

数值仿真技术在航空动力研制中的地位和作用

刘大响, 金捷, 刘邓欢

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对先进航空发动机的技术发展需求, 提出了航空发动机数值仿真技术的定义和内涵。从专业、学科、空间、时间、工具等方面给出了航空发动机数值仿真技术的五个维度, 从促进航空发动机研制模式转变等方面分析了其战略地位和作用。通过国外典型研究计划和实例分析了国内外发展现状, 指出了我国在该技术领域的主要差距。提出要充分认识数值仿真技术在航空发动机研制中的重要地位和作用, 尽快建设和发展属于我国自己的航空发动机数值仿真系统, 建设面向全行业的“航空发动机数据库”。

关 键 词: 航空发动机; 数值仿真技术维度; 技术发展需求; 发动机仿真系统; 航空发动机数值仿真研究中心
中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Position and function of numerical simulation technology in aero-engine development

LIU Daxiang, JIN Jie, LIU Denghuan

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The definition and implication of numerical simulation technology were proposed based on the technical development requirements of advanced aero-engines development. The dimensions of aero-engine numerical simulation technology were studied from specialty, discipline, space, time and tools, while the strategic position and function in promoting the transformation of aero-engine development method were analyzed. The disparity of numerical technology for aero-engine at home and abroad was discussed by analyzing the development status of typical foreign research plans and projects. It is proposed to fully understand the important position and function of numerical simulation technology in the aero-engine development, and to build and develop our own aero-engine numerical system and industry-wide “aero-engine database” as soon as possible.

Keywords: aero-engine; dimensions of numerical simulation technology;
technical development requirement; aero-engine numerical system;
aero-engine simulation research center

1 数值仿真技术的内涵和需求

1.1 数值仿真技术的内涵

航空发动机数值仿真技术是指按照先进军民航空发动机研制的需求, 以先进航空发动机整机、飞/发一体化复杂系统和流-固-热多学科综合数值仿真为特点, 以开发具有自主知识产权的仿真系统 and 专业仿真软件为重点, 结合商用仿真软

件的应用校核和二次开发升级, 以整机复杂系统的全流程、全构件、全参数精细准确校核验证为基础, 依托高性能计算和虚拟现实等先进信息化技术, 由仿真软硬件支撑环境(包括高性能计算和虚拟现实系统)、航空发动机数值仿真系统、仿真综合验证试验平台等部分组成的先进航空发动机数值仿真与验证支撑技术体系。总之, 航空发动

收稿日期: 2022-03-03

作者简介: 刘大响(1937—), 男, 教授、博士生导师、中国工程院院士, 主要从事航空发动机设计和研究工作。

通信作者: 刘邓欢(1988—), 男, 博士, 主要从事航空发动机燃烧室数值仿真工作。E-mail: dean8174@126.com

引用格式: 刘大响, 金捷, 刘邓欢. 数值仿真技术在航空动力研制中的地位和作用[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2017-2024. LIU Daxiang, JIN Jie, LIU Denghuan. Position and function of numerical simulation technology in aero-engine development[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2017-2024.

机数值仿真技术的核心就是利用先进计算机技术,基于多学科耦合对航空发动机整机或部件进行高精度高效率的数值模拟计算。

航空发动机数值仿真技术是计算流体力学、计算结构力学、虚拟现实、人工智能、大数据等最新科学研究和计算机信息技术在航空发动机上的综合应用^[1]。在现代先进航空发动机的研制全过程中,计算机仿真模拟、理论计算分析和实物试验验证,已发展成为三种不同的重要设计手段和工具,三者紧密相联,互为补充,缺一不可,并贯彻于发动机设计、研制、使用、故检、维修和退役的全寿命周期之中。

1.2 数值仿真技术的需求

1.2.1 促进航空发动机研制从过去的完全依赖实物试验向与虚拟试验并重的方向转变

1) 方案论证阶段: 整机仿真技术, 已经成为开展发动机方案筛选和优化的主要手段之一。

2) 工程研制阶段: 与实物试验数据相结合的零部件/系统性能仿真、多学科耦合仿真, 以及整机总体性能/结构匹配/方案优化仿真, 是完善设计、实现技术指标优化的主要方法。

3) 全寿命周期: 对于某些难以进行或不可能进行的实物试验, 或者现有试验设备参数无法达到的试验, 以及难以复现的故障^[2]或特殊工作状态, 采用以仿真为基础的虚拟试验, 也可以说是唯一可行的研究手段和方法。

