

文章编号:1672-3961(2008)06-0011-04

# 流体控制阀的流固耦合特性

尚翠霞, 王勇, 谢玉东

(山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**控制阀阀芯型线方程对阀前后压差有着重要的影响.基于有限元分析软件 ANSYS,建立了控制阀的仿真模型,并对不同阀芯型线的模型进行了仿真分析,得出了不同阀芯型线对阀前后压降的影响.同时,在考虑流固耦合作用下对控制阀阀体进行了应力分析.通过耦合场分析,可以避免应力集中,提高阀体的使用寿命,优化设计阀体结构.

**关键词:**控制阀;阀芯型线;ANSYS;流固耦合

**中图分类号:**TH137.52 **文献标志码:**A

## The fluid-structure interaction features of control valve

SHANG Cui-xia, WANG Yong, XIE Yu-dong

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

**Abstract:** The plug molded line equation plays an important part in the pressure drop of the control valve. Based on the finite element analysis software ANSYS, a control valve simulation model was established, the plugs with different molded lines were analyzed, and the effects of different molded lines on the pressure drop were presented. At the same time, the stress analysis of the control valve body was shown by considering the fluid-structure interaction. This study provides theoretical guidance for shortening the optimization design cycle of the control valve.

**Key words:** control valve; plug molded lines; ANSYS; fluid-structure interaction

## 0 引言

控制阀的发展与工业生产过程的发展密切相关.随着工业生产规模的扩大,工业过程控制要求的提高以及一些大型石油化工企业、核电站等工业项目的进行,对控制阀的要求也越来越高<sup>[1]</sup>.由于技术、安全和成本的原因,稳压技术目前大多采用气动压力控制阀实现,但往往得不到预期的效果.这就要求我们开发高性能的压力控制阀,使阀前阀后的压力稳定. ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体,以有限元分析为基础的大型通用 CAE 软件. ANSYS 软件能够不断地吸收新的计算方法和计

算技术,领导世界有限元技术的发展,并为全球工业界所接受<sup>[2]</sup>.首先利用 ANSYS 对不同阀芯型线的控制阀进行流体动力学分析,并进一步利用流体-结构耦合分析,得到阀体应力分布云图,从而优化阀体结构.

## 1 控制阀的工作原理

### 1.1 连续性方程

连续性方程是描述运动流体质量守恒定律的数学方程式,它是运动学方程,适用于理想流体,也适用于实际流体.对封闭管道上的连续性方程可描述为可压缩非定常流动

收稿日期:2008-04-15

基金项目:国家高技术研究发展计划 863 项目(2008AA04Z130)

作者简介:尚翠霞(1982-),女,山东莱芜人,硕士研究生,研究方向为机械系统(包括机器人)智能控制与动态检测技术.

E-mail: shanguixia1011@163.com

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = q_m(t); \quad (1)$$

可压缩定常流动

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = q_m = \text{常数}; \quad (2)$$

不可压缩定常流动

$$\rho_1 = \rho_2; v_1 A_1 = v_2 A_2 = q_v = \text{常数}. \quad (3)$$

式中,下标 1 和下标 2 表示不同截面;  $A$  表示截面面积;  $v$  表示该截面处的平均流速;  $\rho$  表示该截面处流体平均密度;  $q_m$ 、 $q_v$  是不随时间变化的质量流量和体积流量;  $q_m(t)$  是随时间变化的质量流量.

### 1.2 流量方程

根据连续性方程和伯努利方程,可知控制阀的流量方程.不可压缩流体的流量方程为

$$Q = \frac{A}{\sqrt{1-\beta^4}} E \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1 - p_2)}. \quad (4)$$

由于流体可压缩,因此流体密度不是常数,它随温度和压力等参数的变化而变化,流量方程增加体膨胀系数  $\epsilon$ .可压缩流体的流量方程

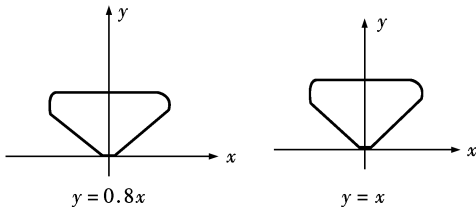
$$Q = \frac{A}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon E \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1 - p_2)}, \quad (5)$$

式中,  $\beta$  是径比,即缩流处截面等效直径与管道截面等效直径之比;  $E$  是与流速等有关的系数;  $A$  是缩流处截面积;  $\rho_1$  表示入口处流体平均密度;  $Q$  是体积流量;  $p_1$  和  $p_2$  分别是入口和最大流速处的平均静压力;  $\epsilon$  是体膨胀系数,它与流体的流束收缩情况、等熵指数、 $p_1$  和  $p_2$ 、径比等有关.

