

基于 MTMD 的大跨度人行悬索桥人致振动控制

沈文爱^{1,2}, 曾东鳌³, 朱宏平^{*1,2}

(1. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074;

2. 华中科技大学 控制结构湖北省重点实验室, 武汉 430074; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 大跨度人行悬索桥柔度大且阻尼小, 易在人群荷载激励下产生过大振动, 导致舒适度不满足规范要求。对于此类结构, 需要采取有效减振措施控制其动力响应。本文介绍了多重调谐质量阻尼器(MTMD)对主跨 600 m 人行悬索桥的人致振动控制性能。利用有限元软件建立了某大跨度人行悬索桥模型, 以德国 EN03 规范为计算依据, 计算了悬索桥的人致振动响应, 并重点分析了 MTMD 系统的人致振动控制效果。结果表明, 即便人行悬索桥跨度达 600 m, 经合理设计的 MTMD 系统的减振效果仍十分明显, 人行悬索桥多个模态的动力响应都得到有效抑制, 其振动舒适度可满足规范要求。

关键词: 人行悬索桥; 振动舒适度; 人致振动控制; MTMD 系统; 减振性能

中图分类号: O328

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2022)02-0178-07

1 引言

桥梁的人致振动问题由来已久, 但直到 20 世纪末伦敦千禧桥^[1]和日本 T 桥^[2]等事件发生后才引起学者们的广泛关注。从早期到现在, 对于人行桥的振动控制主要有三种方法^[3]。

- (1) 限制通行人数及防止行人以整齐和规则的步频过桥。
- (2) 频率调整法。
- (3) 阻尼减振法。

根据 Matsumoto 等^[4]的理论, 设立各种规则实质上是限制了人群的动载因子 m 以及人数 N , 但这样会限制行人的自由性, 如今很少考虑采用此方法。频率调整法是避免让结构的频率出现在步行敏感频率范围之内以减小其振动反应。在 20 世纪, 这种方法由诸多规范采用, 如 SIA160(1989), ENV(1991), CEB(1993), BS5400(1992) 及我国的 CJJ69-95 规范(1995)等。然而进入 21 世纪以来, 桥梁结构愈加轻质大跨, 曾广泛采用的频率调整法在很多情况下不再适用。以伦敦千禧桥为例, 其一阶侧向振动频率仅为 0.49 Hz, 若要符合频率调整法的要求, 其侧向振动频率最少需达到 1.5 Hz, 由

于 $\omega = \sqrt{k/m}$, 这就意味着在质量不变的前提下, 结构的刚度至少需增加 9 倍, 这既在经济性上行不通, 又会对桥梁的外观产生巨大的影响。因此, 近年来, 更多的是采用第三种方法, 即通过在结构上装配经合理设计的阻尼器来减小结构的人致振动响应。

此前, 已有学者对人行悬索桥的减振方法进行了研究, 如 TMD 方法^[5-10]。但是目前对于大跨度人行悬索桥, 特别是主跨大于 500 m 的人行桥的减振性能研究还较少。本文以一座 600 m 跨度的人行悬索桥为例, 利用有限元软件 Midas/Civil 建立其有限元模型, 结合德国 EN03 规范, 计算了加装 MTMD 减振系统前后结构的振动响应, 并进行了对比分析, 评估了其对人致振动的控制性能, 为同桥型的减振设计提供重要参考。

2 MTMD 设计参数

MTMD 全称为多重调谐质量阻尼器(Multiple Tuned Mass Damper), 是单个 TMD 基础上的一种延伸^[11], 单个 TMD 具有调频范围窄、控制效果不稳定及不能应对外荷载频率变化的缺陷^[12]。而以控制模态频率为中心, 将多个 TMD 按一定的频率宽度分布, 可得 MTMD 系统, 得到的控制系统的鲁棒性较强, 可以同时控制多阶模态的振动响应, 且更易安装, 经济实用。MTMD 不仅在电塔和高层建筑中有广泛应用, 其在控制桥梁人致振动响应时, 效果也非常明显, 其力学模型如图 1 所示。

收稿日期: 2021-02-23; 修改稿收到日期: 2021-06-02.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51838006)资助项目.

