

# 航空发动机数字化制造技术的应用现状与发展趋势

Application and Development of Digital Manufacturing Technology on Aeroengine

西北工业大学 李山  
沈阳发动机设计研究所 张光星



李山

西北工业大学机电学院院长助理, 讲师, 博士, 西安航空发动机(集团)有限公司博士后工作站博士后, 研究方向为企业级信息系统体系架构、快速响应制造技术。

近 50 年来,我国航空发动机行业经过引进专利生产、改进改型、测绘仿制、原型机参考设计及制造的发展过程,逐步走上自主产品设计研制的发展道路。随着“秦岭”、“太行”和第 4 代航空发动机等型号的批产和立项,我国航空发动机事业获得了

发达国家的航空和防务工业已经基本完成从传统的大批量生产向精益生产模式的转变,数字化制造技术在缩短产品研制周期、降低研制成本、提高产品质量方面取得了突出的经济效益和社会效益。

一个难得的发展机遇。数字化制造技术作为新一代发动机研制生产的支撑手段,是提高设计、制造和管理水平,保障重点型号的研制,促进发动机行业跨越式发展的必然选择。

## 航空发动机数字化制造技术及其基本内容

### 1 数字化制造技术及其技术特征

尽管就其行业覆盖面和学科上而言,数字化制造技术已经成为推动 21 世纪制造业向前发展的主流技术,但对于其技术内涵和体系结构尚没有权威、统一的界定。从我国军工行业的应用背景出发,对于数字化制造技术定义如下:

数字化制造技术指以产品研制的多厂所、多部门用户为对象,以并行工程为指导思想,以各类数字化技术手段应用为主要特征,以信息离散

化的表述、传递、存贮、处理作为设计制造协调的主要手段,支持产品全生命周期的制造活动和企业的全局优化运作的数字化技术应用技术体系的集合。

数字化制造技术的特征如下:

(1) 数字化制造技术是先进技术的集合。数字化制造涵盖了企业管理、产品设计、工艺设计、零部件制造、装配、客户服务与保障等技术领域,以提供这些领域的先进信息技术的应用为主要特征,包括 CAx/MES/PDM/ERP/ 各类仿真软件/各种共享资源库等支撑系统、平台和数据库,与单一产品数据源、 workflow、系统集成、仿真等技术紧密相关。

(2) 数字化制造是一种先进制造模式。数字化制造以并行工程为基本特征,强调并支持产品全生命周期的并行与协同,并为这种并行与协

同提供技术手段;数字化制造同时吸收了敏捷制造的基本思想,对变化的市场和客户化的产品做出快速和准确响应,强调并支持生产过程组建灵活多变的动态组织机构;数字化制造把先进的生产技术、先进的管理技术和高素质的人员有效集成。

(3) 数字化制造是一种现代企业特征。数字化制造不仅为企业目标实现提供一系列的技术手段和解决方案,而且提供一种先进的运行组织体系,给传统航空发动机行业的研制模式、企业运作方式、组织结构、经营理念等带来新的变化,从而推动企业向着数字化生产方式的方向发展。

## 2 我国航空发动机行业数字化制造技术应用基本内容

右下图所示为在多厂所联合研制新一代发动机中应用数字化制造技术的总体发展设想,重点突出了协同工作平台构建、产品数据管理、数字化设计/试验/工艺/装配等技术的研究和推广应用。

### (1) 协同工作平台。

协同工作平台提供多厂所联合设计制造管理的协同工作流程控制管理、数据服务功能,实现各应用系统的信息集成,主要建设内容包括:

- 协同工作平台为多厂所发动机协同研制提供基本的协同工具,包括设计/制造/试验/管理多层次BOM管理、分布式产品数据管理、设计/制造数据中心管理与维护、可视化工具、并行工程团队IPT定义与管理等功能。

- 协同工作平台为多厂所发动机联合研制提供流程控制工具,包括厂所内部设计/制造/试验/管理流程与外部协同流程的定制、控制和管理,跨厂所异地协同流程的定制、控制和管理等多个层次的流程。

- 协同工作平台与各厂所PLM/PDM系统实现紧密集成,并将进一步和各厂所ERP系统实现集成,不仅为系统项目成员之间的信息

共享与集成提供平台,同时为企业级集成系统建设提供基础平台。

(2) 航空发动机数字化制造技术的应用领域。

- 数字化设计: 建立支持气动、结构、强度、热力、传热、燃烧、自动控制等学科的专业支撑工具,开展多学科综合优化设计技术及其应用系统开发,实现设计过程中主要专业的协同与并行,建立包括发动机设计规范、标准化体系、发动机工程数据库在内的知识管理系统。

