

文章编号: 1000-8055(2005) 04-0684-05

基于 UML 的航空发动机仿真建模研究

窦建平, 黄金泉, 周文祥

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 面向对象建模技术是建立可重用和扩展灵活的航空发动机仿真软件的有效途径。本文论述了应用可视化面向对象统一建模语言(Unified Modeling Language)建立航空发动机仿真软件模型的方法和过程,首次运用 UML 表示法中的用例图、类图、顺序图和活动图描述了发动机仿真软件模型,并用 C++ 编程实现了仿真软件中发动机模型类库、算法类及图形界面类,在此仿真平台上成功的实现了某双轴涡轮发动机的稳态仿真和动态仿真。结果表明, UML 是建立扩展灵活的发动机仿真软件的有力工具。

关键词: 航空、航天推进系统; 面向对象建模; 统一建模语言; 仿真

中图分类号: V233.7; TP391.9

文献标识码: A

Research of Aeroengine Modeling Based on UML

DOU Jian-ping, HUANG Jin-quan, ZHOU Wen-xiang

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The object-oriented technology is an effective approach in establishing an extendable and reusable simulation platform for aeroengines. The method and process of developing simulation software for aeroengines with Unified Modeling Language (UML) was discussed. The simulation model software was described using case diagram, class diagram, sequence diagram and activity diagram. Aeroengine model classes, solver classes and user interface classes were programmed with C++ language. On the simulation platform, steady state and transient simulation of a twin-spool turbofan engine have been realized. It shows that UML is effective in establishing extendable and flexible simulation software for aeroengines.

Key words: aerospace propulsion system; objected-oriented modeling;

Unified Modeling Language (UML); simulation

航空发动机仿真技术在发动机研制、试验、制造和使用中已成为一项极为重要的技术。计算机仿真离不开建模,面向对象建模技术是建立代码重用率高、灵活通用、扩充性强、支持多学科耦合(Coupling)和多精度缩放(Zooming)及分布式仿真平台的基础^[1]。

应用面向对象技术建立航空发动机仿真模型

的研究,始于二十世纪九十年代初中期^[2,3],国内始于 20 世纪 90 年代中后期^[4,5]。当时面向对象分析方法众多,主要有 BOOCH, OMT, OOSE 等方法,缺乏统一的标准和 CASE 工具,建模人员交流不方便,影响了面向对象分析和设计方法的应用。为此 1997 年 11 月,OMG 采纳 UML1.1 作为基于面向对象技术的统一建模语言。UML 是在

BOOCH, OMT 和 OOSE 方法的基础上发展起来的面向对象的建模语言,它具有严谨的元模型语义,丰富的图形元素,完整的视图功能和强大的扩展机制,可运用在系统开发的需求分析、设计、构造和测试阶段^[6]。UML 特别适用于构建复杂的软件系统。航空发动机仿真软件由于其复杂性,需要先进软件工程技术支持,UML 为我们提供了面向对象建模的强有力工具。本文应用 UML 对建立航空发动机仿真软件系统模型进行了探索。

1 统一建模语言

统一建模语言吸取了面向对象技术领域各流派的长处以及非面向对象方法的影响,溶入了软件工程领域的新思想、新方法和新技术。UML 的目标是以面向对象图的方式来描述任何类型的系统,具有很宽的应用领域,其中最常用的是建立软件系统的模型。UML 是一种面向对象的可视化标准建模语言,采用图形符号表示系统中对象和关系,UML 的定义包括 UML 语义和 UML 表示法两部分,运用元模型规定的关联和泛化关系,定义了 5 类共 10 种模型图,包括用例图、静态图(类图、对象图和包图)、行为图(状态图、活动图)、交互图(顺序图和合作图)、实现图(构件图、配置图)^[7]。这些图为系统的分析、开发提供了多种图形表示,它们的有机结合就可能分析和构造一个一致的系统。

