

可重构制造系统

王成恩 尹朝万 罗焕佐 张士廉 许石哲 著

东北大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

可重构创造系统/王成恩等著. —沈阳: 东北大学出版社, 2000.12
ISBN 7-81054-573-6

I. 可… II. 王… III. 制造业-研究 IV. T

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 56878 号

内 容 简 介

未来制造系统的核心能力是以自我变化响应外界环境的变化, 所以说研究如何设计、构造并实现可重构的制造系统是十分重要的。本书论述了可重构制造的理论方法, 提出了可重构制造系统的体系结构框架, 给出了其研究内涵和发展方向。全书共分七章, 从制造策略、组织结构、业务过程、产品工程、加工制造、信息集成等不同侧面和角度阐述了可重构制造的概念、方法与技术, 对我国制造科学领域的研究与应用, 具有重要的促进作用。

本书适用于现代制造科学领域从事研究、开发、管理的各类人员, 可以作为机械、电子、制造自动化、管理工程、计算机应用等相关专业高年级本科生的选修教材及硕士、博士研究生的参考教材。本书亦可作为政府工业与科技主管、企业管理及工程技术人员了解 21 世纪的制造模式和技术发展趋势及制定对策的参考用书。

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110006)

电话: (024)23890881

传真: (024)23892538

网址: <http://www.neupress.com> E-mail: neuph@neupress.com

北宁市印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本: 787mm × 1092mm 1/16

字数: 271 千字

印张: 11

印数: 1~2000 册

2000 年 12 月第 1 版

2000 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘宗玉

责任校对: 冯 伟

封面设计: 唐敏智

责任出版: 秦 力

定价: 21.50 元

前 言

20 世纪制造理论与技术发展迅速,提高了生产率和产品质量,并且降低了制造成本。除了技术因素,制造业更加关心人的作用、组织结构、管理、产品销售和增值服务。因此,过去的 30 年中出现了大量的制造概念和技术。例如,柔性制造系统用于解决产品的批量变化和降低中小型零件的加工成本。计算机集成制造系统用于联接异构计算机环境中的应用系统,保证用户能够方便地访问所需的信息。美国人总结了日本丰田生产管理方式后,提出了精良生产以降低和消除制造过程中的冗余和浪费。20 世纪 90 年代初,经营过程再工程(BPR)得到研究与管理人员的广泛接受,制造企业开始重新审视传统的工作方式和规范。BPR 要求企业彻底抛弃过去习以为常的经营过程,并且重新设计适应当前变化环境的业务流程。然而,BPR 在企业应用的结果却无法令人信服,据报导仅仅 30% 的 BPR 项目取得了成功。绿色设计(制造)目的是降低产品生产与使用中的污染,解决日益严重的生态环境问题;再制造(Re-manufacturing)系统通过分解和重新加工报废产品的零部件,降低自然资源消耗和避免环境污染;快速响应制造(Quick Response Manufacturing)提出各种策略以提高各部门的速度,通过缩短产品上市时间来击败竞争对手。连续涌现的制造概念表明制造业在现代社会具有非常重要的意义,因为制造业创造了人类社会财富。

中国几个世纪来在科学技术方面远远落后于西方发达国家,因此,中国的科技人员习惯于跟踪和学习国外的具体技术,而不善于从认识论的高度学习国外科技人员的思维模式。其实,人类的一切研究和创造活动都是在一定的世界观(哲理)支配下进行的。过去我们学习国外先进科学技术,基本上以一种全盘接受的观点沿着外国人画出的跑道向前追踪领先者。因为,前面有领先者,我们很少思索为什么和如何开拓出现在的科技发展轨道。这种科技发展模式使我们能不断地缩短与国外的差距,但又不不断拉大差距。一个世纪来,中国在科技方面基本没有产生对世界有重大影响的科学技术发现,其中缘由固然很多,但是,其中一个重要原因是中国科技人员缺乏战略高度思维模式,当跑到现有跑道的尽头时不知道如何确定前进的方向。

实践表明,科学技术研究和创造活动需要扎实的专业知识,更需要战略性跨越思维模式。国内外有建树的许多科学家一方面具有深厚的专业知识,同时具有渊博的哲学知识,甚至又是哲学家。例如,维纳在建立控制论时不是简单局限于伺服控制系统的反馈机制,而是从哲学的高度将控制系统中的反馈、通信系统的信息、热力学中分子运动和医学中人体机理等内容进行对比分析和归纳,创立了控制论。20 世纪 70 年代初,计算机技术已经在制造企业的各个环节得到了一定的应用,计算机辅助设计 CAD 开始取代传统的图板、圆规及三角尺,物料需求计划 MRP 系统帮助制定生产计划,计算机控制机床进行切削加工。美国的约瑟夫·哈林顿不局限于计算机本身和单项应用,而是看到各种单项计算机应用之间存在不可分割的联系,进一步将企业的经营制造过程与信息处理流程结合起来,提出了计算机集成制造的概念。

目前,人类社会带着 20 世纪在科学技术方面的辉煌成就,已经跨入 21 世纪。以科学技术为基础的经济竞争成为这个时代的主要特征和社会发展的动力。制造业是人类社会物质财富的主要创造者,也是经济竞争的主要领域。剧烈的市场环境变化和信息技术的发展促使制造业本身在观念、模式、结构和技术等方面发生了巨大变化。新的制造模式成为普遍关注和广泛研究的问题,工业发达国家提出了大量新思想和理论。大量的学术论文和科技报告在介绍各

种新的制造概念,如果仅仅从具体概念、术语和实现方式上看,这些制造系统理论之间存在巨大的差异,甚至令人感到迥然不同。然而,如果从系统哲理的高度进行对比分析,就会发现它们之间具有许多共性和相似之处。

在制造领域,如何提高我国企业在国内外市场的竞争能力呢?无疑,许多研究人员主张跟踪发达国家的制造理论并将其本地化。虽然学习国外先进的制造技术和理论具有重要意义,但是我国企业不可能完全照搬国外成功的经验。首先,制造模式依赖于发源地环境,由于社会文化的不同,引进的制造模式往往无法取得预期的效果。例如,日本的及时生产(JIT)根本无法在中国企业得到成功应用。其次,由于竞争的原因,领先的企业也不可能将自己的关键技术传授给我们的企业。对利润的追求驱使领先的企业不断地超越其竞争对手,以取得更大的市场份额。第三,今天的制造业需要创新,单纯跟踪研究,将无法跻身于国际先进领域。我国近20年的发展奠定了较好的基础,我们不必完全踩着别人的脚印,完全有能力对制造系统理论的研究作出贡献。为了建立中国科技创新体系和实现跨越性发展,必须首先树立全局性观点。

