

基于 MTMD 的大跨人行悬索桥减振措施研究

张彦玲^{1,2}, 程 艺^{1,2}, 王泽涵^{1,2}, 王昂洋³

(1.石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,河北 石家庄 050043;

2.石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;

3.国网河北省电力有限公司 沧州市供电分公司,河北 沧州 061000)

摘要:为了研究多重调谐质量阻尼器装置(MTMD)在大跨人行悬索桥上的减振效果,依托某景区大跨人行悬索桥,采用 Midas/Civil 建立了有限元模型,根据行人步频范围内的桥梁自振频率进行了人致振动和行人舒适度分析;采用 MTMD 进行了人行悬索桥的竖向减振分析,通过 MTMD 系统的参数优化,对减振效果进行了研究。研究表明,主梁加速度极值随行人密度的增加而增大,计入人群质量后加速度极值减小,不同行人步频下主梁加速度极值受加载模态振型和荷载折减系数 ψ 的影响;以根据受控频率得到的 MTMD 系统参数为基准,随着参数比例系数的增加,主梁竖向加速度最大值减小,减振率增大,但最优参数需根据减振率和系统总质量综合确定;安装 MTMD 系统后,人行悬索桥主梁受控频率下的最大减振率达到 39.1%,说明 MTMD 系统的减振效果明显。研究内容可对同类结构的减振措施提供参考。

关键词:桥梁工程;人行悬索桥;人致振动;减振分析;多重调谐质量阻尼器

中图分类号: U448.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0001-10

0 引言

由于新材料的使用和更现代化的施工和设计方法,以及充分考虑建筑与环境的融合,人行桥向轻质、细柔方向逐步发展,这也导致桥梁自振频率较低,可能会引起行人的舒适性下降,甚至发生人桥共振现象危及人身安全,当舒适度不满足要求时则需采用必要的减振措施。

减振方法主要分为 2 种:一种是通过改变桥梁结构自重与刚度从而达到降低振动响应的效果;另一种是利用调谐质量阻尼器(TMD)进行减振。Den^[1]提出了 TMD 概念,分析了无阻尼吸振器的理论,并对不同参数的单个 TMD 系统减振效果进行分析,得到了最优的控制参数求解方法,并总结了最优的参数表达式;基于 TMD,王立彬等^[2]对某大跨钢结构人行桥、刘梦渝^[3]对人行拱桥和人行悬索桥进行了减振分析。1984 年,Iwanami et al^[4]提出了由多个 TMD 组成的 STMD 系统的概念,但其减振效果依赖于自身频率与主结构频率精确接近,导致其自身控制的有效频率范围受限。1987 年,Clark et al^[5]设计出了多重调谐质量阻尼器装置(简称 MTMD),其设计原理与 TMD 一致,主要不同在于 MTMD 选取多个 STMD 子结构控制多种频率,从而改进了 TMD 系统的控制稳定性和控制带宽较小的问题。肖学双^[6]、Li et al^[7]分别采用 MTMD 对钢结构人行桥进行舒适度及振动控制研究,提出了此类人行桥的舒适度评价标准;高飞^[8]针对小半径曲线梁桥的弯扭耦合受力特性,研究了 TMD 和 MTMD 对其在地震作用下震动的控制效果;Domizio et al^[9]研究了地震作用下结构的非线性动力响应,进行了 MTMD 减振系统的参数优化。

针对不同桥梁的独特性,MTMD 的设置效果也不相同。以某带风缆的大跨径人行玻璃悬索桥为工程背景,采用 Midas 建立有限元模型,首先进行自振特性和主梁的人致振动分析,并对行人舒适度进行评价,然后基于多重调谐质量阻尼器装置 MTMD 对主梁进行竖向减振措施研究,通过 MTMD 系统的参数

收稿日期:2022-03-25 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220070

基金项目:国家自然科学基金(51778377);河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室开放基金(KLLSHMC2112)

作者简介:张彦玲(1973—),女,教授,研究方向为桥梁结构分析、组合结构桥梁。E-mail:06mzhang@163.com

张彦玲,程艺,王泽涵,等.基于 MTMD 的大跨人行悬索桥减振措施研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(3):1-10.

选取和优化,得到最佳减振效果,验证 MTMD 在大跨径人行玻璃悬索桥上的减振效果。

1 工程背景

某地锚式单跨简支玻璃人行悬索桥,桥面宽度 4.6 m,主缆跨径布置为(40+580+40)m,矢跨比为 1/10.8,矢高 53.3 m。主缆采用 19 股 91 丝 $\Phi 5.1$ mm 的镀锌高强度平行钢丝成品索;吊杆沿顺桥向布置,间距为 3 m,采用 61 丝 $\Phi 5$ mm 的平行钢丝成品索。抗风缆跨度 516 m,面内矢跨比为 1/17.2,采用 3 股 91 丝 $\Phi 5.1$ mm 的镀锌高强度平行钢丝成品索;抗风拉索采用 $\Phi 30$ mm 的 ZAA6-7+WSC1 770 钢丝绳,平行布置,自距离索鞍 38 m 起,每隔 6 m 布置一根抗风拉索。抗风拉索所在平面与主梁水平面夹角为 30° 。采用无塔式结构,将塔索鞍设立在山头上。主梁标准节骨架由纵梁和横梁构成,纵、横梁皆为箱型截面,钢材采用 Q345。标准节高为 0.6 m,宽为 3 m。桥面板采用特制钢化玻璃安装在 2 个纵梁之间。桥梁布置如图 1 所示。

