

大跨度桥梁多模态耦合颤振的 TMD 控制

张鸣祥, 王建国*, 汪 权

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 推导了装有 TMD 的结构在气动自激力作用下的动力微分方程, 基于模态空间中多模态耦合颤振分析手段, 运用考虑安装 TMD 的多模态自动分析法对结构-TMD 系统进行了颤振分析和 TMD 控制分析, 使多模态自动分析法能适用于 TMD 颤振控制分析, 避免了双参数搜索和迭代计算, 提高了计算效率。对某在建三塔悬索桥进行了原结构颤振分析和 TMD-结构颤振频域分析, 探讨 TMD 控制参数对颤振临界风速的影响。

关键词: 调谐质量阻尼器; 被动控制; 颤振; 临界风速; 悬索桥

中图分类号: O32 **文献标志码:** A

1 引言

自 Tacoma 悬索桥垮塌(1940 年)以来, 由气动自激力所激发的颤振成为大跨度桥梁必须杜绝的风致振动。在研究颤振发生的机理和规律的同时^[1], 为了提高桥梁的颤振临界风速, 各国工程设计人员提出了多种方法^[2]。振动控制在悬索桥的颤振控制这一领域有较多研究和应用, Pourzeynali、Gu 和 Shum 分别使用主动、半主动或其他被动控制手段提高颤振临界风速以及抑制其他同时发生的动力响应^[3-5], 并在风洞试验中加以验证^[6]。作为被动控制装置, TMD(调谐质量阻尼器)在大跨度桥梁等结构的抗震设计^[7-8]和车-桥-风系统振动控制^[9]等方面有着广泛的运用, 在颤振的临界风速提高这个问题中也有着广泛的研究, 其一般布置形式如图 1 所示。

Kwon^[10]系统比较了 TMD、MTMD 和 IMTMD 控制颤振临界风速的鲁棒性的差异。曾宪武^[11]使用基于多模态计算法的 pK-F 法分析了结构-TMD 系统的颤振临界风速, 在搜寻颤振临界风速时需进行双参数迭代并且自动性较差。

本文选取多模态耦合颤振自动分析法作为 TMD 控制分析的基本算法, 并做相应修改以适用于结构-TMD 颤振控制理论, 研究 TMD 的参数设

置对颤振临界风速控制效率的影响。多模态自动分析法采用单参数搜索, 不需要迭代计算且自动性较好。在原结构的颤振多模态全过程分析的基础上, 结构-TMD 系统的控制分析不需要再进行全过程分析, 大大节省了机时, 提高了运算效率。

2 基本理论

2.1 模态空间内自激气动力作用下的结构-TMD 运动微分方程

桥梁结构在 TMD 以及气动自激力作用下的运动微分方程为

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{x}_b = \mathbf{F}_{TMD} + \mathbf{F}_{se} \quad (1)$$

式中 \mathbf{M}_b 、 \mathbf{C}_b 和 \mathbf{K}_b 分别为桥梁结构的总体质量、阻尼和刚度矩阵, \mathbf{x}_b 为桥梁节点位移向量, 其上标为对时间的导数, \mathbf{F}_{TMD} 为 TMD 控制力向量, \mathbf{F}_{se} 为气动自激力向量。

根据第 i 个 TMD 作用于结构的 j 节点的控制力等于 TMD 的惯性力, 如图 1 所示, 其控制力为

$$\begin{Bmatrix} F_{TMD}(j) \\ M_{TMD}(j) \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{Ti} & m_{Ti}d_i & m_{Ti} \\ m_{Ti}d_i & m_{Ti}d_i^2 & m_{Ti}d_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_j \\ \ddot{\alpha}_j \\ \ddot{x}_{Tbi} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 m_{Ti} 和 x_{Ti} 分别为第 i 个 TMD 的质量和位移, x_j 和 α_j 分别为 j 节点的竖向和扭转位移, x_{Tbi} 为第 i 个 TMD 相对于 j 节点的竖向位移, d_i 为第 i 个 TMD 距截面形心的水平距离。针对多个 TMD, \mathbf{F}_{TMD} 可写为

$$\mathbf{F}_{TMD} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bin} & \mathbf{M}_{bT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_b \\ \ddot{\mathbf{x}}_{Tb} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

收稿日期: 2010-12-13; 修改稿收到日期: 2011-05-20.

基金项目: 国家自然科学基金(11172087)资助项目.