1.2.2 实物试验与虚拟试验有机结合, 互为补充, 不断提高研发水平

1) 在许多实物试验中, 测点数量少、某些部位测不到、流线和分离看不到、动态变化分析不清等问题, 在仿真虚拟试验中可以得到必要的弥补^[3]。

2) 虚拟试验再好, 但它也不能完全代替实物试验, 特别是结构强度^[4]、安全性^[5]、可靠性^[6]和寿命^[7]等, 必须要通过实物试验考核, 所以两者具有很强的互补性。

3) 航空发动机系统构成十分复杂, 内部流-固-热多学科高度耦合^[8], 在湍流流动、两相燃烧、材料疲劳等机理尚未吃透情况下, 无法实现有效的建模和仿真。

4) 实物试验可以为虚拟试验模型的确认提供必要的大量数据和信息^[9], 还可以发现虚拟试验中不能涵盖的机理问题。

5) 通过将实物试验与虚拟试验有机地结合, 实现虚实互补、相互借鉴, 螺旋式提升, 可以不断提高航空发动机的整体研制水平, 更快更好地实现研制目标。

1.2.3 为建立航空发动机自主研发体系, 要求仿真技术向全过程、全寿命周期覆盖

航空发动机研制是一项高度复杂的大系统工程, 从管理科学角度而言, 就包括项目管理和技术管理两大过程, 而其中项目管理过程又包括集成管理、计划管理、资源管理、沟通管理、质量管理、风险管理等; 技术管理过程又包括技术规划、技术控制、技术评估、技术决策等。从项目研制流程来看, 以自主研发为基础的正向研制流程包括方案论证、设计计算、工装/制造/装配、试验/试飞验证、使用维护保障等。从设计角度而言, 又包括需求分解与定义、集成与验证等各阶段反复的验证和确认过程, 即所谓双“V”构架(如图 1)。这其中仿真技术始终贯穿研制的各个阶段和流程, 已经成为航空发动机自主研发全过程、全周期不可或缺的必要手段。

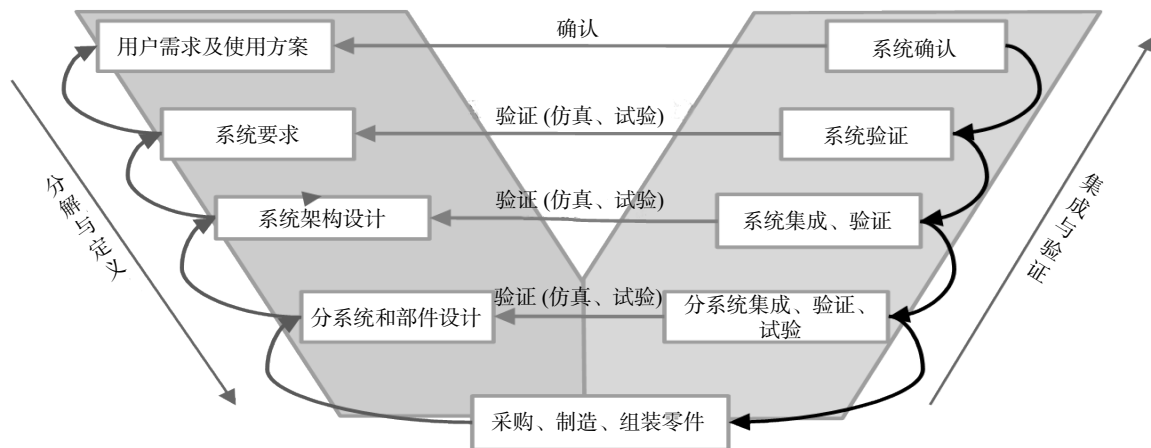


图 1 航空发动机正向研制流程示意图

Fig. 1 Technology development roadmap of aero-engine

总之,利用数值仿真技术,在新型航空发动机初期设计阶段,对其设计方案进行仿真验证和优化,提高设计的“一次通过率”,为技术决策提供支持;在发动机研制阶段,提供部件或整机性能参数分析,起到数值试车平台作用;在型号定型阶段,给故障诊断分析提供技术支持。数值仿真技术可以大幅度地缩短发动机的研制周期,提高设计水平,降低研制费用,完善技术保障,推动和促进航空发动机技术的加速发展,从而不断提高我国航空发动机研制基础,缩短与美欧等航空大国之间的差距,为实现我国航空发动机从“传统设计”到“预测设计”的战略转变奠定技术基础,是建设我国先进航空发动机技术支撑体系不可或缺的重要环节和支持工具。

1.3 数值仿真技术的维度

从不同的视角出发,可将航空发动机数值仿真技术所涵盖的专业、学科、空间、时间、工具等方面,概括为以下五个维度:

1) 专业维度:航空发动机整机、部件和系统的主要专业,包括总体性能、总体结构、风扇、压气机、燃烧室、涡轮、加力燃烧室、进排气系统、机械系统、空气系统、控制系统等。

2) 学科维度:力学、热学、机械学、声学、化

学、材料学、信息学等主要基础和工程技术学科,包括流体力学、燃烧学、传热学、结构强度、振动、可靠性分析、机械设计、控制系统、材料学、工艺制造、计算机、信息学及多学科交叉耦合等。

3) 空间维度:包括零维、一维、二维、准三维和全三维等所有宏观空间尺度。

4) 时间维度:包括定常、非定常、稳态和瞬态等。

5) 工具维度:主要包括计算机辅助设计(computer aided design, CAD)、计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)、计算燃烧学(computational combustion dynamics, CCD)、计算机辅助制造(computer aided manufacturing, CAM)、有限元分析(finite element analysis, FEA)、虚拟现实(virtual reality, VR)和高性能计算(high performance computing, HPC)等各类通用和专用软件工具。

2 数值仿真技术的地位和作用

2.1 促进设计模式的转变

随着计算流体力学、计算结构力学和计算机仿真技术的发展,国外航空强国(尤其是美国)引发了一场航空发动机设计模式的“革命”,基本实现了从“传统设计”向“预测设计”转变(如图2)。

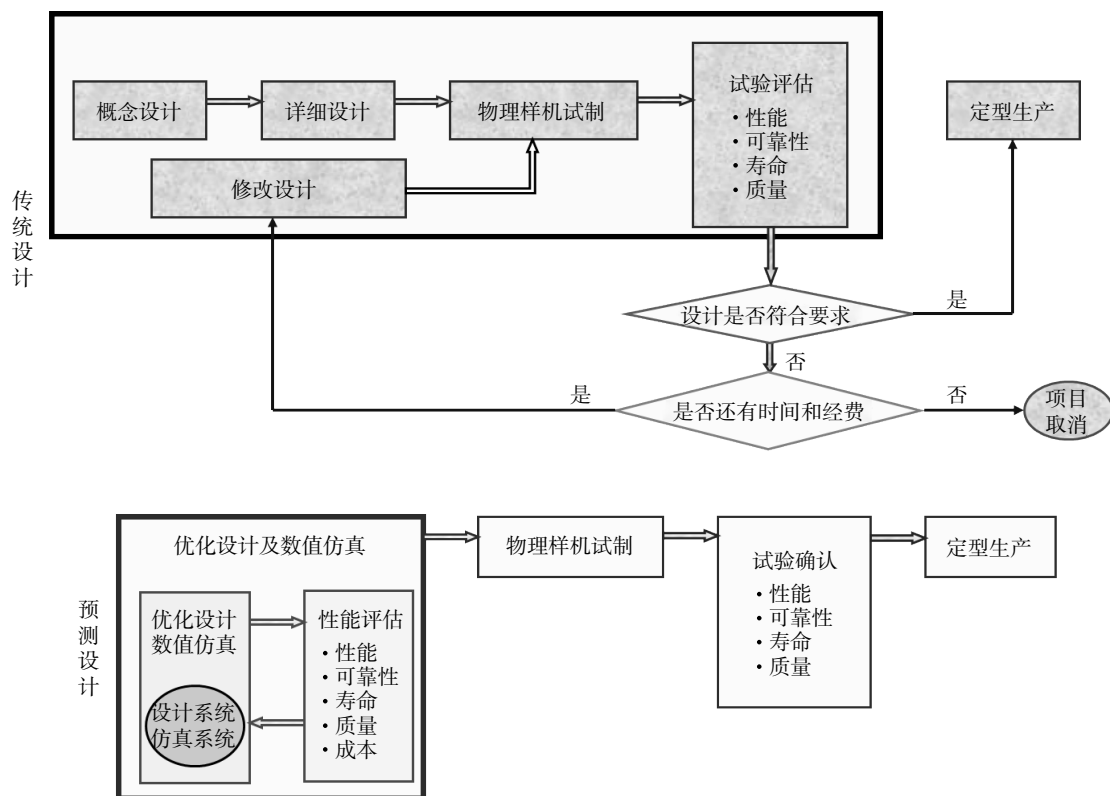


图2 传统设计和预测设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of traditional design and predictive design

传统设计是指通过大量反复的实物试验来确定方案,暴露问题,排除故障。传统设计的研制周期一般需 20~30 年,发动机直到完成定型设计,需要制造 50 台左右的样机。因此过去常说:“发动机是试验出来的”。

