

引用格式: Zhang Xiheng, Bai Yazhou, Chen Xiugao. Research on Numerical Analysis of Internal Structure Optimization and Energy Dissipation Rate of Cone Valve[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(6): 107-111. [张希恒, 白亚州, 陈修高. 锥形阀内部结构优化及消能率的研究数值分析[J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(6): 107-111.] doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2018.06.021.

锥形阀内部结构优化及消能率的研究数值分析

张希恒, 白亚州, 陈修高

(兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 在水利水电系统中, 锥形阀应用于较高水头、大流量工况下的消能控流工作, 其主要作用是能量的消除, 所以设计优化锥形阀结构使其具有较高消能率是主要任务。针对这一问题, 现给阀门导流罩中加入消能孔板, 通过 CFD 的方法对 2 种不同结构的锥形阀内部流场进行数值分析。研究结果表明, 在满足工程实际需求的前提下, 加消能孔板的锥形阀消能效果得到很大提高, 在各开度下消能率均能达到 96% 以上。

关键词 锥形阀; 开度; 内部结构; 消能率

中图分类号: TE952

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2018)06-0107-05

锥形阀是一种用于中、高水头下的消能控流阀, 广泛应用于水利水电系统中, 其主要作用是流量调节和能量消除。在水利水电工程中, 泄水消能建筑占了建筑成本的很大一部分, 所以消能设备在同等条件下达到最好的效果具有重要的工程应用价值。锥形阀一般应用于较高水头、大流量下的消能控流工作, 其内部流场极为复杂, 通过内部消能结构催生高速流撞击、漩涡、摩擦、扩散等现象, 以此将过大的初流能量转化消除^[1-2]。锥形阀处于半淹没工况下, 上游水流经过锥形阀的作用将静压能转化为动压能, 并冲击下游的消能池等设施, 如果不及时将动压能消除将会对下游建筑物、下游河床等造成严重的损害。所以为了保证水利枢纽正常运行消除水库泄放的流水能量, 水流消能可采用修建消能工和设置消能阀 2 种办法。在大多数情况下, 消能阀相比消能工有节约投资、节省空间、运行稳定、可连续调节流量等优点, 因而消能阀在大坝生态放流等方面的应用越来越广。现对锥形阀结构进行结构优化, 使较高水头的水流在经过锥形阀时, 达到良好的消能的效果。

随着对锥形阀研究的不断深入, 罗毅等^[3]通过实验对锥形阀的流态及消能率做了研究; Dalin 等^[4]

给锥形阀创新的加了金属罩, 并对其效能率做了研究; 李颖等^[5]对锥形阀内部流场进行了仿真计算, 并对其结构进行了优化设计; 郑淑娟等^[6]通过数值模拟计算得到了更为准确的液动力计算公式; 喻哲钦等^[7]通过计算流体力学的数值模拟计算方法对 3 种不同结构的锥形阀进行了研究, 并研究了其消能效果; 秦武等^[8]通过 CFD 数值模拟的方法研究了锥形阀全开时的内部问题并对其内部结构进行了优化; Kelly^[9]通过研究表明内部结构尺寸对锥形阀整体消能效果有着很大的影响。研究将利用流体动力学理论和 Fluent 软件, 研究在不同结构、不同开度下的流动特性, 并根据相关公式计算拟合出在不同结构下的消能率曲线。

1 数值模型的建立

1.1 几何模型

不带消能孔板导流罩的锥形阀装配体模型如图 1 所示, 带消能孔板导流罩的锥形阀装配体模型如图 2 所示, 阀门公称直径为 DN1000, 介质为水, 高压介质从左侧流入, 右侧流出。

运用 SolidWorks 软件建立开度分别为 10%、30%、50%、70%、80%、90% 和 100% 的流道模型。

收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-06-25

作者简介: 张希恒(1966-), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 研究方向为阀门设计与密封技术。E-mail: 124589926@qq.com

