

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.011

风力机叶片结构参数敏感性分析及优化设计

朱杰¹, 蔡新^{1,2}, 潘盼¹, 顾荣蓉¹

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 以某 1.5 MW 风力机叶片为实例, 建立叶片有限元模型, 并对叶片关键结构参数进行敏感性分析。结果表明, 铺层角度对叶片结构特性影响最大, 主梁帽宽度及铺层厚度的影响次之, 主梁帽铺层位置以及腹板布置位置的影响最小。在敏感性分析的基础上, 建立以叶片质量最轻为目标函数, 以主梁帽宽度、铺层数、铺层位置以及腹板布置位置为设计变量, 以叶片的强度、刚度与振动性能为约束条件的优化设计数学模型, 采用遗传算法与有限元法相结合的方法对叶片结构进行优化设计研究。与原设计方案相比, 优化设计方案的叶片质量减轻 9.8%, 结构应变分布更为合理, 且不会发生共振, 表明优化方法合理有效。

关键词: 风力机叶片; 结构参数敏感性分析; 优化设计; 叶片质量; 遗传算法; 有限元法

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)02-0156-07

Parameter sensitivity analysis and optimization for structure of wind turbine blades

ZHU Jie¹, CAI Xin^{1,2}, PAN Pan¹, GU Rongrong¹

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A finite element model of a 1.5 MW wind turbine blade was established, and sensitivity analysis of key structural parameters was carried out. The results show that the ply angle has the greatest influence on the structural performance of the blade, with the width and the layer thickness of the spar cap coming second, and that the layer locations of the spar cap and the position of the shear web have the least influence. Based on the sensitivity analysis, an optimization design mathematical model pursued with respect to minimum mass of the blade was developed. The width, layer number, and layer location of the spar cap, and the position of the shear web were employed as the design variables, while the demands of strength, stiffness, and stability of the blade were taken into account as the constraint conditions. The optimization design of the blade was carried out by combining the genetic algorithm and the finite element method. Compared with the original design, the optimization design results achieve a decrease of 9.8% of blade mass, and the strain distribution of the structure is more reasonable, without occurrence of resonance, showing that the method used in this study is efficient.

Key words: wind turbine blade; sensitivity analysis of structural parameter; optimization design; blade mass; genetic algorithm; finite element method

作为风力机关键部件的叶片, 需要合理的结构、先进的材料和科学的工艺使其能可靠地承担风力、自重和离心力等载荷给予的各种弯矩与拉力, 因而叶片的结构设计对其性能具有决定性影响^[1]。随着风力机向大型化发展, 叶片尺寸不断增大, 其所受载荷越来越大, 叶片的结构设计也越来越受到重视。

叶片结构设计包括材料的选择、叶片剖面结构形式设计、复合材料铺层设计等。目前大型风力机叶片的材料大多以轻质高强、耐蚀性好、具有可设计性的复合材料为主, 采用复合材料制造的叶片具有承载能力好、

收稿日期: 2014-04-29

基金项目: 江苏高校“沿海开发与保护协同创新中心”计划(苏政办发[2013]56号); 南通市科技引导专项(2013400303)

作者简介: 朱杰(1985—), 男, 浙江余姚人, 博士研究生, 主要从事工程结构现代设计理论与方法应用研究。E-mail: zhukejie2222@163.com

结构性能可靠等优点,但同时也存在着制造成本高、结构设计分析异常复杂等缺点^[2-4]。降低制造成本的有效途径之一是对叶片结构进行优化设计,减少材料的使用,减轻叶片质量,即在保证强度、刚度、稳定性以及叶片气动性能的前提下,通过反复调整叶片的截面尺寸、形状以及复合材料铺层来完善叶片结构设计,最终达到结构的经济性与合理性^[5-7]。

