

机械工程科学技术前沿

国家自然科学基金委员会工程与材料科学部

机械工程科学技术前沿 编委会



机械工业出版社

机 械 工 程 科 学 技 术 前 沿

国家自然科学基金委员会工程与材料科学部

机械工程科学技术前沿 编委会



机 械 工 业 出 版 社

内 容 简 介

当代科学技术迅速发展,如计算机在各个领域广泛应用,智能制造、微型机械、纳米技术等都是近几年发展起来的。各个不同学科之间又互相渗透、交叉融合,产生了新的学科领域。例如智能技术、传感技术、信息技术与结构科学交叉,产生了智能结构科学,激光技术、材料技术和计算机辅助设计和制造集成产生了快速原型制造新技术等等。这种新的学科领域也称为学科前沿。这本机械工程科学技术前沿科学地分析、论述、展望和预测了我国机械工程科学的未来,也详尽地介绍了我国在机械工程科学前沿领域的研究成果。因而,阅读本书可使读者开阔眼界,站在很高的层次上展望未来。本书的作者均为我国机械工程科研领域的学科带头人或专家。本书论述的内容都是最新的科学技术的前沿,既有很高的学术价值,又有通俗可读性。本书适宜的读者为与机械工程有关的专家、学者以及高级管理人员,也适宜对机械工程科学技术前沿感兴趣的一切热心读者,对政府有关部门制订科技政策、企事业领导和技术人员了解和应用新技术,大专院校相关学科师生学习掌握新知识有指导意义。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程科学技术前沿/国家自然科学基金委员会工程与材料科学部
《机械工程科学技术前沿》编委会编。

—北京:机械工业出版社,1996.5

ISBN 7-111-05157-2

I. 机… II. 国… III. 机械工程—科学研究—概况—世界 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 04773 号

出版人:马九荣(北京百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑:杨少晨

封面设计:王洪流

北京怀柔桥中印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996年5月第1版·1996年5月第1次印刷

开本 787mm×1092mm 1/16·印张 14.5·字数 360千字

印数:1500册

定价:23.00元

机械工程科学技术前沿编审委员会

主 任：蔡睿贤

副 主 任：李克健

编 委：卜 炎 冯培恩 师汉民 刘 飞 陈慧毅 李敏贤
周兆英 周 济 柳百成 宗光华 温诗铸 张伯鹏
张祖明 诸德超 杨光薰 杨广勇 雷源忠 黄尚廉
颜永年 黎 明 魏宸官(以姓氏笔划为序)

主 审：路甬祥 雷天觉 杨叔子 高镇同 阮雪榆 蔡鹤皋
王信义 熊光楞 徐济超 张长生 陈志诚

策 划：雷源忠

责任编辑：杨少晨

前 言

当代科学技术的迅速发展不仅促进了经济的繁荣和社会的进步,而且丰富和发展了各门学科。一方面不同科学技术之间的交叉融合迅速产生了科学技术新的聚集。例如智能技术、传感技术、信息技术与结构科学的交叉正在产生智能结构科学;激光技术、材料技术、计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)集成了快速原型制造(RPM)新技术。另一方面,经济的发展和社会的进步又对科学技术提出了新的期望。例如,人们设想制造出微型机器人进入人体血管进行医疗作业。而微型机械的发展要求纳米摩擦学解决微型机械中运动副的摩擦、磨损和润滑等问题。上述这种聚集和期望可称之为学科前沿。学科前沿也可以理解为已解决的和未解决的科学技术问题之间的界域。

前沿科技的发展十分迅速,十多年前还很少见到计算机在设计、制造中的应用,而现在CAD、CAE、CAPP、CAM几乎比比皆是。智能制造、微型机械及纳米技术等都是最近几年才发展起来的。另外,机械工程科学的新领域几乎都属交叉学科,特别是计算机技术和信息技术的应用,使机械工程科学进入了全新的时代。此外由于通讯技术的发展和世界各国政治、经济的开放,国际间竞争与合作并存的局面正在形成,前沿学科之间、各国科学家之间的交流与合作显得更加迫切、容易和频繁,并已出现多国科学家共同合作研究同一前沿科学难题的现象。这就是现代科学技术前沿发展的三个明显特点:迅速快捷、交叉融合和全球共享。

国家自然科学基金委员会机械学科曾在80年代末组织了学科发展战略研究,出版了《机械学》和《机械制造科学》发展战略研究报告,它对我国机械工程基础研究起到了一定的指导和推动作用。由于学科前沿的迅速发展,近几年来,机械工程学科前沿又涌现了不少新领域。工程科学研究必须瞄准前沿、结合国情、自主创新、明确应用前景。编写《机械工程科学技术前沿》一书的目的是在掌握大量国际国内前沿信息的基础上,科学地分析、论述、展望、预测我国机械工程科学的未来,用以指导学科制定2010年前的优先资助领域,同时也可作为我国机械工程专家和学者的参考资料。

