

智能生产系统构建方法及其 关键技术研究

王焱^{1,2}, 王湘念^{1,2}, 王晓丽^{1,2}, 卢志军³, 姬学庄¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 航空工业数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024;

3. 中国航空工业集团有限公司科技质量部, 北京 100028)

[摘要] 简要回顾了制造业发展过程及智能制造发展的驱动要素, 针对航空产品制造过程多品种、小批量的离散型制造需求, 分析了智能生产系统的结构、组成及关键要素, 讨论了智能生产系统构建方法、智能化关键技术, 提出了模块化智能单元体模型, 给出了制造过程、生产系统结构的分析表达样例, 为航空工业智能制造的应用提供参考。

关键词: 智能生产系统; 智能单元体; 数字主线; 赛博-物理系统; 工程控制; 智能制造; 数字孪生

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.016



王焱

研究员, 长期从事切削加工、数控工艺、柔性制造技术、数字化制造技术等研究与应用工作, 完成了多项科研课题和型号攻关任务。近年来, 重点开展了复杂结构件精确数控加工、快速响应制造车间、复杂曲面构件适应性加工等技术研究。撰写科技论文及科技报告 60 余篇, 获集团公司科技进步奖 5 项、航空科学技术研究计划项目立功 2 次。

制造业发展回顾及智能制造发展的驱动因素

18 世纪蒸汽机的出现和应用, 标志着工业化时代的开始。随着 19 世纪新型冶炼技术、内燃机、电气技术的发展, 流水线生产、科学管理成为产品规模化生产的基本形态。到 20 世纪中叶, 随着电子技术、集成电路、计算机技术和信息技术的进步, 工业化生产被推进到了数字化时代, 数控加工、柔性制造系统、计算机集成制造、精益生产等成为现代制造技术体系的核心。针对人们对多样化产品的需求, 制造业经历了 5 个阶段的演变: 少量定制、标准化生产(可互换零件)、大批量标准化生产(福特生产线)、大批量定制(精益生产)、个性化量产(差异化服务), 当前处在大批量定制、个性化量产这一阶段。而制造业的未来, 则是差异化生产(多样化产品), 目前大批量定制正在向面向高端和主流消费市场主导、满足

客户个性需求的生产模式转变, 即个性化定制生产模式, 客户参与产品的制造过程, 能够与企业进行联合创造和协同设计^[1-2], 生产组织理念也从科学管理、标准化生产, 发展到今天的精益生产、敏捷制造、系统工程等。这些制造技术、生产管理理念的变化, 在制造业发展的不同阶段支持了小品种单件少量、少品种大批量、多品种小批量、多品种大批量等的生产形态。制造业发展形态及其形成的核心要素可概括为图 1。

从制造业发展形态及其形成的核心要素中可以看出, 电气与电子技术、计算机技术、信息技术不断与制造技术融合发展, 推动着机床装备沿着从机械到数控、从数控到智能的方向发展和演变, 推动着生产系统沿着成组技术、流水生产线、刚性自动线、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)的方向发展和演变。在工程技术领域, 1956 年“人工智能”这个术语出现

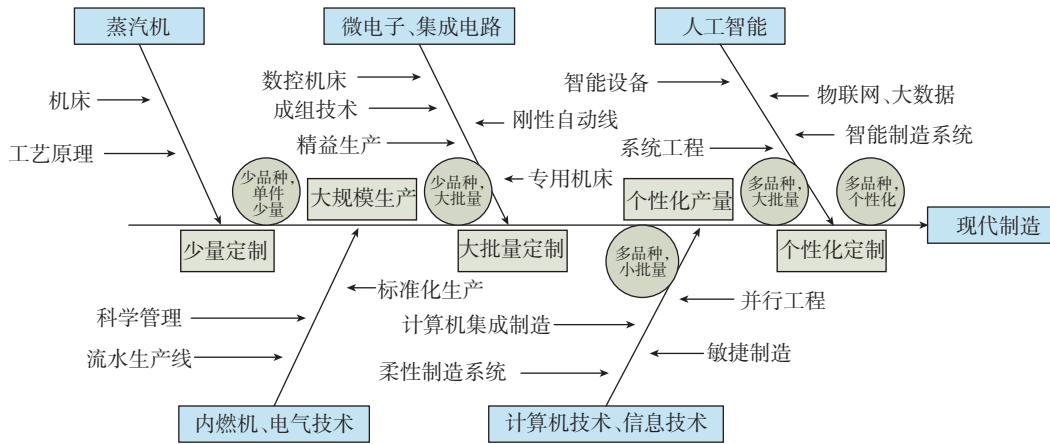


图1 制造业发展形态及其形成的核心要素

Fig.1 Development form and core elements of manufacturing industry

后,不断融入制造领域,推动了智能控制、智能分析与加工技术的发展,到20世纪80年代末,“智能制造”成为制造业新模式的研究和发展方向,形成了将管理技术和制造技术融合在一起的智能制造系统(Intelligent Manufacturing System)、全能制造系统(Holonic Manufacturing System)、敏捷化智能制造系统等基本框架和实现方法^[3-4],这是在继承CIMS的集成特性基础上,增强了智能、分布、并行的特性而发展的结果;在工业工程领域,20世纪末期起,人们深入研究了“大批量定制”生产特征和实现原理,认为大批量定制是以大批量生产的成本和效率,为客户提供定制的个性化产品与服务的生产方式,通过这种生产方式,可实现高效率、低成本生产,为客户提供需要的定制产品。大批量定制生产方式是在相似性原理、重用性原理、全局性原理、平均成本原理以及定制点原理等基础上,采取有效的开发、设计、制造以及管理等方法与手段来减少内部的多样化、增加外部多样化^[5-7];与此并行快速发展的数字化技术,从早期的CAD逐步发展成为CAD/CAM集成,产品定义从简单的二维图发展到全机数字模型,制造数据、制造资源、管理流程都变得可描述、可定义,为实现制造过程的数值计算、逻辑推理、分析决

