

文章编号: 1000-8055(2002)05-0650-05

燃气轮机分布式仿真的现状与展望

刘永文, 张会生, 翁史烈
(上海交通大学 动力与能源学院, 上海 200030)

摘要: 燃气轮机仿真正在从单一的、定制的仿真程序, 向多学科综合的、适应各种需要的仿真环境发展。由于燃气轮机各个部件模型通常使用不同的编程模型和编程语言, 需要在系统层次采用统一的编程模型来进行集成, 同时屏蔽编程语言的差异。本文从编程模型的角度出发, 对各种分布式仿真技术进行比较分析, 并介绍了国内外燃气轮机仿真的发展现状。最后对国内燃气轮机分布式仿真的发展方向进行了探讨。

关键词: 燃气轮机; 分布式仿真; 编程模型
中图分类号: TK47; TP31 **文献标识码:** A

Recent Development and Prospects for the Distributed Simulation of Gas Turbine

L U Yong-wen, ZHANG Hui-sheng, WENG Shi-lie
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Due to the complexity of gas turbines and the increasing requirements (including economic, safety and environmental protection) being imposed upon, the pressure to decrease the design and development costs, time and risks of gas turbine is accordingly increasing. With in-depth study of various physical phenomena, precise models of different parts and different disciplines have been developed. However, it is not an easy job to integrate these models into a system model. One particular difficulty comes from the fact that different hardware/software platforms and different programming models are used. In order to make these models interact, distributed simulation environment and unified programming model must be used. The programming models used in general distributed systems can be classified into message passing, control flow, data flow, blackboard/shared space, mobile object/agent. In this article, these programming models are generally described and their applications in gas turbine distributed simulation are also reviewed. However, one serious drawback of the programming models been used is that they lack direct support for distributed simulation, so the needed features have to be added usually at the will of the developers, without taking into consideration of standardization. The US Department of Defense has set down a distributed interactive simulation standard-High Level Architecture, whose main purpose is to facilitate the reusability and interoperability of simulation. The HLA should also be adopted as the standard for gas turbine distributed simulation to facilitate the multi-site, multipart, and multi-discipline integrated simulation of gas turbine. Some advice on further development of gas turbine simulation is also given to domestic researchers.

收稿日期: 2001- 11- 14; **修订日期:** 2002- 01- 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59976022)

作者简介: 刘永文(1967-), 男, 四川叙永人, 上海交通大学动力与能源学院讲师, 主要从事热力系统仿真研究

Key words gas turbine; distributed simulation; programming model

1 引言

燃气轮机具有上万个部件, 其中很多部件工作在极端条件下。燃气轮机运行过程中发生的物理现象, 在空间尺度上从数十微米(燃烧、湍流、材料失效)到数米(气体流动、旋转结构等)变化, 在时间尺度上从以微秒为单位到以月为单位变化。对燃气轮机的分析包括了热力学、反应流体动力学、机械学、结构和几何等各个方面。发动机的设计要求各个学科的分析交互作用, 以得到最终的结果。实践已经证明, 计算机仿真可以在设计阶段为各种设计提供迅速的和相对便宜的评价手段, 也可以替代一些代价昂贵的试验。但由于计算机资源的限制和对物理现象理解的限制, 燃气轮机性能仿真的部件模型通常用相对简单的方程和经验数据表示。由于燃气轮机本身的复杂性和对燃气轮机不断提高的运行要求(包括经济性、安全性、环境保护要求等), 要求降低燃气轮机设计开发成本、时间和风险的压力不断增加。随着对各种物理现象的深入了解, 各种更为精细的部件模型和不同学科模型发展起来。然而, 将这些模型集成到燃气轮机的系统模型中还存在很大的困难, 需要各个方面人员的相互合作, 也需要相当的资金和时间投入。作为支撑技术, 仿真环境的作用是将使用不同的编程模型和编程语言、在不同的硬件平台上运行的部件模型集成为系统模型, 使用户能够监视和控制仿真的进程, 并提供相应的分析手段。本文将重点讨论实现部件模型集成的燃气轮机分布仿真技术。

由于燃气轮机各个部件模型本身可能使用了不同的编程模型和编程语言, 需要在系统层次采用统一的编程模型来进行集成, 同时屏蔽编程语言的差异。在第 2 节中, 将从编程模型的角度出发, 对各种分布式仿真技术进行比较分析, 并介绍在燃气轮机仿真中的应用现状。在第 3 节, 对国内如何开展燃气轮机分布式仿真进行了探讨。

2 分布式仿真技术及其在燃气轮机仿真中的应用现状

分布式计算技术中的编程模型可以分为:

- 消息传递: PVM (Parallel Virtual Machine, 并行虚拟机)、MPI (Message Passing Interface) 等;
- 控制流: 对象间的方法调用;

