

基于先进控制流理论的偏置叶片优化方法

贾瑞宣, 徐 鸿

(电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘 要: 针对过去过多地依赖经验确定复合叶轮短叶片偏置位置和角度的弊端, 提出了采用先进控制流理论来控制短叶片偏置的优化设计方法. 首先根据离心式后向叶轮流道内流体微团的受力情况, 建立沿流线法线方向的受力平衡微分方程, 再根据相对运动 Bernoulli 方程, 推导出沿流线法线方向压强梯度与速度梯度的关系, 进而得出沿流线法向速度梯度与几何结构之间的关系. 通过对几个相关式子的分析, 可确定周向最佳偏置位置. 同时考虑将短叶片进口边适度向吸力面偏斜, 以期实现后加载特性. 试验结果表明, 分析所得结论比较符合试验数据, 证明了理论分析的可靠性.

关键词: 离心泵; 复合叶轮; 偏置叶片; 先进控制流理论; 优化方法

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)05-0402-05

Optimization method for offset splitting blades based on advanced control-flow theory

Jia Ruixuan, Xu Hong

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University), Ministry of Education, Beijing 102206, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of fully depending on experience in the past while choosing the offset position and offset angle of splitting blades in centrifugal pump compound impellers, the advanced control-flow theory was used to optimize splitting blades design. First of all, on the basis of the fluid element stress conditions in flow passage of centrifugal backward sweep impellers, the equilibrium of force perpendicular to the streamline was established. Subsequently, along normal orientation to the streamline, the relevant formula between pressure gradient and relative velocity gradient was deduced from relatively movement Bernoulli equation. Furthermore, the relation between pressure gradient normal to the streamline and geometry structure was obtained. Then the prime offset location was identified by analyzing several correlative formulas. At the same time, splitting blade inlet was offsetted moderately to suction side to realize the after-loading characteristic. The test results show that the analysis conclusions match the experimental data very well and are proved to be reasonable.

Key words: centrifugal pump; compound impeller; offset splitting blades; advanced control-flow theory; optimization method

收稿日期: 2009-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579083)

作者简介: 贾瑞宣(1971—), 男, 河北唐山人, 博士(jrx@ncepu.edu.cn), 主要从事电厂通流部分优化设计与节能研究.

徐 鸿(1959—), 男, 浙江黄岩人, 教授, 博士生导师(xuhong@ncepu.edu.cn), 主要从事电厂通流部分优化设计研究.

分流叶片作为解决低比转速离心泵效率低、扬程曲线易出现驼峰、易过载的最有效方法之一,在国内外的研究已经有近 40 年的历史. 早期主要通过试验进行外特性研究,以提高扬程和效率. 近 20 年来,随着计算流体力学的发展,以及高性能计算机、先进的 PIV 测试技术的应用^[1],着眼于内特性的数值模拟和试验研究不断取得新的成果^[2-3].

综合国内外众多学者的研究情况,目前对带分流叶片叶轮性能优化研究主要集中在 4 个方面:叶片数、叶片起始位置、叶片偏置位置和叶片偏置角度. 崔宝玲等^[4]以不出现负的相对速度分布为准则,对叶片数的优化准则进行了理论推导;潘中永等^[5]对叶片起始位置、叶片偏置位置进行了基于叶轮流道内不出现回流区域的优化设计准则研究. 但叶片偏置角度的优化还只有一些试验结论,基础理论分析尚未见到论述.

文中从先进控制流理论角度研究分流叶片偏置的优化设计方法,主要侧重最佳偏置位置和偏置角度的确定.

1 先进控制流理论

先进控制流概念是徐大懋院士在 1999 年工程热物理学会年会上最早提出的^[6],其理论核心是通过合理控制边界的几何结构来控制压强分布,削弱或消除回流、二次流的影响,提高设备效率. 文中涉及的先进控制流理论主要包括两个方面.

1.1 控制压强梯度的数学模型

对于离心泵,在图 1 所示后弯叶片流道内取流体微团,其质量为

$$dm = \rho b ds dn, \quad (1)$$

式中 ds, dn 分别为沿流线方向和法线方向流体微团长度; b 为叶片宽度; ρ 为流体的密度.

