


04

第 4 章

智能制造技术融合

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

- 了解工业自动化和控制系统,包括PLC、CNC、机器视觉等技术。
- 理解物联网和传感器技术,用于实时监测和数据采集,以支持生产设备的连接和数据驱动的决策制定。
- 学习如何处理和分析大规模的生产数据。
- 了解云计算和边缘计算技术,以实现数据存储、处理和分发的有效管理,同时确保数据的安全性和可用性。
- 了解人工智能和机器学习方法,用于预测性维护、质量控制、生产优化和自动化决策。
- 理解数字孪生、数字化工厂等的实际应用。

科普素养目标

- 了解智能制造中的数据隐私和网络安全问题,以及如何保护个人和商业数据。
- 了解如何使用智能制造技术来鼓励创新、减少资源浪费,实现可持续发展。

仅供国规教材评审使用



4.1 智能制造与工业大数据

4.1.1 什么是工业大数据

工业大数据是指在工业领域中，围绕典型智能制造模式，从客户需求到销售、订单、计划、研发、设计、工艺、制造、采购、供应、库存、发货和交付、售后服务、运维、报废或回收再制造等整个产品全生命周期各个环节所产生的各类数据及相关技术和应用的总称。

1. 数据来源

在智能制造领域，大数据的主要来源有两个，第一个数据来源于智能设备。在智能制造工厂，工人可以带普适感应器等智能设备来参加生产和管理。第二个数据来源于人类轨迹产生的数据，包括在采购、生产、物流与销售市场的内部流程以及外部互联网信息等产生的数据。通过行为轨迹数据与设备数据的结合，大数据可以帮助我们实现对客户的分析和挖掘。

2. 数据的关系

数据必须要放到相应的环境中一起分析，才能了解数据之间的关系，分析出问题的根本原因。例如，每一款新机型在交付给航空公司之前都会接受一系列残酷的飞行测试。极端天气测试就是多项严酷的测试之一。该测试的目的是为了确保飞机的发动机、材料和控制系统能在极端天气条件下正常运行。

问题的处理关键在于找到产生问题的根源，而对错误的消除，关键在于解决方案的可靠有效。一旦找到并确定了根本原因，同时产生了可接受的应急措施，就可把问题当成一个已知错误来处理。问题调查的过程一定需要收集所有可用的、与事件相关的信息来确定并消除引起事件和问题的根本原因。数据采集与分析必须要与

事件 / 问题发生的环境数据结合。

3. 数据的收益

大数据不仅要关注实际数据量的多少，更要关注大数据的处理方法在特定场合的应用，让数据产生创新价值。如果离开了收益考虑或投资回报的设计，一味寻求大数据，既无法落地，也无法为企业创造价值。

4.1.2 工业大数据分析的类型

1. 工业大数据分析

生产执行系统（MES）与飞机发动机健康管理系统如出一辙。我们可以从工厂的生产中，实时采集到海量的流程、变量、测量结果等数据。这些数据都是在制造环境中设备或资产连接后所产生的。然而基于大量数据集而生成的报表，或是基础统计的分析并不足以称之为制造业的大数据分析。

当代大数据处理技术的价值在于技术进步，这也使得大数据成为商业中有价值的核心驱动因素。作为智能制造的“三驾马车”之一，工业大数据分析已经被多数的制造企业所认知并接受。

2. 工业大数据类型

大数据不仅仅是大量的数据的堆积。大数据的重要属性之一就是不断变化的数据类型。如果只是大量采集同一类型的数据，再大的数据量都不能称之为大数据。

数据必须包括高度可变性和种类多样性。制造工厂中存在无数的大数据应用，但并不包括简单的分类和展示一连串的流程测量结果，因为这些工作由基本的统计展现就可以完成。

4.1.3 工业大数据在智能制造领域的应用

1. 工业大数据的应用范围

工业大数据覆盖工业生产的全流程和产品的全生命周期，典型应用包括产品创新、产品故障诊断与预测、工业生产线物联网分析、工业企业供应链优化、产品精准营销、生产计划与排程和产品质量管理与分析等诸多方面。它所表现出来的核心技术优势体现在采集与预处理、存储与管理、分析与挖掘、展现与应用上。

2. 工业大数据的应用场景

工业大数据能够参与到从工厂内部的缩短研发和设计周期、生产工艺与流程优化、生产设备维护预警、能源消耗管控到外部的供应链体系优化、个性化定制、助力企业服务化转型等各个环节，可以在不同应用场景下发挥着核心的驱动作用。

案例

沈阳机床：“终端 + 云端 + 商业模式”带动行业发展

智能制造装备成为我国高端装备制造重点发展方向之一。机床是装备制造的工作母机，是先进制造技术的载体和装备工业的基本生产手段。沈阳机床集团作为我国机床行业骨干企业，肩负着我国机床制造业从传统向现代、从中低端向高端发展的重要使命。

我国是全球第一机床消费大国，占有全球30%的市场。同时，我国机床行业整体存在大而不强，数控系统和功能部件发展滞后，产品同质化竞争严重，行业整体经济效益差等问题。沈阳机床集团立足于自主研发的i5数控系统，结合新一代信息技术与大数据应用，以分享共赢的商业理念布局工业互联网服务平台，面向机加工行业提供“终端 + 云端 + 商业模式”完全贯通的智能制造解决方案，支持机加工行业上下游企业协同发展，带动整个机床行业经济效益的增长。

机床的数字化是沈阳机床集团的智能制造解决方案的起点，机床作为生产过程的数据中心，通过对机床关键参数的采集、存储、分析和处理，获得对制造过程的感知能力，形成基于机床运行数据的智能化功能。例如能耗分析功能，通过采集功率负载与电流信息，能够实现对设备进行状态分析、能耗分析、加工过程状态监测分析以及对加工方案进行多维度量化评价。

同样基于机床运行大数据，可以实现机床健康度诊断（合理选择能够反映设备健康状态的指标数据，通过高频采集模式，进而基于这些指标数据进行设备健康状态的评估）、L指数分析（‘L指数即Life指数’是一套用于评价设备或部件单元的生命值指数的体系，基于全生命周期的价值链分享理念，通过实时采集设备运行数据，采用特定的数学模型，得出与设备使用条件和使用历史相关的L指数）与预防性维护（根据设备使用数据分析，及时预警

机床故障，进而进行定期维护，保障设备长期安全可靠运行）。

我国机床用户多为中小企业，普遍存在的情况是研发设计、制造、销售与服务等环节基本在企业内部独立完成，机床设备独立工作，相互之间不存在交互，不具备协同工作的能力，造成产能等生产资源的分配不合理和浪费。另一方面，用户企业因为规模和效益的限制，对企业信息化改造投入不足，加剧了生产设备成为“信息孤岛”的现象。

为解决企业生产信息集成度不高的问题，沈阳机床集团建设工业服务平台——iSESOL 云制造服务平台（见图 4-1），通过接入设备对象的扩充和开放，实现从不同设备到完整制造系统数据接入，为广大的中小型机加工企业提供云化 SaaS 服务。产能、数据、金融、安全等各种要素被有机集成，形成了基于订单和生产数据的机床租赁服务，专注于产能交易与加工服务的产能云服务、按需体验式定制服务的定制云服务、区域合作与装备协同的区域云

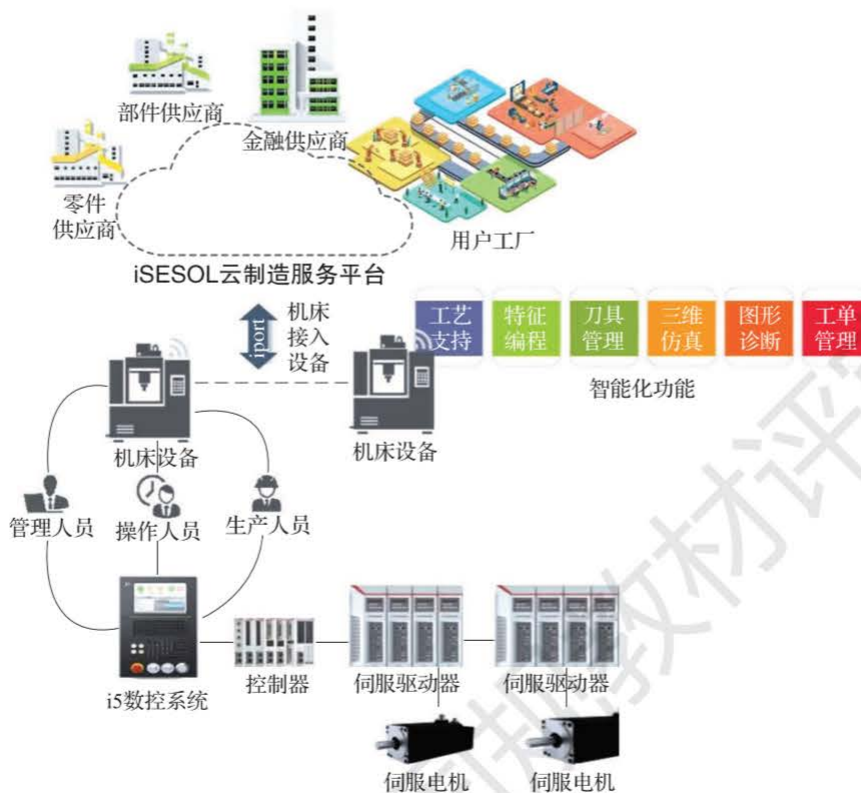


图 4-1 iSESOL 云制造服务平台

服务、产能数据预测式分析的数据云服务、新一代加工从业培训的培训云服务。实现制造过程的跨组织数据穿透，形成全球互联的虚拟工厂。

在此基础上，iSESOL 云制造服务平台接入基于民众的创新和设计能力，工艺师、设计师等各种智力资源也可以被展示和交易，参与到机加工产业链的协同和价值分享；同时物流服务企业的接入使得从原材料到机加工产品可以实现由平台调配的第三方灵活供给，实现资源的优化配置。基于平台的开放性，iSESOL 云制造服务平台连接社会的制造资源，实现了从机床全生命周期维护到虚拟智能工厂的行业全链条解决方案，形成了完整的制造生态系统。基于 iSESOL 云制造服务平台，制造业用户及设备制造商可以分享该平台的渠道资源、人力资源、设计资源，基于工业互联网的商业模式可以获得快速的复制。



4.2 智能制造与工业互联网

4.2.1 什么是工业互联网

工业互联网是一种通过互联网和物联网技术连接和集成生产系统和企业的各个环节，实现企业内部和外部资源的共享和协同，提高生产效率和资源利用率的生产方式。工业互联网技术包括传感器技术、云计算、大数据分析、人工智能等。工业互联网是 5G 时代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，是数字经济的重要组成部分以及中国工业转型升级和创新发展的主要驱动力。

智能制造和工业互联网的结合，可以实现生产过程的数字化、智能化和自动化，提高生产效率，降低生产成本，提升产品质量和产品设计能力，并且可以满足市场的多样化需求。同时，智能制造和工业互联网的发展也对制造企业提出了新的要求，即要具备更高的技术能力和管理能力，要推动传统制造业向高端智能制造转型升级。

近年来，中国工业互联网快速成长，已全面融入45个国民经济大类。截至2023年上半年，中国工业互联网的产业规模已超1.2万亿元，工业互联网技术体系及关键技术已成为基础设施要素升级和集成创新的重要支撑，工业互联网平台资源配置能力显著增强，重点平台工业设备连接数量大幅增长。

4.2.2 智能制造与工业互联网的特征、侧重点

1. 智能制造系统的特征

(1) 自律能力

搜集与理解环境信息和自身的信息，并进行分析判断和规划自身行为的能力。强有力的知识库和基于知识的模型是自律能力的基础。

(2) 人机一体化

智能制造系统是人机一体化智能系统，突出人在制造系统中的核心地位，同时在智能机器的配合下，更好地发挥出人的潜能，使人机之间相互协作、相辅相成。

(3) 虚拟现实技术

虚拟现实（Virtual Reality）技术能模拟实际制造过程和未来的产品，从感官和视觉上使人获得完全如同真实的感受。这种人机结合的新一代智能界面，是智能制造的一个显著特征。

(4) 自组织超柔性

智能制造系统中的各组成单元能够依据工作任务的需要，自行组成一种最佳结构，其柔性不仅突出在运行方式上，而且突出在结构形式上，所以称这种柔性为超柔性，如同一群人类专家组成的群体，具有生物特征。

(5) 学习与维护

智能制造系统能够在实践中不断地充实知识库，具有自学习功能。同时，在运行过程中自行诊断故障，并具备对故障自行排除、自行维护的能力，能够自我优化并适应各种复杂的环境。

2. 工业互联网的特征

(1) 智能机器

以崭新的方法将现实世界中的机器、设备、团队和网络通过先进的传感器、控制器和软件应用程序连接起来。

（2）高级分析

使用基于物理的分析法、预测算法、自动化和材料科学、电气工程及其他关键学科的深厚专业知识来理解机器与大型系统的运作方式。

（3）工作人员

建立员工之间的实时连接，连接各种工作场所的人员，以支持更为智能的设计、操作、维护以及高质量的服务与安全保障。

3. 智能制造和工业互联网的侧重点

工业互联网侧重基于数据资产的智慧服务，将互联网技术和思维模式引入到工业的生产组织当中去，使得日常生产中的海量数据信息传递、集成、挖掘成为可能，主要由工业平台为企业提供定制化的服务，帮助企业上云。

智能制造侧重于工业制造，是信息技术与制造技术的深度融合和集成，通过对市场用户的数据收集，优化制造产业链过程，最大程度提升效率，提高生产的灵活性和高质量，实现工厂智能自动化，是全球工业的终极目标。

4.2.3 智能制造与工业互联网的联系

1. 工业互联网是智能制造的基础

智能制造与工业互联网有着紧密的联系，智能制造的实现主要依托两方面的基础能力。一是工业制造技术，包括先进装备、先进的材料和先进的工艺等，是决定制造边界与制造能力的根本；二是工业互联网，包括智能传感控制软硬件、新型工业网络、工业大数据平台等综合信息技术要素，是充分发挥工业装备、工艺和材料潜能，提高生产效率、优化资源配置效率、创造差异化产品和实现服务增值的关键。因此，工业互联网是智能制造的关键基础，为其变革提供了必需的共性基础设施和能力，同时也可以用于支撑其他产业的智能化发展。

从智能工厂系统架构（见图4-2）可以看出，智能制造是侧重于生产制造环节的，致力于产品全生命周期的数字化与智能化。

智能制造的基础是生产和产品数据的采集、传输、处理、分析及应用，上述数据操作需要一个端到端的网络平台作为管道和载体，这个网络平台就是工业互联网，在结构上位于产线级和车间级之间。

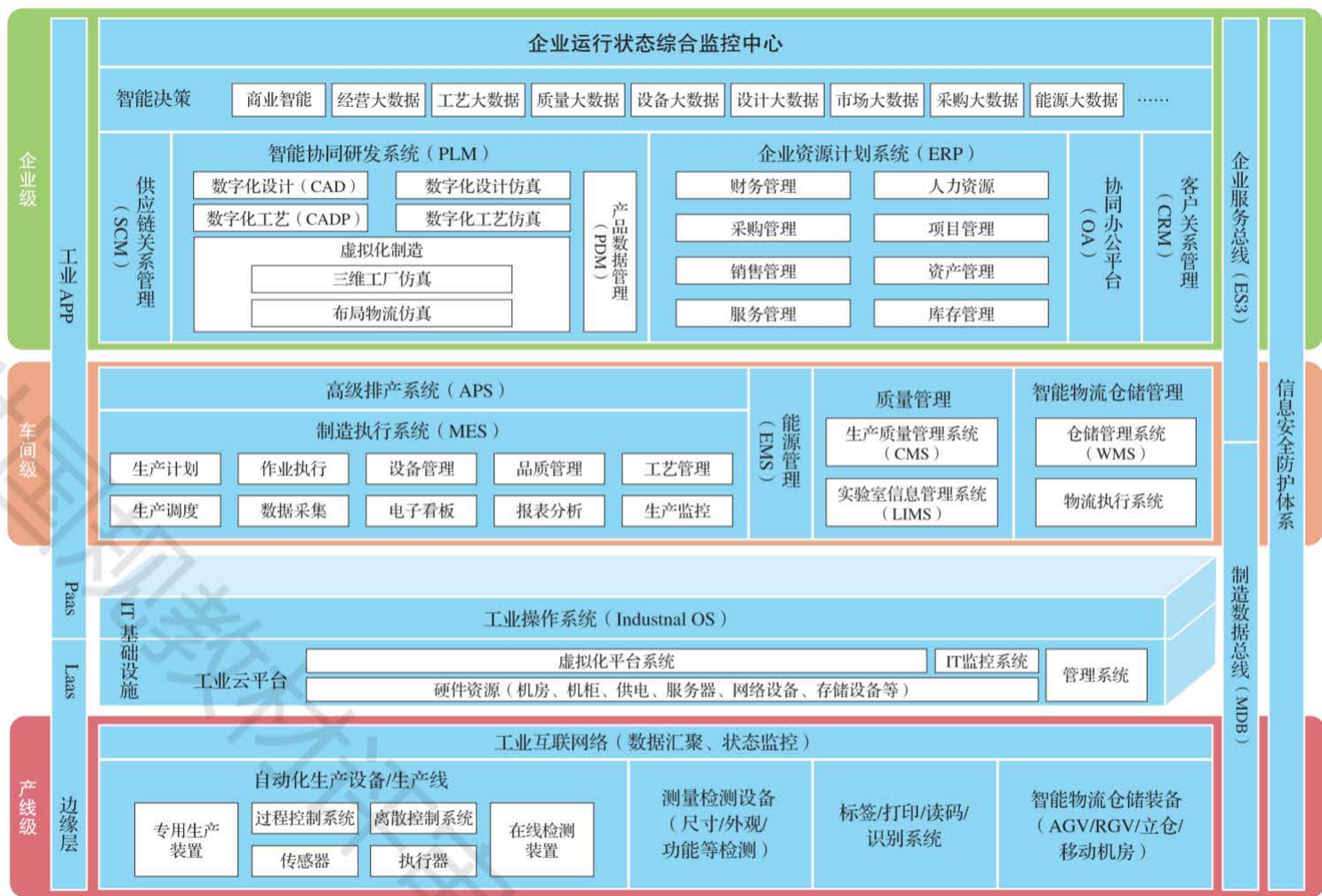


图 4-2 智能工厂系统架构

2. 智能制造与工业互联网相辅相成、相互促进

(1) 工业互联网助力智能制造

从能力供给角度讲，工业互联网主要通过五大技术来支持实现智能制造，包括工业软件技术、工业网络技术、工业平台技术、工业安全技术及工业智能技术。

1) 工业软件技术：实现云化和 APP 化部署，消除信息孤岛，实现数据的自由流通。

2) 工业网络技术：连接人、机、物、法、环及料等生产要素，实现全生产链、全价值链的互联互通。

3) 工业平台技术：实现端到端的数据采集、处理和分析，在形态上包括边缘平台、云平台等。

4) 工业安全技术：设备、网络、平台及数据等的安全保障，为智能制造提供安全防护系统。

5) 工业智能技术：实现全生产链、全价值链的数据的深度应用，优化生产流程，完善服务体系的必要手段。

因此，网络、数据、安全是工业互联网的重要内容，“网络”支撑工业系统互联和工业数据交换，“数据”驱动工业智能化，“安全”保障网络与数据在工业中的应用，同时，工业互联网反馈的应用效果能够优化智能制造的设计，进而促进企业通过智能制造实现业务目标。

