

# Stability Failure Mechanism to Offshore Wind Turbine Tower

Xiaohui Dong, Shucong Zhen

Yancheng Institute of Technology, Yancheng, China

Email: dxhzsc@163.com

**Abstract:** By the analysis on factors causing offshore wind turbine tower unstable failure, the tower fatigue damage unstable mechanism was explained from the viewpoint of energy. As viewed from damage mechanics, combining with residual strength formula of fracture mechanics, according to residual strength decay model proposed by Schaff, elastic modulus calculation model of tower material was deduced. On this basis, using the unit load method, formula of deflection amplitude variation regular in the top of tower is given on the stiffness decay condition. At last, the tower buckling failure mechanism was analyzed. Reference was provided to avoid or reduce instability of offshore wind turbine tower.

**Keywords:** offshore wind turbine; tower; stability failure mechanism; fatigue damage; buckling

## 近海风力机塔架失稳破坏机理研究

董晓慧, 甄树聪

盐城工学院, 盐城, 中国, 224051

Email: dxhzsc@163.com

**摘要:** 在分析近海风力机塔架失稳破坏影响因素的基础上, 从能量的角度阐释了塔架疲劳损伤失稳破坏的机理, 并采用损伤力学方法, 结合断裂力学理论中的剩余强度公式, 依据 Schaff 提出的剩余强度衰减模型, 推导出了塔架材料弹性模量衰减计算模型。在此基础上, 由单位荷载法, 给出了刚度衰减下的塔架顶端挠度幅值变化规律, 运用屈曲理论分析了塔架屈曲失稳破坏机理, 为从根本上避免或最大限度的降低近海风力机塔架失稳破坏及其所造成的损失提供参考。

**关键词:** 近海风力机; 塔架; 失稳破坏机理; 疲劳损伤; 屈曲

### 1 引言

风能资源是清洁的可再生能源, 利用风能发电是新能源领域中技术最成熟、最具开发条件和发展前景的发电方式之一。截止 2008 年底, 世界风电装机容量已经达到 121188 MW<sup>[1]</sup>, 随着装机容量的增加, 风力发电机的制造成本和性能的要求也越来越高, 而海上风电由于其节约土地和风能资源丰富越来越受到风电商青睐。

海上不像陆地地形那样复杂, 风的湍流强度小, 风力机桨叶乃至整个机组承受疲劳损伤也相应较小<sup>[2-3]</sup>, 而立在海上的风力机塔架的受力情况比陆地风力机塔架的受力情况要复杂的多, 不仅要考虑风作用于风力机风轮和塔架上的气动载荷, 还要考虑波浪、流对其产生的水动力载荷, 而塔架的变形和损伤将直接影响风力机整体的可靠性和安全性。

目前, 对于近海风力机塔架的稳定性分析还没有相关文献进行论述。鉴于此, 本文在对影响近海风力机塔架失稳破坏主要因素进行分析的基础上, 阐述了近海风力机塔架疲劳损伤失稳破坏机理和屈曲失稳破坏机理, 并给出了疲劳损伤刚度衰减计算模型及刚度衰减下的挠度变化规律。

### 2 近海风力机塔架失稳破坏的影响因素

#### 2.1 近海风力机塔架结构分析

近海风力机塔架一般采用圆锥筒形薄壁钢结构, 即切割并轧辊成圆锥形, 然后焊接成大型塔架分段部件, 总高度一般为 60-80m, 中间用法兰连接, 法兰盘采用螺栓相互连接, 顶部与发电机转轴相连, 底部与塔基固定, 内部装有电缆、爬梯、平台和电器设备。现代塔架一般设有装卸搬运设备(如起重机), 还有专门为其它船

船或直升机准备的额外入口,使进出塔架作业更方便。在距离海平面上约9m处设有平台,在接近海平面处设有船舶停靠的装置<sup>[4]</sup>。根据其结构特点,总结其引起塔架失稳原因如下:

- 风力机塔架本身是变截面结构,各截面的抗弯截面模量随塔架高度而变化,造成各截面的刚度各不相同。
- 塔架是焊接结构,焊缝的疲劳损伤是塔架稳定的潜在隐患。
- 法兰与塔体通过焊接相连,法兰的平面度、角变形、端面平行度、同轴度、椭圆度直接影响塔架的刚度。
- 法兰盘之间采用螺栓连接,构件的应力集中引起塑性变形影响构件的疲劳寿命。
- 塔架必须设有入口以方便进出塔架的作业,入口的应力集中影响塔架的强度与刚度。

## 2.2 近海风力机塔架载荷分布

风暴潮环境下作用在近海风力机塔架上的载荷除了由风作用于风力机风轮和塔架产生的气动载荷外,塔架还受到波浪、流等水动力载荷的作用,塔架的变形和振动直接影响风轮以及整个风力机结构的空气动力学和结构动力学特性<sup>[5]</sup>,具体表现包括:

- 风轮和机舱上的气动载荷、惯性载荷作用在塔架顶部不会改变塔架结构的固有动态特性,但会影响塔架的结构振动强度。
- 台风、海啸以及海冰等自然不确定因素带来的极端载荷,往往是引起塔架断裂的关键因素。
- 由于塔架的变截面以及不同高度风速不同,致使塔架在设计时很难计算载荷大小,其强度与刚度的计算存在一定的误差。
- 机组重心偏移引起的偏心力矩直接影响风力机塔架的稳定性和动态特性。
- 气动载荷和水动力载荷是引起塔架疲劳损伤的主要因素,疲劳过程中,随着损伤的增加,塔架的有效刚度逐步衰减,塔架顶端的位移(挠度)幅值逐步放大,最终导致塔架失稳。

## 2.3 自然环境

我国海域不同于欧洲北海,在我国,海洋环境气候比较恶劣,除了渤海湾台风比较少之外,其它几个海域都有台风问题,而地震所带来的海啸问题,四个

海域全部涉及,除此之外,海冰对塔架的冲击力也是影响塔架稳固性的因素。因此,如何消除自然灾害对塔架稳固性带来的影响,是目前海洋风电产业中无法解答的难题。

## 2.4 设计与制造因素

设计原因造成的塔架失稳破坏主要体现在系统固有频率的计算不够准确形成不稳定区。

制造过程影响塔架稳定性的原因主要体现在法兰的制造误差、焊接不当或存在裂纹,防腐不当造成塔架腐蚀损伤等。

## 3 塔架疲劳损伤失稳破坏机理分析

### 3.1 疲劳损伤破坏机理

疲劳损伤是塔架失稳破坏的重要形式之一,近海风力机塔架材料一般采用Q345C钢(塔体)、Q345E钢(法兰)和Q345E-Z25钢(门框),当材料内部存在位错、微裂纹、微孔洞等缺陷时,这些缺陷在外界循环载荷的作用下不断演化,最终导致材料的破坏。塔架疲劳损伤过程可以看成是能量的转化过程,在塔架材料内部结构损伤的形成、发展及破坏过程中,如果材料受力积累变形能不能及时转化为热能而散失,材料将通过产生表面裂纹而破损将能量转化为表面能等。之后一段时期,裂纹继续开展并伴有新的裂纹出现,此时塔架的有效承载面积减少,抗弯强度和刚度明显降低,当超出塔架的承载能力时,便造成了塔架的断裂或倒塌。

### 3.2 塔架受损状态下的剩余强度

#### 3.2.1 塔架力学模型

在不考虑塔基及海床阻尼状况下,根据近海风力机的结构特点和受力情况,可将其简化为如图1所示的受横向弯曲的悬臂结构。

图1中 $G$ 、 $P_0$ 、 $M$ 、 $q_w$ 、 $q_s$ 分别为作用于塔架顶端的重力、横向力、弯矩和沿其高度上作用的风载荷和波浪载荷, $dA$ 为损伤单元, $D$ 为损伤变量, $A$ :无损伤状态的横截面面积, $\tilde{A}$ 为受损后的有效承载面积。

其中,作用于变截面塔架结构上的风载荷 $q_w$ ,一般应按随着高度系数而变化的倒梯形非均布载荷计算。但由于变截面塔架结构的截面随着高度的增加,其截面却相应减小。因而,实际上受到的风载荷也随着迎风面积的减少而相应的减小,故可将风载荷近似

