

工业革命与制造变革驱动了数字化设计与智能制造的发展。本章首先介绍工业革命与制造变革，在介绍产品设计流程及成本关系的基础上，阐述产品数字化设计的过程以及产品数字化开发的三个阶段，然后介绍产品全生命周期管理（PLM）的概念、内涵、管理功能以及相关软件，最后是数字化设计与制造相关技术及其应用。

### 3.1 工业革命与制造变革

人类的文明史也是一部制造业的发展与进步史，如图3.1所示，从18世纪至今人类经历了四次工业革命，从工业1.0的机械化，到2.0的规模化，到3.0的自动化，再到4.0的智慧化，每一次工业革命都带来了制造业的变革。



视频讲解

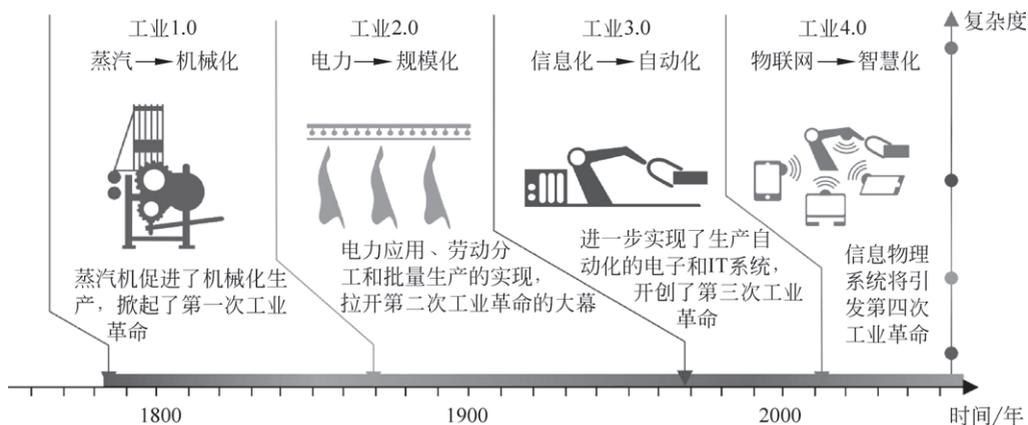


图3.1 工业革命的发展历程

#### 3.1.1 工业革命的发展历程

##### 1. 第一次工业革命

17世纪以后，资本主义开始在英、法等国萌芽，商品生产与流通开始成为社会关注的问题。随着煤、金属矿石需求量和开采量的不断增加，仅依靠人力和畜力已不能

满足生产需求，动力开始成为生产中的瓶颈环节。为此，英国人开始将纺织、磨粉等工厂设在河边，利用水轮来驱动机械化工作。但是，水力驱动受到很多因素的制约，限制了它的使用。

18世纪初，英国工程师托马斯·纽科门（Thomas Newcomen，1663—1729）在前人工作的基础上发明了大气压力活塞式蒸汽机，用来抽取矿井中的积水。但是，这种蒸汽机存在消耗燃料多、热量浪费大、工作效率低、体积庞大和只能做简单的往复式线性运动等缺点。

18世纪60年代到80年代，英国工程师詹姆斯·瓦特（James Watt，以下简称瓦特，1736—1819）针对当时蒸汽机存在的问题和不足，持续对蒸汽机的原理、结构、材料和工艺等进行改良，先后发明了单动式蒸汽机、复式蒸汽机（也称万能蒸汽机）和高压蒸汽机。瓦特发明的蒸汽机耗煤量少，功效得到很大提高。蒸汽机通过煤的燃烧获得大小可控的动力，极大地促进了机器的普及和工厂生产，使工业技术出现飞跃式发展。

蒸汽机的发明解决了工业发展中的动力问题，从而根据需要建立工厂，不再受河流等自然条件的限制。蒸汽机的发明是第一次工业革命的重要标志，人类开始进入蒸汽时代。

由此导致深刻的社会变革，主要表现在：以机器生产逐步取代手工劳动，以大规模工厂化生产取代个体手工生产，由工厂手工业向机器大工业转变。高耸入云的烟囱、体积庞大的厂房以及隆隆轰鸣的机器，打破了人类长久以来的田园生活，这些国家开始从传统的农业社会向现代工业社会转变。

第一次工业革命不仅是生产方式和科技的革命，也是一场深刻的社会关系和生产组织变革。在自然经济和手工业生产方式中，人们主要凭经验管理生产。第一次工业革命之后，生产力得到解放，传统的管理方法已难以满足社会需要。

1776年，英国哲学家和经济学家亚当·斯密（Adam Smith，1723—1790）出版了《国富论》（*The Wealth of Nations*）一书。该书阐述了欧洲产业增长和商业发展的历史，提出了“劳动专业化分工”的概念，成为推动工业革命的重要力量。此外，该书还首次提出“市场经济是由‘看不见的手’自行调节”的理论，奠定了资本主义自由经济的理论基础，成为现代经济学的开山之作，也使经济学成为一门独立的学科。与亚当·斯密同时代的学者大卫·李嘉图（David Ricardo，1772—1823）等对工厂制度、工资制度、利润理论的建立起到积极的推动作用。他们都是第一次工业革命中里程碑式的人物。

## 2. 第二次工业革命

机器对动力的需求是第一次工业革命的重要驱动力，其间的发明创造多来自经验丰富的工匠和技术人员，科学并未对工业进步产生太大影响。1870年前后，社会进步

体现出两个重要趋势：一是科学开始影响工业；二是大批量生产技术不断得到改善并且在工业生产中得到应用。有关工业问题的研究不再仅仅是在发明者的作坊里，训练有素的科学家开始在装备着昂贵仪器和装置的实验室里对特定的问题进行系统研究。

第二次工业革命是指1870年至1914年的工业革命。其中，在西欧（包括英国、德国、法国和丹麦）和美国以及1870年后的日本，工业得到飞速发展。第二次工业革命紧跟着18世纪末的第一次工业革命，并且从英国向西欧和北美蔓延。第二次工业革命以电力的大规模应用为代表。

1866年，德国人西门子制成了发电机；到19世纪70年代，实际可用的发电机问世。电力开始用于带动机器，成为补充和取代以蒸汽机为动力的新能源。随后，电灯、电车、电影放映机相继问世，人类进入了“电气时代”。

科学技术应用于工业生产的另一项重大成就是内燃机的创新和使用。19世纪七八十年代，以煤气和汽油为燃料的内燃机相继诞生，19世纪90年代柴油机创制成功。内燃机的发明解决了交通工具的发动机问题。19世纪80年代德国人卡尔·弗里特立奇·本茨等人成功地制造出由内燃机驱动的汽车，内燃汽车、远洋轮船、飞机等也得到了迅速发展。内燃机的发明推动了石油开采业的发展和石油化工工业的生产。1870年，全世界生产大约80万吨石油，而1900年的年生产量猛增到了2000万吨石油。

科学技术的进步也带动了电信事业的发展。19世纪70年代美国人贝尔发明了电话，19世纪90年代意大利人马可尼试验无线电报取得了成功，这些都为迅速传递信息提供了方便。世界各国的经济、政治和文化联系进一步加强。

第二次工业革命期间，福特在汽车的生产方式、生产技术、企业运作管理和商业模式等方面取得成功，并在世界范围内掀起了大批量生产的产业革命。他为汽车产业和制造业的发展做出了巨大贡献，主要表现在以下几方面。

（1）简单化设计和标准化生产。福特认为，必须使汽车构造简单化。只有简单，汽车才可能轻便，才容易修理。此外，简单的设计易于大批量生产。福特还认为，当产量增大时，生产成本就会降低，汽车价格就可以更加低廉，才会有更多的人购买。福特还将惠特尼的零件标准化和互换性的生产方法用于汽车制造中，将T型轿车的主要零部件设计成统一规格，实现零件的标准化和总成互换。

（2）流水线生产方式。在福特之前，汽车制造（装配）均是在固定工位上完成的，由一个工人完成从原材料到整车的的所有组装工作，作业效率低，生产周期长，生产组织困难。原始的组装技术根本无法满足大规模生产的需求，并导致汽车价格居高不下。为此，福特开始思考提高生产效率的方法。

福特在参观屠宰场时发现，整个屠宰过程可以由多名工人分工合作且每名工人只需进行最简单的操作就可以快速完成。于是，福特将这种具有连贯性和高效的流水作

业方式运用到汽车制造中，由机械传送装置运送零件和工具，工人只需在各自工位上完成简单和规定的操作，从而极大地提高了汽车的生产效率。

1913年，世界上第一条刚性汽车装配线在福特公司诞生。在采用流水线生产方式后，每辆汽车底盘的装配时间从12小时减少到1.5小时，T型轿车的售价从1908年的850美元降到1916年的360美元，再到1929年的260美元。之后，福特公司连创世界汽车工业的生产纪录：1920年2月7日，每分钟生产一辆汽车；1925年10月30日，10秒生产一辆汽车。福特T型轿车因便宜、实用和易于操作，迅速占领了市场。

福特T型轿车是世界上第一种以大量通用零部件和大规模流水线装配作业方式生产的汽车。它首次实现了刚性流水生产，奠定了现代大规模生产的技术基础。福特也因此被称为现代“流水装配线之父”。

### 3. 第三次工业革命

第二次世界大战前后，出于战争的目的和国家之间经济竞争的需要，人类在核能、电子计算机、微电子、航空航天、生物工程等领域相继取得重大突破。它们在更广阔的领域和更深的层次上影响着社会的发展和人们的生活，市场需求呈现出新的变化，制造技术产生了新的飞跃。这是人类文明史上又一次根本性变革，人们将之称为第三次工业革命或信息革命。

20世纪70年代以后，集成电路（integrated circuit, IC）、个人计算机（personal computer, PC）、互联网（internet）、纳米技术（nanotechnology）以及知识经济（knowledge economy）等迅速崛起，人类开始进入信息社会（information society）。

信息化是第三次工业革命取得的标志性成果。集成电路、计算机软硬件、网络技术和各类自动化装备在制造业中得到广泛应用，极大地提高了制造与管理的效率，改变了制造业既有的技术体系与管理架构。2002年11月，中国共产党第十六次全国代表大会报告指出：“实现工业化仍然是我国现代化进程中艰巨的历史性任务。信息化是我国加快实现工业化和现代化的必然选择。坚持以信息化带动工业化，以工业化促进信息化，走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子。”

### 4. 第四次工业革命

工业革命深刻地改变了人类乃至地球的本来面貌。在工业化进程中，物质、能源和信息的关系日趋紧密，产品制造过程中的人财物、产供销、软硬件等要素的联系越来越密切，界限越来越模糊，社会变革过程中也不断提出新的技术与管理需求。

随着计算机、互联网、传感器、物联网等技术的成熟与普遍使用，人们开始通过各类终端设备实现信息的互联互通，实现虚拟与现实的有机融合，最终实现万物互联（internet of everything, IoE），给制造业带来了新的发展机遇与挑战。21世纪以来，

从纳米技术到基因测序，从可再生能源到量子计算，从3D打印到工业机器人，从石墨烯到物联网，从无人驾驶到智能制造，人类在众多领域的研究工作中取得突破，横跨制造、材料、能源、信息、物理、生物、自动化等学科，具有多学科多专业交叉、科学与技术深度融合、产学研互动等特征，呈现出与前三次工业革命不同的特质，催生了新一轮的科技突破和产业变革。

### 3.1.2 工业 4.0 与智能制造

德国学术界和产业界认为，前三次工业革命的发生，分别源于蒸汽提供动力基础上的机械化、电力提供扩散基础上的规模化和信息化提供抽象基础上的自动化。

18世纪制造业引入的机械制造设备定义为工业1.0；20世纪初引入的电气化定义为2.0；始于20世纪60年代的生产工艺自动化定义为3.0；当前物联网等数智技术的引入和制造业服务化的深化迎来了以智能制造为主导的第四次工业革命，即“工业4.0”。

工业4.0（industry 4.0）的概念最早出现在德国，于2013年的汉诺威工业博览会上正式推出，其核心目的是提高德国工业的竞争力，在新一轮工业革命中占领先机。随后由德国政府列入《德国2020高技术战略》中确定的十大未来项目之一，后上升为德国的国家战略，旨在支持工业领域新一代革命性技术的研发与创新。德国“工业4.0”战略旨在通过充分利用信息通信技术和信息物理系统（cyber-physical systems, CPS）两者相结合的手段，推动制造业向智能化转型。“中国制造2025”与德国“工业4.0”的合作对接渊源已久。2015年5月，国务院正式印发《中国制造2025》，部署全面推进实施制造强国战略。工业4.0具有以下三方面的特征。

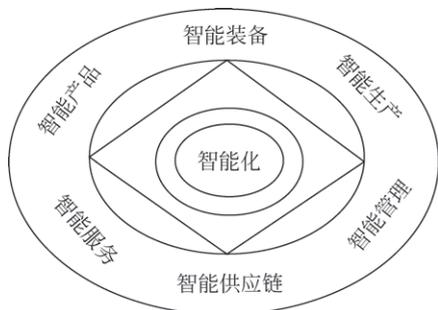
#### 1. 万物互联

工业4.0通过传感器、智能面板、通信系统、终端设备等物联网系统，实现产品、设备、员工、厂商和客户等制造要素的互联互通，为人类展示出一幅全新的工业蓝图。通过将不同类型、不同功能的设备互联，形成智能化生产链；在不同生产链互联的基础上组建智能车间；不同智能车间互联，构建起智能化工厂；不同领域的智能化工厂互联，形成智能化生产制造系统。智能化生产链、智能化生产车间和智能化制造企业既是一个完整、独立的制造单元，又可以根据市场需求完美地匹配组合，以满足顾客的个性化需求。在网络化和智能化的世界里，互联网和物联网将渗透到制造业的所有环节，传统的产业链将被分工重组，既有的行业界限将变迁或消失，新的制造模式、技术方法和管理手段将会层出不穷。

#### 2. 智能化

智能制造（intelligent manufacturing）建立在传感器、CPS和人工智能等技术的基础之上，旨在实现人、设备和产品间信息资源的互通与共享，实现产品设计、生产、管理和服务等环节的贯通融合。智能制造具有自我感知、自主判断、优化决策和自主

执行等能力，可以实现从用户到产品的智能化。智能制造是一个庞大、复杂的系统工程，涉及与制造相关的所有环节，涵盖智能产品、智能装备、智能生产、智能管理、智能供应链和智能服务等内容，如图3.2所示。



智能化制造企业通过智能产品、智能供应链等，利用大数据技术全面分析顾客的习惯、兴趣、爱好、身份、经济条件、生活状态等信息，快速捕捉、挖掘顾客的显性及隐性需求，利用智能装备和智能生产系统快速定制产品和服务，为顾客提供个性化精准服务。

随着工业4.0时代的到来，顾客个性化服务需求急剧增加，大规模生产、大批量销售模式将逐步被柔性化生产、个性化销售所代替，制造企业将向服务型企业转型，生产与服务将加速融合。