从1996年初开始,我们试图发展一种策略使制造系统可以通过重构快速响应外界变化。这项研究工作逐步得到各种科技发展计划的支持,并且引起其他研究单位的注目。我们将可重构制造作为探索新的制造系统理论的切入点,认为未来制造系统的核心能力是自我变化达到响应外界环境变化的能力。而这种在变化环境中进行相应自我变化的能力就是系统的可重构能力。一个成功的企业(制造系统)应该在组织、过程、产品、设备装置和信息基础结构等方面是可重构的。基于这种前提条件,我们研究可重构的制造系统。可重构制造系统将企业作为一个有机整体,并且重视各个组成单元之间的联系。可重构制造系统全面考虑制造中的因素,实现多领域知识的集成。在可重构制造模式下,企业将采用动态的世界观代替传统的静态世界观。近来,可重构制造系统理论在国内外正逐步得到接受,但是人们对可重构制造概念有着不同的理解。为了能让更多的人了解可重构制造系统理论,使一部分人能把可重构制造理论应用于其工作领域,我们编写了本书。出版本书的目的是多方面的:第一,分析市场竞争对企业提出的要求,解释为什么需要可重构制造模式;第二,将提出可重构制造系统的概念框架,定义基本概念和确定可重构制造系统的主要研究内涵和方向;第三,本书表达了我们对可重构制造系统的理解和描述我们若干相关项目的阶段性成果,感兴趣的读者可以在网址 <http://www.sy.cims.edu.cn/lab> 查询我们相关的工作和最新动态。

本书的写作和出版是集体智慧和劳动的结晶。王天然研究员倡议和推动了本书的撰写工作,审阅了全部书稿并提出了许多方向性建设意见。王成恩统筹规划了本书的写作大纲、目录和定位,并且撰写了第一、第二和第三章;罗焕佐撰写了第四章;张士廉撰写了第五章;许石哲撰写了第六章;尹朝万撰写了第七章;张宇参加了3.4节的写作。由于可重构制造系统是一种新兴的制造科学理论,其研究在国内外均处于起步阶段,加之作者水平和时间的限制,书中错误之处在所难免,恳请读者批评指正!

致谢:本书的研究得到国家“863计划”CIMS主题、辽宁省国际合作基金、沈阳市科技基金、中国科学院与德国Fraunhofer学会合作计划及中国科学院沈阳自动化研究所内部预研课题的支持;在本书的写作过程中,得到中国科学院东北先进制造技术创新基地纪慎之研究员和曲玉华高工等人的鼓励和支持,作者向他们表示诚挚感谢!

王成恩

2000年9月于沈阳

目 录

第一章 制造系统和制造模式	1
1.1 制造业面临的挑战	1
1.2 探索新的制造模式	5
1.3 制造系统	7
1.4 制造模式	12
第二章 制造模式的发展与研究	17
2.1 制造模式的发展历程	17
2.2 敏捷制造	23
2.3 制造 2000 年计划与分形公司理论	27
2.4 整子制造系统	32
2.5 生物制造	37
2.6 制造模式的比较	39
第三章 可重构制造模式	44
3.1 未来制造系统的影响因素	44
3.2 可重构制造模式	46
3.3 可重构制造系统体系结构	50
3.4 可重构制造系统理论基础	64
第四章 组织结构重构	74
4.1 组织重构的概念体系	74
4.2 组织结构重构的类型	85
4.3 组织重构的方法	94
4.4 组织重构的切入点	97
第五章 可重构的企业动态联盟与供应链	99
5.1 动态联盟的基本概念	99
5.2 动态联盟组织的建立	101
5.3 动态联盟企业的动态可重构	103
5.4 供应链的基本概念	105
5.5 供应链企业间的合作与协调机制	108
5.6 供应链管理系统的动态可重构	112
5.7 我国企业实施动态联盟和供应链管理的战略	117

第六章 可重构的产品开发技术	120
6.1 零部件可重构设计技术	120
6.2 基于 PDM 的多构形设计	127
6.3 面向全产品生命周期的产品设计和重构	131
6.4 面向环境的产品设计方法	137
6.5 可重构产品开发技术的展望	139
第七章 可重构的信息集成	141
7.1 可重构的信息集成需求与内涵	141
7.2 分布对象模型与信息集成体系结构	144
7.3 CORBA 规范与技术	146
7.4 交易服务与联邦交易模型	150
7.5 可重构的信息集成框架	154
7.6 基于 Web 的 NetCAD 系统实例	163

第一章 制造系统和制造模式

1.1 制造业面临的挑战

1.1.1 制造环境的变化

自然辩证法告诉我们历史的发展过程是曲折的和按螺旋方式上升，现在的世界总是按照某种规律“再现”历史。人类的制造模式经历了一个从单件、小批量到大批量生产又回到单件小批量生产的螺旋上升过程。19 世纪中叶以前，制造技术水平和生产能力十分低下，产品的生产完全由工匠的技艺水平和客户的需求所决定。由于缺乏标准的工具和工艺，每件产品各不相同，是典型的单件生产方式。在 20 世纪，制造技术和企业经营模式经历了巨大的发展与变革，人类社会(尤其是发达国家)完成了工业化进程。随着机器的使用和技术水平的提高，生产规模不断扩大，制造业进入小批量生产时期。

(1) 传统制造系统

20 世纪初，由于采用标准化的产品设计、工艺以及自动化的流水线，制造业进入大批量生产阶段。在很长一段时期，生产能力远远落后于社会消费需求，各种制造业具有稳定的市场环境。企业的主要任务是在有限生产能力约束下有效地生产产品，制造企业生产的根本目的与竞争方式是扩大生产规模。企业与市场客户是分离的，企业根据历史数据进行需求预测和制订生产计划。企业设置若干专业部门和采取递阶组织结构，并且采用各种自动化技术降低生产成本，提高生产效率，大批量地生产相同种类与规格的产品。客户对产品的构形和制造过程基本没有影响，只能被动地接受企业提供的产品。企业的最大目标就是通过采用先进的设备提高产品产量和降低成本。在这种制造模式指导下，企业是完全技术驱动；企业管理层十分重视机床设备，却忽略人的作用。例如，虽然目前我国许多企业可以花大量资金引进数控机床，却不愿意在员工培训和改善工作环境方面进行投资。过去，技术的应用完全着眼于局部的优化。许多员工在一个专业部门工作相当长时间，却不了解相邻部门的业务。企业也缺乏良好的机制激发员工的积极性和创造性。