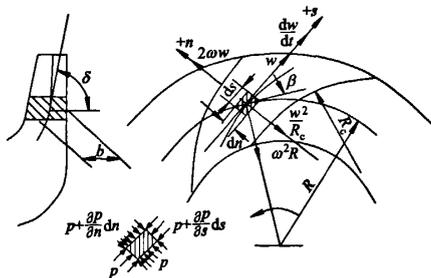


图 1 后向叶轮流道内流体微团的受力情况

Fig. 1 Fluid element stress conditions in flow passage of backward skewed impeller

由于流体微团作复合运动,它的绝对加速度向量等于牵连加速度向量、相对加速度向量与科氏加速度向量之和.

牵连加速度为 $\omega^2 R$, 它的惯性力为 $\omega^2 R dm$, 其在回转面上的投影为 $\omega^2 R \sin \delta dm$. 它在正 n 方向的分力为 $\omega^2 R \sin \delta \cos \beta dm$, 在正 s 方向的分力为 $\omega^2 R \sin \delta \sin \beta dm$. 其中 R 为流体微团到圆心的距离, ω 为旋转角速度, δ 为子午流线方向与旋转轴的夹角, β 为流线方向与周线相反方向的夹角.

相对加速度有两个,一个沿着流线的切线方向,其值为 $\frac{dw}{dt}$, 惯性力为 $dm \cdot \frac{dw}{dt}$, 沿负 s 方向; 另一个沿流线的法线方向, 其值为 $\frac{w^2}{R_c}$, 惯性力为 $dm \frac{w^2}{R_c}$, 沿正 n 方向. 其中 R_c 为叶片的曲率半径.

科氏加速度为 $2w\omega$, 其惯性力为 $2w\omega dm$, 它在回转面上的投影为 $2w\omega \sin \delta dm$, 沿负 n 方向.

这些力与作用于流体微团上的压力相平衡.

沿 n 方向力的平衡方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial n} b dn ds + \rho b dn ds \omega^2 R \sin \delta \cos \beta + \rho b dn ds \frac{w^2}{R_c} - 2\rho b dn ds w \omega \sin \delta = 0,$$

消去 $b dn ds$ 并移项得

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \omega^2 R \sin \delta \cos \beta + \rho \frac{w^2}{R_c} - 2\rho w \omega \sin \delta, \quad (2)$$

式(2)为沿流线法线方向受力平衡微分方程. 实际上,沿流线法线方向的压强梯度也可以由不可压缩流体相对运动 Bernoulli 方程推出.

回转面沿流线的相对运动 Bernoulli 方程为

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g} - \frac{u^2}{2g} = \text{const}, \quad (3)$$

式中 const 为常数,将式(3)对 n 求偏导,得

$$\frac{\partial p}{\partial n} \frac{1}{\rho g} + \frac{w}{g} \frac{\partial w}{\partial n} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial n} = 0,$$

即

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial n} - w \frac{\partial w}{\partial n} \right).$$

由于 $u = \omega R$, $\cos \beta = \frac{dR}{dn \sin \delta} = \frac{\partial R}{\partial n \sin \delta}$, 代入式

(3), 得

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \left(\omega^2 R \sin \delta \cos \beta - w \frac{\partial w}{\partial n} \right). \quad (4)$$

将式(2)和(4)合并,可得

$$\frac{\partial w}{\partial n} = 2\omega \sin \delta - \frac{w}{R_c} \quad (5)$$

在方程(5)中, $2\omega \sin \delta$ 基本为定值不变, 而 w 受叶轮流道过流断面面积以及其扩散程度影响. 因此, 方程(5)反映流线法向速度梯度和几何结构关系, 而方程(4)反映流线法向压强梯度和速度梯度关系, 两者结合在一起, 实现结构对性能的控制.

