

以风轮气动性能为目标的风力机翼型优化设计

丁力 陆志良 郭同庆

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室,南京,210016)

摘要:提出了一种优化风力机翼型气动特性的设计方法。在现有风力机翼型的基础上,通过改变其最大厚度位置至后缘部分的外形进行优化计算。采用N-S方程计算翼型的流场及气动特性,以提高风力机切向力同时减小其法向力为目的,用二维线性插值的方法进行多目标优化。以DU93W210翼型为例,针对风力机翼型气动性能本身的矛盾性,根据实际需求提出几种方案加以优化。结果表明,在不同的性能需求下,本文所提出的设计方法能取得较好的效果。

关键词:风力机翼型;气动特性;N-S方程;多目标优化

中图分类号:TK83

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)05-0667-05

Optimal Design of Wind Turbine Airfoils Aimed for Aerodynamic Performance of Wind Wheel

Ding Li, Lu Zhiliang, Guo Tongqing

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A design method for optimizing the aerodynamic performance of wind turbine airfoils is presented. The calculation is optimized on the existing wind turbine airfoil through changing the outline of the range from the position of its maximum thickness to its trailing edge. The flow field and aerodynamic characteristic of airfoil are obtained by using the Navier-Stokes (N-S) equations, then the method of two-dimensional linear interpolation is used for multi-objective optimization, which is tried to increase the tangential force while reducing the normal force of wind turbine simultaneously. Taking the DU93-W210 airfoil as an example, aiming at the contradiction of the wind turbine airfoil aerodynamic characteristic of itself, several programs are proposed and improved according to the actual needs. The results show that the design method proposed can get good effect under different performance requirement.

Key words: wind turbine airfoils; aerodynamic characteristics; Navier-Stokes (N-S) equations; multi-objective optimization

当今风能的发展已经成为国内的重大战略任务,也是可持续发展战略的一部分^[1]。风力机的性能与风力机叶片的气动性能息息相关,而风力机叶片又是由风力机翼型组成,可以说,风力机剖面翼型气动性能的好坏决定风力机的性能,决定风力机的发电量^[2-4]。早期的风力机翼型通常采用已经发

展成熟的航空翼型,但是由于工作环境的较大差异,这些航空翼型往往不能满足使用的需求。自20世纪80年代起,欧美一些风力资源比较发达的国家开始研究设计风力机翼型。目前国外的风力机翼型主要有美国的NREL S系列、丹麦的RISΦ系列、瑞典的FFA-W系列以及荷兰的DU系列等翼

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:2011-04-29;**修订日期:**2011-08-15

通讯作者:陆志良,男,教授,博士生导师,1963年6月生,E-mail:luzl@nuaa.edu.cn。

型^[5-7]；国内的风力机翼型主要有西北工业大学的WA系列翼型。

本文在国际上较为先进的荷兰DU系列翼型DU93W210翼型的基础上对翼型剖面进行计算和优化。主要的研究对象是风力机翼型的切向力、法向力以及翼型的低头力矩。切向力为平行于风轮平面的力，是产生风力机旋转力矩的主要动力，对风力机发电至关重要，较大的切向力能够为风力机提供较大的力矩，进而产生更多的电能；法向力为垂直于风轮平面的力，不产生旋转力矩，对发电基本没有贡献，而且法向力的增加会加重结构的负担，使得风力机的结构强度和使用寿命减少，同时法向力越大，风力机叶片碰撞风力机塔架的概率就会越大；翼型的低头力矩虽然对风力机旋转的力矩没有贡献，但是大的低头力矩对变桨距有很大的好处，同时低头力矩越大，叶片对于其钢轴的扭转静稳定性也会增强，可以较好地避免叶片相对其钢轴的静发散^[8-9]。本文就是以增加切向力、减小法向力和增加低头力矩为目标，在已有翼型的基础上进行优化。

