

批量定制柔性生产的数字化、智能化、网络化制造发展

单忠德^{1,2}, 汪俊¹, 张倩²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;
2. 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 数字化、智能化、网络化制造技术与装备是制造强国、网络强国建设的重要基础, 是数字化车间、智能化工厂建设的重要工具, 赋能制造业转型升级与高质量发展。结合航空航天领域等产品多品种变批量的特点, 研究了如何更好实现数字化、智能化、网络化制造, 如何更好建设数字制造车间、柔性智能制造工厂。针对单件小批量柔性化生产制造, 提出了数字化智能化柔性制造生产线、车间/工厂的建设原则、实施路径和技术架构, 可以用于指导建设面向未来的柔性制造标准化的数字化智能化车间/工厂。通过航空航天领域典型智能工厂建设的探索和应用实践, 探索了柔性智能生产装备、自动化柔性精密测量装备、基于测量反馈的自适应加工以及基于工业互联网的数字孪生系统等创新场景应用。

关键词: 智能制造; 网络制造; 柔性制造; 智能装备; 智能工厂

中图分类号: T-01

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00241

Development of digital intelligent networked manufacturing for flexible customized manufacturing

SHAN Zhongde^{1,2}, WANG Jun¹, ZHANG Qian²

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
2. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing 100083, China

Abstract: Digital intelligent networked manufacturing technology and equipment are important foundations for the construction of manufacturing power and Internet power. They are important tools for the construction of digital workshop and intelligent factory, enabling the transformation and upgrading and high-quality development of the manufacturing industry. Combined with the characteristics of multiple varieties and variable batches of products in the aerospace field, it was studied how to better conduct digital intelligent networked manufacturing, how to better build digital manufacturing workshops and flexible intelligent manufacturing factories. For single piece and small batch flexible manufacturing, the construction principle, implementation path and technical architecture of digital intelligent flexible manufacturing production line and workshop/factory were proposed, which could be used to guide the construction of digital intelligent workshop/factory for future flexible manufacturing standardization. Through the exploration and application practice of typical intelligent factory construction in the aerospace field, the innovative scenario applications were explored, such as flexible intelligent production equipment, automatic flexible precision measurement equipment, measurement feedback-based adaptive processing and industrial internet-based digital twin system.

Key words: intelligent manufacturing, network manufacturing, flexible manufacturing, intelligent equipment, intelligent factory

收稿日期: 2021-08-05; 修回日期: 2021-08-25

通信作者: 单忠德, shanzd@nuaa.edu.cn

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目 (No.2021-XZ-26)

Foundation Item: Strategic Research and Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (No.2021-XZ-26)

1 引言

制造业是实体经济的重要基础，是新一轮技术革命和产业变革必须占据的制高点^[1]。世界各主要经济体，特别是工业发达国家，针对提升制造业国际竞争力，制定了国家级战略和规划，如美国的“先进制造业国家战略计划”、德国的“工业 4.0”、日本的“科技工业联盟”、英国的“工业 2050 战略”等。我国是世界制造大国，拥有门类齐全、独立完整的工业体系，具有很好的规模优势、产业优势、市场优势和体制优势，取得了举世瞩目的成就，也制定了全面推进实施制造强国的战略文件。要建设成为制造强国，实现高水平科技自立自强，高端装备中的一些关键基础材料、核心基础零部件、高端芯片还严重依赖进口，制造技术依存度超过 50%，还存在一些制约发展的短板技术、“卡脖子”技术等基础关键共性技术瓶颈。智能制造是实现我国制造业由大变强的核心技术和主线，优先推进数字化、网络化、智能化制造、发展智能制造技术与装备是推动我国制造业变革和转型升级的必经之路，为中国制造跨越式发展提供历史性机遇，促进我国产业迈向全球价值链中高端。通过新一代信息技术、人工智能技术与先进制造业的深度融合，培育中国特色的制造文化，实现制造强国的战略发展目标^[2]。

数字化、智能化、网络化制造将生产过程中数字化设计、制造工艺、数字化装备等制造技术、制造软件、管理技术、智能及信息技术、工业互联网等集成创新与交叉融合发展。贯穿于研发、设计、生产、物流、销售、服务等制造活动全生命周期的各个环节，旨在高效、优质、低耗、清洁、安全、敏捷地制造产品、服务用户的制造模式，代表制造业的未来。智能制造基本范式的演进发展，使得智能产品、智能装备、智能生产和智能服务等不断创新和持续优化。大规模个性化定制、网络化协同制造等创新产业模式的出现，先进制造与信息技术、工业互联网融合，极大地改变了产品的设计、制造、提供甚至使用方式。产品生命周期日益缩短，更新速度日益加快，制造业企业的生产方式已由面向产品的生产逐渐转变为面向市场的生产^[3]。围绕发展高质量产品与高端装备，利用先进制造、智能制造、绿色制造等技术实现高效、优质、低耗、清洁、安全、敏捷地制造产品，智能制造的内涵和特征在不断发展和深化，以适应多种混合型制造场景和模式的变化^[4]。