1.2 后加载理论

后加载叶型内背弧压差为“前小后大”, 端壁横向流则是“前弱后强”, 如图2所示, 其中 bs 表示沿翼弦方向坐标, 后部横向流未能与背弧相撞即进入主流, 二次流损失下降.

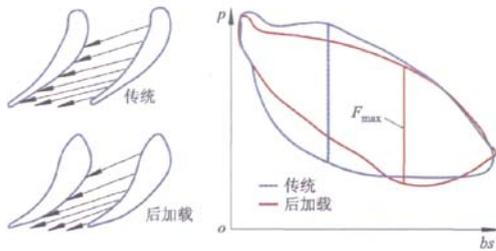


图2 后加载翼型机理

Fig. 2 After-loading blade mechanism

当代常规叶型已具有很低的叶型损失, 但后加载叶型在降低二次流损失方面效果明显, 其总损失低于常规叶型, 如图3所示.

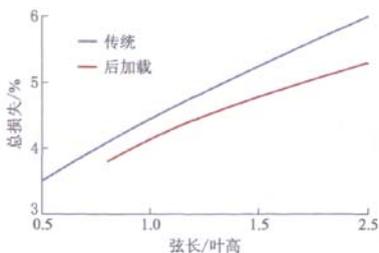


图3 两种叶型总损失比较

Fig. 3 Total loss comparing of two kinds of blades

2 偏置叶片优化的理论分析

式(2)和(4)列出了流线法向压强梯度的表达式. 该压强梯度是影响回转面出口回流以及二次流的主要因素, 压强梯度越大, 出口回流以及二次流越严重. 找出压强梯度最大的位置, 在此设置分流叶片导流, 是可以削弱或消除回流、二次流影响的.

式(4)中 ρ 和 ω 是定值, β 基本不变. 这样, 变

量只有 r 和 w . 沿流线外法线方向, r 是逐渐增加的, 而 w 的变化略显复杂, 有一个极大值点, 且该点离吸力面更近一些, 证明详见相关泵教材或著作^[7].

由图4可见, $\frac{\partial w}{\partial n}$ 在离吸力面较近位置为负值, 从而由式(4)可以定性得出在偏向吸力面某位置法向压强梯度有最大值. 因此, 分流叶片偏置于离吸力面较近某位置比较合适.

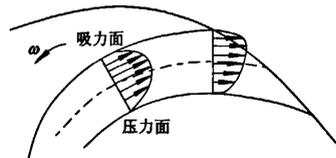


图4 回转面内过流断面速度分布

Fig. 4 Velocity distribution of passage section in revolution surface

分流叶片圆周偏置位置确定以后, 还要考虑分流叶片的偏置角度, 尤其是进口的偏置角度. 将进口边适度向吸力面偏斜, 可实现后加载特性.

分流叶片进口偏置角度的取值要综合考虑进口冲角和后加载性能.

3 试验

有关分流叶片圆周偏置位置和入口偏置角度, 许多学者都作过相关试验, 这里引用他们的试验来验证上述结论. 表1为分流短叶片设计参数.

表1 分流短叶片设计参数

Tab. 1 Design parameters of splitter short blades

叶轮 编号	截圆直径 D'/mm	液流角 $\alpha/(\circ)$		偏置角 $\theta/(\circ)$	
		进口	出口	进口	出口
1	$0.6(D_2 - D_1) + D_1$	17.6	33	10	0
2	$0.6(D_2 - D_1) + D_1$	52.8	33	5	10
3	$0.6(D_2 - D_1) + D_1$	52.8	33	0	5

袁寿其^[8]曾对带分流叶片的离心泵进行试验测试, 认为与分流叶片居中设置相比, 当分流叶片偏向长叶片吸力面时, 扬程提高了 0.22 m, 效率提高 0.31%; 而当分流叶片偏向长叶片压力面时, 扬程降低 2.68 m, 效率降低 0.94%. 因此, 分流叶片偏向长叶片吸力面可减少损失和提高效率, 理论分析和试验测试结论一致.

