

基于均匀设计的风力机塔架结构参数优化研究

郑玉巧, 和 哲, 张 璐, 潘永祥

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 针对大型水平轴风力机塔架结构优化过程中主要影响要素不显著问题,以塔架塔顶与机舱底座连接处为研究对象,采用均匀设计法对连接处2要素(厚度、高度)进行 $U_0(9^2)$ 静强度试验设计并进行数值仿真模拟。研究结果表明:塔架最大变形值与最大应力值与连接处2要素(厚度、高度)呈线性与双曲抛物面函数关系,其中高度变化较厚度变化对塔架的应力值变化影响更大,优化塔顶结构参数后比原塔架最大应力值减小0.89%,最大位移值减少0.22%,质量降低0.24%,该研究为风力机塔架多目标结构优化设计提供理论依据。

关键词: 风力机; 塔架; 结构优化; 计算机仿真; 静力分析

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

塔架作为风力机组的关键支撑结构,其结构性能是否可靠直接影响风力机的整机性能。为捕获更多的风能资源而导致塔架高度的不断增加^[1],势必带来风力机组成本的不断增长,直接影响风电企业的经济效益^[2]。因此,对塔架的设计提出了更高的要求。

传统的塔架设计通常采用试验-纠错的设计方法^[3],其经济性主要依赖于设计师的经验,具有主观随意性。因此采用现代设计方法对塔架进行优化设计,显得尤为重要^[4]。近年来有限元方法在工程优化领域不断应用。文献[5]基于有限元方法给出了1 MW塔架的最优原型。赵立新^[6]使用有限元方法对锥筒形塔架的分段厚度进行优化设计,使其整体结构更轻。一些智能算法也向工程优化领域不断应用,文献[7]综合多学科下的优化算法对SWT-3.6-107型海上风力机进行优化设计,使塔架整体质量减少12.1%。蔡新等^[8]采用多目标遗传算法及模糊优选方法对塔架进行全方位优化。而在塔架的众多优化方案中,对于优化模型中的主要影响要素研究较少。而主要影响要素作为构建目标函数的关键环节,直接影响优化过程中的速度与准确性。因此,本文以塔架顶部结构为研究对象,采用数论科学中的均匀设计方法,构建塔架整体

静强度与塔架顶部结构参数间的函数模型,并最终通过仿真实验验证优化结果,为塔架的多目标优化提供了理论依据。

1 理论方法简介

1.1 均匀设计方法

在结构优化时为了寻找最优解,必须进行大量的计算,尤其对于高耸型构件塔架的结构优化,计算速度和精度为优化计算的关注的焦点。

均匀设计(uniform design)为仅考虑试验点在试验范围内均匀散布的一种试验设计方法,亦在试验范围内选择最有效的试验点,通过对每个试验点进行试验,得到试验指标的观测值,然后对其进行数据分析,最后求得达到最优值的试验条件。目前已逐渐成为解决一些复杂工程优化问题的强有力工具。

与正交设计不同,均匀设计只考虑试验点在试验范围内的“均匀分散”,而不考虑“整齐可比”,它通过试验点“均匀散布”实现以最少的试验次数获得最多的信息,因而与正交设计相比其试验次数显著减少;尤其对于多因素多水平试验和系统模型完全未知的情况,均匀设计的优越性更加明显。本文研究的问题有2个因素,各因素均有9个水平,若采用正交设计需 $9^2=81$ 次,而均匀设计最少仅需9次。

收稿日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(51965034;51565028); 兰州市人才创新创业项目(2018-RC-25)

通信作者: 郑玉巧(1977—),女,博士、副研究员、硕士研究生导师,主要从事机械设计理论及方法方面的研究。zhengyuqiaolul@163.com

均匀设计以中心化 L_2 -偏差 CD_2 作为度量均匀性的指标,偏差 CD_2 越小说明均匀性越好。类似于正交设计,均匀设计是通过设计表来安排试验,均匀设计表有 2 类:1) $U_n(q^s)$; 2) $U_n^*(q^s)$, n 为试验次数, q 为水平数, s 为因素数,其中带有“*”的均匀设计表具有更好的均匀性,应优先选用。每个设计表对应其使用表供参考,根据确定的因素及其水平用户可以选择满足试验要求的设计表进行试验安排。本文所采用的均匀实验步骤如图 1 所示。

