

离心风机叶片三维反问题优化设计*

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】 基于三维反问题设计方法和 CFD 技术, 结合试验设计方法、响应面方法和模拟退火优化算法, 建立了离心风机叶片三维形状的优化设计方法。以叶轮效率为优化目标, 以环量分布参数为优化设计变量, 进行了离心风机叶片的优化设计, 优化设计结果叶轮效率提高了 2.2%。根据建立的优化设计变量和叶轮效率之间的响应面函数关系式, 分析了不同环量分布参数及参数间交互效应对叶轮效率的影响, 结果显示轮毂进口段环量分布对叶轮效率有较大影响; 轮毂处的环量分布形式对叶轮效率影响更为显著。

关键词: 离心风机 反问题设计 计算流体力学 优化设计

中图分类号: TH442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0105-05

Aerodynamic Optimization Design of Centrifugal Fan Blades Based on 3-D Inverse Design Method

Yang Wei¹ Wang Fujun¹ Wang Hong²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

An optimization design method based on 3-D inverse design method and CFD was developed by combining design of experiment method, response surface method and simulated annealing optimization calculation. The method was applied to a centrifugal fan blade design by setting the impeller efficiency and the circulation distribution parameters as the optimization object and the optimization design variables respectively. The efficiency was improved by 2.2% with the optimization method. The effects of the circulation parameters and their interaction effects on the impeller efficiency were analyzed according to the constructed response surface between the design parameters and the impeller efficiency. It is shown that the inlet circulation distribution on the hub plays an important role on the efficiency. Comparing with the hub, the circulation distribution shape on the shroud has more influences on the efficiency.

Key words Centrifugal fan, Inverse design, Computational fluid dynamics, Optimization design

引言

离心式叶轮机械内部流动复杂, 影响叶轮性能的参数多, 且参数之间相互影响, 使得高性能离心式叶轮的设计颇具挑战。随着计算机硬件技术和应用数学理论的发展, CFD 技术应用越来越广泛, 成为离心式叶轮机械设计的有力工具^[1-2]。通过 CFD 模拟可以评价各种参数变化对叶轮性能的影响, 从

而选择较优的参数组合, 获得优化的设计结果。尽管如此, 由于离心式叶轮设计参数多, 往往需要进行大量的 CFD 计算才能获得优化结果, 使得这种完全基于 CFD 流场评价的优化方法应用范围有限。

针对这一点, 基于反问题设计方法的叶轮优化具有显著优势^[3-4]; 其优化设计变量少, 优化设计变量物理意义更加明确。反问题设计方法根据给定的速度(环量)分布或压力分布进行叶片的设计计算,

给定的速度(环量)分布或压力分布对叶轮性能的影响较几何参数更为直接,便于理论分析,如通过给定合理的速度环量分布可以有效抑制空化和二次流^[5-6]。因此,基于反问题设计方法的叶轮优化设计能够有效减少计算量,获得满意的优化设计结果。

本文以三维无粘反问题设计方法^[7]和 CFD 技术为基础,结合正交试验设计方法、响应面方法和模拟退火优化算法,建立离心式风机叶片三维优化设计方法,并进行实例研究,验证方法的有效性。

1 优化设计方法

1.1 反问题设计方法

反问题设计方法一般包含两个部分:流场计算和叶片形状计算,叶片形状基于流场计算结果进行,是正反问题迭代过程^[8-10]。本文采用基于文献^[7]的三维定常可压缩无粘反问题设计方法,该方法中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

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho_i}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_i}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = \frac{\partial C}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial r} - \frac{\partial C}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial z}$$

$$\text{其中} \quad C = r \bar{V}_u \quad (1)$$

式中 r ——径向坐标 z ——轴向坐标

ρ_i ——参考密度 $\bar{\rho}$ ——周向平均密度

Ψ ——流函数 f ——叶片包角

C ——周向平均速度环量

\bar{V}_u ——周向平均速度

周期速度满足势函数方程

$$\frac{\partial^2 \Phi_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi_m}{\partial z^2} + \frac{\partial \Phi_m}{\partial z} \frac{\partial \ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_m}{\partial r} \frac{\partial \ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial r} - \frac{m^2 B^2}{r^2} \Phi_m = \frac{e^{-imBf(r,z)}}{imB} \left[\nabla^2 C + \frac{\partial C}{\partial r} \frac{\partial \ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial r} + \frac{\partial C}{\partial z} \frac{\partial \ln(\bar{\rho}/\rho_i)}{\partial z} \right] - e^{-imBf(r,z)} \left(\frac{\partial f}{\partial r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中 m ——傅里叶展开的项数

