

DOI:10.11918/201912126

脱硫排烟一体式钢塔 TMD 减振效果分析

王希慧^{1,2}, 宋波^{1,2}, 陈磊^{1,2}, 劳俊^{2,3}, 王满生⁴

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083; 3. 北京国电龙源环保工程有限公司, 北京 100039; 4. 北京市住房和城乡建设科学技术研究所, 北京 100021)

摘要: 发电厂中新型脱硫排烟一体式钢塔属于复杂的高耸薄壁结构, 由于顶部截面突然变细, 风荷载作用下极易产生较大振动, 为了减小风致振动, 提出了适用于脱硫排烟一体式钢塔的调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)减振方案. 基于流固耦合理论, 建立了结构场与流场计算模型, 成功利用数值风洞方法计算了有无 TMD 结构的风振响应, 并通过现场风振监测对数值方法的可靠性进行了验证. 结果表明, 该脱硫排烟一体式钢塔振型以局部或整体的平动、转动、屈曲与扭转为主, 通过在塔体顶部设置 TMD, 位移动力响应最大值降低 41%, 均方根值降低 75%. 频谱分析表明, 结构安装 TMD 后部分低频振型被激起, 同时主频率对应的动力响应大大降低, TMD 对于该脱硫排烟一体式钢塔可以起到较好的减振效果, 为类似高耸薄壁结构的风振控制提供了参考.

关键词: 脱硫塔; 调谐质量阻尼器; 数值风洞; 现场监测; 风振控制

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)10-0071-07

Analysis of vibration reduction effect of tuned mass damper for desulfurization and exhaust smoke integrated steel tower

WANG Xihui^{1,2}, SONG Bo^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, LAO Jun^{2,3}, WANG Mansheng⁴

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of the Rail Transit Engineering in the Strong Motion Area, Beijing 100083, China; 3. Beijing Guodian Longyuan Environmental Protection Engineering, Co. Ltd., Beijing 100039, China; 4. Beijing Institute of Housing and Urban-Rural Construction Science and Technology, Beijing 100021, China)

Abstract: In power plant, the novel desulfurization and exhaust smoke integrated steel tower is a complex high thin-walled structure. With the top section suddenly becomes thinner, the steel tower is prone to vibration under wind loads. To reduce the wind-induced vibration of the structure, a tuned mass damper (TMD) vibration reduction scheme suitable for desulfurization and exhaust smoke integrated steel tower was proposed. Based on the fluid-structure interaction theory, structure field and flow field models were established. Wind vibration responses of the structure with or without TMD were calculated by using a numerical wind tunnel method, and the method was verified by on-site wind vibration monitoring. Results show that the vibration modes of the integrated steel tower were mainly local or overall translation, rotation, buckling and torsion. By installing a TMD on top of the tower, the peak value of the displacement dynamic response was reduced by 41% and the RMS value was reduced by 75%. Spectrum analysis results show that the low-frequency component of the structure was excited after installing TMD, and the dynamic response of the main frequency was greatly reduced. Vibration reduction effect was obvious for the desulfurization and exhaust smoke integrated steel tower with TMD, which provides a reference for wind-induced vibration control of similar structures.

Keywords: desulfurization tower; tuned mass damper; numerical wind tunnel; on-site monitoring; wind-induced vibration control

近年来随着环保力度的增大, 要求发电厂排烟高度不断提升, 进而产生了脱硫排烟一体式钢塔, 即将烟囱直接设置在钢制脱硫塔顶部, 提升排烟高

度^[1], 其环保效果显著. 由于烟囱与脱硫塔结合部位存在截面突变, 削弱了刚度, 增加了风致敏感性, 导致结构在风荷载作用下极容易发生振动, 甚至产生过大位移, 对结构安全造成威胁, 因此有必要研究适用于脱硫排烟一体式钢塔的减振措施.

调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)作为一种高效、便捷的振动控制装置, 在高层建筑^[2]及高耸结构^[3]、风电塔^[4]等特种结构上都所有应

收稿日期: 2019-12-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0205003)

作者简介: 王希慧(1990—), 男, 博士研究生;

宋波(1962—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 宋波, songbocestb@126.com

用,可有效降低结构的振动响应. Elias 等^[5]研究了装有 TMD 的高层建筑的风振控制问题,利用 Newmark 积分法,导出了有无 TMD 结构的耦合运动微分方程,计算了风荷载作用下建筑物动力响应的变化. 邢磊等^[6]将 TMD 应用于高层钢框架结构,使建筑结构在地震作用下的动力响应下降 19%~26%,提高了结构的稳定性. 陈鑫等^[7]针对自立式高耸结构的特点,设计了环形 TMD 减振装置,并通过时程分析的方法验证了该装置的有效性. 田英鹏等^[8]通过有限元法分析了风力发电机塔架施工阶段的 TMD 减振效果,并通过 TMD 缩尺模型进行了试验验证.

