

多品种变批量产品智能生产线 应用框架*

于成龙¹,侯俊杰¹,陆 菁²,张 伟¹,蒲洪波¹,郭旭凯¹

(1. 中国航天系统科学与工程研究院,北京 100048;

2. 中科信工程咨询(北京)有限责任公司,北京 100039)

[摘要] 为推动智能制造技术在多品种变批量产品生产中的应用,研究了智能生产线的应用框架,提出了智能生产线的应用流程和体系架构,梳理了重点内容和关键技术,对于发展智能制造技术、构建智能生产线和落实智能制造在生产中的应用具有较好的参考价值。

关键词: 多品种;变批量;智能制造;智能生产线;应用框架

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.06.073



于成龙

博士/博士后,高级工程师,从事先进制造技术研究、规划及应用,共发表文章 20 余篇,曾获国防科技进步一等奖和航空工业科技一等奖等。

当前,随着“中国制造 2025”的深入推进,智能制造在研究和应用方面均取得了较大进展,大量文献阐述了智能制造内涵、架构^[1-4]和关键技术^[5-6],探索、研究及初步实践了智能工厂^[7-10]和智能生产线。生产线是企业进行生产活动的基本组织,智能生产线是发展智能制造的基础载体,近年来很多学者围绕智能生产线做了大量的研究工作,尤其在具备多品种变批量特点的航空、航天和船舶等离散制造领域。在智能生产线总体技术研究及应用方面,苕书梅^[11]和宋利康等^[12]围绕飞机脉动总装生产线的建设,研究了总体架构、系统组成和主要内容,探讨了飞机脉动智能生产线的内涵,并在具体生产线上进行了应用验证;单继东等^[13]围绕航空发动机生产线建设需求,研究了智能制造的内涵及设计了机械加工智能生产线,阐述了其内容、关键技术和实现方法;王庆等^[14]探讨了典型壳段

加工智能生产线的建设思路以及关键技术,并提出了典型壳段加工智能生产线总体框架与建设方案;秦浩然等^[15]结合船舶喷涂的需求,研究并打造出一套以现场总线控制技术以及先进无线通信技术为控制核心的船舶智能化涂装生产线。在智能生产线单项技术方面,孙元亮等^[16]开展了基于物联网的飞机移动总装生产线管理技术研究,并开发了原型系统;丁涛^[17]和何军红等^[18]分别开展了基于大数据的生产线管控和生产线健康管理等研究,提出了生产线管控及维护的方法;王文理等^[19]对智能制造的工艺特点、作用及重要性进行了探讨,并对发展智能制造工艺技术提出了建议;杜彬等^[20]研究了工艺及装备在智能生产线的作用,指出了工艺和装备的关键技术并在实际中进行了应用;刘锡朋等^[21]研究了多工位智能生产的物流管控技术,并成功应用于防爆弹底火自动装配生产线和

* 基金项目: 国防基础科研计划 (JCKY2017203B071, JCKY2016605B006, JCKY2017203C105)。

延期管自动装压药生产线；潘志豪等^[22]构建了多目标多约束的E类飞机总装脉动生产线平衡问题模型，并研究了求解算法，为优化装配流程和提升装配效率提供了基础方法。另外，针对多品种变批量产品的系统设计和生成问题，楼洪梁^[23]和周宏明等^[24]分别研究了多品种变批量可重构制造系统的设计方法和制造单元的生成方法，建立了相关模型并开展了应用验证。

智能制造的研究和应用是一个循序渐进的发展过程，本文在借鉴前人研究成果的基础上，围绕具备多品种变批量特征的军工产品的未来发展需求，进一步探讨该类智能生产线的应用框架。

总体框架

多品种变批量产品生产所需生产线的显著特点是具备可重构性，即根据工艺规程将车间制造资源进行重组并形成生产线，以满足生产要求，其中工艺规程是进行生产线设计的牵引和依据。智能生产线的基本应用流程如图1所示。

