



引用格式:沈鑫成,孙后环,吴旭龙.基于粒子群优化算法的风机叶片铺层厚度优化与分析[J].轻工学报,2019,34(6):103-108.

中图分类号:TK83 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2019.06.014

文章编号:2096-1553(2019)06-0103-06

# 基于粒子群优化算法的 风机叶片铺层厚度优化与分析

## Optimization and analysis of layup thickness of wind turbine blade based on PSO algorithm

沈鑫成,孙后环,吴旭龙

SHEN Xincheng, SUN Houhuan, WU Xulong

南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816

School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

关键词:

风机叶片;铺层厚度;  
粒子群优化算法

Key words:

wind turbine blade;  
layup thickness;  
particle swarm  
optimization (PSO)  
algorithm

**摘要:**针对风机叶片工作时最大应力集中分布在叶片距离叶根部分1/3处,极易引起叶片疲劳破坏的问题,运用粒子群优化(PSO)算法结合有限元方法对某型号1.5 MW风机叶片根部危险区域铺层厚度进行优化设计,建立最大应力数学模型,以铺层厚度为设计变量,通过迭代搜索得到最优解。结果表明:风机叶片危险区域最大应力减小了5.25 MPa,风机叶片最大变形减小了78 mm,优化后叶片的一阶固有频率为0.73 Hz,一阶屈曲因子为2.79,满足了振动和稳定要求,提高了叶片的疲劳寿命。

收稿日期:2019-06-09

基金项目:江苏省六大人才高峰高层次人才资助项目(2012-ZBZZ-047)

作者简介:沈鑫成(1995—),男,江苏省南通市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为流体机械。

通信作者:孙后环(1965—),男,江苏省徐州市人,南京工业大学教授,主要研究方向为微机控制自动化和机电一体化。

**Abstract:** The maximum stress of the blade occurs in the 1/3 region of the blade, which may cause the fatigue failure of the blade. The particle swarm optimization (PSO) algorithm combined with the finite element method was used to optimize the layer thickness of a 1.5 MW wind turbine blade root dangerous area. The maximum stress mathematical model was established and the layer thickness was used as variable. The optimal solution was obtained through iterative search. The results showed that the maximum stress in the dangerous area of the blade was reduced by 5.25 MPa, the maximum deformation of the blade was decreased by 78 mm, the optimized first-order natural frequency of the blade was 0.73 Hz and the first-order buckling factor was 2.79, which satisfied the requirements of vibration and stability and improved the blade's fatigue life.

## 0 引言

随着资源消耗的提高及风机技术的发展,风机叶片的优化设计逐渐引起国内外业内专家的关注.从风机叶片的参数设计到风机叶片的制作,每一个环节的优化改进都将对风机技术的发展产生重要影响.风机叶片在工作过程中受到复杂的交变载荷作用,因而风机的设计寿命一般为20 a,且在整个工作过程中,风机风轮的循环次数超过108次<sup>[1]</sup>.风机叶片的疲劳破坏是叶片损伤的主要失效方式<sup>[2]</sup>,静力学分析结果显示,叶片的最大应力集中分布在叶片距离根部1/3处的区域,故在实际工况中,叶片大多率先在应力集中的该区域达到疲劳破坏.

针对复合材料风机叶片存在的整体性能问题,通常以实际工程应用为基础,对复合材料风机叶片的结构参数或铺层方案等进行优化.冯消冰等<sup>[3]</sup>考虑到实际工程应用,限制铺层角度,运用遗传算法对复合纤维风机叶片根部进行铺层优化设计,获得较理想的铺层结构.田德等<sup>[4]</sup>以叶片质量最小为目标,运用粒子群优化算法对10 MW海上风电机组叶片进行铺层厚度优化,优化后叶片质量下降了约10%.张龙等<sup>[5]</sup>考虑弯扭耦合效应,采用弯扭耦合试验和有限元仿真的方法分析了刚度权值和载荷系数对叶片结构的影响,以刚度权值为约束条件,以叶片曲率最小为优化目标进行铺层优化设计,得到了满足叶片曲率的最优铺层顺序.但是,上述文献在对风机叶片进行优化时,没有考虑影响叶片疲

