



新型悬吊式 TMD 及其在某标志塔风振控制中的应用

闫维明, 纪金豹, 蒋华戈, 鄢圣超, 秦 丽

(北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:为了控制河南艺术中心标志塔的风致振动,提出了一种采用十字形万向铰轴实现多向振动控制、采用摩擦阻尼片提供附加阻尼、采用放射型弹簧提供附加刚度的新型悬吊式 TMD。根据标志塔结构的动力特性,设计加工了足尺 TMD,通过实验室试验对其动力性能进行了测试,并将该 TMD 安装在实际结构上,依据实测频率和阻尼对其参数进行了现场调整。研究表明,该 TMD 装置具有构造简单,稳定性和持久性好等优点。

关键词:高耸结构; 风振控制; 悬吊式 TMD

中图分类号:TU352.2 TU311.3 **文献标志码:**A

A new type pendulous TMD and its application on a tower for wind-induced vibration control

YAN Weiming, JI Jinbao, JIANG Huage, YAN Shengchao, QIN Li

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A new type of pendulous tuned mass damper (TMD) with universal hinge, friction damping sheets and additional preloaded spring was presented to control the wind-induced vibration of a tower at the Henan Art Centre. A prototype TMD was designed and manufactured according to the dynamic parameters of the tower. Several tests were performed in laboratory to verify the dynamic performance. The TMD was then installed on the tower and the mechanical parameters were adjusted according to the on-site measured dynamic parameters of the tower. The studies indicate that the construction of the TMD is simple with strong stability and durability.

Keywords: high-rise building; wind-induced vibration control; tuned mass damper (TMD)

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAJ03B06), 高等学校博士学科点专项科研基金(20060005004)。

作者简介: 闫维明(1960—)男, 黑龙江哈尔滨人, 工学博士, 研究员。E-mail: yanwm@bjut.edu.cn

收稿日期: 2008年12月

0 引言

高层建筑物在强风作用下容易产生明显的振动效应,会对其舒适度和使用寿命产生不利影响。为减小风致振动效应,常采用在建筑物的顶部安装结构调谐振动控制装置的方法。结构调谐振动控制装置有多种:调谐质量阻尼器(tuned mass dampers, TMD)^[1]、调谐液体阻尼器(tuned liquid dampers, TLD)或调谐晃荡阻尼器(tuned sloshing dampers, TSD)、质量泵(mass pumps, MP)等^[2],其中以TMD最为简单实用。TMD主要有支撑式和悬吊式两种形式。本文提出了一种具有万向铰轴的新型悬吊式调谐质量阻尼器用于标志塔的风振控制,完成了该TMD的构造设计、实验室性能测试和现场安装调试,并结合前期的计算分析对其减振能力进行了评价。

1 TMD的构造设计

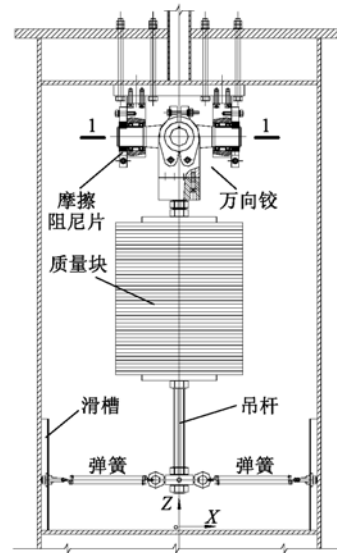
河南艺术中心标志塔总高60m,最大直径3m,主体骨架(标高6.00~48.35m)为双钢管加肋筒结构,标高48.35m以上设有9根环绕钢管柱的天线部分。塔体内筒尺寸 $\Phi 1500 \times 20$,从标高6.00m贯通骨架主体到48.35m;外筒厚36mm,从标高6.0m处延伸至40.0m,外径从标高6.0m处的3.0m线性渐变到1.8m;内外钢筒由20mm厚加劲板连接。该塔钢材采用Q345B,骨架为全焊接连接。钢塔外部安装玻璃幕墙,塔外观见图1所示。



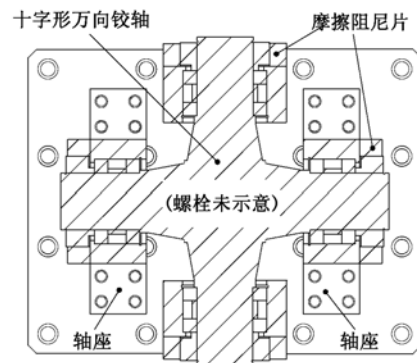
图1 标志塔照片
Fig.1 Photo of tower

标志塔钢筒的形体基本对称,由于在一个方向开有孔洞导致两个正交方向上刚度略有差异。由于来风方向的不确定性,TMD设计中应当能够控制不同方向来风所引起的振动。考虑此因素,本文提出了一种新型的悬吊式TMD(图2、3),其主要构造设计如下:

