

文章编号: 1000-8055(2005) 02-0339-06

液体火箭发动机试验台贮箱增压系统 模块化仿真

陈阳¹, 高芳¹, 张振鹏¹, 陈锋²
(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;
2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要: 采用一维理想气体流动的有限元状态变量模型, 运用模块化建模与仿真方法和Fortran90语言进行了某液体火箭发动机试验台贮箱增压系统工作过程的仿真, 获得了细致的管网状态参数分布曲线, 为分析贮箱增压系统的工作过程及各组件的作用提供了数值依据。数学模型和模块化建模与仿真方法显示出较好的有效性和通用性。

关键词: 航空、航天推进系统; 液体推进剂火箭发动机; 试验台贮箱增压系统; 数值仿真; 模块化
中图分类号: V434.3 文献标识码: A

Modular Simulation for Tank Pressurization System of LRE Test-Bed

CHEN Yang¹, GAO Fang¹, ZHANG Zhen-peng¹, CHEN Feng²
(1. School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Using the finite element state-variable model for one-dimensional ideal gas flow, a modularized simulation model was established, and then the working process was calculated for the tank pressurization system of LRE test-bed. Detailed distribution curves of state parameters for the pipe net were obtained, which could be used to analyze the working process of the system and the function of every component. The mathematical model and the method of modularized modeling and simulation were validated to be effective and versatile.

Key words: aerospace propulsion system; liquid propellant rocket engine;
tank pressurization system of LRE test-bed; numerical simulation;
modularized model

刘昆^[1]通过引入空间位置交错的两种有限控制体积, 提出了一维可压缩瞬变流的有限元状态变量模型, 解决了以往同类模型的不足之处, 模型具备的诸多优点使其适用于对复杂管网的建模, 已应

用于液发管路充填^[2,3]、燃烧室计算^[4]等领域。在此基础上, 文献[5]发展了一种计算分级燃烧循环液氢液氧发动机瞬变过程的模块化建模与仿真方法并采用C++语言编制了软件。

收稿日期: 2004-05-21; 修订日期: 2004-11-22

作者简介: 陈阳(1979-), 男, 河南漯河人, 北京航空航天大学宇航学院博士生, 主要从事液体火箭发动机系统仿真研究。

Fortran77 语言为面向过程的结构化语言,对模块化建模与仿真难以胜任, Fortran90 加入派生类型和模块程序单元等功能后,为模块化建模与仿真提供了方便可行的语言工具。液体火箭发动机贮箱增压系统的正常运行是保证液路系统运行正常的前提,本文采用文献[1]提出的有限元状态变量模型,运用模块化建模与仿真方法和Fortran90 语言研究某液体火箭发动机试验台贮箱增压系统工作时管网中的状态参数分布。

1 数学模型

认为气体管流为一维理想气体绝热流动,管壁摩擦采用准稳态的平均摩擦损失模型,高压气瓶为亚音速管流提供恒温恒压入口边界条件,贮箱为亚音速管流提供恒压出口边界条件。

1.1 气体管道模块

连续方程^[1]:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{\Delta V_i} (\rho_i^{\text{in}} u_i A_i - \rho_i^{\text{out}} u_{i+1} A_{i+1})$$

(1)

能量方程^[1]:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\Delta V_i} [(E_i^{\text{in}} + P_i^{\text{in}}) u_i A_i - (E_i^{\text{out}} + P_i^{\text{out}}) u_{i+1} A_{i+1}]$$

(2)

动量方程^[1]:

$$\begin{aligned} \frac{dW_j}{dt} = & [P_{j-1} + \rho_{j-1}(u_j^{\text{in}})^2] \bar{A}_{j-1} - [P_j + \rho_j(u_j^{\text{out}})^2] \bar{A}_j + \\ & \frac{1}{2}(P_{j-1} + P_j)(\bar{A}_j - \bar{A}_{j-1}) - \frac{(1/2)f_j(\Delta V_{j-1}\rho_{j-1} + \Delta V_j\rho_j)}{2d_j}|u_j|u_j| \end{aligned}$$

