

# 面向智能制造的飞机结构件 数字化车间构建关键技术\*

宋智勇,李 杰,刘大炜

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

[摘要] 智能制造是引领制造业发展,推动下一次工业革命的重要引擎。飞机结构件加工是典型的小批量、大柔性离散型制造,在实现智能制造转型过程中存在诸多难点。介绍了智能制造的背景、特征和内涵,在此基础上分析了飞机结构件智能制造转型面临的现状,提出了面向智能制造的飞机结构件数字化车间构建关键技术,为建立飞机结构件智能制造范式奠定基础。

关键词: 智能制造;飞机结构件;离散型制造;数字化车间;信息技术

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.026



宋智勇

工学博士,先后参与 10 多项国家重大科技项目攻关,荣获中国航空工业集团有限公司“科学技术进步奖”等 6 项,授权国家发明专利 3 项、国际发明专利 1 项;主创的《综合检测数控铣床精度的“S”形测试件及其检测方法》获得国家发明专利与美国发明专利授权,基于“S”形测试件的数控铣床五轴联动精度测试标准提案在第 74 届 ISO/TC39/SC2 技术委员会会议上通过。

制造业是实体经济的支柱,是提升国家竞争力和实现绿色化、可持续发展的源头,是建设现代化强国的产业基石<sup>[1]</sup>。以飞机结构件加工为典型代表的航空制造领域,既具有品种多、批量小、科研批产混线等离散制造特征,又具有多学科、边缘性、尖端性等特点,处于制造领域的顶端<sup>[2]</sup>。飞机结构件的加工过程以数控加工为主,新一代飞行器隐身性和机动需求不断提升,飞机结构件也日趋大型化、复杂化和整体化,带来的数控加工难题成为影响重点机型快速研制的重要因素<sup>[3-4]</sup>。与此同时,随着信息技术和制造技术不断发展,以信息化方式驱动的制造业产品、装备、工艺、管理、服务的智能化,即智能制造已经成为现代制造业的重要发展方向<sup>[5]</sup>。智能制造将所有分散的制造资源、功能和信息集成到相互关联的统一和协调关系中,使所有资源、数据、知识达到充分共享,实现集中、高效、便利的管理<sup>[6]</sup>,为飞机结构件制造摆脱离散制造模式困境、突破数控加工

难题提供了重要途经。

近年来,各国为提高产品质量、降低各类成本、减少研制周期,制订了多项先进制造的发展战略与规划,尤其是美国、德国制订了先进制造的相关国家战略<sup>[7]</sup>。美国国家科学技术委员会发布《国家先进制造战略规划》用于指导联邦政府支持先进制造研究开发的各项计划和行动<sup>[8]</sup>。该战略规划指明了先进制造在于运用和调度信息、自动装置、计算、软件、传感、网络,以及运用基于物理、化学和生物学等多学科实现新的产品制造方法和技术。德国政府在 2013 年 4 月推出《德国工业 4.0 战略规划实施建议》,该计划对全球工艺未来的发展趋势进行了探索性研究和清晰描述,为德国预测未来 10~20 年的工业生产方式提供了依据<sup>[9]</sup>。工业 4.0 的核心在于制造环境下物理系统和信息系统的深度融合,主要支撑技术在于智能装备技术、物联网技术以及工业应用软件系统。

我国飞机结构件加工在数字化、

\* 基金项目:国家重大专项(2017ZX04002001)。

信息化方面已经取得了长足发展,但依然面临着数字化、自动化水平低,缺乏高效产业流程管理,制造过程无法形成闭环管控等现实问题<sup>[2]</sup>。目前,涉及智能制造的报道颇多,但相对比较成功的案例(如西门子安贝格智能工厂、通用电气的智能制造应用)都诞生于国外数字化程度极高的先进制造企业,国内制造领域特别是飞机结构件制造企业距离智能制造还有相当远的距离。

为此,本文立足于国内飞机结构件制造的现状,系统性介绍了智能制造的背景、特征和内涵,分析了飞机结构件智能制造转型存在的难点,并针对现状提出了面向智能制造的飞机结构件数字化车间构建关键技术,为建立飞机结构件智能制造范式奠定基础。

