

基于 NSGA-II 遗传算法高比转速混流泵多目标优化设计

王春林, 叶 剑, 曾 成, 夏 勇, 罗 波

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 为进一步探索优化高比转速混流泵水力性能的方法, 该文选用比转速为 803 的高比转速混流泵为研究对象, 运用商用软件 ANSYS CFX 15.0, 选取剪切应力传输 (shear stress transport, SST) 湍流模型对其内部流动进行计算。以高比转速混流泵的水力效率、扬程为优化目标, 采用给定沿叶轮叶片轴面流线的速度矩的分布规律来实现对叶片的间接参数化, 以描述该速度矩分布的四次多项式的 3 个参数为优化变量。采用均匀试验设计安排样本空间, 利用径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络拟合优化变量与优化目标间的映射关联, 最后结合 NSGA-II 遗传算法进行多目标寻优, 取效率最优个体和扬程最优个体与初始模型进行分析: 得到了上述 3 个个体的速度矩分布规律与各微元段包角沿轴面流线的变化趋势, 效率最优与扬程最优时叶片包角, 即各微元段包角之和, 分别为 75.15°、67.85°。给出了 0.5 倍叶高处叶轮导叶的相对流线、速度、静压分布以及 0.2 倍、0.5 倍、0.8 倍叶高处叶片相对弦长的静压分布。试验证明, 效率最优个体的效率较初始个体提高了 1.12%, 与 CFD (计算流体动力学, computational fluid dynamics) 计算结果 1.33% 接近。该优化方法改善了叶轮的水力特性, 提高了高比转速混流泵的性能, 为高比转速混流泵的优化设计提供了参考。

关键词: 泵; 优化; 计算机仿真; 高比转速; 速度矩; 神经网络; 遗传算法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.015

中图分类号: TH313

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0100-07

王春林, 叶 剑, 曾 成, 夏 勇, 罗 波. 基于 NSGA-II 遗传算法高比转速混流泵多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 100—106. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.015 http://www.tcsae.org

Wang Chunlin, Ye Jian, Zeng Cheng, Xia Yong, Luo Bo. Multi-objective optimum design of high specific speed mixed-flow pump based on NSGA-II genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 100—106. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.015 http://www.tcsae.org

0 引 言

混流泵具有良好的水力特性, 被广泛地应用于农田灌溉、污水处理以及电站循环水冷却等领域^[1-3]。近年来随着混流泵的高比转速化^[4], 其使用范围开始逐渐扩大。目前关于混流泵的研究, 特别是对高比转速混流泵的研究, 与离心泵和轴流泵^[5-6]相比, 还存在一定差距。因此对高比转速混流泵的研究, 优化其设计方法, 提高泵的运行效率具有重大工程价值和实际意义。

随着对混流泵研究的深入, 在结构、性能^[7-8]、内部流动特性^[9]、设计理论^[10]和设计方法^[11-14]等方面都取得了较大进展。采用三元理论设计混流泵已经成为研究的热点^[15-16], 但由于其设计程序较为复杂, 因而实际使用不多。一元、二元理论相对成熟, 已广泛应用于混流泵的设计中^[17]。采用二元理论进行设计混流泵, 理论上较一元理论更为合理, 因为二元理论更能够真实地反映泵内的流动状况^[18]。但是, 采用二元理论设计混流泵的过程中需给定速度矩的分布规律, 而目前还没有统一表达方

法以及可以遵循的具体规则, 设计者需要过多地依赖经验给定^[19]。混流泵叶片速度矩分布规律是叶轮设计的重要参数, 对叶轮能量转换有重要的作用。因此, 确定合理的速度矩的分布规律对提升混流泵的性能十分重要。

近年来, 国内外出现了许多算法用于对流体机械叶片的优化设计^[20-23], 并获得了良好的效果。为此, 本文选取比转速为 803 的高比转速混流泵为研究对象, 运用 ANSYS CFX 15.0 软件, 基于径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络和 NSGA-II 算法结合的方法, 对沿叶轮叶片轴面流线的速度矩的分布规律进行优化, 以期高比转速混流泵的优化提供参考。

1 高比转速混流泵数值计算

1.1 叶片的参数化表达

本文对叶轮叶片的参数化处理是在对叶片进行反问题计算时完成的。通过给定叶片沿轴面流线上的速度矩分布规律, 结合叶片型线微分方程即能实现对叶片形状的控制。采用无量纲四次多项式 $f(x)$ 来给定沿轴面流线速度矩函数 $c_u r$ 的分布规律。

$$c_u r = c_{u1} r + f(x) \cdot \Delta(c_u r) = f(x) \frac{gH}{\omega \eta_h} \quad (1)$$