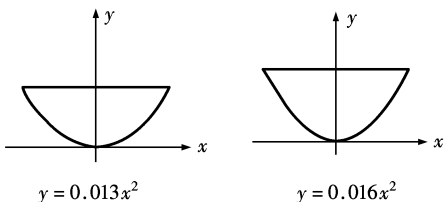
由流量方程可知,控制阀两端压力的变化与流量有关,即阀前阀后压差会影响控制阀的流量特性.

## 2 控制阀阀芯线型

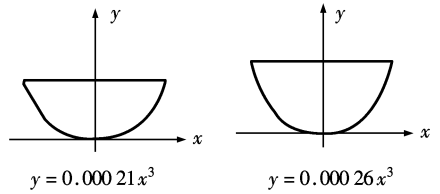
控制阀阀芯形状如图 1 所示:



(a) 修正直线阀芯



(b) 抛物线阀芯



(c) 修正三次曲线阀芯

图 1 阀芯型线结构及方程

Fig.1 Plug molded lines structure and equations

讨论的控制阀是用于大型机械并要求压力稳定的条件下使用的,如用于火力发电、核电、化工等场合.设其公称通径为 250 mm,据工况需要,阀芯行程取 100 mm、125 mm,阀芯形状为修正直线、抛物线及修正三次曲线<sup>[3]</sup>,从而得其方程分别为

$$\begin{aligned} y &= 0.8x; & y &= x; \\ y &= 0.013x^2; & y &= 0.016x^2; \\ y &= 0.00021x^3; & y &= 0.00026x^3. \end{aligned}$$

## 3 有限元模型的建立

### 3.1 创建模型

流体在控制阀中的流动实际上是轴对称流动.考虑到流体的流动特性,可以把二维模型作为我们的研究对象.从建模、划分网格、求解的计算效率等角度看,二维模型要好于三维模型,所以按二维问题进行分析.建立二维平面几何模型时,考虑到阀体结构复杂,ANSYS 的实体造型有限,二维模型在 AUTO-CAD 中建立,然后通过数据接口输入 ANSYS 中.模型如图 2 所示.

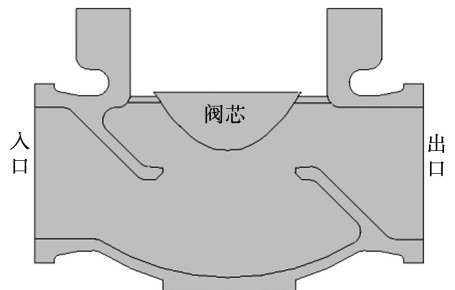


图 2 实体模型  
Fig.2 Solid Model

因为实际的产品结构中有很多对产品性能没有多大影响的复杂细节结构,如圆角、连接孔等,而这些结构在有限元计算中却非常复杂,因此,在进行有限元计算时,可合理简化几何模型.在进行实体建模时,阀杆及阀座上的连接孔均未画出.控制阀的阀杆与阀芯连接,当执行机构做直线位移时,通过阀杆带动阀芯移动.建立的二维实体模型,左侧为阀门入口面,流体经左侧阀道、阀芯、右侧阀道,最后从阀门出

口流出.

### 3.2 网格划分

ANSYS 程序中的 FLOTRAN CFD 分析功能是一个用于分析二维及三维流体流动场的先进的工具,讨论的流体属于二维几何模型,所以采用 ANSYS 单元库中 FLOTRAN CFD 141 二维四节点结构单元.流体区域网格划分后如图 3 所示.

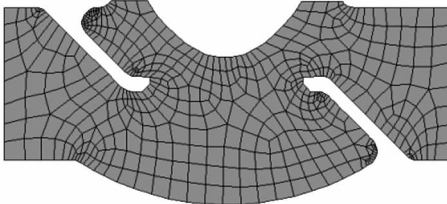


图 3 流体网格图  
Fig.3 Fluid grid map

### 3.3 边界条件和加载

根据现场情况设定流体入口速度为 50 m/s,即入口处 X 方向速度为 50 m/s,其它方向上的速度为 0;出口处压力为 0;流体域与阀体的公共壁面处流体是不可移动的,所以在 X、Y 两个方向上流体的速度均为 0.模型加载后如图 4.