策提供了必要条件。特别是在产品模型定义与表达方面,基于模型的定义(Model Based Definition)方法日趋成熟,近几年又进一步发展出数字主线(Digital Thread)、数字孪生(Digital Twin)概念,使数字化设计制造技术迈上一个新台阶,这是实现智能制造模式的基础^[8]。

面对不断增长的个性化定制需求,多品种个性化生产将成为一种新的生产形态,这需要制造系统能够以高效率、低成本生产客户需要的定制产品。21世纪以来,先进制造技术和管理理念的发展促进了生产模式的变革,为了快速响应用户需求实现产品快速准时交付,制造技术及其生产系统正向着数字化、集成化、网络化、智能化方向发展,同时绿色环保成为工业化生产必须遵循的基本约束条件^[9]。制造模式的变革和发展内因是技术和管理综合发展的结果,进入21世纪以来人工智能领域又呈现出了快速发展态势,为制造业向智能制造模式发展提供了技术支撑。目前存在两种人工智能流派,分别是“符号主义”智能与“连接主义”智能。符号主义智能(Symbolicism,又称逻辑主义)基于物理符号系统假设,用具有特定含义的数理逻辑符号对问题进行描述,在计算机出现后,又与信息技术结合实现了智能逻辑演绎

系统;连接主义智能(Connectionism,又称仿生学派)则是通过多个具有简单应激性的无差异个体在相互交流信息的条件下协同工作,最后达到更高的智能,例如并行信息处理、自组织自学习能力等^[10],这些方法目前已经在制造系统智能处理方面得到综合应用,如智能控制、运行管理、自适应加工等,使得制造过程呈现出“动态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的智能特征^[11],支持了制造形态向自适应、自组织、自学习、自维护的智能制造模式的转变。可以说,计算机技术、微电子技术、人工智能技术与制造技术、生产管理技术的深度融合,是驱动传统制造方式向柔性制造、计算机集成制造、智能制造方式发展的根本因素。

智能生产系统的结构组成及关键要素

制造系统是制造模式的物理实现,制造模式决定了制造系统的结构和运行方式。制造系统是一个将生产资源(原材料、生产信息等)转变为成品或半成品的输入输出系统,伴随着物流、信息流、能量流的流动,是一个“动态”过程,包含了客户需求/市场分析、产品设计、工艺规划、制造装配、检验交付、运行服务乃至报废回收的产品全生命周期,概念上可用图2模型来表达^[11-12],这是在传统制造系统基础上增强了状态感知、决策处理为主体的智能处理过程。其中,生产指令驱动的工艺规划、制造装配、检验交付是产品的实现阶段,本文讨论的智能生产系统主要聚焦在这个实现阶段,也就是狭义的制造过程,为避免与制造系统整体概念混

淆,这里称其为智能生产系统。智能生产系统的建立需要两个前提,一是有产品的数字模型;二是可有编程的数字化设备或自动化设备。在航空制造领域,全机数字模型、数字量协调、工艺装备高度自动化控制等基础条件以及异地协同工程实践等已经为智能生产系统建立奠定了良好基

础。
航空产品研制是典型的离散型过程,产品型号种类多、需求总量少,产品设计、制造生产、运行维护分属于相对独立的企业或机构,使得航空产品研制呈现出多品种、小批量/变批量、研制与批生产混合、异地协同的生产形态。从制造业发展回顾中

可以看出,生产形态、制造模式、制造系统的演变是一个继承和发展的过程,智能制造模式也必然是在柔性制造、计算机集成制造、敏捷制造的基础上演变完善的,智能生产系统是在继承和综合了柔性化、集成化、敏捷化制造系统特征基础上,进一步扩展和增强互联互通、智能处理、并行协同能力,使制造过程体现出智能特征,以满足多品种、变批量、异地协同乃至个性化的产品研制需求。

制造活动体现在企业的不同层级中,企业、工作场所、工作区域、生产线/生产单元、加工设备构成了支持制造活动的主体^[13-14],其中,企业层主要承担产品策划、财政规划、销售服务等运营管理功能;工作场所、工作区域、生产线/生产单元、加工设备是生产过程的运行主体,完成狭义上的制造活动。产品生产过程是物流、信息流、能量流的动态流动过程,可以将生产系统的制造活动及其关系表达为图3(其中,粗实线表示信息流,点划线表示物流,细实线表示

