排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2012 年 11 月 Nov. 2012 | 第 30 卷 第 6 期 Vol. 30 No. 6
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.06.003

离心式叶轮三维反问题设计和数值计算

杨魏[1]，王福军[1]，王宏[2]
（1. 中国农业大学水利与土木工程学院，北京 100083；2. 清华大学核能技术与新能源技术研究院，北京 100084）

摘要：为解决离心式叶轮传统设计方法主要依赖于设计者经验以及设计周期较长等问题，采用三维反问题设计方法，根据给定的流场进行叶轮形状的设计，从而提高设计过程对叶轮性能的控制能力. 三维反问题设计方法基于无黏有势流假设，将三维速度场分解为周向平均速度和周期速度进行求解，实现了在二维轴面流道上叶片形状和流场的三维计算. 三维叶片形状根据速度在叶片表面满足滑移条件计算得到，同时获得该叶轮形状下其内部三维流场的计算结果. 采用自编三维反问题设计程序进行了离心式叶轮的设计计算，并利用三维定常湍流数值计算技术对设计结果进行了流场模拟和性能评价，流场的模拟结果与设计方法计算结果定性吻合，验证了设计方法的有效性. 研究结果表明：将三维反问题设计方法和三维湍流数值计算技术结合可有效缩短设计周期，提高设计质量，并可用于各种叶轮机械的设计.

关键词：离心叶轮；反问题设计；性能预测；湍流模拟
中图分类号：S277.9；TG111　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2012)06-0632-04

Three-dimensional inverse design and fluid flow numerical simulation for centrifugal impeller

Yang Wei[1], *Wang Fujun*[1], *Wang Hong*[2]
(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the problems of traditional design methods, which are mainly rely on experience of a designer and the design cycle is often too long, a three-dimensional (3D) inverse design method was used to design the impeller according to given flow field conditions. The method has a better control ability of design outcomes during the design procedure. Based on the inviscid and potential flow assumption, a 3D velocity field in centrifugal impeller is decomposed into an averaged circumferential flow and a periodic one; subsequently they are solved numerically in the two-dimensional meridional plane and the blade-to-blade surface to approximately obtain the 3D fluid flow field. 3D geometry of a blade is established according to the slip boundary condition on the surface of the blade, the flow field in the designed impeller is obtainable simultaneously as well. A centrifugal impeller was designed by a 3D inverse design code developed by the authors, also a 3D steady, turbulent fluid flow in the impeller was simulated by using a CFD code to examine the flow field and evaluate the impeller performance. The viscous fluid flow simulated and inviscid one obtained in the design are in qualitative agreement, confirming the validity of the 3D inverse design method. The results indicate that combination of the inverse design method and the turbulent flow simulation technique can shorten design cycle and improve design quality effectively. This design strategy may be applicable to impeller design of the

收稿日期：2012-08-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51139007)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011JS124)
作者简介：杨魏(1982—)，男，安徽铜陵人，讲师(wyang@cau.edu.cn)，主要从事流体机械优化设计研究.
王福军(1964—)，男，河北丰润人，教授，博士生导师(wangfj@cau.edu.cn)，主要从事流体机械设计、计算流体力学理论研究.

rest type of fluid machine.

Key words: centrifugal impeller; inverse design; performance prediction; turbulence simulation

相对于叶轮机械的正问题分析计算，反问题设计计算更加困难，因为在反问题设计中需要根据性能要求设计出相应的叶轮形状，而叶轮形状本身是未知的，是需要求解的对象之一. 因此，反问题设计方法中既要进行正问题的流场计算，也要进行叶片形状的反问题计算，是一个正反问题迭代的过程[1-2]，其计算结果在输出叶片形状的同时得到相应的流场. 与传统以经验为指导的叶轮机械设计方法相比，三维反问题设计方法是一种以理论为指导的设计方法. 它具有设计输入条件少和实现流场预控制等优点. 叶轮机械反问题设计方法已成功应用到不同叶轮机械的设计中[3-4]，较传统设计方法更具优势和潜力.

