

兆瓦级风力机叶片外形设计及其三维建模

鄂再新, 崔琦, 刘涛, 杨成

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

Design of the Megawatt Wind Turbine Blade and 3D-modeling

WU Zai-xin, CUI Qi, LIU Tao, YANG Cheng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

摘要:针对兆瓦级大型风力发电机叶片最佳设计攻角和升力系数沿叶片展向呈非线性分布的情况,对传统 Willson 设计方法进行修正,优化设计叶片的气动外形。并结合优化得出的叶片几何外形参数,运用点的坐标转换理论来计算叶片各截面翼型的空间实际坐标。利用 CATIA 软件完成叶片的三维建模。

关键词:风力机叶片;气动外形优化;三维建模;CATIA

中图分类号:TK81;TP302.4

文献标识码:A

文章编号:1001-2257(2013)07-0075-03

Abstract:In the light of the nonlinear distribution of optimal designed attack angle and lift coefficient along blade axis of megawatt wind turbine blade, conventional Willson algorithm is amended. Aerodynamic shape of blade is optimization design by amended algorithm. Based on geometric parameters of blades, the article using point coordinate transformation theory to calculate the actual coordinates of the blade airfoil cross-sections, and then establishing the three-dimensional model of blade by using CATIA modeling software.

Key words:wind turbine blades; aerodynamic shape optimizing; three-dimensional modeling; CATIA

0 引言

叶片是风力发电机的能量转换部件,风力机依靠叶片捕获风能,将风能转化为动能,进而带动发电

机产生电能,因此,叶片是风力机的关键设备之一。叶片的气动外形决定了风能的转换效率,气动外形的设计主要解决的是叶片最佳几何外形参数的确定,包括叶素翼型、弦长、安装角以及厚度分布。

1 风力机叶片气动外形优化设计

1.1 风轮的基本设计参数

风力机风轮的基本参数:风轮直径为 80 m;叶片数为 3;设计尖速比 λ 为 9.5;额定功率为 1.5 MW。

1.2 翼型的选择

翼型的选择对于风力机效率十分重要,翼型的选取应尽量使升阻比趋于最大,从而提高风力机的效率,而根部则采用相对厚度较大的翼型,以保证大型叶片的结构强度。设计采用 NACA63 系列航空翼型,叶尖部翼型相对厚度为 16%,叶片中部翼型相对厚度为 25%,最大弦长处翼型相对厚度为 40%,根部采用圆形。

翼型选定之后,根据软件 Profili 选取升阻比最大的点所对应的升力系数、阻力系数和对应的最佳攻角。如通过 Profili,生成翼型 NACA63-416 在雷诺系数 700 000 下的升阻比曲线和升力系数曲线,如图 1 和图 2 所示。可以得出,该翼型最大升阻比对应的攻角 α 为 6° ,攻角 α 对应的升力系数为 1.0。

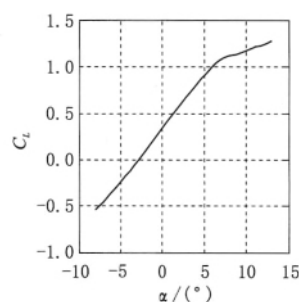


图1 升力系数 C_L 随攻角 α 变化曲线

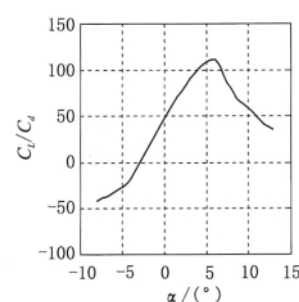


图2 升阻比 C_L/C_D 随攻角 α 变化曲线

收稿日期:2013-03-06

《机械与电子》2013(7)

由于 Profili 软件翼型数量有限,只提供很少几种相对厚度值的标准翼型,无法满足设计需求,所以要通过 Profili 软件的翼型管理功能对现有的标准翼型进行厚度修型,生成所需要的新翼型。将新生成的翼型导入 Profili,获得设计攻角和升力系数等参数。通过这种方法得到翼型 NACA63-425 和 NACA63-440 的气动数据。同样生成的新翼型的相关气动数据也可以通过相邻标准翼型的气动数据插值获得,经比较,其插值计算结果和 Profili 计算结果比较非常接近^[1]。