作者简介: 张鸣祥(1980-), 男, 博士, 讲师;

王建国*(1954-), 男, 教授

(E-mail: jianguow@hfut.edu.cn);

汪 权(1981-), 男, 博士, 讲师.

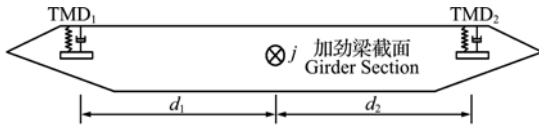


图1 TMD布置示意图

Fig. 1 Configuration of TMD

将式(3)代入式(1),并化简可得

$$(\mathbf{M}_b + \mathbf{M}_{bin})\ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{x}_b + \mathbf{M}_{bT} \ddot{\mathbf{x}}_{Tb} = \mathbf{F}_{se} \quad (4)$$

取第 i 个 TMD 作为单独结构,其运动微分方程的向量形式为

$$\begin{bmatrix} m_{Ti} & m_{Ti}d_i & m_{Ti} \\ 0 & 0 & c_{Ti} \\ 0 & 0 & k_{Ti} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_j & \ddot{\alpha}_j & \ddot{x}_{Tbi} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{Ti} \\ 0 & 0 & k_{Ti} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_j & \dot{\alpha}_j & \dot{x}_{Tbi} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{Ti} \\ 0 & 0 & k_{Ti} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j & \alpha_j & x_{Tbi} \end{bmatrix}^T = 0 \quad (5)$$

式中 c_{Ti} 和 k_{Ti} 分别为第 i 个 TMD 的阻尼和刚度。针对多个 TMD,都有相应的式(5),写成矩阵形式,可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bT}^T & \mathbf{M}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_b \\ \ddot{\mathbf{x}}_{Tb} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{C}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_b \\ \dot{\mathbf{x}}_{Tb} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{K}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_b \\ \mathbf{x}_{Tb} \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (6)$$

令 $\mathbf{x}_b = \Phi_b \mathbf{X}_b$, $\mathbf{x}_{Tb} = \Phi_{Tb} \mathbf{X}_{Tb}$, Φ_b 和 Φ_{Tb} 分别为结构和 TMD 质量归一化振型矩阵, \mathbf{X}_b 和 \mathbf{X}_{Tb} 分别为结构和 TMD 的广义位移。式(4)左乘 Φ_b^T 和式(6)左乘 Φ_{Tb}^T 并联立,可得

$$\tilde{\mathbf{M}} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_b \\ \ddot{\mathbf{X}}_{Tb} \end{Bmatrix} + \tilde{\mathbf{C}} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_b \\ \dot{\mathbf{X}}_{Tb} \end{Bmatrix} + \Lambda \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_b \\ \mathbf{X}_{Tb} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_b^T \mathbf{F}_{se} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式(7)为模态空间内结构-TMD 运动微分方程,其中

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} + \Phi_b^T \mathbf{M}_{bin} \Phi_b & \Phi_b^T \mathbf{M}_{bT} \Phi_{Tb} \\ \Phi_{Tb}^T \mathbf{M}_{bT}^T \Phi_b & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{C}}_T \end{bmatrix}, \Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda_T \end{bmatrix}$$

$\Lambda_b = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_m^2)$, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ 为桥梁前 m 阶振动频率, $\Lambda_T = \text{diag}(\omega_{T1}^2, \omega_{T2}^2, \dots, \omega_{Tn}^2)$, $\omega_{T1}, \omega_{T2}, \dots, \omega_{Tn}$ 为 TMD 振动频率, n 为 TMD 的数目, $\tilde{\mathbf{C}}_b = \text{diag}(2\xi_1 \omega_1, 2\xi_2 \omega_2, \dots, 2\xi_m \omega_m)$, $\tilde{\mathbf{C}}_T = \text{diag}(2\xi_{T1} \omega_{T1}, 2\xi_{T2} \omega_{T2}, \dots, 2\xi_{Tn} \omega_{Tn})$, $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$ 为桥梁前 m 阶振型阻尼比, $\xi_{T1}, \xi_{T2}, \dots, \xi_{Tn}$ 为 TMD 阻尼比, $\text{diag}(\cdot)$ 为对角阵。