工业互联网对智能制造的支撑作用体现在商业模式创新、生产模式创新、运营模式创新和决策模式创新等方面，具体内容如图 4-3 所示。



图 4-3 工业互联网对智能制造的支撑作用

（2）智能制造推动工业互联网升级

智能制造中的工业互联网强调构建从设备端到边缘端再到云端的全栈式的平台和网络的能力。智能制造的数字化、网络化、智能化程度取决于上云的数据维度、数量和质量，同时影响工业互联网服务的产业宽度和深度。

与传统互联网相比，工业互联网致力于通过生产要素的互联互通形成全面的数据驱动智能制造，在这个过程中，工业互联网自身也演进并构建出面向智能制造的三大优化闭环。

其一，设备运行优化的闭环，基于对设备数据、生产数据的实时感知和边缘计算，实现设备的动态优化调整，构建智能机器人和柔性产线。

其二，生产运营优化的闭环，基于信息系统数据、制造执行系统数据及控制系统数据等的集成处理和大数据建模分析，实现生产运营管理的动态优化调整，形成各种场景下的智能生产模式。

其三，面向企业协同、用户交互和产品服务优化的闭环，基于供应链数据、用户需求数据及产品服务数据等的综合集成和分析，实现企业资源组织和商业活动的创新，形成网络化协同、个性化定制、服务化延伸等新模式。

总体而言，智能制造与工业互联网都属于先进工业范畴的理念，既互相联系，又各不相同。智能制造源于人工智能的研究，是人工智能与制造技术的融合，是制造技术发展，特别是制造信息技术发展的必然，也是自动化和集成技术纵深发展的结果。工业互联网是工业与互联网结合的产物，整合了工业革命和网络革命的优势。

智能制造是制造业追求实现的结果与目标，致力于实现整个制造业价值链的智能化，是一个长期的过程，需要先实现制造的自动化、信息化，再借助数字化、网络化，最终走向智能化，也是工业互联网落地的方式之一。而工业互联网是实现智能制造的发展模式和有效途径，是传统工业变革的一种工具，也是智能制造的关键基础设施，或者说是关键的使能技术，工业互联网是工业企业数字化转型的核心生产要素和推动力，智能制造需要借助工业互联网打造全新的工业生态系统。

随着技术的不断深化，未来会有更多的企业借助工业互联网实现智能化生产，工业互联网与智能制造的结合将帮助更多企业迈向新的发展阶段，在愈加激烈的市场竞争中占据优势地位。

案例

智能制造协同平台打造柔性化生产线

在某家居集团股份有限公司的自动化木门生产车间，经过复合、裁切等工序，一扇扇个性化“定制版”木门不断被加工成型。

定制木门，客户的需求极其多样化，为了能够更好地满足客户的需求，该家居公司通过产品数字化、模块化设计、个性化组合和生产流水线智能化建设，创新搭建了个性化大规模家居智能制造协同平台。

该智能制造协同平台由智能营销、3D研发设计、智能制造运营、供应商管理、数字化决策支持等子平台组成，通过信息化集成和协同，将客户个性化定制平台与客户关系管理系统、供应链管理系统、生产过程执行系统进行全面协同，并将个性化定制平台的客户需求与产品设计、原料采购、订单处理、生产制造、仓储运输、物流配送及安装售后等环节高效整合，建立快速反应、服务全程自动化、透明化、数字化的高效智能处理体系，实现核心业务的一体化、模型化、多元化运营。

以前装修房子，设计图纸多为CAD黑白图纸，从图纸定稿到开始装修，设计师要与客户来回沟通、反复画图。为了有效提高沟通效率，快速让客户体验到家居空间效果，该家居公司通过智能制造协同平台，运用三维设计软件，客户就可以与设计师零距离在线交流，以类似“搭积木”的方式，实现非标材料在线挑选，自由组合生成设计图纸，并快速形成装修设计的效果图，还可以通过快速变更模型来改变设计方案，给客户更好的设计体验。

设计方案确定后，智能制造协同平台的订单系统按照客户需求，对产品进行三维建模，并通过生产软件系统自动拆解为相应的生产部件，同时平台还可根据订单时间要求，将订单涉及的生产部件区分为通用件、专用件、非标件后，再合理安排投入生产线，实现柔性生产。

进入该家居公司的智能化生产车间，设备感知系统、产线自动配送系统等不同生产类型的设备成片规整设置，生产、包装等环节一目了然。该家居公司个性化定制已全部实现从投料到成品的流水式柔性混流生产加工，能快速满足消费者个性化需求；智能制造单线效率可以做到1分钟1扇木门。工业互联网平台的建设，不仅解决了木作行业调度难、排程难、质量控制难等问题，

还实现了木作的多规格、小批量、个性化生产。

统计显示，该平台运用后，该家居公司的运营成本降低了约 20%，产品研制周期缩短了近 30%，生产效率提升了 20% 以上，产品不良品率也大大降低。



4.3 智能制造与工业物联网

4.3.1 什么是工业物联网

工业物联网（Industrial Internet of Things, IIoT）是物联网在工业领域的应用，它将具有感知、监控能力的各类采集、控制传感器或控制器，以及移动通信、智能分析等技术不断融入工业生产过程各个环节。其目的是提高生产制造效率，提高工业管理水平，在改进产品质量的同时降低生产损耗，实现真正意义上的“降本增效”。

工业物联网在技术架构上分为感知层、通信层、平台层和应用层。

1) 感知层：主要由传感器、视觉感知和可编程逻辑控制器等器件组成。感知层一方面可以主动采集生产环境中各种类型的信号，如图像、温度、湿度、磁场、声波、电能量等，另一方面可以接收上层管理系统下达的操作命令，自动执行具体的工业操作。

2) 通信层：主要由各种网络设备和线路组成，也就是物联网中的网络载体，包括有线网络通信和无线网络通信两种主要形式。

3) 平台层：作用是提供公共的数据、知识和技术能力。当底层终端传输的数据关联和结构化解析之后，沉淀为平台数据，并可从中不断提炼出有价值的专业知识。

4) 应用层：主要根据不同行业、领域的具体数字化需求，落地为垂直化的应用软件，通过整合平台层沉淀的数据和用户配置的控制指令，实现对终端设备的高效应用，具体技术形态有 MES、仓库管理系统、设备管理系统、能源管理系统、智能调度系统等。

工业互联网和工业物联网的区别

工业互联网是信息通信技术革命与传统工业全流程相结合的产物，其本质是把设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密连接融合起来，帮助制造业企业拉长产业链，形成跨设备、跨系统、跨厂区、跨地区的“互联互通”，推动整个制造服务体系的协同化、精益化、智能化。

因此，工业互联网不是工业的互联网，而是工业互联的网。工业互联网和工业物联网的区别如下。

- 工业互联网涵盖了工业物联网的技术部分，工业互联网是要实现人、机、物的全面互联，追求的是业务数字化；而工业物联网强调的是物与物的连接，追求的是生产自动化。
- 工业互联网是叠加在工业物联网上的“数字化应用场景”；工业物联网充当的是其底层“基建”的角色，重点关注的是在设备层和网络层的连接，负责打通人、机、物之间的关键数据流。
- 工业互联网偏向于关注如何精准地管理和决策；工业物联网偏向于关注如何高效地操作和执行。

4.3.2 工业物联网的安全问题

随着物联网设备的普及和数据的不断收集，如何保障数据的安全性和完整性成为当前智能制造过程中的重要课题。工业物联网的安全问题主要有以下3点。

1) 许多企业仍在使用传统的系统和流程，这使得工业物联网集成变得异常困难。采用新技术可能会使现有设备变得更为复杂，并留下更大的出错空间。

2) 网络安全问题。任何网络都可能遭黑客入侵。为防止重大违规事件和停工发生，使用工业物联网的行业必须采取新方法安全地管理设备和数字组件。

3) 设备管理和更新。采用更多的工业物联网设备意味着需要有一种有效的方式进行追踪。此外，设备必须保持更新才能正常运行。设备和软件需要接收定期更新，需要安装另一个系统来追踪这些更新并确保其正确安装。

4.3.3 工业物联网与智能制造的联系

1. 融合

通过工业物联网，企业可以对供应链进行实时监控和优化。结合 5G 技术，企业可以实现更快速的数据传输和处理，提高供应链的透明度和效率。因此，工业物联网与智能制造融合能够实现产品设计智能化，如数码设计、虚拟空间设计、多媒体设计及远程设计等，并且在产品中融入现代信息技术，使产品实现更多的智能化功能，满足消费者的多样化需求。工业物联网可以实时获取并分析生产现场的当前数据，将生产过程中的数据实时展示在图表中，使得数据间的关系清晰可见。

2. 互动

物联网技术是实现智能制造的重要手段，为智能制造提供了数据支持和网络基础。智能制造的核心在于实现生产过程的自动化、信息化和智能化，这需要大量设备、传感器和系统的连接和数据交互。以智能仓储系统为例，它就是基于物联网技术，通过在仓库中安装传感器和 RFID 标签，可以实时监测货物的位置和数量。当货物需要调度时，系统可以自动识别货物的位置，并指导机器人将货物送到指定位置。这种智能仓储系统不仅提高了仓库的管理效率，减少了人为错误的发生，还大大降低了工人的劳动强度。

物联网技术通过各种设备、传感器和系统的连接，实现了生产过程中数据的采集、传输、处理和应用，为智能制造提供了数据支持。同时，物联网技术可以提供各种智能设备和系统的网络连接，实现各种设备和系统的互通互联，为智能制造提供网络基础。以智能生产线为例，在生产线的每个环节都安装传感器和监控设备，实时监测设备的运行状态和产品的质量。当设备出现异常时，系统可以自动发出警报并通知维修人员进行处理。同时，通过对生产数据的实时分析，可以及时调整生产计划，提高生产效率和产品质量。

案例

工业物联网的应用案例

案例 1 某钢铁企业生产线上设备监测与维护

某钢铁企业生产线上的设备数量众多，而且运行环境较为恶劣，容易出现

故障。通过工业物联网技术，该企业搭建了一个设备监测与维护平台，可以实时监测设备的运行状态，包括温度、湿度、压力等参数，以及设备的运行位置和轨迹等。同时，通过对设备的历史数据进行分析，可以预测设备的维护需求，及时进行维修和更换，避免设备在生产过程中出现故障，提高设备的运行效率和生产效率。

案例2 某汽车制造企业生产线自动化改造

该汽车制造企业生产线上的工序复杂，而且需要大量的人工操作。通过工业物联网技术，该企业实现生产线自动化改造，将生产线上的设备进行互联互通，实现设备的自动化控制和监测。同时，通过对生产线上的数据进行分析 and 优化，可以实现对生产流程的精细化管理，提高生产效率和产品质量。

案例3 某能源企业油田生产智能化管理

该能源企业油田生产过程中需要处理大量的数据和信息，而且需要对油田的生产过程进行精细化管理。通过工业物联网技术，该企业搭建了一个智能化管理平台，可以实现对油田生产全过程的精细化管理。例如，通过物联网技术，可以实时监控油田的储量、开采情况、运输情况等数据，及时对生产进行优化和调整。同时，通过对油田生产过程中的数据进行挖掘和分析，可以预测油田的产量和采收率等指标，提高油田的生产效率和经济效益。



4.4 智能制造与数字孪生

4.4.1 数字孪生概述

1. 数字孪生的定义

数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应

的实体装备的全生命周期过程。数字孪生是一种超越现实的概念，可以被视为一个或多个重要的、彼此依赖的装备系统的数字映射系统。

2. 数字孪生的发展历程

2002年，美国密歇根大学成立了一个PLM（产品生命周期管理）中心。迈克尔·格里夫斯（Michael Grieves）教授面向工业界发表《PLM的概念性设想》（*Conceptual Ideal for PLM*），首次提出了PLM概念模型，在这个模型里提出“与物理产品等价的虚拟数字化表达”，出现了现实空间、虚拟空间的描述，并且用一张图介绍了从现实空间到虚拟空间的数据流连接，以及从虚拟空间到现实空间和虚拟子空间的信息流连接，如图4-4所示。

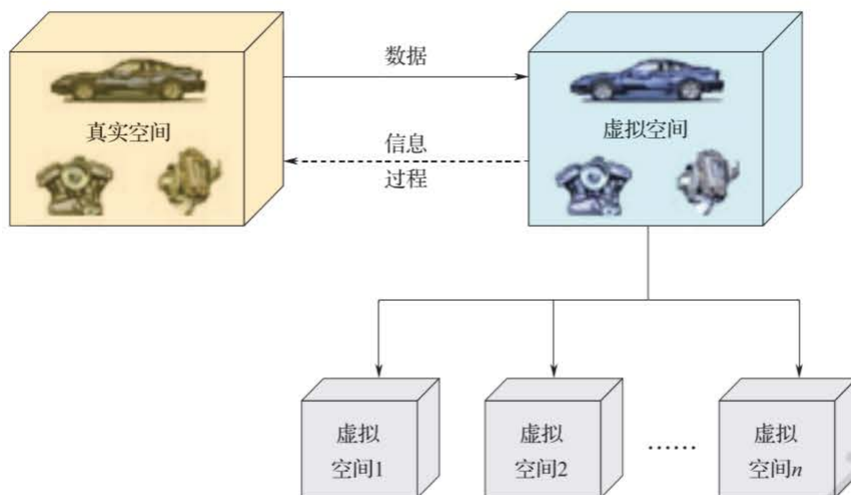


图 4-4 PLM 概念模型

表 4-1 展示了数字孪生发展历程上的里程碑事件。

表 4-1 数字孪生发展历程上的里程碑事件

时间	事件
20 世纪 50 年代	开始尝试将物理系统建模成数字形式
20 世纪 80 年代至 90 年代	计算机图形学和虚拟现实技术的出现使得数字建模和仿真技术更加逼真和精确
2002 年	美国宇航局（NASA）提出了“数字孪生”概念，用于描述将数字模型应用于宇航员健康监测和航天器维修方面的工作
2011 年	德国工业 4.0 倡议中首次提到数字孪生的概念

(续)

时间	事件
2015年	法国提出数字孪生作为其“新工业计划”的一部分
2017年	德国启动“数字孪生”研究计划，以促进数字孪生技术的发展
2018年	美国白宫发布了“智能制造国家战略”报告，提出数字孪生是实现智能制造的关键技术之一
2020年	我国提出数字孪生作为其“新基建”计划的一部分，以推进数字化转型和智能化制造

