

# 计算流体力学在控制阀故障分析及结构改进上的应用

孙志民\*

(艾默生过程管理(天津)阀门有限公司,天津301700)

**摘要:**以真实案例为例,利用计算流体力学软件对问题阀芯进行受力分析,发现了阀门振动的原因,并通过对仿真矢量图的分析指出了结构改进的方向。分析证明,新结构的受力情况得到明显改善,展示了计算流体力学在阀门故障分析和结构改进中的应用。

**关键词:**计算流体力学(CFD);控制阀;故障分析;结构改进

**中图分类号:**TE624;TQ051.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2016)06-0176-03

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.06.043

## Application of computational fluid dynamics in analysis on trouble shooting of control valve and design optimization

SUN Zhi-min\*

(Emerson Process Management (Tianjin) Valves Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

**Abstract:** By analyzing the force on the plug in a real field case, the reason for vibration of control valve is found. The direction of optimizing the control valve structure is clear through the analysis on the vectors. The analysis results show that the force on the plug is obviously improved. It suggests that CFD is a helpful tool for analysis of the trouble shooting issue of control valves and design optimization.

**Key words:** computational fluid dynamics (CFD); control valve; trouble shooting; design optimization

控制阀(也称作调节阀)是过程控制工业中最为常用的终端控制单元,其调节流体(如气体、蒸汽、水等)以补偿负载扰动并使得被控制的过程变量尽可能地靠近所需的设定点<sup>[1]</sup>。控制阀通常由阀体、阀内件、执行机构和其他附件组成。由于其最终控制的是流体,所以控制阀设计中的一个重要部分是对阀门中流体流动特性的设计。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)是指利用数值方法通过计算机求解描述流体运动的数学方程,揭示流体运动的物理规律,研究定常流体运动的空间物理特征和非定常流体运动的时空物理特征的学科<sup>[2]</sup>。它与实验流体力学和理论流体力学共同组成了流体力学体系。相较于实验和理论方法,其优势在于费用低、周期短、能够形象地反映流体的运动,从而比实验和理论计算提供的结果更为直观和易于理解。当然,其缺点是其对现实反映的真实性还有待进一步论证。

随着计算理论、流体力学理论、计算机硬件和软件技术的发展,计算流体力学已经成为了阀门设计的重要辅助工具。多年的实践证明,其对阀门内的流动状态和阀门的流量系数的预测已经达到一定精

度<sup>[3-6]</sup>,对汽蚀<sup>[7-8]</sup>、噪声<sup>[9-10]</sup>、振动<sup>[11]</sup>、磨蚀<sup>[12]</sup>等特殊工况的模拟也有了一定的进展。

由于流体流动的诸多不确定性以及阀门所在控制回路工况的复杂性,阀门在实际使用中会遇到各种各样的问题甚至是失效,而这些都是阀门设计中很难全部考虑到的。因此针对故障工况,进行特定的流体力学分析将有助于工程技术人员了解阀门内部的流动状态,从而更合理地诊断阀门故障原因以及快速地提出合理的解决方案。本文中通过对具体案例的分析,展示了计算流体力学在辅助技术人员对阀门振动的故障分析和结果改进上的成功应用。

## 1 案例工况

某炼油厂在其脱硫系统中使用胺液吸收烃类混合气中的酸性气体(主要为硫化氢),以产出较清洁的产品,同时保护下游关键设备免受损坏。气流从吸收塔中部进入,与从塔顶进入的吸收液(贫胺液)进行逆流接触,从而达到吸收的目的,清洁气体从吸收塔塔顶离开,吸收了酸性气体的胺液(富胺液)从塔底排出。在离开吸收塔后,富胺液进入闪蒸罐,在

闪蒸罐中吸收的大部分酸气会析出成为废气排出。闪蒸罐出来的胺液经过再生后回到吸收塔顶循环使用(如图1所示)。为了控制吸收塔中的胺液液位,同时排出富胺液,需在吸收塔底部设置液位阀(也称富胺放液阀)。由于吸收塔与闪蒸罐之间的大压差,富胺液中吸收的气体发生的解吸现象会使阀门中形成两相流,一相为富胺液,另一相为酸气。两相流会造成阀门振动和冲蚀问题,所以此处选用了NPS16带脏污工况阀内件的阀门(如图2所示)。此阀采用多级降压方式,以避免气蚀的产生;总体流动方向为向下,在阀内轴向流动和径向流动相结合,允许大颗粒通过避免了堵塞;保护式阀座设计帮助保持阀门长期关闭的完整性。在开车调试时发现在40%行程附近出现阀芯振动现象,在排除操作及其他外因的情况下,怀疑是由于流体流动的原因产生的振动。其操作工况见表1。