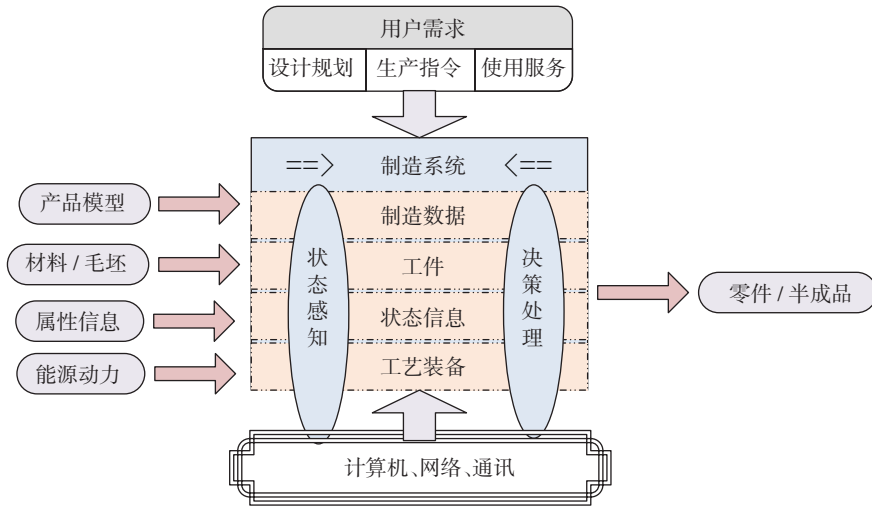


图2 面向零件加工的智能制造系统模型

Fig.2 Intelligent manufacturing system model for parts processing

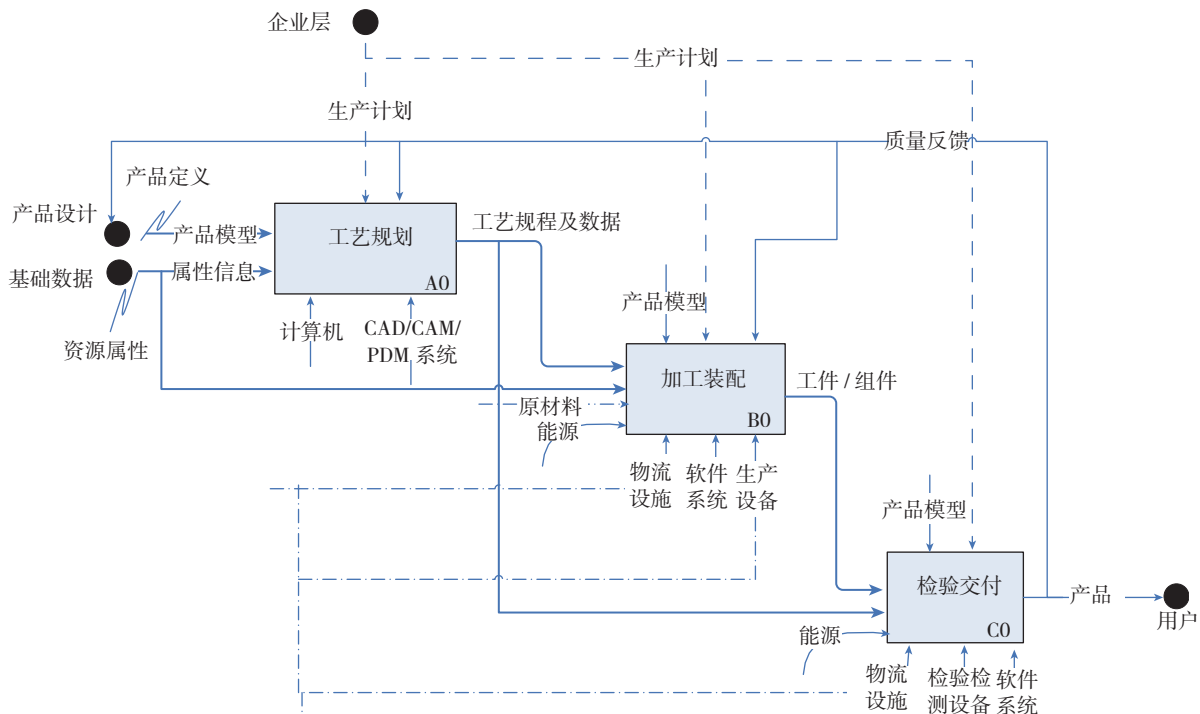


图3 制造活动及其关系

Fig.3 Relationship of manufacturing activity

信息反馈,虚线表示上层生产计划,独立箭头表示控制条件或支持条件,黑点表示本文讨论的边界)。

承载这些活动的主要资源和设施包括:(1)支持工艺规划活动的制造数据准备系统;(2)支持加工装配活动的零件加工系统产品装配系统和其运行控制系统,以及物流系统;(3)支持检验交付的质量控制系统、检验检测系统、物流系统等。图4给出了生产系统的整体组成。其中,零件加工系统、产品装配系统、检验检测系统是由生产设备、工装模具、检验设备及仪器等物理设备及其控制系统组成,它们是生产系统的最小实体。生产系统是围绕工作场所、工作区域、生产线/生产单元、加工设备构成的一个层次系统,在形式上,根据生产活动分工而形成不同生产单元、生产线、生产车间、工厂等。

生产系统智能化主要体现在运行状态识别、运行过程决策处理、加工工艺实时优化上,是一个从局部到整体的过程。智能设备、智能决策处理系统、分布式控制、物联网是智能生产系统的关键要素,是支持制造信息及时处理、资源优化利用、质量实时跟踪控制的核心基础。生产系统中生产设备、工装模具、检验设

备及仪器等物理设备的智能化是建立智能生产系统的必要前提,物联网、智能决策处理系统、分布式控制是支持总体运行逻辑实现的基本条件,其中智能决策系统分布在工艺规划、运行控制、加工装配等活动的不同层面上。智能设备和功能系统体现的是个体智能,实现局部环节的智能处理;通过分布式控制、物联网实现智能设备、功能系统的协调运行及信息反馈,才能构建出人机互联的智能化生产系统,使制造智能由个体智能跨越到整体智能,实现物流、信息流的实时管理和生产过程的精准执行。

智能生产系统构建方法

生产系统构建是生产工程实施的一个关键环节,智能生产系统的构建首先遵循传统的生产系统构建流程和基本策略,产品对象、产能指标是建立生产系统的基本约束条件。图5表示了生产系统构建的总体流程(矩形框是工作节点,菱形框是关键控制点,圆形框是系统约束条件,箭头实线表示流程顺序,虚线表示各工作节点的主要内容或结果)。

多品种小批量或变批量生产方式下,生产系统是以产品族为对象,

采用成组工艺原理进行构建的,图5中步骤①~②完成的是成组工艺设计;步骤③~⑤是针对产品族加工工艺需求的全集进行设备选择,按成组工艺的工序进行设备数量配置,按产品族工艺路线进行布局;步骤⑥主体上是生产系统运行控制设计,涉及控制系统、过程管理、质量控制;步骤⑦~⑧是对生产系统的技术经济性评价。对于智能生产系统,运行控制系统的设计是整个系统设计的核心和关键,通过运行控制系统,将生产系统各组成要素、加工对象有序组织起来实现协调运转,运行控制逻辑是运行控制系统设计与实现的前提。

