

引用格式: Zhang Weizheng, Cao Shijing, Chen Xiugao. Flow Field Numerical Simulation and Experimental Study of Regulating Valve Based on CFD[J]. Journal of Gansu Sciences, 2019, 31(3): 108-113. [张伟政, 曹石婧, 陈修高. 基于CFD的调节阀流场数值模拟与实验研究[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(3): 108-113.]
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2019.03.019.

基于CFD的调节阀流场数值模拟与实验研究

张伟政, 曹石婧, 陈修高

(兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 为了对某国产调节阀进行优化设计, 利用CFD方法对其内部三维流场进行数值模拟, 根据模拟结果分析了不同开度下调阀内流场流动特性, 得到了速度和压力的可视化结果, 计算了不同开度下调阀流阻系数与流量系数, 绘制了调节阀流量特性曲线, 最后将模拟结果与实验结果进行对比。结果表明: 随着调节阀开度的增大, 流量增大, 流阻减小, 流量系数增大。数值模拟与实验分析结果吻合程度良好, 进一步验证了数值模拟的可靠性, 为后续对阀芯的优化设计提供依据。

关键词 调节阀; 数值模拟; 流量系数; 流量特性

中图分类号: TQ055

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2019)03-0108-06

调节阀作为生产过程自动化的“手脚”, 被广泛应用于石油、化工、冶金等领域, 具有广阔的应用前景^[1]。

目前阀门的设计与改进优化仍然以实验为主, 通过实验结果对阀门结构进行不断改进, 但这就产生了成本高、耗费时间长等缺点。相比之下以数值模拟为主, 少量实验为辅来设计确定方案弥补了单独使用实验研究的缺陷。通过CFD方法进行数值模拟可以直观地反映出流道内流体流动情况及速度压力分布, 同时能够求出阀门的流量特性参数, 据此进行流道优化和设计方案改进, 再通过较少的实验进行校核, 可在短期内开发出符合需求的高质量产品^[2-3]。

随着对调节阀研究的不断深入, 许多学者在不同方向上对调节阀做了一些有益研究。Lisowski等^[4-5]用CFD分析了具有创新开口形状的比例流量控制阀流动特性并通过修改阀芯几何形状来提升性能, 同时也对比例控制阀流量系数进行了分析研究。孙长周等^[6]计算了某流量调节阀由于内部湍流作用而产生的向外传播的噪声, 并提出了通过阀座改造来降低噪声的方案。宋忠荣等^[7]、陶国庆等^[8]对迷宫式调节阀流量特性及最小流量调节阀内部流场进

行了数值模拟。邢建文等^[9]研究了调节阀汽蚀和闪蒸的危害及应对方法。王渭等^[10]针对直通单座调节阀提出了一种柱塞式阀芯型线设计方法。Guillermo等^[11]研究了三维几何结构对调节阀水力特性的影响, 研究发现阀芯出口处采用光顺的几何结构可以提高流量系数, 减少内部空穴、噪音以及振动。综上所述, CFD方法可以广泛应用于阀门的性能预测、数值实验和优化设计当中。

通过数值模拟与实验研究对某国产调节阀进行分析研究。利用CFD软件Fluent模拟了调节阀不同开度下的内流场并分析其内部压力、速度的变化, 通过流量实验对调节阀的流量系数、流阻系数等进行了计算, 为后续对该调节阀的优化设计提供依据。

1 调节阀数值模型

1.1 几何模型

调节阀装配结构如图1所示。此调节阀公称通径为80 mm, 总长480 mm, 公称压力25 MPa。流量特性为等百分比。

利用SolidWorks三维建模软件分别建立10个开度下的模型。为了使调节阀内流场流动稳定, 对

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-12-20

作者简介: 张伟政(1978), 男, 甘肃白银人, 副教授, 研究方向为阀门及流体动密封。E-mail: 43919809384@163.com

通信作者: 曹石婧, E-mail: caosj1992@163.com

<http://www.cnki.net>

调节阀入口前端进行 5 倍管道直径延长,对出口后端进行 10 倍管道直径延长处理,并通过 Workbench 抽取流道。通过前处理软件 ICEM 对模型进行网格划分,采用混合网格处理方法,即入口和出口直管道部分采用六面体结构化网格,中间流体部分采用四面体非结构化网格,并对模型尺寸较小处进行网格加密处理,最终网格数约为 100 万。全开时流道模型及网格模型如图 2 所示。

