

风力机翼型的多学科设计优化

余莉 呼政魁 程涵明 晓

(南京航空航天大学航空宇航学院,南京,210016)

摘要:为了解决优化计算和流场分析耦合求解的难题,并实现优化流程的自动化运行,采用多学科优化设计框架软件,针对风力机专用翼型运行工况,对低雷诺数航空翼型NACA4412的气动性能进行优化设计。软件集成了翼型生成、网格划分、流场分析、优化计算4个模块。其中,流场计算采用N-S方程求解;优化方法为多岛遗传算法。优化结果表明,优化后翼型有较高的升力系数和相对大的升阻比,其升阻比提高了15.9%。该方法可以实现多学科领域的精确分析和整个优化循环过程的自动化运行,也能为其他气动外形的优化设计提供参考。

关键词:翼型;多岛遗传算法;流场计算;优化设计

中图分类号:V211.3;TK83

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)05-0697-04

Multidisciplinary Design Optimization for Wind Turbine Airfoil

Yu Li, Hu Zhengkui, Cheng Han, Ming Xiao

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A framework for multidisciplinary optimization design is applied to solve the coupling problem of optimization and flow field analysis in automatically. For the operating conditions of wind turbine airfoil, the NACA4412 is chosen as an initial airfoil and is optimized in flow field with low Reynolds numbers. There are four modules integrated into software including airfoil generation, mesh division, flow field analysis and optimization. In the third module, the Navier-Stokes(N-S) equation is used. The optimization method is a multi-island genetic algorithm. Results show that an optimized airfoil has a higher lift coefficient and a 15.9% higher lift-drag ratio. This method can be applied in multi-disciplinary accurate analysis and realize the optimization cycle automatically, which can be widely used in airfoil optimization design.

Key words: airfoil; multi-island genetic algorithm; flow field calculation; optimization design

能源的开发和利用是人类赖以生存与发展的基础,随着经济的快速发展,化石燃料日益枯竭,能源和环境问题日益突出,储量丰富、无污染的可再生能源——风能逐渐受到人们的青睐。但是,在风力机空气动力学领域,还有许多基本理论问题没有得到很好的解决,其中最突出的是风力机叶片的气动设计,而叶片的气动性能又与其翼型密切相关。因此,设计开发出满足风力机性能需要的专用翼型对于提高风力机效率、安全可靠利用风能资源

具有重要意义。

当前,具有自主知识产权的国内风力机专用翼型研究较少,现有的研究成果一般均是对国外风力机专用翼型进行气动性能数值试验或者风洞实验^[1-2]。李宏利采用正问题设计方法可以实现风力机翼型的设计,但需要设计者反复地试凑,限制了设计的速度^[3]。气动外形的优化设计涉及外形优化计算和流场计算两类数值计算问题,两者难以联立求解,更难于实现优化流程的自动化运行。本文通

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2010-11-16;**修订日期:**2011-01-10

通讯作者:余莉,女,教授,1969年11月生,E-mail:yuli-happy@nuaa.edu.cn。

过ISIGHT软件将自程序和CFD软件集成,能够实现整个优化流程的自动化运行,解决了复杂的流场数值计算与强非线性优化技术耦合的难题,能够在多种气动外形的优化设计上,同时可以进行风力机专用翼型优化设计,解决了国内风力机翼型设计的自主知识产权问题。因为方法的通用性和自动化,这种方法可以很方便地加入更多变量,实现多目标或者多学科优化。

1 翼型流场气动分析

风力机主要功率产生区域集中在叶片的75%半径处,此处翼型要求具有较高的升阻比,其切向速度范围约为45~68 m/s,雷诺数范围是 $0.7 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6$,属于低雷诺数绕流问题。因此,基本控制方程为不可压缩N-S方程,湍流模型选取RNG $k-\epsilon$ 两方程模型,对上述方程进行二阶迎风格式离散,采用压力基求解器进行求解,其中经验常数取Fluent默认值。无穷远处来流速度为入口边界条件,自由出流为出口边界条件,壁面为无滑移边界条件。

