

智能制造技术在航天大型构件中的应用

何建利,高嘉爽

(上海航天设备制造总厂有限公司,上海 200245)

摘要: 智能制造是制造技术、系统工程、人工智能与网络技术等学科互相渗透、互相交织而形成的一门综合技术,可为高品质复杂零件制造提供新的解决方案,特别适应航天多品种、小批量生产的需要。本文分析了航天大型构件的生产制造现状,并列举了智能制造在航天构件领域应用的情况,分别从体系构架、工艺技术、制造装备、生产管理方面阐述了智能制造的实践应用。结合企业近年来的工作,从数字化的航天产品工艺设计和管理、面向航天复杂构件的智能化装备升级、全过程透明化的智能运营管控、航天智能焊接车间建设探索、数字孪生技术实现虚实融合等几个方面展开论述。

关键词: 智能制造; 航天构件; 工艺设计; 智能管控; 智能车间

中图分类号: TP 399; V 11

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.03.016

Applications of Intelligent Manufacturing to Large Aerospace Components

HE Jianli, GAO Jiashuang

(Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: Intelligent manufacturing is a comprehensive technology which integrates manufacturing technology, system engineering, artificial intelligence, network technology and so on. It can provide new solutions for the manufacturing of high-quality complex products, and is suitable for aerospace multispecies and small-batch production especially. In this paper, the production and manufacturing status of large aerospace components is analyzed, and the applications of intelligent manufacturing in the field of aerospace components are introduced. Furthermore, the practical applications of intelligent manufacturing for system design, process, equipment, and production management are presented. Finally, the experience of aerospace product digital process design, transparent intelligent management in the whole process, intelligent equipment upgrading for aerospace complex components, intelligent welding workshop design, and digital twin technology in recent years are shared.

Key words: intelligent manufacturing; aerospace component; process design; intelligent management; intelligent workshop

0 引言

智能制造目前仍未形成统一共识的定义。通俗地讲,智能制造的本质是自动化技术、系统工程、人工智能技术、网络技术等新兴技术与制造技术的有机融合,以便更加经济、灵活地优化生产过程,制造出更好的产品,使企业创造更多的效益^[1-5]。世界各国为了应对制造业迅猛的发展需求,分别制订了

相应的智能制造国家战略计划。如德国提出以信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)为基础的“工业 4.0”概念^[6-8];美国提出人、数据、机器互联的工业互联网概念;我国先后发布以智能制造为主攻方向的《中国制造 2025》《智能制造发展规划(2016—2020 年)》《国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》等文件,将智

收稿日期:2021-03-11; 修回日期:2021-04-12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2010704)

作者简介:何建利(1968—),男,本科,研究员,主要研究方向为非标测试设备、智能装备研发。

通信作者:高嘉爽(1981—),女,博士,研究员,主要研究方向为材料加工工程、焊接仿真等。

能制造作为国家先进制造产业的重点突破方向,以工业互联网为网络化平台,推动工业制造向数字化、智能化转型升级^[2-3,9-10]。

1 航天大型构件制造的生产现状与需求

1.1 我国航天构件制造面临的生产现状

近年来,我国航天构件制造的技术水平随着型号任务的开展取得了显著提升,但与国外航天先进水平相比还有一定的差距,还不能很好地适应航天产业快速发展的要求。我国航天构件制造面临的生产现状包括以下几个方面^[11-13]:

1) 产品仍沿用了大量的手工、半自动生产方式,如焊接、装配、铆接、喷涂等。手工生产的产品质量一致性很难保证^[14]。设计—工艺—现场生产线之间的数据链路没有贯通,设计阶段生成的数字化模型无法直接辅助生产制造。工艺仿真、数字化装配等先进数字化制造技术能力薄弱。

2) 目前生产设备大多数为单机作业,缺乏数据的采集和集中管控,而航天产品具有研制型小批量的特点,单机离散型的生产组织模式不够灵活,很难快速切换,效率低下。在研制和批量生产模式发生冲突时,批量生产能力易受到影响。同时,由于航天产品多品种、小批量的特点,使其制造过程换型频繁,制造单元的制造效率难以获得根本性的提升。

3) 目前仍采用传统的设计、工艺、制造单链条研发模式,设计制造一体化程度不高。工艺设计与产品设计尚未实现并行工程,工艺提前介入设计的程度有限,研发效率低,问题解决迭代时间长,尤其对于结构复杂、工序多的产品,研发周期往往为 3~5 a。设计与工艺之间的系统平台、专业软件、标注规范尚不统一,设计模型和数据难以共享。

1.2 智能制造在航天构件中的应用需求

将智能制造引入航天大型构件制造领域,重点解决以下几方面的矛盾:质量要求日益提高与生产方式落后之间的矛盾;快速低成本生产与传统的组织管理模式之间的矛盾;复杂构件协同制造与传统的孤岛式研发模式之间的矛盾。

