

文章编号:1000-582X(2012)11-040-07

改进的粒子群算法在翼型优化设计中的应用

陈进,汪泉,李松林,郭小峰
(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:建立了多目标风力机翼型型线优化模型,并采用改进的粒子群优化算法对多目标风力机翼型型线进行优化,设计出 4 种不同厚度的性能较好的风力机翼型。对 CQU-A18 和 CQU-A21 两种新翼型的气动特性与相同厚度典型的风力机翼型进行对比分析,结果表明,该翼型具有良好的气动特性,对翼型的前缘粗糙度不敏感,在主要攻角范围内,光滑和粗糙条件下,新翼型的升力系数和升阻比都要高,其气动特性具有显著的提高。

关键词:风力机翼型;粒子群算法;升力系数;阻力系数;粗糙度敏感性

中图分类号:TK83; TH12

文献标志码:A

Airfoil design using improved particle swarm optimization

CHEN Jin, WANG Quan, LI Songlin, GUO Xiaofeng

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the theory of standard particle swarm optimization (PSO), an improved particle swarm optimization algorithm is presented, and it has a better optimized performance than standard PSO. A multi-objective wind turbine airfoil shape optimization model is established and 4 kinds of different thick wind turbine airfoils with better performance are designed by using the improved PSO algorithm. The aerodynamic performance of the CQU-A18 and CQU-A21 airfoils are analyzed in detail compared with the commonly used wind turbine airfoil with the same thickness. The results show that the new airfoils show very good aerodynamic characteristics, and they are found to be very insensitive to leading edge roughness. The new airfoils exhibit the higher lift coefficient and larger lift/drag ratio in both smooth condition and rough condition at the main angle of attacks. The performances of the new airfoils show a significant improvement compared with the typical airfoils.

Key words: wind turbine airfoil; PSO algorithm; lift coefficient; drag coefficient; roughness sensitivity

对于风力机来说,准确地预测到风能捕获率和结构特性显得至关重要,但这些都依赖于翼型气动特性的设计。在风力机翼型气动设计过程中,一个关键的因素就是使用专用的风力机翼型来提高能源捕获率以及降低单位发电量成本。风力机翼型的发展在某种程度上来说是建立在低速翼型应用基础上的,例如滑翔机翼型、FX-77 翼型以及 NASA LS 翼

型等。为了适应风力机运行工况要求,从 20 世纪 80 年代中期国外开始研制风力机专用翼型,目前已经开发了多个系列的翼型,主要有丹麦的 RIS \emptyset 系列翼型^[1]、荷兰的 DU 系列翼型^[2];在国内,对风力机专用翼型设计的研究工作刚起步。白井艳等^[3]采用 NUMECA 软件中的 AUTOBLADE 模块进行翼型的几何造型,使用 XFOIL 进行气动优化与分析,

收稿日期:2012-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175526)

作者简介:陈进(1956-),男,重庆大学教授,博士研究生导师,主要研究方向为机械系统协同优化和可再生能源装备设计理念及方法,(E-mail)chenjin413@yahoo.com.cn。

并设计出风力机专用翼型族,该翼型系列具有良好的气动特性及几何兼容性;重庆大学王旭东等^[4-5]提出了一种基于广义泛函及儒科夫斯基保角变换的翼型参数化集成表达方法。该方法将近似于圆的图形通过儒科夫斯基保角变换生成翼型,改变其控制方程中的系数就能够控制翼型型线,通过这种方法,已优化出性能较好的翼型^[4-5],该方法的研究为中国自主研发新型风力机叶片奠定了良好的基础;另外还有一些国内外学者对翼型的设计优化做出了贡献^[6-10],都值得借鉴与研究。

然而笔者对翼型参数化表达方法进行研究发现,此方法所生成翼型的尾部大都较为平滑,尤其是对于中等厚度或者大厚度的翼型,尾缘部分上下表面的曲线均较为接近直线,弯度较小。也就是说,当控制变量为 6 时,控制方程对翼型形状的控制并不理想,很难再提高翼型的升力系数、升阻比等气动性能。因此,为了有效地更好地控制翼型的型线,笔者提出将控制变量增加到 12 个,建立了多目标翼型型线优化设计模型,寻求在更广的设计空间域内对翼型型线进行设计与优化;提出了一种改进的粒子群算法,并将其应用到基于权重系数的多目标风力机翼型型线优化设计中,给出了风力机翼型形状的多目标设计实例分析。

