

# 第 1 章

## 先进制造战略与企业计算机应用

### 1.1 企业经营环境的变化

自 20 世纪 70 年代以来，世界市场已经由传统的相对稳定逐步演变成动态多变的市场，企业之间的竞争也由过去的局部竞争演变成全球范围内的竞争。同行业之间、跨行业之间相互渗透、相互竞争日趋激烈。在企业间竞争日益国际化、白热化的同时，当今企业所面临的社会、经济、制造环境与客户需求也已经发生了巨大的变化。

70 年代以前，一个产品的生命周期很长，构成产品的技术相对比较简单。一个新产品上市，其余工厂很快就生产出功能相同的产品，因此，市场竞争主要围绕如何提高生产率进行，大批量刚性生产由此应运而生。这种生产线建筑在产品部件化、部件标准化及加工工序规范化的基础上，然后应用泰勒的管理思想，把工人固定在以一定节奏运动的生产线旁，从事几项简单和熟练的加工操作，从而大幅度地提高了劳动生产率。从 70 年代中后期开始，直到 80 年代，市场竞争转到如何全面改善 T、Q、C 和 S 上。其含义是：T—产品的交货时间或新产品的上市时间；Q—质量；C—成本；S—售前和售后服务。进入 20 世纪 90 年代之后，市场竞争主要是围绕新产品的竞争而展开的。这是因为，一个新产品的价格总是高于其价值的，通过竞争，价格才逐渐接近价值。一个产品失去其独占期，就意味着这个产品生命周期的结

束。因此，今天的企业依靠一项或几项独占性技术构成的新产品就能获取高额利润。这种现象反映了这个时代的一个基本特征，即独占性技术构成了产品的主要价值及价格。信息时代的实质是知识的时代，大量知识产生、传播、应用，使知识—技术—新知识诞生的周期越来越短。如何敏捷地利用技术提供的可能性及时抓住市场对新产品需求的机遇，快速开发新产品，已成为赢得竞争的最重要的手段。

从图 1.1 给出的变化趋势上可以看出，在当今市场环境下，产品的生命周期在不断缩短，同一种产品的重复定单数量在不断减少，每批定单中对一种产品的数量也在不断减少，而客户对产品的多样性的要求呈持续增长的趋势。

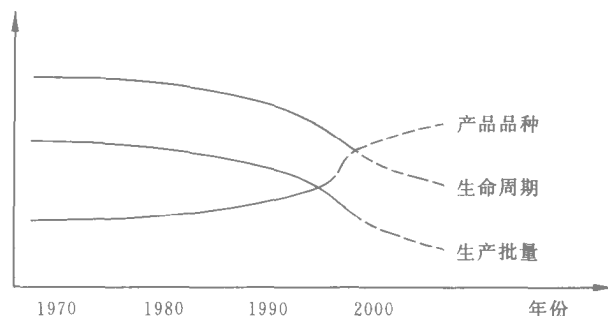


图 1.1 产品的变化趋势

除了传统的对企业提供产品的低成本、高质量要求外，当今的企业生产经营还要能够适应以下的市场环境变化：

(1) 市场被迅速地分割：当今，除了极个别的产品市场（如微软公司的 Windows 操作系统、波音飞机公司）被少数公司垄断以外，大部分产品的市场都被许多公司在动态地分割，每个公司凭借其实力和经营策略试图占有更多的市场份额。通过垄断来独占市场或者通过大批量生产的方式获得高额利润的机会已经越来越小。相反，在市场上能够异军突起、独占鳌头的公司则需要依靠推出能够领导市场潮流的创新产品，如近几年兴起的移动通信产品、电子商务软件、群件系统软件平台等。

(2) 产品的生命周期缩短：与 20 世纪 70 年代相比，当今产品的生命周期已经显著地缩短，产品的更新换代速度在显著加快。一种产品从投放市场到最终被淘汰的时间已经大大缩短。由于整个产品的销售时间缩短，企业在每个产品上的利润回报时间也大大缩短了，这就要求企业在研制开发这个产品上的投资能够在短期内得到效益回报。以汽车工业为例，在 20 世纪 50~60 年代，汽车公司推出的大部分车型平均可以有 15~20 年的生命周期，而到了 20 世纪 90 年代后期，汽车的平均生命周期已经缩短到了 5~7 年。国际上某

个著名的生产工程运输机械的公司为了加强其市场竞争能力，制定的产品（工程车辆）发展战略为：3周设计、3个月试制与3年的生命周期。

（3）产品交货期缩短：由于最终用户对产品迅速交货的要求越来越强烈，交货期已经成为企业市场竞争力的一个重要因素。在有些情况下，用户对交货期的要求甚至超过了对价格的要求。在供应商与客户的对话过程中，经常可以听到“只要你能够在某时交货，价格贵一点没有关系”之类的说法。缩短产品交货期主要包括缩短产品的设计周期与制造周期。对于简单的装配型产品如小家电、自行车、低档次的计算机设备，由于其设计过程相对简单，因此，缩短交货期的主要问题是解决生产组织和物料及时供应问题。对于复杂的产品如飞机、大型船舶、大型发电机组、复杂的汽车模具，缩短设计过程并且提高产品的设计质量成为缩短产品交货期的更关键的因素，而且经常是决定性的因素。对于这些复杂产品，减少由于设计不合理而造成的在产品制造过程中出现加工困难、废品增加、返工次数增加，甚至不得不重新修改设计是缩短产品交货期的最迫切需要解决的问题。

