

多品种变批量产品智能工厂功能框架*

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] 为推动多品种变批量产品智能工厂的研究、规划和应用,以工厂基本业务流程为牵引,研究了智能工厂的功能框架,梳理了智能工厂的概念及内涵,提出了智能工厂的体系架构,讨论了协同设计、智能生产、试验验证和智能管控等主要内容,以及研究了研制过程模型的智能转换和研制过程数据的自动采集及分析等关键技术,对于后续智能工厂的设计及建设具有一定的参考价值。

关键词: 多品种; 变批量; 智能工厂; 功能框架; 产品研制

Function Architecture of Intelligent Factory for Multi-Varieties 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 research, planning and application of intelligent factory for products with multi variety and variable batch characteristics, driven by the basic business process of the factory, the function architecture of intelligent factory is studied. The system architecture of the factory is put forward, and the concept, connotation and the main contents such as collaborative design, intelligent production, test verification and intelligent control are discussed. Furthermore, the key techniques such as intelligent conversion of model, automatic acquisition and analysis of data in the development process are studied. It is certain reference value for the subsequent plant design and construction of the intelligent factory.

Keywords: Multi-varieties; Variable-batch; Intelligent factory; Function architecture; Product development

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.14.093

近年来,在“中国制造 2025”牵引下,各部委制定并发布了多项智能制造发展推进计划和项目指南,如科技部《智能制造科技发展“十二五”重点专项规划》、工信部《智能制造科技发展“十二五”重点专项规划》、工信部《智能制造发展规划(2016-2020年)》及“智能制造试点示范项目”等,推进了智能制造的发展和应用,夯实了智能制造的技术基础;2018年,科工局发布了《智能制造专项行动计划项目指南》,旨在推动智能制造在军工产品研制中的应用,提升研制能力和研制水平,为国防和军队建设提供保障。

军工制造业是我国制造业的重要组成部分,普遍具有多品种变批量特点^[1-2],体现在产品品种不确定性和数量不确定性,由此导致研制产品类型众多且由于衍生产品多引起设计更改频繁,生产过程离散程度高且由于产品类型经常变换导致生产计划难以制定和过程管控

难度大,不同批次和不同数量产品的生产引起工装数量众多且生产转换频繁、生产效率低、设备利用率低和质量一致性不高等,生产过程影响因素众多引起研制生产组织复杂等,解决以上问题需要生产系统集成化和数字化、并行协同的产品快速研制、基于全过程实时信息分析及决策的研制生产系统快速优化调整、基于柔性 and 自动装备的柔性生产及生产系统的快速组合和调整等^[3-5]。满足以上所述要求的生产系统属于智能制造研究范畴,并且工厂是进行产品研制生产活动的载体,智能工厂是发展智能制造的核心^[6],因此,本文拟以智能工厂为载体研究多品种变批量军工产品的智能制造问题。近年来,围绕智能工厂已经进行了很多研究,在智能工厂规划方面,介绍了国外通用公司、雷神公司和纽波特纽斯船厂等军工企业的智能工厂建设案例^[7],初步讨论了智

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

能工厂建设的要求^[8-10]和提出了智能工厂的建设思路^[11]等;在智能工厂体系方面,重点研究了智能工厂的体系架构、关键内容和管理体系等^[6,10-12],并给出了智能工厂技术架构标准^[13-14];在智能工厂设计及应用方面,重点研究了智能工厂制造执行系统的应用^[15-16]、智能工厂设计与实现^[17-18]和智能工厂建设方案^[19]等;在智能工厂涉及一些技术方面:围绕数字孪生技术,研究和探讨了数字孪生的理论与技术、概念内涵与体系架构、研制过程应用等^[20-22],并认为该技术是实现智能制造的技术基础^[23];围绕数据管理及应用方面,研究了BOM在产品生产制造和管理中的应用等^[24-27];围绕试验验证,研究了虚拟试验在产品研制中的作用和应用,并探讨了建立试验体系的问题等^[28-29];另外,围绕多品种变批量生产的概念,一些学者认为:多品种变批量生产是一种根据待制造产品的品种和批量变化而迅速调整生产的制造模式,该模式面向生产任务和生产资源,在低成本投资甚至无投资方式下,使得生产功能、生产能力和生产过程得到快速改变,以实现产品多品种、变批量的柔性生产^[3-5,30]。上述研究从不同的角度和层面对智能工厂进行了诠释,对数字孪生、BOM及试验验证等技术在生产中的应用进行了探讨,并对多品种变批量的概念进行了阐述。本文围绕具有多品种变批量特点的军工产品,借鉴前人研究成果,对智能工厂的功能框架作进一步研究和探讨。

1 智能工厂概念及内涵

1.1 概念

从工厂职能来看,其活动主要包括需求分析及论证、产品设计、试验验证、生产制造、销售及售后服务、经营管理。多品种变批量智能工厂是指围绕多品种变批量产品的研制生产需求,充分利用工业互联网、信息感知、大数据和在线监控等技术,基于设备互联和唯一数据源的研制流程再造,融合设计制造知识,实现工厂不同层级和硬件系统的互联互通、产品研制及生产过程的实时监控、基于数据分析的研制过程的优化决策、基于仿真手段和知识支持的并行优化设计、基于先进制造装备的柔性化自适应制造和基于数字孪生的生产过程自主管控等,保证工厂能够根据待研制产品的品种和待生产产品的批量变化而迅速调整研制生产计划并按计划完成任务。

1.2 内涵

多品种变批量产品智能工厂以客户需求为牵引,基于工业互联网建立高度集成和柔性的智能研制体系,解决产品品种不确定及数量不确定的问题,实现高效率、低成本、高质量、短周期和个性化研制生产。其中,围绕产品品种的不确定性,能够根据多型号的研制任务,快

