

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0033

基于伴随方法的离心泵叶轮优化设计

张人会^{1,2}, 郭苗¹, 杨军虎^{1,2}, 刘宜^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)



张人会

摘要: 针对水力机械优化设计过程中存在计算量巨大、叶型的控制及修改不便等问题,提出了基于伴随方法的离心泵叶轮优化设计方法.以某低比转数离心泵叶轮为研究对象,采用泰勒展开法进行离心泵叶片形状的参数化控制.将泵内流动控制方程作为优化问题的约束条件,通过引入伴随变量将约束优化问题变为无约束优化问题,推导了目标函数的变分形式、伴随方程及伴随变量在计算域各边界上的边界条件.根据伴随方法计算目标函数对设计变量的梯度矢量,在任意给定的初始直叶片的基础上沿梯度矢量反方向不断更新叶片形状,直至目标函数达到最小值时即为最优设计.由于在目标函数的变分中不包含流场参数的变分,在一次优化迭代中只需要计算流场及伴随变量场各一次,大大减少了叶轮优化过程的计算量.算例计算结果表明所提出的离心泵叶轮伴随优化方法是可行的.

关键词: 离心泵;伴随方法;参数化控制;优化设计

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2014)11-0943-05

张人会, 郭苗, 杨军虎, 等. 基于伴随方法的离心泵叶轮优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11): 943-947, 954.

Zhang Renhui, Guo Miao, Yang Junhu, et al. Blade shape optimization of centrifugal pump impeller with adjoint method [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2014, 32(11): 943-947, 954. (in Chinese)

Blade shape optimization of centrifugal pump impeller with adjoint method

Zhang Renhui^{1,2}, Guo Miao¹, Yang Junhu^{1,2}, Liu Yi^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: To prevent some drawbacks in hydrodynamics optimization procedure of hydraulic machinery, such as a huge time-consuming and the difficulty in blade shape control and update etc, an adjoint method is proposed to optimize the blade shape of centrifugal pump impellers. At first, the camber line of impeller blade of a low specific centrifugal pump is expressed as a polynomial in terms of dimensionless radius. Secondly, the governing equations of ideal fluid flow in the centrifugal pump impeller are considered as the constraints of the optimization problem; then the constrained optimization problem is transformed into an unconstrained one by introducing four adjoint variables. Finally, the variation formulas of objective function, the adjoint equations and the boundary conditions of the computational domain for the adjoint variables are deduced. The gradients of the objective function with respect to the control variables are calculated. Accordingly the blade shape is updated continually against the direction of the gradients starting with straight blade until a minimized objective function is achieved. Be-

收稿日期: 2014-03-20; 网络出版时间: 2014-11-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.14.0033.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109104); “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAF01B02); 甘肃省高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 张人会(1977—), 男, 江西都昌人, 副教授, 博士(zhangrh@lut.cn), 主要从事流体机械内部流动及其性能优化研究.
郭苗(1986—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生(miaomiao866@gmail.com), 主要从事流体机械设计研究.

cause the variation of flow variables is not included in the variation of objective function, the flow field and adjoint variable field need to be simulated once only in one optimization cycle, causing a greatly reduced computing time for the optimization. The results of the case study indicate that the proposed adjoint method is feasible for blade shape optimization of centrifugal impellers.

Key words: centrifugal pump; adjoint method; parameterization control; optimization design

水力机械内部流动结构及其性能的优化研究是当前该领域研究的热点及难点,对于水力机械的性能研究可看作具有流动约束的流道几何形状优化研究.由于流道几何形状的复杂性以及旋转坐标系下的非稳态流动约束的复杂性,导致水力机械优化研究难以进行.

