

# GFRP 风机叶片结构设计的二级优化方法

李丹 姚卫星

(南京航空航天大学飞行器先进设计技术重点学科实验室, 南京, 210016)

**摘要:**通过对风机叶片结构特性的分析,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。首先建立腹板位置参数的代理模型,根据所建的代理模型以质量最轻为目标进行系统级优化求解出腹板位置,然后将结果传给子系统级,子系统级采取分步优化策略求解叶片铺层厚度。当两级优化结果收敛时得到叶片最佳设计。经算例验证,采用这种二级优化方法,可得到较为理想的叶片结构设计结果。

**关键词:**风机叶片;结构设计;二级优化方法;屈曲

**中图分类号:**TU318 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)05-0598-04

## Two-Level Optimization for GFRP Wind Turbine Blade Structural Design

Li Dan, Yao Weixing

(Key Laboratory of Fundamental Science of Advanced Design Technology of Flight Vehicle,  
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Based on the topology of wind turbine blade structures, the web position of the blade is chosen as systematical design variable and the layer thickness as size design variable, and then a two-level optimization method is proposed to determine web position and skin layer thickness. Firstly, the surrogate model of web position is established based on which the system level optimization is performed with weight minimum as objective in order to obtain the position variable values. Then the position values are passed to sub-system where the layer thickness is optimized with a fractional step strategy. When the results of system and sub-system satisfy convergent condition, the optimum blade structure design is obtained. The two-level optimization method is proved to be efficient to obtain better blade design by the given examples.

**Key words:** wind turbine blade; structure design; two-level optimization method; buckling

叶片是风机设备的关键部件之一,从成本上看,其制造成本约占风机总成本的15%~25%;从性能上看,风力机捕获风能的多少与风轮直径的平方成正比<sup>[1]</sup>。因此,叶片的优化设计是极为重要的。

为达到最佳气动性能,叶片设计优先考虑气动外形,近年来国内外在兆瓦级大型风机上都研发有翼型设计分析程序,以气动性能最佳为目标,综合运用传统的数学优化方法和现代优化方法,优化叶片各翼型参数,并不断通过风洞试验验证提高设计程

序的准确性<sup>[2-3]</sup>。气动几何外形确定后,再考虑结构形式的选择,包括叶片剖面拓扑形状及尺寸设计等<sup>[4]</sup>。由于风机叶片大量使用复合材料<sup>[5]</sup>,结构优化很大程度上是层合板铺层设计。叶片的气动-结构耦合优化设计通常采用多学科优化设计策略<sup>[6-9]</sup>。

本文针对给定气动外形和所承载荷的叶片,在分析叶片结构特点的基础上,选择双腹板式叶片剖面结构形式,提出了二级优化方法,设计叶片腹板位置和铺层厚度。

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:**2011-04-27;**修订日期:**2011-07-13

**通讯作者:**姚卫星,男,教授,博士生导师,1957年1月生,E-mail:wxyao@nuaa.edu.cn。

## 1 二级优化设计方法

### 1.1 叶片结构特点

风力机所受载荷比较复杂,叶片作为转化风能的主要部件,承受大部分气动载荷和惯性载荷。从整体上看,叶片是一个细长的悬臂梁,弯矩是其主要载荷。为提高截面弯扭刚度,防止局部失稳,叶片剖面主要采用主梁加气动外壳的三闭室结构形式,见图1。

