面向航空协同制造的工业互联网架构研究与应用

蒋敏^{1,2*}, 郑力¹

1. 清华大学工业工程系, 北京 100084;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091

* E-mail: jiang_min2000@163.com

收稿日期: 2021-04-22; 接受日期: 2021-08-18; 网络版发表日期: 2021-12-01

国家重点研发计划(编号: 2020YFB1712500)资助项目

摘要 当前新一代信息技术与制造业的深度融合, 正驱动着传统制造业的数字化、智能化转型发展及业务模式的深刻变革. 航空装备研制过程具有跨时空域、跨产业链、跨多主体高效协同的典型特征, 是一项复杂的系统工程, 构建面向航空复杂装备协同制造的工业互联网平台, 既是满足当前航空复杂装备高效研制的必要手段, 也是以新模式驱动航空制造数字化转型的重要举措. 本文主要从航空装备研制数字化转型过程中对工业互联网发展的迫切需求与发展机遇出发, 研究面向航空装备协同制造的工业互联网架构体系, 并对其涉及的关键技术及应用场景进行了初步探讨, 以期对航空制造工业互联网的建设发展提供参考与借鉴.

关键词 工业互联网, 航空装备, 数字化转型, 协同制造

1 引言

航空工业是国家战略性高技术产业, 是国防空中力量和航空交通运输的物质基础. 航空制造业是知识密集型、技术密集型、多学科集成的产业, 是多品种小批量、离散型制造的典型代表. 航空装备自身具有极高的复杂性, 飞机零部件数量众多(大型飞机零件部数达300~500万), 研制周期长、成本高、风险大. 多年来, 国内外航空产业均形成了“社会化协同”制造模式, 通过风险共担的“主制造商-供应商”全国乃至全球合作模式, 降低单位成本、简化装配流程并加快产品的研制进程. 近年来, 航空制造业面临研制周期越来越

短、新品数量激增、交付质量要求越来越高的巨大压力, 当前主机与配套厂商信息相对滞后的协同制造模式已经很难满足主机研制生产需求及研制任务的顺利完成. 因此, 航空工业着力构建“小核心、大协作、专业化、开放型”高效航空产业链协同研制体系, 促进航空工业研制生产模式的转型升级. 航空型号研制正由单个厂所向多厂所协作、由同地域向多地联合研制转变. 当前新一代信息技术与制造业的深度融合, 正驱动着传统制造业的数字化、智能化转型发展及业务模式的深刻变革^[1]. 在这个关键环节上, 打造面向航空复杂装备协同制造的工业互联网平台, 构建面向全社会的航空研制产业链生态, 推动产业升级, 实现航空制造

引用格式: 蒋敏, 郑力. 面向航空协同制造的工业互联网架构研究与应用. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 3–13

Jiang M, Zheng L. Industrial internet architecture for collaborative manufacturing of aviation equipment (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 3–13, doi: 10.1360/SST-2021-0176

的智能化生产、网络化协同、个性化定制、服务化延伸,既是满足当前航空复杂装备研制生产需求的必要手段,也是面向未来航空装备制造新模式的应对措施。

工业互联网(Industrial internet)最早由美国GE公司提出,GE认为工业互联网是一个由机器、设备组、设施和系统网络组成的庞大物理世界,能够在更深层面与连接能力、大数据分析相结合^[2,3]。美国GE公司在2013年推出以PaaS(平台即服务)为核心的Predix工业公有云平台,开启了国际工业互联网云平台发展的序幕^[4]。随着工业互联网平台的理念和重要性逐渐被产业界所认识,全球推出一系列工业互联网平台产品。根据工业互联网产业联盟有关资料披露,全球工业互联网平台数量超过300多个。特别是2015年以后,跨国企业对平台布局明显加快,后续陆续出现的代表性平台包括:西门子MindSphere、SAP HANA、PTC ThingWorx、IBM Bluemix、博世IoT Cloud等^[5]。

