

风力机叶片三维设计与混合参数化建模方法研究^①

陈亚琼^② 方跃法 郭盛 王冰

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要 为实现风力机叶片的三维参数化设计与建模,建立了包含风力机翼型轮廓线以及弦长分布和扭角分布的混合参数化数学模型。用综合翼型泛函集成理论与 Bezier 曲线拟合的混合建模方法,以拟合标准偏差最小为目标,对风力机翼型形状函数参数的最优值进行迭代求解,同时对弦长分布和扭角分布进行修正和参数化表达,从而获得了更加光顺的风力机叶片外形。以设计 1.2kW 小型风力机叶片为例,根据叶片不同部位的工况要求采用 3 种风力机专用翼型,基于叶素风能利用系数最大化方法获得了风力机几何参数,并用 58 个参数对风力机叶片进行了参数化建模。研究表明,混合建模方法在满足几何精度要求的前提下可以用较少的参数完成风力机叶片的参数化表达。

关键词 参数化建模, 叶片设计, 翼型型线, 风力机, 风能利用系数, Bezier 曲线

0 引言

风力发电是一种开发利用清洁新能源的重要技术。风力机专用翼型的设计与开发是风力发电研究领域的重要课题之一。目前已经建立了多个系列的风力机专用翼型,例如美国的 NREL-S 系列翼型^[1]、丹麦的 Risø 系列翼型^[2]等。随着风力发电技术的普及应用,风场环境和工作场合等对风力机翼型提出了更多的指标要求^[3],因此研究更加适用于实地工作环境的风力机专用翼型也成为了研究热点之一,因而风力机专用翼型的种类也随之不断增加^[4,5]。风力机叶片的外形设计决定了其功率特性、结构特性和噪声特性。风力机叶片外形参数依据不同的设计理论有着不同的校正方法^[6]。风力机叶片参数化建模更方便进行对风力机叶片外形几何参数的修改^[7],同时也对叶片的优化设计起着关键作用。为了详细分析叶片的各项特性,需要具有精确的叶片造型^[8]。

风力机叶片的参数化建模和自动造型能为其气动、结构及噪声一体化设计提供统一的几何参数模型。应用于叶片造型和参数化建模的 CATIA、UG 等程序的开发^[7,9]减少了叶片复杂曲面建模工作量。随着风力机叶片几何外形的复杂化,在保证几何精度要求的情况下,需要尽量减少参数化建模的控制系数的个数^[10]。本研究采用叶片局部风能利用系数最大化和叶素风能利用系数最大化两种工程设计方法获得了风力机叶片的几何参数,基于翼型的泛函集成理论对风力机所采用的 3 种翼型进行参数化表达,推导出了弦长和扭角分布的 Bezier 曲线用于修正与拟合表达式,从而实现了风力机叶片的混合参数化建模。通过翼型的拟合误差和弦长、扭角分布修正及拟合效果,评估了本文提出的混合建模方法的有效性。

1 翼型选择

风力机的风能利用系数主要是由风力机叶片决

^① 国家自然科学基金(51175029)资助项目。

^② 男,1984 年生,博士生;研究方向:可再生能源装备关键技术;联系人,E-mail: jeromechen298@bjtu.edu.cn
(收稿日期:2015-05-12)

定的,而翼型作为叶片的基本要素,直接决定叶片的各项性能。影响风力机翼型性能的指标主要包括在气动、结构、声学等不同方面上的要求。风力机专用翼型需要具有以下特点:高升阻比、高升力系数、良好的几何结构兼容性及低噪声特性^[11]。风力机叶片外侧翼型具有高的最大升阻比能有效提高整体的风能利用系数,内侧翼型尽可能高的最大升力系数可以降低叶根弦长长度。由于沿叶片展向翼型的最大相对厚度是变化的,因此良好的几何兼容性可使翼型之间光滑过渡,以保证整个叶片的几何光滑性。风力机叶片不同部位的翼型参数对整个叶片的特性重要性如表 1 所示。

表 1 叶片不同部位翼型特征参数的重要性

	内侧部分	中间部分	外侧部分
最大相对厚度	>28%	21% ~ 28%	<21%
结构特性	非常重要	重要	一般
几何兼容性	重要	重要	重要
前缘粗糙度敏感性	一般	重要	非常重要
最大升阻比	一般	重要	重要
最大升力系数	重要	重要	非常重要
失速特性	/	一般	非常重要
噪声	/	一般	非常重要

2 速度诱导因子的设计

风力机叶片设计的首要任务是在设计来流风速下,通过合理的速度诱导因子分布,让风力机叶片的每一段翼型在最佳攻角下工作,从而获得最大的风能利用系数^[12]。工程上主要基于叶片局部风能利用系数最大化或叶素风能利用系数最大化两种方法来设计速度诱导因子。

2.1 基于叶片局部风能利用系数最大化

基于动量-叶素理论,叶片局部风能利用系数 dC_p 可由公式

$$dC_p = \frac{8}{\lambda_0^2} b(1-a) F \lambda^3 d\lambda \quad (1)$$

表达。式中 λ_0 为叶尖处的尖速比, a 、 b 分别为轴向和周向速度诱导因子, F 为 Prant 叶尖损失修正因子, λ 为风轮半径 r 处的当地尖速比。通过叶片局