《机械工程科学技术前沿》研究报告比较难写。第一,它不是一般的教材,不求系统性和完整性。本书所涉及的只是机械工程学科部分前沿领域;由于字数限制,各章节只求突出重点,不一定面面俱到。第二,它不是一般综述性文章,要求结合国情,联系实际。既要有综述和数据资料,又要有分析、评述、创见和科学展望。第三,它不是一般科普读物,主要读者应是机械工程的专家(包括管理专家)、学者和研究生。因此,既要有一定的通俗可读性,又要有高的学术价值。我们希望这本书能起到这样的作用。本书作者均是近年来在机械工程科学领域里比较活跃的科学家,但文章中的学术观点只是作者的看法,相信不会影响学术上的“百家争鸣”。

雷源忠

1996.3

目 录

前言

一、制造系统理论与建模	(1)
(一) 制造系统的定义和内涵	(1)
(二) 制造系统理论体系框架	(2)
(三) 制造系统的建模	(8)
(四) 制造系统理论和建模技术的发展与展望	(12)
参考文献	(14)
二、集成制造与智能制造	(15)
(一) 制造系统的结构和运行	(15)
(二) 计算机集成制造系统	(16)
(三) 智能制造	(23)
(四) 国情与策略	(28)
参考文献	(29)
三、精益生产	(31)
(一) 新时代工业化的标志	(31)
(二) 大量生产方式向精益生产方式转化	(32)
(三) 对 LP 的机理研究	(36)
(四) LP 的实现	(43)
(五) LP 与其他高新技术的关系	(44)
(六) 优先发展 LP 搞有中国特色的 LP	(46)
参考文献	(47)
四、面向 21 世纪的制造模式	(49)
(一) 概述	(49)
(二) 先进制造技术与模式的产生背景	(50)
(三) 关于制造模式	(51)
(四) 国内外制造模式的现状与发展	(52)
(五) 面向 21 世纪的制造模式	(60)
参考文献	(63)
五、新一代材料精确成形技术	(65)
(一) 材料加工成形技术的地位与作用	(65)
(二) 精确铸造成形技术	(66)
(三) 塑性精确成形	(68)
(四) 新一代连接成形技术	(70)
(五) 激光加工技术	(74)

(六) 材料成形过程模拟仿真	(76)
(七) 展望	(79)
参考文献	(80)
六、快速原型/零件制造(RPM)	(82)
(一) RPM 产生的历史背景	(82)
(二) 成形学与离散/堆积成形	(82)
(三) RPM 的主要工艺方法	(85)
(四) RPM 与相关学科间的关系	(87)
(五) 国内外 RPM 发展和应用现状	(89)
(六) 发展 RPM 技术展望	(93)
(七) 发展 RPM 技术建议	(96)
参考文献	(97)
七、超高速切削和磨削	(99)
(一) 超高速切削	(99)
(二) 超高速磨削	(105)
参考文献	(112)
八、微米/纳米技术	(113)
(一) 概述	(118)
(二) 微米/纳米技术	(118)
(三) 扫描探针显微镜技术	(116)
(四) 微型电子机械系统	(120)
(五) 微米/纳米技术的军事应用	(124)
(六) 微米/纳米技术的展望	(127)
参考文献	(128)
九、并行工程	(129)
(一) 概述	(129)
(二) 并行工程的定义和内涵	(130)
(三) 并行工程技术的发展	(133)
(四) 并行工程对制造业的影响	(135)
(五) 并行工程的关键技术	(138)
(六) 我国实行并行工程的战略	(142)
参考文献	(143)
十、智能结构系统与机器人	(144)
(一) 概念、现状与发展趋势	(144)
(二) 智能结构系统的基础技术	(147)
(三) 智能结构系统及其应用	(151)
(四) 先进制造技术与机器人	(154)
(五) 机器人机械学的学科前沿	(156)
参考文献	(160)

十一、面向工程的广义优化设计	(162)
(一) 工程广义优化设计的提出	(162)
(二) 工程广义优化设计的研究范畴	(163)
(三) 工程广义优化设计发展中若干关键问题	(164)
(四) 面向 21 世纪的工程广义优化设计	(172)
参考文献	(173)
十二、质量工程	(175)
(一) 质量工程的定义、范围和发展特点	(175)
(二) 设计质量工程	(176)
(三) 制造质量工程	(185)
参考文献	(190)
十三、机械系统中的混沌	(191)
(一) 概述	(191)
(二) 混沌现象	(191)
(三) 研究方法	(193)
(四) 应用	(194)
(五) 展望	(195)
参考文献	(195)
十四、纳米机械学研究现状与展望	(196)
(一) 纳米机械的产生背景	(196)
(二) 纳米机械学的范畴与组成	(197)
(三) 纳米机械学的研究进展	(198)
(四) 纳米机械学研究的关键问题与发展战略	(200)
参考文献	(205)
十五、电流变技术及其工程应用	(206)
(一) 一项有广阔前景的高新技术	(206)
(二) 电流变效及其影响因素	(208)
(三) 电流变液体	(215)
(四) 电流变技术及其工程应用	(220)
(五) 结束语	(222)
参考文献	(223)

一、制造系统理论与建模

制造系统理论是制造技术发展的科学基础。制造系统理论学科前沿的主要研究问题是希望建立系统化的制造系统理论体系。制造系统的模型是制造系统客观现实的抽象,是研究制造系统的有力工具之一。

