

基于仿真决策的飞机总装脉动 生产线规划与运行优化关键技术

陈 军,孙技伟,杨 毅

(中航飞机股份有限公司汉中飞机分公司,汉中 723213)

[摘要] 针对飞机总装脉动生产线,探讨虚实映射环境下,利用建模仿真和决策支持等技术对生产线的装配工艺流程、生产线规划、物流配送和资源调度等方案的优化方法,解决脉动生产线在设计阶段规划不够合理,在运行阶段节拍不稳定、节点难保证等问题,提高生产线整体运行效率。

关键词: 生产线建模; 仿真决策; 飞机总装脉动生产线; 生产线规划; 生产线运行优化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.12.040



陈 军
高级工程师,长期从事飞机总装
与调试的工艺技术研究工作。

飞机的总装过程作为飞机制造过程中的最后环节,也是最为重要的环节之一,涉及的零件众多,业务流程非常复杂,同时对装配精度和质量也有较高要求。因此,飞机总装生产系统前期设计规划的优化与系统建

成后运行过程中的优化都是保证飞机总装生产效率和产品装配质量的重要问题。

产品的实际生产过程是否顺畅和高效,很大程度上取决于生产线规划的合理性,而生产线规划的重要基础是制造工艺。工艺路线中不同工序安排的前后关系,以及多条工艺路线的穿插排序,影响着生产线在运行过程中的节拍和效率。飞机总装过程主要以人工为主,产品装配工艺主要以纸质或电子的工艺流程文档形式为主^[1]。一个型号的飞机产品往往包含多达几千道工序,工序内部又包括若干条工步,而同一条生产线有时可以接受同一型号不同构型的飞机同时生产。因此,在生产线建设前,以目前主要凭借经验为主的工艺设计和系统设计方式,难以对于飞机产品总装工艺流程进行合理规划,并在此基础上综合各种因素考虑生产线执行的全过程和涉及的全要素,对生产线内物流方案、资源配置等方面也进行系统量化的分析与

决策。这就导致了在生产线投产后无法发挥其最大效能,同时还存在着由于规划不合理导致的二次建设产生的各种浪费。

将数以千计的工序执行计划合理安排和装配所需的各类物料准时送达,对于飞机总装生产线而言是两项至关重要的决策。飞机总装过程的相关技术和管理复杂程度较高,经常出现人员作业交叉、现场物流混乱、工序执行拖期等问题,生产计划在执行的过程中需要频繁调整,而目前由计划员、调度员和工段长等管理人员进行的手动计划重排,无法兼备计划安排的合理性和实效性。同时,装配所需的零部件、标准件、导管、线缆和成品等物料需要在合适的时间被配送至合适的地点,既不能过早送达导致现场物料堆积,也不能过晚送到致使停工待料,因此物料配送方案也需要随每个站位当前的工序执行进度情况实时调整、更新和下达,使物料配送达到最优。这一问题紧靠人工也难以

完成。

随着近年来信息物理系统、数字孪生等技术的不断发展,传统的建模仿真技术与物联网、传感技术相结合,可以在虚拟的环境中模拟出物理世界当前的真实状态,并对状态加以分析和判断,针对关键问题和事件进行决策,并将结果发送回物理世界中,实现真正的虚实映射,解决实际中出现的问题^[2]。面对考虑因素维度多、数量多、交叉性强、管理复杂的飞机总装脉动生产线,结合仿真手段及先进的智能算法,对生产线规划阶段的工艺流程设计和生产线总体规划,以及生产线运行阶段的排产与资源调度、物料配送方案调整等问题进行辅助决策优化,既可以为飞机总装生产线带来较高的投入产出比,减少投入浪费和后期改建花费,同时也可以在生产线运行过程中对关键问题的决策进行支持,提供量化的、可执行的优化方案,在整体上提升飞机产品的装配效率。

