

# 钢拱塔施工和成塔状态的风振控制

李加武,车艳阳,李 宇,白 桦

(长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了研究拱形钢塔在施工阶段和成塔状态时的风致振动控制方法,建立了之江大桥施工及成塔状态的拱形钢塔有限元模型,采用改进谐波合成法模拟了脉动风荷载并作为输入,对加设 MTMD 的施工及成塔状态的钢拱塔进行了动力时程分析。利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 编制了计算程序,以精确求解钢拱塔顶部的最大位移与加速度的减振率,进而对 MTMD 系统进行了参数分析,研究了质量比  $\mu$ 、TMD 的数量  $m$ 、阻尼比  $\xi_T$  和带宽  $\beta$  对 MTMD 系统减振效果的影响,并得到了最优化的参数值;并设计了可控制钢拱塔面内(施工)与面外(成塔)振动的 MTMD 系统,提供了工程施工所需的具体设计参数值。研究表明:当钢拱塔从施工状态变为成塔状态时,其基阶振型也由面内振动转变为面外振动,在这体系转换过程中,钢拱塔容易发生风致振动;建议了施工和成塔状态的 MTMD 系统的最优参数值,即  $\mu=0.01$ 、 $m=12$ 、 $\xi_T=0.05$ 、 $\beta=0.1$ (施工)和  $\beta=0.2$ (成塔)。所设计的可转动的 MTMD 系统可以有效地控制钢拱塔的风致振动响应,并可同类工程的建设提供科学依据和参考。

**关键词:**桥梁工程;钢拱塔;风致振动;MTMD;参数优化

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## Control of wind-induced vibration for arch steel tower in construction and completed stage

LI Jia-wu, CHE Yan-yang, LI Yu, BAI Hua

(1. Key Laboratory of Ministry of Communications for Bridge Detection & Reinforcement Technology, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** FEA models of arch steel tower of Hangzhou Zhijiang Bridge in construction and completed stage were established to analyze the dynamic characteristics of different structural system in order to study wind-induced vibration control of arch steel tower. Based on improved WAWS method, perfect stochastic fluctuating wind field processes were generated. By inputting them into FEA models of arch steel tower with MTMD in construction and completed stage, the time-history analysis was carried on. Then, by using ANSYS parametric design language, one calculation program is prepared to calculate the vibration reduction rate of maximum displacement and acceleration. Considering the effect of mass ratio, number of TMD, damping ratio and bandwidth on MTMD, parametric analyses on MTMD system were carried on to obtain optimization parameters. Finally, MTMD devices and parameters, which could con-

收稿日期:2014-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51078038,51408062);陕西自然科学基金项目(2014JQ7253);

西安建筑科技大学基础研究基金项目(JC 1302)

作者简介:李加武(1972-),男,安徽舒城人,教授,工学博士,E-mail:liyu@chd.edu.cn。

control the plane-vibration and out-of-plane vibration for arch steel tower were suggested. The results showed that: wind-induced vibration would easily occur in the system transformation of arch steel tower from construction stage to completed stage, because the first vibration mode changes from in-plane vibration to outside surface. The optimal parameter values, which are  $\mu=0.01$ ,  $m=12$ ,  $\xi_T=0.05$ ,  $\beta=0.1$  and  $\beta=0.2$ , are suggested for MTMD in construction and completed stage. In a word, MTMD designed in this paper can effectively control the vibration of arch steel tower in construction and completed stage, which could provide some meaningful references for the further research on control of wind-induced vibration for arch steel tower. 2 tabs, 11 figs, 15 refs.

**Key words:** bridge engineering; arch steel tower; wind-induced vibration; MTMD; parameter optimization

## 0 引言

拱型门式钢塔是一种结构比较新颖的高耸建筑物,其塔柱形状有别于常规塔柱,呈曲线形,故其斜拉索也因此呈空间索面,进而给塔柱和钢索的设计与施工增加了困难。目前,中国已修建的拱塔斜拉桥大都位于风景区,如西安灞河二号桥、天津河北大街立交桥、福建三明市台江大桥、常州龙城大桥、沈阳三好桥、酒泉卫星城友谊大桥等,而杭州之江大桥以 246 m 的主跨及 97.5 m 的塔高均处于中国第一<sup>[1]</sup>。