近年来,许多学者在该领域做了大量的工作,对水力机械的优化提出了响应面优化方法^[1-2]、智能优化算法^[3-6]、梯度优化算法^[7-8]等.基于试验设计的响应面优化方法是通过有限个点的目标函数值,构建整个变量区间目标函数与控制变量之间的响应关系.智能优化算法是建立在生物智能或物理现象等基础上的全局搜索算法.基于梯度优化方法的基本思想是沿着目标函数对控制变量的梯度矢量方向,不断更新控制变量.响应面方法及智能优化算法一般用于对水力机械的关键几何参数进行优化,当控制变量较多时,由于需要对每个样本的目标函数都进行预估,计算量较大.梯度优化方法在流体机械中应用的最大困难在于目标函数对设计变量的梯度矢量难以计算,每优化一步均需要计算 $n+1$ (n 为控制变量的维数) 次内流场^[7].伴随方法反映了当前形状优化领域的前沿和发展趋势,该方法由 A. Jameson 等^[9] 提出,首先应用于航空翼型的气动优化设计, NASA 和 Stanford University 的学者^[10-12] 在这方面做了大量工作.在伴随方法中,由于引入了伴随变量,使得最终目标函数的变分与流动参数的变分无关,因此在计算目标函数对控制变量的梯度矢量时,只需分别计算流场及伴随变量场各 1 次,计算量与设计变量的维数无关.

文中采用泰勒展开法对叶片形状进行参数化控制,详细推导离心泵叶轮的伴随优化模型,将流动控制方程作为优化问题的约束条件,推导目标函数的变化、伴随方程以及伴随变量在计算域各边界上的边界条件.以某低比转数离心叶轮为算例,应用伴随方法精确求解目标函数对设计变量的梯度,在任意给定的直叶片基础上沿着目标函数对设计变量梯度反方向不断进行优化迭代,逐步更新叶片型线,直至得到离心泵叶轮的最优设计.

1 伴随方法应用于叶轮优化

1.1 叶片型线参数化控制

在离心泵叶轮的优化问题中,控制变量用于对叶轮叶片形状的参数化控制.文中采用泰勒展开法对某低比转数离心泵叶轮二维叶片型线进行参数化控制,当叶轮轴面不变时(前后盖板形状不变),叶片形状可由函数 $f(r, \theta) = 0$ 表示,对于任意叶片形状可以表示为其在最初叶片型线基础上的泰勒展开,即

$$\theta(r) = \theta_0 + a_1 r + a_2 r^2 + \dots + a_n r^n, \quad (1)$$

式中: θ_0 为初始圆周角; θ 为圆周角坐标; a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为控制变量; $r = (R - R_1)/(R_2 - R_1)$ 为量纲一的量.

任意叶片型线都可由式(1)参数化表示,如图 1 所示.

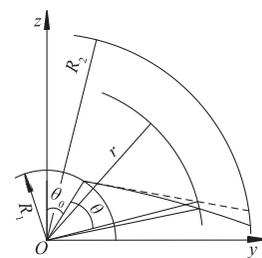


图 1 泰勒多项式参数化控制叶片型线

Fig. 1 Blade camber line is parameterized by a polynomial of dimensionless radius

1.2 优化目标函数

在离心泵的优化问题中,通常以额定流量及扬程点的效率最高为优化目标.在此为验证伴随方法的可靠性,对问题进行简化,在叶轮轴面不变的条件下,对叶片型线进行优化,取作用于叶轮上的转矩为目标函数,转矩 M 可表述为流场参数在叶轮几何边界上的积分,即

$$M = \int_{P,S} [(\mathbf{R} \times \mathbf{n})p + (\mathbf{R} \times \boldsymbol{\tau}_w) \cot \beta'] ds + \int_{\text{hub, shroud}} (\mathbf{R} \times \boldsymbol{\tau}_w) \cot \beta' ds, \quad (2)$$

式中:下标 P, S, hub, shroud 分别为叶片工作面、背

面、叶轮后盖板、前盖板; τ_w 为切应力; β' 为叶片安放角; \mathbf{n} 为叶片表面法向矢量; \mathbf{R} 为叶片表面点位置矢量.

