

基于数字孪生的智能脉动管控*

赵阳¹, 伏晓露¹, 廖庆妙¹, 刘庆华², 郇涛²

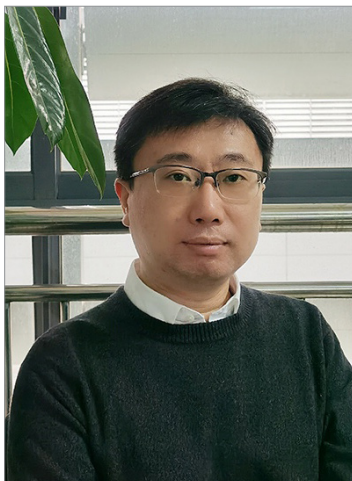
(1. 航空工业信息技术中心(金航数码), 北京 100028;

2. 中航飞机股份有限公司汉中飞机分公司, 汉中 723213)

[摘要] 为提升飞机总装脉动生产线智能化水平, 开展了基于数字孪生的智能脉动管控研究。基于数字孪生五维模型理论构建了飞机总装脉动生产线数字孪生应用架构, 从反应式计划调度、物流精准配送、智能作业指导、产线健康监视、资源迭代优化配置 5 个方面开展了技术研究, 为复杂产品装配的智能制造应用提供参考。

关键词: 智能制造; 数字孪生; 五维模型; 飞机总装脉动生产线; 智能管控

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2020.01/02.014



赵阳

航空工业信息技术中心(金航数码)生产管理业务部副部长, 主要从事供应链管理、企业生产计划、制造执行等方面的研究, 主持研发金航生产管理 V6.0 软件产品, 从事生产管理信息化工作 14 年, 参与航空工业成飞、陕飞、西飞、洪都, 航发黎明、西航等众多生产管理信息化项目的建设。

在“中国制造 2025”实现制造强国的战略目标指引下, 国内众多制造企业开始向智能工厂方向探索, 在生产过程中实现数字化、自动化、智能化。智能制造是制造业的发展趋势, 也是中国航空工业落实创新驱动发展、实现工业转型的关键举措。智能制造的核心在于实现物理世界和信息世界的互联互通和智能化操作, 而如何实现这一目标则是当前智能制造面临的瓶颈与挑战。针对这一难题, 北航陶飞教授提出了数字孪生车间的概念^[1], 提出了数字孪生五维模型^[2], 并在此基础上建立了数字孪生标准体系架构^[3], 为智能制造的落地应用提供了理论支撑和方法指导。

随着我国飞机总装技术不断发展, 飞机总装逐步从传统机库式装配向脉动模式转变, 该模式有效缩短了飞机总装作业周期, 解决了传统模式成本高、质量低、应变能力差等问题^[4-5]。航空工业西飞于 2010 年建成了国内首条飞机总装脉动生产线^[6], 2018 年航空工业陕飞总装脉动生产线投产使用, 并对智能制造相关技术应用进行了探索研究^[7]。

尽管如此, 当前飞机总装脉动生产过程的全局优化能力依然存在不足^[8], 尚需车间物理世界与信息世界的进一步融合, 而数字孪生车间概念的出现为解决上述问题提供了思路。

本文基于数字孪生五维模型理论, 探讨了数字孪生技术在飞机总装脉动生产线中的应用。通过构建数字孪生脉动线, 实现飞机总装脉动生产线的反应式计划调度、物流精准配送、智能作业指导、产线健康监视以及资源迭代优化配置, 最终实现基于数字孪生的智能脉动管控效果。

基于数字孪生的智能脉动管控总体架构

数字孪生五维模型提供了数字孪生落地应用的通用参考架构, 包括物理实体(PE)、虚拟实体(VE)、服务(Ss)、孪生数据(DD)以及连接(CN)5 个部分。物理实体是数字孪生的构建基础, 是客观存在的实体集合; 虚拟实体是数字孪生的引擎, 是物理实体的全息数字化镜像; 服务是数字孪生的应用目的, 通过数字孪生为用户提供直观便捷的智能应用