由于拱形钢桥独特的外形和较小的阻尼,其对风的反应较为敏感。黄士柏等对拱形塔悬索斜拉组合结构桥梁的设计与施工进行了研究<sup>[1]</sup>;文永奎等探讨了大跨度斜拉桥钢塔制振方案与参数分析<sup>[2]</sup>;曹永睿开展了斜拉桥地震响应分析与桥塔 MTMD 风振控制研究<sup>[3]</sup>;徐刚等对施工中大桥桥塔的 TMD 减振措施进行了研究<sup>[4]</sup>;贺媛等比较了桥塔自立状态下抗风性能<sup>[5]</sup>;王中文等研究了钢桥塔裸塔状态涡激振动的 TLD 减振方法<sup>[6]</sup>。但是,目前针对桥塔风振控制的研究主要集中在常规桥塔上,尚未有文献提及钢拱塔的风振控制。鉴于此,本文以杭州之江大桥为工程背景,开展了钢拱塔施工和成塔状态的风振控制研究,以为同类工程的建设提供科学参考。

## 1 钢拱塔施工及成塔状态的动力特性

杭州之江大桥的拱型门式钢桥塔高 97.5 m,宽 43.5 m,如图 1 所示。上部拱形塔柱为矩形钢箱结构,其断面横桥向宽 3.6 m,顺桥向宽 4.0~6.0 m。下塔柱为矩形实体混凝土结构,钢混结合断面距承台 22.5 m。

基于有限元软件 ASNYS,采用 Beam4 单元来模拟承台、混凝土段、钢塔段、钢横梁、上支架(立柱、平联和横撑)、主梁节段以及下支架(立柱、平联和斜撑),采用 MASS21 单元来模拟横梁和钢塔上的附



图 1 之江大桥效果

Fig. 1 Rendering of Zhijiang bridge

加质量,进而计算了钢拱塔施工及成塔状态的动力特性。下页图 2 给出了桥塔不同施工状态对结构前 6 阶频率的影响,而下页图 3 则计算了钢拱塔施工及成塔状态的基阶模态。可以看出:钢塔合拢前,其基阶模态为面内振动,频率为 0.623 Hz,振型参与质量为 64.04%;钢塔合拢后,其基阶模态变为了面外振动,频率为 0.642 Hz,振型参与质量为 38.73%;同时,随着拱形钢桥塔施工的不断进行,桥塔不断增高,结构的第 1、2 阶频率不断降低。可见,施工时的钢拱塔,由于缺少横向联系,其结构刚度较合拢后的小,而且振动模态也发生了变化。即施工和成塔状态的钢拱塔对风的作用将会很敏感,容易发生风致振动,进而对钢拱塔施工质量、施工设备及人员安全产生较大的影响。因此,需要采取适当的措施,以减轻施工和成塔状态钢拱塔的风致振动。

## 2 改进谐波合成法模拟脉动风荷载

要进行桥塔的风振分析,首先要人工模拟出脉动风荷载。由于脉动风在空间与时间上都是随机的,通常可以将其视为多维多变量各态历经平稳高斯过程。此处采用改进谐波合成法生成之江大桥钢拱塔不同高度处的风速时程,实现的方法如下<sup>[7-8]</sup>:对零均值的一维  $n$  个分量高斯过程,在场场模拟中对每个频率点  $\omega_m$  都要进行一次互谱密度矩阵  $S^0(\omega)$  的 cholesky 分解,可采用三次拉格朗日多项式插值

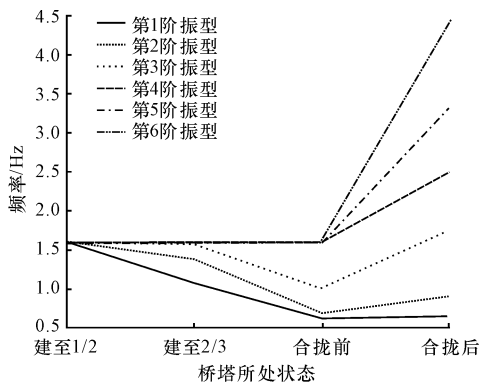
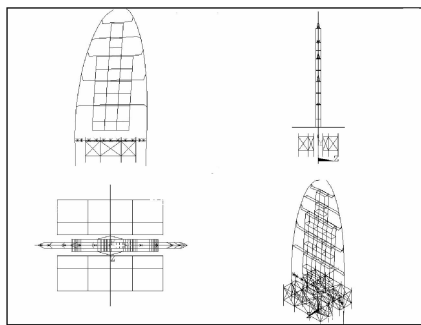
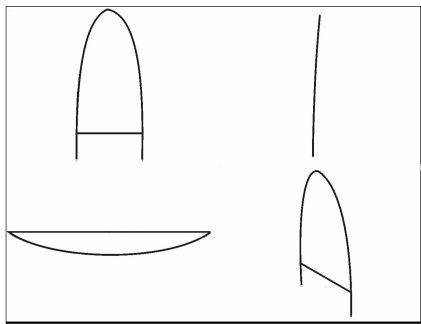


