

[研究·设计]

DOI 10.3969/j.issn.1005-2895.2011.02.004

基于 UDFs 程序的先导式截止阀 启闭特性数值分析

张 含, 匡继勇, 王建凯, 钱锦远, 金志江

(浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 先导式截止阀利用液体流动产生的压差作为阀门开启的动力, 具有反应时间短、能耗低的优点, 然而对于开启时间长短以及开启后产生压差的大小, 目前仍缺乏理论研究。文章通过编制 UDFs 程序, 实现了压差的测量, 并利用压差的大小, 控制阀芯的运动, 模拟出阀门的开启过程, 得出了开启时间的数值解, 为进行阀门系统的分析提供了数值方法。通过对阀门流场的分析, 指出了本阀门的主要阻力损失区域, 为阀门进一步的优化设计提供了理论依据。图 6 参 9

关键词: 流体输送; 截止阀; 先导控制; UDFs 程序; 启闭特性; 动态数值模拟

中图分类号: TQ055.8 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2011)02-0010-04

Characteristics Numerical Analysis for Open and Close Feature of a Pilot-controlling Cut-off Valve Based on UDFs Program

ZHANG Han, KUANG Ji-yong, WANG Jian-kai, QIAN Jin-yuan, JIN Zhijiang

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

Abstract The pilot-controlling cut-off valve uses the pressure difference which forms when fluid flows as its power to open. The valve acts quickly with low energy consumption, however, there are few theory research on the opening time and the pressure difference produced after opening. In order to provide a simulation method for systematic analysis of the valve, the pressure difference was measured with UDFs program, and the opening process was simulated which tells the opening time of the valve by controlling the motion of the valve core which depends on the value of the pressure difference. Main regions that causes a large quantity of resistance loss were pointed out by means of analyzing the flow field of the valve which provides theoretical basis for optimal design of the valve. [Ch 6 fig 9 ref]

Key words fluid transfer; cut-off valve; pilot-control; UDFs program; open and close feature; dynamic numerical simulation

0 引言

截止阀在管道系统中起到截断或接通管路介质的作用, 应用广泛, 其性能影响系统稳定与经济效益。传统截止阀通过外力驱动装置实现启闭, 普遍存在着启闭动作缓慢、执行机构庞大、驱动能耗高等问题。本文提出了一种新型先导式截止阀^[1-2], 利用流体在流动过程中产生的压差来推动阀芯的运动, 实现阀门的快

速开启; 同时利用先导阀控制阀门运行状态, 实现阀门的低能耗运行。国内外截止阀流场的研究, 内容及方法各有不同。Ferrari 和 Leutwyler Z 采用树脂玻璃截止阀进行实验以便于对阀门内部流场的实时观察, 并通过 CFD 数值模拟阀门在不同情况下的工况^[3]; 袁新明等结合截止阀流道流场的数值模拟进行阀门的体型优化^[4]。由于对先导式截止阀动态数值模拟无系统

收稿日期: 2010-09-01; 修回日期: 2010-10-20

基金项目: 浙江省重大科技专项 (优先主题) 项目 (2008C01023-3)

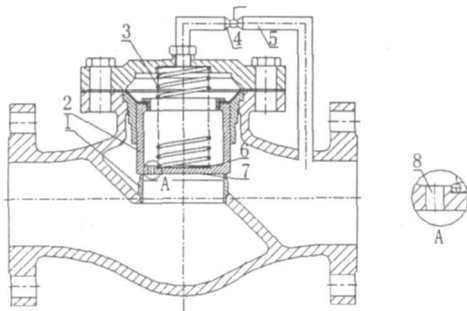
专利项目: 金志江, 匡继勇. 一种带有先导阀的截止阀 (200810120906.1); 金志江, 匡继勇. 带有先导阀的截止阀 (ZL 200820164064.5)

作者简介: 张含 (1986), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向为新型阀门的开发。E-mail: zhanghandex@163.com

研究,对其开启时间及能耗情况没有确切的数值分析,对阀门此方面性能的认识并不深入。文章通过 UDFs 编程,对阀门的开启过程进行动态模拟,得出阀门开启稳定后压差的大小以及开启时间值,同时分析阀门的能耗并与通用阀门驱动能耗对比,为阀门的进一步系统研究与设计提供了方法与依据。

1 原理分析

文中阐述的新型先导式截止阀如图 1 所示。此先导阀是单向流通阀,要保证其正常工作,流体只能从图 1 所示的方向流动。



1-底座; 2-活塞式阀芯; 3-弹簧; 4-先导阀; 5-先导管; 6-阀芯上底面;
7-阀芯下底面; 8-小孔

图 1 先导式截止阀示意图

Figure 1 Sketch map of pilot-controlling cut-off valve

阀门的先导控制通过先导阀实现,当先导阀打开时,阀前流体就能通过小孔以及先导管流往阀后形成通路,流体流经小孔,局部流体形状的变化导致压力损失,在阀芯的上底面与下地面间形成压差,在压差的作用下,阀芯往上运动,阀门打开,由此可见,阀门的开启运动与压差力是密切相关的,在实现阀门开启动态过程的模拟中,压差的实时处理非常重要。

