

多品种变批量产品智能制造系统框架*

于成龙,侯俊杰,赵颖,徐皓,张伟

(中国航天系统科学与工程研究院,北京 100048)

[摘要] 为推动多品种变批量产品智能制造技术的发展,促进智能制造技术在生产中的应用,提出了产品智能制造系统框架,梳理了智能制造的内涵、重点发展内容及关键技术,对于发展智能制造技术和落实智能制造的实际应用具有较好的借鉴意义。

关键词:多品种;变批量;智能制造;柔性生产;系统框架

Intelligent Manufacturing System Architecture of Multi-Variety and Variable-Batch Products

YU Chenglong, HOU Junjie, ZHAO Ying, XU Hao, ZHANG Wei

(China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China)

[ABSTRACT] To promote the technology development and application in production of intelligent manufacturing, a system architecture is proposed. The Connotation, key development contents and technologies of intelligent manufacturing are sorted out. It is a good borrowing for the technology development and the practical application of intelligent manufacturing.

Keywords: Multi-variety; Variable-batch; Intelligent manufacturing; Flexible production; System architecture

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.098

近年来,制造强国将智能制造作为科技创新突破口,如美国先进制造业国家战略计划、德国工业 4.0 等,力图通过发展智能制造继续保持核心竞争优势。围绕智能制造国家战略需求,国外军工制造领域正开展相关研究及应用工作,如美国国防预先研究计划局在自适应车辆制造项目中采用基于模型的设计、系统工程、“分级抽象”的系统设计方法,开创了一种快速可重构的适应性研制模式;通用公司打通设计、工艺、制造、供应链、分销渠道、售后服务的数据链,形成一个内聚、连贯的智能系统;雷锡恩公司建立了防空导弹数字化和智能化总装生产线,并在生产中进行了应用;三菱重工建设的波音 777 机身智能制造生产线,机身钢板打孔及铆接工序由智能工艺装备完成,并实现数据自动收集和故障诊断等。

我国制造业经过几十年的快速发展,建立了门类齐全、独立完整的制造体系,并通过不断的技术创新,一批重大技术装备取得突破,形成了若干具有国际竞争力的优势产业和骨干企业。但我国制造业大而不强,整体水平与发达国家还有较大差距。为促进制造业转型升级,

实现由制造大国向制造强国的转变,我国发布了“中国制造 2025”,并将智能制造作为主攻方向。其中,具备多品种变批量特点的军工产品制造是我国制造业重要组成部分,该类产品具有多型号同时要求交货、生产过程易反复、多型号频繁更换、生产过程不连续、工艺周期长等特点。生产过程强调产品品种的不确定性、产品数量的不确定性等,需要面向生产任务和生产资源,以快速重排和重复利用的方式快速调整生产计划,实现产品的柔性生产^[1-2]。产品研制过程中存在跨地域、跨行业协同研制能力较弱,数字化程度不够^[3],先进工艺设计仿真手段不足^[4],关键制造环节管控及制造装备智能化和柔性化程度较低等,已经成为制约其发展的重要问题,需要通过发展智能制造改变产品的研制模式,提升产品的制造能力和制造水平。整体来看,我国智能制造仍处于初期发展阶段,研究智能制造的体系架构对于建设和应用智能制造系统具有引领和奠基作用。目前,国内针对智能制造体系架构已经做了较多的研究:在智能制造技术层面,研究了智能制造的关键技术^[5]、实施智能制造的前提条件^[6]以及智能制造系统架构和标准化框架^[7-9]等;在智能生产线层面,重点集中在飞机^[10-12]和航空发动机^[13]装配的体系架构、组成部分和实施方

* 基金项目:国防基础科研项目(JCKY2017203C105)。

法等;在智能工厂层面,研究了智能工厂的基本特征与框架体系^[14]以及离散型智能工厂通用技术架构^[15]。另外,在柔性化系统设计及建设方面,一些学者重点研究了面向多品种变批量的可重构制造系统的设计^[16]、可重构单元的生成方法^[17]、生产过程柔性调度优化^[18]等。上述研究从不同的角度和层面对智能制造体系进行了诠释。本文借鉴前人研究成果,从全生命周期角度对多品种变批量产品智能制造系统架构进行进一步的研究。

1 多品种变批量产品智能制造内涵及特征

1.1 内涵

多品种变批量产品智能制造是指围绕具备多品种变批量、高质量、高效率、高可靠性特征的军工产品研制需求,综合利用现代传感技术、网络技术、自动化技术,以及物联网、大数据、云计算等新兴技术,以构建高度柔性、具备智能分析决策和自适应控制特征的制造系统为核心,贯穿产品生命周期,通过智能研发、智能生产、智能服务的有机融合与集成,全面提升产品的个性化研制、快速敏捷供应、精益制造与高质量生产的能力,实现产品研制过程的数字化、网络化和智能化,提升多品种变批量产品核心研制能力。

