

崇尚科学 · 探索未知

高等职业教育科普教育系列教材

智能制造


概论

丛书主编 ◎ 沈言锦

本书主编 ◎ 陈 强 李 湾



配 微课视频
电子课件

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业教育科普教育系列教材

智能制造 概论



丛书主编 ◎ 沈言锦

本书主编 ◎ 陈强 李湾

本书副主编 ◎ 胡艳华 赵橄培 王嵘

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书共分6章,分别为智能制造的发展历程、智能制造系统架构与基本理念、智能制造核心技术、智能制造技术融合、智能工厂与智能生产、智能制造的应用,旨在帮助读者掌握智能制造的基础理论和关键技术,了解智能工厂和智能生产的构建及实现场景,树立智能制造新思维。

本书适合作为高等职业院校智能制造工程、机械工程及相关专业开设的智能制造概论、智能制造导论、智能制造基础等课程的教材,也可作为对智能制造感兴趣的读者的科普知识读物。

本书配有微课视频,读者扫描书中二维码,即可观看。

为方便教学,本书配有电子课件、习题及答案等数字资源,使用本书作为授课教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网(www.cmpedu.com)下载,也可来电(电话:010-88379375)咨询。

图书在版编目(CIP)数据

智能制造概论 / 陈强, 李湾主编. —北京: 机械工业出版社, 2023.12 (2024.8重印)
高等职业教育科普教育系列教材 / 沈言锦主编
ISBN 978-7-111-75022-2

I. ①智… II. ①陈… ②李… III. ①智能制造系统—高等职业教育—教材
IV. ①TH166

中国国家版本馆CIP数据核字(2024)第003041号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 杨晓昱 责任编辑: 杨晓昱

责任校对: 张征 梁静 封面设计: 马精明

责任印制: 刘媛

北京中科印刷有限公司印刷

2024年8月第1版第4次印刷

184mm × 260mm · 10.25印张 · 164千字

标准书号: ISBN 978-7-111-75022-2

定价: 49.00元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前言

中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于新时代进一步加强科学技术普及工作的意见》指出，“科学技术普及（以下简称科普）是国家和社会普及科学技术知识、弘扬科学精神、传播科学思想、倡导科学方法的活动，是实现创新发展的重要基础性工作”，并要求“高等学校应设立科技相关通识课程，满足不同专业、不同学习阶段学生需求，鼓励和支持学生开展创新实践活动和科普志愿服务”“强化职业学校教育和职业技能培训中的科普。弘扬工匠精神，提升技能素质，培育高技能人才队伍”。

党的二十大报告进一步提出加强国家科普能力建设，将科普作为提高全社会文明程度的重要举措。

为了落实党的二十大精神 and 《关于新时代进一步加强科学技术普及工作的意见》的文件精神，强化高职院校的科普教育，湖南省多家高职院校、研究机构共同编写出版高等职业教育科普教育系列教材，本书为该系列教材之一。

党的二十大报告明确提出“坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。”智能制造是推进新型工业化的重要突破口和着力点。智能制造能够提高生产效率、提升产品质量、实现个性化定制、优化资源配置、推动绿色环保、促进产业升级、创造新的就业机会、实现人才结构优化，进而加快推进中国工业的五个转型升级，实现工业的数字转型与智能化升级，使我国制造大国的地位进一步巩固。

本书共分6章，分别为智能制造的发展历程、智能制造系统架构与基本理念、智能制造核心技术、智能制造技术融合、智能工厂与智能生产、智能制造的应用，

旨在帮助读者掌握智能制造的基础理论和关键技术，了解智能工厂和智能生产的构建及实现场景，树立智能制造新思维。

本书编写遵循下列 4 个要点：①以深入浅出的方式，激发读者崇尚科学、探索未知的兴趣，促进其科学素质的提高；②介绍基本概念或解释原理框架，让读者能切实理解和掌握智能制造技术的基本原理及相关应用知识；③提供浅显易懂的案例，善用学习金字塔的学习效能要求，便于读者采用多元学习方式；④每章设置了难度适中的思考与练习题，让读者在练习后能够更自信地建构智能制造的基本观念与技术框架。

本书内容力求突出通识性和实用性，便于教学。成渝 AI 智能视觉检测服务应用与示范、沈阳机床“终端+云端+商业模式”、三一重工 18 号工厂等案例都展示了中国式现代化的生机活力与美好未来。

本书适合作为高等职业院校智能制造工程、机械工程及相关专业开设的智能制造概论、智能制造导论、智能制造基础等课程的教材，也可作为对智能制造感兴趣的读者的科普通识读物。感谢湖南省教育科学研究院、湖南汽车工程职业学院、湖南九嶷职业技术学院、永州职业技术学院、长沙环境保护职业技术学院等研究机构和院校对本书编写给予的大力支持。

由于编者水平有限，书中难免存在缺陷和不足，请读者不吝指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 智能制造的发展历程

1.1 智能制造概念的产生 (微课 1)	003
1.1.1 工业 1.0 时代	004
1.1.2 工业 2.0 时代	004
1.1.3 工业 3.0 时代	005
1.1.4 工业 4.0 时代	006
1.1.5 智能制造的概念	007
1.2 智能制造发展的三个阶段 (微课 2)	008
1.3 智能制造的国内外发展概况 (微课 3、4、5)	009
1.3.1 德国“工业 4.0”	009
1.3.2 美国“先进制造”	012
1.3.3 英国“先进制造”	013
1.3.4 我国“新型工业化”	015
思考与练习	017

第 2 章 智能制造系统架构与基本理念

2.1 智能制造系统架构 (微课 6、7、8)	021
2.1.1 产品生命周期管理系统	021
2.1.2 系统层级	023
2.1.3 智能特征	024
2.2 智能制造的基本理念 (微课 9、10、11)	027
2.2.1 绿色制造与人及社会	027
2.2.2 个性化定制与维护	029
2.2.3 精益生产	032
思考与练习	036

第 3 章 智能制造核心技术

3.1 数字化制造技术 (微课 12、13、14、15)	041
------------------------------	-----

智能制造概论

3.1.1	产品数据的数字化处理	041
3.1.2	逆向工程技术	042
3.1.3	增材制造技术	047
3.1.4	虚拟制造技术	050
3.2	智能检测技术 (微课 16、17、18、19、20)	054
3.2.1	射频识别技术	057
3.2.2	机器视觉检测技术	064
3.2.3	无损检测技术	069
	思考与练习	076

第 4 章 智能制造技术融合

4.1	智能制造与工业大数据 (微课 21)	081
4.1.1	什么是工业大数据	081
4.1.2	工业大数据分析类型	082
4.1.3	工业大数据在智能制造领域的应用	082
4.2	智能制造与工业互联网 (微课 22)	085
4.2.1	什么是工业互联网	085
4.2.2	智能制造与工业互联网的特征、侧重点	086
4.2.3	智能制造与工业互联网的联系	087
4.3	智能制造与工业物联网 (微课 23)	092
4.3.1	什么是工业物联网	092
4.3.2	工业物联网的安全问题	093
4.3.3	工业物联网与智能制造的联系	094
4.4	智能制造与数字孪生 (微课 24)	095
4.4.1	数字孪生概述	095
4.4.2	数字孪生的概念模型	097
4.4.3	数字孪生的成熟度模型	098
4.4.4	数字孪生的关键技术	099
4.4.5	数字孪生在智能制造领域的应用	103
4.5	智能制造时代工程师的伦理责任 (微课 25)	108
	思考与练习	110

第5章 智能工厂与智能生产

5.1 从数字化工厂到智能工厂的演化 (微课 26)	113
5.1.1 数字化工厂和智能工厂的对比	113
5.1.2 智能工厂的演化过程	114
5.2 智能工厂的构造与核心技术 (微课 27)	116
5.2.1 智能工厂的含义	116
5.2.2 智能工厂的分类	116
5.2.3 智能工厂的特征与构造要素	117
5.2.4 智能工厂的核心技术	118
5.3 智能工厂的基本结构与建设方案 (微课 28)	119
5.3.1 智能工厂的基本结构	119
5.3.2 智能工厂的建设方案	120
5.4 智能生产 (微课 29)	121
5.4.1 智能生产系统的特点与构成	121
5.4.2 智能生产系统模型	124
5.5 案例: 三一重工 18 号工厂	126
思考与练习	133

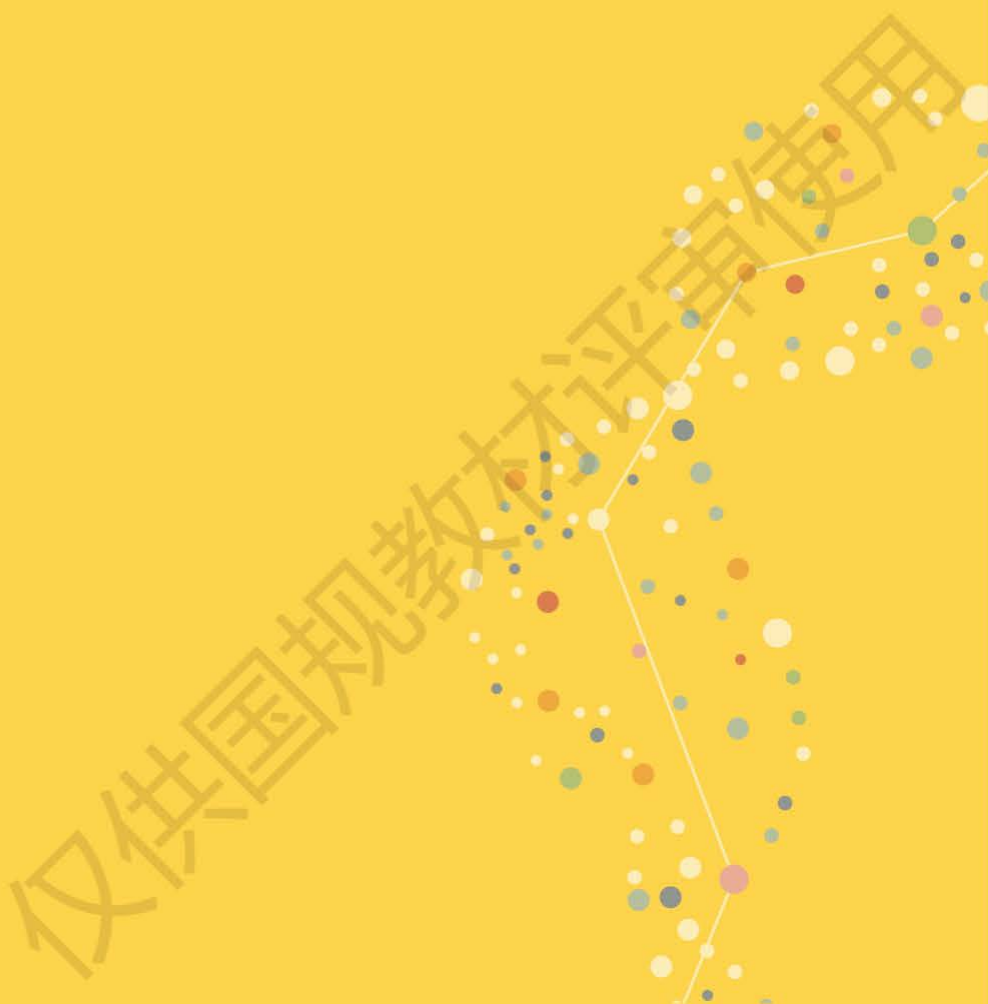
第6章 智能制造的应用

6.1 智能制造应用模型 (微课 30、31、32、33)	137
6.1.1 基于动作分析和工艺的智能生产模型	137
6.1.2 基于 BOM 和流程的运营管理模式	139
6.1.3 基于工业大数据的智能决策模型	142
6.1.4 基于产品和服务的智能商业模型	145
6.2 智能制造应用案例 (微课 34、35)	147
6.2.1 青岛红领集团	147
6.2.2 圣龙股份全业务链数字化	149
思考与练习	153

参考文献	155
------	-----

01

第 1 章 智能制造的发展历程



仅供国规教材评审使用

智能制造概论

知识目标

- 了解智能制造的概念，熟悉智能制造的发展历程。
- 了解国内外智能制造发展概况，熟悉“新型工业化”的内容。
- 了解智能制造业的机遇与挑战。

科普素养目标

- 通过了解智能制造的发展历程，学会主动追根溯源。
- 通过对国内外智能制造发展的了解，扩大视野。
- 通过对我国新型工业化发展进程的了解，培养爱国主义情怀。

仅供国规教材评审使用

智能制造是21世纪以来工业制造业的重要发展方向，它采用信息、智能化和物联网等新技术，实现了生产过程的数字化、网络化、智能化和柔性化，提高了制造业的效率和质量。

2015年，我国提出了“中国制造2025”计划，旨在加快推动制造业向智能化、绿色化、服务化转型。随后，各地政府纷纷出台相关政策和规划，鼓励和支持智能制造的发展。这些政策的出台，为智能制造的发展提供了政策保障和市场环境。

2022年，党的二十大报告明确提出“坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。”



1.1 智能制造概念的产生

如图1-1所示，工业1.0是蒸汽机时代，工业2.0是电气时代，工业3.0是信息时代，而工业4.0其实就是“互联网+制造业”，也就是智能时代。

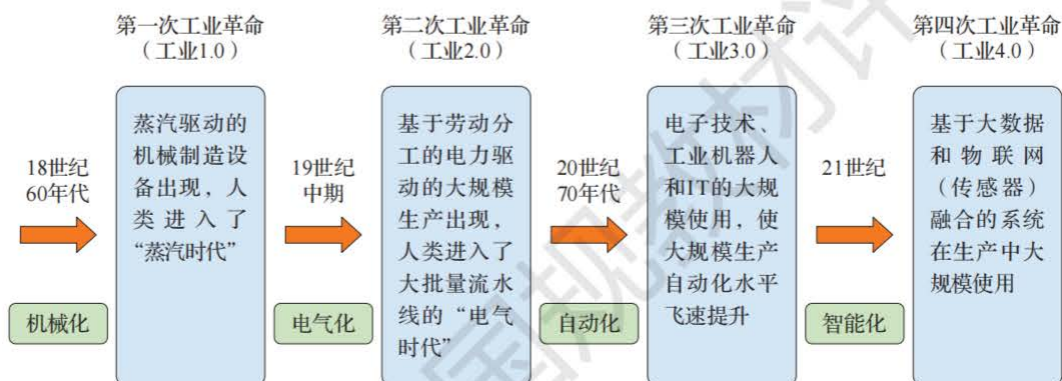


图 1-1 工业发展的四个阶段

1.1.1 工业 1.0 时代

第一次工业革命是工业发展史上的一次巨大革命，指的是 18 世纪 60 年代从英国发起的技术革命，开创了以机器生产代替手工劳动的时代。此次革命的标志是工作机的诞生和蒸汽机被广泛作为动力机使用，如图 1-2 所示。这次技术革命和与之相关联的社会关系的变革，被称为第一次工业革命或者产业革命。

第一次工业革命使工厂制得到广泛推广，从而逐步代替了传统的手工工场，用机器生产代替了手工劳动。从社会关系来说，工业革命使工业资产阶级和工业无产阶级形成和壮大起来，而依附于落后生产方式的自耕农阶级渐渐消失了。

这场技术革命本质上是从生产领域产生的变革，这次变革需要提供强有力的动力支持，而蒸汽机的改良为机器的普及以及大工厂制的建立奠定了坚实的技术基础，开创了以机器代替手工劳动的时代。



图 1-2 工业 1.0 时代

1.1.2 工业 2.0 时代

第二次工业革命是指 19 世纪中期，欧洲国家和美国、日本的资产阶级革命或改

革的完成促进了经济的发展，此次革命强调电力驱动产品的大规模生产，并开创了产品批量生产的新模式，人类进入“电气时代”，如图 1-3 所示。

在第二次工业革命中出现的新兴工业如电力工业、化学工业、石油工业和汽车工业等，都要求实行大规模的集中生产，垄断组织应运而生。垄断组织的出现，使企业的规模进一步扩大，劳动生产率进一步提高。控制垄断组织的大资本家为了攫取更多的利润，越来越多地干预国家的经济、政治生活，资本主义国家逐渐成为垄断组织利益的代表者。垄断组织还跨越国界，形成国际垄断集团，要求从经济上瓜分世界，促使各资本主义国家加紧了对外侵略扩张的步伐。

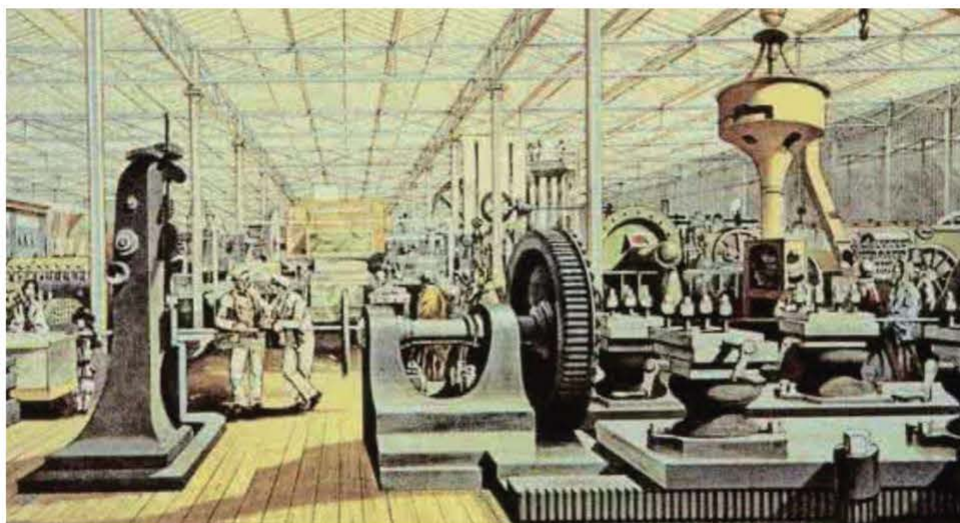


图 1-3 工业 2.0 时代

1.1.3 工业 3.0 时代

第三次工业革命始于 20 世纪 70 年代并一直延续到现在，以原子能、电子计算机、空间技术和生物工程的发明和应用为主要标志，是涉及信息技术、新能源技术、新材料技术、生物技术、空间技术和海洋技术等诸多领域的一场信息控制技术革命，如图 1-4 所示。第三次工业革命不仅极大地推动了人类社会经济、政治、文化领域的变革，还影响了人类生活方式和思维方式，是人类文明史上继蒸汽技术革命和电力技术革命之后科技领域里的又一次重大飞跃。