近年来,许多学者采取了不同的方法对叶片结构进行优化设计以实现减轻叶片质量这一具体设计目标。Liao 等^[8]以叶片主梁帽的铺层及位置为设计变量,使用改进的粒子群算法减轻某 1.5 MW 风力机叶片质量。但其在分析叶片结构特性时将叶片简化为简单梁模型,作了较多假设,并忽略了叶片壳体结构的三维扭转效应,可能导致计算结果不精确。Jureczko 等^[9]以壳厚度、腹板厚度、刚性肋条数与布置位置为设计变量,采用有限元法与改进遗传算法相结合的方法实现叶片减重,但是没有考虑材料实际铺层情况。李丹等^[10]同样采用有限元法计算叶片结构特性,以叶片腹板位置和蒙皮铺层厚度为设计变量,发展了一种二级优化设计方法减轻叶片质量,即先优化腹板位置,再优化铺层厚度,但此方法较难搜索到全局最优解。

为了得到理想的优化结果,首先需要就结构参数对叶片结构特性的影响进行敏感性分析,进而确定合理的设计变量。本文在不改变气动外形的前提下,建立叶片有限元参数化模型,详细分析结构尺寸及材料铺层对叶片结构特性的影响。在此基础上,选择合适的结构参数作为设计变量,以叶片质量最轻为目标函数,将遗传算法与有限元法相结合,对极限挥舞弯矩作用下的某 1.5 MW 风力机叶片结构进行优化设计研究。

1 叶片有限元计算模型

1.1 叶片几何结构

本文所研究的 1.5 MW 风力机叶片长 37 m, 质量为 6 580.4 kg。叶片剖面结构形式如图 1 所示,由主梁帽、腹板、前缘与后缘组成。前缘、后缘和腹板采用夹层结构,由玻璃纤维织物与夹芯材料铺设而成,主梁帽主要由单向 UD 布带铺设而成。

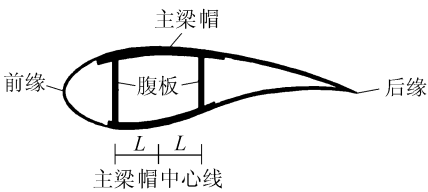


图 1 叶片剖面结构形式

Fig. 1 Cross-section structure on blade

1.2 叶片有限元模型

由于叶尖主要起降低噪音的作用,对叶片整体结构强度影响较小,故建立有限元模型时除去叶尖部分,建模长度为 36.5 m。采用 APDL 语言在 ANSYS 中建立叶片参数化模型,利用 SHELL91 与 SHELL99 单元分别对夹层结构及主梁帽材料铺层进行模拟。叶片有限元模型如图 2 所示,所建模型质量与叶片实际质量相差 0.38%。

1.3 模型约束与载荷

将叶片视为悬臂梁模型,对叶片根部采用完全约束的边界条件。由 I 类风场 50 a 一遇极限风速计算所得极限挥舞弯矩为 4 429.3 kN · m,对该弯矩进行简化施加在模型上,并与试验加载方式保持一致,载荷具体分布情况如图 3 所示。

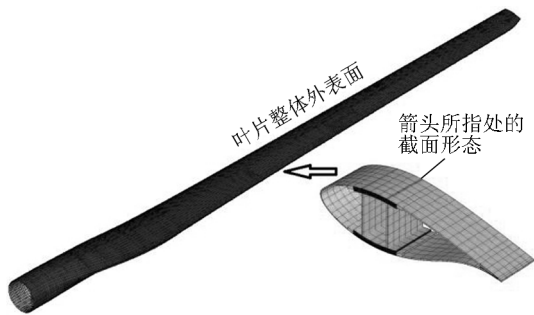


图 2 叶片有限元模型

Fig. 2 FEM model of blade

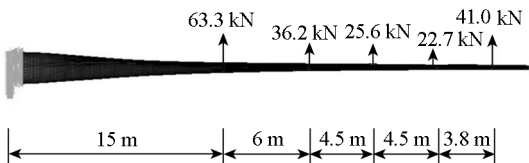


图 3 叶片载荷分布

Fig. 3 Load distribution on blade

2 叶片结构参数敏感性分析

主梁帽是叶片的主要承力结构,承载大部分弯曲载荷,腹板则主要承担叶片挥舞方向的剪切载荷与扭转载荷,主梁帽几何尺寸、铺层及腹板布置位置对叶片质量和结构性态有重要影响。因此本文选取主梁帽宽

