

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2013.01.010

轴流式止回阀动态特性

杨国来, 伍国果, 刘小雄, 曹文斌, 许敏影

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)



杨国来

摘要: 基于 Fluent 软件提供的计算方法和物理模型, 利用动网格及用户自定义函数技术对轴流式止回阀的阀瓣运动过程进行动态数值模拟. 通过动网格较好地解决了因阀瓣运动而导致的计算区域瞬时变化的问题. 利用 CFD 软件 Fluent, 采用非结构化网格, 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 模拟了阀瓣关闭的动态过程中, 止回阀内压力场和速度场的瞬态变化过程, 计算出动态特性曲线, 并进行了相应的试验验证. 结果表明: 运用动网格技术能较好地模拟止回阀内部压力和速度的动态变化, 试验结果与数值计算结果趋于一致, 验证了数值模拟的可靠性. 通过数值模拟不同公称直径和外力下止回阀内的压力场和速度场的瞬态变化, 计算出对应的动态特性曲线, 并总结了止回阀的公称直径和外力对其动态特性的影响结果, 对工程设计与管理具有指导作用.

关键词: 止回阀; 动网格; 用户自定义函数; 动态特性; 数值模拟

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)01-0046-04

Dynamic characteristics of axial flow check valve

Yang Guolai, Wu Guoguo, Liu Xiaoxiong, Cao Wenbing, Xu Minying

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The unsteady fluid flow caused from the moving disc in an axial flow check valve was numerically simulated by means of the computational methods and flow physical models available in CFD code-Fluent. The disc regularly instantaneous movement was realized by the dynamic mesh technique and UDF (user defined function) in Fluent. The transient pressure and velocity were obtained during a period of the disc being closed by means of unstructured mesh, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model. Those transient characteristic curves have been measured experimentally as well, and exhibit good agreement with the predicted ones, suggesting the numerical simulation method is reliable. Moreover, such dynamic characteristic curves were calculated in the valves in various nominal diameters and external forces and their influences have been identified. Those results will play a critical role in investigation into water hammer effect in the axial flow check valve, and might be useful for check valve design in engineering projects.

Key words: check valve; dynamic mesh; user defined function; dynamic characteristics; numerical simulation

管道系统内止回阀最主要的作用是避免管道机械与机械设备受水锤破坏. 泵意外停顿时, 液体流速变小, 止回阀渐渐关小; 短时间内, 液体开始反向加速流动, 止回阀加速关闭. 在关闭瞬间, 反向液体流

速达到 v_{\max} 使止回阀关闭, 反向流动液体的流速立即由 v_{\max} 变为 0, 立即在止回阀下游产生水击压力增值 ΔH , 进而产生水锤效应, 影响管道设备的使用寿命. 通常将止回阀的 $dv/dt - v_{\max}$ 关系曲线称为动态

收稿日期: 2012-05-05

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(1014RJZA023)

作者简介: 杨国来(1963—)男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师(yanggl@lut.cn), 主要从事流体机械设计理论和流场分析研究.

伍国果(1986—)男, 四川广安人, 硕士研究生(wuguoguo516112@sina.cn), 主要从事流场分析及数值模拟研究.

特性曲线^[1]。该曲线为研究止回阀关闭时生成的水锤效应具有重要作用,同时还是工程中采取防止或减小水锤危害措施的理论依据。

目前已有许多学者对止回阀的动态特性进行了研究,Botros等^[2]从理论上介绍了止回阀的动态特性和弹簧对其影响,Sibilla等^[3]利用动网格技术对止回阀压力场与速度场进行了仿真,得出其内部流场变化。文中从试验和数值模拟的角度,计算轴流式止回阀在不同公称直径和外力下的动态特性曲线,并分析其影响,为以后的改进提供参考。

1 轴流式止回阀结构及原理

轴流式止回阀的结构简单,主要由阀座、阀体、阀瓣、阀杆、弹簧等组成,平面结构图^[3]如图1所示。

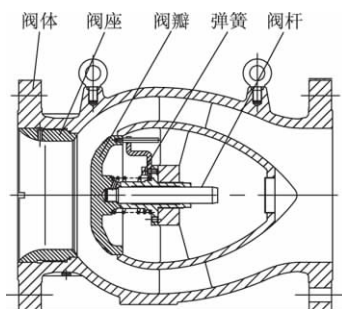


图 1 轴流式止回阀的结构图

Fig. 1 Structure of axial flow check valve

当液体进入轴流式止回阀时,作用于阀瓣上的液体静压力与冲量使阀瓣开启,液体通过流道,流道面积变小,流速变大,压力减小,阀瓣前后形成压力差,在液体冲量与压力差的共同作用下,使阀瓣克服弹簧的作用力,推动阀门继续开启。