- 数据流: 数据的发布/登记模型;
- 黑板/共享空间: Linda 系统, JavaSpace 等;

- 移动对象: agent (智能代理) 等。

分布式系统由网络连接各个单独的计算机系统(通常称为结点计算机)组成, 网络的工作模式是传递数据包, 而结点计算机的工作模式是过程(或方法)调用。以这两种工作模式为基础, 发展出不同的分布式系统编程模型。按过程(或方法)调用的工作模式, 程序控制在不同结点计算机上转移, 产生控制流; 按传递数据包的工作模式, 在不同结点计算机间产生数据流。

RPC (Remote Procedure Call, 远程过程调用)^[1]是较早出现的控制流编程模型。使用 RPC 的程序分为客户和服务端, 两者间的接口由 DL (Interface Definition Language, 接口定义语言)描述, 然后由编译器根据客户和服务端使用的编程语言和硬件平台, 分别编译为 Client Stub 和 Server Stub。在客户端, Client Stub 将过程调用及其参数被打包, 通过网络传递到服务端, 由 Server Stub 解包, 并形成本地的过程调用。RPC 的实现还包括运行库, 以配合不同的网络传输协议。RPC 被各种商用操作系统广泛地支持。文献[2]中采用 RPC 来解决燃气轮机仿真中的异构和分布问题, 其 RPC 实现包括一种简单的说明语言、一种中间数据表示、各种 Stub 的编译器和运行库。各个部件模型被包装为计算过程, 由上游的部件模型调用。由于过程调用的特点, 各个部件模型是串行运行, 未能充分利用分布式系统固有的并发性。

在客户/服务器模型的基础上发展出分布对象技术 CORBA (Common Object Request Broker Architecture, 公共对象请求中介体系结构)^[3]。CORBA 在客户和服务端中间插入了一个中介 (Broker) 层, 其结果是客户端和服务端通过中介相互作用, 不需要直接了解关于对方的信息, 而且客户端和服务端之间不再限制为一一对应关系。同时, CORBA 结合了对象模型, 以利用面向对象技术中的抽象、封装、继承和多态性等机制。NASA 进行的 NPSS 项目研究中, 已使用面向对象技术, 例如 C++ 对象来封装燃气轮机的部件模型, 并利用 CORBA 的对象请求中介来实现对象间的通讯^[4]。上海交通大学在燃气轮机面向对象仿真^[5]的研究基础上也对利用 CORBA 实现分布对象仿

真进行了探讨^[6]。CORBA 的主体仍然采用了控制流编程模型,用 DL 描述的对象接口中包括了方法和属性,但对属性的访问被编译成特殊的方法,所以 CORBA 的主体仍然是控制流编程模型。最近的 CORBA 标准和实现中加入对其它编程模型的支持。由于远程对象间方法调用经过的层次多,使通讯开销相对较大。

消息传递模型的核心是两个原语 send 和 receive,它们提供了对分布式内存的有限访问,即一个程序将自己内存某个部分的拷贝(称为消息)发送到另外一个程序,后者接收到消息后可以将消息写到自己的内存中,在逻辑上消息的发送者改写了接收者的内存。在各种消息传递环境中,PVM 可以用于网络环境下异构并发计算,其系统组成包括每个计算机上运行的守护进程(daemon)和 PVM 接口库^[7]。MPI 是最近提出的消息传递接口标准,目的在于进一步提高可移植性和并行效率^[8]。PVM 和 MPI 已普遍应用于实现燃气轮机的分布并行仿真^[9,2]。与控制流编程模型的同步方法调用相比,消息传递模型的异步消息发送和接收对于实现部件模型的并发仿真更有利。但是消息传递模型的发送和接收都需要指定对方的进程号,使得程序结构的灵活性不足。

作为消息传递模型中比较特殊的一类,共享空间编程模型的基本语义是对共享空间中的数据对象(称为元组)进行操作^[10]。通讯的发起方在共享空间中产生一个元组,而接收方从共享空间中读或取出元组,共享空间起到中介作用。根据 Yale 大学的研究,Linda 的运行效率可以与标准的消息传递系统竞争,所以共享空间编程模型也是燃气轮机仿真集成值得注意的一个方向。

在以上的讨论中,主要涉及的是实现燃气轮机系统仿真中各个部件、各个学科模型的互操作,即各个子模型间方法和数据的相互访问。在系统仿真的过程中,还需要控制各个子模型的运行,满足相互之间边界上的约束,体现相互作用。为此,需要提供监视工具使用户可以通过关键参数的显示来观察仿真的进程,而专家系统可以持续地监视并主动控制仿真过程。这种方法已在文献^[11]中采用,用于 NASA 的 NPSS 项目。当子模型本身的复杂性和子模型的数目达到一定程度后,对仿真过程的集中控制容易出现困难。将知识和控制分散到子模型中,可以克服集中控制的缺点,而 Agent 技术是达到这一目标的有效手段。

