

大型风力机叶片的耦合优化方法*

刘伟江, 潘柏松*, 陈栋栋
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了降低兆瓦级风力机叶片的制造成本,通过耦合叶素动量理论与复合材料欧拉伯努利梁强度设计理论,综合考虑风能效率和成本,以叶片的风能效率成本最小化为优化目标,提出了大型风力发电机叶片的多学科优化设计方法。并基于该方法,对某 50 m 风力机叶片进行了优化设计。研究表明,该方法能够找到风能效率与成本的平衡设计点,叶片风能效率成本比传统设计方法设计的叶片减少了 8.84%。

关键词: 多学科优化; 风力机叶片; 叶素动量理论; 欧拉伯努利梁理论; 风能效率

中图分类号: TH123; TH614; TK83

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)03-0261-04

Coupling optimization method for MultiMW wind turbine blades

LIU Wei-jiang, PAN Bo-song, CHEN Dong-dong

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to reduce the cost of manufacturing the wind turbine blade, multidisciplinary design optimization method for MultiMW wind turbine blades with the design objective of minimum of blade efficiency cost was presented, based on the blade element momentum theory (BEM) and Euler-Bernoulli beam theory of composites material. Then, the coupling optimization method was applied in the design of a new wind turbine blade with a length of 50 meters. The results show that the balance between energy efficiency and the cost of manufacture can be easily found through the proposed methodology, and the blade efficiency cost is reduced by 8.84%.

Key words: multidisciplinary design optimization; wind turbine blade; blade element momentum theory (BEM); Euler-Bernoulli beam theory; wind energy efficiency

0 引言

传统的叶片设计方法往往是将气动设计和结构设计分离开,在设计时注重保证风能利用效率的最大化,使得结构重量较大,从而导致了较高的风能成本^[1]。有研究者基于叶素动量理论采用不同的优化算法对叶片的几何参数进行了优化设计,以期获得最大可能的风能利用系数^[2-3]。杜刚等人通过在iSIGHT软件上集成Fluent、Matlab和自编变形网格生成软件,建立了风力机专用翼型的优化设计平台^[4]。但这些研究都是仅仅针对气动性能进行优化的设计方法。随着风机叶片向大型化发展,兆瓦级风机叶片对可靠性和成本控制

提出了更高的要求,因此需要一种综合考虑气动性能与结构强度的新设计方法。

针对BSDS叶片,美国Sandia国家实验室综合考虑气动性能与结构强度,通过增大叶根附近翼型相对厚度的设计,不仅保证了叶片整体性能,而且有效地减轻了叶片重量,降低了风能成本^[5]。郑悦红等通过增加17.65%翼展处翼型相对厚度,设计了一款兆瓦级风机叶片^[6]。但是,这些研究者并没有真正耦合气动性能与结构强度进行优化设计与分析。

为此,本研究耦合叶素动量理论与复合材料欧拉伯努利梁理论强度设计理论,提出了针对大型风力发电机叶片的多学科优化设计方法。

收稿日期: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075365)

作者简介: 刘伟江(1987-),男,浙江上虞人,主要从事机械CAD/CAE及结构优化设计方面的研究。E-mail: wei Jiang1237@163.com

通信联系人: 潘柏松,男,教授,硕士生导师。E-mail: panbsz@zjut.edu.cn

1 多学科优化设计方法

1.1 气动性能设计理论

叶素动量理论是基于动量理论和叶素理论的风机气动分析理论,基于动量定义,可得叶素的推力和转矩为:

$$\begin{aligned} dQ &= 4F\rho_{\text{air}}U_{\infty}^2 a(1-a)\pi r dr \\ dT &= 4Fa'(1-a)\rho_{\text{air}}U_{\infty}\pi r^3\Omega dr \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ_{air} —标准空气密度, U_{∞} —无穷远处来流风速, a —轴向诱导因子, a' —切向诱导因子, F —普朗特叶尖损失因子, r —叶片径向位置, Ω —风轮旋转角速度, B —风轮叶片数目。

叶尖损失因子可表示为:

$$F = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left[\exp \left\{ - \left\{ \frac{(B/2)[1-(r/R)]}{(r/R)\sin\phi} \right\} \right\} \right] \quad (2)$$

