弱可压缩流体与可压缩流体模型的管路水击研究*

任孝文1,陈宏玉1,李 平2,李鹏飞1,张波涛1

(1. 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室,陕西西安 710100;2. 航天推进技术研究院,陕西西安 710100)

摘 要:为提升液体推进系统模型对可压缩流体的仿真能力,针对供应管路的瞬变流动,采用一维 有限体积法,使用 Modelica 语言基于 MWorks 平台分别开发了适用于补燃循环发动机仿真模型库的弱可 压缩流体与可压缩流体的管路模型,不同于控制方程中显含声速的弱可压缩流体模型,可压缩流体模型 通过将守恒方程与真实流体的 SRK型状态方程耦合求解来计算压力波的传播。在管路供应系统中,分别 以液氢、液氧及液甲烷为工质进行关阀水击的仿真研究,结果表明:使用 SRK 状态方程避免了可压缩流 体模型对内能拟合公式的依赖,减轻了建模难度;可压缩流体模型对液氧及液甲烷的仿真结果较为准 确,最大误差不超过2%,对液氢的最大计算误差约9%;相对于可压缩流体模型,弱可压缩流体模型计 算得到的水击压力在振幅及频率上均偏大;可压缩流体模型计算得到的流体密度波动不超过3%,因此 工程实践中处理水击问题时将液体假设为弱可压具有一定的合理性。

关键词:管路模型;水击;弱可压缩流体;可压缩流体;有限体积法
中图分类号: V421.42
文献标识码: A
文章编号: 1001-4055 (2020) 08-1880-07
DOI: 10.13675/j.enki. tjjs. 190415

Investigation on Water Hammer in Pipes by Slightly Compressible Fluid Model and Compressible Fluid Model

REN Xiao-wen¹, CHEN Hong-yu¹, LI Ping², LI Peng-fei¹, ZHANG Bo-tao¹

(1. Science and Technology Laboratory on Liquid Rocket Engine, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;
 2. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: To improve the simulation capability of the liquid propulsion system model for compressible fluids, the pipeline models for slightly compressible fluid and compressible fluid have been developed respectively to investigate the hydraulic transients of feed lines in the present work. With one-dimensional finite volume method programmed under Modelica on MWorks platform, the models are suitable for a staged combustion cycle engine simulation package. Different from the slightly compressible fluid model, the speed of sound does not appear explicitly in the governing equations of the compressible fluid model. Instead, an equation of state for real fluid, SRK EoS, is solved in conjunction with the conservation equations to simulate the compressibility for modeling the wave propagation. The pressure surges of liquid hydrogen, liquid oxygen and liquid methane in a feed system have been predicted due to valve closing, and the results show that the utilization of SRK equation of state in compressible fluid model avoids the dependence on fitting the internal energy equation, which reduces the difficulty

^{*} 收稿日期: 2019-06-17;修订日期: 2019-09-06。

基金项目:液体火箭发动机技术重点实验室开发基金(6142704180308)。

通讯作者: 任孝文, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机系统动力学。E-mail: renxiaowenchina@163.com

引用格式:任孝文,陈宏玉,李 平,等.弱可压缩流体与可压缩流体模型的管路水击研究[J].推进技术,2020,41(8):
 1880-1886. (REN Xiao-wen, CHEN Hong-yu, LI Ping, et al. Investigation on Water Hammer in Pipes by Slightly Compressible Fluid Model and Compressible Fluid Model[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(8):1880-1886.)

of modeling. And with the compressible model, the simulations of liquid oxygen and liquid methane are more accurate, that the maximum error does not exceed 2%, while the simulating error of liquid hydrogen is about 9%. The amplitude and frequency of impact pressure at the upstream of valve simulated by the slightly compressible fluid model are larger, compared to the compressible fluid model. Since density fluctuation calculated by the compressible fluid model is less than 3%, the assumption that transient flow of liquid is slightly compressible would be acceptable, especially for engineering application.

