

文章编号:1674-8190(2014)01-092-07

安溢活门动态流场数值模拟研究

刘靖东,喻天翔,宋笔锋,金朋

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要: 为了研究安溢活门主阀开启过程中的动态流场特性,采用 Fluent 动网格法和用户自定义函数方法对其进行流固耦合数值模拟。通过 Fluent 3D 非定常显式耦合求解器以及虚拟挡板技术求解某时刻主阀腔内的气压力,并通过有限气容充放气过程方程确定背压腔充放气过程对膜片的气压力,得到膜片上的总合力。进而通过求解质量弹簧阻尼系统动力学方程确定主、副活门的运动速度和位移。结果表明:活门开启过程中开度越大,阀道内流场越复杂,流动越不稳定;活门开度增大,阀座处流量线性增加,入口腔流量变化平稳,而出口腔流量波动较大;随着开度增加,活门不同位置和膜片上的气压力变化规律不同。

关键词: 安溢活门;动态流场;数值模拟;流固耦合;Fluent

中图分类号: TB126; V211

文献标识码: A

Numerical Simulation Research of Safety Valve Dynamic Flow Field

Liu Jingdong, Yu Tianxiang, Song Bifeng, Jin Peng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To research the dynamic flow field characteristics of main valve during the safety valve opening period, the Fluent dynamic mesh method and user-defined function method are used for fluid-structure interaction numerical simulation. The pressure load of main valve is obtained through Fluent 3D unsteady explicit coupling solver with virtual baffle technique, and the pressure load of diaphragm during filling and exhausting process is obtained by solving the air-capacitor filling and exhausting process equation. And then the valve speed and displacement are solved through the mass-spring-damping system dynamic equation with total force of diaphragm. Results show that flow field becomes more complex and unstable with larger valve opening degree. With opening degree increasing, throat flow mass increase linearly, inlet flow changes smoothly and outlet flow has an unsmooth fluctuation. Also, the pressure loads located on diaphragm and different places of valve vary differently.

Key words: safety valve; dynamic flow field; numerical simulation; fluid-structure interaction; Fluent

0 引言

安溢活门广泛应用于飞行器常温增压输送系统中,作为增压输送系统一种多种功能元件,它在工作过程中一直处于动态调整状态,动态调整特性是影响其性能指标的关键因素。调整过程不仅包含流体的非定常流动、活门的刚体运动以及弹性敏感元件的变形运动,还包含流体与活门、流体与敏

感元件之间的耦合振动,因此是一个典型的流固耦合问题。安溢活门在使用工程中发生振动和鸣叫问题,其原因有两方面:一方面,系统动态特性未满足稳定性需求;另一方面,阀道流场压力的非定常波动,造成活门及膜片所受气压力的不平衡状态随时间不断变化,一旦不平衡变化与系统结构频率接近就会发生耦合共振,并辐射出强烈的噪声。耦合共振将导致敏感元件的疲劳破裂,最终造成安溢活门功能失效。因此,对安溢活门开展持续而深入的研究具有重要的工程应用价值。

目前,国内外在活门动态特性方面开展了大量研究工作,数值研究主要集中在流场数值模拟以及系统动力学仿真方面。国外,A. Lafond^[1]对比例

收稿日期:2013-10-09; 修回日期:2013-12-19

基金项目:国家自然科学基金(51105308)

