

钢桁架人行桥人致振动控制设计

邹卓,鲁思宁,陈春霞

(浙江数智交院科技股份有限公司,浙江 杭州 310000)

摘要:我国现行规范明确要求人行桥竖向基频不低于3 Hz,而大跨度人行桥受自身结构特性影响,往往难以满足该指标。参考德国《人行桥设计指南》(EN03—2007)发现,限制人致振动加速度更适合大跨度人行桥设计。以简支钢桁架人行桥为工程背景,根据《人行桥设计指南》(EN03—2007)规范规定的人行荷载模式,分析了结构振动加速度,评价了行人舒适度。通过参数分析优化了调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)与主体结构的质量比和频率比。结果表明,减振率随着TMD的质量比增大而增大,但并非线性关系,当质量比达到1.5%以上时,减振率的提升幅度明显变小;而TMD频率比的变化对振动加速度的影响较小,减振效果优化不明显。选取质量比为1.0%的TMD可使简支钢桁架人行桥人致振动减振率达到74.8%,达到《人行桥设计指南》(EN03—2007)规范的最好舒适度要求。

关键词:钢桁架人行桥;人行荷载;人致振动;舒适度;减振率

中图分类号:U441.3;TU997

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2026)06-0270-05

Design of Human-induced Vibration Control for Pedestrian Steel Truss Bridges

ZOU Zhuo, LU Sining, CHEN ChunXia

(Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: China's current codes clearly stipulate that the vertical fundamental frequency of footbridges shall not be less than 3 Hz. However, due to the influence of their own structural characteristics, long-span footbridges are often difficult to meet this requirement. With reference to the German design of footbridges guideline (EN03—2007), it found that the method limiting vibration acceleration was more reasonable for the design of long-span footbridges. A simply-supported steel truss pedestrian bridge was taken as the engineering background in this paper. Based on the pedestrian load patterns specified in the EN03—2007 guideline, the structural vibration acceleration was analyzed and the comfort evaluation was conducted. The mass ratio and frequency ratio between the Tuned Mass Damper (TMD) and the main structure were optimized through parametric analysis. The calculated results indicate: The vibration reduction rate increases with the increase of the mass ratio of TMD, but the relationship is not linear; when the mass ratio exceeds 1.5%, the improvement amplitude of the vibration reduction rate decreases significantly. In contrast, the change of the frequency ratio of TMD has a minor impact on the vibration acceleration, and the optimization effect of vibration reduction is not obvious. Selecting a TMD with a mass ratio of 1.0% achieves a human-induced vibration reduction rate of 74.8% for the simply-supported steel truss footbridge, meeting the highest comfort level requirement specified by the EN03-2007 guideline.

Keywords: steel truss footbridge; pedestrian-induced forces; pedestrian-induced vibration; vibration comfort; vibration reduction rate

0 引言

钢桁架桥由于跨越能力强,在净空受限的城市人行桥中应用广泛。由于受使用功能的影响,此类钢桁架桥多为大跨、轻质结构,自振频率容易接近人

行步频,引起共振现象,给行人带来不适。目前,国内外已制定了用于评价人行桥舒适度的相关标准与规范。我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)^[1]中明确规定,人行桥的竖向基频应不低于3 Hz,但大跨度人行桥受自身结构特性影响,往往难以满足该指标。与之不同的是,德国《人行桥设计指南》(EN03—2007)规范^[2]则将人行荷载作用下的加速度峰值作为舒适度的核心评价指标。

收稿日期:2025-11-20

作者简介:邹卓(1994—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

1956 年 Den Hartog^[3]首次提出减振器的基本原理,此后一些学者对 TMD 装置在人行桥减振中的应用开始了大量研究。樊健生等^[4]分析了 S(单)TMD 及 M(多)TMD 在梁式人行桥减振设计中的最优参数。Tubino 等^[5]提出了一种基于减振效率最大化的数值优化准则,通过优化 TMD 参数来减弱人行桥的人致振动。Liang kun Wang^[6]等研究了半主动可变量 TMD 在梁式人行桥中的应用。朱准峰^[7-9]等研究了 TMD 对人行悬索桥的减振控制。周望^[10]和戚志河^[11]等利用 TMD 对人行斜拉桥进行减振措施设计。温青^[12]和陈建兵^[13]等采用有限元模拟和现场实测两种方式,研究了 TMD 在连续钢桁梁人行桥人致振动减振设计中的效果。田颖^[14]和蔡华权^[15]等利用 TMD 对异形钢结构人行桥开展减振研究。

