

自力式调压阀变开度流场及特性分析*

李 哲, 魏志军, 张 平

(北京理工大学 宇航科学与技术学院, 北京 100081)

摘 要: 以研究自力式调压阀性能为目的, 利用动态网格方法对阀门内流场进行数值模拟。通过对不同入口流量和弹性系数的多个算例分析得到: 稳定压力和入口流量呈直线关系; 稳定压力、阀门开度和弹性系数呈二次曲线关系。调压阀在入口质量流量变化时, 阀门可以很快稳定, 实现对压力和流量进行的调节。

关键词: 燃气发生器; 压力控制阀; 流动分布; 动态网格⁺; 弹性系数

中图分类号: V235.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 05-0622-05

Analysis of characteristic and flow field of self operated pressure-regulating valve

LI Zhe WEI Zhi-jun ZHANG Ping

(School of Aerospace Science and Engineering Beijing Inst. of Technology Beijing 100081, China)

Abstract In order to analyze the work performance of pressure-regulating valve, numerical calculation of the internal flow field was carried out by means of dynamic mesh. Some cases of different inlet mass flow rate or stiffness coefficient were analyzed and it came to the conclusion that the relationship between inlet pressure and mass flow rate was linear and the relationship between inlet pressure or opening of valve and stiffness coefficient was conic. With variational inlet mass flow rate, the valve can be stable and regulate the pressure and mass flow rate.

Key words Gas generator; Pressure control valve; Flow field; Dynamic mesh⁺; Stiffness coefficient

1 引 言

燃气发生器是火箭、导弹等飞行器的重要部件。燃气阀起到了调节发生器内部压力和流量的作用, 其性能的好坏直接影响燃气发生器的工作。但是要准确测试阀门内部流场的详细情况是十分困难的, 因此需要数值计算这样的辅助工具, 在实验的基础上来获得阀门内部流场更为详尽的数据, 以便于改进阀门的流动特性以及研究阀门的流量特性。

国内外对固体燃气调压阀作了一些研究, 提出了一些新的设计思路, 在耐高温复合材料以及阀门内流场等方面进行了研究^[1~5], 弓永军等人计算了 4 种不同阀芯的内流场, 分析了阀芯型面对水利阀门性能的影响^[6]。

本文采用动态网格对阀门内流场进行计算, 在不

同质量流量和弹性元件条件下, 研究了阀门的调节能力和动态特性, 并且得到了稳定压力和质量流量、弹性系数之间的关系。

2 工作原理

燃气发生器采用端燃药柱, 在工作时, 工作气体通过固定节流孔流向伺服系统, 另外一部分经过调压阀排入大气。调压阀结构如图 1 所示, 阀芯的后端装有一个弹性元件, 设计有一定的预紧力, 使阀门在非工作状态关闭。

燃气发生器产生大量燃气, 工作气体由固定节流孔流向伺服系统。当压力超过限定值时, 阀门打开, 阀门分流部分燃气, 使燃烧室内部压力减小。经过一系列动态响应过程, 最终达到一个平衡状态, 入口压力越大阀门开度也越大, 阀门分流燃气越多, 从而使

* 收稿日期: 2007-06-12 修订日期: 2008-06-12

作者简介: 李 哲 (1981—), 男, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: lizhe@bit.edu.cn

燃气发生器内部压力和进入气动元件的燃气流量稳定在一定范围内。

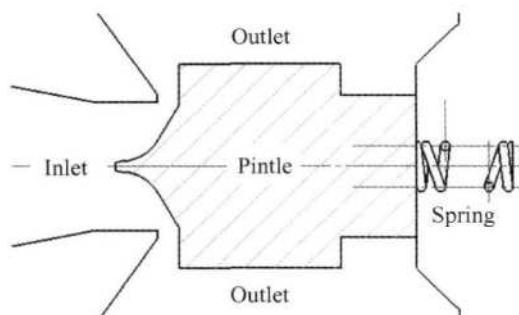


Fig 1 Configuration of the regulating valve

3 计算模型与边界条件

3.1 计算模型

如图 1, 计算所采用的调压阀入口直径为 7 mm, 阀芯直径为 10 mm。由于计算资源和时间的限制, 计算域取图 1 中喉部附近小部分。这一区域包括了整个流场中物理量变化最剧烈的部分, 而且这一区域的仿真结果可以分析阀芯的受力、阀芯的移动特性和阀门的流量特性, 完全可以满足本次仿真的要求。

