

车-桥耦合系统 MTMD 振动控制参数研究

刘广波¹, 周星德², 石星星¹, 张安乐²

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 建立了车-桥耦合系统的连续梁模型, 对车-桥耦合系统的多重调谐质量阻尼器 (MTMD) 振动控制进行了研究. 结合实例分析模态数对仿真计算的影响, 给出了仿真计算应考虑的模式数取值, 在保证计算精度的基础上大大减少了计算的工作量. 考虑到目前新型高速铁路桥梁抗扭刚度较小, 对高速铁路桥的扭转振动影响进行研究, 结果表明扭转振动在高速列车作用下对桥梁有较大影响. 最后, 对 MTMD 的布置方式及参数设计进行了改进.

关键词: 高速列车; 桥梁; MTMD; 振动控制; 耦合作用

中图分类号: U24 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.06.015

0 引言

目前, 车-桥系统的动力分析已经发展相对成熟, 而振动控制策略的研究相对滞后, 专门针对高速铁路车-桥振动控制的研究文献并不多见.

早期的国内外学者采用调谐质量阻尼器 (TMD) 对车-桥耦合振动系统的某一振型模态进行控制, 有效地降低了桥梁在竖向的动力响应^[1-3]. 但随着列车时速不断提高, 车桥耦合系统的共振问题日益突出, 单一的 MTMD 控制系统已无法满足要求^[4]. 多频调谐质量阻尼器 (MTMD) 由多个小 TMD 组成, 可以对系统的一段频率进行控制, 对不同振型模态下的动力响应都有较好的控制效果^[5-7]. MTMD 相对于 TMD 具有多频调谐的优点, 但 MTMD 需要较大的安装空间^[8], 其参数选取也较为困难, 如何合理地选取 MTMD 并设计其参数, 从而实现对车-桥耦合系统的有效控制成为当前研究的一个课题. 针对以上出现的问题, 笔者对 MTMD 的参数设计进行了研究, 给出了 MTMD 各项参数的选取方法和最优布置方案, 改进了参数的设计方法, 降低了经济成本, 提高了控制的效率.

1 车-桥-MTMD 系统振动方程

1.1 振动方程^[9]

图 1 所示为车-桥-MTMD 耦合振动系统,

车辆简化为半车模型, 采用二系悬挂.

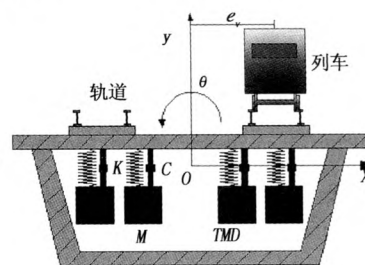


图 1 车-桥-MTMD 系统截面

Fig. 1 Vehicle-bridge system cross-section

1.2 整体运动方程

$$\begin{bmatrix} M_b & 0 & 0 \\ 0 & M_v & 0 \\ 0 & 0 & M_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\nu}_b \\ \ddot{\nu}_v \\ \ddot{\nu}_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bv} & 0 \\ C_{vb} & C_{vv} & C_{vM} \\ 0 & C_{Mv} & C_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\nu}_b \\ \dot{\nu}_v \\ \dot{\nu}_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bv} & 0 \\ K_{vb} & K_{vv} & K_{vM} \\ 0 & K_{Mv} & K_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_b \\ \nu_v \\ \nu_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: M_b 、 M_v 、 M_M 分别为桥、车、MTMD 的质量矩阵; ν_b 、 ν_v 、 ν_M 为桥、车、MTMD 的位移矩阵; K_{bb} 、 K_{vv} 、 K_{MM} 为桥、车、MTMD 的刚度矩阵; C_{bb} 、 C_{vv} 、 C_{MM} 为桥、车、MTMD 的阻尼矩阵.

1.3 竖向振动方程

$$m(x) \frac{\partial^2 \gamma(x, t)}{\partial t^2} + C_y(x) \frac{\partial \gamma(x, t)}{\partial t} +$$

收稿日期: 2012-06-02; 修订日期: 2012-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51178160); 国家自然科学基金资助重点项目 (U1134207)

通信作者: 周星德 (1964-), 男, 安徽合肥人, 河海大学教授, 博士后, 主要从事振动控制方面的研究, E-mail: xing-

dezhou@163.com

$$\left[EI(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right] = F_y. \quad (2)$$

式中: $m(x)$ 为桥梁单位长度质量; $C_y(x)$ 表示桥竖向振动的阻尼; $y(x,t)$ 表示 t 时刻的竖向位移; E 为弹性模量; $I(x)$ 表示截面惯性矩; F_y 表示竖向作用力。

