—2007)^[5]、《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)^[6]及《城镇人行天桥设计标准》(DB33/T 1245—

2021)^[7]均对人行桥的振动性能提出了明确要求。这些规范主要通过避免结构敏感频率的方法提升舒适性,但在复杂荷载条件和新型结构形式下存在一定局限性^[8-9]。同时,近年来国内外学者通过有限元建模和调谐质量阻尼器(TMD)等技术手段,对桥梁的动力特性分析与振动控制开展了深入研究。例如,伦敦千禧桥在开通初期因横向共振问题引发的行人不适和安全隐患,通过改造增加阻尼装置后显著提升了桥梁的舒适性,日本戴田公园T桥的振动控制措施也提供了宝贵的实际经验^[10]。

本文以绍兴市镜湖新区潞家湾水秀桥为研究对象,针对其异形钢结构形式及人群荷载特点,系统开展舒适度分析与控制研究。通过优化TMD装置设计,验证减振措施的有效性,以期今后类似项目提供理论依据和工程参考。

收稿日期: 2025-01-13

作者简介: 赵佳骏(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

1 舒适度分析方法及控制措施

1.1 舒适度分析方法

1.1.1 分析指标及评价标准

根据国内外研究,当人行桥固有频率落在敏感频率范围时需要进行动力响应分析即舒适性分析,其对于竖向舒适度需验算频率范围为1.25~3.00 Hz,对于横向舒适度需验算频率范围为0.5~1.2 Hz^[7]。而行人步频一般在1.6~2.4 Hz之间,落在需验算频率之间易产生共振^[11]。

舒适度评价主要通过分析结构振动对行人舒适性的影响来进行评估^[12]。行人对振动的感知主要受振动加速度、频率和振幅的影响,其中振动加速度是衡量舒适度的关键参数之一^[13]。研究表明,当桥梁振动加速度超过一定阈值时,行人会感到不适甚至恐慌^[14]。

因此,国内外规范中的对加速度指定了相应的限值,用于评估桥梁在不同荷载工况下的振动表现^[5-6]。以《城镇人行天桥设计标准》^[7]为例,行人舒适度评价标准可按表1选取,规范中要求舒适度等级不应低于CL3级别,宜达到CL1级别。

表1 舒适度评价标准

舒适度等级	舒适度评价	竖向峰值加速度限值/(m·s ⁻²)	侧向峰值加速度限值/(m·s ⁻²)
CL1	最佳	[0,0.25·f ^{0.78}]	[0,0.1)
CL2	合格	[0.25·f ^{0.78} ,min(0.5·f ^{0.5} ,0.7))	[0.1,0.15·f ^{0.5})
CL3	不合格	[min(0.5·f ^{0.5} ,0.7),∞)	[0.15·f ^{0.5} ,∞)

1.1.2 人行荷载

此外,行人步频的随机性和人群荷载模型的复杂性也对桥梁舒适度产生显著影响。因此,准确建立人群荷载模型和人流量的确定是舒适度分析的基础^[15]。

《城镇人行天桥设计标准》^[7]中5.5.5条规定当在人行天桥舒适度分析中,行人密度不应低于1.0人/m²且不宜低于1.5人/m²,分别对应《德国人行桥设计指南》^[5]中最高的两个交通等级TC4(交通十分繁忙)及TC5(交通异常繁忙)。对于大跨人行桥设计来说,通常以TC5交通等级对应的人流量来进行舒适度分析。

研究显示,在人行荷载下结构的第一振型起到了决定性作用^[16-17]。为实现模型的简化,采用第一阶的周期性谐波荷载来模拟人群的激励荷载^[4]。

《德国人行桥设计指南》^[5]中把人行激励模拟成

均布谐波荷载,并且将行人步频范围内的结构自振频率视作行人激励频率。基于行人流统计规律,给出了竖向和侧向的行人激励荷载,具体如下:

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

式中:P为单个行人产生的荷载幅值,kN;f_s为步频,可以假定其为人行桥基频,Hz;n'表示等效人行密度;ψ为考虑步频与基频关系后的折减系数。

其中,n'可根据人流密度采用以下公式进行等效计算^[5]:

人群密度小于1.0人/m²,

$$n'=\frac{10.8\sqrt{\xi\times n}}{S}$$
 (2)

人群密度大于1.5人/m²,

$$n'=\frac{10.8\sqrt{n}}{S}$$
 (3)

式中:ξ为结构阻尼比;S为加载面积,m²。

1.1.3 结构阻尼比

结构阻尼比是舒适度分析中重要的参数之一,《城镇人行天桥设计标准》^[7]中给出了相应的建议值供设计使用,具体见表2。

表2 结构类型对应阻尼比参考值

结构类型	阻尼比/%
钢筋混凝土结构	1.3
预应力混凝土结构	1.0
钢-混凝土组合结构	0.6
钢结构	0.4
铝合金结构	0.9

1.1.4 分析流程

综上所述,具体舒适度分析流程可总结见图1。

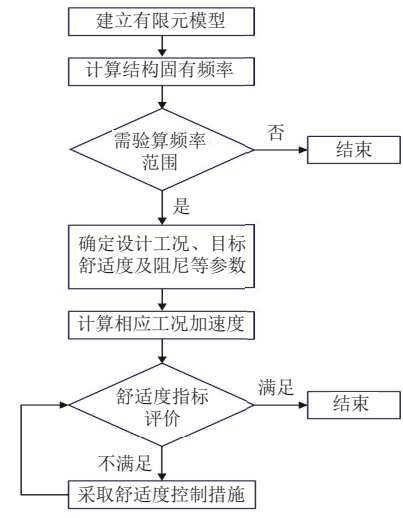


图1 舒适度分析流程图

1.2 舒适度控制措施

针对桥梁舒适度问题,常用的控制方法分为主

动控制和被动控制两大类。

(1) 主动控制方法

主动控制方法通过实时监测桥梁振动状态,利用智能控制装置(如主动质量阻尼器)实时调整桥梁动力响应,从而降低振动幅度。这种方法通过主动调整力的分配,快速响应外部激励,特别适用于风致振动控制等特殊需求桥梁,但相对成本较高。

(2) 被动控制方法

被动控制方法通过结构优化设计和附加阻尼装置实现振动控制。

a. 结构优化设计:提高桥梁刚度或质量,调整固有频率,避免结构频率与行人步频产生共振^[18]。

b. 调谐质量阻尼器(TMD):TMD 是一种常用的被动减振装置,通过调谐阻尼系统与桥梁振动频率相匹配,吸收振动能量,显著降低桥梁的振动幅度^[19]。

c. 多调谐质量阻尼器(MTMD):在多个位置安装 TMD 装置,以增强对复杂振动模式的控制效果。

目前,TMD 以其优异的减振性能及相对较低的成本,成为在大跨度景观人行桥上的首选^[20]。

2 工程概况

水秀桥坐落于绍兴市镜湖新区潞家湾,桥梁位于十字河口处,跨六级航道线路。桥梁布跨为(35+60+35) m,其中主桥上部结构为变截面连续钢箱梁,梁高变化从桥台 1.2 m 变化到连续墩 1.5 m 再到跨中 1.0 m,桥宽从桥台 8.0 m 变化到桥墩 9.7 m 再到跨中 11.0 m。

钢箱梁采用单箱三室截面,顶底板宽 5.0~8.0 m。主桥边跨支座节段顶底板厚 16 mm;边跨跨中节段顶板厚 20 mm,底板厚 16 mm;1#、2#桥墩支座节段顶底板厚 20 mm;中跨两侧节段顶板厚 20 mm,底板厚 16 mm;中跨跨中节段顶板厚 24 mm,底板厚 20 mm;腹板厚均为 14 mm。横隔板标准间距 3 m,每间隔 1.5 m 设一道横向加劲肋,顶、底板设 160 mm×14 mm 纵向加劲肋。

