中国航空发动机集团有限公司

中航动力股份有限公司

工程与管理数据中心建设项目

可行性研究报告

中国航空规划设计研究总院有限公司

2016年3月

版权所有　不得复制

图册号：97135 可-1/5

编 制 人 员 名 单

专　　业	设　　计	校　　对	审　　核	审　　定
工　　艺	王　刚 薛承博 田　凯	秦　培	王少龙	李　凯
技术经济	王　蕊	李　玲	李梅英	李梅英

报告确认

中航动力股份有限公司(简称中航动力)对《中航动力股份有限公司工程与管理数据中心建设项目》进行了审阅。认为本可研建设方案，符合中航动力关于本项目的相关要求。

中航动力代表签字：_____

目　　录

序号	名　　称	页次或图号
1	项目概述	1
	1.1　项目名称及承办单位	1
	1.2　项目提出的依据	1
	1.3　建设单位基本情况	1
	1.4　项目提出的背景及理由	2
	1.5　项目概况	3
	1.6　需要说明的问题	7
2	项目的必要性和可行性	10
	2.1　项目必要性	10
	2.2　项目可行性	13
3	主要协作关系及任务分工	16
4	技术攻关方案	15
	4.1　工程数据中心	17
	4.2　管理数据中心	69
5	组织机构、劳动定员和人员培训	69
	5.1　组织机构	69
	5.2　劳动定员和人员培训	69
6	项目建设实施计划	73
	6.1　项目建设周期	73
	6.2　项目建设实施安排	73

目　　录

序号	名　　称	页次或图号
7	项目招标方案	83
8	投资估算	84
	8.1　投资估算说明	84
	8.2　投资估算表	85
9	结论和建议	88
10	附表、附件、附图	89
	1）新增工艺设备明细表	89

1　项目概述

1.1　项目名称及承办单位

1.1.1　项目名称

中航动力股份有限公司工程与管理数据中心建设项目

1.1.2　承办单位及法定代表人

承办单位：中航动力股份有限公司，简称中航动力。

法定代表人：庞为。

1.1.3　项目拟建地区和地址

建设地点在陕西省西安市未央区徐家湾。

1.1.4　可行性研究报告编制单位及法定代表人

编制单位：中国航空规划设计研究总院有限公司。

法定代表人：廉大为。

1.2　项目提出的依据

1.2.1　甲方提供的设计资料

1）航空发动机智能制造关键技术研究项目设计方案。

2）甲方提供的投资估算。

1.2.2　国家和地方、行业现行有关法令、法规、规范、标准

1.3　建设单位基本情况

1.4.1　建设单位现状

中航动力是中国大中型军民用航空发动机研制和生产基地，大型舰船用燃气轮机动力装置生产修理基地和新型环保能源领域研发基地；是国家认定企业技术中心、博士后科研工作站设站单位。

公司经历了我国各类大中型航空发动机的研制过程，研制生产了多型涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、大档功率舰用燃气轮机。具备航空发动机盘、轴、叶片、机匣等关键零件制造、检测、整机装配、试车，以及发动机修理、维护、服务保障等全套技术研制和生产能力，承担着大涵道比和新一代航空发动机的研制任务。积极融入世界航空产业链，与美国 GE、英国 RR 等世界著名航空发动机制造企业建立了长期战略合作伙伴关系，全球有一千架以上在役民航飞机装有公司制造的零部件；非航产品由传统产业向新能源、洁净能源等发展，涉足斯特林太阳能发电装置、工业燃机等新能源和石油钻采设备、新材料新工艺、建筑装饰等。

1.4　项目提出的背景及理由

航空发动机是大国的战略性产业，航空发动机作为当代前沿理论和技术的集成者，一直是大国争雄的核心领域之一，是关系到国家安全、经济建设和科技发展的支柱产业，是一个国家综合国力、工业基础和科技水平的集中体现，对国家安全和发展具有全局意义和深远影响。本项目能够提升国内航空发动机研发数字化水平，支

撑新一代研发技术体系在航空动力成员单位企业全面运行

1.5 项目概况

1.5.1 技术攻关主要研究内容

本项目包含工程数据中心和管理数据中心两部分内容，其中：工程数据中心分五个子项，技术攻关主要研究内容为智能制造共性技术研究、机匣零件智能制造关键技术研究、中央齿轮机匣壳体智能制造关键技术研究、航空发动机液压作动筒智能制造关键技术研究和压气机叶片智能制造关键技术研究。

1）工程数据中心

（1）智能制造共性技术研究

围绕航空发动机零件智能制造需求，实现产品生命周期与生产生命周期融合，主要内容有：

a. 数字化生产线规划设计技术，含：数字化工厂体系研究、数字化生产线功能设计与系统总成技术、生产线状态智能诊断与维护技术、数字化生产线运行综合管控技术等；

b. 基于 MBD 技术的设计制造协同，含：基于结构特征的 MBD 建模规范和标准研究、设计制造协同规范和标准研究、工艺分工与 BOM 管理方法、生产工艺准备状态管理模式研究等；

c. 数字化工艺设计，含：数字化工艺规划与管理技术、工艺细化方法研究、结构化工艺规范研究、数控加工快速程编工具开发与应用

等。

d. 虚拟仿真，含：仿真资源数据库构建技术、工具数据库构建技术、切削参数库构建技术、仿真数据与工程数据中心集成技术等。

e. 系统集成技术，含：产品实物数据分析技术、现场服务总线集成技术、制造数据与工程数据中心集成技术等。

（2）机匣零件智能制造关键技术研究

围绕机匣生产线建设或改造需求，实现产品生命周期与生产生命周期融合，主要内容有：

a. 数字化工艺设计，含：机匣生产线铣、车复合加工过程工艺路线规划技术研究，机匣生产线铣、车复合加工自动化编程技术研究等；

b. 虚拟仿真，含：机匣数字化工厂建模及仿真技术，机匣工艺过程物理仿真、分析及优化技术，机匣工艺参数分析优化技术，虚拟仿真工具集成技术等；

c. 物理验证，含：机匣生产线铣、车复合加工切削路径优化技术，机匣复合加工过程中的高速铣削技术，机匣生产线复合加工过程装夹与支撑技术，机匣智能加工过程控制技术，基于典型机匣特征的数字化检测技术研究等。

（3）中央齿轮机匣壳体智能制造关键技术研究

以航空发动机中央齿轮机匣壳体为验证对象，系统地开展智能制造技术研究，实现加工过程的状态感知、实时分析、自主决策以及精准执行，减少人为干预。通过智能制造单元的相应技术研究，建立中

央齿轮机匣壳体零件制造智能加工验证平台，缩短产品制造周期20%、生产准备周期30%。具体内容如下：基于MBD技术的设计制造协同、数字化工艺设计、虚拟仿真、物理验证。

（4）航空发动机液压作动筒智能制造关键技术研究

研究航空发动机作动筒基于 MBD 技术的设计制造协同，通过PBOM建立起适合企业内部使用的数据模型，并研究数据、属性等与设计的对应关系；研究作动筒数字化工艺设计，在结构化工艺、典型特征编程、工艺数据库等方面展开研究；使用仿真平台模拟零件虚拟制造过程，在零件物理生产之前完成零件所有过程的仿真，并通过实际生产线验证典型零件数字化制造与自动化制造的全过程。包括：基于MBD技术的设计制造协同、数字化工艺设计、虚拟仿真、物理验证。

（5）压气机叶片智能制造关键技术研究

a. 数字化工艺设计

a）知识驱动工艺流程设计

通过构建压气机叶片典型工艺流程知识数据库，制定压气机叶片的工艺流程编制规范，开发基于知识库驱动的工艺流程设计专用软件，用规范和知识数据库来驱动典型工艺流程的设计过程。

b）知识驱动数控加工程序设计

通过构建切削刀具库、切削参数库，并集成到程序编制软件中，实现模型特征的智能加工程序设计。

在 PDM 中实现压气机叶片数控程序模板管理，实现压气机叶片数控编程知识的重用。

b. 虚拟仿真

a）生产单元运行仿真

模拟叶片加工单元的运行过程，实现生产过程模拟。

b）机加工艺几何仿真

通过机加工艺全过程的几何仿真，及时发现工艺流程设计中的问题。

c）物理验证

自感知、自适应加工、智能装备、智能分析与决策。

2）管理数据中心

数字化生产线运行综合管控技术和管控系统集成技术。

1.5.2 项目主要建设内容

本项目包含工程数据中心和管理数据中心两部分内容，工程数据中心分五个子项，包括：航空发动机智能制造共性技术研究、航空发动机机匣零件智能制造技术研究、航空发动机中央齿轮机匣壳体智能制造技术研究、航空发动机液压作动筒智能制造技术研究、航空发动机压气机叶片智能制造技术研究，其中，后四项为第一项的典型件实施技术验证；管理数据中心包括数字化生产线运行综合管控技术和管控系统集成技术。

1.5.3 项目总投资及资金来源

1）项目总投资

本项目总投资（总经费）10975 万元，含 324.61 万美元。

2）资金来源

本项目总投资 10975 万元，全部为募投融资。

1.5.4 项目建设周期

本项目建设（研究）周期为 60 个月，即：2014 年 1 月至 2018 年 12 月。

1.6 需要说明的问题

1.6.1 调整的原因

数据中心项目为 2014 年立项项目，最初目标是建成工程数据中心和管理数据中心，对航空发动机全生命周期工程数据（有效的工程数据、重要的工程知识数据、必要的工程资源数据）和管理数据进行集中存储和管理，支持航空发动机自主研发业务模式，推进数字化设计和制造技术的研究及发展。

2015 年，国家正式发布了《中国制造 2025》，作为实施制造强国战略的行动纲领，并对航空制造企业向数字化、网络化与智能化方向转型升级提出了明确要求。在新的智能制造模式下，信息系统之间、信息系统与自动化系统之间要实现深度集成，数据（工程数据和管理数据）采集、管理和应用的方式发生了显著的变化，涉及的数据管理类型也会扩展到生产数据、计量数据和质量数据等，除了基本的数据

共享管理以外，更加注重大数据的分析能力。项目原有的数据中心建设内容与中航动力实施智能制造的实际需求存在一定差距，因此，需要对原建设内容进行调整，面向智能制造，对产品自主研制过程的产生、传递、存储、管理、应用的模式开展关键技术研究，并针对航空发动机典型件、形成制造过程和生产线数据模型的技术标准。

按照项目调整后的研究及建设内容，中航动力将突破产品设计、工艺设计、智能线建设、生产管控等方面的智能制造共性关键技术，建立与产品研制现场集成的细分数据库，同时，建立四类典型零件的数字化生产线（生产单元）建设模型，形成中航动力智能制造系统保障能力。

调整后的研究内容包括五个方面，分别是航空发动机智能制造共性技术，航空发动机机匣零件智能制造关键技术、航空发动机中央齿轮机匣壳体智能制造关键技术、航空发动机叶片液压作动筒智能制造关键技术和压气机智能制造关键技术。其工程数据和资源数据来源与工程数据中心和管理数据中心，同时形成更为系统的数字化工厂技术、智能制造技术和工业软件，及其工艺装备，并对工程数据中心进行科学化、标准化和规范化的反复迭代，促进强基工程的产业化发展，能够进一步夯实航空发动机基础，并对航空发动机强基工程起到更有利的支撑。共性技术研究内容包含生产线规划技术、设计制造协同、数字化工艺、虚拟仿真和系统集成等详细研究内容，重点关注产品设计、工艺准备、生产过程的智能化关键技术研发和应用系统研发，涉

及产品数据、工艺数据、工具数据等工程数据库的构建及集成，后 4 项为智能制造共性技术研究的典型件技术验证，是对工程数据中心实用性的综合验证，及充实工程数据中心的数据。

2　项目的必要性和可行性

2.1　项目必要性

随着德国“工业4.0”概念的提出与内涵的不断完善，美国先进制造计划不断地完善及案例持续的更新，中国制造2025的提出以及智能制造专项的发展，要求航空制造企业必须向着数字化、网络化与智能化的发展。其中：

数字化是指：以模型的方式实现产品生命周期和生产生命周期的数字量表达；定义系统的需求、功能、逻辑和物理（RFLP）模型；定义制造的产品、工艺和资源（PPR）模型，通过仿真、分析和优化生成驱动机器执行代码。

网络化是指：将数字化模型应用到产品生命周期、生产生命周期和价值链的协同过程；支持以“数字线”为核心的设计、制造、管理和服务的集成；实现网络化跨域能力单元的动态配置、优化。

智能化是指：延展人类认知过程和机器动力控制系统的自主化能力；基于赛博物理系统（CPS）实现对物理世界的感知、处理、决策和反馈；提升设计、制造、管理、服务、管理等业务过程的自组织、自学习、自适应、自优化能力。

根据这三化的发展要求，在生产制造领域，首先以产品、工艺和资源模型为核心，以仿真为手段，进行工艺的优化；其次以“数字线”为核心，完成工艺向生产转化，同时将生产现场装备、机床设备及产品等以工业网络技术进行联接，形成有机的综合机体，进行统一调度和自动运行；再者，基于网络环境构建CPS系统，在CPS的基础上感知各项数据，开展制造工程数据分析，实现制造、管理及服务等业务过程的自组织、自学习、自适应、自优化，实现自动调度与快速生产。

因此，在此工艺变革与生产线革新的两大需求驱使下，势必开展以下举措：

1）通过贯通虚拟研制到实物生产的所有环节，通过 PLM、MES 与 TIA 系统的集成和融合搭建出了面向未来工业再发展的智能架构，使企业能够支撑多种生产模式的变化，在占用资源更少的情况下实现产能跃升，灵活的应对市场和全球领域的需求和技术更新变化，从而促进工业的生产模式优化和发展。

2）以数字化手段改进工艺，提高切削效率。目前的工艺一般数控加工为主，但是切削参数给的较保守，因此需要尝试采用新加工策略、新的切削参数，但这势必增大出错率，则需要加大仿真验证，提前预错。

3）通过对现有低产的生产线进行改造，提高其生产效率，以实现增产。但是新的、高效的生产线建设存在十分巨大风险，因此在生产线建造前，需要提出一套切实的建设方案，并且该建方案能够准确估算未来的产量，能够提前仿真整个生产环节。

4）以智能化为向导、以 CPS 为核心，提升生产线的智能性与高产性。重点在自动化加工、物料存储、物流传输、生产管控及复杂生产线集成等方面进行突破。但是这类技术一般涉及硬件和软件，在生产线未正式构建之前，则主要基于现有环境，开展技术研究，并形成可行性研究报告，为智能化生产线的建设提供关键技术支持。

航空发动机是飞机的“心脏”，需要在高温、高压、高转速环境下长期反复使用，其结构复杂、技术难度大、研发周期长，被誉为“现代工业皇冠上的明珠”。目前全世界能研制高性能航空发动机的只有美、英、俄、法四国，先进的航空发动机已经成为一个国家军事装备、科技工业水平和综合国力的重要标志之一，集中体现了一个国家高端制造业的水平和能力，历来是世界军事强国优先发展、高度垄断、严密封锁的核心关键技术。

随着军用飞行器不断发展，对航空发动机的要求大幅提升，航空动力

技术逐渐向满足持续留空时间长、进入临近空间、速度和机动要求、机载能量武器需求、持续作战能力需求以及隐身等其他能力需求的方向发展，发动机产品需要完成由当前三代机向未来四代机的跨越。

大批先进技术和复杂结构将在新产品中采用，例如整体叶盘制造技术、宽弦空心风扇叶片制造技术、浮动壁瓦片制造技术、单晶涡轮叶片等制造技术。现有制造技术很难满足产品高可靠性、高质量、高寿命要求，因此对我国航空发动机制造能力提出非常高的要求，需要在当前技术水平基础上实现制造能力的快速提升，从仅注重几何加工和定性测量的传统粗放式加工方式，逐步完成向以精密化、柔性化、智能化和集成化为特点的精细化加工方式转变。一方面大幅提升加工精度和效率，另一方面有效降低成本、提高经济性。

当前的传统制造方式是一种离散的制造模式。由于“厂所分治”的现实情况，设计和制造部门的工作协同无法做到全面和及时，产品数据难以反馈回设计部门，影响外场服务保障。同时，企业管控、工艺准备、生产准备缺乏系统衔接，设备数据交互能力不足，生产效率增速远低于产品需求增速，无法满足未来先进发动机复杂结构以及先进工艺的要求。中航工业发动机各成员单位总体上处于“工业 2.X”阶段，部分生产线达到了“工业 3.0”阶段，距离智能制造的目标尚有较大差距。

在航空发动机领域大力开展智能制造技术研究，在传统制造技术基础上发展先进制造技术，打造支撑现代制造业的骨架和核心，将成为提高设计、制造和管理水平，保障重点型号的研制，促进航空工业跨越式发展的必然选择。以信息化带动传统制造业长足发展，以网络化突破空间地域对企业生产经营范围和方式的约束，实现企业间的协同和各种社会资源的共享与集成，将数字化制造技术渗透到产品研制的设计、制造、试验和管理的全过程中，提高生产过程的可控性、减少生产线上人工的干预，高效、高质量、低成本地为市场提供所需的产品和服务。

2.2 项目可行性

航空发动机技术的发展，对于数字化技术提出了更高的需求，对于智能制造技术建设提出了更大的挑战。需要将智能制造技术应用放在重要的发展地位，将其作为企业的核心竞争力培育，在更广的范围和更深的层次上应用数字化技术，增强航空发动机制造业的竞争力和快速响应能力。

1）智能制造共性技术研究

承研单位是国防工业重点建设的航空发动机零部件生产单位，拥有完整的专业生产线和专业的加工工艺技术/技能专家队伍，能熟练应用数字化工艺设计、数控加工、数字检测以及过程仿真的软件和设备。目前工厂在建项目以高档数控机床和数字化检测设备为主，具有较强的数控加工技术和管理基础，形成了完整的加工、检测技术体系，技术水平和制造能力处于国内领先地位。

