

# 钢 - 混凝土风电塔架仿真优化设计及损伤预测研究

周月婷, 蒋善超, 何坚强

盐城工学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2023年1月4日; 录用日期: 2023年2月22日; 发布日期: 2023年3月3日

---

## 摘要

针对单一的钢材料和混凝土材料已经不能满足风机塔架发展的需求的问题, 为提高塔架的强度性能、稳定性和耐用性, 对塔架进行损伤预测研究, 提出了一种基于嵌入式的设计。首先, 使用SOLIDWORKS对120米高的塔架进行建模; 其次, 利用ANSYS Workbench对塔架所受力进行了应力分析, 可得出塔架中部及衔接处受力及形变最大, 因此也是损伤最大的部位; 最后, 提出了一种基于嵌入式的设计对塔架进行组装, 在满足风机塔架的强度性能要求的同时, 提高了经济效益。

## 关键词

风机塔架, Solidworks, ANSYS Workbench, 表面应变

---

# Simulation and Optimization Design and Damage Prediction of Steel-Concrete Wind Turbine Tower

Yueting Zhou, Shanchao Jiang, Jianqiang He

Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Jan. 4<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2023

---

## Abstract

In order to improve the strength performance, stability and durability of the tower, the damage prediction of the tower is studied, and a design based on embedded system is proposed. Firstly, the 120-meter-high tower is modeled by SOLIDWORKS, and secondly, the stress of the tower is ana-

lyzed by ANSYS Workbench, and at last, a kind of embedded design is put forward to assemble the tower, which can meet the requirements of the strength performance of the fan tower and improve the economic benefit.

## Keywords

Wind Turbine Tower, Solidworks, ANSYS Workbench, Surface Strain

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,风力发电作为清洁能源迅速发展,并越来越趋向于大型化、高效率。风电技术发展的同时,对风机塔架的高度要求也越来越高,对塔架材料和性能[1]的要求随之增加。已知的塔架最高已达 140 米,虽然能够带来更高效率的资源,但是运输不易且成本大,容易造成安全隐患。目前,风机塔架常用材料有钢和混凝土两种。钢材料易浇筑,硬度大,但随着高度增加,对钢材料的强度和硬度都有更高的要求,且目前钢的价格有大幅度的增长。此外,钢材还需考虑腐蚀问题,增加了后续维修成本。而混凝土材料便宜,但浇筑至成型施工周期长,越高的塔架浇筑越困难,难以应用到超高塔架中。钢-混凝土材料可以避免两种材料的缺点,不仅可以解决了钢材料价格高昂的缺点,而且还可以解决混凝土材料的施工周期长缺点。

基于此,研究人员针对钢-混凝土结构的塔架做了大量的研究,黄一航等[2]提出内埋方钢管空间钢构架混凝土短柱的组合柱方法,其极限承载力满足一定应用需求。但此组合对浇筑工艺要求高,塔架过高无法一次成型。李斌等[3]通过分析不同参数对节点承载力,提出了钢管内填充混凝土后可以达到极限承载力,但是研究仅局限于管板节点。杨晨旭等[4]装配式节点进行了有限元分析研究,提出了在进行新型装配式节点设计时,应当控制腹杆与包裹板、腹杆与加劲板的壁厚比在合理的取值范围内,但是仅研究了静力理论分析部分,有所局限。张冬冬等[5]利用 ABAQUS 有限元软件对试验模型和原型塔架模型进行数值模拟,给出了在不同工况下混凝土塔架结构的承载变形能力和动力特性,但是仅对模型塔架进行拟静力荷载试验,并未进行混凝土塔架的抗震分析。

因此,本文以混凝土材料作为塔架底部,以钢材料作为塔架的塔身,提出了一种嵌套式结构的设计。对混凝土段和钢段比例进行探究,从经济和性能的方向寻求最好的比例。达到了满足风机塔架的强度和韧性的效果。同时,根据盈利分析结果提出一套嵌套式组装方案,在从方便运输和经济角度考虑的同时也减少了工程量。

## 2. 原理

### 2.1. 风速

风速是指空气相对于地球某一固定地点的运动速率,是衡量风力大小的标准。风力是指风吹到物体上所表现出的力量的大小。使用风速计可以得到地面风速。由于塔底和塔顶的落差较大,测量塔顶的风速较为困难,为了得到塔顶的风速,采用了风速与高度的换算公式,如式(1)所示:

$$v_A = \frac{\lg h - \lg z_0}{\lg h_0 - \lg z_0} v_0 = k_0 v_0 \quad (1)$$

其中,  $v_A$ ——距地面高度  $h$  处的风速,  $v_0$ ——距地面高度  $h_0$  处的风速,  $z_0$ ——地面状况系数,  $k_0$ ——风速高度系数。

根据式(1), 可计算出塔底与塔顶的风速, 在插件中设置 Velocity at the Bottom/Top 两个风速, 即可生成模拟出的实际风, 方便下面计算风载荷步骤的进行。