传统的制造过程是以人为核心实施制造活动,依靠人的组织和协调来建立运行逻辑,按确定性条件以时间为基线(生产计划)驱动生产系统运转。随着数字模型、数字量协调、数字化和自动化设备的广泛应用,数字量成为驱动生产系统运转的主体,生产活动的组织和协调也需要自动化手段支持才能满足大量制造数据、复杂工作状态下准实时/实时数据处理要求。采用控制论的反馈原理^[15],可以用图6的控制模型来描述智能生产系统的总体逻辑,这是一个闭环控制的逻辑模型,生产现场是控制对象,数据管理系统提供公共数据,质量控制系统为闭环信息反馈的主体,这种驱动生产系统运转的策略是以系统状态为基线实现闭环反馈控制,时间基线成为运行过程的控制条件,整个生产系统的执行过程以运行控制系统为核心实现信息流的流动,并围绕“原材料·半成品·产品”进行反复迭代的过程。这里的运行控制系统是一个分布式控制系统,由设备控制层、单元控制层、系统控制层构成,形成一个递阶式控制结构。

基于图6的功能划分,智能生产系统中工艺规划系统、运行控制系统、生产现场、质量控制系统的构建,首要目标是解决制造过程信息流的

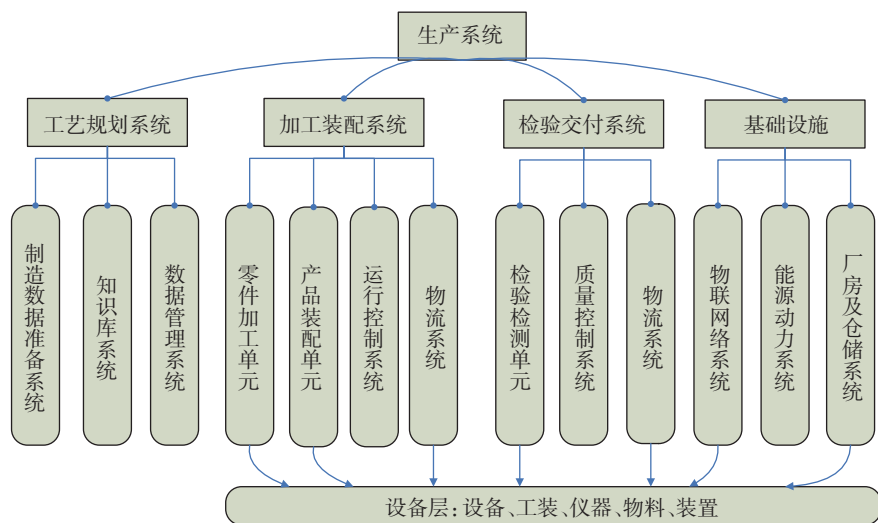


图4 生产系统整体组成

Fig.4 General architecture of manufacturing system

处理、传递和使用问题,其次是解决物流的协调运行问题,最后要建立生产状态反馈机制。

制造过程中信息流有2个主线:一是产品模型的处理和转换,从三维模型直至生成设备可用的加工程序、工艺规程、操作指令等制造数据集,这是工艺规划系统处理的核心内容;

二是以工件对象为载体的过程数据(包括制造数据集、生产状态、质量状态),这是运行控制系统处理、分配和反馈的主体内容。在工艺规划系统、运行控制系统共同作用下,形成2条数据链路,一是从产品模型到设备驱动信号的正向传递,即产品模型→工艺模型→工艺规程→加工程序→控

制代码→控制信号;二是从现场传感器信号到运行控制系统、工艺规划系统的信息反馈,即传感信号→工况状态→质量状态→误差模型→重构模型,形成从产品模型出发到重构模型建立的循环,直至加工的实物产品符合设计要求(实物与模型达成一致)。智能生产过程中,这2个数据链路形

