

基于加权 Kriging 模型的风力机翼型气动优化设计



孟祥恒*

湘潭理工学院汽车工程学院, 湖南湘潭 410219

摘要: 风力机翼型设计理论是决定风力机功率特性的根本因素, 通过改变风力机翼型的最大相对厚度、最大相对弯度及前缘半径等几何参数, 可设计出不同几何外形和气动性能的风力机翼型, 但翼型设计方法存在计算效率低、样本收敛性差等不足, 这可能导致风力机翼型气动性能不足, 针对上述存在的不足之处, 在风力机翼型参数化模型的基础上, 采用加权的 Kriging 模型对多目标优化设计算法进行寻优改进。首先, 将加权 Kriging 模型与融合小生境遗传算法的 Pareto 多目标优化方法相结合, 利用加权 Kriging 模型的高效预测性能和 Pareto 多目标优化方法的非线性数值处理能力对风力机翼型进行多目标气动优化设计。其次, 以风力机翼型的升阻比和升力系数最大化为优化目标, 以力矩系数、最大相对厚度及其位置和上翼面转捩点位置为约束条件, 建立基于加权 Kriging 模型与 Pareto 多目标优化方法的某一相对厚度风力机翼型多目标气动优化设计模型, 得出设计攻角时升阻比特性提升至 2 倍等的优化设计结果。最后, 在保证风力机翼型结构合理的前提下, 提出可以提高风力机翼型气动性能的建议, 这对风力机翼型的气动性能提升具有一定的工程指导意义。

关键词: Kriging 模型; 多目标优化设计; 气动特性; 风力机翼型

DOI: [10.57237/j.mse.2023.03.001](https://doi.org/10.57237/j.mse.2023.03.001)

Aerodynamic Optimization Design of Wind Turbine Airfoil Based on Weighted Kriging Model

Meng Xiangheng*

School of Automotive Engineering, Xiangtan Institute of Technology, Xiangtan 410219, China

Abstract: The design theory of wind turbine airfoil is the fundamental factor determining the power characteristics of a wind turbine. By altering geometric parameters such as maximum relative thickness, maximum camber, and leading-edge radius of the airfoil, different geometric shapes and aerodynamic performance of the wind turbine airfoil can be achieved. However, the existing airfoil design methods suffer from low computational efficiency and poor sample convergence, which may result in inadequate aerodynamic performance of the wind turbine airfoil. To address the shortcomings mentioned above, an improved optimization algorithm utilizing a weighted Kriging model is proposed based on the parameterized model of the wind turbine airfoil. Firstly, the weighted Kriging model is combined with a Pareto multi-objective optimization method that incorporates a niche genetic algorithm. This approach utilizes the efficient predictive performance of the weighted Kriging model and the nonlinear numerical processing capability of the Pareto multi-objective optimization method to achieve multi-objective aerodynamic optimization design of the wind

*通信作者: 孟祥恒, meng372021@163.com

turbine airfoil. Secondly, aiming to maximize the lift-to-drag ratio and lift coefficient of the wind turbine airfoil, with constraints on the moment coefficient, maximum relative thickness and its position, as well as the location of the upper surface transition point, a multi-objective aerodynamic optimization design model for a specific relative thickness wind turbine airfoil is established based on the weighted Kriging model and the Pareto multi-objective optimization method. The optimized design results include the improvement of lift-to-drag ratio characteristics by a factor of 2 when considering the optimized angle of attack. Finally, while ensuring the rationality of the wind turbine airfoil structure, recommendations are made to improve its aerodynamic performance. These suggestions provide engineering guidance for enhancing the aerodynamic performance of wind turbine airfoils.