## 2.2. 风载荷

风载荷[6]是指风吹在设备上引起的载荷。设备在迎风侧受到与地面平行的脉动风压[7]作用, 风压是由空气流动的动能转变而来的, 并随着地面的高度增加而增大。塔架的侧面积可由圆台侧面积公式计算得出, 圆台侧面积公式如式(2)所示:

$$S = \pi l (r' + r) \quad (2)$$

根据式(2), 可计算出塔架的侧面积为  $1808.8 \text{ m}^2$ 。在  $10 \text{ m/s}$  的风速下, 空气密度为  $1 \text{ g/cm}^3$ , 塔与空气的阻力系数为 1。使用风载公式计算风载荷大小, 如式(3)所示:

$$Fd = \frac{4}{2} \rho v^2 A c_d \quad (3)$$

( $Fd$  为风载荷,  $\rho$  为空气密度,  $v$  为风速,  $A$  为风载荷面积,  $c_d$  为牵引系数)。由于风载荷与收空气密度影响, 因此在试验中取同样环境温度为  $20^\circ\text{C}$ , 定义空气形状因子为 1 避免环境温度不同队友的空气密度也不相同[8]。

考虑到塔架过高, 导致的塔底与塔顶风速无法保持相同, 为更贴合实际, 风载荷[9]的添加使用插件 WindLoad\_APDL 完成, 安装插件后, 设置风速的变化为 Gradient 坡度变换, 即风速由塔底至塔顶逐步增加。

## 3. 有限元模型建立

以 120 米高的钢材料塔架为研究对象, 建立有限元[10]模型。设置塔底外径 6.4 米, 壁厚 0.3 米, 塔顶外径 3.2 米, 壁厚 0.08 米。本文使用 Solidworks 软件实行建模工作。一体模型可以使用旋转变换得到。对于需要组装的塔架模型, 可使用 Solidworks 软件里的装配体功能进行处理。将两截塔架分别保存后在装配体功能中打开, 各自设置材料、密度等数据。设置好后利用配合功能将其组合, 为确保两截面完全重合, 配合时选择使两塔架的侧面重合, 重合方向设置为同向, 由此可得到组装后的材料不一致的塔架。此时塔架虽然看起来组装完成, 但两个重合面之间没有作用力, 一旦受力, 两部分会分离。为使塔架在模拟时仍为一个整体, 此处使用夹具及载荷[11]功能在拼接面对其施加一个趋近于无穷的力, 使两个面紧紧贴合。

塔架圆台形状特殊, 塔架在工作时, 只会有一半的面迎风, 考虑到圆台模型侧面是一个无法分割的面, 无法选取一半, 将文件另存为 STEP AP214 (\*step;\*.stp)格式, 可以使塔架外侧面被划分为两个侧面, 处理完的模型如图 1 所示, 符合实际受力情况。

## 4. 受力分析

### 4.1. 风电塔架应力分析

对塔架竖直方向受到的来自风机机头的压力、自身受到的重力和风载荷对塔架侧面的作用力进行模拟仿真, 用 ANSYS Workbench 软件生成表面应变云图用以分析其表面应变[12]。表面云图不同色块表示塔架不同部位受力大小, 可以清晰的观察到总体的受力情况, 探究塔架受力分布。在局部坐标系中对风机塔架建立大小适当的网格。网格太大会导致结果不准确, 过小的网格又会对计算机造成负担, 考虑到

塔架整体高度及大小，此处将网格基础单位设置为 0.5 m。因为风机机头会对塔架有作用力，所以将塔架的上顶面和下底面固定。然后，对塔架模型添加负载。对塔架施加方向竖直向下的自身所受重力 Standard Earth Gravity、风载荷及风机机头对塔架的压力。

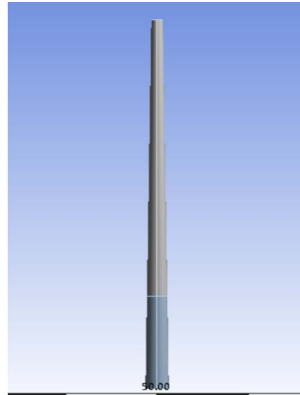


Figure 1. Fan tower model

图 1. 风机塔架模型

受力全部设置好后，由于本文研究的是塔架的受力及形变，设置 Total Deformation 可得到塔架形变，设置 Equivalion Stress 得到塔架所受应力，生成应力云图和形变云图。选择 1.0 (Ture Scale)使模型与实际一比一仿真。应力分析结果如图 2 所示，形变分析结果如图 3 所示。对塔架进行对照实验，分别施加功率为 13.2 mw 的风机机头、12 mw 的风机机头、10 mw 的风机机头对塔架的压力。考虑风速变化，选择最小风速 5 m/s、平均风速 15 m/s、季风风速 25 m/s 三种风速探究不同机头压力及风速对塔架所受应力及形变的影响。

