

# 大型风力机叶片气动外形设计及三维实体建模研究

□ 胡世军 □ 张恒磊

兰州理工大学 机电工程学院 兰州 730050

**摘要:**针对大型风力机叶片气动外形设计方法,基于动量-叶素理论,通过 Wilson 设计法,对 1.5 MW 风力机叶片进行气动外形设计,并提出一种风力机叶片三维建模的方法,为叶片的气动性能计算和结构设计与分析奠定了基础。

**关键词:**风力机叶片 气动外形 三维建模 设计

中图分类号:TK83;TM315 文献标志码:A 文章编号:1000-4998(2016)01-0016-03

风力机叶片是风电机组的核心部件之一,其设计质量对风电机组整体及其零部件的性能和寿命有着直接影响。随着风电机组容量和叶片尺寸的不断增大,且由于叶片精度、强度和刚度要求高等特点,使叶片的结构及外形尺寸的设计显得更为重要。风力机叶片设计包括气动设计和结构设计,气动设计的主要任务是确定叶片的气动外形,应用空气动力学基础理论,并结合叶片的结构和工艺要求,形成沿叶片展向的截面形状。气动设计的基本思想是主要考虑叶片的各剖面叶素输出功率达到最大。

## 1 风力机气动外形设计

风力机叶片的气动外形设计包括:叶片直径  $D$ ,叶片数  $B$ ,叶片翼型的选取,叶片各截面的弦长  $C$ ,安装角  $\theta$ 。笔者给定的参数:风力机输出功率  $P=1.5$  MW,设计风速  $v=12$  m/s,风能利用因数  $C_p=0.42$ ,风力机的机电效率  $\eta=\eta_1\eta_2=0.89$  ( $\eta_1$  为传动效率,  $\eta_2$  为发电机效率)。

### 1.1 确定叶片直径 $D$

$$P=0.5\rho v^3 A C_p \eta_1 \eta_2 \quad (1)$$

$$D=\sqrt{\frac{P}{C_p \eta \frac{\rho}{2} v^3 \frac{\pi}{4}}} \quad (2)$$

式中: $A$  为风轮的扫掠面积,  $A=\pi D^2/4$ ,  $m^2$ ;  $\rho$  为空气密度,取  $1.225$   $kg/m^3$ 。

将各参数代入式(2),可得  $D=70$  m。

### 1.2 确定叶片数 $B$ 和叶尖速比 $\lambda$

通常风轮的叶片数取决于风轮的叶尖速比,国际 GB/T 13981-1992 给出了叶尖速比和叶片数的对应关系,见表 1。目前用于风力发电的风轮都属于高速风力机,叶尖速比都大于 2,尤其是大型风力发电机叶尖速比都在 3~10,甚至更高。考虑到大型叶片的成本、稳定

性、载荷、噪声等因素,一般都采用三叶片的风轮。笔者选定  $B=3, \lambda=7$ 。

表 1 叶尖速比与叶片数匹配

叶尖速比 $\lambda$	叶片数 $B$	风机类型	叶尖速比 $\lambda$	叶片数 $B$	风机类型
1	6~20	低速	4	3~5	中速
2	4~12	低速	5~8	2~4	高速
3	3~8	中速	8~12	1~2	高速

### 1.3 翼型的选择

翼型对风力机叶片十分重要,它直接影响风轮的启动和接受风能的效率。一台性能良好的风力机应当尽量增加升力同时减小阻力,使升阻比尽量趋于最大值,从而增加风力机的风能利用因数。常用的翼型有 NA-CA44XX 系列和 NACA230XX 系列航空翼型;专用翼型如 SERI 系列、NREL 系列、RisΦ-A 系列以及 FFA-W 系列等也逐渐得到研究。Tangler(美国可再生能源国家实验室研究员)发现一些传统翼型(如 NACA230XX 系列)对叶片表面粗糙度十分敏感,即当叶片表面变脏时,翼型的最大升力因数急剧下降。NACA63XXX 系列能较大程度地减少表面粗糙度的影响,因而常用来替代 NACA230XX。FX-S 翼型系列在较大的攻角时,升力因数很稳定,能较好地满足叶尖附近区域(含叶尖)所需的性能要求。

选择翼型时,叶根处一般选用相对较厚的翼型,以承受叶片运行时的应力;叶尖应选用相对较薄的翼型,以满足叶片的气动性能要求。根据以上表述,笔者选用翼型为 NACA63-421。

### 1.4 翼型弦长和安装角计算

笔者采用 Wilson 设计法,Wilson 设计法是在 Glauert 设计法基础上作了改进,主要增加了对叶片最佳性能具有影响的叶梢损失因数和升阻比参数。由动量-叶素理论可得:

收稿日期:2015年7月

$$dC_l = \frac{8}{\lambda^2} b(1-a)F\lambda^3 d\lambda \quad (3)$$

$$a(1-aF) = b(1-a)\lambda^2 \quad (4)$$

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^f) \quad (5)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{R \sin \phi} \quad (6)$$

$$\tan \phi = \frac{1-a}{1+b} \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