Keywords: Kriging Model; Multi-objective Optimization Design; Aerodynamic Characteristics; Wind Turbine Airfoil

1 引言

风力机翼型设计理论是决定风力机功率特性的根本因素, 通过改变风力机翼型的最大相对厚度、最大相对弯度及前缘半径等几何参数, 可设计出不同几何外形和气动性能的风力机翼型[1]。在风力机翼型参数化模型设计中, CST (Class/Shape Function Transformation) 方法显著提高了风力机翼型的设计效率[2]。Papadimitriou 等[3]采用基于稀疏网格技术的翼型气动优化方法, 对翼型的气动性能及其稳定性开展了优化工作。Ram 等[4]采用基于 Bézier 曲线的优化设计方法, 提高了风力机翼型的升阻比特性。王迅等[5]将改进的 CST 方法与遗传算法结合, 并展开了翼型气动优化设计。Soltani 等[6]提出一种截面几何特性的多目标优化设计方法, 开展了风力机翼型的优化设计工作。Liu 等[7]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。Haftka 等[8]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[9]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。陈学礼[10]采用 Kriging 模型和遗传算法, 进行了低雷诺数工况下的翼型多点优化设计。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, 国内外学者围绕翼型气动优化设计展开大量研究, 但研究方法存在计算效率低、样本收敛性差等不足, 这可能导致风力机翼型气动性能不足, 因此对于风力机翼型气动特性的优化设计研究仍需进一步展开。

针对上述存在的不足之处, 采用加权的 Kriging 模型对多目标优化设计算法进行寻优改进。将加权 Kriging 模型与融合小生境遗传算法的 Pareto 多目标优化方法相结合, 利用加权 Kriging 模型的高效预测性能和 Pareto 多目标优化方法的非线性数值处理能力对风

力机翼型进行多目标气动优化设计。以风力机翼型的升阻比和升力系数最大化为优化目标, 以力矩系数、最大相对厚度及其位置和上翼面转捩点位置为约束条件, 建立基于加权 Kriging 模型与 Pareto 多目标优化方法的某一相对厚度风力机翼型多目标气动优化设计模型, 得出优化设计结果, 在保证风力机翼型结构合理的同时, 提高风力机翼型气动性能。这对风力机翼型的优化设计以及风力机风能转换能力的提升具有一定的工程指导意义。

2 风力机翼型几何特征及设计要求

2.1 风力机翼型参数化模型的几何特征

风力机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, 翼型的几何结构特征与气动性能密切相关[11]。图 1 为风力机翼型参数化模型的几何特征示意图。

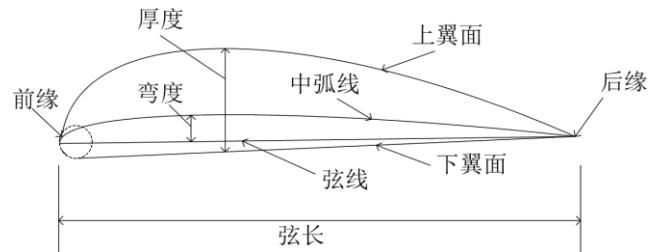


图 1 风力机翼型参数化模型的几何特征

Figure 1 Geometric characteristics of parametric models of wind turbine airfoils

2.2 风力机翼型几何外形设计要求

为了满足大功率风力发电机的优化设计需求,

与传统航空翼型相比,风力机翼型的气动性能更好、载荷作用更低,同时,其失速特性及噪声特性更低、表面粗糙度敏感性更低,合理的结构特性可以保证叶片在低风速下的捕风能力。因此,风力机翼型还需要具备合理的几何外形结构、良好的几何收敛性等特征。

3 风力机翼型多目标气动优化设计算法

3.1 Pareto 多目标优化设计算法

Pareto 方法是处理多目标优化问题的常用方法之一,首先要明确不同目标的优先级权重,然后找到优化条件在不同权重下各为最优解的 Pareto 解集(即 Pareto 前沿),最后根据决策者的偏好或应用场景选择最优解[12]。

Pareto 多目标优化方法在设定目标值后,先初始化种群,若种群越优秀,则收敛至最优解的速度越快,随后个体间交配产生新个体,同时为防止收敛至局部最优解,通过一定概率使个体产生变异,最终达到设定的结束条件,即终止迭代,输出最终的 Pareto 最优解集。但是, Pareto 多目标优化方法依旧存在优化效率较低、受目标函数的建模误差影响较大等不足之处,因此,本文拟将加权的 Kriging 模型与 Pareto 多目标优化方法相结合,改进风力机翼型多目标气动优化设计算法。

