

大跨度人行斜拉桥 TMD 减振分析

戚志河, 陈玉珂, 王裕滔, 李植良, 刘 蕊

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 为避免人行桥发生共振,以新金牛(岛型)公园 C、D 地块人行斜拉桥为例,通过数值仿真和脉动试验得到了人行斜拉桥的一阶自振频率。进一步地,选取人行激励荷载,确定舒适度评价标准。最后,数值分析了原桥的振动响应,并根据原桥动力分析结果设计了调谐质量阻尼器(TMD)减振方案。研究表明:本桥端跨的一阶竖弯频率为 2.73 Hz,跨中频率为 1.51 Hz;安装 TMD 后,端跨和跨中的加速度峰值符合舒适度标准,TMD 减振效果最大可达到 60%。

关键词: 人行斜拉桥;舒适度;调谐质量阻尼器;减振

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)07-0059-04

0 引言

在城市发展中,为满足交通畅通和建筑美观的要求,人行天桥正朝着轻质、纤细化、大跨度的方向发展。据统计,大多数人行天桥的自振频率约为 2~3 Hz^[1]。而人步行频率约为 2 Hz,容易引起人桥共振、抖振等现象^[2-4]。这种振动不但会引起行人的恐慌,还会降低结构的安全性和使用性。所以,在设计之初,就应将桥梁振动作为重点关注对象之一。我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69—95)^[5]要求,人行天桥自振频率不应小于 3 Hz,但一般大跨度人行天桥很难满足这一要求。

现行各国规范通过避开敏感频率范围和限制动力响应值的方法来降低结构振动,提高人行桥舒适度^[6-7]。避开敏感频率利用动力学原理,通过增加梁高或板厚等方式提高结构刚度,提高桥梁的自振频率。但该方法自振频率提高效果有限,且会降低桥梁美感,提高造价^[8]。此外,还可以安装调谐质量阻尼器(TMD)来提高桥梁的阻尼,减小结构的振动响应。相比增加桥梁结构刚度,设置 TMD 的方法效果更好,是现阶段桥梁减振的主要方法之一。

1 工程概况

本研究以新金牛(岛型)公园 C、D 地块人行天桥为例(见图 1),桥梁跨越一品天下大街,道路下方

为成都市地铁 7 号线。桥梁采用双塔斜拉桥,跨径布置为(30.75+96.5+30.75)m,全长 158 m,桥梁两侧各设置 16 m(C 地块侧)、18 m(D 地块侧)引道与地面相接。结构体系采用半飘浮支承体系,在两侧桥台、桥梁横梁上设置单向支座,对主梁横向、竖向进行约束,释放纵向方向约束。桥梁桥面宽 6.5 m,桥面布置为 0.5 m(花槽)+0.25 m(栏杆)+5 m(人行道)+0.25 m(栏杆)+0.5 m(花槽)。

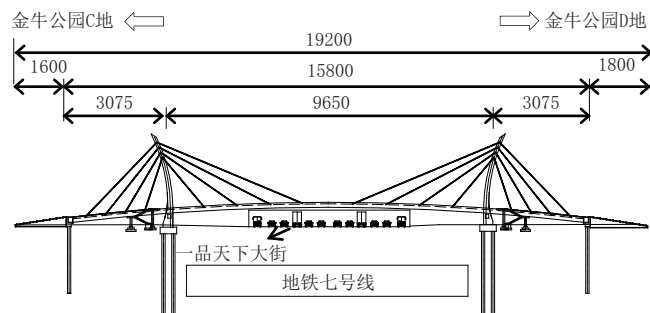


图 1 新金牛(岛型)公园 C、D 地块人行天桥结构示意图(单位:cm)

2 结构自振分析及测试

2.1 数值模态分析

本文采用 Midas Civil 软件对人行桥进行动力分析。其中,主梁、桥塔、承台、系梁等结构均采用梁单元模拟,拉索采用桁架单元模拟;边界条件根据人行斜拉桥的实际状况模拟。