式中: $c_u r$ 为沿轴面流线速度矩函数; $\Delta(c_u r)$ 为叶片进出口速度矩差值, m^2/s ; c_u 为绝对速度在圆周方向的分量, m/s , 下标 1 为泵叶轮进口参数; r 为圆周半径, m ; H 为

收稿日期: 2015-07-17 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51109094); 江苏高校优势学科建设工程项目。

作者简介: 王春林, 男, 江苏盐城人, 教授, 主要从事流体机械理论、特性及流动模拟的研究。镇江 江苏大学能源工程与动力学院, 212013。

Email: wangzha@pub.zj.jsinfo.net

泵的扬程, m ; η_h 为泵的水力效率, %; ω 为泵转速, rad/s ; $f(x)$ 为无量纲分布函数, 且 $0 \leq f(x) \leq 1$, 用来描述四阶多项式; g 为重力加速度, m/s^2 。

$f(x)$ 的系数求解方程:

$$\begin{cases} f(0) = e = 0 \\ f(1) = a + b + c + d = 1 \\ f(\frac{1}{2}) = \frac{1}{16}a + \frac{1}{8}b + \frac{1}{4}c + \frac{1}{2}d = X_2 \\ f'(0) = d = X_1 \\ f'(1) = 4a + 3b + 2c + d = X_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 、 e 为系数; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为多项式在轴面流线进口处导数、中点处函数值和出口处导数值, 均为常数值。通过改变这 3 个参数的值来控制速度矩的变化规律。本文以 X_1 、 X_2 、 X_3 3 个变量为优化设计变量, 以模型泵扬程、水力效率为优化目标。优化问题可以描述为: 优化变量: $X=(X_1、X_2、X_3)$; 优化目标: $\text{Maximize}\{H(X)、\eta_h(X)\}$ 。

1.2 计算模型及网格划分

本文以型号为 JHM-800 的高比转速混流泵作为初始模型, 其速度矩分布规律沿叶片轴面流线呈线性分布。泵的基本参数为: 流量 $Q=0.384 \text{ m}^3/\text{s}$, 扬程 $H=6.53 \text{ m}$, 转速 $n=1\,450 \text{ r/min}$, 效率 $\eta=84.32\%$, 比转速 $n_s=803$ 。

模型计算域共分为进口直锥段、叶轮段、导叶段、出口段四部分。为了让进出口的湍流充分发展, 将水泵进口直锥段及出口段均延长四倍管径进行计算, 整个流体计算域如图 1a 所示。计算域的进口段以及出口段采用结构化网格, 叶轮段以及导叶段采用非结构网格。

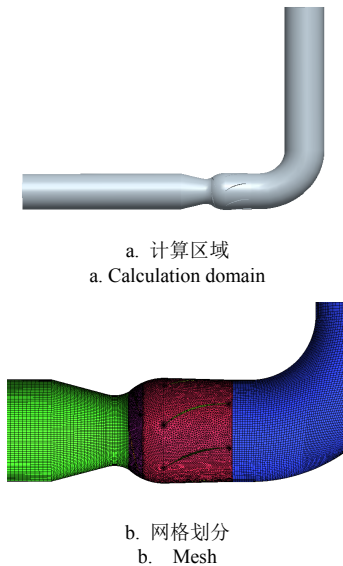


图 1 高比转速混流泵模型

Fig.1 Calculation model of high specific speed mixed flow pump

计算域网格无关性验证如表 1 所示: 当网格数量超过 253 万时, 扬程与水力效率受网格的影响已经非常微弱, 结合计算精度及计算量综合考量, 选取网格 2 进行计算。其网格如图 1b 所示。

表 1 网格无关性验证

Table 1		Grid independence verification		
编号	Number	网格总数 Total mesh	扬程 Head H/m	效率 Efficiency $\eta_h/\%$
网格 1	Mesh 1	1 800 664	7.269 1	89.22
网格 2	Mesh 2	2 539 154	7.200 4	89.03
网格 3	Mesh 3	3 419 745	7.208 6	88.96

1.3 边界条件

采用 SST (剪切应力传输, shear stress transport) 湍流模型, 速度进口, 静压出口, 壁面上满足无滑移固壁条件, 近壁区域采用湍流模型自带的壁面函数, 动静结合面采用 frozen rotor interface 进行处理。

1.4 外特性验证

为验证数值计算结果的可信性, 对所研究的模型泵进行性能试验。试验在江苏大学流体机械实验室 C 级闭式性能试验台上进行。以常温清水为实验介质, 流量测量采用 LWGY—25A 型涡轮流量传感器, 测量精度为 $\pm 0.35\%$, 扬程测量采用 WT-1151 型智能电容式压力变送器, 测量精度为 $\pm 0.25\%$, 功率、转速测量选用 JN338-100AG 型转矩转速仪, 转速测量精度为 $\pm 0.05\%$ 。

