

文章编号:1000-8055(2013)03-0561-06

推进剂管路充填过程的数值模拟

陈宏玉, 刘红军, 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: 基于一维管路瞬变流理论, 利用特征线有限差分法, 建立了推进剂供应系统管路充填过程的数学模型. 利用坐标变换方法, 将管路内液体与时间相关的求解区域变换为求解较方便的固定求解区域, 很好地处理了模型的移动边界问题. 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, 并将计算结果与传统的采用特征线方法获得的结果进行对比分析, 验证了方法的有效性. 进一步研究了最大压力峰值的影响因素, 结果表明: 增多初始气体压力、减小贮箱压力、增多多变指数可有效减小最大压力峰值.

关 键 词: 液体推进剂火箭发动机; 推进剂输送; 特征线方法; 坐标变换; 数值模拟

中图分类号: V421.42

文献标志码: A

Numerical simulation of priming process of propellant pipelines

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

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

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

Abstract: A mathematical model of the priming process of propellant pipelines was presented based on one-dimensional fluid theory using the method of characteristics (MOC) and finite difference. Coordinate transformation technique was employed to change fluid motion in time-dependent domains to ones in time-independent domains. The details of the method were presented with an illustration of the priming process of a simple piping system (system consisted of a tank, a pipe and a isolation valve). The results exhibited greater consistency with conventional method of characteristic calculations. The influence factors to the surge pressure of priming process have been studied future. The results show that the surge pressure can be effectively reduced by increasing the initial gas pressure, decreasing the tank pressure and increasing the polytrophic exponenting.

Key words: liquid propellant rocket engine; propellant transfer; method of characteristics; coordinate transformation; numerical simulation

液体火箭发动机的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. 此外, 高压推进剂向管路中充填, 不可避免地会在管路中形成水击, 充填水击会造成发动机密封失效, 推进剂泄露, 甚至会使推进系统失去动力. 因此, 研究充填过程中推进系统的动态特性对系统设计与分析有

重要意义.

国内外对推进剂管路充填过程进行了大量仿真研究. 管路充填过程中瞬态特性分析的数学模型有集中参数模型^[1-2]、分段集中参数模型^[3-6]以及分布参数模型^[7-11]等. 集中参数模型的求解简单, 但对于较长的管路求解结果不够精确. 因而目前较多采用一维分布参数瞬变管流模型, 并利用特

收稿日期: 2012-03-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.561_013.html

作者简介: 陈宏玉(1982—), 男, 陕西横山人, 博士生, 主要从事液体火箭发动机系统与总体技术.

征线方法对这一瞬变过程进行描述和分析^[7-10]. 当采用特征线方法解算充填过程中管路内液体一维瞬变流方程时, 液相段求解域的长度是变化的, 液头部分在管路内充填大部分时间里, 处于计算网格节点之间的空白区域, 无法仅用网格节点上的参数来描述液头的运动. 为解决这一问题, 文献[7, 9, 11]中把网格节点间的液体团作为集中参数的质量来分析其运动. 即液相段采用分布参数得一维瞬变管流模型, 液气两项段采用集中惯性模型.

本文利用坐标变换方法, 克服了以往模型计算域的时间相关性, 此时, 计算域固定, 但特征线随时间是变化的, 使得液头部分始终处于计算网格节点上, 很好地处理了模型的移动边界问题.

1 数学模型

在液体火箭发动机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的简单模型中发生的瞬变现象类似, 因此研究图1所示的流体瞬变现象可以为同类问题提供指导. 图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, 贮箱距离阀门的长度为 s_0 , 阀门后所连接的管道预存一定压力的气体, 整个管路长度为 L . 假定膜片阀瞬时破裂, 并忽略其流阻损失, 壁面摩擦损失按准稳态计算.

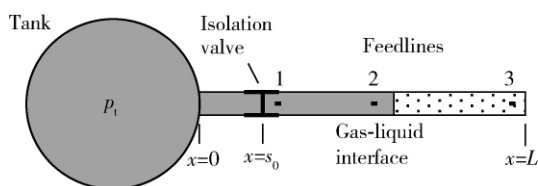


图1 高压推进剂充填管路示意图

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

假设管路内液体推进剂的充填过程是一维绝热有摩擦的瞬变流, 其连续性方程和运动方程如下:

连续性方程

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} + \rho_1 a_1^2 \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

运动方程

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{f}{2D} u_1 |u_1| = 0 \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, 下标1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^[1], 预存气体可以用理想气体状态方程描述:

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

式中 p_g 为气体压力; V 为气体体积; γ 为多变指数.