作者简介: 沈文爱(1983-), 男, 博士, 副教授

(E-mail: wshen@hust.edu.cn);

朱宏平*(1965-), 男, 博士, 教授

(E-mail: hpzhu@hust.edu.cn).

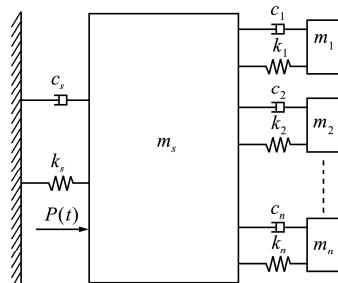


图 1 MTMD^[13]
Fig. 1 MTMD system

李春祥等^[14]提出了 MTMD 作用的 5 种模型 (Model 1-Model 5), 具体内容列入表 1。表 1 中 M_0 和 ω_0 为主结构受控模态的质量和自振频率, $\mu = \sum_{j=1}^n M_j / M_0$ 为 MTMD 系统的总质量比; ω_j , M_j , K_j , C_j , ξ_j 和 μ_j 分别为第 j 个 TMD 的频率、质量、刚度、阻尼系数、阻尼比和模态质量之比; $r_j = \omega_j / \omega_0$ 为第 j 个 TMD 的频率与结构受控模态的频率比; $\omega_T = \sum_{j=1}^n \omega_j / n$ 和 $\xi_T = \sum_{j=1}^n \xi_j / n$ 分别为 MTMD 系统的中心频率和平均阻尼比, $f = \omega_T / \omega_0$ 为 MTMD 系统的中心频率比。

根据相关研究成果, Model 1 和 Model 4 的鲁棒性在五种模型中较优。Model 1 中各 TMD 参数除质量 M 以外均相同, 这样在 MTMD 系统制作过程中可仅改变各 TMD 中质量块的质量, 为生产制作带来了较大便利, 因此, 本文采用 Model 1 进行 MTMD 系统设计。

表 1 MTMD 模型列表
Tab. 1 Models of MTMD system

模型	μ_j	ξ_j
Model 1: $K_1 = K_2 = \dots = K_n$ $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ $M_1 \neq M_2 \neq \dots \neq M_n$ $\xi_1 \neq \xi_2 \neq \dots \neq \xi_n$	$\frac{\mu}{r_j^2 \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_j^2}}$	$\frac{r_j \xi_T}{f}$
Model 2: $K_1 \neq K_2 \neq \dots \neq K_n$ $C_1 \neq C_2 \neq \dots \neq C_n$ $M_1 = M_2 = \dots = M_n$ $\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n$	μ / n	ξ_T
Model 3: $K_1 \neq K_2 \neq \dots \neq K_n$ $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ $M_1 = M_2 = \dots = M_n$ $\xi_1 \neq \xi_2 \neq \dots \neq \xi_n$	μ / n	$\frac{n \xi_T}{r_j^2 \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_j^2}}$
Model 4: $K_1 = K_2 = \dots = K_n$ $C_1 \neq C_2 \neq \dots \neq C_n$ $M_1 \neq M_2 \neq \dots \neq M_n$ $\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n$	$\frac{\mu}{r_j^2 \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_j^2}}$	ξ_T
Model 5: $K_1 \neq K_2 \neq \dots \neq K_n$ $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ $M_1 \neq M_2 \neq \dots \neq M_n$ $\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n$	$\frac{\mu}{r_j^2 \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_j^2}}$	ξ_T

3 工程概况

本文考虑的某大跨度人行桥为平面直线无塔悬索桥结构, 主缆直接锚固于岩体上, 桥面到底谷

的距离为 234.8 m, 如图 2 所示。



图 2 某大跨度人行悬索桥
Fig. 2 Proposed suspension footbridge

桥梁主缆跨径 750 m, 加劲梁跨径 600 m, 主缆在桥左右两侧各分别对称布置, 加劲梁与主缆通过 118 根悬索相连, 加劲梁采用钢箱梁截面, 桥梁立面和平面布置如图 3 和图 4 所示。

