

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.10.026

钢结构景观人行桥振动舒适度优化设计

张慧新, 邵明洁

[悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 215000]

摘要: 随着城市景观人行桥的发展,其结构越来越多的呈现出轻柔、低阻尼等特征,而这些特点会引发人致振动现象,桥梁的基频也基本无法达到国内外现行标准的要求。以苏州某曲线形景观人行桥为例,对桥梁方案设计加以阐述,并根据《德国人行桥设计指南》(EN03—2007),得到人行激励荷载,对设置 TMD 阻尼减震器前后对结构的动力特性和峰值加速度响应进行分析对比,分析对桥梁结构舒适度的影响,供今后类似项目参考。

关键词: 景观人行天桥;人行振动舒适度;峰值加速度;质量调谐阻尼器(TMD)

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0115-04

0 引言

近年来,随着我国城镇化进程的推进,城市人行桥得到了前所未有的发展。现在的人行天桥比传统的更轻柔,这会带来结构固有频率的降低,使其容易落入人行的步频范围内,引发人-桥共振,使得人行桥发生大幅度振动^[1],容易引起行人的不适及恐慌。我国现行《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)^[2]中对天桥舒适度的规定为“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”。若增大桥梁截面和调整结构形式,不经济且不能充分利用空间。然而,通过设置安装 TMD 阻尼减震器,我们能够有效地降低振动,从而提升行走的舒适感。

该文以苏州某人行天桥项目为研究对象,此天桥为单跨曲线变宽预制钢箱梁结构,此桥需综合考虑景观效果,桥梁曲率半径较小并且呈现 S 形,整体受力较为复杂。使用有限元软件 MIDAS Civil 建模,分析得到其自振频率小于 3 Hz,根据《德国人行桥设计指南》(EN03—2007)^[3]得到人行激励荷载,给出设置 TMD 阻尼减震器前后结构的加速度对比,提高了行人的过桥舒适度,供今后类似项目参考。

1 桥梁景观方案设计

该桥梁的外观设计以苏州传统元素中的丝绸为

出发点,提取丝绸灵动柔美的形态特征并转换为桥梁外观的设计语汇。桥身的立面外侧以三角形不锈钢板对桥体结构进行装饰,确保桥体从多方位角度的观感下呈现出轻盈、自然的视觉感受。此天桥为景观人行天桥,漫步在天桥之上,人们可以在此更好的感受这座城市的美。而天桥本身以其轻盈的身姿、优美的曲线,亦成为了钢铁丛林都市中的别样风景。

此天桥的建成将满足此区域的以下需求:

(1) 形象需求

新增的景观天桥将成为此片区独有的城市名片,使得整个片区风貌焕然一新。

(2) 空间需求

天桥可将被道路分开的两处地块进行空间上的整合,从而带动两大商业综合体协调发展,打造协同发展、优势互补的现代化商业圈。是加快城区改造,营造良好投资环境的需求。

(3) 动线需求

景观天桥的设置可以免去行人穿越地面道路所带来的麻烦,有效缓解了此地区车流、人流平面相交的冲突,保证步行的安全性。是完善城市慢行网络,满足城市交通发展的需求。

(4) 文化需求

天桥的外观及细节设计从苏州的传统的丝绸元素出发,展现当地的特色文化。

(5) 功能提升

天桥可对已有过街通行方式(通过轨道站点)进行补充。东侧商业体人群可通过天桥直接进入西侧商业体,同时东西两侧均设置接地踏步一部及无障碍直

收稿日期: 2023-10-31

作者简介: 张慧新(1990—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

梯一部,方便行人更便捷、舒适的通过,也方便残障人士及婴幼儿同行人员无障碍通行。

2 桥梁结构概况

2.1 桥梁整体参数

主桥采用单跨 49.315 m、两侧悬臂分别为 1.7 m 和 3 m 的预制钢箱梁结构,主桥钢桥为变钢箱梁,由单箱双室变为单箱四室又变为单箱双室,主桥钢箱梁顶、底板宽均为 5.3~7.43 m。道路中心线处梁高 1.3 m,外侧变宽部分梁高 0.85 m。钢箱梁顶、底板厚度均为 28 mm,腹板厚度为 16 mm。顶底板均设板肋,截面 16 mm×160 mm,加劲肋间距最小为 350 mm,外侧变宽部分按照加劲肋中心距离腹板中心线 350 mm,加劲肋中心间距按照间隔 350 mm 设置。横隔板间距一般为 1 500 mm,端支点横隔板板厚 30 mm,普通横隔板板厚 16 mm。