本试验系统运行稳定, 重复性好, 其效率综合误差为 $\pm 0.836\%$, 试验方法按照 GB/ T3216-2005 《回转动力泵水力性能验收试验 1 级和 2 级》试验方法的规范进行。

模拟值与试验值的对比如图 2 所示: 在设计工况点处计算值与试验值比较吻合, 误差较小。小流量工况下误差也并不明显, 但随流量向大流量区偏移时误差呈明显递增趋势。本文优化工作针对设计工况展开, 故上述数值计算方法可行。

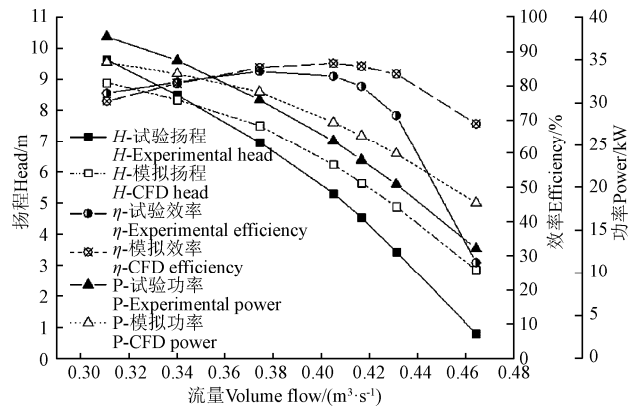


图 2 外特性曲线的计算值与试验值对比

Fig.2 Comparison of external characteristic curve between calculation value and experiment value

2 多目标寻优

2.1 试验安排

限于试验规模, 本文采用均匀试验设计安排样本空间。一共 3 个因素, 每个因素取 30 个水平。综合各方面及优化空间的大小考虑, 各变量取值范围如下: 进口导数 X_1 , $X_1 \in [0, 1.2]$; 中间函数值 X_2 , $X_2 \in [0.2, 0.8]$; 出口导数 X_3 , $X_3 \in [0, 1.2]$ 。

2.2 RBF 神经网络与 NSGA-II 遗传算法

由于无法直接建立速度矩与水力效率、扬程间的数学模型,故在完成样本空间设计安排后,用 RBF 神经网络,以样本空间中的数据节点信息为基准,拟合优化变量与优化目标之间的内在映射。

RBF 神经网络采用 *newrb* 函数来构建三层网络拓扑结构,给定网络均方误差 0.001,扩展常数值为 2,径向基函数神经元的传递函数为 *Radbas* 函数,权值矩阵与输入向量之间的距离通过欧氏距离权值函数 *Dist* 函数进行计算,其他参数保持默认设置。相应函数调用格式为:

$$net = newrb(p_tr, t_tr, eg, sc) \quad (3)$$

式中: *net* 为训练后得到的 RBF 神经网络; *newrb* 为 Matlab 软件提供的一个用于 RBF 神经网络训练的函数; *p_tr* 为训练样本数据值矩阵; *t_tr* 为训练样本的目标数据值矩阵; *eg* 为网络均方误差; *sc* 为径向基函数扩展常数。

采用 NSGA-II 遗传算法进行多目标寻优。NSGA-II 遗传算法是在 NSGA 算法基础上进行改进得到的。采用快速非劣分层排序机制,能够很好的逼近 Pareto(最优解)前沿,同时通过引入拥挤度算子,保证了 Pareto 最优解分散的均匀度。本文使用遗传算法的交叉概率为 0.9,初始种群规模为 100,遗传代数为 500。

3 结果分析

3.1 优化结果基本分析

当算法迭代完成后,即可获得相应的非支配解集。优化后的 Pareto 前沿如图 3 所示。如图 3 所示,整个 Pareto 前沿呈下凸状,较为光滑,分布度较好,连续性强,反映出 NSGA-II 遗传算法良好的搜索 Pareto 解的能力。