通信作者:喻天翔,tianxiangyu@nwpu.edu.cn

转向阀开展了 CFD 模拟,计算了不同开度下的转向效率特性及气动力变化情况,其模拟结果的压力分布与试验测试结果吻合很好;Guillermo Palau Salvador 等^[2]采用 Fluent 软件对几何形状较为复杂的控制阀流场开展了数值模拟,并提取了流动集总特性参数,结果表明这些参数的数值预测与试验数据吻合较好;J. Shipman 等^[3]通过对火箭推进系统反馈元件采用高精度组合通用多单元方案进行分析计算,解决了传统 CFD 方法较难求解的问题,并对压力调节类控制阀进行了详细的非定常模拟,探讨了流动不稳定性的物理机理,并对波动的主模态进行了预测。国内,袁新明等^[4]采用孔隙率定义流场空间,对阀道流场进行了数值模拟,并研究其阻力特性,通过阀道的结构优化,寻求到阻力系数和过水断面较小的合理阀道;诸葛伟林等^[5]采用基于非结构、非交错网格的有限体积法,对蝶阀的三维分离流动进行了数值模拟,研究蝶阀流阻系数与关闭角度之间的关系;吴石等^[6]对水管路系统中三种常见阀门的三维分离流动进行数值模拟,并试验研究了阀门上下游的流致噪声问题;刘刚等^[7]根据调节阀阻力特性和流量特性的定义,建立了二者之间的数值关系方程,并基于管道瞬变流理论,提出了调节阀动态特性的数值分析方法,分别对固有流量特性近似为直线和等百分比特性的平板闸阀和球阀在管路系统中的动态特性进行了数值模拟。

本文基于 Fluent 动网格技术,采用用户自定义函数(User-Defined Function,简称 UDF)方法,对指挥式结构安溢活门启闭过程主阀动态流场开展 CFD 数值模拟,研究流场分布、活门及膜片所受气压力,以及进出口、阀座处流量的变化情况,对安溢活门动态特性研究及其设计提供指导。

1 计算模型

指挥式结构安溢活门由主阀和副阀组成,主阀膜片把阀腔分成主阀腔和背压腔,副阀膜片感受压力变化,通过控制副阀启闭来控制背压腔的压力充放,进而控制主阀的启闭,安溢阀工作过程原理如图 1 所示。当副阀腔入口压力低于安溢活门开启压力时,副阀处于关闭状态,主阀腔与背压腔连通($p_A = p_B$),主阀处于关闭状态;当副阀腔压力高于安溢阀打开压力时,副阀开启,主阀腔与背压腔通道

被切断,背压腔与出口腔连通并向外放气,使得背压腔压力降低($p_A > p_B$),主阀膜片在主阀腔与背压腔压差的作用下带动主活阀运动,主阀打开。

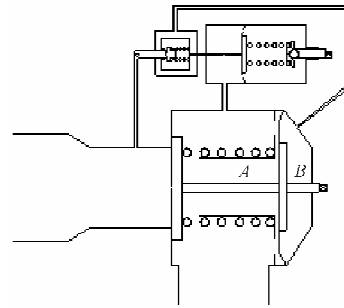


图 1 安溢阀工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of safety valve working principle

本文对安溢活门达到开启压力后背压腔放气并带动主活阀运动的过程进行研究,主要考虑活阀的刚性运动与流体的相互作用,暂不考虑敏感元件膜片变形对流场的影响,膜片非线性刚度由结构有限元计算得出,背压腔简化为绝热充放气定容气容,活门运动规律由质量弹簧阻尼系统方程描述,关阀过程处理为开阀过程的反向镜像。

2 流体控制方程及求解

ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)有限体积描述的三维可压缩非定常 Euler 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{Q} dV + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{F}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

式中: Ω 为控制体; $\partial\Omega$ 为控制体边界; \mathbf{n} 为控制体边界外法向单位向量;守恒变量 \mathbf{Q} 和对流项 \mathbf{F} 为

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e \end{pmatrix}, \mathbf{F}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e + p \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} 0 \\ n_x \\ n_y \\ n_z \\ a_t \end{pmatrix},$$

