

仿真技术在球阀特性研究中的应用

赵 莹, 许 健, 张 强
(北京航天动力研究所, 北京, 100076)

摘 要: 航天领域火箭发动机上的球阀性能要求高、工作条件恶劣, 对球阀流场分布特性、流量系数特性和力矩特性的研究一直是关注的焦点, 要得到较为精确的计算结果又节省大量试验经费, 对球阀流场进行仿真研究是有效途径。以液体火箭发动机用球阀为例, 建立了三维稳态仿真数学模型并进行仿真计算, 然后与试验结果进行比较, 验证了计算模型的正确性。

关键词: 液体火箭发动机; 球阀; 流场分布; 流量系数

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 06-0029-06

Application of simulation technology in ball valve characteristic study

ZHAO Ying, XU Jian, ZHANG Qiang
(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In the aerospace industry, the ball valve in rocket engine has high performance requirement and works in an extraordinary adverse condition. The study on flow field distribution, flow coefficient and torque characteristics of the ball valve has been a focus of attention. It is effective way to make numerical simulation of the flow field in the ball valve in order to achieve an accurate calculation result and cut off testing expenditure. The ball valve in a liquid rocket engine is taken as an example to establish the three-dimensional mathematical models for steady state condition and perform the simulation computation. The computed results are compared with the test results to verify the correctness of the mathematical models.

Keywords: liquid rocket engine; ball valve; flow field distribution; flow coefficient

0 引言

球形调节阀是根据系统要求利用不同开度调

节流量的装置, 目前被广泛应用于各行各业。在液体火箭发动机上, 球形调节阀往往应用于主路或副控路上, 它们工作在高压、低温等恶劣条件下, 不仅承担介质的供给, 而且通过改变其开度

收稿日期: 2013-09-05; 修回日期: 2013-09-26

作者简介: 赵莹 (1977—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

可以控制推进剂的流量,从而实现发动机混合比等重要性能参数的调节。流量调节特性和液动力矩特性是影响该类球阀调节功能及动作可靠性的两大关键特性,一直是阀门设计人员关注的焦点。在传统的球形调节阀工程设计中,对流量调节和液动力矩的分析和研究仍依靠大量的经验公式进行估算^[2],不但精确性低而且最终要通过大量水力试验来进行验证,耗时长、经费高,易导致整体方案的反复。伴随计算机以及相关技术的迅速发展,数值模拟方法正逐步取代传统经验公式及大量水力试验,为设计人员设计、改进和优化方案提供依据。

本文正是应用计算流体力学和数值模拟的相关理论以及最新发展成果,结合试验验证和理论分析,对不同开度下可调球阀流场的分离流动、流量系数和力矩特性等进行分析 and 计算,从而得出有关球阀性能方面的重要结论,为火箭发动机系统流量控制、阀门控制系统结构设计和性能优化提供依据,为球阀的研究开辟新途径、提供新方法。因此,无论在航天领域还是其他工程应用领域都具有一定的现实意义和应用价值。

1 数学模型

球阀内部的流动情况比较复杂,尤其是在小开度的情况下存在大尺度的三维分离流动。本文采用雷诺时均 N-S 方程组和 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型对球阀内部的流动进行数值模拟。为便于数值计算,对球阀流场进行如下简化:

- 1) 球阀流道计算区域内流体为不可压流体。
- 2) 根据 50 kg/s 计算流量,得到流动雷诺数为 $Re=9.1 \times 10^5$,流道内的流动过程为三维不可压、高雷诺数湍流流动。
- 3) 忽略热传递和能量交换,按定常流动方法进行模拟。

$k-\varepsilon$ 两方程模型基本形式比较简单,能较为真实的描述流动中主要的物理过程,有较好的通用性和精度,且不需要太大的计算量,是目前应用最广,在科学研究及工程实际中得到最广泛检验和成功应用的模型^[4-5]。在直角坐标系下,对于

不可压缩流体,忽略热交换条件下,标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型封闭方程组以哈密尔顿算子 ∇ 形式表示,并以运动黏度 ν 代替 μ ,则有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \bar{U} = 0 \\ \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \otimes \bar{U}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu + \nu_t) \nabla^2 \bar{U} \\ \nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_\mu k^2 / \varepsilon \\ \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} k) = \frac{\nu_t}{\sigma_k} \nabla^2 k + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \varepsilon) = \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla^2 \varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} \left[C_1 \frac{G_\varepsilon}{\rho} - C_2 \varepsilon \right] \\ G_k = G_\varepsilon = \mu_t \nabla \bar{U} \cdot (\nabla \bar{U} \cdot \nabla \bar{U}^T) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: U 为进口介质速度, m/s; $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为湍流模型常数; ρ 为流体密度, kg/m³。

