

文章编号:1005-0523(2021)06-0046-08



轴向运动嵌套悬臂梁的 MTMD 设计与减振鲁棒性分析

王建平¹, 于洋¹, 王峥嵘¹, 程建生¹, 余文明², 高锋³

(1. 陆军工程大学野战工程学院, 江苏南京 210007; 2. 中国船舶重工集团应急预警与救援装备股份有限公司, 湖北武汉 430223; 3. 中国人民解放军 73211 部队, 江苏南京 210000)

摘要:针对装配式钢桁架桥架设过程中运用调谐质量阻尼器(TMD)进行减振控制会遇到结构布置受限的问题,研究在时变系统中采用多重调谐质量阻尼器(MTMD)来进行减振控制。运用 ANSYS 软件建立轴向运动嵌套悬臂梁的有限元模型,利用动力学理论建立了轴向运动嵌套悬臂梁附加 MTMD 的动力学方程,数值求解后与有限元法进行对比表明吻合较好,并得到了结构振动的受控模态;按照受控模态设计了 MTMD 系统的参数,研究不同数量的 TMD 对桥梁减振效果,得到 3 个 TMD 的减振效果明显的结论。研究导轨不同推送速度在 MTMD 下减振效果的鲁棒性,提出适当放大 MTMD 的频率间距,可降低推送速度波动带来减振效果不良影响的结论。

关键词:装配式钢桁架桥;轴向运动嵌套悬臂梁;多重调谐质量阻尼器;减振鲁棒性分析

中图分类号:U448

文献标志码:A

本文引用格式:王建平,于洋,王峥嵘,等.轴向运动嵌套悬臂梁的 MTMD 设计与减振鲁棒性分析[J].华东交通大学学报,2021,38(6):46-53.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20211210.002

MTMD Design and Vibration Reduction Robustness Analysis of Axially Moving Nested Cantilever Beam

Wang Jianping¹, Yu Yang¹, Wang Zhengrong¹, Cheng Jiansheng¹, Yu Wenming², Gao Feng³

(1. College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007; 2. China Harzone Industry Co., LTD., Wuhan 430223, China; 3. The 73211th Troop of PLA, Nanjing 210000, China)

Abstract: In the process of erecting fabricated steel truss bridge, the tuned mass dampers (TMD) vibration control will encounter the problem of structural layout limitation. In this study, multiple tuned mass dampers (MTMD) was used to reduce the vibration of the time-varying system. The finite element model of the axially moving nested cantilever beam was established by ANSYS software. The dynamic equations of an axially moving nested cantilever with an additional MTMD were established by using the dynamic theory. The numerical results agreed well with the FEM results, and the controlled modes of the structure were obtained. The parameters of the MTMD system were designed according to the controlled mode. The controlled reduction effect of different number of TMD was explored. Through the analysis of the robustness of MTMD with different pushing velocity of the guide beam, it finds that the vibration reduction effect of three TMD is obvious and enlarging the frequency interval of MTMD properly can reduce the bad influence of the pushing velocity on the vibration reduction effect.

Key words: assembled steel truss bridge; axially moving nested cantilever beam; multiple tuned mass dampers (MTMD); vibration reduction robustness analysis

Citation format: WANG J P, YU Y, WANG Z R, et al. MTMD design and vibration reduction robustness analysis of axially moving nested cantilever beam[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 46-53.

收稿日期:2021-05-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC082702)

重型支援桥是一种装配式钢桁架桥^[1],在架设前选择合适的场地和气象条件,采用在架设车上整体拼装、先推送导梁、导梁对岸着地、再沿着导梁推送主梁的架设方法,该方法架设速度快、对场地要求低、架设可靠性高,但是在导梁推送阶段结构振动问题不容忽视。近几十年来调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)开始逐步运用于大型建筑领域,沈火明^[2]通过建立车-桥-TMD的动力系统振动方程,研究编组列车通过桥梁时的减振效果,提出了中小跨度桥梁的最佳质量比;李春祥^[3]提出了适用于大跨度桥梁风致振动控制的杠杆式主动多重调谐质量阻尼器(LT-AMTD)的策略,利用建立的LT-AMTD结构系统的动力放大系数,评价了LT-AMTD减振性能;罗文俊^[4]运用有限元和统计能量法,建立了钢-混结构桥梁模型,预测了列车高速交汇条件下结构振动响应和结构噪声;张新亚^[5]在对箱型截面简支梁振动特性研究的基础上,基于位移振幅最小化的原则,建立了评价函数进行MTMD的最优参数设计,并用有限元法进行谐响应的分析,得到了在附加质量相同的情况下,TMD的数量增加而减振效果会增加的结论;金波^[6]针对悬索桥抖振控制问题,建立了有限元模型,应用神经网络和遗传算法对MTMD进行双参数优化,取得了较好的减振效果;王梁坤^[7]通过现场实测修正有限元模型,并设计了自适应MTMD系统验证了频率自适应调节的鲁棒性;郭宏超^[8]对大跨度钢桁架连廊的人致振动响应进行了计算,采用MTMD系统在保证减振效果的同时可以扩大减振频带宽度,表明具有更强的鲁棒性。

