

文章编号:1000-8055(2011)03-0687-05

液体火箭发动机模块化通用仿真

张黎辉, 李 伟, 段 娜

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 以大型液体火箭发动机研制为背景, 根据模块化建模思想和通用仿真要求, 提出一种具有良好通用性和系统组织能力的仿真方法, 数学模型在模块内的存储形式是代码文本, 操作者只需从界面即可添加模型, 扩展模块库. 描述了实现这种方法的软件架构, 在 Microsoft Visual Studio 6.0 平台上, 采用 C++ 语言开发出该仿真软件, 并在 MFC(Microsoft Foundation Classes)文档视图结构的基础上实现了可视化建模, 完成了对某液体火箭发动机瞬变过程仿真. 通过计算结果与试车曲线的对比, 初步验证了所采用仿真方法的可行性和正确性. 研究工作可以很方便地实现对其他液体火箭发动机系统动态过程的仿真.

关 键 词: 液体火箭发动机; 瞬变过程; 模块化; 通用仿真; 仿真软件

中图分类号: V434

文献标识码: A

General simulation on modularization of liquid rocket engine

ZHANG Li-hui, LI Wei, DUAN Na

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the development of large liquid rocket engines, a universal system organization capability approach was presented according to the thought of modularization modeling and the requirements of general simulation. Mathematical model in the module was stored in the form of code text; and the operator could add models or expand block library from the operator interface. This paper described the approach of realizing such software architecture. In Microsoft Visual Studio 6.0 platform, C++ language was utilized to develop the simulation software and implement visual modeling based on MFC (Microsoft Foundation Classes) document view architecture, and finally a particular transient simulation of liquid propellant rocket engine was fulfilled. By comparing the results with the test run curve, the feasibility and correctness by adopting the simulation method was verified primarily. The researchers can carry out expediently dynamic process simulation in other liquid rocket engines.

Key words: liquid rocket engine; transient process; modularization; general simulation; simulation software

随着我国新型运载火箭技术的不断成熟, 计算机仿真技术已经成为一种必不可少的工具. 在传统的火箭发动机仿真研究中, 对动态过程的仿真大都针对某一特定发动机进行建模、编程和求解, 在发动机方案变动或需要对不同的发动机动

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上述复杂的过程, 缺乏通用性.

为了进一步深入研究液体火箭发动机组件和系统的瞬变特性, 把研究人员从繁杂的代码编写和调试过程中解放出来, 将工作的重心放在对火

收稿日期: 2010-02-02; 修订日期: 2010-05-27

作者简介: 张黎辉(1966—), 女, 吉林长春人, 副教授, 博士, 研究方向: 液体火箭发动机系统设计、仿真和优化.

箭发动机理论和数学模型的研究上,研制出具有良好通用性的仿真软件具有重要意义。

早在20世纪80年代末,由美国马歇尔空间飞行中心开发的火箭发动机瞬态仿真系统(ROCETS)^[1],就采用模块化建模思想,将发动机系统中功能相似的组件划分为许多子模块,并依据需要进行系统集成。由于当时没有条件采用可视化界面,因此ROCETS还是通过一些提示性的语言来实现工程模块和系统之间的集成,对于比较复杂系统的仿真则显得非常繁琐。

具有代表性的软件还有法国宇航局和宇航材料研究局于2000年开始联合研制开发用于预测液体火箭推进系统瞬态特性的软件CARINS^[2]。该软件系统结构包括图形化用户接口、模型库和模型自动生成器三方面。工程人员可以在CARINS的界面上构建所需要仿真的系统,并对系统进行赋值或者确定属性等操作。在完成建模后,自动生成该系统的基于Fortran语言的仿真系统,并对整个系统进行求解。此外,还有许多其他类似的研究工作如文献[3-8]中所述。

国内目前在工程上应用较多的模块化仿真软件是由我国国防科学技术大学刘昆等人开发的发动机瞬变过程仿真软件(LRETMMSS)^[9]。该软件拥有可视化界面,采用C++语言编写而成,分割的模块具有简单性和连接组装的方便性。自开发成功以来已经在我国液体火箭发动机研究中发挥了重要作用。但该软件由于缺少模型动态生成部分,使其在针对不同类型液体火箭发动机进行仿真时,需要改进模型库。因此,在软件通用性和模块的维护性方面还有待进一步改善。

