

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.04.011

孔板流量计瞬时孔流系数的数值预测

李志峰^{1,2}, 武 鹏^{1,2}, 吴大转^{1,2}, 戴维平^{1,2}, 王乐勤^{1,2}

(1. 浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 高压过程装备与安全教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了研究孔板流量计在测量流量快速变化时的特性, 以孔板流量计瞬时孔流系数 C 为研究对象, 采用计算流体动力学(CFD)方法, 基于 Realizable 分离涡模拟(DES)描述瞬时湍流流动, 模拟研究了流量直线加速过程瞬时 C 和内流场随时间的演变结果。为了对比分析, 将加速过程离散为不同流量下的稳态点, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模拟各个稳态点的孔流系数和流场结构。稳态孔流系数 C_0 的模拟结果与 ISO 试验回归曲线相比, 误差在 3% 以内。将加速过程和稳态假设下模拟的孔流系数结果进行对比, 结果表明: 加速过程瞬时 C 从 0 逐渐增加至稳定值, 而稳态 C_0 基本保持在 0.6 附近。进一步将孔流系数与内流场和压力场分布的演化结合起来分析, 得出以下结论: 加速流动的漩涡滞后于稳定状态, 加速前期压能没有在短距离内全部转换为动能, 是导致 C 与 C_0 产生偏差的内流原因。研究内容可为瞬时流量的测量提供参考基础。

关键词: 孔板流量计; 流体加速; 瞬时孔流系数; 数值模拟; 分离涡模型

中图分类号: S274.4; V211.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)04-0328-05

Numerical prediction of transient discharge coefficient
in orifice flow meterLi Zhifeng^{1,2}, Wu Peng^{1,2}, Wu Dazhuan^{1,2}, Dai Weiping^{1,2}, Wang Legin^{1,2}

(1. Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China; 2. Engineering Research Center of High Pressure Process Equipment and Safety, Ministry of Education, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: To study the characteristics of the orifice flow meter when measuring linear accelerating flow rate, taking the curves of the transient discharge coefficient(C) as the study object, the computational fluid dynamics(CFD) method was used to simulate the C and the evolutions of the corresponding flow field. The transient turbulent flow was described by the Realizable detached eddy simulation(DES). For comparative analysis, the accelerating process was discretized to separate steady-state conditions at different points of flow rate. The Realizable $k-\varepsilon$ model was chosen as the steady-state turbulent closure. The error between curves of present steady discharge coefficient(C_0) and the ISO data is less than 3%, so the current calculation results is validated. Comparison of discharge coefficients between flow acceleration process and steady-state condition was performed. Comparison results show that the transient C curve increases from 0 to a constant value gradually and the steady C_0 remained in the vicinity of 0.6. The discharge coefficient together with the evolutions of velocity and pressure field were combined to further analysis the internal flow mechanisms. Reasons of deviation between transient and steady discharge coefficients are that the vortex of the acceleration state lags behind the steady-state conditions, so the pressure energy was not able to transform into the kinetic energy at the early process.

收稿日期: 2010-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979095, 50906074); 中国博士后科学基金面上资助项目(20100471697); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 李志峰(1983—), 男, 黑龙江鹤岗人, 博士(andyas@zju.edu.cn), 主要从事流体机械等化工过程机械的设计、优化和控制研究。
吴大转(1977—), 男, 浙江温州人, 副教授(通信作者, wudazhuan@zju.edu.cn), 主要从事流体机械设计与控制研究。

within a short distance. Contents of current study can serve as the reference of the instantaneous flow measurements.

Key words: orifice flow meter; fluid acceleration; transient discharge coefficient; numerical simulation; detached eddy model

在流体机械瞬态流动研究^[1-2]的过程中,需要对瞬时流量进行测试.电磁流量计在测量快速变化的流量时,其转换器的信号处理时间普遍超过0.2 s^[3-4],需要经过特殊设计才能达到要求^[5];涡轮流量计在测试小流量的瞬时变化时,存在强烈的非线性问题.而在许多场合,孔板流量计能较好地用于瞬态流量的测试.