陈松山等^[9]做过角度偏置比较试验. 所取 3 个叶轮数据如表 1 所示, 叶轮 1 进口偏向吸力面, 叶轮 2 进口偏向吸力面而出口偏向压力面, 叶轮 3 出口偏向压力面.

偏置角度的影响主要体现在对相对速度分布的均匀性的影响(见图5).而速度分布的均匀性会影响到回流、二次流损失等,最终会影响到离心泵的扬

程和效率(见图6).对于分流叶片入口端适度向吸力面偏置,这个试验结果和后加载理论分析的结论是一致的.

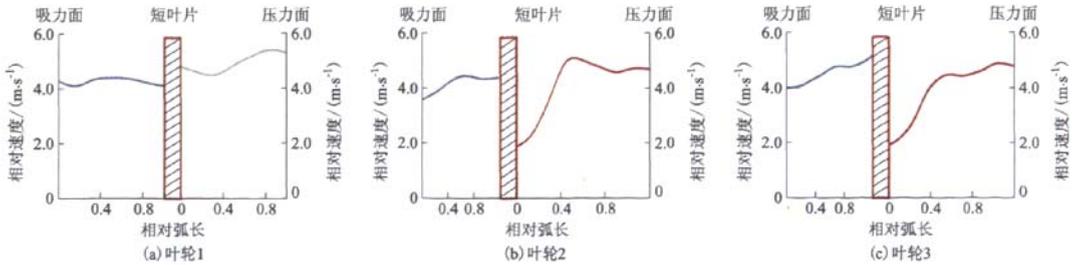


图5 3种偏置角度叶轮的出口相对速度比较

Fig. 5 Comparisons of outlet relatively velocity among three kinds of offset angle blades

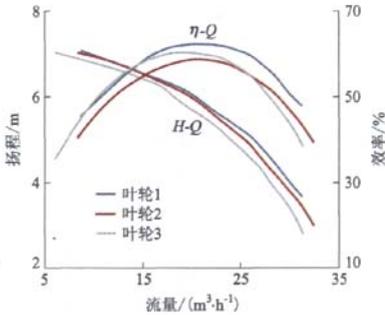


图6 3种偏置角度叶轮的外特性比较

Fig. 6 Comparisons of outer characteristic among three kinds of offset angle blades

4 进一步应用发展的新思路

文中只是先进控制流理论在带分流叶片低比转速离心泵内特性优化方面的初步应用,还有一系列工作需要去做。①将叶轮流道分为无粘性的主流势流区域和绕流叶片的边界层流动区域,基于这样的考虑推导叶轮流道过流断面相对速度的比较精确的表达关系,进而可以得出考虑粘性影响的沿流线法线方向压强梯度的表达关系;②根据控制压强梯度的数学模型,将流线法线方向的压强梯度作为控制目标进行数值模拟;③后加载理论的量化建模研究;④考虑到控制压强梯度的数学模型中 δ 的影响,进一步研究在混流泵中的应用。

5 结论

(1)先进控制流理论可以用来对带分流叶片的低比转速离心泵进行性能优化。

(2)分流叶片的圆周方向位置可以通过控制流线法线方向的最大压强梯度确定。

(3)分流叶片的偏置角度可以通过适当的后加载特性实现。

参考文献 (References)

- [1] 袁寿其,何有世,袁建平,等.带分流叶片的离心泵叶轮内部流场的PIV测量与数值模拟[J].机械工程学报,2006,42(5):60-63.
Yuan Shouqi, He Youshi, Yuan Jianping, et al. PIV measurements and numerical simulations of flow in centrifugal pump impellers with splitting vanes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5): 60-63. (in Chinese)
- [2] 何有世,袁寿其,郭晓梅,等.带分流叶片的离心泵叶轮内三维不可压湍流场的数值模拟[J].机械工程学报,2004,40(11):153-157.
He Youshi, Yuan Shouqi, Guo Xiaomei, et al. Numerical simulation for 3D incompressible turbulent flow in the impeller with splitting vanes of centrifugal pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(11): 153-157. (in Chinese)
- [3] 付跃登,袁寿其,袁建平.带分流叶片离心泵研究现状与发展趋势[J].中国农村水利水电,2007(5):123-128.
Fu Yuedeng, Yuan Shouqi, Yuan Jianping. Present status and development trends in centrifugal pumps with splitter blades[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2007(5): 123-128. (in Chinese)
- [4] 崔宝玲,朱祖超,陈鹰,等.长中短叶片离心叶轮内部流动的数值模拟[J].推进技术,2006,27(3):243-247.
Cui Baoling, Zhu Zuchao, Chen Ying, et al. Numerical