用 CFD 前处理软件 ICEM 进行网格划分, 网格采用结构网格和非结构网格混合网格画法, 并对内部细节进行局部加密处理。

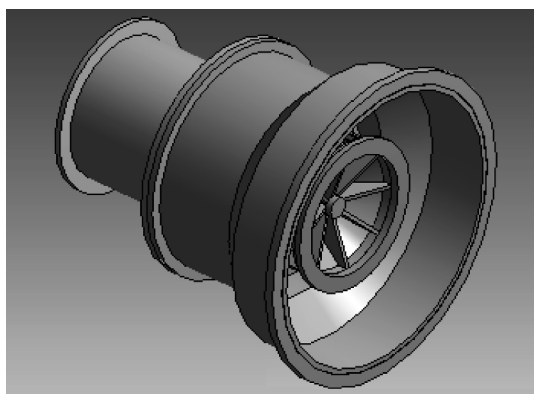


图 1 不带消能孔板导流罩的锥形阀

Fig.1 Cone valve without energy dissipation orifice plate fairing

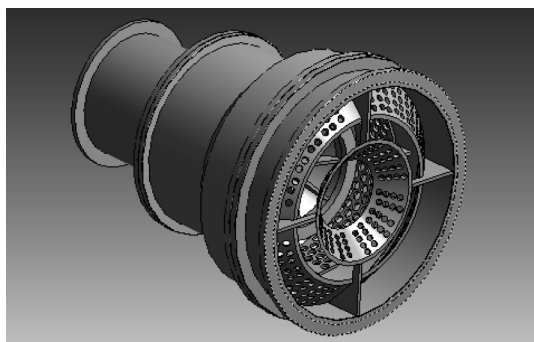


图 2 带消能孔板导流罩的锥形阀

Fig.2 Cone valve with energy dissipation orifice plate fairing

1.2 数学模型

(1) 质量守恒方程(连续性方程) 质量守恒方程描述的是在任意区域内守恒量总量的改变, 等于从边界进入或离去的数量, 守恒量不能够增加或减少, 只能从一个位置迁移到另外的一个位置, 由此得出质量守恒方程的积分式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dx dy dz + \iint_A \rho V n dA = 0, \quad (1)$$

其中: V 为控制体; A 为控制面。

根据奥高公式^[10], 连续性方程在直角坐标系下的微分形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量 (m/s)。

(2) 动量方程 动量方程式是根据牛顿第二定律及 N-S 方程推导出来的, 概括为: 对一给定的流

体系统, 其动量的时间变化率等于作用于其上的外力总和。动量方程^[11] 可表示为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \quad (3)$$

其中: p 是静压; ρg_i 和 F_i 分别是 i 方向上的重力体积力和外部体积力。

2 计算流量系数及消能率

2.1 流量系数计算

阀门的流量系数只与阀门的结构有关, 流量系数在一定开度下是一个定值, 与介质的种类没有关系, 以水为介质的流量系数计算公式为

$$K_V = \frac{Q}{N_1 F_P F_R} \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta P}}, \quad (4)$$

其中: Q 为体积流量 (m^3/s); F_P 表示管道的几何系数, 未加附属管道时, $F_P = 1$; F_R 为雷诺系数, 当阀门内部达到紊流状态时, $F_R = 1$; ρ/ρ_0 表示相对密度, $\rho/\rho_0 = 1$; 对于不可压缩流体, $N_1 = 0.1$ 。

2.2 消能率计算

锥形阀作为在线式调流阀, 不但应具有调流功能, 还应具有良好的消能功能。锥形阀后面加了消能导流罩目的是更好的达到导流和消能效果。锥形阀后面加导流罩, 使出口高速水流与导流片发生碰撞, 消减高速水头, 消除能量。消能率采用能量守恒定律, 根据伯努利方程, 消能率数值的大小采用锥形阀阀前总能量与阀后总能量的差值与初始能量的比值来确定, 消能率的计算公式为

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% = \frac{P_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \left(P_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right)}{P_1 + \frac{V_1^2}{2g}} \times 100\%, \quad (5)$$

其中: E_1 表示阀前总能量 (mH_2O); E_2 表示阀后总能量 (mH_2O); P_1 表示阀前静压 (mH_2O); P_2 表示阀后静压 (mH_2O); V_1 表示进口速度 (m/s); V_2 表示出口速度 (m/s)。

3 数值模拟及结果分析

3.1 设置边界条件

进行 Fluent 仿真模拟计算时, 进口边界条件设置为压力进口, 数值为 1.6 MPa, 出口设置为压力出

口,数值为标准大气压,内部阀芯、孔套、套筒等结构设置为非流通的 wall 边界。

3.2 FLUENT 仿真模拟结果分析

由于阀门在开度比较接近的条件下流动状态没有明显的区别,所以仅取几个具有代表性的开度用以显示阀门内部流场分布,现对 2 种不同结构的锥形阀进行研究。重点研究带消能孔板导流罩的锥形阀,由于篇幅限制现只展现部分压力、速度云图:

(1) 当阀门开度为 10% 时,阀门开度很小导致阀门进出口压差很大,开度为 10% 的阀门压力分布云图如图 3 所示。可以看出从阀门入口到阀门出口压降很明显,压力依次减之。出口出达到了最小值。10% 开度的速度云图如图 4 所示,水流与消能孔板发生作用,但对冲作用不是很明显。



图 3 10%开度的压力云图

Fig.3 Pressure cloud chart with 10% opening

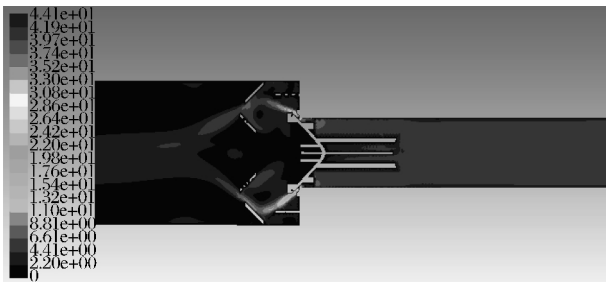


图 4 10%开度的速度云图

Fig.4 Velocity cloud chart with 10% opening

(2) 当阀门开度为 80% 时,阀门开度增大阀体内部压力发生变化,如图 5 所示,压降相对明显,在导流罩导流片处的压力增大。图 6 是内部流场速度云图,由图 6 可以看出水流对冲效果比较明显,出口流速较高,水流高速撞击导流片之后速度降低比较明显。

(3) 当阀门开度为 100% 时,压力云图如图 7 所示,速度云图如图 8 所示。阀门全开时流速比较均匀,经过导流片时速度衰减比较明显,流体速度方向有对冲现象,这也是带有导流罩所特有的消能特征。

