

阀门内流场数值模拟分析研究

彭 龔, 郝刘峰

(四川理工学院计算机学院, 四川 自贡 643000)

摘要: 文章在讨论阀门流量系数计算原理的基础上, 给出了阀门内流场数值模拟分析方法。利用 COSMOS/Floworks 实现球阀的流量系数计算分析, 计算分析验证了应用 CFD 技术所计算阀门流量系数的准确性, 并揭示球阀内流场压力的分布情况规律, 为现实的设计生产提出了一种较为简单易行的计算阀门流量系数的方法。

关键词: 阀门; 流量系数; 流场数值模拟; COSMOS/Floworks

中图分类号: TH134

文献标识码: A

引言

流场数值模拟也叫流场计算机模拟, 是计算流体力学的核心内容, 也称 CFD (Computational Fluid Dynamics)^[1]。它是计算机为手段, 通过数值计算以数据和图像显示, 再现研究对象及其内在规律。它的兴起促进了实验和理论分析方法的发展, 将实验研究与理论分析方法联系起来, 为简化流动模型的建立提供了更多的依据, 使很多简化方法得到了发展和改善, 利用它研究流体运动的物理特性。

阀门的流量系数是衡量阀门流通能力的指标, 流量系数值越大说明流体流过阀门时的压力损失越小。国外工业发达国家的阀门生产厂家大多把不同压力等级、不同类型和不同公称口径阀门的流量系数值列入产品样本, 供设计部门和使用单位选用。流量系数值随阀门的尺寸、型式和结构而变化, 不同类型和不同规格的阀门都要分别进行试验, 才能确定该阀门的流量系数值。目前, 在我国能够测量阀门流量系数的试验设备很少, 远远不能满足实际的需要, 并且这些设备大多是采用传统仪表测量和手动测量的落后方法, 所能达到的精度比较低, 但随着现代 CAE 技术的发展, 使得这一只能用实验方法测得的数据现在完全可以在虚拟机上通过模拟来实现。

1 阀门流量系数计算原理^[2]

阀门的流量系数是当水流经阀门的两端压差为 100kPa 时, 某给定行程所流过的以 m^3/h 计的流量数值。流量系数的计算公式为:

$$C_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (1)$$

式中, C_v 为流量系数 $m^3/3600Q$ Q 为流经阀门的流量值, 单位为 m^3/h ; ρ 为流体密度, 本系统所用流体为水, $\rho = 1$; Δp 为阀门两端的压力差, 单位为 Pa 。

根据阀门设计的实际情况可知, 一般厂家提供给阀门生产厂商的数据都包括管道的压力, 即是阀门的公称压力, 还有管道介质的体积流量。所以要求解阀门的流量系数, 主要工作就集中在对阀门两端的压力差的求解上。

由于流体在流动过程中的状态分为层流和紊流, 雷诺系数为其流态的判别数。在工程上, 通常以 $Re_c = 2320$ 作为临界雷诺数, 即当 $Re \leq 2320$ 时, 流态为层流, 当 $Re \geq 2320$ 时, 流态为紊流。

$$Re = \frac{F_g}{F_m} = \frac{\rho s v^2}{l \eta v} = \frac{v}{\eta} \rho \quad (2)$$

式中, v 为流体的平均速度; L 为流束的定型尺寸; η 为流体的动力粘度; ρ 为流体密度。

根据本文所选实际样本球阀的实际工程应用状况, 所分析计算的流体流态为紊流, 分析计算的流体为不可压缩介质, 故这时的标准 $k-\varepsilon$ 模型为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - G_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