(1) 根据生产计划得到工件加工安排，并基于工艺规程，统筹车间制造资源进行生产线设计，进而形成虚拟智能生产线；然后基于智能生产管控系统完成生产线运行过程仿真和优化；基于优化的虚拟生产线与后续说明的实体生产线进行融合，形成智能生产线数字孪生模型。

(2) 根据仿真优化结果构建实体智能生产线，其中，围绕机加、焊接、钣金、复材等关键工序采用数控设备的制造，构建数控设备及手动工位物理空间不变的逻辑实体生产线，而线缆和装配等采用柔性化自动工装和手工作业相结合的制造，进行位置调整形成物理实体生产线（或基于原有实体生产线进行局部调整和改造形成新生产线）。

(3) 基于工艺规程和生产线进

行智能生产加工，其中智能生产管控系统负责对工位和物流等进行管理，以及对生产实时数据的采集、分析和决策，并基于决策形成的优化方案对生产过程进行优化调整，保证高效率 and 高质量完成生产任务。

根据智能生产线业务流程形成的系统架构如图2所示，包括基础

层、集成层、业务层和应用层。基础层主要包括车间的制造资源及基本设施，如数控加工设备、智能物流设备、数控检测设备、柔性自动工装、工业互联网和智能管控系统等；集成层基于工业互联网完成基础层各类资源的集成，主要实现基于工业互联网的加工工位（含检测和检验）、生产过程监控、物流和生产管