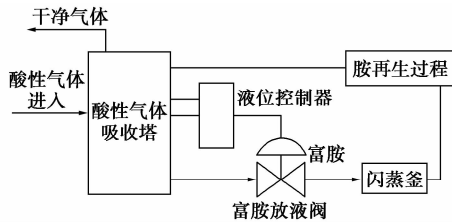


图1 操作流程示意图

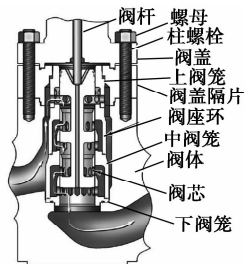


图2 阀门结构示意图

表1 操作工况

| 介质             | 温度/<br>℃ | 阀门进口<br>压力/MPa | 阀门压差/<br>MPa |
|----------------|----------|----------------|--------------|
| 水,胺(质量分数小于30%) | 50       | 3.7            | 3            |

## 2 数值模拟

根据工况描述,分析阀芯的受力情况,有助于找到阀芯振动的原因。为了更全面地了解阀芯的受力情况,分别模拟了8%、20%、30%、40%、50%、55%、60%、70%行程下阀芯的受力情况。

首先将阀体中流体流过的区域分离出来,得到

流体域,并去除影响网格质量但不影响计算结果的部件间的微小缝隙和零件上的小圆角,然后利用ANSYS Workbench中的网格工具对其进行网格处理。为了更好地再现流体在阀内的流动,采用了局部加密的方法以保证其高梯度的位置有足够多的网格;同时低梯度区域的网格较粗以节约计算时间,网格形式为四面体。阀门的进出口设置为压力进口和压力出口边界条件,其余部分设置为壁面边界条件,为了方便得到阀芯所受到的力,阀芯的表面单独设置为1个壁面区域,模型整体设置为流体。为了节省运算时间,在Ansys Fluent中将四面体网格整体转换为多面体网格。

通过现场调查,由于并未发现汽蚀或解吸现象的发生,而且胺含量也不高,所以在模拟中使用50℃水作为介质,进行单项流稳态模拟。由于操作中的温度变化不大,因此在模拟中未考虑温度的影响。湍流模型选用的是Realizable  $k-\varepsilon$  模型。

介质和边界条件见表2。

表2 介质与边界条件

| 介质     | 进口     |               | 出口     |               | 壁面          |
|--------|--------|---------------|--------|---------------|-------------|
|        | 压力/MPa | 湍流            | 压力/MPa | 湍流            |             |
| 水(50℃) | 3.7    | 水力直径和<br>湍流强度 | 3      | 水力直径和<br>湍流强度 | 无滑移边<br>界条件 |

运算时选用Pressure based分离式求解器,运算方式为压力-速度耦合的SIMPLE方式,离散格式采用二阶格式。

## 3 结果讨论

由图3可以发现,阀芯在30%和50%行程处存在巨大的负向力,其中正方向为沿阀杆向阀盖的方向,负方向为沿阀杆向阀座的方向。振动的原因是由于30%行程时有很大的负向力,执行机构为了平衡这个力会通过增大给气压力产生足够的反作用力。当阀芯需要提升至40%行程时,控制器会预设一个压力给执行机构使其上行,以平衡执行机构内弹簧压缩时产生的作用力。由于这时阀芯的受力在同步减小,所以这个平衡要比正常时候来得更早,之后阀芯会继续向上,阀芯的受力会进一步减小,这样阀芯就会超过40%的设定继续向上;这时由于位置反馈会使控制器给出信号减小供气压力,可是这时阀芯的受力会逐步增大,所以阀芯在达到一个位置后就会向下运动;当阀芯降低至40%行程以下时,由于负向力增大,其会继续下行,而控制器根据

位置反馈又会增压使其上行。由于阀芯在 40% 行程附近的受力变化巨大,所以很难使阀芯受力平衡而停在设定点,从而形成了阀芯的振动。

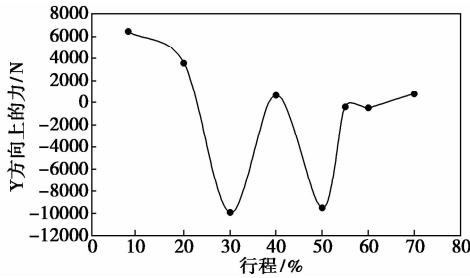


图 3 阀芯在不同行程下的 Y 方向受力(改进前)

