

多变空间连续桁架人行景观桥振动控制研究

胡方健

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘要:为实现建筑造型,对人行桥采用了复杂的空间桁架结构。该结构在各向的刚度较小,自振频率与人行敏感频率接近可能诱发结构出现过大振动,故采取阻尼器振动控制措施。以海口市龙昆南路上一座具有“飞鱼”形态的人行景观桥为例,介绍了对原始结构的动力特性分析、阻尼器布置方案设计、结构减震效果分析、阻尼器参数及适应性分析,并经过理论研究和实际应用,桥梁减震效果达到预定目标。

关键词:人行桥;钢桁架桥;振动;调谐质量阻尼器

中图分类号: U441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)05-0093-04

1 概述

海口市龙昆南路上建设的一座具有“飞鱼”形态的人行景观桥,解决了道路两侧非机动车和行人的过街需求,缓解了道路在局部的交通压力,也为城市增添了风景。该桥分为主桥、梯道和坡道。主桥纵向布置为(5.4+32+32+5.4)m,桥宽 8.5~14.5 m,设计通行非机动车和行人。桥梁上部结构为异形连续钢桁架,在平面呈 2 个鱼形,断面为带挑臂的三角形,立面分段变高(见图 1)。桁架弦杆采用焊接箱型截面,竖腹杆为工字形截面,斜腹杆采用圆形钢拉杆。桥墩采用钢结构分叉柱,并与桁架刚接和铰接^[1]。

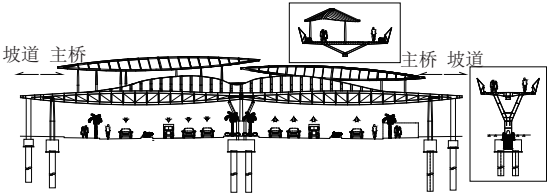


图 1 桥梁总体布置示意

桥梁造型十分轻盈,结构整体刚度小且有低阶扭转现象,给设计带来较大困难,尤其是在解决结构自振和人致振动方面。下面介绍相关解决方案和研究成果。

2 研究内容和技术路线

(1)结合桥梁特点和设计目标需求,项目组对结构动力特性和原始结构在人致振动下的桥面加速度

进行分析,充分论证采用减振措施的必要性。

(2)根据桥梁动力特性和阻尼器特性提出阻尼器布置方案和阻尼器特征参数。

(3)计算桥梁在采用阻尼器后的自振特性和人致振动响应,并研究不同人群密度下的情况。

(4)调整阻尼器参数、结构动力特性,研究结构的适应性。

(5)考虑附属结构刚度,研究其对结构整体的影响。

3 原始结构计算分析

3.1 动力特性计算

根据桥梁设计方案,采用 Midas Civil 建立空间杆系有限元模型,进行动力特性计算,各模态阻尼比均取 0.2%。分析结果见表 1,结构第 1 阶振型如图 2 所示。参考《德国人行桥设计指南》(EN03,2007)及文献[2],人行桥在行人荷载下的固有频率临界范围如下:

表 1 结构动力特性计算结果

模态号	振型特征	频率/Hz
1	竖向扭转	1.362 1
2	竖向扭转	1.556 5
3	纵向振动	2.095 5
4	雨棚横向振动	2.233 0
5	雨棚纵向振动	2.582 5
6	竖向扭转	2.677 6
7	竖向扭转	2.714 9
8	竖向振动	3.130 0
9	竖向振动	3.300 7

收稿日期: 2021-07-04

作者简介: 胡方健(1984—),男,博士,高级工程师,从事桥梁设计及研究工作。

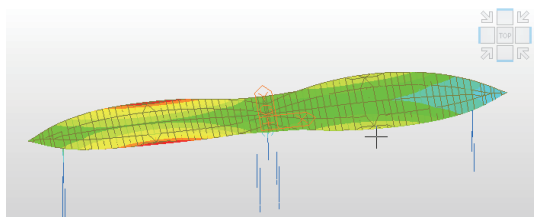


图2 第1阶模态(竖向扭转振动,频率 1.3621 Hz)

(1) 对于竖向振动为 1.25~2.3 Hz、2.5~4.6 Hz (考虑二阶简谐荷载激励)。

(2) 对于横向振动为 0.5~1.2 Hz。

根据以上分析,结构第1、2、6、7、8、9阶模态频率均在人行竖向活动频率的敏感范围,容易引起共振,需进行舒适度计算。

3.2 人致振动计算结果

人行荷载模型参考《德国人行桥设计指南》及文献[2]提供的连续步行荷载,如式(1)所示:

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

式中: $P \times \cos(2\pi f_s t)$ 为单个行人的谐波荷载; P 为步频为 f_s 时,单个行人产生的荷载幅值; f_s 为步频,假设它等于所考虑的人行桥的基频; n' 是加载面积为 S 时的等效行人密度; Ψ 为考虑到步频接近基频变化范围临界值的概率而引入的折减系数,本工程基于频率线性插值。

针对不同密度人群自由行走,《德国人行桥设计指南》按照随机概率分布模拟方法,得到了低密度人群(密度小于 1.0 P/m^2)和高密度人群(密度不小于 1.0 P/m^2)自由行走的等效计算公式。考虑到桥梁上跨道路两侧繁忙的人非通行流量,本项目人群密度取 1.0 P/m^2 、加载面积 714.7 m^2 、加载人数714.7人,等效人群数49。表2列出了加载参数,单人连续行走的竖向荷载加载曲线通过Midas Civil中自带的谐振荷载定义。谐振荷载幅值采用等效的节点集中力。

表2 无TMD振动工况加载时程荷载参数(人群密度 1.0 P/m^2)

工况编号	加载频率	加载方向	加载点个数	节点动力荷载系数
工况 1-1	1.362 1	竖向	258	0.192
工况 1-2	1.556 5	竖向	258	0.192
工况 1-6	2.677 6	竖向	258	0.192
工况 1-7	2.714 9	竖向	258	0.192
工况 1-8	3.130 0	竖向	316	0.157
工况 1-9	3.300 7	竖向	316	0.157

图3给出了有限元模型中的桥面观测点位置,表3给出了各观测点在各工况下的竖向加速度量值。由计算结果可见,结构在人行荷载激励下的桥面

竖向加速度大部分超过 0.5 m/s^2 ,不满足设计要求的舒适度,故需进行振动控制。

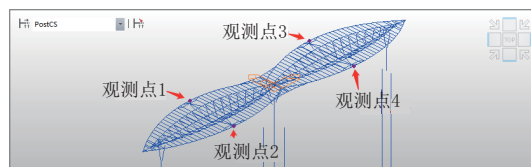


图3 桥面观测点

表3 无TMD工况最不利观测点加速度峰值 单位: m/s^2

观测点	工况 1-1	工况 1-2	工况 1-6	工况 1-7	工况 1-8	工况 1-9
1	1.72	2.97	—	0.24	1.44	1.61
2	1.67	2.92	—	0.33	1.84	1.96
3	0.92	5.87	0.35	—	1.69	1.48
4	0.93	5.81	0.38	—	2.01	1.80

4 设置TMD的减震效果分析

4.1 阻尼器设置

在对结构动力特性分析的基础上,采用调频质量阻尼器(tuned mass damper,以下简称“TMD”)对行人激振和结构共振响应进行控制。TMD质量采用节点附加质量模拟,在需要布置TMD的节点下方500 mm设置新节点,对该节点施加质量以模拟TMD质量,阻尼和刚度采用两点连接的黏弹性消能器(一般连接)模拟。TMD在模型中的位置如图4所示,TMD参数见表4。布置TMD后,结构基频发生变化,最不利的步频可能出现在新的基频上,故对各需要振动控制的振型,按新频率多计算几个工况。

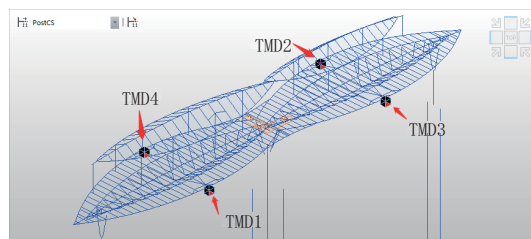


图4 TMD安装位置

表4 TMD参数

TMD 编号	质量块 /t	控制频率 /Hz	弹簧刚度 / ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$)	阻尼比	阻尼系数 / ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$)	数量
TMD1	0.6	1.362 1	43.5	0.041	0.422	1
TMD2	1.0	1.556 5	93.6	0.062	1.196	1
TMD3	0.3	3.130 0	115.3	0.032	0.373	1
TMD4	0.3	3.300 7	128.5	0.024	0.296	1

4.2 设置TMD后的结构动力计算

增加TMD后,针对控制频率1.3621 Hz、1.5565 Hz、3.1300 Hz、3.3007 Hz和新出现的相近频率进行了动力特性计算,结果见表5。图5为第1阶共振工况