过去人们虽然将制造系统当做开放系统，却只注重制造系统与外界的信息和物质交换。图 1.1 描述了一个典型的传统企业概念，首先企业经营部门从环境中得到市场需求和客户订单，然后将合同信息和产品技术性能要求等信息分别传递到生产计划部门和产品设计部门。生产计划部门根据产品交货期等信息向设计部门下达产品设计计划和技术准备计划，设计部门根据客户的技术要求和产品设计计划等进行产品设计、工艺规划和工装准备等。设计部门向计划部门提供产品结构数据，同时向车间提供产品几何数据和工艺信息等。计划部门根据合同和产品结构信息，下达采购指令和制造指令；采购部门依据采购指令向供应商订购原材料和标准件等。采购项目到货后，库存管理部门进行验收、统计和分发，财务部门支付供应商货款。车间根据计划和技术信息对原材料进行加工和装配，产品检验合格后进入成品库。最后，经营部门向客户交货，客户向企业的财务部门付款。

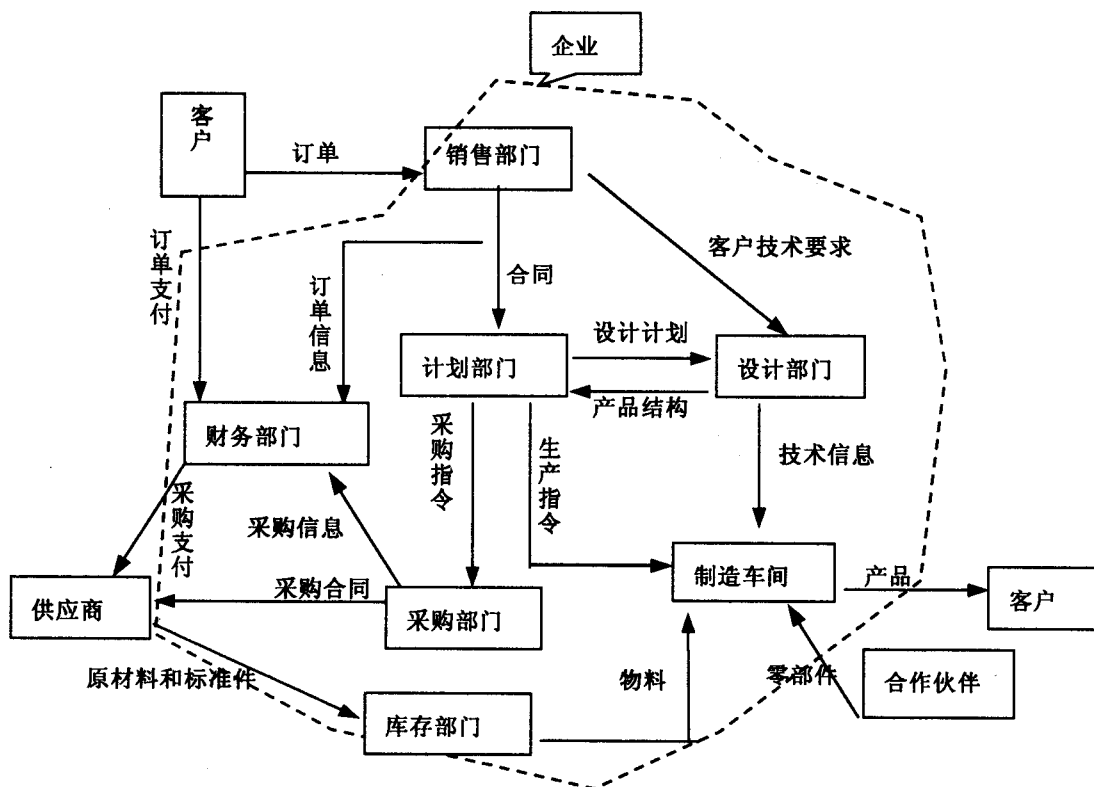


图 1.1 传统企业与外部环境关系

在这个典型的企业概念模型中，仅仅物流和信息流是动态的，而企业具有固定不变的边界和静态的刚性内部结构。企业内部的各个部门如同一部庞大机器中的一个个齿轮按照固定的规律转动着。在这里，变化的只是物料和信息，而企业本身是一个稳定的系统。这是一种非常典型的机械论系统观点，忽略了系统的进化和发展。

(2) 制造环境变化

20 世纪下半叶以后，市场逐渐趋于饱和，大批量生产方式缺乏灵活性，不能满足客户的多样化需求。制造企业的竞争焦点转移到如何提高生产柔性并快速向客户提供高质量的个性化的产品及服务。技术进步和环境变化使得工业发达国家的公司不断开拓其他地区的市场，以获得更高的利润、廉价的劳力和资源。通信及交通运输等基础设施的发展，进一步促进了全球经济一体化的进程。目前，复杂产品的设计制造和市场销售通常要由分布在不同区域的许多公司合作完成。中国实行改革开放政策后，大量的外国公司向中国市场提供产品和服务，并且进行投资。外国产品和资本的大量涌入促进了经济发展、繁荣了市场，也对我国企业生存与发展造成巨大的冲击。中国的经济开放政策和即将加入世界贸易组织为我国企业的发展提供了良好的机遇，同时，也使企业面临严峻的挑战。许多企业习惯于计划经济或者受到现行体制的约束，在市场中非常脆弱和缺乏竞争力。国有企业改革与发展引起各界的高度关注，采用新的制造模式与信息技术提高企业竞争力已经成为我国经济进一步发展的关键。

只有采用科学的企业经营管理模式和先进的制造技术对传统的制造企业进行改造，才能

提高我国企业的市场竞争能力。提高企业的应变能力涉及大量的复杂因素，不单纯是管理或者技术问题，是一个复杂的综合系统工程。我国虽然是发展中国家，但是十分重视先进制造技术的研究和应用，因为我国企业面临与其他国家企业相同的问题。改革开放以来，我国企业引进了大批先进设备装置，提高生产率和产品质量。并且，逐渐引进各种制造理论和管理方法，改善企业总体运营状况。从 20 世纪 80 年代末，在国家“863 计划”支持下对制造理论与技术进行了大量的研究与实践。先进制造技术与理论研究推动了企业的发展步伐并缩短了与发达国家的差距。在一些行业，中国制造的产品已经在国内外得到客户的高度认可。然而，许多困扰我国企业的问题并没有彻底解决，而且随着形势发展会不断出现新问题。当然，按照社会发展规律，我们也不可能一劳永逸地解决激烈市场竞争造成的问题。因此，研究发展合理有效的制造模式和技术是长期的科研课题。