Φ_m ——速度势函数 B ——叶片数

i ——虚数单位

密度根据理想气体等熵关系式进行计算

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_i} = \left[1 + \frac{\omega^2 r^2 - (\mathbf{W} \cdot \mathbf{W})}{2c_p T_i} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3)$$

式中 ω ——旋转角速度 \mathbf{W} ——相对速度矢量

c_p ——定压比热容 T_i ——参考温度

γ ——绝热系数

叶片形状由速度在叶片表面满足滑移条件进行计算,即

$$(\bar{v}_z + v_{zbl}) \frac{\partial f}{\partial z} + (\bar{v}_r + v_{rbl}) \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{C}{r^2} + \frac{v_{\theta bl}}{r} - \omega \quad (4)$$

式中 \bar{v}_z ——周向平均的轴向速度

\bar{v}_r ——周向平均的径向速度

$v_{zbl}, v_{rbl}, v_{\theta bl}$ ——轴向、径向和周向周期速度分量

式(1)~(4)构成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 CFD 计算方法

采用商业软件 CFX 进行叶轮三维定常湍流模拟,选择 SST- $k\omega$ 湍流模型,单流道模型进行数值模拟计算,分块结构化网格划分技术进行计算域网格的划分,如图 1 所示。



图 1 叶轮 50% 翼展截面网格示意图

Fig. 1 Mesh on the 50% spanwise section surface of impeller

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;根据湍流模型的要求确定壁面附近网格尺寸的大小。边界条件设置如下:进口给定总压和总温,出口给定质量流量。在旋转周期边界上给定周期性条件。根据 CFD 计算结果可对叶轮流场及其性能进行评价,为寻优计算提供依据。

1.3 优化方法

1.3.1 叶片形状参数化

选择叶片形状参数为优化设计变量。叶片形状参数化通过反问题设计方法由环量分布参数化实现。这里采用三段线方法给定轴面流道环量分布。具体方法如下:给定环量梯度(与叶片载荷直接相关)沿轴面流道轮毂和轮缘的三段线分布:第一段为进口段,采用多项式分布;第二段为中间段,采用直线分布;第三段为出口段,采用多项式分布,如图 2 所示。环量由环量梯度的积分得到,轮毂和轮缘之间轴面流道中的环量分布根据轮毂和轮缘的环量值进行插值获得。采用三段线进行环量分布的参数化共 6 个参数,分别是 $S_{1s}, S_{2s}, K_s, S_{1h}, S_{2h}$ 和 K_h , 各参数的含义如图 2 所示。

1.3.2 优化步骤

以叶轮效率为优化目标,叶轮效率根据 CFD 计

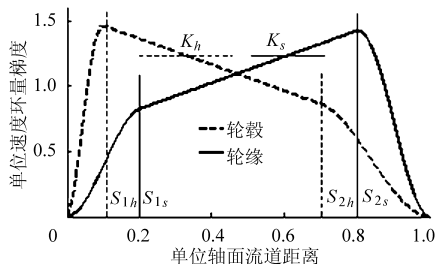


图 2 三段线环量梯度分布的参数化

Fig. 2 Parameterization of three-segments circulation gradient distribution

算结果由下式计算

$$\eta = \frac{\ln(p_2/p_1) / \ln(T_2/T_1)}{\gamma / (\gamma - 1) + (v_2^2 - v_1^2) / [2R(T_2 - T_1)]} \quad (5)$$

式中 η ——叶轮效率 R ——气体常数

p_2, p_1 ——叶轮进、出口压力

T_2, T_1 ——叶轮进、出口温度

v_1, v_2 ——进、出口绝对速度

采用正交试验设计进行参数的组合设计。由于环量分布参数对叶轮性能有直接影响,因此采用响应面方法建立设计参数与性能参数的响应面函数关系式,考虑参数之间的交互效应,忽略二次项,响应面函数采用如下形式

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=0}^n \beta_j X_j + \sum_{j \neq k} \beta_{j,k} X_j X_k \quad (6)$$

