复合材料风力机叶片结构厚度优化设计

周 双,岳彩宾

(内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁轧钢厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 复合材料风力机叶片铺层厚度对叶片性能影响作用明显,不同角度纤维布所占铺层厚度不同对叶片结构性能影响不同。采用遗传算法作为优化算法,以某1.5 MW成熟风机叶片作为研究模型,探究单向纤维布铺层厚度对风机叶片性能影响的特性规律。根据风力机叶片结构特点,确定合适建模方法,寻求适于非对称层合板的目标函数、遗传算子(选择、交叉、变异)等,并在此基础上得到采用不同纤维布铺设的风机叶片铺层厚度最优解。

关键词: 铺层设计; 结构性能; 铺层厚度; 遗传算子

中图分类号: TK83 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2018)05-0067-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.05.019

Optimization Design for Structure Thickness of Wind Turbine Blade with Composite Material

Zhou Shuang, Yue Cai-bin

(*Rail and Beam Steel Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The effects of layer thickness of wind turbine blade with composite material on performance of blade are obvious and the effects of fibre cloth with different angles on structure property of blade are different since it occupies different layer thickness. The characteristics and law on effects of layer thickness of unidirectional fiber fabric on the performance of fan blade are investigated by taking the genetic algorithm as the optimization algorithm and taking a 1.5 MW mature fan blade as the research model. According to the structural features of wind turbine blade, the appropriate modeling method is determined as well as the objective function, genetic operators (selection, crossing and variation) suitable for the asymmetric laminate are found out. On this basis, the optimal solution of the layer thickness for fan blade laid with different fiber cloth is obtained.

Key words: layer design; structural performance; layer thickness; genetic operator

复合材料风力机叶片作为风能利用的主要部件,其铺层结构相对复杂,不同纤维布所占铺层厚度不同对叶片整体结构性能具有不同影响。不同方向纤维布铺层厚度优化设计应使叶片的机械性能尽可能达到最优。在复合材料铺层优化方面,目前国外的Zehnder基于遗传算法可实现全局优化的事实对复合材料层合板进行全局优化[1];Erdal采用模拟退火法对复合材料铺层结构进行优化设计[2];Callahan

收稿日期: 2018-05-03

作者简介: 周 双(1969-),男,内蒙古赤峰市人,高级工程师,现任包钢轨梁轧钢厂设备厂长。

对已设定好纤维取向的复合材料铺层顺序进行了优化[3]。另外,国内学者对复合材料层压板结构优化研究也取得一定成果。其中,冯消冰基于工程实际中常用复合材料纤维取向,利用遗传算法在处理离散问题的优势,对复合材料风机叶片根部进行了铺层优化设计[4];王向阳以纤维方向角和层合板厚度作为设计变量,以最终失效强度为优化目标,对复合材料结构进行优化[5]。本文将遗传算法理论应用于风力机叶片复合材料非等厚度铺层优化研究,有效解决铺层参数离散型特点,提出适于叶片铺层厚度优化研究的目标函数。对叶片进行分级分块优化研究,建立相关数学模型、约束条件等,在参考相关层合板铺层原则基础上,应用遗传算法对复合材料风机叶片进行铺层厚度优化研究。

1 风力机叶片结构及模型

以具有较强代表性的某1.5 MW成熟叶片为对象,该叶片采用Aerodyn与NACA64-618修正翼型,叶片长40.3 m,风轮直径82.5 m,最大弦长3.13 m,额定转速17.4 r/min,适应风场等级IEC ⅢA。叶片为主梁双腹板结构,由内外蒙皮、主梁、腹板等构成,如图1所示。