### 智能制造的特征与内涵

目前国内制造业发展已进入过渡时期,既面临环境保护、成本增长等内在因素限制,又面临发达国家先进技术制约、发展中国家低成本制造市场竞争的双重夹击。结合我国基本国情实现制造业转型,提升制造业技术水平、降低制造成本、提升制造业竞争力是创造制造业增长,实现由制造大国向制造强国转变的关键。2015年5月8日,国务院公布了强化高端制造业的国家战略规划“中国制造2025”,坚持结合国情走中国特色新型工业化道路,以信息化与工业化融合为主线,以提质增效为中心,以制造业由大变强的成功转型为最终目的。

无论是美国《国家先进制造战略规划》、《德国工业4.0 战略计划实施建议》,还是“中国制造2025”,其核心在于改变现有制造模式建立新的绿色、高效、优质、低成本的制造生态环境,而智能制造则是这些战略计划中的最关键技术。智能制造是信息技术与工业技术的深度融合,以智能工

厂为实现载体,以全面的、深度的互联为基础,以端到端的信息数据流动为核心<sup>[10]</sup>,具有动态感知、实时分析、自主决策、精准执行的优点。智能制造是以数字化制造为基础,在制造领域进一步扩展通讯定位、先进传感、网络云计算、虚拟现实、人工智能等科技技术应用范畴,并同时结合3D打印、机器人等先进制造装备,构建以知识流为制造信息传递方式,以自主优化、迭代学习为特征的闭环制造范式<sup>[11-12]</sup>,如图1所示。

### 飞机结构件智能制造转型的现状

飞机结构件加工具有品种多、批量小、科研批产混线等离散制造特征,又具有多学科交叉、工程边缘性问题多、尖端性技术突出等特点,为其智能制造转型带来了几个难点,具体体现在以下4个方面。

(1)飞机结构件加工涉及制造大纲编制、毛坯订货、工艺程序编制、下料、粗加工、精加工、去凸台、钳工打磨、表面处理等多个环节,这些制造环节通常分布于不同部门,在不同时段由不同人员和设备进行处理,各环节信息系统相对孤立。一件产品的形成往往会经历多个时间和空间的变换,无论是在每一个特定时空连续的制造过程,还是不同时空之间承

接性突变的制造过程,都将产生大量与产品相关的制造信息。这些信息发生所涉及的时空开放性强导致采集度低,信息涉及范围广造成集成性差,从而导致飞机结构件智能制造转型缺乏信息基础。

(2)飞机结构件几何特征复杂,通常一项零件具有多种槽腔特征,同一槽腔具有多种加工轨迹设计方法,每一种加工轨迹下具有多种加工参数设置方法。因为缺乏统一工艺编程标准,不同工艺编程人员针对同一项零件或一类相似零件,往往具有不同的加工工艺规划和程序编制方法。即使同一个工艺员,在不同时间针对相似工件也会编制出不同的加工工艺,所加工形成的产品质量波动性较大。产品质量数据的一致性和可重复性较差,使得加工质量数据样本容量过大,聚集特征不足,为建立零件质量数据库,实现数据深度分析和优化带来了极大的挑战。

(3)飞机结构件材料以高强度、刚度的航空铝合金、钛合金和复合材料为主,普遍采用五轴联动铣削加工完成。一方面,加工过程材料去除率大,刀具与材料切削运动伴随强烈的交变载荷和温度变化;另一方面,五轴数控机床精密复杂易受到加工力和温度变化影响而产生加工误差,进而影响飞机结构件的加工精度。此

