

文章编号: 1000-8055(2007)07-1204-05

液体火箭发动机稳态特性仿真软件的改进

李家文, 郑安豫

(北京航空航天大学 宇航学院, 100083)

摘 要: 对作者先前编写的液体火箭发动机稳态特性仿真软件进行了改进, 使仿真软件通过调用用户编写的动态链接库, 添加新的方程和求解算法, 提高了仿真软件的通用性和可扩充性。同时, 仿真软件允许用户直接调整模型中参数的数量和种类, 以及需要求解的方程数量, 使仿真软件能够在不更改模型输入文件的条件下, 进行故障分析、系统参数调整等工作。

关键词: 航空、航天推进系统; 液体火箭发动机; 稳态特性; 仿真; 动态链接库

中图分类号: V430

文献标识码: A

Improvement on simulation software for static characteristics of liquid rocket engine

LI Jia-wen, ZHENG An-yu

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The author improved the former simulation software for static characteristics of liquid rocket engine. Users could add new equations and algorithms by using dynamic link Library. It made the simulation software more general and extended. Users could adjust the models' parameters and the amount of the needing resolve equations directly with the improved software. So the software could do fault analysis and system parameters adjusting without modifying the input files.

Key words: aerospace propulsion system; liquid rocket engine; static characteristics; simulation; dynamic link library

稳态特性仿真在液体火箭发动机研制过程中有着很重要的作用, 稳态特性仿真软件可以应用在系统平衡计算、干扰因素分析、发动机调整计算和试验数据分析等工作中^[1-2]。仿真软件的一个很重要的指标是软件的通用性, 但由于液体火箭发动机的系统结构和工作过程都是非常复杂的, 对仿真精度的要求也越来越高, 在仿真新型发动机、原发动机增加新部件或者描述部件的方程更加复杂等情况下, 通常需要对源程序进行修改, 来适应仿真的需要。修改源程序对于普通软件使用者具有一定的难度。为了解决这个问题, 需要软件能够

具有可扩充性, 添加新模块时不需修改源程序。

稳态特性仿真软件的一个重要组成部分是求解模块, 通常需要对非线性方程组进行求解, 仿真软件如果能够允许用户添加自己的求解算法, 就可以避免在出现求解问题时修改源程序。将稳态特性仿真软件应用在发动机调整计算或者试验数据分析的过程时, 可能需要对发动机系统模型进行修改, 例如增加、减少方程数量, 改变未知量、已知量的种类和数量(将试验数据或者是期望得到的参数作为已知量, 将某个部件的面积、流阻系数等参数作为未知量), 一般情况下, 就需要修改仿

收稿日期: 2006-06-23; 修订日期: 2006-11-28

作者简介: 李家文(1972-), 男, 黑龙江佳木斯人, 副教授, 研究领域: 液体火箭发动机工作过程仿真。

真软件的输入文件或者模型.如果需要重复的次数比较多,这个工作量也是很大的.

针对上述的问题,本文在文献[3]提出的基于方程的仿真软件基础上,进行了改进,以提高软件的通用性和可扩充性.

1 新方程的添加

发动机的稳态模型可以用下面的方程组表示

$$F(X, Z) = 0 \quad (1)$$

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为系统未知量, $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ 为常量,包括各部件固有特性参数和外界环境条件等; $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 为描述各部件工作的函数.如果方程数 m 等于变量数 n ,就可以对方程组(1)求解.

可以将方程组(1)改为

$$F(X) = 0, \quad (2)$$

其中 X 包含了方程组(1)中的 x 和 z .

如果方程组(1)中的所有方程类型都包含在文献[3]介绍的通用仿真软件中,则可以利用该软件进行稳态仿真研究.由于不可能将所有需要的方程事先编入仿真软件中,需要仿真软件能够提供方便的添加新方程的功能.

一种最直接的添加新方程的方法是在原有仿真软件基础上,通过修改源程序进行,这对于软件编写者来说是很简单的工作,但对于其他软件使用者来说,就需要有源程序,使用相同的编译器,并且对软件结构有比较深入的了解.另一种方法是使用动态链接库(Dynamic Link Library,简称 DLL),这种方法增加了仿真软件编写的难度,但对于普通用户的使用就方便了许多.用户需要按照一定的要求编写相应的 DLL 文件,就可以添加新的方程,在这个过程中,可以使用不同的编译器(VC, C++ Builder 等),甚至不同的编程语言(C++, BASIC, FORTRAN 等).