速组织及完成产品设计、试生产、设计定型及批生产等;与该类不确定性相适应的是产品研制过程实现基于知识的快速建模及评估、基于模型的协同设计优化、基于柔性化和自动化装备的智能生产和基于唯一数据源的模型自动转换等。围绕产品数量的不确定性,能够根据不同型号多批次和不同数量的生产任务,快速调整生产系统及组织生产,并按要求完成生产任务;与批次和数量不确定性相适应的是产品设计和工艺设计的协同、工艺规程的自动和柔性编制、整机及零部件自动和柔性生产、生产过程的在线监控及基于数据分析的智能管控、生产过程仿真优化等。

2 智能工厂功能框架

2.1 总体框架

多品种变批量产品智能工厂的基本业务流程如图1所示,围绕产品多品种的研制需求,快速完成设计并组织生产,具体如下:

(1)需求分析。根据客户研制需求和已有的知识进行分析和评估,生成初步的概念模型、概念设计方案和实施路径,并经过多次协调和讨论,形成最终概念设计方案、概念模型和实施路径。

(2)产品设计。根据概念模型,基于设计知识库和模块化的设计系统,完成总体、分系统和零部件设计,生成数字化模型,并实现基于数字化模型的设计之间的协同、设计与制造的协同,并由仿真试验完成设计的虚拟验证。

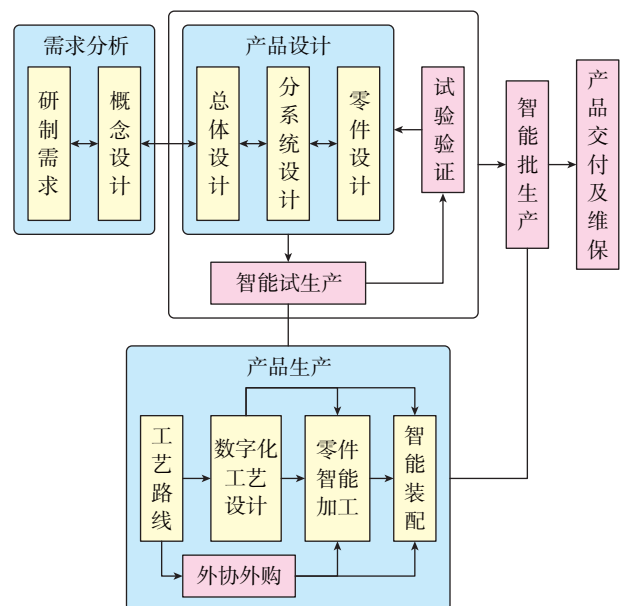


图1 智能工厂基本业务流程

Fig.1 Intelligent factory basic business process

(3) 智能试生产。基于产品设计方案和设计模型并行完成总装、部装和零件加工的工艺设计,形成工艺方案,然后基于智能生产系统组织零部件加工、部件装配和总装配,完成产品试制,其中部分零件和部件需要通过外协外购完成加工。

(4) 试验验证。试生产结束后,根据客户需求及设计要求,并结合虚拟试验,按照试验标准进行实物验证试验,试验过程自动采集产生的价值数据并分析形成试验结论,验证设计指标是否满足设计要求,并为后续的设计改进及优化提供依据。

(5) 智能批生产。产品在设计改进及优化后,经综合评估完成设计定型和工艺定型,进入批产阶段,基于智能生产系统完成产品批生产。

(6) 产品交付及维保。产品生产完成交付客户后,进行运维及保障;针对异常情况和质量问题能够快速诊断和及时处理。

产品的设计和生产是工厂活动的主体,本文围绕智能工厂基本业务流程,主要研究设计和制造环节,形成智能工厂功能的系统架构,如图2所示,包括基础层、集成层、管理层和应用层。基础层涵盖工厂所有的制造资源,包括先进的制造装备、检测装备、工艺装备、各类设计软件系统等;集成层基于基础层和工业互联网络系统

形成协同研制和智能生产集成平台;管理层围绕产品的研制和生产,基于研制生产全过程数据和工业大数据分析平台,对工厂的日常经营、产品研制、生产制造和产品质量进行管控;应用层基于集成层和管理层,实现产品的需求分析、协同设计、智能生产和试验验证。

综合考虑智能工厂的业务流程、系统框架和设计制造关键环节,智能工厂功能框架主要内容包括协同设计、智能生产、试验验证和智能管控,关键技术包括研制过程模型的智能转换和研制过程数据的自动采集及分析。其中,围绕军工产品多品种变批量特点引起的新产品和衍生产品类型众多、研制过程复杂多变、生产现场任务调整频繁和设备柔性化不够等问题,协同设计主要通过知识和仿真手段解决多型号的快速研制的问题;智能生产主要通过柔性化和智能化装备升级和管理提升等手段解决不同品种和不同数量产品的快速生产转化及高效生产的问题;试验验证主要通过虚实结合的试验手段解决有效减少实物试验次数、验证设计参数及优化设计的问题;智能管控主要以数字化和智能手段解决研制生产任务变更及时重新组织研制生产任务的问题;关键技术“研制过程模型的智能转换”重点解决研制过程存在的数据不唯一、频繁设计变更和版本升级导致的管理混乱和数据集成管控的问题;关键技术“研制过程数据的自动采集及分析”重点解决由于研制过程复杂多变导致的生产系统运行状态难以准确掌握和管控的问题。通过解决以上问题并形成智能工厂,有效提升研制效率及降低研制成本,保证多品种变批量产品的快速研制生产。

