

大飞机用发动机制造 与信息技术的发展

Development of Aeroengine Manufacturing and
Informatization Technology for Large Aircraft

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 王增强



王增强

西北工业大学研究员,航空发动机CAD/CAM研究所副所长。长期从事航空发动机整体叶盘五坐标数控加工技术、叶片无余量高效数控加工技术、涡轮叶片精铸模具CAD/CAM技术以及航空发动机信息化技术的应用研究。获国家科技进步二等奖1项,部级科技进步一等奖2项、二等奖2项,发表学术论文30余篇。

大飞机用发动机为大涵道比涡扇航空发动机,具有安全性好、寿命长、便于维护维修、绿色环保、综合运行成本低等特点。国外在开展大涵道比发动机研制和生产时,以信息技术为手段,实现了发动机的全球化生

目前在改善我国发动机行业运行体制、提高现有发动机制造团队素质的同时,必须以信息技术为依托,充分整合我国航空发动机行业的优势资源,实现设计、制造、装配、维修全寿命周期的高效运行,积极借助国外先进技术和国内民营企业在单项技术方面的优势,早日实现中国的大飞机装上“中国心”。

产、低成本制造、高效率运营,推动航空制造业发生了“革命性”的变化,取得了很多值得借鉴的成功经验。

国外航空制造业信息技术的应用情况及效果

1 国外航空制造业信息技术的应用情况

美国和欧洲的航空制造业正经历着从传统的大批量生产向精益生产模式的转变。在转变过程中,信息技术的应用和发展起着非常重要的作用。主要表现在以下几个方面:

(1) 制造知识的积累和共享。

从20世纪50年代数控机床出现以来,为解决航空复杂结构件的制造,美国、德国、法国等国家建立了专门的机构,投入大量的人力物力,开展了众多针对材料切削工艺、切削刀具、等温锻造、精密锻造、定向凝固与

单晶铸造、宽弦叶片制造、整体叶盘制造、特种加工等制造工艺的研究和工程化应用,实现了航空产品的高效低成本制造。针对环保型、高推重比等设计技术,NASA与美国国防部先后开展了“航空航天推进系统仿真”(Aerospace Propulsion System Simulation, APSS)和“推进系统数值仿真”(Numerical Propulsion System Simulation, NPSS)等研究计划。开发的数字式振动系统,可模拟仿真飞机和发动机运行状态下系统间的振动情况及相互影响,以及时发现设计和材料使用上存在的不足,并在零件实际加工之前进行改进。

国外利用信息技术手段对飞机和发动机的设计、制造的经验、结果数据等知识经过了半个多世纪的积累,建立了庞大的、丰富的、非常有应用价值的设计知识库和制造工艺数

数据库,并且这些数据库得到不断的扩充和完善,同时形成了大量的关于飞机和发动机设计、制造、试验、适航、维修等方面的规范和标准。制造知识的积累和共享使国外航空制造业在新产品研制时更加容易、便捷和快速。如波音公司声称他们只需要3天时间就能开发出一种新型的飞机,只需要11天时间就可以生产出一架波音737,而2000年前他们制造一架波音737还需要28天的时间,这就得益于他们长期的知识积累和共享。

(2) 信息化单元技术在航空制造业中的应用与发展。

国外飞机和发动机行业,结合产品结构特点,广泛开展信息化单元技术的研究与应用,自20世纪60年代开始,针对数字化产品的信息建模和加工,围绕产品加工过程的数字化,在计算机技术和数字控制技术方面,突破了航空产品CAD、CAPP、CAM、CAE等信息化单元技术;自20世纪80年代开始,针对航空产品各单元系统之间存在的信息孤岛问题,围绕产品研究的集成化,突破了航空产品的CIMS和PDM技术;自20世纪90年代开始,为了提高区域制造业的竞争力,围绕产品研制过程中的异地协同问题,突破了网络化协同设计与制造技术。