\mathbf{U} 为流体相对于网格的速度, a_t 为网格运动的法向速度, n_x, n_y, n_z 是 \mathbf{n} 的三个分量。

$$\mathbf{U} = \{(u - x_t), (v - y_t), (w - z_t)\} \quad (2)$$

$$a_t = x_t n_x + y_t n_y + z_t n_z \quad (3)$$

式中: x_t, y_t, z_t 分别为网格运动速度的三个分量。

阀门在自动关阀过程中出口是超声速流动,而容器内则是马赫数极低的不可压缩流动,为了能够较准确地计算流速范围跨度很大的流场,在数值方

法上引入预处理技术。

预处理形式的控制方程为

$$\Gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{q} dV + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{F}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (4)$$

式中: \mathbf{q} 为基本变量, $\mathbf{q} = (p, u, v, w, T)^T$ 。

预处理矩阵为

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \theta & 0 & 0 & 0 & \rho\tau \\ \theta u & \rho & 0 & 0 & \rho\tau u \\ \theta v & 0 & \rho & 0 & \rho\tau v \\ \theta w & 0 & 0 & \rho & \rho\tau w \\ \theta H - 1 & \rho u & \rho v & \rho w & \rho\tau H + \rho Cp \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: θ 为修正后的 $\partial\rho/\partial p$, $\theta = \left(\frac{1}{u_r^2} - \frac{\rho\tau}{\rho Cp}\right)$ 。

当 u_r 的取值为当地声速时, 方程恢复为未预处理的形式, 即

$$\mathbf{u}_r = \begin{cases} c_{\text{local}}, & \text{未预处理} \\ |\mathbf{V}|_{\text{local}}, & \text{预处理} \end{cases} \quad (6)$$

在控制体(三维网格单元)内积分(4)式, 有

$$\frac{\partial(\mathbf{q}V)}{\partial t} = -\Gamma^{-1} \sum_{k=1}^4 \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{S}_k \quad (7)$$

式中: \mathbf{S}_k 为第 k 个积分面的矢量面积。

为了得到积分面上对流项通量的二阶近似, 首先采用泰勒展开法, 由单元中心处向积分面中心对基本变量进行重建, 然后采用通量矢量分裂方法(Van-Leer 或 Steger 分裂法)解决积分面上的 Riemann 问题, 即

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{F}_k^L(\mathbf{q}_L) + \mathbf{F}_k^R(\mathbf{q}_R) \quad (8)$$

基本变量的重建值由下式计算:

$$\mathbf{q}_L = \mathbf{q}_i + \phi_{ij} (\nabla \mathbf{q})_i \cdot \mathbf{r}_{jk} \quad (9)$$

$$\mathbf{q}_R = \mathbf{q}_j + \phi_{ij} (\nabla \mathbf{q})_j \cdot \mathbf{r}_{jk}$$

式中: ϕ_{ij} 是限制器。

采用传统的格林公式求解变量梯度, 即

$$\int_{\Omega} \nabla \mathbf{q} dV = \oint_{\partial\Omega} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS \quad (10)$$

以三维网格单元为控制体, 近似计算上式右端的面积分, 可得单元中心处的变量梯度:

$$(\nabla \mathbf{q})_i = \frac{1}{V_i} \oint_{\partial V_i} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS \quad (11)$$

上述公式中的变量定义如图 2 所示。为了抑制流场中物理量间断处可能出现的数值振荡, 改进 Barth 和 Jespersen 的通量限制器, 即

$$\phi_{ik} = \begin{cases} \min\left(1, \frac{\mathbf{q}_i^{\max} - \mathbf{q}_i}{\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_i}\right) & \mathbf{q}_k - \mathbf{q}_i > 0 \\ \min\left(1, \frac{\mathbf{q}_i^{\min} - \mathbf{q}_i}{\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_i}\right) & \mathbf{q}_k - \mathbf{q}_i < 0 \\ 1 & \mathbf{q}_k - \mathbf{q}_i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{q}_i^{\max} = \max(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)$, $\mathbf{q}_i^{\min} = \min(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)$, $j = 1, \dots, 4$, 下标“ j ”为单元 i 的四个面相邻单元。

$$\mathbf{q}_k = \mathbf{q}_i + (\nabla \mathbf{q})_i \cdot \mathbf{r}_{ik} \quad (13)$$