2.2 主要内容

2.2.1 协同设计

多品种变批量产品协同设计流程如图3所示,基于三维模型实现概念设计和总体设计的协同、总体设计和详细设计的协同、产品设计和工艺设计的协同,具体如下:

(1) 概念设计和总体设计的协同。根据用户需求明确产品的使用环境、产品功能及性能等,基于专家分析决策系统对需求进行综合评估并生成概念数字模型;同时进行产品的总体设计并形成总体数字模型,包括机械系统设计、控制系统设计和电气系统设计等,以及进行分系统分解,并进一步明确功能指标和性能指标的实现方案,完成使用环境下应用仿真验证及优化和分系统总装仿真验证及优化;基于概念数字模型及总体数字模型,通过和客户多次沟通,优化调整并确定最终的概念设计和总体设计方案。

(2) 总体设计和详细设计的协同。在概念设计和总体设计的同时,根据总体设计方案形成的分系统模块,进行各模块及所含零件的详细设计。其中围绕分系

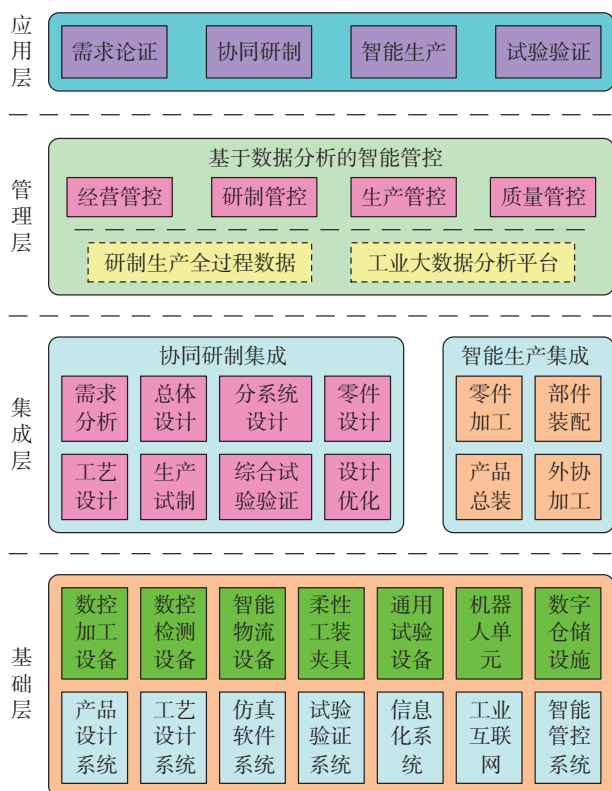


图2 智能工厂系统架构

Fig.2 Intelligent factory system architecture

统设计,重点完成结构、热、控制、电气等多学科耦合分析及虚拟验证、部装过程仿真和设计优化;围绕零件设计,明确零件的加工工艺及完成工艺过程仿真验证及优化和基于虚拟生产线的加工过程仿真验证。

(3)产品设计和工艺设计的协同。围绕总体设计、分系统设计和零件设计生成的三维数字模型,基于三维工艺设计系统和知识库,结合工艺过程的仿真及工艺优化,分别生成总装、部装和零件的三维工艺规程;基于工艺规程指导零件智能加工、部件智能装配和智能总装配,然后将试制完成的产品进行试验验证,并将试验验证和试制过程产生的数据进行分析并反馈到设计各阶段以完成设计优化。

2.2.2 智能生产

多品种变批量产品的智能生产具有柔性化和可重构的特点,能够根据生产任务要求和实时生产状态尽快完成生产调整和组织再生产,具体逻辑流程如图4所示。首先根据客户需求或生产需求,形成工厂级的生产任务和生计划;工厂根据生产任务和生计划分解各车间的生产任务和任务节点并下发至各车间;车间根据生产任务和时间节点分解各生产线的生产任务和生节点,然后组织生产并完成生产任务。生产过程能够根据产品特点和生情况进行自适应生调整,体现状态感知、实时分析、自主决策和精准执行的柔性化智能生产的特点。其中:

(1)生产线由各工位合作完成生产任务。工位的功能包括基于机器人的物料自动装填和卸载、物料的柔性化自动精准装夹、根据自身状态和当前工况的自适应生、生产过程的在线检测、检测结果的实时分析及决策、基于决策的优化调整等。

(2)实时监控车间各生产线的运行状况和产品的生情况。将生产过程的价值数据进行分析挖掘,提出优化方案并进行生调整,优化车间的内部资源以保证完成生;各车间的生情况及时反馈给智能工厂分析决策系统,并在分析决策的基础上将价值信息反馈给智能工厂。其中与生相关的信息主要包括生的总体进展、生的演化规律、生瓶颈分析和生过程各种问题的解决方案等。

(3)物料配送是指车间生产过程的配送。主要包括物料进厂、物料进车间和零部件出车间并配送其他车间3个环节,即根据需求完成各车间物料的智能配送,并在物料配送的过程中实时分析当前的生情况及完成物料的准时化配送,保证生的顺利进行。

2.2.3 试验验证

试验验证是研制阶段的关键环节,随着军工产品的复杂度、研制成本和需验证的功能及性能指标的增加,传统的仅以实物产品进行试验验证的方式不仅增加了研制成本,也增加了验证的复杂程度。随着仿真技术的发展及可信度的提高,为尽可能减少实物验证的次数及有效降低成本,仿真技术已经广泛应用于实验验证。采用虚实结合进行试验验证的逻辑流程如图5所示,主要通过虚拟试验和实体产品试验相结合的方式,对设计指标进行验证,并将验证结果作为仿真模型修整和设计优化的依据,提升仿真模型的成熟度和置信度,并有效优化产品和提升产品的性能。具体如下:

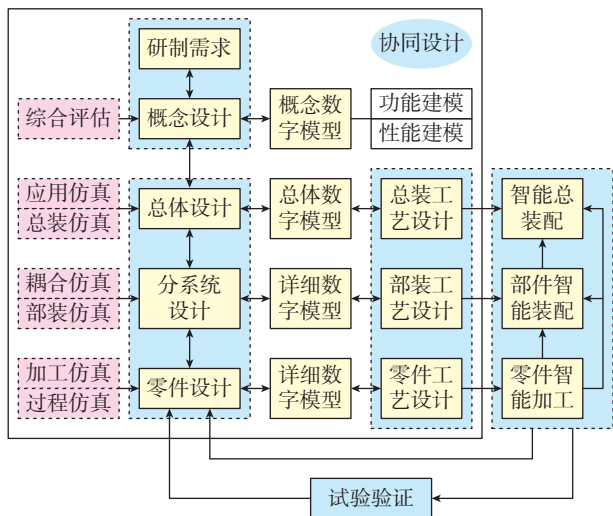


图3 协同设计逻辑流程

Fig.3 collaborative design logic process

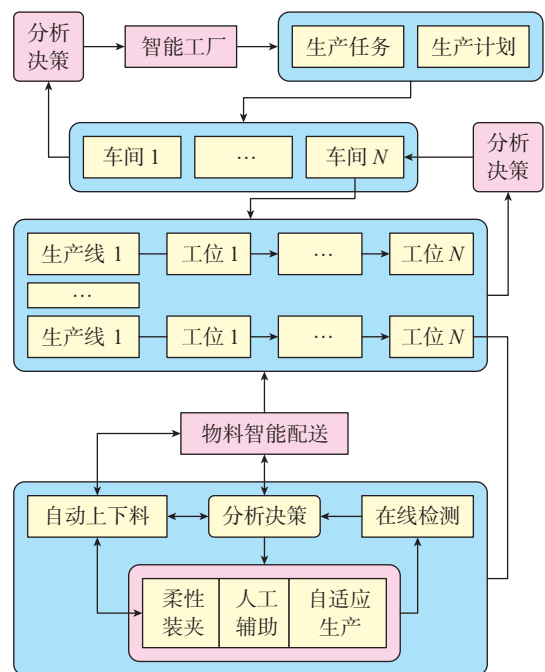


图4 智能生产逻辑流程

Fig.4 Intelligent production logic process

(1) 根据使用环境、功能指标和性能指标等设计参数,对产品进行深入研究和分析,清楚产品的总体和分系统的结构、功能和性能,并掌握实现该功能和性能的方法。

(2) 基于数字化模型,结合产品及分系统的使用环境和试验标准,建立部件及整机的仿真模型,对机械系统、控制系统、液压系统以及整机的使用过程进行仿真,得到仿真结果;然后根据产品和工厂的实际情况建立评估模型并进行评估,并参考评估结果对设计进行迭代和优化,输出满意的设计结果和生成相应的仿真评估数据,为后续的实物试验提供参考,并作为辅助材料为最终试验结果提供补充。

(3) 基于产品和分系统的分析结果、设计指标和实物样机,设计及制定合理的试验方案,并在条件成熟时组织实物试验,试验过程中自动采集/搜集结果数据;然后基于数据智能分析手段对采集的数据进行自主建模及自动分析,并结合仿真数据分析结果生成最终的试验结果评估报告及根据评估报告进行决策,进一步优化设计方案,并以实物试验数据为依据进一步修整和调整仿真模型,提升仿真模型的置信度;另外,基于实物试验数据及解决问题的方案等形成设计知识,融入产品的设计知识库,不断提升设计系统的智能水平。

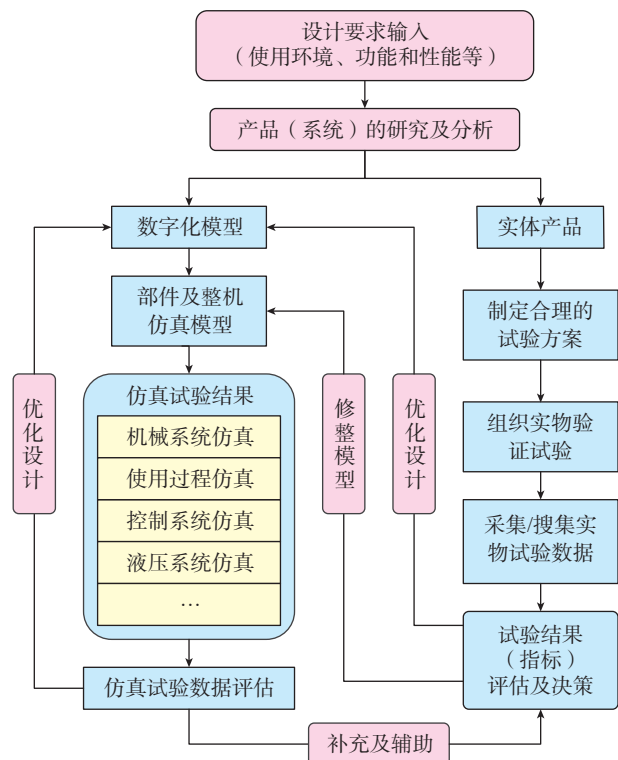


图5 试验验证逻辑流程
Fig.5 Test verification logic process

2.2.4 智能管控

多品种变批量的生产过程经常由于生产变更导致生产任务的再调整,准确掌握当前生产现状并根据工厂实际运行情况进行及时调整是智能管控的关键,具体逻辑流程如图6所示,分为业务及数据、模型及分析、展示及决策和调整及优化4部分,形成“业务精准执行-数据在线采集-状态实时分析-决策及优化调整”的闭环控制模式,实现工厂业务过程的智能管控,其中:

(1) 业务和数据。围绕工厂的主要业务,面向设计/工艺设计过程,重点采集设计/工艺设计计划、当前进度、预计完成时间、出现的问题及解决情况(如解决方案、解决过程、当前进度等);面向制造过程,重点采集车间的生产情况(如各生产线的生产安排、设备状态、生产节点记录、完工预测、生产质量等)、资源使用情况、物流情况、生产计划及执行情况等;面向试验过程,重点采集试验计划、预计完成时间、当前进度、试验结果及优化设计生产的方案、出现的问题及解决方案等。

(2) 模型和分析。基于实时采集的数据进行分析,

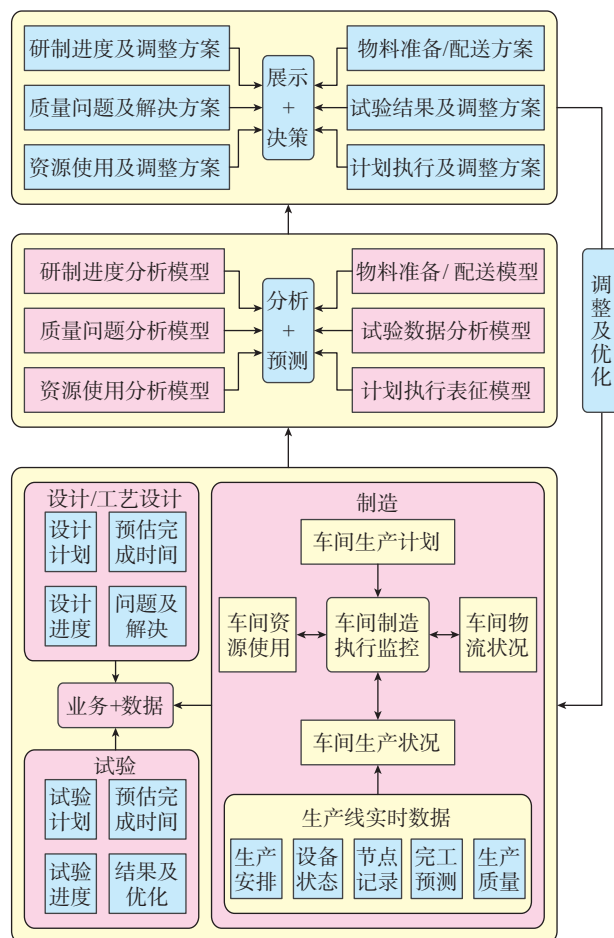


图6 智能管控逻辑流程
Fig.6 Intelligent control logic process

重点整理关于研制进度、质量问题、资源使用、物料准备 / 配送、试验数据和计划执行 6 个方面的数据,并根据工厂的管理职能和管理需求分别构建研制进度分析、质量问题分析、资源使用分析、物料准备 / 配送、试验数据分析和计划执行表征等模型和进行分析,重点得到当前产品的研制情况和工厂的运行情况,并预测未来的发展趋势。

(3) 决策和展示。基于分析结果和展示显示大屏幕等硬件系统,以不同的展示方式形象及直观显示当前所有产品的研制进度、资源保障及使用、物料准备及配送、试验结果、存在的质量问题和计划执行等情况,并基于当前工厂的运行情况、存在的问题和预测的未来发展情况进行综合评估和判断,生成问题的解决方案和优化调整方案,以解决当前已经存在的问题,或提前解决可能存在的问题。

(4) 调整和优化。基于生成的解决方案和调整优化方案,对工厂的业务过程进行调整,实现优化设计和优化生产的目的。其中,面向产品设计和工艺设计过程,重点根据试验结果进行产品的优化设计和根据设计调整的工艺设计,并根据当前产品的研制进度及计划执行情况,重新生成研制计划,实现产品设计和工艺设计的过程管控;面向制造过程,重点根据生产过程优化调整方案生成新的生产计划和资源配置安排,保证资源利用率和生产效率,实现优化生产;围绕试验过程,重点根据设计及生产调整结果生成新的试验验证方案,为后续的验证做好准备。

2.3 关键技术

2.3.1 研制过程模型的智能转换

具有多品种变批量特点的军工产品结构复杂、使用环境苛刻和可靠性要求高等,经常由于试制暴露的问题和客户需求等原因导致设计变更,为避免频繁设计变更和版本升级导致的管理混乱,特别需要建立基于唯一数据源的研制体系,将设计、工艺、生产和检测等模型进行关联,实现工艺、生产和检测等模型(含数据)根据设计变化进行自动判断和调整,完成设计和工艺变更,有效提升模型的变更效率。以唯一数据源作为产品设计生产的依据是数字化制造和智能制造的关键问题,其模型及数据转换逻辑流程如图 7 所示,需要说明的是后续描述中没有提及并行协同,实际各阶段的数字样机和模型仍然以并行协同的方式完成设计。具体如下:

(1) 基于客户需求的分析,形成研制需求并进一步量化及形成技术指标。主要包括产品的使用环境、性能指标和功能指标等,在技术指标的基础上,基于设计知识和设计工具自动进行判断及生成概念数字样机,并请客户确认,审签完成后基于设计知识、多学科仿真手段

