

文章编号: 1000-8055(2004)04-0562-10

航空发动机系统级仿真研究的回顾与展望

曹 源, 金先龙, 孟 光

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘要: 实践证明计算机仿真是降低发动机研发费用, 缩短开发周期的一个重要手段。各国都对此进行了大量研究。其仿真正在从单一的、定制的仿真程序向多学科综合的、适应各种需要的综合的仿真环境发展。本文从航空发动机系统级仿真的角度对国内外近年来在相关仿真软件和系统开发方面的工作做了简要概述和总结。并结合当前航空发动机系统级仿真的现状以及计算机仿真理论的发展, 探讨了未来航空发动机系统级仿真的发展趋势。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 计算机仿真; 现状; 展望

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

Recent Development and Prospects of System-Level Modeling of Aircraft Engine

CAO Yuan, JIN Xian-long, MENG Guang

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: It is time-consuming and expensive to design and develop a new aircraft engine. Computational simulation is a promising means for alleviating cost, much work about it has been done and many achievements have been acquired. In the past, limited computer resources forced component representations to be based on relatively simple equations and empirical data obtained from components and system testings. As the aerospace industry enters the 21st century, there is increasing pressure to reduce the time, cost and risk of aircraft engine development. Now the traditional method for numerical simulation of the gas turbine engine is not suitable. As a result, the common simulation model for aircraft engine becomes important and some research teams are developing these models and some models have been used in aircraft industry. On the other hand, with the in-depth study in various domains relating to the engine, precise models of different parts and different disciplines have been developed. But it is a hard work to integrate these advanced multidisciplinary and multifidelity analysis methods. Thanks to the big progress in computer science and other domains, to construct flexible simulation softwares and integrate different precise models of engine into one system has become possible and realistical. In order to make clear the development direction of the simulation of aircraft engine, the recent development and results

收稿日期: 2003-07-21; **修订日期:** 2003-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60273048)

作者简介: 曹源(1976-), 男, 山东人, 上海交通大学机械与动力工程学院博士生, 主要从事航空发动机分布式仿真和网格计算研究

have been summarized and the prospects have been studied in this paper. At last some advice on further development of gas turbine simulation is also given for domestic researchers

Key words aerospace propulsion system; aircraft engine; computational simulation; overview; prospect

作为飞机的心脏, 航空发动机是各国研究与投入的重点。从 20 世纪初, 经历了螺旋桨、涡轮喷气、涡轮等几个重要发展历程。特别是二次大战后, 以燃气轮机为基础的涡轮(涡轮)发动机得到了巨大发展并已成为当今航空动力系统的主要组成部分。

几十年的发展, 已使航空动力工业成为知识密集、技术密集、高投入、高附加值的高技术产业。它具有发展周期长、科研投入高、技术综合性与对抗性强、预研究成果筛选率高和研制风险大等特点。其成本过高的一个重要原因是必须进行大量大尺寸的实验。而在此方面计算机仿真具有巨大优势: 可以减少实验工作量, 有效降低研制费用, 缩短研发周期。

计算机仿真是指以计算机硬件及相应的软件技术为基础, 以现代控制理论与相似原理为方法, 借助系统模型对设想的或真实的系统进行解析或半实物混合仿真试验研究的一门综合性技术。自计算机问世特别是 80 年代以来, 西方发达国家相继开展了航空发动机仿真研究工作, 并取得了相当成果。目前航空发动机的设计研制正逐渐开始由以大量试验为前提的传统设计向以 CFD 和计算机仿真为主的预测设计转变, 其目标是使发动机研制周期从 10~15 年缩短到 7~8 年, 试验从 40~50 台减少到 10 台左右。

由于种种原因, 我国目前的航空动力技术还比较落后, 制约了航空工业的发展。可以说航空动力落后已经成为航空工业发展的“瓶颈”。因此根据我国研制经费较少, 基础薄弱等国情, 要在航空发动机方面赶超发达国家, 就更需要大力发展航空发动机的计算机仿真。“在我国预研和型号研制已有的软件基础上, 再适当引进并消化、吸收国外一些先进软件, 建立一套中国自己的设计软件体系和数值仿真系统, 不但是必要的, 也是有可能的。”^[1]

本文就航空发动机系统级计算机仿真的发展, 特别是近几年的最新成果做了简要概述和总结, 并结合计算机及相关仿真理论的进展探讨了航空发动机系统级仿真的发展趋势。

1 航空发动机系统级仿真研究现状

1.1 国外研究现状

以往航空发动机的设计, 主要建立在以试验来暴露设计技术问题的基础之上。一台发动机的研制成功, 需要经过大量的试验, 进行多次反复修改和调试。近十几年来, 随着计算流体力学(CFD)、计算结构力学(CSD)和计算机仿真技术等迅速发展以及大量试验数据的积累, 在西方发达国家引发了一场革命。他们目前正在尝试从“传统设计”向“预测设计”的转变。预测设计主要是在较精确的数学模型、优化计算和虚拟现实仿真的基础上, 把大量的设计及修改放在计算机上进行。

西方各国在预先研究方面开展了一系列工作。如美国军方从 50 年代中期就开始实施航空推进技术探索发展计划; 70 年代末以来, 美国政府(由 NASA 主持)也先后实施了发动机部件改进计划、高效节能发动机计划等。80 年代末 NASA 刘易斯研究中心的一些管理人员和研究人员开始研究如何将快速发展的计算机仿真技术应用到航空发动机部件及整机的设计中。特别是近年来, 国外在航空燃气轮机总体性能仿真、建模研究方面的工作开展的比较广泛, 建立了一系列仿真模型^[2~6]。