预测设计是指发动机的方案设计及修改主要在计算机上进行,基于数学模型、数值计算和虚拟现实技术来模拟出发动机性能参数。此时仅需少量的试验工作来验证数值计算的设计结果,从而大大缩短发动机的研制周期,节省研制成本。因此现在也可以说:“发动机是设计出来的”。

2.2 数值仿真的主要作用

1) 利用数值试验优化设计,暴露问题,筛选方案,提高设计的“一次通过率”。

2) 减少试验工作量,减少试验件的数量,缩短研制周期,降低研制成本。

3) 实现发动机设计的“透明”化,大大提高设计的准确度。采用数值仿真方法,可以获得物理试验中无法测量的发动机内部详细信息和参数,也可对某些难以试验的发动机工况进行数值试验。

4) 加快发动机设计工作从“传统设计”到“预测设计”转型,实现从“测绘仿制”到“自主研制”的战略转变。

国外的成功实践经验表明,广泛采用以数值仿真技术为基础的先进设计仿真工具和方法,可以大大减少实物物理试验的工作量和时数,从而既减少了研制时间和周期,也大大降低了研制费用。据美国空军研究机构(AFRL/PRTA)2002 年 3 月发表的资料表明^[10],在第三代发动机改进改型和第四代发动机研制中,通过采用先进设计仿真工具,可将发动机研制过程中用于测试的发动机整机数目从 14 台减到 9 台左右,而总的试验时数可以从 10 000 多小时降低到 7 000 多小时,减少大约 30%(见表 1)。而相应的研制经费也可从

表 1 采用先进设计仿真工具技术可减少的试验小时数

Table 1 Reduced experimental hours with advanced simulation technology

测试项目	试验时间/h	
	传统方式	先进仿真设计
气动/机械	775	400
功能/环境	675	500
主动控制/耐久性	775	400
地面操控性	750	450
空中操控性	2 595	1 325
热端部件/寿命	3 000	2 000
总试验小时数	11 020	7 550

15 亿美元左右减少到 7 亿多美元,降低幅度达到 50%(见表 2),体现了仿真技术的显著军事和经济效益。

表 2 采用先进设计仿真工具技术可减少的研制经费

Table 2 Reduced development costs with advanced simulation technology

研发过程		(研制经费/百万美元)/%	
		传统方式	先进仿真设计
工装/制造/装配	概要设计	46(3)	37(7)
	详细设计	198(13)	160(22)
	部件	30(2)	22(3)
	核心机/发动机样机	481(32)	164(22)
试验	飞行试验用发动机	300(21)	156(21)
	部件	16(1)	16(2)
	核心机/发动机	202(14)	126(17)
	项目管理/其他	213(14)	52(8)
总研制经费		1 496	733

注:括号内为该阶段经费占总经费的比例。

正因如此,仿真技术被公认为是现代先进航空发动机研制技术的一个重要发展方向,可以推动现代科学技术的进步,世界各国都已高度重视并大力发展。

3 仿真技术发展现状

3.1 国外发展现状和典型实例

正是因为逐渐认识到数值仿真技术的巨大影响,自 20 世纪 80 年代后期以来,美国、英国、法国和俄罗斯等航空发达国家非常注重多学科数值仿真技术在研制过程中的重要作用,相继制定并实施了相关计划,开展发动机数值仿真与验证技术研究。

3.1.1 美国

在航空发动机数值仿真技术的众多发展计划中,迄今为止规模最大的是美国的推进系统数值仿真计划(NPSS)^[11-12]。该计划隶属于 NASA 的高性能计算和通信计划(HPCCP),由美国 NASA Glenn 研究中心负责,联合工业界、学校和其他政府机构共同参与实施,其中仅在乔治亚理工学院(GIT)建立的一个仿真研究中心就拥有 120 人的研究队伍。在经费投入上,从 20 世纪 90 年代到 2010 年的 10 多年间,年均投入经费近 4 000 万美元,其中仅系统开发年均投入经费就高达 420 万美元。该计划已取得重大进展,在部件集成方面,

已完成风扇与短舱、风扇与增压级、混合器与喷管、三维低压分系统及三维高压压气机的集成数值仿真；在整机仿真方面，基于 GE90-94B 发动机，于 1997 年实现了发动机的零维/一维仿真，1999 年实现发动机的轴对称二维仿真，2001 年实现三

维稳态气体动力学仿真，2005 年实现全台发动机三维稳态多学科仿真，2010 年实现三维过渡态多学科仿真，并最终实现飞机/发动机综合仿真(如图 3)。该系统于 2000 年 3 月发布了 NPSS V1.0 完全版，并 2001 年升级到 2.0 版^[13-14]。