在每一时间步, 由软件 FLUENT 6.2 计算压力和阀芯受力, 由子程序读入此数据以计算阀芯的速度、位移, 然后将子程序计算出的数据赋值给 FLUENT 6.2 作为边界条件和阀芯移动条件进行下一个时间步的计算。

内流场简化为二维轴对称可压缩的非稳态湍流流动, 计算采用 PISO 算法, 湍流模型采用标准雷诺数 k - ϵ 两方程模型^[7]。

计算采用的网格如图 2 所示, 网格整体分为两大部分, 1 区为动态网格区域, 采用非结构的三角形网格, 动态网格采用弹性拉伸 (Smoothing) 和网格重划 (Remeshing) 方法; 2 区是静态网格区域, 这一区域的网格是四边形结构网格; 两个部分由 interfaces 连

接。阀芯型面形状不变, 按照程序的要求前后移动。

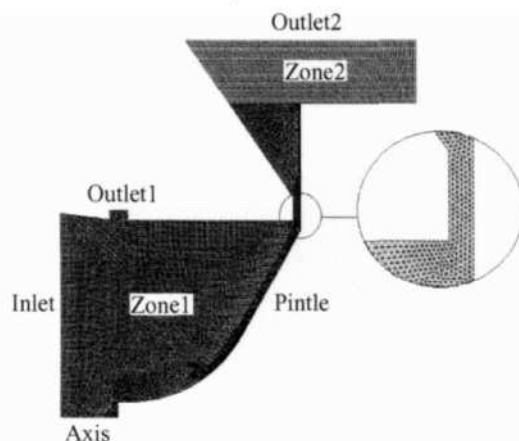


Fig 2 Model of flow field

3.2 边界条件

(1) 入口边界条件

取阀门进气通道为质量流量入口, 流量值固定。 k , ϵ 的值由公式 $k_{in} = 0.004 u_{in}^2$, $\epsilon_{in} = c_{\mu}^{0.75} k_{in}^{1.5} / l$ 进行预估, 入口温度为 1 405 K。

(2) 出口边界条件

设定阀门出口 (出口 2) 和通往伺服系统的固定节流孔 (出口 1) 都为压力出口边界, 取出口压力值为 1.013 25 MPa, 温度为 300 K, 其它参数由上游临近的参数外插得到。

(3) 壁面边界条件

壁面定义为绝热无滑移边界。

(4) 气体性质

采用实际燃气的参数, 平均分子量为 22.3, 比热比为 1.27。

4 计算结果及分析

图 3 和图 4 表示的分别为弹性系数为 $k = 150$ N/mm, 质量流量为 0.03 kg/s 时喉部以后的压力 p 和马赫数 Ma 分布, 三个时刻阀门开度分别是 0.131 mm, 0.060 mm, 0.067 mm。从图中可以看出, 在扩张段出

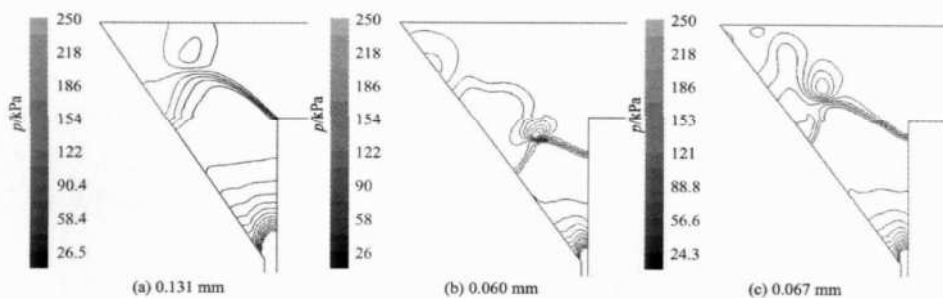


Fig 3 Pressure contours of different opening

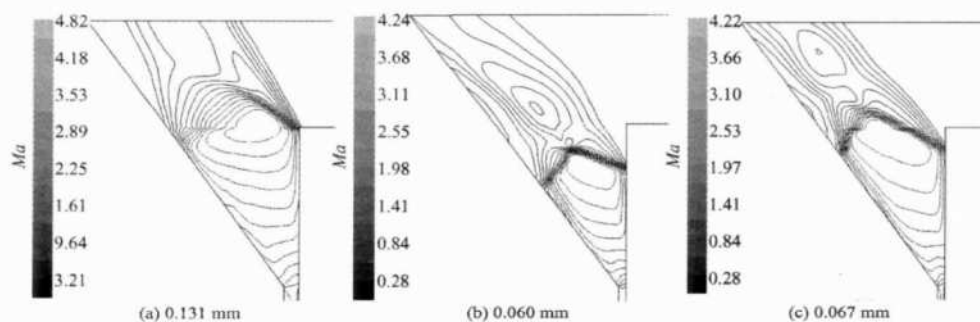


Fig 4 Mach number contours of different opening

口处阀芯和阀座上形成了两道斜激波,使得压力升高、气流速度下降;激波相交后产生两道新的激波,在新生成激波之间形成了一个小的超高压区。对比 3 幅图可以看出阀门开度增大时,激波位置外移,超声速流域增大,并且激波强度逐渐减弱。