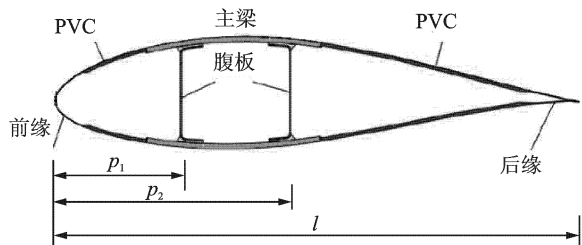


图1 叶片剖面形式

大型化是叶片发展的重要趋势。随着功率的增大,叶片越来越长,自重越来越大。对10~60 m叶片的统计研究表明,叶片质量按长度的三次方增加。在风机运行时,叶片自重会产生交变载荷,对风机运行、疲劳寿命和能量输出等有重要影响,以致传统材料不能满足大型机组对叶片强度和刚度的要求。在这种情况下,复合材料成为叶片材料的必然选择。长度50 m以下的叶片结构材料一般以单向玻璃纤维增强复合材料为主,承受大部分弯曲载荷,并铺设部分双轴向玻璃纤维增强复合材料,承受扭转载荷。为增强屈曲稳定性,夹芯材料PVC泡沫也有大量应用。当叶片长度大于50 m时,玻璃纤维复合材料已不能满足叶片的强度和刚度要求而改用碳纤维复合材料。目前全碳纤维的叶片应用较少,多以混杂复合材料应用为主<sup>[10]</sup>。

叶根处有根部螺栓与轮毂法兰盘相连,结构尺寸主要取决于连接强度,此处结构不参与优化,其他部分沿展向和弦向分别设定叶片分区,优化各区域铺层厚度。

### 1.2 二级优化设计方法

#### 1.2.1 优化模型

##### (1) 设计变量

根据设计变量与有限元模型的关系,可将其分为两个层级,系统级为腹板位置 $p_1, p_2$ ,即叶剖面前后腹板距前缘点的位置百分比(图1),它决定了有限元模型网格的划分;子系统级为铺层厚度,它与有限元网格的划分无关。考虑到单向玻璃纤维增强复合材料的弹性模量远高于双轴向玻璃纤维增强

复合材料,为提高叶片截面刚度,蒙皮从外向内的铺层顺序设计为单向玻璃纤维增强复合材料/PVC/双轴向玻璃纤维增强复合材料,以减小结构的弯曲变形。

##### (2) 设计约束

结构约束包括变形、强度、稳定性和工艺性四个方面:(a)叶尖最大变形不超过叶片展长的10%,与腹板位置关系不大,主要由叶片蒙皮整体铺层布置决定;(b)考虑载荷和材料的分散性,叶片的屈曲临界载荷不小于正常使用载荷的1.1倍,失稳一般发生在局部,叶片的屈曲因子除受腹板位置影响外,更多的由局部蒙皮铺层厚度决定;(c)工艺上要求叶片沿展向相邻区域铺层厚度不宜相差过大,可通过增设叶片展向分区来满足;(d)各分区按最大应力强度准则不发生失效。

##### (3) 设计目标

以风机叶片质量最轻为优化目标,在腹板位置变量 $p_1, p_2$ 确定的条件下,风机质量为叶片各铺层厚度的线性函数。

##### (4) 构造二级优化设计方法

根据以上对设计变量和约束的分析,构造二级优化方法如下:

首先,以腹板位置 $p_1, p_2$ 为系统设计变量,采用全因子设计试验法确定样本点,应用参数化建模技术建立结构尺寸优化的有限元模型,求各腹板位置下满足结构设计约束的叶片最轻质量,建立系统级代理模型;然后根据所建的代理模型以质量最轻为目标进行系统级优化求解腹板位置,并将结果传给子系统级,子系统级优化给定腹板位置下的叶片铺层厚度。其次,比较子系统级与系统级优化得到的叶片质量,若两者误差在5%以内,认为收敛,迭代结束,子系统级所得结果即为最佳叶片设计;若两者误差在5%以上,将子系统级结果作为新的样本点,更新代理模型,重新进行系统级优化,继续迭代至收敛。

在优化给定腹板位置下叶片最轻质量时,根据对各约束的分析,采取分步优化策略。第一步,以变形为约束,采用数学规划法-改进的可行方向法优化叶片各铺层厚度;第二步,以第一步优化结果为初值,以稳定性为紧约束,采用准则法优化叶片局部失稳区域的铺层厚度。图2为优化流程图。