(3)

理想气体压力计算公式:

$$P_i = (\gamma - 1) \left[E_i - \frac{1}{2} \rho_i \left(\frac{u_i + u_{i+1}}{2} \right)^2 \right]$$

(4)

其中:

$$E_i = \rho_i e_i + \frac{1}{2} \rho_i \left[\frac{1}{2} (u_i + u_{i+1}) \right]^2 = \frac{P_i}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho_i \left[\frac{1}{2} (u_i + u_{i+1}) \right]^2$$

, γ 为气体比热比

$$W_j = \frac{1}{2} (\Delta V_{j-1} \rho_{j-1} + \Delta V_j \rho_j) u_j, \quad u_j^{\text{in}} = \frac{1}{2} (u_{j-1} + u_j), \quad u_j^{\text{out}} = \frac{1}{2} (u_j + u_{j+1})$$

ΔV_i 为对应状态单元的体积, $\bar{A}_j = \frac{A_j + A_{j+1}}{2}$, f_j 为准稳态的平均摩擦损失系数。

i, j 分别表示状态单元和速度单元网格点,单元边界参数采用迎风格式(以下模块相同)。

求解模块调用的Fortran90 子程序为:

Subroutine Gas_Pipe(Coding, TimePara, GP_BP, GP_SV, GP_Other, n_grid)

1.2 气体阀门模块

对于长径比小,流体流动方向面积有变化的组件,可假定为局部压力损失组件。例如过滤器、截止阀、球阀、补偿器、加/排阀、安全阀、孔板、减压器等。

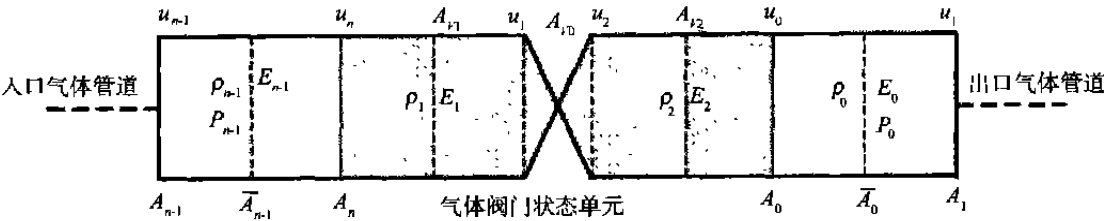


图1 气体阀门处的网格划分

Fig. 1 The grid of Gas Valve

连续方程^[6]:

$$\begin{cases} \frac{d\rho_1}{dt} = \frac{1}{V_1} (\rho_1^{in} u_n A_n - Q_m) \\ \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V_2} (Q_m - \rho_2^{out} u_0 A_0) \end{cases} \quad (5)$$

能量方程:

$$\begin{cases} \frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left[(E_1^{in} + P_1^{in}) u_n A_n - (E_1^{out} + P_1^{out}) \frac{Q_m}{\rho_1^{out}} \right] \\ \frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \left[(E_2^{in} + P_2^{in}) \frac{Q_m}{\rho_2^{in}} - (E_2^{out} + P_2^{out}) u_0 A_0 \right] \end{cases} \quad (6)$$

阀门质量流量方程^[6]:

$$Q_m = \begin{cases} \tau C_d A_{v0} \frac{2\gamma}{\gamma-1} P_1 \rho_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right] & \frac{P_2}{P_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \\ \tau C_d' A_{v0} P_1 \rho_1 \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} & \frac{P_2}{P_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \end{cases} \quad P_1 \geq P_2 \geq 0 \quad (7)$$