* 基金项目: 工信部民用飞机专项科研项目(MJZ-2016-G-59)。

和交互；孪生数据是数字孪生的驱动，包括物理实体数据、虚拟实体数据、服务数据、知识数据以及融合衍生数据；连接是数字孪生的动脉，是实现各组成部分动态实时互联互通的技术手段^[9]。

基于数字孪生五维模型理论，本文开展了总装脉动生产线智能管控研究，建立了包含物理产线、虚拟产线、孪生数据平台、服务应用、数据连接器的脉动线数字孪生应用架构，实现了反应式计划调度、物流精准配送、智能作业指导、产线健康监视、资源迭代优化配置，全面提高飞机装配的自动化、柔性化、智能化水平，为复杂产品装配阶段的智能制造落地提供参考案例。

基于数字孪生的智能脉动管控总体应用架构，如图1所示。

1 物理产线

物理产线是指与飞机总装生产线相关的制造资源以及基础设施。制造资源包括脉动式装配线、智能物流设施、以及数字化/自动化装配系统和设备，其中脉动式装配线包

含厂房、飞机产品、机体加载移动平台等实体要素；智能物流设施包括立体仓库、传送带、AGV小车等智能物流硬件；数字化/自动化装配系统和设备包括自动化装配设备、数字化检测设备、多余物自动检测和清理装置、整机集成在线检测装置等。除此之外，还包含采集计算机、电子标签、传感器、采集器、视觉设备、扫描设备、手持终端设备等信息化基础设施。

2 虚拟产线

虚拟产线是针对物理产线开展全要素和全流程的仿真建模，以实现物理产线的全息数字化镜像。虚拟产线需要通过三维可视化提供沉浸式人机交互，如通过主流三维建模工具(CATIA、NX等)对场景中的物理实体进行建模，包括飞机、零部件、工装工具等，然后对模型进行轻量化处理，从而实现三维模型的Web展示。

虚拟产线模型(表1)，包含脉动线“人机料法环测”等组成部分的要素、行为与规则。其中“人”指在满

足操作许可规则下，将任务均衡分派给操作工；“机”包括脉动线设备、工装工具等模型，建立合理的预防性维修机制；“料”包括协同保障物料与物流配送模型，建立精益化的全局拉动机制；“法”用于指导与控制整个装配操作过程，包含复杂串并行关系的装配网络模型与全要素控制的AO装配指令模型；“环”包括现场温湿度的控制、生产过程中的风、液、电、气等供给；“测”建立起符合适航规范与质量体系的现场检测与审理流程。

3 孪生数据平台

孪生数据平台采用分布式架构，打通了各系统间的数据通道，实现了对结构化与非结构化数据的存储和备份，具备对时序数据的实时处理能力和数据融合能力，为整个数字孪生系统的运行提供准确、实时和可靠的数据保障。