1.4 扭转振动方程

$$J_m(x) \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial t^2} + C_\theta(x) \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[GJ(x) \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} + EC_w(x) \frac{\partial^3 \theta(x,t)}{\partial x^3} \right] = F_\theta. \quad (3)$$

式中: $J_m(x)$ 为桥梁单位长度转动惯量; $C_\theta(x)$ 表示桥转动方向阻尼; $\theta(x,t)$ 表示 t 时刻的转角; G 为剪切模量; $J(x)$ 表示转动惯性矩; F_θ 表示扭转力。

1.5 MTMD 的振动方程

跨中截面处第 l 个 TMD 的振动方程如下:

$$m_{sl} \ddot{z}_{sl}(t) + c_{sl} [\dot{z}_{sl}(t) - \dot{y}(x_s, t) - e_{sl} \dot{\theta}(x_s, t)] + k_{sl} [z_{sl}(t) - y(x_s, t) - e_{sl} \theta(x_s, t)] = 0. \quad (4)$$

式中: m_{sl} 表示第 l 个 TMD 的质量; c_{sl} 表示第 l 个 TMD 的阻尼; k_{sl} 表示第 l 个 TMD 的刚度; $z_{sl}(t)$ 表示第 l 个 TMD 的位移; e_{sl} 表示第 l 个 TMD 到截面轴的距离; p 为 TMD 的数量。

2 振动方程解耦

桥梁的竖向位移和转角为

$$y(x,t) = \Phi^T(x) \eta(t); \quad (5)$$

$$\theta(x,t) = \varphi^T(x) \gamma(t). \quad (6)$$

式中: Φ 、 φ 分别为竖向振型函数和扭转振型函数。

将式(5)、(6)代入方程式(2)、(3)并分别左乘 Φ 、 φ , 对方程两边进行积分, 得到解耦后的方程如下:

$$M_y \ddot{\eta}(t) + C_y \dot{\eta}(t) + K_y \eta(t) = F_{yv} + F_{y,MTMD}; \quad (7)$$

$$M_\theta \ddot{\gamma}(t) + C_\theta \dot{\gamma}(t) + K_\theta \gamma(t) = F_{\theta v} + F_{\theta,MTMD}. \quad (8)$$

式中: M_y 、 C_y 、 K_y 为 N 阶方阵, 分别表示竖向模态下的质量、阻尼、刚度矩阵; M_θ 、 C_θ 、 K_θ 为 N 阶方阵, 分别表示转动模态下的质量、阻尼、刚度矩阵。

3 MTMD 布置及参数设计

3.1 MTMD 奇数布置法

研究发现控制器安装在受控模型位移峰值处时, 结构的控制效果达到最优, 笔者将 MTMD 安装在跨中截面处。

MTMD 在布置时往往采取对称布置, 对称布置又分为奇数对称布置和偶数对称布置, 见图 2。

偶数对称布置法以截面对称轴为准, 两侧对称安装 TMD。奇数对称布置法首先在对称轴处安装 TMD 两侧依次布置, 因此 TMD 的总数量要比偶数布置少, 但频带宽度并未改变, 因此二者的控制效果基本相同。

箱梁内部空间有限, 安装和维修等都比较困难, 因此 MTMD 中 TMD 的数量不宜过多。奇数对称布置法在保证控制效果的前提下具有较少的 TMD, 减少桥的附加质量以及 TMD 维护方面的问题, 因此更加合理。

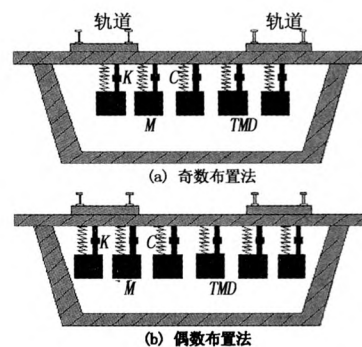


图2 奇数(偶数)对称布置

Fig. 2 Odd (even) symmetrical arrangement

3.2 MTMD 最优频率

MTMD 的特点就是多频调谐, 频率的选取对控制效果有较大影响。

第 j 阶振型模态下 TMD 的频率比为

$$r_{jl} = \omega_{sl} / \omega_{yj}. \quad (9)$$

最优频率比可通过求解以下方程求得

$$\begin{cases} \frac{\partial R_{dvj}}{\partial r_{f1}} = \frac{\partial R_{dvj}}{\partial r_{f2}} = \dots = \frac{\partial R_{dvj}}{\partial r_{fl}} = 0; \\ \frac{\partial R_{dvj}}{\partial \mu_{s0}} = 0; \\ \frac{\partial R_{dvj}}{\partial \xi_{s0}} = 0; j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_{dvj} 为第 j 阶模态的响应比函数。