- (1)采用十字形万向铰轴作为TMD的吊点连接主体结构与刚性吊杆,从而控制结构的水平双向振动;
- (2)十字形万向铰轴的端部安装有4个摩擦阻尼片,通过改变阻尼片的预压力可以改变阻尼片与铰轴之间的摩擦力,方便地调节TMD的阻尼参数;
- (3)刚性吊杆悬挂的质量块由多块圆片形钢板层叠而成,数量可以增减;
- (4)质量块下部设置8根放射状预拉弹簧,弹簧位置可以沿滑槽上下调整,可以通过调整弹簧的刚度和上下位置改变TMD的频率。



(a) 立面示意图



(b) 1-1 剖面

图2 悬吊式TMD结构示意图

Fig.2 Schematic of pendulous TMD in tower

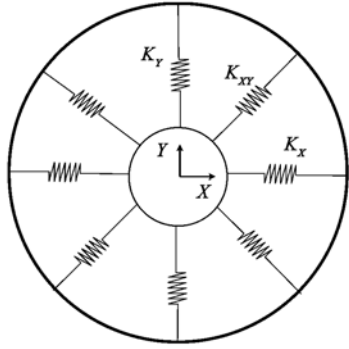


图3 弹簧布置示意图

Fig.3 Schematic of springs

2 TMD 的参数设计

理论计算结果表明^[3],对于河南艺术中心标志塔,当TMD的频率比(TMD频率与结构自振频率的比值)接近1.0时,标志塔位移减振率可达到50%;频率比在0.85~1.10之间时,位移减振率达到30%以上。当频率比一定时,减振效果随TMD附加阻尼比增大而增大,当TMD附加阻尼比大于0.05时,位移减振率达到30%以上,但当TMD附加阻尼比大于0.10后,减振效果的增加比较缓慢,并且导致TMD运动幅度降低,耗能能力反而下降。因此选择TMD的频率比在0.85~1.10之间,附加阻尼比在0.05~0.10之间即可实现30%以上的位移减振目标。

为精确计算标志塔的自振频率,采用SAP2000有限元软件建立了钢塔骨架的精细化实体模型(图4所示,定义X向为标志塔刚度较小方向,Y向为标志塔刚度较大方向),采用里兹向量法进行了模态分析,初步确定TMD的频率范围,结合人工合成风时程动力对TMD的频率和附加阻尼进行优选,从而得到TMD所需控制参数见表1^[4]。

TMD的刚度由质量块的恢复力和弹簧的刚度来提供。TMD装置的摆长依据建筑可用空间大小和摆锤的高度进行确定,根据TMD的设计自振频率计算弹簧的刚度和安装位置。

表1 TMD 系统的设计参数

Table 1 Design parameters of TMD

参数名称	X向	Y向
TMD质量/kg	2.4×10^3	2.4×10^3
TMD自振频率/Hz	1.097	1.242
TMD刚度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	113.95	146.07
TMD附加阻尼比	0.090	0.080
阻尼系数/ $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	2.646	2.970
容许位移/mm	$\pm 55\text{mm}$	$\pm 35\text{mm}$

注:定义X向为TMD刚度较小的方向,Y向为TMD刚度较大方向。

将TMD简化为图5所示的计算简图,图中K为弹簧在某一水平方向的总刚度,l为质量块的质心距离摆轴轴心的距离(有效摆长),h为弹簧距离摆轴轴心的力矩长度,m为质量块的总质量。根据能量守恒关系,TMD的固有圆频率 ω 与有效摆长l、弹簧高度h的关系可表示为:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{K}{m} \left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (1)$$