本文针对脱硫排烟一体式钢塔结构特点,提出适用于该类塔体的 TMD 减振方案. 基于流固耦合原理,建立结构场与流场模型,采用数值风洞方法,对 TMD 的减振效果进行了分析,并通过现场风振监测,验证了数值风洞方法的可靠性. TMD 可大大减小结构的风致动力响应,大大提高结构的稳定性.

1 TMD 减振方案设计

1.1 工程背景

以赤峰某电厂项目脱硫排烟一体式钢塔作为研究背景,见图 1.

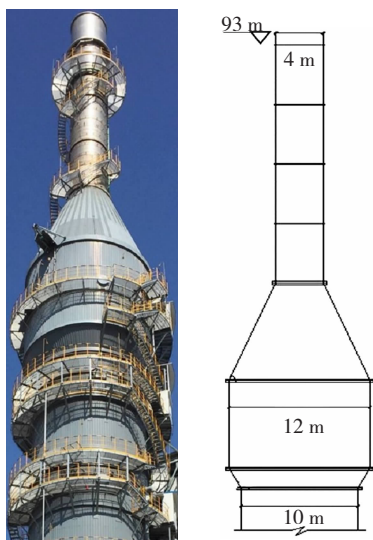


图 1 脱硫排烟一体式钢塔

Fig. 1 Desulfurization and exhaust smoke integrated tower

塔体主要由底部脱硫塔与顶部烟囱组成,总高度为 93 m,材料类型为 Q235B,密度为 $7\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$,泊松比为 0.3,弹性模量为 $2.06 \times 10^{11}\ \text{Pa}$. 壁厚从底往上逐渐递减,底部壁厚为 30 mm,顶部壁厚为 6 mm. 湿除扩大段塔体直径 12 m,烟囱直径 4 m,下部筒体直径 10 m. 地面粗糙度类别属于 B 类,地面粗糙度系数为 0.16,梯度风高度 $H_c = 350\ \text{m}$. 根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[9]可知,赤峰

地区 10 a 重现期基本风压为 $0.30\ \text{kN}/\text{m}^2$,由风速风压换算公式计算可知赤峰地区 10 a 重现期 10 m 高度处 10 min 内平均风速为 $22.13\ \text{m}/\text{s}$.

1.2 TMD 设置方案

TMD 属于被动减振控制体系的一种,主要由质量块、调频弹簧和阻尼元件组成,设计时主要考虑质量比、阻尼比、频率等参数^[10]. 当阻尼器系统自身频率调整到与结构振动的主频率相近时,阻尼器会产生与结构反向共振的行为^[11],此时 TMD 会通过阻尼耗散部分能量,从而起到减小结构动力响应的目的. 根据 TMD 减振原理,结合塔体的结构特点,可在塔体顶部设置悬吊式 TMD,具体设置方案见图 2. 为减小对排烟效率的影响,质量块设计成圆柱形,在烟囱顶部设置横梁,通过悬索或吊杆将质量块吊起(塔体横梁受力部位应采取加固措施,防止产生局部屈曲),质量块与烟囱内壁沿环向设置弹簧阻尼器,起到限位与耗能的作用.

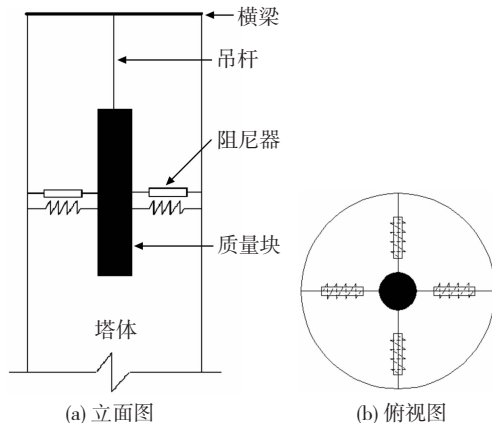


图 2 塔体 TMD 设置方案

Fig. 2 TMD setting inside tower

2 数值风洞的建立

根据文献[12]可知,相邻构筑物在不同参数条件下会呈现不同的绕流特点,根据实际情况,可以忽略周围构筑物的影响. 基于流固耦合理论^[13],利用有限元软件,建立了钢塔的结构模型与流场模型,并通过自回归模型 AR 法确定 10 a 重现期的风速时程.

