

电磁阀内部流场数值模拟

马莹雪, 孙得川

(西北工业大学航天学院, 陕西西安 710072)

摘要: 在液体火箭发动机系统仿真过程中, 对于控制发动机脉冲工作的电磁阀, 其数学模型建立的准确性将对仿真结果产生很大的影响。本文采用商用 CFD 软件 Fluent, 对某电磁阀分别进行了稳态流场和非稳态流场的数值计算。通过稳态流动模拟, 得到了电磁阀出口的质量流量和阀门前后压降的关系式。通过非稳态流场的计算, 得到了电磁阀出口的质量流量以及阀门前后压降随阀门关闭过程的变化情况, 并对流量和压降的这种变化进行了分析。结果表明: 使用 Fluent 软件对阀门内部流场进行数值模拟, 较好地反映了其工作状态, 是建立电磁阀数学模型的基础。

关键词: 电磁阀; 流场; 数值模拟; 液体火箭发动机

中图分类号: TK421.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2008)1-111-3

The Numerical Simulation of the Flow Field in an Electromagnetic Valve

MA Yingxue, SUN Dechuan

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: The precision of the mathematical modeling of the electromagnetic valve, which is used to control the pulse operation, leads to a great influence on the liquid rocket engine simulation. The commercial CFD software, Fluent, was used to simulate the static and dynamic flow field of an electromagnetic valve. The function between the flow mass rate and the drop of pressure through the electromagnetic valve was obtained from the results of static flow field simulation. From numerical simulation of the unsteady flow, the valve closed procedure was calculated. The results indicate that the inner flow field numerical simulation of the valve by Fluent can reflect its working procedure, which is useful for building the mathematical model.

Keywords: Electromagnetic valve; Flow field; Numerical simulation; Liquid rocket engine

电磁阀是液体火箭发动机中重要的控制元件, 在姿控发动机的工作过程中, 阀门多处于脉冲工作状态, 其动态特性直接影响到发动机的正常工作。为了深入了解阀门的静态和动态性能, 建立相对准确的数学模型, 从而进一步开展发动机系统的仿真工作, 有必要对电磁阀的内部流场进行数值模拟。

由于阀门内部结构的复杂性以及多样性, 导致人们对阀门不能够建立精确的数学模型, 常用的经验公式只能得到稳态时流量与压降开方值呈线性化的关系, 因此需要通过稳态数值模拟的方法得到该线性化关系的系数。在考虑阀门动态工作过程时, 作用在阀芯上的力不止有电磁力, 还有阀门内部流场的流动对阀芯运动时的影响, 所以阀门的动态数学模型是不能够通过经验公式得到的。

笔者所作的主要工作: (1) 通过稳态流场的数值模拟, 得到阀门内部的流动状态和压力损失情况, 建立该阀的静态数学模型。(2) 通过非定常计算, 得到阀芯在运动过程中阀门出口推进剂流量以及阀门压降等参数随阀门闭合时间的变化情况。

1 几何模型及工作原理

图1是某电磁阀的结构简图, 它主要由阀套和阀

芯等组件构成。由图可知, 流体在电磁阀内的流动是轴对称的, 流体流入阀腔, 在阀腔端部由2个斜45°的圆孔将其导流出阀腔, 随后流向出口。

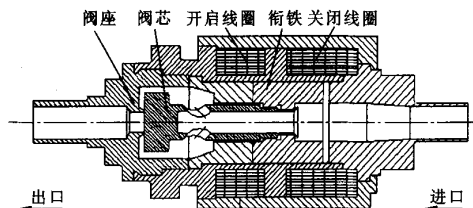


图1 电磁阀结构示意图

实际阀腔的三维模型: 在一个有厚度的直管上对称地开2个孔, 孔的中轴线与管的中轴线成45°夹角, 且位于同一平面。简化后的阀腔二维模型: 取孔与管的中轴线所在平面作为参考面, 将三维直管在此平面上简化为一个有厚度的二维直管, 由于对称孔的影响, 此二维直管被截断成2个二维直管, 其切面成45°。由于三维模型中的2个斜45°圆孔的流通面积与二维模型中的两切面之间的流通面积相同, 因此可以将该三维模型简化为二维模型。

