

doi: 10.7690/bgzdh.2019.02.007

# 面向军工行业数字化生产线建模仿真与优化技术

徐曼菲, 吴跃, 邱枫

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造技术研发中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对军工行业数字化生产线大批量、多品种、混线生产模式中存在的排产调度灵活性差、布局限制资源效率发挥、过程状态掌控难等问题, 提出一种适用于军工行业的数字化生产线建模仿真与优化技术解决方案。结合国内外生产线仿真发展趋势, 分析军工企业产品生产线主要现状, 依据军工行业生产线场景, 构建了生产系统仿真模型及仿真总体技术方案, 得出我国新一代军工生产线工艺及物流优化布局。结果表明: 该方案能提高整体生产效率, 缩小装备生产制造环节的短板, 对军工制造行业向智能制造的转型升级有一定的实用意义。

**关键词:** 生产线; 快速建模; 仿真优化; 实时数据融合

**中图分类号:** TP391; TP278 **文献标志码:** A

## Modeling Simulation and Optimization Technology of Digital Production Line for Military Industry

Xu Manfei, Wu Yue, Qiu Feng

(Research & Development Center of Intelligent Manufacturing Technology, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aimed at the flexibility of production scheduling of large batch, multi variety and mixed line production mode in digital production line of military industry is poor and the layout restricts the efficiency of resources, the process state is difficult to control, a solution for modeling, simulation and optimization of digital production line for military industry is proposed. Combining with the development trend of production line simulation at home and abroad, the main status of the production line of the military enterprise is analyzed, according to the scene of the production line of the military industry, the simulation model of production system and the general technical scheme of simulation are constructed. The technological and logistics optimization layout of the new generation of military production line is obtained in China. The results show that the scheme can improve the overall production efficiency, shorten the short board of equipment manufacturing, it has some practical significance to the transformation and upgrading of the military manufacturing industry to the intelligent manufacturing.

**Keywords:** production line; rapid modeling; simulation optimization; real time data fusion

## 0 引言

智能工厂建设是我国制造强国战略的重要组成部分。《中国制造 2025》明确提出加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展, 把智能制造作为两化深度融合的主攻方向, 在重点领域试点建设智能工厂及数字化车间<sup>[1]</sup>。

有些军工数字化生产线制造过程属于典型离散制造过程, 既需要进行成熟型号的批量化生产, 又需要进行科研型号的小批量试产, 使变产成为军工生产企业一种典型的特征<sup>[2]</sup>。科研型号试产的小批量、多品种特征给企业生产组织过程中的制造资源配置、工序能力与负荷平衡、同步性制造节拍控制、成套性节点计划、制造成本控制与优化等方面带来困难, 导致制造周期的延长、资源的浪费与生产成

本的增加。企业亟需解决科研型号的批量化生产问题, 实现批量生产模式与小样试产模式之间的敏捷切换。

因此, 笔者面向军工行业智能制造新模式的需求, 紧密围绕“变批量、多品种、混线生产”模式中存在的突出问题和新产品研制的制造保障要求, 提出一种适用于军工行业的数字化生产线建模仿真与优化技术解决方案, 实现资源高效利用、生产线优化布局、制造能力平衡等, 尽可能减少生产过程中的不确定因素, 以提升生产线高效、柔性生产能力, 为建立军工行业智能制造新模式提供支撑。