水秀桥桥型布置见图 2,图 3 为跨中处主梁横断面构造图。

3 动力特性分析

3.1 结构自振频率与振型分析

采用 MIDAS Civil 建立空间有限元模型,全桥共离散为 140 个单元,157 个节点,结构计算模型见图 4。

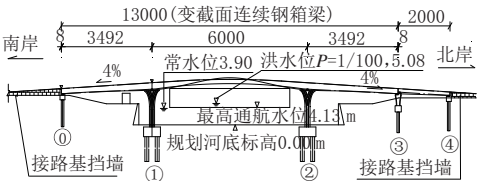


图 2 桥型布置图(单位:cm)

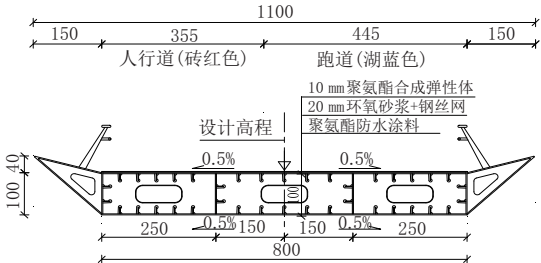


图 3 跨中处主梁横断面构造图(单位:cm)

桥梁采用盆式橡胶支座,按连续梁布置,具体支座布置见图 5。

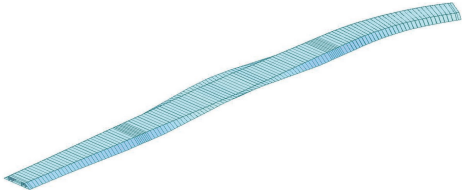


图 4 有限元结构离散模型

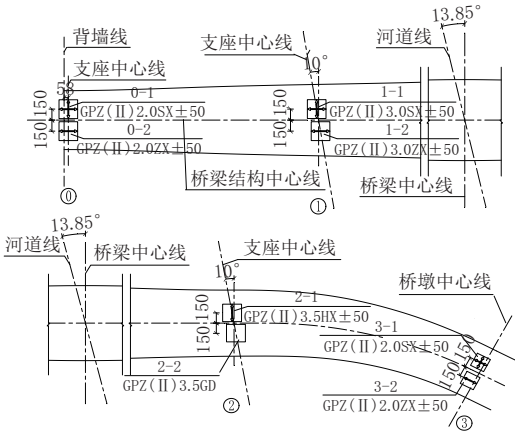


图 5 支座布置示意图(单位:cm)

采用 Lanczos 特征值向量法对结构进行动力特性分析^[14],该桥前 3 阶主要振型见图 6,自振特性参数见表 3。

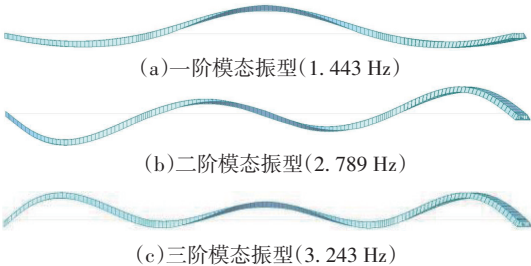


图 6 前三阶振动模态图

表3 单个TMD参数表(合计4个)

位置	TMD质量/ kg	结构基频/ Hz	TMD刚度/ (N·m ⁻¹)	TMD阻尼系数/ (N·s·m ⁻¹)
跨中处	1 000	1.443	83 003.37	1 457.70

根据计算可知,桥梁结构一阶竖向基频为1.443 Hz,二阶竖向频率为2.789 Hz。根据《城镇人行天桥设计标准》(DB33/T 1245—2021)第5.5条,天桥结构竖向固有频率小于3 Hz,应进行人致振动舒适度验算^[7]。