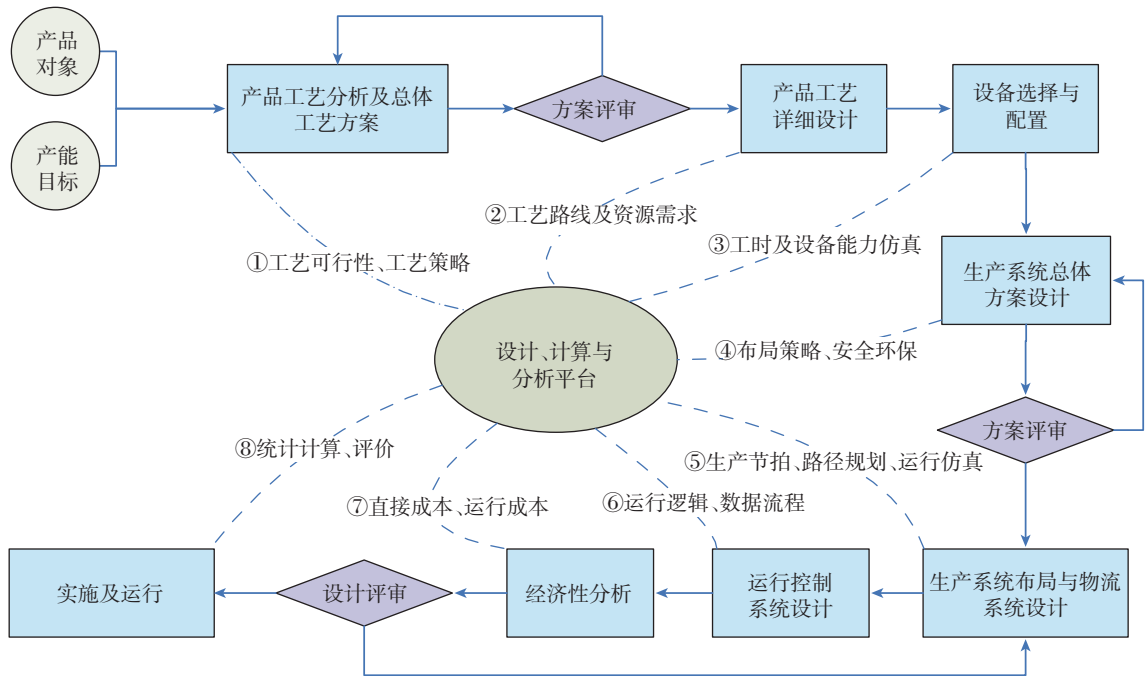


图5 生产系统构建的总体流程

Fig.5 General procedures of constructing manufacturing system

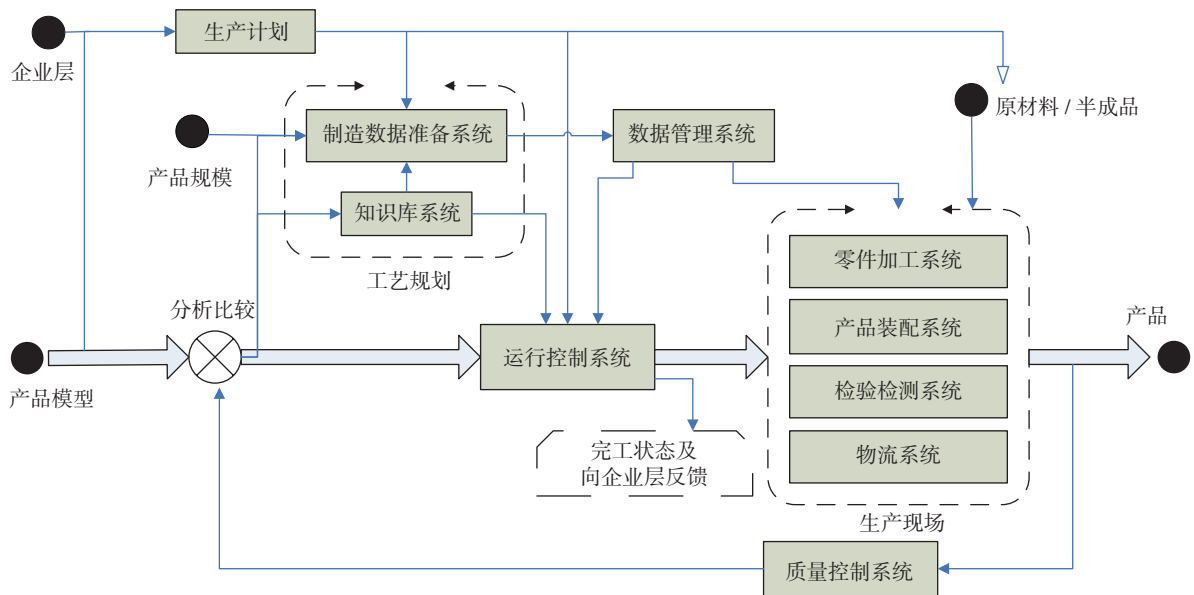


图6 生产系统运行的总体逻辑

Fig.6 General logical pattern for operating of manufacturing system

成生产系统的“数字主线”,通过数据状态的连续演变形成完整数据闭环;同时,伴随传感信号到重构模型的不断演变,形成现场实体映射到虚拟空间的“数字孪生”模型。

智能生产系统的各子系统功能设计时,针对上述2个数据链路中不同阶段,均需从传统的确定性规则、人工交互处理方式转换为采用人工智能方法进行数据处理,以满足整个系统控制基线的实时性要求,实现的基本途径是采用模块化思想将系统功能模块化分解,以模块为最小单元实现单一智能处理功能,再通过通讯机制实现不同功能模块协同工作。

物流是在生产计划、工艺过程综合作用驱动下的实物传递过程,主要由运行控制系统实现。物流承载的实物传递过程本质上是基于时间和状态的数据传递过程,时间和状态必须同时考虑。时间基线是基于生产计划分解的,可以是月、周、班、时的周期;状态基线是基于工艺规程分解的,可以是工作场所、工作区域、生产线/生产单元、加工设备的状态,这个状态的主体是加工对象的质量状态或活动进展情况,也涉及设备或其他生产资源的运行状态。时间基线和状态基线构成了物流规划与运行的基准,物流运行调度策略是时间、状态综合平衡的结果,实现根据需求传递实物的目标。

智能生产系统的生产状态反馈机制是支持智能生产过程实时分析和决策处理的基础,首先是基于传感器、物联网的信息采集和传递,其次是通过综合和分析给出生产状态。图6这个反馈机制主要通过质量控制系统实现,需要在传统的分散信息处理、传递基础上增加数据分析和建模功能,使信息变成有意义的数据,并及时传递到对应的决策系统中。

航空产品制造是典型的离散生产方式,多品种小批量生产特点使其生产系统组织原则主要是以工艺相

似性为主的成组生产。例如,飞机机体制造一般按专业划分生产系统,分为零件加工(机加、钣金、复材等)、组件/部件装配(壁板、机翼部件、机身段、起落架等)、整机装配(部件对接、机械系统安装、特设系统安装、系统试验与通电联试)等不同阶段。零件加工以机加生产系统、钣金生产系统、复材生产系统为呈现形式,完成结构件的制造;而航空发动机零件的生产系统一般在专业分工基础上再以零件类型细分,如叶片、盘环、机匣等生产线/车间。航空产品装配一般以工作站位形式呈现,它是以装配工装为中心来配备钻孔、铆接、测量等系统,在站位上完成一系列装配作业,物流是装配过程调度的主体。

航空产品智能生产系统规划设计中,首先要按图5中步骤①~②完成成组工艺设计,然后才能考虑设备和布局问题。生产线布局总体上以成组工艺为中心,针对零件加工,设备以专业分工为主体进行布局;针对部装总装,装配工作站位以“制造单元”为单位集成工装、设备及测量装置,并充分体现上述信息流、物流的构建原则。

生产系统智能化的关键技术

智能生产系统的信息流、物流、反馈建立在网络互联基础上,生产系统中各组成要素已不限于是否处于同一物理区域中,生产系统可以认为是各组成要素基于网络的逻辑关联构成的生产平台,各组成要素在网络呈现分布状态,这样生产组织管理方式也由集中管理转变为分布式管理,要求生产系统中每个个体具有独立处理现场问题的能力。生产系统的智能化,首先是每个要素个体的智能化,然后才有系统整体的智能化。

