

DOI: 10.3901/JME.2010.21.124

制造系统研究的挑战和前沿*

郑力¹ 江平宇² 乔立红³ 奚立峰⁴

- (1. 清华大学工业工程系 北京 100084;
2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;
3. 北京航空航天大学工业与制造系统工程系 北京 100191;
4. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要: 生产模式对制造业的影响深刻而长远,特别是近40年来,发达国家先后提出先进制造系统的研究计划,提出如智能制造、大规模定制、可持续制造等一系列新的制造模式,尝试突破以批量生产为主流的生产模式,建立国家竞争优势。生产系统的研究大都跨越传统的技术因素,经济和社会影响也常常纳入研究的视野。生产系统研究的基本目标是系统的效率、质量和成本,而近些年服务和环境也成为生产系统优化的目标。生产系统的分析、设计和运行控制是生产系统研究的基本问题,但制造系统的系统复杂性问题十分突出,其主要求解工具:运筹学和系统理论仍然有待突破。现代信息技术为制造系统的基本目标提供了突破的新方法,因此近几十年来,以信息技术为基础,数字化为手段的新兴制造系统成为研究热点,也取得了重大突破。展望未来,制造系统将向着精确化、绿色化和服务化方向发展,在此背景下,生产系统的研究将面临着更多的机遇和挑战。

关键词: 制造系统工程 生产计划与控制 数字化制造 质量 绿色制造 生产性服务

中图分类号: T19

Challenges and Frontiers of Manufacturing Systems

ZHENG Li¹ JIANG Pingyu² QIAO Lihong³ XI Lifeng⁴

- (1. Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;
2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
3. Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191;
4. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Manufacturing paradigm plays a very important role in the national competitiveness of manufacturing industries. In recent 40 years, the developed countries have begun their research programs in advanced production system and new production paradigms such as intelligent manufacturing, mass customization and sustainable manufacturing, have been proposed in a bid to exceed the traditional "mass production" paradigm. The research in production system area considers not only the technical factor, but also economic and social factors. The research in production system area covers from modeling, analyzing, and designing production system to operating and controlling it. The fundamental objectives are optimizations of productivity, quality, cost, service, and environment as well. Today on the one hand, we still need tremendous tasks on optimizing tool which is usually obtained from operations research and system theory because of the complexity of production system. On the other hand the modern information and communication technology (ICT) has supplied new opportunities, the information driven manufacturing has become the hottest research topics and made a great progress. In the future the production system must be planned and operated more precisely than today, based on the new ICT, to win the competitiveness. Looking into the future, manufacturing systems will develop toward the directions of precision, green and service. Under this background, the research on production systems will face more opportunities and challenges.

Key words: Production system engineering Production planning and control Digital manufacturing Quality Green manufacturing Producer service

* 国家自然科学基金(50375082, 60834004, 70771058, 50905114, 50875204)、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2008AA04Z102, 2007AA00Z108)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2005CB724106)和北京市教育委员会共建资助项目。20091215 收到初稿, 20100416 收到修改稿

0 前言

从历史上看, 19世纪中叶的英国, 20世纪初的美国和20世纪中的日本被公认为是“世界工厂”。导致这种世界工厂转移的关键是制造技术的进步, 英国的瓦特发明了蒸汽机, 解放了工人的体力劳动, 美国的福特发明了流水线, 它颠覆了传统欧洲式的生产组织方式, 使生产率获得了很大的提高; 日本的丰田发明了精益生产系统, 它对传统大批量生产方式进行了革命性的思考, 极大提高了生产效益。

由于先进制造系统模式在制造业发展中的重要地位和作用, 近30年来, 美、日、德、韩、西欧及我国都先后提出先进制造系统领域有关的研究计划, 并将之上升到国家战略高度^[1-8]。在这些研究计划的支撑下, 提出了众多先进制造系统模式, 如美国的敏捷制造系统模式、日本的智能制造系统和仿生制造系统、德国的分形制造系统、我国的现代集成制造系统模式等。这些先进制造系统模式及其理论与方法的研究为各国制造业发展战略、制造企业战略的建立提供了重要的理论和方法。

1 制造系统的定义、学科基础和研究范围

关于制造系统的概念, 国际生产工程学会给出的定义是: 制造系统是制造业中形成生产的有机整体。广义的制造系统包括从设计、生产、配送到销售的所有功能。国际著名制造系统工程专家、日本东京大学人见胜人教授指出: 制造系统可从3个方面来定义, 即系统结构、系统转变(输入/输出)和系统运行。综合上述的几种定义, 可以有不同的制造系统观。

(1) 车间工厂观: 制造系统就是由工艺、人员和设备组成的系统, 它完成从原材料到产品的制造作业, 并使原材料增值。

(2) 产品生命周期观: 制造系统包含从市场调研、产品设计、生产制造到物流、销售和售后服务的所有产品生命周期中的各个环节。今天制造系统进一步延伸到回收、重用等环节。

(3) 供应链工厂观: 制造系统包含整个从原材料到零售商的所有企业。

(4) 硬系统/软系统观: 硬系统关注生产系统内的“硬件”, 而软系统关注生产系统内的“软件”, 如生产组织等。

(5) 流程观: 典型的观点有: 工艺流、物流、信息流、决策/控制流、资金流和商流。

与单元制造技术不同, 制造系统的研究目标已不再仅仅是传统意义上的技术行为, 还包括经济、社会、人文等综合因素, 因此, 必须将制造系统置于经济、社会和人文环境中, 作为复杂的社会化大系统来考虑。

效率、质量、成本、服务和环境 (Time, quality, cost, service, environment, TQCSE)是制造系统研究的基本目标。

制造系统的系统复杂性问题十分突出。其研究工具: 运筹学和系统理论仍然有待突破。

现代信息技术为制造系统的基本目标提供了突破的新方法, 因此近几十年来, 以数字化为手段, 提出了新的制造系统, 如敏捷制造、大规模定制、网络化制造、智能制造等具有信息时代特征的制造系统。

新的技术产品和新的工艺、设备是推动制造系统发展的另一个永恒的动力。

人是制造系统中的一个环节, 有时是最主要的环节, 而制造系统其本质上是一个复杂的社会、经济、人文交互系统。

生产系统研究的基本问题是: 生产系统的分析与设计、生产系统的运行控制两个领域。在制造系统的分析和设计领域, 研究的目的是发现工具找到有效和准确刻画制造系统绩效, 比如可靠性、产量、交期、质量等的方法。在制造系统运行控制领域, 主要通过综合的管理和技术手段, 有效运行制造系统达到设定目标, 比如生产调度、生产组织等都是制造系统运行控制的研究内容。近些年信息技术对制造系统领域的渗透, 因此数字化制造成为制造系统研究的新领域, 如智能维护技术、无线射频与条码技术等, 其主要思想是利用信息技术尤其是实时信息处理手段来提高制造系统的绩效。

2 制造系统的研究现状

尽管制造业的存在与发展有很长的历史, 但制造系统, 特别是制造模式的研究直到20世纪后期才开始受到关注, 一旦人们发现其价值所在, 随之而来的研究如同雨后春笋, 发展很快。20世纪90年代以来出现的先进制造系统模式列举如下: 成组技术、精益生产、环境友好生产/绿色制造、计算机集成制造系统、全面质量管理、大规模定制、面向制造的(装配的, 试验的)设计、敏捷制造、企业重组、并行工程、全生命周期工程和供应链系统。

