

大型风电机组叶片气动外形优化设计

陈 坤¹ 贺德馨¹ 戴有羽² 戴峥峥²

(1 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所 四川绵阳 621000; 2 沈阳风电设备发展有限责任公司 沈阳 110101)

摘 要: 本文主要介绍了风电机组风轮叶片气动外形设计的设计参数、理论基础、模型和方法, 以一 1.5MW 叶片作设计案例, 介绍了叶片气动外形设计过程, 并给出了设计结果。虽然动量叶素理论存在难以处理诸如非轴向来流、三元流动等问题的不足, 但是在实际应用中还是表现出比数值计算方法等其他方法有明显的优越性。在目前国际国内主流的风电机组空气动力设计、载荷计算、设计评估、型式认证等所采用的软件, 其空气动力计算模块主要还是基于工程算法的动量叶素理论开发的, 包括英国 Garrad Hassen 公司的 Bladed 软件。在这种背景下, 我国完全有能力设计出和国外先进叶片相当甚至更优表现的空气动力性能的风电机组叶片。

关键词: 风电机组; 叶片; 气动外形; 优化设计

1 引言

有关部门从我国风电产业现状和发展趋势预测, 风电到在 2010 年和 2020 年的累计装机容量可能分别达到 1000 万千瓦和 4500 万千瓦。从目前的发展趋势看, 这个目标也许是很保守的, 因此未来十年间中国将有一个数千亿的风电大市场, 其中叶片大约将占到 1/6~1/5。为了占领中国庞大的风电市场, 必须提高国内风力发电设备制造能力, 加速风力发电设备国产化进程, 形成与风电场建设基本同步的生产能力, 满足国内市场需求, 甚至争取占领海外市场。然而, 目前的现状是国内众多叶片厂商虽然完成了叶片制造的国产化, 设计技术却往往掌握在国外设计公司手里。本文介绍叶片设计的第一步, 气动外形设计。

叶片的气动外形是指叶片采用的翼型族以及剖面弦长、扭角和相对厚度沿叶片展向的分布。由于风轮数值计算的网格数量巨大、网格生成困难、耗时等特点, 数值计算应用到叶片气动外形设计目前还有一定距离。因此, 叶片气动外形设计的基础仍然是基于工程算法的动量叶素理论。它也是目前国际风电行业性能、载荷主流计算软件的理论基础。本文正是基于动量叶素理论进行叶片气动外形设计的。

2 设计参数

设计技术参数是指叶片在什么样的条件下进行设计。一般来说, 叶片厂商会根据风电机组总装厂商的要求进行叶片设计, 同时根据市场上同类叶片运行参数确定部分主要的设计参数。因为叶片设计出来是要面对市场的, 如果主要的设计参数差异较大, 则面临市场面较窄的问题。确定设计技术参数首先需要确定的叶片型式: 失速型或者变速变距型叶片。这关系到叶片其它重要设计参数的选取, 如翼型族选择。两种型式的叶片对翼型族的要求是不同的, 失速型叶片要求翼型族失速区空气动力特性过渡平滑, 而变速变距型叶片则没有这个限制, 只需要翼型有较优的空气动力特性即可。叶片设计技术参数包括风电机组风轮参数和叶片本身的技术参数, 一般包括:

(1) 风轮叶片数目, 现代 MW 级风电机组一般为 3 叶片, 2 叶片情况比较罕见。

(2) 额定功率。

(3) 额定风速, 在该风速下, 发动机稳定输出额定功率。在初步设计时, 额定风速是一个范围。

(4) 风轮直径, 由叶片、轮毂等组成的风轮绕主轴旋转形成一个圆形扫略面, 其直径为风轮直径。一般的, 在开始需要确定叶片适用的风区, 如果是 IEC I 类风区, 额定风速较高, 风轮直径会较小; 相反, 如果是 IEC III 类风区或更差, 要求额定风速会低些, 风轮直径会更大。

(5) 风轮转速, 对失速型风电机组, 由发电机和齿轮箱决定了风轮转速是一个或两个; 对变速变距风电机组风轮转速则是某一个范围。由于控制气动噪声的原因, 叶尖线速度一般在 70m/s 附近(海上风电机组略有放开), 这决定了风轮的最大转速。

(6) 风轮仰角和风轮锥角, 由于叶片柔性很大, 设计仰角和锥角是为了防止叶尖与塔架碰撞。风轮仰角是指风轮主轴轴线与水平面的夹角; 风轮锥角是指叶片根部轴线(变距轴)与风轮主轴轴线夹角的余角。