三维反问题设计方法通常包含两个部分：一部分是流场的计算，另一部分是叶片形状的计算. 叶片形状的计算基于流场的计算进行. 因此，三维反问题设计方法的关键在于其流场计算的精度[5-6]. 现有反问题设计方法中流场的计算多数基于定常、无黏等假设，在黏性起重要作用的叶轮机械的设计中，为了保证设计质量通常将这类方法与三维湍流计算结合进行叶轮的优化设计[7-8].

文中介绍三维反问题设计方法的基本原理和计算步骤，并采用该方法进行离心式叶轮的设计计算. 为了验证三维反问题设计方法的正确性，采用三维湍流数值计算技术对设计得到的叶轮进行流动和性能评价，并与反问题计算的结果进行比较分析.

1　三维反问题设计方法

1.1　基本方程

反问题设计方法一般包含流场计算和叶片形状计算 2 个部分，叶片形状基于流场计算结果进行改进是正反问题的迭代过程[9-10]. 文中采用基于文献[6]的三维定常可压缩无黏反问题设计方法，该方法将速度场分解为周向平均速度和周期速度进行求解. 周向平均速度满足流函数方程，即

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\rho_i}{\bar{\rho}}\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho_i}{\bar{\rho}}\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}\right)=\frac{\partial r\bar{v}_u}{\partial z}\frac{\partial f}{\partial r}-\frac{\partial r\bar{v}_u}{\partial r}\frac{\partial f}{\partial z},\tag{1}$$

式中：r，z 分别为径向坐标和轴向坐标；ρ_i 为参考密度；$\bar{\rho}$ 为周向平均密度；ψ 为流函数；$r\bar{v}_u$ 为周向平均的速度环量；f 为叶片包角.

周期速度满足势函数方程，即

$$\frac{\partial^2\Phi_m}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\Phi_m}{\partial r}+\frac{\partial^2\Phi_m}{\partial z^2}+\frac{\partial\Phi_m}{\partial z}\frac{\partial\ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial z}+\frac{\partial\Phi_m}{\partial r}\frac{\partial\ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial r}-\frac{m^2B^2}{r^2}\Phi_m=\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}mBf(r,z)}}{\mathrm{i}mB}\cdot\left(\nabla^2 r\bar{v}_u+\frac{\partial r\bar{v}_u}{\partial r}\frac{\partial\ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial r}+\frac{\partial r\bar{v}_u}{\partial z}\frac{\partial\ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial z}\right)-\mathrm{e}^{-\mathrm{i}mBf(r,z)}\left(\frac{\partial f}{\partial r}\frac{\partial r\bar{v}_u}{\partial r}+\frac{\partial f}{\partial z}\frac{\partial r\bar{v}_u}{\partial z}\right),\tag{2}$$

式中：m 为傅里叶展开的项数；Φ_m 为速度势函数；B 为叶片数.

密度根据理想气体等熵关系式进行计算，即

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_i}=\left[1+\frac{\omega^2r^2-(\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{w})}{2c_pT_i}\right]^{1/(\gamma-1)},\tag{3}$$

式中：ω 为旋转角速度；$\boldsymbol{w}$ 为相对速度矢量.

叶片形状由速度在叶片表面满足滑移条件进行计算，即

$$(\bar{v}_z+v_{z\mathrm{bl}})\frac{\partial f}{\partial z}+(\bar{v}_r+v_{r\mathrm{bl}})\frac{\partial f}{\partial r}=\frac{r\bar{v}_u}{r^2}+\frac{v_{\theta\mathrm{bl}}}{r}-\omega,\tag{4}$$

式中：$\bar{v}_z$ 为周向平均的轴向速度；$\bar{v}_r$ 为周向平均的径向速度；$v_{z\mathrm{bl}}$，$v_{r\mathrm{bl}}$，$v_{\theta\mathrm{bl}}$ 分别为轴向、径向和周向周期速度分量.

式(1)－(4)构成了反问题设计方法的求解方程组，给定轴面流道形状及其上的环量分布、厚度分布和叶轮的相关参数即可进行叶片形状的设计计算.

1.2　求解步骤

反问题的求解是个迭代过程，其计算步骤如图 1 所示，计算由自编程序实现.