1 改进的粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 于 1995 年由美国电气工程师 Eberhart 和社会心理学家 Kennedy 基于鸟群觅食行为提出的^[11]。该算法通过鸟之间的集体协作使群体达到最优。此算法基于群体迭代,群体在解空间中随最优粒子进行搜索。其优势在于简单且容易实现,同时具有记忆功能。Shi 和 Eberhart^[12]中首次提出了惯性权重 ω 的概念,并对基本算法中的粒子速度更新公式进行了修正,以获得更佳的全局优化效果。之后一些学者在此基础上对粒子群算法做了进一步的改进与研究^[13-16],优化结果良好。笔者在研究中发现,惯性权重 ω 对寻优结果影响较大,因此提出一种反双曲余弦函数形式的非线性惯性权重表示法,其表达式为

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\operatorname{arcosh} k_{\max}} \times \operatorname{arcosh} k, \quad (1)$$

式中: ω_{\max} 为初始权重; ω_{\min} 为最终权重; k_{\min} 为最大迭代次数; k 为当前迭代次数。

另外标准的粒子群算法两个重要的概念是粒子的速度和位置更新公式,即

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + C_1 R_1 (P_i^k - X_i^k) + C_2 R_2 (P_g^k - X_i^k), \quad (2)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}, \quad (3)$$

式中: $i=1,2,\dots,m$; k 为迭代次数; C_1 、 C_2 为学习因子,根据经验一般取 $[0,2]$ 之间; R_1 、 R_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数; X_{ki} 为当前粒子群的位置; P_i^k 、 P_g^k 分别为当前局部最优解的位置和全局最优解的位置。

本文算法具体描述如下:

- 1) 设置参数,将粒子群初始化,以随机的方式求出每一粒子的初始位置与速度;
- 2) 根据目标函数的不同计算其适应度值以作为判断每一个粒子群的好坏的依据;
- 3) 找出每一粒子到目前为止的搜寻过程中最佳解,这个最佳解称为 Pbest;
- 4) 找出所有粒子到目前为止所搜寻到的整体最佳解,此最佳解称为 Gbest;
- 5) 根据式(1)、(2)、(3) 更新每一粒子的速度与位置;
- 6) 回到步骤 2,继续执行,直到获得一个令人满意的结果或符合迭代终止条件。

为了验证本改进粒子群算法的优化效果,现对 3 种测试函数进行优化,3 种测试函数描述如下。

1) Rosenbrock 函数。

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2). \quad (4)$$

2) Rastrigrin 函数。

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10). \quad (5)$$

3) Rriewank 函数。

$$f_3(x) = \frac{1}{4\ 000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1. \quad (6)$$

以上 3 个方程都有全局最小值,且理论最小值 $\min(f) = f(0,0,\dots,0) = 0$ 。当变量越多时,优化方法越难找到最优值,通常用上述函数方程作为评价优化算法好坏。

粒子群算法的基本参数设置:对于标准的粒子群算法,根据优化过程中的经验,惯性权重取 0.9,学习因子 C_1 、 C_2 均取 0.5,变量维数为 10,种群大小为 50,最大迭代次数为 1 000;对于改进的粒子群算法,为了便于比较,其他参数不变,仅将惯性权重常量改为反双曲余弦函数形式的非线性惯性权重,如式(1),为了在优化迭代开始具有多样性且迭代后期具有较快的收敛特性,在这里取初始权重为 1.2,最终权重为 0.6。

表 1 为根据不同目标函数编制的改进的粒子群

算法与标准的粒子群算法计算结果对比。最优值是运行 20 次中的最小值;平均最优解为运行 20 次最优值的平均值。由表 1 可以看出,改进后的粒子群算法的平均最优值要明显优于标准的粒子群算法,说明其稳定性要好于标准的粒子群算法,而且运行 20 次后的最优值也要好于标准的粒子群算法计算出来的结果。这为下面翼型优化设计理论奠定算法实现的基础。