飞机总装脉动生产线

传统飞机总装一般采用机库式(或停车场式)装配,待装配的部件在固定位置上,逐步完成全部装配和试验。这种装配方式中,工人在开始一道工序执行前,需要到车间的不同位置获得待装零件、工具、工艺文件等,工人的作业活动范围大,同时飞机总装往往涉及的专业数量较多,作业交叉现象普遍存在,生产线现场情况易混乱,且作业时间严重浪费^[3]。另外,固定式飞机的装配由多组工人同时并行作业,各架飞机的实际装配进度难以保持一致,无法保证装配过程的协调与产品装配的质量。目前我国飞机总体型号和构型较多,需求变化较快,这就造成了飞机产品装配周期长、交付压力大和库存浪费严重等问题^[4]。要解决上述问题,在飞机总装生产线上采用先进的装配技术和生产模式

已迫在眉睫。

波音首先冲破了传统的多品种小批量飞机生产不能采用移动式生产线的禁锢,成功设计并实施了波音717机型的总装移动生产线,使得整机装配时间缩短了85%,成功影响了世界各大飞机制造商,使得广大飞机制造商对连续移动和脉冲式移动装配生产线产生了强烈的需求^[5]。空客、洛克希德·马丁、庞巴迪、阿古斯特维斯特兰等国外先进的飞机制造企业也纷纷建立了飞机连续移动和脉冲式移动的装配线,以提高生产效率^[6]。

飞机总装的脉冲式移动生产线,即脉动生产线,相较连续移动式生产线而言对生产节拍和流程管理的复杂度和程度要求低。由于目前我国飞机装配的整体工艺水平和管理水平并不能与世界先进的企业相比,因此国内相关飞机制造企业都选择脉动式的总装模式代替原有的机库式装配模式,逐步优化工艺和管理流程,不断提高飞机总装效率和质量。航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司引入脉冲式移动生产的理念,以客户需求为导向,进行工艺流程优化和布局优化,同时关注生产过程中的物流与质量,建立了通用飞机总装脉动生产线,实现了8h/架的生产速率目标,提高了企业竞争力^[7]。航空工业陕西飞机工业(集团)有限公司建立了由5个站位组成的飞机总装脉动式生产线,并在信息采集、智能管控、智能物流、部件对接和线缆检测等方面展开了技术的研究与应用,从而实现脉动线的管控全面信息化、物流配送精准化、作业适度自动化、决策有限智能化和现场管理精益化^[8]。

脉动式和移动式生产线的作业方式要求工人精细分工、动作标准化,同时物料精确到位,生产线整体节拍均衡^[9]。传统上这种方式只用于批量较大、品种单一且结构简单的

产品。而飞机是典型的多品种、小批量、长周期生产的产品,装配工艺复杂,经常实行单架次构型管理,同时飞机总装阶段往往涉及10多种不同的专业,管理复杂程度也同样非常高。这就使得飞机装配线在建设前必须综合各方因素考虑,通过量化手段进行工艺优化,合理规划生产线的各站位资源配置,减少生产线建设后出现的各种浪费。

另一方面,飞机产品往往研制和批生产的产品混线装配,而产品的型号和批量也会随着技术的发展和用户的需求而变化。另外,由于装配零部件、标准件和成品件的数量庞大,而且飞机产品装配质量要求较高,在飞机装配的过程中经常会出现由于缺件问题或质量问题导致的中断,这在脉动生产的形式下就会影响某一站位的装配进度,进而影响整条生产线的脉动节拍^[10]。因此,飞机总装生产线在运行过程中也需要针对人员、设备、工装等资源的调配和物流配送方案的调整实现目标决策的动态优化,以适应内外部环境的变化。对于脉动生产线来说,不同站位的资源调配和物料准时配送是两项至关重要的问题,它们很大程度上影响着脉动生产线能否顺畅运行,同时也决定着生产线在面对资源和节拍变化时的柔性和高效性。

飞机总装脉动生产线规划关键技术

针对我国目前飞机制造存在工艺流程不系统、装配质量不够稳定、物流供应不及时等问题,针对飞机总装的工艺流程和脉动式生产线车间的布局进行合理规划,可以实现工艺标准化、完善价值流分析,加强线内外物料供应的管控,保证零部件和标准件的准时性。总装脉动生产线往往包含数千个不同专业的工序,对于合理安排工序执行的先后顺序,以及配备合适数量的资源以保证生产,是