1 流场计算方法

本文中所采用的网格生成软件和流场计算软件均为南京航空航天大学自主研发的软件，经过多年实践的检验，N-S方程求解器的可靠性有一定保障。计算网格采用C型结构粘性网格，网格数为 337×73 ，精度满足计算需求。图1为风力机翼型网格图，图2为典型算例结果。图中， c 表示翼型弧长； x, z 分别表示横、纵坐标。

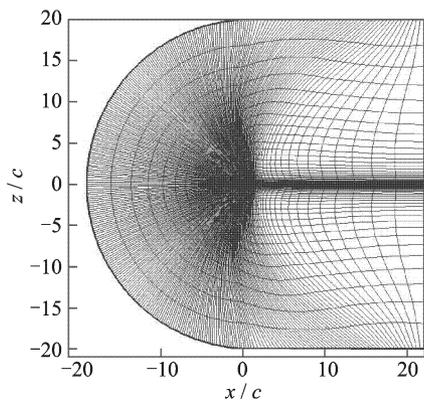
2 设计方法

本文对翼型的优化主要是通过对其外形的改变实现。对外形的改变仅限于对翼型最大厚度弦长处至后缘的外形，以保证新旧翼型具有相同的最大厚度及最大厚度弦向位置。由于前缘处的外形对翼型的粗糙度敏感性影响较大，而本文没有针对翼型的粗糙度敏感性做优化，故在此对前缘至最大厚度处的外形不做任何改变。

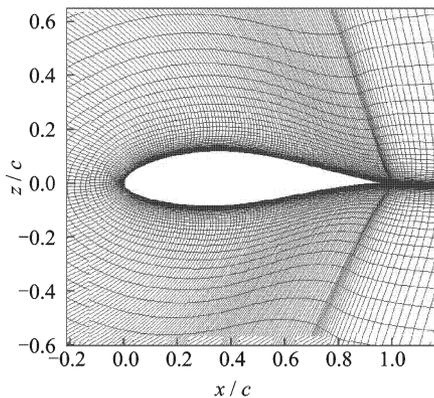
对于翼型的修改部分分为上下两部分，上表面用 u 表示，下表面用 l 表示，均采用3次多项式拟合

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

式中未知数有4个($a_i, i=0, 1, 2, 3$)，需要4个条件。以上表面为例，4个条件分别为：相切点处坐标



(a) 网格全局图



(b) 网格局部图

图1 风力机翼型网格图

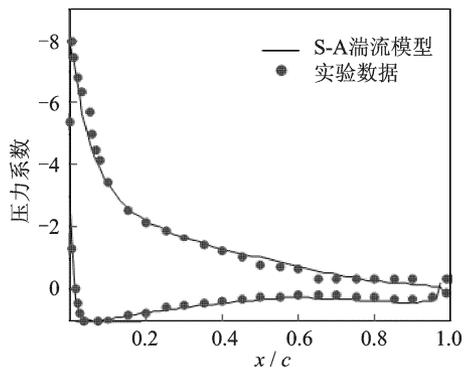


图2 GA(W)-1段翼型压强分布计算实验值对比
($Re = 6.3 \times 10^6, Ma = 0.15, \alpha = 18^\circ$)

(x_T^l, y_T^l)；控制点处坐标(x_k^l, y_k^l)；后缘点处坐标(x_F^l, y_F^l)；切点处的斜率(x_T^l, h_T^l)。其中，上标 l 表示表面，下标 T 表示切点， k 表示控制点， F 表示后缘点。 x_T^l 取最大厚度弦向位置，DU93W210翼型最大厚度在约35%弦长处，故 x_T^l 取0.35倍的弦长； x_k^l 取最大厚度和后缘中间的位置，本文中取0.7倍的弦长；后缘固定。 y_T^l 和 h_T^l 根据原始翼型数据获得。只需改变控制点的纵坐标(即 y_k^l)就可以确定多项式的全部未知数。然后将原始外形数据的横坐标 x 代