4.1 不同流量下的阀门特性

调压阀的工作目的是在燃气发生器质量流量变化较大时,能够使燃烧室压力稳定在一个范围且为固定节流孔提供稳定气源。为了研究在质量流量改变时阀门性能和质量流量与稳定压力的关系,本文计算 8 个算例,入口质量流量从 0.02~0.034 kg/s 之间平均取 8 个值。此燃气发生器所采用的装药压力系数 n 很小,即压力对燃速的影响不大,因此本文忽略压力和质量流量之间的耦合关系,主要研究在阶跃输入情况下阀门的动态特性。

图 5 和图 6 分别表示在质量流量 q_{in} 为 0.02 kg/s 时,压力 p 、阀门开度 l 随时间 t 的变化规律。在初始时刻,阀门处于关闭状态,当有固定流量的气体流入时,压力上升,使阀门打开,阀门开度增加到一定程度压力下降,压力下降后一段时间由于弹性力的作用阀门逐渐闭合,然后开始第二周期运动。经过如图 5 的一系列振动之后,阀芯和压力趋于稳定。当入口质量流量增大时,振动过程与图 5 相同,但压力峰值和稳定值略有升高。

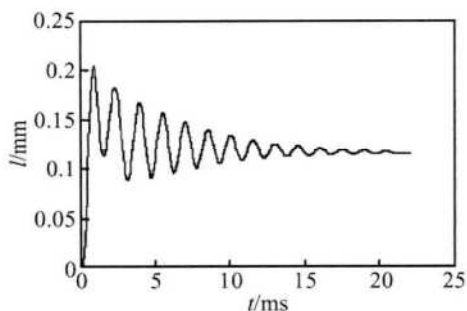


Fig 6 Displacement of pintle

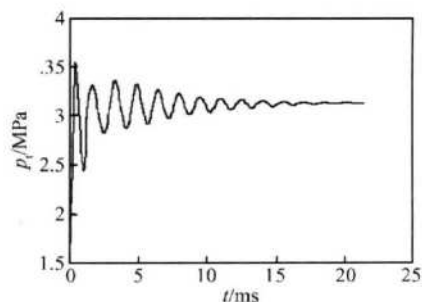


Fig 5 Inlet pressure

图 7 表示各个算例中质量流量 q_{in} 与稳定压力 p 的关系。从图中可以看出,虽然稳定压力随着质量流量的增加而增加,但由于调压阀的作用,压力增加的比率 11.5% 远远小于质量流量增加比率 75%。通过数据拟合,得到其关系可用下式表示

$$p = a q_{in} + b \quad (1)$$

式中 a , b 为常数 $a = 25.86$, $b = 2.613$ 。

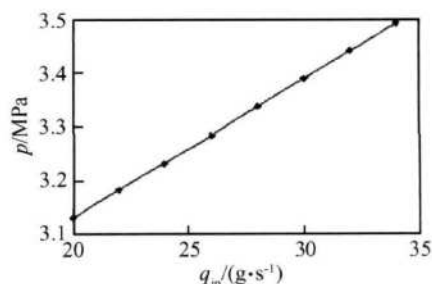


Fig 7 Relationship between mass flow rate and inlet pressure

图 8 为稳定压力 p 与稳定后阀门开度 l 之间的关系。阀门开度随着稳定压力增大而增大,并呈线性关系。即压力升高时阀门对其调节力度加大,减缓流量和压力增加产生的影响。

图 9 表示入口质量流量 q_{in} 增加时,出口质量流量 q_{out} 的变化规律,出口包括固定节流孔 (Outlet 1) 和

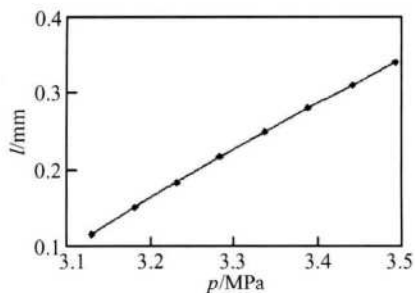


Fig 8 Relationship between inlet pressure and opening of valve

阀门出口 (Outlet 2)。从图中可以看出, 当入口流量增加时, 固定节流孔的质量流量变化不大, 调压阀的质量流量升高很快, 分流了流量增量的绝大部分。由于调压阀的存在, 在入口质量流量变化时, 通过固定节流孔流向伺服系统的气流比较平稳, 说明调压阀能够起到调节压力和稳定流量的作用。

