

面向对象的燃气轮机仿真建模: 综述与展望*

(上海交通大学) 谢志武 陈德来 翁史烈

[摘要] 为充分发挥仿真技术在燃气轮机整个生命周期中的中枢作用,有必要在仿真建模中采用面向对象方法。文中在回顾和总结了过程式和过程式模块化燃气轮机仿真实践的经验教训后,阐述了面向对象方法在这一领域应用的必要性,评述了当前面向对象的燃气轮机建模研究的进展,最后归纳了三个有前途的发展方向。

关键词 燃气轮机 仿真 建模 面向对象方法

中图分类号 TK47 TP31

1 前言

燃气轮机仿真技术发展至今已有 40 多年历史,但是,仿真软件的集成度和规模与总体性能仿真的中枢地位还很不相称。随着当代燃气轮机在应用广度和深度上的迅猛发展,原有仿真软件在仿真能力上的局限性也越来越明显。机组结构型式的变化、STIG 或 HAT 改型、部件特性由特性图改为 CFD 估算以及仿真算法改进等一系列仿真课题,目前只能通过开发新的专用软件来实现。

燃气轮机仿真局限性的根源在于软件结构不合理。虽然很多研究对此已有所察觉并逐步由普通的过程式软件构造范式向模块化范式过渡,但理论和实践都表明,传统的模块化范式同样难以适应今后的仿真需求。开发具有优良集成和扩展能力的仿真软件环境有赖于新的软件构造范式的采用,其中最具有前途的是面向对象方法。

本文在回顾和总结了过程式和过程式模块化燃气轮机仿真实践的经验教训后,阐述了面向对象方法在这一领域应用的必要性,评述了当前面向对象的燃气轮机建模研究的进展,最后归纳了几个有前途的发展方向。

2 燃气轮机过程式建模的回顾和总结

2.1 过程式建模

计算机仿真建模的实质是抽象现实世界的客观规律并将其映射为一个符合计算机运行规范的计算模型。从计算机的底层实现看,数据和对数据的操作是显式分离的。与这一状况相适应,仿真建模也可以分别看待数据和操作,把现实世界抽象为一组数据和施加于该组数据之上的操作序列,从这种思路出发的仿真建模称为过程式建模。

迄今为止,绝大多数燃气轮机仿真软件均采用过程式建模方法,这使得仿真软件具有很强的

专用化特点,它迫使开发者和用户为仿真需求的每一处微小的改变不断地对软件进行改写或重新开发。这不但耗费了大量人力、物力、财力,而且最终产品一遇到大的需求变化就束手无策,软件的生命周期极为有限。

2.2 过程式模块化建模

为改变上述状况,几十年来在软件工程领域进行了大量研究,提出了许多解决方案,模块化软件构造范式是其中影响较为深远的的一个分支。模块化建模的基本思想是将问题域“分而治之”(Divide and Conquer)。在过程式软件中,由于数据和操作是显式分离的,因而可以方便地把对各种数据执行相同操作的子过程如函数和子程序集中加以整理,作为基本的功能模块。这种基于功能分解的分治方式是当前模块化建模的主流,这里称之为过程式模块化或狭义模块化建模。

过程式模块化建模可以分解问题域,但不能有效降低模块间的相互依存和联系程度。随着软件规模的不断扩大,模块间的调用和依赖关系总量急剧增长,对软件的任何改动所必须调整的联系总量亦随之增长,从而大大降低了软件的扩展裕量和可维护能力。理论和实践表明,过程式模块化建模难以适应今后仿真研究的需求,因而亟需开展对新的软件