航天大型构件产品具有先进性、复杂性、集成性和极端制造等各方面特性。在迈入智能制造的过程中,航天企业应充分有效利用物联网、大数据、

云计算等信息手段,将生产制造模式与先进技术有机融合,逐步实现以感知、分析、执行一体化为代表的智能制造,开展在轨组装、在轨加工、增材制造、机器人、虚拟现实等技术的研究,优化产品生产流程,实现生产过程的数字化、信息化和智能化,构建航天构件产品智能制造管控信息系统,实现具有真正智能的航天制造综合体。

2 智能制造技术在航天构件中的研究现状

2.1 国外航天智能制造研究现状

航天大型构件制造是现代工程制造技术的重要组成部分,对国民经济的发展以及国防实力的增强具有极为重要的作用。波音公司、洛克希德马丁公司、美国国家航空航天局(NASA)等国外航天机构都在先进制造技术的研究和应用上取得了重大进展^[11,15-16]。近年来,这些机构纷纷引入智能制造理念,研究集中于系统构建、云计算、数字孪生^[17-18]、虚拟现实技术、3D 增材制造^[19-20]、机器人、智能感知和智能装配等方向。

如美国正研究将数字孪生技术和基于模型的系统工程方法应用于太空空间与网络安全。达索航空公司开发的基于数字孪生理念建立的虚拟开发与仿真平台,用于“阵风”系列战斗机和“隼”系列公务机的设计过程改进^[21]。洛马公司则计划采用数字孪生技术实现工程设计与制造的链接,也就是在设计阶段产生精确的 3D 实体模型,用于加工模拟、编程、坐标测量机和检测的环节。泰雷兹阿莱尼亚宇航公司建立了一个虚拟环境研究平台 VERITAS,用于验证各种航天器虚拟现实的原型,支持自然交互设备的集成与应用,进行宇航产品协同装配序列规划与可视化^[22]。波音公司采用三维数字模型、仿真、虚拟现实等技术研究高速机械加工、搅拌摩擦焊等制造手段,研制的载人宇航飞船 CST-100 采用了一体化设计技术和模块化、流程化的装配工艺执行模式,大幅度降低了研制成本,缩短生产周期。美国空间探索公司更是把智能制造理念嵌入到生产制造的各个环节,大幅度提高火箭构件生产效率^[23]。

2.2 国内航天智能制造研究现状

国内智能制造的研究以华中科技大学、浙江大

学、清华大学、哈尔滨工业大学和上海交通大学等为代表,取得了一系列理论成果和工程实践经验^[24-25]。智能制造在航天构件领域中的实际应用还处于初级阶段,大部分集中在单项技术或者某一特定方面的研究,距完整技术体系、成熟工程应用还有差距。目前相关的研究与应用主要集中以下几个方面:

1) 先进制造模式与航天制造的融合。“互联网+制造”、服务型制造、云制造等先进制造模式逐步引领传统制造业向数字化、智能化的阶段发展^[26-29]。复杂产品智能制造技术国家重点实验室提出一种“智能+”时代的新智能制造系统——云制造系统3.0,该系统借助新一代智能科学技术、新制造科学技术等,构成以用户为中心的统一经营的新智能制造资源、产品与能力的服务云。该系统针对航天复杂产品的特点及其对新生产模式的挑战,搭建航天云网,实现了基于大数据的制造资源/能力的智能推荐、跨企业的制造能力的智能感知和动态协同、人机混合智能等应用^[30-31]。北京卫星制造厂^[22]提出了CAST制造的概念,阐述了航天产业云制造、基于数据分析的自动化、基于智能化的制造服务和基于制造模式的转型发展的具体内容,并在航天器中的管路、电缆网、直属件、结构板等典型产品中开展实际应用。

2) 航天领域数字化制造。数字化是智能化的基础,数字化技术与航天构件的研发、设计、制造相结合,可有效提升产品的性能与质量,提升设计能力,缩短研发周期。如基于模型定义的数字化协同设计技术广泛应用于我国空间站、飞船等重要大工程中^[32-34],国内卫星的数字化协同已深入应用^[35-36]。还有部分研究涉及三维协同研制体系标准的制定等^[37]。在数字化制造方面,设计端直到生产末端的信息传递、数字化协同制造的计划管理^[32]、数据传递和转化效率等问题还需要进一步深化研究。

3) 航天智能生产线与智能车间。据资料文献报告,航天智能生产线与车间的具体应用涉及钣金车间、飞行器装配车间、焊接车间、电装车间等。研究关注集中于智能车间系统框架的设计、平台的开发与研究、数据孪生技术、单元布局的优化、数据采集与智能管理等方面。如新一代运载火箭钣金制造车间从改善车间管理入手,建立了现场层、业务层和智能决策层的数字化建设体系,通过MES系统

进行串联和实现^[38]。航天构件机械加工车间从车间内产品、资源和工艺入手,利用数字孪生对车间建模,分别对产品数字化定义、基于数字孪生的资源建模和工艺信息的数字化定义等问题进行研究分析^[39]。王艳广等^[40]针对航天某液压系统为研究对象,开展了基于平台的业务数字化集成以及车间智能化改造。首都航天机械有限公司对智能制造的理念引入到生产线刀具管理系统,提高了刀具管理的信息化、智能化水平^[41]。王宇生等^[42]对飞行器装配车间进行了基于大数据的智能车间平台研究。