2.2 结构特点

(1)为体现此人行天桥轻薄的视觉效果,采用了多种措施:在钢箱梁受力满足的情况,钢箱梁的梁高比同等跨径的桥梁要低很多,设置为 1.3 m;桥梁栏杆扶手采用了透明扶手,可实现良好的视觉效果;桥身立面外侧设置了三角形白色烤漆不锈钢板并配合洗墙灯,从视觉上降低了梁高;不锈钢板采用了整块开模制作,安装后进行特殊喷漆处理,完成后不锈钢板表面无拼接痕迹,实现了较完美的视觉效果。这些措施将桥梁整体呈现出更轻薄、飘逸的视觉效果,达到实用性与美观性的统一。

(2)桥梁线形为两次反弯弧线,最小曲率半径仅为 15 m,桥梁易出现梁体曲线内侧支座脱空及整体倾覆等病害。因此,通过以下几个方面的措施予以解决:合理布置曲线梁的支座形式,同时在墩顶设置纵、横双向限位措施,限制由径向力及制动力引起的滑移;对横梁通过增加支座间距以增加桥梁整体的抗扭能力,防止支座脱空,当条件受限时,可采用铁砂混凝土压重,避免出现支座脱空;设计时应严格按照规范要求来验算梁体的抗倾覆性能,避免梁体出现整体倾覆。

(3)此天桥为景观天桥,两侧设置绿植装饰,为达到最好的视觉效果,栏杆采用钢化夹胶玻璃及不锈钢立杆,两侧箱室高度下降,在两侧箱室上部设置花箱,根据季节变化种植错落有致的植物呈现出空中花园的通透。栏杆内部设置了灯带,重大节假日可配合周围装饰烘托节日氛围。

(4)因钢箱梁上设置了绿植,钢箱梁需要考虑提高防腐措施,本工程钢箱梁涂装采用的是环氧富锌底漆配环氧云铁中间漆,内侧则采用新型的无溶剂环氧涂料,可很好的解决防腐问题。

(5)与西侧建筑连接位置的桥墩受位置限制只能作用于轨道联络通道正上方,为减小对轨道的影响,采用了基础扩大并回填泡沫混凝土轻质填料的方案。

(6)考虑桥梁整体景观效果,本天桥下槛取消,通过桥两侧设置暗沟来收集桥面降水,并通过桥梁两侧设置槽钢排水篦子将雨水收集至排水管,通过箱室内的排水管收集至桥墩处再排至地下。绿植的日常护理用水进水管也采用铺设在箱室内部的方式。在桥梁外侧及底部均设置外包装饰,达到视觉观感的整体统一。

桥梁结构的具体布置见图 1~图 3。

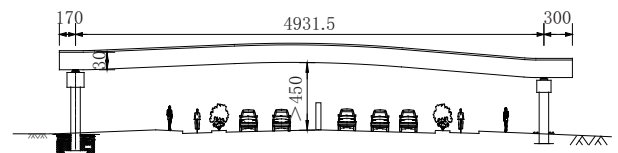


图1 桥梁立面图(单位:cm)

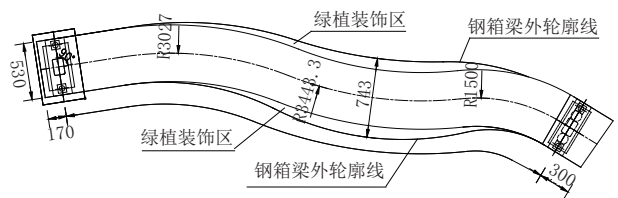


图2 桥梁平面图(单位:cm)

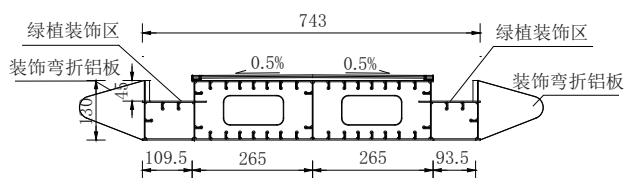


图3 桥梁断面图(单位:cm)

