

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.027

基于 CFD 技术的多级潜水泵优化设计*

崔宝玲 孟嘉嘉 贾晓奇

(浙江理工大学浙江省流体传输技术研究重点实验室, 杭州 310018)

【摘要】 结合多级潜水泵的特点,针对后倾式叶轮及空间导叶的多级潜水泵,以效率最大为优化目标进行优化设计。为了提高优化的精度,对后倾式叶轮和空间导叶进行参数化拟合处理,选择叶轮和导叶的进出口角作为控制参数并在原模型基础上增加 $\pm 20^\circ$ 作为优化范围,在不断进行流场校核的基础上基于遗传算法寻找目标函数的最优值,得到控制参数变化范围内的最优叶轮模型。数值模拟结果表明:当叶轮根部进口角为 35.53° ,出口角为 27.32° ,导叶进口角为 15.48° ,出口角为 61.75° 时获得最优模型,优化后的水泵效率提高了4.12%,单级扬程提高了1.449 m,拓宽了水泵的高效区,提高了水泵的运行稳定性,泵性能得到了优化。

关键词: 多级潜水泵 CFD 优化设计 遗传算法 效率

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0142-05

Optimization Design of Multi-stage Submersible Pump Based on CFD

Cui Baoling Meng Jiajia Jia Xiaoqi

(Province Key Laboratory of Fluid Transmission Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

Combined with the characteristics of multi-stage submersible pump, the pump with sloping impeller and space guide vane was optimized using efficiency as optimization object. To improve the accuracy of numerical simulation, parametric fitting for sloping impeller and space guide vane was carried out. In the process of optimization, the blade inlet and outlet angle of the impeller and guide vane were considered as the control parameters. The range of angle was increased $\pm 20^\circ$ compared with the original model. Based on the successive flow field check, the optimal impeller model was obtained in the variation range of control parameters searching the optimum value of objective function based on genetic algorithm. The optimal model was obtained when inlet angle at the bottom of the blade was 35.53° and the outlet angle was 27.32° , the inlet angle of the guide vane was 15.48° and outlet angle was 61.75° . The pump efficiency increased by 4.12%, and the single stage head increased 1.449 m. The range of high efficiency has been extended, the stability of pump operation is improved, and the performance of the pump is optimized.

Key words Multi-stage submersible pump, CFD, Optimization design, Genetic algorithm, Efficiency

引言

近年来我国在潜水泵的水力设计中往往采用离心泵的设计方法,设计人员在设计过程中常把并用潜水泵当作一般多级泵来对待,其结果使并用潜水

泵的单级扬程和整机效率都降低很多^[1]。比较普遍的现象是生产厂家对同类产品略加改造来满足市场需求。

潜水泵叶轮的优化设计,就是以潜水泵的使用性能为出发点,将流动的基本原理、优化设计的理

收稿日期: 2011-11-01 修回日期: 2011-12-06

* 浙江省重大科技专项重大工业项目(2010C01032)

作者简介: 崔宝玲,教授,主要从事流体机械汽蚀特性与数值模拟研究,E-mail: blcui@zstu.edu.cn

念、计算流体力学和泵的设计有机结合起来,在不同的流场环境中寻求其水力性能和几何参数之间的最佳平衡点,以保证潜水泵在满足性能指标要求的前提下综合性能最佳^[2]。

目前,针对井用潜水泵已进行了一定的研究。针对潜水泵外径受井径限制的结构条件,陆伟刚^[3-4]提出了一种深井离心泵叶轮极大直径设计法,可以使单级扬程大大增加,降低了生产成本;田辉^[5]基于遗传算法对离心泵叶片型线以水力效率及理论扬程进行了多目标优化;李颖晨^[6]结合基于梯度的优化算法和神经网络对二维透平叶栅进行优化设计,提高了优化效率,且计算资源不会随优化变量的增加而显著增加;李军^[7]结合 Bezier 曲线拟合技术及遗传算法对离心泵导叶进行了优化设计;Benini^[8]以熵效率及总压为优化目标,成功地对 NASA rotor37 进行了多目标优化;Derakhshan^[9]基于梯度的优化算法对离心泵叶片型线进行了优化;但针对叶轮和导叶的优化设计研究较少。本文采用 NUMECA 软件,针对采用后倾式叶轮和空间导叶的潜水泵模型,以效率最大为目标函数,以叶轮和导叶的进、出口角作为控制参数,并在原模型基础上增加 $\pm 20^\circ$ 作为优化范围,引进诸如遗传算法、神经网络等优化设计方法进行优化设计,提出最优叶轮模型,并对优化前、后的潜水泵进行数值模拟和性能预测。