2 面向国际竞争的制造业数字化、智能化、网络化发展新挑战

美国国家标准与技术研究院（NIST）认为：智能制造解决差异化更大的定制化服务、更小的生产批量和不可预知的供应链变更，应对制造复杂系统的不确定性，实现数据驱动从规模化生产到定制化生产。制造业数字化、智能化、网络化过程，促使承载信息和知识数据在产品研发、生产计划、生产执行、市场营销、售后服务等环节有序自由流动，实现生产全过程、产品全生命周期、全产业链的高效运转和价值再造^[5]。

基于现代传感技术、网络技术、自动化技术、工业智能技术等基础，通过智能化的状态感知、实时分析、科学决策和精准执行技术，实现产品设计过程、生产制造执行过程和制造装备智能化^[6]。两化融合和工业互联网的推进，正在加速中国新型工业化的进程，赋能行业的数字化转型，并成为高质量发展的重要引擎。自动化改造升级、信息化基础条件和应用能力建设发展，有力地促进了企业技术创新和管理变革，为建设未来标准化的数字工厂、智能工厂、网络制造工厂夯实了基础。在国家大力推进新基建的指引下，针对产品高质量交付、降低生产成本和提高生产效能的需求，更需要加大力度发展数字制造、智能制造、网络制造的技术与装备，更好地建立快速响应、高度柔性且透明协同的智能工厂。

高端装备制造业如航空航天、轨道交通、汽车船舶等行业领域，是直接关系国家安全、国民经济战略发展的高技术产业，是先进制造业的典型代表，是知识密集型、技术密集型的高端产业。其产品结构和制造工艺过程复杂，配套零件种类、数量众多，使得生产制造过程、协调关系非常繁杂且研制生产周期长，同时质量控制严格且可靠性要求高。因高端装备制造具有技术难度大、多品种、单台套、小批量、变批量等特点，在产品种类、订单数量和生产节拍上存在不确定性，提高高端装备制造的竞争力更需要用数字技术、智能技术、网络技术改造提升和发展数字装备、智能装备，实现个性化数字化柔性生产制造，快速、敏捷地响应和满足市场需求。

为了更好地实现高端装备制造业的数字化、智能化、网络化，建设满足柔性批量定制生产的数字

化生产线、数字制造车间和智能制造工厂，以工艺数字化、装备智能化、系统网络化为核心构建安全高效的数字化、智能化、网络化制造系统，迫切需要开展以下工作。

(1) 做好柔性批量定制混线生产模式的顶层设计规划。高端产品和高端装备的研制大多都是多部门跨业务领域协同完成的，在构建智能制造体系的过程中，需要依据智能制造能力成熟度模型从基本范式、功能和结构多维度出发，结合产品特点和批产的实际需求制定行动计划和实施路径。更好地解决各制造环节上的智能制造基础和水平参差不齐、应用系统边界划分不清、部分系统重复建设、工厂生产执行层黑箱和存在大量信息“孤岛”等系统性问题，构建基于统一数据源的敏捷研制体系。提升分布式协同研制能力，建立能够支持持续、稳定、高效批量生产的智能化柔性产线技术体系，更好地满足航空航天等高端产品与高端装备的快速研制和混型批量生产需求。

(2) 研发智能制造装备并提升装配生产系统抗异常干扰能力。航空航天等高端产品的制造工艺过程复杂，技术难度高，生产对象多品种、变批量，甚至存在单件和极小量的混线生产，对生产系统的柔性提出了更高要求。现有装配生产系统主要依据装配工艺流程设计的节拍式模式，在面向航空航天产品类型多、制造离散程度高且异常扰动因素多的生产模式下，生产工装数量多且转换频繁、设备综合效率低且质量一致性不高，不能适应柔性生产的要求。由于生产系统的设计柔性不足，系统对生产线设计更改、关键件缺件、质量问题、未完工保留等动态异常变化的适应能力较差。同时，对制造全要素建模、误差传播机制以及全流程多目标持续优化的机理研究不足，单机设备的数字化、智能化、网络化水平不够，使得柔性制造系统动态重构能力较弱、生产计划难以制定、生产资源齐套性差且过程管控难度大。

(3) 研发数字化运行管理系统并提升数据驱动决策能力。如果难以及时准确地掌握生产现场各种资源状态，就难以保证信息的继承性与可追溯性，不能全面建立生产各环节数据关联关系，难以及时感知和预测质量、成本、进度、设备的状态与发展趋势，对全线运行态势的集成掌控能力较弱。数据信息的产生与问题的反馈较慢，机理模型缺乏沉淀，数据效能难以充分发挥，甚至涉及数据保密等