陈家庆等^[6]基于CFD技术,通过改变流量、直径比、孔板厚度和流体介质等,对孔板内部稳定流动进行了系统研究. Kumar等^[7]采用CFD技术研究了方形孔和圆形孔板流量计在测量湿天然气时的异同; Singh等^[8]对锥体流量计的孔流系数进行数值模拟研究; Washio等^[9]对周期性波动的流量流经孔板进行了实验和理论分析后指出,孔板前后压差呈现非线性,且滞后于流量的变化,称之为“涡惯性”.

鉴于目前未见有对孔板流量计在测量流量加速瞬态过程的相关研究,为了从内流角度揭示压差滞后于流量变化的原因,考虑到采用试验测量较为困难,文中采用CFD方法分别对稳态和加速过程的孔流系数进行数值预测,重点分析孔流系数与流动状态瞬时转变间的联系,为实现采用孔板流量计测量

瞬时流量提供参考.

1 物理模型和数值方法

1.1 基本理论

孔板流量计是一种差压式流量计.对于不可压流体的水平管流动,忽略管壁摩擦阻力损失,根据流体的连续性和机械能的相互转化可得

$$Q = CA_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}, \quad (1)$$

式中: Q 为流量; C 为孔流系数; A_0 为孔板开孔面积, $A_0 = \frac{1}{16} \pi D^2$, D 为圆管内径; ρ 为流体密度; Δp 为孔板前后测点的静压差.

1.2 模型、网格和边界条件

图1为孔板流量计的物理模型示意.根据标准孔板流量计的安装,图1a中,上下游直管段长分别取 $10D$ 和 $5D$ 作为稳定直管段.其中上下游管内径 D 取100 mm,孔板厚度 δ 取3 mm.

流量从0以恒定加速度增长,如图1b所示;测压点的位置示于图1c.

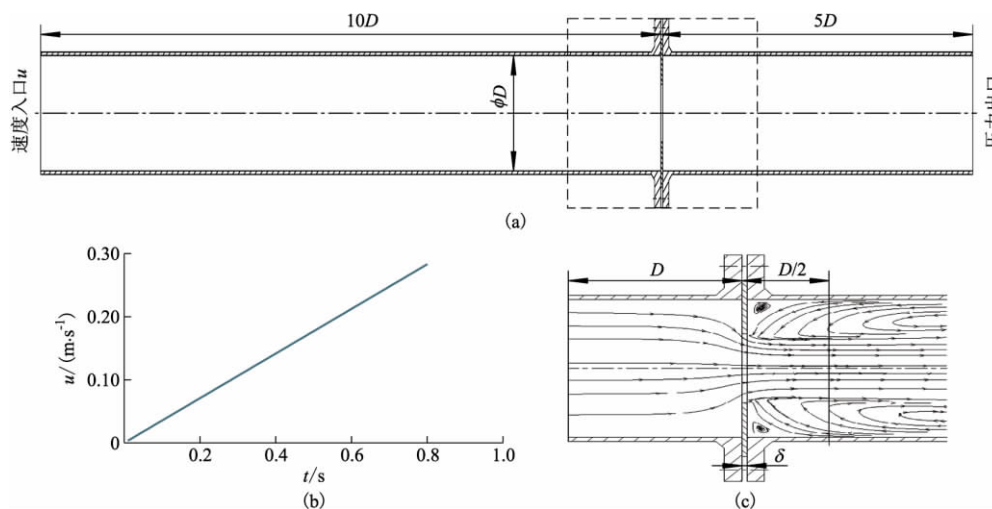


图1 物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model

为了准确捕捉孔板前后流场的变化情况,首先在壁面附近划分了边界层网格,边界层第1层厚度为0.1 mm,共10层,高度增长因子为1.1;其次,用

与孔板等孔径的圆柱面作为分界面,对内部流域进行切割,并对该边界面附近划分同上的边界层网格,其内部区域采用蝶形网格划分;最后,在边界层设置

好的基础上,采用结构化网格生成方式完成其余部分的网格划分。

图 2 给出了孔板附近的网格分布。以常温状态下液态水作为流体介质,动量、湍动能和湍流耗散率方程的离散选择二阶迎风格式,压力和速度耦合选用 SIMPLE 算法。稳态和加速条件下的湍流模型分别采用 Realizable $k-\varepsilon$ 和 Realizable DES 模型。稳态和加速过程的进口均采用速度进口边界条件,流体加速曲线见图 1b,管壁为无滑移壁面边界条件。