和设计工具等生成总体设计模型并完成审签;将总体设计模型作为产品修改和调整的源头,主要表征产品的外形、部件、部件所含的零件、零部件之间的关联关系。

(2) 基于总体设计模型。分解各部件并基于设计知识、仿真手段和设计工具完成部件及所含零件的详细设计,并与总体设计模型进行关联,继承已有的特征并根据功能需求和后续的工艺设计及加工需要详细设计部件及零件,审签结束并自动生成设计 BOM(EBOM),然后发送工艺部门进行工艺设计;工艺设计部门基于设计数字样机和 EBOM,以及工艺设计知识和仿真工具,面向后续的加工,完成工艺路线的设计规划、零部件设计调整、工艺辅助零件的设计、总装 / 部装 / 零件加工的车间安排等,最终生成关联设计数字样机的工艺数字样机,并在完成审签的同时生成工艺 BOM(PBOM)。

(3) 基于工艺数字样机和 PBOM,将总装、部装和零件加工任务分解发给对应车间,随即基于力学仿真、加工过程仿真,以及设计知识和设计工具,并结合待加工零部件特征和生产车间的制造资源和管理流程等自动完成工艺规程的设计和配套工装设计,以及分解外协外购任务等,生成与工艺数字样机关联的制造数字样机,并在完成审签的同时生成制造 BOM(MBOM)。

(4) 基于制造数字样机和待加工零部件的检测需求,自动生成生产过程检测三维数字模型和检测流程,并结合制造数字样机完成生产任务,制造形成合格产品。当由于研制过程出现问题或客户要求变化等引起设计变更时,以总体设计模型为源头,以标准化和流程

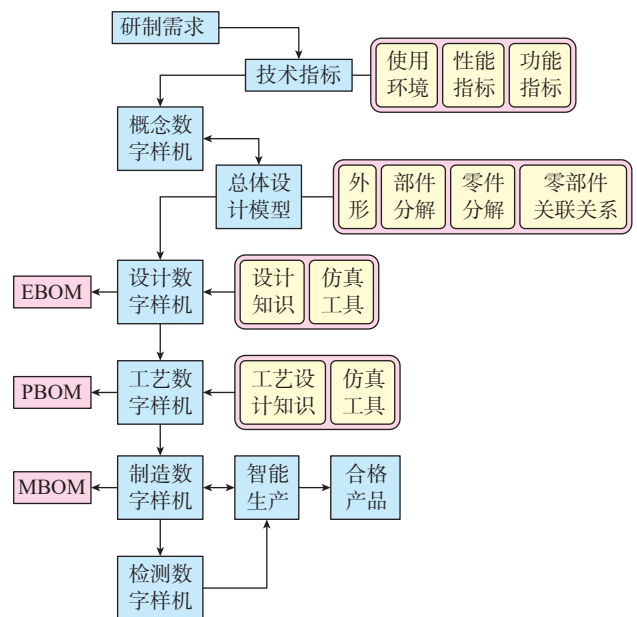


图7 研制过程模型及数据转换基本逻辑
Fig.7 Model and data conversion basic logic in development process

化的研制过程变更审签流程进行模型及数据更改,以及各数字样机及各阶段 BOM 的自动更新,生成完整的设计、工艺和制造等模型及相关联的数据,保证新版模型及数据的唯一性、可靠性和实用性。其中,如果更新过程出现问题时,需要人为干预。

2.3.2 研制过程数据的自动采集及分析

相对于规模化和批量化产品研制,以多品种变批量为特点的工厂涉及研制产品众多,研制过程复杂多变,及时准确掌握工厂的运行状态和预测未来的发展趋势并以此为依据进行决策显得尤为重要;研制过程的数据采集及分析是实现上述需求的基础,也是工厂进行管控的关键,属于智能工厂规划和研究的关键问题,其基本逻辑流程如图 8 所示,具体如下:

(1) 数据自动采集。围绕智能工厂产品的研制生

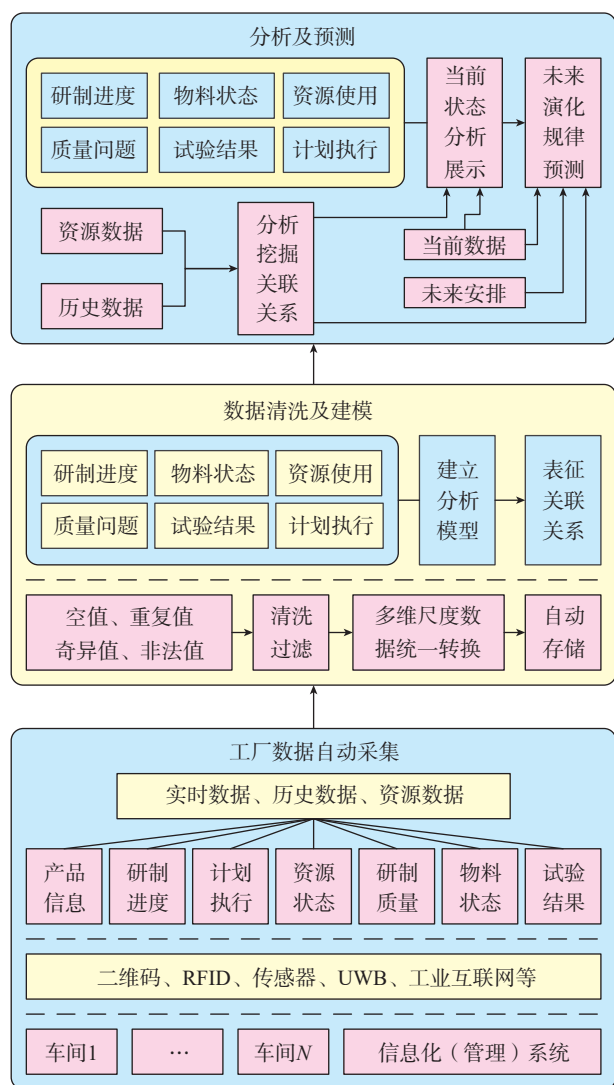


图8 研制过程数据采集及分析基本逻辑

Fig.8 Data acquisition and analysis basic logic in development process

产过程,基于工业互联网和采集工具及配套系统(如二维码、RFID、传感器、UWB等)将各车间及信息化管理系统所含的研制进度、计划执行、资源状态、研制质量、物料状态和试验验证结果等数据进行自动化采集,并将数据分类为实时数据、历史数据(已经感知完毕的数据)和资源数据。其中,实时数据是指当前实时感知的数据,历史数据是指已经感知完毕的数据。