存储的数据包含设计数据、工艺数据、加工数据、检测数据、仿真数据、定位数据、环境数据、设备数据、人员数据、问题数据以及统计分析数

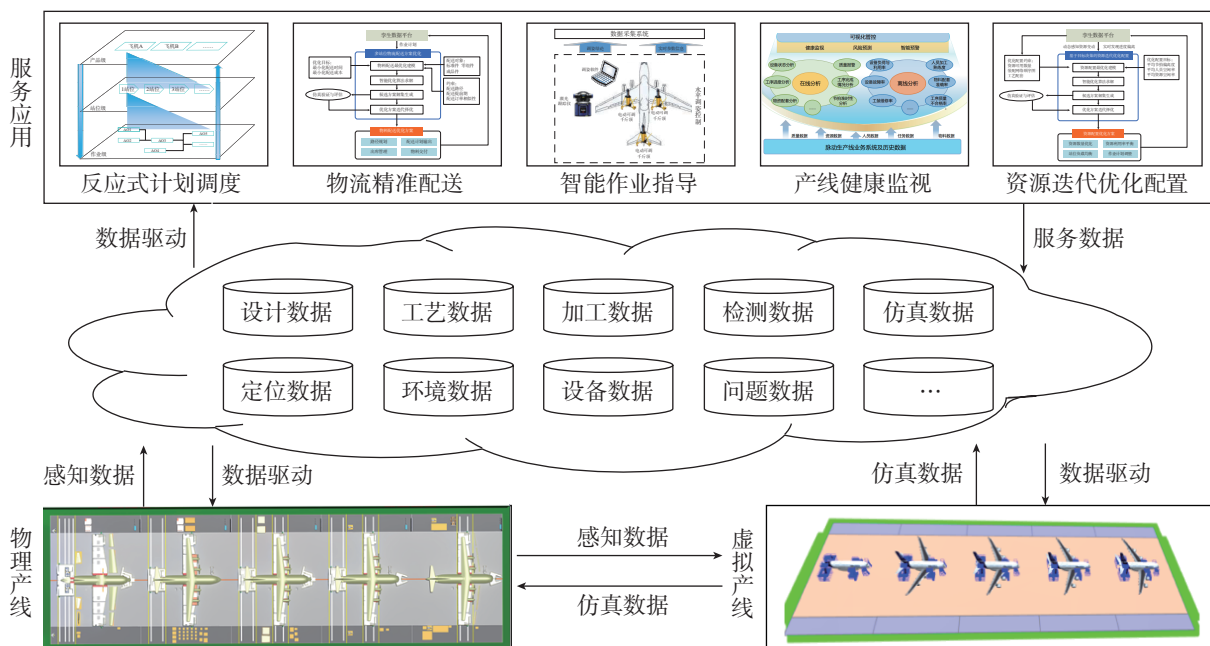


图1 基于数字孪生的智能脉动管控总体应用架构图

Fig.1 Application architecture of aircraft assembly pulsation line based on digital twin

表1 脉动线模型的要素、行为和规则

Table 1 Factors, behaviors and rules of aircraft assembly pulsation line model

分类	模型	要素	行为	规则
人	人员保障模型	人员、AO需求清单	派工、加工、换岗、借调	人员许可规则、均衡负荷规则
机	设备保障模型	设备、AO需求清单	维修保养、使用	有效性控制规则、维修规则
	工具保障模型	工具、AO需求清单	借还、使用、维修保养	有效性控制规则、借还规则、维修规则
料	协同保障模型	AO物料需求清单、拉式计划	齐套分析、拉式计划发布与闭环、预警	计划滚动规则、优先级规则、预警规则
法	物流配送模型	AO物料清单、配送库房与站位、运输工具、线边库	物料识别与选配、配送、串换	行迹控制规则、配送时间窗规则、物料串换规则
	装配网络图模型	网络图模板与实例、串并行关系	AO节点控制、站位保留	前置约束强弱限制、站位保留规则
	AO操作模型	AO指令文件、临时补充指令	操作指导与控制、更改贯彻、工艺参数优化	工艺技术有效性控制、工艺参数自适应优化规则
环	环境保障模型	温度、湿度和风、液、电、气	温湿度调整和风、液、电、气	环境保障规则、绿色节能规则
测	AO检测模型	检验员、AO检测规范、测量工具	检测、驳回、审理	适航规范、质量体系规范

据等。其中定位数据包含由UWB定位系统实现的对AGV小车、物料在制品、人员等物流对象的实时精准定位信息,环境数据包含生产现场温度、湿度等,检测数据包含飞机水平测量数据、阶差/间隙数据及电缆检测数据等。

4 服务应用

服务应用主要包括脉动生产线的反应式计划调度、物流精准配送、智能作业指导、产线健康监视、资源迭代优化配置等服务应用。通过反应式计划调度快速应对生产不确定性;通过物流精准配送保障现场装配的不间断运行;通过智能作业指导实现飞机装配过程中的防错防漏指导、智能姿态控制、集成在线检测,保障总装作业高质高效完成;通过产线健康监视对脉动生产线的运行健康状态进行分析和预测,提前发现问题并规避风险;通过资源迭代优化配置保障脉动生产线按节拍“脉动”。

5 数据连接器

数据连接器需保证脉动产线、虚拟脉动产线模型、服务应用之间各类异构系统的互联互通。

由于物理脉动产线设备的多样性,数据连接器具备良好的兼容性,支持工控网中广泛使用的OPC、OPC UA、Modbus等协议;具有良好互联特性,设备互联的接口及配置模式统一、便利、快捷;同时系统具备客户化负载均衡、基于协议的通讯优化、设备连接冗余服务等能力,提升通讯质量、降低设备负担、提高设备互联的稳定性。