首先根据设计要求和工况确定轴面流道形状、速度环量分布、叶片厚度分布和堆栈条件等，然后根据速度环量分布和假设的均匀流动计算得到包角值，作为初始叶片形状. 此时，进入迭代计算循环，即求解流函数方程和势函数方程得到平均速度解和周期速度解. 利用上述速度解在叶片表面满足不可穿透条件，计算得到新的叶片包角值. 如此循环迭代直到收敛，输出叶片形状和相应的流场结算结果.

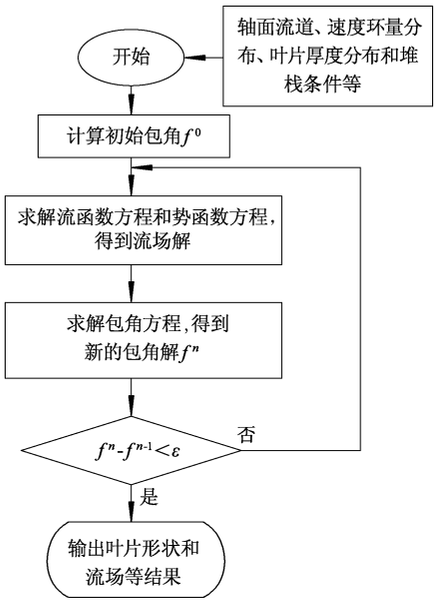


图1 反问题方法的求解步骤

Fig. 1 Procedure for inverse method solving inverse problem

2 设计实例

为了验证三维反问题设计方法的正确性，采用该方法设计计算了某风机叶轮，其质量流量为96 kg/s，转速为4 000 r/min，静压升要求不低于200 kPa，输入功率要求不超过4 500 kW. 轴面流道形状和给定的轴面流道的环量分布如图2所示.

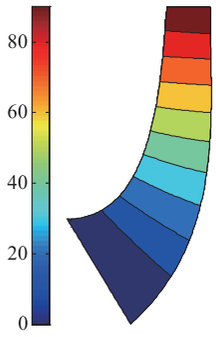


图2 轴面流道形状及环量分布

Fig. 2 Meridional channel shape and prescribed circulation distribution

给定进口环量为0，出口环量根据风机的轴功率. 要求由欧拉方程确定. 进、出口环量值沿翼展方向不变. 叶片采用等厚度分布. 给定叶片出口边的包角值为0，作为叶片包角计算的堆栈条件. 反问题设计计算得到的叶轮三维模型如图3所示.

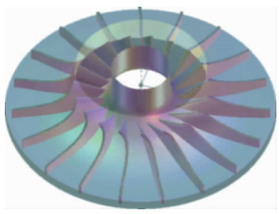


图3 叶轮三维模型

Fig. 3 Three-dimensional geometrical model of impeller

3 结果分析

采用三维定常湍流计算技术对设计得到的风机叶轮进行流动和性能评价. 采用SST $k-\omega$ 湍流模型，将流场简化为单流道进行计算，并采用结构化网格进行叶轮流道的划分. 叶片周围采用O型网格加密，叶片前缘和后缘采用H型网格加密，壁面附近网格尺寸的选择满足湍流模型的需要. 边界条件分别设置为进口给定总压和总温，出口给定质量流量. 三维湍流计算由商业程序CFX实现.

经计算，叶轮性能分别为静压升243.7 kPa，输入功率4 500 kW，多变效率80.3%，完全满足叶轮的设计性能要求，说明反问题设计方法是正确的，可以有效地控制叶轮的宏观性能，在保证叶轮宏观性能基本不变的前提下改变叶片形状.

进一步将流场的计算结果与三维湍流计算结果进行比较，如图4，5所示.