2 阀门内流场数值模拟分析方法

根据流体分析原理和基本方法、阀门内流场的 CFD 计算任务, 阀门内流场计算机模拟方法如图 1 所示^[3-5]。

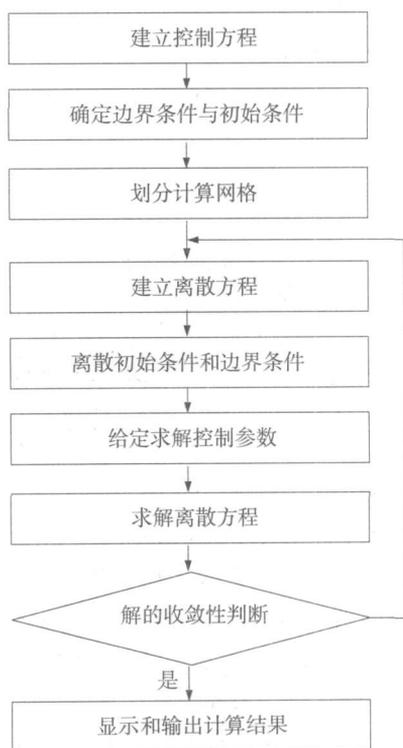


图 1 数值模拟过程

(1) 建立控制方程

对于一般的流体流动, 可直接写出其控制方程。对于流动大多是处于湍流范围的流动, 还需要增加湍流方程。

(2) 确定边界条件与初始条件

控制方程与相应的初始条件、边界条件的组合构成对一个物理过程完整的数学描述。初始条件是所研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况。对于瞬态问题, 必须给定初始条件。对于稳态问题, 不需要初始条件。边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律, 初始条件

和边界条件的处理将直接影响计算结果的精度。

(3) 划分计算网格

对于二维问题, 常用的网格单元有三角形和四边形等形式; 对于三维问题, 常用的网格单元有四面体、六面体和三棱体等形式。在整个计算域上, 网格通过节点联系在一起。目前各种 CFD 软件都配有专用的网格生成工具, 如 FLUENT 使用 GAMBIT 作为前处理软件。多数 CFD 软件可接收采用其他 CAD 或 CFD/FEM 软件产生的网格模型。对于问题不是特别复杂时, 可自行编程生成网格。

(4) 建立离散方程

由于所处理的问题自身的复杂性, 一般很难获得方程的真解 (或称精确解)。因此, 就需要通过数值方法把计算域内有限数量位置 (网格节点或网格中心点) 上的因变量值当作基本未知量来处理, 从而建立一组关于这些未知量的代数方程组, 然后通过求解代数方程组来得到这些节点值, 而计算域内其他位置上的值则根据节点位置上的值来确定。由于所引入的应变变量在节点之间的分布假设及推导离散化方程的方法不同, 就形成了有限差分法、有限元法和有限元体积法等不同类型的离散化方法。对于瞬态问题, 除了在空间域上的离散外, 还要设计在时间域上的离散后, 使用何种时间积分方案的问题。有限体积法由于其最大限度地保持了差分法的简单性, 又兼有有限元法的精确性, 具有积分守恒性、易于处理边界控制体的特点, 因而目前在二维和三维紊流数值计算中有限体积法得到了广泛而成功的应用。

(5) 离散初始条件和边界条件

前面所给定的初始条件和边界条件是连续性的, 现在需要针对所生成的网格, 将连续型的初始条件和边界条件转化为特定节点上的值, 这样, 连同各节点处所建立的离散的控制方程, 才能对方程组进行求解。在 CFD 软件中, 往往在前处理阶段完成了网格划分后, 直接在边界上指定初始条件和边界条件, 然后由前处理软件自动将这些初始条件和边界条件按离散的方式分配到相应的节点上去。

(6) 给定求解控制参数

在离散空间上建立了离散化的代数方程组, 并施加离散化的初始条件和边界条件后, 还需要给定流体的物理参数和湍流模型的经验系数等。此外, 在实际计算时, 还要给定迭代计算的控制精度、瞬态问题的时间步长和输出频率等对计算精度和效率有至关重要的参数量。

(7) 求解离散方程

在进行了上述设置后,生成了具有定解条件的代数方程组。利用数学上已有相应的解法求解,如线性方程组可采用 Gauss消去法或 Gauss-Seidel迭代法求解,而非线性方程组,可采用 Newton-Raphson方法。在 CFD 相关软件中,往往提供多种不同的解法,以适应不同类型的问题。