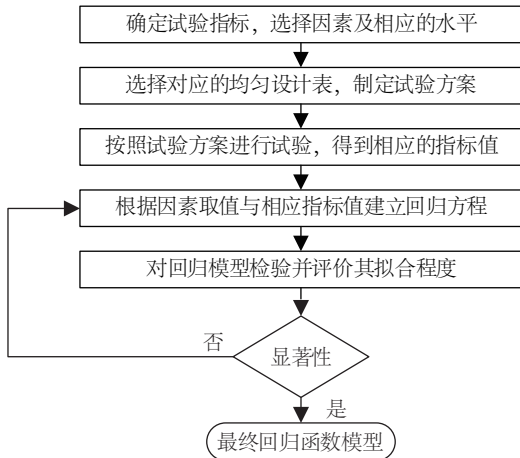


图 1 均匀设计法的基本步骤

Fig. 1 Basic steps of uniform design method

2 风力机塔架的结构参数试验设计

2.1 塔架的结构简介

采用某企业 2 MW 风力机塔架为研究对象,其中,风力机组风轮直径为 93 m,轮毂中心高度为 80 m。采用锥形圆筒式塔架,为方便生产和运输,塔架分为几段,不同塔架段之间通过法兰和螺栓连接,塔架及连接法兰材料采用 Q345。塔架直径由上而下从小变大。塔底直径为 4200 mm,塔顶直径为 3005 mm。

2.2 塔架的力学模型及受载概况

2.2.1 塔架的简化力学简介

据塔架结构特点及受载状况可将其简化为底端固定,顶端自由的悬臂梁模型,其力学性能分析时不仅要考虑塔顶叶轮、机舱的压力作用,而且考虑集中质量点(mass point)偏离塔架中心引起的偏心弯矩作用,塔架的简化力学模型如图 2 所示, $q(z)$ 为风压载荷, \vec{F}_y 为水平轴向推力, \vec{F}_z 为塔顶部件叶轮与机舱的总重力, \vec{M}_x 为机舱偏心矩和弯矩(侧向和轴向); H 为叶轮及机舱的中心距塔底的高度。

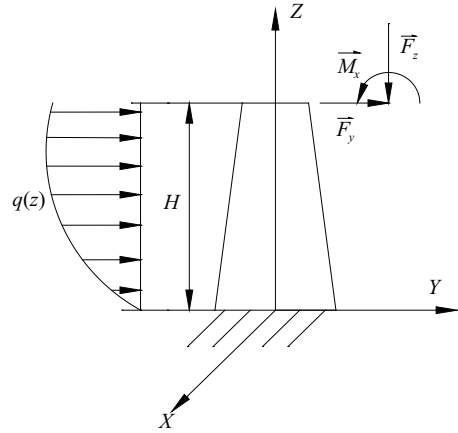


图 2 塔架的简化力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model of tower structure

2.2.2 塔架的受载及简化处理

塔架的载荷主要由 4 部分组成水平轴向推力、塔顶部件叶轮与机舱的总重力、塔顶的偏心矩和弯矩及风压的垂直大小分布。

1) 水平轴向推力计算公式。

$$\vec{F}_y = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^2 C_T \quad (1)$$

式中, ρ ——空气密度, kg/m^3 ; R ——叶轮半径, m ; V ——风力机的额定速度, m/s ; C_T ——风力机的推力系数。

2) 塔顶部件叶轮与机舱的总重力计算公式。

$$\vec{F}_z = (m_1 + m_2)g \quad (2)$$

式中, m_1 ——叶轮质量, kg ; m_2 ——机舱质量, kg ; g ——重力加速度, m/s^2 。

3) 偏心矩和弯矩(侧向和轴向) \vec{M}_x 可由水平轴向推力 \vec{F}_y 和总重力 \vec{F}_z 按式(3)计算。

$$\vec{M}_x = -\vec{F}_y H + \vec{F}_z e \quad (3)$$

式中, e ——总重力与塔架中心轴线的水平距离, m 。

4) 塔架风压大小分布计算公式。

$$q(z) = \frac{1}{2} \rho V_z^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{z}{H_0} \right)^{2\alpha} V_0^2 \quad (4)$$