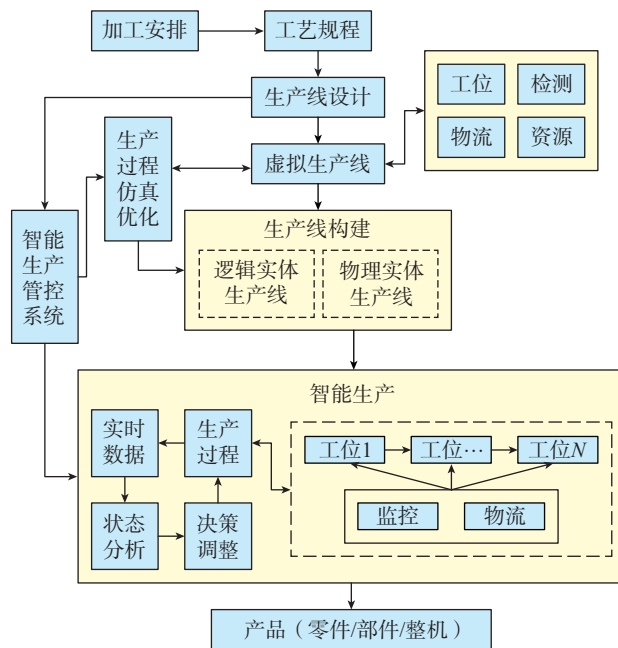


图1 智能生产线应用流程

Fig.1 Intelligent line application process

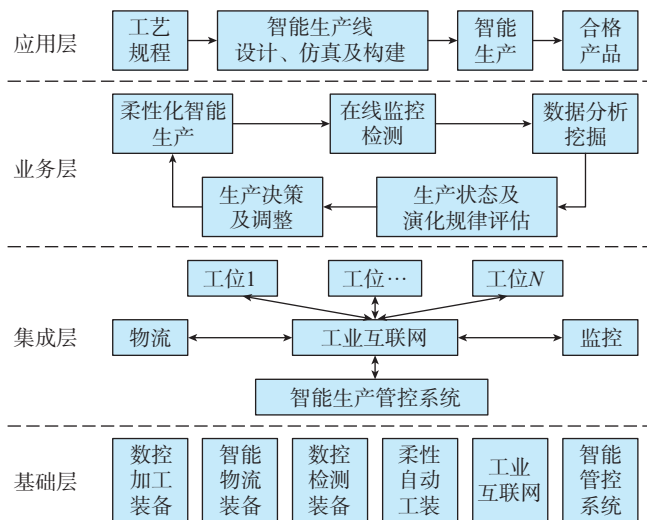


图2 智能生产线系统架构

Fig.2 Intelligent line system architecture

控系统的互联互通,保证生产数据的实时采集及集成管理和控制;业务层说明了基于集成层实现的业务功能,表征了智能生产线的基本生产过程,体现了“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的智能制造特征;应用层基于集成层及业务层,主要表征为以工艺为牵引的多品种变批量产品智能生产线的构建思路及应用流程。其中,智能生产线构建涉及的主要内容包括智能生产线设计优化、智能制造集成单元构建、物料智能配送和生产过程分析及管控。

主要内容

1 智能生产线优化设计

围绕多品种变批量的生产特点,生产线需要具备可重构性,即根据不同种类和不同批次的产品的生产安排,以各自的工艺规程为依据设计、调整和组合形成新的生产线以完成加工任务。其中,针对具体生产线的优化设计流程如图3所示。

(1)以车间的生产计划和加工安排为源头,以工艺规程为牵引,确定具体的工艺流程,整合车间的制造资源和安排工位,然后对工位进行功能建模并基于工艺流程完成生产线加工路线建模,初步确定加工方案。

(2)根据加工方案生成物料需求信息和进行物料配送路线设计,然后结合生产线运行计划及实际生产进度完成物料配送过程的分析和优化,确定配送方案并进行配送过程建模。

(3)基于以上工作,建立生产线运行仿真模型,并采用基于数据分析挖掘、经验公式计算和实际测算相结合的方法确定工序的加工工时,形成工序作业标准时间;综合考虑车间整体生产情况,完成各工序加工节拍平衡为目标的智能生产线运行过程优化和检验生产线的

运行情况,确定加工方案,并根据优化结果进一步进行生产线设计及建设。

2 智能制造集成单元构建

智能生产线由诸多工位组成,关键工位的功能由智能制造集成单元实现,其组成与逻辑如图4所示,主要由精准执行机构、在线采集系统和分析决策系统组成,具备自动装料、柔性夹持、精准定位、加工执行、在线检测、实时分析和决策调整等功能,其柔性夹持部分主要实现不同尺寸零件的可靠装夹,满足多品种变批量的生产需求。其中,精准执行机构包括机器人上下料、柔性自动装夹设备、自适应定位工

装、数控加工/检测设备和在线监控设备等,实现制造(含装配)过程的自动上下料、加工件的柔性装夹、工装/夹具状态的自动判断及自动定位调整、工件的精确加工、加工过程实时检测、加工完成后的自动检验,以及生产状态的实时监控等;在线采集系统将“精准执行机构”产生的加工参数、质量数据、物流数据、加工进度和设备运行参数等数据进行采集;分析决策系统将上述采集的数据进行分析,围绕现有加工环境下的加工参数是否满足质量要求、工装的夹持力和位置等是否满足加工要求、单元所含的设备是否运行平稳或存在问题等