英国罗·罗公司通过开发专业化设计系统、CFD仿真分析系统,实施并行工程,建立发动机典型零件的数字化生产线等措施,实现了航空发动机协同设计制造与管理;美国通用电气公司发动机部制订并实施了航空发动机异地协同设计和制造的增量式发展规划,大大缩短了概念设计、详细设计的工作时间、制造阶段的流程开发时间和设计更改时的流程再造时间。普惠公司在建立企业核心数据库和实施PDM的基础上,采用集成产品开发(Integrated Product Development, IPD)团队的

形式实现了对发动机全寿命周期内的计划、流程、技术、信息等经济技术活动的管理。

(3) 全寿命周期管理技术。

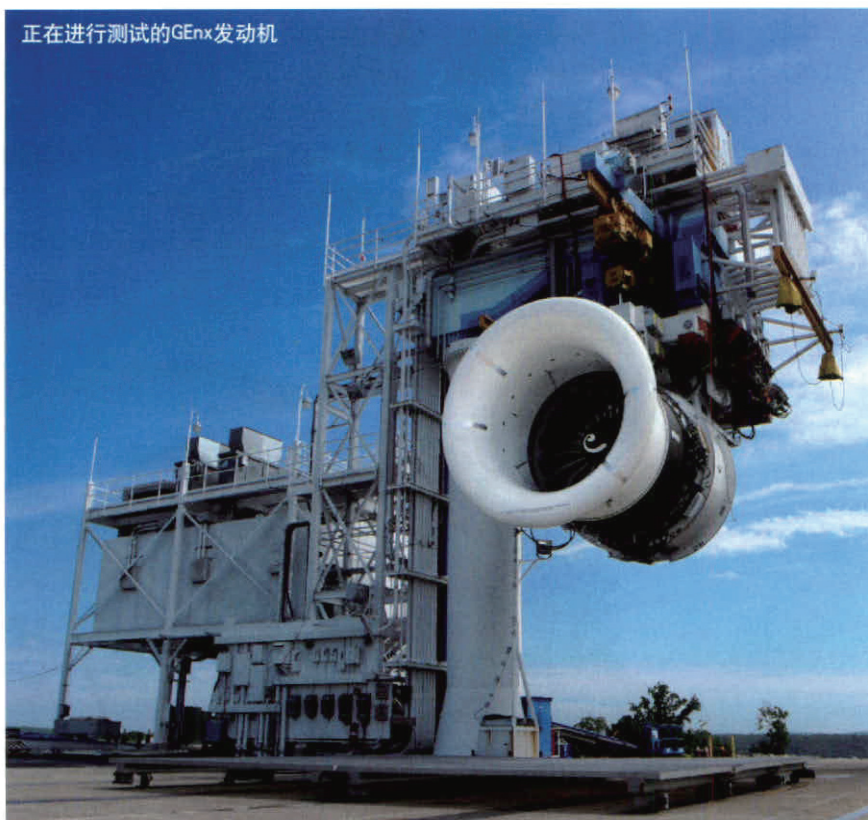
2002年,波音总裁穆拉利提出了“虚拟出厂”的设想。他提出,波音要在数字化应用上取得重大突破,要实现从数字式总装到飞机全寿命周期每一个环节的虚拟展示,实现从设计到生产车间,从生产到客户资源全过程的信息化。为满足波音787飞机项目研发的要求,达索公司与波音公司共同研发PLM V5系统。PLM V5被称作全球协作环境(GCE),采用了一系列软件解决方案如CATIA、DELMIA、ENOVIA、SMARTEAM等,对产品研制中的制造流程、方法和管理过程进行数字化设计、制造和测试。其中CATIA用于数字产品的定义和模拟,DELMIA用于精益生产流程的定义,ENOVIA和SMARTEAM则以一种协同的方式管理产品生命周期内产品配置、工艺知识和资源等全

部信息。这些数字化的工具贯穿于波音787飞机整个寿命周期,包括销售、市场以及未来的交付、维护和维修。该PLM系统对项目研发中的各部门、合作伙伴、系统设备供应商及客户等所有参与者都是通用的,它通过网络使所有项目参与者,不受地域和国别的限制,无论身处何地都像在同一个机构工作一样,并按按照统一的标准进行概念设计、产品设计、产品制造和产品服务。