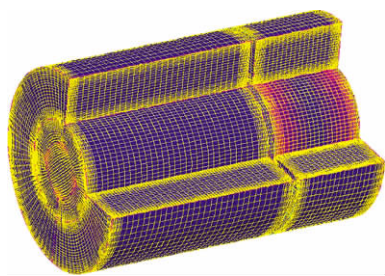


图 2 孔板附近三维网格

Fig. 2 Three-dimensional grid near orifice

由于流速不断增大,考虑采用变时间步长的方式以提高迭代过程的经济性,时间步长 Δt 与时刻 t 采用式(1)的关系式:

$$\Delta t = \begin{cases} 0.00212, & t < 0.1, \\ 0.000212/t, & 0.1 \leq t \leq 1, \\ 0.000212, & t > 1. \end{cases} \quad (2)$$

流场求解软件为 Linux 平台下的 Fluent 6.3,采用曙光 1800 工作站上的 8 个 Intel Xeon 处理器 (3.2 GHz) 进行并行计算。稳态迭代 4 000 次约需 2 h,瞬态迭代 250 个时间步约需 22 h。

2 结果分析

2.1 孔流系数和压降

图 3 给出了孔流系数的数值模拟结果,Realizable $k-\varepsilon$ 模拟的稳态孔流系数 C_0 与 ISO 试验回归曲线^[10]的最大误差在 3% 以内,标准 $k-\varepsilon$ 的最大误差达 6%^[6]。

对于流量 $Q \leq 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$, C_0 随流量的增加缓慢下降,之后保持在 0.63 左右。与 C_0 不同的是, C 从 0 开始随流量的增大而增大,并逐渐向 C_0 靠近,直至 $Q \geq 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 后才达到 C_0 的水平。 C 在时间上滞后于 C_0 。图 4 中 $\Delta p-Q$ 曲线显示, $Q \leq 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,加速过程孔板前后压降高于同等流量下稳态压降; $Q \geq 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 后,瞬态压降才降为稳态水平。

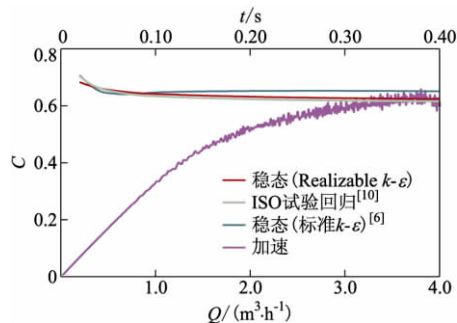


图 3 稳态和加速过程孔流系数与流量关系曲线

Fig. 3 Curve of orifice coefficient under steady and accelerating process

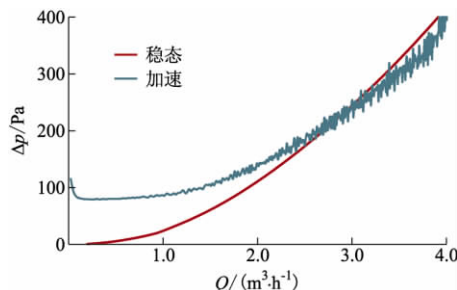


图 4 稳态和加速过程压降与流量关系曲线

Fig. 4 Curve of pressure under steady and accelerating process

2.2 速度和压力场分析

从内流角度分析导致第 2.1 节中 C 和 C_0 不同的原因,图 5 和图 6 分别给出并对比了相同流量下稳态和加速过程中流经孔板前后流体的速度和压力场。对于 $Q \leq 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 稳态条件,孔板后方始终可观察到一个被拉长的主涡和孔板右上方的小涡,流动的损失较大,同时表明流场中已形成稳定的流动通道,动能和压能的转化已达到平衡,流动的损失(长漩涡)也趋于稳定,并且压差随流量的增大而稳定增大。

加速过程中孔板后方的漩涡是逐渐形成的:小流量时流动较为平稳,流体不断被加速的流体向下游推动,漩涡来不及形成,流动的损失较小;随着流量的不断加大,孔板后方开始出现流动分离(约在 $Q > 1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时);当流量进一步加大,孔板后方出现了较大的漩涡。加速前期,压力沿整个管道逐渐向下游传播,压能传播的距离较长,没有在短距离内快速转换为动能。