式中:g为重力加速度。

对于选定的圆频率 ω 和有效摆长l,对应的弹簧刚度计算式为:

$$K = ml(\omega^2 l - g)/h^2 \quad (2)$$

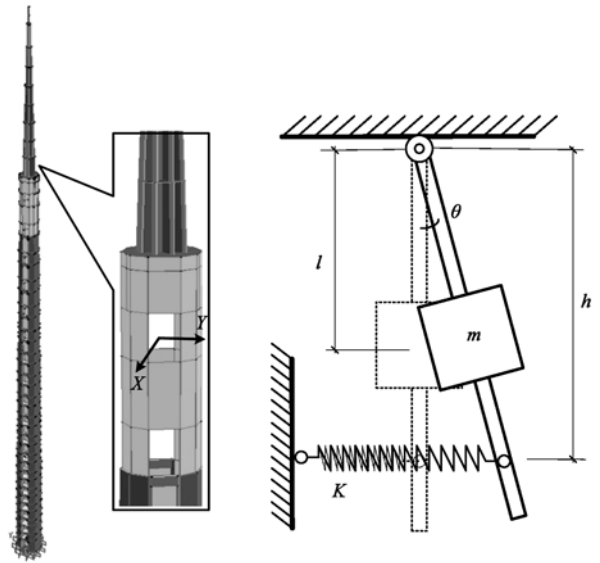


图4 标志塔有限元模型 图5 悬吊式TMD计算简图

Fig.4 FEM model of tower

Fig.5 Calculation diagram of pendulous TMD

TMD安装于塔体标高46.05~48.35m筒体内部,筒体内部净空高度约2.30m,直径为1.48m。考虑到调试人员进出所占用的空间和TMD运行空间,TMD质量块的直径不宜大于1.0m。通过反复计算调整,最后选定质量块直径为0.680m,圆形钢板厚度为20mm,共设置52块。质量块最小有效摆长l为872.5mm,弹簧的最大安装高度 h_{\max} 为1845mm,弹簧高度的调节范围为465mm。

根据式(2)计算选用刚度为6.90N/mm的弹簧6根,刚度为22.22N/mm的弹簧2根。

3 TMD 实验室测试

为了考察TMD的加工装配精度、动力参数和减振性能,将TMD安装于高6m的钢框架试验结构上(图6),在北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室的3m×3m地震模拟振动台上进行了

TMD 的动力特性测试和减振试验(减振试验情况另文介绍)。



图 6 TMD 测试照片
Fig. 6 Photo of TMD test

3.1 TMD 频率调整和测试

通过改变弹簧的位置和刚度相对于改变配重质量块的数量和位置要容易得多,因此,试验中选择完全松开摩擦阻尼片,不安装弹簧和安装弹簧,质量块为设计重量并安装于设计位置进行试验。安装弹簧时,分别实测 X 向(弹簧刚度较小)和 Y 向(弹簧刚度较大)。

当完全松开摩擦阻尼片,不安装弹簧,质量块为设计重量并安装于设计位置时,采用初位移法得到 TMD 位移自由衰减曲线如图 7 所示。进行 FFT 频谱分析,得到 TMD 振动频率如图 8 所示。得到 TMD 的最低自振频率为 0.427Hz。

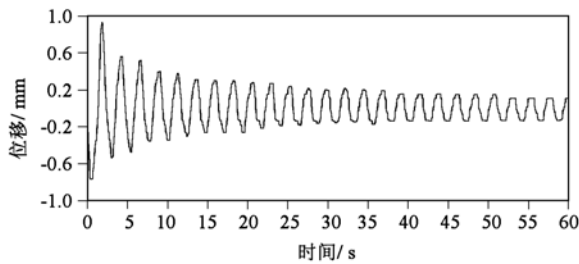


图 7 不安装弹簧时 TMD 位移衰减曲线
Fig. 7 Displacement curve of TMD without tension springs

当完全松开摩擦阻尼片,将 8 根弹簧安装于最大安装高度(2 根刚度大的弹簧安装位置为相隔 180°),质量块为设计重量并安装于设计位置时,TMD 在 X 向的最高频率为 1.367Hz;TMD 在 Y 向的位移自由衰减曲线如图 9 所示,进行 FFT 频谱分析得到 TMD 振动频率如图 10 所示,TMD 最高频率达到 1.416Hz。

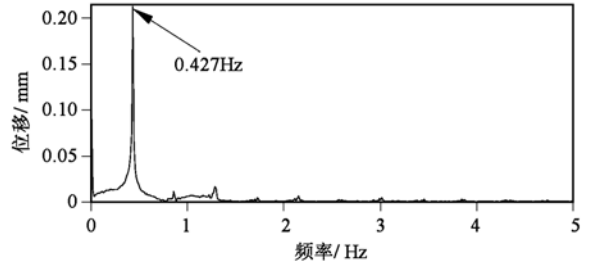


图 8 不安装弹簧时 TMD 频率幅值谱
Fig. 8 Spectrum curve of TMD without tension springs

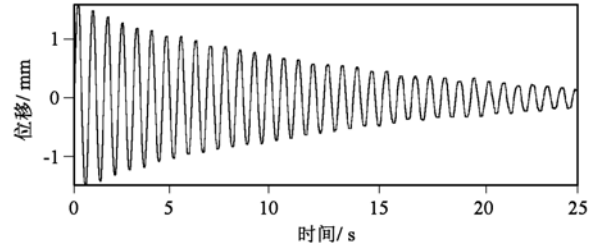


图 9 安装弹簧时 TMD 位移衰减曲线(Y 向)
Fig. 9 Displacement curves of TMD with tension springs installed