度、主梁帽复合材料铺层厚度、铺层角度、铺层位置以及腹板布置位置为关键结构参数,对其进行敏感性分析,以便全面了解叶片结构特性随这些参数的变化规律,为叶片结构优化设计打下基础。

腹板布置位置见图1。主梁帽材料铺层如图4所示,选取铺层较厚段(4.4~25.3 m)进行分析,采用8个控制点对该区域铺层进行模拟,如图5所示。图5中,控制点3~6各包含2个参数,分别为铺层厚度与铺层位置,剩余4个控制点每个点只包含1个参数,即铺层厚度。铺层厚度采用2种方式表述:(a) UD布带单层厚度保持不变,改变铺层数;(b)铺层数保持不变,改变UD布带单层厚度。

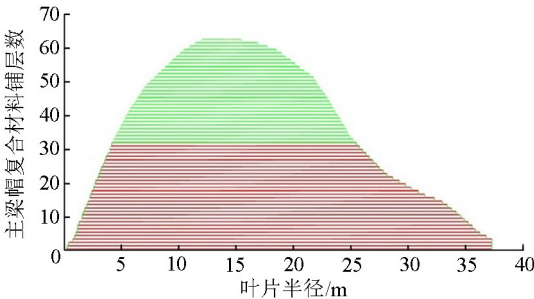


图4 主梁帽材料铺层

Fig. 4 Material layout of spar cap

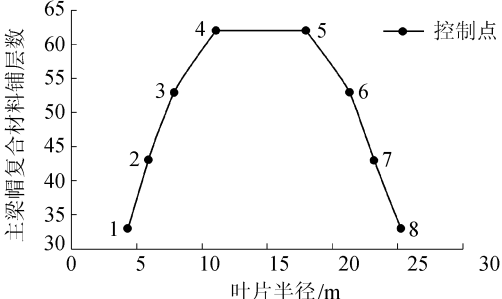


图5 主梁帽参数化铺层

Fig. 5 Parametric material layout of spar cap

对主梁帽宽度、铺层厚度、铺层位置及腹板布置位置4个参数进行归一化处理,其变化范围设为 $[0.8, 1.2]$,铺层角度的变化范围设为 $[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ 。将铺层厚度及铺层位置视作2个整体,统一进行变化。规定铺层位置向叶根、叶尖偏移时系数增大,向叶片中段偏移时系数减小;腹板布置位置向前、后缘偏移时系数增大,向主梁帽中心线偏移时系数减小。

由于篇幅有限,本文仅列出关键结构参数对叶片质量及最大等效应变的影响程度,具体计算结果见图6。由图6可以看出:在各参数变化过程中,叶片质量与主梁帽宽度、铺层厚度及铺层位置呈线性递增关系,与腹板布置位置呈线性递减关系,铺层角度的变化对叶片质量没有影响。主梁帽宽度与铺层厚度对叶片质量的影响较大,尤其是主梁帽宽度,变化20%时叶片质量最大变化9.53%。相比而言,铺层位置与腹板布置位置对叶片质量的影响较小,铺层位置变化20%时叶片质量最大变化1.35%,腹板布置位置变化20%时叶片质量最大变化0.99%。

叶片最大等效应变与主梁帽宽度、铺层厚度及铺层位置呈非线性减小关系,与腹板布置位置呈非线性增大关系。铺层角度对叶片最大等效应变的影响最大,随着铺层角度的改变,最大等效应变明显增大,并关于 0° 基本呈对称分布。角度变化 15° 时最大等效应变变化36.6%,角度变化 60° 时最大等效应变变化199.1%。与铺层角度相比,主梁帽宽度与铺层厚度对最大等效应变的影响相对较小,铺层位置与腹板布置位置对最大等效应变的影响则最小。