保证总装线顺畅运行的重要基础。对工艺的建模、分析、优化和仿真验证,是进行总装脉动生产线规划的有力途径。飞机总装脉动生产线规划的相关关键技术如图1所示。

1 模块化装配工艺建模与工艺流程规划

进行飞机总装工艺流程合理的规划,首先需要将总装各个专业的工艺过程进行数字量表达。也就是说,利用基于模型的定义(MBD)技术对飞机装配环节的所有几何信息与非几何信息进行标准化定义,如管理信息、装配基准信息、装配约束信息、装配层次信息等。可采用连接矩阵、干涉矩阵等方式实现飞机零件之间复杂拓扑关系和干涉关系的数字量表示。在此基础上,建立MBD工艺信息动态数据库,实现MBD模型与工艺信息的动态链接。根据飞机总装工艺,构建基于MBD模型工艺数据的装配工艺资源清单,实现由产品设计EBOM到工艺PBOM再到制造MBOM的工艺信息无缝连接与传递,形成满足装配工艺要求的飞机总装模型及产品结构树,构建其与工艺指令的映射关系。在此过程中,需

要对飞机产品MBD模型中的模型空间信息、属性空间信息和标注空间信息进行提取,并将这些信息传递至装配工艺中。

飞机总装过程中涉及多个专业数量庞大的作业工序,同时它们之间有着时间和空间上并行或串行的约束关系。因此,可以从飞机产品的MBD模型中提取所有信息,按照飞机的设计功能划分,重新组合成按模块的飞机结构化装配模型,简化工艺规划复杂程度的同时为后续装配工艺规划奠定基础。

另外,由于飞机总装与其他飞机的加工和装配阶段不同,主要以人工操作为主,因此在产品装配过程中积累的大量经验和知识对产品的装配效率和质量有着重要影响。在梳理飞机总装过程中长期积累的工艺知识的基础上,通过语义规范、关键词识别、内容关联等技术,提取飞机总装工艺知识,包括典型的装配工艺知识、工装等资源知识、装配参数知识和质量参数知识等,形成飞机总装工艺知识库,实现快速而精确的工艺规划。在飞机总装工艺知识库的基础上,基于装配零部件特征、装配站位

特点建立装配工艺知识专家系统,实现对飞机总装专家工艺分析决策的支持。

2 考虑工艺过程的飞机总装过程仿真分析

借助DELMIA等装配仿真软件的应用与二次开发,可以实现飞机总装过程的建模与仿真,并通过仿真验证理论环境下优化的工艺流程,对产品—工装—工艺过程规划结果进行综合验证,尽可能充分预测装配生产过程中可能出现的问题,并及时反馈修正。(1)要对产品自身的装配过程进行仿真,对装配过程中可能出现的干涉等装配问题进行预测,并由工艺人员配合软件系统提出问题的解决方案;(2)通过对狭小装配工作区域展开人机工效仿真分析,验证工人操作的安全性和舒适性,同时对引入的人工工具进行操作仿真,验证工具的可达性和空间操作敞开性等;(3)针对站位中采用的机器人等自动化装备,采用离线编程的手段进行编程仿真和过程控制。在仿真验证的基础上,对所预测的装配过程中可能出现的问题进行分析,以分析结果作为依据进行工艺优化,从而保证飞机总装各专业各工作区域内装配方案的可行性。

3 基于仿真的飞机总装生产线规划

在总装工艺流程规划与装配仿真的基础上,针对飞机产品构型和批量不稳定的特点,需要进行生产线的资源配比、布局和物流等规划设计。基于当前飞机产品产能要求和各专业工艺的梳理与分析,可以计算并得出最合理的站位划分。根据工艺流程与资源的匹配能够得出各装配站位资源配比。利用基于Petri网的离散事件建模方法构建总装生产线各元素的物理模型与逻辑模型,包括物料、设备、工装、工具等物理实体及根据经验和计算得出的相关规则。Petri网利用库所、变迁和有限弧等元素,可以很好地对离散型生

