

第 1 章

工业互联网的发展背景

1.1 工业 1.0~工业 3.0 发展历程

对于人类工业化阶段的划分有着不同的提法，目前接受度最高的是工业 1.0、工业 2.0、工业 3.0 再到工业 4.0，是随着德国的工业 4.0 发展规划的提出而广为流传的。

工业 1.0，也称为第一次工业革命。其标志是瓦特改良的蒸汽机，瓦特对蒸汽机进行了一系列改良，大大提高了蒸汽机的效率和实用性，其中有一个重要的改良是使用了离心调速器，实现了蒸汽机转速的自动控制，也由此开启了自动控制学科。改良后的蒸汽机在工业生产中得到了广泛应用，开创了以机器占主导地位的制造业，生产制造从此逐渐摆脱手工方式而转向机械化生产。

随着蒸汽机的推广应用，出现了各种蒸汽驱动机器或装备，比如轮船、火车等。因此，这一阶段也被称为蒸汽时代。

工业 2.0 是电气化时代，1821 年法拉第发明了第一台电动机的雏形，从此开启了一个新的时代。

1834 年，德国人莫里茨·雅可比造出了世界上第一台实用的直流电动机。

1855 年，西门子公司开始生产交流电动机。

德国在电气领域做出了一系列杰出的贡献，将第二次工业革命推向了一个新的高潮。

电气时代另一个重大的发明是福特公司开发的世界上第一条工业流水线，使汽车制造的效率极大地提高。在使用流水线之前，福特汽车的年产量只有 1 万辆，而流水线出现后的 1913—1914 年，福特公司就生产了 25 万辆汽车，每天生产近 800 辆。到了 1927 年，每 24 秒就能组装一部汽车。用这条流水线生产出的 T 型车成本极大地降低，从而让汽车这种曾经只有少数富人才能拥有的高消费产品成为大众消费品。因此，T 型车被称为第一款国民车。

流水线的发明颠覆了传统的手工作坊的生产方式，使人类实现了真正意义上的工业化大规模生产。

第二次工业革命的产品和生产方式到现在还一直影响着我们的生活方方面面，我们使用的大部分产品都是以电力为动力的。

工业 3.0 时代是以计算机为代表的信息化时代。第一台通用计算机出现于 20 世纪 40 年代，当时是一个由 18 000 多个电子管组成的庞然大物，而运算速度以现在的标准看则小得可怜。随着集成电路的出现，计算机体积迅速缩小，而性能快速提升，应用也随之越来越广泛。

信息时代还有一个影响深远的发明，那就是互联网。研发互联网最初的动机来自美苏的冷战。20 世纪 60 年代初，美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA），研究在受到核打击后仍能有效地实施和指挥的网络构型，此研究项目被命名为 The Interneting Project。

1968 年，DARPA 采用以上思想建立了第一个真正意义的计算机网络 ARPAnet，第一个节点位于加州大学洛杉矶分校。

1983 年 1 月 1 日，美国国防部通信局正式将 TCP/IP 作为 ARPAnet 的网络协议。

随着冷战的结束以及计算机的普及，互联网进而转为民用。1986 年，在美国国家自然科学基金会的资助下，建立了 NSFnet，将全美五大超级计算中心连接起来，并与 ARPAnet 实现互连。

1989 年，在 ARPAnet 和 NSFnet 上的节点数目超过 10 万个，其中大多是大学、科研机构和政府机关。

此后，将由 The Interneting Project 发展而来的，运行 TCP/IP 的计算机网络称为 Internet；NSFnet 取代 ARPAnet 成为 Internet 的骨干网。而后互联网给人类社会所带来的变化都是有目共睹的了。

在工业领域，随着以计算机和互联网为核心的信息技术的深入应用，无论是产品的制造过程还是产品本身，都发生了翻天覆地的变化。通过在设计制造过程中引入信息技术，工业的创新能力和效率得到迅速提升，生产制造的效率进一步大幅提高，而产品本身的功能、形态和使用方式也发生了前所未有的变化。

需要指出的是，工业 1.0~工业 3.0，它们虽然有着标志性的开始，却没有一个标志性的结束。一个新的时代开始了，旧的技术并不会马上消失，它们会持续很长时间，然后或被慢慢淘汰，或被融入下一代技术当中。我们现在所处的时代，打一个比方，是披着工业 1.0 的余晖，骑着工业 2.0 的战马，提着工业 3.0 的武器，奔向工业 4.0。

1.2 制造业信息化

在深入介绍工业互联网之前，先简要介绍一下我国工业信息化的发展历程。工业信息化的主要内容是制造业信息化。众所周知，制造业占工业的比重超过八成，工业互联网的应用对象绝大部分也是在制造业。因此，本书主要以制造业为背景介绍相关

的概念和技术。

“信息化”这个术语最早于 20 世纪 60 年代出现在日本, 20 世纪 90 年代, 在我国开始被广泛使用。顺便说一下, 现在业界更愿意叫数字化, 认为信息化是信息技术在企业最基础和初级的应用, 数字化才代表了当前的先进技术。出现这种认知的原因可能是, 信息化这个概念出现得比较早, 很多人一提起信息化便自然和早期的信息技术应用关联起来。而数字化在最近 10 年左右提得比较多, 很多近年来出现的一些新的信息技术被冠以数字化技术。而事实上, 从概念上讲, 信息化包含所有信息技术以及通信技术 (也就是 ICT 技术), 而数字化只是其中的一部分, 还有网络化、智能化, 都可看作信息化的内容。

1. 制造业信息化的概念

关于制造业信息化到目前还没有统一的定义, 不同行业、不同组织都从自身的角度对这一概念进行过描述。

关于制造业信息化的定义有数十种, 比如:

“制造业信息化是制造企业应用现代信息技术、开发应用信息资源、实现制造业现代化的过程。”

“制造业信息化是指利用信息技术获取、处理、传输、应用知识和信息资源, 使企业的竞争力更强和收益更多的一个动态过程。”

“制造业信息化是制造企业利用现代信息技术, 通过对信息资源的深化开发和广泛利用, 不断提高生产、经营、管理、决策的效率和水平, 进而提高企业经济效益和企业竞争力的过程。”

类似的定义还有很多, 都是从不同角度来阐述信息化在制造业中的应用方式和过程^[2,4]。随着信息技术的不断发展, 也常用一些最新的术语或概念来表示制造业信息化, 如互联网+制造、智能+制造等。

尽管定义和描述各不相同, 但基本理念是相同的, 所以, 用现在的话概括起来, 制造业信息化可以理解为产品全生命周期的数字化、网络化和智能化。

具体的内容包括以下几方面。

- (1) 企业内部信息化: 设计、加工、组装、测试、仓储、物流、人员等。
- (2) 企业与供应商关系的信息化: 采购、物流等。
- (3) 企业与客户关系的信息化: 营销、服务等。
- (4) 企业与金融机构关系的信息化: 财务、金融等。
- (5) 企业管理信息化: 与各部分均有关。

2. 制造业的分类

按照国民经济行业分类, 制造业可分为几十个大类, 六百多个小类。但从制造技术研究的角度, 往往从另外的维度进行分类, 即按照产品特征和制造方式一般分成两大类, 即离散型制造和连续型 (或流程型) 制造。

离散型制造，是通过对原材料的物理形状进行改变、组装，使其成为产品并增值。产品往往由多个零件经过一系列并不连续的工序的加工最终装配而成。

这类产品的组成部分通常是独立的、可分离的，例如火箭、飞机、武器装备、船舶、电子设备、机床、汽车等制造业，都属于离散型制造企业。

1) 按业务种类分类

- (1) 偏重于零部件制造的企业，称为加工型企业。
- (2) 偏重于装配的企业，称为装配型企业。
- (3) 加工和装配都主要由自身完成的企业，称为综合型企业。

2) 按产品结构分类

- (1) 多品种、大批量。
- (2) 少品种、大批量。
- (3) 多品种、小批量。
- (4) 少品种、小批量。

离散型制造业的特点如下。

1) 产品结构

离散型制造企业的产品结构可以用树的概念进行描述，最终产品一定是由固定个数的零件或部件组成，这些关系非常明确且固定。

2) 工艺流程

不连续，变化多。以单件、小批量生产为例，生产设备不是按产品而是按工艺进行布置的，例如，按车、磨、刨、铣来安排机床的位置。每个产品的工艺过程都可能不一样，而且，可以进行同一种加工工艺的机床有多台。因此，需要对所加工的物料进行调度，并且中间品需要进行存储和搬运。

3) 物料存储

离散型工业企业的原材料主要是固体，产品也为固体形状。因此，存储多为室内仓库或室外露天仓库。

离散型制造业的自动化水平和流程行业比，总体上相对较低，很多环节仍然需要大量人员参与。目前多数离散型制造企业的自动化主要集中在单元级，如数控机床、柔性加工单元、自动小车。提高制造过程的自动化和智能化水平，也是工业互联网的重要使命之一。

在生产计划管理方面，典型的离散型制造业企业很多是按订单生产，订单往往不好预测，而且产品的工艺过程也时常变更。因此，对原材料、零部件的采购以及生产计划的要求很高，需要有预测性并能动态调整，生产加工过程也需要灵活高效地调度。计划与调度所带来的效益在离散型制造业中相当显著。

连续型制造，主要通过对原材料进行混合、分离、粉碎、加热等物理或化学方法，使原材料增值。

最终产品形态有固体、液体、能量和气体，通常以批量或连续的方式进行生产。流程行业的产品大多是关系国计民生的日用消费品，如石油、化工、电力、纺织、食品、制药、冶金等。

流程行业的特点如下。

1) 产品结构

流程企业的产品结构与离散行业有较大的不同。上级物料和下级物料之间的数量关系可能随温度、压力、湿度、季节、人员技术水平、工艺条件不同而不同。产品一旦形成，很难从产品中反向分析出原材料的组成。这和离散型行业的产品是非常不同的。

2) 工艺流程

流程工业企业的特点是品种固定，批量大，生产设备投资高，而且按照产品进行布置，通常设备是专用的，很难改做其他用途。

3) 物料存储

流程工业企业的原材料和产品通常是液体、气体、粉状等。因此，存储通常采用罐、箱、柜、桶等形式进行存储。并且多数存储的数量可以用能转变为电信号的传感器进行计量。

4) 自动化水平

流程工业企业采用大规模生产方式，生产工艺技术成熟，控制生产的工艺条件的自动化设备比较成熟，例如，DCS、PLC。因此，生产过程多数是自动化，生产车间的人员主要负责管理、监视和设备检修。流程行业总体上的自动化水平高于离散行业。

5) 生产计划管理

流程企业由于主要是大批量生产，或者说是按库存生产。企业只有满负荷生产，才能将成本降下来，在市场上具有竞争力。

因此，在流程工业企业的生产计划中，年度计划更具有重要性。年度生产计划和销售计划，决定了企业的物料平衡，即物料采购计划。一般情况下，企业按月份签订供货合同以及结算货款。每日、每周生产计划的物料平衡依靠原材料库存来保证和调节。