下面结合几个目前比较成功的航空燃气轮机仿真系统介绍国外航空发动机系统级仿真主要特点。

1.1.1 通用性和可扩展性

目前西方先进国家已经开始探索从“一机一模型”的专用仿真软件, 向高效、通用、可扩展的仿真系统转变。发动机建模要求能够灵活的用标准模型元件生成完整的, 以至更复杂的发动机模型; 因此建模的公式化、模块化和标准化变的非常重要。FORTRAN 等传统计算机语言尽管仍被相当广泛的应用, 但现在的趋势是向基于 C++, JAVA 等面向对象和图形化的新型软件发展。

荷兰国家航空航天实验室(National Aerospace Laboratory)开展了燃气轮机仿真项目

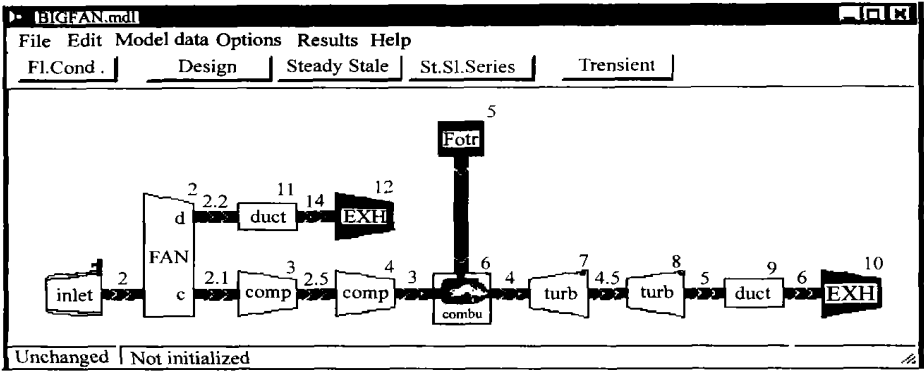


图 1 基于 GSP 系统建立的模型

Fig 1 Gas turbine model of GSP

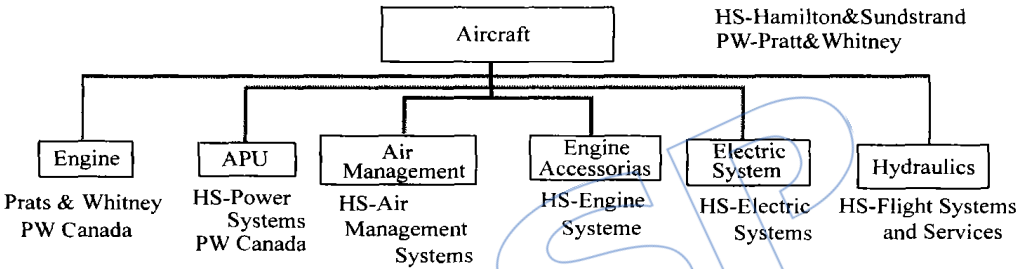


图 2 航空动力系统功能模块分解

Fig 2 Functional decomposition of aircraft power systems and the associated UTC business unit

GSP (Gas Turbine Simulation Program) [7]。GSP 应用了 Borland Delphi 面向对象环境, 因此提供了一个非常适于维护和扩展软件的手段。它可以不断的被新的、能应用于许多特殊领域的模型扩展和丰富。每个模块化模型都包含了所要模拟的部件特性。如图 1, 它可以代表所有的子系统部件 (因此也增强了 GSP 的灵活性)。每一个模块都有一个特定的界面让用户输入一系列相应的数据, 如设计点的值以及部件特性图等。

GSP 可以被用于各种场合, 如离线性能分析, 排出物计算, 控制系统设计和航空与工业用发动机故障诊断。更进一步的用途包括涡轮轴性能分析, STOVL 推进系统, 控制逻辑验证和在高温下工作的元件热负载对其生命周期的模拟。

1.1.2 模块化建模

美国 UTC 公司 (United Technology Company) 的 ITAPS 项目 (Integrated Total Aircraft Power Systems) 的目标是根据市场要求分解并分析航空动力与推进系统 [8]。通过建立一个系统规范及接口, 提出一种可以把各学科专门技术知识综合到一个共同的仿真环境下进行协同开发的框

架。目的是建立一个广泛的可能的商用飞机发动机仿真系统。该协同设计已经可以应用在军事中。对发动机对象进行模块化分解和建模是该计划的基础。图 2 是 ITAPS 项目结构划分的不同模块, 图 3 是根据所建立的模块库而构建的航空动力系统的整体结构。从中可以看出, 整个系统被分为液压、电力、发动机、辅助动力装置以及电子控制等诸多子系统模块, 每个子系统进一步细分为更具体部件的模块模型。最后通过网络把分布于不同物理位置上的计算机中的各个子系统集成于一体, 进行整个动力系统的仿真。由于采用了模块化和面向对象建模技术, 该系统具有良好的通用性和可扩展性。

意大利与瑞典合作的航空燃气轮机仿真项目 MOGM (Modeling of a Gas Turbine with Modelica) [9] 是基于新型的面向对象仿真软件/语言—Dymola/Modelica 建立的, 其充分利用该软件和语言的面向对象和 non-causal 特性较好地解决了模块化建模所带来的系统内相互作用 (耦合) 的表达, 并建立了具有良好的可扩展性和通用性的模块化模型库。依据此模型库可以根据不同类型