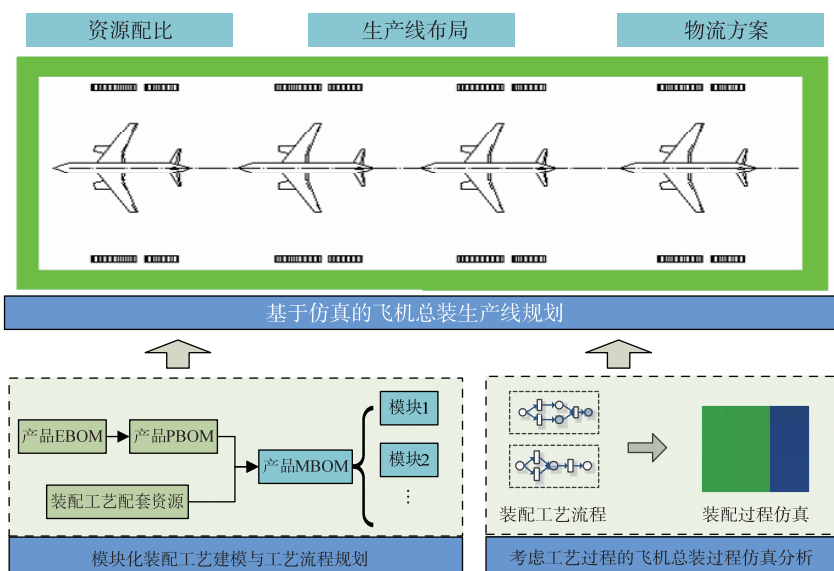


图1 飞机总装脉动生产线规划的关键技术框架

Fig.1 Technology architecture of production line planning for aircraft final assembly

产线运行过程中的各类事件进行建模。在飞机总装过程工艺路线、各工序的串并行关系、生产线各类资源的约束下,以满足节拍和工作负荷平衡为目标,建立生产线资源配比和物流规划问题的优化模型,采用逐层法进行模型求解,根据关键路径计算并确定生产线各站位的最短工期和最佳资源配置。传统基于建模的优化方法往往与生产线实际运行过程出入较大,因此,利用 DELMIA/Quest、PlantSimulation 等生产线三维动态仿真软件的应用与二次开发,进行总装生产线布局与物流方案的仿真验证,在此过程中找到物流瓶颈、物料堆积、人员/设备负荷不合理等问题,通过定量分析与调整优化,不断迭代仿真结果,最终生成最优的生产线规划方案。

基于仿真的飞机总装脉动生产线运行优化关键技术

飞机总装的脉动式生产线涉及的工艺种类、人员、设备、工具和物料

等生产资源数量庞大,技术和管理复杂程度高,同时由于飞机产品的需求受技术水平提高和需求多变的影响,产品种类和批量变化频繁。即使在生产线建设前利用建模和仿真的方法进行了合理规划,在生产线的运行过程中生产计划无法始终按照理论的安排执行,而且不同站位之间和同一站位内部各类资源冲突现象也不可避免。因此,需要在生产线运行过程中对各站位的资源调度进行优化,以应对线内频发的资源冲突等现象,保证生产线顺畅运行。同样在生产线运行过程中,物料配送也直接影响着生产线的效率和平衡性,是脉动生产线中最关键的问题之一。因此需要根据生产现场实际装配进度,利用先进的手段对物料配送方案进行动态优化,减少飞机装配过程中不必要的等待浪费。

1 生产线运行过程中的排产优化与冲突消解

生产线资源配置与敏捷调度是保证飞机总装过程在动态环境下稳

定运行的重要手段。作业工期滞后、物料短缺、返工返修等现场的异常问题,都会使实际作业进度与预定的排产计划发生偏离,由此形成了不同作业之间在空间、时间和资源方面的冲突,因此需要有效的资源冲突消解规则和资源再配置规则来保证整条生产线的生产节拍(图2)。

