

基于遗传算法的离心泵叶片水力性能优化

田 辉 孙秀玲 郭 涛 李国君
(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

【摘要】 建立了一种基于遗传算法的离心泵叶片型线水力性能优化方法。区别于传统优化方法,此方法通过CFD技术求解离心泵叶片的水力性能,以离心泵水力效率及理论扬程作为优化目标进行多目标优化。包含3个主要步骤:基于蒙面法和三次B样条曲线的三维叶片型线参数化;基于NUMECA商用软件的计算域网格划分及流场求解;基于多目标遗传算法的全局优化。应用此方法对某单级单吸蜗壳离心泵水力性能进行了多目标优化,优化结果表明离心泵水力效率及理论扬程分别提高了0.35%和0.944%。

关键词: 离心泵 遗传算法 多目标 参数化
中图分类号: O357.1; TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0064-04

Optimization for the Hydraulic Performance of Centrifugal Blade Based on the Genetic Algorithm

Tian Hui Sun Xiuling Guo Tao Li Guojun
(School of Energy and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract

A new optimization method based on genetic algorithm for the optimization of a centrifugal blade profile was presented. Different from the traditional optimization method, the hydraulic performance of centrifugal blade profile was predicted with CFD technology in the new developed method. The hydraulic efficiency and theoretical head were defined as the objective functions for the blade profile optimization using multiobjective genetic algorithm. Three key technologies were employed as the follows: 3-D blade profile parameterization, grid generation & CFD analysis, multiobjective optimization. By this optimization method, a single-stage single-suction centrifugal blade was redesigned and optimized at the design condition. The results showed that the objective function values of the maximum hydraulic efficiency and the theoretical head were increased by 0.35% and 0.944% respectively.

Key words Centrifugal pump, Genetic algorithm, Multiobjective, Parameterization

引言

基于三维流场模拟结果对离心泵结构参数进行适当调整可以提高离心泵性能,但这需要设计者具有丰富的设计经验,一种更有效的办法是应用优化算法寻找优化方向。Jameson^[1]及 Reuther^[2]分别利用基于梯度的优化算法成功地对超音速翼型进行了优化设计,但优化过程中梯度的离散格式精度还有

待提高。李颖晨^[3]结合基于梯度的优化算法和人工神经网络对二维透平叶栅进行了反设计,此法提供了较高的优化效率且其计算资源并不会因优化变量的增加而显著增加,但此法不便于施加约束条件及实现多目标优化。Benini^[4]以等熵效率及总压为优化目标,质量流量为约束条件成功地对 NASA rotor 37 进行了多目标优化。李军^[5]结合贝塞尔曲线拟合技术及遗传算法对离心泵导叶型线进行了优

收稿日期: 2009-07-06 修回日期: 2009-09-07
作者简介: 田辉, 博士生, 主要从事离心泵优化设计及气液两相流数值模拟研究, E-mail: tianhui.cfd@stu.xjtu.edu.cn
通讯作者: 李国君, 教授, 博士生导师, 主要从事叶轮机械气动动力学及泵的优化设计研究, E-mail: liguojun@mail.xjtu.edu.cn

化设计。宋立明^[6]将差分进化算法拓展至并行计算实现了对透平叶片的优化设计。然而遗传算法在离心泵性能优化的研究报导并不多。最近, Derakhshan^[7]基于梯度的优化算法对离心泵叶片型线进行了优化得到了可喜的成果。

本文旨在探索一种适用于离心泵叶片型线优化设计的多目标优化方法。以离心泵水力效率及理论扬程为优化目标,对某单级单吸蜗壳离心泵叶片型线进行多目标优化设计。通过自编 Fortran 程序实现:① 三次 B 样条曲线对叶片进行参数化。② 调用 NUMECA 商用软件进行流场分析。③ 多目标遗传算法优化等过程的自动实现。应用此优化算法对某离心叶片型线进行优化设计。