2 动态数值模拟

先导式截止阀内部流场形状复杂,为了提高数值模拟计算效率并保证不失准确性,必须对阀门结构进行合理的简化。先导式截止阀开启过程受压差大小控制,在阀芯的运动过程中,阀芯受力不断变化,必须建立阀芯的受力函数通过编程才能实现对运动的准确模拟。

2.1 模型建立与边界设定

以公称压力为 2.5 MPa DN100 的先导式截止阀为研究对象,简化后的网格模型如图 2 所示。

三维模型的建立,对某些不影响流场整体特性的微小不规则边角区进行规则化处理,并加长阀门的出口管段长度,以防止模拟结果中出口处有回流现象,保证数值模拟的准确性。由于动态模拟时,活塞式阀芯

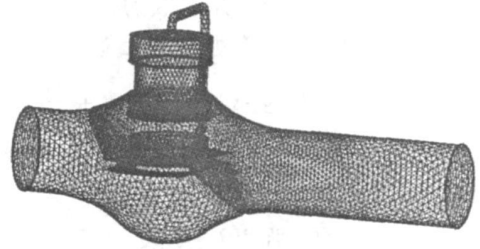


图 2 先导式截止阀网格模型

Figure 2 Grid model of pilot-controlling cut-off valve
运动位移大,须更新网格范围广,采用四面体网格模型。

流场的确定通过速度入口及压力出口;为了实现动网格功能以及采集活塞式阀芯上下底表面的压强数据,将上下底表面以及活塞式阀芯的壁面分别独立设置为 wall 边界。

2.2 UDFs 编程

文中的先导式截止阀在开启过程中,动力为压差产生的压差力 F_p ,阻力位阀芯重力 G 、弹簧弹力 F_k 、阀芯与其他零件之间的摩擦力 F_u 以及膜片的变形力 F_i 。根据对原理的分析,先导式截止阀阀芯的开启过程是力的平衡过程,随着阀芯位移的增大,阻力逐渐变大并最终与压差力平衡,实现阀门的开启。

UDFs 的实现思路:摩擦力以及变形力相对于其他力影响很小,在受力函数中忽略不计,那么阀芯受力

$$F = F_p - F_k - G = \Delta P \cdot A - k \cdot s - G$$

式中: ΔP —上下底表面的平均压强 /Pa

A —底表面面积 m^2 ;

k —弹簧的弹性模量 $(N \cdot m^{-1})$;

s —弹簧的位移 m 。

由于开启运动力,阀芯所受合力 F 不断变化,阀芯的运动复杂,利用微积分的无限接近原理,文中通过 2 个 `DEFINE_CG_MOTION()` 宏分别控制面的运动,将开启时间分成小的时间微元 dt 在每个 dt 中运动简化为匀加速直线运动,累积时间微元,最终实现开启过程的数值模拟。为了获得 ΔP 值,首先利用 UDFs 的 `Lookup_Thread()` 宏获得 Fluent 分配给上下底表面 wall 边界的 `id` 值,然后利用 `begin_f_loop()` 循环宏循环面元、累积压强并分别求出平均压强值。初始状态为阀门关闭状态,则初始弹簧位移 s_0 已知,通过 1 次循环后,阀芯第 1 个时间微元的受力 F_1 便已知,加速度值 $a_1 = F_1/m$ (m 为阀芯质量),第 1 个时间微元结束后,阀芯速度为 $v_1 = a_1 dt$ 位移量为 $s_1 = 0.5 a_1 dt^2$,UDFs 将此计算结果反馈到 Fluent 解算器,更新网格;第 2 个

时间微元开始, Fluent调用 UDFs程序, 计算新位置上下底表面的压强平均值, 并求取加速度 a_2 , 则阀芯做初速度 v_1 , 加速度 a_2 的匀加速直线运动, 第 2 个时间微元结束后的阀芯位移: $s_2 = s_1 + v_1 dt + \frac{1}{2} a_2 dt^2$ 。如此循环叠加, 最终实现开启过程的模拟。同时, 在每一个时间微元的循环结束后, 利用 `fprintf()` 函数分别输出上下底表面的平均压强以及压差 ΔP , 开启时间 t 即为位移 s 稳定时, $t = \sum dt$ 。