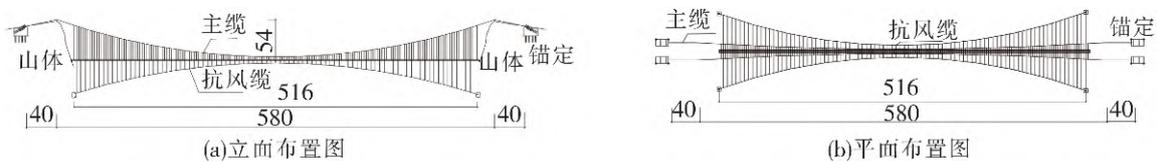


图 1 人行悬索桥布置图(单位:m)

2 人致振动及行人舒适度分析

2.1 有限元模型

采用 Midas/Civil 建立有限元模型,其中主缆、吊杆、抗风缆和抗风拉索采用索单元,主梁和横梁采用梁单元。边界条件为:① 主缆锚碇处、抗风缆锚碇和索鞍底部处做固结处理;② 主缆在索鞍处释放 X 轴(纵桥向)方向的位移约束;③ 主梁一端为固定铰支座,另一端为活动铰支座;④ 主缆和吊杆、吊杆和主梁、抗风拉索和主梁、抗风缆和抗风拉索之间均采用刚接。由于悬索桥属于柔性结构体系,表现为非线性大变形,因此进行了合理成桥状态的主缆和抗风缆精确线形。找形后得到的有限元模型共 1 912 个节点,2 760 个单元,其中梁单元 1 729 个,索单元 1 031 个。全桥模型及主梁局部模型如图 2 所示。

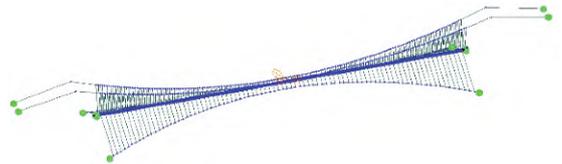


图 2 有限元模型图

2.2 人致振动分析

2.2.1 行人荷载

行人荷载依据文献[10]选取,计算公式为

$$P(t) = P_0 \cos(2\pi f_p t) n' \psi \quad (1)$$

式中, $P(t)$ 为简谐波荷载; P_0 为振幅幅值,当取竖向振动模态时, P_0 取 280 N/m^2 ,当取横向振动模态时, P_0 取 35 N/m^2 ; f_p 为行人步频; t 为时间; n' 为等效人流密度,即将单位面积内的行人人数(行人密度) n 等效成 n' 个完全同步移动的行人荷载模型,当单位面积行人人数小于 1 时, $n' = 10.8\sqrt{\xi n}/S$,大于或等于 1 时, $n' = 1.85\sqrt{n}/S$,其中, ξ 为结构阻尼系数,本桥为钢结构主体,取 ξ 为 0.02, S 为人群荷载实际加载面积; ψ 为行人频率接近模态频率范围值的概率而引起幅值变化的折减系数,取值见文献[10]。

2.2.2 行人步频范围内的振型及频率

依据文献[10]规定,行人竖向一阶频率在 1.25~2.3 Hz 之间;横向一阶频率在 0.5~1.2 Hz。当行人荷载频率与桥梁频率一致时易引起共振,因此需选择行人步频范围内的振型进行舒适度研究。通过特征值分析,可以得到不考虑人群密度,以及取行人密度 n 分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 人/ m^2 时,行人步频范围内的横弯及竖弯自振频率,以及行人频率取该频率时的折减系数 ψ ,见表 1 所示。

表 1 竖向和横向步频范围内的自振频率及折减系数 ψ

振动模态	振动阶数	不考虑人群		0.5 人/m ²		1.0 人/m ²		1.5 人/m ²		2.0 人/m ²	
		f /Hz	ψ	f /Hz	ψ	f /Hz	ψ	f /Hz	ψ	f /Hz	ψ
横弯	3	0.565	0.325	0.553	0.265	0.544	0.220	0.530	0.150	0.520	0.100
	4	0.733	1.000	0.719	1.000	0.702	1.000	0.668	0.840	0.666	0.830
	5	1.034	0.830	1.005	0.975	0.957	1.000	0.913	1.000	0.959	1.000
	6	1.149	0.255	1.121	0.395	1.096	0.520	1.067	0.665	1.045	0.775
竖弯	13	1.343	0.207	1.309	0.131	1.277	0.060	1.247	0	1.244	0
	14	1.470	0.489	1.433	0.407	1.423	0.384	1.365	0.256	1.335	0.189
	15	1.608	0.796	1.599	0.776	1.599	0.776	1.599	0.776	1.459	0.464
	16	1.745	1.000	1.700	1.000	1.658	0.907	1.620	0.822	1.584	0.742
	17	1.893	1.000	1.845	1.000	1.800	1.000	1.758	1.000	1.713	1.000
	18	2.041	1.000	1.989	1.000	1.940	1.000	1.895	1.000	1.853	1.000
	19	2.200	0.500	2.146	0.770	2.094	1.000	2.045	1.000	1.999	1.000
	20	2.360	0	2.299	0.005	2.243	0.285	2.191	0.545	2.142	0.790

