文章编号：1000-4750(2017)Suppl-0134-05

风力发电机塔筒风致响应分析与风振控制研究

李　斌，文昊天，宫兆宇

(内蒙古科技大学建筑与土木工程学院土木工程系，内蒙古，包头 014010)

摘　要：该文以内蒙古白云鄂博某 1.5 MW 风力发电机塔筒为研究对象，根据线性滤波法模拟生成风力发电机暴风风况瞬时风速时程，利用模拟得到的瞬时风速对风力发电机塔筒进行风致响应分析，应用调谐质量阻尼减振技术(TMD)对风力发电机塔筒进行暴风风况下的风振控制研究。结果表明：风力发电机塔筒顶部的动力响应具有较强的随机性和波动性；TMD 对风力发电机塔筒具有较好的风振控制效果，总体上 TMD 对风力发电机塔筒的风振控制效果随着质量比和阻尼比的增大而增加，最后趋于稳定。该文给出了设计中质量比、阻尼比及频率比的取值建议。

关键词：线性滤波法；暴风风况瞬时风速；风力发电机塔筒；风致响应分析；风振控制研究

中图分类号：TM315　　**文献标志码：**A　　doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.S022

WIND-INDUCED RESPONSE ANALYSIS AND WIND VIBRATION CONTROL OF A WIND TURBINE TOWER DRUM

LI Bin , WEN Hao-tian , GONG Zhao-yu

(College of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: A 1.5 MW wind turbine tower drum in Inner Mongolia Bayan obo area was taken as the research object. The instantaneous wind velocity time-history under the storm conditions was simulated by the linear filtering method. The simulated instantaneous wind speed was used to analyze the wind-induced response of wind machine tower drum. The turbine tower drum's wind vibration control which uses the tuned mass damper damping technology (TMD) in the storm was studied. The results show that the dynamic response at top of the tower drum exhibits strong randomness and volatility under the storm wind. TMD has a good effect on the wind vibration control of the wind turbine tower drum. The wind vibration control effect of TMD to wind turbine tower drum increases with the increase of mass ratio and damping ratio, and tends to become stable. The selection of mass ratio, damping ratio and frequency ratio is advised in this paper.

Key words: linear filtering method; storm conditions instantaneous wind speed; wind machine tower drum; wind-induced re sponse analysis; wind vibration control

随着风电技术日益向大功率的方向发展，风力发电机塔架的高度和体量不断增加，传统的抗风结构设计越来越难以满足塔架结构的使用要求，塔架在风荷载作用下的振动问题日益凸显[1]。较大的振动效应将会导致塔架结构发生破坏甚至倒塌，采用振动控制技术可以较为安全、经济、可靠、有效地解决这个问题[2−5]。在风力发电机塔架中考虑与设置振动控制装置，以调谐和减轻塔架结构的振动效应对于减小风力发电机塔架的振动反应，有效地保护风力发电机组整体结构正常工作状态、遭受强风和强震状况的安全性均具有重要的意义。

《高耸结构设计规范》规定[6]：对于变形控制的高耸结构，宜采用适当的振动控制技术来减小结构的变形及加速度。鉴于此，本文对风力发电机塔

收稿日期：2016-04-22；修改日期：2016-10-21

通讯作者：李　斌(1961－)，男，陕西榆林人，教授，博士，副校长，主要从事组合结构及结构抗震研究(E-mail: btlibin@189.cn).

作者简介：文昊天(1991－)，男，辽宁沈阳人，硕士生，从事组合结构动力性能研究(E-mail: 15539895916@163.com)；

宫兆宇(1990－)，男，辽宁丹东人，工程师，硕士，从事组合结构研究(E-mail: gongzhaoyu6@126.com).