1 离心泵叶片型线参数化

样条曲线、贝塞尔曲线、B 样条曲线等拟合方法广泛应用于型线参数化领域^[8]。本文应用 3 次 B 样条曲线分别拟合沿叶高方向上 Hub 面,中叶展平面及 Shroud 面的压力面型线及吸力面型线,通过蒙面法将这一系列拟合曲线生成三维叶片。由于 B 样条曲线及蒙面法本身的局部性特点使得此种参数化方法更容易根据流场水力性能的需要对三维叶型进行局部调整。图 1a 中给出了 3 个二维面上拟合曲线的示意图。

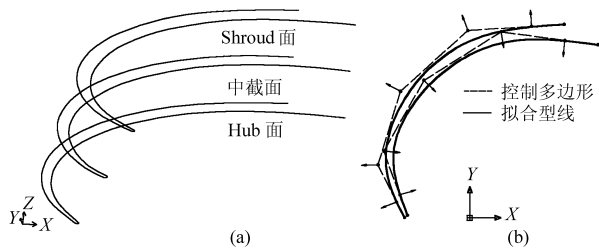


图 1 叶片型线参数化
Fig. 1 Blade profiles parameterization

- (a) 蒙面法拟合生成三维叶片型线
- (b) 三次 B 样条曲线拟合二维叶片型线及优化变量分布

图 1b 中给出 3 次 B 样条曲线拟合二维叶片型线示意图并给出优化变量分布。根据文献[9~10]中的求解方法,本文采用包括前缘点和尾缘点在内的 7 个控制点拟合生成 81 个型值点来描述每条二维曲线。图 1b 中实心圆点表示控制点。B 样条曲线的局部性可以增大搜索域而更大限度地体现各控制点对叶片水力性能的影响。优化过程中保持前缘点和尾缘点不变,中间 5 个可变控制点可沿图中箭头所指方向(近似为拟合曲线法线方向)搜索。定义可变控制点新旧位置间的距离为优化变量,记作 $\Delta h(i)$ 。若记可变控制点原始位置为 $(x_0(i), y_0(i))$,新位置为 $(x(i), y(i))$,法线方向的方向角

为 θ ,则控制点沿法线方向移动距离 $\Delta h(i)$ 后的新位置为

$$\begin{cases} x(i) = x_0(i) + \Delta h(i) \cos \theta \\ y(i) = y_0(i) + \Delta h(i) \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中距离 $\Delta h(i)$ 由多目标遗传算法根据“遗传”信息而定,本文对其变化控制在 $\pm 5\%$ 倍弦长范围内。“-”表示变化方向与图中箭头方向相反。

2 离心泵内三维流场分析

在叶片水力性能三维 CFD 分析时,优化目标水力效率及理论扬程通过 NUMECA 商用软件求得。由于优化目标为离心泵的总性能而不过多地考虑泵内流动细节,本文采用混合平面法处理动静界面间数据传递。计算网格由单个流道及蜗壳组成,如图 2 所示。

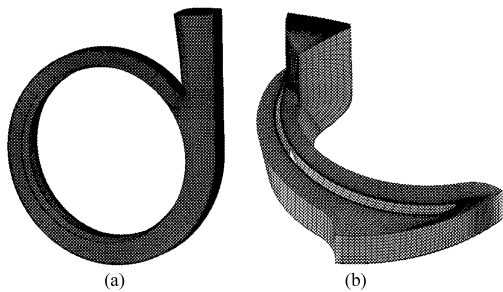


图 2 计算网格
Fig. 2 Computational grid
(a) 蜗壳网格 (b) 叶轮网格

2.1 网格生成

计算域采用分块结构化网格,蜗壳内采用蝶形网格保证块与块间网格点一一对应,以加速计算过程中的数据传递。叶轮网格采用 H—O—H 型网格,保证计算网格正交性。为保证计算精度,将第一层网格与壁面间距离设为 0.05 mm 以满足 $y^+ \in [20, 50]$ ^[11]。蜗壳部分网格总数为 435 844,叶轮部分网格总数为 168 742。优化过程中 AutoGrid 读取 .trb 文件中保存的叶轮网格拓扑结构,并将此网格设置应用于新的叶型(保存于 .Geomturbo 文件)。