本文根据上述文献的研究思想,提出一种具有良好通用性和系统组织能力的仿真方法。所研制的软件可以最大限度地提高模型的扩展能力,有效地减少建模任务的复杂性,为新型发动机的研制提供方便快捷的仿真工具。

1 模块化通用仿真方法

根据液体火箭发动机的结构特点,在模块化仿真软件的研制过程中^[10-11],其关键在于解决不同发动机系统进行仿真的通用性问题和提高复杂系统的组织能力问题,即解决模块数学模型的不确定性和系统结构的不确定性问题。因此,模块内部需要有一个灵活的逻辑结构。

1.1 模块内部结构

模块是发动机系统内各个组件的数学模型在

仿真软件中的存在形式,它与要仿真的组件相对应。模块内部封装对应组件的尺寸属性、性能参数、数学模型和与其他组件做物质和能量交换的数据。虽然在进行发动机系统仿真时,一般情况下只需要简单的模块来组织系统,但是对于一些考虑比较全面的复杂系统,为了简化系统组建过程,需要对一些重复出现的局部结构进行封装。

针对这些需求,本文在模块中设计了五种数据类型,如图1所示,包括变量、数学模型、子模块、接口和接口连接关系,它们可根据需要动态生成。其中变量的功能与程序语言中的变量功能类似,既可以用于存储尺寸属性和性能参数等数据,还可用于数学模型的计算。数学模型在模块内的形式比较复杂,首先它在模块中的存储形式是代码文本,而仿真计算时又会被转换为计算程序,并与变量进行数据交互。子模块是在模块内嵌套的模块,利用这种嵌套的结构可以灵活地组织复杂的系统模型。接口的功能是存储输入输出信息和实现模块之间的数据交换,依赖于连接关系。连接关系本身也是一种数据类型,用于实现接口之间的连接和查询。

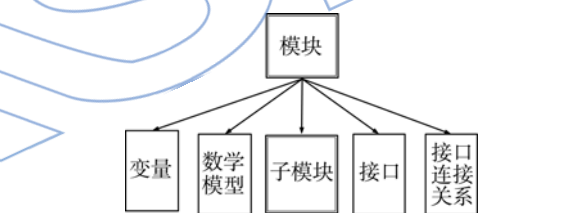


图1 模块内部数据结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the module interior data

仿真软件是否具有通用性,很大程度依赖于模块生成器的作用。模块生成器通过界面建模工具,按照上述的数据结构生成模块,简单快捷,更易于操作。它的功能在于生成新的模块、复制和更改已有的模块、封装由多个模块组成的局部结构等,从而达到扩展和更新模块库的目的。目前国内的仿真软件大多欠缺这一功能,因此很难称得上通用性,本文所作的研究工作正是为改善这一现状。模块内部结构示例代码如图2所示。

1.2 模块库

模块库是整个软件的核心部分。模块库中模块的种类越多、模型准确度越高,则其中积累的仿真经验也就越丰富全面,软件的应用范围也会随之得到扩展。

模块库是由若干个库文件组成的,每个库文

```

Class variable;
Class port;
Class relation;
Class program;

Class mok
{
    list <variable*> vars;
    list <port*> ports;
    list <relation*> relations;
    list <mok*> moks;
    program* p_prog;
    CString progtext;
    void Createprogram(){
        p_prog = new program (progtext);
        ...
    }
    ...
}

```

图2 模块结构示例代码

Fig. 2 Sample code of module structure

件内含一组模块,如图3所示.在搭建系统时,这些模块被作为样本,用于生成新的模块.库文件可以从一个平台移植到另一个平台,这也是扩展模块库的一种方法.

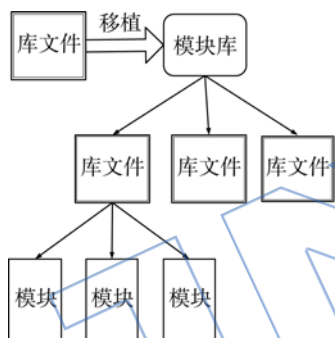


图3 模块库的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the module library

通过扩展模块库,可以开发出更加复杂的系统,使软件的系统组织能力得到提高,应用范围也不局限于发动机系统.甚至还可以让一些团队协作工作变得非常简便,即在团队成员间共享库文件,不用兼顾接口标准,更容易联合各分系统,实现系统集成,提高仿真效率.这种系统集成功能在国内已有的发动机仿真软件中还未出现.