当流速继续增加到阀门最小全开速度 v_0 时,阀门为全开,此时阀瓣液体冲量与压力差和弹簧作用力的合力 F 平衡。流速超过 v_0 时,阀瓣不随流速的波动而运动,产生噪音,使用寿命受到影响,这时流阻系数最小并恒定。

当流速减至 v_0 时,阀瓣开始移动,当速度从 v_0 逐渐减小时,弹簧提供的作用力大于作用在阀瓣上的合力,使阀门做关闭运动,因为阀瓣关闭行程短,所以阀瓣关闭迅速到位,当 v_0 减小到0时,阀门已基本关闭,这时流体的回流受到限制,回流的速度很小,减小了水锤危害,保护了机械设备和管道。

2 试验与数值模拟

2.1 试验装置及试验方法

图2为检测装置流程图,高压罐和储气罐的作用是使检测段内的液体逆向流动,水塔提供稳定的流量和压力并将检测段与泵隔开避免水击对泵的损坏。其工作原理:首先调整储气罐和高压罐中的压力,调节控制阀使下游压力和检测段内的流量达到稳定值。然后,在规定时间内打开快速进气阀,使得检测段的下游高压罐和储气罐相通,由于储气罐的压力大于水塔提供的压力,气压将高压罐中的液体压出罐外,因此检测段内的流体开始反向流动。这时流量计测出反向流量(流速 v_{\max}),记录仪记录止回阀上下游的压力变化情况。将试验所得的参数组经过曲线拟合得到动态特性曲线。

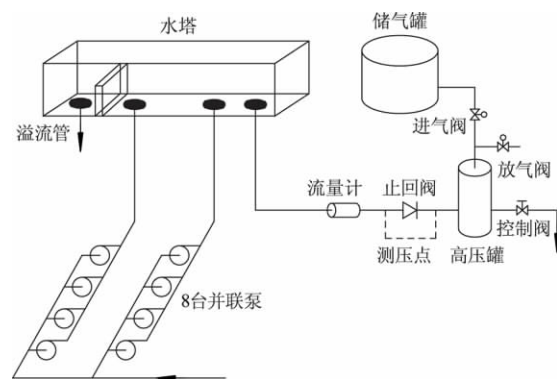


图 2 检测装置流程图

Fig. 2 Flow chart of detection device

2.2 数值模拟

2.2.1 网格划分

在模拟过程中,选取阀瓣右侧为初始模型进行网格划分,因为阀瓣处于运动中,所以要分区划分网格,阀瓣的运动区域划分三角形非结构网格,其他区域划分四边形网格^[4]。

动网格用于模拟阀瓣在止回阀中的运动,动网格由阀瓣的运动方程式(1)来控制。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_s - f - p, \quad (1)$$

式中: m 为阀瓣的质量; F_s 为弹簧力, $F_s = -k\Delta x$; f 为摩擦力,可省略不计; p 为液体压力。

采用动网格技术模拟阀瓣运动,利用Fluent软件的DEFINE_CG_MOTION宏函数并通过C语言编制用户自定义函数,通过记录当前阀瓣的位置,得到弹簧变形量,从而求出弹簧作用在阀瓣上的作用力,

同时根据流场计算对阀瓣受到的流体作用力进行积分。

2.2.2 动网格计算模型

动网格模型可以用来模拟由于流域边界运动引起流域形状随时间变化的流动情况^[5]。对于通量 ϕ ，在任意控制体 V 内，其边界是运动的，守恒方程的通式^[5]为

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \cdot d\mathbf{A} = \int_V \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV, \quad (2)$$

式中： ρ 为流体密度； \mathbf{u} 为流体速度矢量； \mathbf{u}_s 为动网格的网格变形速度； Γ 为扩散系数； S_ϕ 为通量 ϕ 的源项； ∂V 为控制体边界。

式(2)中第1项可以利用一阶向后差分写成

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV = \frac{(\rho \phi dV)^{n+1} - (\rho \phi dV)^n}{\Delta t}, \quad (3)$$