1 计算模型和网格划分

本文选用的井用潜水泵是多级泵的一种,与普通单级泵相比,结构形式较为复杂,流动特性也比较特殊。多级泵的首级叶轮进口为无旋流动,其后各级叶轮进口为有旋流动。国内学者研究结果表明,多级泵中第 2 级泵的内部流动状态与其后各级泵内部流动状态大致相同,可以使用第 2 级泵的水力性能代表其后各级泵的水力性能。考虑到级数增加后所带来的网格总数的递增,而网格数的增加又极大延长了计算时间,为了减少计算和优化时间,选取两级泵进行数值模拟分析,取第 2 级泵作为潜水泵优化的原始模型进行优化设计。

1.1 计算模型

研究对象为后倾式叶轮及空间导叶的潜水泵,其流量 $Q = 36 \text{ m}^3/\text{h}$,单级扬程 $H = 6.3 \text{ m}$,转速 $n = 2850 \text{ r}/\text{min}$,叶轮叶片数 $Z_1 = 7$,叶轮叶根处进口角 $\beta_1 = 22.73^\circ$,叶轮叶根处出口角 $\beta_2 = 44.67^\circ$,导叶叶片数 $Z_2 = 8$,导叶叶根处进口角 $\beta_3 = 22.59^\circ$,导叶叶根处出口角 $\beta_4 = 79.33^\circ$,总级数为 11 级。潜水泵叶轮和导叶的几何模型如图 1 所示,为了更好地显示

叶轮和导叶的形状,图中叶轮、导叶前盖板均作透明处理,第 1 级泵作半剖处理。

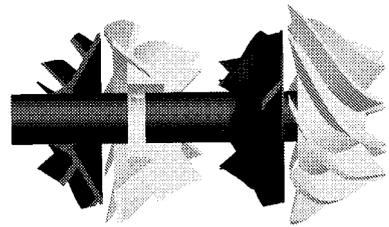


图 1 叶轮和导叶的几何模型

Fig. 1 Geometrical model of impeller and guide vane

1.2 网格划分

网格是 CFD 模型的几何表达形式,也是模拟与分析的载体。潜水泵的后倾式叶轮和空间导叶具有较强的空间三维性,几何形状复杂。本文全部采用六面体结构化网格,其优点是网格质量高,对曲面或空间的拟合度极高,并且在叶轮和导叶前缘、尾缘和壁面附近等位置进行适当加密,以期能准确捕捉到关键部位的流场分布和变化,最大程度保证计算精度。

在后续优化过程中,根据优化参数的变化对叶片几何进行修改得到新的几何模型,为了防止新几何模型出现网格质量太差甚至不能划分网格的情况,同时为了保证网格拓扑结构的一致性和流场计算的延续性,后续所有进行流场校核的优化样本将严格按照原始网格的节点分布规律进行网格划分。潜水泵前两级的网格如图 2 所示。

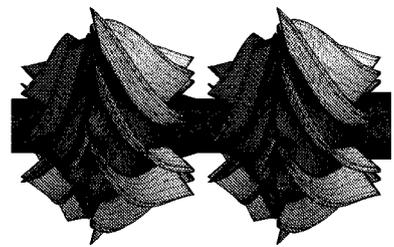


图 2 潜水泵前两级网格

Fig. 2 Grid of front two stages for submersible pump

2 数值模拟

2.1 控制方程和湍流模型

控制方程采用雷诺时均 Navier - Stokes 方程。湍流模型选用鲁棒性非常好、计算消耗少的 Spalart - Allmaras 一方程湍流模型^[10]。Spalart - Allmaras 模型湍流漩涡粘性区是连续的,模型计算稳定,而且 CPU 和内存空间使用很少。

使用多重网格技术和隐式残差光滑等措施来提高计算效率和加速收敛速度。

2.2 边界条件

计算区域的进口边界上假定质量流为均匀连续

分布的边界条件;在计算域出口边界上假定出口静压力;固壁边界为绝热条件,叶轮出口与导叶进口之间截面为动静转子面。临近固壁区域采取壁面函数,并假定叶片表面、前后盖板等固壁均为无滑移、绝热壁面边界条件。

