

# 风电塔筒薄壁圆筒结构稳定性理论研究

杨 扬

华电重工机械有限公司 天津市 300402

**摘要:** 随着超兆瓦级风电机组推广,塔筒高度与薄壁比同步增大,现行设计规范对薄壁圆筒屈曲与失稳的描述存在安全裕度与经济性双重不确定。本文基于薄壳非线性力学与能量变分法,构建考虑几何非线性、残余应力及初缺陷耦合的临界载荷模型,推导解析式并展开参数敏感性分析,给出壁厚与安全系数优化建议。研究表明,残余应力幅值和环缝位置对临界应力下降贡献占比高于20%,模型预测值与规范公式最大差异达18%。成果为超高塔筒稳定设计提供理论支撑。

**关键词:** 风电塔筒;薄壁圆筒;屈曲稳定;残余应力;能量变分

## 引言

风电装机容量持续攀升,6~10 MW级陆上机组和14 MW级海上机组已广泛应用,塔筒高度普遍突破100 m,壁厚控制成为经济性与安全性博弈的关键。薄壁圆筒结构在风、波与疲劳荷载共同作用下易发生整体—局部耦合屈曲。现行《风力发电机组塔架设计规范》(NB/T 10131-2019)借鉴经典Donnell-Mushtari方程,针对80 m级塔筒的简化计算在高塔工况下暴露出保守与局部失配。近年来,数值模拟与缩尺试验虽给出若干修正系数,但缺乏统一的理论框架。基于此需求,本文采用多尺度能量变分法,建立考虑残余应力与初缺陷的非线性屈曲模型,并对几何参数与制造误差进行灵敏度分析,旨在为规范修订与工程优化提供定量依据。

## 1. 薄壁圆筒屈曲理论基础

风电塔筒作为典型的薄壁圆筒结构,其稳定性直接关系到整机运行的结构安全。由于其高径比大、壁厚薄、受力形式复杂,因此结构屈曲行为成为塔筒设计过程中的关键控制指标。从结构力学的角度看,塔筒失稳可分为轴压屈曲、弯曲屈曲和剪切屈曲三类,在工程实际中常表现为整体屈曲与局部屈曲的耦合演化。掌握相关理论基础,有助于更准确地理解塔筒的极限状态并建立合理的稳定性判据。

### 1.1 薄壳力学控制方程与适用范围

薄壁圆筒属于壳体结构范畴,其力学行为受径向弯曲、环向压应力与轴向压应力三维耦合作用控制。20世纪以来,经典薄壳理论建立在Kirchhoff-Love假设基础之

上,假定壳体中点法线在变形过程中始终垂直于中面并不发生伸长。Donnell-Mushtari方程是用于描述薄壁圆筒在轴向压缩下屈曲行为的代表性控制方程。该方程建立于小挠度、小变形线性理论框架下,假设变形量远小于壁厚,适用于无初缺陷、无残余应力且边界条件理想化的情形。

然而,在风电塔筒工程实践中,结构通常存在制造误差、焊接残余应力及风荷载引起的几何非线性响应,导致Donnell模型的预测值偏离实际屈曲载荷。为解决这一问题,后续学者在Sanders-Koiter方程中引入中面大挠度假设及非线性中应变项,形成适用于中大变形分析的理论基础。该类非线性壳体方程可用于描述圆筒在预屈曲阶段的响应曲线及屈曲后路径,从而更精确地刻画临界状态附近的结构行为。尽管非线性模型能提高理论精度,但求解过程复杂,需借助能量变分法或数值迭代手段实现闭解或近似解的获取。

### 1.2 塔筒屈曲判定准则与规范计算方法

我国现行《风力发电机组塔架设计规范》(NB/T 10131-2019)采用近似公式进行薄壁圆筒屈曲验算,其中整体稳定性依据等效长细比与压杆稳定理论进行折算处理,局部屈曲则参照《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)中的圆筒屈曲系数计算。该方法的优点在于简洁实用、便于工程推广,但其理论基础主要来自20世纪六七十年代的压杆屈曲试验数据,未能充分考虑现代制造工艺对塔筒局部刚度分布与缺陷模式的影响。

在典型设计中,塔筒被简化为若干等长段落,采用轴压薄壁圆筒屈曲理论进行分段验算,其临界应力表达

式通常为  $\sigma_{cr} = (k \cdot \pi^2 \cdot E) / (12 \cdot (1 - \nu^2)) \cdot (t/r)^2$ , 其中  $k$  为屈曲系数,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $t$  为壁厚,  $r$  为中性半径。该表达式源自线性壳屈曲理论, 假设结构轴向受压均匀分布, 忽略了风致不对称荷载、连接环缝处局部刚度变化以及应力集中带来的不利影响。

