

文章编号: 1000-8055(2002) 04-0483-06

航空发动机数值仿真试验台建立中 几个关键技术问题的讨论

冯国泰, 黄家骅, 王松涛

(哈尔滨工业大学 发动机气动研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 本文主要讨论航空发动机数值仿真试验台建立中几个关键技术问题: 发动机数值仿真试验台建立的目标与基本要求; 发动机三维多功能数值仿真数学模型、精度可靠性与并行算法; 部件与发动机数值仿真试验台集成软件包; 发动机仿真软件平台的框架; 发动机三维数值仿真硬件系统。只有系统解决上述六个问题才能顺利建立这一仿真试验台。

关键词: 涡轮发动机; 数值仿真; 数学模型

中图分类号: V 23 **文献标识码:** A

Discussion on Key Technical Problems in Developing Numerical Simulation Test-Bed for Aeroengine

FENG Guo-tai, HUANG Jia-hua, WANG Shong-tao

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In this paper some key technical problems about developing numerical simulation test-bed for aeroengine are discussed, including: aim and elementary object, three-dimensional multi-field coupling model as well as its validation and parallel arithmetic, integrate software package, generic framework of simulation test-bed and simulation environment, and all these should be prepared before numerical simulation test-bed could be established.

Key words: gas turbine engine/turbo; numerical simulation; mathematical model

1 前言

发动机数值仿真作为航空发动机核心技术, 是低成本、短周期研制先进水平航空发动机重要环节和手段。我国航空发动机与国外比, 差距大约在20~30年左右, 国外喷气发动机已经发展到第四代, 我们仅有少量第三代发动机。在新的世纪, 发达国家还要大力发展航空发动机, 其中, 推重比要达到15~20, 油耗要下降30~40%, 涡轮前温度要提高到2200 K 以上, 压比要提高到36~45左

右^[1]。

高成本与高投入是高性能发动机研制的特点, 美国 IHPTET 计划15年总投入五十亿美元。我们在二十年中的预研总投资还不及美国一年投资的几分之一。要发展我国的航空事业, 不能全靠在投资上与发达国家比高低, 我们应在发动机的关键技术与研制手段上集中力量赶上发达国家, 而建立三维多功能多系统发动机数值仿真试验台正是关键措施之一。我们知道航空发动机的研制费用主要是试验设备投入与实验费用, 随着发动

机性能的不不断提高这一投入急剧增加。为了解决这一问题,国外正在开发大型的发动机数值模拟试验台^[1~9]。俄罗斯的 ЦИАМ 与美国的 Lewis 研究中心在这方面进行了大量的工作。ЦИАМ 研究工作与美国 NASA 研究表明,发动机数值仿真可减少研制经费与减少了研制周期三分之一以上。在 21 世纪初,我们应抓住这一关键技术措施,全面开展这一工作,有可能在比较短的时间内,建立工程上可用的,有我们自己特点的发动机数值仿真试验台,解决我国在航空发动研制中投资不足的困难。

航空发动机的数值仿真技术有四种:零维、一维、准三维和三维。零维仿真主要应用功率平衡,流量平衡与部件特性等求解发动机特性或起动加速特性。各国各大公司现主要仿真的手段是仍然是这种方法。我国也有这种计算方法和相应的计算程序,但由于缺少试验校对与标定,计算的精度不可避免地差一些。对于一维与准三维的发动机数值仿真,是通过一维、准三维方程,损失模型、落后角模型和一些经验系数来进行计算的。一维与准三维的发动机数值仿真,从掌握资料来看主要是俄罗斯 ЦИАМ 编制的有关计算程序,并进行了仿真计算,我国引进了这一准三维的计算程序,但程序还不成熟。俄罗斯与美国等研究部门正在研制整个发动机的三维数值仿真计算程序^[9]。

