

# 基于模型的航空脉动装配生产线关键数字化技术研究

张晓梅

(航空工业信息技术中心(金航数码),北京 100028)

**[摘要]** 结合某飞机总装厂脉动生产线项目,针对航空脉动装配生产线,从基于模型的系统工程和智能制造出发,研究了基于模型的航空脉动装配生产线应用的关键技术。通过航空脉动装配生产线关键技术的研究,打通了基于模型的航空脉动装配生产线的产品研制过程,为航空脉动装配生产线数字化生产和智能化决策提供技术支撑。

**关键词:** 航空脉动装配生产线;基于模型的系统工程;生产流程标准作业图;物(Thing);设备互联;安灯;健康分析预测;智能决策

## Research on Key Digital Technology of Aircraft Pulsation Assembly Production Line Based on Model

ZHANG Xiaomei

(AVIC Digital Center (AVIC Digital Corporation Ltd.), Beijing 100028, China)

**[ABSTRACT]** Based on the project of pulsation production line of an aircraft assembly plant, this paper studies the key technologies of the application of pulsation assembly line based on model-based system engineering and intelligent manufacturing. Through the research of the key technology of the aviation pulsation assembly line, the product development process of the aviation pulsation assembly line based on the model is opened, which provides technical support for the digital production and intelligent decision-making of the aviation pulsating assembly line.

**Keywords:** Aviation pulsation assembly line; Model-based system engineering; Production process standard operating chart; Thing; Equipment interconnection; Andon; Health analysis prediction; Intelligent decision-making

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.04.074

当今航空工业迅猛发展,飞机的研制任务日益增多,航空运输业的快速发展带来新型飞机需求量的急剧增长,传统的机库式飞机装配模式,各个工序之间相互影响、互相牵制,直接影响物料、人员、设备、工具等的高效使用,导致现场问题反馈和处理缓慢、装配周期长,这样的装配模式已无法适应现代飞机快速研制的要求。为满足新的业务需求和挑战,一种基于精益制造的先进航空脉动装配生产线应运而生。航空脉动装配生产线可以将整个生产线按照站位划成几个单元,每个单元有其固定的设备、人员、工具、物料和工艺等,各个站位可以相互独立工作。这样可以合理分配利用资源,并大大减少问题反馈周期,可以极大提高整体装配效能。国际上,如波音 787、空客 A320、洛马 F-35 飞机都在用脉动装配生产线进行飞机装配,并取得了显著成效<sup>[1]</sup>。国内主要飞机总装厂已经建造有飞机脉动装配生产线,并开始飞机脉动装配,极大提高了飞机装配效能和质量<sup>[2]</sup>。然而,传统的飞机脉动装配生产线是基于图纸的产品研制模式,纸质的工卡、物料清单、问题报告等,不便于文

件存储和管理,不便于信息的查找、浏览和理解,难于实现信息的完整定义、连续传递和关联变化,已经远远不能满足飞机数字化协同研制的要求,因此基于模型的航空脉动生产线成为现代飞机研制必要的新模式。

基于模型的智能化航空脉动装配生产线是借助数字化、智能化、网络化技术,通过集成、仿真、分析、控制等手段,实现航空脉动装配生产线的动态感知、实时分析、自主决策和精准执行<sup>[3]</sup>。本文从基于模型的系统工程和智能制造出发,结合某飞机总装厂总装脉动生产线项目实践经验,综合国内外航空脉动装配生产线研究成果,开展基于模型的航空脉动装配生产线关键技术研究。

### 1 基于模型的航空脉动装配生产线数字化技术应用综述

图 1 是基于模型的系统工程整体架构,通过构建数字系统模型框架,将模型贯穿于产品研制的整个过程,包括:需求工程、设计工程、制造工程、试验工程和转移与确认等,通过建立有体系架构模型、任务架构模型、需



图1 基于模型的系统工程整体架构

Fig.1 System engineering architecture based on model

求模型、功能模型、逻辑模型、物理模型、仿真模型、制造模型、试验模型和运行模型等,实现模型连续传递与持续验证。在数字化虚拟环境中,解决传统飞机研制在物理环境下的试验验证和更改改进,减少设计制造迭代,确保产品研制一次成功。