劳寿命最关键的因素,即叶片所受载荷,而叶片的疲劳寿命又关系到风机的使用寿命.粒子群优化(PSO)算法<sup>[6]</sup>是一种基于群体的具有全局寻优能力的智能优化工具,适合用于科学研究及工程应用,操作简单、易于实现.鉴于此,本文拟以叶片最大应力最小为优化目标,基于原始铺层角度和铺层顺序,运用PSO算法对某型号1.5 MW风机叶片根部危险区域铺层厚度进行优化设计,以期减小应力集中区域的最大应力,有效增加风机叶片在循环载荷下的工作时间,优化风机叶片的抗疲劳性能,为风机叶片的生产制作提供理论支持.

## 1 基于粒子群优化算法的风机叶片铺层厚度优化

### 1.1 风机叶片结构设计理论

**1.1.1 铺层设计表达方式** 风机叶片采用玻璃钢复合材料,制作过程中叶片的蒙皮、主梁和腹板均采用铺层设计.铺层顺序、铺层角度和铺层厚度是影响复合材料力学性能和结构性能的关键因素<sup>[7]</sup>.

为了准确高效地进行生产制作,对铺层设计制定了简洁、方便的表达方式,一般直接通过代号来表示铺层角度和铺层顺序.在风机叶片设计中,为了满足强度、刚度的要求,同时也为了减小制作的复杂程度,叶片的铺层角度通常取 $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ 和 $90^\circ$ <sup>[8]</sup>.在描述铺层顺序时,按照铺层的顺序,使用中括号表达各个铺层角度的层数,铺层设计表达方式如图1所示.

90°	0°	0°
0°	+45°	+45°
90°	-45°	-45°
0°	90°	90°
90°	90°	90°
0°	-45°	90°
90°	+45°	90°
0°	0°	0°

a)  $[90^{\circ}/0^{\circ}]_4$       b)  $[0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}]_s$       c)  $[0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}]$

图1 铺层设计表达方式

Fig. 1 Expressions of layer design

**1.1.2 强度理论** 单层的复合材料板粘合在一起组成复合材料层合板,其具有正交各向异性的特性,每个单层板都有各自的强度,整个复合材料层合板的强度受到各个单层板之间相互作用的影响.风机叶片近似于复合材料层合板,叶片在强度校核时,首先需要确定单层板的应力,然后基于强度准则进行强度判断;复合材料层合板在发生破坏时,一般都是各单层板逐层开始发生破坏,因此,基于单层板强度理论可预估层合板的强度<sup>[9]</sup>.在强度准则校核中,一般使用 Tsai-Wu(蔡-吴)张量强度准则,该准则的一般表达式为

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_{ij} \sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (1)$$

式中,  $F_i$  和  $F_{ij}$  为表征材料强度性能的参数,它们是对称张量.

式①可简化为

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1$$

式中,  $F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{66}, F_{12}$  都为材料的强度性能参数.

## 1.2 叶片铺层厚度优化

**1.2.1 优化方案** 风机叶片在制作过程中根据风机叶片铺层设计原则<sup>[10]</sup>进行铺层设计.以叶片初始铺层顺序方案为基础,铺层的角度设定为  $0^{\circ}, \pm 45^{\circ}$  和  $90^{\circ}$ .对风机叶片根部至叶片  $1/3$  处的这一部分叶片,以减小叶片的最大应

力为目标,对铺层厚度进行优化,并将风机叶片根部至叶片  $1/3$  处的区域划分为叶根过渡区域、最大弦长区域和其他区域,其中叶片的初始铺层采用等厚度铺层设计.叶片根部不同部位处的初始铺层方案如表1所示.

