

文章编号: 1000-8055(2000)03-0307-04

燃气轮机系统仿真集成概念及其分布对象实现

谢志武 苏 明 翁史烈

(上海交通大学 动力与能源工程学院, 上海 200030)

摘要: 本文提出燃气轮机系统仿真集成的概念, 分析了关键实现技术, 然后从跨平台性入手, 给出 1 个分布异构计算机平台上的面向对象实现方案。算例表明, 这一方案成功实现了系统仿真集成的主要功能, 从而为发动机系统的多学科开发、研制和实验提供了有效的仿真软、硬件平台, 并使发动机的远程协同设计成为可能。

关键词: 燃气轮机; 系统; 仿真

中图分类号: TK47; TP15

文献标识码: A

1 引言

在发动机研制、使用、维护各阶段必须进行大量的计算机仿真研究。这些仿真活动涉及气动热力学、结构和材料科学、自动控制、决策科学等众多学科门类, 规模小的仅是单片机上的几十行语句, 大的则需要超级向量计算机数日的计算量, 但都无不是对发动机系统不同层次、不同侧面相互耦合着的各种物理现象的计算机描述, 因而应当成为发动机大系统仿真的有机组成部分。

遵循科学研究的分析传统, 以往的研究已成功地上述各仿真活动与大系统隔离开来, 并为其定义了清晰的边界条件和研究目的。他们各自沿着不同的学术路线发展, 相互之间虽有渗透融合, 但总的说仍处于分散、小规模、无组织的状态, 这给许多复杂现象的建模仿真带来了极大困难。随着计算机工程和网络技术的长足进步, 依据系统科学规律将发动机寿命周期内的各种独立的仿真活动综合集成为一个有机整体的时机日益成熟。本文即是在这个方向上的一次有益探索。

2 仿真集成概念及关键技术

发动机系统的仿真集成是指通过网络设备将运行在不同计算机软、硬件平台上的涉及不同学

科门类, 从不同角度、层次和侧面反映发动机全寿命周期内各部件及总体工作状态的各个独立仿真软件联结在一起, 通过各种手段使他们相互配合、协同工作, 以解决原本单个学科门类所难以解决的问题。不应将仿真集成简单地理解为重构一个规模更大的专用仿真软件, 正相反, 仿真集成应当尽可能地重用现有的独立仿真软件。当这些软件进化升级时, 仿真集成不受影响, 并能获得更强的功能或更高的性能。在上述集成化仿真环境内, 还应能机动灵活地筛选和组合不同的仿真软件集以适应不同仿真目标的需要。可见, 仿真集成对软件的可扩展能力和通用化程度提出很高要求。

为此, 首先必须解决一些关键的技术问题。计算机硬件互联并无实质性的难度, 关键在于仿真软件的构造。首先, 如何确定不同仿真软件的适用前提和界限并将其衔接起来, 即如何利用单学科仿真研究之间的相互作用和渗透来重构发动机大系统。其次, 要能够从软件外部调用独立仿真软件包的仿真功能, 就必须对软件调用形式进行规划调整, 即对独立仿真软件进行包装(Wrapping)。随独立仿真软件的不同, 所需的软件包装技术也大相径庭。常见的情况是, 独立仿真软件既无源代码可直接利用, 也无完整的 API, 因而必须使用 RPC 及 Sockets 等繁复的编程手段。第三, 跨平台性是对任何仿真集成框架的最基本要求, 这是由

收稿日期: 1999-09-08; 修订日期: 1999-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59976022)

作者简介: 谢志武(1970-), 男, 上海交通大学动力与能源工程学院讲师, 博士

运行各独立仿真软件所要求的软、硬件平台所决定的。新兴的网络技术给出了一些跨平台方案,但技术上仍互有短长,目前尚没有一种方案在可预见的将来能够占据绝对优势。第四,各独立仿真软件在时间和精度上能否相互匹配是决定仿真互操作(Interoperability)成败的关键因素。最后,分布异构计算平台,尤其是非专用的分布异构平台上的通信具有很大的不确定性,因而仿真集成的容错问题也不可忽视。

一蹴而就解决上述所有关键问题的条件尚不成熟,事实上也没有这个必要。一方面,越来越多的商业软件供应商已开始自行升级其代码以支持一种或数种分布计算标准,同时分布式应用的开发过程也日益简化以至于软件包装的工作量将可能超过重新开发,因而其必要性也必然会随着时间的推移而逐步减弱。另一方面,从软件角度解决分布应用的实时和容错问题远没有硬件技术进步来得迅速和有效。采用高速交换机和光纤专用网络的价格将很快降至大众可接受的范围,而在带宽、稳定性和可靠性等指标上却有数量级飞跃。只有那时,对要求实时和高可靠性的一类动力系统仿真应用,软件的实时和容错才有现实意义^[1]。

在现阶段,最为迫切而意义深远的工作是研究如何使仿真集成获得跨平台协同能力。只有解决这一关键问题,方能对不同系统重构方案进行比较,软件包装才有章可循,实时和容错系统也才有存在的基础。本文给出了动力系统仿真集成的一种跨平台实现方案。