地当作均布载荷来处理<sup>[6]</sup>，波浪载荷  $q_s$  亦如此。

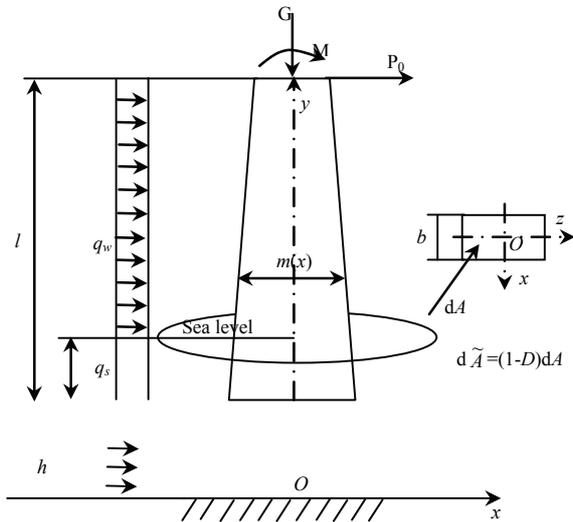


Figure 1. Mechanical model of the tower and damage cell in the fatigue damage process  
图 1. 塔架力学模型与疲劳过程中的损伤单元

### 3.2.2 损伤变量的计算与应变等效假设

由损伤力学理论，损伤变量可以借助于图 1 所示的损伤单元来定义，单元体受载后，由于微裂纹和微孔洞的存在，微缺陷所导致的微应力集中以及缺陷的相互作用，有效承载面积减小为  $\tilde{A}$ <sup>[7]</sup>。假定这些微裂纹和微孔洞在空间各个方向均匀分布，则

$$D = \frac{A - \tilde{A}}{A} \quad (1)$$

根据应变等效假设，损伤单元在应力  $\sigma$  作用下的应变响应与无损单元在有效 Cauchy 应力张量  $\tilde{\sigma}$  作用下的应变响应相同，即

$$\varepsilon = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-D)} = \frac{\sigma}{\tilde{E}} \quad (2)$$

式中： $\varepsilon$  为一维线弹性应变， $E$  为无损单元塔架材料的弹性模量， $\tilde{E}$  为损伤单元塔架材料的弹性模量。

由式 (1) 和式 (2) 可得

$$\tilde{A} = \tilde{E} \frac{A}{E} \quad (3)$$

### 3.2.2 塔架在受损状态下的剩余强度

剩余强度是指元件在使用一段时间后，该元件还具有的抵抗外载荷的能力<sup>[8]</sup>。对于金属材料，剩余强度开始衰减的较慢，但当循环比  $n/N$  接近于 1 时急剧

减少，从而发生破坏。根据 Schaff 提出的剩余强度模型，其剩余强度为

$$R(n) = R(0) - \left| R(0) - \frac{F_{fi}}{A(n)} \left\| \frac{n}{N} \right|^c \right| \quad (4)$$

式中： $R(0)$  为静强度， $F_{fi}$  为疲劳载荷对塔架产生的疲劳内力， $A(n)$  为经过  $n$  次循环后，元件的有效截面积， $c$  为指数，主要取决于塔架材料内部损伤的发展规律，当  $c=1$  时， $R(n)$  退化成线性规律形式，当  $c$  大于 1 时， $R(n)$  具有突然失效的特性， $n$ 、 $N$  分别为疲劳载荷作用在塔架上的循环次数与塔架的疲劳寿命。

根据损伤力学理论<sup>[9]</sup>及塔架损伤机理分析，塔架断裂时所需的表面能是由断裂面附近所储藏的应变能提供，即塔架受损状态下的剩余强度为

$$R(n) = \sqrt{\frac{\gamma \tilde{E}}{b}} \quad (5)$$

式中： $\gamma$  为表面能密度（根据塔架的材料查物理手册获得）， $b$  为晶格间距（根据塔架的材料查物理手册获得）。

联合式(3)、式(4)和(5)计算得到塔架损伤状态下的弹性模量衰减方程为

$$\tilde{E} = \frac{b}{\gamma} \left( R(0) - \left| R(0) - \frac{F_{fi}}{A(n)} \left\| \frac{n}{N} \right|^c \right| \right)^2 \quad (6)$$