(2) 数据清洗和建模。直接采集的数据通常都存在问题,包括空值、不一致值、非法值、重复值等问题,通过数据清洗与过滤,保证数据的真实性和唯一性。围绕后续分析模型建立和关联关系分析挖掘的需求,将经过清洗和过滤的不同尺度的各类数据转化为相同尺度的数据,在此基础上,采用 min-max 归一化方法对原始数据进行及线性变化,将结果落到 [0, 1] 区间,并将处理完成的数据自动存储到相应的数据库中;建立工厂层面关注的研制进度、物料状态、资源使用、质量问题、试验结果和计划执行的分析模型,并表征可能存在的关联关系。

(3) 分析和预测。基于资源数据、历史数据以及建立的分析模型进行分析,挖掘与研制进度、物料状态、资源使用、质量问题、试验结果和计划执行等要素相关参数之间的关联关系,并基于实时数据掌握当前工厂的运行情况和在大型显示设备上同步形象展示,以便于决策层及时掌握工厂的运行情况;然后,基于挖掘的研制进度、物料状态、资源使用、质量问题、试验结果和计划执行等要素与相关参数的关联关系、实时数据和未来计划/安排等,计算工厂上述各业务的演化规律,并判断未来的发展趋势,为工厂管理层的决策提供依据。

3 结论

智能工厂是进行智能生产核心,也是发展智能制造的载体。本文围绕多品种变批量特点的军工产品智能工厂的功能体系开展研究,以工厂的基本业务流程为牵引,研究了智能工厂的功能框架,提出了相关的体系架构,进一步说明了协同设计、智能生产、试验验证和智能管控等主要内容,并研究了研制过程模型的智能转换和数据自动采集及分析两项关键技术。以上研究对于后续智能工厂的规划、设计、建设及应用具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 彭艳萍. 发展军工制造技术,提升军工核心能力[J]. 国防制造技术, 2009, 12(6): 5-7.

PENG Yanping. Develop military manufacturing technology and enhance the core competence of military industry[J]. Defense

Manufacturing Technology, 2009, 12(6): 5-7.

[2] 丁学彬, 谷彦军, 刘忠柏. 未来军工产品制造工艺的发展方向[J]. 国防技术基础, 2006(4): 38-40.

DING Xuebin, GU Yanjun, LIU Zhongbai. Future development direction of military product manufacturing process[J]. Technology Foundation of National Defense, 2006(4): 38-40.

[3] 王宝友, 宁汝新, 崔丽华. 变批量生产及其关键技术[J]. 现代制造工程, 2002(8): 5-6.

WANG Baoyou, NING Ruxin, CUI Lihua. Scalable batch manufacturing and its key techniques[J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2002(8): 5-6.

[4] 陶小晶. 多品种变批量拉链生产计划优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

TAO Xiaojing. A research on a variety of scalable batch production planning and its optimization for zipper enterprise[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[5] 李京生. 面向多品种变批量生产的重构调度方法[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

LI Jingsheng. Reconfigurable scheduling method for multiproduct and variant volume production[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

[6] 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.

[7] 黄珊, 李晓红. 国外典型军工企业智能工厂建设案例[J]. 国防制造技术, 2017(4): 4-8.

HUANG Shan, LI Xiaohong. Construction case of intelligent factory in typical foreign military enterprise[J]. Defense Manufacturing Technology, 2017(4): 4-8.

[8] 李慧丽. 航天智能工厂建设的几点思考[J]. 网信军民融合, 2017(3): 50-54.

LI Huili. Some deliberation on the construction of aerospace intelligent factory[J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2017(3): 50-54.

[9] 王保民, 张淑敏. 离散型制造业智能工厂建设思路与关键要素分析[J]. 国防制造技术, 2016(1): 26-29.

WANG Baomin, ZHANG Shumin. Thinking and key elements analysis of intelligent factory construction in discrete manufacturing industry[J]. Defense Manufacturing Technology, 2016(1): 26-29.

[10] 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.

[11] 廖瑗, 冯亮. 汽车企业智能工厂建设探索[J]. 企业管理, 2018(7): 102-104.

LIAO Yuan, FENG Liang. Construction exploration of intelligent factory in automobile enterprises[J]. Enterprise Management, 2018(7): 102-104.

[12] 林锦州, 于英杰, 赵彦春. 面向智能工厂建设的汽车制造运行管理系统方案研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2018, 8(2): 79-81.

LIN Jinzhou, YU Yingjie, ZHAO Yanchun. Research on automobile manufacturing operation management system for intelligent factory construction[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2018, 8(2): 79-81.

[13] 陈荣, 袁宁, 王晗, 等. 我国离散制造业智能工厂通用技术架构研究[J]. 机械工程与自动化, 2016(5): 222-224.

CHEN Rong, YUAN Ning, WANG Han, et al. Intelligent factory's technical frame in dispersed manufacturing industry[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016(5): 222-224.