表1 叶片根部不同部位处的初始铺层方案

Table 1 Initial layer scheme of the root of the blade

位置	铺层方案	循环次数
叶根过渡区域	$[0^{\circ}/(\pm 45^{\circ})/90^{\circ}]$	6
最大弦长区域	$[0^{\circ}/0^{\circ}/(\pm 45^{\circ})/0^{\circ}/0^{\circ}]$	4
其他区域	$[0^{\circ}/(\pm 45^{\circ})/(\pm 45^{\circ})/90^{\circ}]$	4

**1.2.2 优化设计** 通过粒子群优化算法,以某型号 1.5 MW 风力机叶片最大应力最小为优化目标,通过有限元模型<sup>[11]</sup>静强度分析得到叶片的最大应力和其所在位置,将模型的最大应力作为粒子群优化算法的优化对象,设置铺层厚度为自变量,得到计算最优解.基于粒子群优化算法和有限元方法的优化设计的流程如图2所示.

以最大应力最小为优化目标,其等效数学模型可表示为

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

约束条件的数学模型可表示为

$$g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$h_k(X) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$x_L \leq x_i \leq x_U \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其中,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  为铺层中每个单层铺层的厚度,即为设计变量;  $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为优化目标函数;  $x_L$  为铺层中单层铺层的最小厚度;  $x_U$  为铺层中单层铺层的最大厚度.

**1.2.3 优化结果** 设置优化迭代次数为 30 次,经优化计算后得出风机叶片各区域铺层厚度的结果如表2所示.

优化结果为各区域铺层厚度分布,可满足风机叶片最大应力处应力最小的要求,参考该表进行风力机叶片复合材料层合板制作和叶片三维模型建模.

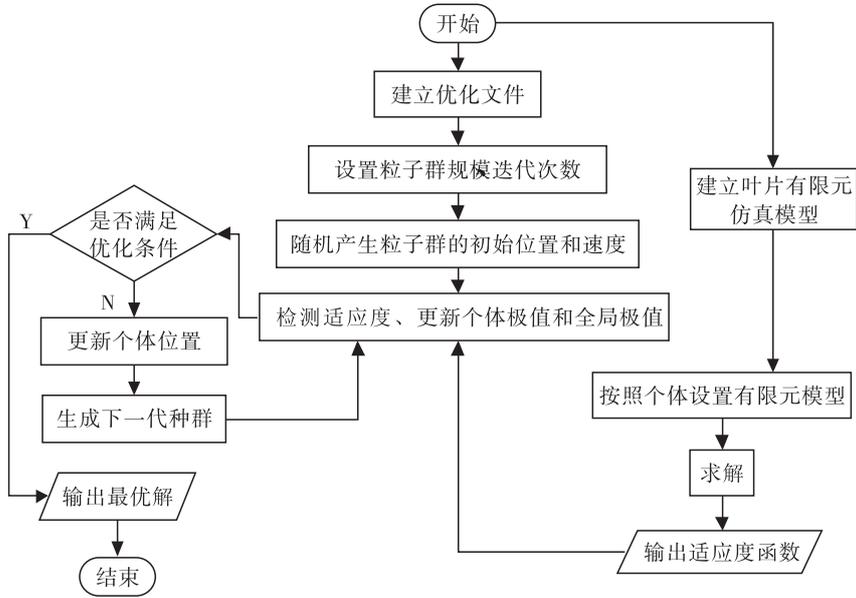


图2 基于粒子群优化算法和有限元方法的风机叶片铺层厚度优化流程图

Fig. 2 Optimal flow chart of layer thickness of the blade based on PSO and FEM

表2 优化后风机叶片各区域铺层厚度

Table 2 Layer thickness in each area after optimization mm

层数	叶根过渡区域	最大弦长区域	其他区域
1	0.408	0.407	0.421
2	0.512	0.406	0.536
3	0.512	0.556	0.536
4	0.408	0.548	0.536
5	0.406	0.439	0.536
6	0.509	0.406	0.397
7	0.508	0.416	0.397
8	0.397	0.561	0.526
9	0.406	0.558	0.548
10	0.501	0.403	0.545
11	0.509	0.416	0.556
12	0.408	0.413	0.432
13	0.406	0.512	0.441
14	0.512	0.538	0.528
15	0.509	0.382	0.539
16	0.408	0.397	0.539
17	0.397	0.389	0.545
18	0.512	0.548	0.432
19	0.512	0.551	0.441
20	0.406	0.404	0.526
21	0.396	0.551	0.547
22	0.512	0.556	0.551
23	0.512	0.407	0.548
24	0.396	0.409	0.431

## 2 优化结果分析

### 2.1 应力与应变结果分析

在额定工况,即额定风速  $v = 12 \text{ m/s}$ , 转速  $n = 19.1 \text{ r/min}$  的条件下,优化前后风机叶片的应力云图对比如图3所示,优化前后位移云图对比如图4所示.