令 $[\mathbf{X}_b \quad \mathbf{X}_{Tb}]^T = \mathbf{q}e^{st}$, \mathbf{q} 为 $(m+n)$ 行的广义坐标向量,代入式(7)进而可得

$$s^2 \tilde{\mathbf{M}} \mathbf{q} e^{st} + s \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{q} e^{st} + \Lambda \mathbf{q} e^{st} = \begin{Bmatrix} \Phi_b^T \mathbf{F}_{se} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

2.2 结构-TMD 多模态颤振自动分析法

文献[12]由 Scanlan 的气动自激力公式^[13]并根据机翼理论推导了 \mathbf{F}_{se} 的复数表达式,即

$$\mathbf{F}_{se} = \omega^2 \mathbf{A}_{se} \mathbf{x}_b \quad (9)$$

式中 \mathbf{A}_{se} 为自激力总体气动矩阵, ω 为结构振动频率,将式(9)代入式(8),令

$$\tilde{\mathbf{A}}_{se} = \begin{bmatrix} \Phi_b^T \mathbf{A}_{se} \Phi_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

并考虑系统在颤振临界状态附近,其 $\xi \approx 0$,故

$$[s^2(\tilde{\mathbf{M}} + \tilde{\mathbf{A}}_{se}) + s\tilde{\mathbf{C}} + \Lambda] \mathbf{q} e^{st} = \mathbf{0} \quad (11)$$

写成状态空间变量的形式为

$$(\mathbf{A} - s\mathbf{I}) \mathbf{Y} e^{st} = \mathbf{0} \quad (12)$$

其中

$$\mathbf{Y} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ s\mathbf{q} \end{Bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\bar{\mathbf{M}}\Lambda & -\bar{\mathbf{M}}\tilde{\mathbf{C}} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{M}} = (\tilde{\mathbf{M}} + \tilde{\mathbf{A}}_{se})^{-1}$$

由于 $e^{st} \neq 0$,则式(12)可以转化为特征值问题:

$$\mathbf{A}\mathbf{Y} = s\mathbf{Y} \quad (13)$$

式中 \mathbf{A} 为 $2(m+n) \times 2(m+n)$ 阶复数矩阵,其唯一的自变量为折减频率(K)或折减风速($v = 2\pi/K$)。由于复数表示的自激力表达式不显含风速 U ,所以式(13)仅含 s 和 K 两个变量,回避了二维搜索方法。确定的 K 或 v ,可求解出式(13)的特征值 s 和特征向量 \mathbf{Y} ,且

$$s = (-\xi + i)\omega, \mathbf{q} = \mathbf{a} + \mathbf{b}i$$

其特征值 s 为共轭复数成对出现,其虚部为正值 ($m+n$) 个特征值及其特征向量为系统的广义复模态形式,其他虚部为负值的 ($m+n$) 个特征值及其特征向量无实际物理意义。

在某确定的 K 或 v 下,当所有的复模态阻尼比均大于零时,颤振响应逐渐收敛,系统稳定;当任意一复模态阻尼比等于零时,颤振响应维持不变,系统处于临界状态;当任意一复模态的阻尼比小于零时,颤振响应逐步发散,系统不稳定。

3 TMD 参数设定与程序设计

TMD 的参数包括:TMD 的安放位置、质量、频率和阻尼比,其值的确定以获取最大的控制效率为目的,故设定 TMD 颤振控制效率为

$$\eta = \frac{U_{bT} - U_{cr}}{U_{cr}} \times 100\% \quad (14)$$

式中 U_{bT} 和 U_{cr} 分别为桥梁-TMD 系统和桥梁原结构的颤振临界风速。由于 TMD 的控制力与其惯性

力有关,一般安装在主梁跨中振幅最大处。如图 1 所示的双 TMD 布置也以控制扭转为目的,故在横向布置上尽量靠近主梁横截面边缘,以获得最大的惯性矩。对 TMD 的质量、频率和阻尼比分别设定取值区间,取值区间可以根据不同的桥形、跨径和技术水准设定。为了研究各参数对 TMD 颤振控制效率的敏感性,分别设定 TMD 质量比率 u_M , TMD 频率偏移率 u_ω 和 TMD 阻尼比 ξ_{TMD} 。

$$u_M = \frac{m_{TMD}}{m_b}, u_\omega = \frac{\omega_{TMD} - \omega_{cr}}{\omega_{cr}}$$