气液界面处运动关系式

$$\frac{ds(t)}{dt} = u_1[s(t), t] \quad (4)$$

边界条件

$$p_1(0, t) = p_t, \quad p_1(s(t), t) = p_g(t) \quad (5)$$

初始条件

$$p_1(x, t) = p_t, \quad u_1(x, t) = 0 \quad (6)$$

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

式中 p_t 为贮箱压力; p_{g0} 为管道中初始气体压力.

2 坐标变换及特征线方法求解

液体瞬变流控制方程式(1)和式(2)的求解, 特征线法是其较常用的求解方法之一, 其原理是将偏微分方程转化为特殊的全微分方程, 即特征方程, 然后再转化为1阶有限差分方程, 求其近似解^[12]. 但对于充填管路, 因其求解区域为 $[0, s(t)]$, 求解区域存在时间相关性, 将与时间变量独立的空间变量 x 作以下变换^[13-15]

$$y = \frac{x}{s} \quad (8)$$

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 $y \in [0, 1]$. 并令

$$\tau = \frac{ta_1}{L}, \quad U = \frac{u_1}{a_1}, \quad \varphi = \frac{p_1}{p_t}, \quad \eta = \frac{s}{L},$$

$$\varepsilon = \frac{p_t}{\rho_1 a_1^2}, \quad \mu = \frac{fL}{2D}, \quad \lambda = \frac{s_0}{L}, \quad \delta = \frac{p_{g0}}{p_t}$$

代入控制方程, 得描述管路内流体瞬变流无量纲控制方程

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon \eta} \frac{\partial U}{\partial y} - y \frac{\dot{\eta}}{\eta} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\varepsilon}{\eta} \frac{\partial \varphi}{\partial y} - y \frac{\dot{\eta}}{\eta} \frac{\partial U}{\partial y} + \mu U |U| = 0 \quad (10)$$

气液界面运动

$$\dot{\eta} = U(1, \tau) \quad (11)$$

边界条件

$$\varphi(0, \tau) = 1, \varphi(1, \tau) = \left[\frac{1-\lambda}{1-\eta(\tau)} \right]^\gamma \quad (12)$$

初始条件

$$\varphi(y, 0) = 1, U(y, 0) = 0, \eta(0) = \lambda \quad (13)$$

为了联解 2 个偏微分方程而得到常微分方程, 将式(9)、式(10)进行线性组合

$$L_1 + \lambda L_2 = 0$$

其中 λ 为待定系数, 整理后与 φ, U 的全微分关系对比可发现: 当 $\lambda^2 = (\varepsilon\eta)^{-2}$ 时, 控制方程式(9)、式(10)中 φ, U 可在特征线上全微分表示出来. 特征方程及相容方程如下:

沿正向波 c^+

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{dU}{d\tau} + \frac{\mu}{\varepsilon} U |U| = 0 \\ \frac{dy}{d\tau} = -\frac{\dot{\eta}}{\eta} y + \frac{1}{\eta} \end{cases} \quad y \in [0, 1] \quad (14)$$

沿负向波 c^-

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{dU}{d\tau} - \frac{\mu}{\varepsilon} U |U| = 0 \\ \frac{dy}{d\tau} = -\frac{\dot{\eta}}{\eta} y - \frac{1}{\eta} \end{cases} \quad y \in [0, 1] \quad (15)$$

式(14)、式(15)中的摩擦阻力项是非线性的, 不能用积分方法得到解析解. 因此, 采用有限差分方法求数值解. 将液体区域分成 N 段, 每段长度为 $y = 1/N$, 计算时间步长为 $\Delta\tau$. 构成如图 2 所示的矩形网格, 即特征线网格. 由上式可知经过坐标变化后, 计算域为固定计算域, 但特征线是变化的. 因此, 时间步长 $\Delta\tau$ 也是变化的, 其值的选取要保证在 1 个时间步长 $\Delta\tau$ 内, 扰动波的传播在相邻 2 个网格节点内.