### 3. 集成创新

在“工业4.0”时代，制造企业要在激烈的竞争中脱颖而出，集成创新将是一条必由之路。集成是指企业不同应用系统之间实现信息共享，并通过传感器、接收终端、控制系统等实现不同网络体系之间的互联与融合。

集成包括企业内部集成（网络化制造纵向集成）、企业外部集成（业务网络横向集成）、端到端集成（价值链端到端数字化集成）三个层面，如图3.3所示。企业内部集成是将企业内部各环节、层次、部门的信息无缝对接。企业内部集成主要体现在数据、硬件设备、应用系统和产品输出等方面，是智能生产和智能管理的前提与基础。数据和数据库集成是企业内部集成需要首先解决的问题。在此基础上，集成机床、工作站、流水线、计算机等硬件设备。企业外部集成是指跨越企业内部，扩展到不同企业之间的集成，实现大企业之间价值链和信息资源的整合共享，在合作伙伴之间建立

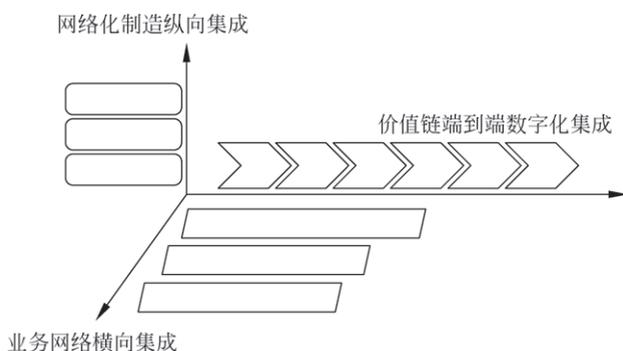


图3.3 工业4.0集成创新的三个层面

起动态联盟，提升产品研发、生产和物流效率，最大限度地满足顾客需求。端到端集成是指整个价值链上各环节的集成。通过整合不同企业的资源，实现产品从研发、设计、制造到销售、使用和维护等环节的无缝对接，实现供应商、制造商、销售商的无缝对接，利用智能化供应链实现统一的管理和服务。

### 3.1.3 工业 5.0

近年来，全球经济发展面临下行压力，中国正以迅猛发展态势追赶世界老牌强国的步伐，世界各国重新认识到制造业在拉动经济增长、创造就业机会等方面的作用。欧洲在这种压力下于2021年1月提出了工业5.0发展概念，试图重振制造业并再次引领全球工业发展潮流。在欧盟这份《工业5.0：迈向持续、以人为本且富有韧性的欧洲工业》报告中提出，工业5.0源于工业4.0，但并非简单延续，而是更加注重社会和生态价值。其要求工业生产必须尊重和保护地球生态，将工人的利益置于生产过程的中心位置，进而使工业可以实现就业和增长以外的社会目标，成为社会稳定和繁荣的基石。

工业5.0概念重点关注三个关键词：工人福祉、可持续性和工业韧性。这与自工业1.0以来追求提高效率、改进质量和降低成本的以系统为本的制造有本质不同，距离德国早在2011年提出的工业4.0已经过去10年之久，工业5.0在欧洲社会被许多学者认为是下一个10年的制造业关键性变革方向。

相对于工业4.0的“数字化”（digitalization）转型趋势，工业5.0开始涉及欧洲工业转型（transforming）、生产流程加速（accelerating）和工人角色改变（changing）。这为全球制造业高端化、智能化、绿色化发展提供历史机遇，也让工业5.0概念呈现出更多落地可能性。

## 3.2 产品数字化开发

### 3.2.1 产品开发基本流程

数字化开发广泛应用具有深远意义，它不仅极大地解放了人的体力劳动，还有效地减轻了人的脑力劳动。它使得以直觉、经验、图样、手工计算、手工生产等为特征的产品传统开发模式逐渐淡出历史舞台。要准确理解产品数字化开发技术的功用和价值，就有必要了解产品开发的基本流程。产品开发通常源于对用户和市场需求的分析。总体上，从市场需求到最终产品要经历产品设计和产品制造两个过程，如图3.4所示。

设计过程（design process）始于对客户需求的分析和对未来市场变化的预测。在获取市场需求之后，还需要进一步收集与产品功能、结构、外观、材料、色彩、性能、配置、制造工艺、生产成本、预计售价、预期产量等相关的信息，了解相关行业发展和产品演化趋势、竞争对手和技术动态，在开展可行性分析与论证的基础上制订



视频讲解

产品开发目标，拟定产品设计方案，设定产品预期功能，确定产品结构、配置及其性能参数，利用数字化设计软件建立零部件和产品的数字化模型，应用数字化仿真等工具完成产品结构、尺寸和性能的分析、评价与优化，提交完整的产品设计文档。

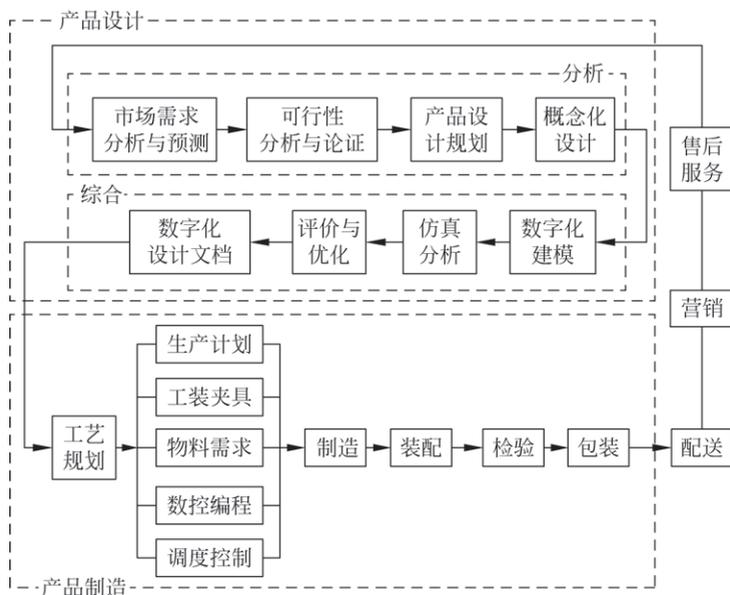


图3.4 产品开发的基本流程

制造过程（manufacturing process）始于产品的设计文档，需要根据零部件结构参数和性能要求，制订合理的制造工艺规划和生产计划，设计、制造或购买相关的加工装备和工装夹具，根据物料需求计划（materials requirement planning, MRP）采购原材料、毛坯或必要的成品零部件。以产品数字化设计模型为基础，根据制造工艺不同，开发模具、定制专用的加工设备、编制相应的数控加工程序，完成零部件的数字化制造和装配。在确保所制造产品的性能指标符合设计要求的基础上，对检验合格的产品进行包装，至此制造阶段的任务基本完成。

### 3.2.2 产品数字化设计过程

设计过程包括分析和综合两个阶段。

#### 1. 分析

分析是早期的产品设计活动，主要任务是确定产品的工作原理、结构组成和基本配置，包括调研市场需求、收集产品的设计信息、完成产品的概念化设计等。分析阶段的重要结果是产品的概念化设计方案。概念化设计是设计人员对产品各种方案进行评估、分析、对比和综合评价的结果，据此勾勒出产品的初步布局和结构草图，定义各功能部件之间内在的联系和约束关系。当设计者完成产品构思后，就可以利用概念

化设计软件和相关建模工具将设计思想表达出来。

产品全生命周期成本主要包括设计成本、制造成本、运行成本和维护成本等。其中，制造成本由劳动力成本（占5%~15%）、材料成本（占50%~80%）和制造过程的运行成本（占15%~45%）等构成。研究表明，设计阶段的实际投入通常只占产品全生命周期成本的5%左右，但是它却决定了产品全生命周期成本的70%~80%。图3.5所示为产品全生命周期与成本之间的关系。因此，设计阶段在产品生命周期中扮演着重要角色。

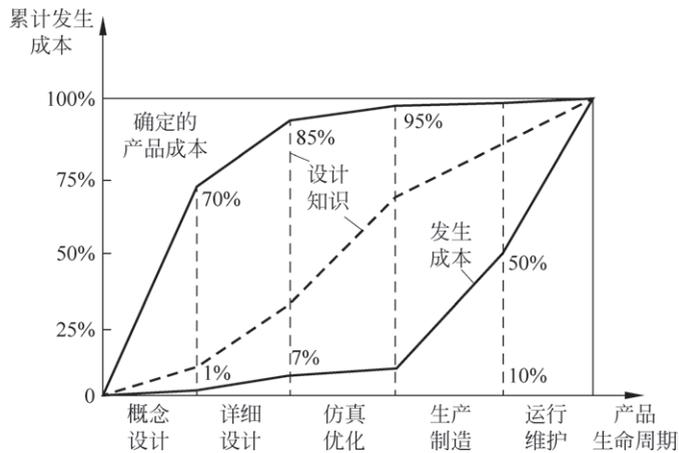


图3.5 产品全生命周期与成本之间的关系

此外，上游设计阶段的失误（设计变更）对产品成本的影响会以逐级放大的形式向下游传播。美国波音公司的统计数据表明，这一逐级放大的比例系数甚至可以达到1:10，如图3.6所示。显然，早期的设计决策是否正确是决定产品开发成功与否的关键因素之一。若因设计方案不合理使得产品的技术性能和经济性存在先天不足，而需要在制造过程中通过更换材料、修改制造工艺、加强成本控制等措施加以挽回，将会付出相当大的代价。因此，设计阶段是控制和降低产品成本的最好阶段。

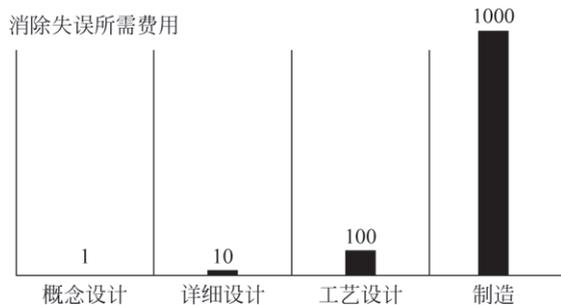


图3.6 设计变更与产品成本关系示意图

此时设计者有很大的自由度来修改、完善设计方案,以便实现产品全生命周期成本的最小化。数字化设计可以为此提供有效的技术支撑。此外,设计师水平对产品性能、成本具有决定性作用。要求设计师不仅要具备过硬的写产品设计、制造相关的专业知识,还应掌握必要的成本分析方法,以便准确评估产品成本,对设计方案做出科学的技术经济性评价,以达到优选设计方案、降低产品成本的目的。

## 2. 综合

综合是在分析的基础上,完成产品的详细设计、性能评价和结构参数优化,并形成完整的设计文档。其中,数字化建模是数字化设计的基础和核心内容。随着设计软件功能的完善,产品数字化建模的效率和模型质量越来越高。设计软件通常会提供颜色、网格、目标捕捉等造型辅助工具,提供各种图形变换和视图观察功能,提供渲染、材质、动画和曲面质量检测功能等。数字化模型为产品性能分析、评价和优化创造了条件。以产品数字化模型为基础,采用优化算法、有限元分析法(finite elements method, FEM)和其他分析工具,可以完成产品形状、结构和性能的分析、预测、评价与优化,并根据分析结果进一步修改和优化产品的数字化设计模型。

仿真分析和优化包括:①应力和强度分析,确定零件强度是否满足要求,产品是否具有足够的安全性和可靠性。②拓扑结构和尺寸优化,确定最佳的截面形状和尺寸,以达到减小体积、减轻重量和降低成本的目的。③装配体设计分析,检查各零件之间是否存在干涉现象,是否能顺利装配和拆卸,是否便于维护等。④动力学和运动学分析,检查产品运动学和动力学性能是否满足规定的要求。⑤制造工艺分析,分析产品及其零部件的制造工艺,确定最佳的制造方法。⑥技术经济性分析,分析产品的性能/价格比是否合理,分析产品的可回收性和再制造性等。

利用计算机仿真技术,可以在计算机中构建数字化的产品虚拟样机(virtual prototype, VP),并利用虚拟样机评价和优化产品的结构、尺寸及其性能,这就是虚拟现实(virtual reality, VR)技术。随着相关理论模型、技术和软件工具的不断完善,虚拟样机与实物样机(physical prototype)的性能和评估效果越来越接近,正在逐步取代传统的实物样机试验,这不仅可以有效地缩短产品开发周期,还有利于提高产品质量,降低开发成本。

此外,以已有产品的实物、影像、数据模型或数控加工程序等信息为基础,采用坐标测量设备、模型重构算法等技术可以获取已有产品的三维坐标数据和结构信息,借助于计算机辅助设计(computer aided design, CAD)软件的相关功能模块,在计算机中快速重建产品数字化模型。在此基础上,完成产品结构、尺寸、形状、制造工艺、材料或性能等方面的改进、完善和创新,在较短的时间里获得与原有产品结构和功能相似、相同甚至更优的产品,这就是逆向工程(reverse engineering, RE)技术。

综上所述，数字化设计就是以新产品设计为目标，以计算机软硬件技术为基础，以产品数字化信息为载体，支持产品建模、分析、性能预测、优化和设计文档生成等相关技术。因此，任何以计算机图形学和优化算法为理论基础、支持产品设计的计算机软硬件系统都可归入数字化设计技术的范畴。数字化设计技术群包括计算机图形学（computer graphics, CG）、计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工程（computer aided engineering, CAE）、逆向工程（RE）和虚拟样机等技术。

### 3.2.3 产品数字化开发的三个阶段

从产品开发的角度，设计过程与制造过程关系密切，两者之间存在密切的双向联系。例如，设计人员在设计产品时，需要考虑产品的制造问题，如零部件的制造工艺、加工的可行性与难易程度、生产成本等；同样地，在产品制造过程中也可能发现设计中存在的问题和不合理之处，需要返回给设计人员以便改进、优化设计方案。显然，只有将设计与制造有机地结合起来，才能获得最佳的开发效率和经济效益。数字化技术为两者的结合和融合提供了良好条件，也具有迫切的信息集成需求。一方面，只有与数字化制造技术结合，产品数字化设计模型的信息才能被充分利用；另一方面，只有以产品数字化设计模型为基础，才能充分体现数控加工和数字化制造的高效特征。

数字化制造技术是以产品制造中的工艺规划、过程控制为核心，以计算机为直接或间接工具来控制生产装备，实现产品数字化加工和生产的相关技术。其中，数控编程、数控机床及数控加工技术是数字化制造的基础，另外还包括成组技术（group technology, GT）、计算机辅助过程规划（computer aided process planning, CAPP）等技术。其中，数控加工是数字化制造中技术最成熟、应用最广泛的技术。它利用编程指令来控制数控机床，以全自动或人机交互方式完成车削、铣削、磨削、钻孔、镗孔、电火花加工、冲压、剪切、折弯等加工操作。