1.1.2 制造业面临的挑战

20 世纪中叶以后，由于科学技术发展迅速，信息技术、自动化技术、新材料和新的工艺方法使全球制造业发生了巨大的变化。制造业为人类社会创造了巨大的财富，加速了社会价值、生活方式和环境的变化。反过来，这些变化又支配着制造业未来发展轨迹。现代通信技术、发达便利的运输业以及开放与自由贸易政策等因素促使全球融合成为一个统一的大市场。20 世纪人类在科学技术领域取得了空前的进步，科技成果的应用极大地推动了制造技术的发展。随着科学技术发展和人类文明的进步，全球制造业发生了巨大的变化，进入了后大批量生产(Post-Mass Production)时期。客户不再满足于被动接受现有的产品，而是要求企业生产个性化产品。当前，制造环境的根本特点就是在客户需求方面的剧烈快速变化。尤其是 80 年代以来，各国制造企业在世界市场进行日益激烈和残酷的竞争。市场具有不可计划性和不确定性，传统的企业经营/制造模式已经不能应付今天快速变化的环境。制造企业必须采用合适的经营模式和技术，与其存在的外部环境相适应。环境变化给制造企业所带来的挑战主要体现在以下几个方面。

(1) 产业及贸易政策变化

制造企业是人类改造自然界的主要形式或途径，充分体现了人类的主观能动作用。因此，制造企业对国家政策的变化十分敏感，各种政策法规对企业运行起到约束控制、引导和扶持作用。这些政策法规涉及制造企业经营生产的方方面面，如组织结构、原材料采购、制造加工、产品销售以及售后服务等。例如，国家税收政策的调整直接影响企业的生产经营成本。贸易政策则影响原材料的采购途径及成本，也支配产品销售市场的开拓与分布。在世界贸易中，当两国政府缔结合作条约时相关制造业的生产与销售就会出现增长。相反，如果两国关系恶化，就会采取贸易禁运等经济制裁措施，使相关制造企业蒙受损失。而各国法律政策制订调整过程受到意识形态、立法机构、政治、经济、军事和文化等大量因素的影响。因此，政策的调整变化是经常的，并且具有突发性。这也是一个国家政府扶持或者抑制某些行业以及保护本国企业的主要手段。例如，美国、日本和欧洲经常采用各种关税政策在电子和汽车等工业方面进行贸易对抗。企业应该清醒地认识到，在市场经济中国家宏观调控作用不但没有削弱反而得到加强。企业必须及时掌握相关法律政策的调整变化，快速采取措施降低负面影响，并且充分利用政策变化带来的机遇。

(2) 市场和制造的全球化

制造技术的发展使得工业发达国家的市场在 20 世纪 80 年代基本趋于饱和，驱使企业在

有限的市场中进行激烈竞争以及在世界其他区域开拓市场。例如，欧洲、美国和日本的企业纷纷在发展中国家寻求发展。另一方面，发展中国家的企业为了获得充足的外贸收入实现持续发展，也努力打入发达国家的市场。各国政府不断采取开放与自由贸易政策促进和发展国际经济贸易；现代社会通信技术发展迅速，使企业可以快速全面掌握市场动态信息；发达便利的运输业加强了供应商、制造商以及分销商之间的联系。这些因素促成了市场的国际化，使全球融合成为一个大市场。工业发达国家不断进行激烈的竞争，同时许多发展中国家纷纷进行工业现代化建设。最近 20 年来环太平洋国家和地区工业增长迅速，并且积极参与全球市场竞争，使世界市场竞争日益激烈。

市场的全球化使企业可以在世界范围内利用各种制造资源(包括原材料、人力和技术等)，这使得长期的客户—供应商关系解体。企业开始重新考虑供应和销售问题，追求建立灵活的动态供应链和分销网络。产品和制造的复杂性使得单个企业无力完成产品的全部制造过程，因此，分布在各地的企业共同合作生产一种产品。企业在全世界制造和市场竞争中必须加强与其他企业的合作，建立面向任务的动态联盟。在快速变化的全球市场环境中，寻找和选择合适的伙伴，建立并且有效地管理合作关系，对企业是一个挑战。

(3) 环境保护与生态平衡

制造过程将原材料转换成产品，同时产生各种辅助产品和废弃物。制造技术及生产力发展一方面创造了巨大的社会物质财富，另一方面，也消耗了大量的自然资源和造成严重的环境污染。根据研究报告，制造业与生态环境问题(化学污染、酸雨和气候变化等)有直接的关系。目前，全球生态环境破坏严重、自然资源日趋匮乏。为了人类社会的可持续发展，人类环保意识日渐增强，环保措施更加严格。制造业面临政府和绿色组织等社会团体的压力，必须开发绿色产品和实现清洁生产过程。

(4) 多样化的客户需求

市场环境中的非确定性变化因素使企业不能仅仅根据市场预测进行生产。市场需求呈现动态不确定性，企业无法进行准确市场预测。随着生产能力超过市场需求，客户不再轻易满足于产品的功能，而倾向于独特性的产品。企业不再能够通过大批量生产单一产品满足众多的客户。客户需求多样化及个性化，要求不断增加产品种类和缩短交货期。例如，沈阳某一客车制造企业统计发现，几乎每个客户对客车要求(外观和内部结构等)都不同。而且，客户要求企业提供高质量的产品和增值服务。客户对产品的质量与售后服务要求越来越高，企业必须对产品开发、制造、使用到报废的全过程进行严格的质量控制，同时搞好客户技术支持。企业必须不断开发新产品，而产品的市场生命周期却不断下降。产品与生物系统相似，具有一个从孕育(概念设计)、出生(加工装配)、成长(市场销售上升)到衰老(市场销售下降)和死亡(停止生产销售)的生命周期。目前，产品的生命周期逐渐缩短，而产品的结构却越来越复杂，开发难度越来越高。由于采用高新技术、新工艺和新材料，产品的制造成本不断增加，但是，为了增强市场竞争能力，企业需要降低产品的销售价格。企业在较短的产品生命周期内很难收回产品的开发与制造成本。

(5) 知识与技术创新

制造环境一个主要变化因素是知识与技术创新，以及人才的流动。新的制造理论与技术不断涌现，企业很难跟上知识与技术创新步伐。企业往往发现不久前完成的企业管理系统或者引进的生产设备需要进行更新。企业的员工需要不断进行培训，更新知识和学习新的技术。以信息技术为龙头的技术进步冲击着传统的制造业，信息产生与处理速度以几何级数