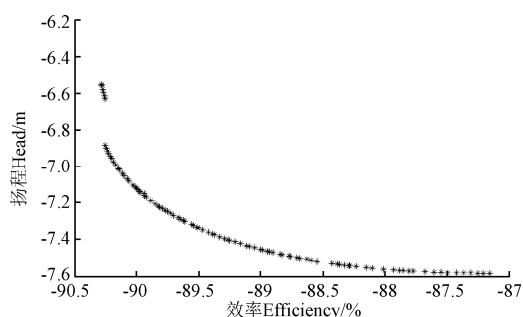


图 3 NSGA-II 遗传算法优化后的最优解前沿分布
Fig.3 Distribution of Pareto frontier from NSGA-II

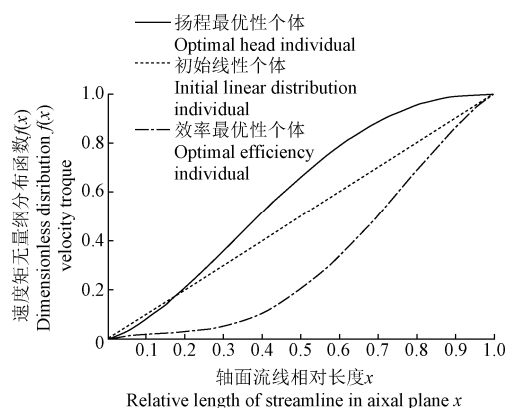
针对 NSGA-II 遗传算法寻优后得到的 Pareto 解集,获得了 2 个适应度值最大(效率最优、扬程最优)个体,分别得到了描述这 2 个个体速度矩分布的四次函数多项式的 3 个参数 X_1 、 X_2 、 X_3 。根据上述参数确定的叶轮,分别将每个叶轮对应的泵进行 CFD 计算,得到最优效率个体的效率与最优扬程个体的扬程分别为 90.36%、7.5292 m,这与由优化算法预测得到的最优效率与最优扬程分别为 90.29%、7.5841 m 的结果相当接近,说明了所采用的 NSGA-II 遗传算法的有效性。表 2 给出了经 NSGA-II 遗传算法寻优后获得效率最优个体的效率和扬

程最优个体的扬程的 CFD 计算值与初始线性个体之间的对比结果。由表 2 可知:效率最优个体的效率与优化前相比提高了 1.33 个百分点。扬程最优个体的扬程较优化前提高了约 0.33 m。多目标优化结果的效率及扬程较初始叶轮分别有一定提高。

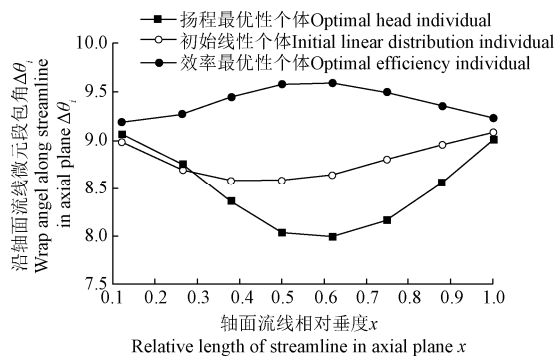
图 4 为经过 NSGA-II 遗传算法优化前后速度矩与包角对比图。由图 4a 可知,当速度矩分布规律呈下凹状,且前半段斜率变化较为平缓时(即便到轴面流线中段处, $f(x)$ 的值仅为 0.2)效率较高,但扬程较低,说明前半段的能量转换较为平缓;而当速度矩分布规律呈上凸型的 S 状时,则扬程较高,效率较低。效率最优个体与扬程最优个体的速度矩分布规律自叶片进口后便呈现一定的相反的变化趋势。

表 2 NSGA-II 遗传算法优化前后的 CFD 计算结果对比
Table 2 Comparison of CFD results between initial and optimal by NSGA-II

个体 Individuals	扬程 Head/m	效率 Efficiency/%
初始个体 Initial individual	7.200 4	89.03
效率最优 Optimal efficiency individual	6.552 8	90.36
扬程最优 Optimal head individual	7.529 2	87.39



a. 速度矩分布规律对比图
a. Comparison of velocity torque distribution



b. 沿轴面流线各微元段包角变化趋势
b. Change trends of micro-element of wrap angel along axial plane streamline

图 4 NSGA-II 遗传算法优化前后速度矩与包角对比图
Fig.4 Comparison of velocity torque and wrap angel between initial and optimal by NSGA-II

叶片绘型时, 将轴面流线分成 8 个微元段, 每个微元段对应相应的包角 $\Delta\theta_i$ 。由于速度矩分布规律直接影响叶片包角分布, 故本文给出了优化前后沿轴面流线各微元段包角的变化趋势, 如图 4b 所示。图 4b 中初始线性分布个体、扬程最优个体和效率最优个体的叶片包角, 即图中各微元段包角之和, 分别为 70.3° 、 67.85° 、 75.15° 。效率最优个体的包角变化趋势与扬程最优个体及线性分布个体的变化趋势相反, 且效率最优个体各微元段的包角值均大于线性分布个体。而扬程最优个体的包角变化趋势则与线性分布个体保持一致, 且变化幅度加大, 各微元段包角基本小于线性分布个体的包角值。

3.2 效率最优个体的试验验证

图 5 为初始模型泵的试验得到的效率曲线与经过多目标遗传算法 NSGA-II 寻优得到的效率最优个体的试验(试验地点、仪器、方法等均与上文 1.4 外特性验证部分相同)效率曲线对比图。由图 5 可知, 初始模型泵的最高效率为 84.32% , 效率最优个体的最高效率为 85.44% , 通过优化设计后, 效率提高了 1.12% , 与预测的结果相符。通过试验, 验证了利用多目标遗传算法 NSGA-II 对高比转速混流泵的优化设计是可信且有效的。