2.2.3 人致振动响应

根据式(1)所示的行人谐波荷载模型,取 f_p 为表 1 中各阶模态所对应的频率,行人密度 n 分别取 0.5、1.0、1.5、2.0 人/m²,并根据图 3 计算横向及竖向振动折减系数 ψ 值,得出不同频率下的行人谐波荷载,然后根据相应的主梁振型图按最不利方式施加到主梁节点上,计算各谐波荷载下主梁各节点的加速度时程,并识别出加速度时程中的最大加速度值,再通过比较取出各节点中最大加速度值的极大值,简称为加速度极大值。重复以上计算过程,求得不同行人密度下主梁的加速度极大值,见图 3 和图 4。

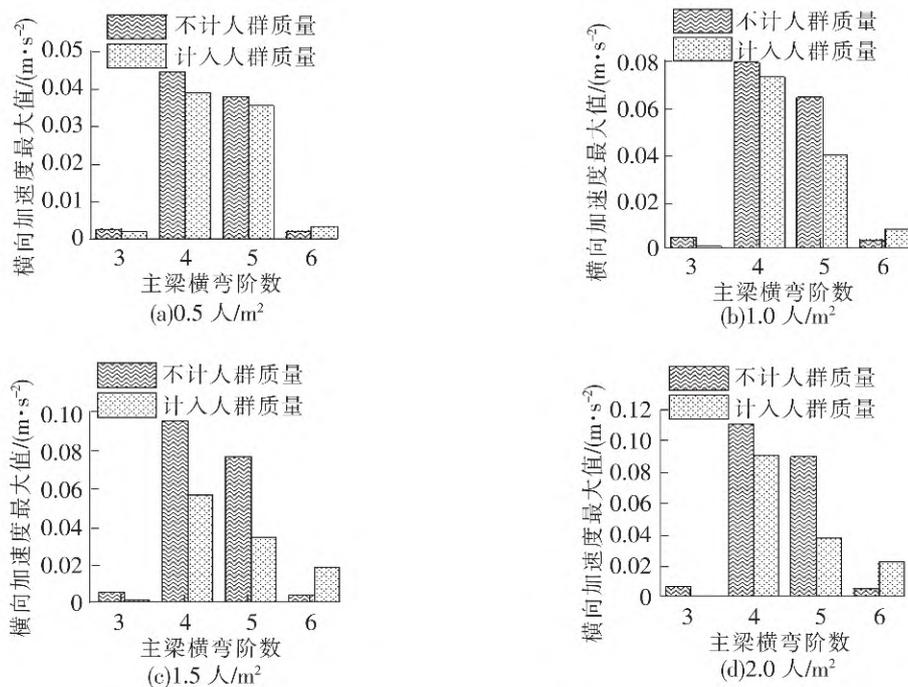


图 3 不同行人密度下主梁横向加速度最大值

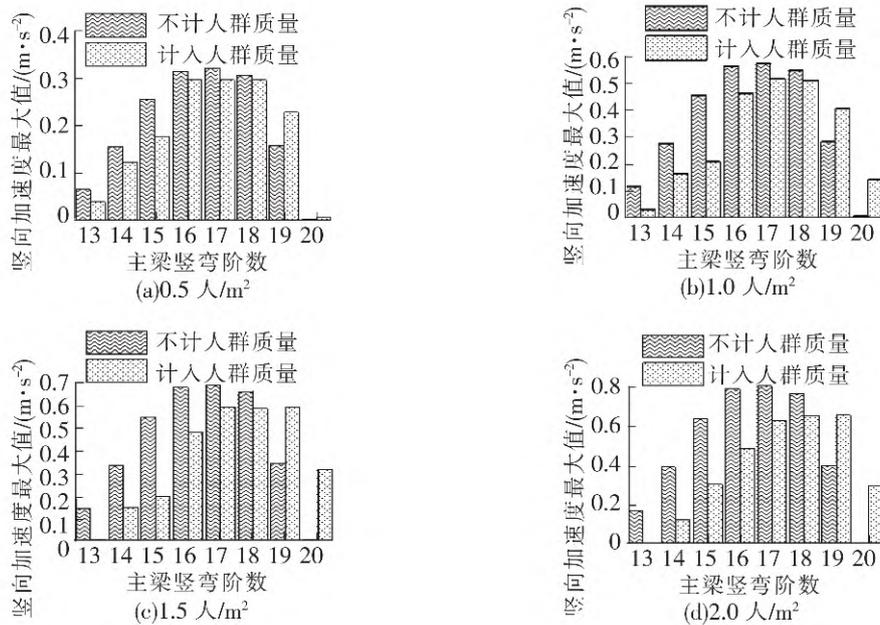


图 4 不同行人密度下主梁竖向加速度最大值

由图 3 和图 4 可知,主梁横向和竖向加速度极值随行人密度的增加而增大;计入人群质量后,加速度极值下降;行人步频取桥梁不同阶固有频率时引起的主梁加速度极值不同,这与所加载的模式振型形状、不同步频时所对应的荷载折减系数 ψ 这 2 种因素有关。

2.3 行人舒适度分析

文献[10]根据结构加速度,将行人舒适度分为 4 个等级:加速度在横向小于 0.1 m/s^2 、竖向小于 0.5 m/s^2 时为很舒适状态;横向在 $0.1 \sim 0.3 \text{ m/s}^2$ 、竖向在 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}^2$ 时为中等舒适状态;横向在 $0.3 \sim 0.8 \text{ m/s}^2$ 、竖向在 $1.0 \sim 2.5 \text{ m/s}^2$ 时为不舒适状态;横向大于 0.8 m/s^2 、竖向大于 2.5 m/s^2 时为不可忍受状态。