增长,知识传递速度不断加快。企业在复杂的信息环境中有效获取和利用知识,变得十分困难。企业处于一个知识和技术持续发展的环境中,如果不能掌握新的知识和技术,就可能被淘汰。

过去确定产品销售价格的主要依据是原材料和生产成本(加工装配),生产方式是资本密集型。而目前产品的销售价格中直接生产成本只占有很小的比例,产品价格主要包括市场开拓和服务成本以及知识创新性。人类社会进入知识经济时代,知识成为制造系统的重要资源,企业不仅销售物理产品,而且销售信息与知识。企业在向顾客提供产品时,必须向顾客提供良好的售前服务和售后服务。例如,企业在产品销售前需要进行产品广告宣传和开拓市场,使客户接受所制造的产品。在产品销售后,企业需要进行全面的售后服务,包括产品安装、客户培训、维护和更新等。信息和知识在产品中的附加值越来越高,甚至超过物理产品本身的价值。而且,许多企业认为自己不再是单纯地向客户推销产品,而是向客户提供全面的解决方案和让客户分享他们的知识和经验。当然,客户需要为这些方案、知识和经验进行支付。由于知识与信息在制造活动的重要性,掌握知识并且善于学习的人成为制造企业的宝贵资源,合格的人才成为企业技术创新与发展的动力。在世界各国,制造业承受创造就业机会的巨大社会压力。一方面,在工业发达国家和发展中国家,失业率很高并且不断上升。另一方面,制造企业却很难招募到合格的人员,只好雇用低素质的员工。由于传统教育体制培养的学生无法胜任多学科交叉的制造业需求,企业面临职业培训的挑战。同时,企业必须建立适宜的管理机制和工作环境,吸引优秀、合格的人才。

1.2 探索新的制造模式

剧烈的和不可预测的市场环境变化,对制造企业的生存与发展提出了严峻的挑战。在世纪之交,各国已经为21世纪中的制造业竞争进行技术准备。工业发达国家的政府、产业界及科技界对未来的制造模式进行了广泛的研究与实践。美国在20世纪90年代提出了敏捷制造模式,并且成立了敏捷制造企业论坛,研讨敏捷制造的概念、理论和工程实践。美国提出敏捷制造的依据有两条:目前企业自我变化和调整的速度跟不上环境剧烈变化的速度;必须彻底抛弃大批量生产模式和采用全新的制造模式。敏捷制造强调在信息技术支持下建立企业动态联盟,使每个企业将重点放在核心能力上,提高反应速度。敏捷制造在国际学术科技界引起广泛影响,被认为是“21世纪的制造模式”。日本联合欧洲及美国、加拿大、澳大利亚等工业国开展智能制造研究计划,目的是发展“下一代制造模式”。智能制造研究计划中的NGMS项目提出了生物制造理论,通过模仿生物智能提高制造系统对环境的自适应能力。生物制造系统模仿脱氧核糖核酸DNA和核糖核酸RNA在细胞分解复制过程中的信息存储、传递和表达机制,以及生物个体、家庭和社会组织模式,建立制造系统的动态结构。同样在智能制造计划支持下,欧洲及加拿大、澳大利亚和美国等国的科研单位联合研究整子制造系统,目的是充分利用计算机、传感器和分布式自治系统等方面的技术,实现下一代制造系统的特性。整子制造系统在合作性、自治性和智能性基础上,通过系统内整子的动态组合提高系统的响应能力。德国夫朗和费学会提出了分形公司理论,目的是在德国社会价值观和文化的基础上,建立一种能够凝聚德国优势的新型制造模式。分形公司通过自相似、自优化和自组织等三个核心性质,实现可重构的企业结构。

传统制造模式已经不能适应目前激烈竞争的市场环境,必须进行制造模式转换成为共

识。显然,新制造模式的研究具有重要的理论和工程应用价值。制造模式与具体的单元技术不同,它是制造业的发展战略。我们必须进行这方面的研究工作,这是一种“一旦突破,可以带动全局”的研究项目。对于未来的制造模式的研究,我们可以采取两条道路。一条道路是跟踪和学习工业发达国家的研究成果。我国“863 计划”CIMS 主题在前期基本上采用跟踪发展的道路。我们从美国引进了 CIMS 概念,向欧洲学习计算机集成制造—开放系统体系结构(CIMS-OSA)的思想,并且在企业中进行应用验证。随后,我们借鉴日本丰田公司的及时生产(JIT)及精良生产思想,将美国的并行工程纳入 CIMS 发展的新阶段。跟踪与吸收国外的制造理论与思想,可以帮助我们方便地确定未来的研究方向。由于我国与工业发达国家在相应领域具有较大的差距,在今后一段时期内学习消化国外的研究成果仍然具有重要意义。但是,制造模式与社会文化和技术水平等因素有关,工业发达国家的制造模式是针对其本国的特点提出来的,未必适合中国国情。国家科委在 1997 年下半年组织两院院士对我国 CIMS 应用发展情况进行了评估,这期间,相当部分专家对采用美国人提出 CIMS 名称作为我国高技术计划的主题是否合适提出了疑问。其实,CIMS 进入中国后,我国科技人员已经进行了大量的创造性研究工作,极大丰富和扩展了 CIMS 的内涵。但是,CIMS 名称的洋味,经常引起误解和反对;例如,使我们自己的研究工作被当成外国制造理论的简单扩展或应用实践。造成我们缺乏自己的概念,研究工作没有创新性,在国内企业进行应用推广时遇到较大的阻力。另外一条道路是创新性地研究和发展我国自己的制造模式,我国经过改革开放后十余年的发展,已经可能实现跨越式发展。因此,我们应该研究自己的新一代制造系统模式,发挥我国文化、管理和技术方面的优势。我国 863 计划 CIMS 主题在后期积极支持具有创新性的制造理论研究工作。

