

文章编号:1000-8055(2009)10-2368-04

航空发动机组件化建模技术

孙龙飞, 孙健国, 张海波

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 提出了使用组件化开发通用航空发动机仿真平台的思想:从发动机结构的角度将发动机模型分解成多个组件;从软件功能的角度将仿真软件的辅助部分也分解成多个组件.在此基础上开发了涡扇发动机的仿真平台,取得了良好的效果.所建立的仿真系统实现了模块化、层次化,易于维护和改进,可扩展性强,提高了代码重用率,体现了该框架的灵活性.

关 键 词: 建模; 航空发动机; 面向对象; 组件化

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Software componentization modeling for aero-engines

SUN Long-fei, SUN Jian-guo, ZHANG Hai-bo

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A methodology was proposed to develop generic aero-engine simulation platform by using software componentization. From the point of view of the engine construction engine model was broken down into several components, from the point of view of software functions the supplementary part of the simulation software was also broken down into multiple components. And a simulation platform of turbofan engines was established, which had achieved good effect. The simulation system based on this method had achieved to be modular, hierarchical, and easy to be maintained and improved. It has strong expandability, and has increased code reuse rate, which reflects the flexibility of the framework of the simulation platform.

Key words: modeling; aero-engine; object-oriented; software componentization

航空发动机仿真是航空发动机设计过程中的一种辅助工具,它可以缩短研发周期,降低开发风险和成本.上世纪 90 年代兴起的面向对象思想极大促进了建模技术的发展^[1].文献[2]利用面向对象方法中的封装和继承的思想,以发动机为建模对象,使用 Visual C++ 语言为每个部件建立了气动热力学模型,并开发了用户操作界面.在建立各部件类的过程中以部件的相似特性为基础抽象出几个基类,形成了模型对象类属层次关系,但这单纯使用面向对象方法中的“类”数据结构作为系

统构造的基本单元开发出的模型仍然难以维护,其他程序员要修改该模型时,不得不花费大量时间熟悉该模型的绝大部分代码.

随着软件的发展,软件功能越来越强大,结构越来越复杂,面向对象技术所概括的内容在现在看来变得太笼统,已不能满足需求.最近几年崛起的基于组件的程序设计方法(component based software development,简称 CBD)继承并发展了面向对象的程序设计方法.它从组件的生产和装配这两方面对面向对象的程序设计的实现过程作

收稿日期:2008-10-16; 修订日期:2009-02-18

基金项目:国家自然科学基金(50576033); 航空科学基金(04C52019)

作者简介:孙龙飞(1979-),男,江苏盐城人,硕士生,研究领域为航空发动机控制与仿真.

了进一步的抽象.组件化方法具有语言无关性、进程透明性、可重用性等特征.作为解决“软件危机”的一种有效的途径组件技术正被许多国家政府部门所青睐并给予大力支持,在美国军方与政府资助的项目中,已建立了若干组件库(component library),如 CARDS(card automated reproduction and distribution system),ASSET,DSRS(data storage and retrieval system)等.这些组件库作为管理软件组件及促进软件复用的核心机制,可以极大地提高软件开发的效率和质量.

本文把组件化的思想带入到航空发动机建模中,以 Microsoft 公司的 COM(component object model)规范为基础,利用 UML(unified modeling language)进行仿真软件的需求分析,将发动机对象分解成多个独立的程序模块并创建为较小的 COM 组件,并将文献[3-4]提出的数据连接器加以改进,以适应组件间的数据耦合,最大限度地提高了模型的可扩展能力,从而有效地减少建模任务的复杂性.

1 仿真系统的组件设计

在软件设计过程中将软件分解成多个可分离的部分,这些互相独立的部分即组件.组件通过接口与主程序及其他组件实现“互操作”.可见组件与平台是相互独立的,且与编程语言无关,这使得程序员可以专注于组件模块或平台的设计,提高了软件开发效率并且易于实现系统的升级和维护.

