

风力机专用翼型气动结构一体化设计

陈进¹, 李松林^{1,2}, 孙振业¹, 陈刚¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 东方电气风电有限公司技术部, 四川 德阳 618000)

摘要: 基于保角变换理论, 提出了风力机专用翼型气动结构一体化设计方法。该方法结合西奥道生理论和 B 样条曲线对风力机翼型进行参数化表达; 以翼型气动和结构性能最优为目标, 建立了翼型优化数学模型; 运用 RFOIL 软件求解气动特性、利用 Matlab 求解翼型结构特性, 结合改进的遗传算法对翼型进行优化设计。优化得到相对厚度为 21% 的新翼型 CQUL210, 并将该翼型与国际知名的风力机翼型 DU93-W-210 进行了对比分析, 结果表明: 在设计攻角范围内, 新翼型在自由转换和固定转换条件下气动性能都更加优越。有限元分析结果表明, 新设计的 CQUL210 翼型的结构性能优于 DU93-W-210 翼型。本文方法对提高叶片捕风能力和减轻叶片质量具有重大意义。

关键词: 机械设计; 风力机翼型; 一体化设计; 遗传算法; 气动性能; 结构性能

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2016)06-1940-06

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201606024

Integrated design of aerodynamic and structural performance for wind turbine dedicated airfoil

CHEN Jin¹, LI Song-lin^{1,2}, SUN Zhen-ye¹, CHEN Gang¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Ministry of Technology of Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: An integrated design method of aerodynamic and structural performance for wind turbine airfoil is proposed based on conformal transformation theory. In this method, the parameterized expression of an airfoil is presented by combing Theodorsen theory and B-spline curve. In order to optimize the aerodynamic and structural performance, an optimization mathematical model of the airfoil is established. The RFOIL software is used to solve the aerodynamic performance and a MATLAB code is used to solve the structural performance. The airfoil optimization is accomplished using an improved genetic algorithm. A new airfoil named CQUL210 with 21% maximum relative thickness is designed. Compared with the worldwide well known wind turbine airfoil DU93-W-210, of which the maximum relative thickness is also 21%, CQUL210 has higher aerodynamic performance both in smooth and rough transitions in the range of the design attack angle. Finite element analysis indicates that CQUL210 has higher structural performance than DU93-W-210. The method of this

收稿日期: 2015-05-21.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2012AA051301); 国家自然科学基金项目(51175526).

作者简介: 陈进(1956-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 可再生能源装备设计理论与方法.

E-mail: chenjin413@cqu.edu.cn

study can be applied to increase the wind capturing power and reduce the mass of the turbine blade.

Key words: mechanical design; wind turbine airfoil; integrated design; genetic algorithm; aerodynamic performance; structural performance

0 引 言

风力机叶片是风电机组的核心部件,是不同翼型沿展向积迭而成,因此,叶片的捕风能力和结构特性都与翼型紧密相关,翼型的设计显得至关重要。自 20 世纪后期开始,国外学者开始专注于风力机专用翼型系列的研究设计,目前荷兰、丹麦、瑞典和美国的翼型系列已广泛应用于风力机叶片的设计中^[1-4]。Seppehr 等^[5]用 bezier 曲线表征翼型型线对翼型进行了优化设计,在提高翼型气动性能的同时降低了翼型的噪音。Bak 等^[6]通过对多个翼型族对比分析发现:对箱型主梁的叶片截面,主梁变宽,翼型结构性能提高,气动性能降低;翼型相对厚度减小,翼型结构性能降低,气动性能提高。国内也有许多学者开始专注风力机翼型的设计,黎作武等^[7]采用在初始翼型上叠加平滑扰动的方法设计出 BH W-400 翼型,运用 Eppler 反设计方法设计了 BUAA-W2-400 翼型。陈进等^[8]提出了一种基于广义泛函和保角变换理论的翼型参数化集成表达方法并设计出相对厚度为 18%,气动性能更为优越的翼型;另外还有一些学者对风力机翼型的优化设计做出了贡献^[9-12]。