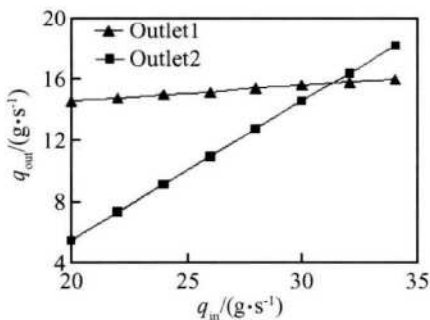


Fig 9 Characteristics of outlet mass flow rate

4.2 弹性系数对阀门性能的影响

阀芯后部的弹性元件是为调压阀提供动力的唯一部件, 其对压力的敏感性和对阀芯运动的控制力都影响着调压阀的工作性能。为了研究弹性系数对调压阀性能的影响, 本文对采用不同弹性系数的算例 9 个, 在 80~180 N/mm 之间平均取值。

图 10 和图 11 分别表示弹性系数 k 与稳定压力 p 和稳定后阀门开度 l 的关系, 可以看出, 弹性系数增加后, 阀门开度减小, 稳定压力上升并且压力峰值也有所提升, 导致固定节流孔流量提高并在入口流量变化时变化较大, 使调压阀调节性能下降。但若弹性系数过小, 弹性元件的预紧量和阀门开度增大, 阀芯活动必然范围增大, 为阀门设计带来不便。通过数据拟合, 可以得到弹性系数和稳定压力、阀门开度之间的关系。其关系可用下列公式表示

$$p = a_1 k^2 + b_1 k + c_1 \quad (2)$$

$$l = a_2 k^2 + b_2 k + c_2 \quad (3)$$

式中常数 $a_1 = 6.844 \times 10^{-6}$, $b_1 = 3.081 \times 10^{-4}$, $c_1 = 3.043$, $a_2 = -8.791 \times 10^{-7}$, $b_2 = -2.946 \times 10^{-5}$, $c_2 = 0.1257$ 。

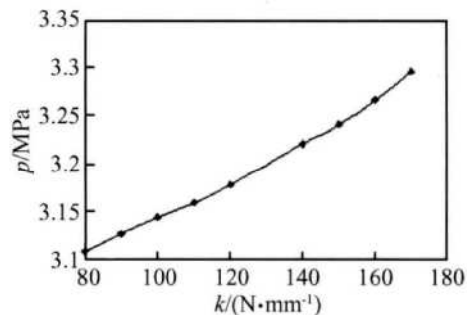


Fig 10 Relationship between stiffness coefficient and inlet pressure

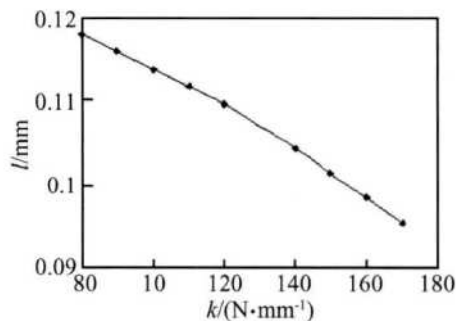


Fig 11 Relationship between stiffness coefficient and opening of valve

结合公式 (1)、(2), 可以得到稳定压力与质量流量与弹性系数之间的关系, 表示如下

$$p = d(aq_{in} + b) \times (a_1 k^2 + b_1 k + c_1) \quad (4)$$

式中 $d = 0.319$ 。通过上式可以比较方便地计算出在某一质量流量下, 不同弹性系数对应的稳定压力和阀门开度, 从而找到既满足性能要求又满足结构设计的弹性系数。

图 12 是在相同入口条件, 不同弹性系数情况下, 阀芯位移随时间变化规律。从图中可以看出, 弹性系数对阀门的动态特性影响较大。弹性系数较大时, 阀门稳定较慢并且震动频率较快, 稳定时间较长; 但阀芯的位移和运动速度较小。在阀门设计时要综合考虑各种因素, 选取一个最优值。