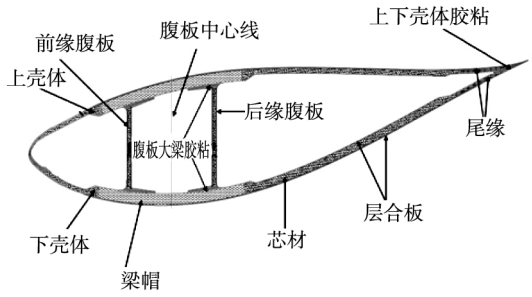


图1 某1.5 MW叶片截面结构示意图

风力机叶片铺层为典型非回转体不等厚度铺放,依据已有实际铺层方案对其分层逐段建模,其过程相对繁琐、工作量大。综合考虑叶片建模可行性、有效性等相关因素,选取距离距叶根14.6 m处为研究对象,建立有限元模型。在叶片每个受力截面中心处施加等效后的三个方向的集中力和三个方向的弯矩载荷,对叶片根部进行六个自由度上的全约束。最终得到如图2所示的有限元模型,其中共包含9 060个单元,9 120个节点。

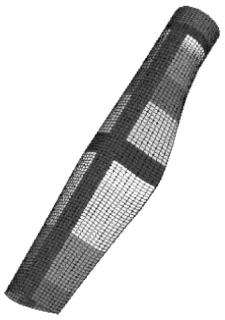


图2 某1.5 MW风力机叶片有限元模型

1.1 叶片材料属性

复合材料纤维布的基本属性如表1所示。

表1 复合纤维布基本参数

材料	弹性模量/MPa		剪切模量/MPa		泊松比	
单轴向布	E_x	33190	G_{xy}	3690	μ_{xy}	0.230
	E_y	11120	G_{yz}	3000	μ_{yz}	0.110
	E_z	10120	G_{xz}	3000	μ_{xz}	0.110
双轴向布(±45°)	E_x	12500	G_{xy}	6000	μ_{xy}	0.626
	E_y	11300	G_{yz}	6000	μ_{yz}	0.626
	E_z	10000	G_{xz}	3200	μ_{xz}	0.140

密度依次为1.93×10^3 kg/m^3、1.91×10^3 kg/m^3。

1.2 叶片载荷

叶片不同位置载荷的精确性,对整机叶片的分析具有重要意义。本文选用叶片在50年一遇极端运行阵风(EOG50)情况下的工况作为叶片运行环境条件,经Bladed软件处理,得到DCL1.6极限载荷工况载荷作为计算载荷工况(如表2所示)。

表2 DCL1.6极限工况下叶片各截面载荷

截面位置/m	集中力载荷/kN			弯矩载荷/(kN.m^{-1})		
	F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
0.7	5	3.0	3	30	55	0.5
1.5	1	3.5	2	110	23	1.0
1.8	6	2.0	15	125	120	1.5
3.2	4	1.0	10	75	50	0.5
4.5	5	0.9	3	170	120	0.5
6.5	10	1.0	30	150	105	1.5
8.5	8	3.0	25	300	120	4.0
11.2	8	8.0	50	310	140	4.5
14.6	5	4.0	20	180	50	1.5

2　风机叶片厚度遗传优化设计

风机叶片复合材料铺层厚度优化设计是一种典型的带有离散设计变量或混合设计变量的优化问题，遗传算法相较于传统优化方法（枚举、启发式等）具有较好全局搜索能力，可有效避免陷入局部最优解，在满足层合板铺层基本原则、刚强度等要求下，合理选取初始种群、迭代数目、遗传算子（选择、交叉、变异）等相关参数，对于正确研究复合纤维铺层厚度对叶片结构性能的影响有重要的作用。

2.1　复合材料最大应力强度失效准则

当材料主方向上任何一个应力分量达到相应的基本强度值时，材料被破坏。即：

$$\begin{cases}\sigma_1 < X_t, \sigma_1 > -X_c \\ \sigma_2 < Y_t, \sigma_2 > -Y_c \\ |\tau_{12}| < S\end{cases}$$