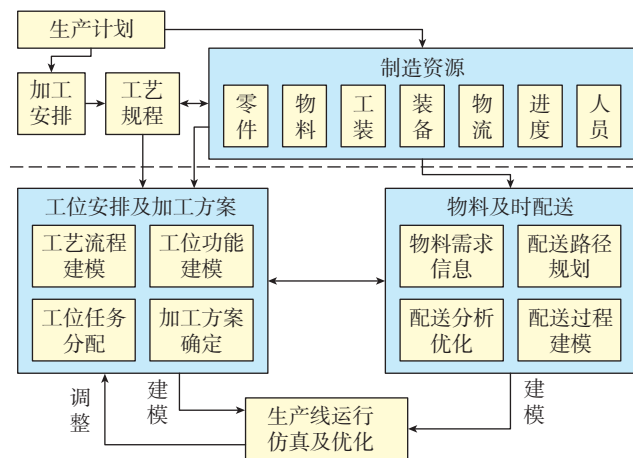


图3 智能生产线设计优化

Fig.3 Intelligent line design and optimization

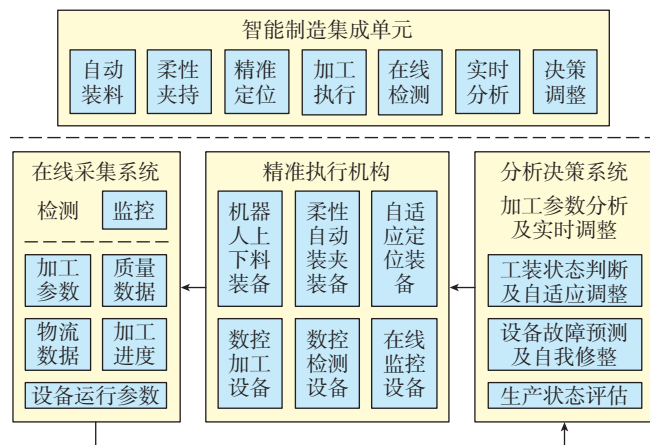


图4 智能制造单元组成与逻辑

Fig.4 Intelligent manufacturing unit composition and logic

以及当前制造单元是否按时完成加工任务等进行判断和决策,并针对存在的问题形成解决措施和及时调整,实现工艺参数分析及实时调整、工装状态判断及自适应调整、设备故障预测及自我修整和制造单元的生产状态评估等。

3 物料智能配送

物料智能配送实现制造过程物料及时准确配送,以及配送过程物料状态、配送装备及辅助设施的实时跟踪、配送过程分析及决策等,如图5所示,以制造过程的物料需求为输入,以“物料配送管控系统”为管理核心,实现配送路径的仿真优化、物料准备和配送管理、配送路径仿真优化和配送指令下达、配送过程实时监控、异常事件分析及决策等。其中,“物料配送管控系统”包括出入库管理、物料准备情况监控、配送过程监控和配送状态分析决策等;“智能物流条件建设”为智能物流提供基础设施,包括数字化立体仓库、物料智能配送车和配送路径导引系统(如RFID和磁条导引配送车)等;“物料配送路径仿真优化”根据“物料配送管控系统”指令和车间环境模型完成配送路径规划及仿真优化,包括取料仿真、路径规划、配送过程仿真和工位卸料仿真等;“车间环境建模”根据车间实际进行建模,为配送路径规划及优化提供数字化模型,包括厂房环境及布局、车间制造资源模型、物料配送设备模型和物料配送规则模型等。