UML 的作用域不限于支持面向对象的分析与设计,还支持从需求分析开始的软件开发全过程。在需求分析阶段,可以用用例捕获用户需求。通过用例建模,描述对系统感兴趣的外部角色对系统的功能要求。分析阶段主要关心问题域的主要概念(如抽象、类和对象等)和机制,需要识别这些类以及它们间的相互关系,并用 UML 类图来描述。为实现用例,类之间需要合作,类之间的合作关系用动态模型来描述。用例模型是系统的核心,它驱动着其它模型的开发。

UML 规范未定义标准的过程,UML 开发者提出的开发过程是用例驱动的、以体系结构为中心的、迭代递增的过程,这可以说是一个元过程。在应用中建模的一般过程是:首先从功能需求出发建立用例模型,得到系统的功能。其次对用例模型和功能需求进行分析得到系统的整体结构,即建立静态模型;然后将整个系统要完成的功能在类间进行分配,得到各个类的操作;再建立系统的动态模型,描述各个对象是如何完成这些功能的;

最后一步是检查模型间的一致性。一般来说经过上述过程一次不能完整地描述整个系统,因此应该反复这个过程。

2 应用 UML 建立航空发动机仿真模型

航空发动机部件级模型主要包括稳态模型和动态模型,稳态模型多用于发动机总体特性计算,动态模型主要用于控制规律设计仿真。目前对发动机仿真提出了更高要求,是进行仿真设计,美国开展的 NPSS 计划集中体现了对航空发动机仿真需求^[8]。本文以实现某双轴涡扇发动机性能仿真为基本目标,演示了应用 UML 依次建立用例模型、静态模型、动态模型及最终编码实现的建模全过程,文中采用了用例图、类图、顺序图和活动图来描述软件系统模型。由于面向对象建模侧重于扩展灵活性和可重用性,为建立某一发动机仿真模型通常先建立整个框架,然后运用框架中的类,给定数据并实例化,就建立了某一特定型号发动机的模型。

2.1 建立用例模型

用例分析是系统设计和开发的基础,它明确了系统的需求。在用例图中,执行者是与系统打交道的人和事或其它系统,执行者执行用例。发动机仿真用例图(图 1)中主要执行者有建模人员、部件研发人员、文件系统、数据库系统等。网络连接服务系统暂未实现,故在图中作为模型库的外部执行者。用例就是系统提供的功能,图中用椭圆表示用例,带箭头的直线表示信息的交流。箭头线上的《ses》表示使用关系,《xtends》表示扩展关系,《communicates》表示通信关系。

2.2 建立静态模型

建立了用例模型后,接下来就可建立静态模型。静态模型是从系统的结构和静态观点来描述系统的视图,它定义了系统中的对象和类,类之间的关系和类内部的结构,即类的属性和操作,但不定义导出属性和操作的细节。进行静态建模首先应从问题域和初始用例中找出实体类;然后确定类之间的关系:泛化,聚合和关联;再确定对象实体之间的功能关系,即限定实体取值范围和约束;建立系统的静态模型。