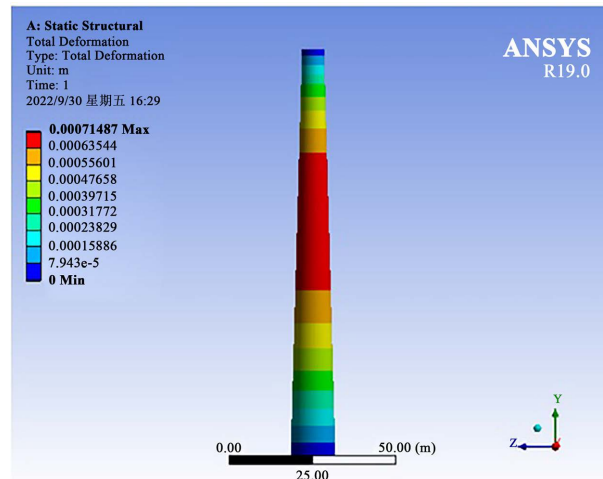


Figure 2. Stress analysis nephogram

图 2. 应力分析云图

## 4.2. 探测点分析

探测点的添加，有利于多组对照采集数据后做比对。不但检测数据精确，能精准地对塔架某点受力及损伤情况进行判断，而且系统的操作也比较便捷，能够全方位地进行检测。应力云图可以反映塔架

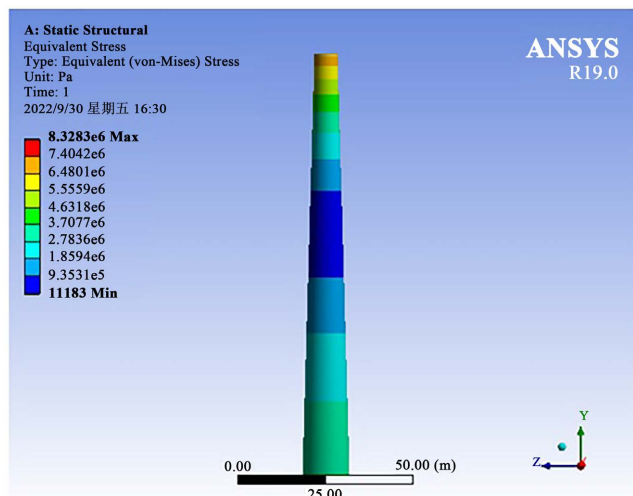


Figure 3. Deformation nephogram

图 3. 形变云图

受力情况，但只限于整体，不能展现某一确切点的受力情形。使用 ANSYS 中的 Probe 点探测功能，该功能可以用来监测点的形变，以数据的形式展现连续点的受力。研究形变时在 Total Deformation 中对研究对象选取代表性位置添加 123 Probe，如图 4 所示。究所受应力时在 Equivalion Stress 中对研究对象选取代表性位置添加 123 Probe，如图 5 所示。

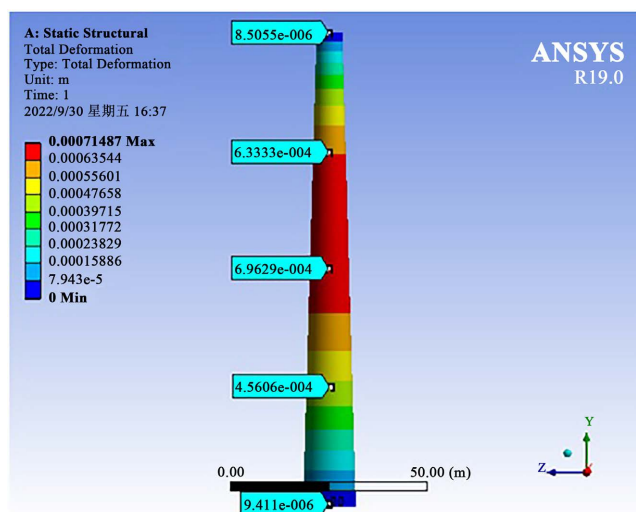


Figure 4. Add detection points in stress nephogram

图 4. 在应力云图中添加探测点

为探究钢材和混凝土以何种比例可使塔架既稳固又经济，现对不同比例的风机塔架进行模拟。现对全 120 米纯钢塔架、上部 60 米材料为结构钢，下部 60 米材料为混凝土的塔架、上部 30 米材料为结构钢，下部 90 米材料为混凝土的塔架、上部 90 米材料为结构钢，下部 30 米材料为混凝土四种材料结构的塔架进行如上分析。

120 米全钢塔架的形变云图及应力云图如图 6 所示，上部 60 米材料为结构钢、下部 60 米材料为混凝土的塔架的形变云图及应力云图如图 7 所示，上部 30 米材料为结构钢、下部 90 米材料为混凝土的塔