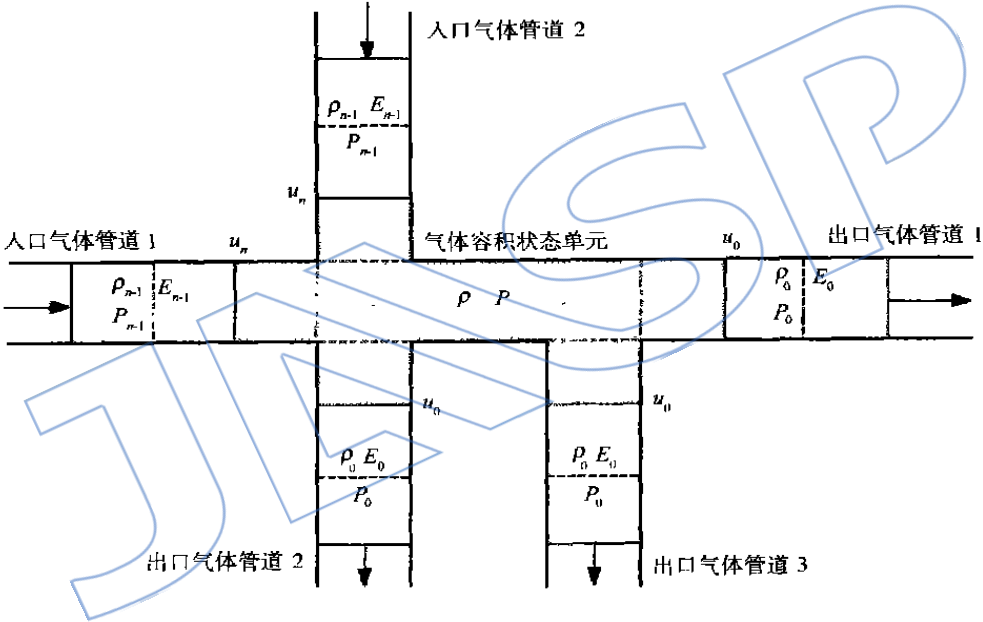


图2 气体容积处的网格划分

Fig. 2 The grid of Gas Volume

其中 τ 为阀门相对开度; C_d 和 C_d' 为流量系数, 表征阀门的节流特性, 其值为 τ 的函数, 需要通过试验针对不同类型的阀门建立 C_d (C_d') $\sim \tau$ 曲线, 且对不同的流体介质要依据粘度和密度作适当修正; A_{v0} 为阀门全开时 ($\tau=1$) 的流通截面积。

为了考虑阀门处倒流的情况, 对文献[6]中的方程进行了改进, (6)、(7)即为改进后的形式, 其中方程(7)在不符合条件的情况下, 即 $0 \leq P_1 < P_2$ 时, P_1 和 P_2 位置交换并在阀门质量流量结果前加上负号。

求解模块调用的Fortran90子程序为:

Subroutine Gas_Valve(Coding,

TimePara, GV_BP, GV_SV, GV_Other)

1.3 气体容积模块

图2为二进三出气体容积, 各气体管道边界延伸出的半个速度单元组成气体容积状态单元的边界, 加上自身的容积, 共同组成气体容积状态单元 V , 单元内压力、密度、单位体积总能量等状态参数是瞬时一致和均匀的, 忽略沿程和局部损失, 其模型方程为:

连续方程^[1]:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V} \left(\sum Q_m^{in} - \sum Q_m^{out} \right) =$$

$$\frac{1}{V} \left[\sum_{i=1}^{n_{in}} \rho_i^{in} (u_n A_n)_i - \sum_{j=1}^{n_{out}} \rho_j^{out} (u_0 A_0)_j \right] \quad (8)$$

能量方程^[1]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma}{V} \cdot$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n_{in}} P_i^{in}(u_n A_n)_i - \sum_{j=1}^{n_{out}} P_j^{out}(u_n A_n)_j \right] \quad (9)$$

求解模块调用的Fortran90子程序为:

Subroutine Gas_Volume(Coding, TimePara,
GVol_BP, GVol_SV, GVol_Other,
n_in, n_out)

其中通过n_in, n_out 来控制调用的对象为几进几出, 从而实现了任意气体容积采用同一子程序的模块化。

1.4 恒压源模块

恒压源组件的压力和温度为给定常数, 其作用是提供入口、出口边界条件。

求解模块调用的Fortran90子程序为:

Subroutine Constant_Source(Coding,
TimePara, CS_BP, CS_SV, CS_Other)