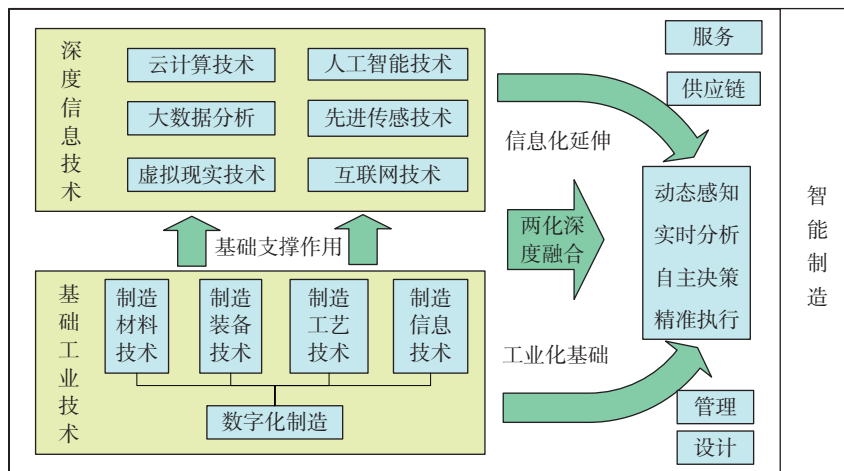


图1 智能制造的构成及内涵

Fig.1 Constitution and connotation of intelligent manufacturing

外,五轴数控机床的进给单元、刀库、冷却系统、液压系统、电控系统、数控单元等多个复杂系统都处于频繁动态工作中,任何系统或单元故障都将影响产品质量。数控机床精度退化和系统故障都将影响优质、高效加工,成为飞机结构件智能化生产的一道屏障。

(4)飞机结构件制造过程中,科研生产混线,多品种、小批量个性化定制特征明显,对制造系统柔性要求高。在设计制造初期,飞机结构件种类多,单件需求量小,通常还会依据设计需求进行某项零件的个性化定制加工。在制造稳定期,结构件加工产量需求明显提升,并要求能及时响应设计更改实现快速制造。而任何一个飞机结构件制造企业必然存在研究产品和批产零件交替和并存的情况,在当前单机制造模式或简单小柔性制造环境下,还难以实现飞机结构件个性化定制加工与大柔性快速批产结合的智能制造生产模式。

### 数字化车间构建关键技术

智能制造既是制造业转型参考

的范式,也是实现优质高效生产的重要手段,但归根到底智能制造必须服务于制造业提质增效的目标。就当前飞机结构件制造具有工业、信息技术基础而言,实现智能制造还需从飞机结构件的智能化设计、短板智能装备的研发、关键工业智能软件的开发、智能加工工艺研究、智能传感检测、大数据分析技术、云计算等多个方面努力。必须认识到这是一个漫长的过程,距离智能制造依然还有相当大的距离,规划未来制造蓝图的同时更需要立足当下国情、企业行情,持续推进基础工业和信息技术的发展。

数字化车间作为智能制造实现的基础载体,是迈向智能制造不可跨越的基石,也是结合当下飞机结构件制造基础走向智能制造的第一大步。为此,本文基于飞机结构件制造转型的难点分析,提出飞机结构件数字化车间构建的关键点为:

(1)自上而下,建立飞机结构件制造信息协同系统;自下而上建立制造过程信息采集系统,共同形成飞机结构件智能制造的信息网络基础。

如图2所示,在上层构建企业MES云系统,企业制造云平台一方面与供应商企业连接实现供应商协同管理;另一方面与设计数据进行集成,通过协同设计制造平台实现从设计到零件制造的全流程数字化。在底层构建制造资源保障系统、零件自动加工系统及车间智能物流系统,与车间智能管控系统集成,对生产现场进行实时信息采集和管控,解决飞机结构件制造过程信息采集度低的难题。在中部建立MES信息纽带,车间MES向下与智能管控系统集成,下发生产计划,向上与企业制造云平台集成,接收公司级生产计划并反馈车间生产任务完成情况,以车间MES为纽带实现企业顶层与制造底层纵向信息流通;通过不同车间级MES系统在企业MES云系统中实现信息共享,打通飞机结构件制造横向信息交互,解决飞机制造过程信息集成度低的难题,从而建立结构件智能制造的信息网络基础。