在 21 世纪中制造企业的主导模式是什么呢?或者下一代制造系统会采用什么模式呢?以及制造系统如何实现新的制造模式呢?这是本书主要研究和探讨的内容。目前,新一代制造模式研究得到广泛重视,新的思想正在不断提出:仿生制造、敏捷制造、网络化工厂以及分形公司等。这些理论都在努力解决企业目前和未来所面临的问题,有一点值得注意的是虽然这些理论的术语和概念有较大差别,但是却具有共同的前提条件:环境变化是永恒的、剧烈的和不可预测的。因此,可以断定制造系统生存发展能力取决于其对环境变化的响应能力,而提高响应能力的关键手段是通过制造系统自身的快速变化(即自组织重构),以内部变化来适应外部变化。所以,作者认为未来的制造系统只有具备可重构性,才能在激烈的竞争中求得生存和发展。未来的制造系统必须建立在可重构制造模式上,实际上制造系统的动态可重构已经包括了敏捷制造、分形公司和智能制造等模式的精髓。另外,制造系统具备可重构能力也是企业的迫切需求,许多企业正在进行结构重组/重构。在许多 CIMS 规划设计和实施过程企业明确提出未来的 CIMS 必须具备重构的能力。例如,在作者主持的沈阳飞机制造公司 CIMS 规划设计时,其中的企业资源计划系统(ERP)采用基于企业动态模型的可重构方案。目前,国内外许多企业都在对组织结构和经营业务过程进行调整,要求企业的设备、管理和信息系统具有可重构性。不仅制造系统本身需要具备重构能力,产品也需要重构能力以便提高产品的附加值。将来,当产品不再满足应用要求后,人们可以通过重构对产品进行功能性维护和升级换代;或者通过重构将废弃产品的零件分别应用到其他产品中。产品重构可以延长产品的寿命,降低资源消耗和充分保护环境。

因此,从 1996 年初我们开始研究一种具有可重构性,通过自身变化快速响应外部环境变化的制造系统理论。本书叙述了这项研究的初步结果,反映了作者对 21 世纪制造模式的

思考。

1.3 制造系统

制造或生产是我们当今社会的基本组成部分，也是满足人类不断增长的物质需求的主要手段。制造与制造系统等术语深深地渗透到社会的方方面面，例如政治、工业、商业、科研以及日常生活等。大量的论文与书籍采用不同的方法和视角来描述制造的各个方面。与以前的文献不同，本书采用了一个新的视角(即可重构性)来描述和分析制造与制造系统。研究制造系统不可避免地遇到一些基本问题。什么是制造与制造系统定义？什么是制造系统的范畴？为了给进一步的讨论建立共同的基础，本节将讨论制造系统的概念、内涵和性质。

1.3.1 系统的概念和性质

(1) 系统的定义

系统观念是人类历史中最古老的概念，也是目前各个领域广泛应用的概念。系统观念强调局部之间的联系，使人全面地分析与归纳各种事物。系统的概念、内涵和外延也因研究领域而各异。系统的概念在科技领域帮助研究人员将研究对象从环境中“分离”出来。通过定义一个系统，科研人员可以准确界定研究工作的边界和确定主要问题。通过系统的观点，人们可以将一组对象作为整体以便研究它们内部的联系。系统的概念强调了部分之间的协调，即整体优化大于局部优化之和。2500 年以前，中国哲学家老子首先提出了这一思想，以后，古希腊哲学家亚里士多德也提出了这一思想，200 年前德国哲学家黑格尔也有过相同的论述。1994 年版 Longman 英语字典将系统解释为：①一组经常交互或相互关联的物体组成的整体，②一个关于原则、思想和原理的有机集合，用于解释一个系统性整体的安排和运动。《辞海》中将系统定义为自成体系的组织；相同或相类似的事物按一定的秩序和内部联系组合而成的整体。在自然辩证法中，同“要素”组成一对范畴，是由若干相互联系和相互作用的要素组成的具有特定功能的统一整体；要素是构成系统的组成单元。在本书中，系统是在确定的研究范畴内由一组相互关联和作用的实体构成的，完成相应功能的结构化集合。

(2) 系统性质

在一个系统中，系统整体的特性和功能在原则上不能归结为组成它的要素特性和功能的总和；处于系统中的组成要素的特性和功能，也异于它们在孤立状态时的特性和功能。要素是系统存在的基础，要素决定系统。各种要素在系统中的地位和作用有差异，复杂系统的诸要素有的处于主导支配地位，有的处于从属被支配地位。由于各种需要，在科技领域人们定义了大量的系统。一方面，各种系统在结构、功能与生命周期等方面具有较大的区别。另一方面各种系统又具有许多共同的性质。

1)全局性(整体性)：由于客观条件和人类认识的限制，20 世纪以前的科学技术研究中国主要采用分析方法。法国科学家笛卡儿曾经说过“如果一个问题庞大复杂到难以解决，就把它分解成可以解决的子问题”。这种分析方法认为一个问题的解等于其子问题解的和，忽略了系统单元之间的联系。这种分解方法可以降低问题的复杂性，使人们能集中力量解决主要的矛盾，对于某些特定的情况是有效的。所以，这种分解的方法目前仍然是人类解决复杂系统问题的主要手段。然而，这种分解的方法割裂了系统内部的联系，破坏了系统整体性。科学技术的发展表明，系统不是构成实体简单的线性叠加，整体大于部分之和。在大型复杂系

统中众多的变量相互影响、制约、竞争与协同，使系统在整体上表现出不同的性质。在科学技术领域，人们为了简化研究对象，有时忽略系统中的非线性作用，建立系统的线性模型。例如，生产车间的生产调度系统可以采用线性规划模型进行描述，某些控制系统采用线性状态方程进行研究和设计。但是，这些线性系统仅仅是在特定条件下对实际系统的一种近似。通常意义上的系统都是非线性的，制造系统更是典型的非线性系统。系统的非线性作用体现了系统内部构成要素之间的复杂耦合关系，支配系统的整体性。

2)层次性：系统不是绝对的概念，是相对于研究范畴而言的。因此，某个具体的对象是否是系统，取决所要研究的问题范畴。例如，当研究车间的生产调度问题时，车间就构成了一个系统。而在进行 CIMS 工程规划设计时，车间仅仅是系统的一个构成部分。在医学研究过程中，人是一个完整的系统，而在社会学研究领域，人只是社会系统中的个体。根据研究领域与目标，系统外延可以大到全球生态环境系统或者宇宙星系，也可以小到细胞和分子/原子等微观世界。因此，高层次的系统可以分解为低层次的系统，而低层次的系统也可以复合成高层次的系统。

3)抽象性：系统实质上是人们为了研究问题时具有相对确定的内涵与外延，而创造的抽象观念。系统定义的抽象性体现在组成系统的实体既可以是物理实体，也可以是抽象实体。系统既可以是物理系统，也可以是抽象的概念系统。例如，制造系统一般是物理系统，计算机应用系统是物理系统。各种制造系统理论包括关于制造的概念、模型、规则和原理等，所以是抽象系统。在计算机软件科学中许多系统对象就是抽象系统。系统定义的抽象性还体现在系统只是对于一类具有相同或者相似性质的对象的概括，而不是精确的描述。系统是一种集合概念，某一种系统具有许多实例(Instances)。而且，系统的实例虽然具有许多共同点，却存在许多差异。举例来说，“863 计划”在 200 家企业实施了 CIMS 应用示范工程；这些 CIMS 系统除具有共性外，还具有明显的差别。例如沈阳鼓风机厂的 CIMS 与沈阳飞机制造公司的 CIMS 都是计算机集成制造系统，但是它们具有明显的差别。系统定义的抽象性还体现在系统集合的隶属函数的模糊性和边界的模糊性。一般，系统的定义无法给出完整的和有限的充分必要条件来判断某一对象是否属于该集合。例如，计算机集成制造系统一般包括计算机辅助设计 CAD 系统、计算机辅助工艺规划 CAPP 系统和生产管理系统等。但是，也有的 CIMS 不包括 CAD 系统或 CAPP 系统。

