

矩形钢管混凝土束风机塔筒风振特性研究

高翔^{1,2}, 郭宏超^{1,2}, 郭品彰², 梁刚^{1,2}

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:随着风电资源优势区开发逐渐饱和, 风电开发的重心开始向风资源条件相对恶劣的低风速地区转移, 分布式、大功率、高塔筒和长叶片已经成为风电行业发展趋势。基于此提出了一种新型的矩形钢管混凝土束风机塔筒, 该塔筒由矩形钢管混凝土束拼接而成, 具有强度高、刚度大和耗能能力强的优点。为研究该塔筒结构的风振响应特性, 选用 Kaimal 脉动风速功率谱, 采用谐波合成法模拟风荷载时程曲线, 对其进行了动力时程分析, 并计算了风振系数及等效静力风荷载。结果表明: 该新型塔筒在额定风速下位移塔顶位移最大值为 911.84 mm, 对应的水平位移角为 1/154, 符合规范要求。塔筒各构件的强度较好, 且具有较大的安全富余度。基于位移等效的阵风荷载因子法计算得到的风振系数值较低; 在惯性风荷载法计算得到的等效静力风荷载作用下, 结构位移、基底剪力与结构随机振动分析得到的基本一致。

关键词: 风机塔筒; 矩形钢管混凝土束; 风振响应; 动力时程分析; 等效静力风荷载

中图分类号: TU511.3; TU973.2⁺13

文献标识码: A

Study on wind vibration characteristics of rectangular concrete filled steel tube bundle wind turbine tower

GAO Xiang^{1,2}, GUO Hongchao^{1,2}, GUO Pinzhang², LIANG Gang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the development of wind power resource advantageous areas gradually saturated, the focus of wind power development has shifts to low wind speed areas with relatively poor wind resource conditions. Distributed, high power, high tower and long blades have become the trend in the wind power industry. Based on the above, a new rectangular concrete filled steel tube bundle wind turbine tower is proposed. The tower is made of rectangular concrete filled steel tube bundles, which has the advantages of high strength, rigidity and energy consumption capacity. To study the wind vibration response characteristics of this tower structure, the Kaimal pulsating wind speed power spectrum was chosen and the wind load time curve was simulated using the harmonic synthesis method to carry out the dynamic time analysis. Wind vibration coefficients and equivalent static wind loads were calculated for the tower. The results show that the maximum displacement of the top of this new tower at rated wind speed is 911.84 mm, which corresponds to a horizontal displacement angle of 1/154 and meets the code requirements. The tower components are of good strength and have a large safety margin. The wind vibration coefficient obtained by the displacement-equivalent gust load factor method is lower. Under the equivalent static wind loads calculated by the inertial wind load method, the structural displacements and basal shear forces are basically the same as those obtained from the structural random vibration analysis.

收稿日期: 2022-10-01; 修回日期: 2023-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978571); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-199, 2022SF-121); 陕西省杰出青年基金项目(2021JC-41); 陕西省自然科学基金项目(2020JQ-628); 西安理工大学优硕种子基金项目(310-252082110); 中国博士后科学基金项目(2022M712562)

作者简介: 高翔(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构及结构抗震研究。E-mail: gaoxiangskd@163.com

通讯作者: 郭宏超(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢结构及结构抗震研究。E-mail: ghc-1209@163.com

Key words: wind turbine tower; rectangular concrete filled steel tube bundle; wind-induced response; dynamic time history analysis; equivalent static wind load

0 引言

我国风电资源优势区开发逐渐饱和,风电开发的重心开始向风资源条件相对恶劣的低风速地区转移。叶片越来越长、塔筒高度越来越高,已经成为风电发展的主要趋势。常见的纯钢塔筒随着高度的增加,抗弯刚度略显不足,容易失稳破坏,同时钢塔筒作为高柔结构,摆幅大、涡激振动和疲劳等问题突出。塔筒高度的增加同样带来塔筒制造、运输吊装及施工的难度和成本增加。基于此,本文提出了一种新型塔筒结构形式——矩形钢管混凝土束风机塔筒。该风机塔筒由多片矩形钢管混凝土束焊接组合成塔筒单元,环向由 4 个塔筒单元构成一个塔段,每个塔筒单元竖向和横向均通过双盖板穿芯螺栓连接而成。钢管混凝土结构^[1]利用钢管对混凝土的套箍作用,提高了混凝土的抗压性能,又利用混凝土延缓了钢管的屈曲,具有承载力高、刚度大和抗震性能好等优点。此外,新型塔筒还可实现装配化,钢管混凝土和焊接部件均可在工厂完成预制,保证构件的加工质量,也简化了现场施工难度,缩短了建设周期,节省了成本。

