

面向智能制造的航空发动机 协同设计与制造*

陈冰

(西北工业大学机电学院,西安 710072)

[摘要] 智能制造技术是在信息化、数字化、网络化基础上,将人工智能引入制造理论及生产运行过程中,形成以存储、计算、逻辑、推理为特征的机器智能所驱动的产品制造技术。目前,统一模型驱动下的协同研制已经成为航空发动机产品研制的未来发展模式。在此背景下首先分析航空发动机产品研制的现状,从基于模型的数据集成、基于工艺系统协同的智能加工技术、基于 CoE 模式的组织协同、工业大数据驱动下的过程协同和基于 CPS 的协同优化等方面探讨了智能制造环境下协同设计制造发展趋势,为航空发动机协同研制技术的发展提供了有益的参考。

关键词: 航空发动机;协同设计;协同制造;智能制造

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.016



陈冰

西北工业大学机电学院副教授,参与和主持包括国家973项目、国家自然科学基金重点项目、国家863项目、陕西科技计划项目在内的多项纵向横向课题。在国内外期刊上发表相关论文20余篇,其中SCI收录1篇,EI收录14篇,ISTP收录5篇,取得国家发明专利3项,软件著作权7项。

* 基金项目:西安市科技计划项目(CXY1313和CXY1338(5))。

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。欧美发达国家均采用工业化和信息化深度融合的模式提升制造业水平。2012年德国政府提出了基于工业4.0的国家发展战略,其核心是智能产品和智能工厂。2012年2月美国政府出台“先进制造业国家战略计划”,2013年1月,美国总统执行办公室、国家科学技术委员会和高端制造业国家项目办公室联合发布了《国家制造业创新网络初步设计》。美国创新网络计划的核心是集中产学研力量推动智能制造、新能源以及新材料应用等先进制造业的创新发展,从而使美国在全球制造业新一轮变革中抢占先机,继续保持领导者地位。

为了促进我国制造业的技术创新、产业结构升级,实现跨越式发展,《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》明确指出,加快建设制造强国,以信息化和工业化深度融合为抓手,实施

“中国制造2025”,构建以智能制造为重点的新型制造体系是增强我国综合国力和国际竞争力、保障国家安全和民族复兴的国家战略。

航空发动机是具有客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造流程复杂、试验维护复杂、项目管理复杂、工作环境复杂等特征的典型复杂产品,集中了工业制造和信息行业中的高精尖技术,最能体现国家的工业基础、科技水平和国防实力,被誉为现代工业“皇冠上的明珠”,目前已经成为“中国制造2025”和“国防科技工业2025”的重点突破方向。

航空发动机协同设计与制造 现状分析

航空发动机研制是一项多领域迭代耦合过程。由于航空发动机具有几何形状复杂、性能要求高、研制信息量大、涉及学科多、制造工艺难、研发周期长等特点,其研制需要由多团队、多学科、多设计所、多制造企业

共同参与完成^[1]。

发达国家先进航空制造企业已经大量采用各种基于项目或公司之间大协同,呈现出研制组织的多区域协同、研制过程的多领域协同和业务活动的多学科协同的特点。例如美国洛克希德·马丁公司主导的重大军用飞机研制项目 JSF,建立了支持产品全生命周期的虚拟产品研制平台,支持全球 50 多家合作伙伴全方位协同;罗·罗构建了开放式的协同框架与平台,面向产品全生命周期支持公司全球设计、制造和维护等业务单元的高效协作。普惠利用覆盖航空发动机研发全过程的 PLM 技术来增强企业的创新能力,使产品充分体现出气动、结构、机械设计、性能、控制等技术领域的最新成就,获得了显著的经济效益^[1-2]。

我国航空发动机行业面临设计制造厂所异地分离,预研产品和定型产品多品种小批量混线研制模式等诸多难题,经过各厂所共同努力已经初步建成满足航空发动机公司级的协同研制平台,支持航空发动机公司级以型号产品为中心的多行业、跨地域、多厂所联合研制的协同工作^[3]。