表 1 测试函数结果对比

函数	算法	最优值	平均最优值
Rosenbrock	标准 PSO	3.160e-4	2.129 70
	改进 PSO	5.505e-5	0.542 86
σ Rastrigrin	标准 PSO	0.99496	6.218 51
	改进 PSO	8.054e-9	1.790 93
Griewank	标准 PSO	8.643e-9	0.040 36
	改进 PSO	5.071e-9	0.010 50

2 翼型型线优化设计

2.1 翼型参数表达理论

翼型的型线研究一般采用保角变换理论^[4],把一个平面的图形通过保角变换方法变换到另一个平面上去,成为另外一个图形。变换后的图形不仅取决于具体的变换公式,而且还与原来图形的位置相关。

平面 z 上的一个圆 z_c ,通过改变圆心的位置,利用儒可夫斯基变换式

$$\zeta = f(z_c) = z_c + a^2/z_c, \quad (7)$$

就能够变换成另一平面 ζ 上的一个翼型(如图 1 所示)。为了保证翼型后缘具有尖尾缘特性, z 平面上的圆需要通过 $x=a$ 点。其中, a 为 $1/4$ 翼型弦长。

ζ 平面上的翼型坐标可以表示为

$$\left. \begin{aligned} x &= (r + a^2/r) \cos \theta, \\ y &= (r - a^2/r) \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: x 为翼型横坐标; y 为翼型纵坐标; r 为翼型在平面 ζ 中的矢径; θ 为幅角。

但是实际的翼型形状并不是简单的变换。通过将实际翼型的逆向转换,可以看出转换的结果是一个近似的圆。将 z 表示为

$$z = a \exp(\varphi(\theta) + i\theta), \quad (9)$$

那么 $r = a \exp(\varphi(\theta))$, r 实际上是一个关于 θ 的函数。通过选取不同的 $\varphi(\theta)$ 就可以变换出不同的翼型。

根据以上的儒可夫斯基变换理论,基于泰勒级数思想,可将 $\varphi(\theta)$ 的广义泛函方程集成为

$$\begin{aligned} \varphi(\theta) &= a_1(1 - \cos \theta) + b_1 \sin \theta + a_2(1 - \cos \theta)^2 + \\ & b_2 \sin \theta + \dots + a_k(1 - \cos \theta)^k + \\ & b_k \sin^k \theta + \dots, k = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (10)$$

通过选取不同的 k, a_k, b_k , 就可以表达任意形状的翼型。一般情况下,公式中的 k 取到 3, 就足以很好地表达翼型形状。这样,控制变量为 6 个。

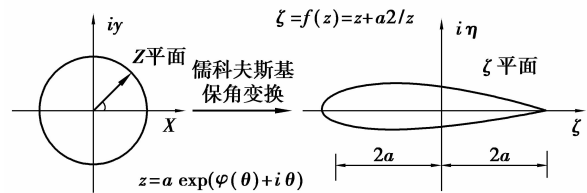


图 1 一般翼型的转化变化

这种翼型参数表示方法通过控制函数方程的系数就能够得到各种形状的翼型,并且具有良好的集成性与通用性。然而,笔者在采用这种方法研究翼型的过程中发现,此方法所生成的翼型的尾部大都较为平滑,尤其是对于中等厚度或者大厚度的翼型,尾缘部分上下表面的曲线均较为接近直线,弯度较小。图 2 给出了控制变量个数对翼型优化结果的影响。由图 2 可知,当控制变量为 6 时,控制方程对翼型形状的控制并不理想。为了较好地控制翼型形状曲线,尤其是翼型的尾缘部分,笔者提出将控制变量增多至 12 个,试图设计出如图虚线所示的翼型型线,其翼型尾缘呈现“S”型,这样有利于翼型的气动性能的提高。由于控制变量的增多,其变量的范围将很难界定,这给翼型的优化过程带来较大的难度,鉴于改进的粒子群算法在多变量优化方面所体现出来的优势,采用本文改进的粒子群算法对风力机翼型型线进行优化设计。