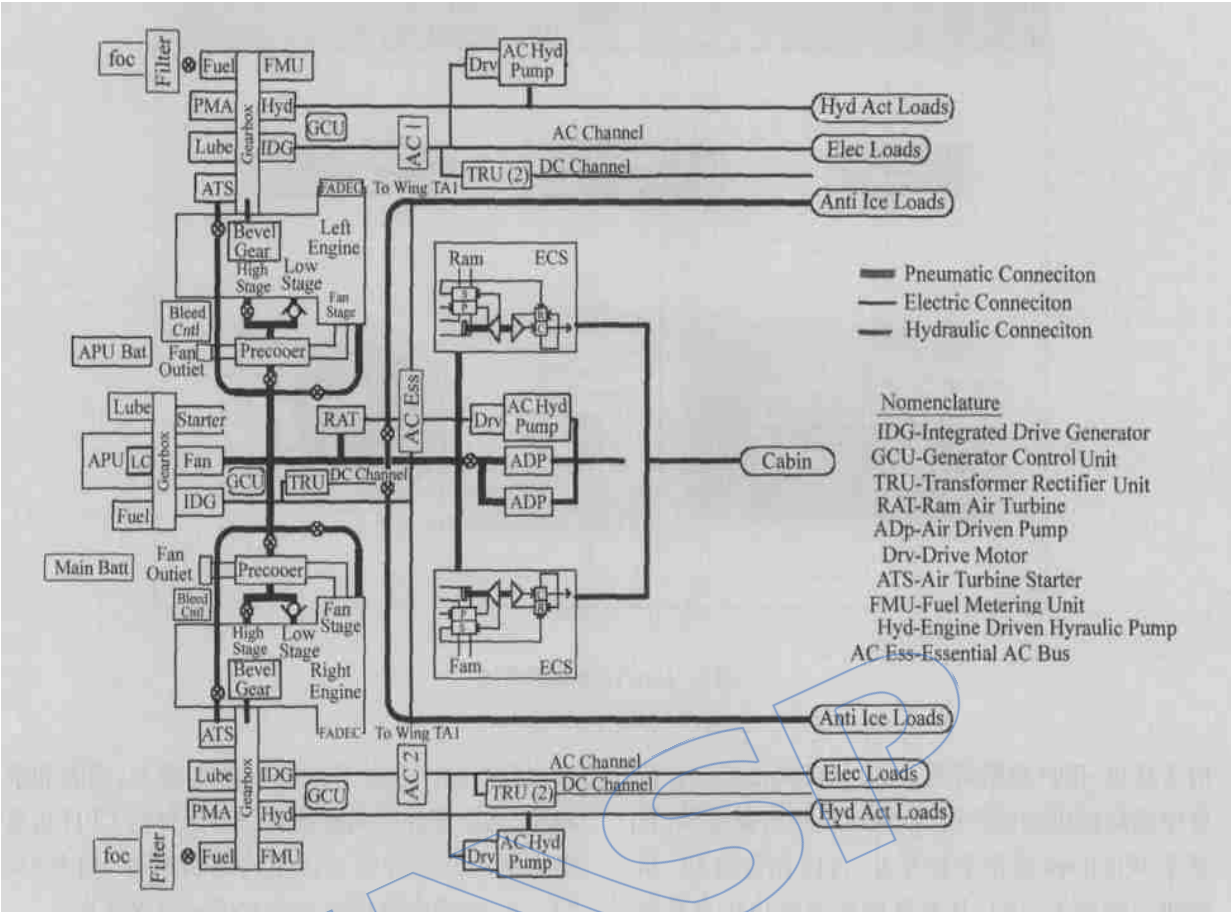


图 3 航空动力系统结构模块框图

Fig 3 Block Diagram of a Power System

或型号的发动机原型建立相应的仿真模型用于预测设计、制造以及故障诊断等整个生命周期。仿真时，从模型库中选取相应的部件模块按照一定物

理联接关系建立仿真模型，并通过图形化的用户界面输入相应的物理参数，如压气机特性图、部件几何尺寸和结构参数等。图 4 为所建立的单轴燃气轮机模型示意图。

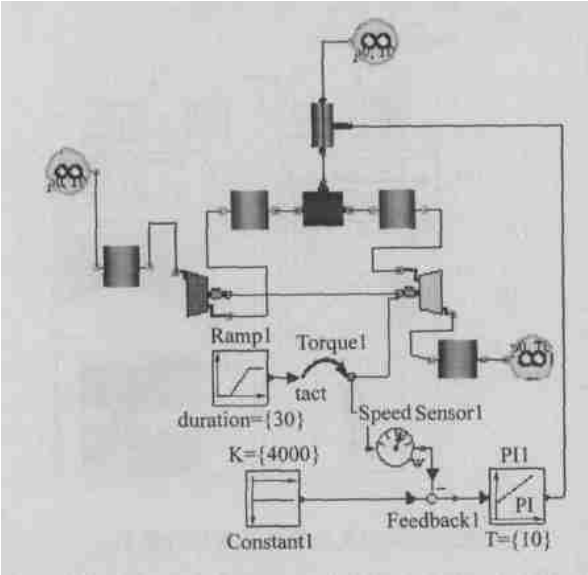


图 4 基于Dymola 的燃气轮机仿真模型

Fig 4 Gas Turbine Model of Dymola

1.1.3 基于 PC 机图形化用户界面的
发动机仿真系统

GSP 运行的平台是M S-W N D O W S。灵活的面向对象的架构可以允许其在W N D O W S 下用友好的用户即时拖、放界面对各种类型燃气轮机进行静态或动态仿真。在使用时用户选择与各物理原型对应的图形化模块，按一定物理关系连接组装成一个完整的 GSP 发动机模型如图 1。GSP 所建立的模型可以在 PC 机或工作站上进行仿真，满足一般工业要求的仿真精度。

