

结合TMD的钢板组合梁人行桥舒适度分析

马维康

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 随着城市人行桥向着轻盈、美观的方向发展,人行桥的舒适度问题越发突出。为了研究1座主跨43 m的双主梁式斜腹板钢板组合梁人行桥在行人荷载作用下的振动问题,采用有限元计算软件模拟了桥梁结构在行人激励荷载下的动力响应,并比较了不同质量比的阻尼器对结构动力响应的影响。结果表明:该桥竖向1阶、2阶振动模态均有可能被激发,需要进行舒适度验算;应根据不同自振模态合理设计阻尼器参数,以满足舒适度要求;阻尼器质量比增加有助于控制结构的动力响应,但二者并非线性关系。

关键词: 人行桥;动力响应;时程分析;阻尼器;舒适度;调谐质量阻尼器(TMD)

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0180-05

Analysis on Comfort of Steel Plate Composite Beam Pedestrian Bridge with TMD

MA Weikang

(Guangzhou Metro Design Research Institute Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: With the development of urban pedestrian bridges in the direction of lightness and beauty, the comfort problem of pedestrian bridges has become more and more prominent. In order to study the vibration problem of a double-girder inclined-web steel plate composite beam pedestrian bridge with a main span of 43 m under the action of pedestrian load, the finite element calculation software is used to simulate the dynamic response of bridge structure under the pedestrian excitation load, and the influence of different mass dampers on the dynamic response of the structure is compared. The results show that the vertical vibration modes of the first and second orders of the bridge may be excited, and the comfort checking calculation needs to be carried out. The damper parameters should be reasonably designed according to different natural vibration modes to meet the comfort requirements. The increase in the mass of the damper helps to control the dynamic response of the structure, but the relationship between the two is not linear.

Keywords: pedestrian bridge; dynamic response; time-course analysis; dampers; comfort level; tuned mass damper (TMD)

0 引言

近年来,人行桥结构体系向着大跨径、轻量化方向发展,控制人行桥设计的往往不是常规的强度、裂缝、稳定性等方面,而是结构的自振频率。其中我国《城市人行天桥与人行地道技术》(CJJ 69—1995)规定,人行天桥自振频率不应小于3 Hz;欧洲规范^[1]规定,结构纵向、竖向频率敏感范围为1.25~2.3 Hz,横向振动敏感范围为0.5~1.2 Hz时应进行舒适度验算;美国规范^[2]要求,结构竖向自振频率应大于3 Hz、横向频率应大于1.3 Hz。为了满足这些条件,需要改变

结构刚度。提高刚度的方法有很多,如增加梁高、添加多余约束、减小跨径、使用轻质高强材料等。但由于工程实际条件的限制,上述方法往往不能实现。此时,添加调谐质量阻尼器(TMD)成为了控制振动的有效方式。

桥梁受到外荷载作用时,其振动响应控制可以分为被动控制、半主动控制、主动控制、混合控制和智能控制5种^[3]。本文所采用的TMD属于被动控制的其中一种。蔡华权等^[4]将TMD应用于某3肢星形人行桥,很好地控制了3肢主梁的竖向振动,最大减振率达到87.6%。陈建兵等^[5]对1座主跨120 m的连续变截面钢桁梁桥采用TMD来控制结构在行人荷载下的振动,舒适度达到了“最好”等级,现场测试结果显示与计算结果吻合较好。樊亭等^[6]对一大跨连廊

收稿日期: 2025-01-15

作者简介: 马维康(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

结构跨中底板设置了若干台 3 Hz 的 TMD,有效减小了楼盖的竖向震动,减振率达到 67.5%。李娟燕等^[7]以某 180 m 跨径的人行玻璃悬索桥为背景,提出了通过安装多重调谐质量阻尼器来控制桥梁中 5 个敏感模态的方法,安装后各阶模态均能达到合格标准。

本文拟通过对 1 座钢板组合梁人行桥的人致振动舒适度分析,为类似工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