(4) 科学有效的供应链管理技术。

民用飞机的供应商遍布全球各地,在保证产品精益制造的效率水平的基础上,实现民用飞机及发动机生产科学有效的供应链管理,信息技术正在发挥着非常重要作用。

美国波音和洛克希德·马丁公司,在波音787和F-35项目开发中采用了基于万维网系统进行供应链管理,其特点是灵活性和保密性好。F-35设计生产中,利用网络环境对1000多个供应商的项目进行网络协



正在进行测试的GE9X发动机

调。采购订单涉及多国提交信息的供应链,洛克希德·马丁公司和合作伙伴均能进入项目的产品数据管理系统,并将JSF零部件的CATIA模型数据传送给100个主要供应商。这种协调管理被洛克希德·马丁公司称为“数字化思路”,全球供应链及时准确地将飞机零部件从一家工厂转移到另一家工厂。实施结果是供应商制造的零件精确度大大提高,零部件的返工降低了40%~50%,异地加工的JSF结构件在第一次组装中就获得了圆满成功。

2 国外航空制造业信息技术的应用效果

随着信息化技术的不断应用和发展,国外航空制造业取得了以下显著的应用效果:

(1) 提高了生产制造的效率。

通过对生产过程直观的三维仿真,优化了航空产品生产的资源配置,避免了因设计和生产计划调度上的问题带来研制成本的增加。采用精确的三维部件模型和装配工具模型进行生产线的设计和规划,减少了返工次数。数字化制造环境下建立了以并行工程为指导的设计人员和制造人员的沟通机制,保证了设计模型的更改与制造模型的及时性和一致性调整,降低了制造模型修改不及时所造成的损失。基于真实工程数

据库的航空产品虚拟出厂,真实反映了飞机组装的整个过程,实现了航空产品的优化装配,从而显著提高了产品的生产效率。

(2) 实现了产品方案的优化设计。

航空产品设计时,每一步工作都必须精确按照预期的结果进行。利用数字化仿真技术,飞机的机翼、发动机叶盘等设计时,按照各自结构承受载荷的状态,在计算机上进行不同运行状态下的校核计算,及时发现气动及结构设计中的问题;同时通过对产品生产过程以及制造资源的建模和仿真,实现产品设计、资源结构和生产过程的整体优化,减少实物原型制造及试验周期和费用从而提高新产品交付速度。

(3) 提高了航空产品的异地协同研制能力。

波音787项目研制,在强化主承包商地位的同时,与全球数十家企业结成风险共担的合作伙伴关系。其分承包商下子承包商成千上万,分布于世界各地至少16个国家,是一种具有全球性、全天候虚拟工作环境的业务模式。俄罗斯工程师使用法国达索公司的CATIA软件可以与他们在美国的同事合作,开展计算机辅助飞机设计工作。如生产波音777机翼时,波音公司将波音777机翼的

设计图提供给日本分包商制造,然后日本航空公司从波音购买整架飞机。而在生产波音787飞机时,波音公司只是将波音787飞机的机翼参数提供给日本分包商,日本公司不仅要承接机翼设计还要负责生产。日本公司将机翼的设计任务分包到负责波音787其他部件设计的俄罗斯设计师,俄罗斯设计师完成气动和结构设计后将部分设计工作外包给班加罗尔的负责飞机设计数字化的印度斯坦航空公司。