图 2 桥塔不同施工状态对结构前 6 阶频率的影响

Fig. 2 Effect of different construction stages on frequencies



(a) 钢塔合拢前基阶振型



(b) 钢塔合拢后的基阶振型

图 3 钢拱塔的动力特性

Fig. 3 Dynamic characteristics of arch steel tower

减少  $\mathbf{S}^0(\omega)$  的分解次数,即

$$H_{jk} = \sum_{l=1}^{i+2} H_{jk}(\omega_l) L_l(\omega) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{H}(\omega)$  为  $\mathbf{S}^0(\omega)$  进行 cholesky 分解后的下三角矩阵;  $H_{jk}(\omega)$  为  $\mathbf{S}^0(\omega)$  进行 cholesky 分解后的下三角矩阵的第  $i$  行  $j$  列的元素;  $H_{jk}$  为  $H_{jk}(\omega)$  与拉格朗日插值函数  $L_l(\omega)$  乘积的总和;  $L_l(\omega)$  为拉格朗日插值函数。

如此脉动风样本的模拟公式可表示为

$$f_j(t) = \sqrt{2\Delta\omega} \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N H_{jm}(\omega_{ml}) \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{ml} - \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \varphi_{ml}]$$

$$\theta_{jm}(\omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_{jm}(\omega)]}{\text{Re}[H_{jm}(\omega)]} \right\}$$

$$\omega_{ml} = (l-1)\Delta\omega + \frac{m}{N}\Delta\omega \quad (2)$$

式中:  $f_j(t)$  为脉动风样本;  $j=1,2,\dots,n$ ; 时间增量  $\Delta t \leq \pi/\omega_{up}$ ;  $\omega_{up}$  为最小频率;  $\Delta\omega$  为频率间隔;  $\varphi_{ml}$  为相位角。

根据上述计算方法,本文采用 MATLAB 编制了模拟脉动风速时程的程序,得到了不同塔高位置处的风速时程曲线,限于篇幅,仅给出塔高 97 m 位置处的脉动风速时程及功率谱,如图 4 所示。从图中可以看出,改进谐波合成法模拟出的脉动风时程功率谱与 Kaimal 谱吻合的很好,即本文模拟的脉动风速时程是准确有效的。

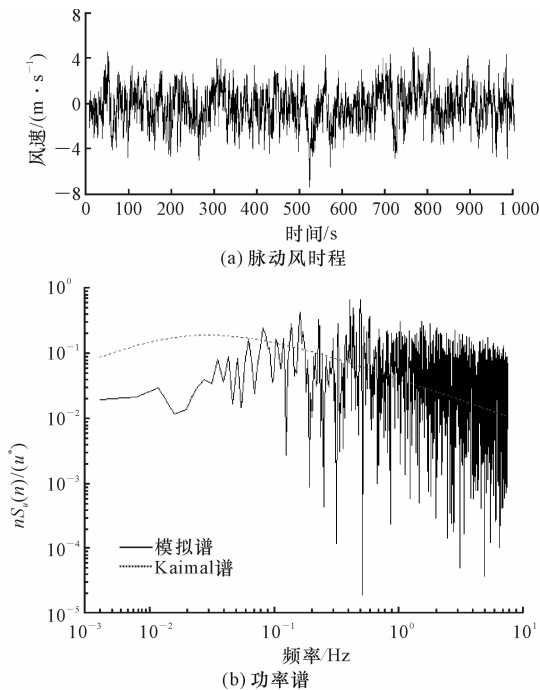


图 4 脉动风时程及功率谱

Fig. 4 Wind velocity time history and power spectrum

### 3 MTMD 系统的基本设计理论

调谐质量阻尼器(TMD)在结构振动控制上的有效性已经为大量的工程实例所证实<sup>[9-11]</sup>。但是,单个 TMD 的控制效果对其频率较为敏感,当频率略微偏离设计值时,控制效果便会极大下降。而采用 MTMD 则能提高控制系统的鲁棒性,以达到较好的减振效果<sup>[12-15]</sup>。MTMD 是由  $m$  个 TMD 组成的,每个 TMD 的频率可不相同,并以结构被控振型的频率为中心,分布在一定范围内,并作如下假定<sup>[12-15]</sup>:①参数分析时,结构被控频率取结构基阶振型的频率;②频带宽度不得跨越结构其他频率;③ MTMD 的总质量与结构总质量的比是常数;④ MTMD 中  $m$  个 TMD 的频率均匀分布。鉴于此,本