我国采用“工业互联网”这一概念,其内涵也在不断丰富和完善。在工业互联网平台建设层面,我国的工业互联网平台发展模式与国外的十分相似,工业企业、互联网企业、传统软件企业各自不断发力,推出了一系列平台产品。当前各行各业工业互联网推进如火如荼,航天云网重点发挥航天科工产业门类全、涉及领域广的优势,为制造企业用户提供包括创意、设计、制造、投资等服务,实现网上企业资源共享与能力协同^[6]。海尔推出COSMOPlat,作为最早开始智能制造转型的企业之一,逐步探索出一条满足用户全流程最佳体验为中心的互联工厂模式,完成了由大规模制造向大规模定制的转变^[7]。阿里巴巴等致力于成为全球领先的具有云计算架构、大数据挖掘、机器深度学习企业,提供物联网应用解决方案的工业互联网平台。

综合来看,工业互联网只有与特定行业、特定应用场景的深度融合,才能发挥其真正作用,通过快速落地,推动技术进步、模式创新与行业发展。由于航空复杂装备制造行业本身的特殊性、复杂性,使得航空制造领域工业互联网的应用与发展仍然面临诸多挑战。本文主要从航空装备研制数字化转型过程中对工业互联网发展的迫切需求与发展机遇出发,研究面向航空装备数智化制造的工业互联网架构体系,并对其涉及的关键技术及应用场景进行了初步探讨,以期对航空制造工业互联网的建设发展提供参考与借鉴。

2 工业互联网支撑复杂航空装备协同研制

2.1 航空复杂装备数字化协同研制生产的需求

复杂航空装备研制系统是一个由多业务域(设计、工艺、生产、质量、试验、维保等)、多主体(厂、所、军、供应商等)、多层次制造系统强耦合而成的分布式、离散型复杂制造系统,其生产制造过程具有跨设计所-主机厂-配套厂并行协同研制、研制与批产混线,涉及产品设计、工艺设计、零件制造、结构装配、总装集成、试验试飞、服务保障、供应链管控、生态集成等多业务过程,研制过程协同难、技术状态管控难、生产效能提升难等问题尤为突出^[8]。

由于航空产品的研制生产具有典型的跨业务域、跨多主体协同的特点,制造工艺能力水平与质量管控要求高、交期紧、成本控制严,使得生产过程、协调关系非常繁杂,加之产品本身和制造系统的复杂性,使得产品研制过程容易受到多种不确定性扰动因素的干扰,系统运作模式具有明显动态、非线性特征,引发了对系统进行协同优化控制的多层次、多维度复杂性问题。在当前企业数字化转型的大背景下,要实现系统的高效稳态运行,更依赖于以数据、模型及智能为核心的调控机制的建立,借助工业互联网打通各环节、各维度信息链路,融合物联网、大数据、人工智能等先进信息技术,通过对实物流、信息流、业务流、质量流、成本流等的高实时、高敏捷、高可靠的有效管控,建立企业从战略到执行、产品从设计到运维的数字化环境,通过全域状态感知能力、高端制造数字化工艺能力、复杂过程协同能力、数据驱动决策能力等的持续提升,构建航空武器装备智能制造能力体系,支撑全产业链集成环境下的跨域资源协同与优化配置、设计制造技术的持续优化迭代及运营管控模式的持续创新,从而满足航空产品日益严格的质量、成本与效率要求,这已成为航空制造企业数字化转型过程中需要解决的关键问题。

2.2 工业互联网助推航空装备协同研制发展机遇

工业互联网的本质是以机器、原材料、控制系统、信息系统、产品以及人之间的网络互联为基础,通过对工业数据的全面深度感知、实时传输交换、快速计算处理和高级建模分析,实现智能控制、运营优化和生产组织方式变革^[9]。我国航空制造业,已经具有

一定数字化、网络化基础,运用工业互联网构建新型业务模式,是航空工业智能制造快速发展的重要支撑^[10]。以工业互联网为驱动力,可通过信息链接的深度与广度,通过提升信息交互与传递能力,实现设备级至供应链级各级制造系统状态的精准感知能力^[11],可通过构建基于工业互联网的一体化的航空产品设计/制造/服务一体化研制环境^[12],实现航空产品协同研制、工艺优化改进、运维服务等场景优化提升,为航空制造数字化转型赋能。