（4）产品的复杂性增加：随着产品设计水平的提高和产品功能的不断增加，当今产品已经变得越来越复杂。这对企业的产品研制水平提出了越来越高的要求。以汽车为例，最早的汽车设计主要考虑机械设计问题，而当今的汽车除了机械部件越来越复杂外，还需要考虑电子点火系统、安全保护装置、空调系统、无线电系统，乃至全球定位系统。产品复杂性增加直接导致产品研制费用和产品开发周期的增加，尤其是制造用来进行试验和分析的产品原型的时间和费用迅速增加。因此，如何降低产品的研制费用，尤其是原型制造费用，是降低产品成本的关键问题。许多公司已经开始使用先进的计算机数字化产品模型与虚拟制造技术，通过在计算机上对数字化产品模型进行仿真分析，从而避免在物理上制造产品原型的方法来降低产品研制费用。典型的例子是波音公司的777型飞机的研制采用了数字化产品模型和虚拟制造技术。该公司在没有生产物理样机的情况下完成了777型飞机的设计开发，并成功地将该机型投入了市场销售。

（5）定制产品数量增加：当今客户已经越来越不满足于大众化的通用产品，他们希望制造企业能够按照他们特定需求生产符合其特定功能要求、环境要求、个人兴趣，甚至审美观念的产品。按照特定客户需求设计制造的产品称为定制产品。用户不仅可以对定制产品提出需求，甚至可以直接参与其设计过程，对设计方案提出他们的建议。目前，客户定制产品的种类与在企业整个产品数量中的比例呈不断上升的趋势。许多大的轿车生产厂家已经推出了网上客户定制服务软件，供用户对他想购买的轿车提出要求。另外，国外的糖果厂还提供按照客户需求定制礼品巧克力、礼品饼干、蛋糕的业务。同样，在自

行车、冰箱、家具等行业，提供定制服务的公司数量也在迅速增加。提供定制服务已经被认为是企业扩大其市场份额的一个重要手段。

(6) 环保要求日益增强：随着全球环境保护呼声的日益高涨，对制造企业的环境要求也越来越强烈。对制造企业在环境保护方面的要求主要包括两大方面：一是对企业在产品制造过程中对环境的低污染要求，包括噪音、废气、废水、废液、废料；另一方面指产品在报废以后要对其大部分的部件尽可能地回收重用，对于不能够回收重用的要能够方便地进行分解处理，从而在最大程度上减少对环境的污染。近些年来，与环保要求相关的绿色制造、多生命周期产品设计、可拆卸设计技术得到了高度的重视。

(7) 劳动力成本提高与工作时间缩短：虽然还有相当多的不发达地区有廉价的劳动力，但是，对于许多现代企业技术人员还是相当紧缺，而且技术工人的劳动力成本也呈不断上升的趋势，这就导致了企业产品成本的增加。另外，随着国家、地区公共节假日的增多，劳动保护法条例的不断细化和贯彻执行，劳动力的工作时间还在不断地缩短，这也会导致企业的劳动力成本提高。

以上的市场环境变化因素对企业的生产经营提出了更高的要求，而且这些不同的因素相互之间又是矛盾的，如产品复杂性增加与按照客户需求定制生产直接导致产品成本增加、生产周期与交货期延长，劳动力成本的增加和企业满足环保要求都将导致产品成本的增加。因此，虽然全面改善企业的 T（交货期短）、Q（高质量）、C（低成本）、S（更好的服务）水平是企业努力的方向，但是，要真正实现这些目标并不是一件容易的事情。企业必须综合利用各种先进制造技术，在网络与信息技术的支持下，改进现行的生产经营模式和组织结构，才有可能全面实现这些目标，并在未来的市场竞争中赢得更多的份额。

## 1.2 先进制造战略

制造业是国民经济的支柱产业，无论是在发达国家，还是在发展中国家，制造业在国民经济中均占据主要地位。1994 年，在新加坡召开的国际生产工程学会（CIRP）第 44 届年会上，大会主席日本吉川教授在总结报告中指出：世界上各个国家经济的竞争主要是制造技术的竞争，在各个国家的企业生产力构成中，制造技术的作用一般占 60% 左右。由此可见，制造技术水平的高低已成为衡量一个国家经济实力和科技发展水平的重要标志之一。

在当前竞争激烈，需求变化非常迅速的市场环境下，传统的制造业正在发

生着深刻的变革，先进制造技术正显著地提高企业的产品质量、经济效益和市场竞争能力。越来越多的企业将先进制造技术作为企业适应迅速多变的市场需求和提高竞争力的主要手段。先进制造技术还在大幅度改善企业产品结构、生产过程和经营管理模式上发挥重要的作用。越来越多的企业把能够高质量、快响应、灵活、敏捷地满足客户需求的先进制造技术作为企业继续生存并保持发展的有效途径。

先进制造技术是传统制造业不断吸收机械、电子、信息、材料、能源及现代管理等技术成果，并将其综合应用于制造全过程，以实现优质、高效、低消耗、清洁、灵活生产，从而取得较理想的技术与经济效果的制造技术的总称。先进制造技术是制造技术的最新发展阶段，它既由传统制造技术发展而来，又随着高新技术的引入和制造环境的变化而产生质的飞跃，现已成为能够有效地控制制造系统中的物料流、信息流和资金流的工程技术。作为面向 21 世纪的制造技术，先进制造技术具有以下显著的特点：

(1) 先进制造技术贯穿了制造的全过程：传统制造技术一般仅指加工制造的工艺方法，实际上只是制造全过程中的一部分；而先进制造技术贯穿了从市场预测、产品设计、采购、生产经营管理、制造装配、质量保证、市场销售、售后服务、报废处理，甚至回收再利用等整个制造过程，使整个制造过程成为集市场、产品、制造为一体的大系统。