本文对制造系统理论与建模研究的国内外现状进行了综述和分析,探索了制造系统的理论体系和系统建模问题。主要内容为:针对制造系统至今尚无统一定义的现状,提出了制造系统的基本定义及其结构定义、功能定义和过程定义;通过总结和集成制造系统理论研究的现有主要结论和观点,建立了制造系统理论体系的初步框架;分析和总结了制造系统现有的模型和建模技术,提出了一种制造系统的总体决策框架模型;最后对制造系统理论和建模技术的发展进行了论述和展望。

(一)制造系统的定义和内涵

制造业是将制造资源(物料、能源、设备工具、资金、技术、信息和人力等),通过制造过程,转化为可供人们使用或利用的工业品或生活消费品的行业。它涉及到国民经济的大量部门,是国民经济和综合国力的产业支柱。制造系统是制造业的基本组成实体。

对于“制造系统”的概念,至今尚无统一的定义。随着制造业的发展和人们认识的不断深化,“制造系统”的定义也在不断发展和完善之中。国际生产工程学会(CIRP)1990年公布的制造系统的定义是^[1]:制造系统是制造业中形成制造生产(简称生产)的组织形式;在机电工程产业中,制造系统具有设计、生产、发运和销售的一体化功能。美国麻省理工学院(MIT)教授 G. Chryssolouris 于 1992 年在文献[2]中定义制造系统为:制造系统是人、机器和装备以及物料流和信息流的一个组合体。国际著名制造系统工程专家、日本京都大学的 K. Hitomi 教授于 1994 年在文献[3]中从制造系统的结构、制造系统的转变特性、制造系统的过程特性三方面定义了制造系统。另外还有其他许多制造系统的定义观点。

综合考虑已有的制造系统的主要定义,并考虑制造的本质功能,本文将制造系统定义如下:

制造过程及其所涉及的硬件、软件和人员组成的一个将制造资源转变为产品(含半成品)的有机整体,称为制造系统。以上是关于制造系统的基本定义。制造系统还可有以下三方面的定义:

(1)制造系统的结构定义 制造系统是制造过程所涉及的硬件(物料、设备、工具和能源等)、软件(包括制造理论、制造工艺和制造信息等)和人员所组成的一个具有特定功能的有机整体。

(2)制造系统的功能定义 制造系统是一个输入制造资源(原材料、能源等),通过制造过程输出产品或半成品的输入输出系统。

(3)制造系统的过程定义 制造系统可看成是制造生产的运行过程,包括市场分析、产品

设计、工艺规划、制造装配、检验出厂、产品销售及售后服务等各个环节的制造全过程。

根据上述制造系统的定义可知,机械加工系统就是一种典型的制造系统,它由机床、夹具、刀具、被加工工件、操作人员及加工工艺等组成。机械加工系统输入的是制造资源(毛坯或半成品、能源和劳动力),经过机械加工过程制成产品或零件输出,这个过程就是制造资源向产品或零件的转变过程。

(二)制造系统理论体系框架

1. 制造系统理论研究现状分析

广义的制造系统理论包括领域制造理论和系统制造理论。

领域制造理论是针对制造过程或产品生命周期内的某一环节的理论或制造过程中针对某一技术的理论,它又称为局部理论或专门理论。长期以来,人们对领域制造理论已做了大量深入的研究,在制造业的部份领域已形成了较为完整,并已被成功应用的各种专门理论,如产品设计理论、金属切削理论、机械传动理论、过程控制理论等。领域制造理论仍然处于不断发展和完善之中。

系统制造理论是指针对制造全过程或制造过程多个环节有机结合的理论,或制造过程中综合性技术问题或管理问题的理论。其特点是具有明显的系统科学性和学科综合性特征,它追求的目标是制造全过程或制造系统的整体最优。

当然某些领域制造理论也部分具有系统制造理论的特性。领域制造理论和系统制造理论并没有绝对的界限。

系统制造理论研究的前沿课题主要围绕解决表 1 所示的制造技术问题进行。

表 1 制造系统理论围绕解决的主要问题

制造系统的不同侧面 目 标	现 代 制 造 系 统 作 为			
	技术—经济 系 统	人—机集成 系 统	社会—文化 系 统	自然子系统
制造技术	主要解决: • 提高制造系统的生产率 • 提高产品质量和服务质量 • 降低制造成本等 • 改善制造系统的人—机友善性			主要解决: • 减少制造系统对自然的危害和影响
现代制造系统装备技术				
制造系统与人				
产品设计技术				
制造系统控制技术				
现代制造系统的结构				
现代制造系统的运行与管理				

本文主要是研究系统制造理论和建模问题。若未加以特别注明,本文后面所提及的“系统制造理论”和“制造系统理论”含义相同。

下面简要分析国内外制造系统理论研究的主要成果。

美国麻省理工学院(MIT)以 G. Chryssolouris 教授为代表的制造系统理论^[2]研究重点考虑制造系统在以成本、生产率或时间、柔性、质量为总体优化(多)目标时,制造系统的设计、制