1.3 系统构建

运用模块库中已有的模块,按发动机系统结构组合成仿真系统.如图4所示,构建发动机系统时从模块库中选取需要的模块,在发动机系统中生成复本,且更改复本不会影响库文件中的模块.

一个发动机系统中可存在某个模块的多个复本.从图4可以看出,发动机系统也是一个相对复杂的模块,跟其他模块一样,也可用来组织更加复杂的系统.

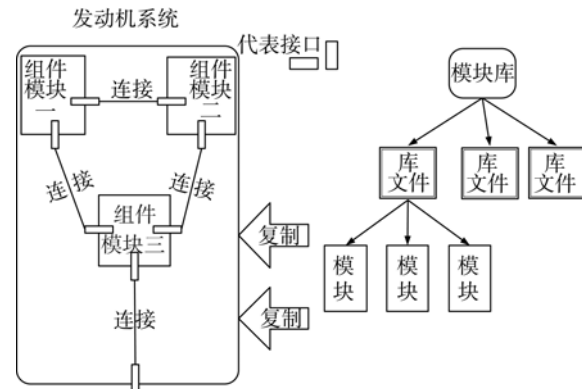


图4 构建发动机系统的示意图

Fig. 4 Schematic of constructing engine system

1.4 代码生成和调试工具

代码生成指的是从模块中的数学模型,即代码文本,经过附加算法,词法分析和语法检查,到生成令牌列表这一过程,如图5所示.调试指的是这一过程中的检查和信息反馈.

数学模型在模块中以类C代码的文本形式存在.代码中可以使用系统的全局变量,模块内定义的局部变量和临时变量.

不包含子模块的简单模块,其代码是一个函数.包含子模块的复杂模块,代码包含所有的子模块函数的调用.代码通过词法分析之后,转换为令牌列表.令牌与模块中的变量对象关联.

词法分析指的是对关键字、分隔符、运算符、变量名、常量、函数名等进行识别,而语法检查指的是检查符号有无错误,变量名是否有定义等.

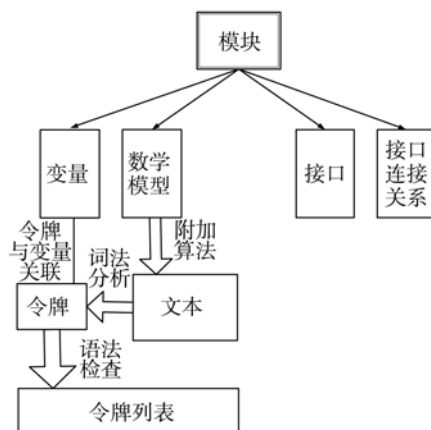


图5 代码生成和调试工具

Fig. 5 Code generation and debugging tools

1.5 求解器

求解器的功能是利用类C语言解释器解释运行令牌列表,驱动仿真程序开始运行,运行过程中与变量交互数据,如图6所示.

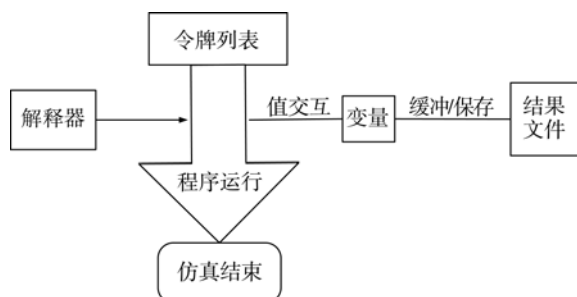


图6 求解器示意图

Fig. 6 Solver diagram

2 软件架构与实施

为了开发出适合国内工作特点的发动机推进系统仿真软件,需要一种既能结合以前动力系统各专业已经积累的宝贵仿真经验,又能融合新的研究成果和经验的软件架构,才能支持和开展对液体火箭发动机系统工作过程仿真技术的研究。