的最不利桥面竖向加速度时程。采用 TMD 减震后的结构竖向加速度最大值小于 0.5 m/s², 减震率为 86%~97%, 满足设计要求的舒适度。

表 5 设置 TMD 后各工况最不利点竖向加速度峰值汇总

荷载工况	最不利点加速度峰值/(m·s ⁻²)		
	工况 -1	工况 -2	工况 -3
1 阶	0.149 7	0.068 8	0.164 6
	0.155 6	0.067 4	0.176 3
	0.106 1	0.043 1	0.117 4
	0.109 8	0.044 2	0.122 1
2 阶	0.177 2	0.121 8	0.205 9
	0.187 7	0.129 7	0.217 4
	0.345 9	0.203 5	0.417 9
	0.341 9	0.215 2	0.398 4
8 阶	0.239 1	0.166 9	0.266 8
	0.146 9	0.103 0	0.162 4
	0.168 2	0.147 6	0.148 4
	0.159 8	0.176 6	0.120 1
9 阶	0.180 2	0.171 0	0.066 7
	0.137 0	0.126 2	0.058 1
	0.262 1	0.256 5	0.109 3
	0.191 3	0.186 8	0.082 9

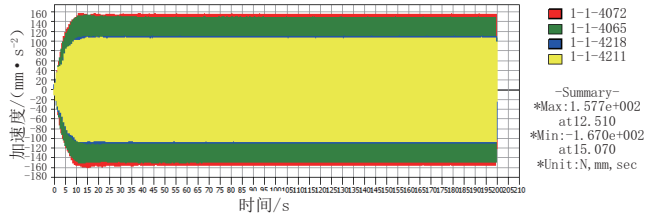


图 5 第 1 阶共振工况最不利点竖向加速度时程曲线

ISO 10137 中规定, 横向振动频率小于约 1.3 Hz 的人行桥, 需要考虑行人和跑者引起的横向振动, 对横向加速度峰值控制在 0.216 m/s², 计算中的钢结构阻尼比取 0.005。规范中规定的单个行人产生的荷载可表示为:

$$F(t)=Q\alpha\sin(2\pi ft)$$

Q 为单个行人的重量, 采用 70 kg, 对水平向作用 α 值为定值 0.1, 因此 ISO 10137 中单人水平作用力幅值为 70 N, 是《德国人行桥设计指南》中横向作用力最大值的 2 倍, 且偏安全地没有考虑对应不同频率的折减。

考虑采用与竖向舒适度设计时相同的人群密度 1 P/m², 计算等效人群折减系数。公式为:

$$C(N)=\sqrt{N}/N=\sqrt{714}/714=0.037$$

根据等效人群数对模型以第 1 阶频率 1.36 Hz 加载, 结构在横向作用下各观测点的横向加速度时程如图 6 所示。经过计算, 桥面横向加速度最大值为 0.212 m/s², 满足要求。

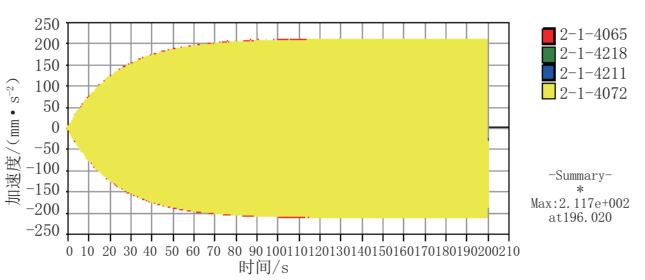


图 6 第 1 阶工况横向加速度响应时程

5 设计参数分析

5.1 质量块大小对加速度影响

以结构第 2 阶振型为例开展参数分析, 考虑不同质量块大小, 分析 TMD 的减振效果。采用人群密度按 1.0 P/m² 计算分析所用模型, 在 TMD2 位置处, 采用 0.2 t、0.4 t、0.6 t、0.8 t 和 1.0 t 质量设计 TMD 参数, 桥面竖向加速度最大值如图 7 所示。

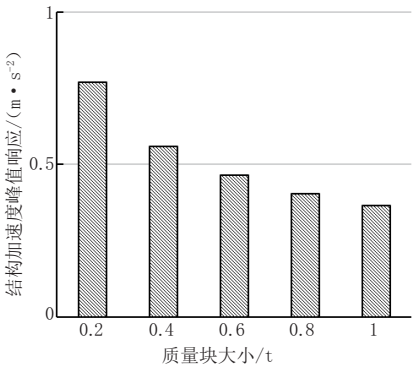


图 7 加速度峰值响应随质量块变化

从图 7 中可以看出, 随着质量块大小的增加, 结构对应最大加速度峰值观测值逐步减小, 但不是线性减小。1.0 P/m² 的荷载标准下质量块超过 0.6 t 时结构加速度响应即可满足舒适度要求, 但从工程实施考虑最终选择 1.0 t。