图2为基于模型的航空脉动装配生产线在产品设计、工艺设计、生产制造领域所涉及的内容。基于模型的航空脉动装配生产线,将模型应用于制造工程环节,数字化模型贯穿于工艺规划设计、工艺设计、工装设计、工艺分析仿真和验证、车间生产线布局设计、物流仿真和验证、设备运行模拟仿真、质量分析和控制等制造工程的各个过程,实现航空脉动装配生产线快速设计、正常运转和不断改进优化。

建立基于模型的数字化航空脉动装配生产线,基于前端的设计模型、工艺模型和生产线模型,进行脉动装配生产过程模拟仿真。通过设备互联、安灯系统和ERP/MES/MDC的集成,实时获得现场作业信息。建立数字化设备模型、生产作业模型,通过数字化模型仿真了解生产过程。根据产品的变化对生产系统进行重组,并模拟生产运行情况,对生产过程进行优化。使脉动装配生产线在投入运行前就了解其使用情况,分析其可靠性、经济性、质量、工期等,为生产过程优化和智能制造提供支持。

从数字化、模型化、智能化范畴而言,基于模型的航空脉动装配生产线的技术应用主要有以下几点:

(1)基于三维模型的数字化协同研制。

数字化协同产品研制环境,确保三维模型从产品研制的上游畅通地向下游传递,解决了基于三维模型的设计工艺协同工作问题,解决了基于三维设计模型的工艺制造应用问题,解决了生产现场无纸化环境下基于模型的产品加工、装配、检测等问题,为基于模型的航空脉动装配生产线提供基础数据支撑,为数字化、模型化、智能化产品研制奠定基础。

(2)基于虚拟仿真技术的飞机脉动装配生产线模拟。

数字化模拟工厂是将数字化技术在航空脉动装配生产线制造规划层的一个应用。基于数字化技术建立数字化工厂模型,基于虚拟仿真技术实现数字化工厂模拟仿真,包括工艺方案和工艺路线规划仿真和优化、工艺设计和仿真优化、工装设计和仿真优化、制造过程设计和仿真优化等,在数字化世界确保飞机脉动装配生产线的正常运作和智能运行,为真实生产提供科学的保障依据。

(3)基于制造过程管控实现飞机脉动装配生产线的优化。

通过设备互联互通、安灯系统和ERP/MES/MDC系统集成等应用,可获得制造过程产生的各种数据,基

于这些数据进行问题快速反馈和处理,形成现场问题快速处理闭环<sup>[4]</sup>。利用这些实时数据和历史数据,建立数字化分析仿真模型,基于大数据模型进行生产过程分析仿真和预测分析<sup>[5]</sup>,从质量趋势、物流瓶颈、计划执行情况、设备运行情况等方面找出影响生产过程的规律,为生产决策提供科学依据,进而提升飞机脉动装配生产线的预知、响应和判断能力,实现智能化决策。

## 2 智能化航空脉动装配生产线关键技术

图3是基于模型的航空脉动装配生产线包含的内容,主要包括4大部分:基于模型的产品设计和管理、基于模型的工艺设计和管理、脉动线生产执行过程管理、基于模型的健康监测和智能决策等。

针对航空脉动装配生产线的研制特点,基于模型的航空脉动装配生产线从基于模型的系统工程理论出发,通过数字化、模型化、智能化技术应用,在数字化环境将

模型贯穿应用于设计与生产各个环节,基于生产状态的信息进行航空脉动装配生产线实时分析和智能决策。

智能总装脉动生产线的关键技术有:面向航空脉动装配生产线的基于模型的设计和工艺规划技术、基于模型的航空脉动装配生产线设计与仿真技术、基于模型的智能设备信息采集和处理技术、基于模型的现场作业信息快速反馈和处理技术、基于模型的运行状态监控与优化分析技术等。

### 2.1 面向航空脉动装配生产线的基于模型的设计和工艺规划技术

以MBD技术为核心的基于模型的数字化协同产品研发,实现以产品结构为核心的数字样机管理,通过EBOM可视化重构PBOM。PBOM的重构是以脉动生产模式为依据,基于总装脉动生产线的节拍和站位进行PBOM的重构,以满足脉动生产的要求。工艺总方案和工艺分工路线的制定是基于总装脉动生产线的生产模