该电磁阀为双稳态电磁阀, 采用电磁驱动, 在完

收稿日期: 2007-01-23

作者简介: 马莹雪(1982—), 女, 北京人, 硕士研究生, 主要研究方向为液体火箭发动机系统仿真及组件的数值计算。电话: 029-88494641, E-mail: mayingxue@mail.nwpu.edu.cn。

成开启/关闭动作后，通过永磁将衔铁保持在最后的工作位置上，无需额外施加电源。

2 流体力学基本方程

假设流体为不可压缩流体，忽略重力的影响，且在阀内部的流动为定常流动，列出流体在阀内部二维流动的控制方程。

流量连续性方程： $\partial u_x / \partial x + \partial u_y / \partial y = 0$ (1)

Nacier-Stokes 方程 (简称 N-S 方程) 为：

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x = u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y = u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

式中： ρ 为流体密度； u_x 、 u_y 分别为流体沿 x 轴、 y 轴方向的速度分量； p 为流体压强； ν 为流体运动粘度。

3 计算网格与边界条件

3.1 网格划分

计算网格由 Fluent 的前处理器 Gambit 软件来生成。采用非结构网格的划分方法，将流体流动区域划分为 61 120 个面网格。在考虑动网格计算时，针对阀芯的运动，编写阀芯的运动函数并在 Fluent 中进行编译，分别将阀芯运动区域中需要压缩或拉伸的各边 (包括 Wall 和 Axis 上的各条线段) 设置为变形 (Deforming)，再将阀芯上需要移动的部分统一设置为刚性体 (Rigid Body)，使用 UDF 文件控制此运动。阀芯的运动方程为：

$$v_{i+1} = v_i + a(t) dt \quad (3)$$

式中： v_{i+1} 为阀芯在 $t+1$ 时刻的运动速度； v_i 为阀芯在 t 时刻的运动速度； $a(t)$ 为阀芯在 t 时刻的加速度； dt 为阀芯运动的时间步长。

3.2 边界条件

在静态仿真过程中，选用偏二甲肼、水和四氧化二氮作为流体，为得到入口质量流量与阀门出口和入口相应压降的对应关系，入口边界条件选用流量入口 (Mass_flow_inlet) (此时局部进口总压是变化的，用以调节速度，从而达到给定的流量)，出口边界条件选用 Outflow (出流边界上的压力或速度均为未知的情形下，选用此条件)。

在动态仿真过程中，入口边界条件选择压力入口 (Pressure-inlet) (通常用于流体在入口处的压力为已知的情形)，出口边界选择压力出口 (Pressure-outlet) (压力根据内部流动计算结果给定，其它量都是根据内部流动外推边界条件)。

3.3 计算初值

(1) 静态仿真

电磁阀初始为开启状态，计算过程中，通过选用不同流体介质、改变入口条件质量流量的大小，得到阀门在不同状态下的流动参数，从而拟合出其静态特

性。选取的质量流量的范围为 $0 \leq \dot{m} \leq 0.28 \text{ kg/s}$ 。阀门入口及出口的直径均为 8.4mm。

(2) 动态仿真

电磁阀初始为开启状态，本文的计算选择入口质量流量为 $\dot{m} = 0.12 \text{ kg/s}$ 的稳态工况下的数值仿真结果作为初值，阀芯质量为 0.05kg，假设电磁力为恒值 15N，阀芯在该电磁力下按公式 (3) 开始运动，总位移为 1mm，直至电磁阀关闭，仿真结束。

4 数值计算结果与分析

4.1 稳态数值计算结果

计算过程中，通过改变入口条件，得到阀门在不同状态下的流动参数，从而拟合出其静态数学模型。

表 1 各介质的物理性质

名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	热导/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	粘性
UDMH	791.4	2 731.3	0.575 6	0.001 6
H ₂ O	998.2	4 182	0.6	0.001 003
N ₂ O ₄	1 450	1 574	0.351 8	0.000 786