随着工业 4.0 的兴起,智能制造成为制造业变革的主线,在此背景下,揭示航空发动机协同设计与制造的内涵,刻画航空发动机协同设计与制造过程各要素之间的耦合交互行为关系成为关键。据此,如何在智能制造模式下进行航空发动机协同设计与制造成为一个热点。本文拟从 3 个横向维度(数据集成、过程集成和组织集成)和 3 个纵向维度(设计/设计协同、设计/制造协同、制造/制造协同)进行讨论和分析。

基于模型的数据集成

数据集成是实现航空发动机协同设计与制造的基础和保障,统一的产品数字化定义是实现智能制造的基石。产品定义经历了二维图纸数

字化、二维数字图纸+三维模型到基于模型的产品数字化定义^[4]。

MBD 与其说是产品数据的表征方法,不如说是统一的产品数字化定义模式,MBD 是通过定义特征和控制特征关系完成模型定义的方法。MBD 的核心是基于特征定义的三维模型,围绕三维模型集成了包括设计、工艺、制造、检验等各部门的信息,形成单一数据源,成为产品设计与设计、设计与制造和制造与制造之间统一的信息载体,并且可以根据协同研制需求提供不同视图用于装配、仿真、工艺设计等。同时 MBD 能够通过设计、制造等工程特征进行语义描述,融合可更新的工程知识。

MBD 模型中主要管理两类数据,一类是几何信息(几何模型);一类是非几何信息(标注信息)。非几何信息基本不是独立存在的,而是与几何特征有关,并通过特征关系实现关联。几何信息通过 CAD 系统进行管理,而非几何信息通过产品数据管理系统进行存储和管理,通过这种机制就实现了几何信息与非几何信息的高度集成。这种集成机制解决了航空发动机产品研制过程中设计与设计、设计与制造、制造与制造协同过程中的数据集成问题(图 1)。

· 设计与设计协同过程:在设计与设计协同过程中,由于航空发动机

结构复杂性,设计更改频繁,以往的二维设计模式难以满足,既不能保证设计数据的关联性,增加了设计更改的工作量;同时无法保证总体与各单元设计进行并行协同设计。基于 MBD 模型,航空发动机部件设计单位可以建立气动、结构、强度、热力、传热、燃烧等多领域仿真环境,开展多学科综合优化设计技术及实现设计过程中主要专业的协同与并行。

· 设计与制造协同过程:航空发动机设计过程中存在设计与工艺的协同,主要任务是对产品的设计进行可制造性分析和工艺审查,同时对某些生产准备周期长的零件,可以提前进行工艺准备(毛坯设计、工装设计等),基于 MBD 单一数据源的出现能够保证在统一的数据模型下进行工艺设计及工艺准备工作,针对长周期关键零件实现设计制造协同^[5-7]。

· 制造与制造协同过程:制造过程覆盖了工艺设计、工装设计、加工、装配等诸多环节,这些制造活动之间存在着数据交互和集成,工装设计、数控加工和装配工艺设计都需要数据模型作为单一数据源,进行并行协同工作^[5-7]。