Daimler Chrysler 中的M T U Aero Engines 部门开发的 GasTurb 系统(图 5)主要可以用来根据设计方案对发动机性能进行预测仿真和离线设计(off-design calculation)^[10]。它的主要特点是将发动机设计过程中所需要研究的内容分解成标准化

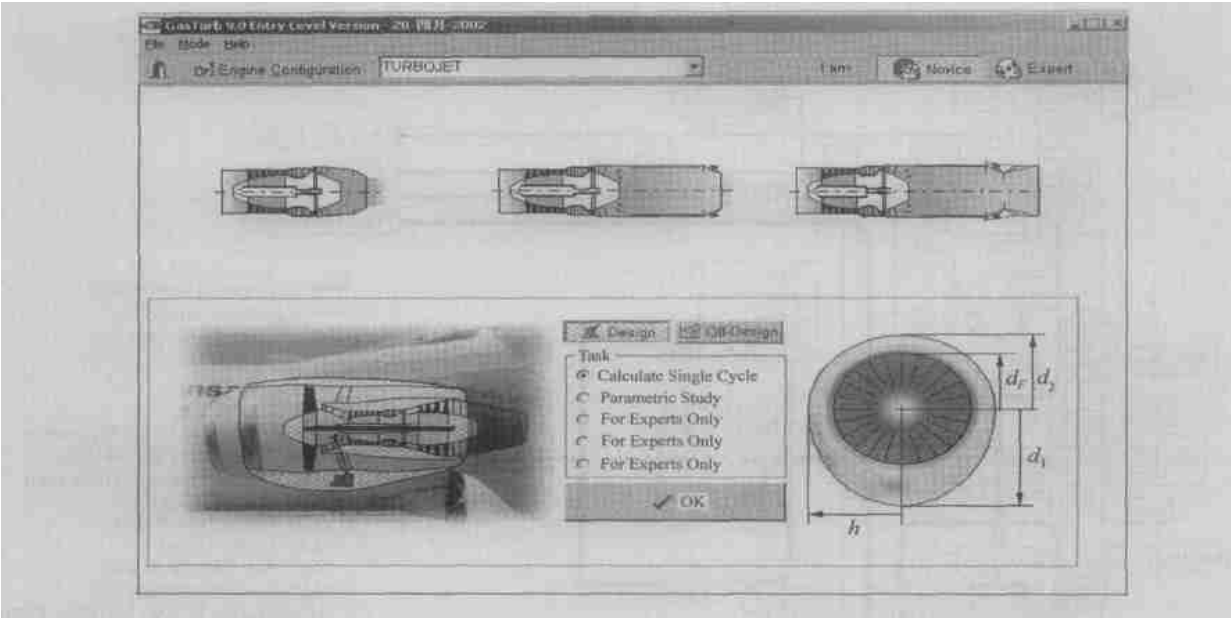


图 5 Gas Turb 仿真系统
Fig 5 Gas Turb System

的工具包。用户根据需要, 可以从模块化的设计任务中选取相应的设计模型, 快速得到所需结果。它基于 Windows 操作系统开发, 可以在普通 PC 系统或工作站上运行, 具有良好的图形化用户界面和方便的数据操作功能。

1.2 最新进展—Onyx 系统

随着计算技术和仿真实理论的进步, 在以上航空发动机仿真系统的基础上, 美国 Toledo 大学与 NASA Lewis 研究中心的推进系统数值仿真项目组正在合作开发一种新的面向对象的计算机仿真框架, 并初步建立了一套航空发动机分布式综合仿真系统—Onyx^[11]。该系统是基于 Java 的、面向对象的航空推进系统仿真软件。它集成了先进的数值方法, 能够在不同精度层次上对一个完整的发动机模型进行跨学科的分析。以风扇为例它主要在 4 个层次上对航空发动机进行仿真, 见图 6。

0 维模型: 部件对象的建模是通过空间平均代数方法和(或者)常微分方程、特性图和设计几何学来得到稳态和瞬态的工作特性。由流体动力学根据等熵关系和基线图来得到滞止压力、转速、效率和质量流量的关系。

1 维模型: 风扇内的流动视为一维模型, 该模型使用速度三角形来计算。用一个简单的梁的模型可以反映出结构的影响, 从这个梁的模型中可以得到叶片的位移和频率响应。

2 维模型: 二维流体模型是通过轴对称 CFD 模型描述的。全三维 Navier-Stokes 方程的边界条

件周向平均产生的作用在叶片上的力、损失和泄漏项, 是由部件的实验或者三维部件的 CFD 仿真得来的。结构分析是用结构分析软件, 如 NASTRAN, 来得到轴或轮盘的有限元网格模型。

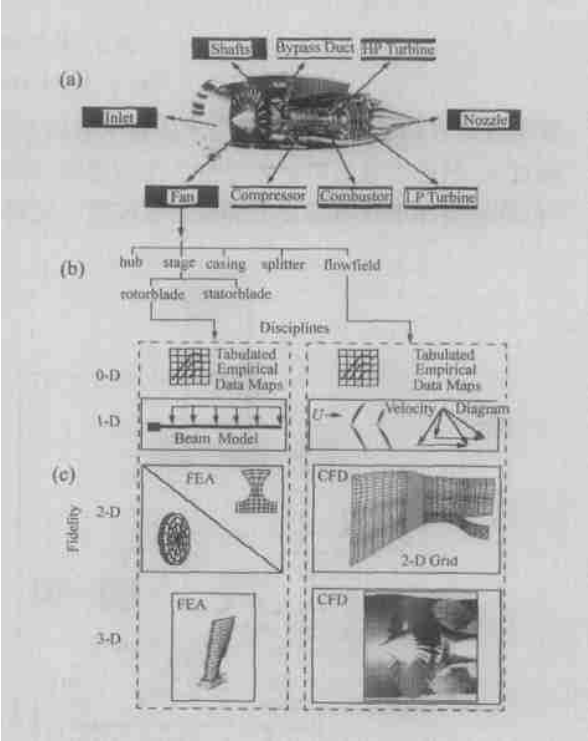


图 6 航空发动机仿真模块分解图
Fig 6 Structural and behavioral abstraction of gas turbine engine and its components
3 维模型: 三维流动分析通常是通过 Navier