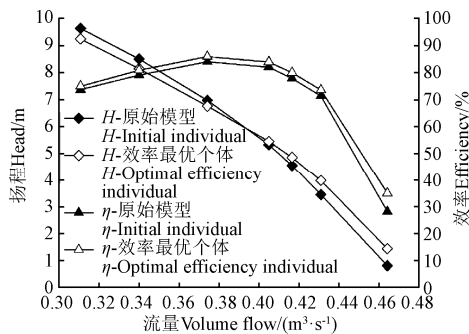


图 5 初始泵效率曲线与最优效率曲线试验对比图

Fig.5 Comparison of original and optimized pump experiment efficiency curves

3.3 优化前后流场对比分析

本文选取优化后的效率最优个体及扬程最优个体的流场与初始线性分布个体流场展开对比分析。图 6 分别为 3 个个体在 0.5 倍叶高处的相对流线、叶轮导叶速度和静压分布图。图 6a 中, 效率最优个体漩涡消失, 各轴面流道内流线分布均匀。扬程最优个体仅存在一个漩涡, 且涡旋强度弱于线性分布个体。图 6b 中, 扬程最优个体的局部高速区最为狭长。随叶高增高, 叶轮内速度幅值上升, 局部高速区域更为狭长。效率最优个体的高速区域始终保持最大, 扬程最优个体的高速区域最小, 但其间的差异逐渐缩小。图 6c 中, 导叶中局部高压区域向全流道扩散, 效率最优个体扩散度最好。扬程最优个体扩散度较差, 且叶轮背面靠近进口处出现一个最低静压区, 此处可能发生汽蚀。

为进一步对优化前后个体间的差异进行对比, 下面对叶轮叶片不同叶高处的弦向静压进行分析, 相应位置分别取为 0.2 倍叶高、0.5 倍叶高和 0.8 倍叶高。

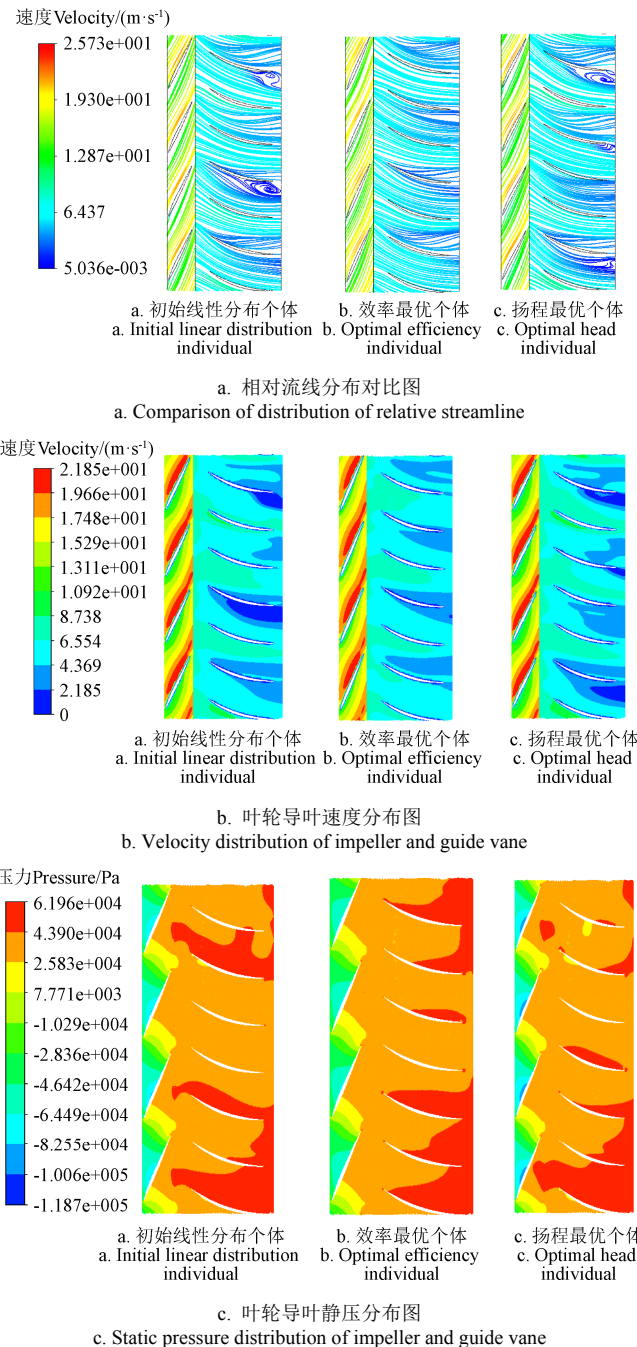


图 6 0.5 倍叶高处相对流线、叶轮导叶速度与静压分布对比图
Fig.6 Comparison of distribution of relative streamline, velocity, static pressure of impeller and guide vane at 0.5 times blade height