1.2 特征

(1) 个性化定制。智能制造强调柔性、可控、自适应的生产能力,为产品多品种变批量的个性化研制需求提供保障。

(2) 适应性生产。智能制造系统是可满足多品种混线生产的柔性化生产系统,系统具备智能感知、实时分析、优化决策、精准管控与执行等自适应调控能力。

(3) 预测性维保。能够为用户提供产品在线支持、实时维护、智能监测、诊断,实现维护保障的主动化,在

产品出故障之前能够预测,做到预测性维保。

(4) 装备安全可控。具有较高的智能制造装备应用深度和系统集成能力,确保软硬件装备的安全可控。

2 多品种变批量产品智能制造系统框架

2.1 系统框架

系统框架如图1所示,面向需求论证、产品设计、仿真验证、加工、装配和保障服务全生命周期,建成具有动态感知、实时分析、自主决策、精准执行特点的智能制造系统,实现基于数字模型和知识的产品协同研发、具备在线感知/自决策/自执行能力的柔性化智能生产、远程智能保障服务,形成数字化、网络化、智能化为特征的多品种变批量产品智能制造能力体系,支撑高效率、高质量和高可靠性的研制生产。该智能制造系统主要包括模型驱动的协同研发、基于信息物理融合的智能生产、智能维护保障、智能制造基础4个部分。

2.2 主要内容

2.2.1 模型驱动的协同研发

模型驱动的协同研发围绕研制过程知识转化与重用度不够、复杂系统功能及逻辑综合设计仿真验证应用不足、全生命周期信息尚未完全贯通等问题进行研究,如图1所示。

(1) 基于模型的设计制造集成。针对产品多品种变批量的特点,基于已有的知识及数学模型,实现针对客户或市场需求的快速分析和评估,生成初步的概念模型、设计方案和实施路径,并多次调整和修改,形成最终的设计方案和实施路径;在网络化并行与协同设计验证的环境条件下,建立协同设计生产一体化的产品智能研制应用模式,打通全三维数字化的产品设计、工艺设计、检测和试验生产链路,实现总体部、专业所、工厂等部门

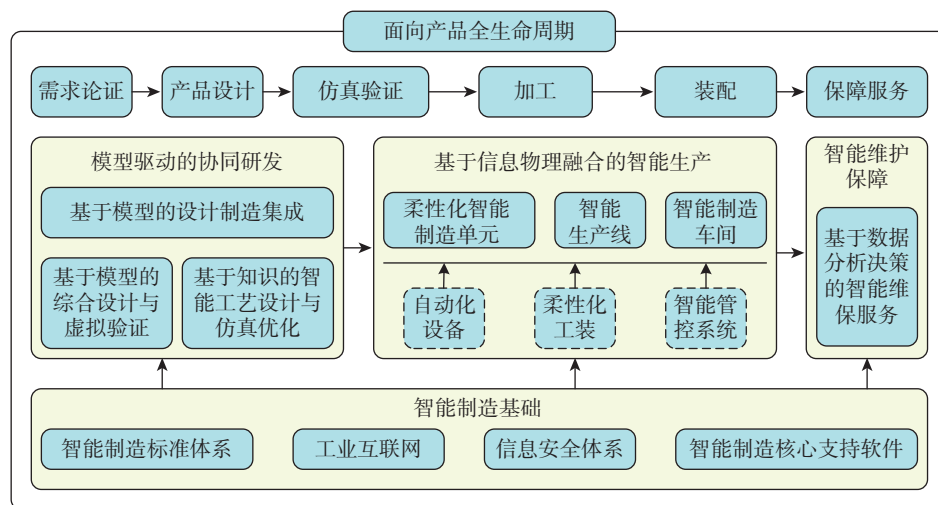


图1 智能制造系统框架

Fig.1 Intelligent manufacturing system architecture

的并行协同研制,以及设计、制造、试验验证各环节的管控及数据分析决策。

(2)基于模型的综合设计与虚拟验证。在产品“总体设计-分系统并行设计-面向生产的协同设计”流程基础上,分步开展需求和模型驱动的总体设计,基于部件和子系统的功能设计,详细设计验证和优化,分系统集成和验证,以及基于试验验证等产品研制流程,并以虚拟样机逐渐取代实物样机作为数据载体贯穿设计和仿真工作始终,实现基于MBSE的系统总体设计、多物理域功能/性能协同仿真验证、基于模型的虚拟样机构建与集成管理等。