下面简单介绍一下在作者编写的稳态特性仿真软件中添加新方程的过程:

用户需要在 DLL 文件中定义下面两个函数:

```
int GetEqNumber(void);
```

```
void GetEqInfo( struct EqInfo t);
```

函数 GetEqNumber 返回 DLL 文件中包含的方程数量.函数 GetEqInfo 返回所有方程的信息 t , struct EqInfo 的格式:

```
struct EqInfo {  
    int Id;    // 方程的编号  
    int n;    // 方程所包含的参数数量
```

```
double ( *pf )( double * ,int * );// 该方程  
所使用函数的指针
```

```
char *Commentary;    // 注释  
};
```

例如,添加下面的管路方程

$$p_1 - p_2 - k \cdot \dot{m}^2 = 0$$

用户需定义管路的函数:

```
double liquid_pipe1( double * x,int *index )  
{ double p1 = x[index[0]],  
  p2 = x[index[1]],  
  m = x[index[2]],  
  e = x[index[3]];  
  
  return p1 - p2 - e * m * fabs(m); }
```

并且在 GetEqInfo 函数中返回管路方程的信息(结构 struct EqInfo):

```
{11,4,liquid_pipe1,“管路”}
```

11 为管路方程的编号,可以是其它整型数;4 是方程包含的参数数量;liquid_pipe1 是管路函数的名称;“管路”是字符串,作为的这个方程的说明.

图 1 给出了仿真软件调用 DLL 文件的过程.

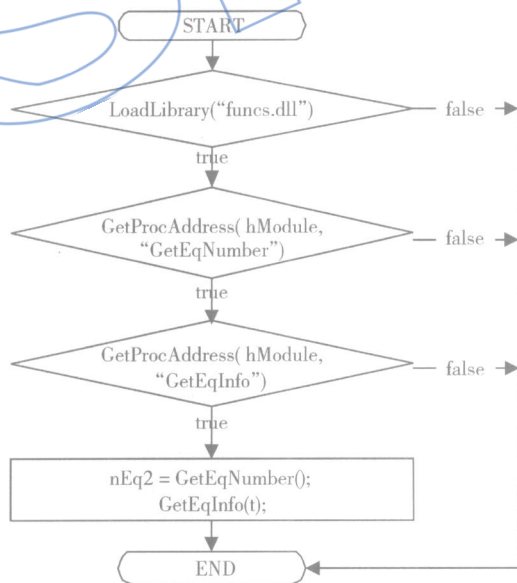


图 1 包含方程信息的 DLL 文件调用过程

Fig. 1 Process of calling DLL files including equations' information

在读入模型输入文件时,将对每一个方程重复下面的过程(图 2):

采用动态链接库添加新方程的方法,可以额外增加软件的一个功能:用相同编号的新方程替代原有的方程,在进行仿真时,就可以不修改原来的模型文件.例如,在混合比变化不大的情况下,可以近似认为描述燃烧室工作过程的方程中,燃

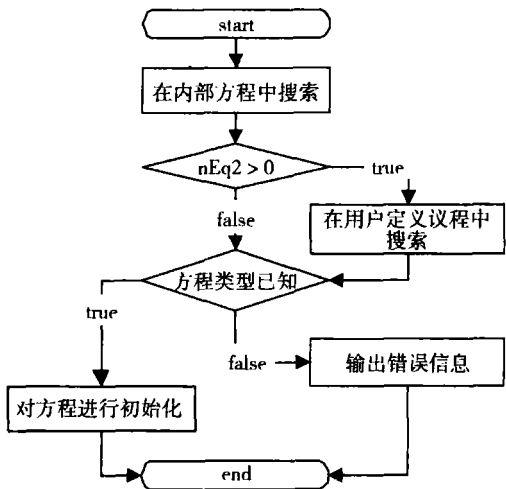


图 2 方程在建立模型时的设置过程

Fig. 2 Setting process of equation model building

气 RT 值为常数,如果需要考虑 RT 值的变化,可以链接新的考虑 RT 值变化的 DLL 文件,不需要修改原来的模型文件。

2 非线性方程组求解算法的添加

添加新的非线性方程组求解算法,需要用户建立一个动态链接库,其中包含下面的函数:

```
int UserResFunc( void f(double * x, double * f x), double * x0, double * x1, int n);
```

UserResFunc 函数对方程组 f 进行求解,初值为 x_0 ,求解结果为 x_1 ,方程组有 n 个方程,返回结果为迭代次数(整型数, int)。方程组 f ,也就是函数 $\text{void } f(\text{double } * x, \text{double } * f x)$ 包含 n 个方程,根据输入数组 x ,返回 n 个方程的结果。参照方程组(2)的形式,函数 $\text{void } f(\text{double } * x, \text{double } * f x)$ 的功能为计算:

$$FX = F(X)$$

用户只要在上述函数中添加自己的求解方法,编写 DLL 文件,将 DLL 文件拷贝到仿真软件所在的目录下,仿真软件在运行时就可以调用用户自己编写的求解算法了。

按照上述编写求解算法 DLL 文件的过程,分别编写了拟牛顿法、Broyden 法、延拓法求解非线性方程组的 DLL 文件,并利用一个由 236 个方程组成的小推力液体火箭发动机系统稳态模型,进行了这些算法的验证和对比。在给定一组初值后,这几种算法给出了相同的方程组的解。在下表中给出了不同算法的收敛速度。

