

基于自由曲面变形方法的离心泵叶片反问题方法研究*

张人会^{1,2} 郭苗¹ 杨军虎¹ 刘宜¹ 李仁年¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 安徽三联泵业有限公司, 和县 238200)

摘要: 提出了一种基于自由曲面变形(FFD)方法的离心泵叶片反问题新方法。采用自由曲面变形方法对叶轮叶片形状进行控制,将叶片空间曲面嵌入到一个均匀剖分的三参数张量控制体内,移动控制晶格点位置使控制体发生变形,控制体内的叶片曲面形状随之改变。根据给定的叶片目标载荷分布进行叶片形状的控制,构建控制晶格点的变形函数,根据叶轮内三维湍流数值模拟结果与期望的叶片载荷分布规律控制晶格点的变形,实现了由物理参数对叶片形状的直接控制。算例计算结果表明,所提出的基于FFD方法的离心泵叶片反问题方法是可行的。

关键词: 离心泵 叶片 自由曲面变形 反问题

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0084-05

引言

随着流动计算技术及现代流场测试技术的发展,对于水力机械内流动的数值计算及流场的高精度测试研究进展迅速,对水力机械内复杂的气液、固液多相流动、水力机械内流动的高精度湍流计算模型、水力机械内流动的瞬态特性及过渡过程等的研究是当前该领域研究的热点。但由于反问题的复杂性,对于水力机械叶轮反问题的研究进展缓慢^[1-7],其优化研究更是难以进行。目前,离心泵叶片反问题方法主要有从正问题出发的反问题方法及从反问题出发的反问题方法^[2-3]。从反问题出发的反问题方法中,叶片造型一般作为边界条件来给定,根据方程 $wn=0$ 来构建叶片骨面,该方法中叶片造型与流动计算同时进行,但流动的计算模型相对较简单;从正问题出发的反问题方法根据较为精确的流场计算结果来修改叶型的设计,不断进行迭代,直至流场计算结果满意为止,该方法中正问题的求解和反问题设计是独立进行的,流场计算可采用较复杂精确的模型,但叶型的控制及修改不便。本文在此基础上提出利用自由曲面变形技术(FFD)对叶轮流道形状进行参数化控制,通过构造控制晶格点的变形函数,实现由液体能量梯度分布参数直接控制叶片型线的叶片反问题新方法。

1 自由曲面变形技术

1.1 自由曲面变形技术概述

在泵叶轮反问题的研究中,需要不断地进行内

流场的计算及叶片的造型过程,其中对叶片形状的控制是个关键问题。本研究提出采用自由曲面变形技术对叶片曲面进行参数化控制。1984年, Barr提出在力的作用下物体发生拉伸、均匀张缩、扭转和弯曲变形,并提到物体表面变形前后对应点法矢关系,在此基础上, Sederberg和 Parry^[8]提出自由曲面变形方法。自由曲面变形的基本思想是假定物体有很好的弹性,容易在外力作用下发生变形,首先构造一个长方体控制框架,而后将待变形的物体或曲面嵌入框架中,对框架施加外力使其变形,物体的形状随之发生变化,框架的变形是由其上的控制顶点的变化而产生的,可以通过控制框架的顶点来改变被控制物体的形状。Samareh^[9]将FFD方法应用于航空翼型的优化设计,实现了对计算网格的参数化控制及机翼外形扰动量的参数化控制。

1.2 自由曲面变形基本算法

曲面变形的实质是建立一种数学映射,原始曲面上的点为 $X(u, v)$,变形后曲面上的点为 $X'(u, v)$,变形函数 $X' = F(X)$ 即为所期望建立的映射。

FFD方法基本算法如下:

(1) 在一个包围待变形物体的长方体(控制体)中构造局部坐标系 $O'STU$,则该坐标系中任意一点 $X(s, t, u)$ 可表示为

$$X = X_0 + sS + tT + uU \quad (0 \leq s, t, u \leq 1) \quad (1)$$

(2) 在长方体上构造控制顶点网格 $P_{i,j,k}$,分别用平行于 $O'TU$ 、 $O'SU$ 、 $O'ST$ 的坐标面将控制体 l 、 m 、 n 等分。其交点构成控制顶点晶格(如图1所示)。

$$P_{i,j,k} = X_0 + \frac{i}{l}S + \frac{j}{m}T + \frac{k}{n}U \quad (2)$$

式中 i, j, k ——控制晶格点在 S, T, U 方向上的坐标

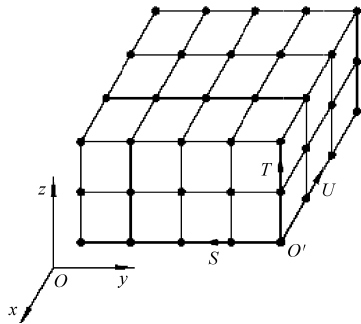


图1 控制晶格点及晶格坐标系

Fig.1 Control volume and lattices

此时控制体内任何一点的笛卡尔坐标可以表示为

$$X(s, t, u) = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n P_{i,j,k} B_{il}(s) B_{jm}(t) B_{kn}(u) \quad (3)$$

