

面向对象的航空发动机性能仿真系统框架设计

骆广琦¹, 刘琨¹, 李游¹, 刘波², 马前荣³

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038; 2. 中国人民解放军驻420厂军事代表室, 四川成都, 610503; 3. 中国燃气涡轮研究院, 四川江油, 621703)

摘要 基于面向对象的软件设计思想, 设计了一种灵活、通用、可靠的航空发动机仿真平台框架。将仿真平台划分成了清晰的3个层次, 并在每一层下设置了相应的类模型, 各层之间的数据交换灵活、高效; 然后建立了标准化的部件类库, 针对不同类型的发动机, 可以高效地搭建起对应的发动机模型, 并可兼顾稳态、过渡态和实时仿真等多种计算任务的要求。最后在该框架的基础上, 建立了某型双转子混排涡扇发动机的对象模型, 分别对稳态和过渡态过程进行了仿真, 计算结果精度高, 验证了仿真平台的有效性。

关键词 航空发动机; 面向对象; 性能仿真; 框架设计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.001

中图分类号 V430 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0001-04

A Study of Object-oriented Approach to Aero-engine Performance Simulation Framework

LUO Guang-qi¹, LIU Kun¹, LI You¹, LIU Bo², MA Qian-rong³

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Military Representative Office Stationed in Factory 420, Chengdu 610503, China; 3. Gas Turbine Research Institute, Jiangyou 621703, Sichuan, China)

Abstract: Using the object-oriented design method, a general, flexible and reliable aircraft engine performance simulation framework is designed. The simulation platform is divided into three layers clearly and the corresponding kind of model is established under each layer, thus the data exchanges among layers are flexible and effective. The fundament component class library is established and can be used to build different aero-engine simulation models. The performance simulation framework is applied to several calculating missions including steady, transient and real-time simulations. Based on the simulation framework, a two-spool mixed flow turbofan simulation model is build and its steady and transient progress are calculated. The calculation results are of high precision and verify the effectiveness of the framework.

Key words: aero-engine; object-oriented; performance simulation; framework design

传统的面向过程的航空发动机性能仿真只针对某一型号的发动机或某一固定仿真任务, 单独建立仿真模型, 因此程序的通用性差, 可维护性低。面向对象方法具有开发效率高、易于软件的维护和拓展

等优点^[1], 已广泛用于航空发动机仿真软件的开发中。目前, 航空发达国家已经开发出了 GSP^[2]、GasTurb^[3]等大型商用计算软件, 国内研究机构也尝试了采用面向对象技术开发航空发动机性能仿真

收稿日期: 2013-01-06

基金项目: 航空科学基金资助项目(JJHK-2011-09)

作者简介: 骆广琦(1971—), 男, 陕西泾阳人, 教授, 博士, 主要从事航空发动机总体设计, 性能评定与数值仿真等研究。
E-mail: mercury1112@sina.com

软件。王波、唐海龙等基于标准化的部件类库,构建了自由灵活的“积木式”的仿真系统^[4],但当发动机结构可变、控制规律复杂时,模型搭建较为困难^[5];徐鲁兵等采用分层的设计思想构建了发动机的仿真框架^[6],但未包括目前应用广泛的涡扇发动机;窦建平、黄金泉等运用 UML 法建模^[7],采用的双端口/数据连接器的通信模式较为复杂。综上,国内还没有出现 GSP、GasTurb 这样成熟的仿真系统。

本文充分利用面向对象的封装、继承和多态等思想,提出一种兼顾通用性与专用性的发动机部件与整机建模仿真的方法,并对某型双转子混排涡扇发动机建立模型,进行了稳态与过渡态仿真。

1 仿真系统总体框架设计

根据仿真系统各部分的不同功能,将仿真系统的各部分划分成 3 个层次,由低至高分别为模型层、应用层、管理层。这样层次结构紧凑、清晰,提高了仿真系统的开发效率。

1) 模型层:该层构建出了航空发动机从部件到

整机的热力计算模型。当已知部件进口的输入参数时,即可通过部件内部的计算得到出口参数,而不涉及到部件间的影响。各部件类之间的有机组合就构成了不同的发动机模型。

2) 应用层:该层包含了发动机的稳态、过渡态计算以及实时仿真等功能。根据管理层传来的指令和数据,完成模型层的初始化,并调用相关求解函数以及模型层的发动机的热力计算模型,完成计算任务。

3) 管理层:该层主要完成软件与用户之间的交互作用。用户将参数和指令输入软件,软件通过管理层将数据和指令传递到应用层进行计算,并通过管理层输出计算结果。

2 类模型的设计

根据软件的功能的分解与归类,将软件系统分为部件类 CComponents、发动机类 CEngine、求解器类 CSolver、管理类 COperator,并根据仿真的具体要求对这 4 个相互关联的类进行扩充。各类与各层次之间的关系见图 1。