目前,研究人员对不同结构类型人行桥的人致振动响应及人致振动控制均有研究,但针对大跨度简支钢桁架人行桥的研究较少,以一座城市简支钢桁架人行桥实际工程为背景,计算分析了结构动力特性,根据《人行桥设计指南》(EN03—2007)规范确定了人行荷载,分析了结构振动加速度,评价了行人舒适度,通过参数分析优化了 TMD 设计参数,研究了最优 TMD 布置方案。研究结果可为同类型桥梁的减振设计提供参考依据,具有重要工程应用意义。

1 人致振动控制理论

改善桥梁人致振动响应的核心方法主要有两类,其一为优化结构固有频率,使其脱离人行荷载的基频区间,该方法通常通过增大结构刚度实现,但会伴随结构尺寸与质量增加,进而影响景观效果及经济性;其二为提升桥梁阻尼以削弱共振效应,调谐质量阻尼器(TMD)是此类方法中的核心技术措施。在外荷载激励作用下,若 TMD 系统的自振频率与主结构振动频率相近,TMD 会随主结构同步振动,并向主结构施加反向作用力,最终达到削弱主结构振动响应的效果。因此,合理选取 TMD 参数起关键作用,其核心参数为质量比、频率比及阻尼比。1956 年,Den Hartog^[3]以简谐人群荷载激励下主结构的稳态响应为目标,求解了无阻尼结构的 TMD 最优参数:

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu}; \quad \zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (1)$$

式中: α_{opt} 为最优频率比; ζ_{opt} 为最优阻尼比; μ 为 TMD 与主结构的质量比, $\mu = m_d/m$ 。

人致振动时桥梁结构一般为小阻尼结构,可选取无阻尼结构的 TMD 最优参数作为初始迭代值,通过优化分析,确定该结构的最优 TMD 设计参数。

2 人行钢桁架桥动力特性及舒适度评价

2.1 工程概况及计算模型

本文以一座下承式简支钢桁架人行桥为工程背景,桥梁跨径 77 m,桥宽 4 m,主桁采用三角形桁架,主桁中心间距 4.8 m,桁高 5 m,节间长 7 m,上弦 10 个节间,下弦 11 个节间。桥面采用 25 cm 厚 C40 混凝土桥面板,桁架采用 Q355 钢材。人行桥桥型立面图如图 1 所示,各构件截面特性如表 1 所示。

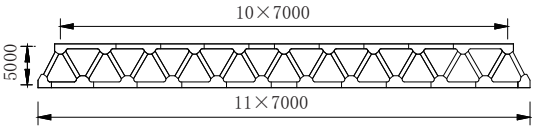


图 1 钢桁架人行桥立面图(单位:mm)

表 1 材料及截面特性

构件	截面形状	面积/ m ²	竖弯 惯性矩/m ⁴	侧弯 惯性矩/m ⁴	弹性模 量/MPa
上弦杆	箱形	6.34×10 ⁻²	3.50×10 ⁻³	2.21×10 ⁻³	2.06×10 ⁵
下弦杆	箱形	6.72×10 ⁻²	4.78×10 ⁻³	2.50×10 ⁻³	2.06×10 ⁵
支点腹杆	箱形	5.47×10 ⁻²	2.86×10 ⁻³	1.47×10 ⁻³	2.06×10 ⁵
其他腹杆	工字形	1.90×10 ⁻²	6.56×10 ⁻⁴	1.98×10 ⁻⁴	2.06×10 ⁵
横梁	工字形	1.87×10 ⁻²	1.74×10 ⁻⁴	1.09×10 ⁻⁴	2.06×10 ⁵
平联	工字形	1.11×10 ⁻²	2.01×10 ⁻⁴	3.69×10 ⁻⁵	2.06×10 ⁵
桥面板	矩形	—	—	—	3.25×10 ⁴

采用 MIDAS Civil NX 建立钢桁架人行桥的有限元模型,主桁边界约束条件模拟为简支结构,采用梁单元模拟主桁杆件,采用板单元模拟混凝土桥面板,全桥共有节点 638 个,梁单元 550 个,板单元 264 个。全桥有限元模型如图 2 所示。