$$\phi_i = \min(\phi_{ik}, k = 1, \dots, 4) \quad (14)$$

$$\phi_{ij} = \min(\phi_i, \phi_j) \quad (15)$$

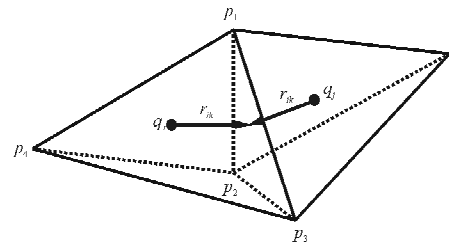
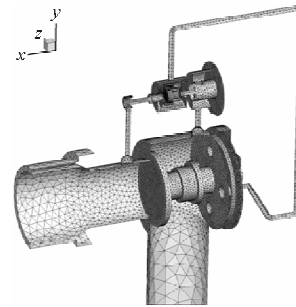


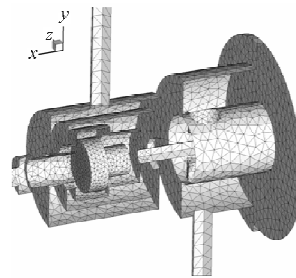
图 2 变量定义方式示意

Fig. 2 Schematic diagram of variable definition

安溢活门流固耦合计算采用非结构化网格, 几何建模包括指挥阀和连通管, 如图 3 所示。



(a) 整阀表面网格



(b) 指挥阀表面网格

图 3 整阀及指挥阀表面网格

Fig. 3 Surface mesh model of the whole valve and command valve

3 自定义函数 UDF

(1) 气容充放气过程方程

有限气容充放气过程方程为

$$\pm kRT \sum Q_m = kp \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} \quad (16)$$

$$Q_m = f\left(\frac{p_0}{p}, A\right) = \begin{cases} \frac{\alpha A p B}{\sqrt{T}} \varphi\left(\frac{p_0}{p}\right) & \frac{p_0}{p} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\alpha A p C}{\sqrt{T}} & \frac{p_0}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: Q_m 为等熵流动质量流量; $\varphi\left(\frac{p_0}{p}\right) =$

$$\sqrt{\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{2k+1}{k}}}; \quad B = \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}}; \quad C = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}}; k \text{ 为绝热指数}; R \text{ 为气体常数}; \alpha \text{ 为流量系数}; A \text{ 为节流面积}; p_0 \text{ 为大气压}; p, V, T \text{ 分别为背压腔压力、容积、温度。}$$

(2) 动力学方程

活门质量弹簧阻尼系统动力学方程

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (18)$$

式中: M 为系统质量; C 为阻尼系数; K 为系统刚度; $F(t)$ 为合外力; $x(t)$ 为活门位移。

通过 CFD 计算求解某时刻主阀腔内的气压力,并通过式(16)和式(17)确定背压腔充放气过程对膜片的气压力,得到膜片两侧的压差,进而通过式(18)确定主、副活门的运动速度和位移,得到新的活塞开度,再求解下一个时刻主阀腔内的气压力,以实现流固耦合计算。

4 虚拟挡板技术

主活塞和小活塞从紧密关闭到开启的过程,采用虚拟挡板技术。虚拟挡板技术详见参考文献[8]。根据所能承受的最小网格尺度,在网格生成时人为地在主活塞与排气口之间布置一个宽度为 1.6 mm 的虚拟挡板,在指挥阀内小活塞处布置两个 1.0 mm 的虚拟挡板,如图 4 所示。指挥阀小活塞处直径较大的虚拟挡板控制指挥阀与控制腔之间的连通,直径较小的虚拟挡板实现控制腔与出口之间的连通。由于指挥阀拉杆拉套与衬套之间是滑动间隙配合,存在漏气量,若想实现对该漏气量的模拟,只需在指挥阀与控制腔之间的虚拟挡板上