图 7 为各个体在不同叶高处沿叶轮叶片弦向的静压分布。由图 7 可知: 整个叶片的静压分布规律与叶片表面实际静压分布规律基本保持一致, 由叶片进口向出口递增, 叶片表面压差沿弦向不断减小, 且个体间变化幅度呈现一定差异。随叶高增高, 叶片工作面静压值不断下降, 而叶片背面静压与之背离呈上升趋势。0.2 倍叶高处的叶片表面压差最小, 0.5 倍与 0.8 倍叶高处的叶片表面压差相当, 但叶片表面静压分布特征不同。当处于同一叶高位置时, 个体间的差异主要集中在叶片前半段, 变化幅度由叶片进口边和叶片中段向中间逐渐扩大。图中效率最优个体沿弦向的压差最小, 载荷变化相对最为

平缓, 扬程最优个体的压差最大。其中, 0.8 倍叶高处, 效率最优个体在 0.05 倍相对弦长位置出现交叉, 即在相交之前叶片背面压力高于工作面压力, 压力梯度为负。可能是此处出现负冲角或局部脱流所致, 容易形成空化区域。此外, 相对于线性分布个体, 效率最优个体的载荷峰值后移, 扬程最优个体的载荷峰值前移。

综上所述, 本文根据寻优结果将 2 个目标所对应的极值个体与初始线性分布个体的性能特征进行了对比。但在实际情况中, 最优的结果并不是目标所对应的极值个体, 因为单纯追求某一指标的提升必会造成其他性能的下降, 故实际运用中应当根据不同指标的重要性进行合理选择。

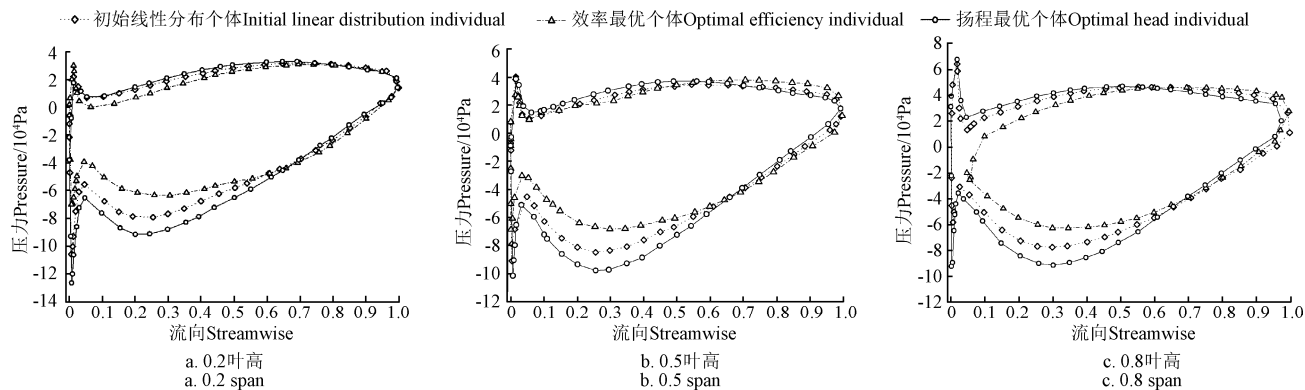


图 7 不同叶高处对应弦长的静压分布

Fig.7 Static pressure distribution of different blade height corresponding chord length

4 结 论

1) 本文结合径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络与 NSGA-II 遗传算法对高比转速混流泵叶轮进行优化设计, 在样本空间内寻优, 获得了相应的 Pareto (最优解) 解集。

2) 取解集中 2 个极值 (效率最优、扬程最优) 个体, 获得描述速度矩分布规律的无量纲四次函数曲线: 效率最优个体的四次函数曲线整体下凹, 扬程最优个体的四次函数曲线呈 S 状。得到效率最优个体各微元段包角变化趋势与初始个体相反, 而扬程最优个体与之相同, 但幅度变大。效率最优、扬程最优时叶片包角值 (各微元段包角之和) 分别为 75.15° 、 67.85° 。

3) 取 2 个极值个体与初始个体进行流场计算, 对比分析了 3 个个体的叶轮导叶在 0.5 倍叶高处相对流线、速度、静压的分布及在叶片的不同叶高处沿叶片弦向的静压变化趋势。试验验证表明, 效率最优个体的效率较初始个体的效率提高 1.12%。