上述 $k-\varepsilon$ 模型中的系数取值见表 1^[1]:

表 1 $k-\varepsilon$ 模型中的系数
Tab. 1 Coefficients of $k-\varepsilon$ model

系数	C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
数值	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

本文采用基于非交错网格的有限体积法对控制方程组进行离散,控制体积的界面位于网格各个结点的中间平面上,利用压强校正法求解各个变量。壁面附近的流动采用壁面函数进行模拟。

2 实体建模与边界条件

以某液体火箭发动机用球阀为例,根据该阀门的结构设计总图,同时考虑到实际数值模拟的可行性,对球阀计算模型进行合理的简化。为了保证仿真计算精度,对流场影响较大的球体密封部分、球体旋转通道和壁面等部分按照实际设计尺寸进行了细致的描述。选取整个球阀流体通道作为计算域,采用 CAD 实体建模软件 SOLIDWORKS 进行实体造型,保存为 step 格式后输入到 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 进行网格的划分。流动方向为 +x 方向。阀门流场三维实体模型以球体开度 30° 为例 (如图 1 所示)。

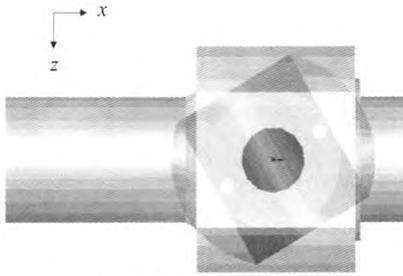


图 1 开度 30° 时的三维数学模型

Fig. 1 Three-dimensional mathematical model at 30° opening

为简化计算, 将进口条件给成均匀流场的形式, $v_{in}=0$ (即 y 向速度为 0), x 向分量 u 由给定的进口流量计算得到, 管道进口的湍流动能 k 和耗散率 ε 由下式给定:

$$k_{in}=0.01u^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{in}=0.1643k^{3/2}/(0.09D) \quad (3)$$

式中 D 为球阀入口直径。

在实际流动中, $Re>10^5$, 湍流相当强烈, 进口 k_{in} , ε_{in} 对计算结果影响不大。对于不可压定常流的三维微分方程, 由微分方程的定解条件可知, 属于混合型。压强波瞬间传遍全域, 而流线上的信息却由上游传向下游, 一般解法难以奏效。采用 SIMPLE 算法, 只需给出压力值的大小就可以了。本课题中球阀出口直接通向大气, 所以出口条件为: $p_{out}=1.01325 \times 10^5$ Pa。

在管道和阀瓣壁面上给定无滑移固壁条件, 即 $v_{wall}=0$, $w_{wall}=0$, $k_{wall}=0$, $\varepsilon_{wall}=0$ 。

3 计算网格

采用 FLUENT 的前处理软件 GAMBIT 来划分网格, 三维流体数值计算可以采用的单元类型有四结点的四面体单元、五结点的金字塔单元和八结点六面体单元等。上述几种单元相比, 六面体单元的精度高于其他两种单元的计算精度, 但由于球阀内流道相当复杂, 采用六面体单元划分网格很困难, 因此采用四面体单元进行离散。实际计算时为了满足计算精度的需要, 又不增加不必要的计算量, 在出口区设置单元尺度较小, 进

口区的单元尺度相对较大。为了提高计算精度, 在阀门旋转球通道的旋转入口和旋转出口采用加密网格, 具体网格划分情况见图 2。

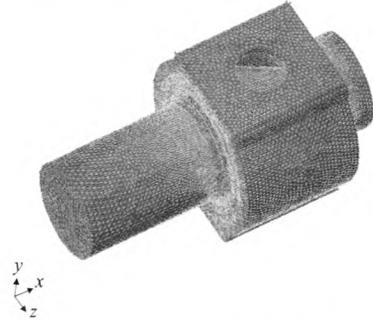


图 2 三维流场网格划分

Fig. 2 Grids for three-dimensional flow field

实际计算时上述模型被划分为约 517 199 ~ 823 604 个三维单元。为了提高计算精度, 曾将 40° 网格数目由 536 081 提高到 1 096 623 个, 结果两种网格的计算结果相差不大, 说明计算网格的划分比较合理。同时, 为了较好的模拟压力梯度较大的区域, 在 FLUENT 计算结果处理过程中对网格进行了压力梯度自适应处理。为了计算液动力矩在不同壁面上的分配情况, 分析液动力的作用方向, 将模型壁面分解为球体旋转通道壁面、球体外壁面、通道内圆柱壁面和流体外通道壁面 4 个部分。