罗安^[9]研究了该桥架设和通载过程中的极限承载力;王建平^[10]利用瑞利法建立了系统在典型工况下的动力学方程并求解,并得到了实桥试验的验证;针对该桥架设过程中结构处于时变状态,随着

架设过程的进行其架设长度不断改变,而难以用ANSYS系统对时变系统进行分析的情况,段应昌^[11]将装配式钢桁架桥架设过程中导梁推出过程称为轴向运动嵌套悬臂梁,并开展了相应的理论和试验研究。杨双双^[12]研究成果说明了TMD具有一定的减振效果,但是TMD的设置受到结构限制,需要研究多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass dampers, MTMD)对装配式钢桁架桥架设过程中振动的抑制效果。

1 轴向运动嵌套悬臂梁状态

装配式钢桁架桥全桥拼装完毕后,进入导梁推送阶段。首先解除导梁与主桥跨之间的连接装置,然后往车头方向回收桥跨,完成结构配重工作,最后启动导梁推桥齿轮推出导梁,见示意图1。由于导梁推送过程中悬臂长度不断增加,桥体的振动效应非常显著,将导梁推送阶段作为轴向运动嵌套悬臂梁模型来研究。在这个阶段主桥及导梁的各阶振动随着导梁伸出长度的增加而增加,将明显地影响架设速度,振动严重时还将危及结构的安全。

2 轴向运动嵌套悬臂梁动力振动分析

建立导梁伸出主桥最大长度瞬时状态的有限元分析模型^[12],并通过振动模态分析,得到了轴向运动嵌套悬臂梁前10阶模态的频率值、振型特征、竖向模态质量及振型贡献率,见表1。图2给出了轴向运动嵌套悬臂梁前6阶振型图。可以看出,前6阶模态中竖向振动系数较高的是第1,第4,第6阶,振型特征分别为1阶竖弯、2阶竖弯和3阶竖弯。

对轴向运动嵌套悬臂梁进行谐响应分析,激励力幅值为10 000 N,频率变化范围为0~10 Hz,将激励频率划分为100等分,轴向运动嵌套悬臂梁端部下弦杆节点的位移谐响应曲线如图3所示。

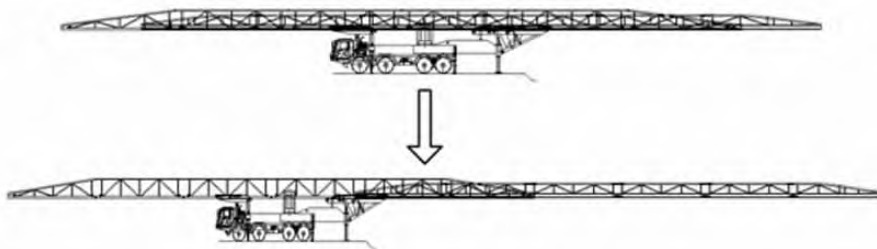


图1 轴向运动嵌套悬臂梁工作阶段

Fig.1 Axial motion nest cantilever beam working state

表 1 轴向运动嵌套悬臂梁前 10 阶自振特性与竖向振动模态贡献率

Tab.1 Free vibration characteristics and vertical vibration mode contribution of the first 10 modes of the axial motion nest cantilever beam

Mode	Frequency/Hz	Modal mass	Vibration contribution/%	Vibration feature
1	0.724 11	5.460 98	15.70	First order vertical bend
2	0.964 43	0.404 609×10 ⁻⁰⁵	0.01	First order transverse bend
3	1.650 2	0.106 809×10 ⁻⁰⁵	0	Partial transverse bend + twist
4	1.814 5	2.985 71	8.60	Second order vertical bend
5	2.693 8	0.846 672×10 ⁻⁰³	2.94	Second order transverse bend + twist
6	2.985 3	14.950 4	42.90	Third order vertical bend
7	3.496 2	0.511 909×10 ⁻⁰⁵	0.02	Cross bending + twisting
8	4.195 3	0.480 885×10 ⁻⁰⁶	0.00	Partial transverse bend + twist
9	5.806 5	0.107 710×10 ⁻⁰³	0.37	Third order transverse bend
10	6.526 2	0.538 439×10 ⁻⁰⁵	0.02	Cross bending + twisting