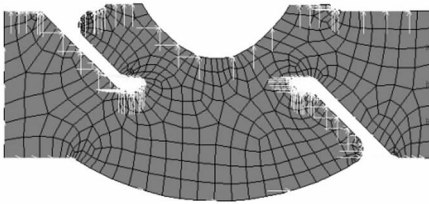


图 4 施加边界条件后的模型  
Fig.4 Boundary conditions imposed after the model

进行流体动力学分析时,还需要确定流体的密度和粘度,研究的流体为混合煤气,其密度  $\rho = 1.178 \text{ kg/m}^3$ ,粘度  $\mu = 0.083 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,流体的雷诺数  $Re = v d \rho / \mu$  其中:  $v$  表示流速;  $d$  表示直径.由雷诺数的大小来判断流体流动的状态:层流或湍流.根据计算结果流体属于层流.

## 4 计算求解与结果分析

### 4.1 计算过程

对上面已经建立好的有限元仿真模型施加边界条件和载荷之后,使用 ANSYS 求解器对模型进行求解.

求解结果如图 5 和图 6 所示,两图为阀芯型线方程为  $y = 0.013 x^2$  时建立模型,在进口速度为 50 m/s,出口压力为 0 的边界条件下得到的阀内流体的速度和压力分布图.

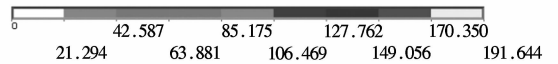
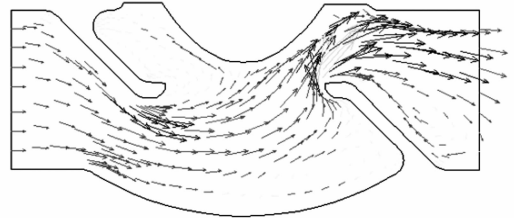


图 5 速度矢量图结果显示

Fig.5 The results show of the velocity vector

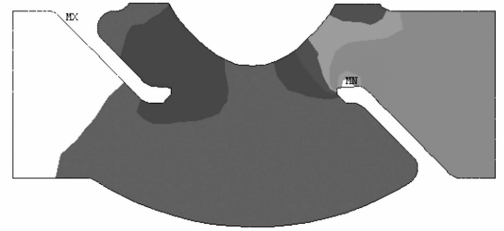


图 6 阀体内流体压力结果显示

Fig.6 Valve body fluid pressure results

### 4.2 结果分析

通过计算可以得到不同阀芯结构的控制阀在相同进口速度、相同开度的情况下的压差值,表 1 为 6 种阀芯型线方程得到的控制阀阀前阀后压差计算值.

表 1 控制阀阀前阀后压差值  
Table 1 The pressure before and after the valve body

线型	$y = 0.8x$	$y = x$	$y = 0.013x^2$	$y = 0.016x^2$	$y = 0.00021x^3$	$y = 0.00026x^3$
压差/MPa	0.438	0.223	0.266	0.444	0.270	0.404

通过表 1 我们可以看出不同线型的阀芯对压差的影响是不同的,而两端压力的变化又会影响控制阀的流量特性.我们应根据不同工况,选择符合要求的阀芯.有些阀芯虽然前后压差相差小,但回流现象严重.从图 5 和图 6 我们可以看出,流体流过控制阀时,其流速和压力均发生了变化.如图 5 所示,在阀

门节流处由于流通面积的缩小,该处的流速达到最大,随着流通面积的增大,流速变小,阀体内流体很不均匀.图 6 为阀体内流体压力分布云图,从图中可以看出,流体入口处压力值最大,随着流体的流动,部分能量转化为内能,从而压力值越来越小<sup>[4]</sup>.

## 5 耦合场分析优化结构

流固耦合问题有着广阔的工程背景.近些年的相关研究包括:基于传统的水锤和梁理论,考虑流固耦合的相互作用,对厚壁管道的研究<sup>[5]</sup>;考虑流固耦合作用,对一个封闭的、充水、T形、实验室管系统模型的研究<sup>[6]</sup>等.