2.1 发展现状及比较分析

当前,科学技术的迅速发展和市场体制的革新给制造系统的发展带来了巨大机遇。未来的制造系统将在数字制造、制造智能等新兴技术和日益迫切的精确化、绿色化、服务化的市场需求驱动下,以制造系统工程作为基础理论,以数字制造和制造智能作为支撑,形成新兴的制造模式,构建出全新的下一代制造系统。图 1 给出了未来制造系统的机遇示意图。

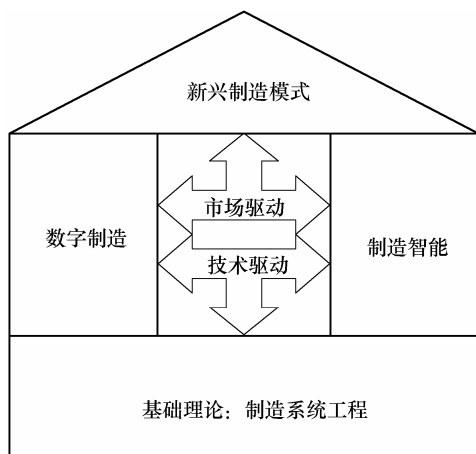


图 1 未来制造系统机遇

2.1.1 制造系统基础研究、主要新理论、新方法和新技术及产业发展状况

制造系统是一个跨学科的研究领域,近年来不论是基础研究还是应用研究都十分活跃,下面就按图 1 所示的 4 个方面综述近些年的主要研究进展及其应用。

2.1.1.1 制造系统工程的新理论

针对制造系统的日益复杂化,近年来出现了一些新的制造系统工程理论或方法,如偏差流理论、无尺度网络系统分析方法等。下面分别进行阐述。

(1) 不确定环境下的系统分析方法^[9-10]。在实际系统中,由于事件发生的随机性、数据的非精确性、对象的模糊不确定性等,使得环境的动态变化不可避免。不确定环境下的系统分析方法通常要求:实时和动态重构性、协调和自治性、动态学习和进化特性。相应的研究热点和发展趋势包括以下几个方面。

① 随机系统方法方面:隐准马尔科夫模型、自适应性马尔科夫模型和动态贝叶斯网络等模型的是重要的发展方向。

② 模糊系统方法方面:一是与传统系统分析方法相结合,如模糊层次分析法,以充分和合理地考虑层次分析法中主观判断的不确定性;二是与其他智能计算技术如神经网络、遗传算法(Genic

algorithm, GA)等结合,目的是利用模糊系统方法增强智能算法的学习能力,避免陷入局部最小。

③ 基于自治与协商机制方法方面:一是与 GA、禁忌搜索算法等强调解性能的智能算法结合,在提高系统实时响应性的同时提高系统分析性能,二是研究结合学习算法的协商机制,提高动态协商优化性能和减少协商过程通信负荷。

(2) 无尺度网络系统分析方法。许多复杂系统从拓扑结构的角度看都可抽象为网络。系统元素作为网络的节点,元素之间的相互联系(作用)作为节点之间的连接。这样就可以运用图论和网络分析的理论、方法和工具进行系统结构的拓扑特性研究。网络的研究经历了三个主要阶段:规则网络、随机网络和复杂网络(小世界网络和无尺度网络)。大多数的复杂系统是动态演化的,是开放自组织的,是规则和随机伴行的,既非完全规则也非完全随机。单纯应用规则图和随机网络理论对普遍存在的这些复杂系统不能进行实质性的分析研究。1998 年, BARABASI 等在开展一项描绘万维网的研究时,发现了“无尺度网络”。他们的多篇相关文章发表在《科学》、《自然》、《物理评论快讯》等权威刊物上。无尺度网络对蓄意攻击具有脆弱性和对偶然故障(误差)具有鲁棒性。从网络形成机制上看,这种特性的根源在于众多实际网络所共有的两种形成机制:增长与择优连接,也在于这些网络的基于集散节点的非同质拓扑结构。这种普适的特性,不但对说明系统进化的机理有着极其重要的理论意义,而且在系统工程的应用方面也具有重要的实际价值。近年来,国内外学者以无尺度网络研究为切入点,深入地开展了相关系统结构的研究。BARABASI 和 ALBERT 建立的 B-A 无尺度网络模型,是分析无尺度网络最常用的一种动力学模型,目前大多数研究无尺度网络所使用的动力学模型都是 B-A 模型的修正、延伸或变体。特别地,聚集度可调的无尺度网络演化模型是复杂网络研究领域的一个重要问题。

(3) 误差流理论^[11]。产品尺寸误差是指产品在加工过程中受各种误差源的影响,随着零件通过生产线,尺寸误差不断地产生、累积和传递,最终形成产品的实际尺寸相对于设计尺寸的偏离差值。产品尺寸误差是直接影响产品质量、生产率和市场响应时间等的最重要因素之一。误差流控制和误差流理论应用的主要发展趋势是:① 提高设计阶段“首次正确率”控制误差流,产品开发的质量和效率主要取决于产品设计的“首次正确率”,其目的就是尽量减少在制造阶段对产品和工艺进行修改;

② 通过误差源的诊断控制误差流,实现精密化制造不仅需要设计阶段提高“首次正确率”,而且需要在制造阶段快速有效地诊断和排除系统误差源;③ 充分利用多工序间复杂的相关性控制误差流,为了实现误差流的控制,需要在建立关键特征分析流程基础上,揭示关键特征之间相互影响的逻辑关系和建立产品误差与各种误差之间定量关系的数学模型,通过对误差传递的过程进行机理性的描述,系统地指导产品尺寸的设计与优化;④ 误差流理论应用的主要发展趋势,误差流理论作为误差分析、建模、诊断和控制的有效工具已经在汽车车身制造、发动机制造等领域得到成功应用。目前国内外学者正将该理论扩展到半导体制造与装配、飞机关键零部件的制造与装配过程中。

(4) 复杂制造系统的分析方法。制造系统是一个复杂大系统,按生产模式可分为:连续型、离散型和混合流程型。离散型生产的特点是:产品可数,加工过程非连续。其生产过程主要改变物料的物理特性,其物料的变化是以整数为特征的。连续型生产的特点是:产品连续不断地经过加工设备,一批产品通常不可分开。通常用基于连续化模型方法的差分或微分方程来描述连续型制造系统。混合流程制造系统是指兼有连续型和离散型特征的生产系统。

1) 复杂离散型制造系统分析方法。汽车制造是一种典型的复杂离散型制造行业。目前,国内外学者对复杂离散型制造系统的建模与分析主要采用离散事件动态系统理论。近年来,系统重叠分解法引起了学术界的高度重视。该方法的思想是将复杂制造系统分解成一系列连续且相互首尾重叠的生产线。对于复杂离散型制造系统,使用系统重叠分解法进行建模与分析将是未来的重要发展趋势。如前所述,基于误差流理论的建模方法已用于汽车车身制造领域的分析。排队网络方法、摄动分析方法、有限自动机/形式语言方法、Petri网方法等则是通用的离散系统分析工具,在此不再赘述。

