

离心泵内泄漏流计算及其对转子振动的影响

蒋庆磊, 戴维平, 吴大转, 王乐勤

(浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为研究泄漏流对离心泵转子振动特性的影响,建立了离心泵内泄漏流流场数值模型并对其进行可靠性进行了验证,验证基于加州理工学院 RFTF 装置试验结果,验证结果显示数值计算结果与试验结果吻合较好。通过在泄漏流流场与转子系统间进行数据传递,实现了流场模型与基于节点单元法建立的转子系统的耦合计算,得到了泄漏流流体力作用下的转子系统响应结果,结果显示泄漏流的存在明显提高了转子系统刚度并进而增加了其稳定性。该方法可以略去流体力环节从而直观了解到泄漏流道参数变化对转子系统振动特性的影响,对优化离心泵相关参数,提高转子系统稳定性具有重要意义。

关键词: 离心泵; 泄漏流; 流固耦合; 转子; 振动特性

中图分类号: S277.9; TQ051 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)03-0202-05

Computation of leakage flow in centrifugal pumps
and its effects on rotor's vibration

Jiang Qinglei, Dai Weiping, Wu Dazhuan, Wang Leqin

(Institute of Chemical Machinery Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: To study how the leakage flow affect the vibration characteristics of rotors in centrifugal pump, the leakage flow channel was modeled and then verified by comparing numerical computing results with experimental data obtained from RFTF facility, which was established in California Institute of Technology. Rotors system was established based on finite element method and coupled with leakage flow channel model by transferring data between two domains, then response of rotors was obtained. The results show that stability and stiffness of rotor system are increased by considering the influence of leakage flow on rotors. The fluid-structure interaction approach presented here is useful to directly study influence of leakage flow channel parameters on vibration characteristics of rotors without considering fluid-induced forces and the research results can be used to enhance stability of rotors, especially those in multi-stage pumps.

Key words: centrifugal pumps; leakage flow; flow structure interaction; rotors; vibration characteristics

近年来,越来越多的试验及数值计算显示,旋转机械中转子系统的振动与作用在转子上的流体作用力紧密相关^[1-2],而环绕叶轮前盖板周围的泄漏流则对流体力有着显著的影响,在加州理工学院具有涡动速度叶轮的试验装置 RFTF (rotor force test fa-

cility) 上进行试验证明,泄漏流分别贡献了流体力中 70% 的径向力和 30% 的切向力^[3]。目前,为提高旋转机械的工作效率并减少泄漏,高压、高速及小间隙泄漏流结构得到了广泛应用,这导致泄漏流场上产生的流体力更为复杂且更易引起转子的不稳定,

收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 浙江省重大科技项目(2008C11056, 2008C13046)

作者简介: 蒋庆磊(1986—),男,山东聊城人,博士研究生(jiangqinglei00@163.com),主要从事流体机械研究。

戴维平(1973—),男,浙江杭州人,高级技师(hj_wlq2@zju.edu.cn),主要从事流体机械研究。

如何计算泄漏流流体力并分析其对转子振动特性的影响显得尤为重要。

1 研究背景

图1为作用在旋转叶轮上泄漏流产生的流体力示意图,它通常可以分解为径向力 F_n 和切向力 F_t ,为转子动力学求解方便,这两个力又常作为涡动率 Ω/ω 的函数而写为式(1)和(2)所示的无量纲形式。需要指出的是,式(1)和(2)是由 F_n 和 F_t 相对于涡动率的曲线近似得到的,它与真实的流体力相比有一定误差,只是由于误差不大且便于引入转子动力学计算中,所以较为常用。目前针对泄漏流的数值及试验研究通常将流体力的最终结果以这种形式表达出来,式中 M, K, C, k, c 五个参数用于分析流体力对转子特性的影响^[3]。

$$F_n = M \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2 - c \left(\frac{\Omega}{\omega} \right) - K, \quad (1)$$