3.2 加权的 Kriging 模型算法

Kriging 模型的代理过程可视为随机过程[13],由随机函数 $Z(x)$ 与常数值 μ 组成:

$$y(x) = Z(x) + \mu \quad (1)$$

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

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

式中, \mathbf{R} 为变异函数矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R(x_1, x_1) & \dots & R(x_1, x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R(x_n, x_1) & \dots & R(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (3)$$

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,与点对间的空间距离相关,相关性随着空间距离的增大而减小,当空间距离为 0 时, $R(x_i, x_j) = 1$;当空间距离无穷大时, $R(x_i, x_j) = 0$ 。

设存在一个最优加权系数矩阵 $\boldsymbol{\omega}$,使预测值的均方差 $MSE[y(x)]$ 达到最小,其中均方差由式(4)定义,应用拉格朗日乘数法,得到式(5),并得出最优加权系数矩阵。

$$MSE[y(x)] = E[((\boldsymbol{\omega}^T y(x) - y(x))^2)] \quad (4)$$

式中 $\boldsymbol{\omega} = [\omega_1 \ \dots \ \omega_i \ \dots \ \omega_n]$, ($i=1, 2, \dots, n$), $y(x)$ 为原函数。

$$\left\{ \begin{array}{l} R(x_i, x^*) = \sum_{j=1}^n \omega_j R(x_i, x_j) + \frac{\partial}{2\sigma^2} \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \end{array} \right. \quad (5)$$

式中, ∂ 为拉格朗日乘数。

将式(5)改为矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I}^T & \mathbf{O} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{I} 为 n 维单位列向量; $\mu = \frac{\partial}{2\sigma^2}$;

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} R(x_1, x^*) \\ \vdots \\ R(x_n, x^*) \end{pmatrix}.$$

不同间距内的点对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。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之间的距离,导致 Kriging 模型的近似精度受到极大影响。Kriging 模型的近似精度取决于待测点 x^* 与其余点 x_i 的间距,样本点离 x^* 越近,预测值 $y(x)$ 的误差也就越小。

权重因子 $\frac{n}{(x^*)^k}$ 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, 采用权重因子 $\frac{n}{(x^*)^k}$ 对变异函数进行加权处理, 得到加权的变异函数如式(7)所示。

$$R(x^*, x_i) = \exp \left(-\sum_{k=1}^n \frac{n}{(x^*)^{2k}} \theta_k |(x^*)^k - x_i^k|^2 \right) \quad (7)$$

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。

求解式(6)的矩阵方程可得到 Kriging 模型在待测点 x^* 处的函数预测值 $y(x)$ 。

$$y(x) = \mu + \mathbf{r}^T(x^*) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mu \mathbf{I}) \quad (8)$$

式中, \mathbf{y} 为 n 维列向量, 每个元素为样本函数值。

$$\mu = (\mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I}) \mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (9)$$