作者在对风力机进行研究时发现,叶片的结构变形会影响风轮的捕风性能,过大的变形甚至会造成叶片与塔架碰撞,而翼型是构成叶片的基本元素,不仅影响叶片的气动性能,对叶片的结构性能也将产生影响。目前学者在设计翼型时,只考虑翼型型线对叶片气动特性的影响,并未考虑其对叶片结构特性的影响,尽管有学者提出设计翼型时需综合考虑气动和结构性能,但目前鲜有学者提出合理可行的同时考虑气动和结构性能的翼型设计方法^[6]。在此基础上,本文提出了风力机专用翼型的气动与结构一体化设计方法,结合西奥道生理论和 B 样条曲线对风力机翼型进行参数化表达,以翼型气动和结构性能最优为目标,建立了翼型优化数学模型;运用改进的遗传算法对相对厚度为 21% 的风力机翼型型线进行优化设计。优化得到相对厚度为 21% 的新翼型 CQUL210,将新设计的翼型与现有知名翼型

DU93-W-210 进行对比分析,验证新方法的正确性和可行性。

1 西奥道生理论和 B 样条曲线

基于保角变换理论^[13,14],通过调整复平面 z 上圆心的位置,利用 Joukowski 变换(见式 1)则可在另一复平面 ξ 上得到一个类似翼型的流线型图形(见图 1)。

$$\xi = F(z_c) = z_c + a^2/z_c \quad (1)$$

式中: z_c 为 z 平面上的圆; a 为翼型弦长的 1/4。

为了保证翼型尖尾缘特性, z 平面上的圆需通过 $(a, 0)$ 点,于是平面 ξ 上的翼型坐标表示为:

$$\begin{cases} x = (r + a^2/r)\cos\theta \\ y = (r - a^2/r)\sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: x, y 分别为翼型的横、纵坐标; r 为 z 平面上圆 z_c 的矢径; θ 为幅角。

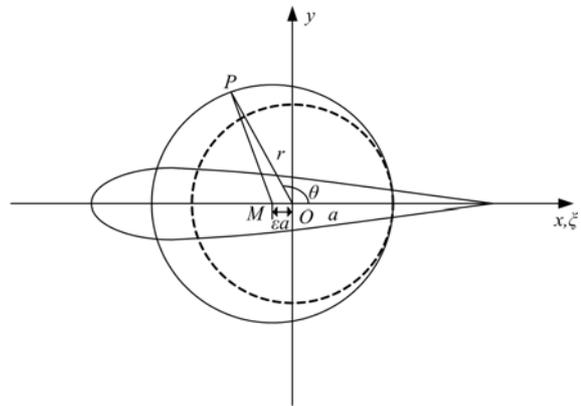


图 1 儒可夫斯基翼型变换

Fig. 1 Joukowski conformal transformation

在此基础上,西奥道生提出^[15]:一个已有的翼型根据 Joukowski 反变换,所得到的图形可能是一个接近于圆的拟圆。

基于西奥道生理论,文中提出一个拟圆表达式:

$$z_c = a\rho(\theta)\exp(i\theta) \quad (3)$$

式中: $a\rho(\theta)$ 为拟圆的矢径 r ;通过将圆心 M 偏移 ea 后,运用 Joukowski 反变换便能得到不同厚度、弯度、前缘半径及后缘夹角的翼型。

根据以上变换理论,采用三次 B 样条曲线来表示拟圆矢径:

$$\begin{cases} r(u) = \sum_{i=0}^8 N_{i,3}(u) P_i, u_0 \leq u \leq u_{12} \\ U = \{u_0, u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $N_{i,3}(u)$ 为 B 样条曲线基函数,通过式(5)求得:

$$\begin{cases} N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,2}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+1}-u_i} N_{i,1}(u) + \frac{u_{i+2}-u}{u_{i+2}-u_{i+1}} N_{i+1,1}(u) \\ N_{i,3}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+2}-u_i} N_{i,2}(u) + \frac{u_{i+3}-u}{u_{i+3}-u_{i+1}} N_{i+1,2}(u) \end{cases} \quad (5)$$

联立式(1)(4)即结合西奥道生理论和 B 样条曲线的风力机翼型设计方法理论,并通过改变控制点的位置,就能得到不同类型的翼型。

2 翼型截面特性

美国可再生能源实验室开发了专门用于计算复合材料叶片截面性质的软件 Precomp,其优点是可精确计算截面的挥舞刚度、摆振刚度和扭转刚度^[16];缺点是在使用时,需要将叶片内部结构和铺层等数据录入,工作量相对较大。文中利用翼型截面极惯性矩可以衡量截面抵抗变形能力的特点,编写 Matlab 程序求解翼型截面极惯性矩,从而得到翼型截面的结构性能。在计算翼型截面特性时,本文假设翼型内部各处厚度一致,截面材料为单一均匀材料,如图 2 所示。