2) 混合流程制造系统分析方法。混合流程制造系统主要分布于制药、冶金、食品和化工等行业。在这些行业中,生产线设备由多阶段组成,而在有些加工阶段是由并行机器或其他设备构成。这些并行设备是为了增加整个流程的生产能力,或平衡各阶段的加工能力,或消除、减小整个生产过程中加工能力瓶颈的影响。在所有生产阶段中,有些阶段为离散加工过程,有些阶段是流程加工过程,这样的生产过程是比较典型的混合流程制造系统。近年来,已陆续发展了多种混合流程制造系统模型但是

这些混合流程制造系统模型,大多属于单层次建模方法,对简单的混合系统比较实用,但当混合流程制造系统较大、较复杂时,使得系统约束增多,单层次模型变得非常复杂。因此对于复杂的混合流程制造系统,使用分层次建模的方法将是未来的发展趋势。

2.1.1.2 制造系统的计划及控制

制造系统的计划与控制是制造企业运作的基本部分,是实现制造目的的物理过程,也是现代制造技术发展的重要方面。制造系统的计划与控制包括了生产计划制定、制造过程控制、制造质量保证、系统运行保障等多个方面。国内外学者在这些方面进行了深入研究,取得了一定成绩。

(1) 先进生产计划与调度。现代制造企业需要面对无法预料的需求行为和制造环境的不确定性、解决产品生命周期问题并实现敏捷制造,适应由单个企业向供应链企业生产模式的转变。先进生产计划和调度(Advanced planning and scheduling, APS)为这些问题的解决提供了一条可行的途径^[12]。

先进生产计划与调度的关键是涵盖供应链管理的企业多层生产计划与运作的综合集成。APS面向包括整个供应链的可用计划和决策支持,是一个分级的自上而下的系统,在时间上跨越了长期计划、中期计划、短期计划;在功能上涵盖了从联盟战略、产品预测到物料需求、生产调度;在决策支持方面包括整个生产组织从采购到最终销售的供应链生产的全过程的信息系统。

与传统的企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)系统相比,APS^[13]能制定更为精确的生产计划,并且支持基于供应链的企业合作生产模式,所以得到了越来越多的重视和应用。研究和应用APS对提高我国制造业生产质量和竞争能力,实现企业信息化水平的跨越式发展具有重要意义。

目前,对APS主要的应用研究方向包括以下几个方面。

运作为中心的物料清单(Bill of materials, BOM)技术。APS集成了传统的BOM和工艺路线,能把旧的BOM中的项目和工艺路线表中资源相关联。

复杂不确定生产环境下优化调度。在实际生产环境中制订可行的,有效的生产作业计划,综合调度工厂及社会的生产资源,从而达到生产、财务和交货期等目标。

动态生产系统仿真技术。主要通过逻辑描述实际生产的过程建立生产系统的仿真模型。通过动态的模拟生产系统的运行,利用试验的方法找到计划和调度的可行解或者较优解。

数据模型耦合与系统集成。APS 需要企业内部其他信息系统的支持和互动, 比如和财务信息系统的集成, 与车间层控制系统(Manufacturing execution system, MES) 的集成, 与 ERP 的集成。

(2) 计划执行与生产控制。生产计划与控制是制造企业的核心内容, 编制满足需求数量和交货期的计划, 监督和控制该计划的实现, 从而在满足需求的前提下, 最合理地分配资源、最经济地生产是生产计划与控制的主要活动。

现代生产计划与控制主要有五种模式, 体现在以制造资源计划为代表的推式生产方式, 以丰田准时生产、精益制造为思想的拉式生产方式、约束理论(Theory of constraints, TOC)为基础的生产方式、敏捷制造为基础的灵活响应生产方式和以可重构制造为基础的自适应生产方式。其中, 精益制造、敏捷制造和可重构制造得到了越来越多的重视和研究。这些生产模式已经得到广泛重视和研究。

目前计划执行与控制的主要研究方向包括以下几个方面。

混合生产系统。根据工厂的实际情况, 将推式生产、拉式生产或者 TOC 理论结合起来, 取长补短, 建立混合生产系统将有助于改善生产组织状况。

动态自适应看板系统。动态自适应看板系统可以根据用户需求和系统状态的改变自动调整看板的数量以及瓶颈资源缓冲的大小, 有效地降低工厂中在制品的数量和生产的成本。

瓶颈资源动态调度。生产系统某些不确定事件发生会造成系统的瓶颈漂移。所以, 在生产系统状态改变时, 如何及时地、动态地对系统重新调度是今后研究的重点之一。

多目标优化的智能算法。根据相互冲突的目标建立生产系统的多目标优化模型, 可以较好地平衡各个目标间的冲突, 使系统总体达到最优。

(3) 质量控制。质量控制可分为大样本质量控制和小样本质量控制。

对于大样本质量控制, 其主要的方法是: ① 基于系统过程建模的方法; ② 基于知识的系统方法; ③ 利用神经网络等工具的学习方法; ④ 数理统计方法。在对大型、复杂设备和系统进行可靠性分析时, 样本数据少的问题显得极为突出。小样本质量控制变得极为重要, 小样本方法是一个难度很大的课题, 目前还没有形成比较完善和系统的一套理论。目前贝叶斯方法、Bootstrap 和 Bayes Bootstrap 方法、蒙特卡罗仿真方法等。

近年来, 质量控制的趋势是把质量控制的重点

从过程的输出转向对过程本身的研究。基于过程模型的质量控制技术得到较快的发展, 一个控制系统整个过程在时域上具有相关性, 历史状态对系统的当前状态有影响。基于过程的建模方法主要考虑生产过程的历史信息, 提高了对过程识别的能力, 利用模型可以很好地解决过程数据的相关性。系统过程建模可以解决过程质量特征数据的相关性或局部数据的残缺等问题。

(4) 可靠性与设备性能维护。制造系统可靠性与设备性能维护一直是学术产业界关注的重点与热点^[14]。中国国家发展与改革委员会提倡要大力开展设备维护的研究, 以减少工业生产资源浪费。从 2002 年起, 由国家自然科学基金资助, 相继发展了设备维护外包运行策略、设备 e 维护等项目的研究。中国科学院沈阳自动化研究所承担了国家高技术研究发展计划“863 计划”资助课题“支持大型设备监测/维护的 CBM (Condition-based maintenance) 标准化网络平台及服务网格技术”的研究, 研究成果在多家企业中得到了应用, 取得了良好的社会效益与经济效益。

发达国家特别重视设备性能维护, 瑞典从以工业监测为基础进行预防维护发展到多学科维修组织科学化维修; 德国重点发展了全民生产维护零故障工程, 并加入了设备的综合效率概念; 日本从全员生产维护开始已经发展了全员规范化生产维护等相关理论。美国自然科学基金近几年来对可靠性与设备性能维护领域的支持越来越多, 如美国 Iowa 大学与美国威斯康辛大学麦迪逊分校联合申请的“售后工程系统的基于事件日志故障预测与设备维护”的课题及美国佐治亚理工大学申请的“基于实时的预测理论的提高可靠性与设备维护”课题等。