- Stokes 方程求解代表单个叶片通道 (single blade passage) 的有限元体积单元来实现的。结构分析是对单个动叶模型进行分析, 用的方法是有限元法。

Onyx 的通用工程模型 CEM (Common Engineering Model) 是由模块化、层次化模型集成的。CEM 是构成发动机、部件、子部件和子组件的基础, 它的内部数据结构与 CFD 或 FEA 的几何外形的网格生成和可视化软件工具兼容。CEM 也同时提供一种可以连接不同系统和精度的数据的机制。

Onyx 仿真系统采用分布式仿真环境, 该环境是灵活的、用户化的、可扩展的和使用简单的^[12]。多学科模型和具有不同精度层次模型的引入是需要分布式计算的主要原因。它使用了一些广泛应用的软件分布机制, 如 CORBA 和 RM I。它能够用尽可能少的附加工作来支持新仿真技术和计算方法的集成。Onyx 提供了更方便的图形用户界面, 减少了开发新模型和执行仿真需要的工作量。

目前该系统还处于研发阶段。

1.3 我国研究现状

与国外相比, 我国虽然起点较低, 但也在这方面做了相当工作。我国的科研机构 and 高等院校在 20 世纪 80 年代初编制了一些发动机仿真程序^[13, 14]。文献[13]介绍了一种可对稳态设计点和非设计点性能进行计算的程序, 它适用于单轴、双轴和三轴简单热力循环、输出轴功的燃气轮机。程序中采用变比热算法, 使用了适应性较强的插值方法, 可用于部件特性突变的情况。

20 世纪 90 年代以来我国航空发动机仿真工作取得了更多成果。樊思齐等^[15]采用修正因子方法和神经网络建立自适应控制仿真模型, 根据测量数据校正部件特性参数, 从而提高了发动机仿真模型的精度。曾庆福、黄万伟等^[16~19]也在发动机仿真控制和仿真模型的自适应建模方面有比较突出的工作。黄知涛等在部件特性和发动机数学模型等方面^[20~24]有比较深入的研究。在实时仿真方面孙建国等^[25~29]则代表了我国的最高水平。此外, 606 所、624 所等已经建立了发动机二维的仿真模型。以上这些研究在发动机建模、数学模型的建立以及涡轮、压气机等发动机具体部件的仿真都相当深入, 有一些已经达到了先进国家的水平。但是, 我们同时注意到目前国内基于系统级的整机仿真研究开展的并不多, 更重要的是没有形成

比较成熟的通用化的仿真系统。

进入 90 年代后半期, 特别是上世纪末和本世纪初, 我国也开始在发动机系统级通用仿真方面取得进展。唐海龙等^[30, 31]提出了一种用于建立扩展性强、灵活可靠的航空发动机性能仿真方法。通过建立一个面向对象的航空发动机基本类库, 针对不同的研究目的或不同类型的航空发动机, 能够方便可靠地建立起高效专用的发动机性能仿真程序。在此基础上建的某双轴涡扇发动机和某涡轮轴发动机的性能仿真模型, 体现了该框架的灵活性。而且对模型中的数据通信模式进行了研究, 提出了端口字典和部件字典概念。部件间通过端口连接器实现数据同步, 连接器通过指向部件和关键字的指针获得端口地址, 然后操作。

谢志武^[32]提出了基于信息传递的面向对象的燃气轮机仿真模型思想。以此为基础建立了可扩展的燃气轮机仿真类属框架。在此基础上刘永文等^[33]应用 EASY5 软件建立了船用燃气轮机的模块化仿真库, 实验证明该模型库具有良好的可扩展性和实时仿真功能。

丛靖梅等采用框架灵活方便、具有可扩展性的 VC++ 建立了混排加力涡扇发动机的实时仿真模型, 可准确模拟发动机及其部件的工作状况。该模型的建模方法具有一定的通用性, 可适用于其它类型发动机的实时建模要求^[34]。

总体来看, 我国在航空发动机系统级建模的研究上与国外相比还有一些差距, 这主要表现在:

(1) 模型的通用性和可扩展性不强; 通常只针对某一具体型号或特定类型的发动机, 通用性不够, 仿真系统也不完善; (2) 较少采用面向对象技术和模块化、层次化建模方法, 因而所建立的仿真系统难以维护和改进; (3) 图形化建模较差, 用户界面不友好; 一般用户难以掌握。

2 发展展望

2.1 航空发动机仿真相关领域的发展

航空燃气轮机设计制造是极为复杂的, 它包含了众多工程领域: 空气动力学, 热力学, 传热学, 材料科学, 部件设计和结构分析等等。因此发动机的设计往往是非线性的和互相依赖的。在确定最终设计方案的过程中需要多次的反复。这就要求在建模仿真过程中对发动机全面考虑, 尽可能地建立完整、完善的模型。但过去由于计算条件和理论的限制, 不得不对发动机系统模型做大量简化并依赖于经验数据的选择。