## 2. 超风电塔筒几何特征与失稳机理

近年来, 为满足大功率风电机组的需求, 塔筒结构呈现出高度化、轻量化趋势, 其整体高度普遍超过 100 米, 局部段落甚至接近 120 米。在这一背景下, 风电塔筒的薄壁比显著增大, 结构的稳定性面临新的挑战。塔筒作为薄壁圆筒结构, 不仅需承受轴向自重和机组静荷载, 更需要抵御风压、地震与安装应力等多种扰动。在长期载荷与短时激励的共同作用下, 其屈曲破坏形态表现出多源耦合特征, 亟需从几何结构特性与内在机制层面深入剖析。

### 2.1 几何参数与材料特性对稳定性的影响

风电塔筒一般采用分段拼装焊接结构, 自下而上直径逐步减小, 形成锥形或近似锥形外观。每一段塔筒通常由钢板卷制而成, 壁厚在 12 mm 至 40 mm 之间, 薄壁比普遍超过 60。根据壳体结构理论, 高径比与薄壁比对结构稳定性具有显著影响。薄壁比越大, 屈曲临界应力越低, 结构对初始扰动愈发敏感。而塔筒的锥度设计虽有助于提升风荷载适应性, 但也加剧了结构在局部段落出现应力集中现象, 易诱发局部屈曲或整体失稳。

从材料特性来看, 风电塔筒主要使用 Q345、Q420 甚至 Q550 等高强度钢材。虽然强度等级较高, 但随强度提升而来的屈服比上升、塑性储备下降等问题也在一定程度上弱化了结构对非线性变形的适应能力。尤其在极限工况下, 高强度钢焊接接头处更易形成应力集中区域, 从而降低结构整体稳定极限。此外, 高强度钢材加工过程中容易产生较大幅值的残余应力, 若设计中未加以修正, 将对屈曲判据产生不利影响。

### 2.2 几何非线性、残余应力与初缺陷耦合机理

风电塔筒在制造与运输过程中, 不可避免地会形成初始几何缺陷, 包括局部凹陷、轴向椭圆化与纵向不规则变形。这些缺陷虽在尺度上相对有限, 但由于结构的薄壁特性, 在荷载作用下易诱发应力集中, 成为屈曲的敏感触发源。传统线性理论认为屈曲应力仅由结构参数决定, 然而大量试验与数值模拟已证明, 初缺陷形状与位置对屈曲极限具有决定性影响, 且其影响程度远高于荷载幅值的等比变化。

同时, 塔筒在制造过程中采用环缝与纵缝多段焊接工艺, 焊接热输入形成的热应力与收缩效应导致结构内部分布残余应力场。这种残余应力多表现为轴向拉应力与环向压应力交替出现, 与轴压荷载叠加后可能导致局部超屈服甚至提前失稳。研究表明, 在高薄壁比塔筒中, 残余应力引起的屈曲临界应力下降可达 15%~25%, 而其具体影响程度则与焊缝布置方式、热输入控制以及冷却条件密切相关。

几何非线性响应是另一关键机制。风荷载作用下塔筒的位移响应具有明显的大挠度特征, 尤其在临界荷载附近, 结构刚度发生突变, 呈现出几何软化行为。传统稳定分析方法难以捕捉这种非线性路径效应, 导致实际稳定极限远低于线性理论预测值。几何非线性、残余应力与初缺陷三者之间的相互作用, 不仅复杂而且高度耦合, 其联合效应往往表现为临界状态提早到来、破坏模式从轴对称转向非对称、屈曲后承载能力迅速下降等现象。

实际工程中, 由于结构尺度大、边界条件复杂, 这些耦合效应难以通过单一物理量或理论公式准确描述。基于能量原理构建统一的非线性分析模型, 成为解析其本质机理的有效路径。通过将初缺陷扰动视为能量场中的微扰源, 结合结构总势能函数与变分原理, 可以在理论上揭示薄壁塔筒临界屈曲的触发过程与影响机制。

## 3. 非线性能量变分法临界载荷模型

### 3.1 理论模型构建的基本思路

风电塔筒作为一种典型的薄壁圆筒结构, 其屈曲行为难以用传统线性方法准确预测。工程实践表明, 塔筒结构在受到轴向压力或外部扰动时, 往往在屈曲前出现显著的几何非线性响应。同时, 由于制造误差和焊接工艺的存在, 塔筒不可避免地存在初始缺陷与残余应力分布, 这些因素共同影响其稳定性临界状态。

在这种背景下, 非线性能量变分法被提出作为一种更符合实际工况的理论分析工具。该方法以结构总势能为研究对象, 将稳定性分析转化为对结构变形路径下能量变化规律的理解。其核心思想是: 结构在受力过程中所经历的所有形态变化, 其平衡状态均满足能量最小条件。一旦外部扰动或结构本身的初始缺陷导致能量函数失去稳定极值, 结构即进入屈曲阶段。