【参 考 文 献】

[1] 谈明高, 吴贤芳, 刘厚林, 等. 高比转速蜗壳式混流泵的设计与试验[J]. 流体机械, 2011, 39(12): 1—4.
Tan MingGao, Wu Xianfang, Liu Houlin, et al. Design and experiment for high specific speed mixed flow pump impeller and volute[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(12): 1—4. (in Chinese with English abstract)

[2] 王巍, 陆鹏波, 王晓放, 等. 混流泵叶片优化及基于状态方程模型的空化研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, 55(1): 29—35.
Wang Wei, Lu Pengbo, Wang Xiaofang, et al. Blade optimal design and cavitation investigation based on state equation

model of mixed-flow pump[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 55(1): 29—35. (in Chinese with English abstract)

[3] 邴浩, 张勤昭, 曹树良, 等. 混流泵叶轮的正反问题迭代法设计及流动分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(2): 179—183.
Bing Hao, Zhang Qinzhaio, Cao Shuliang, et al. Iteration design of direct and inverse problems and flow analysis of mixed-flow pump impellers[J]. Tsinghua Univ: Sci&Tech, 2013, 52(2): 179—183. (in Chinese with English abstract)

[4] 施卫东, 邹萍萍, 张德胜, 等. 斜流泵性能预测与叶轮进出口环量分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 94—97.
Shi Weidong, Zou Pingping, Zhang Desheng, et al. Performance prediction and circulation distribution analysis at impeller inlet and outlet of mixed-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 94—97. (in Chinese with English abstract)

[5] 史广泰, 杨军虎, 苗森春. 离心泵作液力透平叶轮出口滑移系数的解析计算方法及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 66—73.
Shi Guangtai, Yang Junhu, Miao Senchun. Analytical methods and verification for determining slip factor at impeller outlet of centrifugal pumps as turbines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(11): 66—73. (in Chinese with English abstract)

[6] 杨敏官, 孟宇, 李忠, 等. 轴流泵叶轮导水锥型式设计及其流道水力特性模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 81—88.
Yang Minguan, Meng Yu, Li Zhong, et al. Design of

- axial-flow impeller guide cone and simulation on hydraulic performance of its passage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(11): 81—88. (in Chinese with English abstract)
- [7] Cugal M, Gopalakrishnan S, Ferman R S. Experimental and Numerical Flow Field Analysis of a Mixed Flow Pump Impeller[M]. San Diego, CA, USA: ASME, 1996: 167—174.
- [8] Van E B P M, Kruijff N P. Hydraulic performance of a mixed-flow pump: Unsteady inviscid computations and loss models[J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2001, 123(2): 256—264.
- [9] 王春林, 郑海霞, 司艳雷, 等. 等环量流型高比转速混流泵内部流场数值模拟[J]. 流体机械, 2009, 37(4): 18—21.
- Wang Chunlin, Zheng Haixia, Si Yanlei, et al. Numerical simulation of interior flow for high specific speed mixed-flow pump designed by constant circulation flow pattern[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(4): 18—21. (in Chinese with English abstract)
- [10] Kim J H, Ahn H J, Kim K Y. High-efficiency design of a mixed-flow pump[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(1): 24—27.
- [11] 常书平, 王永生, 靳栓宝, 等. 载荷分布规律对混流泵叶轮设计的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(2): 123—127.
- Chang Shuping, Wang Yongsheng, Jin Shuanbao, et al. Influence of blade loading distribution law on design of mixed-flow pump impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2013, 31(2): 123—127. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邴浩, 曹树良, 谭磊. 混流泵叶轮设计正反问题迭代方法[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 277—281.
- Bing Hao, Cao Shuliang, Tan Lei. Iteration method of direct inverse problem of mixed-flow pump impeller design[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2011, 29(4): 277—281. (in Chinese with English abstract)
- [13] 蔡佑林, 王立祥, 张新. 混流泵叶轮三元可控速度矩的设计[J]. 流体机械, 2005, 33(11): 13—15.
- Cai Youlin, Wang Lixiang, Zhang, Xin. Design of 3-D controlled velocity moment for impeller of mixed-flow pump[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(11): 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [14] 蔡佑林, 王立祥, 张新. 喷水推进混流泵叶轮三元可控速度矩设计[J]. 船舶, 2006(1): 24—26.
- Cai Youlin, Wang Lixiang, Zhang, Xin. Design of 3-D controlled velocity moment of the impeller of mixed-flow water jet pump[J]. Ship & Boat, 2006(1): 24—26. (in Chinese with English abstract)
- [15] Goto A, Zangeneh M. Hydrodynamic design of pump diffuser using inverse design method and CFD[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(6): 319—328.
- [16] Goto A, Nohmi M, Sakurai T, et al. Hydrodynamic design system for pumps based on 3-D CAD, CFD, and inverse design method[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(6): 329—335.
- [17] 邴浩, 曹树良, 谭磊, 等. 速度矩分布规律参数化描述及对混流泵性能的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 100—105.
- Bing Hao, Cao Shuliang, Tan Lei, et al. Parameterization of velocity moment distribution and its effects on performance of mixed-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 100—105. (in Chinese with English abstract)
- [18] 林恺, 曹树良, 祝宝山, 等. 用于高比转速混流泵设计的流场计算[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(2): 219—223.
- Lin Kai, Cao Shuliang, Zhu Baoshan, et al. Flow computational for the design of high specific speed mixed-flow pumps[J]. Tsinghua Univ: Sci&Tech, 2008, 48(2): 219—223. (in Chinese with English abstract)
- [19] 常书平, 石岩峰, 周晨, 等. 出口环量分布对混流泵性能的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 89—93.
- Chang Shuping, Shi Yanfeng, Zhou Chen, et al. Effects of exit circulation distribution on performances of mixed-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 89—93. (in Chinese with English abstract)
- [20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182—197.
- [21] Yang B, Shu X W. Hydrofoil optimization and experimental validation in helical vertical axis turbine for power generation from marine current[J]. Ocean Engineering, 2012, 42: 35—46.
- [22] 袁寿其, 王文杰, 裴吉, 等. 低比转数离心泵的多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 46—52.
- Yuan Shouqi, Wang Wenjie, Pei Ji, et al. Multi-objective optimization of low-specific-speed centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 46—52. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李彦军, 颜红勤, 葛强, 等. 大型低扬程泵装置优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 144—148.
- Li Yanjun, Yan Hongqin, Ge Qiang, et al. Optimum hydraulic design and model test of large-scale low-lift pump devices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 144—148. (in Chinese with English abstract)