由叶素定理,可得叶素推力和转矩的另一种表达式为:

$$\begin{aligned} dQ &= \frac{1}{2} FB\rho W^2 c (C_l \sin\phi - C_d \cos\phi) r dr \\ dT &= \frac{1}{2} FB\rho W^2 c (C_l \cos\phi + C_d \sin\phi) dr \end{aligned} \quad (3)$$

式中: W —入流风速, c —翼型弦长, ϕ —入流角, C_l —升力系数, C_d —阻力系数。

结合式(1)和式(3),可得轴向诱导因子和切向诱导因子表达式为:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{4F \sin^2\phi / \sigma C_2 - 1} \\ a' &= \frac{1}{4F \sin\phi \cos\phi / \sigma C_1 + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $C_1 = C_l \sin\phi - C_d \cos\phi$, $C_2 = C_l \cos\phi + \sin\phi$, $\sigma = Bc / (2\pi r)$ 。

叶素分析示意图如图1所示。

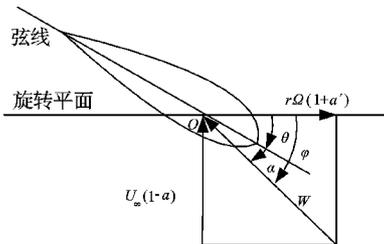


图1 叶素分析示意图

由几何关系(如图1所示)可得:

$$\tan\phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{(1-a)}{(1+a')\lambda_r} \quad (5)$$

式中: λ_r —局部尖速比。

叶片的额定功率 P 可以表示为:

$$P = \int_{r_h}^R \frac{1}{2} F\Omega B\rho W^2 c (C_l \sin\phi - C_d \cos\phi) r dr \quad (6)$$

式中: r_h —根部翼展位置。

1.2 复合材料梁设计理论

本研究根据欧拉伯努利梁理论^[7],可求得非对称截面内任意一点的弯曲应力为:

$$\sigma(x,y) = -M_x E \frac{T_y(y-y_e) - T_{xy}(x-x_e)}{T_x T_y - (T_{xy})^2} \quad (7)$$

其中:

$$T_y = EI_{xy} - ES_x ES_y / EA, T_x = EI_x - ES_x^2 / EA, T_y = EI_y - ES_y^2 / EA, x_e = ES_y / EA, y_e = ES_x / EA。$$

式中: $\sigma(x,y)$ —翼型表面坐标为 x,y 点的应力; M_x —叶片受翼缘方向的弯矩; E —铺层翼展方向的弹性模量; EI_x, EI_y, EI_{xy} —截面弯曲刚度; ES_x, ES_y —截面静矩; x —翼型弦长方向坐标; y —翼型厚度方向坐标。

1.3 多学科优化设计模型

根据美国Sandia国家实验室的叶片内外圈划分原则,对于大型风力发电机叶片而言,其中将位于0~55%的翼展方向的叶片区域定义为内圈,而位于55%~100%的翼展方向的叶片区域定义为外圈,叶片内外圈划分示意图如图2所示。

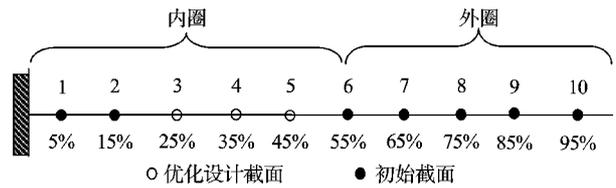


图2 叶片内外圈划分示意图

根据文献[7],外圈设计主要以气动性能为设计目标,而内圈要更多的考虑其结构特性。传统设计方法分为两步:①气动设计,以气动性能最佳为设计目标,优化设计叶片的气动外形;②结构设计,在气动外形确定的基础上,以质量最小为设计目标,优化设计内部大梁结构。

本研究基于传统的设计方法对某型号叶片进行优化设计,得到叶片额定功率与质量的关系,如图3所示。从图3中可以看出,随着翼型的相对厚度变大,其内圈额定功率是先增大后减小,在相对厚度大约为