- 数字化制造: 包括工艺与工装设计、数字化生产线建设、制造过程集成应用、制造工艺/制造资源数据库、工艺仿真、制造过程仿真等内容。工艺与工装设计重点解决快速工艺与工装设计、工艺工装设计并行等设计环境与工具的开发。建立发动机关键重件生产线支撑系统,完成几条重点生产线的数字化改造。推进仿真技术在发动机制造过程的应用,由专业应用仿真向制造过程仿真过渡。

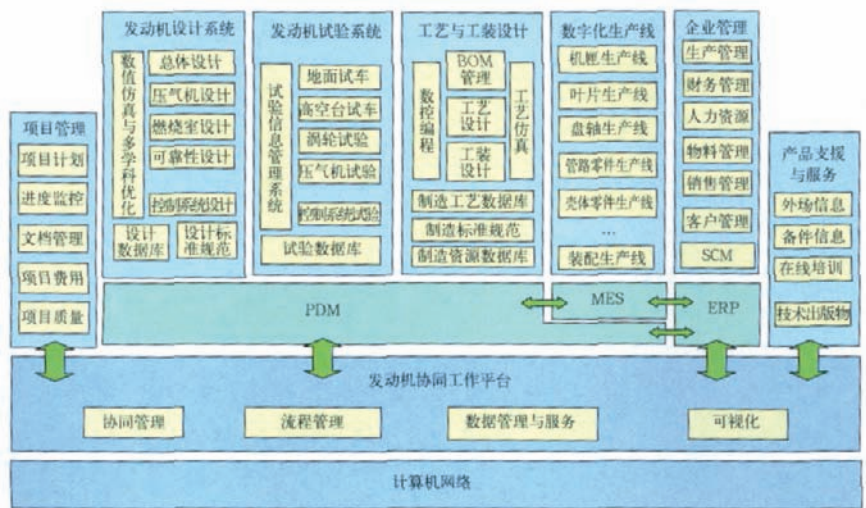
风险。

- 数字化管理: 包括企业管理、项目管理、产品支持与服务等内容。通过ERP系统实施,实现生产、财务、人力资源等的一体化管理。构建跨地域的项目管理平台,具有多项目按层次管理和任务关联的能力、项目信息共享和协同的能力。建立完整的发动机外场服务系统,与PDM等系统有效集成,实现发动机售后服务的信息化。

## 国外航空发动机行业数字化制造技术的应用情况

发达国家的航空和防务工业已经基本完成从传统的大批量生产向精益生产模式的转变,数字化制造技术在缩短产品研制周期、降低研制成本、提高产品质量方面取得了突出的经济效益和社会效益。

由美国洛克希德·马丁公司主持的重大军用飞机研制项目美国联合攻击战斗机(JSF),包括英国、土



航空发动机数字化技术的总体发展设想

- 数字化试验: 开展试验信息实时传送技术的研究,支持异地设计试验协同;建立整机、部件及系统试验数据库,满足发动机设计对试验数据的需求;开展压气机、燃烧室、涡轮、控制及发动机各系统的试验仿真研究,提高试验效率,降低试验成本及

土耳其、意大利等30个国家的50多家公司共同参与。在JSF研制中建立了支持产品全生命周期的虚拟产品研发平台(Integrated Management Framework, IMF),形成全球虚拟企业动态联盟,位于多个国家的供应商能够异地协同工作,使工程人员可

以模拟在工装和零件实际制造之前的飞机设计和制造的各个环节,缩短制造时间 66%,降低制造成本 50%,具备一年最多可交付 500 架的能力。

Inchinnan 工厂是罗·罗公司的专业化航空发动机压气机叶片制造厂。所有产品工艺在投放生产之前,均采用生产线仿真手段进行仿真模拟,确保生产线稳态安全运行;标准的数控加工制造单元中包括了机器人手臂、标准化工装、测具及刀具、待加工零件与工序的柔性自适应制造工艺与数控加工程序,零件的装夹、找正、周转、测量、数控加工以及零件在不同制造工区的周转均自动完成;通过系统集成、规范数据结构,能够与罗·罗公司总部产品设计部门实时保持沟通并参与设计决策过程。

进一步分析国外的应用案例,呈现以下应用特点:

- 大规模并行工程及其技术的应用,在企业内部不同部门、企业核心成员体、供应链各个环节之间建立了协同工作机制与环境;
- 以数字样机为代表的数字化设计制造技术,实现了发动机研制过程基于统一虚拟产品样机的信息共享;
- 大规模的仿真技术的应用,在专业应用仿真的基础之上,实现了面向制造过程的仿真技术应用,局部取消了物理样机;
- 规范完善的数字化制造技术应用支撑体系,包括各类标准规范、共享资源数据库等。

### 数字化制造技术的发展趋势

要提高发动机的研制和制造水平,必须在更广的范围和更深的层次上应用数字化技术,从整体上增强发动机企业的发展能力和核心竞争力。同时,我们也总结出数字化制造一些技术发展及其应用趋势:

(1) 建立支持数字化制造的流程体系与组织模式。

在制造生产全球一体化的形势下,制造系统面对的是异地分布的制造资源,所以未来的制造系统将采用并行化的先进制造理念和集成化的网络制造环境组织业务流程,并更强调资源的合理重组和企业间及其企业内部的优化协作,以快速响应市场需求。

(2) 实现各种资源的整合与协同。

实现人力资源、知识与技术资源、制造资源、客户资源等企业资源的有效组织与协调,基于虚拟企业的组织体系使得企业各层次人员能够利用现有条件、方法与工具有效的协同工作,进一步提升各种资源的利用效率。

(3) 建立贯穿产品全生命周期快速响应制造工程的模型和建模方法。

建立快速产品设计、快速工艺设计与工装设计、快速加工与装配等模型,使它们的数据能够实现共享和继承、并可重用,基于单一数据源实现各阶段模型数据关联和无缝连接,为产品的优化设计、性能分析、生产制造、质量检验及企业生产系统规划、调度、各级过程管理与控制提供一体化模型支持。

(4) 建立支持产品全生命周期的虚拟企业协同工作平台。

结合具体行业应用,基于供应链的虚拟企业运行模式,建立从产品概念设计,详细设计,生产准备,零部件制造、装配到客户服务与维修保障的快速响应协同工作平台及其支撑系统,并实现这些应用系统之间的集成,建立支持各个应用系统及集成系统的知识库体系,建立基于协同工作平台的标准规范体系。

(5) 由专业仿真和局部仿真向快速响应制造过程仿真发展。

仿真技术在快速响应制造中的范围进一步扩展,仿真的精度进一步提高,在“产品、过程、资源及制造”

的一体化集成平台和产品知识库支持下,由面向具体专业应用的局部仿真向基于产品数字样机的研制过程仿真的方向发展,实现虚拟环境下的产品创新设计、精益制造与基于人机工程的产品应用验证。

## 我国航空发动机数字化制造技术的应用现状与问题

### 1 我国航空发动机数字化制造应用情况

近 30 年来,特别是“十五”期间,我国发动机主要制造厂不断深入开展数字化制造技术的研究与应用,在发动机关键零件工艺设计、工装设计、数控加工中取得了明显的效果,推动了传统的发动机研制和生产模式的变化。

在基础支撑环境方面,包括基础网络环境、软硬件条件等,引进了一批先进的工程分析与仿真、三维 CAD/CAM、PDM、数据库等软件系统,开发了一批具有航空发动机行业特点的软件系统,基本形成了初具规模的数字化基础能力,为发动机型号研制和数字化技术推广应用提供了重要保障。

在关重件的制造环节,CAPP 技术在工艺设计中得到了较普遍的应用;普及了以二维 CAD 软件为基础的工装设计;数控加工设备有较大增长,具备了一般复杂零件数控编程的能力;PDM 开始在企业局部得到应用,并初步实现了 PDM 与 CAPP 系统;开始规划建设以 MES 技术为基础的数字化制造车间信息管理系统并取得进展;重视并开展了标准规范体系和信息资源库的建设。

在企业管理方面,各单位均不同程度、不同侧重点地在生产计划管理、物质供应、财务管理、项目管理、人力资源管理、办公自动化等方面推广了数字化技术;初步实现了主生产计划和物料需求计划的制定和管理;开展了一些管理流程优化

工作,提高了管理效率,降低了管理成本,取得了比较明显应用效果。

## 2 航空发动机行业数字化技术应用存在问题

从总体上来说,我国航空发动机行业的数字化制造技术水平较低,与国际先进水平相比有很大差距,尚未形成一种强大的生产力,无法充分满足大规模数字化技术在型号工程中的应用,主要表现在:

(1) 数字化制造技术应用的范围和深度有限。

目前各厂所数字化制造技术的发展是分散、独立进行的,只是在部分环节上辅以数字化技术手段。数字化技术在航空发动机行业的应用还没有经历一个完整的型号研制过程的全面应用验证,无法形成有效的数字化制造技术体系,数字化制造技术应用的效益、效果尚不能充分发挥。

(2) 设计所、制造厂分离造成并行工程不宜实施。

目前航空发动机设计所、制造厂分离的组织体系,使得不同部门间的信息交流存在障碍,生产准备周期长,更改反复频繁,由此造成实施航空发动机研制的设计制造并行工程的困难。

(3) 目前的数字化技术应用仍以单项应用为主,“信息孤岛”问题依然严峻。

各单位、甚至同一单位的不同部门之间,数字化制造技术应用自成体系、相互隔离、低水平重复建设比较普遍,没有通过数字化手段将异构、分散和孤立的各种资源有效的集成和共享。各厂所之间尚未建立有效的数据共享与传递平台,纸质介质图纸仍是设计表达的唯一“合法”手段。

(4) 数字化制造技术基础薄弱,行业发展不平衡。

基础薄弱表现在技术基础滞后,缺乏有效的数字化信息资源,各厂所的数字化应用与开发能力不强,基础设施不配套,数字化技术应用标准规

范建设滞后于数字技术的推广应用。总体上,发动机行业的数字化制造应用水平远远落后于国外发动机行业目前的技术水平,在国内落后于飞机等其他行业;在行业内部,各厂所的发展不平衡;即使在同一单位不同专业之间也存在明显差距。

## 进一步发展的思路

面对新一代航空发动机研制的迫切需要,面对与国外先进技术水平差距,我们必须立足现状,正视问题与差距,针对目前存在全局性、迫切性、方向性的问题,采取有针对性的措施。

(1) 推动流程优化重组,逐步改变传统串行研制模式。

在对国外航空发动机研制模式、流程和生产组织形式等研究和分析的基础上,总结和提炼适应我国数字化制造技术的发动机设计和制造的模式、方法、流程、规范及相应的组织形式和规章制度。以重大型号工程为研究背景及应用对象,推动航空发动机企业数字化设计/制造/管理条件下的流程优化,推动并行工程全面实施。

(2) 抓好多厂所协同工作平台研究和建设。

构建支持多厂所联合型号研制的协同工作平台将是实施数字化设计/制造/管理的必要技术基础。为此,应尽快进行协同平台软件系统的选型论证和协同平台具体方案设计工作,包括协同工作平台的构建目标、平台的主要功能、基于协同平台的应用系统集成、主要协同工作流程设计、平台构建的实施步骤与方法、协同平台系统的应用验证等内容。

(3) 重视数字化制造单项技术应用的同时重视集成应用。

应重视 CAD/CAPP/CAM、PDM、MES、MRO 等各类单项数字化制造技术的应用,特别是加强三维产品/工艺/工装设计、工艺仿真

/制造过程仿真技术的应用,突破基于数字样机的产品设计与设计过程仿真、三维装配工艺设计与装配过程仿真、生产线及工艺过程运行仿真、人机工程应用盲区。更应重视各类应用系统的集成,构建基于统一知识库体系的企业级集成平台,比如 ERP/PDM/MES/MRO 一体化集成工作平台,发挥数字化系统的集成应用效果。

(4) 加强数字化制造标准规范体系建设。

标准规范体系的建设是推进数字化制造技术的重要的基础性工作之一,发动机行业的数字化标准规范建设才刚刚起步,标准规范体系尚未形成,目前数字化标准规范体系严重滞后于发动机数字化研制的需求。加强标准体系和数据库建设,制订适合企业状况的数字化制造标准规范体系框架,在数字化制造推进过程中不断扩充完善,部分标准需要超前制订。

(5) 重视人才队伍建设。

需要特别重视数字化制造人才队伍的建设。应该对于数字化制造技术管理与应用推广部门和人才予以待遇优惠等倾斜政策,制定对数字化制造技术专业人员的激励、培养、锻炼措施,逐步造就一支具有较高水平的稳定的技术队伍;同时要加强对各类技术人员和管理人员的制度化、规范化、高层次地数字化制造技术培训。

## 结束语

数字化制造技术的应用是新一代航空发动机研制的必需手段和必由之路,需要各单位在投资方向、政策措施、人才引进等方面予以保障,重视理念的转变。并且要认清差距,抓住第4代航空发动机立项研制的机遇,努力实现数字化制造技术应用水平的跨越式发展。

(责编 晓霖)