

文章编号:1000-8055(2012)09-2134-06

基于谱方法的管路充填过程仿真

陈宏玉, 刘红军, 陈建华, 刘 上

(中国航天科技集团公司 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘 要: 基于一维瞬变流理论,建立了推进剂供应系统管路充填过程数学模型. 提出采用 Fourier 谱方法求解充填管道中液体瞬变流控制方程的新方法. 利用坐标变换方法,很好地处理了解算管内气液移动边界时,非线性迭代收敛速度较慢这一难题. 对由贮箱、隔离阀、管道组成的系统充填过程进行了仿真计算,并将计算结果与已发表的采用特征线方法获得的结果进行对比分析,表明该方法和仿真结果可信. 进一步研究了预存气体压力、贮箱压力、多变指数等影响因素对最大充填压力峰的影响规律.

关 键 词: 液体推进剂火箭发动机; 推进剂输送; 水击; 谱方法; 数值模拟

中图分类号: V421.42

文献标志码: A

Investigation of priming process of propellant lines using Fourier spectral method

CHEN Hong-yu, LIU Hong-jun CHEN Jian-hua, LIU Shang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: A mathematical model was presented for the priming process of propellant lines with moving boundary conditions based on one-dimensional fluid transient theory. The nonlinear hyperbolic partial differential equations governing the unsteady motion of fluid were solved by the Fourier spectral method. A coordinate transformation technique was employed to reduce fluid motion in time-dependent domains to ones in time-independent domains. The results obtained from the Fourier spectral method exhibit greater consistency with method of characteristics. In addition, spectral method requires less computer calculation time with less numerical error, which shows that the method is more suitable to solve fluids motions in such a complex system. The analysis shows that initial gas pressure, tank pressure and poytropic exponent all have vital effects on surge pressure.

Key words: liquid propellant rocket engine; propellant transfer; water hammer; spectral method; numerical simulation

液体火箭发动机起动过程的安全性及可靠性主要由合理的起动时序来保证,影响起动时序的关键因素是推进剂的充填过程.同时,高压推进剂向管路系统中充填,形成的水击和压力振荡还有可能会造成发动机密封失效,推进剂泄露,甚至引起发动机结构破坏.因此,研究推进剂供应管路系

统充填过程的水击和压力瞬变规律,对优化发动机起动时序,抑制和消除水击和压力振荡对管路系统的危害,提高发动机工作可靠性具有重要的意义.

描述充填管道中液体一维瞬变流的基本方程是一对拟线性双曲型偏微分方程,具有移动边界

收稿日期:2011-10-22

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120921.1251.029.html>

作者简介:陈宏玉(1982—),男,陕西横山人,博士生,研究领域为液体火箭发动机系统与总体技术.

的特点,特征线方法(MOC)是目前较常用的数值计算方法^[1-7].当采用特征线方法解算一维分布参数模型方程时,在解算移动边界问题时非线性迭代解算收敛较慢,计算效率低.同时,推进剂供应管路系统是同时包括液路、气路和容腔的复杂管网系统,特征线方法在时间步长协调上比较困难,边界条件的处理比较复杂^[8],不适合复杂热动力管网系统(如补燃循环发动机)的仿真分析.常用求解瞬变流控制方程的方法还有有限单元法(FEM)^[8]和有限体积法(FVM)^[9-10].谱方法(spectral method)作为数值求解偏微分方程的一种手段,在最近二、三十年里获得了迅速的发展,已经和有限差分法、有限元法一起成为数值求解偏微分方程的重要工具^[11-13].谱方法最大的优点就是它的“无穷阶”收敛性,即如果原问题的解充分光滑,那么用适当的谱方法所求得的近似解将以基函数个数的任意次幂速度收敛于精确解^[12].此外谱方法的数学特征很接近于所求解的微分方程,即加在谱逼近上的边界条件,形式上和加在微分方程上的一样,边界处理灵活.

本文采用 Fourier 谱方法对推进剂充填过程中流体瞬变特性进行了数值计算.分析了管道内水击和管流振荡现象,并与一维模型特征线方法计算结果进行了比较分析.