2 模块化建模与仿真方法的实现

仿真程序中设置了4个基本模块: 气体管道、气体阀门、气体容积、恒压源。以气体管道模块为例, 其求解模块调用的Fortran90子程序为:

Subroutine Gas_Pipe(Coding,
TimePara, GP_BP, GP_SV,
GP_Other, n_grid)

其中Coding, TimePara, GP_BP, GP_SV, GP_Other 为派生类型变量, 其成员分别对应调用管道对象的编码参数、时间步长参数、边界参数、状态变量、其它参数, n_grid 为划分的网格数。编码、时间步长参数分别在主程序中赋值和计算; 状态变量用来保存该模块组件(在本例中为一个气体管道)在此次迭代后计算得到的新时层状态变量; 边界参数则从相连模块组件的状态变量中获得; 其它参数包括本模块组件前后迭代最大误差、网格数和定位坐标, 定位坐标从相连的前一个模块组件获得; 管道尺寸参数、流体介质物性参数则通过编码信息从对应的输入文件读入模块子程序中。这样的模块子程序结构就可以通过调用同一个气体管道模块子程序建立所有气体管道组件的计算模型, 在定义了气体阀门、气体容积和恒压源模块以后, 就可以通过模块组件的组合形成贮箱增压系统仿真模型, 根据文献[5]提出的管道—体积模块化分解方法, 原则上气体管道模块之间不能直接相联。图3为模块化

建模与仿真过程的流程图, 其中计算结束条件中的Maxerror<Error用以进行稳态工作过程仿真, 而time<Simulation_time用以进行动态工作过程仿真。

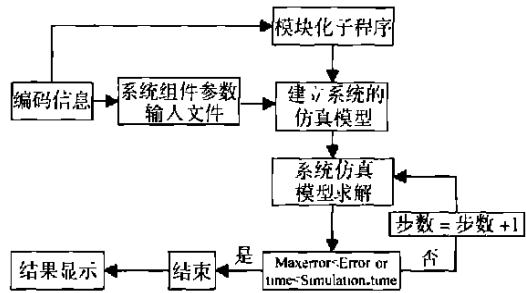


图3 模块化建模与仿真过程流程图

Fig. 3 Flowchart of modularization modeling and simulation

模块子程序的结构大致包括如下内部过程子程序: 模块入口接口、气体管道形面和网格生成、一维初始流场赋值、有限元状态变量法求解、结果输出、模块出口接口。其中, 模块入口和出口接口内部过程用来与主程序和相连模块进行信息传递, 结果输出内部过程用以进行该模块组件计算结果(包括稳态结果和动态结果)的输出。把结果输出作为模块子程序内部过程的优点是在每次迭代后输出该模块组件详细计算结果并通过派生类型变量GP_SV, GP_Other 保存维持计算的必要结果之后, 其它变量所占的内存空间就可以释放, 减小了内存占用量, 当只需要输出关键组件的计算结果时, 可以通过编码参数派生类型变量的相应成员进行控制, 例如Coding%Output=1就输出, 否则不输出。获得计算结果之后可以通过数据处理软件进行结果曲线显示。

3 计算结果及分析

图4为某液体火箭发动机试验台液氧贮箱增压系统的模块化模型简图, 模块化建模时把此系统化为17段气体管道(GP1~GP17)、12个气体阀门(GV1~GV12)、2个气体容积(GVol1~GVol2, 即集气管)和2个恒压源(CS1~CS2), 气体管道网格划分为100 mm/grid, 图中标出了各管道的长度(单位: m), 阀门和集气管沿管路走向的长度为两个网格单元, 集气管1前管道内径40 mm, 集气管2后50 mm, 其间3条管道内径由上到下分别为32 mm, 10 mm, 32 mm。系统中阀门7, 9在贮箱工作时常闭, 其对应的流路只用于推