在生产线的规划阶段,已将产品装配工艺流程进行了量化分析与优化,针对同一型号的飞机产品得到了一个或一组理论上最佳的多专业工艺路线。在飞机的实际装配过程中,由于同一型号不同架次在局部构型上的差异,以及生产现场频发的异常问题,对各专业的装配工艺路线进行实时调整不可避免。需要考虑作业周期、成本和站位负载等要求,对生产计划进行调整优化。由于总装过程专业和工序数量非常多,利用传统的数学建模方法很难描述清楚飞机总装过程的各类约束和目标。同时现场对排产的即时性要求也较高,针对突发的问题应快速获得新的排产

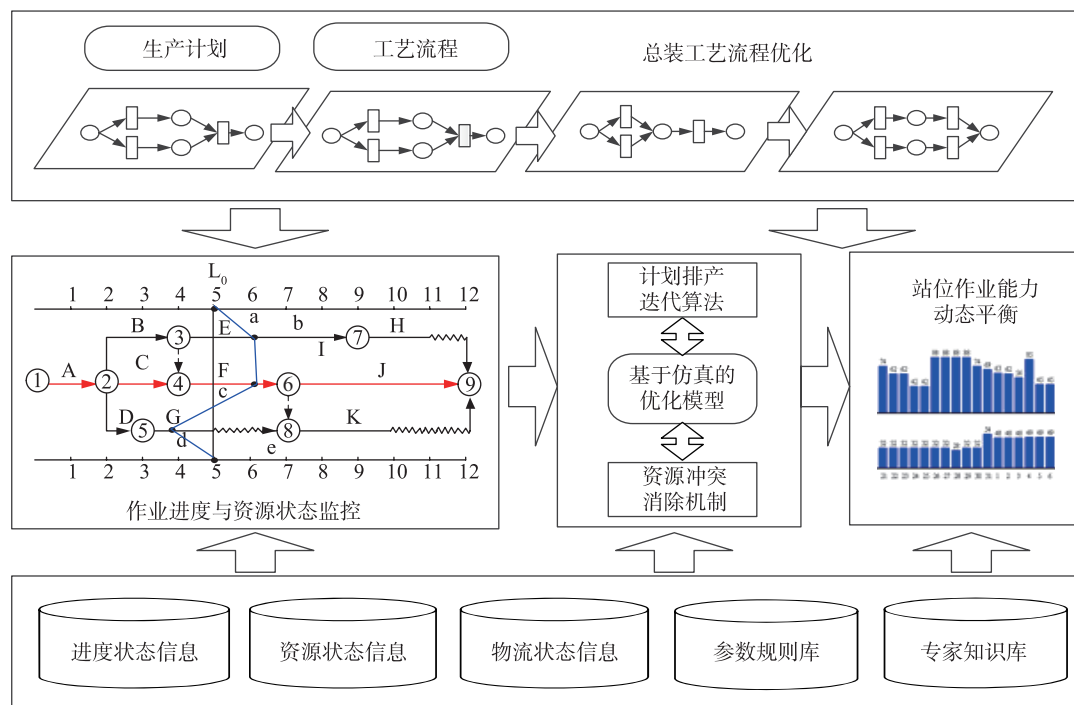


图2 生产线运行过程中的排产优化与冲突消解技术框架

Fig.2 Technology architecture for planning optimization and conflict resolution of production line operating

计划。因此,在飞机总装生产线中需要借助仿真的手段,结合高效的资源调度迭代算法,以及生产计划或订单要求,形成生产线当前最优或近似最优的排产方案。

飞机总装脉动生产线内的大部分设备、人员、工具等资源都是站点专用的,因此如果某一瓶颈资源无法得到最合理的分配,优化后的排产方案也难以帮助生产节拍维持平衡,而保证各站点的生产节拍是脉动生产线顺畅运行最重要的因素。因此,当生产线内各类关键资源产生需求冲突时,要建立资源冲突的动态预测与消解机制。首先需要从作业空间区域、作业时间、设备使用和工具使用等方面总结现场可能出现的冲突类型,形成冲突类型目录。接着以现场作业状态信息的实时采集为基础,建立各类冲突的状态触发规则,支撑装配作业执行过程中的冲突动态预测。最后依据冲突类型,建立冲突触发时的消解规则,形成冲突规则库,确定各类作业在资源冲突时的优先排序。例如,当同一专业的操作人员在不同站点同一时间都有需求,而专业班组