1 控制方程及无量纲化

推进剂供应管路的充填过程十分复杂,包括气液两相间的相互作用,交界面的运动变化以及物质交换和热交换等.采用三维数学模型去分析和模拟这一现象非常困难.通过合理假设简化,可采用一维瞬变流模型结合理想气体状态方程对推进剂充填管道这一瞬变过程进行描述和分析.管路充填过程示意图如图1所示.

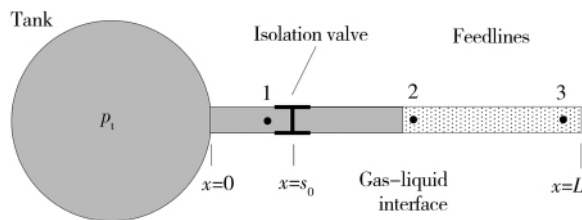


图1 高压贮箱充填末端封闭管路示意图

Fig. 1 Sketch of high pressure tank priming a pipe with a closed end

假设管路内液体流动是一维绝热有摩擦的液

体瞬变流,描述管路内液体瞬变流的基本方程包括运动方程和连续方程,是一组拟线性双曲型偏微分方程组,具体形式如下:

连续性方程

$$\frac{\partial p_l}{\partial t} + \rho_l a_l^2 \frac{\partial u_l}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

运动方程

$$\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial p_l}{\partial x} + \frac{\partial u_l}{\partial t} + \frac{f}{2D} u_l |u_l| = 0 \quad (2)$$

式(1)、式(2)中,下标 l 表示为液相; p 为 x 断面的流体平均压力; u 为 x 断面流体的平均流速; ρ 为流体密度; a 为水击波传播速度; D 为管道内径; f 为壁面摩擦损失系数; x 为沿流体流动方向管道上的位置(即空间变量), $x \in [0, s(t)]$; t 为时间变量.

隔离阀打开之前,若供应系统管路预存一定压力的预存气体,在充填过程中,考虑气体和液相的物质交换及其与外界的热交换^[2],预存气体可以用理想气体状态方程描述

$$p_g \bar{V}^\gamma = C \quad (3)$$

式中 p_g 为气体压力; $\bar{V}$ 为气体体积; γ 为多方指数.

气-液界面处运动关系式

$$\frac{ds(t)}{dt} = u_l[s(t), t] \quad (4)$$

边界条件

$$p_l(0, t) = p_t, p_l[s(t), t] = p_g(t) \quad (5)$$

初始条件

$$p_l(x, 0) = p_t, u_l(x, 0) = 0 \quad (6)$$

$$p_g = p_{g0} \quad (7)$$

式中 p_t 为贮箱压力; p_{g0} 为管道中预存气体压力.

描述已充填管路内液体瞬变流控制方程(1)、方程(2)中,求解区域为 $[0, s(t)]$, 存在求解区域时间相关性,将与时间变量独立的空间变量 x 作以下变换

$$y = \frac{x}{s}$$

这样,已充填管路内液体与时间相关的求解区域 $x \in [0, s(t)]$, 变换为求解较方便的固定求解域 $y \in [0, 1]$ ^[14-15]. 并令

$$\tau = \frac{ta_1}{L}, U = \frac{u_l}{a_l}, \varphi = \frac{p_l}{p_t}, \eta = \frac{s}{L},$$

$$\epsilon = \frac{p_t}{\rho_l a_l^2}, \mu = \frac{fL}{2D}, \lambda = \frac{s_0}{L}, \delta = \frac{p_{g0}}{p_t}$$

代入控制方程,得描述管路内流体瞬变流无量纲控制方程.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon \eta} \frac{\partial U}{\partial y} - y \frac{\dot{\eta}}{\eta} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\varepsilon}{\eta} \frac{\partial \varphi}{\partial y} - y \frac{\dot{\eta}}{\eta} \frac{\partial U}{\partial y} + \mu U |U| = 0 \quad (9)$$

气-液界面运动

$$\dot{\eta} = U(1, \tau) \quad (10)$$

边界条件

$$\begin{cases} \varphi(0, \tau) = 1 \\ \varphi(1, \tau) = \delta \left[\frac{1-\lambda}{1-\eta(\tau)} \right]^\gamma \end{cases} \quad (11)$$