Agent 是一种软件成分,具有自治性、适应

性、反应性、移动性、合作性、交互性和代理等一系列特性^[12]。Agent 在与人工智能相关的研究中得到普遍的关注,但在与科学计算及相关领域还未普遍使用。在 Purdue 大学进行的 GasTurbnLab 项目,采用了多 Agent 来组成燃气轮机的仿真环境^[13]:在各个子模型上增加表达方式的转换和通讯功能,形成计算 Agent;在存在边界的每两个计算 Agent 间,有一个协调 Agent 负责两者之间边界条件的满足;全局协调由仿真控制器 Agent 负责;在仿真环境的底层,资源 Agent 根据系统模型和部件模型的需要,定位合适的运行平台及选择合适的算法,而数据库 Agent 提供必要数据存取服务。

基于 Agent 的体系结构提供了一种自然的方法将大任务分解成一系列自包含的子任务,或者相反,通过一系列 Agent 来建立一个系统求解复杂问题。Agent 技术的应用将在更大程度上减轻仿真用户的负担,这一特点使它在燃气轮机综合仿真中将具有广阔的应用前景。同时需要指出的是,Agent 的自治性和部分知识可能会起到相反的作用,Agent 可能会错误理解得到的指令,可能决策错误,甚至失去控制。因此,对于 Agent 系统的控制策略的研究也不可忽略。

与控制流模型相比,发布/登记模型提供了异步形式的匿名多对多通讯。数据的接收方登记特定的数据类、主题或数据通道,而不是某个发送方;数据的发送方发布满足条件的数据。发布的数据将传递到所有登记过的接收方,可以是立即传递(推模式)或根据接收方的请求(拉模式)。美国国防部制定的分布式交互仿真标准,称为 HLA (High Level Architecture,高层体系结构),其中采用了发布/登记模型实现仿真运行过程中的互操作^[14]。目前,已由上海交通大学率先开展了 HLA 在燃气轮机仿真中的应用研究^[15]。

HLA 的逻辑结构为联邦制。一个 HLA 仿真应用的顶层逻辑单位为联邦(Federation),联邦由至少一个联邦成员(Federate)组成。联邦和联邦成员的关系是动态的,联邦随第一个联邦成员创建而创建,在最后一个联邦成员退出联邦后,联邦也随之消亡。在联邦的生命周期内,联邦成员根据需要动态地加入或退出联邦。每个联邦成员与外界(其它联邦成员)进行交换的数据使用 SOM (Simulation Object Model,仿真对象模型)表示。SOM 借用了面向对象技术,每个联邦成员表示为一个或多个对象,每个对象都属于某个类,对象由

属性表示。

与面向对象技术的明显不同的是,HLA 的对象模型中不包括对象的行为,这与数据流编程模型是一致的。除了每个联邦成员的 SOM 外,每个联邦还需要建立 FOM (Federation Object Model, 联邦对象模型)。FOM 并不确定联邦中的具体联邦成员,只是表示联邦中可能出现的对象类。这样的联邦对象模型表现出很大的灵活性,使联邦可以由不同种类、不同实现的联邦成员组合而成。

HLA 中的 RTI(Run-Time Infrastructure, 运行基础结构)按发布/登记模型实现联邦成员间的互操作。HLA 标准规定联邦成员间不允许直接交换数据,而必须通过 RTI 进行。这一限制,增强了联邦结构的灵活性,也提高了联邦成员的可重用性。RTI 通过标准接口为联邦成员提供服务,反过来联邦成员也需要实现一些标准接口供 RTI 调用。作为标准,HLA 只用 DL 描述了 RTI 和联邦成员的接口,为各种 RTI 的实现提供了可能。

3 燃气轮机分布式仿真的展望

某个主要的燃气轮机制造商估计,通过对燃气轮机进行详细的全系统仿真,可以减少大约 30~40% 的设计、开发的时间和成本。所以多学科综合的、适应各种需要的燃气轮机分布仿真环境的研究和开发具有积极的现实意义。国内的发展现状与国外相比,还有较大的差距。对于国内今后一段时间内燃气轮机仿真的发展,首先要指出的是:

- 部件性能计算和总体性能计算相结合,是燃气轮机性能计算与仿真的发展方向。要达到这个目标,需要技术手段(即仿真环境)的支持,更需要思路上的改变。应当认识到,部件间的相互作用对于最终总体性能的影响不能忽略,除了性能试验外,系统仿真也是一个有效手段。