4 CFD 仿真结果分析

数值计算时采用计算机主板为奔腾 4, 内存为 512 M。模型计算时的残差迭代到 500 步时已全部收敛于 1×10^{-3} , 说明计算模型的收敛速度比较快。

计算首先给定设计流量为 50 kg/s, 得到该流量下流量系数 μF 值随开阀角度变化的曲线。为了分析球阀在实际使用过程中调节流量的工况, 即变流量工况下的流量系数特性及液动力矩特性, 给出变流量工况的计算分析结果。

4.1 定流量工况结果分析

由三维仿真计算得到球阀在不同开度下的压力场图谱, 40° 和 60° 压力场图谱见图 3(a) 和 3(b)。

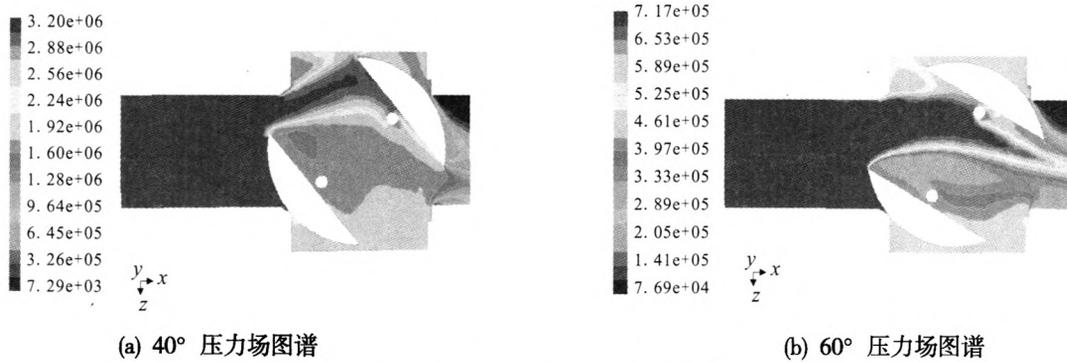


图3 不同开度 XZ 截面压力场图谱

Fig. 3 Pressure field distribution for XZ section at openings of 40° and 60°

上述计算结果容易得出球阀在三维流动条件下给定流量为 50 kg/s 时的随阀门不同开度下的压降。根据压降、流量和流量系数之间的换算关系式，在给定流量 50 kg/s 条件下，可以计算出球阀不同开度下的流量系数值。

$$\Delta p = \xi \frac{(0.001)^2 \cdot Q^2}{2 \cdot \rho \cdot F^2} = \frac{(0.001)^2 \cdot Q^2}{\mu^2 \cdot 2 \cdot \rho \cdot F^2} \quad (4)$$

式中： Δp 为阀门进出口压降，MPa； Q 为质量流量，kg/s； F 为流通截面积，mm²； ξ 为流阻系数，无量纲； μ 为流量系数，无量纲， $\mu = \frac{1}{\sqrt{k}}$ 。

工程计算中通常用 μF 值表征阀门的流通能力，因此常常用 μF 值取代 μ 值，把它称为该阀门的流量系数。

根据公式(4)容易计算出球阀流量系数 μF 随球阀开度 χ 变化关系曲线，如图 4 所示。

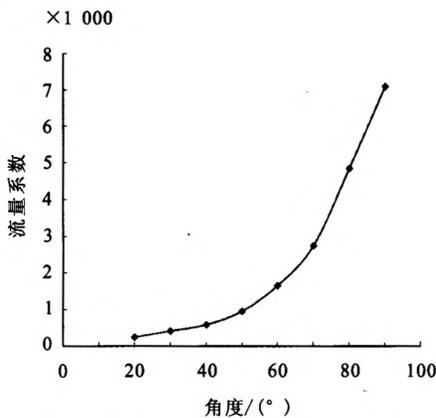


图4 仿真流量系数随开度变化曲线

Fig. 4 Calculated flow coefficient versus different opening

由图 4 可知随球阀开度的增大流量系数呈现非线性增大，而且当开度较小时，流量系数的变化也较小；开度增大时，尤其是当球阀的开度大于 70° 时，流量系数也迅速增大。这是由球阀流量调节的等百分比特性决定的。