(4) 加强了与客户的沟通,随时按市场动态调整研发任务。

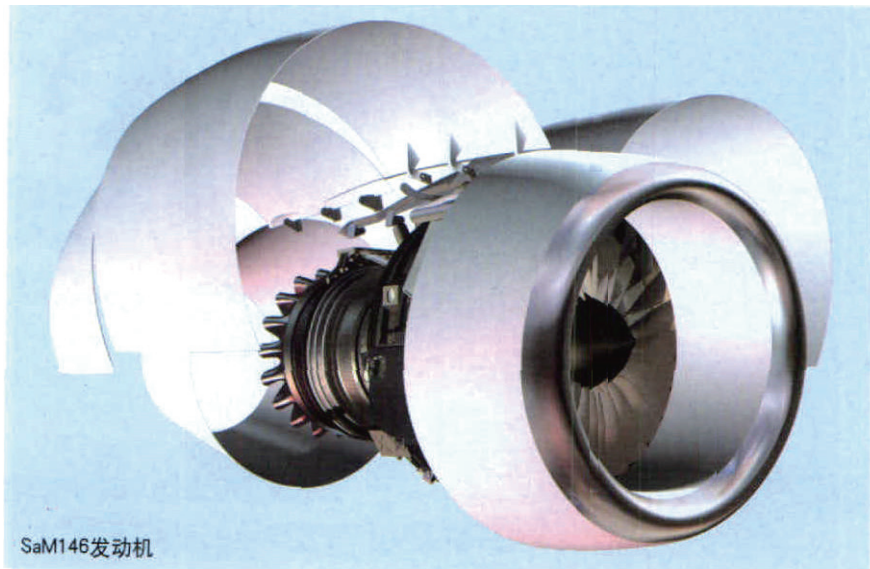
民航运输业的激烈竞争使航空公司对新飞机的油耗、维修性、舒适性等提出了更高的要求。采用数字化设计制造技术,能让客户在设计阶段就对产品有更直观的了解,从而加快产品进入市场的速度。利用三维的虚拟仿真系统,航空企业可以形象地向航空公司客户展示飞机维修的过程和内容,演示未来客舱的环境条件,并将客户提出的个性化要求及时充实到设计和制造过程中。

(5) 满足了FAA和EASA适航认证要求,缩短了取证时间。

为了保证飞机的安全飞行,涉及飞机的性能、载荷、结构、设备、动力装置以及使用和维护等,都要按照适航认证的要求进行试验验证。在制造过程中每个关键和重要零件都要由适航检查员把关,总装完毕后对每个系统进行功能测试和试飞后才能取得每架飞机的适航证。在波音787的适航认证中,波音公司安排适航官员在虚拟演示的环境中,能够全面理解新的飞机设计思路,并在实际飞机出厂前批准这些新的设计。在此基础上,波音公司已经完成一些提前取证的工作,加快了取证的速度。

国内航空发动机制造业信息技术的应用现状

发达国家的实践表明,航空制



SaM146发动机

制造业的发展需求为信息化技术提供了广阔的发展空间,信息技术的发展也改变了航空发动机制造业的面貌。20世纪90年代以来,信息化技术在我国航空制造业受到了空前的重视,并取得了长足的发展。目前,国内发动机设计部门广泛采用数字化设计技术,初步实施了PDM系统,并在新研制的发动机型号中基本实现了对发动机产品结构、设计审签、数据发放、设计文档(包括CAD模型)的管理与控制,确立了数字化设计的主导地位。在发动机制造企业,广泛开展了数字化制造和管理技术的应用,发动机关键零件工艺设计、工装设计、数控加工等均不同程度的采用了信息化技术。部分工装模具已实现三维数字化设计,在工艺设计方面采用了计算机辅助工艺设计技术(CAPP),提高了工艺设计的效率。在企业管理方面,主要生产企业也开展了数字化技术在发动机研制和生产管理中的应用工作。

但是,与发达国家相比,我国航空发动机行业的信息化水平从总体上来说还存在较大差距,尚未形成一种强大的生产力,主要体现在:

(1) 异地协同设计制造体系尚未完全建立,发动机设计与制造的数字信息基本分离。目前我国的发动机研发以串行的模式进行,部门间的信息没有实现实时交流,三维实体模型未作为发动机制造的信息依据,更改频繁且采用纸质方式传递信息。

