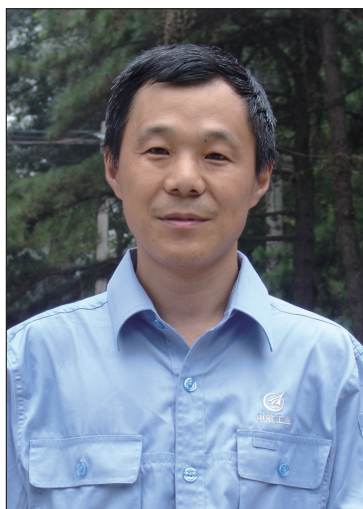


未来工厂： 数字量贯通的集成运行

Future Factory: Integrated Working With Digital Stream

中航工业北京航空制造工程研究所 王 焱



王 焱

中航工业北京航空制造工程研究所研究员,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。

人类社会的发展与制造技术的进步密切相关,从 1769 年苏格兰工程师詹姆斯·瓦特制造出工业蒸汽机开始,制造业开始进入由人造动力驱动的工业化生产时代,1796 年亨利·莫兹利发明了车床,开启了制造技术快速发展的序幕。经过 2 个多

未来工厂中,无论是从设备到系统,还是从生产工程(工艺规划、计划排产、生产准备等)到运行管控(运行调度、质量控制等),甚至从现场物流输送到物料管理等各阶段的制造活动,都将表现出“状态采集-实时分析-自主决策-精准执行”这样的特征。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.08.040

世纪的发展,已经进入以机械-电力技术为核心,以电子技术、计算机技术和信息技广泛应用为特征的现代制造时期,见图 1。

纵观制造业发展历程,影响其发展的最主要因素是技术的推动及市场需求的变化。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、个性化量产这样一个阶段。而制造业的未来,则是差异化生

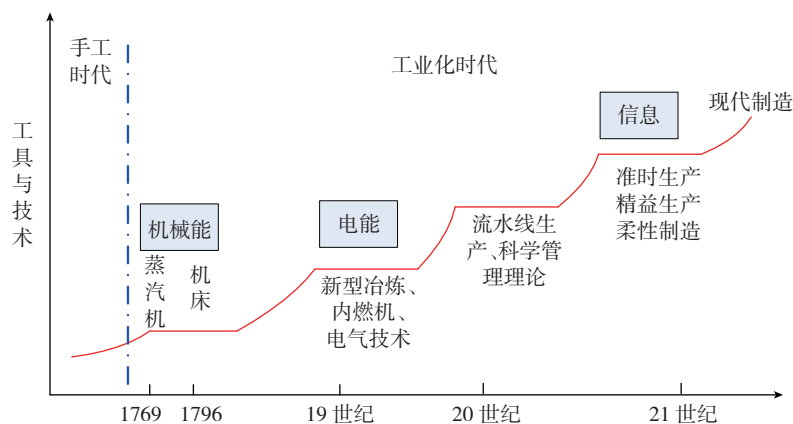


图1 制造技术发展历程

产(多样化产品)^[1]。

航空制造业是高新技术战略产业之一,是国家工业基础、科技水平、综合国力、国防实力的重要标志和综合体现。无论是高性能战斗机还是大型客货运输机,具有严格的气动外形要求、内部结构复杂、涉及的专业面广、设计更改频繁、应用的材料种类多、零部件数量巨大、零件之间的装配关系复杂等特点,航空产品的制造要经过工艺准备、工艺装备制造、毛坯制备、零件加工、装配和检测等过程,涉及的主要材料是铝合金、钛合金、高强度合金钢、高温合金、复合材料等,从材料到形成产品覆盖了锻/铸造坯、机械加工、钣金成形、复合材料构件成型、表面处理、连接装配等复杂的工艺过程。航空产品的研制过程是一个技术难度大、工艺方法多、协作面广、管理复杂的系统工程,各项任务之间既相互联系又相互制约,必须从航空产品全生命周期的角度,即从用户需求开始,直至航空产品设计、制造、交付出厂以及投入运营后的服务工作进行综合、协调和集成。这迫切需要航空制造业广泛应用先进制造技术并应用先进制造系统,不断完善和创新航空产品的研制模式、方法和过程,大幅度地提高飞机研制质量、缩短研制周期和降低制造成本,以满足不断变化的市场需求。