式中 m_{TMD} 和 ω_{TMD} 分别为 TMD 的质量和频率, m_b 和 ω_{cr} 分别为主梁的每延米质量和桥梁的颤振频率, u_M , u_ω 和 ξ_{TMD} 分别为本文 TMD 的设定参数。

为了探讨 TMD 设定参数对颤振控制效率的影响,采用区间内逐点计算的方法搜索颤振控制效率最大值,而在实际工程应用中可以采用现代最优化方法快速搜索。再根据原结构的颤振分析,可以恰当地选择折减风速 v (或折减频率 K) 的取值区间和步长,从而缩短单次 TMD-结构颤振分析时长。根据上述理论以及 TMD 参数的设定,利用 ANSYS 和 Matlab 建立有限元模型编制相应程序来实现。

在 ANSYS 中建立桥梁结构的有限元模型,使用 beam 4 单元模拟空间三维梁单元,使用 link 10 单元模拟空间三维拉索以及吊杆单元,利用 mass 21 单元模拟桥面质量以及扭转惯性矩。对建立的有限元模型进行模态分析,并利用 APDL 语言编程导出模型各阶模态的振型矩阵和频率及节点单元信息等。

将上述信息导入 Matlab 中编制 TMD 控制颤振程序,程序流程如下。

(1) 根据文献[12],利用多模态颤振自动分析法分析原结构颤振状态。

(2) 根据原结构的颤振状态,确定 TMD 的布置方案以及 TMD 的参数区间。

(3) 根据 TMD 参数区间设定一组参数,计算组装 M_{br} 和 M_{bin} 以及 \tilde{M} , \tilde{C} 和 Λ 。

(4) 根据 v (或 K) 确定取值区间和步长,并计算当前 v (或 K) 下的 \tilde{A}_{se} 。

(5) 对式(13)进行特征值分析得到特征值 s 和特征向量 Y 。

(6) 如果当前 v (或 K) 达到取值区间的最末,则进入下一步,如未达到区间最末,则 v (或 K) 迭加一步长回到第(5)步。

(7) 计算频率和阻尼比,判断颤振模态、频率以及临界风速。

(8) 取下一组 TMD 参数,回到第(4)步,如果所有的 TMD 组参数计算完毕则进入下一步。

(9) 对各组参数的颤振模态、频率以及临界风速分析比较,选取最佳 TMD 参数组。

4 算例

4.1 具有理想平板断面的简支梁

以理想平板简支梁为例,验证利用 ANSYS 和 Matlab 编制程序的正确性。简支梁长 300 m,宽 40 m,两端约束延梁方向的扭转自由度。平板断面的竖向刚度和横向刚度分别为 $2.1 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^4$ 和 $1.8 \times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^4$,扭转刚度为 $4.1 \times 10^5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^4$ 。每延米质量为 20t,质量惯性矩为 $4.5 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}$,空气密度为 $1.225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,假定所有的模态阻尼比为 0,自激力可用 Theodorson 函数表示,其颤振导数 H_i^* 和 A_i^* ($i = 1 \sim 4$) 可从该函数中确定^[14]。

以理想平板前 10 阶模态为基础(表 1),其颤振特性的频率变化如图 2 所示,阻尼比变化如图 3 所示。从图 3 可以看出,前 10 阶模态中有 2 阶模态发生了颤振,分别为第 2 阶和第 5 阶,其振型分别为一阶对称扭转和一阶反对称扭转,阻尼比为 0,所对应的频率分别为 0.3800 Hz 和 0.8870 Hz。颤振风速分别为 139.93 m/s 和 226.30 m/s,故颤振临界风速为 139.93 m/s,颤振频率为 0.3800 Hz,而理想平板的精确解是颤振临界风速为 139.9 m/s,颤振频率为 0.3801 Hz。由此可见,本文使用的 ANSYS 是 Matlab 混合编制的颤振分析程序能够准确地描述结构的颤振状态。

表 1 理想平板断面简支梁前 10 阶模态

Tab. 1 The first 10 modes of thin airfoil

No.	Freq/Hz	Mode shape	No.	Freq/Hz	Mode shape
1	0.17884	SV1	6	1.50303	ST2
2	0.50285	ST1	7	1.60958	SV2
3	0.52360	SL1	8	1.99763	AT2
4	0.71537	AV1	9	2.09439	AL1
5	1.00432	AT1	10	2.48675	ST3