航空发动机部件组件设计:根据面向对象设计思想,航空发动机依据其功能和物理结构可以分解成相互作用且相对独立的“对象”部件.从装配角度把发动机分解成进气道、风扇、压气机、燃烧室、外涵道、高压涡轮、低压涡轮、混合器、加力燃烧室、尾喷管和传动轴等部件,这些部件有着不同的特性.将每个部件的特性封装在一个与之对应的组件中,这些封装包含了部件的气动热力计算、特性参数以及其他属性,例如图标、位图、参数设置窗口等.仿真平台可以通过组件的接口触发部件的气动热力过程模拟函数,模拟发动机部件的运转;也可以通过设置窗口调整部件特性参数.严格的接口设计是实现这些功能的前提,本文为每个组件都设计了一系列的接口,通过传递映射表的指针实现不同组件之间以及组件与仿真平台的数据交流.

求解器组件设计:发动机工作过程中,各部件共同工作必需满足一定的共同工作方程.如发动

机稳态工作时必需满足流量连续、压力平衡及功率平衡.动态过程中必需满足转子动力学原理.对于发动机共同工作方程的求解,目前比较有效的方法有牛顿迭代法和容积辅助变量法,本文对这两种方法开发了相对应的求解器组件以及求解器组件所需要的算法库组件.由于每种求解方法所使用的变量内容和变量个数都不相同,这个接口的通用性带来了困难.所以本文为组件设计相同接口的基础上使用了映射列表来传递组件求解所需要的参数以及求解后返回的数值.

其他辅助组件设计:在完成以上发动机仿真必须的组件设计之后,本文进一步开发了辅助的组件:数据库组件以及网络组件.

在模型仿真过程中每个发动机部件的组件和求解器组件都将产生大量的计算结果数据,这些组件将仿真所得的数据按照标准 SQL(structured query language)语言的格式通过接口传递给数据库组件,数据库组件中使用中间件技术建立对数据库的连接,并执行这些 SQL 命令,将计算结果存储于数据库中.

网络组件的设计是为了方便仿真平台使用远程计算机的控制系统,且不受远程控制器的开发语言的限制.本文开发的网络组件基于 TCP(transmission control protocol)协议,这种协议具有较强的网络安全性.在模型的仿真过程中还需要考虑网络堵塞以及计算耗时问题,所以网络组件中设计了仿真时钟同步功能以解决因为时钟不同步而导致的仿真中止的问题.

2 仿真系统的平台设计

数据的流动:数据接口是组件的数据输入输出端口,是组件化建模的重要组成部分.它由端口类型和输入输出参数组成.通过这些接口仿真模型组件能够发送和接收仿真事件和数据,实现与其他仿真模型组件之间的互操作.由于发动机求解的特殊性,除了相连接的部件之间有着参数传递的需求之外,在平衡方程求解过程中也需要使用到一些部件的部分数据.所以本文将组件的数据分成三个部分:其中第一部分用于提供给后续组件;第二部分提供给求解器使用;第三部分是需要外部提供的数据,这部分实际上是空指针,由模型编译器根据模型连接方案将其指向到存储这部分数据的内存地址.每部分数据通过 Visual C++ 的 MFC(microsoft foundation class)类库中提供的 CMap 映射模板类,通过关键字对数据

进行读取和修改. 这样可以有效减少组件间的耦合. 数据流程如图 1 所示.