部风能利用系数达到最大来获得 a 和 b 值,最终可归结为最优化问题。

$$\min: \frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{8}{\lambda_0^2} b(a-1) F \lambda^3 \quad (2)$$

$$\text{sub to: } a(1-aF) = b(1+b)\lambda^2$$

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

$$f = B(R-r)/(2R\sin\phi)$$

a 和 b 的初值由经验性初值公式

$$a_0 = \frac{\lambda_0^2}{2000} + 0.027\lambda_0 - 0.038 \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{10}{\lambda_0} \cdot e^{\frac{12r}{R}} \quad (4)$$

获得。式中 r 为叶素截面到风轮中心的距离, R 为风轮半径, ϕ 为叶素入流角, $\phi = \arctan \frac{1-a}{\lambda(1+b)}$ 。

2.2 基于叶素风能利用系数最大化

叶片每个叶素的风能利用系数又可以由下式

$$C_p = \frac{dF_d \Omega r}{0.5 \rho v_0^3 dA} \quad (5)$$

表达。式中 dF_d 为局部切向力, Ω 为风轮旋转角速度, ρ 为空气密度, v_0 为来流风速, $dA = 2\pi r dr$ 为局部风轮转盘面积。

通常将叶素翼型的风能利用系数表达成^[4]

$$C_p = [(1-a)^2 + \lambda^2(1+b)^2] \lambda c_x \sigma \quad (6)$$

式中 c_x 为切向系数, σ 为叶片实度。

a 和 b 分别由公式

$$a = \frac{1}{4F \sin^2 \phi / (\sigma c_y) + 1} \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{4F \sin \phi \cos \phi / (\sigma c_x) - 1} \quad (8)$$

获得,式中

$$\sigma = 2F \sin^2 \phi / c_y \quad (9)$$

$$c_x = c_l [\sin \phi - \frac{1}{c_l/c_d} \cos \phi] \quad (10)$$

$$c_y = c_l [\cos \phi + \frac{1}{c_l/c_d} \sin \phi] \quad (11)$$

式中 c_l 、 c_d 分别为叶素升力系数和阻力系数, c_y 为法向力系数。

给定当地速比 λ , a 和 b 的初值由经验性初值式(3)和(4)获得,容许偏差为 0.0001,通过迭代计算就可以求出收敛以后 a 和 b 的值。

基于叶片局部风能利用系数最大化和叶素风能利用系数最大化两种方法得到的风力叶片速度诱导因子的分布如图 1 所示。由图可以看出,两种方法周向速度诱导因子分布基本一致。基于叶素风能利用系数最大化,获得轴向速度诱导因子 $a = 1/3$, 而基于叶片局部风能利用系数最大化,在叶尖部分 a 大于 $1/3$, 叶片其他部分,两种方法计算的结果基本一致。

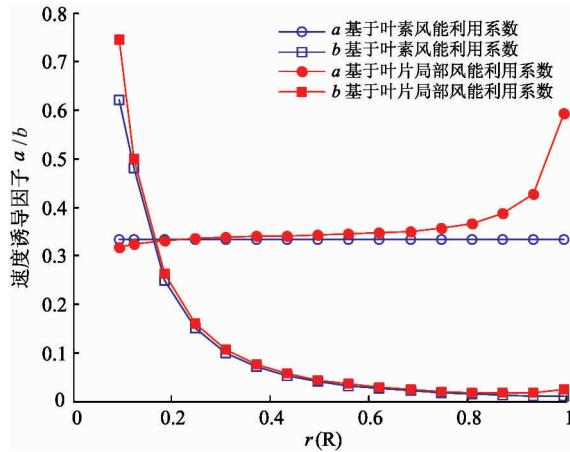


图 1 速度诱导因子分布

3 翼型风能利用系数

由式(6)得到叶素的风能利用系数随升阻比的变化如图 2 所示。从图中可得,在同一当地尖速比下,翼型的升阻比越大,对应的风能利用系数越高。但是当升阻比增大到 130 以上时,翼型的风能利用系数提高的幅度逐渐减小,这是因为风能利用系数不会超过贝茨极限 0.593。

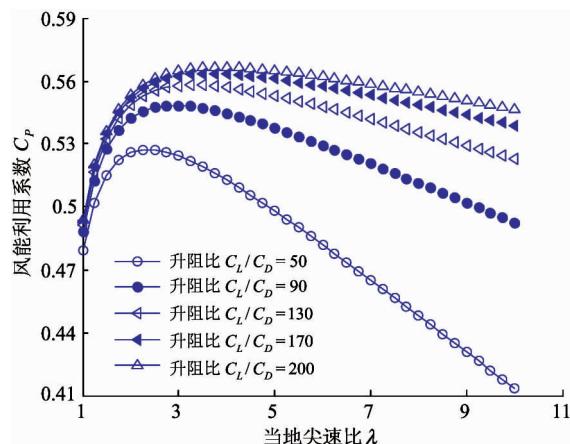


图 2 风能利用系数 C_p 随翼型升阻比及当地尖速比变化图

将基于叶片局部风能利用系数最大化和叶素风能利用系数最大化两种方法计算得到的轴向和周向速度诱导因子代入叶素风能利用系数计算公式,计算结果如图 3 所示。由图中可以看出,基于叶素风能利用系数最大化获得的计算效果更好,主要体现在叶尖部分叶素的风能利用系数得到了提高。