始终保留一个微小的通气缝隙。

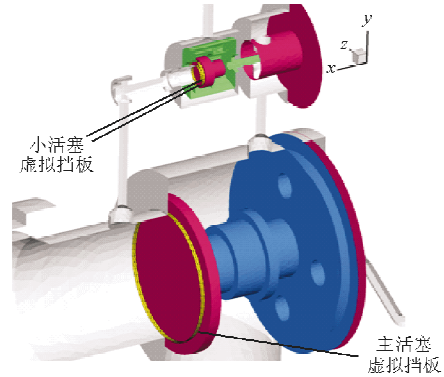


图 4 虚拟挡板设置

Fig. 4 Setting of virtual baffle

动网格计算中敏感元件的运动规律采用如下的处理方法:当主活塞开度小于 1.6 mm 时,由虚拟挡板部分通气模拟真实开度,此时虚拟挡板网格不动,主活塞的前端面(出口一侧)设定为固定不动;当主活塞开度大于 1.6 mm 时,虚拟挡板全通气并随着活塞运动作拉伸动网格处理,主活塞的前端面按照计算出的位移作平动。主活塞的后端面(阀腔一侧)始终按照计算得出的活塞位移作平动。主膜片被硬芯和压板覆盖的部分及硬芯也按活塞位移作平动,主膜片在压板以外的部分则沿径向作线性变形。指挥阀内由于拉套与右壳体间的空间较小,作动网格处理容易导致质量较差的网格出现,并且拉套的运动不会导致右壳体内体积的变化,因此在指挥阀内仅对小膜片作动网格处理。小膜片的运动规律是沿径向作线性变形。