式中, V_z ——塔架沿高度 z 轴方向的风速大小分布, m/s ; V_0 ——塔高 $H_0 = 10 \text{ m}$ 处测到的风速值, m/s ; α ——风切变指数,当 $\alpha = 0$ 时,表示风速随高度不发生变化。

采用 GH Blade 软件计算出塔架在 3 种极端风力工况下,即极端湍流模型 1.3、极端风速切变模型 1.5 和极端风速模型 6.2 的载荷情况如表 1 所示。

表1 极限载荷			
Table 1 Ultimate load			
参数	工况 1.3	工况 1.5	工况 6.2
$\vec{M}_x/\text{kN}\cdot\text{m}$	-4924.9	-2664.5	-2344.7
$\vec{M}_y/\text{kN}\cdot\text{m}$	-116.2	583.7	876.2
$\vec{M}_z/\text{kN}\cdot\text{m}$	678.9	676.4	-1579.8
\vec{F}_x/kN	19.2	3.5	-509.5
\vec{F}_y/kN	-13.3	-433.0	-52.2
\vec{F}_z/kN	1056.2	1032.5	1021.3

2.3 塔架的静力学强度校核

构建塔架的三维模型时,排除内部爬梯、电缆架、平台等对塔架整体强度影响较小的复杂部件,集中考虑塔架、法兰及门洞等重要的连接部位及应力集中点。将三维模型进行网格化分,得到单元数为 227503 个,节点数为 438706 个。最后对塔架网格模型施加极限载荷及边界条件:将塔架底部全约束,考虑整体重力及集中质量点的影响。得到塔架的极限应力及变形云图如图 3a 及图 3b 所示。由图 3a 可知,最大应力为 223.05 MPa,出现在塔架底部,在迎风面与背风面变化趋势不同;依据 IEC 61400-6 ED1 规范^[9],取安全系数 1.1,材料最大许用应力为 313.6 MPa,塔架满足强度要求。从图 3b 中可

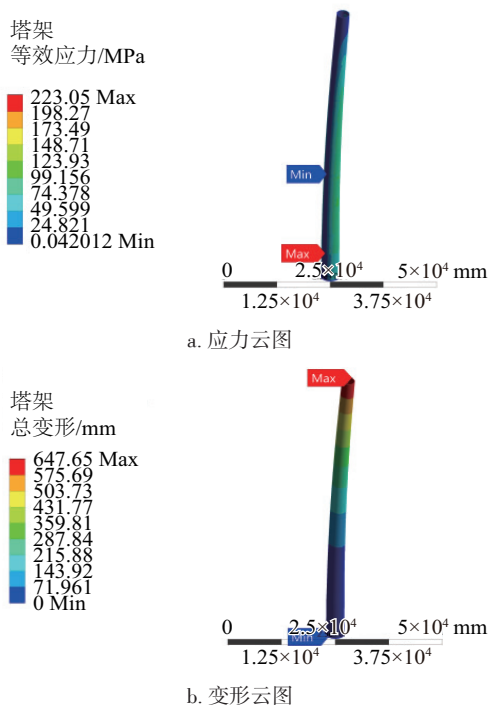


图3 6.2工况下塔架的应力云图和变形云图
Fig.3 Nephogram of tower stress and deformation under 6.2 working conditions

看出最大位移为 647.65 mm,发生在塔顶位置,整体变化趋势从塔底到塔顶呈逐渐增大,根据高耸结构设计规范^[10],塔顶位移应控制在塔架总高度的 0.5%~0.8%范围内,在这种极限工况下的位移达到控制范围的最大值。因此,塔架总体受力及变形能满足其正常工作的要求,并且应力方面还有一定储备。

