

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.07.032

大跨度人行桥舒适性分析和 TMD 减振设计

宋 奕

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 随着对景观要求的提高,人行桥向着轻柔和大跨度方向发展。目前,我国规范对人行桥舒适性评价标准并不适合大跨度人行桥。通过研究对比国内外相关规范,推荐采用德国人行桥设计指南进行舒适性评价。而对于无法满足舒适性要求的人行桥需要采用一定的减振措施,如广泛采用的减振措施——调谐质量阻尼器(TMD)的设计方法。同时以一座百米级桁架梁桥为例,采用时程分析方法,按照德国人行桥设计指南对桥梁舒适性进行评价,并采用 TMD 进行减振处理,分析结果表明减振效果显著。

关键词: 人行桥;舒适性分析;调谐质量阻尼器

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)07-0118-03

0 引 言

随着城市人行桥对景观要求的提高,人行桥越来越多地向着轻柔和大跨度方向发展。为了避免共振,减少行人不安全感,我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》中规定,人行桥结构竖向自振频率不应小于 3 Hz。而对于大跨度人行桥而言,自振频率很难达到 3 Hz 以上。若要满足规范要求,就会造成材料的浪费,而且效果有限。另外,对于大跨度柔性结构的人行桥来讲,横向振动的问题也同样突出,但是我国规范中也并未涉及。本文比较了各国人行桥舒适性评价标准和常用的减震措施,以一座百米级人行桥为例,按照《德国人行桥设计指南 EN03》对桥梁进行舒适性分析并采用调谐质量阻尼器(TMD)进行减振。结果表明,有效提高了桥梁的舒适性。

1 国内外规范人行桥舒适性评价指标

我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》中规定,人行桥结构竖向自振频率不应小于 3 Hz,使之避开人桥共振的敏感频率范围。研究表明,振动的位移、速度和加速度 3 个要素中,影响人的生理和心理感受的最主要因素是加速度^[1]。因此,国外规范在频率难以满足的情况下,增加了关于加速度的评价指标(见表 1)。

收稿日期: 2020-12-24

作者简介: 宋奕(1988—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

表 1 国外规范人行桥舒适性评价标准

规范名称	最大加速度 限值/(m·s ⁻²)		说明
	横向	竖向	
瑞典国家规范 Bro 2004 ^[2]	—	0.5	竖向 3.5 Hz 以下
德国人行桥 设计指南 EN03 ^[3]	0.1	0.5	很舒适 竖向 1.25 ~
	0.3	1.0	中度舒适 4.6 Hz, 侧向
	0.8	2.5	不舒适 0.5 ~ 1.2 Hz
英国规范 BS5400 ^[4]	—	$0.5\sqrt{f_0}$ 3 Hz; 0.87	f_0 为桥梁基频 竖向 5 Hz 以下验算
欧洲规范 EN1990 ^[5]	0.2~0.4	0.7	竖向 5 Hz 以下验算, 横向 2.5 Hz 以下验算

上述国外规范基本采用了桥梁自振频率限制与加速度限制相结合的方法。首先采用桥梁自振频率进行评价,当不满足频率要求时,采用加速度指标进行评价。对比上述各规范可知,《德国人行桥设计指南 EN03》最完善,不仅规定了竖向与横向的加速度限制,还进一步划分了从舒适到不可忍受 4 个等级。因此,本文推荐采用《德国人行桥设计指南 EN03》指标评价人行桥的舒适性。

2 TMD 减振设计

对于无法满足舒适性要求的人行桥需要采用一定措施进行减振,TMD 具有简单、有效、易更换等优点,因此被广泛用于人行桥的减振控制。

2.1 TMD 减震原理

TMD 由固体质量、弹簧和阻尼器组成。TMD 系统为被动受力模式,当主结构振动时,子结构产生一个

与振动方向相反的惯性力作用在主结构上,从而使主结构的振动减小。

2.2 TMD 参数设计

TMD 需要设计的参数主要包括质量比、频率比和阻尼比。一般情况下,质量越大,减振效果越好,但是过大的质量会增加 TMD 的施工难度,也会增加桥梁的恒载。因此,通常情况下,质量与控制模态的广义质量比值取 1%~5%^[1]。最优频率比和阻尼比的取值需要根据位移、加速度等不同的优化目标来选取不同的计算式。人行桥一般情况下的减振优化目标为加速度,此时最优频率 α_{opt} 比和最优阻尼比 ξ_{opt} 按式(1)、式(2)确定:

$$\alpha_{opt}=\sqrt{\frac{1}{1+\mu}} \tag{1}$$

$$\xi_{opt}=\sqrt{\frac{3\mu}{8+(1+\mu)}} \tag{2}$$

当确定了质量比、频率比和阻尼比之后,便可按式(3)~式(6)计算 TMD 的频率 f_d 、质量 m_d 、弹簧刚度 k_d 、阻尼系数 c_d 等参数。

$$f_d=\alpha_{opt}\times f_s \tag{3}$$

$$m_d=\mu\times M_j \tag{4}$$

$$k_d=(2\pi f_d)^2\times m_d \tag{5}$$

$$c_d=2m_d\times 2\pi f_d\times \xi_{opt} \tag{6}$$

式中: M_j 为控制模态的广义质量。

在实际设计当中,一般先通过上式计算得到合理的质量范围,再选用常规的 TMD 质量规格,反算得到广义质量比 μ ,然后计算得到其他的设计参数。

3 实桥应用

3.1 项目概况

主桥上部结构为拱形钢桁架,板桁结合体系。桥梁跨径布置为 2+100+2=104 m,桥宽 11m,跨中桁高 7.2 m。桥梁双层设置,上层设置 3 m 宽景观步道,下层两侧各挑出 4 m 宽人非道。桥梁总体布置和跨中断面如图 1、图 2 所示。

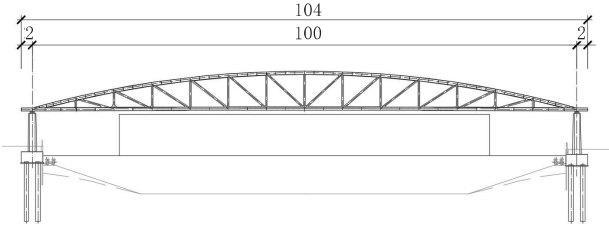


图 1 桥梁总体立面图(单位:m)

3.2 桥梁动力特性

评价人行桥舒适性,首先需要计算桥梁动力特

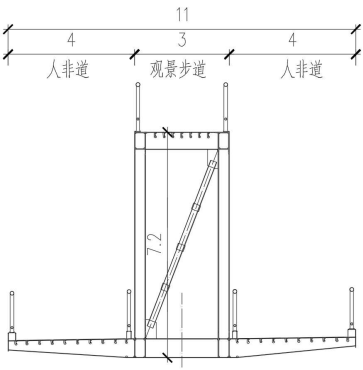


图 2 桥梁跨中断面图(单位:m)

性,校核各模态频率是否处于临界范围之内。若高于临界频率,则无须进一步计算,即可认为舒适性满足要求;否则需要通过加速度来判断桥梁的舒适度。本桥空间有限元模型采用了板壳单元和梁单元。其中,桥面板采用板单元,主桁杆件及桥墩、承台采用梁单元,模型示意图如图 3 所示。计算得到前 10 阶振型见表 2。

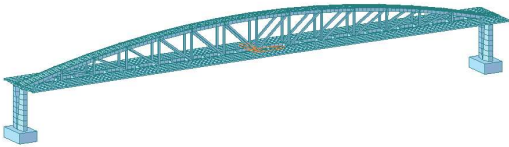


图 3 空间有限元模型示意图

表 2 人行桥前 10 阶振动模态

模态	基频 /Hz	描述
1	1.016	一阶竖向扭转和水平振动
2	1.239	一阶竖向扭转和水平振动
3	1.257	一阶竖向振动
4	1.652	一阶纵向振动
5	2.695	二阶竖向扭转+水平振动
6	2.934	二阶水平振动
7	3.164	二阶竖向振动
8	4.293	三阶竖向扭转和水平振动
9	4.786	三阶竖向扭转和水平振动
10	5.340	三阶竖向振动

根据《德国人行桥设计指南 EN03》,人行桥频率 f_i 的临界范围是:一阶竖向和纵向振动 $1.25\text{ Hz}\leq f_i\leq 2.3\text{ Hz}$,二阶竖向和纵向振动 $2.5\text{ Hz}\leq f_i\leq 4.6\text{ Hz}$;水平振动 $0.5\text{ Hz}\leq f_i\leq 1.2\text{ Hz}$,水平振动不受二阶简谐行人荷载影响。

由表 2 可知:模态 1 为频率处于水平振动临界范围内,模态 2、3、4 处于一阶竖向和纵向振动临界范围之内或附近,模态 5、7 振动处于二阶竖向和纵向振动临界范围内。因此,模态 2、3、5、7 需要考虑人行桥的竖向舒适度问题,模态 1 需要考虑人行桥的水平舒适度问题。

3.3 荷载工况

因为本桥为空间桁架结构,双层人行桥,大部分振型是多方向耦合,无法采用逐个模态验算的方式,故采用时程法计算最大加速度响应。人行激励荷载的作用方向根据所计算的振型形状加载,如图 4 所示。