注:S 为 symmetric,A 为 asymmetric,V 为 vertical,T 为 torsional,L 为 lateral。

表 2 三塔悬索桥主要构件截面参数

Tab. 2 Section parameters of suspension bridge

	E/MPa	γ	A/m ²	I _y /m ⁴	I _z /m ⁴	M/kg·m	I/kgm ² ·m
Girder	2.1×10^5	0.3	1.62	207.04	3.22	2.14×10^4	2.59×10^6
Cable	2.0×10^5		0.297			2.72×10^3	
Truss	2.0×10^5		0.004			49.92	

4.2 某在建长江公路大桥

某在建长江公路大桥主跨为 2×1080 m 三塔悬索桥,如图4所示,跨径布置为 360 m + 1080 m + 1080 m + 360 m = 2880 m,加劲梁采用闭口扁平钢箱梁,高为 3.5 m,宽为 38.5 m,加劲梁设上下斜腹板构成导风嘴。索塔总高为 178.3 m,两主缆横向间距为 35.8 m。桥塔主体混凝土浇筑,成 H 型,中塔采用扩大三角支撑。大跨度三塔悬索桥相对于两塔单跨悬索桥来说结构更为复杂,其中塔-塔梁结合一般为固结,全桥的振动响应与两塔单跨悬索桥有很大区别。而在我国目前有多个大跨度桥梁都选用该桥型最终方案。因此,研究其风致响应及控制,不仅对该桥有重要意义,而且对将来建设同类型桥梁有借鉴作用。

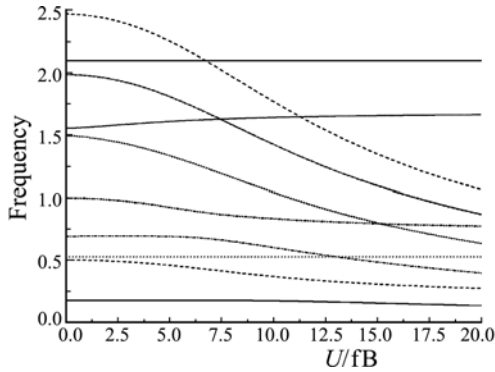


图2 系统复模态频率变化
Fig. 2 Frequency of complex mode

表3 三塔悬索桥主要振型
Tab. 3 Main mode shapes of suspension bridge

No.	Freq/Hz	Mode shape	No.	Freq/Hz	Mode shape
1	0.08623	AV1	10	0.24146	AV4
2	0.09745	AL1	11	0.24171	SV4
3	0.09961	SL1	12	0.26841	CAL2
4	0.11945	SV2	13	0.26915	CSL2
5	0.12017	AV2	14	0.27831	ST1
6	0.15583	—	24	0.32217	AT2
7	0.17425	AV3	25	0.32218	ST2
8	0.22391	SV3	43	0.48451	AT3
9	0.22761	AT1	44	0.48838	ST3

注:S为symmetric,A为asymmetric,V为vertical,T为torsional,L为lateral,C为cable.

表4 多模态耦合颤振自动分析法分析结果
Tab. 4 Results of automatic analysis for multimode-coupled flutter

Flutter No.	Flutter mode	ν (U/fB)	Flutter Freq. (Hz)	Flutter wind speed (m/s)
1	14	7.9096	0.2646	80.5834
2	25	7.1167	0.3024	82.8580
3	41	7.1138	0.4549	124.5868