$$F_t = -C \left(\frac{\Omega}{\omega} \right) + k. \quad (2)$$

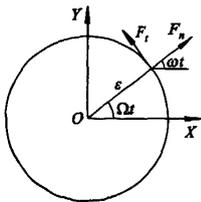


图1 作用在叶轮上的流体力
Fig.1 Fluid force on impellers

目前针对泄漏流已进行了大量的数值及试验研究,也得出了一些对转子动力学计算重要的结论。Childs^[4]将他之前应用在密封分析上的技术用于分析泄漏流道内的流动,提出了一种计算泄漏流作用在转子上动态径向力的方法。在密封问题中,流场控制方程分别为轴向、切向动量方程及连续方程,Childs通过将轴向动量方程改进为沿流道方向的动量方程,并引入了额外的变量用以表述流体的离心和科氏加速度,从而得到了针对泄漏流的总流模型方法。基于这一方法可得到轴和泵壳上压力分布,积分后可以得到轴上的径向及切向力。在试验研究方面,Guinzburg等^[5]为研究叶轮前盖板和泵壳间流场产生的流体力对转子特性的影响,在加州理工学院设计了专门的试验装置RFTF,分析了泄漏流量、流道间隙及叶轮偏心率对流体力的影响,得出流体力与流道间隙成反比的重要结论。试验中3种泄漏流

道结构如图2所示。Yun Hsu等^[6]在对RFTF试验装置进行改进的基础上,测试了不同泄漏流道及入口涡流对流体力的影响,发现只有交叉刚度受到流道形状改变的影响。在同一试验装置上Christopher等^[7]进一步研究了不同涡动率对流体力的影响,并且尝试在前盖板上增加沟槽或凸条以降低入口处涡流率,进而增加转子系统的稳定性,但效果并不明显。为研究流体力对轴振动特性的影响,Takayuki Suzuki等^[8]针对一种人造心脏中的微型离心泵建立了泄漏流试验装置,并分有无涡动两种情况测试得到了作用在转子上的流体力,发现在正涡动情况下转子上流体力将使转子变得不稳定。

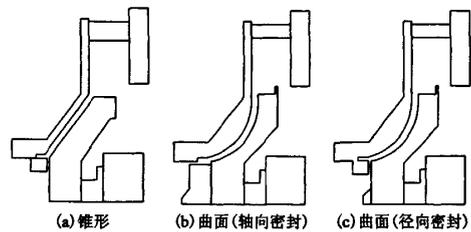


图2 3种流道结构

Fig.2 Three leakage flow channels

综上所述,目前针对泄漏流的研究通常集中在流场本身,且只针对某一特定的转速及偏心率进行,而实际情况下叶轮偏心率在运转过程中会不断变化,这将使泄漏流产生的流体力大小及方向产生变化,无法根据特定偏心率数据预测转子系统振动特性。为弥补上述不足以实现转子系统模型与泄漏流场模型的耦合计算,并进一步研究耦合条件下泄漏流对转子振动特性的影响,文中首先建立泄漏流流场模型并对其可靠性进行验证,然后将验证后的流场模型与利用结点单元法建立的转子系统进行了耦合,得到在考虑流场力作用下转子系统的响应结果,并对结果进行分析。

2 泄漏流模型验证分析

2.1 流场模型

前期的数值计算大都根据Childs于1989年推导出的由两个动量方程及连续方程组成的总流模型进行,而这一模型是根据雷诺方程推导得到的,控制方程可由经典雷诺方程^[9]得出

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6(U_1 + U_2) \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} +$$

$$6(V_1 + V_2) \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} + 12 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (3)$$

由于雷诺方程的特点,上述针对泄漏流场的控制方程不计及惯性的影响,而且泄漏流只能按层流进行计算.但实际情况中泄漏流并不一定满足层流假设,上述所提及的试验研究也大都针对湍流情况,其泄漏流入口处同时具有径向及切向速度,这会导致流道内湍流的产生.基于该原因并考虑到耦合计算的方便,笔者采用CFX软件针对Guinzburg等设计的锥形流道建立流场模型.图3为锥形流道结构及叶轮偏心位置,其具体参数分别为 $L=49.20$ mm, $\Omega=1000$ r/min, $\varepsilon=0.25$ mm, $R_2=93.66$ mm, $H=3.00$ mm, $R_1=43.46$ mm.