3 算例分析

3.1 塔顶连接处均匀试验安排及试验结果

某 2 MW 塔架塔顶连接处原始尺寸上部外径为 3005 mm,下部外径为 3019 mm,高度为 840 mm,厚度为 22 mm。保持连接处下部外径尺寸不变,考虑下部厚度由 14 mm 突变为 22 mm,下部高度由 2700 mm 突变为 840 mm,具体结构参数如表 2 所示。

表2 塔顶连接处结构参数				
Table 2 Structural parameters at top of tower				
项目	上部 外径/mm	下部 外径/mm	厚度/ mm	高度/ mm
连接处	3005	3019	22	840
连接处下部	—	—	14	2700

选取塔顶连接处为研究对象,进行 2 因素(厚度 T 、高度 H)9 水平的 $U_9^*(9^2)$ 试验安排,具体试验因素水平表如表 3 所示。

表3 因素水平表					
Table 3 Table of factors and levels					
N	T/mm	H/mm	N	T/mm	H/mm
1	14	800	6	24	1000
2	16	840	7	26	1040
3	18	880	8	28	1080
4	20	920	9	30	1120
5	22	960	—	—	—

注: N —试验序号; T —厚度; H —高度。

表4 $U_9^*(9^2)$ 均匀设计表					
Table 4 Uniform design table $U_9^*(9^2)$					
N	$S=2$		N	$S=2$	
1	1	3	6	6	8
2	2	6	7	7	1
3	3	9	8	8	4
4	4	2	9	9	7
5	5	5	—	—	—

注: N —试验序号; S —试验因素数。

利用有限元分析软件按照表 4 所示的试验方案进行模拟仿真试验,考察不同因素及不同水平下塔架最大变形量值 w 及最大应力值 σ ,试验方案及结果如表 5 所示。

表 5 试验方案及结果

Table 5 Experimental scheme and results

N	试验因素及水平		试验结果	
	T/mm	H/mm	σ /MPa	w/mm
1	14(1)	880(3)	102.55	644.95
2	16(2)	1000(6)	102.66	644.24
3	18(3)	1120(9)	102.94	647.00
4	20(4)	840(2)	102.75	635.95
5	22(5)	960(5)	103.25	643.30
6	24(6)	1080(8)	103.41	646.86
7	26(7)	800(1)	103.17	637.76
8	28(8)	920(4)	101.78	641.18
9	30(9)	1040(7)	102.37	644.99

注:表中括号内的数字代表均匀设计表中各因素水平的序号;N—试验序号;T—塔顶连接处厚度;H—塔顶连接处高度;w—塔架最大变形量; σ —塔架最大应力值。

3.2 试验数据的回归分析

根据表 5 中的实验结果,采用 2 次多项式回归,考虑因素间的交叉影响,排除应力试验 8、试验 9 结果中的异常值影响,得到关于变形与应力的回归模型为:

$$\begin{cases} w = 613.7824 + 0.0303h \\ \sigma = 101.613 + 7.0904 \times 10^{-5}t \cdot h \end{cases} \quad (5)$$

式中, w ——塔架最大变形量,mm; h ——塔顶连接处高度,mm; σ ——塔架最大应力值,MPa; t ——塔顶连接处厚度,mm。

式(5)中最大变形值 w 为线性函数模型,最大应力值 σ 为双曲抛物面函数模型,现对上述 2 模型进行拟合程度检验。

表 6 给出了回归模型的相关系数 R 判定系数 R^2 及修正的判定系数 R^2 ,可以看出,回归方程系数值非常接近于 1,说明回归方程的拟合程度较好。其次是对回归模型进行显著性检验,假设显著性水平 $\alpha=0.05$,而样本容量 n 为 9,模型中回归系数 k 为 2。查 F 分布表,得 $F_{\alpha}(k, n-k-1)=F_{0.05}(2, 6)=5.14$;查 T 分布表,得 $T_{\alpha}(n-k-1)=T_{0.05}(6)=1.943$; F_{α} 与 T_{α} 分别为 F 分布和 T 分布显著水平为 α 时的临界值。