模块化是生产系统智能化的第一个关键技术。制造业发展过程中,标准化生产增强了产品批量产出能力,模块化设计增强产品变化能力,

柔性化增强了多品种批量产出能力。面对个性化产品定制生产需求,产品和生产系统的模块化是快速应对变化的基本前提。生产系统的模块化是将组成要素逐步分解,形成独立的功能体或单元体,如智能铣削、智能工装、定位分析、尺寸测量、误差评估等,这需要对生产系统组成要素进行深入分析和逐步积累,也与相关产品或工业系统的发展进步密切相关。

智能单元体(功能体或单元体)设计是生产系统智能化的第二个关键技术,也是生产系统智能化的核心技术之一。在人工智能技术发展过程中,面对分布式应用形成了Agent技术,Agent是一个独立的程序,拥有知识、自主处理及针对外部采取动作的能力,其结构见图7^[3,10];另一方面,基于控制论思想,控制对象从简单的“对象/过程”发展到复杂的“系统”层级,工程控制论(Cybernetics Engineering)经历了局部自动化、综合自动化阶段的成熟发展,逐步与物理对象深度融合,演变出了赛博-物理系统(Cyber-Physical System, CPS),CPS结构见图8^[15-17]。可以看出,Agent与CPS在内部机制上完全相似,只是CPS包含了物理对象,而Agent只是计算机空间的程序。针对智能生产系统,将模块化、Agent、CPS结合起来,构建生产系统要素的最小单元体并使其成为智能单元体(可以是Agent形态,或者是CPS形态的),以支持生产系统智能化运行。

合适的人工智能算法是实现生产系统智能化的第3个关键技术。人工智能在工程中的应用,首先是与

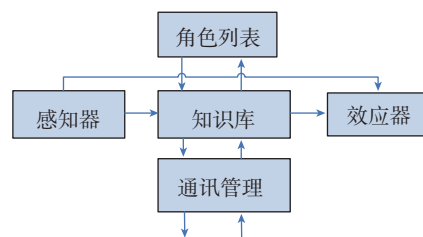


图7 Agent结构
Fig.7 Agent framework

工程控制结合,形成了模糊控制、学习控制、神经元控制、神经网络控制、专家系统控制等智能控制方法并获得工程应用^[18];其次,人工智能方法与加工过程、生产运行管理结合,在工艺规划设计、作业动态调度、故障分析诊断、加工过程互操作等方面广泛应用知识管理、遗传算法、神经网络等人工智能算法实现智能化分析与决策^[19-20]。智能生产系统涉及人工智能技术,应用范围主要涉及制造知识表达及知识库建立、工艺规划中的分析决策、运行过程的动态调度、加工过程的智能控制等,合适的模型和智能算法是实现智能决策的前提。

基于上述3方面关键技术,把生产过程、对象要素等抽象成模块化结构,每个模块化结构是“控制层+执行层”的智能单元体(Intelligent Unit),其模型表示为图9,其中“控制/决策层”是智能处理功能的核心。

控制/决策层(包含了知识库或决策规则)主要是数据控制、协调控制、执行分工控制以及通讯控制,处理的内容是数据(包括I/O信号),通过决策分析给出相应结论以驱动执行层工作;过程/功能执行层是具体活动的执行(对于软件系统是确定性逻辑处理过程),按控制层指令完成规定的工作;感知器接收执行层反馈信息,也通过控制层间接获取外部信息,提供给控制层处理;执行器是数据到动作的变换装置(对于软件系统是逻辑转换接口),驱动执行层执行具体动作;通讯层用于与其他模块化智能单元体的交互、协调或互操作;对象是物料、工件等实物,对于软件系统,对象则是算法库、函数库、公共数据库等;数据是对象相关的属性数据,主体是生产过程传递的信息流;领域层是指本单元体作用范围。