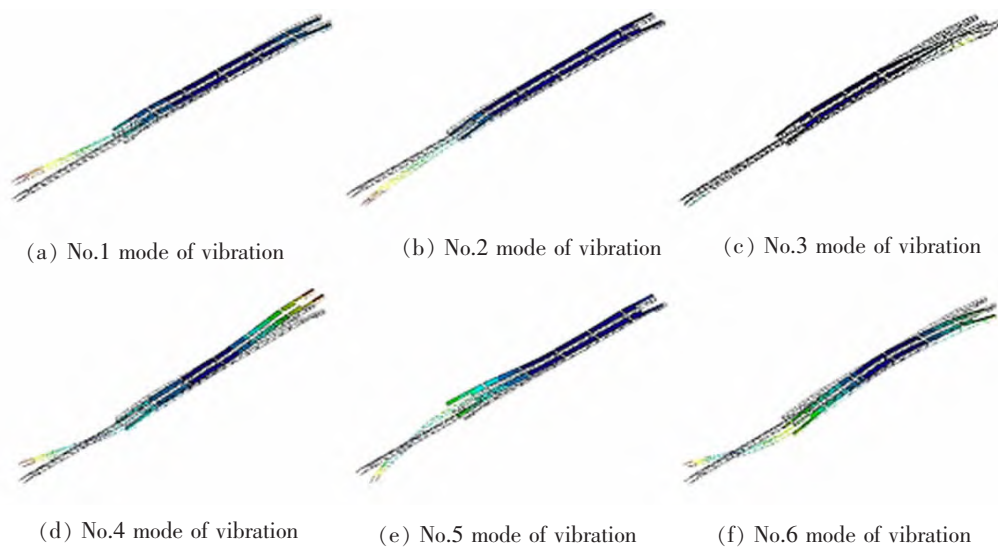


图 2 轴向运动嵌套悬臂梁前 6 阶振型图

Fig.2 The first 6 modes figure of the axial motion nest cantilever beam

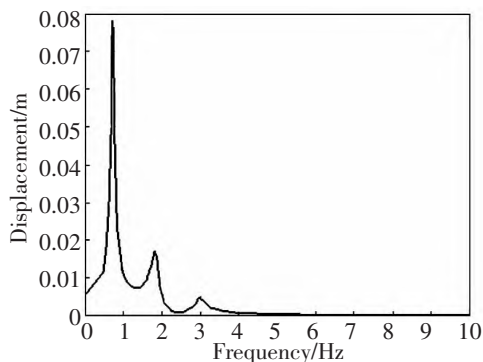


图 3 轴向运动嵌套悬臂梁导梁端部竖向位移谐波响应曲线
Fig.3 Harmonic response curve of vertical displacement at nose end of the axial motion nest cantilever beam

由图 3 可以看出,轴向运动嵌套悬臂梁竖向谐波响应频率分别与固有频率的第 1, 第 4, 第 6 阶对应,且当外部激励与第 1 阶固有频率重合时,结构位移响应幅值最大;因此将轴向运动嵌套悬臂梁的第 1 阶振型选定为此工况的受控模态。

3 附加 MTMD 的轴向运动嵌套悬臂梁竖向振动理论计算

3.1 振动方程建立

钢桁架桥的导梁在主梁里沿桥轴方向向外伸长架设的工作阶段可以简化为轴向运动嵌套悬臂

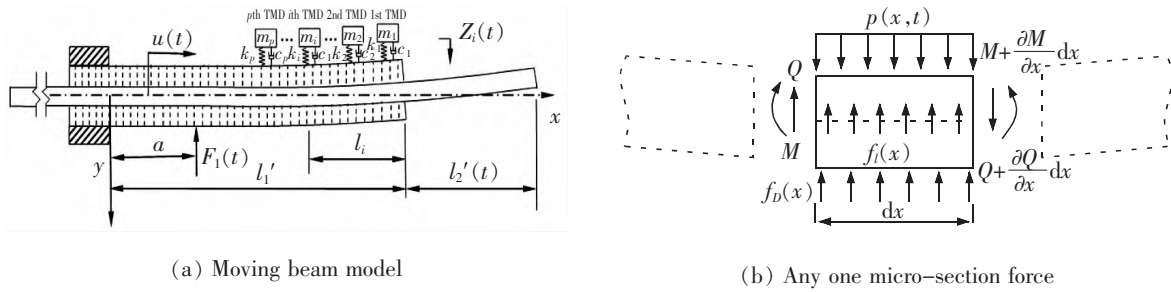


图 4 附加 MTMD 的轴向运动嵌套悬臂梁模型
Fig.4 Axial motion nest cantilever beam model with MTMD

梁模型^[17],附加 MTMD 后如图 4 所示。在系统的动力方程建立过程中使用了欧拉-伯努利梁模型,嵌套悬臂梁任意位置 x 处的抗弯刚度为 $E(x)$,单位长度平均质量为 $m(x)$,阻尼系数为 $c(x)$ 。导梁在任意时刻 t 的运动速度为 $u(t)$,第 1 段梁为固定长度梁,长度为 l_1' ,第 2 段梁长度随时间变化,瞬时长度为 $l_2'(t)$ 。

