

DOI: 10.19666/j.rlfed.202307112

# 风电 NACA63418 翼型参数化建模及优化

张照煌, 王丙申, 贾晓娜  
(华北电力大学能源动力与工程学院, 北京 102206)

[摘要] 风力发电机的风轮气动效率与优良翼型的气动性能密切相关。以风力机传统翼型为研究对象, 结合翼型参数化建模及自适应遗传算法, 寻优搜索得到高性能优化翼型。比较了 CST 法和改进的 Hicks-Henne 型函数法对于 NACA63418 传统翼型的拟合精度, 进而选用 Hicks-Henne 型函数法对 NACA63418 翼型进行参数化建模。通过自适应遗传算法和 XFOIL 软件耦合实现翼型气动特性的自动计算, 提高翼形的设计效率, 为翼型的理论设计拓宽了思路。

[关键词] 翼型; 气动性能; 参数化建模; 自适应遗传算法

[引用本文格式] 张照煌, 王丙申, 贾晓娜. 风电 NACA63418 翼型参数化建模及优化[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 86-92.  
ZHANG Zhaohuang, WANG Bingshen, JIA Xiaona. Parametric modeling and optimization of NACA63418 airfoil[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 86-92.

## Parametric modeling and optimization of NACA63418 airfoil

ZHANG Zhaohuang, WANG Bingshen, JIA Xiaona  
(School of Energy Power and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In wind turbines, the aerodynamic efficiency of wind turbines is closely related to the aerodynamic performance of excellent airfoils. Taking the conventional airfoil of wind turbine as the research object, combined with airfoil parametric modeling and self-adaptive genetic algorithm, the high performance optimized airfoil is obtained. The fitting accuracy of the conventional NACA63418 airfoil is compared between the CST method and the improved Hicks-Henne type function method, and then the Hicks-Henne type function method is selected to model the NACA63418 airfoil. The automatic calculation of aerodynamic characteristics of airfoil is realized by the coupling of self-adaptive genetic algorithm and XFOIL software, and the design efficiency of airfoil is improved. It broadens the train of thought and improves the design efficiency for the theoretical design of airfoils.

**Key words:** airfoil profile; aerodynamic performance; parametric modelling; self-adaptive genetic algorithm

以风力发电和光伏发电为主的可再生能源已经成为我国发展新能源的必然趋势<sup>[1]</sup>。风力机叶片是由展向不同位置的翼型堆叠而成, 传统的水平轴风力机常用翼型家族包括 NACA 44XX、NACA 23XXX、NACA 63XXX 和 NASA LS 系列翼型<sup>[2]</sup>。针对翼型的研究, 上世纪 80 年代后美国、丹麦等国家先后开展了风力机先进翼型的研究, 比较著名的有美国 NERL-S 系列<sup>[3]</sup>、丹麦 RISØ 系列<sup>[4]</sup>、荷兰 DU 系列<sup>[5]</sup>、瑞典 FFA-W 系列<sup>[6]</sup>等。国产风力机翼

型族有西北工业大学乔志德等<sup>[7]</sup>设计的 NPU-WA 翼型族, 以及中科院工程热物理所白井艳等<sup>[8]</sup>开发的 CAS 系列。其中, CAS 系列采用正向设计方法需要搜集大量的翼型数据, 不断反复拟合优化, 但仍会遗漏很多优化方案<sup>[9]</sup>; NPU-WA 翼型系列采用反向设计方法。随着优化算法的迅速发展, 正向设计法成为主流<sup>[10]</sup>。

一般来说, 叶片翼型设计主要有翼型气动性能计算和翼型设计优化 2 部分。现代设计中常用计算

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2019QN021)

Supported by: Special Funds for Basic Scientific Research in Central Colleges and Universities (2019QN021)

第一作者简介: 张照煌 (1963), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为先进施工装备及技术 and 可再生能源利用技术, zh\_zhaohuang@163.com。

通信作者简介: 王丙申 (1992), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源利用技术和先进施工装备及技术, 565129224@qq.com。

流体力学 (CFD-FLUENT) 或 XFOIL 软件对风力机翼型进行气动性能计算。CFD-FLUENT 计算模型将研究对象划分为计算网格, 对每个网格都进行 N-S 方程离散化求解, 计算时间巨大<sup>[11]</sup>。基于面元法的 XFOIL 软件能较准确地进行翼型气动计算, 也发展得比较成熟, 得到了工程应用的认可, 且计算速度较快, 特别适用于快速迭代和参数化研究, 可大幅缩短翼型开发周期<sup>[12]</sup>。