为提高航空发动机自主研发能力，航空动力相继成立了企业技术中心、工艺研发中心、快速反应中心以及博士后工作站等，为技术攻关的完成提供了保障。

针对关键技术攻关项目，建立了以总工程师为攻关组长的科研团队，成员包括发动机首席专家、研高工、高工等 30 余人，攻关团队协同、并行开展相应工作，该项目通过国内外高校、企业开展“产”、“学”、“研”、“用”合作，组成了一支高素质、技术全面稳定的研究队伍，航空动力拥有一支优秀的数字化制造技术、技能专家队伍，能熟练应用数字化工艺设计、数控加工、数字检测以及过程仿真的软件和设备，目前已经有多项数字化技术获得突破，这些技术已经成功推广应用到多个型号的科研生产中，提高了产品质量，降低了研发成本，缩短了产品研发周期。

2）机匣零件智能制造关键技术研究

承研单位拥有完整的机匣生产线和专业的机匣加工工艺技术/技能专家

队伍，能熟练应用数字化工艺设计、数控加工、数字检测以及过程仿真的软件和设备。目前工厂在建项目以高档数控机床和数字化检测设备为主，具有较强的数控加工技术和管理基础，形成了完整的加工、检测技术体系，技术水平和制造能力处于国内领先地位。

3）中央齿轮机匣壳体智能制造关键技术研究

通过深入开展数字制造技术的研究与应用，搭建安全、稳定的信息化基础平台，在贯穿于整个产品研制的技术准备、制造过程、服务保障等全寿命周期相应环节中推进了数字化技术应用。数字化技术已在部分型号研制中的设计制造数据协同、工艺设计、工装设计等环节的工程化应用，多轴数控编程、数控加工几何仿真等技术在航空发动机关键零部件制造过程中得到广泛应用。

基于 MBD 技术的工艺、工装设计、复杂零件的数控编程与加工技术已在某航空发动机齿箱壳体类零件研制中得到验证应用，并掌握了三代机中央齿轮机匣壳体的数控加工技术，满足了型号研制需求。为数字化智能制造奠定了基础。

承研单位相继建设并获得批准成立了企业技术中心、博士后工作站等，为技术攻关的完成提供了保障。

针对该项目，成立了以总工程师为攻关组长的科研团队，成员包括首席专家、研高工、高工等 30 余人，攻关团队协同、并行开展工作。该项目通过与国内外高校、企业开展“产”、“学”、“研”、“用”合作，组成了一支高素质、技术全面稳定的研究队伍。目前已有多项关键技术获得突破，先后掌握了二代、三代、四代发动机关键零件制造技术，数字化制造体系初步形成，已经基本形成数字化技术覆盖领域齐全、覆盖深度不断增加的发展格局。

4）航空发动机液压作动筒智能制造关键技术研究

通过承担批产和新机液压作动筒的加工生产，承研单位具备完整的工艺技术标准和质量体系，具有坚实的技术能力和加工实力。随着企业近些年

在信息化方面的投入，当前企业已建立起以 PDM 为基础的工艺研发平台，以及以资源管理为主的 ERP 平台，具备了对液压作动筒进行数字化研究的条件。

5）压气机叶片智能制造关键技术研究

通过多种型号航空发动机的研制和生产，基本掌握了压气机叶片制造技术。

（1）掌握了压气机叶片复杂型面数控铣加工技术，五轴数控铣削加工自动编程技术，几何仿真技术，型面无余量数控铣削加工技术。

（2）积累了高温合金、不锈钢、钛合金等材料的加工经验参数。

为了提高航空发动机压气机叶片制造能力，承研单位相继成立了工艺研发中心、快速反应中心等，为技术攻关的完成提供了保障。

针对关键技术攻关各子项目，分别成立了以总工程师为攻关组长的科研团队，成员包括发动机首席专家、技术专家、研高工、高工等。攻关团队协同、并行开展相关工作。

另外，通过与国内外高校、企业开展“产”、“学”、“研”、“用”合作，组成了一支高素质、技术全面稳定的研究队伍，针对压气机叶片加工技术，制定可行的技术方案、基础理论及方法研究、工艺技术研究、工艺装备研制等。近年来，承担和参与了多型航空发动机、燃气轮机科研生产任务，目前已有多项关键技术获得突破，已成功推广应用到多个型号的科研生产中，提高了产品质量、降低了生产成本、缩短了科研周期。

3　主要协作关系及任务分工

本项目为工程与管理数据中心建设项目，包含工程数据中心和管理数据中心两部分，部署在四个建设地点。其中工程数据中心包含五个子项目，航空发动机智能制造共性技术研究和航空发动机机匣零件智能制造关键技术研究由黎明航空发动机（集团）有限责任公司负责项目组织与协调工作；航空发动机中央齿轮机匣壳体智能制造关键技术研究由中航动力股份有限公司负责项目组织与协调工作；航空发动机液压作动筒智能制造关键技术研究由贵州黎阳航空动力有限公司负责项目组织与协调工作；航空发动机压气机叶片智能制造技术研究由中国南方航空工业（集团）有限公司负责项目组织与协调工作；管理数据中心由中航动力股份有限公司负责项目组织与协调工作。

4　技术攻关方案

本项目包含工程数据中心和管理数据中心两部分内容，工程数据中心分五个子项，包括：航空发动机智能制造共性技术研究、航空发动机机匣零件智能制造技术研究、航空发动机中央齿轮机匣壳体智能制造技术研究、航空发动机液压作动筒智能制造技术研究、航空发动机压气机叶片智能制造技术研究，其中，后四项为第一项的典型件实施技术验证；管理数据中心包括数字化生产线运行综合管控技术和管控系统集成技术。具体技术攻关方案如下。

4.1　工程数据中心

工程数据中心不仅是航空动力的工程数据存储中心和数据共享管理平台，而且是中航动力面向智能制造的工作业务平台。重点建设内容包含 5 个方面：

1）智能制造共性技术研究；

2）机匣零件智能制造关键技术研究；

3）中央齿轮机匣壳体智能制造关键技术研究；

4）液压作动筒智能制造关键技术研究；

5）压气机叶片智能制造关键技术研究。

共性技术研究内容包含生产线规划技术、设计制造协同、数字化工艺、虚拟仿真和系统集成等详细研究内容，重点关注产品设计、工艺准备、生产过程的智能化关键技术研发和应用系统研发，涉及产品数据、工艺数据、工具数据等工程数据库的构建及集成。

4.1.1　航空发动机智能制造共性技术研究

为推进航空发动机零件生产方式变革和加工技术升级，实现航空发动

机零件智能制造，急需应对“新三座大山”的压力：一是在未来3~5年内，年生产能力提高2~3倍的产能快速增长压力；二是零件从现在的符合性加工交付转变为高品质加工交付的优质交付压力；三是从常规生产方式向高端制造变革所面临的集先进技术、软件工程、工艺装备为一体的技术产业化压力。目的是用适合的智能化手段解决目前企业自动化程度较低的问题，包括生产工艺准备过程和生产运行过程两个方面。为此，本项目重点关注生产工艺准备过程的智能化关键技术研发和生产运行过程的智能化应用系统工具研发两个方面。在此基础上，实施数字化生产线示范工程，实现年生产能力的快速增长、提高优质交付压力，并研发新工业革命、新工业转型的高端制造技术。

4.1.1.1　主要研究内容

1）智能制造关键技术的示范应用

通过技术攻关，突破典型零件智能制造关键技术，完善三维生产工艺准备模式，建立基于系统工程的机加工艺综合优化体系，提高生产工艺准备过程的自动化程度和三维制造技术应用水平。

2）智能制造应用系统工具的集成应用

通过典型发动机零件单元级多工序集成自动化技术攻关，组建发动机零件自动化加工，提高发动机零件的加工过程自动化程度和生产资源利用率。

3）实施数字化生产线示范工程

围绕生产车间与不同品种或批量的生产线进行综合建模，基于构建的模型完成生产线的设计与生产厂房的布局，然后根据经验与相应的仿真计算结果，对生产物流与生产线的能力平衡进行评估分析，最终得出各条生产线与生产厂房的年产量。数字化生产线的功能框架，从设计端的三维协同、数字化定义，到生产准备端的生产线仿真，再到制造端的自动化控制、自动化加工和检测，生产管控和工业网络，定位明晰的功能区间。在生产

线的生产过程中，从信息流角度来看，就是各个部门、设备等系统间的信息采集、分析、传输和执行；从业务流角度来看，生产线通过中央控制系统实现各制造业务环节的数字化功能模型，功能模块包括：产品设计、技术准备、技术管理、物流管理、数控加工、维护保障。

4.1.1.2　关键技术

1）数字化生产线布局规划技术

2）数字化生产线功能设计与系统总成技术

3）生产线状态智能诊断与维护技术

4）数控加工快速程编工具开发技术

5）工具数据库构建技术

6）工具数据库集成技术

7）基于 MBD 技术的设计制造协同

8）数字化工艺设计

9）虚拟仿真

10）系统集成技术

4.1.1.3　技术方案

智能制造是指将物联网、大数据、云计算等新一代信息技术与设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节融合，具有信息技术深度自感知、指挥优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称，具备以智能工厂为载体，以关键制造环节智能化为核心，以端到端数据流为基础、以网通互联为支撑的四大特征，可有效缩短产品研制周期、提高生产效率、提升产品质量、降低资源能源消耗，对推动制造业转型升级具有重要意义。

本项目围绕航空发动机零部件智能制造共性技术发展需求，实现产能、质量和效益的多元化增长，主要内容有：

1）数字化生产线规划设计技术

包括：数字化工厂体系研究、数字化生产线功能设计与系统总成技术、生产线状态智能诊断与维护技术、数字化生产线运行综合管控技术等。

2）基于 MBD 技术的设计制造协同

包括：基于结构特征的 MBD 建模规范和标准研究、设计制造协同规范和标准研究、工艺分工与 BOM 管理方法、生产工艺准备状态管理模式研究等。

3）数字化工艺设计

包括：数字化工艺规划与管理技术、工艺细化方法研究、结构化工艺规范研究、数控加工快速程编工具开发与应用等。

4）虚拟仿真

包括：仿真资源数据库构建技术、工具数据库构建技术、切削参数库构建技术、仿真数据与工程数据中心集成技术等。

5）系统集成技术

包括：产品实物数据分析技术、现场服务总线集成技术、制造数据与工程数据中心集成技术等。

4.1.1.4　主要技术途径

1）数字化生产线规划设计技术

面向智能制造的需要，针对航空发动机零件特色，进行数字化环境的优化与关键技术研究，形成数字化生产线设计方案，可直接指导新型高效物理生产线建设。数字化生产线规划主要是围绕生产车间与不同品种或批量的生产线进行综合建模，基于构建的模型完成生产线的设计与生产厂房的布局，然后根据经验与相应的仿真计算结果，对生产物流与生产线的能力平衡进行评估分析，最终得出各条生产线年产量。

（1）数字化工厂体系研究

结合“国家智能制造系统架构及标准体系”要求，建立适合企业生产方式下的智能制造系统架构及标准体系，形成数字化生产线规划设计的总

体要求、建设思路、建设内容和组织实施方式，并以此为依据支撑和指导数字化工厂在企业的实施和具体应用。通过研究各类数字化工厂智能制造先进应用及技术，提取其共性抽象特征，构建由生命周期、系统层级和智能功能组成的三维智能制造系统架构，从而界定数字化工厂中智能制造标准化的内涵和外延，识别智能制造中现有和缺失的管理文件，认知其交叉重叠关系，在此基础上形成综合智能制造系统架构各维度逻辑关系，将智能制造系统架构的生命周期维度和系统层级维度组成的平面映射到智能功能的相应层级，形成智能装备、智能工厂、智能服务、工业软件和大数据、工业互联网等五类关键技术文件，形成一套数字化工厂应用的标准和管理规范以及作业指导性文件，搭建数字化工厂体系。通过数字化体系研究，统筹管理资源规划、优化工厂建设架构，解决推进智能制造建设及实施工作中的数据集成、互联互通等基础瓶颈问题。

（2）数字化生产线功能设计与系统总成技术

定义数字化生产线的功能设计与系统总成，从设计端的三维协同、数字化定义，到生产准备端的生产线仿真，再到制造端的自动化控制、自动化加工和检测，生产管控和工业网络，定位明晰的功能区间。在生产线的生产过程中，从信息流角度来看，就是各个部门、设备等系统间的信息采集、分析、传输和执行；从业务流角度来看，生产线通过中央控制系统实现各制造业务环节的数字化功能模型，功能模块包括：产品设计、技术准备、技术管理、物流管理、数控加工、维护保障。

（3）生产线状态智能诊断与维护技术

开展故障树分析（FTA）、失效模式影响与危害性分析（FMECA）。基于丰富的故障知识库，对正在研制的航空发动机产品进行故障树分析（FTA）、失效模式影响与危害性分析（FMECA），支撑产品的“六性”分析。

实现高效的服务执行管理。根据维护保障服务规划和请求，制定维护

保障执行作业和任务计划，分配维护保障服务资源，估算服务工作量，跟踪从执行维护保障到完工确认的整个过程，记录完整的服务事件和数据。利用远程诊断技术，专家团队对故障进行远程分析，查询航空发动机当前和历史状态，详细记录远程诊断的过程和结果。

加强过程控制，对生产线上正在产生的实时数据进行分析，减少并预防产品缺陷的发生，降低直接生产成本和潜在风险成本。可对所有关注的生产过程进行实时监控和预警，帮助企业在第一时间发现产品质量隐患，提高对异常过程的快速响应能力。为 ERP、MES 系统提供实物管理数据，并提供分析工具，生成各类报表，提高生产过程中质量问题的汇总和分析能力。

2）基于 MBD 技术的设计制造协同

突破协同技术管理模式、协同平台环境等关键技术，建立基于模型的协同工艺准备系统，涵盖工艺设计、毛坯设计、工装设计和数字化检测等多个技术环节。

（1）基于结构特征的 MBD 建模规范和标准研究

结合发动机研制需求，构建发动机 MBD 标准体系，完成通用要求、叶片、盘、机匣、管路、复杂壳体等 MBD 标准、基于 MBD 的特征系列标准编制，规范发动机典型结构件叶片、机匣、盘、复杂壳体等模型定义要求；识别提取发动机零件通用、典型结构特征，基于 MBD 技术应用要求，规定特征形式、特征参数和特征标记要求；提出 MBD 模型检查要求，对模型数据质量的规范性要求作出规定；以图文并茂的形式对 MBD 标准应用技巧原则进行规定；规范航空发动机结构特征库的构建、管理和维护等要求。

（2）设计制造协同规范和标准研究

建立基于协同平台的适用于 MBD 设计制造一体化的工艺设计、工装设计、检测技术、数字化仿真及数字化装配的体系标准和制度；制定数字

化设计协同制造管理制度； 以标准为基础，基于协同研制平台完成标准化环境设置、设计特征库构建、MBD 模型模板文件制作等工作，将通用软件环境变为适合发动机型号研制需求的专用软件环境，满足设计、制造人员对软件易用性、标准适应性方面的需求。

（3）工艺分工与 BOM 管理方法

开展基于单一数据源的工艺模型研究，实现从产品设计到工艺、制造的模型信息集成，建立从 EBOM 到 PBOM、MBOM 的转换标准，可基于 PBOM 定义工艺路线编制工艺流水或工艺分工。

（4）生产工艺准备状态管理模式研究

数字化工艺设计管理将实现结构化、数字化零件工艺编制，实现工艺路线、资源物料需求、电子工艺等数据按生产任务需求下发生产车间。建立满足零部件制造的实际需要，支持工艺的应用需求，实现三维数字化工艺编制，初步形成适应发动机产品研制、生产的工艺中心数字化制造/工艺管理技术体系，初步形成数字化生产工艺准备模式。

借鉴国外先进企业经验，开展工艺标准化工作，打破传统的一人负责到底的工艺管理模式，实行顶层的工艺规划与专业化的详细工艺设计相结合的业务模式。开发相应的系统功能模块，并建立零件专业知识库，促进产品集成技术的积累和专业技术深度的研究。

3）数字化工艺设计

建立数字化工艺规划平台，实现数字化工艺规划与管理功能。依据工艺规划结果，各专业化工艺员开展详细工艺设计。大力推进结构化工艺研究及应用，实现工艺规程中工序、工艺资源等对象的结构化建模。推进工艺细化方法研究。基于典型设计特征建立具备可操作性的工艺规范和技术标准，加强制造过程控制。

（1）数字化工艺规划与管理技术

建立数字化工艺规划平台，实现数字化工艺规划与管理功能，支持工

艺路线的规划、加工余量的设计与调整、加工基准的选定，指派并关联数字化生产线的各工序加工单元和设备，在工艺资源数据库支撑下选择合适的工装、工具，提出新制工装请制需求，落实关重特性要求等工作，最终形成工艺规划报告和详细工艺设计任务书。

（2）工艺细化方法研究

实现产品制造工序的设计，解决冷热工艺融合、多工序尺寸链传递等问题。依据工艺规划结果，各专业化工艺员开展详细工艺设计。利用设计数据进行结构化工艺详细设计，加工图表可以进行客户化定制，支持工序模型和尺寸标注，制订详细的加工步骤和走刀路线。提出详细的检测要求和关重特性控制措施，明确加工参数和装夹找正要求，实现加工工艺与特种工艺的协同设计。可以实现对工艺数据的权限、版本、配置及流程管理。通过对典型工艺、工序、工步的模板化应用，实现知识重用，提高工艺设计效率。零件工艺的解决方案包括所有涉及零件制造过程，比如机加工艺、钣焊、锻铸、热表、及普通工艺等专业。

（3）结构化工艺规范研究

大力推进结构化工艺研究及应用。实现工艺规程中工序、工艺资源等对象的结构化建模，保证每个工序所需的加工（装配）零件、工序模型、工装、设备、NC 程序、作业指导书与相关工序关联，实现与 ERP、MES 的数据传递，提高工艺设计效率和工艺知识重用。全面推进工艺细化方法研究。基于典型设计特征建立具备可操作性的工艺规范和技术标准，加强制造过程控制。