(2)全面采用零点定位快速装夹、零件在线测量、基于特征的智能编程技术、工艺知识库及加工仿真等

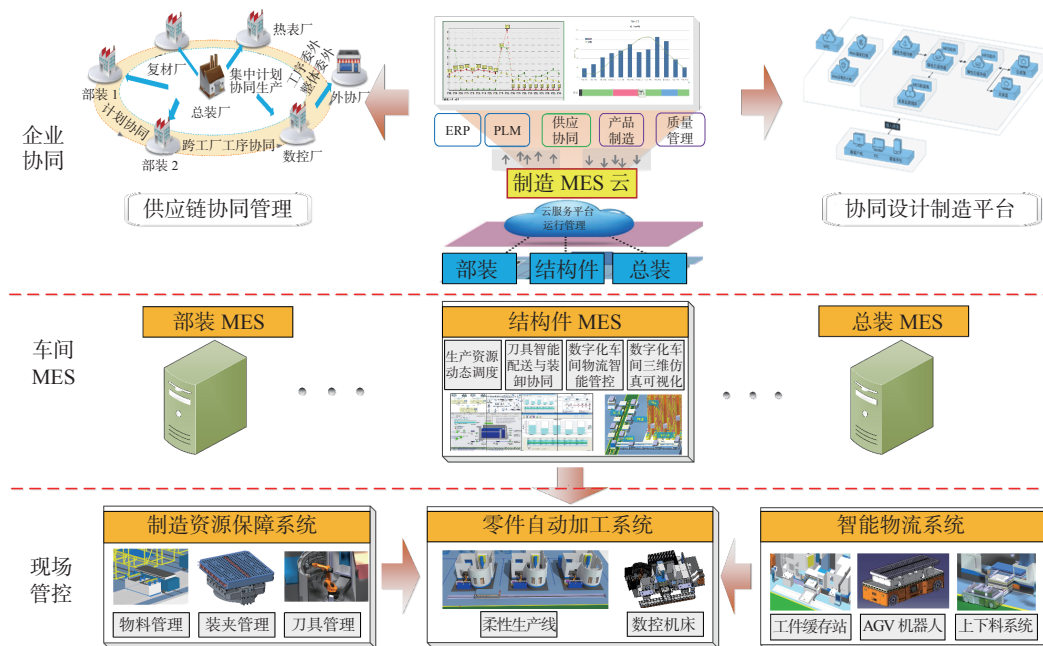


图2 结构件智能制造的信息网络

Fig.2 Information network for intelligent manufacturing of structural parts

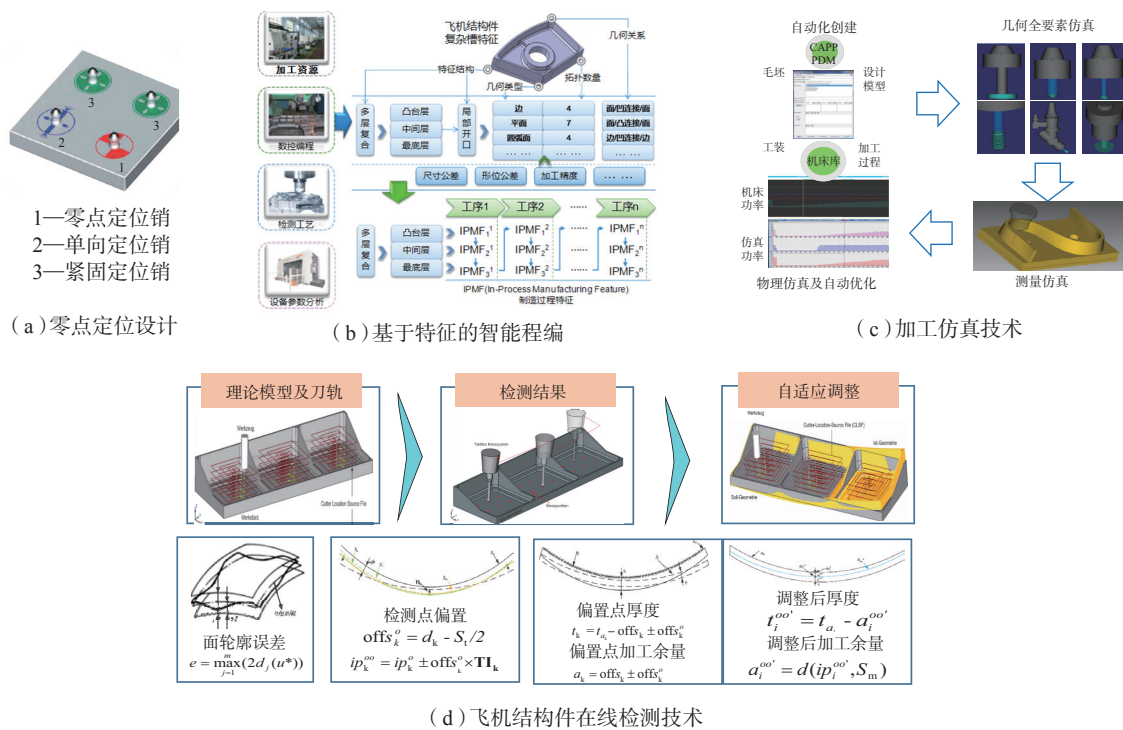


图3 数字化车间工艺支撑技术

Fig.3 Support technologies of process for digital workshop

工艺技术,建立具有高度工艺一致性的数字工艺体系。

如图3所示,采用零点定位系统可实现零件与通用工装所构成的整体在运输及加工时快速装夹,同时确保工装在同种机床装夹时安装位置的高度一致性。采用零件在线检测技术,一方面可实现零件加工初始位置找正,确保相同工件加工初始位置一致性;另一方面在加工过程中可进行间歇性测量和加工参数调整,确保零件最终加工质量具有高度稳定性。采用基于特征的智能编程技术可以有效减小小工艺编程过程人机交互频次,统一同类零件特征的工艺处理规范,提升飞机结构件工艺规划的一致性。应用加工仿真技术对飞机结构件切削参数进行优化整合,通过工艺知识库对切削参数进行统一管理,建立飞机结构件切削参数选择标准方法。通过上述多种技术的应用,在飞机结构件制造流程中的物理接口和信息接口处建立统一的规范和标准,形成具有高度一致性的工艺体系,使