式中 X ——优化设计变量

β ——待求系数 n ——变量个数

根据 CFD 计算结果,由最小二乘法确定式(6)中的待求系数 β ,即可获得设计参数和性能参数的响应面函数关系。响应面函数存在误差,原因可能是样本不足,也可能是数据存在偏差。通常使用相关系数 R^2 和 R_a^2 进行准确性评估

$$R^2 = \frac{S_R}{S_T} = 1 - \frac{S_E}{S_T} \quad (7)$$

$$R_a^2 = 1 - \frac{s-1}{s-s_p} (1 - R^2) \quad (8)$$

式中 S_E ——残差平方和 S_R ——回归平方和

S_T ——总平方和 s ——样本数

s_p ——多项式系数个数

R^2 和 R_a^2 的值越接近 1,表示响应面模型拟合样本数据越精确。

离心式风机叶片的优化步骤如下:首先采用正交试验设计方法建立风机叶片参数的样本空间;然后采用三维反问题设计方法对样本空间的试验点进行设计计算,得到风机叶轮的设计集合;采用 CFD 技术对得到的风机叶轮模型进行性能评价;根据 CFD 计算结果建立风机性能参数与设计参数的响应面函数关系;采用模拟退火算法对得到的响应面

函数关系式进行全局最优搜索,得到近似最优解;对优化得到的近似最优解进行 CFD 计算校核,若确实为最优则输出结果;若不是最优,则将本次结算结果加入样本空间,更新响应面函数关系式,重新采用模拟退火算法进行全局最优搜索,直到获得最优结果。具体的优化过程步骤如图 3 所示。

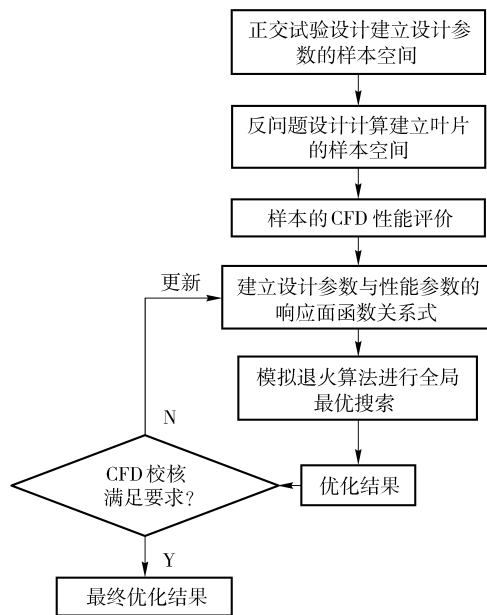


图 3 优化设计计算过程步骤

Fig. 3 Procedures of optimization design process

2 优化设计实例

为了验证上述离心式风机叶片优化设计方法,将该方法应用到某一离心风机叶轮的优化设计中,其主要性能参数及要求如下:流量 96 kg/s、转速 4 000 r/min、叶轮进出口静压升大于等于 200 kPa、输入功率小于等于 4 500 kW。

优化设计过程中叶轮轴面流道形状和尺寸、叶片厚度分布等与参考模型一致并保持不变,叶片头部进行修圆处理,尾部进行截断处理。优化设计变量的取值范围如表 1 所示。

表 1 优化设计变量取值范围

Tab. 1 Value range of optimization design parameters

参数	S_{1h}, S_{1s}	S_{2h}, S_{2s}	K_h	K_s
数值	0.10 ~ 0.35	0.65 ~ 0.90	0 ~ 2	-1 ~ 1

首先采用正交试验设计进行试验工况点的选择,建立参数样本空间。考虑参数的交互作用,因此选用正交表 $L_{32}(2^6)$ 。将各参数的取值范围进行编码变换,统一换算到 $[-1, 1]$, -1 对应参数取值的下限,1 对应参数选择的上限。然后对样本空间中 32 组参数采用三维反问题设计方法进行叶片设计,建立风机叶轮的样本空间。对得到的叶轮样本空间

采用上述 CFD 方法进行性能评价,根据式(5)得到目标函数效率的计算结果。基于计算结果,根据式(6)采用最小二乘法确定相关系数,建立叶轮效率和设计参数之间的响应面函数关系式。