目前国内外学者关于钢管混凝土的轴压、压弯和抗震等性能已开展了较为全面的研究^[2-6],但在风电塔筒这类高耸构筑物的应用较少。例如王宇航等^[7]提出了装配式钢板-混凝土组合塔筒,并研究了双钢板-混凝土组合塔筒中钢板的轴压稳定承载性能。李斌等^[8-9]、高春彦等^[10]则研究了格构式钢管混凝土风电塔架的相关力学性能以及风振响应。塔筒作为高耸结构,应对其在风场作用下的力学性能进行研究,确保结构的安全性并指导结构的优化设计。王文达等^[11]对中空夹层钢管混凝土(concrete filled double skin steel tubes, CFDST)塔筒与和其承载力相等的纯钢塔筒的风振响应进行对比分析,发现 CFDST 塔筒抗变形能力良好,稳定性好。黄帅等^[12]、楚晨辉^[13]、刘香等^[14]通过建立风力发电机的有限元模型,对其进行脉动风速谱下风致动力响应分析,结果表明我国建筑规范中的相关规定偏于保守。黄帅等^[12]的研究还表明常规风荷载作用下的应力和位移的数值仿真结果与监测结果吻合较好。柯世堂等^[15-16]建立了考虑 SSI 效应的风力机一体化模型,通过分析认为 SSI 效应对风力机结构的风振响应有较大影响。李峰等^[17]通过风洞试验得到了格构式塔架横向向脉动风荷载及脉动风速的相干函数并分析比较了脉动风荷载及脉动风速的相干函数特点与变化规律。

为了更好地了解本文提出的矩形钢管混凝土束风机塔筒风振特性,对其在风场作用下的力学性能进行研究,确保结构的安全性并指导结构的优化设计,为矩形钢管混凝土束在风电领域的推广应用提供参考。

1 塔筒有限元建模及模态分析

1.1 有限元模型的建立

矩形钢管混凝土束风机塔筒构造如图 1 所示,本文以功率为 4.5 MW 的水平轴风力发电机为研究对象,风力机基本参数如表 1 所示。采用 ABAQUS 有限元软件建立塔筒模型,混凝土强度等级为 C50,钢材选用 Q355 钢。塔筒横截面为正八边形,每条边由 5 个矩形钢管混凝土束连接而成,塔筒总高度为 140 m,塔筒截面随高度增加而不断变小。各段塔筒截面尺寸的详细信息如表 2 所示,塔筒结构示意图如图 2 所示。

考虑上部结构质量对塔筒自振频率的影响,将塔筒上部结构简化为中心与上部结构质心重合的集中质量点^[10]。通过定义耦合约束连接质量点与塔筒顶部。风轮旋转产生的气动荷载通过计算得到,直接作用于质量点,计算过程见 2.2 节。塔筒在设计时按照等强原则考虑,即要求构件的破坏早于连接节点,因此在建模过程中直接对各段塔筒进

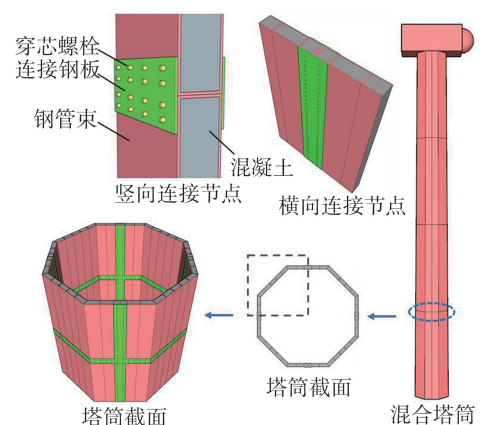


图 1 矩形钢管混凝土束风机塔筒示意图

Fig. 1 Schematic of rectangular concrete filled steel tube bundle wind tower

行整体建模,不考虑连接节点。塔底与基础固定,不考虑塔筒基础及土体与结构之间的相互作用。模型中钢板、混凝土均采用 C3D8R 实体单元,钢材的弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比取 0.3。混凝土采用文献[18]提出的核心混凝土等效受压应力-应变曲线,泊松比取 0.2。定义钢管与混凝土间的接触为“面面接触”,法向采用硬接触,切向采用摩擦接触,取摩擦系数为 0.25,对风机塔筒有限元模型底部施加完全固定约束,顶部无约束,仅将塔筒顶面与质点耦合,以便施加荷载。

表 1 风力机基本参数

Table 1 Basic parameters of wind turbine generator

参数	数值	参数	数值
适用风区	IEC II 类	额定功率/kW	4 500
转轮直径/m	155	额定转速/(r/min)	10.2
轮毂高度/m	140	叶片重量/(kg/片)	19 200
额定风速/(m/s)	10	轮毂重量/kg	42 400
切入风速/(m/s)	4	机舱重量/kg	27 200
切出风速/(m/s)	20	极端风速/(m/s)	42.5

表 2 塔筒尺寸参数

Table 2 Dimension parameters of wind turbine tower

标高范围/m	高 H /m	边长 L /mm	墙肢总厚度 b /mm	钢管壁厚 t /mm
[0, 40)	0	2 600	240	14
	40	2 400		
[40, 80)	80	2 200	220	12
[80, 120)	120	2 000	200	12
[120, 140]	140	1 900	200	10

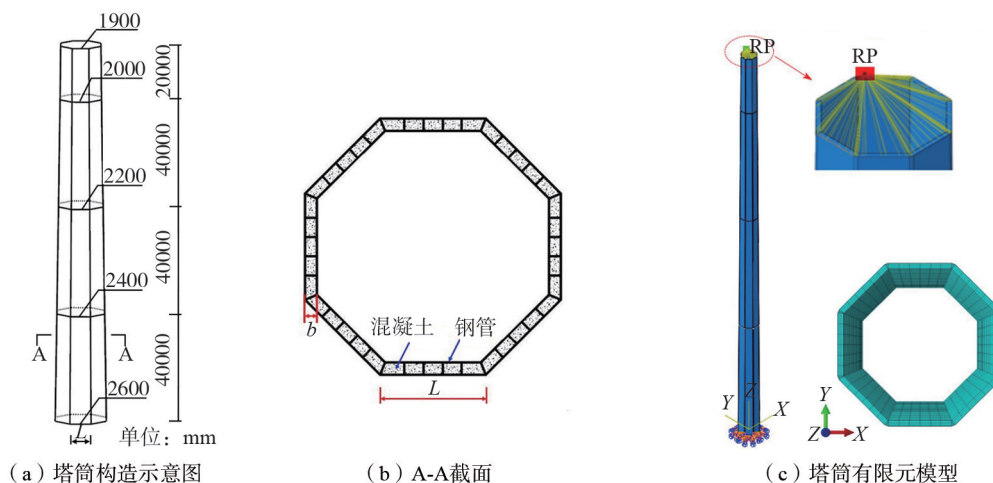


图 2 塔筒结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of wind turbine tower