造工艺过程规划、制造装备系统的组织结构等问题,同时也十分强调制造系统的运行管理问题。上述制造系统理论的重要特点之一是从系统综合整体最优的角度研究制造系统。

挪威技术学院的 ϕ . Bjørke 教授等关于制造系统理论研究的成果形成了被称为斯堪的纳维亚(Scandinavia)体系的制造系统理论^[4]。该理论体系希望建立一套统一的、具有系统性和一般性的制造系统分析与综合方法,包括制造系统的建模技术和模型求解方法,同时希望形成一套用计算机自动建立制造系统模型和模型求解的软件系统。

日本大阪大学 K. Iwata 教授等提出了以建立随机制造系统(Random Manufacturing Systems, 简称 RMS) 为目标的制造系统理论研究体系^[5]。所谓 RMS 是指具有自优化特性(Self-optimization)、自稳定性(Self-stabilization)和自组织性(Self-organization)的制造系统。K. Iwata 教授等认为应该用超系统(Super-System)的概念来描述制造系统,从不同的角度制造系统体现出不同的超系统特性,制造系统理论研究应解决的主要问题是制造系统与环境(包括自然、社会、文化和人等)的适应性问题。具体看应解决制造系统在设备、人、产品、制造系统控制、制造系统结构及运行管理等六个方面的问题。

日本京都大学 K. Hitomi 教授于 70 年代提出了将制造系统中的物料流和信息流综合处理的制造系统理论,并称之为“制造系统工程”(Manufacturing Systems Engineering, 简称 MSE)^[2]。制造系统工程的出现及发展在西方工业化国家引起了很大反响,本文(四)将重点讨论有关 MSE 的问题。

计算机集成制造技术和系统(CIMS)的理论也成为制造系统理论研究的新领域。CIMS 是一种现代制造系统,是一个复杂的大系统。关于 CIMS 的研究包括 CIMS 建模方法、参考模型和结构化的系统分析设计方法,通称为 CIMS 的体系结构,其研究代表着未来制造系统理论研究的一个重要方面。

我国在制造系统理论研究中也取得了一些成果。如在国家 863/CIMS 主题中广泛开展了对 CIMS 体系结构的研究。国内部分高校和研究机构在制造系统理论领域中的信息制造观^[6]、制造系统的人机集成论^[7]、制造系统工程^[9]、机电集成技术的理论体系等方面也进行了积极探索。

上述有关制造系统理论的研究,虽然已取得不少成果,但也存在不足之处。例如,文献[2]的制造系统理论涉及制造过程应用理论和技术较多,但基础理论,特别是制造系统的基本特性方面涉及较少;斯堪的纳维亚制造系统理论从系统科学的角度论述制造系统与“系统”有关的基本特性,如系统概念、定量表示法、系统关联性等方面内容丰富,而对制造系统中与“制造”有关的理论涉及较少。

纵观上述研究成果,我们认为制造系统理论研究还处于比较分散、缺乏系统性的阶段。当今制造系统理论与建模研究的学科前沿之一是建立具有系统科学性和学科综合性特征的制造系统理论与建模的学科体系,使“制造工程”由工程技术的范畴向科学的范畴过渡,最终形成制造系统理论与建模的科学体系。

2. 制造系统理论体系框架

总结国内外关于制造系统理论研究的成果,并综合作者们多年的研究工作,提出下面关于制造系统理论体系的初步框架,以供商榷。这个理论体系框架主要包括制造系统的基本特性以及制造系统的“三流”结构论、信息制造观、人机集成论、集成决策观等。

(1) 制造系统的基本特性 现代制造系统是一个有多个优化目标的复杂大系统。可以将制

造系统看作一个以生产率最高为优化目标的技术—经济系统,也可看作一个追求社会适应性最优的社会—技术系统;同时可看作一个追求自然适应性最优的自然—技术系统;还可看作一个人—机集成系统或一个制造信息处理系统。

如前所述,由于从不同的观点看待制造系统,需要重点解决不同方面的问题,但各方面的问题又不是相互孤立的。因此,必须用系统科学和工程的观点和方法来研究描述制造系统的概念和制造系统的基本特性。概括地说,制造系统的基本特性包括集合性、相关性、目的性、环境适应性、动态特性、反馈特性和随机特性等。

1)集合性 制造系统是由两个或两个以上的可以相互区别的要素(或环节、子系统)所组成的集合体。

2)相关性 制造系统内各要素是相互联系的。集合性确定了制造系统的组成要素,而相关性则说明这些组成要素之间的关系,这种关系构成了制造系统的结构,而结构又决定了制造系统的性质。制造系统的基本结构体现为组织、技术和管理三方面,其中组织结构,也就是制造系统的生产范式,是制造系统结构的核心。制造系统中任一要素与存在于该制造系统中的其他要素是互相关联和互相制约的,当其某一要素发生变化时,则其他相关联的要素也相应地改变和调整,以保持系统的整体优化状态。