图2 基于模型的航空脉动装配生产线

Fig.2 Aircraft pulsation assembly production line based on model

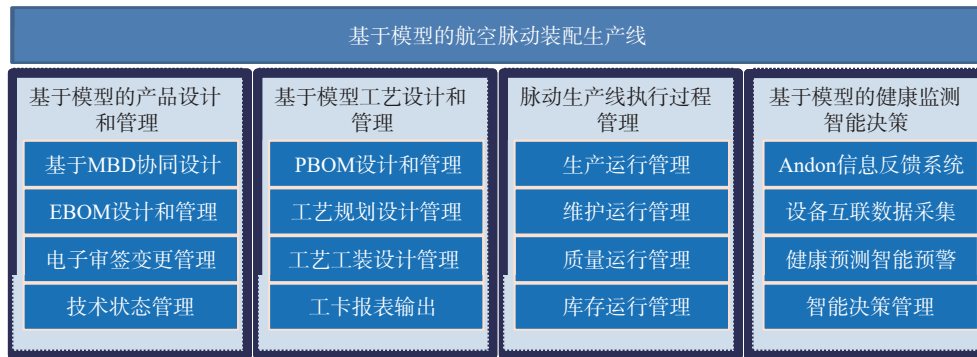


图3 基于模型的航空脉动装配生产线包括内容

Fig.3 Contents of aircraft pulsation assembly production line based on model

式,根据脉动节拍进行工艺分离面划分的。

飞机脉动装配生产线的每一站位是以生产流程标准作业图来描述的,生产流程标准作业图体现了飞机脉动装配生产线每一站位某一天的所有工作任务、专业内部及跨专业间的串并行工序作业关系、装配指令的关键工序信息、开工时间完成周期及操作者。通过可视化的方式,实现对装配单元的串并行关系、关键路径、父子隶属关系、架次有效性的定义,以及站位信息、加工周期、加工工种、加工工人及脉动节拍的定义。

某飞机总装厂脉动生产线项目中,通过生产流程标准作业图的构建方式,业务人员可以依据工艺成组方法,并考虑到应用的便捷性,对装配单元或 AO 进行分组打包定义。在生产流程标准作业图调整时可直接对分组图进行调整,分组内的装配单元或 AO 调整时并不会影响整个生产流程标准作业图的结构关系,形成相互独立的工艺单元,进行相互独立的快速设计和变更,以满足脉动生产的业务需求。

## 2.2 基于模型的航空脉动装配生产线设计与仿真技术

通过数字化技术对制造系统中的各个制造要素和过程进行数字化建模,形成和物理环境相似的数字化模型。通过数字化仿真技术模拟仿真生产线过程,在数字世界中完成航空脉动装配线模拟仿真,实现航空脉动装配线上每个站位装配过程的模拟,并按照脉动站位特点对实际业务流程和制造资源进行优化配置,主要包含车间层、生产线层、单元层以及操作层的规划和仿真等。如基于脉动站位进行各站位物料配送模拟仿真,实现物流效率分析、物流设施容量计算、物流路径规划等,支持基于脉动节拍实现实际业务流程和制造资源的优化配置。如基于每个站位个人的工作任务完成节拍,实现工序时间的分析和优化,合理定义每个站位每道工序需要

的工时,优化人力资源分配和生产进度节拍,达到优化航空脉动装配线和高效生产的目的。

## 2.3 基于模型的智能设备信息采集和处理技术

智能设备是智能制造的物理实现载体,基于物联网技术,连接现场作业的设备、工装、工具、物料等,了解物(Thing)的具体位置和运行情况,实现设备间互联互通,实现物(Thing)信息的实时采集、数据挖掘、分析和展示,并对设备进行实时监控和健康预测管理,提高设备的工作效率和使用寿命。

图4是某飞机总装厂脉动生产线项目中智能设备信息采集和处理系统,由物理层、控制层和决策层构成,物理层指设备的执行单元、传动单元、感知单元和测量单元等物理结构;控制层指具备自适应控制和一定自主决策能力的控制系统;决策层指基于工件状态在线感知测量的加工编程和优化修正系统。

智能设备信息采集和处理系统架构中有两个智能闭环控制环路:由控制层和物理层构成的控制系统闭环,实现设备运动过程的自主和自适应控制;由决策层、控制层和物理层共同构成的生产决策闭环系统实现生产状态的在线预测和智能优化等。

通过设备互联,实时采集设备运行数据。统计设备运行过程中的关键指标数据,基于模板输出设备运行数据结果。建立设备数字化模型,针对采集到的数据进行仿真分析,分析设备中关键数据的变化规律,以及其变化趋势,对设备进行健康预测,为设备维修维护、备品备件的前提采购提供科学依据。