经上述分析可以认为,导致加速前期 C 和 C_0 之间差异的内流原因是,漩涡形成的滞后以及加速前期压力能没有在短距离内全部转化为动能。

随着流量的增大,孔板后方出现了明显的漩涡,漩涡中心附近区域即为低压区。虽然孔流系数和压

降的瞬态和稳态值分别相互接近,然而由于流体仍然处于加速阶段,因此流动状态(漩涡的形状和位

置)和压力分布与稳态条件相比,仍然存在较大差异。

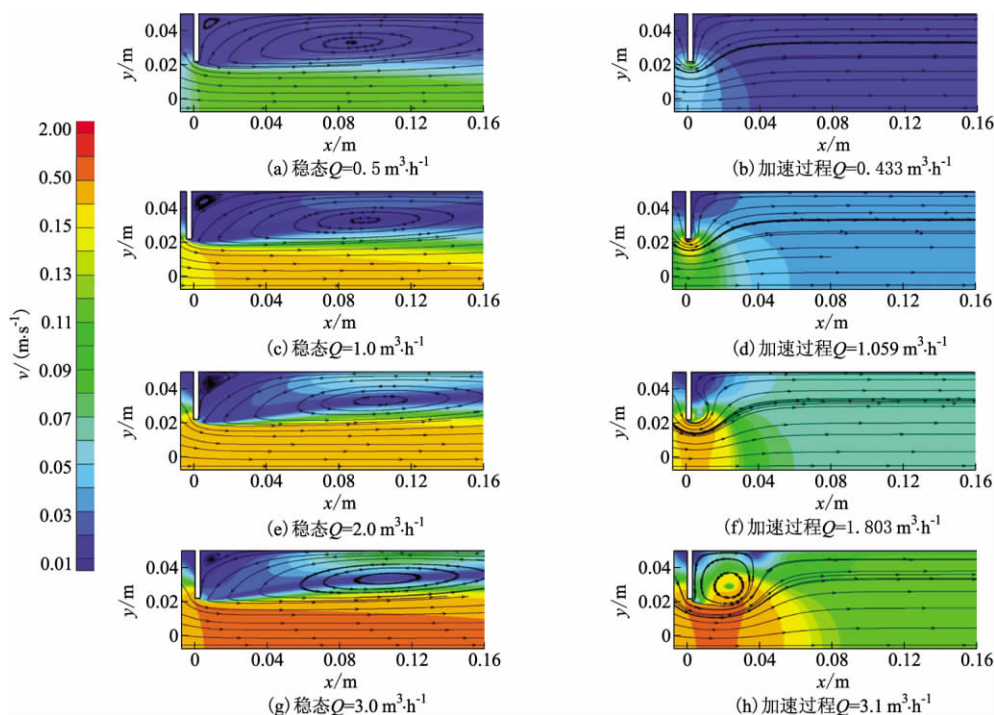


图5 稳态(左)与加速过程(右)速度场

Fig. 5 Velocity field of steady state(left) and accelerating process(right)