在服务应用模型的连接上,数据连接器采用REST(Representational State Transfer)服务方式提供标准接口,从而提高系统的集成能力。REST即表述性状态传递,是一种Web服务软件架构风格。它针对网络应用的设计和开发方式,可以降低开发的复杂性,提高服务应用的伸缩性。

在虚拟脉动产线模型的连接上,数据连接器支持通过Socket等技术实现数据实时传输。当数据推送过来后,通过订阅机制接收更新数据,通过Socket.IO接口直接在Web页面驱动三维模型的动画效果展示和页面数据更新,实现数据实时推送、页面及时响应的实时联

动效果。

数字孪生五维模型在脉动生产线中的应用

1 反应式计划调度

反应式计划调度是脉动线应对生产不确定性的重要使能技术,它包括产品级、站位级和作业级3个层次,分别描述如下:

(1)产品级——基于实时齐套分析的产线协同。

系统根据飞机进入装配线的投入计划自动进行齐套分析,动态感知脉动线的库存状态情况,实时分析脉动线上的飞机架次及线前若干架次的齐套情况,根据装配网络顺序图、制造物料清单(Manufacturing Bill of Material, MBOM)、装配指令(Assembly Order, AO)等信息,结合库存及供货进行精准匹配分析,系统自主决策生成各站位配套资源的生产计划及采购计划的拉式信号,指导现场精准执行,从而建立总装计划拉动的全局协同保障体系。

(2)站位级——基于最小节拍扰动的站位协同。

当某站位出现作业计划未完

成,并且通过作业计划重排仍无法消除影响时,系统支持对站位计划进行滚动重排,以影响站位的关键节点拖期最少为原则,给出重新安排的站位计划。

(3)作业级——基于装配网络图的反应式调度。

在计划编制过程中,基于站位节拍和订单优先级编制站位计划,然后基于站位计划的起止时间,结合装配网络顺序图的串并行关系、AO与站位的柔性关系、AO空间限制等复杂约束,科学合理编制各站位的AO计划。在计划执行过程中,动态感知生产线的人、机、料、法、环的变化,自主进行反应式重调度。如果AO计划的调整影响了关键路径,导致AO计划超出该站位的结束时间,系统会自动申请站位计划重排。

通过这种“产品-站位-AO”的多层主从决策模式,实现对产线变化快速响应和自适应在线调度,形成动态感知、实时分析、自主决策、精准执行的计划闭环管理,从而构建脉动线数字孪生模式下的一体化计划调度体系,如图2所示。

2 物流精准配送

基于数字孪生动态感知配套物料、仓储设施、分拣设备、运输设备等状态变化,以装配作业计划为基础,运用人工智能算法制定最优物流规划,按照配套清单将物料自动分拣、自动配送到指定工位,实现按站位的物料精准配送执行,保障现场装配不间断运行。物流精准配送包括物流实时定位和多站位物流优化配送2个部分。

(1)物流实时定位。

物流实时定位服务采用UWB定位技术。UWB技术具有系统复杂度低、发射信号功率谱密度低、对信道衰落不敏感、截获能力低、定位精度高等优点,尤其适用于室内等密集多径场所的高速无线接入。通过在总装脉动生产线搭建定位基站、同步控制器、信令控制基站、定制定位标签等相关硬件,实现在工控网内对物料、人员、物流小车进行实时定位,并实现孪生模型的定时调整,最终实现对重点关注区域的物流情况实时监控与报警。系统报警信息分为6类:静止报警、移动报

警、速度报警、距离报警、电子围栏报警、路径报警。进入报警设置,可在虚拟孪生模型上对报警信息进行设置。

(2)物流优化配送。

基于脉动生产现场实时采集的状态信息,对各站位所需物料的种类、数量和需求时间节点进行优化匹配,以最小化配送时间和配送成本为目标,通过智能算法和模拟择优技术生成最优配送方案(图3),保障现场物料的精准配送。