架的形变云图及应力云图如图 8 所示，上部 90 米材料为结构钢、下部 30 米材料为混凝土的塔架的形变云图及应力云图如图 9 所示。

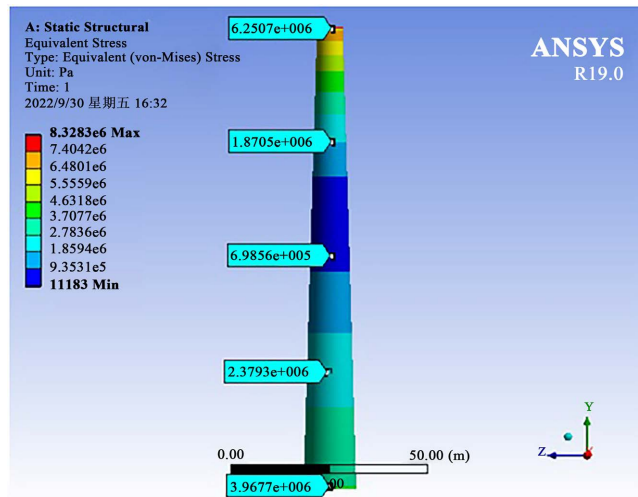


Figure 5. Add detection points to deformation nephogram  
图 5. 在形变云图中添加探测点

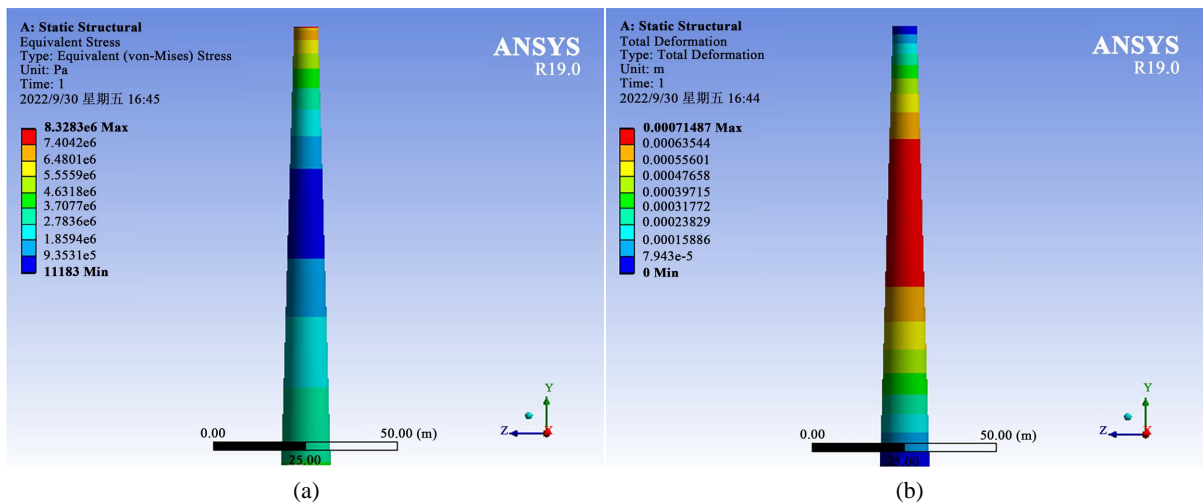


Figure 6. Deformation nephogram and stress nephogram of 120 m all-steel tower  
图 6. 120 米全钢塔架的形变云图及应力云图

基于本文研究对象的实际情况，在迎风面对塔架底部、30 米处、60 米处、90 米处、顶部这些特殊位置添加探测点，如有拼接则在拼接处上下都添加探测点。得到数据，应力如表 1 所示，形变如表 2 所示。

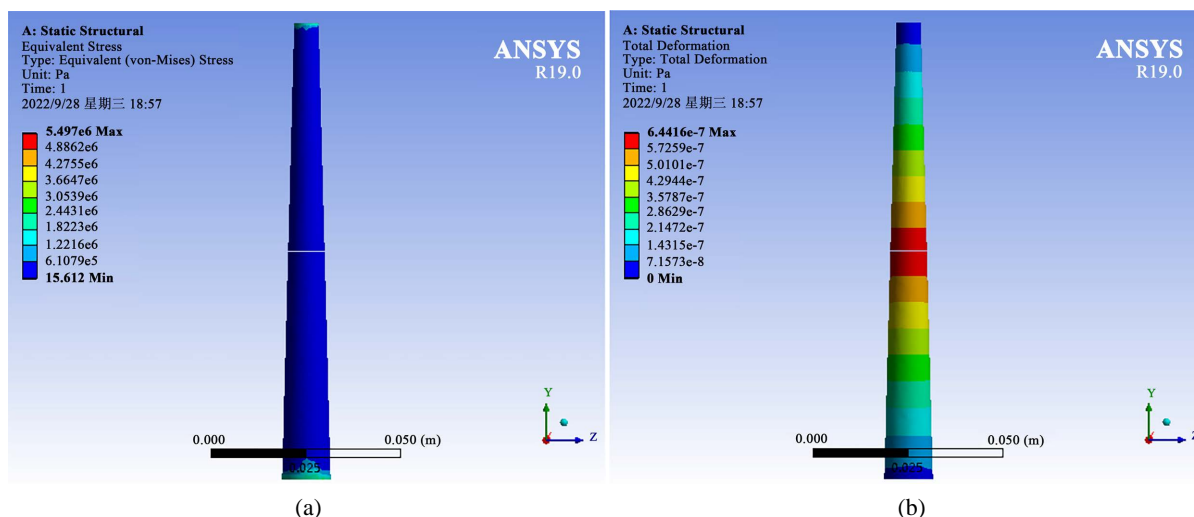
由表 1、表 2 的对比结果可以看出，塔架受力最小处在塔顶及塔底，塔架受力最大处在塔架中部及衔接处。应力最大处也是形变最大处，由此可知，长此以往，此处会成为损伤最大区域，即整个风机塔架最先损坏的部分。