(3)基于知识的智能工艺设计。该部分链接产品设计和生产,主要开展基于知识的工艺模型快速构建、制造过程仿真验证及优化等研究,构建多技术融合的工艺智能设计系统平台,实现工艺规程的快速设计和投产之前零部件可制造性验证等。

2.2.2 基于信息物理融合的智能生产

智能生产系统是产品制造的载体,通过采集生产过程的质量、设备、排产、生产进度等与生产相关的数据,并进行分析,对生产情况进行准确评估,及时发现生产过程存在的问题或潜在的生产问题,在此基础上进行决策,并及时发送生产调整指令,调配整个生产资源,优化生产并提前解决潜在的问题,实现高效率、高质量和低成本生产。智能生产系统结构如图2所示,基础层包括自动化设备、柔性化工装和智能管控系统等基本要素;自动化设备和柔性化工装能够针对不同产品,在硬件上实现柔性调整和自动化生产;智能管控系统能够实现生

产过程数据的分析及决策,并能够结合生产任务的变化形成调整方案,实现多任务生产的柔性调整。集成层包括智能制造单元、智能制造生产线和智能制造车间3个层面。业务层说明了智能生产、智能物流、生产智能管控、智能物流、多任务柔性调整的逻辑关系,体现“状态感知、实时分析及决策、精准执行”的智能特点。应用层说明了生产中应用的功能。其中智能制造单元、生产线和车间具体情况如下:

(1)智能制造单元基于自动化装备和柔性化工装等,通过传感器收集外部环境和内部状态信息,对生产目标及外界环境的变化、设备自身状态改变等因素实时监控,并通过识别、分析、判断及推理进行自适应的补偿调节,有效控制设备的几何误差、热(变形)误差、力(变形)误差、装配误差等,自动调节、适应动态、非线性、时变、非确定性的生产环境,具备感知、分析、推理、决策、控制等能力,以及数字化、智能化和柔性化的特质。

(2)智能制造生产线和智能制造车间以装备和工位的智能化为基础,将各生产环节串联起来,实现各台设备和各个工位之间信息的实时传递和数据共享,并为控制层所用,而控制层命令也及时准确传递到各工位或设备,使生产线或车间能够及时调整自己的生产状态,实现产品的混线生产以及柔性生产,满足具有多品种小批量特点的产品生产的快速转换,具体内容主要包括:智能数据采集与智能控制、现场管理系统、智能制造装备/单元、智能物流仓储、制造资源管理等。

2.2.3 智能维护保障

智能维护保障是产品产业链的末端环节,主要针对

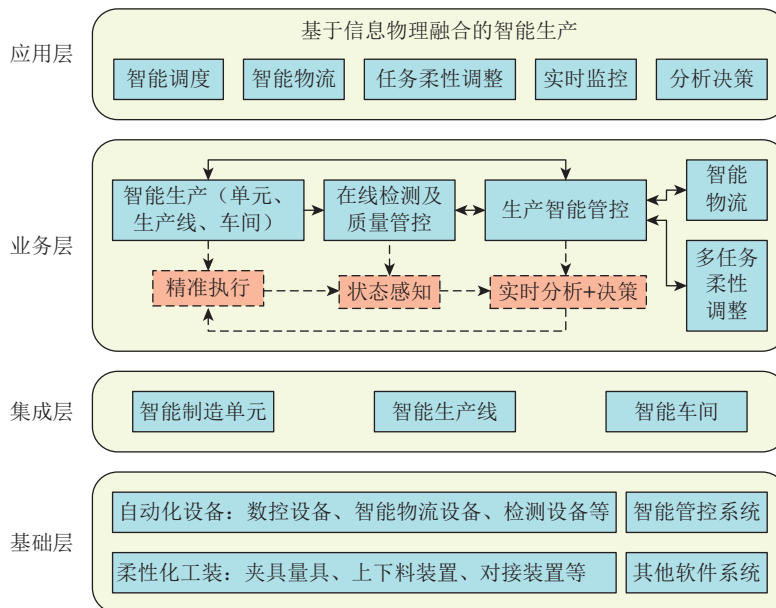


图2 智能生产系统架构

Fig.2 Intelligent producing system architecture

已经交付的产品运行情况和性能进行实时监控,对异常情况进行快速诊断和及时处理;对客户的维护或维修需求进行及时响应和快速解决问题,实现售后需求的个性化、服务的标准化、管控的智能化;并且针对故障进行统一管理,形成故障诊断库,能够根据监控数据或故障描述数据进行智能决策,生成故障解决方案,并能够根据故障频率和特点给出预测性服务计划;具体内容主要包括运行维护数据智能采集、存储和挖掘、基于大数据的故障诊断与预测、远程监测与保障服务。