除设计和制造外，产品开发过程中还涉及订单管理、供应链管理（supply chain management, SCM）、产品数据管理（product data management, PDM）、库存管理、人力资源管理、财务管理、成本管理、设备管理、客户关系管理（customer relationship management, CRM）等众多管理环节。这些环节与产品开发密切关联，并且直接影响产品开发的效率和质量。在计算机和网络环境下，可以实现上述管理信息和管理方式的数字化，这就是数字化管理技术。数字化管理不仅有利于提高制造企业的管理效率和质量，也有利于降低管理成本和生产成本。典型的数字化管理系统包括PDM、产品全生命周期管理（product lifecycle management, PLM）、企业资源计划（enterprise resource planning, ERP）、CRM和SCM等。

数字化设计、数字化制造和数字化管理分别关注产品生命周期的不同阶段或环节。



视频讲解

## 3.3 产品全生命周期管理

### 3.3.1 PLM 的概念与内涵

数字化设计与制造的单元技术(如CAX、DFX等)已经在产品开发中得到广泛应用,而各种企业和产品管理模块(如SCM、PDM、CRM等)也受到人们的重视,它们从不同层面提升了企业的竞争能力。但是,如果各单元技术及管理模块相互独立,就会形成“自动化孤岛”和“信息孤岛”,使产品信息和企业资源难以发挥应有作用。单元技术和管理模块的集成、企业内部与合作伙伴之间的集成以及产品全生命周期信息的集成,成为人们关注的问题。

PLM产生于美国汽车公司(American Motors Corporation, AMC)。1985年,AMC希望找到一种可以加快开发过程的方法。时任产品工程和开发副总裁的弗朗索瓦·卡斯坦(Francois Castaing)后来回顾了当时的情况,他指出,为了降低成本,AMC最终采取了两项措施:一是采用CAD,这有助于加快产品研发;二是建了一个集中的数据库,存储所有的设计图和文档。效果是显而易见的,甚至在克莱斯勒收购AMC之后,这种方法推广到了全公司,促使克莱斯勒大幅降低了整体生产成本;据相关统计数据显示,克莱斯勒在20世纪90年代生产成本仅为同行业平均水平的一半。

1983年,罗克韦尔国际公司实现了PDM的初期理念,后来为B1B轰炸机设计提供了PLM系统,当时这个系统名为EDS(engineering data system)。

20世纪80年代中期,产品生命周期成为热点,国际标准化组织(ISO)设立了TC 184/SC 4工作组负责“工业数据”(industrial data)标准的制定工作。该工作组负责了多个标准的制定,包括13584、15531、15926、18629、18876、22745和8000等数据相关标准。其中涉及CAD数据交换标准(standard for exchange of product, STEP),这与ISO 13584关联比较大,该标准由美国商务部下属的NIST负责管理。

1984年,ISO启动产品生命周期系统标准研究工作之后,吸引了全球不少企业参与。ISO的工作早期放到设计和制造应用上,后来很明确聚焦CAD数据交换格式IGES(initial graphics exchange specification,初始图形数据交换规范),推动形成了STEP标准,成为ISO 10303标准体系核心部分。

1994年,ISO TC 184/SC 4发布了10303的部分标准。按照ISO 10303的定义,它是关于产品制造信息的计算机可读的表示和交换。

目前,对PLM还没有统一的定义,以下列举相关企业与机构的观点。

CIMdata的观点:PLM是一种企业信息化战略。它提供一整套业务解决方案,将企业内的人、过程和信息有效地集成起来,支持产品从概念设计到报废的全生命周期,支持与产品相关的协作研发、管理、分发和使用。

Aberdeen的观点:PLM是覆盖从产品产生到报废全生命周期的、开放式和互操作

的整套应用方案和企业信息化环境，它需要有一个记录所有产品信息的、系统化的产品数据知识库。

Collaborative Visions的观点：PLM是一种商业IT战略。它专门解决与企业新产品开发和交付相关的重要问题，以实现产品创新的最优化，改善产品研发速度和敏捷性，增强产品客户化能力，以最大限度地满足客户的需求。企业PLM的组织和实施要围绕以下六种需求来构造。

- (1) 调整 (alignment)。平衡企业在信息化建设的投入。
- (2) 协同 (collaboration)。与业务伙伴交换见解、想法和知识。
- (3) 技术 (technology)。获取新的技术以建立智力资产系统。
- (4) 创新 (innovation)。开发客户驱动的创新产品。
- (5) 机会 (opportunity)。致力于跨学科的集成，寻找产品新生命周期的机会。
- (6) 智力资产 (intellectual property)。将产品知识作为企业的战略财富加以充分利用。

AMR的观点：PLM是一种技术管理战略，它将跨越不同业务流程和用户群的单点应用集成起来，并使用流程建模工具、可视化工具或其他协作技术整合已有的系统。AMR将PLM分为四部分。

(1) 产品数据管理 (PDM)。作为中心数据仓库保存着产品的所有信息，并提供企业与研发、生产相关的物料管理。

(2) 协同产品设计 (collaborative product design, CPD)。利用CAD/CAE/CAM及相关软件，技术人员以协同方式从事产品研发。

(3) 产品资财管理 (product portfolio management, PPM)。提供相关工具，为管理产品资财提供决策支持。

(4) 客户需求管理 (customer needs management, CNM)。获取销售数据和市场反馈，并将之集成到产品设计和研发过程中。

综上，PLM应该包括以下五方面。

- (1) PLM是关于产品数据、信息和知识的。
- (2) PLM关注产品整个生命周期，从最初开始到周期结束。
- (3) PLM不仅是软件或过程，更是一种方法。
- (4) PLM横跨职能的、地理的和组织的边界。
- (5) PLM综合了行为 (实践或方法) 中的人、过程和技术三个要素。

因此，PLM是一个集成的、信息驱动的方法，它由人、过程/实践和技术组成，应用于从设计、制造、配置、维护、服务到最终处理的产品生命周期的所有方面，通过利用产品信息来减少整个企业乃至供应链中时间、能量和物质的浪费。

### 3.3.2 PLM 的管理功能

#### 1. PLM的主要管理功能

PLM模型如图3.7所示。模型的中心是信息核心，其描述了产品生命周期中的所有产品数据和信息，被分散到不同的职能领域和阶段来使用。产品信息并不属于某一个职能领域，而是可用于所有的职能领域。

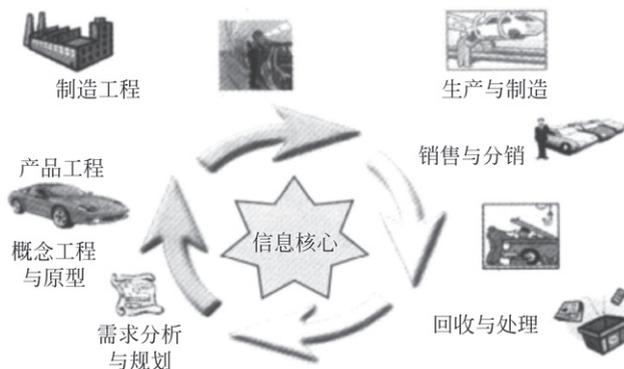


图3.7 PLM模型

图3.7中围绕在信息核心周围的是构成产品生命周期的各个职能领域，这些职能领域就是企业将产品周期分割成规划、设计、制造、支持和处理这五个重要阶段的依据。

(1) 规划。该模型开始于需求分析与规划，这也是任何产品开发的初始步骤。产品必须实现的功能是什么？产品必须满足的需求是什么？这些需求被映射为设计规范。例如一个电动窗户的需求映射为设计规范：一块重 $x$ 千克的玻璃必须能够在 $z$ 时间内升降 $y$ 次；在一些情况下，这些需求可以直接从购买产品的客户那里得到；在另一些情况下，需求将间接地从销售或决定客户购买特定功能产品的企业职能部门中得到。

(2) 设计。上面提到的需求是从概念设计和原型制作开始实施的。由需求分析与规划得到的功能通常能用不同的方法来实现。此外，功能需求也可以用不同的方法进行组合以便用于实现功能的零件数量可以变化。每一个功能可能有它自己的零件，或者一些功能可以组合到单个零件中。此外，不同的技术可以用于实现相同的功能，例如，电力控制可以代替液压控制。

在这个阶段，开始考虑产品的美观。虽然“形状服从功能”是产品设计的基本原则，但差别很大的外形也可以实现相同的功能。汽车和消费品设计者花费大量的精力在设计上，对于相同的功能，设计出形状变化较大的最终产品。然而，设计师工作时，需要确认它们的概念和原型是否满足所有必要的功能需求和尽可能多地满足那些期望达到的功能。当需要折中时，就像他们一直做的那样，概念和原型设计师必须与设计规范开发者共享这些信息。

周期中的下一个步骤是产品工程，就是把这些功能设计和原型转变成准确的设计规范。正是产品工程这个角色在这一阶段完全地确定了产品。概念工程师设计出了产品的总体形状，产品工程师在获得了这个总的形状之后，完全地确定它们的细节。产品工程师必须确保所有不同零件可以装配在一起，形成一个集成的系统，并且这个系统是内在一致的。另外，产品工程师必须对零件和整个产品进行各种测试，如力学的和流体的分析，以确保产品确实能够满足需求。产品工程师还要把这些信息加入产品生命周期模型中。在这一阶段的最后，组成产品的零件在基于数学的模型或CAD规范中完全确定下来。

(3) 制造。当产品完全确定之后，制造工程就要决定怎样制造出产品。必须对设计进行分析，开发工艺清单以确定要完成哪些工序以及按什么顺序去加工所要求的零件，然后必须将这些零件按照确定的顺序装配成一个完整的产品。

在大多数企业中，这将包括三个完全不同的阶段：试件制造、生产调整、批量生产。在试件制造时，有两种情况：在新的工厂中制造或者在已有的工厂中制造。

如果产品是在新的工厂中制造，那么设计阶段将变得更加复杂，因为不仅要设计产品，还要确定制造这个产品所用的工具。制造工程师或者选择满足这些规范的工具，或者向工具制造商发出询价单，要求他们提供制造满足这些规范的工具的报价单。

如果产品是在一个或几个已有的工厂中制造，任务也不会变得更简单。这类似于一个线性规划问题，制造工程师必须决定怎样利用工厂中已有的工具和设备制造零件。在一些情况下，如果一个设计不能用已有的设备制造出来，而另一个等价的设计却可以，这时就必须改变设计或改变工艺单。此外，如果多个工厂有着不同的设备配置或者系统清单，那么工程师的任务就是要确定哪个系统清单最适合零件和产品的制造。

在这个过程中，也许会有一些影响到设计的问题。其中上面已经提到过的就是等价设计问题，一个设计可以被制造出来而另一个却不能。另一个问题是设计出来的产品不能制造。有时候，这个问题十分严重，由于加工问题不能解决，因此必须返回到设计。另一些问题是出现在制造过程中的。最常见的问题是工件表面上钻有孔，而在设计中并没有这些孔，原因是制造小组需要钻出工艺孔以便安装一个螺栓或紧固件。这听起来好像是合理的，但是钻孔可能会改变这一表面的强度特性。因此不能完全依赖于分析，因为设计工程师并不知道它的存在。

生产与制造阶段是产品批量生产的阶段，经验曲线表明在此过程中需要大量的实验。生产与制造人员拿着产品计划和工艺清单，不断地修改和完善它们，以便能够使用最少的资源制造零部件和产品。

(4) 支持。销售与分销部门能使用产品信息达到以下目的：①告诉买主和产品使用者有关产品的功能和设计规范。②保证产品的性能达到期望的设计规范。产品使用

者需要通过产品信息了解怎样获得需要的功能（如按下按钮来调整座位）。在产品出现故障或者失效时，与产品制造商有关的或者独立的服务部门也需要产品信息来维护产品。

产品生命周期的这一部分也是产品信息一个潜在的丰富资源。产品在使用中实际运行情况如何是确定产品设计是否正确的最有用的信息。返修数据以及监控系统收集到的数据都是关于产品是否按期望执行其功能的重要信息。

（5）处理。产品生命周期的最后阶段是处理与回收，它结束了产品的整个生命周期。有关产品是如何设计的以及零部件是如何组装的信息对有效的回收与处理十分必要。有关产品是否能够回收的信息对以后的产品设计也是十分重要的。

在信息核心的基础上，这一循环随着产品的下一个版本再次开始。PLM模型显示了这一顺序过程，它反映了人们是怎样看待产品生命周期的。现实的情况有一点混乱。设计和制造职能通常需要反复迭代设计方案，使其成为一个既能满足功能需求又能以合理的成本被实际制造出来的解决方案。此领域的应用经验能够指出新产品和已有产品中需要被确定的主要问题。

然而，尽管存在这些问题，PLM模型还是一个很好的模型。它反映了产品生命周期中各个独立的阶段，这些阶段有相对的顺序，产品信息核心对于产品的有效开发和利用是必需的。产品信息需要在整个产品生命周期中开发和利用，而不被时间或职能领域分割。

## 2. PLM与PDM

如图3.8所示，PLM与PDM的区别与联系主要包含以下几方面。



图3.8 PLM与PDM的区别与联系

（1）PDM涉及从产品概念设计到样机试验阶段的产品数据信息的管理；PLM涵盖从产品规划、设计、制造、使用、报废乃至回收的全部过程，并向前延伸至CNM和SCM，向后延伸至客户关系管理（CRM），从而形成包括产品全生命周期所有信息的管理。

（2）PDM注重产品开发阶段的数据管理，PLM关注产品全生命周期内数据的管理。

（3）PDM侧重于企业内部和产品数据的管理，PLM则强调对支持产品全生命周期

的企业内部以及跨越企业的资源信息的管理及利用。

(4) PDM是以文档为中心的研发流程管理，主要通过建立文档之间刚性的、单纯的连接来实现；PLM则力图实现多功能、多部门、多学科以及与供应商、销售商之间的协同工作，需要提供上下文关联式的、更具柔性的连接。

### 3. PLM与ERP

#### 1) PLM与ERP的比较

关于PLM，一个自然的和常见的比较就是同企业信息化的另一个重要方法ERP的比较。如果有了ERP系统，是否还需要PLM？PLM和ERP是相互竞争的吗？PLM和ERP如何一起工作？

要比较ERP和PLM，首先就要先了解企业的结构。大部分现代企业都被分成几个职能部门，最通常的职能部门是设计和开发、工程、生产、销售和服务，以及处理和回收。除了划分成这些职能部门外，企业还可以划分成知识领域。知识领域是指那些具有共同主题的事物的不同知识范围。企业中最常见的知识领域是关于产品、客户、员工和供应商的知识。其中，产品知识涉及企业拥有的有关产品的所有信息：产品怎样设计、怎样制造以及需要具备什么功能等。客户知识涉及与客户有关的知识：客户的需求、他们的商务程序、决策方式。员工知识涉及员工的专业领域知识：员工的工作过程和其在某领域的专业知识。最后，供应商知识涉及供应商的专业知识：供应商能提供的产品、他们做生意的方式、工作质量、可靠性和其他相关知识。