所谓三维多功能数值仿真试验台是指可直接对发动机从进口到出口的三维流场进行全流场模拟,对旋转部件特别是热端部件可以进行温度场与应力场的模拟,可以与控制系统数值仿真相结合进行发动机起动,加速与运行的仿真。这种综合多功能仿真的进一步发展应是发动机各辅助系统的仿真。这种数值仿真试验台可以充分了解发动机总体参数与部件之间的关系,准确描述各部件之间的关联与影响,分析压气机出口流场对燃烧不稳定的影响,分析燃烧室出口温度不均匀对涡轮可靠性的影响,同时可对多场进行耦合分析等等。再有不同部件,不同部件不同的级可做为不同对象。不同对象可用不同的维数,不同的物理分析程序,这样灵活的模块式组合可在不同条件下应用最快的速度最少的时间研究不同的问题,这样的综合多功能数值仿真试验台将对发动机设计方法将产生重大的影响,会使发动机设计、试验与运行逐渐走向一体化。对我国发动机试验台不足、研制经费较紧的国情来说,这种综合多功能仿真试验台的建立是非常必要的。

2 发动机数值仿真试验台建立的目标与基本要求

数值仿真试验台与一般数值计算软件是有区别的,前者目标界定清楚而后者通用性强,一般数值计算软件仅是数值仿真试验台的软件平台,另外前者有可靠性与精度的明确要求,而后者仅能达到定性或一定定量的分析,只有类同问题大量计算并与实验数据进行对比与标定后才能达到仿真的水平。下面对发动机数值仿真试验台建立的目标进行一定的讨论。

发动机数值仿真试验台建立的总目标与要求应是:建立有数据库支持的,通过实验标定的,达到工程实用化程度的先进的、可靠的、智能化、多功能的发动机零维、一维、准三维与三维发动机部件与整机数值仿真系统。

三维多功能多系统数值仿真试验的主要作用是:新一代部件、发动机与子系统综合设计平台;设计预测模拟平台;试验预测平台;故障监测与预估平台;学习与训练平台;远程监测与控制平台。发动机子系统包括:燃油系统、润滑系统与冷气系统等的数值仿真。

多功能是发动机数值试验平台另一种重要作用,多功能是指:流场、温度场、应力场与多场耦合的数值仿真。为了提高推重比,减少油耗和提高地面燃机的热效率,就得提高涡轮前的温度。我们知道航空发动机涡轮前的温度提高到 1800~2000 K,涡轮冷气量就要提高到 20% 左右,如果提高到 2200 K 以上冷气量还要大,这样就有一个在大冷气量时如何保持涡轮效率在一个比较高水平的关键问题,这也是目前国内外很多学者对涡轮内考虑冷气掺混的多组份流场结构研究非常重视的原因。另外在高温条件下,叶片、叶轮与机匣的温度场、热应力场与多组份流场是耦合在一起的,因此就提出了求解气、热、弹耦合动力学问题。只有解决了这个问题,才能使仿真真正对现代燃气轮机技术发展有重要的推动作用。

3 发动机三维多功能数值仿真数学模型、精度可靠性与并行算法

对于涡轮发动机由于流场、温度场、应力场等多场同时存在,要真正进行发动机仿真必须考虑多种场的耦合计算,必须考虑各种场内的复杂物理过程。如涡轮内要考虑有冷气掺混的流场,要考

虑热辐射问题, 在燃烧室内还要考虑燃烧、扩散、多相流。发动机的三维气、热、弹多场耦合动力学积分方程组可写为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dV + \oint \rho(\vec{w} - \vec{w}_s) \cdot d\vec{S} = \iiint \dot{m} c dV \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho \vec{w} dV + \oint \rho \vec{w}(\vec{w} - \vec{w}_s) \cdot d\vec{S} + \\ \iiint (2\rho \vec{\omega} \times \vec{w} - \omega^2 \vec{r}) dV = \\ \oint (-IP + \Pi) \cdot d\vec{S} + \\ \iiint \dot{m} c \vec{V}_c dV + \iiint \vec{f}_m dV \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho e dV + \oint \rho e(\vec{w} - \vec{w}_s) \cdot d\vec{S} = \\ \oint q d\vec{S} + \oint \vec{w} \cdot (\Pi' - IP) \cdot d\vec{S} + \\ \iiint \rho Q dV + \iiint \dot{m} c i_c^* dV + \\ \iiint \rho h dV + \iiint \vec{f}_m \cdot \vec{w} dV \end{aligned} \quad (3)$$