梁所受外部激励力为 $F(t)$,作用位置距固定端的距离为 a 。梁在 x 位置处的竖向位移为 $y(x,t)$,梁的轴向变形不予考虑。第 1 段梁上附加 p 个 TMD 系统,设第 i 个 TMD 的振子质量为 m_i ,弹簧刚度为 k_i ,阻尼系数为 c_i ,安装位置距离梁端 l_i ,振子的竖向位移为 $Z_i(t)$ 。

利用动力学原理^[13],建立梁微段上力和力矩的两个平衡方程,进一步化简可得到梁的动力学方程

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI(x)] \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + m(x) \frac{d^2 y(x,t)}{dx^2} + c(x) \frac{dy(x,t)}{dx} = p(x,t) \quad (1)$$

外力 $p(x,t)$ 的表达式为

$$p(x,t) = \sum_{i=2}^p \left\{ k_i [Z_i(t) - y(x,t)] + c_i \left[\dot{Z}_i(t) - \frac{dy(x,t)}{dx} \right] \right\} \delta[x - l_1' + l_i] - F(t) \delta(x - a) \quad (2)$$

式中: δ 是狄拉克函数。

通过建立第 i 个 TMD 的力平衡关系,得到如下动力方程

$$m_i \ddot{Z}_i(t) + k_i [Z_i(t) - y(l_1' + l_i, t)] + c_i \left[\dot{Z}_i(t) - \frac{dy(l_1' + l_i, t)}{dt} \right] = 0 \quad (3)$$

3.2 振动方程的求解

轴向运动嵌套悬臂梁由两段等截面的阶梯梁构成,一段梁的长度固定,另一段梁的长度时变。设

长度固定的第 1 段梁长为 l_1' ,抗弯刚度为 EI_1 ,单位长度平均质量为 m_1' ,长度时变的第 2 段梁任意时刻长度为 $l_2'(t)$,抗弯刚度为 EI_2 ,单位长度平均质量为 m_2' ,导梁在任意时刻 t 的运动速度为 $u(t)$ 。为简化计算,在计算过程中忽略阶梯梁的第一段梁内部导梁的轴向运动。

运用修正的伽辽金法对时变动力方程进行近似求解,利用梁的瞬时模态对方程进行解耦,可将方程(1)的解表示为

$$y(x,t) = \sum_{j=2}^q \Phi_j(x) \eta_j(x) = \begin{cases} \sum_{j=1}^q \phi_j \eta_j(x) & 0 \leq x \leq l_1' \\ \sum_{j=1}^q \Psi_j(x,t) \eta_j(x) = \sum_{j=1}^q \varphi_j(\xi) \eta_j(x) & l_1' \leq x \leq l_1' + l_2'(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi = \frac{x}{l_1' + l_2'(t)} \quad \frac{l_1'}{l_1' + l_2'(t)} \leq \xi \leq 1 \quad (5)$$

式中: $\eta_j(t)$ 为广义坐标; $\varphi_j(x)$ 为阶梯梁第 1 段梁的模态函数; $\Psi_j(x)$ 为第 2 段梁的模态函数; $\varphi_j(\xi)$ 为其变量替换后的形式,以上模态函数具体形式参见文献[17]。将式(4)变换为向量形式

$$y(x,t) = \Phi^T(x) \cdot \eta(x) = \begin{cases} \Phi^T(x) \cdot \eta(x) & 0 \leq x \leq l_1' \\ \varphi^T(\xi) \cdot \eta(x) & \frac{l_1'}{l_1' + l_2'(t)} \leq \xi \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

将方程(6)代入方程(1),方程两边同时乘以 $\Phi(x)$,并在梁全长 $l_1' + l_2'(t)$ 上积分,化简得到带有 MTMD 成分的轴向运动嵌套悬臂梁动力方程

$$M(t) \ddot{\eta}(t) + C(t) \dot{\eta}(t) - \sum_{i=1}^p c_i \phi(l_1' - l_i) \dot{Z}_i(t) + K(t) \eta(t) - \sum_{i=1}^p k_i \phi(l_1' - l_i) Z_i(t) = P(t) \quad (7)$$