根据式(6)，只要确定了疲劳载荷、塔架静强度以及疲劳载荷作用于塔架的循环次数和塔架的疲劳寿命就可以进行塔架刚度衰减分析。

### 3.3 刚度衰减下的挠度变化规律

疲劳过程中，随着损伤的增加，塔架的有效刚度逐步衰减，塔架顶端挠度逐渐增大。根据单位荷载法，疲劳过程中塔架顶端的挠度幅值变化规律为

$$f(n) = \int_0^l \frac{P_0(l-y)^2}{\tilde{E}I_n(y)} dy + \int_0^l \frac{M(l-y)}{\tilde{E}I_n(y)} dy + \int_h^l \frac{\frac{1}{2}q_w(l-y)^3}{\tilde{E}I_n(y)} dy + \int_0^h \frac{\frac{1}{2}q_s(l-y)^3}{\tilde{E}I_n(y)} dy + \int_0^l \frac{Gx(l-y)}{\tilde{E}I_n(y)} dy \quad (7)$$

式中：

$l$  为塔架的高度；

$h$  为塔架位于海平面以下的高度；

$I_n(y)$ 为由于损伤, 横截面的有效惯性矩, 其值为

$$I_n(y) = \int_A x^2 d\tilde{A} = 2 \int_0^{m/2} x^2 (1-D) b dx \quad (8)$$

式(8)中:  $m$  为塔架横截面的高度;

式(7)中: 1、2、3、4、5 项分别表示横向力、弯矩、风载荷、波浪载荷及轴向力对结构顶端所产生的位移。由于轴向力所引起位移相对其它几项要小得多, 可略去不计。

#### 4 塔架屈曲失稳破坏机理分析

塔架除受横向载荷外, 还受塔架顶端的重力作用使塔架受压。对于受压结构, 随着压力的增大, 结构抵抗横向变形的能力会下降。当载荷达到某一水平, 结构的总体刚度趋于零, 丧失稳定性, 此时若出现横向的挠动, 结构会发生屈曲破坏<sup>[10]</sup>。风力发电机组塔架是一种薄壁圆筒结构, 机组运行时, 塔架在外载荷的作用下发生变形和位移, 作用在塔顶的轴向压力会对塔架各截面产生弯矩, 当外载荷达到一定值时, 会导致塔架某一截面的屈曲超出其屈服极限, 局部失稳, 使得塔架发生破坏<sup>[11]</sup>。根据工程结构失稳时平衡状态的变化特征, 塔架主要存在以下两类屈曲失稳问题。

##### 4.1 分叉点失稳

当作用于塔架上的轴向载荷没有达到极限值时, 塔架始终保持垂直方向的稳定平衡状态, 此时若对其施加横向外载荷, 塔架出现微小弯曲, 撤去载荷后, 将恢复原有平衡状态。当塔架轴向载荷达到某一极限值时, 塔架突然产生弯曲, 即屈曲, 平衡状态由原来的垂直平衡变为微小弯曲平衡, 此极值点即为分叉点, 其载荷为屈曲载荷。之后, 塔架的平衡途径分为两条: 若无横向外载荷, 它将沿一个途径发展, 这一途径上各点对应的平衡状态不稳定。若有横向外载荷, 它将沿另一途径发展, 其各点对应着稳定的平衡状态。

##### 4.2 极值点失稳

由于塔架的疲劳损伤导致刚度衰减及风力机的重心偏移使塔架处于偏心受压状态, 且塔顶处承受横向载荷、温度应力, 塔架下的塔基还要承受土的弹性阻抗, 所以塔架初始状态就处于压弯平衡状态, 其塔顶的挠度随外载荷的增加持续增大。当外载荷达到某一极限值时, 塔架所受轴向载荷稍有增加就会由于平衡的不稳定而突变破坏。因为偏心造成的塔架始终处于