基于机床-刀具-工件-工装协同的智能加工技术

新一代航空发动机大量采用高

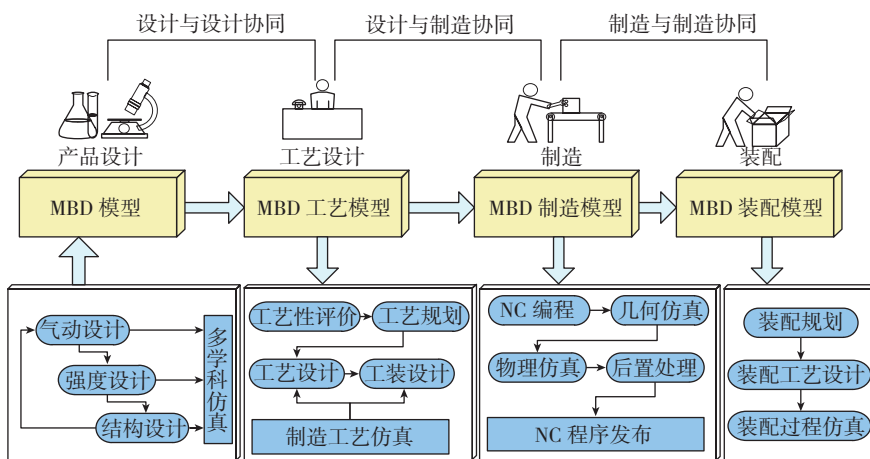


图1 基于MBD的设计制造协同

Fig.1 Collaborative design and manufacturing based on MBD

性能 / 轻量化复杂薄壁整体结构, 以最小结构重量满足高性能比要求, 其服役性能对制造偏差和应力集中极为敏感, 对零件表面完整性、工艺过程质量可靠性、一致性要求极为苛刻。必须从机床 - 刀具 - 工件 - 工装形成工艺系统开展协同制造技术研究, 实现工艺过程准确预测和精确调控, 保障关键零件制造过程质量精度一致性和工艺过程的鲁棒性^[8-9]。

实现机床 - 刀具 - 工件 - 工装协同的智能加工, 必须突破智能加工工艺模型建模技术、基于物理模型的工艺仿真优化、基于测量的工艺过程调控技术以及智能机床及组件技术, 面向协同的智能加工技术框架以及智能加工实现过程如图 2 和 3 所示。

· 智能加工工艺模型应该具备基于智能的模型自主学习、自适应进化、推理决策与自适应调控等功能。通过构建自学习自进化知识模型, 采用先进的检测、加工设备及仿真手段, 集成已有加工知识和经验实现对加工过程仿真、预测, 以及进行实时监测、描述与控制, 最终使加工系统能根据实时加工工况自动选取最优加工参数与加工状态, 从而获得最优的加工性能与最佳的加工质效。

· 刀具 - 工件 - 夹具协同交互行为与识别: 通过刻画工件形貌和加工过程的映射关系, 揭示工艺系统界面耦合作用对界面交互行为的影响机制; 分析实时工况的特征表现形式, 研究基于 DS 理论和多传感器信息融合工况特征在线识别方法。

· 基于实时监测的自主学习与模型进化: 通过实际加工过程中主动激励与系统响应的侦测方法及基于智能感知和侦测信息的模型参数辨识方法, 建立不同工序间多态模型, 揭示工件形貌及模态的演化机理。