随着全球化竞争的加剧,航空产品的更新换代和设计制造周期缩短以及客户化定制生产方式已经开始逐步形成,这给航空制造企业带来越来越大的竞争压力。以计算机为中心的新一代信息技术的发展,使制造技术达到了前所未有的新高度。自20世纪80年代开始,西方发达国家已经开始把三维设计技术应用于产品设计和制造过程中,21世纪初,电子样机技术已经在我国飞机研制中得到规模化应用,在某些方面已经接近或赶上国际先进水平,在多个飞机

型号的研制中,已经完全使用数字样机取代物理样机。最近几年,新一代飞机研制中已经全面采用参照波音公司基于模型定义(Model Based Definition, MBD)方法的全三维设计技术,形成了以关联设计和协同研制为主体的数字化协同设计制造体系,全三维模型成为航空产品设计制造的统一数据源^[2]。

面对当今全球化竞争、计算机技术为中心的信息技术发展、用户需求快速变化的时代,航空制造业正经历着从批量定制、个性化量产向差异化生产的转变过程中,必须以数字化技术、网络化技术和智能化技术为基础,利用各学科最新研究成果,通过集成传统制造技术、计算机科学与技术,发展新型的适合航空产品研制的制造技术与系统,建立面向未来的制造系统和生产模式,实现航空产品制造过程数字量贯通的集成运行,以适应这种不断变化着的技术状态和市场需求。

制造系统与生产方式

制造一般是指将原材料转变为产品的过程,可分为狭义和广义2种,狭义的制造是指生产车间内与产品加工、装配相关的工艺过程;广义的制造是指将可用的资源(物质、能量、信息等)转化为可供人们利用或使用产品的过程,它不仅指具体的工艺活动,还包括与产品制造相关的需求分析、产品设计、物料选择、工艺规划、生产准备、作业计划、加工装配、质量保证、运行维护以及报废产品回收等一系列相互联系的活动,涵盖产品全生命周期。制造系统是指以生产产品为目的,由制造过程的物料、能源、软硬件设备、人员及相关设计方法、加工工艺、生产调度、系统维护、管理规范等组成的具有特定功能的有机整体,传统制造活动的过程是输入原材料或毛坯,利用加工设备和工具在能源驱动作用下,使原材料或

毛坯的几何形状或物理化学性能发生变化,最终形成各种用途的产品的过程,人(劳动力)是活动的主体。

随着电子技术和计算机的问世与发展,产品制造方式大体沿着传统制造技术改进与提升、借助计算机和自动化科学实现生产方式转变这样2条路线发展。随着人们需求的不断增强,产品变得越来越复杂,使得生产设备和制造系统日益趋向复杂和昂贵,而生产过程和制造系统的布局 and 配置是否适应所制造的产品,是制造过程面临的新问题;另一方面,航空产品制造过程是一种典型的非线性离散化的过程,其制造系统的加工能力、运行稳定性、生产效率是影响航空产品质量和交付周期的关键。在全三维模型广泛应用的前提下,航空制造过程已经开始进入数字化制造时代,其中,数控机械加工是航空产品制造中数字化技术应用较为完整和领先的技术领域。在数字化环境下,数字量信息伴随着原材料流动、设备运转和制造活动成为航空产品制造过程中产生、处理、存储和使用的关键资源之一,这使得航空产品制造系统及生产方式由传统的制造模式向信息驱动的制造模式转变。