本领域的研究已在产业得到了广泛应用。ReliaSoft 公司发布了 QTMS、Dashboard、Xfmea 企业版等以可靠性为中心的设备维护分析软件, 其能够进行完善的设备失效报告、分析和纠正; 提供完全实时监控企业产品质量与可靠性数据。

设备维护技术已经由事后维护、预防维护发展到预知维护。随着多学科技术的发展, 新颖的设备维护理念不断地被提出, 发展了以可靠性为中心的维护、以利用率为中心的维护、适应性维护、费用有效维护、价值驱动维护、设备全生命周期管理与绿色维护等。计算机维修管理系统与设备资产管理的发展更标志着智能化、专业化、协同化、信息化与数字化设备维护时代的到来。

(5) 制造过程中的智能计算。近二十年来智能制造的理论与应用取得了长足的发展, 新兴的计算

智能拓展了传统的计算模式和智能理论,适用于无法用数学模型精确描述的复杂系统,在机械工程领域得到越来越广泛的应用,并取得了一定的效果。

在制造系统中,面向制造过程的智能计算可定义为:针对制造过程中的巨量复杂不确定信息,采用各种智能计算技术对制造执行过程中的规划、调度和控制等复杂问题对象通过特定的物理或数学模型进行描述求解,使得问题对象能在有限的时间内获得令人满意的解,进而指导生产实践活动。

鉴于所研究问题的复杂性和多样性,智能计算技术表现出向集成化发展的趋势,强调不同的智能技术思想有机融合的重要性,要求人们协调各种技术的应用来解决复杂问题,从而使每种技术的强势得到发挥、劣势得到弥补,最终达到解决问题的目的。另外一种趋势就是对现有智能算法的改进和提出新的求解算法,因为虽然目前已经有了很多针对生产制造过程问题的算法和系统,但是由于生产制造过程中的很多问题都是非线性(Non-polynomial, NP)难问题,不可能在短期内取得突破性进展,这就要求人们进一步拓宽研究范围和思路,在原来算法的基础上继续寻找可行的能够获得最优解而且求解速度快的算法。这些新的研究思路都将为智能优化技术在制造系统学科的研究提供新的发展空间。

2.1.1.3 数字化制造过程与系统

(1) 传感网络。由无线射频标签、条码和传感器构成的传感网络为制造系统的物质资源提供了“物体”识别标志,通过与制造数据库系统的结合,主要用于获取制造过程工件、加工工艺系统工况等相关的实时数据,进行制造过程的实时跟踪、决策与精确控制,是实现实时的全数字化制造过程的核心。针对制造系统的信息采集需求来设计并配置由巨量的传感节点组成的网络,且每个传感节点具有感知、采集、运算、存储、通信及传输数据的能力。通过网络通信技术,传感节点之间既可相互交换信息,也可把信息直接传输到数据采集终端,进而完成该采集任务的自组织、分布式网络系统,其实质是把制造系统中的物质资源互联成为一个“物联网”。

本领域的学科研究方向包括:① 传感网络基础理论与关键方法研究,重点研究传感网络的拓结构型、优化设计方法、动态配置策略、容错性、实时性、可靠性和资源利用率间的自适应平衡机制,以揭示传感网络的形成机理与传播规律;② 高效的无线传感器网络结构研究,研究网络各层间的相关性,设计合理交叉层优化技术,最大限度地利用有

限资源,在网络效率、开销、可靠性和可扩展方面求得平衡以最大限度地利用资源;③ 面向数字化制造的智能传感网络研究,针对制造过程信息的采集任务,智能传感网络能够根据任务的信息采集需求,通过分析在各个传感节点上的采集序列,自主进行部署调整,并对传感网络进行优化,确保传感网络的健康运行。

(2) 数字化制造过程建模。数字化制造过程建模可定义为:利用数学工具对制造过程涉及的设备、刀、夹、量具等制造资源以及工艺过程进行定性描述和定量解析。数字化制造过程建模涉及3个层面的问题:第一个层面的问题是基于工序(工步)层的切削加工过程建模和工艺系统建模,解决“工件—刀具—夹具—机床”切削过程优化和制造误差控制问题;第二个层面的问题是研究工序间的耦合效应,如工序间误差传递问题、工序公差自适应调整等,解决工序流层面工序间协同控制问题;第三个层面的问题是涉及多工序流,研究批次零件引起的多工序流间相互耦合效应,解决制造过程资源的有效配置和协同控制问题。

数字化制造过程建模研究方向包括:① 复杂工况环境下的切削过程建模问题,建立力、热等多场耦合效应下的切削过程模型和刀具位姿、路径控制模型;② 制造过程多工序流建模及其复杂性分析问题,不同工序间的耦合效应导致了制造过程的复杂性,如工序间的资源约束、节拍平衡、误差传递等,需要解决制造过程的平滑性控制问题,需要对制造过程不同工序间的耦合机理及其复杂性进行分析;③ 虚拟现实支持的制造过程建模,虚拟现实技术为人机交互提供了很好的平台,借助虚拟现实技术实现对制造过程建模的支持,可以提高建模过程的效率和质量。

(3) 制造执行系统(Manufacturing execution system, MES)。MES作为支持车间级数字化制造过程的核心模块,与传感网络一起负责底层设备信息的反馈处理与上层计划指令的传达、执行^[15]。MES弥合了企业计划层和生产车间过程控制系统之间的鸿沟,是走向制造过程实时信息集成的纽带。它通过强调制造过程的整体优化来帮助企业实施完整的闭环生产,实现制造过程的敏捷性与快速响应性。MES理念可解决当前企业经营层和生产层脱节的现状,其经过十多年的迅速发展,已给制造企业带来了可观的经济效益,受益于MES技术的制造业覆盖电子、机械、航空、汽车、医疗、食品、酿酒、石油、化工和冶金等各个领域。

MES研究方向包括:① MES标准化包括制定

制造数据实时交换标准、MES 体系结构、系统总线与模块化标准等；② MES 理论研究包括针对不同制造过程特征(如离散、混流等生产模式)的 MES 系统设计理论与复杂性分析，以传感网络为基础的制造物流网络分析与实时制造数据融合，MES 中先进排程、调度、生产控制、库存以及维护的深度建模与智能求解算法，实时制造跟踪与决策方法，制造服务与 MES 的融合等；③ 新型的 MES 体系结构包括具有开放式、客户化、可配置、可伸缩、网络化等特性，可针对企业业务流程的变更或重组进行系统重构和快速配置；制造服务与工业产品服务系统驱动的 MES 体系结构；智能 MES 体系结构等。

(4) 系统集成技术。集成是指通过思想观念的转变、组织机构的重组、流程(过程)的重构以及计算机系统的开放互连，使整个企业彼此协调地工作，从而发挥整体上的最大效益^[16]。当前先进制造系统所涉及的集成范围包括：信息集成(如计算机集成制造)；过程集成(如精益生产、并行工程)；企业间集成(如虚拟制造、敏捷制造、网络化制造)；人机集成等^[16-17]。