3 集成的分布对象实现

本文从发动机仿真集成的跨平台协同能力入手,用尽可能简单的例子避开系统重构、软件包装等问题,实现时也尽量不加附加限制条件。

3.1 问题描述

以下针对带动力涡轮的双转子燃气轮机进行一维瞬态性能仿真,外负荷接近三次方规律。由于采用了面向对象的建模仿真技术,本文的模型理论上可适用于任意结构形式的燃气轮机。发动机总体性能根据部件性能计算的结果采用容积惯性环节法^[2],同时也允许用其他性能计算方法如三阶龙格—库塔法^[3]等,因而本文的结论不会因系统重构方式的改变而失效。压气机和涡轮计算采用性能图表插值法获得,但因为构造了通用的部件计算接口,所以任何经过面向对象包装的第三

方代码,如二、三维CFD 部件性能仿真软件等,理论上都可以无缝地嵌入系统。对各部件的性能仿真设置了相同的时间步长和相互匹配的精度要求,同时由于系统运行于流量负荷不大的局域网,因此通信损失可暂时忽略不计。系统实现采用面向对象的分分布式计算框架,从异构性着眼,系统结构符合对象管理集团(OMG)定义的面向对象的分分布式计算标准 CORBA (Common Object Request Broker Architecture)^[4~6]。

3.2 发动机系统仿真的分布对象模型

本文给出的面向对象的分布式燃气轮机仿真模型是在原有的仅适用于单机的可扩展的面向对象模型^[7]上改造得到的。由于 CORBA 是一种基于软件总线 ORB 的多层客户机-服务器模型,对上述模型的改造首先要采用与平台无关的界面定义语言 IDL 为所有可能分布到异地机上运行的代码定义通用界面。本文主要为各种发动机部件如压气机、燃烧室、涡轮、进排气道、各种管道和接头部件以及转子惯性环节和容积惯性环节等定义了通用界面。在此基础上,可以用不同的编程语言为他们在不同软、硬件平台上构造服务器程序。连接器、各种流路计算方法和系统性能仿真方法都将留在本地机运行,因而只需嵌入客户程序即可。由于 CORBA 的采用,所有运行在异地机上的服务器对象在本地机上都有相应的代理(Proxy),仿真模型运行时客户机只对本地的代理对象提出请求而无需区分本地机和异地机的差异,这就为第三方软件模块的嵌入提供了便利条件。例如,只要第三方涡轮性能计算软件经过包装后界面与原有的插值程序界面相同,经过简单的设置,原本客户机发给涡轮性能插值计算服务器代理的请求就会被 ORB 转向到这个第三方程序。不仅如此,只要网络通信能得到保障,客户机对各服务器在地理位置上的差异也不加区别,这就为发动机的远程协同仿真创造了条件。

3.3 试算软硬件环境

以下仿真计算软硬件环境如表 1 所示,通过高速以太网互联的 3 台微机和 1 台工作站组成。

3.4 计算结果及讨论

在上述异构网络环境下进行发动机系统仿真集成试算,算例与文献^[7]相同。由于这一仿真模型的灵活性,可以将不同的仿真计算功能方便地分配给不同的计算机。为进一步研究本实现方案的实现效率,使用 7 种不同的仿真配置对同一仿

真任务进行了试算, 结果见表 2, 其中的计算时间是仿真发动机在一个仿真时间步长(0.5ms)内的动态变化所消耗的时间。表中数据为 200 次仿真计算的平均值, 并已排除了输入输出耗时。

在 7 种不同仿真配置下得到的系统动态特性结果与单机计算^[7]完全一致。由此可见, 本文给出的发动机仿真集成的分布对象实现是正确的, 它能够满足多学科综合仿真研究的需要。

与文献[7]的结果比较可知, 在分布异构平台上计算相同问题的耗时居然是单机上的近千倍, 这似乎提示分布异构实现方案在计算效率上有重大缺陷。但进一步分析上述结果可以发现, 不同的仿真计算配置并没有造成实现效率的明显变化, 高性能工作站和 PC 机在计算效率上的差异完全没有得到体现, 这说明上述仿真计算中用于网络通信的开销大大超出了 CPU 的计算开销。需要

指出, 虽然在某些计算方案中接入网络的计算机数目有所变化, 但由于客户机对服务器的总请求次数没有变化, 因而网络开销也不变。极端的例子是方案 1, 单台计算机兼作客户机和服务器, 虽然此时客户机和服务器运行在同一台计算机上, 但他们各自处于不同的寻址空间, 相互间无法直接通信。客户机发出的每一次服务请求仍然必须首先通过 Proxy 对象传送给 ORB, 经由 IDP 协议和 TCP/IP 协议由局域网再发送给本地计算机上的服务器程序, 网络开销没有减少, 因而其计算时间也不可能明显减少。

以上讨论的网络开销是分布计算所必须消耗的。但不应将本算例中分布计算与单机计算间的效率差异简单推广到所有其他应用。与并行计算的结论一致, 上述差异是由于在计算中分配给服务器的计算任务粒度过小。显然, 本问题中分配给