### 5. 模型设计及效能分析

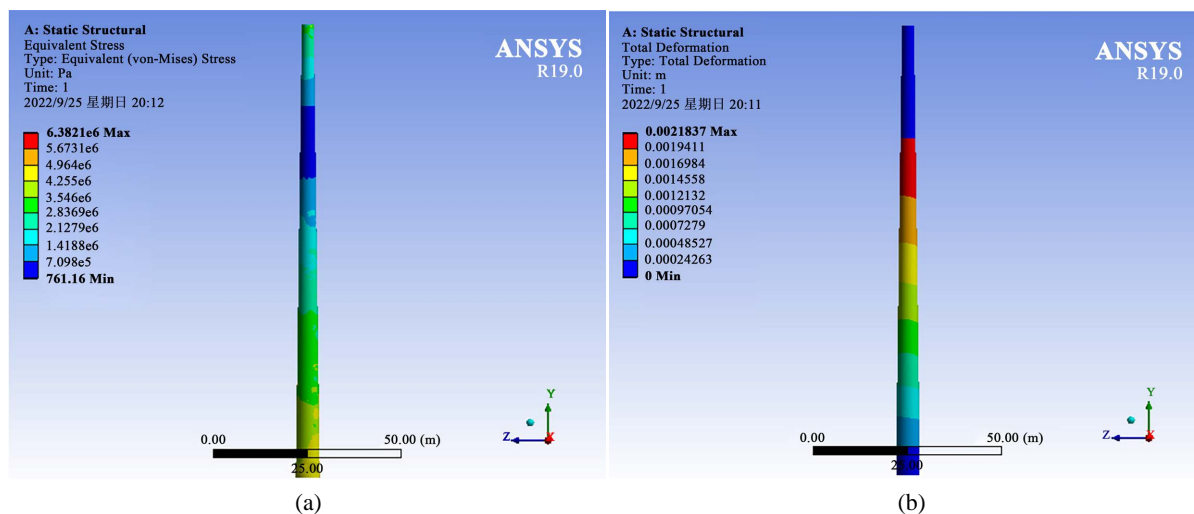
目前单件风机塔架不可拆卸，一处损坏需要将塔架全部替换，造成材料的浪费，经济效益低。在运



输方面,塔架的高度与重量增加了运输的难度,增加了人工工作量,在增加工程量的同时也造成了安全隐患。故本文提出一种钢-混凝土[13]材料的嵌套式组装[14],对整体风机塔架分块处理,运输到风电场后再进行组装。



**Figure 7.** Deformation nephogram and stress nephogram of 60 m steel and 60 m concrete tower  
**图 7.** 60 米钢、60 米混凝土塔架的形变云图及应力云图

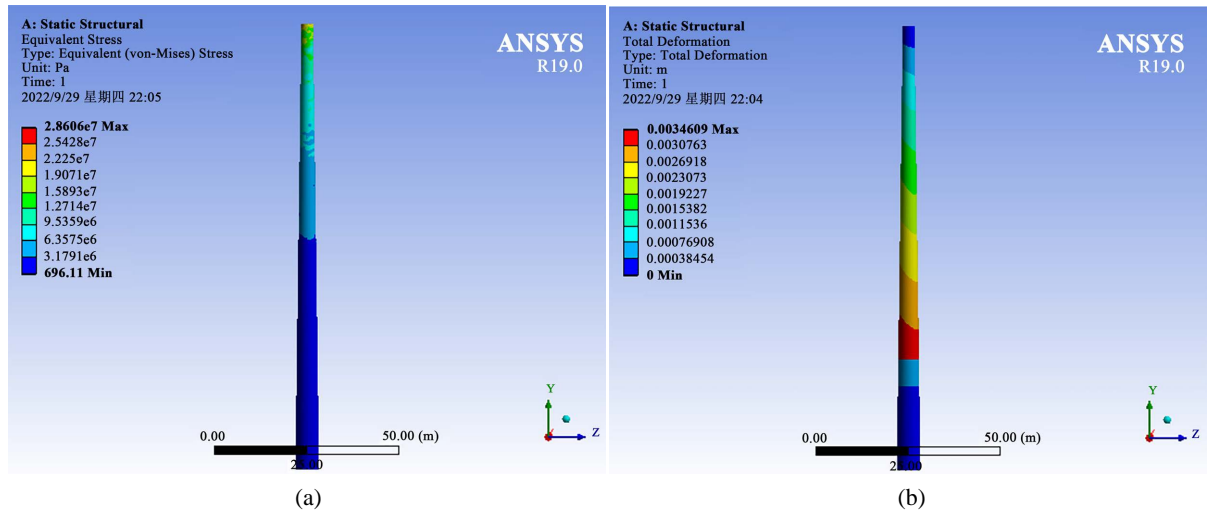


**Figure 8.** Deformation nephogram and stress nephogram of 30 m steel and 90 m concrete tower  
**图 8.** 30 米钢、90 米混凝土塔架的形变云图及应力云图