初始条件

$$\varphi(y, 0) = 1, U(y, 0) = 0, \eta(0) = \lambda \quad (12)$$

2 数值解法

2.1 Fourier 谱方法

推进剂供应系统管路充填过程中液体瞬变特性具有时间周期性, 因此可通过选用特殊的周期函数(如 Fourier 级数)作为基函数, 将未知函数分解展开成空间变量基与时间函数系数的分离变量形式的解式。这里将液体无量纲压力 $\varphi(y, \tau)$ 作 Fourier 正弦级数展开, 液体无量纲流速 $U(y, \tau)$ 作 Fourier 余弦级数展开。

$$\begin{aligned} \varphi(y, \tau) \approx & \varphi(0, \tau) + y[\varphi(1, \tau) - \varphi(0, \tau)] + \\ & 2 \sum_{k=1}^N \left[\frac{(-1)^k \varphi(1, \tau) - \varphi(0, \tau)}{k\pi} + \varphi_k(\tau) \right] \cdot \sin(k\pi y) \\ U(y, \tau) \approx & U_0(\tau) + 2 \sum_{k=1}^N U_k(\tau) \cos(k\pi y) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)是通过 $\varphi_y(y, \tau)$ 的 Fourier 余弦级数展开, 然后逐项积分所得。式(13)和式(14)中, 与时间相关的系数 $\varphi_k(\tau)$ 和 $U_k(\tau)$ 为

$$\varphi_k(\tau) = \int_0^1 \varphi(y, \tau) \sin(k\pi y) dy \quad (15)$$

$$U_k(\tau) = \int_0^1 U(y, \tau) \cos(k\pi y) dy \quad (16)$$

式中 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。这样, 非线性无量纲控制方程(8)、方程(9)求解就转换为确定系数函数 $\varphi_k(\tau)$ 和 $U_k(\tau)$ 的形式。Fourier 谱展开的项数 N 选取取决于计算精度。

现将液体无量纲压力 $\varphi(y, \tau)$ 、流速 $U(y, \tau)$ 的 Fourier 谱展开式(13)、式(14)代入方程(8)、

方程(9)中, 得

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_k(\tau)}{d\tau} = & \frac{k\pi}{\varepsilon\eta} U_k(\tau) + \\ & \frac{\dot{\eta}}{\eta} [\varphi(1, \tau) - \varphi(0, \tau)] J(0, k) + \\ & 2 \frac{\dot{\eta}}{\eta} \sum_{j=1}^N [(-1)^j \varphi(1, \tau) - \varphi(0, \tau) + \\ & j\pi \varphi_j(\tau)] J(j, k) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_0(\tau)}{d\tau} = & \frac{\dot{\eta}}{\eta} [U(1, \tau) - U_0(\tau)] + \\ & \frac{\varepsilon}{\eta} [\varphi(0, \tau) - \varphi(1, \tau)] - \\ & \int_0^1 \mu U(y, \tau) |U(y, \tau)| dy \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_k(\tau)}{d\tau} = & -\frac{k\pi\varepsilon}{\eta} \varphi_k(\tau) + \\ & \frac{\varepsilon}{\eta} [\varphi(0, \tau) - (-1)^k \varphi(1, \tau)] - \\ & 2\pi \frac{\dot{\eta}}{\eta} \sum_{j=1}^N U_j(\tau) j J(j, k) - \\ & \int_0^1 \mu \cos(k\pi y) U(y, \tau) |U(y, \tau)| dy \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。且

$$J(j, k) = \int_0^1 y \cos(j\pi y) \sin(k\pi y) dy \quad (20)$$

由气液界面的运动方程(10)、边界条件(11)和初始条件(12)求得各时间展开系数 $\varphi_k(\tau)$ 和 $U_k(\tau)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N$)。为了适应谱方法的高精度并保证时程积分的稳定性, 采用具有 4 阶精度的 Runge-Kutta 积分法, 数值求解展项系数并代入式(13)、式(14), 即得到无量纲控制方程(8)、式(9)的近似解。