从飞机研制过程看,如图1所示,其研制流程涉及从需求定义到服务保障的20余项主要研制过程,以某机型为例其主线研制活动多达900余项,涉及相关工作人员4000余人,从立项到研制交付一般需要3~5年,每架次仅设计更改就多达数百项,期间涉及复杂的业务处理流程,导致其研制过程管控难度大。为有序整合支撑飞机研制的各种资源,使研制过程可控、可追溯、可优化,需要建立基于工业互联网支撑的协同研制体系,通过数据连续贯通、过程高效协同、资源紧密协作,构建协同、高效的航空产品研制新型基础设施环境,实现跨专业协作和跨域协同,可大幅缩短研发周期,提高研制效率。在航空数字化转型发展的大背景下,现代飞机研制模式正由传统设计-制造-试验模式,向设计-虚拟综合-数字制造-物理制造的新模式转变。以工业互联网为基础,建立统一、集成、共享的数字化研制平台及系列数字化工具集,通过建立数字主线和基于数字主线模型的过程、数据无缝融合与高效的协同研制体系,实现多点异地的多专业高效协同,可有效支撑产品快速迭代^[13]。

围绕产品全生命周期过程配合航空企业的数字化协同研制,达索、西门子以及PTC等国际软件供应商,构建了以产品单一数据管理为核心的协同研制环境,打造支撑全球范围的产品研制协同。通过相关平台的使用,波音、空客、洛克希德马丁、欧直等先进航空企业,构建了全球协同环境,实现了面向产品单一数据管理体系、全业务过程价值流管理,并提供了集成化服务和自主保障能力。空客在PHENIX项目上,构建了市场营销、研发、生产、客户服务的一体化应用体系^[14]。该应用体系通过xBOM实现单一数据源管理和构型管理,通过构建面向全球的协同环境实现跨集团的广域协同,以支撑空客内部以及17000多名供应商之间的协同研发,保证了A380/A350等型号研制的成功。波音基于达索3DEXPERIENCE平台实现了多专业协同设计,提升数字化协同能力,降低了40%~60%的成本^[15]。

从飞机生产制造模式看,航空复杂装备的研制已经转向社会化大协作研制生产模式,飞机生产全流程涉及庞大的供应链体系,涉及成品、原材料、生产配套等各类、各级供应链生态合作企业,配套企业数量多、分布广、交付波动大、协同难度大程度低,已经成为制约航空装备快速批产的瓶颈,更敏捷的供应链协同管控能力,有利于提升供应链整体的风险预防与控制能力,保障供应链整体的健壮性。当前高端航空装备制造企业之间的竞争越来越表现为供应链能力之间的竞争。利用工业互联网,统筹建立覆盖“主机厂-所-客户-合作伙伴-核心供应商”的航空制造生态圈,形成价值链网络生态,打破价值链各主体间网络、系

图1 航空装备复杂协同研制过程

Figure 1 Complex collaborative development processes of aviation equipment.

统、数据异构, 物理、应用、流程割裂的现状, 已经成为诸多航空装备制造企业快速发展的关键。波音、空客、洛马等先进航空企业通过引入新的信息化技术和先进管理思想, 构建数字化协同的先进协同应用体系, 统一管理各业务过程价值流, 推动飞机研发、制造、服务保障的业务模式变革, 提升核心竞争力。波音通过构建全球式协同信息系统, 整合全球供应链上的供应商, 完成全球范围、多层次的协同, 实现从制造商向集成商的转变^[16]。洛克希德·马丁公司在F-35项目中, 建立航空协同中心架构, 支持欧、美等合作伙伴的跨地域全生命周期过程的协同^[17]。在此基础上, 在采购、物料需求、配送、供应商管理等几个方面做了大量工作, 实现整个协同过程中的OEM、政府、供应商以及客户的全业务过程的价值流管理。

航空制造业产品生产批量小, 工艺较为复杂, 组织生产难度大, 普遍存在计划、管理不善, 造成库存和在制品数量多、流动资金占用大和不能准时交付等问题。构建基于工业互联网的数字化协同制造平台, 支持型号全生命周期协同研制, 实现总体设计单位、总体承制单位、分承制单位和社会协作配套单位的数据共享。在产品制造过程中通过生产线互联改造、智能控制、大数据分析, 缩短产品研制周期, 提高生产效率