* 中国船舶工业总公司“九五”重点项目及博士后科学基金项目

收稿日期 1997-10-29 翁史烈工程院院士为本文作者的指导教师

构造范式的研究和应用。

3 面向对象的燃气轮机仿真建模

3.1 应用面向对象方法的必要性

面向对象方法是一种以对象为中心的方法。所谓对象乃是从软件上封装起来的一组数据和施加于该组数据之上的操作。面向对象方法企图用这个封装来模拟现实世界中的事物,其中数据用于代表事物的属性,对数据的操作则体现其行为方式。封装意味着数据和操作是一个整体,游离于对象之外的数据和操作恰如没有主体的属性和行为,是没有意义的。对象封装使我们有可能按照人,而不是计算机的思维方式在计算机上模拟现实世界。

人类思维采用抽象 (Abstraction) 和分类 (Classification) 的方法处理复杂事物: 抽象提取本质, 忽略细节; 分类则建立各种抽象的结构和层次。在燃气轮机研究中, 我们抽象出大量与细节无关的概念如负反馈、控制容积、基元级等, 将其纳入不同层次的研究范畴, 如系统科学、热力学、气动力学、材料科学之中。各学科间虽然有关联, 其相关性却仅体现在少量与细节无关的抽象概念上。例如在仿真算法研究中, 我们将压气机、燃烧室、涡轮等部件抽象为控制容积, 这样不仅排除了各种气动热力细节对研究的干扰, 而且算法研究的成果也能适用于所有满足控制容积抽象的部件, 甚至包括目前尚无法预知的部件。分层抽象为人类处理复杂系统提供了有力的工具, 也是人类知识结构的基本组织方式。

分层抽象要求从整体上把握事物的属性和行为方式, 因而其计算机实现就不能割裂数据和操作的内在联系。过程式模块化方法企图用一个统一的操作序列来替代所有部件的实现过程, 但最终得到的不是控制容积抽象, 而是一个标准部件。这种标准部件不能容纳新部件的引入, 所以不能随着研究的深入而进化。

为支持分层抽象, 面向对象方法引进了一系列从软件上模拟现实事物间复杂关系的机制, 其中抽象数据类型 (Abstract Data Type, 或 ADT) 是这些机制的基础, 继承 (Inheritance) 和多态 (Polymorphism) 则是其本质体现。面向对象方法通过继承和多态将问题域分解为从抽象到具体的类层次结构 (Hierarchy), 借助抽象类和纯虚函数将系统总体框架定位于上层的抽象类中。这样, 系统内部各具体对象间的复杂联系和依存关系就被映射到相对稳定的抽象类上, 底层的变化不致影响系统的结构。从这种意义上说, 面向对象建模也是一种“分而治之”的策略, 因而可以被认为是—种广义的、更优越的模块化方法。

面向对象方法对燃气轮机仿真具有特殊意义。仿真研究的中枢地位决定了它的跨学科特点和需求多变性, 面向对象方法则提供了一个与学科发展同构的仿真进化模式。具体地说, 通过分层抽象, 燃气轮机对象模型不仅可以兼容机组的任意结构型式, 而且能不断增添新的部件; 由于工质类可以派生出其他流体, 因而空气、燃气、蒸汽及其他工质的任意混合物都可以出现在系统中, 为 STIG 和 HAT 循环研究提供更便利的条件; 求解顺序上的不

断演化可以包容各种仿真算法的演变; 求解方法可以随时调整, 既能兼容各种性能表达格式, 又能嵌入各种从简单到复杂的特性计算方法, 甚至调用大型 CFD 软件包; 由于系统结构的改良, 使并行及分布式计算的任务划分更为便利。此外, 燃气轮机对象模型本身也可以作为一个子系统嵌入更大的系统中, 如作为动力模块嵌入飞机或舰船仿真乃至战役仿真中去。总之, 面向对象的建模方法为燃气轮机研究提供了更为便利的条件, 并首次使仿真技术发挥其发动机生命周期的中枢作用成为可能, 受到了各国学者的高度重视。

3.2 燃气轮机对象模型综述

自 90 年代初面向对象的燃气轮机仿真建模研究起步以来, 模型质量不断改善, 功能不断增强, 应用领域逐步扩大, 取得了长足进步。以下仅从模型质量上对已有的软件作一初步归纳。