式中： n 及 $n+1$ 表示当前时间及下一时间，第 $n+1$ 时间上体积 V^{n+1} 通过式(4)计算。

$$V^{n+1} = V^n + \frac{dV}{dt} \Delta t, \quad (4)$$

式中： dV/dt 为控制体对时间的导数，为满足网格守恒定律，控制体的体积时间导数通过式(5)计算。

$$\frac{dV}{dt} = \int_{\partial V} \mathbf{u}_s \cdot d\mathbf{A} = \sum_j^{n_f} \mathbf{u}_{s_j} \cdot \mathbf{A}_j, \quad (5)$$

式中： n_f 为控制体的面数； \mathbf{A}_j 为 j 面的表面积，每个控制容积面上点 $\mathbf{u}_{s_j} \cdot \mathbf{A}_j$ 通过式(6)计算。

$$\mathbf{u}_{s_j} \cdot \mathbf{A}_j = \frac{\delta V_j}{\Delta t}, \quad (6)$$

式中： δV_j 为整个时间步长 Δt 上控制面 j 膨胀引起的体积改变。

2.2.3 计算方法和边界条件

动网格的更新主要有以下3种方式：弹簧近似光滑法 (spring-based smoothing)、动态分层法 (dynamic layering) 和局部网格重划法 (local remeshing)^[6]。选定弹簧近似光滑和局部网格重划2种方法^[7]。模拟中使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，对流项的离散采用二阶迎风格式，扩散项的离散采用具有二阶精度的中心差分格式，速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法^[8]。为表征阀瓣的运动，在 VC++ 中编写阀瓣运动函数并在 Fluent 中进行编译，在动网格的区域设置中分别把阀瓣设置为刚体。

为保证止回阀出、进口的边界条件符合实际，建立计算模型时对止回阀的出、进口分别添加了同等

直径的管道。因为止回阀进口的流量容易确定，进口速度就容易计算，而出口速度和压力未知，所以使用自由出流出口边界条件^[10]和速度进口边界条件。

为了保证止回阀进、出口的边界条件符合实际，在建立计算模型时分别对止回阀的进、出口添加了等同直径的管道。由于止回阀的进口流量容易确定，进口速度容易计算，而出口压力和速度未知，所以使用速度进口边界条件和自由出流出口边界条件^[9]。

2.3 计算与试验结果分析

由 Fluent 模拟出来的关闭过程中不同瞬时速度场与压力场分别如图3、4所示。通过对相同口径的轴流式止回阀进行动态特性测试并进行数值计算，得出动态特性曲线对比如图5所示。

图3为轴流式止回阀关闭过程各时刻的压力场分布。第1阶段关闭初期 $t = 2.0 \times 10^{-2}$ s 时，阀瓣关闭速度较慢，阀瓣前端已形成一个高压区，过流面积减小处形成一个较大范围的低压区；在 $t = 4.0 \times 10^{-2}$ s 时，阀瓣前端压力分布趋于均匀；在 $t = 5.5 \times 10^{-2}$ s 时，阀瓣关闭速度加快，过流面积减小处的低压区范围减小；在 $t = 6.0 \times 10^{-2}$ s 时，关闭基本结束，阀瓣前后压力稳定。

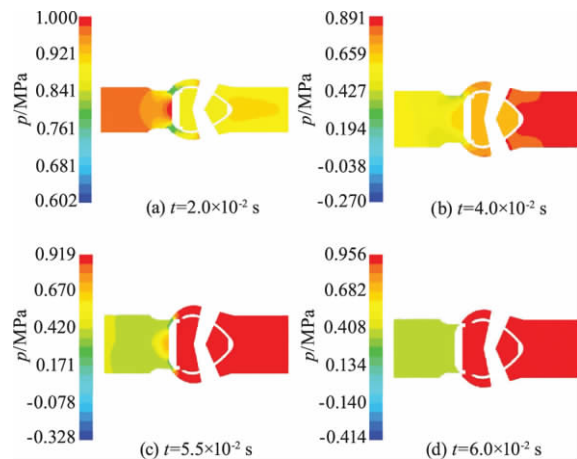


图3 轴流式止回阀关闭过程中不同瞬时压力分布

Fig. 3 Instantaneous pressure profiles during check valve closure

图4为轴流式止回阀关闭过程各时刻的速度场分布。在 $t = 2.0 \times 10^{-2}$ s 时，阀瓣前端已形成一个很小的旋涡；在 $t = 4.0 \times 10^{-2}$ s 时，阀瓣前端已有较为明显的撞击和脱流，旋涡变大；在 $t = 5.5 \times 10^{-2}$ s 时，导流罩后端形成旋涡；在 $t = 6.0 \times 10^{-2}$ s 时，关闭结束，旋涡消失。