(2) 先进制造技术注重技术、管理、人员三者的有机集成：实践证明，先进制造技术不是一个单纯的技术问题，在实施先进制造技术的过程中，如果只采用从技术到技术的做法，而忽略组织、管理和人员的作用，在实施后往往不会取得令人满意的效果。因此，在实施先进制造技术的过程中，要注重技术、管理、人员三者的有机集成，使制造全过程能够达到优化运行，使组织管理模式更加灵活合理。当今一些先进制造技术，如计算机集成制造、并行工程、准时制造、全面质量管理、精良生产、敏捷制造等都体现了技术与管理、人员三者紧密结合这一特点。

(3) 先进制造技术能有效支持可持续发展战略：资源、环境与人口是当今社会面临的三大主要问题。联合国从人类长远生存的角度出发，提出了促进世界经济可持续发展的可持续发展战略。对于制造业，先进制造技术领域中的绿色制造、清洁制造、生态工厂等新概念、新哲理 是支持可持续发展战略的有力武器，是企业跨世纪的发展战略。在企业中运用它们会有助于保护自然环境，最大限度地提高资源利用率和改善员工的工作环境。

(4) 先进制造技术是多学科交叉融合的产物：传统制造技术的专业、学科单一，不同专业之间的界限分明，而先进制造技术的专业、学科之间不断渗透、交叉、融合，其界限逐渐淡化甚至消失，这使得先进制造技术趋于系统化、

集成化 并发展成为集机械、电子、信息、材料和管理等技术于一体的新兴交叉技术。如快速原型制造技术，它可以自动而迅速地将设计思想物化为具有一定结构与功能的原型或者实际零件，从而对产品设计进行快速评价、测试、改进，以迅速响应市场需求。快速原型制造技术是机械工程、CAD(计算机辅助设计)数控、激光以及材料等技术的交叉与优化集成。

由于先进制造技术不是一项或者几项单纯的具体技术，而是由传统的制造技术与以信息技术为核心的现代科学技术相结合而产生的一个完整的高新技术群，因此，可以称为先进制造技术的新技术很多，而且还会不断出现许多新的先进制造技术。为了给读者一个关于先进制造技术的初步印象，本节介绍几个比较有影响的先进制造战略。

### 1.2.1 并行工程

在企业的以功能为核心划分的部门组织结构下，传统的产品研制是一种串行的过程，即在前一个部门完成某个功能后将设计结果移交给下一个部门进行下一步的设计工作。这种串行的产品研制方式存在的严重不足是不同的设计开发部门之间缺乏交流，每个部门仅考虑其局部的功能性能要求，从设计时间和成本上进行局部的优化。但是，由于每个部门在进行局部优化的过程中未考虑后续部门的要求和产品设计制造周期中的各种因素，所以会导致最终设计出来的产品的可制造性和可装配性差、产品制造周期长、废品率高、产品成本高。从决策空间的角度来看待产品研制过程可以更好地理解串行设计方式存在的不足。在产品设计的早期阶段，产品设计的决策空间很大，但是，随着设计过程的深入，产品设计空间越来越小，因此，在产品设计的早期阶段如果不考虑后续设计过程的约束，则在产品研制的后期，留给设计者的余地就很小了，有时甚至无法完成设计制造工作。在这种情况下，经常需要从头开始修改设计，而从头开始修改设计将导致所有部门的工作全部需要重做，这不仅造成设计周期的延长，而且导致大量设计精力的浪费，并直接引起产品研制成本的增加。

为了解决串行设计存在的严重不足，1988年美国国防分析研究所(IDA)的 R. I. Winner 在题为“并行工程在武器系统采购中的作用”的研究报告中提出了并行工程的概念。并行工程的定义是：集成地、并行地设计产品及其相关的各种过程(包括制造过程和支持过程)的系统方法。这种方法要求产品开发人员在设计一开始就考虑到产品的整个生命周期(从概念形成到产品报废)中的所有因素，包括质量、成本、进度计划和用户需求。

根据上述定义不难看出，并行工程这种先进制造模式的技术核心，除了继

承早期计算机集成制造系统 (CIMS) 的信息集成外,其主要特点是过程集成。所谓过程集成是指利用计算机集成支持软件工具高效、实时地实现企业事务处理系统间的数据、资源的共享和应用间的协同工作,将一个个孤立的应用集成起来形成一个协调的企业信息系统。实现过程集成后,就可以方便地协调各种企业应用系统的功能,把人和资源、资金及应用合理地组织在一起,获得最佳的运行效益。并行工程中的过程集成主要完成产品开发过程中不同的设计活动和过程的重组,将产品开发过程中各种串行过程尽可能多地转变为并行过程,使设计人员在设计的早期阶段就能考虑到产品的可制造性、可装配性、可测试性、可维护性、可靠性及低成本等因素 促进产品设计不同阶段工作之间的及时交流、协调,避免跨不同设计阶段的大返工,进而达到缩短产品开发周期、降低成本的目的。