美国数学家 Norbert Wiener 的《控制论:或在动物和机器中的通信和控制的科学》开启了控制论思想。控制论认为,控制系统的作用就是以某种智能的方式从外界提取必要的信息(称为输入),按一定的法则由中央处理器进行处理,产生新的信息(称为输出)反作用于外界,以达到一定目的^[3]。基于控制论原理,给出信息驱动下的制造活动模型(图2),把产品看作是在传统的原始资源上赋予新信息的产物,而从用户的角度只是使用产品的功能满足需求(即产品提供服务),这样,制造过程就是一个对制造系统注入生产原料(原始资源、能源和信息),从而使产品信息获得增值的过程。

显然,在信息驱动下的制造活动中,原材料、信息成为整个制造流程处理的核心对象,而设备、软件、能源、人员等成为保障系统运行的基础资源。在这里,信息有3个层次的涵义:一是与制造系统的事件相关的,由系统执行、生产运行活动产生的(如设备状态、工件状态、工况状态等),主要涉及各种信息的获取、变换、传输、处理、利用,属于信息科学应用范畴;二是指与产品定义相关的,由产品模型及属性数据、工艺规程、数控程序、质量数据等构成,是附加于产品实物之上的属性标识集合,属于数字化技术范畴;三是与控制相关的数据,来源于 PLC、控制元件、数控系统等设备层内部,属于自动控制技术范畴。

在制造流程处理的核心环节中,制造过程的信息处理模式变革将是未来工厂与现在工厂明显区分的重点要素,而信息处理是电子技术、计算机技术发挥作用的重要领域。起源于20世纪中期的人工智能(Artificial Intelligence, AI)是计算机科学的一个分支,其目标是使智能行为自动化。20世纪90年代,人工智能开始在制造领域逐步得到应用,专家系统、模式识别、神经网络等成为当时学术领域探讨的重点,出现了“智能制造”的概念。进入21世纪,

电子、信息、计算等技术的快速发展并日趋成熟,推动了互联网、物联网、大数据等技术领域的快速发展,引发了工业界尤其是制造业模式的变革。德国称这种变革为第四次工业革命,即“工业4.0”;美国则称其为第三次创新变革浪潮,认为未来工业的典型特征之一是“工业互联网”,最终的结果殊途同归,就是更高的智能化^[4]。

智能制造技术是在机械化、数字化、自动化装置及系统应用的基础上,将人工智能引入到制造理论及生产运行过程中,形成以存储、计算、逻辑、推理为特征的机器智能所驱动的产品制造技术。智能制造技术是人工智能与制造技术的有机结合,其基本内涵是指在制造过程的各个环节,采用人机交互、高度柔性与高度集成的方式,通过计算机模拟人类专家的智能活动,对生产运行过程进行分析、判断、推理、构思和决策,延伸或取代制造活动中人的脑力劳动,实现制造过程的优化,并对人类专家的制造智能进行收集、存储、完善、共享、继承与发展^[5]。可以说,传统的工具、设备延伸了人的四肢能力,智能制造技术则拓展了人的大脑能力。

制造系统已经从机械化、自动化发展到数字化,未来将向智能化方向发展,这也是走向未来工厂的必经之路。未来工厂,通过数字化与自动化

融合、网络化连通和智能化处理,实现整个制造系统数字量贯通的集成运行,而支撑未来工厂的核心便是智能制造。

制造过程数字化与自动化的融合

我国航空产品研制已经进入数字化时代,数字模型、协同化研制、数字化制造已经成为新产品研制的基本模式。全三维模型已经在新型航空产品研制中普遍使用,数字化模型发放替代了传统的设计图发放模式,制造过程以数字化模型为唯一数据源,进行机械加工、钣金成形、复材构件生产、连接装配等工艺活动,制造过程进入数字量协调时代;数字化的装备成为各个工艺环节不可或缺的基础资源,复杂形状零部件制造的工艺活动已经由传统的手工操作变成程序控制执行,这种数字化执行手段为实现航空产品智能制造奠定了基础。

