

空间推进系统工作过程的模块化建模*

樊忠泽¹, 黄敏超², 余勇³, 朱恒伟³

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院 陕西 西安 710049 ;

2. 国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073 ;

3. 第二炮兵装备研究院 北京 100085)

摘要 建立空间推进系统仿真模块(包括液体管道模块、三通模块、充填模块、推力室模块等)的数学模型。虽然采用的是集中参数方法,但同时考虑了液体的惯性、粘性和压缩性,所以本文建立的常微分方程组能在一定程度上反映供应系统工作过程的分布特性。

关键词 空间推进系统;工作过程;模块

中图分类号 :V433 文献标识码 :A

Modular Model of Space Propulsion System in the Whole Operation Process

FAN Zhong-ze¹, HUANG Min-chao², YU Yong³, ZHU Heng-wei³

(1. College of Electric and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China ;

2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China ;

3. Equipment Academe of the Second Artillery, Beijing 100085, China)

Abstract This paper established dynamic mathematical models of simulation modules of the space propulsion system in the whole operation process, which include liquid pipeline module, triple link module, filling-in pipeline module, thrust chamber module and so on. The lumped parameters method is employed, aiming at synchronously considering the inertia, viscosity and compressibility of liquid. Thus the ordinary differential equation set built in the research can generally reflect the distributed characteristics of the operation process in the supplying system.

Key words space propulsion system; operation process; module

目前,开展空间推进系统工作过程仿真研究时,大都是针对某一特定系统采用某一具体方法进行建模、编程和求解。当空间推进系统方案局部变动时,就必须较大地修改计算机程序或重复复杂的建模、编程和求解过程。实际上,构成空间推进系统的各个部件是类似的,主要包括导管、充填与排空导管、喷注器、燃烧室、喷管等,它们的数学模型在形式上具有一定的通用性。利用这一特点,可建立各个部件的仿真模块,并利用模块库中的部件模块拼装推进系统,然后进行其工作过程通用仿真^[1-4]。这样,既提高了程序的通用性,又大大减少了程序的修改难度。

1 液体管道模块

若把一根管道分为 N 段,这会形成 $2N$ 个独立变量,它们是 N 个压力 p_i 和 N 个流量 q_i ,其微分方程可表示为:

$$R_i \frac{dq_i}{dt} = p_{i-1} - p_i - \xi_i \frac{q_i |q_i|}{\rho} + h_i \rho g, \quad i = 2 \dots N \quad (1)$$

$$\chi_i \frac{dp_i}{dt} = q_i - q_{i+1}, \quad i = 1 \dots N-1 \quad (2)$$

* 收稿日期 2006-10-08

基金项目 国家部委资助项目(103020302)

作者简介 樊忠泽(1968—)男,高级工程师,博士生。

式中 $R_i = l/(NA)$ $h_i = h/N$ $\chi_i = V\rho/(NK)$, V 是管道容积 ρ 是推进剂密度 K 是推进剂体积弹性模量。
 q_i p_N 的微分方程与这根管道的边界条件有关,必须与其它部件联合求解。(1)式和(2)式的计算过程在 C++ 语言中可用一个函数原型来实现,其定义为

```
void PipeLine( Module part double * y double * dydt )
```

对象 $part$ 代表管道,状态变量指针 y 表示 q_i p_i , 导数指针 $dydt$ 表示 dq_i/dt dp_i/dt 。这样,用“PipeLine”函数并套上管道 $part$ 的具体参数就可以建立如图 1 所示所有管道的仿真模型。

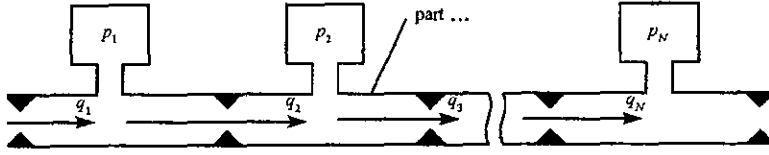


图 1 液体管道分段示意图

Fig. 1 Illustration of a divided pipeline

2 三通模块

如图 2 所示,描述三通模块的微分方程包括:

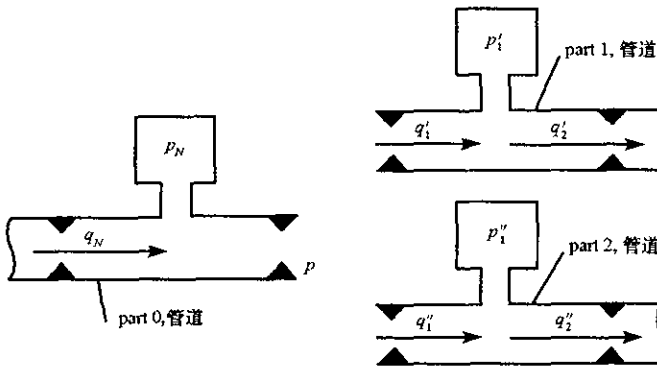


图 2 三通模块连接示意图

Fig. 2 Illustration of triple link

$$\chi_N \frac{dp_N}{dt} = q_N - q \tag{3}$$

$$R_{N+1} \frac{d(q'_1 + q''_1)}{dt} = p_N - p - \xi_{N+1} \frac{(q'_1 + q''_1)|q'_1 + q''_1|}{p} + h_{N+1}\rho g \tag{4}$$

$$R'_1 \frac{dq'_1}{dt} = p - p'_1 - \xi'_1 \frac{q'_1|q'_1|}{\rho} + h'_1\rho g \tag{5}$$

$$R''_1 \frac{dq''_1}{dt} = p - p''_1 - \xi''_1 \frac{q''_1|q''_1|}{\rho} + h''_1\rho g \tag{6}$$

式中 $\chi_N = \frac{V\rho}{NK}$ $R_{N+1} = \frac{1}{2NA}$ $h_{N+1} = \frac{h}{2N}$ $R'_1 = \frac{l'}{2N'A'}$ $h'_1 = \frac{h'}{2N'}$ $R''_1 = \frac{l''}{2N''A''}$ $h''_1 = \frac{h''}{2N''}$ 令

$$D = p_N - \xi_{N+1} \frac{(q'_1 + q''_1)|q'_1 + q''_1|}{p} + h_{N+1}\rho g$$

$$D_1 = -p'_1 - \xi'_1 \frac{q'_1 + |q'_1|}{\rho} + h'_1\rho g$$

$$D_2 = -p''_1 - \xi''_1 \frac{q''_1 + |q''_1|}{\rho} + h''_1\rho g$$

对(4)式、(5)式和(6)式联合求解可得

$$\frac{dq'_1}{dt} = - \frac{-D_1 R_{N+1} + D_2 R_{N+1} - DR'_1 - D_1 R''_1}{R_{N+1} R'_1 + R_{N+1} R''_1 + R'_1 R''_1} \tag{7}$$

$$\frac{dq''_1}{dt} = -\frac{D_1 R_{N+1} - D_2 R_{N+1} - DR'_1 - D_1 R'_1}{R_{N+1} R'_1 + R_{N+1} R''_1 + R'_1 R''_1} \quad (8)$$

(3)式、(7)式和(8)式的组织计算可用一个函数“ Pipeline_Pipeline2 ”来实现 其原型为
 void Pipeline_Pipeline2(Module part double * y double * dydt)

3 充填模块

充填模块示意图如图3所示。

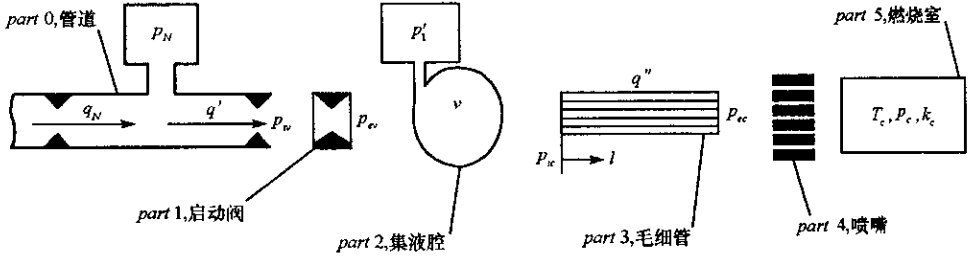


图3 充填模块示意图

Fig. 3 Illustration of filling-in pipeline

管道 part0 最后一段的压力方程为

$$\begin{cases} \chi_N \frac{dp_N}{dt} = q_N - q' \\ \chi_N = \frac{V\rho}{NK} \end{cases} \quad (9)$$

管道 part0 最后一段至启动阀的流量方程为

$$R_{N+1} \frac{dq'}{dt} = p_N - p_{ivo} - \xi_{N+1} \frac{q' |q'|}{\rho} + h_{N+1} \rho g \quad (10)$$

式中 $R_{N+1} = \frac{1}{2NA}$ $h_{N+1} = \frac{h}{2N}$ 若令

$$D = p_N - \xi_{N+1} \frac{q' |q'|}{\rho} + h_{N+1} \rho g$$

(10)式改写为

$$R_{N+1} \frac{dq'}{dt} = D - p_{ivo} \quad (11)$$

对于启动阀 part1 若令

$$D_1 - \xi_{vo} \frac{q' |q'|}{\rho}$$

它的静态方程为

$$0 = p_{ivo} - p'_1 + D_1 \quad (12)$$

由(11)式和(12)式可得

$$R_{N+1} \frac{dq'}{dt} = D + D_1 - p'_1 \quad (13)$$

对于集液腔 part2 ,它的微分方程为

$$\chi' \frac{dp'}{dt} = q' - q'' \quad (14)$$

$$R(v) \frac{dq''}{dt} = p' - p_{ic} - \xi(v) \frac{q'' |q''|}{\rho} \quad (15)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{q' - q''}{\rho} \quad (16)$$

式中 $\chi' = (v + l\pi d_c^2 N_c / 4) \rho / K$ $R(v) = \frac{v}{V} R_v$ $\xi(v) = \frac{v}{V} \xi_v$ v 为集液腔内推进剂体积, V 为集液腔体积 l 为

毛细管中推进剂充填长度 l_c 为毛细管内径, N_c 为毛细管根数。

若令

$$D_2 = p' - \xi(v) \frac{q'' l q'' l}{\rho}$$

(15)式变为

$$R(v) \frac{dq''}{dt} = D_2 - p_{ic} \quad (17)$$

对于毛细管 part3 ,它的微分方程为

$$R(l) \frac{d(q''/N_c)}{dt} = p_{ic} - p_{ec} - \xi(l) \frac{(q''/N_c) l q''/N_c l}{\rho} + h(l) \rho g \quad (18)$$

$$\frac{dl}{dt} = \begin{cases} \frac{q''/N_c}{\rho R(l)}, & \text{当推进剂处于充填过程时} \\ -\frac{q''/N_c}{\rho R(l)}, & \text{当推进剂处于排空过程时} \end{cases} \quad (19)$$

式中 $R(l) = \int_0^l \frac{dl}{A(l)}$ $h(l) = \frac{l}{l_c} h_c$ l_c 为毛细管长度。

若令

$$D_3 = -\frac{\xi(l) q'' l q'' l}{N_c^2 \rho} + h(l) \rho g$$

(18)式变为

$$\frac{R(l) dq''}{N_c dt} = p_{ic} - p_{ec} + D_3 \quad (20)$$

对于喷嘴 part4 若令

$$D_4 = -\xi_n \frac{q'' l q'' l}{\rho}$$

它的静态方程为

$$0 = p_{ec} - p_c + D_4 \quad (21)$$

(17)、(20)和(21)三式相加可得

$$\left[R(v) + \frac{R(l)}{N_c} \right] \frac{dq''}{dt} = D_2 + D_3 + D_4 - p_c \quad (22)$$

(9)式、(13)式、(14)式、(16)式、(19)式和(22)式的组织计算可用一个函数“ Filling-in Pipeline ”来实现,其原型为

```
void Filling-in Pipeline( Module part double * y double * dydt
```

4 推力室模块

描述燃烧室的微分方程包括:

$$\frac{d[K(t)]}{dt} = [K(t) + 1] [q_{01}(t-\tau) - K(t)q_{11}(t-\tau)] \frac{RT(t)}{\rho(t)V} \quad (23)$$

$$\frac{\rho(t)V d[RT(t)]}{RT(t)} = (\gamma - 1) \left[\frac{\gamma_1}{\gamma_1 - 1} R_1 T_1(t-\tau) q_1(t-\tau) \eta_c - \frac{\gamma_2}{\gamma_2 - 1} R_2 T_2(t) q_2(t) \right] - RT(t) [q_1(t-\tau) q_2(t)] \quad (24)$$

$$V \frac{d[\rho(t)]}{dt} = (\gamma - 1) \left[\frac{\gamma_1}{\gamma_1 - 1} R_1 T_1(t-\tau) q_1(t-\tau) \eta_c - \frac{\gamma_2}{\gamma_2 - 1} R_2 T_2(t) q_2(t) \right] \quad (25)$$

式中 τ 是燃烧时滞, η_c 是燃烧效率。喷管流量为

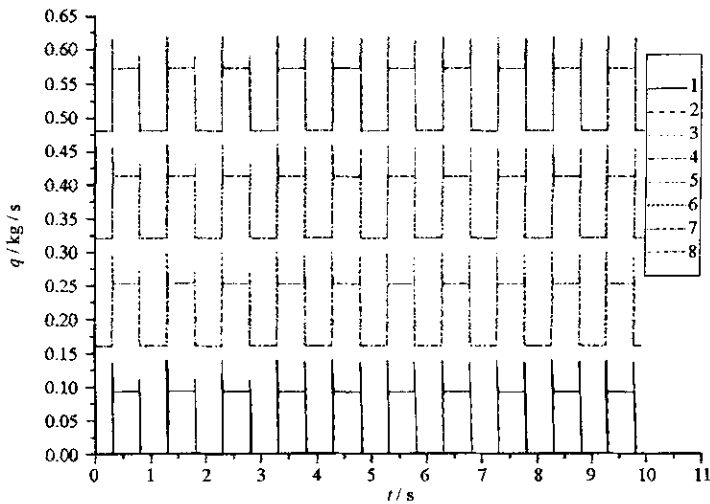
$$q = \begin{cases} \frac{\mu p_c A_t}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, & \frac{p_a}{p_c} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{\mu p_c A_t}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \frac{p_a}{p_c} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (26)$$

式中 μ 是喷管流量系数 p_a 是环境压力 p_c 是燃烧室燃气压力。(23)~(26)式的组织计算可用一个函数“Thrust_Chamber”来实现,其原型为

```
void Thrust_Chamber( Module part ,double * y ,double * dydt )
```

5 结论

各仿真模块编制好以后,根据模块化部件拼装空间推进系统,采用积分一步的变步长龙格—库塔法,就可以模拟整个推进系统工作过程,如图4所示。依据某导弹动力系统的仿真结果,对其工作程序、水击特性和流量匹配规律进行了数值分析,这样在一定程度上指导了发动机试车,节省了发动机试车成本,加快了发动机研制步伐。



1— q_{1i} 2— q_{1e} 3— $q_{2i} + 0.16\text{kg/s}$ 4— $q_{2e} + 0.16\text{kg/s}$,
5— $q_{3i} + 0.32\text{kg/s}$ 6— $q_{3e} + 0.32\text{kg/s}$ 7— $q_{4i} + 0.48\text{kg/s}$ 8— $q_{4e} + 0.48\text{kg/s}$

图4 推力室1~4#流量曲线

Fig. 4 Flux curves of thrust chamber 1~4

参考文献:

- [1] 刘红军. 补燃循环发动机静态特性与动态响应特性研究[D]. 北京: 中国航天工业总公司, 1998.
- [2] 张育林, 刘昆, 程谋森. 液体火箭发动机动理学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 魏鹏飞. 可重复使用液体火箭发动机智能减损控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.