要求，依然需要大量纸质文件。缺乏面向多层级、多角色需求的生产透明综合管控系统，决策缺少丰富且有效的数据支撑。产品全流程质量数据采集覆盖不全，质量数据集成分析能力弱，质量数据应用效能差。因为缺乏基于知识、数据等建立的运行管理系统，自主分析与决策的动态调整能力弱，制造工艺设计缺少数据依据、工艺决策能力低下、非关键制造工艺不达标等，无法做出及时调整，产品整体不合格的现象经常发生。

针对多品种、变批量生产制造模式带来的挑战，构建可以在正确的时间以正确的制造成本生产出质量合格、数量正确的商品并提供优质服务的柔性智能工厂体系，将显著提高生产制造效率和产品质量水平，从根本上提升市场竞争力。

3 柔性批量定制的数字制造、智能制造工厂建设路径

在加快新订单产品研制、形成批产能力、缩短交付周期、提升产品质量和降低生产成本的制造要求下，通过数字化、智能化、网络化工厂的建设，稳步构建生产柔性制造系统，提升脉动生产线能力和产业链的协同能力，满足生产制造的自主研发和自主创新的业务发展需求。根据产品多品种、变批量且高复杂度的特点，将先进制造技术、新一代信息技术、智能制造技术和工业互联网等融合到生产制造业务全流程，以数字孪生系统为载体，以关键制造和生产管控过程的智能化为核心，以精益生产、提高产线绩效为目标，完成产品工艺过程的新型生产组织形式，进而实现生产全流程的透明可视、自主控制和持续优化。

柔性批量定制的数字制造、智能制造工厂总体建设思路遵循3个基本原则。

(1) 顶层设计，稳步推进。依据智能制成熟度模型和行业标准进行顶层规划设计，增强系统弹性和兼容性，依据技术成熟度和市场需求，合理安排实施节奏，逐步实现智能化。

(2) 因企制宜，灵活选择。结合企业产品特点、业务需求、市场需求和企业基础实际，以实用、有效为前提，弥补短板的同时寻求发展，赋能企业的数字化转型。

(3) 协同创新，持续优化。工厂智能化的建设进程，需要多学科多领域的交叉融合创新，突破关键技术，实现多系统深度协同生产，基于建设后评

价在应用中持续改善。

3.1 柔性批量定制的智能工厂建设规划设计、方案实施和生产运营

在智能工厂规划阶段，依据产品种类、数量和工艺相似性，设计系统目标、明确系统约束，按产品成组化原则组织起来，基于工艺路线进行装备选型。采用工艺过程仿真、生产布局仿真、物流与仓储设计仿真、实时反馈仿真和信息管控系统流程设计仿真等仿真技术实施智能工厂统一规划，以提高生产制造全流程全要素规划设计的合理性，同时设立设备综合应用效率、生产节拍、产品合格率等评价指标。

在智能工厂方案实施阶段，通过工艺流程数字化、核心装备智能化、生产布局精益化、计划管控智能化、物流仓储透明化、质量检测在线化、运营

系统集成化、装配过程协同化等功能的实现，突破高精度定位技术、无线传感网络、网络安全、先进控制与优化技术等基础共性关键技术。深度融合先进制造技术、自动化技术、新一代信息技术和工业智能技术等前沿技术，构建以动态感知、实时分析、自主决策和精准执行为特征的闭环生产制造系统。

在智能工厂生产运营阶段，通过完善的信息化体系建设，以工厂核心主数据和企业资源计划为牵引，基于基础应用平台的信息交互和系统集成控制，实现软件系统间的数据交换与知识共享，对生产过程进行持续改善和多目标优化，提升柔性管控系统的可靠性和稳定性。