4.4.2 数字孪生的概念模型

为使数字孪生进一步在更多领域落地应用，北京航空航天大学数字孪生技术研究团队对已有三维模型进行了扩展，并增加了孪生数据和服务两个新维度，创造性提出了数字孪生五维模型的概念，表达式如下：

$$MDT = (PE, VE, Ss, DD, CN)$$

式中，PE表示物理实体，VE表示虚拟实体，Ss表示服务，DD表示孪生数据，CN表示各组成部分间的连接。数字孪生五维模型结构如图4-5所示。

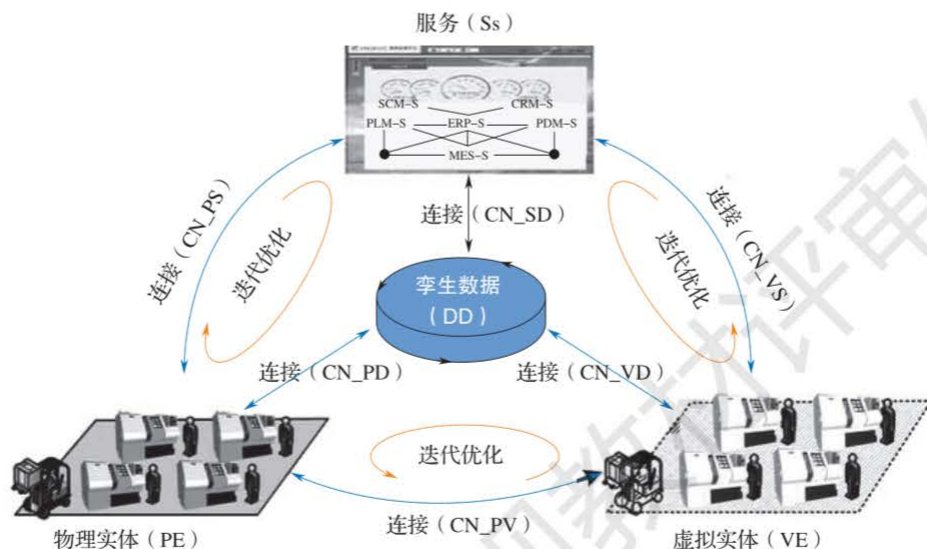


图 4-5 数字孪生五维模型结构

数字孪生五维模型能满足数字孪生应用的新需求。首先，MDT 是一个通用的参考架构，能适用不同领域的不同应用对象。其次，它的五维结构能与物联网、大数

据、人工智能等新 IT 集成与融合，满足信息物理系统集成、信息物理数据融合、虚实双向连接与交互等需求。再次，孪生数据（DD）集成融合了信息数据与物理数据，满足信息空间与物理空间的一致性与同步性需求，能提供更加准确、全面的全要素 / 全流程 / 全业务数据支持。服务（Ss）对数字孪生应用过程中面向不同领域、不同层次用户、不同业务所需的各类数据、模型、算法、仿真、结果等进行服务化封装，并以应用软件或移动端 APP 的形式提供给用户，实现对服务的便捷与按需使用。连接（CN）实现物理实体、虚拟实体、服务及数据之间的普适工业互联，从而支持虚实实时互联与融合。虚拟实体（VE）从多维度、多空间尺度及多时间尺度对物理实体进行刻画和描述。

4.4.3 数字孪生的成熟度模型

数字孪生不仅仅是物理世界的镜像，也要接受物理世界实时信息，更要反过来实时驱动物理世界，而且进化为物理世界的先知、先觉甚至超体。这个演变过程称为成熟度进化，即数字孪生的生长发育将经历数化、互动、先知、先觉和共智等几个过程，如图 4-6 所示。

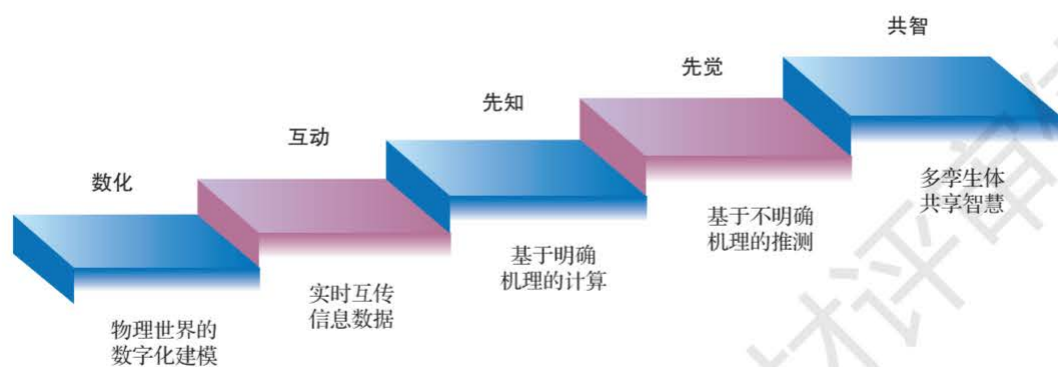


图 4-6 数字孪生成熟度模型

(1) 数化

数化是对物理世界数字化的过程。这个过程需要将物理对象表达为计算机和网络所能识别的数字模型。建模技术是数字化的核心技术之一，例如，测绘扫描、几何建模、网格建模、系统建模、流程建模、组织建模等技术。物联网是“数化”的另一项核心技术，将物理世界本身的状态变为可以被计算机和网络所能感知、识别

和分析的信息数据。

(2) 互动

互动主要是指数字对象及其物理对象之间的实时动态互动。物联网是实现虚实之间互动的核心技术。数字世界的责任之一是预测和优化，同时根据优化结果干预物理世界，所以需要将指令传递到物理世界。物理世界的新状态需要实时传导到数字世界，作为数字世界的新初始值和新边界条件。另外，这种互动包括数字对象之间的互动，依靠数字线程来实现。

(3) 先知

先知是指利用仿真技术对物理世界的动态预测。这需要数字对象不仅表达物理世界的几何形状，更需要在数字模型中融入物理规律和机理。仿真技术不仅建立物理对象的数字化模型，还要根据当前状态，通过物理学规律和机理来计算、分析和预测物理对象的未来状态。

(4) 先觉

如果说“先知”是依据物理对象的确定规律和完整机理来预测数字孪生的未来，那么“先觉”就是依据不完整的信息和不明确的机理，通过工业大数据和机器学习技术来预感未来。如果要求数字孪生越来越智能和智慧，就不应局限于人类对物理世界的确定性认知，因为人类本身就不是完全依赖确定性知识而领悟世界的。

(5) 共智

共智是通过云计算技术实现不同数字孪生之间的智慧交换和共享，其隐含的前提是单个数字孪生内部各构件的智慧首先是共享的。所谓“单个”数字孪生体是人为定义的范围，多个数字孪生单体可以通过“共智”形成更大和更高层次的数字孪生体，这个数量和层次可以是无限的。

4.4.4 数字孪生的关键技术

建模、仿真和基于数据融合的数字线程是数字孪生的3项核心技术。

1. 建模

数字化建模技术起源于20世纪50年代，建模的目的是将我们对物理世界或问题的理解进行简化和模型化。数字孪生的目的或本质是通过数字化和模型化，消除

各种物理实体、特别是复杂系统的不确定性。所以建立物理实体的数字化模型或信息建模技术是创建数字孪生、实现数字孪生的源头和核心技术，也是“数化”阶段的核心。

数字孪生的模型发展分为4个阶段，这种划分代表了工业界对数字孪生模型发展的普遍认识，如图4-7所示。

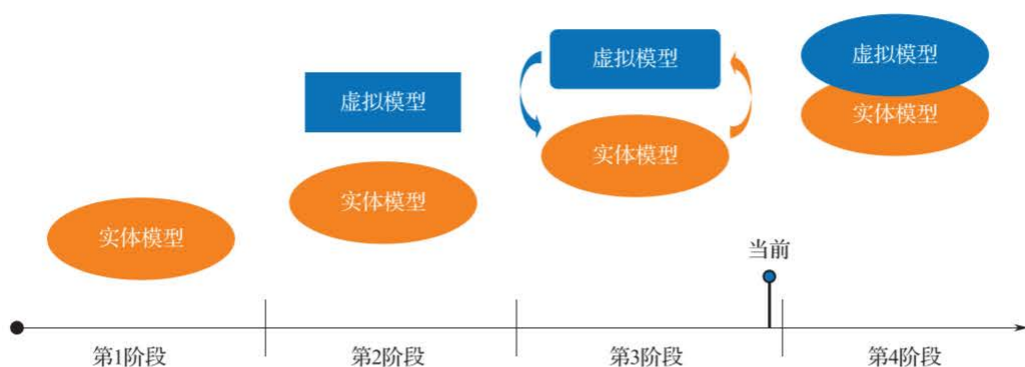


图 4-7 数字孪生模型发展的 4 个阶段

第1阶段是实体模型阶段，没有虚拟模型与之对应。NASA 在太空飞船飞行过程中，会在地面构建太空飞船的双胞胎实物模型。这套实物模型曾在美国宇航局拯救阿波罗 13 号的过程中起到了关键作用。

第2阶段是实体模型有其对应的部分实现的虚拟模型，但它们之间不存在数据通信。其实这个阶段不能称为数字孪生的阶段，一般准确的说法是实物的数字模型。虽然有虚拟模型，但这个虚拟模型可能反映的是来源于它的所有实体，例如设计成果二维/三维模型，同样使用数字形式表达了实体模型，但两者直接并不是个体对应的。

第3阶段是在实体模型生命周期里，存在与之对应的虚拟模型，但虚拟模型是部分实现的，就像是实体模型的影子，也可称为数字影子模型，在虚拟模型间和实体模型间可以进行有限的双向数据通信，即实体状态数据采集和虚拟模型信息反馈。当前数字孪生的建模技术能够较好地满足这个阶段的要求。

第4阶段是完整数字孪生阶段，即实体模型和虚拟模型完全一一对应。虚拟模型完整表达了实体模型，并且两者之间实现了融合，实现了虚拟模型和实体模型间自我认知和自我处置，相互之间的状态能够实时保真地保持同步。

数字孪生技术应用的高级阶段

值得注意的是，有时候可以先有虚拟模型，再有实体模型，这也是数字孪生技术应用的高级阶段。

一个物理实体不是仅对应一个数字孪生体，可能需要多个从不同侧面或视角描述的数字孪生体。人们很容易认为一个物理实体对应一个数字孪生体。如果只是几何的，这种说法尚能成立。恰恰因为人们需要认识实体所处的不同阶段、不同环境中的不同物理过程，一个数字孪生体显然难以描述。如一台机床在加工时的振动变形情况、热变形情况、刀具与工件相互作用的情况……这些情况自然需要不同的数字孪生体进行描述。

不同的建模者从某一个特定视角描述一个物理实体的数字孪生模型似乎应该是一样的，但实际上可能有很大差异。前述一个物理实体可能对应多个数字孪生体，但从某个特定视角的数字孪生体似乎应该是唯一的，实则不然。差异不仅是模型的表达形式，更重要的是孪生数据的粒度。例如，在智能机床中，通常人们通过传感器实时获得加工尺寸、切削力、振动、关键部位的温度等方面的数据，以此反映加工质量和机床运行状态。不同的建模者对数据的取舍肯定不一样。一般而言，细粒度数据有利于人们更深刻地认识物理实体及其运行过程。

2. 仿真

从技术角度看，建模和仿真是一对伴生体：如果说建模是模型化我们对物理世界或问题的理解，那么仿真就是验证和确认这种理解的正确性和有效性。所以，数字化模型的仿真技术是创建和运行数字孪生体、保证数字孪生体与对应物理实体实现有效闭环的核心技术。

仿真是将包含了确定性规律和完整机理的模型转化成软件的方式来模拟物理世界的一种技术。只要模型正确，并拥有了完整的输入信息和环境数据，就可以基本正确地反映物理世界的特性和参数。

仿真兴起于工业领域，作为必不可少的重要技术，已经被世界上众多企业广泛

应用到工业各个领域，是推动工业技术快速发展的核心技术，是工业 3.0 时代最重要的技术之一，在产品优化和创新活动中扮演不可或缺的角色。近年来，随着工业 4.0、智能制造等新一轮工业革命的兴起，新技术与传统制造的结合催生了大量新型应用，仿真技术快速发展，并逐渐发展出更多类型的仿真技术和软件。针对与数字孪生紧密相关的智能制造工业场景，涉及的仿真技术主要如下。

- 1) 产品仿真，如系统仿真、多体仿真、物理场仿真、虚拟实验等。
- 2) 制造仿真，如工艺仿真、装配仿真、数控加工仿真等。
- 3) 生产仿真，如离散制造工厂仿真、流程制造仿真等。

在数字孪生的成熟度的每个阶段，仿真都在扮演着不可或缺的角色：“数化”的核心技术——建模总是和仿真联系在一起，或是仿真的一部分；“互动”是半实物仿真中司空见惯的场景；“先知”的核心技术本色就是仿真；很多学者将“先觉”中的核心技术——工业大数据视为一种新的仿真范式；“共智”需要通过不同孪生体之间的多种学科耦合仿真才能让思想碰撞，才能产生智慧的火花。数字孪生也因为仿真在不同成熟度阶段中无处不在而成为智能化和智慧化的源泉与核心。

3. 数字线程

一个与数字孪生紧密联系在一起的概念是数字线程（Digital Thread）。数字孪生应用的前提是各个环节的模型及大量的数据，那么类似于产品的设计、制造、运维等各方面的数据，如何产生、交换和流转？如何在一些相对独立的系统之间实现数据的无缝流动？如何在正确的时间把正确的信息用正确的方式连接到正确的地方？连接的过程如何可追溯？连接的效果还要可评估。这些正是数字线程要解决的问题。

数字线程是与某个或某类物理实体对应的若干数字孪生体之间的沟通桥梁，这些数字孪生体反映了该物理实体不同侧面的模型视图。能够实现多视图模型数据融合的机制或引擎是数字线程技术的核心。因此，在数字孪生的概念模型中，将数字线程表示为模型数据融合引擎和一系列数字孪生体的结合。数字孪生环境下实现数字线程有如下需求。

- 1) 能区分类型和实例。
- 2) 支持需求及其分配、追踪、验证和确认。

- 3) 支持系统跨时间尺度各模型视图间的实际状态记实、关联和追踪。
- 4) 支持系统跨时间尺度各模型间的关联及其时间尺度模型视图的关联。
- 5) 记录各种属性及其随时间和不同视图变化的情况。
- 6) 记录作用于系统以及由系统完成的过程或动作。
- 7) 记录使能系统的用途和属性。
- 8) 记录与系统及其使能系统相关的文档和信息。

数字线程必须在全生命周期中使用某种“共同语言”，才能交互。例如，在概念设计阶段，就有必要由产品工程师与制造工程师共同创建能够共享的动态数字模型。据此模型生成加工制造和质量检验等生产过程所需的可视化工艺、数控程序、验收规范等，不断优化产品和过程，并保持实时同步更新。数字线程能有效地评估系统在其生命周期中的当前和未来能力，在产品开发之前，通过仿真的方法及早发现系统性能缺陷，优化产品的可操作性、可制造性、质量控制，以及在整个生命周期中应用模型实现可预测维护。

4.4.5 数字孪生在智能制造领域的应用

1. 数字孪生的应用领域

生产过程仿真与优化是数字孪生技术在制造业中的重要应用之一。通过建立数字孪生模型，制造企业可以对生产过程进行全面的仿真和优化，以提高生产效率、质量和资源利用率。

(1) 生产过程

数字孪生可以模拟和重现实际生产过程的各个环节，包括物料流动、设备操作、工艺参数等。通过实时采集和整合生产数据，数字孪生模型能够准确地反映当前生产状态，并提供对生产过程的全面可视化。这使得制造企业能够实时监测和分析生产过程中产生瓶颈、瑕疵和使效率低下的因素。

基于数字孪生模型的仿真可以进行虚拟实验和优化，以改进生产过程。通过在模型中尝试不同的参数设置、工艺流程和生产策略，制造企业可以预测和评估不同方案对生产效率和产品质量的影响。这使得企业能够准确找到优化生产方向，避免实际生产中的试错和调整，从而节省时间和成本。

（2）产品设计与开发

数字孪生在产品设计与开发方面发挥着重要作用。通过将实际产品与数字孪生模型相连接，制造企业能够进行虚拟的产品设计、测试和优化，大大缩短产品开发周期并降低开发成本。数字孪生模型能够准确模拟产品的物理特性、性能和行为，使设计团队能够在数字环境中进行快速迭代和验证。这加速了产品开发周期，减少了实际试制和测试阶段的资源消耗和时间延迟。

（3）跨部门的协作与知识共享

数字孪生技术还促进了跨部门的协作与知识共享。不同部门的工程师、设计师和生产人员可以通过数字孪生模型实时共享信息、协同工作，加速问题解决和创新过程。这种协同作业有助于提高产品质量和设计效率，同时促进团队间的沟通与合作。

数字孪生技术在生产过程仿真与优化以及产品设计与开发领域的应用，为制造企业带来了明显的益处。通过数字孪生模型的建立和应用，企业能够深入理解和优化生产过程，实现精细化的生产规划和资源调配。

2. 数字孪生技术的核心功能与优势

（1）故障预测和维修

故障预测和维修是数字孪生技术在制造业中的一个重要应用领域。通过建立数字孪生模型，并结合实时数据监测和分析，制造企业能够实现对设备和系统故障的预测和预防，以及更加高效地维修和保养。

利用数字孪生模型进行故障预测，能够提前发现潜在的设备故障。通过与实际设备连接并实时采集数据，数字孪生模型能够分析设备的运行状态、性能参数和健康指标。利用机器学习和数据分析技术，模型可以识别出异常和趋势，发现与故障相关的模式和指标。这使得制造企业能够提前预测设备故障的发生，及时采取相应的维修和预防措施，避免生产中断和损失。

数字孪生技术为维修和保养提供了更加精确和高效的方法。通过实时监测设备的运行状态和性能，数字孪生模型能够生成设备的维修建议和优化方案。维修人员可以通过模型的指导，定位故障原因和解决方案，减少维修时间和资源消耗。此外，数字孪生模型还可以提供设备维护计划和保养周期的优化建议，以最大限度地延长

设备的使用寿命和可靠性。

通过故障预测与维修，制造企业能够有效降低设备故障对生产过程的不良影响，从而提高生产线的稳定性和可靠性。这一技术的应用可以显著减少停机时间，提高生产效率和产品质量，同时降低维修和维护成本。

此外，数字孪生技术为企业提供了数据驱动的决策支持，赋予管理层更好的资源分配和设备规划能力。通过实时数据采集和分析，企业能够优化维修策略和生产调度，进一步提高运营效率和业务绩效。通过提前发现故障、提供精确的维修指导和优化建议，提高设备的可靠性和使用寿命，从而降低生产风险，提高生产效率，为企业创造更大的价值。

（2）实时监控与数据分析

这是数字孪生技术在制造业中的关键功能之一。通过实时监控设备和生产过程，并结合数据分析技术，制造企业能够获得全面的数据洞察，实现精细化的运营管理和决策支持。

数字孪生技术通过与实际设备连接并实时采集数据，可以实现对设备和生产过程的实时监控。传感器和物联网技术的应用使得制造企业能够收集到大量的实时数据，包括设备状态、运行参数及传感器读数等。这些数据通过数字孪生模型进行实时整合和分析，可以准确地反映设备的运行状态和性能表现。

