

风电塔筒仿生竹节式抗台风抗倒伏设计研究

匡舫舫, 高佳颖, 杨潇, 黄琪钰, 周思彤

湖南工学院, 湖南 衡阳 421002

DOI: 10.61369/TACS.2026010011

摘要：针对东南沿海台风高发地区风电机组易发生塔筒折断、倒塌等灾难性事故的问题，本文受竹子优异的抗风抗倒伏生物特性启发，提出了一种基于“竹节”结构的非均匀刚度仿生风电塔筒设计方案。通过有限元分析（FEA）模拟，研究了仿生节间距、节高度及加强筋分布对塔筒模态及抗屈曲能力的性能影响。结果表明，仿生竹节设计能显著提高塔筒的径向刚度，改变局部失稳模态，在高烈度台风载荷下表现出更优的载荷传递机制。

关键词：风电塔筒；仿生设计；竹节结构；抗台风；抗倒伏

Research on Bionic Bamboo Joint Anti-typhoon and Anti-toppling Design of Wind Turbine Tower

Kuang Shanshan, Gao Jiaying, Yang Xiao, Huang Qiyu, Zhou Sitong

Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan 421002

Abstract： Aiming at the catastrophic accidents such as tower buckling and collapse of wind turbines in typhoon-prone coastal areas, this paper proposes a bionic wind turbine tower design with non-uniform stiffness based on the "bamboo node" structure. Inspired by the excellent wind-resistant and anti-lodging biological characteristics of bamboo, the effects of bionic node spacing, height, and rib distribution on the modal and buckling performance of the tower were studied through Finite Element Analysis (FEA). The results indicate that the bionic node design significantly improves radial stiffness and alters local instability modes, demonstrating a superior load transfer mechanism under high-intensity typhoon loads.

Keywords： wind turbine tower; bionic design; bamboo node structure; typhoon resistance; anti-lodging

引言

在全球应对气候变化及推动“双碳”目标实现的背景下，能源生产与消费革命已成为世界性的战略议题。我国能源资源与需求呈逆向分布，海上风电因具备风能资源丰富、单机容量大、运行效率高（年运行小时数可达4000h以上）以及靠近东部负荷中心、就地消纳方便等显著优势，已成为支撑我国能源结构绿色低碳转型的关键增长极^[1]。

然而，海上风电的规模化发展正由近海向深远海、“由浅入深”推进，面临着极端台风载荷导致的结构安全瓶颈。台风产生的巨大倾覆力矩与瞬时载荷是导致风电塔筒失效的核心诱因，传统的锥形或变壁厚薄壁圆筒结构在极端轴压下极易发生局部屈曲失稳。

自然界中，竹子（Phyllostachys）作为一种典型的天然复合材料，拥有极高的径高比却能在飓风中展现出优异的“倒而不折”特性，这为其在工程结构领域的应用提供了重要的仿生启示。研究表明，竹材宏观上的离散竹节（Bionic Nodes）并非结构缺陷，而是关键的增强体，其类似于横向加强隔板（Transverse Diaphragms），不仅能有效约束薄壁管状结构在受弯时的截面畸变，还能起到引导变形模式、提高抗劈强度及径向抗挤压能力的作用^[2]。通过借鉴竹节的等强度设计原理及节间距分布规律，对风电塔筒进行仿生拓扑优化，有望显著提升其在极端工况下的极限承载能力与结构稳定性，为我国海上风电的高质量发展提供新型技术支撑。

一、仿生设计原理

自然界中的竹子作为一种典型的轻质高强生物结构，其优异

的力学性能源于其宏观与微观结构的协同演化。在风载作用下，竹节不仅是连接节间的几何特征，更起到了“横隔板”的力学支撑作用，能够有效抑制薄壁管状结构在受弯时的截面畸变^{[2][3]}。