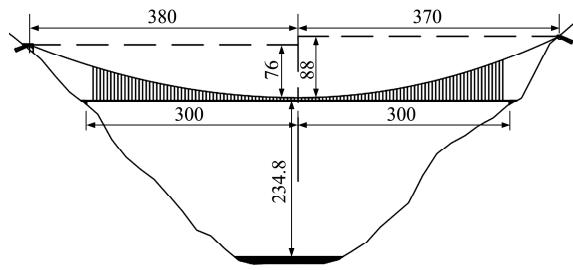


图 3 人行悬索桥立面布置
Fig. 3 Elevation layout of pedestrian suspension bridge

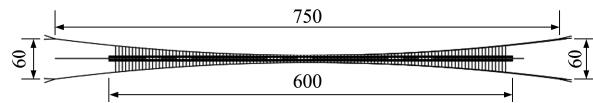


图 4 人行悬索桥平面布置
Fig. 4 Plane layout of pedestrian suspension bridge

4 结构动力特性分析及人致振动计算

4.1 计算软件及模型

采用 Midas/Civil 软件建立该人行悬索桥的有限元模型。主缆及悬索采用受拉单元, 横梁及边纵梁采用空间梁单元。由于主鞍座直接置于岩体上, 刚度较大, 故直接采用边界条件来对桥梁两端进行约束。两根主缆的四端均采用 6 自由度完全约束进行固定, 全桥有限元模型如图 5 所示。

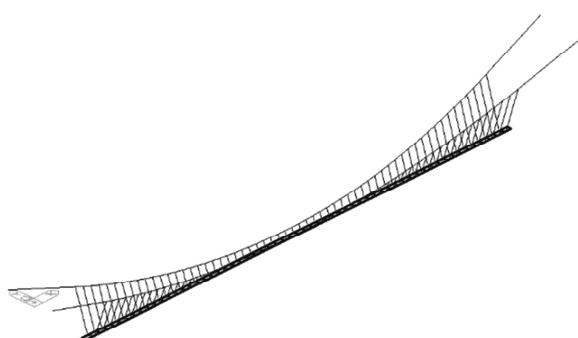


图 5 悬索桥模型
Fig. 5 Finite element model picture of the suspension bridge

4.2 人致荷载模型

本文的人致振动分析采用德国规范 EN03 推荐的人致荷载模型。EN03 规范的荷载模型在 TC1~TC5 交通级别下的荷载均采用简谐荷载模型,其荷载大小与等效行人密度有关,可表示为

$$\rho(t) = P \cos(2\pi f_p t) n' \Psi \quad (1)$$

式中 P 为行人步频为 f_p 时,单个行人荷载的幅值,竖向取 280 N,纵向取 140 N,横向取 35 N; n' 为加载面积为 S 时的等效行人密度,和交通级别有关; S 为加载面积,取人能行走的桥面面积; Ψ 为折减系数,考虑了行人频率的影响,敏感频率范围以外的折减系数为 0。

此外,在加载时,式(1)的荷载函数正负号需与结构振型函数的正负号保持一致。

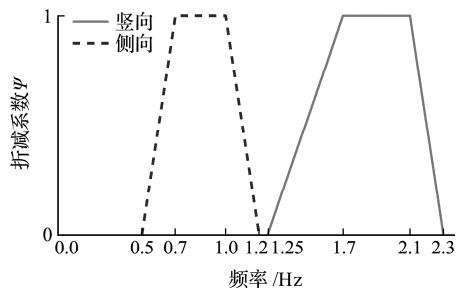


图 6 人致荷载模型折减系数 Ψ 与频率的关系

Fig. 6 Relationship between the reduction factor of the human-induced load model Ψ and frequency

4.3 结构动力特性分析

采用 Lanczos 法计算人行悬索桥动力特性,结果表明该桥基频很低(0.0769 Hz)且模态分布密集。因此,本文仅针对德国规范中施加荷载最大($\Psi=1$)且具有明显竖向和侧向振动特征的模态进行振动控制设计。表 2 和表 3 列出了相关控制模态的信息。可知本文 MTMD 设计考虑的竖向频率范围为 1.715 Hz~1.996 Hz;横向频率范围为 0.714 Hz~0.985 Hz。需要说明的是,针对敏感频率范围之内(1.25 Hz~2.5 Hz)的其他振动模态,本文以 0.1 Hz 为激励频率间隔,采用式(1)的人致荷载模型进行减振前后的动力响应分析,以验证 MTMD 系统在敏感频率范围的人致振动控制性能。