数字孪生技术结合数据分析技术，为制造企业提供了强大的数据处理和分析能力。借助机器学习、人工智能和大数据分析等技术，数字孪生模型能够高效处理和智能分析实时数据，提取有价值的信息和洞察。这使得企业能够了解设备的健康状况、性能趋势、生产效率等关键指标，为决策者提供实时的运营数据和指导。

数字孪生技术在跨部门协作与知识共享方面也起到了积极的作用。数字孪生模型可以作为信息共享和协作平台，促进不同部门之间的沟通与合作。设计师、工程师、生产人员等可以通过模型实时共享信息、协同工作，共同解决问题和优化生产过程。这种跨部门的协作与知识共享能够加速问题的解决，促进创新和持续改进，提高工作效率和团队协作能力。

实时监控与数据分析以及跨部门协作与知识共享是数字孪生技术在制造业中的重要应用领域。数字孪生技术促进了部门间的协作与知识共享，推动团队创新和持

续改进。

3. 数字孪生技术在智能制造领域的商业价值

(1) 提高生产效率和质量

数字孪生技术通过实时监控设备和生产过程，提供了全面的数据洞察和分析，使制造企业能够优化生产流程、减少生产中断和故障，并提高生产效率和产品质量。它可以帮助企业实现更好的资源利用、优化生产调度和减少人为错误，从而降低生产成本并提升竞争力。

(2) 加速产品设计与开发

数字孪生技术通过建立虚拟的产品模型和实时数据分析，可以在产品设计与开发阶段进行模拟和优化。它使设计团队能够快速迭代和验证产品设计，减少实际试制和测试的资源消耗和时间延迟，从而加速产品上市时间，满足市场需求的快速变化。

(3) 故障预测与维修

数字孪生技术结合实时数据监测和分析，能够提前预测设备故障并提供维修指导。通过及时采取预防和维修措施，制造企业可以减少生产中断，降低维修成本，并提高设备的可靠性和使用寿命。这有助于提高生产线的稳定性，增强企业的竞争力。

(4) 数据驱动的决策支持

数字孪生技术通过实时数据采集和分析，为企业提供数据驱动的决策支持。企业可以基于准确的数据洞察，做出更加明智的决策，优化生产规划、资源分配和运营管理，降低风险并提高效益。数字孪生技术还可以提供预测和仿真分析，帮助企业预测市场需求和趋势，制定战略规划。

(5) 跨部门协作与知识共享

数字孪生技术作为信息共享和协作平台，促进不同部门之间的沟通与合作。设计师、工程师、生产人员等可以通过数字孪生模型实时共享信息，协同工作，共同解决问题和优化生产过程。这种协作与知识共享有助于加速问题的解决、促进创新和持续改进，提高工作效率和团队协作能力。

案例

数字孪生带来别样改变

对于整车或零部件制造而言，怎样判断一颗螺钉有没有拧好？在传统的流水线上，这项工作需要人工检查，但通过数字孪生技术，可以通过算法算出拧这颗螺钉用了多大力、拧了多少度等。

在汽车及零部件企业的实际应用中，数字孪生主要包括两个方面的内容。一是对现实中的整车或零部件建立数字模型，二是对计算机设计的数字模型进行复制。换句话说，就是既可以“从实到虚”，也可以“从虚到虚”，目的都是通过计算机技术进行较为复杂、精细的数据处理，提高精确度和效率，同时极大地拓展设计的想象力及实用性，比如根据实际需要将规则的四边形汽车覆盖件改造成多边形甚至不规则形状，并利用计算机同步解决智能化制造工艺细节问题。

电动汽车的安全稳定行驶，离不开动力电池的良好工作状态。车载电池管理系统计算能力有限，数据存储能力有限，很难做到精确监控动力电池运行状态。动力电池数字孪生监控系统就可以解决这一问题。该系统包括数据感知、数据收集的互联装置，数据存储的云端，数据分析软件，数据可视化用户界面等，通过对动力电池温度、电量、阻抗和电压电流曲线等实时感应并与标定数据实时比对，一旦发现偏差就及时报警，在全面监控动力电池工作状态的同时，提前预测并及早发现问题。

数字孪生与汽车及零部件企业设计开发中几乎普遍使用的仿真技术既有不同，又有密切的联系。首先，数字孪生需要依靠计算机仿真、实测、数据分析、工业互联网等技术对物体状态进行感知、诊断和预测以优化设计；其次，仿真技术作为创建和运行数字孪生的核心，是数字孪生实现数据交互与融合的基础，但由于仿真技术本身以离线方式模拟物体，不具备数字孪生的实时性、闭环性等特征及优化功能；最后，在此基础上，数字孪生必须依托并集成其他新技术，与传感器共同在线才能实现保真性、实时性与闭环性。



4.5 智能制造时代工程师的伦理责任

智能制造工程技术先进，伦理关系复杂，目标和结果难以预测，对工程师提出了更高的伦理要求，遵循这些伦理责任和原则，工程师可以在智能制造时代更好地服务于社会和环境，同时确保他们的工作符合道德和法律要求。

（1）保护用户隐私

工程师需要确保在收集、存储和使用用户数据的过程中尊重用户隐私权，并采取适当的安全措施，防止数据泄露或被滥用。

（2）确保产品安全

工程师有责任确保设计、开发和生产的产品在使用过程中不会对用户或其他相关方造成伤害。这包括确保产品在各种情况下的可靠性和稳定性，以及考虑潜在的安全风险并采取预防措施。

（3）负责环境保护

工程师应该关注智能制造过程中可能对环境产生的影响，努力减少资源浪费和环境污染，推动可持续发展。

（4）社会责任

工程师应关注智能制造技术对社会的影响，包括自动化可能导致的失业问题、人工智能决策的道德难题以及数据滥用和歧视等问题。他们需要在设计和实施解决方案时充分考虑这些问题，并寻求在商业利益和道德伦理之间的平衡。

（5）遵守行业伦理准则

工程师应遵循相关行业的伦理准则和法律法规，确保其工作符合道德和法律要求。

（6）提倡透明度和问责

工程师应在智能制造过程中提倡透明度，使相关方了解项目的目标、进度和潜

在风险。此外，他们还应承担对项目结果的问责，以确保符合道德和法律要求。

(7) 继续教育和自我提升

工程师有责任不断学习和了解伦理问题的最新发展，以便在智能制造时代更好地践行道德伦理。

仅供国规教材评审使用

思考与练习

【单选题】

1. 智能制造的核心要素是()。
A. 人工智能 B. 物联网 C. 大数据 D. 所有以上要素
2. 工业互联网的主要目标是()。
A. 提高生产效率 B. 降低生产成本
C. 实现智能化生产与服务 D. 以上都是
3. 工业大数据分析的主要难点是()。
A. 数据规模过大 B. 数据类型复杂
C. 数据实时性要求高 D. 以上都是
4. 数字孪生技术的关键组成部分包括()。
A. 数据采集 B. 数据处理与分析
C. 三维模型 D. 以上都是
5. 数字孪生技术有助于实现()。
A. 减少生产成本 B. 提高产品质量
C. 缩短产品上市时间 D. 以上都是
6. 下列()与数字孪生技术密切相关。
A. 物联网 (IoT) B. 大数据
C. 人工智能 D. 所有以上概念

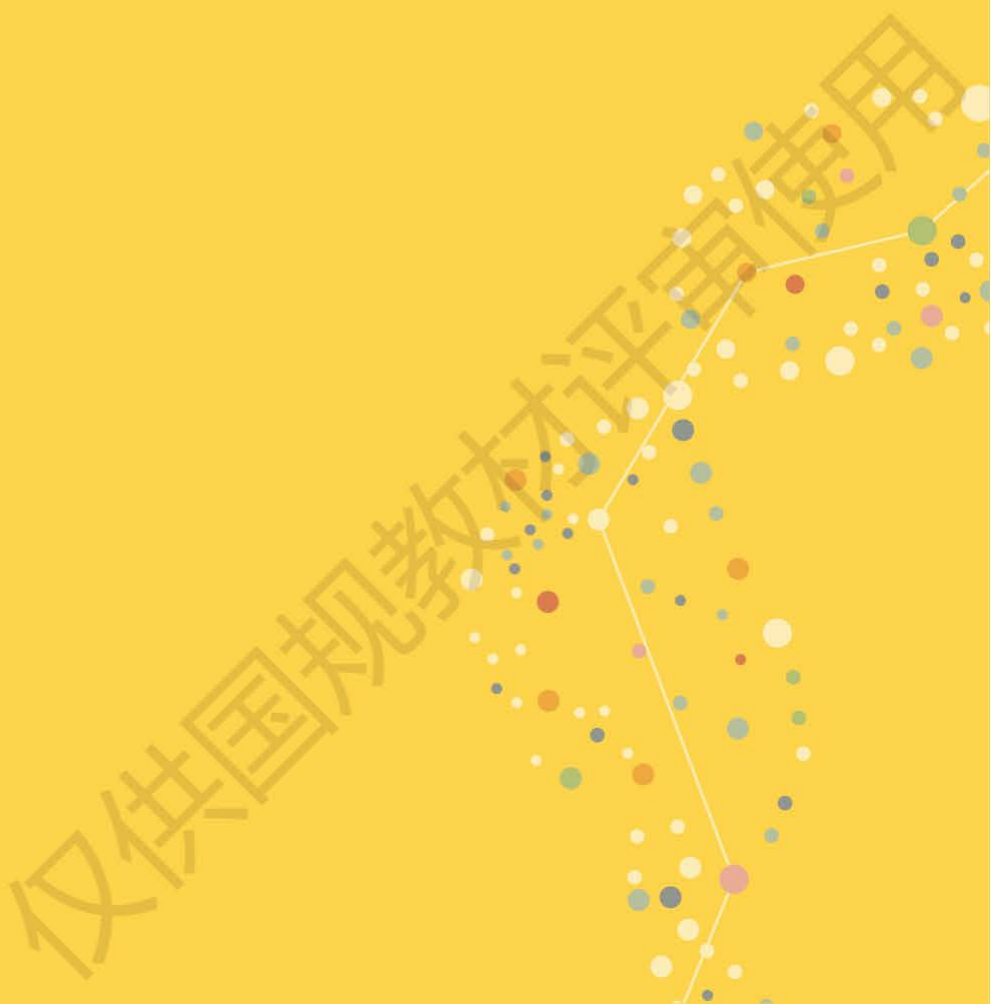
【简答题】

1. 数字孪生主要有哪些应用场景?
2. 当工程师面临商业利益与道德伦理之间的冲突时,他们应该如何选择?



05

第 5 章 智能工厂与智能生产



仅供国规教材评审使用

智能制造概论

知识目标

- 了解数字化工厂到智能工厂的演化过程。
- 了解智能工厂的构造与核心。
- 了解智能生产系统的功能模型。

科普素养目标

- 通过了解智能工厂的演化过程，掌握循序渐进的学习方法。
- 通过了解智能工厂的构造与核心，掌握剖析事物本质的方法。
- 通过了解智能生产系统的功能模型，学会提炼关键信息。

仅供国规教材评审使用



5.1 从数字化工厂到智能工厂的演化

5.1.1 数字化工厂和智能工厂的对比

数字化制造系统是一种以制造信息集成与信息流自动化为特征、利用数字化装备自动完成各种制造活动的系统。随着科技的不断发展，数字化工厂逐渐演化为智能工厂。

相比于数字化工厂，智能工厂在生产过程中融入了更多的人工智能、机器学习、物联网、云计算等新技术，实现了更高效、更灵活、更自动化的生产方式。基于工业 4.0 的智能工厂将出现下列新的变化。

- 1) 元(部)件采用自感知/自预测特性传感器,可进行性能衰减监测和剩余可用寿命预报。
- 2) 设备控制器具有自感知/自预测/自诊断能力,可以预知工作时间和防止失效。
- 3) 生产系统具有自配置/自维护/自组织特性的网络系统,可以通过具有弹性可恢复能力的控制系统获得极高的生产率。

智能工厂可以通过实时数据采集、处理和分析,快速响应市场需求,提供个性化的产品定制服务。同时,智能工厂还具备资源优化能力,能够有效管理生产过程中的资源,保证生产效率与质量。此外,智能工厂强化了数字化工厂的安全性,通过各种措施对生产环境、产品质量和工人健康提供保障。

总体来说,数字化工厂到智能工厂的演化是一种技术和理念的飞跃,标志着制造业进入了一个更加智能化、可持续化的新时代。

5.1.2 智能工厂的演化过程

从数字化工厂到智能工厂的演化是一个逐渐深入的过程，可以分为以下几个阶段。

(1) 数据集成阶段

在这一阶段，企业将各个生产环节中产生的数据进行整合和分析，形成一个全面、系统的数字化模型。该阶段的主要任务是搭建一个信息化平台，实现从供应商到下游客户、从原材料到成品的全规模数据采集和互联互通，并以此建立完整的生产线数字孪生模型。在这个阶段，需要考虑以下几方面的内容。

1) 数据源识别：识别数据来源，包括生产设备、传感器、控制系统、计算机网络等。

2) 数据采集：建立数据采集体系，确保数据源的可靠采集和传输。

3) 数据清洗：对采集到的数据进行清洗、过滤和去重，确保数据质量。

4) 数据整合：将各个数据来源的数据整合成一个整体，使得数据可以进行统一存储和管理。

5) 数据转换：对数据进行转换，使其适用于不同的应用场景和业务需求。

6) 数据存储：建立数据仓库，对整合后的数据进行存储和备份，确保数据的安全和可靠性。

7) 数据分析：对存储的数据进行分析和挖掘，帮助企业了解生产过程并提高效率。

通过以上步骤，智能工厂的各项数据可以被整合起来，形成一个智能化的数据生态系统，为企业生产经营提供有力的支持。

(2) 智能控制阶段

在数字化基础上，企业利用物联网、云计算、大数据等技术，将自动化技术与信息技术深度融合，实现对生产过程的有效监测和快速响应。通过开发自适应控制和优化算法，实现能源优化、生产率提升和质量保障等目标。在这个阶段中，需要考虑以下几个方面。

1) 数据采集与处理：通过传感器、监测设备等采集生产现场的数据，利用大数据技术进行处理，得到实时的生产数据。

2) 预测和优化: 利用机器学习等人工智能技术, 对生产数据进行分析和预测, 为生产提供更加精细化、个性化的服务。

3) 智能控制: 通过自动化控制系统和智能化算法, 对生产过程进行实时控制和优化, 实现环境监测、生产流程优化等智能化管理。

4) 自适应和自主学习: 通过不断地收集生产数据, 对生产流程进行自适应和自主学习, 最大限度地提升生产效率和质量。

(3) 智能化协同阶段

在智能控制基础上, 企业通过人工智能技术实现生产过程中各个环节之间的紧密协调和高效沟通。例如, 在生产过程中, 智能机器人可以预测传送带上零部件的状况并与机床协同调度, 从而实现零部件的快速加工和生产周期的缩短。在这个阶段需要考虑以下几个方面。

1) 数据共享: 建立数据共享平台, 实现多个系统之间的数据共享和交流, 避免因信息孤岛造成无法协同和重复性工作。

2) 业务流程协同: 通过 ERP、MES 等软件系统, 实现业务流程的协同管理, 同时也可以进行实时监测和控制。

3) 资源共享: 包括设备、人员、物料等资源的有效管理和共享, 最大限度地提高利用率和效率。

4) 供应链协同: 与供应商、客户等外部合作伙伴进行协同合作, 从而实现生产供应链的高效管理。

5) 智能决策: 基于智能算法和人工智能技术, 在生产过程中进行实时的数据分析和决策, 从而实现生产过程的优化和协同。

通过以上步骤, 智能工厂可以实现系统、业务、资源和供应链等多方面的协同管理, 提高整个生产过程中的效率和品质, 并且为企业提供更高效的管理手段。

(4) 智能服务阶段

在前三个阶段建立的智能化体系基础上, 企业利用大数据、机器学习等技术, 为客户提供更快、更准、更个性化的定制化服务。例如, 在客户需求预测方面, 通过对历史订单、市场趋势和客户反馈等多维度数据的分析, 实现产品定制化、智能配料和设计优化等目标。

总之，从数字化工厂到智能工厂的演化是一个逐步深入的过程，需要企业投入大量的人力、物力和财力，并结合自身的发展情况和行业特点，选择合适的技术和方法。



5.2 智能工厂的构造与核心技术

5.2.1 智能工厂的含义

智能工厂是新型数字化工厂，也就是通过信息物理系统使现有的数字化工厂智能化。从狭义上来看，智能工厂是新一代通信技术、工业大数据技术、人工智能等智能制造相关技术、产品及系统在工厂层面的具体应用，以实现生产系统的智能化、网络化、柔性化。从广义上来看，智能工厂是通过制造串联产业链上下游并同步延伸的组织载体，能够覆盖产品整个生命周期作业。

智能工厂可以实现高度智能化、自动化、柔性化和定制化的生产，从而快速响应市场的需求，实现高度定制化的集约化生产。智能工厂的本质就是通过人机交互来实现人与机器的协同合作，优化生产制造流程的各个环节。