（4）数控加工快速程编工具开发与应用

研究快速编程技术，满足典型零件的快速编程需求，解决程序质量难以有效控制、编程效率低、灵活性差等技术难题，形成基于知识驱动的编程新模式。

研发出一套适用于航空发动机零件的快速编程体系和软件工具，解决

航空发动机零件数控加工程序快速编制急需的方法和工具问题。通过在航空发动机型号工程中得到工程应用，进一步提高我国航空发动机零件的数控加工技术水平

4）虚拟仿真

（1）仿真资源数据库构建技术

深入开展工艺仿真技术研究，包含工厂/车间仿真、机加仿真、检测仿真、装配仿真、基于特征的NC 仿真、人因工程仿真、机械运动仿真等等，实现基于知识的仿真优化和制造反馈。

（2）工具数据库构建技术

建立统一的工艺知识库，包括典型件工艺模板，典型零件数控加工模板，典型零件铸造、锻造工艺, 标准热、表处理工艺及参数等。建立结构统一的制造资源库，实现制造资源数据的有效管理。针对设备、工具、工装等部分资源，建立起基于三维可视化模型的制造资源库，可用于加工装配过程的仿真。重点加强研发技术体系方法数据建设，统一整合、定制开发流程、工具、规范、工具数据库等数据管理功能，推进方法数据工程化应用。

（3）切削参数库构建技术

在企业已有基础数据库基础上，构建面向智能加工应用数据库系统。一方面，通过定义切削数据的实体关系模型、不同工艺策略之间的逻辑关联关系和不同特征不同加工技术指标的匹配规则，建立基础数据和工程应用数据之间的桥梁，实现基础切削数据的适宜性再加工；另一方面，深入研究分析不同工况下切削数据优化计算方法，开发基于航空发动机零件典型工艺特征的机械加工切削数据库，并实现与PDM/CAM 的集成，提供在不同切削条件下的动态切削数据，提升数控程序切削参数的精准性，提升加工效率和机床利用率，降低刀具成本。重点研究加工特征、加工材料、加工刀具、加工方法、加工策略、切削参数等之间的关联关系。

（4）仿真数据与工程数据中心集成技术

建立仿真数据库与工程数据库的接口，按照发动机公司工程数据中心的统一要求，规范化仿真知识数据、资源数据的管理功能。实时管理航空发动机仿真资源数据、仿真结果数据，支撑仿真业务开展。

5）系统集成技术

（1）产品实物数据分析技术

加强过程控制，对生产线上正在产生的实时数据进行分析，减少并预防产品缺陷的发生，降低直接生产成本和潜在风险成本。可对所有关注的生产过程进行实时监控和预警，帮助企业在第一时间发现产品质量隐患，提高对异常过程的快速响应能力。为 ERP、MES 系统提供实物管理数据，并提供分析工具，生成各类报表，提高生产过程中质量问题的汇总和分析能力。

（2）现场服务总线集成技术研究

现场服务总线集成，将数控设备控制与管理系统与工程软件集成，系统实现物料信息、工艺信息及工装工具信息，通过产品数据管理系统输入至数控设备控制与管理系统和生产执行操作系统，同时，将物料信息传递至生产执行操作系统的物资供给和库存管理。增配以太网交换机、补充网络节点、补充数控设备控制与管理系统点数，实现数控设备联网在线管理，数控程序通过网络直接分发到数控设备端，并支持在线加工，通过加密技术保证数据传输过程安全并收集详细的数据传输日志作为审计追溯手段。

（3）制造数据与工程数据中心集成技术

建立制造资源库与工程数据库的接口，基于架构统一、分布式部署的工程数据中心，管理航空发动机制造资源数据，实现动态数据采集结果与工程数据库的实时交互，支撑制造过程开展。

4.1.1.5　攻关达到的技术性能指标

1）建立数字化工厂示范体系。

2）建立数字化生产线运行综合管控体系。

3）典型零件编程效率提升 20%~30%。

4）实现仿真数据与工程数据中心的集成。

4.1.1.6　攻关研究成果及鉴定验收方式

1）硬件成果

（1）智能制造技术集成应用环境 1 个。

（2）数字化工厂示范线一条。

2）软件成果

（1）研究报告 7 份

a 数字化工厂建设规划研究报告。

b 数字化生产线状态智能诊断与维护研究报告。

c 仿真数据与工程数据中心集成研究报告。

d 现场服务总线集成研究报告。

e 制造数据与工程数据中心集成研究报告。

f 数控加工快速程编工具开发与应用研究报告。

g 基于 MBD 技术的设计制造协同研究报告。

（2）软件系统 4 套

a 数字化工厂建模及仿真环境 1 套。

b 仿真资源数据库 1 套。

c 工具数据库 1 套。

d 切削参数库 1 套。

（3）在国家级刊物发表论文 2~3 篇

（4）申请国家发明专利 2~3 项

3）鉴定验收方式

召开评审会进行鉴定验收。

4.2.1　航空发动机机匣零件智能制造技术研究

4.2.1.1　主要研究内容

围绕机匣生产线建设或改造需求，实现产品生命周期与生产生命周期融合，主要内容有：

1）数字化工艺设计，含：机匣生产线铣、车复合加工过程工艺路线规划技术研究，机匣生产线铣、车复合加工自动化编程技术研究等；

2）虚拟仿真，含：机匣数字化工厂建模及仿真技术，机匣工艺过程物理仿真、分析及优化技术，机匣工艺参数分析优化技术，虚拟仿真工具集成技术等；

3）物理验证，含：机匣生产线铣、车复合加工切削路径优化技术，机匣复合加工过程中的高速铣削技术，机匣生产线复合加工过程装夹与支撑技术，机匣智能加工过程控制技术，基于典型机匣特征的数字化检测技术研究等。

4.2.1.2　关键技术

1）机匣数字化工艺设计

2）机匣加工过程虚拟仿真技术

3）机匣加工物理验证技术

4.2.1.3　技术方案

本项目围绕机匣零部件智能制造关键技术发展需求，实现产能、质量和效益的多元化增长，主要内容有：

1）数字化工艺设计

包括：机匣生产线铣、车复合加工过程工艺路线规划技术研究，机匣生产线铣、车复合加工自动化编程技术研究等。

2）虚拟仿真

包括：机匣数字化工厂建模及仿真技术，机匣工艺过程物理仿真、分析及优化技术，机匣工艺参数分析优化技术，虚拟仿真工具集成技术等。

3）物理验证

包括：机匣生产线铣、车复合加工切削路径优化技术，机匣复合加工过程中的高速铣削技术，机匣生产线复合加工过程装夹与支撑技术，机匣智能加工过程控制技术，基于典型机匣特征的数字化检测技术研究等。

4.2.1.4　主要技术途径

1）数字化工艺设计

研究典型件的铣车复合加工工艺路线规划技术、切削路径优化技术，摸索铣车复合加工的切削参数选择、变形控制方法，实现车削、铣削、钻削等复合加工的工艺方法。

（1）机匣车铣、铣车复合加工工艺路线规划技术

研究典型件复合加工工艺路线规划方法的制定，研究车、铣复合加工技术在大型薄壁零件中的应用，针对当前零件的工艺路线，对相同加工状态的工序进行合并，探究车、铣复合加工技术的生产应用。

研究车铣、铣车复合加工工序中工步过程的制定，探索控制壁厚尺寸的复合加工方案，以及控制车、铣表面过渡区域表面状态。

（2）机匣车铣、铣车复合加工自动化编程技术

针对机匣典型件，以型号研制为载体，研究典型件的铣、车复合加工自动化编程技术，通过开展机匣编程特征模块化研究和特征编程技术研究，开发快速编程和 UG 后置处理系统，实现铣、车复合加工的车削、铣削、钻削等工艺的自动化编程方法。

2）虚拟仿真

研究机匣数字化工厂建模及仿真技术、机匣工艺过程物理仿真分析及优化技术，探索机匣工艺参数分析优化技术和虚拟仿真工具集成技术，实现加工过程前的预先验证及优化分析。

（1）机匣数字化工厂建模及仿真技术

建立一套集合柔性加工单元、数字化检测单元、生产准备单元、智能物料传输系统、中央控制系统、工业网络、PLM 数据管理系统的数字化生

产模型。在定义过程中，细化机床、设备、工装、工位等内容，落实物料传递路线、确立相应的物理参数，完成建造前的真实生产线与厂房的布局和规划。

模拟实际生产线的活动和状态，为调度决策提供依据，包括规划生产系统、优化生产线结构、确定生产能力和运作方式、优化关键参数、确定物料管理和存放、确定库存和警戒线、优化人力资源、预测设备故障、确定生产周期、确定控制策略。

（2）机匣工艺过程物理仿真、分析及优化技术

机匣工艺过程物理仿真、分析及优化包括机床动态响应过程诊断分析、加工系统动态仿真分析和面向工艺过程的关联性仿真应用等多个层次，其核心是机床动态响应数据、切削过程有限分析数据与加工几何仿真过程的关

联性应用，目的是提高智能加工工艺数据的准确率、适宜性和实用性。

（3）机匣工艺参数分析优化技术

基于切削加工系统特性测试结果和刀具/工件材料对的切削力系数，分别以材料去除率、切削功率消耗、加工成本等为目标函数，以稳定切削条件、切削力、机床功率、机床转矩和加工表面粗糙度等为约束条件，获取最优切削参数，利用仿真软件，预测加工过程中的变形，提早进行变形抵抗，从而减少变形，提高加工质量。

（4）虚拟仿真工具集成技术

利用综合集成的方法，将不同制造单元、业务活动分散的管理过程、信息技术和软件资源以及设计制造过程，通过封装技术和集成方法屏蔽原始资源的异构特性和地理分布性，整合为一个整体的制造信息系统，以仿真分析为手段，针对型号研制的各项性能指标要求，提供从概念技术规划到试制全过程的预先技术验证工具和方法。

3）物理验证

研究典型件的铣车复合加工工艺路线规划技术、切削路径优化技术，摸索铣车复合加工的切削参数选择、变形控制方法，实现车削、铣削、钻削等复合加工的工艺方法。

（1）机匣生产线铣、车复合加工切削路径优化技术

针对机匣典型件，以型号研制为载体，研究典型件的铣、车复合加工切削路径优化技术，开展机匣零件凸台、型腔等工艺特征-切削方案系统研究，摸索铣、车复合加工的刀具轨迹优化方法、切削参数选择、变形控制方法，实现典型件铣、车复合加工的切削路径优化。

（2）机匣复合加工过程中的高速铣削技术

研究高速铣削加工技术，进行对开机匣走刀轨迹及工艺参数优化技术研究，通过优化数控程序及加工参数等方法提高加工效率；以对开机匣典型件为载体，配合刀具相关技术研究，进一步优化零件装夹方式，提高零件刚性，满足零件高效铣削要求。摸索复合加工设备上的高速铣削加工参数，提高复杂型面的铣削效率和表面质量。

（3）机匣生产线复合加工过程装夹与支撑技术

分析国外机加变形控制专用工装夹具的结构特点、各元器件的装配关系等制造工艺，并总结出一套适用于机匣产品的工装选用方案。以工装零点快换基准系统技术、气液压控制工装技术实现零件加工的高效装夹，提高设备利用率，提高工艺能力。应用机匣变形控制工装技术，提高零件的刚性和减少零件的装夹应力，保证零件的加工质量，减少零件在加工中的振动，提高零件的表面完整性。应用随行工装技术，统一零件的加工基准，以提高零件的加工精度。随着零件加工新技术的发展，工装要有新的结构，满足新工艺技术的要求，满足工艺无干预加工的工装自动退让技术及柔性制造单元工装等。

（4）机匣智能加工过程控制技术

开展智能加工过程控制技术研究，突破加工位置及形状几何自适应控

制、加工过程自适应控制和生产运行自适应控制等方面的关键技术，实现加工过程中的智能诊断与维护、先进控制和优化。通过研发和应用自适应加工控制辅助工具，实现依据负荷、零件、余量等因素变化自适应调整策略的功能目标，以适应设备或零件的实时加工状况，满足因目标不同而制定的生产需求，达到工作效能的最大化。

（5）基于典型机匣特征的数字化检测技术

开展基于三维模型的离线快速编程技术研究，满足数字化生产线机床在线测量、三坐标精确测量的需求。开展以激光测量为代表的非接触式测量技术研究，通过快速成像，自动对比，实现数字化快速检测，满足数控自适应加工需求。采用新型的具有采集数据和反馈的测量器具，实时显示和记录测量的结果。并将检测结果数据与其它加工数据通过系统平台实现集成管理。

4.2.1.5　攻关达到的技术性能指标

1）完成 4 种典型机匣零件智能加工实物验证，单工序加工效率提高15%。

2）完成 4 种典型机匣零件单元级多工序集成自动化生产验证，提高加工效率 20%。

4.2.1.6　攻关研究成果及鉴定验收方式

1）硬件成果

（1）典型零件机匣单工序智能加工和单元级自动化加工夹具 6 套

（2）典型机匣零件单工序高性能数控加工加工刀具 4 组

（3）自适应加工应用系统 1 套

（4）8 件典型机匣零件成品实物：低压一级内机匣 2 件、低压二级机匣 2 件、前机匣上、下半部各 2 件

2）软件成果

（1）虚拟机匣生产线演示模型 1 套。

（2）软件应用工具 6 个：典型数字化检测工具、机匣数控程序快速程编工具、加工位置及形状几何自适应控制技术研发和工具集成、加工过程自适应控制技术研发和工具集成、生产运行自适应控制技术研发和工具集成、产品实物数据分析软件。

（3）机匣智能化生产线关键技术研究报告 6 份，包括：机床动态响应过程诊断分析、工艺过程仿真分析、加工系统动态仿真分析、面向工艺过程的关联性仿真应用、机匣零件典型工艺过程分析优化、工艺参数分析优化。

（4）工艺规程 3 份：低压一级内机匣车铣复合加工工艺规程、低压二级机匣车铣复合加工工艺规程和前机匣铣车复合加工工艺规程。

（5）数控加工程序 3 套：低压一级内机匣车铣复合加工数控程序、低压二级机匣车铣复合加工数控程序、前机匣铣车复合加工数控程序。

（6）在国家级刊物发表论文 2~3 篇。

（7）申请国家发明专利 2~3 项。

3）鉴定验收方式

召开评审会进行鉴定验收。

4.3.1　航空发动机中央齿轮机匣壳体智能制造技术研究

4.3.1.1　主要研究内容

以航空发动机中央齿轮机匣壳体为验证对象，系统地开展智能制造技术研究，实现加工过程的状态感知、实时分析、自主决策以及精准执行，减少人为干预。通过智能制造单元的相应技术研究，建立中央齿轮机匣壳体零件制造智能加工验证平台，缩短产品制造周期 20%、生产准备周期 30%。具体内容如下：

1）基于 MBD 技术的设计制造协同

基于单一数据源的中央齿轮机匣壳体类零件建模规范和标准研究

2）数字化工艺设计

基于产品特征的数控编程技术研究

3）虚拟仿真

（1）数控编程与加工仿真集成

（2）机械加工过程物理仿真

（3）机器人运动仿真

（4）智能制造单元虚拟建模及运行仿真

4）物理验证

（1）基于自动检测的数字化加工

•数控加工刀具机内自动检测

•数控加工零件机内自动检测及误差补偿

•基于特征尺寸的模型最大包容性分析

•数控加工零件机内自动定位

（2）面向制造过程的实时监控与优化

•基于感知的加工状态信息采集

•数控加工机床健康保障

•数控加工刀具状态管控

•机床可视化监控

•机床负载的自适应控制

•大数据分析与决策

4.3.1.2　关键技术

1）基于特征的数控编程及仿真集成技术

2）制造单元虚拟建模与运行仿真技术

3）包容性制造数据处理及计算分析技术

4）结合机内检测的自适应加工技术

5）基于感知的工况信息采集和大数据分析技术

4.3.1.3　技术方案

结合中央齿轮机匣壳体零件特点，开展基于单一数据源的中央齿轮机匣壳体类零件建模规范和标准研究，为行业标准的形成提供依据，促进单一数据源模型的高效利用;开展基于特征的数控编程及仿真集成技术研究，基于特征编程及加工仿真系统实现产品特征和工艺要素的参数化管理，通过加工编程与仿真优化集成，提高数控程序的质量；通过智能制造单元虚拟建模与仿真技术研究，提高研制周期制造过程透明化水平，缩短产品研制周期；通过机内自动检测及定位技术研究，结合机器人应用技术，缩短装夹时间，形成定位精度的快速响应，减少生产准备时间，提升设备能源利用率；开展数控加工机内在线检测技术研究，通过数控自动测量代替手工测量，实现对加工误差的自动补偿及参数优化，提高加工过程的生产力和效率；通过以上智能制造技术研究的应用验证，归纳制造过程数据的收集、处理与计算分析方法，形成一种智能制造单元构建模式，达到全面提高零件加工效率及制造质量，降低企业的生产成本，保障企业有限资源能够得到较充分应用的目的。

4.3.1.4　主要技术途径

1）基于 MBD 技术的设计制造协同

（1)基于单一数据源的中央齿轮机匣壳体类零件建模规范和标准研究

针对中央齿轮机匣壳体类零件，设计统一建模顺序、实行参数化建模，并建立建模标准，对中央齿轮机匣壳体零件的标注原则、标注信息、标注方法及标注形式进行定义，为行业标准的形成提供依据，促进型号数字化协同研制的顺利开展。

2）数字化工艺设计

（1）基于产品特征的数控编程技术研究

针对中央齿轮机匣壳体工艺和零件特点，对中央齿轮机匣壳体零件的几何特征、加工特征、工艺策略等进行研究，基于特征编程及加工仿真系统实现产品特征和工艺要素的参数化管理；通过研究特征识别技术，对零