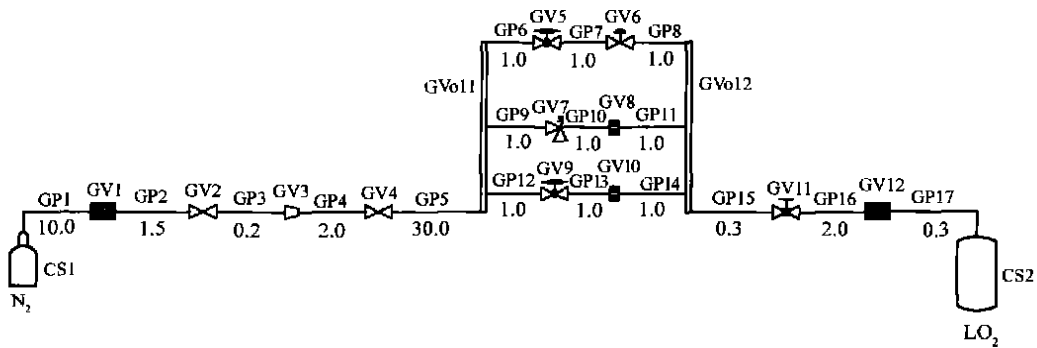


图4 液氧贮箱增压系统的模块化模型简图

Fig. 4 Modularization model of LO₂ tank pressurization system

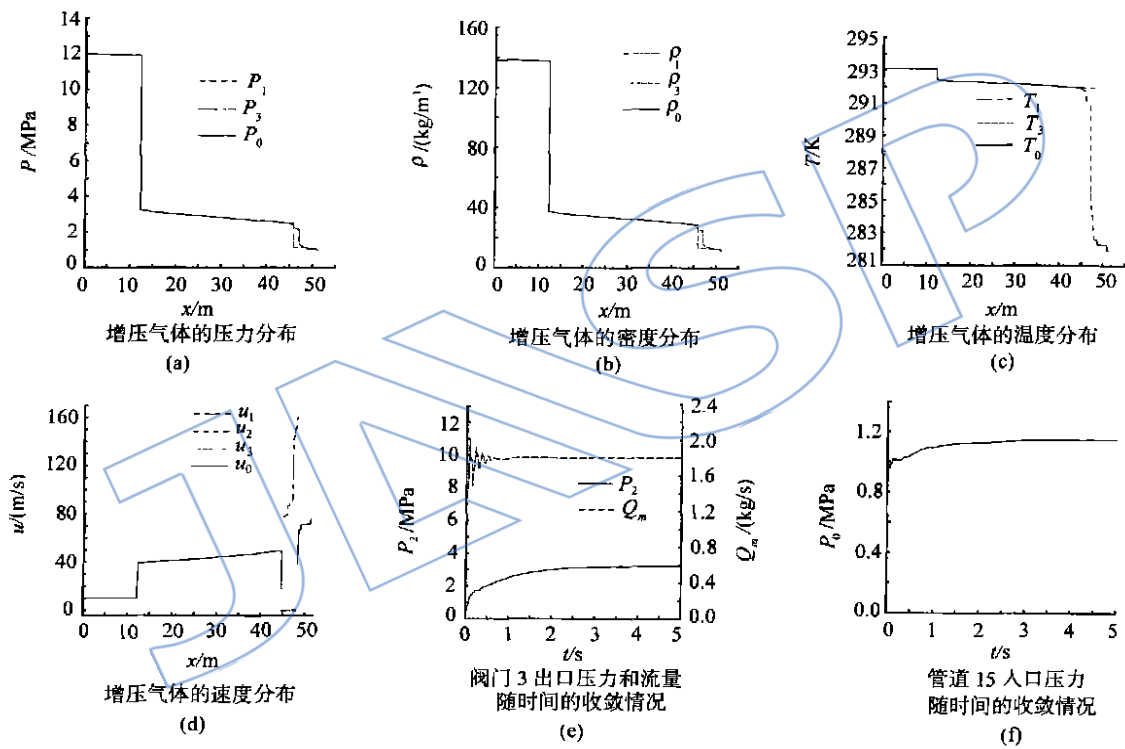


图5 贮箱增压系统管网的计算结果曲线

Fig. 5 Calculation results of tank pressurization system

进剂加注时的启动增压, 阀门6为气动薄膜调节阀, 用来控制增压气体流量, 通常只开30%, 阀门3为减压器, 把高压氮气的压力降低到工作要求的范围, 其它阀门常开。氮气瓶压强12 MPa, 温度按常温(20℃)处理, 贮箱增压压强1 MPa。