从图 4 的矢量图可以看到,阀芯最后一级的区域存在较大的漩涡使得流动不稳,而且也会产生低压区。其产生的原因是由于最后一级上部的锥形空间,当流体由这一级的进口流入时,由于上方的空间较大,容易使得流入的流体向上流动然后到达壁面后再向下流动从而形成漩涡。为了减小漩涡的影响,尝试将其去除。通过重新模拟,从图 5 的矢量图

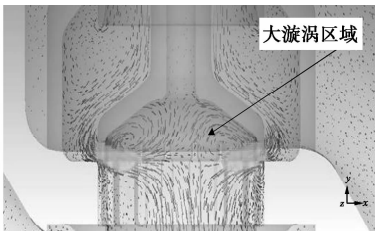


图 4 30% 开度时最后一级的矢量图(改进前)

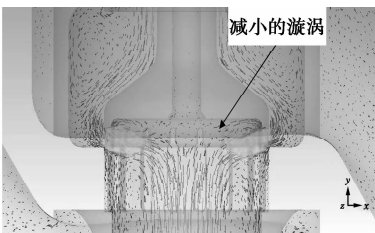
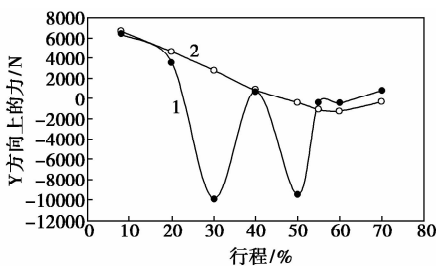


图 5 30% 开度时最后一级的矢量图(改进后)



1—原设计;2—改进设计

图 6 阀芯在不同行程下的 Y 方向受力(改进前后)

中可以看出,此区域处的漩涡明显减小。从图 6 新的受力结果可以看出,改进后的阀芯受力变化比较平滑,没有大的受力方向改变的现象发生。

### 4 结论

利用计算流体力学模拟软件对案例中的阀芯振动现象进行了分析,并提供了改进方案。改造前后的阀芯受力情况对比显示出改进后的阀芯受力情况更为合理,从模拟结果矢量图可以看出,阀芯最后一级处的漩涡减小,流动更为顺畅。从以上的案例可以看出,计算流体力学可以辅助工程师对阀门的故障进行分析,从而有助于解决方案的提出。

### 参考文献

- [1] 费希尔控制设备国际有限公司. 控制阀手册[Z]. 3 版. 中国,1999.
- [2] 傅德薰,马延文. 计算流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [3] Toro A D. Computational fluid dynamics analysis of butterfly valve performance factors[D]. Logan:Utah State University,2012.
- [4] Xue G S,Young C P. Numerical analysis of butterfly valve-reduction of flow coefficient and hydrodynamic torque coefficient [A]. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science[C]. San Francisco, USA, 2007.
- [5] An Y J, Kim B J, Shin B R. Numerical analysis of 3-D flow through LNG marine control valves for their advanced design[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(10): 1998 - 2005.
- [6] Bigliardi E, Francia M, Milani M, et al. Multi-phase and multi-component CFD analysis of a load-sensing proportional control valve [J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(1): 421 - 426.
- [7] Brett G, Riveland M, Jensen T C, et al. Cavitation from a butterfly valve: comparing 3d simulations to 3D X-ray computed tomography flow visualization [A]. ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference [C]. Hamamatsu, Japan, 2011.
- [8] Nima T S, Gholam R A, Gholam H A. CFD analysis of the ball valve performance in presence of cavitation [J]. Life Science Journal, 2012, 9(4): 1460 - 1467.
- [9] Wei L, Zhu G R, Qian J Y, et al. Numerical simulation of flow-induced noise in high pressure reducing valve [J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0129050.
- [10] Liu J M, Zhang T, Zhang Y O. Numerical study on flow-induced noise for a steam stop-valve using large eddy simulation [J]. Journal of Marine Science and Application, 2013, 12(3): 351 - 360.
- [11] Morita R, Inada F, Mori M, et al. CFD simulations and experiments of flow fluctuations around a steam control valve [J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 129(1): 48 - 54.
- [12] Zhu H J, Pan Q, Zhang W L, et al. CFD simulations of flow erosion and flow-induced deformation of needle valve; Effects of operation, structure and fluid parameters [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 273: 396 - 411. ■