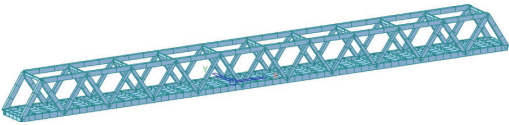


图 2 钢桁架人行桥有限元模型

2.2 结构自振特性

对结构模态分析得到各阶自振频率和振型形状,结构的前 6 阶振型如表 2 所示,振型形状如图 3 所示。

2.3 舒适度评价

依据德国规范《人行桥设计指南》(EN03—2007),当竖向振动频率位于 1.25 ~ 2.30 Hz 的范围、侧向振动频率位于 0.5 ~ 1.2 Hz 的范围时,在人行荷载下容易发生共振,须进行舒适度评价。对于竖向或纵向

表2 振型描述

模态号	频率/Hz	主要振型描述
1	1.180	一阶侧弯
2	1.893	一阶竖弯
3	2.802	一阶扭转
4	3.279	二阶侧弯
5	5.430	三阶侧弯
6	5.720	二阶竖弯

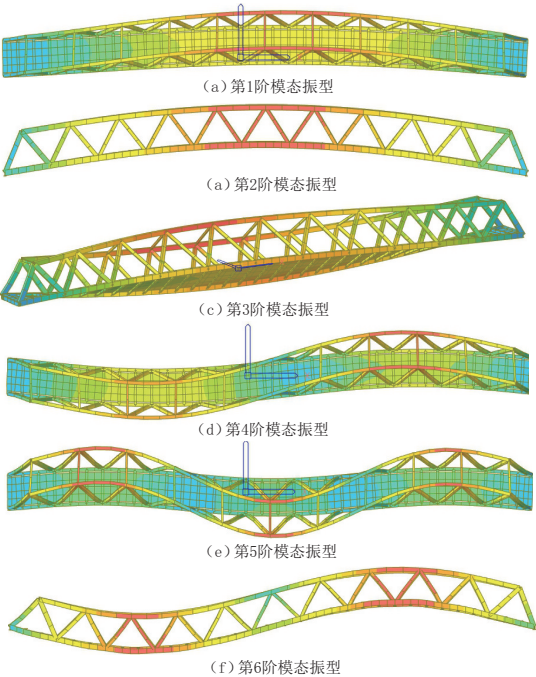


图3 部分振动模态

振动频率在2.5~4.6 Hz之间的人行天桥,可能被人行荷载的二次谐波激励共振,也应进行舒适度评价。侧向振动不受人行荷载的二次谐波影响。从表2可得,本桥第1、2阶自振频率分别为1.180、1.893 Hz。故计算第1阶模态侧向振动的最大加速度响应,计算第2阶模态竖向振动的最大加速度响应。本桥第3、4阶频率位于2.5~4.6 Hz之间,但是振型形态为扭转和侧弯,因此不用考虑人行荷载的二次谐波影响。

EN03—2007规定的等效人行荷载为:

$$P(t)=P\times\cos(2\pi f_s t)\times n'\times\psi\tag{2}$$

式中: P 为步频等于 f_s 时单人行产生的荷载幅值,竖向振动计算时取280 N,横向振动计算时取35 N; f_s 为行人步频,该参数与人行桥的自振频率相等; t 为行人荷载作用时间; n' 为等效行人密度; ψ 为考虑概率影响引入的折减系数。等效行人密度由行人密度 d 换算得出,本桥计算时采用《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》规定的最大行人密度 $d=4.6$ 人/ m^2 。

舒适度评价主要依据加速度峰值进行判断,《人

行桥设计指南》(EN03—2007)规定的舒适度等级如表3所示。

表3 EN03-2007舒适度等级与加速度限值

舒适度等级	舒适度	竖向加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	水平加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
CL1	最舒适	<0.5	<0.1
CL2	中等舒适	0.5~1.0	0.1~0.3
CL3	不舒适	1.0~2.5	0.3~0.8
CL4	不可接受	>2.5	>0.8

将依据式(2)求得各模态下的人群荷载施加在该人行桥上,再选取1/2跨截面及1/4跨截面计算结构加速度响应,并评价各位置舒适度,结果如表4所示。

表4 加速度分析结果及舒适度评价

模态	主跨	1/4截面	1/2截面
竖向 2	峰值加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	1.16	1.56
	舒适度评价	不舒适	不舒适
侧向 1	峰值加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	0.15	0.19
	舒适度评价	中等舒适	中等舒适