其中:

$$M(t)=m_1' \int_0^{l_1'} \boldsymbol{\phi}(x)\boldsymbol{\phi}^T(x)dx+m_2'(l_1'+l_2') \int_{\frac{l_1'}{l_1'+l_2'}}^1 \boldsymbol{\varphi}(\xi) \boldsymbol{\varphi}^T(\xi)d\xi \quad (8)$$

$$C(t)=c \int_0^{l_1'} \boldsymbol{\phi}(x)\boldsymbol{\phi}^T(x)dx+2um_2' \int_{\frac{l_1'}{l_1'+l_2'}}^1 (1-\xi)\boldsymbol{\varphi}(\xi)\boldsymbol{\varphi}^T(\xi)d\xi+c(l_1'+l_2') \int_{\frac{l_1'}{l_1'+l_2'}}^1 \boldsymbol{\varphi}(\xi)\boldsymbol{\varphi}^T(\xi)d\xi+\sum_{i=1}^p c_i\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_i)\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_i) \quad (9)$$

$$K(t)=E_1 \int_0^{l_1'} \boldsymbol{\phi}'(x)\boldsymbol{\phi}'^T(x)dx+E_2(l_1'+l_2')^{-3} \int_{\frac{l_1'}{l_1'+l_2'}}^1 \boldsymbol{\varphi}''(\xi)\boldsymbol{\varphi}''^T(\xi)d\xi+m_2[u-2u^2(l_1'+l_2')^{-1}] \int_{\frac{l_1'}{l_1'+l_2'}}^1 (1-\xi)\boldsymbol{\varphi}(\xi)\boldsymbol{\varphi}^T(\xi)d\xi+m_2u^2(l_1'+l_2')^{-1} \int_{\frac{l_1'}{l_1'+l_2'}}^1 (1-\xi)^2\boldsymbol{\varphi}(\xi)\boldsymbol{\varphi}^T(\xi)d\xi+cu \int_{\frac{l_1'}{l_1'+l_2'}}^1 (1-\xi)\boldsymbol{\varphi}(\xi)\boldsymbol{\varphi}^T(\xi)d\xi+\sum_{i=1}^p k_i\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_i)\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_i) \quad (10)$$

$$P(t)=-F(t)\boldsymbol{\phi}(a) \quad (11)$$

将方程(6)代入方程(3),得到第*i*个TMD系统的动力方程

$$m_i\ddot{Z}_i(t)+c_i\dot{Z}_i(t)-c_i\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_i)\boldsymbol{\eta}(t)+k_iZ_i(t)-k_i\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_i)\boldsymbol{\eta}(t)=0 \quad (12)$$

联立方程(7)和方程(12),得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}(t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\eta}}(t) \\ \ddot{\mathbf{Z}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}(t) & \mathbf{K}_{pq} \\ \mathbf{K}_{qp} & \mathbf{K}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}(t) \\ \mathbf{Z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(t) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{M}_{pp} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_p \end{bmatrix}; \mathbf{C}_{pp} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_p \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{pq} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & k_p \end{bmatrix}; \mathbf{C}_{pq} = \begin{bmatrix} -c_1\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_1) \\ -c_2\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_2) \\ \dots \\ -c_p\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_p) \end{bmatrix}; \mathbf{K}_{qp} = \begin{bmatrix} -c_1\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_1) \\ -c_2\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_2) \\ \vdots \\ -c_p\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_p) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{pq} = \begin{bmatrix} -k_1\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_1) \\ -k_2\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_2) \\ \dots \\ -k_p\boldsymbol{\phi}(l_1'-l_p) \end{bmatrix}; \mathbf{K}_{qp} = \begin{bmatrix} -k_1\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_1) \\ -k_2\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_2) \\ \dots \\ -k_p\boldsymbol{\phi}^T(l_1'-l_p) \end{bmatrix}。数值求解不$$

同TMD数量情况下,梁端加速度的变化见图5。图中分别表示1个、3个和5个TMD后在不同速度

下的梁端振动加速度的曲线。图5中,速度0表示为静态,既没有伸长运动也没有缩短运动;速度为正值时,表示嵌套梁伸长运动;速度为负值时,表示嵌套梁缩短运动。而竖坐标表示梁端部的加速度值,可以看到1个TMD时,加速度幅值加大;3个TMD时,梁端加速度幅值减小;而5个TMD时,梁端加速度比3个时略有减少但效果不明显。综合减振效果、设置TMD的工作量和经济性,采用3个TMD作为减振系统。