由图6(b)(c)可以看出:叶片结构特性随2种铺层厚度方式的变化趋势基本一致,对材料单层厚度的敏感性稍强于材料铺层数。但实际生产叶片时减少铺层数可简化制造工艺,降低制作成本,故本文采用改变铺层数的方式来体现铺层厚度的变化。

通过关键结构参数敏感性分析可知,叶片结构特性对铺层角度最为敏感,对主梁帽宽度及铺层厚度次之,对铺层位置及腹板布置位置敏感性则较弱。但当铺层角度变化时叶片最大等效应变已远超过其允许值,因此不宜改变主梁帽复合材料铺层角度,将其设置为 0° 时叶片承载性能最好。在强度范围内,减小主梁帽宽度、减少主梁帽复合材料铺层数可有效减小叶片质量,在优化设计时应给予重点考虑。虽然主梁帽复合材料铺层位置及腹板布置位置对叶片结构特性的影响较小,但对其进行合理布置可进一步减小叶片质量,在优化设计时也可作为设计变量。

3 优化设计计算

3.1 优化设计模型

3.1.1 目标函数

以叶片质量最小为目标函数,具体表示如下:

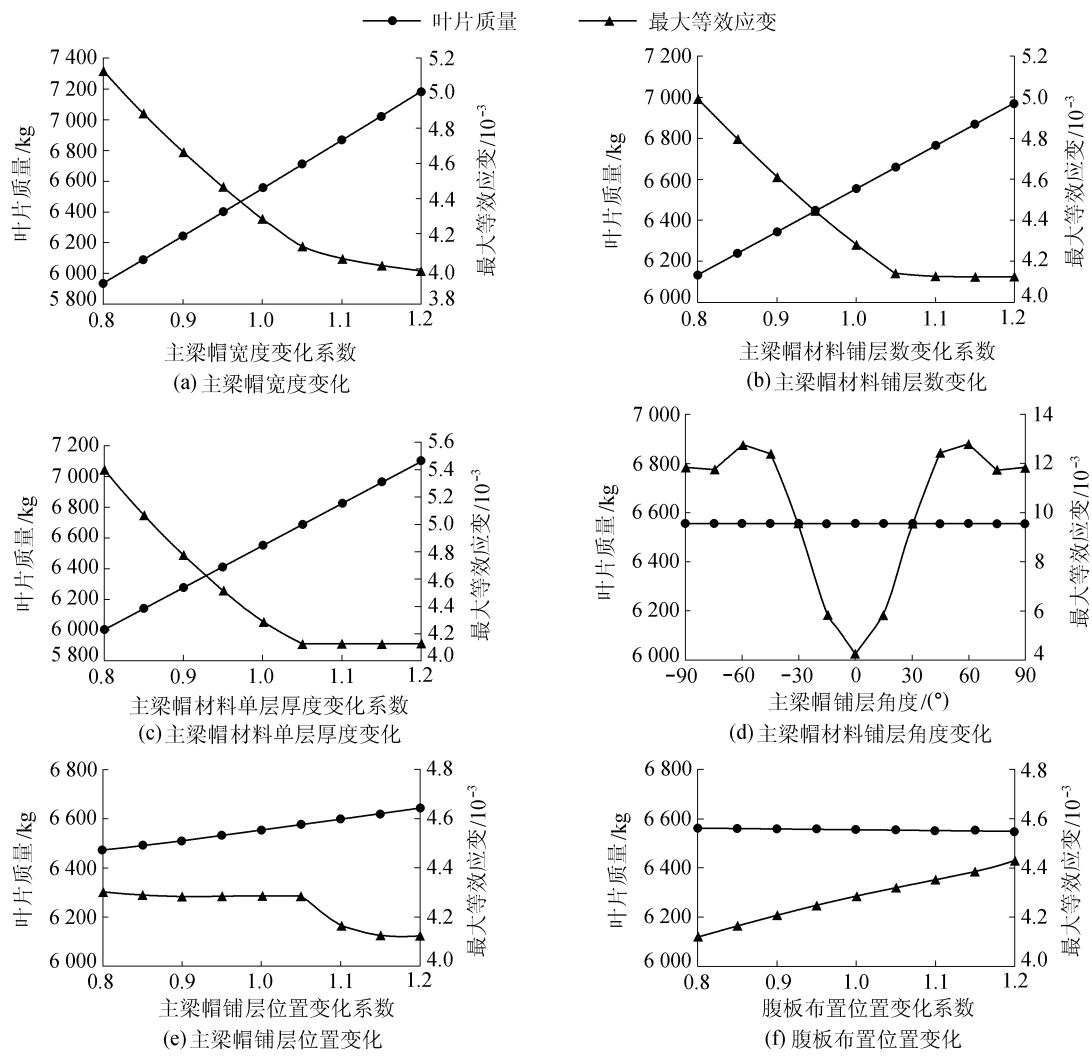


图 6 叶片质量及最大等效应变敏感性曲线

Fig. 6 Sensitivity curves of blade mass and maximum equivalent strain

$$\min F(X) = \sum \rho_i V_i \tag{1}$$

式中: X ——设计变量; ρ_i ——第 i 种材料的密度; V_i ——第 i 种材料的体积。

3.1.2 设计变量

根据结构参数敏感性分析结果,选取主梁帽宽度、主梁帽复合材料铺层数、铺层位置以及腹板布置位置为设计变量,总共有 13 个设计变量,即

$$\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n] \quad n = 13 \tag{2}$$