4) 航天大型构件智能化装备的应用。我国航天构件的装备智能化程度还不高^[11]。刘强^[43]认为在航空航天领域中,制造装备的自动化、数字化和智能化是建设智能制造系统的基础,集成车间数字化仿真、智能化物流与运输、智能化管理模块,可构建先进的智能化制造系统。国家工信部实施“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项,针对我国航天领域重大专项的需求,研制了高档数控加工、搅拌摩擦焊接、充液拉深成型和自动化装配等一系列装备,助力航天制造向智能制造转型升级。

3 航天大型构件智能制造的应用实践

3.1 航天大型构件智能制造

智能制造是将制造技术与数字化技术、智能技术及新一代信息技术交叉融合,面向产品全生命周期具有信息感知、优化分析、自主决策、精准执行控制等功能^[44-46]。结合航天大型构件产品制造特点,体系包括智能化设计、智能化管理、智能化制造平台,来自制造执行系统(Manufacturing Executive System, MES)、企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)、产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)等系统成为数采平台数据来源,为各个业务系统的实时反馈和闭环控制提供技术支持。以某航天大型构件智能制造过程为例(如图1所示),通过数字化和仿真技术进行产品虚拟设计,依据设计原型进行工艺编制并完成排产。物理车间把虚拟设计变为现实产品,同时通过物联网、互联网, MES实时采集生产现场信息,包括设备状态、物流等,反馈到虚拟世界中对反馈信息分析和优化,从而进一步提升产品品质和效率。

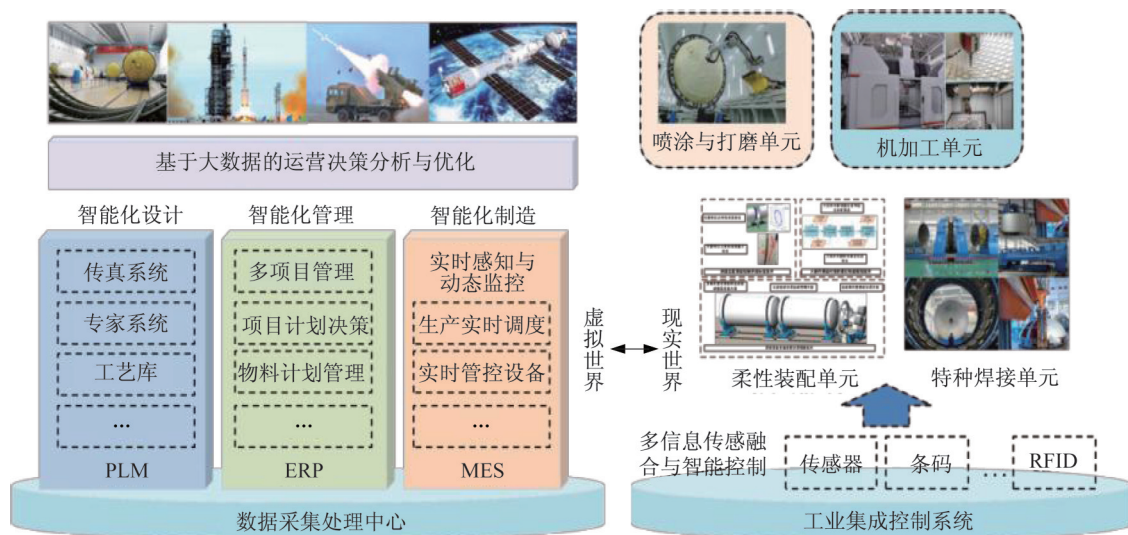


图1 航天大型构件智能制造体系图

Fig.1 Intelligent manufacturing system for large aerospace components

3.1.1 工艺设计

工艺设计涵盖基于大数据与知识发现的智能工艺创新、基于制造过程仿真分析的工艺设计与优化、基于增强现实技术的智能化加工仿真培训和工装的数字化设计等功能。工艺专家系统可改善传统的工艺设计依赖主观经验、工艺试验难以量化的生产现状,降低航天大型构件工艺研究的成本;工艺仿真平台可改进传统的工艺分析模式,利用仿真模拟手段获得制造结果(如温度场、流场),提高产品的可靠性。智能工艺设计流程如图2所示。

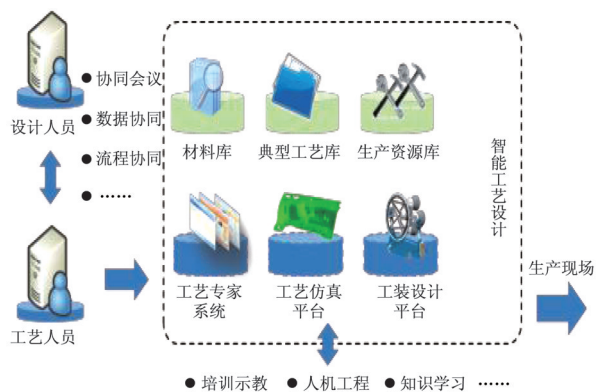


图2 智能工艺设计

Fig.2 Intelligent process design

3.1.2 制造装备

制造装备包括加工设备工业互联网系统、基于

智能感知和地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术的全程追踪信息系统、基于人工智能技术的物流决策支持与智能运输系统和智能调度,以及设备联网与监控等功能^[47]。通过工业集成控制系统,利用条码、传感器以及现场的网络数据接口等,实现生产现场物-物相连。大型航天构件大多采用数控加工设备,建立多层级互联网络系统,通过通用总线数据、解析TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol Address)协议、增加传感器等方式,实现设备集中管理和监控,提高设备运行效率(如图3所示)。