3.2 柔性批量定制的智能工厂建设技术架构

柔性化生产的智能制造工厂技术架构如图 1 所示，主要包含生产要素资源层、基础技术平台层、

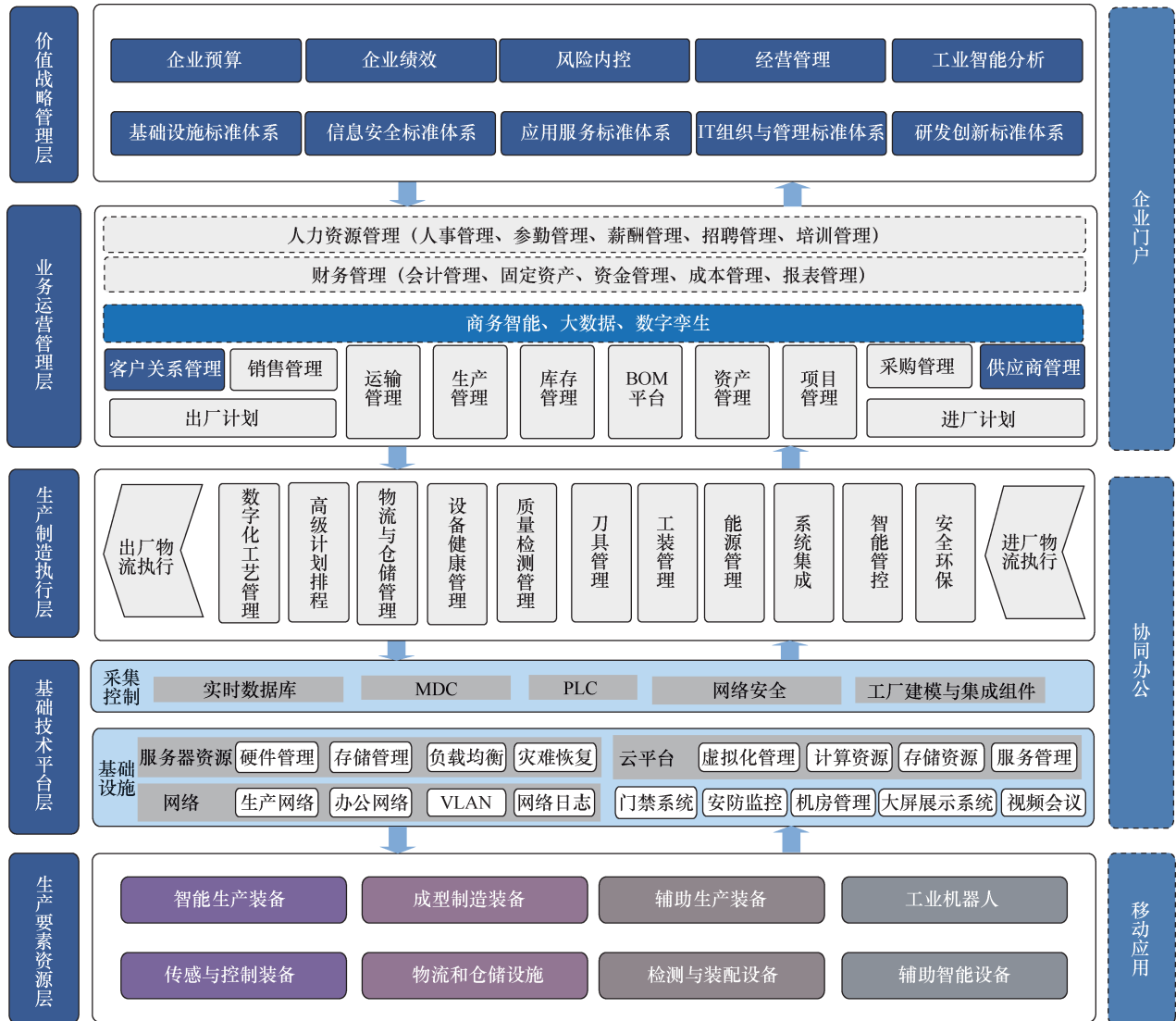


图 1 柔性化生产的智能制造工厂技术架构

生产制造执行层、业务运营管理层和价值战略管理层5层。

生产要素资源层主要包括智能生产装备、成型制造装备、辅助生产装备、工业机器人、传感与控制装备、物流和仓储设施、检测与装配设备、辅助智能设备等功能单元。智能化柔性生产装备系统具有数据采集器、嵌入式控制器、智能仪表和传感器以及通信接口，实现制造数据的精确表达、双向传输和采集存储，工艺动作自动控制，设备运行状态实时监控，故障诊断和趋势预警，实现关键生产过程自主控制和优化。此外，通过辅助生产的工控、智能传感器、视觉设备、电子标签和手持终端等设备，实现实时采集、监控、统计分析、边缘计算和存储等功能，向上实现生产数据库的共享以及系统控制指令的互相传递。

基础技术平台层主要对多源异构数据按照通信协议提供格式化的表示和转换数据服务，构建统一的工业大数据中心，实现生产数据的集成、处理、存储和分发，主要涉及服务器资源、网络安全、工厂建模与集成组件、业务数据交换组件、实时数据库、云平台组件等基础设施体系，使整体系统具备可重构和可扩展的能力。

生产制造执行层主要实现生产管控和决策，围绕数字化工艺管理、高级计划排程、物流与仓储管理、设备健康管理、刀具管理、质量检测管理以及系统集成与智能管控等主要维度，建立制造全要素业务全景模型。具体地，数字化工艺管理是指应用数字化工艺技术实现数字化产品定义、基于三维模型的计算机辅助工艺设计、协同设计和工艺规划仿真。高级计划排程系统将高级计划与排程（APS, advanced planning and scheduling）与制造执行系统（MES, manufacturing execution system）集成，实现生产计划的自动编制、生产任务派工、实时动态调度、生产计划执行的全过程透明化管理和异常问题的快速反应。物流与仓储管理应用标识编码与解析技术、传感器技术、物联网技术以及自动物流技术构建智能化物流系统，建立物流控制塔实现物料、工装、刀具、量具和夹具等生产资源的一体化自动配送和动态可视化跟踪，实现对生产物料需求的及时响应。设备健康管理应用工业物联网技术、实时监控技术和故障诊断技术构建设备健康管理系统，基于设备本身的运行数据和外设传感器数据实现设备实时状态监控、生产效率分析和设备预防性维