5.2.2 智能工厂的分类

1. 基于流程制造的智能工厂

基于流程制造的智能工厂模型是制造企业对工厂总体设计、工程设计、工艺流程及布局等建立的较完善的系统模型，并对其进行模拟仿真，设计相关的数据进入企业核心数据库。

该模型的建立具体要求如下。

首先，企业关键生产环节的实现要基于模型的先进控制和在线优化，因此工厂需要配置符合设计要求的数据采集系统和先进控制系统，达到 90% 以上的生产工艺

数据自动采集率和工厂自控投用率。

其次，工厂生产的实现要基于工业互联网的信息共享及优化管理，因此企业还需建立实时数据库平台，并使之与过程控制、生产管理集成应用。

2. 基于离散制造的智能工厂

基于离散制造的智能工厂包括实现计划、排产、生产、检验的全过程闭环管理的车间制造执行系统；装备、零部件、人员等的车间级工业通信网络系统；企业资源计划管理系统，其中供应链管理模块能实现采购、外协、物流的管理与优化。

该模型利用云计算、大数据等新一代信息技术，在保障信息安全的前提下实现经营、管理和决策的优化与企业智能管理与决策，全面提升企业资源配置优化、操作自动化、实时在线优化、生产管理精细化和智能决策科学化的水平。另外，通过持续改进该模型，能实现企业设计、工艺、制造、管理、监测、物流等环节的集成化。

5.2.3 智能工厂的特征与构造要素

1. 智能工厂的典型特征

智能工厂具有三大典型特征，如图 5-1 所示。

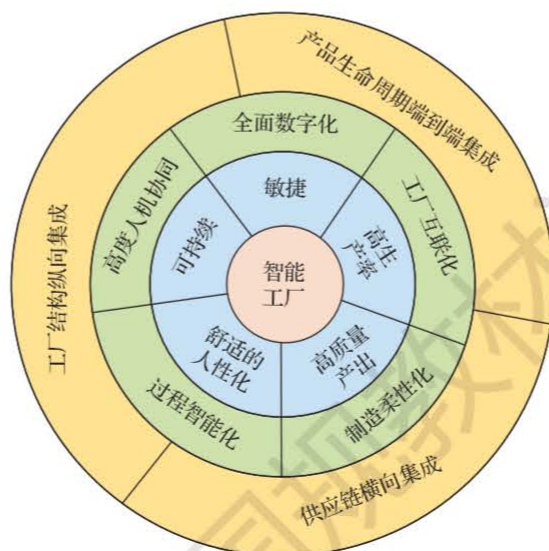


图 5-1 智能工厂的三大典型特征

（1）生产目标方面

智能工厂具有敏捷化、高生产率、高质量产出、可持续性和舒适的人性化等特征。

（2）技术等级

智能工厂具有全面数字化、制造柔性化、工厂互联化、高度人机协同和过程智能化（实现智能管控）五大特征。

（3）集成路径

智能工厂应具备产品生命周期端到端集成、工厂结构纵向集成和供应链横向集成三大特征，这一层面与“工业 4.0”的三大集成理念是一致的。

2. 智能工厂的构造要素

智能工厂是由一系列智能化系统集成而成的，主要包括以下几个构造要素。

（1）信息集成

通过物联网等技术对生产设备、物料、人员等进行信息采集和互联互通，形成生产全过程的数字孪生模型，旨在实现一站式信息上传下达，提高信息共享效率。

（2）智能控制

基于数据分析、机器学习和自适应控制等技术，实现生产环节的快速监测、预警和调整，以提高生产效率和降低成本。

（3）智能协同

通过人机协同、机机协同等方式，实现不同环节之间的紧密协作和高效沟通，以适应灵活多变的生产需求和快速应对市场变化。

（4）智能服务

依托大数据和智能算法，为客户提供个性化定制的产品和服务，以满足不同客户的需求。

5.2.4 智能工厂的核心技术

智能工厂的核心技术包括以下几个重要方面。

（1）物联网技术

通过各种传感器、通信设备、数据处理平台等技术，将生产线上的设备、物料

和人员等信息采集起来，实现全面、实时的监测和控制。

（2）人工智能技术

利用机器学习、深度学习等技术，实现对大量数据的自动处理和分析，支持生产中的预测性维护、质量控制和自适应控制等功能。

（3）云计算和大数据分析技术

通过云计算和大数据分析技术，实现复杂数据的存储、处理和分析，支持生产过程中的优化决策和管理。

（4）自动化技术

包括各种传感器、机器人、自动化设备等，以实现自动化生产和控制。

（5）虚拟仿真技术

通过建立生产过程的虚拟模型，实现对生产过程的可视化展示和仿真模拟，以支持决策和优化。



5.3 智能工厂的基本结构与建设方案

5.3.1 智能工厂的基本结构

智能工厂的基本结构包括功能、结构、范式 3 个维度，如图 5-2 所示。

1. 功能维度

功能维度描述产品从虚拟设计到物理实现的过程，与工业 4.0 的三大集成中的端到端集成相关联。功能维度包括智能化设计、智能化工艺、智能化生产、智能化物流。

2. 结构维度

结构维度描述从智能制造装备、智能车间到智能工厂的进阶，实质上与工业 4.0 的 3 大集成中的纵向集成是一致的。

3. 范式维度

范式维度描述从数字化、网络化到智能化的演变范式 (Paradigm)，包含数字化、网络化、智能化 3 个方面。通过将新一代信息技术和新一代人工智能技术应用于产品设计、工艺、生产等过程，使得制造工厂在其关键环节或过程中能够体现出智能化特征，即自主性的感知、学习、分析、预测、决策、通信与协调控制能力，能动态地适应制造环境的变化，从而实现提质增效、节能降本的目标。

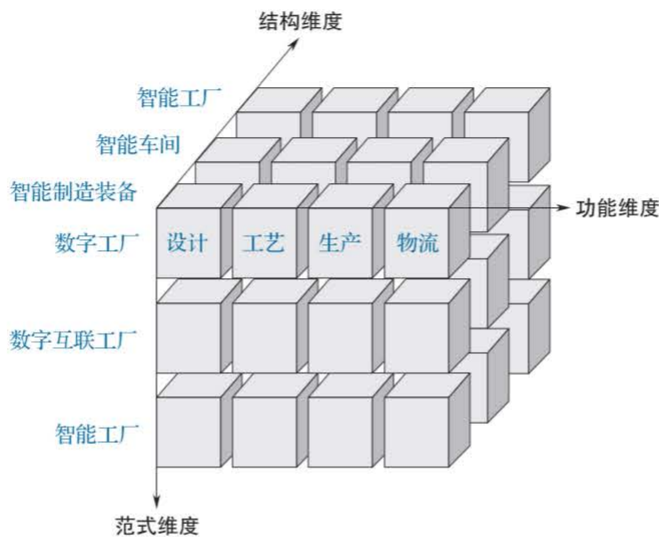


图 5-2 智能工厂的基本结构

5.3.2 智能工厂的建设方案

智能工厂的建设方案主要包括以下几个方面。

1. 物联网技术方案

通过传感器、自动控制设备等实现对生产过程的实时监控，及时采集和处理物流、运行、质量等数据信息，构建完整的生产过程数字孪生模型，在此基础上实现精细化生产控制。

2. 云计算与大数据方案

通过云平台对海量数据进行收集、存储、分析和挖掘，为生产过程提供数据驱动的决策分析和优化服务，支持精益生产管理。

3. 智能制造系统方案

通过人工智能技术实现自适应控制，支持生产智能化，提升制造效率和产品品质。

4. 集成协同方案

通过 ERP、MES 等系统整合企业内外各类信息资源，实现全面信息共享，推动内外部协同，保障企业业务运转效率和精度。



5.4 智能生产

5.4.1 智能生产系统的特点与构成

智能生产是指利用信息技术、自动化技术、人工智能等先进技术实现生产环节的智能化、自动化和数字化，以提高生产效率、产品品质和企业竞争力。它是智能制造的核心内容之一。

智能生产系统以车间级的制造自动化系统（Manufacturing Automation System, MAS）为基础，根据产品工程技术信息（材料、结构、工艺和装配等设计要求）、车间层加工执行的指令，结合车间物流管理、工艺管理、设备管理、刀具管理等系统，优化制造活动和生产过程，完成对零件制造过程的作业调度及加工。

1. 智能生产系统的主要特点

（1）高度智能化

采用先进的人工智能算法及自动控制技术，通过数据分析、机器学习等方式实现自适应控制、自动优化、自我调整和智能制造。

（2）精细化管理

通过物联网等技术将生产过程的各个环节连接起来，形成全面的数字孪生模型。通过对生产数据进行实时监测和分析，实现精益生产管理。

（3）高效化生产

通过自动化技术实现生产线上的物料流转、设备控制和作业流程控制等功能，大大提高生产效率和生产质量。

（4）信息化协同

通过 ERP、MES 等系统实现企业内外各类信息资源整合，实现跨部门协作和协同管理。

2. 智能生产系统的主要构成

（1）车间生产控制系统

如图 5-3 所示，智能工厂车间控制系统由车间层、单元层、工作站层和设备层以及车间涉及的生产和管理人员等组成。

1) 车间层的核心是车间控制器，实现计划、调度和监控等功能，其主要任务是根据企业下达的生产计划进行车间作业分解和作业调度，并监控和反馈车间的生产状态和数据等信息。车间控制器是车间层控制系统与外界交换信息的核心与枢纽，具有三大功能。

①计划：根据 MIS 下达的主生产作业计划和 EDS（工程设计系统）提供的生产工艺信息制订车间某时期内的生产计划。

②调度：根据各生产单元的计划完成情况对单元之间的生产任务和资源分配做适当的调整，保证车间任务按期完成。

③监控：监视各单元在生产过程中出现的各种异常现象，并将异常信息及时反馈给调度模块，供其决策。

2) 单元层同时兼有计划和调度的功能，其控制周期从几小时到几周，完成任务的分解、调度、资源需求分析，向工作站分配任务及监控任务的执行情况，并向车间控制器报告作业完成情况和单元状态。单元控制器在向单元内的各加工设备分配任务时，要考虑各设备的加工能力和加工任务的均衡分配。当单元控制器遇到无法解决的故障时，则向上一级的车间控制器实时反馈信息，进行单元间的任务调整。

3) 工作站层负责指挥和协调车间中某个设备小组的活动，如加工工作站、毛坯工作站、刀具工作站、夹具工作站、测量工作站和物料存储工作站等。其控制周期可以从几分钟到几小时，主要功能是根据单元控制器下达的命令完成各种加工准备、

物料和刀具传送、加工过程监控和协调、加工检验等工作。

4) 设备层包括机床、加工中心、机器人、坐标测量机、自动引导车等设备的控制器。控制周期一般从几毫秒到几分钟，是车间控制系统中实时性要求最高的一级。设备控制器的功能是将工作站控制器命令转换成可操作的、有顺序的简单任务运行，完成工作站层指定的各类加工、测量任务，并通过各种传感器监控这些任务的执行信息。

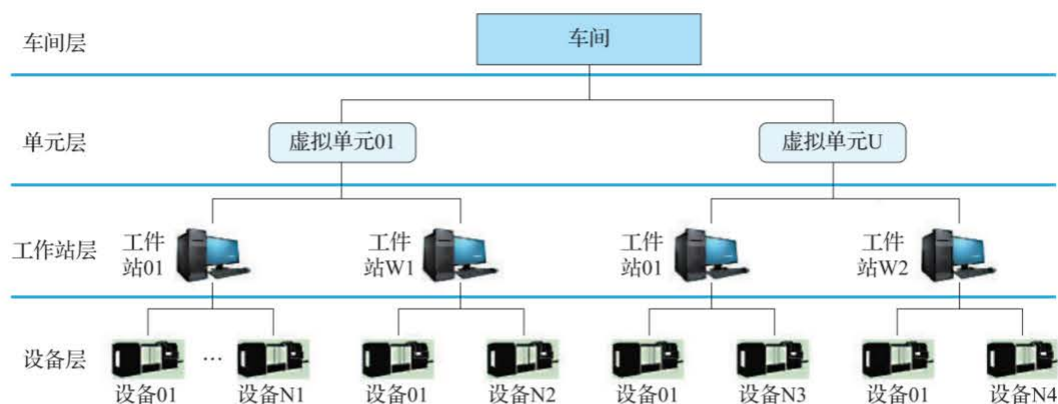


图 5-3 智能工厂车间控制系统

(2) 加工系统

加工系统是由机床、机器人、AGV 等硬件设备构成的用于完成具体零件加工任务的单元/线。常见的加工系统类型有刚性自动线 (TL)、柔性制造单元 (FMC)、柔性制造系统 (FMS)、柔性制造线 (FML)、柔性装配线 (FAL) 和脉动生产线 (PPL) 等。

(3) 物流系统

物流系统负责生产过程中各种物料 (如工件、刀具、夹具、切屑等) 的运送与流动, 以及将工件毛坯或半成品及时准确送达指定的加工位置, 并将完成加工的成品送入仓库或装卸站, 以保证自动化生产过程正常运行。

常用的工件输送设备包括传送带、运输小车、工业机器人、托盘及托盘交换装置等; 常用的物料存储系统有工件进出站、托盘站、自动化立体仓库等。

物流系统还包括刀具准备与配送系统, 负责为加工设备及时提供各种刀具并可在机床间进行刀具交换, 具有刀具运送、管理、检测、预调和监控等功能。具体包括刀具组装机、刀具预调仪、刀具进出站、中央刀具库、机床刀库、刀具配送装置

和刀具交换机构、控制系统等。

(4) 检测和监控系统

检测和监控系统保证智能生产系统正常可靠地运行及满足加工质量要求。检测和监控的对象包括加工设备及加工过程、工件输送设备、刀具配送系统、工件加工质量、环境及安全参数等。

检测和监控系统包括如下内容。

1) 传统检验检测装置：各种量具量仪（如卡尺、千分尺、百分表等）、自动化测量装置（如三坐标测量仪）等。

2) 智能检测技术：各种智能化传感器和感知技术、智能仪器仪表、边缘计算和加工大数据分析技术等。

5.4.2 智能生产系统模型

(1) 生产系统功能模型

如图 5-4 所示，智能生产系统功能模型包括车间层生产管理与调度控制、工作

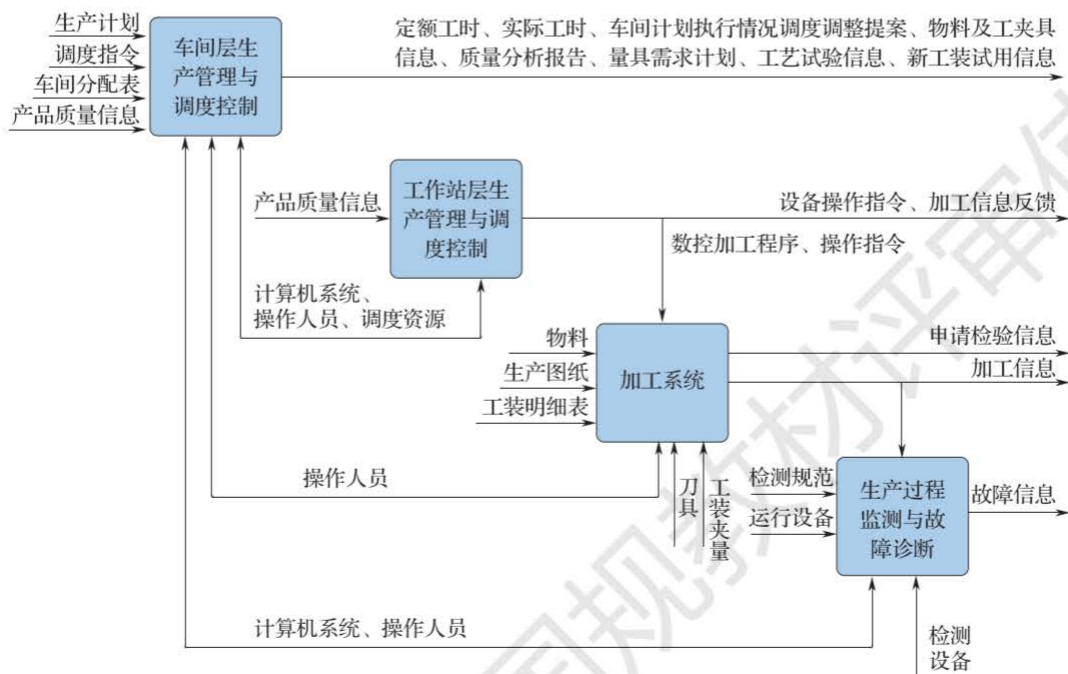


图 5-4 智能生产系统功能模型

站层生产管理与调度控制、加工系统、生产过程监测与故障诊断，围绕这四大模块形成紧密的生产流。

（2）智能生产系统物资流

智能生产系统物资流是指在生产过程中作为实体流的原材料、毛坯料、零件、装配组件、集成对象和最终产品的运输流过程。

（3）智能生产系统信息流

智能生产系统信息流主要包括以下几个方面。

1) 产品设计阶段的信息流：在产品设计阶段，需要对产品进行详细的定义和规划，确定产品的特性、参数、功能及工艺要求等。这些信息将被记录并存储在数字化设计软件中，供后续的生产制造使用。

2) 订单管理阶段的信息流：订单管理阶段需要对客户的订单进行处理和分解，将订单数据转化为生产计划和物料需求清单，形成生产计划的基础。在这个过程中，系统需要不断地从订单、计划、库存等方面收集相关数据，并实时更新到数据库中。

3) 生产计划阶段的信息流：生产计划阶段需要根据客户订单、工艺路线、人员和设备等资源情况进行排程，制订出合理的生产计划，并与实际生产情况相结合，进行实时调整。在这个过程中，需要持续获取实际生产数据并反馈到生产计划中进行调整。

4) 生产执行阶段的信息流：生产执行阶段需要对生产现场进行监控和控制，实时获取设备状态、生产进度、质量检测等数据信息，以便及时调整生产过程，保证生产效率和产品质量。同时，还需要对生产数据进行记录和存储，供后续的数据分析和优化使用。