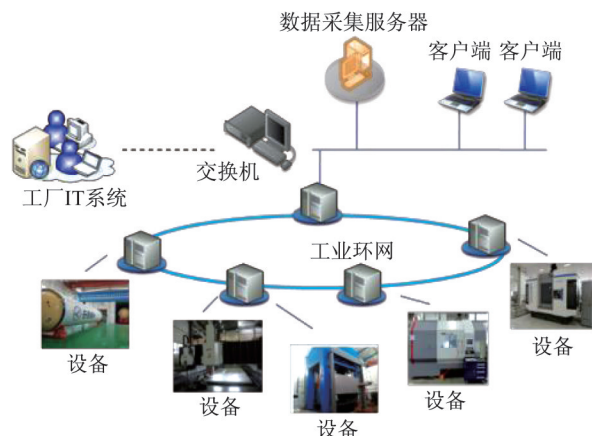


图3 航天大型构件现场物联网构架

Fig.3 Internet of thing (IOT) frame for large aerospace component manufacturing

3.1.3 生产管理

通过智能生产管理,实现个体资源动态重组与协作规划,通过智能项目计划管理解决航天多品种并行、生产计划多变等问题,降低生产扰动对系统的影响,提升车间执行系统集成度和柔性。以MES为核心,对制造过程需要的资源、环境、计划、排产和流程等进行管控,针对航天产品的投产特点,实施基于计划完成周期和解耦策略的优化排产技术。以ERP系统为核心,实施核心资源约束的多项目计划管理,最终实现资源均衡。

3.2 149厂在智能制造方面开展的工作

149厂是我国唯一集“弹、箭、星、船、器”制造及总装综测为一体的综合型航天企业。为适应型号任务快速研制需求,企业致力于打造航天器复杂构件智能工厂。以航天复杂构件生产研制过程为核心,围绕“制造装备国产化、智能化,制造过程数字化、网络化”为总体目标,持续推进高端国产数控装备、机器人装备、增材制造装备和运载火箭自动化对接技术等研究与应用,走出了一条具有航天特色的智能化道路,企业被上海市经济和信息化委员会认定为首批20家上海市智能工厂之一。通过信息技术(Information Technology, IT)与运行技术(Operational Technology, OT)综合集成,智能装备、管控系统、现场执行等相互融合,产线整体效率、柔性得以提升,运载总装时间缩短1/6,部分产线产量提升200%,高端装备国产化率达到70%。

3.2.1 数字化的航天产品工艺设计和管理

以实现航天产品设计性能为目标,构建以ERP+PDM+MES为基础,以三维模型数据为核心的综合数字化工艺设计信息系统,贯通工艺设计、生产准备、产品制造、验收交付和质量管理等各环节数据流,并实现跨域设计文件的审查、签署与分发。最终实现航天产品设计制造协同、工艺设计数字化、生产过程透明管控,并在此基础上构建企业级大数据平台,为智能制造与智能运营提供数据支撑,为企业运营管理和生产管控提供决策支持。基于模型定义(Model Based Definition, MBD)的数字化工艺设计流程如图4所示,主要分为型号管理系统与生产管理系统两个模块,具体涵盖设计方案库、仿真模型库、面向设计制造(Design for Manufacture, DFM)和符号等,流程以设计物料清单(Engineering

Bill of Material, EBOM)、工艺物料清单(Process Bill of Material, PBOM)、制造物料清单(Manufacturing Bill of Material, MBOM)做为系统数据来源,实现基于模型的数字化工艺设计,打通科研生产过程中跨厂所协同,实现了基于信息处理技术(Information Processing Technology, IPT)模式、三维模型下厂的设计与工艺协同、技术状态的同步控制,有效提高了会签效率80%。打通了与总体设计所产品数据包结构化信息传递,以阀门产品为试点,推广到飞船型号、运载型号,提高产品制造过程相关质量信息、制造信息的传递速度100%,提高数据分析利用率100%。打通与各总体所质量单据审签流程,提高了制品处理的及时性和信息准确性。