护。通过射频识别（RFID, radio frequency identification）芯片将对刀仪测量参数写入数控系统以对刀具信息进行管理和预警，实现对关键刀具的识别、追踪与在线监控。通过监控刀具磨损数据和实时运行状态，建立寿命预测曲线，实现刀具寿命预测和管理功能。质量检测管理运用数字化测量技术、在线检测技术和全面质量管理等方法进行产品质量的过程控制、实时监控和分析，建立质量分析知识库，实现质量追溯体系和质量管控体系的构建。系统集成与智能管控运用新一代系统集成技术建立数据湖，实现系统全要素数据信息的集成，运用数字孪生技术实现绩效指标的可视化以及统计分析，识别生产过程瓶颈。通过准确掌握当前生产现状并根据实际运行情况及时调整，基于工业智能分析方法为管理决策提供辅助支撑和持续改进的方向，实现面向生产业务全流程优化的智能管控。

业务运营管理层从研发设计、供应链管理和销售管理的角度，基于商务智能和大数据挖掘技术进行业务绩效分析和科学决策，构建协同工作平台，提升多品种变批量混线生产模式下生产计划与供应链的协调运作能力。

价值战略管理层主要基于价值链的角度，从企业预算、企业绩效、风险内控和经营管理等方面实施决策，同时构建工厂基础设施、信息安全、应用服务、IT组织与管理和研发创新等标准体系，指导标准化智能工厂的建设。

4 航空航天领域柔性制造的智能工厂建设创新实践

航空航天、国防军工等制造业体系作为我国制造业结构的重要组成部分，在经历了研制和试制阶段、部分型号产品设计和工艺定型进入批产后，正处于“多功能、多构型、多状态”并存、研制与批产高度交织的关键阶段，制造生产线功能、性能正在不断完善提升，生产线潜力正在不断挖掘。面对高质量制造发展需求，需要不断研发柔性自动化生产新装备，提升生产管控过程自主分析决策能力，构建制造工艺过程有效数据输入与反馈控制的运行管理系统，进一步提升型号产品生产线的效能。针对型号多品种研制和批产共线生产具有变批换速率、构型换状态的特点，使生产组织模式更好地满足混线生产的需求，实

现制造系统的快速响应、高柔性和高质量交付。结合航空航天行业应用实践，形成了柔性智能生产装备、自动化柔性精密测量装备、基于测量反馈的自适应加工系统以及基于工业互联网的数字孪生系统等创新应用场景。

4.1 柔性智能生产装备

针对产品个性化定制的需求，由智能生产单元和柔性控制系统组成的柔性智能生产线，使生产过程灵活、高效、计划精准、生产透明、事后可追溯且将来可优化，实现了高效、高质、低成本智能化生产。柔性生产控制系统如图 2 所示，集成了加工系统、物流储运系统、在线质量检测 and 智能管控系统，通过数据接口与其他系统进行数据交换，进而实现生产全流程状态的综合分析、对比计算与自主决策，从而达到智能柔性生产线的最优化控制、运行和实时调度。该系统将作为在企业整体制造系统之下独立运行的生产制造单元，基于标准化的接口进行反馈控制，使装备具有数字化和智能化的特征，实现生产过程的预测、自主控制和产能持续优化，也是未来高端制造装备发展的趋势。

4.2 自动化柔性精密测量装备

针对新型战机的高超音速、高隐身、高可靠性、长寿命的发展要求，对整机制造装配精度与效率提出了更高挑战。特别是复合材料的使用量未来将超过 50%，且高性能复材成形构件尺寸大型化、