在图 3 和图 4 中,针对每一种行人密度,取出由不同步频下行人荷载所激励起的加速度最大值中的极值进行舒适度评价,如图 5 所示。

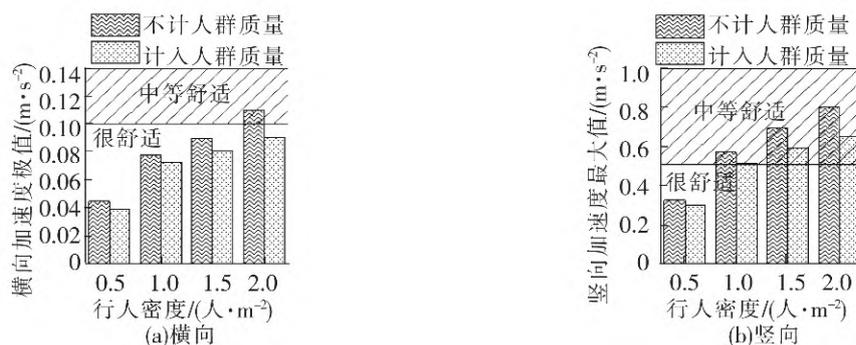


图 5 竖直吊杆模型主梁加速度极值及舒适度评价

由图 5 可知,在行人密度区间 $[0.5 \text{ 人/m}^2, 2.0 \text{ 人/m}^2]$ 内,该人行悬索桥在横向和竖向的人致振动均未进入不舒适区,但只有在行人密度为 0.5 人/m^2 下横向和竖向均处于很舒适区间,横向舒适度在行人密度为 2.0 人/m^2 时进入中等舒适区间,而竖向舒适度在行人密度为 1.0 人/m^2 时已进入中等舒适区。总体来说,该悬索桥的横向舒适度优于竖向舒适度,虽然竖向舒适度在行人密度为 2.0 人/m^2 时仍处于中等舒适区,但加速度极大值已达到 0.8 m/s^2 ,若在景区行人特别密集时仍可能进入不舒适区,因此需进行竖向减振分析。

3 基于 MTMD 的减振措施研究

3.1 调谐质量阻尼器系统减振原理

当主结构受到简谐荷载 $p(t) = p_0 \sin \omega t$ 时,安装 TMD 的无阻尼结构的动力响应放大系数可表示为^[1]

$$A = \frac{X_{\max}}{X_{st}} = \sqrt{\frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\xi_a \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\xi_a \alpha \beta)^2 (1 - \beta^2 - \mu \beta^2)^2}} \quad (2)$$

式中, X_{\max} 为主结构的最大位移; X_{st} 为 p_0 静力作用下的位移; β 为激励频率与主结构频率之比, $\beta = \omega / \omega_s$, ω_s 为主结构的自振频率, $\omega_s = \sqrt{K/M}$; α 为激励频率与 TMD 频率之比, $\alpha = \omega / \omega_a$, ω_a 为阻尼器的自振频率, $\omega_a = \sqrt{k_d/m_d}$; ξ_a 为阻尼器的模态阻尼比, $\xi_a = c_d / (2M\omega_a)$; μ 为阻尼器的模态质量比, $\mu = m_d / M$; M 、 K 分别为主结构的质量和刚度; m_d 、 c_d 、 k_d 分别为阻尼器的质量、阻尼和刚度。

当 $\xi_a = 0$ (即 TMD 阻尼为零) 及 $\alpha = \beta$ (主结构和 TMD 频率相等) 时, $A = 0$, 则主结构达到了最优的控制效果。Den^[1] 给出了最优频率比 α_{opt} 和最优阻尼比 ξ_{opt} 的具体计算公式

$$\begin{cases} \alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \\ \xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \end{cases} \quad (3)$$

TMD 的自振频率只有与主体结构的自振频率保持一致, 才会表现出良好的减振效果, 但实际运营过程中, 桥梁结构在一定频率范围内会产生多种共振情况, 因此单一的 TMD 系统并不能满足实际的减振需要, 而 MTMD 系统由多个子结构 TMD 组成, 每个 TMD 分别控制不同的振动频率, 故可以控制多个模式的振动响应。MTMD 系统需满足 2 个条件: ① 每个 TMD 控制相应的模态振动, 即 TMD 自振频率与受控模态自振频率相同; ② TMD 分别放置在不同模态的振型位移最大处。主体结构施加 MTMD 后, 在外界荷载激励 $p(t)$ 作用下, 设 C 为主结构阻尼, 则桥梁结构的运动方程可表示为^[11-12]

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) - \sum_{i=1}^n c_{di} [\dot{x}_{di}(t) - \dot{X}(t)] - \sum_{i=1}^n k_{di} [x_{di}(t) - X(t)] = p(t) \quad (4)$$

第 i 个 TMD 运动方程为

$$m_{di} \ddot{x}_{di}(t) + c_{di} [\dot{x}_{di}(t) - \dot{X}(t)] + k_{di} [x_{di}(t) - X(t)] = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

将 MTMD 和桥梁结构视作耦合运动系统, 合并方程可得到整体的运动耦合方程

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (6)$$

根据式(6), 结合 Newmark- β 法可以在时域内进行行人简谐荷载作用下整体结构耦合系统的动力时程分析, 也就是安装 MTMD 系统后桥梁结构的振动响应分析。

