

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.007

止回阀流动特性与阀芯优化设计

孙 晓, 谢知航

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 止回阀阀芯的优化设计可提高阀体的寿命与使用效果, 通过对止回阀不同过流面结构的工作过程进行模拟和仿真, 发现修改阀瓣与阀芯改变过流面结构, 可以有效改善阀门处水体的整体流动特性。以阀体加工的工艺要求及仿真边界条件的约束为基础, 对阀芯长度与阀瓣进行优化设计, 得出一个能够降低涡流和射流现象、减少水流分层效果的新结构。后期的实验验证了优化后的结构具有较好的性能。

关键词: 止回阀; 优化设计; 流场压力; 过流面结构; 阀芯结构

中图分类号: TH137.52

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)06-0039-06

Flow Characteristics of Check Valves and Optimal Design of Valve Cores

SUN Xiao, XIE Zhihang

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: An optimum design of check valve cores helps to improve the life and service effect of the valve body. It is found that modifying valve clacks and cores to change the flow surface structure can effectively improve the overall flow characteristics of the water body at the valves by simulating the working process of check valves with different flow surface structure. Based on the technological requirements of valve body processing and the constraints of simulation boundary conditions, an optimal design can be established of the valve core length and valve clacks, thus obtaining a new structure that helps to reduce the swirling and jetting phenomena as well as the effect of water flow stratification. Subsequent experiments verify that the optimized structure is characterized with a better performance.

Keywords: check valve; optimal design; flow field pressure; flow surface structure; valve core structure

0 引言

随着我国机械制造业的不断发展, 阀门的绿色制造和设计现已经成为我国机械制造企业发展的趋势之一。而随着人们环保意识的增强, 关于阀门工作噪声的控制和使用效果的优化, 也已经成为先进阀门绿色制造领域里的一个重要研究方向^[1]。但是该方向已有的研究主要注重于阀门整体阀体^[2]与阀门制造材料^[3]的选择等方面, 阀门的优化设计成本较大,

因而在绿色阀门设计中, 关于经济节能方面的研究有待完善。

为了深入探讨阀门内部噪声的产生机理和静音设计的可行性, 同时保证一定的经济性, 本文以一常用的轴流式止回阀为研究对象, 通过优化局部设计回转体中过流面导流罩与阀芯结构的参数, 以达到减少介质流动过程中的涡流和射流现象的目的, 从而降低止回阀噪声, 以期对阀门绿色设计提供一定的理论参

收稿日期: 2018-01-22

作者简介: 孙 晓 (1972-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事机电控制方面的教学与研究,

E-mail: sxbug@163.com

考依据。

1 止回阀工作原理及其结构特点

止回阀主要由阀体、阀杆及弹簧、导流面、导向弹簧及阀瓣等组成,图1所示为止回阀的结构剖面SolidWorks模型图。

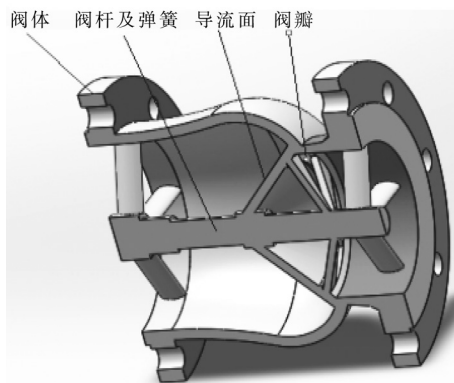


图1 止回阀结构图

Fig.1 Check valve structure chart

止回阀的工作原理如下:当止回阀工作时,流动介质克服阀瓣弹簧产生的阻力由入口端进入阀体内部,此时流体的截面积减少,导致流体的流速增加;当阀瓣达到全开位置时,流体的流速即达到全开安全速度,此后阀瓣的运动轨迹不再随流量的增加而发生变化。当流通介质的压力低于弹簧的反作用力、前后端压力不能形成稳定的压差状态时,阀瓣在弹簧的作用下反向运动,此时流动介质也快速回流,通过导流面时由于面积减少的流通面形成文丘里结构状态,导致流动冲击惯性减小,直至阀门完全关闭。