1.2 模态分析

采用 ABAQUS 中的 Lanczos 法计算塔筒的模态振型。风机塔筒等高耸结构的振动主要以低阶模态频率控制,塔筒的前 4 阶模态振型,如图 3 所示。模态频率如表 3 所示。塔筒的第一阶振型为塔顶沿前后方向(沿 X 轴)摆动,第二阶振型为塔顶沿左右方向(沿 Y 轴)摆动,第三阶振型为左右方向弯曲,第四阶振型为前后弯曲。塔筒的一、二阶模态频率接近,三、四阶模态频率接近,这与塔筒关于 XOZ 平面对称一致。由风轮转动的 $1P$ (P 为风轮振动频率)和 $3P$ 范围分别为 $0.11 \sim 0.17$ Hz、 $0.33 \sim 0.51$ Hz。结合表 3 可知,塔筒前 4 阶模态频率与 $1P$ 、 $3P$ 的最小差值为 31.82%,表明塔筒在正常工作时的转动频率不会与结构固有频率发生共振。

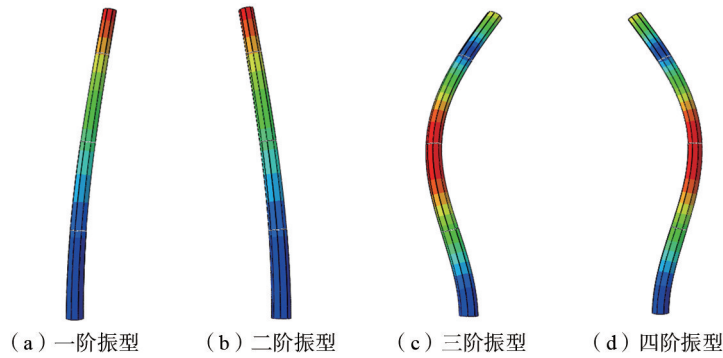


图 3 塔筒前 4 阶模态振型

Fig. 3 The first four modes of wind turbine tower

表 3 塔筒前 4 阶振型频率

Table 3 Frequency of the first four vibration modes of the tower

振型	频率/Hz	最小差值/%		振型描述
		与 1P	与 3P	
一阶	0.224 98	32.34	31.82	前后摆动
二阶	0.224 98	32.34	31.82	左右摆动
三阶	1.238 20	628.35	142.78	左右弯曲
四阶	1.238 30	628.41	142.80	前后弯曲

2 脉动风模拟及荷载计算

2.1 脉动风速时程模拟

脉动风速时程可用具有各态历经性的零均值高斯平稳随机过程来描述^[19]。脉动风速功率谱是描述脉动风概率分布特性的重要指标。本文采用 Kaimal 脉动风速功率谱来模拟顺风向脉动风速,其表达式为

$$\begin{cases} S_v(f) = 200(v^*)^2 \frac{x}{f(1 + 50x)^{5/3}} \\ x = \frac{fz}{\bar{v}(z)}, f = \frac{\omega}{2\pi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_v(f)$ 为脉动风速功率谱; f 为脉动风速频率; $\bar{v}(z)$ 为高度为 z 处的平均风速。考虑竖直相关性相关系数的经验表达式为

$$\rho_{ij} = \exp\left(-\frac{|z_i - z_j|}{v_{10}}\right) \quad (2)$$

式中, z_i 、 z_j 分别为 i 、 j 两点的高度。则风速互功率谱为

$$S_{ij}(n) = \rho_{ij} S_v(n) \quad (3)$$

本文脉动风速模拟的总时长 $T=10 \text{ min}$, 步长 $\Delta t=0.05 \text{ s}$, 地面粗糙度指数 $\alpha=0.2$, 参考高度为轮毂高度, 即 $z_r=140 \text{ m}$, 参考风速取轮毂处的平均风速, 即 $V_r=V_{hub}$ 。

为更好的与目标谱吻合, 通过 Matlab 编写代码实现 AR 线性滤波法与谐波合成法模拟脉动风速时程, AR 模型阶数取 5。采用 2 种方法计算得到的 140 m 处脉动风速功率谱与目标谱的对比图如图 4 所示。由图可知, 2 种方法模拟得到的脉动风速与目标谱的吻合程度都较好, 尤其是在高频段吻合程度最好。在低频段, 谐波合成法与目标谱的误差明显小于线性滤波法。因此本文采用谐波合成法模拟所有工况下塔筒的脉动风速。限于篇幅, 仅给出谐波合成法模拟的 140 m 处脉动风速时程, 如图 5 所示。