3.2 MTMD 系统布置

由图 5 可知, 在各种行人密度下, 与行人步频产生共振并激起较大竖向加速度的振型主要包括第 15、16、17、18 阶竖向振动模态, 故选取这 4 个竖向振动模态进行控制, 针对每一阶振型设置一个子结构 STMD, 共 4 个。由于每个 STMD 系统质量较大, 故分成 4 个频率相同的 TMD 阻尼器, 如图 6 所示。

STMD 安装的位置根据 4 个频率下主梁的模态位移幅值来决定, 从有限元模型提取出行人密度为 2.0 人/ m^2 时每个频率对应的振型最大位移正则化图, 如图 7 所示。

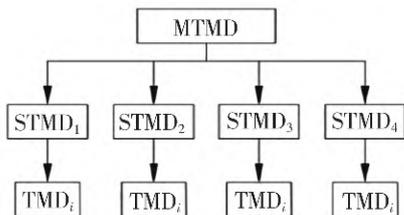


图 6 MTMD 系统结构图

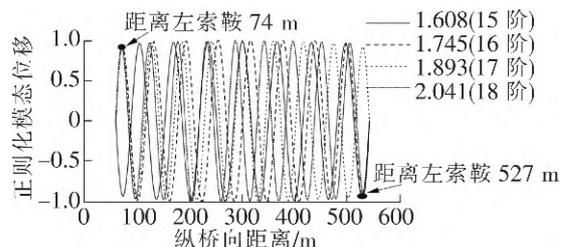


图 7 不同频率下的竖向位移模态组合图

由图 7 可以看出,在纵向距离左索鞍 74 m 和 527 m 处,每个频率下主梁节点的竖向位移均产生了最大位移幅值,因此在这两处设置 STMD 子系统减振效果更明显。为了使结构受力更加对称,在每个位置附近设置 2 个子系统 TMD,在 74 m 处设置 TMD₁ 系统和 TMD₄ 系统;在 527 m 处设置 TMD₂ 系统和 TMD₃ 系统,见图 8。

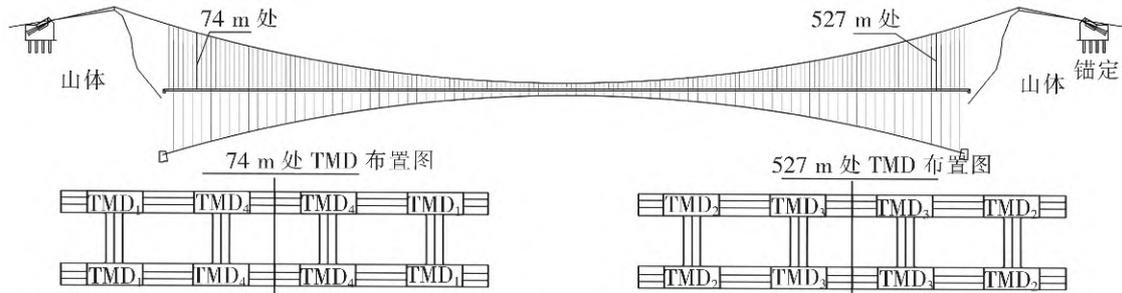


图 8 MTMD 系统安装布置图

3.3 MTMD 初始参数确定

MTMD 主要设计参数包括质量、刚度和阻尼。一般情况下质量和刚度对主结构的影响较大,应优先考虑。通常 MTMD 系统总质量为控制模态广义质量的 1%~5%,此范围内 MTMD 成本低、效果好。基于第 2 节的人致振动分析,采用加速度为优化目标,按如下步骤确定 MTMD 参数:①选取 MTMD 与广义模态质量的比值 μ ;②依据式(2)并结合 μ 值,确定 MTMD 的最优频率比 α_{opt} 和最优阻尼比 ξ_{opt} ;③确定对应于第 n 阶振动模态的子结构 STMD 的质量、刚度、阻尼,计算公式为^[3]

$$\begin{cases} m_d = \mu M_n \\ k_d = 4\pi^2 \alpha_{opt}^2 \omega_s^2 m_d \\ c_d = 4\pi \xi_{opt} \alpha_{opt} \omega_s m_d \end{cases} \quad (7)$$

式中, m_d 为 STMD 的质量; M_n 为第 n 阶受控模态的广义质量; ω_s 为受控模态频率; k_d 为子结构 STMD 最优刚度; c_d 为子结构 STMD 最优阻尼。

考虑到本桥跨度长,自重大等情况,MTMD 系统与桥梁广义质量比 μ 取 3%,故每个 STMD 系统初始质量按照桥梁广义质量的 0.075% 设置,则根据式(6)可得每个 STMD 系统的 $\alpha_{opt} = 0.992 6$, $\xi_{opt} = 0.052 8$ 。再由式(7)计算出每个 STMD 系统的总刚度和总阻尼,如表 2 所示。由于桥梁频率受人群质量的影响,而 MTMD 的参数只能取固定数值,因此表 2 中的频率采用了不考虑行人质量时的数值。

表 2 MTMD 的初始参数

阻尼器子结构	ω_s / Hz	M_n / kg	m_d / kg	$k_d / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_d / (\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1})$
STMD ₁	1.608(第 15 阶)	180 667	1 355.0	136 264	1 614.6
STMD ₂	1.745(第 16 阶)	153 400	1 150.5	136 264	1 371.0
STMD ₃	1.893(第 17 阶)	130 360	977.7	136 264	1 165.0
STMD ₄	2.041(第 18 阶)	112 133	841.0	136 264	1 002.0