式中: $x_1 \sim x_7$ ——主梁帽材料铺设层数; $x_8 \sim x_{11}$ ——主梁帽材料铺设位置; x_{12} ——腹板布置位置; x_{13} ——主梁帽宽度。

3.1.3 约束条件

强度方面,为了保证叶片不发生破坏,需对叶片应变进行约束,即极限载荷产生的最大应变不能超过材料的破坏极限^[11]:

$$\varepsilon_{\max} \leq \frac{\varepsilon_d}{\gamma_{S1}} = \frac{0.0055}{C_{4a}C_{4b}} \tag{3}$$

式中: $\varepsilon_{\max}$ ——叶片最大应变; ε_d ——叶片设计应变; γ_{S1} ——应变安全系数; C_{4a} 、 C_{4b} ——材料局部安全系数。对于预浸料成型及半自动制造成型叶片, $C_{4a} = 1.1$;对于单向增强制品材料, $C_{4b} = 1.0$ 。

刚度方面,在极限载荷作用下,超过约 10% 的叶片半径出现尖端位移,因此必须避免叶片与塔架发生碰撞,即必须限制叶尖在载荷作用下的极限变形。IEC 标准要求当极限载荷乘以载荷和材料的综合局部安全

系数后,叶片与塔架不能接触^[12]:

$$d_{\max} \leq \frac{d_d}{\gamma_{s2}}$$

(4)

式中: $d_{\max}$ ——叶尖最大位移; d_d ——叶片与塔架允许间隙; γ_{s2} ——位移安全系数。

稳定性方面,叶片在设计载荷作用下不能发生屈曲失稳:

$$\lambda_1 \geq 1.0\gamma_{s3}$$

(5)

式中: λ_1 ——叶片一阶屈曲失稳因子; γ_{s3} ——失稳安全系数。

振动性能方面,叶片的固有频率应与风轮的激振频率错开,避免产生共振^[9]:

$$|F_{\text{叶片}} - F_{\text{风轮}}| \geq \Delta$$

(6)