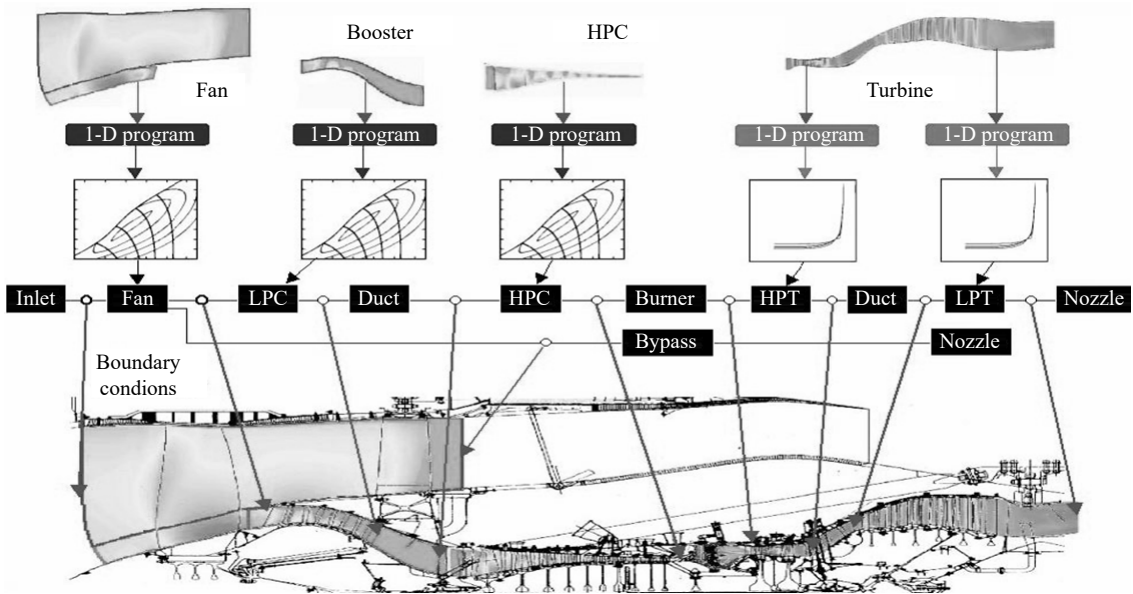


图 3 基于 NPSS 平台的 GE90-94B 发动机整机仿真^[14]
Fig. 3 Simulation of GE90-94B engine based on NPSS^[14]

利用 NPSS 及其相关技术成果，美国还开展了 GE90 发动机的涡轮部件设计仿真优化，包括涡轮总体性能优化、流道形状优化、降低气动损失等。优化效果表明：单机质量减少约 113.4 kg (250 磅)，油耗下降 1%。每个引擎节省近 25 万美元。整个工作在 3 个月内完成，大大缩短了设计周期^[15]。

与此同时，美国还在燃烧数值仿真方面实施了专门的国家燃烧代码(NCC)计划，并在 IHP-TET、VAATE 等其他相关计划中得到支持。

众所周知，要想真正实现航空发动机的预测设计，数值仿真和设计工具的预估精度需要有大幅度的提高。表 3 给出了要想实现预测设计所需要的大致仿真精度，以及美国目前达到的水平，从中可看出，美国目前在仿真与验证技术方面已经达到相当高的技术水平。

3.1.2 俄罗斯

为了抗衡美国在数值仿真软件方面的发展，俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)启动了涡轮发动机计算机试验技术(CT3)计划，并开发了燃气轮机计算机仿真系统(Computer Gas Turbine

Engine Simulator, CGTES)。该系统是专为航空发动机数值仿真研究开发的独立计算体系^[16]，包括一系列从一维到三维的高精度仿真软件，可实现对发动机整机或部件的数值计算。该系统即可计算发动机的稳态参数，也可对非定常过渡态进行计算。目前 CGTES 已经成为俄罗斯航空发动机

表 3 仿真需要的精度和目前达到的水平
Table 3 Accuracy required for simulation and the currently level

参数		目前的精度/%	需要的精度/%
整机性能		±2.0	±0.5
操控性		±20.0	±2.0
气动热力学		±3.0	±1.0
三维结构		±5.0	±2.0
高周疲劳/断裂力学		±20.0	±10.0
集成控制规律的性能		±2.0	±0.5
寿命	低周疲劳	±25.0	±5.0
	高周疲劳	±100.0	±20.0
	抗氧化	±10.0	±5.0
	应力断裂	±10.0	±5.0
	材料属性	±10.0	±5.0