如果对应知识领域来划分职能领域（见图3.9），就可以形成一个以职能领域为纵轴、知识领域为横轴的矩阵。定义的产品生命周期管理包含产品知识领域，贯穿所有的职能领域，如图3.9中竖条所示。产品生命周期管理由设计与开发阶段、工程阶段、生产阶段、销售与服务阶段和回收阶段中所涉及的所有产品信息组成。显然，PLM对应于产品知识领域，并且包含企业的所有职能领域。

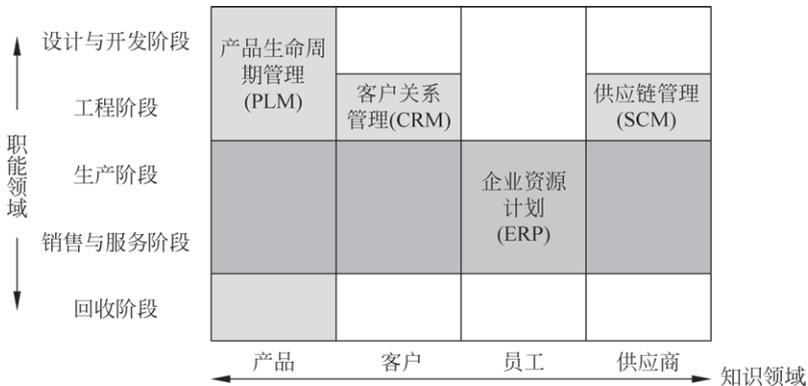


图3.9 PLM与ERP、CRM、SCM等的比较

ERP则相反，如图3.9中横条所示，ERP贯穿所有的知识领域：产品、客户、员工和供应商知识领域，但仅仅集中在生产、销售和服务职能领域上。ERP主要是基于业务的，它关注的是有关产品、客户、员工和供应商业务信息的获取，并跟踪这些信息以产生一个完整的订单，获得利益。

就这一点来说，ERP关注的职能领域较窄，但牵涉企业中较多的知识领域。它关注最终的结果，产生一个将产品或服务交付给客户的相关业务。然而，正如人们所看到的，ERP和PLM在生产、销售和服务领域中所涉及的信息有相互重叠的地方。由于ERP是横向的，因此它也与SCM、CRM相重叠。但是同样，CRM和SCM应用和系统涉及的知识领域比ERP系统深得多。

另一种研究PLM与ERP之间异同的方法是查看它们所涉及的信息粒度。图3.10显示了一个企业信息粒度增长的矩阵。

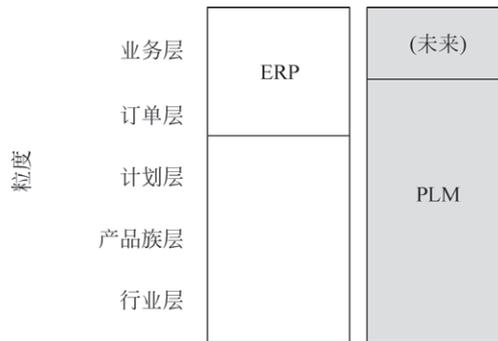


图3.10 PLM与ERP在粒度上的比较

信息粒度的最小层是业务，基于业务的系统只处理手上的特定业务。一个业务像一个事件一样开始和结束，然后在系统中处理。沿粒度增大方向，业务成为订单的一部分。对应于一个订单要处理和装载多个不同的业务。

信息粒度上的下一刻度是计划。计划是指对某一特定类型产品的所有产品的装运活动。这一类型的产品通常被称为型号，该型号有很多的情况称为型号系列。因此，对于如有关某一汽车型号的计划可能要执行一年或几年。一个计划也可以专注于喷气式战斗机，就像洛克希德·马丁公司的联合攻击战斗机（JSF）计划。该计划不仅包括一个喷气式战斗机型号，还包括该机型用于空军和海军的改装型号。随着粒度的增加，向产品族移动。产品族是在定义上相似但在很多方面都不相同的产品。一个卡车族在生产线上可能不仅有若干不同的型号，而且在一个公共的平台上生产，这个平台有着不同的名称但属于同一产品族。最后是行业，基本上是具有共同技术的产品族向未来的延续。

正如从图3.10所看到的，ERP主要涉及的是业务和订单。一旦一个订单停止，ERP系统将处理与这个订单相关的业务，但绝对不会超出此订单的范围。另外，PLM的粒度涉及的是用于产品的订单，并且扩展到计划，甚至产品族和整个行业。此外，相信PLM未来的定义会延伸到单个业务，作为现成的（as-built）。在PLM中每个产品将被系列化或准系列化，以便对每一个产品的跟踪可以贯穿其整个生命周期，并且反映其变化。从图3.10可以看出PLM和ERP是相互补充的系统。

图3.11中，现有ERP借助计划材料表，逐渐涉及计划层/产品（型号）系列层和产品族层，但仍无法有效处理行业层次的战略管理。现有PLM主要涉及用于产品的订单并扩展至计划层/产品（型号）系列层和产品族层，但涉及行业层和业务层信息少。

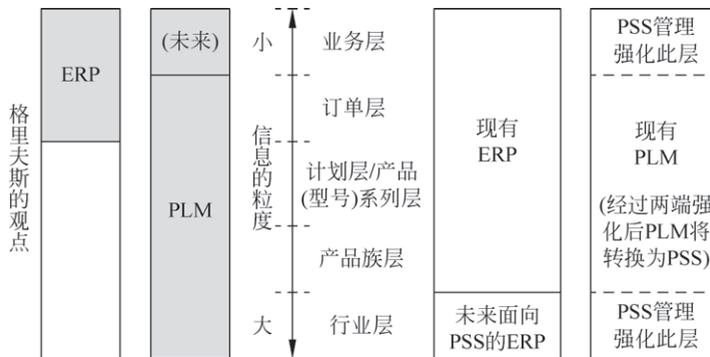


图3.11 面向产品服务系统的PLM与ERP比较

鉴于诸多与客户交互的服务具有不可存储性和不可分离性，融合服务的产品服务系统（product service system, PSS）管理必将强化业务层的信息处理。鉴于PSS管理中对战略生命周期和可持续发展的更多关注，未来PSS管理必将强化行业层信息处理。

对制造企业可持续发展的管理需求，必将引发对企业产品服务系统的信息化管理需求；相应未来面向企业产品服务系统管理的ERP需扩展至行业层，才能真正解决现有ERP管理缺乏管理可持续发展战略问题的能力。

## 2) PLM与ERP系统的集成

PLM系统是企业信息化系统和数字化转型的数据源头，企业资源规划（ERP）系统和制造执行系统（MES）是企业生产运营核心管理系统。PLM与ERP和MES的集成是提高企业整体业务协同效率和、仓储物流管理（WMS/WCS）、人事一体化管理系统（HR/OA/费控）、SRM系统、CRM系统、客户服务管理（MRO）系统的整合，以PLM系统为平台，统筹几大业务系统，有效管理企业的有形无形资产。

PLM系统可通过集成为用户ERP系统提供主物料、结构、设计变更和设计文档等信息和数据。可采用统一数据传递格式完成PLM和用户ERP之间的集成。提供统一数

据传递格式将所管理的设计产品数据传递给ERP系统使用。还包括零部件表（bill of material, BOM）和变更信息。PLM系统和用户ERP之间传递的主要数据如图3.12所示（以西门子公司为例）。

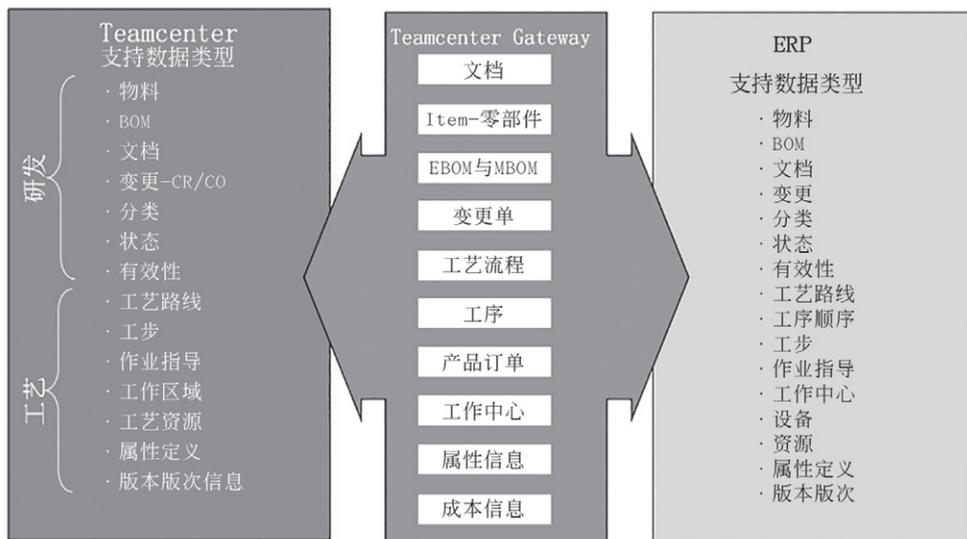


图3.12 PLM与ERP的数据集成

#### 4. PLM与MES

PLM系统实现与MES的集成，支持将工艺信息传递至MES，如自动推送产品物料清单、产品工序清单、工艺变更数据、SOP、工艺参数等信息，为MES提供现场作业的准确指导标准，如图3.13所示。

PLM系统传递给MES的数据主要有BOM信息、工艺规程、材料和产品标准。

（1）BOM信息。在工艺设计系统中完成的设计BOM需要通过通用数据网关传输进入MES用于装配作业和配料，BOM清单包括的关键数据包括物料名称、物料代号、规格型号和BOM版本对应的装配物料的名称、代号、规格和数量及装配工位等，通过通用网关提供的数据对应功能，可实现各关键字段之间的对应逻辑关系建立，实现BOM数据的核对和传递，并在MES中完成确认。

（2）工艺规程。通过通用网关实现工艺设计系统中各类工艺规程信息在MES的传递和管理等，传递的工艺规程信息包括版本号、工序号、工序名称、工序逻辑、工序物料、单台数量、设备编号、设备名称、工装具编号、工装具名称等，MES将基于此工艺规程文件完成生产执行。

（3）材料。通过接口将材料基础信息传输到MES，实现材料号、名称、规格、类型等信息在MES中的对应，提供材料出库使用依据。

(4) 产品标准。通过接口将产品标准等信息导入MES，实现技术要求、技术参数、公差等信息在MES中的使用指导加工。

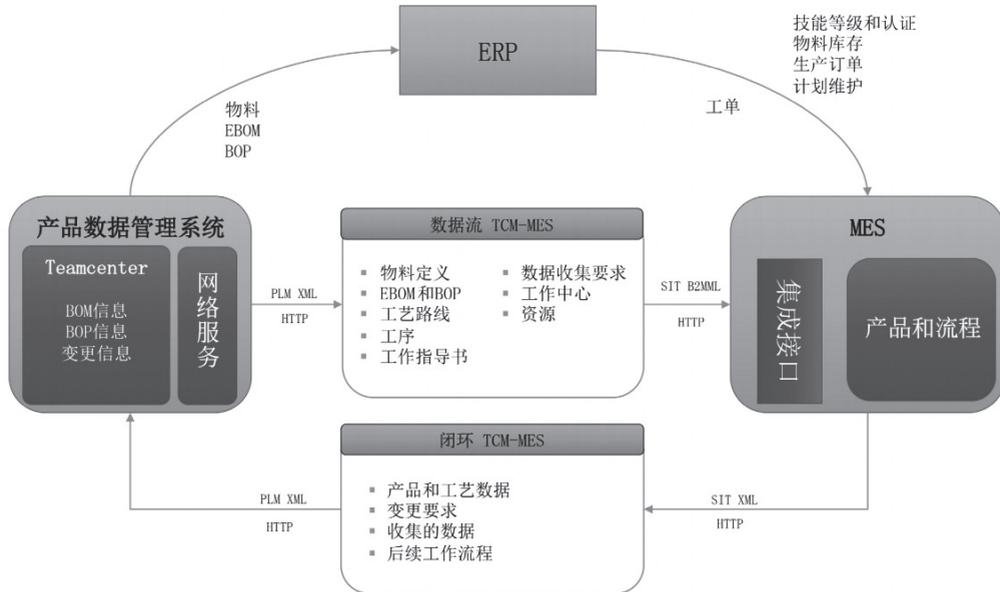


图3.13 PLM与ERP和MES的集成

### 3.3.3 PLM 软件介绍

当前，总体上来说，比较常用的PLM软件可以分为以下两种类型。

#### 1. 以PDM为中心的PLM

以数字化开发及PDM软件为核心，并集成部分ERP功能的PLM软件有Teamcenter和CATIA等。PDM系统以BOM作为产品管理的中心，对设计信息进行一元化的管理；最近，不仅是与产品设计相关的信息，与设计产品制造方法的工厂设计相关的信息也能够进行一元化管理，从着手设计直到开始量产为止的所有必要信息都可以进行一元化管理，如图3.14所示。这类软件具有强大的产品数字化开发和产品数据管理能力，是以设计现场的业务效率化为目的、以产品开发为导向的PLM产品。以PDM为中心的PLM主要在以飞机和汽车、家电产品为代表的装配制造行业中应用。

#### 2. 以ERP为中心的PLM

以ERP软件为核心，通过增加协同工作功能的PLM软件有SAP、Baan和Oracle等公司的产品。以ERP为中心的PLM以实现经营信息的“可视化”为目的，旨在实现贯穿产品整个生命周期的信息管理。这类软件以资源管理和组织计划为基础，注重制造业的流程配置，能灵活运用ERP的优势，将产品信息和成本信息紧密相连。因此，能

够将计划管理及设备管理、销售及保养服务的信息与商品（产品）开发过程关联起来，轻松获取产品开发的投资情况及整个生命周期的收支情况等经营管理层所必需的信息，如图3.15所示。以ERP为中心的PLM主要在石油化学产业、制药及食品、日用品产业中应用。