入式(1)便可得到新的外形,如图3所示。

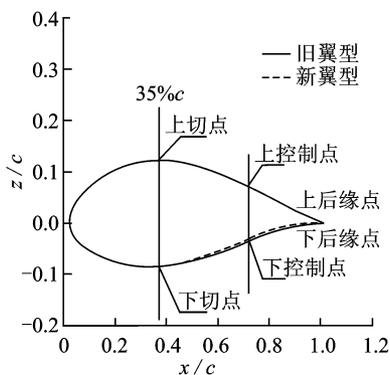


图3 新旧翼型对比

在风力机转速和来流风速不变的前提下,对风力机剖面进行优化。转速和来流风速一定使得入流合成速度一定,在翼型升力系数 C_L 和阻力系数 C_d 变化不大的情况下,认为该剖面处的入流角 Φ 不变,而该位置处翼型的桨距角 θ 一定,故该位置处的迎角 $\alpha(\alpha = \Phi - \theta)$ 不变。所以,在翼型的优化过程中,马赫数、雷诺数以及迎角都是确定的。

首先计算该剖面翼型在一定 α 和 Ma 下的升力系数、阻力系数和力矩系数,再根据入流角 Φ 按式(2)计算得出切向力 C_T 和法向力 C_N

$$\begin{aligned} C_T &= C_L \cdot \sin\Phi - C_d \cdot \cos\Phi \\ C_N &= C_L \cdot \cos\Phi + C_d \cdot \sin\Phi \end{aligned} \quad (2)$$

然后调节控制点上下位置进行插值。调节量皆取为 $-\Delta, 0, \Delta$ (Δ 一般最大取0.005倍的弦长,过大地取值会引起较强的非线性),共有9种组合,向上调节为正,反之则为负。若以上表面变化量为横坐标、下表面变化量为纵坐标,则9个优化点组成如图4所示的图形。

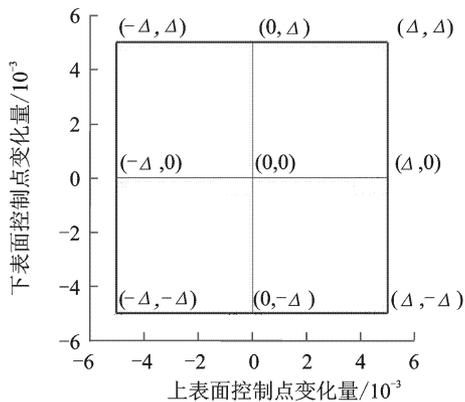


图4 上下控制点不同变化量组合形成的图形

分别计算9个不同外形的切向力 C_T ,法向力 C_N 和力矩系数 C_m ,得出9种不同外形的 C_T, C_N 和 C_m 与原始翼型的 C_T, C_N 和 C_m 之间的相对变化量。

任取一组控制变化量,用二维分片线性插值的方法进行插值。

设任意一组控制变量组合成一点,为 P 点。插值时首先判断 P 点在第几象限,然后再判断 P 点属于哪一个三角形区域。现假设 P 点位于如图5所示的位置,已知三角形区域结点1,2,3点的函数值,则 P 点的函数值可用式(3)求得

$$f_P = (S_1 \cdot f_1 + S_2 \cdot f_2 + S_3 \cdot f_3) / (S_1 + S_2 + S_3) \quad (3)$$