2.2 流场求解

流场计算设置为:工质为水,湍流模型为 $k-\varepsilon$ 模型,特征长度为 0.41 m,特征速度为 25.0 m/s,特征密度为 998 kg/m³,旋转速度为 1 200 r/min,动静交界面处理为混合平面方式,入口边界条件为质量流量,出口边界条件为静压,设计流量为 59 kg/s。

在 FINE 模块中将流场计算设置(保存于 .run 文件)施加于上一步生成的网格中。求解三维稳态时均 Navier—Stokes 方程。控制方程通过有限体积法离散,保证对流相、扩散相均达到二阶精度。采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。由于叶轮网格拓扑结构形式相同,

本文采用原始叶型收敛的流场信息作为新叶型的初场。同时应用多重网格技术使得求解过程在 500 步迭代计算中残差降到 10^{-5} 范围内。优化过程在 Core(TM)2 Quad Q9650 3.00 GHz 同时配有 4 GB 内存的计算机上运行,求解每个叶型水力性能耗时近 80 min。图 3 给出了原型泵水力效率及理论扬程数值解与实验值的对比。(图 3 中的实验值为在水泵实验所得效率、扬程通过考虑机械效率及容积效率折算后的水力效率及理论扬程。)图中可见两条性能曲线趋势相一致。在设计流量附近数值解与实验值吻合良好。

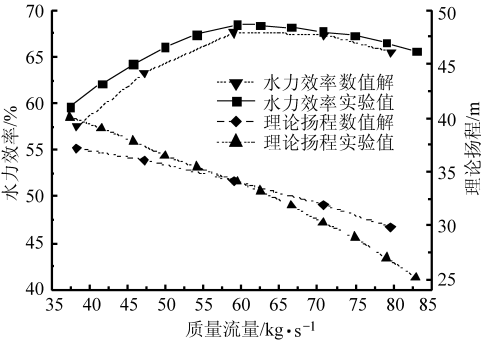


图 3 性能曲线
Fig. 3 Performance curves

3 离心泵水力性能优化

基于对 5 个典型测试函数的数值优化实验,本文选择由模拟退火选择算子、模拟二进制杂交算子、非均匀变异算子组成的多目标遗传算法对离心泵水力效率及理论扬程进行多目标优化。优化过程中根据每代结果生成非劣集最终逼近多目标优化问题的最优解 (pareto-optimal front)^[12-13]。优化算法的可行性验证详见参考文献[14]。

离心泵叶片型线优化问题可表示为

$$\max \begin{cases} F(\Delta h(i)) = [F_1(\Delta h(i)), F_2(\Delta h(i))] \\ \Delta h(i) \in [-5\%l, 5\%l] \end{cases} \tag{2}$$

$$F_1(\Delta h(i)) = \eta(\Delta h(i)) = \frac{\Delta p_{tot}(\Delta h(i)) Q}{M(\Delta h(i)) \omega} \tag{3}$$

$$F_2(\Delta h(i)) = H(\Delta h(i)) = \frac{\Delta p_{tot}(\Delta h(i))}{\rho g} \tag{4}$$

式中 $\Delta h(i)$ ——第 i 个优化变量
 l ——叶片弦长
 $\eta(\Delta h(i))$ ——水力效率
 $H(\Delta h(i))$ ——理论扬程
 Δp_{tot} ——出口与进口的总压差
 Q ——质量流量 M ——叶片扭矩
 ω ——旋转角速度