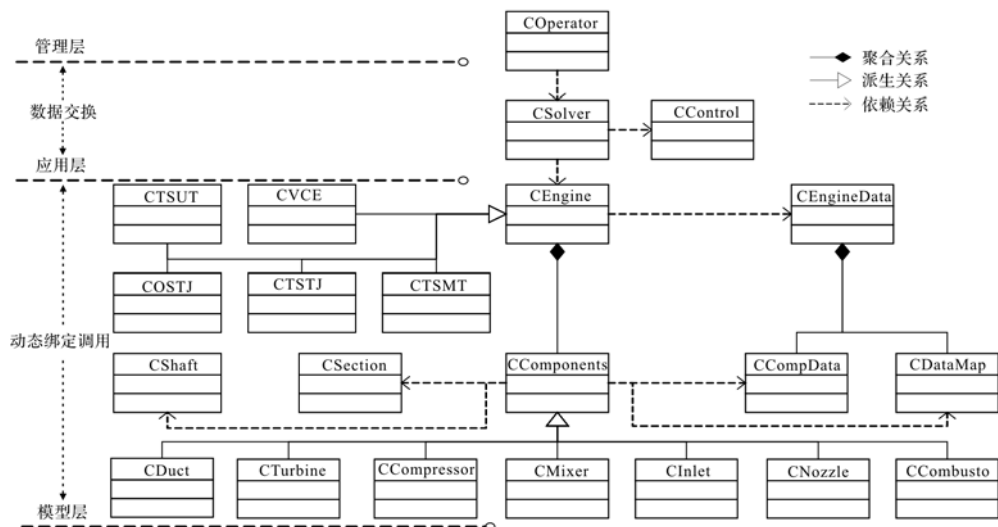


图 1 仿真系统各类之间的层次关系

Fig. 1 Hierarchical relationship of classes in simulation system

1) 部件类 CComponents 属于模型层,针对不同的部件类型,派生出 7 个部件子类。在部件基类中,设计了 4 个辅助类:部件特性图类 CDataMap、部件参数类 CCompData、截面类 CSection、轴类 CShaft,从而构成了一个标准的部件类库。

2) 发动机类 CEngine 属于模型层,主要由部件类组成。其由发动机基类派生出了 5 个发动机子类,各子类可以在保持通用性的基础上增强不同类型发动机的专用性。同时,设计了发动机数据类 CEngineData,用于描述发动机的设计点参数和各部件特性。

3) 求解器类 CSolver 属于应用层。该类主要描述了仿真系统所具备的所有计算功能。当 CSolver 中接收到管理层传来的仿真任务指令时,动态调用相应的发动机模型和计算函数进行求解计算和数据交换。

4) 用户管理类 COperator 属于管理层,用于实现仿真系统与用户间的交互作用。该类中封装有读取发动机数据文件的函数,并可实现与求解器类 CSolver 之间的数据交换,输出计算结果。另外,单独设计了 CControl 来实现用户对飞行状况、发动机控制规律、燃油供给曲线等数据的控制。

3 仿真系统的功能实现

3.1 模型的初始化

发动机的设计点参数、部件特性和计算任务所需的飞行状况、燃油流量、控制规律、部件的几何变化规律等数据以外部文件形式存放,依靠 COperator 完成数据录入;调用 CSolver 的方法 Initial() 将指向发动机基类的指针动态绑定到发动机子类上。这样就完成了数据的录入和模型的建立,即模型初始化过程,见图 2。

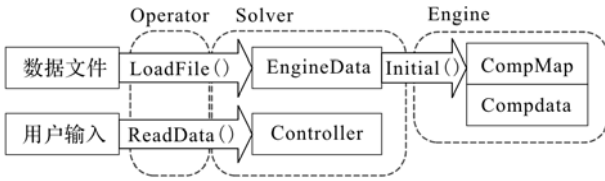


图 2 模型的初始化过程

Fig. 2 Progress of initializing engine model

3.2 模型的计算求解

依靠 CSolver 中相应的计算功能实现模型的求解,过程见图 3。稳态计算函数 Steady()、过渡态计算函数 Transient() 和实时计算函数 RealTime() 通过调用 CEngine 及其子类中的发动机热力计算过程 Thermo() 来完成仿真,该函数由对应发动机子类中各部件顺序计算得到。对于稳态计算和过渡态计算,还需要调用 CSolver 中的共同工作点求解函数 CoWork(), 而实时仿真功能则只需要调用 Thermo(), 不需要进行迭代求解共同工作点^[8]。