3. 大制造

大制造是和传统意义上的制造相对应的。传统意义上的制造主要是指，将原材料通过一系列的流程，制作成产品的过程。

大制造无论是在时间尺度还是空间尺度，都比传统意义上的制造更大，包含的内容更多。

在时间尺度上，大制造涉及产品全生命周期活动与过程：“从产品的论证、设计、加工生产、试验运行、定型、销售、服务到最终的报废处理”活动与过程中的各类信息 / 资源 / 能力的集成与优化活动。

在空间尺度上，大制造不仅包括一个企业内部的各个机构和各项活动，而且包括

和企业相关的上下游企业或机构之间的跨企业甚至跨国境的各类活动。

另外，涉及制造企业的范畴，既包括传统的机械、电子类的离散型制造（如飞机、汽车、机床、家电等），也包括石油、化工、食品等连续型或混合型制造，还包括信息、新材料、生物等新型制造业。

大制造概念是在制造业信息化的大背景下提出的，也就意味着，制造业信息化涉及制造业的方方面面。

不过在正式的文献或报告中，我们很少见到“大制造”这个提法，也很少把传统意义上的制造称为“小制造”，一般需要根据上下文的含义去理解和区分。比如我们平时常讲的智能制造、制造信息化、制造大国、制造强国等一定指的是大制造；如果说设计与制造，这里的制造一般是指传统意义上的制造。有时为了区分，把传统意义上的制造称为生产（production）。

1.3 CIMS

CIMS 是指计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System），是信息技术和制造业相结合的最有代表性的案例，特别是在中国，要讲工业或制造业与信息技术的结合，CIMS 是绕不过去的话题。CIMS 是我国以政府的力量推动制造业信息化的开始。

CIM 是 1973 年由美国的 Joseph Harrington 博士提出的一种理念。主要包含两方面的内容。

（1）系统的观点，即企业的各个生产环节是不可分割的整体，需要统一考虑。

（2）信息的观点，即整个制造过程本质上是信息的采集、传递和加工处理的过程，也就是说制造过程应该以信息技术为核心。

通俗地讲，CIM 就是利用计算机和网络，通过信息集成实现现代化的生产制造，以提高企业的总体效益。而 CIMS 就是基于 CIM 的理念，采用信息技术实现集成制造的具体的系统。CIM 和 CIMS 最初是针对离散型制造业提出的。CIMS 刚被提出来时，并没有引起业界的重视。

自从福特公司的汽车生产流水线出现以来，美国制造业走上高速发展的道路，到 20 世纪 70 年代，已经历了半个多世纪的发展，生产模式已相当成熟，以汽车制造为代表的制造业成了传统行业。因此，导致许多人对制造业的认识产生了偏差，认为制造业已经是夕阳产业，是生了锈的皮带，导致制造业的人才和资本大量流失，严重影响了其发展和创新的能力及动力。

但在 20 世纪 70 年代末，一场全球性的石油危机对美国制造业，特别是汽车行业产生了致命的打击。石油危机导致油价暴涨，对于崇尚大排量的美国汽车的消费者而言，高油耗成为他们巨大的负担。由于难以承受高昂的油价，消费者便把目光转向了

油耗更低且可靠性更高的日本汽车。这一时期，日本汽车大举进军美国市场，最严重的时候，每十辆汽车就有七辆是日本制造，美国汽车巨头亏损严重、大量裁员，有的甚至濒临倒闭。

这迫使美国从政府到民间开始重新审视传统制造业的价值，重新定位制造业是国家综合国力和国民经济的根本，并重新激发起技术创新的动力，以重新夺回制造业的霸主地位。

到 20 世纪 80 年代初，美国在以计算机为代表的信息技术领域取得许多突破，在全球处于领先地位。

这时，融合信息技术和传统制造的 CIM 理念开始引起制造业的重视。从 1984 年以后许多制造企业开始实施 CIMS。在美国的带动下，欧洲、日本等制造发达国家也纷纷加入研究、开发和实施 CIMS 的行列。

我国的 863 计划于 1986 年将 CIMS 列为 15 个主题之一，从此开启了我国的制造业信息化，也是工业信息化的序幕。

1985 年，美国制造工程师学会（SME）的计算机与自动化系统协会（SME/CASA）发表 CIMS 最早的轮图（即表达 CIMS 内涵的图形）。

如图 1.1 所示，该轮图的含义是，在网络和数据库等计算机技术的支持下，实现企业设计、制造、质量控制及业务管理等全生命周期各个环节的集成。

这是最初的 CIMS 的内涵。

1985 年，德国经济生产委员会（AWF）提出 CIM 的推荐定义：CIM 是指在所有与生产有关的企业部门中集成地采用电子数据处理。CIM 包括了生产计划与控制（PPC）、计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺规划（CAPP）、计算机辅助制造（CAM）、计算机辅助质量管理（CAQ）之间信息技术上的协同工作，其中为生产产品所必需的各种技术功能和管理功能应实现集成。

但到 20 世纪 80 年代末，世界上只有少数几个公司在实施 CIMS 中取得示范性的潜在效益，大多数公司几乎都失败了。

这里所说的失败，并不是信息系统本身的技术不成功，而是实施了 CIMS 之后，并没有取得预期的效益。

通过大量的研究和反思，人们发现，CIMS 的实施并非仅仅是一个技术问题，如果企业的管理和文化不能适应新技术所带来的变化，那么再好的信息系统也无法产生应有的效果。也就是在 CIMS 系统的应用过程中，忽视了人的因素。单纯的技术驱动，应该转向以人为核心。