Key words: Pipeline model; Water hammer; Slightly compressible fluid; Compressible fluid; Finite volume method

1 引 言

水击现象是一种压力瞬变过程,通常由于阀门 的突然关闭引起。发生水击时,管路内流体可达到 数倍于稳态值的压力,这将对管路系统造成震动、变 形,严重时将导致管路破裂并引发流体泄露等重大 事故^[1]。特别对于航空航天动力装置的复杂管路而 言,水击问题将严重影响着飞行任务的安全,因此该 问题一直受到国内外学者的大量关注^[2-4],如戴佳 等^[5]仿真计算了挤压式发动机系统启动过程中节流 孔的大小和位置对水击压力峰的影响,林景松等^[6]对 装配有非标准元件的推进剂供应管路进行了数值模 拟并提出了减小水击压力的措施。

目前公开文献中涉及水击现象所使用的管路模 型主要有集中参数模型和分布参数模型两大类,在 集中参数模型中流体被假设为刚性固体,且流体的 声速为无穷大,流动条件的任何改变瞬间传遍整个 流场,同时只有在无量纲频率远小于1时^[7],集中参 数模型才适用,否则应当使用分布参数模型。关于 分布参数模型,适合于编程计算的方法主要有特征 线法,有限差分法^[8-9],有限体积法以及谱方法^[10]等。 其中特征线法发展较早[11]且应用广泛,其在解决一 维瞬态流动方面具有效率高、易于程式化的特点,特 别适用于声速为定值的流动^[12],但在复杂管路系统 仿真中,无法精确满足库朗数为1的条件。关于有限 差分法的管路模型,国内外开展了大量的研究工作, 典型的有 Chaudhry 等^[13]使用预测-修正的二阶显式 有限差分法建立的流体瞬态特性的仿真模型,秦艳 平等^[14]基于三阶有限差分型 WENO 格式建立的液体 管路动态特性仿真模型,Grevvenstein^[15]基于瞬时压 力修正建立的一种隐式的有限差分格式,该模型不 仅通用于气相流动和液相流动,同时适用于瞬态流 和缓变流。近些年针对液体火箭发动机等复杂管网 进行的仿真模拟,大量研究使用了有限体积法的模 块化建模思想,代表性的有 NASA 马歇尔空间飞行中 心(MSFC)开发的通用流体系统仿真程序 GFSSP^[16], 欧洲航天局主持开发的推进系统仿真软件 ESPSS^[17] 等,这些程序在保持仿真精度的前提下具有通用性 强、方便维护,易于快速构建系统模型的优点。国内 张峥岳等^[18]利用 AMESim 软件基于模块化思想对某 轨姿控发动机工作过程中的水击压力进行了数值模 拟,结果与试验数据吻合度较好。国防科技大学刘 昆等^[19]开发了液体火箭发动机瞬变过程模块化建模 与仿真软件 LRETMMSS,该软件的流体管路模型采 用了可压缩流体的一维有限元模型^[20],其中压力方 程由能量方程和流体的内能、压力、密度拟合公式推 导得到,该方法能较准确地计算出流动参数的一维 分布,但针对不同的流体需要将其内能拟合为压力 与密度的函数,实际建模过程较为复杂。

鉴于国内补燃循环发动机仿真平台[21]目前已有 的管路模型主要为集中参数模型和分段集中参数模 型,本文在刘昆等研究的基础上采用一维有限体积 法,使用非因果建模的 Modelica 语言^[22]基于 MWorks 仿真平台,分别开发了适用于补燃循环发动机仿真 模型库的弱可压缩流体与可压缩流体的一维管路模 型。其中可压缩流体模型的流体状态方程使用了 SRK方程^[23],这使得在仿真过程中只需掌握流体工 质的临界属性等即可进行可压缩流体状态变量的计 算,大大减小了建模的难度;不同于弱可压缩流体, 该模型的控制方程中并不显含声速,即计算中压力 波的传播速度是变化的,这与实际瞬变流动过程中 流体声速随压力温度变化的真实情况相一致^[24]。针 对管路供应系统常见的水击问题,本文以液氢、液氧 和液甲烷为流体工质,对比研究了弱可压缩流体模 型与可压缩流体模型的水击仿真结果。

2 模型及验证

2.1 数学模型

假设在任一瞬间,管流的压强、密度、温度和速 度在任一截面上是均一的且只随管长方向变化,流 体与壁面无热量交换,管路横截面积为定值,管路为 刚性管,忽略流体重力的影响,则流动可用如下简单 的形式描述,即

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{1}^{2}\rho\mathrm{d}x = \left(\rho u\right)_{1} - \left(\rho u\right)_{2} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \int_{1}^{2} (\rho u) \,\mathrm{d}x = (\rho u^{2} + p)_{1} - (\rho u^{2} + p)_{2} - \int_{1}^{2} \left(\frac{\lambda}{2D} \cdot \rho u |u|\right) \,\mathrm{d}x$$
(2)