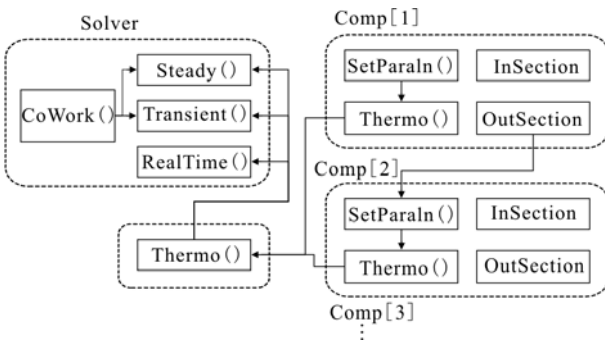


图 3 仿真系统中计算功能的实现过程

Fig. 3 Process of calculate functions in simulation system

4 实例验证

根据上述的仿真系统实现方法,选择某型双转子混排涡扇发动机作为验证对象进行稳态和过渡态的计算。图 4~图 5 显示发动机在高度为 1 km、8 km、18 km 的速度特性。考虑到计算精度的需要,采取变比热法进行计算,并考虑飞机引气、功率提取

与涡轮冷却对发动机性能的影响。共同工作点的迭代采用 N+1 点残量法。过渡态计算分别采用基于准平衡假设的非实时仿真和基于容积惯性法的实时仿真。其中稳态的计算结果与该型发动机型号程序的计算结果做了对比。

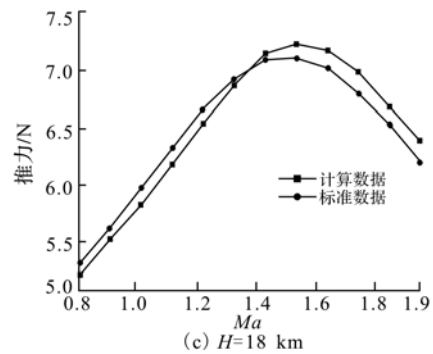
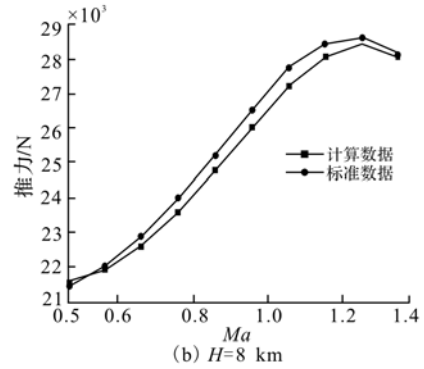
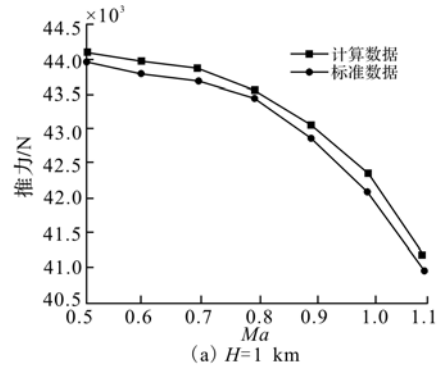
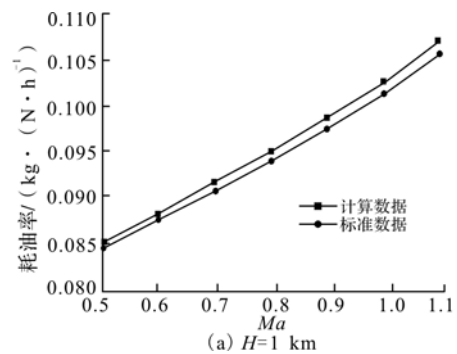