表 2 入口质量流量和对应压降值

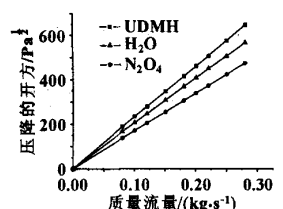
工况	$\dot{m}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta p_{\text{N}_2\text{O}_4}/\text{Pa}$	$\Delta p_{\text{H}_2\text{O}}/\text{Pa}$	$\Delta p_{\text{UDMH}}/\text{Pa}$
0	0	0	0	0
1	0.08	18 711.12	26 820.9	35 568.20
2	0.10	29 108.64	41 554.61	54 958.06
3	0.12	41 746.81	59 418.95	77 937.22
4	0.15	64 759.46	92 437.57	120 777.49
5	0.18	93 304.17	138 285.9	172 982.00
6	0.20	114 982.80	170 603.1	212 941.40
7	0.22	139 062.06	206 688.89	257 126.73
8	0.25	179 715.16	255 764.86	331 385.21
9	0.28	225 071.24	320 191.98	418 137.86

由表 2 可看出，各流体介质均随着阀门入口质量流量的增加，使阀门上、下游的压降增大；且由于各介质的密度、粘性系数不同，导致了在相同质量流量下，介质密度越小、粘性越大，阀门压差越大。

$$\text{常用经验公式为: } \dot{m} = C_d A_v \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad (4)$$

式中： \dot{m} 为通过阀门的质量流量； C_d 为流量系数； A_v 为阀门有效出口面积； Δp 为阀口压差； ρ 为流体密度。

由常用经验公式 (4) 可看出，当电磁阀中有某种流体介质流过时，阀门有效出口面积不变的情况下，阀的出口质量流量和阀门压降的平方呈线性关系。因此将数值计算得到的数据用图形表示出来，以便观察。



由图 2 可看出，入口质量流量和相应压降开方值基本呈线性分布，因此

图 2 入口质量流量和相应压降开方值曲线

对三组数据分别进行线性拟合，可得到入口质量流量和相应压降开方值的关系式：

$$\dot{m} = 4.32774 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p_{UDMH}} \quad (5)$$

$$\dot{m} = 4.90952 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p_{H_2O}} \quad (6)$$

$$\dot{m} = 5.89495 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p_{N_2O_4}} \quad (7)$$

分析公式(5)~(7)，可知将各公式 $\sqrt{\Delta p}$ 前的系数分别除以各自的 $\sqrt{\rho}$ ，得到：

公式(5)可化为：

$$\dot{m} = 0.1538 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p_{UDMH} \rho_{UDMH}} \quad (8)$$

公式(6)可化为：

$$\dot{m} = 0.1554 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p_{H_2O} \rho_{H_2O}} \quad (9)$$

公式(7)可化为：

$$\dot{m} = 0.1548 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p_{N_2O_4} \rho_{N_2O_4}} \quad (10)$$

因此可将该阀门的静态数学模型归纳为：

$$\dot{m} = 0.1547 \times 10^{-4} \sqrt{\Delta p} \quad (11)$$

对于四氧化二氮 (N_2O_4) 来说，质量流量与公式(10)的偏差大概为 0.064%；对于水 (H_2O) 来说，偏差大概为 0.45%；对于偏二甲肼 (UDMH) 来说，偏差大概为 0.58%。

综上所述，说明公式(11)可以较确切地表示阀门出口质量流量与流体介质、阀门上下游压差的关系，阀门的静态数学模型建立完毕。

4.2 非稳态数值计算结果

在电磁阀进行关闭时，作用在阀芯上的力不仅有电磁力，还有由于液体压差作用在阀芯上的合力，使电磁阀以加速度为 $a(t)$ 开始运动。加速度为：

$$a(t) = \frac{F_{mag} \pm F_f(t)}{m} \quad (12)$$

$$F_f(t) = \sum_{i=1}^n A_{imove} p_i(t) \quad (13)$$

式中： $a(t)$ 为阀芯在 t 时刻的运动加速度； F_{mag} 为电磁阀的电磁作用力，关闭过程 F_{mag} 取负值； $F_f(t)$ 为阀芯在 t 时刻所受的液体阻力； A_{imove} 为阀芯第 i 个移动部分的面积； $p_i(t)$ 为阀芯第 i 个移动部分在 t 时刻所受的压力； $1, \dots, n$ 为阀芯移动部分被划分的编号。

由数值模拟得到阀门由开启到闭合的时间为 3.64ms。如图 3、4 所示为电磁阀内部流场分别在 0、2、3.63ms 时的速度与压力图。由图可以看出，在阀门即将关闭的时候，入口的流动速度趋近于 0，阀芯上游的压力逐渐变大；在阀门闭合时间为 0 和 2ms 时，可以看出此时阀门入口质量流量以及前后压降变化不大，因此随着阀门有效截面积的减小，流体在经过阀芯后，速度较大，压力较小。