(8)判断解的收敛性

对于稳态问题的解,或是瞬态问题在某个特定时间步上的解,往往要通过多次迭代才能得到。有时,因网格形式或网格大小、对流项的离散插值格式等原因,可能导致解的发散。因此在迭代过程中,要针对不同的情况对解的收敛性随时进行监视分析,并在系统达到指定精度后,结束迭代过程。

(9)显示和输出计算结果

采用线值图、矢量图、等值线图、流线和云图等方式对计算结果进行说明。

3 固定球阀内流场数值模拟分析^[5]

根据计算阀门流量系数的方法。对 10-8-150LB 缩颈球阀进行内流场数值模拟。其中采用数值模拟实现软件为 COSMOS/Floworks 流体分析软件和 SolidWorks 三维建模软件。

(1)利用 SolidWorks 建立 10-8-150LB 缩颈球阀三维模型如图 2 所示。

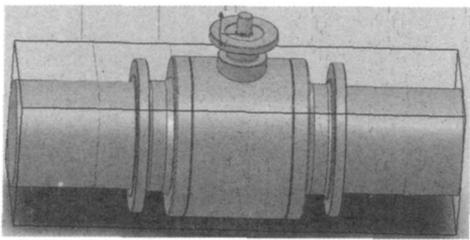


图 2 数值模拟分析模型

(2)将缩颈球阀三维模型导入 COSMOS/Floworks 并根据 COSMOS/Floworks 流体分析软件要求,完成单位制设定、定义流体介质、定义定数值模拟分析流态类型和定义网格划分规格等数值模拟部分的前期工作。

(3)由阀门流量的计算公式可以得知,数值模拟主要的目的就是要求解出阀门两端的压差。故在分析计算时,还应定义阀门的进口压力即为阀门的公称压力值 2.5MPa,而要使得所建立的求解方程收敛,根据伯努利方程:

$$P + \rho \frac{V^2}{2g} = C \quad (5)$$

其中, P 为压力能; ρ 为流体密度; V 为流体速度; C 为重力

力加速度; C 为为一常数。

式中前两项即为压力能和动能之和等于后项的机械能。机械能为一常数,其物理意义为单位重量的流体,其机械能在流体所流经的任何位置上都是相同的。所以要是求解方程收敛,即还需定义流体的流速,又因为 $Q/S=V$,即流量除以流体所经的面积,就为流体流速。因阀门量一般是知道的,所以在求解压差时我们还需定义阀门出口的流量。

为了准确求得阀门的流量系数,固定阀门公称压力是通过改变阀门的出口流量对比求得阀门的流量系数,以确保所求解值得的准确性。

(4)数值计算及结果分析

对阀门两端压差的求解过程中,定义阀门的进口压力为其公称压力,而通过改变其流量来分别求得其差。

① 阀门进口压力为 2.5MPa,出口流量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 的内流场压力分布如图 3 所示。

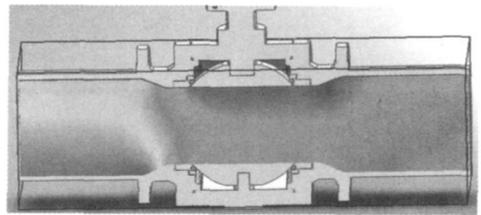


图 3 出口流量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 数值模拟分布图

根据模拟分布图 3 分析结果和理论吻合。其一由于重力作用使得流体底部的压力值高于流体顶部的压力值;其二在缩颈处由于流体速度增快,由伯努利方程可知这时的压力值是随之降低的;其三阀门前后端由于流道的突然扩充与突然减小,流体介质所接触阀门处的摩擦力,使得前后端口存在压差。

通过探测可得知阀门前端和后端的压力值,相减即为压差:

前端压力值: 2533125Pa

后端压力值: 2530457Pa

Q 值: $360 \text{ m}^3/\text{h}$

Cv 值: $220.40 \text{ m}^2/3600$

② 阀门进口压力为 2.5MPa,出口流量为 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 的内流场压力分布如图 4 所示。

由图 4 可知,由于流量的增加,重力对介质底部的压力影响明显减小。其他原理分析同介质的体积流量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$

通过探测可得知阀门前端和后端的压力值,相减即为压差:

前端压力值: 2533125Pa

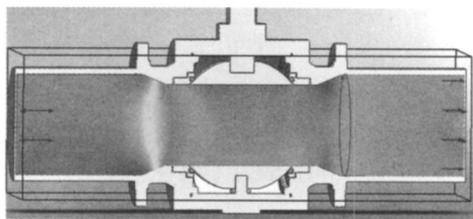


图 4 出口流量为 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 数值模拟分布图

后端压力值: 2516425Pa

Q 值: $900\text{m}^3/\text{h}$

Cv 值: $220.23\text{m}^2/3600$

③ 阀门进口压力为 2.5MPa 出口流量为 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 的内流场压力分布如图 5 所示。

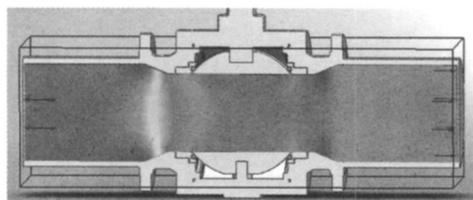


图 5 出口流量为 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 数值模拟分布图

由图 5 明显可知由于介质流量的继续增加, 介质在阀体流场内的分布已很均匀。通过探测可得知阀门前端和后端的压力值, 相减即为压差:

前端压力值: 2533125Pa

后端压力值: 2466455Pa

Q 值: $1800\text{m}^3/\text{h}$

Cv 值: $220.45\text{m}^2/3600$

通过上述对不同介质流量的分析计算, 可得知在介质流量分别处于 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 时计算的阀门流量系数的 Cv 值分别为 $220.40\text{m}^2/3600$ 、 $220.23\text{m}^2/3600$ 和 $220.45\text{m}^2/3600$ 。可见其误差是非常小的。所以通过以上分析计算所得到的 Cv 值是可信的。

4 结束语

论文针对阀门内流场计算分析进行实体模拟实验的复杂性及其缺乏, 以及进行阀门设计计算的需要, 应用 CFD 技术, 采用 COSMOS/Floworks 工具计算得出了样本球阀的流量系数, 通过理论计算和计算机模拟分析计算比较验证了计算的一致性。研究揭示了球阀内流场压力的分布情况规律, 为现实的设计生产提出了一种较为简单易行的计算阀门流量系数的方法。

参考文献:

- [1] 由胜霞. 自力式流量控制阀流量特性研究及数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004
- [2] 张涵信, 沈孟育. 计算流体力学-差分方法的原理和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [3] 翟建华. 计算流体力学 (CFD) 的通用软件 [J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(2): 160-165
- [4] Erlebacher G, Hussaini M Y, Kress H O, et al The analysis of compressible turbulence [J]. Theoret Comput Fluid Dynamics and modeling 1990 (1): 133-135
- [5] 焦明海. 使用 COSMOSM 对模型进行局部网格细化 [J]. 数字化设计, 2002 9(11): 47-48

Research on Valve Computational Internal Fluid Dynamics

PENG Yan, HAO Liu-feng

(School of Computer Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract The paper discussed the principle about valve flow coefficient and gave the computation method of valve flow coefficient by computational fluid dynamics technology and computed ball-valve the flow coefficient. By the method of comparative analysis, accuracy of CFD technology is verified, the rule of ball pressure distribution in valve internal flow field is revealed, and the simply computation method about valve flow coefficient in reality is pointed out.

Key words valve, flow coefficient, computational fluid dynamics, COSMOS/Floworks