本文采用正向设计法, 在 NACA 翼型的基础上, 使用改进的 Hicks-Henne 型函数法进行参数化建模<sup>[13-14]</sup>, 再通过自适应遗传算法调用 XFOIL 软件搜索找到高性能的优化翼型, 尝试探索用时较少、效率较高的翼型设计路径, 为翼型设计拓宽思路, 提供借鉴。

## 1 翼型优化

叶片的主要功率产生区位于 75% 展长附近翼型<sup>[15]</sup>, 因此, 本文采用叶尖位置气动性能要求较高的 NACA63418 作为基础翼型。将翼型气动计算软件和数值优化算法结合起来, 通过改变翼型几何描述参数找到气动特性最佳的翼型几何形状。首先, 分别采用 CST 法<sup>[16]</sup>和改进的 Hicks-Henne 型函数法对翼型参数化建模, 并比较这 2 种方法的表达精度。然后, 利用对风力机翼型的计算较为准确和用时较少的 XFOIL 软件<sup>[17-18]</sup>作为气动特性求解器; 最后结合自适应遗传算法, 以翼型特定攻角下的最大升阻比为优化目标来找到设计翼型。

### 1.1 翼型参数化建模及精度对比

为保证翼型外形足够光滑连续, 翼型设计前期需要对翼型参数化建模。现有多种表征翼型几何形状的参数化方法, 这些方法各有特点, 适用不同场合。以传统翼型 NACA63418 为例, 选择 CST 方法和改进的 Hicks-Henne 型函数分别对翼型参数化建模, 分析不同阶数下的拟合精度, 找到适用设计翼型的建模方法。

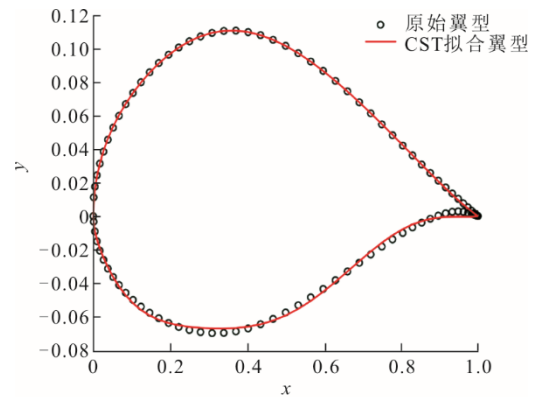
翼型的参数化通常采用尽可能少的设计变量来达到较好控制翼型形状的效果。通过 CST 法和改进的 Hicks-Henne 型函数法对 NACA63418 翼型进行最小二乘拟合, 并对其表述精度。采用上下翼型线纵坐标的残差<sup>[19]</sup>来描述 2 种参数化方法的拟合精度。

$$e = y_i - y_{0i} \quad (1)$$

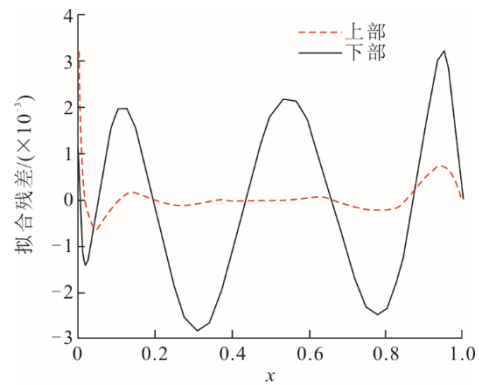
式中:  $e$  为拟合残差;  $y_i$  和  $y_{0i}$  分别为拟合翼型和基