最优频率的连续性越好, 控制效果也就越好, 因此在进行频率设计时要结合 TMD 的数量和最优频率特征值进行优化设计, 频率设计应满足连续性好、频带宽度大的要求。

4 实例分析

4.1 计算参数

以台湾高速铁路桥为例进行仿真计算, 桥长 40 m, 单位长度质量 $38\,240 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, 截面惯性矩 17.9 m^4 , 单位质量极惯性矩 $464\,500 \text{ N} \cdot \text{s}^2$,

惯性扭矩 35 m^4 , 列车偏心距 2.35 m , 阻尼比 2.5% , $1 \sim 2$ 阶竖向振动频率分别为 $22.54, 90.24 \text{ rad/s}$, $1 \sim 2$ 阶扭转振动频率分别为 $74.54, 149.08 \text{ rad/s}$. 列车采用法国 TGV 高速列车, 车厢长度 18.7 m , 列车时速 240 km/h , 半车质量 $27\,000 \text{ kg}$, 转向架质量 $3\,000 \text{ kg}$.

4.2 计算结果分析

4.2.1 扭转振动对动力响应的影响

由结果分析可知, 考虑扭转效应后跨中位移比不考虑扭转效应的跨中位移增大, 最大位移差达到 0.6 mm , 位移增大约 24% , 如图 3 所示.

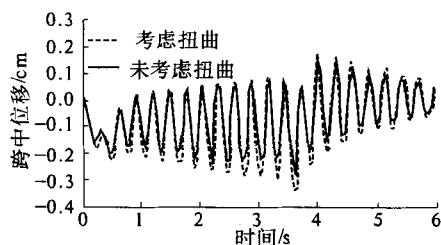


图3 动力响应曲线

Fig.3 Dynamic responses curve

扭转效应对新型高速铁路桥梁的振动响应有较大的影响, 因此对高速铁路桥梁进行动力分析应考虑扭转效应的影响.

4.2.2 MTMD 减振效果

采用 MTMD 控制, 跨中位移和加速度明显降低, MTMD 控制取得了显著的控制效果, 如图 4 所示. 针对列车上桥和下桥时存在的峰值跳跃现象, 采用 MTMD-MTMD 或 MTMD-TMD 混合控制的方法进行控制, 将取得较好的效果.

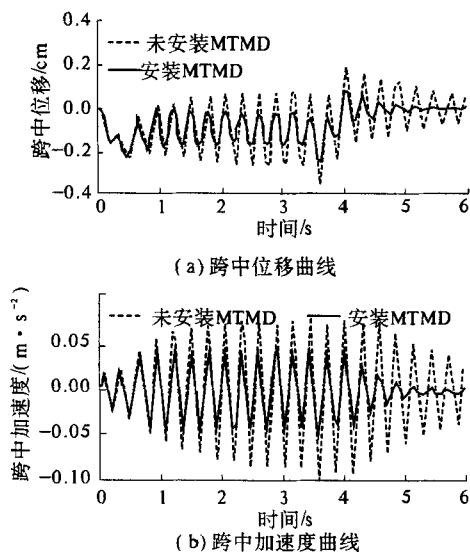


图4 跨中位移和加速度时程曲线

Fig.4 Midspan displacement and acceleration curve

4.2.3 计算模态数及频率取值

结构的模态数对结构的位移有较大影响, 考虑较高的模态数能使结果更精确, 但相应的计算量也会增加. 研究发现, 高阶模态下的响应对结果影响较小, 可以取较少的模态数进行计算. 取模态数 N 为 2 和 20 计算, 竖向与扭转位移曲线见图 5.

对峰值处的位移进行误差分析, 最大误差为 0.05 mm . $N=2$ 相比 $N=20$ 结果只减小了 2.4% , 但计算时间由 38 s 降低到 2 s , 这对于高速铁路的实时控制有较大的意义. 笔者建议在进行仿真计算时可仅考虑前两阶模态.