首先,建立物流配送策略模型,对每道工序中涉及的零件种类、数量在不同时间阶段的分布情况和特点进行分析,并建立多站位下的物流配送策略数学模型。然后,利用数字孪生技术对脉动线实时生产状态信息进行采集和跟踪,获取生产运行状态,明确各站位的当前工序步骤,建立物流信息标识与状态追踪模块,准确采集生产过程中物流运输装备使用情况与物料仓储状态,以作为物流方案配置的依据。再次,通过智能算法求解生成候选方案集,通过仿真模拟择优确定最

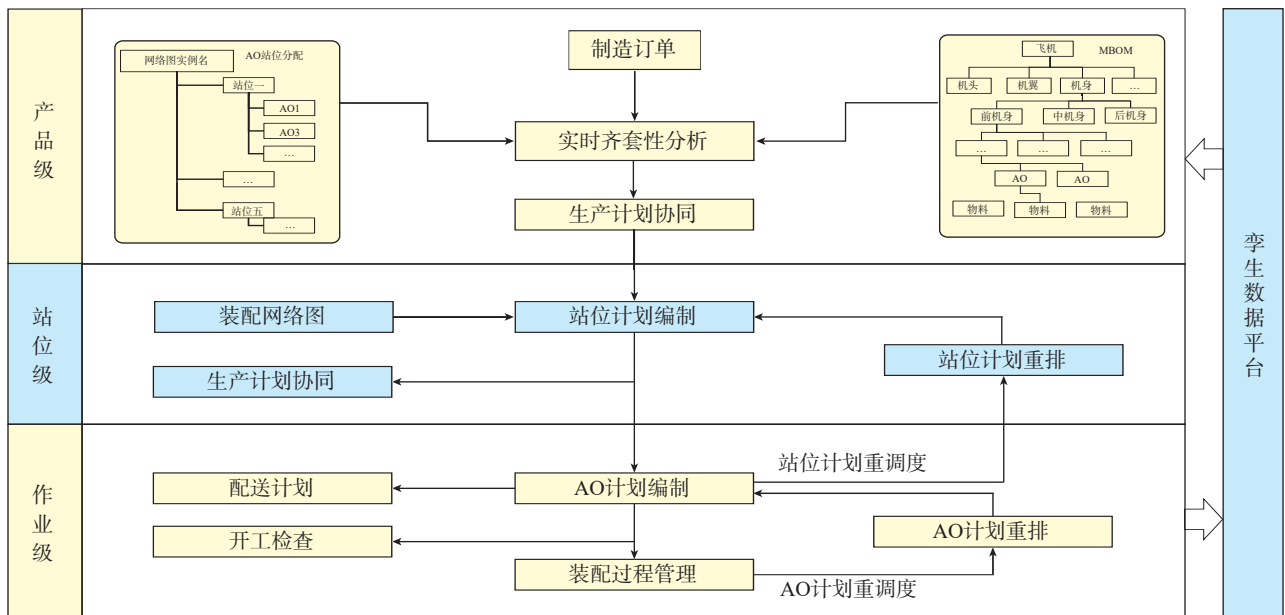


图2 反应式计划调度

Fig.2 Reactive planning and scheduling

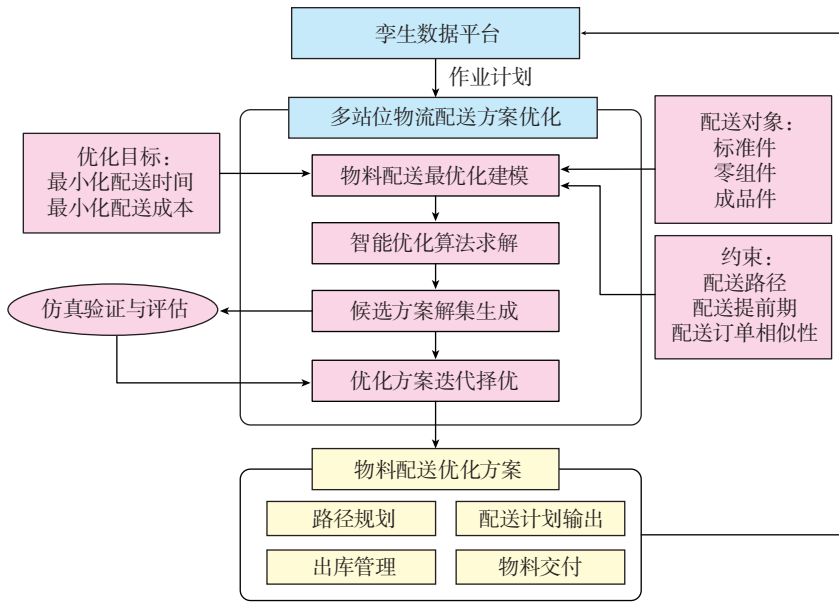


图3 物流配送方案优化过程
Fig.3 Precise logistics distribution

优方案。最后,以物流配送优化方案输出数据为驱动,操控现场AGV等运输设备运行。

3 智能作业指导

基于数字孪生动态感知AO执行数据、飞机定位数据,实时分析整机状态及AO执行状态,对现场工人装配作业进行精准可视化操作指导。飞机总装主要包含大部件对接、发动机安装、管路电缆安装及检测、整机供电及气密试验、水平测量等工作^[10],装配作业内容复杂、专业性强、对质量和精度要求极高。通过防错防漏指导、智能调姿指导、整机线缆在线检测等智能化作业指导,保障总装作业高质高效完成。

(1) 智能防错防漏。

系统通过现场智能终端、AR眼镜应用等手段,动态感知产品装配部位和物料,对物料错漏及时提醒。另外,系统可以实时分析工人下一步应进行的操作,精准直观地进行可视化指导,有效实现工人装配过程中的防错防漏。

(2) 智能调姿控制。

智能调姿系统利用激光跟踪仪

和千斤顶判断和调整飞机的姿态。首先,通过激光跟踪仪对测量控制关键特性数据进行采集;随后,按实测数据进行虚拟预装配,在实际装配前采取措施(部件精加工、柔性定位等),保证外缘公差、对接面、交点等精度要求,实现基于实测数据的部件姿态虚拟评价,提前对部件的可装配性进行评估;最后,基于虚拟调姿结论,控制千斤顶的顶升高度,调整飞机姿态,保障部件的顺利对接。