某钢板梁人行桥位于南方某省,为连接村中心与湿地公园的唯一通道,跨越既有河道。河道现状宽度约 31~34 m,未来考虑提升航道宽度至 40 m,需满足 VI 级航道标准。为了实现快速化施工、适当考虑景观效果并降低工程造价,建设方选择了单跨钢板组合梁的设计方案。主梁跨径 43 m,计算跨径 41.8 m。桥梁结构宽度 4.5 m,桥面净宽 3.5 m。主梁两侧布置工字形混凝土梯道;下部结构采用钻孔灌注桩基础。钢板梁人行桥主桥立面布置图见图 1。

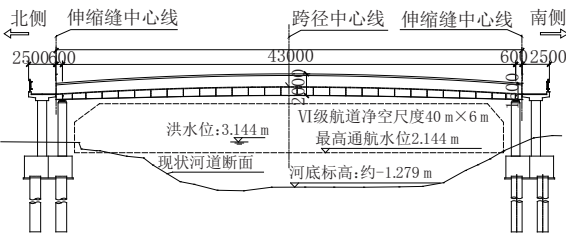


图 1 主桥立面布置图(单位:mm)

主梁采用斜腹板钢板梁,梁高由支点 1.5 m 过渡到跨中 2 m,顶板受压区上翼缘焊接剪力钉,在钢结构吊装完成后,二期恒载施加前,后浇 15 cm 的 C50 混凝土。这样的设计充分发挥了混凝土抗压作用,降低了用钢量。同时混凝土板的存在有效避免了上翼缘受压状态下的局部屈曲。钢桥面板顶面焊接防滑钢筋,铺装采用 2 cm 水泥砂浆+3 cm 花岗岩面砖。主桥标准断面、主桥支点断面见图 2、图 3。

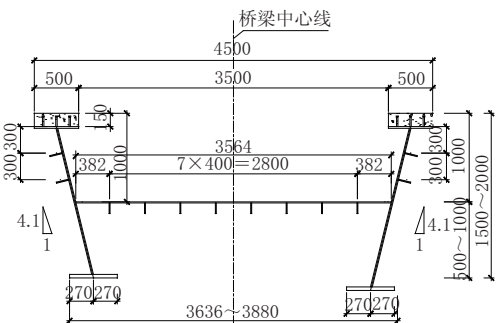


图 2 主桥标准断面(单位:mm)

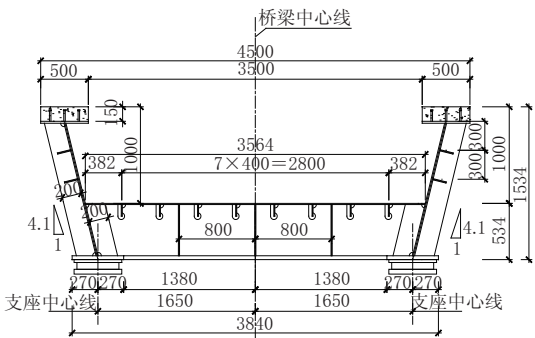


图 3 主桥支点断面(单位:mm)

2 舒适度分析

2.1 计算固有频率

采用某国产有限元软件,建立人行桥结构双主梁模型,分析模型前 10 阶的振动模态。其中 1 阶模态表现为竖向对称平动;2 阶模态表现为纵桥向扭转;3 阶模态表现为横桥向平动;4 阶模态表现为竖向反对称平动;其余模态略。前 4 阶振动模态见图 4 至图 7。

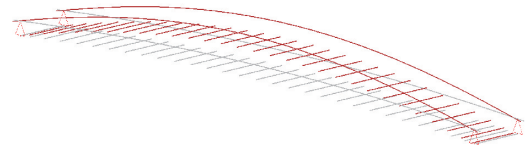


图 4 1 阶振动模态(竖向对称平动)

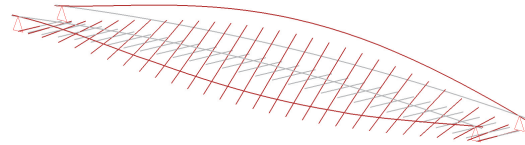


图 5 2 阶振动模态(纵桥向扭转)

