

# 新型能源电力设施结构设计中的荷载及安全分析

李丽香

中智广西人力资源服务有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i5.9909

**[摘要]** 随着对清洁能源需求的不断增长,新型能源电力设施如风力发电塔得到了广泛的应用。本文详细探讨了风力发电塔结构设计中的荷载分析以及与结构安全相关的重要因素。首先阐述了风力发电塔所承受的各类荷载,包括风荷载、重力荷载、地震荷载等的计算方法和特点。接着分析了荷载组合对结构的影响,以及如何通过合理的结构设计来确保在各种荷载组合下的结构安全。通过对结构安全评估方法的研究,包括应力分析、变形分析等,为风力发电塔的优化设计提供依据。同时,结合实际工程案例和数据,展示了荷载分析与结构安全在风力发电塔设计中的重要性。

**[关键词]** 风力发电塔; 荷载分析; 结构安全; 结构设计; 清洁能源

中图分类号: TB482.2 文献标识码: A

## Load analysis and structural safety in the structural design of new energy power facilities, such as wind power towers

Lixiang Li

Zhongzhi Guangxi Human Resources Service Co., Ltd

**[Abstract]** With the continuous growth of demand for clean energy, new energy power facilities such as wind power towers have been widely used. This article discusses in detail the load analysis and important factors related to structural safety in the design of wind turbine tower structures. Firstly, the calculation methods and characteristics of various loads borne by wind power towers, including wind loads, gravity loads, seismic loads, etc., were elaborated. Then, the impact of load combinations on the structure was analyzed, and how to ensure structural safety under various load combinations through reasonable structural design. By studying structural safety assessment methods, including stress analysis, deformation analysis, etc., a basis is provided for the optimization design of wind power towers. Meanwhile, by combining practical engineering cases and data, the importance of load analysis and structural safety in wind turbine tower design is demonstrated.

**[Key words]** wind power tower; Load analysis; Structural safety; Structural design; clean energy

### 引言

新型能源电力设施在当今全球能源转型中扮演着至关重要的角色。风力发电作为一种清洁、可再生的能源获取方式,风力发电塔的结构设计是确保其高效、安全运行的关键。在风力发电塔的结构设计中,荷载分析是基础,它直接关系到结构的安全性、可靠性和经济性。准确地分析荷载,并合理地设计结构以承受这些荷载,是风力发电塔设计的核心任务。

### 1 风力发电塔结构概述

风力发电塔主要由塔架、机舱、风轮等部分组成,如图1。塔架是支撑整个风力发电系统的关键结构,其高度通常从几十米到上百米不等<sup>[1]</sup>。塔架的结构形式多样,常见的有筒形塔、桁架塔等。筒形塔具有较好的整体性和美观性,而桁架塔在材料利用效率方面具有一定优势<sup>[2]</sup>。



图1 风力发电塔

### 1.1 塔架的材料

风力发电塔的塔架材料主要包括钢材、混凝土等。钢材具有高强度、良好的韧性和可加工性,是目前应用最广泛的材料。混凝土塔架则在一些大型、海上风力发电项目中也有应用,其具有较好的耐久性和抗腐蚀性<sup>[3]</sup>。

### 1.2 塔架的连接方式

塔架的连接方式对于结构的整体性和传力性能有着重要影响。在钢结构塔架中,常见的连接方式有螺栓连接和焊接连接。螺栓连接便于安装和拆卸,而焊接连接可以提供更好的连接强度<sup>[4]</sup>。

## 2 荷载分析

### 2.1 风荷载

风荷载是风力发电塔所承受的最主要荷载之一。风对塔架的作用力可以通过空气动力学原理进行分析。根据伯努利方程,风的动压与风速的平方成正比。当风作用于塔架时,会产生压力和吸力。风荷载的大小与风速、空气密度、塔架的体型系数等因素有关<sup>[5]</sup>。

风荷载的计算通常采用规范推荐的方法。例如,我国的《建筑结构荷载规范》给出了风荷载标准值的计算公式:  $w_k = \beta_z \mu_s \mu_{z0} w_0$ , 其中  $w_k$  为风荷载标准值,  $\beta_z$  为高度  $z$  处的风振系数,  $\mu_s$  为风荷载体型系数,  $\mu_z$  为风压高度变化系数,  $w_0$  为基本风压。对于风力发电塔这样的高耸结构,风振系数的计算尤为重要。风振系数考虑了风的脉动特性对结构的影响,其计算需要考虑结构的自振频率、阻尼比等因素<sup>[6]</sup>。