## 2.4 基于模型的现场作业信息快速反馈和处理技术

在航空脉动装配生产线运行过程中,如何及时获得现场作业信息,如何抽取现场反馈的问题,如何根据问题的轻重缓急将问题反馈给相关人员,如何实现问题的



图4 智能设备信息采集和处理

Fig.4 Intelligent device information collection and processing

快速处理,将极大影响脉动生产线运转情况。图5描述了基于模型的航空脉动装配生产线在生产现场健康与监视管理过程,基于模型的现场作业信息快速反馈和处理技术通过现场作业问题的获取、分类、传递和反馈,形成现场问题快速处理的闭环,满足航空脉动装配线生产线高效运行要求。

故障种类有:设备故障应急、消防应急、质量应急、物料缺失、工具缺失、生产指令出错、工艺中断、成品问题、人员操作错误以及其他突发事件等。某飞机总装厂脉动生产线项目中,为了脉动线健康与监视管理系统警情的醒目、简洁,将问题报警归类为5大类,并在悬挂的安灯看板上重点显示脉动站位各种信息,包含:人员、缺件、设备、质量、消防安全。该项目中,根据生产现场问题详细分类,设定三级报警级别与三级责任人与部门,实现问题的逐层上报和处理。三级报警级别:第1级,物料缺失、人员少量缺失、工艺超时、质量;第2级,站位装配成品损坏、拖期、设备和工具损坏或缺失,影响工艺继续的质量问题,工艺流程中断(允许时间内);第3级,生产节拍中断(严重滞后),人员伤亡等重大事故等。

三级责任人与部门:第1级:工人、工段长、调度、工艺、检验、库房、设备管理员;第2级:工艺室、调度室、检验室、设备室主任;第3级:总装厂长/副厂长、制造部部长、质量部部长、工程技术部部长。

在某飞机总装厂脉动生产线项目中建立有现场问

题快速响应的安灯系统,安灯系统通过站位的现场终端实时收集脉动线上物料、人员、设备、质量、工具等问题信息,将这些问题及时反馈到车间脉动线的安灯看板、广播报警设备、灯光报警设备、现场和责任部门可视化终端等,让相关部门的相关角色及时获得现场作业信息,及时动态调整各站位的人员、缺件、设备等问题,并根据各站位的作业情况,及时解决质量安全和消防问题,进而实现整个脉动生产过程的透明化,实现问题闭环的快速处理,让整个总装脉动生产线的资源最大利用,提高整个总装脉动生产线效能。

### 2.5 基于模型的运行状态监控与优化分析技术

随着智能装备的大规模应用及PLM/ERP/MES等软件的应用推广,制造企业已积累了大量的与制造有关的各种数据,如工艺规划、工艺规程、生产计划、不合格品/超差处理记录、生产节拍、质量状态、成本定额、人力资源、供应链信息等。基于模型的航空脉动装配生产线可基于角色和站位需要收集各种数据,建立大数据分析仿真模型实现航空脉动装配生产线分析仿真和验证,通过生产线平衡技术的应用<sup>[6]</sup>,从中找出改善未来总装脉动生产线业务的依据,从质量趋势、物流瓶颈、计划执行情况、设备运行历史、成本定额、供应链信息等数据中发现可能影响未来生产过程的规律,以指导飞机脉动装配生产线生产决策。