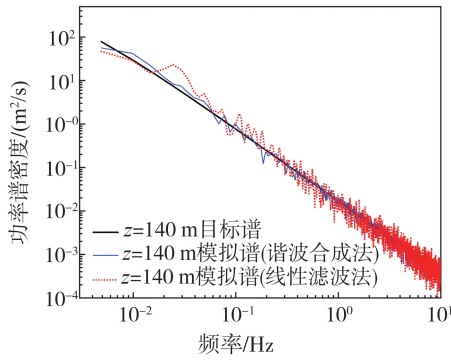


图4 140 m处脉动风模拟风谱与目标谱对比

Fig. 4 Comparison between the simulated wind spectrum and the target spectrum of fluctuating wind at 140 m

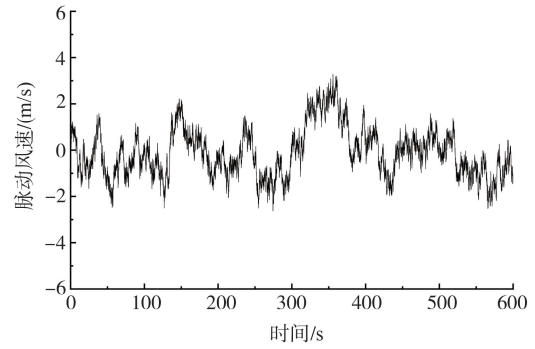


图5 谐波合成法模拟的140 m处脉动风速时程

Fig. 5 Pulsating wind speed time history at 140 m simulated by harmonic synthesis

2.2 塔筒荷载计算

风力发电机工作环境复杂导致其所受荷载情况也很复杂,主要包括自身所受风荷载、上部结构传至塔筒顶部的重力荷载和偏心弯矩,以及来自风轮旋转产生的气动荷载等,风机塔筒受力情况计算示意图如图6所示,其中 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 分别为将塔筒顶部沿3个方向的合力和合力矩。塔筒顶部受到的荷载均作用于集中质量点处。

将塔筒视为多自由度质点体系,如图6(b)所示,对塔身风荷载进行简化。沿塔筒高度取20个计算点,每7 m一个,将塔身所受风荷载简化为计算点处的集中荷载。每个计算节点的风荷载 F_{xi} 用式(4)计算,得

$$F_{xi} = \frac{1}{2} \rho v_i^2 A_i \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度; v_i 为第*i*个计算节点的瞬时风速; A_i 为第*i*段塔筒的迎风面积。

叶片旋转平面上受到的水平推力为

$$F_x = C_f \rho V^2 A \quad (5)$$

式中: C_f 为推力系数; V 为轮毂处风速; A 为风轮的扫掠面积。

由于风向变化引起的偏转力 F_y ,其表达式为

$$F_y = F_x \cos \delta \sin \delta \quad (6)$$

式中 δ 为风速与风轮轴线间的夹角。

由于风速沿叶片高度分布不均而产生的仰俯力矩 M_{y1} 为

$$M_{y1} = \frac{4}{27} \frac{\rho}{B} \pi R^3 (V_2^2 - V_1^2) \quad (7)$$

式中: B 为叶片数量; V_1 、 V_2 分别为叶片扫掠中心下、上叶片2/3半径处的风速; R 为风轮直径。

叶轮产生的偏转力矩是塔架扭矩的主要荷载,文献[11]将偏转力矩计算公式简化为

$$M_{z1} = 0.23 \rho V_p^2 \pi R^2 e \quad (8)$$

式中 e 为风轮中心距塔筒轴线距离。

转矩 M_{x1} 可用式(9)计算:

$$M_{x1} = \frac{P}{n} \quad (9)$$

式中: P 为风力发电机功率; n 为风轮转速。

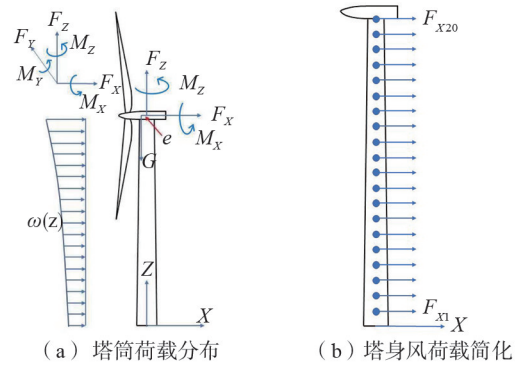


图6 塔筒荷载计算示意图

Fig. 6 Calculation diagram of the load of wind turbine tower

3 塔筒风振响应分析

3.1 阻尼设置

风力发电机的结构阻尼取值大多在 0.2%~1.5% 之间^[20],本文钢管混凝土束剪力墙的结构阻尼比取 1%,采用有限元软件中的 Rayleigh 阻尼设置。假设结构质量矩阵和刚度矩阵的线性组合,表达式如式(10)~式(12)所示。通过推导可得到 Rayleigh 阻尼与频率的关系,为

$$C = \eta M + \delta K \tag{10}$$

$$\xi = \frac{\eta}{2\omega_1} + \frac{\delta\omega_1}{2} = \frac{\eta}{2\omega_2} + \frac{\delta\omega_2}{2} \tag{11}$$

$$\eta = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}\xi, \delta = \frac{2}{\omega_1 + \omega_2}\xi \tag{12}$$

式中: M 、 K 分别为质量矩阵和刚度矩阵; η 、 δ 为阻尼系数,由模态分析第一阶、第二阶自振频率 ω_1 、 ω_2 及阻尼比 ξ 确定,计算得 $\eta=0.02392$, $\delta=0.00218$ 。