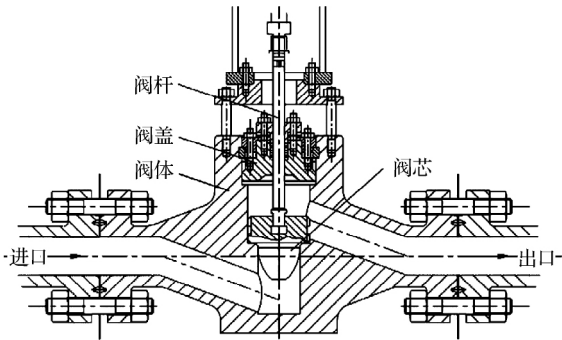


图 1 调节阀结构

Fig.1 Structural diagram of regulating valve



图 2 全开时流道模型及网格

Fig.2 Fully-open flow model and grid chart

1.2 数学模型

(1) 连续性方程 质量守恒定理在流场中的数学表达称为连续性方程。质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

其中: u_x, u_y, u_z 分别为 x, y, z 方向速度分量 (m/s)。

(2) 动量方程 动量守恒定理在流场中的数学表达称为动量方程。动量方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z, \quad (4)$$

其中: f_x, f_y, f_z 分别为 x, y, z 方向上的单位质量

力 (m^2/s)。

2 数值模拟及结果分析

2.1 边界条件及参数设置

选择压力进口和压力出口边界条件,设置压力进口为 1.2 MPa;压力出口为 1.1 MPa,介质为水。湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型。压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法求解,各项收敛残差设为 10^{-5} 。

2.2 模拟结果分析

阀门相邻开度的流场具有相似性,现针对 100%、60%、20% 3 个开度下典型流场进行分析。

图 3、图 4 分别为全开时对称面上的压力云图和速度云图。从图 3 中可看出,进口到出口的压力变化比较均匀,压力最小处出现在阀芯底部及阀门出口与管道连接拐点处。从图 4 可看出,在阀芯底部靠近出口侧及在阀门出口与管道连接处出现了高流速区,高流速区使得靠出口侧阀芯与连接管道的上部受到流体冲击。

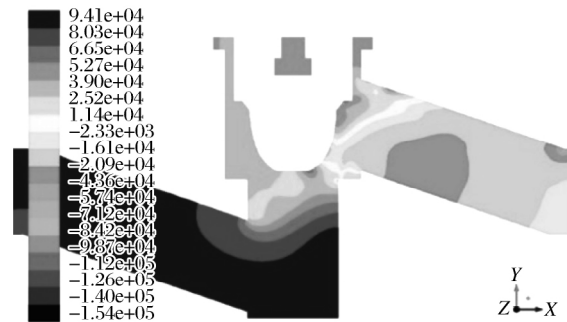


图 3 全开时压力分布云图

Fig.3 Cloud chart of fully-open pressure distribution

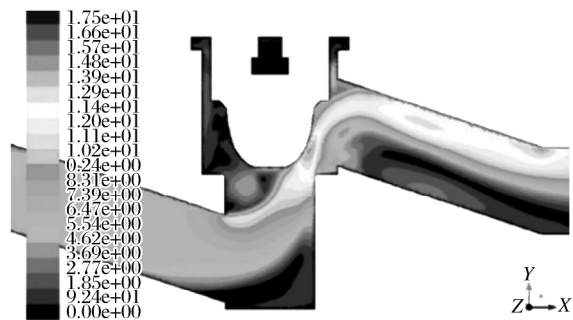


图 4 全开时速度分布云图

Fig.4 Cloud chart of fully-open speed distribution

图 5、图 6 分别为 60% 开度下对称面上的压力云图和速度云图。从图中可看出压力与速度均在节流处变化较明显,流体在经过阀芯底部时,压差变大,速度增加,其中速度在流通面积最小处达到最大值。