之后又对 CIM 的内涵进行了改进，突出了人的作用。1992 年国际标准化组织 ISO

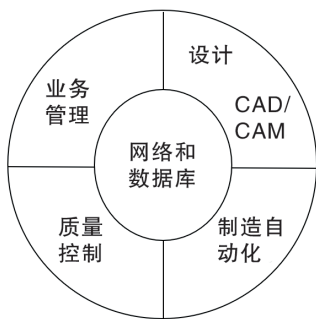


图 1.1 最早的 CIMS 轮图

TC184/SC5/WG1 对 CIM 进行了如下阐述: CIM 是把人的经营知识及能力与信息技术、制造技术综合应用,以提高制造企业的生产率和灵活性,由此将所有的人员、功能、信息和组织等方面集成为一个整体。

1993 年, SME 给出了 CIMS 的第三版轮图, 该图将顾客作为制造业一切活动的核心, 强调了人、组织和协同工作的重要性。

如图 1.2 所示, 该图共分五层, 中心第一层为顾客; 第二层为人员、小组和组织, 这表明企业全部活动围绕顾客的需要来进行, 而完成这一目标的关键要素是人, 这体现了技术与现代企业管理思想的深度结合, 是 CIM 理念的重大变化。

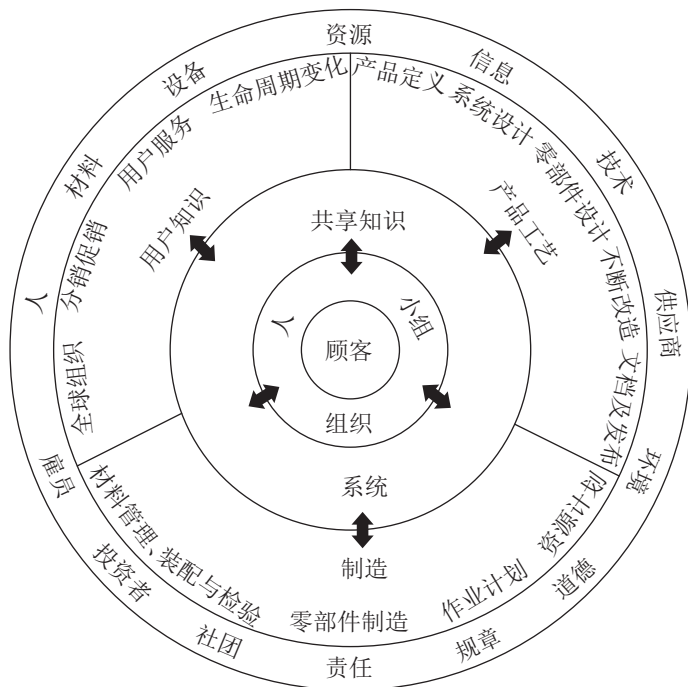


图 1.2 第三版 CIMS 轮图

1998 年, 我国的 863/CIMS 专家组结合国内外对 CIMS 的研究, 以及我国 10 多年的实践经验和教训, 给出 CIMS 的一个比较系统和全面的定义^[5,6]: 将信息技术、现代管理技术和制造技术相结合, 并应用于企业产品全生命周期(从市场需求分析到最终报废处理)的各个阶段。通过信息集成、过程优化及资源优化, 实现物流、信息流、价值流(三流)的集成和优化运行, 达到人(组织)、经营管理和技术(三要素)的集成, 以加强企业新产品开发的 T (Time to Market, 上市时间)、Q (Quality, 质量)、C (Cost, 成本)、S (Service, 服务)、E (Environment, 环境), 从而提高企业的市场应变能力和竞争能力。

1999 年 CIMS 专家组给出了 CIMS 技术体系, 包括总体技术、设计自动化技术、加工生产自动化技术、经营管理与决策系统技术, 流程制造 CIMS 中生产过程控制技

术,以及支撑平台技术。涵盖了信息技术在制造业中应用的几乎所有内容。

因此,中国的 CIMS 概念已经大大超出 CIMS 最开始的内涵和内容,成了制造业信息化的代名词。

从 20 世纪 90 年代中后期,制造信息化领域逐渐出现并兴起了一批新概念和新技术,比如敏捷制造、网络化制造、协同产品商务、供应链管理等,而 CIMS 这一概念在欧美国家逐渐淡出。

为适应这种变化,CIMS 几度改名,先是把计算机(Computer)改成现代(Contemporary),缩写还是 CIMS,后来又改成现代制造集成系统(CMIS),后来又改成网络化协同制造。

但不管名字怎么改,我国制造业信息化或工业信息化的发展是一脉相承的。CIMS 的研究和实践对我国制造业信息化的发展起到了巨大的推动作用,并直接或间接地影响了后续国家层面有关制造业转型升级的一系列重大决策。例如:

《中国制造 2025》;

《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》;

《发展服务型制造专项行动指南》;

《智能制造发展规划(2016—2020 年)》;

《“十三五”先进制造技术领域科技创新专项规划》;

《新一代人工智能发展规划》;

《国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》。

进入 21 世纪以来,世界各国纷纷针对各自制造业的发展,制定了一系列战略规划,比如:美国的“先进制造伙伴计划”,欧盟的“智能制造系统 2020 计划”,英国的“《未来的制造》报告”,法国的“未来智能工厂计划”,日本的“未来新工业和新市场的研究计划”,其中最著名的是德国的“工业 4.0 计划”。

这预示着,新一代信息技术与制造业的融合正在推动一场新的工业革命。

1.4 迈向工业 4.0

经历了机械化、电气化和信息化三次工业革命,人类迎来了第四次工业革命,迈向工业 4.0 时代。在德国工程院、弗劳恩霍夫协会、西门子公司等德国学术界和产业界的共同推动下,工业 4.0 的概念最初在 2013 年的德国汉诺威工业博览会上首次正式亮相,同年德国联邦教育研究部工业 4.0 工作组正式发布了《把握德国制造业的未来:实施工业 4.0 战略的建议》。工业 4.0 旨在推动制造业的数字化、自动化和智能化转型,以提高生产效率、灵活性和创新能力^[7]。