为了提高模拟的准确性, 利用 `DEFINE_PROFILE()` 宏控制入口处流速 $F_PROFILE(f, t, i)$, 有

$$F_PROFILE(f, t, i) = \frac{s_i v_0}{s}$$

式中: s_i —第 i 个时间微元下阀芯位移 /m;
 s —阀芯全开时的开度 /m;
 v_0 —全开时入口流速 /($m \cdot s^{-1}$)。

通过该方程, 可以实现随着阀门开度增大, 流量增加, 当阀门达到全开时, 其流量达到预定值。

2.3 数值计算

选择 Fluent 的 Unsteady 模式, 双精度的 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型^[5-7], 动网格^[8-9] 的更新采用 smoothing 结合 remeshing 的方式, 方程的求解采用 SIMPLE 算法, 在求解过程中, 监视阀门速度场与压力场的变化, 以阀芯位移稳定作为计算收敛条件, 进行迭代计算, 并输出平均压强、压差、时间及阀芯位移等数值解。

3 模拟结果分析

3.1 速度场分析

先导式截止阀在动态模拟达到稳定的开启状态后, 其中心面的速度场分布如图 3 所示。

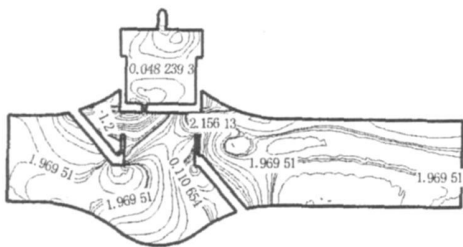


图 3 先导式截止阀中心面速度场 /($m \cdot s^{-1}$)

Figure 3 Velocity field of central plane

入口流速为 $2 m/s$ 时, 活塞式阀芯内部的液体流速 v_f 仅为 $0.05 m/s$ 。假设液体介质不可压缩, 根据流体力学的连续性原理

$$v_f A_f = v_h A_h$$

式中: A_f —活塞式阀芯的横截面积 / m^2 ;

v_h —小孔内液体流速 /($m \cdot s^{-1}$);

A_h —小孔横截面积 / m^2 。

由于活塞式阀芯横截面积远大于小孔横截面积, 计算可得, 小孔内液体流速可达 $13.8 m/s$ 。由此可见, 高速流体流过小孔产生压力损失, 导致阀芯上下底表面之间存在较大压差, 是本阀门正常工作的关键机理。

从阀门的内部流场分布来看, 流体流经阀座时, 有 x 负方向的速度分量, 与入口来流发生碰撞, 从而在阀座底部边缘处形成涡流; 流体流出阀座时, 由于阀座的高环形结构, 与阀体上壁面距离近, 在阀座与阀体之间形成“环沟”形区域, 在“环沟”内, 流体形成强涡流, 如图 4 所示, 从图中可以看出, 强涡流填满整个“环沟”, 在“环沟”底部, 气体不易排尽, 易发生气蚀, 从而影响阀门寿命; 另一方面, 流体从阀座出口流向阀门出口管段时, 由于液流落差较大, 流体撞击出口管段底部, 形成较大范围的涡流; 同时, 涡与涡之间相互作用, 流体流动状况不佳, 在进行后续的阀门结构优化设计中, 必须针对这些主要的阻力损失原因, 改善阀门流道, 以改善先导式截止阀的阻力特性。

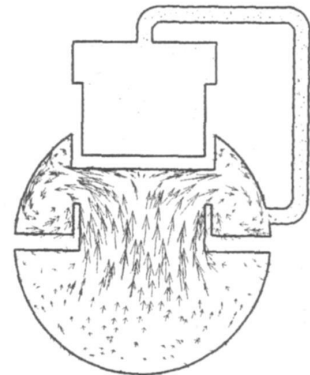


图 4 “环沟”涡流示意图

Figure 4 Sketch map of vortex

3.2 压力场分析

先导式截止阀在全开状态时的压力场分布如图 5 所示。从图中可以看出, 由于局部区域涡流以及流体流动死角的存在, 流体流速降低, 导致在沿流方向有压力增大现象, 同时由于流体流动比较紊乱, 沿流方向整体压降较大。

阀芯上底表面跟下底表面上压力分布不均, 特别是阀芯的下底表面, 中心部分位与出流冲击区, 而周边部分受“环沟”涡流的影响较大, 所以在进行压差计算时, 通过 UDFs 对上下底表面的压强做平均处理后, 计算显示的最终压差为 $24.4 kPa$, 与图 5 所示中心面处