2.2 非线性项的处理

值得注意的是, 非线性摩擦积分项出现在方程(18)和方程(19)中, 令

$$W \equiv \mu U(y, \tau) |U(y, \tau)|$$

对摩擦项积分, W 的 Fourier 余弦系数可表达成离散的 Fourier 变换形式

$$\begin{aligned} \int_0^1 \mu \cos(k\pi y) U(y, \tau) |U(y, \tau)| dy = \\ \frac{1}{2K} [W(0, \tau) + (-1)^k W(1, \tau)] + \\ \frac{1}{K} \sum_{p=1}^{K-1} W(y_p, \tau) \cos(k\pi y_p) \end{aligned} \quad (21)$$

式中 $y_p = p/K$ 。

3 算例验证及结果分析

在推进剂供应管路系统中, 当高压推进剂向

管路中充填时,发生的流体瞬变现象通常与图1中的简单模型中发生的瞬变现象类似,因此研究图1中的流体瞬变现象可以为类似的问题提供指导。图1中,贮箱通过隔离阀与管道相连,贮箱中充满增压后的推进剂,阀门前的管道中充满推进剂,阀门后所连接的管道预存一定压力的气体。计算条件为^[8],流体介质为水,贮箱压力 $p_t = 2.0$ MPa,管道内径 $D = 0.01$ m,管道内充满标准大气压的空气。计算时 Fourier 展开项数 N 取 8,多方指数 γ 取 1.4。计算结果如图 2 所示。

假设隔离阀瞬时打开,从图 2(a)可以看出,由于管道内气液两相间存在静压差,液体介质向前充填,并压缩气体,由于液体的惯性,液体继续挤压着末端的气团,使气团压力迅速上升,形成水击压力峰后,气团推动液体回流。如此往复,形成管路末端的水击压力振荡,该压力振荡由于管道摩擦等阻尼作用而迅速衰减。这一过程中,不同位置处(如图 1 所示)的充填水击压力值不同,越靠近管道末端压力值最大,反映了管道充填过程中,

液体的分布参数特性。在隔离阀打开后初期,由于液体的惯性,隔离阀上游处(测点 1)有压力“凹坑”,并伴有较高频率的压力振荡,随着时间的推移,较高频率压力振荡的振幅和频率均减小,幅值的衰减是由于管道摩擦等阻尼作用,频率的减小是由于随充液管道长度的增加,压力振荡传播周期增长。图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)分别给出了这一过程中气液充填界面的位置、流速以及管路末端气体压力的仿真结果与特征线法的计算结果的对比。由图可见 Fourier 谱方法与特征线法计算结果完全吻合。相同计算机硬件条件下,Fourier 谱方法较特征线法仿真耗时大大缩短,采用 Fourier 谱方法(展开项数 $N = 4$)耗时 0.735 s,特征线法耗时 7.893 s(迭代误差不大于 10^{-8})。

图 3 给出了 Fourier 谱展开项数 N 分别取为 4, 8, 16 时,管路末端气团压力随时间的变化情况,从图中可以看出,当 Fourier 谱展开项数 $N \geq 4$ 时,Fourier 谱方法的计算结果已经可以满足工程要求,仿真过程中可以选取较低的展开项数,提