由图3可知,额定工况下,风机叶片优化前的最大应力为  $54.89 \text{ MPa}$ ,优化后的最大应力为  $49.64 \text{ MPa}$ ,比优化前减小了  $5.25 \text{ MPa}$ ,优化幅度达到  $9.6\%$ . 风机叶片最大应力的降低能够有效地增加叶片在循环载荷下的工作时间,增加风机叶片的抗疲劳能力,延长其寿命<sup>[12]</sup>.

由图4可知,风机叶片优化前的最大应变为  $1\ 071.2 \text{ mm}$ ,优化后的最大应变为  $993.2 \text{ mm}$ ,比优化前减小了  $78 \text{ mm}$ ,优化幅度达到  $7.2\%$ ,有效地降低了叶片的最大应变量. 由于风机工作过程中叶片的应变会影响塔架的稳定性,所以叶片最大应变量的减小能够增加风机整体的稳定性.

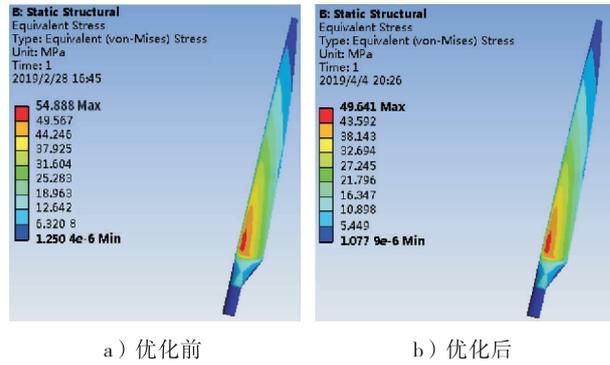


图3 应力云图对比

Fig. 3 Stress cloud map comparison

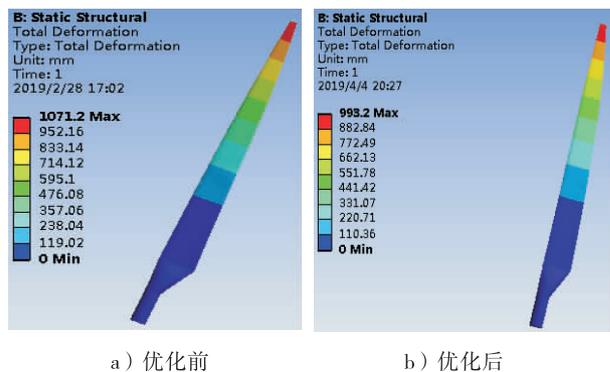


图4 位移云图对比

Fig. 4 Displacement cloud map comparison

## 2.2 叶片振动和稳定性校核

经铺层优化设计后,风机叶片的结构发生了细微的改变,因此,叶片的固有频率也会发生相应的变化,故需要对叶片是否会发生共振进行验证.由优化前的风机叶片的模态分析<sup>[13]</sup>可知,叶片在自由振动下的第一阶模态时,其固有频率最小,因而取其自由振动下的第一阶模态进行验证.优化后风力机叶片的第一阶模态振型图如图5所示.由图5可知,在自由状态下,优化后叶片的第一阶固有频率为0.73 Hz,由于叶片的激振频率为0.318 Hz,优化后叶片的固有频率是其激振频率的2倍以上,因而优化后的叶片不会发生共振,满足了叶片设计的要求.

风机叶片可能发生失稳的区域在叶片的最大弦长处,需要验证优化后叶片是否会发生失

稳.设置叶片在额定状态下进行屈曲分析,优化后风机叶片的第一阶屈曲振型图如图6所示.由图6可知,第一阶屈曲因子为2.79,优化后叶片的屈曲因子均大于1,说明优化后叶片不会发生失稳破坏,满足叶片设计要求.