表 1 燃气轮机仿真集成的分布对象实现软硬件条件

	服务器 1	服务器 2	服务器 3	客户机兼服务器 4
硬件环境	Pentium II 266	Pentium 266	SUN Ultra 1 170	Pentium II 233
操作系统	Windows NT 4.0	Windows NT 4.0	SUN Solaris 2.6	Windows NT 4.0
编译器	Visual C++ 5.0	Visual C++ 5.0	Visual Workshop C++	Visual C++ 5.0
ORB	Orbix for Windows NT 2.3	Orbix for Windows NT 2.3	Orbix for Solaris 2.3	Orbix for Windows NT 2.3

表 2 燃气轮机仿真集成的分布对象计算结果汇总

计算方案	各计算机所起作用				计算时间(s) ¹
	服务器 1	服务器 2	服务器 3	客户机/服务器 4	
1	未接入	未接入	未接入	系统性能仿真及调度, 同时作为服务器负责所有其他部件的性能仿真	3.450
2	高、低压压气机, 高低压、动力涡轮及燃烧室性能仿真	未接入	未接入	同上	3.232
3	未接入	未接入	燃烧室性能仿真	同上	3.534
4	未接入	燃烧室性能仿真	未接入	同上	3.514
5	未接入	高、低压及动力涡轮性能仿真	燃烧室性能仿真	同上	3.509
6	高、低压压气机性能仿真	高、低压及动力涡轮性能仿真	燃烧室性能仿真	同上	3.309
7	高压压气机及低压涡轮性能仿真	低压压气机及动力涡轮性能仿真	燃烧室性能仿真	同上	3.377

各服务器的计算任务仅仅是一些简单的插值计算,当然无法体现分布异构计算的优越性,但如果分配给服务器的计算任务是需要大量消耗 CPU 时间的 CFD 计算任务,上述差异必定会明显减小,而由于多学科综合分析带来的好处也会更加明显起来。在针对上述仿真环境进行的一项计数器对比计算实验中,已观察到服务器上的加法计算粒度增大一个数量级时,单机计算和分布计算的耗时比大幅降低^[8]。不仅如此,在对各部件进行复杂的 CFD 详细计算时,发动机性能的总计算量对绝大多数计算机而言都将是难以胜任的,此时分布异构计算是一个很有前途的选择。目前,NA SA Glenn 研究中心进行的 NPSS 计划已经能够在对大多数部件进行三维或准三维计算的条件下,通过分布异构平台上的 CORBA 机制将获得发动机系统总体性能的时间控制在数天的数量级范围内,这充分体现其优越性。

4 结 论

本文提出了发动机系统仿真集成的概念,并通过实例给出了仿真集成的分布对象实现方案,它初步验证了仿真集成概念的可行性。

与并行计算不同,异构式分布对象计算技术应用于燃气轮机仿真的目的并不单纯是为了追求

更高的仿真计算速度,而是着眼于更充分合理地利用网络计算的软、硬件资源,加速发动机开发研制周期,并使发动机的异地协同开发、研制和实验成为可能。从这个意义上说,发动机性能仿真集成概念及其分布对象实现具有很高的战略价值。

参 考 文 献

- 1 Xie J, Cai M, Wang Y. An Implementation Model of Real Time CORBA for Internet Applications[C]. Proceedings of 31st International Conference on Technology of Object-Oriented Languages and Systems, Nanjing, 1999: 326- 330
- 2 苏明, 翁史烈. 汽轮机系统仿真中一种容积环节仿真模型及其解[J]. 动力工程, 1998, 18(2): 75- 78
- 3 翁史烈. 燃气轮机性能分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987: 87- 92
- 4 Object Management Group. The Common Object Request Broker: Architecture and Specification [M]. Revision 2.0, 1996
- 5 Otto R, Patrick P, Roy M. Understanding CORBA [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995
- 6 DNA Technologies PL.C. Orbix Programmer's Guide[M]. 1997
- 7 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
- 8 谢志武, 刘劲杨, 苏明, 翁史烈. Orbix 的分布对象计算性能分析[J]. 海军工程大学学报, 2000, 89: 1- 5

(责任编辑 王震华)

Gas Turbine Simulation Integration and its Distributed Object Implementation

Xie Zhiwu, Su Ming, Weng Shilie

(School of Power & Energy Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to systematically, rather than analytically investigate the interdisciplinary phenomenon during the engine's life cycle, the concept of gas turbine simulation integration is proposed. The technological obstacles in its realization are identified. Then a prototype distributed object implementation is presented from the viewpoint of the cross-platform attribute of the simulation integration. For engine overall performance simulation based on its components' performance on a heterogeneous distributed computing platform, the IEEE standard for distributed object computing, CORBA, is conformed throughout the implementation. The implementation is tested on a network environment consisting of 3 Pentium II PCs and 1 SUN Ultra 1 workstation interconnected through a LAN. The functionality of simulation integration is fully verified and various simulation results of different configurations are presented and analyzed. It is concluded that, without real-time support, the above implementation can only be used in interdisciplinary researches not requiring any real-time capabilities. Some potential applications of the implementation, including remote collaborative engine design and simulation, are also proposed.

Key words: gas turbines; systems; simulation