止回阀工作过程中,依托其较短的关闭行程提供较小的阀瓣回程惯性,减少回流流量。通过减少回流过程中流动介质的流通面积,可以改善水击强度,从而可有效地保护止回阀和管网系统。

可见,阀芯内部的不同导流体结构,引起的内部紊流状态(角涡的产生)^[4]变化是非常明显的,因此,本研究通过对阀芯和阀瓣等主要结构因素进行分析与改进,优化其工作效果。

2 噪声产生机理分析

2.1 阀体噪声产生机理

止回阀工作时,导致噪声产生的因素有共振、湍流和喷注。共振产生噪声,主要是指阀体与其零部件的固有频率与介质流经阀体产生涡流、射流和湍流波动^[5]的振动频率相等,从而产生了共振现象而导致的噪声。湍流产生噪声,主要是指由于阀门流场状态

为湍流,当流体受到过流面面积变化时会产生阻碍作用,从而形成大小不一的涡流和射流现象^[5],这种流场会不断形成和脱落,在脱落过程中会释放能量给周围流场,直到接触壁面,从而形成冲击和噪声。喷注产生噪声^[6],主要是指流体由大体积喷口进入小体积流域时,由于缩流断面^[7]的节流作用,流体速度剧增,阀门下流体与流速较低的介质产生湍流混合,从而产生噪声。考虑目前研究的阀门有低流速阀门类型,故主要针对湍流因素进行分析。由于这种振动的高频特性使得阀体产生了较大的水平应力^[8],加速了阀体和连接件的疲劳破坏。为了缓解这种由于涡流、湍流波动以及动态分层导致的振动引起的噪声现象,考虑从结构入手改变涡流、湍流及动态分层等现象的程度,从而抑制噪声。

根据 Powell 理论^[9],对于任何低于马赫数且等熵绝热的流体运动,涡是产生流体动力场与辐射声场的唯一源,由式(1)可知,右侧 $\omega \times \mathbf{u}$ 是产生流体噪声的源,涡量越大源项越强,产生的噪声越大。

$$\frac{1}{c_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = p_0 \nabla \cdot (\omega \times \mathbf{u}) \quad (1)$$

式中: c_0 为参考介质流速;

p 为声压, P_0 为参考声压常数;

t 为时间;

∇ 为梯度下降量;

ω 为涡量;

\mathbf{u} 为流体质点速度矢量。

涡流噪声的声功率 W 可以使用如下近似公式进行估算:

$$W = k \frac{\Delta p^3 D^2}{\rho^2 c_0^3} \quad (2)$$

式中: ρ 为介质密度;

D 为截面直径;

Δp 为前后压力差;

k 为涡噪系数。

因此,可以在保证阀门流量表达的前提下,适当地改变雷诺系数以降低流体流速,并减少流道中的流动阻力,从而降低阀门噪声。

通过对止回阀阀体内部的流场进行仿真,以判断其内部流动的工作性能。通过优化止回阀阀体内部结构,降低流阻系数 ζ ,减少流通阻力和涡流现象,从而达到静音降噪的效果。

流阻系数的计算式如下:

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \quad (3)$$

式中 v 为平均流速。

通过上述式子可知, 可以通过对阀门过流面结构进行优化, 降低流阻系数 ζ , 减少流道流动阻力, 从而减少因涡流量过大引起的噪声。

2.2 阀体工作环境建模

在 Fluent 模拟^[10-11]中, 采用收敛性和精准性较高的标准 $k-\epsilon$ 模型, 扩散项采用中心差分格式, 其他项采用二阶迎风格式离散, 速度与压力的耦合算法采用 SIMPLE 进行运算。