(3) 集成在线检测。

系统支持基于模型的快速在线检测及自动判定,利用激光雷达、iGPS、激光跟踪仪、间隙测量枪等数字化检测设备,以及飞控系统、任务系统、武器系统等数字化测试设备,完成全机调试、管路气密试验、通电检查、功能性测试等检测任务,通过工业控制网络实现各类设备的互联互通,最终将测试日志和测试结果输出到孪生数据平台。

4 产线健康监视

产线健康监视是基于数字孪生系统的实时数据和历史数据,运用统

计分析和数据挖掘技术,对脉动生产线的运行健康状态进行分析和预测的可视化管控手段。通过产线健康监视,能够提前发现问题、规避风险,保障脉动生产线平稳高效运行,如图4所示。

(1) 运行状态在线分析。

对生产线执行状态进行实时监控,重点关注物料配套/配送、生产进度、质量问题、站位问题和设备的运行状态,从站位、生产计划、架次等多视角分析并生成分析报告,包含预警、状态和结论信息,并将预警信息发送到负责人。

(2) 运行状态离线分析。

对生产线运作过程中产生的历史数据进行处理,通过聚类分析、相关性分析等算法,挖掘生产进度、生产配套情况、设备、工人可靠性等因素对生产的影响,为生产线生产持续优化提供决策支持和指导。

(3) 风险预测及智能预警。

建立故障分析模型,对历史数据进行多维度的分析用以支撑预测工作,如故障类型、月份、操作人员、班组、舱位、飞机成熟度、设备等,最终达到降低单机故障总数、消除人为及重复性等故障的目的,实现企业质量控制模式由事后控制向过程预防的全面转型。

5 资源迭代优化配置

资源迭代优化配置是一种面向现场持续优化的生产线资源动态配置方法。在实际生产中,由于配套保障不及时、作业工期滞后、质量不一致等现场不确定问题,会使实际资源使用情况与预定的资源配置、排产、进度发生偏离,由此形成生产线在成本产能等不同目标决策下的优化需求,因此需要面向现场持续优化的生产线资源动态配置技术来保证生产过程稳步运行。