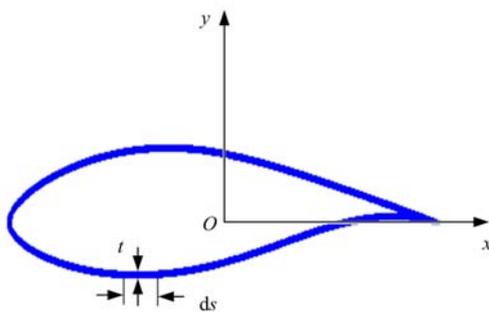


图 2 翼型截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of airfoil section

根据材料力学知识,图 2 中翼型绕 y 轴和 x 轴的静矩分别为:

$$\begin{cases} S_x = \int_A y dA \\ S_y = \int_A x dA \end{cases} \quad (6)$$

式中: A 为翼型截面面积。

翼型重心坐标为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{S_y}{A} \\ y_c = \frac{S_x}{A} \end{cases} \quad (7)$$

绕过重心的截面惯性矩分别为:

$$\begin{cases} I_x = \int_A y^2 dA \\ I_y = \int_A x^2 dA \end{cases} \quad (8)$$

翼型截面为薄壁闭室截面,其扭转惯性矩^[17]为:

$$J = 4A^2 \int \frac{ds}{t} \quad (9)$$

联立式(6)~(9),可得翼型截面弯曲和扭转惯性矩。对于弹性均匀材料,截面惯性矩是衡量截面抵抗变形的一个重要参数,截面惯性矩越大,截面就越不易变形,即截面刚度越大。截面刚度与截面惯性矩成正比关系,因此,通过对比翼型截面惯性矩可比较翼型截面刚度。

3 优化模型建立

3.1 目标函数

翼型的升力与阻力的比值(升阻比)是评价风轮的一个重要参数,直接影响风轮的风能利用率。风力机叶片在高空、全天候条件下工作,其表面长期受到沙尘、暴雨、冰霜等侵蚀而变得粗糙,特别是翼型前缘受污染后,翼型的升阻比会大幅降低,文中分别用自由转捩工况和固定转捩工况模拟光滑条件和粗糙条件。

随着风力发电机输出功率的不断提高,风轮机叶片的尺寸也越来越大。翼型的截面属性直接影响叶片的刚度,提高翼型的截面刚度,有助于在设计叶片结构时减轻叶片质量,从而降低叶片的制造成本。

综合考虑上述因素,将翼型自由转捩和固定转捩时的最大升阻比、翼型弯曲和扭转惯性矩作为优化目标,目标函数为:

$$f(X) = \max(\mu_1 c_l / c_d + \mu_2 c'_l / c'_d + \mu_3 I) \quad (10)$$

式中: c_l, c_d 分别为翼型自由转捩时升力系数和阻力系数; c'_l, c'_d 分别为翼型固定转捩时升力系数和阻力系数; I 为翼型截面惯性矩,计算目标函数时分别将弯曲和扭转惯性矩缩放至同等数量级并求和; μ_1, μ_2 分别为翼型自由转捩和固定转捩时

升阻比的权重; μ_3 为翼型截面惯性矩的权重; $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \in [0, 1]$ 且 $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$ 。

3.2 设计变量

结合西奥道生理理论和 B 样条曲线进行参数优化时,为了更好地控制拟圆矢径,在拟圆矢径曲线上选取 8 个控制点作为优化设计的变量:

$$X = (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8) \quad (11)$$

3.3 约束条件

为保证生成的型线具有翼型的基本形状特征,设定变量边界约束条件为:

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \quad (12)$$

翼型厚度是翼型气动性能和结构性能的一个重要指标,文中设计翼型相对厚度为 21%,则翼型厚度约束设定为:

$$0.205 \leq t_{th} \leq 0.215 \quad (13)$$

为了降低粗糙条件对翼型升阻比的影响,应对翼型升力系数的粗糙度敏感性进行约束。在设计攻角范围(文中为 $5^\circ \sim 17^\circ$)内,翼型升力系数需满足如下条件:

$$c_l - c_l' \leq 0.2 \quad (14)$$

风力机运转时遇到风速突然增大会发生失速,造成升力急剧减小。为了减小失速对风力机的影响,即保证风力机具有较好的失速性能,需对翼型升力系数作如下约束:

$$c_{l_{\max}} - c_{l_{\text{avg}}} < 0.08 \quad (15)$$

式中: $c_{l_{\max}}$ 为自由转捩时翼型最大升力系数; $c_{l_{\text{avg}}}$ 为自由转捩时翼型在设计攻角范围内失速后升力系数的平均值。

结合风力机运转时的扭矩特性,并确保设计翼型具有较高的与其他翼型相互兼容的能力,翼型最大厚度的弦向位置 L_{\max} 应满足:

$$0.24 \leq L_{\max} \leq 0.35 \quad (16)$$

4 翼型优化分析

4.1 优化方法

标准的遗传算法在使用时有两个缺陷:①随机产生初始种群,易产生不良个体,不利于优化收敛;②在迭代过程中,交叉和变异算子都是在一定的概率下进行搜索,易产生退化现象。基于此,文中对标准遗传算法作如下改进:①增加对初始种群的筛选,要求初始种群内 90% 以上个体满足优化模型的约束条件;②迭代过程中,增加对交叉变异算子概率的控制,使其随着迭代进程发生改变,防止个体产生退化。

运用已建立的优化设计数学模型,采用改进的遗传算法,对相对厚度为 21% 的翼型型线进行优化设计,运用 RFOIL 软件求解翼型气动性能。通过多次迭代求解,得到风力机专用翼型 CQUL210,新翼型型线如图 3 所示。最大相对厚度为 21%,其位置在弦向位置 33% 处,新翼型为钝尾缘特性,有较好的结构强度。

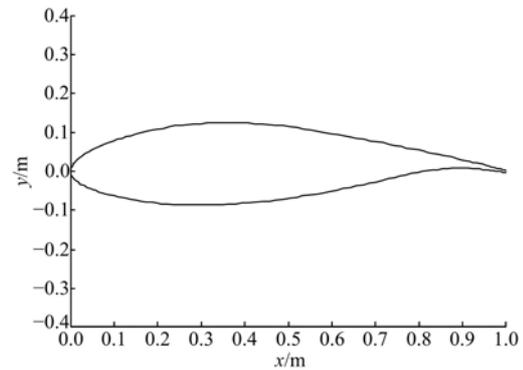
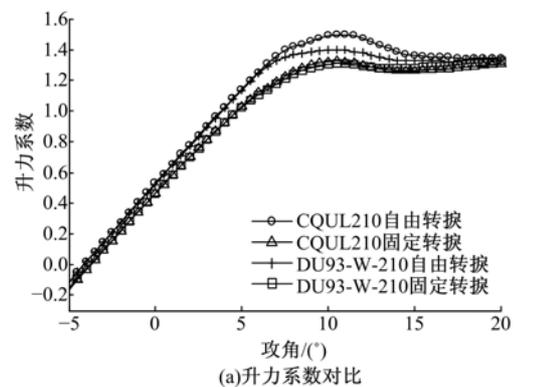