3)目的性 一个实际的制造系统,是一个整体,要完成一定的制造任务,或者说要达到一个或多个目的。制造系统的主要目的就是要将制造资源转变成财富或产品。

4)环境适应性 一个具体的制造系统,必须具有对周围环境变化的适应性。外部环境变化与系统是互相影响的,两者之间必然要进行物质、能量或信息的交换。制造系统应是具有动态适应性的系统,表现为以最少的代价和时间延迟去适应变化的环境,使系统接近理想状态。

5)动态性 制造系统的动态性主要表现在以下几个方面:

①制造系统总是处于生产要素(原材料、能量、信息等)的不断输入和有形财富(产品)的不断输出这样一种动态过程中。

②制造系统内部的全部硬件和软件也是处于不断的动态变化发展之中。

③制造系统为适应生存的环境,特别是在激烈的市场竞争中总是处于不断发展、不断更新、不断完善的运动中,极端情况是制造系统组织结构的突变或重组,使制造系统向更高的形式进化。

6)反馈特性 制造系统在运行过程中,其输出状态如产品质量信息和制造资源利用状况总是不断地反馈回制造过程的各个环节中,从而实现产品生命周期中的不断调节、改进和优化。图1是制造系统反馈特性的示意图。

7)随机特性 制造系统中有很多随机因素,从而使制造系统的某些性质具有随机特性。如制造系统关于产品的市场需求、产品制造装配的质量等均有随机性。制造系统的随机特性给解决制造系统控制等问题带来了极大的困难。

(2)制造系统的三流结构论 制造系统在运行过程中,无时无刻不伴随着“三流”的运动,即总是伴随着物料流、信息流和能量流的运动。下面以机械加工系统为例予以简要说明。

机械加工系统的“三流”(即物料流、信息流和能量流)运动图可用图2表示。

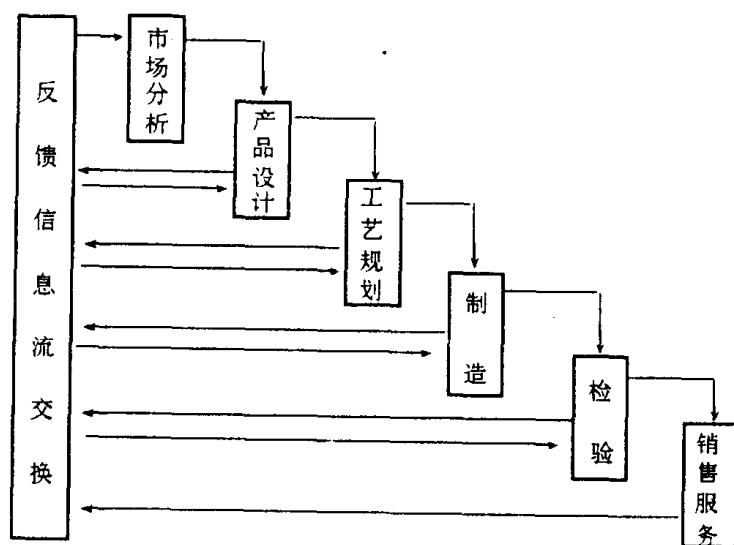


图1 制造系统的反馈特性示意图

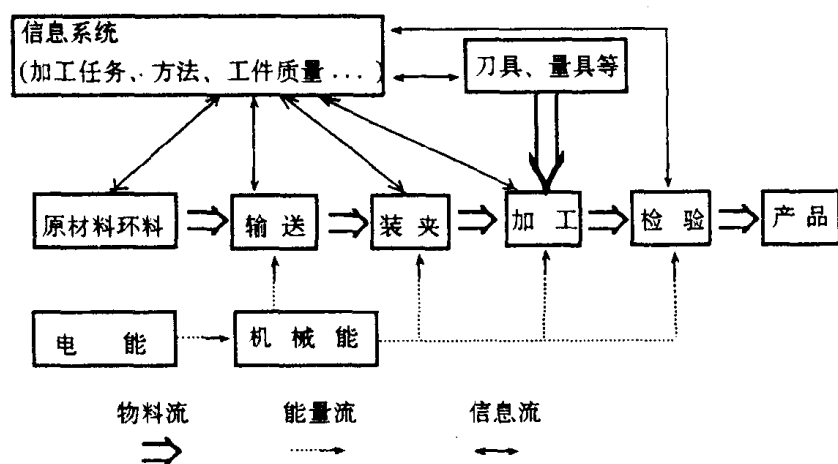


图2 机械加工系统的“三流”运动示意图

1) 物料流 机械加工系统输入的是原材料或坯料(有时也包括半成品)及相应的刀具、量具、夹具、润滑油、冷却液和其他辅助物料等,经过输送、装夹、加工和检验等过程,最后输出半成品或产品(一般还伴随着切屑的输出)。整个加工过程(包括加工准备阶段)是物料的输入和输出的动态过程,这种物料在机械加工系统中的运动被称为物料流。

2) 信息流 为保证机械加工过程的正常进行,必须集成各方面的信息,这些信息主要包括加工任务、加工工序、加工方法、刀具状态、工件要求、质量指标、切削参数等等。这些信息又可分为静态信息(如工件尺寸要求、公差大小等)和动态信息(如刀具磨损程度、机床故障状态等)。所有这些构成了机械加工过程的信息系统,这个系统不断地和机械加工过程的各种状态进行信息交换,从而有效地控制机械加工过程,以保证机械加工的效率和产品质量。这种信息在机械加工系统中的作用过程称为信息流。

