

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.02.018

不同结构形式对风电机组塔架 轻量化设计的影响研究^{*}

宋恭杰^{1,2}, 裘慧杰^{1,2}, 何先照^{1,2}, 许 斌^{1,2}, 王克峰^{1,2}, 汤永江^{1,2}

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江省风力发电技术重点实验室, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对全球风力发电市场对风电项目投资成本控制,尤其是对塔架投资成本控制的迫切需求的问题,对不同结构形式塔架模型的固有频率、受载状态、强度性能、屈曲稳定性以及疲劳损伤等方面进行了对比计算与研究。对风力发电机组塔架轻量化设计受其本体不同结构形式的影响程度进行了归纳,提出了一种基于塔架设计原则的相关计算理论,构建了若干款不同结构形式的塔架模型;并在同一控制策略、同一风况条件下,利用 BLADED 仿真软件、工程算法进行了载荷求解计算和结果对比。研究结果表明:在塔架结构尺寸设计允许的情况下,塔架底部直径越大或靠近塔架底部的塔节直段数量越多,越有利于塔架的本体刚度、抗极限性能和抗疲劳性能的提高,也就越有利于塔架的轻量化设计。

关键词:结构形式;风电机组;塔架轻量化;对比计算

中图分类号:TH122;TK83

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)02-0250-06

Influence of different structural forms on the lightweight of wind turbine tower

SONG Gong-jie^{1,2}, QIU Hui-jie^{1,2}, HE Xian-zhao^{1,2},
XU Bin^{1,2}, WANG Ke-feng^{1,2}, TANG Yong-jiang^{1,2}

(1. Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Key Laboratory of Wind Power
Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the urgent demand of global wind power market for project investment cost control, especially for tower investment cost control, contrast calculation of the natural frequency, loading state, strength performance, buckling stability and fatigue damage of different tower models were made. The influence of different structure forms on the lightweight design of wind turbine tower was summarized. Based on the relevant calculation theories of tower design principles, a number of tower models with different structure forms were built, and BLADED simulation software and engineering algorithm were used to solve the load calculation and compare the results under the same control strategy and wind conditions. The results indicate that based on allowance of the size design of the tower structure, the larger the diameter at the bottom of the tower or the more the number of straight sections near the bottom of the tower, the more beneficial to the improvement of the stiffness, the anti-limit performance and the anti-fatigue performance of the tower, and the more beneficial to the lightweight design of the tower.

Key words: structures forms; wind turbine; tower lightweight; contrast calculation

收稿日期:2020-06-01

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB2005005)

作者简介:宋恭杰(1988-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事风力发电机组塔架方面的研究。E-mail:songgj@chinawindey.com

0 引言

近年来,随着我国风力发电行业的快速发展,风力发电机组越来越趋向于大型化。塔架作为风电机组的重要承重部件,吸收机组振动的同时对机舱和叶轮起着重要的支撑作用,使叶轮等部件得以在高处平稳运行,以获得足够的风能驱动发电^[1]。然而,塔架作为一种高耸的钢结构,在承受着机组重量的同时,也承受着巨大的弯矩作用,这就要求塔架必须具有足够的刚度以保障机组的安全。

随着风电补贴政策逐步的退出,平价上网时代的来临,市场的竞争愈加激烈,陆上风场的投资商越来越注重设备投入成本的控制。塔架作为风电机组的大部件之一,根据机组兆瓦、风轮不同,其 90 m ~ 100 m 高的塔架重量一般在 170 t ~ 290 t 左右,其成本大概占据了一台风机 20% ~ 25% 的投资比例。因此,在未来的风电竞争中,投资商和各主机厂商势必在塔架轻量化方面进行研究,以降低风场投资^[2]。

目前,针对塔架轻量化的设计,各大主机厂商的研究主要集中在以下几个方面:(1)对控制策略进行研究及优化^[3]; (2)对各风场进行定场址载荷计算; (3)对塔架内件的减重优化; (4)对塔门局部加强形式^[4]的研究设计等,而对于塔架不同结构形式的研究较少。