风力发电机运行过程中,由叶片旋转产生的气动阻尼力对塔筒的振动具有很大影响,参考文献[21],阻尼比 ξ_{aero} 可定义为

$$\xi_{aero} = \frac{c_d}{c_{cr}} \tag{13}$$

式中, c_{cr} 为系统临界阻尼, $c_{cr}=2m\omega_n$,其中 m 为单自由度系统的质量, ω_n 为固有频率,可通过求解塔架固有动力特性获得; c_d 为阻尼系数,与结构运动速度相关,其表达式为

$$c_d = \rho V c C_{L\alpha} / 2 \tag{14}$$

式中: ρ 为空气密度; V 为风速; c 为截面弦长; $C_{L\alpha}$ 为升力系数与入流角的函数关系^[21]。整个风轮的气动阻尼比^[21]为

$$\xi_{aero} = \frac{N\rho\Omega}{4M_0\omega_n} \int_{R_{root}}^R C_{L\alpha} c(r) r dr \tag{15}$$

式中: N 为叶片数目; Ω 为叶轮转速; R 为风轮旋转平面半径; R_{root} 为叶根处风轮半径; M_0 为塔架模态质量; $c(r)$ 为叶片半径 r 处的翼型弦长。

计算求得在切入风速至切出风速之间,来自整个风轮的气动阻尼比如图 7 所示。由图可知,在风力机正常工作时,顺风向的气动阻尼比位于 6.0%~7.4% 之间。气动阻尼发生在塔筒定顶部通过轮毂传至塔筒,因此在有限元模型中通过在集中质量点处设置弹簧来模拟顺风向气动阻尼^[20],如图 8(a) 弹簧的阻尼系数与结构阻尼系数相等。将气动阻尼比 ξ_{aero} 、塔筒模态质量 M_0 、塔筒一阶固有频率 ω_1 代入式(13)即可求得阻尼系数 c_d 。有限元模型中气动阻尼的模拟如图 8(b) 所示。

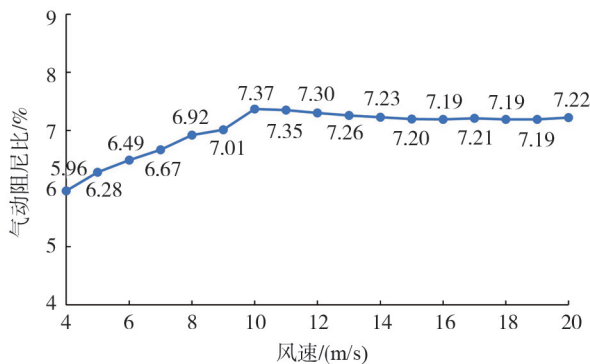


图 7 顺风向气动阻尼比

Fig. 7 Aerodynamic damping ratio along wind

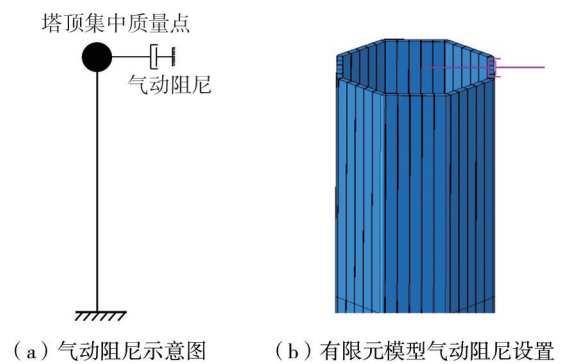


图 8 气动阻尼模型

Fig. 8 Aerodynamic damping model

3.2 顺风向风振响应分析

额定风速下塔筒顶部位移时程曲线如图 9 所示。塔筒的风致振动形式为“抖振”,变化范围在 500~900 mm

之间。额定风速下塔筒不同高度处的位移时程曲线如图 10 所示。塔筒位移随高度的增高呈现出抛物线式增大,沿高度方向呈“弯曲型”。塔筒顶端位移统计值随风速的变化趋势如图 11 所示。GB 50135—2019《高耸结构设计标准》^[22]规定,对于以风荷载为主的自立式塔,按非线性分析时,钢结构塔的水平位移角限值为 1/50,混凝土塔为 1/100;T/CECS 546—2018《钢管混凝土束结构技术标准》^[23]规定,钢管混凝土束剪力墙结构按弹塑性方法计算的风荷载作用下的最大水平位移角限值为 1/100。本文中风力发电机正常工作时,钢管混凝土束风机塔筒顶端位移的最大值和均值均在额定风速下最大,分别为 911.84 mm 和 715.49 mm,塔筒的最大水平位移角为 1/154,满足规范要求,表明结构刚度较好。风轮轴向推力是塔筒顶部产生位移的主要原因,当风速小于额定风速时,随着风速的增加使得风轮轴向推力增大,塔筒顶端位移的均值呈现抛物线式增加的趋势;而当风速大于额定风速时,气动阻尼对塔筒顶部位移的影响愈发明显,随着风速增加阻尼力也增大,使得塔筒顶端位移的均值随着风速的增大逐渐减小。塔筒顶部最大位移与位移均值的变化规律相似,但随着风速的增大,脉动风湍流强度不断增大,使塔架振动的波动性增强,最终导致顶端位移最大值与均值的差值不断增加。塔筒顶端位移均方根随风速增加呈线性增加。