(1)加工过程的数字化与自动化融合。一般的数字化加工过程是根据设计模型和工艺要求确定加工工艺及程序,基于空间和时间的确定性关系来完成产品制造,加工状态是依靠人员监控、事后检测来确认的,难以实时掌握加工过程中工况变化并及时调整,导致航空产品零部件质量一致性不稳定、表面质量状态波动大。未来的制造过程将形成一种实时优化调控模式,制造过程中增加对加工过程、时变工况的在线监测,利用智能化技术对获取的加工过程状态信息进行实时分析、评估和决策,实现对加工过程的自主学习和决策控制;通过自主学习形成工艺知识库,支持工艺设计与程序设计过程,实现工件加工工艺的自主决策设计和优化。图3为自适应加工组成示例(其中,实线框为自适应加工运行流程),在计算机及控制系统支持下,这一过程将是基于知识的自动化操

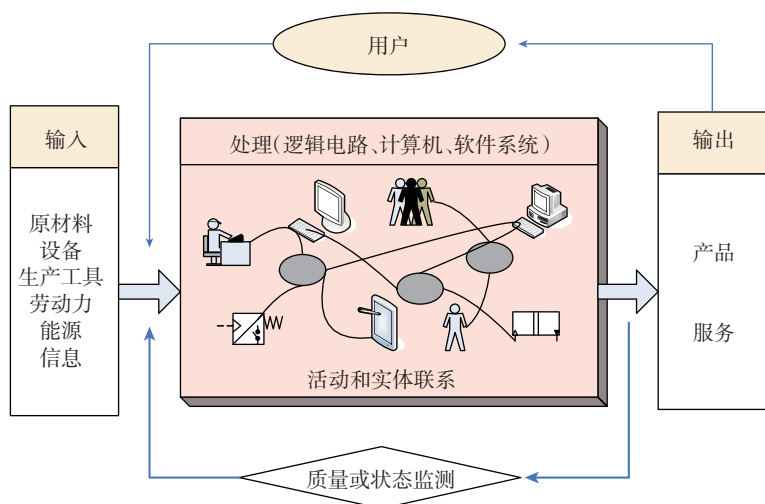


图2 信息驱动下的制造活动模型

作。

(2)加工设备的数字化与自动化融合。目前的数控装备是按确定的空间关系和程序逻辑来运转的,随着数控系统计算处理能力的不断提升和功能部件的不断发展完善,数控装备的加工效率、稳定性、灵活性、信息处理能力都有了极大的提高,基于工况的自主处理能力日趋增强。航空制造领域的未来设备及制造单元将具有较完备的数字化与自动化深入融合的智能处理能力,图4为具有智能处理能力的装备模型。智能装备主要包括智能机床、智能机器人、智能控制装置及系统、智能物流系统、传感识别及信息采集装置等,能

够对制造过程中运动、功率、扭矩、能量、信息等状态进行实时监测和收集,形成设备运行状态的数字化表达,并实现基于规则的自主决策与自适应控制。

在未来工厂中,除上述加工过程、加工设备2个层次实现数字化与自动化深度融合外,运行调度、制造资源、质量控制等层面也都将在数字化与自动化深度融合的前提下实现高效运转,提升未来工厂的快速响应、敏捷制造能力。

制造过程的网络化连通和智能处理

自数控机床诞生之日起,以数控

设备为中心的制造过程网络化连通就不断在发展和完善,这种网络化连通主要是直接数控(Direct Numerical Control, DNC,基于独立通信线路,零件加工程序在计算机上处理,通过传输接口把数控程序加载到数控装置直接驱动机床加工,一台计算机可控制多台数控机床)、分布式数控(Distributed Numerical Control, DNC,基于网络,形成系统支持层、分布处理层、信息集成层等递阶层次的网络化结构,对加工任务、数控设备和数据实现统一管理 and 动态分配)^[6]。目前在国内航空产品制造过程中,这种网络化连通主要在生产线或车间范围上应用。