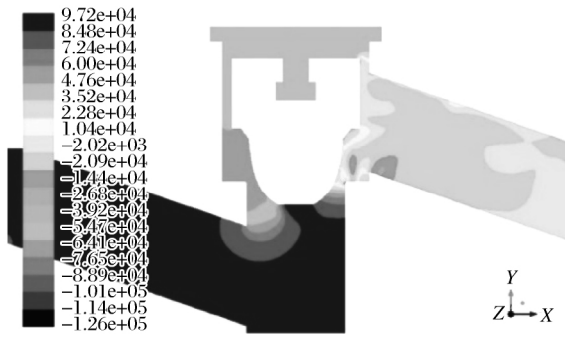


图5 开度为60%压力分布云图

Fig.5 Cloud chart of pressure distribution with 60% opening width

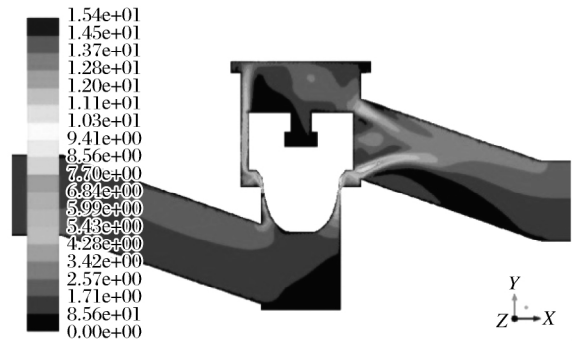


图8 开度为20%速度分布云图

Fig.8 Cloud chart of speed distribution with 20% opening width

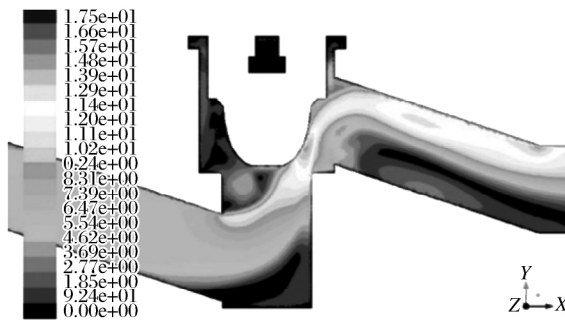


图6 开度为60%速度分布云图

Fig.6 Cloud chart of speed distribution with 60% opening width

图7、图8分别为20%开度下对称面上的压力云图和速度云图。从图7中可看出,阀芯中部由于受到流体冲击出现了局部高压区。在流通面积最小处出现小面积低压区。阀芯底部靠近出口侧存在较明显的压力梯度。从图8中可看出,流体经过阀芯处时,流速随着流通面积的减小而急剧增大,而此时也容易产生空化气蚀等现象损坏阀芯和阀体;当流体通过阀芯后,随着流通面积的增大速度又逐渐降低趋于平稳。

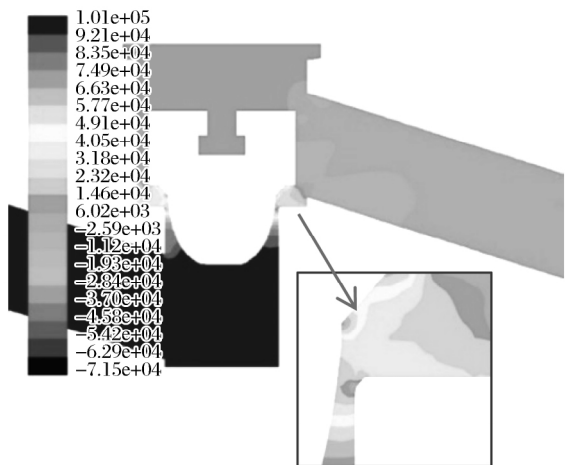


图7 开度为20%压力分布云图

Fig.7 Cloud chart of pressure distribution with 20% opening width

2.3 流量系数与流阻系数的计算

阀门的流量系数是衡量阀门流通能力的一项重要指标,流量系数值越大说明流体经过阀门时的压力损失越小^[12]。

阀门流量系数定义为流体流经阀门产生单位压力损失时流体的流量。

阀门流量系数的计算公式为

$$K_v = 10 \times Q \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_v \times \rho_0}}, \quad (5)$$

其中: K_v 为水流经阀门 a 两端压差为100 kPa时,以 m^3/h 计的流量数值; ΔP_v 为阀门的净压差(kPa); Q 为测得的水流量(m^3/h); ρ 为水的密度(kg/m^3); ρ_0 为15°时水的密度(kg/m^3)。常温时 ρ/ρ_0 取值为1。