由表4可知,竖向振动时1/4跨和1/2跨截面的舒适级别都达到了“不舒适”等级,不满足规范设计要求,因此须对该桥第2阶竖向振动模态进行减振设计。而侧向振动达到了“中等舒适”等级,但是《人行桥设计指南》(EN03—2007)表明当桥面行人数量多到一定程度时,侧弯基频低于1.2 Hz的人行桥易发生侧向发散振动,即侧向“锁定”现象。即桥梁发生振动时,桥面行人会通过自主调整步频与步幅,实现与桥梁振动的动态适配。当群体中多数行人形成这一适应性步态后,会产生显著的行人-桥梁耦合效应,进而加剧桥梁的振动响应,直至振动强度超出人体舒适度阈值,行人被迫停止行进。当侧向加速度大于0.10~0.15 m/s^2 时,则有可能触发“锁定”现象。为避免发生“锁定”现象,规范推导了桥梁产生侧向动力失稳现象的临界人数。但考虑通行效率和运营成本等原因,该桥在运营阶段限制通行人数较为困难,因此需要对侧向振动进行减振设计。

3 侧向减振设计

由于一阶侧弯频率为1.18 Hz,接近1.2 Hz,舒适度已经达到中等舒适级别,同时原设计平联设置较为薄弱,因此通过加强平联设计来使得一阶侧弯频率远离侧向共振敏感范围,平联设计优化前后对比如图4所示。优化后一阶侧弯频率为1.71 Hz>1.2 Hz,优化后前6阶振型如表5所示。

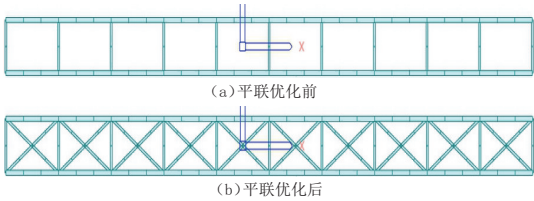


图 4 平联形式优化设计

表 5 平联形式优化后振型描述

模态号	频率/Hz	主要振型描述
1	1.710	一阶侧弯
2	1.906	一阶竖弯
3	3.730	一阶扭转
4	4.520	二阶侧弯
5	5.719	二阶竖弯
6	7.536	二阶扭转

根据《人行桥设计指南》(EN03—2007)规范计算等效行人荷载,由于规范中规定当结构侧向自振频率大于 1.2 Hz 时,折减系数 ψ 取值为 0,此时 $P(t)=0$,即人群荷载对结构产生侧向力为 0,结构的侧向加速度也为 0。为与平联优化前的结构振动加速度进行对比,取 $\psi=0.5$ 计算等效人群荷载,分析结果如表 6 所示,可以看出,加强平联设计明显减小了结构的侧向振动加速度。

表 6 平联优化前后舒适度评价

工况	主跨	1/4 截面	1/2 截面
平联优化前	峰值加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	0.15	0.19
	舒适度评价	中等舒适	中等舒适
平联优化后	峰值加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	0.082	0.98
	舒适度评价	很舒适	很舒适

4 竖向减振设计

4.1 TMD 参数分析

4.1.1 质量比

以无阻尼结构 TMD 的最优参数作为初始迭代值,通过 TMD 参数敏感性分析,最终确定有阻尼结构对应的 TMD 最优参数。考虑到第 2 阶振型跨中截面的模态位移幅值最大,为简化参数分析流程,先将 TMD 装置布置于桥梁 1/2 跨处开展计算;待 TMD 最优参数明确后,再进一步开展 TMD 布置数量及具体安装位置的优化设计。

第 2 阶竖弯振型对应的模态质量为 489.66 t,基于 Den Hartog 求解的无阻尼结构最优参数,计算得到的结构无阻尼时的 TMD 最优参数结果如表 7 所示。质量比与结构最大加速度响应的关系如图 5 所示,质量比与减振率的关系如图 6 所示。

由图 6 可见,TMD 质量比与减振效果呈正相关,

表 7 无阻尼结构的最优参数(第 2 阶模态)