1.3 基于欧拉方程的伴随方程及边界条件

1.3.1 伴随方程

在笛卡儿坐标系下,三维欧拉方程为

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{W} = [p \quad u \quad v \quad w]^T$; $\mathbf{e} = [u \quad u^2 + \frac{p}{\rho} \quad uv$

$uw]^T$; $\mathbf{f} = [v \quad uv \quad v^2 + \frac{p}{\rho} \quad vw]^T$; $\mathbf{g} = [w \quad uw \quad vw$

$w^2 + \frac{p}{\rho}]^T$; u, v, w 分别为笛卡儿坐标系下速度分

量; p 为压力.

流动控制方程的变分为

$$\frac{\partial \delta \mathbf{e}}{\partial x} + \frac{\partial \delta \mathbf{f}}{\partial y} + \frac{\partial \delta \mathbf{g}}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

可缩写为 $\frac{\partial \delta \mathbf{e}_i}{\partial x_i} = 0$, 其中,

$$\delta \mathbf{e}_i = \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial \mathbf{W}} \delta \mathbf{W} + \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial x_j} \delta x_j = \mathbf{A}_i \delta \mathbf{W} + \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial x_j} \delta x_j. \quad (5)$$

引入伴随变量 $\boldsymbol{\psi} = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4)^T$, 将方程(4)的变分与伴随变量加到原目标函数的变分, 则有

$$\delta I_0 = \delta I + \int_D \boldsymbol{\psi}^T \left(\frac{\partial \delta \mathbf{e}}{\partial x} + \frac{\partial \delta \mathbf{f}}{\partial y} + \frac{\partial \delta \mathbf{g}}{\partial z} \right) dV, \quad (6)$$

对式(6)右端第2项进行分部积分, 有

$$\begin{aligned} \int_D \boldsymbol{\psi}^T \left(\frac{\partial \delta \mathbf{e}}{\partial x} + \frac{\partial \delta \mathbf{f}}{\partial y} + \frac{\partial \delta \mathbf{g}}{\partial z} \right) dV = \\ \int_D \left[\frac{\partial (\boldsymbol{\psi}^T \delta \mathbf{e})}{\partial x} + \frac{\partial (\boldsymbol{\psi}^T \delta \mathbf{f})}{\partial y} + \frac{\partial (\boldsymbol{\psi}^T \delta \mathbf{g})}{\partial z} \right] dV - \\ \int_D \left(\frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial x} \delta \mathbf{e} + \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial y} \delta \mathbf{f} + \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial z} \delta \mathbf{g} \right) dV, \quad (7) \end{aligned}$$

根据高斯定理, 式(7)右端形式可写为

$$\begin{aligned} \int_{\Sigma} (\boldsymbol{\psi}^T \delta \mathbf{e} \cos \alpha + \boldsymbol{\psi}^T \delta \mathbf{f} \cos \beta + \boldsymbol{\psi}^T \delta \mathbf{g} \cos \gamma) ds - \\ \int_D \left(\frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial x} \delta \mathbf{e} + \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial y} \delta \mathbf{f} + \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial z} \delta \mathbf{g} \right) dV, \quad (8) \end{aligned}$$

其中, $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ 为边界 Σ 上点 (x, y, z) 处法向量方向余弦.

将以上关联各式代入式(6)得

$$\begin{aligned} \delta I_0 = \int_{P,S} \delta p r \sin \beta' ds + \int_{P,S} pr \delta (\sin \beta') ds + \\ \int_{P,S} pr \sin \beta' \delta (ds) + \int_{\Sigma} \left[\boldsymbol{\psi}^T \left(\mathbf{A} \delta w + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial y} \delta y + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\left. \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial z} \delta z \right) \cos \alpha + \boldsymbol{\psi}^T \left(\mathbf{B} \delta w + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial z} \delta z \right) \cos \beta +$$

$$\boldsymbol{\psi}^T \left(\mathbf{C} \delta w + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial z} \delta z \right) \cos \gamma \Big] ds -$$

$$\int_V \left[\frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial x} \left(\mathbf{A} \delta w + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial z} \delta z \right) + \right.$$

$$\left. \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial y} \left(\mathbf{B} \delta w + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial z} \delta z \right) + \right.$$

$$\left. \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial z} \left(\mathbf{C} \delta w + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial z} \delta z \right) \right] dV. \quad (9)$$