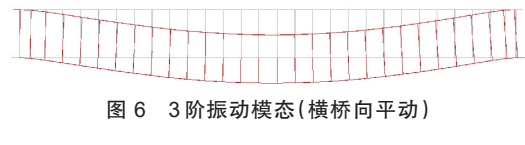


图 6 3 阶振动模态(横桥向平动)

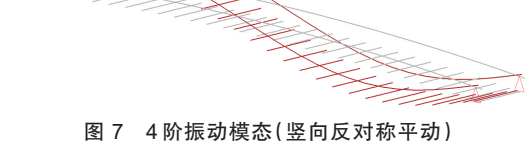


图 7 4 阶振动模态(竖向反对称平动)

为便于观察,第 1、2、4 阶模态以轴侧视角显示;第 3 阶平动模态以顶平面视角显示。前 4 阶模态的自振频率及质量参与系数见表 1。

由表 1 可知,前 2 阶自振频率均小于《城市人行天桥与人行地道技术》规定竖向振动 3 Hz 的要求,需要进行竖向舒适度验算;第 3 阶横桥向振动频率大于 1.5 Hz,无须进行侧向舒适度验算。

表 1 人行桥自振特性汇总表

模态序号	频率/f/Hz	周期/s	质量 m/t	振型参与质量系数					
				X 平动	X 累计	Y 平动	Y 累计	Z 平动	Z 累计
1	1.85	0.54	85.760	0.021 6	0.021 6	0	0	0.754 0	0.754 0
2	2.60	0.38	83.402	0	0.021 6	0.011 1	0.011 1	0	0.754 0
3	4.06	0.25	79.658	0	0.021 6	0.716 4	0.727 6	0	0.754 0
4	6.62	0.15	6.880	0.082 8	0.104 4	0	0.727 6	0.001 2	0.755 1

2.2 定义激励荷载

人行激励荷载最容易激发的振动是1阶竖向振动,因此荷载频率取结构1阶自振频率1.85 Hz。在结构阻尼比方面,对于钢结构,阻尼比通常取0.5%;对于混凝土结构,阻尼比通常取2%;本结构属于钢-混凝土组合结构,阻尼比取1%。时程分析工况方面,工程中常采用瑞利(Rayleigh)阻尼,因其简单、方便,在结构动力分析中得到了广泛应用。瑞利阻尼假设结构的阻尼矩阵是质量矩阵和刚度矩阵的组合,其表达式为:

[C] = a₀[M] + a₁[K] (1)

式中:[M]为质量矩阵;[K]为刚度矩阵;a₀、a₁分别为质量、刚度矩阵参数。

在确定a₀和a₁时,应确保计算覆盖目标频率范围(图8中的ω_m和ω_n),而实际阻尼在此区间内小于计算用阻尼ζ_m、ζ_n,这对工程来说是偏安全的,一般采用对结构振型贡献比较大的2个频率值进行反算。该工程第1阶、第4阶主要以竖向振动为主,其频率可作为瑞利阻尼求解的参数。

瑞利阻尼曲线见图8。

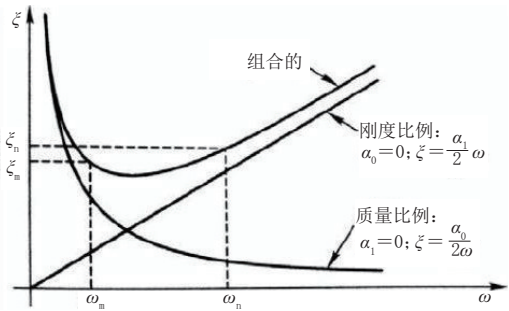


图 8 瑞利阻尼曲线

吴刚杰等^[8]研究发现,TMD的减振效果与人群密度有关。对于不同的人群密度,减振率随着随机人群密度的增高呈现出先增大后减小的现象。同时,根据《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—201X)(征求意见稿)相应要求,行人密度不宜小于1.5人/m²,不应小于1.0人/m²,此处取1.5人/m²。主桥跨径43 m,桥面净宽3.5 m,则桥面加载面积为150.5 m²。将相应数据代入式(2),可得均布谐波荷