件加工模型中的特征进行自动识别，实现基于特征的自动数控编程。

3）虚拟仿真

（1）数控编程与加工仿真集成

基于特征编程及加工仿真系统开展数控编程及仿真优化集成技术研究，实现数控加工编程过程中可直接调用机床、工装、刀具模型进行虚拟仿真，验证机床运动，包括轴的行程、换刀和进刀运动，并根据仿真的实际加工情况进行程序优化，在虚拟环境中实现边编程、边仿真、边优化。

（2）机械加工过程物理仿真

开展加工过程物理仿真的变形控制技术研究，基于加工过程物理仿真软件去模拟切削加工过程，综合考虑力、速度、加速度、质量、密度、能量等物理参数的影响，通过对工件、刀具、机床及 NC 程序的综合分析，模拟金属切削中的切削力、热流、温度、切屑形成、切屑断裂及残余应力，得到整个加工过程中的切削力、温度及功率等数据。仿真结果指导技术人员确定加工参数以及刀具配置，以便降低加工过程中的切削力、切削温度以及加工变形，从而减少车间现场实际物理验证时间与验证成本。

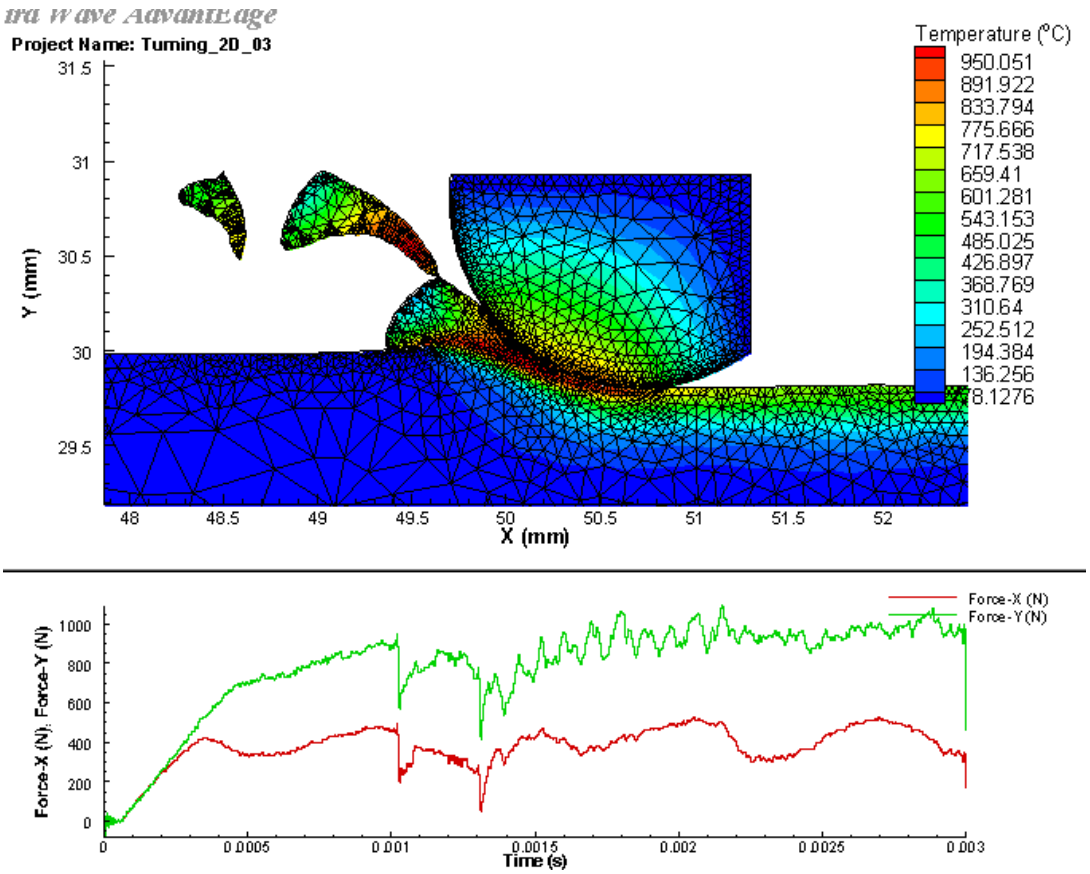

图 4.3.4-1　切削过程物理仿真

（3）机器人运动仿真

开展机器人离线编程及仿真技术研究，通过机器人离线编程及仿真系统实现机器人虚拟建模、机器人运动仿真、干涉碰撞检查等工作。通过仿真，系统自动将存在问题的路径突出显示，并对是否达到机器人的轴向限界，是否出现奇异和碰撞做出提示。以图形方式显示轴限界、手臂奇异和轴反转，直观了解机器人的运动，以图形方式显示机器人主轴的加速和减速，从而提高机器人编程效率及质量。

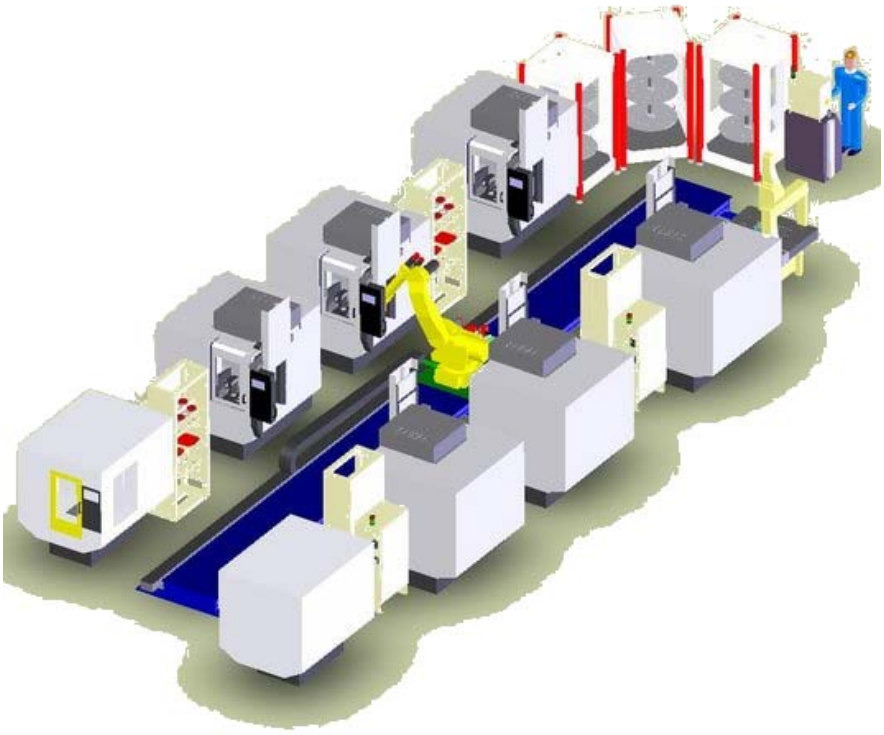

图 4.3.4-2　机器人运动仿真

（4）智能制造单元虚拟建模及运行仿真

开展智能制造单元虚拟建模及运行仿真技术研究，通过建立具备物理模型、逻辑模型和运动学模型属性的制造资源库，依据生产纲领、零件清单、工艺流程、生产组织、物流规划、工艺平面布置等参数，对智能制造单元运行过程进行模拟仿真。

考虑人机工程，对布局和生产线进行动态仿真过程进行分析和评价，对生产布局进行优化和调整，以满足效率、成本、人机工作能力等指标要求;最后将优化结果反馈给相应系统。

生产运行过程是一个复杂的系统，需要借助于数字化工厂软件进行仿真和分析，通过二次开发编制符合实际情况的逻辑和控制策略。在仿真过程中，可以通过图表输出生产过程相关的绩效状态数据(如设备的利用率、生产周期、生产日志等)，直观地描述生产系统的运行状态。根据仿真的结果，可以确定生产效率的影响因素，消除生产瓶颈，提高生产运营效率，

对生产计划与控制策略进行精确地指导。如下图所示。

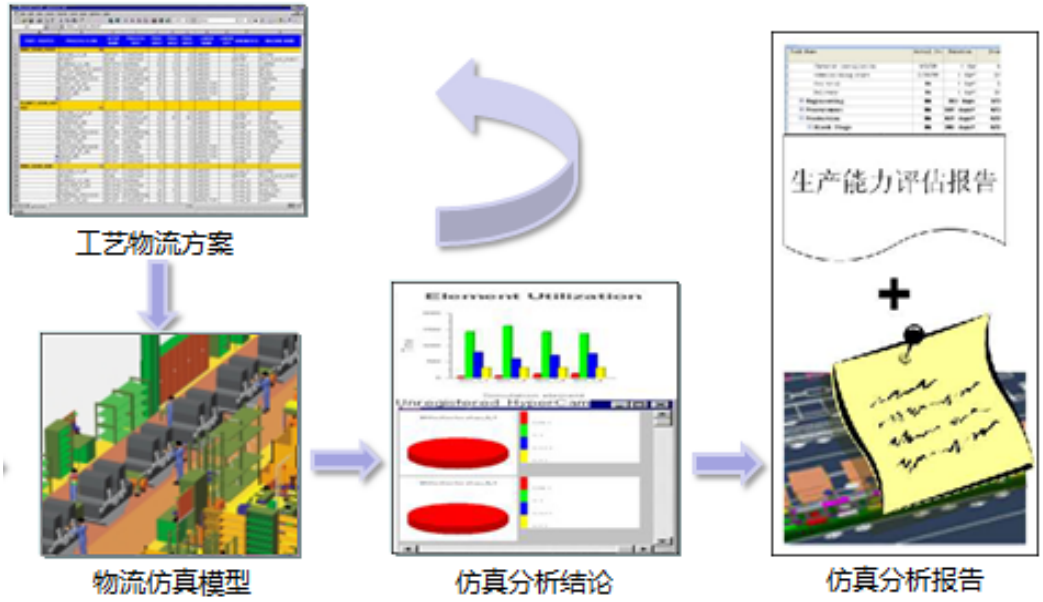

图 4.3.4-3　智能制造单元虚拟建模及运行仿真

4）物理验证

（1）基于自动检测的数字化加工

传统的手工检测和离线检测效率低、检测精度差、检测过程繁琐费力,已经远远达不到生产过程对刀具、零件检测速度和精度的要求，急需开展基于自动检测的数字化加工技术研究。一是在加工准备阶段，提高工件的装夹定位速度、实现刀具信息自动采集及其参数防错；二是在加工过程阶段，提高感知能力，实现零件机内检测与加工误差补偿。

a 数控加工刀具机内自动检测

通过在机床上安装配置机内刀具检测系统，研究机内刀具自动检测相关算法，并对检测数据的提取、传递、机床自动补偿等技术进行突破。通过刀具自动检测实现刀补信息自动更新，避免人工对刀，杜绝人为输错刀补造成零件报废的现象；对刀具调用错误、刀具安装错误、刀具过度磨损等现象，及时准确地发出报警，节省反复装卸、测刀、对刀所用时间，降低工人手动反复装卸、测刀、对刀工作量。

b 数控加工零件机内自动检测

研究开发零件机内自动检测及编程系统，输入零件识别后的待检测特征，自动生成测量主程序，确定测量轨迹、测点数目、测点布局，对测量过程产生的误差进行实时补偿，完成测量主程序与被调用宏程序的发送及测点坐标信息的接收；基于数控机床在线检测仿真系统，分析测头与待测部位接触点位置信息，并通过仿真对检测路径进行检查，修正程序编制中的错误，然后用修正后的程序继续加工。

通过在机床上安装配置零件机内检测系统（图 4.3.4-4 为检测技术流程），实现加工过程中，自感知加工余量，自适应调整下一步加工余量，保证加工稳定性和加工质量。该技术可以方便地在粗加工、半精加工等阶段就很好地控制产品的加工精度--通过检测迅速得到误差情况，及时调整加工方案，保证最终的加工符合要求。

图 4.3.4-4　机内自动检测及误差补偿

c 基于特征尺寸的模型最大包容性分析

中央齿轮机匣壳体结构复杂，其设计、生产、检测、试验等环节需要进行大量的实体数字化操作和三维测量，迫切需要快速、高效、准确的三维测量方法、逆向设计技术以及容差优化分配算法。

a）基于点云技术的实物模型快速生成

通过光学检测设备进行实物测量，以多幅点云的形式快速获取曲面的几何特征，运用逆向设计方法中的点云处理技术来获取快速获取实物的数字化模型。

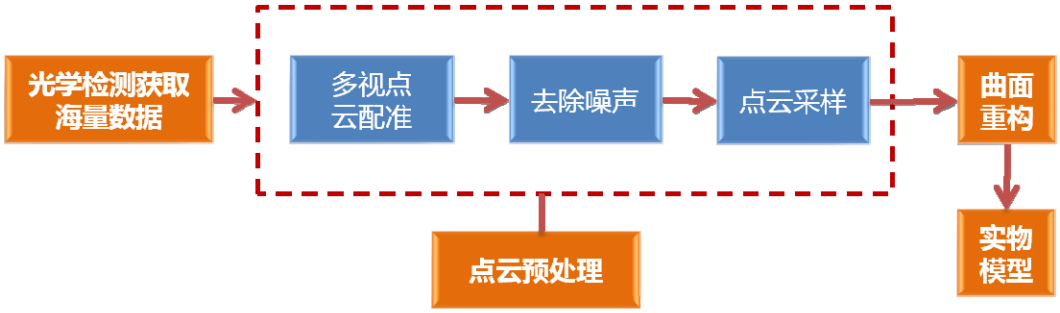

图 4.3.4-5　点云预处理流程

b）基于模型包容性的容差优化分配

针对复杂结构毛坯的小余量数控加工中易出现局部加工余量不足的问题，基于毛坯表面的点云测量数据，利用特殊的约束配准算法，实现最大包容性模型的分析，从而满足加工余量的优化分配要求。

d 数控加工零件机内自动定位

对数控加工零件机内自动找正技术进行研究，通过在机检测手段测量参考特征或曲面，使得数控机床具有“感知”能力，用于零件和夹具的精确定位。

利用零件在机床的精确位置数据，将刀具路径的名义位置和工件在机床上的实际位置进行比对，自动移动或旋转刀具路径原点位置,从而使刀具路径和工件对齐并将结果输出到机床控制器。由此得到比手工设置更稳定的输出结果，减少零件变动和装夹次数，提高产品质量，提高生产力。

结合快换工装的使用，通过对零件进行简单装夹定位后，即可实时自动对齐定位 NC 刀具路径，从而帮助机床操作人员快速准确地进行工件的重复装夹定位，节省时间，提高定位精度。

（2）制造过程实时监控与优化

对制造过程实时监控与优化技术进行研究，包括：基于感知的加工状态信息采集、机床健康保障、加工刀具状态管控、可视化制造过程监控、机床负载的自适应控制、大数据分析与决策等。

a 基于感知的加工状态信息采集

开展基于感知的加工状态信息采集技术研究，构建数控机床监控网络，通过基于感知的物联网实现设备互联，监控设备可以感知生产加工的状况，同时机床状态信息、故障信息可以获得，综合分析加工过程中监测到的数据，获取加工过程中的振动、切削力、切削温度、刀具磨损、加工变形等数据。

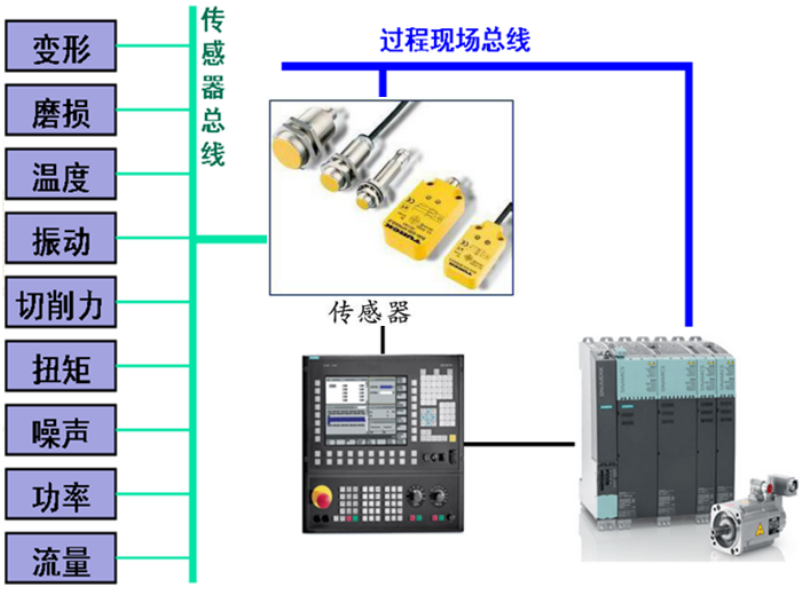

图 4.3.4-6　基于感知的加工状态信息采集

b 数控加工机床健康保障

数控加工机床按照既定 G 指令运行，通过服务平台获取对应 G 指令运行过程中的实时数据（包括指令行号、进给轴负载电流、主轴电流、实际

位置、加速度、跟随误差等），将采集的数据传输到服务器上，通过制造单元服务器平台上的可视化界面，直观显示机床健康指数，并通过在服务器上运行数控机床健康保障算法，提供相关决策信息，实现数控机床健康保障功能。