式中 $B_{il}(s), B_{jm}(t), B_{kn}(u)$ ——Bernstein 基函数

(3) 建立原始曲面和框架关系,将原始曲面的笛卡尔坐标值变换到晶格坐标系(X_0STU)上对应的(s, t, u)。

(4) 改变控制点,控制框架发生变形,同时嵌入其中的原始表面上的点坐标随之变化,原始表面发生变形,保持原始表面上各点对应的(s, t, u)局部坐标值不变,即

$$X'(s, t, u) = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n P'_{i,j,k} B_{il}(s) B_{jm}(t) B_{kn}(u) \quad (4)$$

式中 $P'_{i,j,k}$ ——晶格点变形后的位置坐标

式(4)即为曲面的变形函数。不同的曲面变形函数可以得到不同的变形变换。

因此,FFD方法能用于任何形式的曲面(平面、二次曲面、参数曲面等)及实体造型系统,能直观地控制几何连续性,能对曲面进行局部变形,计算简便,无需对初始的曲面进行拟合。

1.3 水力机械叶片的自由曲面变形控制

水力机械叶轮叶片形状一般为扭曲的三维叶片,形状复杂,难以参数化表示,这也正是水力机械叶片反问题及其优化研究难以进行的原因之一。笔者前期曾提出采用高阶 Bezier 曲线来控制叶轮轴面前、后盖板流线的平面投影的方法及提出采用偏微分方程曲面造型方法构建叶片的骨面^[10],这些方法均能实现水力机械叶片的参数化控制,但其在反问题求解中计算量较大,不能方便地实现

对叶片曲面形状的自由控制,控制变量的物理意义不够明确。

本研究采用自由曲面变形方法(FFD)对水力机械叶片进行参数化变形控制。其计算步骤如下:

(1) 首先构造长方体控制晶格框架,该控制体要能容纳下三维扭曲叶片。

(2) 将水力机械的原始叶片嵌入其中,无论是参数化方法生成的叶片,还是由传统设计方法生成的叶片木模图所表示的叶片均可。

(3) 建立控制晶格框架的局部坐标系 $OSTU$;得到控制晶格点 $P_{i,j,k}$ 的全局坐标(x, y, z)及局部坐标(s, t, u)。

(4) 求解待变形曲面上各点局部坐标(s, t, u)。

(5) 改变控制框架各晶格点的位置,使控制体发生变形,构造变形函数,根据流动计算结果与预期的流场分布来调整晶格点的位置。

(6) 叶片曲面的变形。叶片曲面的形状随着控制体形状的改变而改变,保持叶片曲面上各点对应的局部坐标(s, t, u)不变,计算在变形后的控制体框架上叶片曲面上各点对应的新坐标。

2 基于 FFD 方法的泵叶片反问题方法

Zangeneh^[1,11-12]提出根据给定的液体角动量分

布规律($\frac{\partial(v_u r)}{\partial s_m}, v_u r$ 表示速度矩, s_m 表示轴面流线长度)来进行叶片的反问题设计,并提出二次抛物线与直线组合的动量矩分布规律,由于水力机械进行流体输送的目的在于其主轴机械能与液体能量间的传递,液体由叶轮进口至叶轮出口液体能量梯度的变化决定了其内部流动特性及外特性,为此考虑给定叶轮的总能量头分布规律进行叶片型线的反设计。

由式 $H_i = \frac{u_i v_{ui}}{g} = \frac{p_i}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2g}$ ($H_i, u_i, v_{ui}, g, p_i, \gamma, v_i$ 分别表示液体能量头、圆周速度、绝对速度的圆周分量、重力加速度、压力、密度及绝对速度)可知, $\frac{\partial H_i}{\partial m}$ 与

$\frac{\partial(v_u r)}{\partial s_m}$ 实质是一致的, $\frac{\partial H_i}{\partial m}$ 为液体能量梯度的分布,