2013年5月,McKinsey Global Institute发布了有关未来颠覆性技术的分析报告,指出移动互联网、知识工作自动化、物联网、云、先进机器人等将给人类生活、商务活动和全球经济带来颠覆性的变化。计算机及网络技术的快速发展和广泛应用使整个世界进入互联时代,网络让整个世界连接成一体,而制造过程也将在不远的将来,在计算机网络、物联网络支持下,实现加工设备、制造数据、运行控制的网络化连通,其中,信息生成、传输、分配、使用将成为制造活动的主线,而这些信息包含设备控制、产品属性、运行状态等的多层次、多来源、多状态的信息,将形成贯穿整个制造周期、产品生命周期的“有历史的数据”,与运行状态、设备控制相关的数据又常常是实时的、动态的,传统的人工处理与决策方式已无法满足要求,必须借助计算机技术实现基于实时状态的智能处理,整个制造过程才能精确执行制造活动。

智能处理是对采集的制造信息进行实时分析、自主决策、驱动执行的过程,人工智能技术将对智能处理提供重要支持(图5)。实时分析是对多源、多态信息的识别、分类和规范化;自主决策是基于规则和知识

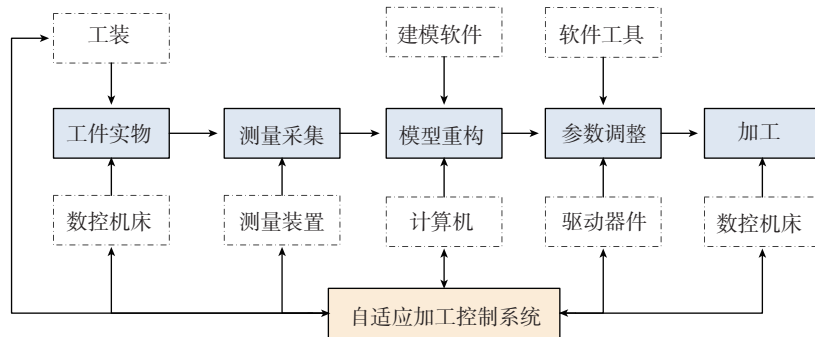
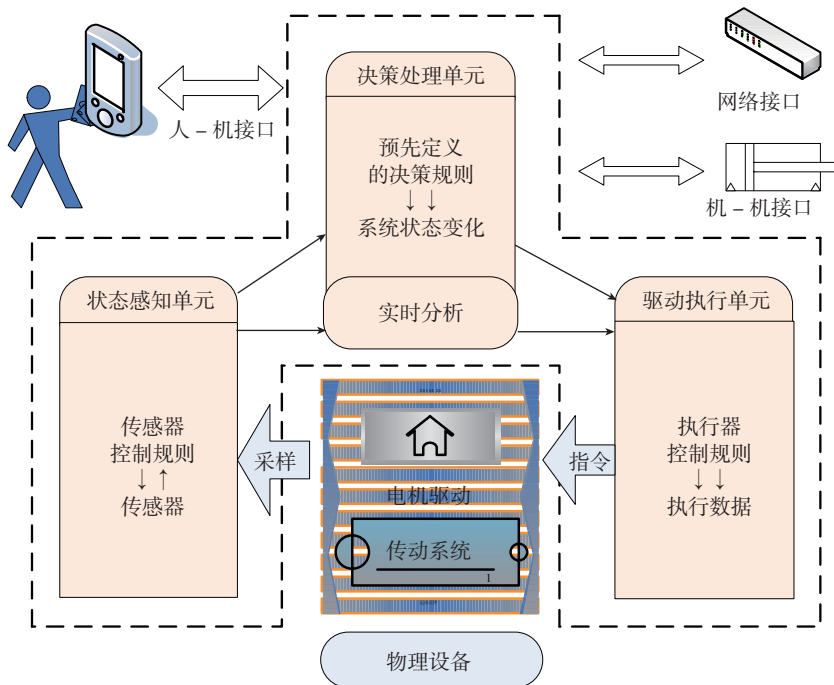