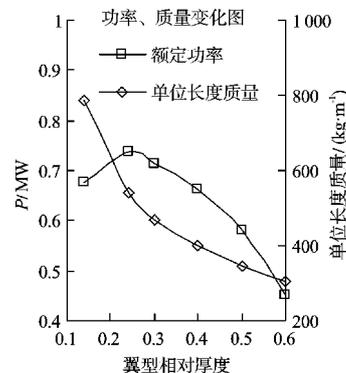


图3 某叶片功率与质量的关系

0.24时达到最大,相对厚度大于0.24后功率急剧下降,内圈叶片质量随着相对厚度的增加而减小。当相对厚度大约为0.24时,叶片虽然气动性能是最好的,但是其质量比较大;而翼型相对厚度为0.6时,叶片质量比较小,但是其气动性能很差。为此,须找到一个设计平衡点,使叶片的气动性能和质量都满足要求,传统设计方法显然不能解决这个问题。

为此,本研究提出叶片多学科优化设计模型,以风能成本为设计目标,优化设计叶片内圈翼型的相对厚度,找到叶片气动性能和质量平衡设计点:

1.3.1 设计目标

基于Sandia国家实验室风机成本报告显示^[8],叶片长度为30 m~70 m的玻璃钢材料的成本约占总材料成本60%,叶片材料成本约占叶片总成本38%。本研究建立叶片成本同玻璃钢材料成本的关系式为:

$$C_b = \frac{C_{b-GRP}}{0.38 \times 0.6} = \frac{C_{b-GRP}}{0.228} \quad (8)$$

式中: C_b —初始叶片总成本, C_{b-GRP} —初始叶片的玻璃钢材料成本。

叶片中非设计成本 C_0 (根部玻璃钢材料成本、外圈玻璃钢材料成本以及非玻璃钢材料成本等)可表示为:

$$C_0 = m_{b-root} M_{unit} \cdot (R/10 - 2) + C_{b-out-GRP} + (C_b - C_{b-GRP}) \quad (9)$$

式中: C_{b-else} —叶片非玻璃钢材料成本, m_{b-root} —叶片根部单位长度玻璃钢质量, M_{unit} —玻璃钢材料的单位质量成本, $C_{b-out-GRP}$ —叶片外圈玻璃钢材料成本。

为了综合考虑风能效率的最大化和成本最低化,本研究将设计目标选为叶片的风能效率成本 f 最小化:

$$\min f = \frac{C}{P} = \frac{f_2 + f_3 + f_4 + (f_2 + m_{b-root})/2}{10(f_1 + P_{out})/M_{unit} \cdot R} + \frac{C_0}{f_1 + P_{out}} \quad (10)$$

式中: R —风轮回转半径, C —叶片成本, P —风机额定功率, f_1 —叶片内圈的额定功率, f_2, f_3, f_4 —叶片截面3、截面4和截面5(如图2所示)的单位长度玻璃钢质量, P_{out} —风轮外圈提供的额定功率。

1.3.2 约束条件

为简单起见,不考虑位于0~15%翼展方向的叶根区域,而将叶片内圈其他区域划分为3个截面,作为多学科优化设计区域。本研究将截面3(翼展25%处)的翼型的相对厚度 h 作为设计变量,截面4和截面5的翼型相对厚度 h_{IV}, h_{V} 通过线性插值得到:

$$h_{IV} = \frac{2}{3}h + \frac{1}{3}h_{VI}, \quad h_V = \frac{1}{3}h + \frac{2}{3}h_{VI} \quad (11)$$

式中: h_{IV} —翼展55%处翼型的相对厚度。

约束条件包括状态约束和变量约束,在多学科可行法(MDF)方法^[9]中,状态约束在子系统中设置,变量约束为:

$$0.14 \leq h \leq 0.16 \quad (12)$$

1.3.3 MDF的系统任务分解

基于MDF的系统控制任务分解示意图如图4所示。在系统控制层中,本研究以系统变量 h 为设计变量, $\min \{F=f(f_1, f_2, f_3, f_4)\}$ 为设计目标。气动学科Sub1按照1.1节的气动分析流程计算内圈的额定功率 f_1 。结构学科中将截面3、截面4和截面5视为3个相互独立的子系统。在结构学科的每个子系统中按照公式(7)建立优化设计模型;优化设计中,考虑0°玻璃钢复合材料铺层厚度 t_2, t_3, t_4 ,最终分别获得最小的单位长度重量 f_2, f_3 和 f_4 。本研究在叶片多学科优化设计过程中通过调用子系统,迭代计算,获得最优解。