4)关联性：系统内的实体存在各类关系，系统具有相应的结构容纳和规范其构成实体。正是由于系统内存在各种关联，其构成元素才能互相约束和配合，以便完成系统目标。例如，企业具有组织结构确定各成员之间的关系，规范员工的行为，进行业务运营。

5)动态自适应性：系统是一个动态的概念，在其生命周期内，系统的边界、结构和内部构成实体等不断变化。与环境的紧密关联向系统提供能量，进行新陈代谢，适应环境变化。在自然界的发展过程中，各种生物进化出不同的形态与习性，以便适应生存环境。人工系统在运行过程中，也要根据环境变化调整结构形状、行为方式和功能。例如，在政策法规、市场和技术变化时，制造企业也需要变革组织结构、管理体制和生产工艺等。

6)功利性：系统内的实体是目标驱动的(Goal-Driven)，它们组织在一起构成系统的目的是为了更有效地完成某些确定的功能。单个或者部分实体往往无法完成这些功能，只要相互协作才能达到目标。多数系统往往具有多个目标，系统运行过程总是力求使某些性能指标最优。

7)有序与无序：有序性和无序性是系统的两种基本状态，系统的发展过程实际上是有序

状态与无序状态的交替转变过程。热力学的奠基人克劳修斯提出熵的概念，用于定量地表达系统无序的程度。热力学第二定律提出了熵增原理，即一个孤立的系统总是自发地从有序趋向无序。基于熵增原理，克劳修斯提出了“宇宙热寂论”，认为整个宇宙最终将达到温度平衡的无序状态。然而，生物进化论和社会发展史表明，系统演化方向并非只是从有序到无序，很多情况恰恰是从无序到有序。系统为了正常运转必须保持某种秩序，而系统具有熵增现象导致混沌，因此，系统为了维护有序性必须与外界进行物质、信息和能量的交换。

8)不可逆的生命周期性：任何系统都具有一个从孕育、出生和成长，经过成熟和衰老，到死亡的生命周期。显然，自然界中各类生物系统都具有确定的生命周期，而各类人造系统也具有从概念设计、加工装配、应用到报废的过程。虽然各类系统生命周期长短有巨大的差别，但是对于全部系统从出生到死亡是一个必然的历程，而且这个过程是不可逆的。在生命周期内系统可能出现病态，系统内某部件出现故障，破坏了系统的关联性、功利性、自适应性和有序性等。

当然，作为一个广泛研究的主题，系统还具有许多其他性质，我们不做详细论述。根据系统与外界环境的关系，系统可以分成三类：孤立系统、封闭式系统和开放式系统。孤立系统是指与外界没有物质、信息和能量交换的系统。封闭式系统是与外界只有信息和能量交换，而没有物质交换的系统。与外界交换物质、信息和能量的系统称为开放式系统。事实上，所谓的孤立系统及封闭系统，只是人们为了方便地研究某些系统的内部结构和运动机制，暂时将该系统人为地从环境中割裂出来而形成的概念系统；绝对意义上的孤立或封闭系统是不存在的。因此，许多学者对孤立、封闭和开放系统的分类理论提出质疑。一些研究人员认为所有的系统都存在开放/封闭两重性，每一个系统的开闭程度因其性质和所处生命周期的阶段不同而不同。

按照系统组成机理，系统又可以分成自然系统、人造系统(人工系统)和复合系统。自然系统指自然界中没有经过人工主动干预而自然存在的系统。人造系统指人类按照主观意志设计、改造和创造的系统。随着人类改造自然的能动作用的加强，许多自然系统已经变成人工系统。在许多情况下，不存在纯粹的自然系统或者人工系统。一般，根据系统的主要成分和研究领域来确定一个系统是自然系统还是人工系统。制造系统、交通系统和通信系统等都是典型的人造系统。另外，许多系统既包括自然系统的成分又包括人造系统的成分，这种系统称为复合系统。

1.3.2 制造系统的定义和特性

制造活动在人类文明发展过程中发挥了决定性作用，今天，制造业已经成为国民经济的支柱产业，对人类社会具有重要的意义。广义上讲，制造就是将自然界中天然存在的原材料和经过一定加工的半成品转变为成品的过程。人类进化与成长过程与制造密切相关，人类从原始社会起就开始进行一定的制造活动。我国不但制造历史悠久，制造技艺亦很精湛，早在夏商时代就有了精美的青铜制手工艺制品，秦汉时期的铁器制造就达到了很高水平。都江堰建设是早期系统工程的典范，诸葛亮的“木牛流马”则是自动化机械装置的雏形。但是，早期的制造活动还是一种纯粹的人力行为，制造规模很小，工具简单，技术水平也很低。因此，这些生产活动还不是严格意义上的制造过程，真正意义上的制造业起源于欧美，以各种新的能源和机械的应用为标志。

目前，制造系统或者生产系统还没有统一的定义。日本学者人见胜人归纳了制造系统的

三个性质。①制造系统的结构特性，即制造系统是在软件支持下的，若干硬件的统一集合体。②制造系统的转变特性，即将生产要素转变成产品的过程。③制造系统的程序性，即制造系统是生产的管理系统。然而，人见胜人的归纳并没有全面描述制造系统的特性。他在结构特性中仅仅介绍了制造系统的空间静态结构(设备布局)，却忽略了制造系统的组织结构，而且，没有认识到制造系统结构的动态性。在转变特性中只注意到了物流，而没有看到信息流、能量流、资金流等。在制造系统的程序性中，他只讲管理和控制，没有意识到系统内实体的自治性和自适应性。刘飞在总结归纳国外的几种制造系统定义的基础上，将制造系统定义为制造过程及其所涉及的硬件包括人员、生产设备、材料、能源和各种辅助装置，其有关的软件包括制造理论、制造技术和制造信息等组成的一个具有特定功能的有机整体。