据此,本文将通过在同等计算条件下,计算不同结构形式的塔架受载情况,对比研究结构形式对塔架轻量化的影响。

1 塔架轻量化的对比方法

1.1 研究对象

本文针对结构形式对塔架轻量化的影响研究,将通过两种不同形式的对比方式展开:

(1)相同结构、不同底径。针对 3.0 MW 机组,选择两种不同高度的塔架即 90 m (风轮直径采用 140 m) 和 100 m (风轮直径采用 147 m),每种高度均采用 4.5 m 和 4.3 m 的两种塔底直径进行建模。

相同结构、不同底径的塔架模型如图 1 所示。

(2)相同底径、不同结构。针对 2.5 MW 机组(风轮直径采用 140 m),采用同一塔底直径、4 种不同结构形式的塔架进行对比研究。

相同底径、不同结构的塔架模型如图 2 所示。

塔架详细结构形式说明如表 1 所示。

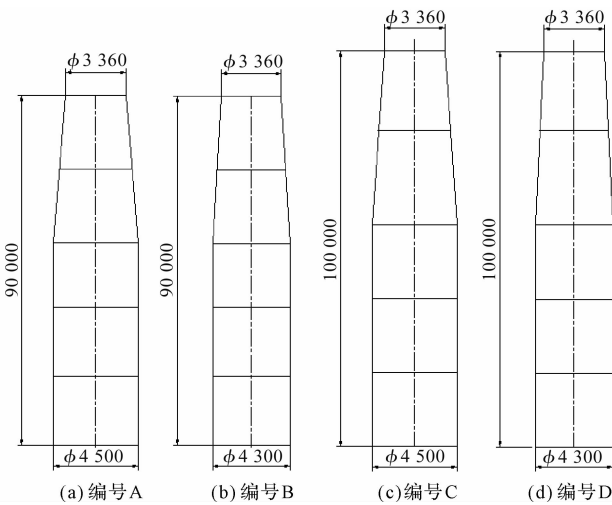


图 1 相同结构、不同底径的塔架模型图

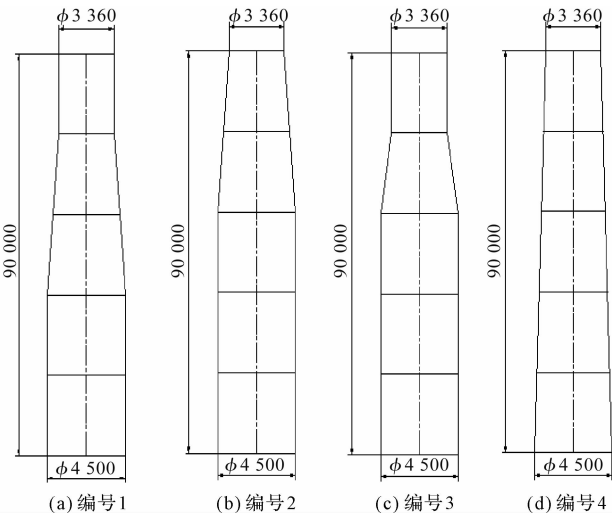


图 2 相同底径、不同结构的塔架模型图

表 1 塔架详细结构形式说明

编号	塔高/m	机型	底径/m	段数	分段形式 (从下往上)
A	90	3.0 MW	4.5	5 段	直 + 直 + 直 + 锥 + 锥
B		140 m 风轮	4.3		
C		3.0 MW	4.5		
D		147 m 风轮	4.3		
1	90	2.5 MW 140 m 风轮	4.5	5 段	直 + 直 + 锥 + 锥 + 直
2					直 + 直 + 直 + 锥 + 锥
3					直 + 直 + 直 + 锥 + 直
4					全锥

注:“直”——塔段为直段;“锥”——塔段为锥段

在风场条件方面,挑选一个较典型风况条件的风场,其风场的风况基本参数如表 2 所示。

表 2 研究风场的风况基本参数

参数名称	参数值
极限风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	37.5
年平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.5
空气密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.225
平均风速 15 m/s 时的特征湍 I15/(%)	16