准翼型的纵坐标。

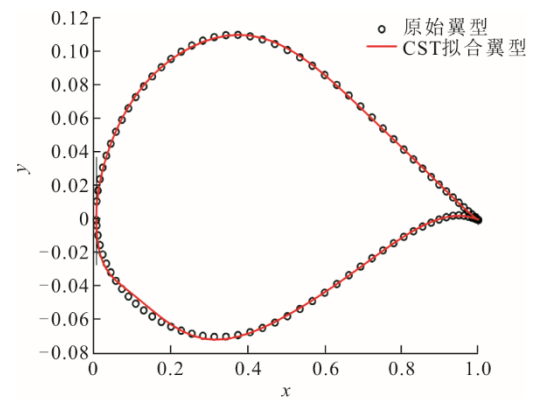
通过最小二乘求得不同阶数下的拟合精度, 结果如图 1、图 2 所示。



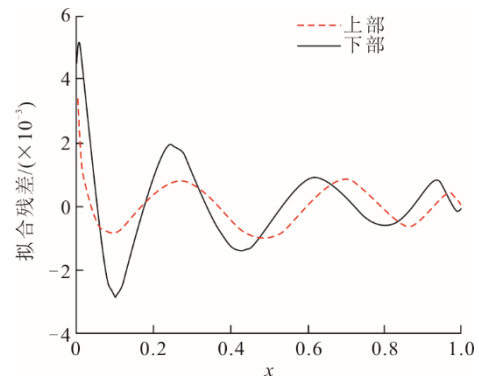
a) CST法阶数 $n=6$ 翼型拟合



b) CST法阶数 $n=6$ 翼型拟合残差



c) CST法阶数 $n=7$ 翼型拟合



d) CST法阶数 $n=7$ 翼型拟合残差

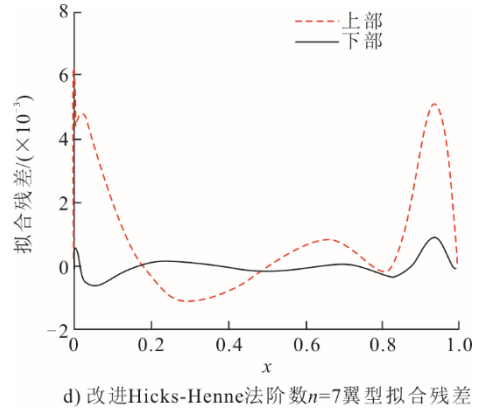
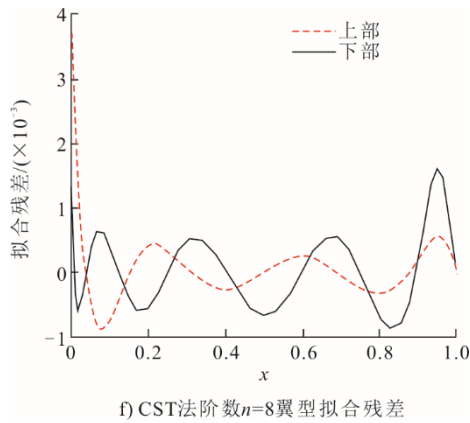
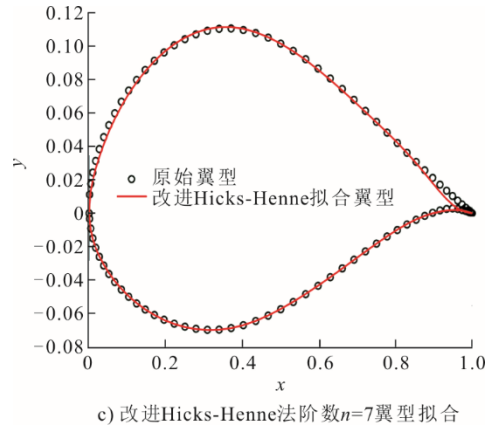
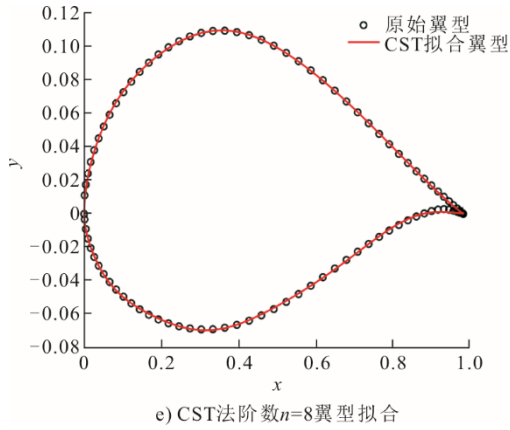


图 1 NACA63418 翼型 CST 法参数化拟合  
Fig.1 Parametric fitting of NACA63418 airfoils by CST method

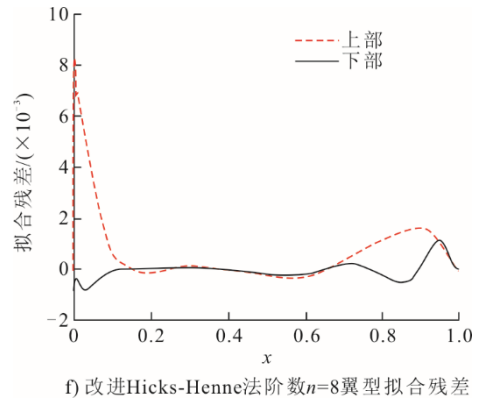
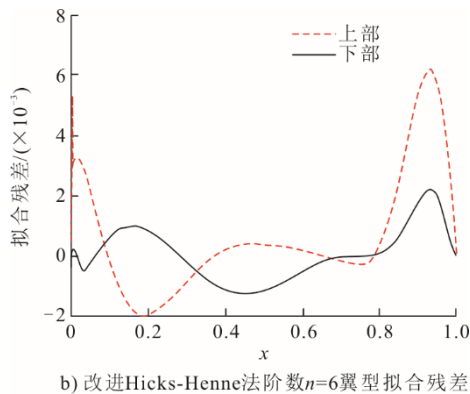
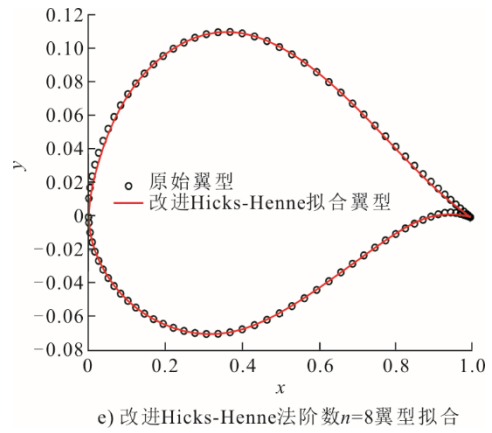
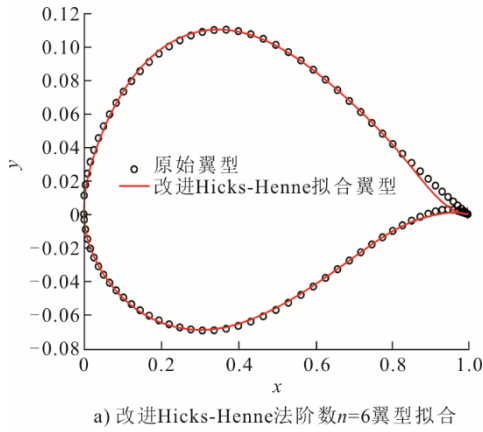


图 2 NACA63418 翼型改进 Hicks-Henne 法参数化拟合  
Fig.2 Parametric fitting of NACA63418 airfoils by improved HH method

由图 1 和图 2 看出: CST 法和改进的 Hicks-Henne 型函数法都能对预估翼型实现较精确拟合; 随着变量维数的增加, 2 种参数化方法的拟合残差呈减小趋势, 尤其从 6 维增至 8 维变量, 改进 Hicks-Henne 型函数法拟合精度明显提高。CST 方法对不同类别的翼型控制能力存在较大差别, 使用 MATLAB 软件<sup>[20]</sup>翼型拟合过程中, 需选用合适的初始化参数, 参数设置不当, 极易产生不光顺翼型或尾缘交叉翼型。改进的 Hicks-Henne 型函数法无需考虑初始参数的影响, 可在基准翼型的基础上对设计翼型进行调整, 8 维变量表征翼型时精度较高。

### 1.2 采用 XFOIL 软件计算翼型特性

翼型气动性能数据主要通过风洞实验、理论分析及数值计算等途径来获取。风洞实验获取的数据准确, 但数据非常有限且实验成本昂贵。XFOIL 软件能有效避免该问题<sup>[8]</sup>, 将设计翼型 NACA63418 的气动性能与风洞实验数据对比分析<sup>[21]</sup>, 结果如图 3 所示。

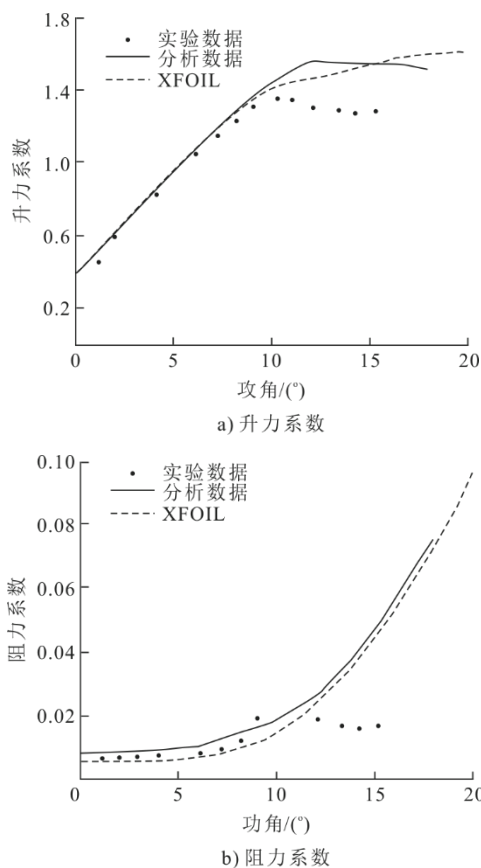


图 3 XFOIL 软件与实验数据对比

Fig.3 Comparison between XFOIL software and trial data

由图 3 可见, 在雷诺数  $Re=3 \times 10^6$ , 自由转捩的工况下, 攻角范围为  $0^\circ \sim 10^\circ$ , XFOIL 软件计算的升

阻力系数与实验数据非常接近, 且变化趋势相同, 但同样大攻角失速状态下的数据有较大偏差。这也侧面说明 XFOIL 软件预测大攻角翼型流动不准确的特点。虽然数值计算的方法不能完全准确预测翼型的气动特性, 但目前风力机翼型正常运行的攻角在小攻角范围内, 故通过 XFOIL 软件计算也具有参考性。

## 2 自适应遗传算法翼型气动优化模型

结合上节相关内容, 选用改进的 Hicks-Henne 型函数法 8 维变量表征翼型具有较高精度, 可通过此方法参与后续设计。针对叶片不同展向位置翼型的运行特点及设计要求, 通过自适应遗传算法耦合 XFOIL 软件来实现翼型气动性能的自动计算, 进而完成翼型的气动优化设计。

### 2.1 自适应遗传算法

遗传算法 (GA) 是依据遗传学机理演化而来的随机全局寻优算法<sup>[22]</sup>, 通常能较快速找到最佳结果。为提高算法的收敛能力<sup>[23]</sup>, 本文采用 Srinivas 提出的自适应遗传算法, 使交叉概率  $P_c$  及变异概率  $P_m$  能随适应函数值自由变化<sup>[24]</sup>, 自适应参数  $P_c$  及  $P_m$  的表达式分别为:

$$P_c = \begin{cases} 0.9 - \frac{0.300(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ 0.9 & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = \begin{cases} 0.1 - \frac{0.099(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ 0.1 & f < f_{avg} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f'$  为交叉个体中较大的适应值;  $f_{avg}$  为种群平均适应值;  $f_{max}$  为群体中最大适应值;  $f$  为变异个体的适应值; 0.300 为交叉率的变化值; 0.099 为变异率的变化值。

这种自适应遗传算法虽然收敛速度较慢但能够维持群体多样性。本文建立的风力机翼型气动优化模型则基于自适应遗传算法 (adaptive genetic algorithm) 的变量算子复制、交叉及变异实现, 并通过算法与气动分析软件 XFOIL 耦合对翼型进行单目标优化设计。

### 2.2 优化设计模型

采用基函数系数为设计变量<sup>[25]</sup>, 通过调整控制变量条件和翼型形状约束, 结合自适应遗传算法和 XFOIL 气动求解器找到气动特性更佳的优化翼型。图 4 为翼型优化设计流程, 优化算法多次迭代调用

XFOIL 软件评估翼型特性, 待达到优化终止条件, 算法停止并返回优化翼型。

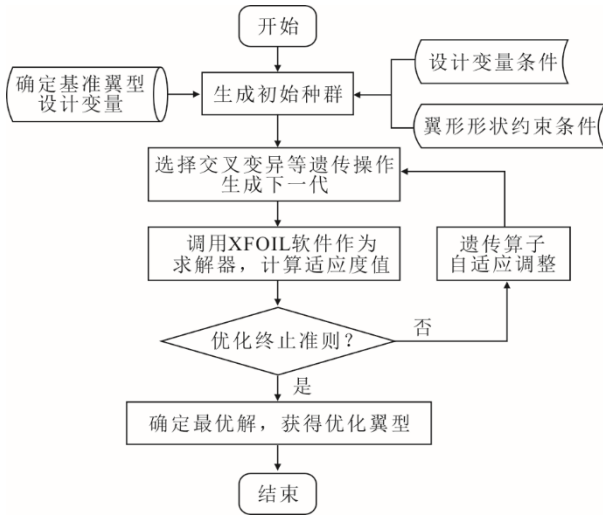


图4 翼型优化设计流程

Fig.4 Flow chart of airfoil optimization design

### 1) 目标函数选取

NACA63418 翼型风力机叶片位于叶尖位置, 该翼型要求较高的风能捕捉能力, 偏高的最大升阻比及和缓的失速能力<sup>[26]</sup>。因此, 本文以风力机翼型的升阻比及升力系数最大为多目标优化函数。采用权重系数法, 优化变量的权重系数为 0.5。由于升力系数与升阻比数值上差异近 2 个数量级, 故取 0.01 倍的升阻比和升力系数为优化目标, 将多目标优化求解转化为单目标求解问题。目标函数表示为:

$$f(x) = 0.5 \times 0.01 \max(C_l / C_d) + 0.5 \max(C_l) \quad (4)$$

式中:  $C_l$  和  $C_d$  分别为升力系数和阻力系数。

### 2) 设计变量的选取

采用改进的 Hicks-Henne 型函数法的基函数系数为设计变量<sup>[27]</sup>。通常参数化建模过程中设计变量数目增多, 表征能力较强, 但控制变量数目太多会大幅增长优化时间。因此, 选择上下翼型面各 8 个设计变量:

$$c = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{16}] \quad (5)$$

式中:  $c_1$ — $c_8$  为上翼型面控制变量;  $c_9$ — $c_{16}$  为下翼型面的控制变量。

### 3) 优化约束条件

翼型的最大厚度及其弦长相对位置等几何参数对气动特性产生较大影响, 需对翼型形状参数进行相应约束。为避免改进 Hicks-Henne 型函数法

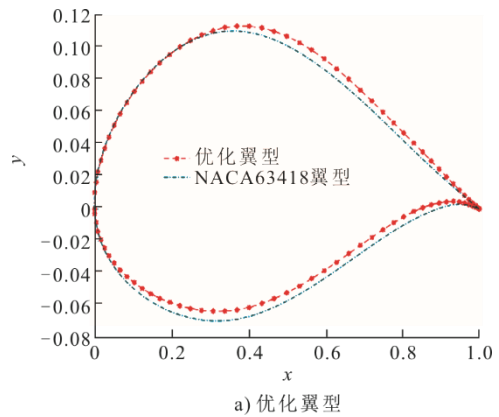
建立的扰动函数出现不具备控制翼型形状的特征, 控制变量的范围为  $-0.005 < c_i < 0.005$ 。

### 4) 优化算法的实现

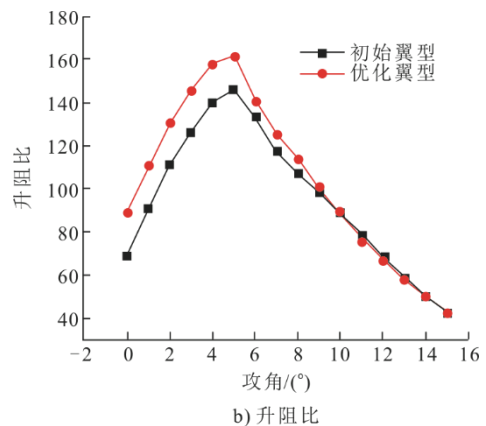
本文采用 MATLAB 软件编写翼型优化程序, 在设计变量空间内随机生成初始种群, XFOIL 软件作为翼型气动求解器, AGA 自适应算法种群规模取 20, 迭代次数取 100, 变量采用二进制编码。

### 2.3 优化实例

基准翼型: NACA63418 翼型, 使用改进的 Hicks-Henne 型函数法, 攻角为  $5^\circ$ , 雷诺数  $Re = 3 \times 10^6$ 。目标函数: 远方来流速度为 6 m/s, 翼型的升阻比及升力系数最大, 即目标函数  $f(x)$ 。设计变量: 基函数系数  $c_i$  为设计变量, 上下翼型线各选 8 个扰动点, 共 16 个变量。约束条件: 设计变量控制在  $[-0.005, 0.005]$  范围内, 翼型形状约束包括翼型的最大厚度控制在 17.50%~18.50%, 最大厚度位置控制在 25.00%~40.00%。经自适应遗传算法优化, 找到优化翼型如图 5 所示。



a) 优化翼型



b) 升阻比

图5 NACA63418 翼型外形优化前后对比

Fig.5 Comparison of NACA63418 airfoils before and after shape optimization

在给设计变量的边界空间搜索最优翼型, 程序停止搜索到相较于基准翼型气动参数更优的翼

型,其设计变量取值和优化前后的几何特性见表 1。由表 1 可见:翼型厚度有所减小,由初始 18.00%减小到 17.66%,最大厚度位置向后缘移动;相应地,翼型弯度增大,最大弯度位置也向后缘移动。

表 1 NACA63418 翼型几何特性

Tab.1 Geometric characteristics of NACA63418 airfoils

翼型	最大厚度/%	最大厚度位置	最大弯度/%	最大弯度位置
NACA63418	18.00	0.343	2.21	0.513
优化翼型	17.66	0.357	2.77	0.538

算法耦合 XFOIL 软件计算得到基准翼型和优化翼型在设计攻角下的气动参数见表 2。由表 2 可见,翼型的升力系数增长 11.00%,升阻比增长 8.62%,能达到翼型优化的效果。

表 2 NACA63418 翼型气动性能对比

Tab.2 Aerodynamic performance comparison of NACA63418 airfoils

翼型	升力系数	阻力系数	升阻比
NACA63418	0.931 1	0.006 4	146.399
优化翼型	1.033 6	0.006 5	159.015
变化率/%	11.00	1.56	8.62

图 6 为优化翼型与初始翼型的升阻性能比较。

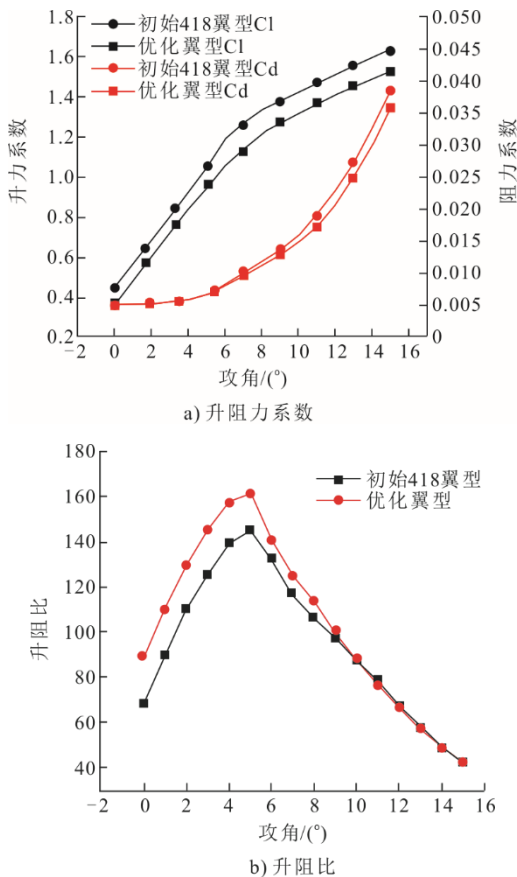


图 6 NACA63418 翼型升阻性能对比  
Fig.6 Comparison of lift-drag performance of NACA63418 airfoils

由图 6 可见, 相较基础 NACA63418 翼型, 优化翼型多攻角范围内的升力都明显增大, 阻力变化较小, 升阻比也呈增大趋势。

通过 CST 法和改进的 Hicks-Henne 型函数法描述设计翼型, 确定改进 Hicks-Henne 型函数法能精确描述翼型轮廓, 且设计空间充足, 但参数不宜过多。翼型优化过程涉及频繁调用 XFOIL, 通过算法调用 XFOIL 软件可实现 MATLAB 环境下翼型性能的自动分析计算, 着重考虑翼型的升阻比及升力系数气动特性, 量化分析表明优化后翼型的性能所提升。

### 3 结 论

1) 为提升风力机翼型叶片性能, 本文对翼型进行了气动优化设计。变量维数的增加能提高 CST 法和改进 Hicks-Henne 型函数法 2 种参数化方法的表征精度, 但维数过大会影响计算成本时间。相较于 CST, 改进 Hicks-Henne 型函数法无需设定初始参数, 且表征稳定不易出现波浪翼型, 确定 8 阶变量下的基函数系数为设计变量。

2) 以 NACA63418 翼型的基函数系数为设计变量进行寻优设计, 优化翼型的升力系数增长 11.00%, 升阻比增长 8.62%。

3) 实例仿真证明, 在正向设计方法路径中, 采用 MATLAB 和 XFOIL 软件数值计算结合, 可有效提高了设计效率。

#### [参考文献]

[1] 冯泽深, 赵增海, 郭雁珩, 等. 2021 年中国风电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(10): 1-3.  
FENG Zeshen, ZHAO Zenghai, GUO Yanheng, et al. Status and prospect of China's wind power development in 2021[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 48(10): 1-3.

[2] TANGLER J L, SOMERS D M. NREL airfoil families for HAWTs[R]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1995: 1.

[3] TANGLER J L, SOMERS D M. Status of the special-purpose airfoil families[C]. Presented at Windpower '87, San Francisco, Calif., 5 Oct. 1987, 1987.

[4] FUGLSANG P, BAK C. Development of the riso wind turbine airfoils[J]. Wind Energy, 2004, 7(2): 145-162.

[5] TIMMER W A, VAN ROOIJR P J O M. Summary of the delft university wind turbine dedicated airfoils[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(4): 11-21.

[6] BJORCK A. Coordinates and calculations for the FFA-W1-xxx, FFAW2-xxx, and FFA-W3-xxx series of airfoils for horizontal axis wind turbines[R]. FFATN 1990-15, 1990: 1.

[7] 乔志德, 宋文萍, 高永卫. NPU-WA 系列风力机翼型设计与风洞实验[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(2): 260-265.  
QIAO Zhide, SONG Wenping, GAO Yongwei. Design

- and experiment of the NPU-WA airfoil family for wind turbines[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 30(2): 260-265.
- [8] 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.
- [9] 白井艳. 水平轴风力机专用翼型族试验分析及优化设计[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2010: 1.  
BAI Jingyan. The experimental analysis, and optimal design of dedicated airfoil family for horizontal-axis wind turbines[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2010: 1.
- [10] 王同光, 田琳琳, 钟伟, 等. 风能利用中的空气动力学研究进展 I: 风力机气动特性[J]. *空气动力学学报*, 2022, 40(4): 1-21.  
WANG Tongguang, TIAN Linlin, ZHONG Wei, et al. Aerodynamic research progress in wind energy I: wind turbine aerodynamic characteristics[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(4): 1-21.
- [11] HANSEN M O L. *Aerodynamics of wind turbines*[M]. 2nd ed. London: Routledge, 2008: 15.
- [12] 黎作武, 陈江, 陈宝, 等. 风力机组叶片的先进翼型族设计[J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(1): 130-136.  
LI Zuowu, CHEN Jiang, CHEN Bao, et al. Design of advanced airfoil families for wind turbines[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(1): 130-136.
- [13] 何伟. 风力机翼型气动性能全局稳健优化设计研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018: 51-52.  
HE Wei. Aerodynamic performance based globally robust design optimization of wind turbine airfoils[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018: 51-52.
- [14] HICKS R M, HENNE P A. Wing design by numerical optimization[J]. *Journal of Aircraft*, 1978, 15(7): 407-412.
- [15] 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[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(24): 111-117.  
CHENG Jiangtao, CHEN Jin, SHEN Wenzhong, et al. Design of wind turbine airfoils based on maximum power coefficient[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(24): 111-117.
- [16] 廖炎平, 刘莉, 龙腾. 几种翼型参数化方法研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(3): 160-164.  
LIAO Yanping, LIU Li, LONG Teng. The research on some parameterized methods for airfoil[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(3): 160-164.
- [17] SAMAREH J A. Survey of shape parameterization techniques for high-fidelity multidisciplinary shape optimization[J]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2001, 39(5): 877-884.
- [18] GUNEL O, KOC E, YARUZ T. Comparison of CFD and XFOIL airfoil analyses for low Reynolds number[J]. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 2016, 3: 83-86.
- [19] MORGADO J, VIZINHO R, SILVESTRE M A R, et al. XFOIL vs CFD performance predictions for high lift low Reynolds number airfoils[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 52: 207-214.
- [20] 高永, 朱飞翔, 李冰, 等. 改进 CST 方法在翼型优化设计中的应用[J]. *海军航空工程学院学报*, 2017, 32(5): 426-430.  
GAO Yong, ZHU Feixiang, LI Bing, et al. Application of improved CST parametric method in airfoil design[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2017, 32(5): 426-430.
- [21] 洪星. 基于气动性能与截面刚度特性的风力机翼型廓线设计研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019: 53-55.  
HONG Xing. Research on wind turbine airfoil profile design based on aerodynamic performance and cross section stiffness characteristics[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019: 53-55.
- [22] PAREZANOVIC V, RASUO B, ADZIC M. Design of airfoils for wind turbine blades[Z]. Doctoral, 2005: 195-200.
- [23] 陈进, 陆群峰, 王旭东, 等. 基于自适应遗传算法的风力机通用翼型的优化设计研究[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(20): 2448-2451.  
CHEN Jin, LU Qunfeng, WANG Xudong, et al. Research on optimization of general airfoil profiles for wind turbines based on adaptive genetic algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(20): 2448-2451, 2469.
- [24] DEB K, BEYER H G. Self-adaptive genetic algorithms with simulated binary crossover[J]. *Evolutionary Computation*, 2001, 9(2): 197-221.
- [25] 任雪莲, 陈晓芬, 马骏. 基于 BP 神经网络的遗传算法在短时交通流预测中的应用[J]. *河北交通职业技术学院学报*, 2009, 6(2): 58-61.  
REN Xuelian, CHEN Xiaofen, MA Jun. Research on genetic algorithms used in short-term traffic flow forecasting based on BP neural networks[J]. *Journal of Hebei Jiaotong Vocational and Technical College*, 2009, 6(2): 58-61.
- [26] BERTAGNOLIO F, SØRENSEN N, JOHANSEN, et al. *Wind turbine airfoil catalogue*[R]. RisØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, August 2001.
- [27] 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): 211-213.  
WANG Xudong, CHEN Jin, ZHANG Shiqiang. Integration study on airfoil profile for wind turbines[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(2): 211-213.

(责任编辑 杨嘉蕾)