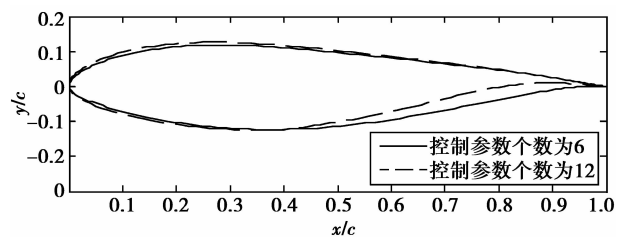


图 2 控制参数个数对翼型优化结果的影响

2.2 翼型型线优化模型

2.2.1 目标函数

主要设计目标以最大升阻比作为评判指标,在

设计雷诺数 $Re = 6 \times 10^6$ 和马赫数 $Ma = 0.15$ 的工况下,在光滑与粗糙度两种工况下,翼型在设计攻角 $\alpha = 6^\circ$ 以升阻比最大作为目标函数,即

$$f(x) = \max(\mu_1 \cdot c_l/c_d + \mu_2 \cdot c'_l/c'_d), \quad (11)$$

式中: μ_1, μ_2 分别为在光滑与粗糙条件下的权值系数, $\mu_1, \mu_2 \in [0, 1]$,且 $\mu_1 + \mu_2 = 1$,采用线性加权系数法,取 $\mu_1 = [0.10:0.05:0.90]$; $c_l/c_d, c'_l/c'_d$, 分别为翼型在光滑和粗糙状况下的升阻比。其中以自由转捩工况模拟光滑条件,以固定转捩工况模拟粗糙条件,采用吸力面处于 1% 弦长,压力面处于 10% 弦长位置固定转捩来模拟翼型最恶劣的粗糙条件^[2,17]。

2.2.2 设计变量

在翼型泛函集成理论分析的基础上,考虑到设计变量数目对翼型型线控制不利的影 响,控制变量

越多,对翼型的型线控制将越有利,在设计空间范围里将更能够优化得到性能较佳的翼型,但是,控制变量的增多,对变量范围的界定将变得更加困难,因此,为了能够较好地控制翼型型线,尤其是翼型尾缘位置的形状,选取翼型控制方程函数 $\varphi(\theta)$ 的第 1 到第 12 项系数作为优化设计的变量,确定设计变量为

$$\mathbf{X} = (a_1, b_1, b_2, b_2, a_3, b_3, a_4, b_4, a_5, b_5, a_6, b_6)^T. \quad (12)$$

2.2.3 约束条件

在风力机翼型优化分析过程中,当控制变量的值超过一定范围时,翼型的控制函数将不再具有翼型的形状特征,建立变量边界约束条件为

$$\mathbf{X}_{\min} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_{\max}. \quad (13)$$

设计参数的取值范围如表 2 所示。

表 2 优化变量的约束范围

变量	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4	a_5	b_5	a_6	b_6
最大值	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
最小值	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08

风力机的主要产生功率位置位于叶片展向约 75% 处,此处翼型的最大相对厚度一般在 18% 左右,要求翼型的升阻比较高,同时应该具有较低的表面粗糙度敏感性。因此,应用本文改进的粒子群算法分别选择了最大相对厚度为 15%、18%、21% 和 25% 4 种翼型进行优化设计,翼型厚度约束设定为

$$\frac{th}{c} = t \in [0.15 \sim 0.25]. \quad (14)$$

除了对翼型的厚度进行约束以外,还需对翼型的最大相对厚度所处的位置进行约束,这里将翼型的最大相对厚度所处的位置控制在

$$0.24 \leq L_{\max} \leq 0.35. \quad (15)$$

风力机翼型为低雷诺数翼型,翼型的前缘半径不能太小,这一要求通过翼型 10% 弦长处的上下翼面点进行控制:

$$t|_{x=0.1} \geq 0.08. \quad (16)$$

3 翼型优化实例分析

采用编制的改进多目标粒子群算法,对风力机翼型进行优化,其中翼型的气动性能采用专用风力机翼型分析软件 RFOIL^[2] 进行分析,将改进的粒子群算法程序与 RFOIL 软件进行耦合计算。算法的基本参数保持不变,如前所述,翼型优化过程中