如图 5 所示，可以看到阀芯运动过程中发生的一些现象，以下将对出现的现象进行解释：

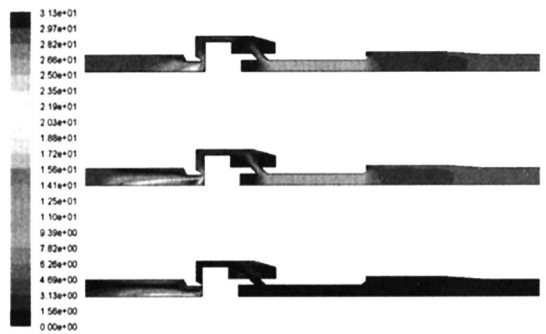


图 3 $t=0, 2ms, 3.63ms$ 内流场的速度图

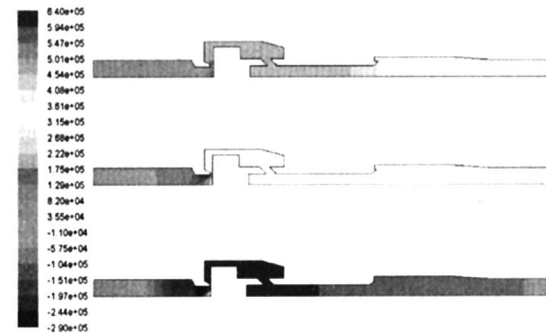


图 4 $t=0, 2ms, 3.63ms$ 内流场的压力图

(1) 阀门出口质量流量的总体变化趋势为减小，压降的总体变化趋势为增大。这是由于阀门的由打开到闭合的过程中，阀门的有效截面积逐渐减小，直至最终闭合，使截面积为 0，导致出口的质量流量为 0；阀门闭合过程中，由于阀芯的运动，逐渐切断阀门下游的压力，因此会使压差增大。

(2) 当阀门逐渐闭合时，质量流量会出现增大的现象，压差会出现降低的现象。这是由于电磁阀的阀芯在闭合的运动过程中，其流体通道的有效截面积在不断地减小，因此造成电磁阀入口和出口之间压差的增大。截面积的减小会对流量起减小的作用，而压差的增大会对流量起增大的作用。因此当截面积减小的影响小于压差增大的影响时，电磁阀虽然在闭合，但是流量却处于增大的状态；当截面积减小的影响超过了压差增大的影响时，电磁阀流量就不可避免地减小，直至阀芯完全闭合。

(3) 阀门运动的后半程（阀芯运动总路程为 1mm），每 0.2ms 之间所取样点的质量流量和压降的变化梯度逐渐增大。这是由于阀芯在做加速运动，因此在阀芯运动过程的后期，它的运动速度逐渐增大，使得所取相同时间间隔样点的质量流量和压降的值受阀芯运动位移的影响较大，从而使得它们的变化梯度较大。

从图 6 中可观察到，在电磁阀闭合的非稳态计算中，每一个时刻阀门进、出口的流量并不相等，出口

(下转第 131 页)

采用双层钛合金筒体结构，用尽量简捷的支撑结构将两个筒体隔开，两筒体的中间间隙填充粉末型保温材料，再抽成真空，使其导热系数达到 0.005 以下，入口和出口的管道分别采用 0.5m 长的毛细钛合金管（内径 1mm，外径 3mm），这样可以很好地解决热传导和热对流问题，同时，将内筒的外壁和外筒的内壁涂上水银反射层，解决热辐射问题。

仿真后得到 6h 热液中心温度变化曲线，见图 7。

本方案的关键是真空度、填充保温材料的导热系数和小导热系数最简化支撑环

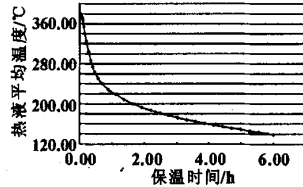


图 7 6h 热液中心温度变化曲线

3 结束语

与一般的机械结构设计不同，采样器的工作环境很难在实验室里模拟，而且采样器样机的制造周期较长，投资大，可供参考的设计资料非常少，因此在研究时必须用实验、理论与计算机仿真技术相结合的方法进行。