人数不足时,就需要综合考虑任务的优先级和人员空闲时间段情况,对计划安排进行重新调整。

2 生产线运行过程中的物流配送方案优化

对于飞机总装脉动生产线而言,及时并准确地进行物料配套并将配套好的物料送至线内所需的具体位置,是保证生产线顺畅运行的关键。随着生产线现场各类传感设备的不断完善,结合部分工作区域人机交互进行信息录入的方式,可以及时掌握现场的作业进度与物料消耗情况。同时,对于飞机总装而言,物料的缺少、错发和质量不合格等现象不可避免,因此需要在生产线运行过程中进行物流配送方案的实时优化(图3)。

通过生产线规划阶段的工艺流程仿真与优化,可以生成合理的装配BOM模型和管理方法,这是实现物料配套和准时化配送的基础信息。结合飞机数字化装配工艺流程和产品的MBOM信息,生成针对每架飞机的配送BOM实例,拉动各物流系统之间的数据集成。配送BOM管理的信息分为静态信息和动态信息,其

中静态信息主要由装配工位、装配工序、工序中包含的物料类型和数量等;动态信息主要包括配送物料的编码、配送时间、配送数量、发放人、接收人以及相关的派工单信息等。配送计划的生成是在配送BOM的基础上,结合工序工时信息、配送时间信息物料配送提前期等信息自动生成。

通过对总装生产线旁电缆立体库、导管立体库、标准件库、成品件库、工具库、工装库等各库房位置、各装配站点缓冲区位置和连接路径进行建模,可以作为物料状态追踪和管理的主要依据。同时,通过快速对比配送BOM和实际库存情况,可以实现装配开工前的物料齐套性检查,对于不可开工项,能够自动生成缺料清单。

在飞机总装生产线运行过程中,对车间库房的管理可以实时掌握可用的零部件、标准件、工装、工具等实物信息。以减少库存浪费为原则,各库房针对下发的生产计划进行物料的配套,完成针对装配大纲(AO)不同种类物料的配套。同时,通过现场传感设备和人机交互等方式对总装生产线实时生产状态进行采集跟踪,通过实时数据分析获得各个站点的当前工序步骤,同时在生产状态变动时实时获取生产状态数据。以AO为配送单位,考虑其全部所需的零组件、标准件和成品件,建立物料配送时间求解仿真模型。在对物料拣选时间、物料装载时间、物料卸载时间和物料运输时间等进行考虑的基础上,针对各站点的工序进行情况对比,对各站点物料需求时间进行计算,获取准确的物料配送时间,从而保证各站点物料的精准、按需配送。