具体算法流程如图 3 所示。给定目标函数,设计变量,约束条件等,优化出了 4 种性能较好的风力机翼型,分别取名为 CQU-A15, CQU-A18, CQU-A21, CQU-A25。此时 4 种不同厚度的翼型对应的权值系数 μ_1 分别为 0.40, 0.40, 0.40 和 0.25。图 4 给出了这些翼型的轮廓线,由图 4 可以看出,由于控制变量的增多,能够较好地控制翼型的型线,尤其是翼型的尾缘部分,四种新翼型的尾缘部分均有较大的弯度,呈现出“S”形状,这将有利于翼型气动性能的提高。

限于篇幅有限,选择 CQU-A18 和 CQU-A21 两种新翼型来进行分析。如表 3 所示,为两种新翼型的几何特性参数。两种新翼型与其他风力机翼型均具有良好的结构兼容性。翼型具有钝尾缘特性,这样是考虑到叶片的制造工艺及结构强度。

表 3 两种翼型的几何特性

翼型名称	最大厚度	弦向坐标	最大弯度	弦向坐标
CQU-A18	0.180 43	0.320	0.042 78	0.519
CQU-A21	0.209 67	0.318	0.033 67	0.674

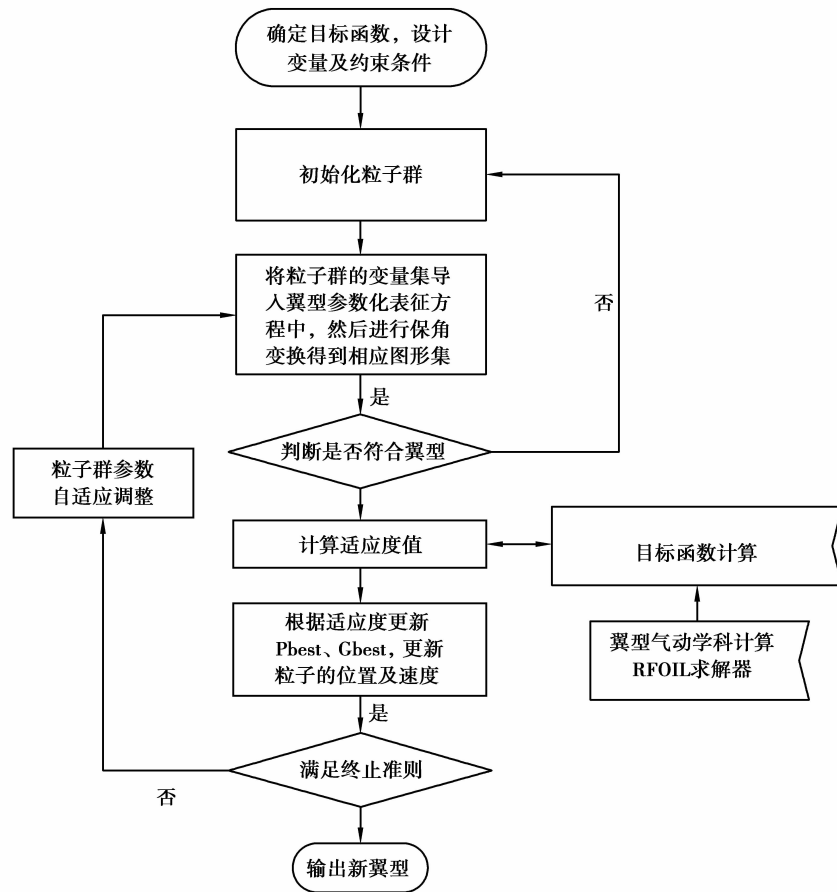


图 3 改进粒子群算法翼型优化设计流程图

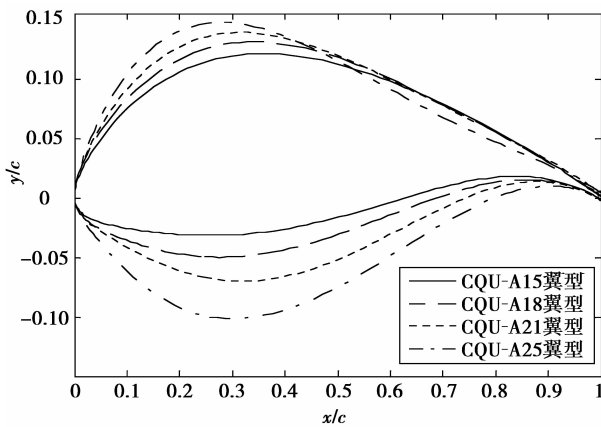


图 4 4 种新翼型的型线轮廓