载峰值p_v(t)为51.7 Pa。

p_v(t) = 280cos(2πf_st) × ψ × n' / S (2)

式中:f_s为1阶模态频率,取1.85 Hz;n'为行人流等效人数,225.75人;S为加载面积,150.5 m²;ψ为折减系数,该工程不折减,取1.0。

将谐波荷载满跨布置,计算后查看结构在激励荷载下的加速度、位移响应等。由于该工程前2阶振动模态均处于敏感范围内,应注意定义2种不同的激励荷载,分别为双主梁同向振动(竖向平动)、双主梁反向振动(沿纵轴扭转)并满跨布置,分别计算。为方便加载,将51.7 Pa荷载集度转化为每延米加载,桥面净宽3.5 m。则单侧主梁谐波荷载峰值为:51.7×3.5/2=90.475 N/m。

对每片主梁的全宽范围施加均布简谐荷载,加载方式见图9。

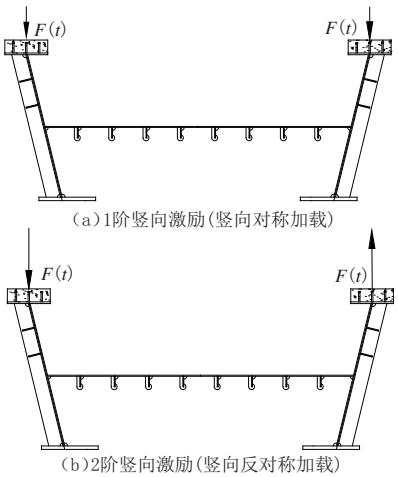


图 9 荷载加载模式

2.3 查看加速度时程

本文采用《城市人行天桥与人行地道技术规范》(征求意见稿)中的舒适度控制标准,舒适度分为3个等级,见表2。

竖向峰值加速度时程结果见表3。

由表3可见,结构在谐波荷载下,1阶、2阶跨中峰值竖向加速度均已超过CL2等级(合格)竖向峰值加速度限值0.68 m/s²要求,需要采取措施加以限制。

表 2 行人舒适度等级

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

表 3 竖向峰值加速度时程结果

激励荷载 种类	振动模式	正弦荷载峰值/ (N·m ⁻¹)		跨中峰值加 速度/ (m·s ⁻²)
		主梁 1	主梁 2	
1 阶荷载	双主梁同向振动	90.475	90.475	2.735
2 阶荷载	双主梁反向振动	90.475	-90.475	1.619

3 舒适度分析

3.1 TMD 减振原理

TMD 的减振原理可简单描述为:当主结构产生振动时,阻尼器与主结构的相对位移产生了相对于振动方向的反作用力,从而抑制了主结构的振动。阻尼器的主要参数为质量、刚度、阻尼比(或阻尼系数)。符川^[9]提出了无阻尼结构在正弦谐波荷载作用下以最小结构响应为目标的最优参数设计方法,而人行桥结构阻尼较小,可以近似地使用上述方法。

最优频率比为:

$$\omega_{opt} = \frac{1}{1 + \mu_j} \tag{3}$$

最优阻尼比为:

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu_j}{8(1 + \mu_j)}} \tag{4}$$

式中:μ_j为阻尼器质量与主结构振动模态参与质量之比。

3.2 阻尼器参数定义

由于工程中不可能无限制增加阻尼器质量,根据相关工程经验,当阻尼器质量为主结构振型参与质量的 0.5%~3% 时,减振效果与工程实用性均较好。该工程选取 μ_j 为 0.5%~3%,并以 0.5% 为差异等级,分别按照式(3)~(6)设计阻尼器参数(模态质量 m 见表 1)。由于该工程前 2 阶自振模态均处于敏感范围内,故需要设置 2 个不同的阻尼器。2 个阻尼器的参数见表 4、表 5。

