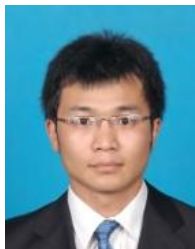


航天大型薄壁结构件智能生产系统研究

郭具涛 杨长祺 李中权 张小龙 钟珂珂

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)



摘要: 以运载火箭箭体结构为生产对象, 以智能化为手段, 进行智能生产系统总体方案设计, 明确支撑箭体结构生产系统实现生产过程智能化的关键要素, 探索航天大型薄壁结构件智能制造生产模式和实现智能生产的可行途径, 以提升产品质量和研制效率。

关键词: 工业 4.0; 智能制造; 数字化制造; 工艺优化设计

Study on Intelligent Production System of Aerospace Large Thin-walled Structure Parts

Guo Jutao Yang Changqi Li Zhongquan Zhang Xiaolong Zhong Keke

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

Abstract: The intelligent production system of aerospace large thin-walled structure parts is studied with the launch vehicle structure as the production object. By designing the overall scheme and defining the key elements of the rocket structure intelligent production, the intelligent manufacturing production mode of large thin-walled structure parts and the feasible way to realize the intelligent production are explored in order to improve the product quality and production efficiency.

Key words: Industrie 4.0; intelligent manufacturing; digital manufacturing; process optimization design

1 引言

德国工业 4.0 概念的提出被认为是以智能制造为核心的第四次工业革命^[1], 引起了广泛的关注。作为我国先进制造的风向标和国家两化融合的重要载体, 智能制造技术被认为是我国产业转型升级和实现跨越发展的关键使能技术^[2]。智能生产系统将信息技术和物理信息融合技术相结合, 以提升产品生产过程智能化水平, 进而支撑建立一个高度灵活的个性化生产模式。航天产品具有小批量、个性化的典型特点, 可充分发挥智能制造的作用, 以航天产品为对象开展智能生产系统建设, 具有广泛的带动性和示范意义。本文是以运载火箭箭体结构为生产对象对智能生产系统在航天领域的一个应用探索。

2 背景与需求



a 贮箱 b 铆接舱段
图 1 运载火箭箭体结构组成

箭体结构(图1)是运载火箭最为关键的结构部件, 由推进剂贮箱、铆接舱段、整流罩等部分构成。推进剂贮箱作为运载火箭的主承力结构, 是一种大尺寸、薄壁高强铝合金焊接结构, 具有大尺寸、轻质、薄壁、复杂等典型特征。现阶段箭体结构制造技术流程如图2所示, 虽然制造过程逐步实现了制造设备的单机自动化, 但需要通过人工干预、离线仿真与自动化设备的方式相结合, 来保证当前运载火箭的高质量生产。同时, 面对我国运载火箭快速增长的发展需求,

航天制造业当前的生产方式面临严峻的挑战。

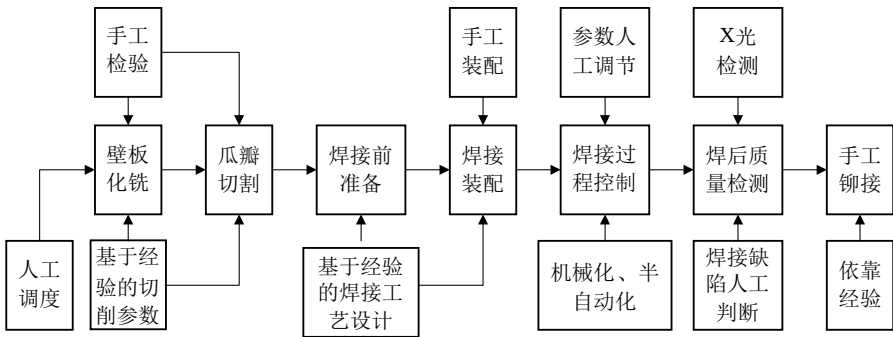


图 2 现阶段箭体结构制造技术手段

智能生产系统以智能化为手段，以数字化物流、专家知识库、生产过程实时监控、工艺过程自适应控制、在线高精度检验、设备故障诊断等智能功能为建设内容，突破工艺自适应控制、制造质量控制、知识获取与应用等关键技术，改变传统制造模式，可显著提升产品质量一致性、增强制造系统柔性、提升制造效率。因此，以运载火箭箭体结构大型薄壁结构件为对象，开展智能生产系统研究具有迫切的需求和典型的现实意义。