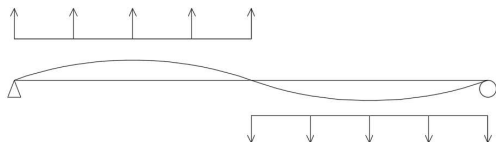


图 4 人行激励荷载加载形式示意图

人行激励荷载模型取《德国人行桥设计指南 EN03》提供的连续步行荷载(N/m^2),如式(7)所示:

$$p(t)=P \times \cos(2\pi f_s t) \times \psi \times N' \quad (7)$$

式中: P 为步行频率为 f_s 时,单个行人产生的荷载幅值,对侧向激励取 35 N,对竖向激励取 280 N; f_s 按验算工况所取模态的频率取值; t 为时间; ψ 为考虑步频接近基频变化范围临界值的概率而引入的折减系数,本工程偏于安全的对一阶人行荷载取 1.0,对二阶人行荷载取 0.25; N' 为等效行人数量,当人行密度小于 $1.0 \text{ P}/\text{m}^2$ 时,

$$N'=10.8\sqrt{n\xi}$$

式中: ξ 为振型阻尼比, n 为总人数。

人行密度大于 $1.0 \text{ P}/\text{m}^2$ 时,取 $N'=1.85\sqrt{n}$ 。

根据上文分析,共有 5 个振型模态需要考虑舒适性问题,因此共建立 5 个荷载工况进行计算分析,荷载参数取值见表 3。

表 3 荷载参数

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
对应模态	1 阶	2 阶	3 阶	5 阶	7 阶
频率 /Hz	1.016	1.239	1.257	2.696	3.164
人群密度 /($\text{P} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
荷载方向	水平	竖向	竖向	竖向	竖向
荷载形式	同向	横向 反对称	同向	纵、横向 反对称	纵向 反对称
ψ	1.0	1.0	1.0	0.25	0.25

3.4 舒适性评价

选取各工况对应振型位移最大点作为加速度观测点,各工况观测点位置及其加速度最大值见表 4。

由表 4 可知,本桥在工况 4、工况 5 下竖向加速度小于 0.5 Hz ,达到最佳舒适度标准;工况 2 和工况 3 下,竖向振动未达到最佳舒适度标准,需要采取措

表 4 各个工况下观测点的加速度值

荷载工况	观测点位置	加速度最大值 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	
		侧向	竖向
工况 1	上层桥面跨中	0.162	—
工况 2	下层桥面跨中挑臂端部	—	0.708
工况 3	下层桥面跨中挑臂端部	—	1.210
工况 4	下层桥面四分点挑臂端部	—	0.319
工况 5	下层桥面四分点挑臂端部	—	0.300

施进行振动控制;工况 1 下,水平振动未能达到最佳舒适度标准,需要采取措施进行振动控制。

3.5 TMD 减振设计及效果

本桥采用 TMD 进行减振设计。研究表明,TMD 放置于位移最大处效果最明显。根据振型 1,放置 1 个 TMD 于上层桥面跨中处,控制水平方向;根据振型 2,放置 2 个 TMD 于跨中处两侧挑臂端部,控制竖向振动;根据振型 3,放置 2 个 TMD 于跨中处桁架下弦杆处,控制竖向振动,共 5 个 TMD。其参数见表 5,其布置图如图 5 所示。

表 5 TMD 参数

TMD 编号	质量 块 /t	弹簧总度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	调频频率 /Hz	阻尼比	阻尼系数 /($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	数量	控制方向
TMD-1	1	40.45	1.016	0.037	0.47	1	水平
TMD-2	1	60.35	1.239	0.026	0.40	2	竖向
TMD-3	1	62.12	1.257	0.023	0.37	2	竖向

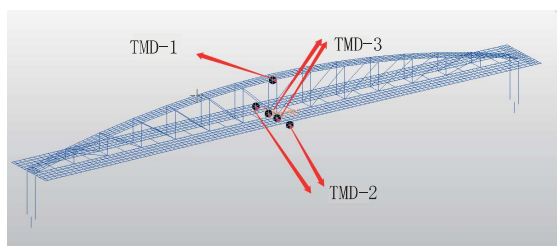


图 5 TMD 设置位置示意图

布置 TMD 后,重新对工况 1、2、3 进行计算,测点在各个工况下的最大加速度值见表 6。

表 6 各个工况下观测点的加速度值

荷载工况	观测点加速度稳态值 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	
	侧向	竖向
工况 1	0.017	—
工况 2	—	0.063 4
工况 3	—	0.081 0

TMD 减振效果采用减振率表示,其计算公式为:

$$\delta = \frac{\alpha_{\text{无控}} - \alpha_{\text{有控}}}{\alpha_{\text{无控}}} \times 100\% \quad (8)$$