5 结果分析

5.1 主阀动态位移

开闭过程中活塞位移曲线如图 5 所示。

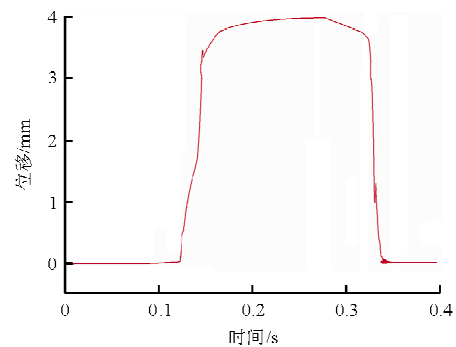


图 5 主阀位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of main valve

从图 5 可以看出,在行程上限或行程下限处均有振荡,这与参考文献[8]得出的结论吻合。

5.2 流场分析

不同活门开度下速度场、压力场的分布图像如图 6 所示。

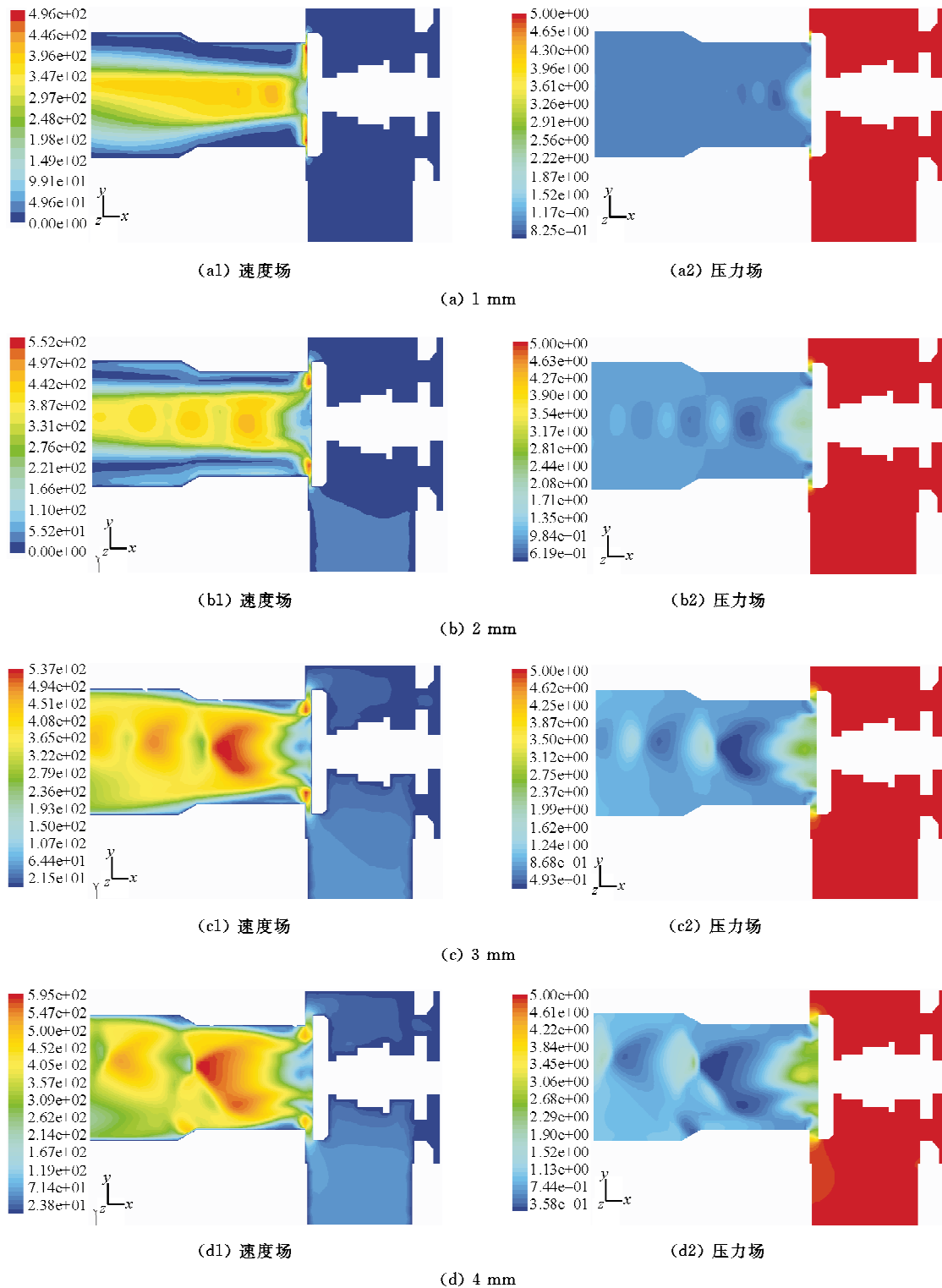


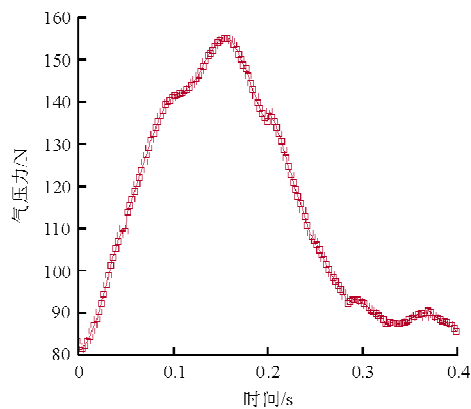
图 6 不同活门开度下速度场、压力场

Fig. 6 Velocity and pressure fields with various valve opening degree

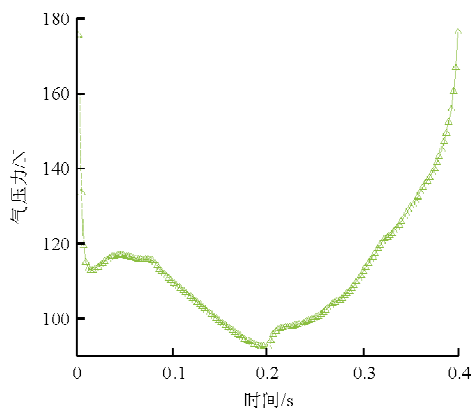
从图 6 可以看出:随着开度变化,阀道流场变化很大,开度越大出口流场越复杂,流动越不稳定。反映在对活门运动的影响上,表现为活门背面流动滞止区随着开度的变大不稳定性越来越大,压力波动也越来越强烈。