3 智能生产系统架构

航天大型薄壁结构件智能生产系统架构如图3所示，底层是由智能装备、车间网络、数据采集系统、

实时数据管理系统和生产仿真系统组成的面向航天复杂薄壁结构件生产的信息物理融合系统；中间层是基于知识和实时数据的敏捷可组态 MES 系统和 ERP 系统，作为实时贯通各个环节的交集点，向上能够衔接顶层知识库/专家系统/大数据挖掘，向下又能够与底层信息物理融合系统实时交互；顶层是由知识库、专家系统、大数据挖掘系统组成，通过知识积累和专家推理，优化工艺参数，实现工艺的优化设计。

航天大型薄壁结构件智能生产系统主要由生产过程自适应控制、知识库与专家系统、实时监控与数据采集、数字化物流以及敏捷可组态 MES 系统等要素组成，通过各要素集成应用，实现箭体结构生产系统运行优化，进而支撑生产模式向智能生产模式转变。

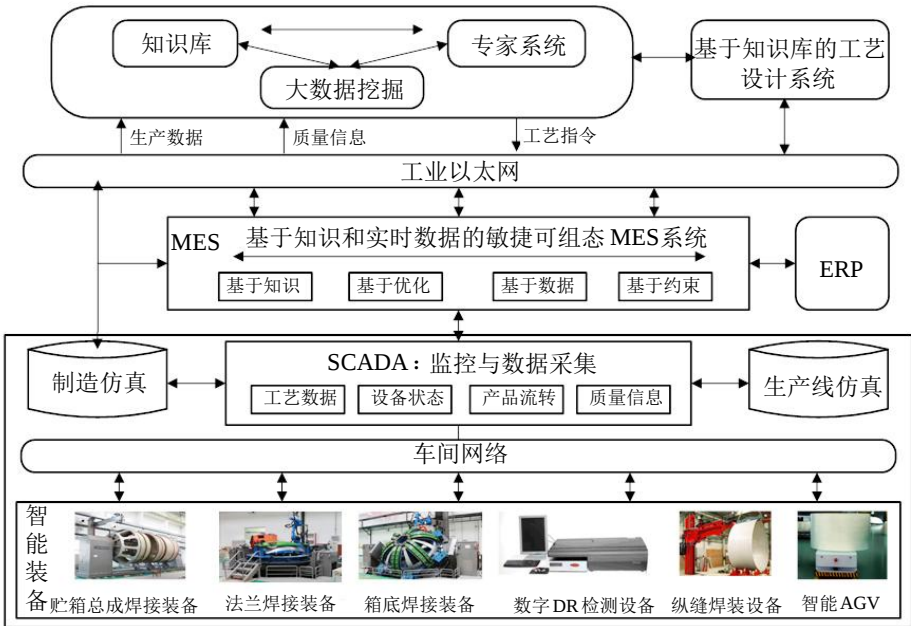


图 3 航天大型薄壁结构件智能生产系统架构

4 智能生产系统要素

4.1 生产过程自适应控制

生产过程自适应控制是智能生产系统的核心技术,面向箭体结构生产过程的自适应控制涵盖机加、焊接、铆接和检测等工艺环节,通过在自动化设备上集成自适应控制智能功能部件,可有效减少生产过程中人工干预以及对成熟工艺人员的依赖,并可保证产品质量和提升制造效率。

机加环节,在龙门五轴加工装备上集成壁厚在线高精度检测系统,实现壁板加工过程的在线高精度实时壁厚测量,以精确控制壁板的厚度;焊接环节,在自动化焊接设备上增加焊接路径自适应控制、焊接成形自适应控制等智能功能部件,实现焊接路径自动跟踪和焊接工艺参数实时自动调节;铆接环节,在铆接设备上增加基于测量数据的 NC 加工补偿和铆钉自动排列与卡钉识别-自动送钉功能,显著提高铆接效率和自动化水平;检测环节,在数字 DR 检测设备上增加缺陷自动识别智能功能,实现缺陷的自动识别与定性分析。