2.1 结构与流场模型的建立

为使计算结果更具参考价值,按照脱硫排烟一体式钢塔实际尺寸建立结构有限元模型,见图 3. 单元类型选择适用于薄壁的 Shell 单元,由于脱硫塔结构壁厚沿高度方向逐渐递减,因此采用分区建模的方式形成壁厚变化的结构模型.

TMD 通过多单元组合的方式进行模拟,塔顶横梁采用大位移弹性 Beam 单元,中间悬索或吊杆采用 Truss 单元,为使其能够自由摆动,顶部与横梁铰接,通过调整弹簧单元刚度 k 与阻尼 c 来模拟环向

的弹簧阻尼器,质量块通过定义集中质量的方式定义.根据经验系数,质量块配重取结构总重的 1.2% 即 4 t,有效摆长取 1 m,为充分发挥 TMD 的作用,使其频率约等于结构自振频率 1 s,通过式(1)、(2)得出^[14],弹簧阻尼在单一水平方向总刚度 K 为 119 N/mm,阻尼 C 为 3.0 (N·s)/mm.

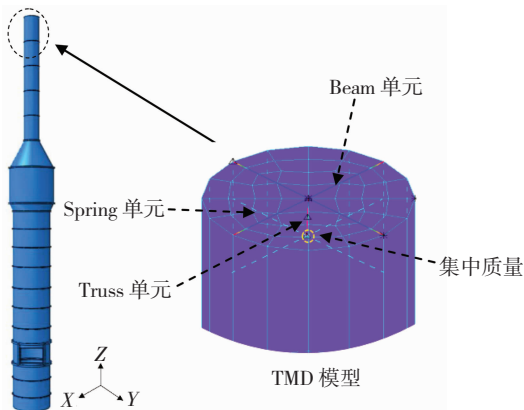


图 3 结构数值计算模型

Fig. 3 Finite element model of structure

$$K = ml / (w^2 l - g) / h^2, \quad (1)$$

$$C = 2mw\xi_c, \quad (2)$$

式中: m 为配重块质量, l 为有效摆长, w 为 TMD 圆频率, g 为重力加速度, h 为弹簧距离摆轴中心力矩长度, ξ_c 为阻尼调整系数,一般取 0.06.

为满足阻塞率的要求^[15],流场域尺寸为 200 m × 200 m × 130 m,见图 4.

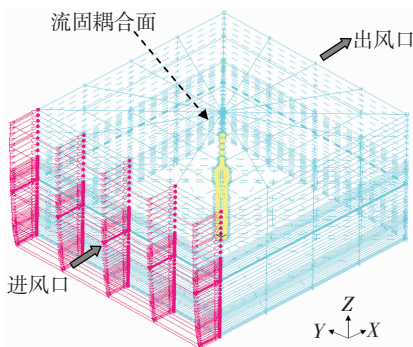


图 4 流场有限元模型

Fig. 4 Finite element model of flow field

为提高计算效率,网格划分密度由外向内逐渐加密,其中 $-X$ 方向为流场进风口, $+X$ 方向为流场出风口.流场域入口采用速度入口边界条件,同时为了提高入口边界条件的自保持性,对入口的湍流能和耗散率进行了设置.流场域出口采用完全发展的边界条件,流场域底部、顶部及侧面采用固定边界条件,结构与流场结合面采用流固耦合边界.流场域的单元类型为 3D-Fluid,空气密度为 1.225 kg/m³,黏性系数为 1.78 × 10⁻⁵ kg/(m·s).湍流模型采用的是 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,该湍流模型在进行数值模拟时

能更好地处理高应变率和流动弯曲度较大的流动,使得数值模拟结果更加准确.