## 1 国内外现状分析

### 1.1 国外现状

从 20 世纪 90 年代开始, 国外研究人员在生产

收稿日期: 2018-11-05; 修回日期: 2018-12-28

作者简介: 徐曼菲(1991—), 女, 重庆人, 硕士, 助理工程师, 从事数字化管控、生产线仿真研究。

系统仿真建模与模型优化方面进行了大量的研究与探索,并提出很多方法,主要可以归纳为模型的概念设计及数据驱动建模、面向模型结构控制的建模 2 类。美国堪萨斯州立大学 Azadivar 和 Tompkins 于 1999 年针对具有离散、定性决策变量和模型结构变化的问题,提出了一种 GA 和仿真模型自动生成器相结合的仿真优化方法<sup>[3]</sup>。2004 年,比利时 Allaoui 等利用仿真优化技术研究了具有维修时间约束的混合流水车间调度问题<sup>[4]</sup>。2005 年,法国 Cergy 大学的 Fontanili 等研究了装配线运行管理问题<sup>[5]</sup>。美国密西西比州立大学的 Greenwood 等建立了仿真优化决策支持系统(DSS),使之可以根据车间当前状态及不同性能评价指标自动选取性能较好的调度规则<sup>[6]</sup>。洛克希德·马丁公司对 F-35 飞机移动式总装配线及其各个大部件的集成装配线进行了整体的全 3 维仿真,优化了生产节拍,分阶段提升装配生产能力,2016 年达到了每天交付一架的水平<sup>[7]</sup>。波音公司在波音 787 飞机移动总装线建设之前就采用虚拟现实技术对整个装配线进行了系统仿真和优化,对方案和工艺进行精确优化,减少返工<sup>[8]</sup>。法国的斯奈克玛(Snecma)公司通过生产线的仿真优化,实现了 CFM56 发动机的脉动装配,将装配周期减少了 35%<sup>[9]</sup>。2016 年,Kitazawa 等利用工人位置数据的实时模拟器来支持管理者在制造系统中的决策,实时仿真结果证明其有效地减少了预测误差,提高了管理层决策效率<sup>[10]</sup>。

## 1.2 国内现状

由于我国对仿真工具的研发和引进相对较晚,造成我国对生产系统仿真软件的应用还处于初级阶段,目前主要应用于汽车、物流运输、电子等行业<sup>[11]</sup>。在汽车行业中,上海大众成功应用生产系统仿真软件对发动机生产线的工艺设计和装配线控制进行了优化;一汽大众则成功应用系统仿真软件完成了车身、底盘装配生产线的设计规划、物流分析、工艺布置优化等工作<sup>[12]</sup>。在电子行业,深圳华为股份有限公司利用 eM-Plant 仿真软件成功完成了通信设备各生产线的优化设计<sup>[13]</sup>。目前国内造船行业也开始着手引入系统仿真软件进行相关的生产计划调度优化设计,同时结合车间物联网技术进行生产线建模仿真,从而通过利用生产线实时和历史生产数据,提高系统性能优化能力,以及对异常状况的预知、响应和判断能力。国内成飞、沈阳机床、华中数控等企业均对现有的制造车间进行了智能化改造,诸多学者和专家亦对智能车间/工厂的

实时仿真系统架构和软硬件配置进行了详细分析和设计。然而,针对具有单件小批量、定制化、高端复杂等特点的军工行业传统装备制造车间,尚缺乏具体的生产线建模仿真与优化实施方案和相应的示范应用。

## 2 存在的问题

目前,部分军工企业产品生产线零部件加工仍然采用人工加单机的生产模式,操作人员经验、个人技能水平对产品的制造精度、质量一致性影响明显,这种方式虽可基本满足现阶段的生产技术要求,但需经过操作人员的反复调整、校正,过程繁复且受人工因素影响较大。主要表现为:

1) 生产过程中信息化手段缺乏,自动化水平低,生产效率低下;手工作业导致主要零部件加工过程定位准确度不高,加工精度得不到保证,最终影响产品装调质量与装调周期,装配型架均为专用工装,生产线柔性化程度低,难以适应多品种产品共线生产;

2) 生产线中装备数控化水平参差不齐,自动化水平亟需全面提升,新老数控装备混杂,单机与制造单元装卸载依赖人工作业,尚未实现车间物流与在制品存储的自动化;