图 1-4 工业 3.0 时代

1.1.4 工业 4.0 时代

被称为第四次工业革命的“工业 4.0”概念最早出现在德国，2013 年 4 月在汉诺威工业博览会上正式推出，其核心是实现“互联网+制造业”的智能生产，通过互联网、大数据、人工智能等技术，将设计、生产、销售等环节数字化和智能化，从而生产出高度灵活的个性化和数字化的产品和服务，如图 1-5 所示。工业 4.0 不仅可以提高制造企业的效率和质量，还可以创造新型商业模式，满足消费者的多样化需求。工业 4.0 主要有以下几个特点。

1) 互联：互联工业 4.0 的核心是连接，要把设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密地联系在一起。

2) 数据：工业 4.0 连接的是产品数据、设备数据、研发数据、工业链数据、运营数据、管理数据、销售数据、消费者数据。

3) 集成：工业 4.0 将无处不在的传感器、嵌入式中端系统、智能控制系统、通信设施通过信息物理系统（Cyber-Physical Systems, CPS）形成一个智能网络。通过这个智能网络，使人与人、人与机器、机器与机器、以及服务与服务之间，能够形成互联，从而实现横向、纵向和端到端的高度集成。

4) 创新：工业 4.0 的实施过程是制造业创新发展的过程，制造技术、产品、模

式、业态、组织等方面的创新将会层出不穷，从技术创新到产品创新，到模式创新，再到业态创新，最后到组织创新。

5) 转型：对于传统制造业而言，实际上是从传统的工厂转型到具备工业 4.0 技术的工厂，整个生产形态上，从大规模生产转向个性化定制，整个生产的过程更加柔性化、个性化、定制化。



图 1-5 工业 4.0 时代

1.1.5 智能制造的概念

智能制造（Intelligent Manufacturing, IM）是一种由智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统，它在制造过程中能进行智能活动，诸如分析、推理、判断、构思和决策等。通过人与智能机器的合作共事，去扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。它把制造自动化的概念更新，扩展到柔性化、智能化和高度集成化。

由于每一位客户的需求不同，个性化或定制的产品不可能大批量生产，所以智能制造必须解决的第一个问题就是：单件小批量生产如何才能达到类似于大规模生产的效率和成本？而一家能够提供高品质和个性化产品的智能工厂的构建，就是以生产技术、环境和社会 / 人三方面和谐为前提的。

科普小百科

智能制造系统（IMS）

智能制造系统（Intelligent Manufacturing System, IMS）是1988年日本通产省（MITI）提出的一种智能制造方案，1989年形成了一份国际合作项目正式文件，目的是在21世纪全球化的大趋势下，通过国际合作共同研发新一代制造系统，迎接新世纪全球变化的挑战。智能制造系统项目对未来工厂的定义，大体上已经涵盖了当今智能制造的主要内容。智能制造系统项目得到了日本、美国、欧盟、韩国、瑞士、墨西哥等国家和组织的大力支持，数百家企业、高校和研究机构参与其中，持续不断地促进了智能制造系统的开发与应用。



1.2 智能制造发展的三个阶段

自动化和智能化是制造业不断发展的重要方向，它们的发展不仅提高了生产效率和质量，也使得制造业更加智能化和自动化，为实现智能制造打下了坚实的基础。智能制造的发展历程可以分为三个阶段。

第一个阶段是自动化生产。自动化生产是工业生产的基础，通过机械化设备、自动控制技术和传感器等技术手段，实现生产过程的自动化。自动化生产的发展使生产效率得到了大幅提升，但是仍然存在生产过程中需要人工干预的问题。

第二个阶段是智能化生产。智能化生产是在自动化生产基础上，通过信息技术和人工智能技术的应用，实现生产过程的智能化和自适应。智能化生产的出现，进一步提高了生产效率，同时更好地满足了市场对于个性化、高品质和小批量生产的需求。

第三个阶段是数字化生产。数字化生产是在智能化生产基础上，通过数字化技术、虚拟仿真技术和物联网技术等手段，实现生产全生命周期的数字化和智能化。

数字化生产的出现，让生产过程变得更加灵活、高效和智能化，还可以实现对生产过程的全面监控和优化。

未来，随着人工智能和其他新技术的不断发展，智能制造将会不断向更高的层次和更广泛的领域发展。



1.3 智能制造的国内外发展概况

1.3.1 德国“工业4.0”

随着新一轮技术浪潮的到来以及国际科技竞争的加剧，作为工业化强国，德国敏锐地感觉到新机遇、新挑战，为此及时制定并推进产业发展创新战略——“工业4.0”。德国主要从如下几个方面采取举措来推进实施“工业4.0”。

(1) 建立指导框架

2013年4月，德国机械及制造商协会等机构设立“工业4.0平台”并向德国政府提交了平台工作组的最终报告《保障德国制造业的未来——关于实施工业4.0战略的建议》，被德国政府采纳。

自此以后，德国陆续出台了一系列指导性规划框架。如2014年8月德国政府通过《数字化行动议程（2014—2017）》，旨在加速数字化转型进程，提高德国经济的竞争力。

2016年德国经济与能源部发布了“数字战略2025”，旨在推动德国经济的数字化转型。该报告提出了一系列措施，如加强数字基础设施建设、推进人工智能技术应用、加强数据保护等。

2018年10月德国政府发布“高技术战略2025（HTS2025）”，明确了德国未来7年研究和创新政策的跨部门任务、标志性目标以及微电子、材料研究与生物技术、人工智能等领域的技术发展方向、培训和继续教育紧密衔接的重点领域、创建创新

机构（跨越创新署），并通过税收优惠支持研发。

（2）推进数字化进程

数字化是指将物理世界中的信息转换为数字信号，并对其进行处理、存储、传输和展示等操作。数字化技术是“工业 4.0”实现的基础和关键技术之一。它可以将生产过程中产生的各种数据进行采集、处理和分析，并将其转换为有价值的信息。这些信息可以帮助企业更好地了解生产过程中存在的问题，并及时采取措施进行调整和优化。只有数字化进程得到推进，未来生产网络才能得以建立。

德国政府在 2017 年发布了“数字平台”白皮书，制定“数字化的秩序政策”，旨在推动数字化转型进程，加速德国经济的数字化转型。德国“工业 4.0”强调利用信息技术和制造技术的融合，来改变当前的工业生产与服务模式，既能使生产和交付更加灵活，又有助于提高能源利用效率，优化人才结构。

德国企业通过建立健全知识和技术转化机制，加速创新成果的商业化；通过广泛应用嵌入式软件，使产品具有记忆、感知、计算等功能。通过产品的智能化，大幅度提升产品附加值；通过互联网掌握已售产品的运行状态，帮助客户更好地使用产品，为客户创造新的价值，并进行预防性维护；同时，还通过这个系统采集产品运行过程中的各种数据，辅助产品进行升级换代，促进新产品的开发，以及其他市场经营行为的决策。

科普小百科

最接近工业 4.0 的智能制造工厂是什么样子的？

德国工业巨头西门子旗下的安贝格工厂创建于 1989 年，是欧洲乃至全球最先进的数字化工厂，被业界认为是最接近工业 4.0 概念雏形的工厂。安贝格工厂采取了结构化、精益化的数字工厂策略，部署了智能机器人、人工智能工艺控制和预测维护算法等技术，在产品复杂性翻倍、电力和资源消耗量不变的情况下，将工厂产量增加了 40%。该工厂拥有高度数字化的生产流程，能灵活实现小批量、多批次生产，每 100 万件产品中残次品仅为 10 余件，生产线可靠性达到 99%，可追溯性高达 100%。

（3）推进智能制造

智能制造是“工业 4.0”的核心，它通过嵌入式的处理器、存储器、传感器和通信模块，把设备、产品、原材料、软件联系在一起，使得产品和不同的生产设备能够互联互通并交换命令。除了产品和机器的互联外，“工业 4.0”还将在未来实现工厂、消费者、产品、信息数据的互联，最终实现万物互联，从而重构整个社会的生产方式。

（4）打造标准化

“工业 4.0”战略的落实需要把各种不同产业领域及环节之间的隔阂打通，实现关键技术术语、规格标准等联机语言的统一化和标准化。统一的标准是德国“工业 4.0”得以实现的基本保障。为了保障“工业 4.0”的顺利实现，德国把标准化排在第一位。德国在政府、协会、企业等合作的基础上，制定了 8 项优先行动计划，其中将标准化排在 8 项计划的首位。

继 2013 年 12 月德国电气电子和信息技术协会发布首个“工业 4.0”标准化路线图，就“工业 4.0”涉及的技术标准和规格为所有参与方提供一个概览和规划基础之后，德国工业界与标准化领域权威机构于 2016 年共同宣布设立“‘工业 4.0’标准化理事会”，提出“工业 4.0”数字化产品相关标准并协调其在德国和全球范围内落地。德国正是通过标准的推广和应用，使得技术创新得以迅速扩散，并转化为现实的生产力提升。

（5）完善人才培养

培养人才是实施“工业 4.0”的重要环节，也是企业发展的核心要素。在实施“工业 4.0”战略中，数字化的日益普及极大地改变了现有生产内容与工艺流程，并对劳动者的知识技能和工作习惯提出新的要求。因此，工业技师需要更强的协调和领导能力。德国技师培训也进行了相应变革，重点培养工业技师生产流程优化、新产品研发成本评估、企业人员规划及培训等能力。

（6）强化创新合作

实施“工业 4.0”战略需要巨大的资金支持。为此，德国政府、各州政府、政策性银行和大型企业设置了高科技创业基金，对实施“工业 4.0”的创新型企业研发给予风险投资支持。

除此之外，德国还积极拓展与欧盟及其他国家的教育与科技合作。比如，2017年6月，德国“工业4.0”应用平台、法国未来工业联盟和意大利国家“工业4.0”计划三家机构就生产数字化开展三方合作行动方案达成一致；2017年，德国联邦教育及研究部为国际合作投入超过8.5亿欧元；2018年1月1日，德国联邦经济合作与发展部发布新修订的中小企业创新核心计划（ZIM）即“国际化模式探索”项目。

1.3.2 美国“先进制造”

2022年10月7日，美国政府发布了2022版《先进制造业国家战略》，与2018年版相比，该战略突出强调了为美国制造业注入新活力的重要性以及构建制造业供应链弹性的紧迫性。该战略指出，美国仍是先进技术的领导者，但在一些高科技制造领域的生产能力以及就业吸纳能力急剧下降。因此，该战略提出了美国在先进制造领域的愿景和目标，包括开发和实施先进制造技术、发展先进制造业劳动力和加强制造业供应链韧性等三个互相关联的目标。该战略还确定了未来四年的11项战略方向及相关技术方案建议，涉及清洁和可持续制造、微电子和半导体制造、生物制造、新材料和新加工技术、智能制造等领域。该战略旨在促进美国的经济增长、创造高质量的就业机会、增强环境可持续性、应对气候变化、加强供应链韧性、确保国家安全并改善医疗保健条件。

科普小百科

美国的“先进制造”战略和德国的“工业4.0”的区别

1. 政策目标

美国的“先进制造”战略的政策目标是提高美国在全球科技领域的竞争优势和领导地位，通过创新和投资来推动清洁能源、微电子、生物经济、新材料、智能制造等领域的发展，同时应对竞争对手的挑战和威胁。

德国的“工业4.0”的政策目标是提高德国制造业的效率和质量，通过数字化和智能化来实现物联网、大数据、云计算、人工智能等技术在制造业中的应用，同时应对全球市场变化的需求。

2. 政策主体

美国的“先进制造”战略是由政府主导，以总统办公室和总统科技顾问委员会为核心，指导和支持先进制造业的发展。

德国的“工业 4.0”是由企业主导，以西门子为代表，提出“工业 4.0”的概念和方案，同时得到政府的支持和配合，发布了《创新为德国——高新科技战略》，作为国家层面的指导方针。

3. 政策内容

美国的“先进制造”战略涉及多个领域，包括清洁能源、微电子、生物经济、新材料、智能制造等，其中最具代表性的是工业互联网，即利用物联网、大数据、云计算等技术，将人、数据和机器连接起来，形成开放的、全球化的工业网络。

德国的“工业 4.0”主要关注制造业领域，包括物联网、大数据、云计算、人工智能等技术在制造业中的应用，其中最具代表性的是智能工厂，即利用物联网、大数据、云计算等技术将生产中的供应、制造、销售信息数据化和智能化，实现快速、有效、个性化的产品供应。

4. 政策效果

美国的“先进制造”战略在一定程度上提升了美国在全球科技领域的竞争力和领导地位，推动了清洁能源、微电子、生物经济、新材料、智能制造等领域的创新和发展，同时也增强了美国在供应链安全和韧性方面的主动权和优势。

德国的“工业 4.0”在一定程度上提升了德国制造业的效率和质量，实现了物联网、大数据、云计算、人工智能等技术在制造业中的应用，同时也满足了全球市场变化的需求。

1.3.3 英国“先进制造”

英国是全球现代工业革命的“摇篮”，第一次工业革命就发源于英国，制造业在英国经济中占有重要地位。制造业曾经给英国带来 300 多年的经济繁荣，但 20 世纪 80 年代以来，英国开始推行“去工业化”战略，不断缩减钢铁、化工等传统制造

业的发展空间，将汽车等许多传统产业转移到劳动力及生产成本相对低廉的发展中国家，集中精力发展金融、数字创意等高端服务业。

2008年国际金融危机爆发后，英国GDP一度转向负增长，让英国政府意识到以金融为核心的服务业无法持续保持国际竞争力，于是开始探索重振制造业，并将制造业复苏作为英国经济发展的重中之重，相继颁布了一系列扶持政策。随着政策效果不断显现，英国制造业逐步缓慢复苏。

为保持和强化先进制造业的国际领先优势，英国政府近年来先后出台了一系列产业扶持政策，主要集中在以下几个方面。

1) 促进制造业回流。金融危机使过度依赖虚拟经济的英国受到巨大冲击，英国政府意识到只有同时抓好实体经济，才能稳定经济发展，于是“重振制造业”被提上日程。

2) 对科研、技术、基础设施等予以资金支持。2014年12月，英国政府发布了《我们的成长计划：科学和创新》政策报告，提出要加强科技人才的培养，加大对英国科技基础设施的投资力度，支持创新研究和转化，积极参与全球科技创新。

3) 鼓励制造业向价值链高端跃升。英国政府2008年推出“高价值制造”战略，其目的是扶持英国本土高价值制造业的发展；2012年，英国技术战略委员会的“创新英国”项目发布题为《高价值制造战略2012—2015》的报告，确定了高价值制造业创新的五大重点领域，包括资源效率、制造业体系、新材料与制造业技术融合、制造业工艺与新型商业模式等。

科普小百科

英国所说的AM，是什么？

英国所说的AM (Advanced Manufacturing)，不是先进制造业，而是先进制造。一个有“业”，一个无“业”，一字之差，内涵迥异。带“业”字，指的是产业；去掉“业”字，指的是方式，强调制造过程和方式的先进，不会与传统制造业形成对比。

1.3.4 我国“新型工业化”

新型工业化作为我国重要的战略部署，自 2002 年首次提出至今已有二十多年。

1. 新型工业化的定义

新型工业化是发展经济学概念，知识化、信息化、全球化、生态化是其本质特征。

新型工业化概念始于 2002 年，即：“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。”

新型工业化是现代化的必由之路，加快建设现代化产业体系是高质量发展的首要任务。推进新型工业化是党中央统筹中华民族伟大复兴战略全局和世界百年未有之大变局做出的重要决策部署。

2. 新型工业化的“新”特征

1) 新的发展目标：产业安全自主可控、产业基础能力高级化、产业竞争力持续提升。

2) 新的发展要求：打造以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局，进一步扩大高水平对外开放，进一步融入和引领全球产业链供应链。

3) 新的发展模式：发展动力创新化、产业结构高端化、区域布局集群化、产业组织结构协同化。

4) 新的发展路径：制造业高质量发展是经济高质量发展的核心内容，也是推进新型工业化、加快建设制造强国的根本路径。

5) 新的发展动力：科技创新是新型工业化发展的重要引擎，又是新型工业化的内在要求，坚持以科技创新为引领，将为新型工业化提供不竭动力。

6) 新的发展成效：实现产品质量高端化、生产过程集约化、生产效益最大化，有效地带动和扩大人均可支配收入和中等收入群体规模，为实现共同富裕提供重要保障。

3. 我国在智能制造方面取得的成就

由工业和信息化部、国家发展和改革委员会、教育部、科技部等八部门印发的

《“十四五”智能制造发展规划》强调：智能制造是制造强国建设的主攻方向，其发展程度直接关乎我国制造业质量水平。发展智能制造对于巩固实体经济根基、建成现代产业体系、实现新型工业化具有重要作用。

我国已经掌握了部分智能制造技术，如机器人技术、感知技术、复杂制造系统、智能信息处理技术等。以新型传感器、智能控制系统、工业机器人、自动化成套生产线为代表的智能制造装备产业体系初步形成。我国在智能制造方面取得的成就如下。

1) 我国制造业数字化具备一定的基础。目前规模以上工业企业在研发设计方面应用数字化工具普及率已经达到 54%，生产线上数控装备比重已经达到 30%。

2) 我国智能制造发展取得长足进步。供给能力不断提升，智能制造装备市场满足率超过 50%，主营业务收入超 10 亿元的系统解决方案供应商达 40 余家。支撑体系逐步完善，构建了国际先行的标准体系，发布国家标准 285 项，牵头制定国际标准 28 项；培育具有行业和区域影响力的工业互联网平台近 80 个。推广应用成效显著，试点示范项目生产效率平均提高 45%、产品研制周期平均缩短 35%、产品不良品率平均降低 35%，涌现出离散型智能制造、流程型智能制造、网络协同制造、大规模个性化定制、远程运维服务等新模式和新业态。

3) 我国智能制造能力成熟度水平稳步提升。2021 年数据显示，目前我国 69% 的规模以上制造业企业处于一级及以下水平，达到二级、三级的制造企业分别占比为 15% 以及 7%，四级及以上制造企业占比达 9%。2021 年全国制造业智能制造能力成熟度较 2020 年有所提升，一级及以下的低成熟度企业占比减少 6 个百分点，三级以上的高成熟度企业数量增加了 5 个百分点。