所谓对象模型的质量首先取决于对面向对象机制的运用是否充分合理。面向对象机制的运用水平大体可分为三个层次: 第一层次侧重于抽象数据类型的使用, 其基本的建模思路仍囿于过程式模块化或基于对象 (Object Based) 范式; 第二层次是对面向对象机制的一般运用, 继承、多态的使用较为随意, 扩展能力不强; 第三层次则是较好的面向对象系统。

Poole 等^[1]论述了 C++ 语言在燃气轮机仿真中的应用前景, 这是燃气轮机仿真文献中首次出现对继承和多态等典型面向对象机制的描述和使用。他们主要着眼于对象封装对燃气轮机部

件模块分割及单独实现的好处, 继承和多态的使用侧重于减少冗余代码, 而不是更好地描述系统的层次结构, 建模仍沿用过程式模块化范式, 应属于第一层次模型。

Heyen 等^[2,3]为仿真燃气轮机驱动的流体输送管道网的复杂动态, 使用了面向对象机制来简化模块层次。他们在非面向对象语言 FORTRAN 之上构造内存管理和信息交换协议以模拟数据独立、重用和继承等面向对象特性。由于语言的限制, 对继承和多态运用不足, 应属第一层次中的基于对象方法。

Ho 等^[4]分析了在燃气轮机性能计算中应用面向对象方法的技巧。其模型中无论是涡喷或涡扇发动机的仿真, 都只需调用 Simulation 对象的 run() 函数, 这是在系统级上运用多态机制的结果。但他们对多态的运用以参数多态为主, 对扩展性的考虑不足。例如, 没有抽象的部件类, 因此加入新部件将十分困难; 为实现燃气求焓的多态, 将燃气作为干空气的单继承子类, 这不仅与物理含义不合, 而且不符合对象抽象的 Liskov 原则和开闭 (Open-Close) 原则, 扩展时将造成工质类结构的混乱。该模型可归入上述第二层次。

NASA Lewis 研究中心自 1991 年起在 NPSS (Numerical Propulsion System Simulator) 及其各子计划中系统地进行了面向对象方法的研究和实践, 其目的是建立一个供北美主要发动机和飞机制造商在各个阶段对各种型号燃气轮机进行仿真的统一的、集成的数值实验台。Drummond 等^[5,6]先后用 CLOS 和 C++ 对过程式模块化燃气轮机仿真软件

DIGTEM 进行了面向对象化改写。从文献中看, 其类属层次结构较为合理, 但体系结构上过分拘泥于原过程式方案, 因此扩展能力有限, 仍应归于第二层次。Curlett 等^[7]在总结了 Drummond 等的经验教训后, 重新进行了彻底的面向对象开发, 其模型层次较为合理, 并广泛地照顾到了扩展和维护的需要, 属于较为成功的面向对象燃气轮机模型。目前, NPSS 计划仍在进行之中, 上述的燃气轮机模型也还在不断演化。

4 燃气轮机面向对象建模的发展趋势

4.1 利用面向对象的分析和设计方法改进对象模型质量

模型质量决定软件的生命力。利用面向对象的分析和设计 (Object-Oriented Analysis & Design 或 OOAD) 方法有望大幅提高燃气轮机对象模型的质量。所谓面向对象的分析和设计, 就是在面向对象的软件开发中采用图示方法分析、筛选和调整各类对象及其相互关系配置, 用各种过程测试其使用情况, 以便及早发现系统结构的弱点并加以调整。

OOAD 方法的研究极为活跃, 从 1989 年到 1994 年的 5 年间, 方法总数已从 10 种激增到 50 余种。1994 年, 以 Booch、OMT 和 Jacobson 方法为蓝本, 广泛吸收其他方法先进思想的 UML (Unified Modeling Language)^[8]开始了 OOAD 方法的统一并迅速取得巨大成功。UML 将重点放在图示语言的统一上,