· 面向实际工况的智能决策与工艺过程自适应调控: 研究标准工况与实际工况的差异和决策行为之

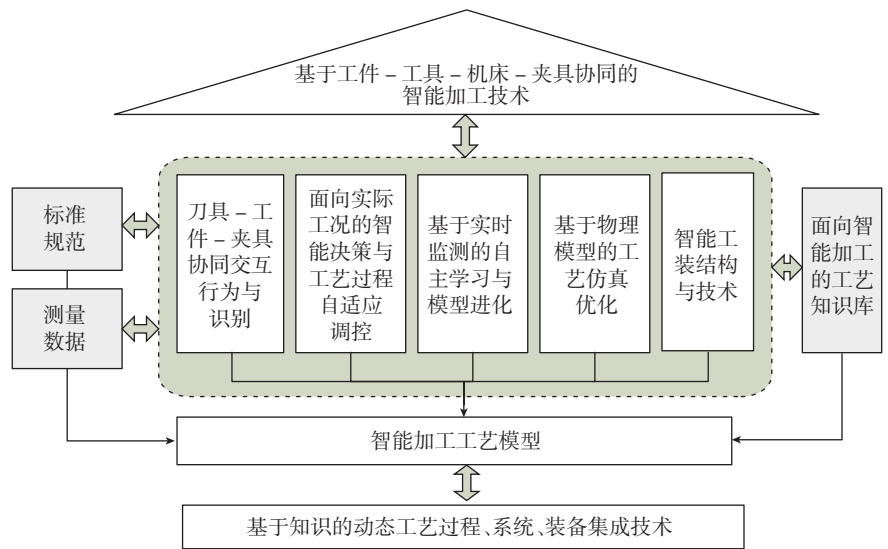


图2 面向协同的智能加工技术框架

Fig.2 Intelligent processing technology framework oriented to collaboration

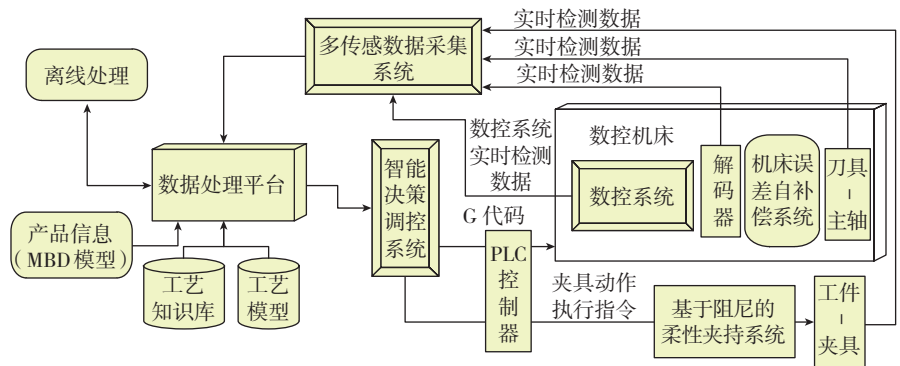


图3 智能加工实现过程

Fig.3 Implement process of smart processing

间的映射关系, 建立工况差异对交互作用影响的灵敏度分析方法和随机扰动补偿模型。研究工艺参数和装卡系统状态的自适应调整方法, 建立面向离散事件和随机扰动的智能决策模型和工艺过程自适应调控方法。

· 基于物理模型的工艺仿真优化: 通过多重几何与物理属性的定义, 采用广义体积元分析复杂结构件加工过程中工件几何与物理属性的时空变换规律。根据复杂结构件的加工轨迹, 建立结构件加工过程的精细化表征方法, 描述加工过程中工件状态随时间与轨迹的变化, 以及工艺系统属性随时间的变化。

· 智能工装结构与技术: 面向薄壁件加工过程控制, 对零件施加预应

力, 实现预应力装夹, 在加工过程中实时调整夹紧力, 保持加工过程的稳定, 抑制振动, 平衡加工中的切削力和残余应力, 减小变形。虚位移, 释放一部分变形。主要涉及自适应工装与可重构工装的结构与控制、传感器驱动的智能夹持方法、工装快速精确和高精度定位技术、容差控制与工装装夹规划优化、工装定位 / 夹紧力 / 夹持点的自适应优化控制、工装与零件接触变形 / 表面损害、热 / 振动变形预测与控制、加工中工装的刚度、摩擦与动态稳定性分析等关键技术。

· 基于知识的动态工艺过程、系统、装备集成技术: 采用系统集成理论方法, 结合制造装备的特点, 建立

工艺与装备的信息交互模型,构建工艺、感知、智能执行单元之间的实时信息通讯接口,形成感知数据和工艺知识集成单元、面向实际工况和装备运行状态的自主决策单元和快速响应执行单元,实现装备智能化控制。

基于 CoE 的组织协同

实现智能化的航空发动机协同研制首先必须实现协同研制过程的组织集成。通过革新协同组织模式实现多学科协同优化设计、设计/制造协同、制造/制造协同和基于项目管理的综合管控协同^[3,10]。