式中: f_P 为 P 点处的函数值; S_i 和 $f_i(i=1,2,3)$ 代表三角形结点对应的面积和函数值。

插值后区域内的 C_T, C_N 和 C_m 的相对变化量云图如图6所示。

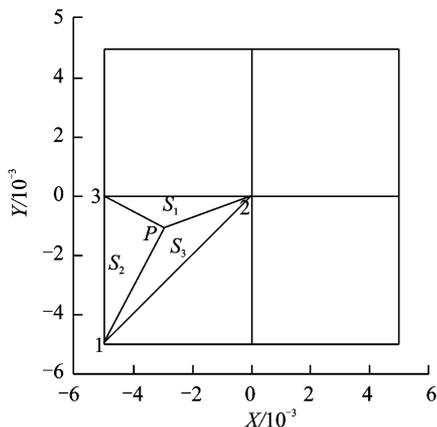


图5 二维分片线性插值示意图

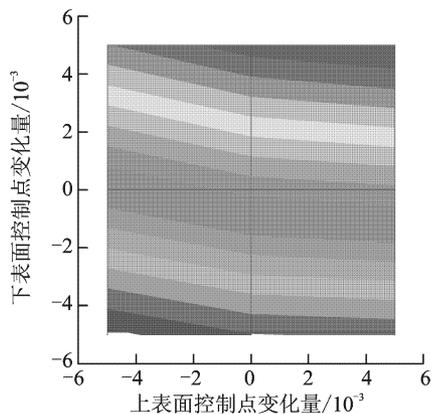


图6 不同变化量组合时的目标值相对变化量云图

每一组上下控制点变化量都可以唯一确定一个 C_T, C_N 和 C_m ,以一个小量(比如 $\frac{\Delta}{100}$)为步长,不断调整上下控制点的变化量,就可以得到不同的 C_T, C_N 和 C_m 的相对变化量的组合。相反,根据所需求的 C_T, C_N 和 C_m 的相对变化量,则可以得到对应的控制点变化量,进而得到新的外形。重复上述过

程优化后,就能得到所需要的比较理想的结果。

3 设计结果

通常情况下,风力机的工况非常复杂,很难做全面的优化,因此本文选择一般大型风力机通常工作的工况。翼型剖面的选择也是按其对气动性能的重要性来抉择。

本文选取DU93W210翼型为基本翼型,设定其在风力机叶片31 m旋转半径处,来流风速取8 m/s,该风速是一般风力机大致的工作环境风速。风力机转速取17.2 r/min,可得该剖面入流合速度为56.407 m/s。桨距角 θ 设为 -0.336° ,入流角 Φ 设为 5.39° ,可得迎角 α 为 5.73° 。大气参数取海平面值。

设计优化状态:马赫数0.166,迎角 5.73° ,入流角 5.39° ,雷诺数 3.861×10^6 。

表1为不同调整量对应的翼型气动性能与原始翼型气动性能的相对变化量。图7为这些相对变化量的云图。

通过观察表1可以看出, C_T 、 C_N 和 C_m 随外形调整量的变化特性几乎一致。原因有两点:(1)由于入流角 Φ 较小,为 5.39° , $\tan\Phi$ 约为0.1,通常在工作状态翼型的升阻比可达几十甚至上百,所以由式(2)可以看出,无论是对于 C_T 还是对于 C_N ,升力系数 C_L 都起着决定性的作用,因此 C_T 和 C_N 具有相同的变化特性。(2)本文对翼型的优化仅限于翼型后半段外形的改变,升力系数 C_L 的提高主要得益于翼型的后加载,而后加载能够为翼型提供较大的低头力矩,因此 C_T 、 C_N 和 C_m 几乎具有相同的变化特性。

表1 $\Delta=0.005$ 时的 C_T 、 C_N 和 C_m 的相对变化量

序号	上表面调整量	下表面调整量	C_T 相对变化量	C_N 相对变化量	C_m 相对变化量
1	-0.005	-0.005	-0.103	-0.088	-0.450
2	-0.005	0	-0.031	-0.027	-0.182
3	-0.005	0.005	0.039	0.033	0.080
4	0	-0.005	-0.091	-0.077	-0.338
5	0	0	-0.017	-0.015	-0.062
6	0	0.005	0.056	0.047	0.208
7	0.005	-0.005	-0.088	-0.073	-0.238
8	0.005	0	-0.012	-0.008	0.047
9	0.005	0.005	0.062	0.056	0.324