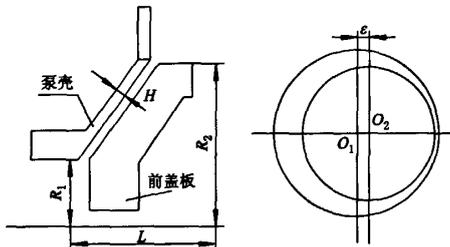


图3 锥形流道结构及偏心位置

Fig. 3 Structure of cone shaped leakage flow channel and eccentric position

2.2 对比分析

泄漏流场区域网格划分如图4所示.因泄漏流间隙较小,采用了结构化网格以保证网格质量,在进行网格无关性验证后将沿间隙方向网格取8层.流体动力粘度取为 0.001 Pa·s,叶轮及泵壳边界均设置为壁面.为提高计算效率,涡动率 Ω/ω 范围取 $0\sim 0.7$,泄漏流入口流动系数 $\varphi=0$,涡流比 $\Gamma=0$.考虑到泄漏流场内的转子存在涡动,通过分别给定转子在 X, Y 方向上的正弦余弦位移给定偏心量 ε 及涡动转速,结合转子自转实现其在流场内的涡动.

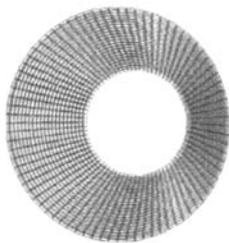


图4 锥形流道网格

Fig. 4 Mesh of cone shaped leakage flow

图5给出了计算得到的泄漏流截面典型压力分

布,由图中可以看出,由于涡动的存在,压力沿叶轮盖板环向出现了明显的分布不均,这导致了切向力 F_t 及径向力 F_n 的产生,并直接影响到转子系统的稳定性,具体表现为正向涡动条件下切向力 F_t 的增加将对轴的涡动产生诱导作用,从而使涡动偏心量增加,降低转子稳定性;径向力 F_n 的存在会提高轴的刚度从而增加转子的稳定性.文中 F_t 和 F_n 均为无量纲力,无量纲系数为 $\rho\pi\Omega^2 R_2^2 L\varepsilon$.

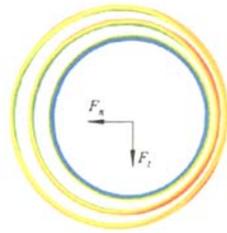


图5 锥形流道截面压力分布

Fig. 5 Pressure distribution of cone shaped leakage

图6给出了 1000 r/min转速下当泄漏流入口流动系数 $\varphi=0$,涡流比 $\Gamma=0$ 时流场力随涡动率变化的数值计算结果与试验结果对比.

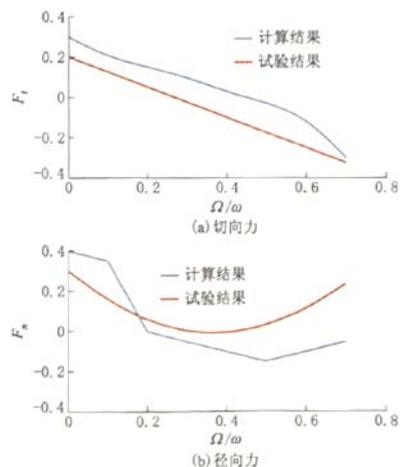


图6 切向力和径向力计算结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparisons of tangential force and normal force with experimental results