思考与练习

【单选题】

1. “互联网+制造”被称为（ ），也就是所谓的智能化时代。
A. 工业 1.0 B. 工业 2.0 C. 工业 3.0 D. 工业 4.0
2. 第三次工业革命始于（ ）并一直延续到现在，通过电子与信息技术的广泛应用，使得制造过程不断实现自动化。
A. 20 世纪 70 年代 B. 20 世纪 80 年代
C. 20 世纪 90 年代 D. 20 世纪 60 年代
3. 以（ ）为标志的信息高速公路正在缩短人类交往的距离。
A. 信息化 B. 全球互联网络 C. 电子计算机

【多选题】

1. 智能制造采用信息技术、智能化技术和物联网等新技术，实现了生产过程的（ ）。
A. 数字化 B. 网络化 C. 智能化 D. 柔性化
2. 我国政府提出“新型工业化”，旨在加快推动制造业向（ ）转型。
A. 智能化 B. 绿色化 C. 服务化 D. 智慧化
3. 第三次科技革命以（ ）的发明和应用为主要标志。
A. 原子能 B. 电子计算机 C. 空间技术 D. 生物工程

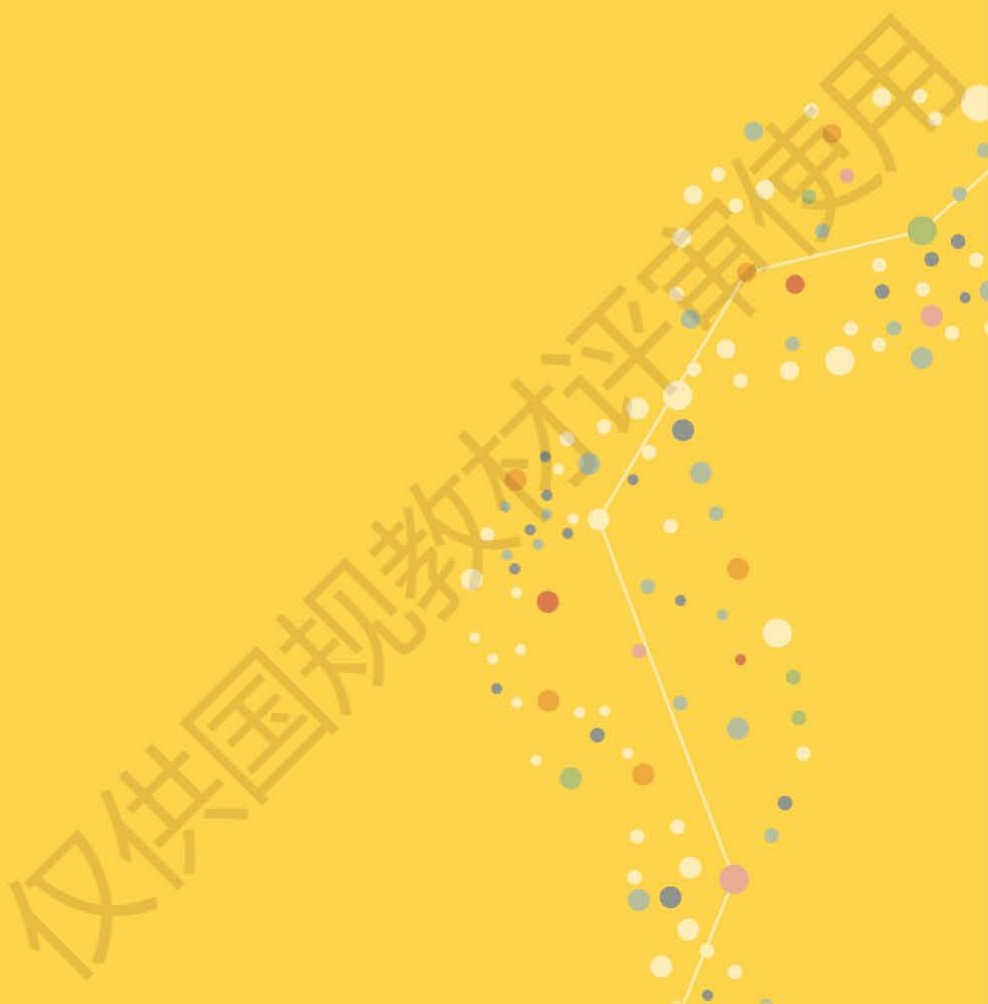
【简答题】

1. 简述智能制造是什么。
2. 简述智能化生产的起源。
3. 简述智能制造国内外发展概况。



02

第 2 章 智能制造系统架构与 基本理念



智能制造概论

知识目标

- 了解智能制造的系统构架，熟悉国家智能制造标准体系。
- 了解智能制造的基本理念，熟悉智能制造个性化定制与维护。
- 熟悉智能制造精益化生产过程。

科普素养目标

- 通过学习智能制造构架，培养科学创新精神。
- 通过学习精益化生产过程，培养精益求精的精神。
- 通过了解绿色制造与人及社会的关系，培养环保再生的理念。

仅供国规教材评审使用



2.1 智能制造系统架构

智能制造系统架构（见图 2-1）是指从生命周期、系统层级和智能特征等三个维度对智能制造所涉及的活动、装备、特征等内容进行描述，主要用于明确智能制造的标准化需求、对象和范围，指导国家智能制造标准体系建设。

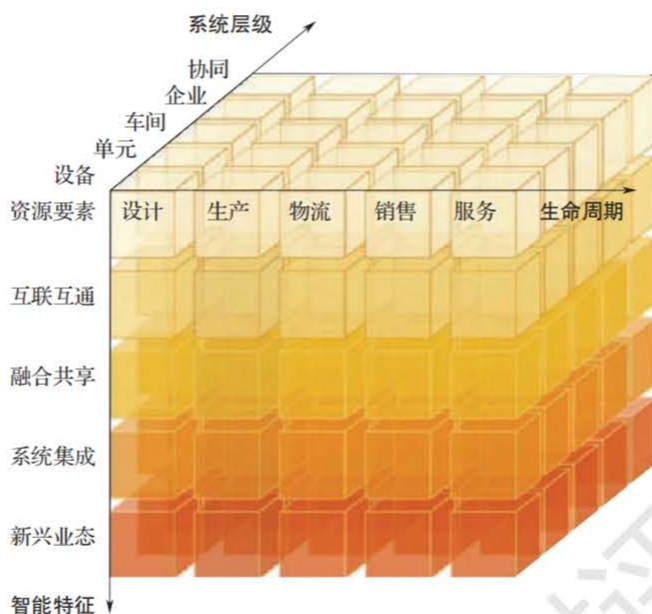


图 2-1 智能制造系统构架

2.1.1 产品生命周期管理系统

产品生命周期（Product Life Cycle）涵盖从产品原型研发到产品回收再制造的各个阶段，包括设计、生产、物流、销售、服务等一系列相互联系的价值创造活动。生命周期的各项活动可进行迭代优化，具有可持续性发展等特点，不同行业的生命周期构成和时间顺序不尽相同。

1) 设计是指根据企业的所有约束条件以及所选择的技术来对需求进行实现和优化的过程。

2) 生产是指将物料进行加工、运送、装配、检验等活动创造产品的过程。

3) 物流是指物品从供应地向接收地的实体流动过程。

4) 销售是指产品或商品等从企业转移到客户手中的经营活动。

5) 服务是指产品提供者与客户接触过程中所产生的一系列活动的过程及其结果。

产品生命周期管理系统 (PLM) 是指在产品的整个生命周期内, 从产品的创意、设计、生产、使用到报废, 对产品的信息进行有效管理和控制的系统。PLM 是智能制造系统架构中的一个重要组成部分, 它涉及产品生命周期的设计、生产、物流、销售和服务等环节, 以及系统层级的设备层、单元层、车间层、企业层和协同层, 还有智能特征的资源要素、互联互通、融合共享、系统集成和新兴业态等层级。PLM 的主要功能是实现产品数据的集中管理和共享, 支持产品创新和协同设计, 提高产品质量和效率, 降低产品成本和风险, 延长产品寿命, 满足客户需求。

案例

达索系统的 3D EXPERIENCE 平台是一个基于云的平台, 可以实现产品数据的集中管理和共享, 支持产品创新和协同设计, 提供虚拟孪生体验, 实现物理空间和数字空间的集成与融合, 如图 2-2 所示。

达索系统 3D EXPERIENCE 平台上的产品生命周期管理解决方案可促进持续创新



图 2-2 达索系统平台的产品生命周期管理解决方案

AeroMobil 是一家飞行汽车公司，使用 3D EXPERIENCE 平台来管理其飞行汽车的生命周期，确保合规性，并在物理原型制作之前找到最佳设计。

西门子的 PLM 软件是一个面向制造业的综合解决方案，可以实现从概念到生产的全流程管理，支持多学科协作，提供数字化模拟和验证，实现智能制造和数字化工厂。

知乎是中文问答社区，使用 PLM 的思想来管理其产品的不同阶段，从引入期到成熟期再到衰退期，根据用户需求和市场变化不断进行功能迭代和优化。

2.1.2 系统层级

系统层级是指与企业生产活动相关的组织结构的层级划分，包括设备层、单元层、车间层、企业层和协同层。

1) 设备层是指企业利用传感器、仪器仪表、机器、装置等，实现实际物理流程并感知和操控物理流程的层级。例如，智能机床、智能机器人、智能传感器等都属于设备层的组成部分。

2) 单元层是指用于企业内处理信息、实现监测和控制物理流程的层级。例如，工业控制器、工业计算机、工业网络等都属于单元层的组成部分。

3) 车间层是实现面向工厂或车间的生产管理的层级。例如，制造执行系统 (MES)、车间调度系统 (WMS)、车间监控系统 (WCS) 等都属于车间层的组成部分。

4) 企业层是实现面向企业经营管理的层级。例如，企业资源计划系统 (ERP)、供应链管理系统 (SCM)、客户关系管理系统 (CRM) 等都属于企业层的组成部分。

5) 协同层是企业实现其内部和外部信息互联和共享，实现跨企业间业务协同的层级。例如，云平台、大数据平台、物联网平台等都属于协同层的组成部分。

案例

海尔“1+7”并联平台

海尔互联工厂是一个典型的智能制造案例，它涵盖了市场、研发、采购、制造、物流、服务等全流程，构建了“1+7”并联平台。

设备层：海尔利用智能机床、智能机器人、智能传感器等设备，实现了产品的精准加工、自动装配、在线检测等功能。

单元层：海尔利用工业控制器、工业计算机、工业网络等设备，实现了设备的远程监控、数据采集和分析、故障诊断和预警等功能。

车间层：海尔利用制造执行系统（MES）、车间调度系统（WMS）、车间监控系统（WCS）等实现了生产计划的下达和执行、生产过程的可视化和优化、生产质量的保障和提升等功能。

企业层：海尔利用企业资源计划系统（ERP）、供应链管理系统（SCM）、客户关系管理系统（CRM）等实现了企业财务管理、人力资源管理、库存管理、物流管理等功能。

协同层：海尔利用云平台、大数据平台、物联网平台等实现了与用户、供应商、合作伙伴等多方的信息交换和资源共享，推进协同研发、协调生产、精准物流等功能。

2.1.3 智能特征

智能特征是指制造活动具有的自感知、自决策、自执行、自学习、自适应之类功能的表征，包括资源要素、互联互通、融合共享、系统集成和新兴业态共五层智能化要求。

1) 资源要素是指企业从事生产时所需要使用的资源或工具及其数字化模型所在的层级。

2) 互联互通是指通过有线或无线网络、通信协议与接口，实现资源要素之间的数据传递与参数语义交换的层级。

3) 融合共享是指在互联互通的基础上，利用云计算、大数据等新一代信息通信技术，实现信息协同共享的层级。

4) 系统集成是指企业实现智能制造过程中的装备、生产单元、生产线、数字化车间、智能工厂之间，以及智能制造系统之间的数据交换和功能互联的层级。

5) 新兴业态是指基于物理空间不同层级资源要素和数字空间集成与融合的数据、模型及系统，建立的涵盖了认知、诊断、预测及决策等功能，且支持虚实迭代优化的层级。

案例

不同行业和领域的智能制造实践

造纸业：晨鸣集团利用工业控制器、工业计算机、工业网络等设备，实现了设备的远程监控、数据采集和分析、故障诊断和预警等功能，提高了生产效率和质量。

酿酒业：茅台集团利用云平台、大数据平台、物联网平台等，实现了与用户、供应商、合作伙伴等多方的信息交换和资源共享，推进协同研发、协调生产、精准物流等功能，提升了用户体验和市场竞争能力。

饮品业：娃哈哈集团将自主开发的多种规格的工业机器人应用于饮料生产线中的物料添加、装箱码垛等工序，大大降低了生产线员工的劳动强度、提高了效率，不断向“无人工厂”的目标迈进。

家电业：海尔集团利用 COSMOPlat 平台，实现了用户和员工的融合。COSMOPlat 平台是海尔自主研发、拥有中国特色的自主产权平台，其核心就是把社区生态、企业和资源连接起来，构建成一个工业新生态，这个新生态能够实现用户的最佳体验，实现用户的终身价值。

电池业：天能集团利用柔性智能制造平台和大数据云驱动平台，实现了从接收订单，到安排供应、生产与发货计划，再到质量追溯、成本核算、财务结算全过程的系统化与信息化。同时，还通过设备管理、设备利用、设备维护保养等方面大力打造数字化车间，实现各工序数字化全覆盖。

案例

海尔互联工厂的智能特征

从智能特征的体现和运作的角度来看，海尔互联工厂的智能特征主要体现在以下几个方面。

大规模定制：海尔互联工厂通过交互定制平台，实现了用户和企业的零距离交互，用户可以根据自己的需求和喜好定制产品和智慧生活场景，互联工厂可以快速响应用户的需求，并根据订单驱动生产制造。这样既提高了用户

满意度，又降低了库存和成本。

开放创新：海尔互联工厂通过开放创新平台，实现了全球 20 万网络资源和用户的零距离交互，利用云计算、大数据等技术进行创意转化和迭代式研发，提高了产品的创新性和质量。

模块采购：海尔互联工厂通过模块采购平台，实现了一流资源无障碍进入，与用户需求零距离交互，事前协同设计，从采购零件到交互模块化解决方案，快速提供个性需求解决方案。

智慧生活：海尔互联工厂通过智慧生活平台，实现了从硬件到网器到生态圈的转型，构建多样场景商务模式，提供智慧生活一站式服务，实现生态圈利益方共创共赢。每一个产品都成为“网器”，每一个解决方案都融合进一个统一平台，与用户实现智能化交互和服务。

物联网：物联网是实现人、机、物等互联的基础技术，它通过传感器、通信网络、数据中心等设备和系统，实现数据的采集、传输、存储、分析和应用。物联网使得海尔互联工厂可以实时监控和控制设备、产品、物流等各个环节的状态和参数，提高效率和质量。

大数据：大数据是实现数据分析和优化的核心技术，它通过数据挖掘、机器学习、人工智能等方法，对海量数据进行处理和分析，提取有价值的信息和知识。大数据使得海尔互联工厂可以根据用户需求、市场变化、生产状况等进行智能决策和优化，提升产品的创新性和竞争力，增强用户的体验和忠诚度。

云计算：云计算是实现数据存储和服务的关键技术，它通过虚拟化、分布式、弹性等技术，将计算资源和服务部署在云端，实现按需使用和按量付费。云计算使得海尔互联工厂可以实现数据的安全存储和共享，以及各种应用的快速部署和运行，降低成本和风险，提高效率和灵活性。

人工智能：人工智能是实现数据智能化的重要技术，它通过深度学习、自然语言处理、计算机视觉等技术，使计算机具有类似人类的智能功能。人工智能使得海尔互联工厂可以实现产品的智能设计、制造、检测、维修等，以及用户的智能交互、服务、推荐等，提高品质和效果，增加价值和吸引力。



2.2 智能制造的基本理念

2.2.1 绿色制造与人及社会

20 世纪高速发展的工业经济给人类带来了高度发达的物质文明，同时也带来了一系列严重的环境污染问题，如温室气体、雾霾和水污染（见图 2-3），制约了人类社会的可持续发展。

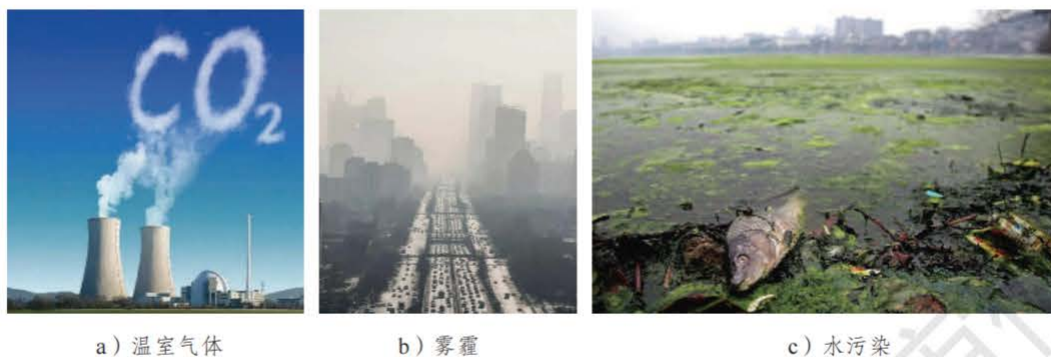


图 2-3 环境污染

绿色制造，又称为环境意识制造或面向环境的制造，最早起源于 20 世纪 30 年代，到 1996 年才由美国工程师学会（SME）比较系统地提出“绿色制造”的概念。20 世纪 90 年代以来，绿色制造技术在绿色浪潮和可持续发展思想的推动下，迅速发展并在众多国家和地区得到了广泛的应用。图 2-4 是绿色制造工厂示意图。

绿色制造是一个综合考虑环境影响和资源效率的现代制造模式，其目标是使得产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个周期内，对环境的影响（负面影响）为零或者极小，资源消耗尽可能小，并使企业的经济效益和社会效益协调优化。



图 2-4 绿色制造工厂示意图

2021 年，工业和信息化部印发《“十四五”工业绿色发展规划》，提出“十四五”期间工业绿色发展的总体思路，要求以碳达峰碳中和目标为引领，统筹发展与绿色低碳转型，深入实施绿色制造，大力推进工业节能降碳，全面提高资源利用效率，积极推行清洁生产改造，提升绿色低碳技术、产品和服务供给能力。明确了碳排放强度和污染物排放强度下降、能源效率和资源利用水平提升、完善绿色制造体系等发展目标。