架进行了 TMD 减振控制研究[7−8]。TMD 对风力发电机组的功能要求影响较小，仅占用极少的面积，并且安装维修更换简单、方便。将其应用于风力发电机塔架结构中不仅能改善塔架的受力状况，减小塔架的振动，提高风力发电机组的运行性能，而且还可以减少风力发电机塔架倒塌事故的发生，这对未来风电技术的发展有着重大的现实意义。

1　风力发电机塔筒有限元模型建立

本文以内蒙古白云鄂博某 1.5 MW 风力发电机塔筒为研究对象，塔筒高度为 73 m，底部和顶部直径分别为 4.2 m、2.606 m，由 4 段塔筒组成，高度分别为 18.485 m、19.815 m、18.6 m 和 16.1 m。应用 ABAQUS 有限元软件建立风力发电机塔筒有限元模型，其中塔筒采用壳单元，网格划分技术采用扫掠网格划分[9]，如图 1 所示。风轮与机舱简化为考虑质量 88000 kg 及 1.2 m 偏心距的质量点，风力发电机塔筒顶部与质量点采用刚体约束方法连接，塔筒底部与基础采用全约束。

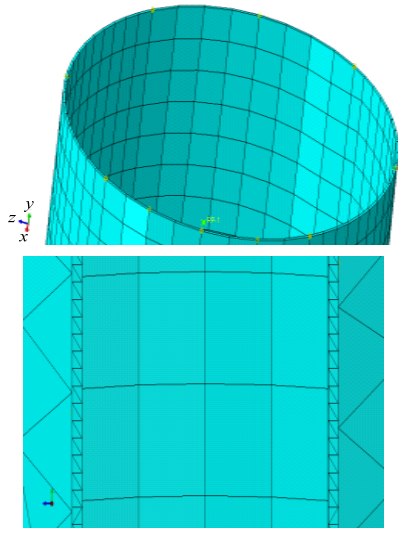


图 1　风力发电机塔筒有限元模型

Fig.1　Finite element model of wind turbine tower

2　风力发电机暴风风况风速模拟

本文采用 Davenport 脉动风水平风速谱，通过调用 MATLAB 数学函数库中的 randn 函数生成随机数样本空间，针对线性方程组求解回归系数、矩阵相乘以及矩阵的 Cholesky 分解等部分，依次调用了 trapz 函数和 chol 函数，保证了计算精度和模拟方法的稳定性，最终模拟得到风力发电机风轮中心位置处暴风风况下的风速时程曲线，如图 2 所示[10]。

3　风力发电机塔筒风致响应分析

利用 ABAQUS 有限元软件包中的通用分析步，选择隐式动力分析选项，在加载制度选项里创建振幅 Amp-1，将模拟生成的风荷载时程添加到 Amp-1，在基线矫正选项中选择单一间隔。应用 ABAQUS 有限元软件，分析得到风力发电机塔筒顶部风振动态响应时程曲线，分别如图 3~图 5 所示。

从图 3 可以看出，暴风风况下塔筒顶部位移响应时程曲线多在–0.4 m~0.4 m 范围内；由图 4 可知风力发电机塔筒顶部速度响应时程曲线多在–0.5 m/s~0.5 m/s 范围内；图 5 反映了塔筒顶部加速度响应时程曲线多在–1.5 m/s^2~1.5 m/s^2 范围内。可