4 生产过程分析及管控

生产过程分析管控逻辑如图6所示,以车间为管理单元对生产线进行集中管控和资源统一配置。

首先,通过采集系统对车间各生产线和信息化系统的数据进行感知和采集,主要包括生产计划、工艺规程、生产执行、制造资源、扰动情况、质量检测、物料物流和设

备运行等数据;然后,提取其中有价值的数据进行清洗和融合,建立基于数据挖掘的生产进度、加工质量和设备故障等关键要素和价值

数据之间的关联关系,进一步建立基于时序的生产进度、加工质量和设备故障随时间的演化规律模型并对未来发展规律进行科学预测;最

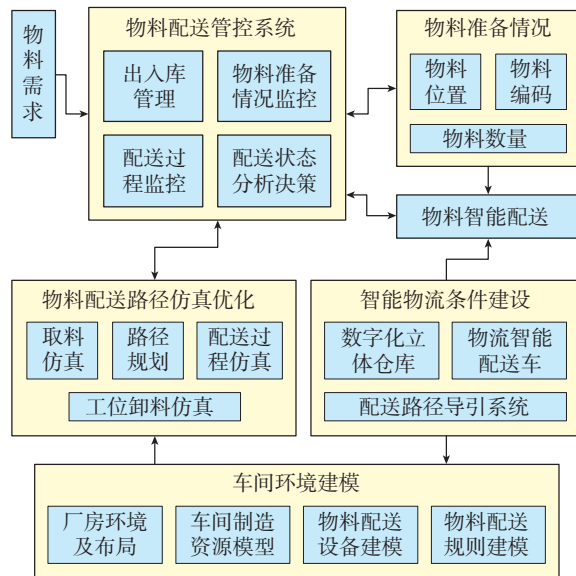


图5 智能物流系统逻辑

Fig.5 Intelligent logistics system logic

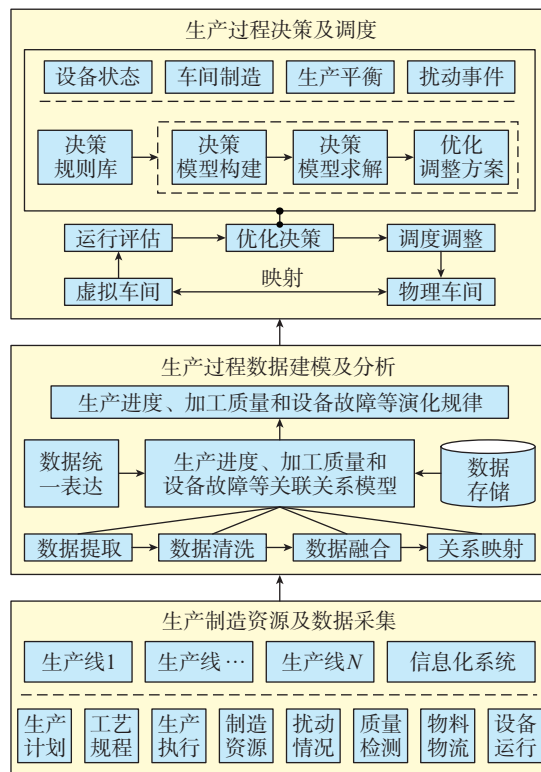


图6 生产过程分析管控逻辑

Fig.6 Production process analysis and control logic

- Integrated Manufacturing System, 2016, 22(9): 2108-2117.
- [2] 于成龙, 侯俊杰, 赵颖, 等. 多品种变批量产品智能制造系统框架[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 98-102.
- YU Chenglong, HOU Junjie, ZHAO Ying, et al. Intelligent manufacturing system architecture of multi-varieties and variable-batch products [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 98-102.
- [3] 李清, 唐赛璘, 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, 2016, 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, 2016, 24(3): 539-549.
- [4] 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.
- [5] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 26(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 26(1): 1-18.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 陈明, 刘江山, 李杰林, 等. 基于信息物理系统新特性的智能工厂部署策略研究[J]. 中国工程机械学报, 2017, 15(5): 383-388.
- CHEN Ming, LIU Jiangshan, LI Jielin, et al. Research of smart factory deployment strategy based on new characteristics of cyber-physical system[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2017, 15(5): 383-388.
- [9] 李羿辉, 朱海平, 朱康俊. 中低压开关柜行业智能工厂体系架构标准研究[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 25(6): 1216-1223.
- LI Yihui, ZHU Haiping, ZHU Kangjun. Smart factory architecture standard for and low-voltage switchgear assembly industry[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 25(6): 1216-1223.
- [10] 单继东, 曹增义, 王昭阳. 航空发动机制造企业智能工厂建设[J]. 航空制造技术, 2018, 61(15): 70-77.
- SHAN Jidong, CAO Zengyi, WANG Zhaoyang. Smart factory construction research of aero-engine manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(15): 70-77.
- [11] 裴书梅, 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.
- [12] 宋利康, 郑堂介, 朱永国, 等. 飞机脉动总装智能生产线构建技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(1/2): 28-32.
- SONG Likang, ZHENG Tangjie, ZHU Yongguo, et al. Construction technologies of intelligent pulse production line for aircraft final assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1/2): 28-32.
- [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] 王庆, 陈宁, 刘辉, 等. 航天典型壳段加工智能生产线总体方案探索[J]. 航空制造技术, 2017, 12(6): 57-60.
- WANG Qing, CHEN Ning, LIU Hui, et al. Exploration on overall scheme of intelligent production line for typical shell machining in aerospace[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017, 12(6): 57-60.
- [15] 秦浩然, 王毅, 钟晴威, 等. 船舶智能涂装生产线研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(4): 288-292.
- QIN Haoran, WANG Yi, ZHONG Qingwei, et al. Research on ship intelligent coating production line [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(4): 288-292.
- [16] 孙元亮, 张超. 基于物联网的飞机移动总装生产线管理关键技术[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 30-37, 60.
- SUN Yuanliang, ZHANG Chao. Analysis of aircraft modular assembly process design in main manufacturer-supplier patterns[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 30-37, 60.
- [17] 丁涛, 齐建军, 杜林, 等. 基于工业大数据的柔性生产线智能控制模型[J]. 信息技术与标准化, 2015(7): 15-17.
- DING Tao, QI Jianjun, DU Lin, et al. Intelligent control model of flexible production line based on industrial big data[J]. Information Technology & Standardization, 2015(7): 15-17.
- [18] 何军红, 刘赛, 薛文琦. 基于PHM的数字化生产线健康管理体系统结构研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(6): 5-8, 17.
- HE Junhong, LIU Sai, XUE Wenqi. Research on health management system structure of digital production line based on PHM [J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(6): 5-8, 17.
- [19] 王文理, 康永峰. 工艺在智能制造