1.2 对比方法

在同等计算参数、同一控制策略、塔架重量保持一致的条件下,笔者针对 1.1 节中提出的两种对比形式的 8 款塔架分别进行计算,通过对比整机的固有频率、各截面极限载荷、各截面疲劳载荷、塔架各截面余量,以及在该载荷下塔架可优化到的最轻重量,来判断不同结构形式对塔架轻量化的影响程度。

2 塔架设计原则

塔架的设计原则是应在规定的外部条件、设计工况和载荷情况下,能稳定地支撑机舱和风轮的运行,且应具有足够的强度、屈曲稳定性和抗疲劳性能^[5-8]。

本文主要对比较核塔架的强度、屈曲稳定性和焊缝疲劳是否满足设计要求,对比过程中不考虑塔架内附件重量和门框有限元等的影响。

塔架强度,主要指塔架静强度计算,由正应力和切应力组成,求解得到的等效应力需满足钢材许用应力。

根据第四强度理论,可以得到塔架强度计算公式为:

$$\sigma_{\text{eq,Ed}} = \sqrt{\sigma_{\text{x,Ed}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{x}\theta,\text{Ed}}^2} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\text{eq,Ed}}$ —等效应力,MPa; $\sigma_{\text{x,Ed}}$ —总的正应力,MPa; $\tau_{\text{x}\theta,\text{Ed}}$ —总的切应力,MPa。

总的正应力由重力产生的轴向正应力和主力矩产生的弯曲正应力组合而成,如下式所示:

$$\sigma_{\text{x,Ed}} = \frac{F_z}{2\pi \cdot r_{\text{can}} \cdot t_{\text{can}} \cdot \cos(\beta)} + \frac{M_{\text{xy}}}{\pi \cdot r_{\text{can}}^2 \cdot t_{\text{can}} \cdot \cos(\beta)} \quad (2)$$

式中: F_z —重力,kN; M_{xy} —主力矩,kNm; r_{can} —各塔筒塔节底部位置的平均半径,m; t_{can} —各塔筒塔节的塔壁厚度,m; β —各塔筒塔节的锥角。

总的切应力由剪切切应力和扭转切应力组合而成,如下式所示:

$$\tau_{\text{x}\theta,\text{Ed}} = \frac{F_{\text{xy}}}{\pi \cdot r_{\text{can}} \cdot t_{\text{can}}} + \frac{M_z}{2\pi \cdot r_{\text{can}}^2 \cdot t_{\text{can}}} \quad (3)$$

式中: F_{xy} —剪切力,kN; M_z —扭转力矩,kNm。

塔架屈曲稳定性,主要用于研究结构在特定载荷下塔架是否会产生屈曲失稳破坏,其判断公式如下:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{x,Ed}}}{\sigma_{\text{x,Rd}}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{\text{x,Ed}}}{\sigma_{\text{x,Rd}}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,\text{Ed}}}{\sigma_{\theta,\text{Rd}}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,\text{Ed}}}{\sigma_{\theta,\text{Rd}}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{\text{x}\theta,\text{Ed}}}{\tau_{\text{x}\theta,\text{Rd}}} \right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (4)$$

式中: $k_i \left(\frac{\sigma_{\text{x,Ed}}}{\sigma_{\text{x,Rd}}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,\text{Ed}}}{\sigma_{\theta,\text{Rd}}} \right) - \left(\frac{\sigma_{\theta,\text{Ed}}}{\sigma_{\theta,\text{Rd}}} \right)^{k_\theta}$ —环向应力引起的屈曲稳定性。

根据经验,环向应力非常接近 0,可以忽略不计,因此,以上公式便可简化为:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{x,Ed}}}{\sigma_{\text{x,Rd}}} \right)^{k_x} + \left(\frac{\tau_{\text{x}\theta,\text{Ed}}}{\tau_{\text{x}\theta,\text{Rd}}} \right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (5)$$