由图6可以看出,随着涡动率增加叶轮上所受切向流场力一直减小直至负值,而径向力则在涡动率为 $0.4\sim 0.5$ 时达到最小值,随后开始增加,呈二次曲线分布.因此,在转子正向涡动,涡动率在一定范围内增加时有利于转子系统的稳定,但为提高转子稳定性,应避免涡动率 $0.4\sim 0.5$ 的范围.数值结果与试验结果的变化趋势基本一致,但切向力的数

值稍大,而径向力在涡动率较小时偏大,在涡动率较大时则偏小.上述差异的存在与边界条件的设置有关,即数值计算中设置的压力边界与试验条件下测得进出口压力并非完全一致,从而造成计算结果的差异.另外,考虑到涡动率较大时叶轮处离心力的增大,在试验研究情况下可能无法保证转子本身完全不产生变形,这会使得测出的径向力与理想情况相比存在偏差.

3 耦合方法与结果分析

3.1 耦合计算方法

在流场模型验证的基础上,基于节点单元法完成了转子系统模型的建立,进而实现了转子系统与流体流动的耦合计算,计算流程如图7所示.首先对转子系统数学模型进行计算得到其模态振型,在不考虑流场影响下对转子系统施加相应转速及不平衡质量后进行计算,得到液膜及叶轮结点处偏移量后将数据传递到流场模型中;对流场模型进行计算得到压力分布,然后在交界面处对压力进行积分并将结果作为载荷边界施加到转子耦合系统中的相应结点上;对加载后的转子系统利用模态叠加法计算其相应偏移量直至收敛,得到流场作用下叶轮处响应值;增加时间步长 Δt 后,对加载后的转子有限元模型重复计算,计算过程中将上一步的计算结果作为初始条件代入.

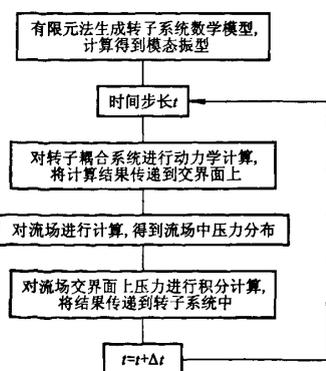


图7 流固耦合流程
Fig.7 Flowchart of FSI process

上述耦合方法属于典型的弱耦合方法,即分别考虑流体和固体方程,在交界面处进行流体域和固体域的数据传递,将传递后的数据分别作为两个域的边界条件.这种方法的好处在于耦合过程可控且可以利用现有的成熟工具进行计算,本算例中采用

了CFX软件进行流场计算,考虑到CFX软件本身较成熟以及泄漏流场较规则且流动平稳的特点,计算结果较为可信.

3.2 结果分析

为检验耦合方法的可靠性并分析锥形流道流场力对转子系统振动特性的影响,基于一个经典的单转子系统建立了数学模型.模型分两步完成,首先基于有限元法完成转子系统的建模,然后建立相应的流场数学模型,如图8所示.模型按照节点单元法建立,模型中考虑了叶轮的弯曲及扭转自由度和偏心质量,又因为叶轮不在轴的中点,考虑了陀螺力矩的影响.



图8 单转子模型
Fig.8 Single rotor model

选择文中所建立的锥形流道作为流场模型,根据耦合方法对单转子模型进行了耦合计算,图9给出了转速在15 000~21 000 r/min范围内转子不平衡响应的变化趋势.

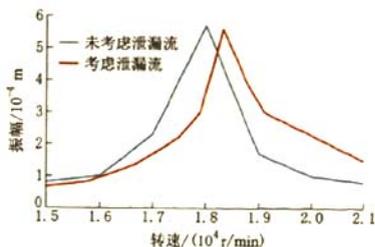


图9 转子不平衡响应计算结果的比较
Fig.9 Results comparisons of rotors unbalance response computation

由图9可以看出,当考虑泄漏流流体力影响时,由于径向力 F_n 的存在提高了转子系统本身的刚度,其临界转速明显提高,但振幅几乎没有变化.