阻尼器刚度 k 为:

$$k = m \times (2\pi f)^2 \tag{5}$$

阻尼系数 c 为:

$$c = 4\pi f m \zeta \tag{6}$$

表 4 阻尼器 1 参数

质量比 μ _j /%	质量 m ₁ /kg	频率 f ₁ / Hz	阻尼比 ζ ₁	阻尼系数 c ₁ / (N·s·m ⁻¹)	刚度 k ₁ / (N·m ⁻¹)
0.5	428.8	1.840 8	0.043 19	428.44	57 362.2
1.0	857.6	1.831 7	0.060 93	1 202.82	113 591.3
1.5	1 286.4	1.822 7	0.074 44	2 193.41	168 712.5
2.0	1 715.2	1.813 7	0.085 75	3 352.18	222 750.0
2.5	2 144.0	1.804 9	0.095 64	4 650.57	275 727.6
3.0	2 572.8	1.796 1	0.104 51	6 068.87	327 668.6

表 5 阻尼器 2 参数

质量比 μ _j /%	质量 m ₂ /kg	频率 f ₂ / Hz	阻尼比 ζ ₂	阻尼系数 c ₂ / (N·s·m ⁻¹)	刚度 k ₂ / (N·m ⁻¹)
0.5	417	2.656 7	0.043 19	601.32	116 194.7
1.0	834	2.643 6	0.060 93	1 688.19	230 094.1
1.5	1 251	2.630 5	0.074 44	3078.51	341 749.2
2.0	1 668	2.617 6	0.085 75	4 704.87	451 209.2
2.5	2 085	2.604 9	0.095 64	6 527.20	558 522.4
3.0	2 502	2.592 2	0.104 51	8 517.83	663 735.6

阻尼器一般设置在结构响应最大的位置,对于该工程而言即为跨中。该工程截面为斜腹板钢板梁,阻尼器可设置在桥面板以下、下翼缘上方,如图 10 所示。这样从侧面行人视角看,阻尼器被主梁腹板挡住,不影响桥梁整体景观效果。

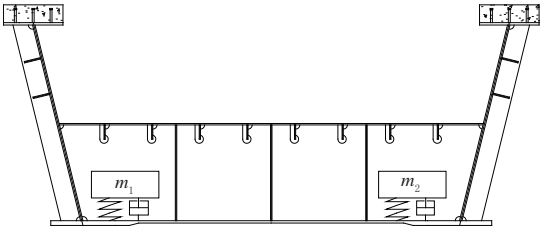


图 10 TMD 安装位置

3.3 查看计算结果

设置 TMD 后分别查看结构的最大竖向加速度、跨中最大竖向位移结果,整理可得质量比-加速度曲线、质量比-位移曲线,见图 11、图 12。

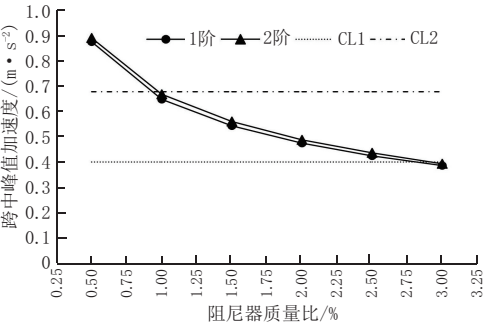


图 11 质量比-加速度曲线

由图 11、图 12 可见,随着阻尼器质量的增加,结构的加速度响应和位移响应均有所减少。质量比为 1% 时,已可满足《城市人行天桥与人行地道技术规范》(征求意见稿)中对于 CL2(合格)等级的舒适度