目前，系统集成领域国内外主要的研究方向包括以下几个方面。

1) 产品全生命周期管理(Product lifecycle management, PLM)是当前系统集成研究的主要内容^[17]。PLM 的主要关键技术包括：数据转换技术、数据迁移技术、系统管理技术、通信/通知技术、可视化技术、协同技术和企业应用集成。国外对 PLM 理论和技术进行了大量的研究。如欧盟的 ICP-35K 项目、美国的 JSF 项目、AdCoMS 项目、Enhance 项目和 PLCS 计划等。

2) 企业应用集成是最近国内外研究的一个非常热门的领域。企业应用集成技术可以把各个应用程序集成为一个无缝整体。目前，企业应用集成的关键技术主要有：消息中间件、过程管理和工作流技术、应用服务器以及 Web Services 技术等。

3) 制造网格是制造集成技术的更高层次。基于网格技术和相关先进计算机及信息技术，对产品全生命周期的设计、制造资源和信息进行集成，形成了支撑现代制造系统及企业群体协同运作和管理的支撑环境。制造网格当前研究的主要问题有：制造网格资源封装、配置与管理技术、制造网格应用支持工具技术、面向制造网格的中间件接口技术、制造网格的实施和应用等^[7]。

4) 标准化技术是集成技术的基础。与制造企业信息化有关的标准体系的研究还不够完善，还需要进一步深入研究，包括基础标准、数字化设计标准、

数字化制造标准、数字化测试与试验标准、数字化管理标准、信息安全标准等。其中，制造技术标准研究进展主要包括 STEP (Standard exchange of product data model)标准(ISO10303)、零件库标准(ISO13584)、EDI (Electronic data interchange)运作标准 UN/EDIFACT (ISO9735)、数字化制造过程与管理数据集成标准(ISO15531)等。

(5) e 制造与电子商务^[18-19]。e 制造也称电子化制造，其实质是以电子商务支付手段和互联网技术为支撑平台，以实现制造企业在产供销方面的电子化、数字化、服务化、在线化及协同商务化，进而达到从工厂底层设备直接到客户和供应商的整个供应链系统的集成。其中，以电子商务支付为核心的网上制造活动流程重构、e 服务、e-销售、跨企业供应链服务体系、扩展企业为核心的制造执行系统等是 e 制造的核心。实施 e 制造的最终目的是通过电子商务技术从价值链的角度提升制造企业的价值，减少企业流通与信息处理环节，达到增效的目标，进而帮助企业提高市场响应速度和竞争能力。

e 制造的研究方向包括：① e 制造系统模式的数学模型建立与解析问题。包括研究 e 制造系统的在线服务模型、电子商务模型和服务链模型，研究 e 制造系统模型运行的行为与状态模式解析等；② 反映产品制造过程中产品相关的行为与状态的数据分析与处理问题；③ e 制造协同学理论，信息交换、共享以及可视化技术；④ e 制造执行系统及其网络平台的研究。包括构成客户、供应商和制造企业之间扁平式的协作网络关系，实现虚拟的电子化制造平台等。

2.1.1.4 新兴制造系统

制造系统是指对生产产品或提供服务的人员、设备、资金、原材料、能源、信息等，在一定的环境和条件下进行最佳组合，而形成的系统，这个系统既包含硬的形态，如设备系统、信息系统、物流系统，也包含软的形态，如管理运行体系、生产组织方式等。包含全部制造系统硬、软要素的制造系统通常也称为制造模式，它对制造业有着重大的影响。采取何种类型的制造模式决定着制造系统控制资源和信息的方式，极大地影响制造系统的特性，这些特性包括：系统的运行效率，系统的适应性，系统的经济性，系统的可靠性，系统的可持续发展性，以及系统的技术先进性等，制造模式并无定式。

(1) 绿色制造系统。绿色制造(Green manufacturing, GM)，又称环境意识制造(Environmentally conscious manufacturing, ECM)、面向环境的制造

(Manufacturing for environment, MFE)等。它是一个综合考虑环境影响和资源效益的现代化制造模式,其目标是使产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中,对环境的影响(负作用)最小,资源利用率最高,并使企业经济效益和社会效益协调优化。绿色制造实质上是人类社会可持续发展战略在现代制造业中的体现。

绿色制造的研究方法是以生命周期思想作为指导,对象是一个闭合循环的复合系统。传统上这个系统优化主要面向生产段的优化,今天系统优化的概念扩展到包括使用和回收段的全生命周期,未来将进一步扩展到多次循环使用的扩展生命周期,如图2所示。

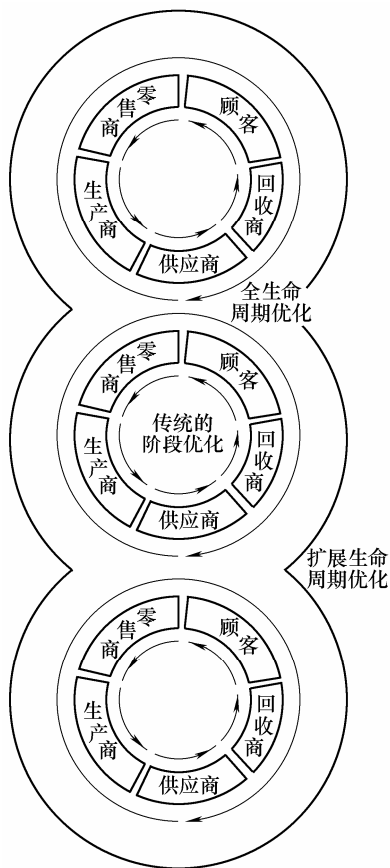


图2 产品生命周期

绿色制造的提出引起了国际社会的广泛关注,美国制造工程师学会1996年发表了关于绿色制造的蓝皮书《Green Manufacturing》,提出绿色制造的概念,一批国际知名学者进行了大量的研究,在中国国家自然科学基金会和科技部国家高技术研究发展计划“863计划”中都对绿色制造进行了资助,目前主要的研究方向包括如下几个部分。

绿色设计:绿色设计的基本思想就是要在设计阶段就将环境因素和预防污染的措施纳入产品设计之中,将环境性能作为产品的设计目标和出发

点,力求使产品对环境的影响达到最小。

清洁生产:相对于真正的清洁生产技术而言,这里所提到的清洁生产仅仅指生产加工过程。

绿色供应链和逆向物流:绿色不应该仅仅考虑在一个企业内部,通过供应链的协同和考虑回收物流使得产品在更大范围内取得优化,特别是逆向物流往往成为企业进行全生命周期管理的难点,良好的逆向物流优化成为企业进行绿色生产的关键。

绿色管理模式:已经有一些国际标准比如ISO14000环境管理体系标准,提供基本的指导,但是仍然需要研究面向绿色制造的全产品生命周期的绿色管理模式。

绿色制造支撑技术:绿色制造的数据库和知识库、环境影响评估系统和绿色制造的实施工具。

随着ISO14000环境管理体系系列标准、OHSAS18000职业健康与安全卫生标准系列、绿色产品标志认证以及一系列环境法规的颁布,企业也面临越来越严峻的绿色贸易壁垒的压力。欧洲、日本、美国等发达国家的一些企业,特别是一些跨国公司,将绿色制造作为优先发展战略之一,甚至认为在不久的将来,无论从工程还是商务与市场的角度,绿色制造都将成为工业界最大的战略挑战之一。