(7) 叶片翼型族的选择。叶片采用的翼型(族)要根据叶片型式来决定。失速型叶片必须选择失速特性优良的翼型(族), 比如 NACA 634 系列、NACA 632 系列、FFA W3 系列等。这些翼型的特点是升力系数在失速区域变化平缓, 不会使风电机组的输出功率在额定风速附近发生剧烈波动。变速变距型叶片则一般选择具有良好升阻比特性的翼型, 对翼型的失速特性考虑不多, 但失速特性好的翼型也可以用于变速变距型叶片。好的翼型最大升阻比往往超过 120 甚至更高, 在翼型的升力系数曲线线性段区间阻力系数一般在 0.006~0.008 之间。为了满足结构设计的需要, 不论那种型式的叶片, 靠近叶片根部的翼型都必须是大厚度翼型, 其相对厚度一般根据强度要求从根部的 100% (圆柱) 过渡到 40% 左右。对小型风电机组叶片来说, 其结构强度能够满足要求, 则其叶片根部可以是翼型。近年来, 个别大型风电机组叶片根部设计形式发生变化 (如 Enercon 公司的 E-70 E4 机组), 根部也是翼型, 弦长很大, 这是用动量叶素理论优化设计的结果。该机组的风能利用系数达到 0.5。

翼型的空气动力特性是风电机组叶片气动设计的基础参数, 其准确、完备对叶片气动设计具有十分重要的意义。由于风电机组叶片和普通飞机机翼不同, 其运行期间迎角范围是 -180°~180°, 雷诺数的范围也比较宽, 大型风电机组叶片运行雷诺数在 $10^6 \sim 10^7$ 之间。

(8) 叶片长度, 由轮毂半径、风轮半径及风轮锥角等确定。

(9) 叶片最大弦长。

(10) 设计目标, 一般包括最大风能利用系数、额定风速以及年发电量等。一般来说, 如果风能利用系数在 0.45 以上有较宽的叶尖速比范围的话, 叶片设计应该比较成功, 这时额定风速一般较低, 当然年发电量与当地风谱有关, 但风谱相同的情况下, 年发电量也较大。

(11) 设计变量。叶片气动设计仅仅是叶片设计的第一步, 也是叶片对风能捕获效率的关键。叶片气动外形设计的变量有三个, 是叶片弦长、几何扭角、相对厚度沿叶片展向的分布。弦长是叶片剖面的宽度; 扭角是叶片剖面弦线与某参考弦线的夹角; 相对厚度是叶片剖面厚度与弦长的比, 它决定叶片上翼型的分布。

3 动量叶素理论^[1]

动量叶素理论主要通过动量理论和经典翼型理论以及一些必要合理的假设, 得到叶素(小的叶片段)位置的诱导速度。通过迭代方法求得轴向诱导因子 a 和周向诱导因子 b , 迭代步骤如下:

(1) 假设 a 和 b 初值, 一般可取 0;

$$(2) \text{ 计算入流角 } \phi = \arctan \frac{(1-a)V_1}{(1+b)\Omega r};$$

(3) 计算迎角 $\alpha = \phi - \eta$;

(4) 根据翼型空气动力特性曲线得到叶素的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d ;

(5) 计算法向力系数 C_n 和切向力系数 C_t

$$\begin{aligned} C_n &= C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \\ C_t &= C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \end{aligned} \quad (1)$$

(6) 计算新的 a 和 b 值

$$\begin{aligned} \frac{a}{1-a} &= \frac{\sigma C_n}{4F \sin^2 \phi} \\ \frac{b}{1+b} &= \frac{\sigma C_t}{4F \sin \phi \cos \phi} \end{aligned} \quad (2)$$

(7) 比较计算的 a 和 b 值与上一次的 a 和 b 值, 如果误差小于设定的误差值 (一般可取 0.0001), 则迭代终止; 否则, 再回到 (2) 继续迭代。

进一步得到作用在叶素上的气流速度关系、入

流角和迎角等角度关系(图1),求得作用在叶素上的空气动力(升力 L 、阻力 D)对风轮转矩力及推力的贡献分量 dF_n 和 dF_t ,对三叶片的叶素分量求和可以计算出风轮的转矩 M 、主轴功率 P 和推力 T ,并计算风轮风能利用系数 C_p 和推力系数 C_T 。详细可参考文献[1]。

$$\left. \begin{aligned} dF_n &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 C_n dr \\ dF_t &= \frac{1}{2} \rho c V_0^2 C_t dr \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$T = \sum \frac{1}{2} B \rho c V_0^2 C_n \Delta r \quad (4)$$

$$M = \sum \frac{1}{2} B \rho c V_0^2 C_t r \Delta r \quad (5)$$

$$P = M \Omega \quad (6)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (7)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V_1^2} \quad (8)$$