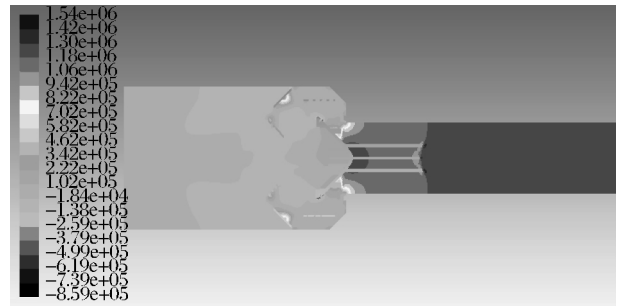


图 5 80%开度的压力云图

Fig.5 Pressure cloud chart with 80% opening

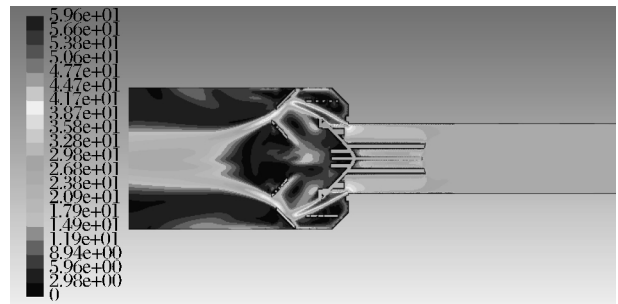


图 6 80%开度的速度云图

Fig.6 Velocity cloud chart with 80% opening

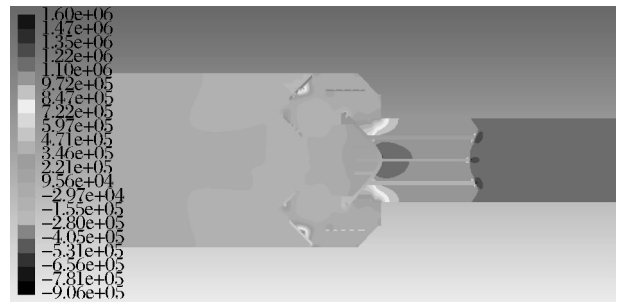


图 7 100%开度的压力云图

Fig.7 Pressure cloud chart with 100% opening

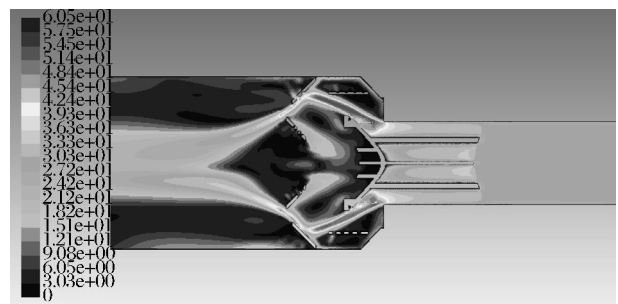


图 8 100%开度的速度云图

Fig.8 Velocity cloud chart with 100% opening

根据 Fluent 数值模拟分析结果,可以得出不带导流罩和带导流罩阀门的压差以及流速等,带入式(4)和式(5)中可以分别计算各开度下的流量系数、消能率,部分开度计算结果如表 1 所列。

表1 流量系数与消能率计算结果

Table 1 Calculation results of flow coefficient and energy dissipation rate

阀门	开度/%	10	30	50	70	90	100
不带导流罩	流量系数 $K_v/(m^3 \cdot s^{-1})$	3 676.8	8 139.1	12 199.6	16 796.1	21 382.6	21 284.2
	消能率/%	94.3	92.8	85.5	78.6	73.6	61.7
带导流罩	流量系数 $K_v/(m^3 \cdot s^{-1})$	3 817.4	8 401.5	12 096.9	16 185.4	20 402.4	19 990.9
	消能率/%	99.9	99.3	98.4	97.5	96.4	96.5

固定锥形阀带与不带导流罩流量系数对比见图9。由图9可以看出,流量系数在90%开度时达到最大,当开度再继续增大时流量系数不再增大,这可能是发生了阻塞流,阻塞流判定公式为

$$\Delta p \geq F_L^2 (p_1 - F_F p_V), \quad (6)$$

其中: $F_L = \sqrt{(P_1 - P_2)/(P_1 - P_{VC})}$, $P_{VC} = F_F \times P_V$, $F_F = 0.96 - 0.28 \times \sqrt{P_V/P_C}$; P_1 表示阀前压力; P_2 表示阀后压力; P_{VC} 表示产生阻塞流时缩流断面的压力; F_L 表示液体压力恢复系数; F_F 表示液体临界压力比系数; P_V 表示液体饱和蒸汽压力; P_C 表示液体临界压力。

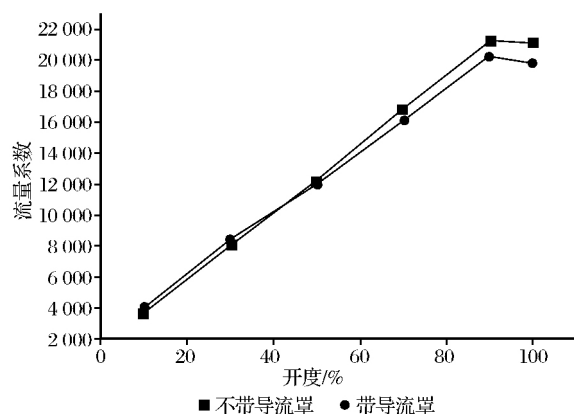


图9 流量系数曲线对比

Fig.9 Comparison chart of flow coefficient curve

根据公式(6)计算得,上、下口压力差值等于产生阻流时的控制阀压降,为阻塞流状态,所以当锥形阀>90%开度时发生了阻塞流,使得流量系数不再继续增大。

带导流罩结构的锥形阀流量系数比不带导流罩的在70%开度以上时偏小,这是因为导流罩中的孔板结构虽然在流通面积上和不带导流罩的相同,但是在开度大时由于流量的增大,孔板结构依然对阀门的流通能力产生了一定的影响,但是带导流罩的最大流量系数达到20 402.4,已经满足工程实际需求,所以流量系数上的差异可以忽略不计。

锥形阀带与不带导流罩二者之间消能率的对比见图10。由图10可得二者在10%开度时的消能率

差值最小,随着开度的增大消能率差值也随之增大,全开时达到最大。由于小开度时,阀门本身流阻很大,流量较小,使得不带导流罩的锥形阀由于自身的流阻产生了很好的消能效果,所以小开度时的消能率相差较小,当开度增大时,流阻减小,流量增大,此时导流罩孔板结构对消能效果起到了决定性的作用,使得二者之间的消能率相差增大。由此可见,导流罩的孔板结构很好的增大了锥形阀消能效果,所以对锥形阀加导流罩孔板结构增大消能率是准确可行的。