图 5 为 CQU-A18 新翼型与相同厚度的风力机翼型 NACA-64-418 在相同条件下 ($Re=6 \times 10^6$, $Ma=0.15$) 的气动性能对比分析图, 表 4 给出了其关键的气动参数对比值。相比 NACA-64-418 翼型, 新翼型在自由转捩工况下的最大升力系数为 1.7423 (攻角 12° 的位置), 提高了 23.928%, 最大升阻比为 199.158 (攻角 6° 的位置), 提高了 39.870%; 在固定转捩工况下的最大升力系数为

1.709 (攻角 12° 的位置), 提高了 23.839%, 最大升阻比为 105.946 (攻角 6° 的位置), 提高了 19.640%。

图 6 为 CQU-A21 新翼型与相同厚度的风力机翼型 FFA-W3-211 在相同条件下 ($Re=6 \times 10^6$, $Ma=0.15$) 的气动性能对比分析图, 表 5 给出了其关键的气动参数对比值。相比 FFA-W3-211 翼型, 新翼型在自由转捩工况下的最大升力系数为 1.724 (攻角 11° 的位置), 提高了 6.982%, 最大升阻比为 187.384 (攻角 6° 的位置), 提高了 11.360%, 随着攻角的增大, 升阻比减小得很快, 这是因为随着翼型的失速, 阻力系数迅速增大, 进而造成了升阻比的大幅度降低; 在固定转捩工况下的最大升力系数为 1.685 (攻角 11° 的位置), 提高了 12.940%, 最大升阻比为 99.231 (攻角 7° 的位置), 提高了 5.470%。

从以上对比分析表明: 这两种新翼型相比传统翼型具有更高的升阻比和升力系数, 具有较低的粗糙度敏感性。设计出来的新翼型相比风力机典型翼型而言, 所考查性能指标都有所提高, 验证了该改进算法的可行性。