式中D为管路直径,u为流体速度,λ为达西摩擦 系数。

控制方程的离散采用压力和密度的状态单元与 速度单元交错^[25]的有限体积法,不同于文献[20]等 常用的压力边界,为了能够与文献[21]中补燃循环 发动机仿真平台的其它组件模块的接口配合,本文 采用图1所示的速度边界,其中管道两端半个状态单 元内流体的速度取实际上下游边界的速度,分别用 下标 a 和 b 表示,并认为单元内流体的状态参数及速 度是瞬时一致和均匀的,由此可分别得到可压缩流 体及弱可压缩流体的一维有限体积模型。





- 2.1.1 可压缩流体的一维有限体积模型 对状态单元运用质量方程
 - $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\rho}_i}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\Delta l} \left(\boldsymbol{\rho}_i^{\mathrm{in}} \boldsymbol{u}_{i-1} \boldsymbol{\rho}_i^{\mathrm{out}} \boldsymbol{u}_i \right) \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots N + 1) \quad (3)$

式中l为管路长度, $u_0=u_a$, $u_{N+1}=u_b$ 。

对速度单元运用动量方程

$$\frac{\mathrm{d}w_{i}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\Delta l} \left(p_{i} + \rho_{i} \cdot \left(u_{i}^{\mathrm{in}} \right)^{2} - p_{i+1} - \rho_{i+1} \cdot \left(u_{i}^{\mathrm{out}} \right)^{2} \right) - \frac{\lambda \cdot w_{i} \cdot \left| u_{i} \right|}{2D}$$

$$(4)$$

式中 $w_i = 0.5(\rho_i + \rho_{i+1})u_i$ (*i*=1,2,3,4,····*N*)。 上标 in 和 out 表示状态单元及速度单元的进出口边 界,具体取值格式可参见文献[20,26]。

状态方程采用 Soave-Redlich-Kwong (SRK)立方型状态方程,该方程能够较为准确地模拟纯物质液相及气相的压力、温度及密度之间的关系,而无需如 文献[26]中对液氧液氢分别进行内能与压力、密度的公式拟合。只要掌握所需纯物质的临界压力 p_e ,临 界温度 T_e ,偏心因子 σ 等流体固有属性即可进行状态 变量的计算,同时配合 Modelica 面向对象编程的方 式,在 Mworks 图形界面中直接更换流体属性模型即 可实现对不同流体的流动计算,大大减小了使用者 的建模难度。

SRK方程形式为

$$p_i = \frac{RT}{V_i - k} - \frac{s_i}{V_i^2 + kV_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots N) \quad (5)$$

式中
$$R$$
为理想气体常数, $V_i = \frac{M}{\rho_i}$ 为摩尔体积, M

为摩尔质量,
$$k = \frac{0.08664RT_{\rm e}}{P_{\rm e}}, s_i = \frac{0.42748R^2T_{\rm e}^2}{P_{\rm e}} \left| 1 + \frac{1}{2} \right|$$

$$f_{\varpi}\left(1-\left(\frac{T_i}{T_c}\right)^2\right)\right]^2, f_{\varpi}=0.48+1.574\boldsymbol{\varpi}-0.176\boldsymbol{\varpi}^2_{\circ}$$

2.1.2 弱可压缩流体的一维有限体积模型

在上述方程的基础上,假设流体是弱可压缩的^[27](流体密度近似认为定值),并引入流体声速 a =

$$\begin{split} \left| \frac{dp}{d\rho}, \mathbf{M} \mathbf{J} \mathbf{K} \mathbf{\hat{x}} \hat{\mathbf{\mu}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\Pi} \mathbf{f} \mathbf{f} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{f} \mathbf{\hat{z}}, \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{f} \mathbf{\hat{z}} \right| \\ \frac{dp_i}{dt} &= \frac{\rho a^2}{\Delta l} \left(u_{i-1} - u_i \right) \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots N + 1) \quad (6) \\ \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{r}} \mathbf{u}_0 = u_a, u_{N+1} = u_{b^\circ} \\ \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{r}} \mathbf{u}_0 = u_a, \mathbf{u}_{N+1} = u_{b^\circ} \\ \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{r}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{H}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{H}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}} \\ \rho \frac{du_i}{dt} = \frac{1}{\Delta l} \left(p_i + \rho \cdot \left(u_i^{\text{in}} \right)^2 - p_{i+1} - \rho \cdot \left(u_i^{\text{out}} \right)^2 \right) - \\ \frac{\lambda \cdot \rho u_i \cdot \left| u_i \right|}{2D} \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots N) \end{split}$$