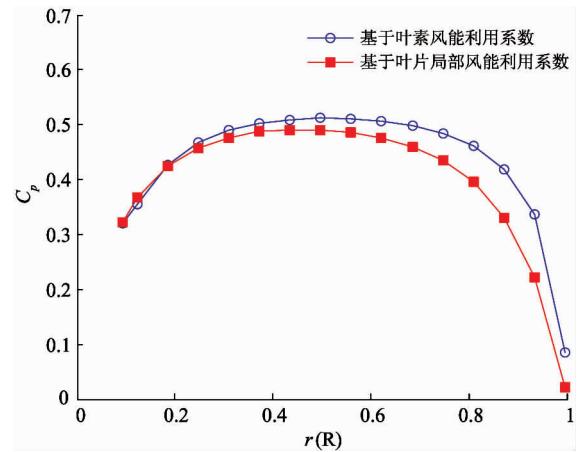


图 3 风能利用系数分布

4 弦长和扭角分布

通过式(12)和式(13)获得了风力机叶片的理想弦长和最佳扭角分布。

$$c = \frac{8\pi r a F (1 - a F)}{B c_l (1 - a)^2} \cdot \frac{\sin^2 \phi}{\cos \phi} \quad (12)$$

$$\beta = \phi - \alpha \quad (13)$$

式中: α 为叶素最佳攻角。

由于速度诱导因子的确定是一个迭代的过程,因此最终可以确定一个最优弦长。各截面弦长计算出之后,要对其进行检查和修正,从而使各截面弦长的连线形成一个光滑的曲线。基于叶片局部风能利用系数最大化和叶素风能利用系数最大化两种设计方法得到叶片的弦长分布如图 4 所示。由图可以看出,通过两种设计方法获得的叶片弦长分布,后者在叶中到叶尖部分弦长减小,这主要是因为风能利用系数也得到提高的缘故。因此本文采用基于叶素风能利用系数最大化的方法获得风力机叶片的几何参数。

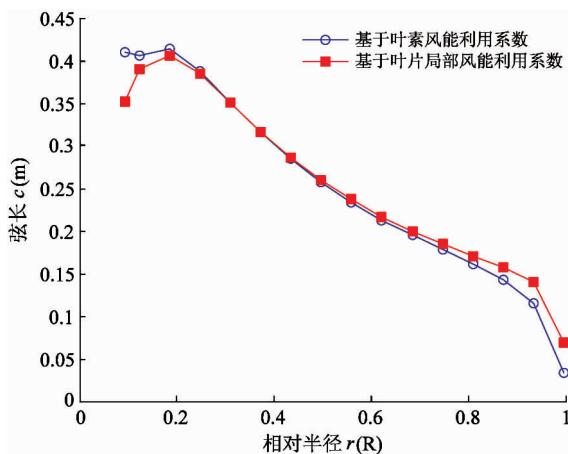


图 4 弦长分布

5 风力机叶片的参数化表达

风力机叶片的翼型廓线、弦长分布和扭角分布目前没有特定的表达式, 主要通过离散点来实现的。风力机三维几何参数的函数特性研究及其数学模型的建立, 对于风力机叶片的优化设计具有重要的理论指导意义^[13]。

5.1 翼型廓线参数化表达方法

根据翼型的泛函集成理论^[14], 翼型二维平面坐标 (x, y) 所对应的形状函数矢径 ρ 及幅角 Φ 之间的关系如下式所示:

$$\sin^2 \Phi = \frac{1}{2} \left(h + \sqrt{h^2 + \frac{y^2}{l^2}} \right) \quad (14)$$

$$\rho = \frac{1}{2l} \left(\frac{x}{\cos \Phi} + \frac{y}{\sin \Phi} \right) \quad (15)$$

式中 $h = \frac{-x^2 - y^2 + 4l^2}{4l^2}$, l 为形状函数参数。

基于泰勒级数思想, 可将 $\rho(\Phi)$ 的广义函数方程集成为高阶多项式:

$$\begin{aligned} \rho(\Phi) &= C_0 + C_1 \Phi + C_2 \Phi^2 + C_3 \Phi^3 + \cdots \\ &\quad + C_k \Phi^k + \cdots, \quad k = 1, 2, 3, \cdots, n \end{aligned} \quad (16)$$

通过式(16), 选取各自不同的系数, 就可以表达任意形状的翼型。反之, 将翼型的坐标代入式(14)、(15), 就可以确定翼型形函数的控制系数, 从而实现翼型的集成表达。对于实际的风力机翼型, 在集成表达过程中, 形状函数参数 l 值为 0.25 时拟合效果并不理想, 而 l 值接近 0.25 时可以提高拟合精度。因此, 本文提出以拟合翼型残差最小为目标对 l 进行修正。假定 l 值取值范围是 $[0.24, 0.26]$, 在此范围内通过迭代求解。求得拟合多项式阶数在 n 变化下, 翼型拟合残差最小时对应 l 的值。具体步骤如下:

(1) 设定拟合多项式阶数为 n , l 的取值范围为 $[0.24, 0.26]$, 并确定计算步长为 0.00001;

(2) 选择风力机翼型;

(3) 通过翼型泛函表达方法式(14)和(15)计算形状函数矢径 ρ 和幅角 Φ 的数值;

(4) 计算多项式阶数下翼型拟合残差最小时对应的 l 的值, 此时即为所求得值。

5.2 弦长和扭角的参数化表达方法

Bezier 曲线能有效地满足空间参数化表示和几何模型要求, 因此成为机械加工中最常用的光滑曲线之一^[15]。 n 次 Bezier 曲线数学表达式为

$$P(t) = \sum_{j=0}^n B_{j,n} Q = \sum_{j=0}^n C_n^j (1-t)^{n-j} t^j Q \quad (17)$$

式中 $P(t)$ 为拟合曲线上的任意一点坐标, $t \in (0, 1)$ 为参变量, $B_{j,n}$ 为 Bernstein 基函数, Q 为控制点坐标, C_n^j 为组合数。

图 5 和图 6 给出了由计算得到的理想弦长 c 和理想扭角 β 的值。图中显示叶片的叶根处弦长的值很大, 这样将大大增加了制造加工的难度。而叶根主要作用是支撑叶片和连接轮毂, 对整个叶片的功率的贡献较小。因此需要对叶片的理想弦长分布和扭角分布进行修正。首先选取 $0.35R \sim 0.9R$ 的各

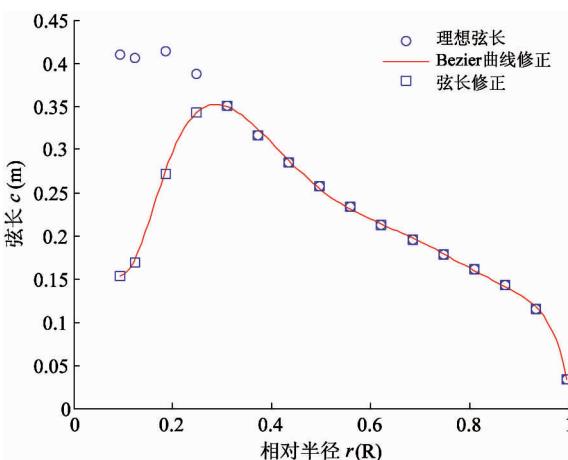


图 5 弦长修正与拟合图

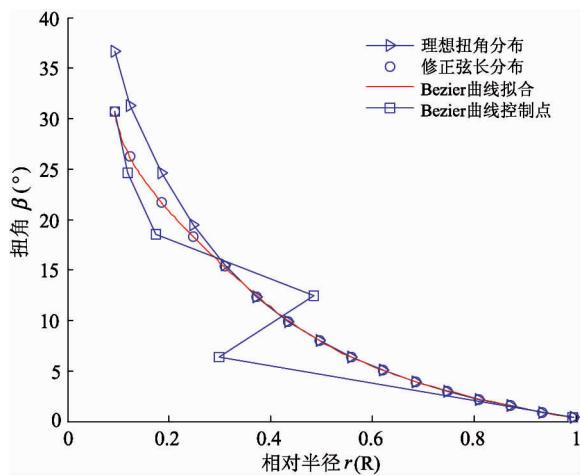


图 6 扭角修正与拟合图

个叶素,采用 Bezier 曲线拟合弦长在叶展方向上的分布函数。经过多次对比,最后用 8 阶 Bezier 曲线对弦长分布进行拟合和修正,如图 5 所示既保证了拟合精度,又使叶片弦长 c 在叶根处的值明显减小。扭角分布 β 的拟合和修正则采用 5 阶 Bezier 曲线即可达到效果,如图 6 所示。

6 风力机叶片的三维建模

首先建立叶片的三维坐标系,取轮毂中心为坐标原点,平行叶素平面为 xOy 平面。当叶素扭角为 0 时, x 轴正向为叶素翼型前缘到后缘的连线, y 轴正向为垂直于翼型弦长并指向上弦, z 轴正向为叶展方向,如图 7 所示。

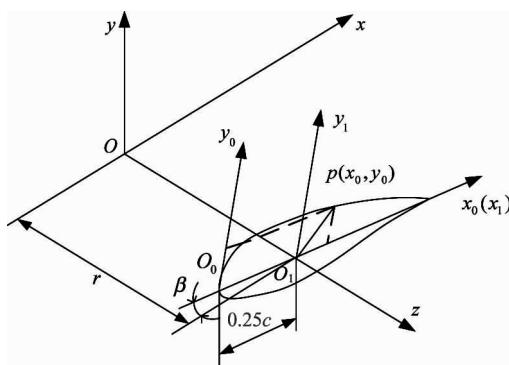


图 7 叶片截面三维坐标的求解原理图

设所选翼型的气动中心在距截面翼型前缘 25% 的弦上,由图 7 得到:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - 0.25c \\ y_1 = y_0 \end{cases} \quad (18)$$