工业 4.0 战略体系可以用一个核心、两大主题、三维集成、八项计划来概括^[43]。其中,一个核心是指 CPS(Cyber-Physical System),也就是信息物理融合系统。两大

主题是智能工厂和智能生产。三维集成是指价值网络中的企业之间的横向集成，贯穿价值链的端到端集成，企业内部灵活组合的智能化制造系统的纵向集成。八项计划指的是标准化和参考架构、工业宽带基础设施、安全和保障、工作的组织和设计、培训和持续的职业发展、监管框架、资源利用效率。

如图 1.3 所示，以典型的工业 4.0 未来工厂西门子安贝格智能工厂为例，安贝格智能工厂坐落于德国巴伐利亚东部小城纽伦堡，始建于 1989 年，主要生产具有世界领先水平的西门子（SIEMENS）可编程逻辑控制器 PLC。PLC 是实现机器设备自动化控制的核心器件，类似 CPU 对于计算机的作用。通常汽车制造需要 50~100 套 SIEMENS 控制系统，而安贝格智能工厂的产品种类将近 1000 种。安贝格智能工厂建成以来，在工厂场地和人员都没有增加的前提下，产能提升了 8 倍，产品质量提升了 40 倍。安贝格智能工厂作为西门子的示范工厂，具有一组让人惊叹的数据。安贝格智能工厂年产超过 1200 万件产品，每 1 秒就能产出 1 个产品，而且合格率达到了惊人的 99.9985%。安贝格智能工厂管理着 30 亿个元器件，拥有 5 千米的地下元器件运输带。75% 的工序由生产设备和计算机自主完成，只有四分之一的工作需要人工完成^[44]。

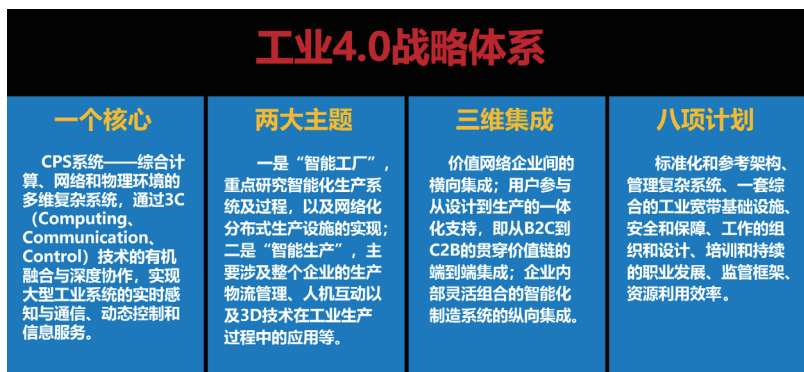


图 1.3 工业 4.0 战略体系

在西门子公司的安贝格智能工厂中，核心技术之一是 CPS。CPS 也就是信息物理融合系统，是实现工业 4.0 的基础，主要技术可以通过 3 个 C 来概括，也就是 Computing（计算）、Communication（通信）、Control（控制技术），通过 3C 技术的有机融合和深度协作，实现大型工业系统的实时感知与通信、动态控制和信息服务。CPS 使得各类工业物理设备能够连接到互联网上，并且使得工业物理设备具备了网络化感知、通信、计算、控制与协同的智能化功能，为工业物理世界和数字虚拟世界的有机融合提供核心技术的支撑。

德国工业 4.0 的落脚点就是智能工厂，首先关注的是如何实现智能生产。工厂里的“智能”体现在以下多个方面。工厂的各种机器设备以及加工件、物料，都能够接入有线或无线网络，从而能够实时地感知它们的状态。并且，机器设备经过智能化改造，将具有计算能力，例如当设备存在故障隐患时，能够智能化地预知并发出提醒和警报。再

如,视觉监测设备可以通过人工智能算法的图像分析,智能化地判断产品的表面加工质量是否有瑕疵。每个加工件都有自己的ID,里面记录了自己的身份信息,可以与生产设备进行通信和交流,告诉生产设备自己应该在什么时间、在哪条产线、哪个工序、被如何操作和加工。在虚拟环境中,生产流程可以被灵活地规划和调整。因此,同一条产线可以柔性地适应多个品种的产品生产流程,通过虚拟环境和物理环境的互相协作,构建具有柔性可重构能力的智能化产线,实现产品的个性化定制^[3]。同时,整个制造过程的数据都会被记录下来,形成制造大数据,使得所有的生产过程都可以追溯,并且从大数据中可以挖掘出潜在的模式和规律,例如,对于类似的定制化产品,在历史生产数据中学习并发现更为优化的工艺方案、更为高效的排产方案等。智能工厂的未来,将实现工况自感知、工艺自学习、设备自执行、系统自组织的美好愿景和目标。

工业4.0追求三个维度的集成。

第一类是价值网络的横向集成。横向集成指的是处于价值链上的合作企业之间,通过信息网络来实现资源的优化整合。当前,制造业企业的各项业务,例如研发设计、生产制造、经营管理、运维服务等,都离不开上下游合作企业的协作,需要将以往局限于企业内部的业务范畴,扩展至与上下游供应链、产业链的价值链企业进行协作。因此,需要在物流、信息流、资金流等各方面与供应商、经销商、客户等进行集成,以提供更为及时的产品与服务。例如,产品的创新设计过程需要及时与供应商进行协同,以确定是否存在供应链断供的风险。再如,售出的产品如现在的新能源汽车,企业需要实时地与客户进行互动,以获取客户的改进反馈。通过横向集成,可以构建企业间的价值网络,实现资源的优化整合与价值增值。