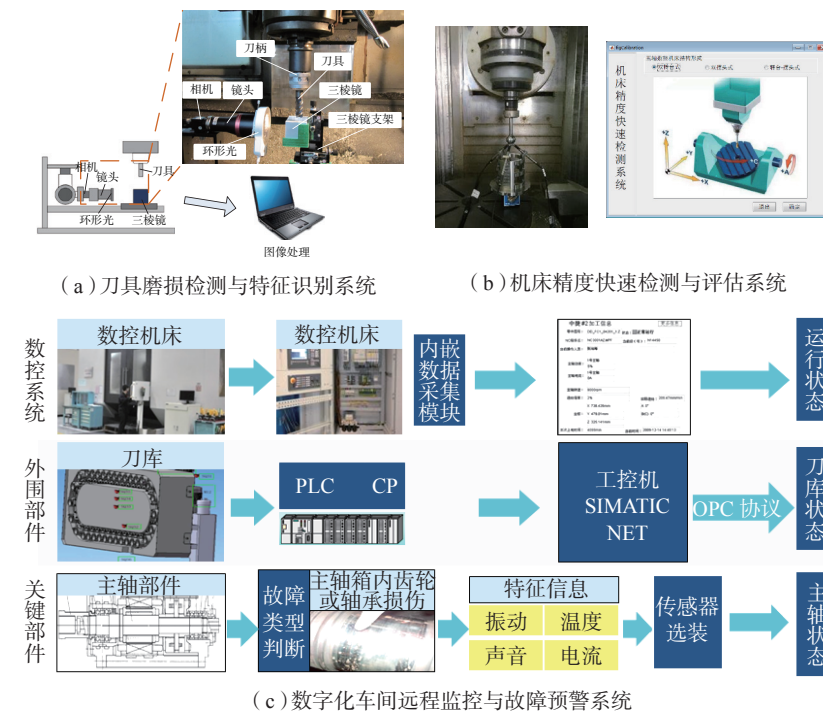


图4 数字化车间设备保障技术

Fig.4 Guarantee technologies of equipment for digital workshop

得飞机结构件制造过程工艺信息一致性和重复性大大提升,为飞机结构件智能制造奠定数字化工艺基础。

(3)全面整合刀具监测与寿命管理技术、数控装备远程故障预警技术、机床精度快速评测技术,建立数

数字化车间可靠性保障技术体系。

如图4所示,应用刀具特征检测与识别技术,结合刀具磨损机理,建立刀具寿命预测曲线,开发刀具在线监测与寿命管理系统,有助于及时获取加工系统中刀具的寿命状态,一方面可以避免刀具破损、断裂等突发问题引起的加工质量事故,另一方面通过刀具状态监控与寿命预测研究能够提升刀具的利用率、降低制造成本。开发数控机床精度快速评测技术,实现飞机结构件加工精度的事前预测,能有效避免高价值零件加工质量问题,也为机床预防性维护保养提供了指导依据。建立数控装备远程监控系统与故障预警系统,及时获取车间加工装备的状态信息,通过故障预测模型和设备维护专家知识库,实现车间设备故障提前发现、及时排除,能有效避免重大设备故障,提升设备综合利用率。从刀具监测与寿命管理、精度评测和故障预警等多方面努力,建立数字化车间可靠性保障体系,全面提升飞机结构件制造系统的可靠性,为数字化车间的健康运行提供重要支撑。

(4)全面应用柔性生产线、自动化立体库、车间AGV小车、工业机器人以及自动化上下料系统,建立可变节奏数字化加工车间以及物流系统(图5)。

建立具有多条柔性生产线构成的加工车间。同一条柔性生产线内的加工具有可替换性,以满足批量生产要求。不同柔性生产线之间的加工设备具有互补性,以满足个性化定制加工的需求。每条柔性生产线具有独立的运输及缓存功能,能够满足短时间无人工干预加工的需求。每条柔性生产线分别具有至少一个物料和刀具进出接口,并通过物料AGV和刀具AGV与车间立体仓库建立物流通道。车间立体库依据生产计划自动存货和出货,货物(工装、毛坯、刀具)由AGV小车运送到生产线物流接口,再通过自动上下料结构、工业机器人分别实现柔性生产线物料和刀具的补充和更换。车间物流系统采用RFID射频识别技术,可以甄别货物的具体规格参数,并通过物流仿真系统实时显示和生产现场一致的物流状态,用以实现生产全流程物