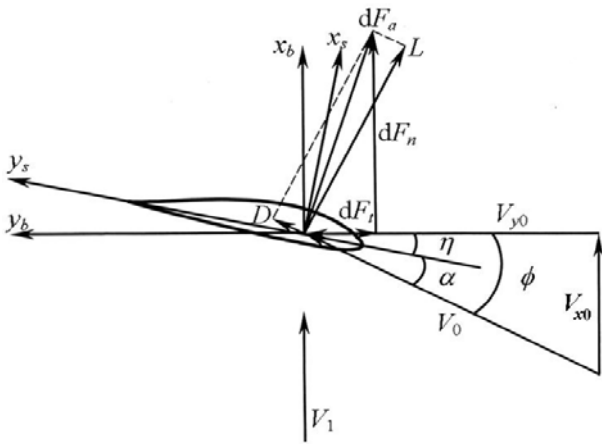


图1 叶素上的气流速度三角形和空气动力分量

4 优化设计

目前优化设计是一门专门的学科,目前已经发展的优化设计方法很多,包括间接最优化方法、直接最优化方法、全局最优化方法、禁忌搜索算法、进化算法、模拟退火算法、拉格朗日松弛算法等。叶片气动外形优化设计相对简单,本文采用直接优化的方法。叶片气动外形优化设计的数学模型是一个单目标多变量的最优化设计数学模型 $f(x)$,它是

基于动量叶素理论建立的:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ x \in [x_b, x_u] \end{aligned} \quad (9)$$

受约束于

$$S_{ib} \leq S_i \leq S_{iu}, \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

式中 x_b 为设计变量下限, x_u 为设计变量上限, S 为约束条件。

这个数学模型的目标函数是风轮风能利用系数或者风电机组的年发电量,对于变速变距的叶片,目标函数是选择某叶尖速比值的风能利用系数的负数:

$$f(x) = -C_p \Big|_{\lambda=\lambda_{\text{design}}} \quad (11)$$

式中 C_p 为风电机组风轮风能利用系数, λ_{design} 为设计叶尖速比。

设计变量是沿叶片展向变化的剖面弦长 $c(r)$ 、扭角 $\eta(r)$ 和相对厚度 $t(r)$ 。约束条件是给出风轮叶片沿展向分布的剖面弦长、厚度和扭角的上、下限制值。设计参数中由叶片厂商提出的最大弦长、最大扭角等也是约束条件之一。

5 设计案例

下面以沈阳风电设备发展有限责任公司1.5MW叶片为案例介绍叶片气动外形的设计过程和结果。沈阳风电设备发展有限责任公司给出的总体技术参数和叶片本身的基本参数如下:

叶片数目:	3
风轮直径:	77m
功率控制:	变速变距
风轮仰角:	5°
风轮锥角:	0°
风轮转速范围:	9.7 rpm~17.4rpm
额定转速:	17.4rpm
切入风速:	3.5 m/s
切出风速:	25 m/s
适用风区:	IEC II类
额定功率:	1.5MW
叶片长度:	37.5 m
最大弦长:	3.0m~3.2 m

设计目标是三叶片风轮最大风能利用系数达到 0.46 以上，额定风速在 11 m/s 附近。

该叶片翼型族选用 WORTMANN FX 77 W 系列翼型及 NACA 634 系列翼型。在风电机组叶片不同展向位置如何选择不同的翼型进行配置，满足风电机组叶片性能和结构的要求，是风电机组叶片气动外形设计时的重要环节。一般叶片配置的翼型应具有 (1) 相对高的升阻比，以获取最大的功率系数；(2) 有足够的相对厚度，以保持应有的结构刚度和强度。另外，在风电机组叶片根部和尖部处配置的翼型不只是满足局部气动特性的要求，而且也希望从叶片根部到尖部，气动特性的变化是连续的。从结构强度和刚度考虑在根部配置的翼型其相对厚度要大。根据上述要求，在叶尖部分布的是 NACA 63415 翼型和 NACA 63418 翼型，叶片中段布置 FX 77 W 258 和 FX 77 W 270S 翼型，在向叶片根部靠近依次分别布置 FX 77 W 343、FX 77 W 400 和 FX 77 W 500 翼型，叶根为圆柱段。