生产线设计与运行控制中的重要作用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 48-51, 62.

WANG Wenli, KANG Yongfeng. Development of production line simulation technology and its application in aeronautical manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 48-51, 62.

[20] 杜彬, 李娜泽. LTCC 智能生产线关键技术研究[J]. 电子与封装, 2018, 18(7): 39-41.

DU Bin, LI Shanze. The research of the key technology on intelligent manufacturing of LTCC[J]. Electronics & Packaging, 2018, 18(7): 39-41.

[21] 刘锡朋, 王国辉, 何川. 面向智能制造的多工位自动生产线物流控制技术[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 173-175.

LIU Xipeng, WANG Guohui, HE Chuan.

Logistics control technology of multistation automation production line for intelligent manufacturing[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(8): 173-175.

[22] 潘志豪, 郭宇, 查珊珊, 等. 基于混合优化算法的飞机总装脉动生产线平衡问题[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 26(10): 2436-2447.

PAN Zhihao, GUO Yu, CHA Shanshan, et al. Aircraft pulsating assembly line balancing problem based on hybrid algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 26(10): 2436-2447.

[23] 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 multi-product and change demand[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(13): 1360-1365.

[24] 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, 18(12): 2589-2595.

ZHOU Hongming, ZHOU Yuqing, CHEN Yarong, et al. Methodology of manufacturing cell formation for multi-product and change demand production[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 18(12): 2589-2595.

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研究及应用, E-mail: 13801174416@139.com。

Application Architecture of Intelligent Line for Multi-Variety and Variable-Batch Products

YU Chenglong¹, HOU Junjie¹, LU Jing², ZHANG Wei¹, PU Hongbo¹, GUO Xukai¹

(1. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China;

2. Zhongkexin Engineering Consulting (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100039, China)

[ABSTRACT] To promote the application of intelligent manufacturing technology in the producing process of multi-variety and variable-batch products, the application architecture of intelligent line is studied. The application process and system architecture of the line are put forward, and the key contents and technologies are sorted out. It is a good reference value for the development of intelligent manufacturing technology, the construction of intelligent line and the implementation of intelligent manufacturing application in production.

Keywords: Multi-variety; Variable-batch; Intelligent manufacture; Intelligent line; Application architecture

(责编 大漠)