式中: $\sigma_{\text{x,Rd}}$ —正应力的抗屈曲系数; $\tau_{\text{x}\theta,\text{Rd}}$ —剪应力的抗屈曲系数; k_x, k_τ —屈曲相互作用参数。

塔架焊缝疲劳,即当焊缝受到多次重复的载荷作用后,应力值虽没有超过材料的强度极限,甚至比弹性极限还低的情况下就可能发生疲劳破坏。

风机塔架的焊缝疲劳损伤需按照满足 20 年运行进行校核,如下式所示:

$$D_{20} = \frac{N_{20}}{N_{\text{allowable}, 20}} \leq 1 \quad (6)$$

式中: D_{20} —风机运行 20 年实际损伤值; N_{20} —风机运行 20 年实际循环次数; $N_{\text{allowable}, 20}$ —风机 20 年许用循环次数。

3 不同结构形式塔架的对比计算

作用在风电机组塔架的外部载荷主要由塔架本身的气动载荷、由风轮和机舱产生的空气动力载荷、力载荷以及塔架自重等组成。

塔架分析坐标系如图 3 所示。

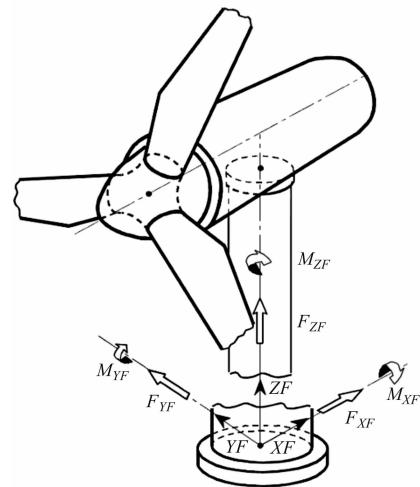


图 3 塔架分析坐标系

在图 3 的塔架坐标系中: ZF 为垂直方向, XF 沿水平方向指向下风向, YF 垂直于 XF 和 ZF ^[9-11]。

3.1 相同结构、不同底径的塔架计算

针对 1.1 节中的第 1 种对比方式,按照图 1 所示的塔架结构,笔者利用 BLADED 载荷仿真软件进行建

模,并加载计算。其中,3.0 MW 机组 90 m 的两款塔架均按照 176 t(不含塔架内附件)进行建模;3.0 MW 机组 100 m 的两款塔架均按照 290 t(不含塔架内附件)进行建模。

塔架模型参数如表 3 所示(因各款塔架的钢板数量较多,表中仅挑选部分钢板列出)。

表 3 塔架模型参数

高度/m	编号 A/mm	编号 B/mm	编号 C/mm	编号 D/mm
0	36	36	52	52
10	22	23.8	39	41.5
15	20.5	22	36.5	39
20	19.5	20.5	34	35.5
25	18.5	19.5	31.5	33
30	17.7	18.5	29	30.5
35	17	17.5	27	28.5
40	16	16.5	25	26.5
50	14.5	15.2	21	23
60	13.5	13.8	18.5	19.5
70	12.8	12.5	16.5	17
80	12	12	14.5	14.5
90	28	28	16	16
97.3	/	/	28	28

在 BLADED 软件中,求解得到的相同结构、不同底径的塔架固有频率数据如表 4 所示。

表 4 相同结构、不同底径的塔架固有频率

塔架	固有频率
编号 A	0.239
编号 B	0.225
编号 C	0.227
编号 D	0.219

由表 4 可知:4.5 m 底径的塔架整机固有频率比 4.3 m 的略大。

塔架各截面极限载荷 (M_{xy}) 和等效疲劳载荷 (M_f) 计算结果如图所示(为便于视图,图中仅显示 20 m 高度内的载荷状态)。

根据图 4 对比上述几款塔架计算的实际载荷数值可以得到:极限载荷,4.5 m 底径的塔架比 4.3 m 的小 3% 左右;而等效疲劳载荷较接近,4.5 m 底径的塔架比 4.3 m 略小一点。