将风力机叶片各个叶素的弦长 c 、扭角 β 以及所采用的翼型平面坐标 (x_0, y_0) 代入式(19)和(20),就可得到各个截面在上述坐标系中的空间坐标。

$x_1 < 0$ 时,有

$$\begin{cases} x = -c / \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cos(\arctan \frac{y_1}{x_1} + \beta) \\ y = -c / \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sin(\arctan \frac{y_1}{x_1} + \beta) \\ z = r \end{cases} \quad (19)$$

$x_1 > 0$ 时,有

$$\begin{cases} x = c / \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cos(\arctan \frac{y_1}{x_1} + \beta) \\ y = c / \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sin(\arctan \frac{y_1}{x_1} + \beta) \\ z = r \end{cases} \quad (20)$$

通过将空间点的三维坐标的.i bl 文件导入到 Pro/E 来实现自动绘制参数化曲线。所有翼型截面三维离散点坐标 (x, y, z) 的数据格式如图 8 所示。

```

Open %打开数据文件
Arclength %以曲线连接各点
Begin section! 1 %绘制第1个翼型截面
Begin curve! 1 %绘制第1个翼型的上翼型
1    0.09212398    0.06854162    0.18500000
2    0.09153528    0.06828949    0.18500000
3    0.08980076    0.06768176    0.18500000
4    0.08709172    0.06689111    0.18500000
.....
Begin curve! 2 %绘制第1个翼型的下翼型
1    -0.03070799   -0.02284721   0.18500000
2    -0.02976103   -0.02383452   0.18500000
3    -0.02786530   -0.02503134   0.18500000
4    -0.02542802   -0.02589831   0.18500000
.....
Begin section!2 %绘制第1个翼型截面
.....
```

图 8 叶片叶素轮廓线.i bl 文件

将数据文件导入 Pro/E 软件后得到叶片各叶素轮廓线的三维分布,以其作为叶片的骨架采用“边界混合”工具生成叶片的上下表面,然后“合并”得到整体叶片的曲面,最终“实体化”叶片的曲面完成

三维造型,如图 9 所示。

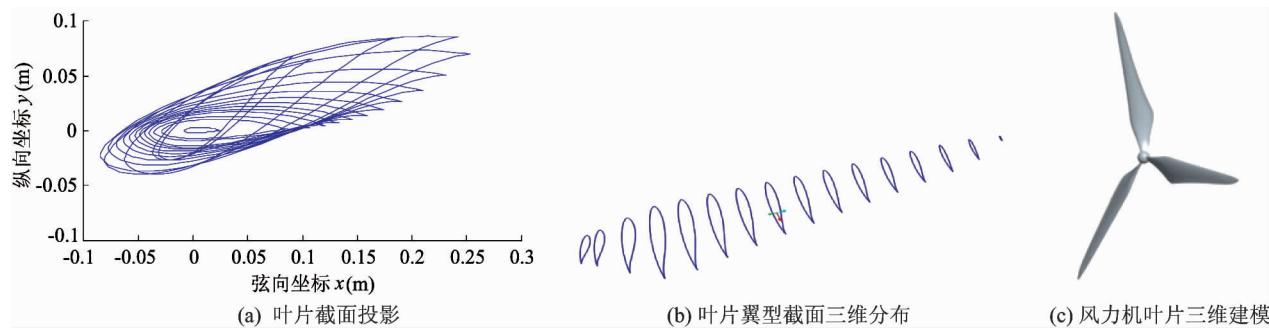


图 9 叶片截面分布与三维建模

7 实例

主要设计参数如下:额定风速为 7m/s,额定功率为 1.2kW,取地面 6m 高度的空气密度 $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$,取尖速比 $\lambda_0 = 4.5$,采用三叶片式。基于风力机叶片对风力机翼型的要求,叶片翼型选用美国 NREL 风力机专用翼型 S835、S833 和 S834。基于叶素风能利用系数最大化的方法获得风力机叶片的弦长和扭角分布如表 2 所示。

表 2 部分叶片弦长与扭角分布

序号	λ	r (m)	c (m)	β (°)
1	0.42	0.185	0.1531	30.65
2	0.55	0.2449	0.1852	26.24
3	0.83	0.3698	0.2751	21.67
4	1.11	0.4947	0.3543	18.29
5	1.39	0.6196	0.3412	15.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

基于翼型的泛函集成理论,风力机叶片采用的翼型可以用 11 阶形状函数来表达,弦长分布用 8 阶 Bezier 曲线表达,扭角分布用 5 阶 Bezier 曲线表达,如下式所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(\Phi) = C_0 + C_1\Phi + C_2\Phi^2 + C_3\Phi^3 + \dots \\ \quad + C_k\Phi^k + \dots \quad k = 1, 2, 3, \dots, 11 \\ P_c(t) = \sum_{j=0}^8 B_{j,8} Q_c = \sum_{j=0}^8 C_8^j (1-t)^{8-j} t^j Q_c \\ P_\beta(t) = \sum_{j=0}^5 B_{j,5} Q_\beta = \sum_{j=0}^5 C_5^j (1-t)^{5-j} t^j Q_\beta \end{array} \right.$$