如图 10 所示,将塔架设计成  $120^\circ$  的模块,三个即可组为一层。塔架内壁铺设钢管,外部浇筑混凝土,钢管比之一般的钢筋,具有防漏水的功效。钢-混凝土材料保证了塔架的硬度及韧性,模块化塔架减短了生产周期,省去混凝土一层一层浇筑的施工时间,塔架不必整体运送,减少运输难度。

如图 11 所示,为组装后的一层塔架结构。

对修正后的模型再次进行上述仿真。已知整个塔架受力最大处在塔架中部,故选择此处作为研究对象。探究其在三种机头重量及最小风速  $5 \text{ m/s}$ 、平均风速  $15 \text{ m/s}$ 、季风风速  $25 \text{ m/s}$  三种风速下的受力及形变。应力分析结果如图 12 所示,形变分析结果如图 13 所示。



**Figure 9.** Deformation nephogram and stress nephogram of 90 m steel and 30 m concrete tower  
**图 9.** 90 米钢、30 米混凝土塔架的形变云图及应力云图

**Table 1.** Stress detection point data  
**表 1.** 应力探测点数据

		功率/mw	风速/m/s	应力/ $10^6$ Pa				
120	13.2	5	6.2507	1.8705	0.6986	2.3793	3.9677	
			15	6.7237	1.8947	0.7359	2.3941	4.0221
			25	6.7885	1.8071	0.7414	2.3834	4.0219
		12	5	6.6676	1.8565	0.7561	2.3834	4.0217
			15	6.7237	1.9083	0.7413	2.3834	3.9707
			25	6.3256	1.8823	0.7414	2.4047	3.9715
	10	5	6.3391	1.8172	0.7113	2.3883	3.7632	
			15	6.6661	1.8943	0.6971	2.3671	3.7952
			25	6.9521	1.7919	0.7413	2.3993	3.3725
		13.2	5	2.6646	0.03	2.1126	3.1342	4.8231
			15	2.812	0.0602	2.0367	3.0753	5.6078
			25	2.3285	0.0247	2.1806	2.987	4.8469
30 + 90	5	2.7255	0.0101	2.0791	3.1586	4.5971		
		12	15	2.5288	0.0371	2.0365	2.9777	4.7167
		25	2.8163	0.0378	2.0644	3.0644	4.7305	
	10	5	2.767	0.0865	2.1225	3.2009	4.4074	
		15	2.6685	0.0663	2.1112	3.1412	4.4444	
		25	2.5468	0.1297	2.0355	3.1327	4.3949	
60 + 60	13.2	5	1.3449	0.0036	0.0011	0.00147	2.2097	
		15	1.2228	0.0034	0.0121	0.0147	2.14	
		25	1.731	0.0036	0.0131	0.0153	2.1267	



Continued

60 + 60	12	5	1.3159	0.0034	0.0001	0.0128	1.9455
		15	0.9596	0.0034	0.0134	0.0141	1.8762
		25	1.1035	0.0034	0.0134	0.0137	1.8762
	10	5	1.003	0.0035	0.0098	0.0111	1.5627
		15	0.8965	0.0031	0.0079	0.0104	1.6313
		25	1.5946	0.0028	0.0082	0.023	1.7154
90 + 30	13.2	5	20.708	8.242	2.5381	0.0248	3.5762
		15	20.023	4.9178	2.7416	0.0663	2.4851
		25	21.429	5.8681	2.7078	0.0845	2.7546
	12	5	21.397	5.3558	2.7267	0.0844	2.5066
		15	22.406	4.9126	2.6123	0.0121	2.3269
		25	20.925	6.6639	2.7494	0.0789	2.4173
	10	5	20.859	5.9093	2.8985	0.079	2.5554
		15	20.859	5.8758	2.8619	0.079	2.2905
		25	20.178	6.1003	2.7357	0.0619	2.2999

Table 2. Deformation detection point data

表 2. 形变探测点数据

		功率/mw	风速/m/s	形变/ $10^{-6}$ m			
120	13.2	5	8.5055	633.33	696.29	456.06	9.4111
		15	21.976	625.02	697.86	456.06	9.4113
		25	21.975	627.14	697.86	458.73	3.8355
	12	5	8.5048	633.33	694.64	456.05	3.8357
		15	45.136	633.33	694.64	450.68	3.8359
		25	21.975	629.22	695.47	456.06	15.128
	10	5	35.592	632.38	696.28	449.45	9.7576
		15	22.869	624.04	695.47	457.48	9.7576
		25	22.869	630.32	696.28	449.45	4.2194
30 + 90	13.2	5	24.079	123.58/2157.8	1658.1	200.41	6.5499
		15	18.453	119.84/2161.3	1657.8	907.62	6.0857
		25	11.894	120.73/2157.4	1665.3	912.58	6.95
	12	5	13.628	105.62/2075.6	1585.4	860.39	4.9793
		15	23.395	101.12/2080.4	1594.6	873.46	3.4974
		25	2.9284	102.32/2078.3	1591.4	873.46	10.255
	10	5	7.764	77.637/1941.6	1524.2	839.45	6.1985
		15	5.6768	81.268/1944.9	1514.9	699.42	5.3904
		25	16.154	79.859/1940.2	1520.5	841.74	8.4121