首先,根据数字孪生系统动态感知的现场作业进度、人员状况、资源利用、生产线负荷等数据,实时分析

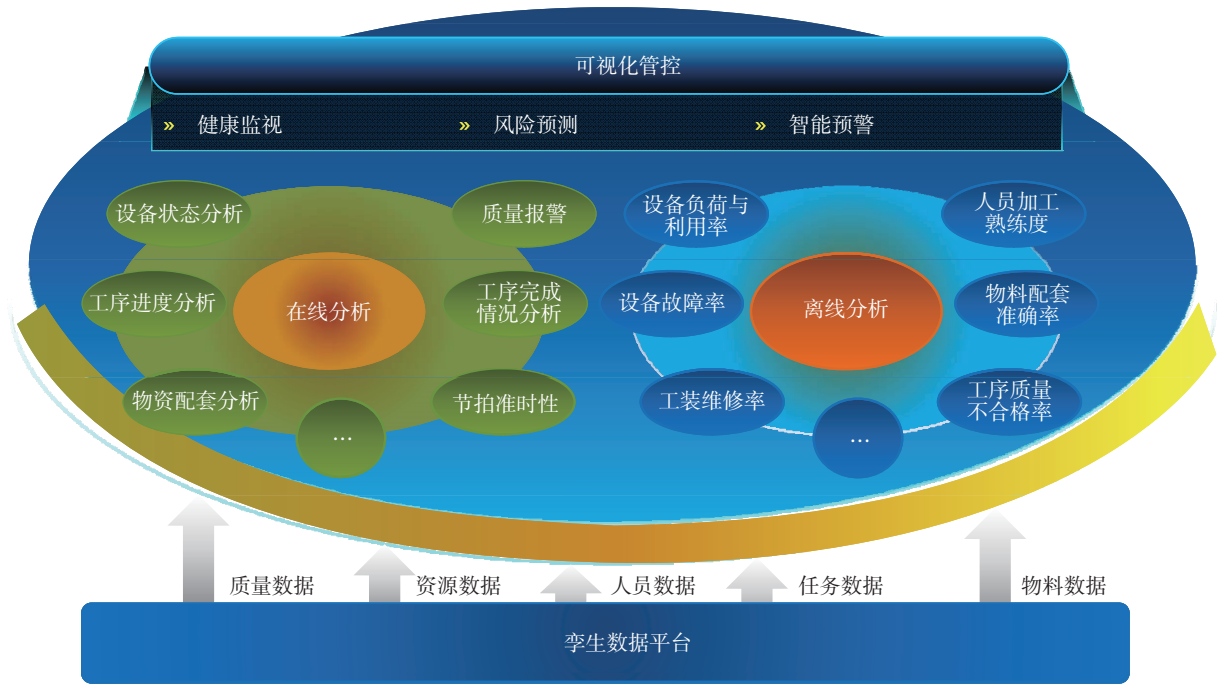


图4 产线健康监视功能框架
Fig.4 Production line health monitoring

生产进度和节拍的偏离情况,自主决策是否进行资源重新配置优化;如果确定进行资源配置优化,则新建资源配置优化项目,选择优化目标,通过多目标优化算法,得到多个初始资源配置方案;然后,将资源配置方案传递给仿真系统进行模拟择优,反馈仿真评价结果,根据评价结果选择最优配置方案;最后,根据最优的资源配置方案向现场发出调度计划结果,指导生产现场的资源优化与生产作业的精准执行,实现脉动生产线的动态平衡和持续优化。资源配置迭代优化过程如图5所示。

结论

顺应国家和航空工业智能制造的发展趋势,本文探讨了基于数字孪生的智能脉动管控方法,以数字孪生五维模型理论为依据,构建了飞机总装脉动生产线数字孪生应用架构。在实现物理产线的全息数字化建模和数据实时互联互通的基础上,研究了飞机总装脉动生产线反