3 优化策略

3.1 多级泵优化步骤

针对潜水泵中最重要的过流部件——叶轮和导叶进行结构改进以达到优化潜水泵的目的。在多级泵的优化过程中,首先在两级泵环境中针对第2级泵叶轮进行叶轮优化,获取最优的叶轮模型;将最优叶轮与原始导叶组合成为新的两级泵,再针对第2级泵导叶进行优化,获取最优导叶模型;最后针对最优叶轮与最优导叶组合模型进行数值模拟和性能预测。叶轮与导叶优化过程中采取相同的优化步骤与优化策略。

3.2 模型的参数化

潜水泵的参数化就是将原始模型的几何特性全部用参数方程表示出来,而且必须保证参数化后的模型集合与原始几何相差无几,从而保证后续优化确实在原始几何基础上进行。

鉴于叶轮叶片的参数化过程和导叶叶片的参数化过程相似,本文以叶轮叶片的参数化过程为例进行说明。叶轮叶片原始模型参数化主要针对叶片子午线与叶片型线进行。如图3所示为叶轮子午面上流线的示意图及流面1参数化拟合的结果。在子午面选定半径 R 方向上高度分别为0、10%、30%、50%、70%、90%和100%的7个流面进行参数化造型,以保证参数化后的叶型与原始叶型相同。参数化后,通过比照参数化前后各个参数点坐标数值,可发现误差小于 10^{-4} ,即可认为参数化叶型与初始叶型完全吻合,可以满足后续优化需求。

3.3 优化参数的选择

优化参数为设计时待定的参数。因此,优化参数越多,设计自由度就越大,达到最优设计目标就越容易,但是同时也会大大提高优化数学函数的维数,增加优化计算的难度和计算时间。

叶轮的几何尺寸主要包括进口直径、出口直径、叶轮前后泵盖的后倾角度以及叶片的进口角、出口角、进出口宽度、叶片数等。考虑到井泵受到井径的约束,将不改变出口直径;为保证配套功率,保持轮毂直径不变,即叶轮进口直径不变;同时为减少目标函数维数,降低优化设计求解难度和计算时间,也不改变叶轮前后盖板的倾斜角度。本次优化将对叶轮进口角和出口角以及空间导叶的进口角和出口角这

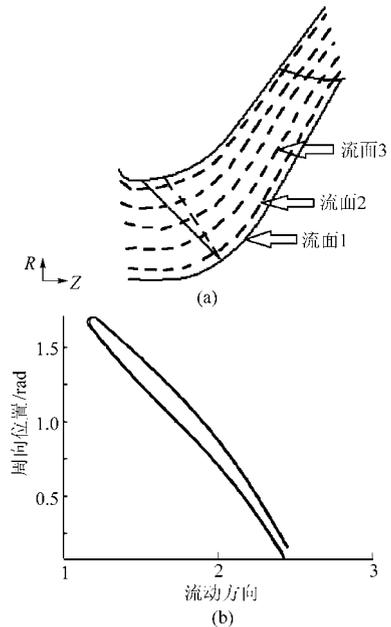


图3 叶轮叶片的参数化

Fig. 3 Parameter fitting of blade for impeller

(a) 流面示意图 (b) 叶片流面1参数化叶型

4个参数进行优化。

3.4 优化参数的设计约束与目标函数

在优化设计中,设计变量不仅在设定范围内变化,而且各变量之间还必须满足一定关系,其他变量根据一定关系随着设计变量的变化而变化。所以由设计变量组成的 N 维变量空间虽然是所有方案的集合,但是有些方案并不符合实际。因此在优化设计中,其优化过程的运算必须是在可行区域内或者逐渐逼近可行区域的边界,最终优化结果的设计方案一定是落在可行区域内或边界上,否则结果无效。

本次优化设计中,对于4个设计变量提出4种不同的设计约束来保证各变量随设计变量的变化而变化,以叶轮进口角 β_1 为例:为简化模型,假定各个流面层间距相同,任意两个相邻流面进口角变化数值相同,叶轮第 n 层流面进口角表示为 $S(n)_{\text{CAMBER_BETA1}}$,约束条件为: $S(n)_{\text{CAMBER_BETA1}} = (S1_{\text{CAMBER_BETA1}} - S7_{\text{CAMBER_BETA1}}) / 7 * (n - 1) + S1_{\text{CAMBER_BETA1}}$,其中 n ($n = 1, 2, 3, \dots, 7$) 为流面层数。