文设计的 MTMD 系统以之江大桥钢拱塔施工及成塔状态的基阶频率为控制频率,并基于上述假定给出了每个 TMD 的设计参数。

MTMD 系统中的第  $j$  个 TMD 的自然频率  $\omega_j$

$$\omega_j = \omega_T \left[ 1 + \left( j - \frac{m}{2} \right) \beta \right] \quad (3)$$

$$\omega_T = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_j}{m}, \quad \beta = \frac{\omega_n - \omega_1}{\omega_T} \quad (4)$$

式中:  $\omega_T$  为  $m$  个 TMD 自然频率的平均值;  $j$  为 MTMD 中 TMD 的个数(1, 2, ...,  $m$ );  $\beta$  为 MTMD 中 TMD 自然频率的带宽。

MTMD 中每个 TMD 的质量与阻尼比分别为

$$m_j = K_j / \omega_j^2, \quad \xi_T = C_j / 2m_j\omega_j \quad (5)$$

式中:  $K_j$ 、 $C_j$  分别为每个 TMD 的刚度和阻尼。

进而可定义 MTMD 的质量比与频率比

$$\mu = \sum_{j=1}^m m_j / m_s, \quad \lambda_T = \omega_T / \omega_s \quad (6)$$

式中:  $\mu$  为质量比;  $\lambda_T$  为频率比;  $m_s$  为结构的质量;  $m_j$  为每个子 TMD 的质量;  $\omega_s$  为结构第一振型的频率。

为了便于工程施工,每个 TMD 的阻尼比与刚度均相同,即只需改变每个 TMD 的质量就可以控制它们的频率。

## 4 MTMD 系统的参数分析及优化

影响 MTMD 减振效果的设计参数主要有质量比  $\mu$ 、TMD 的数量  $m$ 、阻尼比  $\xi_T$  和带宽  $\beta$ 。因此,必须找出上述 4 个参数的最优组合值,以期设计出减振效果最好的 MTMD 系统。

基于有限元软件 ANSYS,采用 combin14 单元来模拟 MTMD 的弹簧及阻尼器,采用 MASS21 单元来模拟 MTMD 的质量块,建立了加设 MTMD 的钢拱塔施工及成塔状态的有限元模型(图 5),并输入不同塔高处的脉动风速时程(距离水面 10 m 高度处的基本风速为 36.9 m/s),进行了动力时程分析。在此基础上,利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL)编制了计算程序,以精确求解钢拱塔顶部的最大位移与加速度的减振率,并以此作为评价 MTMD 风振控制效果的指标。

### 4.1 质量比的影响

取 TMD 数量  $m=8$ ,阻尼比  $\xi_T=0.05$ ,带宽  $\beta=0.1$ ,对加设 MTMD 的施工及成塔状态的钢拱塔进行了动力时程分析,研究了质量比  $\mu$  对位移和加速度减振率的影响规律,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出:① MTMD 系统能够有效地减小钢拱塔的位移和加速度响应,尤其是加速度响应;② 质量比  $\mu$  越大,钢拱塔的位移和加速度减振率也随之