ρ ——工质密度,水取 998 kg/m^3
 g ——重力加速度,取 9.81 m/s^2

如图 4 所示优化过程由以下几个步骤组成:
① 读入控制参数。② 初始化原始参数化叶型、网格拓扑结构、计算设置及流场初始化。③ 初始化当前代优化变量、参数化表示当前代叶型。④ 对当前代个体逐一进行 CFD 分析得到表征其水力性能的优化目标函数值。⑤ 进行选择、交叉、变异等遗传操作。⑥ 产生新子代,并过滤出当前代非劣集。⑦ 重复③~⑥直到最大优化代数,得到多目标问题的全局最优解。

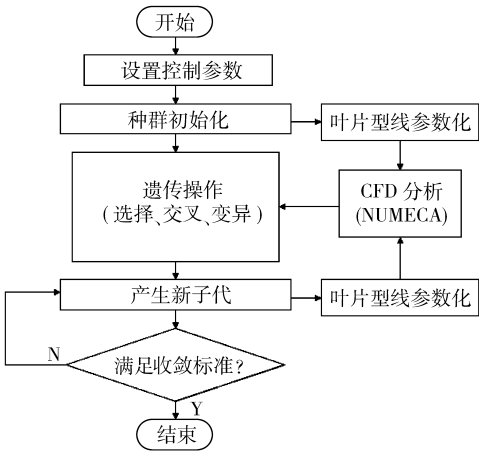


图 4 优化流程图

Fig. 4 Flowchart of the optimization method

4 优化结果

如上所述,一个三维叶片由沿着叶高方向上 3 个平面内的 6 条三次 B 样条曲线通过蒙面法生成。每条曲线包含 5 个可变控制点。随意优化变量总数为 30 个。种群规模及最大优化代数分别为 50 和 30。交叉概率设为 100%。兼顾种群多样性及搜索效率,变异概率设为 2%。同时应用精英保留策略,代沟 (generation gap) 取 20%。

应用上述优化算法在设计工况下对一单级单吸蜗壳离心泵叶片型线进行了多目标优化,叶片转速为 1 200 r/min,质量流量为 59 kg/s。经过 30 代进化得到由 17 个多目标最优解组成的 Pareto-optimal Front。图 5 给出了多目标优化的收敛史,图 6 给出了中叶展平面内原始叶型与优化后个体 A 及个体 B 的几何形状。优化结果显示离心泵水力效率及理论扬程最大分别提高了 0.35% 和 0.944%,如图 5f 所示。