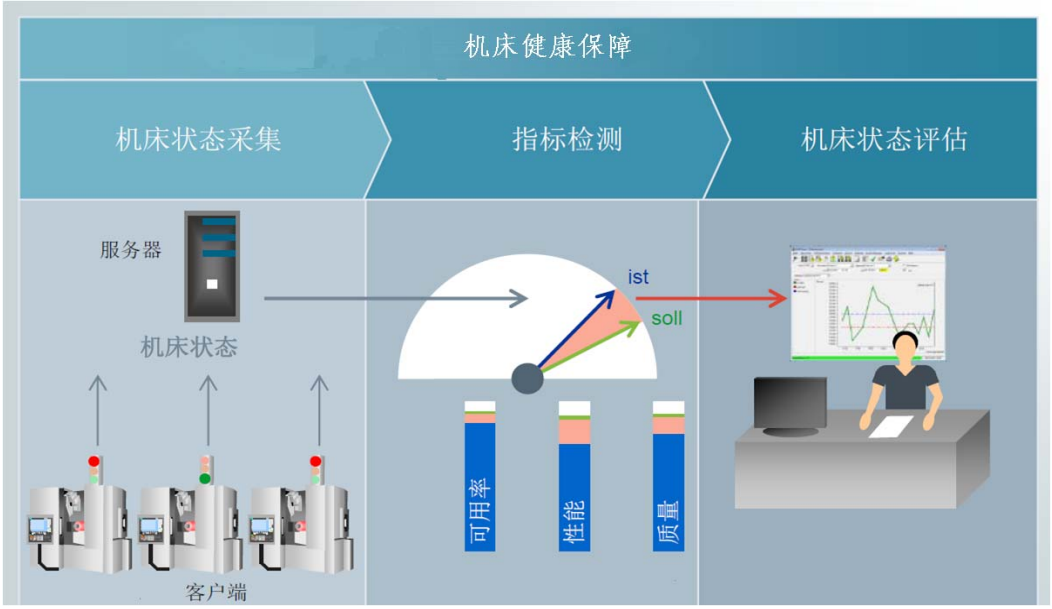

图 4.3.4-7　机床健康保障

c 数控加工刀具状态管控

采用二维码标识和智能传感技术，建立集感知、测量、分析、决策于一体的刀具实时监测与在线管理平台，解决刀具在位置跟踪、状态监测、寿命管理、配送与库存管理、刀具参数选配等环节存在的物流与信息流实时监控难题，实现刀具从刀库、对刀仪、加工中心、监控终端以及刀具研磨等全生命周期的过程管控，为企业高效、敏捷刀具管理提供重要的技术支撑。主要包括：刀具位置跟踪与状态监控、刀具参数选配和寿命预测。

图 4.3.4-8　加工刀具状态管控

d 机床可视化监控

针对中央齿轮机匣壳体零件智能制造生产单元的需求，硬件网络拓扑如下图所示，建立光纤网络，将机床加工设备、传感器、自动化上下料（如机器人手）、智能化的物料配送、网络设备、服务器、服务平台、防火墙、三层式交换机互联，并与生产过程的实时监控设备构成统一的信息平台。通过远程的访问，实现多台数控机床监控，单台数控系统的深度监控。主要包括：制造单元状态监控、数控系统状态监控。

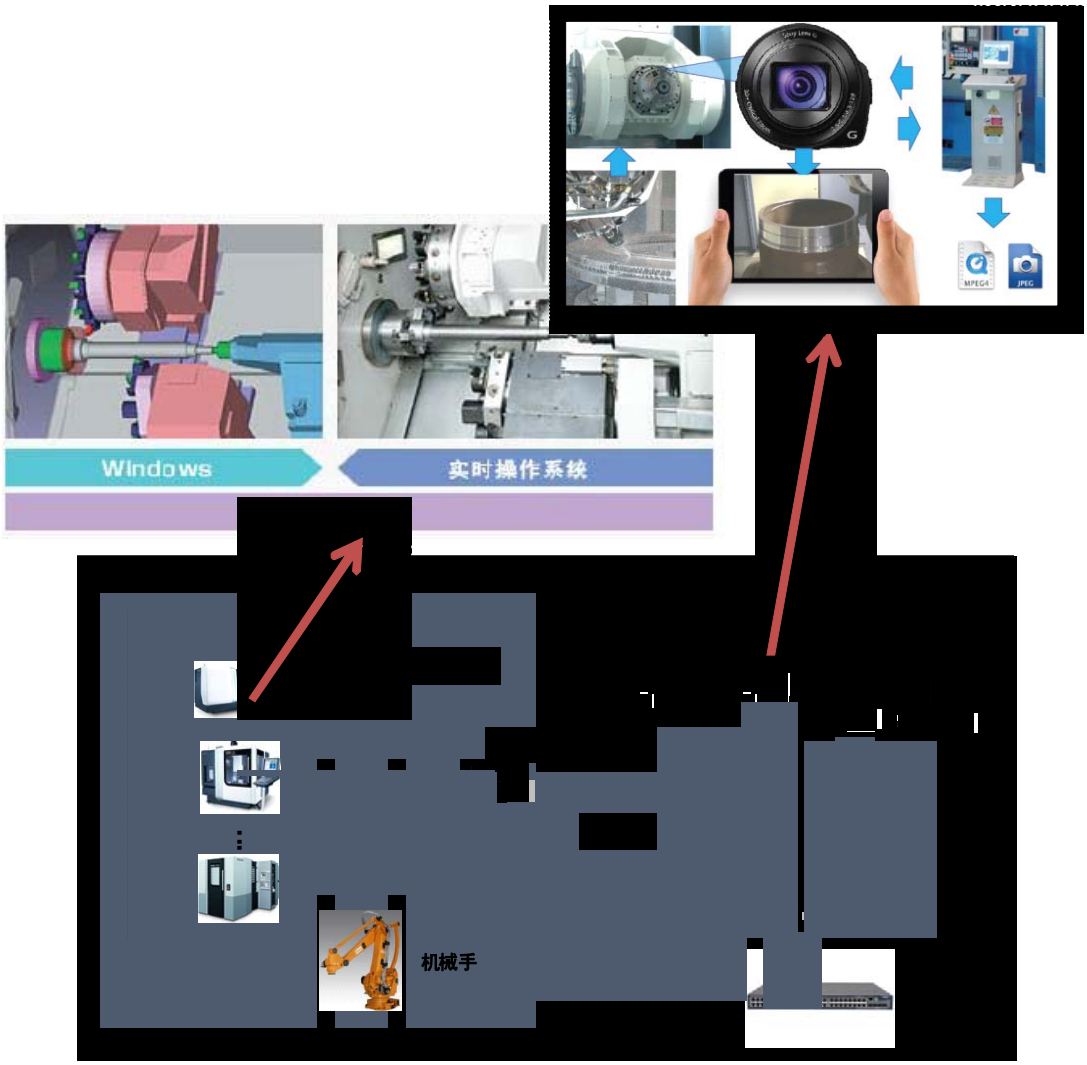

图 4.3.4-9　机床可视化监控

e 机床负载的自适应控制

基于切削负载监测与控制系统，应用数控机床数据实时采集监控和自动调节切削参数的自适应控制技术，实时采集监控设备参数，通过自适应控制系统自主动态优化、控制切削参数，保证进给速率可随着实际切削条件的不同而实时变化，实现加工过程中的恒负荷切削，最终达到控制中央齿轮机匣壳体变形，提高加工效率，稳定其加工质量的目的。

f 大数据分析与决策

数控系统在运行时蕴含大量的实时工作状态数据，如指令位置、编码器实际位置、光栅尺实际位置、主轴电流、振动信号、温度信号等，这些

大数据与数控加工指令密切相关，与零件加工质量、精度和加工效率之间存在着内蕴的映射关系，经过有效的分析处理，其在提高零件加工质量和效率方面具有重要的意义。

通过现场服务总线获取设备内部数控装置、伺服驱动器、传感器之间高速流通的数据和信息，并实时通过网络传输到制造单元私有云服务器中。

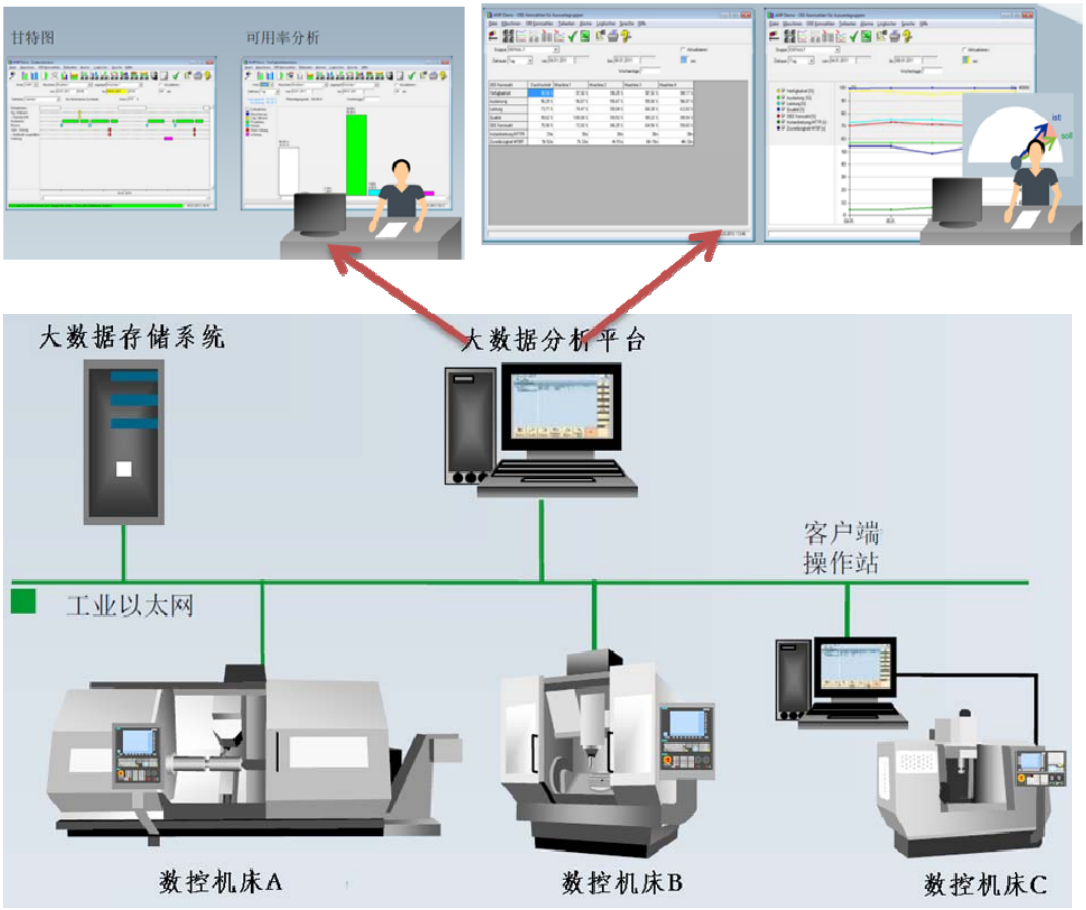

图 4.3.4-10　大数据分析

利用分布式存储系统建立制造单元大数据分析计算平台，对制造单元私有云服务器中的大数据，根据不同的业务需要进行有意义的专业化处理，实现机床加工状态识别、质量检测、工件质量分析等功能，根据采集和保存的大量加工信息数据，对设备健康、刀具寿命、加工性能、产品质量进行统计分析，制定评价模型与规则，并将处理结果用于提高零件加工质量，改善机床加工性能等方面。

4.3.1.5　攻关达到的技术性能指标

通过技术攻关，掌握中央齿轮机匣壳体加工状态和变形规律及装夹问题，完善其加工工艺，优化其结构设计规范，形成有关技术文件并积累工程经验。

通过本项目实施，将达到以下指标：

1）建立中央齿轮机匣壳体零件制造智能加工验证平台。

2）缩短产品制造周期 20%、生产准备周期 30%。

4.3.1.6　攻关研究成果及鉴定验收方式

1）硬件成果

中央齿轮机匣壳体智能制造示范单元。

2）软件成果

（1）基于单一数据源的中央齿轮机匣壳体类零件建模规范和标准。

（2）数控编程及加工仿真系统。

（3）机内自动检测系统。

（4）基于单一数据源的结构化工艺规程。

（5）基于特征尺寸的模型最大包容性分析研究报告。

（6）机器人离线编程及仿真系统。

（7）机器人仿真标准流程。

（9）形成 3 项技术标准或规范。

（10）发表论文 1～2 篇。

（11）申请专利 3 项。

2）鉴定验收方式

召开评审会进行鉴定验收。

4.4.1　航空发动机液压作动筒智能制造技术研究

4.4.1.1　主要研究内容

本项目主要研究航空发动机作动筒基于 MBD 技术的设计制造协同，

通过 PBOM 建立起适合企业内部使用的数据模型，并研究数据、属性等与设计的对应关系；研究作动筒数字化工艺设计，在结构化工艺、典型特征编程、工艺数据库等方面展开研究；使用仿真平台模拟零件虚拟制造过程，在零件物理生产之前完成零件所有过程的仿真，并通过实际生产线验证典型零件数字化制造与自动化制造的全过程。

上述四部分研究内容具体包括：

1）基于 MBD 技术的设计制造协同

主要包括：基于结构特征的作动筒零件建模规范和标准研究；基于单一模型的设计工艺协同方法研究。

2）数字化工艺设计

主要包括：作动筒结构化工艺设计方法，包括工艺流程、规范、工具、设备等； 基于单一模型特征的编程；模块化工装设计方法。

3）虚拟仿真

主要包括：工艺仿真技术研究：包括物理仿真、机加几何仿真、焊接仿真等；生产线模拟仿真技术研究：包括生产线运行仿真。

4）物理验证

自感知：包括数字化检测（在机、在线、离线）、刀具自动检测与控制、设备可视化监控（含机床健康保障）；

自适应加工：包括设备负载自适应；姿态自适应（坐标重构、加工精度）；多轴联动动作自适应（机床精度、刀具补偿）；

智能装备：包括智能工装；机器人应用；

智能分析与决策：包括过程数据采集与大数据分析；SPC、CPK。

4.4.1.2 关键技术

1）制造层级 MBD 作动筒零件虚拟验证。

2）基于主轴负载、在机测量以及零件变形的自适应加工技术研究。

3）基于零件实物质量信息驱动数模的装配仿真。

4）基于大数据 MES、ERP 数据分析、迭代管理。

5）基于自主感知的物、物信息交换及数据处理。

6）质量数据 SPC、CPK、PPK 统计与控制。

4.4.1.3　技术方案

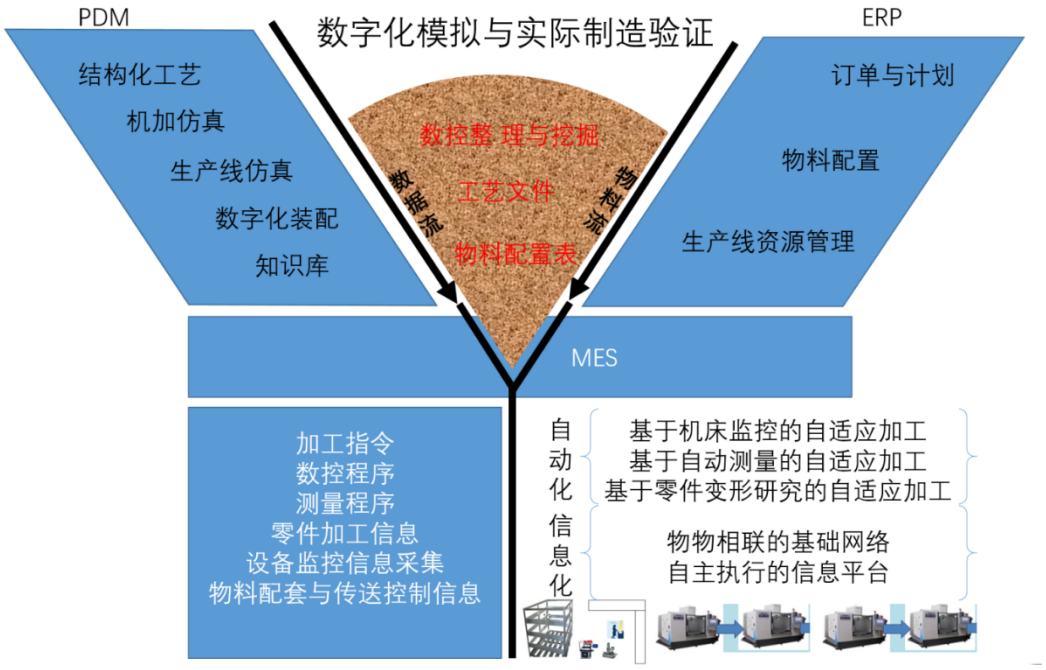

图 4.4.3-1　数字化模拟与实际制造验证

在具体工作流程上从 PDM 输入生产资源信息，PDM 平台根据需求进行工艺设计，确定生产制造单元，给 ERP 输入工艺设计后的物流需求信息，MES 平台根据需求指令接收来至 ERP 系统的物料（零件毛坯、工具、辅料等）以及 PDM 系统的工艺规程、作业指导书、数控加工程序等信息，经过排产后推送到制造单元进行生产。最后将产品返回 ERP 系统进行交付，数字制造流程如图 4.4.3-2 所示。

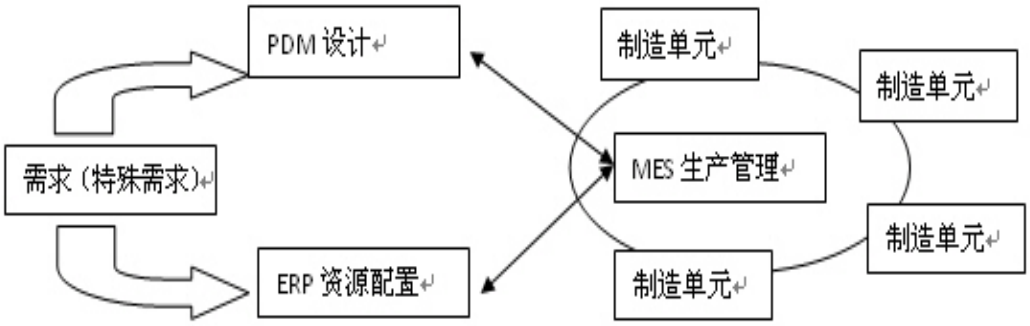

图 4.4.3-2　数字制造流程图

4.4.1.4　主要技术途径

1）工艺虚拟验证技术研究

未来的制造是两条主线的制造，一方面是在虚拟空间对零件的形成过程进行设计、仿真。另一方面则是在真实的生产线上完成零件的制造过程。作动筒工艺虚拟验证技术研究就是要进行数字化环境的优化与关键技术研究，形成作动筒数字化生产线设计方案，通过大量的仿真技术，将在生产线上的各个环节进行仿真，指导实体生产线建设、管理。因而需要研究零件制造过程中如加工机理、刀具路径、物料运动等与零件相关的过程。在高阶流程上研究零件的运动，在低阶流程上研究零件切削力、变形以及加工路线等。