提取式(9)中的 $\delta \mathbf{W}$ 项, 并令其系数为0, 则目标函数的变分与流场变量变分无关, 同时可在流动计算域内得到伴随方程. 伴随方程为

$$\mathbf{A}^T \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial x} + \mathbf{B}^T \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial y} + \mathbf{C}^T \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial z} = 0. \quad (10)$$

在计算域边界上提取 $\delta \mathbf{W}$ 项并令其为0, 可得伴随方程(10)的边界条件.

1.3.2 边界条件

从式(9)的右端面积分中消去流场变量在边界上的变分 $\delta \mathbf{W}$ 项, 即得到伴随方程的边界条件. 在前、后盖板及进出口边界面上满足

$$\boldsymbol{\psi}^T \mathbf{A} \cos \alpha + \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{B} \cos \beta + \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{C} \cos \gamma = 0, \quad (11)$$

在叶片的工作面及背面满足

$$\begin{aligned} (\boldsymbol{\psi}^T \mathbf{A} \cos \alpha + \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{B} \cos \beta + \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{C} \cos \gamma) \delta w + \\ r \sin \beta' \delta p = 0, \quad (12) \end{aligned}$$

最终目标函数的变分为

$$\delta I_0 = \int_{P,S} \delta p r \sin \beta' ds + \int_{P,S} pr \delta (\sin \beta') ds +$$

$$\int_{P,S} pr \sin \beta' \delta (ds) + \int_{\Sigma} \left[\boldsymbol{\psi}^T \left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial y} \delta y + \right. \right.$$

$$\left. \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial z} \delta z \right) \cos \alpha + \boldsymbol{\psi}^T \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial z} \delta z \right) \cos \beta +$$

$$\boldsymbol{\psi}^T \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial z} \delta z \right) \cos \gamma \Big] ds -$$

$$\int_D \left[\frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial z} \delta z \right) + \right.$$

$$\left. \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial y} \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial z} \delta z \right) + \right.$$

$$\left. \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial z} \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial z} \delta z \right) \right] dV. \quad (13)$$

由于伴随变量的引入, 使得目标函数的变分与流动参数的变分无关, 因此计算目标函数对设计变量的梯度矢量时只需要计算一次流场及一次伴随变量场, 计算量大大减少. 给定各控制参数相应的小扰动 (δa_i 近似取值为 $0.5\% a_i$), 同时保证其他控

制参数不变,计算目标函数对叶片型线控制变量 a_i 的梯度矢量,即

$$\frac{d\hat{I}_0}{da_i} = \frac{\delta\hat{I}_0}{\delta a_i}, \quad (14)$$

同时沿梯度矢量的反方向不断地更新叶片形状,

$$a_i^{(n+1)} = a_i^{(n)} - \lambda \frac{\delta\hat{I}_0}{\delta a_i}, \quad (15)$$

式中: λ 为步长系数; n 为迭代次数. 循环迭代直至叶片收敛于最优设计.

基于伴随方法的离心泵叶轮优化方法步骤可概括:① 给定原始叶片形状 $a_i^{(0)}$;② 计算流场,得到流场变量 \mathbf{W} ;③ 计算伴随变量场,得到伴随场变量 ψ ;④ 计算目标函数变分 δI_0 ;⑤ 按照式(15)计算目标函数对控制变量的梯度 $\frac{\delta I_0}{\delta a_i^{(n)}}$,并进行收敛性检验;⑥ 按照式(15)更新叶片形状,得 $a_i^{(n+1)}$,转入步骤② 继续迭代.