2022 年 8 月，工业和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部发布《工业领域碳达峰实施方案》（以下简称《方案》）。《方案》要求，深度调整产业结构，推动产业结构优化升级，坚决遏制高耗能高排放低水平项目盲目发展，大力发展绿色低碳产业。深入推进节能降碳，把节能提效作为满足能源消费增长的最优先来源，大幅提升重点行业能源利用效率和重点产品能效水平，推进用能低碳化、智慧化、系统化。积极推行绿色制造，完善绿色制造体系，深入推进清洁生产，打造绿色低碳工厂、绿色低碳工业园区、绿色低碳供应链，通过典型示范带动生产模式绿色转型。大力发展循环经济，优化资源配置结构，充分发挥节约资源和降碳的协同作用，通过资源高效循环利用降低工业领域碳排放。加快工业绿色低碳技术变革，推进重大低碳技术、工艺、装备创新突破和改造应用，以技术工艺革新、生产流程再造促进工业减碳去碳。主动推进工业领域数字化转型，推动数字赋能工业绿色低碳转型，强化企业需求和信息服务供给对接，加快数字化低碳解决方案应用推广。

党的二十大报告提出，“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节。”这是立足我国进入全面建设社会主义现代化国家、实现第二个百年奋斗目标的新发展阶段的战略选择，必须牢固树立和践行“绿水青山就是金山银山”的理念，站在人与自然和谐共生的高度谋划发展。“加快推动产业结构、能源结构、交通运输结构等调整优化”，意味着在今后的生态环境保护工作中要持续在结构调整上下功夫，进一步调整优化产业布局，大力发展绿色低碳和生态产品产业。同时，坚决把好高耗能高排放项目准入关口，依法依规淘汰落后产能和化解过剩产能，不断壮大节能环保产业，推进基础设施绿色低碳升级，提供绿色低碳服务等。

2.2.2 个性化定制与维护

1. 个性化定制的定义

个性化定制是指基于新一代信息技术和柔性制造技术，以模块化设计为基础，以接近大批量生产的效率和成本提供能满足客户个性化需求的一种智能服务模式。区别于大规模定制，个性化定制更加注重消费者的全程参与。

如图 2-5 所示，制造业在经历了手工生产、机器生产、大规模生产和大规模定制四个阶段之后，个性化定制成为制造业的一个重要分支。有专家预测，“制造业的

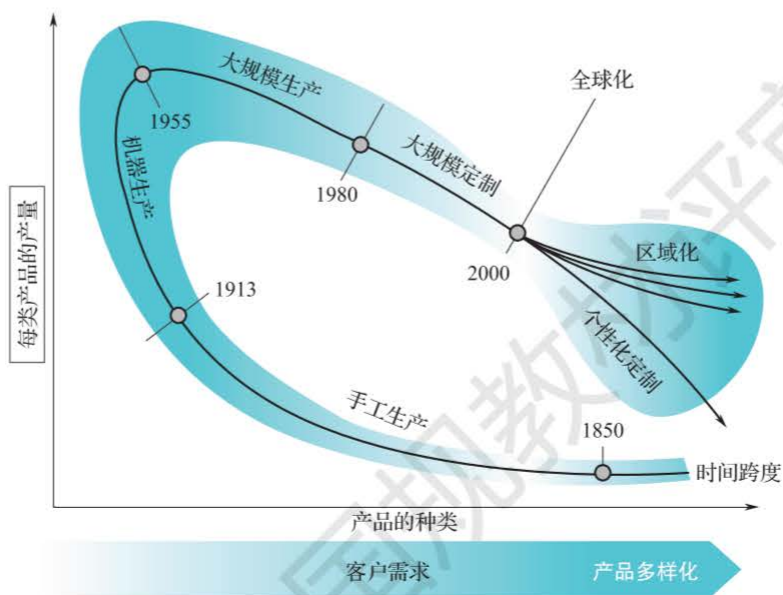


图 2-5 制造业发展流程

明天一半以上的制造为个性化定制”。智能制造时代，随着相关技术的发展，消费者和制造商这种线上与线下的直接沟通，将开启一种新的更适应消费者需求和时代发展的制造模式。

2. 个性化定制的特征

区别于传统的制造模式，个性化定制模式最重要的特征是明确以消费者为中心、由订单驱动进行大规模小批量的生产，它将销售过程前置了。如图 2-6 所示，制造商通过平台与消费者进行信息交互并产生订单，以消费者需求为导向进行产品制造，而不再是传统的先生产后销售。



图 2-6 销售前置的大规模个性化定制模式

在工业 4.0 时代，在消费者基于产品属性和功能相关的产品实用性功能诉求不断得到满足后，在精神层面上对来自产品所承载的情感、有别于他人的个性倾向和自我表达有了更高的追求。虽然大规模定制与个性化生产都是为了向客户提供能够满足其需求与偏好的产品。但大规模定制以现有模块化为基础，所以市场上仍存在许多类似产品。在个性化生产模式下，客户与工厂频繁交流沟通，让客户实际参与其产品的需求调研、产品设计、生产等过程。

从消费的意义上看，工业 4.0 就是将原料、生产、加工、运输与消费结为一体的大网，消费者只需要用手机或计算机等下单，网络就会自动将订单以及个性化需求下达到工厂。从本质上看，工业 4.0 就是将信息技术与工业技术深度融合，智慧工厂与智能生产让用户的个性化需求得到满足。工业 4.0 时代的智慧工厂、智慧生产和智慧物流这三大主题都以信息物理系统（Cyber-Physical System, CPS）融合技术为基础。CPS 采用物联网和服务网，实现人的控制在时间、空间等方面的延伸，实现人、机、物的融合，从而实现客户要求和生产制造的实时沟通。最终实现企业

的纵向（企业内部人流、信息流、物流、资金流）集成、横向（企业之间的价值链和信息网）集成和产品的端对端（产品生命周期）集成，从而使企业能够快速对客户实时需求做出相应反馈。

3. 个性化定制体系架构

为实现个性化定制，需要建立消费者个性化需求信息平台和各层级的个性化定制服务平台，平台需要具备消费者需求特征的数据挖掘和分析服务（平台设计）能力，以及可使消费者完全参与的产品设计、计划排产、柔性制造、物流配送、售后服务的集成和协同优化能力。个性化定制体系架构如图 2-7 所示。

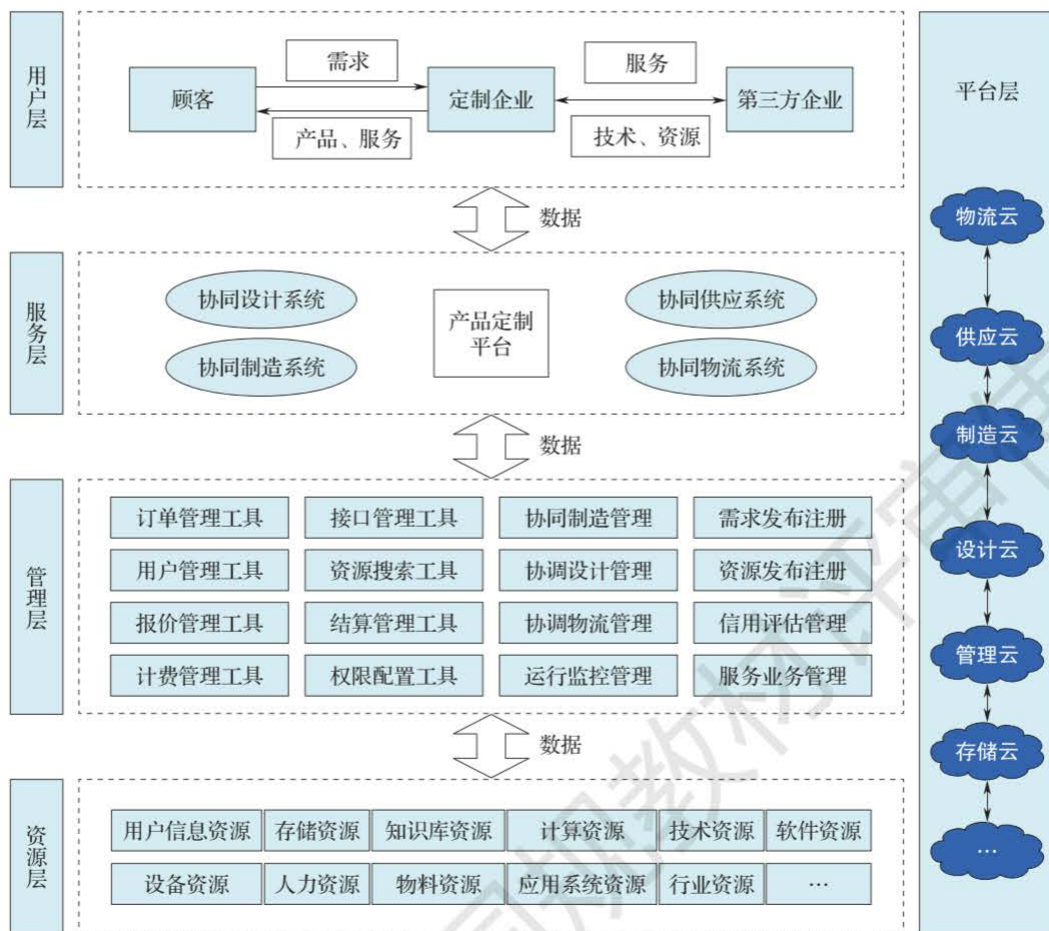


图 2-7 个性化定制体系架构

该体系架构以数据为核心，将各层级相互串联。产品定制平台作为定制服务的起始点，将来自客户的需求信息作为制造的目标，通过物流云、供应云、制造云、设计云等协同企业内部和企业间的生产与服务，最终为客户提供满足要求的产品及服务。资源层整合了整个生产流程及供应链中的所有资源；管理层对资源进行数字化管理；服务层利用协同技术，根据定制平台的需求整合企业内部和企业间的相关资源信息；最终在用户层，实现用户需求采集、产品生产、产品物流和服务提供。

2.2.3 精益生产

1. 精益生产的定义

精益生产方式是指综合运用多种现代管理方法和手段，以客户需求为依据，以充分发挥全体员工的积极性为根本，对企业的各项资源进行有效配置和合理使用，最大限度地为企业谋求经济利益的一种新型生产方式，是全员参与持续改善的一种管理状态，也是一种适时制造，消除一切浪费和故障，向零缺陷、零库存努力的新型生产管理方式。

2. 精益生产的发展历程

20世纪初，从美国福特汽车公司创立第一条汽车生产流水线以来，大规模的生产流水线一直是现代工业生产的主要特征。大规模生产方式是以标准化、大批量生产来降低生产成本，提高生产效率的。这种方式适应了美国当时的国情，汽车生产流水线的产生，一举把汽车从少数富翁的奢侈品变成了大众化的交通工具，美国汽车工业也由此迅速成长为美国的一大支柱产业，并带动和促进了包括钢铁、玻璃、橡胶、机电以至交通服务业等在内的一大批产业的发展。

大规模流水生产在生产技术以及生产管理史上具有极为重要的意义。但是第二次世界大战以后，社会进入了一个市场需求向多样化发展的新阶段，相应地要求工业生产向多品种、小批量的方向发展。为了顺应这样的时代要求，日本丰田汽车公司在实践中摸索，创造出来了精益生产方式，被称为“改变世界的机器”。

总体来说，根据精益生产方式的形成过程可以将其划分为三个阶段：丰田生产方式形成与完善阶段，丰田生产方式的系统化阶段（即精益生产方式的提出），精

益生产方式的革新阶段（对以前的方法理论进行再思考，提出新的见解）。

3. 精益生产的要求

精益生产方式要求企业在生产组织过程中从客户（内部和外部）的角度来确定企业从产品设计、生产到交付的整个过程，实现客户利益最大化，在“客户拉动”观念指引下，消除产品的过早过多生产，确保现场在制品和库存的大量减少，压缩生产提前期，减少所有资源消耗且不增值活动，并向员工授权，引导员工，激励全体员工用价值流分析方法找出更隐秘的浪费，以求生产过程的持续改善和改进。改进的结果必然是在企业中加速从原材料转变为成品的过程，并显著增加产品价值，如图 2-8 所示。

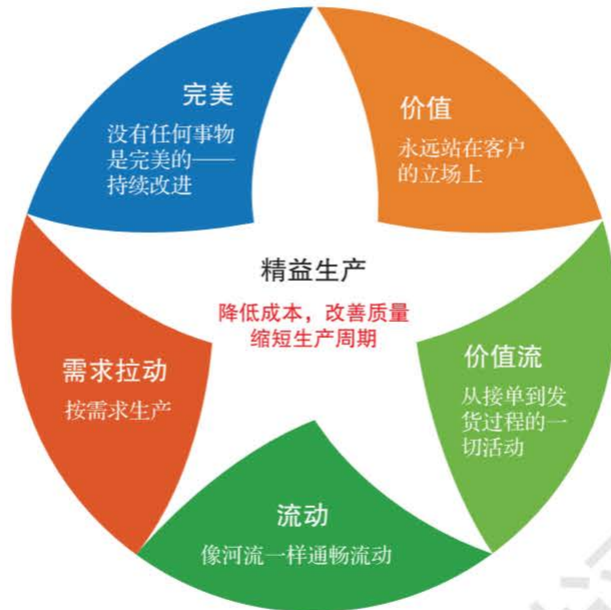


图 2-8 精益生产的原则

精益生产方式的管理出发点是要求企业运用精益思维消除一切耗费了资源而不创造价值的活动，这些活动包括许多，如残次品、超过需求的生产、不必要的各种裕量、不必要的工艺、闲置的资源和库存、各种等待、不必要的运输、不必要的人员变动、需要纠正的错误等。

精益生产既是一种以最大限度地减少企业生产中所使用的资源和降低企业管理运营成本为主要目标的生产模式，也是一种理念，是支撑个人与企业生命的一种精

神力量，是一种员工精益求精无止境追求的企业文化。

4. 精益生产的优越性

与大量生产方式相比，精益生产的优越性主要表现在以下几个方面。

1) 所需人力资源——无论是在产品开发、生产系统，还是工厂的其他部门，与大量生产方式下的工厂相比，最低能减至 1/2。

2) 新产品开发周期——最低可减至 1/2 或 2/3。

3) 生产过程的在制品库存——最低可减至大量生产方式下一般水平的 1/10。

4) 工厂占用空间——最低可减至采用大量生产方式下的 1/2。

5) 成品库存——最低可减至大量生产方式下平均库存水平的 1/4。

6) 产品质量——可大幅度提升。

5. 制定精益生产的步骤

精益生产是一种非常有效的生产方式，可帮助企业最大限度地利用资源，提高生产效率和质量，满足客户需求，然后在市场竞争中获得主导地位。要制订适合公司的精益生产计划，企业需要全面评价自己的生产过程，制定相应的解决方案，不断改进和完善。只有这样，企业才能在实施精益生产的过程中取得最佳的效果。制定精益生产的具体步骤如下。

1) 确定价值流：通过识别价值流，可以确定哪些步骤是浪费的，并在生产过程中找到价值流和非价值流。价值流是指客户认可的生产环节，非价值流是指客户不认可的生产环节，然后制定改进计划。

2) 识别浪费：浪费是指任何不增加价值的活动或过程。通过识别浪费，可以制定减少或消除浪费的计划。在找到价值流和非价值流后，就应该开始消除浪费。浪费是指等待、运输、库存等不必要的生产环节。通过消除浪费，可以提高生产效率，降低成本。

3) 制订改进计划：根据识别的浪费制订改进计划。这些计划可能包括优化流程、减少库存、改进设备维护等。

4) 改进计划的实施：这个计划需要每个人的参与，包括管理、生产工人和供应商。在实施过程中，应不断监控和调整计划，以确保其有效性。

5) 持续改进: 精益生产是一个持续改进的过程。公司应不断寻找新的改进机会, 以提高生产效率和质量, 改进生产过程, 降低成本, 以满足客户的需求。

总之, 制定精益生产计划需要对公司的生产过程进行全面的分析和评估, 以确认浪费和优化方向。然后, 制定和实施改进计划, 继续提高生产效率和质量。这样, 我们就可以创建一个高效、低成本、高质量的生产过程。

仅供国规教材评审使用

思考与练习

【单选题】

1. 绿色制造又称为（ ）或面向环境的制造。
A. 环境意识制造 B. 环境制造
C. 绿植制造 D. 智能标准制造
2. 个性化定制是指基于新一代信息技术和柔性制造技术，以（ ）设计为基础，以接近大批量生产的效率和成本提供能满足客户个性化需求的一种智能服务模式。
A. 个性化 B. 模块化 C. 私人化 D. 定制化

【多选题】

1. 智能制造系统架构是指从（ ）等三个维度对智能制造所涉及的活动、装备、特征等内容进行描述。
A. 生命周期 B. 系统层级 C. 智能特征 D. 网络化
2. 生命周期涵盖从产品原型研发到产品回收再制造的各个阶段，包括（ ）等一系列相互联系的价值创造活动。
A. 设计 B. 生产 C. 物流 D. 销售 E. 服务
3. 系统层级是指与企业生产活动相关的组织结构的层级划分，包括（ ）。
A. 设备层 B. 单元层 C. 车间层 D. 企业层 E. 协同层
4. 智能特征是指制造活动具有的自感知、自决策、自执行、自学习、自适应之类功能的表征，包括（ ）等智能化要求。
A. 资源要素 B. 互联互通 C. 融合共享 D. 系统集成 E. 新兴业态



【填空题】

精益生产成功实施的五个步骤：_____、_____、_____、_____以及_____。

【简答题】

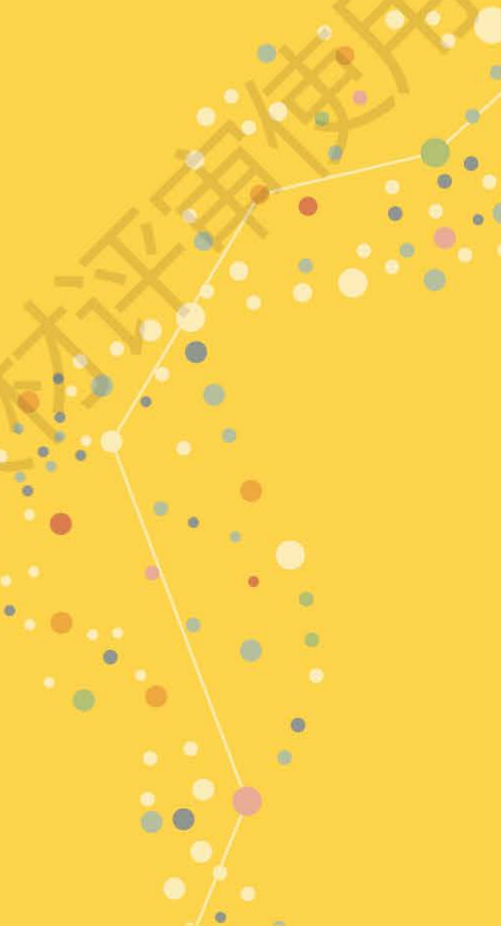
1. 简述什么是智能制造个性化定制与维护。
2. 简述什么是智能制造精益化生产。



03

第 3 章 智能制造核心技术

仅供国规教材评审使用

A decorative graphic in the bottom right corner consisting of a network of nodes and lines. The nodes are small circles in various colors (white, blue, green, red, purple) and are connected by thin white lines, forming a complex, branching structure that resembles a data network or a molecular structure.