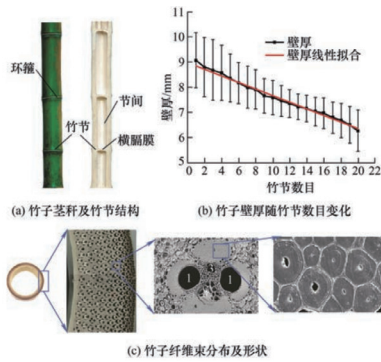


图2.1竹子结构图

(一) 结构仿生学机理

在仿生学视角下，竹子（*Phyllostachys*）的茎干是由离散的竹节（Nodes）和空心的节间（Internodes）构成的多级支撑结构。其抗弯强度与抗屈曲能力与其特有的“节-间”构型密切相关。

1. 截面刚度约束与畸变抑制

研究表明，竹节充当了横向加强刚性隔板（Transverse Rigid Diaphragm）的功能。在外界弯矩或轴向压力作用下，传统的薄壁圆筒易发生截面扁平化（Ovalization），导致局部屈曲失稳。仿生竹节结构通过显著提高节点处的截面惯性矩和径向刚度，强制限制了由于泊松效应产生的截面扩张，将大范围的整体屈曲转化为局部的约束屈曲，从而延缓了结构的崩溃进程^{[3][4]}。

2. 变形引导与载荷路径优化

竹节在结构中还起到“引导变形”的关键作用。文献研究指出，节的介入改变了薄壁管的褶皱模式，使其在极端载荷下能够按预设方向发生变形，避免了瞬时的灾难性折断^[2]。此外，竹节将集中的边缘载荷转化为在节间均匀分布的应力状态，有效抑制了筒体底部的应力集中。这种机制在工程上能显著改善风电塔筒常见的“象脚效应”（Elephant Foot Buckling），提升结构的极限承载能力。

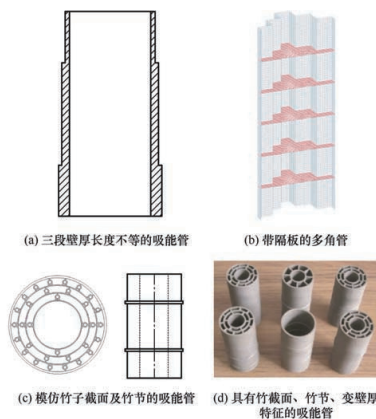


图2.2以仿生竹截面为特征的圆筒管模型

(二) 力学建模与优化策略

为定量研究竹节结构对风电塔筒的增强效应，本研究结合薄壁圆筒非线性屈曲理论，建立仿生塔筒的优化数学模型。

1. 结构本构关系

定义仿生塔筒的节间距为 L_i ，内部强化隔板（仿生节）的几

何参数（如厚度、内径和倒角）对吸能与稳定性有显著影响^[2]。塔筒的极限承载能力不仅取决于径厚比 R/t ，更取决于节分布函数 $f(L_i)$ 。

2. 优化目标函数

在进行数值优化时，旨在寻求质量增加最小化、抗屈曲能力最大化的最优解：

$$\min \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_y} \right) \quad \text{且} \quad \max(\lambda_{cr})$$

约束条件需考虑风电塔筒特有的动态响应要求：

$$\begin{cases} M_{bending} \leq M_{allowable} \\ f_{first} \notin [f_{wind,min}, f_{wind,max}] \end{cases}$$

其中，为最大 Von-Mises 应力，为非线性屈曲因子， $M_{allowable}$ 为许用弯矩， f_{first} 为塔筒一阶固有频率，需避开风载卓越频率区间以防止共振^[3]。

3. 非均匀分布策略

参考竹子自下而上节间距由短变长的生长规律，本设计引入分级非均匀间距策略（即底部密集、顶部稀疏）。这种非均匀设计能使塔筒在承受下部巨大弯矩的同时，保持上部结构的灵活性与轻量化，实现刚度分布与材料布局的协同优化，在满足抗台风极限载荷条件下，最大化材料利用率^{[3][4]}。

二、仿真与性能分析

本节采用有限元分析方法（Finite Element Analysis, FEA），利用 ANSYS Workbench 软件建立全尺寸风电塔筒数值模型，对比研究常规圆筒塔筒与仿生竹节塔筒在极端台风载荷下的结构力学性能。