本文从用例图出发,建立了使用类图描述的航空发动机仿真模型类库(图 2),即软件的静态模型。发动机各部件从 CEngComp 派生,分别与

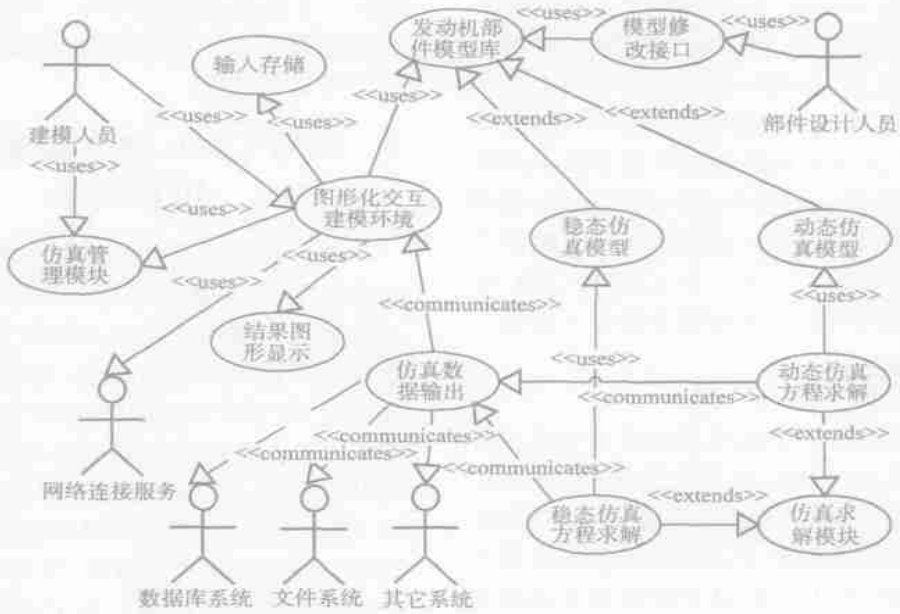


图 1 航空发动机仿真用例图

Fig. 1 Use-case diagrams for aeroengine simulation

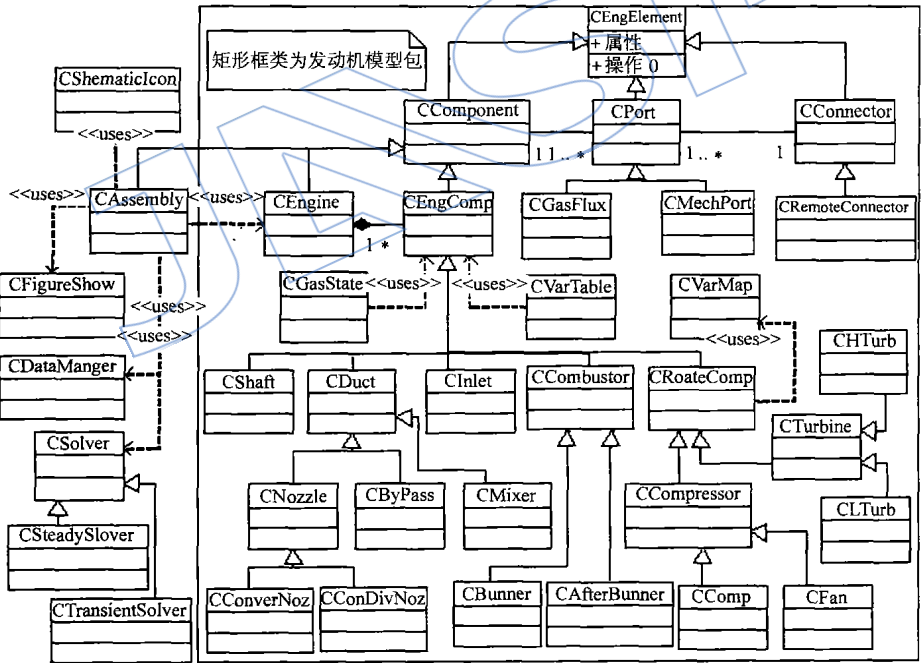


图 2 航空发动机仿真类图

Fig. 2 Class diagrams for aeroengine simulation

一个类对应;各部件由端口类 CPort 的派生类管理相应的数据字典 CVarTable 类;部件连接由 CConnector 类执行。各部件类在 CEngine 类中聚合特定类型的发动机。CAssembly 类为图形界面交互类, CFigureShow 为仿真结果曲线绘制

类, CSchematicIcon 为图标管理类, CDataManger 为数据管理类。还有一些工具类,如 CVarMap 负责特性图插值, CGasState 为气体参数计算类, CSolver 为算法类父类。