5 结束语

本文提出了一种基于多目标遗传算法的水泵型

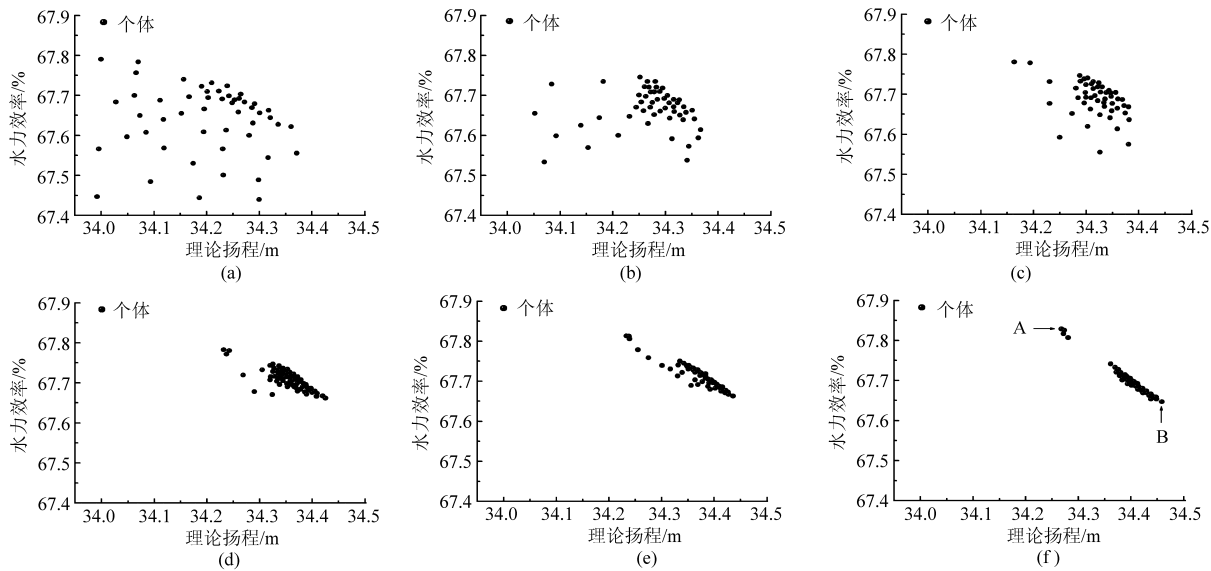


图 5 多目标优化收敛史

Fig. 5 Convergence history of multiobjective optimization

(a) 第 5 代 (b) 第 10 代 (c) 第 15 代 (d) 第 20 代 (e) 第 25 代 (f) 第 30 代

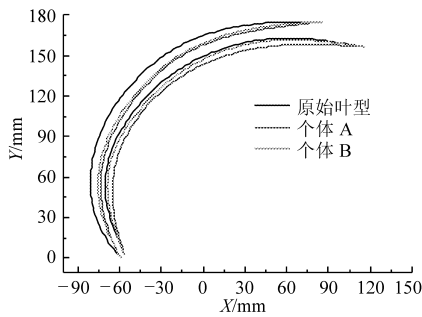


图 6 中叶展平面内原始型线与优化后型线对比

Fig. 6 Original and optimized blades on mid span

线优化方法。结合叶片型线三维参数化方法及 NUMECA 商用软件对叶片水力性能的预测,利用此优化方法在设计工况下对某单级单吸蜗壳离心泵叶片型线进行了多目标优化设计。优化结果表明离心泵水力效率及理论扬程得到了提高。同时验证了本文所建立的优化方法对设计者经验并没有过多要求,可以根据多目标遗传算法确定搜索方向实现叶片型线的自动优化设计。

参 考 文 献

1 Jameson A, Martinelli L, Pierce N A. Optimum aerodynamic design using the Navier-Stokes equations[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1998, 10(1~4): 213~237.

2 Reuther J, Alonso J J, Rimlinger M J, et al. Aerodynamic shape optimization of supersonic aircraft configurations via an adjoint formulation on distributed memory parallel computers[J]. Computers & Fluids, 1999, 28(4~5): 675~700.

3 Li Y C, Yang D L, Feng Z P. Inverse problem in aerodynamic shape design of turbomachinery blades[C]//2006 Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Barcelona, 2006.

4 Benini E. Three-dimensional multi-objective design optimization of a transonic compressor rotor[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(3): 559~565.

5 Li J, Feng Z P, Chang J Z, et al. Aerodynamic optimum design of transonic turbine cascade using genetic algorithms[J]. Journal Thermal Science, 1997, 6(2): 111~116.

6 Song L M, Feng Z P, Li J. Shape optimization of turbine stage using adaptive range differential evolution and three-dimensional Navier-Stokes solver[C]. ASME Paper GT2005-68280, 2005.

7 Derakhshan S, Mohammadi B, Nourbakhsh A. Efficiency improvement of centrifugal reverse pumps[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(2): 1 103~1 111.

8 Hoschek J, Muller R. Turbine blade design by lofted B-spline surfaces [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 119(1~2): 235~248.

9 Schoenberg I J. On spline function[C]//Proceedings of the National Academy of Science USA, 1964, 52(4): 947~950.

10 Carl D B. On calculation with B-spline[J]. Journal of Approximation Theory, 1972, 6(1): 50~62.

检测结果的准确度。表 3 为试验得到的数据。

表 3 准确性试验结果
Tab.3 Test results of accuracy %

试验序号	化学值	预测值	偏差	相对误差
1	13.59	14.01	0.42	3.09
2	13.59	13.28	0.31	2.28
3	13.59	14.17	0.58	4.27
4	13.59	13.39	0.20	1.47
5	13.59	13.73	0.14	1.03