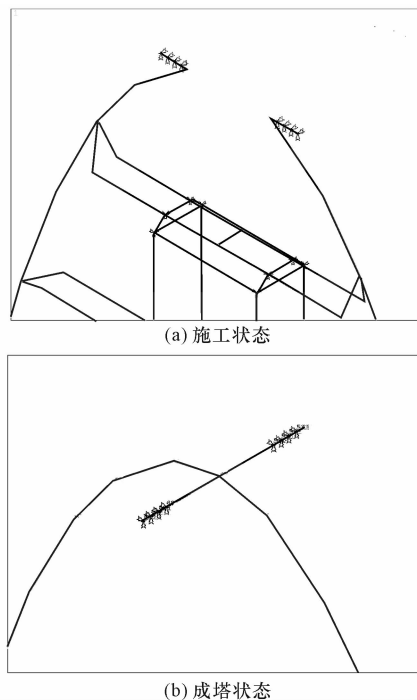


图 5 加设 MTMD 的钢拱塔有限元模型

Fig. 5 FEA model of arch steel tower with MTMD

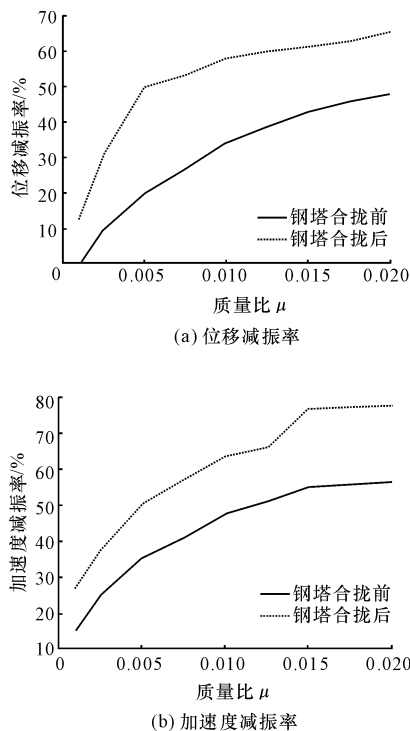


图 6 质量比  $\mu$  的影响

Fig. 6 Effect of mass ratio

增大,即 MTMD 的减振效果越明显,但是,钢拱塔的施工难度也随之上升;③ 当  $\mu=0.015$  时,位移和加速度减振率都已趋于平缓(施工状态达到 43.1%和 55.7%,成塔状态达到 61.3%和 76.7%)。可见,在位移和加速度双控的目标下, $\mu=0.015$  是 MTMD 系统的最优参

数。因此,本文建议取质量比  $\mu$  为 0.010~0.015。

#### 4.2 TMD 数量的影响

取质量比  $\mu=0.02$ 、阻尼比  $\zeta_T=0.05$ 、带宽  $\beta=0.1$ ,对加设 MTMD 的施工及成塔状态的钢拱塔进行了动力时程分析,研究了 TMD 的数量对 MTMD 系统减振效果的影响。从图 7 中可以看出:TMD 的数量对位移和加速度减振率的影响比较一致,即当  $m=2$  时,钢拱塔的位移和加速度减振率最小,随着  $m$  的增加,位移和加速度减振率逐渐增大,MTMD 系统的减振效果越趋明显。本文综合考虑了 MTMD 系统的质量比、阻尼比、带宽和工程施工难易程度后,建议取 TMD 的数量为 12。

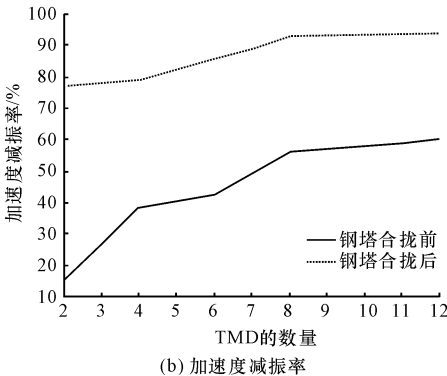
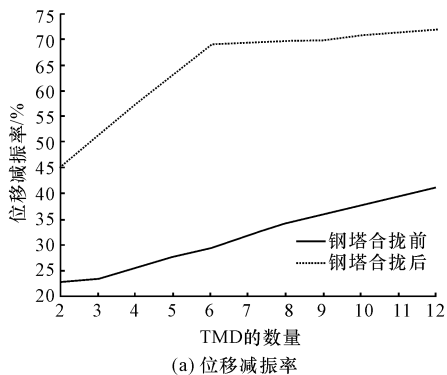


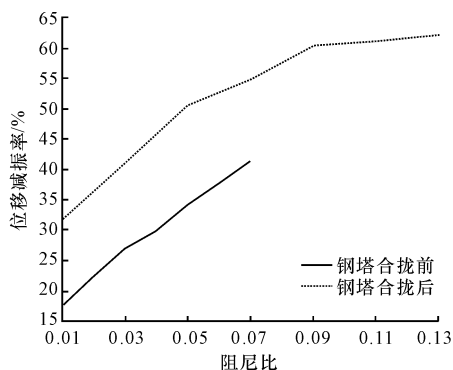
图 7 TMD 数量  $n$  的影响

Fig. 7 Effect of number of TMD

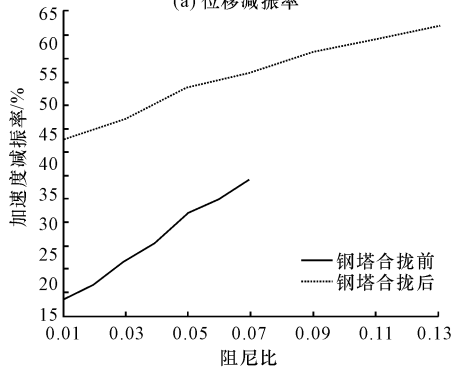
#### 4.3 阻尼比的影响

取质量比  $\mu=0.02$ 、带宽  $\beta=0.1$ 、TMD 数量  $m=8$ ,对加设 MTMD 的施工及成塔状态的钢拱塔进行了动力时程分析,研究了阻尼比  $\zeta_T$  对 MTMD 系统减振效果的影响。