表 6 回归模型拟合程度评价指标

Table 6 Evaluation index of fitting degree for regression models

回归方程	R	R^2	\bar{R}^2
w	0.9572	0.9163	0.8996
σ	0.9948	0.9896	0.9862

注: w —变形量; σ —应力值; R —相关系数; R^2 —判定系数; \bar{R}^2 —修正判定系数。

表 7 给出回归方程的 F 统计量和各回归方程中回归系数的 T 统计量,各回归方程的 F 统计量值均远大于显著水平为 0.05 时的临界值 F_{α} ,各参数的回归系数的 T 统计量的绝对值均大于 T_{α} 。表明回归模型精度高,模型中各参数对试验指标的影响显著。

表 7 回归模型显著性水平检验指标

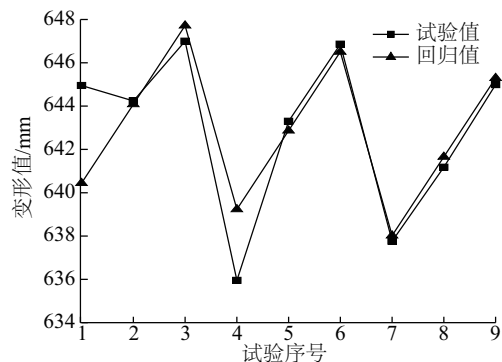
Table 7 Test index of significance level for regression model

回归方程	F	T_0	T_1
w	54.76	545.33	7.40
σ	286.19	1009.95	16.92

注: F —回归方程的 F 统计量; T_0 —回归系数的 T 统计量。

3.2 回归模型的总结及塔顶的结构参数优化

根据回归模型(5)及表 5 中的试验方案可做出试验值与回归值的对比图 4。由图 4b 可看出,试验序号 8、9 的试验值与回归值相差较大,属于异常值,在回归分析中应排除,其他回归值都接近于试验值,图 4a 及图 4b 中的回归值与试验值最大相对误差为 0.7%,0.14%。从而进一步验证了回归模型的显著性特点。通过上述分析,说明试验参数与试验指标之间的近似函数关系可用式(5)表示。由式(5)可知,塔架的最大变形值 w 、塔架的最大应力值 σ 相对塔顶结构参数呈线性与双曲抛物面函数关系。其中最大变形值随参数 h 的增大而增大;最大应力值随参数 t 与 h 的增大而增大,且高度参数 h 变化相对厚度参数 t 变化影响更为显著。



a. 变形值对比

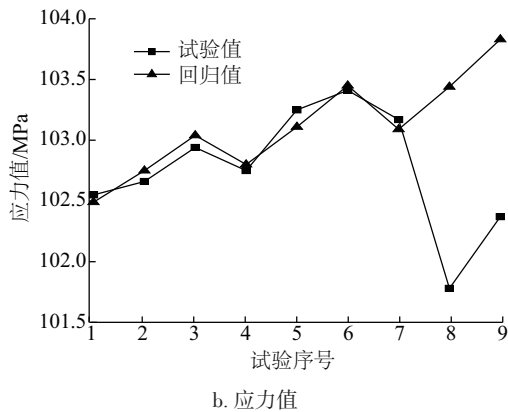


图4 试验值与回归值的比较

Fig. 4 Comparison of experiment values and regression values

减小塔架的质量势必减小塔架的外形尺寸,由于塔顶与机舱底座连接处直径尺寸已确定,故仅考虑减小连接处的厚度与高度尺寸。由式(5)可知,减小连接处厚度与高度尺寸能够减小塔架整体最大变形值与最大应力值。因此,依据塔架总体厚度与高度的变化规律优化塔顶连接处的厚度与高度尺寸,优化结果如表8所示。

表8 优化结果对比

Table 8 Comparison of optimization results

参数	T/mm	H/mm	σ/MPa	w/mm	m/kg
优化前	22	960	103.39	640.07	301950
优化后	12	800	102.47	638.64	301220
变率/%	—	—	0.89	0.22	0.24