经过几轮外形优化设计，并与结构设计协调，对相对厚度分布、最大弦长、最大扭角等进行数次调整，以满足结构设计需要，确定叶片气动外形，即弦长 c 、扭角 η 和相对厚度 t 沿叶片展向的分布。图 2 为叶片剖面弦长沿叶片展向的分布曲线，图 3 为叶片剖面扭角沿叶片展向的分布曲线，图 4 为相对厚度分布曲线。由于为沈阳风电保密需要，图中隐去坐标刻度。图 5 为生产出的叶片。

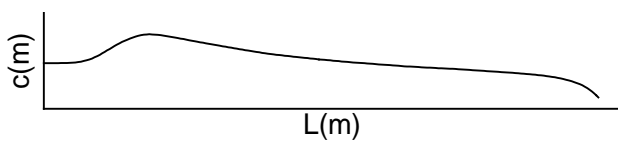


图 2 叶片剖面弦长沿展向分布

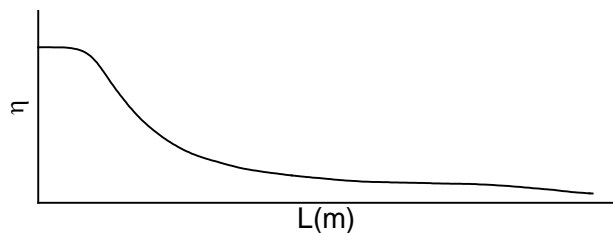


图 3 叶片剖面扭角沿展向分布

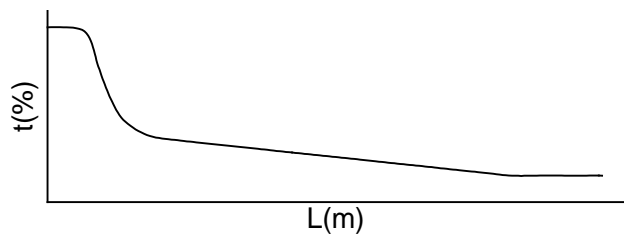


图 4 叶片剖面相对厚度沿展向分布



图 5 沈阳风电设备发展有限责任公司生产出的叶片

在叶片气动外形设计完成后，分别用自己的性能程序 (WT-AeroPerf) 和 Bladed 软件对三叶片风轮进行了性能校核计算，Bladed 计算结果由叶片型式认证单位提供。图 6 给出风轮风能利用系数曲线，图 7 给出推力系数曲线。性能计算结果表明：最大风能利用系数达到 0.49，发生在设计叶尖速比 8.2 附近，满足风能利用系数的设计目标。在 6.3~11 较宽的叶尖速比范围，风能利用系数都超过 0.45。Bladed 软件计算结果与自己的性能程序计算结果吻合较好，叶片气动外形设计结果得到叶片型式认证单位的认可。

在假设了一较优的发电机转速扭矩曲线后，计算了随风速变化的风轮性能。图 8 是风轮主轴输出功率 P_M 和发电机输出功率 P_E 随风速的变化情况。计算结果表明，额定风速在 10.6m/s 附近，满足额定风速的设计目标。图 9 是桨距角 η^* 随风速变化曲线，未对额定风速前的桨距角进行优化计算，在超过额定风速后，变桨是为了抑制超发功率。图 10 是风能利用系数随风速变化曲线。由图可知，在低风速区，风能利用系数保持很高的水平。图 11 是风轮转速随风速的变化曲线，由图可知，在风速 5m/s~8.5m/s 之间，转速与风速成线性关系，这时风轮以最优叶尖速比运行。

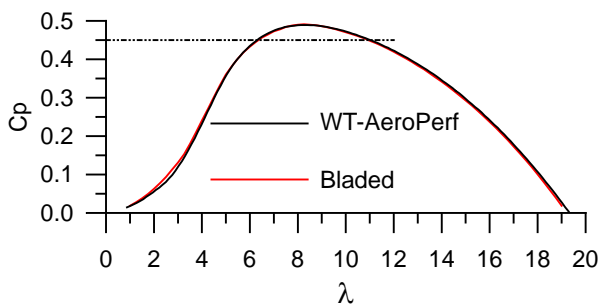


图6 风轮风能利用系数曲线 (0°桨距角)