也可以看作为叶片载荷。文献[13]提出基于物理模型或物理变量进行曲面造型,该造型方法直接从曲面的功能出发,物理意义明显。本文根据液体能量梯度分布(或叶片载荷分布)对叶片曲面进行控制也属基于物理模型的曲面造型方法。

自由曲面变形方法能够将现有两种反问题方法的优点很好地结合起来。

首先通过自由曲面变形方法对叶片曲面进行参

数化控制,给定期望的沿叶片表面液体能量梯度的变化规律,然后根据流场计算结果得到的沿叶片表面液体能量梯度分布与期望的梯度分布的差值来修改控制晶格点的位置。晶格变形需要根据流场构建变形函数。

构造的晶格变形函数为

$$\Delta P_{i,j}(r,\theta) = k \left(\frac{\partial H_i}{\partial m}(r_i) \Big|_o - \frac{\partial H_i}{\partial m}(r_i) \right) f(\theta) \quad (5)$$

式中 k ——步长系数

r_i ——叶片型线上点的半径

$f(\theta)$ ——角度 θ 变量的影响系数

不同的影响系数可以得到不同的晶格变形函数,在此设定其值为常系数,主要考虑叶片载荷对变形的影响。

依据 FFD 方法实现了对叶片形状的反问题迭代,其算法流程如图 2 所示。

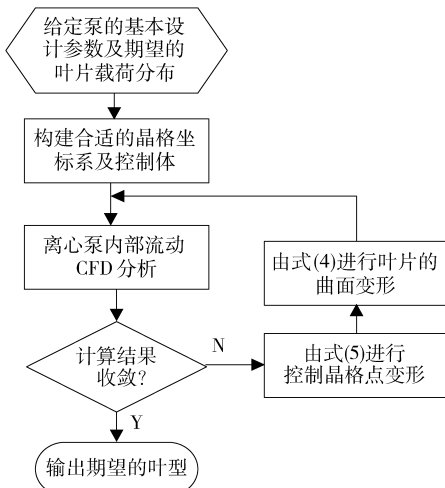


图 2 基于 FFD 方法的泵叶片反问题算法流程

Fig. 2 Flow chart of the inverse problem to pump blade based on free form deformation

3 算例

以笔者前期对叶轮优化研究^[14]中的低比转数离心泵叶轮(流量 $Q = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $H = 30.7 \text{ m}$, 转速 $n = 2900 \text{ r/min}$, 效率 $\eta = 53\%$)为研究对象,将其第一次优化的叶型作为本研究的初始叶型,以其最终的优化叶型计算得到叶片表面的载荷分布作为该反问题的叶片目标载荷分布。

在包含初始叶型的控制体内构建控制晶格点及极坐标系下的晶格坐标系(如图 3)。泵内流场采用基于雷诺时均 N-S 方程的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算,流场计算结果与实验结果的对比在前期工作中已经进行了验证^[14-15],根据流场计算结果、变形函数式(5)及图 4 所示的目标载荷分布,对控制体内的控制晶格点的位置进行控制,根据式(4)及

变形后的控制晶格点重新生成新的叶片型线(如图 5)。根据重新生成的叶片重新对泵内部流动进行计算,经 2 次迭代得到其叶片上的液体能量梯度分布与目标分布十分接近,其叶片型线与目标叶片型线近似一致(如图 6、图 7)。计算结果表明该反问题算法稳定性好,收敛速度快,实现了由给定目标流场分布的叶片反问题的快速求解。

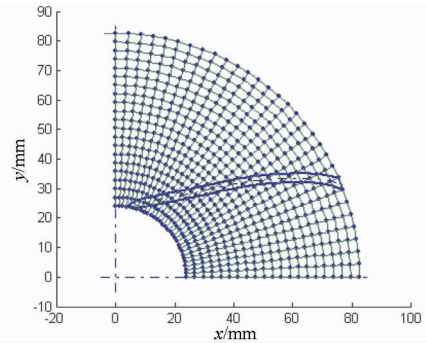


图 3 初始叶型及控制晶格点

Fig. 3 Initial blade and the control lattices

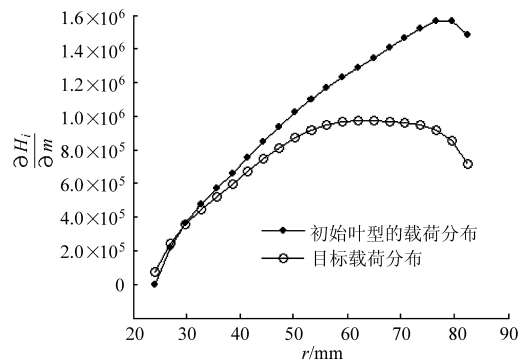


图 4 初始叶片及目标叶片表面液体能量梯度分布

Fig. 4 Energy gradient distribution of fluid on the objective and the initial blade surface