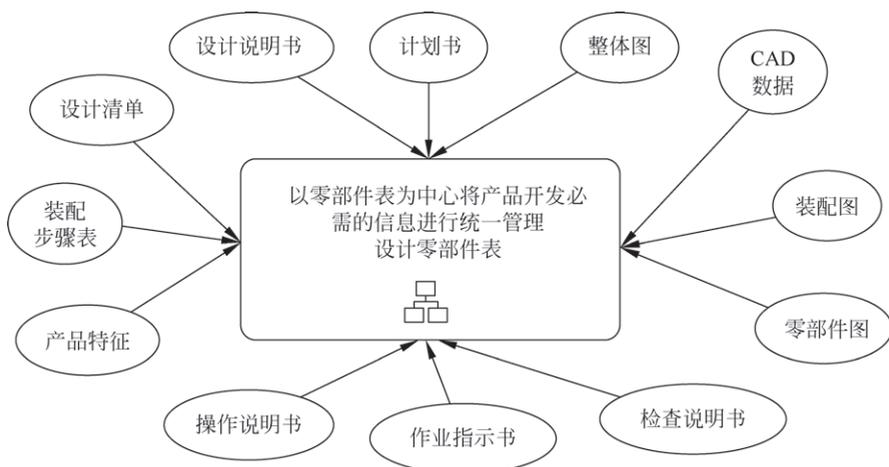


图3.14 以PDM为中心的PLM

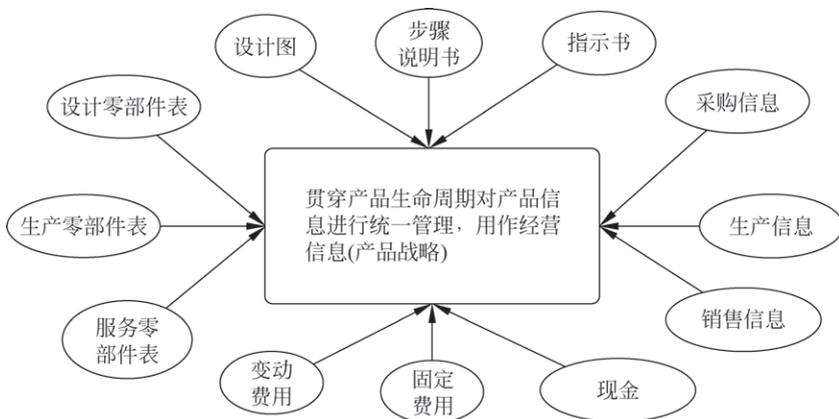


图3.15 以ERP为中心的PLM



视频讲解

### 3.4 数字化设计与制造技术

#### 3.4.1 数字化设计技术

数字化设计是数字化技术与产品设计相互融合的产物，其中，数字化是将产品设计的相关信息以二进制、数字的方式加以表达和呈现，其输出是产品的数字化模型。

产品造型也称产品建模，它已经以数字化方法在计算机中表达产品的形状、属性及其相互关系，在计算机中模拟产品的特定状态，以产品的数字化模型信息为基础，可以完成结构优化设计、运动学和动力学分析、装配和干涉检查、数控加工程序编程等。

### 1. 计算机辅助设计

AutoCAD (autodesk computer aided design) 是计算机辅助设计软件提供商 Autodesk (欧特克) 公司的产品，AutoCAD 是一款自动计算机辅助设计软件，该软件作为 CAD 工业的旗舰产品，用于二维绘图、设计文档和基本三维设计，广泛应用于电子、机械、建筑、航空等行业。AutoCAD 的主要功能有以下几方面。

#### 1) 绘制与编辑图形

AutoCAD 的“绘图”菜单中包含有丰富的绘图命令，使用它们可以绘制直线、构造线、多线段、圆、矩形、多边形、椭圆等基本图形，也可以将绘制的图形进行填充形成面域，再加上“修改”菜单中的相关命令，便可以绘制出多种二维图形。

对于一些二维图，通过拉伸、设置标高和厚度等操作就可以轻松转换为三维图形。使用“绘制”“建模”命令中的子命令，用户可以很方便地绘制圆柱体、球体、长方体等基本实体以及三维网格、旋转网格等曲面模型。同样再结合“修改”菜单中的相关命令，还可以绘制出多种复杂的三维图形。

#### 2) 标注图形尺寸

尺寸标注是向图形中添加测量注释的过程，是整个绘图过程中不可缺少的一步。AutoCAD 的“标注”菜单中包含了一套完整的尺寸标准和编辑命令，使用它们可以在图形的各个方向上创建各种类型的标注，也可以快速地创建符合行业或项目标准的标注。

标注显示了对对象的测量值，对象之间的距离、角度或者特征与制定原点的距离。在 AutoCAD 中提供了线性、半径和角度三种基本的标注类型，可以进行水平、垂直、对齐、旋转、坐标、基线或连续等标注。此外，还可以进行引线标注、公差标注，以及自定义粗糙度标注。标注的对象可以是二维图形或三维图形。

#### 3) 输出与打印图形

AutoCAD 不仅允许将所绘图形以不同样式通过绘图仪或打印机输出，还能够将不同格式的图形导入 AutoCAD 或将 AutoCAD 图形以其他格式输出。因此，当图形绘制完成之后可以使用多种方法将其输出。例如，可以将图形打印在图纸上，或创建文件以供其他应用程序使用。

#### 4) 其他功能

(1) 具备缩放、平移等动态观察功能，并具有透视、投影、轴测、着色等多种图形显示方式。

(2) 提供栅格、正交、极轴、对象捕捉及追踪等多种辅助工具，保证精确绘图。

(3) 提供图块及属性等功能, 便于制作图形数据库, 大大提高绘图效率。

(4) 利用参数化设计功能, 约束图形几何特性和尺寸大小。

(5) 利用测量工具, 可以查询图形的长度、面积、体积、力学等特性。

(6) 提供了样板图技术、CAD标准、设计中心、外部参照、光栅图像、链接与嵌入、电子传递等功能, 以规范和协调设计, 并共享AutoCAD图形数据。

(7) 提供多种软件的接口, 可方便地将设计数据和图形在多个软件中共享, 进一步发挥各个软件的特点和优势。

(8) 具备强大的用户定制功能。用户可以方便地将图形界面、快捷键、工具选项板、简化命令、菜单、工具栏、填充图案、线型等改造得更易于使用。

(9) 具有良好的二次开发性。AutoCAD提供多种方式, 以使用户按照自己的思路去解决实际问题; AutoCAD开放的平台使用户可以用AutoLISP、ARX、VBA、.NET等语言开发适合特定行业使用的CAD产品。

## 2. 虚拟样机

早在1985年美国麻省理工学院(MIT)就开始进行虚拟环境的正规研究, 建立了一种虚拟环境下的对象运动跟踪动态系统。而机械工程中的虚拟样机技术又称为机械系统动态仿真技术, 是20世纪80年代随着计算机技术发展而迅速发展起来的一项计算机辅助工程(CAE)技术, 从国内外对虚拟样机技术的研究可以看出, 虚拟样机技术没有一确切的概念, 不同应用领域中虚拟样机的定义也不尽相同。

在建模和仿真领域比较通用的关于虚拟样机的概念是美国国防部建模和仿真办公室(DMSO)的定义。DMSO将虚拟样机定义为对一个与物理原型具有功能相似的系统或者子系统模型进行的基于计算机的仿真, 而虚拟样机则是使用虚拟样机来代替物理样机, 对候选设计方案的某一方面的特性进行仿真测试和评估的过程。工程师在计算机上建立样机模型, 对模型进行各种动态性能分析, 然后改进样机设计方案, 用数字化形式代替传统的实物样机试验。

运用虚拟样机技术, 不仅可以减少产品研发成本, 明显提高产品质量, 提升产品的系统性能, 获得更优化和创新的产品, 同时, 也有助于企业做出前瞻性的决策, 实现产品总体优化, 进而赢得市场和用户。图3.16所示为基于虚拟样机的汽车数字化开发。

## 3. 基于模型的产品定义

20世纪90年代之后, 基于模型的产品定义(model-based definition, MBD)成为数字化设计领域的前沿研究课题。MBD的核心是产品三维几何模型, 除此之外, 与产品相关的尺寸、公差、材料、工艺、属性、注释等信息都附着在三维模型中。MBD改变了原来用三维实体模型描述产品几何形状, 用二维工程图样定义尺寸、公差和工艺信息的传统产品数字化定义方法, 彻底摒弃了以工程图样为主、以三维实体模型为辅

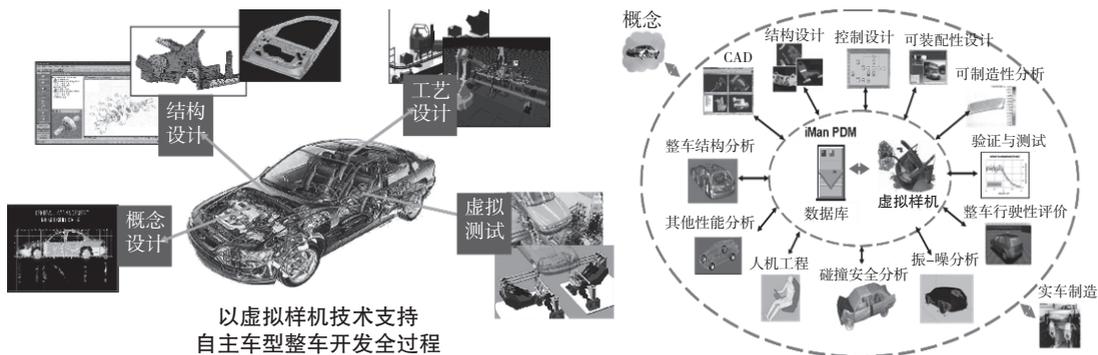


图3.16 基于虚拟样机的汽车数字化开发

的产品制造流程。三维模型成为生产制造过程中的唯一依据，实现了设计、工艺、制造、装配、检测等流程的高度集成，开创了数字化设计与制造的新纪元。

单一数据库是MBD技术的基础，它有助于消除传统模式中三维模型与二维图样之间可能存在的信息冲突，提高了信息传递的效率和质量。此外，以MBD为基础，可以建立涵盖产品全生命周期以及整个企业和供应链体系的集成化、协作化的开发环境，有效缩短产品研发周期，提高设计质量和生产率。

美国波音公司在波音787客机的研制过程中全面采用MBD技术，将设计信息和产品制造信息（product manufacturing information, PMI）定义到三维数字化模型中，彻底摒弃二维图样，以三维标注模型为制造依据，开创了大型、复杂机电产品数字化设计与制造的崭新模式。之后，众多企业开始将PMI三维标注模型作为单一数据源，贯穿产品研发的各个环节，推动三维模型在产品研制各阶段的应用，优化企业的业务流程。

2009年12月25日，我国自行研制、具有自主知识产权的大型喷气式客机C919机头工程样机在上海交付，标志着国产大型客机的研制工作取得重要的阶段性成果。该机头工程样机在研制过程中采用先进的材料和制造工艺，全面应用MBD技术，通过全三维数字化设计和模块化管理，实现了产品全关联设计，仅用半年时间就完成了样机的设计与制造。

全三维、无纸化是基于MBD产品数字化开发模式的核心所在，它是对以“三维模型+二维图样”为特征的传统数字化开发模式的根本性变革。其影响不仅涉及产品设计方面，还涵盖工艺规划、产品制造和检测等业务环节。它给供应商和合作伙伴带来了新的体验，也提出了新的要求。MBD技术的出现对产品开发模式产生了深远影响，主要体现在以下五方面。

#### 1) 产品设计

MBD三维模型涵盖产品研制和生产过程中的相关信息，包括几何模型、公差、尺

寸、材料、工艺、属性、注释等。通过对三维模型信息的管理，可以有效地提高作业质量和效率。MBD模型不仅反映产品的几何形状和功能需求，还包含产品的加工工艺和制造信息，可以实现产品设计、工艺规划和生产制造的并行与协同。此外，以MBD模型为基础，由基于二维图样的审核转变为基于三维模型的审核、批阅和进度跟踪，改变了传统的设计方案审核模式。

### 2) 工艺规划

传统的工艺规划是基于二维文档的、卡片式的工艺设计方式。以MBD三维模型为基础，工艺规划转变为三维可视化工序模型，实现了工艺数据来源、工序模型、工装设计、工艺编制、工艺仿真、工艺结果、工艺输出和工序执行的三维可视化。

### 3) 产品制造

以产品三维数字化模型为基础，利用数控编程软件和数控机床，由三维模型直接驱动完成数控作业，传统的二维图样被现场的终端和显示器所取代，图3.17所示为基于三维模型的制造工序创建示例。

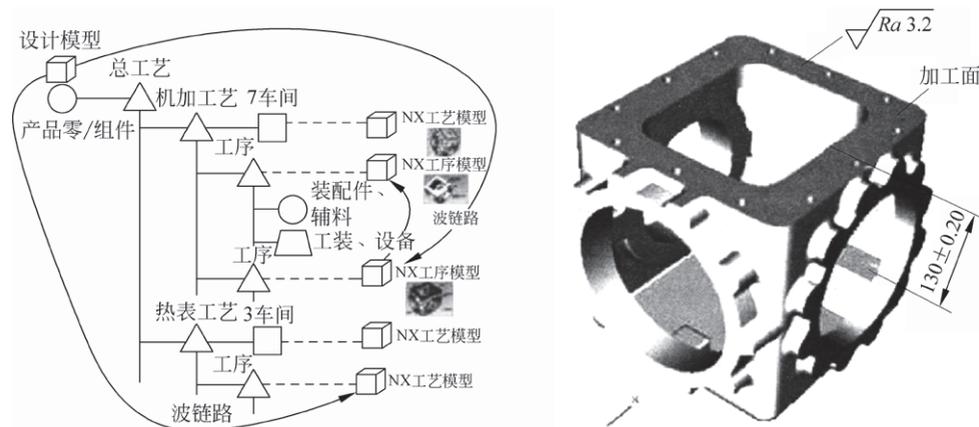


图3.17 基于三维模型的制造工序创建示例

### 4) 质量检测

传统的基于图样的检验转变为基于三维模型的检验。此外，数控加工和自动化检测设备的广泛使用，有效地减少了质量检验工作量，提高了检测效率。

### 5) 标准化和协同作业

以MBD相关标准为基础，可以构建全流程三维数字化产品研发环境，实现企业内部以及企业与合作伙伴、供应商、顾客之间的三维可视化沟通和协同。

MBD将设计、制造、检验和管理的三维信息有机融合，是业界普遍认同的先进数字化设计与制造技术。它解决了传统数字化设计、产品开发和企业管理中存在的技术瓶颈，是产品数字化定义方式上的一次革命。需要指出的是，MBD的实施是一项长

期、复杂和艰巨的系统工程，涉及企业信息化平台建设、标准规范制定、管理模式变革、人才培养和储备等众多方面，不是一朝一夕就能够实现的。

1997年1月，美国机械工程师协会（ASME）提出开发《数字产品定义数据实践》标准的设想，随后ASME Y14.41—2003、ISO 16792和GB/T 24734—2009等标准给出了MBD的基本准则和框架，但是并没有规定操作层面的内容。在工程应用中，MBD的实现离不开具体的产品数据管理系统和软件工具，西门子、PTC、Dassault等数字化软件公司将该标准应用于各自的商业化软件系统中。如西门子工业软件公司的Teamcenter+NX是一个基于MBD技术的信息化平台，它主要包括MBD三维设计系统、MBD三维工艺系统、MBD标准检验系统等部分，在众多行业和企业中得到应用。

### 3.4.2 基于模型的系统工程

#### 1. 什么是MBSE

系统工程（system engineer）是为了很好地实现系统的目的，对系统的组成要素、组织结构、信息流、控制机构等进行分析研究的科学方法。它集成了所有学科和专业团队，形成结构化的开发过程：从工程概念到产品再到运营，考虑所有客户的业务和技术需求，提供一个满足用户需求高质量和安全的产品。