(21)

求得风力机叶片采用的 3 种翼型的形状函数的控制系数如表 3 所示。弦长分布和扭角分布的控制系数为控制点的坐标,如表 4 和表 5 所示。因此,风力机叶片的翼型共用 36 个参数表达,弦长分布用 14 个参数表达,扭角分布用 8 个参数进行表达,从而完成了风力机叶片的整体的参数化建模。

表 3 翼型形状函数系数

C_0	C_1	C_2	C_3
ρ_1	1.002	-2.108e-3	5.723e-4
ρ_2	1.001	-4.692e-4	4.009e-4
ρ_3	1.011	-6.132e-4	2.711e-4
C_4	C_5	C_6	C_7
ρ_1	5.306e-7	-6.911e-9	5.611e-11
ρ_2	3.533e-7	-4.575e-9	3.738e-11
ρ_3	1.868e-7	-2.252e-9	1.733e-11
C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
ρ_1	9.606e-16	1.961e-18	2.321e-19
ρ_2	6.611e-18	-1.3773e-19	1.632e-20
ρ_3	2.767e-17	-5.509e-18	6.321e-19

表 4 弦长分布控制点坐标

序号	Q_c
1	0.4335
2	0.4329
3	1.0344
4	0.8948
5	1.4258
6	1.4633
7	1.8302

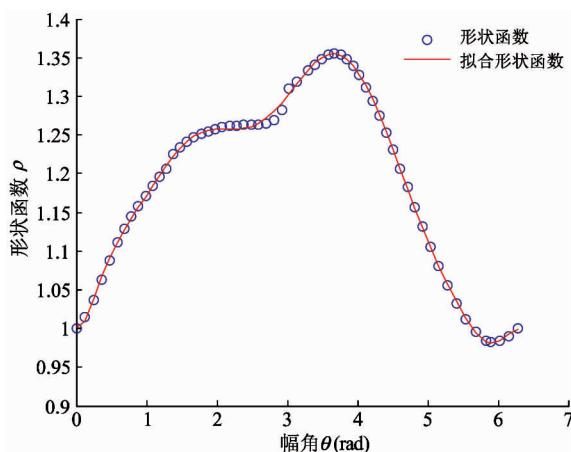
表 5 扭角分布控制点坐标

序号	Q_β
1	0.1179
2	0.1751
3	0.4840
4	0.2976
	24.5929
	18.5192
	12.4883
	6.3952

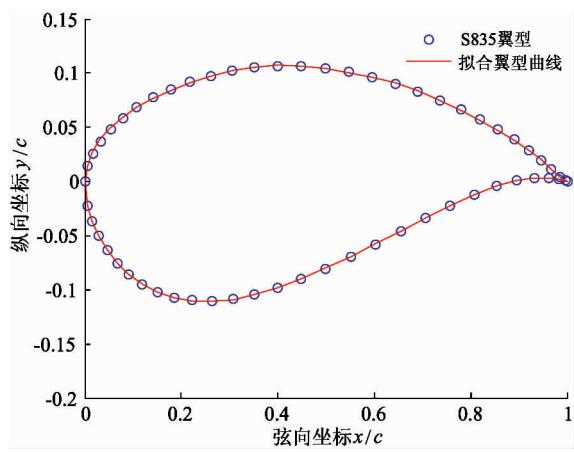
风力机叶片的翼型对拟合精度要求较高,标准偏差在 10^{-4} 以下可以满足气动、噪声等性能的收敛要求。本文风力机叶片所采用的翼型得到的拟合偏差为如表 6 所示。拟合效果如图 11~13 所示,由图中可以看出,拟合翼型与原翼型几乎完全重合。

表 6 翼型拟合标准偏差

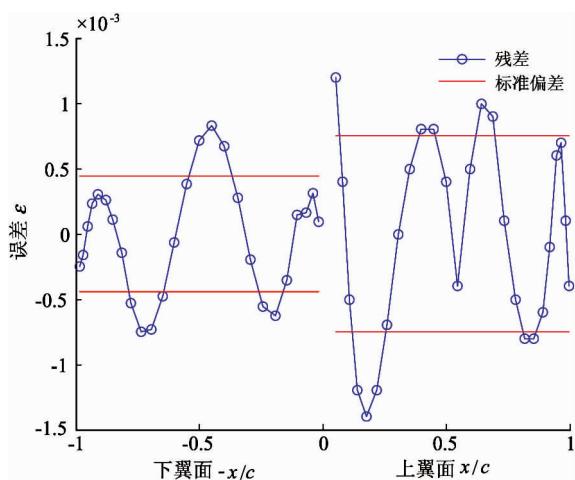
叶片部位	翼型	拟合阶数	形状函数	上翼面	下翼面
			参数	标准偏差	标准偏差
内侧	S835	11	0.24187	7.485×10^{-4}	4.398×10^{-4}
中间	S833	11	0.24335	6.134×10^{-4}	4.962×10^{-4}
外侧	S834	11	0.24583	3.772×10^{-4}	2.872×10^{-4}