压力单元边界与速度单元边界设置方式与可压 缩流体相同。

2.2 模型验证

2.2.1 SRK状态方程验证

为验证 SRK 状态方程的准确性,将使用该方程 计算得到的氢、甲烷的密度与美国国家标准与技术 研究院(NIST)的实验数据库^[28]中相应压力温度条件 下的数据进行对比,如图 2 所示,氧的数据对比可参 见文献[29],且文献中表明该方程对液氧密度的预 测十分准确。从图 2 中可以看到,由 SRK 状态方程计 算得到的甲烷密度值(图中实线,下同)与 NIST 数据 (图中散点,下同)十分相近,在给定压力与温度范围 内最大误差不超过 2%;而氢的计算值在液相时与 NIST 数据误差相对较大,即在温度小于 20K时,SRK 方程计算得到的液氢密度偏高,误差在 9% 左右。因 此在需要准确计算液氢流动的情况下,要求对真实 流体的状态方程进行进一步的修正。



Fig. 2 Results of SRK EoS validated against NIST data

2.2.2 一维有限体积模型验证

使用一维有限体积模型进行 Sod 激波管的计算, 并与经典的黎曼解进行对比,以验证该模型的准确 性。图 3 中给出了膜片破裂 1ms 后数值解与分析解 在压力、密度以及流速沿管长的分布对比,其中数值 解分别给出了速度单元边界使用迎风格式与算数平 均格式的结果。图中可以看到,一维有限体积模型 得到的 Sod 激波管数值解与黎曼解具有较高的吻合 度,能够捕捉到典型的稀疏波、接触间断以及激波, 但是算术平均格式在激波间断位置存在较大的震 荡,因此本文模型中速度单元边界选用迎风格式。

计算及分析 3

3.1 计算模型

采用基于 Modelica 面向对象编程的 MW orks 仿真 平台,分别建立可压缩流体及弱可压缩流体的一维 管路模型,并与文献[21]中已有的贮箱、节流圈以及



Fig. 3 Numerical results and Riemann solution of Sod shock tube

阀门模型组合,构建出供应系统模型以模拟管路水 击,如图4所示。

图4供应系统中,管路长l=4.8m,贮箱压力恒定 为 $p_{=6.0MPa}$,阀门出口压力为 $p_{=5.5MPa}$,节流圈流 量系数取0.95,阀门流量系数取0.7,管壁达西摩擦系 数λ取0.1;假设阀门关闭前管路已被充分预冷且流 动参数已达到平衡,整个过程流体温度保持恒定, 0.1s时刻阀门在5ms内按直线关闭。分别对液氢、液 氧及液甲烷进行水击过程的仿真模拟,计算中将管 路等分为40段。

使用可压缩流体的一维有限体积模型进行计算 时,液氢温度取21K且保持恒定,液氧温度为90K,液 甲烷温度111K;使用弱可压缩流体的一维有限体积 模型时,液氢声速取1342m/s,液氧声速取910m/s,液 甲烷声速取1398m/s。

3.2 结果及分析

图5给出了液甲烷在管路入口(图4中+标记位 置)、管路中部(图4中Δ标记位置)以及管路出口(图 4中〇标记位置)的压力变化,可以看到一维有限体 积分布参数的管路模型能够很好地反应水击压力在 管路内各个位置的传播情况,由于管路摩擦的影响, 管路出口末端的压力波动峰值最大,入口压力波动 最小,管路中部介于两者之间;还可看到弱可压缩流 体模型与可压缩流体模型在管路入口位置的计算结 果较为接近,在管路中部及出口位置存在较大差异,