从图 8 中可以看出:随着阻尼比  $\zeta_T$  的增大,钢拱塔的位移和加速度减振率都随之增大,这是因为 MTMD 系统所提供的阻尼增大了钢拱塔的总阻尼,进而消耗了更多的振动能量,导致了结构的位移和加速度响应的减小。本文在综合考虑 MTMD 系统的质量比、阻尼比、带宽、TMD 的数量以及冲程等问题后,建议取阻尼比  $\zeta_T$  为 5%。



(a) 位移减振率



(b) 加速度减振率

图 8 阻尼比的影响

Fig. 8 Effect of damping ratio

#### 4.4 带宽分析

取质量比  $\mu=0.02$ 、阻尼比  $\zeta_T=0.05$ 、TMD 数量  $m=8$ ,对加设 MTMD 的施工及成塔状态的钢拱塔进行了动力时程分析,研究了带宽  $\beta$  为 0~0.4 对 MTMD 系统减振效果的影响。

从下页图 9(a)可以看出:对于加设 MTMD 的施工状态的钢拱塔,带宽  $\beta$  对其位移减振率的影响较小,而加速度减振率则随着  $\beta$  的增加而减小。可见,当  $\beta$  取值较小时,无法拓宽被控频带;而  $\beta$  取值较大时,控制效果又将有所损失。因此,本文在建议施工状态下的 MTMD 系统的带宽  $\beta$  可取为 0.05~0.10。

从图 9(b)可以看出:对于加设 MTMD 的成塔状态的钢拱塔,带宽  $\beta$  对位移和加速度减振率的影响基本成倒 V 字形,这说明带宽  $\beta$  存在最优值,即当  $\beta$  为 0.15~0.25 时,位移和加速度的减振效果达到最优。因此,本文建议取 MTMD 的带宽  $\beta$  为 0.20。可见,MTMD 系统之所以有良好的鲁棒性,主要原因在于它不同于单 TMD 仅有 1 个频率,而是多个 TMD 的频率按一定规则分布于中心频率两侧,具有一定的频带宽度。

### 5 钢拱塔 MTMD 系统的设计

#### 5.1 MTMD 系统的设计步骤

本文根据计算所得的 MTMD 系统的优化参

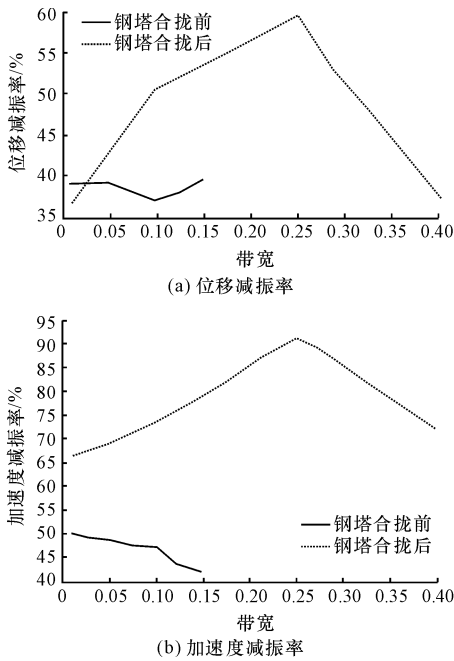


图 9 带宽的影响

Fig. 9 Effect of bandwidth

数,设计了可在 2 个方向(横桥和顺桥向)转动的 MTMD 系统,以达到控制钢拱塔面内(施工)和面外(成塔)振动的目的。可按以下步骤设计单个 TMD(图 10、图 11):①在平台振动方向设置水平钢板作为底座,并在其上增设 2 个竖立的钢板;②将弹簧的一端通过垫圈和螺栓固定在质量块上,另一端固定在竖立的钢板上;③将阻尼器均衡地布置在质量块的两侧,其一端可通过螺栓和夹板连接在竖立的钢板上,另一端则固定在质量块的卡槽上;④将质量块放置在中心位置处的卡槽内,如果质量块为混凝土块,卡槽尺寸设计为 1 m×1 m,如为铅块,卡槽尺寸则为 0.6 m×0.6 m;⑤在质量块下面安装滚轴,以减小其与钢板底座之间的摩擦;⑥在 2 个竖立钢板的两侧设置可 360°转动的转轮,当施工状态时的面内振动控制完毕后,可拆除高强螺栓,再采用起吊装置将 TMD 转动 90°以控制钢拱塔合拢后的面外振动,而另一个方向则预留螺栓孔,以便 TMD 的固定。