从表中得到预测值均值为 13.72%，平均偏差为 0.33%，平均相对误差为 2.43%。

(4) 误差分析

噪声水平和重复性试验是在同一次装样的条件下得到的,而准确性试验是将样品重新装样检测后,进行预测得到的。从试验可以看出本系统的噪声水

平低,重复性较差,对预测的准确度还不理想,这主要是由于不同次装样导致实际光程和样品的松紧程度不同所造成的,但是采用多次重复装样检测,最后取均值能提高样品含量的预测准确性。

5 结束语

结合 NIR 技术和虚拟仪器技术,搭建了一个近红外谷物成分检测仪器。用户可以根据需求建立不同粮食的预测模型,从而达到对多种成分的同时检测。该系统利用计算机丰富的软件资源,实现了部分硬件的软件化,简化了仪器结构,缩短了仪器的开发周期。该仪器调试、扩展和维护方便,人机界面友好,增加了系统的灵活性,能直接实时地对测试数据进行分析和处理。通过试验证明仪器性能稳定,可以用于测定粮食样品中的蛋白质、淀粉和脂肪等多种成分。

参 考 文 献

1 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京:中国石化出版社,2000.

2 严衍禄,赵莲蓬,韩东海,等. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京:中国轻工业出版社,2005.

3 孙旭东,章海亮,欧阳爱国,等. 南丰蜜桔可溶性固形物近红外特征波段选择[J]. 农业机械学报,2009,40(7):129~132.
Sun Xudong, Zhang Hailiang, Ouyang Aiguo, et al. Selection of NIR characteristic wavelength bands for soluble solids content in Nanfeng mandarin fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(7):129~132. (in Chinese)

4 徐广通,袁洪福,陆婉珍. 现代近红外光谱技术及应用进展[J]. 光谱学与光谱分析,2002,20(2):134~142.
Xu Guangtong, Yuan Hongfu, Lu Wanzhen. Development of modern near infrared spectroscopic techniques and its applications[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2002, 20(2):134~142. (in Chinese)

5 向贤毅,温志渝,龙再川,等. 微型近红外光谱仪分析系统的研制[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(8):2 286~2 290.
Xiang Xianyi, Wen Zhiyu, Long Zaichuan, et al. Research on the near-infrared spectrometer system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009,29(8):2 286~2 290. (in Chinese)

6 占细雄,林君,周志恒. 近红外光谱仪中的微弱信号检测技术[J]. 仪器仪表学报,2002,23(3):29~31.
Zhan Xixiong, Lin Jun, Zhou Zhiheng. The technique of acquiring weak signal in NIR spectrometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002,23(3):29~31. (in Chinese)

7 修连存,郑志忠,陈春霞,等. 国产便携式近红外药品分析仪原理及其应用[J]. 现代科学仪器,2008(4):120~123.
Xiu Liancun, Zheng Zhizhong, Chen Chunxia, et al. Principle and application of domestic portable near infrared medicine analyzer[J]. Modern Scientific Instruments, 2008(4):120~123. (in Chinese)

8 梁晓艳,吉海彦. 基于 LabVIEW 的近红外测量系统[J]. 微计算机信息,2008,24(1~2):100~101.
Liang Xiaoyan, Ji Haiyan. The measuring system of NIR based on virtual instrument[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(1~2):100~101. (in Chinese)

(上接第 67 页)

11 NUMECA int. User manual[M]. 2006, 7A. Brussels; NUMECA International.

12 Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms[M]. Chichester, U. K: John Wiley & Sons, 2001.

13 Farina M, Deb K, Amato P. Dynamic multiobjective optimization problems: test cases, approximations, and applications [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(5): 425~442.

14 田辉. 离心泵内部流动数值计算及叶片型线优化设计[D]. 西安: 西安交通大学,2008.
Tian Hui. Numerical simulation of the flow in centrifugal pump and the blade profile optimization[D]. Xi'an: Xian Jiaotong University, 2008. (in Chinese)