智能制造概论

知识目标

- 掌握产品数据的数字化处理技术。
- 了解数字化制造技术的基本原理、应用特点等。
- 理解智能检测技术是如何利用计算机和传感器等技术实现自动化和精确检测的。

科普素养目标

- 通过了解产品的数字化处理，学会辩证地思考问题。
- 通过了解逆向工程技术，培养创新性发散思维。
- 通过了解增材制造技术，培养积少成多、精益求精的学习习惯。
- 认识智能检测中的数据隐私、伦理和法规问题，增强个人隐私保护和数据安全意识。
- 认识到推动智能检测技术的可持续发展和应用的重要性。

仅供国规教材评审使用



3.1 数字化制造技术

3.1.1 产品数据的数字化处理

在数字化制造中，产品数据的数字化处理是一个重要的步骤。它将产品的相关信息转化为数字化形式，建立数字模型，以实现产品的数字化管理和生产制造，如图 3-1 所示。

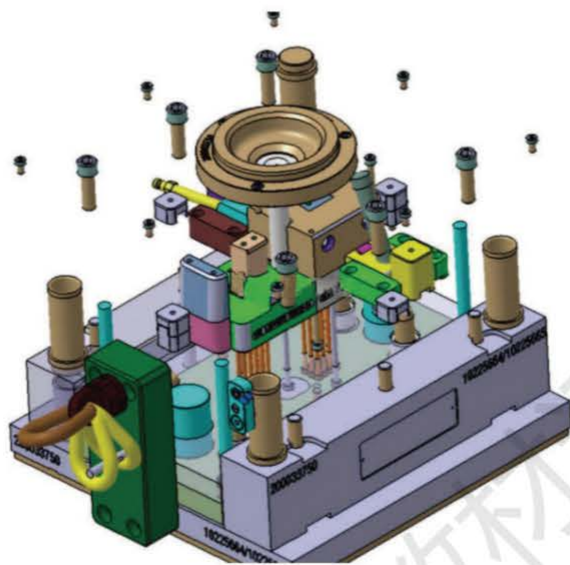


图 3-1 产品数字化模型

数字化处理的具体步骤如下。

(1) 数据采集

通过传感器、扫描仪等设备，收集产品的相关数据信息，包括 3D 图形数据、工艺参数、物料配方、生产计划等。

（2）数据处理与分析

对采集到的数据进行处理和分析，将其转化为可识别、可操作、可利用的数字化数据，并进行相应的数据清洗、分类和整合，以确保数据的准确性和完整性。

（3）建立数字模型

根据产品的特点和需求，采用数字化设计软件，建立数字模型，包括 3D 模型、CAD 模型和 CAM 模型等。这些模型将作为生产加工的依据，实现自动化生产制造。

（4）数据共享与交流

通过网络等手段，将数字模型和相关数据信息共享给生产部门、研发团队和客户等，实现生产、协同和服务的数字化管理。

（5）数据挖掘与分析

通过大数据分析、人工智能等技术手段，对数据进行挖掘和分析，预测未来趋势和变化，提高产品质量和生产效率。

总之，产品数据的数字化处理是智能制造的重要组成部分，通过数字化设计、数字模型和数字化生产等手段，实现产品设计、生产制造和服务的数字化管理，提高生产效率和产品质量。

3.1.2 逆向工程技术

逆向工程（Reverse Engineering, RE）又称反求工程、反向工程，可以定义为将实物转变为 CAD 模型相关的数字化技术、几何模型重建技术和产品制造技术的总称。逆向工程是一门涉及光学、电子、自动控制、机械、计算机视觉、计算机图形学、计算机图形处理、微分几何、计算几何、数理统计和软件工程等多学科的综合性 CAD 技术，已成为 CAD/CAM 系统中一个应用和研究的热点，并发展成为一个相对独立的领域。

如图 3-2 所示，逆向工程是在没有设计图样或图样不完整而有样品的情况下，利用三维扫描测量仪，准确快速地测量样品表面数据或轮廓外形，加以点数据处理、曲面创建、三维实体模型重构，然后通过 CAM 系统进行数控编程，直至利用 CNC 加工机床或快速成型机床制造产品。这与传统的“产品概念设计→产品 CAD 模型→产品（物理模型）”的正向工程相反。

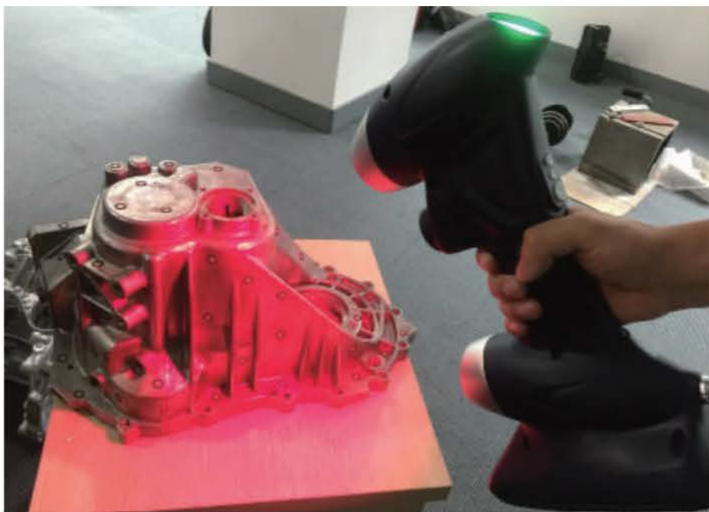


图 3-2 产品逆向工程

逆向工程的思想最初来自从油泥模型到产品实物的设计过程，除此之外，目前基于实物的逆向工程应用最广泛的领域是进行产品的复制和仿制，尤其是外观产品，因为不涉及复杂的动力学分析、材料、热处理等技术难题，因而相对容易实现。概括起来，逆向工程主要应用于新产品研发，产品的微创新和改进设计，损坏或磨损零件的修复，快速模具制造，文物的保护和监测，医学领域的应用，CAE 模型分析等。

1. 几何逆向反求的重构方法

逆向工程技术包括几何逆向反求、材料逆向反求和工艺逆向反求等，是一个复杂、庞大的系统工程。目前，在机械工业领域中，大多数关于逆向工程的研究和实践都集中在几何形状反求，即重建产品实物的 CAD 模型方面。

所谓产品的几何逆向反求，就是根据实物样件的表面轮廓的数字化信息反求出样件的 CAD 模型，其重构方法主要有以下三种。

(1) 实物反求

在已有实物的前提下，通过试验、测绘和分析，提出重构所需的关键点、线、面等信息，结合曲面构造方法实现模型再现。在反求过程中，理解并吸收其结构功能、材质、精度、工艺方案以及设计规范等多方面信息。实物反求对象可以是整机、组件和零件。

（2）软件反求

产品样本的技术文件、图样、设计说明书、使用说明书、有关规范和标准等均称为技术软件。通过对样本的技术软件的分析研究，提取出产品样件的设计参数和思路来完成产品反求，称为软件反求。软件反求又可以细分为三种情况：既有实物，又有全套技术软件；既有实物，又有部分技术软件；无实物，仅有全套或部分技术软件。

（3）影像反求

根据产品数字化图片或影视画面提供的几何维度和色彩维度信息，实现模型重构，称为影像反求。影像反求是一个复杂的创新过程，目前还未形成相对成熟的技术。一般要利用透视变换和透视投影（涉及复杂的矩阵运算）形成不同的透视图，从外形尺寸、比例和颜色等信息中提取重构参数，进而通过专业系统实现模型几何以及色彩维度的反求。

2. 逆向工程的特点

（1）产品设计周期短

正向设计是一个从市场需求到概念设计，再到产品设计加工的“从无到有”的过程。在产品设计之初就应该满足功能要求，这往往需要灵感和缜密的思考。而逆向设计以已有实物为参照，比较直观，在此基础上进行复制和改进设计，可以节省大量的产品构思时间。

（2）产品设计更加稳定可靠

正向设计具有一定的创新性和不可预见性，即使是经验丰富的设计师，在创新的过程中也会存在设计失败的风险。而在已有成熟产品基础上进行改进设计，风险将会降到最低，设计出的产品也会更加稳定可靠。

（3）产品设计成本更低

在正向设计过程中，产品的研发一般都要经过反复修改来提高其可靠性、稳定性以及运行的经济性，不仅周期长，而且成本也比较高。逆向设计的产品是在原有产品的基础上进行的，可减少研发过程中的反复修改，有效降低了开发成本。

（4）产品设计品质更高

利用逆向工程对模型各方面数据进行精确全面的采集和偏差分析，将成品数据

与设计数据进行全面比对,可找出生产或设计上的缺陷,在继承原有产品优点的基础上,使产品的品质更高。

逆向工程以已有的产品或技术为对象,用现代化的手段和理论,解剖并掌握所研究对象的关键技术,在充分研究对象的基础上实现再创造,开发新产品,实行“样品→反求→再创造设计→产品”的新产品设计开发过程。据有关文献统计,逆向工程可以将新产品研制周期缩短 40% 以上,是提高新产品研发能力的有效手段。

3. 逆向工程的关键技术

逆向工程的关键技术包括数据测量技术、数据预处理技术、模型重构及产品制造技术。

(1) 数据测量技术

逆向工程中数据测量方法主要分为两种:一种是传统的接触式测量法,如三坐标测量机法;另一种是非接触测量法,如投影光栅法、激光三角形法、工业 CT 法、核磁共振法(MRI)及自动断层扫描法等。只有获取了高质量的三维坐标数据,才能构建准确的几何模型。所以,测量方法的选取是逆向工程中一个非常重要的问题。

(2) 数据预处理技术

对于得到的测量数据,在 CAD 模型重构之前应进行数据预处理,主要是为了排除噪声数据和异常数据,精简和归并冗余数据。

(3) 模型重构及产品制造技术

通过重构产品零件的 CAD 模型,在探寻和了解原设计技术的基础上,实现对原型的修改和再设计,以达到设计创新、产品更新的目的,同时可以完成产品或模具的制造。

4. 逆向工程常用的软件

逆向工程软件主要用于处理和优化密集的扫描点云以生成更规则的结果点云,规则的点云可以用于快速成型,也可以根据这些规则的点云构建出最终的曲面,以输入到 CAD 软件进行后续的结构和功能设计工作。逆向工程常用的软件如图 3-3 所示。



图 3-3 逆向工程常用的软件

(1) Imageware

Imageware 是由美国 EDS 公司研发的，该公司后被德国西门子公司收购，现已并入其旗下的 NX 产品线，是著名的逆向工程软件之一。Imageware 因其强大的点云处理能力、曲面编辑能力和 A 级曲面的构建能力，被广泛应用于汽车、航天航空、消费家电、模具及计算机零部件等的设计与制造。

(2) Geomagic Studio

Geomagic Studio 是由美国 Raindrop Geomagic 公司研发的逆向工程和三维检测软件。该软件也是除了 Imageware 以外应用最为广泛的逆向工程软件。Geomagic Studio 是市面上对点云处理及三维曲面构建功能最强大的软件之一，可根据扫描所得的点云数据创建出完美的多边形模型和网格，并可自动转换为 NURBS 曲面，从点云处理到三维曲面重构的时间通常只有同类软件的三分之一。

(3) CopyCAD

CopyCAD 是由英国 DELCAM 公司研发的功能强大的逆向工程系统软件，它允许从已存在的零件或实体模型中产生三维 CAD 模型。该软件为来自数字化数据的 CAD 曲面的产生提供了复杂的工具。CopyCAD 能够接受来自坐标测量机床的数据，同时跟踪机床和激光扫描器。CopyCAD 简洁的用户界面允许用户在尽可能短的时间内进行生产，并且能够快速掌握其功能，即使初次使用者也能做到这一点。使

用 CopyCAD 的用户能够快速编辑数字化数据，产生高质量的复杂曲面。该软件可以完全控制曲面边界的选取，然后根据设定的公差自动产生光滑的多块曲面，同时 CopyCAD 还能保证相邻表面间的相切连续性。

3.1.3 增材制造技术

增材制造技术也称 3D 打印技术，是通过 CAD 设计数据采用材料逐层累加的方法制造实体零件的技术，相对于传统的材料去除（切削加工）技术，是一种“自下而上”材料累加的制造方法。3D 打印主要应用于复杂结构的快速打印、产品的个性化定制、高附加值产品制造。

从成型角度看，零件可视为“点”或“面”的叠加。从 CAD 电子模型中离散得到“点”或“面”的几何信息，再与成型工艺参数信息结合，控制材料有规律、精确地由点到面，由面到体地堆积零件。

从制造角度看，它根据 CAD 造型生成零件三维几何信息，控制多维系统，通过激光束或其他方法将材料逐层堆积而形成原型或零件。

从实现流程来看，增材制造的主要流程如图 3-4 所示。



图 3-4 增材制造的主要流程

1) 获取模型。利用计算机辅助软件如 Pro/E、I-DEAS、NX 等软件进行直接构建。对产品实体进行激光扫描、CT 断层扫描，得到点云数据，再通过逆向工程的方法构建三维模型。

2) 分层处理。在成型高度方向上用一系列一定间隔的平面切割模型，以提取截面轮廓信息。

3) 实施制造。根据切片处理获得的截面轮廓，在计算机控制下，相应的成型头

按各截面轮廓信息进行扫描，在工作台上层层堆积，然后黏结材料，最终得到产品原型。

4) 后处理。从成型系统里取出成型件，进行剥离、后固化、修补、抛光等。

增材制造的主要方式有光固化成型 (SLA)、选择性激光烧结 (SLS)、熔融挤出成型 (FDM/MEM)、三维印刷 (3DP)、分层实体制造 (LOM)。

(1) 光固化成型 (SLA)

光固化成型是利用紫外光照射在液态的光敏树脂上使其凝固的原理进行工作的。由计算机控制激光束，以模型各分层截面轮廓为轨迹，逐点扫描，使被扫描区内的树脂薄层产生光聚合反应后固化，从而形成制件的一个薄层截面。每固化一层，工作台就下移一个层厚的距离，以便固化好的树脂表面再敷上一层新的液态树脂，进行下一层的扫描加工，如此反复，直到整个原型制造完毕。光固化成型原理图如图 3-5 所示。

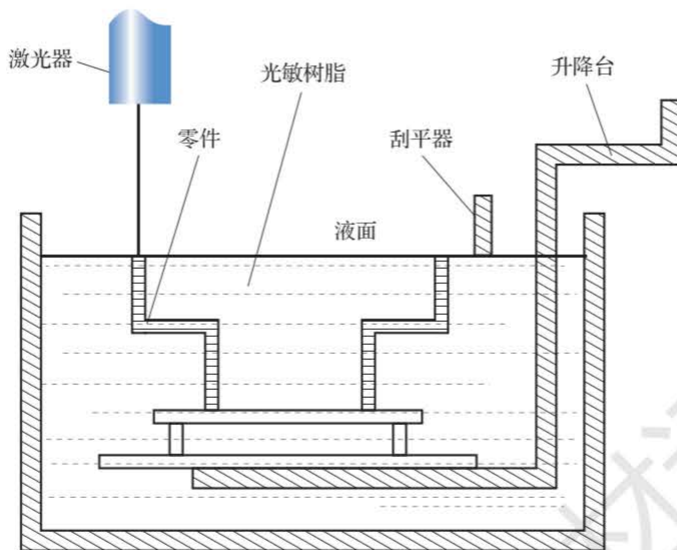


图 3-5 光固化成型原理图

(2) 选择性激光烧结 (SLS)

选择性激光烧结是利用粉末状材料成型的。将材料粉末铺在已成型零件的上表面，并刮平；用高强度的 CO_2 激光器在刚铺的新层上扫描出零件截面；材料粉末在高强度的激光照射下被烧结在一起，得到零件的截面，并与下面已成型的部分粘接；

当一层截面烧结完后，铺上新的一层材料粉末，选择性地烧结下层截面，如图 3-6 所示。

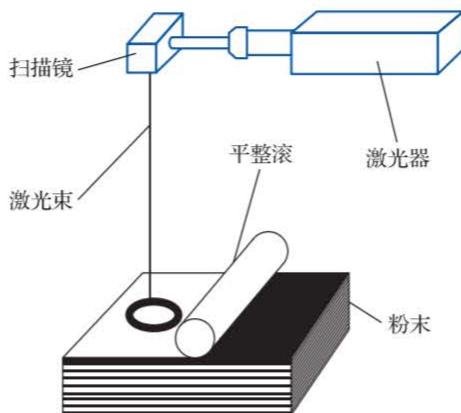


图 3-6 选择性激光烧结的工艺原理图

选择性激光烧结的优点和缺点见表 3-1。

表 3-1 选择性激光烧结的优点和缺点

优点	缺点
1) 可采用多种材料 2) 制造工艺比较简单 3) 高精度 4) 无须支撑结构	1) 成型零件精度有限 2) 无法直接成型高性能的金属和陶瓷零件 3) 成型大尺寸零件时容易发生翘曲变形 4) 由于使用了大功率激光器，整体制造和维护成本非常高，一般消费者难于承受 5) 成型坯件的物理性能不能满足功能性制品的要求