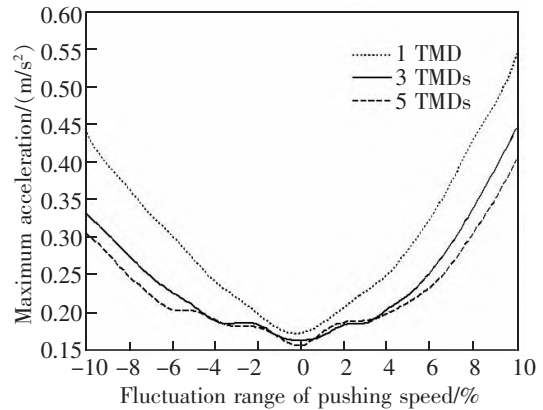


图5 考虑不同数量TMD的梁端加速度响应峰值图

Fig.5 Peak figure of acceleration response at beam end considering different quantity of TMD

4 MTMD 参数优化设计与减振效果分析

4.1 MTMD 参数设计

轴向运动嵌套悬臂梁的一阶自振圆频率在2.46~9.82 rad/s之间变化。在这个频率带宽内,设置数目分别为1个、3个、5个的MTMD来抑制结构振动。综合考虑MTMD的经济性、桥体的静力性能以及减振效果等因素,将MTMD的总质量设定为被控桥体质量的1%。假定MTMD具有相同的阻尼比、均匀的频率间隔、均匀分布质量等。对于轴向运动嵌套悬臂梁的一阶模态来说,TMD的最佳位置是梁的自由端。考虑到该桥的实际空间尺寸因素,第1个TMD可安装在距离桥自由端1.5 m处,其他等间距设置。为了获得MTMD系统的最佳频率和阻尼比,将梁端加速度响应峰值最小化作为目标函数,优化表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \min a_{\max}(\omega_i \xi_i) \\ \text{s.t.: } \omega_i \in [5.2, 11.1] \text{ rad/s} \\ \xi_i \in [0, 1] \quad (i=1, 2, \dots, p) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: a_{\max} 是梁端加速度响应峰值; ω_i 和 ξ_i 分别是第*i*个TMD的自振频率和阻尼比。

表 2 遗传算法参数设置
Tab.2 Parameter setting of genetic algorithm

Optimized object	Variable number	Individuals number	Crossover rate	Mutation rate	Maximum hereditary algebra
1 TMD	2	20	0.9	0.1	100
3 TMDs	6	60	0.9	0.1	200
5 TMDs	10	100	0.9	0.1	300

表 3 MTMD 最优参数(质量比 1%)
Tab.3 Optimum parameters of MTMD(mass ratio 1%)

Number of TMD	1	3	5
Optimal frequency	7.084 2	6.872 8, 7.001 1, 7.113 1	6.775 6, 6.847 7, 6.957 9, 7.142 5, 7.274 3
Optimal damping ratio	0.097 5	0.048 6, 0.052 4, 0.033 7	0.057 4, 0.045 8, 0.038 1, 0.042 8, 0.037 8
Peak acceleration	0.170 8	0.160 3	0.156 8

运用基因遗传算法对其进行求解,表 2 给出了遗传算法的详细参数,表 3 列出了经过计算得到的质量比为 1% 的 MTMD 最优参数。MTMD 的最优频率分布在激励力频率周围,符合动力调谐条件的特征。

4.2 减振效果分析

经试验测得桥端加速度响应峰值随着 MTMD 数目的增加而降低,表明适当增加 MTMD 的数目可以提高其减振效果。图 6 给出了在有控和无控状态下桥端部加速度响应时程曲线包络图,可以看出在附加 MTMD 系统之后,桥端的加速度峰值和整体加速度水平都得到了显著降低,尤其是 MTMD 数目达到 5 个时,桥端的加速度响应峰值下降到了无控状态下的 15%。

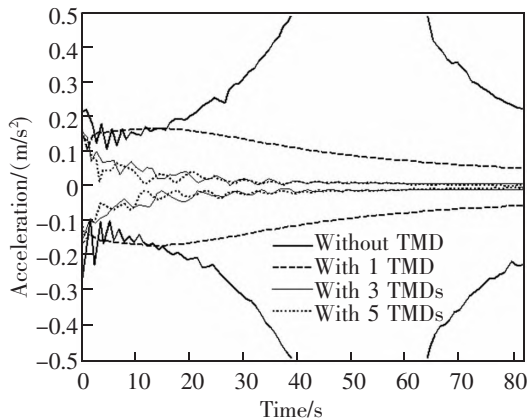


图 6 梁端加速度响应时程曲线包络图

Fig.6 Envelope diagram for time-history curve of acceleration response at beam end