式中: $F_{\text{叶片}}$ ——叶片一阶固有频率; $F_{\text{风轮}}$ ——风轮激振频率; Δ ——容许差别。

考虑到实际制造工艺的可操作性与材料铺层的连续性,设计变量还需满足以下不等式:

$$\begin{cases} x_i^L \leq x_i \leq x_i^U & (i = 1, 2, \dots, 13) \\ x_j - x_{j+1} \leq 0 & (j = 1, 2, 3) \\ x_{k+1} - x_k \leq 0 & (k = 4, 5, 6) \\ x_{12} \leq \frac{x_{13}}{2} \end{cases}$$

(7)

式中: x^L 、 x^U ——设计变量的下限与上限。

设计变量与约束条件取值范围如表1所示,其中 $F_{\text{叶片}}$ 的取值范围为 $F_{\text{叶片}} \leq 0.94 \text{ Hz}$ 或 $F_{\text{叶片}} \geq 0.96 \text{ Hz}$ 。

表1 设计变量与约束条件取值

Table 1 Lower and upper bounds of variables and constraint conditions

约束条件	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8/m	x_9/m	x_{10}/m	x_{11}/m	x_{12}/m	x_{13}/m	$\varepsilon/10^{-6}$	$d_{\max}/\text{m}$	λ_1
下限	28	28	33	35	33	28	28	7	10	16	20.5	0.13	0.5			1.2
上限	38	48	58	65	55	45	40	9	13	19	22.0	0.25	0.7	5000	5.5	

3.2 优化设计计算方法

遗传算法^[13-15]是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,具有大范围全局搜索能力,适用于处理复杂和非线性优化问题。本文采用MATLAB编写遗传算法程序,并结合ANSYS批处理模式计算叶片结构特性,从而实现叶片的结构优化设计。

遗传算法参数具体设置:种群大小为30,最大进化代数数为30,交叉概率为0.8,变异概率为0.01。图7为优化设计流程。

4 优化结果与分析

图8为优化过程中目标函数随迭代步数的变化情况,由图8可见,在迭代至第24步时求得叶片质量最小,为5912.4 kg。优化前后设计变量值如表2所示。图9为原设计方案与优化设计方案主梁帽复合材料铺层数对比。

由表2与图9可以看到,与原设计方案相比,优化设计方案主梁帽各段材料铺层数均有所减少。由于所受载荷相对较小,铺层数在靠近叶尖段减少较明显,在靠近叶根段与主梁帽中段则变化较小。主梁帽宽度变小,主梁帽复合材料铺层位置向叶片中段偏移,最大铺层区域变小,腹板布置位置向主梁帽中心线偏移,这些都有利于减小叶片质量。

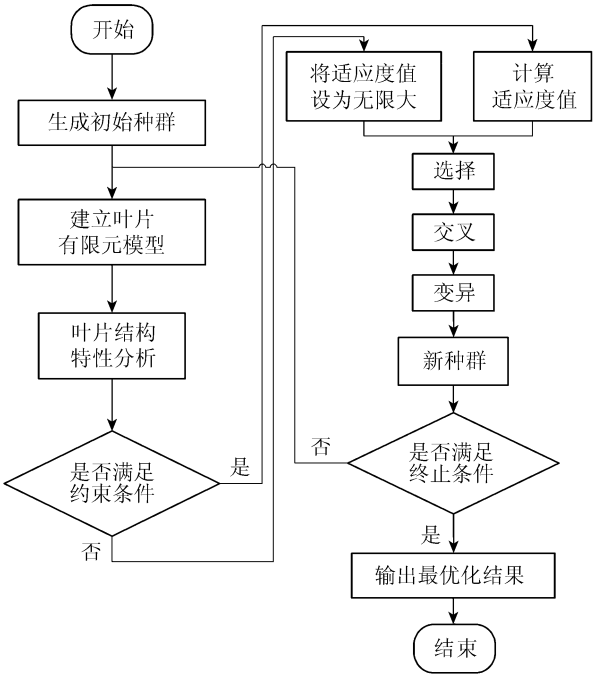


图7 优化设计流程

Fig. 7 Flowchart of optimization procedure

由于所受载荷相对较小,铺层数在靠近叶尖段减少较明显,在靠近叶根段与主梁帽中段则变化较小。主梁帽宽度变小,主梁帽复合材料铺层位置向叶片中段偏移,最大铺层区域变小,腹板布置位置向主梁帽中心线偏移,这些都有利于减小叶片质量。