风力机翼型多目标气动优化设计的基本流程如图 2 所示。

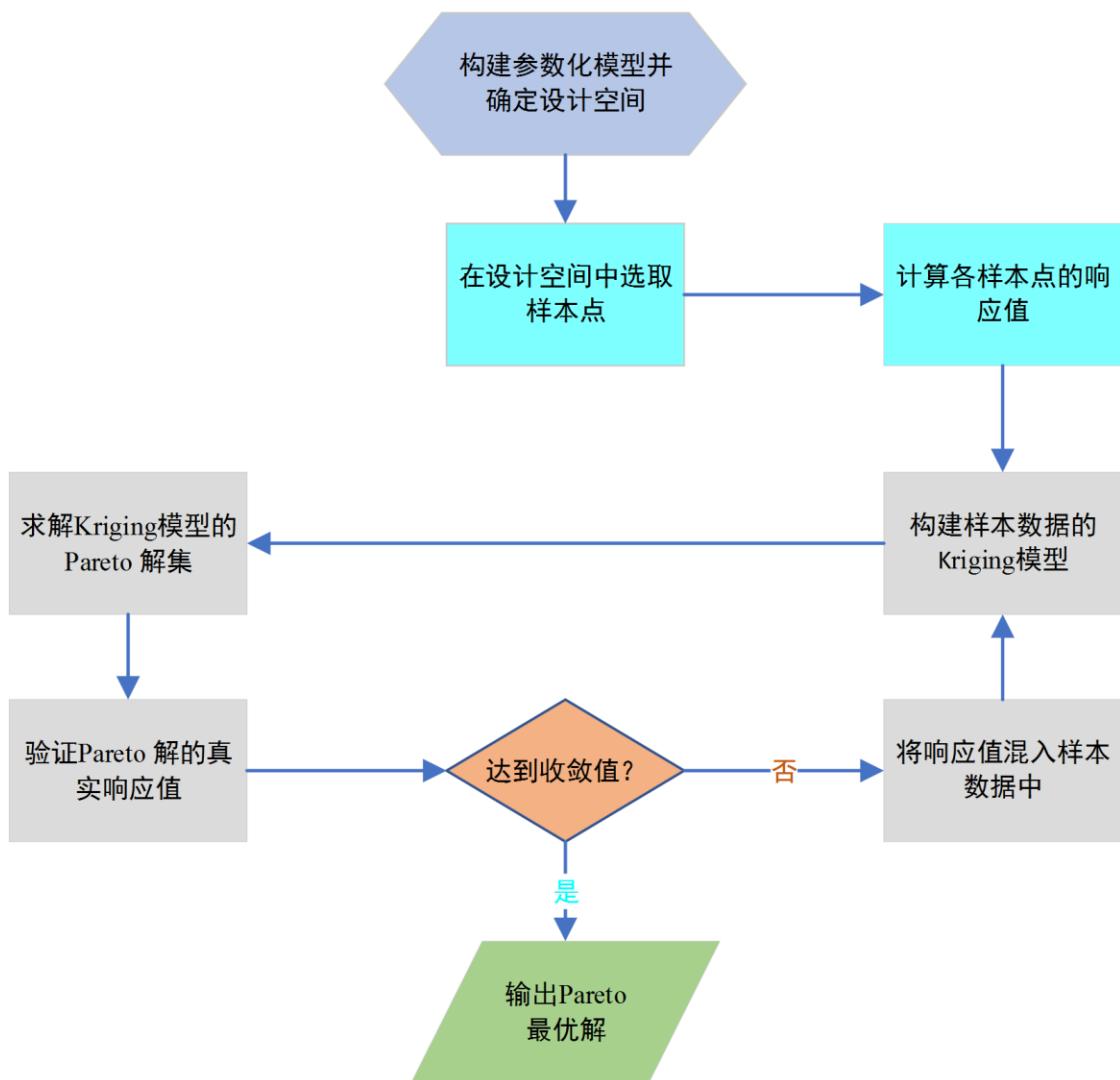


图 2 风力机翼型气动优化设计的基本流程

Figure 2 Basic flow chart of wind turbine airfoil optimization design

4 算例应用研究

4.1 风力机翼型多目标气动优化设计模型

选取风力机翼型 S832 为研究对象, 以升阻比和升力系数最大化为优化目标, 以力矩系数、最大相对厚度及其位置和上翼面转捩点位置为约束条件, 以风力机翼型的几何参数为设计变量, 展开风力机翼型的多目标气动优化设计。由于最大相对厚度为 $14.9\%c$ (c 为弦长) 的风力机翼型位于叶尖处, 应尽量控制其失速特性与几何兼容性等, 控制几何兼容性需要约束其最大相对厚度位置, 约束上翼面转捩点位置可以控制翼型失速特性及粗糙度敏感性等[14]。风力机翼型气动优化设计工况为:

$$Ma = 0.165, Re = 1.0E+06, \theta = 5^\circ;$$

$$Ma = 0.165, Re = 1.0E+06, \theta = 16^\circ.$$

其中, Ma 为马赫数; Re 为雷诺数; $\theta = 5^\circ$ 为设计攻角; $\theta = 16^\circ$ 表示为临界攻角。

建立的风力机翼型多目标气动优化设计模型为:

$$\begin{aligned} \max \quad & C_{L\theta=16^\circ}; \epsilon_{\theta=5^\circ} \\ \text{s.t.} \quad & C_{L0\theta=5^\circ} < C_{L\theta=5^\circ}; \\ & C_{L0\theta=16^\circ} < C_{L\theta=16^\circ}; \\ & |C_{M\theta=5^\circ}| < |C_{M0\theta=5^\circ}|; \\ & |C_{M\theta=16^\circ}| < |C_{M0\theta=16^\circ}|; \quad (10) \\ & X_{tr\theta=5^\circ} < X_{tr0\theta=5^\circ}; \\ & X_{tr\theta=16^\circ} < X_{tr0\theta=16^\circ}; \\ & |t - 0.149| < 0.001; \\ & |X_{t,\max} - 0.44| < 0.015. \end{aligned}$$

式中, 下标 $\theta = 5^\circ$ 或 $\theta = 16^\circ$ 表示风力机翼型的计算工况, 下标 0 表示风力机初始翼型的性能参数。 C_L 、 ϵ 、 C_M 分别表示风力机翼型的升力系数、升阻比和力矩系数; X_{tr} 表示风力机翼型上翼面的转捩点位置; t 、 $X_{t,\max}$ 分别表示风力机翼型的最大相对厚度和其位置。

4.2 风力机翼型多目标气动优化设计结果

图 3 为 Pareto 前沿结果; 图 4 为风力机翼型几何特征优化结果; 图 5 为风力机翼型升力特性优化结果; 图 6 为风力机翼型力矩特性优化结果; 图 7 为风力机翼型升阻比优化结果。

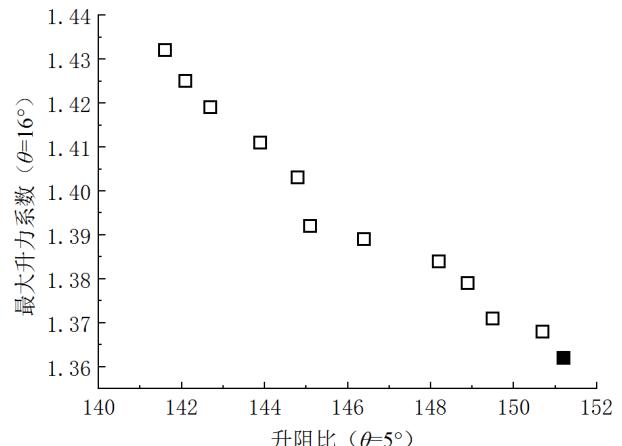


图 3 Pareto 前沿结果

Figure 3 The results of Pareto leading edge

根据风力机翼型的实际服役环境, 确定在来流攻角 $\theta = 5^\circ$ 时, 风力机翼型的升阻比气动特性所占的优先级权重更大[15], 因此, 从图 3 中可选出表示风力机翼型升阻比特性最高值的 Pareto 最优解, 即图 3 中的黑色方格点。