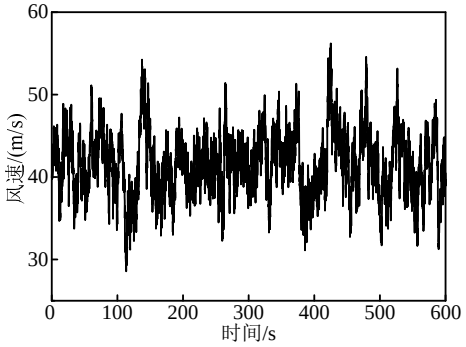


图 2　暴风风况风速时程曲线

Fig.2　Wind velocity time history curve of wind storm

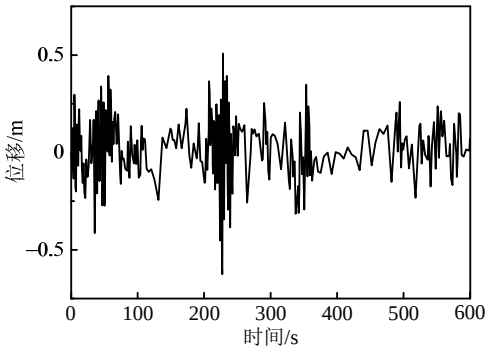


图 3　暴风风况塔顶位移时程曲线

Fig.3　Time history curve at top of tower

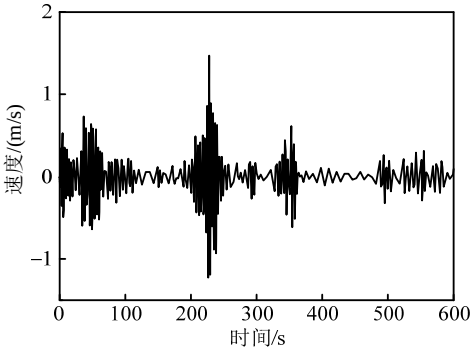


图 4　暴风风况塔顶速度时程曲线

Fig.4　Velocity time history curve at top of tower

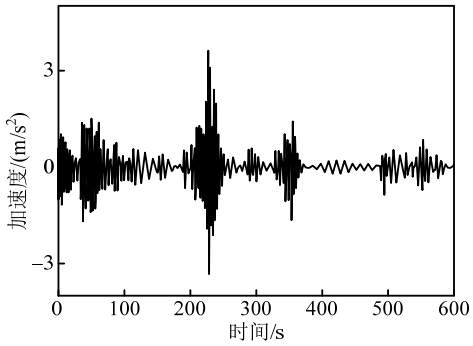


图 5 暴风风况塔顶加速度时程曲线

Fig.5 Acceleration time history curve at top of tower

以发现暴风风况下风力发电机塔筒顶部动力响应具有较强的随机性和波动性，且波动值较大。最大位移响应值为–0.626 m，最大速度响应值为 1.468 m/s，最大加速度响应值为 3.628 m/s^2。

4 风力发电机塔筒风振响应控制研究

4.1 TMD 对风力发电机塔筒减振控制的原理

TMD 对结构进行振动控制的机理是：当结构在外部激励作用下产生振动时，TMD 控制装置率先进入工作状态。TMD 系统产生的惯性力反作用到结构上，调谐这个惯性力，耗散外部激励输入结构的振动能量，减小结构的振动反应，使结构的振动得到抑制。

4.2 TMD 的形式与布置原则

总的来说，减振结构阻尼器的布置应尽量使减振结构形成均匀合理的受力体系。本文采用 TMD 对风力发电机塔筒的风振响应进行减振控制，将 TMD 安置于风力发电机塔筒顶部，通过两端的法兰带用螺栓现场连接。TMD 减振控制装置形式主要有支撑式和悬吊式两种，本文采用的形式为支撑式如图 6 所示。