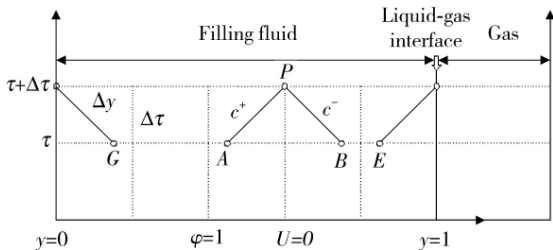


图 2 瞬变流计算 y - t 网格

Fig. 2 y - t grid for solving transient flow

在数值求解过程中, 特征线是气液界面处参数 η^j 和 U_N^j 的函数, 首先应求解气液界面处参数

(气液界面位移 η^j , 运动速度 U_N^j , 液体压力 φ_N^j). 气液界面处参数满足相容方程式(14)、气液界面关系式(11)及边界条件式(12). 下一时刻气液界面位置 η^j 采用 2 阶近似

$$\eta^j = \eta^{j-1} + \frac{\Delta\tau}{2} (U_N^j + U_N^{j-1}) \quad (16)$$

其中上标表示时间层, 下标表示空间网格节点. 由 1 阶有限差分近似求解气液界面的处相容方程和特征线得

$$\varphi_N^j - \varphi_E + \varepsilon (U_N^j - U_E) - \frac{\mu}{\varepsilon} \Delta\tau U_A |U_A| = 0 \quad (17)$$

$$1 - y_E = \frac{\Delta\tau}{\eta^j} - \left(\frac{U_N^j}{\eta^j} \right) y_E \Delta\tau \quad (18)$$

式中 φ_E, U_E 由同一时间层相邻 2 个节点差值求得. 整理后可得

$$\varphi_N^j = a_2 - \frac{1}{\varepsilon} (U_N^j - a_3) - \frac{\mu}{\varepsilon} a_3 |a_3| = 0 \quad (19)$$

式中系数 a_1, a_2, a_3 计算关系式为

$$a_1 = \frac{\eta^j - \Delta\tau}{\eta^{j-1} - \Delta\tau U_N^{j-1}} \quad (20)$$

$$a_2 = \varphi_{N-1}^{j-1} + \left(\frac{\varphi_N^{j-1} - \varphi_{N-1}^{j-1}}{\Delta y} \right) (a_1 - y_{N-1}) \quad (21)$$

$$a_3 = U_{N-1}^{j-1} + \left(\frac{U_N^{j-1} - U_{N-1}^{j-1}}{\Delta y} \right) (a_1 - y_{N-1}) \quad (22)$$

由于 a_1, a_2, a_3 均是下一时刻气液界面处 η^j , U_N^j 的函数, 因此需要迭代计算气液界面位移 η^j 和气液界面的运动速度 U_N^j . 迭代步骤: ①首先选取 U_N^j , 由式(16)计算出 η^j ; ②计算系数 a_1, a_2, a_3 , 由式(19)计算得 φ_N^j ; ③判断 φ_N^j 是否满足边界关系式(12), 如果不满足重新选取 U_N^j , 边界关系式(12)误差不大于 10^{-8} .

知道网格边界处的参数, 求解网格节点内的参数. 在一个时间步长 $\Delta\tau$ 内, 在特征线 AP 上满足式(14), 设 A 点的 φ_A, U_A 已知, 则在 A, P 点间积分, 可用 φ_A, U_A 将 P 点的未知量 φ_P, U_P 表示出来; 同理在特征线 BP 上满足式(15), 可用 φ_B, U_B 将 φ_P, U_P 表示出来. 联立求得 P 点处的 P . 由此可得出网格内节点处的参数.

3 计算及分析

为验证本文提出的方法用于推进剂供应系统管路充填过程分析的可行性, 对贮箱、隔离阀、充

填管路组成的简单系统的充填过程进行了数值模拟。问题的描述如下:流体介质为水,贮箱压力 p_t 为 2.0 MPa, 充填管路内径 D 为 0.01 m, 预存气体压力 p_g 为 0.10 MPa, 假设隔离阀瞬时打开。计算结果如图 3、图 4 和图 5 所示。