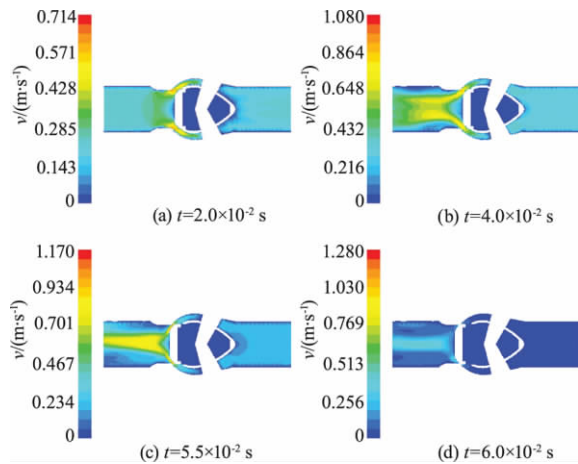


图 4 轴流式止回阀关闭过程中不同瞬时速度分布
Fig. 4 Instantaneous velocity profiles during check valve closure

将图 5 中所示的试验与计算的动态特性曲线比较可以看出,试验与计算出来的动态特性曲线均显示最大流速随加速度的增大而增大;当 $dv/dt \leq 10 \text{ m/s}^2$ 时,试验结果与计算结果比较接近;但 $dv/dt > 10 \text{ m/s}^2$ 时,其误差比较大.分析认为其原因为① 摩擦力 f 不能省略不计;② 数值计算方面的误差.

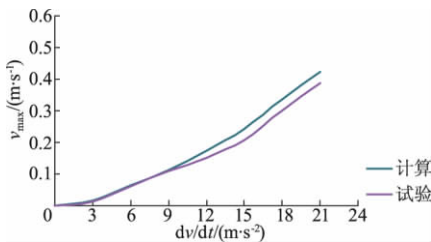


图 5 试验与计算的动态特性曲线对比
Fig. 5 Comparison of tested and calculated dynamic characteristics curves

3 动态特性研究

3.1 公称直径对动态特性的影响

应用动网格对不同公称直径轴的流式止回阀计算,分别计算出动态特性曲线如图 6 所示.该曲线随着公称直径的变大而变陡,即同一工况下,大口径

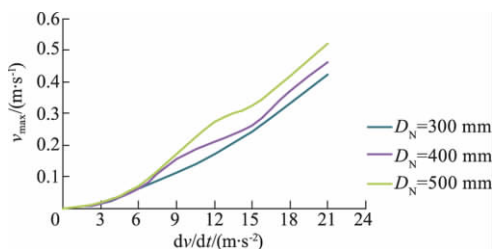


图 6 公称直径对动态特性的影响
Fig. 6 Influence of nominal diameter on dynamic characteristics

止回阀产生较大的水锤效果,所以在工程应用中应尽量选择公称直径小的止回阀,那样可以减小水击对设备的损坏.

3.2 外力对动态特性的影响

调整轴流式止回阀弹簧的弹性系数,外力 F_i 分别为 300, 400 N 时,对同一公称直径不同弹簧的止回阀应用动网格计算,计算出各动态特性曲线如图 7 所示.

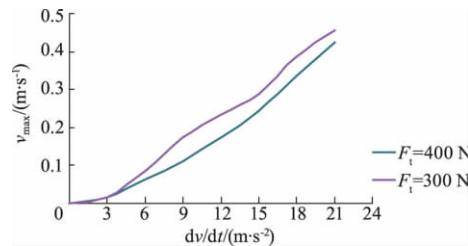


图 7 外力对动态特性的影响
Fig. 7 Influence of external force on dynamic characteristics

止回阀关闭速度随外力的变大而变大,其动态特性也变平缓,说明止回阀的快关特性可以减小水击强度,但也不能过分增大外力,因为外力越大止回阀稳态压力损失就越大,不符合节能的要求.

4 结论

1) 通过实验结果与数值模拟计算结果的对比,数值模拟计算止回阀的动态特性曲线的可行性和有效性得到了验证.

2) 同一工况下,轴流式止回阀公称直径越大水击越大.止回阀的水击压力随着外力的增大而减小,其动态特性也越平坦.

3) 阻力弹簧具有不增加阀瓣惯量和能使止回阀对流体流动状态的变化做出较迅速响应的优点,所以对止回阀是有利的;弹簧强度越大,产生的水击压力越小,但稳态压力损失越大.