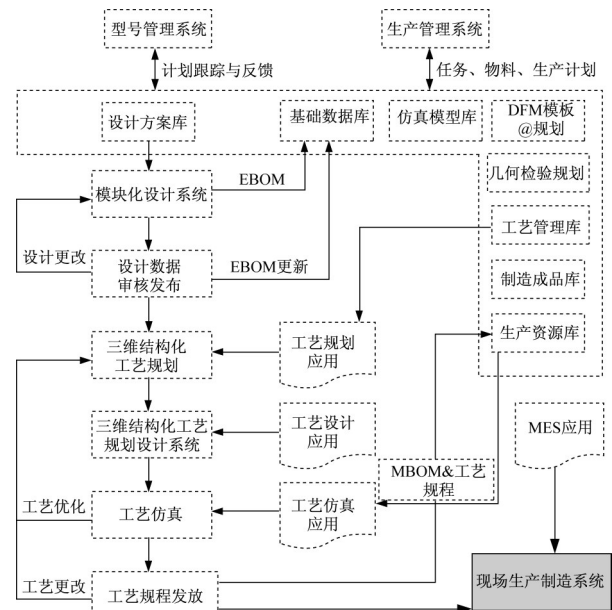


图4 基于模型的数字化工艺设计

Fig.4 Digital process design based on MBD

企业目前在某型运载火箭总装中正式运行该系统,可实现一站式自动化柔性装配,数据全流程贯通,工艺信息全三维化,装配质量提前预判,形成设计、工艺、制造的一体化管理。基于自动测量技术、数字化驱动技术和闭环控制技术实现运载火箭的短装配周期、高装配质量、装配过程数据采集和追踪溯源。运载火箭自动化柔性总装过程中采用的测量-匹配-调姿闭环集成控制原理如图5所示。

3.2.2 面向航天复杂构件的智能化装备升级

智能装备是针对航天大型构件的制造需求,对

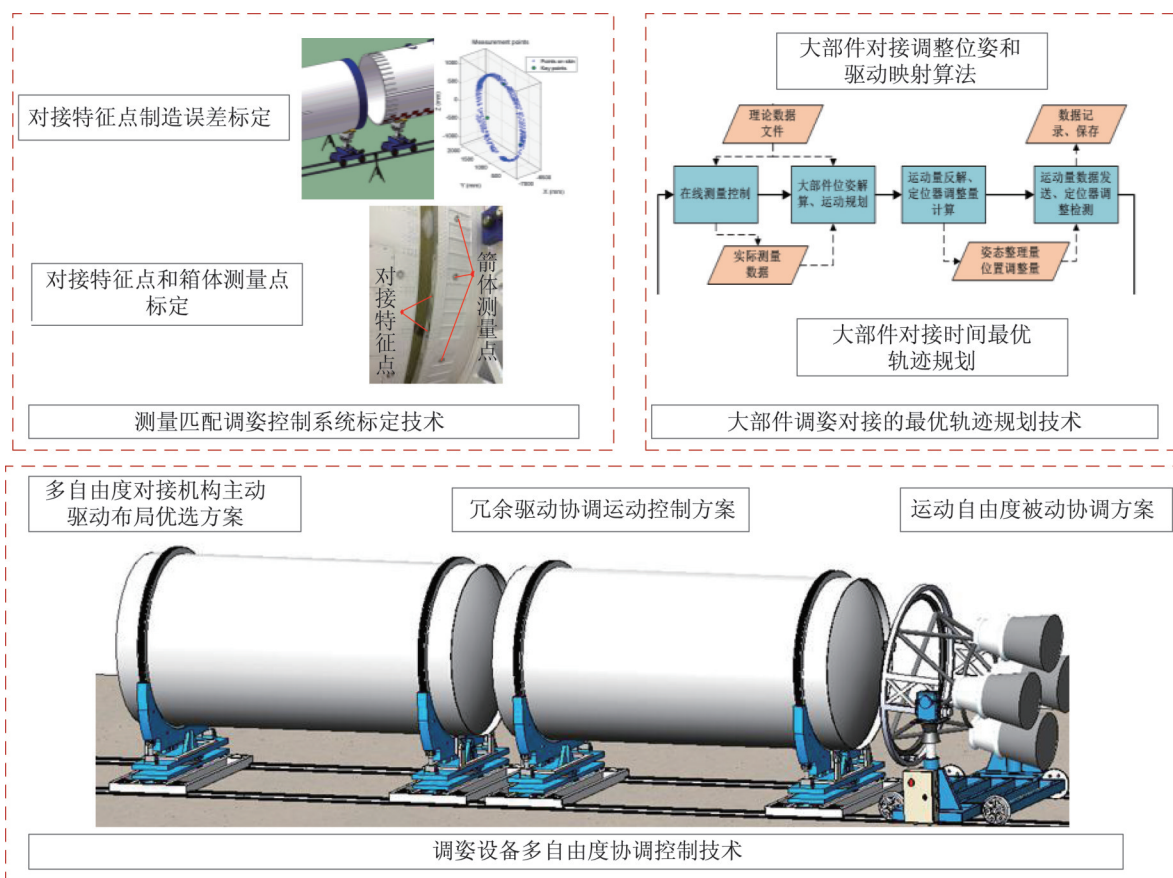


图5 运载火箭自动化柔性总装测量-匹配-调姿集成控制

Fig.5 Integrated control system of measurement-match-posture adjustment for the automatic flexible assembly of launch vehicles