### 2.2 重力荷载

塔架自重是风力发电塔结构设计中必须考虑的重力荷载之一。塔架自重的计算需要根据塔架的结构形式、材料密度和尺寸进行精确计算。对于筒形塔,其自重可以通过计算塔壁的体积乘以材料密度得到。对于桁架塔,则需要分别计算各杆件的重量并求和<sup>[7]</sup>。

### 2.3 地震荷载

在地震多发地区,地震荷载是风力发电塔结构设计中需要考虑的重要荷载。地震时,地壳的运动通过地基传递给塔架,使塔架产生振动。地震荷载的大小与地震的震级、震中距、场地土的类型等因素有关<sup>[8]</sup>。

### 2.4 其他荷载

温度变化会引起塔架的热胀冷缩,从而产生温度应力。在昼夜温差较大或者季节温差明显的地区,温度荷载对风力发电塔结构的影响不容忽视。温度荷载的计算需要考虑塔架的材料热膨胀系数、结构的约束条件等因素。

在寒冷地区,冰荷载可能会对风力发电塔造成影响。冰荷载包括静冰压力和动冰压力。静冰压力是由于冰的冻结和膨胀对塔架产生的压力,动冰压力则是在水流或风的作用下,冰块撞击塔架产生的冲击力。冰荷载的计算较为复杂,需要考虑冰的厚度、冰的强度、水流速度等因素。

## 3 荷载组合

### 3.1 基本荷载组合

在风力发电塔的结构设计进程中,基本荷载组合的考量是确保结构安全性与合理性的关键要素。基本荷载组合主要涉及永久荷载和可变荷载的组合情况。永久荷载涵盖了如塔架自重、机舱以及风轮等设备重量这些在结构整个生命周期内始终存在且基本不变的荷载。可变荷载则包括风荷载、温度荷载等在数值和作用方向上可能随时间发生变化的荷载。

在承载能力极限状态下,结构面临着最大的受力挑战,此时的安全性要求更高。所以,荷载组合系数会相应地进行调整,通常会增大可变荷载的组合系数,以确保结构在最不利的荷载组合下依然能够安全可靠地承载。

### 3.2 偶然荷载组合

偶然荷载组合主要聚焦于地震荷载等偶然发生但一旦发生会对结构产生重大影响的荷载与其他荷载的组合情况。地震作为一种不可预测的自然灾害,在地震多发地区的风力发电塔结构设计中必须加以重点考虑。

## 4 结构安全分析

### 4.1 应力分析

应力分析是评估风力发电塔结构安全的重要手段。有限元方法是目前应用最广泛的应力分析方法。通过将塔架离散为有限个单元,建立结构的有限元模型,可以计算出在各种荷载组合下结构各部位的应力。在有限元模型中,需要准确输入塔架的几何尺寸、材料属性、荷载条件等参数。

通过有限元分析,可以得到风力发电塔在不同荷载组合下的应力分布规律。一般来说,在塔架底部和连接部位,应力相对较大。这是因为这些部位承受着较大的荷载传递和应力集中。例如,在风荷载作用下,塔架底部的弯矩和剪力较大,导致该部位的应力水平较高。

### 4.2 变形分析

变形分析对于评估风力发电塔的结构性能也非常重要。变形计算可以采用结构力学方法或者有限元方法。对于简单的结构形式,可以采用结构力学中的梁理论进行变形计算。对于复杂的塔架结构,有限元方法能够更准确地计算出结构的变形。

在结构设计中,需要规定塔架的变形限值。变形限值的确定需要考虑多个因素,如保证机舱和风轮的正常运转、避免结构因过度变形而产生附加应力等。例如,塔架顶部的水平位移限值一般为塔高的1/150~1/200。

## 5 结构安全评估

### 5.1 结构可靠性理论

结构可靠性理论是评估风力发电塔结构安全的理论基础。结构可靠性是指结构在规定的时间内和规定的条件下,完成预定功能的概率。通过考虑荷载的不确定性、结构材料性能的不确定性等因素,采用概率方法来评估结构的可靠性。