为了验证本流场模型的正确性,采用张亚峰等人^[2]对低速高升力翼型的风洞实验结果来验证。以 $Ma = 0.04$,来流迎角为 2° , $Re = 7.1 \times 10^5$ 时的LA203A翼型为例。利用前处理软件Gambit进行几何建模,计算网格采用结构化C型网格(图1),网格数为50 000。Fluent数值计算结果和实验结果对比如表1,证明本文采用的流场模型能反映工程实际情况。

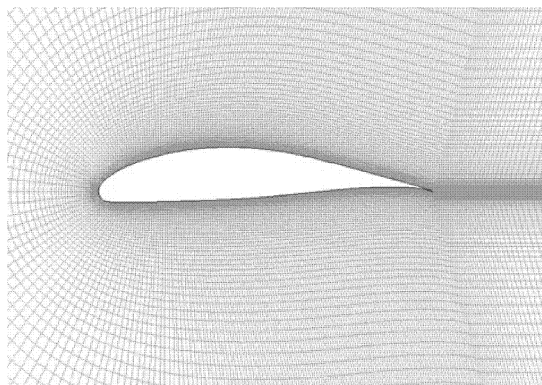


图1 翼型局部网格

表1 数值计算结果与实验结果对比

气动特性	升力系数 C_L	阻力系数 C_D	升阻比 C_L/C_D
实验结果	0.940	0.018	52.2
数值结果	0.951	0.020	47.6

2 遗传优化算法

2.1 遗传算法原理

遗传算法^[4-5]是一种基于生物进化原理构想出

来的搜索最优解的仿生算法。其基本原理是从随机生成的初始群体出发,采用基于优胜劣汰策略选择优良个体作为父代;通过父代个体的复制、杂交和变异来繁衍进化的子代种群,最终收敛得到最优个体。该算法对搜索空间无苛刻要求,不要求函数具有连续性和可导性,非常适合对复杂工程问题进行优化分析。

本文采用多岛遗传算法(Multi-island genetic algorithm, MIGA)进行计算,其特点是将每个种群的个体分为几个子群——岛,标准遗传算法的所有操作分别在每个岛上进行,每个岛上选定的个体定期地迁移到另外岛上^[6]。多岛遗传算法中的迁移操作保持了解的多样性,提高了全局最优解的机会,可抑制早熟现象的发生。

2.2 算例验证

翼型气动性能优化问题中,设计变量与外形的优化是强非线性关系,而在对复杂非线性的工程问题进行优化时,可能由于复杂问题的多峰值,使得一般的传统算法容易陷入局部最优或者得不出可靠的最优解。因此,本文选择一个多元多峰函数Shubert来测试本文中采用的多岛遗传算法的全局性和可靠性。Shuert函数为

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^5 i \cos[(i+1)x + i] \times \sum_{j=1}^5 j \cos[(i+1)y + 1] \quad (1)$$

求 $\min z(x, y)$ 。式中 $-10 \leq x, y \leq 10$ 。对该典型函数,其最小值为 -186.7309 ^[7]。

优化计算所选择的进化代数100,其他参数设定如下:子种群规模及个体数分别取5和10;复制、杂交、变异概率分别取0.8,0.9,0.01;迁移率及迁移间隔分别为0.3及4。经过100代计算后得到全局最优值 -186.73084 ,证明选取的多岛遗传算法具有一定的稳定性和可靠性。