Continued

60 + 60	13.2	5	0.0107	0.3205	0.6327/0.6366	0.3236	0.0023
		15	0.0123	0.3223	0.6301/0.6389	0.3301	0.0083
		25	0.0121	0.3205	0.6304/0.6344	0.3325	0.0065
	12	5	0.009	0.2914	0.573/0.575	0.3003	0.0124
		15	0.0124	0.2995	0.5731/0.5746	0.3043	0.0075
		25	0.006	0.2954	0.5772/0.5767	0.2984	0.0075
	10	5	0.0085	0.2443	0.4808/0.4807	0.2504	0.002
		15	0.0052	0.246	0.4774/0.4824	0.2504	0.0063
		25	0.0028	0.2635	0.4773/0.4837	0.2436	0.0033
90 + 30	13.2	5	43.514	1457	2443	3334.9/469.45	8.8547
		15	66.778	1429.3	2461.7	3334.9/459.67	3.324
		25	68.362	1448.6	2461.5	3325/469.45	14.667
	12	5	66.689	1458.4	2480	3356.4/449.3	3.1519
		15	66.688	1480.2	2474	3321.9/449.19	3.155
		25	87.966	1465.8	2492.4	3372.6/449.59	8.5284
	10	5	44.19	1540.4	2593.2	3452.1/391.51	11.725
		15	86.762	1495.6	2560.6	3458.4/387.84	2.9668
		25	44.19	1525.3	2573.3	3445.7/393.32	7.2048