3.4 MTMD 参数优化

MTMD 系统参数优化目的是使桥梁振动得到最优控制,同时 MTMD 系统参数达到最优。优化过程中应保持 STMD 自振频率与被控模态频率一致,故参数优化过程中,应使刚度参数与质量参数的变化比例相同;阻尼参数的选取主要与质量有关,因此阻尼参数变化应随着质量参数变化而变化。参数优化步骤如下。

(1)将表 2 中根据受控频率得到的每个 STMD _{i} ($i=1,2,3,4$) 的质量 m_{di} 、刚度 k_{di} 和阻尼 c_{di} 的值定为基准值,取其比例系数 η 为 1.0,然后变化比例系数 η ,使 STMD _{i} 的各参数按比例变化。以控制第 15 阶竖向振动的 STMD₁ 为例,当 $\eta=0.5$ 时,质量 m_{d1} 、刚度 k_{d1} 和阻尼 c_{d1} 的值分别为 $1\ 355 \times 0.5 = 677.5 \text{ kg}$ 、

13 624.4×0.5=68 132.2 N/m、1 614.6×0.5=807.3 Ns/m。通过类似的计算方式,计算出每个 STMD_i 在各种比例系数下的结构参数 m_{di} 、 k_{di} 和 c_{di} 。

(2)把相同刚度系数下的每个 STMD_i 中的 4 个 TMD 对应的 $m_{di}/4$ 、 $k_{di}/4$ 和 $c_{di}/4$ 输入到被控振型中进行计算。例如,当比例系数为 1.0 时,将表 2 所列各 STMD_i 的结构参数除以 4,得到各子系统中每个 TMD 的参数,然后在 Midas 一般连接特性值中设置 TMD 参数,再使用一般连接建立 TMD 单元。根据不同的受控振型,按最不利方式在主梁上施加 2.0 人/m² 的人群简谐波荷载,计算出比例系数为 1.0 时主梁各节点的竖向加速度,并取最大值,即主梁竖向加速度最大值。

(3)变化比例系数,重复以上计算步骤,可得到 4 个振动模式下主梁竖向加速度最大值随比例系数的变化,见图 9(a)。定义减振率为加速度变化值与未施加 TMD 时主梁加速度最大值的比值,见图 9(b)。

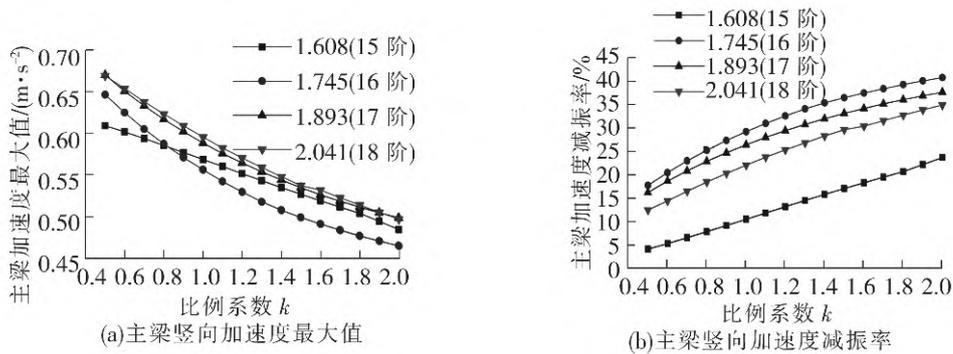


图 9 主梁竖向加速度最大值及减振率随比例系数的变化

根据图 9 可以看出,随 MTMD 系统比例系数的增加,主梁竖向加速度最大值下降,减振率增加。其中,MTMD 系统对第 16 阶竖向振动减振效果最明显,对第 15 阶减振效果最小。由图 9(b)可见,比例系数越大,减振效果越好,但减振率并非随比例系数的增加而线性增加,而且过大的质量也会影响桥梁结构的正常使用,因此 TMD 的总质量与桥梁广义质量比 μ 的取值范围在 1%~5% 之间为宜。取比例系数 $k=1.8$,在此工况下,4 个 STMD 系统总质量在桥梁广义质量的 5% 左右;同时 4 个主控频率的主梁加速度均在 0.5 m/s² 附近,满足行人舒适度的要求。优化后 MTMD 系统中单个 TMD 的最终参数见表 3。

表 3 MTMD 系统中单个 TMD 最终优化参数

TMD	频率/Hz	质量/kg	刚度/(N·m ⁻¹)	阻尼/(Ns·m ⁻¹)
TMD ₁	1.608	609.7	61 318.9	641.3
TMD ₂	1.745	517.7	61 318.9	590.9
TMD ₃	1.893	439.9	61 318.9	544.7
TMD ₄	2.041	378.5	61 318.9	505.3

注:TMD₁、TMD₂、TMD₃ 和 TMD₄ 分别为 STMD₁、STMD₂、STMD₃ 和 STMD₄ 中的减振器。

由于 MTMD 系统质量较大,需将这一部分荷载计入悬索桥二期荷载中重新进行建模找形,精确计算加入 MTMD 系统后的悬索桥受力情况。计入 MTMD 系统质量后,桥梁结构振型未发生变化;桥梁第 15 阶频率从 1.608 Hz 变化为 1.607 Hz,其他频率变化也很小,因此该 MTMD 系统可以达到良好的减振效果。