(a) 形状函数拟合

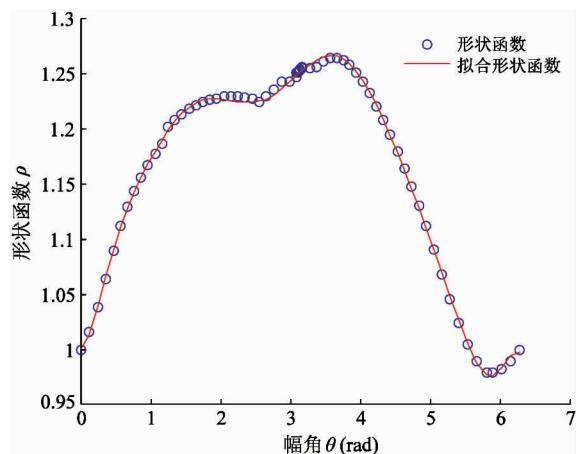


(b) 翼型轮廓线拟合

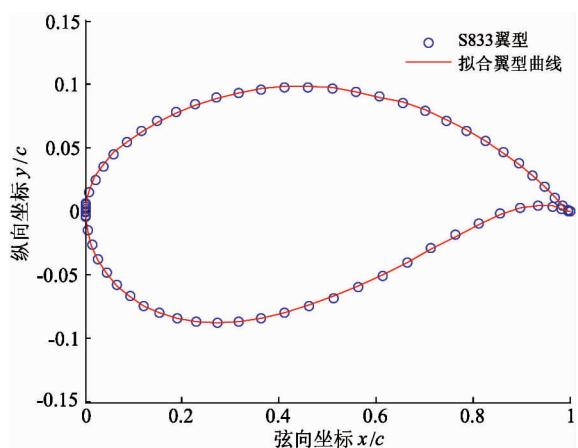


(c) 残差与标准偏差

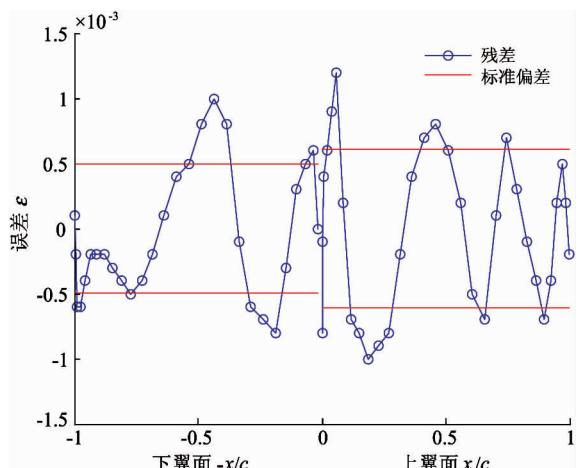
图 11 S835 翼型参数化几何型线收敛效果



(a) 形状函数拟合



(b) 翼型轮廓线拟合

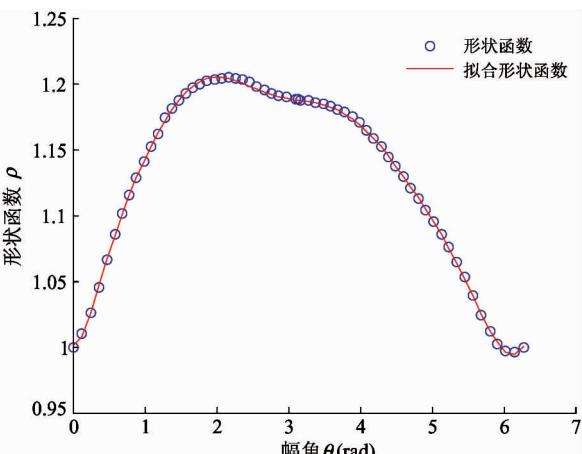


(c) 残差与标准偏差

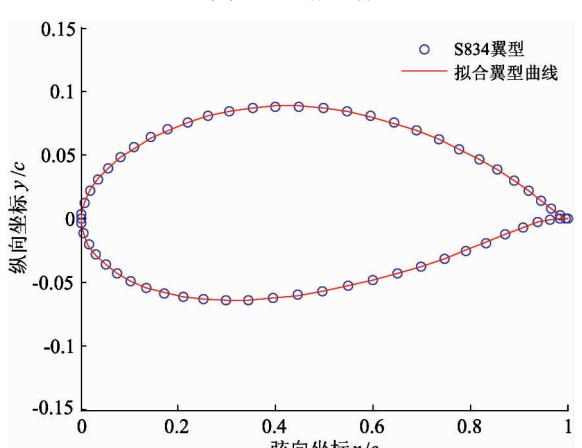
图 12 S833 翼型参数化几何型线收敛效果

8 结论

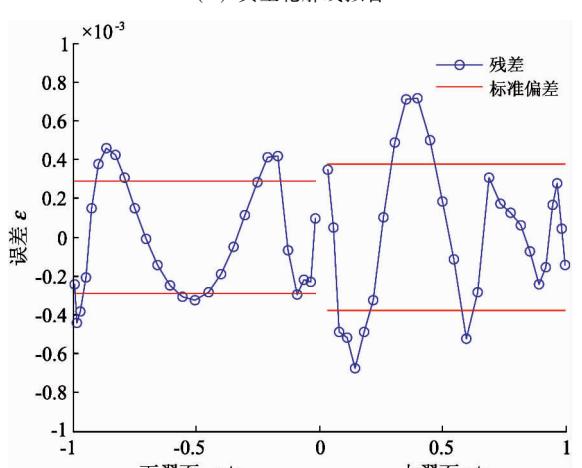
(1) 本文通过两种工程设计方法获得风力机叶片的几何参数, 从风力机整体风能利用系数而言, 基