4.2 变流量工况结果分析

为了与试验数据进行对比，给定三维变流量计算工况与试验工况相同，如表 2 所示。

表 2 不同开度下的计算工况

Tab. 2 Calculated parameters at different opening								
开度 χ (°)	20	30	40	50	60	70	80	90
流量/(kg·s ⁻¹)	38.2	45	55	71.7	91.7	98.4	99.4	100

与定流量工况类似，同理可以得到变流量工况下流量系数 μF 随球阀开度 χ 变化关系曲线。与定流量工况曲线的对比见图 5。

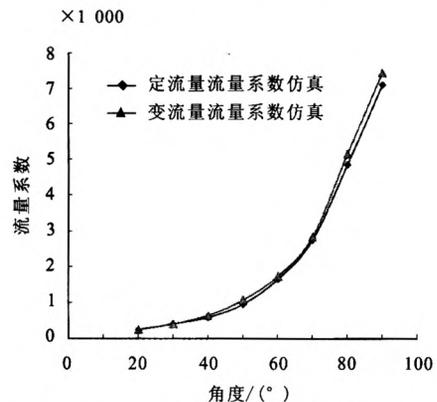


图5 定流量(50 kg/s)与变流量工况流量系数对比

Fig. 5 Comparison of flow coefficients of fixed flux (50 kg/s) and variable flux

对比可知, 两种工况下流量系数计算结果具有很好的 consistency, 这一结果验证了高雷诺数下流量系数只与阀门自身结构有关的理论。

通过 CFD 仿真计算, 设定目标值为液动力矩, 可以得到球阀不同开度下的总液动力矩和在不同壁上液动力矩的分布情况, 计算结果见图 6。计算过程表明所有角度下的液动力矩数值均为负数, 说明在球体转动过程中, 液动力矩始终作用于使阀门关闭的方向上。为了便于与水力试验结果对比, 在曲线中不考虑液动力矩的方向。

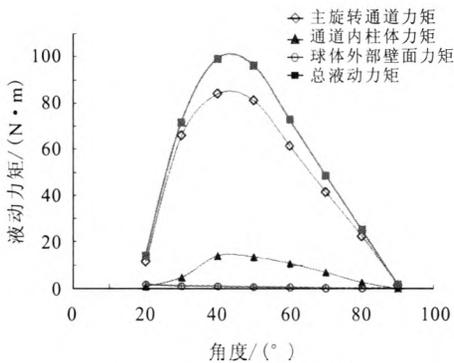


图 6 液动力矩分布情况

Fig. 6 Distribution curves of hydrokinetics torque

由图 6 分析可知球阀的液动力矩随球体开度的不同呈现两头小中间大的变化趋势, 其中在 40°~50°区间所受的液动力矩最大, 90°时球体所受的液动力矩值趋近于零。球体通道内部壁面上的液动力矩与总液动力矩变化趋势相一致, 而外部壁面上的液动力矩随开阀角度增大而呈现减小的趋势。球阀液动力矩的变化主要取决于主旋转通道的角度变化, 这部分液动力矩占总液动力矩的比例为 85.3%; 其次是通道内两柱体的液动力矩; 球体外部壁面对总体液动力矩的影响很小, 最大占总液动力矩的比例约为 0.2%, 基本可以忽略。因此, 可以通过优化主旋转通道和柱体结构来降低液动力矩, 并可在兼顾强度的情况下尽量减小球体外部壁面尺寸来减重。