5.2 结构动力特性改变对加速度的影响

通过改变铺装层质量倍数(0~5 倍区间)、删减铺装与附属设施的质量信息, 使结构频率发生改变, 保持 TMD 参数不变, 分析 TMD 系统的适用性。经过计算, 第 2 阶频率分布为 1.353~1.883 Hz 区间, 对 TMD2 分别采用 0.6 t、0.8 t、1.0 t 的质量和参数, 得到桥面竖向加速度最大值的分布情况, 如图 8 所示。对于固定的 TMD 参数, 当结构动力特性改变时, TMD 的减振效果将存在一定波动, 结构加速度响应可能会进入不满足舒适度要求的范围。因此, 在设计时应考虑一定的冗余度, 应采用较大的质量块以提高 TMD 系统的稳定性。如图 8 所示, TMD 采用 1.0 t 质量时就能在更宽一些的频率范围内满足设计要求。

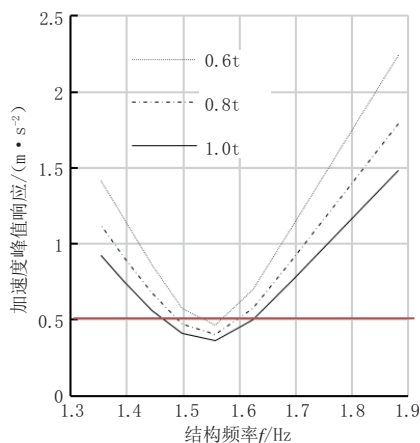


图8 不同大小质量块和不同结构频率时的桥面加速度分布

5.3 遮阳棚振动分析

本项目人行桥第1、第2阶振型受行人荷载作用,发生共振时,桥面会发生较大的竖向扭转振动。因此,带动桥面上安装的遮阳棚发生横向振动。考虑到这一现象容易导致遮阳棚立柱底部产生较大的应力幅,可能诱发立柱疲劳,因此选取振幅较大处附近立柱,增加观测点,考察立柱顶与桥面相对变形,以及立柱底部弯曲应力幅值,对比有无TMD装置时观测点的动力响应。选取振幅最大的一处(立柱与遮阳棚纵向骨架交接部)作为观测点。

经过时程计算,观测点在无TMD时的最大水平相对位移约为41 mm、应力幅约为120 MPa,有TMD时的最大水平相对位移约为4 mm、应力幅约为10 MPa。由此可见,减震是必要的,且效果明显。

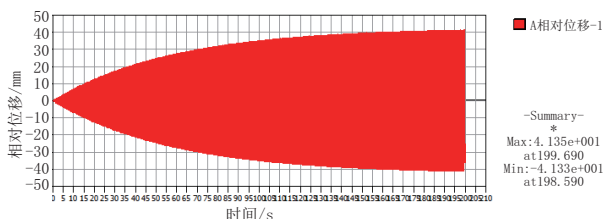


图9 无TMD时立柱顶部观测点水平相对位移

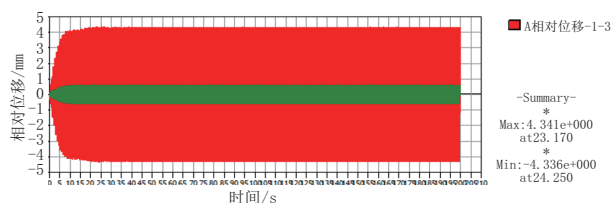


图10 有TMD时立柱顶部观测点水平相对位移

6 结 语

(1)本桥结构刚度较小,由于桥面变宽且采用横向悬臂结构,因而初始的低阶振型体现为扭转模态。通过采用TMD解决了人致振动问题,保证了结构正常运营的舒适性与安全性。经过参数分析,研究了TMD关键参数的工作范围,并通过适当增大质量块来提高其适用性。遮阳棚伴随主体结构的振动不可忽略,针对主桥的振动控制措施,能确保其安全性。



图11 海口市龙昆南路“飞鱼”人行桥实景照片(2021年4月)

(2)本桥已于2021年4月底完成施工,现场实景如图11所示。经过施工过程临时加载、成桥荷载试验和使用期间的实际验证,结构未出现显著振动。本研究成果的应用是成功的。

参考文献:

- [1] 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司. 龙昆南延长线立体过街设施工程初步设计文件[R].2020.10.
- [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.

《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