系统工程侧重于在开发早期定义客户的需求和所需的功能，并记录所有需求，然后进行设计综合和系统验证，是一个以客户需求为导向的正向开发过程，以寻求系统有很好的解决方案。如图3.18所示，传统设计方式中，系统方案设计阶段多数通过撰写方案设计文档来对系统进行定义。



图3.18 传统设计中文档记录模式

基于模型的系统工程（model-based system engineer, MBSE）将系统工程传统的文本格式转向了图形化的系统建模语言，形成“以模型为主，文档为辅”的系统架构

方案。

MBSE通过系统架构方案的模型化，能实现与周边人、机对接，从而完成需求高效准确地传递。MBSE与传统系统工程不同，它强调中央系统模型。该模型描述了捕捉的系统需求以及描述这些需求的设计决策。如图3.19所示，MBSE用数字化建模代替写文档进行系统方案设计，把设计文档中描述系统结构、功能、性能、规格需求的名词、动词、形容词、参数全部转换为数字化模型表达。

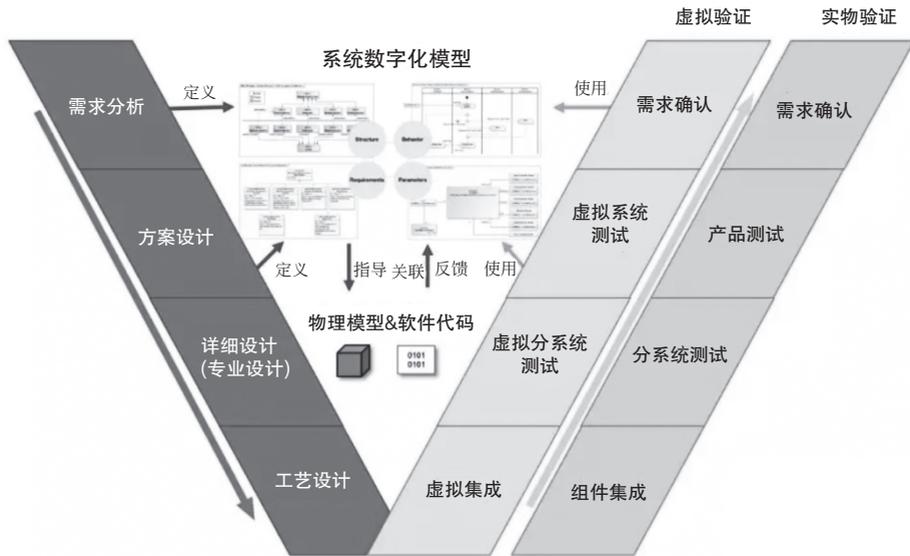


图3.19 基于MBSE的系统数字化模型记录模式

以下例子展示从文档转换到数字化模型的直观理解。

(1) 名词（描述系统结构）基于文本的设计：“该系统由发动机、通信系统、控制系统、生命保障系统等子系统构成”。MBSE中对名词的数字化模型表达示例如图3.20所示。

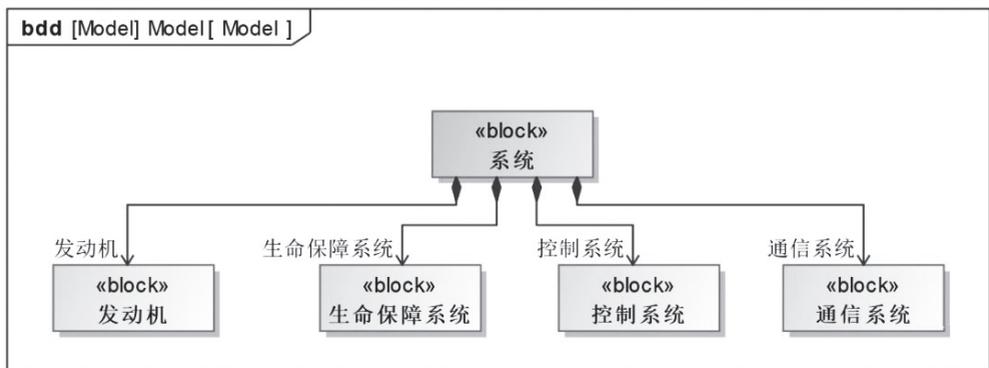


图3.20 MBSE中对名词的数字化模型表达示例

(2) 动词（描述系统行为）基于文本的设计：“系统的启动过程为：首先启动发动机，然后依次检查控制系统、生命保障系统、通信系统状态，如果一切正常，则进入工作状态；如果发现异常，则由操作人员进行故障排查。”MBSE中对动词的数字化模型表达示例如图3.21所示。

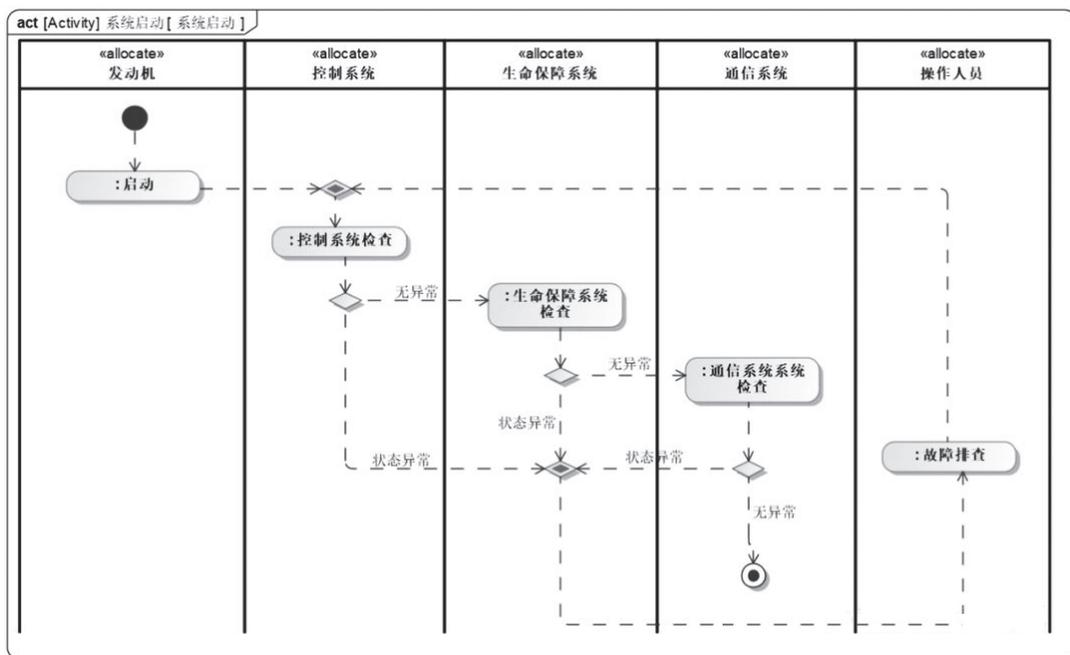


图3.21 MBSE中对动词的数字化模型表达示例

(3) 参数（对系统规格、系统性能等的定量描述）基于文本的系统设计：“需求A：系统总质量不能超过100kg。”MBSE中参数的数字化模型表达示例如图3.22所示。

(4) 形容词（需要被量化）：形容词是文档中的特殊产物，在模型中不存在对应内容。

原因在于形容词是模糊描述，无法明确表达，也意味着无法准确验证。因此，理论上，在系统设计和需求规格描述中，不应该使用形容词，否则可能导致如图3.23中的后果。

## 2. 为什么要做MBSE

在当前航空、航天、汽车等行业，对工业产品易用性、舒适性、安全性等方面要求的提高，导致当前工业产品电气化、智能化程度越来越高，产品复杂度的量级不断跃升。

基于文本的系统设计方式存在天然局限，导致其越来越难以应对当前的复杂产品

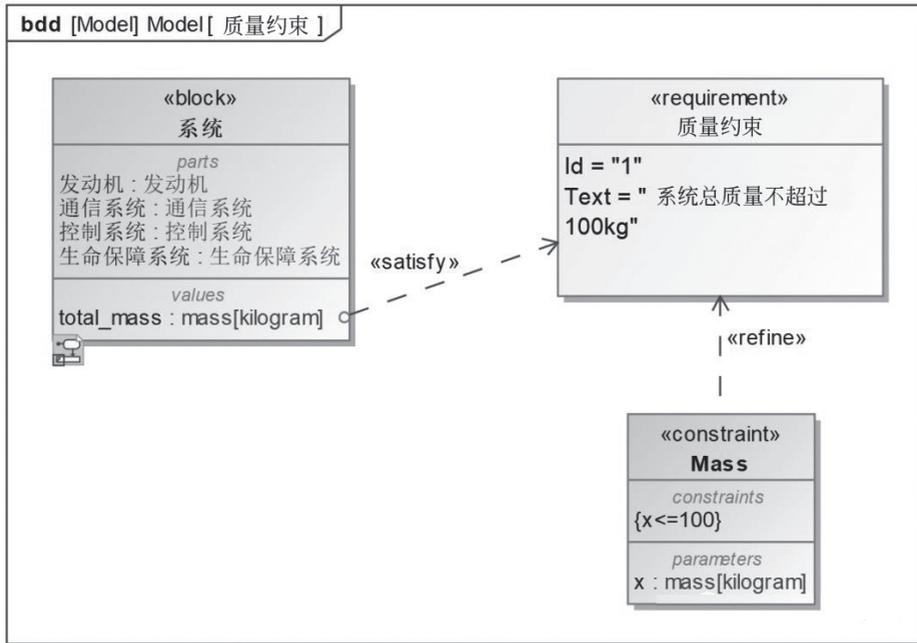


图3.22 MBSE中参数的数字化模型表达示例

形容词的代价



量化描述后

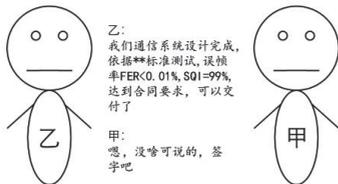


图3.23 MBSE中形容词的数字化模型表达示例

设计挑战, 例如: ①基于自然语言描述的设计文档一致性差, 沟通效率低且容易出现歧义; ②自然语言容易引入形容词等模糊描述, 很难保证准确性; ③文本描述的设计元素之间无法实现追溯分析, 当出现设计变更时很难对变更影响进行准确评估; ④基于文本的设计方案无法进行前期仿真验证; ⑤设计方案无法与详细设计阶段的数字化模型(如CAD)关联。

而MBSE技术的出现为应对这些问题提供了有效的应对手段。本节分别从几个系统设计活动——需求分析与验证、系统设计、系统验证来具体分析MBSE到底可以为企业带来哪些价值, 如表3.1所示。

表3.1 MBSE各业务阶段的功能点及价值

业务阶段	功能点	价值
需求分析与验证	需求分类描述：通过不同类型元素将需求区别描述，如功能需求、性能需求、接口需求等，并在模型中 <b>约束不同类型需求在设计中的实现方式</b> （如功能需求需要被一个功能设计满足、性能需求需要有参数进行量化描述与验证、接口需求需要结构设计上存在一个接口等）	保证质量：避免需求的错误处理或遗漏，保证设计需求100%准确实现
	需求量化描述与 <b>自动验证</b> ：通过数学公式对量化的需求进行描述，并将系统设计结果自动导入约束公式进行验证	提高效率： （1）提高设计过程中需求验证工作的效率； （2）提高产品验收工作效率，避免需求的模糊描述造成项目验收“扯皮”
	<u>需求追溯</u> ：模型中包含了每一条需求从需求分解、分配、设计实现到测试验证的完整追溯	保证质量
	需求库重用	提高效率
系统设计	保证 <b>设计语言一致性</b> ，避免自然语言带来的理解歧义	提高效率
	<u>设计可追溯</u>	保证质量
	与 <b>周边数字化工具集成</b> ，如可靠性分析、质量管理	提高效率
	<u>设计变更影响分析</u> ，对于复杂系统设计过程优势更加明显	提高效率与保证质量
	基于模型的 <b>文档自动生成</b>	提高效率
系统数字化模型可在衍生 <b>项目中复用</b>	提高效率	
系统验证	<b>系统级仿真分析</b> ：系统数字化模型可以支撑系统级仿真分析，精确评估系统设计方案合理性	保证质量

注：方框代表文本无法实现而MBSE能够实现的功能，下划线代表MBSE相对文本的优势功能。

### 3. 怎么做MBSE

MBSE是建模的形式化应用，以支持系统需求、设计、分析、验证和确认活动，始于概念设计阶段，并持续到整个开发和生命周期后期阶段。MBSE中的模型通常指原理图模型，一般包括需求模型、功能模型和架构模型等，这些模型从不同视角描述同一

个系统，并贯穿全生命周期，其基本思想是使用形式化的标准模型协助相关系统工程从业人员进行系统工程实践。MBSE是系统设计工作通过数字化设计手段的实现，因此在工作流程上与传统系统工程并无太大差异，仍然分为需求分析、系统设计、系统验证、需求确认四个步骤。