阀体工作环境建模时, 进口边界条件设定为速度进口, 出口条件设定为自由出口, 其余采用默认的边界条件进行设定。液体的初始进口速度为 10 m/s; 介质为水, 其密度为 998.2 kg/m^3 ; 动力黏度为 $\mu=1.003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; 运动黏度 $\nu=1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.3 过流面结构对工作性能影响分析

正常工况下, 普通止回阀正常工作时的压力与速度分布云图如图 2 和 3 所示。

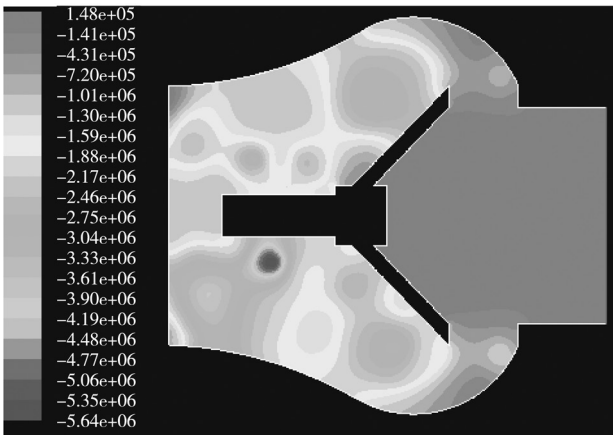


图 2 普通止回阀压力云图

Fig. 2 Pressure cloud chart of normal check valves

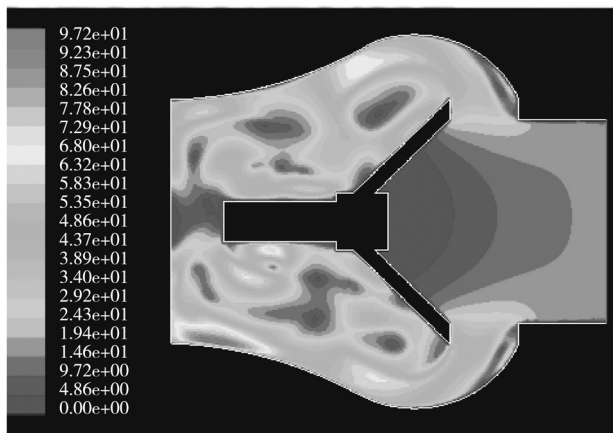


图 3 普通止回阀速度云图

Fig. 3 Velocity cloud chart of normal check valves

由图 2 和 3 可以得知, 该结构的止回阀在工作过程中, 压力和速度的分布存在较大的不均匀性, 导致

过流面产生的涡流和射流现象较为明显, 大量紊流必然引起较大的水损和冲击, 导致噪声增加, 对阀体工作性能有严重的影响。

3 过流面与阀瓣结构优化设计分析

阀门内部导流罩的设计, 直接影响了水流流动过程中因文丘里收敛结构而产生的平稳流动状态的性能, 合理的导流罩结构可以减少湍流、水损和流体阻力。优化限定条件如下: 首先, 限定阀瓣与导流罩交界处的横纵轴坐标值相等、切线斜率相等以及曲率相等, 简称三个相等^[12]; 其次, 尾椎区定半径与定点的角度不大于 40 度。

本研究采用等强度线源均匀叠加法^[13]描述阀瓣与导流体过流面的几何状态。即通过改变阀门中的阀瓣最大半径与阀芯长度的比值进行模拟分析, 观察该比值变化对流体流动特性的影响, 并基于其特性对阀芯进行优化设计。

阀瓣长度与导流罩的有效半径对应关系计算公式如下:

$$r^2 = \frac{R^2}{2L} \left(\sqrt{x^2 + r^2} - \sqrt{(x-L)^2 + r^2} \right) + \frac{R^2}{2} \quad (4)$$

式中: r 为阀瓣与导流罩的有效半径;