结论

本文面向飞机总装脉动生产线,以有效控制生产节拍、降低制造成本

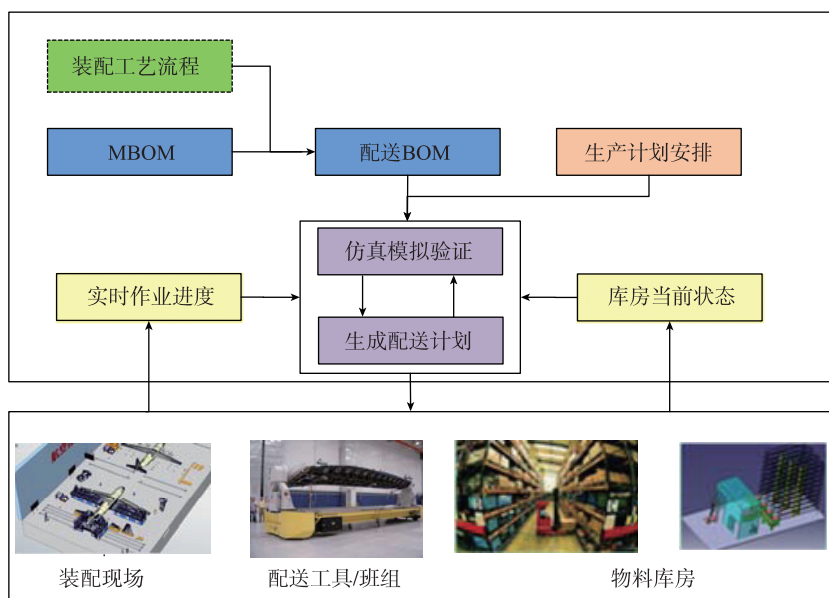


图3 实时状态驱动的物料配送方案决策优化

Fig.3 Material distribution optimization based on real time state

和提升生产线快速反应能力为目标,讨论了在生产线运行前进行总装工艺流程建模、基于工艺流程的装配仿真以及生产线规划等方面,及生产线运行过程中需要重点考虑的排产调度与物料配送等方面的问题解决方法,提出了关键技术及基于仿真决策的实现方法和途径,为构建合理、高效、灵活的飞机总装脉动生产线和生产线运维过程中的科学管理工作打下了重要的技术基础,同时也为飞机总装领域实现智能制造提供了发展思路。后续工作将基于关键技术的研究,开展系统开发与实施应用工作,以科学的手段辅助飞机总装脉动生产线的顺畅运行。

参考文献

- [1] 李涛,张世炯,张宁.工业4.0牵引的飞机总装工艺流程设计技术浅析[J].航空制造技术,2015,58(21):81-86.
- LI Tao, ZHANG Shijiong, ZHANG Ning. Preliminary research on aircraft final assembly process design in industrie 4.0[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(21): 81-86.
- [2] 侯志霞,邹方,吕瑞强,等.信息物理融合系统及其在航空制造业应用展望[J].航空制造技术,2014,57(21):47-53.
- HOU Zhixia, ZOU Fang, LÜ Ruiqiang, et al. Analysis on cyber-physical system and its application in aeronautical manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 47-53.
- [3] 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 pulsation production line for aircraft final assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 48-51.
- [4] 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.
- [5] 许国康.飞机总装移动生产线技术[J].航空制造技术,2008,41(20):40-43.
- XU Guokang. Movable production line technology for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 41(20): 40-43.
- [6] 陈绍文.航空产品移动式装配的动向和对策[N].中国航空报,2013-1-10(T03).
- CHEN Shaowen. The trend and countermeasure of mobile aviation assembly[N]. China Aviation News, 2013-1-10(T03).
- [7] 郭佳,吴永林.通用飞机总装脉动式生产线构建[J].航空制造技术,2015,58(5):58-61.
- GUO Jia, WU Yonglin. Construction of pulsating production line of general aircraft for final assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(5): 58-61.
- [8] 袁书梅,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.
- [9] 段胜文.飞机脉动总装生产线物流布局方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- DUAN Shengwen. Research on the production logistics layout method of the aircraft pulse final assembly line [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [10] 王巍,俞鸿均,安宏喜,等.飞机数字化装配生产线布局仿真技术研究[J].制造业自动化,2015,37(5):64-66,89.
- WANG Wei, YU Hongjun, AN Hongxi, et al. Research on simulation about aircraft digital assembly line layout[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(5): 64-66, 89.

通讯作者:陈军, E-mail: 172199753@qq.com。

Research on Key Technology of Aircraft Assembly Pulsation Line Planning and Operation Optimization Based on Simulation Decision

CHEN Jun, SUN Jiwei, YANG Yi

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

[ABSTRACT] In the view of aircraft assembly pulse production line, the simulation and decision support technologies are discussed, in terms of assembly process, production line planning, material distribution and resource scheduling. These technologies aim to increase the rationality of the planning scheme in the line design stage, and to stabilize the takt time, to guarantee the product due time, and to improve the efficiency of the overall production line in the line operation stage.

Keywords: Production line modeling; Simulation decision; Aircraft assembly pulse production line; Production line planning; Production line operation optimization

(责编 大漠)