和质量稳定性, 已成为当务之急。

3 航空产品协同研制工业互联网体系架构

工业互联网应用于航空制造业, 应充分适应行业跨业务域、跨多主体、跨全生命周期精准协同与管控的特性, 提升物流、信息流、业务流、质量流在多业务界面间、多研制主体间的整体协同性。基于此, 提出了面向航空制造跨全生命周期、跨主体融合的工业互联网体系架构。充分利用新一代信息技术, 建立面向航空产品研制全生命周期各环节、各主体高效协同的工业互联网架构, 通过实现制造资源、过程的全域动态感知、研制过程大数据实时分析、流程控制自主决策、制造现场精准执行及工业知识沉淀与优化, 推动航空制造智能化转型发展。

图2为航空复杂装备协同制造工业互联网平台体系架构。平台共分为应用层、平台层、IaaS层、边缘计算层以及工业安全防护。应用层围绕供应链计划管理、高级计划优化管理、供应链管理、采购履行管理、企业物流管理、企业统一库存管理、集成质量管理、……

图2 航空复杂装备协同制造工业互联网平台架构

Figure 2 Industrial internet platform architecture for aviation collaborative manufacturing.

包括处理CPU、内存、存储、网络和其他基本的计算资源,满足用户需求;边缘计算层针对航空工业生产过程中设备、系统等要素通过工控网络实现横向互联和数据采集;工业安全防护从防护对象、防护措施及防护管理三个视角,构建针对不同的防护对象部署相应安全防护措施的工业互联网的持续安全。

面向航空制造的工业互联网架构,强调航空制造行业特有的高质量安全和应用需求,将“数据+算法+模型+知识”作为关键技术要素,具有互联、集成、协同、智能、安全等典型特征。

(1) 跨尺度、跨主体的IT与OT. 全面深度互联是航空制造工业互联网的基础。通过工业互联网终端建立人、机、料、法、环与控制系统(OT)、信息系统(IT)之间的互联通路,建立跨尺度、跨主体、跨业务域的端到端数据传递与互通机制,实现从设计、生产、物流和服务等各个环节的数据串连,加速决策,提高准确性。只有打通数据流才能实现基于实时数据变化,对生产过程进行分析和优化处理,进而实现业务流程、工艺流程和资金流程的协同,以及生产资源(材料、能源等)在企业内部及企业之间的动态配置。打通数据流主要包括三类数据的连通,即生产流程数据、产品数据以及供应链数据。

(2) 跨业务域、跨时空的集成是关键路径。航空研制新模式的特点是设计-制造的互联和综合,可在更大的时空域的范围提升物流、信息流、业务流网络的运行效率,提升产品研制效率与批产效能;同时,面向全产业链的工业互联网平台,能够让更多的产业链企业参与到航空产品的研制过程中,通过数字主线打通业务数据壁垒,构建统一数据源,形成一体化集成的数字化协同研制环境生态。

(3) 航空制造工业互联网的多维度、多尺度协同性。航空制造工业互联网的协同性是面向航空制造多维度、多尺度的,包括计划、质量、资源、工艺等多维度的协同,也包括设备、产线、车间、工厂、供应链等多尺度生产制造过程的协同。通过内外制造系统的深度协同,建立计划、质量、资源等多维度的智能协同管控体系已经是当前航空制造社会化生产模式下的必由之路。

(4) 航空制造工业互联网的智能性。航空制造过程的互联、集成、协同都是为了更快速、更精准地获取、处理各种数据与信息,从而驱动制造过程的高效运行。

然而制造系统的复杂性,天然地决定了依赖人工经验决策为主的模式,已经难以保障制造系统长期稳定高效地运行,以大数据与人工智能等信息技术为代表的新一代信息技术正推动着制造系统向智能化方向发展^[18]。结合云计算与边缘计算,通过IT技术与OT技术的深度融合,提升人们对复杂制造系统的认识与管控能力,已经成为航空制造工业互联网发展的核心驱动力之一。通过构建智慧制造单元,实现设备故障智能诊断、加工过程异常检测、生产过程实时调度、生产工艺智能优化、过程智能控制等,可有效提升制造系统的运行效能。