2 结果分析及讨论

选取某单级单吸石油化工离心泵 MH48-12.5 为研究对象,进行优化设计计算例分析,其基本性能参数分别为流量 $Q_0 = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $H_0 = 30.7 \text{ m}$, 转速 $n_0 = 2900 \text{ r/min}$, 效率 $\eta_0 = 53\%$. 优化目标是在设计工况点时泵的效率最高,目标函数在前面已经建立. 叶片形状通过式(1)参数化控制,保留式中的 5 次项,即有 5 个控制变量 $a_i (i = 1, 2, \dots, 5)$. 本算例初始模型给定叶片型线为进口安放角为 25° 的直叶片,由初始叶片形状与式(1)反推控制变量 $a_i^{(0)}$ 初始值 ($a_1^{(0)} = 3.89, a_2^{(0)} = -10.17, a_3^{(0)} = 15.75, a_4^{(0)} = -12.56, a_5^{(0)} = 3.95$). 流场、伴随变量场分别采用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 旋转机械模块与数学模块耦合求解. 采用 COMSOL 自带的网格工具,进行局部加密的非结构化网格划分. 根据流场计算结果,计算扬程及水力效率: $H = \frac{(p_{\text{out}} - p_{\text{in}})}{\gamma} + \frac{(U_2^2 - U_1^2)}{2g} + \Delta Z, \eta_h = \frac{\rho g Q H}{M \omega}$, 容积效率与机械效率按离心泵传统设计理论中统计公式进行计算^[13],最终得到泵的总效率. 根据流场、伴随变量场计算结果由式(2)及式(14)计算目标函数及目标函数对控制变量梯度. 按照式(15)逐步更新叶片型线,直至收敛. 其中梯度矢量的计算、叶型的控制及更新均由 Matlab 程序代码实现.

图 2 为优化循环过程中泵的水力性能变化规

律,图 2 中, N 为优化循环迭代次数. 可以看出,随着循环迭代次数的增大,泵的效率逐渐增大,而作用在叶轮上的转矩和泵的扬程逐渐减小,在第 8 次优化循环时泵的效率最高,此后又减小,说明第 8 次优化为最优.

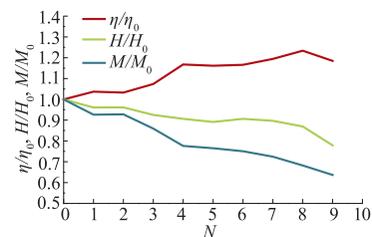


图 2 优化迭代过程中转矩、扬程和效率的变化
Fig. 2 Torque, head and efficiency vary in course of optimization

图 3 为优化循环过程中从初始直叶片至最优模型的叶片型线变化,可以看出,随着叶轮叶片型线不断地优化,叶片包角逐渐增大,出口安放角逐渐减小,在叶轮轴面形状不变的情况下,扬程会逐渐降低,作用于叶轮上的转矩也会逐渐降低,而且叶轮内流动分离现象逐渐减弱,进而效率逐步提高.

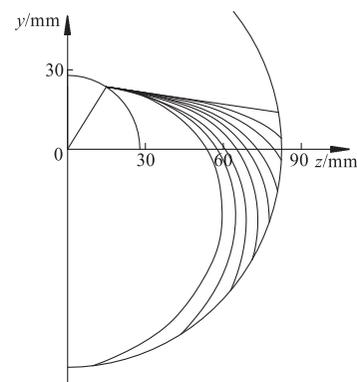


图 3 优化迭代过程中叶片型线的变化
Fig. 3 Blade shape vary in course of optimization

本算例优化设计叶轮和已有水力模型在不同工况下的水力性能 CFD 数值计算与试验结果对比如图 4 所示. 可以看出:已有水力模型的数值计算结果与试验结果基本保持一致,其误差主要在于湍流模型误差和数值方法误差,因此,可以用来进行目标函数的评估;优化设计叶轮的扬程与效率在各个工况点均与已有较好的水力模型模拟结果基本一致,在整个流量范围内,优化设计叶轮的扬程略低于已有模型,但效率均高于现有水力模型. 这表明离心泵叶轮的伴随优化方法在任意给定的初始直叶片的基础上,均能得到较好的优化效果,该方法具有较好的收敛性.