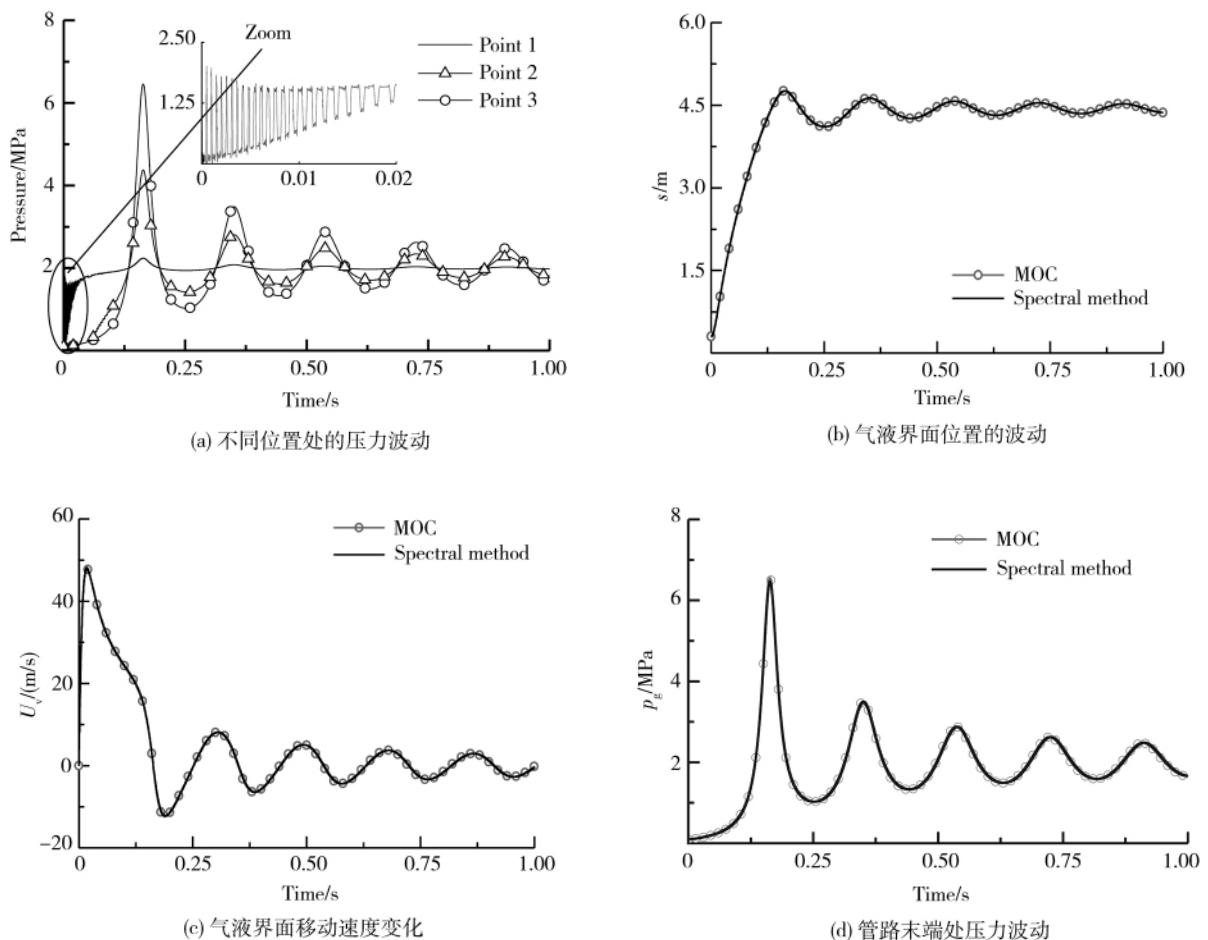


图 2 高压贮箱充填管路仿真结果

Fig. 2 Calculation results of high pressure tank priming a pipe with a closed end

高 Fourier 谱方法的计算效率.

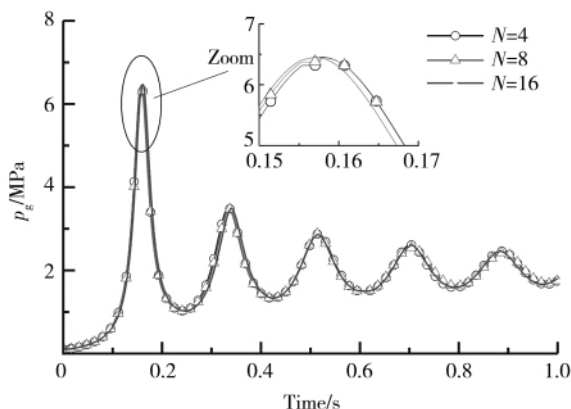


图 3 仿真结果与 Fourier 展开项数的无关性

Fig. 3 Independency of result with respect to Fourier term

对于大多数工程问题,主要关心的是充填压力峰值,这一过程中,包含了弹性液体介质、可压缩气体的特性变化以及能量耗散,在假定管道内气液介质的物性不变的情况下,重点讨论预存气体压力、贮箱压力、多变指数等参数对充填压力峰值的影响.在不考虑物性变化的情况下,充填过程中压力峰值随预存气体压力的变化关系如图 4 所示,由图可以看出,预存气体压力越高,充填压力峰值越小,反之越大.这是由于预存气体是可压缩的,对液体充填有缓冲作用,气体压力越高,缓冲越明显.对于液体推进系统而言,预存气体压力不会很高,有时甚至是真空充填.在真空充填时,当隔离阀打开瞬间,一部分推进剂暴沸,形成蒸汽包笼在液体的前段,充填中,蒸汽团被压缩,压力上