有限元软件 ANSYS 中的耦合场分析是指考虑了两个或多个工程物理场之间相互作用的分析.顺序耦合分析是以特定的顺序求解单个物理场的耦合分析方法,将前一个分析的结果作为后续分析的边界条件施加,所以也称之为间接耦合分析.该分析方法主要应用于物理场之间单向的耦合关系<sup>[7]</sup>.本文是在分析完流体之后用 ANSYS 耦合场分析中的顺序弱耦合分析,进行流体-固体耦合分析.

顺序弱耦合分析能够在 ANSYS FLOTRAN 和 ANSYS 结构、热或耦合场单元间进行流体-结构耦合分析.流体和结构分析的求解顺序发生,穿过流体和结构区域相同或不同的网格界面载荷在内部进行传递.进行流体-结构耦合分析有五个主要步骤:设置流体和结构分析、标记流体结构界面、指定流体结构耦合求解选项、获得求解、对结果进行后处理.流体和结构单元分别使用 FLUID141 和 PLANE42.

通过流固耦合分析求解可以很容易得到阀体在该工况下的最大应力值,将该应力值与阀体的许用应力相比较即可校核阀体的强度和刚度,从而保证阀体的正常工作和使用寿命.阀体所受应力分布云图如图 7 所示,在阀腔内尖角处容易出现应力集中,要尽量采用过渡圆弧,另外在加工有缺陷的地方也会有应力集中现象,值得注意.我们可以通过 ANSYS 仿真模拟来改进阀体的结构.

## 6 结论

研制大型智能控制阀实现流体压力稳定,可广泛应用于机械制造、石油化工等行业.有限元法是计算机辅助设计的重要组成部分,利用 ANSYS 软件对结构复杂的控制阀进行了有限元仿真分析.仿真结果我们可以清楚的看到阀体内流体的流动及流体压力对结构的影响.

结果表明:通过流体动力学分析,得出阀芯线型对控制阀前阀后压差有影响,我们应根据不同工况,选择合适的控制阀;通过耦合场分析,得出流体压力对结构影响较大,我们应采取措施,避免应力集中现象,提高阀体的使用寿命.

### 参考文献:

- [1] 何衍庆,邱宣振,杨洁,等.控制阀工程设计与应用[M].北京:化学工业出版社,2005:2-7.  
HE Yan-qing, QIU Xuan-zhen, YANG Jie, et al. Control valve engineering design and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:2-7.
- [2] 宋勇,艾宴清,梁波,等.ANSYS7.0有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2004:1-3.  
SONG Yong, AI Yan-qing, LIANG Bo, et al. ANSYS7.0 finite element analysis[M]. Beijing: Qinghua University Press, 2004:1-3.
- [3] 周勇军,顾伯勤.ANSYS软件在调节阀阀芯型线设计中的应用[J].化工机械,2002,29(6):327-329.  
ZHOU Yong-jun, GU Bo-qin. Application of ANSYS in the design of the molded lines of the valve core of an adjustable valve [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2002, 29(6):327-329.
- [4] 杨国来,司国雷.用 ANSYS 对水压锥阀流场的可视化研究[J].机床与液压,2005.No.10:106-107.  
YANG Guo-lai, SI Guo-lei. Visualizing pictures' research of the flow field inside the water hydraulic poppet valve by using the ANSYS[J]. Machine tool & Hydraulic Pressure, 2005. No.10:106-107.
- [5] TIJSELING A S. Water hammer with fluid-structure interaction in thick-walled pipes[J]. Computers & Structures, 2007, 85(11-14):844-851.
- [6] TIJSELING A S, VARDY A E. Fluid-structure interaction and transient cavitation tests in a T-piece pipe[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(6):753-762.
- [7] 周宁.ANSYS机械应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2006:290-295.  
ZHOU Ning. ANSYS mechanical engineering applications[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006:290-295.

(编辑:陈燕)

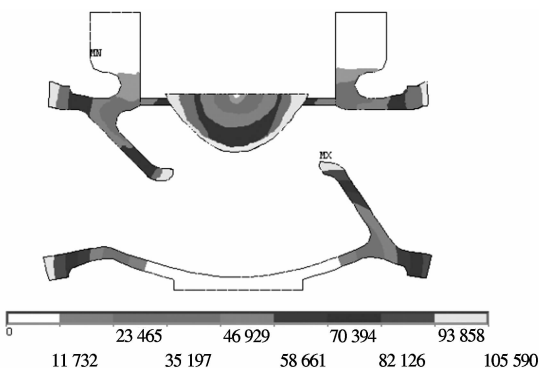


图7 阀体总应力结果显示

Fig.7 The results show of the valve total stress