根据计算结果,由式(7)和式(8)得到响应面函数关系式的相关系数 R^2 和 R_a^2 分别为 0.98 和 0.93,表明所建立的响应面函数关系式是有效的。采用模拟退火算法对该响应面函数关系式进行全局搜索,得到最优计算结果如表 2 所示,对应的最优参数组合 S_{1s} 、 S_{2s} 、 K_s 、 S_{1h} 、 S_{2h} 和 K_h 的值为 0.35、0.65、1.00、0.35、0.65 和 2.00。轮毂和轮缘处的环量梯度分布均为后载荷形式,如图 4 所示。对应的叶轮三维几何形状如图 5 所示。从计算结果来看,最优叶轮的效率显著提高,相对于参考叶轮效率提高了 2.2% (表 2)。优化叶轮叶道中的流动较参考叶轮更加顺畅,如图 6 所示。

表 2 离心风机叶轮优化设计结果

Tab. 2 Optimization design results of centrifugal fan impeller

项目	性能参数		
	静压升 p_s /kPa	输入功率 N /kW	效率 η /%
参考叶轮	250.4	4 627	80.7
优化叶轮	205.0	3 216	82.9
性能要求	≥ 200	$\leq 4 500$	≥ 80

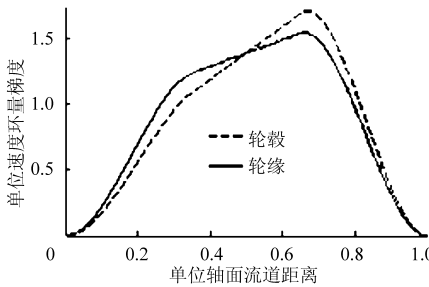


图 4 优化的环量分布

Fig. 4 Optimized velocity circulation distributions

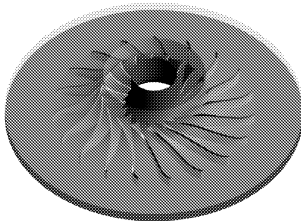


图 5 优化的叶轮三维几何模型

Fig. 5 Optimized 3-D geometry model of impeller

为了进一步分析三段线环量梯度分布不同参数对风机性能的影响,基于得到的效率与环量梯度分布参数的响应面函数关系式,采用试验设计方法对参数主效应和参数间交互效应进行计算,以分析不

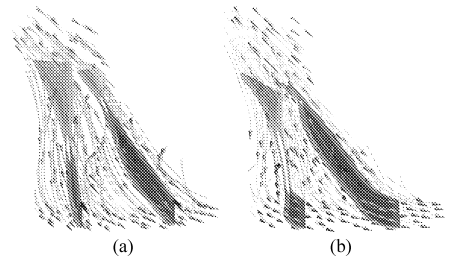


图 6 叶轮叶道中的流线图

Fig. 6 Streamlines in blade channel of impeller

(a) 参考叶轮 (b) 优化叶轮

同设计参数对风机叶轮效率的影响。图 7 中参数水平从 1 到 2 表示参数取值从小到大。从图 7 中可以看出,单个参数的主效应大小依次为 S_{1h} 、 S_{1s} 、 S_{2s} 、 K_s 、 S_{2h} 、 K_h ,其中 S_{1h} 为正效应; S_{2s} 和 K_s 为负效应。即效率随着 S_{1h} 增大而增大,随着 S_{2s} 和 K_s 的增大而减小。轮毂处 S_{1h} 的影响较大,表明轮毂进口段的环量梯度分布对叶轮效率影响较大; S_{2h} 、 K_h 影响较小,表明轮毂处环量梯度分布的形式对效率的影响不大;与此相比,轮缘处的环量梯度分布规律对叶轮效率的影响更为显著。