R 为最大阀瓣半径;

x 为阀瓣与导流罩表面对应的水平坐标;

L 为阀瓣顶端到尾椎的长度。

设计参数的线源法示意图见图 4。

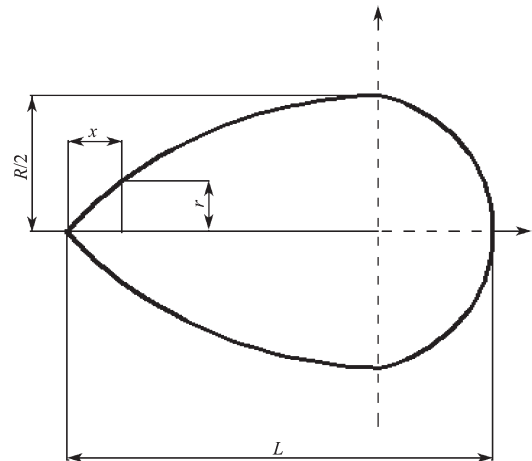


图 4 线源法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the line source method

设定导流面为线性方程, 分别与已知条件三相等和尾椎定点参数联立方程得到该方程的控制常数, 得到优化设计方程, 从而得到优化定点坐标。约束条件分别如下: 1) 阀瓣与导流罩斜率相等; 2) 阀瓣与导流罩曲率相等; 3) 阀瓣与导流罩曲面相等。

并设定优化目标函数为 $f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3$ ，分别求 $f(x)=r$ 、 $f^{(1)}(x)=dr/dx$ 、 $f^{(2)}(x)=d^2r/dx^2$ ，并给定尾椎固定角度作为约束常数。

3.1 模型优化及动态仿真

增加阀芯长度与阀瓣最大半径之比，能够使整个过流面趋向于一个完整的“水滴”结构，但是过大的比例也会导致过流面面积过大等问题，这是一个相互制约的条件。

针对常用的 GLH41 类止回阀进行优化，其最大阀芯半径为 75 mm，阀芯长度为 156 mm。

图 5 和 6 为轴流式阀门工作状态的止回阀压力与速度云图。

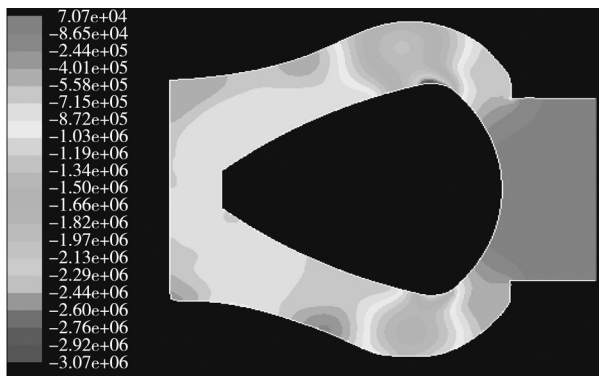


图 5 轴流式止回阀压力云图

Fig. 5 Pressure cloud chart of axial flow check valves

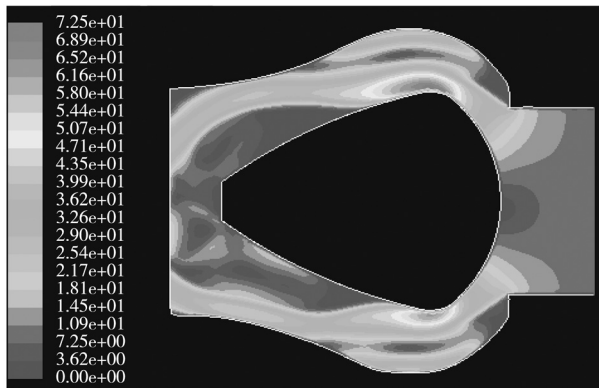


图 6 轴流式止回阀速度云图

Fig. 6 Velocity cloud chart of axial flow check valves

由图 5 和 6 可以得知，在阀瓣的入水口处形成了较大的压力团范围，尾椎部分的压力与水流分层较为明显，特别是尾椎部分速度降速较大，产生了比较显著的速度损失，部分位置产生了较为明显的射流，极有可能是因为过流面流线型不足，无法对水流进行延缓分层，抑制压力差云团分布过多而产生的涡流现象。其产生的噪声和震动对阀门的工作寿命和工作性能都有负面影响。