制造装备进行智能化的升级改造,使其具有感知、分析、推理、决策、控制等功能,并适时地做出优化调整。工厂通过系统集成、智能改造、功能扩展等方式,构建火箭燃料贮箱整体充液拉深成形、贮箱特种焊接、航天器舱体结构智能铆接等,有效提升航天结构件整体制造能力,工厂高端智能装备国产化率达到70%。打破国外技术封锁,研制完成国内首台、世界先进水平的重载搅拌摩擦焊装备。焊接厚度单面80 mm、双面150 mm,单块面板焊缝总长超过百米,技术指标国内领先,装备已应用于大型军用雷达面板、大型航天器试验平台、卫星平台底座等超大厚度构件焊接中。研制国际首台成形吨位最大的15 000 t数控双动充液拉深成形装备(如图6所示),攻克了大尺寸薄壁构件成形易于起皱和开裂等工艺难题。该设备制造出国际上首个直径3 350 mm贮箱整体充液拉深箱底,推进航天“一体轻量化”整体成形,形成运载火箭三米级整体箱底全流程制造布局;突破了大尺度薄壁构件几何外形

精确建模、多复杂任务联合作业运动轨迹规划与精度控制等关键技术,建成运载火箭低温贮箱绝热层柔性自动化喷涂成型智能装备;研制运载火箭贮箱零部件焊接预处理自动柔性磨削装备,大幅提升生产效率,提高焊接质量等。

3.2.3 全过程透明化的智能运营管控

选取某战车作为应用对象,根据其投产模式的特点,结合设备资源、物流资源和空间场地等多约束条件,基于MES系统实现生产节拍优化、配套及时和动态响应的生产过程控制,达到产线平衡、物流准时和管控实时的目标。内容包括生产节拍设计、工位设计、产线平衡、空间布局、物流设计和搬运路线规划等。某战车产品生产过程规划如图7所示。

规范现场作业流程,建立产品制造全过程的监控体系,实现产品生产透明化管控能力,研制人员通过MES系统搭建的自动监测设备实时记录现场数据,构建产品质量数据上报系统,建立全闭环的



图 6 航天复杂构件智能化装备

Fig.6 Intelligent equipment for complex aerospace components

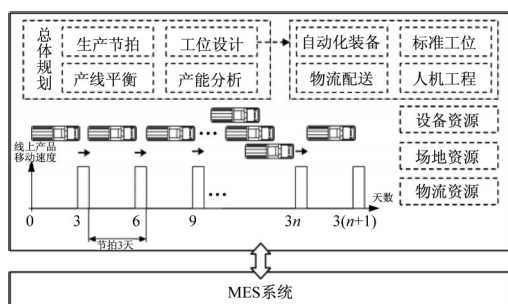


图 7 某战车产品生产过程规划

Fig.7 Production planning of a combat vehicle

产品质量追踪体系,提升产品检验效率,提高质量管理水平。

总装现场布置便携式终端,系统根据装配作业计划,智能优化工位生产节拍,实现自动排产;装配生产管理模块包括收料、装配操作、异常记录等工作管理。系统实时查看具体工位和工序总体进度和详细进度。通过多源信息融合识别、质量信息流的协同管理等,对全过程的质量进行跟踪和追溯,实现全过程智能监控及基于知识的异常源智能诊断,提高产品的制造精度和稳定性。

生产效率方面,通过数据实时传递、展示、分析,减少非增值活动,提高管理效率,降低成本,提高质量追溯效率提高 80%,减少生产过程、发射服务的数据转录、翻译实践,生产进度、物资管理等管理

效率提升 30%。

3.2.4 航天智能焊接车间建设探索

焊接是航天构件的重要加工手段,选取以贮箱焊接车间为研究对象,从布局优化、系统建设、关键工序智能化等方面,建立车间模型,对构建智能焊接车间进行了前期探索性研究。

智能焊接车间是以物联网、CPS、大数据为核心的智能制造平台,分为“智能化焊接技术研发”“协同焊接制造”“智能化运行管理”3个业务平台。智能焊接车间业务体系设计如图 8 所示。通过二维码、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)标识的产品追踪系统、视频-温度-湿度环境传感器、可穿戴移动设备、在线测量等自动化信息采集和检测装置获取整个车间的加工、物流、制造、环境等状态信息;通过 CPS 平台通信、计算及控制能力实现生产对象信息物理融合和交互操作,支撑焊接加工系统和物流控制的智能化;通过大数据平台知识挖掘、专家系统实现焊接工艺的持续优化和创新,并实现生产管理决策的智能化。

3.2.5 数字孪生技术实现虚实融合

工厂探索应用数字孪生技术,在加工过程中实现了生产过程中的产品、物料、物流和设备加工状态等物理系统向虚拟空间数字化模型的实时反馈与驱动。通过虚拟现实展示空间站舱体装配过程,