2.2 脉动风速模拟

在开展结构风振响应分析时,脉动风速的合理确定非常关键^[16],本文基于自回归模型 AR 方法,编译适用于钢塔结构的脉动风速,其中平均风速基于场地环境条件以及国家规范确定^[9],脉动风速采用随机序列产生.本文主要目标是通过设置 TMD 保证钢塔在大风作用下不致产生过大的振动而倒塌,因此根据赤峰 10 a 重现期基本风速为 22.13 m/s,频率范围取 0.001 ~ 6 Hz,通过 Davenport 谱模拟得到的赤峰地区 10 a 重现期脉动风速时程,见图 5.为验证应用 AR 自回归法模拟脉动风速的准确性,将模拟谱和目标谱(Davenport 谱)作对比,见图 6.

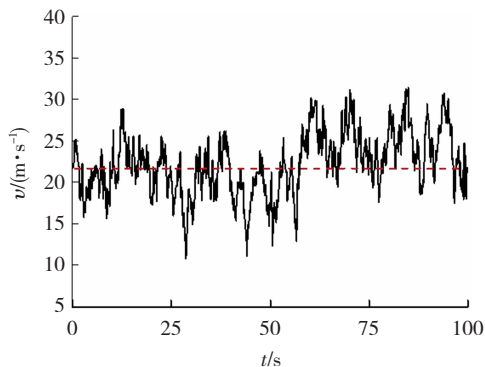


图 5 10 a 重现期脉动风速时程

Fig. 5 Time-history of wind speed in 10 year return period

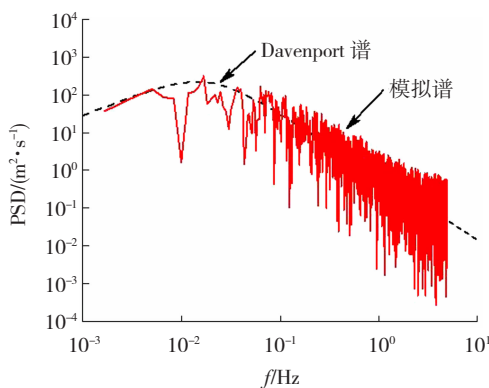


图 6 功率谱密度对比

Fig. 6 Comparison of power spectral densities

从图 5 可看出,脉动风在平均风的基准线处上下波动,从图 6 可看出,应用 AR 自回归方法模拟的脉动风速谱与目标谱基本一致,表明两者拟合情况良好,说明采用 AR 自回归法对自然风的模拟可靠有效,且未发生脉动风速时程失真现象.

3 TMD 减振效果分析

3.1 自振特性分析

采用子空间法对脱硫排烟一体式钢塔(无

TMD)进行模态分析,以确定该结构的自振频率、周期和振型,为 TMD 设置提供依据.提取塔体前 10 阶自振模态结果,见表 1,部分代表性振型,见图 7.结合表 1 和图 7 可看出,塔体振型主要以局部或整体的平动、转动、屈曲与扭转为主,在风荷载作用下结构第 1 阶振型提供的响应在 80% 以上^[17],一般控制钢塔结构第 1 阶振型的变形,即可达到工程实用精度,塔体第 1 阶振型主要以整体平动为主.

表 1 前 10 阶自振模态结果

Tab. 1 First 10 orders natural modal results

阶数	频率/Hz	周期/s	振型
1	1.040 3	0.961 3	整体平动
2	1.469 7	0.680 4	整体平动
3	3.725 3	0.268 4	顶部转动
4	3.915 4	0.255 4	顶部转动
5	5.357 0	0.186 7	中部屈曲
6	5.376 9	0.186 0	中部屈曲
7	6.837 5	0.146 3	顶部屈曲
8	6.842 7	0.146 1	顶部屈曲
9	7.017 6	0.142 5	整体扭转
10	9.534 3	0.104 9	烟道屈曲

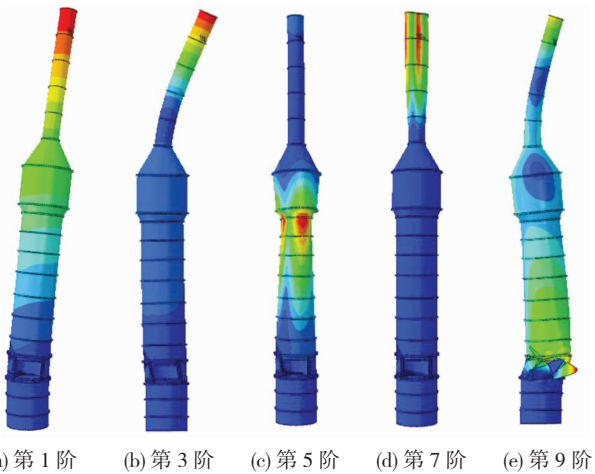


图 7 部分塔体振型

Fig. 7 Examples of tower body vibration shapes

3.2 风振响应时程分析

流固耦合分析可以更好地体现出风荷载的脉动特性,尤其对于风振响应的研究只有通过流固耦合才能体现风振的脉动特性,通过切片方式显示高度 80 m 处流场速度矢量变化,见图 8.可以看出流体经过结构时,产生明显的绕流,流固耦合效果显著.