(2) 各厂所使用的三维设计与加工编程软件版本不统一。虽然高版本可兼容低版本信息,但低版本无法完全兼容高版本信息,造成了设计与制造过程中信息的交换障碍。

(3) 信息化技术应用的基础数据库没有建立,造成了发动机制造周期长、效率低、成本高,影响了制造过程仿真的有效性和实用性。

(4) 发动机产品结构、设计审批、数据发放等设计环节进行的PDM

管理没有经历一个完整的型号过程全面应用验证,也没有实现设计制造过程统一的PDM管理。

(5) 在某些型号的装配、维护、维修、大修过程中开展了信息化管理工作,开发了AMRO管理系统,但面向航空发动机全生命周期的信息化管理模式没有形成,无法满足大涵道比发动机的研制生产需求。

(6) 大涵道比发动机研制生产的供应链未形成。主承包商大飞机公司刚成立,与现有发动机企业、地

制造、全生命周期管理、供应链管理等信息化技术应用模式。结合我国航空制造业信息化技术的应用现状,就大涵道比发动机制造信息化技术的应用提出以下建议:

(1) 大涵道比发动机的研制生产必须按市场规律运作。大涵道比发动机的市场规律运作就是全球经济模式,在做好设计、装配和试验等关键环节的同时,必须利用网络技术,按市场经济规律,在网络化的全球经济市场中,从世界范围内最合适



俄罗斯伊尔-86飞机的数字建模

方企业、民营机构和国外企业等分包商之间的供应链环节还未理顺,更谈不上全球供应链信息化管理。

大涵道比发动机信息技术应用建议

我国发动机设计与制造企业地域分布广(北京、黑龙江、辽宁、陕西、四川、贵州、江苏、湖南等省市)、跨部门(中国一航、中航二集团)、网络信息交流不畅、发动机型号多批量少,信息化技术的应用水平发展还不平衡。虽然军用发动机研制有一定的技术积累,但大型运输机发动机生产基本是空白。大涵道比发动机研制在基于已有研究基础的同时,还必须引入地方和民间资源,广泛开展与国外的交流和分包。因此,大涵道比发动机研制迫切需要采用国际通用的研制模式,采用先进的异地协同设计

的地方以最合理的价位获得最佳质量的发动机部件。

(2) 重视基础技术的研究与开发。为了满足航空发动机部件的低油耗、低成本、轻量化、整体化的要求,必须不断的研究和开发新的制造方法和工艺。我国发动机以及飞机的制造水平低,制造质量不稳定、制造周期长,主要是基础技术的研究不够充分。以切削加工为例,铝合金、45号结构钢的切削数据较全但没有建立共享的切削参数数据库,而发动机广泛使用的钛合金、高温合金、不锈钢等材料的切削数据不全,没有建立完整的切削参数数据库,也没有按不同材料的切削工艺要求设计相应的系列化特种刀具。等温锻造、精密锻造、定向凝固与单晶叶片精铸、焊接、特种加工、陶瓷材料成型、复合材料成型等技术的工艺数据积累也不

够全面。这些关键的基础技术研究和工艺数据库的建立,对提高发动机制造水平至关重要,是实现发动机高效制造的基础。希望国家在开展大飞机研制的同时,系统全面的开展相应的基础研究工作,切实取得完整、有实用价值,并经制造环节验证的制造工艺数据。这些基础数据不仅能最大限度的提高发动机的制造水平和制造能力,而且还能保证工艺仿真的真实性和有效性。

(3) 建立知识积累机制,促进大涵道比发动机生产制造规范和标准的形成。我国经过 50 多年航空发动机的研制,在发动机制造中积累了大量的经验和知识,但没有建立科学、良好的知识积累机制,许多知识(经验)没有转化为规范和标准,随着人员的退休、调离、升迁、跳槽等原因,许多非常有用的制造知识和经验没有保存下来,这是发动机行业的一大损失。知识积累不能视为信息的简单堆积,而应当是技术人员积极交流、系统固化和知识共享的过程。对大涵道比发动机设计、制造、装配、维修的全生命周期来说,需要营造一种良好的知识氛围,建立一个自我组织和灵活、高效的知识信息化网络,以分布式的组织结构,促进无等级制的快速的知识流动。在大涵道比航空发动机的制造过程中,必须充分利用各种具有优势和特色的制造技术及工艺过程,利用信息技术手段,将这些过程复杂、周期长、费用高的技术和工艺过程进行归纳和总结,形成高效的发动机关键零部件的制造规范和标准,以确保发动机零件稳定的制造质量。