1.3 弦长和安装角设计

Willson 法是目前国内外应用较为普遍的风力机叶片设计方法^[2],它以风能利用系数 C_p 为优化目标,通过迭代计算,求取当 C_p 为极大值时的轴向、切向干涉因子 a, b 的值,并以此为基础,综合最佳升阻比下的攻角 α 和升力系数 C_L 等参数,计算得出弦长 c ,扭角 θ 等叶片外形参数。Willson 法考虑了叶梢损失和升阻比对叶片最佳性能的影响,因此相对精度较高。这里利用 Willson 法建立计算模型:

$$dC_p = \frac{8}{\lambda_0^3} b(1-a) F \lambda^3 d\lambda \quad (1)$$

$$a(1-aF) = b(1+b)\lambda^3 \quad (2)$$

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (3)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{R \sin \phi} \quad (4)$$

$$\tan \phi = \frac{V_1(1-a)}{\Omega r(1+b)} = \frac{1}{\lambda} \frac{1-a}{1+b} \quad (5)$$

$$\frac{BcC_L}{r} = \frac{8\pi a F(1-aF) \sin^2 \phi}{(1-a)^3 \cos \phi} \quad (6)$$

$$\theta = \phi - \alpha \quad (7)$$

λ 为尖速比; f 为中间变量; R 为风机叶片半径; ϕ 为来流角。

Willson 法以式(1)为优化目标函数,以式(2)~式(4)为条件函数,利用 Matlab 的优化工具箱来求取在有约束非线性的最值问题,得出干扰系数 a, b 和叶梢损失系数 F ,再利用式(5)和式(7)计算各截面的弦长和扭角。

以上为传统的 Willson 法,通常选择统一最佳攻角 α ,因为小型风力机的叶片设计中常用的是一种翼型,且叶片长度不大,各个截面的雷诺系数相差不大,升、阻力系数基本相同,可以选择统一攻角。但其设计结果需大幅修正,设计效果难以控制。对

于兆瓦级的大型风力机,叶片展向采用的是多种翼型,且每个截面的雷诺系数不同,使不同截面翼型的升力系数、阻力系数差距较大,造成最佳升阻比下的攻角不同,呈非线性分布。所以采取统一升力系数、统一攻角的设计方法,并不是最优设计。

针对大型风力机,采取改进的 Willson 优化设计法,根据截面翼型的不同来确定最佳设计攻角和升力系数的不同,所以将式(6)和式(7)改为:

$$\frac{BcC_{L_i}}{r} = \frac{(1-aF)aF8\pi \sin^2 \phi}{(1-a)^2 \cos \phi} \quad (8)$$

$$\theta = \phi - \alpha_i \quad (9)$$

C_{L_i} 和 α_i 为不同截面位置处翼型各自的最佳攻角和升力系数。

改进的 Willson 法设计流程如图 3 所示,所得叶片各截面弦长和安装角如表 1 所示。

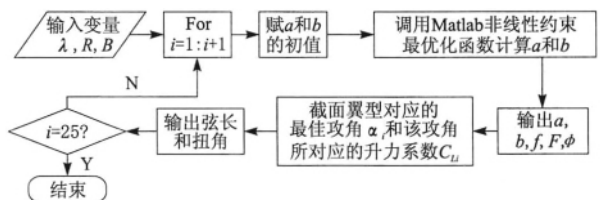


图 3 程序流程

表 1 各截面弦长和扭转角

截面位置(m)	弦长 c (m)	扭角 θ ($^\circ$)
0.0	1.890	10.00
1.5	1.934	10.82
3.0	2.243	13.03
4.5	2.595	14.82
6.0	2.948	15.13
.....
34.5	0.961	-0.30
36.0	0.885	-0.54
37.5	0.809	-0.74
39.0	0.734	-0.86

2 翼型坐标转换

2.1 坐标转换方式

基于点坐标的几何变换理论,求解叶片各截面在空间实际位置的三维坐标,具体方式为:转换原始翼型数据为以气动中心为原点的二维坐标 (x_1, y_1) ,再确定空间坐标系,最后,经过旋转变换计算出叶片各截面离散点空间的实际坐标 (x, y, z) ^[3]。

2.2 空间坐标系的确定

在建模选定空间基准坐标时,以叶片第 1 个截

面($r=0$)的前缘点为原点,截面所在平面为 XOY 平面,弦长前缘至后缘方向为 X 方向的正向,截面上弧方向为 Y 的正向,叶展方向为 Z 轴正向的空间坐标系。