提取未设置与设置 TMD 结构模型顶部加速度与位移顺风向(X 向)时程结果,同时提取应力较大部位的应力时程结果,见图 9.分别计算加速度、位移和应力结果的最大值与均方根值减振率,见表 2.从表 2 可以看出,加速度最大值降低 43%,均方根

值降低 72%,位移最大值降低 41%,均方根值降低 75%,应力最大值降低 37%,均方根值降低 50%,可见 TMD 大大降低结构的动力响应.

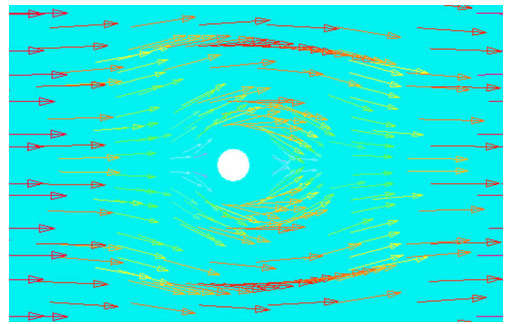
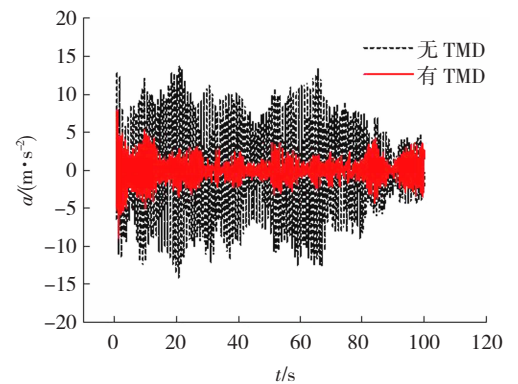
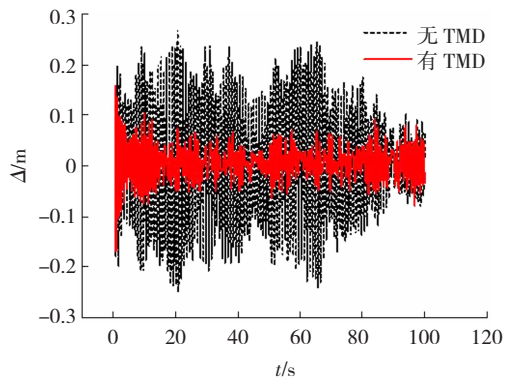


图 8 流场速度矢量图

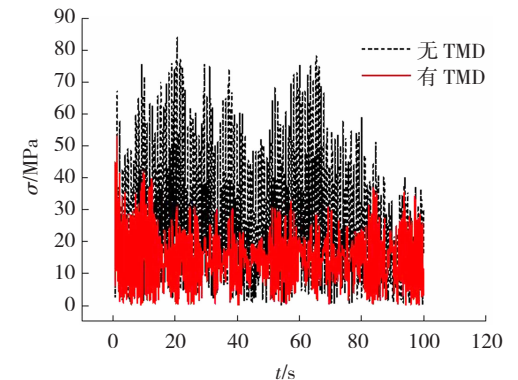
Fig. 8 Vector illustration of flow field speed



(a) 塔体顶部加速度时程对比



(b) 塔体顶部位移时程对比



(c) 应力时程对比

图 9 风振响应时程结果

Fig. 9 Time-history results of wind vibration response

表 2 动力响应减振率计算

Tab. 2 Calculation of dynamic response damping rates

动力响应指标	加速度/($m \cdot s^{-2}$)	位移/m	应力/MPa	
最大值	无 TMD	13.80	0.27	84.15
	有 TMD	7.91	0.16	53.14
减振率/%	43.00	41.00	37.00	
均方根	无 TMD	6.41	0.12	34.70
	有 TMD	1.77	0.03	17.20
减振率/%	72.00	75.00	50.00	

位移是评价结构动力响应的重要指标^[18],采用快速傅里叶变换方法,对位移时程数据进行频谱分析,得到有无 TMD 结构的风振响应频谱曲线,见图 10.