(一) 有限元模型建立与边界条件

研究对象为某沿海风场常用的 4MW 风电机组塔筒，总高度为 90 米，底部直径为 5.5 米，顶部直径为 3.5 米，采用锥形筒体结构。利用有限元软件建立三维实体模型^[7]。在建模中，充分考虑了机舱、叶轮转动惯量等顶端载荷，并通过增加等效桩长的方法模拟土-结构耦合作用（Soil-Structure Interaction）。

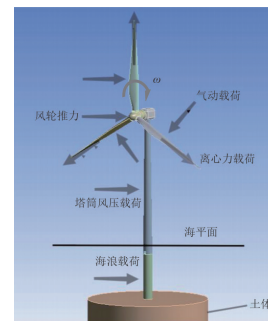


图3.1单桩式海上风电机组三维实体模型

几何模型：常规组为厚度不等的钢制圆锥筒；仿生组在常规模型基础上，根据竹子节间距规律，自下而上布置 15 个环形加强节（竹节）。竹节内部采用环形隔板（Ring Stiffener）结构，厚度与相邻筒体壁厚一致。

风载时程模拟：针对暴风工况，采用线性滤波法（Autoregressive 法）模拟生成脉动风速时程曲线^[6]。计算中选取的粗糙度系数为 0.03，时间步长取为 0.1s。根据模拟得到的瞬时风速，计算作用在塔筒各段的分段风荷载。

模拟工况：选取从切入风速（3m/s）到切出风速（25m/s）区间的 6 种典型平均风速及其对应的叶轮转速进行非线性动力分析^[7]。

材料属性：采用 Q355B 钢材，弹性模量 $E=2.06 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ ，屈服强度 $\delta_y=355 \text{MPa}$

网格划分：使用 Shell181 壳单元对筒体进行网格划分，竹节处进行局部细化，网格尺寸控制在 50mm 以内，确保应力梯度变化捕捉准确。

边界条件：塔筒底部完全固定（Fixed Support）；顶部通过刚性耦合点施加机舱和叶轮的等效集中质量和载荷。

（二）模态分析与动力特性

台风环境下，风荷载具有明显的脉动特征。若塔筒固有频率与风荷载卓越频率重合，将引发共振破坏。

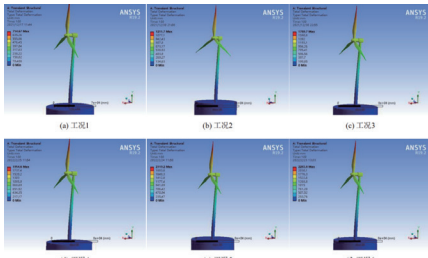


图 3.2 不同工况下 ANSYS 模拟机组整体瞬态响应位移云图

表 3-1 展示了两模型的前三阶固有频率对比。

模态阶数	振型描述	常规塔筒频率 (Hz)	仿生塔筒频率 (Hz)	提升幅度
一阶	前后弯曲	0.285	0.308	+8.07%
二阶	左右弯曲	0.287	0.309	+7.66%
三阶	扭转	1.150	1.280	+11.3%

分析：模态分析结果显示，塔筒的动力特性受外部运行条件显著影响。

频率漂移特性：随着风速从 3m/s 增至 25m/s，由于叶轮转速增加产生的动力软化或硬化效应，塔筒的前两阶模态频率呈现逐渐增大的趋势^[7]。

仿生增强效应：引入仿生竹节（内部环形筋板）后，结构在横向的径向刚度得到显著补偿。这种物理约束不仅提高了整体的一阶频率，使其有效避开风载卓越频率区间，还减小了塔顶在极端载荷下的频率波动范围^[6]。