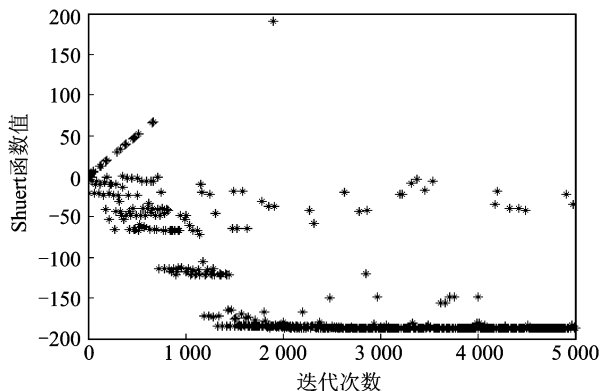


图2 Shuert函数优化过程

3 风力机专用翼型优化设计

3.1 翼型的参数化表达方式

翼型的参数化表示方法会直接影响翼型优化设计的结果。简单的插值方法对设计过程中曲线的变化缺乏局部控制能力。不同的插值方法会得到不同的插值曲线,为解决上述问题,本文采用解析函数线性叠加来表示翼型形状^[7-8]

$$y(x) = y_0(x) + \sum_{k=1}^N c_k f_k(x) \quad (2)$$

式中: $y_0(x)$ 为基准翼型的形状; N 和 $c_k(k=1, \dots, N)$ 分别表示控制翼型形状的参数个数和系数; $f_k(x)$ 为所选用的型函数

$$f_k(x) = \begin{cases} x^{0.25}(1-x)e^{-20x} & k=1 \\ \sin^3(\pi x^{e(k)}) & k>1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $e(k) = \frac{\log 0.5}{\log x_k}, 0 \leq x \leq 1, k=2, 3, 4, 5, 6, 7$ 时, x_k 分别为0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 0.90。

型函数系数作为设计变量,与基准翼型和固定的前后缘点一起确定翼型形状。选取上、下各7个设计变量来确定翼型,其取值范围为 $\left[-4 \frac{\delta_0}{100}, 4 \frac{\delta_0}{100}\right]$ (δ_0 为翼型最大厚度)。

3.2 ISIGHT 集成优化流程

ISIGHT 软件不仅可以连接自行开发的各种程序模块,也可以集成多种商业软件,从而实现全流程的自动化运行^[9-10]。本文在ISIGHT平台下集成了翼型生成、网格划分、流场分析、优化计算4个模块。优化流程如图3所示:(1)根据基准翼型及型函数系数,编写参数化翼型结构生成程序,得到翼型结构数据文件;(2)Gambit 网格划分模块调用翼型结构数据文件,自动划分网格,并生成翼型网格文件;(3)流场计算模块调用网格文件,进行翼型气动流场计算,并将气动系数写入数据文件;(4)根据气动系数数据文件,利用多岛遗传算法运算后生成新一代的种群个体,得到新的型函数系数。由新的型函数系数,重复步骤(1)~(4),直至优化收敛。

在上述4个计算模块中,(2)~(4)模块均会产生巨大的计算消耗,尤其是Flunt 流场计算模块所

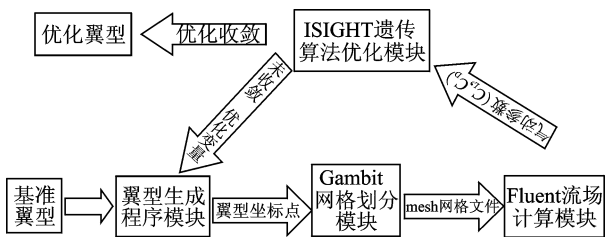


图3 优化流程图

耗费的计算资源最多。为此,本文采用二维翼形进行优化分析;同时,整个优化流程在8核、16G内存的曙光服务器上进行计算。

3.3 风力机专用翼型优化算例

本文针对600 kW 风力机运行工况,工作雷诺数为 2×10^6 条件下的二维翼形进行优化设计,该区域可选用风力机上最常见、最具代表性NACA系列低速翼型作为基准翼型。本论文所选翼型为NACA4412,优化目标为在不大于原翼型阻力的基础上,尽可能提高升力。