图 1.2 给出了两种不同设计模式。

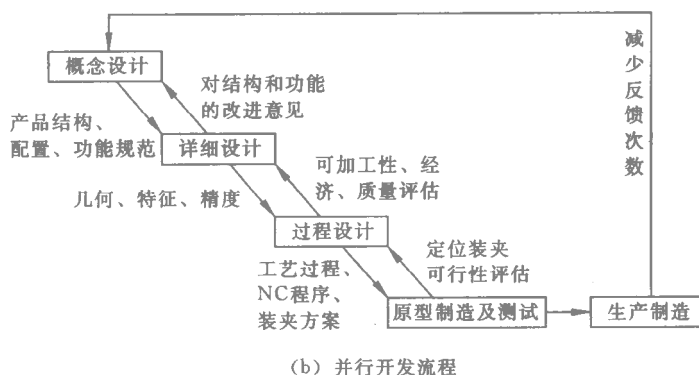
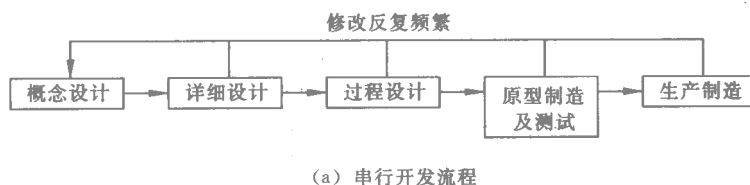


图 1.2 两种产品开发流程

并行工程作为实现产品高质量、低成本、上市快及满足用户需求的先进制造技术,它基于传统的 CAD、CAPP (计算机辅助工艺)、CAM (计算机辅助制造) 技术,采用先进的 PDM 产品数据管理作为支撑平台,通过组建多学科的团队和设计流程重组,从根本上改变传统的产品设计模式。并行工程的概念和方法的内涵是十分丰富的。首先,并行工程是一种集成化、系统化的设计方法学,它强调产品全生命周期——市场需求分析、产品定义、研究开发、设计、

制造、支持（包括质量、销售、采购、发送、服务）及产品报废等各个阶段过程的集成、并发与优化。并行工程要求人们在进行产品生命周期的上游阶段的工作时，要充分考虑下游工作的可实现性。其次，并行工程强调过程重组与流程改进，并提出了以产品为中心，组成有关部门代表参加的多学科小组（群）进行“团队”工作的工作方式。这种工作方式不仅加强了部门间的协调，而且集成了多学科人员的智慧。另外，并行工程还十分重视采用先进的信息技术和产品设计技术，如采用产品数据管理作为支持产品开发的支撑环境，采用工作流管理作为支持设计流程重组与流程管理的工具，采用产品的数字化定义、DFA（面向装配的设计）、DFM（面向制造的设计）、QFD（质量功能配置）等技术提高产品设计水平。

并行工程实施涉及许多将影响该战略最终是否获得成功的关键技术问题，主要包括：

（1）并行产品开发过程建模、仿真与优化：并行工程与传统的设计方法的本质差别在于它把产品开发的各个活动作为一个集成的、并行的产品开发过程，强调下游过程在产品开发的早期参与设计，因此，对产品开发过程进行建模，在过程仿真与优化分析的基础上实现对产品开发过程的有效管理和控制，有利于不断改善产品的开发过程。

（2）并行工程的集成产品开发团队的组织：在并行工程中，产品开发由传统的部门制或者专业组变为以产品（型号）为主线的多功能集成产品开发团队。根据产品复杂程度的不同和涉及的范围不同，团队可以有企业级、产品级、部件级和零件级等不同层次。合理地组织团队，赋予团队相应的权力、责任，为团队开展工作和实施集体决策提供协同工作的环境，是实现集成产品开发重要的组织保证。

（3）并行工程支撑环境的建立：在并行工程产品开发模式下，产品开发是由分布在异地的采用异种计算机软件工作的多学科小组完成的，多学科小组之间及多学科小组内部各组成人员之间存在着大量相互依赖的关系，并行工程的不同应用软件之间也存在着大量的数据共享和应用活动逻辑之间的约束。因此，建立能够屏蔽硬件、软件系统的异构性，并能够高效实时地支持数据管理、应用管理、应用协调和过程管理的支撑环境对于成功实施并行工程具有非常重要的意义。

（4）数字化产品建模与 CAx/DFx 使能工具：建立产品全生命周期的数字化模型，特别是基于 STEP 的特征模型，是高效快速实现不同设计软件工具之间的信息交换的基础，也是完成计算机模拟仿真分析的基础。除了基础的支撑软件环境外，实施并行工程还需要许多计算机辅助设计制造的使能工具的支持，如 CAD、CAE（计算机辅助工程）、CAPP、CAM、CAFD（计算机辅助

工装系统)、DFA、DFM、MPS(加工过程仿真)等。

自 20 世纪 80 年代以来,并行工程在国际上得到了广泛重视,在许多应用中取得了成功。如波音飞机公司在其波音 777 型飞机的设计中采用了并行工程技术从 1990 年 10 月开始到 1994 年 6 月结束,波音公司仅用了 3 年零 8 个月的时间就完成了波音 777 飞机的设计开发,而通常开发同样型号的飞机需要 7~10 年的时间。在波音 777 开发过程中,波音公司对产品的设计开发过程进行了重组,按照功能组建了 200 多个设计/制造团队,并实现了这些集成产品团队(IPT)的协同工作。通过全面采用三维实体建模和 100% 的数字化预装配,将设计更改、错误或返工报废减少了 50%。成功利用并行工程技术开发的产品还有瑞士 ABB 公司的火车运输系统、美国 Chrysler 公司的新型汽车、德国西门子公司自动化部的汽车电子系统、美国洛可希德导弹与空间公司的 Thaad 导弹等。

在 863/CIMS 主题的支持下,我国于 1995 年 7 月开展了 863/CIMS 关键技术攻关项目——并行工程。由清华大学、华中理工大学、北京航空航天大学、上海交通大学、航天总公司二院等 5 个单位联合开展技术攻关,并以航天二院某型号的复杂结构件为背景进行了初步的应用,取得了较好的攻关成果。目前,作为并行过程攻关成果的应用推广,国内 9 家企业正在进一步开展实施并行工程的工作。实践证明,并行工程是一种加速企业新产品开发,赢得市场竞争的有效的先进制造模式与技术。