基于模型的航空脉动装配生产线支持航空脉动装

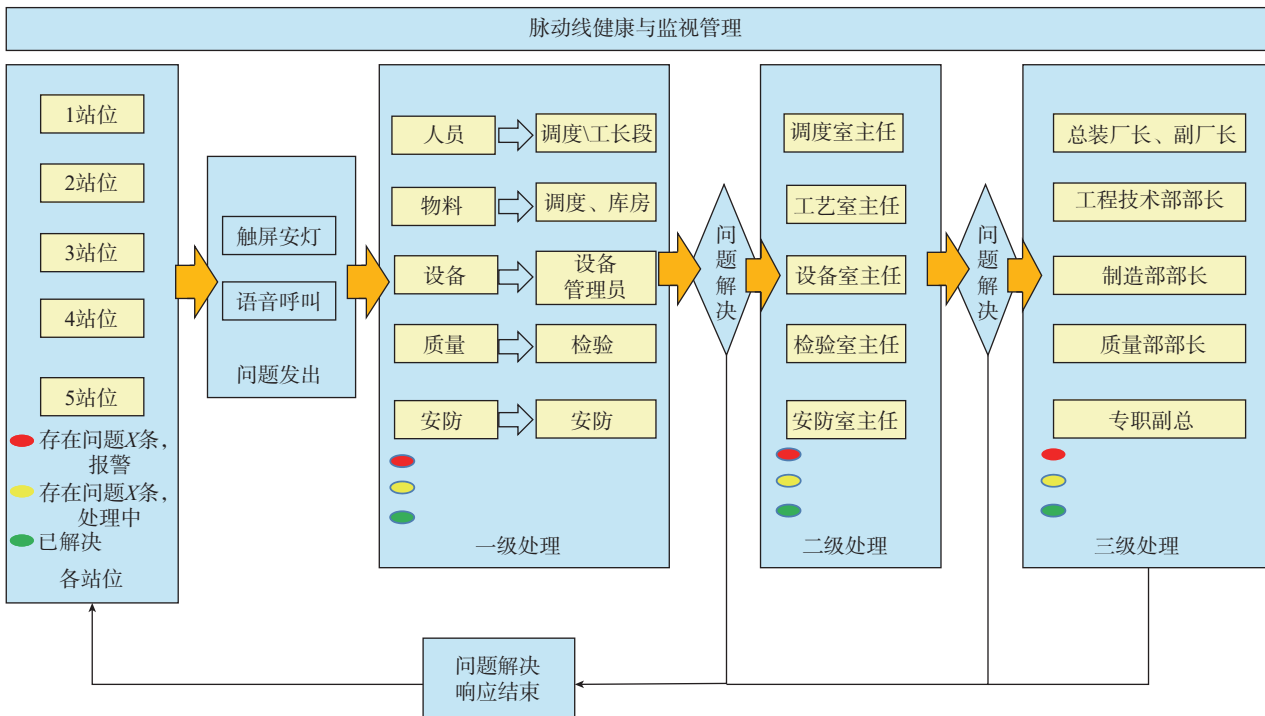


图5 脉动线健康与监视管理  
Fig.5 Pulsation line health and surveillance management

配生产线运行状态在线及离线分析。在线分析通过对物料、工序进度、工序完成情况等信息的统计,可以基于数字化模型对脉动线节拍的准时性进行实时的在线分析。计划员针对现场生产设备的产能进行计划优化分析;工艺员针对现场设备的参数及指标优化,对工时进行优化设计;工人在现场作业时,系统对频发性的质量问题点进行提醒;质检员从事后质量转变为事前质量的预测和监控;系统针对设备维修和保养及备件的采购提醒设备管理员。

脉动线运行状态离线分析的周期可灵活进行设置,例如以月、季度、年为时间周期。通过一段时间运行,以人员、物料、设备、工序、质量、工装、工具等信息为输入,基于大数据模型对人员加工熟练度、物料配套准确率、设备故障率、工序质量不合格率、工装工具维修率等因素进行分析,进而实现航空脉动装配生产线优化设计,如:基于产线平衡的产线优化设计、物流配送优化设计、设备健康预测、设备科学维修维护、生产计划及工艺优化设计、各站位资源的优化设计等,为智能决策提供科学依据。

### 3 基于模型的航空脉动装配生产线应用场景描述

#### 3.1 生产线优化设计

脉动装配生产线运行过程中,生产线的负载率经常在一定的范围内波动,对负载率进行分析,有利于宏观

把握脉动线生产效率以及减少资源的浪费。脉动线的载荷是反映脉动线加工能力的技术参数,在脉动线运行良好的情况下,载荷在一个稳定的范围内波动,对脉动线载荷进行预测,有助于提高脉动线产能。脉动线运行状态是判定是否需要停工检修的依据。将脉动线运行状态分为良好、较差两类,处于良好状态时不需要停工检修,较差状态时需要停工检修。

脉动线健康状态离线分析见图6。影响脉动线运行状态的因素包括人员、物料、设备、工序质量、工具等。不同的操作人员因知识背景、累计经验、身体条件等条件的差异,相同工艺操作技术、速率等可能会有所不同,从而使时间产生差异;物料配套的准确率以及物料是否按时配送等也会造成停工等待;在生产过程中,由于设备发生故障也会造成脉动线的停产;工序质量不合格、工具维修换新等行为也会对脉动线效率有影响。