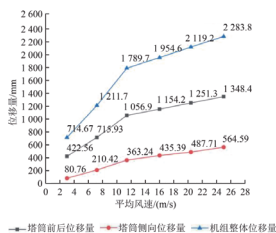


图 3.3 塔筒瞬态响应位移量随平均风速变化曲线

仿生节结构显著增加了塔筒的局部截面刚度（惯性矩），特别是对扭转刚度的提升更为明显。一阶固有频率的提高使塔筒能更好地避开低频风载区间，降低了台风期间发生共振的风险。从振型云图上看，仿生节有效抑制了高阶模式下的局部变形，体现了“竹节”在约束圆周畸变方面的作用。

（三）极限台风载荷下的风致响应分析

为模拟极限台风工况，按照 IEC 61400-1 标准^[10]，在塔筒顶部施加高风速产生的极限弯矩 $M_{\max}$ 和水平推力 $F_{\max}$ 。

在暴风工况（脉动风速时程）作用下，对塔筒顶部的动力响应进行实时监测：

位移波动抑制：仿真显示，塔筒顶部的动力响应具有较强的随机性和波动性。常规塔筒在切出风速下，顶部位移峰值随时间波动剧烈；而仿生竹节塔筒凭借内部筋板对横截面畸变的抑制作用，使得位移响应曲线的振幅包络线更加平稳，有效降低了塔顶的最大位移量^{[6][7]}。

应力传递优化：传统圆筒在弯矩作用下，受压侧底部易出现明显的应力集中。仿生设计通过在关键节段设置“引导变形”的节点，改变了筒壁的屈曲波长，使得应力分布不再集中于底部单一区域，而是沿纵向分段均匀化。

1. 线性屈曲分析 (Eigenvalue Buckling)

通过特征值屈曲分析求得临界失稳载荷因子 λ 。

常规塔筒：屈曲主要发生在底部第三节筒体，表现为典型的“象脚”失稳模式，屈曲因子为 2.8。

仿生塔筒：载荷传递路径发生改变。由于仿生节的存在，载荷被分散至各个节间。屈曲因子提高至 3.6，意味着抗屈曲能力提升了约 28.6%。

2. 非线性极限强度分析 (Non-linear Static)

考虑材料非线性（塑性）和几何非线性（大变形），采用弧长法（Arc-length Method）分析结构破坏过程。

应力分布对比：

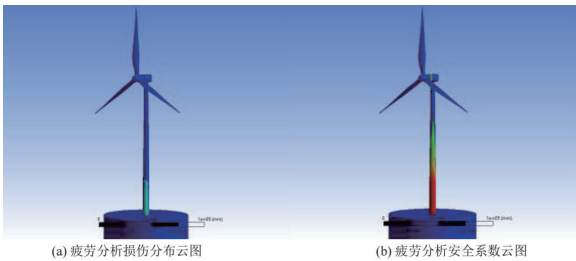


图 3.3 极限载荷下两者的疲劳应力云图。

常规塔筒：应力高度集中于筒体底部边缘和变壁厚过渡处，局部应力最大值达到 380 MPa，已超过材料屈服强度，即将发生局部屈曲。

仿生塔筒：应力分布更加均匀。竹节作为环形加强构件，承担了大部分径向应力，筒体中部应力水平降低。最高应力区出现在受压侧的第一个竹节上方，最大值为 320 MPa，仍处于弹性范围内，结构保持稳定。

3. 位移与刚度分析

在极限载荷下，常规塔筒顶部水平位移为 1450mm，而仿生

塔筒由于整体刚度提升，顶部水平位移减小至1120mm，降低了约 22.7%。这证明仿生设计不仅提高了抗局部屈曲能力，也显著提升了整体结构刚度，对控制风机在极端工况下的变形幅度具有重要意义。

三、抗倒伏机制讨论

风电塔筒在极端服役环境下的抗倒伏能力不仅取决于结构的极限强度，更依赖于其抵抗局部屈曲的能力以及全寿命周期内的状态监测与维护。本部分将结合力学优化参数与健康评估体系，探讨增强塔筒抗倒伏能力的综合机制。