以计算流体力学和计算结构力学为例, 20 世纪 80 年代, 计算流体力学在离散方法、网格生成和求解方法等各方面已基本成熟, 针对各种具体流动情况而发展起来的不同的湍流模型, 也为各种工程问题的解决起到越来越大的作用, 作为计算流体力学的重要组成部分的叶轮机数值模拟技术进入了全三维非定常粘性数值模拟阶段; 与此同时, 叶轮机计算结构力学(CSD)也保持同步发展。从总体上讲, 叶轮机CFD技术本身的发展始终超前于计算机硬件的发展。这在一定程度上限制了航空发动机系统仿真。

最近几年, 随计算机计算速度的进一步倍增, 特别是高速局域网技术的成熟和超级计算机的发展, 已经可以组建出非常经济的高效能的计算机群或超级计算机。基于计算机群和超级计算机的并行数值模拟技术、非结构化数值模拟技术和流/固耦合数值模拟技术, 以及大涡模拟(LES)在叶轮机内部复杂流动研究中的应用都有相当进展。现在的计算机速度比 1992 年增加了 300 倍, 使得基于全三维定常粘性的软件的数值模拟能够达到工程实用化的目的。美国NASA已把整机的全三维定常计算作为一个仿真重点。相比之下, 我们现在也已经拥有了实施该项目的软硬件条件^[35, 36]。

计算机硬件与软件的发展, 如并行工程、超级计算机、基于网络的分布式交互仿真、先期概念技术演示验证、虚拟现实、定性定量综合集成、发动机部件缩放和图形可视化等现代计算机理论和关键技术的飞速发展都为航空发动机系统仿真提供了必要条件^[37, 38]。航空发动机仿真其它相关领域如燃烧学、传热学、控制理论等等的巨大进步也为航空发动机系统级仿真发展奠定了基础。

NASA 的发动机数值推进系统仿真(NPSS, Numerical Propulsion System Simulation)的目标就是将上述发动机技术和高性能计算及信息技术结合起来, 对航空发动机进行全尺寸的详细仿真。NPSS 包含 3 个部分: 发动机的应用模型、仿真环境系统软件和高性能计算。据估计^[39], NPSS 一旦研制成功和运用, 将通过减少重复设计、实验和昂贵的硬件设施建设等为生产商节约 30% 到 40% 的研制时间和经费。无疑NPSS反映了当前发动机数值仿真的最高水平, 并代表了将来一个时期的发展趋势和方向。

2.2 航空发动机仿真框架设计

要明确未来航空发动机仿真的发展方向不仅需要相应技术发展的支持, 更需要了解潜在用户

对其的要求。

为此北约(NATO)的RTO机构对航空发动机仿真感兴趣的各组织进行了一次广泛的调查。调查的对象主要是: 发动机和飞机制造商, 科研学术机构, 飞行公司以及其技术支持公司和代表机构。调查结果表明用户对未来的航空发动机系统级仿真有如下要求^[40]:

- (1) 通用的仿真应用平台, 其中包括各种操作平台、语言以及输入输出接口等;
- (2) 仿真模型能满足不同应用领域的要求, 如结构分析、性能仿真等;
- (3) 发动机模型应该能与其它独立的子系统联结。因此就对模型的组件和子系统在细节上提出了不同的要求;
- (4) 不同层次模型之间和系统(仿真系统和操作系统)的界面接口;
- (5) 图形化的用户界面和可视化的仿真结果。

结合仿真理论的进步和用户要求, 美国NASA提出了对未来航空发动机仿真系统的规划蓝图。航空发动机系统仿真由三部分组成^[41, 42]: 工程模型、仿真环境和高性能计算。总体设计思想是: 应用面向对象软件设计的模块化结构; 建立与缩放模型相关的系统级的子系统和部件的集成, 在合适保真度水平上将各子系统和各部件综合在一起; 在此基础上将分布式、异构的计算机平台集成为可进行大规模并行计算的系统软件。见图 7。

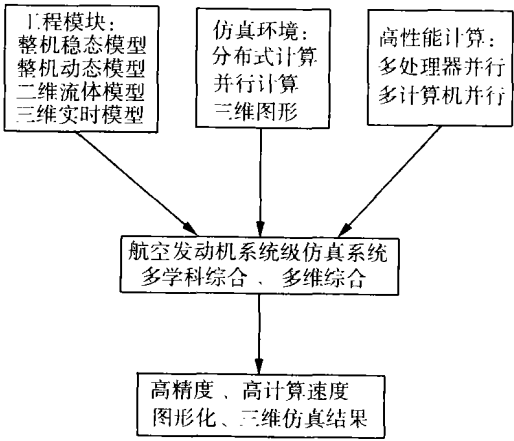


图 7 仿真系统框架

Fig 7 Framework of Gas Turbine Simulation system

2.2.1 工程模型

将部件模型集成, 实现大规模子系统和系统仿真; 通过多学科耦合研究来掌握各学科之间相互影响的关键问题; 具有可变复杂性分析的能力, 以适应不同设计问题对分析复杂性的要求。

对于发动机这个多学科仿真系统来说可以大体分为几个层次。(1) 发动机整体模型: 把发动机看作一个独立完整的系统, 是一个稳态热力学基本模型; 根据发动机结构和部件性能计算发动机系统性能和效率; (2) 发动机系统动态和控制模型: 该模型是一个一维热力基本模型, 并带有简化的结构元件, 控制其它学科数据。它利用部件性能、几何尺寸和动力学数据来计算发动机推力和重量, 以及系统瞬态特性; (3) 发动机系统空间和时间平均模型: 该模型是一个二维流体模型。使部件边界条件与整个系统边界条件相关; (4) 部件三维实时精确模型: 把所有零部件的全部物理过程进行全三维实时精确仿真。

