

补燃循环液体火箭发动机启动过程的模块化仿真^{*}

黄敏超, 王新建, 王楠

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 通过模块化编程, 建立了新一代高性能补燃发动机启动过程的部件模型。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, 所以建立的常微分方程组能在一定程度上反映发动机工作过程的分布特性。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 启动; 模块化设计; 仿真

中图分类号: V430 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2001) 02-0101-03

Modular simulation on the start process for staged combustion cycle liquid propellant rocket engine

HUANG Min-chao, WANG Xin-jian, WANG Nan

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The dynamic models of engine parts in a new high-performance staged combustion cycle liquid propellant rocket through the module codified were built. The lumped parameters method was used, the inertia, viscosity and compressibility of liquid were considered at the same time. However, the ordinary differential equation set can generally reflect the distributed characteristic of the flowing process in the engine.

Key words: Liquid propellant rocket engine; Starting; Modularized design; Emulation

1 引言

利用计算机对发动机的动态过程进行仿真计算, 以预示其动态参数的变化趋势, 尽量减少试车次数, 具有重要的意义。目前, 对补燃循环液体火箭发动机动态过程的计算机仿真, 大都是针对某一特定发动机采用某一方法进行建模、编程和求解^[1-4]。但在发动机方案变动或需要对不同的发动机的动态过程进行仿真计算时, 需要较大地修改计算机程序或重复复杂的建模、编程和求解。实际上, 构成液体火箭发动机系统的组件是固定的, 其动态数学模型在形式上具有一定的通用性。本文利用这一特点, 建立各个组件的仿真模块, 并开发可利用模块库中的组件模块拼装发动机系统, 然后进行动态过程仿真的通用仿真程序。既提高了程序的通用性, 又大大减少了程序的修改难度。

2 液路系统的数学模型

液体火箭发动机的液路是将各组合件——贮箱、

涡轮泵、燃烧室、预燃室等相互联结起来的管路。此外, 泵、流量调节器、阀门、推力室的冷却套等组件的流道部分也是液路, 它们各自具有一定的特殊性能。

为了分析液路的流动特性, 必须考虑它的许多物理性质——压缩性、惯性、粘性^[5,6]。如果采用集中参数方法来描述这些物理特性, 必需满足空间长度与波长相比几何尺寸很小的条件限制, 例如管路长度 $L \ll \lambda = a/f_{max}$, a 为声速, $f_{max} = \omega_{max}/2\pi$ 为最大振频。

2.1 惯性

假定流路分段内充满了无粘性不可压缩的液体, 在计算非稳态运动时, 只考虑液柱的惯性。由动量方程可得

$$F(p_1 - p'_2) = m \frac{dv}{dt} = \rho L F \frac{dv}{dt} = L \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

即

$$\frac{L}{F} \frac{dq}{dt} = p_1 - p'_2 = \Delta p_1 \quad (2)$$

* 收稿日期: 2000-06-30; 修订日期: 2000-09-14。

作者简介: 黄敏超 (1969—), 男, 博士, 讲师, 研究领域为推进系统动力学及人工智能技术在空间推进中的应用。

式中 p_1, p'_2 分别是液路分段入口、出口压力, m 是分段内液柱质量, f 是分段截面积, L 是分段长度, v 是分段内流体流速, q 是分段内液体流量, Δp_1 是分段降压, ρ 是液体密度。

2.2 粘性

在发动机流路中, 液体的粘性表现为局部阻力, 可表示为

$$p'_2 - p_2 = \Delta p_2 = \xi \frac{q^2}{\rho} \quad (3)$$

式中 ξ 为管路流阻系数。若同时考虑管路的惯性和粘性及重力场的影响, 根据压力叠加原理有

$$R \frac{dq}{dt} = p_1 - p_2 - \xi \frac{q^2}{\rho} + h\rho g \quad (4)$$

式中 h 是管路分段高度, 向下流为正, 向上流为负, g 是重力加速度, R 是惯性流阻, 定义为 L/F 。

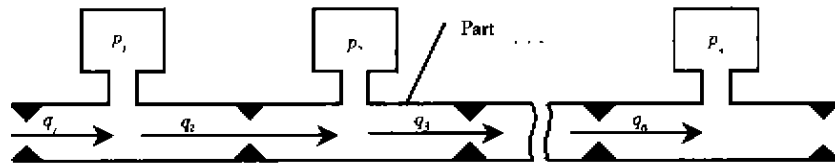


Fig. 1 Illustration of divided line

$$R_i \frac{dq_i}{dt} = p_{i-1} - p_i - \xi_i \frac{q_i^2}{\rho} + h_i \rho g, \quad i = 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\chi_i \frac{dp_i}{dt} = p_i - p_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (7)$$

式中 $R_i = L/nF = R/n$, $\xi_i = \xi/(n+1)$, $h_i = h/n$, $\chi_i = V\rho/nK$ 。 q_1, p_n 的微分方程与这根管路的边界条件有关, 必须与其它部件联合求解。方程组(6),(7)的组织计算过程在 C++ 语言中可以用一个函数来实现^[7,8], 其定义为

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

其中, 对象 part 代表这根管路, 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“Line”函数并套上管路 part 的特性参数就可以建立所有管路的计算模型。

对于两根管路的连接处可进行以下处理: 前一段管路下端的一个微分方程为

$$\chi_n \frac{dp_n}{dt} = q_n - q'_1, \quad \chi_n = \frac{V\rho}{nK} \quad (8)$$

下一根管路的第一个流量方程为

$$R'_1 \frac{dq'_1}{dt} = p_n - p'_1 - \xi'_1 \frac{q'^2_1}{\rho} + h'_1 \rho g \quad (9)$$

2.3 压缩性

忽略液柱惯性和壁面摩擦损失, 这时候, 液路分段的动态特性主要取决于液体的压缩性。压缩性的影响表现在当压力变化时流路内液体的质量也在变化, 这就意味着入口和出口的流量瞬时值是不同的。由非稳态流动时的质量平衡方程变化后可得

$$\chi \frac{dp}{dt} = q_1 - q_2 \quad (5)$$

式中 q_1, q_2 分别是分段入口、出口处的质量流量, a 是液体中声速, $\chi = \frac{V\rho}{K} = \frac{V}{a^2}$, K 是液体的体积弹性模量。

下面讨论各管路的模块化设计。对于各种管路均可构成图 1 所示的分段模型, 若把一根管路分为 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 , 其微分方程表示为

$$\text{式中 } R'_1 = \frac{R}{2n} + \frac{R'}{2m}, \xi'_1 = \frac{\xi}{n+1} + \frac{\xi'}{m+1}, h'_1 = \frac{h}{2n} + \frac{h'}{2m}, m \text{ 为管路 part1 的分段数。}$$

方程组(8),(9)的组织计算过程可用一个函数“Mode2”来实现, 其函数原型为

```
void Node2 (Module part, Module part1, double* y, double* dydt)
```

在其它管路的连接处只要引用这个函数并套上相应参数便可以了。

3 调节器模块

调节器的动态方程为

$$\begin{aligned} (R_{pkc} + R'_1) \frac{dq'_1}{dt} &= p_{epd} - p'_1 - \\ (\xi_{pkc} + \xi'_1) \frac{q'^2_1}{\rho} &+ h'_1 \rho g \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $R'_1 = \frac{R}{2m}$, $\xi'_1 = \frac{\xi'}{m+1}$, $h'_1 = \frac{h'}{2m}$, R_{pkc}, ξ_{pkc} 为调节器的惯性流阻、阻力系数, m 为流量调节器出口至点火导管分段数, 阻力系数 ξ_{pkc} 由调节流量的两个腔道之间的流阻系数 ξ_1 和保持稳定性的两个腔道之间的

流阻系数 ξ_2 来合成。

方程(10)再结合调节器的其它特性方程便构成了调节器的数学模型,它们的组织计算过程由函数“Adjustor”来实现,其函数原形为

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

4 气路数学模型

气路的混合比变化率为(参见图 2)

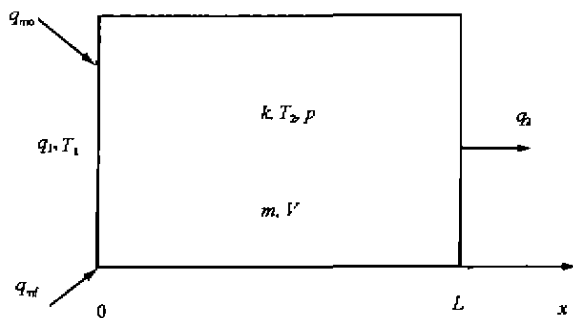


Fig.2 Illustration of gas line

$$\frac{dk}{dt} = \frac{k+1}{m} (q_{m0} - kq_{m1}) = (k+1)(q_{m0} - kq_{m1}) \frac{RT}{pV} \quad (11)$$

式中 R 是气体常数, V 是腔容积。

如果认为热导率和扩散系数为无限大,那么整个气路分段上的燃气温度的瞬时值(在该瞬间刚进入入口的那股燃气除外)是一样的,并等于气路分段出口处的温度。忽略燃气的动能,假设流动是绝热的,则气路能量守恒方程表示为

$$m \frac{dT_2}{dt} = (\gamma T_1 - T_2) q_1 - (\gamma T_2 - T_2) q_2 \quad (12)$$

根据理想气体方程,两边取导数并引入式(12)整理为

$$\frac{V}{\gamma RT_2} \frac{dp}{dt} = \frac{T_1}{T_2} q_1 - q_2 \quad (13)$$

式(11)~(13)即为气路的基本方程,再加上各分段内的静态方程及特性方程便可建立整个气路的分段数学模型,它们的组织计算过程由函数“Gasline”来实现,其函数原形为

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

5 涡轮泵模块

根据涡轮泵的结构关系和运转情况可得其动态方程为

$$J \frac{dw}{dt} = M_T - \sum_i M_{Hi} \quad (14)$$

其中 J 为涡轮旋转部分的总转动惯量,包括涡轮泵的转动部件和泵内液体部分。 w 为涡轮泵转动角速度, M_T, M_{Hi} 为涡轮和第 i 台泵的力矩。

将功率(力矩和功率有一定的关系)引入式(14)可得

$$J \frac{dn}{dt} = \frac{900}{\pi \tau^2} [N_T - \sum_i N_i] \quad (15)$$

其中 N_i 为各泵的功率。

式(15)再结合涡轮泵的特性方程(流量方程、功率方程、温度方程和效率方程等)即可构成涡轮泵的数学模型。

各仿真模块编制好以后,根据发动机系统拼装模块化部件,采用积分一步的变步长龙格-库塔法,就可以模拟整个发动机的启动过程。依据某发动机试验装置的仿真结果,对其各种阀门的打开时序进行了优化和稳定性分析,从而向设计者和试验者提供了可靠的理论依据,节省了大量费用。

参考文献:

- [1] 张黎辉,张振鹏.补燃循环液体火箭发动机输送系统的频率特性[J].推进技术,2000,21(1).
- [2] 刘红军,张恩昭,董锡鉴.补燃循环发动机启动特性仿真研究[J].推进技术,1999,20(3).
- [3] 刘红军,张恩昭,张育林,等.基于混合遗传算法的液氧/煤油补燃循环火箭发动机非线性稳态特性仿真[J].推进技术,1998,19(2).
- [4] 刘红军.液氧/煤油高压补燃火箭发动机非线性稳态模型——考虑推进剂升温与密度变化[J].推进技术,1999,20(2).
- [5] 戴莱 J W,哈里曼.流体力学[M].郭子中、陈玉璞译,北京:人民教育出版社,1983.
- [6] 格列克曼 B Ф.液体火箭发动机自动调节[M].顾明初,郁明桂、邱明煜译,北京:宇航出版社,1994.
- [7] 徐士良主编.C常用算法程序集(第二版)[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [8] 黄庆生,汤毅,戴宁编.精通 Visual C++ 6.0[M].北京:人民邮电出版社,1999.

(编辑:王居信)