3) 能量流 能量是一切物质运动的基础。机械加工系统是一个动态系统,其动态过程是指机械加工过程中的各种运动过程,这个运动过程中的所有运动,特别是物料的运动,均需要能量来维持。来自机械加工系统外部的能量(一般是电能),多数转变为机械能。一部分机械能

用以维持系统中的各种运动，另一部分通过传递、损耗而达到机械加工的切削区域，转变为分离金属的动能和势能。这种在机械加工过程中的能量运动称为能量流。

制造系统中的物料流、信息流、能量流之间是相互联系，相互影响的，是一个不可分割的有机整体。

(3)现代制造系统的信息制造观 传统制造观是指所谓的机械制造观，其本质在于认为制造过程是对原材料进行加工处理，使之具有一定用途的产品的过程，其中使用了能源作为加工制造的驱动源。传统制造观注重用制造系统中的物料流与能量流来描述制造系统。

随着计算机、自动化及通讯技术等高新技术在制造系统中的应用，一种新的制造观即信息制造观正在孕育和发展之中。这是因为信息在制造系统中起着越来越重要的作用。首先，信息是连接各系统要素，从而形成一定生产组织结构的制造系统的纽带；第二，产品制造过程中的信息投入已逐步成为决定产品成本的主要因素；第三，现代制造系统(如 CIMS)研究的重点之一是如何提高制造系统的信息处理能力；第四，制造系统中的信息已成为制造系统中与设备等同等重要的制造资源，如同能量一样是驱动制造系统运行的重要驱动源；第五，智能制造的概念从本质上看是指制造系统在信息处理的某些方面“具备”人的智能。

因此从上述诸方面看，制造过程的实质是对制造过程中各种信息资源的采集、输入和加工处理过程，最终形成的产品可看作信息的物质表现。从信息的角度看，制造过程实质上是一个使原材料的熵降低，使产品信息含量增高的过程。上述即为信息制造观的主要思想。

目前熵是刻划信息量的基本概念，鉴于它在系统科学中所具有的重要地位，我们认为通过用“熵”的概念对制造系统中的信息进行研究将沟通系统科学与制造系统理论之间的桥梁，从而成为制造系统理论科学化的基础之一。

当前研究制造信息的一个重要方面是考虑如何有效地建立起与制造系统功能相适应的制造信息系统，其中除涉及到信息系统的分析、设计与实现的硬、软件技术外，还应考虑制造信息的分类与描述问题。

(4)制造系统的人机集成论 智能制造系统概念的提出，引起了世界各国制造自动化领域内研究者的重视，以致于使人们曾一度认为制造自动化的最终目标是形成完全“无人化的自动化工厂”。智能制造系统的基本理论是建立在人工智能理论与技术的基础上，通过建立“世界模型库”，从而用人工智能的方法求解制造系统在物料、信息及决策三方面的模型以达到对制造系统进行目标状态控制的目的。但是，基于人工智能的智能制造系统研究存在以下问题：

1)由于目前对人类思维机理探索尚有很大局限性，故模拟人的思维的人工智能技术也存在局限性。

2)应用建立世界模型库的思路解决制造系统的决策问题，存在当前计算机信息处理技术难以解决的信息组合爆炸问题。

3)在制造系统中存在大量非结构化、动态的决策问题，对此应用“世界模型”难以解决。

4)完全的无人化制造自动化并不适合中国的国情。

通过对无人制造自动化的反思，学者们认为：在现代制造系统中，人的作用不但依然是重要的，而且在信息与知识的处理与生产方面变得更加关键，人的作用是计算机难以代替的。

目前，学术界对于人在制造自动化系统中有着机器不可替代的重要作用已成为共识。有鉴于此，国内外学者对于如何将人与制造系统有机结合，在理论与技术上展开了积极的探索，具有代表性的是“人机一体化制造系统”^[7]的新思想。所谓人机一体化制造系统，就是发挥人的

核心作用,采用人-机一体的技术路线,将人作为系统结构中的有机组成部分,使人与机器处于优化合作的地位,实现制造系统中人与机器一体化的人机集成的决策机制,从而使人与机器协同工作,以取得制造系统的最佳效益。

人机一体化制造系统理论与建模技术的研究,将开辟一条智能制造系统研究的新途径,形成制造系统理论与建模技术的学科前沿之一。

(5)制造系统的集成决策观 制造系统是复杂的大系统。制造过程中时刻面临着各种复杂的决策问题,为此需要将制造企业的经营、管理、计划、产品设计、加工制造、销售及服务等全部生产活动集成起来,将各种局部自动化系统集成起来,将各种资源集成起来,将人、机系统集成起来,实现整个企业的信息集成和功能集成,以实施最优决策及其行动,达到制造全过程的整体优化和提高制造企业的综合效益的目的。