## 1.2.2 敏捷制造

### 1. 敏捷制造提出的背景

1991 年,由美国国防制造技术计划秘书办公室资助,由里海(Lehigh)大学的亚柯卡(Iacocca)研究所主持了一项关于 21 世纪发展战略的研究。这项研究由亚柯卡研究所和美国 13 家大型企业的行政首脑组成核心组进行,并邀请 100 多家企业和著名的咨询公司参与研讨,历时半年,形成了一份名为《21 世纪制造企业发展战略》的著名报告。敏捷制造(agile manufacturing)正是在这份报告中总结经济发展现状,展示未来而提出的一种先进制造技术。提出敏捷制造的直接原因是市场的需求,同时,技术的发展又使其成为可能。

在 21 世纪,技术的发展及世界市场的竞争,无疑会沿着 20 世纪 90 年代展开的道路前进:危机与机遇并存,竞争更加激烈,企业面临更加严峻的挑战。随着生活水平的不断提高,人们对产品的性能和质量的要求也越来越高。新技术的迅速涌现使得一个产品的生命周期越来越短,产品的技术含量

越来越高，产品的生产批量却越来越少。用户需求日趋多样化、个性化，所有企业都将处于一种连续改变、不可预见的市场环境中。如何对现有企业进行改造与结构调整，使之能在复杂多变的环境中赢得竞争，求得生存和发展，已成为全球企业界共同关心的问题。问题的核心是能否抓住机遇，快速响应市场，开发出新产品。敏捷制造的思想正是在这种市场竞争的背景下提出的，它是总结和预测经济发展客观规律的产物，决不只是一个新名词的问题。目前，国内外均有不少企业自觉或自发地运用敏捷制造的思想，从而取得了相当大的成功。

从制造业技术发展的角度来看，敏捷制造也是自动化技术、计算机应用技术、信息技术、网络通信技术发展的一种必然结果。CIMS 技术是采用信息集成的方式来解决设计、管理和加工制造中大量存在的自动化孤岛问题，解决其信息的正确、高效共享和交换。信息集成技术更进一步提高了生产线的产品生产效率，并使之具有柔性。在信息集成的基础上，为了进一步实现设计过程的优化和设计制造资源的优化，CIMS 技术必然向过程集成（如并行工程和企业集成如敏捷制造延伸。

## 2. 敏捷制造的概念和内涵

在《21 世纪制造企业发展战略》报告中，明确提出了敏捷制造的概念。其基本思想是：通过将高素质的员工、动态灵活的虚拟组织机构（virtual organization）或动态联盟、先进的柔性生产技术进行全面集成，使企业能对持续变化、不可预测的市场需求作出快速反应，由此获得长期的经济效益。它强调人、组织、管理、技术的高度集成，强调企业面向市场的敏捷性（agility）。图 1.3 形象地体现了敏捷制造的概念。

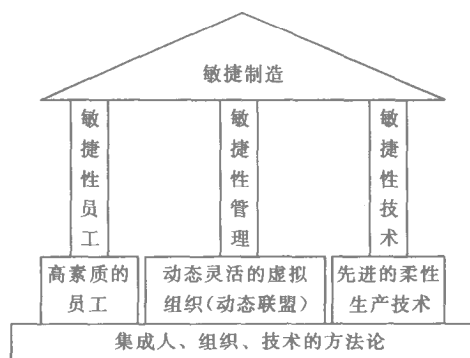


图 1.3 敏捷制造的概念

敏捷制造包含如下丰富的内涵：

(1) 敏捷制造的出发点是多样化、个性化的市场需求和瞬息万变的经营机遇,是一种‘定单式’的制造方式。

(2) 敏捷性反映的是制造企业驾驭变化、把握机遇和产品创新的能力。

(3) 敏捷制造重视充分调动人的积极因素,强调需要有知识、精技能、善合作、能应变的高素质员工,充分弘扬人机系统中人的主观能动性。

(4) 敏捷制造不采用以职能部门为基础的静态结构,而是推行面向产品过程的小组工作方式,企业间由机遇驱动而形成动态联盟。

动态联盟是敏捷制造的基本组织形态,其含义是指企业群体为了赢得某一机遇性市场竞争,围绕某种新产品开发,通过选用不同组织/企业的优势资源,综合成单一的靠网络通信联系的阶段性经营实体。动态联盟具有集成性和时效性两大特点。它实质上是不同组织/企业间的动态集成,随市场机遇的存亡而聚散。在具体表现上,结盟的可以是同一个大公司的不同组织部门(以互利和信任为基础,而非上级意识),也可以是不同国家的不同公司。动态联盟的思想基础是共同赢(win-win),联盟中的各个组织/企业互补结盟,以整体优势来应付多变的市场,从而共同获利。

敏捷制造作为一种新的制造哲理,有许多新的制造思想。但是,必须指出,敏捷制造并不意味着需要高额的投资作为前提,也不需要抛弃所有过去的生产过程和结构,而是强调如何利用旧的、可靠的生产过程和生产要素(尽可能少添加新过程)来构成新系统,生产出更多的新产品。动态联盟就是利用已有的社会技术基础,通过重组来实现敏捷制造的有效方式。