5 基于推送速度波动的 MTMD 鲁棒性分析

单个 TMD 的减振效果鲁棒性较差,对频率比和阻尼比的波动非常敏感,由于减振系统在制作、运输和安装过程中参数发生偏差^[4]、主结构动力特性的改变以及对结构自振频率的错误估计^[5]等因素,其减振效果会随时间逐渐减弱,称为 TMD 的去谐效应。为了解决这一问题,Xu^[16]提出具有不同频率比的多重调谐质量阻尼器(MTMD),通过设置更宽的频率带来提高减振系统的鲁棒性。

实际桥梁的桥节推送过程的速度取为 0.11 m/s,然而,在实际情况中推送速度会在一定的范围内波动,从而导致 MTMD 发生去谐现象。图 7(a),图 7(b)分别展示了考虑 10% 推送速度波动时,不同数目 MTMD 控制下梁端加速度响应峰值曲线图。可以看出,当桥节推送速度发生波动时,桥端的加速度响应会显著地增大,MTMD 的减振效果大幅减弱。而且从理论上讲,相比于 MTMD,单个 TMD 对推送速度的波动更加敏感,MTMD 控制效果的鲁棒性随着 TMD 数目的增加而增强。

为了提高 MTMD 系统的可靠性,以抵抗桥节推送速度波动带来的影响,在保持 MTMD 中心频率不变的状态下,放大各 TMD 之间的频率间距,放大比例分别为 25%,50%,75%和 100%。图 7(a),图 7(b)分别作出了 MTMD 数目为 3 和 5 时,相应的梁端加速度响应峰值图。可以看出,当桥节推送速度波动较小时,放大 MTMD 的频率间距会使其丧失一定的

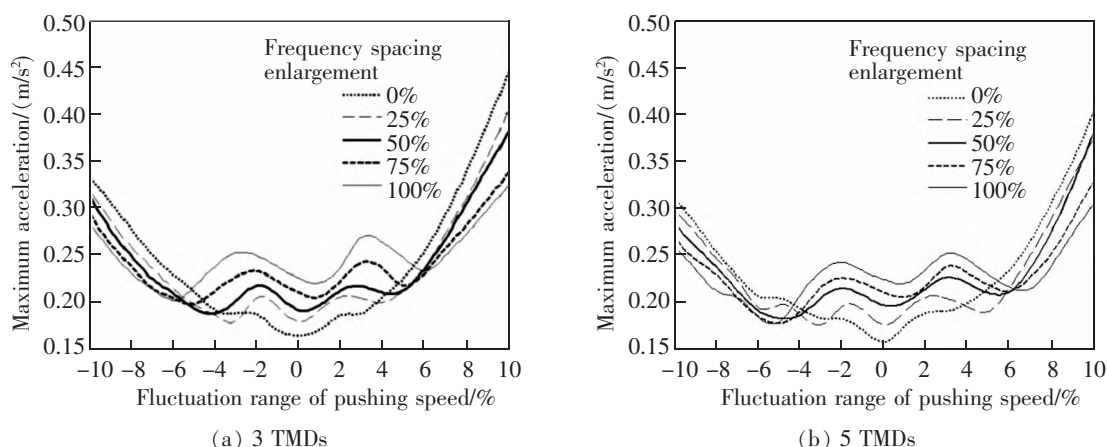


图7 扩大 MTMD 频率间距梁端加速度响应峰值图

Fig.7 Peak value diagram of acceleration response at beam end after enlarging MTMD frequency interval

减振效果,然而当桥节推送速度波动较大时,具有更宽频率带的 MTMD 减振效果更好。适当地扩大频率间距能有效提高主结构-MTMD 系统的鲁棒性,以降低推送速度波动带来的不良影响。

6 结论

通过以上研究,得到以下结论:

1) 通过有限元建模分析、理论公式推导和实桥试验研究,得到了装配式钢桁架桥轴向运动嵌套悬臂梁的振动基本规律,尤其是 1 阶,4 阶和 6 阶垂弯振动贡献率是最大的,选择 1 阶振动作为受控模态;

2) 设计 MTMD 系统,并建立了主结构-MTMD 时变系统的振动方程,数值求解结果表明,MTMD 的减振效果好于单独的 TMD,3 个 TMD 的减振效果已经能够满足工程需要且经济性较好,为解决该类问题提供了技术支持;

3) 在考虑不同推送速度对 MTMD 减振效果的鲁棒性问题时,提出适当放大 MTMD 的频率间距,将提高主结构-MTMD 系统的鲁棒性,可降低推送速度波动带来的不良影响。

参考文献:

[1] 王建平,余文明. 渡河桥梁设计概论[M]. 北京:人民交通出版社,2020.
WANG J P, YU W M. Introduction to the Design of River-crossing and Bridge[M]. Beijing: People's Communications Press, 2020.