5.2 MTMD 系统的具体设计参数

本节给出各 TMD 的具体设计参数(表 1~下页表 2)。为方便制作,每个 TMD 的弹簧刚度保持一致,为 TMD 装置中弹簧的总刚度。

6 结 语

(1)当钢拱塔从施工状态变为成塔状态时,其基阶振型也由面内振动转变为面外振动,在这体系转换的过程中,钢拱塔容易发生风致振动。

(2)研究了质量比  $\mu$ 、TMD 的数量  $m$ 、阻尼比  $\xi_T$

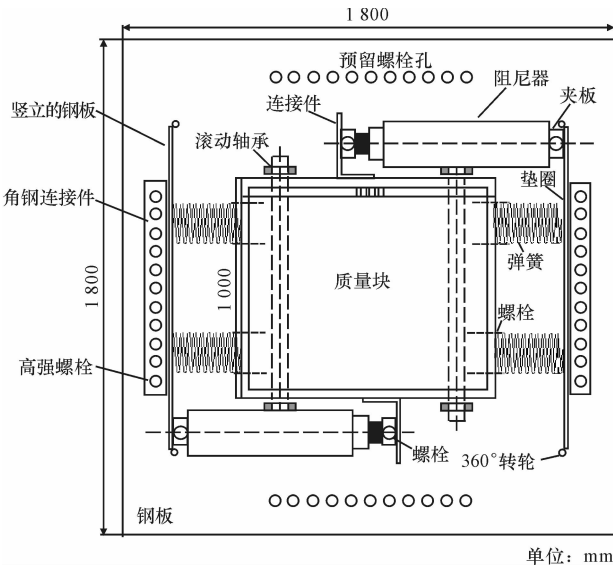


图 10 单个 TMD 结构

Fig. 10 Structure of single TMD

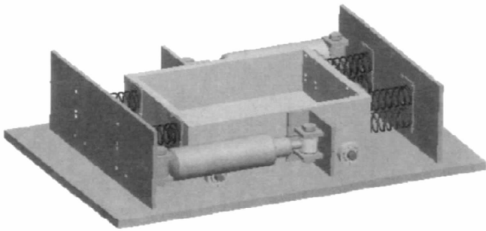


图 11 单个 TMD 效果

Fig. 11 Rendering of single TMD

和带宽  $\beta$  对钢拱塔 MTMD 系统减振效果的影响,进而建议了施工和成塔状态的 MTMD 系统的最优参数值,即  $\mu=0.01$ 、 $m=12$ 、 $\xi_T=0.05$ 、 $\beta=0.1$ (施工)和带宽  $\beta=0.2$ (成塔)。

(3)建议了适用于钢拱塔 MTMD 系统的具体

表 1 钢拱塔施工阶段的 MTMD 设计结果

Tab. 1 Design for arch steel tower in construction stage

序号	质量/t	刚度/ (N·m <sup>-1</sup> )	阻尼系数/ (N·s·m <sup>-1</sup> )	圆频率/ (rad·s <sup>-1</sup> )
m1	2.276	42 470.98	983.12	4.320
m2	2.349	42 470.98	998.85	4.252
m3	2.426	42 470.98	1 015.08	4.184
m4	2.507	42 470.98	1 031.85	4.116
m5	2.592	42 470.98	1 049.18	4.048
m6	2.681	42 470.98	1 067.11	3.980
m7	2.874	42 470.98	1 104.86	3.844
m8	2.978	42 470.98	1 124.76	3.776
m9	3.088	42 470.98	1 145.39	3.708
m10	3.205	42 470.98	1 166.79	3.640
m11	3.329	42 470.98	1 189.00	3.572
m12	3.459	42 470.98	1 212.07	3.504

表 2 钢拱塔合拢后的 MTMD 设计结果  
Tab. 2 MTMD design for completed arch steel tower

序号	质量/t	刚度/ (N·m <sup>-1</sup> )	阻尼系数/ (N·s·m <sup>-1</sup> )	圆频率/ (rad·s <sup>-1</sup> )
m1	1.389	42 470.98	768.04	5.529
m2	1.524	42 470.98	804.41	5.279
m3	1.679	42 470.98	844.40	5.029
m4	1.859	42 470.98	888.57	4.779
m5	2.070	42 470.98	937.62	4.529
m6	2.319	42 470.98	992.40	4.279
m7	2.974	42 470.98	1 123.71	3.779
m8	3.410	42 470.98	1 203.31	3.529
m9	3.950	42 470.98	1 295.06	3.279
m10	4.628	42 470.98	1 401.94	3.029
m11	5.499	42 470.98	1 528.06	2.779
m12	6.639	42 470.98	1 679.12	2.529