图5为贮箱增压系统管网的计算结果曲线, 其中参数符号的下标0对应主管路, 下标1, 2, 3分别对应两集气管之间的3条支路, 阀门7, 9所在的2条支路各种状态参数分布曲线基本重合, 为避免曲线互相影响, 图中未显示下标为2支路的结果曲

线。由于减压器按阀门处理并且各阀门流量系数未经试验修正, 因此在此只作定性分析。从图(a)可以看出, 各个阀门处压力降幅较大, 存在压力台阶, 阀门3为减压器, 压力降幅最大, 阀门6通常只开30%, 压力降幅也较大; 由于未考虑环境传热, 流动按绝热处理, 图(c)显示增压气体温度沿管网逐渐降低; 从图(d)可以看出, 阀门7, 9由于常闭, 其所在支路流速接近于零, 这与流量曲线一致(主管路流量为1.80 kg/s, 下标为1的支路为1.79 kg/s, 另两条支路流量接近于零); 图(e), (f)显示在计算过

程中,管网中的流动随着仿真时间的增加由流场初值逐渐收敛于稳定工况。

4 结束语

在建模过程中,虽然对数学模型作了局部修改,但基本思路与刘昆博士等人提出的大致相同。建模与仿真过程显示出文献[1]提出的有限元状态变量模型在复杂管网的建模上具有明显的有效性和优越性。面向过程的Fortran 语言在加入派生类型、模块程序单元等功能后适用于通用模块化建模与仿真。编制的程序解决了由气体管道、气体阀门、气体容积、恒压源4个基本模块组成的发动机系统的通用仿真问题。本文获得的贮箱增压系统细致的管网状态参数分布曲线为分析贮箱增压系统的工作过程及各组件的作用提供了数值依据,获得的仿真数据可以为实际试车提供监控依据,通过分析获得的结论可用以指导现有试验台的改进以及新试验台的设计与建设。

由于贮箱增压系统管网的参数测点较少,将在以后的试车中增加测点并与试车测试结果进行对比以修正部件的模型参数(例如阀门流量系数),并进一步发展减压器、高压气瓶和贮箱的模块化数学模型,进行更为精确的静、动态过程仿真,研究各个气动控制阀门的开关时序与规律,从而实现对液体推进剂贮箱增压压强的准确控制。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 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 Yu-Lin. Finite Element State-Variable Models for the Priming Process of Feed Lines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(1):19~21.

- [3] 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 Mou-sen, ZHANG Yu-Lin. Dynamic Model of Priming Processes of Cryogenic Propellant Feed Lines [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2003, 25(3):1~5.

- [4] 刘昆,张育林.液体火箭发动机燃烧室的一种分区模型[J].航空动力学报,2002,17(1):135~139.

LIU Kun, ZHANG Yu-Lin. An Innovative Partition Model of Liquid Rocket Engine Combustion Chambers[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(1):135~139.

- [5] 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 Mou-sen. Modularization Modeling and Simulation for the Transients of Liquid Propellant Rocket Engines [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(5):401~405.

- [6] 刘昆.分级燃烧循环液氧液氢发动机系统分布参数模型与通用仿真研究[D].长沙:国防科技大学,1999.

- [7] 黄敏超,王新建,王楠.补燃循环液体火箭发动机起动过程的模块化仿真[J].推进技术,2001,22(2):101~103.

HUANG Min-chao, WANG Xin-jian, WANG Nan. Modular Simulation on the Start Process for Staged Combustion Cycle Liquid Propellant Rocket Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(2):101~103.

- [8] 潘在元,张素素.FORTRAN 90 教程[M].杭州:浙江大学出版社,1993.