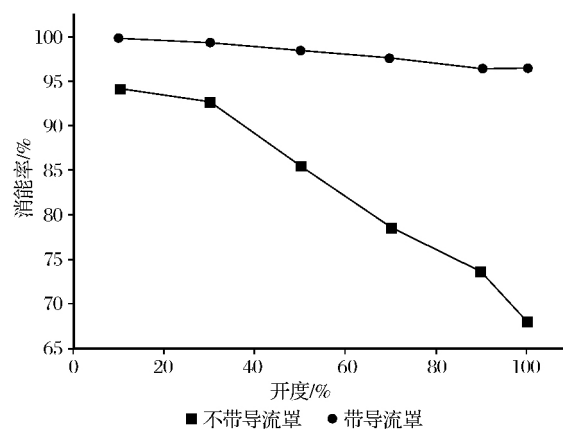


图10 消能率对比曲线

Fig.10 Contrast curve graph of energy dissipation rate

4 结论

通过对锥形阀内部结构优化及数值分析,得出结论如下:

(1) 在相同的工况状态下,随着阀门开度的增加,带消能孔板导流罩的锥形阀与不带消能孔板导流罩的锥形阀在90%开度以后,流量系数都不再继续增大,通过计算得知阀门此时发生了阻塞流。

(2) 在开度<70%时,带消能孔板导流罩锥形阀的流量系数与不带消能孔板导流罩锥形阀的流量系数基本吻合;在开度>70%时,带消能孔板导流罩锥形阀的流量系数略小于不带消能孔板导流罩锥形阀的流量系数,但最大流量系数达到20 402.4,满足工程实际需求。

(3) 在相同的工况状态下,带消能孔板导流罩的锥形阀的消能率在大开度下明显高于不带消能孔板导流罩。消能孔板结构对消能效果起到了决定性的作用,所以对锥形阀导流罩加孔板结构的优化设计是准确可行的。

参考文献:

- [1] 陈千文,易忠有.阿萨汉一级水电站消能阀选型设计[J].水力发电,2012,59(3):18-20,57.
- [2] 周琦,杨校礼,傅宗甫,等.山区弯道水流特性及消能选型[J].水电能源科学,2013,31(1):76-78,91.
- [3] 罗毅,谭哲武.高压输水管道中锥形阀的消能研究[J].中国农村水利水电,2015,(3):185-187.
- [4] Dallin Stephens, Michael C, Johnson, *et al.* Design Considerations for Fixed-Cone Valve with Baffled Hood[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(2): 204-209.
- [5] 李颖,杨东生.锥阀流场的数值模拟与结构优化[J].科学技术与工程,2011,11(21):5180-5183.
- [6] 郑淑娟,权龙,王文全.平底锥形阀内流工况稳态液动力的研究[J].液压与气动,2014,(8):55-59,108.
- [7] 喻哲钦,李志鹏,董成彪,等.消能锥形阀内部结构优化与消能效果探讨[J].水力发电学报,2015,34(12):108-114.
- [8] 秦武,李志鹏,喻哲钦,等.消能锥形阀过流状态研究与优化[J].南水北调与水利科技,2017,15(1):193-198.
- [9] Kelly Rose. Cone Improvements: Advances in Cone Valve Technology Gives New Levels of IBC Containment[J]. Solids & Handling, 2009, 35(7): 156-160.
- [10] 陈懋章.粘性流体动力学基础[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [11] 王福军.计算流体动力学分析 CFD 软原理与应用[M].北京:清华大学出版,2004.

Research on Numerical Analysis of Internal Structure Optimization and Energy Dissipation Rate of Cone Valve

Zhang Xiheng, Bai Yazhou, Chen Xiugao

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

Abstract The cone valve is used for the energy dissipation and velocity control under the working conditions of high water head and large flow in the water conservancy and hydropower system, and its main function is to eliminate the energy, so the main task is to design and optimize the cone valve structure to make it have a high energy dissipation rate. In order to solve this problem, the energy dissipation orifice plate is added to the valve fairing, and the numerical analysis is conducted on the internal flow field of two different structural cone valves by the CFD method. The research results show that the energy dissipation effect of the cone valve with the energy dissipation orifice plate is greatly improved, and the energy dissipation rate under each opening can reach more than 96% under the condition of meeting the actual engineering demand.

Key words Cone valve; Opening; Interior construction; Energy dissipation rate