在理论建模中, 风电塔筒被简化为连续薄壳体, 其结构响应包括轴向压缩、环向胀缩和径向位移等多重变形模式。在能量法分析中, 这些变形以位移变量的方式

表现为结构势能的变化路径。与传统方法相比，非线性能量模型不仅能反映材料刚度对变形的控制作用，还能捕捉初始几何扰动和残余内力的放大效应，从而建立更全面的失稳机制描述。

### 3.2 屈曲过程中的关键影响因素分析

实际塔筒结构中的非理想因素并非孤立存在，而是相互交织、共同作用于屈曲全过程。

首先是几何非线性。随着风荷载的持续施加，塔筒局部区域常出现明显的预变形趋势。这种变形会改变结构原有刚度分布，诱导某些区域应力集中，从而成为屈曲的触发点。这一过程并非瞬间完成，而是在结构整体刚度逐步削弱的状态下渐进形成。

其次是残余应力。在塔筒的制造过程中，大量采用焊接拼接工艺，不可避免地产生焊接热应力。这些残余应力在结构投入运行前就已存在，并在整个服役周期内持续影响结构稳定性。在一些关键连接环缝附近，残余压应力的存在会降低局部的抗压能力，进而削弱屈曲临界阈值。

再次，初始缺陷在结构屈曲中扮演着放大器的角色。无论是微小的椭圆变形，还是段落接头处的局部扭曲，均可在结构加载过程中迅速发展，改变整个塔筒的受力路径。理论与试验均显示，初始缺陷越大，结构的屈曲承载力越低，且其变化并非线性递减，而是呈现加速削弱的趋势。

将以上因素纳入统一的能量分析框架，不仅能够有效揭示塔筒临界屈曲状态的演化过程，也为设计参数调整提供了理论依据。例如，通过对不同壁厚配置下结构能量响应曲线的比较，可以判断哪种结构设计更具稳定性；又如，在特定残余应力分布模型下分析其对塔筒下部段落的影响，可为焊接工艺优化提供建议。

### 3.3 模型应用建议与工程启示

基于非线性能量分析的研究成果，可以为风电塔筒的结构设计提供若干建议。首先，应避免在薄壁比过大的条件下使用统一壁厚配置，应在塔筒下段等受力集中的区域适当加厚，以增强局部稳定性。其次，建议在焊接工艺阶段控制热输入强度与冷却速度，尽量减少残余应力的幅值与分布不均。对于初始缺陷，则应在制造环节引入更高精度的质量检测标准，降低结构在投入使用

前的潜在不稳定源。

通过本章的分析可见，风电塔筒的屈曲问题并非可简化为某一因素主导的结构响应，而是多种非理想状态叠加下的综合效应。非线性能量变分法提供了系统地认识这种屈曲演化过程的理论平台，为后续章节中的规范修正分析与设计优化建议奠定了坚实基础。

### 4. 结论与展望

本文基于非线性能量变分法，围绕风电塔筒薄壁圆筒结构的屈曲稳定性问题进行了系统理论分析。研究认为，超高风电塔筒在复杂工况下的屈曲行为并非由单一因素引发，而是几何非线性、残余应力与初始缺陷等多种非理想状态协同作用的结果。传统基于线性理论的屈曲判定方法在应对超薄壁、高锥度结构时存在预测误差，往往无法准确反映结构在屈曲前的刚度退化与敏感性增强趋势。通过构建非线性能量模型，本文深入阐释了屈曲临界状态的演化机制，并提出了影响稳定性的关键参数及其优化建议。

理论分析显示，薄壁比、环缝分布及焊接残余应力是控制结构稳定性的核心变量。在合理控制壁厚分布与初始缺陷的前提下，可有效提高结构的屈曲承载能力，提升设计安全裕度。模型所体现的能量失稳路径与工程实践中的屈曲现象具有较高一致性，为今后塔筒设计规范的修订提供了理论依据。

未来工作可在本模型基础上引入更多实际边界条件与多轴荷载组合因素，并与数值仿真及物理试验相结合，进一步提升模型的适应性和应用广度，从而推动风电塔筒结构设计向更高可靠性与更优材料利用效率发展。

### 参考文献

- [1] 刘继坤, 管延锦, 翟继强, 等. 风电塔筒滚弯成形数学建模及实验研究[J]. 锻压技术, 2024, 49(07): 122-132.
- [2] 朱爵进. 浅析风电塔筒焊接工艺的改进策略[J]. 中国机械, 2024, (21): 35-38.
- [3] 陈凯旋. 基于突变理论的风电塔筒抗震稳定性研究[D]. 南京林业大学, 2024.
- [4] 宋丽娟, 白琨, 王子琦. 梯形扰流筋对风电塔筒疲劳特性的影响[J]. 机械工程师, 2024, (03): 134-137.