[2] 沈火明,肖艳平. TMD 控制下的车桥动力特性研究[J]. 西华大学学报(自然科学版),2005,24(4):24-27.
SHEN H M, XIAO Y P. Dynamic character of the bridge and train under the controlling of TMD[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2005, 24(4): 24-27.

[3] 李春祥. 大跨桥梁振动控制的杠杆主动多重调谐质量阻尼器策略[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(4):155-161.
LI C X. Lever-type active multiple tuned mass dampers strategy for vibration mitigation of long-span bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 155-161.

[4] 罗文俊,曹浩,张子正,等. 基于 FE-SEA 混合法列车交会桥梁振动噪声分析[J]. 华东交通大学学报,2021,37(2):1-7.
LUO W J, CAO H, ZHANG Z Z, et al. Analysis of bridge vibration and structure noise based on FE-SEA hybrid method for train rendezvous[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 37(2): 1-7.

[5] 张新亚,雷晓燕,罗锐. 多重调谐质量阻尼器对简支箱型梁结构低频振动控制的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究,2021(1):111-115.
ZHANG X Y, LEI X Y, LUO K. Simulation research on MTMD control of low frequency vibration of simple support box girder[J]. Urban Mass Transit, 2021(1): 111-115.

[6] 金波,唐丽莹,周旺. 大跨悬索桥 MTMD 抖振控制的参数优化[J]. 公路工程,2020,45(1):98-104.
JIN B, TANG L Y, ZHOU W, et al. Parameter optimization of multiple tuned mass damper based on long-span suspension bridge damping control[J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 98-104.

[7] 王梁坤,施卫星,张全伍. 自适应多重 TMD 在大跨楼板结

- 构减振中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2020,40(3):578-584.
- WANG L K,SHI W X,ZHANG Q W. Adaptive-passive multiple tuned mass damper on large-span floor structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis 2020, 40(3):578-584.
- [8] 郭宏超,李炎隆,王凯励. 大跨度钢连廊人致激励下 MTMD 减振控制[J]. 自然灾害学报,2020,29(3):145-152.
- GUO H C,LI Y L,WANG K L. MTMD vibration reduction control of large span steel corridor under the human-induced excitation[J]. Journal of Natural Disasters,2020,29(3):145-152.
- [9] 罗安. 重型支援桥极限承载力分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.
- LUO A. Analysis on ultimate load capacity of the heavy support bridge[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2007.
- [10] 王建平,黄逸辉,郑峰. 大跨度变截面梁沿导梁推送架设时的振动响应分析[J]. 华东交通大学学报,2015,32(2):23-28.
- WANG J P,HUANG Y H,ZHENG F. Vibration response analysis of large span varying cross-section beam in erection along the guide beam[J]. Journal of East China Jiaotong University,2015,32(2):23-28.
- [11] DUAN Y C,WANG J P,SHAO F,et al. Theoretical and experimental study on the dynamic characteristics of an axially moving nested clamped-hinged beam[J]. Journal of Vibroengineering,2015,17(2):602-619.
- [12] 杨双双,王建平,赵志波,等. 基于调谐质量阻尼器的装配式钢桁桥振动控制研究[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(8):50-53.
- YANG S S,WANG J P,ZHAO Z B,et al. Study on vibration control of prefabricated steel truss bridge based on tuned mass damper[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017,38(8):50-53.
- [13] R 克拉夫. 结构动力学[M]. 王光远,译. 北京:高等教育出版社,2006.
- CRAIG R. Structural Dynamics [M]. WANG G Y,translation. Beijing:Higher Education Press,2006.
- [14] DUAN Y C,WANG J P,WANG J Q,et al. Theoretical and experimental study on the transverse vibration properties of an axially moving nested cantilever beam[J]. Journal of Sound & Vibration,2014,333(13):2885-2897.
- [15] BACHMANN H,WEBER B. Tuned vibration absorbers for "Lively" structures[J]. Structural Engineering International, 1995,5(1):31-36.
- [16] XU K,IGUSA T. Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1992,21(12):1059-1070.



第一作者:王建平(1961—),男,教授,博士,博士生导师,先后获得国家科技进步二等奖1次,省部级科技进步二等奖7次、三等奖8次;获军队专业技术岗位一类津贴、全军教书育人奖“银奖”;在工程兵工程学院先后获得学士,硕士学位,在解放军理工大学获得博士学位,研究方向为土木工程,交通运输工程。E-mail:2362172261@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)