优化以效率最大作为目标函数,即在兼顾潜水泵其他特性参数的前提下提高效率。

3.5 优化策略

本次优化采用基于近似函数技术的优化策略,由基因遗传算法和人工神经网络来实现。基因遗传算法是一种类似生物进化的多目标搜索技术,通过在上代中随机选择个体进行遗传操作,产生新一代,在选择中有效运用了运行过程中的信息使得新一代比上一代具有更好的目标函数值。为保证

优化方案为全局最优结果,而非局部最优,在优化样本数据库生成过程中采取随机漫步的方法。通过人工神经网络对样本数据库进行学习,仿真出各个设计变量参数对目标函数的影响因素,通过优化设置神经网络参数与数值优化算法优化出最优的几何参数,并且通过求解器进行验算。

潜水泵的叶轮和导叶的初始叶型经过拟合后产生用以优化的参数化叶型;再根据优化需要给定控制参数,将针对叶轮进口角、出口角以及空间导叶的进口角和出口角这 4 个参数进行优化;利用参数化叶型和控制参数生成具有代表性的初始样本数据库,其中初始样本数据库的个数 N 与控制参数个数有关;采用人工神经网络的近似函数法构建近似模型来描述几何变量与目标函数之间的关系,如图 4 所示的 $\eta(G)$ 函数;即以提高效率为优化目标,根据优化算法预测出效率最高时的几何变量,对预测的最优叶型进行流场校核,然后将新的 CFD 计算结果补充到数据库中;在新建立的近似函数 $\eta(G)$ 上预测新的最佳值并再次进行 CFD 分析校核,如此往复循环使得样本数据库中的样本数随着优化次数的增加而增加,从而使神经网络的仿真结果越来越好,直到相应的控制参数收敛在某个具体值上,此时优化过程结束,并得到较好的优化方案。

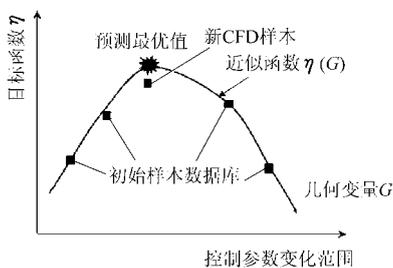


图 4 优化策略

Fig. 4 Optimization strategy

4 优化结果

介质为水,在流量为 $Q = 36 \text{ m}^3/\text{h}$,转速为 $n = 2850 \text{ r/min}$ 的情况下,对潜水泵以效率最大为目标进行优化设计。图 5 为潜水泵优化的收敛过程,叶轮优化样本算至 13 步时,得到了最佳的优化结果,导叶优化样本算至 14 步时得到了最佳优化结果。本次优化设计的最终优化方案如表 1 所示。

图 6 为优化前、后水泵的水力性能曲线,本文在设计工况点附近取值进行数值模拟与分析。图中 H_0 为原模型试验扬程, η_0 为原模型试验效率, H_1 为原模型数值模拟扬程, η_1 为原模型数值模拟效率, H_2 为优化后模型数值模拟扬程, η_2 为优化后模型数值模拟效率。

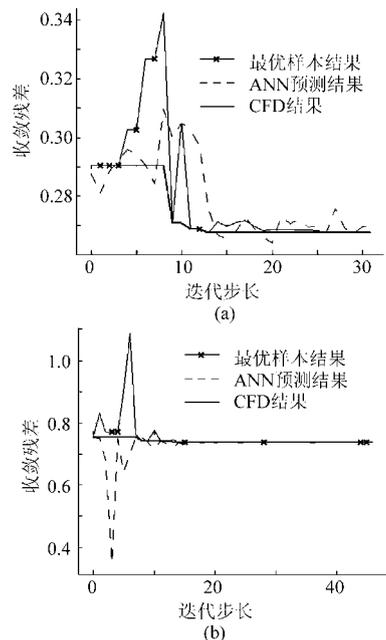


图 5 优化收敛过程

Fig. 5 Process of convergence for optimization

(a) 叶轮收敛过程 (b) 导叶收敛过程

表 1 优化方案

Tab. 1 Optimization scheme

| 模型 | 叶轮进口角 | 叶轮出口角 | 导叶进口角 | 导叶出口角 |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | $\beta_1 / (^\circ)$ | $\beta_2 / (^\circ)$ | $\beta_3 / (^\circ)$ | $\beta_4 / (^\circ)$ |
| 原始 | 22.73 | 44.67 | 22.59 | 79.33 |
| 优化 | 35.53 | 27.32 | 15.48 | 61.75 |