（一）基于壁厚梯度优化的结构抗屈曲机理

传统的塔筒设计通常采用分段式或等厚度结构，在面对台风引起的巨大倾覆力矩时，底部极易因局部失稳而失效^[9]。

参数优化策略：研究表明，采用壁厚分段式线性变化结构可以显著改善应力分布。通过数值仿真分析塔架结构参数与极限载荷应力之间的关联特性，可以优化底部筒壁的厚度分布，从而有效分散瞬时极端载荷，抑制象脚破坏模式的发生^[9]。

仿生融合：若将竹节的“非均匀刚度分布”思想融入分段壁厚设计，即在应力集中的底部区域密集布置加强环（竹节），而在上部区域稀疏布置，可以在保证质量最小化的前提下，最大限度地提升抗局部屈曲能力。

（二）基于健康状态评估的抗倒伏保障体系

在极端服役环境下，塔筒结构处于动态变化之中，建立完善的健康评估体系是保障塔筒长期安全稳定运行的必要手段^[8]。

腐蚀与疲劳监测：极端海况或陆地复杂环境会导致筒壁腐蚀

和疲劳损伤累积。塔筒的健康状态评估不仅包含物理力学参数，还应包括腐蚀速率和疲劳裂纹的监测。例如，当裂纹长度超过特定危险值（如表面5mm、内部3mm）时，应采取必要措施，防止其在极端风载下引发局部断裂导致整体倒伏^[8]。

指标体系的动态优化：抗倒伏保障不仅是一个静止的设计问题，也是一个动态的维护问题。应根据风电场的实际运行情况，动态调整评估指标。例如，在高湿盐雾地区，应强化“筒壁腐蚀速率”指标；多沙尘地区增加“筒壁磨损量”指标^[8]。

（三）综合抗倒伏机理总结

综上所述，增强风电塔筒抗倒伏能力的综合机理可归纳为：“基于极限强度与刚度分布的参数优化设计”与“基于全寿命周期监测与动态优化的状态保障”的结合。

在设计阶段，采用非均匀壁厚变化与仿生环形筋板，优化局部应力状态^[9]。

在运维阶段，通过层次分析法和数据驱动法建立动态的健康评估体系，及时剔除冗余指标，针对特定环境下的高敏感性损伤（如疲劳裂纹）进行提前预警与修复^[8]。仿生节不仅是加强筋，更是“断裂阻断器”。当局部发生轻微塑性变形时，竹节结构能阻止裂纹或褶皱向全周向蔓延，从而维持结构的整体残余强度，防止因局部失效导致的整体倒塌^[8]。

四、结论

本文提出的风电塔筒仿生竹节设计，通过极小幅度的质量增加，换取了显著的抗屈曲能力提升。该设计为深远海大容量风机抗台风设计提供了新的工程思路。

参考文献

- [1] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149–159.
- [2] 宋家锋, 王会霞, 盖宏健, 等. 基于竹结构的薄壁吸能管仿生优化研究 [J]. 载人航天, 2017, 23(04): 473–481.
- [3] 周剑飞, 郭子琦, 等. 生物轻质高强结构及其在吸能结构中的仿生应用 [J]. 机械工程学报, 2023.
- [4] 于鹏山, 刘志芳, 李世强. 新型仿竹薄壁圆管的设计与吸能特性分析 [J]. 高压物理学报, 2021, 35(5): 054205.
- [5] 刘纲, 文明玉, 杨庆山, 等. 风机塔筒惯质阻尼吸振机理及振动控制方法研究 [J]. 工程力学, 2024.
- [6] 李斌, 文昊天, 宫兆宇. 风力发电机塔筒风致响应分析与风振控制研究 [J]. 工程力学, 2017, 34(增刊): 134–138.
- [7] 樊昂, 李录平, 张世海, 等. 大型风电机组塔筒动力学特性与寿命损耗研究进展 [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3).
- [8] 王奋汝. 风电机组塔筒结构健康状态评估体系研究 [J]. 城市建筑与发展, 2025, 6(23): 148–150.
- [9] 戴巨川, 刘旋, 杨书仪, 等. 极端服役环境下的风电机组塔架结构参数优化研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(16): 2150–2156.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 61400-1: Wind turbines part 1: Design requirements [J]. International Electrotechnical Commission, 2005: 54–56.