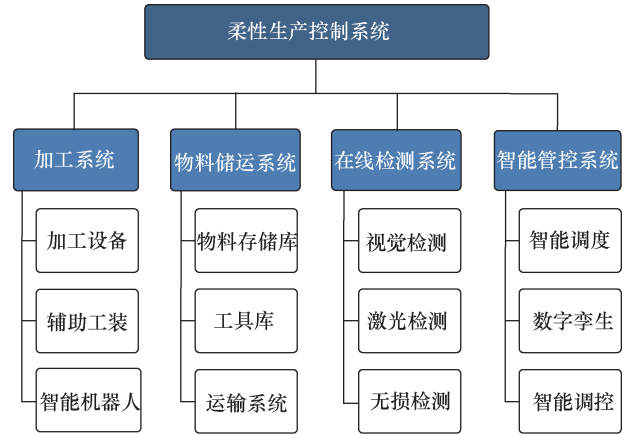


图 2 柔性生产控制系统

结构复杂化、内在致密化是趋势。由于大型复材壁板存在刚性弱、易翘曲等问题，因此，研制大尺寸高精度自动化柔性测量装备能更好地保障高端装备型号任务的生产，服务于国民经济和国家重大工程建设。面向大型航空脉动生产线，建立了基于移动平台与测量传感器组合的大尺寸、高精度、柔性自动化测量体系与方法，解决复杂装配现场的快速高效高精度数字化检测难题。自动化柔性精密测量技术与装备如图 3 所示，利用机械臂操作三维激光扫描仪，结合自动驾驶移动小车（AGV, automated guided vehicle），实现高效的自动化扫描测量，显著拓展了精密测量的尺度空间和测量效率。一方面，通过自动构建 AGV 测量站位和机械臂空间移动路径，解决大部件测量效率低、空间可达性差等问题。

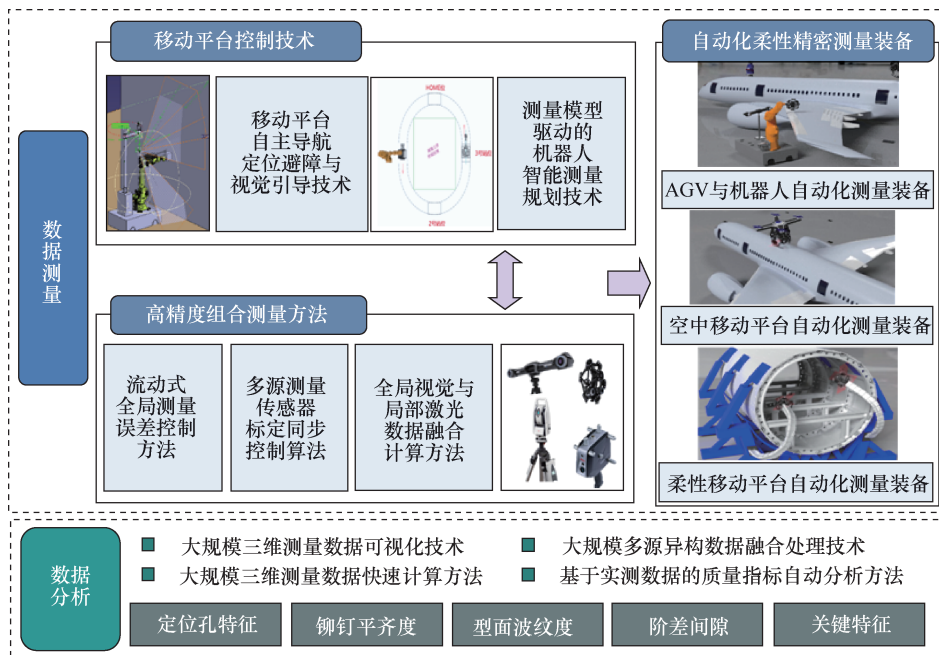


图 3 自动化柔性精密测量技术与装备

另一方面,针对特定的测量任务,在机械臂末端搭载多源测量设备来适应不同场景下的任务需求,以保证在产品质量检测各环节及过程中都能够获取有效的实测数据。同时,针对大规模三维测量数据,基于自适应结构树的大规模数据组织方法、复杂特征敏感的数据增强方法对海量点云数据进行处理,结合大规模数据高效查询与检索技术、大规模三维测量数据可视化技术、融合处理技术以及快速计算和分析等关键技术,实现测量数据快速计算与质量指标自动分析,为产品质量分析提供高效可靠的数据来源和科学依据。同时,通过研发工业测量软件、构建数字化检测一体化平台、测量资源在线化,实现测量数据的传递及共享、分析计算和协同应用。

4.3 基于测量反馈的自适应加工系统

航空航天大型复杂产品的生产制造过程具有加工精度要求高、误差精确控制难的特点,传统制造过程中加工、检测、优化控制各阶段相互独立,无法实现全过程的实时控制优化,难以保障零件加工精度。在航空航天产品高质量制造加工过程中,将质量检测系统、可编程逻辑控制器(PLC, programmable logic controller)、工控和机床进行连接,实现检测设备、读取装置、监测系统、数据信息处理系统与机床之间的数据传递,基于测量反馈的自适应加工系统如图4所示。机床通过宏变量调取实时独立测量数据,加工程序根据实际测量结果对目标工件进行数据加工补偿,实现同一系列工件数据的实时感知和精确补偿,实现机床对工件精准加工的目的。系统与MES进行数据整合,打通生产制造数据流,使得产品加工工时大大缩短,提升了加工效率。减少人工质量测量及录入刀具补偿值的时间,使产能显著提高且能建立产品全过程质量追溯