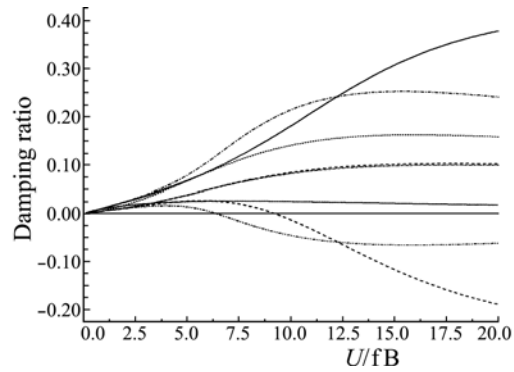


图3 系统复模态阻尼比变化
Fig. 3 Damping ratio of complex mode

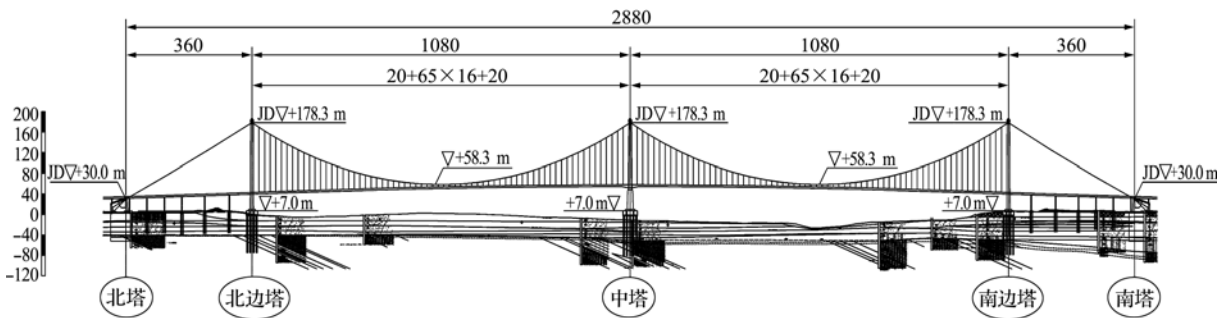


图4 某在建长江公路大桥(单位:m)
Fig. 4 Suspension bridge crossing the Yangtze River (unit:m)