Fig. 4 Schematic of feed system

这是因为管路入口位置受上游贮箱压力影响较大, 中下游表现出的差异则由两种模型对流体压缩性的 不同处理方式引起。



结合图 6 中液氢及液氧在管路出口位置的计算 结果,可以看到弱可压缩流体模型计算得到的三种 流体的水击压力在振幅与频率方面均略大于可压缩 流体模型,其中液氢的差异较小,液甲烷的差异较 大。造成这一差异的原因在于弱可压缩流体模型通 过声速来计算压力波的传播,且声速通常设置为定 值;而可压缩流体模型的控制方程中不显含声速,其 通过耦合求解守恒方程与 SRK 状态方程来计算压力 波的传播,因此该模型中流体的声速实际上是随压 力和温度变化的。从图 5(c)、图 6 中可压缩流体模型 计算得到的水击压力变化也可以证明这一点,随着 时间的推进,水击压力的震荡周期增长,即随着压力 的减小,流体的声速也逐渐减小;同时在水击过程 中,真实的流体密度是随时间变化的,特别对于管路 出口末端,阀门的突然关闭将导致该处的流体受到 压缩,从图 7 给出的密度曲线中可以看到,可压缩流 体模型计算得到了流体密度的改变,但是相对于稳 态值,密度的改变最大不超过 3%,因此在工程实践中 将液体假设为弱可压缩流体可以认为是有一定合理 性的。



Fig. 6 Pressure at the downstream end of the pipeline

对于液氢的计算,图7(b)中的稳态密度值在 83.5kg/m³左右,与相同条件下的NIST数据76.3kg/m³ 相差较大,而液氧与液甲烷的稳态密度值与相同条 件下NIST数据值相符,造成液氢密度值出现差异的 原因在于SRK方程对液氢的拟合精度不高,与2.2.1 节的验证结论相符。

此外,观察管路出口位置流体的水击压力变化 曲线,压力在突然升高后,具有一段缓慢爬升至最大 值的过程,该过程是由管壁摩擦引起的,光滑管壁不 存在此现象^[30]。在阀门瞬间关闭后,阀门上游紧邻 阀门的流体层受到瞬时滞止,导致该位置流体压强



Fig. 7 Density at the downstream end of the pipeline

突然上升;而由于管壁沿程摩擦的存在,该流体层从 管路入口流动到阀门位置时已有部分压力损失,如 图 5(c)及图 6中的稳态压力值小于 6MPa,因此阀门 关闭后管路末端出口位置的压力值为沿程损失后的 滞止压力,之后随着激波向上游的传递,上游的流体 层依次滞止,但是由于越靠近管路入口的流体层沿 程损失越小(走过的管壁路程越小),因此滞止后的 压力值越大,从而使得管路末端流体的压力缓慢 增大。

4 结 论

以补燃循环发动机供应系统为研究对象,基于 MWorks仿真平台建立了弱可压缩流体及可压缩流体 的一维管路有限体积模型,针对水击这一瞬态流动 现象分别进行了液氢、液氧和液甲烷的流动仿真研 究,得到结论如下:

(1)可压缩流体模型中采用的 SRK 状态方程对 甲烷的模拟精度较高,最大误差不超过 2%,对液氢的 拟合精度相对较低,最大误差在 9% 左右,因此提高 液氢的模拟精度是下一步需要开展的工作。

(2)一维有限体积模型能较好地捕捉瞬变流动 的间断,其中速度单元边界使用迎风格式效果较好。

(3)由于对声速的处理方式不同,可压缩流体的 一维有限体积模型的控制方程中不显含声速,实际 声速随压力变化,因此计算得到的水击压力在振幅 及频率上与弱可压缩流体模型有较大的差别,弱可 压缩流体模型的计算结果均略大于可压缩流体 模型。

(4)模拟管路水击过程时,可压缩流体模型计算 得到的流体密度波动不超过3%,因此在工程实践中 将液体假设为弱可压缩流体是合理的。

本文研究模型是等截面的直管路,下一阶段将 以变截面、带曲率的管路为对象开展研究工作;同时 液氧、液氢及液甲烷的水击实验也是下一步将要开 展的重点工作。

致 谢:感谢液体火箭发动机技术重点实验室开放基金 的资助。

参考文献

- Avanish K, Satya P P, Raghavendra R M. Experimental Studies of Water Hammer in Propellant Feed System of Reaction Control System [J]. Propulsion and Power Research, 2018, 7(1): 52-59.
- [2] Majumdar A K, Flachbart R H. Numerical Modeling of Fluid Transients by a Finite Volume Procedure for Rocket Propulsion Systems[C]. Hawaii: 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference, 2003.
- [3] 刘海飞,陈 虹,王天祥,等.液氢和液氧低温推进 剂加注系统中的管路瞬变特性研究[J].水动力学研 究与进展:A辑,2014,29(6):642-648.
- [4] 袁朝辉,滕炯华.飞机液压系统压力脉冲试验波形控 制[J].航空学报,2003,24(5):395-399.
- [5] 戴 佳,黄敏超,沈赤兵,等.挤压式液体火箭发动 机水击特性研究[J].上海航天,2007,24(1):52-55.
- [6] 林景松,王平阳,高 红,等.液体推进剂管路局部 损失及瞬变流动数值模拟[J].水动力学研究与进展, A辑,2008,23(1):112-118.
- [7] Chaudhry M H. Resonance in Pressurized Piping Systems
 [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1970.