CoE (Center of Excellence) 指的是一种正式指定或公众认可的在某一学科领域具有知识和经验的实体或能力中心。GE 公司按发动机部件划分成立了研究高压涡轮叶片的冷却、涡轮叶型热力和统计分析的叶片 CoE、结构 CoE、旋转零件 CoE 和燃烧室制造 CoE 等。罗·罗公司设立了宽弦风扇叶片 CoE、航宇材料 CoE、计算流体力学 CoE 以及环境评估 CoE 等。空中客车公司根据“Power8”重组计划,于 2007 年建立了 4 个跨国 CoE,机身与客舱 CoE、机翼与吊架 CoE、后机身与尾翼 CoE 以及飞机结构 CoE,这些中心不仅从事核心技术的研发,而且往往与生产 CoE 是一个实体。通常有各自的责任和决策链,统一负责该部件领域的产品开发和生产工作,在这种组织形式下,研发生产完全一体化^[11-12]。

我国航空发动机行业从顶层平台到部件设计制造,结合航空发动机研制进行了基于 CoE 模式的组织集成。图 4 描述了基于 CoE 模式的协同平台架构^[3]。

技术体系架构以 CoE 管理体制为依托,形成一个平台,若干单元体 CoE 应用系统、总装试车基地、若干数据中心通过集成接口实现与集团的有机集成。通过项目牵引、总体设计推动、总装拉动模式实现数字化协

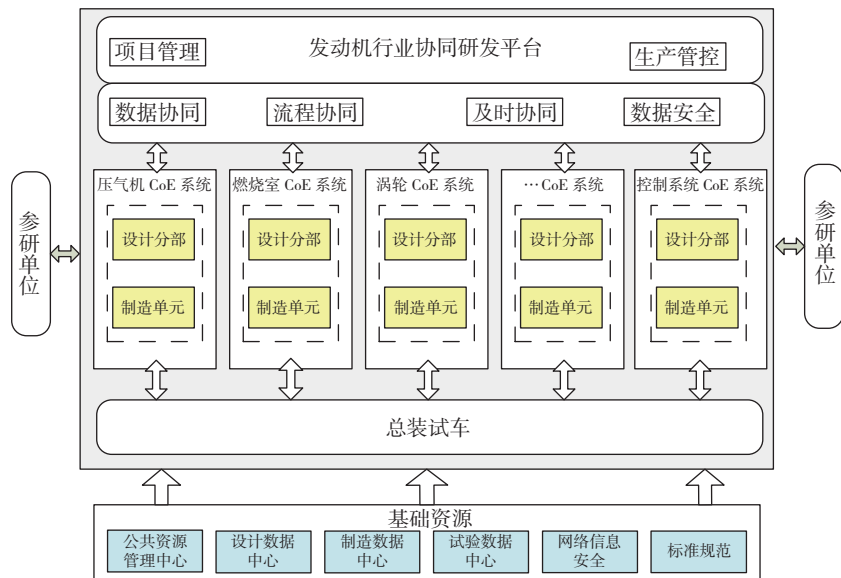


图4 基于CoE模式的组织协同

Fig.4 Organization collaboration based on CoE model

同研发。研究院承担总体设计,部件的方案设计、技术设计,试车试验等。部件的详细设计与关键零部件制造单元融合形成设计、制造、装配、试验一体化集成的单元体 CoE,通过供应链管理系统,形成贯通零部件制造单元-单元体 CoE-总装试车基地供应链集成体系。

协同研发平台具备分布式数字产品定义功能,通过项目管理推动在整个产品生命周期(总体方案设计、总体技术设计、总体详细设计、工艺设计、工装设计、数控编程等)中能够有效组织所产生的各种产品定义数据(包括全部 3D、2D 图样数据,相应的技术文件和 BOM 数据),并能够进行产品数据共享、转换、管理和控制,支持基于产品生命周期的成熟度驱动的 MBD 模型技术应用。

在协同工作平台环境中,处于异地的总体设计人员与 CoE 设计、工艺和制造人员可以利用协同研发平台中的协同社区,在有效的访问权限控制下共享基于 MBD 模型的单一数据源,实现对各种异构产品数据的可视化协作,具备多学科协同优化设计,基于成熟度的设计数据发放与接受、工艺审查,基于技术状态管理的工程