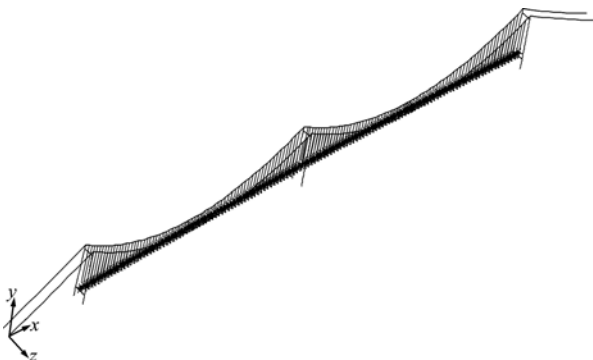


图5 全桥有限元模型
Fig. 5 FE model of suspension bridge

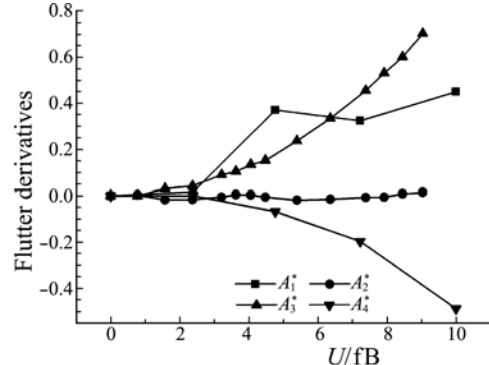


图6 三塔悬索桥颤振导数 A_i^*
Fig. 6 Flutter derivatives of suspension bridge A_i^*

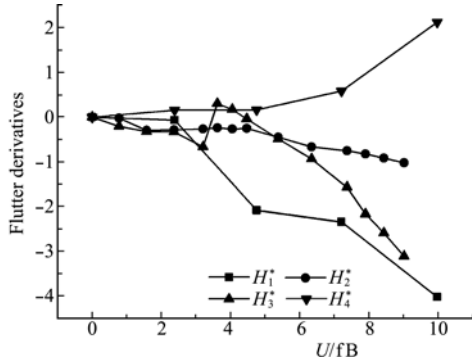


图7 三塔悬索桥颤振导数 H_i^*

Fig. 7 Flutter derivatives of suspension bridge H_i^*

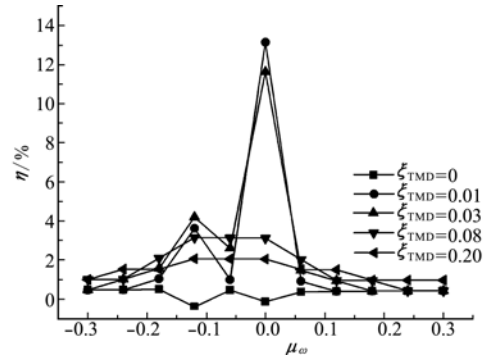


图8 TMD 颤振控制效率 $\mu_m=0.05$

Fig. 8 TMD flutter control efficiency $\mu_m=0.05$

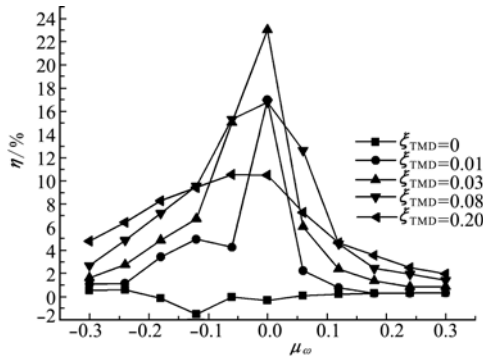


图9 TMD 颤振控制效率 $\mu_m=0.25$

Fig. 9 TMD flutter control efficiency $\mu_m=0.25$

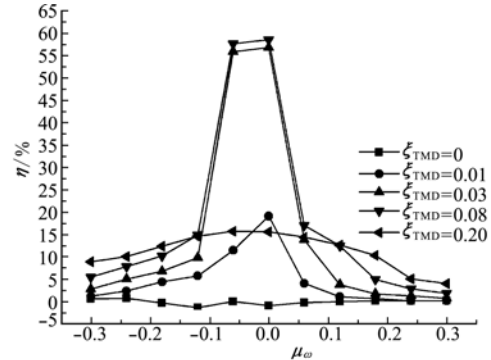


图10 TMD 颤振控制效率 $\mu_m=0.50$

Fig. 10 TMD flutter control efficiency $\mu_m=0.50$

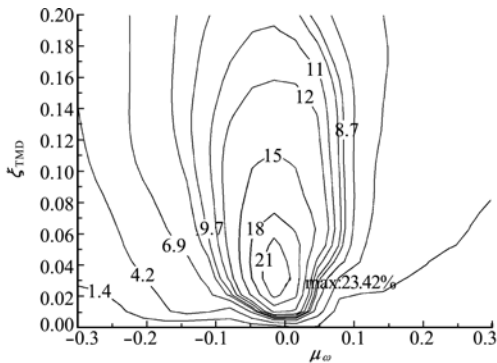


图11 颤振控制效率等高线 $\mu_m=0.25$

Fig. 11 Contour map of flutter control efficiency $\mu_m=0.25$

建模采用的单主梁模型如图 5 所示,主要构件的截面特性见表 2。图 6 和图 7 为风洞试验得到的颤振导数。分析前 50 阶模态,主要模态见表 3。

对前 50 阶模态采用多模态自动分析法搜寻颤振风速、颤振频率和颤振模态,结果见表 4。由表 4 可知,在前 50 阶模态中共有三个颤振失稳模态,均发生在对称扭转振型的模态,且颤振临界风速为 80.58 m/s,颤振频率为 0.2646 Hz,发生于第 14 阶模态。

根据颤振发生的主要模态和颤振失稳风速,发现前两个颤振失稳风速相临较近。TMD 的颤振控制必须同时控制这两个颤振主要模态的振动,而这两个模态的振幅最大值发生在三塔悬索桥两跨的 1/2 跨、1/4 跨和 3/4 跨,故在悬索桥两跨 1/4 跨、1/2 跨和 3/4 跨处各布置一对 TMD,即 12 个

TMD,在 1/2 跨处布置的 TMD 频率为 0.2646 Hz,而 1/4 跨和 3/4 处的 TMD 频率为 0.3024 Hz。所有 TMD 距离截面中心的距离均设定 15 m。设定 u_M 分别为 0.05,0.25 和 0.50 这三种情况, u_ω 的步长 $du_\omega = 0.6/11$, ξ_{TMD} 分别取 0,0.01,0.03,0.08 和 0.20,计算结果如图 8 ~ 图 10 所示,根据 Renka-Cline 法,绘制 $u_M=0.25$ 时控制效率等高线,如图 11 所示。

5 结 论

通过对三塔悬索桥安装 TMD 装置并进行颤振分析,发现 TMD 能有效地提高颤振临界风速,而 TMD 参数设置则至关重要,从算例中可以得出如下几点。

(1) TMD 的质量块越大,控制的效果越好,当 u_M 从 0.05 调至 0.25, η_{max} 则从 13.29% 增大到 58.51%。

(2) 随着 u_M 的增大, u_ω 可选择的区间也逐步扩大,如图 8 ~ 图 10 所示,具有较明显的控制区间;随着 u_M 的增大而相应增大,即 TMD 的质量越大,对于频率的敏感逐步下降。