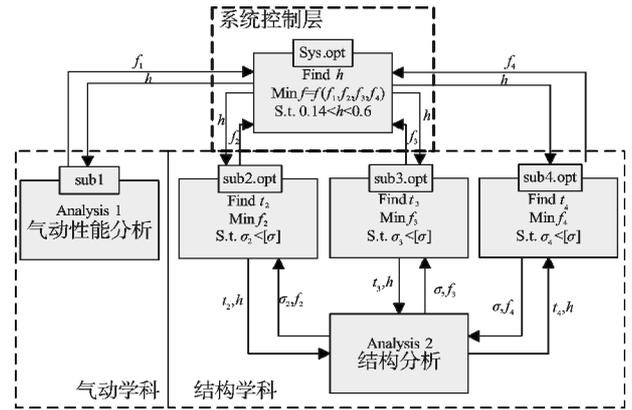


图4 叶片多学科优化系统MDF分解

1.4 多学科优化设计模型求解

求解多学科优化设计模型(如图4所示)需要优化算法与分析软件高度集成,目前分析软件的优化能力都比较差,需要第三方软件的支持,本研究采用iSIGHT来完成此项集成协同优化工作。基于Matlab分析计算优化模型的设计目标及约束条件,本研究选择iSIGHT自身集成的二次规划法,通过多次调用Matlab程序来实现优化迭代计算。

2 叶片的设计参数

初始叶片的气动外形参数和设计载荷分布如表1所示。初始叶片的内部结构分布示意图如图5所示,其

表1 初始叶片气动外形

翼展/(%)	相对厚度/(%)	弦长比/(%)	扭角/(°)	弯矩/(kN·m)
5	100	5.2	29.5	10 407
15	62	7.8	19.5	8 010
25	24(S818)	8.6	13	5 861
35	23.4	7.6	8.8	4 085
45	22.8	6.6	6.2	2 691
55	22.2	5.7	4.4	1 652
65	21.6	4.9	3.1	918
75	21(S816)	4.0	1.9	439
85	18.5	3.2	0.8	160
95	16(S817)	2.4	0	32

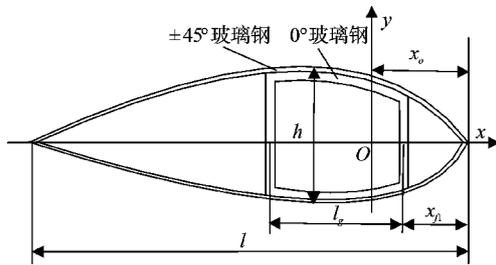


图5 叶片截面示意图

中表面蒙皮铺设±45°玻璃纤维加强复合材料,箱型翼梁铺设0°玻璃纤维加强复合材料。为统一起见,根据文献[10],令±45°玻璃钢厚度为0°玻璃钢厚度的1/3;箱型梁位置参数为 $x_0=0.25$, $x_{r1}=0.125$, $l_g=0.375$ 。

±45°玻璃纤维加强复合材料和0°玻璃纤维加强复合材料的性能参数^[11]如表2所示。在结构设计时,取压应力的安全系数为4,拉应力安全系数为3^[12]。

表2 材料属性材料铺层

材料	铺层角度 / (°)	许用应力 /MPa	弹性模量 /GPa	密度 / (kg·m ⁻³)
±45°玻璃钢	±45	121	18.1	1 830
0°玻璃钢	0	483	48.4	1 860

3 优化结果分析

为了分析比较风机叶片多学科设计方法和常规设计方法的优缺点,本研究分别以风机额定功率最大 ($\max\{f=f_1\}$)、叶片质量最小 ($\min\{f=f_2+f_3+f_4\}$) 和风能效率成本最低 ($\min\{f=f_1, f_2, f_3, f_4\}$) 作为设计目标,分别设计获得了3类叶片,记为B₁、B₂和B₃。