物理仿真：在模拟制造中，零件未来的加工参数均需要进行确认，利用仿工具预测加工过程中的切削力、切削温度、加工变形等，通过不断迭代，在对加工过程不断的优化后得到零件最佳切削参数。同时建立起零件材料、刀具材料、典型切削的仿真数据库。并在今后的实物零件加工中去不断进行修证。

几何仿真：在加工程序和检测程序的编制中，必须对刀具轨迹、测量路径进行充分的仿真，对刀具、测头、工件、机床的相互运动关系进行仿真研究，验证路线是否正确，避免加工过程中的碰撞与干涉，逐步取消零

件试切工作。

焊接仿真：在焊接中，液压作动筒的筒体和端盖在真空电子束焊接过程中主体材料的融化、金相组织的变化过程是宏观中不可知其具体变化的，通过仿真工具研究焊接过程中各种边界条件对焊缝表面质量的影响（如气孔、夹渣、未焊透等焊接缺陷）。获得焊接参数对不同材料、不同焊接厚度、不同焊接接头形式的影响程度，以最终得到优化的焊接参数用于实际生产。

装配仿真：基于零件实际质量状态的仿真是在虚拟的计算机环境下验证和评价产品的装配过程和装配方法。主要研究基于零件实际尺寸驱动数模的装配方法。对于作动筒这种精密耦合件，很有必要从零件单件质量信息去抽取零件的相关作用尺寸，在仿真工具中去驱动零件数模进行装配，以达到最优化的相配件的选配能力。

试验仿真：液压作动筒的试验是验证作动筒在进行耦合运动过程中流量是否达标，密封压力是否能够满足时间要求的重要指标。通过对流量/密封试验进行虚拟仿真，可预先掌握作动筒在工作中进出油口尺寸对流量的影响程度，并从零件质量信息中去提取与流量相关的尺寸信息，仿真未来实物组件的流量参数，从而减少试验过程中流量调整的工作。

生产线仿真：生产线的虚拟仿真主要根据零件的工工艺路线，将生产过程中所涉及的机床、机器人、物流系统以零件实现过程进行虚拟试运行，优化出设备的摆放布局，生产线现场的物流、人流、工位、夹具等摆放部位，模拟零件运转、自动上下料以及各系统的运动，计算出零件的生产节拍，设备利用率等信息。为真实的生产线提供运行、以及改进依据。

2）自适应加工技术研究

为实现作动筒的智能制造自动化制造，必需实现零件生产过程无人值守，因而需要解决以下几个问题：

（1）基于机床监控的自适应加工系统

目前自动线存在以下问题：

a 不知刀具破损或断裂引起的机床空转导致零件没有被加工（人工干预）；

b 刀具切入切出以及毛坯不均匀造成加工过程不平稳（人工干预）；

c 根据载荷的变化确定不同刀具的使用寿命（人工干预）。

为了解决自动线上无人对上述过程进行判断和决策的问题，必须对切削力或主轴负载大小进行研究。通过研究去解决切削参数优化，提高刀具寿命、减少非切削时间，第一时间检查到刀具磨损断裂，给出相应的解决方案，保护机床、零件和刀具。

为实现加工过程中基于主轴负载监控的自适应加工功能需要以下几个方面的研究：

a 主轴扭矩数据的提取和转换；

b 各个主轴阀值参数如何确定；

c 如何建立主轴扭矩参数与进给率之间的理论模型。

在研究过程中，需要针对每一个工序中的每一种刀具的主轴载荷进行实验研究，对应的 T1、T2、T3、T4 建立数据库，在实际加工过程中调用该数据库，时间基于主轴负载监控的参数自适应。如下表 4.4.4-1 所示。

表 4.4.4-1　　时间基于主轴负载监控的参数自适应表

主轴载荷 T	T＜T1	T1≤T＜T2	T2≤T＜T3	T3≤T＜T4	T4≤T＜T5	T≥T5
体现的现象	刀具破损，不加工	F 过低需增大	F 合适	F 过大需降低	刀具磨损严重，需更换	出现碰撞，自动报警并机床停转

作动筒加工过程中基于主轴负载监控的参数自适应系统图如图 4.4.3-3 所示。

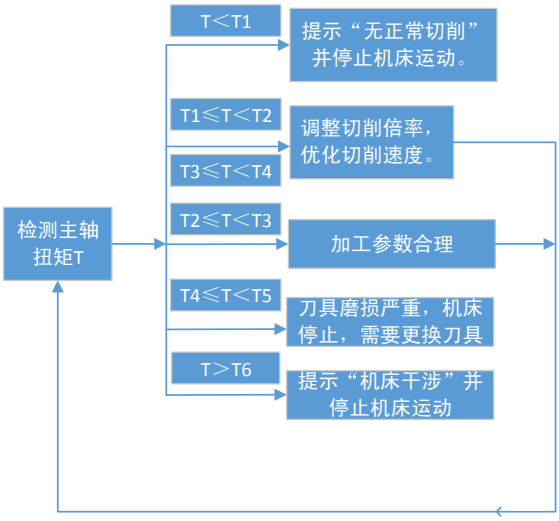

图 4.4.3-3　主轴负载监控的参数自适应系统图

（2）基于在机测量技术的自适应加工系统

自动化生产线零件加工过程的质量控制需要实时高效去进行处理，因而需要在自动化生产线上对以下现象进行研究：

a 因测量不及时导致零件的返工或报废（人工测量、决策或当前一些自动线按刀具寿命去控制零件加工质量）；

b 零件定位不准带来的质量风险（人工测量并调整）；

c 加工过程中刀具磨损导致的质量风险（人工测量并调整刀具补偿）。

指标的确定：零件装夹过程后机床自动需获取零件的实际位置，并确定和调用新的工件坐标系；零件加工过程中需获得所加工特征的真实形位尺寸，并反写机床函数重新对不合格尺寸进行自动补正加工。

技术优势：实时性-加工后直接进行测量；互动性-可根据测量结果修改加工参数。测量自适应加工流程如图 4.4.3-3 所示。

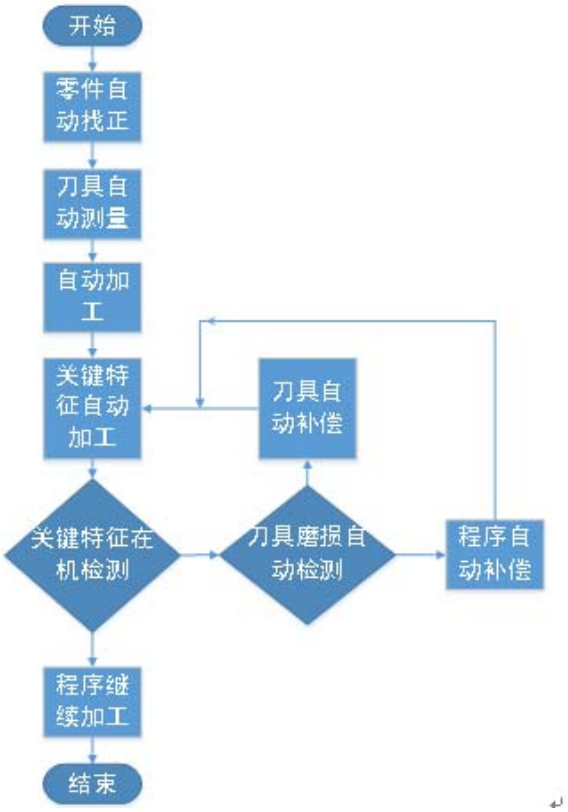

图 4.4.3-4　测量自适应加工流程图

（3）基于在机测量技术和自动编程技术的刀轨自动优化

航空发动机零件在加工中，由于零件变形，如果按零件原有的刀轨，零件的实际加工形状将在自由状态下由于变形的恢复导致零件不合格，因而在加工时通过计算并对比模型适时去改变零件的实际加工刀轨，并最终满足零件要求。

表现在：零件装夹导致零件发生变形，加工完成后变形释放导致零件超差或报废；已工作后的变形零件修理，由于零件工作一段时间后变形，在零件修理时加工刀轨必须在理论刀轨的基础上根据零件实际数模进行智能调整，实现零件修复时自适应满足零件最终需求。

a 指标的确定：毛料的真实状态；零件装夹过程后零件的变形量；零件修复前的变形情况。刀轨自适应优化如图 4.4.3-5 所示。

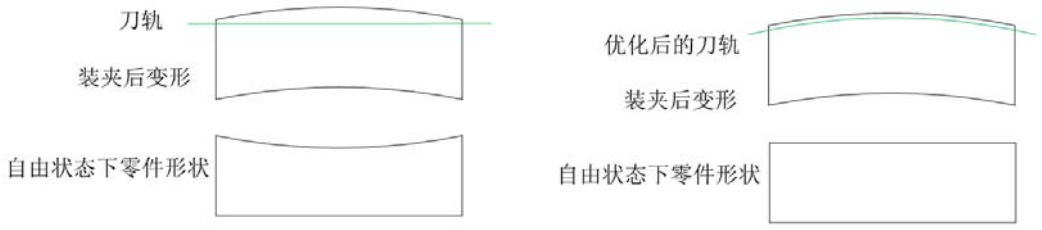

图 4.4.3-5　刀轨自适应优化图

b 实现途径：通过在机测量系统自动检测零件的真实状态，并通过数据处理系统反馈到零件模型修正软件中，编程软件根据自动修正后的零件模型将加工程序输出到数控机床中并执行，最终得到一个合格的零件。

3）基于自主感知的物、物信息交换及数据处理

在自动生产线上，机床主轴与刀具、机床与夹具、夹具与零件、零件与机床、零件与托盘、机器人与零件等都需要去交换信息，达到线上物流按需要流动，正确的物料在正确的时间到达正确的位置，因而必须展开物料之间的信息交换研究，建立起信息交换与数据处理机制，在零件快速换模上，为保证零件的安装精度，还需要对零点夹持工具进行研究，通过集中标准安装模块解决零件的自动定位问题。

4）质量数据 SPC、CPK、PPK 统计与控制

对于零件的质量管理，需要在自动化线上安排在机、在线的测量系统，通过将零件质量信息的管理，运用统计分析工具去即时监控生产过程中的波动，最终达到生产流程稳定，零件质量一致性更优的目的。

5）建立自动化生产线

生产线主要针对作动筒三个主要零件的自动化加工，按年产 5000 套作动筒，15000 个主要零件进行设计。在生产单元上 MES 系统对生产指令进行分解，从 PDM 中获取零件相关的工艺信息，从 ERP 中配套零件加工的所需资源，将相关信息传递给执行机构，生产线自动完成零件所有机加工

工序加工，如图 4.4.3-6 所示。

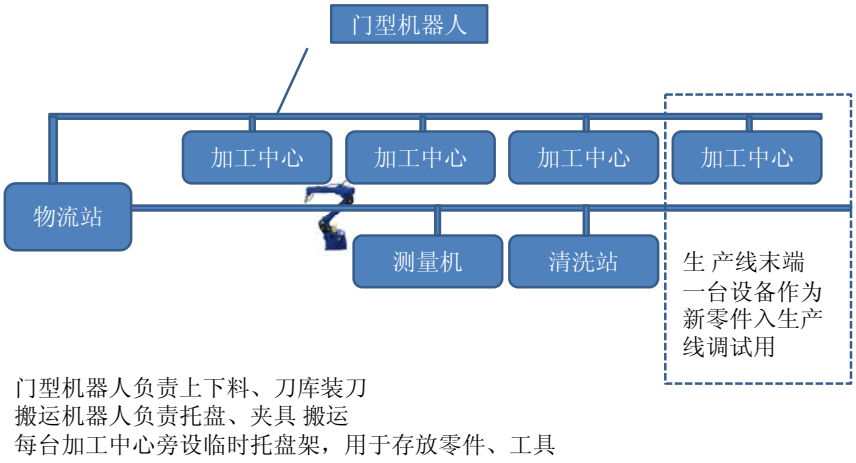

图 4.4.3-6 自动化生产线示意图

6）标准化数据管理

项目要规范各种数据，纳入工程数据中心（EDC）进行管理。具体梳理出以下方面：

工艺信息类：包含结构化工艺、设备信息、工具信息、加工程序等。

质量信息类：零件质量档案、过程能力控制、产品质量信息树等。

在数据规范上，要研究工程数据中心对数据的要求，研究在生产过程中持续向数据中心提供数据以及数据分析及重用技术。

7）多项目管理

初步实现本项目的业务数据填报，从项目进度、经费、文档等方面进行功能应用，实现业务数据填报、反馈、汇总及分析等工作。

4.4.1.5 攻关达到的技术性能指标

通过技术研究，解决航空发动机液压作动筒智能制造关键技术，建立一套液压作动筒的数字化智能制造生产线，保证产品加工质量，提高企业生产能力。

通过本项目实施，将达到以下指标：

1）建立基于 MBD 的作动筒零件的结构化工艺。

2）建立作动筒典型特征编程平台。

3）建立作动筒智能制造的专家知识库。

4）零件制造过程实现自动化和数字化，实现设备加工过程无人值守。

5）保证零件加工质量的一致性，产品合格率 99%以上。

4.4.1.6　攻关研究成果及鉴定验收方式

1）硬件成果

建立液压作动筒的数字化智能制造生产线，实现三类典型零件的数字化加工。

2）软件成果

（1）“航空发动机液压作动筒智能制造生产线”研究报告。

（2）基于实物尺寸的数模装配技术研究报告。

（3）基于主轴监控与典型工具切削模型的研究报告。

（4）自动确定加工坐标系及自动测量、补偿及自动标准流程。

（5）编制 3 套作动筒结构化工艺规程。

（6）编制作动筒数字化装配工艺规程。

（7）编写“制造精度与设计公差相互协调”标准。

（8）发表论文 2～4 篇。

（9）申请专利 3 项。

3）鉴定验收方式

召开评审会进行鉴定验收。

4.5.1　航空发动机压气机叶片智能制造技术研究

4.5.1.1　主要研究内容

1）数字化工艺设计

（1）知识驱动工艺流程设计

通过构建压气机叶片典型工艺流程知识数据库，制定压气机叶片的工

艺流程编制规范，开发基于知识库驱动的工艺流程设计专用软件，用规范和知识数据库来驱动典型工艺流程的设计过程。

（2）知识驱动数控加工程序设计

通过构建切削刀具库、切削参数库，并集成到程序编制软件中，实现模型特征的智能加工程序设计。在 PDM 中实现压气机叶片数控程序模板管理，实现压气机叶片数控编程知识的重用。

2）虚拟仿真

（1）生产单元运行仿真

模拟叶片加工单元的运行过程，实现生产过程模拟。

（2）机加工艺几何仿真

通过机加工艺全过程的几何仿真，及时发现工艺流程设计中的问题。

3）物理验证

（1）自感知

a 叶片型面数字化在线检测

实现叶片型面质量的在线测量。

b 机内刀具自动检测与控制

机内刀具长度和半径的自动检测，自动输入刀具参数，同时进行刀具寿命管理。

c 机床状态监控

实时监测机床的运行状态，为优化生产提供支持。

（2）自适应加工

切削进给自适应。通过检测机床的负载，实时调整切削进给量，实现提高加工效率和叶片的表面质量、延长刀具寿命的目标。

（3）智能装备

a 智能工装

具有自动定位，自识别的快换工装。

b 机械手或机器人应用

自动物流的手段。

c 工件自动识别与标识系统

实现自动物流的自动识别的基本条件。

d 智能分析与决策

a）根据生产计划组织生产，自动判断和下载数控程序。

b）自动排单。

c）刀具检测和寿命管理。

d）自动监测零件过程状态。

4.5.1.2 关键技术

1）知识驱动工艺流程设计技术

2）智能化数控程序设计技术

3）机加工艺全过程仿真技术

4）自动检测与补偿技术

5）智能生产

4.5.1.3 技术方案

面向航空发动机压气机叶片，立足于现有先进的工艺系统和加工基础理论，采用关键技术研究、规范与工具系统研制开发和应用验证相结合的研究方法，对具有轴颈、榫头结构的典型压气机叶片，采用“精密数控加工+机械光整”的工艺方法；突破叶片型面铣削、叶片加工非均匀变余量颤振抑制、叶片加工模型反变形补偿优化、叶片加工参数选择及复杂叶片加工仿真、复杂曲面快速高精度测量技术等关键技术。

4.5.1.4 主要技术途径

1）知识驱动工艺流程设计技术

构建典型压气机叶片工艺模板库（含零件级工艺模板、工序级工艺模板、典型特征工艺模板），制定压气机叶片工艺流程编制规范，开发压气机

叶片智能工艺流程设计软件，在新的压气机叶片工艺编制过程中，通过相似度对比分析（含人工参与选择判断和基于特征模型的自动判断分析两种类型）、技术要求比对等，实现同类叶片工艺流程的智能设计，如图 4.5.4-1 所示。