图 4 双转子涡扇发动机的推力-速度特性

Fig. 4 Thrust-speed character of turbofan engine



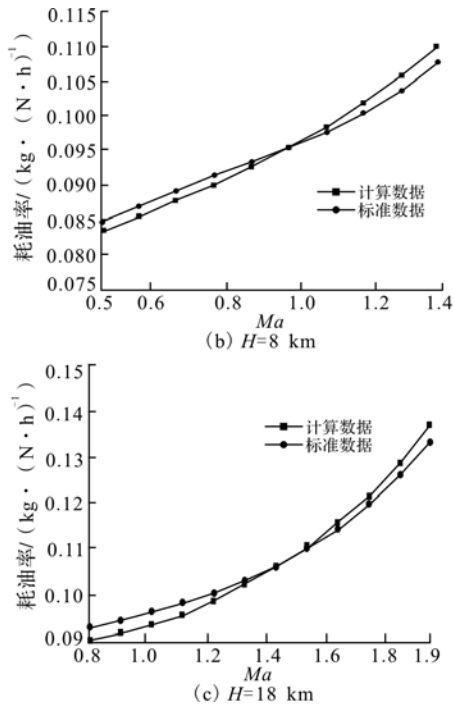


图5 双转子涡扇发动机的耗油率-速度特性

Fig. 5 SFC-Speed character of turbofan engine

图中计算结果相比误差较小,最大误差在3%以内,表明仿真模型是正确的。

在标准大气条件下,采用图6的供油规律,进行地面从慢车至最大的加速过程仿真。图7为加速过程中分别采用实时和非实时计算高、低压转子转速变化的仿真结果。可以看出,采用2种计算方法后转速的变化较接近,并都能平稳地到达最大转速。

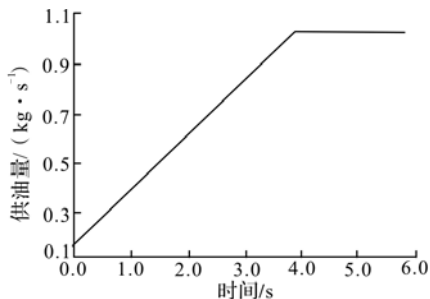


图6 加速过程的供油曲线

Fig. 6 Fuel delivery in acceleration

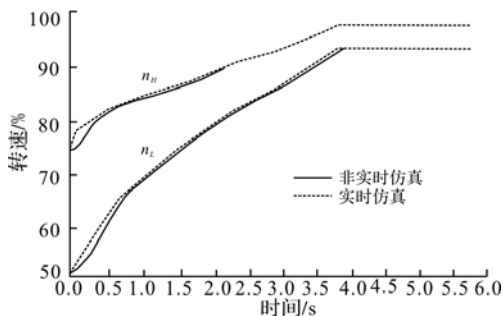


图7 加速过程的仿真结果

Fig. 7 Rotor speed in acceleration

5 结语

本文利用面向对象的软件设计方法,将整个软件的设计划分为模型层、应用层和管理层,并开展了相应的类模型设计研究,在此基础上开发完成了航空发动机性能仿真平台。该平台结构层次清晰,计算任务可灵活配置,软件通用性和可扩展性强。针对某双转子涡扇发动机计算验证表明,该平台仿真精度较高,能够满足发动机性能研究的需要。该平台的设计为变循环发动机、预冷却发动机、涡轮基组合循环发动机等新型航空动力装置的性能研究提供了必要的手段,具有广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] Curlett Brian P, Gould Jack J. Flexible method for inter-object communication in C++[R]. NASA-TM-106315, 1995.
- [2] Visser W P J, Broomhead M J. A generic object-oriented gas turbine simulation environment[R]. NLR-TP-2000-267.
- [3] Joachin Kurzke. Fundamental differences between conventional and geared turbofans[R]. ASME GT2009-59745.
- [4] 唐海龙,张津. 面向对象的航空发动机性能仿真程序设计方法研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(4): 421-424.
TANG Hailong, ZHANG Jin. A study of object-oriented approach for aeroengine performances simulation[J]. Journal of aerospace power, 1999, 14(4): 421-424. (in Chinese)
- [5] 张海明, 骆广琦, 孟龙, 等. STOVL型战斗机变循环发动机性能数值模拟[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(6): 13-17.
ZHANG Haiming, LUO Guangqi, MENG Long, et al. Numerical simulation on performance of a variable cycle engine for STOVL fighter [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(6): 13-17. (in Chinese)
- [6] 窦建平, 黄金泉, 周文祥. 基于UML的航空发动机仿真建模研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 684-688.
DOU Jianping, HUANG Jinquan, ZHOU Wenxiang. Researching of aeroengine modeling based on UML[J]. Journal of aerospace power, 2005, 20(4): 684-688. (in Chinese)
- [7] 徐鲁兵, 潘宏亮, 周鹏. 基于面向对象技术的航空发动机性能仿真框架设计[J]. 测控技术, 2006, 26(4): 83-86.
XU Lubing, PAN Hongliang, ZHOU Peng. Design of aero-engine performance simulation framework based on object-oriented [J]. Technique measurement & control technology, 2006, 26(4): 83-86. (in Chinese)
- [8] 周文祥, 黄金泉, 黄开明. 航空发动机简化实时模型仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 251-255.
ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan, HUANG Kai-ming. Real-time simulation system for aeroengine based on simplified model[J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2005, 37(2): 251-255. (in Chinese)

(编辑:徐敏)