(5) 航空制造工业互联网的安全性。近年来,随着工业控制系统信息化程度的不断加深,针对工业控制系统的信息安全问题不断凸显,业界对信息安全的重视程度逐步提高。工业互联网具有的低时延、高可靠、广覆盖的典型工业属性,使得工业互联网平台连接业务复杂,连接设备种类繁多,数据格式多样,在推进智能化、柔性化、协同化生产的同时,安全边界也越发模糊,受攻击面不断扩大,互联网和工业控制网上的威胁对工业互联网形成“双向挤压”,工业互联网平台各层均存在潜在安全风险。

4 协同研制工业互联网平台关键技术分析

4.1 基于边缘网关的统一数据采集分析与传输

在边缘计算层,与飞机高质量数字化制造能力需求相匹配,航空装备制造过程中数字化、智能化装备应用越来越广泛。一方面,种类繁多的数字化、智能化设备,带来了设备通信协议的网络异构性、数据类型的复杂多样性等问题,造成信息隔离、互联互通难度大;另一方面,由于所产生的数据量大、数据处理实时性要求高,对工控数据高实时性、高可靠性采集分析提出了更高要求。

研究基于边缘工业互联网网关的制造现场数据采集、分析处理及传输技术,已经成为航空制造数字化转型过程中需要解决的关键问题。如图3所示,通过边缘网关对采集到的生产数据进行解析、封装和本地处理,完成采集数据的分流、分析、存储等功能,并进行基于设备、数据的安全策略分析,同时保证上行数据获取与下行控制可以连续处理、循序渐进,支持更为复杂和完善的航空制造业应用需求。通过边缘层数据

图 3 基于边缘网关统一数据采集分析与传输
Figure 3 Unified data acquisition, analysis and transmission based on edge gateway.

处理, 剔除冗余数据, 减少数据量给网络传输、平台存储与计算处理等方面带来性能和成本上的巨大压力, 减小资源占用。通过边缘网关实现制造现场异构协议、异构网络适配, 建立数据安全访问机制, 实现底层资源设备多源异构分布式采集及异构网络协议层面的互联与集成。

在实现底层数据汇聚处理的基础上, 通过支持设备信息建模、传输加密及订阅模式, 实现对生产现场的物料准时化配送系统、机身总装数字化对接系统、机器人精加工系统、自动钻铆系统等工艺制造设备建立数字化虚拟模型, 结合生产管控系统, 对任务工单、工序、物料号、责任人同过程制造数据进行绑定, 实现数据信息的纵向集成, 从管控端延伸到设备资源端, 打通信息孤岛, 使数据更加线性、完整; 通过在边缘层进行数据的智能分析应用, 提升操作响应灵敏度, 实现对生产现场的异常报警、预测性维护等业务就近处理和决策, 增加现场处理的弹性。

4.2 工业大数据平台构建

由于航空产品的复杂系统特性, 零件级、部件级、子系统级、系统级数据之间具有强关联性, 不同专业、不同学科之间的数据也具有强关联性。而工业过程大部分遵循物理、化学等原理, 很多问题的产生背后存在复杂的工业机理。面对企业日益增加的数据量以及复杂的异构环境, 在平台PaaS层, 需要更快、更方便地获取原有沉积在各种异构应用系统孤岛中的数据, 以及通过梳理、分类、管理、整合成为有价值

的数据资源, 更有效地应用于各类智能应用^[19,20]。

面向供应数据链、生产数据链、服务数据链的基础需求, 结合工业制造现场数据存储分散和数据间关系复杂的特点, 建立工业大数据平台, 通过跨链数据语义关联及集成融合, 实现生产制造各环节数据的融合。面向航空制造的工业大数据支撑平台如图4所示, 通过汇聚整合设计、制造、实验、保障等多主题域数据, 融合工业物联数据、应用系统数据、外部跨界数据, 建立面向工业互联网多应用场景的数据服务中台, 整合异构网络、异构系统、异构类型的数据, 实现多源异构数据快速融合。该平台主要包括: (1) 数据采集层: 数据采集是以既定的方式获取和测量目标变量信息, 实现制造现场资源、流程、任务等状态异构信息的采集与获取; (2) 数据分析处理层: 将数据进行检查、清理、转换、适当采取智能技术与数据分析技术进行建模, 发现有用信息, 支持自主决策; (3) 数据应用服务层: 面向原始数据及数据分析成果的访问、提取、可视化、二次加工、复用、价值共享, 为各类应用业务场景赋能; (4) 数据管理: 对数据模型、安全、标准、规范、质量、治理、元数据、集成等进行有效管理。

4.3 基于工业互联网的产业链高效协同管控与追溯

在当前“小核心, 大协作”的航空产品研制社会化协作生产模式下, 需要整合的外部供应链企业资源急剧增加, 供应链管控任务数量大幅提升, 产业链规模

图 4 (网络版彩图)工业大数据支撑平台
Figure 4 (Color online) Industrial big data support platform.