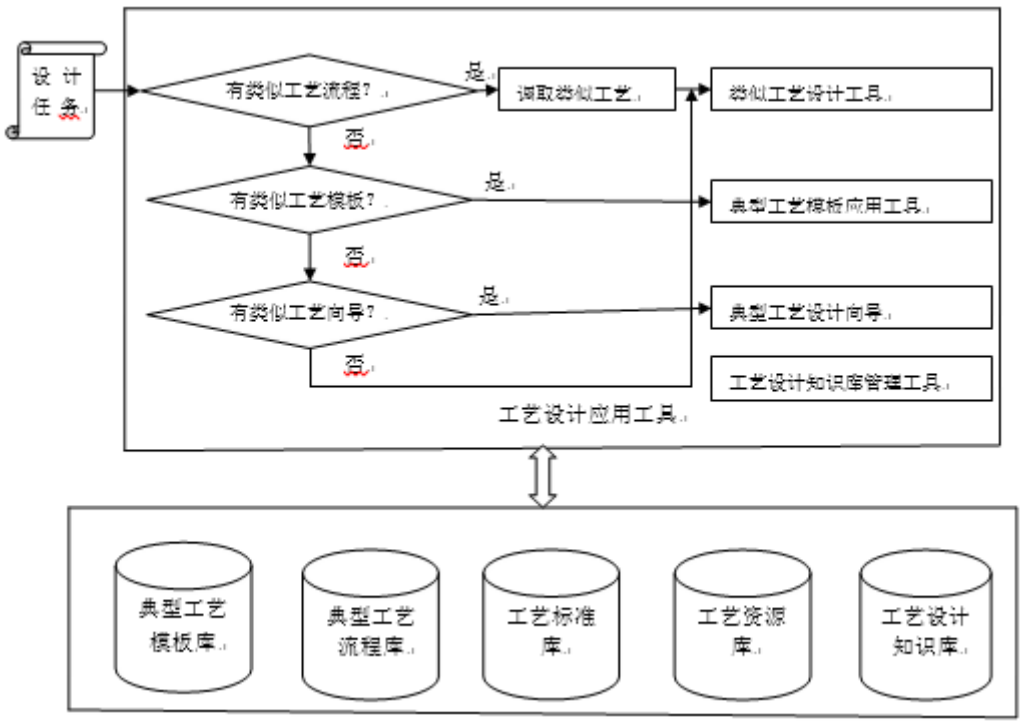

图 4.5.4-1　知识驱动工艺设计流程

主要功能：

（1）调用工艺路线模板：点击“调用工艺路线模板”按钮创建类似的工艺路线，如图 4.5.4-2 所示。

图 4.5.4-2　工艺路线模板调用

（2）典型工艺模板调用。在新工序设计过程中通过调用工艺模板，实现经验知识的重用，提高工艺设计的效率。

（3）工序检验卡的自动生成，包括提取尺寸编号、检验项目内容、工装名称和牌号等。

2）知识驱动数控程序设计

（1）数控程序知识管理和重用

构建在 PDM 中实现压气机叶片数控程序模板管理，通过零件分类调用模板实现压气机叶片数控编程知识的重用。包括单叶片类软件编程模板和整体叶轮叶盘类编程模板。

（2）数控编程模板定制

a 切削刀具智能管理与选择

构建切削刀具库，与数控编程软件集成，在零件数控程序编制过程中，只需设定一定的条件，即可实现加工刀具的智能推荐与选择。

b 切削参数智能选择和优化

通过切削试验等手段获取合理的切削参数，构建面向压气机叶片类零件高效铣削的切削参数数据库，与数控编程软件集成，实现数控程序编制过程中切削参数的智能化设置。

c 智能化走刀路径设计技术

构建智能刀具路径知识库，与数控编程软件集成，设定有限的条件，实现零件数控程序编制过程中加工路径的智能推荐与选择。

3）工装设计及仿真

目标：建设工装设计仿真平台，实现工装刚度设计与仿真、工装装配过程空间分析与路径优化、工装设计中的容差分配与优化分析等。

建设方案如图 4.5.4-3 所示。

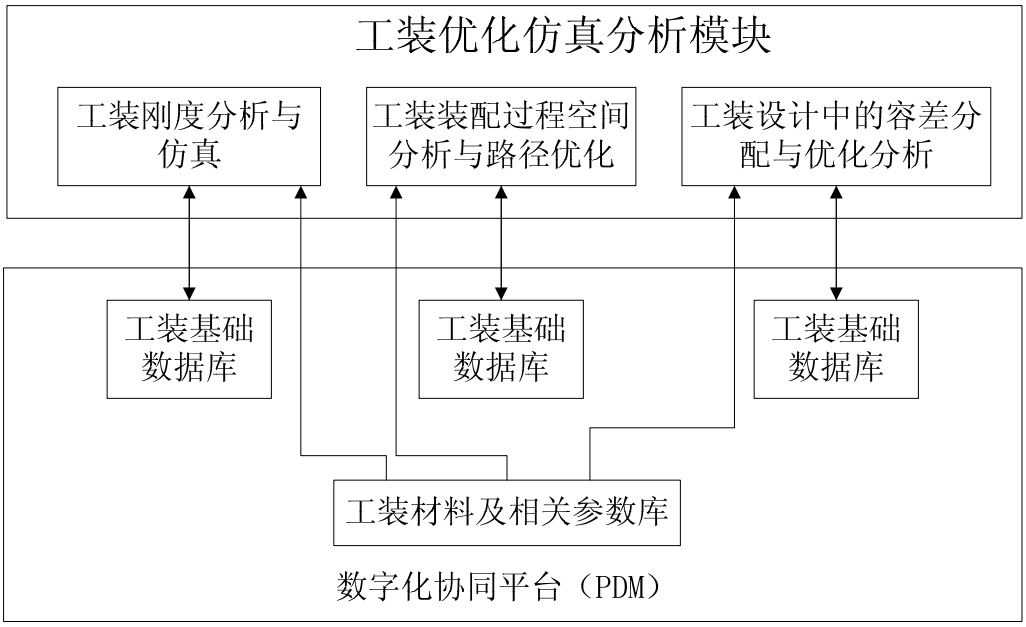

图 4.5.4-3　工装优化分析系统构架

（1）相关技术参数整合形成数据库

统计归纳各专业工装结构及工作状态，找出相似性；编辑工装材料参数，形成知识在界面或材料库上固化；搜集工装使用现场数据，反馈意见，以标准数据的模式录入结构分析数据库。

（2）装配路径优化

分析容易发生工件装配干涉的典型工装，建立一套适合于计算机理解的工装结构优化方法；以及一套用于评价工件装配难易程度的标准。使得最终优化设计得到的工装结构不但不会发生干涉，而且是最便于工件装配和拆卸的方案。

（3）误差分析优化

利用工件和工装的三维模型进行仿真分析，模拟仿真工件的装配这一随机过程从而实现对工件定位误差的分析、并通过不断调整定位件的公差分配以找到一个最合适的定位公差。特别是建立适合对于那些特殊的定位方式的定位误差的模拟分析。

利用第一步实现的定位公差分配结果，通过建立一套通用的适合计算机使用的调整全工艺过程的公差分配方法，实现从全局的角度去优化每一工序定位公差。

（4）工装强度刚度分析

规范工装使用、存放、维护方法，结合工装材料及相关参数数据库，调用其相关参数支持分析的大量数据输入通过计算模拟仿真在长时间跨度上的工装变形对其精度的影响以达到，从而达到预测和优化设计的目的，并将优化设计结果编译到该系统中。

4）机加工艺全过程仿真技术

应用Vericut仿真平台，通过机加工艺全过程的几何仿真，检查各工序模型设计的正确性（加工余量检查），通过干涉检查判断判数控程序的正确性、零件工艺基准（支靠、定位、夹紧）是否合理，及时发现刀具、夹具设计存在的问题。

Vericut的自动比较功能（加工后的模型与毛坯模型比较）如图4.5.4-4和图4.5.4-5所示。

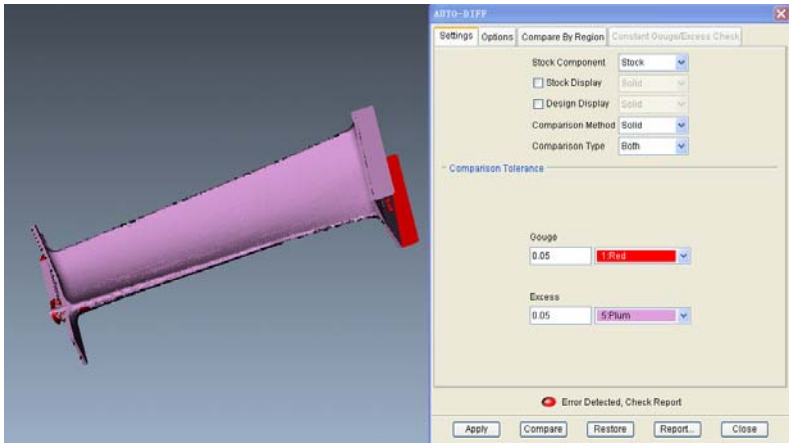

图 4.5.4-4　叶型铣削后模型对比结果显示

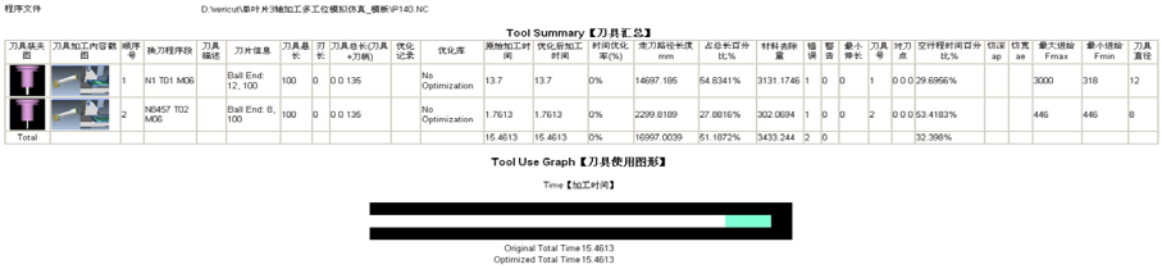

图4.5.4-5　仿真报表

5）自动检测与补偿技术

（1）刀具自动监测与补偿

在机床中配置机内对刀仪和相应的检测和控制程序，实现刀具直径和长度的自动检测与补偿，自动更新刀具参数。同时，系统能够根据设定的条件对刀具的寿命进行监测、控制、预警和管理功能，及时提醒操作员换刀。

（2）切削参数实时感知和调整

切削过程在线监测和切削参数的自动调整，实时跟踪、调整实际切削进给。应用以色列OMATIVE自适应控制与监测系统，实现进给率实时优化，提高生产效率，监测刀具磨损，提高刀具利用率，对加工过程的实时监测与保护。

6）智能生产管理

在柔性自动生产单元内，应用智能的生产管理系统，实现以下功能：

- 自动仓储。
- 原料和夹具管理。
- 组织生产，数控程序下载。
- 自动排单（对于多品种，小批量的生产，自动排单非常关键）。
- 订单管理，动态调整（如有紧急单子，可以随时插进来，不用停机）。
- 刀具管理（刀具检测和寿命管理）。
- 产能计算，库存计算。
- 生产模拟（通过模拟，可以判断生产线的生产是否饱满，每个机床的负载情况，一目了然的认知和掌握现阶段的生产能力，生产负载和状态：更好得应对内部和外部市场的变化）。
- 可以进行2周的生产模拟，通过模拟，系统可以事先告知原料和刀具的消耗，以便及时购买，不会导致因原料不够或刀具缺失而停产。生产效率的高低，主要取决于生产准备是否充分。）
- 远程监控。
- 真正的无人生产。
- 实现和MES的连接（直接从MES下单，生产信息反馈给MES等）。
- 生产数据报告的采集（这些报告可以让用户日后更好得优化其生产和工艺，而不断提高其生产效率）。
- 信息流：库存数量或价值，订单进程，各种设备的利用率等。

● 机床产能最大化。

7）快速检测

应用零点定位系统实现叶型三坐标标快速测量和分析。

8）系统集成

将 MES 与生产线中央管理系统集成，使设计、工艺、计划与现场执行无缝集成。

以 MDC、DNC、嵌入式系统为基础的物联网建设和集成，将加工设备、工位器具、物流设备、人员、场所联网，实现分布式控制和智能识别。

9）智能加工单元建设

（1）总体方案

以 2 台五轴加工中心为基础，通过系统集成先进的管理系统、物流系统，自动识别系统等，实现压气机叶片的智能化加工。

（2）智能加工系统组成

● 工件料库；

● 工件上下料站；

● 自动工件托盘交换装置；

● 中央生产管理控制系统；

● 智能工装系统；

● 工件识别系统。

（3）工艺布局

智能加工系统结构组成如图 4.5.4-6 所示。

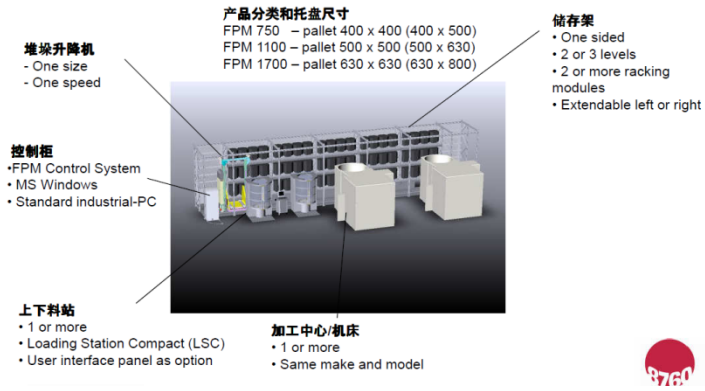

图 4.5.4-6　智能加工系统结构组成图

系统可延展，如图 4.5.4-7 所示。

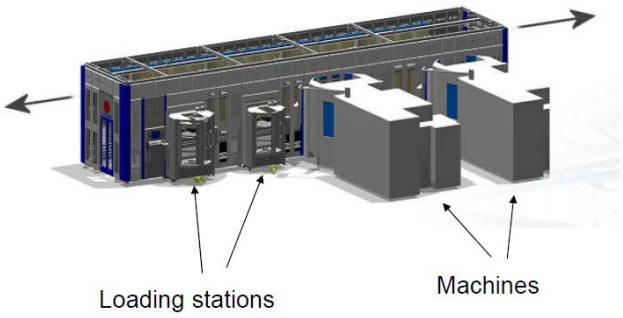

图 4.5.4-7　智能加工单元初步方案

（4）主要目标

- 提高自动化水平，利于提高产品质量、降低劳动强度、改善生产环境。实现8小时无人操作。
- 实现多品种中小批量（18种零件）生产。
- 提高设备的利用率，实现70%的利用率。
- 缩短生产周期，减少库存量，以利于提高市场响应能力。
- 大幅度减少机床等待时间。
- 降低人为因素的影响，实现长时间的无人操作。
- 预测刀具寿命，有效管理刀具。

● 操作人员数量减少，人力成本降低，效率提高。

● 空间利用最大化，节省地面空间。

4.5.1.5　攻关达到的技术性能指标

本项目拟通过压气机叶片的智能制造研究，建设工艺数据库、刀具库、切削参数库、仿真系统和切削参数优化系统，集成各种工艺设计工具软件与知识数据库，开发智能工艺设计软件，实现压气机叶片类零件的智能化工艺设计；集成人工智能、数控技术、计算机技术、机器人技术以及现代生产管理技术等先进制造技术，实现压气机叶片类零件智能加工和智能检测。

通过本项目实施，将达到以下指标：

1）设备利用率≥70%。

2）压气机叶片叶型加工合格率≥90%。

3）刀具寿命提高20%。

4）加工效率提高20%。

4.5.1.6　攻关研究成果及鉴定验收方式

1）硬件成果

建设一条压气机叶片柔性智能化加工单元。

2）软件成果

（1）知识驱动工艺设计软件 1 套；

（2）工装夹具仿真分析和优化报告 1 份；

（3）全机加过程仿真规范一份；

（4）叶片铣削加工单元虚拟建模及运行仿真模型 1 套；

（5）压气机叶片加工效率及刀具寿命提高报告 1 份；

（6）设备利用率提升报告 1 份；

（7）论文 1 篇；

（8）专利 1 项。

3）鉴定验收方式

召开评审会进行鉴定验收。

4.2 管理数据中心

管理数据中心主要实现中航动力业务数据的有效集成，为公司的决策、分析人员所用。业务数据，是指通过企业业务系统收集到的数据，这些数据分布在各单位不同的数据库和网络中，为不同的部门服务。管理数据中心，就是要对这些数据进行获取、并进行结构重组，并进行全面分析，是资源得到更合理的利用。项目管理、生产运行过程管理、企业运行管控和商务智能的数据为本项目管理数据中心的重点建设内容。

4.2.1 建设原则

- 推行信息资源规划，建立完整的信息资源体系；
- 建立数据标准体系，对数据及其利用过程进行标准化、规范化；
- 支持数据安全管理机制，通过管理和技术手段实现数据安全管理；

4.2.2 建设的必要性

随着航空动力发展壮大，必须从粗放经营转变到集约经营。经营决策需要尽可能多的定量分析，而不是似是而非的定性分析；经营决策还需要尽可能快的速度。

随着各主机厂 ERP、CRM、MES 等信息系统的广泛应用，使得企业数据量激增。现在，各主机厂并不缺少数据，而是苦恼于海量数据以及数据的不一致性；随着数据量的增加，数据变得越来越难以访问、管理。在使用这些数据的过程中存在以下问题：

1）数据量大、数据来源广，业务系统每天产生的采购订单数就达数万

条；这还不包括其它生产环节如库存、制造等所产生的运营数据；而经营管理所牵涉的数据除此以外还包括了内部管理的人力、财务、以及与企业相关的外部环境数据。

2）中航动力四家主机厂对数据的理解存在偏差，定义不统一，导致数据可信度无法保证。对单个业务部门来说可能是合法的数据，但缺乏信息的集成和整合，导致整个企业对数据的含义、数值及使用方式产生歧义。

3)每个系统都有独立的报表系统,随着需求的变化和统计项目的变化，使得报表的修改相对比较困难；尤其目前很多在用系统的报表都固化在程序中，给今后的修改带来诸多不便。

4）对于一些需要跨平台才能进行的分析，平台不一致，应用系统之间数据定义也不一致，又没有实现数据共享，很难进行关联分析；并且，一个企业内部，不同系统平台之间的数据存在较大的冗余，增加了维护工作量，并可能造成系统资源的浪费。

5）在应用系统上进行统计分析会影响到正常系统运转。应用系统的时效性要求较高，需要大量的系统资源进行保障，为确保应用系统安全稳定运行，有必要将统计、分析等对时效性要求相对较低的管理数据从应用系统提取出来。