4.4 结构人致振动计算

根据德国 EN03 规范对桥梁进行人致振动计算。结构模态阻尼比取 0.003,振动响应计算采用时程分析法,分析时间取 600 s(人行速度约为 1 m/s,则通过全桥时间约为 600 s),取桥梁约 1/10 跨、1/5 跨、3/10 跨、2/5 跨和 1/2 跨处节点为

观测节点。

表 2 坚向振动控制模态
Tab. 2 Control modes in vertical direction

模态号	频率/Hz	特征
81	1.715	桥两侧同向竖弯
82	1.741	桥两侧同向竖弯
83	1.769	桥两侧同向竖弯
84	1.797	桥两侧同向竖弯
85	1.824	桥两侧同向竖弯
90	1.855	桥两侧同向竖弯
91	1.884	桥两侧同向竖弯
92	1.913	桥两侧同向竖弯
103	1.996	桥两侧反向竖弯

表 3 侧向振动控制模态
Tab. 3 Control modes in lateral direction

模态号	频率/Hz	特征
27	0.714	桥两侧同向侧弯
30	0.738	桥两侧小幅度侧弯
31	0.793	桥两侧反向竖弯+同向侧弯
33	0.845	桥两侧小幅度反向竖弯+同向侧弯
37	0.917	小幅度侧弯+小幅度竖弯
39	0.976	桥两侧反向竖弯+同向侧弯
40	0.985	桥两侧反向竖弯+同向侧弯

计算结果表明,在 TC4 交通级别下,观测点坚向的最大加速度响应超过 $1/2$ 大于 0.5 m/s^2 ,其中最大加速度为 1.700 m/s^2 。在 TC5 交通级别下,观测点坚向最大加速度响应几乎全大于 0.5 m/s^2 ,其中最大加速度为 2.080 m/s^2 。此交通级别下,侧向最大加速度响应也达 0.200 m/s^2 。因此,若有大量游客在桥上通行,则行走舒适度无法得到保证,甚至可能造成游客及工作人员产生恐慌,需要进行振动控制以减小桥梁的振动响应。

5 人致振动控制设计

5.1 人行桥的坚向振动控制

由于大跨人行悬索桥模态密集,位于敏感频段的坚向模态较多,因此需要同时进行多模态振动控制。本文取第 85 阶为中心模态,坚向 MTMD 系统频率以此为中心向两侧延伸,中心频率比取 1^[13]。

根据桥梁实际情况,全桥布置 24 个用于坚向振动控制的 TMD 形成坚向 MTMD 系统,设计参数列入表 4。值得注意的是,除 3 号 TMD 外,其余坚向 TMD 均分别对应表 2 的坚向振动模态。布置 3 号 TMD 的目的是保持整个 MTMD 系统的中心频率与中心模态频率一致。

表 4 坚向 MTMD 系统控制参数

Tab. 4 Parameters of the MTMD system
in vertical direction

TMD 编号	数量	TMD 频率 /Hz	质量 /kg	刚度 /N·m ⁻¹	阻尼 /N·s·m ⁻¹
1	2	1.715	1489	172891	3015
2	2	1.741	1444	172891	3015
3	2	1.758	1416	172891	3015
4	2	1.769	1400	172891	3015
5	2	1.797	1356	172891	3015
6	6	1.825	1314	172891	3015
7	2	1.855	1273	172891	3015
8	2	1.884	1233	172891	3015
9	2	1.913	1196	172891	3015
10	2	1.996	1099	172891	3015
MTMD 质量和/kg		31708			
总质量比 μ /%		3.6			
平均阻尼比 ξ_T		0.1			
中心模态质量(取第 85 阶)/kg		883317.3			
中心模态频率(取第 85 阶) ω_T /Hz		1.825			
中心频率比 f		1			

坚向 MTMD 的布置位置如图 7 所示。坚向 MTMD 系统布置原则如下,1 号 TMD 布置在振型向量最大值处,2 号 TMD 与 1 号 TMD 关于桥中心对称布置,1 号与 2 号均往桥中心移动 10 m 得 3 号与 4 号点位(对应振型向量较大值处),剩余点位依此类推,每一处布置两个完全相同的 TMD,剩余的 4 个 6 号 TMD 在距跨中 10 m 处相对跨中对称布置。