图3 自适应加工系统组成示例



的演绎、推理、归纳、综合,形成针对制造现场事件或状态的执行方案和数
据;驱动执行是对决策形成的执行方
案和数据进行分解、格式加工,形
成执行指令,在这一过程中,人工
智能技术及方法将在设计活动(产
品或工艺)、系统控制(设备或系
统)、工艺规划(生产系统或加工
单元)、运行调度(生产系统过程
或局部工艺过程)以及质量管理
及设备维护诊断等获得充分应
用,支持实现整个过程的知
识处理工作自动化、自主化,这
种智能处理体现在加工设备、运
行调度、数据准备等不同层次
上,并具有针对局部或整体的信
息反馈,以优化设备或系统的运
行参数及状态。图5给出了面向
制造系统的智能处理总体逻辑,
加工设备、工艺过程中的智能处
理与此类似,只是把制造系统换
为相应的对象即可。

未来工厂中,无论是从设备到系
统,还是从生产工程(工艺规划、
计划排产、生产准备等)到运行
管控(运行调度、质量控制等),
甚至从现场物流输送到物料管
理等各阶段的制造活动,都将表
现出“状态采集-实时分析-自主
决策-精准执行”这样

的特征,具有这个特征的设备或系
统可称为智能设备或智能系统。图
6是面向零件加工的智能制造系
统模型,基于计算机、网络和通
信技术,在传统制造系统上增强
了状态感知、决策处理能力。

制造系统数字量贯通的集成运行

工厂是由不同的制造单元、制造
系统组成的一个具有层次结构的
整体,其运行和管理架构可以从工
厂结

构、信息结构、控制结构3个角
度来划分。图7~图10分别是
现代先进制造技术体系下企业
组织的层级结构、信息结构、多
级分布式控制结构和控制系统基
本结构^[3,5-7],这4个结构模
型是工厂组织和运行的基本框
架,制造系统的所有活动都是围
绕这4个抽象模型而展开。未
来工厂是在数字化、自动化、网
络化技术基础上,以数字量贯通
整个制造过程,实现整个制造系
系统集成运行。

现代工厂的工厂结构、信息结
构、控制结构以相对独立自成
一体模式为主,未来工厂的主
体模式将是在工厂结构、信息
结构、控制结构的基础上,以数
字量驱动为核心,通过交互通
信和传感识别手段实现制造系
统中人-设备-信息的高度集
成、数字量与物理系统实现高
度融合,计算机网络和工业控
制网络是制造系统各要素之间
建立联系的基础环境。宏观上
是以智能处理为特征的信息流
动过程,微观上是以智能控制
为特征的控制信号传递过程,这
2个层次构成了制造系统的虚
拟空间;产品实物上体现的是
物料流动、设备运转并自主交
互的过程,原材料、加工设备及
基础设施则构成了物理空间。在
未来工厂的虚拟空间和物理空
间中,数字量成为最活跃的要素,