急剧扩大,使得航空多级配套模式下供应链管理难度大,协同配套管理难.另一方面,航空复杂装备制造涉及供应链上下游多方协同和成品交付,需要对其进行全生命周期跟踪,通过全面记录生产环节关键信息、物流信息,回溯飞机零部件制造流通过程,实现对零部件的质量追踪,确保技术状态可控.随着航空产品的持续迭代对产业链协同要求日益提高,生产周期大幅缩短,生产节拍要求更严,对供应链计划、采购、库存、物流、质量、成本等多要素的管控力度更细更广,从而对产业链整体精益运营能力带来新的挑战.

研究基于工业互联网的产业链高效协同管控与追溯技术,面向产业链多厂所、多专业、多地域协同研制需要,解决云平台产业链协同下的复杂信息集成与高效传递、资源配套管控与质量追溯问题,可进一步缩短上下游企业对供应链的响应时间,能够在极大程度上提升企业生产效率和产品质量.如图5所示,在供应链协同方面,针对航空供应链上下游多级配套生产协同管理需求,通过构建基于云的供应链精细化管控能力,形成数据驱动的面向航空多级配套的全周期供

应链网络化协同管理模式,实现生产制造全过程的智能化有效控制和管理.同时,航空产品协同制造是跨企业/跨地域研制过程,建立并维护全供应链产品信用体系.针对航空协同供应链产品信息溯源难度大,质量溯源难的问题,利用工业物联网技术,基于产品全流程数据进行多维度的质量管控与追溯,实现上下游企业基于云平台进行产品质量溯源;应用区块链技术,保证航空产品重要信息真实与不可篡改,提升供应链效率,避免不必要的反复检查并减少生产成本,为实现供应链物流、信息流、资金流三流合一奠定基础.

5 航空零部件协同制造应用实践

供应链作为航空制造企业的主价值链及核心竞争力,在飞机社会化协同制造的大背景下,其高质量发展面临着前所未有的机遇和挑战,特别是大量一般能力社会化配套后,庞大的外部供应链管控将面临巨大挑战.为保证任务的优质、准时、低成本完成,需更敏捷的供应链协同能力,更健壮的供应链生态体系,更

图 5 基于云的供应链高效协同管控

Figure 5 Efficient management of supply chain based on cloud platform.

精细精准的供应链管控手段，提高风险预防与控制能力，这一方面需要提升供应链高效协同与管控能力，另一方面需要提升协作配套企业生产制造能力。

针对航空零部件生产供应链复杂度高、零部件加工过程质量要求高，但供应链实际管控能力不足的问题，构建基于工业互联网的面向产业园区的供应链协同管控平台，利用工业互联网平台技术，实现基于云的供应链采购过程协同，在与产业园供应商企业信息互联共享的基础上，实现了合同、订单、物流、制造过程、质量等的全面协同，提升了供应链整体协同效率，如图6所示。

针对供应链配套企业制造能力提升的迫切需求，通过构建智能化工艺云端集成解决方案，以数字化工艺系统作为集成平台，通过接口开发实现CAM软件与数据库、后置处理软件、仿真软件、CAPP等的无缝集成，使系统间的数据交换和配置设置自动化，提高了工艺员工艺准备过程的效率和标准化；并通过对数控设备加工过程的实时监控、云边协同，实现了对零部件加工过程的实时闭环控制，保障了零部件加工过程质量，如图7所示。通过智能工艺云平台，形成包括工