↓ 坚向 TMD, 数字表示 TMD 编号

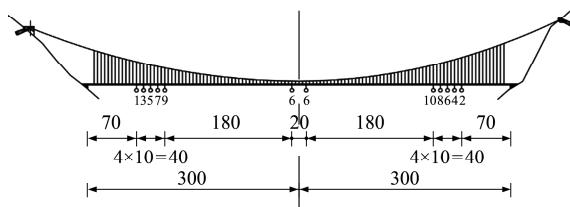


图 7 坚向 MTMD 阻尼器布置

Fig. 7 Distribution of MTMD dampers for vertical vibration control

5.2 人行桥的侧向振动控制

侧向振动控制与坚向类似,共布置 6 个 TMD 形成 MTMD 系统,MTMD 的布置位置如图 8 所示,1 号、2 号和 3 号均布置在对应模态的振型向量最大值处,设计参数列入表 5。

由表 5 可知,侧向 MTMD 系统不需要每阶模态均设置对应的子 TMD,只需保持 MTMD 系统的频带($0.714\text{ Hz} \sim 0.976\text{ Hz}$)足以大致覆盖所有

受控的侧向模态即可。

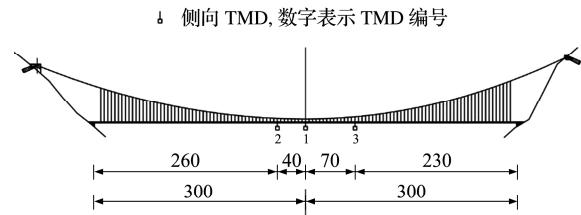
图 8 侧向 MTMD 阻尼器布置
Fig. 8 Distribution of MTMD dampers for lateral vibration control

表 5 侧向 MTMD 系统控制参数

Tab. 5 Parameters of the MTMD system in lateral direction

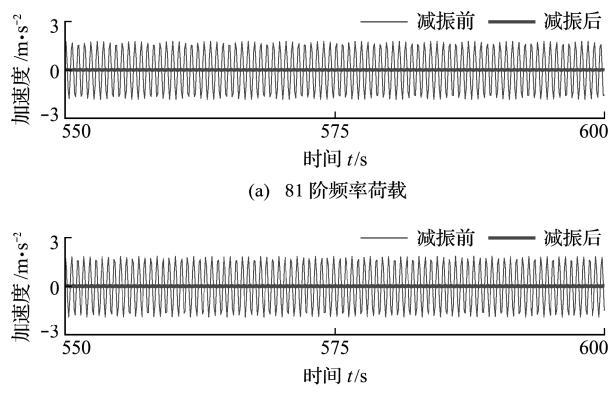
TMD 编号	数量	TMD 频率 /Hz	质量 /kg	刚度 /N·m ⁻¹	阻尼 /N·s·m ⁻¹
1	2	0.714	5217	104911	3950
2	2	0.845	3720	104911	3950
3	2	0.976	2789	104911	3950
MTMD 质量和/kg		23451.7			
总质量比 μ /%		1			
平均阻尼比 ξ_T		0.1			
中心模态质量(取第 33 阶)/kg		2345166			
中心模态频率(取第 33 阶)/Hz		0.845			
中心频率比		1			

6 MTMD 振动控制性能分析

布置 MTMD 系统后,本文按相同方法加载如式(1),再次计算悬索桥在 TC5 交通级别各阶频率人致荷载下的振动响应及减振率。

6.1 坚向振动响应控制性能

图 9 对比了加装 MTMD 减振系统前后,在 TC5 交通级别条件下,悬索桥 1/10 跨观测点的 81 和 83 阶人致振动响应的加速度时程曲线。可以看出,MTMD 系统具有显著的人致振动控制效果。

图 9 TC5 交通级别不同频率荷载下 1/10 跨竖向加速度时程
Fig. 9 Vertical acceleration time-histories at 1/10 span under loads with different frequencies at TC5 traffic level