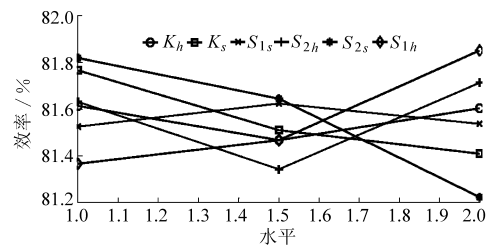


图 7 环量分布参数对风机叶轮效率的主效应

Fig. 7 Main effects on impeller efficiency from circulation parameters

从交互效应的计算结果来看,轮毂和轮缘处环量梯度分布参数之间的交互效应很小,几乎没有,表明轮毂和轮缘处的参数以主效应影响为主,结合主效应的分析可知轮毂进口处和轮缘处的环量梯度分布规律对叶轮效率的影响最为显著。参数交互效应中,与轮缘环量梯度分布的直线段斜率 K_s 相关的交互效应最多,为 5 种;其次是与轮毂处环量分布的直线斜率 K_h 相关的 4 种交互效应;再次为与轮毂轮缘处环量梯度分布最大(小)值点位置 S_{2s} 和 S_{2h} 相关的 3 种交互效应,同为 3 种交互效应的还有轮缘处的直线段起始位置 S_{1s} ;而与轮毂处直线段起始位置 S_{2h} 相关的交互效应最少,为 1 种,如图 8 所示。上述交互效应中,与 K_s 、 K_h 与 S_{2s} 、 S_{2h} 之间的交互影响最为显著,表明环量梯度分布规律中直线段部分的分布规律对叶轮的效率影响显著。综上所述,三段线环量梯度分布的给定方法是一种以直线段部分规律给定为主的方法,直线段部分环量梯度分布的给

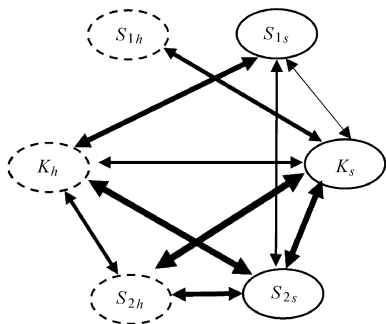


图 8 各参数交互效应示意图(双向箭头线越粗交互效应越大)

Fig.8 Interaction effects between design parameters on impeller efficiency (the thicker the arrow line is, the bigger the effect is)

定直接决定叶片设计的质量。

3 结论

(1) 基于三维反问题设计方法的叶片形状优化

设计可有效减少优化设计变量;同时,优化设计变量对叶轮性能有直接影响,可以建立优化变量和叶轮性能参数的函数关系式,便于优化计算和分析优化设计变量对性能的影响。

(2) 基于三维反问题设计方法和 CFD 技术,结合实验设计方法、响应面方法和模拟退火优化算法,建立了离心式风机叶片气动优化设计方法,并进行了实例验证,结果表明该方法可根据不同的性能要求快速有效地进行风机叶片的优化设计。

(3) 根据优化设计结果分析了不同环量分布参数及参数间交互效应对叶轮效率的影响:轴面流道轮毂进口段环量分布对叶轮效率影响显著,但轮毂处环量分布形式对叶轮效率影响有限;轮毂处环量分布对叶轮效率有重要影响。三段线环量分布给定方法是一种以直线段规律为主的方法。

参 考 文 献

- 刘文龙,郭加宏,陈红勋. CFD 在双吸式离心泵优化设计中的应用[J]. 工程热物理学报,2007,28(3):421~423.
Liu Wenlong, Guo Jiahong, Chen Hongxun. Application of CFD in optimization design of the double-suction centrifugal pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(3): 421~423. (in Chinese)
- 齐学义,孔源,田亚斌,等. 基于 CFD 技术的超低比转速离心泵叶轮的优化设计[J]. 兰州理工大学学报,2010,36(4):52~55.
Qi Xueyi, Kong Yuan, Tian Yabin, et al. Optimization design of impeller for centrifugal pumps with super-low specific-speed by means of CFD technology[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(4): 52~55. (in Chinese)
- 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, 32(3): 1104~1118.
- 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(2): 1014~1029.
- Okamoto H, Goto A. Suppression of cavitation in a Francis turbine runner by application of 3D inverse design method[C]// Proceedings of FEDSM02: The 2002 Joint US ASME-European Fluids Engineering Summer Conference, Montreal, 2002.
- Zangeneh M, Goto A, Harada H. On the design criteria for suppression of secondary flows in centrifugal and mixed flow impellers[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 723~735.
- Zangeneh M. A compressible 3D design method for radial and mixed flow turbomachinery blades[J]. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 1991, 13(5): 599~624.
- 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):277~281,302.
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, 302. (in Chinese)
- 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):30~35,10
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): 30~35, 10. (in Chinese)
- 谭磊,曹树良. 中比转速离心泵叶轮的优化设计及数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):282~285,290.
Tan Lei, Cao Shuliang. Optimal design and numerical simulation for impeller of centrifugal pump with medium-high specific speed[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 282~285, 290. (in Chinese)