（3）熔融挤出成型（FDM/MEM）

熔融挤出成型指丝材在喷头内被加热熔化。喷头沿零件截面轮廓和填充轨迹运动，同时将熔化的材料挤出，材料迅速固化，并与周围的材料黏结。每一个层片都是在上一层上堆积而成的，上一层对当前层起到定位和支撑的作用。

（4）三维印刷（3DP）

与选择性激光烧结的工艺类似，三维印刷采用粉末材料成型，如陶瓷粉末、金属粉末。不同之处在于材料粉末不是通过烧结连接起来的，而是通过喷头用黏接剂（如硅胶）将零件的截面“印刷”在材料粉末上面。用黏接剂粘接的零件强度较低，还需后处理。



(5) 分层实体制造 (LOM)

分层实体制造采用薄片材料，如纸、塑料薄膜等。通过加热的滚筒纸使纸张一层层粘在一起。每粘一层由激光按照零件形状将纸切断，最后由每一层叠起来的纸张形成零件。

3.1.4 虚拟制造技术

虚拟制造技术的涉及面很广，如可制造性自动分析、分布式制造技术、决策支持工具、接口技术、智能设计技术、建模技术、仿真技术以及虚拟现实技术等。其中，后四项是虚拟制造的核心。虚拟制造技术场景如图 3-7 所示。



图 3-7 虚拟制造技术场景

(1) 智能设计技术

智能设计技术是对传统计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 技术的进一步研究和加强，既具有传统 CAD 系统的数值计算和图形处理能力，又能满足设计过程自动化的要求，对设计的全过程提供智能化的计算机支持，因此又被称为智能 CAD 系统，简称 ICAD。

智能设计技术有如下特点。

1) 以设计方法学为指导。设计方法学对设计本质、过程设计思维特征及方法学的深入研究是智能设计模拟人工设计的基本依据。

2) 以人工智能技术为实现手段。借助专家系统技术的强大知识处理功能,结合神经网络和机器学习技术,可以较好地支持设计过程自动化。

3) 将传统 CAD 技术作为数值计算和图形处理工具,提供对设计方案优化和图形显示输出的支持。

4) 面向集成智能化。不仅支持设计的全过程,还能为集成其他系统提供统一的数据模型及数据交换接口。

5) 提供了强大的人机交互功能。使设计师对智能设计过程的干预(即任何人工智能的融合)成为可能。

(2) 建模技术

虚拟制造系统(Virtual Manufacturing System, VMS)是现实制造系统(Real Manufacturing System, RMS)在虚拟环境下的映射,是 RMS 的模型化、形式化和计算机化的抽象描述和表示。VMS 的建模包括生产模型、产品模型和工业模型三种。

(3) 仿真技术

仿真就是应用计算机将复杂的现实系统抽象并简化为系统模型,然后在分析的基础上运行此模型,从而获知原系统一系列的统计性能。仿真是以系统模型为对象的研究方法,不会干扰实际生产系统。利用计算机的快速运算能力,仿真可以用很短的时间模拟实际生产中需要很长时间的长生产周期,因此可以缩短决策时间,避免资金、人力的浪费,并可重复仿真,优化实施方案,如图 3-8 所示。

1) 仿真的基本步骤:研究系统(收集数据)→建立系统模型(确定仿真算法)→建立仿真模型→运行仿真模型→最后输出结果并分析。

2) 产品制造过程仿真可归纳为制造系统仿真和加工过程仿真。

①制造系统仿真:包括产品建模仿真、设计过程规划仿真、设计思维过程和设计交互行为仿真等。用户可以对设计结果进行评价,实现设计过程早期反馈,减少或避免产品设计错误。

②加工过程仿真:包括切削过程仿真、装配过程仿真、检验过程仿真,以及焊接、压力加工、铸造仿真等。



图 3-8 仿真分析概念图

(4) 虚拟现实技术

虚拟现实（Virtual Reality, VR）技术是综合利用计算机图形系统、各种显示和控制等接口设备，在计算机生成的可交互的三维环境（称为虚拟环境）中提供沉浸感觉的技术。虚拟现实系统包括操作者、机器和人机接口三个基本要素。利用虚拟现实技术可以对真实世界进行动态模拟，通过用户的交互输入，及时按输出修改虚拟环境，使人产生身临其境的沉浸感觉。虚拟现实技术是虚拟制造的关键技术之一。

虚拟制造在智能制造生产过程中的相关实用技术还包括如下内容。

1) 虚拟设计与装配：包括虚拟产品形状设计，虚拟装配/拆卸设计与优化，虚拟样机以及具有视觉的虚拟装配等。基于虚拟样机的试验仿真分析可以在真实制造之前发现问题，并得以解决。

2) 虚拟产品实现技术：包括虚拟加工，远程机器人操作与监控，虚拟测量技术以及基于表面质量分析的切削参数选择等。

3) 虚拟检测与评价技术：包括虚拟表面接触刚度分析，刀位轨迹检测及碰撞干涉检验，工艺过程规划与仿真，基于应力的加工质量评价以及装配信息建模等。

4) 虚拟试验技术：包括虚拟试验的物理建模，虚拟试验的运行平台，虚拟测试以及虚拟样机的性能评价等。

5) 虚拟生产技术：包括虚拟生产线/车间实时三维布局，生产线/车间生产过程虚拟仿真以及基于 VR 的网络化分散制造仿真与评价等。

（5）数字化虚拟制造在制造业中的应用

数字化虚拟制造技术首先成功应用于飞机、汽车等工业领域，未来在智能制造中的应用前景非常广阔。

1) 产品开发过程管理：根据企业产品规划和产品开发计划管理各个产品开发项目。通过虚拟使用环境、虚拟测试环境和虚拟制造环境了解产品开发过程中所面临的未知因素，从而提高产品的设计质量，减少设计缺陷，优化产品性能。

①虚拟使用环境：使用户在产品开发的早期就参与产品开发活动，这既有利于尽早地反映用户需求情况，解决与用户需求有关的未知因素，也加强了用户对自己提出的需求的合理性认识。

②虚拟测试环境：使设计人员能够基于虚拟产品，对产品设计进行性能分析、评估和改进，可加强设计人员之间、设计人员与用户之间以及设计人员与合作伙伴之间的联系。

③虚拟制造环境：用于在产品开发过程中，为整个企业的运行提供一个基于计算机环境的具有制造意义的集成基础结构，为所设计的产品的制造过程提供仿真环境和论证平台，解决与制造有关的未知因素，提高工艺规划和加工过程的合理性，优化制造质量。

2) 生产过程管理：对于生产过程来说，虚拟制造系统是一个监视、控制、管理、维护和仿真系统，可以提高制造和生产过程中的管理、协调和控制能力。通过将现实制造系统映射为虚拟制造系统，实现对企业制造资源的建模以及生产过程规划、管理、调整、控制的仿真。通过生产计划的仿真，可以优化资源配置和物流管理，实现柔性制造和敏捷制造，缩短制造周期，降低生产成本。

3) 整体运作：根据产品类型、规模以及企业资源等情况，控制和协调生产活动，合理配置和利用人、财、物资源，以提高企业的整体运作效率。

4) 系统维护：虚拟制造系统管理软件用于系统管理人员对于整个虚拟制造系统的管理、控制、维护和更新。

综上所述，虚拟制造技术的主要目标是能够根据实际生产线及生产车间情况进行规模布局，以建模与仿真为核心内容，进行产品的全生命周期设计，该技术具有巨大的应用潜力。



3.2 智能检测技术

智能检测技术具有检测精度高、工作效率高及不受人因素干扰等优势，在满足大批量检测连续性、一致性和可靠性要求的同时，能将人从恶劣检测环境、高机械性重复性的劳动中解放出来，并且可以很好地适应各种工业应用场景，极大地提高工业产品检测过程的柔性化和智能化水平。智能检测技术除了广泛应用于智能制造装备之外，还可以应用于生产过程监控、基于虚拟现实的产品设计等环节，通过该技术，可以大幅度降低设计和生产制造成本。智能检测技术在智能制造中的应用如图 3-9 所示。

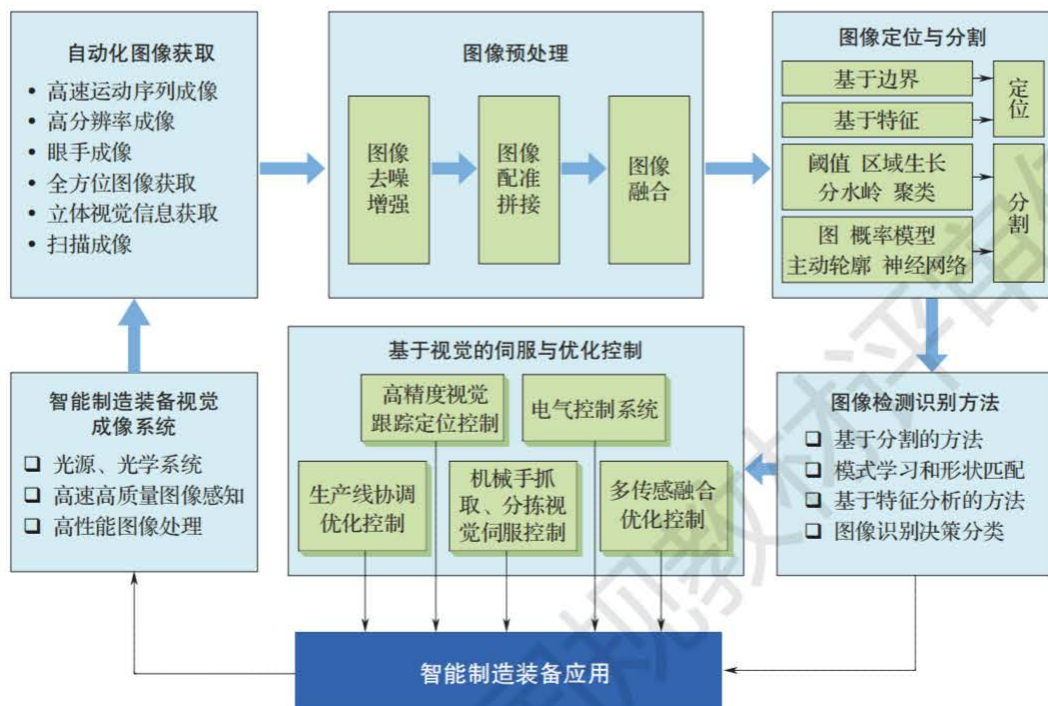


图 3-9 智能检测技术在智能制造中的应用

完善的智能化检测，能将客户需求与来自采样、前处理、分析测试、数据处理和综合评价的结果相结合，将之前孤立存在的检测信息的可视性和洞察提升到全新水平，实现预测性维护，自我优化流程改进，提升效率和客户响应能力。一个完善的智能检验检测系统必然包括 AI 视觉系统、AI 深度学习系统、AI 边缘计算系统。

（1）AI 视觉系统

AI 视觉系统通常使用 AI 智能相机，通过将硬件与预装的软件环境相结合，将 AI 功能直接集成到相机本身。

自动化质量检测系统使用机器视觉人工智能软件可以对其看到的内容进行分类，智能化程度更高时，还可以创建自动化工作流程，将 AI 添加到机器视觉硬件中，开发人员和系统集成商可以轻松地直接在智能相机中运行不同的 AI 模型。

（2）AI 深度学习系统

AI 系统更利于表面特征的检测，AI 系统有自动学习的判断能力，可以像人一样去思考一些不良特征是否合适。

标准机器视觉是基于规则的，机器视觉 AI 系统会随着使用更多图像而变得更加智能。许多工厂和生产线已经在使用标准机器视觉，它能够检测出什么时候出现问题，但这些系统无法告诉我们究竟出了什么问题（分类），也无法在收到信息后指导系统采取行动。

（3）AI 边缘计算系统

AI 边缘计算就是将从终端采集到的数据，直接在靠近数据产生的本地设备或网络中进行分析，无须再将数据传输至云端数据处理中心。AI 边缘计算传输速度非常快，可以在缩短时间的同时提高响应速度，有助于防止重要的机器操作发生故障或引发危险事件。

随着工业 4.0 时代的到来，发展智能工厂和智能制造产业已经成为各国的共识。智能制造过程十分复杂，通常由多个环节构成，每一个环节都采用一到多种智能制造装备完成。智能制造装备的环境感知和智能检测技术是高适应性、高精度、智能化作业的根本保障，也是研制智能制造装备必须首先解决的技术难题。传统的感知控制方法无法满足智能制造装备实时、高精度、模块化、无损感知等需求，而智能检测技术则为该技术难题的解决提供了一种最优方案。

科普小百科

高端装备研制生产领域是智能检测技术应用的大舞台

智能检测技术在研制生产中的应用场景如图 3-10 所示。高端装备采购商对于智能检测技术极为青睐。例如，西门子燃气轮机要求高温部分的大型锻件必须采用智能检测设备进行检测。这主要基于两个方面的原因：

其一是超声波等手工无损检测的工作质量很大程度上依赖于人员素质，手工检测的结果经常因为不同人员的工作质量不同而产生差异。而智能检测更多地依靠检测设备的稳定性，人员因素影响较小。通过检测前后的两次校验，采用自动检测确保被检工件可以完全按照标准要求检测。

其二是随着现代计算机技术的飞跃发展，智能检测可以达到许多手工检测无法实现的功能，比如其设备可以将超声检测的结果全波记录下来，对全波进行 B 超、C 超等显示，以及通过计算机软件对全波分析得到缺陷的定量定位等信息。采购商方面的检测专家还可以依据对工件检测结果进行的离线分析，提高对不合格品处理意见（比如存在的缺陷是否可以在后续机加工过程中去除等）的准确性。



图 3-10 智能检测技术在研制生产中的应用场景

科普小百科

成渝 AI 智能视觉检测服务应用与示范

重庆中科摇橹船信息科技有限公司（以下简称摇橹船）由中科院西光所、重庆两江创投、重庆慧聚成江合力组建。摇橹船构筑了系列光学、机械、电学、算法、软件科研平台，相继开发了以 2D 相机、3D 相机、光场相机为代表的核心机器视觉硬件产品，联合成都理工大学、重庆大学等高校，以及平伟实业、长安汽车、赛力斯等行业龙头企业，以产学研用模式，打破日美等国的长期技术垄断，攻坚克难突破“卡脖子”难题，打造了“成渝 AI 智能视觉检测服务应用与示范”项目，其“5G+焊接大数据服务”应用针对汽车制造行业，利用 5G 物联技术突破焊接车间全工位飞溅特征和焊点工艺参数的海量数据传输链路带宽瓶颈，实现焊接车间焊点质量大数据的融合分析，并给出质量提升策略和工艺改进策略。现已服务众多成渝双城汽车产业链企业，做深做实成渝地区协同发展创新，助力成渝地区双城经济圈战略。

“成渝 AI 智能视觉检测服务应用与示范”项目通过机器视觉、5G、人工智能、边缘计算等新技术的有机结合，实现产品实时在线高精度检测，其识别精度可达 99.9% 以上，已在离散制造行业进行试点、应用及推广。该项目产业化效果良好，基于 5G 技术，将实物、系统、环境、管理人员、一线工人进行集中化管理，实时集中化收集信息、传递、存储，通过高等级智能化分析，对焊接工艺流程全流程监控，可提高生产运营效率 20%，降低生产成本约 10%，降低不良品率约 20%。

3.2.1 射频识别技术

射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）是自动识别技术的一种，通过电磁波对记录媒体（电子标签或射频卡）进行非接触双向数据通信。RFID 的应用非常广泛，典型应用有动物晶片、汽车晶片防盗器、门禁管制、停车场管制、生产线自动化、物料管理等。

1. RFID 系统概述

(1) RFID 系统的发展历程

1940—1950 年：由于雷达技术的发展和进步，衍生出 RFID 技术，1948 年 RFID 的理论基础诞生。

1951—1960 年：人们开始对 RFID 技术进行探索，但是并没有脱离实验室研究。

1961—1970 年：相关理论不断发展，并且在实际中开始运用 RFID 系统。

1971—1980 年：RFID 技术不断更新，产品研究逐步深入，对于 RFID 的测试开始进一步加速，并且实现了对相关系统的应用。

1981—1990 年：RFID 技术和相关产品被开发并且应用在中市场中，在多个领域实现应用。

1991—2000 年：人们开始对 RFID 的标准化问题给予重视，并且在生活的多个领域可以见到 RFID 系统的身影。

2000 年后：人们普遍认识到标准化问题的重要意义，RFID 产品的种类进一步丰富发展，无论是有源、无源还是半有源电子标签都开始发展起来，相关生产成本进一步下降，应用领域逐渐增加。

时至今日，射频电路已成为广泛应用于无线通信中的集成电路，上至卫星通信，下至手机、WiFi、共享单车，处处都有射频电路的身影。RFID 的技术理论得到了进一步的丰富和发展，单芯片电子标签、多电子标签识读、无线可读可写、适应高速移动物体的 RFID 技术不断发展，并且相关产品也走入人们的生活，得到广泛应用。