MTMD系统对表2各阶竖向振动模态的减振控制效果如图10所示。可以看出,附加MTMD系统之后,悬索桥在各阶频率荷载作用下的加速度响应大幅减少,减振后的加速度响应最大为 0.323 m/s^2 ,小于 0.5 m/s^2 ,达到了最高舒适度级别。此外,考虑人致振动敏感频率范围($1.25 \text{ Hz} \sim 2.5 \text{ Hz}$),以 0.1 Hz 为频率间隔进行加载计算,结果表明,观测点减振率普遍大于80%,最大减振率为99.75%。可见,所设计的竖向MTMD系统减振效果非常好,完全抑制了人群荷载导致的加速度响应,使得该人行悬索桥完全满足舒适度的要求。

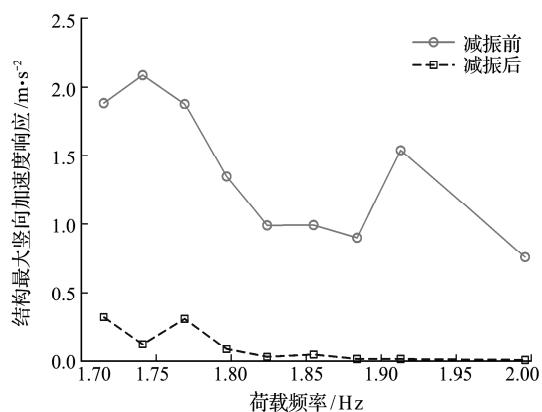


图10 减振前后悬索桥最大竖向加速度响应
Fig. 10 Maximum vertical acceleration responses of the suspension bridge

6.2 侧向振动响应控制性能

人行悬索桥在TC5交通级别,第27和33阶频率荷载的作用下,1/5跨观测点在加装MTMD系统前后的加速度响应如图11所示。可以看出,侧向MTMD系统同样具有优越的减振性能,可以有效提升大跨度人行悬索桥的振动舒适度。

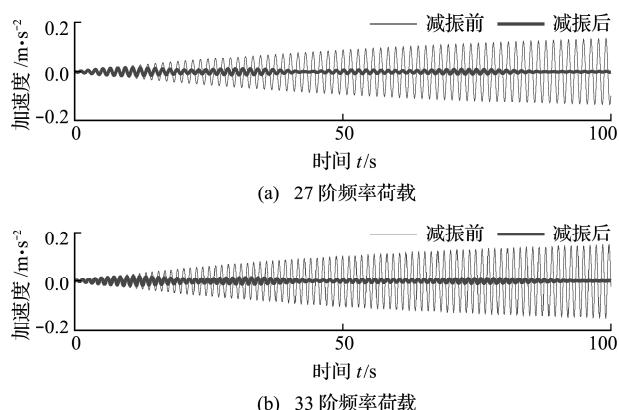


图11 TC5交通级别不同频率荷载下1/5跨侧向加速度时程
Fig. 11 Lateral acceleration time-histories at 1/5 span under loads with different frequencies at TC5 traffic level

MTMD系统对表3各阶侧向振动模态的减振控制效果如图12所示。可以看出,附加MTMD系统之后,悬索桥在各阶频率荷载作用下的侧向加速度响应受到了有效抑制,减振后的最大响应为 0.018 m/s^2 ,小于 0.1 m/s^2 ,观测点减振率普遍大于82%,最大减振率达97.94%,达到了最高舒适度级别。同时,也使人行桥的侧向失稳锁定现象不再可能发生,大大提高了人行桥的安全性。

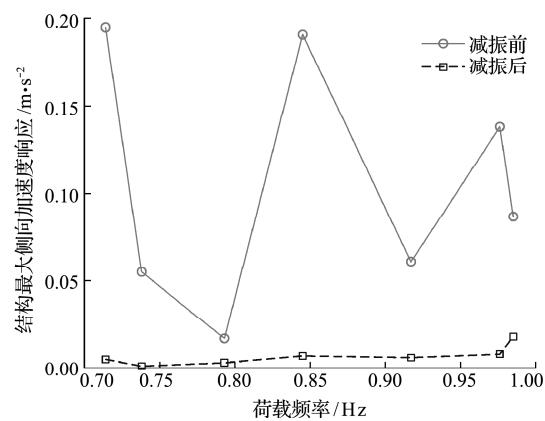


图12 减振前后悬索桥最大侧向加速度响应
Fig. 12 Maximum lateral acceleration responses of the suspension bridge