4.2 知识发现与积累

制造活动中包含大量的数据、信息、经验和知识,

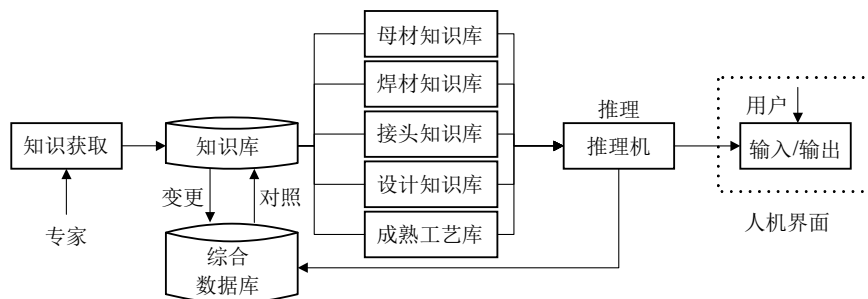


图4 焊接工艺优化专家系统结构

4.3 敏捷可组态 MES 系统

MES 作为智能生产系统的重要支柱,需要与信息物理融合系统进行无缝对接,实现生产过程的横向和纵向集成,并增加现场实时分析、协同智能决策等智能功能,同时,随着车间智能化和精细化管理水平的不断提高, MES 系统还需实现组态化。

基于知识和实时数据的敏捷可组态 MES 系统,在原有基础上增加实时信息管理和以实时数据为基础的生产调度平台。实时信息管理包括过程数据接口、实时数据库、过程数据分析工具、过程可视化组态工具等内容。基于实时数据的生产调度平台为生产

它们是专家智能在制造活动中的结晶,是企业发展与创新的重要基础。制造技术追求的目标之一就是更加有效、充分地利用这些数据、信息、经验和知识,不断提高制造活动的智能水平。

航天大型薄壁结构件智能生产系统通过建立高速切削专家知识库和焊接工艺知识库与专家系统,对生产过程知识进行挖掘发现和积累复用。高速切削专家知识库主要由高效切削加工基础数据库、高效加工工艺优化实例数据库、优化切削参数数据库和高效切削加工专家数据库组成,通过人工智能理论和优化方法,为箭体结构壁板的高速高效加工生产直接提供指导。焊接工艺知识库与专家系统由数据库及管理系统、知识库及管理系统、模型库、焊接工艺设计专家系统及用户权限管理五大部分组成。工艺知识库实现焊接知识的积累复用,摆脱对经验知识的高度依赖,同时也可以向焊接工艺优化专家系统提供充分的数据支撑;焊接工艺优化专家系统通过获取母材、焊材、接头等焊接工艺知识,逐步积累形成知识库,通过基于实例的优化设计或遗传算法实现焊接工艺推理功能,将工艺推理形成的焊接指导文件通过人机界面展现给工艺人员,并进行系统闭环反馈,实现焊接工艺的持续优化,系统结构如图4所示。

调度人员提供强大的辅助调度功能。平台通过对比、分析、跟踪、监视等手段完成对生产过程参数的监控和实时操作以及对重要设备运行状态、生产实时进度、实时工艺参数等的监控;生产调度优化以生产现场的实时数据为依托,通过大数据分析技术分析产品的实时生产质量,并借助知识库、专家系统等工具,给出设备运行参数和工艺参数等的动态优化结果,完成对生产过程智能优化。

4.4 数字化物流

自动导引车系统 (AGVS, Automated Guided Vehicle System) 具有自动化程度高、安全、灵活等特

点, 广泛应用在企业自动化生产、仓储系统和物流配送中心等。

为了实现运载火箭结构件在加工过程中壁板、瓜瓣、箱底、筒段的智能配送, 系统采用磁点导航自动导引小车(背驮式)。AGV 小车输送系统不仅可以满足车间的生产要求, 大大提高劳动生产率及物流系统的自动化水平, 提高物料搬运过程中各个环节的准确性, 降低生产成本, 增强生产过程中的灵活性, 而且还可对智能生产系统的物料搬运信息进行动态跟踪管理, 以适应现代化的管理方式。