对 x 、 r 之比的变化进行列表优化，并建模分析。采用上述的优化方式与边界条件进行计算，得出 r 与

x 的线性方程，并代入计算（表中采用直径 d 的表达形式），可得出主要优化点数据，如表 1 所示。

表 1 主要优化点数据

Table 1 Main optimization point data

坐标点	坐标值		坐标点	坐标值	
	d	x		d	x
1	18.15	0	12	55.07	132.31
2	24.23	10.32	13	51.01	135.32
3	29.41	20.21	14	48.41	138.91
4	31.79	33.32	15	45.79	140.32
5	33.35	46.72	16	41.35	143.72
6	36.90	59.05	17	36.91	146.05
7	39.59	74.50	18	30.59	149.50
8	47.41	89.65	19	23.41	151.65
9	53.32	101.31	20	13.32	153.31
10	54.47	119.71	21	2.37	154.71
11	55.79	131.21	22	0	155.98

将上述坐标点导入制图软件中，构造出优化后的导流罩与阀瓣过流面的结构，并导入 ICFEM 中划分网格，再进行 Fluent 模拟，得出其仿真图形，所得优化后止回阀的压力分布云图如图 7 所示，速度分布云图如图 8 所示。

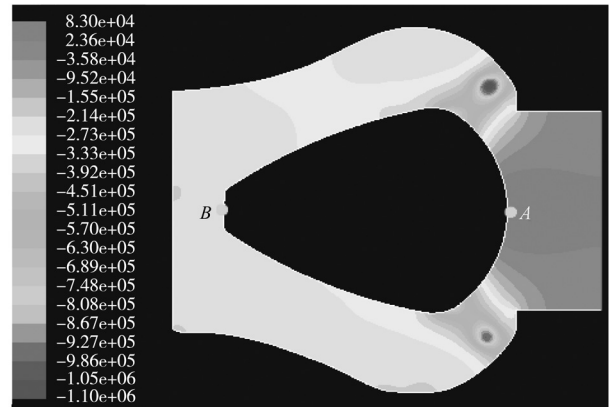


图 7 优化后止回阀的压力云图

Fig. 7 Optimized pressure cloud chart of check valves

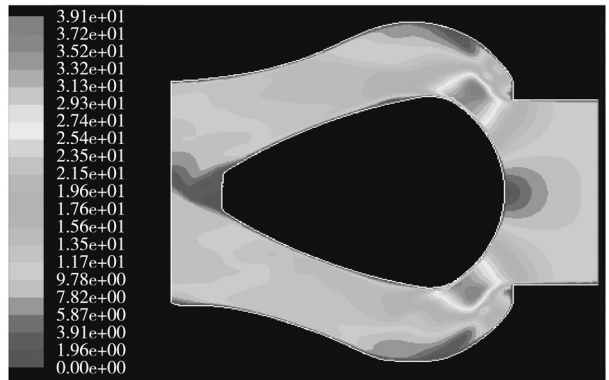


图 8 优化后止回阀的速度云图

Fig. 8 Optimized velocity chart of check valves

图中 A、B 点分别为前后口压力模拟取值点，可见，经过优化阀瓣与导流罩曲率后，阀瓣周径位置有一个

较大的水击变化,可通过改善弧度比例以得到更为平稳的水流特性。通过改变弧度比例变化,角涡开始减少,尾部水流分层也更为平缓,比未优化之前有更为平稳的水流特性,水流速度损失较小。