质量 m_d/kg	质量比 μ	频率比 α_{opt}	阻尼比 ζ_{opt}	刚度 $k_{\text{opt}}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	阻尼系数 $c_{\text{opt}}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
1224.1	0.25%	0.998	0.031	174689.6	892.1
2448.3	0.50%	0.995	0.043	347643.2	2507.7
4896.6	1.00%	0.990	0.060	688419.4	7005.4
7344.8	1.50%	0.985	0.073	1022480.4	12711.9
9793.1	2.00%	0.980	0.084	1349974.3	19332.3
12241.4	2.50%	0.976	0.093	1671044.9	26689.4
17137.9	3.50%	0.966	0.109	2294474.2	43150.9

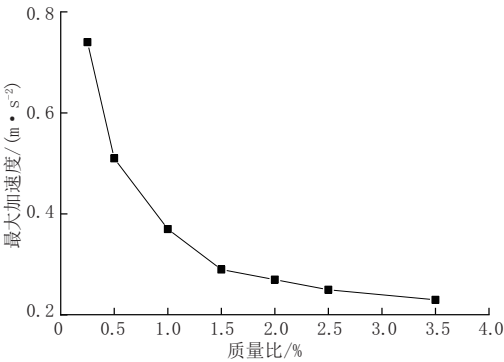


图 5 不同质量比时 1/2 跨最大加速度

但减振率并非线性提升,当质量比达到 1.5% 以上时,减振率的提升幅度明显变小。质量比的增大会导致 TMD 的体积增大,会加大 TMD 安装难度,同时过大的质量比也会影响结构承载力和经济性,从图 6 可得,选取 1.0% 质量比的 TMD 可使结构最大竖向加速度减弱至 $0.37 \text{ m/s}^2 < 0.5 \text{ m/s}^2$,满足规范所述最优舒适度等级,故选取 TMD 质量为 4 896.6 kg (1.0% 质量比)。

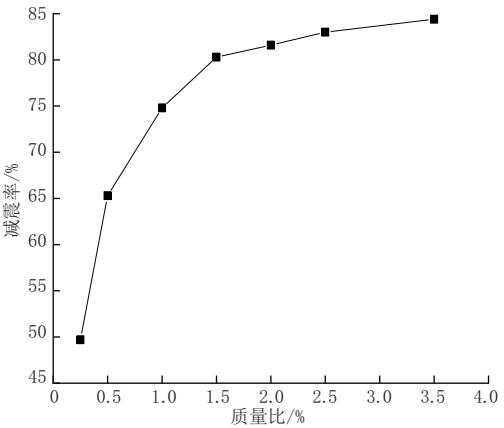


图 6 不同质量比时 1/2 跨减振率

4.1.2 频率比

当质量比取 1.0 时,无阻尼结构的 TMD 频率比为 0.990。为确定有阻尼结构的最优参数,以 0.008 为频率比增量,计算不同频率比下结构的最大竖向加速度,结果如图 7 所示。由图 7 可见,频率比变化对竖向最大加速度影响较小,在频率比为 1.022 时,竖向

加速度取得最小值 0.35 m/s^2 ,此时相应的TMD刚度为 $733\ 637.9\text{ N/m}$,阻尼系数为 $7\ 231.9\text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。

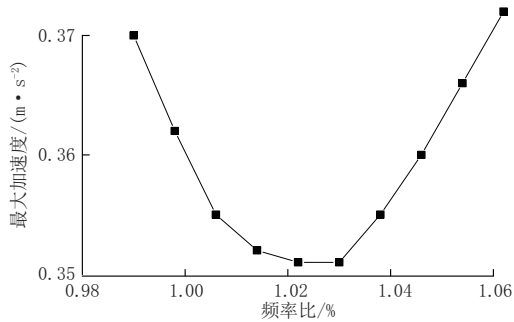


图7 不同频率比时1/2跨最大加速度

4.2 TMD 设置方案

TMD 通常布置于各阶模态振型的位移极值位置,以此确保其发挥最优减振效能。本桥以第2阶振型为基础,分析了TMD的最优参数,但是结构振动会受到高阶振型的影响。因此,需针对 TMD 的安装位置与布置数量开展针对性分析,探讨其对结构竖向加速度的影响。在TMD总质量($4\ 896.6\text{ kg}$)、总刚度($733\ 637.9\text{ N/m}$)和总阻尼($7\ 231.9\text{ N}\cdot\text{s/m}$)不变的情况下,设计三种布置方案,如表8所示。