应该指出的是,上面给出的结果会受到每种算法的优化程度的影响。在编写拟牛顿法时,进行

表 1 不同算法的收敛速度

Table 1 Comparison for algorithms' rate of convergence

算法	拟牛顿法	Broyden 法	延拓法
求解时间/s	0.063	0.563	0.156

了比较深入的优化研究,包括在对雅各比矩阵求解时,考虑了小推力发动机系统主要由管路、阀门等组成,矩阵中的非零元素很少(稀疏矩阵),优化后可以将求解速度提高 30 %左右。

由于现在计算机的运算速度有了很大的提高,对于很多问题,在初值和方程组的解差别不大时,这些算法都能满足求解速度的要求。主要的问题是保证在不能给出合适的初值的情况下,能够得到方程组的解。在实际应用过程中发现,在有些情况下,拟牛顿法会出现迭代发散,在另一些情况下,Broyden 法会迭代发散,延拓法会出现迭代次数过多的问题。解决这个问题的方法可以是:在一种方法迭代出错的情况下选取另一种方法;采用延拓法迭代几次后,将结果作为其它方法的初值继续计算;研究其它算法,例如神经网络法。本文提出的添加新算法的方法为解决求解问题提供了帮助。

3 仿真模型的调整

仿真软件采用了 C++ 面向对象编程技术,计算模型包括三个主要组成部分:参数、方程和方程组。每个参数可以是变量或者常量;每个方程由一个或几个参数和参数之间的关系式组成;方程组由一个或几个方程组成。由于计算模型具有这样的结构,通过对原有软件进行了一定的修改,使仿真软件在不修改模型输入文件的条件下,直接利用软件的图形界面,允许进行以下操作:

- a) 将某个参数由变量改为常数,或相反;
- b) 调整某个方程在方程组中的位置(改变方程排列顺序);
- c) 改变需要求解的方程组中方程的数量。

通过以上三种基本操作,可以很方便地解决液体火箭发动机稳态仿真中一些问题。具体方法将在下面的简单例子上进行演示。

图 3 给出了一个液体管路示意图(1, 2, 3, 4, 5-导管; 6, 7-连接点; p -压力; m -流量),图 3 的管路图可用方程组(3)来描述:

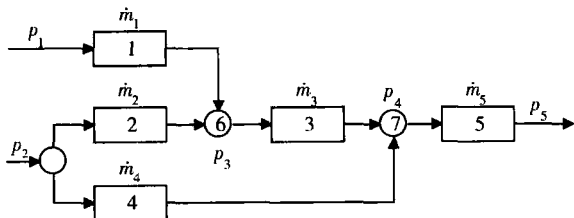


图 3 液体管路示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of liquid pipeline

$$\begin{aligned} f_1: & p_1 - p_3 - k_1 \dot{m}_1 | \dot{m}_1 | = 0 \\ f_2: & p_2 - p_3 - k_2 \dot{m}_2 | \dot{m}_2 | = 0 \\ f_3: & p_3 - p_4 - k_3 \dot{m}_3 | \dot{m}_3 | = 0 \\ f_4: & p_2 - p_4 - k_4 \dot{m}_4 | \dot{m}_4 | = 0 \\ f_5: & p_4 - p_5 - k_5 \dot{m}_5 | \dot{m}_5 | = 0 \\ f_6: & \dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0 \\ f_7: & \dot{m}_3 + \dot{m}_4 - \dot{m}_5 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

(1) 系统方案设计(调整计算):

通过将流阻系数等参数设置为变量,给出所要求的参数数值(对于发动机来说,可将涡轮泵转速、燃烧室压力等设置为常量),求出达到给定燃烧室压力、转速需要的流阻系数数值.针对上面的例子,通常情况下,各管路的流阻系数已知,给定入口和出口压力,求其余的压力和流量.可以在这个模型基础上,将 $\dot{m}_5$ 设置为常量, k_2 设置为变量,求出为了得到给定流量 $\dot{m}_5$ 的 k_2 的数值.

指定 $\dot{m}_5 = 4.4$,求解得到 $k_2 = 90.165$,也就是说,将管路 2 的流阻系数调整为 90.165,可以使流量 $\dot{m}_5$ 为 4.4.