(1) 需求分析。实现需求条目化分类，并对特殊需求（性能需求）进行量化描述，如图3.24和图3.25所示。



图3.24 需求类型示例

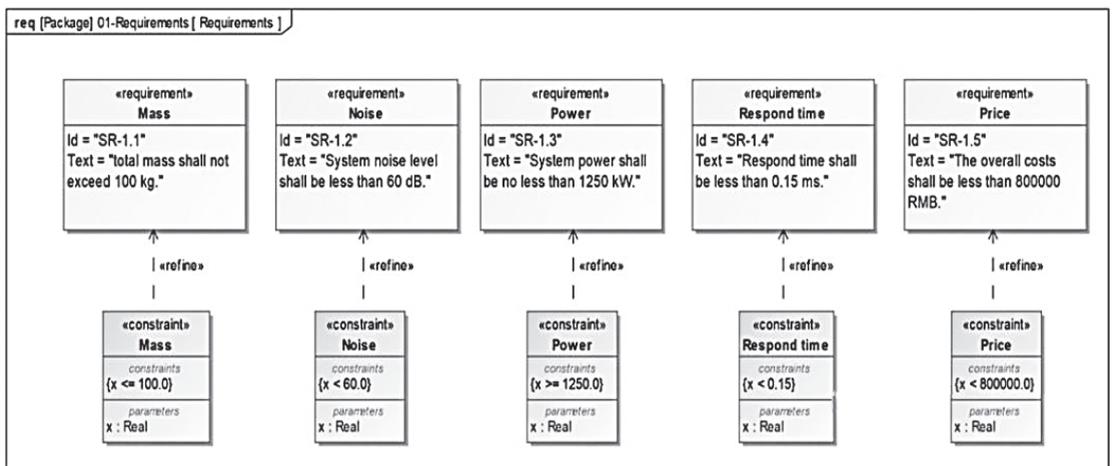


图3.25 需求量化描述

(2) 系统设计。依照特定的系统设计逻辑方法，完成系统功能、结构设计，以及参数化表征，并将设计内容与需求进行关联，确保追溯关系完整，如图3.26所示。

(3) 系统验证。基于数字化系统设计模型进行系统仿真，根据设计需求进行系统验证工作，如图3.27所示。

(4) 需求确认。将设计参数值与量化的需求约束进行验证，如图3.28所示。

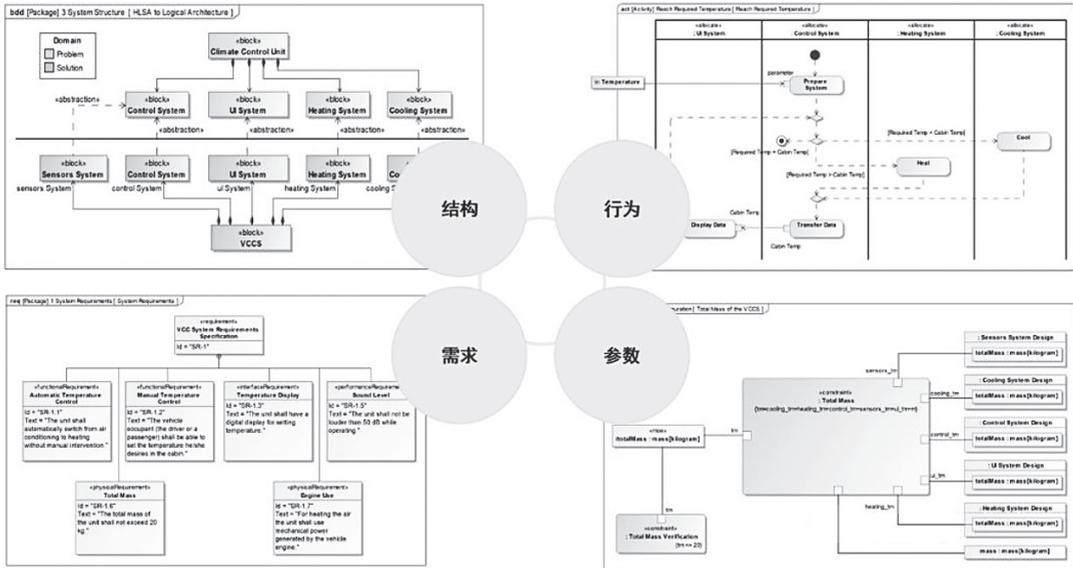


图3.26 系统设计

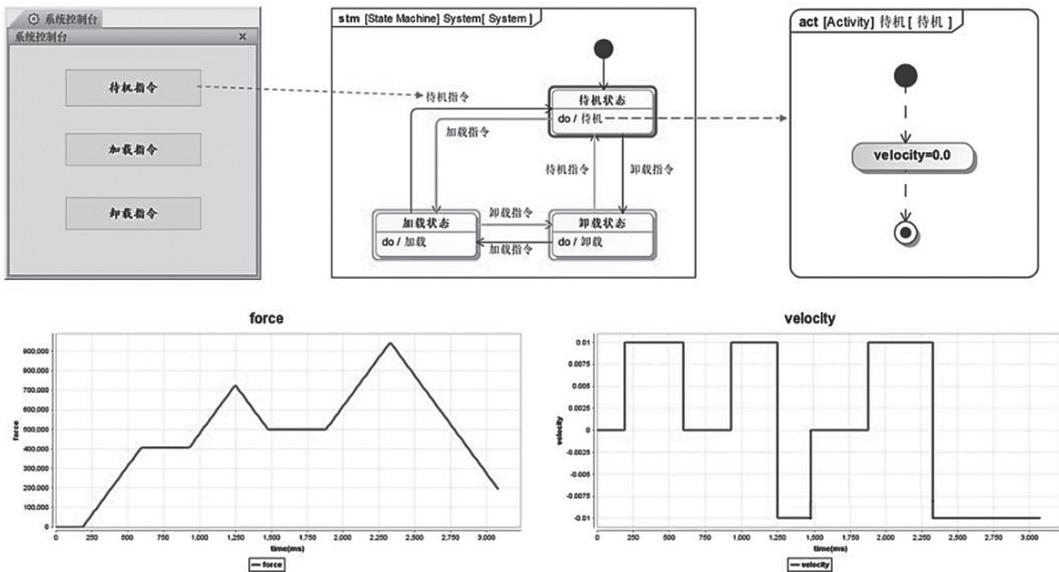


图3.27 系统模型仿真验证

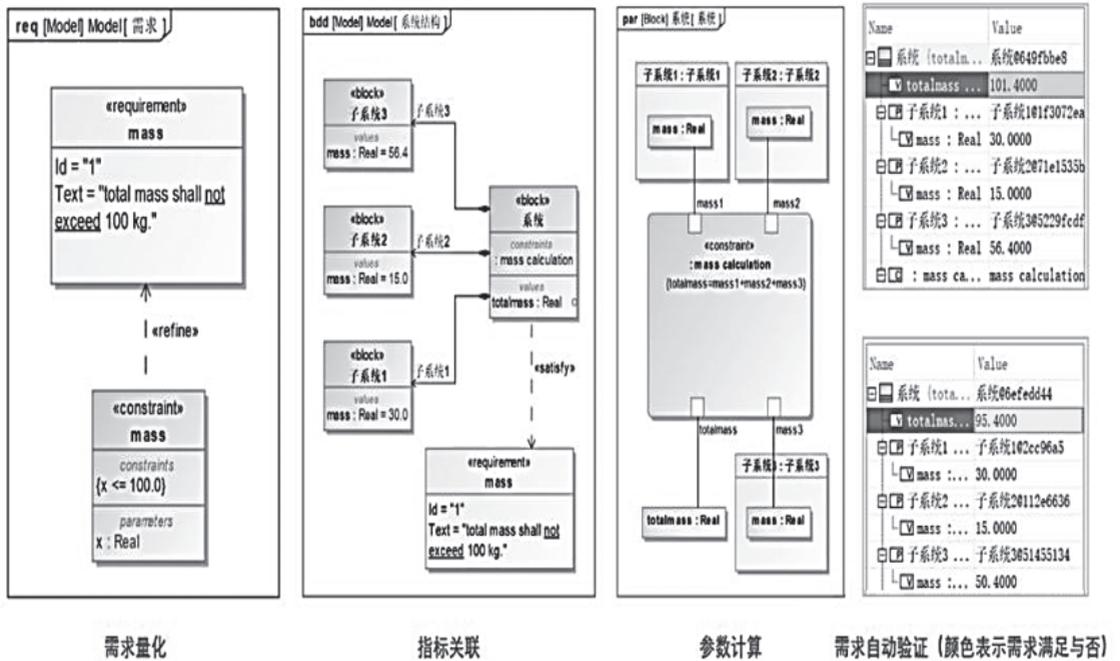


图3.28 需求确认

当前MBSE领域主流的系统设计语言是OMG维护和发布的SysML（System Modeling Language），该语言基于UML发展而来，并专门针对系统设计领域特点进行了扩展。

目前国内工程领域主要的MBSE工具为NoMagic公司（2018年加入达索）MagicDraw和IBM Rhapsody，其他如Sparx Systems的Enterprise Architecture、达索CATIA RFLP、Siemens PLM、ANSYS Scade等也有部分应用。MBSE建模工具的选择需要考虑因素很多，需要根据不同企业具体情况具体分析。



视频讲解

### 3.4.3 数字化制造技术

#### 1. 数字化制造概述

随着科学技术发展和市场竞争的加剧，顾客对制造企业提出了更为苛刻的要求，主要表现在产品的高质量、高可靠性、高柔性、短交货期和低价格等方面。为此，制造企业需要采用先进的加工装备、制造工艺和管理方法，其中加工装备、制造工艺和生产过程数字化成为重要的发展趋势。以数字控制（numerical control, NC）技术和可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）为基础，基于计算机软硬件、信息技术和网络技术，建立全数字化产品生产环境，成为制造企业的必然选择。实际上，数字化已经成为先进制造技术的核心内容和重要载体。

数字化制造是制造技术与信息技术有机融合、相互集成的产物，它是对传统制造

技术的拓展、突破和创新。可以从以下三个层面来理解数字化制造。

(1) 数字化制造是以产品数字化设计为基础的制造。以产品数字化模型为基础,通过对产品结构的仿真分析实现设计方案的优化,在此基础上完成产品制造工艺的制定、制造过程的管控、产品装配、质量检测、制造成本测算与控制等生产过程的数字化。

(2) 数字化制造是以控制为中心的制造。数字化信息是数字化制造的主线,它贯穿于制造的全部过程中。数字化制造以数字化信息的获取、存储、组织和控制为抓手,完成对加工过程中物料、设备、人员以及生产组织的控制。在开展加工过程仿真的基础上,实现企业生产组织、计划、调度、控制、决策等制造过程的优化。

(3) 数字化制造是基于数字化管理的制造。要真正体现数字化制造的潜在效益和效率,必须实现市场需求、研究开发、产品设计、工程制造、销售、服务、维护等环节相关信息的高度集成,以数字化方式高效管理产品开发、供应链、客户关系和企业资源计划等业务流程。因此,只有建立功能完善的数字化管理系统,才有可能实现数字化制造的内在价值。与传统的制造技术相比,数字化制造更加重视制造与管理的结合,追求制造过程组织和管理的合理化、简化和优化,由此形成精益生产(lean production, LP)、并行工程(concurrent engineering, CE)、企业业务流程重组(business process reengineering, BPR)、敏捷制造、智能制造等新的生产组织方式。

数字化制造的核心技术包括计算机辅助工艺规划(computer aided process planning, CAPP)技术、成组技术(group technology, GT)、数控加工技术和增材制造技术等。

## 2. CAPP技术

计算机和信息技术的发展使得利用计算机辅助编制工艺规划成为可能,由此产生了CAPP技术。CAPP是指利用计算机来制订零件加工工艺的方法和过程,通过向计算机输入被加工零件的几何信息(如形状、尺寸、精度等)、工艺信息(如材料、热处理、生产批量等)、加工条件和加工要求等,由计算机自动输出经过优化的工艺路线和工序内容等。计算机在工艺规划中的辅助作用主要体现在交互处理、数值计算、图形处理、逻辑决策、数据存储与管理、流程优化等方面。采用CAPP系统代替传统的工艺设计方法具有重要意义,主要表现在以下四方面。

(1) 它将工艺设计人员从烦琐的、重复性的劳动中解放出来,使其能够将更多的精力放在新工艺的开发和工艺优化上,从根本上改变了工艺设计依赖于个人经验的状况,有利于提高工艺设计的质量。

(2) 有助于缩短工艺设计周期,加快产品开发速度。

(3) 有利于总结和传承工艺设计人员的经验,逐步形成典型零件的标准工艺库,实现工艺设计的优化和标准化。

(4) CAPP是产品数字化造型和数控加工之间的桥梁,有助于将产品数字化设计

的结果快速应用于生产制造，发挥数控编程和数控加工技术的优势，实现数字化设计与数字化制造环节的信息集成。

随着数字化设计与制造技术不断向系统化、集成化方向发展，CAPP的内涵不断扩展，先后出现了狭义的CAPP和广义的CAPP。狭义的CAPP是指利用计算机辅助编制工艺规划的过程；广义的CAPP是指在数字化设计与制造集成系统中，利用计算机实现生产计划和作业计划的优化，它是产品制造过程、制造资源计划（manufacturing resources planning, MRP II）和企业资源计划的重要组成部分。CAPP与数字化设计、数字化制造等子系统之间的关系如图3.29所示。

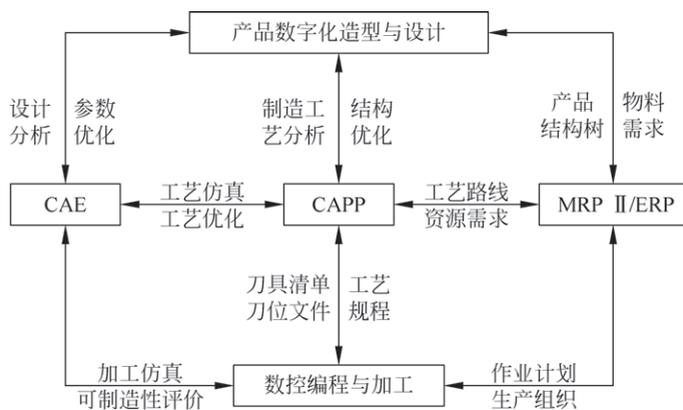


图3.29 CAPP与数字化设计、数字化制造等子系统之间的关系

随着产品数字化技术的发展，CAPP在产品数字化开发和企业信息化中的作用越来越显著。在集成化环境下，CAPP与企业信息系统各模块之间存在如下信息交互。

（1）CAPP从数字化设计系统中获取零件的几何信息、材料信息和工艺信息等，作为CAPP系统的原始输入，同时向数字化设计系统反馈产品结构工艺性的评价信息。

（2）CAPP向数控加工系统提供零件加工所需的设备、工装、切削参数、装夹参数以及反映零件切削过程的刀具轨迹文件，并接收数控系统反馈的工艺修改意见。

（3）CAPP向工装设计系统提供工艺规程文件和工装设计任务书。

（4）CAPP向制造自动化系统（manufacturing automation system, MAS）提供各种工艺规程文件和夹具、刀具等信息，并接收由MAS反馈的刀具使用报告和工艺修改意见。

（5）CAPP向计算机辅助工程分析（CAE）系统提供工序、设备、工装、检测等工艺数据，并接收CAE系统的分析和反馈信息，用以修改工艺规程。

（6）CAPP向管理信息系统（management information system, MIS）、MRP II和ERP系统提供工艺路线、设备、工装、工时、材料定额等信息，接收MES、MRP II和

ERP系统发出的技术准备计划、原材料库存、刀夹量具状况、设备变更等信息，还能与PDM系统、PLM系统无缝集成。

### 3. 基于模型的工艺规划

在MBD环境下，制造工艺信息建立在产品三维模型的基础上，并存储于三维模型中，与产品的三维几何信息密切关联。利用MBD技术，在PLM和协同设计环境下，工艺设计人员可以在设计部门发放的三维模型基础上开展工艺设计，建立三维制造工艺规程。具体步骤如下：设计工程师完成产品设计，并将设计结果保存到PLM系统中；工艺设计师从PLM系统获取设计部门发放的三维模型，完成工艺设计，并将工艺设计文件保存到PLM系统中；制造执行系统（manufacturing execution system, MES）和生产现场从PLM系统获取工艺规程文件，安排生产。