7 结论

大跨度人行悬索桥具有自振频率低、阻尼比小和柔度大的特点,其在行人荷载的敏感频段具有非常密集的振动模态,因此人致振动控制问题是其设计和安全服役的关键。MTMD系统具有控制频带较宽、可覆盖多阶振动模态及鲁棒性强的优点,是大跨度人行悬索桥人致振动控制的优先选项。本文采用两个MTMD系统分别对悬索人行桥竖向及侧向人致振动同时进行多模态控制。研究发现,即便悬索桥跨度达到了600 m,经合理设计的MTMD系统减振效果仍十分显著。在拥挤行人工况下,人行悬索桥的竖向和侧向人致振动响应均抑制在最高舒适等级范围内,同时消除了大跨度人行悬索桥发生侧向锁定失稳的可能性。其次,本文研究发现,在振型向量值较大处布置MTMD系统,且符合对称布置原则,可取得较优的减振效果。本文研究结果为同类型大跨度人行悬索桥的人致振动控制提供了一个重要的参考依据。进一步的研究应重点关注MTMD系统人致振动多模态控制的最优设计问题。

参考文献(References):

- [1] Dallard P, Fitzpatrick T, Flint A, et al. London millennium bridge: pedestrian-induced lateral vibration [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, **6**(6): 412-417.
- [2] Nakamura S I, Kawasaki T. Lateral vibration of footbridges by synchronous walking[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, **62**(11): 1148-1160.
- [3] 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.(CHEN Zheng-qing, HUA Xu-gang. *Vibration and Dynamic Design of Footbridges* [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [4] Matsumoto Y, Nishioka T, Shiojiri H, et al. *Dynamic Design of Footbridges* [M]. IABSE, 1978.
- [5] 朱准峰.自锚式人行悬索桥人致振动及振动控制研究[D].中南大学,2014.(ZHU Zhun-feng. Analysis of Pedestrian-Induced Vibration and Vibration Control Method of Self-Anchored Suspension Footbridge [D]. Central South University, 2014. (in Chinese))
- [6] 孟永旺.大跨度人行悬索桥颤振稳定性与人致振动响应研究[D].湖南大学,2015.(MENG Yong-wang. Study on Flutter Stability and Vibration Response Due to Pedestrian Walking of Long-Span Suspension Footbridge[D]. Hunan University, 2015. (in Chinese))
- [7] 刘梦渝.基于TMD的人行桥多振型减振控制研究[D].哈尔滨工业大学,2019.(LIU Meng-yu. Research on Multi-Mode Vibration Control of Footbridge Based on TMD [D]. Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese))
- [8] 朱俊朋,鞠三,徐秀丽,等.考虑舒适度的人行悬索桥振动控制[J].南京工业大学学报(自然科学版),2013, **35**(3): 56-60.(ZHU Jun-peng, JU San, XU Xiu-li, et al. Vibration control of pedestrian suspension bridge considering human comfort [J]. *Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition)*, 2013, **35**(3): 56-60. (in Chinese))
- [9] 孙利民,杨伟,于军峰,等.空间曲梁单边悬索桥的振动舒适性评估及减振设计[J].建筑施工,2015, **37**(12): 1345-1348.(SUN Li-min, YANG Wei, YU Jun-feng, et al. Vibration comfort evaluation and vibration reduction design of space curved beam unilateral suspension bridge [J]. *Building Construction*, 2015, **37**(12): 1345-1348. (in Chinese))
- [10] 邹卓,宋旭明,李璋,等.基于TMD的自锚式人行悬索桥人致振动控制研究[J].铁道科学与工程学报,2018, **15**(10): 2574-2582. (ZOU Zhuo, SONG Xu-ming, LI Zhang, et al. Study of pedestrian-induced vibration of self-anchored suspension footbridge based on TMD [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, **15**(10): 2574-2582. (in Chinese))
- [11] 李晓伟,施卫星.人行天桥MTMD减振控制的鲁棒性研究[J].结构工程师,2012, **28**(4): 7-12. (LI Xiao-wei, SHI Wei-xing. Research on robustness of vibration control of pedestrian bridges using multi degree of freedom passive tuned mass-dampers [J]. *Structural Engineers*, 2012, **28**(4): 7-12. (in Chinese))
- [12] 付杰.调谐质量阻尼器的减振研究[D].华侨大学,2017.(FU Jie. Vibration Suppression Based on the Tuned Mass Damper Technology[D]. Huaqiao University, 2017. (in Chinese))
- [13] 陈广生.MTMD对钢结构人行天桥的振动控制研究[D].南京林业大学,2015.(CHEN Guang-sheng. The research of MTMD forvibration Control of Steel Pedestrian Bridge [D]. Nanjing Forestry University, 2015. (in Chinese))
- [14] 李春祥,熊学玉.地震作用下基于ADMF和系统参数组合的最优MTMD[J].计算力学学报,2002, **19**(3): 291-298. (LI Chun-xiang, XIONG Xue-yu. Optimum multiple tuned mass dampers based on ADMF and the combinations available of the system parameters under earthquake[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2002, **19**(3): 291-298. (in Chinese))
- [15] 葛俊颖.桥梁工程软件midas Civil使用指南[M].北京:人民交通出版社,2013(GE Jun-ying. *Guidance for the Use of Bridge Engineering Software Midas Civil* [M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese))
- [16] 费梁.大跨径钢结构人行桥人致振动分析与控制[D].东南大学,2018.(FEI Liang. Analysis and Control of Human-Induced Vibration of Long-Span Steel Footbridge[D]. Southeast University, 2018. (in Chinese))
- [17] 陈阶亮.行人激励下人行天桥的振动舒适性研究[D].浙江大学,2007.(CHEN Jie-liang. Research on Vibration Comfort of Footbridge Induced by Pedestrian Excitation[D]. Zhejiang University. 2007. (in Chinese))
- [18] 杨舒蔚,葛容华.钢箱梁悬索桥模态阻尼比分析[J].四川建筑,2018, **38**(2): 159-162. (YANG Shu-wei, GE Rong-hua. Modal damping ratio analysis of steel