#### 1.2.2 代理模型技术

为得到最佳叶片质量关于腹板位置变量的整体分布关系,采用均匀全因子设计方法取实验点<sup>[11]</sup>;且各特征量水平数较大,故代理模型取插值类代理模型。三次样条插值在给出的样本点之间具有二阶连续导数,光滑性较好,故插值方法取样条插值<sup>[12]</sup>。

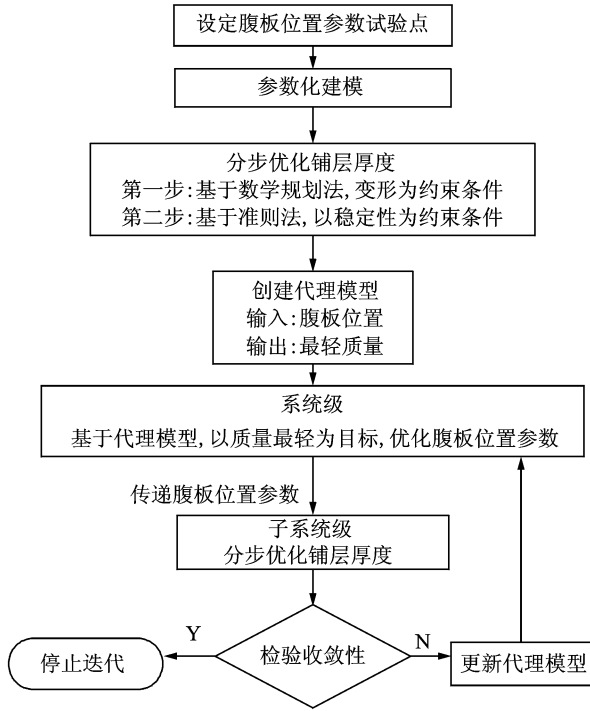


图2 二级优化方法流程图

### 1.2.3 以稳定性为约束的优化准则法

由叶片结构特点可知,主梁处有腹板支撑,一般不会发生屈曲,失稳经常发生在前后缘或腹板处。失稳区域铺层设置如图3所示。

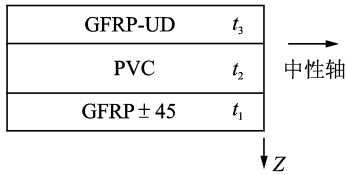


图3 区域铺层设置示意图

图中GFRP±45为双向玻璃纤维增强材料,PVC为夹芯材料,GFRP-UD为单向玻璃纤维增强材料,铺层厚度分别为 $t_1, t_2, t_3$ 。稳定性为紧约束下的准则法如下所述:

设定加速收敛因子 $p$

$$p = \begin{cases} 0.3 & \lambda > 1.2\lambda_0 \\ 0.6 & \lambda_0 \leq \lambda \leq 1.2\lambda_0 \\ 1 & \lambda \leq \lambda_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为本次屈曲分析计算所得特征值; $\lambda_0$ 为优化要达到的特征值。

当 $\lambda \leq 0.6\lambda_0$ ,认为屈曲因子与失稳区域层合板的弯曲刚度成正比;当 $\lambda > 0.6\lambda_0$ 时,认为屈曲因子与失稳区域层合板的拉伸刚度成正比<sup>[13]</sup>。由于PVC材料弹性模量很低,对刚度的影响忽略。叶片铺层弯曲刚度 $D$ 和拉伸刚度 $A$ 定义如下

$$D = E_{UD}t_3^3 + E_{GFRP}[(t_2 + t_1)^3 - t_2^3]$$

$$A = E_{UD}t_3 + E_{GFRP}t_1 \quad (2)$$

式中 $E_{UD}, E_{GFRP}$ 分别为GFRP-UD和GFRP±45的材料模量。

设优化后此区域铺层厚度变为 $t'_1, t'_2, t'_3$ ,对应材料密度分别为 $\rho_{GFRP}, \rho_{PVC}, \rho_{UD}$ ,为使结构在满足稳定性紧约束的同时不违背变形约束,控制调整后各铺层厚度不小于第一步变形约束优化所得各层厚度,故准则法优化铺层厚度等效为解下述优化问题