3种设计目标分别获得的3种设计结果如表3所示。由表3可见,B₁与初始叶片较接近;B₂叶片质量最小,成本最低,但是额定功率也最低;而B₃风能效率成本最低,B₃比B₁额定功率减少约4.14%,但质量减少约21%,导致风能效率成本减小约8.84%;B₃比B₂质量增加约7.57%,但额定功率增加约8.32%,风能成本降低约3.28%。

表3 优化设计叶结果叶片

叶片编号	相对厚度 h	总质量 l_t	总功率 /MW	风能效率成本指标 f
初始叶片(B ₀)	0.240	21.26	2.479	0.141 3
额定功率最大(B ₁)	0.238	21.39	2.486	0.141 4
叶片质量最小(B ₂)	0.599	15.71	2.200	0.134 2
风能成本最低(B ₃)	0.469	16.90	2.383	0.128 9

叶片内圈功率、质量贡献沿截面编号的分布曲线如图6、图7所示。由此可见,通过优化设计叶片翼型相对厚度,适当牺牲叶片风能利用效率,可大幅减轻叶片的质量,从而降低风能成本。

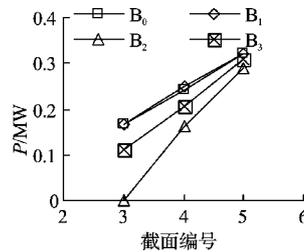


图6 内圈功率贡献沿截面编号分布

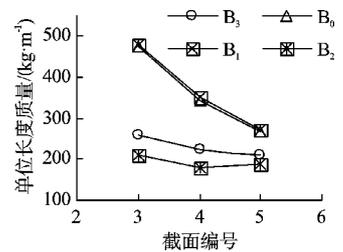


图7 内圈质量沿截面编号分布

4 结束语

为降低风力机叶片制造成本,本研究提出了大型风力发电机叶片的多学科设计方法。利用该法获得的叶片与传统设计方法获得的叶片相比,其风能利用效率相对较低,而叶片重量则得到了明显减轻,风能成本较小。研究表明,大型风机叶片可采用适当牺牲叶片风能利用效率从而减轻叶片重量的方法,来降低风能成本。

参考文献(References):

- [1] HILLMER B. Aerodynamic and Structural Design of MultiMW Wind Turbine Blades beyond 5MW [C]// Conference on the Science of Making Torque from Wind. Tech. Univ. Denmark, Lyngby, DENMARK, 2007:12002–12002.
- [2] 钱太明,李 春,巩丽丽. 风力机叶片的优化设计[J]. 机械制造, 2009, 47(11): 48–50.
- [3] 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.
- [4] 杜 刚,陈 江,曹人靖. 基于 iSIGHT 的风力机翼型优化设计平台[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 891–895.
- [5] STUDIES W B S D. Innovative Design Approaches for Large Wind Turbine Blades Final Report[R]. WindPACT Blade System Design Studies, 2004.
- [6] 郑悦红,周立成. 兆瓦级风力发电设备的风轮叶片:中国, 200740023456.X[P]. 2007–10–24.
- [7] STUDIES W B S D. Parametric Study for Large Wind Turbine Blades[R]. Sandia National Laboratories, 2002.
- [8] STUDIES W B S D. Cost Study for Large Wind Turbine Blades[R]. Sandia National Laboratories, 2003.
- [9] 谷良贤,龚春林. 多学科设计优化方法比较[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 60–62.
- [10] LDJT P. PRE- and POST-THIN a tool for the probabilistic design and analysis of composite rotor blade strength [J]. Wind Energy, 2009, 12(7): 666–691.
- [11] MANDELL J F S. SNL/MSU/DOE Composite Material Fatigue Database[R]. Sandia National Laboratories, 2011.
- [12] KONG C, BANG J, SUGIYAMA Y. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life[J]. Energy, 2005, 30(11–12): 2101–2114.

[编辑:张 翔]