- box girder suspension bridge[J]. *Sichuan Architecture*, 2018, **38**(2): 159-162. (in Chinese)
- [19] 黄国平,侯苏伟,王新忠.基于单自由度共振反应的模态质量计算方法[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2017, **26**(5): 7-11. (HUANG Guo-ping, HOU Su-wei, WANG Xin-zhong. A computing method modal mass based on the single degree of freedom of resonance reaction[J]. *Journal of Hunan City University(Natural Science)*, 2017, **26**(5): 7-11. (in Chinese))

Vibration control on of long-span pedestrian suspension bridge based on MTMD system

SHEN Wen-ai^{1,2}, ZENG Dong-jun³, ZHU Hong-ping^{*1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Due to large flexibility and low damping, long-span pedestrian suspension bridges are often vulnerable to excessive vibrations under pedestrian loads, leading to problems about pedestrian comfort. For such structures, effective measures need to be taken to reduce their dynamic responses. This paper presents the vibration mitigation performance of multiple tuned mass dampers (MTMD) on a pedestrian suspension bridge with a span of 600 m. We establish the finite element model of the pedestrian suspension bridge using Midas software, and compute its pedestrian-induced vibration responses based on the relevant contents in German Standard EN03, focusing on the performance analysis of the MTMD on pedestrian-induced vibration mitigation. Numerical results demonstrate that the vibration mitigation performance of the MTMD is significant if properly designed, even though the span is as long as 600 meters, and the dynamic responses of several vibration modes have been effectively suppressed. Thus the vibration serviceability can meet the requirements of the design code.

Key words: pedestrian suspension bridge; vibration serviceability; human-induced vibration control; MTMD system; vibration mitigation performance

引用本文/Cite this paper:

沈文爱,曾东鋆,朱宏平. 基于 MTMD 的大跨度人行悬索桥人致振动控制[J]. 计算力学学报, 2022, **39**(2): 178-184.

SHEN Wen-ai, ZENG Dong-jun, ZHU Hong-ping. Vibration control on of long-span pedestrian suspension bridge based on MTMD system[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(2): 178-184.