$$\begin{cases} \min m = \rho_{GFRP}t'_1 + \rho_{PVC}t'_2 + \rho_{UD}t'_3 \\ \text{s. t. } D' = E_{UD}t'^3_3 + E_{GFRP}[(t'_1 + t'_2)^3 - t'^3_2] = \\ \quad \frac{\lambda_0}{\lambda} p D & \lambda \leq 0.6\lambda_0 \\ A' = E_{UD}t'_3 + E_{GFRP}t'_1 = \frac{\lambda_0}{\lambda} p A & \lambda > 0.6\lambda_0 \\ t'_1 \geq t_0^{GFRP} & t'_3 \geq t_0^{UD} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $t_0^{UD}, t_0^{GFRP}$ 为第一步变形约束优化对应的区域铺层厚度。

解此优化问题,当 $\lambda \leq 0.6\lambda_0$ 时,有

$$\begin{cases} q_2 = \sqrt{\frac{\rho_{GFRP} - \rho_{PVC}}{\rho_{UD}} \frac{E_{UD}}{E_{GFRP}}} \\ q_1 = q_2 \left\{ \sqrt{\frac{\rho_{GFRP}}{\rho_{GFRP} - \rho_{PVC}}} - 1 \right\} \\ t'_3 = \sqrt[3]{\frac{D'}{E_{UD} + E_{GFRP}(q_1^3 + 3q_1^2 q_2 + 3q_2^2 q_1)}} \\ t'_1 = q_1 t'_3 \quad t'_2 = q_2 t'_3 \quad t'_3 = \max(t'_3, t_0^{UD}) \end{cases} \quad (4)$$

当 $\lambda > 0.6\lambda_0$ 时,由于单层增强纤维比双向增强纤维模量大得多,保持GFRP±45铺层厚度不变,只调整GFRP-UD铺层厚度,取近似解: $t'_1 = t_0^{GFRP}$ ,  $t'_3 = \frac{\lambda_0}{\lambda} p t_3$ 。

## 2 算 例

以800 kW复合材料风机叶片为例,采用二级优化方法,优化设计腹板位置和叶片铺层厚度。

### 2.1 800 kW叶片优化模型介绍

叶片展长为25 m,铺层材料选用单向玻璃纤维增强复合材料UD1250,单层厚度0.95 mm;双轴向玻璃纤维增强复合材料BX806,单层厚度0.58 mm;泡沫夹芯材料PVC。剖面为双腹板式结构,原腹板位置参数 $p_1 = 0.33, p_2 = 0.67$ ,设计质量为2 301 kg。

有限元建模时,除去叶尖前后缘重合为一点的部分,建模长度24.8 m,故叶尖最大变形不大于

2 480 mm;叶片弦向分区设置:叶剖面分为8个分区,P01~P06为蒙皮,P07和P08为腹板(图4),各区域铺层厚度不小于对应材料的单层厚度;考虑到叶片沿展向翼型弦长变化及翼型扭转,确定前缘腹板位置距前缘点的距离不小于根弦的25%,不大于40%,后缘腹板位置距前缘点距离不小于根弦的40%,不大于75%,即 $0.25 \leq p_1 \leq 0.4$ , $0.4 \leq p_2 \leq 0.75$ 。均匀全因子设计下试验点取值见式(5),除去两腹板重合点 $[0.4 \quad 0.4]$ ,试验点共 $4 \times 8 - 1 = 31$ (个)。

$$\begin{cases} p_1 = 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 \\ p_2 = 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75 \end{cases} \quad (5)$$