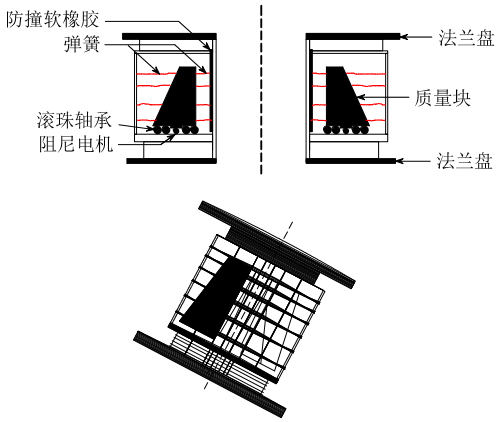


图 6 调谐质量阻尼减振装置的形式

Fig.6 Form of tuned mass damper

4.3 TMD 参数确定与位置选取

考虑到高耸结构的风振反应以第一阵型为主，则对风力发电机塔筒的风振控制研究主要是针对其第一阵型进行振动控制[11]。本文将 TMD 安装于风力发电机塔筒的顶部 73 m 高度处，共采用 5 种不同的 TMD 质量比减振方案[12]，即质量比分别为 1%、2%、3%、4%、5%。利用 ABAQUS 有限元软件，对风力发电机塔筒进行暴风风况下风振响应控制研究。图 7~图 9 分别为减振后风力发电机塔筒顶部的位移、速度、加速度时程曲线，表 1 为减振前后塔顶动力响应峰值对比。

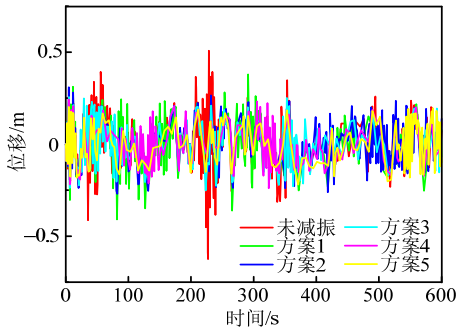


图 7 风力发电机塔顶位移减振时程曲线

Fig.7 Vibration reduction time history curve of wind turbine tower

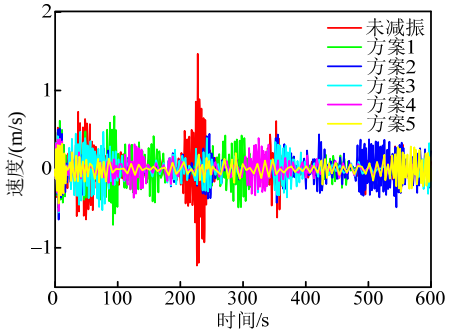


图 8 风力发电机塔顶速度减振时程曲线

Fig.8 Vibration time history curve of top speed of wind generator

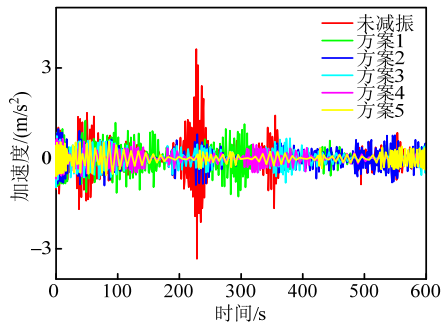


图 9 风力发电机塔顶加速度减振时程曲线

Fig.9 Time history curve of acceleration and vibration of wind turbine tower

表 1　暴风风况减振前后塔顶动力响应峰值

Table 1　Peak dynamic response of tower before and after storm

方案	位移/m		速度/(m/s)		加速度/(m/s^2)	
未减振	–0.626	0.508	–1.226	1.468	–3.331	3.628
方案 1	–0.409	0.379	–0.710	0.675	–1.268	1.254
方案 2	–0.271	0.310	–0.642	0.519	–0.958	0.978
方案 3	–0.251	0.257	–0.550	0.476	–0.958	0.745
方案 4	–0.240	0.243	–0.535	0.397	–0.663	0.658
方案 5	–0.219	0.203	–0.437	0.324	–0.581	0.610

由图 7~图 9 和表 1 可知，随着 TMD 质量比的增加，风力发电机塔筒顶部最大位移响应由–0.626 m 降至–0.219 m，减振效果达 64.9%；最大速度响应由 1.468 m/s 降至 0.324 m/s，减振效果达 77.9%；最大加速度响应从 3.628 m/s^2 降至 0.610 m/s^2，降幅效果达 83.2%。可以发现减振后风力发电机塔筒顶部的动力响应时程曲线较未减振状况下有明显改善。