图 3 CQUL210 翼型型线

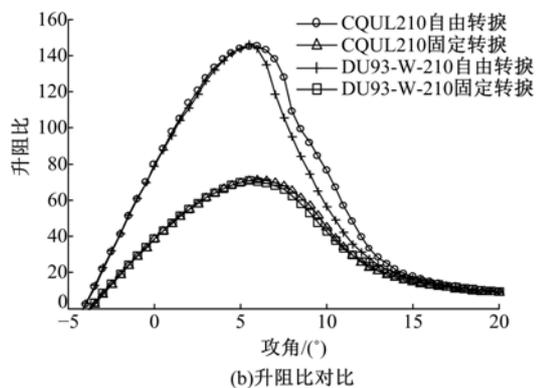
Fig. 3 Airfoil profile of CQUL210

4.2 气动性能对比

将新设计的翼型与相同厚度的荷兰知名翼型 DU93-W-210^[2]作气动特性比较分析。图 4 为新



(a) 升力系数对比



(b) 升阻比对比

图 4 两种翼型气动特性对比

Fig. 4 Comparison of aerodynamic performance of two kinds of airfoils

翼型 CQUL210 和 DU93-W-210 翼型在相同运行工况下($Re=2 \times 10^6$, $Ma=0.13$)的气动特性对比图。表 1 给出了两种翼型的气动特性数据对比。结合图 4 和表 1 可以看出,CQUL210 翼型在自由转捩和固定转捩条件下的升力系数和升阻比均高于 DU93-W-210 翼型。自由转捩时,最大升力系数和最大升阻比分别为 1.496 和 145.6,与 DU93-W-210 翼型相比分别提高 7.01% 和 1.11%;固定转捩下,最大升力系数和最大升阻比分别为 1.324 和 71.37,相比 DU93-W-210 翼型分别提高 1.22% 和 1.44%。结果表明,CQUL210 翼型在气动特性方面比 DU93-W-210 翼型更优越。

表 1 翼型气动性能对比

Table 1 Comparison of airfoils' aerodynamic performance

翼型名称	自由转捩		固定转捩	
	C_{lmax}	$\left(\frac{C_l}{C_d}\right)_{max}$	C'_{lmax}	$\left(\frac{C'_l}{C'_d}\right)_{max}$
DU93-W-210	1.398	144.0	1.308	70.36
CQUL210	1.496	145.6	1.324	71.37

4.3 结构性能对比

对翼型进行优化时,为了提高收敛速度,并未按照叶片实际内部结构计算翼型截面特性。因此,为了验证优化后翼型的结构性能,建立了一个分析翼型结构性能的叶片有限元模型,如图 5 所示。叶片总长 24 m,分为 3 部分,分别为 AB、BC 和 CD 三段,AB 段为叶根,采用相对厚度为 21% 的翼型;CD 段为叶尖,截面为圆;BC 段截面翼型相对厚度为 21%~100%。该叶片各截面沿展向扭角为零,叶片内部结构按照实际构造铺设,没有腹板。叶片的叶根和叶尖位置与传统叶片相反,其目的是保证叶片施加载荷部位完全一致,不会因为翼型改变而导致所施加载荷发生变化。

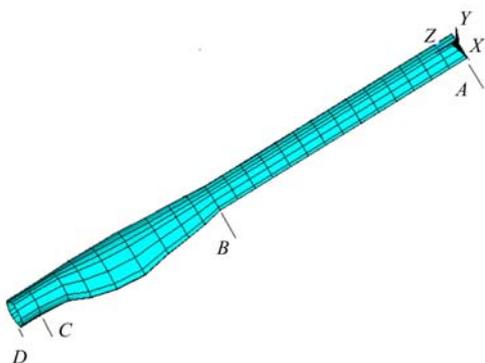


图 5 叶片有限元模型

Fig. 5 Finite element model of blade

对比分析相对厚度为 21% 的不同翼型时,只需将 AB 段翼型替换为需对比的翼型,并对叶根截面 A 作全约束处理,在 CD 段分别单独施加沿 Y 向、X 向和 Z 向的相同大小的载荷,然后对比截面 B 在挥舞、摆振和扭振方向的位移量便可比较翼型截面刚度的大小。表 2 为施加相同载荷时 CQUL210 翼型和 DU93-W-210 翼型在各方向上位移的对比。

表 2 位移对比

Table 2 Comparison of displacement

翼型	挥舞位移/m	摆振位移/m	扭振位移/(°)
DU93-W-210	1.013	0.135	2.407
CQUL210	1.003	0.133	2.336
位移差异/%	-1	-1.48	-2.95

由表 2 可知,在其他条件一样的情况下,用 CQUL210 翼型替换的叶片在挥舞、摆振和扭振方向的位移量均小于用 DU93-W-210 翼型替换的叶片,特别是扭振位移量减小了 2.95%,结构特性提高 2.95%。新设计的 CQUL210 翼型的结构特性强于 DU93-W-210 翼型。

分析结果表明,采用新方法设计的翼型气动性能和结构性能同时得到提高。

5 结 论

(1) 基于保角变换理论,提出了风力机专用翼型的气动结构一体化设计方法。新方法结合西奥道生理论和 B 样条曲线,更加准确地控制翼型型线方程;计算截面特性时简化了翼型截面模型,提高了翼型收敛速度,为翼型气动结构设计提供了新思路。