(2) 服务型生产系统。在服务型制造模式下,各自主制造单元互相提供生产性服务,并以“产品+服务”的形式为客户提供全面解决方案。服务型制造延长了企业价值链,在包括设计、制造、分销、使用和回收等诸环节的产品全生命内,为客户带来服务和价值。

随着经济的发展,服务型制造可使企业从单纯的生产加工,转变为向中间客户和最终客户提供全方位和全生命周期的生产性服务,同时向产品研发和营销网络渗透,通过世界范围内的生产性服务和技术、加工、服务渠道的互相融合,将加快我国制造业转变的步伐。

服务型制造的研究在发达国家有不同的提法,美国称之为基于服务的制造,澳大利亚为服务增强型制造,日本为服务导向型制造,英国为产品服务系统。国内外对服务型制造的研究基本起源于20世纪90年代中后期,最初被称之为服务增强,学者们研究了服务业在发达国家中逐渐兴起的趋势,提出了服务与制造结合的新概念,并提出“服务工厂”的新制造战略,目前有关服务型制造的主要研究领域包括以下几方面。

服务创新与产品—服务集成设计:随着服务融合到产品中,有效地设计产品—服务组合成为产品

设计的新挑战, 由于服务和有形性方面的巨大差异导致必须有新的思想和方法来进行服务创新和产品—服务的设计。

产品服务系统: 产品服务系统(Product service system, PSS)是产品和服务的整合, 用户购买的是产品功能或结果, 其目标旨在产品全生命周期内, 通过增加无形的服务到有形的产品上, 从而达到经济和环境的双赢^[20]。

服务作业的部署与服务系统控制: 与传统的产品制造过程相比, 服务过程批次多、批量小、差异大、变化快, 且涉及顾客参与, 因此服务过程中生产控制, 服务过程的设计与控制面临巨大的挑战, 与产品生产不同, 服务过程将不再区分后台(生产)与前台(销售), 因此需要新的方法来设计服务系统平衡顾客需求多样性和生产过程稳定性。服务信息化和远程作业在这个领域有着极大的发展潜力。

2.2 发展趋势及预测展望

TQCSE 是制造系统研究的基本目标。一方面, 产品的多样性和缩短制造周期, 是当今社会对制造系统的基本要求。不断涌现的现代技术, 特别是信息技术为革命性的解决方案提供了基础, 对制造过程进行“精确化”规划、设计和控制, 制造过程数字化是解决这一问题的关键。另一方面, 市场竞争的加剧使企业尽可能寻求制造过程的增值空间, 引起了以制造资源及其工作能力服务为特点的服务型制造过程的涌现。制造协同、可服务性设计、制造联盟等理论与技术得到了进一步的发展。再者, 由于资源的消耗和环境问题, 制造过程的绿色化也成为未来制造系统的必然趋势。绿色评价、绿色设计、清洁生产、绿色管理和相应的绿色信息支撑等理论和技术也成为亟待研究发展的课题。因此, 未来制造系统在未来 5~20 年, 其发展趋势也将是“精确化”、“服务化”、“绿色化”, 发展过程如下。

(1) 第 1 阶段(2000~2005 年): 传统制造过程, 特征为制造过程数据、信息流通不畅, 制造过程处于粗放状态。

(2) 第 2 阶段(2005~2010 年): 精确化制造过程, 特征为检测传感网络、RFID 技术实时获取过程数据, 实现对制造过程的精确控制。

(3) 第 3 阶段(2010~2015 年): 服务型制造过程, 特征为制造服务理念驱动, 以缩减不增值制造环节为目的, 实现制造过程的服务增值。

(4) 第 4 阶段(2015 年之后): 绿色制造过程, 特征为制造过程能耗低、制造资源可循环利用、制造环境友好。

为了实现数字化、服务化和绿色化的制造, 在

未来 20 年中有可能突破的关键研究领域包括以下几个方面。

(1) 制造系统工程的新理论。随着越来越复杂的制造系统亟需有效的分析工具, 但目前已有的工具在理论和实践方面有着巨大的差距, 新的理论如无尺度网络、误差流等方法展现出一定的发展潜力。其中误差流控制的主要发展趋势包括: 提高设计阶段“首次正确率”控制误差流; 通过误差源的诊断控制误差流; 充分利用多工序间复杂的相关性控制误差流。

(2) 制造智能。生产运行控制是生产系统实现绩效的最后环节, 智能方法将大大提高生产运行与控制质量。具体发展趋势包括以下几点。

智能计算: 随着基于智能技术的数字化制造过程研究的深入, 必然会进一步与生产实践相结合, 向着系统化、集成化、规范化、智能化和实用化的方向发展。

先进生产计划与调度主要有下面 4 个发展趋势: 生产网络结构化、生产模型网络化、智能算法专业化和仿真技术的使用。

计划执行与生产控制主要有以下发展趋势: 生产系统定制化; 看板系统动态化; 瓶颈资源动态流程。

质量控制的趋势是把质量控制的焦点从过程的输出(产品/服务等)转向对过程本身的研究。

可靠性与设备性能维护发展趋势如下: ① 维护工程系统化; ② 设备维护行业化; ③ 设备维护流程化; ④ 设备维护信息化; ⑤ 设备维护智能化。

(3) 数字化制造。信息化为制造系统的设计与运行提供了极大的潜力, 因此数字化制造会成为未来 20 年制造系统领域最有前景的研究方向。具体发展趋势包括以下几个方面。

传感网络研究发展趋势包括: 传感网络基础理论与关键方法研究、高效的无线传感器网络结构、面向数字化制造的智能传感网络。

数字化制造过程建模发展趋势主要有: 多场耦合下的切削加工过程建模; 制造过程复杂性建模与分析; 自适应过程建模新方法; 多学科建模与仿真平台开发。

MES 系统在现代信息技术、控制技术、制造技术以及管理技术等推动下, 正在向集成化、标准化、敏捷化、智能化、可视化、专业化等方向发展。

系统集成技术: PLM 作为系统集成技术的主流技术, 研究的重点主要包括: 企业基础信息框架、统一产品模型、单一数据源、基于 Web 的产品入口, 以及 PLM 标准与规范体系^[17]。2008 年 3 月, 美国

制造业研究与发展跨机构工作组提出了智能集成制造技术^[8]，在研发过程中具有重大意义的4个技术领域：针对产品和过程集成设计和优化的预测工具，使大量的产品开发和测试工作可以在一个虚拟环境下完成；制造工艺和设备智能系统，该系统具备学习、自动推理、自我优化、自我诊断和自适应控制能力；制造软件的自动集成，研究基于语义的自我集成，通过执行计算任务达到集成化；制造系统的安全集成，发展用来测试和验证相互关联的制造系统是否有足够安全程度的自动化工具以防范这些系统遭受恶意攻击。

e 制造与电子商务研究的发展趋势包括：各类信息的集成与本地化处理；先进的预测检测方法和技术；各种非接触式的信息技术例如无线信息技术、无线传感技术、可视化系统等；无线通信和网络结构技术；确定和发展新的通信协议标准；先进的远程智能维护与智能诊断系统、质量信息跟踪技术。