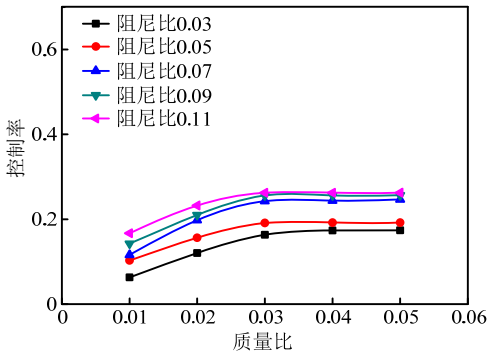
4.4　TMD 各参数对减振效果的影响分析

为了分析与研究 TMD 各参数对风力发电机塔筒在风荷载作用下的风振响应控制效果的影响，定义塔筒顶部位移变量控制率 $\eta=(D_S-D_T)/D_S$，D_S、D_T 分别为风力发电机塔筒未设置 TMD 减振装置和受到减振装置控制时塔筒顶部位移变量峰值。以塔筒顶部位移变量控制率作为标准，分析了 TMD 各参数对风力发电机塔筒减振效果的影响(参数选取见表 2)。图 10 给出了 TMD 在不同质量比、阻尼比和频率比情况下对风力发电机塔筒顶部位移控制率的影响。

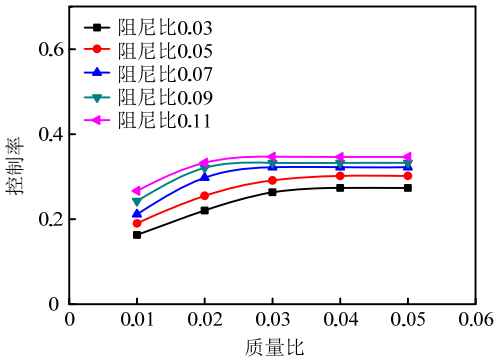
表 2　TMD 参数选取

Table 2　Parameter selection of TMD

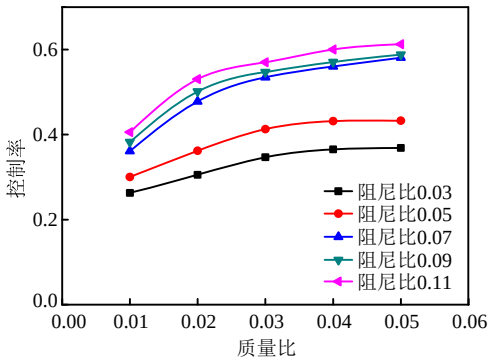
参数	质量比/(%)	频率比	阻尼比
1	1	0.8	0.03
2	2	0.9	0.05
3	3	1.0	0.07
4	4	1.1	0.09
5	5	1.2	0.11