4.5 SCADA

监控与数据采集(SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition)系统利用计算机监督控制与数据采集系统对测控点分散的各种过程或设备进行实时数据采集, 以及全面监控生产过程, 为生产系统优化提供必要且完整的数据支持^[3]。

如图5所示, 面向航天大型薄壁结构件智能生产的监控与数据采集系统主要涉及三个方面: 生产现场信息实时采集针对车间现场数控机床通讯模块、工控上位机、OPC 服务、DNC 软件系统等前端监测接口, 利用车间局域网, 将网络延伸到各设备与质量检测节点, 形成面向不同设备不同接口的数据采集方法, 实现对不同厂家设备运行参数的数据整合; 生产过程实时监控一方面与生产现场信息实时采集系统相衔接, 汇总、预处理、显示与分析生产现场的各项数据, 另一方面为后端的设备故障诊断系统、产品数据包生成系统以及工艺数据库与专家系统提供设备、材料、物流过程的实时信息, 便于生产过程的在线调整; 设备故障诊断与预警主要用于实时监测生产系统内加工设备的运行状态、诊断故障发生的原因、预测设备故障发展趋势, 并给出预防性维修策略, 防止意外故障和失效。

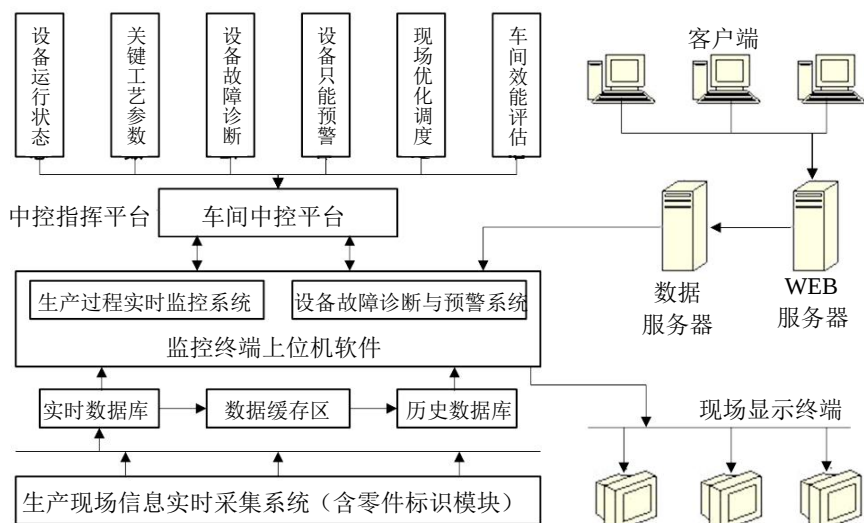


图5 航天大型薄壁结构件智能生产的监控与数据采集系统

4.6 生产过程大数据分析

生产过程大数据分析是通过特定的算法对生产过程中的数据进行挖掘、分析归纳, 从而揭示数据中隐含的规律和发展趋势, 为决策提供支撑依据^[4]。

航天大型薄壁结构件智能生产系统生产过程大数据分析围绕箭体结构的生产业务流程, 基于车间实时互联信息, 考虑生产过程中的复杂、大规模、动态随机等特性, 建立生产状态统计模型, 通过模块的配置实现车间生产计划、工艺、质量、物资、进度、工况等全业务过程管理的数字化、集成化与实时化, 提高业务信息的获取与处理的速度和准确性, 并建立生产状态统计模型, 实时分析与评估车间运行, 全面提升型号产品的快速响应制造能力和精细化管理水平, 为车间运行实时优化提供数据支撑, 并为智能化车间

管理手段和执行方式的创新提供基础。同时, 根据实时检测的生产状态, 实时调度优化生产计划, 使车间加工设备实现实时的、精确的作业调度, 最大限度减少设备的空闲时间。

5 预期效果分析

基于航天产品的高质量要求, 以运载火箭箭体结构为对象, 建立航天大型薄壁结构件智能生产系统, 对实现从人工向自动化、智能化的转变, 以及解决高密度发射时期的产品质量稳定性不足、产能不足、柔

(下转第22页)