上述三个条件只要有一个不成立，则认为材料失效。此失效准则存在一定不足，没有考虑应力分量对材料失效的耦合影响。

X_t—— 沿纤维方向的抗拉强度；

X_c—— 沿纤维方向的抗压强度；

Y_t—— 垂直于纤维方向的抗拉强度；

Yc—— 垂直于纤维方向的抗压强度；

S—— 面内剪切强度。

2.2　铺层优化设计遗传算法实现

影响复合材料风力机叶片性能的主要参数有铺层角度、铺层厚度及铺层顺序。叶片铺层中：0°纤维布铺层方向与主要承受载荷方向基本一致，承担主要轴向力；±45°纤维布有较大铺层范围，叶片扭转产生的剪应力主要由其承担；90°纤维布铺层后主方向与叶片展向垂直，主要起调节作用。确定合适的纤维布铺层厚度（即铺层比例）对于提高叶片的机械性能有重要作用。

叶片的刚度和强度是衡量叶片性能的两个重要参数，而叶片本身结构为典型非等厚度规则回转体，直接以刚度和强度计算叶片整体优化模型其铺层层数多、过程繁琐、计算工作量大。为提高计算效率，首先建立叶片近似模型，将叶片原始铺层结构进行简化，然后分别以叶片刚度、强度为优化目标函数，采用同种铺层方案进行叶片铺层，以有限元法和遗传算法相结合的方法作为优化方法，对近似模型进行结构寻优设计。其简化近似模型如图 3 所示。

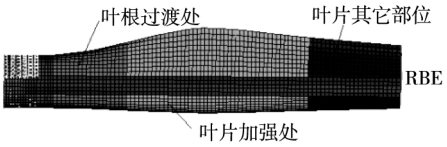


图 3　风力机叶片近似模型

在叶片的三个不同部位，以原有铺层方案为基础，重新设计六种铺层方案，建立近似模型铺层结构（如表 3 所示）。

表 3　六种铺层方案

位置	序号	铺层方案	循环数
过渡处	1	$[0°/(\pm45°)/90°]_{NT}$	5
	2	$[0°/(\pm45°)/0°]_{NT}$	5
其他部位	3	$[0°/(\pm45°)/0°/0°]_{NT}$	4
	4	$[0°/0°/(\pm45°)/0°]_{NT}$	4
加强处	5	$[0°/(\pm45°)/(\pm45°)/90°]_{NT}$	4
	6	$[0°/(\pm45°)/(\pm45°)/0°]_{NT}$	4

2.2.1　铺层优化设计数学模型

以结构刚度为目标函数时设计近似模型的最大位移最小；以结构静强度为目标函数时设计近似模型最大主应力最小。

两种不同优化设计方案的数学模型可整体表述为：

最小化（minimize）：$f(X) = f(x_1, x_2, \cdots x_n)$

约束条件（subject to）：

$g_j(X) \leqslant 0 \quad j = 1, \cdots\cdots, mh$

$h_k(X) = 0 \quad k = 1, \cdots\cdots, mh$

$x_i^L \leqslant x_i \leqslant x_i^U \quad i = 1, \cdots\cdots, n$

式中，$X = (x_1, x_2, \cdots x_n)$ 是设计变量单层铺层厚度，

$f(X)$ 是目标函数，$g(X)$ 是不等式约束函数，

$h(X)$ 是等式约束函数；

L 指 lower limit，即设计变量下限，

U 指 upper limit，即设计变量上限。

2.2.2　约束条件

复合材料铺层厚度优化设计时应满足层合板铺层准则。（1）为避免拉剪、拉弯等引起层合板翘曲变形，应尽量把 ±45° 纤维布铺放于圆筒表面；（2）当铺层厚度发生变化时，应注意层间过度时也要满足坡度要求；（3）为避免分层出现，同种纤维布不宜连续铺放超过 4 层。