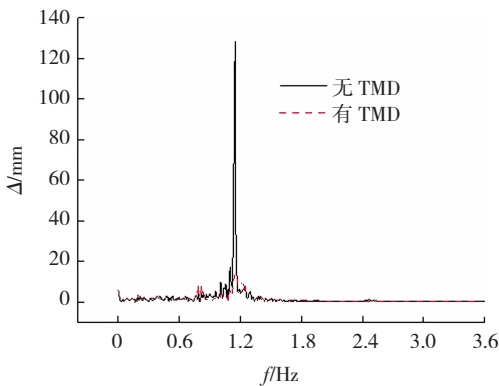


图 10 频谱曲线

Fig. 10 Spectrum curves

结构安装 TMD 后部分低频振型被激起,高频振型变化不大,同时主频率对应的动力响应大大降低,



(a) 采集仪布置



(b) 拾振器固定



(c) 风速采集

图 11 现场监测

Fig. 11 On-site monitoring

4.2 监测结果分析

现场实测底部、中部和顶部的平均风速依次为 3、7 和 9 m/s,沿高度方向呈现梯度分布规律,根据现场风速分布特点,设置与现场风速分布规律一致的梯度风作为入口边界条件,同时依据现场 10 m 高度处监测到的平均风速(4 m/s),通过 AR 自回归法

表明 TMD 对于该脱硫排烟一体式钢塔可以起到较好的减振效果.

4 现场风振监测

目前,对于该脱硫排烟一体式钢塔设计主要依赖于工程经验,缺乏相应的理论和适用的规范.为验证数值风洞计算方法的可靠性,利用风速仪采集现场风速,同时利用振动监测系统,监测在该风速下,脱硫塔沿高度方向的风振响应.同时将现场采集风速输入模型,将现场监测结果与数值模拟结果进行对比.由于是前期设计阶段,TMD 还未安装,现场监测是针对未安装 TMD 的塔体进行的.

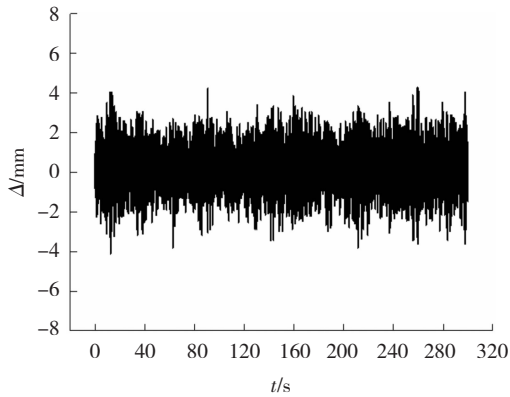
4.1 现场监测布置

数据分析系统采用的是 D1000 动态信号数据分析系统,支持 16 通道,每通道内置独立的 24bit ADC,保证每通道最高以 128 kHz 的采样率同步采样,内置程控放大和滤波器,可完成各种传感器信号的高速采集,现场采集仪布置见图 11(a).传感器采用的是用于超低频或低频振动测量的 941B 拾振器,适用于一般结构物的工业振动测量、高耸结构物的超低频大幅度测量和微弱振动测量.根据现场监测条件,在保证测点高度最大的前提下,分别在塔体背风面沿高度方向标高 30、40 和 50 m 处设置三个测点,编号依次为 1~3#.由于外保温层柔度较大,为更好地反映塔身的振动,将传感器固定在塔体加劲肋上,以使其与塔身能够保持同步运动,拾振器固定及现场风速采集见图 11(b)、(c).

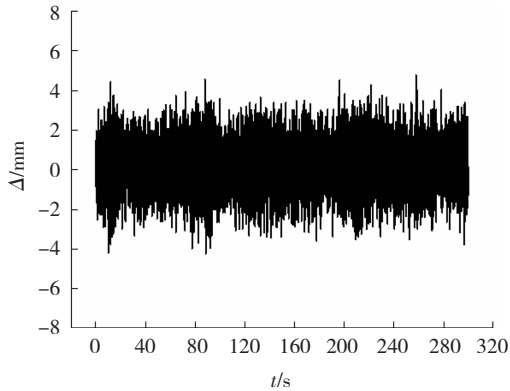
生成现场脉动风速,并将脉动风速输入数值风洞进行计算.