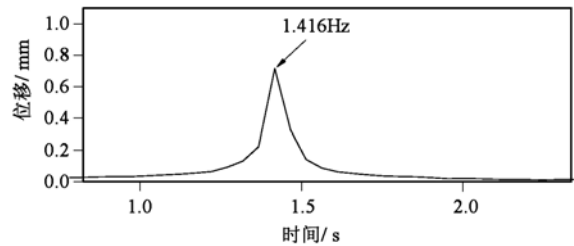


图 10 安装弹簧时 TMD 频率幅值谱(Y 向)
Fig. 10 Spectrum curve of TMD with tension springs installed

3.2 TMD 阻尼调整和测试

TMD 的附加阻尼通过时域衰减曲线法^[5]测得,计算公式为:

$$\zeta = \frac{1}{n} \frac{\lg \psi}{\sqrt{(\pi \lg e)^2 + (\lg \psi / n)^2}} \quad (3)$$

式中: $\psi = |A_k / A_{k+n}|$ 为自由振动实测曲线上相邻 n 个波峰的位移峰值之比(图 11); n 为选择的波峰数; e 为自然对数的底。

当完全松开摩擦阻尼片时,实测质量块 X 向位移时程曲线如图 12 所示;当完全固定摩擦阻尼片时,实测质量块 X 向位移时程曲线如图 13 所示。根据式(3)求得的 X 向阻尼比的范围为 0.0085 ~ 0.1842。同样得到 Y 向阻尼比的变化范围为 0.0186 ~ 0.1918。

4 TMD 现场安装调试

4.1 塔体自振特性测试

TMD 运至施工现场时,塔体尚未完工,在地面上

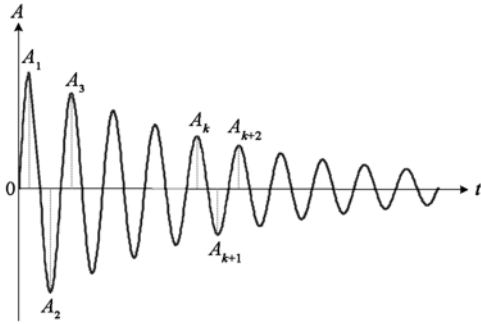


图 11 标准自由衰减曲线
Fig. 11 Free decaying curve

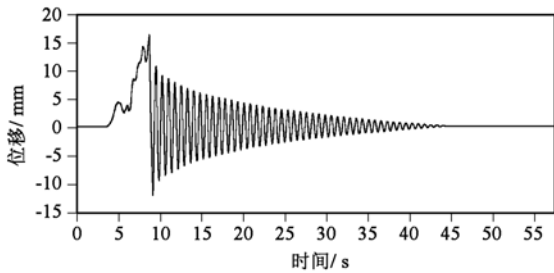


图 12 完全松开阻尼片时 X 向位移时程
Fig. 12 Free decaying curve with screw bolt loosened

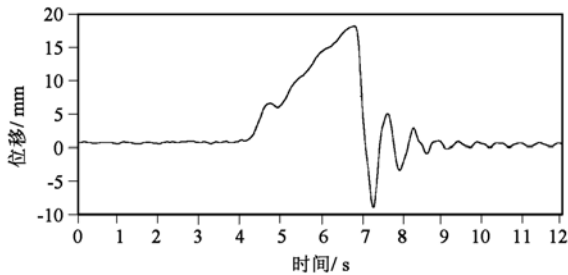


图 13 完全固定阻尼片时 X 向位移时程
Fig. 13 Free decaying curve with screw bolt fastened

直接将 TMD 安装至所在塔体节段(安装 TMD 时,它的大小刚度方向与标志塔的大小刚度方向相一致),和塔体节段共同吊装至焊接位置,未先对塔体的自振特性进行测试。根据 TMD 控制系统设计理论,TMD 的动力参数由受控结构的动力特性所决定^[6]。