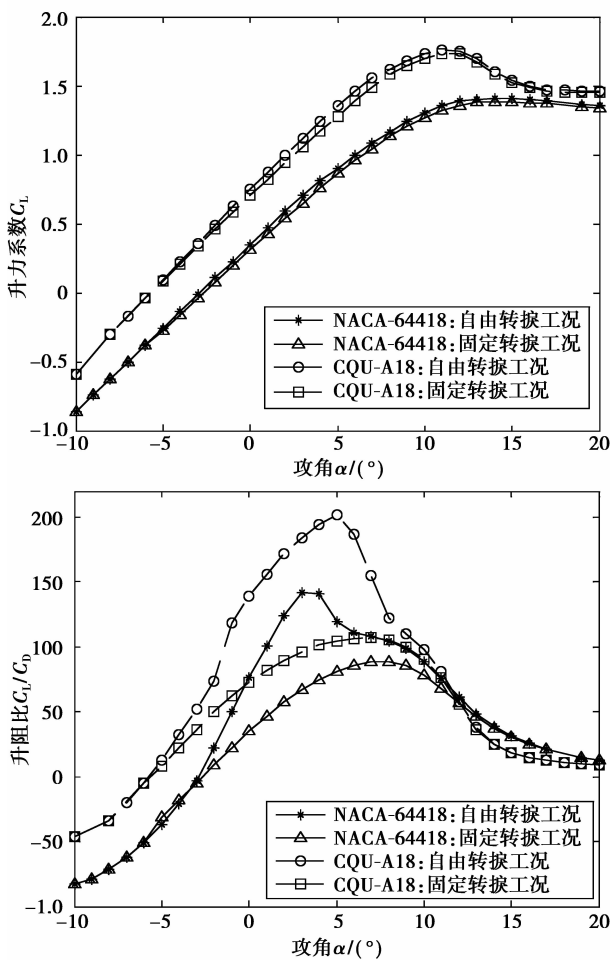


图 5 CQU-A18 翼型与 NACA-64-418 气动特性对比

表 4 翼型主要气动性能参数对比

翼型名称	自由转捩		固定转捩 $X_{trs}=0.01; X_{trp}=0.1$	
	C_{Lmax}	C_L/C_{Dmax}	C_{Lmax}	C_L/C_{Dmax}
NACA-64-418	1.405 9	142.389 1	1.380 1	88.553 6
CQU-A18	1.742 3	199.158 2	1.709 0	105.945 7

表 5 翼型主要气动性能参数对比

翼型名称	自由转捩		固定转捩 $X_{trs}=0.01; X_{trp}=0.1$	
	C_{Lmax}	C_L/C_{Dmax}	C_{Lmax}	C_L/C_{Dmax}
FFA-W3-211	1.611 3	167.801 2	1.492 3	94.084 6
CQU-A21	1.723 8	187.384 2	1.685 4	99.230 8

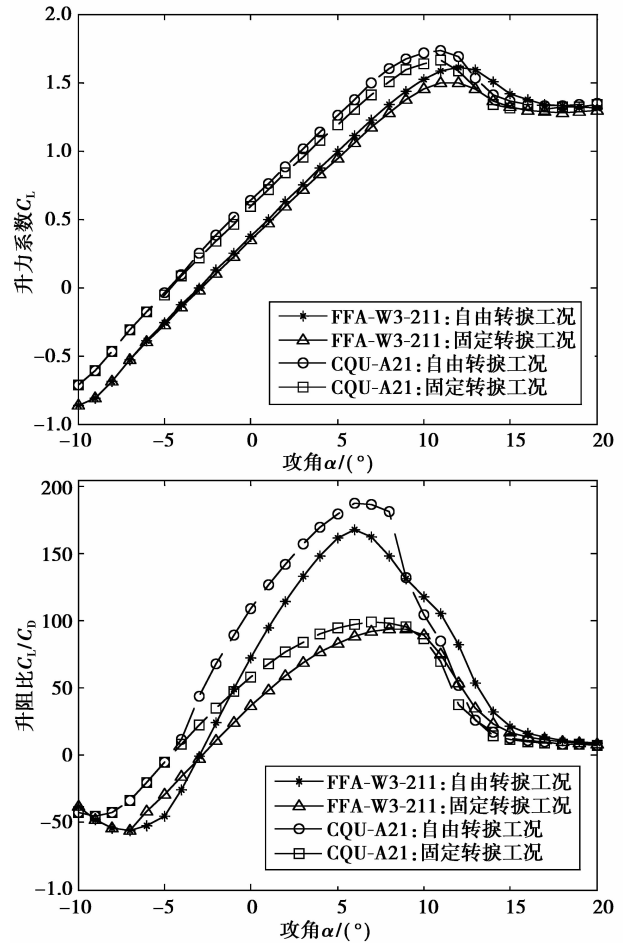


图 6 CQU-A21 翼型与 FFA-W3-211 气动特性对比

表征惯性权重,并应用改进的粒子群算法对 3 种测试函数进行极小值优化,其计算结果在稳定性、最优值方面要明显优于标准的粒子群算法。

2)对风力机翼型泛函参数化表达理论进行了深入的研究,研究发现当翼型控制变量较少时,对风力机翼型的型线控制并不理想,尤其是翼型尾缘附近的曲线较平直,不利于提高翼型的气动特性,因此提出了将控制变量增加到 12 个,以寻求在更广的设计空间域内对翼型型线进行设计优化;将改进的粒子群算法应用到基于权重系数的多目标风力机翼型线优化设计中,成功地求解多目标优化问题的全局 Pareto 最优解。