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

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

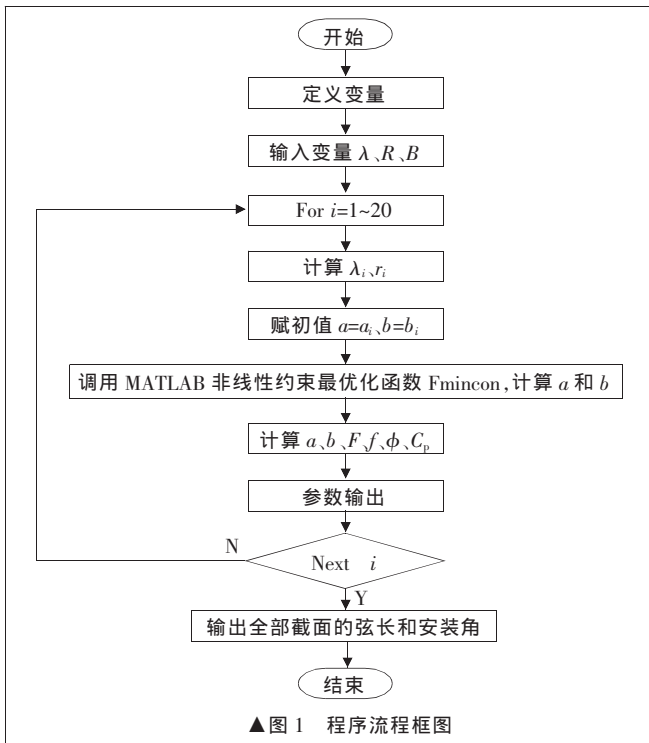
式中:  $a$  为轴向诱导因子;  $b$  为周向诱导因子;  $F$  为叶梢损失因数;  $R$  为叶片半径;  $r$  为叶素截面到叶根距离;  $\phi$  为来流角;  $C_{L_l}$  为叶片翼型升力因数;  $C$  为叶素弦长;  $\theta$  为安装角;  $\alpha$  为最佳攻角;  $e$  为自然常数,  $e=2.718$ 。

以上步骤可通过 MATLAB 编程实现, 具体流程图如图 1 所示。根据图 1 流程图可得出截面的弦长和安装角及部分数据, 见表 2。

## 2 翼型坐标转换

### 2.1 转换思路

将翼型前缘为原点、翼弦方向为  $X$  轴的坐标系下的上下弦数据  $(x_0, y_0)$ , 转换为以气动中心为原点、翼弦方向为  $X$  轴的坐标  $(x_1, y_1)$ , 经过旋转变换, 求得叶素各离散点的空间实际坐标  $(x, y, z)$ , 通过空间实际坐标可以建立叶片三维模型。



▲ 图 1 程序流程图

注 图中 For  $i=1\sim 20$  指的是计算 20 次。

表 2 叶片各截面弦长和安装角

距离叶根位置 $r/m$	弦长 $C/m$	安装角 $\theta/(^\circ)$	距离叶根位置 $r/m$	弦长 $C/m$	安装角 $\theta/(^\circ)$
0.00	1.600	0.00	2.00	1.650	3.05
4.50	2.400	12.00	5.50	1.500	2.39
8.00	2.350	8.59	9.50	1.350	1.87
11.50	2.050	5.49	13.00	0.760	1.85
16.00	1.720	4.04	18.50	0.030	1.30
17.00	1.750	3.75	19.00	1.780	3.76
21.50	1.600	2.69	24.50	1.650	2.89
25.50	1.250	1.82	27.50	1.240	1.72
28.00	0.960	1.25	29.00	0.970	1.35
29.50	0.060	1.00	30.50	0.260	1.05

### 2.2 坐标系的确定

建立三维坐标系, 设叶片根部  $r=0$  的叶素平面为  $XOY$  平面, 叶片叶展方向为  $Z$  轴方向, 原点设在  $r=0$  的叶素平面的气动中心, 叶素各离散点的空间实际坐标为  $(x, y, z)$ 。

### 2.3 叶素各离散点实际坐标的确定

(1) 通过 Profili 或 Naca 软件获得翼型数据  $(x_0, y_0)$ 。

(2) 将获得的翼型数据与气动中心为原点的坐标进行运算, 可求得翼型以气动中心为原点、翼弦为  $X$  轴的二维坐标  $(x_1, y_1)$ 。通常气动中心至翼型前缘的距离为 0.25~0.35 m, 取 0.3 m。所以气动中心的  $X$  轴坐标为  $0.3C$ ,  $Y$  轴坐标为 0, 设气动中心坐标为  $(x_3, y_3)$ , 则:

$$(x_1, y_1) = (x_0, y_0) - (x_3, y_3) \quad (10)$$

(3) 求解叶素各离散点空间实际坐标:

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta \\ y = x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta \\ z = r \end{cases} \quad (11)$$

经变换得:

$$\begin{cases} x = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cos \left[ \arctan \left( \frac{y_1}{x_1} \right) + \theta \right] \\ y = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sin \left[ \arctan \left( \frac{y_1}{x_1} \right) + \theta \right] \\ z = r \end{cases} \quad (12)$$