料状态监控。由柔性生产线、自动化立体仓库、自动上下料系统、AGV小车及机器人所构成的数字化车间具有灵活的调整能力,能够很好地适应飞机结构件科研生产混线,以及大批量生产与多品种、小批量个性定制的多重要求,为飞机结构件数字化车间提供了必要的基础支撑。

### 结论

智能制造将是引领制造业发展,推动下一次工业革命的重要引擎,世界各制造大国都在积极探索适合自己的智能制造道路。国内关于智能制造的分析、论证、探索和研究也正在如火如荼地展开。飞机结构件加工作为国内制造业的重要组成部分,具有转型升级、提质增效的强烈需求,是智能制造技术发展的重点领域。但也必须认识到智能制造的实现是以强大的工业技术和信息技术为基础的,就目前我国飞机结构件制造行业的技术水平而言,距离智能制造依然还有相当的距离。

本文首先对智能制造的特征与内涵进行了介绍,然后分析了飞机结构件智能制造转型存在的主要难点。立足于当下国情提出了建立面向智能制造的飞机结构件数字化车间是实现智能转型的基础,并针对难点系统地分析了构建飞机结构件数字化车间的4项关键点,即构建飞机结构件智能制造的信息网络、建立具有高度工艺一致性的数字工艺体系、建立数字化车间可靠性保障技术体系、建立可变节奏数字化加工车间及物流系统。本文进行的相关分析和提出的方法可为飞机结构件数字化车间建设提供指导,为飞机结构件智能制造奠定基础。

### 参考文献

[1] 路甬祥. 中国智造与中国创造[J]. 全球化, 2016(9): 5-13.

LU Yongxiang. Intelligent manufacturing and creativity in China[J]. Globalization,



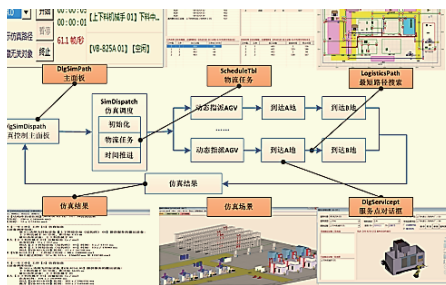
(a) 柔性生产线



(b) 刀具及换刀机器人



(c) 立体库及AGV运输小车



(d) 数字化车间物流仿真系统

图5 数字化车间柔性生产线及自动化物流系统

Fig.5 Flexible manufacturing system and automated logistics system of digital workshop

2016(9): 5-13.