5.3 气压力分析

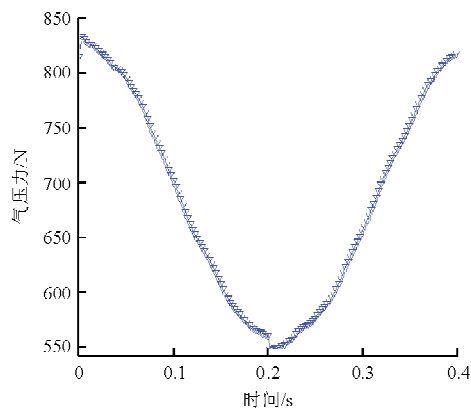
活门背面中心圆面、背面环面、正面以及膜片上所受的气压力随时间变化情况如图 7 所示,活门在 0.2 s 达到最大开度后反向镜像关闭。



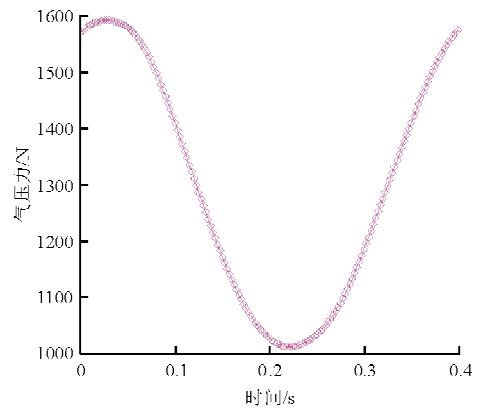
(a) 活门背面中心圆面



(b) 活门背面环面



(c) 活门正面



(d) 膜片

图 7 活门及膜片所受气压力

Fig. 7 Pressure of valve and diaphragm

从图 7(a)、图 7(c)和图 7(d)可以看出:活门背面中心圆面上气压力随着开度变大而变大,随着开度减小而减小,活门正面以及膜片上作用力则相反,这是因为随着开度的增加阀道内流动速度越来越大,必然造成主阀腔内静压下降;而阀口流量的增加必然导致更多流体在活门背面滞止区聚集,从而造成当地静压升高。

从图 7(b)可以看出:活门背面与阀座作用环面上气压力的变化则比较复杂,活门开启瞬间气压作用力迅速下降,略微回升后又随着开度的增大不断下降,开度达到最大时作用力达到最小;在活门关闭过程中该作用力则是随着开度的减小不断地变大,不存在开启时刻的突变现象。

5.4 流量分析

流量特性是阀门一个重要性能指标,入口、阀座及出口流量随活门开度变化情况如图 8 所示。

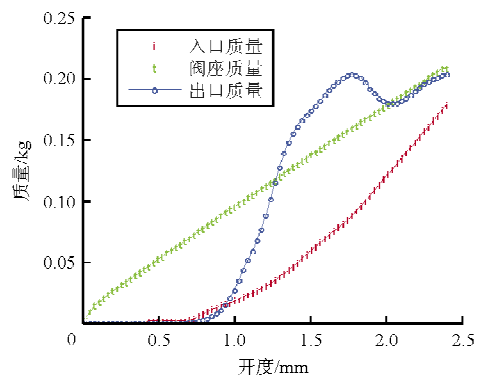


图 8 入口、阀座、出口流量随活门开度的变化
Fig. 8 Changes of flow mass of inlet, throat, and outlet with different opening size