通过分析上述国内外优秀软件的研发技术和经验,借鉴 AMESim 软件和 CARINS 软件的成果,本研究提出了一种新的具有扩展机制的软件架构,如图7所示。

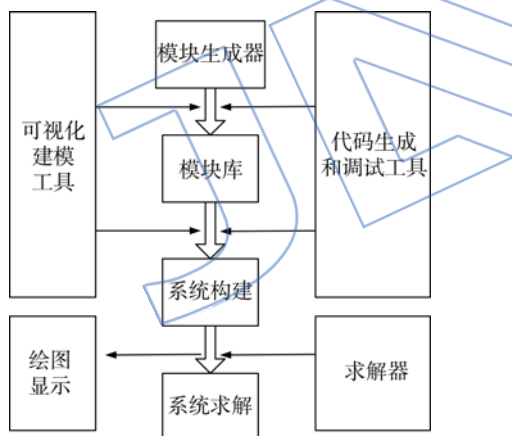


图7 系统架构图

Fig. 7 Architecture diagram of system

该软件架构主要分为三个层次,其中底层由代码生成和调试工具、以及求解器构成,模块中数学模型的分析工作由底层完成,底层还负责由数学模型生成代码并调试,检测数学模型编写中可能出现的语法错误;中间层由模块生成器、模块库、系统构建和求解部分组成,中间层是按照仿真软件工作的主要任务流程来划分,包括模块创建和保存、发动机系统结构的组织构建和求解等部分,中间层会调用底层的代码生成调试工具和求解器来完成上述任务。中间层依靠上层的可视化

建模工具与用户实现交互,并最终将仿真计算结果在绘图工具中进行显示。结构图中各个部分是按照功能来划分和实现的,为了提高整个系统的效率,有些部分之间存在着一定的依赖性。因此,在实现过程中有些结构之间的界限并不十分明显。

2.1 界面

采用 MFC (Microsoft Foundation Classes) 的单文档多视图结构开发出的界面如图8所示。在软件的最左侧是模块库视图,从这里打开各个库文件,提取其中的模块。中间为系统构建视图,系统的构建在这一区域完成,右侧是模块设置和信息展示视图。

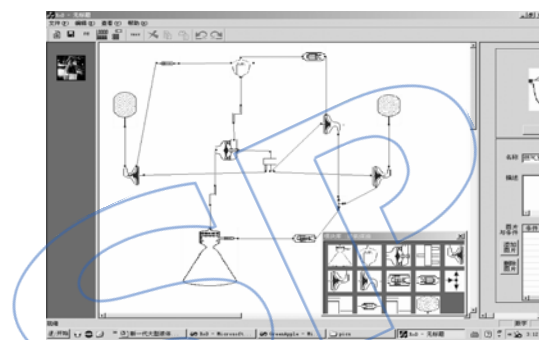


图8 系统的构建

Fig. 8 System construction

2.2 仿真计算和结果

对于系统级的动态特性仿真,目前采用最多也最有效的仍然是建立各种模型的常微分方程组。根据仿真对象和条件,可以直接建立集中参数模型,也可以对诸如一维可压缩流的有限元状态空间模型采用离散控制体积的守恒方程,将分布参数的偏微分方程转化成分段体积上的常微分方程组,并根据仿真需要,采用各种成熟的数值方法求解常微分方程组,以得到各种过渡过程中状态参数的变化规律。由于构成液体火箭发动机的同类组件结构与功能的相似性,因此其数学描述在形式上具有一致性。

发动机集中参数形式的动态数学模型如文献[12]中所述,概括起来可表示为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{F}(t, \mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{D}) \\ H(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}, \mathbf{D}) = 0 \end{cases}$$

式中 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 为状态向量, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 为输出向量, $\mathbf{U}, \mathbf{D}$ 分别为输入向量和结构参数向量。采用上述方法建立起来的发动机系统组件模型,既可以方便地与其他组件连接实

现复杂系统的研究,也可以在给定边界条件下单独用于相应组件的动态特性研究。

根据某液氧/煤油发动机的结构特点和系统起动方式,利用所开发的瞬变过程仿真软件,建立如图8所示的仿真系统。计算条件:假设在发动机起动前推进剂已充填至主阀前;取燃气发生器氧化剂主阀打开时间为仿真起始时间,发生器燃料阀0.2s打开,燃烧室燃料主阀0.5s打开,得到起动过程中发动机燃烧室压力 p_c 、预燃室压力 p_{pg} 和涡轮泵转速 n_t 随时间的变化曲线,如图9所示。通过与图10所示的该发动机某次起动试车参数曲线对比,可以看出,仿真曲线和试车曲线存在一定的差别。其原因可归结于系统仿真时某些初始条件和参数与实际试车时不同。在仿真计算中,没有考虑推进剂供应管路和主阀后推力室腔道的充填,仿真计算的开始时间对应于实际试车1.1s时刻。这样,导致发动机起动时流量变化率较大,仿真曲线上升的速率较快。此外阀门开启时序及开启误差对起动过程也有很大影响。