- 以性能仿真为主线,在分布式仿真环境的支持下,可以进行多学科的综合仿真。以燃气轮机的强度校核为例,一般只对关键零部件进行几个特殊工况点的计算。如果将强度校核程序与性能仿真结合,就可以在全工况范围进行强度校核计算。

- 现代燃气轮机的设计与开发,需要各个方面的合作。美国能源部的先进燃气轮机系统(ATS)计划,综合了政府、大学和工业界的力量。国内的各个单位都有自身的特长和研究重点,需要一种机制以及相应的技术手段来实现资源共享。

燃气轮机分布式仿真的研究和开发可以有两种模式:一是各个单位提供部件计算程序,并由某个单位在进行集成;二是由某个单位提供仿真环境,而各个单位利用提供的工具和标准,自行进行计算程序的封装。从各种因素考虑,第二种模式可能更为现实。美国在全美范围内建立了先进计算基础设施 NPACI,并取得了优异成果。国内也在积极推进类似计划的实施。各个单位的计算程序和试验数据作为一种重要的资源,可以在先进计算基础设施的支持下,通过分布式仿真环境实现多地点、多学科的燃气轮机系统仿真。

目前燃气轮机分布式仿真中存在的一个问题是,各个研究单位直接在各种分布计算技术基础上构造分布式仿真环境,而这些通用的分布计算技术本身缺乏专门的与仿真有关的支持。在开发燃气轮机分布式仿真技术的过程中,各个研究单位按自己的理解和需要添加与仿真有关的功能,缺乏统一的标准,不利于进一步的发展。根据现在分布计算技术和仿真技术的发展趋势,应当采用 HLA 作为实现燃气轮机分布式仿真的标准。HLA 定义的联邦仿真体制,能够较好地适应各种合作模式。HLA 使用的数据流编程模型,容易集成各种计算程序。HLA 标准中只定义了 RTI 的接口,为使用各种分布计算技术来实现 RTI 提供了可能。

4 结 论

燃气轮机仿真正在从单一的、定制的仿真程序,向多学科综合的、适应各种需要的仿真环境发展。为了适应这种发展的需要,国内外都进行了燃气轮机的分布式仿真环境的实现研究。本文根据这些研究采用的不同编程模型,进行了简要介绍,以期引起大家的重视。根据分布计算技术和仿真技术的发展趋势,提出了采用 HLA 作为燃气轮机分布式仿真标准的建议。

参考文献

- [1] Bernstein P A. Middleware[J]. Communications of ACM, 1996, 39(2): 86- 98
- [2] Homer P T, Schlichting R D. Supporting Heterogeneity and Distribution in the Numerical Propulsion System Simulation Project[A]. In: The 2nd International symposium on High Performance Distributed Computing[C]. Washington: IEEE Computer Society, 1993: 187- 195
- [3] Otte R, et al Understanding CORBA[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 1995

[4] Lytle J K. The Numerical Propulsion Simulation: A multidisciplinary Design System for Aerospace Vehicles[R]. NASA/TM - 1999- 209194, Cleveland, Ohio: Glenn Research Center, 1999

[5] 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.

[6] 谢志武, 苏明, 翁史烈. 燃气轮机系统仿真集成概念及其分布对象实现[J]. 航空动力学报, 2000, 14(3): 307- 310

[7] Sunderam V S, Geist G A, Dongarra J, et al. The PVM Concurrent Computing System: Evaluation, Experiences, and Trends[J]. Parallel Computing, 1994, 20(4): 531- 546

[8] Walker D, Dongarra J M P E A. Standard Message Passing Interface[J]. Supercomputer, 1996, 12(1): 56- 68

[9] Lytle J, et al. Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) 1999 Industry Review [R]. TM - 2000- 209795, Glenn research center, 2000

[10] Leter W. Linda Meets Unix[J]. Computer, 1990, 23(2): 43 - 54

[11] Afieh A A, Homer P T, et al. Development of an Intelligent Monitoring and Control System for a Heterogeneous Numerical Propulsion System Simulation[A]. In: Proceedings 28th Annual Simulation Symposium [C]. Phoenix AZ (April 1995): 278- 287.

[12] Weyer P. Agents unleashed[M]. Boston: AP Professional, 1995

[13] Fleeter S, Houstis E N, Rice J R, Zhou C. GasTurbnLab PSE Design[R]. 99- 002, Purdue University: Computer Science Department, 1999

[14] 洪刚, 刘永文, 苏明, 等. HLA - 21 世纪的分布式仿真标准[J]. 上海铁道大学学报, 2000, 21(6): 12- 16

[15] 洪刚. HLA 在热力系统仿真中的初步应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.

(责任编辑 杨再荣)