表2 优化前后设计变量值

Table 2 Values of design variables before and after optimization

方 案	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8/m	x_9/m	x_{10}/m	x_{11}/m	x_{12}/m	x_{13}/m
原设计方案	33	43	53	62	53	43	33	7.8	11.0	18.0	21.3	0.188	0.62
第7步设计方案	31	42	55	60	45	40	32	7.6	11.0	17.3	21.6	0.178	0.59
第20步设计方案	30	41	51	61	40	35	30	7.4	11.3	16.7	20.9	0.171	0.55
最终优化设计方案	28	38	51	61	37	33	30	7.0	10.3	16.5	21.5	0.167	0.53

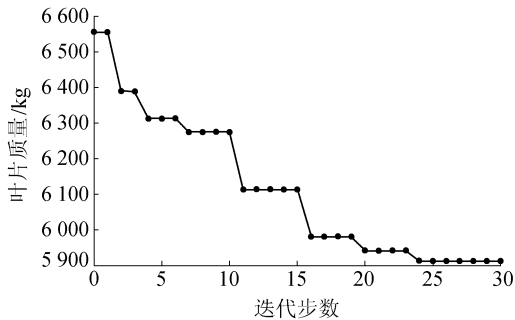


图8 目标函数迭代过程

Fig. 8 Iterative procedure of objective function

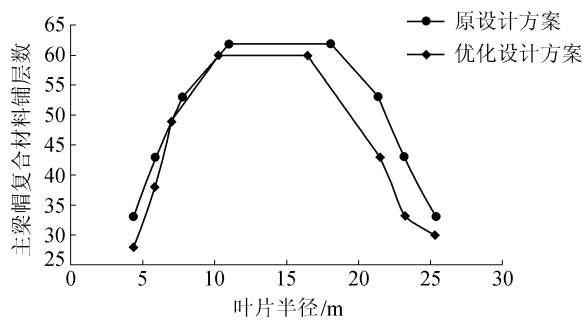


图9 主梁帽复合材料铺层数对比

Fig. 9 Comparison of material layout of spar cap

优化前后叶片结构特性对比见表3。与原设计方案相比,最终优化设计方案的叶片质量减轻9.8%,减重效果明显。最大等效应变以及最大叶尖位移均有所增大,但都在允许范围之内,其中最大叶尖位移达到临界约束,叶片结构应变分布更为合理,更大限度地利用了复合材料的性能。由于主梁帽宽度的减小以及材料铺层数的减少,叶片整体结构刚度相应减小,并且减小程度大于叶片质量的减轻程度,因此叶片一阶固有频率略有降低,但不会发生共振。总的来说,经过优化调整,减轻了叶片质量,改善了叶片结构特性,达到了优化设计的目的。

表3 叶片结构特性对比

Table 3 Comparison of blade structural performance

方 案	$m_{\text{叶片}}/\text{kg}$	$\varepsilon_{\text{max}}/10^{-6}$	d_{max}/m	λ_1	$F_{\text{叶片}}/\text{Hz}$
原设计方案	6555.2	4286.2	4.59	2.024	1.027
第7步设计方案	6274.7	4410.7	4.90	1.915	1.024
第20步设计方案	5980.6	4822.1	5.31	1.633	1.017
最终优化设计方案	5912.4	4949.7	5.50	1.436	1.010

注: $m_{\text{叶片}}$ 为叶片质量。

5 结 论

- a. 主梁帽宽度与铺层厚度对叶片结构特性的影响较大,铺层位置与腹板布置位置对叶片结构特性的影响则较小,在叶片结构设计时应重点考虑主梁帽宽度以及铺层厚度。主梁帽铺层角度不宜进行改变,设置为0°时叶片承载能力最好。
- b. 与原设计方案相比,优化设计方案具有明显的优越性,说明本文所采用的方法合理有效,可为风力机叶片的现代设计提供参考。