在仿真软件中,可以将多个变量设置为常量,或相反.

(2) 试验数据分析(故障分析):

如果试验数据和设计值有偏差,需要对试验数据进行分析,找出故障原因.

仿真管路 2 堵塞故障:设置 $k_2 = 90.165$.

表 4 排除方程的结果

Table 4 Result of removal equation

方程	1	2	3	4	5	6	7
p_3	23.036	23.036	25.009	24.873	24.985	23.036	24.873

排除 1,2,6 方程后,得到的 p_3 结果和测量值相同,代表这三个方程有可能有故障,也就是说,管路 1 故障、管路 2 故障和连接点 6 出现泄漏都有可能

结合上面得到的 $k_1 = -5.6033$ 的结果,可以排除管路 1 出现故障的可能.最终可以得到“管

得到故障仿真结果: $\dot{m}_5 = 4.4$; $p_3 = 23.036$. 这个结果用于演示下面的故障分析过程.

a) 利用上面介绍的“调整计算”的方法.例如, $\dot{m}_5$ 测量值为 4.4,将 $\dot{m}_5$ 设置为常量,将 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 依次设置为变量,得到以下结果.

表 2 $\dot{m}_5$ 为常数时的结果

Table 2 Result when $\dot{m}_5$ is constant

$\dot{m}$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
4.4	-5.6033	90.165	1.7370	1.4754	1.0607

管路的流阻系数为上面列出的数值时,可以使流量 $\dot{m}_5$ 为 4.4.

p_3 测量值为 23.036,将 p_3 设置为常量,将 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 依次设置为变量,得到以下结果:

表 3 p_3 为常数时的结果

Table 3 The result when p_3 is constant

p_3	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
23.036	1.0002	90.294	0.99958	1.0002	0.99958

对比两个结果,可以看出, k_2 数值差别最小(0.15%,计算误差),也就是说,只有 k_2 的增加可以导致 $\dot{m}_5 = 4.4$; $p_3 = 23.036$ 的结果.故障原因:管路 2 堵塞.(在这里没有考虑泄漏故障).

b) 排除方程(部件)的方法.在有些时候,试验数据出现偏差的原因可能是因为数学模型中的方程不准确,或者是某个部件出现了不能通过简单地调整系数来模拟(如出现泄漏、汽蚀等)的故障.这时,需要采取排除方程(部件)的方法.

将一个(几个)测量参数代入数学模型,排除一个(几个)方程,检验这个(几个)方程代表的部件是否出现故障.

采用和上面相同的故障仿真结果.将 $\dot{m}_5$ 设置为常数,依次排除第 1-7 个方程,每排除一个方程后,进行求解,得到相应的 p_3 的数值:

路 2 和连接点 6 出现故障”的结论(包括管路 2 和连接点 6 可能出现泄漏的故障).

4 结 论

本文利用动态链接库和面向对象编程技术,对液体火箭发动机稳态特性仿真软件进行了改

进.改进后的仿真软件增加了以下功能:

(1) 通过动态链接库增加方程类型;(2) 通过动态链接增加非线性方程组求解算法;(3) 不修改模型输入文件,可对模型中的参数类型、方程顺序、方程数量进行调整.

没有改变仿真软件已经具有的特点(和发动机循环方式无关;不用考虑发动机各部件间的连接关系等).结合上面增加的功能,可以认为,本文介绍的稳态特性仿真软件具有很强的通用性和可扩充性,不需要修改仿真软件的主程序,软件使用者可以使用自己熟悉的编程软件对仿真软件进行扩充,能够进行仿真的液体火箭发动机类型没有限制,仿真过程也得到了简化,也可以将该仿真软件应用到其它领域的仿真工作中.

参考文献:

[1] 黄卫东,朱恒伟,王克昌,等.液体火箭发动机静态仿真通

用模块化方法[J].航空动力学报,1998,13(1):53-56.

HUANG Weidong, ZHU Hengwei, WANG Kechang, et al. A general modular method for static simulation of liquid rocket engine[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(1):53-56.

[2] 许琨,张宝炯.液体火箭发动机运动循环参数通用计算方法的研究[J].宇航学报,1996,17(4):26-33.

XU Kun, ZHANG Baojong. Study of general calculation method for power cycle parameters of liquid rocket engine [J]. Journal of Astronautics, 1996, 17(4):26-33.

[3] 李家文,张黎辉,张振鹏.液体火箭发动机数值模拟的计算模型建立方法[J].推进技术,2002,23(5):363-365.

LI Jiawen, ZHANG Lihui, ZHANG Zhenpeng. Method for calculation model establishment in liquid propellant rocket engine numerical simulation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(5):363-365.