3. 制造系统理论体系框架的应用举例

作为制造系统理论体系框架的应用例子,此处应用上文提出的制造系统理论框架中的有关理论对当前几个热点制造模式和概念作出理论上的解释。

(1)关于并行工程的制造系统理论解释 关于并行工程(Concurrent Engineering)的定义,目前国际上有多种提法。比较普遍采用的有以下两种:一是美国国防分析研究所(IDA)的 R. I. Winner 在 1988 年 12 月给出的定义:并行工程是一种系统的集成方法,它采用并行方法处理产品设计及其相关的过程,包括制造过程和支持过程;这种方法可以使产品开发人员从一开始就能考虑到产品从概念设计到消亡的整个生命周期里所有因素,包括质量、成本、作业调度及用户需求。另一个定义是国际生产研究学会(CIRP)执行成员、瑞典皇家工学院 G. Sohlenius 教授 1992 年 CIRP 年会上所作的大会主题报告“并行工程”中的定义:“并行工程指的是一种工作模式,即在产品开发和生产的全过程中涉及的各种各样的工程行为被集成在一起并且尽可能并行起来(而不是串行)统筹考虑”。

从并行工程的定义可知,并行工程实质上是将产品开发过程及其各个环节看成是一个密切关联的有机整体,是产品开发过程的集成,是制造系统的基本特性和制造集成决策观等理论在产品开发过程中的体现。

(2)关于精良生产的制造系统理论解释 精良生产(Lean Production)的特点是在工厂的各个环节去掉一切无用的东西,每个工人及其岗位的安排原则就是必须增值,不能增值的岗位一律撤除。Lean 的核心是精简,精简产品开发设计、生产、管理过程中一切不产生附加值的环节,其重要性是不言而喻的。因为人们尽管一开始便认识到“简化、自动化、集成化”中简化的重要性,但在实践上往往使自动化系统越来越复杂,使组织机构越来越臃肿,可以说 lean 更多的是面向管理的,是从管理角度解决企业竞争需求的。

以上可见,精良生产的实质是管理过程,包括人事组织管理的优化集成,是制造系统的人机集成论和集成决策观等理论在制造过程的组织与管理中的体现。

(3)关于敏捷制造的制造系统理论解释 敏捷制造(Agile Manufacturing)的概念是由美国里海大学的几位教授在美国国会和国防部的支持下会同美国众多工业界的主要决策人于 1991 年向美国国会提交的两份“美国 21 世纪制造战略报告”中首次提出的。以后在美国形成了研究热。1995 年 3 月在美国召开的专题讨论会与会代表已达 520 人。Agile 的实质是改变企业多层递阶的复杂结构为平面式的结构,建立插入兼容式企业(Plug Compatible Company),从优化角度形成虚拟企业(Virtual Enterprise),即企业集成;其技术基础是网络化的工厂及便于

在网络上交换的符合数据交换标准的信息。

因此 Agile 是一种技术与管理相结合的更深层次的集成,是制造系统的环境适应性、信息制造观和集成决策观等理论在企业组织结构与运行中的体现。

以上仅举出三个例子。实际上应用上述的制造系统理论框架,也可以对其他各种现代制造模式和系统技术作出理论上的解释。

(三)制造系统的建模

1. 国内外现状分析

制造系统的模型是对制造系统客观实体的反映或抽象。运用适当的方法将整个制造系统(或其部分)抽象出来,以研究其系统结构、系统特性等,从而达到对制造系统进行分析、综合及优化的目的是制造系统理论与技术发展的途径之一。建模同制造系统理论研究紧密联系在一起。因此,建模的理论与方法学实质上是制造系统理论的有机组成部分。目前很多学者都认为,广义的模型概念应包括建模所依据的理论与方法学(也称为体系结构)。如 CIMS 体系结构研究就属于制造系统广义模型的范畴,它既包括了对 CIMS 系统组织结构(如其中的计算机软、硬件,通讯系统等)的描述,又包含了如何建立系统的方法论。由于制造系统的复杂性,目前还没有既能完全满足对制造系统进行理论分析需要,又能切实指导制造系统建模的理论与方法。制造系统的建模研究一直是制造系统研究的热点之一。

制造系统的模型有多种分类形式。从形式上看,有制造系统的全局系统结构模型(如 CIMS 模型)、局部系统结构模型(如 FMS 模型)、产品结构模型、生产计划调度模型等;从方法上看,有数学解析模型(如离散事件动态系统模型)、图示概念模型(如 IDEF 模型)及图示一解析混合模型(Petri 网模型)等;从功能上看,有制造系统结构描述模型、系统性能分析模型、系统设计实施模型等。下面主要从方法的角度分析制造系统建模研究现状。

制造系统按其生产模式可分为连续型制造系统(如化工系统)和离散型制造系统(如机械制造系统)。鉴于离散型制造系统量大面广,且建模问题比连续性制造系统复杂得多。因此本文仅研究离散型制造系统(简称制造系统)的建模问题。