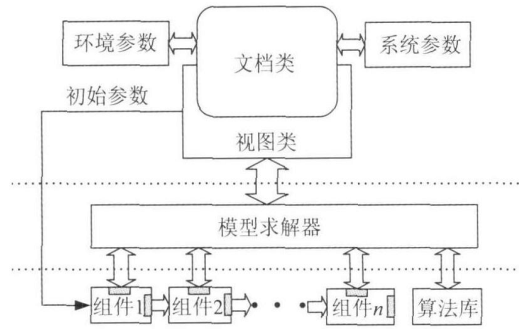


图 1 数据流程图

Fig. 1 Data flow diagram

程序流程: 本文使用在前文开发的组件基础上使用 Visual C++ 6.0 开发了涡扇发动机仿真平台. 通过拖动部件图标搭建起发动机模型. 模型搭建完成之后, 程序对模型进行完整性以及约束性检查, 以确保模型的连接无误以及模型不存在逻辑上的错误. 在检查无误后按照发动机不同部件间的连接方案, 将部件的入口数据映射表指针指向到前续组件的出口映射表内存地址上. 最后检查数据的完整性, 如果数据完整, 所有指针的指向都有效, 则对各组件进行初始化、读入特性数据和设计点参数. 所有这些前期工作完成之后即可开启定时器, 按照部件的连接顺序依次执行对应的组件的气动热力计算函数, 所有组件运行完毕之后再通过求解器求解发动机平衡方程. 如此循环, 即可模拟发动机的运转. 程序流程如图 2 所示.

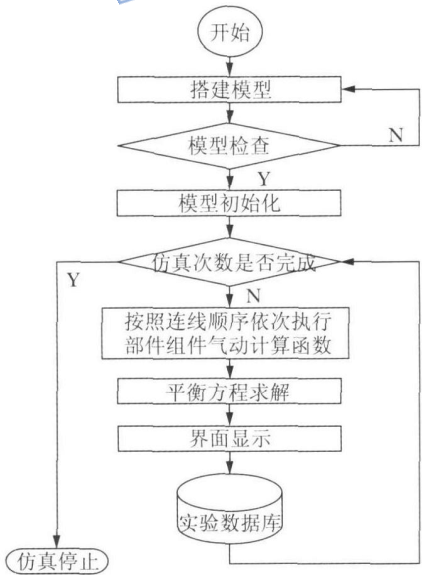


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flow diagram

3 结果分析

按照前文所述, 开发了双轴涡扇发动机的性能仿真平台, 该平台基于 MFC 提供的单文档框架, 界面划分为三部分: 左侧组件资源区, 右侧模型仿真区以及下方即时信息区. 通过鼠标在组件区中选取相关部件在仿真区中搭建发动机模型, 模型搭建成功且检查无误后即可进行仿真. 程序主界面如图 3 所示, 仿真界面如图 4 所示.

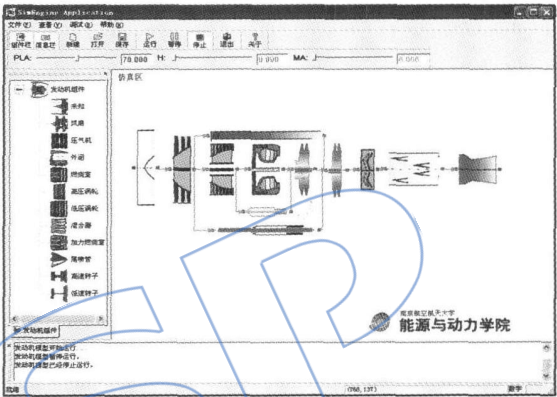


图 3 程序主界面图

Fig. 3 Main interface

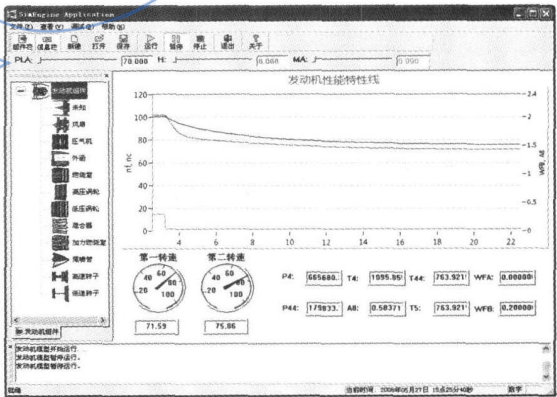


图 4 模型仿真界面图

Fig. 4 Simulation interface

建模完成之后, 以某型涡扇发动机为例, 对其进行动态仿真实验, 分别在高度 $H = 0 \text{ km}$, 马赫数 $Ma = 0$ 的条件下将模型从慢车拉至中间功率状态, 再由中间功率状态拉至慢车, 结果如图 5、图 6 所示, 其中 n_f 为风扇相对物理转速, n_c 为压气机相对物理转速, A_8 为尾喷口喉道面积, q_{WFB} 为燃油流量.