根据计算得到的载荷,利用第 2 节所述的校核内容计算塔架的强度、屈曲稳定性以及 20 年疲劳损伤,可以得到以下结论:(1) 在塔架强度校核方面,4.5 m 底径的塔架比 4.3 m 多 8% ~ 12% 左右的余量;(2) 在屈曲稳定性校核方面,4.5 m 底径的塔架比 4.3 m 多 5% ~ 10% 左右的余量;(3) 在 20 年疲劳损伤校核方面,4.3 m 底径塔架的损伤比 4.5 m 大 0.15 左右。

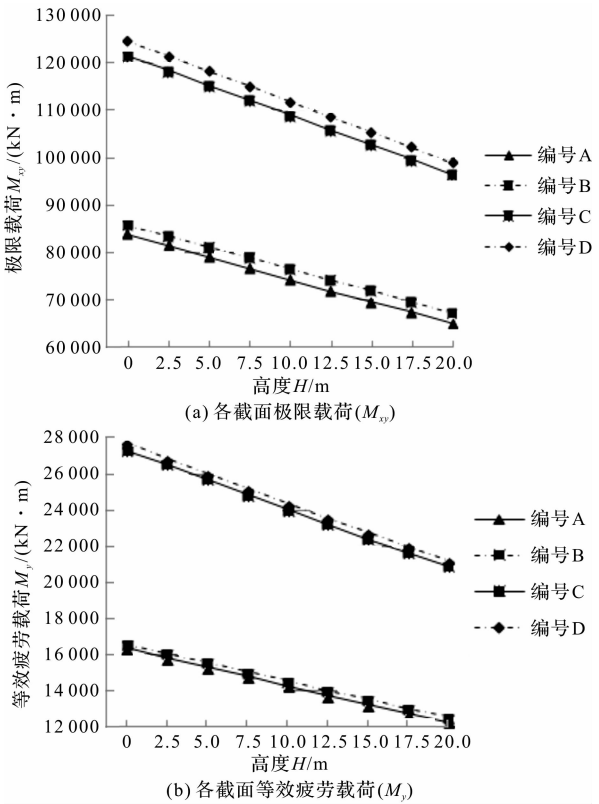


图 4 第 1 种对比方式各款塔架的极限载荷和等效疲劳载荷

3.2 相同底径、不同结构的塔架计算

针对 1.1 节中的第 2 种对比方式,按照图 2 所示的 4 种塔架结构,笔者同样利用 BLADED 载荷仿真软件进行建模,并加载计算。

塔架均按照 180 t(不含塔架内附件)进行建模,具体的 4 款塔架模型参数如表 5 所示。

表 5 4 款塔架模型参数

高度/m	编号 1/mm	编号 2/mm	编号 3/mm	编号 4/mm
0	38	38	38	38
10	23.1	23.1	23.1	24
15	21.3	21.3	21.3	23
20	19.7	19.7	19.7	21
25	18.2	18.2	18.2	20
30	18	18	18	19
35	17	16.8	17	18
40	16.5	15.5	16	17
50	15.3	13.7	14	16
60	14.2	12.5	13.2	14
70	13.2	11.5	13	13.2
80	12	11	11	12
87.3	28	28	28	28