体系。进一步通过分析检测数据来改善产品加工过程,实现加工工艺过程的自适应闭环控制,也能够保证同一系列产品性能和加工质量的一致性。

4.4 基于工业互联网的数字孪生系统

航空航天产品生产过程存在大量信息“孤岛”、生产过程动态随变、制造空间多维多尺度、无法实现制造过程与业务数据交互等问题,而且加工生产周期长、装配过程涉及环节多、资源齐套要求高、协同管控难度大。基于工业互联网的数字孪生系统如图5所示,通过生产全过程数字孪生体的精确建模,将物理空间、信息空间与业务空间融合形成多维孪生体,实现多维度的三维实时监控。基于工业物联网技术,实现多源异构信息实时采集交互,实时监控车间运行各环节,实现设备状态可视化、产品质量可追踪化、工厂运作透明化和智能化,基于虚实映射建立数据驱动的制造系统智能决策与控制。全要素、全流程、全业务、全服务融合集成的数字孪生技术弥补了柔性制造全过程精准主动协同方面的不足,通过建设多源数据动态驱动的智能透明工厂管控系统,实现了对柔性化生产制造系统的主动感知、动态优化控制和智能决策,显著提高了整机装配生产效率。

5 结束语

智能产品与智能装备在制造、交通、医疗等领域优先落地见效,是国际大企业之间竞争的焦点,更是发达国家之间竞争的焦点。数字化、智能化、网络化制造变革制造业发展模式,必将引起我国制造业发生重大的变革,甚至革命性的变化。劳动力成本迅速上升、训练有素技术工人招工难,与高质量产品、高劳动生产率追求不匹配、不均衡,也成