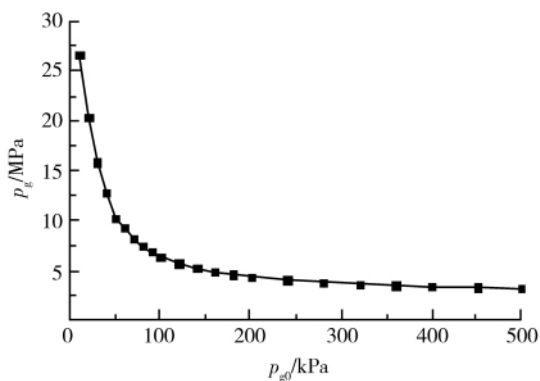


图 4 初始管路压力对末端压力峰值的影响

Fig. 4 Effect of initial pipe pressure on surge pressure at the closed end of feed pipe

升,蒸汽又会溃灭.此时,形成的充填压力峰值最大,危险也最大,尤其应引起重视,最大充填压力峰值可近似认为完全水击压力峰值.如图 5 所示,贮箱压力越高,充填压力峰值越高,且与贮箱压力存在一定的指数关系.

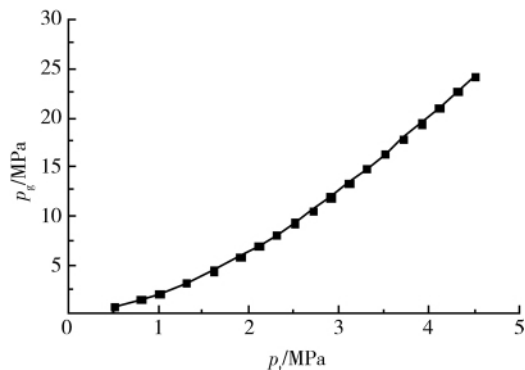


图 5 贮箱压力对末端压力峰值的影响

Fig. 5 Effect of tank pressure on surge pressure at the closed end of feed pipe

推进剂充填管道过程中,预存气体不断压缩、膨胀,期间能量的变化不是绝热过程,必然伴随着一定的能量耗散,而且存在气液两相物质间的相互转化,气液两相转化难以用具体的数学模型去定量表述.文中采用理想气体状态方程来表述这一过程,以期有助于理解充填压力峰值与气体状态方程中多方指数 γ 的变化关系.由图 6 可见,气体状态方程中多方指数 γ 取值越大,计算最大压力峰值越小.因此按等温过程取值多方指数 γ 则计算峰值偏小,而按绝热过程取值则计算峰值偏

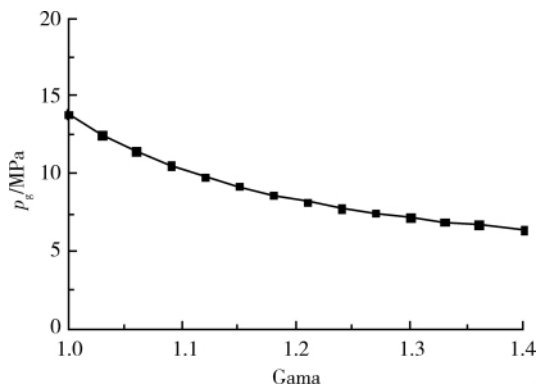


图 6 多方指数对末端压力峰值的影响

Fig. 6 Effect of ploytropic exponent on surge pressure at the closed end of feed pipe

大. 该值可通过试验进行统计得出.

4 结 论

采用 Fourier 谱方法对推进剂充填过程中流体瞬变特性进行数值计算. 可以得到以下结论:

1) Fourier 谱方法应用于推进剂供应系统管路充填过程这一强非线性问题计算时, 求得结果与特征线方法结果一致. 当 Fourier 谱展开项数 $N \geq 4$ 时, 计算结果已经可以满足工程要求.