Multi-objective optimum design of high specific speed mixed-flow pump based on NSGA- II genetic algorithm

Wang Chunlin, Ye Jian, Zeng Cheng, Xia Yong, Luo Bo

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract: With the vigorous promotion of the national strategy for hydraulic engineering, a demand for mixed-flow pump in infrastructure has been increasing for years. As a kind of high-performance pump, the high specific speed mixed-flow pump has the advantages of stable performance and wide application area. With the increasing of specific speed, the high specific speed mixed-flow pump has begun to replace the axial-flow pumps in some application areas in recent years. It is necessary to optimize the impeller performance for it affects the pump performance directly. The velocity torque distribution along mixed-flow pump impeller is a significant parameter, which plays an important role in energy conversion between impellers and fluid. In the design of dualistic theory of mixed-flow pump impeller, the regulation of velocity torque distribution should be defined. But, there is no uniform method of expression as well as specific rule for designers to follow, and too much experience is needed to rely on. It has far-reaching meaning for the promotion of the level of mixed-flow pump design and the performance by establishing the optimization parameter model of velocity torque distribution along impeller. In order to further research the hydraulic performance of optimization method for high specific speed mixed-flow pump, a mixed-flow pump whose specific speed is 803 was chosen as the research object, and the commercial software CFX and the shear stress transport turbulence model were applied to compute the interior flow field within the pump. In this paper, the efficiency and the head were chosen as the optimization objectives, and 3 parameters that describe the velocity torque distribution were chosen as the optimization parameters, which were used to parameterize the impellers. The uniform design was adopted to arrange the sample space, the RBF (radial basis function) neural network was used to fit the relationship between the variables and objectives, and finally the NSGA- II genetic algorithm was used for multi-objective optimization. Moreover, the difference of the internal flow field was obtained by comparing the initial linear distribution individual with the optimal efficiency individual and the optimal head individual respectively, which were selected from the Pareto solutions. The velocity torque distribution and the change trends of the wrap angel along the axial plane streamline between the initial and optimal individual were analyzed. The wrap angel values of optimal efficiency and optimal head were 75.15° and 67.85° , respectively. The variation trends of the wrap angel of micro-element based on optimal efficiency individual were contrary with the initial one, while the variation trends based on optimal head individual were the same as the initial one, but the change range was enlarged. Compared with the initial linear distribution individual, the efficiency of the optimal efficiency individual was improved by 1.12% through experimental verification. Distribution maps of the relative streamline, velocity and static pressure of the impeller guide vane at 0.5 times blade height and the static pressure of the corresponding chord length at 0.2, 0.5 and 0.8 times blade height were showed. And, the possible reasons for the differences between initial individual and optimal individuals were given. It was found that, utilizing the RBF neural network combined with NSGA- II genetic algorithm, the effect of optimizing the impeller hydraulic performance of high specific speed mixed-flow pump was remarkable. The research provides a certain theoretical reference for further improvement of the performance of high specific speed mixed-flow pump.

Key words: pumps; optimization; computer simulation; high specific speed; velocity torque; neural network; genetic algorithm