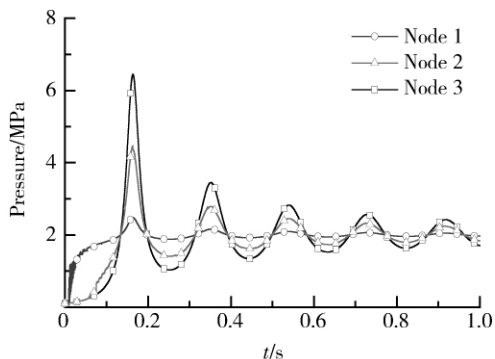


图3 管路不同位置处的压力变化

Fig. 3 Pressures oscillation at different positions of feed pipe

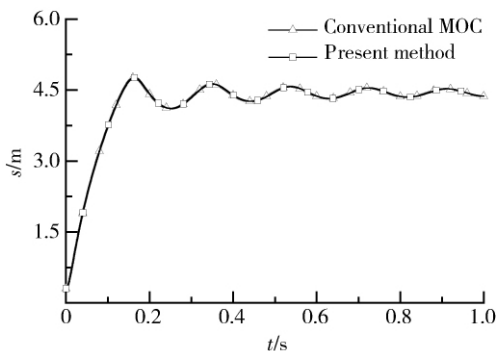


图4 气液界面位移变化

Fig. 4 Position oscillation of liquid-gas interface

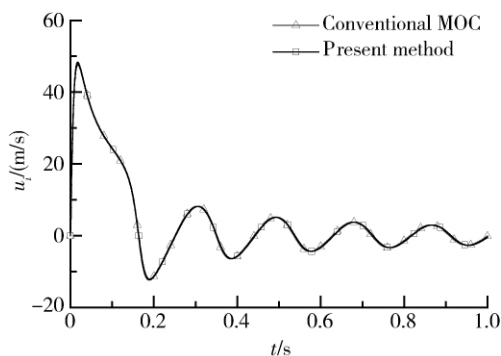


图5 气液界面速度变化

Fig. 5 Velocity oscillation of liquid-gas interface

由图 3 可见,隔离阀打开后,在气液两相间静压差的作用下,推进剂迅速充填管路系统,并挤压

管路末端的气团,由于流体的惯性,气团不断被挤压,形成最大压力峰值,该压力峰值远大于贮箱压力;随后,当气团压力高于液体压力后,形成反向压差,气团推动管路内推进剂回流,气团进一步膨胀,压力降低,又会形成正向压差,如此往复,出现了如图所示的压力振荡。由于管壁摩擦等阻尼作用存在,该压力振荡迅速衰减。图中还给出了这一过程中,不同管路位置处(如图 1 所示的 1,2,3 节点处)的压力值变化过程,从图可知,越靠近管路末端压力峰值最大,反映了推进剂管路充填过程中分布参数特性。图 4 和图 5 给出了按本文方法(present method)的计算结果与按传统特征线方法(conventional MOC)的计算结果的比较。由图可见,采用坐标变化后的特征线方法无论是充填过程中的气液界面位置还是气液界面的移动速度都能与传统特征线方法的计算结果保持一致,验证了本文方法的有效性。

对于大多数工程问题,主要关心的是充填时间和最大压力峰值。这里,充填时间是指从隔离阀打开到形成最大压力峰值所经历的时间。文中重点讨论预存气体压力、贮箱压力对充填时间和最大压力峰值的影响,以及理想气体状态方程中的多变指数取值对计算结果的影响。图 6 给出了不同初始气体压力(0.05, 0.10, 0.15 MPa)下,充填过程中管路末端气团压力变化情况,由图可以看出,初始气体压力越高,充填过程中的压力峰值越小,气团对液体的缓冲作用就越明显。但初始气体压力对充填时间影响很小,这是由于决定充填时间主要因素是气液两相间静压差,此时,初始气体压力变化对气液两相间静压差影响很小。图 7 给出了不同贮箱压力(1.0, 2.0, 3.0 MPa)下,充填过程中管路末端气团压力变化情况,由图可知,贮

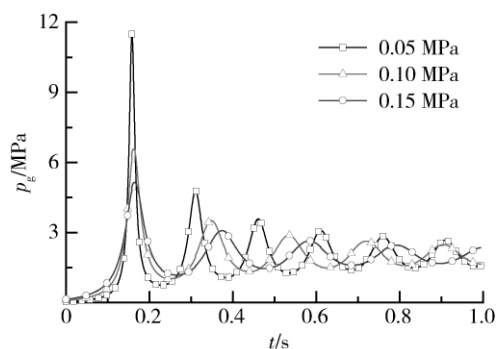


图6 预存气体初始压力对管路末端压力的影响

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

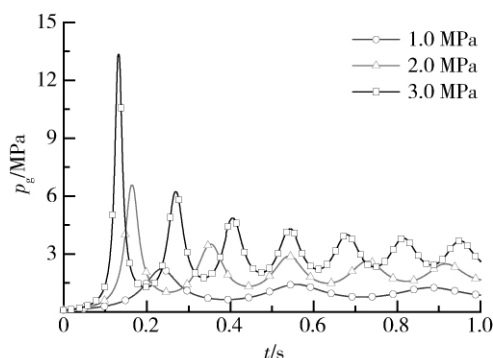


图7 贮箱压力对管路末端压力的影响

Fig. 7 Effect of initial air pressure on surge pressure at the closed end of feed pipe