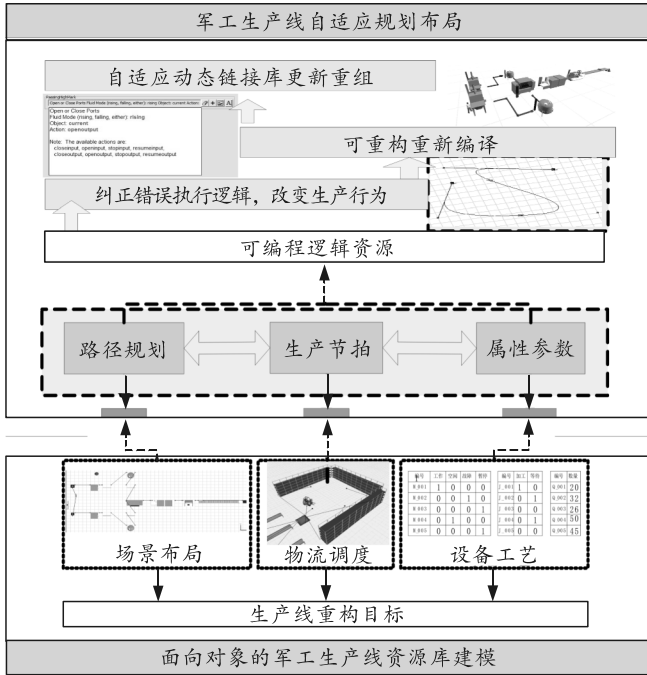
3) 欠缺适应微差异工件成组的方法与理论,以及面向工艺特征的制造单元构建方法与重构技术,对数字化生产线的仿真仅停留在传统制造行业;

4) 生产管控的智能化程度低,所制定的生产计划极难实现系统性的协调与优化,生产过程仍然会出现“生产计划不合理、换产周期长且难度大、生产线设备组负载不均、部分设备稼动率偏低”等生产失衡现象,支撑“共性工艺批量化生产模式”的智能资源调度与计划排产系统缺位。

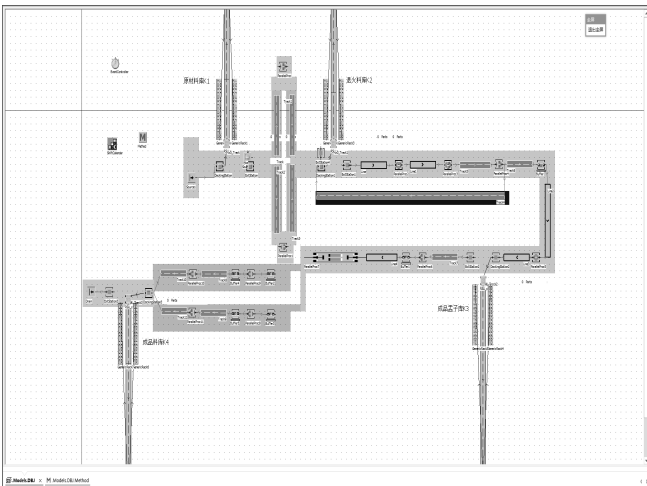
## 3 总体设计方案

总体技术方案如图 1 所示。系统存在虚拟端和实物端。实物端为军工行业的实际生产线,支撑其车间物流;虚拟端则为生产线的数字化模型、管控系统等软件,支撑制造过程的信息流。虚实两端通过 DNC、MDC、MES 等系统衔接。图中从左至右,以实际生产线为对象建立生产线资源库、对象库,建立可重构的生产线模型;通过传感器、MDC、DNC 系统等采集生产线的状态、加工程序进度等实时数据,模型实时重构,实现生产线的实时仿真,产生仿真结果;在仿真结果基础上对制造过程的效能进





(a) 生产线布局规划流程



(b) 生产线布局与优化实施效果

图 3 柔性生产线布局优化流程

### 3.1.3 生产线模型可重构技术

图 4 为生产线模型可重构技术路线。生产系统的仿真建模均是针对特定生产线展开的，即仿真系统的控制逻辑被嵌入描述模型的过程代码中，仿真中涉及的各种控制功能与模型的建模元素不能明确分开，这种建模结构与控制结构混为一体的方式使得模型结构复杂、缺乏灵活性和模块性，不易于模型的维护和扩展。而同其他的制造系统模型相比，可重构制造单元更注重通过自身构件的变化和重构来适应生产的变化，描述可重构制造单元模型必须具有高度的重用性和扩展性，当制造单元发生变化