通过模态分析结果可知,人行斜拉桥的第一阶竖弯频率为 2.74 Hz,UZ 方向振型参与质量为 25.1%。振型如图 2 所示。由于该桥第一阶竖弯频率小于 3 Hz,容易与人行荷载产生共振现象,本研究拟采用 TMD 对振动加以控制。

收稿日期: 2021-10-18

作者简介:戚志河(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

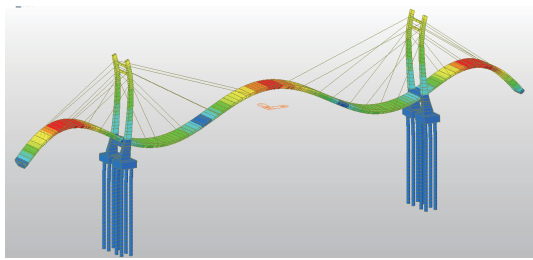


图2 第一阶竖弯振型

2.2 自振频率测试

TMD 由质量块、弹簧与阻尼系统组成。一般情况下,通过改变质量或刚度来调整 TMD 的自振频率。当 TMD 自振频率与天桥频率接近时,利用共振原理,人行桥出现振动时,TMD 也会一起振动。TMD 的惯性力会对结构作用一个与运动方向相反的力,从而减小桥梁的振动响应。

为防止施工完成后天桥竖向实际频率与设计频率存在较大偏差,导致 TMD 失效,本桥采用环境脉动法测试结构自振频率,以此作为 TMD 频率调试的基准频率。

本次测试共布置 3 个测点,测点位置如图 3 所示。

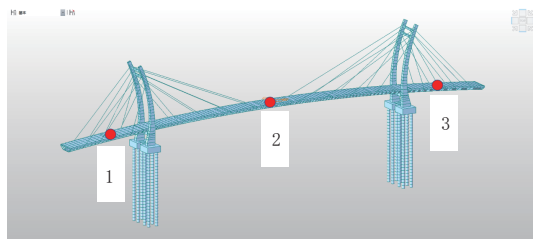


图3 加速度测点布置

相关测试的设备如下:

(1)KD1100LC 压电式加速度传感器。主要参数如下:

- a. 灵敏度:1.065 V/g。
- b. 量程: ± 5 g。
- c. 频率范围:0.2 ~ 1 000 Hz。
- d. 横向灵敏度: $\leq 5\%$ 。

(2)采集仪。采用同济大学自主研发的 SVSA 数据采集仪,采样频率高达 100 kHz。

测试时尽量减少测点周围人员走动和施工作业。传感器布置在 TMD 所在位置的桥面,测量在地面脉动作用下的竖向加速度响应,并通过频谱分析得到结构的竖向自振频率。

本次采样时间为 300 s,采样频率为 50 Hz。处理数据时,时域中尽量剔除外界施工造成的干扰,通过滤波消除电信号的干扰等,通过频域分析减小偶然振动的影响程度。

图 4 为各测点的时域信号。通过对时域信号进行频谱分析,得到各测点的自功率谱,如图 5 所示。由图 5 可知:

(1)测点 1 及测点 3 为天桥端跨的自功率谱,振动频率分别为 1.51 Hz、2.73 Hz、3.81 Hz、4.20 Hz 等。

(2)测点 2 自功率谱频率成分相对单一,桥梁跨中一阶竖向频率为 1.51 Hz。由于中跨跨度较大,相比端跨,其刚度较小,频率相应较低。

因此,天桥端跨的一阶竖弯频率为 2.73 Hz,与模态分析结果基本一致;跨中一阶竖弯频率为 1.51 Hz。

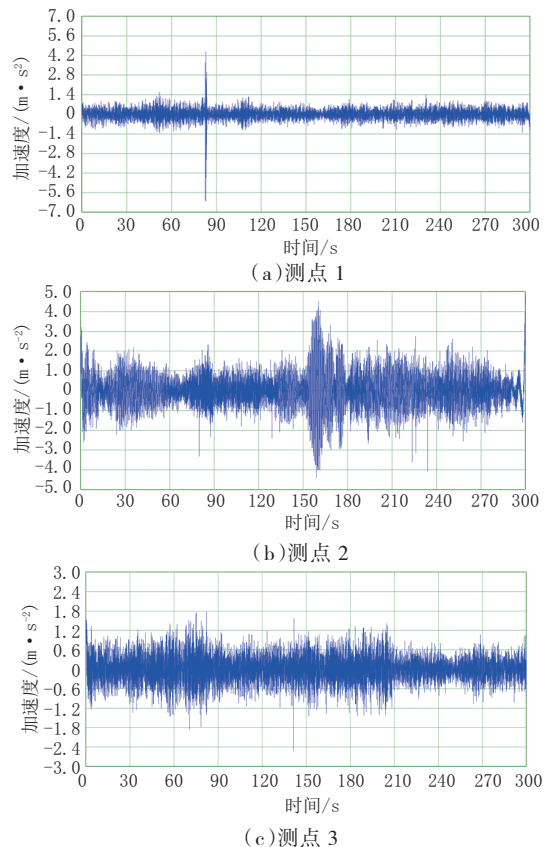


图4 测点的加速度时程曲线

3 人行荷载的模拟

3.1 步行荷载模拟

基于人步行时双脚产生大小相等的周期性荷载的假设,竖向力可以用傅里叶级数的形式表示:

$$F_i = p[1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)]$$

式中: p 为人的自重; α_i 为第阶荷载谐波的动载因子; i 是指第 i 阶荷载谐波($i=1,2,3,\dots$); f_i 为步频; t 表示时间; φ_i 表示相位角。

本桥人的自重取 700 N,步频分别取 2.74 Hz、2.40 Hz、2.20 Hz、1.90 Hz、1.37 Hz(见表 1)。

3.2 人群的影响

人群过桥,当人群密度过大时,行人自由移动的

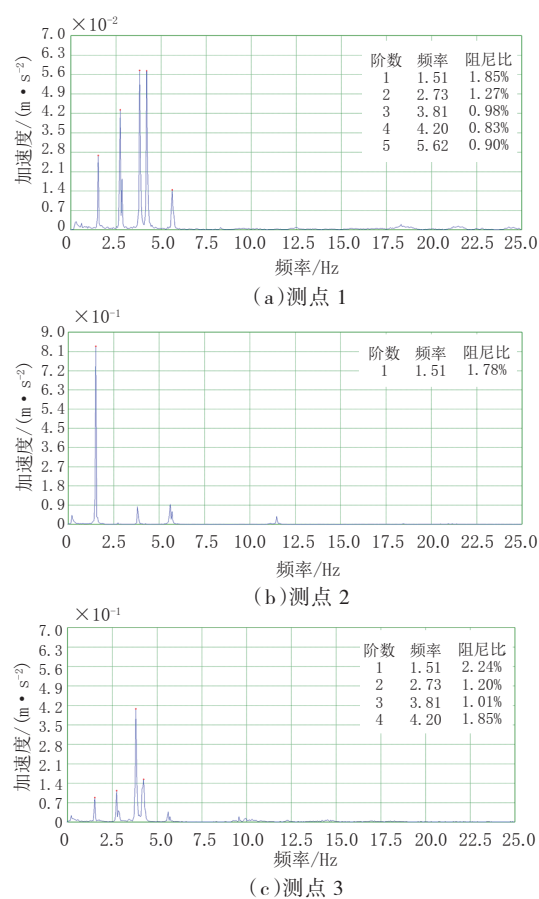


图 5 测点的自功率谱

空间不足,人群协调同步的概率远大于人群密度较少的情况,容易发生人桥共振。人群荷载分析时,通常根据人群密度的不同对行人人数进行等效。参照《建筑楼盖结构振动舒适度技术规范》,等效人群密度可以按照下式进行折减。

$$r = \begin{cases} \frac{10.8\sqrt{\zeta N}}{A} & \text{人群密度} < 1.0 \text{ 人/m}^2 \\ \frac{1.85\sqrt{N}}{A} & \text{人群密度} \geq 1.0 \text{ 人/m}^2 \end{cases}$$