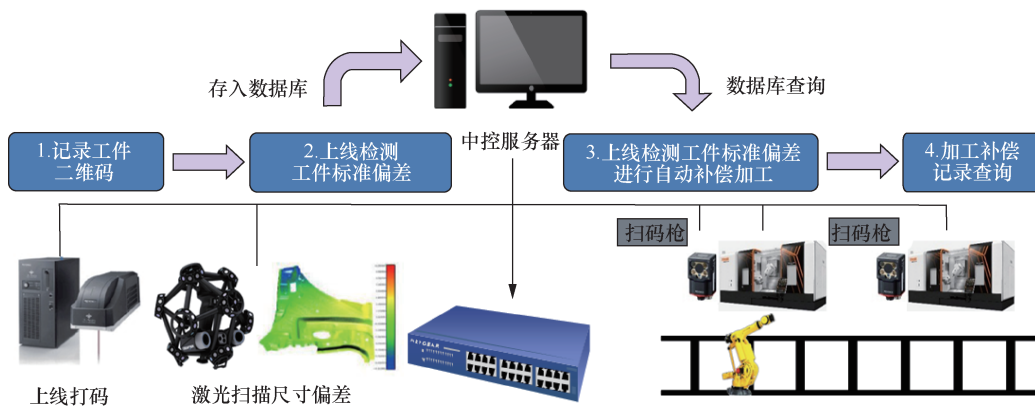


图4 基于测量反馈的自适应加工系统

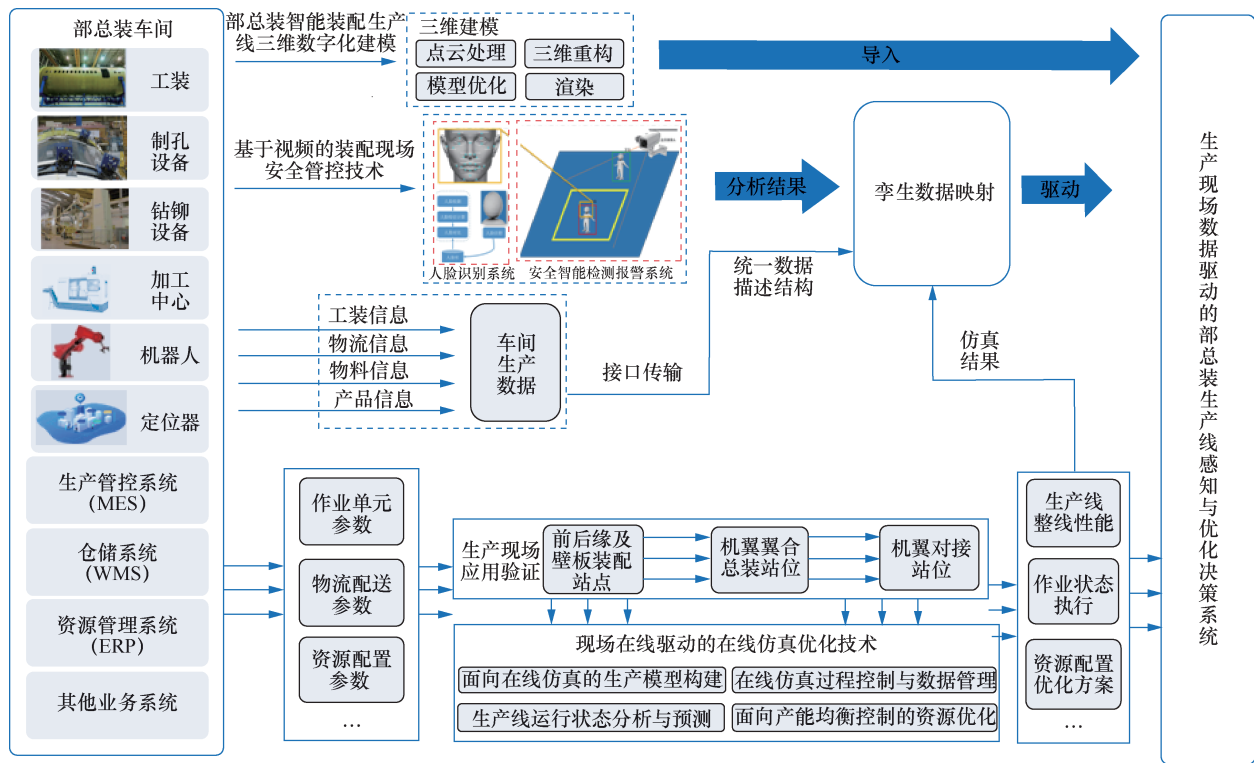


图 5 基于工业互联网的数字孪生系统

为企业发展智能制造、推动制造业转型升级的内生动力。数字化、智能化、网络化制造发展催生制造新原理新方法、新工艺新产品、新装备新系统，带来了市场产品创新、制造技术创新和产业模式创新，数字化、智能化、网络化技术与装备不仅促进传统制造业转型升级，而且促进产业基础高级化产业链现代化，提升国际竞争力。

为了更好地满足高端产品和高端装备批产效能和高质量交付的迫切需求，需要持续研发数字化智能化设计软件系统、智能生产加工制造装备、自动化柔性精密测量装备、工业智能机器人、数字化物流装备、数字化装配技术与装备、远程智能维护与维修技术以及基于工业互联网的数字孪生系统等。推动互联网、大数据、人工智能和制造业深度融合，实现数字化、智能化、网络化设计与结构功能一体化、设计与生产制造一体化、生产制造与检测评价一体化、生产制造与管理运维一体化，构建数字化生产线、离散型智能车间与工厂，生产装备与制造车间数字化、智能化系统集成发展，不同生产制造设备之间、不同制造企业之间实现互联互通和智能制造，实现批量柔性化、智能化、定制化管理运维生产。持续创新离散型智能制造、网络协同

制造、大规模个性化定制、远程运维服务等新模式新业态，推动基于数据驱动的人、机、物全面互联互通与高度智能，从订单管理到设计、生产、销售与服务的制造全流程、全生命周期的数字化、智能化、网络化，促进我国产业迈向全球价值链中高端，更好地培育若干世界级先进制造业集群，推动制造业高质量发展，坚定不移建设制造强国。

参考文献:

- [1] 卢秉恒, 邵新宇, 张俊, 等. 离散型制造智能工厂发展战略[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 44-50.
LU B H, SHAO X Y, ZHANG J, et al. Development strategy for intelligent factory in discrete manufacturing[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 44-50.
- [2] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2018, 4(1): 11-20.
- [3] 谭建荣. 制造业与互联网融合的趋势和实践[J]. 物联网学报, 2018, 2(4): 1-4.
TAN J R. Trends and practices in the integration of manufacturing and the Internet[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(4): 1-4.
- [4] 李培根. 智能制造要夯实“数据”“互联”基础[J]. 智慧中国, 2019(7): 52-53.
LI P G. Intelligent manufacturing should consolidate the foundation of "data" and "interconnection"[J]. Wisdom China, 2019(7): 52-53.
- [5] 姚磊, 中国电子信息产业发展研究院. 2018-2019 年中国工业互联网发展蓝皮书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.

YAO L, CCID. 2018-2019 China's industrial Internet development blue paper[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.

- [6] 刘强. 智能制造理论体系架构研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 24-36.

LIU Q. Study on architecture of intelligent manufacturing theory[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 24-36.

[作者简介]



单忠德(1970-), 男, 博士, 南京航空航天大学研究员, 中国工程院院士, 主要研究方向为数字化机械装备与先进成形制造技术、智能制造技术与装备等。



汪俊(1981-), 男, 博士, 南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数字化制造与检测技术、工业人工智能与数字孪生技术等。



张倩(1981-), 女, 博士, 先进成形技术与装备国家重点实验室研究员, 主要研究方向为装备自动化控制技术及自动化成组成线技术等。