注: T —塔顶连接处厚度; H —塔顶连接处高度; σ —塔架最大应力值; w —塔架最大变形量; m —塔架质量。

4 结论

本文阐述基于均匀设计方法,应用多元回归理论进行塔顶结构参数的优化设计研究,计算结果表明:

1)通过在极限工况下塔架的静态响应分析,得到初始塔架结构参数的合理性,并且在塔架的极限应力方面还有一定储备。

2)采用均匀设计法对塔顶连接处结构参数与塔架静强度间的回归分析得到最大变形值与最大应力值模型为线性函数与双曲抛物面函数。其中最大变形值与高度参数有关,最大应力值与高度及厚度参数均有关,且高度参数变化较厚度参数变化影响更为显著。

3)依据塔架结构参数的变化规律选取较小的塔顶连接处高度与厚度参数使塔架优化后模型比塔架原型

最大应力值减小 0.89%,最大变形值减小 0.22%,整体质量降低 0.24%。

[参考文献]

- [1] ZHENG Y Q, ZHAO R Z. Characteristics for wind energy and wind turbines by considering vertical wind shear[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(6): 2393-2398.
- [2] ENGSTROM S, LYRNER T, HASSANZADEH M, et al. Tall towers for large wind turbines[R]. Elforsk rapport, 2010.
- [3] 刘晓峰, 俞黎萍. 风力机混凝土塔架最小成设计[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 691-698.
LIU X F, YU L P. Minimum cost design of the concrete wind turbine tower[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(3): 691-698.
- [4] 郑玉巧, 赵荣珍, 刘宏. 大型风力机叶片气动与结构耦合优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(8): 1812-1817.
ZHENG Y Q, ZHAO R Z, LIU H. Research of aerodynamic and structural coupling optimization design for blade of large-scale wind turbine[J]. Acta energiae solaris sinica, 2015, 36(8): 1812-1817.
- [5] LAVASSAS I, NIKOLAIDIS G, ZERVAS P. Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW windturbine tower[J]. Engineering structures, 2003, 25(8): 1097-1106.
- [6] 赵立新. 风力发电机塔架的有限元分析与优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
ZHAO L X. Analysis and optimization design for wind turbine tower based on finite element method[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [7] HAGHI R, ASHURI T, VAN DER VALK P L C, et al. Integrated multidisciplinary constrained optimization of offshore support structures[J]. IOP publishing, 2014, 555(1): 435-472.
- [8] 蔡新, 高强, 郭兴文, 等. 水平轴风力机塔架多目标优化及模糊优选[J]. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2821-2826.
CAI X, GAO Q, GUO X W, et al. Multi-objective optimization and fuzzy evaluation of horizontal axis wind turbine tower[J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(11): 2821-2826.
- [9] IEC 61400-6 ED1, Wind energy generation systems—

Part 6: Tower and foundation design requirements[S].
[10] GB 50135—2006, 高耸结构设计规范[S].

GB 50135—2006, Code for design high-rising structures
[S].

OPTIMIZATION OF WIND TURBINE TOWER STRUCTURE PARAMETERS BASED ON UNIFORM DESIGN

Zheng Yuqiao, He Zhe, Zhang Lu, Pan Yongxiang

(School of Mechanical and Electronical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at problems of tower structure optimization of large horizontal axis wind turbine having no obvious main influencing factors, the design and numerical simulation for the top tower junction is presented in this work. The uniform design method is proposed as the $U_9(92)$ static strength experiment of 2 elements (thickness and height) for the top tower junction. The numerical results show that the relationship between the maximum deformation (stress) value and the 2 elements (thickness and height) at the top tower junction is linear (hyperbolic parabola) distribution, as well as the height change has more directly influence than that of the thickness on the stress value of the tower. The optimized tower structure decreases the maximum stress, the maximum deformation and the mass of the top tower by 0.89% , 0.22% and 0.24% respectively. It provides a theoretical basis for the multi-objective structure optimization in designing wind turbine tower.

Keywords: wind turbine; towers; structural optimization; computer simulation; static analysis