[2] 杜宝瑞, 王勃, 赵璐, 等. 航空智能工厂的基本特征与框架体系 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(8): 26-31.

DU Baorui, WANG Bo, ZHAO Lu, et al. Basic characteristics and framework of the intelligent factory in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 26-31.

[3] 汤立民, 牟文平, 宋戈. 飞机结构件数控加工智慧工厂之路 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(5): 26-29.

TANG Limin, MOU Wenping, SONG Ge. Trajectory of intelligent factory in CNC machining of aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 26-29.

[4] 帅朝林. 飞机结构件数字化设计与制造技术 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(1/2): 48-52.

SHUAI Chaolin. The digital design and manufacturing technology for aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(1/2): 48-52.

[5] 单继东, 王昭阳, 陈贺利, 等. 航空发动机智能制造生产线构建技术研究 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 52-56.

SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, CHEN Heli, et al. Building technology of intelligent

manufacturing production line for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 52-56.

[6] 宋利康, 郑堂介, 黄少华, 等. 飞机装配智能制造体系构建及关键技术 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(13): 38-45.

SONG Likang, ZHENG Tangjie, HUANG Shaohua, et al. Aircraft intelligent assembly manufacture system construction and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(13): 38-45.

[7] 宁振波. 智能制造从一美、德制造业战略说起 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(3): 18-23.

NING Zhenbo. Analysis of intelligent manufacturing based on American and German manufacturing industry strategy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(3): 18-23.

[8] 左世全, 王影, 金伟, 等. 美国也要振兴制造业—美国先进制造业国家战略计划编译 [J]. 装备制造, 2012(5): 76-81.

ZUO Shiquan, WANG Ying, JIN Wei, et al. The United States will also revitalize manufacturing—national strategic plan for advanced manufacturing in the United States[J]. China Equipment, 2012(5): 76-81.

[9] 丁纯, 李君扬. 德国“工业 4.0”: 内容、动因与前景及其启示 [J]. 德国研究, 2014, 29(4): 49-66.

DING Chun, LI Junyang. The content, motivation, perspective and enlightenment of Germany industry 4.0[J]. Deutschland-Studien, 2014, 29(4): 49-66.

[10] 杨海成. 全面认识互联网+, 大力推进智能制造 [J]. 机器人技术与应用, 2015(4): 12-14.

YANG Haicheng. Comprehensive understanding of internet +, vigorously promoting intelligent manufacturing[J]. Robot Technology and Application, 2015(4): 12-14.

[11] 谭建荣, 刘振宇. 智能制造—关键技术与企业应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

TAN Jianrong, LIU Zhenyu. Intelligent manufacturing—key technology and enterprise application[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.

[12] 王友发, 周献中. 国内外智能制造研究热点与发展趋势 [J]. 中国科技论坛, 2016(4): 154-159.

WANG Youfa, ZHOU Xianzhong. A review of research on domestic and international intelligent manufacturing[J]. Forum on Science and Technology in China, 2016(4): 154-159.

通讯作者: 李杰, 工学博士, 成都飞机工业(集团)有限责任公司博士后, 主要从事精密工程及智能制造相关技术研究, E-mail: 15810158892@163.com.

## Key Technologies for Constructing Intelligent Manufacturing Oriented Digital Workshop of Aircraft Structural Parts

SONG Zhiyong, LI Jie, LIU Dawei

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** Intelligent manufacturing not only leads the development of manufacturing fields but also is an engine that propels the next industry revolution. The machining of aircraft structural component belongs to typical small batch and large flexible discrete manufacturing. In order to realize the intelligent manufacturing oriented aircraft structural component machining, many complicated problems still need to be solved. In this paper, the background, features and connotation of intelligent manufacturing are briefly introduced. Then, the difficulties that will be faced in the realization process of intelligent manufacturing oriented aircraft structural component machining are analyzed. The construction method of intelligent manufacturing oriented digital plant for aircraft structural component is proposed correspondingly, which can lay a foundation for building the future intelligent manufacturing paradigm of aircraft structural component.

**Keywords:** Intelligent manufacturing; Aircraft structural component; Discrete manufacturing; Digital workshop; Information Technology

(责编 李丹)