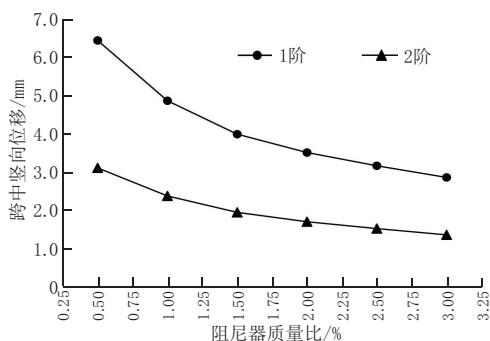


图 12 质量比-位移曲线

要求(小于 0.68 m/s^2);质量比为 3% 时,基本满足上述规范中对于 CL1(优秀)等级的舒适度要求(小于 0.404 m/s^2)。但随着阻尼器质量比的增加,减振效果并不能线性增长。

TMD 的减振效果通常用减振率表示,减振率 δ 定义为^[10]:

$$\delta = \frac{a_{\text{无控}} - a_{\text{有控}}}{a_{\text{无控}}} \times 100\% \quad (7)$$

对比安装 TMD 前后的结构减振效果(见图 13)可见,随着阻尼器质量比的增加,减振效果越来越好。并且在同样质量比下,TMD 对 1 阶振动的控制效果优于对 2 阶振动的控制效果。

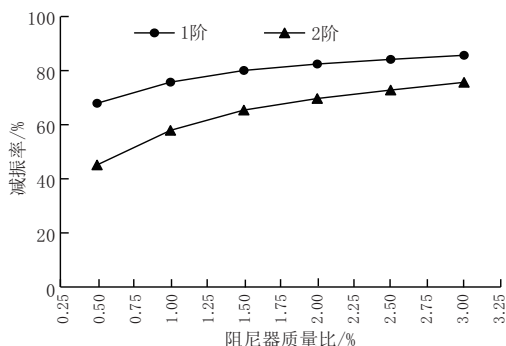


图 13 质量比-减振率曲线

4 结 语

(1)随着城市人行天桥逐渐向轻盈、简约的方向发展,结构的自振频率和舒适度控制往往成为制约人行桥设计的重要因素,设计中不能忽略这方面的考量。

(2)在梁高、跨径、材料、结构形式受制约的情况下,添加 TMD 可以有效控制人致振动。阻尼器 3 个重要参数分别为频率、刚度、阻尼比(或阻尼系数),正确选用设计参数才能有效控制结构振动。

(3)阻尼器质量并非越大越好,具体设计时应根据舒适度控制目标、经济性、可操作性等方面综合选取合理的 TMD 设计方案。

参考文献:

- [1] RFS2-CT—2007-00033, Design of footbridges guideline:EN 03[S].
- [2] AASHTO GSDPB—2009 LRFD, Guide specifications for design the of pedestrian bridges revision 2[S].
- [3] 殷新锋,杨涛,陈鹏,等.地震及人行荷载作用下人行桥 TMD 减振分析[J/OL]. 交通科学与工程, 1-9[2025-07-03]. <https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20221102003>.
- [4] 蔡华权,刘爱荣,黄友钦,等.三肢星型人行桥人致振动舒适度及减振研究[J].工程力学,2025,42(增刊1):71-77.
- [5] 陈建兵,谢永靖,李祖辉,等.变截面钢桁梁人行桥人致振动及振动控制研究[J].地震工程与工程振动,2024,44(6):23-35.
- [6] 樊亭,张春文,胡显昊,等.大跨连廊结构的人致振动效应及 TMD 减振控制[J].结构工程师,2024,40(5):28-35.
- [7] 李娟燕,马旭明,魏汝海,等.大跨径人行玻璃悬索桥人致振动舒适度分析及减振设计[J].世界桥梁,2024,52(5):104-109.
- [8] 吴刚杰,陈得意,李智海.人-桥-TMD 振动舒适度分析及减振研究[J/OL]. 振动工程学报, 1-9[2025-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20241012.1006.002.html>.
- [9] 符川.TLCD-结构转化为 TMD-结构减振控制的研究[J].工程力学,2016,33(4):114-120;129.
- [10] 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.

《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