在开发过程中采取开放的态度, 广泛支持先进的建模原则和方法, 同时提倡“使用实例驱动” (Use-Case Driven)、以结构为中心 (Architecture Centric)、迭代前进 (Iterative) 和增补式 (Incremental) 的开发过程, 这对燃气轮机对象模型的建立具有很高的理论和实用价值, 将成为今后建模的主要工具。

4.2 燃气轮机性能仿真集成软件平台的研究

面向对象模型为燃气轮机仿真应用提供了很好的基础。以燃气轮机对象模型为中心, 广泛集成各种部件、算法和学科视野的软件平台可以大大提高仿真开发能力, 缩短研制周期, 是一个具有战略意义的发展方向。

集成平台中除燃气轮机系统的基本部件外, 还需进行动力系统其他部件的建模; 为集成多学科研究能力, 需要将常规的热力仿真扩展到力学、材料、控制及系统科学等范畴; 集成软件平台要真正实用化, 就必须具有简单易用的图形用户界面。除此以外, 要最大限度地发挥集成平台在仿真中的中枢作用, 就必须将仿真实现分布于多台计算机, 尤其是异种机组成的网络中, 以适应燃气轮机仿真中粒度不均、任务多样的特点。采用跨平台的面向对象语言 Java 是一种可能的解决方案, 但目前 Java 效率过低, 不宜用于构造关键性的应用软件。采用 C++ 等不能跨平台的语言就必须解决分布异构环境下的信息交换问题。在面向对象的体系框架下, 解决上述问题有一套较为成熟的标准, 称为 CORBA (Common Object Request Broker Architecture)^[9]。符合 CORBA 标

准的燃气轮机的对象模型将为分布异构并行处理提供良好的实现基础

4.3 面向对象的燃气轮机实时仿真研究

与过程式模型相比,对象模型的实现效率有所降低,这是面向对象机制本身的开销引起的。但作为燃气轮机仿真应用重要方面的实时仿真要求尽可能高的解算速度,这就要求对对象模型进

行实时化改造,在效率和功能间寻找平衡点

5 结语

综上所述,面向对象的燃气轮机建模仿真将大大拓展当前发动机研究的视野,使一个性能不断深化,功能不断增强的集成化仿真软件平台的构造成为可能。可以按照图 1 的观点看待燃气轮机仿真中的面向对象方法,它描

述的是一种不断在现有仿真层次上覆盖新机制,从而使仿真能力不断进化的过程。

必须指出,面向对象的方法目前还处在不断发展之中,很多概念和方法还有欠成熟。即便是较为成熟的部分,也无法解决软件结构的所有问题,因此面向对象的燃气轮机模型还将在一个较长的时期内追随软件工程的研究不断发展。



图 1 燃气轮机仿真建模示意图

参考文献

- 1 Poole C, Salsi A G, et al. A software environment for the modeling simulation and control of industrial gas turbine engines. ASME 91- GT- 332, 1991
- 2 Heyen G, Murphy K, Marchio D, et al. Dynamic simulation and control of gas turbine and compressor systems. Computers in Chemical Engineering, 1994, 18(11/12): 1071~ 1082
- 3 Heyen G, Kalitventzef B, Hutchinson P, et al. Simulation of fast transients in fluid transport equipments and utility networks. Escape- 1 Symposium. Elsinore 1992, S109- S116
- 4 Ho P Y, Ng P S. Object-oriented approach to gas turbine performance computation, ASME 96- GT- 165, 1996

- 5 Drummond C K, Follen G J, Putt C W. Gas turbine system simulation: An object-oriented approach. N93- 25673, 1992
- 6 Drummond C K, Follen G J, Cannon M. Object-oriented technology for compressor simulation. AIAA 94- 3095, 1994
- 7 Curlett B P, Felder J L. Object-oriented approach for gas turbine engine simulation. NASA TM 106970, 1995
- 8 Rational Software, et al. UML Summary version 1. 1. 1. September 1997
- 9 Object Management Group. The common object request broker Architecture and specification version 2. 0. July 1996