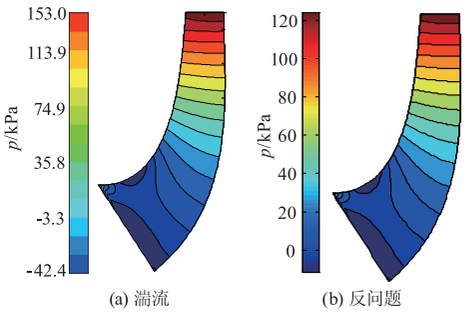


图4 轴面流道相对静压分布

Fig. 4 Static pressure distribution in meridional channel

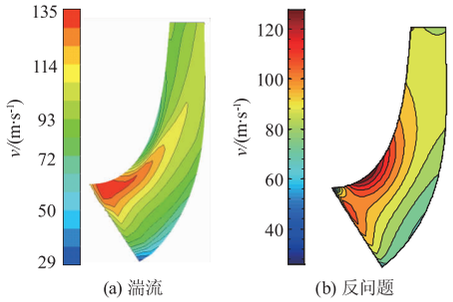


图5 轴面流道轴面速度分布

Fig. 5 Meridional velocity distribution in meridional channel

由图 4，5 可以看出：轴面流道速度和压力分布的整体规律类似，但流动细节存在一定差异，这是由于反问题设计方法中流场的计算基于无黏有势流假设，显然其计算结果与三维湍流计算结果不同.

叶轮流道中流动的三维湍流模拟结果显示，不存在明显的二次流动和横向流动，流动比较顺畅，如图 6 所示.



图 6　叶轮流道中相对流线

Fig. 6　Relative streamlines in impeller channel

4　结　论

1）详细介绍了三维反问题设计方法的基本原理和计算步骤. 与传统设计方法相比，该方法是一种以理论为指导的方法，具有设计输入条件少、可对流场进行预控制等优点.

2）利用自编程序，将上述三维反问题设计方法应用到某离心风机叶轮的设计计算中，设计得到了风机叶轮的三维模型. 采用三维湍流数值计算技术对设计得到的风机叶轮进行了流动和性能评价，并与反问题设计计算结果进行了对比，验证了反问题设计方法的正确性.

3）三维反问题设计方法可运用到各种叶轮机械的设计计算中，具有广泛的应用前景.

虽然三维反问题设计方法具有多种优点，但它基于无黏有势流假设，存在一定的局限性. 因此，应将三维反问题设计方法和三维湍流计算技术有机结合，以提高设计质量.

参考文献(References)

[1] 谭磊，曹树良. 供暖系统混水离心泵叶轮正反问题计算[J]. 流体机械，2009，37(7)：18－23.
Tan Lei, Cao Shuliang. Computer aided design and flow analysis of the mixture water centrifugal pump impeller in heating system [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(7): 18－23. (in Chinese)

[2] 谭磊，曹树良，桂绍波，等. 离心泵叶轮正反问题迭代设计方法[J]. 农业机械学报，2010，41(7)：10，30－35.
Tan Lei, Cao Shuliang, Gui Shaobo, et al. Centrifugal pump impeller design by using direct inverse problem iteration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 10, 30－35. (in Chinese)

[3] Qiu X, Ji M, Dang T. Three-dimensional viscous inverse method for axial blade design [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2009, 17(8): 1019－1036.

[4] 李凤超，樊红刚，陈乃祥. 叶型逼近求解水泵水轮机双向流动的方法[J]. 清华大学学报：自然科学版，2008，48(11)：1777－1780.
Li Fengchao, Fan Honggang, Chen Naixiang. Blade shape approximation for solving the bidirectional flow of pump-turbine runners[J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2008, 48(11): 1777－1780. (in Chinese)

[5] 李凤超，樊红刚，陈乃祥. 水泵水轮机双向流动控制优化设计[J]. 水力发电学报，2010，29(1)：223－228.
Li Fengchao, Fan Honggang, Chen Naixiang. Optimum design of pump-turbine for bidirectional flow control[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 223－228. (in Chinese)

[6] Bonaiuti D, Zangeneh M, Aartojarvi R, et al. Parametric design of a waterjet pump by means of inverse design: CFD calculations and experimental analyses[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132: 1－15.

[7] 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 3D inverse design method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 105－109.

[8] Zangeneh M, Daneshkhah K. A fast 3D inverse design based on multi-objective optimization strategy for design of pumps[C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Colorado: ASME, 2009.

[9] Bonaiuti D, Zangeneh M. On the coupling of inverse design and optimization techniques for the multiobjective, multipoint design of turbomachinery blades[J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131: 021014.

[10] Kerschberger P, Gehrer A. Hydraulic development of high specific-speed pump-turbines by means of an inverse design method, numerical flow-simulation (CFD) and model testing[C]//Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Timisoara: IOP Publishing, 2010.

(责任编辑　陈建华)