2) 推进剂充填过程压力振荡峰值与管道中的预存气体压力、贮箱压力和预存气体的多方指数相关. 管道中的预存气体压力越低, 充填压力峰越大, 贮箱压力越高, 充填压力峰也越大, 且与贮箱压力存在一定的指数关系, 多方指数的取值越大, 气体压力峰值越小, 反之则越大.

3) 采用 Fourier 谱方法分析推进剂供应系统管路充填这一瞬变过程时, 边界处理简单, 计算效率高, 适用于复杂流体网络的建模与仿真, 在工程实际应用方面具有广阔前景.

参考文献:

- [1] Pricatt R P, Mayer E, Hermel J. Water hammer in a spacecraft propellant feed system[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(3): 592-597.
- [2] Lin T Y, Baker D. Analysis and testing of propellant feed system priming process [J]. Journal of Propulsion and Power, 1995, 11(3): 505-512.
- [3] 程谋森, 张育林. 推进剂供应管路充填过程研究[J]. 推进技术, 1997, 18(2): 70-74.
CHEN Moushen, ZHANG Yulin. Analysis on prepressurized and evacuated feedline priming process[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(2): 70-74. (in Chinese)
- [4] 程谋森, 张育林. 航天器推进系统管路充填过程动态特性 I: 理论模型与仿真结果[J]. 推进技术, 2000, 21(2): 25-28.
CHEN Moushen, ZHANG Yulin. Dynamic characteristics of priming process in spacecraft propulsion system I: theoretical model and simulation results[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(2): 25-28. (in Chinese)
- [5] 程谋森, 张育林, 姜春林, 等. 航天器推进系统管路充填过程动态特性 II: 实验模拟与结果评估[J]. 推进技术, 2000, 21(3): 1-5.
CHEN Moushen, ZHANG Yulin, Jiang Chunlin, et al. Dynamic characteristics of priming process in spacecraft propulsion system II: experimental results and reliability analysis[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(3): 1-5. (in Chinese)
- [6] Wylie E B, Streeter V L. Fluid transient in systems endlewood cliffs[M]. USA: Prentice Hall, 1993.
- [7] 薛科, 张黎辉. 卫星推进系统真空充填过程数值仿真[J]. 航空动力学报, 2007, 22(2): 323-326.
XUE Ke, ZHANG Lihui. Numerical simulation of the priming process of satellite propulsion system[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2): 323-326. (in Chinese)
- [8] 刘昆, 张育林. 液体推进系统充填过程的有限元状态变量模型[J]. 推进技术, 2001, 22(1): 19-21.
LIU Kun, ZHANG Yulin. Finite element state-variable models for the priming process of feedlines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(1): 19-21. (in Chinese)
- [9] 高芳, 陈阳, 张振鹏. 低温液体推进剂充填管路的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 109-113.
GAO Fang, CHEN Yang, ZHANG Zhenpeng. Numerical simulation of filling pipe of cryogenic liquid propellant[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 109-113. (in Chinese)
- [10] 陈阳, 高芳, 张振鹏. 准一维可压瞬变流的有限体积模型 I: 流场的有限体积模型[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 311-316.
CHEN Yang, GAO Fang, ZHANG Zhenpeng. Finite volume model for quasi one-dimensional compressible transient pipe flow I: finite volume model of flow field[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 311-316. (in Chinese)
- [11] Canuto C, Quarteroni A. Approximation results for orthogonal polynomials in Sobolev spaces[J]. Math. Comput., 1982, 38(1): 67-86.
- [12] Guo B Y. Spectral methods and their applications [M]. Singapore: World Scientific, 1998.
- [13] SHEN Jie, TANG Tao. Spectral and high-order methods with applications[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [14] ZHANG Yongliang, Vairavamoorthy K. Transient flow in rapidly filling air-entrapped pipelines with moving boundaries[J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11(3): 313-323.
- [15] ZHANG Yongliang, Vairavamoorthy K. Application of method-of-lines to charging-up process in pipelines with entrapped air[J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11(3): 324-331.