利用模块化智能单元体的模型,可以描述制造过程、生产系统结构、工艺设备、运行控制系统等场景。例如,从生产组织角度,产品的局部制

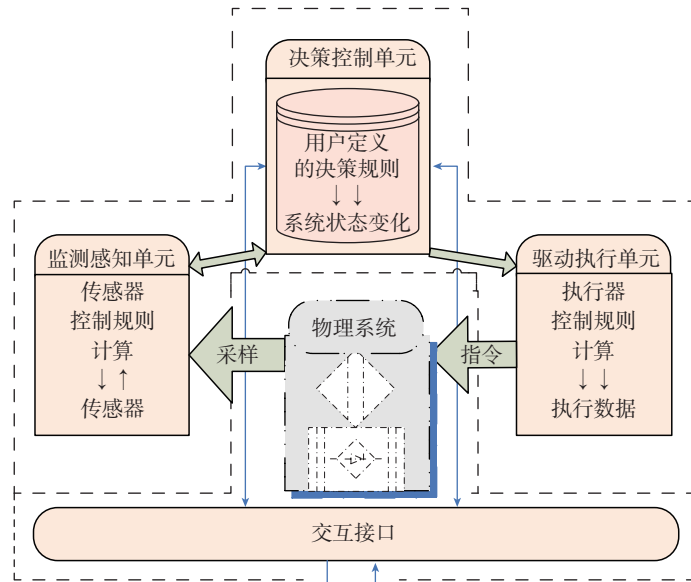


图8 CPS结构
Fig.8 CPS framework

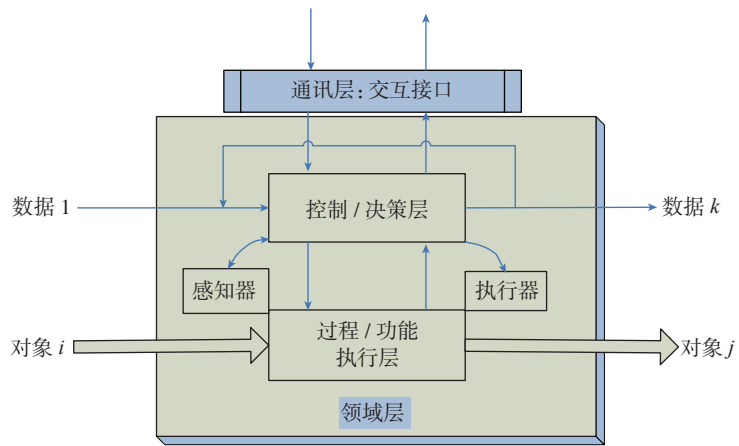


图9 模块化智能单元体的模型
Fig.9 Module model of intelligence unit

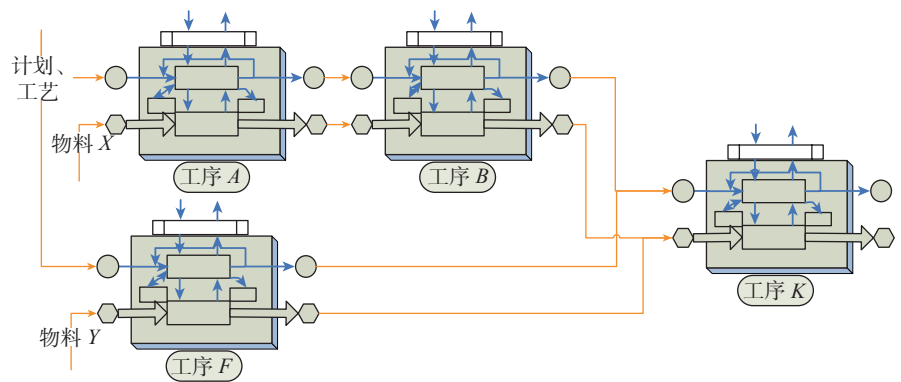


图10 产品制造过程(局部)
Fig.10 Manufacturing progress (segment)

造过程可以表示为图 10 (其中工序 K 是一个装配工序); 从生产系统设计角度, 以机加为例, 生产系统结构可以表示为图 11。航空产品装配生产系统有其特殊性, 设备层是工作站(图 10 中的工序 K), 它是由工装、加工设备、测量设备等硬件构成的“制造单元”, 形成不同工艺装备的紧密集成体(测量设备通常是系统反馈信息的源头), 控制层的对象是“制造单元”, 其中的个体设备再由其自身的控制层完成指令分配和监控, 形成 2 级递阶式控制模式。

结论

智能生产系统是对现代制造系统的继承和发展。伴随着控制技术、计算机及人工智能技术、网络技术、信息技术的发展, 智能生产系统在继承了现代制造系统的柔性化、集成化、网络化、协同化特征基础上扩展完善智能化处理能力。生产系统的智能化, 主要涉及模块化技术、智能单元体技术、合适的人工智能算法 3 方面的关键技术综合应用。

智能生产系统规划设计中, 生产系统运行的总体逻辑设计是关键一环, 应采用控制论思想, 以产品工艺为主线建立基本的运行控制流程, 为运行控制系统的设计奠定基础; 智能单元体的设计是智能生产系统实现的核心, 必须采用模块化设计思想对生产流程、系统功能、生产系统结构进行分析分解, 形成独立功能的智能单元体, 再应用人工智能方法, 实现多智能单元体的联合和协同, 体现出生产系统的整体智能; 智能生产运行管控系统规划设计重点是以构成从产品模型出发到重构模型循环的 2 个数据链为主线, 建立物流规划与运行的基准(时间基线和状态基线), 实现生产系统中生产资源和数据的协同运行。

智能制造是一种适应个性化定制需求的生产模式, 计算机技术、微电子技术、人工智能技术与制造技术、生产管理技术的深度融合, 是驱动传统制造方式向柔性制造、计算机集成制造、智能制造方式发展的根本因素。

参考文献

- [1] 彼得·马什. 新工业革命 [M]. 赛迪研究院专家组, 译. 北京: 中信出版社, 2013.
MARS Peter. The new industrial revolution[M]. Expert group of CCID research institute, trans. Beijing: CITIC Press, 2013.
- [2] 杨帅. 定制模式: 路径与问题分析 [J]. 常州大学学报(社会科学版), 2016, 17(3): 52-59.
YANG Shuai. Customization model: an analysis of its path and problems[J]. Journal of Changzhou University (Social Science Edition), 2016, 17(3): 52-59.
- [3] 李培根, 张洁. 敏捷化智能制造系统的重构与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LI Peigen, ZHANG Jie. Agile-intelligent manufacturing system: reconfiguration and controls technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [4] 颜伟. 现代制造及其优化技术 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.
YAN Wei. The modern manufacturing and optimization technology[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011.
- [5] 邵晓峰, 黄培清, 乔建华. 大规模定制生产模式的研究 [J]. 工业工程与管理, 2001(2): 13-17.
SHAO Xiaofeng, HUANG Peiqing, QIAO