5) 售后服务阶段的信息流：售后服务阶段需要对生产过程中的问题不断进行跟踪和记录，以便快速响应客户请求，并对产品进行升级改进。这个过程需要建立完善的反馈机制，并将相关数据信息记录在售后服务系统中。

总之，智能生产系统信息流涉及从产品设计、订单管理、生产计划、生产执行到售后服务等多个环节，在整个生产过程中需要不断收集、处理、分析并实时反馈相关数据信息，以实现生产过程的数字化和智能化管理。

5.5 案例：三一重工 18 号工厂

三一集团始创于 1989 年，是全球领先的工程机械制造企业。作为重工领域的标杆，三一重工 18 号工厂成为智能制造应用的示范。

三一重工 18 号工厂更像是一个大型计算系统加上传统的操作工具、大型生产设备的智慧体，每一次生产过程、每一次质量检测、每一个工人劳动量都记录在案。装配区、高精机加区、结构件区、立库区等几大主要功能区域都是智能化、数字化模式的产物。

三一重工 18 号工厂建筑面积 10 万平方米，是亚洲最大的单体生产厂房，有混凝土机械、路面机械、港口机械等多条装配线，是三一重工总装车间，年产能 300 亿元，生产的混凝土机械居全球第一，生产的港口机械居中国第一。

1. 高度离散制造企业的困局

三一重工是一个高度离散型制造企业，这种制造模式分散且独立，需要大量的人力物力，造成企业成本提高，这显然不能满足企业高质量发展的需求。三一重工积极借助信息化时代的优势，导入智能制造模式，优化运行系统，提升设备生产制造能力，积极应对工程机械企业多品种、高效率、高质量、低成本方面的压力与挑战。

2. 技术创新，智能引领

(1) 总体架构

三一重工 18 号工厂从产品设计→工艺→工厂规划→生产→交付，打通产品到交付的核心流程，总体架构如图 5-5 所示。

1) 全三维环境下的数字化工厂建模平台、工业设计软件，以及产品全生命周期管理系统的应用，实现数字化研发与协同。



图 5-5 三一重工 18 号工厂总体架构图

2) 多车间协同制造环境下计划与执行一体化、物流配送敏捷化、质量管控协同化，实现混流生产与个性化产品制造，以及人、财、物、信息的集成管理。

3) 自动化立体库 / AGV、自动上下料等智能装备的应用，以及设备的 M2M 智能化改造，实现物与物、人与物之间的互联互通与信息握手。

4) 基于物联网技术的多源异构数据采集和支持数字化车间全面集成的工业互联网，驱动部门业务协同与各应用深度集成。

(2) 基于三维仿真的数字化规划

如图 5-6 所示，通过对整个生产工艺流程建模，在虚拟场景中试生产，优化规划方案。在规划层面的仿真模型实验过程中实现产能分析与评估，通过预测未来可能的市场需求，动态模拟厂房生产系统的响应能力；在装配计划层面的仿真模型中，通过仿真实验进行节拍平衡分析与优化，规划最优的装配任务和资源配置。

(3) 工业物联网与智能产线

如图 5-7 所示，利用智能装备实现生产过程自动化，机器人换人，提升生产效率；同时搭建工业生产物联网，通过网络连入机台，实现机台的生产信息采集，机台互联，以及自动控制与数据传输，使机台使用率最大化。



图 5-6 基于三维仿真的数字化规划

基于物联网平台集成的现场设备数据、生产管理数据和外部数据，运用机器学习、人工智能等大数据分析挖掘技术，建立产品、工艺、设备、产线等数字化模型，提供生产工艺与流程优化、设备预测性维护、智能排产等新型工业应用。



图 5-7 智能装备的应用

(4) MES 和 ERP 无缝集成

如图 5-8 所示，集成 MES 与 ERP 系统，实现了客户订单下达到生产制造、产品交付以及售后追踪的全流程信息化，实现了生产制造现场与客户的实时交互。客户的个性化需求可以第一时间到达计划、制造、商务等相关部门，制造人员就能直接按照客户的要求进行快速生产和交付，客户也可以随时了解所购买设备的生产进度。

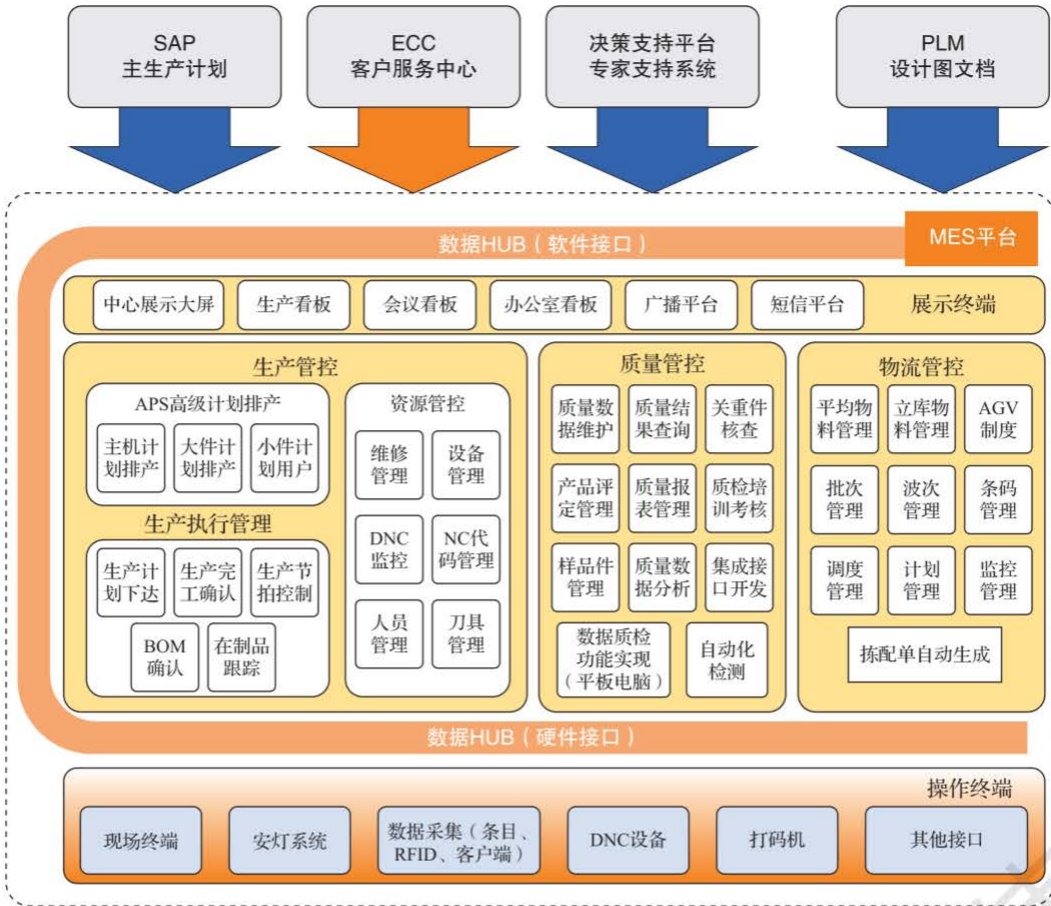


图 5-8 集成 MES 与 ERP 系统结构图

生产现场以 MES 为主线，辅助智能派工、现场 LED 看板等可视化信息，集成化计划 / 物流 / 质量等控制系统，从生产计划下达、物料配送、作业标准查询、质量管理等维度进行在线管控，实现了人员、资源实时调度，生产制造现场与生产管控中心的实时交互。

(5) 公共资源精细化管理

如图 5-9 所示，公共资源定位系统是三一重工 18 号工厂的一个重要支撑。公共制造资源定位平台融合不同的定位方式并满足不同的业务需求的同时，实现基础设施的共用，达到减少重复建设、提高基础设施利用率的目的。

- 通过物联网技术实现对在制品、叉车、人员、设备资源的实时定位、追踪与监控。



- 实时获取物料和运输工具的状态和位置等信息，并可以通过对这些信息的分析实现对物料的高效调度。
- 综合运用 WSN、RFID 和 GPS 等多种定位技术，满足不同制造资源的定位需求。

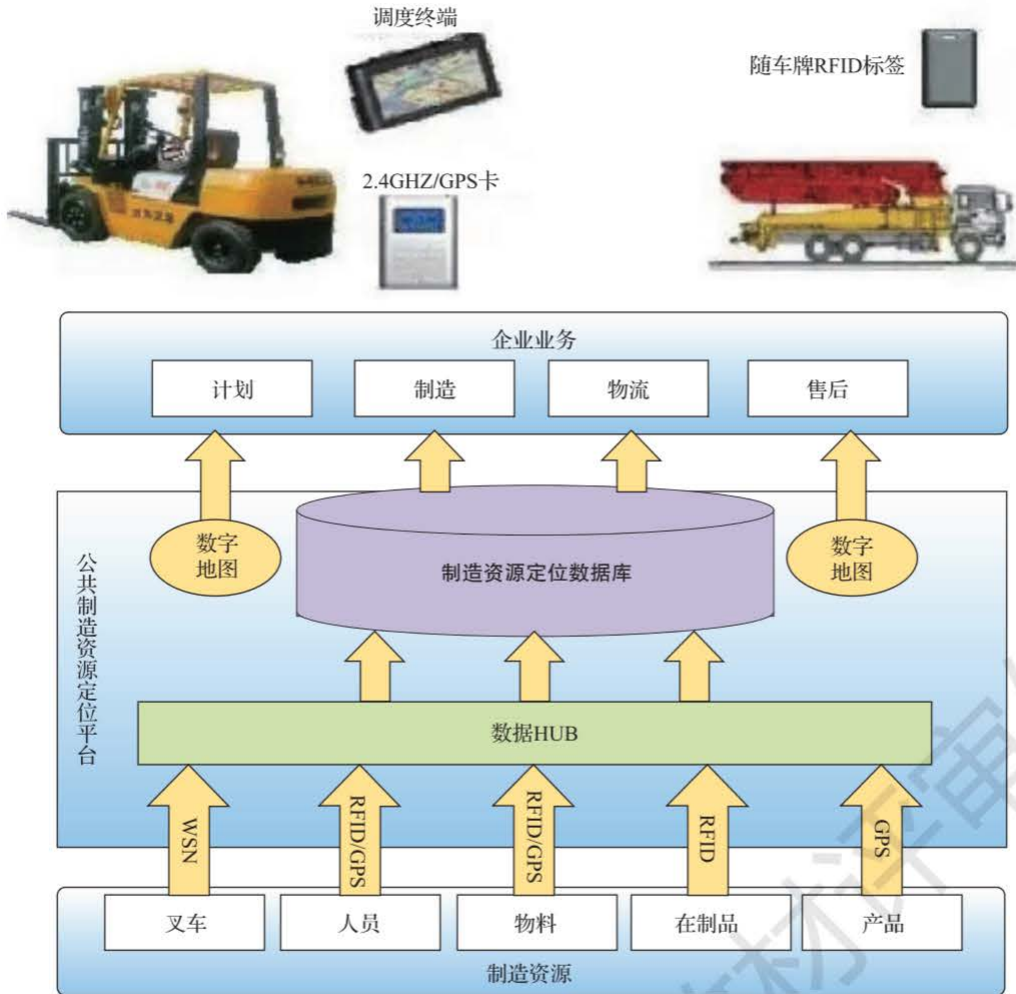


图 5-9 公共资源定位系统结构图

(6) 智能化立体仓库和物流运输系统

智能化立体仓库和物流运输系统实现泵车、拖泵、车载泵装配线及部装线所需物料的暂存、拣选、配盘功能，并与 AGV 配套，实现将工位物料自动配送至各个工位。

仓储模式采用自动化立体仓库存储（主要存储中小件为主）+垂直升降库存储（主要存储小件为主）+平面仓库存储（主要存储大件等其他特殊物资），配合全自动化的AGV小车，把工人从繁复的运输工作中解放出来，使装配区内整个物流通畅有序，改变将近总量30%的物料种类的存储和出入库作业模式，很大程度地缓解了自动化立体仓库的出入库作业压力，有效地提高了整个系统的作业能力。

（7）SPC 质量在线检测与分析

如图5-10所示，三一重工18号智能工厂通过GSP、MES、CSM及QIS的整合应用，实现了涵盖供应商送货、零件制造、整机装配、售后服务等全生命周期的质检数字化，以及SPC分析、质量追溯等功能。

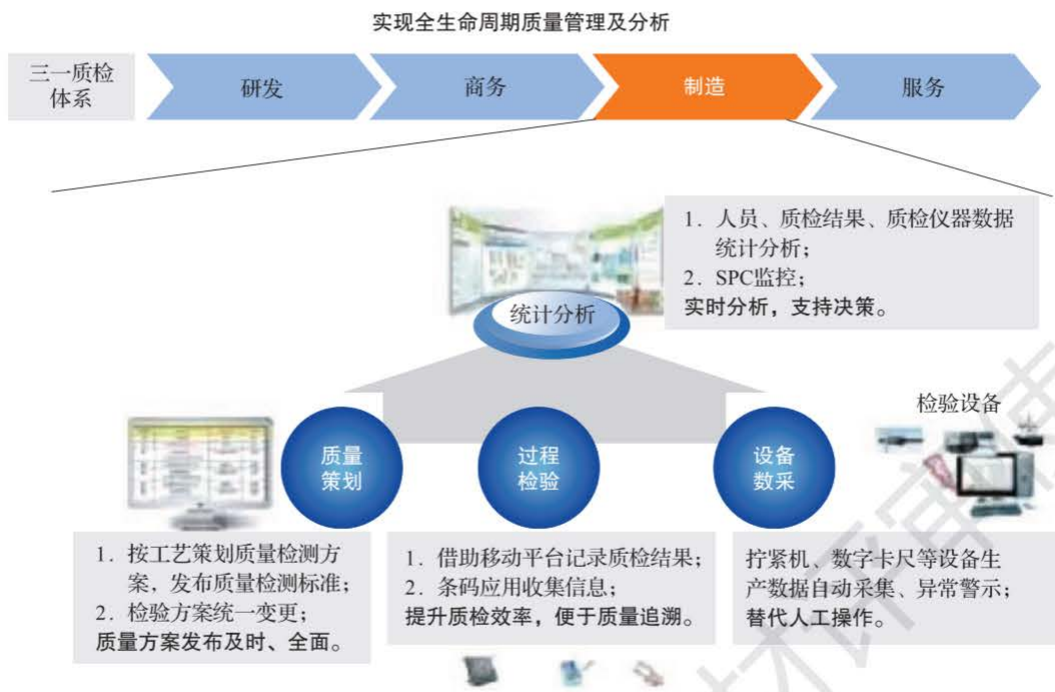


图5-10 SPC系统结构图

质检员所使用的设备，以工业级平板电脑和PDA为载体，在总装及部装线全面应用，实现了图形化质检，指导质检员快速、准确定位质检部位及质检标准。质检项图形化率达90%以上，质检电子化率100%，全面提升了质检效率。

（8）生产控制中心 PCC

如图5-11所示，厂房建设有PCC生产控制中心，通过对生产过程中物料、设

备、辅助生产资源等数据采集，并集成 PDM\ERP\CRM\MES 等应用系统，实现订单执行与生产现场的集中管理与调度。核心业务包括生产计划与执行管控、质量管控、物流管控，以及生产现场视频监控等。

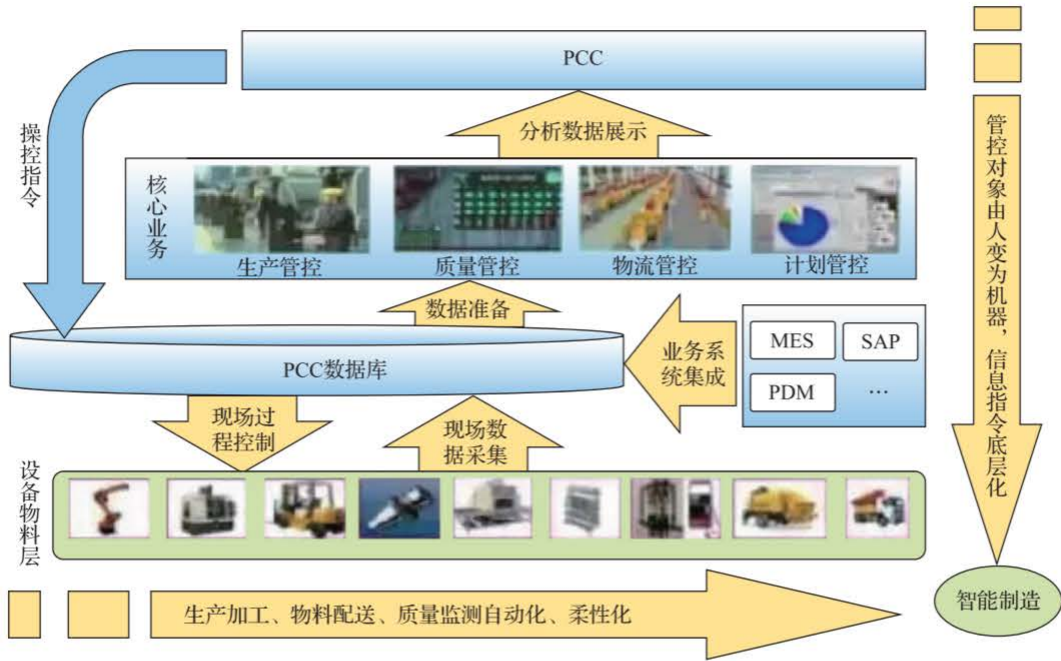


图 5-11 PCC 系统结构图

3. 离散型柔性制造典范

实施智能化改造后，三一重工 18 号工厂实现了厂内物流、装配、质检各环节自动化，一个订单可逐级快速精准地分解至每个工位，创造了一小时下线一台泵车的“三一速度”，实现“产品混装 + 流水线”的高度柔性生产。对整个生产过程的精益管控，大大提高了产品制造过程的质量、物流、生产管控程度，企业生产效率提高 24% 以上，生产周期缩短 28%，减少生产误操作 40%，不良品率下降 14%，物流运作效率提高 18% 以上，送货速度提高 12%；节省人力成本约 20%，总体制造运营成本降低 28%，生产节能 7%。