时能够快速、方便地反应这一变化。通过集成第三方平台，装备库建设、通道建设等二次开发，建设生产线快速定制设计平台，完成生产线 3 维建模、运动脚本编制等工作，同期建设下行指令通道与上行信息通道，实现特种装备、模型与系统之间的数据和指令同步，完成装备、模型与系统的深度集成。依托建立起来虚拟的数字化车间，通过模拟投放等方法，测试与调控制造设备的对差异化工件的适应性(加工柔性)、生产线对差异化订单的适应性(生产柔性)，同时为生产线智能优化与实时监控提供支撑。

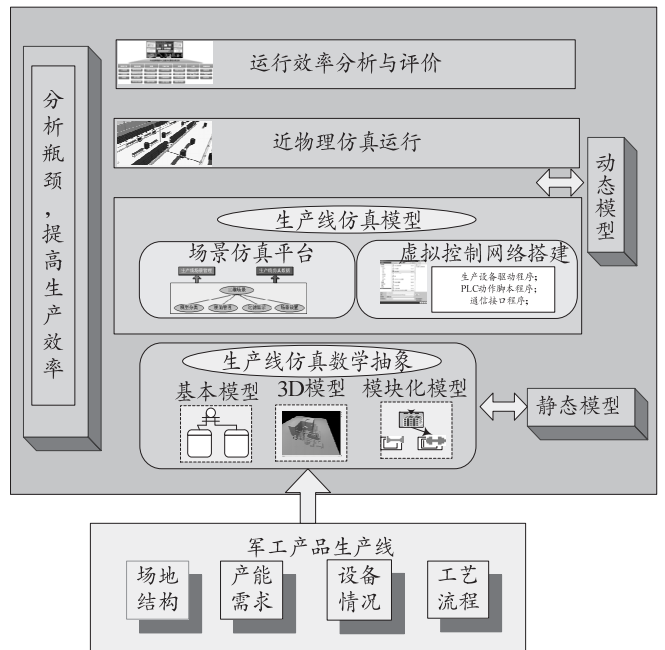


图 4 生产线模型可重构技术路线

## 3.2 军工生产线实时仿真技术研究

### 3.2.1 基于实时数据的生产模型快速重构技术

在建立工艺重组方法的基础上，围绕不同的工艺特性来设置生产单元，推行线下物料准备、夹持、找正、流转与线上加工并行化工程，提高制造单元的生产效率和制造设备的使用率；进而建立多柔性制造单元资源动态调配模型，基于制造任务分类特征和产量计划进行制造单元的快速重构，提高制造车间的生产柔性，实现基于工艺共性的批量化生产。在军工生产线模型的基础上，通过实际生产线与虚拟生产线的实时数据融合，建立“虚实映射”军工数字化生产线，生产线的实时状态可以及时反馈给虚拟的生产线模型并使其快速重构。实时数据军工生产模型快速重构如图 5 所示。