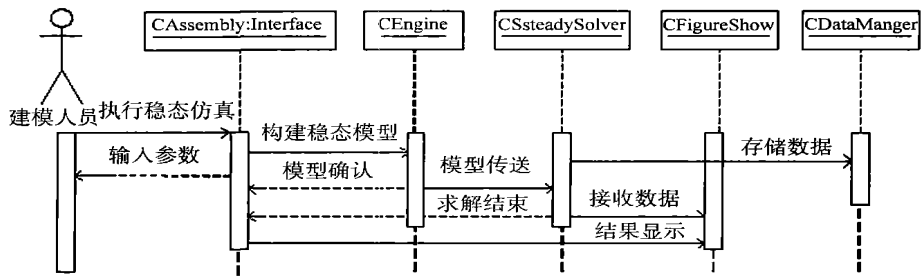


图 3 航空发动机稳态仿真顺序图

Fig.3 Sequence diagrams for aeroengine steady state simulation

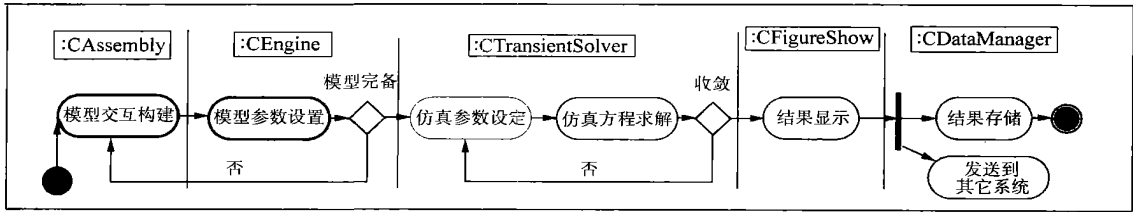


图 4 航空发动机动态仿真活动图

Fig.4 Activity diagrams for aeroengine transient simulation

2.3 建立动态模型

一旦系统的功能和整体结构模型建立后, 就可以建立系统的动态模型。动态模型描述系统的功能是如何完成的, 用顺序图、合作图、状态图和活动图来建模, 它们从不同角度描述对象的行为和对象之间的交互, 并不是在任何情况下都要画所有的图, 应根据项目的实际需要选择建立不同的模型。本文选择顺序图和活动图。顺序图描述了发动机仿真的时间推进机制, 也就是类的对象的执行时间关系, 图 3 描述了进行稳态仿真的顺序图。活动图描述了类的活动, 发动机动态仿真活动图(图 4)显示了进行一次仿真活动参与的各类的活动或动作。

2.4 检查模型的一致性

通过上述步骤, 依次建立了功能模型、静态模型和动态模型, 随着建模过程理解的深入, 建立一个模型时可能对前一个模型有修改、扩充和完善, 这就可能造成模型之间的不一致, 因此必须对模型的一致性进行检查。需要指出的是要贯彻推迟实现的原则, 第一次建立的模型可能还不完整, 随着理解的深入, 再反复上述过程, 仔细检查各模型并逐步精化, 得到完整清晰的模型, 再进入系统详细设计和编码阶段。