压弯状态, 故借用稳定性分析的极值点失稳的概念, 也将这种现象称作做极值点失稳。

#### 5 结论

1) 从近海风力机塔架的结构、载荷分布、自然环境以及设计与制造五个方面分析了易引起塔架失稳破坏的主要因素, 得出了结构特点、疲劳损伤、极端载荷和海冰、设计出现不稳定区以及制造误差是引起塔架失稳破坏的主要原因

2) 从能量的角度分析了塔架疲劳损伤失稳破坏的机理, 并从损伤力学理论出发, 结合断裂力学中的剩余强度模型, 利用应变等效性假设, 根据 Schaff 提出的剩余强度衰减模型, 推导出了塔架材料弹性模量衰减模型。在此基础上, 由单位荷载法, 给出了刚度衰减下的塔架顶端挠度幅值变化规律。

3) 塔架受顶端重力作用而使各截面产生弯矩, 当塔架外载荷达到一定值时, 塔架结构会发生屈曲失稳破坏。

4) 本文的计算模型没有考虑材料损伤的各向异性, 和塔架所承受的载荷变动, 计算模型不够精确, 需做进一步的研究。

#### References (参考文献)

- [1] World Wind Energy Association WWEA, World Wind Energy Report 2008[R], 8th World Wind Energy Conference & Exhibition Wind Power for Islands Offshore and Onshore, Jeju Island, South Korea 23-25 June 2009, World Wind Energy Association WWEA, 2009, 2.
- [2] Bookman Terri T, Focus S, Wind energy's promise, offshore[J], *IEEE Technology and Society Magazine*, 2005, 24, P9-15.
- [3] Lin Yonggang, Li Wei, Cui Baoling, et al, Research on the Load of Offshore Wind Turbines Tower and Foundation[J], *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(7), P961-965 (Ch). 林勇刚, 李伟, 崔宝玲, 等, 近海风力机组塔架塔基载荷研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(7), P961-965.
- [4] Ye Yu, He Yanping, Ge Chuan, et al, Structure, Installation Means of Offshore Wind Farm Assay and Typical Installation Vessels[J], *China Offshore Platform*, 2008, 23(5), P39-44 (Ch). 叶宇, 何炎平, 葛川, 等, 海上风电机组构成、安装方式及典型安装船型[J], 中国海洋平台, 2008, 23(5), P39-44.
- [5] Liu Shengxiang, Li Deyuan, Huang Xiaohua, Fatigue Characteristic Analysis of the Offshore Wind Turbine Tower under Combine Wind and Wave[J], *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(10), P1250-1256 (Ch). 刘胜祥, 李德源, 黄小华. 风波联合作用下的风力机塔架疲劳特性分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(10), P1250-1256.
- [6] Wang Feng, Chen Qi, Yu Guocheng, Research on Large Scale Wind Driven Generator Group Tower Rigidity[J], *Energy Engineering*, 2005, (6), P38-40 (Ch). 王峰, 陈棋, 余国成, 大型风力发电机组塔架刚度的研究[J], 能源工程, 2005, (6), P38-40.
- [7] WANG Jun. Damage Mechanics Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 1997.

- [8] Lu Haibo, Yao Weixing, Residual Strength Model of Element' Fatigue Reliability Evaluation[J], *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2000, 21(1), P74-77 (Ch).  
吕海波, 姚卫星, 元件疲劳可靠性估算的剩余强度模型, *航空学报*[J], 2000, 21(1), P74-77.
- [9] YU Shouwen, FENG Xiqiao. Damage mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [10] Zhu Enchun, C R Calladine, Buckling of Thin Cylindrical Shells Under Locally Axial Compression[J], *Engineering Mechanics*, 2003, (2), P168-170 (Ch).  
祝恩淳, C R Calladine, 圆柱薄壳在局部轴向压力作用下的屈曲[J], *工程力学*, 2003, (2), P168-170.
- [11] Wang Huihui, Huang Fanglin, Wu Hanliang, et al, Finite Element Analysis for the Tower of Wind Turbine[J], *Journal of Shandong JiaoTong University*, 2009, 17(2), P63-67 (Ch).  
王慧慧, 黄方林, 吴含良, 等, 风力发电机塔架的有限元分析[J], *山东交通学院学报*, 2009, 17(2), P63-67.