4) 止回阀的动态特性反应了止回阀的水击特性,揭示了流体在止回阀内的运动规律,设计工程师可以准确地预测轴流式止回阀的各种特性,为工程上设计和优化管道系统提供依据.

参考文献(References)

- [1] Menzler F, Haubold A D, Hwang N H. Dynamic characterization of a new accelerated heart valve tester [J]. *Asaio Journal*, 1997, 43(5): M372 - M377.

(下转第 55 页)

- junction [J]. *As J Energy Env*, 2005, 6(3): 154 - 164.
- [3] Deng Xiaogang. Experimental study of self-excited oscillation pulsed jet aerator [C]//5th international Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Wuhan, China [s. n.] 2011.
- [4] Deswal S. Oxygen transfer by multiple inclined plunging water jets [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, 2(4): 272 - 278.
- [5] Deswal S, Verma D V. Performance evaluation and modeling of a conical plunging jet aerator [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, 2(1): 33 - 37.
- [6] Ratkovich N, Chan C C V, Berube P R, et al. Analysis of shear stress and energy consumption in a tubular air-lift membrane system [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(1): 189 - 198.
- [7] Gao Jifei, Gu Guowei, Zhao Zilong, et al. CFD numerical simulation applied in the design of the jet aerator [J]. *Environmental Informatics Archives*, 2005, 3: 226 - 231.
- [8] 陈同德. QSB 型深水曝气机结构设计 [J]. *机械工程与自动化*, 2009(2): 96 - 97.
Chen Tongde. Structure design of QSB deep water aerator [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2009(2): 96 - 97. (in Chinese)
- [9] 施慧明, 刘艳臣, 施汉昌, 等. 深水型表面曝气机的模拟计算与构型比较 [J]. *环境工程学报*, 2008, 2(2): 154 - 159.
Shi Huiming, Liu Yanchen, Shi Hanchang, et al. CFD simulation and performance comparison of surface aerator for deep aeration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(2): 154 - 159. (in Chinese)
- [10] 黄思, 王宏君, 郑茂溪. 叶片式混输泵气液两相流及性能的数值分析 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(12): 11 - 16.
Huang Si, Wang Hongjun, Zheng Maoxi. Numerical analysis of gas-liquid two-phase flow in multiphase rotodynamic pump and pump performance [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2007, 35(12): 11 - 16. (in Chinese)
- [11] 余志毅, 曹树良, 王国玉. 叶片式混输泵内气液两相流的数值计算 [J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(1): 46 - 48.
Yu Zhiyi, Cao Shuliang, Wang Guoyu. CFD analysis of the air-water bubbly flow in a multiphase rotodynamic pump impeller [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(1): 46 - 48. (in Chinese)
- [12] 刘建瑞, 苏起钦. 自吸泵气液两相流数值模拟分析 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 73 - 76.
Liu Jianrui, Su Qiqin. Numerical simulation on gas-liquid two-phase flow in self-priming pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9): 73 - 76. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)

(上接第 49 页)

- [2] Botros K K. Spring stiffness selection criteria for nozzle check valves employed in compressor stations [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(12): 1 - 11.
- [3] Sibilla S, Gallati M. Hydrodynamic characterization of a nozzle check valve by numerical simulation [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(12): 1 - 12.
- [4] 葛如海, 王桃英, 许栋, 等. 基于动网格和 UDF 技术的气缸动态特性研究 [J]. *机床与液压*, 2010, 38(21): 12 - 15.
Ge Ruhai, Wang Taoying, Xu Dong, et al. Dynamic characteristics of pneumatic cylinder based on dynamic mesh and UDF [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2010, 38(21): 12 - 15. (in Chinese)
- [5] 江帆, 黄鹏. *Fluent 高级应用与实例分析* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 205 - 216.
- [6] Song Xueguan, Wang Lin, Part Y C. Transient analysis of a spring-loaded pressure safety valve using computational fluid dynamics [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2010, 132(5): 1 - 6.
- [7] Han Xu, Zheng Mingguang, Yu Yiqi. Hydrodynamic characterization and optimization of contrapush check valve by numerical simulation [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, 38(6): 1427 - 1437.
- [8] 李志峰, 吴大转, 王乐勤. 基于动网格方法的圆柱启动瞬态流动数值模拟 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2008, 42(2): 264 - 268.
Li Zhifeng, Wu Dazhuan, Wang Leqing. Numerical simulation of transient flow past impulsively started circular cylinder based on dynamic mesh method [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2008, 42(2): 264 - 268. (in Chinese)
- [9] 王福军. *计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 146 - 152.

(责任编辑 谈国鹏)