更改、制造信息反馈与交流、远程试车监控等功能。

协同研发平台提供研究院与各单元体 CoE、关键零件制造单元、总装试车基地之间跨地域、跨企业之间异地流程管理能力,可以让处于异地使用异构平台的用户在一个流程中执行,通过工作流程管理,保证流程控制、数据共享与一致,实现技术状态管理。同时提供相应的应用系统集成接口,中间件实现异构应用系统的信息集成、过程集成和业务集成,确保研究院与各单元体 CoE、关键零件制造单元、总装试车基地业务整合,同时确保研究院与项目管理、生产管控、公共资源管理中心等实现集成。

工业大数据驱动下的过程协同

随着物联网技术的发展,在发动机协同研制过程中,设计、制造、装配、试验、生产和运维都会产生大量的数据,包括设计过程数据、制造工艺数据、制造工况数据、设备机群数据、流程质量数据、装配过程数据、试验试车数据、物流数据、生产过程数据和运行维护数据,这些数据通过传感器形成的物联网进行汇聚、感知,

在特定的语义场景下进行挖掘、监控和决策。这种协同已经超越了单纯的设计制造协同,而是工业大数据驱动的人、物、系统进行过程协同^[13-14]。

协同设计制造过程是一种包含多学科领域设计制造活动的复杂过程,会产生知识数据和智力数据。知识数据是指可以数据化或者信息化的有序、系统的资源,知识资源是智力资源的基础,也是其衍生的资源,包括了经验总结、历史数据和设计规范标准等。智力数据是参与协同设计制造的人员所具有的知识。这些数据必须通过集成、共享、封装来支持协同设计制造,通过云计算技术进行存储从而形成集中资源和分散管理的协同资源管理模式。

智能工厂是智能制造技术的两大基石,目的是提高生产效率的同时大大降低由于人、设备乃至整个生产系统对工厂、生产线、单元和设备的扰动。这种扰动体现在人的错误、设计更改造成的工艺更改、生产计划的变更、物料代用、零件的返修等,这些不确定扰动的产生其实是人物协同之间耦合交互行为所带来的负效应。消减这些负效应就需要对整个生产系统进行状态感知、实时分析、自主决策、精准执行,最终实现可预测可修复自适应的智能协同制造。真正实现可预测自适应的智能协同制造需要向组成系统的若干要素提供智能化的交互手段和智能化的交互界面形成的人机一体化和物物一体化接口,通过接口实现多传感器下的异构信息融合,从而实现状态感知,在此基础上提供智能化的软件和分析服务对各种活动数据进行统计分析、特征提取、关联挖掘、模式识别和进化学习。这种认知和预测分布于加工过程、设备健康状态、生产计划乃至整个生产系统状态的实时分析和自主决策,进而实现整个复杂产品制造系统的可预测和可修复,最终降低成本、提

升运营效率和提高产品质量,这就是工业大数据的精髓所在。

基于CPS的协同优化

信息物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)定义为集成了计算、通信和存储能力,并对物理世界的实体进行可靠、安全、高效和实时的监测和(或)控制的系统。通过CPS系统,能够计算资源与物理资源间的紧密集成与深度协作。CPS系统是实现制造企业从数字化迈向智能化的必由之路^[15-17]。

通过CPS系统能够构建有智能设备、智能物流和智能生产设施组成的智能生产系统。在这个智能生产系统中所有的网络节点、计算、通信模块和人自身都被视为系统中的组成要素,通过信息物理融合及人机交互技术、应用制造过程性能特征主动感知方法,建立集多源异构信息分布式感知、无线射频识别与传输、直接标刻识别技术、实时数据处理等于一体的制造过程主动感知物理信息融合系统,实现制造系统的物联感知、控制与仿真优化。图5描述了基于