(a) 形状函数拟合



(b) 翼型轮廓线拟合



(c) 残差与标准偏差

图 13 S834 翼型参数化几何型线收敛效果

于叶素风能利用系数最大化可获得更优的设计效果。分析各升阻比范围内对翼型风能利用系数的影响, 对风力机叶片翼型的选取具有指导意义。

(2) 针对风力机叶片参数化建模问题, 基于翼

型泛函集成理论与 Bezier 曲线拟合理论,提出了混合建模方法,满足叶片几何精度要求,同时对弦长、扭角分布进行修正,解决了风力机叶片三维参数一体化问题。实现了 Pro/E 数据前处理问题,提高了风力机叶片的造型速度,为进一步三维动态仿真,有限元分析等研究奠定了基础。

参考文献

- [1] Tangler J L, Somers D M. NREL Airfoil Families for HAWTs, NREL/TP-442-7109. Washington: USA, 1995
- [2] Fuglsang P, Bak C. Development of the Risø wind turbine airfoils. European Wind Energy Conference (EWEC), Madrid, SPAIN, 2003. 145-162
- [3] Fischer G R, Kipouros T, Savill A M. Multi-objective optimisation of horizontal axis wind turbine structure and energy production using aerofoil and blade properties as design variables. *Renewable Energy*, 2014, 62: 506-15
- [4] 程江涛, 陈进, 沈文忠等. 基于最大风能利用系数的风力机翼型设计. *机械工程学报*, 2010, 46(24): 111-117
- [5] 李仁年, 袁尚科, 赵子琴. 尾缘改型对风力机翼型性能的影响研究. *空气动力学学报*, 2012, 30(5): 646-652
- [6] 赵旭, 肖俊, 席德科. 比较 Wilson 法和复合形优化法气动设计水平轴风轮, *西北工业大学学报*, 2008, 26(6): 693-697
- [7] 王永志, 张卫民, 康传明等. 基于 CATIA 二次开发的风力机叶片参数化建模. *太阳能学报*, 2012, 33(5): 723-726
- [8] Chen J, Zhang S Q, Hou Y, et al. Parametric geometry representations for wind turbine blade shapes. *High Technology Letters*, 2011, 17(3): 325-332
- [9] 张礼达, 任腊春, 陈荣盛等. 风力机叶片外形设计及三维实体建模研究. *太阳能学报*, 2008, 29(9): 1177-1180
- [10] Wang Q, Chen J, Pang X P, et al. A new direct design method for the medium thickness wind turbine airfoil. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 43: 287-301
- [11] 白井艳, 杨科, 李宏利等. 水平轴风力机专用翼型族设计. *工程热物理学报*, 2010, 31(4): 589-592
- [12] Karthikeyan N, Kalidasa M K, Arun K S, et al. Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 801-822
- [13] 宋显成, 陈江, 杜刚等. 风力机翼型参数化方法. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(3): 301-306
- [14] 陈进, 马金成, 郭小峰等. 基于参数化建模的风力机叶片性能分析. *东北大学学报*, 2014, 35(12): 1768-1772
- [15] 瑚亚平, 张楚华. 利用试验设计法建立翼型气动特性的神经网络模型. *航空学报*, 2010, 31(5): 893-898

Research on three dimensional design and hybrid parametric modeling for wind turbine blades

Chen Yaqiong, Fang Yuefa, Guo Sheng, Wang Bing

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

For realization of wind turbine blades' parametric design and modeling, a hybrid parametric mathematical model containing airfoil profile, chord length distribution and torsion angle distribution was established. A hybrid modeling method of synthesizing the functional integration theory for airfoil profile and the Bezier curve fitting was used to iteratively solve the optimal parameter values of wind turbines' shape function with the goal of achieving the minimum standard deviation in fitting, concurrently, airfoil the chord distribution and the twist angle distribution were modified and parameterically expressed, thus a smoother wind turbine blade was obtained. A 1.2kW small wind turbine was taken as an example. Three kinds of airfoils were adopted for it according to the operating conditions of different parts of its blades. The geometrical parameters of the turbine's blades were obtained by using the method of maximum of blade element's wind energy utilization coefficient, and the wind turbine's blades were modeled by 58 parameters. The research shows that the hybrid modeling method can be used to complete the parametric expression of wind turbine blades with less parameters in the premise of satisfying the geometric precision.

Key words: parametric modeling, blade design, airfoil profile, wind turbine, wind energy utilization coefficient, Bezier curve