4.3 冷气试验

采用弹性系数为 90 N/mm 的弹性元件对实验阀门进行测试, 所测试的物理量为入口压力 p 、阀门开度 s 和质量流量 q 。压缩空气有高压气瓶提供, 经过工作台后进入燃气发生器, 燃气发生器只留有调压阀一个出口, 气流最后经过流量计排到大气中。在阀门入口处设计一压力测试点接入压力传感器; 在阀芯后

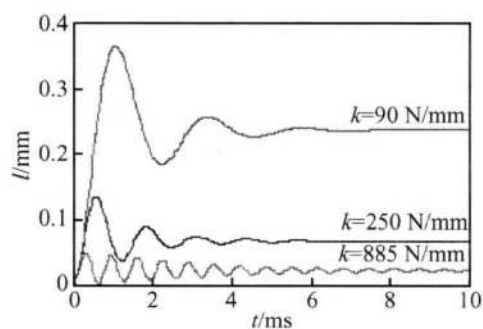


Fig 12 Openings of valve with different stiffness coefficient

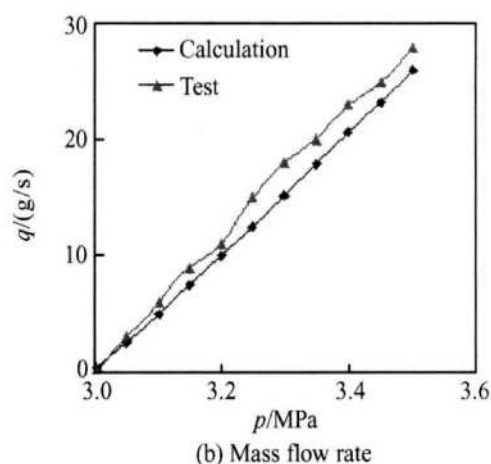
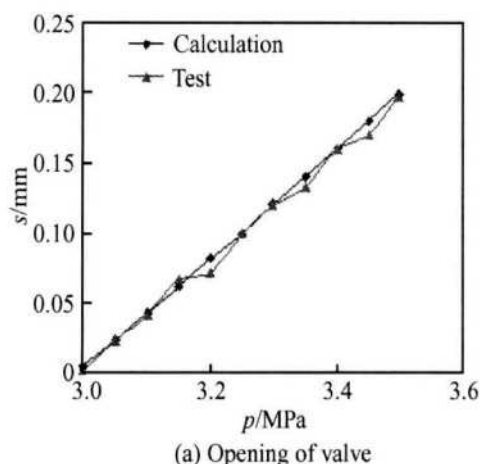


Fig 13 Comparison between computation and test

5 结 论

(1)通过数值计算,可以看出调压阀在入口质量流量变化时,阀门可以很快稳定,并且对压力和流量进行调节,使伺服系统通过固定节流孔得到比较稳定的气源;

(2)得到了稳定压力和入口流量的直线性关系;对于不同的弹性元件,得到了弹性系数和稳定压力、阀门开度的二次曲线关系,对调压阀设计有一定的指导作用;

(3)弹性系数较大时,阀门稳定较慢并且震动频率较快,稳定时间较长;但阀芯的位移值和运动速度较小。

参考文献:

- [1] Andre LAFOND. Numerical simulation of the flow field inside a hot gas valve[R]. AIAA 99-1087.
- [2] Dave Morrow, Mcallister Patrick V, Evans Robert M.

端设计位移测试点连接位移传感器;传感器和流量计的信号经过放大器后通过示波器进行记录。从入口压力 3 MPa 到 3.5 MPa 之间取十个点对实验数据和计算数据进行比较,图 13 是阀门开度、质量流量的计算值和实验数据比较结果,计算值是比较规律的曲线;试验值由于存在一些干扰和摩擦等原因与计算值有小偏差,质量流量比计算值偏大。但是计算值与试验值的变化规律一致,数值上比较接近,证明此次计算方法可行。

High-performance graphite thruster valve system using a 4500° solid propellant gas generator[R]. AIAA 73-1234

- [3] 陈殿京. 安全阀内部流场研究进展[J]. 流体机械, 2004, 23(11): 25~28
- [4] Guillermo Palau Salvador, Jaime Arvizu Valverde, Frankel Steven H. Three-dimensional control valve with complex geometry: CFD modeling and experimental validation[R]. AIAA 2004-2422
- [5] Jeremy Shipman, Ashvin Hosangadi, Vineet Ahuja. Unsteady analyses of valve systems in rocket engine testing environments[R]. AIAA 2004-3663
- [6] 弓永军,周 华,杨华勇. 阀芯结构对纯水溢流阀抗汽蚀特性的影响研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 50~54
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

(编辑: 郭振伶)