2.2.2 仿真环境

目的是为用户提供一个大众化的界面, 适合各种技术水平的用户, 使用户可以修改程序、容易地补充分析工具以及可以从不同来源获得数据。保证在“预测设计”过程中, 设计者能充分利用自己的经验和发挥自己创造性的才能。

2.2.3 高性能计算

航空发动机仿真需要很强的计算能力, 如 FEA 和 CFD 分析需要每秒 10^{15} 浮点运算能力的计算机, 而目前单台计算机很难完成如此大量的计算。要解决这个问题必须通过发展工具软件和系统软件, 采用高性能计算机和并行分布式计算技术。

3 结束语

航空发动机系统仿真一直都受到世界各国的普遍重视, 但以往由于条件的限制, 使得仿真只能在确保设计最优的条件下, 尽可能的对发动机模型进行简化, 仿真结果往往不能令人十分满意。随着计算机硬件、网络技术和仿真理论的进步, 更详细、更准确的对发动机进行建模仿真已经成为可能。

CFD 和 FEA 等的发展使得对发动机内部工作状况和部件性能进行详细的研究成为可能, 而高性能计算机和分布式计算的发展, 以及网络技术的发展都为把发动机系统级模型与部件模型,

乃至元件级模型集成为一个整体研究和对发动机内部复杂过程的仿真分析提供了强有力的工具。虚拟现实技术、图形化、可视化技术的进步更是促进了航空发动机系统仿真的发展。因此把这些新兴技术应用到航空发动机仿真中, 提高仿真研究水平已经成为当今航空发动机系统仿真的一个总的趋势和研究热点。

这场航空发动机设计技术变革在为我国航空发动机的研制提出新挑战、带来新压力的同时, 也为我国实现航空发动机“跨越式”发展提供了契机。

参考文献

- [1] 刘大响 对加快发展我国航空动力的思考[J]. 航空动力学报, 2001, 16(1): 1- 7.
LU Da-xiang Effect of Tabs Fixed on a Convergent-Divergent Nozzle on Infrared Radiation of Exhausting Jet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2001, 16(1): 1- 7.
- [2] Bettocchi R, Spina P R, Fabbri F. Dynamic Modeling Of Single-Shaft Industrial Gas Turbine[R]. *ASME Paper 96- GT - 332*, 1996
- [3] Garrard G D, Davis M W, Jr, Hale A A. Recent Advances in Gas Turbine Engine Dynamic Models Developed Through JDA PS[R]. *ASME Paper 95- GT - 146*, 1995
- [4] Alan Metzger. Dynamic Simulation of the FT8-2TM Gas Turbine[R]. *ASME Paper 95- GT - 347*, 1995
- [5] Ralf Rudnik, Cord-Christian Rossow, Heiko Frhr V Geyr. Numerical Simulation of Engine/Airframe Integration for High-Bypass engines[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2002, (6): 31- 42
- [6] Schobeiri M T, Attia M, Lippke C. GETRAN: A Generic, Modularly Structured Computer Code for Simulation of Dynamic Behavior of Aero-and Power Generation Gas Turbine Engines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, July, 1994, 116(3): 255- 266
- [7] Visser W P J, Broomhead M J. A Generic Object-Oriented Gas Turbine Simulation Environment[R]. *ASME Turbo Expo 2000, Munich, Germany*, 8- 11 May 2000
- [8] Robert L Bayt Michael K. Sahm & Charles E. Lents. Collaborative Engineering in Integrated Aircraft Power System Design[R]. *ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Montreal, Canada*, September 29- October 2, 2002
- [9] Alejandro G ómez P éez. Modeling of a Gas Turbine with Modelica[D]. Lund, Sweden: Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, MASTER THESIS, 2001 May.
- [10] Peter Jeschke, Joachim Kurzke. Preliminary Gas Turbine Design Using the Multidisciplinary Design System MopedS[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, 124(3): 465- 479