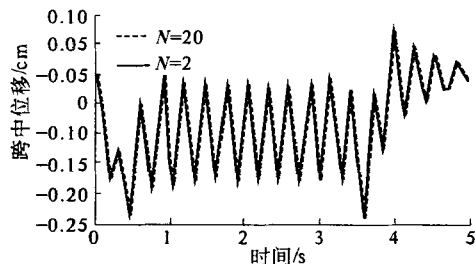


图5 模态数 $N=2, N=20$ 竖向位移曲线

Fig.5 Vertical displacement curve with modal number $N=2, 20$

由式(9)可知 TMD 的频率由结构固有频率来确定. 实际设计中 r_{fl} 取值范围介于 $0.75 \sim 1.25$ 之间, ω_{y1} 随着阶数的增高会急剧变大, 这对于 TMD 设计来讲是比较困难的. 高阶模态下的动力响应对结果的影响不大, 因此可根据结构的低阶频率来确定小 TMD 的频率. 通过研究发现 MTMD 的频率应根据第一阶模态来确定.

则式(9)改写为:

$$r_{fl} = \omega_{s1} / \omega_{y1} \quad (11)$$

4.2.4 奇数布置法控制效果

当列车过桥时, 奇偶布置方法取得的控制效果基本相同, 最大误差仅为 0.003 mm , 见图 6. 偶数布置法比奇数布置法安装的 TMD 数量多, 导致桥的附加荷载增大. 采用奇数布置法既能保证控制效果, 又能节约成本, 具有工程实用价值. 因此, 采用奇数布置法来布置 MTMD 更合理.

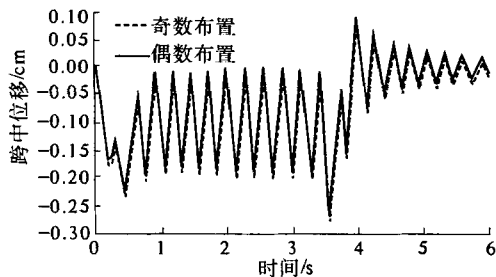


图6 MTMD 奇偶布置位移曲线

Fig.6 Displacement curve with odd and even MTMD

5 结论

(1) 扭转振动对结构稳定性有较大影响,在进行动力分析时应考虑扭转效应。

(2) 高阶模态下车-桥系统的振动响应较小,在进行仿真计算时可取较少的模态数进行仿真计算,这样可以大大减少工作量和计算时间,同时又能保证计算结果的精度。

(3) MTMD 奇数对称布置法设计更为合理,具有较大的工程意义。高阶模态对计算结果影响较小,MTMD 频率应根据第一阶频率来进行设计。

参考文献:

- [1] KWON H C, KIM M C, LEE I W. Vibration control of bridge under moving loads[J]. Computer & Structure, 1998, 66(4): 473 - 480.
- [2] WANG J F, LIN C C. Vibration suppression for high-speed train bridge using tuned mass dampers[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003 (40): 465 - 491.
- [3] LIN C C, WANG J F, CHEN B L. Train-induced vibration control of high-speed railway bridges equipped with tuned mass dampers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(4): 398 - 414.
- [4] WU J D, YANG Y B. Vibration reduction for cable-stayed bridges traveled by high-speed train[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004 (40): 341 - 358.
- [5] YANG Y B, CHANG C H, YAU J D. Element for analyzing vehicle-bridge systems considering vehicle pitching effect[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46(7): 1031 - 1040.
- [6] 肖艳平. 桥梁振动控制的初步研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2006.
- [7] 郭文华, 路萍. TMD 对高速列车通过简支箱梁时的振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2010, 27(11): 42 - 45.
- [8] 杨宜谦, 张锻. 用调频质量阻尼器抑制铁路桥梁竖向共振的研究[J]. 中国铁道科学, 1998, 3(1): 12 - 18.
- [9] 潘家英, 高芒芒. 铁路车-线-桥系统动力分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.

Research on MTMD Vibration Control Parameters in Vehicle-Bridge Coupled System

LIU Guang-bo¹, ZHOU Xing-de², SHI Xing-xing¹, ZHANG An-le²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, a continuous beam model of Vehicle-Bridge Coupled System (VBCS) is built and the vibration control of VBCS is studied with Multiple Tuned Mass Dampers (MTMD). In combination with the analysis impact of modal number on simulating calculation, this paper gives the considered modal number in simulating calculation, and greatly reduces the calculation effort on the basis of ensuring the accuracy of calculation. Considering the weak torsion stiffness of the present new high-speed railway bridge, this paper analyses the torsion vibration effect of the high-speed railway bridge. And the results show that the torsion vibration has a great impact on the bridge under the high-speed train loads. Finally, the MTMD arrangement and parameter design have been improved.

Key words: high-speed train; bridge; MTMD; vibration control; coupling effect