基于MBD环境的三维工艺设计流程包括毛坯模型设计、工序设计、工序模型生成与标注、与标注、三维工艺发布四个环节，如图3.30所示。

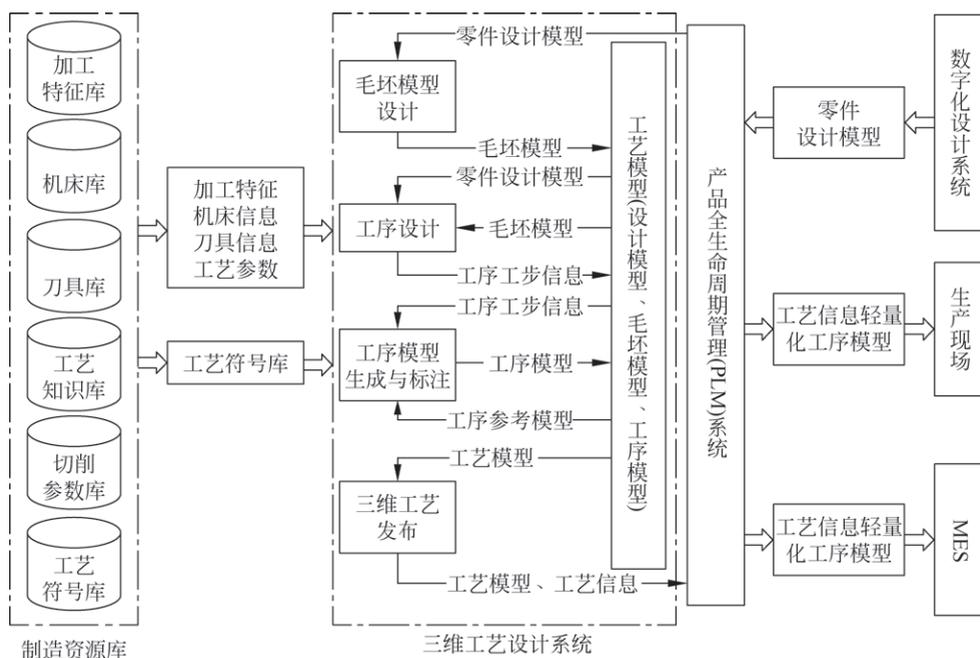


图3.30 基于MBD环境的三维工艺设计流程

通常，将在MBD环境下的工艺规划设计称为基于模型的工艺规划（model-based process planning, MBP）。MBP是基于模型的定义技术在工艺设计中的应用，它将与工艺设计相关的各类信息定义在三维产品模型中，包括产品制造信息（如尺寸公差、几何公差、表面粗糙度、注释、装夹定位基准等）和工艺设计信息（如工艺基本信

息、工序信息、工步信息等)。根据工艺规划对象的不同,MBP包括两方面内容:基于模型的零件加工工艺规划和基于模型的装配工艺规划。

### 3.4.4 基于模型的企业

基于模型的企业(model-based enterprise, MBE)建立在MBD技术的基础上,它的核心思想是基于产品数字化模型来定义、执行、控制和管理企业的所有业务流程,采用建模与仿真技术彻底改造、无缝集成产品设计、制造、技术支持和售后服务等全部环节,利用科学的仿真和分析工具在产品生命周期的每个阶段做出最佳决策,大幅度减少产品研发、制造和售后服务的时间与成本。MBE是多种先进设计、仿真分析与制造方法的集中体现,代表产品开发和制造企业的未来。

#### 1. MBE的组成与效益

MBE主要由基于模型的工程(model-based engineering, MBe)、基于模型的制造(model-based manufacturing, MBm)和基于模型的维护(model-based sustainment, MBs)三部分组成,并形成有机整体。

##### 1) 基于模型的工程

MBe将三维数字化模型作为工程项目开发的基础,涵盖需求分析、设计、制造和验证等产品全生命周期。MBe是MBD的核心,MBe数据一经创建将被后续各业务环节重复利用。MBe的核心是将产品三维模型打造成下游生产活动所需信息的最佳载体,使相关团队和部门将三维模型作为产品信息表达、传递的唯一途径。基于MBe的产品研制可以将质量保障部门纳入技术体系中,并与产品设计、制造形成具有信息反馈功能的封闭环。上述特点有助于缩短产品开发周期,降低研制成本,减少开发中反复修改的现象。

##### 2) 基于模型的制造

MBm用于虚拟制造环境下制造工艺规划的设计、优化和管理。MBm交付的成果包括三维零件制造工艺、三维装配工艺、数控加工工艺、三维电子作业指导等。在某些情况下,上述工作可以在产品设计结束之前完成。此外,MBm允许在实物加工之前开展制造和装配过程仿真。在此基础上,制造工程师可以向设计工程师提供反馈和修改意见,以便形成具有更好可制造性的设计方案。

##### 3) 基于模型的维护

产品设计和制造过程中的数字化模型与仿真结果可以用于产品的维护保障阶段,为用户、维护人员等提供模型和相关数据。此外,产品在工程实际中的使用情况和维护、维修、故障数据也可以用于评估产品设计和工艺方案,并反馈给产品设计和工艺环节,以便改进和优化产品设计。

MBE的效益体现在概念设计、详细设计、设计验证、制造和维护等各个环节,主

要表现在：①有利于降低设计方案的返工和变更的概率，缩短产品交付周期；②有利于整合、简化设计和制造流程，降低研发和生产成本；③有利于减少制订生产计划所需要的时间，减少生产和订单延误的风险；④有助于提高设计质量，减少产品缺陷；⑤有利于改善与产品利益相关方的合作、协同，提高备件采购效率，降低运作成本；⑥有利于改进作业指导书和技术出版物的质量；⑦有利于提高维修质量，降低产品的维修和维护成本，缩短维修时间。

总体上，MBE仍然是发展中的技术和管理方法。理想的MBE具有如下特征：①产品研发和企业管理流程完全基于产品三维模型；②不存在二维工程图；③有完全连接的扩展企业；④模型数据、元数据（metadata）等可以为整个扩展企业访问和使用；⑤具有完全自动化的技术数据包（technical data package, TDP）；⑥具有有效的产品全生命周期数字化管理工具。

## 2. 西门子工业软件公司MBE解决方案

西门子工业软件公司将自动化技术、控制技术和工业软件无缝集成，提供具有系统性的MBE软硬件解决方案，涵盖从产品设计、生产到服务的全价值链各环节，实现了虚拟世界与实物世界的有机衔接，为数字化企业提供了有效的技术支撑。图3.31所示为西门子MBE解决方案的整体架构。

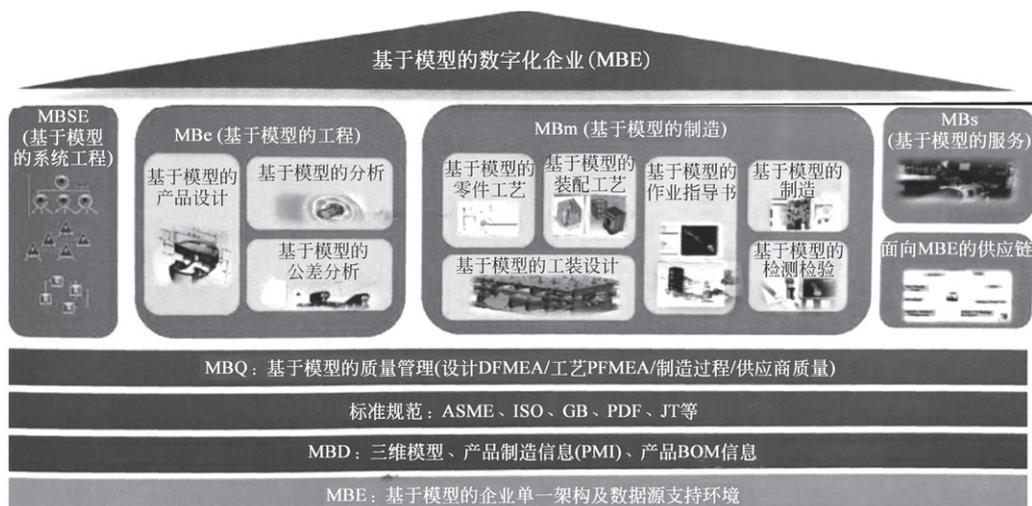


图3.31 西门子工业软件公司MBE解决方案的整体架构

西门子工业软件公司在产品数字化软硬件系统研发、企业并购等方面投入巨额资金，不断扩充与MBE相关的产品线、增强产品功能、完善解决方案。该公司在工业自动化领域具有软硬件集成的强大技术能力，拥有完整的PLM解决方案。此外，该公司还积极参与MBD技术开发和标准制定，开展验证性项目实践。目前，该公司已形成以

NX软件为MBD定义工具、以Tecnomatix软件为基础的数字化制造、以LMS等软件为基础的仿真和虚拟试验、以Teamcenter为平台的MBE解决方案，帮助制造企业构建了完整的MBE系统。图3.32所示为该公司MBE软件模块组成。西门子工业软件公司MBE主要软件模块的功能如下。



图3.32 西门子MBE软件模块组成

(1) NX CAD/CAE/CAM一体化工具，涵盖概念设计、数字化产品定义、数字化仿真分析、评审分析、验证、多学科优化仿真分析等环节。NX提供完整的MBD模型定义(含PMI)、浏览和交互功能。

(2) Tecnomatix基于MBD的数字化制造解决方案，涵盖工艺BOM管理、工艺分工、零件工艺规划装配工艺规划运动仿真、公差仿真、人机仿真、装配仿真、工厂规划仿真优化、生产路线仿真优化、MES集成化管理等功能。

(3) Teamcenter全生命周期管理平台，涵盖智能决策、投资组合、多项目组合管理、需求管理、系统工程、多学科优化仿真分析、数字样机、可视化协同、异地协同、BOM全生命周期管理、维护保障管理、企业知识管理等功能。Teamcenter可用于保证MBD模型及其相关数据的有效配置和管理，以及MBE企业内部和供应链之间的有效流通。

(4) LMS仿真和试验解决方案，将三维功能仿真、试验系统、智能仿真系统、工程咨询服务等业务有机结合，专注于系统动力学、声音品质、舒适性、耐久性、安全性、能量管理、燃油经济性和排放、流体系统、机电系统仿真等专项性能的开发和研究。

该公司提供的MBE模块包括基于模型的系统工程、基于模型的产品设计、基于模型的分析应用、基于模型的机电一体化系统工程、基于模型的全生命周期质量管理、基于模型的工装设计、基于模型的零件工艺、基于模型的装配工艺、基于模型的质量检测、基于模型的作业指导书、基于模型的制造执行、基于模型的实物样机测试、基于模型的MBE供应链管理、基于模型的MBE数字化服务管理、复杂产品构型管理、基于MBD的标准和规范等。

西门子工业软件公司MBE解决方案以系统工程思想为指导，贯穿从需求分析、设计、工艺、制造、试验到服务和维护的全生命周期过程，各阶段形成的数字化信息可以定义到以MBD模型为核心的技术数据包中，上游的技术数据包可以被下游直接重用，从而形成全面的MBE解决方案体系。

## 习题

### 一、判断题

1. 工业4.0的核心是智能制造。( )
2. PLM是PDM系统中的一个子集。( )
3. 智能制造通过工况在线感知（看）、智能决策与控制（想）、装备自律执行（做）的闭环过程，以提升装备性能、增强自适应能力，是高品质制造的必然选择。( )
4. 智能装备的特点包括将专家的知识 and 经验融入感知、决策、执行等制造活动中，赋予产品制造在线学习和知识进化能力。( )
5. 当前物联网的引入和制造业服务化的深化迎来了以智能制造为主导的第四次工业革命，即“工业4.0”。( )
6. 端到端价值链的数字化整合是实现智能制造云的愿景，用户只要提供需求，就可以获得所需的产品。( )
7. 设计阶段的实际投入通常只占产品全生命周期成本的5%左右，但是它却决定了产品全生命周期成本的70%~80%。( )
8. 设计阶段是控制和降低产品成本的最好阶段。此时设计者有很大的自由度来修改、完善设计方案，以便实现产品全生命周期成本的最小化。( )
9. 数字化管理有利于提高制造企业的管理效率和质量，但在一定程度上会提高管理成本和生产成本。( )
10. 如果各单元技术及管理模块相互独立，就会形成“自动化孤岛”和“信息孤岛”，使产品信息和企业资源难以发挥应有的作用。( )

11. PDM是以文档为中心的研发流程管理,主要通过建立文档之间刚性的、单纯的连接来实现。( )

12. 数字化技术体系包括产品表达数字化、制造装备数字化、制造工艺数字化和制造系统数字化。( )

13. MBSE是用数字化建模代替写文档进行系统方案设计,把设计文档中描述系统结构、功能、性能、规格需求全部转化为数字化模型表达。( )

14. 工业5.0源于工业4.0,但是更加注重社会和生态价值。其要求工业生产必须尊重和保护地球生态,将工人的利益置于生产过程的中心位置,进而使工业可以实现就业和增长以外的社会目标,成为社会稳定和繁荣的基石。( )

## 二、单选题

1. ( ) 不属于工业4.0的特征。

- A. 互联                      B. 规模化                      C. 数据                      D. 创新

2. ( ) 不属于增材制造技术。

- A. 3D打印                      B. 快速成型RP                      C. 分层制造                      D. 并行工程

3. 基于MBD环境的三维工艺设计流程不包括以下环节( )。

- A. 毛坯模型设计                      B. 工序设计、工序模型生成与标注  
C. 三维工艺发布 C2M                      D. 装配工艺规划

4. PLM侧重于无形资产的管理,以( )为核心。

- A. 企业的产品                      B. 企业的信息资源                      C. 产品的协同开发                      D. 产品创新

5. ( ) 不属于MBSE能更好实现的功能。

- A. 需求量化描述与自动验证                      B. 基于模型的文档自动生成  
C. 无法实现追溯分析                      D. 系统级仿真分析

## 三、多选题

1. 产品数字化开发包含( )。

- A. 数字化产品                      B. 数字化设计                      C. 数字化制造                      D. 数字化管理

2. 下面( )属于增材制造技术。

- A. 3D打印                      B. RP                      C. DDM                      D. 分层制造

3. 以下属于工业4.0的特征的是( )。

- A. 互联                      B. 绿色                      C. 集成                      D. 数据

4. 推动PLM发展的主要因素有( )。

- A. 网络及信息技术的支持                      B. 全球化的市场竞争  
C. 用户个性化需求                      D. 产品生产成本

5. MBSE的工作流程包含以下( )步骤。
- A. 需求分析            B. 系统设计            C. 系统验证            D. 需求确认
6. 工业5.0概念重点关注以下( )关键词。
- A. 工人福祉            B. 可持续性            C. 工业弹性            D. 工业效率
7. 西门子MBE主要由以下( )组成, 并形成一个有机整体。
- A. 基于模型的工程(MBe)            B. 基于模型的制造(MBm)
- C. 基于模型的维护(MBs)            D. 基于模型的销售(MBsale)

#### 四、简答题

1. 工业革命的发展历程及各阶段的特点是什么?
2. 工业4.0与智能制造的关系是什么?
3. 产品生命周期与产品成本之间的关系?
4. 什么是PLM? PLM的功能有哪些?
5. 数字化设计技术的发展历程是什么? 未来的发展方向是什么?
6. 什么是MBD? MBD技术的出现对产品开发模式会产生哪些深远的影响?
7. MBE有哪几个组成部分? MBE带来的效益体现在哪些方面?