### 5.2 安全系数法

安全系数法是一种传统的结构安全评估方法。通过在结构设计中采用一定的安全系数,如材料强度的安全系数、荷载的放

大系数等, 来确保结构的安全性。然而, 安全系数法不能很好地考虑各种不确定性因素的影响。

## 6 实际工程案例

### 6.1 工程概况

以某沿海地区的风力发电项目为例, 该项目采用了50台单机容量为3MW的风力发电机组。风力发电塔为筒形钢结构塔架, 塔高为100米, 底部直径为6米, 顶部直径为3米。

### 6.2 荷载分析

根据当地的气象观测数据, 该地区50年一遇的基本风压为 $0.6\text{kN/m}^2$ 。采用规范推荐的方法计算风荷载, 考虑到塔架的高度和体型系数, 计算得到塔架在不同高度处的风荷载标准值。同时, 通过风洞试验对风荷载进行了修正, 以提高计算结果的准确性。

塔架自重通过计算塔壁的体积和钢材密度得到, 约为300吨。机舱和风轮等设备的重量共计约150吨。

根据该地区的地震设防烈度为7度, 场地土类型为II类, 采用振型分解反应谱法计算地震荷载。计算得到在地震作用下塔架的基底剪力和弯矩。

### 6.3 结构安全评估

采用有限元软件建立塔架的有限元模型, 输入荷载条件和材料属性, 计算得到在各种荷载组合下塔架各部位的应力。结果表明, 在正常使用极限状态和承载能力极限状态下, 塔架各部位的应力均满足设计要求。

计算塔架在风荷载和重力荷载作用下的变形, 结果显示塔架顶部的水平位移为0.5米, 满足塔高的1/200的变形限值要求。

### 6.4 结构优化

根据荷载分析和结构安全评估的结果, 对塔架的结构进行了优化。优化后的塔架在保证结构安全的前提下, 减少了钢材的用量, 降低了工程造价。

表1 风力发电塔在不同荷载组合下的应力最大值(MPa)

| 荷载组合                                                                      | 应力最大值 |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|
| $1.0 \times \text{永久荷载} + 1.0 \times \text{风荷载} + 0.6 \times \text{温度荷载}$ | 180   |
| $1.0 \times \text{永久荷载} + 1.0 \times \text{地震荷载} + 0.2 \times \text{风荷载}$ | 200   |

## 7 结论

在新型能源电力设施(如风力发电塔)的结构设计中, 荷载分析与结构安全是至关重要的环节。准确地分析各类荷载, 合理地进行荷载组合, 并通过有效的结构安全分析和评估方法, 能够确保风力发电塔在各种工况下的安全运行。同时, 通过实际工程案例的分析, 也验证了荷载分析和结构安全在风力发电塔设计中的重要性。随着风力发电技术的不断发展, 未来需要进一步深入研究荷载的不确定性、结构的非线性行为等问题, 以提高风力发电塔的设计水平和安全性。

### [参考文献]

[1]庞昆.UHPC增强风力发电塔钢-混转接段静力与疲劳性能研究[D].重庆交通大学,2024.

[2]陈俊岭,赵康,冯又全.风力发电塔基础预应力锚栓T型法兰连接系统计算方法研究[J].太阳能学报,2024,45(04):257-264.

[3]柳柏魁,王鑫.地震载荷作用下风力发电塔响应分析[J].机电工程技术,1-6[2024-09-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1522.TH.20240326.1747.002.html>.

[4]郭松龄,周扬,杨强,等.大型海上风力发电塔转接段静力性能研究[J].船舶工程,2023,45(S2):102-109.

[5]杨帅杰.风力发电塔螺栓松动监测系统的建立与应用[J].建筑结构,2023,53(S1):2131-2136.

[6]徐凯,张锦刚,李周波,等.风力发电塔筒在地震和风载下的失效分析[J].焊管,2023,46(05):50-59.

[7]李万润,范科友,吴王浩,等.主余震序列作用下风力发电塔架结构的地震损伤研究[J].工程力学,1-13[2024-09-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20221213.1131.001.html>.

[8]项颖,王珏.SSI效应对重力式风机动力特性及地震响应的影响分析[C]//中国力学学会.中国力学大会-2021+1论文集(第三册).河海大学机电工程学院,2022:1.

### 作者简介:

李丽香(1989--),女,壮族,广西贵港人,大学本科,中级职称,研究方向:土木工程。