箱压力越高,充填压力峰值越高,到达最大峰值的时间越短(即充填时间越短)。

在推进剂充填管路过程的数值模拟中,文中没有考虑气液两相之间的物质交换和热交换,将预存气体用理想气体状态方程描述。但实际上,在充填过程中管路末端气团是不断压缩和膨胀的过程,这一过程存在着复杂的能量、物质转换。目前,对于气液两相间能量、物质转化很难用具体的数学模型去定量表述。文中用理想气体状态方程来表述管路末端气团的压缩、膨胀过程,旨在分析理想气体状态方程中多变指数的取值对压力峰值的影响。图8给出了理想气体状态方程中的多变指数 γ 取值对最大压力峰值的影响,从图可见,多变指数 γ 取值越大,计算得到的压力峰值就越小。而实际过程既不是绝热过程也不是等温过程,应该是介于两者之间的复杂过程,因此,按等温过程取值,计算得到的压力峰值比实际值偏小,而按绝热过程取值则比实际值偏大,该值可通过试验进行

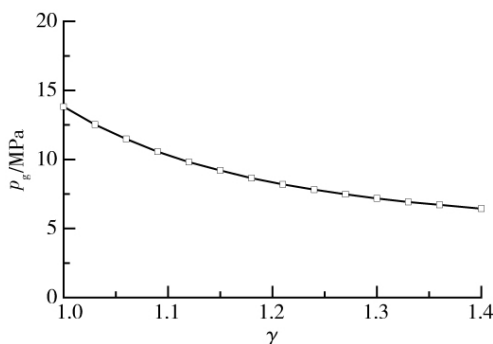


图8 多方指数对管路末端水击压力的影响

Fig. 8 Effect of ploytropic exponent on surge pressure at the closed end of feed pipe

统计得出。

4 结 论

1) 管路内液体采用一维瞬变流模型,压缩气团采用零维理想气体状态方程,得到的计算结果基本能反映推进剂管路充填过程中的水击和管流振荡现象。

2) 通过坐标变换方法,将管路内液体与时间相关的求解区域变换为求解较方便的固定求解域,很好地处理了模型的移动边界问题。

3) 推进剂充填过程中,充填时间、压力峰值与管道中的初始气体压力、贮箱压力、气团多变指数等相关。管路中的初始气体压力越低,充填压力峰越大;贮箱压力越高,充填压力峰也越大,充填时间越短;多变指数的取值越大,气体压力峰值越小,反之则越大。

参考文献:

- [1] Yaggy K L. Analysis of propellant flow into evacuated and pressurized lines[R]. AIAA 84-1346, 1984.
- [2] Beliaev E N, Chevanov V K, Chervakov V V. Mathematical modeling of working process in liquid propellant rocket engines[M]. Moscow: MAI Publications, 2009.
- [3] 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 feed lines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(1): 19-21. (in Chinese)
- [4] 刘昆, 程谋森, 张育林. 低温推进剂供应管道系统充填过程的动力学模型[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 1-5.
LIU Kun, CHENG Mousen, ZHANG Yulin. Dynamic model of priming processes of cryogenic propellant feed lines[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(3): 1-5. (in Chinese)
- [5] 程谋森, 刘昆, 张育林. 低温推进剂供应管路预冷充填瞬变流计算[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 38-41.
CHENG Mousen, LIU Kun, ZHANG Yulin. Numerical analysis of pre-cooling and priming transients in cryogenic propellant feed systems[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(5): 38-41. (in Chinese)
- [6] 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): 108-113.
GAO Fang, CHEN Yang, ZHANG Zhenpeng. Numerical simulation of filling pipe of cryogenic liquid propellant[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 108-113. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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.
- CHENG Moushen,ZHANG Yulin. An analysis on prepressurized and evacuated feedline priming process[J]. Journal of Propulsion Technology,1997,18(2):70-74. (in Chinese)
- [9] 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.
- CHENG 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)
- [10] 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.
- CHENG 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)
- [11] 薛科,张黎辉,苏龙斐,等. 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,SU Longfei,et al. Numerical simulation of the priming process of satellite propulsion system[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(2):323-326. (in Chinese)
- [12] Wylie E B,Streeter V L. Fluid transient in systems[M]. Englewood Cliffs,USA:Prentice Hall,1993.
- [13] 陈宏玉,刘红军,陈建华,等. 基于谱方法的管路充填过程仿真研究[J]. 航空动力学报,2012,27(9):2134-2139.
- CHEN Hongyu,LIU Hongjun,CHEN Jianhua,et al. Investigation of priming process of propellant lines using Fourier spectral method[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(9):2134-2139. (in Chinese)
- [14] ZHANG Yongliang,Vairavamorthy 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,Vairavamorthy 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.