参考文献:

[1] 刘晓红, 汤宏群, 谭俊, 等. 小型风力发电机叶片设计与制造的研究[J]. 现代制造工程, 2012(4):126-129. (LIU Xiaohong, TANG Hongqun, TAN Jun, et al. The study of the small wind turbine blade design and manufacture[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(4):126-129. (in Chinese))

[2] BRØNSTED P, LILHOLT H, LYSTRUP A. Composite materials for wind power turbine blades[J]. Annual Review of Materials Research, 2005, 35: 505-538.

[3] 李成良, 王继辉, 薛忠民. 大型风机叶片材料的应用和发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(4): 49-52. (LI Chengliang, WANG Jihui, XUE Zhongmin. Application and development of materials of large-scale wind turbine blades[J]. FRP/CM, 2008

- (4): 49-52. (in Chinese))
- [4] ZHU Jie, CAI Xin, PAN Pan, et al. Multi-objective structural optimization design of horizontal-axis wind turbine blades using the non-dominated sorting genetic algorithm II and finite element method[J]. *Energies*, 2014, 7(2): 988-1002.
- [5] 廖猜猜, 赵晓路, 王建礼, 等. 基于风力机叶片铺层的频率优化设计[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(8): 1311-1314. (LIAO Caicai, ZHAO Xiaolu, WANG Jianli, et al. Optimization design of the frequency based on wind turbine blade layers [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(8): 1311-1314. (in Chinese))
- [6] 李成良, 陈淳. 风力机叶片的结构分析与铺层优化设计[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2009(6): 50-53. (LI Chengliang, CHEN Chun. Structure analysis and lamination optimum design of wind turbine rotor blade [J]. *FRP/CM*, 2009(6): 50-53. (in Chinese))
- [7] CAI Xin, ZHU Jie, PAN Pan, et al. Structural optimization design of horizontal-axis wind turbine blades using a particle swarm optimization algorithm and finite element method[J]. *Energies*, 2012, 5(11): 4683-4696.
- [8] LIAO Caicai, ZHAO Xiaolu, XU Jianzhong. Blade layers optimization of wind turbines using FAST and improved PSO Algorithm [J]. *Renewable Energy*, 2012, 42: 227-233.
- [9] JURECZKO M, PAWLAK M, MŻYK A. Optimisation of wind turbine blades[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167(2): 463-471.
- [10] 李丹, 姚卫星. GFRP 风机叶片结构设计的二级优化方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(5): 598-601. (LI Dan, YAO Weixing. Two-level optimization for gfrp wind turbine blade structural design[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(5): 598-601. (in Chinese))
- [11] JB/T 10194—2000 风力发电机组风轮叶片[S].
- [12] BURTON T, JENKINS N, SHARPE D, et al. *Wind energy handbook*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011: 405-406.
- [13] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 遗传算法在风力机风轮叶片优化设计中的应用[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(2): 180-185. (LIU Xiong, CHEN Yan, YE Zhiquan. Application of genetic algorithms to HAWT rotor blades optimization [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(2): 180-185. (in Chinese))
- [14] 傅洁, 何斌, 张慧玲, 等. 基于片条理论和遗传算法的风力机叶片全局优化设计[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(8): 3025-3030. (FU Jie, HE Bin, ZHANG Huiling, et al. Optimal design of horizontal-axis wind turbines blade based on strip theory and genetic algorithms [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(8): 3025-3030. (in Chinese))
- [15] 蔡新, 李洪煊, 武颖利, 等. 工程结构优化设计研究进展[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(3): 269-276. (CAI Xin, LI Hongxuan, WU Yingli, et al. Research progress of optimal design for engineering structures [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, 39(3): 269-276. (in Chinese))