(4) 新兴制造模式。市场环境的变化、技术进步、企业社会责任和环境保护等都对现有工业化的生产、生活方式提出质疑，从而提出新的制造模式，引领制造业的发展。其中绿色制造、服务型生产将是今后发展的趋势。作为正在发生的生产方式变革，迫切需要对服务型制造的基础理论进行探索，主要包括：服务型制造系统与复杂网络分析、服务型制造质量与主动健康维护和普适计算环境下的研究。

2.3 本领域我国与国际先进水平的差距

总体来讲，近20多年内，我国制造业在各方面取得了突破性的进展，在绿色制造等领域已经达到或接近国际先进水平。但仍有一些领域目前只处于初步探讨阶段，还需要更加细致的基础研究工作。

(1) 制造智能方面。对先进生产计划与流程的基础理论研究，国内外的差距并不大，但国内对其实现的研究不足。在可靠性与设备性能维护研究方面，国内企业的制造系统维护还只是停留在状态维护上，与国外相比，没有进行预测维护或更深层次的维护研究。对于设备高速化、复杂化和多样化的维护要求还没有具备先进的维护管理工具。

(2) 数字化制造方面。对MES系统的研究，理论方面国内大部分研究工作主要停留在MES思想、内涵以及体系结构方面的研究上，而对MES标准的研究则刚刚开始起步。总体来说，与西方发达国家相比，我国无论是在MES技术深度与应用广度上都存在较大差距。对系统集成技术的研究，在理论

研究方面，目前尚没有可供直接使用的系统集成理论；在企业应用方面，国内还没有真正的PLM系统，大部分国内厂商的PLM系统是从产品管理数据系统延展而来。

(3) 新兴制造模式方面。对服务型生产系统的研究，整体来看，国内外对服务型制造的探索都处于萌芽的概念阶段，缺乏系统的探索和研究，更缺乏对于服务型制造内含的科学原理和指导企业实践技术方面的研究。

3 展望与对策

3.1 我国本领域未来5~10年的重点发展方向

本领域未来5~10年重点发展的方向可概括为以下3个方面。

(1) 精确化。通过低价的传感器、测量器，将制造过程中的数据实时采集并通过计算机实施处理，从而实施决策提供依据，实现制造过程的精确化控制。

(2) 绿色化。绿色化目标是减少制造过程中的污染和能耗，制造过程的绿色化符合国家对环保的迫切需求。

(3) 服务化。在制造过程中引入生产性服务的概念，节约制造成本，另一方面，由于服务本身具有非物质化的特点，因此，服务化也可以减少制造过程中的资源消耗。

3.2 发展策略与对策

(1) 制造过程精确化发展策略与对策。结合制造系统学科的发展方向，通过对精确化制造过程的分析，重点从传感网络、采集数据的实时处理和决策、制造过程的精确控制三方面来实现精确化制造过程。基于此，提出精确化制造过程的发展策略与对策。

1) 在传感网络研究方面。传感网络为制造数据的实时处理和决策、制造过程的精确控制提供了数据支持，是实现精确化制造过程的基础条件。通过研究下一代无线传感网络的形成机理、组织结构及体系构架，在此基础上重点研究传感网络的拓扑构型、优化设计方法、动态配置策略、容错性、实时性、可靠性和资源利用率间的自适应平衡机制，以揭示传感网络的形成机理与传播规律。同时，需要对传感网络的运行进行监控，确保传感网络的运行鲁棒性。

2) 在采集数据实时处理和决策方面。对传感网络采集的数据进行实时处理和决策首先依赖于大型制造数据库系统的构建，因此，应加强对大型制

造数据库系统的研究。包括数据库的模式设计、海量数据的存储、快速搜索及其聚合等；其次应加强针对海量信息的融合、制造知识的提取与重用，利用各种实时数据及其聚合处理解决制造过程的实时跟踪、多目标组合优化与决策等问题。第三应加强对现有智能算法的改进和对新算法的研究，在执行效率、适应性能、稳定收敛等方面进一步提高。其中，采用基于 XML 格式的处理和智能计算技术的决策则表现出很大的优势。在此基础上，通过智能化和集成化的手段来增强数字化制造系统的柔性、自组织能力，提高我国制造业在国际市场的竞争能力和快速响应市场需求变化的能力。

3) 在制造过程的精确控制方面。为了提升产品制造效率和质量，在数字化制造环境下对制造过程进行精确定量分析是至关重要的。传感网络为精确化制造过程的执行提供了数据支持，数据的实时处理和决策为精确化制造过程的执行提供了技术保证，而高效的执行过程则依赖于制造过程(如切削过程、多工序流)建模工具的开发，同时，建模工具的开发前提则需要对数字化制造过程各组成要素间存在的复杂交互效应进行研究。此外，由于数字制造过程不同的耦合效应(工序节点层面的加工要素耦合，工序流层面的工序耦合)，导致了建模方法采用多种建模方法，这就要求必须建立统一的多学科建模与仿真平台，对制造过程的耦合机理及其复杂性进行分析，以实现最终提升制造过程运行效能和制造产品质量之目的。

(2) 制造过程绿色化发展策略与对策。制造过程将制造资源转变为产品，在这个过程中，要消耗资源并产生废弃物。制造业的绿色化是一个综合考虑环境影响和资源效率的现代制造模式，其目标是使得产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中，对环境的负面影响最小，资源效率最高，并使企业经济效益和社会效益协调优化。

绿色化是制造业可持续发展的核心，绿色制造是贯彻可持续发展战略，实现社会、经济、环境协调统一的有效途径。其研究方法是以生命周期思想作为指导，对象是一个闭合循环的复合系统。绿色化制造研究的理论基础是可持续发展、工业生态、循环经济等理论。根据这些基础理论，制定制造过程绿色化发展策略与对策。

1) 绿色设计。绿色设计的基本思想就是要在设计阶段就将环境因素和预防污染的措施纳入产品设计之中，将环境性能作为产品的设计目标和出发点，力求使产品对环境的影响达到最小。从这一点

来说，绿色设计是从可持续发展的高度审视产品的整个生命周期，强调在产品开发阶段按照全生命周期的观点进行系统性的分析与评价，消除潜在的、对环境的负面影响，力求形成“从摇篮到再现”的过程。

2) 绿色材料选择。绿色产品首先要求构成产品的材料具有绿色特性，即在产品的整个生命周期内，这类材料应有利于降低能耗，环境负荷最小。

3) 清洁生产。相对于真正的清洁生产技术而言，这里所提到的清洁生产仅仅指生产加工过程。在这一环节，要想为绿色制造做出贡献，须从绿色制造工艺技术、绿色制造工艺设备与装备等入手。

4) 绿色包装。绿色包装是指采用对环境和人体无污染，可回收重用或可再生的包装材料及其制品的包装。首先必须尽可能简化产品包装，避免过度包装；使包装可以多次重复使用或便于回收，且不会产生二次污染。如在摩托罗拉的标准包装盒项目方面，其做法是缩小包装盒尺寸，提高包装盒利用率，并采用再生纸浆内包装取代原木浆，进而提高经济效益。