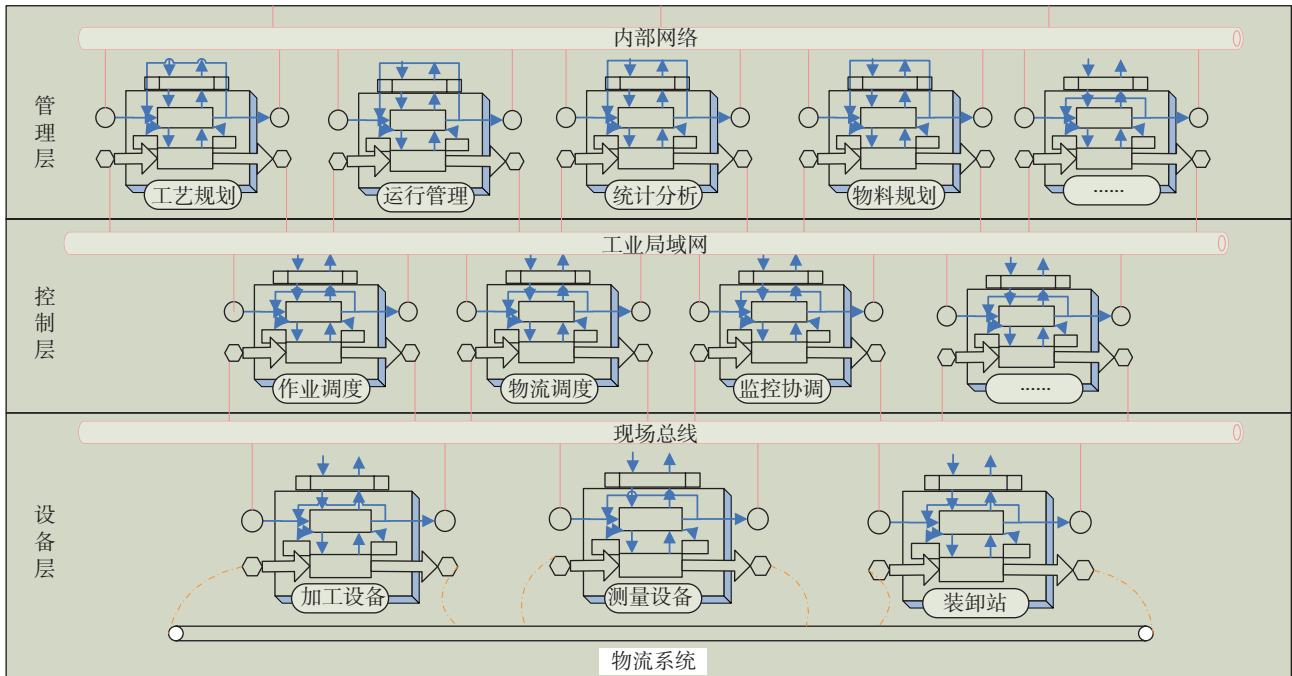


图 11 生产系统结构 (机加型)
Fig.11 Architecture of manufacturing system (machining)

- Jianhua. An analysis of mass customization[J]. Industrial Engineering and Management, 2001(2): 13-17.
- [6] 祁国宁, 顾新建, 杨青海, 等. 大批量定制原理及关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(9): 776-783.
- QI Guoning, GU Xinjian, YANG Qinghai, et al. Principles and key technologies of mass customization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(9): 776-783.
- [7] 杨青海, 祁国宁. 大批量定制原理[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 89-97.
- YANG Qinghai, QI Guoning. The principles of mass customization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 89-97.
- [8] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017, 60(7): 41-45.
- YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 41-45.
- [9] 左延红. 现代制造系统的研究现状及发展趋势[J]. 现代制造工程, 2014(4): 132-136.
- ZUO Yanhong. The status and development trends of modern manufacturing systems' research[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(4): 132-136.
- [10] 蔡自兴, 徐光祐. 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- CAI Zixing, XU Guangyou. Artificial intelligence: principles and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [11] 王焱. 未来工厂: 数字量贯通的集成运行[J]. 航空制造技术, 2015, 58(8): 40-45.
- WANG Yan. Future factory: integrated working with digital stream[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 40-45.
- [12] 戴庆辉. 先进制造系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- DAI Qinghui. Advanced manufacturing system[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [13] 全国工业自动化系统与集成标准化技术委员会. 企业控制系统集成第1部分: 模型和术语: GB/T 20720.1-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- China National Technical Committee for Automation Systems and Integration Standardization. Enterprise-control system integration part 1: models and terminology GB/T 20720.1-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [14] The Standards Policy and Strategy Committee. Enterprise-control system integration part 1: models and terminology: BS EN 62264-1 2013[S]. London: The British Standards Institution, 2013.
- [15] 陈丽娜, 王小乐, 邓苏. CPS体系结构设计[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 295-300.
- CHEN Lina, WANG Xiaole, DENG Su. Cyber-physical system architecture design[J]. Computer Science, 2011, 38(5): 295-300.
- [16] 黎作鹏, 张天驰, 张菁. 信息物理融合系统(CPS)研究综述[J]. 计算机科学, 2011, 38(9): 25-31.
- LI Zuopeng, ZHANG Tianchi, ZHANG Jing. Survey on the research of cyber-physical system (CPS)[J]. Computer Science, 2011, 38(9): 25-31.
- [17] 张伦彦. CPS技术及在航空工业中的应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(13): 62-66.
- ZHANG Lunyan. CPS technology and its application in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(13): 62-66.
- [18] 万百五, 韩崇昭, 蔡远利. 控制论——概念、方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- WAN Baiwu, HAN Chongzhao, CAI Yuanli. Cybernetics: concepts, methods and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [19] 昌盛平. 工艺规划与车间调度紧耦合集成关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- LÜ Shengping. Research on key technology of tightly-coupled process planning and scheduling integration[D]. Beijing: Beihang University, 2012.
- [20] 雷沛. 面向飞机大部件装配界面智能精加工的互操作技术与应用研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.
- LEI Pei. Research on interoperable technologies and applications of smart finish machining for assembly interfaces on large-scale aircraft components[D]. Beijing: Beihang University, 2017.

通讯作者: 王焱, E-mail: 13661051741@139.com。

Research on the Structure and Key-Technology of Intelligent Manufacturing System

WANG Yan^{1,2}, WANG Xiangnian^{1,2}, WANG Xiaoli^{1,2}, LU Zhijun³, JI Xuezhuan¹

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. AVIC Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technology, Beijing 100024, China;

3. Science and Technology Department, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Beijing 100028, China)

[ABSTRACT] In this paper, the industry courses and the key-elements of driving intelligent-manufacturing-system (IMS) development have been reviewed. Focusing on the requirement of discrete-manufacturing with mass-varieties and small-batches, we analyze the structure, components and elements of IMS, discuss the principle, design methods, and the key-technology about IMS, put forward the model of modularization-intelligent-unit, and finally, give example models of manufacturing process and structure of mechanical-processing, provide reference for the application of intelligent manufacturing in aviation industry.

Keywords: Intelligent production system; Intelligent unit; Digital thread; Cyber-physical system; Cybernetics engineering; Intelligent manufacturing; Digital twin

(责编 李丹)