3.2 优化结果分析

通过对比结构优化前后的模拟云图可知,优化后阀体内部的压力梯度减小,水压分布较为均匀。优化后的过流面曲率减小,线性过度光滑且连续,整个流通过程较为稳定,水流速度损失较小,加强了止回阀的工作能力,涡流和射流现象明显降低。

4 实验验证及结果分析

为了证明仿真模拟与实际工作情况相吻合,通过对比原阀门的数值模拟数据与实验数据的误差度来判断其合理性,以便推断模拟优化后结构的可实现性。阀门测试实验装置使用本学院实验室的污水循环处理装置,如图9所示。实验装置的主要结构包括水箱、水泵、流量监控器、球阀、控制阀、压力传感器和显示器等。

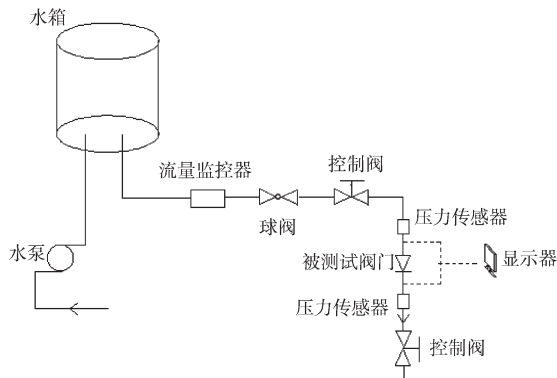


图9 阀门测试装置结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of valve testing devices

阀门测试装置的工作原理如下:调节控制阀的开度,确保被测阀门入水口的流量与压力达到稳定值;在规定的时间内,利用传感器和流量器观察到流量与压力值平稳后,通过控制阀改变其前后压力差,并记录流阻系数随阀门压力差的变化;将所得到的数据进行拟合,得到特征曲线图,即可反映出在阀门全开状态下的特性规律。

流阻系数为流体在流动过程中介质速度因流体阻力引起的速度损失的无量纲表达,具体数值可由阀门前后压力差和介质平均流速之比获得:

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \quad (5)$$

为了证明优化后的止回阀有更好的性能,通过对比同压力差情况下的流阻系数大小,对阀门的性能进

行判断,所得流阻系数与阀门优化前后压力差的关系如图10所示。

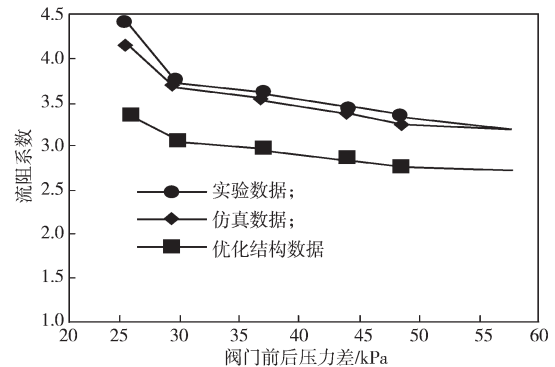


图10 流阻系数与阀门优化前后压力差关系曲线

Fig. 10 Relation curves of flow resistance coefficients and pressure differences before and after opening valves

分析图10所示各流阻系数与阀门优化前后压力差的关系曲线可以得知,原止回阀的实验数据和仿真数据拟合度较高,通过计算5点的平均值可得其误差不超过5%,证明该数值模拟符合实际情况;同时,优化结构后的止回阀在开度变化过程中,内部流动状态较未优化前更为稳定,流阻系数总体下降,且变化趋势更平稳。可见,优化后的结构更有利于阀门健康工作,有效降低了噪声水平数值,增加了流体的流动效率。

5 结语

本文基于GLH41类标准止回阀,对止回阀阀芯过流面进行了优化设计。利用改变回转体阀芯长度与阀瓣半径之比,并通过汇源法得到优化数据,对原止回阀进行不同压力的流阻实验,验证了模拟装置的可实现性。