(4) 积极推动设计、制造工艺与制造过程仿真技术的研究与应用。仿真技术基于设计知识和基础工艺数据可以实现发动机运行状态、零件成型过程以及企业制造资源运行状态的计算机模拟。发展大涵道比发动机,开展仿真技术研究与应用应从

宏观、微观和过程 3 方面展开研究。宏观上,仿真发动机供应链的运行状况,决策和评价生产状况,并及时调整和优化供应链,使发动机总体生产效率最高、成本最低、质量最好;微观上,对发动机关键件的切削、铸造、锻造、焊接等成型过程进行仿真,可预先给出零件的成型工艺参数,以指导零件的实际制造;过程仿真,主要指对装配过程仿真,达到优化装配的目的;对企业的生产运行或制造系统生产线的运行过程进行仿真,可以根据企业的计划生产能力、零件加工所需工序,快速交互地确定各种生产线布局方案。

(5) 建立一批高水平的数字化制造生产线。从总体上讲,我国目前不具备大涵道比发动机的生产条件,但是制造大涵道比发动机的许多关键技术已经突破,从实验室阶段的技术突破到大规模工程应用还需要开展大量的工程化研究工作。长期以来在计划经济的思维模式下,我国既是科研成果的高产出国,又是科研成果的低应用率国家,主要原因有 2 个:一是技术成熟度低、推广效果差,二是成果的推广机制不完善。因此,在大发动机生产过程中必须按市场规律完善和推动发动机关键制造技术的推广应用,用 3 ~ 5 年的时间,发现和培育研究基础较好的科研成果,建立一批大涵道比发动机关键件如定向、单晶涡轮叶片精铸生产线、压气机叶片精密锻造生产线、宽弦空心叶片生产线、复合材料数字化成型生产线、整体叶盘数字化精密加工生产线、复杂发动机结构等温锻造生产线等数字化生产线。这些数字化生产线采用多种工艺、多种设备相结合的方式,在同一 MES 系统的支持下覆盖从毛坯到合格产品的全过程,并按照数字化、敏捷化的先进制造模式运行的自动化生产系统。这些数字化制造生产线既可以用于大涵道比发动机的生产制造,也可以为军用发动

机生产服务,并能够实现与发动机行业现有的机匣线、叶片线、盘环线、中小钢件线的有机结合,从而建立我国具有高工业化水平的航空发动机研发平台,形成我国大涵道比发动机自主研发、生产体系。

(6) 全面实现大涵道比发动机三维全数字化定义及异地协同设计制造。大涵道比发动机的生产模式要求以全三维数字化定义为基础,建立异地协同设计制造管理平台,实现基于协同工作平台的信息集成。大涵道比发动机的设计、制造、管理要跨越地域、空间的限制,将分散在中国的上海、西安、沈阳等地区和美国、英国、俄罗斯等国家在发动机供应链上的资源利用计算机、通信、网络等技术实现信息的交换与共享,实现异地协同设计和制造。

(7) 加强大涵道比发动机全生命周期管理和供应链管理。按照大涵道比发动机的特点开展发动机的全生命周期管理和供应链管理,实现发动机设计、制造、维护、适航认证、交付过程的高效、低成本运行。

结束语

中国制造大飞机在短期内从国外购置少量发动机或许可行,但长期大量依靠国外公司提供高性能发动机是根本不可能的。目前我国航空发动机行业的体制模式、运行状态、技术水平、人员素质等要在近期内生产出能与 GE、普惠、罗·罗相竞争的大涵道比发动机几乎是不可能的,所以目前在大幅度改善我国发动机行业运行体制、提高现有发动机制造团队素质的同时,必须以信息技术为依托,充分整合我国航空发动机行业的优势资源,实现设计、制造、装配、维修全生命周期的高效运行,积极借助国外先进技术和国内民营企业在单项技术方面的优势,早日实现中国的大飞机装上“中国心”。

(责编 微凉)