1) 电子标签：由芯片和天线组成，具有存储数据和收发射频无线信号功能。每个电子标签存储着唯一的电子编码，电子编码关联着物品的详细信息。

2) 读写器：利用射频技术读写电子标签的设备。同时，具备网络通信接口，读写器通过此接口与系统高层通信，完成对标签的读写操作。

3) 系统高层：统筹管理读写器，完成对系统每个电子标签的管理与实时追踪。

(2) RFID 系统的工作流程

RFID 系统工作流程如图 3-11 所示。

1) 系统高层控制读写模块执行读写操作。

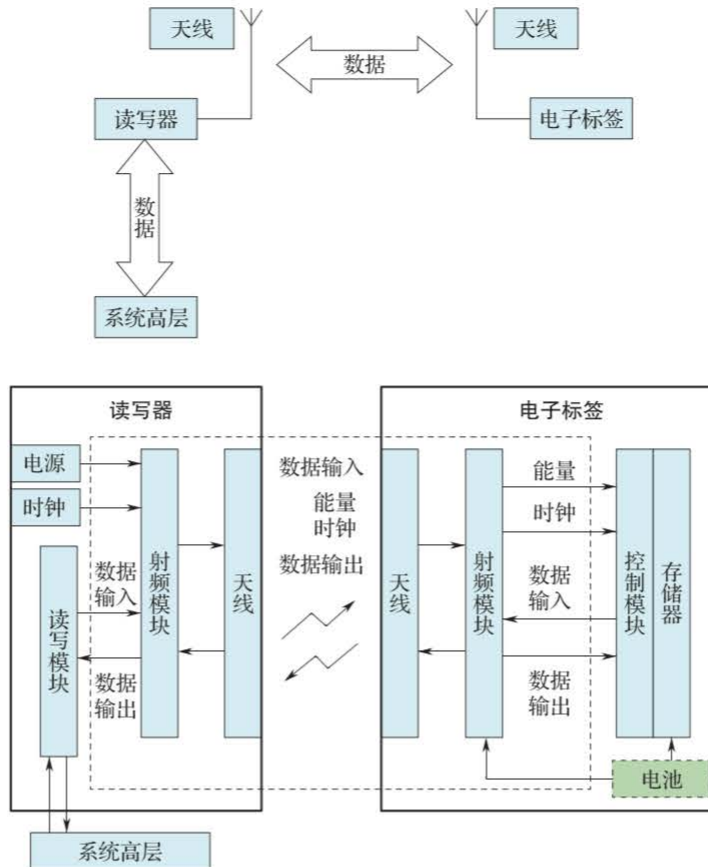


图 3-11 RFID 系统工作流程

2) 读写模块控制射频模块产生射频信号并通过天线发送出去。

3) 标签天线接收到射频信号被激活，通过控制模块操作（读取或者写入）电子标签存储器。

RFID 工作频率的选择要顾及其他无线电服务，不能对其他服务造成干扰和影响。通常情况下，读写器发送的频率称为系统的工作频率或者载波频率，根据工作频率的不同，射频识别分为低频系统 30~300kHz，常见的有 125kHz 和 134.2kHz。高频系统的工作范围为 3~30MHz，RFID 常见的高频工作频率是 6.75MHz、13.56MHz 和 27.125MHz。微波系统工作频率大于 300MHz，常见的微波工作频率是 433MHz、860/960MHz、2.45GHz 和 5.8GHz。其中 433MHz、860/960MHz 也常称为超高频（UHF）频段，其天线波束方向较窄，是目前射频系统研发的核心，是物联网关键技术。

2. 电子标签

如图 3-12 所示，电子标签由标签芯片和天线构成，芯片用来存储物品的数据，芯片的电路一般包含电源电路、时钟电路、解调器、解码器、控制器、编码器、存储器和负载调制电路等功能模块。天线用来收发无线电波。

(1) 电子标签在不同频段上的工作特点

1) 低频电子标签一般为无源标签，在电子标签与读写器传输数据时，电子标签位于读写器天线的近场区，电子标签的工作能量通过变压器耦合方式从读写器中获得，电子标签天线中感应的电压被整流，当作电子标签供电电压使用。

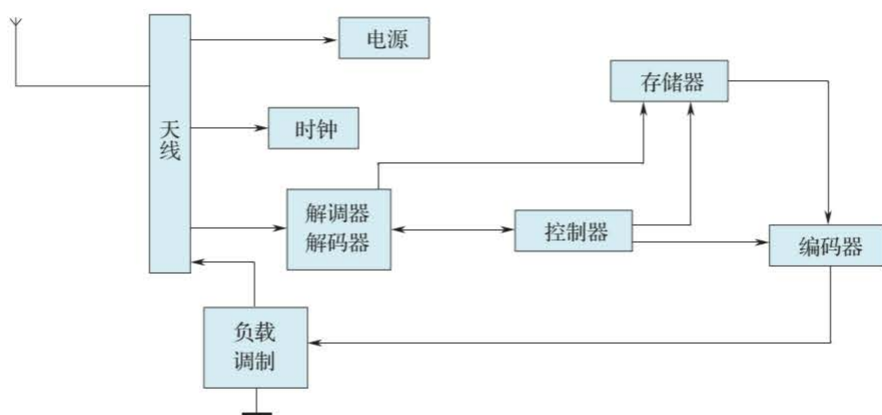


图 3-12 电子标签工作原理

2) 高频电子标签通常也是无源的，一般通过负载调制的方式工作，也就是通过电子标签负载电阻的接通和断开，这些数据就能从电子标签传输到读写器。高频电子标签通常做成卡片的形状。

3) 微波电子标签可以有源或者无源的，微波电子标签与读写器传输数据时，电子标签位于读写器天线的远场区，读写器天线的辐射场为无源电子标签提供能量，或者将有源标签唤醒。由于微波电子标签与读写器的距离较大，在工作区域中可能同时出现多个标签，多个标签同时识读已经成为先进射频识别系统的重要标志，微波的穿透力弱，不能穿透金属，灰尘及雾等悬浮颗粒对微波的传播有影响。

(2) 电子标签的电源电路部分的功能

电子标签的电源电路部分是将电子标签天线输入的射频信号整流稳压后，为标签工作提供直流能量。电子标签获取的载波信号，其频率经过分频之后，可以为编

解码器、存储器和控制器提供时钟信号。电子标签输入的信号经过解调、解码电路，控制命令到达控制器，数据在控制器的控制下写入存储器。电子标签的输出信号在控制器的管理下从存储器输出，经编码器、负载调制电路输出到电子标签的天线。

(3) 可读可写的存储器

EEPROM 是电感耦合式电子标签主要采用的存储器，写入时功耗较高，需要刷新；SRAM 价格高，体积大，集成度较低，需要辅助电池不断进行供电，可以用在微波频段自带电池的电子标签；FRAM 铁电存储器将高速读写和低功耗等优势结合起来，在射频领域有广阔前景。

3. 读写器

(1) 读写器的模块结构

如图 3-13 所示，读写器由射频模块、控制处理模块和天线组成。天线可以是外接的，独立于读写器，也可以是内置的。射频模块用于基带信号（原始电信号）与射频信号的相互转化。控制处理模块是读写器的核心，对发射信号进行编码、调制等各种处理，对接收信号进行解调、解码等各种处理。执行防碰撞算法，实现与后端应用的规范接口。

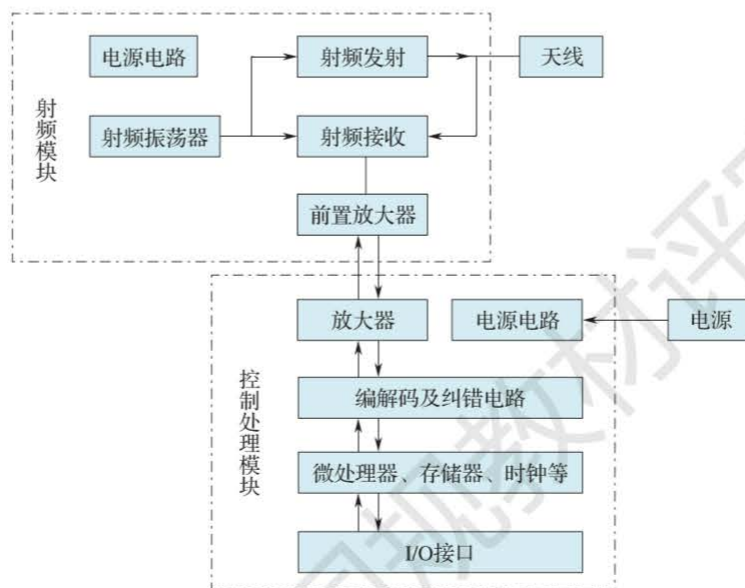


图 3-13 读写器的模块结构

（2）读写器的结构形式

读写器的结构形式有固定式的读写器、手持便携式读写器等。

固定式读写器一般是指天线、读写器与主控机分离。天线可以采用单天线、双天线或多天线形式，天线接口可以是 BNC 或者 SMA 射频接口，天线与读写器的连接可以为螺钉旋接方式，也可以是焊点连接方式。通信接口可以采用 RS232 接口、RS485 接口或者无线局域网 IEEE802.11 接口。

手持便携式读写器将天线与读写器、主控机集成在一起，适用于用户手持使用的电子标签读写设备。

（3）读写器的工作

读写器的工作主要是完成电子标签与读写器之间的通信，这包括对电子标签的初始化，读取或者写入电子标签的内存信息，使电子标签功能失效等。读写器还要完成与系统高层之间的通信，读写器要将读取到的标签信息传递给由计算机网络构成的系统高层，系统高层对读写器进行控制和信息交换，完成特定的应用任务。读写器的识别能力主要体现了读写器的性能，包括防碰撞能力、对高速移动物体识别的能力。

读写器的技术参数包括工作频率、输出功率、输出接口等。工作频率分为低频、高频、超高频。输出功率不仅要满足对应用的需要，还需要符合国家和地区对无线发射功率的许可，符合人体健康要求。输出的接口形式有很多，有 RS232、RS485、USB、WiFi、4G 等多种接口。

4. 系统高层

对于某些简单的应用，一个读写器可以独立完成应用的需要。但对于多数应用来说，射频识别系统是由多个读写器构成的信息系统，系统高层是必不可少的。系统高层可以将许多读写器获取的数据信息有效地整合起来，完成查询、管理和数据交换的功能。

在 RFID 系统中，存在如何将读写器与计算机网络相连的问题。例如，企业通常会提出计算机网络系统如何与读写器设备相连的问题。这就需要中间件。中间件是介于 RFID 读写器与后端应用程序之间的独立软件，中间件可以与多个读写器和多个后端应用程序相连，应用程序通过中间件就能连接到读写器，读取电子标签的数

据，中间件在整个嵌入式应用系统中扮演着设备抽象和管理的作用，解决包括软硬件联调困难和解决方案迭代周期长的问题。

如今，RFID 的应用与日俱增，加之计算机技术、RFID 技术、互联网技术与无线通信技术的飞速发展，对全球每个物品进行识别、跟踪与管理将成为可能，计算机网络将成为 RFID 系统高层。借助于 RFID 技术，物品信息将传送计算机网络的信息控制中心，构成一个全球统一的物品信息系统，构造一个覆盖全球万事万物物联网体系，实现全球信息资源共享、全球协同工作的目标。

案例

菜鸟超高频 RFID 产品生态圈

作为继条形码、二维码之后的第三代识别技术，RFID 一般被用于供应链的商品流通中的货物盘点、出入库交接以及全链路追踪。此前，因为技术突破有限，识别准确率不高，RFID 一直未能大规模投入实际应用。通过优化芯片、读写器及其背后的一整套识别算法，菜鸟将 RFID 的识别准确率大幅提升，尤其是在含金属和液体的场景识别方面取得突破。

通过应用 RFID 读写器，如图 3-14 所示，企业可以低成本地获取供应链全链路的数据，进而让供应链更透明，管理更科学，流程更高效。比如，在服装行业，完成一个门店的物品盘点可能要好几天，但是通过 RFID 远距离扫描、批量读取的特性，半小时甚至几分钟就可以完成盘点。在仓储环节出入库作业也有大量的盘点与登记工作，应用 RFID 技术，在物品搬运的同时，相关信息可以自动上传到系统中。而实现这一切的前提是精准识别物品并读取相关信息。

依托于行业领先的 RFID 电子标签产品设计能力及创新能力，菜鸟针对介质极化效应引入的射频损失、金属环境对标签阻抗系统的剧烈影响以及密集读取场景下互耦干扰等 RFID 应用痛点，进行长期研究与技术创新。经中国物品编码中心、国家射频识别产品质量检验检测中心权威认证，采用创新型自干扰抵消方案及自研解调算法的菜鸟自研 RFID 读写器接收灵敏度达到 -92dBm ，这也意味着菜鸟已成功步入全球 UHF RFID 读写器第一梯队。



图 3-14 菜鸟仓内的 RFID 读写器

以 CNR1 读写器为核心技术，菜鸟还打造出一系列的拳头产品，并应用到物流仓储和供应链管理的各业务场景当中。例如 RFID 盘点小车、RFID 吊顶防盗器、单侧通道门等。以 RFID 吊顶防盗器为例，2023 年，菜鸟基于 CNR1 读写器和巴特勒矩阵天线，并结合多传感融合算法，推出 RFID 吊顶防盗器产品，并将其应用在了服饰行业门店防盗场景。低净空、免运维、低误报、低成本成为这款物联网产品的亮点。

3.2.2 机器视觉检测技术

1. 机器视觉检测系统的工作流程

机器视觉检测系统的工作流程主要分为图像信息获取、图像信息处理和机电系统执行检测结果 3 部分，另外根据系统需要还可以实时地通过人机界面进行参数设置和调整。

当被检测的对象运动到某一设定位置时会被位置传感器发现，位置传感器会向 PLC 发送“探测到被检测物体”的电脉冲信号，PLC 经过计算得出何时物体将移动到 CCD 相机的采集位置，然后准确地向图像采集卡发送触发信号，采集卡检测到此信号后会立即要求 CCD 相机采集图像。被采集到的物体图像会以 BMP 文件的格式送到工控机，然后调用专用的分析工具软件对图像进行分析处理，得出被检测

对象是否符合预设要求的结论，根据“合格”或“不合格”信号，执行机会对被检测物体做出相应的处理。系统如此循环工作，完成对被检测物体队列连续处理，如图 3-15 所示。

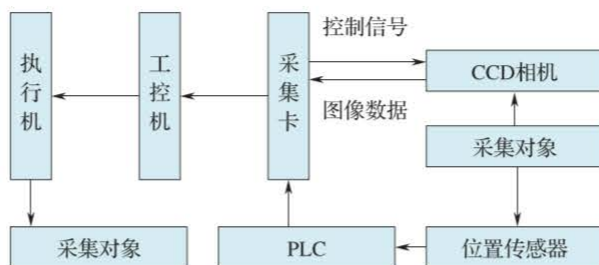


图 3-15 机器视觉检测系统的工作流程

从机器视觉检测系统的工作流程可以看出，机器视觉检测系统是一种相对复杂的系统。大多数监控和检测对象都是运动的物体，系统与运动物体的匹配和协调动作尤为重要，所以给系统各部分的动作时间和处理速度提出了严格的要求。在某些应用领域，例如机器人、飞行物体制导等，对整个系统或者系统的一部分的重量、体积和功耗等都会有严格的要求。

2. 机器视觉检测的相关技术

(1) 图像采集技术——机器视觉的基础

图像采集部分一般由光源、镜头、数字摄像机和图像采集卡构成。采集过程可简单描述为在光源提供照明的条件下，数字摄像机拍摄目标物体并将其转化为图像信号，最后通过图像采集卡传输给图像处理部分。

在设计图像采集部分时，要考虑到多方面的问题，主要是关于数字摄像机、图像采集卡和光源方面的问题。

1) 光源照明。照明是影响机器视觉系统输入的重要因素，其直接影响输入数据的质量和效果。到目前为止，还没有哪种机器视觉照明设备能通用各种应用，因此在实际应用中，需针对应用选择相应的照明设备以满足特定需求。

照明系统按其照射方法可分为背向照明、前向照明、结构光照明和频闪光照明等。其中，背向照明是指将被测物放在光源和摄像机之间，以提高图像的对对比度。前向照明是光源和摄像机位于被测物的同侧，其优点是便于安装。结构光照明是将

光栅或线光源等投射到被测物上,并根据其产生的畸变,解调出被测物的三维信息。频闪光照明是将高频率的光脉冲照射到物体上,摄像机拍摄要求与光源同侧。

2) 光学摄像头。光学摄像头的任务就是进行光学成像,一般在测量领域都有专门的用于测量的摄像镜头,因为其对成像质量起着关键性的作用。

摄像头需要注意的一个问题是畸变。这就需要使用相应的畸变校正方法,目前也开发出了很多自动畸变自动校正系统。

3) CCD 相机及图像采集卡。CCD (Charge Coupled Device) 相机及图像采集卡共同完成对目标图像的采集与数字化。在基于 PC 的机器视觉系统中,图像采集卡是控制相机拍照来完成图像的采集与数字化,并协调整个系统的重要设备。

(2) 图像处理与分析——机器视觉的核心

用于机器视觉的图像处理与分析方法的核心是解决目标的检测识别问题。当所需要识别的目标比较复杂时,就需要通过几个环节从不同的侧面综合来实现。

对目标进行识别提取的时候,首先要考虑如何自动地将目标物从背景中分离出来。目标物提取的复杂性一般就在于目标物与非目标物的特征差异不是很大,在确定了目标提取方案后,就需要对目标特征进行增强。

随着计算机技术、微电子技术以及大规模集成电路的发展,图像信息处理工作越来越多地借助硬件完成,如 DSP 芯片、专用的图像信号处理卡等。软件部分主要用来完成算法中并不成熟又较复杂或需不断完善改进的部分。这既提高了系统的实时性,又降低了系统的复杂度。

3. 机器视觉检测技术的应用与优势

(1) 机器视觉检测技术的应用范围

1) 在工业检测方面:近几十年来,在工业检测中利用视觉系统的非接触、速度快、精度合适、现场抗干扰能力强等突出的优点,使机器视觉技术得到了广泛的应用,取得了巨大的经济与社会效益。

自动视觉识别检测目前已经用于产品外形和表面缺陷检验,如木材加工检测、金属表面视觉检测、二极管基片检查、印刷电路板缺陷检查、焊缝缺陷自动识别等。

这些检测识别系统属于二维机器视觉,技术已经较为成熟,其基本流程是用一个摄像机获取图像,对所获取的图像进行处理及模式识别,检测出所需的内容。

2) 在医学上的应用: 机器视觉主要用于医学辅助诊断。首先采集核磁共振、超声波、激光、X射线、 γ 射线等对人体检查记录的图像, 再利用数字图像处理技术、信息融合技术对这些医学图像进行分析、描述和识别, 最后得出相关信息, 在辅助医生诊断人体病源大小、形状和异常, 并进行有效治疗方面发挥了重要的作用。

不同医学影像设备得到的是不同特性的生物组织图像, 如X射线反映的是骨骼组织, 核磁共振影像反映的是有机组织图像, 而医生往往需要考虑骨骼有机组织的关系, 因而需要利用数字图像处理技术将两种图像适当地叠加起来, 以便于医学分析。

3) 交通监控领域中的应用: 在重要的十字路口安放摄像头, 就可以利用摄像头的快速拍照功能, 实现对违章、逆行等车辆的车牌进行自动识别、存储, 以便相关的工作人员进行查看。

4) 在桥梁检测领域中的应用: 传统的人工检测法和桥检车法都是依靠人工用肉眼对桥梁表面进行检测, 其速度慢, 效率低, 漏检率高, 实时性差, 影响交通, 存在安全隐患, 很难大幅应用。而无损检测包括激光检测、超声波检测以及声发射检测等多种检测技术, 它们仪器昂贵, 测量范围小, 不能满足日益发展的桥梁检测要求。智能化检测有基于导电性材料的混凝土裂缝分布式自动检测系统和智能混凝土技术, 也有机器视觉检测技术。导电性材料技术虽然使用方便, 设备简单, 成本低廉, 但是均需要事先在混凝土结构上涂刷或者埋设导电性材料进行检测, 而且智能混凝土技术还无法确定裂缝位置、裂缝宽度等一系列问题, 距实用化还有较长的差距。