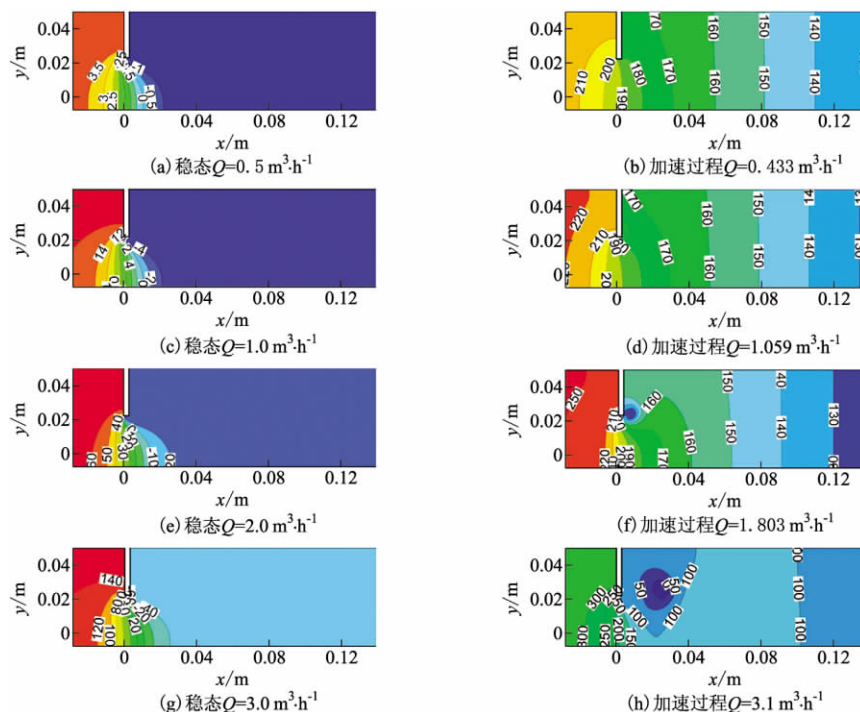


图6 稳态(左)与加速过程(右)压力场(单位: Pa)

Fig. 6 Pressure field of steady state(left) and accelerating process(right) (Unit: Pa)

3 结 论

通过 CFD 技术,实现了稳态和加速流体流经孔板后流场的数值模拟,得到了孔流系数、流场和压力的模拟结果,主要概括为:

1) 稳态孔流系数 C_0 的数值预测值与 ISO 试验回归曲线十分接近,Realizable $k-\varepsilon$ 比标准 $k-\varepsilon$ 的 C_0 预测值更接近 ISO 试验回归曲线,误差分别为 3% 和 6%;

2) 加速过程 C 随流量的增大逐渐增大并靠近稳态 C_0 ; 加速前期,压差高于稳态水平,随着流量的不断增大,瞬态和稳态压差相互接近。

3) 导致加速前期 C 和 C_0 之间差异的内流原因是漩涡形成的滞后以及加速前期压力能没有在短距离内全部转化为动能。

文中内容可为利用孔板流量计测量瞬时流量提供参考依据,为流体机械内部非定常流动等特殊问题的研究提供基本保障。今后的工作将围绕流量波动、阶跃和突减等其他瞬态状况,开展系统深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] Tsukamoto H, Ohashi H. Transient characteristics of a centrifugal pump during starting period [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104(1): 6-13.
- [2] Li Zhifeng, Wu Peng, Wu Dazhuan, et al. Experimental and numerical study of transient flow in a centrifugal pump during startup [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(3): 749-757.
- [3] 李志峰, 吴大转, 王乐勤, 等. 离心泵启动过程瞬态特性的试验 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 389-393.
Li Zhifeng, Wu Dazhuan, Wang Leqin, et al. Experiment on instantaneous characteristics in centrifugal pump during startup period [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(5): 389-393. (in Chinese)
- [4] 吴大转, 王乐勤, 胡征宇. 离心泵快速启动过程外部特性的试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 68-70.
Wu Dazhuan, Wang Leqin, Hu Zhengyu. Experimental study on explicit performance of centrifugal pump during rapid startup period [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(1): 68-70. (in Chinese)
- [5] Lefebvre P J, Durgin W W. A transient electromagnetic flowmeter and calibration facility [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1990, 112(1): 12-15.
- [6] 陈家庆, 王波, 吴波, 等. 标准孔板流量计内部流场的 CFD 数值模拟 [J]. 实验流体力学, 2008, 22(2): 51-55.
Chen Jiaqing, Wang Bo, Wu Bo, et al. CFD simulation of flow field in standard orifice plate flow meter [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2008, 22(2): 51-55. (in Chinese)
- [7] Kumar P, Michael W M B. A CFD study of low pressure wet gas metering using slotted orifice meters [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22(1): 33-42.
- [8] Singh R K, Singh S N, Seshadri V. CFD prediction of the effects of the upstream elbow fittings on the performance of cone flowmeters [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21(2): 88-97.
- [9] Washio S, Takahashi S, Yu Y, et al. Study of unsteady orifice flow characteristics in hydraulic oil lines [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1996, 118(4): 743-748.
- [10] 中国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2624.2—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第 2 部分: 孔板 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

(责任编辑 张文涛)