2.2.3 编码准则选择

遗传算法的编码方式有二进制编码方式、十进制编码方式、实数编码方式等。采用实数编码方式可直接在表现型上进行遗传操作，有效提高搜索能力，提高计算效率。

2.2.4 遗传算子设计

选择、交叉、变异三个基本遗传算子的合理确定对于遗传操作的实现有重要的作用。选择采用联赛选择机制，其值设定为2；交叉算子采用动态调整的方法，有利于保留性能优良个体，淘汰性能较差个体，提高进化速度；变异算子根据适应度函数合理确定为0.01。

2.2.5 建立适应度函数

本文分别以风机叶片模型的结构刚度和结构静强度为优化目标，设定目标函数的最大值最小。建立的优化设计模型存在约束优化，可采用外点罚函数将其转化为无约束问题。在可行域外部定义罚函数，计算时仅需考虑违反约束的设计。将适应度函数定义如下：

$$\hat{f}_0(x) = r\sum_{i=1}^{m}\max\left[g_j(x)-1\right]^t \cdot 0$$

其中，$\hat{f}_0(x)$ 是正则化的目标函数，r 是罚函数乘子，t 定义罚函数的类型。

2.2.6 收敛判断

通过定义最大种群数目以及最大迭代次数来控制遗传算法的计算量，引入全局搜索水平加强对收敛过程的监控。

3 算例优化过程及结果

3.1 算例优化过程

本文采用将有限元分析和遗传算法相结合的方法进行优化分析，将目标函数分别设定为叶片最大位移最小和最大主应力最小。采用实数制编码方式，将离散的铺层厚度设计变量转换为连续设计变量，设计种群规模时采用 Hyperstudy 自定义的方式，采用全局收敛模式对优化过程进行监控，保证计算结果的可靠性[6]。设定种群最大迭代次数为100，最小迭代次数为25。

3.2 算例优化结果

经过25步迭代计算后，遗传算法优化收敛。其优化结果（如表4所示）。

表4 刚度优化铺层厚度结果与强度优化铺层厚度结果表

序号	刚度优化铺层厚度						强度优化铺层厚度					
	初始比例/%			优化后比例/%			初始比例/%			优化后比例/%		
1	30.75	38.50	30.75	33.34	33.36	33.30	30.75	38.50	30.75	33.41	33.32	33.27
2	61.50	38.50		44.37	55.63			61.50	38.50		44.36	55.64
3	70.48	29.52		53.11	46.89			70.48	29.52		53.80	46.20
4	70.48	29.52		52.53	47.27			70.48	29.52		52.45	47.55
5	22.16	55.68	22.16	14.24	71.52	14.24	22.16	55.68	22.16	14.90	70.20	14.90
6	44.31	55.59		28.32	71.68			44.31	55.59		28.17	71.83
角度(°)	0°	±45°	90°	0°	±45°	90°	0°	±45°	90°	0°	±45°	90°

注：表4优化目标最大位移和主应力最小。

根据上述统计结果，分别以两种不同目标函数进行优化时，不同角度纤维布的铺层厚度比例结果趋向一致。在进行层合板铺层分析时，分别以刚度为目标和以强度为目标进行分析结果一致性，这与层合板设计原则一致。

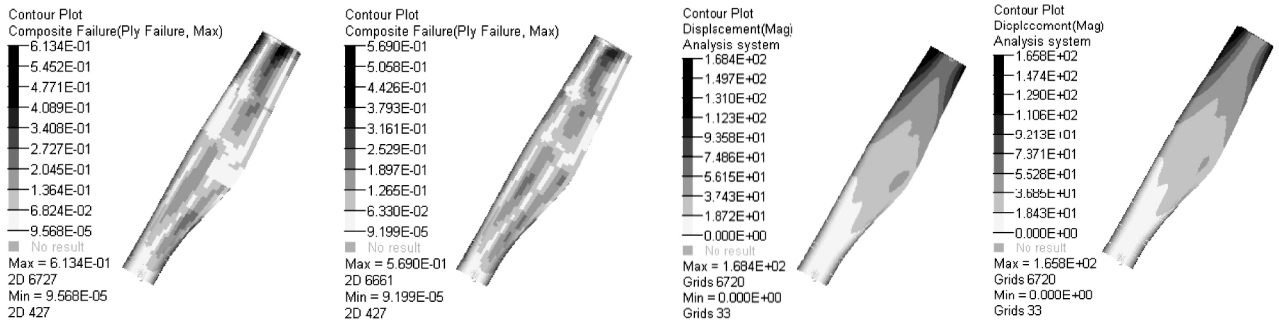
将方案一到方案六得出的结果与铺层最小比例原则相结合，参照实际叶片铺层的工程经验，得出如下结论：