注:调整量皆以弦长为单位长度度量。

在诸多设计指标中,提高 C_T 和 C_m 而保持 C_N 不变甚至减小是最好的设计结果。为此笔者进行了尝试,优化结果为:上表面调节量为-0.003 6,下表面调节量为0.001 9。优化后新旧翼型如图8所示。

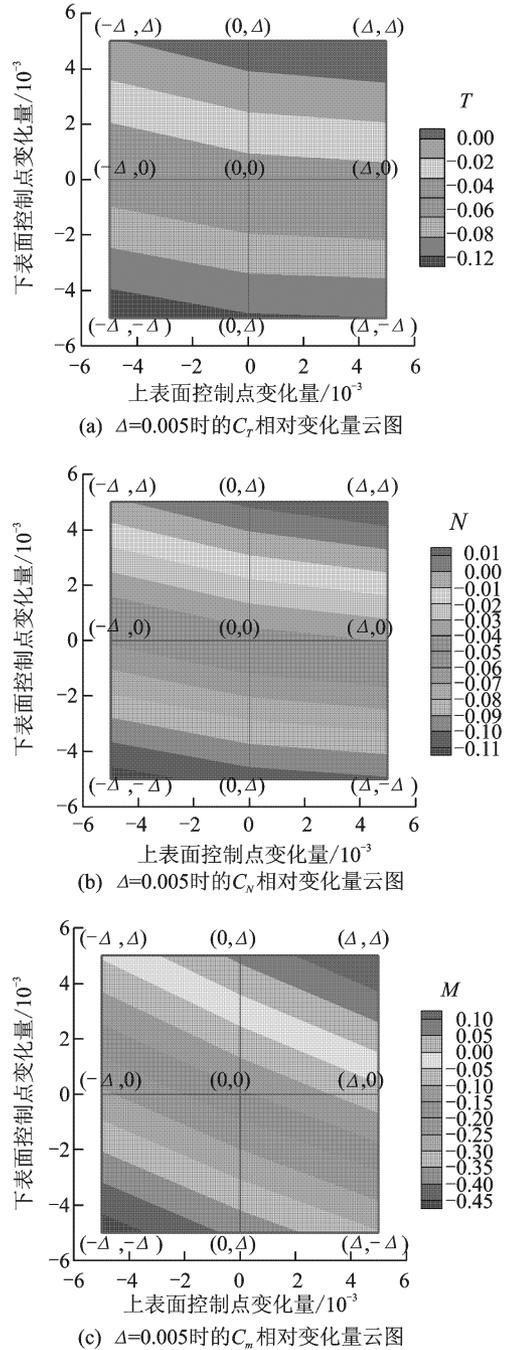


图7 $\Delta=0.005$ 时, C_T 、 C_N 和 C_m 相对变化量云图

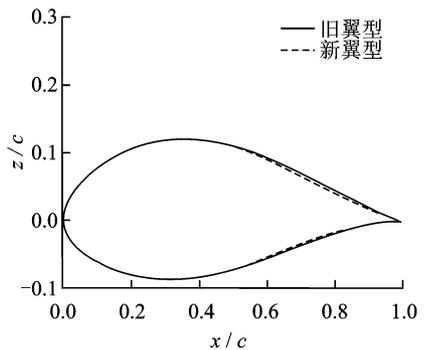


图8 优化后的新旧翼型对比

优化后的新翼型较原始翼型 C_T 提高约 0.104%, C_m 减少约 4.6%, C_N 保持不变,效果甚微。这不仅表明 DU93W210 的确是气动性能比较完美的翼型,同时也说明了这种想法理论上难以实现。因此,针对这种矛盾,笔者提出了几种退而求其次的可实现性方案。

方案1 单纯提高 C_T ,不考虑 C_N 和 C_m ,即认为结构强度和变桨力矩尚有余量。

方案2 单纯减小 C_N ,不考虑 C_T 和 C_m ,即认为风力机扭转力矩和变桨力矩尚有余量

方案3 单纯提高 $|C_m|$,不考虑 C_T 和 C_N ,即认为风力机扭转力矩和结构强度尚有余量。

以下为3种方案的优化结果:

方案1 单纯提高 C_T ,不考虑 C_N 和 C_m 。参照表1可知,采用3,6,9号翼型可以达到提高 C_T 的效果。以6号为例, C_T 较原始翼型提高约 5.6%, $|C_m|$ 较原始翼型提高约 20.8%, C_N 较原始翼型增加约 4.7%,优化后的外形如图9所示。

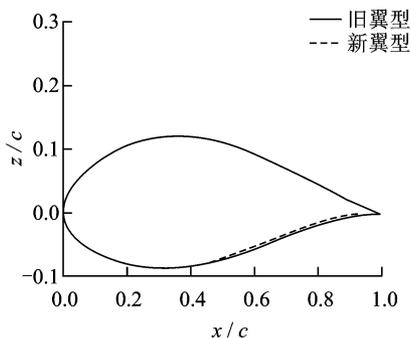


图9 采用方案1优化后的新旧翼型对比

方案2 单纯减小 C_N ,不考虑 C_T 和 C_m 。参照表1可知,采用1,2,4,5,7或8号翼型可以达到提高 C_T 的效果。以4号翼型为例, C_N 较原始翼型减少约 7.7%, C_T 较原始翼型减少约 9.1%, $|C_m|$ 较原始翼型减少约 33.8%,优化后的外形如图10所示。

方案3 单纯提高 $|C_m|$,不考虑 C_T 和 C_N 。参照表1可知,采用3,6,8或9号翼型可以达到提高 $|C_m|$ 的效果。以6号翼型为例,其性能指标及外形图同方案1中的翼型。

4 结束语

本文针对风力机翼型气动特性优化提出一种多目标的优化方法。采用多项式拟合翼型最大厚度

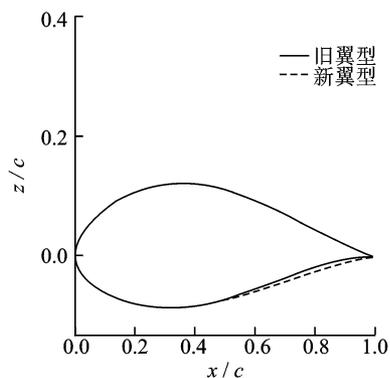


图10 采用方案2优化后的新旧翼型对比

之后的曲线,准确快速得到新外形。多维分片线性插值方法能比较准确、方便地找到优化对象的目标值,避免了盲目的大批量优化,节省了大量的时间。同时,二维分片线性插值的方法能较好地解决多目标优化时存在的严重非线性问题。介于风力机气动特性优化时自身存在的矛盾,本文提出几种优化方案可供参考。

参考文献:

- [1] 贺德馨.我国风工程研究现状与展望[J].力学与实践,2002,24(4):10-19.
- [2] Emesto B, Andrea T. Optimal design of horizontal-axis wind turbine using blade-element theory and evolutionary computation [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(4): 357-363.
- [3] 黄继雄.风力机专用新翼型及其气动特性研究[D].汕头:汕头大学机电控制及自动化学院,2001.
- [4] 叶枝全,黄继雄,陈严,等.风力机新系列翼型气动性能研究[J].太阳能学报,2002,23(2):211-216.
- [5] Tangler J L, Somers D M. NREL airfoil families for HAWTs [R]. NREIJTP-442-7109. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [6] Timmer W A, van Rooij R P J O M. Summary of the delft university wind turbine dedicated airfoils [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 25(4): 488-496.
- [7] Fuglsang P, Bak C. Development of the riso wind turbine airfoils [J]. Wind Energy, 2004, 7(2): 145-162.
- [8] 李德顺.水平轴风力机专用翼型的空气动力学性能研究[D].甘肃:兰州理工大学流体动力与控制学院,2001.
- [9] 刘雄,陈严,叶枝全.水平轴风力机气动性能计算模型[J].太阳能学报,2005,26(6):792-795.