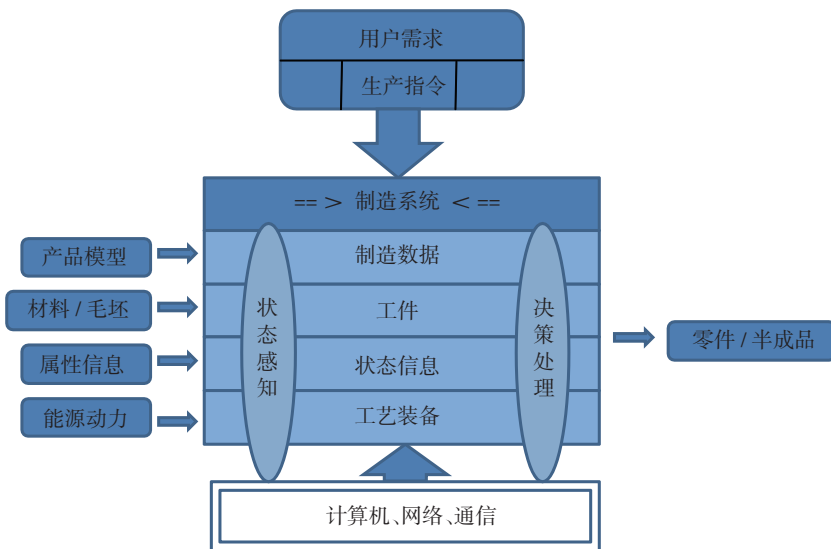


图6 面向零件加工的智能制造系统模型

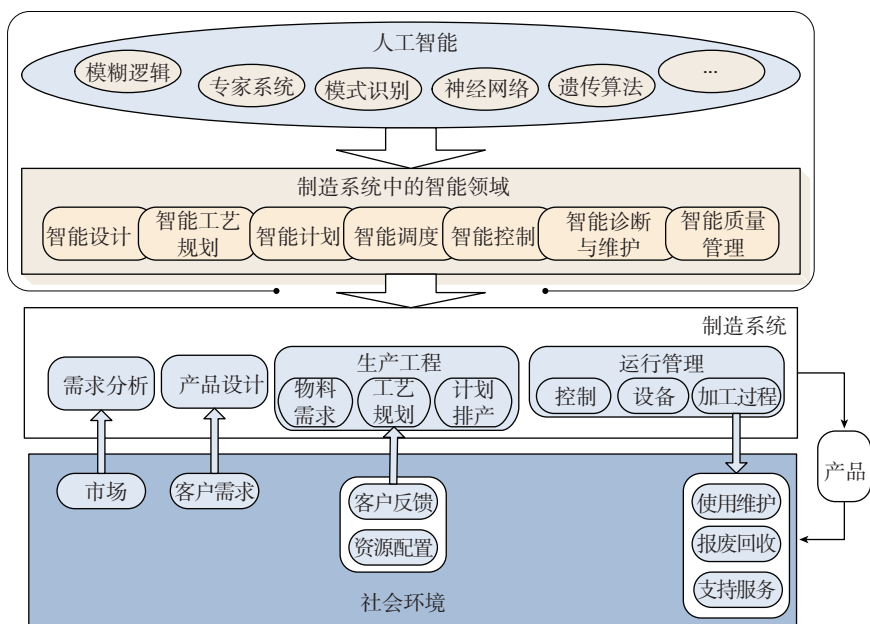


图5 制造系统的智能处理

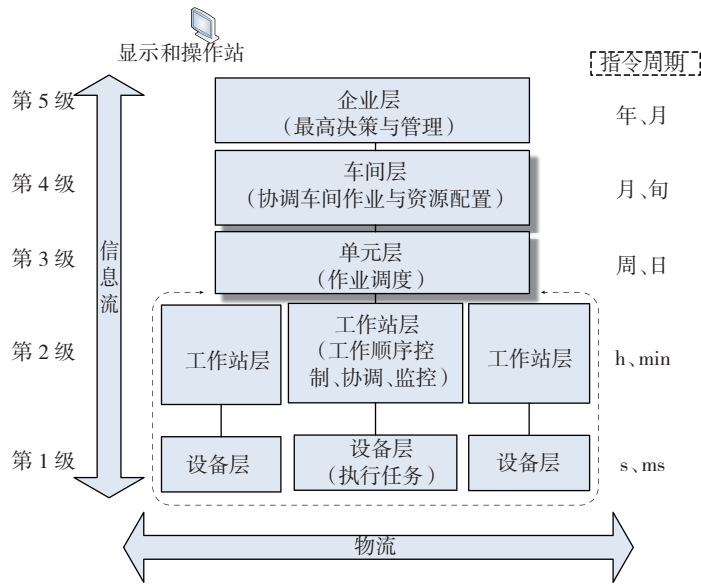


图7 工厂层级结构

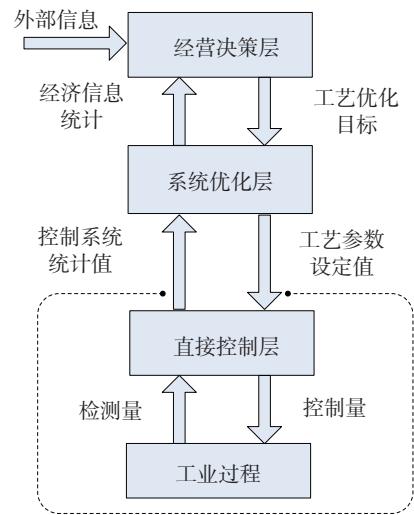


图8 工厂信息结构

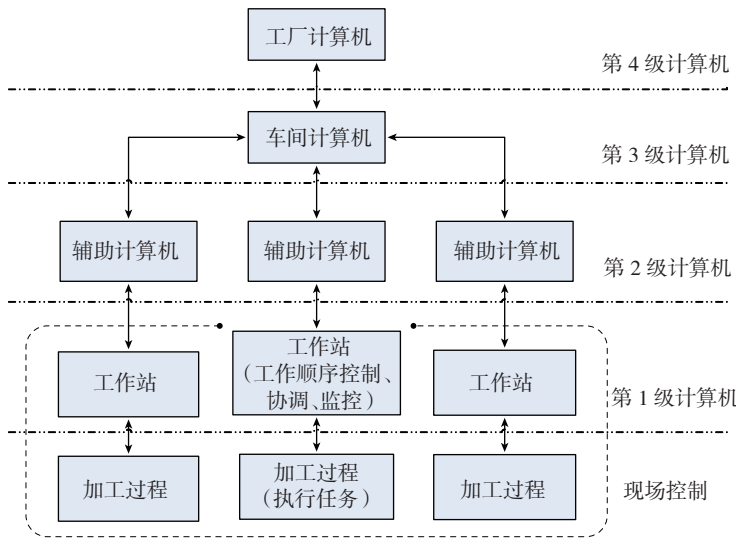


图9 多级分布式控制结构

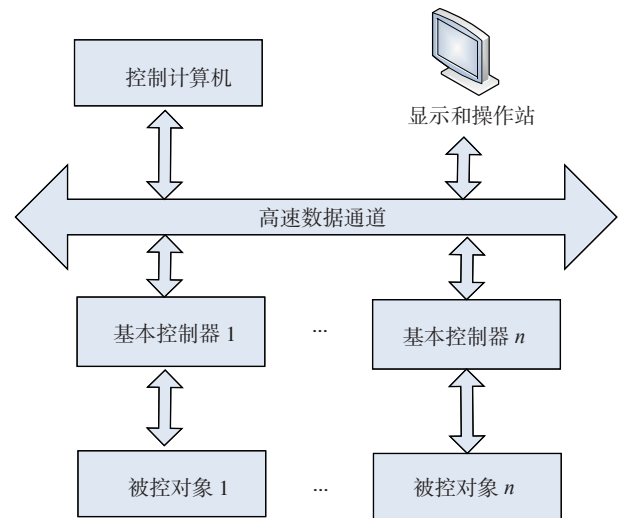


图10 控制系统基本结构

在网络环境支持下,数字量成为贯穿整个制造过程的主体,生产过程中的人-机交互、设备控制、系统运行都是以数字量为基础要素实现作业活动。这一过程中,智能技术成为支持系统有效运行的有力工具,脱离了智能化,集成化也难以完美地实现。

结束语

未来工厂首先是数字化工厂,产品模型、运行数据、控制信号等构成了制造系统的虚拟空间,各个过程均以数字量的形式呈现;其次,未来工

厂是自动化工厂,设备运转、系统执行都是依靠数字量驱动,程序和数据成为基本的驱动工具,人成为过程或状态的监控员,不再直接操作设备或系统运行;第三,未来工厂是智能工厂,智能控制和智能处理将成为区别于现有工厂的显著特征,虚拟空间和物理空间中,智能技术成为支持系统运行的基础。

智能系统是满足市场多样化需求状态的必要条件,通过智能生产提供产品和服务。要指出的是,人的智能涉及记忆力、理解力、预测能力、

计算判断、情感、直觉、意识等,而基于计算机的机器智能则主要是以存储、计算、逻辑、推理为主体,无法体现情感、直觉、意识等人类特有的能力。未来工厂中的机器智能将仍然是有限的智能,不能取代或超越人类智能,未来工厂将是人机高度融合的智能体。

本文共有参考文献7篇,因篇章有限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亿乘)