计算 4 款相同底径、不同结构的塔架固有频率如表 6 所示。

表 6 相同底径、不同结构的塔架固有频率

塔架	固有频率
编号 1	0.235
编号 2	0.243
编号 3	0.241
编号 4	0.228

由表 6 可知:编号 2 的塔架固有频率最大,编号 3 略小,编号 4 的塔架固有频率最小。

塔架各截面极限载荷 (M_{xy}) 和等效疲劳载荷 (M_y) 计算结果如图 5 所示(为便于视图,图中仅显示 20 m 高度内的载荷状态)。

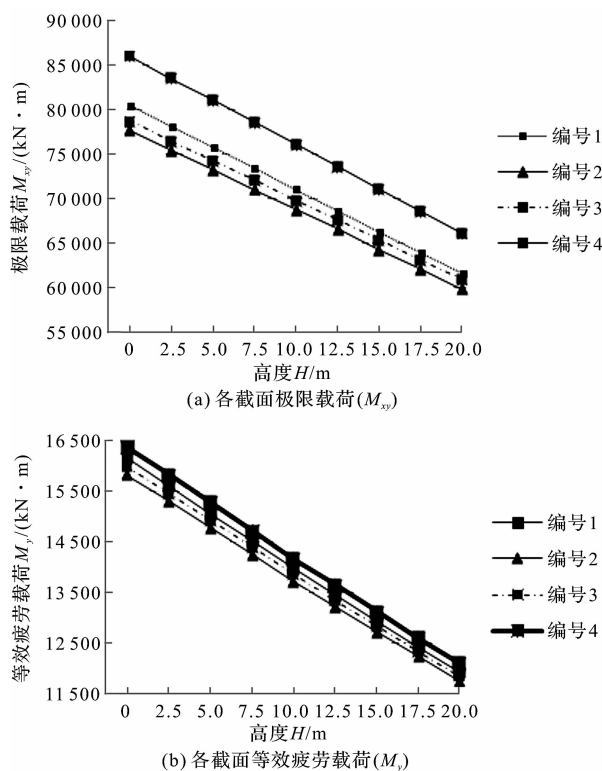


图 5 第 2 种对比方式各款塔架的极限载荷和等效疲劳载荷

根据图 5 对比上述 4 款塔架计算的实际载荷数据可知:(1)极限载荷,编号 2 最小,编号 3 与编号 2 非常接近,载荷折线图基本重合,但编号 1 比编号 2 大 3% 左右,编号 4 比编号 2 大 10% 左右;(2)等效疲劳载荷,从载荷折线图上看,各款塔架载荷比较接近,但从实际数据上比较,编号 2 的等效疲劳载荷最小,编号 1 和编号 3 与之非常接近,编号 4 比编号 2 大 2% 左右。

3.3 塔架轻量化验证及结果分析

在 3.1 节和 3.2 节的极限载荷、等效疲劳载荷基础上,笔者对 8 款塔架做最优化壁厚处理,即运用第 2 节塔架设计原则中的工程计算方法,并使其同时满足以下 3 个要求:强度余量 >0 , 屈曲稳定性 $>5\%$, 20 年疲劳损伤 <1 。

最终得到 8 款塔架调整后的状态如表 7 所示。

表 7 8 款塔架调整后状态表

塔架	是否优化	原重量/t	调整后重量/t
编号 A	可优化	176	174.5
编号 B	需加厚	176	178.3
编号 C	可优化	290	275.3
编号 D	可优化	290	284.5
编号 1	可优化	180	178.2
编号 2	可优化	180	177.1
编号 3	可优化	180	177.4
编号 4	需加厚	180	184.2

笔者通过工程算法对塔架重量优化后的结果进行分析,得到的结果表明:

(1)相同结构、不同底径的塔架,塔底直径越大,其塔架固有频率越高、各截面极限载荷和等效疲劳载荷越小、屈曲稳定性和疲劳损伤余量越大,塔架的设计可以更轻量化;

(2)相同底径、不同结构的塔架,在塔架设计允许的情况下,靠近塔底的直段数量越多(即保持各塔节尽可能多的大直径状态下),其塔架固有频率越高、各截面极限载荷和等效疲劳载荷越小、屈曲稳定性和疲劳损伤余量越大,塔架的设计同样可以更轻量化。

4 结束语

本文基于塔架设计原则的相关计算理论,通过两种不同形式的对比方式展开了研究,构建了 8 款不同塔架模型;同时运用 BLADED 仿真软件和塔架工程算法,对所有塔架模型的固有频率、各截面载荷、屈曲和疲劳损伤等进行了对比计算,研究了不同塔架结构形式对风电机组塔架轻量化的影响。