- [11] John A Reed, Abdollah A Afjeh Computational Simulation of Gas Turbines PART I - Foundations of Component-Based Models[R]. *International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Indianapolis, Indiana*, June 7- 10, 1999
- [12] John A Reed, Abdollah A Afjeh Computational simulation of gas turbines PART II - Extensible Domain Framework [R]. *International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Indianapolis, Indiana*, June 7- 10, 1999
- [13] 张世铮, 遂根寿 燃气轮机设计点和非设计点性能计算方法和计算机程序[J]. *工程热物理学报*, 1983, 4(4): 234- 239
- [14] 童凯生 航空涡轮发动机性能变比热计算方法[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991
- [15] 段守付, 樊思齐, 卢燕 航空发动机自适应建模技术研究[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(4): 440- 442
- DUAN Shou-fu, FAN Si-qi, LU Yan Adaptive Modelling Technique for Aeroengine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(4): 440- 442
- [16] 谢光华, 曾庆福, 张燕东 航空发动机仿真模型参数自适应校正[J]. *航空动力学报*, 1998, 13(1): 37- 40
- XIE Guang-hua, ZENG Qing-fu, ZHANG Yan-dong Adaptive Rectification of Parameters in Aeroengine Simulation Model[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1998, 13(1): 37- 40
- [17] 黄万伟, 张加桢 用LQG/LTR方法设计航空发动机多变量控制器[J]. *航空动力学报*, 1995, 10(3): 301- 303
- HUANG Wan-wei, ZHANG Jia-zhen LQG/LTR Design Methodology for Multivariable Aeroengine Controller[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1995, 10(3): 301- 303
- [18] 陶涛, 阎文博 直接根据性能指标进行航空发动机LQG/LTR控制器设计[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(2): 195- 198
- TAO Tao, YAN Wen-bo Design of Aeroengine LQG/LTR Controller According to Performance Target[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(2): 195- 198
- [19] 郭迎清 航空发动机神经网络自适应控制研究[J]. *航空动力学报*, 2001, 16(1): 83- 86
- GUO Ying-qing A New Neural Network Adaptive Control Scheme Research[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2001, 16(1): 83- 86
- [20] 黄知涛, 胡正峰, 乔渭阳, 等 发动机压缩系统稳定工作边界的预测方法[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(1): 51- 54
- HUANG Zhi-tao, HU Zheng-feng, QIAO Wei-yang, et al Prediction of Stability Operating Limit in Aeroengines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2000, 15(1): 51- 54
- [21] 朱之丽, 李东 变几何涡扇发动机几何调节对性能的影响[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(1): 35- 38
- ZHU Zhi-li, LI Dong Influence of Geometric Variation on Performance of VGE [J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(1): 35- 38
- [22] 程涛, 祁英, 孟庆明 涡扇发动机主燃油控制系统建模与仿真研究[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(3): 317- 319
- CHEN Tao, QI Ying, MENG Qing-ming Modelling and Simulation of Main Fuel Control of Turbofan Engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(3): 317- 319
- [23] 赵子元, 姚华, 李维业 发动机简化数学模型及数字仿真研究[J]. *航空动力学报*, 1993, 8(2): 138- 142
- ZHAO Zi-yuan, YAO Hua, LI Wei-ye Simplified Mathematical Model and Digital Simulation of Aeroengine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1993, 8(2): 138- 142
- [24] 倪维斗, 刘少英 某型双轴航空发动机的混合实时仿真[J]. *航空动力学报*, 1992, 7(4): 381- 384
- NI Wei-dou, LIU Shao-ying A Minimum-Time Acceleration Control Strategy for a Two-Rotor Aeroengine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 1992, 7(4): 381- 384
- [25] 刘燕, 刘伟, 陈辅群, 等 双轴涡喷发动机性能实时模拟简化模型[J]. *航空动力学报*, 1994, 9(4): 357- 360
- LIU Yan, LIU Wei, CHEN Fu-qun, et al A Real-Time Simulation Model of a Twin-Spool Turbojet Engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1994, 9(4): 357- 360
- [26] 吕泽华, 赵士杭, 徐福生 SK15HE 燃气轮机实时仿真器的动态数模与仿真[J]. *热能动力工程*, 1994, 9(5): 261- 268
- [27] 张佰年, 翁史烈 三轴燃气轮机并行数字计算机实时仿真[J]. *热能动力工程*, 1994, 9(6): 356- 361
- [28] 杨蔚华, 孙健国 用于飞行模拟器的发动机闭环实时模型的研究[J]. *航空学报*, 1996, 17(2): 222- 226
- [29] 冯正平, 孙健国, 黄金泉, 等 一种建立航空发动机状态变量模型的新方法[J]. *航空动力学报*, 1998, 13(4): 435- 438
- FENG Zheng-ping, SUN Jian-guo, HUANG Jin-quan, et al A New Method for Establishing a State Variable Model of Aeroengine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1998, 13(4): 435- 438
- [30] 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 Hai-long, ZHANG Jing A Study of Object-Oriented Approach for Aeroengine Performance Simulation[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(4): 421- 424
- [31] 唐海龙, 张津 数据通信模式及其在面向对象的航空发动机性能仿真系统中的应用[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(3): 298- 302
- TANG Hai-long, ZHANG Jing Data Communication Model and Its Application in Object-Oriented Aeroengine Simulation System [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2000, 15(3): 298- 302
- [32] 谢志武 面向对象的燃气轮机仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1998
- [33] 刘永文 模块化建模和半物理仿真研究及其在舰船动力装置中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2002
- [34] 丛靖梅, 唐海龙, 张津 面向对象的双轴混排加力涡扇发动机详细非线性实时仿真模型研究[J]. *航空动力学报*, 2002, 17(1): 65- 68
- CONG Jing-mei, TANG Hai-long, ZHANG Jing A Study of Object-Oriented Detailed Nonlinear Real-Time Performance

Simulation for a Mixed-Flow Two-Spool Turbofan Engine with Afterburner[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(1): 65- 68

[35] 陈懋章. 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[A]. 21 世纪航空动力发展研讨会[C]. 北京: 中国航空动力专业分会, 2000: 74- 87.

[36] 周燕佩, 徐力平. 计算流体动力学在航空叶轮机械中的应用——现状和展望[A]. 21 世纪航空动力发展研讨会[C]. 北京: 中国航空动力专业分会, 2000: 100- 104

[37] Lawrence C. An Overview of Three Approaches to Multidisciplinary Aeropropulsion Simulations[R]. *NASA TM - 107443*, 1997.

[38] John Lytle, Greg Follen, Cynthia Naiman, et al. Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) [R]. *NASA TM - 2000- 209795*.

[39] John K Lytle. The Numerical Propulsion System Simulation: An Overview [R]. *NASA TM - 2000- 209915*.

[40] RTOAVT- 018. Performance Prediction and Simulation of Gas Turbine Engine Operation[R]. *Canada: St Joseph Ottawa/Hull*, 2002.

[41] 张健, 詹孟萱. 开展航空发动机数值仿真研究的探讨[J]. *航空科学技术*, 2001, 1: 23- 27.

[42] 刘大响, 程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. *北京航空航天大学学报*, 2002, 28(5): 490- 496