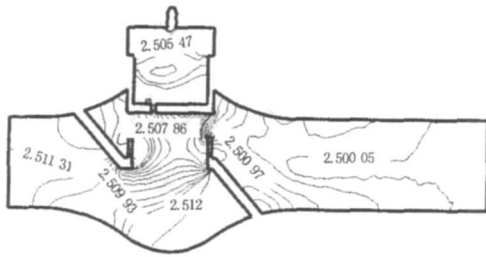


图 5 先导式截止阀中心面压力场 /MPa

Figure 5 Pressure field of central plane

的压差不相等。压差作用在上下底表面上产生 191.5 N 的推力,与活塞的重力以及弹簧的反作用力平衡,使阀芯稳定在全开位置。所以在进行阀门设计过程中,活塞式阀芯与弹簧必须合适选择,才能保证阀门正常工作。

3.3 开启过程动态分析

先导式截止阀的开启是在压差作用力与活塞重力和弹簧反作用力的平衡过程中实现的。在一定的压差作用力下,阀芯上移,弹簧压缩使其反作用力逐渐增大,阀芯受到的合力不断减小,最终压差作用力与重力和弹簧反作用力的合力平衡,实现阀门的开启。数值模拟所得阀芯位移随时间的变化如图 6 所示。

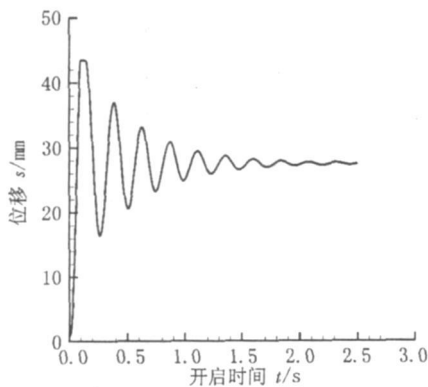


图 6 开启过程阀芯位移图

Figure 6 Displacement of valve core

图 6 中,横坐标 t 表示开启时间,纵坐标 s 表示活塞式阀芯位移。从图中可以看出,先导式截止阀实现开启的过程是一个阻尼震荡过程,活塞式阀芯上移,其重力以及弹簧的弹力作为阻尼逐渐增大,当阻尼大于压差作用力时,合力变为负方向,阀芯速度降低直至反向,阀芯回落,重力和弹簧反作用力之和减小,此时活塞作用力作为阻尼,当阻尼大于重力和弹簧反作用力

之和时,阀芯回落速度逐渐降低并最终正向,实现 1 个震荡周期。通用带执行结构的截止阀,由于需将机械的旋转运动转变为直线运动,启闭时间较长,文中的先导式截止阀达到稳定的开启状态所需要的时间为 2.2 s,响应速度快。

4 结论

1) 由模拟可见,本文的先导式截止阀能利用内部介质流动产生的压差实现阀门的开启而不需要外力作用,阀门的启闭控制通过对微小的先导阀控制实现,无需通用截止阀庞大的执行机构,节能效果明显。

2) 先导式截止阀的活塞式阀芯在达到全开位置时,上下底表面的压差一定,即开启动力一定,造成开启阻力的活塞式阀芯及弹簧在设计过程中必须进行专门的设计与选取,以保证阀门工作时能达到全开状态。

3) 先导式截止阀整个开启过程无通用截止阀执行机构中机械运动的转换,开启时间短,控制响应快,适用于对执行速度要求较高的管路系统。

参考文献 (References):

- [1] 金志江,匡继勇.一种带有先导阀的截止阀:中国,200810120906 [P]. 2009-02-04.
- [2] 金志江,匡继勇.带有先导阀的截止阀:中国,ZL 200820164064 5 [P]. 2009-07-22.
- [3] FERRARI J, LEUTWYLER Z. Fluid flow force measurement under various cavitation state on a globe valve [C]. New York AMER SOC MECHANICAL ENGINEERS, 2009 157-166.
- [4] 袁新明,毛根海,张士乔.阀门流道流场的数值模拟及阻力特性研究 [J]. 水力发电学报,1999 67(4): 60-66.
- [5] MOMPEAN G. Numerical simulation of a turbulent flow near a right-angled corner using the Special non-linear model with RNG K-epsilon equations [J]. Computers & Fluids 1998 27(7): 847-859.
- [6] PAPAGEORGAKIS G C, ASSANIS D N. Comparison of linear and nonlinear RNG-based k-epsilon models for incompressible turbulent flows [J]. Numerical Heat Transfer Part B-fundamentals 1999, 35 (1): 1-22.
- [7] 袁新明,贺治国,毛根海.用 RNG k-epsilon 紊流模型对截止阀三维紊流流动的数值模拟 [J]. 流体机械,2006 34(2): 34-38.
- [8] WU Juan, KOU Ziming. The simulation of hydraulic controllable shut-off valve based on dynamic mesh technology art No. 71271L [J]. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers 2008 7127 1271-1271.
- [9] SR KANTH C, BHASKER C. Flow analysis in valve with moving grids through CFD techniques [J]. Advances in Software Engineering 2009, 40(3): 193-201.