### 3. 企业组织的敏捷性

实现敏捷制造的关键是对制造企业进行敏捷化改造或重组,增强企业的敏捷性。企业的敏捷性是指可重构(reconfigurable)、可重用(reusable)和可扩充(scalable)的特性,即RRS特性。对企业敏捷性的综合度量,可以用成本(cost)、时间(time)、健壮性(robustness)和自适应范围(scope of change)这四个度量指标。其中,自适应范围是敏捷性的精华,它不是预先按规定的需求范围建立某过程,而是使企业从组织结构上具有RRS特性,是企业预计完成变化活动的的能力,与创新性密切相关。成本是指完成敏捷变化(或转换)的成本,变化成本与新产品的上市成本密切相关,也与产品过程的设计与实现相关。健壮性是指敏捷变化过程的坚固性和稳定性,它与新产品和过程的质量密切相关。这四个方面相互约束,相互关联。敏捷性必须在此四个方面取得均衡。例如,无成本约束的快速变化是无意义的;不健壮的变化也不实用;自适应变化范围必须与快速的时间、合理的成本、保险的健壮性相联系。企业实现敏捷性转化的费用直接反映在产品成本、质量、市场响应之中。

从企业的组织管理角度可以用五个主要变量或要素来表示企业的敏捷性，即通信连通性（communication connectedness）、跨组织参与性（interorganization participation）、生产灵活性（production flexibility）、管理相关性（management involvement）和雇员使能性（employee empowerment）。其中，通信连通性是指敏捷企业中跨越公司和组织机构范围的通信、交流程度，它包括通信技术和通信行为两方面。跨组织参与性是指敏捷企业跨越公司范围组织进行经营活动的能力和水平。跨组织的共同参与有多种方式，如基于顾客（供应商）长期合同建立的供应链关系、合资联合体、虚拟伙伴合作关系等。在敏捷制造中主要关心虚拟伙伴合作关系，即动态联盟方式。合作伙伴间的相互信任和依赖是跨组织间的共同参与取得成功所必不可少的因素。生产灵活性是指企业的制造能力、生产及时性和可重构性的水平。敏捷企业要利用各个层次（公司层、工厂层、单元层、设备层等）的灵活性，尤其要考虑公司层的灵活性。管理相关性是指企业主动参与管理以调整其组织和资源使得敏捷制造得以实现的水平。它与企业的组织和资源、企业创新性和主动性、动态联盟的作用密切相关，直接影响着公司及其经营过程的可重构性和灵活性。雇员使能性指企业使每个雇员能够根据公司目标定义其义务责任，影响其工作领域乃至整个公司的决策能力的水平。雇员使能性包括公司建立多功能项目组的能力、对雇员的全面培训、雇员被授权和解决问题的水平等方面。

#### 4. 实现敏捷制造的关键技术

实现敏捷制造应有哪些支撑技术呢？在《21 世纪制造企业发展战略》报告中，描述了美国敏捷制造企业模式中所包含的 20 个技术使能子系统，在此不一一列举，只就其中最为重要的，也是现有企业在敏捷化变革中首先要解决的技术问题简述如下：

（1）基础技术——CIM 技术：CIM（计算机集成制造）技术是一种组织、管理与运行企业生产的技术。它借助于计算机软硬件，综合运用现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术等，将企业生产全过程中有关人、技术、经营管理三要素及信息流、物料流有机地集成并优化运行，以实现产品高质、低耗、上市快，从而使企业赢得市场竞争。它为实现敏捷制造的集成环境打下了坚实的基础，是敏捷制造的基础技术。

（2）环境技术——网络技术：实现敏捷制造，企业需要具有前述的通信连通性，网络环境是必备的，并应按照企业网——全国网——全球网的步骤建立，实施企业的网络技术。利用企业网实现企业内部工作小组之间的交流和并行工作，利用全国网、全球网共享资源，实现异地设计和异地制造，及时地、最优地建立动态联盟。基于网络的企业资源计划管理系统和商品供应链

系统都将为敏捷制造的实施提供必需的信息。

(3) 统一技术——标准化技术：以集成和网络为基础的制造离不开信息的交流，交流的前提是有统一的交流规则，这是标准化的工作。执行电子数据交换标准 EDI、产品数据交换标准 STEP 及超文本数据交换标准 SGML 等，是进入国际合作大环境，参加跨国动态联盟的前提。

(4) 虚拟技术——模型和仿真技术：敏捷制造通过动态联盟和虚拟制造来实现，因而对产品经营过程进行建模和仿真，采用基于仿真的产品设计和制造方法是十分必要的。另外，作为敏捷制造在产品设计和制造过程中的主要手段之一的虚拟原型系统，也是以模型和仿真技术为基础的。

(5) 协同技术——并行工程技术：并行工程技术是对产品及相关过程（包括制造过程和支持过程）进行并行、一体化设计的一种系统化技术。该技术要求产品设计人员在设计一开始就考虑到产品全生命周期（从概念形成到产品报废）中的所有因素，包括质量、成本、速度、进度及用户要求等。并行工程通过组成多学科的产品开发小组协同工作，利用各种计算机辅助工具等手段，使产品开发的各阶段既有一定的时序又能并行。同时，采用由上、下游因素共同决策产品开发各阶段工作的方式，使产品开发的早期就能及时发现产品开发过程中的问题，从而缩短开发周期，降低成本，增强对市场的响应敏捷度。

(6) 过程技术—— workflow 管理技术：动态联盟是面向具体产品而动态创建的虚拟公司，其组织结构的临时性和动态性，加上产品研制过程的创新性和协同特性，在很大程度上决定了动态联盟的管理将采用或者基于项目管理的方式来进行。能够有效支持企业业务重组、业务过程集成、项目管理和群组协同工作的工作流管理技术对于实施动态联盟具有重要的支持作用。另外，工作流管理系统还可以作为企业间信息集成的使能工具，基于 Web 和基于邮件方式的工作流管理系统可以为企业灵活地组建动态联盟和实现信息交换发挥重要作用。