其中: h 为内部单位质量热源(如化学反应热); q 为单位表面热流; Q 为单位质量热辐射及其它换热; $\dot{m} c$ 为质量源(密流); $\vec{V}_c$ 为质量源速度; i_c^* 质量源焓值; Π 为粘性应力张量; $\vec{w}_s$ 为控制体运动速度; $\vec{f}_m$ 为单位质量的质量力。更详细的请参阅文献[10~12]。

数值仿真提高三维仿真精度是十分困难的又必须解决的。对真实的试验台要研究试验误差, 对数值仿真也要确定其计算误差。一般数值仿真误差主要是物理模型简化, 网格畸变引起的误差, 以及建立离散求解系统的截断误差与计算中的舍入误差。在多场耦合计算中我们采用的是三阶 TVD 格式, 但由于分区计算, 在不同的交界面上, 如粗网格区与细网格区的交界面, 叶列之间的混合面, 叶片与叶片之间通道的周期边界, 叶片的气固交界面, 特别是这些交界面带有强间断的条件下, 通量传递或差分格式精度一般都会出现下降现象。这些问题不解决, 数值仿真的误差就会比较大, 如叶片数值仿真的粘性损失计算误差会达到10%以上。对于发动机数值仿真, 大量是针对非设计工况。在非设计工况, 部件中的分离流动, 压气机的失速与喘振, 燃烧室的不稳定燃烧等问题均会出现。从现在计算水平看, 在单叶片通道内, 三维非定常流的平均 N-S 数学模型与其相适应的各种

湍流模型很难能将上述问题模拟准确。另外, 叶片壁面掺混层冷气与燃气互扩散效应被忽略, 在冷气掺混条件下温度与速度关联模型研究的困难, 这些都会使数值仿真产生物理模型简化的误差。因此在数值仿真中就要通过与试验比较, 对数值仿真进行必要的标定。在标定时应使数值仿真具有学习与自我标定能力, 即有智能特点。发动机数值仿真只有在标定范围内, 其仿真结果才准确可靠。

由于计算对象越来越复杂, 计算网格点越来越多, 对于包含各种物理与化学过程的多场、多场耦合问题, 计算量将更大。为了适应大规模的计算, 并行计算机已经有了很大的发展, 大大提高了计算机的运算速度, 但并行计算机的性能要真正的得到应用必须有高效的并行算法给予支持, 因此在数值仿真试验台的建立中必须研究高效的大规模并行计算方法。

4 部件与发动机数值仿真试验台集成软件包

在部件与发动机数值仿真系统中要有完成一系列仿真的专业与商用计算软件。这些软件包括:

- (1) 压气机仿真软件: 一维计算程序(包括特性计算), 准三维计算程序(包括特性计算)。
- (2) 叶片成型与通道几何的成型程序, 三维定常全粘计算程序(包括特性计算), 三维非定常粘性程序(包括特性计算)。
- (3) 燃烧室仿真软件: 一维计算程序(包括变工况), 三维定常与非定常流包括燃烧与传热计算程序(包括变工况)。
- (4) 涡轮仿真软件: 一维计算程序(包括特性计算程序), 准三维计算程序(包括特性计算程序), 叶片成型与通道几何成型程序, 三维定常与非定常粘性流计算程序(包括特性计算)。
- (5) 气、热耦合叶片内外通道计算程序。
- (6) 喷管仿真软件: 一维计算程序(包括特性计算程序), 三维定常与非定常计算程序(包括特性计算程序)。
- (7) 发动机总体仿真软件: 发动机热力分析计算程序, 发动机零维特性计算程序, 起动加速计算程序, 发动机准三维计算程序, 发动机全三维定常与非定常计算程序, 多场耦合分析计算程序。
- (8) 发动机调节数值仿真软件。
- (9) 发动机可靠性与调节故障诊断系统软件。