2.2.4 智能制造基础

主要包括智能制造标准体系、工业互联网、信息安全体系、智能制造核心支撑软件,重点解决智能制造软硬件集成标准缺失、工业安全发展滞后、工业软件自主可控明显不足等问题,其中智能制造标准体系主要包括智能制造总体架构、信息数据融合体系、制造布局及管控、数据格式、信息资源及应用接口规范等,为实施智能制造提供依据;工业互联网和信息安全体系主要建设整个制造系统互联互通及集成和具备安全保障的工业互联网体系,为智能制造提供安全可靠和保障运行的基础;智能制造核心支撑软件结合智能制造的需求,开发智能控制系统、核心制造支撑数据库/资源库/知识库、智能制造执行系统、数据挖掘与智能分析系统等系统研发,为智能制造体系建设提供软件支撑。

2.3 关键技术

2.3.1 面向智能制造的产品设计

当前产品设计面向传统的制造模式,设计的产品基本不具备后续智能制造所需的特征,难以全面实现智能加工和智能装配。因此,从产品全生命周期的角度,针对产品多品种变批量的特点,以产品设计为牵引,充分考虑后续产品的柔性生产、柔性装配和检验过程配套的工艺、设备、工艺装备(工装、夹具等)、生产管理,研究该类智能制造所需的特征、要素及基础条件,解决多品种变批量产品智能制造相关的设计体系和与设计体系配套的制造体系。

2.3.2 信息物理融合模型

信息物理融合模型是智能制造的核心,主要是指通过连接数字模型(虚拟样机)与对应的物理模型(实际物理产品或系统),实现精准映射和互联互通,能够以数字模型控制物理模型,而数字模型也随物理模型状态的改变而同步变化。从产品全生命周期的角度,信息物理融合模型可分为设计、制造和维护保障3个模型,其中设计信息物理融合模型是指建立设计模型与实物样机的精准映射,并以虚拟样机作为核心数据载体,在不同成熟度的基础上并行开展设计、仿真、试验等活动;制造信息物理融合模型是指建立生产过程数字模型和物理模

型精准映射,实现生产活动的互联互通,并由数字模型控制生产过程;维护保障信息物理融合模型是指在产品交付之后,建立产品运行过程的数字模型,准确表征产品的运行状态和性能,并能够由虚拟模型调控产品的运行状态和产品性能等。

2.3.3 工业互联

在智能制造系统中,数据是进行分析、判断、决策以及系统优化的关键,而工业互联是进行数据采集和数据共享的基础。在智能制造的各个环节,通过工业互联实现人员、原材料、装备、零部件和整机的互联互通和数据共享;并基于工业互联对设备和产品的加工状态、进展情况进行实时监控,实现生产过程透明化、生产过程可控化以及精确统计产能等。

2.3.4 基于工业大数据分析决策

智能制造系统中的数据来自于产品的设计、制造、维护保障的整个生命周期中,来源复杂,类型多样,规模庞大,不仅有如二维关系表的结构化数据,还包含大量半结构化和非结构化数据,如CAD、CAE的设计图纸、相关网页、车间视频等,已经具备了大数据特征,而采用传统建立精确模型和精妙算法求解的方式已经很难对这些数据进行处理和分析,需要并建立与大数据相适应的数据存储、分析和决策方法;在此基础上,围绕多品种变批量产品的全生命周期管理、生产过程基于扰动事件及多型号快速转换的实时柔性调度、产品质量管控等方向,提炼并分析共性问题,形成该类大数据分析的技术核心,为多任务多型号的产品优化设计和柔性化快速转换生产提供服务,实现基于大数据挖掘的产品研制过程优化决策,以缩短研制周期,提升质量,降低成本。

3 结论

智能制造作为一种新的制造模式,已经成为我国未来发展重点。本文从全生命周期的角度,提出了多品种变批量产品智能制造系统架构,梳理了其智能制造重点发展内容及关键技术,这对于发展智能制造技术和落实智能制造的实际应用具有较好的借鉴意义,为后续进一步研究提供了参考。

参考文献

- [1] 陶小静. 多品种变批量拉链生产计划优化方法研究[J]. 智能计算机与应用, 2013, 3(5): 81-84.
- TAO Xiaojing. Optimization method's research on multispecies and varying-quantity zipper production planning[J]. Intelligent Computer and Applications, 2013, 3(5): 81-84.
- [2] 项迎. 适合多品种小批量均衡排产的可插入式制造方式[J]. 航空制造技术, 2012, 55(19): 76-78.