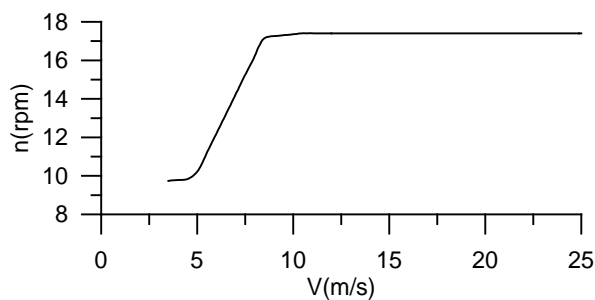


图11 风轮转速随风速变化曲线

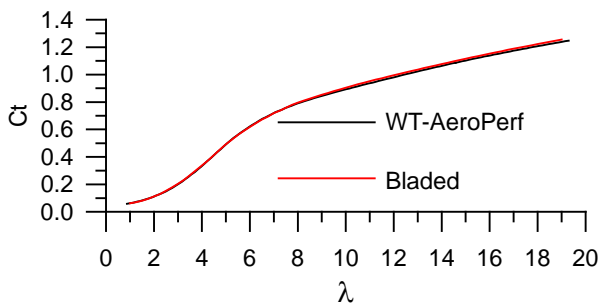


图7 风轮推力系数曲线 (0°桨距角)

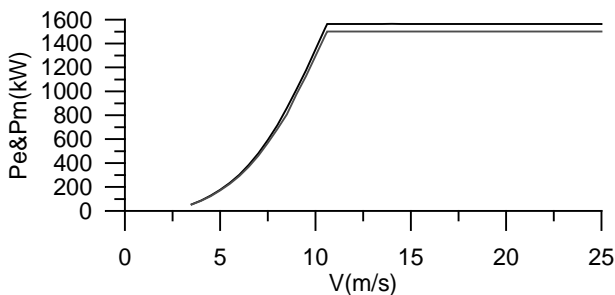


图8 风电机组功率曲线

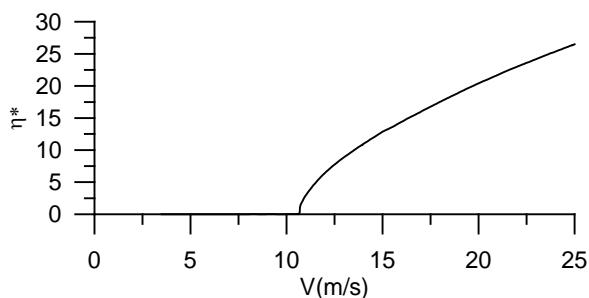


图9 桨距角随风速变化曲线

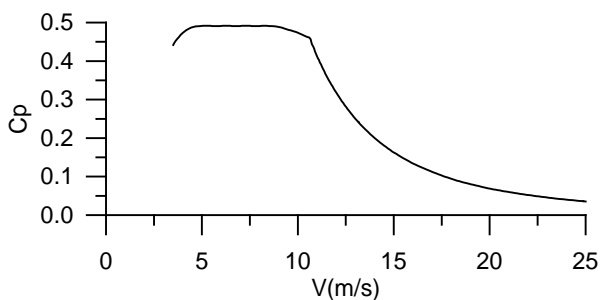


图10 风能利用系数随风速变化曲线

6 结论

本文主要介绍了风电机组风轮叶片气动外形设计的设计参数、理论基础、模型和方法, 以一1.5MW 叶片作设计案例, 介绍了叶片气动外形设计过程, 并给出了设计结果。设计结果表明, 该叶片具有良好的空气动力性能, 满足设计要求。虽然动量叶素理论存在难以处理诸如非轴向来流、三元流动等问题的不足, 但是在实际应用中还是表现出比数值计算方法等其他方法有明显的优越性。在目前国际国内主流的风电机组空气动力设计、载荷计算、设计评估、型式认证等所采用的软件, 其空气动力计算模块主要还是基于工程算法的动量叶素理论开发的, 包括英国 Garrad Hassen 公司的 Bladed 软件。在这种背景下, 我国完全有能力设计出和国外先进叶片相当甚至更优表现的空气动力性能的风电机组叶片。

参考文献

- [1] 贺德馨等. 风工程与工业空气动力学. 国防工业出版社, 2006.01.
- [2] 贺德馨, 陈坤等. 风力机设计软件包理论手册, GF 报告. 中国空气动力研究与发展中心, 2001
- [3] Franck Bertagnolio, Niels Sørensen, Jeppe Johansen and Peter Fuglsang. Wind turbine airfoil catalogue. Risø-R-1280 (EN), Risø. National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001
- [4] Gunner C L, Sten F, Poul S, Michael S C. Horizontal shaft wind turbine design base - theory background. Risø-M-2836, Risø National Laboratory, DK-4000 Roskilde, Denmark, 1989.
- [5] Brian Hahn. Fortran 90 for Scientista and Engineering, Microsoft Corporation, 1994