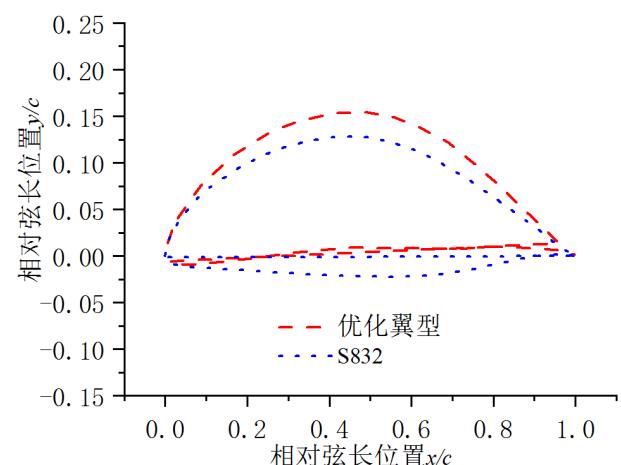


图 4 风力机翼型几何特征优化结果

Figure 4 Optimization results of wind turbine airfoil geometry features

从图 4 中可知, 在来流攻角 $\theta = 5^\circ$ 时, 优化翼型的

最大相对厚度及最大相对厚度位置的数值均比风力机翼型 S832 的小, 分别减少了 $0.03\%c$ 、 $0.18\%c$ 。优化翼型上翼面的转捩点位置比风力机翼型 S832 前移了 0.0127, 因此, 风力机优化翼型的粗糙度敏感性得到有效降低。

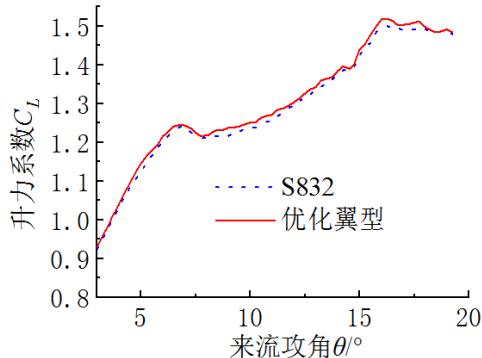


图 5 风力机翼型升力特性优化结果

Figure 5 Optimization results of wind turbine airfoil lift characteristics

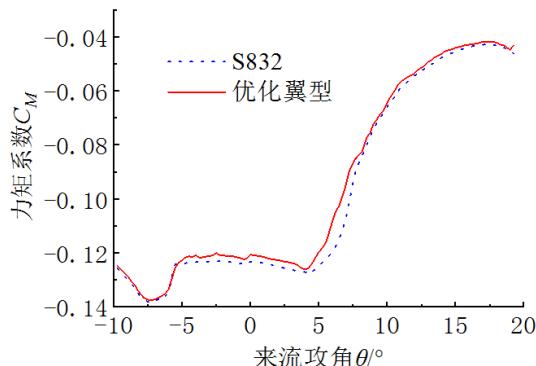


图 6 风力机翼型力矩特性优化结果

Figure 6 Optimization results of wind turbine airfoil moment characteristics

从图 5 可知, 当来流攻角 $\theta \leq 16^\circ$ 时, 升力系数曲线随来流攻角呈上升趋势, 当来流攻角 $\theta > 16^\circ$ 时, 升力系数曲线呈下降趋势。在升力系数曲线上升段内, 空气黏性对气流流动的阻碍作用逐渐增大, 当升力系数达到最大后, 空气黏性对气流流动的阻碍作用大于气流流经风力机翼型所产生的升力, 风力机翼型开始出现动态失速现象, 于是升力系数曲线开始呈下降趋势; 当来流攻角 $\theta=5^\circ$ 和 $\theta=16^\circ$ 时, 优化翼型的升力系数分别比风力机翼型 S832 增加了 28.7% 和 1.32%, 且临界攻角略大于风力机翼型 S832, 约为 1.18° , 一定程度上减弱了风力机翼型动态失速现象的影响。

由图 6 可看出, 当来流攻角 θ 较小时, 由于风力机

翼型几乎不受空气黏性影响, 力矩系数曲线变化趋势较缓, 随着空气黏性影响增大, 力矩系数曲线急剧变化, 在来流攻角 $\theta=5^\circ$ 时, 优化翼型的力矩系数比风力机翼型 S832 的力矩系数更小, 表明优化翼型在有效降低由俯仰力矩作用引起的俯仰运动幅度。

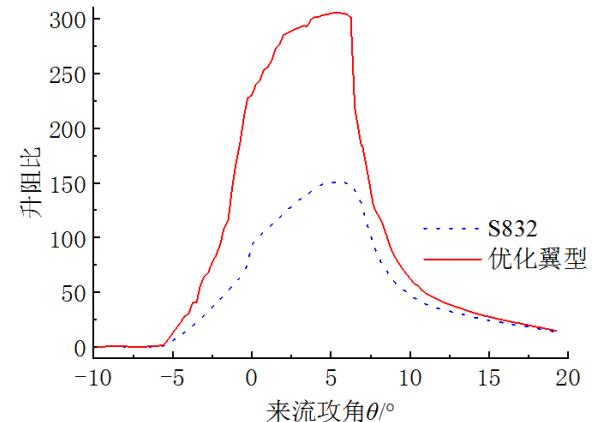


图 7 风力机翼型升阻比特性优化结果

Figure 7 Optimization results of wind turbine airfoil lift-to-drag ratio characteristics