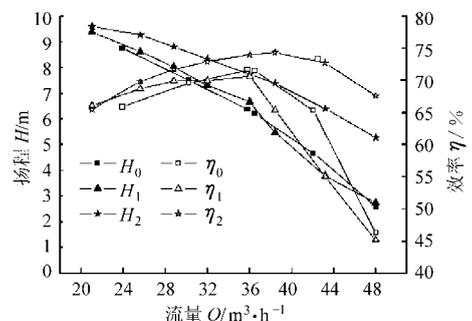


图 6 优化前、后泵的水力性能曲线

Fig. 6 Hydraulic performance curves for original and optimization pump

在设计工况 $Q = 36 \text{ m}^3/\text{h}$ 下,原模型的试验结果为 $H_0 = 6.3 \text{ m}$, $\eta_0 = 70.04\%$;原模型的数值模拟性能预测结果为 $H_1 = 6.66 \text{ m}$, $\eta_1 = 69.03\%$;优化后数值模拟的结果为 $H_2 = 7.749 \text{ m}$, $\eta_2 = 74.16\%$ 。对比原模型试验结果与数值模拟结果,可以看出扬程与效率曲线具有相同的变化趋势,且在设计工况点附近各个流量点处数值差别不大,因此,数值模拟可以有效模拟水泵的真实性能,结果真实可信。对比优化前、后数值模拟结果,通过改进叶轮与导叶的叶片叶型,实现了泵水力性能的优化。优化后泵的流量、扬程都能满足要求,在设计工况点的效率提高了

4.12% ,单级扬程提高了 1.449 m。

5 结 束 语

提出了一种基于遗传算法和人工神经网络算法的潜水泵叶轮优化方法。通过人工神经网络形成近似函数,结合潜水泵叶轮三维参数化方法,在设计工况下对潜水泵的叶轮与导叶以效率为目标函数进行优化设计,并对潜水泵性能进行预测。优化结果表

明潜水泵水力效率及单级扬程均得到了提高,在设计工况下潜水泵效率提高了 4.12% ,单级扬程提高了 1.449 m。改进后潜水泵过流能力得到了提升,提高了潜水泵在大流量工作区域的性能,增强了潜水泵的运行稳定性。根据数值模拟计算的结果,对潜水泵做出改进设计是可行的。本文所建立的优化方法可以缩短潜水泵的设计周期,为潜水泵的设计改进提供依据。

参 考 文 献

- 1 施卫东,王洪亮. 井泵的研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械, 2009, 27(1): 64~68.
Shi Weidong, Wang Hongliang. Well pump research present situation and the development tendency [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(1): 64~68. (in Chinese)
- 2 王志峰. 流体机械设计理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- 3 陆伟刚,张启华,施卫东. 深井离心泵叶轮极大直径设计法[J]. 排灌机械, 2006, 24(5): 1~7.
Lu Weigang, Zhang Qihua, Shi Weidong. Impeller diameter maximum approach for deep well pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(5): 1~7. (in Chinese)
- 4 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵轴向力数值预测与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 100~103.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical prediction and experiment of axial force on deep-well centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 100~103. (in Chinese)
- 5 田辉,孙秀玲,郭涛,等. 基于遗传算法的离心泵叶片水力性能优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 64~67, 119.
Tian Hui, Sun Xiuling, Guo Tao, et al. Optimization for the hydraulic performance of centrifugal blade based on the genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 64~67, 119. (in Chinese)
- 6 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, 6: 1 535~1 543.
- 7 Li Jun, Feng Zhenping, Chang Jianzhong. Aerodynamic optimum design of transonic turbine cascade using genetic algorithms [J]. Journal Thermal Science, 1997, 6(2): 111~116.
- 8 Benini Ernesto. Three-dimensional multi-objective design optimization of a transonic compressor rotor [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(3): 559~565.
- 9 Shahram Derakhshan, Bijan Monhammadi, Ahmad Nourbakhsh. Incomplete sensitivities for 3D radial turbomachinery blade optimization[J]. Computers & Fluids, 2008, 37(10): 1 354~1 363.
- 10 Behr T, Porreca L, Mokulys T, et al. Multistage aspects and unsteady effects of stator and rotor clocking in an axial turbine with low aspect ratio blading[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128: 11~22.
- 11 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 井用潜水泵导叶的正交试验与优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 312~315.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Orthogonal test and optimization design of submersible pump guide vanes[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 312~315. (in Chinese)