5) 绿色制造支撑技术。支撑技术包括：绿色制造的数据库和知识库、环境影响评估系统、绿色管理模式和绿色供应链和绿色制造的实施工具等。

(3) 制造过程服务化发展策略与对策。制造过程服务化具有价值增值、资源节约等方面的优势，其发展策略与对策包括以下几点。

1) 易服务设计。易服务设计的目的是：设计阶段，在满足产品机械特性的前提下，充分考虑到产品制造后续的使用、维护、回收等方面，以“易服务”特性作为重要的设计目标，以期在设计阶段为产品高效服务的策略提供技术支持，从而为实现最终的满足用户需求的目标而打下基础。

研究易服务设计的意义在于：探讨并研究易服务设计的理论与实现方法，揭示了易服务设计过程的一般规律和特点；通过对易服务设计的研究，丰富了与其相关的模块化设计、产品族设计、嵌入式设计、传感网络设计等设计思想的外延和内涵；易服务设计为工业产品服务系统的实施提供了基础。

2) 发展制造外包服务。企业将产品的部分零部件或部分工序外包给第三方专业公司，由于第三方专业公司具有丰富的专业知识，一方面可以节约这些外包件的制造成本，提高了外包部件的质量；另一方面，制造企业不需要购买加工外包部件的设备，减少了物质资源消耗。

3) 发展工业产品服务系统。工业产品服务系统是一种由制造商或第三方服务提供商向工业客户

提供产品工作能力等服务的全新生产性服务运行模式,目前国内已有一些企业进行了这方面的探索并获得了成功,如陕西鼓风机集团公司的鼓风能力提供服务、上海大众汽车的刀具提供服务等。未来5~10年内的发展对策更多的是聚焦在理论与试点并重上。理论发展着重解决好服务增值定量描述、产品工作能力服务的定量研究、服务过程的配置和控制等方面。

4 结论

(1) 制造系统是一个多学科的研究领域,其主要研究问题是生产系统的分析、设计和运行控制。而研究目标是提高制造系统的效率、质量、降低制造的成本,改善服务和减少对环境的影响。

(2) 过去的几十年中,在制造系统工程、制造系统的计划与控制、数字化制造过程与系统和新兴制造系统方面取得了重要的突破。

(3) 信息技术为使得对制造过程进行“精确化”规划、设计和控制变得可行,制造过程与系统的数字化成为制造系统研究的最重方向。

(4) 市场竞争的加剧使制造企业尽可能拓展新的增值空间,从制造向设计开发、物流和售后服务等环节延伸,制造服务化成为制造业,特别是中国制造业的发展趋势,因此有关生产型服务的研究应当成为制造系统的研究焦点。

(5) 制造消耗了大量资源,有时带来严重的环境问题,制造的绿色化和可持续性毫无疑问应该成为未来制造系统的必然趋势,因此可持续的绿色制造系统也成为亟待研究发展的课题。

在制造业日益全球化的今天,生产网络愈加复杂,制造系统研究也因此日益重要。不少领先的企业提出,制造业的竞争不再仅仅是单元技术的竞争,而更是与“制造系统”相关的软性系统技术的竞争。

参 考 文 献

- [1] 刘飞, 张晓冬, 杨丹. 制造系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
LIU Fei, ZHANG Xiaodong, YANG Dan. Manufacturing system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [2] ANDERSON C, BUNCE P. Next generation manufacturing systems white paper[R]. Arlington, Texas: CAM-I, 2000.
- [3] 熊有伦, 吴波, 丁汉. 新一代制造系统理论及建模[J].

- 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 49-52.
- XIONG Youlun, WU Bo, DING Han. The theory and modeling for next generation manufacturing system [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1-2): 49-52.
- [4] 黎明, 雷源忠. 现代制造科学展望[J]. 中国机械工程, 2000, 11(3): 345-347.
LI Ming, LEI Yuanzhong. Prospects for the modern manufacturing science[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(3): 345-347.
- [5] 吴伟仁. 军工制造业数字化[M]. 修订版. 北京: 原子能出版社, 2007.
WU Weiren. Digitized military manufacturing[M]. Revised Edition. Beijing: Atomic Energy Press, 2007.
- [6] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械与制造科学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Engineering and Materials Science Division, National Natural Science Foundation of China. Mechanical and manufacturing science[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [7] 刘强, 李哲浩, 唐晓青. 制造科学与工程学科发展与前沿研究问题[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 283-289.
LIU Qiang, LI Zhehao, TANG Xiaoping. Development of manufacturing science and engineering and its up-to-date research directions[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4): 283-289.
- [8] National Science and Technology Council. Manufacturing the future: Federal priorities for manufacturing research and development [R/OL]. http://www.manufacturing.gov/pdf/STCIWGMFGRD_March2008_Report.pdf, 2008.
- [9] DONG M, HE D. Hidden semi-markov model-based methodology for multi-sensor equipment health diagnosis and prognosis[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 178: 858-878.
- [10] LI J S. Overlapping decomposition: A system-theoretic method for modeling and analysis of complex manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2005, 2(1): 40-53.
- [11] HUANG Q, SHI J. Variation transmission analysis and diagnosis of multi-operational machining processes[J]. IIE Transactions, 2004, 34: 89-105.
- [12] ROBERT S. Achieving competitive advantage through supply chain management-advanced planning and scheduling system[R]. Sunnyvale: VITRIA Technology, INC., 2000.

- [13] PSLX White Paper. Chapter 1 conceptual definition of APS[EB/OL]. <http://www.pslx.org/en/>.
- [14] 李葆文. 现代设备资产管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- LI Baowen. Asset maintenance management[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [15] 朱海平, 邵新宇, 张国军. 不确定信息条件下的车间调度策略研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2006, 12(10): 1637-1642.
- ZHU Haiping, SHAO Xinyu, ZHANG Guojun. Job-shop scheduling strategy under uncertain information environment [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(10): 1637-1642.
- [16] Strategic Analysis, INC. SensIT Project [EB/OL]. <http://www.sainc.com/sensit/>.
- [17] 黄双喜, 范玉顺. 产品生命周期管理研究综述[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(1): 6-9.
- HUANG Shuangxi, FAN Yushun. Overview of product lifecycle management[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(1): 6-9.
- [18] 江平宇. 网络化制造电子服务理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- JIANG Pingyu. Theory and technology of networking manufacturing e-services[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [19] LEE J. E-manufacturing—fundamental, tools and transformation [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2003, 19: 501-507.
- [20] MANZINI E, VEZZOLI C, CLARK G. Product-service systems: Using an existing concept as a new approach to sustainability[J]. Journal of Design Research, 2001, 1(2): 12-18.
-
- 作者简介: 郑力(通信作者), 男, 1964 年出生, 教授。主要研究方向为生产系统的分析和数字化制造。
E-mail: lzhen@tsinghua.edu.cn
- 江平宇, 男, 1963 年出生, 教授。主要研究方向为网络化数字制造与服务系统工程、工业产品服务系统、质量控制等。
E-mail: pjiang@mail.xjtu.edu.cn
- 乔立红, 女, 1961 年出生, 教授。主要研究方向为制造信息建模与集成、数字化制造。
E-mail: lhqiao@buaa.edu.cn
- 奚立峰, 男, 1966 年出生, 教授。主要研究方向为生产系统的分析与规划、质量控制。
E-mail: lfxi@sjtu.edu.cn