# 基于Ansys和Pro/Mechanica对于风力发电机叶 片的分析比较与优化

# 伏天

上海理工大学产业处,上海

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月30日

# 摘要

本文基于Ansys和Pro/Mechanica分别对风力发电机叶片做出静态机构分析和预应力模态分析,发现两款软件在同一条件下对于同一物体的分析处理的不同结果,将两者结果进行对比。除此以外,在 Pro/Mechanica中对风力发电机叶片进行了结构优化。

# 关键词

Ansys Workbench, Pro/Mechanica, 静态机构分析, 模态分析

# Comparison and Optimization of Wind Turbine Blades Analysis Based on Ansys and Pro/Mechanica

## Tian Fu

Industrial Affairs Department, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2024; published: May 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This article conducts static structural analysis and pre-stress modal analysis on wind turbine blades using Ansys and Pro/Mechanica, respectively. It is discovered that the two software programs yield different results for the same object under the same conditions, and a comparison is made between their outcomes. Additionally, structural optimization of the wind turbine blades is performed in Pro/Mechanica.

## **Keywords**

## Ansys Workbench, Pro/Mechanica, Static Structural Analysis, Modal Analysis

Copyright © 2024 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/

# 1. 引言

本文分别基于 AnsysWorkbench 和 Pro/Mechanica 对一长为 4500 mm 的风力发电机叶片,叶片厚为 0.02 m,其中叶根端固定,压力面承受 20 Pa 风压的叶片进行静态机构分析和模态分析,得出其应力、应 变以及挠度、疲劳特性等参数。在整个分析过程中,选择材料为系统默认的不锈钢材料及自定义铝合金材料,其中铝合金材料特性为:弹性模量 E (75×10<sup>3</sup> MPA)、泊松比 µ (0.25)、密度(2.7 g/cm<sup>3</sup>)。模型如图 1。



Figure 1. Wind turbine blades 图 1. 风力发电机叶片

# 2. 基于 Ansys 对叶片的静态机构和模态分析

# 2.1. 静态结构分析

# 2.1.1. 材料属性的定义

要对发电机叶片进行 Ansys 分析,首先必须在项目工作栏中创建任务栏,并且把工具栏中的 Static Structure 拖入其中,建立和项目 A 相关联的项目 B。然后,必须对零件(此处即发电机叶片)进行材料定义,方能进行后续的分析工作。本文分别把材料定义为默认属性下的结构钢和自定义铝合金材料(即弹性 模量 E =  $75 \times 10^3$  MPA、泊松比  $\mu$  = 0.25、密度 = 2.7 g/cm<sup>3</sup>)。

## 2.1.2. 网格划分

在定义了材料属性以后,需要在 Ansys 中对叶片进行网格划分,在划分网格是要注意,首先要为网格划分添加控制尺寸,此处为其添加的 Element Size 为 1 mm。在控制尺寸添加以后,只要执行 Mapple Face Meshing (绘制面网格)指令即可画出合适的网格。在设置完成以后,只需对模型进行网格处理便会自动生成划分的网格,网格效果如图 2 所示。



Figure 2. Mesh division effect diagram 图 2. 网格划分效果图

#### 2.1.3. 施加载荷与约束

如果要对一个物体(此处为风力发电机叶片)进行一系列求解计算,在划分网格之后,就要对物体进行 约束的添加和载荷的施加。因为考虑到整个风力发电机叶片的受力面只有前端的那一个迎风面,因此,载 荷只施加在这个表面上面(如图 4),且联系到实际情况以后该载荷定为均布载荷,大小按条件中给出的 20 Pa 来计算。同样的,根据设计的需求和实际,把固定约束加在叶片和风力发电机连接的圆端处(如图 3)。



Figure 3. Diagram adding constraints 图 3. 约束的添加



Figure 4. Adding loads 图 4. 载荷的添加

## 2.1.4. 结果分析

经过对等效应力、叶片结构疲劳特性、叶片疲劳结构安全按系数等数据的计算,对于自定义铝合金 材料制成的叶片(即弹性模量 E (75×10<sup>3</sup> MPA)、泊松比 $\mu$ (0.25)、密度(2.7 g/cm<sup>3</sup>)),其各项分析结果如下 图 5~8 所示。



**Figure 5.** Custom material stress analysis contour map 1 图 5. 自定义材料应力分析云图 1



**Figure 6.** Custom material stress analysis contour map 2 图 6. 自定义材料应力分析云图 2



**Figure 7.** Custom material strain analysis contour map 1 图 7. 自定义材料应变分析云图 1



**Figure 8.** Custom material strain analysis contour map 2 图 8. 自定义材料应变分析云图 2

由以上分析可知,在转角处应力应变出于较大值,但是仍处于安全范围之内。

# 2.2. 预应力模态分析

在此之前,静态结构分析中已经对叶片的静力进行了求解,本节将通过对叶片的模态及有预应力的 模态进行分析,得出该风力发电机叶片从第一阶到第六阶的模态振型,并且可以得出不同情况下的模型 固有频率。