思考与练习

【单选题】

1. 将自动化技术与()深度融合, 可实现对生产过程的有效监测和快速响应。
A. 信息技术 B. 物联网 C. 5G D. 工业控制
2. 基于工业 4.0 的未来智能工厂出现的新变化不包括()。
A. 元件有自感知、自预测特性
B. 设备控制器有自感知、自预测、自诊断能力
C. 生产系统具有自配置、自维护、自组织特性的网络系统
D. 设备可以自动化生产
3. 在智能生产系统中, 车间层的核心是()。
A. 控制器 B. 车床 C. 铣床 D. 机器人

【多选题】

1. 智能工厂基本结构包括()三个维度。
A. 功能 B. 结构 C. 生产 D. 范式
2. 智能生产系统模型包括()。
A. 生产系统功能模型 B. 智能生产系统物资流
C. 智能生产系统信息流 D. 生产系统检测模型

【填空题】

1. 智能工厂由_____、_____、_____等构造要素集成而成。
2. 智能工厂的建设架构主要包括_____、_____、_____。



3. 智能化协同阶段需要考虑_____、_____、_____、_____以及_____。通过以上步骤，智能工厂可实现系统、业务、资源和供应链等多方面的协同管理。
4. 智能制造工厂的本质就是通过_____来实现_____优化生产制造流程的各个环节。

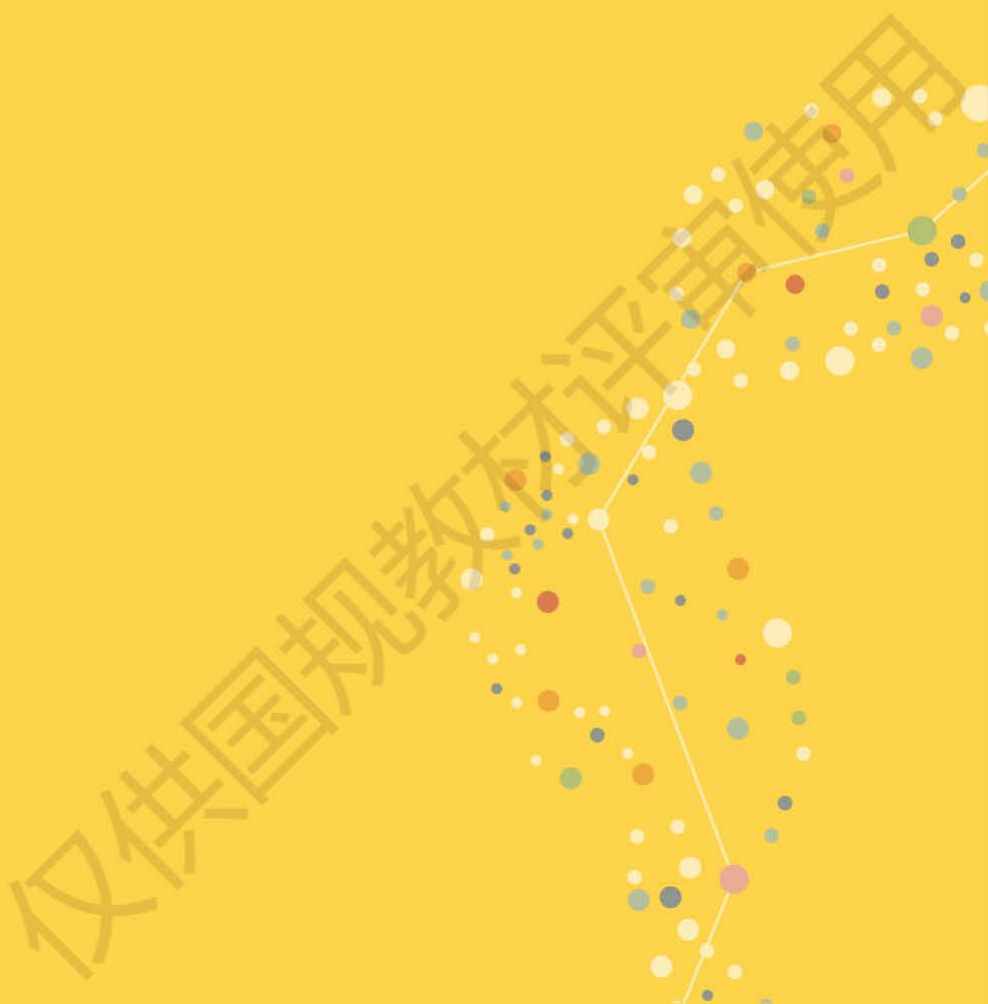
【简答题】

1. 智能工厂的三大典型特征是什么？
2. 生产系统的功能模型包括哪些？



06

第 6 章 智能制造的应用



智能制造概论

知识目标

- 了解基于动作分析和工艺的智能生产模型，熟悉智能生产模型的相关概念。
- 了解基于 BOM 和流程的运营管理模式，熟悉运营管理模式的相关概念。
- 了解基于工业大数据的智能决策模型，熟悉智能决策模型的相关概念。
- 了解基于产品和服务的智能商业模式，熟悉智能商业模式的相关概念。

科普素养目标

- 通过对智能制造应用模型的认识，树立科学意识。
- 通过对典型智能制造应用案例的分析，培养工匠精神。

仅供国规教材评审使用



6.1 智能制造应用模型

6.1.1 基于动作分析和工艺的智能生产模型

MES（制造执行系统）是整个执行层的核心，也是智能生产核心，MES 以工艺为主线、动作分析为基础。本节将对 MES 进行深入阐述，简单介绍其他执行层系统。

智能工序涵盖控制、设备、操作、识别、诊断等，通过智能工序与自动运载的集成，构成智能产线；智能产线与计划排产、MES、数据采集系统等集成构成智能车间；智能车间与 APS、智能调度、智能物流、智能检测、智能仓储、中央监控等构成智能工厂。基于动作分析和工艺的智能生产模型如图 6-1 所示。



图 6-1 基于动作分析和工艺的智能生产模型

1. 智能工序

对工序操作进行动作分解，是智能设备、智能控制、人机配合的设计基础，通过操作系统进行精确操作与控制，在操作和控制过程中实现自我控制、自我判断、警报功能和自我诊断。

很多制造企业因受产品、环境、精度、成本等因素影响，无法实现全过程自动化生产，因此对于瓶颈、环境恶劣、高危等工序采用智能工序设计。智能工序在制造业中大量存在，其中包括生产辅助设备，如工装夹具、刀具等自动选择、验证防呆等。

2. 智能产线

通过对智能工序与运载装置的集成和工序识别集成，构成智能产线。智能产线实现自动上下料、自动加工、装配、运载、搬运、识别等功能，对生产数据实时采集，通过现场显示屏进行生产数据展示，对产品进行自动检测，不良品自动下线，下线维修完成自动返回产线，实现工序与工序的通信等。

常见的运载方式如下。

1) 带式运载：主要材料为不锈钢钢网、防撕裂橡胶、尼龙、钢制或塑料锁扣等耐磨材料，其成本低，应用广泛。

2) 滚筒运载：通过包胶的滚筒，防止输送打滑，减少摩擦，同步性好。

3) 牵引式运载：通过动力、电力驱动，对物品进行搬运，常用的有人工物料配送车、AGV 等。

4) 悬挂运载：根据工艺路线进行设计，贴合生产节拍，实现连续循环式对物料进行搬运。可充分利用三维空间设计，节省场地。

5) 管道运载：管道运载可节省中转环节，缩短搬运周期，降低搬运成本，可以进行快速、安全、连续的传输。

6) 链条 + 载具载盘运载：通过链条 + 载具载盘进行产品搬运，多用于自动组装、测试线。

7) 机械手 + 夹具运载：通过机械手 + 夹具运载，用于固定工序间移栽，可调空间大，通用性强。

8) AGV+AGV+AGV+...：多用于体积大、比较重的产品组装及测试线，灵活性好，通用性好，成本高。

3. 智能车间

智能产线与计划排产、MES、数据采集系统等集成构成智能车间，通过MES实现制造执行信息化，利用计划排产模块进行排产，通过识别传感、终端、数据采集系统对设备与生产数据进行实时采集。

4. 智能工厂

智能车间与APS（高级计划与排程）、调度、物流与仓储、检测、中央监控等构成智能工厂。

6.1.2 基于BOM和流程的运营管理模型

以BOM和流程管理为核心的智能运营管理模型包括智能研发、智能管理、智能物流、智能供应链和智能办公系统。图6-2为以BOM和流程管理为核心的运营管理模型。

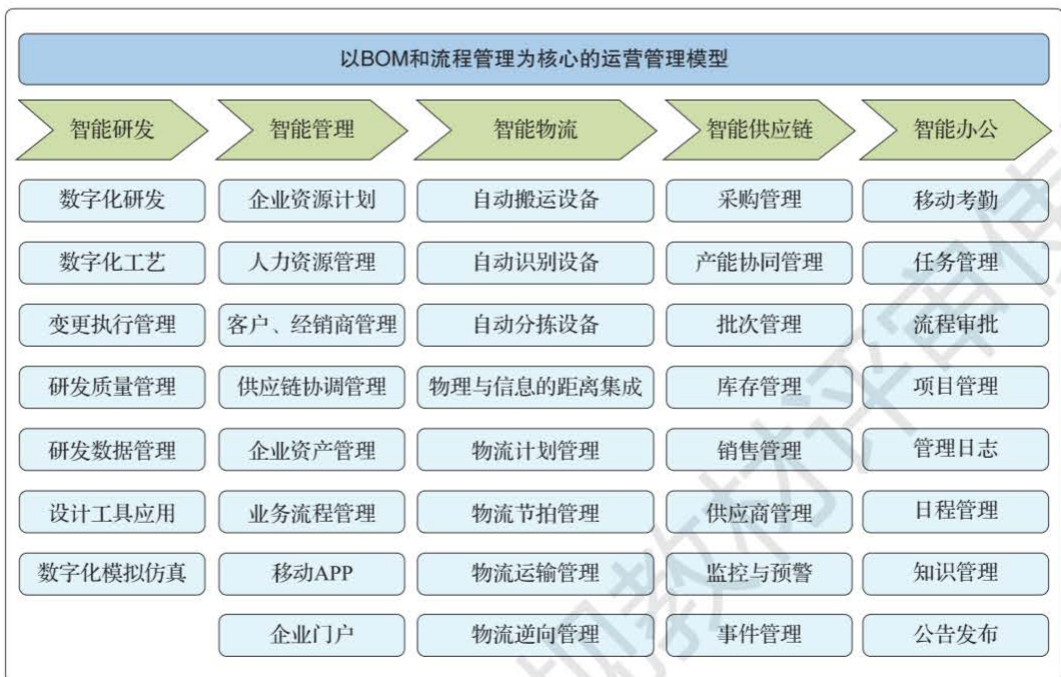


图 6-2 以 BOM 和流程管理为核心的运营管理模型

1. 智能研发管理

在智能制造环境下，企业应从过去的通过测绘仿制、代工等研发模式向具有创新能力的研发方式转型，直接面对用户的相关想法诉求、抽象的需求等，比如产品的性能、设计及制造成本、个性化的造型等。所以产品在概念设计、详细设计、工艺设计、生产设计、销售、售后服务等过程中，需预先考虑设计、制造、工艺、生产、销售、售后服务等相关问题。

企业应建立基于并行工程开发的产品全生命周期管理，对产品的设计及相关过程进行科学、系统的管理。智能研发体系要求产品研发工程师在设计之初就要考虑产品概念阶段到产品应用报废过程中的所有因素，在产品整个生命周期都需要关注这些因素，包含用户诉求、产品质量、制造成本、产品升级等。在产品研发阶段，建立多职能协同作用的项目组织，组织成员包含内外部人员，使用并行工具让所有研发人员在设计之初就获得对待开发产品的要求和信息，开始研究涉及职能工作相关业务，对需求深度了解，让很多问题在研发之初就得以解决，保证产品设计的质量，避免大量的返工而造成浪费。

大量的实践证明，集成且并行的产品设计及过程的智能研发可以快速响应市场，有效缩短产品研发周期，使整个研发流程管理透明规范，产品的应用功能更贴合客户需求，提升产品质量，消除和降低产品缺陷，适应柔性生产，并建立跨组织的共享研发平台，使客户、制造商、供应商协同研发，降低研发成本，提升企业产品竞争能力。

2. 企业资源计划

企业资源计划（Enterprise Resource Planning, ERP）是企业运营管理的核心系统，其将内外部的信息流、物流、资金流进行集成整合管理，快速适应市场和经营环境的变化，为企业运营决策提供实时信息。ERP 借助于严谨的内部控制功能，在库存周转天数降低、物料与计划的协调性、需求与能力的匹配、物与资金的集成、提供准确及时的财务报表、运营管理报表等方面的优势尤其明显，图 6-3 为 ERP 系统功能图。

3. 供应链管理

供应链管理（Supply Chain Management, SCM）包括如下内容。

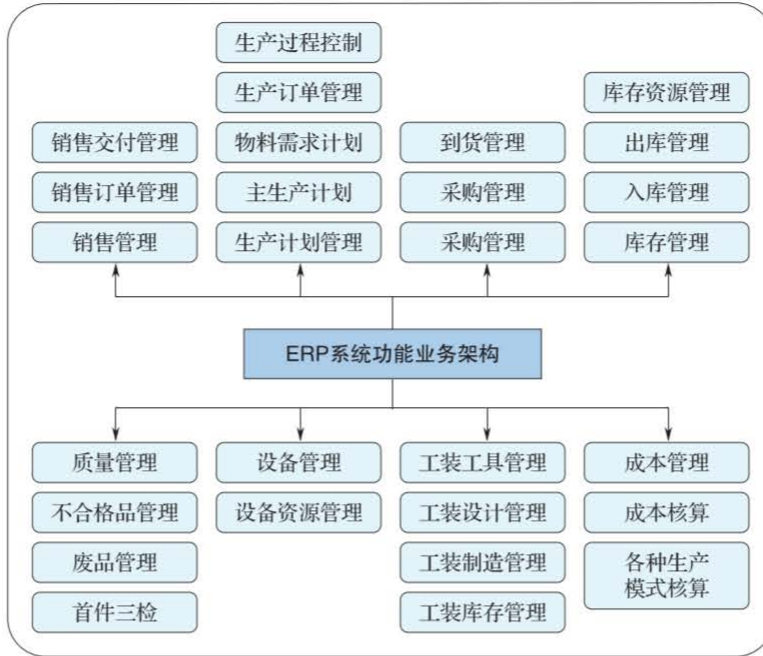


图 6-3 ERP 系统功能图

(1) 供应商管理

建立供应商基础档案，包含公司名称、简称、地址、联系电话、网站、企业法人、联系人、公司基本情况（包括成立日期、注册资本、营业额、银行账号、人力资源状况、设备状况、主要产品、原材料主要供应商及主要客户等）。

(2) 采购管理

根据采购申请需求，核算当前库存、采购在途及销售计划，自动生产包括拟采购品的编码、品名、型号规格及数量等信息；实现与供应商企业数据交换技术，实现从采购订单下达、供应商接收确认、交期反馈、入库信息、物流配送到应收应付管理的全程跟踪管理。通过供应链系统实现企业内部计划、采购、仓库、物流及财务等部门协同工作。

(3) 运输管理

对营运类型进行维护，包括托运单、作业单、调度单、班车的运力管理及自提单的生成等管理；支持通过系统网络给自有车队、运输商发送运输指令；维护计费模板，可以根据配送方式和运输路线自动生成费用清单；根据不同的配送方式和线

路自动生成费用清单；支持对运费的结算。

（4）销售管理

具有客户管理功能，对客户进行分类管理，自定义业务员分区管理和客户管理授权功能。

（5）物料需求计划管理

进行物料需求协同管理，根据生产计划生成物料需求计划和物料采购计划，通过系统与供应商进行正反向协同管理。

（6）仓库管理

智能指定存放和拣货库位，有效防错，提高作业效率；对业务流程标准化管理，对收料、入库、出库、发货、库存管理、盘点、移库、调拨等规范化管理；提供实时的检索查询功能，实时掌握库存状况；与软硬件通过接口对接，自动识别，自动采集，自动执行。

（7）财务管理

可以对总账、明细分类账、现金日记账、银行日记账等会计账户进行实时管理，可以生成资产负债表、利润表、现金流表等财务报表，为供应链决策提供数据参考。

4. 移动 APP 管理

智能制造移动应用（Application，APP）服务是针对各个层面的业务的应用程序服务，也就是对移动端如手机、iPad 等工具的应用服务。移动 APP 管理本身具有随时随身性和互动性，又可以整合 LBS、AR、QR 等智能制造各层级系统。通过对各层面的业务数据实时查询，精准推送，使所有业务指标都处于实时监控之中，方便各级管理人员和业务负责人实时了解业务状况，出现异常能够即时反馈、分析、处理，提升企业运营效率，降低运营成本。