对于机械制造系统而言,其典型特征是制造过程的不连续性(或称离散性)和系统状态的动态性,故从学术上又将制造系统称为离散事件动态系统(Discrete Event Dynamic Systems,简称 DEDES)。在 DEDES 中,系统的状态将随事件(如零部件的达到、设备故障、计划停工或加工任务的完成等)的出现而动态变化。其中,如系统出现“阻塞”(或称“满输出事件”)或“空闲”(或称“无输入事件”)都将导致 DEDES 丧失正常运行的机能。研究 DEDES 系统特性的主要目的是分析阻塞和空闲形成的机制及使系统正常运行的最优条件。

基于排队论的制造系统 DEDES 模型,是最早将数学解析模型用于制造系统特性分析的模型。用它可以方便地求出零件队列的长度、加工设备利用率等制造系统的稳态运行特性。但排队论模型分析制造系统动态特性的能力较差,且由于排队论本身基于随机过程理论,故求得的分析结果是系统状态的期望值。

著名控制论专家 Y. C. Ho 等在制造系统建模中通过引入状态空间的概念,从而成功地进行了摄动分析。所谓摄动分析是计算制造系统性能指标参数的灵敏性。Y. C. Ho 等分别建立了时间域和事件域上的状态方程,特别是事件域上的状态方程较准确地反映了离散事件动态

系统的特点,从而奠定了用状态空间方法研究 DEDS 的理论基础。通过上述模型可分析制造系统事件阻塞形成的条件及解决方法,在对系统进行参数分析和优化设计时特别成功,并解决了很多实际问题。

G. Cohen 等于 1983 年用极大代数方法将制造系统这种普通代数意义下的非线性系统映射为了极大代数意义下的线性系统。通过建立系统的状态方程,然后分析制造系统的能控、能观性,并利用摄动分析方法确定系统的鲁棒性,从而得到了关于制造系统较多的解析性质。但应用极大代数方法建模,具有维数高的缺陷,例如对于有 m 台机床, n 个工件的加工单元,其中的状态变量有 $m \times n$ 个。

近年来,应用 Petri 网建立制造系统(特别是如 FMS 等加工子系统)的模型成为研究热点之一。基本的条件/事件 Petri 网(简称 C/E 网)首先被应用于自动机研究领域。学者们普遍认为 Petri 网是描述离散事件动态系统的有力工具。近年来在 C/E 网的基础上又发展了时间 Petri 网、彩色 Petri 网及时间/彩色混合 Petri 网等。用 Petri 网建立的制造系统模型有以下特点:首先它是以图形方式描述的系统,易于理解,但相应于图形描述又有较严密的数学解析理论支撑,故可以方便地分析制造系统的有关解析特性;它既能刻画制造系统中的物料流,又能描述其信息流;既可用其研究制造系统的静态特性,又可研究其动态特性。但用 Petri 网研究大规模制造系统还有困难。从国内研究成果看,有希望将其应用于 CIMS 车间级(特别是单元级)的系统建模、分析及优化控制等。

制造系统可靠性建模技术及制造系统可靠性理论研究也是近年发展的新方向之一,特别是随着制造系统规模的增大,制造系统的可靠性问题研究越来越显得重要。

在制造系统整体系统建模方面,随着本文第二节所列举的诸如 CIM 哲理、精良生产、并行工程等各种现代制造系统组织结构的新概念、新范式(Paradigm)的提出,相应也出现了较多的制造系统整体模型。其中研究最多的是基于 CIM 哲理的制造系统整体模型。迄今为止,已有数十种关于 CIM 系统模型和体系结构,具有代表性的有美国国家标准局的 CIM-NBS 模型、法国波多尔(Bordeaux)大学的 GRAI 模型、欧共体 ESPRIT 计划中的 PAC 模型、CIM-OSA 体系结构和美国普渡大学的 Purdue-CIM 参考模型等。随着制造系统理论与技术的发展,又出现了诸如精良生产、敏捷制造、虚拟制造、可持续生产、智能制造等新的制造系统组织与运行模式,它们与 CIM 的哲理相结合形成了新意义下的 CIM 内涵。尽管目前 CIMS 的模型有数十种之多,但从结构上看,其中最经典的是美国国家标准局发布的 CIM-NBS 模型。从建模方法上看,影响最大的是 1981 年由美国空军公布的集成计算机辅助制造(Integrated Computer Aided Manufacturing,简称 ICAM)模型,以及随之所公布的 IDEF X 系统建模方法。CIM-NBS 模型奠定了基于 CIMS 的制造系统的递阶控制结构,而 IDEF X 结构化系统分析、设计方法作为制造业软件工程的规范化方法之一被广泛应用于现代制造系统建模及系统开发中。

制造系统的整体模型一般都以图示-概念模型为主,辅以其他分析手段。这种整体模型对于指导制造系统的结构设计很适用,但对于制造系统性能分析却不如数学模型优越。

在制造系统建模中还有另一重要的领域,即制造系统运行管理模型(集)。制造系统运行管理的实质就是根据制造系统的状态信息制订使制造系统运行状态向管理者希望的方向发展变化的一系列决策。由于制造系统的大系统特征,运行管理模型大都采用分解-协调的思想,将制造系统运行的整体目标分解成若干子目标,从而形成若干子模型,如战略层计划模型、战术层计划控制模型、运行层控制调度模型等。对子模型求解后再通过“协调”以求得制造系统的整