以上述5个因素作为马尔科夫模型输入因素,以两年作为一个周期,模型的输入为可观测序列,可观测序列包括人员、物料、设备、工序质量、工具。人员包括掌握不同技术程度的人员百分比,人员对技术的掌握程度分为了解一点、基本掌握、掌握很好3种程度;物料包括物料配送的延时率以及物料配套准确率;设备包括设备故障率;工具包括工具故障率;工序准时完工率、工序质量合格率作为模型的输入;输出因素为脉动线负载率、载荷、健康状况及是否停工检修等内容。基于这些输出内容进行脉动装配生产线调整和设备维修维护等,

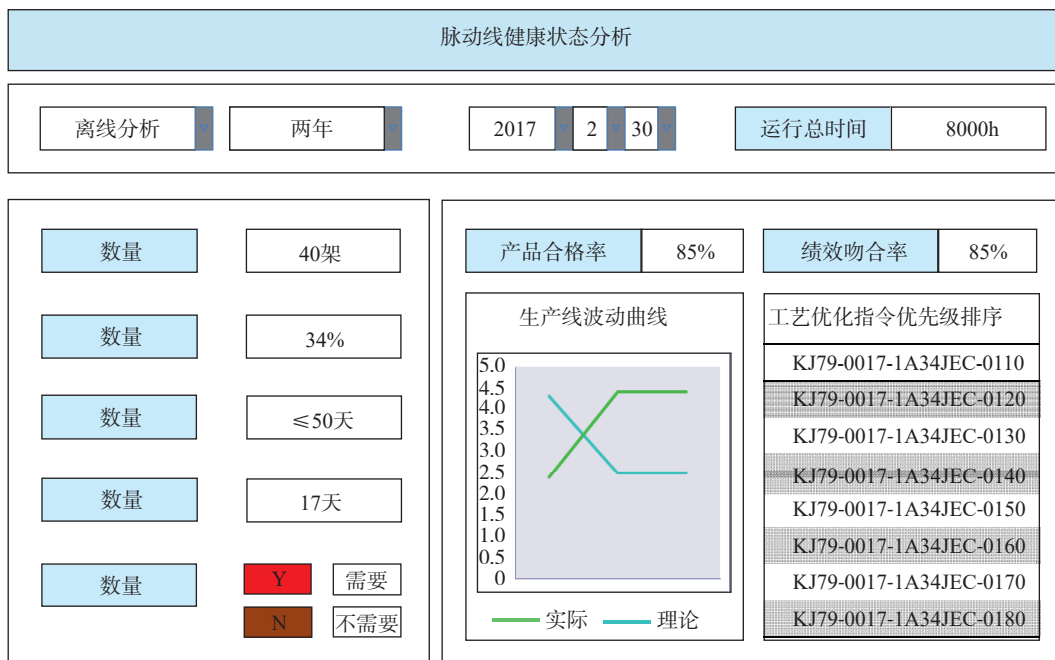


图6 脉动线健康状态离线分析  
Fig.6 Offline analysis of pulsation line health

实现科学依据指导下的智能生产决策。

### 3.2 装配工艺优化设计

基于模型的脉动装配生产线对可实现装配工艺优化设计。基于模型的脉动装配生产线具有对工序计时与统计功能,即对生产的每架次飞机记录每道工序的开始时间、完工移交时间、计划完工移交时间,同时计算出工序的实际工时、延误时间,并判断出工序是否按时完工;进行工序检验时,记录存储工序检验的结果。脉动线运行一段时间后,系统会分别统计出各道工序的完工率、交检率和质量检验时间。依据 3 个指标,在不同的情况下给出不同的工艺优化指令,如图 7 所示。

工序完成情况包括提前完工、按时完工、延迟完工,其中提前或延迟完工频率较高(如超过 70% 的情况提前或延时,由专业工艺员规定)的工序,系统会自动推送消息至指定专业工艺人员,以便工艺员审查和调整该工序的工艺和工时分配合理性。提前完工率较高的工序,可以通过工序合并或其他方法减少工序时间,延时完工率高的工序要从工艺方法、工序安排或者操作人员自身技能等方面进行优化。