一定开度下阀门的流阻系数为定值,只与阀门的结构有关。流阻系数的计算公式为

$$\zeta = \frac{2000 \times \Delta P_v}{\rho \times v^2}, \quad (6)$$

其中: ΔP_v 为阀门的净压差(kPa); v 为管道内水的平均流速(m/s); ρ 为水的密度(kg/m^3)。

根据Fluent的计算结果,可得到阀门前后压差,阀门出口速度,将其代入式(5)、式(6)中可计算得到阀门各开度下的流量系数和流阻系数,如表1所列。

从表1可看出随着开度增大,流量增大,流阻系数减小,流量系数增大。在小开度时,调节阀的流阻系数随开度的增加而急剧减小;大开度至全开时,调节阀的流阻系数变化相对平稳。在开度为10%时,流阻系数达到最大,此时阀内流体能量损失也最大,若进一步优化阀门降低其能量损耗,可从降低其最小开度的能量损耗来考虑。

表2为开度100%和50%时进行不同工况下数值模拟计算的结果。

表 1 不同开度下数值模拟计算结果

Table 1 Calculation result of numerical simulation with different opening widths

开度 /%	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	流阻系数 ζ	流量系数 K_v
10	30.24	71.14	30.36
20	35.28	51.58	35.52
30	41.76	36.67	42.22
40	50.40	26.98	51.39
50	62.28	15.89	64.23
60	76.32	10.28	79.79
70	86.40	7.74	91.90
80	92.52	6.63	99.25
90	96.84	5.98	104.70
100	101.16	5.40	110.18

表 2 不同工况下数值模拟计算结果

Table 2 Calculation result of numerical simulation under different working conditions

开度 /%	压差 /kPa	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	流量系数 K_v
100	125.87	113.40	110.07
100	104.23	104.40	110.36
100	83.14	92.16	110.91
50	119.07	69.12	63.57
50	103.09	64.80	65.86
50	76.96	55.44	65.18

表 3 不同开度下实验计算结果

Table 3 Experimental calculation result with different opening widths

开度 /%	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	净压差 /kPa	流量系数 K_v
10	38.2	103.08	37.62
20	42.5	103.27	41.82
30	46.1	103.08	45.41
40	51.3	102.97	50.55
50	59.3	103.09	58.40
60	68.7	99.48	68.88
70	79.2	98.17	79.93
80	89.0	102.61	87.86
90	94.1	97.97	95.07
100	102.8	104.23	100.69

表 4 不同工况下实验计算结果

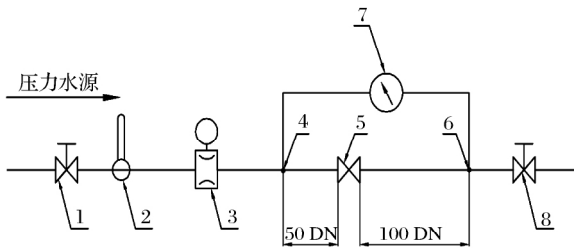
Table 4 Experimental calculation result under different working conditions

开度 /%	压差 /kPa	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	流量系数 K_v
100	125.87	112.8	100.54
100	104.23	102.8	100.69
100	83.14	91.5	100.35
50	119.07	63.6	58.28
50	103.09	59.3	58.40
50	76.96	51.2	58.36