流场计算条件为:采用无穷远来流风速 $V=12$ m/s作为进口边界条件,自由出流为出口边界条件,来流迎角 4° ,湍流度为3%,计算网格采用结构化C型网格。

多岛遗传算法所选择的进化代数40;子种群规模及个体数分别取5和10;复制、杂交、变异概率分别取0.8, 0.9, 0.01;迁移率及迁移间隔分别为0.3及4。

在8核曙光服务器上耗时约80 h完成了优化流程的耦合计算,经过40代约2 000次迭代计算后,实现了优化设计(图4)。翼型优化前后的几何外形如图5所示,优化后翼型弯度增大,升力提高了15.34%,升阻比提高了15.9%(表2)。

图6~9分别为优化前后翼型压力和速度矢量分布。由优化前后的压力图看以看到,优化后翼型下

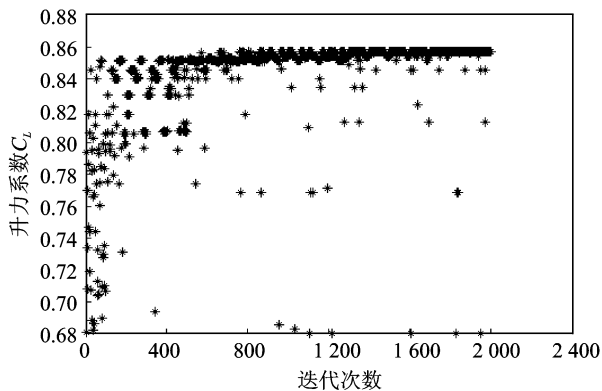


图4 翼型优化迭代过程

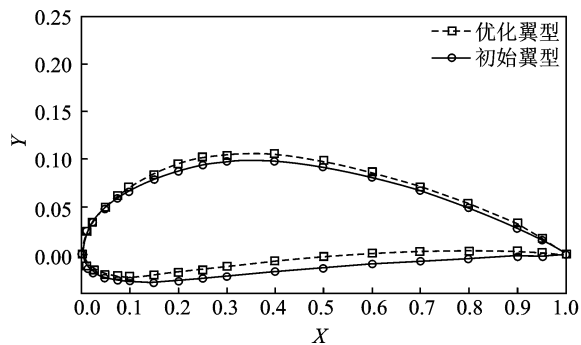


图5 优化前后翼型几何外形

表2 优化前后气动参数

气动特性	升力系数 C_L	阻力系数 C_D	升阻比 C_L/C_D
优化前	0.743	0.026 3	28.3
优化后	0.857	0.026 1	32.8

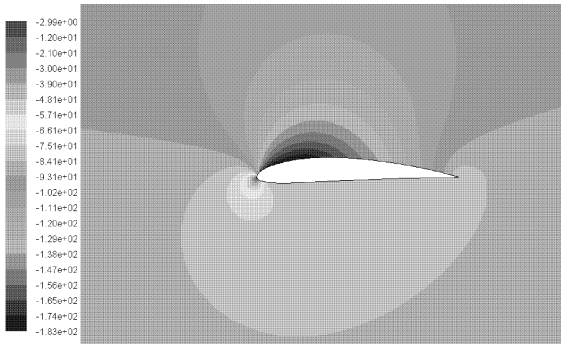


图6 NACA4412翼型压力图

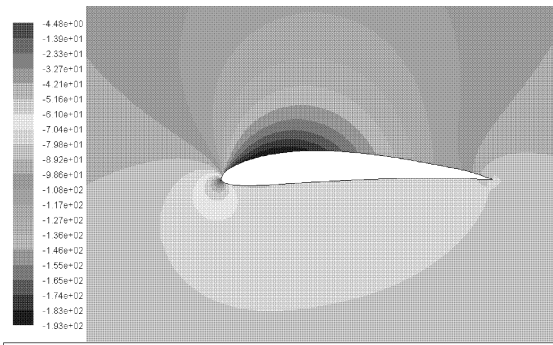


图7 优化翼型压力分布图

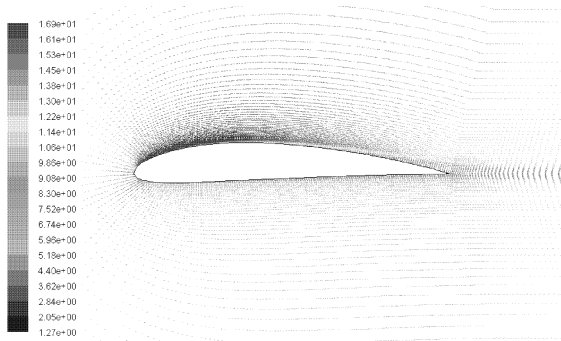


图8 NACA4412翼型速度矢量图

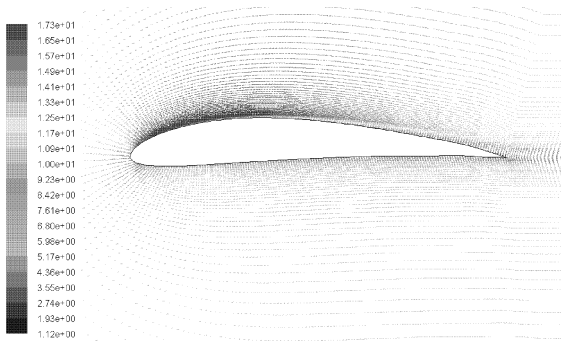


图9 优化翼型速度矢量分布图

表面压力增大、速度减小,上表面压力减小,从而使升力增加。流场结果表明:优化翼型气动性能得到很大的提高。

4 结 论

本文通过优化平台软件将几何建模、网格划分、流场计算、优化算法集成起来,解决了复杂的流场计算和优化计算耦合求解的难题,实现了整个流程的自动化运行,得出以下结论:

(1)通过 ISIGHT 平台可以对商业软件和自己编写的程序进行集成开发,不仅可节省大量编码工作,且可以使整个优化过程实现自动化运行,具有很大的工程意义。

(2)对航空标准翼型在风力机工况下进行气动优化设计,所得优化翼型具有较高的升力系数和升阻比,提高了该翼型的气动性能。采用该方法可以实现自主知识产权的翼型设计,也能实现其他气动外形的优化设计。

(3)优化框架软件集成方法具有较高的通用性,可以很方便地加入更多的变量,实现多目标或者多学科优化。

参考文献:

- [1] 叶枝全, 黄继雄, 陈严, 等. 适用于风力机的新翼型气动性能的实验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4):548-554.
- [2] 张亚峰, 宋笔锋, 李占科. 高升力翼型的气动优化设计和实验研究[J]. 飞行力学, 2006, 24(4):70-72.
- [3] 李宏利. 水平轴风力机专用翼型族的设计及其气动特性研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2009.
- [4] Milono M, Koumoutsakos P. A clustering genetic algorithm for actuator optimization in flow control [J]. Journal of Computational Physics, 2002, 175(1): 79-107.
- [5] Chen H, Ooka R, Kato S. Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms and coupled simulation of convection, radiation and conduction [J]. Building and Environment, 2008, 43(1):18-31.
- [6] 宋昕, 谷正气, 张清林, 等. 基于多岛遗传算法的湍流模型优化研究 [J]. 湖南大学学报, 2011, 38(2): 23-29.
- [7] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [8] Hicks R, Henne P. Wing design by numerical optimization [J]. Aircraft, 1978, 15(7):470-473.
- [9] Yin Bo, Xu Dian, An Yiran, et al. Aerodynamic optimization of 3D wing based on isight [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(5): 603-610.
- [10] Wang Wei, Mo Rong, Chang Zhiyong, et al. Aerodynamic optimization designing of airfoil based on isight [C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing. Shanghai, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010: 262-266.