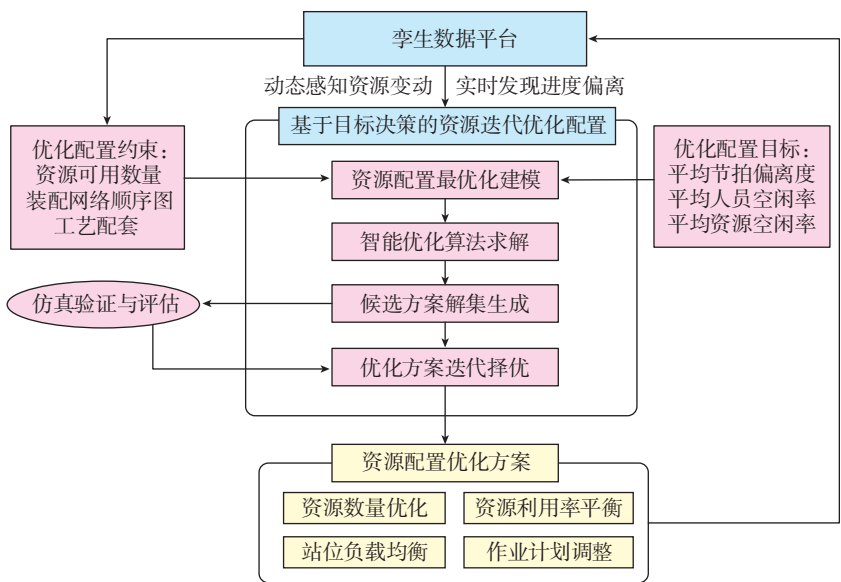


图5 资源配置迭代优化
Fig.5 Continuous optimization of resource allocation

应式计划调度、物流精准配送、智能作业指导、产线健康监视、资源迭代优化配置等智能服务应用,达到了“动态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的智能脉动管控效果。

参考文献

[1] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J].计算

机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.

TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new mode of future workshop operation [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.

[2] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.

TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Digital twin five-dimensional model and ten field applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.

[3] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.

TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Digital twin standard system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(10): 2405-2418.

[4] 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. Intelligent production line

construction technology of aircraft pulse assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1/2): 28-32.

[5] 李金龙, 杜宝瑞, 王碧玲, 等. 脉动装配生产线的应用与发展 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(17): 58-60.

LI Jinlong, DU Baorui, WANG Biling, et al. Application and development of pulse assembly line [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(17): 58-60.

[6] 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司. 构建总装脉动生产线 提高精益化管理水平 [N]. 中国航空报, 2011-09-29(5).

AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd. Build pulsating production line of general assembly to improve lean management level [N]. China Aviation News, 2011-09-29(5).

[7] 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 assembly pulse production line [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16):

41-47.

[8] 罗鑫, 阮亮. 脉动式生产线在飞机总装中的应用探索 [J]. 现代制造技术与装备, 2019(7): 150-152.

LUO Xin, RUAN Liang. Application of pulse production line in aircraft assembly [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(7): 150-152.

[9] 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, 24(1): 1-18.

TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.

[10] 李西宁, 支劭伟, 蒋博, 等. 飞机总装数字化脉动生产线技术 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 48-51.

LI Xining, ZHI Shaowei, JIANG Bo, et al. Digital pulse production line technology for aircraft final assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 48-51.

通讯作者: 赵阳, E-mail: zhaoy@avic-digital.com.

Intelligent Production Management and Control for Aircraft Assembly Pulsation Line Based on Digital Twin

ZHAO Yang¹, FU Xiaolu¹, LIAO Qingmiao¹, LIU Qinghua², WU Tao²

(1. AVIC Digital Corporation Ltd., Beijing 100028, China;

2. Hanzhong Aircraft Branch, AVIC Aircraft Co., Ltd., Hanzhong 723213, China)

[ABSTRACT] This paper studies the application of digital twin on aircraft assembly pulsation line in order to improve the intelligence of production management and control. First, based on the theory of five-dimension digital twin model, the application architecture of digital twin aircraft assembly pulsation line is constructed. Then, five aspects about intelligent production management and control are focused on: reactive planning and scheduling, precise logistics distribution, intelligent operation guidance, production line health monitoring, and continuous optimization of resource allocation.

Keywords: Intelligent manufacturing; Digital twin; Five-dimension model; Aircraft assembly pulsation line; Intelligent production management and control

(责编 思齐)