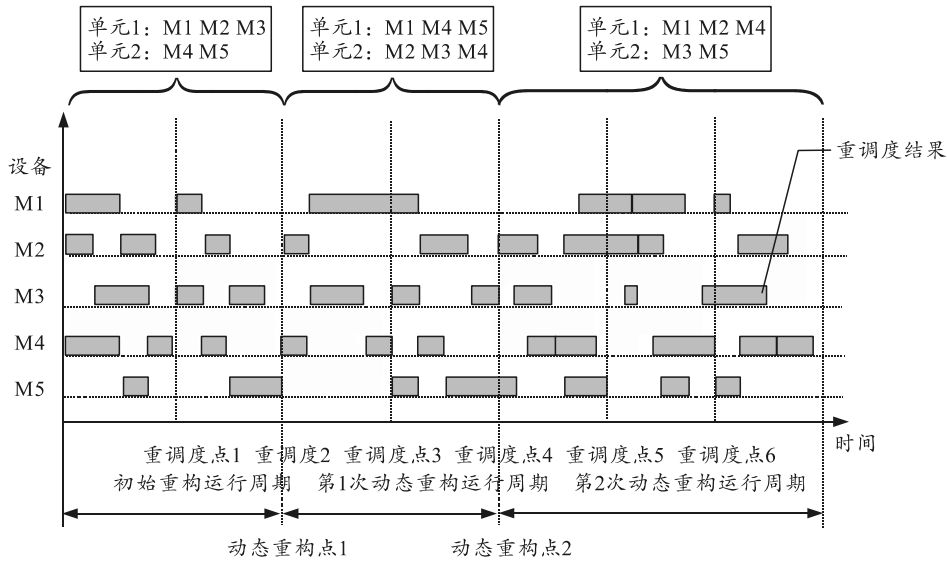


图 5 基于实时数据军工生产模型快速重构

### 3.2.2 生产能力实时仿真与验证

在运行的过程中，生产线状态及参数会随时发生变化，离线建立的生产线模型无法反映生产线当时的生产状态。研究面向军工柔性制造的生产能力实时仿真与验证技术，将生产现场变动的实时状态（设备生产能力、进度变动等）和异常可以高效、低成本地对生产能力进行评估、对柔性制造生产计划进行验证，以及对剩余加工时间进行预估。生产线实时仿真集成验证技术路线如图 6 所示。

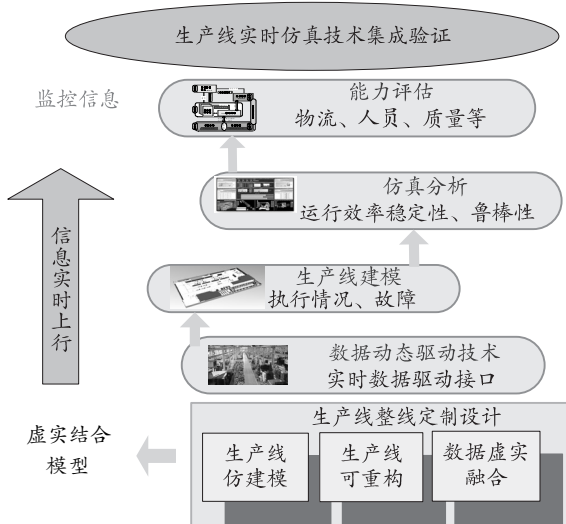


图 6 生产线实时仿真集成验证技术路线

## 3.3 军工生产线优化技术研究

### 3.3.1 生产线工艺流程优化技术

现阶段军工行业关重件的工艺流程主要以人工经验为主导，再进行产品的小批量试制验证，当加工情况符合工厂加工进度和生产周期时，将该工艺

固化到产品工艺流程中。工艺流程中，部分工艺流程顺序可进行调节，以人工经验为主导的工艺流程用于军工柔性制造系统时，灵活性较差，对于某一类或者几类的加工产品具有较强的适应能力，但不能满足柔性制造的要求。采用工艺流程与生产线仿真相结合的方式，对不同的工艺流程在同一生产线系统下的加工能力、设备利用率、生产效率进行比较，从而找出适用于该产品的最佳工艺参数，以求得最佳的零件工艺流程。工艺流程优化如图 7 所示。

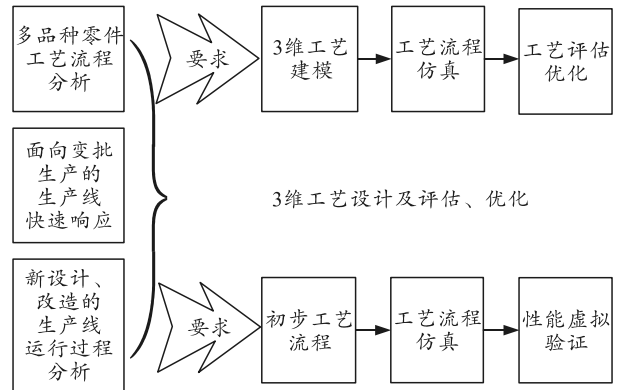


图 7 工艺流程优化技术路线

### 3.3.2 军工生产线系统多目标综合优化技术

生产线系统优化是典型的组合优化问题，随着任务、设备和决策规则数量增加，问题规模成指数增长，需要有效的优化方法解决该问题。在军工生产系统评估数据的基础上，生产过程中的物流参数、调度规则、工序顺序等多种参数为系统优化目标，规则可从资源库中选择并可将其进一步具体化，以仿真极度复杂的控制作业。在生产线仿真中计算模型，发掘系统特征及优化性能，运行生产和仿真预