一般来讲，制造系统在内涵方面可以划分成狭义的制造系统和广义的制造系统。狭义制造系统体现了传统的制造观念，只注重产品的加工装配。制造系统仅仅包括改变原材料几何形状、物理(化学)性质以及空间位置关系的设备，如各类机床、热处理装置和搬运设备等。从某种意义讲，狭义制造系统指企业内部零件加工车间和产品装配车间或者其中的一部分。广义的制造系统包括全部与产品生产和销售有关的活动以及进行这些活动的部门和设备等，如市场销售、供应和库存管理、产品设计、加工装配和客户服务支持等。广义的制造系统实质上就是一个企业的全部，甚至包括与其相关的供应商。目前先进制造领域所涉及的制造系统一般是指广义的制造系统。本书中制造系统是由人、管理、技术和设备等要素构成的系统，目的是向客户提供满意的产品与服务。在本书中，制造系统与制造公司或企业具有相同的含义。我们认为制造系统具有以下特性，使其与其他系统相区别。

(1) 构形化的物理产品(Configured Physical Products)

制造系统的基本功能是将原材料转换成满足客户需求的产品，因此，所生产的各种物理产品是制造系统区别于其他系统的重要标志。在转换过程中，制造系统需要消耗原材料、能量和人工(时)等。过去，这些因素构成了产品的主要成本，并且支配着销售价格。目前，产品设计方案决定了材料的选择、加工工艺和产品功能，并且影响市场销售。因此，产品设计中的独创性具有重要意义。产品的质量、价格和交货周期等是市场竞争的关键因素。产品的设计与开发是产品的物理构形的形成过程，是制造系统的核心能力。为了满足客户的多种需求，产品应该具有多个构形和较高的重构能力。

(2) 增值服务(Value-Added Service)

除了具有高质量和价格适当的产品，制造系统还需要向客户提供增值服务。增值服务是非常重要的市场竞争因素，制造系统必须充分理解客户的价值观念。过去，客户增值服务指在基本产品和服务的基础上，应用昂贵的材料、特殊的加工装置、高技能的人工或者高质量的工艺。在这种基于成本的价值观念中，客户服务的价值主要体现在服务过程所消耗的人工和材料等方面。目前，客户增值服务是一个更为复杂的概念，而且与行业和客户有直接的关系。我们认为客户增值服务是一个客户驱动的过程，它提供产品简单应用以外的价值。一个非常普遍的例子是售后产品在客户现场安装和培训。在计算机行业，许多公司都声称不是卖产品，而是向客户提供全面的问题解决方案。因此，制造企业应该将客户当做商业合作伙伴，而不是简单地向客户推销产品。产品应该被当做向客户提供的增值服务的物理载体。

(3) 人的因素和组织结构(Human Factors and Organization Structure)

制造业对人类社会产生了深刻的影响，是人类社会不可或缺的重要组成部分。人类建立了制造系统，并且主导制造技术的发展，以满足自身的物质和精神需求。人作为制造系统的

有机组成部分，与技术因素紧密结合，发挥重要作用。制造业发展初期，人们十分重视和强调技术的作用，却忽视人的主动性和创造性。目前，快速的市场变化要求企业全面发挥人与技术的作用，人与组织因素受到重视。企业运营需要合格的管理、技术和操作人员，知识与技能是人的因素发挥作用的前提条件。全体员工的主观积极性和创新性是制造系统综合集成和优化运行的基础。提高企业员工的交流与理解，激励创新以及提倡协作，对制造企业具有十分重要的意义。组织结构与人的因素密切相关，是制造系统的重要组成部分。在金字塔形递阶结构中，企业总裁规划企业的长期发展战略和市场经营目标。企业管理人员将这些战略目标转换成产品研制计划、生产计划和加工指令。操作人员仅仅进行执行各种生产指令，完成具体功能。目前，为了提高和发挥企业员工的主动性和创造性，人们提倡建立动态合作式企业结构，建立良好的人—机交互机制，实现管理、组织机构和技术的有效集成。

(4) 面向过程(Process-Oriented)

过去企业一般采用面向功能的运行方式，企业采取多层次递阶结构，各部门分别完成不同业务活动。目前，企业需要减少组织结构层次，采用面向过程的运营方式。企业的生产运营被划分成若干宏观过程。宏观过程被进一步划分成业务过程，业务过程又被划分为子过程。

面向过程的企业管理模式使企业有机会重新彻底分析、评价和改造习以为常的运行机制。目前，企业经营模式基本上侧重于面向部门功能的传统递阶结构。产品开发和制造指令自顶向下逐层传递，各部门完成指令规定的工作、并且向上级反映执行情况。在这种递阶结构中部门之间缺乏必要的交互，跨部门业务需要自底向上逐层反映、并由上级进行协调。各部门工作人员只着眼于具体业务，缺乏全局性流程概念。由于企业员工是面向部门功能而不是经营过程，企业里很少有人能明确地描述产品的开发流程。对企业经营过程设计时，各部门要进行深入细致的交流，管理人员可以十分清晰地理解企业过程的运作方式。经营过程设计与自动化技术应该是相互补充的，改变企业落后的经营模式是引进和充分利用先进技术的前提条件。自动化技术虽然可以加快部门业务处理节奏，但是如果不改变企业经营模式，先进技术就无法发挥应有的巨大效益。只有那些采用新技术同时对自身进行再工程的企业才能生存与发展。

(5) 进出流管理(Inbound and Outbound Flow Management)

制造系统与环境是有机地结合起来的，各种“流”进入和离开制造系统。这些“流”完成制造系统与环境之间的能量、信息和物质等各种交换，因此，必须有效地管理这些“流”。制造系统中典型的“流”包括物流、信息流、资金流和能量流等。物流体现了原材料、零部件和产品等在制造系统内外的有形的运动。因为物流构成制造成本的主要部分，所以，物流管理一直是非常重要的管理课题。制造系统后勤学研究物流的采购、存储、运输和分销等方面的方法和技术。信息流是制造系统中数据产生、存储、获取、处理控制等业务过程。制造系统内典型数据包括市场、客户/供应商、产品、计划调度和库存等数据。传统上，企业对信息处理并不重视，各部门分别单独维护相关数据，很少进行数据交换和共享。20世纪90年代以来，企业为了提高市场响应速度，必须集成各种信息处理过程。随着计算机技术的应用，信息技术成为制造业的使能技术，信息集成变为现代制造系统的基本要求。一些研究人员认为制造过程的实质可看做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，最终形成的产品是信息的物质体现。从信息的角度看，制造过程实质是一个使原材料的熵降低，使产品信息含量增高的过程。计算机集成制造技术研究与开发推动了以信息集成为核心