设计步骤:①首先进行脉动风场的模拟,以提供动力时程分析所需的脉动风速时程;②建立钢拱塔的有限元模型,并计算其基阶振型的频率及参与质量;③对 MTMD 系统进行参数分析,找到最优参数值;④在此基础上,对单个 TMD 进行具体设计,以提供工程施工所需的设计值。

(4)虽然前面的研究证实了本文设计的 MTMD 有良好的减振效果,但它的造价较为昂贵且施工过程比较复杂,因此,针对施工阶段的拱形钢桥塔,一种造价低廉且实用的制振器还有待进一步深入研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] 黄士柏,郝俊峰,徐海军. 拱形塔悬索斜拉组合结构桥梁的设计与施工[J]. 桥梁建设,2010(1):45-48.  
HUANG Shi-bai,HAO Jun-feng,XU Hai-jun. Design and construction of a hybrid suspension and cable-stayed bridge with arch pylon[J]. Bridge Construction,2010(1):45-48. (in Chinese)

[ 2 ] 文永奎,孙利民. 大跨度斜拉桥钢塔制振方案与参数分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(3):296-301.  
WEN Yong-kui,SUN Li-min. Parametric study on vibration control scheme for steel tower of large span cable-stayed bridge[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2006,34(3):296-301. (in Chinese)

[ 3 ] 曹永睿. 斜拉桥地震响应分析与桥塔 MTMD 风振控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2006.  
CAO Yong-rui. The study on seismic response of cable stayed bridge and MTMD wind response control of the bridge tower[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2006. (in Chinese)

[ 4 ] 徐 刚,王靖夫,任文敏,等. 施工中大桥桥塔的 TMD 减振研究[J]. 工程力学,2003,20(6):106-110.  
XU Gang,WANG Jing-fu,REN Wen-min,et al. Reduction of vibration during construction of bridge

towers by TMD[J]. Engineering Mechanics,2003,20(6):106-110. (in Chinese)

[ 5 ] 贺 媛,宋锦忠,杨詠昕. 桥塔自立状态下抗风性能的比较研究[J]. 结构工程师,2007,23(6):49-55.  
HE Yuan,SONG Jin-zhong,YANG Yong-xin. Comparative study on wind resistance of self-supporting pylons[J]. Structural Engineers,2007,23(6):49-55. (in Chinese)

[ 6 ] 王中文,朱宏平,廖海黎,等. 钢桥塔裸塔状态涡激振动的 TLD 减振方法研究[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2009,26(2):9-11,15.  
WANG Zhong-wen,ZHU Hong-ping,LIAO Hai-li,et al. Vortex-induced vibration reduction of steel free-standing tower using tuned liquid damper[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition,2009,26(2):9-11,15. (in Chinese)

[ 7 ] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes[J]. Journal of Engineering Mechanics,1996,122(8):778-787.

[ 8 ] Torium R,Katsuchi H,Furuyan N. A study on spatial correlation of natural wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2000,87(2/3):203-216.

[ 9 ] Ingham T J,Rodriguez S,Nader M. Nonlinear Analysis of the vincent thomas bridge for seismic retrofit [J]. Computers& Structures,1997,64(5/6):1221-1238.

[10] Igusa T,Xu K. Vibration reduction characteristics of distributed tuned mass dampers[C]//RASD Processing 4th Znternal Confess on Structure Dynamics. London;Southampton,UK,1991:201-215.

[11] Wang T,Han W S,Yang F,et al. Wind-vehicle-bridge Coupled Vibration analysis based on random traffic flow simulation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,English Edition,2014,1(4):293-308.

[12] Gu M,Chen S R,Chang C C. Parametric study on multiple tuned mass dampers for buffeting control of Yangpu Bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2001,89(11/12):987-1000.

[13] 刘光众,周 岱,马 骏,等. 剪切来流作用下的拉索流致振动分析[J]. 建筑科学与工程学报,2013,30(2):65-69.  
LIU Guang-hong,ZHOU Dai,MA Jun,et al. Analysis of flow-induced vibration of cable in shear flow[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2013,30(2):65-69. (in Chinese)

[14] Kareem A,Kline S. Performance of multiple mass dampers under random loading[J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(2):348-361.

[15] Li Chun X,Liu Y X. Optimum multiple tuned mass dampers for structures under ground acceleration based on the uniform distribution of system parameters[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2003,32(5):671-690.