设情况与对策情景，确定生产线调度规则与物流策略的制定和优化。建立全局化的优化模型，同步考虑原料下料、订单组批、资源动态配置与调度，生产计划制定等耦合优化问题，同期考虑设备利用率、订单交货期、生产资源利用率等优化目标及多批次、小批量、生产资源受限、突发性需求变动等约束；力求资源配置合理、生产效率提升、成本下降。系统多目标综合优化结构如图 8 所示。

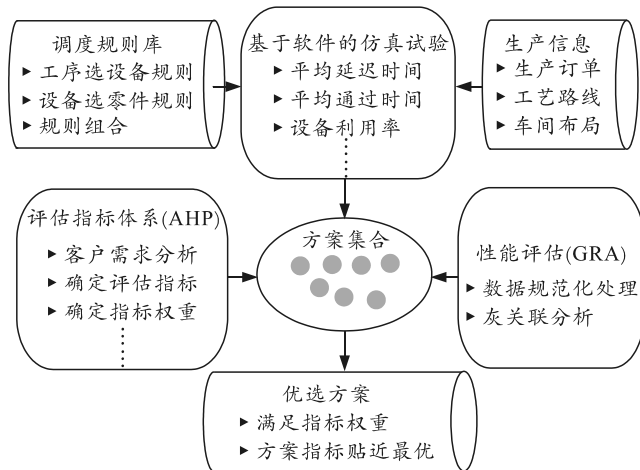


图 8 系统多目标综合优化结构

#### 4 结束语

目前，基于系统仿真的特种产品生产线快速建模与布局优化已在某军工科研院所得应用，逐步通过与 MES、PDM 等信息管理系统进行无缝集成，将成为数字化生产线迈向精益管控的主要发展趋势；同时，面向智能制造的军工数字化柔性生产线的成功实施将改善企业生产组织方式，提升生产线的制造效率与关键设备的利用率，有效降低企业制造成本，保障生产周期。智能生产线的建设思路也将为具有多生产模式并存与切换的军工企业进行智能车间建设与改造提供参考，为军工企业推行智能制造战略提供应用示范。

#### 参考文献：

- [1] 乔运华, 赵宏军, 王啸, 等. 基于两化融合管理体系思想的智能工厂建设规划[J]. 制造业自动化, 2017, 39(6): 77-80.
- [2] 陈阳. 军工企业的数字化机加/装配生产线改造[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(5): 99-101.
- [3] AZADIVAR F, TOMPKINS G. Simulation optimization with qualitative variables and structural model changes: A genetic algorithm approach[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 113(1): 169-182.
- [4] ALLAOUI H, ARTIBA A. Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints[J]. Computers & Industrial Engineering, 2004, 47(4): 431-450.
- [5] FONTANILI F, VINCENT A, PONSONNET R. Flow simulation and genetic algorithm as optimization tools[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 64(1): 91-100.
- [6] GREENWOOD A G, HILL T W, VANGURI S, et al. Simulation optimization decision support system for ship panel shop operations[C]//Proc Winter Simulation Conference. Orlando: IEEE Computer Society Press, 2005: 2078-2086.
- [7] 任晓华. 洛克希德·马丁公司的 F-22 战斗机装配生产线[J]. 航空制造技术, 2006, 21(8): 36-38.
- [8] 范玉青. 波音 787 飞机总装配线及其特点[J]. 航空制造技术, 2011, 19(Z2): 38-42.
- [9] 辛彦秋, 吴斌, 苏丹, 等. 民用航空发动机脉动装配浅析[J]. 航空制造技术, 2013, 440(20): 118-120.
- [10] KITAZAWA M, TAKAHASHI S, TAKAHASHI T B, et al. Combining workers' behavior data and real time simulator for a cellular manufacturing system[C]//World Automation Congress. IEEE, 2016: 1-6.
- [11] 刘刚, 王双义, 祁晓霞, 等. 兵装集团军工智能制造若干问题研究及应对策略[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 1-4.
- [12] 金晔琪. Plant Simulation 仿真技术在汽车发动机装配线中的应用[J]. 上海汽车, 2016, 28(12): 38-43.
- [13] 刘利雷. 数字化车间及四轴数字化加工中心模型的构建研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2009.