结合样机实验和有限元仿真技术，首先用系列实验验证仿真的可靠性和准确性，在有限元方法完全掌握后，再利用计算机进行新型结构的设计和分析，获得可行的方案，再用大量实验进行验证，最终获得有效的设计。

有限元技术已相当成熟，大多数工程问题可以用有限元方法进行分析和研究，尤其当课题中遇到的高温高压热液很难在实验室里获得，因此仿真方法就必不可少。同时使用仿真技术不需要太多的数学基础，也是该方法广泛使用于工程设计的原因。

参考文献

- [1] 陈鹰. 海底热液科学考察中的机电装备技术 [J]. 机械工程学报, 2002, 38.
- [2] Jeffery S. Seewald, Kenneth W. Doherty. A new gas-tight isobaric sampler for hydrothermal fluids [J]. Deep-sea Research I, 2001 (49).
- [3] 陈鹰, 杨灿军, 顾临怡. 基于载人潜水器的深海资源勘探作业技术研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39.
- [4] ANSYS Inc. ANSYS User's Manual for Rev. 9.0 [M]. U. S. A: ANSYS Inc, 2004.
- [5] 张耀明, 李巨白, 姜肇中. 玻璃纤维与矿物棉全书 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [6] 李皓月. ANSYS 工程计算应用教程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [7] Saeed Moaveni. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

(上接第 113 页)

的流量总是稍稍大于进口的流量。导致这种情况的出现，是因为此电磁阀的构造造成的。阀芯在闭合时，不断挤占流通通道的一部分空间。因而在阀芯闭合时，不断排挤部分流体流出口，造成出口质量流量大于进口，且两者之差在开始时不断增大，这也与电磁力使得阀芯做加速运动相一致。在阀芯快要闭合上时，进出口的流量差有所缓和，并有一定程度的减小，这也与此时作用在阀芯上的电磁力和流体对其阻力的合力减小有关，因此减缓了阀芯的闭合速度。同时从进出口流量之差的变化也可以看出，Fluent 软件在非稳态计算时能够很好地计算出非定常量的变化。

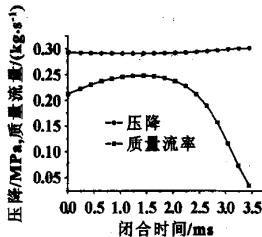


图 5 压降及出口质量流量随时间变化图

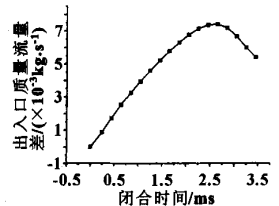


图 6 出口、入口质量流量差随时间变化图

5 结论

本文通过使用 CFD 软件 Fluent 对该电磁阀进行内流场稳态和非稳态的数值模拟，并对模拟结果进行了分析。由分析结果可知：对于一个阀门的精确建模，使用传统阀门建模公式会带来较大误差，需要使用 Fluent 软件对其进行不同输入条件的数值模拟计算，通过多个工况的所得的值，进行拟合，得到较为精确地质量流量与阀门入口和出口压降的关系式。随着阀芯受到电磁力的作用闭合阀门，不仅得到了阀门的闭合时间，还得到了阀门内部流场的一些流动规律。得到电磁阀静态数学模型以及动态的流动规律，对整个姿控发动机系统仿真的准确性有了更多的保证。

参考文献

- [1] Hanz Richter. Modeling, Simulation and Control of a Propellant Mixer [J]. AIAA, 2003: 5245.
- [2] Peter A. Cavallo. Transient Simulations of Valve Motion in Cryogenic Systems [J]. AIAA, 2005: 5152.
- [3] V. Ahuja. Analyses of transient event in complex valve and feed systems [J]. AIAA, 2005: 4549.
- [4] 魏青, 韩云霞. 用于微小卫星的卫星双稳态电磁阀 [J]. 上海航天, 2005 (2): 55-58.
- [5] 卢启龙. 电控柴油喷射系统用高速强力电磁阀的工作特性研究 [J]. 车用发动机, 1996 (1): 27-33.
- [6] 韩占忠, 等. Fluent 流体工程仿真软件计算实例与应用 [M]. 北京理工大学出版社, 2004.