5 试验研究和结果分析

为验证仿真计算结果, 对研究的球阀进行水力试验。本课题所采用的试验装置如图 7 所示。

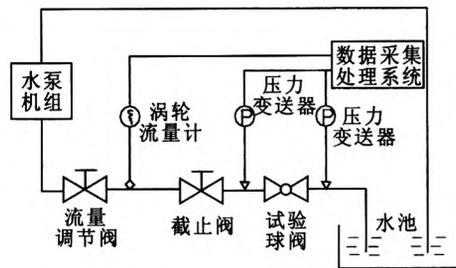


图 7 试验系统示意图

Fig. 7 Schematic of experimental system

三维仿真计算和试验结果的流量系数对比见图 8。

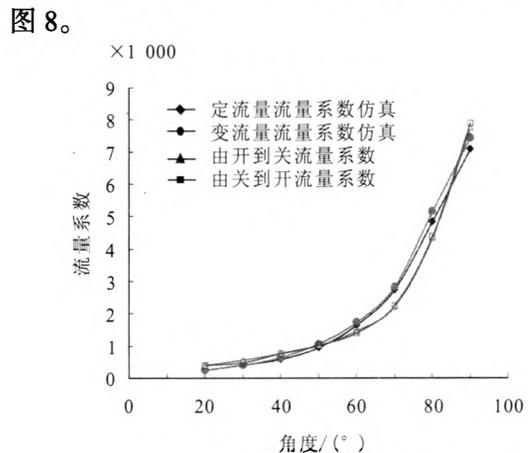


图 8 计算和试验流量系数对比

Fig. 8 Comparison of calculated flow coefficients and test results

水力试验无法分析液动力矩在不同壁面上的分配, 只能得到总液动力矩的试验结果。与三维仿真计算总液动力矩的对比见图 9。

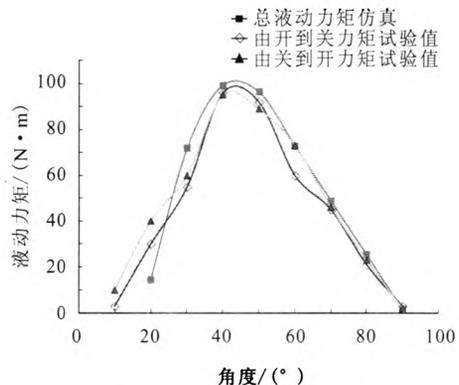


图 9 计算和试验液动力矩对比

Fig. 9 Comparison of calculated hydrokinetics torque and test result

6 结论

以某液体火箭发动机用球阀为例,采用 SOLIDWORKS 和 FLUENT 软件相结合,对复杂结构球阀的流量调节特性和液动力矩特性等进行了三维仿真分析和计算,并通过水力试验对计算结果进行验证,得到以下结论:

1) 通过三维仿真计算获得了流量系数 μF 值和液动力矩随球阀开度变化的曲线,为发动机混合比调节和球阀气动控制结构设计提供重要数据。

2) 通过分析定流量和变流量两个工况下的流量系数曲线,得出了流量系数随阀门开度的变化呈现等百分比特性的结论,验证了高雷诺数下球阀的流量系数只与阀门自身结构有关的结论。

3) 利用液动力矩的仿真计算,得出球阀的液动力矩始终作用于使阀门关闭方向的结论,且最大作用力矩出现在 $40^\circ\sim 50^\circ$ 区间, 90° 时所受的液动力矩值趋近于零。

4) 利用分解仿真模型壁面的方法,研究转动过程中液动力矩在不同壁面上的分配比例,得出影响液动力矩取值的主要因素是旋转通道壁面结构,球体外壁面结构的影响基本可以忽略。

5) 通过与试验结果的对比,验证了采用 FLUENT 软件模拟球阀流场的可行性,为更加全面、深入地研究球阀流场、改进阀门设计提供了全新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [2] 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] 莱昂斯 J L. 阀门技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [4] 吴子牛. 计算流体力学基本原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] 陈矛章. 粘性流体动力学理论及紊流工程计算[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1986.
- [6] 张峥岳, 康乃全. 轨姿控液体火箭发动机水击仿真模拟[J]. 火箭推进, 2012(3): 12-16.
- [7] SALVADOR Guillermo Palau, VALVERDE Jaime Arviza. Three-dimensional control valve with complex geometry: CFD modeling and experimental validation, AIAA2004-2422 [C]// 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Spain: Polytechnic University of Valencia, 2004: 111-124.
- [8] SHIPMAN Jeremy, HOSANGADI Ashvin, AHUJA Vineet. Unsteady analyses of valve systems in rocket engine testing environments, AIAA2004-3663 [R]. USA: AIAA, 2004.
- [9] AHUJA Vineet, HOSANGADI Ashvin, CAVALLO Peter. Simulations of valve motion problems for rocket test facilities, AIAA2007-5502 [R]. USA: AIAA, 2007.
- [10] 刘冰, 方丁酉. 涡流阀调节特性数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 1996, 18(4): 58-61.
- [11] 柳洪芬, 高石, 王国丽. 基于Fluent的复杂通道比例流量阀的数值模拟[J]. 天津理工大学学报, 2007, 23(1): 86-88.
- [12] 魏文礼, 李超. 锥阀附近水力特性的三维数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(1): 109-112.

(编辑: 王建喜)