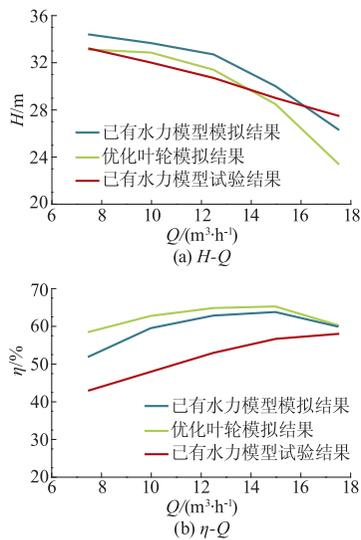


图 4 已有水力模型与优化叶轮的性能曲线对比
Fig. 4 Comparison of existing and optimized impeller performance curves

图 5 为优化叶片与已有水力模型叶片的对比,可以看出,优化叶片包角与现有水力模型的叶片包角大小基本一致。

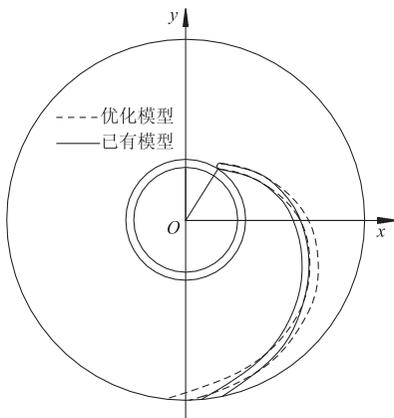


图 5 优化模型与已有水力模型叶片形状
Fig. 5 Blade shapes of optimized and existing impellers

综上所述,保持叶轮轴面形状不变,由给定的任意初始叶片形状,根据伴随方法,沿着目标函数对设计变量的梯度方向不断地更新叶片形状,最终均能得到性能较好的叶片型线。因此,将伴随方法应用于离心泵叶轮的优化设计是可行的,能保证较好的优化结果,同时大大减少了计算量。

3 结 论

1) 建立了基于伴随方法的低比转数离心泵叶轮的优化模型,将流动控制方程作为优化的约束,推导了目标函数的变分、伴随方程及其边界条件的

具体形式。

2) 保持叶轮轴面不变,以转矩为目标函数,对 MH48-12.5 型低比转数离心泵叶轮进行伴随方法优化研究,可得到较为理想的优化结果,优化过程的计算量大大减少,对采用伴随方法得到的叶轮及已有水力模型的数值模拟及试验结果对比表明,所提出的理论及方法是可行的。

在优化过程中,流场的数值计算采用雷诺时均 N-S 方程,伴随方程基于欧拉方程方法,后续研究中将探讨黏性对伴随方程、目标函数变分及寻优速度等的影响。

参考文献 (References)

- [1] 王春林,彭海波,丁剑,等. 基于响应面法的消防泵 S 型叶片改进优化设计[J]. 机械工程学报,2013,49(10): 170-177.
Wang Chunlin, Peng Haibo, Ding Jian, et al. Optimization for S-type blade of fire pump based on response surface method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 170-177. (in Chinese)
- [2] Zhang R, Zheng K, Yang J. Investigation on parametric design of centrifugal pump impeller and its optimization with response surface method[C]//Proceedings of the 2012 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Rio Grande, Puerto Rico: [s. n.], 2012: 529-533.
- [3] Oyama A, Liou M S. Multiobjective optimization of rocket engine pumps using evolutionary algorithm[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(3): 528-535.
- [4] 童彤,丰镇平,孟庆集. 模拟退火算法在透平叶栅多目标优化设计中的应用[J]. 西安交通大学学报,1999,33(3): 64-67.
Tong Tong, Feng Zhenping, Meng Qingji. Simulated annealing algorithm applied to optimize design of turbine cascades[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(3): 64-67. (in Chinese)
- [5] 杨魏,王福军,王宏. 离心风机叶片三维反问题优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(8): 105-109.
Yang Wei, Wang Fujun, Wang Hong. Aerodynamic optimization design of centrifugal fan blades based on 3-D inverse design method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 105-109. (in Chinese)