[14] 李翌辉, 朱海平, 刘康俊. 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, 23(6): 1216-1223.

LI Yihui, ZHU Haiping, LIU Kangjun. Smart factory architecture standard for middle and low-voltage switchgear assembly industry[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1216-1223.

[15] 罗凤, 石宇强. 智能工厂MES关键技术研究[J]. 制造业自动化, 2017, 39(4): 45-49.

LUO Feng, SHI Yuqiang. MES of intelligent plant key technology research[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(4): 45-49.

[16] 王锦程, 谢蕾, 李欣冀, 等. 智能工厂框架下的MES系统构建与应用[J]. 智能制造, 2018(1): 25-28.

WANG Jincheng, XIE Lei, LI Xinji, et al. Construction and application of MES under framework of intelligent factory[J]. Intelligent Manufacturing, 2018(1): 25-28.

[17] 孙为军, 谢胜利, 汪谷银, 等. 智能工厂工业大数据云平台的设计与实现[J]. 广东工业大学学报, 2018, 35(3): 67-71.

SUN Weijun, XIE Shengli, WANG Guyin, et al. Design and implementation of industrial big data cloud platform for smart factory[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2018, 35(3): 67-71.

[18] 虞文进, 黎勇, 徐元根, 等. 智慧工厂的信息物理融合系统体系结构设计[J]. 现代电子技术, 2017, 40(5): 151-154, 158.

YU Wenjin, LI Yong, XU Yuangen, et al. Design of cyberphysical system architecture for smart factory[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(5): 151-154, 158.

[19] 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 aeroengine manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(15): 70–77.

[20] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603–1611.

TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyberphysical fusion in digital twin shopfloor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603–1611.

[21] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753–768.

ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753–768.

[22] 陶剑, 戴永长, 魏冉. 基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 26–31.

TAO Jian, DAI Yongchang, WEI Ran. Study on production lifecycle based on digital thread and digital twin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 26–31.

[23] 于勇, 胡德雨, 戴晟, 等. 数字孪生在工艺设计中的应用探讨[J]. 航空制造技术, 2018, 61(18): 26–33.

YU Yong, HU Deyu, DAI Sheng, et al. Study on application of digital twin in process planning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(18): 26–33.

[24] 刘小龙, 田锡天, 张振明, 等. 产品生命周期过程中的BOM演进与系统集成[J]. 制造业自动化, 2009, 31(10): 27–31.

LIU Xiaolong, TIAN Xitian, ZHANG Zhenming, et al. BOM evolution and system integration in PLM[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(10): 27–31.

[25] 张永弟, 杨光, 岳彦芳. 基于BOM的CAD/CAPP/MES集成研究[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 78–79.

ZHANG Yongdi, YANG Guang, YUE Yanfang. Study on integration of CAD/CAPP/MES based on BOM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(3): 78–79.

[26] 屈力刚, 苑俊超, 魏佩振. 基于MBD的三维装配BOM重构技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(9): 26–29.

QU Ligang, YUAN Junchao, WEI Peizhen. 3D assembly BOM reconstruction technique based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(9): 26–29.

[27] 李沛田, 靳长勇. 基于BOM的船体生产设计数据管理技术研究[J]. 船舶与海洋工程, 2016, 32(4): 72–77.

LI Peitian, JIN Changyong. Research of hull production design data management technology based on BOM[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 32(4): 72–77.

[28] 支超有, 唐长红. 现代飞机系统虚拟试验验证技术发展研究[J]. 航空科学技术, 2010, 21(6): 25–28.

ZHI Chaoyou, TANG Changhong. Research on virtual test technology for modern aircraft system[J]. Aeronautical Science and Technology, 2010, 21(6): 25–28.

[29] 苟仲秋, 闫鑫, 张柏楠, 等. 载人航天器地面试验验证体系研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(6): 528–534.

GOU Zhongqiu, YAN Xin, ZHANG Bainan, et al. The ground test validation system for manned spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(6): 528–534.

[30] 胡小秋. 自动武器变批量生产模式及其若干关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

HU Xiaoqiu. Research on scalable batch manufacturing mode and the key technologies for automatic weapon[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.

通讯作者: 于成龙, 博士后、高级工程师, 主要从事先进制造技术研究、规划及应用, E-mail: yuchengl@163.com。

(责编 古京)

(上接第92页)

中的改进研究[J]. 现代制造工程, 2015(10): 42–46.

LI Qin, LIU Haidong, ZENG Fuhong. Study on improvement of lean Six Sigma method in product manufacturing process[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(10): 42–46.

[5] 杜成立, 李亮. 基于表面成形率的数控加工效率评价方法[J]. 工具技术, 2018, 52(10): 91–94.

DU Chengli, LI Liang. Evaluation method of NC machining efficiency based on surface forming rate[J]. Tool Engineering, 2018, 52(10): 91–94.

[6] FAM S F, LAU B P, ISMAIL N. Lean manufacturing and overall equipment efficiency in paper manufacturing and paper products Industry[C]//International Conference on Design and Concurrent Engineering, IDECON 2016, ID146. Langkawi, 2016.

[7] MUÑOZ-VILLAMIZAR A, SANTOS J, MONTOYA-TORRES J R, et al. Using OEE to evaluate the effectiveness of urban freight transportation systems: a case study[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 197: 232–242.

[8] FAM S F, LOH S L, HASLINDA M, et al. Overall equipment efficiency (OEE) enhancement in manufacture of electronic components & boards industry through total productive maintenance practices[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 150(3): 37–41.

通讯作者: 周佳, 工程师, 研究方向为飞机结构件数控机械加工, E-mail: 654388239@163.com。

(责编 古京)