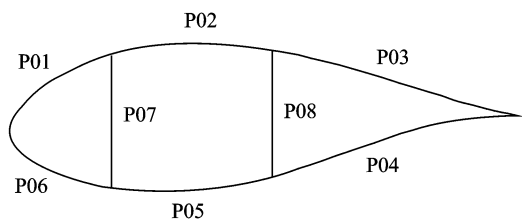


图4 叶片弦向分区设置

## 2.2 优化过程及结果

首先,应用参数化建模技术对各试验点建模,采用分步优化策略求解满足约束的各模型最轻质量;其次,以此为样本点建立基于样条插值的代理模型,进行系统级优化,解得腹板位置参数 $p_1 = 0.284$ , $p_2 = 0.75$ ,对应质量为1 901.7 kg;然后,根据此腹板位置参数进行子系统级优化叶片铺层厚度,得叶片最轻质量1 900.6 kg;最后,比较两级优化所得质量,其相对误差为0.06%,在5%以内,故认为代理模型模拟良好,接受此结果。

优化后的叶片主复合层铺层厚度变化趋势见图5。由图可见,铺层厚度从叶根到叶尖先变大后变小,与叶片载荷和翼型弦长沿展向的变化趋势相符,符合预期。

优化后质量为1 900.6 kg,比叶片原设计质量2 301 kg减少400.4 kg,减重明显。

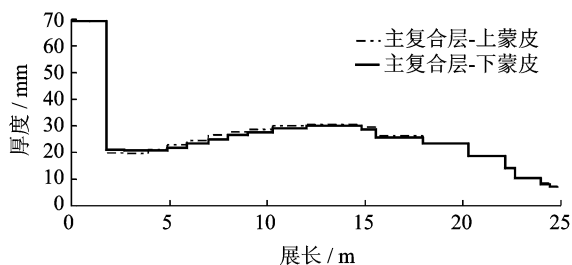


图5 主复合层厚度沿展向变化趋势

## 3 结束语

本文发展了一个风机叶片的二级优化设计方法,对设计变量进行分级,系统级优化求解腹板位置,子系统级优化给定腹板位置下的叶片铺层厚度,优化过程中采取分步实现策略。算例证明,对给定气动外形和所受载荷的叶片,利用本文方法可得到较为理想的可行解。

### 参考文献:

- [1] 陈绍杰,申振华,徐鹤山. 复合材料与风力机叶片[J]. 可再生能源, 2008, 26(2): 90-92.
- [2] Vitale A J, Rossi A P. Computational method for the design of wind turbine blades [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(13): 3466-3470.
- [3] Casas V D, Pena F L, Duro R J. Automatic design and optimization of wind turbine blades [C]//Proceedings of CIMCA-IAWTIC. Washington D C, USA: IEEE Computer Society, 2006: 205-210.
- [4] Forcier L C, Joncas S. New structural design concepts for large thermoplastic wind turbine blades using structural optimization techniques [R]. AIAA-2010-2578, 2010.
- [5] George M. Composites help improve wind turbine breed [J]. Reinforced Plastics, 2005, 49(4): 18-22.
- [6] Hillmer B. Aerodynamic and structural design of multiMW wind turbine blades beyond 5MW [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2007, 75(1): 1-8.
- [7] Veers P S, Ashwill T D, Sutherland H J, et al. Trends in the design, manufacture and evaluation of wind turbine blades [J]. Wind Energy, 2003, 6(3): 245-259.
- [8] Bir G S. Computerized method for preliminary structural design of composite wind turbine blades [J]. Solar Energy Engineering, 2001, 123(4): 372-381.
- [9] 刘克龙,姚卫星. 多学科设计优化的低自由度协同优化方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(3): 317-322.
- [10] 陈宗来,陈余岳. 大型风力机复合材料叶片技术及进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005, 5(3): 53-56.
- [11] 任露露. 试验优化技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1987: 7-15.
- [12] 张铁,闫家斌. 数值分析[M]. 北京:冶金工业出版社, 2005: 134-184.
- [13] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京:航空工业出版社, 2002: 5-25.