同样,系统也需要对交检合格率的统计结果进行反馈。交检率一直保持较高水平的工序(如连续 10 次交检合格率 100%,由专业工艺员规定)可以缩短质检时间或者免去质检环节。而交检率过低的工序,要从工序方法、工序安排以及操作人员水平等方面对工艺进行优化,从而提高质量。质量检验时间从一定程度能反映出工序的复杂程度以及质检方法是否有待优化,对于质量检验时间长的工序可以从质量检验方法以及工序方法

等方面对工艺进行优化,如图 8 所示。

工序方法、工序规划的优化指令需依靠问题管理中对反馈问题中关于工序方法、工序规划部分,在问题处理闭环的流程中,对工艺类问题进行详细描述并反馈,如在工序方法问题封闭时需记录解决问题的工序方法,系统根据此类数据进行分析、类比,在提出工序方法优化指令时,给出解决此类问题常用的新工序方法。

综上所述,基于模型的脉动装配生产线会根据对各站位装配现场人员、工时、质量等因素的信息采集,进行统计和分析,从而提出对部分工序工艺优化的建议,供工艺人员进行工艺的具体优化实现。对飞机总装脉动

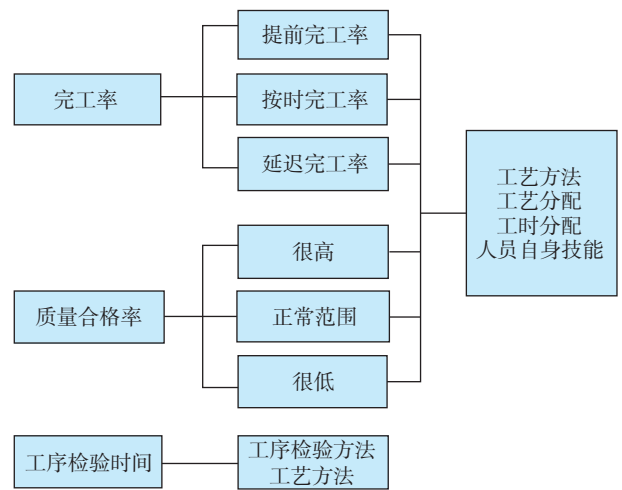


图8 脉动装配生产线工艺优化设计

Fig.8 Optimization design of pulsation assembly production line

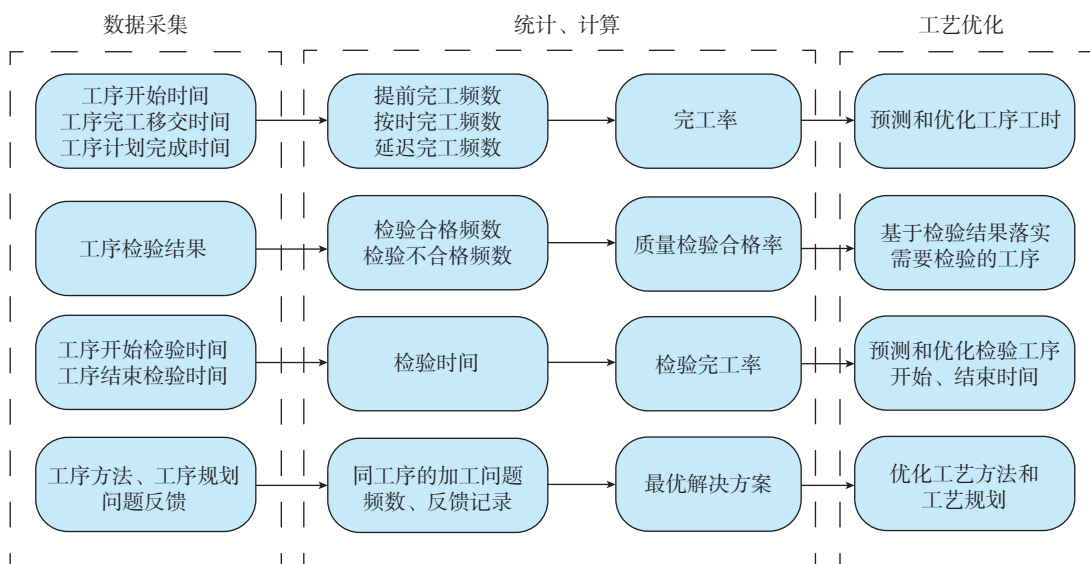


图7 脉动装配生产线装配工艺优化

Fig.7 Optimization of assembly process of pulsation assembly line

线运行过程中出现的问题进行不断改善,有助于提高生产效率,为实现缩短生产节拍、提高产品产能提供必要的支持。

#### 4 结论

本文从基于模型的系统工程和智能制造视角出发,结合某飞机总装厂脉动装配生产线应用,描述了基于模型的航空脉动装配生产线的基本概念,论述了基于模型的航空脉动装配生产线的关键技术。基于模型的航空脉动装配生产线的建设是一个复杂系统工程,其在构建过程中和验证过程中需要参考系统工程和智能制造实施方法论。因此,系统工程和智能制造是未来飞机脉动装配生产线需要加大研究的方向。