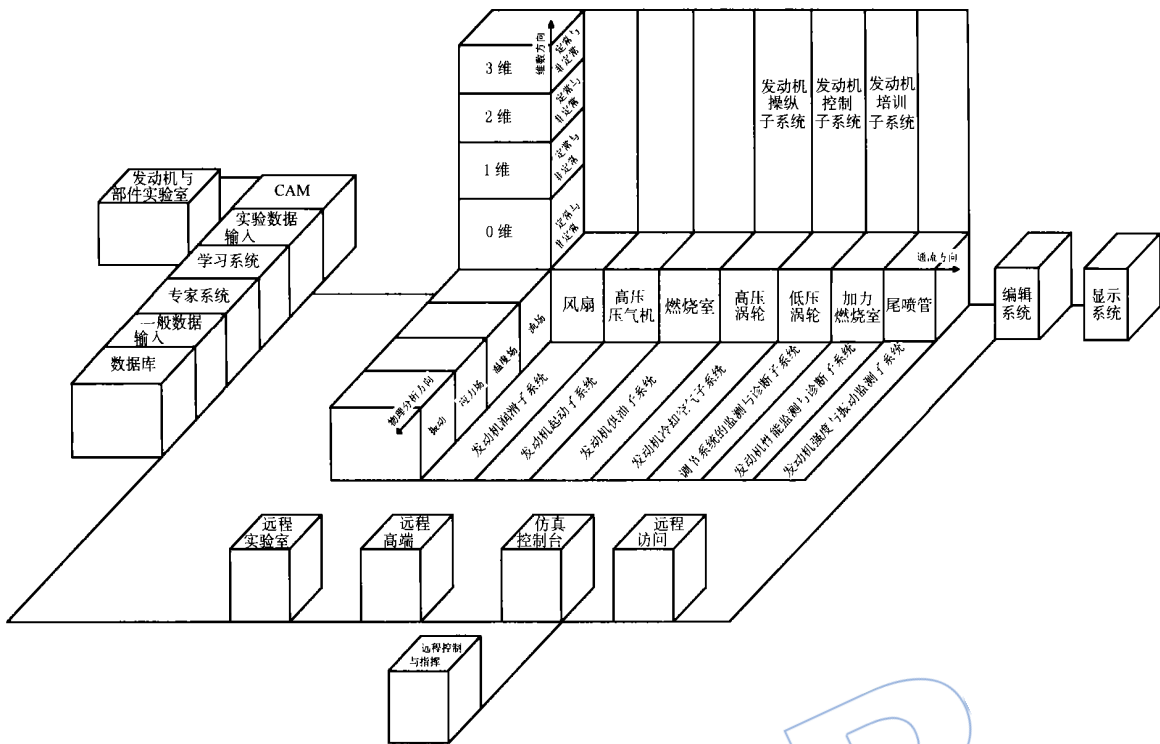


图1 发动机仿真软件平台的框架

Fig. 1 Framework of numerical simulation test-bed for aeroengine

- (10) 发动机温度振动计算通用计算软件: ANSYS, NASTRAN 等。
- (11) 发动机流场计算通用计算软件: FLU-ENT, TASCflow, STAR-CD, NUMECA 等等。
- (12) 发动机故障诊断系统软件。
- (13) 发动机冷却系统计算软件。
- (14) 发动机润滑系统计算软件。
- (15) 发动机油路系统计算软件。
- (16) 各种几何与空间成形通用软件。
- (17) 各种后处理通用软件。

5 发动机仿真软件平台的三向构成框架与建立的准则

综合多功能甚至多系统的发动机数值仿真试验台的建立是一个很大的软件工程。需要进行很多复杂的工作。在目前, 为了这一工作能顺利发展, 应给出软件平台框架(见图1)。

这一软件平台的构思与组成有如下特点。

三向构成 一个方向为维数, 从零维到三维, 每一维中均有定常与非定常之分。另一个方向为流向与对象, 从发动机进口到尾喷管。第三个方向是不同性质的场与不同的物理求解问题, 包括流动分析、温度场与热应力分析等。