2.5 模型的算例验证

使用 UML 中的用例图、类图、顺序图和活动

图描述了航空发动机仿真模型, 至此建立了软件系统的模型, 接下来就可以选择一种面向对象语言来完成类的程序编写, 本文选择 Visual C++

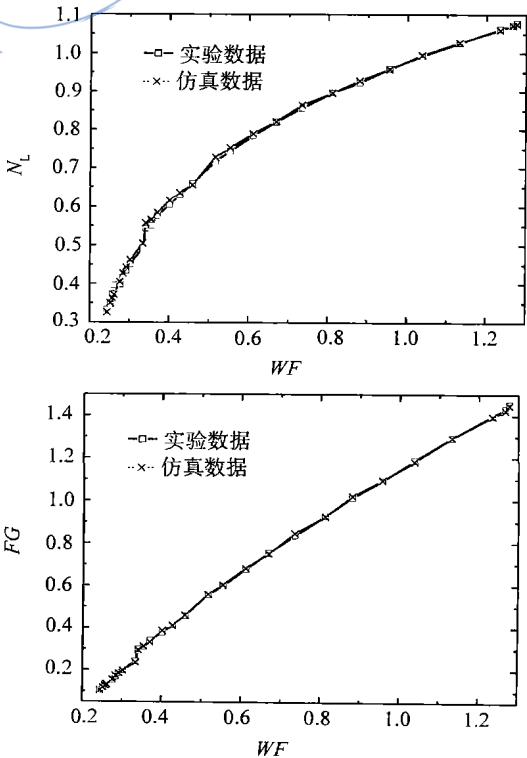


图 5 稳态仿真结果对比

Fig.5 Comparison of steady state simulation

语言, 进行了基于 Windows 的发动机模型类和界

面类开发。基于建立的模型库和算法类,在此平台上实现了某双轴涡扇发动机的稳态仿真和动态仿真,仿真结果与实验数据对比见图 5~图 6,与地

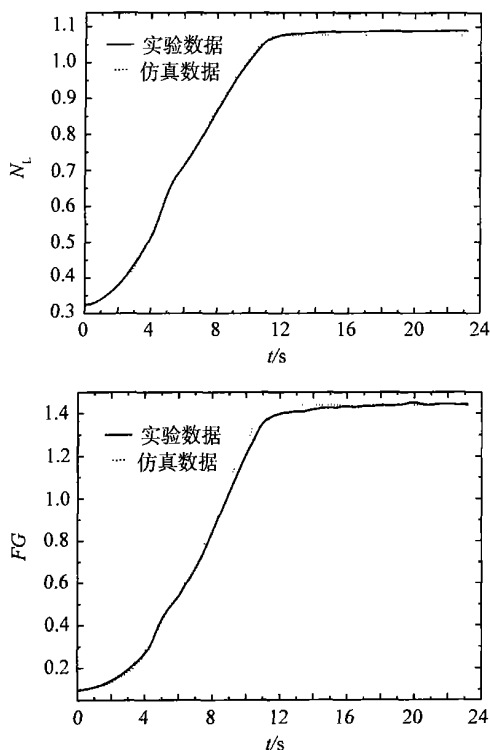


图 6 加速过程仿真结果对比

Fig.6 Comparison of acceleration simulation

面台架试车数据相比稳态误差在 3% 以内; 仿真界面已用 VC++ 编程实现(界面图不再给出)。用此仿真软件能方便的实现不同类型的航空发动机仿真,限于篇幅不再给出仿真结果曲线。

3 结 论

面向对象的建模技术,是建立灵活通用、扩展性强和界面友好的航空发动机仿真的软件有效方法。UML 是开发者们依据最优秀的面向对象方法和丰富的计算机科学实践经验综合提炼而成的,是一种定义良好、易于表达、功能强大且普遍

适用的可视化的建模语言。本文以某双轴涡扇发动机性能仿真为例,阐释了应用 UML 进行航空发动机仿真软件建模的全过程,建立了基于用例图、类图、顺序图和活动图描述的仿真软件模型,用 C++ 编程实现了算法类、模型类库及界面类,在此仿真平台上成功实现了某型发动机的稳态仿真和动态仿真。通过 UML 建模实践,我们认为运用 UML 进行面向对象的分析和设计,有利于理清思路,并且 UML 作为标准建模语言,能促进建模研究人员间的交流。要充分发挥可视化面向对象统一建模语言在航空发动机仿真软件研究中的作用,还需要在此基础上继续进行深入的研究。

参考文献:

- [1] Curlett B P, Felder J L. Object-Oriented Approach for Gas Turbine Engine Simulation [R]. NASA - TM - 106970, 1995.
- [2] Drummond C K, Follen G J, Putt C W. Gas Turbine System Simulation: An Object-Oriented Approach [R]. N93 - 25673, 1992.
- [3] Reed J A. Onyx: An Objected-Oriented Framework for Computational Simulation of Gas Turbine Systems [D]. The University of Toledo, America, 1998.
- [4] 唐海龙, 张津. 面向对象的航空发动机性能仿真程序的设计方法研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(4): 421~424.
TANG Hai-long, ZHANG Jing. A Study of Object-Oriented Approach for Aeroengine Performance Simulation[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(4): 421~424.
- [5] 陈策, 王文栋, 李军. 面向对象的发动机特性计算的建模与仿真[J]. 机械科学与技术, 2003, 7月(增刊): 34~36.
- [6] Rumbaugh J, Jacobson I, Booch G. UML 参考手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] Ying Liang. From Use Cases to Classes a Way of Building Object Model with UML[J]. Information and Software Technology, 2003, 45(2): 83~93.
- [8] Khary I P, James L F, Thomas M L etc. Integrated Control Modeling for Propulsion Systems Using NPSS[R]. NASA - TM - 2004- 212945, 2004.