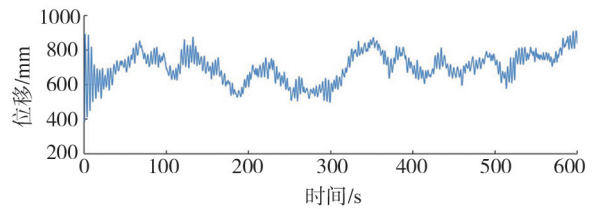


图 9 额定风速下塔筒顶部位移时程曲线

Fig. 9 Displacement time history curves of wind turbine tower top at rated wind speed

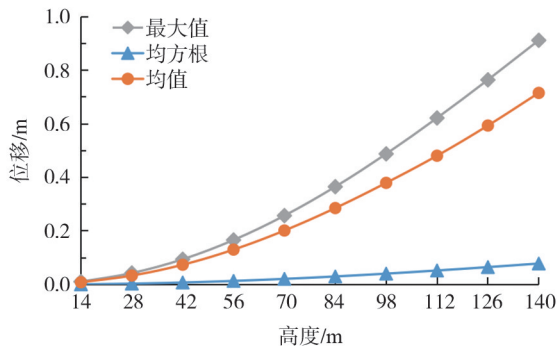


图 10 塔筒不同高度处位移统计值

Fig. 10 Displacement statistics at different heights of wind turbine tower

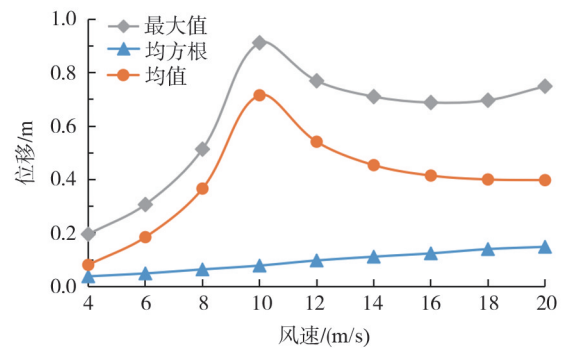


图 11 塔筒顶端位移统计值

Fig. 11 Statistical values of the top displacement of wind turbine tower

3.3 结构内力响应

额定风速下钢管混凝土束风机塔筒的应力云图,如图 12 所示。塔筒的应力随高度上升而不断降低,在塔筒变截面处未发生应力突变,表明塔筒沿高度方向刚度分布均匀。钢管最大应力发生在底部受压区,为 95.49 MPa,混凝土的最大拉应力位于迎风面 100 m 高度处,拉应力值为 2.78 MPa,小于混凝土峰值拉应力 $\sigma_p = 3.41$ MPa。混凝土的受拉损伤主要集中在迎风面 100 m 以下处,最大损伤因子为 0.898,小于设定值 1。综上,风力机正常运行时,塔筒在风致振动过程中一直处于弹性状态,表明塔筒的强度较好,且有一定的安全富余度,在实际工程中可适当优化。

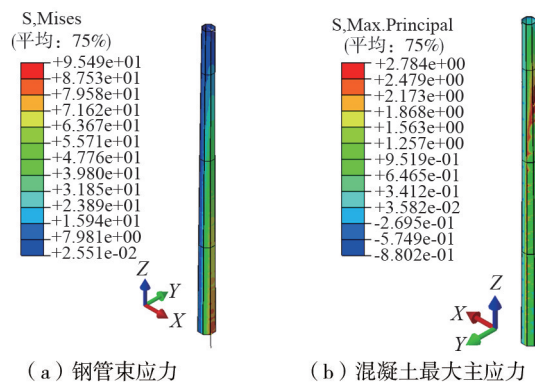


图 12 额定风速下塔筒内力云图

Fig. 12 Tower internal force cloud at rated wind speed

4 等效静力风荷载

采用阵风荷载因子法与惯性风荷载法计算得到的风振系数,如图 13 所示。由图可知,在高度低于 40 m

时,基于位移等效的阵风荷载因子法得到的风振系数大于惯性风荷载法计算得到的,40~60 m 高度处 2 种方法计算得到的风振系数相差不大,高度大于 60 m 时,惯性风荷载法计算得到的风振系数明显大于阵风荷载因子法,并且阵风荷载因子法得到的风振系数随高度变化较小,分析原因应该是由气动阻尼的存在大大降低了塔筒的振动幅度,使得塔筒各位置的位移均方根大幅降低,从而导致阵风荷载因子整体偏低。我国 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[24]与 GB 50135—2019《高耸结构设计标准》^[22]均采用惯性风荷载法计算风振系数,由图可知,2 本规范计算得到的风振系数随高度变化的规律一致,且 GB 50135—2019《高耸结构设计标准》^[22]计算得到的风振系数略微大于 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[24]。

作用于塔身的风荷载用式(16)计算,其表达式为

$$F = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 A \tag{16}$$

式中: β_z 为风振系数; μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; ω_0 为基本风压,取 0.35 kN/m²;A 为结构迎风面面积。