整机性能评估的第三方标准软件,各设计局研制或改进的航空发动机必须要在该系统上进行整机和部件的性能仿真和评估分析,并以此作为发动机性能指标评估和考核的重要依据和参考。

3.1.3 欧洲

欧洲主要是英国罗-罗公司、德国 MTU 公司、法国 SNECMA 公司等航空动力领域的行业巨头,在欧盟、政府、军方和商业投资者支持下开展数值仿真技术研究,在民用航空发动机研发领域得到广泛应用。

英国罗-罗公司针对民用大涵道比涡扇发动机多级压气机部件,在压气机部件气动声学一体化问题的定义、分析、优化和验证等方面广泛应用数值仿真技术,避免许多可控和不可控噪声因子的影响,提高了气动稳定性,缩短了设计周期,节省了研发费用。

德国 MTU 公司在民用大涵道比涡扇发动机多级低压涡轮设计中^[17],以气动损失最小、满足可靠性约束要求为目标,采用涡轮叶片稳健性形状多学科优化仿真技术,明确了制造公差、材料和性能参数等主要不确定性因素,优化结果表明:气动损失降低 7.4%,叶片可靠性大于 95%。

欧盟在 2004—2007 年间实施了基于虚拟航空联合制造的价值提升计划(VIVACE 计划),以多学科协同仿真优化为主要技术手段,构建了多学科协同仿真设计系统,应用于航空发动机等三个航空领域,其范围涵盖产品从可行性研究、概念设计到详细设计的全寿命周期,其计划目标是使得新研发发动机试验时数减少 30%,研制周期缩短 30%,研制费用降低 30%^[18]。

3.2 国内发展现状和差距

3.2.1 发展现状

“七五”之后,我国在部分学科领域陆续开发和引进了一些数值分析软件,开展对数值仿真技术的应用研究。2004 年在原国防科工委领导和中国航空工业集团有限公司支持下,在北京航空航天大学组建了面向航空动力行业开放式的航空发动机数值仿真技术研究和发展专业机构——航空发动机数值仿真研究中心,其主要职能是:建立我国先进航空发动机整机数值仿真系统(CANSS);开展航空发动机数值仿真技术研究,培养仿真技术科研人才;建立航空发动机试验数据库,促进共享共用,减少重复研究;开展与国外的技术交流与合作;为行业内外提供数值仿真技

术的支持和服务。

仿真研究中心自 2004 年成立以来,累计完成技改 2 500 万元,承担原科工委、原总装、工信部、科技部、两机重大专项等多项重大科研项目。目前现有专职研究人员 20 余人,其中院士 1 人、高级职称 12 人、在读博硕士研究生 100 余人。10 多年来共培养博士近 100 人、硕士 400 余人。2017 年 9 月,中国航发研究院与北航能源与动力工程学院签署协议,以“共建共管”的模式,以仿真中心为基础共同组建了“航空发动机仿真联合研究中心”,探索产学研用紧密结合的新模式,共同开展仿真技术的研究和应用工作。

仿真中心于 2005 年引进了当时全行业第一套高性能集群计算机系统和虚拟现实系统,并完成了我国第一代和第二代航空发动机数值仿真系统(CANSS V1.X 和 V2.X 系统)的开发工作,形成了我国自己的航空发动机数值仿真系统(CANSS 系统)第一版和第二版,提供有关研究院所使用,推进了我国航空发动机向信息化、数字化方向发展。

该系统可实现整机零维/一维/二维气动热力仿真、整机一维/部件三维气动热力缩放仿真、部件三维非定常气动热力仿真、结构强度仿真和气固多学科耦合仿真等,已经在现役及在研的 9 型整机、40 余套部件中得到了成功应用,涉及 10 余个型号和项目。其中整机二维计算值与设计值的相对误差在 0.73%~2.8% 之间,整机一维相对误差在 1.03%~3.08% 之间,涡轮部件二维和三维计算值与设计值的相对误差不大于 3%,压缩部件二维和三维计算值与设计值的相对误差不大于 6%,基本满足工程应用的要求(见表 4)。

表 4 目前 CANSS 系统达到的水平
Table 4 Current level of CANSS system

参数	目前的精度/%	需要的精度/%	CANSS 实现的精度/%
整机性能	±2.0	±0.5	2.80
气动热力学性能	±3.0	±1.0	6.00
集成控制规律的性能	±2.0	±0.5	3.08

3.2.2 主要差距

总的说来,目前我国的航空发动机数值仿真技术的研究仍处在较低水平,主要体现在:

1) 在仿真技术和水平方面,发动机整机仿真目前只能实现一维或二维稳态及过渡态数值仿真;

部件仿真还只能实现叶轮机等单独部件的三维数值仿真; 多学科耦合研究仅开展涡轮部件气-固-热耦合仿真技术的研究, 技术水平尚不成熟, 离工程应用有较大差距; 仿真系统仅仅完成了初步版本的开发及技术验证工作。更重要的是, 目前的仿真计算精度离工程实际要求还有很大的差距, 以最常见的气动热力计算为例: 目前能达到的精度为 6%, 国际先进水平为 3%, 工程实用要求为 1%。为了提高数值算法的精度和仿真系统的成熟度, 需要持续不断地进行新技术的探索研究工作。

2) 在科研能力方面, 高性能计算已达到数千到万核级、百万亿次/秒的水平。目前国内航空发动机行业的高性能计算能力整体水平落后, 高性能计算能力严重不足, 不能满足整机和部件多维过渡态以及多学科耦合仿真等工程应用的需要。多通道立体三维视景生成设备(VR 系统)功能单一、扩展性和兼容性差、速度慢、不能满足非定常和实时虚拟仿真的需要。总之, 目前行业内的高性能计算设备在计算速度、存储容量、虚拟环境等方面, 都已经远不能满足整机和部件多维过渡态以及多学科耦合仿真等工程应用的需要, 急需进行合理适当的扩充和完善。

3) 在软件工具方面, 工程应用主要还是依赖大型商业通用软件和部分开源代码软件的二次开发, 如 Ansys、Siemens、Numeca、Openform、Santarn 等, 具有完全自主产权的专业仿真软件种类不全、技术落后、功能不够、验证不足、应用不广, 航空发动机数值仿真领域的专业软件“卡脖子”问题仍十分突出, 亟需加快研发攻关力度, 以期尽早改善和升级。

4) 在人力资源上, 由于以前长期对数值仿真技术的忽视, 投入不足, 人才培养和梯队建设严重滞后, 急需加强数值仿真技术研究人才队伍的建设。

4 思考和建议

4.1 加强领导, 加快发展

充分认识数值仿真技术在航空发动机研制中的重要地位和作用, 要加强领导、加大投入、加快发展、加强应用, 实现航空发动机研制从“传统设计”向“预测设计”的转变, 以信息化和数字化助推航空动力产业实现跨越发展。

4.2 整合力量, 协同创新

在仿真中心已有基础上, 利用联合仿真中心

与工业部门结合紧密的特点, 整合行业内外优势资源, 组织“产学研用”相结合的高水平研发团队, 针对先进航空发动机的技术特点, 集智攻关, 在已有基础上不断发展完善, 不失时机地持续开展航空发动机仿真技术研究, 尽快完善和发展自己的航空发动机数值仿真系统, 形成我国拥有自主知识产权、以整机仿真为主要特点的新一代航空发动机数值仿真平台, 并加强在行业内的推广应用, 不断提高我国航空发动机行业的设计研制水平。

4.3 维护使用, 急需建库

维修保障和外场使用是发动机全寿命周期的重要阶段, 其中的故障模式、分解排故、维修和飞行数据, 对改进和优化设计十分重要, 应单独建立其数据库和仿真系统, 并与设计和研制阶段的数据库和仿真系统之间, 建立必要的互联互通, 这对优化发动机设计、改善维修性, 提高使用可靠性是十分必要的。

4.4 加强保障, 助力提升

高水平的仿真应用离不开高性能计算环境的支持, 高精度的仿真能力必须有海量可信数据的支撑。目前航空发动机行业的高性能计算设备在计算速度和存储能力方面都严重不足, 难以满足高保真数值仿真的工程应用需求, 急需进行扩充和完善。同时, 在仿真软件开发的过程中, 也需要获取海量、全面、精细、可信的试验数据, 对仿真模型、方法等进行不断地改进、修正, 这是一个需要不断迭代完善的过程, 因此, 在组织全行业开展仿真软件校核和推广应用的同时, 也应大力抓紧针对软件开发过程的试验验证条件建设, 全面提高软件的开发能力和水平, 以尽早解决专业软件“卡脖子”问题。

4.5 共享共用, 为心而战

建议在中国航发研究院建设面向全行业的“航空发动机数据库”, 实现资源和数据的共享和共用。同时, 利用航发研究院的行业优势, 面向工程应用, 结合在研型号和预研项目, 落实仿真技术的工程应用转化, 在发动机型号研制和关键技术研究中, 要尽快明确地将仿真数值模拟纳入设计流程之中, 促进仿真技术水平的提高, 为早日搞出强劲的“中国心”作出贡献。

参考文献:

- [1] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 961-970.