- simulation of inner flow field in centrifugal impeller with long, middle and short blades[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(3): 243-247. (in Chinese)
- [5] 潘中永,袁寿其,刘瑞华,等. 离心泵复合叶轮短叶片偏置设计研究[J]. *排灌机械*, 2004, 22(3): 1-4.
Pan Zhongyong, Yuan Shouqi, Liu Ruihua, et al. Research on design for splitting vanes of compound centrifugal pump impeller[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004, 22(3): 1-4. (in Chinese)
- [6] 徐大懋. 先进控制流透平设计的展望[C]//中国工程热物理学会. 热机气动热力学学术会议论文集, 1999.
- [7] Friedrich J. *Centrifugal Pumps* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 76.
- [8] 袁寿其. 低比速离心泵理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [9] 陈松山, 周正富, 何钟宁, 等. 离心泵偏置短叶片叶轮内部流动的粒子图象速度测量[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(1): 56-61.
Chen Songshan, Zhou Zhengfu, He Zhongning, et al. Particle image velocimetry measurement of internal flow characteristics of centrifugal pump impeller with deviated short splitters[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(1): 56-61. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)

(上接第 377 页)

参考文献 (References)

- [1] 黄欢明. 轴流泵叶轮内部流动的数值模拟与试验[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(1): 124-128.
Huang Huanming. Numerical simulation and experimental study on flow field in an axial flow pump[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(1): 124-128. (in Chinese)
- [2] 张德胜, 施卫东. 轴流泵叶轮进出口流场的测量[J]. *排灌机械*, 2009, 27(4): 210-214.
Zhang Desheng, Shi Weidong. Measurement on flow field at inlet and outlet of axial flow pump impeller[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(4): 210-214. (in Chinese)
- [3] Hah C. A numerical modeling of end wall and tip clearance flow of an isolated compressor rotor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1986, 108: 15-21.
- [4] Kochevsky A N, Kozlov S N, Aye K M, et al. Simulation of flow inside an axial-flow pump with adjustable guide vanes[C]//*Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Conference*. United States, New York: ASME, 2005: 1397-1404.
- [5] Zierke W C, Farrell K J, Straka W A. Measurements of the tip clearance flow for a high-Reynolds-number axial-flow rotor—Part 2: Detailed flow measurements[C]//*Proceedings of the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. United States, New York: ASME, 1994: 1-9.
- [6] 梁开洪, 张克危, 许丽. 轴流泵叶顶间隙流动的计算流体动力学分析[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(9): 36-38.
Liang Kaihong, Zhang Kewei, Xu Li. Analysis of the flow through the blade tip clearances of axial pumps by CFD[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2004, 32(9): 36-38. (in Chinese)
- [7] 戴辰辰. 轴流泵端壁间隙流动特性的数值分析[J]. *流体机械*, 2009, 37(6): 32-35.
Dai Chenchen. Numerical analysis of tip clearance flow characteristic in axial flow pump[J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37(6): 32-35. (in Chinese)
- [8] 王正明, 贾希诚, 王嘉伟. 不同间隙条件下的叶顶区流动[J]. *工程热物理学报*, 2003, 24(2): 228-230.
Wang Zhengming, Jia Xicheng, Wang Jiawei. The flow in blade tip region under different clearance conditions[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(2): 228-230. (in Chinese)
- [9] 查森. 叶片泵原理及水力设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [10] 关醒凡. 轴流泵和斜流泵[M]. 北京: 宇航出版社, 2009.

(责任编辑 陈建华)