研究结果表明:在塔架结构尺寸设计允许的情况下,塔架底部直径越大或靠近塔架底部的塔节直段数量越多,越有利于提高塔架的刚度、抗极限性能和抗疲劳性能,也就越有利于塔架的轻量化设计。

参考文献 (References):

- [1] 李建华,魏克湘,毛文贵,等. 小型风力发电机塔架分析及优化设计[J]. 湖南工程学院学报,2017,27(4):26-29.
- [2] 陈 涛,刘晓光,王宏亮. 风力发电机塔筒结构的优化设计[J]. 石油和化工设备,2012,15(4):19-26.
- [3] 赵 进. 台风型风电机组塔架轻量化设计研究[J]. 装备环境工程,2020,17(4):65-69.
- [4] 石秉楠,钱 华,刘麒祥等. 风力发电机塔筒门段结构优化设计[J]. 东方汽轮机,2016(03):67-69,74.
- [5] 王 磊,王作邦. 风力发电机塔架设计计算[J]. 黑龙江科技信息,2017(14):136.

- [6] Din EN 1993-1-6-297. Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-6: Strength and stability of steel structures[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [7] 宋俊杰. 1.5MW 风力发电机塔筒与塔架的对比研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学建筑与土木工程学院, 2012.
- [8] 卓高柱, 刘 刃, 李 林, 等. 大型风力发电机塔筒计算设计[J]. 发电设备, 2011, 25(5): 310-313.
- [9] 左美燕. 轻量化臂架液压缸设计[J]. 液压气动与密封, 2019(10): 75-77, 81.
- [10] IEC61400-6:2017. Wind Energy Generation Systems-Part6: Tower and Foundation Design Requirements[S]. turich: International Electrotechnical Commission, 2017.
- [11] 李钢强, 赵登利, 刘建爽. 波浪对海上大型风力机筒形塔架的影响[J]. 可再生能源, 2020, 38(5): 630-634.

[编辑: 杨梦露]

本文引用格式:

宋恭杰, 裴慧杰, 何先照, 等. 不同结构形式对风电机组塔架轻量化设计的影响研究[J]. 机电工程, 2021, 38(2): 250-255.

SONG Gong-jie, QIU Hui-jie, HE Xian-zhao, et al. Influence of different structural forms on the lightweight of wind turbine tower[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(2): 250-255.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 238 页)

- [7] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [8] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence**, 2017, PP(99): 1-1.
- [9] LIU Wei, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox detector[C]. European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer International Publishing, 2016.
- [10] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]. Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2016.
- [11] REDOM J, FARHANI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Italy: IEEE Computer Society, 2017.
- [12] FU C Y, LIU W, RANGA A, et al. DSSD: Deconvolutional single shot detector[EB/OL]. [2017-01-23]. <https://arxiv.org/abs/1701.06659>.
- [13] 于 洋, 王 晴. 基于 DSSD 的无人车障碍物检测方法[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(5): 7-12.
- [14] LI Yi-ting, HUANG Hai-song, XIE Qing-sheng, et al. Research on a surface defect detection algorithm based on mobilenet-SSD[J]. **Applied Sciences**, 2018, 8(9): 1678.
- [15] 赵君爱, 贾民平. 工件表面微小缺陷的检测与识别方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(4): 735-739.
- [16] 蔡汉明, 刘 明. 基于 Inception-V3 模型的金属板材表面缺陷检测系统[J]. 轻工机械, 2020, 38(1): 71-74.
- [17] 王江辉, 吴小俊. 基于形状轮廓特征的金字塔匹配算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(1): 191-195.
- [18] ZHANG Y, ZHOU W, WANG Y, et al. A real-time recognition method of static gesture based on DSSD[J]. **Multimedia Tools and Applications**, 2020(1): 1-17.
- [19] MATTHEW B, RICHARD S, SIMON W. Multiimage matching using multiscale oriented patches[C]. Proceedings of 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. US: IEEE, 2005.

[编辑: 李 辉]