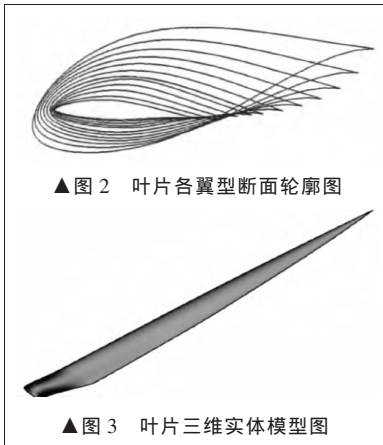
通过 Excel 软件, 完成各叶素上所有离散点空间实际坐标的计算, 部分数据见表 3。

## 3 叶片的三维实体建模

根据上述过程获得各叶素空间实际坐标  $(x, y, z)$ , 进而可通过 CAD/CAM 软件绘制叶片, 采用 UG 软件来完成对叶片的三维实体建模。

具体建模步骤如下。

(1) 绘制各叶素轮廓线。把 Excel 中轮廓线的坐标数据即表 3 数据存为 txt 文件, 编辑后改为 ibl 文件,



▲图2 叶片各翼型断面轮廓图

▲图3 叶片三维实体模型图

将文件导入 UG 软件中,然后利用 UG 软件绘制叶素的上下弦,得各叶素轮廓线如图 2 所示。

(2)生成翼型部分的叶片面,利用曲面混介命令,实现各叶素轮廓线形成曲面。

(3)结合叶柄数据,生成整体叶片,最终的叶片三维实体模型如图 3 所示。

#### 4 结论

以 1.5 MW 风机为例,对风机叶片进行了气动外形设计,在此基础上,通过点的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 UG 软件对风机叶片进行三维实体建模,同时能便于对风机叶片作进一步分析,如叶片的气动性能计算、结构分析等。

#### 参考文献

[1] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2002.  
 [2] 王承煦,张源.风力发电[M].北京:中国电力出版社,2003.  
 [3] 官靖远.风电场工程技术手册[M].北京:机械工业出版社,2004.

表3 第6叶素断面各点的坐标

mm

$x_1$	$y_1$	$x$	$y$	$z$
216.450	0.000	216.343	6.799	3 500
199.280	5.242	199.017	11.499	3 500
159.730	17.396	159.105	22.395	3 500
123.589	28.901	122.621	32.769	3 500
82.343	40.973	81.106	43.542	3 500
39.061	50.583	37.453	51.785	3 500
-3.571	52.291	-5.210	52.153	3 500
-42.554	45.473	-43.961	44.114	3 500
-75.213	34.004	-76.262	31.624	3 500
-99.380	20.368	-99.971	17.237	3 500
-113.350	7.409	-113.527	3.845	3 500
-116.194	-1.367	-116.093	-5.016	3 500
-110.876	-6.331	-110.622	-9.811	3 500
-99.380	-11.214	-98.979	-14.330	3 500

[4] 刘万琨,张志英,李银凤,等.风能及风力发电技术[M].北京:化学工业出版社,2007.  
 [5] Tony Burton.风能技术[M].武鑫译.北京:科学出版社,2007.  
 [6] 王军,周丙超.基于 MATLAB 的小型风力机叶片设计[J].水电能源科学,2007,25(5):142-144.  
 [7] 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.  
 [8] 汪雪英,蔡新娟.计算机优化在机械设计中应用[J].精密制造与自动化,2007(2):44-47.

(编辑 平平)

(上接第 15 页)

表5 应力结果与评定

区域	路径	材料	载荷工况与应力类型		计算应力/MPa	许用应力/MPa	应力比
			正常 工况	异常 工况			
连续区域	f11-16	06Cr18Ni11Ti	正常	薄膜应力	59.33	111.00	0.53
			工况	薄膜加弯曲应力	68.56	166.50	0.41
			异常	薄膜应力	59.35	122.10	0.49
			工况	薄膜加弯曲应力	68.58	183.15	0.37
			事故	薄膜应力	59.36	222.00	0.27
			工况	薄膜加弯曲应力	68.59	266.40	0.26
不连续区域	h11-20	06Cr18Ni11Ti	正常	薄膜应力	41.33	111.00	0.37
			工况	薄膜加弯曲应力	88.42	166.50	0.53
			异常	薄膜应力	41.34	122.10	0.34
			工况	薄膜加弯曲应力	90.25	183.15	0.49
			事故	薄膜应力	41.38	222.00	0.19
			工况	薄膜加弯曲应力	92.61	266.40	0.35

应的应力进行组合和评定。评定结果表明,气体过滤器在各种工况下的强度满足 RCCM 规范的要求。

#### 参考文献

[1] GB 50267-1997,核电厂抗震设计规范[S].  
 [2] RCC-M 2007,法国核电厂设计和建造规则压水堆核岛机械设备设计和建造规则[S].

[3] 王新敏,李义强,许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M].北京:人民交通出版社,2011.  
 [4] 盛选禹,雒晓卫,傅激扬.反应堆主泵抗震强度的三维实体模型计算[J].核动力工程,2005,26(5):471-474.

(编辑 小前)