3 结构动力特性计算

3.1 自振频率结果

利用 MIDAS Civil 建立了天桥的三维模型,其中质量源选取:恒载,振型见图 4。模态分析表明:模型第 1 阶为竖向振动模态,第一阶振动频率为 1.64 Hz< 3 Hz,根据我国规范,为避免共振,人行桥的振动频率需大于 3Hz,该人行景观桥不满足设计的要求。此桥为对景观需求较高的桥梁,所以不采用增加梁高的方式,而采用设置 TMD 减震器的办法来提高人行舒适度。参考德国 EN03 指南,当人行景观桥梁的竖向和横向的自振频率分别在 1.25~2.30 Hz 和 0.5~

1.2 Hz 时,可根据行人稠密等级,通过验算峰值加速度和动力响应,来评价桥梁舒适度^[4]。



图4 第1阶模态(竖向振动)(单位:kN)

3.2 人行激励荷载

3.2.1 单人步行荷载

人行走荷载模型取 IABSE 提供的连续步行荷载,如式(1)所示:

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

式中: F_p 为人行走的激励时程; t 为时间; G 为单个行人的体重,取 G 为 700 N; f_s 为步行频率,行人在不同运动形式下参数见表 1; a 为简谐波荷载因子,其中 $a_1 = 0.4 + 0.25(f_s - 2)$, $a_2 = a_3 = 0.1$, $\phi_1 = 0$, $\phi_2 = \phi_3 = /2\pi$ ^[5]。

行人不同运动形式下参数间的相互关系见表 1。

表 1 行人不同运动形式下参数间的相互关系

	速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	步幅 L_p/m	步频 F_p/Hz
慢走	1.1	0.6	1.7
正常速度行走	1.50	0.75	2.00
快走	2.20	1.00	2.30
正常速度跑步	3.30	1.30	2.50
快跑	5.50	1.75	3.20

3.2.2 人群荷载

实际设计中,较多采用将单人步行力叠加,来得到多人或人群的步行力。按照荷载等效的原则,人数为 N 的人群荷载可折减为 N_p 个步调一致行人产生的荷载,二者比值为同步概率^[6]:

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

对于不同密度人群的自由行走,《德国天桥设计指南》的设计流程中,TC1~TC5 均采用谐波荷载模型^[7],等效计算公式如下:

低密度人群(密度 < 1.0 人 $/m^2$)的计算公式为

$$N_s = 10.8 \sqrt{n\xi} \quad (3)$$

高密度人群(密度 > 1.0 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。

德国设计指南建议的人行桥振动加速度界限见表 2,而室外人行桥人行的舒适性类别应达到 CL1

类,此时对应的最大竖向加速度为 $0.5 m/s^2$,横向为 $0.1 m/s^2$ 。

表 2 人行桥的加速度舒适性指标

等级	舒适度	加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	
		竖向	横向
CL1	很舒服	< 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

3.3 人行荷载模拟

由于行人的交通通行级别与人流密度密切相关,本文参考《德国天桥设计指南》,给出了人群密度为 0.7 人 $/m^2$,此值是根据结构的第一阶竖向振动工况来设置的,该桥人行区域长 $54.015 m$,宽 $5.3 m$,此时桥上最大人数为 200 人。竖向人行激励曲线见图 5。

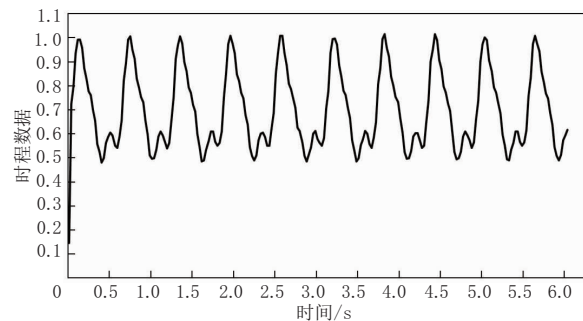


图 5 纵向人群激励荷载

3.4 人行荷载激励分析

基于已生成的人行激励荷载,对天桥施加面荷载,根据《德国天桥设计指南》的要求,满足舒适度要求的竖向加速度限值为 $0.50 m/s^2$,横向加速度限值为 $0.10 m/s^2$ 。

3.4.1 原始天桥(无 TMD)