由图 7 可知, 在来流攻角 $\theta=5^\circ$ 时, 优化翼型的升阻比约为风力机翼型 S832 的 2 倍; 在来流攻角 $\theta=16^\circ$ 时, 优化翼型的升阻比约为风力机翼型 S832 的 1.08 倍。

5 结论

- 1) 加权处理的变异函数可有效提高 Kriging 模型的模拟精度。阐述了 Kriging 模型的计算原理, 并对其变异函数进行加权处理, 综合考虑各点对间的距离及样本个数的影响, 提高模拟精度。
- 2) 通过加权 Kriging 模型与 Pareto 方法的结合, 有效提高了风力机翼型多目标优化效率。优化翼型的升阻比特性显著提高, 最大升力系数特性稍有增大, 力矩系数特性的绝对值、最大相对厚度及其位置等有所减小。与加权 Kriging 模型结合的 Pareto 多目标优化设计算法既能满足风力机翼型的多目标气动优化设计要求, 也提高了风力机翼型多目标气动优化设计的计算效率。

致谢

本文的算例采用湖南科技大学和湘潭理工学院提供的相关计算平台进行研究。

参考文献

- [1] 陈进, 张石强, EECEN P J, 等. 风力机翼型参数化表达及收敛特性 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (10): 132-138.
- [2] LIU D, LITVINENKO A, SCHILLINGS C, et al. Quantification of airfoil geometry-induced aerodynamic uncertainties comparison of approaches [J]. SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification, 2017, 5 (1): 334-352.
- [3] Papadimitriou D. I, Papadimitriou C. Aerodynamic shape optimization for minimum robust drag and lift reliability constraint [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 55: 24-33.
- [4] Ram K R, Lal S P, Ahmed M R. Design and optimization of airfoils and a 20kW wind turbine using multi-objective genetic algorithm and HARP_Opt code [J]. Renewable Energy, 2019, 144: 56-67.
- [5] 王迅, 蔡晋生, 屈崑. 基于改进 CST 参数化方法和转捩模型的翼型优化设计 [J]. 航空学报, 2015, 36 (2): 449-461.
- [6] Mortazavi S. M, Soltani M. R, Motieyan H. A Pareto optimal multi-objective optimization for a horizontal axis wind turbine blade airfoil sections utilizing exergy analysis and neural networks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136: 62-72.
- [7] Liu P. Y, Yu G. H, Zhu X. C. Unsteady aerodynamic prediction for dynamic stall of wind turbine airfoils with the reduced order modeling [J]. Renewable Energy, 2014, 69-74.
- [8] Chaudhuri A, Haftka R. T, Ifju P. Experimental flapping wing optimization and uncertainty quantification using limited samples [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51 (4): 1-14.
- [9] Liu J, Song W. P, Han Z. H. 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.
- [10] 陈学孔. 低雷诺数翼型气动外形优化设计及其应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [11] 文泽军, 孟祥恒, 肖钊, 等. 基于数论网格法与 Morris 法的翼型气动特性敏感性分析 [J]. 工程设计学报, 2022, 42 (4): 1-8.
- [12] 王龙, 宋文萍, 许建华. 基于 Pareto 遗传算法的风力机翼型多点优化设计 [J]. 太阳能学报, 2013, 34 (10): 1685-1689.
- [13] Kleijn E. J. Regression and Kriging metamodels with their experimental designs in simulation: a review [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256 (1): 1-16.
- [14] 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.
- [15] L. O M H. Aerodynamics of Wind Turbines [M]. Taylor and Francis: 2015.