表8 TMD 布置方案

方案	数量/个	TMD 安装位置	最大竖向加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	减振率
一	1	跨中一个	0.37	74.8%
二	2	1/4跨和3/4跨各一个	0.55	62.6%
三	3	跨中一个 1/4跨和3/4跨各一个	0.47	68.0%

人行荷载作用下,桥梁安装TMD前后不同截面的加速度响应,分别如图8、图9所示。由图8、图9分析可得,TMD的施加显著减弱了结构的振动加速度。其中,跨中单处布置TMD为最优方案,减振率达74.8%,满足规范最优舒适度等级要求。人行荷载激励下,桥梁加速度响应快速减弱至稳定状态,充分表明调谐质量阻尼器优异的减振作用。该TMD质量仅占主梁质量的1.0%,可布置于桁架跨中两道横梁之间,不影响桥梁美观及承载力。

5 结 论

(1) 简支钢桁架人行桥自振频率偏低,往往难以满足我国现行规范中竖向基频不小于 3 Hz 的要求。可参考德国《人行桥设计指南》(EN03—2007)规范进行舒适度评价,为钢桁架人行桥的动力设计提供重要参考依据。

(2) 横向减振设计通过增加平联刚度来使得自

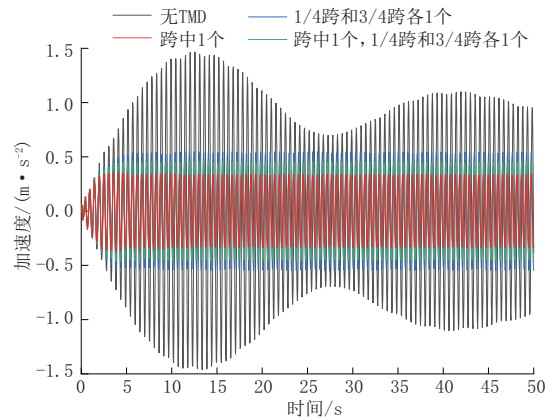


图8 设置TMD前后跨中位置加速度响应

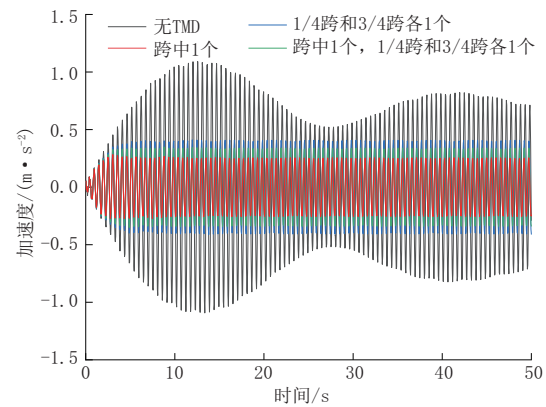


图9 设置TMD前后1/4跨位置加速度响应

振频率远离横向共振敏感范围,竖向减振设计以无阻尼结构的TMD最优参数为初始值,通过对TMD质量比与频率比的参数分析,确定有阻尼结构的TMD最优参数。分析表明,TMD质量比与减振效果呈正相关,但二者并非线性关系,当质量比达到1.5%以上时,减振率的提升幅度明显变小。结合工程实际,该桥选取TMD的质量比为1%。频率比变化对加速度响应影响较小,减振效果优化提升不明显,因此实际工程中可不针对频率比进行额外优化设计,仍能满足工程要求。

(3) TMD对简支钢桁架人行桥的减振作用显著,安装后各工况下桥梁振动可快速趋于稳定,减振率达74.8%,满足规范最优舒适度等级要求。该减振方案附加质量小,不会影响桥梁外观及结构承载性能,是控制简支钢桁架人行桥人致振动的有效技术手段。

参考文献:

[1] CJJ 69—1995 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
[2] EN03—2007 Design of Footbridges Guideline[S].
[3] Den Hartog J P. Mechanical Vibrations[M]. 4th ed. NY: McGraw-Hill, 1956.
[4] 樊健生,陈宇,聂建国.人行桥的TMD减振优化设计研究[J].工程力学,2012,29(9):133-140;156.

(下转第300页)