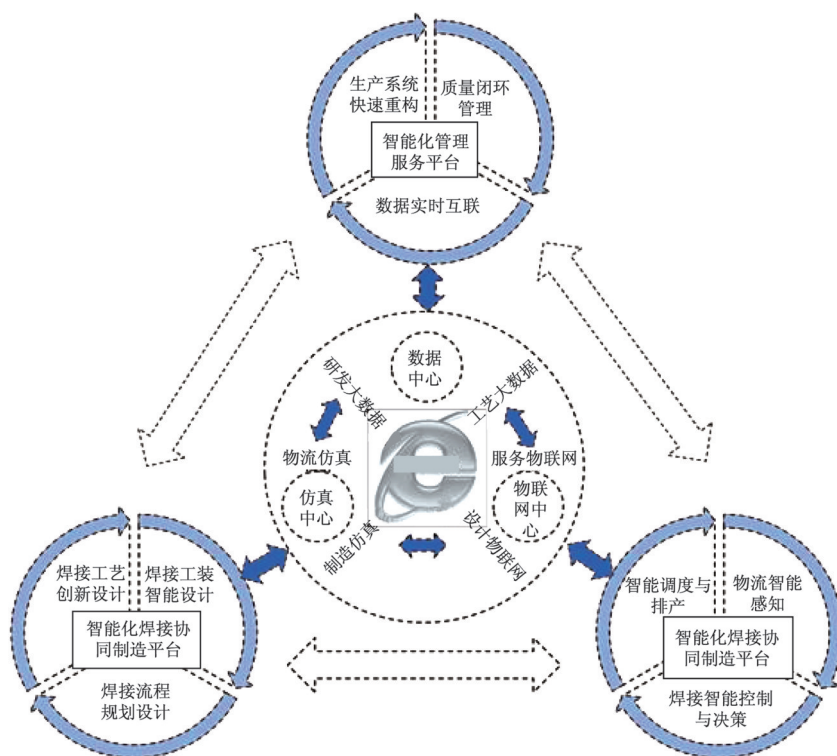


图8 智能焊接车间业务体系设计

Fig.8 Intelligent welding shop system design

实现大质量设备、大载荷机柜、角隔区域总装和航天器管路装配等复杂工种的虚拟现实交互式作业,并在装备过程仿真的基础上实现装配流程驱动的可视化装配场景,如图9所示。



图9 AV/VR在航天器制造中的应用

Fig.9 Application of AV/VR to spacecraft manufacturing

未来企业重点规划产品全生命周期的连接与贯通,强化产品的设计、流程规划到生产实现的数据集成与智能分析,实现产品链的整体优化与深度协同;面向企业业务活动,支撑计划、供应、生产、服务等全流程全业务的互联互通,面向单环节重点场景开展深度数据分析优化,实现全价值链的效率提升与重点业务的价值挖掘;整合小产业集团资源,支撑集团资源多个环节数据集成串联,实现集团化

管理。聚焦小产业集团各公司专业和产品特点,按需推进基于全三维的产品研发和工艺设计数字化,建设以数据为驱动的协同研发环境,通过综合运用流程管理、资源管理、知识工程等技术,将研发方法、经验、标准、工具与知识融入设计流程中。逐步普及数控设备和自动化仪器设备在企业制造、检验检测、物料配送等环节的应用,构建数字化制造单元和产品生产线,提高关键产品制造效率,提升企业核心专业的竞争力。

4 结束语

航天构件的制造过程具有规模庞大、系统复杂、技术难度大、质量可靠性与安全性要求高的特点。智能制造技术作为21世纪先进制造技术发展的重要方向,是新工业革命的主要标志之一,可以实现航天大型构件的高质量、快速、低成本研制,提高产品研制的快速响应能力。智能制造可覆盖航天构件生产的各环节,包括工艺设计过程、制造装备、生产管控。通过在运载火箭箭体总装、大型战车总装、航天器舱体制造等过程中的应用探索,智能制造被证明对于提高航天构件的高质量、快速低