(3) 如果选择的 TMD 频率偏离原结构的颤振频率较大,控制效果较差,偏离率越大效果越小,当 TMD 频率大到一定偏离率,无论是调整质量或调整阻尼比,其控制效果均不明显。

(4) TMD的阻尼比对颤振的控制影响也很明显。总之,不同的质量对阻尼比的要求不一样;当质量较小的时候,阻尼比仅在较小区间内能够获得较好的控制效果,而当选择较大的质量块时,阻尼比越大,可选择的区间也就越大。

(5) 由图 11 可知,对于同等质量条件下的 TMD,其控制效率较之于阻尼,频率的敏感性更强。所以,在实际工程中,频率的设定更为重要。

参考文献(References):

- [1] 辛大波, 欧进萍. 基于流场定常化的桥梁颤振分析简化数值方法[J]. 计算力学学报, 2009, **26**(2): 162-166. (XIN Da-bo, OU Jin-ping. Simplified numerical method for flutter analysis of bridge based on steady-simplified wind field form unsteady flow[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(2): 162-166. (in Chinese))
- [2] H Aslan, U Starossek. Passive Control of Bridge Deck Flutter Using Tuned Mass Dampers and Control Surfaces[C]. *Eurodyn*, 2008.
- [3] S Pourzeynali, T K Datta. Semiactive fuzzy logic control of suspension bridge flutter [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, **131**:900.
- [4] M Gu. Control of wind-induced vibration of long-span bridges and tall buildings[J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2007, **1**(1):51-62.
- [5] K M Shum, Y L Xu, W H Guo. Wind-induced vibration control of long span cable-stayed bridges using multiple pressurized tuned liquid column dampers[J]. *J WIND ENG IND AEROD*, 2008, **96**(2): 166-192.
- [6] R K Rlin, U Starossek. Wind tunnel test of an active mass damper for bridge decks[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, **95**(4):267-277.
- [7] N Hoang, Y Fujino, P Warnitchai. Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas[J]. *Engineering Structures*, 2008, **30**(3):707-715.
- [8] C Adam, T Furtmüller. Seismic performance of tuned mass dampers[J]. *Mechanics and Model-Based Control of Smart Materials and Structures*, 2009:11.
- [9] S R Chen, J Wu. Performance enhancement of bridge infrastructure systems: Long-span bridge, moving trucks and wind with tuned mass dampers[J]. *Engineering Structures*, 2008, **30**(11):3316-3324.
- [10] S D Kwon, K S Park. Suppression of bridge flutter using tuned mass dampers based on robust performance design[J]. *J WIND ENG IND AEROD*, 2004, **92**(11):919-934.
- [11] 曾宪武, 韩大建. 考虑多模态气动耦合效应桥梁颤振 TMD 控制参数分析[J]. 振动与冲击, 2005, **24**(3): 32-35. (ZENG Xian-wu, HAN Da-jian. Parametric study on TMD control of bridge flutter considering the effect of multi-mode aerodynamic coupling[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, **24**(3): 32-35. (in Chinese))
- [12] 丁泉顺, 陈艾荣, 项海帆. 大跨度桥梁多模态耦合颤振的自动分析[J]. 土木工程学报, 2002, **35**(4). (DING Quan-shun, CHEN Ai-rong, XIANG Hai-fan. Automatic analysis for multimode-coupled flutter of long span bridges[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, **35**(4). (in Chinese))
- [13] R Scanlan. The action of flexible bridges under wind, I: flutter theory [J]. *Journal of Sound Vibration*, 1978, **60**:187-199.
- [14] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (CHEN Zheng-qing. *Bridge Wind Engineering* [M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese))

Multi-mode coupled flutter numerical simulation for TMD control of long-span bridges

ZHANG Ming-xiang, WANG Jian-guo*, WANG Quan

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This study addresses the methodology and parameter study of TMD control for long-span bridges. The differential equations governing the motion of the structure with TMDs are established in the mode space, in which the effects of aerodynamic self-excited force are taken into account. The revised automatic analysis for multimode-coupled flutter, which is the single parameter searching method without iterations, is adapted for the flutter control analysis of structure-TMDs system based on the complex modal theory. Taking a three-tower suspension bridge being built crossing the Yangtze River for a numerical example, the flutter analysis of the original bridge and flutter control analysis of bridge-TMDs system are performed. The TMD parameters are discussed for influence of critical wind speed.

Key words: TMD; passive control; flutter; critical wind speed; suspension bridge