各工况下观测点的减振率见表 7。

(下转第 149 页)

上为林地和农田,河道沿线芦苇长势较好。为此,植物品种选择根系发达、适应性强,同时具有净化水质功能的芦苇作为水生植物种植(或补种)在水位变动区(2.60~3.00 m 高程),以削弱水力冲刷对岸坡的影响。常水位以上(3.00 m 高程至堤顶)保留岸坡原有植被,以减轻雨水冲刷对岸坡的影响。结合岸坡上的林地,形成优质的河岸植被缓冲带,在改善水环境的同时,营造出浓厚的“乡愁”氛围。

6.2.2 植物与生态护坡复合措施

植物与生态护坡复合措施应用在新建护岸河段,河岸上为村庄、农田、林地以及通往庙镇镇区的主要道路——宏海公路。

生态护坡材料选用水土保护毯,这是目前生态河道治理常用的材料之一,其网孔孔隙率可达 95%以上;纵、横向抗拉强度可分别达 2.2 kN/m、1.6 kN/m 以上,具有生态、透水、耐久、适用性强、施工简便等特点。

水生植物搭配种植美人蕉、鸢尾、千屈菜、再力花等崇明生态河道治理中应用较多、形态优美的品种。斜坡植物主要选用便于养护、成活率高的麦冬。堤顶种植枫杨、红枫、香樟、红叶李等苗木。配合河道沿线林地、行道树等构建立体河岸植被缓冲带。

施工时,河道边坡修整成 1:2~1:3 缓坡;2.60~3.00 m 高程铺设水土保持毯并用钢钉固定,水土保持毯上覆盖厚 50 cm 耕植土;坡上种植斜坡植物和浅水植物,2.60 m 高程处设置钢筋混凝土方桩。

压顶结构固脚,2.50 m 高程处利用木桩建设水生植物平台,种植水生植物。

目前,本工程已经基本实施完成,植物护坡措施在减少水土流失、削弱水力冲刷以及提升河道沿线景观等方面初见成效。

7 结 语

崇明水系的特点,决定了其在河道生态治理中需要生态环保、效果明显、投资节约的护坡形式。植物护坡措施由于具有投资节约、施工简便、环境优美、功能多样等显著特点,在河道生态治理中得到了广泛的认可和应用。但植物护坡措施也存在着管理养护要求高、受自然环境制约严重的弊端。为此,植物护坡措施的应用仍需要大量的科学研究、学科间的合作与交流以及在河道生态治理中的应用实践,以探索出最优的植物品种种植和搭配方案。

参考文献:

- [1] 上海市崇明区水务局,上海市水务规划设计研究院.崇明区水利规划(2019—2035)[R].上海:上海市崇明区水务局,2019.
- [2] 韩玉玲,李贺鹏,岳春雷,等.应用植物措施进行河道生态建设技术的研究现状[J].浙江林业科技,2008,28(4):95—99.
- [3] 潘树林,王丽,辜彬.论边坡的生态恢复[J].生态学杂志,2005,24(2):217—221.
- [4] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等.河岸植被缓冲带的功能及其设计与管理[J].林业科学,2010,46(2):128—131.
- [5] 刘思涵,李宏庆,孔正红.崇明岛种子植物区系及植被资源[J].长江流域资源与环境,2007,16(Z2):14—18.

(上接第 120 页)

表 7 各个工况下观测点的减振率

荷载工况	减振率	
	侧向	竖向
工况 1	89.51%	—
工况 2	—	91.05%
工况 3	—	93.31%

采用 TMD 减振措施后,桥梁竖向最大加速度为 0.081 m/s^2 , 小于 0.5 m/s^2 , 满足竖向振动舒适性要求; 横向最大加速度为 0.017 m/s^2 , 满足横向舒适性要求, 纵、横向减振效率均达到了 90% 左右, 效果显著。

4 结 语

(1) 由于我国人行桥规范舒适性评价并不适用于大跨度桥梁, 比较国内外各规范后, 推荐采用《德国

人行桥设计指南 EN03》的指标来进行人行桥的舒适度分析。

(2)以一座百米级空间桁架人行桥为列,进行了舒适度分析,并结合桥梁的实际情况设计了TMD的减振措施。分析结果表明,其减振效果显著。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Bro 2004, Vaagverkets allmänna tekniska beskrivning för nybygande och förbättring av broar[S].
- [3] EN03—2008, Design of footbridge guideline[S].
- [4] British Standard 5400, Steel, concrete and composite bridges: Specification for loads[S].
- [5] EN 1990: Eurocode. Basis of structure design[S].2002.