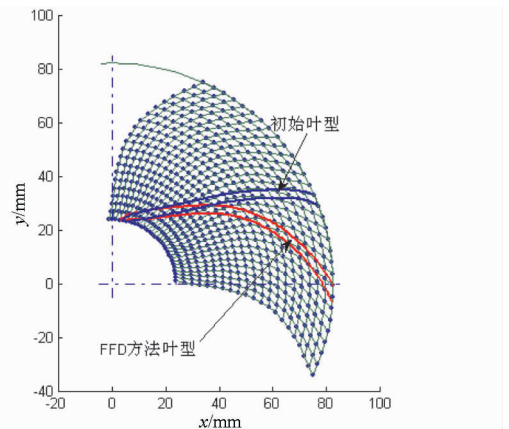


图 5 FFD 反问题方法得到的目标叶型与初始叶型
Fig. 5 Initial blade shape and the blade shape designed by FFD method

4 结论

(1) 提出了一种基于自由曲面变形方法的离心泵叶片反问题方法,根据给定叶片目标载荷分布及

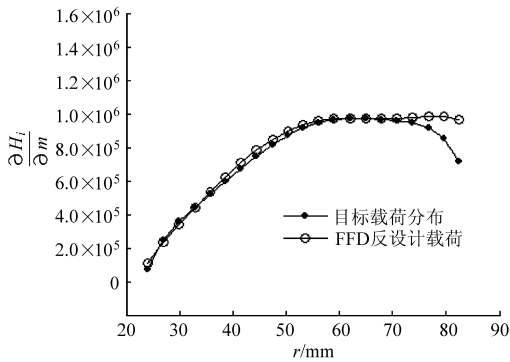


图 6 FFD 反设计得到的液体能量梯度分布与其目标

Fig. 6 Energy gradient distribution of the blade designed by FFD method and the objective energy gradient distribution

泵内流场的模拟结果,不断地更新叶片形状,能快速得到给定的目标载荷分布的期望叶型。

(2) 根据给定的叶片目标载荷分布及流场模拟结果构建了控制晶格点的变形函数,提出了一种叶片形状的修改策略,便于实现根据流场的模拟结果对叶片形状的更新。

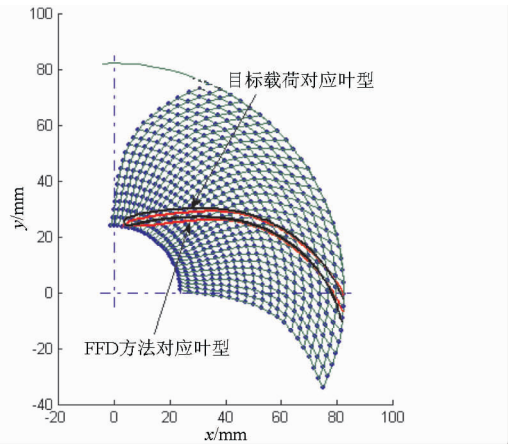


图 7 FFD 反问题方法得到的叶型与目标叶型

Fig. 7 Blade shape design by FFD method and the objective blade shape

(3) 算例计算结果表明,提出的基于 FFD 方法的离心泵叶片反问题方法实现了由液体能量梯度分布参数直接控制叶片曲面形状,算法稳定、收敛速度快,实现了对叶轮内部流动的控制。