第二类是企业内部的纵向集成和网络化制造系统。主要目标是将企业内部不同层面、不同业务阶段的各类IT系统集成在一起。从不同层面的系统视角出发,需要将工业现场设备控制相关的PLC、SCADA系统,与上层的制造执行系统MES,与更上层的企业资源计划系统ERP等,从下而上实现系统集成。从产品全生命周期不同业务阶段来说,需要将产品研发设计类系统CAD、工艺规划类系统CAPP、产品周期数据管理系统PDM、经营管理类系统ERP、生产制造类系统MES、运维服务类系统PHM等各类业务系统,进行深度集成,以实现企业内部各类信息孤岛的整合,实现企业内部所有业务环节信息的无缝集成。

第三类集成是全价值链的端到端集成。工业4.0体系下,通过CPS等新技术,将价值链中的企业协作流程,以及各类终端都连接了起来。围绕产品的全生命周期活动,任何跨域工厂车间、企业组织的协作流程节点都可以直接集成互联,而不会再像以往那样存在中间的流程断点。例如用户的改进需求,与设计企业的创新设计部门,以及生产制造企业的工艺规划部门,还有第三方物流企业等,可以围绕需求的变动敏捷地进行流程集成。同时,处于价值链中的各类终端设备和终端系统,如协作生产的分散企业产线中的机器人、数控机床,以及不同企业的制造执行系统之间,也可以围

绕协同生产的任务要求，进行端到端的集成。从而，整个价值链将不再有断点，实现从 B2C 到 C2B 的贯穿全价值链的端到端的全连接。

德国工业 4.0 战略规划设计好后，又从战术层面，制订了八项优先行动计划。分别是：标准化和参考架构模型，管理复杂系统，一套综合的工业宽带基础设施，安全和保障，工作的组织和设计，培训和持续的职业发展，监管框架，资源利用效率。

在八项优先行动计划中，标准化和参考架构模型处于首位。要实现工业 4.0 所期待的全面互联与集成，标准规范的制定是基础。从制造系统中网络化互联的多种多样的终端设备的角度来看，例如各类工业自动化设备、老旧生产设备、现场总线、可编程逻辑控制器、移动设备、服务器、工作站、网络接入设备等，异构网络协议七国八制，均需要标准化的网络接入。从制造环境中种类繁多的软件应用的角度看，如产线数据采集、生产计划排产、生产调度、质量检测、工艺优化、设备维护等功能接口，均缺乏标准化的互操作接口；各类企业 IT 系统如 ERP、MES、PLM、PHM、SCM、CRM 等，也缺乏统一的标准。上述问题标准化是实现工业 4.0 的前提和基础。

如图 1.4 所示，在工业 4.0 战略的愿景目标下，德国发布了工业 4.0 参考架构模型 RAMI 4.0。通过三个维度，构建了一个三维的立体空间的模型。第一个维度，在纵轴也就是 Layers 层级维度上，主要体现的 CPS 的各项核心功能，自底而上从物理层到信息物理层再到信息层以及管理层，包括工业资产、集成、通信、信息、功能、业务流程等。第二个维度，在产品全生命周期以及业务价值链也就是 Stream 维度上，建立了产品从需求、研发、生产、交付、运维服务等全生命周期价值流，描述了工业要素从虚拟原型到产品实物的全过程，基于 IEC 62890 标准将其分为虚拟原型和实物制造两个阶段。第三个维度，遵循 IEC 62264 和 IEC 61512 标准，建立了工业互联世界的层级模型，包括从产品和设备的互联，到产线工作单元的互联，再到企业的互联，旨在分层描绘工业 4.0 的全互联世界。