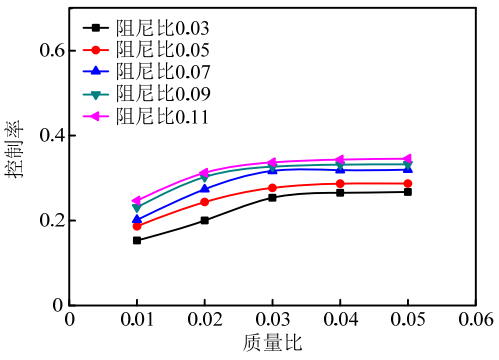
(a) 频率比 0.8



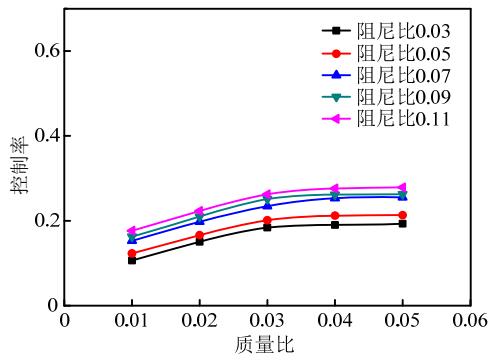
(b) 频率比 0.9



(c) 频率比 1.0



(d) 频率比 1.1



(e) 频率比 1.2

图 10　不同质量比、阻尼比和频率比对控制率的影响

Fig.10　Influence of different mass ratios, damping ratios and frequency ratios

由图 10 可以发现：

1) TMD 质量比对风力发电机塔筒风振响应的

控制有很大影响，在 TMD 阻尼比和频率比为定值的情况下，随着 TMD 质量比的增加，风力发电机塔筒顶部位移变量的控制率逐渐增大。当 TMD 质量比超过 3%时，TMD 对风力发电机塔筒的减振效果趋于稳定。为保证风力发电机塔筒的风振响应控制效果，本文建议质量比可取为 3%。

2) 在 TMD 质量比和频率比不变的情况下，风力发电机塔筒风振响应控制率随着 TMD 阻尼比的增加而增加。由于阻尼比从 0.05 增加至 0.07 时控制率增幅明显，本文建议阻尼比可取为 0.07。

3) 在 TMD 质量比和阻尼比不变的情况下，随着频率比的增加，控制率先增加后减小，在 TMD 的频率比接近 1 时控制率最大。建议风力发电机塔筒 TMD 的频率比取 1 为宜。

5 结论

(1) 暴风工况下，风力发电机塔筒顶部动力响应较大且具有较大的波动性，塔筒顶部位移响应峰值超出容许的范围；

(2) TMD 应用于风力发电机塔筒对塔筒的风振响应具有较好的减振效果，减振后风力发电机塔筒顶部的动力响应较未减振状况下明显变的平缓。

(3) TMD 各参数对风力发电机塔筒风振响应的控制有很大影响，总体上，随着 TMD 质量比和阻尼比的增加，控制率由小变大，最后趋于稳定；随着 TMD 阻尼比的增大，控制率先增大再减小，在 1 附近取得最大值。在建议针对风力发电机塔筒 TMD 风振响应减振控制的质量比取 3%，阻尼比取 0.07，频率比取 1。

参考文献：

[1] 杨校生. 风力发电机组设计导则[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 46.
Yang Xiaosheng. The Wind Turbine Design Guidelines [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011: 46. (in Chinese)

[2] Chou J-S, Tu W-T. Failure analysis and risk management of acollapesd large wind turbine tower [J]. Engineering Failure Aanlysis, 2011, 18(1): 295－313.

[3] 张彪. 强风作用下大功率风力机的振动响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
Zhang Biao. Research on vibration response of high power wind turbine under wind load [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)

[4] 卞建宾. 保型振动控制在建筑加固中的应用研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
Bian Jianbin. Protect shape vibration control in the reinforcement of building the application and research of [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[5] 滕军. 结构振动控制的理论、技术和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 62－66.
Teng Jun. Theory, technology and method of structural vibration control [M]. Beijing: Science Press, 2009: 62－66. (in Chinese)

[6] GB50135-2006, 高耸结构设计规范[S]. 北京: 中国建工出版社, 2006.
GB50135-2006, Code for high slender structure design [S]. Beijing: China Construction Press, 2006. (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. The TMD control of structure’s wind vibration and Seismic response [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese)

[8] Yao J T P. Concept of structure control [J]. Journal of Structure Division ASCE, 1972, 98(7): 56－67.

[9] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 93－96.
Zhuang Zhuo. Based on ABAQUS of finite element analysis and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 93－96. (in Chinese)

[10] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(1): 194－211.

[11] 周云. 结构风振控制的设计方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 9.
Zhou Yun. Design method and application of wind induced vibration control for structures [M]. Beijing: Science Press, 2009: 9. (in Chinese)

[12] 宫兆宇. 调谐质量阻尼减振技术在风力发电机塔架中的研究与应用[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2010: 39.
Gong Zhaoyu. Tuned mass damping technology in wind generator tower in the research and application of [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010: 39. (in Chinese)