从图8可以看出:阀座处流量随开度呈线性增加,这是因为阀座处流动处于临界状态,流量仅与上游参数和流通面积有关,在上游流动参数变化不大的情况下,流量与流动面积呈正比关系,通过这种换算可折算出该结构形式的流量系数,这对系统动力学仿真分析很有意义;入口及出口在活门开启一定开度后才有流量,这体现着主阀腔及出口腔的容积效应,之后入口流量在随着开度的增加而单调增加,而出口流量则变化复杂,表明入口腔流动随开度变化平稳,而出口腔则波动较大。

6 结 论

(1) 本文采用流固耦合数值模拟方法,得到了主阀动态位移,并准确预测了在行程上限和下限处的振荡。

(2) 活门开度越大,流场越复杂,流动也越不稳定。

(3) 活门开度越大,活门背面中心圆面气压力越大,而活门正面和膜片上的气压力越小。随开度增加活门背面环面上气压力变化复杂。

(4) 阀座处流量随开度增大线性增加,入口腔流动随开度增大变化平稳,而出口腔处流量波动较大。

(5) 下一步的工作分为两个方面,一是进行安溢活门动态位移测量研究,以验证本文方法的合理性;二是结合动力学仿真,根据三维流场数据对系统动力学仿真模型关键参数进行校核,以进行系统的全局性能分析和优化设计。

参考文献

- [1] Lafond A. Numerical simulation of the flowfield inside a hot gas valve[R]. AIAA-99-1087, 1999.
- [2] Guillermo Palau Salvador, Jaime Arviza Valverde, Steven H Frankel. Three-dimensional control valve with complex geometry: CFD Modeling and Experimental Validation[C]. 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Portland, OR, 2004.
- [3] Shipman J, Hosangadi A, Ahuja V. Unsteady analyses of valve systems in rocket engine testing environments[R]. AIAA-2004-3663, 2004.
- [4] 袁新明, 毛根海, 张士乔. 阀门流道流场的数值模拟及阻力特性研究[J]. 水力发电学报, 1999(4): 60-66.
Yuan Xinming, Mao Genhai, Zhang Tuqiao. The numerical simulation of flow field and resistance characteristics of valve pipe[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999(4): 60-66. (in Chinese)
- [5] 诸葛伟林, 刘光临, 蒋劲, 等. 蝶阀三维分离流动的数值模拟研究[J]. 流体机械, 2003, 31(6): 14-16.
Zhuge Weilin, Liu Guanglin, Jiang Jin, et al. Numerical investigation on 3-D separate flow of butterfly valve[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(6): 14-16. (in Chinese)
- [6] 吴石, 张文平. 阀门流场的数值模拟及流噪声实验研究[J]. 阀门, 2005(1): 7-10.
Wu Shi, Zhang Wenpin. Investigated numerically on flow field of valves and experimental study of valvenoise[J]. Valve, 2005(1): 7-10. (in Chinese)
- [7] 刘刚, 方金春, 雍歧卫. 调节阀动态特性的数值模拟[J]. 阀门, 2004(4): 8-11.
Liu Gang, Fang Jinchun, Yong Qiwei. The numerical simulation of the regulate valve's dynamic characteristics in long pipeline[J]. Valve, 2004(4): 8-11. (in Chinese)
- [8] 郭正, 刘君, 陈广南. 安溢活门动态特性的流固耦合数值分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 61-66.
Guo Zheng, Liu Jun, Chen Guangnan. Numerical analysis of dynamic properties of safety valve by using method of fluid and structure interaction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 61-66. (in Chinese)

作者简介:

刘靖东(1979—),男,博士研究生。主要研究方向:结构动态特性分析、流固耦合分析。

喻天翔(1977—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器结构/机构可靠性分析。

宋笔锋(1963—),男,教授,博导。主要研究方向:飞机多学科设计优化与顶层决策技术、系统/结构/机构可靠性与维修性等。

金朋(1986—),男,博士研究生。主要研究方向:结构优化设计、复合材料结构设计。

(编辑:赵毓梅)