#### 参考文献

- [1] 范玉青. 波音 787 飞机总装配线及其特点 [J]. 航空制造技术, 2011, 54(23/24): 38-42.
- FAN Yuqing. Boeing 787 final assembly line and its characteristics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(23/24): 38-42.
- [2] 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. The application and development of pulsation assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(17): 58-60.
- [3] 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 in pulsation production line of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 41-47.
- [4] 李西宁, 胡匡植, 李维亮, 等. 飞机数字化柔性装配工装技术 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 40-43.
- LI Xining, HU Kuangzhi, LI Weiliang, et al. Aircraft digital flexible assembly tooling technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 40-43.
- [5] 魏小红, 谈军, 方红文, 等. 航空发动机水平脉动总装生产线规划研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(19): 8-12.
- WEI Xiaohong, TAN Jun, FANG Hongwen, et al. Study on the planning of aero-engine horizontal pulse assembly production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(19): 8-12.
- [6] PAZOKI TOROUDI H, MADANI M S, SARLAK F, et al. A multi-objective method for solving assembly line balancing problem[J]. Decision Science Letters, 2017, 6(1): 1-10.

通讯作者: 张晓梅, 工程师, 航空工业信息技术中心(金航数码)资深顾问, 研究方向为基于模型的系统工程和智能制造, E-mail: 13801312723@139.com。

(责编 阳光)

(上接第73页)

#### 参考文献

- [1] 陈国庆, 树西, 张秉刚, 等. 国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 123-128, 134.
- CHEN Guoqing, SHU Xi, ZHANG Binggang, et al. State-of arts of electron beam freeform fabrication technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 123-128, 134.
- [2] 巩水利. 高能束流加工技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(9): 34-37.
- GONG Shuili. Application of high energy beam processing technology in the field of aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(9): 34-37.
- [3] MELLOR S, HAO L, ZHANG D. Additive manufacturing: A framework for implementation[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 149: 194-201.
- [4] 莫蓉, 常智勇, 刘红军. 图表详解 UG NX 二次开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- MO Rong, CHANG Zhiyong, LIU Hongjun. Detailed explanation of the UG NX secondary development[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.
- [5] 刘晓光. UG 的二次开发及其应用技术研究[J]. 科学技术创新, 2015, 29(11): 117-118.
- LIU Xiaoguang. Research on secondary development of UG and its application technology[J]. Scientific and Technological Innovation, 2015, 29(11): 117-118.
- [6] 吴湘, 赵万生, 魏莉. 三维几何表示法[J]. 航天制造技术, 2002(4): 33, 44-47.
- WU Xiang, ZHAO Wansheng, Wei Li. Three-dimensional geometric representation[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2002(4): 33, 44-47.
- [7] STROUD I. Boundary representation modelling techniques[M]. London: Springer, 2006.
- [8] 高曙明. 自动特征识别技术综述[J]. 计算机学报, 1998, 21(3): 281-288.
- GAO Shuming. Overview of automatic feature recognition technology[J]. Journal of Computer, 1998, 21(3): 281-288.
- [9] 花广如, 周雄辉. 特征识别的现状与存在的问题及解决方案[J]. 机床与液压, 2008, 36(4): 19-22.
- HUA Guangru, ZHOU Xionghui. The status quo of feature recognition and existing problems and solutions[J]. Machine tool and hydraulic, 2008, 36(4): 19-22.
- [10] 刘定伟. 基于 UG 的产品形态特征提取与参数化设计[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- LIU Dingwei. Feature extraction and parametric design of product based on UG[M]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [11] 樊锡鹏. 基于模型定义的制造特征识别方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- FAN Xipeng. Research on the technology manufacturing feature recognition based on model definition[M]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.

通讯作者: 廖敦明, 教授, 博士生导师, 研究方向为材料成形数字化, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn。

(责编 阳光)