此外，集成框架技术、集成平台技术、数据库技术、决策支持系统、人机工程、人工智能等也都是支持敏捷制造和动态联盟的重要技术。敏捷制造是 21 世纪企业生存、竞争的必要条件，它表示的是一种在不可预见、持续变化前提下的适应和驾驭市场变化的能力，它要求整个社会的协同努力。

### 1.2.3 虚拟制造

#### 1. 虚拟制造的定义及内涵

虚拟制造 (virtual manufacturing, VM) 是 20 世纪 90 年代发展起来的一

种先进制造技术，也是敏捷制造的一种实现手段。国内外的许多学者对虚拟制造进行过定义，比较有代表性的定义如下：

虚拟制造是实际制造过程在计算机上的本质实现，即采用计算机仿真与虚拟现实技术，在计算机上群组协同工作，实现产品的设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验以及企业各级过程的管理与控制等产品制造过程，以增强制造过程各级的决策与控制能力。

虚拟制造是一种通过计算机虚拟模型来模拟和预估产品功能、性能及可加工性等各方面可能存在的问题，提高人们的预测和决策水平，从而使制造技术走出主要依赖于经验的狭小天地，发展到全方位预报的新阶段的先进制造技术。图 1.4 表明了虚拟制造和实际制造的关系。

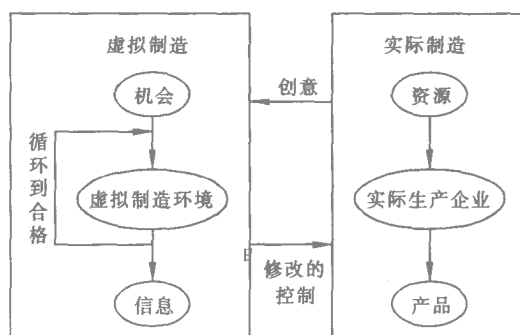


图 1.4 虚拟制造与实际制造

(1) 与实际制造相比，虚拟制造的主要特点是：产品与制造环境是虚拟模型 在计算机上对虚拟模型进行产品设计、制造、测试 甚至设计人员或用户可“进入”虚拟的制造环境检验其设计、加工、装配和操作 而不依赖于传统的原型样机的反复修改 还可将开发的产品 部件 存放在计算机里 不但大大节省仓储费用，更能根据用户需求或市场变化快速改型设计，快速投入批量生产，从而能大幅度压缩新产品的开发时间，提高质量、降低成本。

(2) 可使分布在不同地点、不同部门的不同专业人员在同一产品模型上同时工作，相互交流，信息共享，减少大量的文档生成及其传递的时间和误差，从而使产品开发以快捷、优质、低耗响应市场变化。

## 2. 虚拟制造系统及基本要求

虚拟制造系统 (virtual manufacturing system, VMS) 是基于虚拟制造技术实现的制造系统，是现实制造系统 (real manufacturing system, RMS) 在虚拟环境下的映射，VMS 生产的产品是可视的虚拟产品，是一个数字化产品，它具有真实产品所必须具有的特征，并具有动态结构及决策、控制、调

度、管理等四个机制。虚拟制造技术和虚拟制造系统涉及到整个产品开发和制造过程的方方面面。对于产品来说,涉及到整个产品生命周期的各个方面,对于制造过程来说,涉及到整个工厂生命周期的各个方面。

对 VMS 的基本要求体现在从 RMS 到 VMS 的映射中,应反映出 RMS 的要求,因此,下列要求必须得到满足:

- (1) VMS 与 RMS 具有功能一致性。
- (2) VMS 与 RMS 具有结构相似性。
- (3) VMS 的组织与实现具有高度的柔性。
- (4) VMS 应实现“全集成”,即信息集成、智能集成、串并行工作机制集成、人机集成、过程集成、资源集成及技术集成等。
- (5) 实现虚拟环境下分布式并行处理的智能协同求解和虚拟环境下系统全局的最优决策。
- (6) VMS 在虚拟环境下进行,其工作过程及各阶段的运行状态和结果都应该具有可视性,对其整个制造过程能进行仿真。

### 3. 虚拟产品开发及关键技术

虚拟产品开发 virtual product development, VPD 是虚拟制造研究领域中的一个重要内容,是以计算机仿真、建模为基础,集计算机图形学、智能技术、并行工程、虚拟现实技术和多媒体技术为一体,由多学科知识组成的综合系统技术。它是现实产品开发环境下的映射。它将现实产品开发环境和全过程的一切活动及产品演变成基于数字化的模型,对产品开发的行为进行预测和评价。应用虚拟现实技术,可以达到虚拟产品开发环境的高度真实化,并使其和人全面的感官接触和交融。

虚拟产品开发将从根本上改变设计、试制、修改设计和规模生产、维护的传统模式。在产品真正制造和销售之前,首先在虚拟开发环境中生成数字化产品原型或软产品原型(soft prototype)代替传统的硬样件(hard prototype)进行测试,对其性能、可销售性、可维护性、成本和外观等进行预测和评价,从而缩短产品开发周期,降低开发成本,提高企业快速适应市场变化的能力。

虚拟产品开发的关键技术如下:

- (1) 产品开发的过程建模:在并行工程指导下,产品开发过程是多学科群体在计算机网络通信环境的支持下,在开发时间和资源约束下,建立产品全生命周期信息的开发组织结构和开发任务的动态调控流程。过程建模应考虑的内容有:

过程模型——过程模型的描述方法及在计算机上的处理和实现,过程的动态调整和优化。

组织模型——规划和描述组织结构、活动分工、权限和责任定义。

资源模型——对信息、设备、人力、资金等资源进行动态规划和配置控制。

约束规则——时间约束是首要约束，在资源允许下，增大产品开发活动的并行度；功能约束反映开发活动中后续活动对前期活动的功能要求；关键参数约束是开发活动之间及开发活动中单元之间相关性和一致性的保障。

过程监控和协调——进行实际约束管理、过程的实时监控调度和冲突仲裁，保障过程按照最优方向进展。

(2) 支持 VPD 的产品数据模型：产品建模主要以并行设计及面向对象技术为工具，以 STEP 标准为思想，建立基于装配的约束参数化的特征产品定义模型。其特点如下：

具有统一的数据结构：产品采用百分之百的数字化定义方式，使产品数据模型在产品开发的各个阶段无二义性。

并行方式定义产品：并行产品定义是一种系统工程方法，它使开发人员一开始就考虑到产品生命周期里的所有环节。面向装配的设计、面向制造的设计、面向测试的设计、甚至考虑到产品报废后的可处理性等绿色产品设计思想等在并行方式的产品定义中可得到良好的体现。

支持工程分析工具的应用：工程分析工具利用已经建立好的产品模型，对零部件甚至整机进行有限元受力分析、热应力分析以及运动仿真、性能仿真、装配仿真，仿真的结果可直接用于指导数字化产品的设计修改，不必通过实物模型来验证。

支持产品异地、并行设计：由于产品模型在计算机上定义，加之网络通信的迅速发展，处于异地的设计人员也可方便地进行交流。设计队伍中除有设计、制造、装配、试验等专业人员外，还有合作伙伴、用户代表等，这样在产品开发过程中能及早地发现问题，并使这些问题在产品开发的早期阶段就得到解决，尽量避免下游重大问题的反馈所造成的时间拖延、成本上升等现象。

(3) 多种协同机制：为了实现原型系统中各群体、各层次对信息、资源的共享，协调处理各种更新、冲突和竞争，必须具有各种协同机制。

组织协同：在虚拟产品开发体系下，是以团队（teamwork）的工作方式进行的。这就存在小组（team）内的人员协作和联盟内各小组之间的协作。小组内的各成员发挥自己的专长，通过自己管理、员工参与和适宜的合作机制，实现单元小组的最大效能。小组间的协同则依靠动态联盟的组织机制，保证产品开发的高效和高质量。

人机协同：在系统设计方法中，考虑感知层面上采用人机联合感知，思维层面上采用人机共同分析，决策层面上采用人机相互协作，充分发挥各自

优势。在系统实现上,考虑系统的适度自动化和人机的合理分工,特别在智能控制部分,要根据各环节功能和环境确定“机主人辅”、“人主机辅”或“人机耦合”等控制策略。要强调人机协作来表现高质量的产品开发,而不是消除人的因素来达到全盘自动化。

知识协同:虚拟产品的开发涉及许多技术和环境的基础数据库和知识库。制造全球自动化的趋势,也要求各种产品开发信息和知识的协同、合作和共享。在产品的开发过程中必须解决数据的更新、版本的升级和知识间的冲突,因而必须有一个机制保障这些数据库和知识库间的协调。

人、技术、组织三者的协同:在产品开发系统中,技术是基本手段,人是主体,组织是反映开发活动中人与人的相互关系。一个真正经济、高效、安全的虚拟产品开发系统,应该是由技术、人和组织三方面高度集成和协同的系统,它既是一个技术系统,也是一个社会系统。

(4) 全生命周期的产品演变仿真和产品开发全过程的活动仿真:全生命周期的产品演变仿真是通过产品的数字模型,反映产品从无到有,再到消亡的整个演变活动,用户和开发者在制造实物之前即可评审其美观、可制造性、可装配性、可维护性、可销售性和环保性能等,从而确保产品开发的一次成功率。

产品开发全过程的活动仿真旨在通过开发活动的数字模型,反映动态联盟组织形式下,产品开发活动的功能行为和运作方式,仿真虚拟产品开发的设备布置、物流系统、资源的利用和冲突以及组织结构、生产活动和经营活动等行为,从而确保产品开发的可能性、合理性、可靠性、经济性、高适应性和快速响应能力。

由于系统庞大和复杂,被求解问题越综合、越形象、越直觉、越模糊,则用户和计算机系统之间的鸿沟就越宽,而实际上人们从主观愿望出发,十分迫切地想和计算机建立一个和谐的人机环境,使人们认识客观问题时的认识空间与计算机处理问题时的处理空间尽可能一致。为了适应 21 世纪信息的需求,人们不仅仅要求能通过打印输出或显示屏幕上的窗口,从外部去观察信息处理的结果,而且要求能通过人的视觉、听觉、触觉、嗅觉以及形体、手势或口令,参与到信息处理的环境中去,从而取得亲身的感受。因而信息处理已不再建立在一个单维的数字化信息空间上,而是建立在一个多维化的信息空间中,建立在一个定性和定量相结合、感性认识和理性认识相结合的综合集成环境中。

(5) 各种支持系统的开发:在产品开发过程中,许多环节的功能或作用能通过模型化或其他形式化的方法和手段表现出来,但决策环节有着较多模糊的因素和机理,目前还不能用形式化的方法进行描述。另外在开发活动中环境、组织等方面还存在许多随机和突发的事件,因而虚拟产品开发系统中必须有各种支持系统来支撑,如产品设计支持系统、装配支持系统和测试支持系