由于本工程中 TMD 质量只有塔体质量的 1.33%,TMD 的存在对塔体频率影响很小,现场测试中在塔体上沿高度均匀布置了 7 个 941-B 型加速度传感器,在 TMD 质量块的顶面设置了 1 个 941-B 型加速度传感器。以固定 TMD(用连杆替换弹簧并且旋紧摩擦阻尼片)和放松 TMD(未安装弹簧并且放松摩擦阻尼片)两次频率测定的平均值作为塔体实测频率。测得标志塔的自振频率见表 2,即标志塔第 1 阶 X 向自振频率取 1.032Hz, Y 向自振频率取 1.374Hz。

综合半功率点法、峰点法和时域衰减曲线法,测得对应标志塔第 1 阶频率的两个方向的阻尼比均为 0.012。

表 2 实测标志塔自振频率

Table 2 Measured frequency of tower

序号	工况	方向	实测塔体频率/Hz
1	固定 TMD	X 向	1.038
		Y 向	1.355
2	放松 TMD	X 向	1.025
		Y 向	1.392

4.2 TMD 现场调整与测试

目前国内外的风振响应及控制计算均采用简化的多质点模型,计算精度难以得到保证,特别是 TMD 控制效果对频率十分敏感,简化模型与实际结构在动力特性上的微小偏差,将导致设计出的 TMD 的控制效果大大降低^[3]。与采用的有限元计算值相比,标志塔两个方向的实测频率与计算频率相差均小于 0.06Hz^[7],满足 TMD 进一步调试的需要。

原选用刚度为 6.90N/mm 的弹簧 6 根,刚度为 22.22N/mm 的弹簧 2 根。适当调整弹簧的安装高度即可满足 TMD 频率调整的要求。调整 X 向弹簧总刚度为 27.60N/mm, Y 向弹簧总刚度为 58.64N/mm。最终设定弹簧高度为 1680mm。

弹簧安装就位后,采用人工扰动法测试 TMD 的频率和阻尼比,其中 TMD 的阻尼通过调整摩擦阻尼片的预紧力进行调整。调试完成后实测 TMD 的频率 X 向为 1.001Hz, Y 向为 1.343Hz,实测 TMD 的阻尼比 X 向为 0.095, Y 向为 0.082。

5 结论

(1) 所提出的 TMD 利用十字形万向铰轴连接主体结构,使之对于标志塔水平双向的振动均能起到控制作用。

(2) 采用质量摆和弹簧协同工作的方式,通过更换弹簧及调整弹簧的安装位置可以方便的调整 TMD 的频率。

(3) 根据标志塔实测频率调整后的实测 TMD 动力参数,TMD 的位移减振控制效果可达到 30% 以上。

(4) 实验室性能测试和现场实测表明,所设计 TMD 装置的动力参数和可调范围满足预定设计目标。

参 考 文 献

- [1] 闫维明,纪金豹,鄢圣超,等. 悬吊式调频质量阻尼器减振控制装置:中国,200610057990.8[P]. 2006-10-18. (Yan Weiming, Ji Jinbao, Yan Shengchao, et al. Pendulous turned mass damper for vibration control: China, 200610057990.8 [P]. 2006-10-18. (in Chinese))
- [2] 张文芳. 建筑结构 TMD 振动控制及其新体系减震研究[J]. 太原理工大学学报,2004,35(1):43-47.

- (Zhang Wenfang. Research on vibration control of structures with TMD and shock absorption of new systems [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004,35 (1):43-47. (in Chinese))
- [3] 鄢圣超. 悬吊式 TMD 控制高耸结构风振响应研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2006. (Yan Shengchao. Study on the wind vibration control of the high rising structure by means of pendulum TMD [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [4] 秦丽, 闫维明, 呼学军, 等. 河南艺术中心标志塔 TMD 地震控制 [J]. 北京工业大学学报, 2009,35 (6):761-768. (Qin Li, Yan Weiming, Hu Xuejun, et al. Study on seismic control effectiveness of TMD system of symbolic tower of henan art center [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009,35 (6): 761-768. (in Chinese))
- [5] 黄浩华. 地震模拟振动台的设计与应用技术 [M]. 北京:地震出版社, 2008. (Huang Haohua. Design and application of shaking table [M]. Beijing: Seismological Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 王肇民. 电视塔结构 TMD 风振控制研究与设计 [J]. 建筑结构学报, 1994, 15 (5): 2-13. (WANG Zhaomin. Study and design of TMD wind vibration control of TV tower structures [J]. Journal of Building Structures, 1994,15(5):2-13. (in Chinese))
- [7] 秦丽. 结构风振与地震响应的 TMD 控制 [D]. 北京:北京工业大学, 2008. (Qin Li. TMD control of structural response under wind and earthquake [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese))