

孟祥恒,文泽军,肖钊,等. 基于改进 Kriging 模型的风力机翼型气动优化设计[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(3):85-92. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.011

MENG X H, WEN Z J, Xiao Z, et al. Aerodynamic Optimization Design of Wind Turbine Airfoils Based on Improved Kriging Model [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):85-92. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.011

基于改进 Kriging 模型的风力机翼型气动优化设计

孟祥恒¹, 文泽军^{2*}, 肖钊², 张帆²

(1.昌吉学院 能源与控制工程学院, 新疆 昌吉 831100; 2.湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:针对目前风力机翼型气动性能的优化需求,提出一种基于改进 Kriging 模型的风力机翼型气动优化设计方法.首先,采用 CST 翼型参数化方法,将初始翼型的几何形状转换为可供计算机识别的参数化模型;随后,通过最小二乘法原理的加权处理,建立含有加权变异函数的改进 Kriging 模型,与小生境遗传算法相结合,并从参数化模型的变量空间中选取适量样本构建翼型,以阻力系数及力矩系数最小化为目标,以升力系数及最大厚度不低于初始值为约束条件进行翼型的气动优化设计;最后,通过 CFD 模拟进行优化翼型的仿真验证,并在相同的来流攻角下,将优化翼型与初始翼型进行气动特性对比.结果表明:优化翼型的阻力系数、力矩系数分别降低 0.42%, 0.25%, 同时升力系数增加 6.25%, 证明了该方法有效性.这为风力机翼型气动设计提供了一种新途径.

关键词:最小二乘法; Kriging 模型; 优化设计; 翼型参数化

中图分类号:TK83

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)03-0085-08

Aerodynamic Optimization Design of Wind Turbine Airfoils Based on Improved Kriging Model

MENG Xiangheng¹, WEN Zejun², XIAO Zhao², ZHANG Fan²

(1. School of Energy and Control Engineering, Changji University, Changji 831100, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: An aerodynamic optimization design method based on improved Kriging model for wind turbine airfoils is proposed to meet the current aerodynamic performance optimization requirements. Firstly, the CST airfoil parameterization method is used to convert the initial airfoil geometry into a parameterized model which can be identified by a computer. Then, an improved Kriging model with weighted variogram is established by the weighted processing of the least squares principle. Combined with niche genetic algorithm, the airfoil is constructed by selecting appropriate samples from the variable space of the parameterized model, aiming at minimizing the drag coefficient and moment coefficient. The aerodynamic optimization design of airfoils is carried out under the constraints of lift coefficient and maximum thickness not lower than the initial value. Finally, the optimization airfoils are verified by CFD simulation, and at the same angle of attack of incoming flow, the

收稿日期:2021-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905165);国家重点研发计划项目资助(2016YFF0203400);湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ90003)

* 通信作者, E-mail: zjwen732@163.com

aerodynamic characteristics of the optimized airfoil are compared with that of the initial airfoil. Results show that the drag coefficient and moment coefficient are reduced by 0.42% and 0.25% respectively, at the same time, the lift coefficient is increased by 6.25%. The validity of the method is proved, which provides a new approach to aerodynamic design of wind turbine airfoils.

Keywords: least squares method; Kriging model; optimization design; airfoil parameterization

风能是一种清洁高效的可再生能源,风力机是将风能转化为电能的重要装置,叶片是风力机的关键组成部件,其翼型气动性能不足导致风力机风能转化效率低下,严重制约着风电产业的发展.因此,如何有效研发气动性能优良的风力机翼型,提高风力机风能转化效率,成为当前风力机行业中亟待解决的问题.

多年来,国内外学者围绕翼型的气动性能进行了大量研究,并取得了阶段性研究成果.早期的风力机翼型采用航空翼型,其气动特性常采用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模拟等数值计算方法进行设计^[1].汪泉等^[2]将风力机翼型集成理论与 B 样条曲线法结合,建立翼型数学模型,并进行风力机翼型的型线优化设计;陈亚琼等^[3]应用 B 样条曲线法对风力机翼型的型线进行参数化表达,并对风力机翼型进行气动特性和声学性能的优化设计,但 B 样条曲线法对风力机翼型的型线控制点的优化过程效率较低,几何收敛特性不足;KLEIJNEN^[4]指出 Kriging 模型是代理模型中最常用的模型之一,该模型大大减少设计所需的时间,但 Kriging 模型的精度不足会严重制约产品的有效利用;韩忠华等^[5-6]总结了 CFD 模拟与 Kriging 模型在翼型优化设计方面的应用进展,指出 Kriging 模型比 CFD 模拟优化效率更高,翼型气动优化设计涉及高度非线性问题,Kriging 模型的精度与优化解的精确程度直接相关;段焰辉等^[7]提出代理模型的两步优化方法,使翼型优化设计精度得到一定的提高,但其第一步的优化结果容易陷入局部最优解;LIU 等^[8]将单点加点准则与 Kriging 模型相结合并对翼型进行气动优化设计;CHAUDHURI 等^[9]提出基于多点加点准则的 Kriging 模型,使模拟精度进一步提高;SONG 等^[10]将含多点加点准则的 Kriging 模型应用到翼型的气动优化设计中,但加点准则提高精度的同时也会延长 Kriging 模型得到优化结果的收敛时间.综上所述,上述学者围绕风力机翼型气动性能的研究主要集中于翼型气动外形优化,但这些研究方法仍存在几何收敛特性不足、计算效率较低、模拟精度不足等问题,难以获得具有良好气动性能的风力机翼型.

针对上述不足之处,本文以风力机 S832 翼型为初始翼型,通过 CST (Class/Shape Function Transformation) 方法构建参数化模型,基于一种加权最小二乘法原理,建立含加权变异函数的改进 Kriging 模型,选择小生境遗传算法作为全局优化算法,开展翼型的气动优化设计,获得气动特性更优的风力机翼型,进而提升风力机的风能转换效率.

1 翼型参数化模型

1.1 翼型几何特征

翼型为风力机叶片沿展向的某一横截面形状,其前缘呈圆弧形,后缘呈钝形或尖形,几何外形与翼型的气动性能密切相关.图 1 为翼型几何特征示意图.

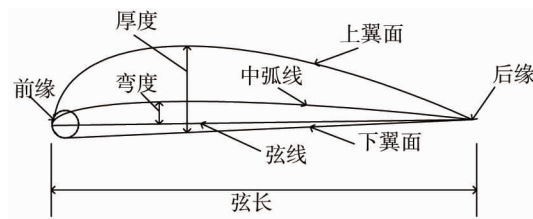


图 1 翼型几何特征

1.2 参数化方法

参数化方法是将翼型几何特征转换为计算机可识别模型的主要方法之一,通过对变量离散化处理建立参数化模型^[11].常用的翼型几何参数化方法有 B 样条曲线法^[12]和 CST 方法^[13]等.CST 方法是根据气动

外形特征,通过类函数和型函数来表示外形变化的翼型参数化方法,其优势是可用少量的参数表达出翼型几何形状.因此本文采用 CST 方法建立翼型参数化模型,其表达式为

$$\zeta = C(\psi)S(\psi) + \psi \frac{\Delta Z_{te}}{c}. \quad (1)$$

式中: ζ 为翼型厚度方向无量纲纵坐标; ψ 为翼型弦线方向无量纲横坐标; $\Delta Z_{te}/c$ 为无量纲翼型后缘厚度比; $C(\psi)$ 为类函数, $S(\psi)$ 为型函数,分别可由式(2)和式(3)表示.

$$C(\psi) = \psi^{N_1}(1 - \psi)^{N_2}; \quad (2)$$

$$S(\psi) = \sum_{i=0}^n A_i \frac{n!}{i!(n-i)!} \psi^i (1 - \psi)^{n-i}. \quad (3)$$

式中: N_1, N_2 为类函数系数,常取 $N_1 = 0.5, N_2 = 1.0$; n 为 Bernstein 多项式(即式(3))阶数,当阶数 $n = 5$ 时的 Bernstein 多项式拟合结果已达到精度要求,因此本文取 $n = 5$; A_i 为待定的 Bernstein 多项式系数.通过改变 A_i 的值,可获得不同几何特征的风力机翼型.

参数化误差 Δy 定义为

$$\Delta y = y_\psi - \zeta. \quad (4)$$

式中: y_ψ 为 $x/c = \psi$ 处的翼型外形坐标.

2 改进 Kriging 模型

2.1 Kriging 模型描述

Kriging 模型的代理过程可视为随机过程,由随机函数 $\tilde{Z}(x)$ 与常数值 μ 组成.

$$\hat{y}(x) = \tilde{Z}(x) + \mu. \quad (5)$$

式中: $\hat{y}(x)$ 为 Kriging 模型的预测值; μ 为样本数据的数学期望; $\tilde{Z}(x)$ 为随机高斯函数,其均值为 0,方差为 σ^2 ,协方差矩阵为

$$\text{Cov}[\tilde{Z}(x_i), \tilde{Z}(x_j)] = \sigma^2 \mathbf{R}. \quad (6)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为变异函数矩阵.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R(x_1, x_1) & \cdots & R(x_1, x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ R(x_n, x_1) & \cdots & R(x_n, x_n) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

式中: $R(x_i, x_j)$ 为描述 x_i 与 x_j 之间某种关系的变异函数,常取为高斯指数型函数.

2.2 变异函数加权处理

不同间距内的点对变异函数的影响程度不同,点对越密集表明该处的变异函数越可信^[14].由于传统的变异函数并未考虑样本数据的多样性和各点对间的距离,导致 Kriging 模型的精度受到极大影响.

权重 $\frac{n}{(x^*)^k}$ 综合考虑了设计变量数目 n 以及待测点 x^* 与其余点 x_i 的间距影响,仅当待测点 x^* 处的

指数型函数值 $(x^*)^k$ 过大时, $\frac{n}{(x^*)^k}$ 可以有效降低变异函数中待测点 x^* 与其余点 x_i 的间距

$|(x^*)^k - x_i^k|$ 过大带来的影响.因此,本文通过权重 $\frac{n}{(x^*)^k}$ 对变异函数进行处理,得到改进的变异函数为

$$R(x^*, x_i) = \exp\left[-\sum_{k=1}^n \frac{n}{(x^*)^{2k}} \theta_k |(x^*)^k - x_i^k|^2\right]. \quad (8)$$

式中: θ_k 为待定的相关参数; x_i^k 为样本点 x_i 的第 k 维变量.

2.3 Kriging 模型预测

Kriging 模型在待测点 x^* 处的函数预测值为 $\hat{y}(x)$.

$$\hat{y}(x) = \hat{\mu} + \mathbf{r}^T(x^*)\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \hat{\mu}\mathbf{I}). \quad (9)$$

式中: $\mathbf{y}$ 为 n 维列向量, 每个元素为样本函数值; $\mathbf{I}$ 为 n 维单位列向量; $\mathbf{r}$ 为 n 维向量;

$$\hat{\mu} = (\mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}; \quad (10)$$

$$\mathbf{r}(x^*) = [\mathbf{R}(x^*, x_1), \mathbf{R}(x^*, x_2), \dots, \mathbf{R}(x^*, x_n)]^T. \quad (11)$$

Kriging 模型的方差为

$$\hat{\sigma}^2 = (\mathbf{y} - \hat{\mu}\mathbf{I})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \hat{\mu}\mathbf{I}) / n. \quad (12)$$

其预测值的均方差为

$$s^2 = \hat{\sigma}^2 (1 - \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + \frac{(1 - \mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})^2}{\mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I}}). \quad (13)$$

相关参数 θ_k 的最大似然估计可通过式(14)求取.

$$f(\theta_k) = \hat{\sigma}^2 |\mathbf{R}|^{\frac{1}{n}}. \quad (14)$$

式中: $f(\theta_k)$ 为相关参数 θ_k 的最大似然函数.

Kriging 模型预测的相对误差 ε 定义为

$$\varepsilon = \frac{|V_{\text{cfd}} - V_k|}{V_{\text{cfd}}} \times 100\%. \quad (15)$$

式中: V_{cfd} 为 CFD 模拟的计算值; V_k 为 Kriging 模型预测值.

3 风力机翼型气动优化

3.1 优化模型建立

本文的设计状态为雷诺数 $Re = 2.5 \times 10^6$, 优化目标为降低风力机翼型的阻力、力矩系数, 同时保证此设计状态下升力系数不减以及翼型最大厚度不减. 根据阻力系数与力矩系数的统计情况^[15], 在目标函数中赋予力矩系数为 0.6 的权值, 阻力系数为 0.4 的权值, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 即

$$\begin{aligned} \min: & f = 0.4C_d + 0.6C_m; \\ \text{s.t.} & \begin{cases} C_{l0} - C_l \leq 0; \\ t_0 - t \leq 0. \end{cases} \end{aligned}$$

式中: f 为本文的目标函数; C_l 为升力系数; C_{l0} 为初始翼型的升力系数; C_d 为阻力系数; C_m 为力矩系数; t_0 为初始翼型最大厚度; t 为翼型最大厚度.

3.2 优化工作流程

小生境遗传算法不仅维持传统遗传算法中种群的多样性, 还提高了多峰值优化处理能力. 本文采用 CST 方法将风力机翼型的几何特征转换为计算机可识别的参数化模型, 将小生境遗传算法与改进 Kriging 模型结合, 以增大风力机翼型的前缘半径、减小风力机翼型的最大厚度为第一步目标^[15]; 将风力机翼型参数化模型中的 Bernstein 多项式系数 A_i 进行寻优, 并构建风力机优化翼型的参数化模型, 采用 CFD 模拟等数值方法计算风力机优化翼型的气动特性, 选取 CFD 模拟的前 5 项气动特性结果为初始种群个体, 以降低风力机翼型的阻力系数及力矩系数为第二步目标; 利用小生境遗传算法的寻优性能帮助改进 Kriging 模型对后续种群个体进行预测并优化, 得到风力机优化翼型的气动特性曲线, 为验证预测结果的合理性, 将 CFD 模拟所得的气动特性结果与预测结果进行对比.

令初始种群规模 $P = 5$, 最大进化代数 $G = 100$, 收敛阈值为 0.001. 当达到最大进化代数或目标函数值的相对误差低于收敛阈值即停止优化工作. 整体优化工作流程如图 2 所示.

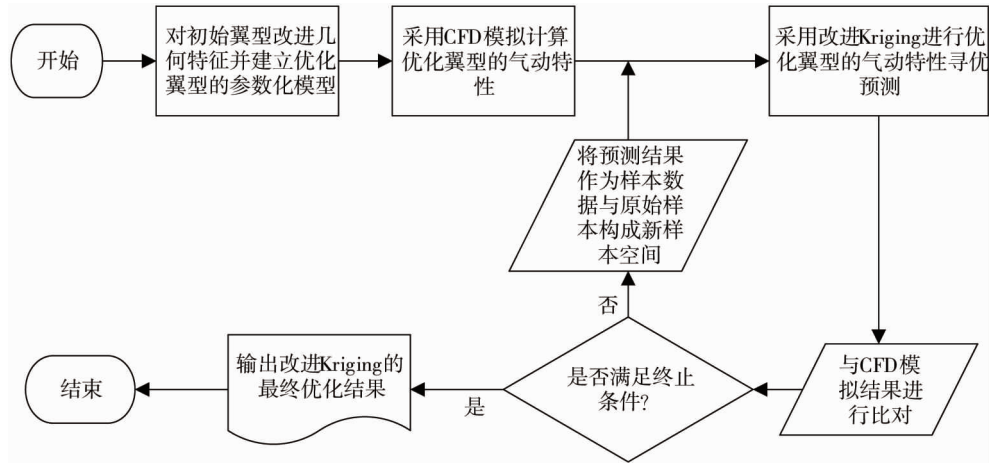


图2 优化模型流程

3.3 优化结果与分析

3.3.1 翼型参数化模型

由于5阶 Bernstein 多项式需要6个 Bernstein 多项式系数,所以翼型上、下翼面共需要12个 Bernstein 多项式系数,如表1所示。

表1 翼型 Bernstein 多项式系数^[16]

上翼面		下翼面	
0.171 3	0.116 0	0.147 1	0.041 3
0.157 3	0.170 3	0.068 4	0.141 5
0.122 9	0.076 6	0.138 7	0.037 2

通过 CST 方法对翼型外形进行参数化拟合,构建出计算机可识别的参数化模型,拟合模型及拟合误差结果如图3所示。

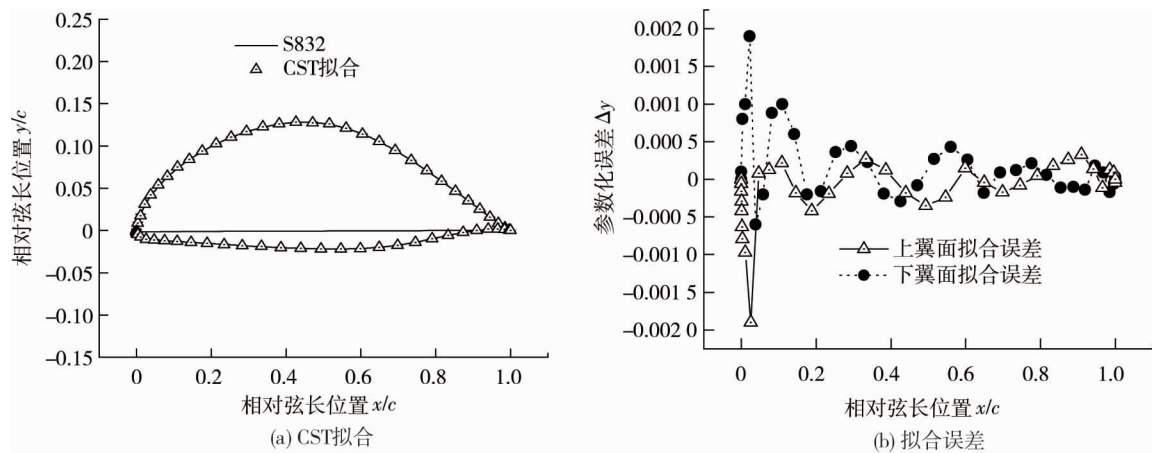


图3 CST方法的拟合结果

图3a表示通过CST方法拟合得到的参数化模型与初始翼型的外形吻合情况示意图,其中, $x/c, y/c$ 分别为基于翼型弦长无量纲横、纵坐标。从图3a可以看出:翼型的参数化模型与初始翼型的外形吻合良好。图3b表示翼型上、下翼面的参数化误差 Δy 随横坐标的变化情况,从图3b中可看出:与上翼面相比,下翼面的参数化误差变化更剧烈,这是因为下翼面型线的弯度及厚度均小于上翼面型线的缘故;上、下翼面在前缘处的参数化误差几乎呈对称分布,这是由于翼型前缘为圆弧状的缘故;参数化误差总体呈现不同幅度的波动,最大误差值为 1.77×10^{-3} ,较大误差集中于翼型前缘部分。

3.3.2 翼型几何优化

通过改进的 Kriging 模型及小生境遗传算法对风力机翼型的几何特征进行改进优化,得到风力机优化翼型几何外形的坐标值,导入 Profili 翼型设计软件中建立风力机优化翼型模型,其翼型几何优化前后对比结果如图 4 所示.

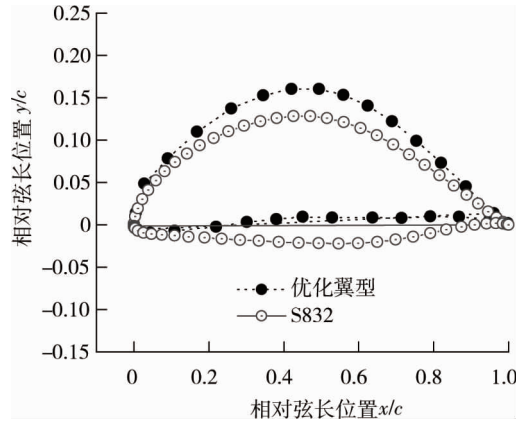


图 4 翼型几何优化前后对比

由图 4 所示:与初始翼型 S832 相比,风力机优化翼型的弦长几乎没有改变,前缘半径略有增大,最大厚度有所减小;上、下翼面在前缘部分及后缘部分变化幅度较小,在中间部分变化幅度较大;下翼面的型线由处于中弧线之下改变为大部分处于中弧线之上,且型线在中间部分近乎平直,这将有利于提高升力性能,减弱阻力的影响.

4 CFD 模拟验证与分析

4.1 翼型几何特性

翼型的几何特性可通过翼型表面的压力分布情况进行评价.取来流攻角 $\alpha = 5^\circ$ 为例,应用 ICEM 网格生成器得到风力机优化翼型的 C 型网格,网格区域由左边半圆和矩形组成,网格总数为 10.6 万,半圆半径长度取 10 倍弦长,矩形的长、宽分别取 15 倍、20 倍弦长,以网格区域的左边半圆和矩形的下边为速度入口,矩形的上边和右边为压力出口,设置边界层法向胀率不大于 1.1;将网格导入 FLUENT 模块中并检查网格质量,设置库朗数为 0.5,创建翼型的压力云图,结果如图 5 所示.

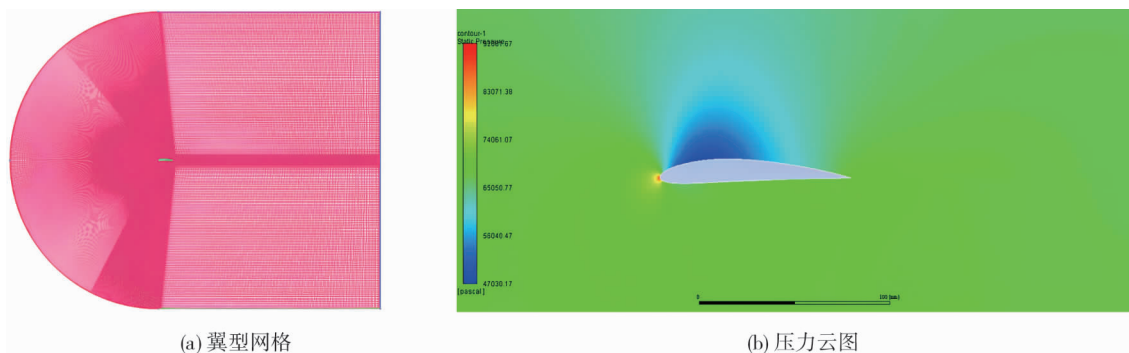


图 5 风力机优化翼型 CFD 模拟结果

由图 5a 可知:风力机优化翼型的网格排列均匀,几乎没有发生畸变.由图 5b 可知:风力机优化翼型所承受的外部压力主要集中于翼型厚度较大处,其中最大压力作用在翼型前缘处,厚度较小的后缘部分几乎没有压力作用,表明风力机优化翼型的几何特性具有合理的压力分布特征,以及有效承载外部载荷的能力.

4.2 翼型气动特性优化结果与验证

将初始翼型 S832 的来流攻角在 $-5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 内的气动特性数据^[17]与风力机优化翼型的气动特性优化结果及 CFD 模拟验证结果组合绘图.图 6 为翼型优化前后的气动特性比较,表 2 为改进 Kriging 模型优化结果的比较.

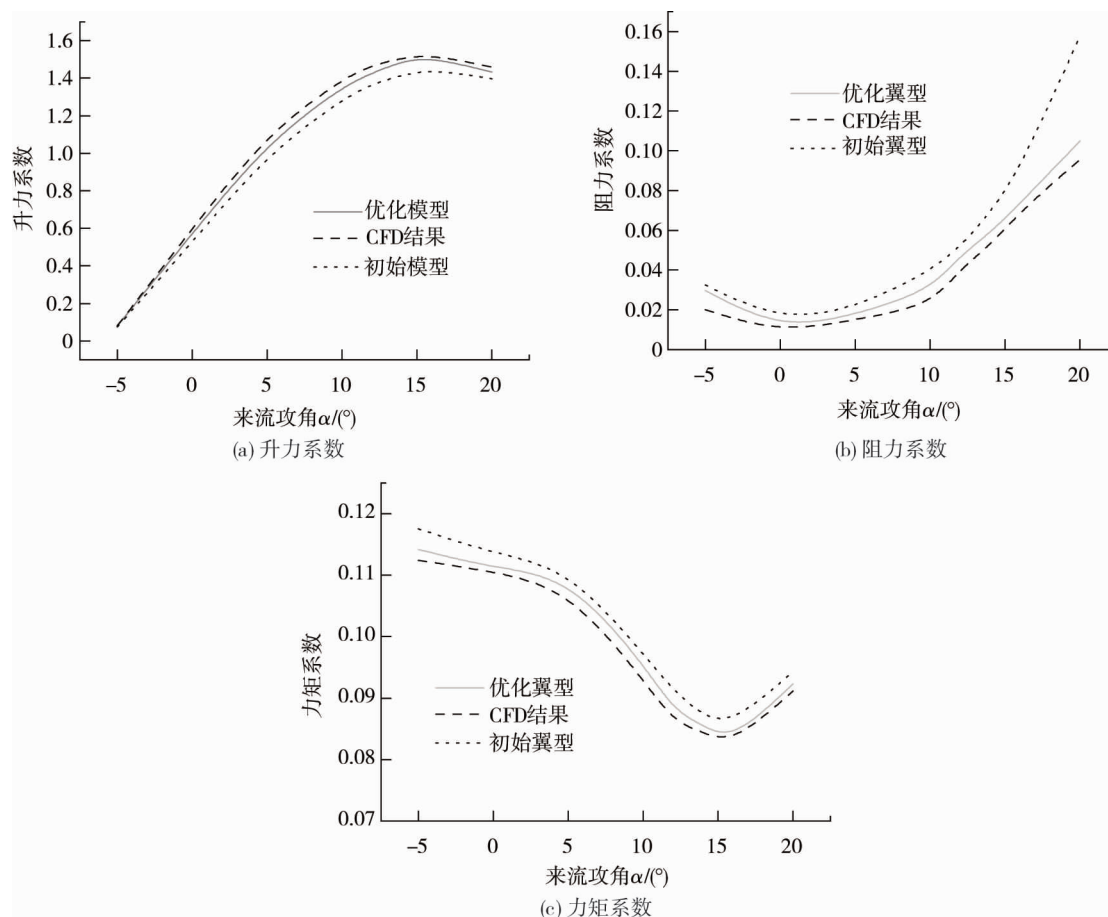


图 6 翼型优化前后气动特性曲线比较

表 2 优化结果的比较

翼型	C_l	C_d	C_m	t
初始翼型	1.447 8	0.014 5	0.085 6	14.91% c
优化翼型	1.510 3	0.010 3	0.083 1	14.79% c
增量	+0.062 5	-0.004 2	-0.002 5	-0.12% c

注:表 2 中 t 列内符号 c 为翼型弦长

如图 6a 所示,风力机优化翼型的升力系数数值普遍高于初始翼型,且优化翼型的临界迎角相较于初始翼型有所增加,这在一定程度上缓解了翼型动态失速现象对风力机性能的影响.由图 6b 可看出:在静态试验条件下,优化翼型的阻力系数均低于初始翼型,当来流攻角 α 达到临界迎角时,优化翼型的阻力系数增幅显著小于初始翼型,这表明优化翼型对流动分离现象具有较好的抑制作用.由图 6c 可看出:在相同的来流攻角 α 条件下,优化翼型的力矩系数较初始翼型的力矩系数有显著减小,表明优化翼型可有效降低由俯仰力矩作用引起的俯仰振荡现象的影响,从而提高了风力机的稳定性和控制性能.虽然 CFD 模拟提供了更为精确的计算结果,但改进 Kriging 模型在预测风力机气动特性方面展现出了较高的准确性,两者的气动特性曲线不仅变化趋势高度一致,且两者的气动特性曲线间距相对较小,当来流攻角 α 相同时,CFD 模拟达到收敛值所需的时间约为 0.5 h,而改进 Kriging 模型得到预测结果所需时间约为 10 s,这在工程实践中具有重要的应用价值.

由表2可看出:优化翼型的升力系数收敛值显著高于初始翼型,这表明优化翼型在相同的流动条件下能够产生更大的升力,且阻力系数、力矩系数的收敛值均有所降低,这进一步证实了优化设计在减少能量损耗和提高结构稳定性方面的有效性,而且优化翼型的最大厚度略低于初始翼型,其增幅仍在风力机翼型几何特征的合理设计范围内.因此,改进的 Kriging 模型在预测和指导翼型气动优化设计方面显示出了较高的准确性和有效性.该模型不仅能够准确地预测翼型的气动特性趋势,而且能够为设计者提供关于如何通过调整翼型几何特征来优化性能的实践参考,是满足翼型气动优化设计要求的有力工具之一.

5 结论

1) CST 方法能够较好地进行翼型几何特征拟合,与小生境遗传算法相结合的改进 Kriging 模型可以快速对风力机翼型的气动特性进行优化设计,其设计效率和精度可以满足风力机翼型气动优化设计的要求.

2) 通过改进 Kriging 模型对翼型几何外形的改进优化,风力机优化翼型的阻力系数、力矩系数均有效降低,升力特性也有效提升,且风力机翼型最大厚度的增幅仍在风力机翼型几何特征的合理设计范围内.

参考文献:

- [1] 杨科,王会社,徐建中,等.基于CFD技术的高性能风力机翼型最优化设计方法[J].工程热物理学报,2007(4):586-588.
- [2] 陈进,汪泉,李松林,等.翼型集成理论与B样条结合的风力机翼型优化设计方法研究[J].太阳能学报,2014,35(10):1930-1935.
- [3] 陈亚琼,方跃法,郭盛,等.风力机专用翼型综合优化设计方法[J].中国机械工程,2015,26(9):1194-1200.
- [4] KLEIJNEN J P C. Regression and Kriging metamodels with their experimental designs in simulation: a review[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256(1): 1-16.
- [5] 许瑞飞,宋文萍,韩忠华.改进Kriging模型在翼型气动优化设计中的应用研究[J].西北工业大学学报,2010,28(4):503-510.
- [6] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J].航空学报,2016,37(11):3197-3225.
- [7] 段焰辉,蔡晋生,刘秋洪.基于代理模型方法的翼型优化设计[J].航空学报,2011,32(4):617-627.
- [8] LIU P Y, YU G H, ZHU X C, et al. Unsteady aerodynamic prediction for dynamic stall of wind turbine airfoils with the reduced order modeling[J]. Renewable Energy, 2014, 69:402-409.
- [9] CHAUDHURI A, HAFTKA R T, IFJU P, et al. Experimental flapping wing optimization and uncertainty quantification using limited samples[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(4):957-970.
- [10] LIU J, SONG W P, HAN Z H, et al. Efficient aerodynamic shape optimization of transonic wings using a parallel infilling strategy and surrogate models[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 55(3):925-943.
- [11] 于佳鑫,陈江涛,王晓东,等.考虑几何不确定性的翼型随机参数化方法研究[J].工程热物理学报,2021,42(5):1184-1192.
- [12] BOEHM W. Bézier presentation of airfoils[J]. Computer Aided Geometric Design, 1987, 4(1-2):17-22.
- [13] KULFAN B M. Universal Parametric Geometry Representation Method[J]. Journal of Aircraft, 2008, 45(1):142-158.
- [14] 赵英文,王乐洋,陈晓勇,等.变异函数模型参数的非线性加权总体最小二乘法[J].测绘科学,2017,42(1):20-24.
- [15] TIRANDAZ M R, REZAEIHA A. Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines in dynamic stall: Symmetric Airfoils[J]. Renewable Energy, 2021, 173:422-441.
- [16] 喻伯平,李高华,谢亮,等.基于代理模型的旋翼翼型动态失速优化设计[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(4):833-842.
- [17] SOMERS D, INCORPORATED A. S830, S831 and S832 Airfoils [J]. Subcontract Report, 2005.