3 实验结果及与模拟对比

3.1 实验装置及结果

实验装置示意图如图 9 所示。



1. 上游调节阀; 2. 温度计; 3. 流量计; 4. 阀前取压孔; 5. 试验阀; 6. 阀后取压孔; 7. 压差测量仪表; 8. 下游调节阀

图 9 实验装置原理图

Fig.9 Schematic diagram of experimental facilities

在不同开度、不同工况下做多次流量测试,实验数据见表 3、表 4。

3.2 实验结果与模拟对比

调节阀的流量特性是调节阀重要指标之一,将不同开度下模拟与实验所得调节阀流量特性曲线进行对比,如图 10 所示。

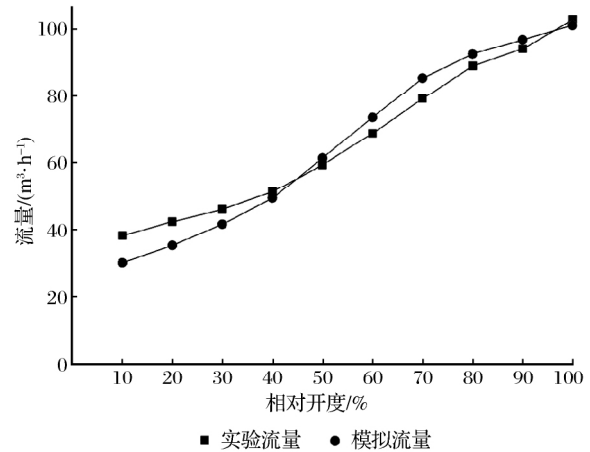


图 10 流量特性模拟与实验对比曲线

Fig.10 Curve diagram of flow characteristic simulation and experimental comparison

从图 10 可看出,实验所得曲线与模拟所得曲线的趋势一致,二者流量均随相对开度的增加而增加,在全开时流量达到最大值。但此调节阀流量特性曲线并不十分符合等百分比流量曲线,尤其在小开度处实验与模拟曲线均与等百分比流量曲线有较大偏

差,整体曲线更接近于抛物线,因此后续还需改进此调节阀阀芯使其流量特性符合等百分比。

调节阀相对开度-流量系数实验与模拟对比曲线如图 11 所示。实验结果与数值模拟结果最大误差在允许范围内。

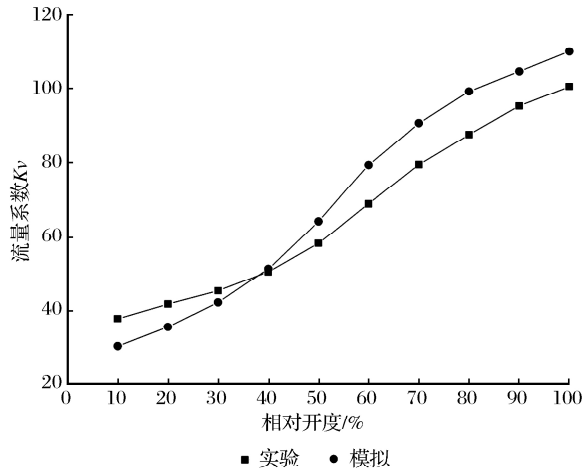


图 11 相对开度-流量系数对比曲线

Fig.11 Curve diagram of relative opening width-flow coefficient comparison

100%开度与 50%开度压降-流量曲线如图 12 所示。从图 12 中可看出,在同一开度下,流量随着压差的增大而增大;在相同压差下,开度越大,流量越大。

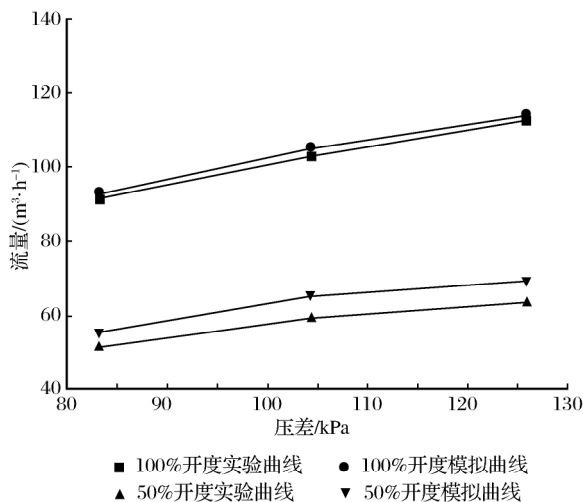


图 12 压降-流量曲线

Fig.12 Curve diagram of pressure drop-flow

4 结论

通过对调节阀不同开度下内流场进行 CFD 数值模拟,得到其内流场速度和压力的可视化结果,计算了流阻系数与流量系数,绘制了调节阀流量特性

曲线,并将模拟结果与实验结果进行了对比,结果表明:

(1) 调节阀内流体流动过程中,随着流通面积减小,压力减小,流速增大。

(2) 随着调节阀开度的增大,流量增大,流阻减小,流量系数增大。在小开度时,调节阀的流阻系数随开度的增加而急剧减小;大开度至全开时,调节阀的流阻系数变化相对平稳。