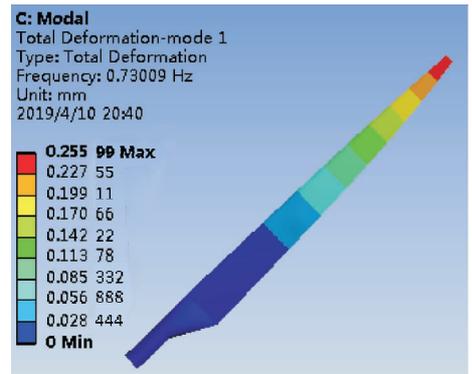


图5 优化后风机叶片的第一阶模态振型图

Fig. 5 First modal analysis of blades after optimization

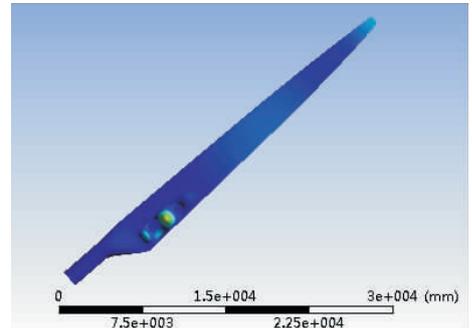


图6 优化后风机叶片的第一阶屈曲振型图

Fig. 6 First buckling analysis of blades after optimization

## 3 结语

本文针对某型号1.5 MW风机叶片距离叶根1/3处的区域所受应力最大、容易引起疲劳破坏的问题,以减小叶片最大应力为目标,基于粒子群优化算法和有限元分析方法对叶片进行铺层厚度优化设计,建立最大应力数学模型,以铺层厚度为设计变量,通过迭代搜索得到最优解.优化后,叶片距离叶根1/3处的最大应力减

小了 5.25 MPa,最大应变减小了 78 mm,且叶片不会发生共振与失稳现象,有效减小了其发生疲劳破坏的可能性,为风力机叶片的设计和制作提供了一定的思路和参考.该方法仅以最大应力为优化目标对铺层厚度进行了优化,后续可以从叶片形状、叶片质量等方面开展铺层优化研究,从而进一步提高风机叶片的整体结构性能.

#### 参考文献:

- [1] 江成生.兆瓦级风电机组叶片疲劳寿命的预测方法研究[D].银川:宁夏大学,2015.
- [2] 解玉平.2 MW 风力发电机叶片的设计建模和疲劳寿命分析[D].烟台:烟台大学,2017.
- [3] 冯消冰,黄海,王伟.大型风机复合材料叶片铺层优化设计[J].玻璃钢/复合材料,2013(3):3.
- [4] 田德,罗涛,林俊杰,等.基于额定载荷的10 MW 海上风电叶片铺层优化[J].太阳能学报,2018,39(8):2195.
- [5] 张龙,贾普荣,王波,等.考虑弯扭耦合效应的复合材料叶片铺层优化方法[J].西北工业大学学报,2018,36(6):1093.
- [6] 张岩,吴水根. MATLAB 优化算法[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [7] 朱启晨,陈勇,肖贾光毅.复合材料风扇叶片铺层设计方法研究[J].航空发动机.2018,44(3):49.
- [8] 王慧敏.复合纤维风机叶片铺层结构优化设计及应用[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2014.
- [9] 谢少军.风力机叶片铺层结构的强度特性研究及设计优化[D].杭州:浙江工业大学,2012.
- [10] 赵丹平,徐宝清.风力机设计原理及方法[M].北京:北京大学出版社,2012.
- [11] 丁欣硕. ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [12] REINHARD V. On reliability estimation based on fuzzy lifetime data[J]. Journal of Statistical Planning and Inference,2009,139(5):1750.
- [13] DOMNICA S M, IOAN C, IONUT T. Structural optimization of composite from wind turbine blades with horizontal axis using finite element analysis [J]. Procedia Technology, 2016, 22(22):726.