（1）在叶根过渡处，±45°铺层比例在50%～60%左右，0°铺层比例在30%～40%左右，90°铺层比例在10%～20%左右；

（2）在叶片其他部位（即远离叶根处），±45°铺层比例在40%～50%左右，0°铺层比例在50%～60%左右，90°铺层可作为铺层调节适当铺设；

(3) 叶片加强处，±45°铺层在 65% ~75% 之间，0°铺层比例在 25% ~35% 左右，90°铺层可适当铺设。

依据上述结论重新建立铺层厚度方案与原方案进行对比。



(a–1) 原有铺层方案—失效因子　(b–1) 优化后方案—失效因子　(a–2) 原有铺层方案—最大位移　(b–2) 优化后方案—最大位移

(a–1) 原有铺层方案—失效因子；(b–1) 优化后方案—失效因子；
(a–2) 原有铺层方案—最大位移；(b–2) 优化后方案—最大位移

图 4　失效因子和最大位移云图

由图 4 可知，原有铺层方案失效因子为 0.613 4，经优化后失效因子变为 0.569 0，与原有铺层方案相比降低了 7.24%；原有铺层方案最大位移为 168.4，经优化后最大位移变为 165.8，与原有铺层方案相比降低了 1.54%。尽管优化后叶片的结构刚度性能提升不大，但优化后的叶片结构强度性能有了较好提高。

4　结论

(1) 与复合材料层合板一致，对风机叶片进行铺层厚度优化分析时，可以从叶片的结构刚度和结构静强度两方面考虑，且经过试验算例证明，其优化结果趋向一致。

(2) 叶片在不同位置时承受的主要载荷不同，不同角度的纤维布可承受的载荷不同，将铺层材料的特点与风机叶片受力特点相结合，在满足层合板铺层最小比例的前提下，得到不同位置处的不同角度纤维布的铺层比例。

(3) 将优化后的铺层厚度或称为铺层比例应用到叶片中，经对比，优化后的叶片刚度性能和强度性能在一定程度上均有提高，证明了优化方法的可行性和正确性。

参　考　文　献

[1] Zehnder. N，Rmanni. P. E. A Methodology for the Global Optimization of Laminated Composite Structures [J]. Composite Structures，2006，(72)：311 – 320.

[2] Erdal O，Sonmez F O. Optimum Design of Composite Laminates for Maximum Buckling Load Capacity Using Simulated Annealing [J]. Composite Structures，2005，(71)：45 – 52.

[3] Callahan K J，Weeks G E. Optimum design of composite laminates using genetic algorithms [J]. Composite Engineering，2008(3)：149 – 160.

[4] 冯消冰，黄海，王伟. 基于遗传算法的大型风机复合材料叶片根部强度优化设计 [J]. 复合材料学报，2012，29(5)：196 – 202.

[5] 王向阳，郭奔. 基于最终实效强度的层合板结构优化分析 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2006，30(1)：140 – 143.

[6] 孙鹏文，侯战华. 基于遗传算法的风力机叶片结构铺层厚度研究 [J]. 太阳能学报(交通科学与工程版)，2016，37(6)：1 566 – 1 571.