多子系统仿真: 油路、润滑、冷却与各种监测系统为子系统。这些子系统与主系统关系也是十分密切的相互影响的, 在一些条件下会成为发动机的主要问题。因此在建立发动机数值试验台时也应把这些子系统包括在内。

闭环仿真: 对于发动机仿真必须考虑调节系统与本体之间的相互关系。如果在一台发动机数值仿真中没有调节系统的参与就好像少了大脑与神经系统。虽然零维闭环仿真已有不少工作, 但准三维与全三维闭环仿真还没有见到报导, 它是非线性很强的仿真系统, 其稳定性、收敛性与仿真效率都是要研究的问题。

此外, 在这一软件框架中还包括仿真的标定与自学习、软件的控制、数值仿真的前后处理等。作为多功能多系统的发动机数值仿真试验台的软件工程, 在建立中必需遵循软件不断更新与发展的规律, 真正按软件工程设计准则建立数值仿真试验台。使这一软件平台准确可靠, 功能全, 使用方便灵活, 应用周期长。

6 发动机三维数值仿真硬件系统

图2是发动机三维数值仿真硬件系统的示意图。在硬件系统中应包括如下几个部分:

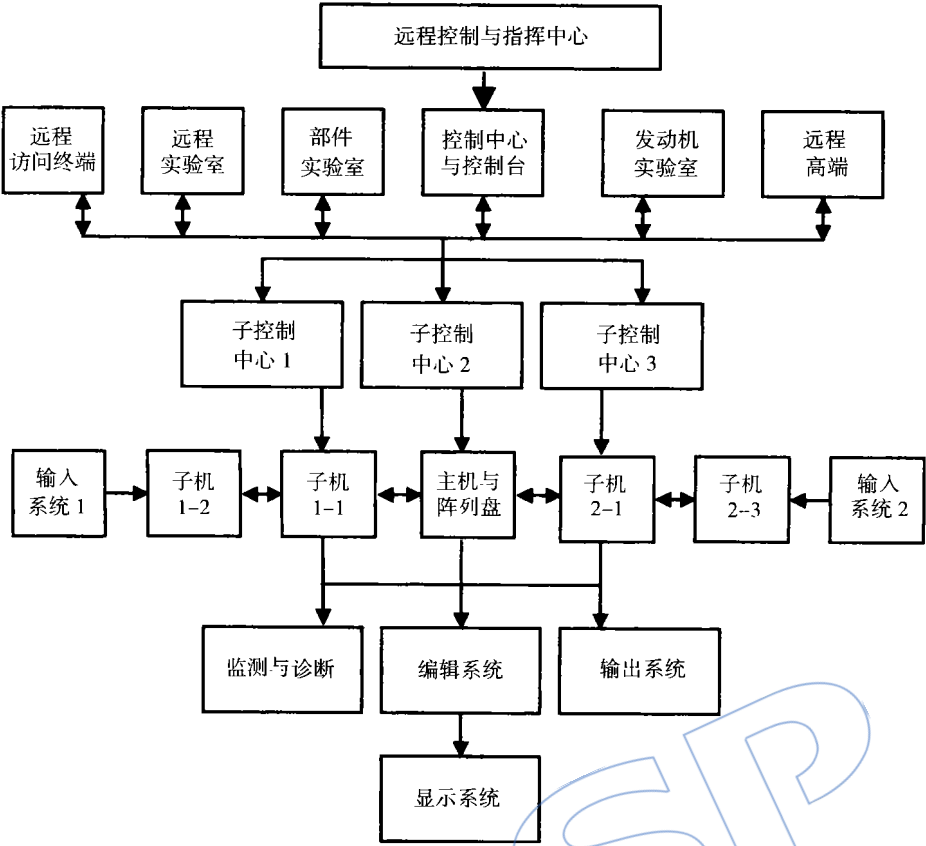


图2 数值仿真平台硬件环境

Fig. 2 Hardware environment of numerical simulation test-bed

主机: 主机应是大型并行计算机, 一般要有每秒几百亿次、几千亿次的计算能力。如果没有大型并行机很难进行发动机的三维仿真, 另外在硬件建设时要考虑应用国内网络高端计算机的运算能力。