艺知识、软件工具、加工监控为一体的面向复杂航空装备零件制造的核心工艺能力，使得工艺工具、方法、知识在航空产业链上下游企业间得到推广应用。

6 展望

面向航空复杂产品生产研制的工业互联网技术及其平台体系，目前仍在快速的发展之中，利用工业互联网创新研制模式，推进航空产品高效研制，仍将是未来很长一段时间内，我国航空制造企业的不懈追求。随着航空产品研制生态及产业链体系的不断发展，其制造系统的复杂性将呈现指数级增长，从而使得制造系统越来越容易受到诸多不确定性因素的影响，不确定性将是航空制造业面临的重大挑战。解决未来航空制造中存在的不确定性问题，需要高效地把人工智能、工业大数据、制造技术进行融合，高效、低成本地获取数据并利用数据，通过数据利用不断优化制造过程，驱动管理优化与变革。另一方面，当前面向航空产品制造全过程、全业务域的工业互联网体系还远未形成，通过工业互联网实现对制造系统“纵向到底、横向到

图 6 面向产业园区的工业互联网协同管控平台

Figure 6 Industrial internet management platform for industrial parks.

图 7 (网络版彩图)智能化工艺云端集成解决方案

Figure 7 (Color online) Intelligent integration solution of processing based on cloud.

边”的全过程、多维度覆盖, 保证全过程数字化链路畅通, 通过工业物联网连接各类装备、传感器、控制器, 打通航空制造底层数据交互和感控渠道, 实现航空制

造的“动态感知、实时分析、自主决策、精准执行”, 推进航空制造数字化转型, 仍将是现阶段我国航空制造企业数字化转型过程中需要解决的重点问题。

参考文献

- 1 Yao X F, Jing X, Zhang J M, et al. Toward smart manufacturing for new industrial revolution (in Chinese). *Comp Integ Manuf Syst*, 2020, 26: 2299–2320 [姚锡凡, 景轩, 张剑铭, 等. 走向新工业革命的智能制造. *计算机集成制造系统*, 2020, 26: 2299–2320]
- 2 Song G. Study on boosting the high-quality development of China's equipment manufacturing industry with industrial internet (in Chinese). *Reg*