提取 1~3#测点前 300 s 的位移时程结果,见图 12.从位移变化幅值来看,风荷载作用下结构沿高度方向平均位移幅值逐渐递增,平均位移变化幅值依次为 5、6 和 8 mm.提取结构模型与现场测点对应高

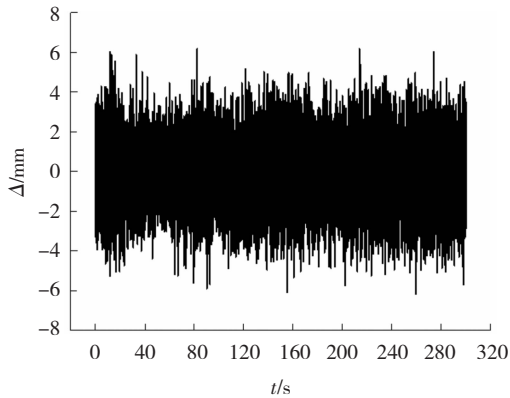
度处平均位移变化幅值,并与现场监测结果作对比,见表 3。从表 3 可看出,由于现场监测环境复杂,受周围环境振动等的影响,各测点数值风洞计算结果整体小于现场监测结果,但各测点最大误差均在 15% 以内,可近似认为数值风洞方法计算结果可靠。



(a) 1# 测点位移时程



(b) 2# 测点位移时程



(c) 3# 测点位移时程

图 12 现场风振监测结果

Fig. 12 On-site wind vibration monitoring results

表 3 监测与模拟结果对比

Tab. 3 Comparison of monitoring and simulation results

测点编号	监测结果/mm	模拟结果/mm	误差/%
1#	5.0	4.7	6.0
2#	6.0	5.5	8.3
3#	8.0	7.1	11.3

5 结 论

1) 提出了适用于脱硫排烟一体式钢塔的 TMD 减振方案,通过内置悬吊式 TMD,位移动力响应最大值降低 41%,均方根值降低 75%,大大降低了结构的风振响应,为类似高耸薄壁结构风振控制提供参考。

2) 基于流固耦合理论,建立了结构场与流场计算模型,成功利用数值风洞方法计算了结构的风振响应,并通过现场监测验证了数值方法的可靠性,由于现场环境振动等的影响,监测结果大于模拟结果,但各测点最大误差均在 15% 以内。

3) 该脱硫排烟一体式钢塔振型主要以结构局部或整体的平动、转动、屈曲与扭转为主,第 1 阶振型主要是整体的平动,结构安装 TMD 后部分低频振型被激起,高频振型无明显变化,主频率对应的动力响应被大大降低,表明 TMD 对于该类塔体起到良好的减振效果。

参考文献

[1] 张仁锋,苏桑桑,马继军,等. 烟塔合一的环境影响实证研究[J]. 中国电力,2018,51(7):162
ZHANG Renfeng, SU Shenshen, MA Jijun, et al. An empirical study on environmental impact of the integration of the natural draft cooling tower and the flue gas[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 162

[2] AKYÜREK O, SUKSAWANG N, GO T H, et al. Performance evaluation of a reinforced concrete building strengthened respectively by the infill wall, active and passive tuned mass damper under seismic load[J]. Computers and Structures, 2019, 223:1. DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.07.006

[3] LONGARINI N, ZUCCA M. A chimney's seismic assessment by a tuned mass damper[J]. Engineering Structures, 2014, 79: 290. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.020

[4] GHASSEMPOUR M, FAILLA G, ARENA F. Vibration mitigation in offshore wind turbines via tuned mass damper [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 610. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.092

[5] ELIAS S, MATSAGAR V. Wind response control of tall buildings with a tuned mass damper[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 15: 51. DOI:10.1016/j.job.2017.11.005

[6] 邢磊,贾宝新,邢锐. 地震作用下钢框架高层结构的抗震性能研究[J]. 地震工程学报,2019,41(6):1482
XING Lei, JIA Baoxin, XING Rui. Seismic performance of high-rise steel-frame structures under seismic action [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1482. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1482

[7] 陈鑫,李爱群,王泳,等. 自立式高耸结构风振控制方法研究[J]. 振动与冲击,2015,34(7):149
CHEN Xin, LI Aiqun, WANG Yong, et al. Investigation on techniques for wind-induced vibration control of self-standing high-rise structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(7): 149. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.07.024