子机: 主要进行部件、子系统及不同物理问题的仿真。由于应用国外商用软件, 计算量大, 一些子机的配置也应是比较高的。

控制台: 对发动机数值仿真台也应有控制台, 这种控制台可用界面也可用硬件控制台, 这种硬件控制台应与试验控制平台类同, 这种控制平台使仿真更真实化并可用来进行实验培训。子控制台的作用主要针对部件的仿真。

网络: 仿真发动机三维数值硬件系统主要由网络支持, 由于计算机间数据交换量大, 网络应是宽带的。

输入输出与显示系统: 仿真发动机三维数值仿真对这三个硬件子系统的要也是很高的。输入系统应与实验室相联, 应能对实验数据进行整理并输入仿真系统, 在输出系统中应包括编辑器、多种多层次的显示装置。还要包括仿真检测。

7 结 论

本文主要讨论航空发动机数值仿真试验台建立中几个关键问题:

- (1) 建立数值仿真平台的紧迫性、必要性与重要性。
- (2) 发动机数值仿真试验台建立的总目标与要求应是: 建立有数据库支持的, 通过实验标定的, 达到工程实用化程度的先进的、可靠的、智能化、多功能的发动机零维、一维、准三维与三维发动机部件与整机数值仿真系统。
- (3) 发动机三维多功能数值仿真数学模型、精度、可靠性与并行算法的研究是建立三维多功能数值仿真试验台关键的物理与数学问题。
- (4) 在部件与发动机数值仿真系统中要有完整的一系列仿真的专业软件, 还要有很多商用计算软件, 这些软件组成了部件与发动机数值仿真的集成软件包, 这是仿真的基础。
- (5) 给出发动机仿真软件平台的框架, 这一框架给出了软件总体构成, 给出了不同问题的三向组合方式, 给出了控制、仿真与输入输出之间的

关系,给出了各种子系统的仿真框架。

(6) 给出了发动机三维数值仿真硬件系统及其构成。

参考文献:

[1] Wright D, Babrauckas T. Affordable High Performance Computing (AHPC) Project [A]. Computational Aerosciences Workshop: 1996 Conference Proceedings [C]. NASA CP-20011, 1996: 123- 128 (available from the Glenn Research Center Computing and Interdisciplinary Systems Office).

[2] Ivanov I J, et al. Mathematical Models of Gas Turbine Engines and Their Components[R]. AGARD- LS- 198.

[3] Calvert W J, Stapletor A W, Fmmerson, et al. Evaluation of a 3D Viscous Code for Turbomachinery Flows[R]. ASME Paper 97- GT- 78.

[4] Kin S M, yang S S, Lee D S. Performance Evaluation of a Thrust Reverser Using an Euler Solver[R]. ISABE Paper No:99- 7258.

[5] Evans A L, et al. An Integrated Computing and Interdisciplinary Systems Approach to Aeropropulsion Simulation[R]. ASME 97-GT-303, 1997.

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

[7] Rifai S M, et al. The Role of Multiphysics Simulation in Multidisciplinary Analysis[R]. AIAA, 1998: 98- 4863.

[8] Hall E J, et al. Energy Efficient Engine Low Pressure Subsystem Aerodynamic Analysis[R]. AIAA, 1998: 98- 3119.

[9] John Lytle, Greg Follen, Cynthia Naiman, et al. Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) [R]. 1999, NASA/ TM- 2000- 209795.

[10] 冯国泰, 黄家骅, 李海滨, 等. 涡轮发动机三维多场耦合数值仿真试验台的数学模型研究[A]. 中国工程热物理学会, 热机气动热力学学术会议[C]. 编号: 20002073.

[11] 冯国泰, 黄家骅, 顾中华, 等. 发动机热流场数值仿真体系建立的研究[A]. 中国工程热物理学会, 热机气动热力学会议文集[C]. 982053.

[12] 施发树, 刘兴州, 冯国泰. 应用统一数学模型的发动机数值仿真试验台建立与初步仿真计算[A]. 中国工程热物理学会, 热机气动热力学会议文集[C]. 982054.

(责任编辑 王震华)