XIANG Ying. Suitable for many varieties of small quantities balanced scheduling pluggable manufacturing method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(19): 76-78.

[3] 张利军, 李利民. 实现军工企业智能制造的数字化研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2016(22): 111-112.

ZHANG Lijun, LI Limin. The realization of digital intelligent manufacturing of military enterprises[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016(22): 111-112.

[4] 刘勇, 张亮. 发展智能制造, 促进兵器装备集团制造业转型升级[J]. 兵工自动化, 2017, 36(1): 1-6.

LIU Yong, ZHANG Liang. Developing intelligent manufacturing, promoting transformation and upgrading of manufacturing industries: thinking of intelligent manufacturing technology and advanced equipment industry development of China south industries group corporation[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(1): 1-6.

[5] 邹方. 智能制造中关键技术与实现[J]. 航空制造技术, 2014, 57(14): 32-37.

ZOU Fang. Key technology and its realization in intelligent manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(14): 32-37.

[6] 宁振波, 吴元良. 从先进制造业的发展看实施工业 4.0 的前提条件[J]. 航空制造技术, 2014, 57(18): 37-40.

NING Zhenbo, WU Yuanliang. Precondition of industrie 4.0 implementation based on the development of advanced manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(18): 37-40.

[7] 韦莎. 智能制造系统架构研究[J]. 信息技术与标准化, 2016(4): 50-54.

WEI Sha. Research on intelligent manufacturing system architecture[J]. Information Technology & Standardization, 2016(4): 50-54.

[8] 李清, 唐莺璘, 陈耀棠, 等. 智能制造体系架构、参考模型与标准化框架研究[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 539-549.

LI Qing, TANG Qianlin, CHEN Yaotang, et al. Smart manufacturing standardization: reference model and standards framework[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(3): 539-549.

[9] 王磊, 刘强. 轻装配智能制造系统框架及管控模式[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(9): 2108-2117.

WANG Lei, LIU Qiang. Framework and control model of lightweight assembly intelligent manufacturing system[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2016, 22(9): 2108-2117.

[10] 郭洪杰, 杜宝瑞, 赵建国, 等. 飞机智能化装配关键技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 44-46.

GUO Hongjie, DU Baorui, ZHAO Jianguo, et al. Key technology on intelligent aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 44-46.

[11] 姚艳彬, 邹方, 刘华东. 飞机智能装配技术[J]. 航空制造

技术, 2014, 57(23/24): 57-59.

YAO Yanbin, ZOU Fang, LIU Huadong. Intelligent assembly technology of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(23/24): 57-59.

[12] 袁书梅, 杨根军, 陈军. 飞机总装脉动生产线智能制造技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 41-47.

CHANG Shumei, YANG Genjun, CHEN Jun. Research and application of intelligent manufacturing technology for aircraft final assembly pulsation production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 41-47.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 陈荣, 袁宁, 王晗, 等. 我国离散制造业智能工厂通用技术架构研究[J]. 机械工程与自动化, 2016(5): 222-224.

CHEN Rong, YUAN Ning, WANG Han, et al. Intelligent factory's technical frame in dispersed manufacturing industry[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016(5): 222-224.

[16] 楼洪梁, 杨将新, 林亚福, 等. 面向多品种变批量的可重构制造系统的设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(13): 1360-1365.

LOU Hongliang, YANG Jiangxin, LIN Yafu, et al. Research on the design methodology of reconfigurable manufacturing systems under multiproduct and change demand[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(13): 1360-1365.

[17] 周宏明, 周余庆, 陈亚绒, 等. 面向多品种变批量生产的制造单元生成方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(12): 2589-2595.

ZHOU Hongming, ZHOU Yuqing, CHEN Yarong, et al. Methodology of manufacturing cell formation for multiproduct and change demand production[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(12): 2589-2595.

[18] 李宏霞, 彭威, 史海波. 装配车间的多品种变批量的生产调度优化模型[J]. 机械设计与制造, 2006, 44(6): 94-96.

LI Hongxia, PENG Wei, SHI Haibo. Optimization model of production scheduling on the assemble shop floor[J]. Machinery Design Manufacture, 2006, 44(6): 94-96.

通讯作者: 侯俊杰, 博士、研究员, 研究方向为数字化及智能制造技术, E-mail: 13801174416@139.com. (责编 大漠)