机器视觉检测技术是利用 CCD 相机获取桥梁表面图片, 然后运用计算机处理后自动识别出裂缝图像, 并从背景中分离出来, 然后进行裂缝参数计算的方法, 它具有便捷、直观、精确、非接触、再现性好、适应性强、灵活性高及成本低廉的优点, 能解放劳动力, 排除人为干扰, 具有很好的应用前景。

据统计, 混凝土桥梁的损坏有 90% 以上都是由裂缝引起的, 因此对桥梁的健康检测主要是对桥梁表面的裂缝进行检测与测量。基于机器视觉的桥梁检测技术主要包括三部分: 桥梁表面图像的获取技术、基于图像的裂缝自动识别理论与算法以及基于图像的裂缝宽度等病害程度定量化测量方法。

基于机器视觉的自动化、智能化检测技术已经在道路、隧道上得到了成功应用，在桥梁上也得到了初步的应用，但主要集中在视线开阔的高空混凝土构件表面图像获取技术上，在病害的自动识别方面仍停留在理论研究阶段，还无法应用于实际工程中。

（2）机器视觉检测技术的优势

1) 效率：工业自动化的快速发展，使生产效率大幅提升，从而对检测效率提出了更高的要求。人工检测效率是在一个固定区间，无法大幅提升，而在流水线重复且机械化的检测过程中，检测人员很容易出现疲劳而导致检测效率降低。机器视觉检测能够更快地检测产品，特别是在生产线检测高速运动的物体时，机器能够提高检测效率，速度甚至能够到达人工的 10~20 倍。

2) 精度：由于人员有物理条件的限制，即使是依靠放大镜或显微镜来检测产品，也会受到主观性方面的影响，精度无法得到保证，而且不同检测人员的标准也会存在差异。在精确性上，机器有明显的优点，它的精度能够达到千分之一英寸。而且机器不受主观控制，只要参数设置没有差异，相同配置的多台机器均能保持相同的精度。

3) 客观性：人工检测难免会出现疲劳，同时有一个致命缺陷，就是情绪带来的主观性，检测结果会随检测人员心情的好坏发生变化；而机器没有喜怒哀乐，它所带来的检测结果自然更加客观可靠。

4) 重复性：机器可以以相同的方法一次又一次地完成检测工作而不会感到疲倦；与此相反，人工长期重复性检测肯定会产生疲劳，同时，即使产品是完全相同的，每次检测产品时都会有细微的不同。

5) 环境：机器视觉是通过图像摄取装置将目标转换成图像信号，传送给专用的图像处理系统，在测量工件过程中，无须与工件进行接触，因此能够适应恶劣危险生产环境，同时也不会对工件造成接触性损伤；而人工则需要与工件进行接触性检测，因此无法应对恶劣环境，且在检查过程中不可避免地会对工件造成接触性损伤。

6) 成本：机器视觉前期投入会比较多，但属于一次性投入，长期产出，由于机器视觉的发展迅速，价格也会逐渐降低；而人工检测则需要长期投入，且人工管理成本会呈不断上升的趋势。由于机器比人工的检测效率高很多，因此长期来看，机

器视觉成本会更低。

7) 信息集成: 机器视觉可以通过多工位检测方法, 一次性完成待检产品的轮廓、尺寸、外观缺陷、产品高度等多技术参数的测量; 而人工检测在面对不同的检测内容时, 只能通过多工位合作协调完成, 而不同员工检测标准不一, 极容易出现误检的情况。

8) 数字化: 机器视觉在工作过程中产生的所有测量数据, 均可独立拷贝或以网络连接方式拷出, 便于生产过程统计和分析。同时还可在检测后导出指定数据并生成报表, 无须人工一一添加, 这无疑大大优于人工检测的数据统计。

总体来说, 机器视觉检测技术对比人工检测具有自动化、客观、非接触和高精度等特点。特别是在工业生产领域, 机器视觉强调生产的精度和速度, 以及工业现场环境下的可靠性, 在重复和机械性的工作中具有较大的应用价值, 对企业来说是实现自动化生产重要的一步。机器视觉工业生产线如图 3-16 所示。



图 3-16 机器视觉工业生产线

3.2.3 无损检测技术

无损检测是指在检查机械材料内部时不损害或不影响被检测对象的使用性能, 不伤害被检测对象内部组织的前提下, 利用材料内部结构异常或缺陷存在引起的热、声、光、电、磁等反应的变化, 以物理或化学方法借助现代化的技术和设备器材,

对试件内部及表面的结构、状态及缺陷的类型、数量、形状、性质、位置、尺寸、分布及其变化进行检查和测试的方法。常用的无损检测技术有超声波检测、射线检测、渗透检测、磁粉检测、涡流检测。

1. 超声波检测技术

在弹性介质中（如固体、液体、气体）波源激发的纵波频率小于 20Hz 为次声波，20~20000Hz 为声波，大于 20000Hz 为超声波。由于超声波可以穿透大多数材料，故可以用来探测材料内部及表面的缺陷，也可用来测量厚度等其他用途。

电源振荡激发高频声波，入射到构件后遇到缺陷，超声波被反射、散射和衰减，由探头接收转换为电信号，再经放大显示，根据波型来判断缺陷的位置、大小和性质，并由相应的判定标准、规范来确定缺陷的危害程度。

(1) 超声波探伤技术

超声波探伤仪如图 3-17 所示。



图 3-17 超声波探伤仪

1) 基本原理：超声波分为纵波、横波、表面波和板波。超声波探伤中广泛应用的是纵波，因为纵波的产生和接收比较容易。横波多用于焊缝的超声波探伤。表面波沿着金属表面进行传播，对表面缺陷非常敏感，可用于探测复杂形状的表面缺陷。板波可对薄板进行检测。

超声波探伤系统由超声波探伤仪和探头组成，一般使用耦合剂，和探头接触的

金属表面要进行打磨，形成光滑清洁的表面。

2) 超声波探伤方法：应用最广泛的方法是脉冲反射法，即超声波发射进入被测金属，然后接收从缺陷处反射回来的回波，用以判断缺陷的一种方法。超声波探伤方法又分为垂直探伤法和斜角探伤法。垂直探伤法主要用于铸件、锻件、板材和复合材料的检测。斜角探伤法主要用于探测焊缝、管件等内部缺陷。

3) 超声波探伤技术的特点：超声波探伤技术应用非常广泛，用以探测构件中的不连续性的缺陷，提供不连续三维位置的信息，给出可用来评估缺陷的数据。例如检测焊缝的缺陷，传动轴、高强螺栓及材料夹层的缺陷等。该技术的主要特点如下。

- ①材料种类和厚度范围广泛。
- ②可提供缺陷的尺寸、深度、位置和性质，判断准确。
- ③对人身、材料无损害。
- ④便于携带，检测成本低，操作灵活、及时。
- ⑤要求操作人员具备较高的知识水平和专业技能。

(2) 超声波测厚技术

超声波测厚技术指利用超声波来检测材料的厚度，检测速度快。采用数字式超声波测厚仪进行检测可直接显示厚度。

高温下应使用高温压电测厚仪，并使用高温耦合剂，使用高温压电测厚仪应在标明的使用温度范围内使用，不适用于不锈钢铸件等晶粒粗大材料的测量。

2. 射线检测技术

(1) 基本原理

射线检测技术是常用的检测技术，用以检测材料的内部缺陷。常用的射线有两种类型，即 X 射线和 γ 射线，如图 3-18 所示。

X 射线：指高速电子流射到某些固体表面（靶子）上时，产生特殊的射线。

γ 射线：放射性同位素（如 ^{60}Co ）可发射出波长很短的电磁波，即 γ 射线，速度达到光速。

射线具有极强的穿透能力，从材料的一个侧面照射，射线穿透材料，使另一面的胶片感光，显示出检测到的缺陷。还可转换成可见光，用电视摄像来显示探测到的缺陷。通过计算机断层分析可确定缺陷的位置和空间尺寸。

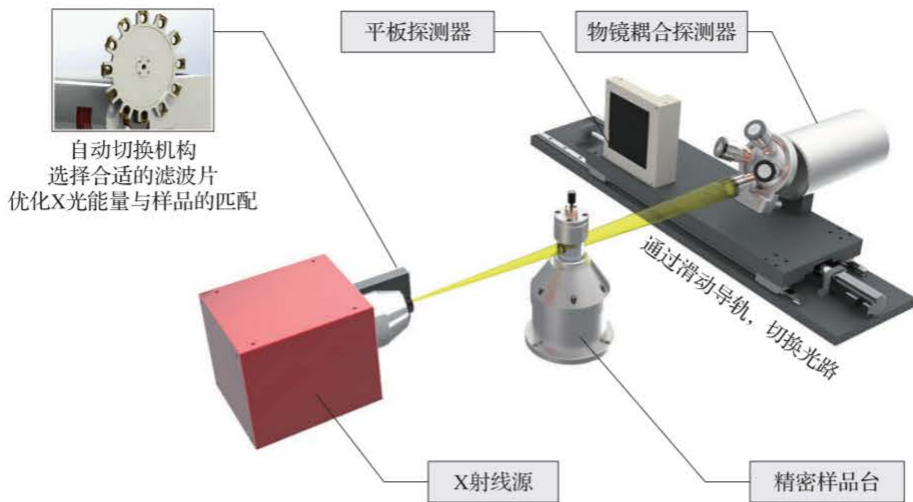


图 3-18 射线检测技术原理

(2) 技术应用及特点

射线检测技术主要用于检查铸件的缩孔、气孔、非金属夹渣，焊缝的不连续性缺陷等。其特点是检测缺陷直观，底片可长期保存，适用范围广，成本低，操作人员业务能力和经验水平较超声波检测技术要求低。

X 射线和 γ 射线检测技术的对比如下。

- 1) X 射线检测技术：仪器尺寸大，不便于携带，穿透力较高，用于较厚材料（钢构件厚度为 120mm）检测，不衰减，可调节射线源强度，对人体有害，需要电源。
- 2) γ 射线检测技术：仪器尺寸小，便于携带，穿透力强，用于厚壁材料（钢构件厚度可达 300mm），衰减，射线源强度不可调，对人体危害大，不需电源。

3. 渗透检测技术

渗透检测技术是将渗透剂涂于清洁的被检查的部件表面，如果表面有开放性缺陷时，渗透剂则渗透到缺陷中去，去除表面多余的渗透剂，再涂上显影剂，缺陷就显现出痕迹，采用天然光或紫外线光观察，判断缺陷的种类和大小。

(1) 基本操作方法

- 1) 清洗：去除金属表面的油污、锈斑及涂料等，待干燥。
- 2) 涂以渗透剂：大约 5min 后，将表面的渗透剂用水或溶剂清除。

3) 显像: 将显影剂喷涂在金属表面上, 干燥后如有缺陷很快就显示出来。如使用荧光显影剂, 则需在紫外线照射下观察缺陷。

4) 清除表面的显影剂: 注意有些渗透剂可能含氯化物, 不能用于奥氏体不锈钢。

(2) 适用范围

渗透探伤适用于检测各种材料和各种形状的构件表面缺陷。其设备简单, 便于携带, 操作简单易学, 检测的效果直观, 成本低廉, 用于表面开放型的缺陷。只对缺陷做出定性判断, 需凭经验对缺陷的深度做出粗略的估计。

4. 磁粉检测技术

(1) 基本原理

磁粉检测技术的基本原理是将铁磁性材料(铁、钴、镍)置于强磁场中, 使其磁化, 如果其表面或近表面存在缺陷, 就会有部分磁力线外溢形成漏磁场, 对施加在其表面的磁粉产生吸附作用, 磁粉缺陷部位显示出缺陷的痕迹, 反映出缺陷的取向、位置和大小。磁粉探伤检测仪如图 3-19 所示。



图 3-19 磁粉探伤检测仪

(2) 操作工艺

- 1) 预处理: 清除金属表面油污、涂料和铁锈等。
- 2) 磁化: 根据构件的大小、形状及缺陷的可能类型选择磁化方法, 按规程进行操作。
- 3) 施加磁粉: 将磁粉或磁悬液施加在磁化的构件上。

4) 检查: 如果使用非荧光磁粉, 可利用自然光观察磁粉的聚集状态, 判定缺陷的部位和大小等。如果使用荧光磁粉, 则需在暗室内利用紫外线照射检查。

5) 后处理: 检查后进行退磁, 清除磁粉等操作。

5. 涡流检测技术

(1) 基本原理

涡流检测技术的基本原理是利用电磁感应来检测导电材料的缺陷。涡流检测探头或线圈使用交流电, 其交变磁场诱发被测试的部件产生涡流电流, 部件的缺陷引起涡流电流强度和分布状况的变化, 并显示在阴极射线管或仪器上, 根据测试涡流电流的变化来判定缺陷。

(2) 技术应用

涡流检测技术主要用于导体(钢铁、有色金属、石墨)的表面及近表面缺陷的探伤, 检查腐蚀、变形、厚度测量、材料分层等, 可提供缺陷的深度尺寸。多用于检查电站、原子能、化学工业、化肥工业等使用的锅炉、冷凝器、炉管、管道等设备的缺陷, 如裂纹、腐蚀、变形等。采用涡流检测技术, 检测速度快, 准确性高, 可进行定量检查, 其厚度误差为 $\pm 0.05\text{mm}$, 还可以实现自动检测和记录, 实现自动化和计算机的数据处理。但是, 难于用于形状复杂的构件。

科普小百科

无损检测技术的应用

无损检测服务是保障工业安全与可靠性的一项重要手段。它能够在不破坏被检测物体完整性的情况下, 及时发现和解决问题, 确保设备和工程的长期安全运行。通过应用无损检测技术, 企业可以减少潜在的风险, 提高生产效率, 降低维修成本。

无损检测技术广泛应用于各种工业领域, 如航空、航天、石油化工、交通运输、建筑、电子电气等。

(1) 航空、航天领域

在航空航天领域, 对飞行器、火箭、卫星等高精密度设备的质量和安全性要求极高。无损检测技术在这里发挥着至关重要的作用。例如, 对于飞

机的机翼、发动机等关键部件，采用超声波探伤、磁粉探伤等无损检测方法，可以有效地检测出内部的裂纹、缺陷等，确保飞行器安全飞行。

（2）石油化工领域

石油化工行业涉及大量的压力容器、管道等设备，这些设备的安全性能直接关系到企业的生产安全和环境保护。无损检测技术在这里也发挥着重要作用。例如，通过射线检测、超声检测等方法，可以对压力容器的焊缝进行质量检测，确保其在高温高压环境下的安全性能。

（3）交通运输领域

在交通运输领域，无损检测技术同样具有重要意义。例如，在桥梁、隧道等基础设施建设过程中，采用声波透射法、电磁波检测法等无损检测方法，可以有效地检测出混凝土结构的裂缝、空洞等问题，为工程的顺利进行提供有力保障。此外，在铁路、公路等运输设施的建设和维护过程中，无损检测技术也发挥着关键作用。

（4）建筑领域

在建筑领域，无损检测技术主要应用于钢结构、混凝土结构等方面。通过超声波探伤、磁粉探伤等方法，可以对建筑物的钢筋、钢结构件等关键部位进行质量检测，确保建筑物的安全性能。同时，在建筑物的使用过程中，无损检测技术还可以对建筑物的结构进行定期检查，及时发现并处理潜在的安全隐患。

（5）电子电气领域

在电子电气领域，无损检测技术主要应用于半导体、电子元器件等方面。通过X射线检测、红外热像检测等方法，可以对半导体芯片、电子元器件等关键部件进行质量检测，确保电子产品的安全性能和可靠性。

无损检测服务的另一个重要优势是提供了全面的数据分析和评估。通过使用先进的数据采集和分析技术，检测专家能够准确地评估设备或结构的健康状况，识别出任何异常或潜在问题的迹象。这种及早的发现和预测能力使企业能够采取相应的措施，避免设备故障和生产停机，提高生产效率和运营成本。

思考与练习

【单选题】

1. 产品数据的数字化处理是指将产品的相关信息转化为（ ）形式，建立数字模型，以实现产品的数字化管理和生产制造。
A. 信息化 B. 数字化 C. 智能化 D. 网络化
2. 根据产品数字化图片或影视画面提供的几何维度和色彩维度信息，实现模型重构，称为（ ）。
A. 逆向反求 B. 影像反求 C. 软件反求 D. 实物反求
3. 相对于传统的材料去除（切削加工）技术，增材制造是一种（ ）材料累加的制造方法。
A. 自下而上 B. 自上而下 C. 由内向外 D. 由外向内
4. 智能检测技术为何有助于提高生产质量？是因为它可以（ ）。
A. 降低检测成本 B. 提高生产速度
C. 自动检测和缺陷识别 D. 增加工人数量
5. 为了推动可持续发展，智能检测技术通常被用于（ ）领域。
A. 赛车竞技 B. 空间探索
C. 医疗保健 D. 垃圾处理
6. 智能检测技术的发展对社会有哪些潜在影响？影响主要有（ ）。
A. 增加资源浪费 B. 减少就业机会
C. 提高生活质量和安全性 D. 增加环境污染

【多选题】

1. 逆向工程技术包括（ ）等。
A. 几何逆向反求 B. 材料逆向反求
C. 工艺逆向反求 D. 智能商业模式



2. 仿真的基本步骤包括 ()。

- A. 研究系统
B. 建立系统模型
C. 建立仿真模型
D. 运行仿真模型输出结果

【填空题】

1. 虚拟现实系统包括 _____、_____ 和 _____ 3 个基本要素。
2. VMS 的建模包括 _____、_____ 和 _____ 3 种模型。
3. 制造系统仿真包括 _____、_____ 和 _____ 等。
4. 智能检测技术的主要目标是 _____ 检测任务。
5. 传感器的作用是 _____ 信息。

【简答题】

1. 智能设计技术有哪些特点?
2. 虚拟制造在智能制造生产过程中有哪些实用技术?
3. 举例说明智能检测中声音和语音分析技术的应用。
4. 在射线检测技术中, X 射线和 γ 射线检测技术有何区别?