- Econo Rev, 2020, 4: 100–108 [宋歌. 以工业互联网助推中国装备制造业高质量发展. 区域经济评论, 2020, 4: 100–108]
- 3 Du C Z, Jin W H. Development experience of industrial internet in the US and its reference to China (in Chinese). Pacific Journal, 2020, 28: 80–93 [杜传忠, 金文翰. 美国工业互联网发展经验及其对中国的借鉴. 太平洋学报, 2020, 28: 80–93]
 - 4 Fu R X. Multidimensional observation on the development of industrial internet—From the perspectives of concept cluster, strategy and policy tools (in Chinese). Frontiers, 2020, 13: 6–13 [傅荣校. 工业互联网发展的多维度观察——基于概念簇、战略、政策工具视角. 人民论坛·学术前沿, 2020, 13: 6–13]
 - 5 Industrial Internet Industry Alliance. White paper on industrial internet platform (in Chinese). 2019, <http://www.miit.gov.cn/n973401/n5993937/n5993968/c6002326/content.html> [工业互联网产业联盟. 工业互联网平台白皮书. 2019, <http://www.miit.gov.cn/n973401/n5993937/n5993968/c6002326/content.html>]
 - 6 Chai X D. Industrial internet practice of Chinese enterprises—Taking aerospace cloud network as an example (in Chinese). China Ind Inform Tech, 2018, 7: 48–57 [柴旭东. 中国企业的工业互联网实践——以航天云网为例. 中国工业和信息化, 2018, 7: 48–57]
 - 7 Lv W J, Chen J, Liu J. Intelligent manufacturing and firm-level platform building in industrial internet: A case study of Haier (in Chinese). China Soft Sci, 2019, 7: 1–13 [吕文晶, 陈劲, 刘进. 工业互联网的智能制造模式与企业平台建设——基于海尔集团的案例研究. 中国软科学, 2019, 7: 1–13]
 - 8 Sui S C, Xu A M, Li X H, et al. Fusion application of DT and AI for aviation intelligent manufacturing (in Chinese). Acta Aeron Astron Sin, 2020, 41: 7–17 [隋少春, 许艾明, 黎小华, 等. 面向航空智能制造的DT与AI融合应用. 航空学报, 2020, 41: 7–17]
 - 9 Yu X H, Liu M, Jiang X H, et al. Industrial internet architecture 2.0 (in Chinese). Comp Integ Manuf Syst, 2019, 25: 2983–2996 [余晓晖, 刘默, 蒋昕昊, 等. 工业互联网体系架构2.0. 计算机集成制造系统, 2019, 25: 2983–2996]
 - 10 Wang L S. Industrial internet supports the rapid development of aviation intelligent manufacturing (in Chinese). China Aviation News, 2018-11-15(005) [王立书. 工业互联网支撑航空智能制造快速发展. 中国航空报, 2018-11-15(005)]
 - 11 CCIDWISE Industrial Internet Platform Situation Analysis Research Group. Industrial internet platform: It will provide strong guarantee for “complementary chain”, “excellent chain” and “strong chain” (in Chinese). Security Inform, 2021, 3: 18–20 [赛迪智库工业互联网平台形势分析课题组. 工业互联网平台: 将为“补链”“优链”“强链”提供有力保障. 网络安全和信息化, 2021, 3: 18–20]
 - 12 Wang X N, Hou Z X. Research on the network-based integration of aviation product’s design, manufacturing and service technology (in Chinese). Aeron Manuf Technol, 2014, 13: 56–59 [王湘念, 侯志霞. 基于网络的航空产品设计/制造/服务一体化技术研究. 航空制造技术, 2014, 13: 56–59]
 - 13 Jiang M, Yu Z Q, Wang P. Key technologies of innovative development for aviation product with integration of design and manufacturing (in Chinese). Aeron Manuf Technol, 2019, 62: 95–101 [蒋敏, 余志强, 王攀. 航空产品设计制造一体化创新研制关键技术. 航空制造技术, 2019, 62: 95–101]
 - 14 Jean N, Martin J. Un système de soutien logistique intégré inédit pour le MRTT Phénix. *Revue Défense Natle*, 2019, 818: 50–52
 - 15 Aldridge P, Glynn A K, McMahon A P, et al. Digital thread implementation at Boeing Aerostructures Australia. In: AIAC18-18th Australian International Aerospace Congress. Melbourne, Australia, 2019
 - 16 Tang C S, Zimmerman J D, Nelson J I. Managing new product development and supply chain risks: The Boeing 787 case. *Supply Chain Forum-An Int J*, 2009, 10: 74–86
 - 17 Kinard D A. F-35 Digital Thread and Advanced Manufacturing. The F-35 Lightning II: From Concept to Cockpit. Atlanta, USA, 2018
 - 18 Ding H, Gao R X, Isaksson A J, et al. State of AI-based monitoring in smart manufacturing and introduction to focused section. IEEE/ASME Trans Mech, 2020, 25: 2143–2154
 - 19 Yuan Y, Tang X C, Zhou W, et al. Data driven discovery of cyber physical systems. Nature Commun, 2019, 10: 1–9
 - 20 Yuan Y, Zhang Y, Ding H. Research on key technology of industrial artificial intelligence and its application in predictive maintenance (in Chinese). Acta Autom Sin, 2020, 46: 2013–2030 [袁烨, 张永, 丁汉. 工业人工智能的关键技术及其在预测性维护中的应用现状. 自动化学报, 2020, 46: 2013–2030]

Industrial internet architecture for collaborative manufacturing of aviation equipment

JIANG Min^{1,2} & ZHENG Li¹

¹ Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China

Currently, the deep fusion of new-generation information technology and the manufacturing industry is driving the digital and intelligent transformation of the traditional manufacturing industry and the profound change of business model. Aviation equipment development is a complex system engineering process, with typical characteristics of cross time as well as space domain, cross-industry chains, and cross multiple manufacturing entities. The construction of an industrial internet platform for collaborative manufacturing of aviation complex equipment is a necessary means of achieving high-efficiency manufacturing of aviation complex equipment, and an important step toward driving the digital transformation of aviation manufacturing via a new mode of production. Because of the urgent requirements and opportunities of industrial internet in the digital transformation process of aviation manufacturing, this study investigated the industrial internet architecture of aviation equipment digital manufacturing and explored the key technologies and application scenarios to provide a reference for the construction and development of aviation manufacturing through an industrial internet architecture.

industrial internet, aviation equipment, digital transformation, co-manufacturing

doi: [10.1360/SST-2021-0176](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0176)