式中: ζ 为舒适度分析时的结构阻尼比,本桥取值为0.02; N 为行人总人数; r 为等效人群密度; A 为加载面积。

本研究按《建筑楼盖结构振动舒适度技术规范》提供的人行荷载,根据结构模态分析结果,在端跨、跨中位置分别施加 2.74 Hz、2.40 Hz、2.20 Hz、1.90 Hz、1.37 Hz 五种频率的人行荷载,测试五种工况下端跨和跨中的振动响应,人行荷载工况见表 1。

3.3 舒适度评价标准

大量的研究和实验证明,人的舒适性感可以 采用楼盖的振动加速度响应来进行评价。本文采用峰值加速度来评判人行斜拉桥的舒适度。表 2 为《建筑楼盖结构振动舒适度技术规范》对连廊和室内天

表 1 人行荷载工况					
工况	行走频率 /Hz	描述	密度 / (人·m ⁻²)	端跨等效 人数	中跨等效 人数
TC1	2.74	人较少,行走完全自由	0.1	9	16
TC2	2.40	人较少,行走基本自由	0.2	13	22
TC3	2.20	人较多,偶有降速需要	0.5	20	35
TC4	1.90	人拥挤,反向横穿超越受限	1.0	33	59
TC5	1.37	非常拥挤,反向横穿超越困难	1.5	40	72

桥的振动峰值加速度的规定。根据规范,本桥以竖向加速度 0.50 m/s² 为限值评估。

表 2 连廊和室内天桥的振动峰值加速度		
楼盖使用类别	峰值加速度 / (m·s ⁻²)	
	竖向	横向
封闭连廊和室内天桥	0.15	0.10
不封闭连廊	0.50	0.10

4 TMD 减振分析

4.1 原桥结构分析

原结构在布置 TMD 前,各工况数值仿真结果见表 3。从中可以看出,在 2.74 Hz 人行荷载作用下,中跨和端跨的竖向加速度峰值分别为 0.57 m/s²、0.60 m/s²,超出了舒适度标准;人行荷载步频为 1.37 Hz 时,中跨最大竖向加速度为 0.65 m/s²,也超出了舒适度标准;其他步频下,桥梁的最大加速度均小于 0.50 m/s²,满足舒适度标准。因此,接下来本桥需对 2.74 Hz、1.37 Hz 步频进行减振分析。

表 3 未减振结构动力响应			
工况	行走频率 /Hz	端跨最大加速度 / (m·s ⁻²)	中跨最大加速度 / (m·s ⁻²)
TC1	2.74	0.57	0.60
TC3	2.40	0.17	0.22
TC4	2.20	0.21	0.34
TC5	1.90	0.28	0.55
TC6	1.37	0.48	0.65

4.2 TMD 设计

TMD 布置位置见图 6,TMD 均布置在振型变形最剧烈位置。

通常,TMD 质量与振型质量比为 1%~5%时,在减振的同时又相对经济^[9]。依据 2.1 节模态分析,一阶竖弯振型参与质量系数为 25.1%,振型质量为 853 t,本研究拟布置 16 个质量 1.0 t 的 TMD。其中,中跨布置 8 个,两侧端跨各布置 4 个,总质量 16 t,质量比

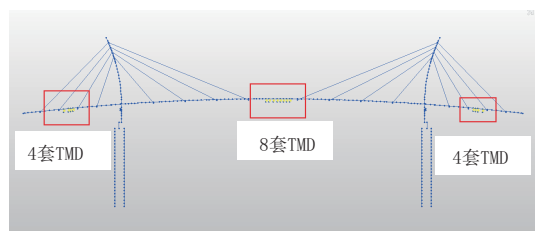


图 6 TMD 布置位置

约为 2%, TMD 频率为 2.74 Hz。TMD 的刚度调整为 $\pm 15\%$, 阻尼比为 0.1。TMD 具体参数见表 4。

表 4 TMD 参数

TMD 型号	质量 /kg	频率 /Hz	刚度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	阻尼系数 /($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	数目
I	1 000	2.74	296	2.75	16