(2) 以翼型气动和结构性能为优化目标,建立了翼型优化数学模型,采用改进的遗传算法和 RFOIL 软件、Matlab 软件对翼型型线进行优化设计,进而得到相对厚度为 21% 的新翼型 CQUL210,与知名翼型 DU93-W-210 相比,其气动和结构性能均更加优越。文中所设计翼型对提高叶片捕风能力和减轻叶片质量具有重大意义,为下一步叶片设计奠定了良好的基础。

参考文献:

[1] Bjork A. Coordinates and calculations for the FFA-W1-xxx, FFA-W2-xxx and FFA-w3-xxx series of airfoils for horizontal axis wind turbines[R]. Stockholm, Sweden: FFATN, 1990.

- [2] Fuglsang P, Bak C. Development of the Ris ϕ wind turbine airfoils[J]. *Wind Energy*, 2004, 7(2): 145-162.
- [3] Tangle J L, Somers D M. NREL airfoil families for HAWT's[DB/OL]. [2015-05-15]. https://www.researchgate.net/publication/237213681_NREL_airfoil_families_for_HAWT%27s.
- [4] Timmer W A, van Rooij R P J O M. Summary of the delft university wind turbine dedicated airfoils [C]// AIAA Paper, 20030.
- [5] Sepehr S, Arash H. Multi-objective optimization of airfoil shape for efficiency improvement and noise reduction in small wind turbines[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2014, 6(5): 053105.
- [6] Bak C, Gaudern N, Zahle F, et al. Airfoil design: finding the balance between design lift and structural stiffness[C]// *Journal of Physics: Conference Series*, Copenhagen, Denmark, 2014, 524: 012017.
- [7] 黎作武, 陈江, 陈宝, 等. 风力机组叶片的先进翼型族设计[J]. *空气动力学报*, 2012, 30(1): 130-136.
Li Zuo-wu, Chen Jiang, Chen Bao, et al. Design of advanced airfoil families for wind turbines[J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2012, 30(1): 130-136.
- [8] 陈进, 王旭东, 王立存. 基于泛函的风力机翼型形状优化设计研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(5): 643-646.
Chen Jin, Wang Xu-dong, Wang Li-cun. Shape optimization of general airfoil profiles for wind turbines based on functional theory[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2010, 31(5): 643-646.
- [9] 陈进, 蒋传鸿, 谢翌, 等. 典型霜冰条件下的风力机翼型优化设计[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(7): 154-160.
Chen Jin, Jiang Chuan-hong, Xie Yi, et al. Optimization design of airfoil for wind turbine under typical rime icing conditions[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(7): 154-160.
- [10] Wang Quan, Chen Jin, Pang Xiao-ping, et al. A new direct design method for the medium thickness wind turbine airfoil[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 43: 287-301.
- [11] 廖庚华, 刘庆平, 陈坤, 等. 基于 CATIA 的轴流风机叶片仿生参数化建模[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2012, 42(2): 403-406.
Liao Geng-hua, Liu Qing-ping, Chen Kun, et al. Parameterized modeling of bionic blade of axial fan based on CATIA[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(2): 403-406.
- [12] 葛长江, 葛美辰, 梁平, 等. 仿生缝翼的曾升作用[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2014, 44(2): 387-391.
Ge Chang-jiang, Ge Mei-chen, Liang Ping, et al. High-lift effect of bionic slat[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44(2): 387-391.
- [13] Abbott I H, Albert E, Doenhofe V. *Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data* [M]. New York: Dover Publications, 1959.
- [14] 张石强. 风力机专用翼型及叶片关键设计理论研究[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2010.
Zhang Shi-qiang. Study on the key theory of wind turbine blade and dedicated airfoils[D]. Chongqing: College of Mechanical Engineering, Chongqing University, 2010.
- [15] Theodore T. *Theory of wing sections of arbitrary shape*[R]. Washington, DC, USA: National Advisory Committee for Aeronautics, 1931.
- [16] Bir G S. User's guide to PreComp[DB/OL]. [2015-05-15]. http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?filename=0&article=2311&context=utk_chanhonproj&type=additional.
- [17] Chun M, Niu Y. *Airframe Stress Analysis and Sizing*[M]. Hong Kong: Conmilit Press, 1999.