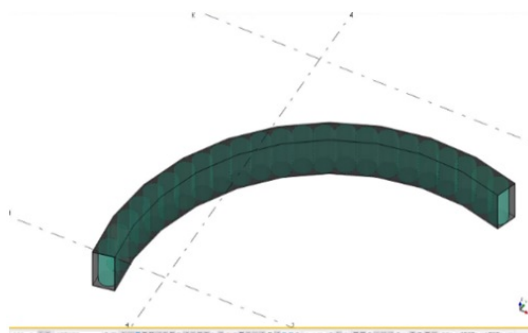


Figure 10. Fan tower module  
图 10. 风机塔架模块

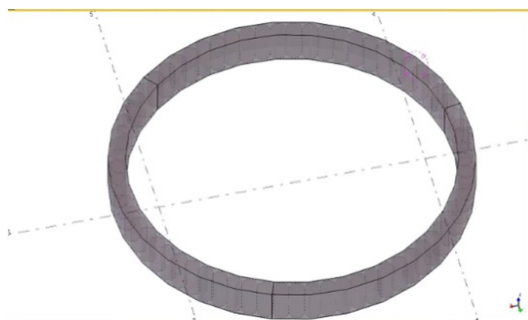


Figure 11. Assembled tower  
图 11. 组装后的塔架

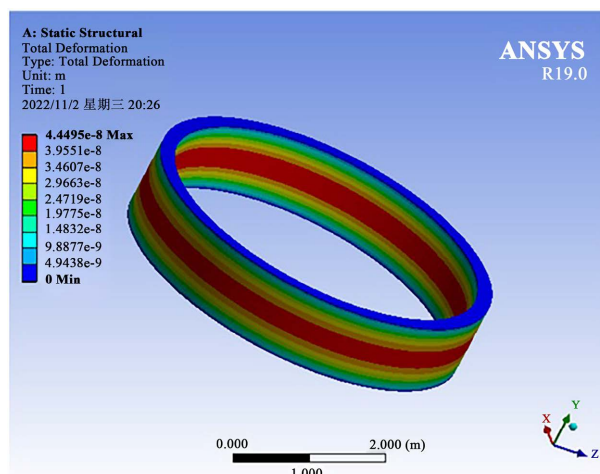


Figure 12. Stress analysis results

图 12. 应力分析结果

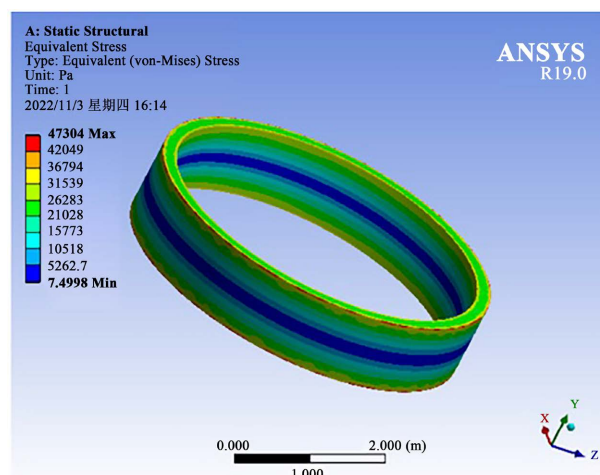


Figure 13. Deformation analysis results

图 13. 形变分析结果

对其添加探测点，得到的数据如表 3 所示。

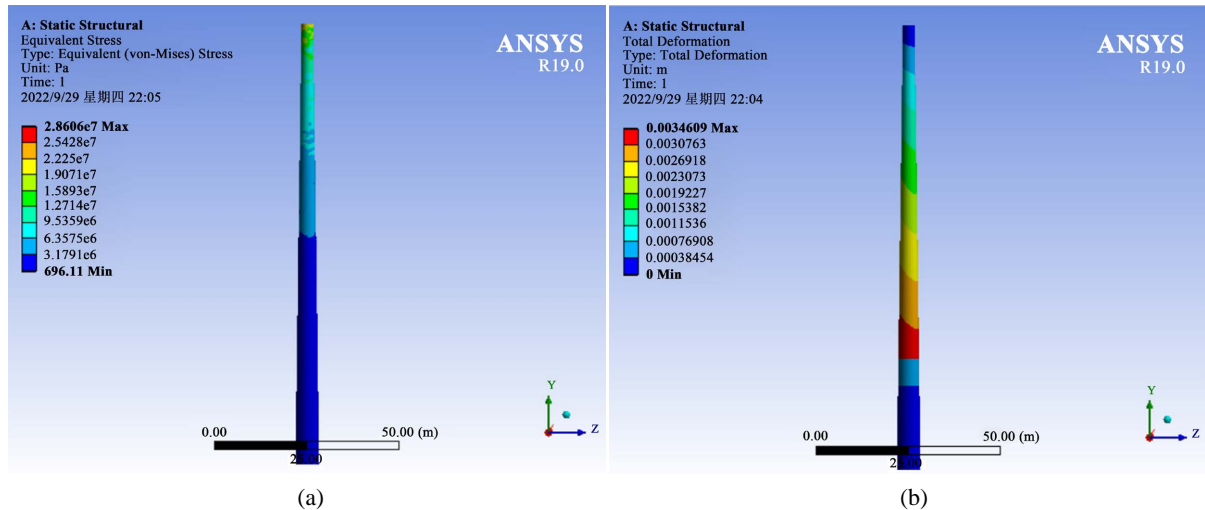
Table 3. Stress and deformation detection point data

表 3. 应力及形变探测点数据

功率/mw	风速/m/s	应力/Pa	形变/ $10^{-8}$ m
13.2	5	23,919	4.204
	15	22,854	4.1942
	25	22,475	4.2107
12	5	22,475	4.204
	15	25,195	4.1942
	25	23,093	4.2107

## Continued

	5	25,195	4.1669
10	15	24,697	4.2178
	25	24,641	4.2176



**Figure 14.** Stress nephogram and deformation nephogram of design model  
**图 14.** 设计模型的应力云图及形变云图

依优化模型提出的方案对整体塔架建模，新建塔架进行应力分析和形变分析，结果如图 14 所示。

由修正模型的受力数据可知，修正模型不仅自身质量小，并且能承受更大的载荷，足以满足大型风电塔架的要求。

## 6. 结论

本文对 120 米高塔架的进行建模，探究不同比例混凝土段和钢段组成的塔架在不同风速、不同风机机头压力下的受力情况。使用应力云图展现整体塔架的受力及形变，采用探测点的方法监测点的数据。通过对数据的采集分析得出塔架中部及衔接处受力最大、损伤最重的结论。

本文提出一种结构嵌套式组装方式，与传统风机塔架相比，该方案不仅满足大型风电塔架的要求，还具有施工周期短、运输方便、易更换更经济的特点。对于未来风机塔架结构的优化有一定的参考价值。

## 致 谢

感谢基金项目《基于光纤检测系统的运营期海上风电叶片多区域损伤定位机理研究(61803325)》为研究提供基金支持。

## 基金项目

基于光纤检测系统的运营期海上风电叶片多区域损伤定位机理研究(61803325)。

## 参考文献

- [1] 刘尚坤. 大型风力机塔架的模式与强度分析[J]. 现代机械, 2012(1): 44-46.
- [2] 黄一航. 钢-混组合式风机塔架设计方法研究[J]. 四川建材, 2019, 45(11): 51-53+63.

- 
- [3] 李斌, 程亚超, 牛丽华. 钢管混凝土风电塔架 K 型焊接管板节点参数研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(3): 179-184.
- [4] 杨晨旭. 钢管混凝土格构式风电塔架新型装配式节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27724/d.cnki.gnmkg.2021.000160>
- [5] 张冬冬. 预应力混凝土风机塔架模型试验和分析研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [6] 崩兴峰, 祁德庆. 海上风机的分部与整体结构设计现状[J]. 结构工程师, 2011, 27(3): 140-148.
- [7] 杜坡. 兆瓦级风电机组的载荷计算与性能分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [8] 周炬, 苏金英. ANSYS Workbench 有限元分析实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [9] 高春彦, 刘泽, 史治宇. 风电机组塔架极限风载荷计算及对比研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1373-1380.
- [10] 章双全, 刘敬波, 员一泽, 王海龙. 基于 SolidWorks 二次开发的风机塔架参数化设计[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(2): 143-145.
- [11] 胡其登. SOLIDWORKS 零件与装配体教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [12] 张庆健. 预应力风机塔架设计及静力学分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2016.
- [13] 董崇海. 钢-混凝土组合结构风电塔架力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [14] 许斌, 李正超, 谢咏剑. 组合风电塔架混凝土填充钢箱连接段数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2016(3): 30-33.