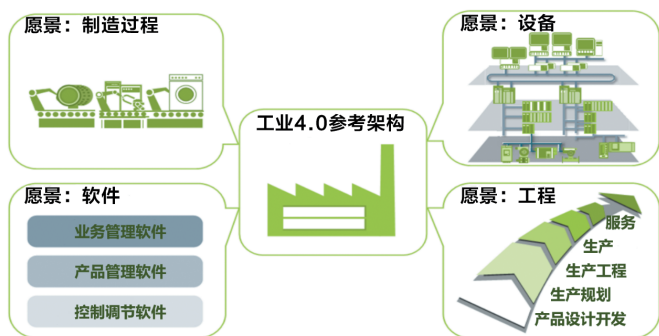


图 1.4 德国工业 4.0 战略愿景目标（来源：西门子 2013）^①

^① 图 1.4 引用网址为 https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf。

如图 1.5 所示，这个参考架构模型，代表了德国对工业 4.0 战略的全局视角。基于这个模型，各个企业都可以在整个三维体系中寻找自己的位置。

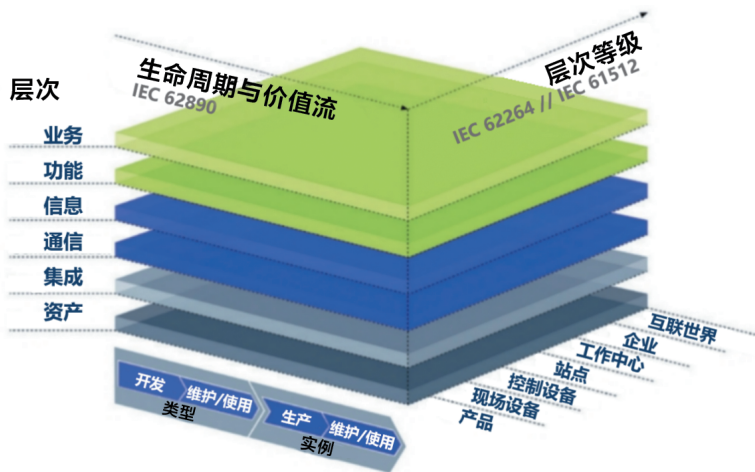


图 1.5 德国工业 4.0 参考架构模型 RAMI 4.0 (来源: Platform Industrie 4.0) ^①

1.5 新一代智能制造

当前社会正处于大制造时代。从时间尺度上讲，大制造过程包括从产品有市场需求，到研发设计、生产制造、试验测试、交付客户、运维服务，再到最终报废处理的全生命周期。从空间尺度来讲，大制造过程涉及从企业内到企业间再到全球化的协作。制造企业的范畴也由传统离散型制造和流程制造发展到了信息制造业、生物产品制造业等新兴制造业。

制造业是国民经济、国计民生和国家安全的重要基石，在第四次工业革命的冲击下，全球制造业都面临着新技术革命和产业变革带来的挑战，特别是新一代信息通信技术与制造业的深度融合，正在引发制造模式、制造手段和整个生态系统的重大变革。近十几年来，全球各国都纷纷制定了国家制造业战略规划^[45]。例如，美国在 2012 年制订了国家制造业创新网络计划，时任美国总统宣布投资至少 10 亿美元建立全美制造业创新网络，将高端制造业牢牢攥在美国本土手中。在 2013 年德国工业 4.0 战略规划提出之后，2021 年欧盟又提出了工业 5.0。英国曾经提出高价值制造计划。法国也提出了未来智能工厂计划。我国也相继提出了“互联网+”行动计划，国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见，国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见等。以上国家战略规划的核心内容是积极发展智能制

① 图 1.5 引用网址为 https://baike.baidu.com/item/%E5%B7%A5%E4%B8%9A4.0%E5%8F%82%E8%80%83%E4%BD%93%E7%B3%BB/22197548?fr=ge_alo。

造的技术、产业和应用，实现面向智能制造的新模式、新手段和新业态。

近年来，工业 5.0 的提出并未取得像当年工业 4.0 带来的冲击效应。工业 5.0 强调以人为中心构建人一信息一物理三元融合系统^[8, 9]，期望在复杂工业网络和数字孪生的基础上，建立知识互联的智慧工业世界，并且更加关注绿色环保的可持续性制造，例如对于双碳目标的重视。同时，工业 5.0 强调建立更为健壮的工业体系。

回顾工业革命的历程，人类的生产制造模式的变革一直伴随着工业革命，蒸汽机革命使得传统的手工作坊走向了机械化生产，电气化革命又催生了大规模生产线，信息化革命造就了计算机集成制造系统。在前三次工业革命浪潮中，英国、德国、美国占得了先机，也发展为全球工业制造业最具竞争力的国家。如今我们正面临新工业革命，在迈向个性化、智能化制造的新历史时期，中国有望实现弯道超车，与欧美发达国家一争高下，这是当前中国面临的难得的历史机遇。

当前，中国制造业正面临从价值链的低端向中高端，从制造大国向制造强国、从中国制造向中国创造转变的关键历史时期。我国许多制造企业处在“微笑曲线”下端，附加价值低。国际高端制造业巨头企业，例如苹果和特斯拉，其核心竞争力都分布在微笑曲线的两个嘴角，也就是高附加价值的区域。中国制造业的主要问题包括：

(1) 产品创新开发和产品质量，以及产品服务方面的竞争能力低；

(2) 产品制造能耗高，并对环境污染严重；

(3) 工业基础薄弱，关键基础材料，核心基础零部件/器件，先进基础工艺，质量技术基础，都比较薄弱；

(4) 产品产业链的集成和优化能力低；

(5) 制造业信息化水平低。

中国制造业要应对挑战，抓住机遇，必须加快推进“五个转型升级”：第一，由技术跟随战略向自主开发战略转型再向技术超越战略转型升级；第二，由传统制造向数字化、网络化、智能化制造转型升级；第三，由粗放型制造向质量效益型制造转型升级；第四，由资源消耗型、环境污染型制造向绿色制造转型升级；第五，由生产型制造向“生产+服务型”制造转型升级^[46]。

在这样的时代背景下，为了应对国际新工业革命的竞争，我国于 2018 年提出了新一代智能制造的概念，也就是数字化网络化智能化制造范式^[10]。

如图 1.6 所示，第一种基本范式是数字化制造。数字化制造创新主要聚焦于企业资深竞争力的提高，包括产品的数字化，制造活动例如论证、设计、生产、仿真、实验、管理、销售、运营、维修等活动的数字化，制造资源和设备的数字化，以及人和组织的数字化。其目标是提高产品创新水平，提高质量，提高生产效率，提高经济效益。



图 1.6 数字化制造

如图 1.7 所示，第二种基本范式是数字化网络化制造，推动企业融入产业链生态网络体系。典型模式包括以用户为中心的个性化定制，例如海尔、小米等产品设计和生产，能够通过与用户交互的平台，与用户实现双向沟通，满足用户个性化需求，使得企业从以产品为中心向用户为中心转变。再如网络化协同制造模式，能通过资源共享和协同平台，实现制造资源的全社会优化配置，基于互联网和云平台开展制造业全生命周期的业务协同、数据协同、模型协同，实现协同设计和协同制造研发、协同制造。并且，能够推动制造业服务化转型，通过远程运维平台，延伸企业的产业链，使企业能够为用户提供远程运维、故障检测等服务，使企业从生产型企业向生产服务型企业转型，提高企业服务能力和高附加值竞争力。