2.3 叶片各截面离散点坐标变换

a. 通过 Profili 或翼型生成软件 AeroEng, 获取翼型离散点坐标 (x_0, y_0) 。

b. 求解翼型以气动中心为原点、翼弦为 X 轴的二维坐标 (x_1, y_1) , 气动中心一般选在翼弦上、距前缘 0.25 倍弦长处, 设气动中心坐标为 (x', y') 。则有:

$$(x_1, y_1) = (x_0, y_0) - (x', y') \quad (10)$$

c. 求解各截面叶素离散点空间实际坐标 (x, y, z) 。结合弦长放大截面叶素坐标为:

$$(x_2, y_2) = c \times (x_1, y_1) \quad (11)$$

将叶素坐标旋转变换得实际空间坐标为:

$$x = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \times \cos(\arctan \frac{y_2}{x_2} + \theta) \quad (12)$$

$$y = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \times \sin(\arctan \frac{y_2}{x_2} + \theta) \quad (13)$$

$$z = r \quad (14)$$

以上计算可以通过 Matlab 的计算功能实现, 计算结果复制到 Excel 软件中。

3 通过 CATIA 建立叶片三维模型

通过前述过程获得的各截面空间实际坐标 (x, y, z) , 进而通过 CATIA 软件实现叶片曲面造型。

a. 利用 CATIA 安装位置下的 command 文件夹内自带宏程序的 Excel, 可以在坐标点导入 CATIA 的功能, 将第 2 节计算所得坐标点复制进 Excel 中, 然后启动宏程序, 坐标点就会依次在 CATIA 中创建, 并按照坐标点导入的顺序自动用样条曲线连接。

b. 利用同样的方法可生成 25 个截面翼型的轮廓曲线, 并结合叶柄部分数据, 生成整体叶片的线框架, 如图 4 所示。

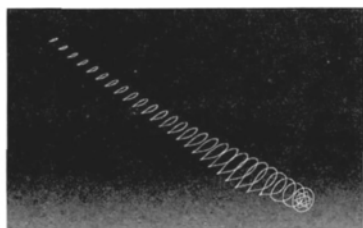


图 4 叶片整体线框

c. 在确定叶片各截面翼型曲线的空间实际位置之后, 利用 CATIA 曲面命令内的“多截面扫掠”功能, 将各个叶片截面依次选中, 生成叶片的三维曲面模型, 扫掠过程中要注意在选中叶片截面后, 每个翼型的末端切线方向要一致, 否则得不到所需要的空间扭转曲面^[4-5]。之后再次利用“多截面扫掠”功能对叶片曲面后缘的开口进行封闭, 得到叶片的实体模型, 此过程需要提取叶片曲面后缘作为扫掠的引导线^[6]。最终得到的叶片模型如图 5 所示。

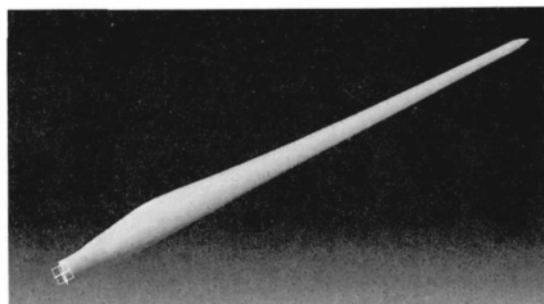


图 5 叶片整体三维模型

4 结束语

以 1.5 MW 风力机叶片为设计目标, 运用改进 Willson 方法对风力机叶片进行了气动外形设计, 得到气动外形。在此基础上, 通过坐标转换来确定各叶素所有离散点的空间实际坐标。最后, 利用 CATIA 软件完成三维建模, 为风力机叶片后续相关设计提供了准确的模型。

参考文献:

- [1] 董礼, 廖明夫, 孙黎翔. 风电机组气动设计中的若干问题探讨[J]. 风能, 2011, (6): 54-58.
- [2] 贺德馨, 李明水. 风工程与空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [3] 陈家权, 杨新彦. 风力机叶片立体图的设计[J]. 机电工程, 2006, 23(4): 37-40.
- [4] 闫海津, 胡丹梅. 风力机叶片的三维建模[J]. 能源技术, 2009, 30(2): 89-91.
- [5] 罗强. 三维 CAD 系统叶片造型方法研究[J]. 机械设计, 2004, 21(12): 57-58.
- [6] 孙森. 基于 CATIA 的自由曲面的设计及数控加工[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.

作者简介: 邬再新 (1971-), 男, 浙江温州人, 副教授, 研究方向为机械设计制造及其自动化、数控技术等; 崔琦 (1987-), 男, 安徽桐城人, 硕士研究生, 研究方向为复杂型面优化设计。