3)优化得出了 4 组不同厚度性能较优的新翼型,新翼型具有良好的几何兼容性。与目前典型的风力机翼型相比,在主要攻角范围内,翼面光滑和粗糙条件下新翼型的升力系数及升阻比都要高,翼型前缘粗糙度并不敏感。笔者完善了翼型型线集成设计理论,验证了提出的改进粒子群算法在风力机翼型设计中应用的可行性,为设计性能优越的风力机叶片奠定了理论基础。

4 结 论

1)在对粒子群算法进行优化的研究过程中,提出了一种具有非线性特性的反双曲余弦函数形式来

参考文献:

- [1] Fuglsang P, Bak C. Development of the Ris \varnothing wind turbine airfoils[J]. *Wind Energy*, 2004,7(2):145-162.
- [2] Timmer W A, Rooij R V. Summary of the delft university wind turbine dedicated airfoils[J]. ASME, 2003, 125: 488-496.
- [3] 白井艳, 杨科, 李宏利, 等. 水平轴风力机专用翼型族设计[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(4):589-592.
BAI Jingyan, YANG Ke, LI Hongli, et al. Design of the horizontal axis wind turbine airfoil family[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(4): 589-592.
- [4] 王旭东, 陈进, 张石强. 风力机叶片翼型型线集成设计理论研究[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(2): 211-228.
WANG Xudong, CHEN Jin, ZHANG Shiqiang. Integration study on airfoil profile for wind turbines[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2009, 20(2): 211-228.
- [5] Shen W Z, Wang X D, Chen J, et al. Airfoils and methods for designing airfoils: US, EP2010/056810 [P/OL]. 2010-12-02[2010-12-25]. <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Airfoils-method-designing/WO2010136357.html>.
- [6] 李静, 高正红, 黄江涛, 等. 基于分布式粒子群算法的翼型优化设计[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(4): 464-469.
LI Jing, GAO Zhengong, HUANG Jiangtao, et al. Airfoil optimization based on distributed particle swarm algorithm [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(4): 464-469.
- [7] 戴韧, 王宏光, 杨爱玲, 等. 基于气动反问题的风力机翼型优化设计[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(9): 1501-1504.
DAI Ren, WANG Hongguang, YANG Ailing, et al. Airfoil optimization based on aerodynamic inverse problem for wind turbine[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(9): 1501-1504.
- [8] 杜磊, 宁方飞. 低速叶型气动反问题设计方法[J]. *航空学报*, 2011, 32(7):1180-1188.
DU Lei, NING Fangfei. Aerodynamic inverse design method for low mach number airfoils [J]. *Acta aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(7): 1180-1188.
- [9] Singh R K, Ahmed M R. Design of a low reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines [J]. *Renewable Energy*, 2011,42: 66-76.
- [10] Henriques J C C, Silva F M D, Estanqueiro A L, et al. Design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load inverse method[J]. *Renewable Energy*. 2009,34(12): 2728-2734.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, November 27-December 1, 1995, Perth, WA. Piscataway: IEEE Press, 1995, 4: 1942-1948.
- [12] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, May 4-9, 1998, Anchorage, AK. Piscataway: IEEE Press, 1998:69-73.
- [13] Shi Y, Eberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[C]// *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*, May 27-30, 2001, Seoul, Korea. Piscataway: IEEE Press, 2001,1:101-106.
- [14] Chatterjee A, Siarry P. Nonlinear inertia weight variation for dynamic adaptation in particle swarm optimization[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(3): 859-871.
- [15] 韩力, 辛懋, 罗辞勇. 基于粒子群优化算法的永磁直流电动机设计[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(5): 535-538.
HAN Li, XIN Mao, LUO Ciyong. Design of permanent magnet direct current motors based on a particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(5): 535-538.
- [16] Shen Q, Shi W M, Kong W, et al. A combination of modified particle swarm optimization algorithm and support vector machine for gene selection and tumor classification[J]. *Talanta*, 2007, 71(4): 1679-1683.
- [17] Timmer W A, Schaffarczyk A P. The effect of roughness at high Reynolds numbers on the performance of airfoil DU 97-W-300Mod [J]. *Wind Energy*, 2004, 136(7): 295-307.

(编辑 张 苹)