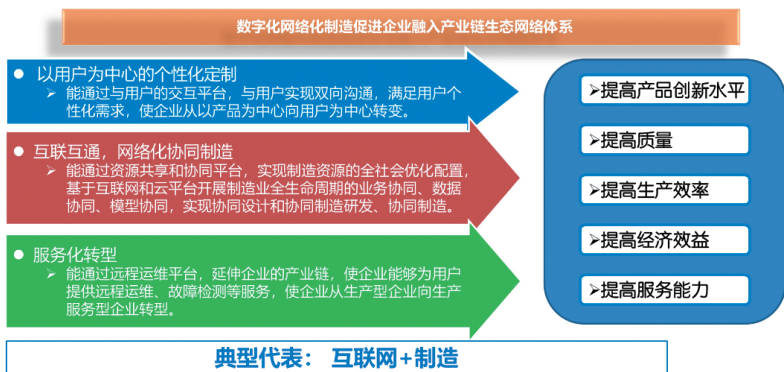


图 1.7 数字化网络化制造

第三种范式，也就是数字化网络化智能化制造，是未来新一代智能制造的基本范式。我们从人类的生产活动改造物理世界说起，最初在工业 1.0 和工业 2.0 时代，人通过机械工具的发明代替了部分体力劳动，直接作用于物理系统。到了工业 3.0 信息化时代，我们将规律性重复性的脑力工作变成了可自动执行的程序代码，交给了信息系统来执行，于是形成了人一信息一物理系统。这时，在大部分体力劳动被代替的同时，部分脑力劳动可以被信息系统来代替，这是所谓授之以鱼，我们注意，这个

“鱼”只是按程序代码一五一十地执行，它并不具有创造性，在制造业的创新性研发设计、工艺优化、异常工况决策等活动中往往无能为力。未来的新一代人一信息一物理系统中，将深度地融入新一代人工智能技术，信息系统将具有学习和创造能力，在代替大量脑力劳动时能够代替部分的创造性活动，这是所谓的授之以渔，它可以从千千万万个历史的产品设计案例中学习知识，自我设计创造出人类难以完成的全新产品方案。它也可以从海量的工艺数据中自己发掘并构建工艺优化方案。未来工业互联网的世界将不再是目前设备和业务流程的连接，将是智慧互联的大集成网络，在此基础上构建智能制造的云平台，提供智能产品、智能生产和智能服务。未来的新一代智能制造系统，将显著提高产品创新水平、质量、效率、服务能力。

如图 1.8 所示，数字化网络化智能化制造让工业世界里的人、机、物彼此连接和对话，机器设备甚至可以和被加工的工件直接交流，自主决定后续的加工工作。此外，它让机器能够学习人的技能，学会思考与应变，能够像人一样协作完成任务。更加超出想象的是，它将让你置身于虚实共生的工业元宇宙世界。曾经出现在科幻大片《变形金刚 4》中外形酷炫的越野车，从流线型的车身外观设计、到发动机、轮胎、内饰，全都通过个性化定制进行了独一无二的创新设计。它们来自一家只有 10 名正式员工的汽车公司 Local Motors。尽管没有庞大的研发中心、生产工厂和销售团队，但是公司的愿望是引领下一代汽车的创新设计与制造，颠覆整个汽车行业。Local Motors 公司建立了全球互联网的“开源汽车”社区，汇集了全球 121 个国家至少 8000 余名汽车爱好者、设计师、工程师、制造商的群体智慧，众包完成极具个性化的汽车的私人定制。从设计到制造，这家汽车公司都展示了十足的未来感，这就是新一代智能制造将带给每个人的改变。

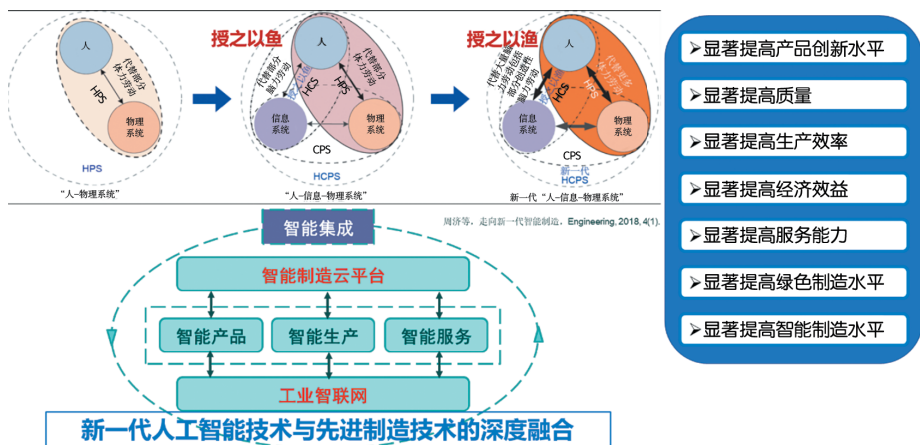


图 1.8 数字化网络化智能化制造^①

^① 图 1.8 引用文献为：周济，李培根，周艳红，等. 走向新一代智能制造 [J]. Engineering, 2018, 4(1).

为了实现新工业革命和未来新一代智能制造的美好愿景，工业互联网为所有这一切提供了新型基础设施的核心支撑。工业互联网是新一代信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态，通过对人、机、物、系统等的全面连接，构建起覆盖全产业链、全价值链的全新制造和服务体系，为工业乃至产业数字化、网络化、智能化发展提供了实现途径。工业互联网是第四次工业革命的重要基石。工业互联网将支撑工业世界从目前的数字化单点优化，走向网络化全面互联网，进一步实现智能化的全局智能^[47]。