首先,由于是在有预应力的模态分析环境下,所以只需要在前一小节的静态结构分析的前提下再加入创建新的预应力模态分析项目(Response Spectrum),即将 Response Spectrum 拖入项目管理区中,待项目 B 中的 Solution 呈高红亮时即可保证相关联的数据可以共享。

在完成了上面这部的工作以后,只要按顺序利用 Total Deformation 命令向项目树中添加模态即可, 例如 Total Deformation-Mode 2 对应二阶模态, Total Deformation-Mode 3 对应三阶模态,以此类推。设计 树中的项目添加完成以后只需对每个模态进行求解即可得到各阶模态分析的结果,如图 9~14,与此同时, 在 Mechanical 图形窗口的下方,也可以观察到模型的固有频率,如图 15。当整个预应力模态分析过程完 成以后,风力发电机叶片的各阶模态均可以由分析结果直观的读出并记录下来,为以后使用。



Figure 9. First order modal shape 图 9. 第一阶模态振型 伏天

#### 伏天







Figure 11. Third order modal shape 图 11. 第三阶模态振型



# **图 12.** 第四阶模态振型



**Figure 13.** Fifth order modal shape 图 13. 第五阶模态振型



Figure 14. Sixth order modal shape 图 14. 第六阶模态振型



图 15. 固有频率

本节中所做的预应力模态分析都是当风力发电机材料为自定义铝合金时候的数据(即材料弹性模量 E (75×10<sup>3</sup> MPA)、泊松比  $\mu$  (0.25)、密度(2.7 g/cm<sup>3</sup>))。

# 3. 基于 Pro/Mechanica 对叶片的静态机构和模态分析

# Pro/Mechanica 中对风力发电机叶片的分析

Pro/Mechanica 虽然与 Ansys 的分析思路有相同之处,但是就如第一节中所叙述的, PRO/Mechanica

伏天

有着他本身的优势,一是对简单物体的分析结果可以十分精确,二是对于非专业使用 CAE 软件的工程师, Pro/Mechanica 无疑更容易操作上手,能够更简便得出所需要的结果。因为 Pro/Mechanica 的分析过程是 先做好前处理工作,后续可以直接的出多个结果,所以,本节将会具体阐述整个分析的过程。

#### 材料定义

在 Pro/Mechanica 中如果要对一个物体进行各项分析,第一步最适合对该物体的材料特性进行定义,因为一旦材料确定了,后续的确定属性单元,应力应变,疲劳强度等等的分析才能进行[1],因此,根据本文中风力发电机叶片自定义铝合金的各项材料特性系数(即材料弹性模量 E (75 × 10<sup>3</sup> MPA)、泊松比 *µ* (0.25)、密度(2.7 g/cm<sup>3</sup>)),现进入材料属性设定页面,选择一种材料对它的属性进行编辑,例如此处的杨氏弹性模量,泊松比,密度等等参数,参数设置如图 16。除此之外还可以设定拉伸屈服应力、拉伸极限应力、压缩极限应力等与材料相关的参数。另外,在材料特性确定以后,还有最后一步,就是把材料的属性赋予当前的模型,即风力发电机叶片。

] 材料定义				X			
名称 STEFI							
说明							
		密度	£ 2.7	g/cm <sup>3</sup>			
结构热	其它 外观 用户定义			~			
		对称 各向同性的					
	应力−应变响应┃线性						
泊松比	0. 25						
杨氏模量	75e+03		MPa 🔹				
热膨胀系数	1.17e-05		/C •				
机构阻尼			sec/in	•			
一材料极限							
		拉伸屈服应力		kg / (in sec^2) •			
		拉伸极限应力 広密期限 広志		kg / (in sec 2) *			
		「正知道の名内区」で入		kg / (III sec 2) ·			
一失效准则							
无				•			
疲劳 —							
无				•			
			[	确定取消			

Figure 16. Material definition table 图 16. 材料定义表

#### 壳单元设置

应用壳单元可以模拟结构,该结构一个方向的尺度(厚度)远小于其它方向的尺度,并忽略沿厚度方向 的应力[2],本文所分析的是风力发电机叶片,根据定义分析的时候把该叶片定义为壳单元。

在 Pro/Mechanica 中定义叶片为壳单元的具体过程为在菜单栏插入中选择壳单元,在选中了所有面之 后根据本例中的设计要求,即叶片厚度为 20 mm,材料选择为上一小节中设定的 steel。