4 结论

为弥补单纯针对泄漏流计算的不足以实现转子系统模型与泄漏流场模型的耦合计算,并进一步研究耦合条件下泄漏流对转子振动特性的影响,建立了泄漏流流场模型并对其可靠性进行了验证,将验证后的流场模型与利用节点单元法建立的转子系统

进行了耦合,由此得到了考虑流场力作用下转子系统响应结果,并对结果进行了简单分析.该方法忽略流体力环节,从而更直观了解泄漏流参数变化对转子系统振动特性的影响,对通过优化泄漏流相关参数以提高转子系统稳定性具有重要意义.在现有耦合程序的基础上,笔者将完善泄漏流场模型,进行更多工况下的数值研究以获得不同流道形状、不同湍动率、不同涡动率及不同入口速度对转子系统上临界转速、振幅等特性的影响,并在此基础上进行泄漏流场的参数优化.

参考文献 (References)

- [1] Adkins D R, Brennen C E. Analyses of hydrodynamic radial forces on centrifugal pump impeller [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1988, 110(1): 20 - 28.
- [2] 黄义刚,朱荣生,陈松,等. 泵振动的原因及其消除措施 [J]. 排灌机械, 2009, 27(6): 56 - 59.
Huang Yigang, Zhu Rongsheng, Chen Song, et al. Numerical analysis of radial force in double-suction centrifugal pumps [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(6): 56 - 59. (in Chinese).
- [3] Robert V U, Brennen C E. Experimental measurements of rotordynamic forces caused by front shroud pump leakage [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1999, 121

(3): 633 - 637.

- [4] Childs D W. Fluid-structure interaction forces at pump-impeller-shroud surfaces for axial vibration analysis [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1991, 113(1): 108 - 115.
- [5] Guinzburg A, Brennen C E, Acosta A J, et al. Experimental results for the rotordynamic characteristics of leakage flows in centrifugal pumps [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(1): 110 - 115.
- [6] Yun Hsu, Brennen C E. Effect of swirl on rotordynamic forces caused by front shroud pump leakage [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(4): 1005 - 1010.
- [7] Brennen C E, Acosta A J. Fluid-induced rotordynamic forces and instabilities [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13(1): 10 - 26.
- [8] Takayuki S, Romain P, Hironori H, et al. Measurements of rotordynamic forces on an artificial heart pump impeller [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2007, 129(11): 1422 - 1427.
- [9] 郑林庆. 摩擦学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994: 13 - 18.

(责任编辑 陈建华)

(上接第 201 页)

- Chang Hongjun, Zhu Yi. Three-dimensional numerical simulation on interior flow field for liquid jet pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(6): 13 - 15. (in Chinese)
- [4] 龙新平,关运生,韩宁,等. 可调式射流泵性能的数值模拟 [J]. 排灌机械, 2008, 26(6): 1 - 5.
Long Xinping, Guan Yunsheng, Han Ning, et al. Numerical simulation on performance of self-regulating jet pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(6): 1 - 5. (in Chinese)
- [5] Elger D F, Taylor S J, Liou C P. Recirculation in an annular-type jet pump [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(4): 735 - 740.
- [6] Namiki N, Kitamura O, Yamamoto M. Numerical prediction of performance of annular-type jet pump [J]. *Nippon*

Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 1997, 63(607): 950 - 956.

- [7] Gazzar M E, Meakhail T, Mikhail S. Numerical study of flow inside an annular jet pump [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, 20(4): 930 - 932.
- [8] Shimizu Y, Nakamura S, Kazumura S, et al. Studies of the configuration and performance of annular type jet pump [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1987, 109(3): 205 - 212.
- [9] 刘晖霞. 环形射流泵产生空化的机理及其改善的研究 [D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2007.

(责任编辑 陈建华)