参 考 文 献

- Zangeneh M, Goto A, Harada H. On the role of three-dimensional inverse design methods in turbomachinery[J]. Proc. IMech E, Part C: Journal of Mechanical Engineering, 1999, 213(1):27~42.
- 杨琳, 陈乃祥. 水力机械转轮三维反问题研究及其新进展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 97~101.
Yang Lin, Chen Naixiang. The new research and development of three-dimensional inverse problem of runners of hydraulic machinery[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 97~101. (in Chinese)
- 彭国义. 水力机械反问题数值研究与进展[J]. 甘肃工业大学学报, 1997, 23(4):31~35.
Peng Guoyi. The numerical approach of the inverse problem of hydraulic machinery runner and its development [J]. Journal of Gansu University of Technology, 1997, 23(4):31~35. (in Chinese)
- 罗兴琦, 陈乃祥, 林汝长. 有厚叶片的 S_2 流面反问题计算[J]. 水利学报, 1995, 26(3):8~15.
Luo Xingqi, Chen Naixiang, Lin Ruchang. Inverse calculation on S_2 streamsurface with blade thickness[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(3):8~15. (in Chinese)
- 邴浩, 曹树良, 谭磊. 混流泵叶片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, 2011, 29(4):277~281. (in Chinese)
- 李文广. 离心泵叶片反问题设计[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3):49~52.
Li Wenguang. Inverse problem design of blade for centrifugal pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3):49~52. (in Chinese)
- 卢金铃, 席光, 祁大同. 反问题与神经网络相结合的混流泵叶片优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3):308~312.
Lu Jinling, Xi Guang, Qi Datong. Blade optimization of mixed-flow pump using inverse design method and neural network[J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2004, 38(3):308~312. (in Chinese)
- Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models[J]. Computer Graphics, 1986, 20(4):151~160.
- Jamshid A Samareh. Aerodynamic shape optimization based on freed-form deformation[C]. AIAA-2004-4630, 2004.
- 张人会, 杨军虎, 李仁年. 基于偏微分方程的离心泵叶片反设计方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9):81~84.
Zhang Renhui, Yang Junhu, Li Rennian. Inverse design method of centrifugal pump blade based on PDE method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9):81~84. (in Chinese)
- Zangeneh M, Goto A, Harada H. On the design criteria for suppression of secondary flows in centrifugal and mixed flow impellers [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(10):723~735.
- Zangeneh M, Goto A, Takemura T. Suppression of secondary flows in a mixed-flow pump impeller by application of three dimensional inverse design method; part I—design and numerical validation [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(7):536~542.
- 成思源, 张湘伟, 熊汉伟. 基于物理的自由曲面造型技术与展望[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(12):7~10.
Cheng Siyuan, Zhang Xiangwei, Xiong Hanwei. State and prospects of physics-based free-form surface modeling[J]. Journal of

Chongqing University, 2002,25(12):7~10. (in Chinese)

- 14 Zhang Renhui, Zheng Kai, Yao Longhou. The optimization of low specific speed centrifugal pump based on income-plete sensitivitie[C]. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Beijing, 2012.
- 15 张人会,郑凯,杨军虎,等. 离心泵叶轮的参数化设计[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):417~421.
- Zhang Renhui, Zheng Kai, Yang Junhu, et al. Parametric design of centrifugal pump impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(4):417~421. (in Chinese)

New Inverse Method of Centrifugal Pump Blade Based on Free-form Deformation

Zhang Renhui^{1,2} Guo Miao¹ Yang Junhu¹ Liu Yi¹ Li Rennian¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Anhui Sanlian Pump Industry Co., Ltd., Hexian 238200, China)

Abstract: A new inverse method for centrifugal pump blade based on free-form deformation, which is used to parametric control of the pump blade shape, was proposed. The blade was implanted to a trivariate control volume which is equally subdivided by control lattices. The control volume can be deformed by moving the control lattices in it, thereupon the object is deformed. The parametric method for the blade shape according to the distribution of the blade load was proposed, and the lattices deformation function was constructed. The deformation of the lattices was implemented according to the three dimensional turbulent flow solve in pump and the desired load distribution of blade. At last, the blade shape was controlled by the physical parameters. The calculation case shows that the proposed inverse method based on FFD method is rational.

Key words: Centrifugal pump Blade Free-form deformation Inverse problem

(上接第 83 页)

Numerical Prediction of Inner Flow Unsteadiness in a Low-specific Speed Centrifugal Pump

Pei Ji Wang Wenjie Yuan Shouqi Meng Fan Chen Jia

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To decrease the flow unsteadiness in pump hydraulic design procedure as much as possible, the inner flow unsteadiness intensity and distribution should be understood. For analyzing the unsteady flow phenomenon in low-specific speed centrifugal pump, CFD software was employed to simulate the 3-D unsteady fluid flow in the pump, and meanwhile the time-averaged unsteadiness intensity coefficients were defined based on velocity triangle in order to directly depict the flow unsteadiness. By analyzing the distributions of the intensity coefficients in the low-specific speed pump, the results show that stronger flow unsteadiness can be found near blade suction side, and in the wake flow area the flow varies with time strongly. In addition, strong flow unsteadiness is also significant in the discharge tube and the area near impeller outlet of the volute.

Key words: Centrifugal pump Low-specific speed Inner flow unsteadiness Numerical simulation