3.2 结构竖向舒适度分析

根据项目可知,本桥跨越河流连接两岸社区,平时人流量较大,计算以TC5级别交通等级作为人行荷载的计算工况,即人群密度取1.5人/m²。

按式(1)计算每延米人群简谐荷载P(t),为简化计算采用线性振型叠加计算方法计算TC5级别交通流量下的最大振动加速度。根据一阶模态下全桥加载模型见图7。



图7 全桥加载示意图

在此加载下,峰值加速度 $a_{\max}$ 位于跨中节点处,此时计算结果见图8。

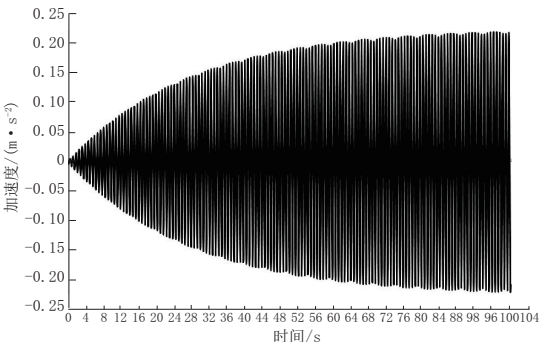


图8 跨中处(原始)模态加速度包络图

根据计算,原始状态下最大加速度 $a_{\max}$ 为2.2 m/s²,规范要求在CL1舒适度级别下加速度应在 $[0,0.25 \cdot f^{0.78}]$ 范围内。一阶竖向频率为1.443 Hz时, $0.25 \cdot f^{0.78}$ 为0.333 m/s²。显然无法满足舒适度要求,应采取控制舒适度的相应措施。

4 结构竖向舒适度控制

4.1 TMD设计及布置

本桥为景观人行桥,桥体设计要求结构纤薄且具有流畅的线型。调整结构高度直接影响了桥梁的美观及流线特性。因此,项目考虑通过使用TMD阻尼器进行降振动。

本项目有两种TMD布置方式,即在跨中集中布置TMD阻尼器或是在中跨处多点布置TMD阻尼器

(MTMD模式)。

通过振型及多点加速度的计算并考虑到减振措施的经济性及减振性能,对于本项目而言,加速度最大位置集中较为明显且位于跨中位置。因此,本项目最终决定仅在跨中处(即最不利加速度处)布置TMD阻尼器。

TMD阻尼参数可参考以下公式进行估算^[4]:

$$m_d = \mu M_i \tag{4}$$

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

$$f_{\text{opt}} = \frac{1}{1+\mu} \tag{6}$$

$$f_d = f_{\text{opt}} f_i \tag{7}$$

$$K_d = (2\pi f_d)^2 m_d \tag{8}$$

$$C_d = 2 \cdot (2\pi f_d) m_d \xi_{\text{opt}} \tag{9}$$

式中: m_d 为TMD质量,kg; M_i 为结构第*i*阶段竖向模态质量,kg; μ 为质量比; ξ_{opt} 为最优阻尼比; f_{opt} 为最优频率比; f_i 为结构第*i*阶段模态频率; K_d 为TMD的刚度,N/m; C_d 为TMD的阻尼系数,N·s/m。

本项选用一阶模态进行设计,根据上述计算最终在桥梁跨中处(即最不利加速度处)布置4个质量为1 t的调谐质量阻尼器(TMD),TMD布置示意图9,具体参数见表3。

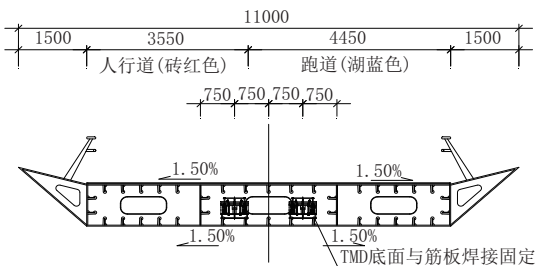


图9 跨中处TMD布置(单位:mm)