- CAO Jianguo. Status, challenges and perspectives of aero-engine simulation technology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(5): 961-970. (in Chinese)
- [2] 孙见忠, 易杨, 文洪, 等. 航空发动机全寿命维修概率建模与仿真[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(3): 573-588.
- SUN Jianzhong, YI Yang, WEN Hong, et al. Life cycle probabilistic modeling and simulation of aero-engine maintenance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(3): 573-588. (in Chinese)
- [3] 朱芳, 陈云永, 卫飞飞, 等. 某民用大涵道比涡扇发动机风扇缩尺试验件气动性能数值仿真[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(7): 1539-1548.
- ZHU Fang, CHEN Yunyong, WEI Feifei, et al. Numerical simulation of aerodynamic performance of scaled fan of a civil high-bypass-ratio turbofan engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(7): 1539-1548. (in Chinese)
- [4] 关鹏, 艾延廷, 王志, 等. 热冲击后气膜冷却叶片结构强度流固热耦合仿真[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(8): 1811-1820.
- GUAN Peng, AI Yanting, WANG Zhi, et al. Structural strength simulation of film cooling vane after heat shock by thermal/flow/structure coupling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(8): 1811-1820. (in Chinese)
- [5] 楚娜娜, 张曙光, 高艳蕾, 等. 基于Simscape模型的航空发动机系统安全性分析方法[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(4): 885-896.
- CHU Nana, ZHANG Shuguang, GAO Yanlei, et al. Safety analysis method of aero-engine systems based on Simscape model[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(4): 885-896. (in Chinese)
- [6] 洪杰, 张姿, 徐筱李, 等. 航空发动机结构系统的可靠性模型[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(8): 1897-1904.
- HONG Jie, ZHANG Zi, XU Xiaoli, et al. Reliability model of aero-engine structural system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(8): 1897-1904. (in Chinese)
- [7] 杜方舟, 孙有朝, 郭媛媛. 基于数据的航空发动机排气温度裕度及剩余寿命计算方法[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(11): 2456-2464.
- DU Fangzhou, SUN Youchao, GUO Yuanyuan. Calculation method of aero-engine exhaust gas temperature margin, and remaining life based on data[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(11): 2456-2464. (in Chinese)
- [8] 陶海亮, 朱阳历, 郭宝亭, 等. 压气机叶片流固耦合数值计算[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(5): 1054-1060.
- TAO Hailiang, ZHU Yangli, GUO Baoting, et al. Numerical simulation of aeroelastic response in compressor based on fluid-structure coupling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(5): 1054-1060. (in Chinese)
- [9] 刘邓欢, 金捷, 王方, 等. 涡轮喷气式发动机整机环境下折流燃烧室性能试验[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(10): 2410-2415.
- LIU Denghuan, JIN Jie, WANG Fang, et al. Performance test of slinger combustor of turbojet engine running in engine test[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(10): 2410-2415. (in Chinese)
- [10] SKIRA C A. Reducing military aircraft engine development cost through modeling and simulation[R]. Paris: RTO Meeting, 2002.
- [11] 金捷. 美国推进系统数值仿真(NPSS)计划综述[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2003, 16(1): 57-62.
- JIN Jie. A summary of numerical propulsion simulation system (NPSS) by NASA[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2003, 16(1): 57-62. (in Chinese)
- [12] NICHOLS D L, CHAMIS C C. Numerical propulsion system simulation: an interdisciplinary approach[R]. AIAA-91-3554, 1991.
- [13] LYTTLE J, REMAKLUS D A, NICHOLS L D. Numerical propulsion system simulation[J]. *Computing Systems in Engineering*, 1990, 2(4): 357-364.
- [14] TURNER M. Lessons learned from the GE90 3-D full engine simulations[R]. AIAA-2010-1606, 2010.
- [15] TURNER M, NORRIES A, VERES J. High fidelity 3D simulation of the GE90 (invited)[R]. AIAA-2003-3996, 2003.
- [16] IVANOV M, NIGMATULLIN R. Interconnected multi-level design of gas turbine elements[R]. AIAA-2003-1215, 2003.
- [17] PANCHENKO V, MOUSTAPHA H, MAH S, et al. Preliminary multi-disciplinary optimization in turbomachinery design[R]. Paris: RTO Meeting, 2002.
- [18] LARSSON T C, HOMSI P. VIVACE - value improvement through a virtual aeronautical collaborative enterprise[R]. Helsinki: VIVACE Public, 2014.

(编辑: 陈 越)