4.3 减振效果分析

布置 TMD 后,对五种步频工况进行计算。桥梁在 2.74 Hz 人行荷载作用下, TMD 减振前后结构的加速度时程曲线如图 7 所示。在共振情况下, 加速度变化幅值明显减小, 端跨跨中最大加速度从 0.57 m/s^2 减小到 0.35 m/s^2 , 中跨最大加速度从 0.60 m/s^2 减小到 0.40 m/s^2 , 减振效果均达到 30%。

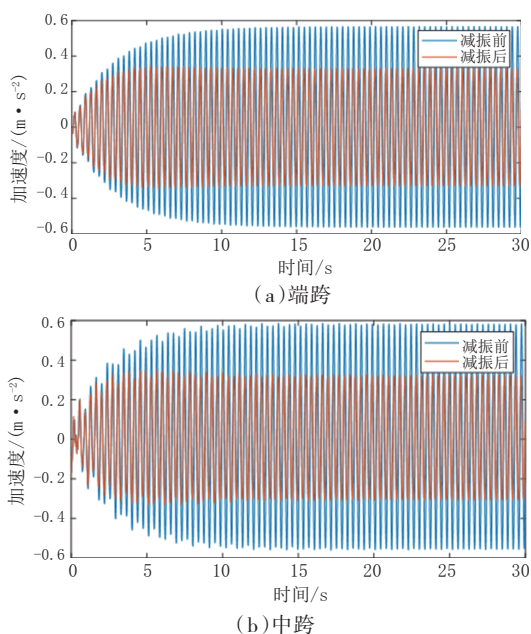


图 7 TC1 工况下各测点的加速度时程曲线

各工况下测点在减振前后的加速度峰值见表 5 和表 6。采用 TMD 减振后, 人行斜拉桥竖向振动加速度峰值均小于 0.5 m/s^2 , 满足舒适度标准。五种步频下, TMD 减振效果最大可达到 60%, 减振效果显著。

表 5 端跨减振前后竖向加速度

工况	行走频率 / Hz	减振前 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	减振后 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	减振效果 /%
TC1	2.74	0.57	0.35	39
TC2	2.40	0.17	0.15	12
TC3	2.20	0.21	0.19	10
TC4	1.90	0.28	0.22	21
TC5	1.37	0.48	0.32	33

表 6 中跨减振前后竖向加速度

工况	行走频率 / Hz	减振前 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	减振后 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	减振效果 /%
TC1	2.74	0.60	0.40	33
TC2	2.40	0.22	0.19	14
TC3	2.20	0.34	0.30	12
TC4	1.90	0.55	0.20	64
TC5	1.37	0.65	0.35	46

5 结 论

(1) 人行斜拉桥端跨的一阶竖弯频率为 2.73 Hz, 跨中竖弯频率为 1.51 Hz, 均小于 3 Hz, 容易发生共振现象。

(2) 端跨和跨中安装了频率为 2.74 Hz 的 TMD, 桥梁的振动加速度大幅度降低, TMD 减振效果最大可达到 60%, 减振效果显著。

参考文献:

- [1] 孙昀. 大跨人行天桥的自振频率初探[J]. 城市道桥与防洪, 2014(7): 157-159, 14.
- [2] 沈晔, 葛春辉. 人行桥自振频率的分析与计算[J]. 特种结构, 2004(1): 53-55.
- [3] 乐小刚. 城市人行天桥舒适性设计标准探讨[J]. 中国市政工程, 2016(6): 23-24, 28, 94.
- [4] 李晓玮, 何斌, 施卫星. TMD 减振系统在人行桥结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2013, 46(S1): 245-250.
- [5] CJJ 69—95, 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [6] 刘中冬, 刘中华, 黄燕平. 人行桥用 TMD 的减振效果研究[J]. 特种结构, 2017, 34(2): 94-98.
- [7] 陈阶亮, 裴新谷. 人行桥振动舒适性评价方法及标准研究现状[J]. 桥梁建设, 2010(1): 75-78.
- [8] 吴建东, 周祥树. 大跨度人行桥 TMD 减振分析[J]. 中外公路, 2013, 33(4): 220-223.
- [9] 宋葵. 大跨度人行桥舒适性分析和 TMD 减振设计[J]. 城市道桥与防洪, 2021(7): 118-120, 149, 15-16.