4 MTMD 系统减振效果分析

根据表 3 中的最优参数建立好 MTMD 系统后,根据不同的受控振型,按最不利方式在主梁上施加 2.0 人/m² 的人群简谐波荷载,得到在安装和未安装 MTMD 系统的条件下最大主梁节点竖向加速度,见图 10。

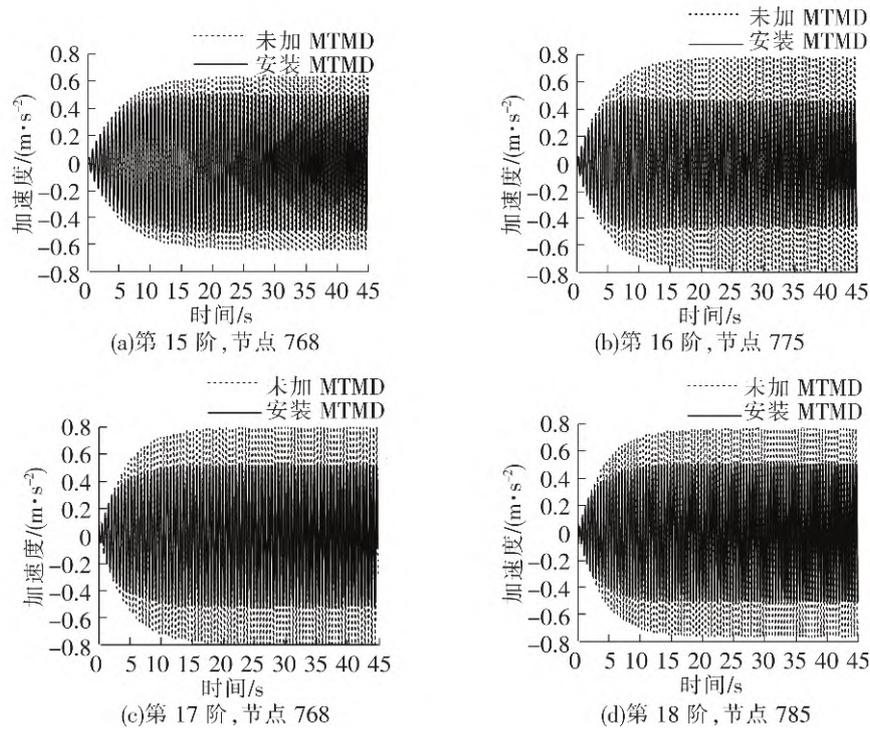


图 10 有无 MTMD 系统时主梁最大竖向加速度时程比较图

从图 10 中可以看出,无 MTMD 系统时,主梁最大竖向加速度接近 $0.8 m/s^2$,已经接近不舒适的行走状态;当安装 MTMD 系统时,主梁节点最大加速度最大值在 $0.5 m/s^2$ 附近,已经达到舒适状态。由此可以看出,MTMD 系统对主梁加速度最大值的减振效果明显。

对每个频率的全桥主梁节点加速度进行分析,得到主梁竖向加速度最值的包络图,见图 11。

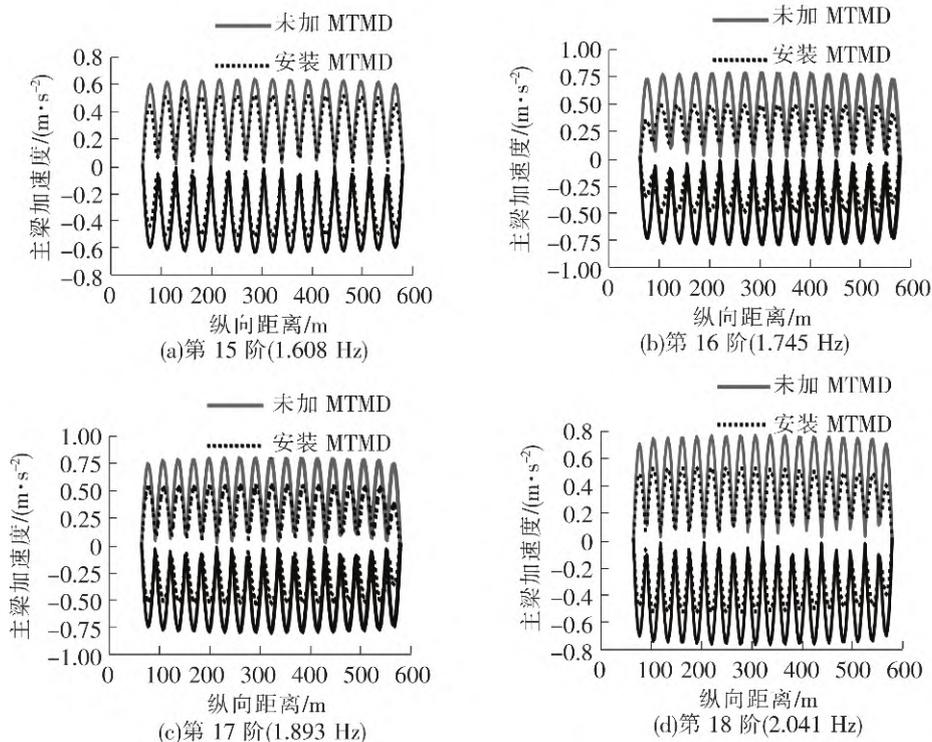


图 11 有无 MTMD 系统时主梁加速度包络图的比较

从图 11 主梁各节点中提取出不同频率下的各主梁竖向加速度的最大值,见表 4。

表 4 安装 MTMD 系统后主梁最大竖向加速度

被控振型	自振频率/Hz	原结构/($m \cdot s^{-2}$)	安装 MTMD /($m \cdot s^{-2}$)	减振率/%	舒适度
15	1.608	0.635	0.500	21.1	舒适
16	1.745	0.785	0.478	39.1	舒适
17	1.893	0.799	0.526	34.1	中等舒适
18	2.041	0.764	0.513	32.8	中等舒适