竖向荷载加速度最大点位于跨中位置,图 6 给出了天桥在最不利工况下该点对应方向的加速度时程曲线。

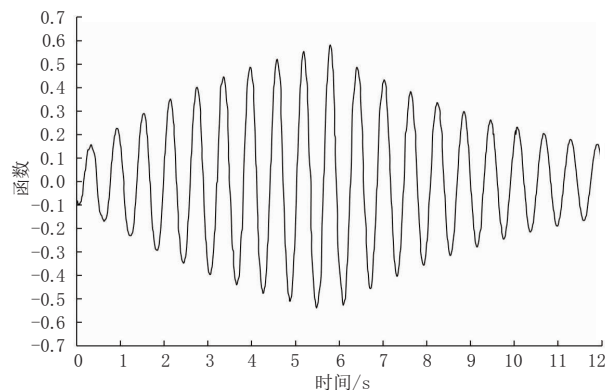


图 6 中部无 TMD 竖向加速度时程曲线

由图6可见,考虑结构的稳态反应,在1.64 Hz 人行连续荷载工况下,天桥与荷载发生共振,该点的纵向最大加速度达到了 0.58 m/s^2 ,此时行人舒适度为CL2级别,不能满足要求。因此,需要对其进行减振设计。

3.4.2 有控天桥(装TMD)

本桥在结构的中部设置了4个TMD减震器,总质量为4 t,TMD采用集中质量模拟,设计参数见表3,TMD布置见图7。

表3 TMD设计参数

控制方向	弹簧刚度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	质量块/t	调频频率/ Hz	阻尼系数/ ($\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	数量
竖向	106	1	1.64	0.89	4

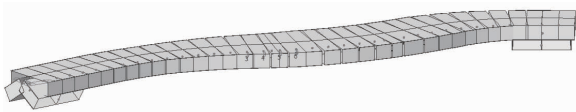


图7 TMD布置示意图

TMD的减振效果通常采用减振率表示,减振率的计算公式为:

$$\delta = \frac{\alpha_{\text{无控}} - \alpha_{\text{有控}}}{\alpha_{\text{无控}}} \times 100\% \quad (5)$$

图8为天桥有控时最不利点对应方向的加速度时程曲线。

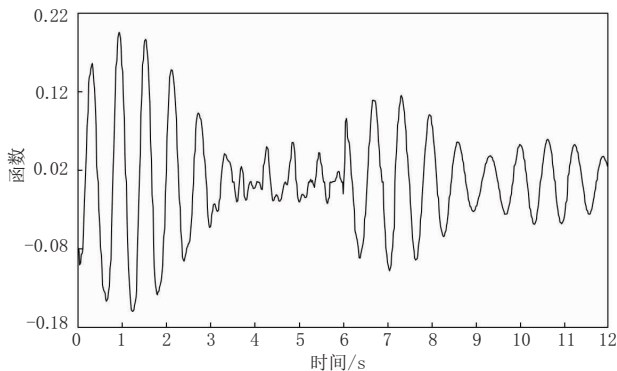


图8 中部有TMD竖向加速度时程曲线

3.4.3 计算分析结果

由图6和图7可得,当无TMD时,桥梁的竖向最不利点加速度为 0.58 m/s^2 ;而设置了TMD后,桥梁竖向最不利点的加速度为 0.187 m/s^2 ,此时行人舒适度为CL1级别,满足规范要求,竖向减振率为67.76%。

4 结论

(1)本工程不采用TMD减振时,在人行激励下,加速度不满足规范要求。

(2)本工程采用TMD减振后,可以有效减小人行激励下结构的加速度,各工况下加速度峰值均小于规范要求,满足要求,且所需TMD数量较少,吨位较低,符合经济型要求。

人行景观桥结构目前均有较轻柔、跨度大且有低阻尼比等特点,其自振频率基本无法满足我国现有规范的要求,因此建议设置TMD减振措施,并参照EN03—2007,通过计算峰值加速度响应来评价桥梁结构的舒适度,可为类似工程提供参考。

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] CJJ 69—201X,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [3] Design of Footbridges Guideline:EN 03[S].Aachen:Research Found for Coal and Steel,2008.
- [4] 林天然.人行景观桥人致振动舒适度分析[J].市政技术,2021,39(6):60-62,68.
- [5] 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.
- [6] 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),2011,27(3):517-523.
- [7] 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.

《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

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com