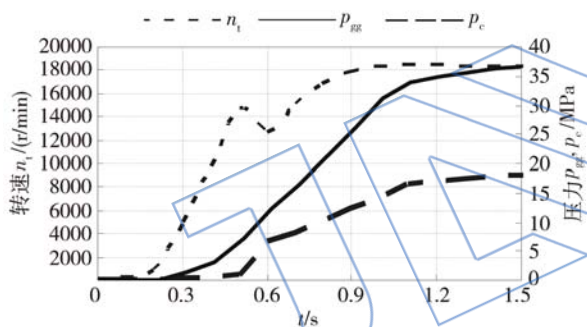


图9 起动过程参数变化曲线

Fig. 9 Parameter curves of starting process

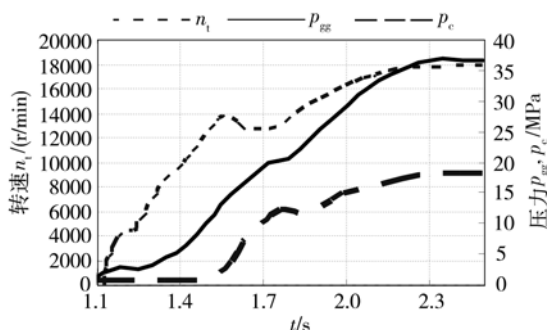


图10 某次起动试车参数曲线

Fig. 10 Parameter curves of once start testing

本文得到的发动机参数变化趋势和过渡时间与试车结果基本一致,说明计算结果基本能够反映实际发动机起动过程的趋势,验证了本文所采用的模块化设计方法的可行性和正确性。

3 结 论

本文利用 Microsoft Visual Studio 6.0 平台,遵循模块化建模思想,采用 C++ 语言,在 MFC 的文档视图结构的基础上实现了可视化建模,开发出一种新的具有扩展机制的液体火箭发动机瞬变过程仿真软件。

该软件可按需要任意定义新的模块类型和模块,弥补了以往的一些仿真软件在对新类型组件进行仿真时的不足,实现了系统集成,提高仿真研究效率,使系统的仿真变得非常便捷。所做的工作为今后液体火箭发动机通用仿真软件的研制打下了良好的基础。

参考文献:

- [1] Mason J R, Southwick R D. Large liquid rocket engine transient performance simulation system[R]. N91-24340, 1989.
- [2] 黄兵. 液体火箭动力系统工作过程仿真系统展望[C]//第一届液体火箭(导弹)动力系统仿真技术研讨会论文集. 北京:中国宇航学会, 2008: 1-16.
- [3] Nguyen D, Martinez A. Vesatile engine design software [R]. AIAA-93-2164, 1993.
- [4] Douglas R R, Daniel J V. Flow network analyses of cryogenic hydrogen propellant storage and feed system[R]. AIAA-97-3223, 1997.
- [5] Tarafder A, Sarangi S. CRESLP: a dynamic simulation for liquid-propellant rocket engines[R]. AIAA-2000-3768, 2000.
- [6] Peukert M, Simon R. ATVSIm the ATV propulsion system simulation software[R]. AIAA 2001-3828, 2001.
- [7] Yamanishi N, Kimura T, Takahashi M, et al. Transient analysis of the LE-7A rocket engine using the rocket engine dynamic simulator (REDS)[R]. AIAA 2004-3850, 2004.
- [8] 孙龙飞, 孙健国, 张海波. 航空发动机组件化建模技术[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2368-2370.
SUN Longfei, SUN Jianguo, ZHANG Haibo. Software componentization modeling for aero-engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2368-2370. (in Chinese)
- [9] 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 Yulin, CHENG Mousen. Modularization modeling and simulation for the transients of liquid propellant rocket engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 401-405. (in Chinese)
- [10] Kruglinski. Visual C++ 技术内幕[M]. 潘爱民, 王国印, 译. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [11] Gamma E, Helm R, Johnson R. 设计模式: 可复用面向对象软件的基础[M]. 李英军, 马晓显, 蔡敏, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [12] 曹泰岳. 火箭发动机动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.