#### 施加载荷与约束

此处所加的载荷和约束与第二章在 Ansys 中分析时所加的载荷与约束基本思想相同,都是在风力发

电机叶片的圆端面加1个固定约束,在受风力的表面加上1个均布载荷,其中均布载荷大小为20Pa。载荷与约束添加以后的总体模型界面如图17所示。



Figure 17. Pressure loads and constraints in the model 图 17. 模型中的压力载荷和约束

## 网格划分

由于风力发电机叶片的结构分析在圆端面较为复杂,因此,在画网格时候对端面处进行细微划分, 模型除端面以外处的网格可以相对放宽标准。细微画网格时需要使用 AutoGem 控制,此处类型选择边分 部,选中左端面的各边,同时把节点数设为 300 个。对其进行网格划分以后,共创建了 5284 个元素和 3804 个节点。在模型上划分完的网格显示如图 18。



Figure 18. Mesh on the model 图 18. 模型上的网格

#### 求解计算

在准备工作一切就绪以后,只需进入分析和设计研究新建1个静态分析即可对其进行应力和应变的 求解,求解以后的结果在结果窗口中可以再下拉菜单中选择应力、位移、应变能等等参数进行观察,本 文选取了其中的应力和应变进行观察。

经过计算以后得出应力应变的值如图 19、图 20 所示。



Figure 19. Stress and strain comparison chart 图 19. 应力、应变比较图



Figure 20. Stress and strain comparison detail chart 图 20. 应力、应变比较细节图

用同样的方法对其施加预应力模态分析,可得出如图 21 所示的结果。



Figure 21. Prestressed modal calculation 图 21. 预应力模态计算

由应力应变的分析图可以看出,在左端面圆端处,有不是很明显的应力集中,如需对此风力发电机 叶片进行优化设计,可对此处进行优化,使其强度增加。

# 4. 对比与优化

## 4.1. Ansys Workbench 与 Pro/Mechaniaca 分析结果对比

从第二章和第三章的分析结果可以看出在 Ansys Workbench 中分析出的应力应变等参数与在 Pro/Mechanica 环境下分析出的参数相比,应力相差为4 MPa,应变相差 10<sup>4</sup>。

目前的有限元分析主要依赖软件如 ANSYS,它在求解算法效率上有优势,但在复杂模型建模上存在 局限。三维设计软件(如 Pro/ENGINEER)通过数据交换解决这一问题,优化了模型建模和分析流程。 Pro/ENGINEER的 MECHANICA 模块直接使用模型数据进行有限元分析,提升了模型一致性和分析效率。 Pro/MECHANICA 基于 P 方法,优于传统的 H 方法,能更精确拟合几何形状,提高计算精度,减少网格 单元数目,自动收敛求解[3]。因此,下文使用 Pro/Mechanica 对风力发电机叶片进行优化。

## 4.2. 风力发电机叶片的结构优化

本文选择在 Pro/Mechanica 中对风力发电机叶片进行结构优化,经过对风力发电机叶片的工作状态和 结构分析,可以看到,在与机身连接的弯曲处应力处于最大位置,因此,分别进行 2 种方案的优化,1) 对 整个风力发电机叶片进行加厚,把原来 20 mm 的壁厚增加至 50 mm;2) 只对连接处进行加厚,同样把 20 mm 的厚度增加至 50 mm。分别对此两种方案进行分析,得出的结果如表 1 所示,模型分析结果如图 22、图 23 所示。

分析所得结果可以看出,如果对整体进行加固即方案一,那么所得的应力和应变相对于方案二较大, 但是最大位移和旋转角度都比较小。因为在第二章 Ansys 分析中曾经对风力发电机的叶片结构疲劳寿命 和叶片结构疲劳安全系数进行过分析,在连接处容易发生疲劳变形,易发生危险,而在叶片主体处没有 疲劳风险。因此权衡两个方案的利弊,可以得出风力发电机叶片的较好优化方案为对连接处进行结构加 强,即加厚,具体加厚数据可以用灵敏度分析法计算出最佳结果。

伏天

Table 1. Scheme comparison 表 1. 方案对比								
结构参数 方案	应力(MPa)	最大位移(mm)	应变	旋转(rad)				
方案一	44.77	33.86	0.0005163	0.001297				
方案二	38.78	101.60	0.0004200	0.003791				







**Figure 23.** Scheme two 图 23. 方案二

# 5. 结论

本文采用了 Ansys 和 Pro/Mechanica 这两种有限元分析软件[1],对风力发电机的叶片进行了深入的

静态结构分析以及预应力模态分析。通过这些分析,我们详细比较了叶片在受到风力作用时的应力分布、 应变情况、挠度反应以及长期使用中可能出现的疲劳特性。通过软件对比及选择,运用 Pro/Mechanica 对风力发电机叶片的结构优化进行了分析,提出了一种优化设计的解决方案。

# 参考文献

- [1] 许静. CAD/CAE 的集成技术在 SCS 电子汽车衡结构件中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [2] 付文智, 李明哲, 陈志红. 蒙皮多点拉形过程中压痕的数值模拟及控制[J]. 材料科学与工艺, 2010(6): 791-795.
- [3] 冀军鹤. 光刻机橡胶隔振垫静态及整机动态特性分析与优化[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.