4.2.3　工艺设备方案

1）　数字化生产线运行综合管控技术

（1）实现智能化的生产计划管理，包括订单的创建和维护、生产批次管理、生产派工、工程变更管理、生产插单、订单进度跟踪等业务活动。实时分析生产计划和生产进度的匹配情况，并在异常情况发生时（如设备宕机、物料短缺等）进入自动运算模式，对当前的任务队列进行动态排产，最大程度地降低生产变化对计划的影响和冲击。能够适应多项目管理的项目驱动生产模式，支撑科研生产模式下的多品种、小批量、工艺数据频繁变更的管理需求，实现生产计划、设计与现场生产的实时联动。能够提供

多角度、多类型的现场过程监控手段，以直观简便的方式满足对整个生产过程的监督和管理需要。

（2）实现智能化的生产现场管理，包括物料控制，电子看板功能和产品追溯的管理。通过物料控制将投料环节、零件加工环节和产品交付环节进行综合管控，并对过程数据进行实时数据采集、统计和分析。通过电子看板，显示生产过程中的物料、设备、质量、人员和任务执行信息，实时反映生产实际情况。按照单件对产品的生产过程信息进行全面精准的追踪，提供原材料向产品的正向追踪，以及从产品向材料和生产过程的反向追踪，获取产品的原材料、生产批次、质量标准、工艺路线、操作者、设备及工装工具使用情况、质量检验情况、返工返修等生产过程信息。

（3）实现智能化的在制品管理。通过条码技术，在毛坯进入工段到产品交付为止的整个生产过程中，对在制品的流转行为进行智能化监控和记录，实时查看在制品的位置、数量和状态信息，提供统计分析功能，对在制品的种类、数量等进行统计，方便在制品的随时清点和台帐的查看，并根据在制品实时情况提供智能决策建议，提高产品的可控能力。

（4）实现智能化的制造资源管理。对工装、刀具等资源信息进行统一管理，包括资源的维护保养、借用、维修等信息。采用条码技术对制造资源进行标识，实现刀具、工装等制造资源的出入库管理，并实时记录刀具工装的报损信息和盘点记录。制造资源出现短缺或非正常损耗时能够做出自动提醒和建议。

（5）实现智能化的质量管理。基于网络技术对生产过程实测质量信息进行实时监控、采集、分析和发布，利用相关计算、报告、查询、分析和挖掘工具生成各类质量关键性能指标（KPI），智能诊断出问题的根源并提供相应的解决方案。实现对产品整个加工过程的追溯，包括工艺路线、加工设备、加工时间、工装工具、操作人员的追溯。

（6）实现智能化的设备维护管理。通过实时设备状态监控，掌控设备

的运行状况的第一手资料；通过各种分析指标，智能管理设备的历史运行状况，指导设备管理部门制定适合的维护和维修策略；制定完善的预防性维修计划，保证机床的开工率。

2）管控系统集成技术

（1）综合管控平台系统集成技术

开展数控设备的 DNC 集成、基于网络的数控设备管理 、面向产品数据安全的外协车间数控装备控制技术研究，通过数字化手段，将多台装备集成为一个装备系统，以实现数控设备的数字化管理、调度、优化，从而提高设备利用率和运行效率。

（2）多项目管理系统集成技术

集成项目总体计划和任务，对型号项目计划进行总体管控，实现多型号项目的看板管理，计划执行交付管理，实现业务数据填报、反馈、汇总及分析等工作。

3） 管理数据中心研究成果及鉴定验收方式

（1）软件成果

a.研究报告 3 份

a） 数字化生产线运行综合管控研究报告数字化工艺设计研究报告。

b） 综合管控平台系统集成研究报告。

c） 多项目管理系统集成研究报告。

（3）鉴定验收方式

召开评审会进行鉴定验收。

5　组织机构、劳动定员和人员培训

5.1　组织机构

本项目为技术攻关项目，企业原有组织机构保持不变。

5.2　劳动定员和人员培训

本项目不新增劳动定员，岗位所需人员由中航动力内部调配解决。

中航动力设有完善的培训组织机构，人员培训由教培中心进行管理，并负责具体的培训工作。

6　项目建设实施计划

6.1　项目建设周期

根据项目建设情况及项目建设特点，本项目建设周期为 60 个月。

6.2　项目建设实施安排

本项目建设周期为 60 个月。本项目实施起始时间为下达项目首批计划时间，结束时间为提交竣工验收报告时间，以月为单位。

具体计划见表 6.2-1：“项目实施进度表”。

表 6.2-1　　项目实施进度表

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
一	工程数据中心								
(一)	航空发动机智能制造共性技术研究								
1	数字化生产线布局规划技术		5-12月	1-12月			1）数字化工厂体系研究	1)数字化工厂建模及仿真环境 2)数字化工厂建设规划研究报告 3)数字化生产线状态智能诊断与维护研究报告	
					1-12月		1）数字化工厂体系研究 2）数字化生产线功能设计 3）数字化生产线系统总成		
						1-12月	1）数字化生产线状态智能诊断与维护技术研究		
2	基于MBD技术的设计制造协同	6-12月		1-12月			1）基于结构特征的MBD建模规范和标准研究 2）设计制造协同规范和标准研究	基于MBD技术的设计制造协同研究报告	
			3-12月	1-12月	1-12月		1）基于结构特征的MBD建模规范和标准研究 2）设计制造协同规范和标准研究		
			1-12月	1-12月	1-12月	1-12月	1）工艺分工与BOM管理方法 2）生产工艺准备状态管理模式研究		
3	数字化工	6-12月	1-12月	1-12月			1）数字化工艺规划与管理技术	1)数字化工艺设计研究报告	

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
	艺设计						2）工艺细化方法研究 3）结构化工艺规范研究	2)数控加工快速程编工具开发与应用研究报告	
					1-12 月	1-12 月	1）数控加工快速程编工具开发与应用		
4	虚拟仿真	6-12 月		1-12 月			1）仿真资源数据库构建	1)工程数据库 3 个：仿真资源数据库、工具数据库、切削参数库 2)仿真数据与工程数据中心集成研究报告	
			5-12 月		1-12 月	1-12 月	1）仿真资源数据库构建 2）工具数据库构建 3）切削参数库构建		
					1-12 月	1-12 月	1）仿真数据与工程数据中心集成		
5	系统集成技术				1-12 月			1）智能制造技术集成应用环境 1 个 2）产品实物数据分析软件 1 套 3）现场服务总线集成研究报告 4）制造数据与工程数据中心集成研究报告	
					1-12 月		1）产品实物数据分析 2）现场服务总线集成		
						1-12 月	1）制造数据与工程数据中心集成		
（二）	航空发动机机匣零件智能制造关键技术研究								
1	数字化工艺设计	5-12 月	1-12 月	1-12 月			1）机匣车铣、铣车复合加工工艺路线统计分析	1）工艺规程 3 份：低压一级内机匣车铣复合加工工艺规程、低压二级机匣车铣复合加工工艺规程和前机匣铣车复合加工工	
		6-12 月	1-12 月	1-12 月	1-12 月		1）机匣车铣、铣车复合加工工艺路线规划技术		

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
							摸索铣、车复合加工工艺路线规划的变形控制要点，实现典型件车铣、铣车复合加工制造及变形控制。	艺规程。 2）数控加工程序 3 套：低压一级内机匣车铣复合加工数控程序、低压二级机匣车铣复合加工数控程序、前机匣铣车复合加工数控程序。	
				3-12 月	1-12 月	1-12 月	1）机匣车铣、铣车复合加工自动化编程技术 实现铣、车复合加工的车削、铣削、钻削等工艺的自动化编程方法。		
2	虚拟仿真			1-12 月	1-12 月	1-12 月	1）机匣数字化工厂建模及仿真技术 建立一套集合多单元系统的数字化生产模型。模拟实际生产线的活动和状态，为调度决策提供依据。	1）仿真模型 1 项：机匣数字化生产线模型。 2）研究报告 6 份：机床动态响应过程诊断分析、工艺过程仿真分析、加工系统动态仿真分析、面向工艺过程的关联性仿真应用、机匣零件典型工艺过程分析优化、工艺参数分析优化； 3）应用工具 1 个：仿真集成工具。	
			1-12 月	1-12 月	1-12 月	1-12 月	1）完成机匣类零件智能加工工艺优化分析 (1)机床动态响应过程诊断分析 (2)工艺过程仿真分析 (3)加工系统动态仿真分析 (4)面向工艺过程的关联性仿真应用 (5)机匣零件典型工艺过程分析		

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
							优化		
			1-12月	1-12月	1-12月	1-12月	1）机匣工艺参数分析优化技术 基于切削加工系统测试结果，以材料去除率、加工成本等为目标函数，以稳定切削条件、切削力等为约束条件，获取最优切削参数。 2）虚拟仿真工具集成技术 整合虚拟仿真工具功能，实现仿真环境的定制、开发、集成。		
3	物理验证			1-12月			1）机匣车铣、铣车复合加工切削路径优化技术 摸索铣、车复合加工的刀具轨迹优化方法、切削参数选择、变形控制方法，实现典型件车铣、铣车复合加工的切削路径优化。	1）过程工装夹具6套：低压一级内机匣车铣复合加工用定位夹具2套、低压二级机匣车铣复合加工用定位夹具2套、前机匣铣车复合加工用定位夹具2套。 2）复合切削刀具4套：其中车铣复合加工系统的车削刀具 1套、铣削刀具1套，铣车复合加工系统的高速铣削刀具1套，车削刀具1套。 3）交付零件8件：低压一级内机匣2件、低压二级机匣2件、前机匣上、下半部各2件。	
				1-12月	1-12月		1）机匣复合加工高速铣削技术 摸索复合加工设备上的高速铣削加工参数，提高复杂型面的铣削效率和表面质量。 2）机匣车铣、铣车复合加工装夹与支承技术		

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
							摸索铣、车复合加工装夹与支撑的控制要点，应用液压涨紧夹具技术和随行夹具技术，实现典型件车铣、铣车复合工装制造、设计及加工制造应用。	4）应用工具3个：加工位置及形状几何自适应控制技术研发和工具集成、加工过程自适应控制技术研发和工具集成、生产运行自适应控制技术研发和工具集成； 5）数字化检测工具1套。	
				9-12月	1-12月	1-12月	1）完成智能加工过程控制技术研究 (1)加工位置及形状几何自适应控制技术 (2)加工过程自适应控制技术 (3)生产运行自适应控制技术 2）基于典型机匣特征的数字化检测技术 开展基于三维模型的离线快速编程技术研究，满足数字化生产线机床在线测量、三坐标精确测量的需求。		
（三）	航空发动机中央齿轮机匣壳体智能制造关键技术研究								
1	基于MBD技术的设计制造协同	1-12月					基于 MBD 的设计制造协同流程研究	MBD工艺协调标准	
					1-12月		基于单一数据源的中央齿轮机	建模标准	

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
							匣壳体类零件建模规范和标准研究		
2	数字化工艺设计		1-12月				基于 MBD 的工序模型构建及标注技术研究	MBD 工序模型建模标准	
					1-12月		基于单一数据源的结构化工艺设计技术研究	基于单一数据源的工艺规程	
						1-12月	基于产品特征的数控编程	基于特征的数控编程模板	
3	虚拟仿真			1-12月			数控编程与加工仿真集成技术	编程与加工仿真系统、仿真标准	
					1-12月		机械加工过程物理仿真	仿真软件、	
								基于仿真的优化参数	
						1-12月	机器人运动仿真 智能制造单元虚拟建模及运行仿真	机器人离线编程及仿真系统、仿真流程	
4	物理验证			1-12月			基于机内自动检测的数控加工	刀具机内检测系统、 零件机内检测及定位系统	
					1-12月		基于特征尺寸的模型最大包容性分析	研究报告	
						1-12月	制造过程实时监控与优化	自适应系统、试验数据、采集装置	
（四）	航空发动机液压作动筒智能制造关键技术研究								
1	基于								
			4-12月				确定液压作动筒典型件协同攻	单一模型	

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
	MBD技术的设计制造协同						关模式		
				1-12月			工艺设计协同研究	设计方案报告	
2	数字化工艺设计	8-12月					液压作动筒加工现状分析		
			1-4月				液压作动筒加工工艺统计	工艺设计方法	
			5-12月				液压作动筒加工工艺路线规划	工艺路线	
				1-10月			作动筒工程模型设计	三维数模	
				6-12月			作动筒工艺优化	结构化工艺规范	
				6-12月			作动筒生产线设计	生产线模型	
3	虚拟仿真			6-12月			梳理模拟制造中，零件仿真参数的构成		
					1-12月		物理仿真	仿真报告、数据库	
					1-12月		几何仿真	仿真报告、数据库	
						1-6月	焊接仿真	仿真报告、数据库	
					1-12月		生产线仿真	仿真报告、数据库	
				6-12月	1-12月		生产线PLC调试仿真	仿真报告、数据库	
				6-12月	1-12月		容差分析	仿真报告、数据库	
					1-12月	1-12月	基于加工过程物理仿真的工艺优化	仿真优化	
4	物理验证				1-12月		机床监控自适应加工系统	加工系统	

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
					1-12月		在机测量反馈自适应加工	研究报告	
					1-12月		基于零件实际状态改变刀轨自适应加工	研究报告	
					1-12月		物物感知和交换信息系统	信息系统	
					1-12月		智能工装	智能工装实物	
					6-12月		建立智能制造生产线	三类典型零件的加工	
						1-12月	智能生产线集成验证	验证报告、标准	
（五）	航空发动机压气机叶片智能制造技术研究								
1	数字化工艺设计	1-12月					MBD工艺设计技术研究	MBD工艺设计系统操作手册	
			1-12月				MBD工艺设计技术验证	压气机叶片MBD工艺规程	
				1-12月			知识驱动软件设计需求分析。	需求分析报告	
					1-12月		1、构建典型工艺知识库； 2、构建压气机叶片铣削加工刀具库； 3、构建压气机叶片铣削加工参数库； 4、知识驱动软件设计技术协议。	1、典型工艺知识库； 2、压气机叶片铣削加工刀具库； 3、压气机叶片铣削加工参数库； 4、知识驱动软件设计技术协议。	
						1-12月	知识驱动工艺流程设计软件开发和验证	知识驱动型工艺流程设计软件1套	

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
2	虚拟仿真	1-12月					压气机叶片叶型铣削Vericut仿真技术研究	五轴铣削仿真模板2份	
			1-12月				1、仿真机床库构建； 2、仿真刀具库构建；	1、仿真机床库； 2、仿真刀具库。	
				1-12月			多工序加工仿真验证。	多工序仿真操作指导书1份	
				1-12月			1、仿真机床库构建； 2、仿真刀具库构建； 3、多工序加工仿真验证。	1、仿真机床库； 2、仿真刀具库。	
					1-12月		1、工序余量检测与控制方法研究； 2、压气机叶片机加全过程仿真研究。 3、工装设计仿真优化需求分析。	1、压气机叶片机加全过程仿真过程研究报告。 2、工装夹具仿真分析和优化报告。	
						1-12月	1、编制压气机叶片机加全过程仿真规范。 2、工装夹具仿真分析验证。	1、压气机叶片机加全过程仿真规范一份。 2、工装夹具仿真分析报告。	
3	物理验证	1-12月					刀具机内检测系统应用验证	刀具机内检测系统编程指导书	
			1-12月				压气机叶片型面五轴铣削自适用加工技术应用验证	叶片型面铣削自适用系统（LX051）	
				1-12月			柔性加工单元建设方案初步分	柔性加工单元建设方案初步分	

序号	名　称	起止时间					主要研究内容	主要成果	考核方式
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年			
							析	析报告。	
					1-12月		柔性加工单元技术需求、招标。	柔性加工单元技术协议	
						1-12月	柔性加工单元安装、调试、应用。	柔性加工单元应用	
4	系统集成		1-12月				工艺、数控编程、加工仿真集成技术研究	基于PDM的数控编程、虚拟仿真集成软件模块	
						1-12月	MES与生产中央控制系统集成	MES与生产中央控制系统集成	
二	管理数据中心								
（一）	数字化生产线运行综合管控技术		1-12月				数字化工艺设计研究	数字化工艺设计研究报告。	
				1-12月			实现智能化的生产计划管理初步分析	实现智能化的生产计划管理初步分析报告	
					1-12月		实现智能化的生产计划管理等	数字化生产线运行综合管控研究报告数字化工艺设计研究报告。	
（二）	管控系统集成技术				1-12月		综合管控平台系统集成技术和多项目管理系统集成技术	综合管控平台系统集成研究报告。多项目管理系统集成研究报告。	

7　项目招标方案

根据有关规定，本项目新增部分设备估算价格在100万元以上的需进行招标。但由于本项目涉及国家秘密和专有技术，招标不宜采用公开招标。

本项目所涉及的设备招标采用委托邀请招标方式。

最终招标方案按有关部门核准意见执行。

8　投资估算

8.1　投资估算说明

8.1.1　编制依据

1）可行性研究的设计资料、图纸和设备表。

2）国家、地方及有关行业的相关文件和规定。

8.1.2　建设投资

1）项目总投资

本项目总投资（总经费）10975 万元，含 324.61 万美元。其中：其他费用为技术研发费用。

2）资金来源

本项目总投资 10975 万元，全部为募投融资。

9　结论和建议

航空发动机是大国战略性产业，航空发动机作为当代前沿技术的集成者，一直是大国争雄的核心领域之一，是关系到国家安全、经济建设和科技发展的支柱产业，是一个国家综合工业基础和科技水平的集中体现，对国家安全和发展具有全局意义和深远影响。

我国航空发动机技术储备不足，缺乏自主创新能力，成为制约航空工业发展的瓶颈之一，要实现我国航空发动机研发水平的全面提升。根据航空发动机的量产要求，急需将发动机产能提高到现有产能的近 3 倍。为实现该目标，重点途径有二：其一，缩短发动机的生产准备周期，包括工艺优化、数据准备等；其二，极大提高生产线的生产效率，瞄准智能化生产的发展，进行生产的改造或新建。

10　附表、附件、附图

10.1　附　表

1）新增工艺设备明细表；