- [8] Chudhury M H, Hussaini M Y. Second-Order Accurate Explicit Finite-Difference Schemes for Water Hammer Analysis [J]. Journal of Fluids Engineering, 1985, 107 (4): 523-529.
- [9] 聂万胜,陈新华,戴德海,等.姿控推进系统发动机 关机的管路瞬变特性[J].推进技术,2003,24(1):68. (NIE Wan-sheng, CHEN Xin-hua, DAI De-hai, et al. Transient Characteristics During Shutdown Operation of Liquid Feed Line for Attitude Control Propulsion Subsystem [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24 (1): 6-8.)
- [10] 陈宏玉,刘红军,陈建华,等.基于谱方法的管路充填过程仿真[J].航空动力学报,2012,27(9):2134-2139.
- [11] Wylie E B, Streeter V L, Suo L. Fluid Transients in Systems [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [12] Hagen D. Numerical Simulation of Transients in Feed Systems of Cryogenic Rocket Engines [R]. AIAA 95-2967.
- [13] Chaudhry M H, Hussaini M Y. Second-Order Explicit Finite-Difference Methods for Transient-Flow Analysis
 [C]. Houston: Proceedings of the Applied Mechanics, Bioengineering, and Fluids Engineering Conference, 1983.
- [14] 秦艳平,梁俊龙,李 斌,等.基于 WENO 格式的燃油供应控制系统对燃油流量调节过程的响应特性研究 [C].大连:中国航天第三专业信息网第三十八届技术 交流会暨第二届空天动力联合会议,2017.
- [15] Greyvenstein G P. An Implicit Method for the Analysis of Transient Flows in Pipe Networks[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, 53 (5): 1127-1143.
- [16] LeClair A, Majumdar A. Computational Model of the Chilldown and Propellant Loading of the Space Shuttle External Tank [C]. Nashville: 46th AIAA/ASME/SAE/AS-EE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010.
- [17] De Rosa M, Steelant J, Moral J, et al. ESPSS: European Space Propulsion System Simulation [C]. Heraklion: International Symposium on Propulsion for Space Transportation, 2008.

- [18] 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,2012,38(3):12-16.
- [19] 刘 昆,张育林,程谋森.液体火箭发动机系统瞬变 过程模块化建模与仿真[J].推进技术,2003,24(5): 401-405. (LIU Kun, ZHANG Yu-lin, CHENG Mousen. Modularization Modeling and Simulation for the Transients of Liquid Propellant Rocket Engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 401-405.)
- [20] 刘 昆,张育林.一维可压缩流的有限元状态空间模型[J].推进技术,1999,20(5):62-66. (LIU Kun, ZHANG Yu-lin. Finite Elements State-Space Model for One-Dimensional Compressible Fluid Flow[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(5):62-66.)
- [21] 陈宏玉, 刘红军, 陈建华. 补燃循环发动机强迫起动 过程[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12): 3010-3016.
- [22] 赵建军,丁建完,周凡利,等. Modelica语言及其多领 域统一建模与仿真机理[J].系统仿真学报,2006,18 (2):570-573.
- [23] Ji W R, Lempe D A. Density Improvement of the SRK Equation of State[J]. Fluid Phase Equilibria, 1997, 130 (1-2): 49-63.
- [24] Thorley A R. Fluid Transients in Pipeline Systems [M]. England: D&L. George Ltd, 1991.
- [25] Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow [M]. US: CRC Press, 1980.
- [26] 张育林,刘 昆,程谋森.液体火箭发动机动力学理 论与应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [27] Chaudhry M H. Applied Hydraulic Transients [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [28] Lemmon E W, Mclinden M O, Friend D G. Thermophysical Properties of Fluid Systems [DB/OL]. https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/, 2010.
- [29] LI Peng-fei, LEI Fan-pei, ZHOU Li-xin, et al. Investigation of Real-Fluid Characteristics in High-Pressure Liquid Rocket Engines [C]. Guadalajara: 67th International Astronautical Congress, 2016.
- [30] Fox J A. Transient Flow in Pipes, Open Channels, and Sewers[M]. England: Halsted Press, 1989.

(编辑:朱立影)