成本研制、柔性透明生产管控等有重要作用,同时,对于提升航天制造的自动化、信息化、数字化具有重要意义。

参考文献

- [1] 欧阳生.精益智能制造[M].北京:机械工业出版社,2018:8-15.
- [2] 姚锡凡,景轩,张剑铭,等.走向新工业革命的智能制造[J].计算机集成制造系统,2020,26(9):2299-2320.
- [3] 周济.智能制造“中国制造2025”的主攻方向[J].中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.
- [4] 周济.走向新一代智能制造[J].中国科技产业,2018(6):20-23.
- [5] YAO X F, ZHANG J J, ZHOU J M, et al. From intelligent manufacturing to smart manufacturing for industry 4.0 driven by next generation artificial intelligence and further on [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Enterprise Systems (ES). Washington D.C., USA: IEEE, 2017:311-318.
- [6] 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.
- [7] YANG L. Cyber physical system (CPS) -based Industry 4.0: a survey [J]. Journal of Industrial Integration and Management, 2017, 2 (3) : 1750014.
- [8] KANG H S, LEE J Y, CHOI S S, et al. Smart manufacturing: past research, present findings, and future directions [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology, 2016, 3(1):111-128.
- [9] 延建林,孔德婧.解析“工业互联网”与“工业4.0”及其对中国制造业发展的启示[J].中国工程科学,2015,17(7):141-144.
- [10] 陶永,蒋昕昊,刘默,等.智能制造和工业互联网融合发展初探[J].中国工程科学,2020,22(4):24-33.
- [11] 栾恩杰,王崑声,胡良元,等.提升我国航天装备制造能力的思考[J].中国工程科学,2016,18(4):83-89.
- [12] 孙京,刘金山,赵长喜.航天智能制造的思考与展望[J].航天器环境工程,2015,32(6):577-582.
- [13] 姜钊,于辉,解晓莉,等.卫星整星智能制造关键技术与应用[J].航天制造技术,2020(6):63-67.
- [14] 孟光,郭立杰,程辉,等.航天智能制造技术与装备[M].武汉:华中科技大学出版社,2020:18-30.
- [15] RYCHTYCKYJ N. Intelligent manufacturing applications at Ford Motor Company [R]. NAFIPS, 2005.
- [16] 黎小平,姜云峰.先进制造技术在航天领域的应用进展[J].智能制造,2019(6):3-8.
- [17] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94 (9/10/11/12) : 3563-3576.
- [18] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4):2405-2415.
- [19] 巩水利,锁红波,李怀学.金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J].航空制造技术,2013(13):66-71.
- [20] CONNER B P, MANOGHARAN G P, MARTOF A N, et al. Making sense of 3D printing: creating a map of additive manufacturing products and services [J]. Additive Manufacturing, 2014(S1-4):64-76.
- [21] 孟松鹤,叶雨玫,杨强,等.数字孪生及其在航空航天中的应用[J].航空学报,2020,41(9):023615.
- [22] CESARE S, ALLASIO A, ANSELMINI A, et al. The European way to gravimetry: from GOCE to NGGM [J]. Advances in Space Research, 2016, 57(4):1047-1064.
- [23] 夏宇,刘艳琼.美国SpaceX公司技术创新的启示[J].国防科技,2017,38(1):72-76.
- [24] ZHOU J, ZHOU Y H, WANG B C et al. Human-Cyber-Physical Systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2019, 5(4):624-636.
- [25] ZHOU J, LI P, ZHOU Y, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4(1):11-20.
- [26] ZHOU J, LI P, ZHOU Y. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4 (1):11-20.
- [27] KUMAR K, ZINDANI D, DAVIM J P. Virtual manufacturing: scope, socio-economic aspects and future trends [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018:195-201.
- [28] JIANG P, DING K, LENG J. Towards a cyber-physical-social connected and service-oriented

- manufacturing paradigm: social manufacturing [J]. Manufacturing Letters, 2016(7):15-21.
- [29] LI B H, ZHANG L, REN L, et al. Typical characteristics, technologies and applications of cloud manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7):1345-1356.
- [30] 李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 等. 云制造系统 3.0: 一种“智能+”时代的新智能制造系统[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12):2997-3012.
- [31] LI B, HOU B, YU W, et al. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review [J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2017, 18(1):86-96.
- [32] 张帅, 林星翰. 空间站结构数字化协同设计中的计划管理[J]. 载人航天, 2019, 25(4):540-544.
- [33] 韩凤宇, 林益明, 范海涛. 基于模型的系统工程在航天器研制中的研究与实践[J]. 航天器工程, 2014, 23(3):119-125.
- [34] 谷巍, 刘刚. 载人航天器数字化设计管理模式[J]. 航天制造技术, 2013(1):59-63.
- [35] 蒋小勇, 葛兴涛, 沈毅奔, 等. 大型复杂卫星实施基于模型的系统工程研制的研究与思考[J]. 航天制造技术, 2017(5):1-4, 14.
- [36] 刘红林, 李英玉, 杨震, 等. 基于能力分析的天基资源虚拟化方法的设计与实现[J]. 上海航天, 2020, 37(1):55-63.
- [37] 石胜友, 袁义, 郎静宏, 等. 航天器三维协同研制标准体系研究[J]. 航天标准化, 2018(1):10-14.
- [38] 李维, 董振义, 李锐. 新一代运载火箭制造数字化车间的探索和实践[J]. 智能制造, 2019(10):46-49.
- [39] 郭东升, 鲍劲松, 史恭威, 等. 基于数字孪生的航天结构件制造车间建模研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(4):578-607.
- [40] 王艳广, 宿春慧, 高方方, 等. 面向航天复杂产品的智能制造[J]. 现代信息科技, 2019(16):150-152.
- [41] 张素燕, 张泽, 何万林, 等. 航天智能制造生产线刀具管理系统研究[J]. 制造技术与机床, 2021(2):577-582.
- [42] 王宇生, 吴国华. 基于大数据的航天飞行智能车间平台的研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(4):5-8.
- [43] 刘强. 航空航天制造中的智能化技术[J]. 现代制造, 2020(9):8-9.
- [44] 钟志华, 臧冀原, 延建林, 等. 智能制造推动我国制造业全面创新升级[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6):136-142.
- [45] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4(1):11-20.
- [46] ZHOU Y, ZANG J Y, MIAO Z Z, et al. Upgrading pathways of intelligent manufacturing in China: transitioning across technological paradigms [J]. Engineering, 2019, 20(4):1-8.
- [47] 张加波, 文科, 周莹皓, 等. 航天器大型构件智能制造技术探索与推广应用[J]. 卫星应用, 2018(1):48-53.