CPS的智能生产系统。

由于航空发动机制造过程存在普遍的高度混杂性和非确定性,要实现基于CPS下的协同优化需要解决几个关键问题:CPPS模型、CPPS系统优化调度与自治机制、CPPS系统的物理、信息可靠性^[18]。

结束语

航空发动机研制过程存在着广泛的协同优化问题,这种协同不仅仅存在于设计/设计、设计/制造、制造/制造协同过程,而且还存在于人、物料、设备和计算机之间,存在于信息世界和物理世界,充分体现了先进制造技术、信息技术和智能技术的有机集成和深度融合。随着“中国制造2025”的逐步推进和智能制造工程的有效实施,必将会产生适合于航空发动机协同设计制造特点的智能制造技术体系。

参考文献

- [1] 李山, 张光星. 航空发动机数字化制造技术的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2009(7):66-69.
- LI Shan, ZHANG Guangxing. Application

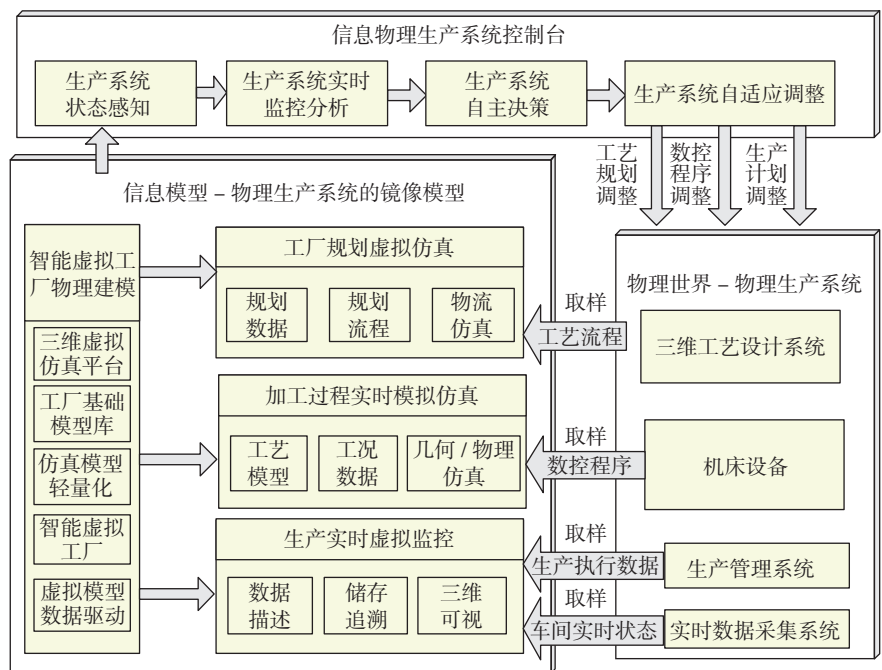


图5 基于CPS的智能生产系统
Fig.5 Smart product system based on CPS

and development of digital manufacturing technology on aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009(7):66-69.

[2] 刘雅星. 航空制造业数字化协同技术综述[J]. *航空制造技术*, 2015(18):66-71.

LIU Yaxing. Review of digital cooperative technology in aeronautical manufacturing industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(18):66-71.

[3] 韩福金, 陆佳圆, 王震, 等. 航空发动机协同研制平台的建设与应用[J]. *航空发动机*, 2015,41(1): 89-93.

HAN Fujin, LU Jiayuan, WANG Zhen, et al. Construction and application of aeroengine collaborative product development platform[J]. *Aeroengine*, 2015,41(1):89-93.

[4] 周秋忠, 樊庆春. MBD支持的产品协同设计及协同信息表达[J]. *制造业自动化*, 2011,33(1):55-59.

ZHOU Qiuzhong, FAN Qingchun. MBD supported product collaborative design and collaborative information definition[J]. *Manufacturing Automation*, 2011,33(1):55-59.