4.2 减振效果对比分析

设置TMD减振后,峰值加速度 $a_{\max}$ 位于跨中节点处的计算结果见图10。

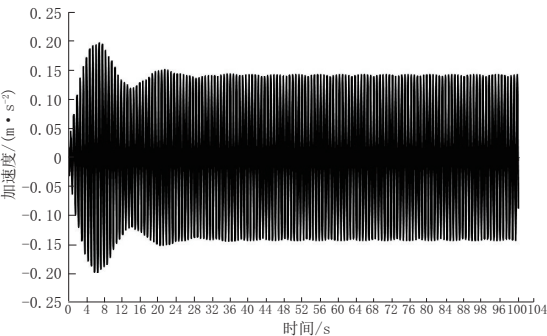


图10 跨中处(减振后)模态加速度包络图

根据计算,此时峰值加速度 $a_{\max}$ 为 0.2 m/s^2 ,控制前后加速度及减振效果参见表 4。

表 4 舒适度控制效果对比

控制前后	加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	CL1 舒适度下加速度 限值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	减振效果/%
控制前	2.2	0.333	90.91
控制后	0.2	0.333	

上述结果表明,采取舒适度控制措施后,加速度相应最大值已达到了规范规定的 CL1 舒适度等级,控制前后减振效果显著。

5 结 语

本文以绍兴市镜湖新区潞家湾水秀桥为研究对象,系统开展了大跨异形钢人行景观桥的舒适度分析与控制研究。通过对桥梁动力特性进行深入分析,得出的主要结论如下。

(1) 由于大跨钢箱景观人行桥其轻柔美观的造型特征,导致结构的质量轻与刚度小,其竖向自振频率往往无法满足大于 3 Hz 的设计要求,人行舒适度需引起重视。

(2) 本工程通过采用调谐质量阻尼器(TMD)吸收结构振动,验证了舒适度控制措施的有效性和适用性。

(3) 本工程主要依据《城镇人行天桥设计标准》^[7]为浙江省地方标准,相对于德国设计标准要求更高,可供类似工程参考。

参考文献:

[1] 金其莉,陈建兵,周晨.外倾单肋曲线人行钢拱桥振动舒适度评价[J].中外公路,2021,41(1):80-85.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 田颖,董玉尊,章浩.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.
[5] Design of footbridges guideline: EN03[S]. Aachen: Research Found for Coal and Steel, 2008.
[6] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
[7] DB33/T 1245—2021,浙江省城镇人行天桥设计标准[S].
[8] 许立言,陶慕轩,樊健生,等.大跨度钢-混凝土组合人行天桥舒适度分析[J].建筑结构学报,2016,37(5):138-145.
[9] 金峰,吴翔宇,王传克,等.某改扩建高中食堂楼盖振动舒适度分析[J].建筑结构,2021,51(16):102-109.
[10] Dallard P, Fitzpatrick T, Flint A J A, et al. The London Millennium Footbridge[J]. Structural Engineer, 2001, 79(171): 17-33.
[11] 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.
[12] 张彦玲,张建林,李运生.柔性人行悬索桥在不同人流量下人致振动分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(6):779-787.
[13] 张存超,郭晓光,张士红.曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥大修改造方案设计[J].中外公路,2018,38(4):127-132.
[14] 尹栋佳,聂科琴,刘政伟.人行景观斜拉桥舒适度研究[J].交通科技,2022(4):67-70.
[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.
[16] 宋志刚,金伟良.行走激励下大跨度楼板振动的最大加速度响应谱方法[J].建筑结构学报,2004,25(2):57-63.
[17] 杨吉新,刘畅,黎建华,等.S形曲线斜拉桥非线性静风稳定性分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(5):827-831.
[18] 石成,麻广林,蒋发.三跨连续钢结构人行天桥自振频率分析与计算[J].市政技术,2012,30(6):51-52;55.
[19] 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.
[20] 吴海亮.异形人行桥人致振动舒适度与减振研究[D].邯郸:河北工程大学,2022.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!
欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