由图 5、图 6 可见, 模型计算收敛, 而且动态过程的计算平稳. 实际上, 作为一种软件构造方式, 组件化建模的优点在于使平台更加灵活. 它改变的是仿真数学模型在计算机上的表达方式. 而

仿真程序的逼真度取决于数学模型的精细程度,收敛特性则取决于与该数学模型所采用的数值求解方案.因此组件化建模技术不会对原问题的逼真度和收敛特性造成任何影响,它仍然遵循原有数学模型和算法所设定的计算任务和计算次序,因而计算结果必然与原程序完全相同.

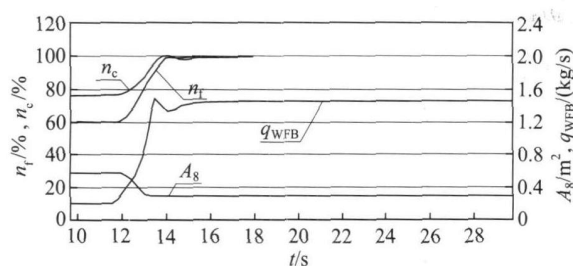


图 5 发动机模型加速曲线

Fig. 5 Accelerating curve

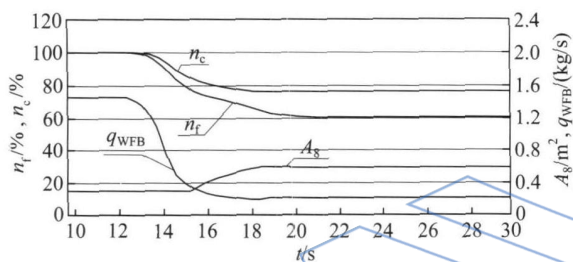


图 6 发动机模型减速曲线

Fig. 6 Decelerated curve

4 结 论

本文将组件化程序设计思想引入到航空发动机仿真软件设计中,对航空发动机的每个物理部

件都设计一个对应的组件,并进一步设计了数据库组件、网络组件以及平衡方程求解组件等.用户可以在可扩展的仿真平台上使用这些功能各异的组件拼装一个完整的航空发动机仿真系统,平台将按用户设定的次序依次运行各组件以完成航空发动机仿真.仿真结果证明组件化建模技术为设计一种具有可扩展能力,维护更加容易的平台提供了一种有效的方法.

参考文献:

- [1] Reed J A, Afjeh A A. An extensible object-oriented framework for distributed computational simulation of gas turbine propulsion systems [R]. AIAA Paper 98-3565.
- [2] 吴瑜,于龙江,朴英. 基于 VC++ 的航空发动机数值仿真平台[J]. 计算机工程, 2008, 34(7): 257-259.
WU Yu, YU Longjiang, PIAO Ying. Aero engine numerical simulation platform based on VC++ language[J]. Computer Engineering, 2008, 34(7): 257-259. (in Chinese)
- [3] 谢志武,苏明,翁史烈. 可扩展的燃气轮机仿真对象模型[J]. 航空动力学报, 1999, 14(2): 143-147.
XIE Zhiwu, SU Ming, WENG Shilie. An extendable object model for gas turbine simulation [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(2): 143-147. (in Chinese)
- [4] 曹源,金先龙,孟光. 航空发动机的非线性模块化建模与仿真[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(3): 505-510.
CAO Yuan, JIN Xianlong, MENG Guang. Non-linear modular modeling and simulation of aeroengine[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2005, 17(3): 505-510. (in Chinese)