[5] 田富君, 田锡天, 耿俊浩, 等. 基于模型定义的工艺信息建模及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2012,18(5):913-919.

TIAN Fujun, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. Model-based definition process information modeling and application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012,18(5):913-919.

[6] 冯潼能, 王铮阳, 孟静晖. MBD技术在数字化协同制造中的应用与展望[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012,44(S1):132-137.

FENG Tongneng, WANG Zhengyang, MENG Jinghui. Application and development

of MBD in digital collaborate manufacturing[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012,44(S1):132-137.

[7] 万能, 常志勇, 莫蓉. 机加工工艺设计的三维新模式研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2011,17(9):1873-1879.

WAN Neng, CHANG Zhiyong, MO Rong. Three-dimensional new mode of machining process planning[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011,17(9):1873-1879.

[8] 张定华, 罗明, 吴宝海, 等. 智能加工技术的发展与应用[J]. *航空制造技术*, 2010(21):40-43.

ZHANG Dinghua, LUO Ming, WU Baohai, et al. Development and application of intelligent machining technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010(21):40-43.

[9] 张定华, 侯永锋, 杨沫, 等. 智能加工工艺引领未来机床发展方向[J]. *航空制造技术*, 2014(11):34-38.

ZHANG Dinghua, HOU Yongfeng, YANG Mo, et al. Intelligent machining process leads future direction of machine tools[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(11):34-38.

[10] 杨海, 宁诺拉, 白代敏. 数字化CoE模式的研究及在航空发动机叶片中的应用[J]. *航空制造技术*, 2014(23/24):36-39.

YANG Hai, NING Nuola, BAI Daimin. Research and application on digital center of excellence mode for aeroengine blade manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(23/24):36-39.

[11] 李海宁. 航空优良制造中心提前/拖期调度算法研究与应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

LI Haining. Center of excellence scheduling with earliness/tardiness penalties[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

[12] 马援. 解读空客CoE—访空客执行副总裁杰拉德·韦伯[J]. *国际航空*, 2009(5):50-51.

MA Yuan. Interpretation of the Airbus CoE—an interview with Gerald Weber, executive vice president of Airbus[J]. *International Aviation*, 2009(5):50-51.

[13] 李杰. 工业大数据[M]. 邱伯华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.

LEE J. Industrial big data[M]. QIU Bohua, Trans. Beijing: China Machine Press, 2015.

[14] LEE J, KAO H A, YANG S H. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment[J]. *Procedia CIRP*, 2014,16:3-8.

[15] LEE J, BAGHERI B, KAO H A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing Letters*, 2015,3:18-23.

[16] DWORSCHAK B, ZAISER H. Competences for cyber-physical systems in manufacturing—first findings and scenarios[J]. *Procedia CIRP*, 2014,25:345-350.

[17] WANG L H, TÖRNGREN M, ONORI M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015,37:517-527.

[18] YU C Y, XU X, LU Y Q. Computer-integrated manufacturing, cyber-physical systems and cloud manufacturing concepts and relationships[J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 6: 5-9.

Collaborative Design and Manufacturing of Aeroengine Oriented to Smart Manufacturing

CHEN Bing

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Based on the modern information technology, digital technology and network communication technology, smart manufacturing technology is a kind of product manufacturing technology by applying the theory of artificial intelligence into the manufacturing and production operation process, which is driven by storage, computing, logic and reasoning of machine intelligence. At present, collaborative development driven by the unified model has become the future mode of aeroengine product development. This paper firstly analyzes the status and development of aeroengines. Meanwhile, the trend of collaborative technologies has been discussed in the environment of smart manufacturing alternatively. These technologies include model of data integration based on the collaborative process system, smart processing technology based on the process system, CoE model, collaborative manufacturing driven by industrial data and collaborative optimization based on CPS. These discussions can provide a useful reference for the development of aeroengine collaborative development.

Keywords: Aeroengine; Collaborative design; Collaborative manufacturing; Smart manufacturing (责编 李舟)