通过实验和模拟数据得知:增加长度与阀瓣半径之比后,过流面垂直梯度变化更为平稳,过流面曲率的下降降低了水流冲击面积,能够缓解水击噪声现象。优化后的结构也使得尾椎部分和入水口部分的射流现象减少,涡流团的面积与数量减小。

在稳定的流速状态下,对不同结构的止回阀进行研究表明,优化后的结构在正常工作情况下,对由于涡流和射流引起的噪声控制程度优于原始结构,有效地减少了由于上述几种情况引起的震动、噪声及阀座的疲劳损坏。这可为以后的阀门设计和水流监测装置的设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] 姬志国. 阀门绿色制造技术分析[J]. 智能城市,

- 2017(12): 105, 107.
JI Zhiguo. Green Manufacturing Technology Analysis of Valves[J]. Intelligent City, 2017(12): 105, 107.
- [2] 刘 飞. 绿色制造的理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 17-25.
LIU Fei. Theory and Technology of Green Manufacturing [M]. Beijing: Science Press, 2007: 17-25.
- [3] 胡 鲲. 解析国外先进阀门标准 [J]. 中国标准导报, 2016, 15(4): 66.
HU Kun. Analysis of Advanced Valve Standards Abroad[J]. China Quality and Standards Review, 2016, 15(4): 66.
- [4] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 10-20.
WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 10-20.
- [5] 高学平. 高等流体力学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2005: 144-175.
GAO Xueping. Advanced Fluid Mechanics[M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2005: 144-175.
- [6] 杜 强, 陈次昌, 季全凯, 等. 防水锤球形止回阀流场数值模拟和试验研究 [J]. 阀门, 2006(4): 14-17
DU Qiang, CHEN Cichang, JI Quankai, et al. The Study About Numerical Simulation and Examination for Flow Field Anti-Water Hammer Spherical Check Valve [J]. Valve, 2006(4): 14-17
- [7] 陈再富. 一种节能止回阀的研制及应用 [J]. 冶金动力, 2006, 14(2): 31-32.
CHEN Zaifu. Development and Application of an Energy Saving Check Valve[J]. Metallurgical Power, 2006, 14(2): 31-32.
- [8] 符永正, 刘万岭. 限流止回阀的工作原理及应用 [J]. 阀门, 2005(2): 36-37.
FU Yongzheng, LIU Wanling. Working Principle and Application of Flow Restricted Check Valve[J]. Valve, 2005(2): 36-37.
- [9] 李贺军, 蔡 勇, 向北平, 等. 梭式止回阀关闭时的流场特性研究 [J]. 机械设计与制造, 2012(6): 226-228.
LI Hejun, CAI Yong, XIANG Beiping, et al. Study on Flow Field Characteristics of Shuttle Check Valves in Shut Process[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2012(6): 226-228.
- [10] 单礼伟, 张风华, 唐川林, 等. 基于正交实验的壅塞空化器数值试验 [J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1), 34-37.
SHAN Liwei, ZHANG Fenghua, TANG Chuanlin. et al. Numerical Simulation for Choking Cavitator Based on Orthogonal Experiment[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1), 34-37.
- [11] 张 祥, 张仕进, 余西伟, 等. 基于试验模态法的直驱式超高压泵动态特性研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(3): 24-29.
ZHANG Xiang, ZHANG Shijin, YU Xiwei, et al. On the Dynamic Characteristics of Direct-Driven Super Pressure Pumps Based on an Experimental Modal Analysis[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(3): 24-29.
- [12] 付文智, 李明哲, 李东平, 等. 液压锥阀的数值模拟 [J]. 机床与液压, 2004(2): 44-46.
FU Wenzhi, LI Mingzhe, LI Dongping, et al. Numerical Simulation of Hydraulic Poppet Valve[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2004(2): 44-46.
- [13] WU Z H, HUANG N E. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-Assisted Data Analysis Method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.

(责任编辑: 廖友媛)