由图 11 和表 4 可以看出,在没有安装 MTMD 系统时,主梁节点加速度峰值沿跨度方向变化幅度很小,加速度峰值都接近 $1 m/s^2$,实际通行中行人接近不舒适的状态;安装 MTMD 系统后,4 个频率下的主梁加速度峰值均明显下降至 $0.5 m/s^2$ 附近,最大竖向加速度峰值减小到初始值的 60.8%,最大减振率达到 39.1%,由此可以看出,MTMD 系统对大跨径人行悬索桥的减振响应效果明显。

5 结论

以某大跨径人行悬索桥为研究对象,首先进行了人致振动和行人舒适度分析,然后针对竖向舒适度较差的问题,采用多重调谐质量阻尼器装置 MTMD 进行了减振分析,主要结果如下:

(1)主梁加速度极值随行人密度的增加而增大,计入人群质量后加速度极值下降。行人步频取桥梁不同阶固有频率时引起的主梁加速度极值受加载模态形状和不同步频时所对应的荷载折减系数 ψ 的影响。

(2)随 MTMD 系统各参数比例系数的增加,主梁竖向加速度最大值减小,减振率增大,但最优的刚度、质量和阻尼需根据减振率和系统总质量综合确定。

(3)安装 MTMD 系统后,人行悬索桥受控频率下的主梁加速度峰值均明显下降,最大减振率达到 39.1%,可以看出,MTMD 系统对人行悬索桥的减振效果明显。

参 考 文 献

- [1]Den Hartog J P. Mechanical vibrations[M]. New York: Dover Publications, 1985.
- [2]王立彬,花杰,刘康安,等.大跨度人行桥 TMD 减振设计[J].世界桥梁,2013,41(6):6-10.
- [3]刘梦渝.基于 TMD 的人行桥多振型减振控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [4]Iwanami K, Seto K. Optimum design of dual tuned mass dampers and their effectiveness [J]. Proc. of the Japan Society of Mechanical Engineering, 1984, 50: 44-52.
- [5]Clark S C, Kamen R. The human hematopoietic colony-stimulating factors [J]. Science, 1987, 236: 1229-1237.
- [6]肖学双.钢结构人行桥人致振动舒适度及其控制研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [7]Li Z, Li D, Lu Y, et al. Analysis on vibration control of a large-span pedestrian suspension bridge based on a multiple tuned mass damper system [J]. Noise & Vibration Worldwide, 2019, 50(2): 56-63.
- [8]高飞.利用 TMD 对曲线梁桥进行振动控制[D].北京:北京交通大学,2011.
- [9]Domizio M, Garrido H, Ambrosini D. Single and multiple TMD optimization to control seismic response of nonlinear structures[J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113667.
- [10]Research Fund for Coal and Steel. Guideline EN03 Design of Footbridges[S]. Germany: Hivoss, 2008.
- [11]肖艳平,沈火明.利用 MTMD 控制桥梁竖向振动的初步研究[J].噪声与振动控制,2005,25(4):14-17.
- [12]李春祥,刘艳霞.地震作用下高层建筑 TMD 控制优化设计[J].同济大学学报(自然科学版),1999,27(3):287-291.

Study on Vibration Reduction Measures of Long-Span Pedestrian Suspension Bridge Based on MTMD

Zhang Yanling^{1,2}, Cheng Yi^{1,2}, Wang Zehan^{1,2}, Wang Angyang³

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education,
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Cangzhou Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co. Ltd., Cangzhou 061000, China)

Abstract: In order to study the vibration reduction effect of multiple tuned mass damper device (MTMD) on long-span pedestrian suspension bridge, based on a scenic spot long-span pedestrian suspension bridge, a finite element model was established by MIDAS / Civil, and the human induced vibration and pedestrian comfort were analyzed according to the bridge natural vibration frequency within the pedestrian step frequency range. The vertical damping analysis of pedestrian suspension bridge was carried out by using MTMD, and the damping effect was studied through the parameter optimization of MTMD system. The results show that the acceleration extreme value of the main beam increases with the increase of pedestrian density, and decreases after taking into account the crowd mass. The acceleration extreme value of the main beam under different pedestrian gait frequencies is affected by the impact of loading mode shape and load reduction coefficient ψ . Based on the MTMD system parameters obtained from the controlled frequency, with the increase of the parameter proportion coefficient, the maximum vertical acceleration of the main beam decreases and the vibration reduction rate increases, but the optimal parameters need to be determined comprehensively according to the vibration reduction rate and the total mass of the system. After installing the MTMD system, the maximum vibration reduction rate of the main beam of the pedestrian suspension bridge under the controlled frequency in this paper reaches 39.1%, indicating that the vibration reduction effect of the MTMD system is obvious. The research content of this paper can provide reference for the vibration reduction measures of similar structures.

Key words: bridge engineering; pedestrian suspension bridge; human induced vibration; vibration reduction analysis; multiple tuned mass damper