(3) 在同一开度下,流量随着压差的增大而增大;在相同压差下,开度越大,流量越大。

(4) 模拟结果与实验结果吻合程度良好,验证了模拟的可靠性。由于所研究的调节阀流量特性不符合等百分比而更接近抛物线,因此后续还需要对阀芯结构进行改进。通过研究分析,后续可以借助 CFD 来继续优化改进阀门,以节省实验所耗费的时间和成本。

参考文献:

- [1] 谢玉东,王勇,刘延俊.调节阀技术研究综述[J].化工自动化及仪表,2012,39(9):1111-1114.
- [2] 张伟政,俞树荣,张希恒,等.调节阀内部流场的数值模拟与试验分析[J].兰州理工大学学报,2008,(3):65-68.
- [3] 孙强,郑俊岭.数值模拟分析技术在阀门设计中的应用[J].通用机械,2013,(9):67-69.
- [4] Lisowski E,Grzegorz Filo.CFD Analysis of the Characteristics of a Proportional Flow Control Valve with an Innovative Opening Shape[J].Energy Conversion and Management,2016,(123):15-28.
- [5] Lisowski E,Filo G.Analysis of a Proportional Control Valve Flow Coefficient with the Usage of a CFD Method[J].Flow Measurement and Instrumentation,2017,(53):269-278.
- [6] 孙长周,于新海,宗新,等.内部湍流作用下调节阀外噪声的预测[J].工程热物理学报,2017,38(9):1866-1871.
- [7] 宋忠荣,陶国庆,刘建峰,等.最小流量调节阀内部流场及流量特性模拟研究[J].流体机械,2014,42(5):31-34.
- [8] 陶国庆,刘建峰,张绍华,等.迷宫式调节阀流量特性的数值模拟[J].流体机械,2014,42(11):50-53.
- [9] 邢建文,陶成军,李伟,等.调节阀汽蚀和闪蒸的危害及应对方法[J].油气储运,2017,36(4):477-480.
- [10] 王涓,陈凤官,明友,等.直通单座调节阀柱塞式阀芯型线设计方法[J].流体机械,2016,44(5):37-41,46.
- [11] Guillermo Palau-Salvador, Pablo Gonzalez-Altozano, Jaime Arviza-Valverde. Three-Dimensional Modeling and Geometrical Influence on the Hydraulic Performance of a Control Valve[J].Journal of Fluids Engineering,2008,130(1):11102.
- [12] 杨源泉.阀门设计手册[M].北京:机械工业出版社,2000.

Flow Field Numerical Simulation and Experimental Study of Regulating Valve Based on CFD

Zhang Weizheng, Cao Shijing, Chen Xiugao

(College of Petrochemical Industry, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract For the purpose of optimizing and designing certain domestic adjusting valve, the CFD method is utilized for the numerical simulation of internal 3D fluid field. Based on the simulation result, the flow characteristics of internal flow field for regulating valve with different opening widths is analyzed; the visual results of speed and pressure are worked out; the flow resistance coefficient and flow coefficient of regulating valve with different opening widths are calculated; the flow characteristics curve of regulating valve is drawn up, and the simulation result and experimental result are compared finally. The results show that: As the opening width of regulating valve increases, both the flow and flow coefficient increase, and the flow resistance decreases. The numerical simulation coincides with the experimental analysis result well, which further verifies the reliability of numerical simulation and provides the basis for the subsequent optimization design of the valve core.

Key words Regulating valve; Numerical simulation; Flow coefficient; Flow characteristics

(上接第 107 页)

Dynamic Analysis of Transient Closing Process of Valve Clack of Axial Flow Check Valve

Zhang Xiheng, Wang Yan, Wang Ting, Yu Jianping, Chen Xiugao

(College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract The variation law of inlet medium pressure of axial flow check valve is obtained from the full characteristic curve of centrifugal pump. By CFD software simulation and UDF dynamic grid technology, the author simulated in a dynamic way the two-dimensional flow field in the closing process of axial flow check valve, analyzed the movement law of the valve clack of the check valve in the process from opening to complete closing and the pressure distribution in valve as well as flow state of medium at each time point, and found that during the process of closing, the pressure at the outlet of the medium decreases in cosine form with the increase of the closing time, while the movement velocity of the valve clack becomes variable accelerated motion, and the acceleration increases with parabolic fluctuation. The research conclusion has certain guiding significance for the design of the axial flow check valve.

Key words Axial flow check valve; Dynamic grid; Impact load; Spring damping model; Non-Hertz theory