通过查阅规范和计算得到塔筒各计算节点处的风荷载参数,以此求得塔筒的等效静力风荷载,各参数及荷载取值如表 4 所示。将等效静力荷载作用于结构上,得到结构塔顶位移、基底剪力和弯矩如表 5 所示。基于阵风荷载因子法的等效静力风荷载作用下,顶部位移为 902.29 mm、基底剪力为 144 259.00 kN,较随机风振分析得到的结构响应小了 17.93%、9.08%,计算结果不安全,建议用阵风荷载因子法计算阻尼较大的结构时,可适当的增大位移峰值因子的取值。惯性风荷载法与结构随机振动分析得到的结构位移、基底剪力响应基本一致,但 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》与 GB 50135—2019《高耸结构设计标准》计算得到的基底弯矩分别比随机振动分析的提升了 3.76%和 8.19%。综上,GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》计算塔筒的等效静力风荷载较为准确,误差较小,GB 50135—2019《高耸结构设计标准》计算得到的塔底等效弯矩计算有一定的安全保障,而阵风荷载因子法计算偏小,建议适当的增大位移峰值因子的取值。

表 4 各参数及等效静力风荷载

Table 4 Parameters and equivalent static wind load

高度/m	μ_z	μ_s	$\omega_0/(kN/m^2)$	A/m ²	阵风荷载因子法		《建筑结构荷载规范》		《高耸结构设计标准》	
					G_z	P_k/kN	β_z	P_k/kN	β_z	P_k/kN
7	1.000	1.19	0.35	47.003	1.330	26.04	1.003	19.63	1.036	20.27
14	1.104	1.19	0.35	46.411	1.348	28.76	1.020	21.76	1.071	22.86
21	1.246	1.19	0.35	45.190	1.366	32.02	1.055	24.74	1.140	26.73
28	1.358	1.19	0.35	45.228	1.384	35.40	1.099	28.11	1.208	30.90
35	1.455	1.19	0.35	44.637	1.403	37.95	1.144	30.94	1.295	35.03
42	1.540	1.19	0.35	44.006	1.421	40.12	1.200	33.88	1.382	39.01
49	1.610	1.19	0.35	43.314	1.439	41.79	1.273	36.99	1.485	43.13
56	1.674	1.19	0.35	42.722	1.457	43.39	1.350	40.21	1.588	47.30
63	1.734	1.19	0.35	42.131	1.475	44.87	1.444	43.94	1.693	51.51
70	1.790	1.19	0.35	41.539	1.493	46.23	1.543	47.79	1.798	55.68
77	1.846	1.19	0.35	40.948	1.511	47.58	1.644	51.77	1.810	56.98
84	1.894	1.19	0.35	40.277	1.534	48.74	1.680	53.37	1.822	57.89
91	1.937	1.19	0.35	39.625	1.549	49.52	1.870	59.78	2.025	64.74
98	1.986	1.19	0.35	39.033	1.569	50.65	1.984	64.05	2.228	71.95
105	2.025	1.19	0.35	38.442	1.589	51.52	2.105	68.23	2.323	75.31
112	2.060	1.19	0.35	37.850	1.610	52.27	2.221	72.13	2.417	78.49
119	2.095	1.19	0.35	37.259	1.631	53.01	2.350	76.39	2.508	81.52
126	2.130	1.19	0.35	36.667	1.652	53.73	2.474	80.49	2.598	84.51
133	2.165	1.19	0.35	36.076	1.673	54.43	2.596	84.46	2.678	87.12
140	2.200	1.19	0.35	35.484	1.730	56.24	2.778	90.34	2.758	89.68

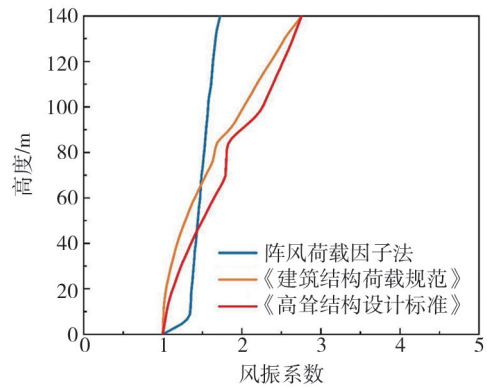


图 13 不同方法计算得到的风振系数

Fig. 13 Wind vibration coefficient calculated by different methods

表5 等效静力风荷载作用下塔筒响应

Table 5 Tower response under equivalent static wind load

参数	阵风荷载因子法	《建筑结构荷载规范》	《高耸结构设计标准》	风振分析
塔顶位移/mm	902.29	1080.66	1125.14	1099.44
塔底弯矩/(kN·m)	144259	164646	171681	158676
基地剪力/kN	19577.7	19586.8	19593.7	19546.8

5 结论

本文提出了一种新型的矩形钢管混凝土束风机塔筒,并研究了该塔筒结构的风振响应特性,主要结论如下:

1)塔筒在额定风速下的振动形式为抖振,塔筒顶端位移响应随平均风速的增大先增大再减小,随高度的增高而增大。

2)塔顶位移最大值为911.84 mm,对应的水平位移角为1/154,符合规范要求。塔筒各构件的强度较好,且具有较大的安全富余度,可进一步优化。

3)对于矩形钢管束混凝土风机塔筒等效静力风荷载的计算,建议采用惯性风荷载法。按照高耸结构设计规范取值偏于安全。

参考文献:

- [1] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 16-26.
CAI Shaohuai. Recent development of steel tube-confined concrete structures in China[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 16-26. (in Chinese)
- [2] 王冬花, 王静峰, 李贝贝, 等. 装配式钢管混凝土组合框架的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(8): 20-28, 48.
WANG Donghua, WANG Jingfeng, LI Beibei, et al. Experimental study on seismic behavior of prefabricated CFST composite frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(8): 20-28, 48. (in Chinese)
- [3] 杨绿峰, 解威威, 戎艳, 等. 矩形钢管混凝土受弯构件材料本构关系与失效判据研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 60-70.
YANG Lvfang, XIE Weiwei, RONG Yan, et al. Constitutive relations and failure criterion for rectangular concrete-filled steel tube members under pure bending[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 60-70. (in Chinese)
- [4] 王亚晋, 范重, 侯超, 等. 矩形钢管混凝土构件双向压弯剪受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊1): 257-263.
WANG Yajin, FAN Zhong, HOU Chao, et al. Mechanical behavior of rectangular CFST columns under biaxial compression-bending-shearing loading condition[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(S1): 257-263. (in Chinese)
- [5] CHITAWADAGI M V, NARASIMHAN M C, KULKARNI S M. Axial capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns-DOE approach[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4): 585-595.
- [6] JAVED M F, RAMLI SULONG N H, ALI MEMON S, et al. FE modelling of the flexural behaviour of square and rectangular steel tubes filled with normal and high strength concrete[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119: 470-481.
- [7] 王宇航, 王姝琪, 周绪红, 等. 钢板-混凝土组合塔筒钢板屈曲承载性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 419-426.
WANG Yuhang, WANG Shuqi, ZHOU Xuhong, et al. Research on buckling bearing capacity of steel plate in steel-concrete composite tower[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S2): 419-426. (in Chinese)
- [8] 李斌, 杨晓云, 高春彦. 风力发电机锥台型塔筒和格构式塔架的抗震性能试验研究与对比分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1): 161-166.
LI Bin, YANG Xiaoyun, GAO Chunyan. Experimental research and comparative analysis on seismic performance of wind turbine frustum tower drum and latticed tower[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1): 161-166. (in Chinese)
- [9] 李斌, 文昊天, 宫兆宇. 风力发电机塔筒风致响应分析与风振控制研究[J]. 工程力学, 2017, 34(增刊1): 134-138.
LI Bin, WEN Haotian, GONG Zhaoyu. Wind-induced response analysis and wind vibration control of a wind turbine tower drum[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S1): 134-138. (in Chinese)
- [10] 高春彦, 李斌, 史治宇. 钢管混凝土风电塔架节点非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1): 140-146.
GAO Chunyan, LI Bin, SHI Zhiyu. Nonlinear finite element analysis of concrete-filled steel tubular wind turbine tower joints[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1): 140-146. (in Chinese)
- [11] 王文达, 张丽丽, 纪孙航, 等. 中空夹层钢管混凝土风力机塔架风振性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 26-39.
WANG Wenda, ZHANG Lili, JI Sunhang, et al. Study on wind vibration performance of concrete-filled double skin steel tubular wind turbine tower[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 26-39. (in Chinese)

- [12] 黄帅, 宋波, 贺文山, 等. 考虑脉动风影响的风电塔风致动力响应数值分析与现场监测比较[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊1): 102-106.
HUANG Shuai, SONG Bo, HE Wenshan, et al. Numerical analysis of dynamic response and in-site monitoring of wind power tower considering the influence of the fluctuating wind load[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S1): 102-106. (in Chinese)
- [13] 楚晨晖. 风力发电机高塔系统动力特性及动力响应研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
CHU Chenhui. The dynamic characteristics and the dynamic response of wind generator tower[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [14] 刘香, 尹艳杰. 锥筒型塔架风振响应分析及风振系数研究[J]. 钢结构, 2015, 30(6): 51-54.
LIU Xiang, YIN Yanjie. Analysis and research of wind vibration response and wind vibration coefficient for cone tower[J]. Steel Construction, 2015, 30(6): 51-54. (in Chinese)
- [15] 柯世堂, 王同光, 胡丰, 等. 基于塔架-叶片耦合模型风力机全机风振疲劳分析[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 36-41.
KE Shitang, WANG Tongguang, HU Feng, et al. Wind-induced fatigue analysis of wind turbine system based on tower-blade coupled model[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 36-41. (in Chinese)
- [16] 柯世堂, 王同光, 曹九发, 等. 考虑土-结相互作用大型风力发电结构风致响应分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 18-25.
KE Shitang, WANG Tongguang, CAO Jiufa, et al. Analysis on wind-induced responses of large wind power structures considering soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 18-25. (in Chinese)
- [17] 李峰, 邹良浩, 梁枢果, 等. 格构式塔架横风向脉动风荷载空间相关性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(5): 25-31.
LI Feng, ZOU Lianghao, LIANG Shuguo, et al. Spatial correlation of across-wind wind fluctuating wind load of a lattice tower[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(5): 25-31. (in Chinese)
- [18] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005. (in Chinese)
- [19] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
HE Dexin. Wind engineering and industrial aerodynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [20] CHEN C, DUFFOUR P. Modelling damping sources in monopile-supported offshore wind turbines[J]. Wind Energy, 2018, 21(11): 1121-1140.
- [21] 郭洪澈, 李钢强, 刘雄, 等. 气动阻尼对海上风力机筒形塔架的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(8): 1450-1457.
GUO Hongche, LI Gangqiang, LIU Xiong, et al. Influence of aerodynamic damping on tubular tower of offshore horizontal axis wind turbines[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(8): 1450-1457. (in Chinese)
- [22] GB 50135—2019 高耸结构设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
GB 50135—2019 Standard for design of high-rising structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [23] T/CECS 546—2018 钢管混凝土束结构技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
T/CECS 546—2018 Technical Standard for structures with concrete-filled multicellular steel tube walls[S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)
- [24] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)