- [8] 田英鹏,徐丹,周惠蒙,等. 对风力发电机塔架施工阶段 TMD 阻尼器的研究[J]. 工程力学,2019,36(增刊1):184
TIAN Yingpeng, XU Dan, ZHOU Huimeng, et al. Study on the TMD damping of wind turbine towers in construction [J]. Engineering Mechanics,2019,36(S1):184. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2018.06.S037
- [9] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [10] 刘琳. 高耸结构 TMD 减振及振动台试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2019
LIU Lin. Research on TMD vibration reduction and vibration table test of high-rise structure[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019
- [11] 施卫星,王梁坤,严俊,等. 改进的自调频单摆式 TMD 的减振性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(2): 40
SHI Weixing, WANG Liangkun, YAN Jun, et al. Performance of semi-adaptive pendulum-type tuned mass damper[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(2): 40. DOI:10.13245/j. hust.180208
- [12] 周晨珺. 双烟囱相互干扰下平均风荷载的数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014
ZHOU Chenjun. Numerical investigation on mean wind loads for interference of twin chimney stacks [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014
- [13] 翟希梅,王皓淞,范峰. 160 000 m³ 大型 LNG 储罐的振动特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(6):14
ZHAI Ximei, WANG Haosong, FAN Feng. Vibration characteristic analysis of 160 000 m³ LNG storage tank [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(6): 14
- [14] 闫维明,纪金豹,蒋华戈,等. 新型悬吊式 TMD 及其在某标志塔风振控制中的应用[J]. 建筑结构学报,2010,31(2):55
YAN Weiming, JI Jinbao, JIANG Huage, et al. A new type pendulous TMD and its application on a tower for wind-induced vibration control [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 55. DOI:10.14006/j. jzjgxb.2010.02.004
- [15] 杜晓庆,林伟群,施春林,等. 高雷诺数下并列双圆柱绕流的大涡模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(6):193
DU Xiaqing, LIN Weiqun, SHI Chunlin, et al. Large eddy simulation of flow around two side-by-side circular cylinders at a high Reynolds number [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 193. DOI: 10.11918/j. issn.0367-6234.201806039
- [16] 宋波,殷炳帅,曹谦. 最不利风向作用下吸收塔风致动力响应[J]. 建筑科学与工程学报,2016,33(3):19
SONG Bo, YIN Bingshuai, CAO Qian. Wind-induced dynamic response of desulfurizing towers under most unfavorable wind direction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 19
- [17] 王树,阎维明,葛家琪,等. 标志塔调谐质量阻尼器(TMD)减振控制分析与应用[J]. 建筑结构,2008,38(12):31
WANG Shu, YAN Weiming, GE Jiaqi, et al. Oscillation reduction control analysis and application research of tuning mass damping (TMD) equipment of the signal tower of Henan Provincial Art Centre[J]. Building Structure, 2008, 38(12): 31. DOI: 10.19701/j. jzjg.2008.12.008
- [18] 高耸结构设计规范: GB 50135—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006
Code for design of high-rise structures: GB 50135—2006 [S]. Beijing: China Planning Press, 2006

(编辑 赵丽莹)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“考虑膝关节转动刚度的二段腿行走步态分析”,是哈尔滨工业大学土木工程学院大跨空间结构研究中心范峰教授课题组提出的一种人体运动模型原理图。该模型由一个质点(代表人体质心)和两条无质量的腿构成,腿部包含两个刚性肢体,代表大腿和小腿,通过具有转动刚度的膝关节连接在一起。人体行走的一个单步过程如图所示:以单足支撑阶段右腿直立为起点,左腿保持恒定的冲击角,直到触地,进入双足支撑阶段,当右腿的地反力减小为零时,右腿离地,再次进入单足支撑阶段,直到左腿直立,一个单步过程结束。根据模型构造及行走过程,建立模型的运动方程,确定方程求解的边界条件,采用庞加莱映射和牛顿迭代法求取不动点,得到了模型的周期性行走步态。对比已有的线弹簧模型,二段腿模型构造更接近于真实人体,模型参数物理意义明确,为模型的实验验证和参数标定打下了基础,推进模型在步态分析、机器人设计、人与结构相互作用等领域的运用。

(图文提供:林彬添,张清文,范峰. 哈尔滨工业大学土木工程学院)