作者简介 谢志武,男,1970年生 上海交通大学涡轮机研究所博士研究生 从事燃气轮机建模、仿真、状态监测及面向对象方法的研究 (通讯处: 200030 上海华山路 1954号)

面向对象的燃气轮机仿真建模 = **Target-oriented Gas Turbine Simulation and Model Establishment** [刊, 中] / Xie Zhiwu, Chen Delai, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 243~ 246

To give full play to the pivotal role of simulation technology in the whole-life cycle of a gas turbine, it is essential to employ a target-oriented method in the course of turbine simulation and model establishment. Following a review and summing-up of the experiences and lessons in the process mode and process mode modularized gas turbine simulation practice, this paper expounds the necessity of using the target-oriented method in this area and comments on the recent progress in the study of target-oriented gas turbine model establishment with three promising development tendencies being pinpointed. Key words: gas turbine, simulation, model establishment, target-oriented method

燃用褐煤气化燃料的燃气轮机电站 = (Vresova Czech Republic) = **Brown Coal Gasified Fuel-fired Gas Turbine Power Station (Vresova Czech Republic)** [刊, 中] / M. Moliere, P. Carros, E. Deramond (European Gas Turbines S A, GEC Alsthom) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 247~ 253

A comprehensive description is given of the present condition of two model 9E gas turbines installed in an existing brown coal gasification plant in Vresova of Czech Republic with emphasis on such aspects as optimized utilization of energy sources, fuel adaptability, environmental protection and favorable social impact, etc. Key words: integrated coal gas-based combined cycle, gas turbine, combined cycle, gasification of coal

燃煤气的闭式 STIG 循环的热力学分析 = **Thermodynamic Analysis of Coal Gas-fired Closed STIG Cycle** [刊, 中] / Chen Anbin, Wang Yongqing, Shang Demin, Yan Jialu (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 254~ 256, 266

With coal gasification technology being used for a closed cycle steam injected gas turbine a thermodynamic analysis is performed of a coal gasification product-fired closed STIG cycle, which is compared with a coal gas-fired open STIG cycle. In addition, analyzed are also water recovery influencing factors. Key words: coal gasification, water recovery, STIG cycle

注蒸汽燃气轮机最佳注汽量的研究 = **A Study of Optimum Steam Injection Rate for a Steam Injected Gas Turbine** [刊, 中] / Hu Zongjun, Wu Minglan (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 257~ 260

First, a thermodynamic analysis from the viewpoint of components heat balance is conducted of a steam injected gas turbine (STIG) with a corresponding thermodynamic process calculation model being set up. Within a wide range of pressure ratio $\pi = 8 \sim 48$ and turbine inlet temperature $TIT = 900 \sim 1300^\circ\text{C}$ a performance simulation has been carried out for the STIG. An in-depth and comprehensive study is conducted of the correlation of an optimum steam injection rate and gas turbine performance. Key words: gas turbine, steam injection, optimum steam injection rate, STIG technology

锅炉全炉膛火焰数字图象处理与监测系统开发与研究 = **Development and Study of a Boiler Furnace Flame Digital Image Processing and Monitoring System** [刊, 中] / Zou Yu, Lu Zhenzhong, Wang Shimin (South-eastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 261~ 263

In view of the inability to attain a design target in home-made thermal power plant boiler safety protection system with the current furnace safety safeguard system (FSSS) mainly based on the logic discrimination of contact signal magnitudes the authors have come up with a scheme featuring the introduction of an analog quantity into the FSSS. On this basis developed is a new generation of flame detection system based on digital image processing, which is capable of describing furnace flame combustion situation through an analog quantity mode. A detailed analysis has been given of the system scheme design, system configuration and industrial testing. Key words: boiler, furnace, protection, flame detection, image processing, digital treatment, compression