6.1.3 基于工业大数据的智能决策模型

大数据的应用是智能制造的核心推动力。图 6-4 和图 6-5 是工业大数据的应用场景和处理流程。



图 6-4 工业大数据的应用场景

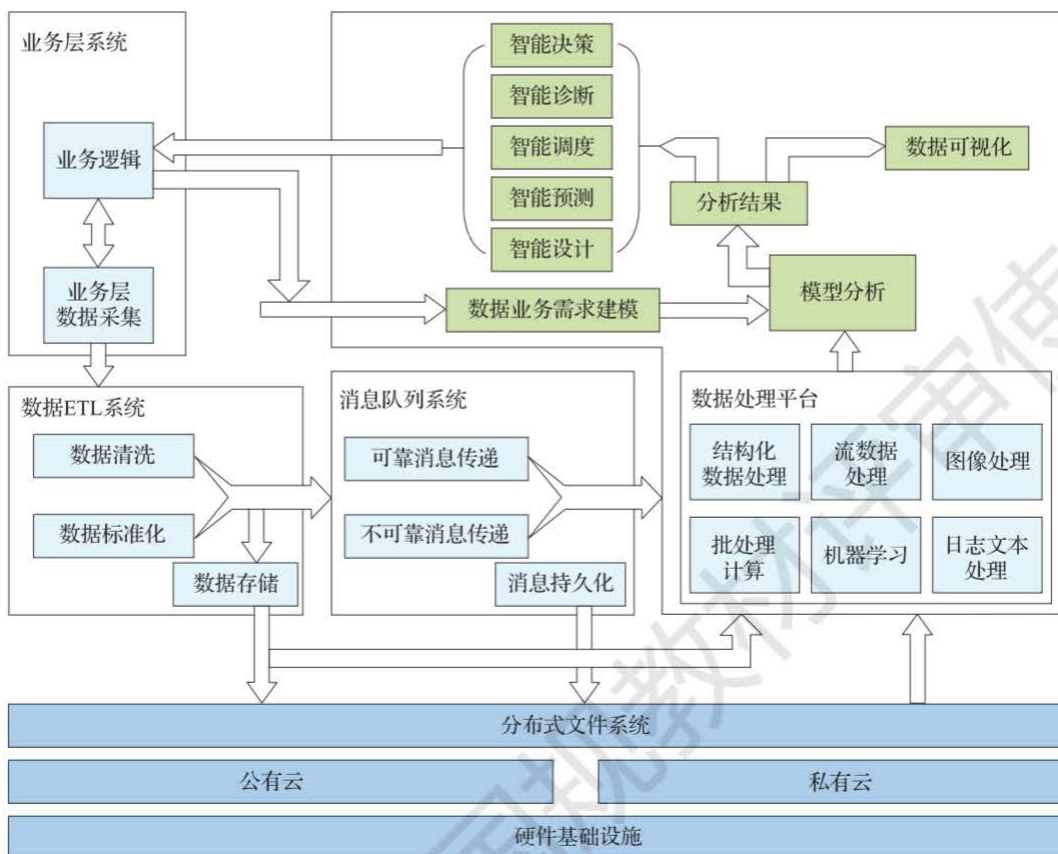


图 6-5 工业大数据的处理流程

1. 数据采集

通过分布式部署的服务器完成生产全过程数据、经营管理数据、商业管理数据等大量数据的实时采集，实现快速数据解析、转化与装载并进行数据整合。支持数据采集点的地理分布和网络跨域数据采集，支持不同系统、不同数据类型的数据采集，支持数据采集实时性，不影响系统的正常运行。可以通过以下方式进行数据采集：终端手工输入、设备连线、子系统服务器数据、传感器数据、条码 /RFID/CCD 数据、社交网络交互数据、移动互联网数据等。

2. 数据存储

使用分布式文件系统（DFS）实现能效优化存储、计算融入存储、去冗余的大数据存储技术。通过建立相应的数据库，对数据进行存储，并可以进行管理和调用；解决非结构化、半结构化、复杂结构化大数据的管理与处理；解决大数据的存储、表示、处理，以及可靠性、有效传输等问题；实现分布式非关系型大数据管理与处理，大数据索引技术，大数据转移 / 备份 / 复制技术，对异构数据的融合技术，数据建模技术，数据组织技术和可视化技术。

3. 数据库管理

（1）数据库云化

建立数据库集群部署模式，实现数据库云化，数据实例可以部署到物理服务器，也可以部署到虚拟服务器，根据业务需求为虚拟机分配合适的 CPU 和内存资源，实例之间不需要共享存储资源，由主节点监控各从节点的运行状态，在用户端请求读写时，由主节点调度合适的从节点，响应需求。

（2）数据计算

实现内存计算：通过 CPU 直接从内存读取数据进行计算，通过内存计算，对传统数据处理进行加速，实现大数据的快速访问和计算。

实现并行计算：实现各个指定节点计算能力的充分发挥，实现 TB/PB 级数据分析秒级响应，最终实现并行计算。

实现库内计算：支持所有专业统计函数设定及应用，由大数据分析引擎指定最

优化的计算方式，将计算量大、费用较高的计算在数据存储的位置直接进行计算，保证数据分析的高性能，减少数据移动，降低通信负担。

4. 数据分析和挖掘

建立从局部到全局、从建模到决策的层级化数据分析，挖掘数据中隐藏的内在规律，形成可视化图表，预测和分析未知错误和潜在问题。同时需注重企业内部数据与外部行业数据相结合，挖掘内部或外部数据间的相互关系，内部数据与外部数据的关系和差异；实现数据质量和数据管理、预测性分析、可视化分析、挖掘算法高处理量和处理速度、管理语义翻译等功能。对已有数据挖掘技术和机器学习技术进行改进，提升挖掘技术、特异群组技术、网络技术、图技术等，通过大数据融合技术实现数据连接（包括相似性连接）、过程分析、行为分析、管理语义分析等大数据挖掘技术。

5. 数据定制

具有高效、完善、安全、经济的数据定制服务，实现个性化数据定制管理。

6. 数据资源应用

对海量制造数据中的信息进行挖掘，为智能制造体系的运行和智能制造管理提供依据，从而提高各个模型的运行效率；通过数据资源，形成企业内外部管理互通，增强协同创新能力，打造企业新型能力。

7. 企业绩效管理

对海量制造数据中的信息进行挖掘，为智能制造体系的运行和智能制造管理提供依据，从而提高各个模型的运行效率；通过数据资源，形成企业内外部管理互通，增强协同创新能力，打造企业新型能力。

6.1.4 基于产品和服务的智能商业模式

智能服务的诉求推动了智能产品的发展，智能服务的结果为智能产品升级提供参考依据，图 6-6 是对基于产品和服务的智能商业模式的描述。



图 6-6 基于产品和服务的智能商业模型

1. 智能产品

智能产品综合软件技术、硬件技术、识别传感技术、自动化控制技术等进行自主感知、自主计算、自主分析判断对比，实现自主决策，用复杂的过程代替人脑和动作进行工作，辅助人们做出决策。

穿戴智能产品是人类的智能化延伸，通过这些设备，人类可以更好地感知外部与自身的信息，能够在计算机、网络甚至其他人的辅助下更为高效率地处理信息，能够实现更为无缝的交流。

无人驾驶汽车从被动驾驶变为主动驾驶，通过车载的各种传感系统感知周边环境，实时获得道路、汽车位置和障碍物信息，用系统控制实现自动规划行车路线、控制车辆的转向和速度，并控制车辆安全到达目的地。

智能家居产品通过系统控制，将计算机技术、网络通信技术、传感技术及自动控制技术等进行综合管理，实现安全防范、居家办公、电器的智能以及远程控制和程序升级等服务。

2. 智能服务

智能服务是根据用户的需求进行主动服务，即采集用户的原始信息，进行后台积累，构建需求结构模型，进行数据加工挖掘和商业智能分析，包括用户的系统、

偏好等需求，通过分析和挖掘与时间、空间、身份、生活、工作状态相关的需求，主动推送客户需求的精准高效的服务。除了传递和反馈数据，系统还需进行多维度、多频次、多层次的感知，以及主动、深入的辨识。

遵守法律法规，通过端到端的安全技术实现对用户信息的保护，实现高安全性，才能使用户对服务建立信任，并进行持续的消费和服务的升级。

建立智能服务体系时须考量经济性和节能环保，最大程度节能降耗，降低运营成本；使用户可以获得个性化服务，也为运营者带来更高的经济和社会价值。



6.2 智能制造应用案例

6.2.1 青岛红领集团

青岛红领集团依托大数据技术，在全球范围内领先实现西装的大规模个性化定制，生产模式从规模化量产转变为更加聚焦消费者的模式。红领集团的个性化定制流程遵循 C2M 模式，其提供的定制化平台采集消费者需求，获取个性化信息数据，通过数据驱动整个生产制造流程，在智能工厂中完成产品的自动设计、个性化制造等环节，合格的个性化产品通过智能物流最终被交付到客户手中。

如图 6-7 所示，消费者在手机 APP 上自行定制服装细节，既可以在此平台上进行自主个性化设计（如领型、口袋、面料、里料、拼接等），又可以选择时尚成衣版型和添加个性化元素（如个性刺绣、个人品牌等），真正做到满足不同类型消费者的个性化需求。这些个性化需求将统一传输到后台数据库中，形成数字模型，由计算机完成打版，随后分解成一道道独立工序，通过控制面板及时下达给相关车间内流水线上的工人。



图 6-7 多样化的刺绣形式

结合线下测量，设计师采集消费者人体 18 个部位的 22 项数据，如图 6-8 所示。将这些关键数据与版型数据库相匹配，获得成衣的设计数据，便可以完成制作服务全过程。同时，为更好地满足消费者的需求，针对消费者模糊的需求信息，系统能够向客户提出建议，根据客户已经填好的资料生成最合适的搭配方案，并通过网页给客户展示一个 3D 模型。顾客可以在 3D 模型上细致地观察款式颜色、细节设计和布料材质等。通过这一标准化的客户信息采集方法，红领集团能够通过数据建模实时实现“一人一版”，在所有细节上实现个性化定制。



图 6-8 设计师线下测量

数据中心通过与其他系统的协同设计，将个性化信息转变为标准化信息，信息会传输到布料准备部门，使其按照订单要求准备布料。裁剪会按照要求进行裁剪，裁剪后的大小不一、色彩各异的布片根据西装的工艺要求（例如领子线、面料、夹里、袖子等）分为 6 部分，每部分均会配挂一个 RFID 电子标签（注明工艺要求），并会随着布料分别进入对应的吊挂流水线，如图 6-9 所示。

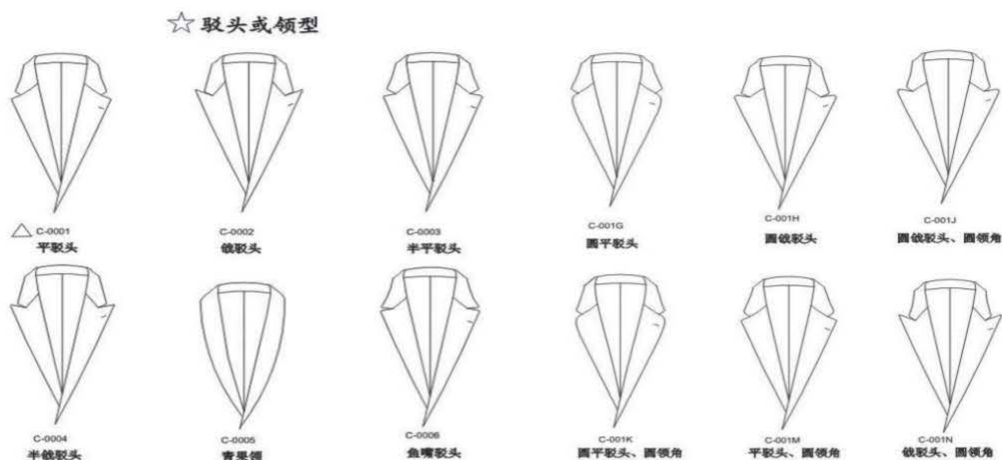


图 6-9 多样化的工艺选择

布料上的标签随流水线被传送，每一个工位都有专用计算机读取 RFID 电子标签上的制作标准信息，流水线上员工根据该信息完成制作。当员工刷卡时，系统就可以监控工艺流转的位置，清晰地知道生产进度。在一道工序完成后，计算机将进行标识，半成品传送到下一工序。在最后的组合环节中，电子标签会在成衣完成后统一为一张 RFID 卡，并随成衣进入到熨烫整理检验环节，最终入库。

6.2.2 圣龙股份全业务链数字化

宁波圣龙汽车动力系统股份有限公司（以下简称“圣龙股份”）是国际知名的汽车动力系统解决方案提供商。圣龙股份以企业战略一致性模型为指导，实现公司的决策管控一体化平台与企业战略、业务战略相匹配，与 IT 架构相支撑，全力推动企业的数字化转型，如图 6-10 所示。

1) 信息孤岛智能销售：满足 MMOG 要求下主机厂供应链一体化联动要求。

圣龙股份建立与其核心主机厂客户长安福特和其他厂商的 EDI 集成接口；建立客户 BOM，根据客户需求直接拆解成圣龙具体销售计划；建立销售执行情况分析、货款跟踪、未结算分析报表等系统；建立主机厂寄售仓调拨及全局库存管理系统；建立汽配行业寄售模式下的快速对账与结算管理系统，通过报表可以查看每一种产品的寄售情况。

2) 智能供应：满足 MMOG、QCA 要求下的产业一体化联动。

全面的供应商协同平台：信息协同、订单协同、交货协同、库存协同、对账协同、开票协同、条码协同等；采购合同、订单全过程跟踪；多维度采购价格定义及价格分析；双经销业务及委外业务出入库用量核销；供应商管理，从而满足产业一体化联动。



图 6-10 圣龙股份数字化转型方案设计

3) 智能设计：研产一体化平台 PLM+ERP+MES。

打通 PLM、ERP、MES 等平台，通过 PLM 文档、物料、设计等管理，将用户需求快速转换成生产所识别的物料、工艺等信息，缩短研发周期；通过 PLM 和星空 ERP 的数据和流程连接，可以缩短企业采购周期，提升企业的采购准确率，进而整

体缩短生产周期，并提升客户满意度。

4) 智能生产：智能系统 + 智能终端，实现对“人机料法环测”六要素管控。

智能生产包括生产实时监控和虚拟仿真平台，其智能生产流程图如图 6-11 所示。



图 6-11 智能生产流程图

5) 智能物流：打通供应商与产线的端到端物流与信息流的通道。

智能物流包括生产计划驱动供货，避免物资堆积；供应商直送 VMI 仓，减少企业仓储、物流成本；条码、RFID 扫描作业；看板备料、发料，差缺件预警，与产线协调保障生产；立体仓库、智能亮灯拣货；AGV 小车搬运并配送至工位。

6) 智能品控：全流程质量管理，智能检验与判定，轻松实现过程品控与质量追溯。

支持追溯方向的随时切换，可从父项溯源追查子项，也可以切换至从子项去向追查父项。通过全流程质量管理，智能检验与判定，轻松实现过程品控与质量追溯。大量减少工作量，同时提升了客户的满意度，如图 6-12 所示。



图 6-12 智能品控流程图

思考与练习

【单选题】

- () 可实现能效优化存储、计算融入存储和去冗余的大数据存储技术。
 A. 使用分布式文件系统 (DFS) B. 建立相应的数据库
 C. 大数据索引技术 D. 大数据转移 / 备份 / 复制技术
- 智能制造管理的主体不包括 ()。
 A. 高层管理者 B. 中层管理者
 C. 基层管理者 D. 基层作业人员
- 在智能工厂中, 负责统一管控产品研发和制造设备的是 ()。
 A. 管理层 B. 企业层 C. 现场层 D. 操作层

【多选题】

- 智能制造应用模型可以分为 ()。
 A. 智能生产模型 B. 运行管理模型
 C. 智能决策模型 D. 智能商业模型
- 数据计算包括 ()。
 A. 实现内存计算 B. 实现并行计算
 C. 实现库内计算 D. 实现数据库云化

【填空题】

- 智能车间由_____、_____、_____以及_____构成。
- 以 BOM 和流程管理为核心的智能运营管理模型包括_____、_____、_____以及_____。
- 供应链管理包括_____、_____、_____、_____以及_____。





【名词解释】

1. 智能工序
2. 智能服务
3. 智能制造移动应用服务

【简答题】

1. 研发智能制造装备有什么意义？
2. 目前国内智能工厂的发展状况如何？
3. 未来智能制造的发展方向是什么？



参 考 文 献

- [1] 任长春, 舒平生. 智能制造概论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [2] 陈明, 张光新, 向宏. 智能制造导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [3] 范君艳, 樊江玲. 智能制造技术概论 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019.
- [4] 申彩英, 朱思瑶, 黄兴驰. 双目视觉的智能汽车目标检测算法研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2023 (11): 1-8.
- [5] 袁航. C2M商业模式在传统企业的应用研究 [J]. 商业研究, 2017 (14): 45-46.
- [6] 姜丽丽. 红领集团C2M“个性化定制”模式研究 [J]. 经贸实践, 2018: 340.
- [7] 侯成凯, 徐欣. 轨道交通车辆牵引系统智能运维研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2023 (05): 107-111.
- [8] 付晶, 谈家英, 周立玮, 等. 输电线路无人机巡检图像缺陷智能识别方法分析 [J]. 高电压技术, 2023, 49 (S1): 103-110.
- [9] 张伟, 王均. 人工智能技术在电气自动化控制中的运用探讨 [J]. 信息系统工程, 2023 (09): 67-70.
- [10] 田海波, 王炳龙. 智能控制技术在自动化系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40 (09): 152-153.
- [11] 史国华, 林焕翔, 杨连生. “中国制造”转向“中国智造”: 数字化赋能大学生工程实践能力培养改革创新 [J]. 科技管理研究, 2023, 43 (11): 127-134.
- [12] 潘海军, 江鹏, 王知鸞. 中国制造2025视域下地方高校“智能材料”课程人才培养模式探究 [J]. 黑龙江教育 (理论与实践), 2022 (12): 29-31.
- [13] 何慧霞, 魏桂英, 武森, 等. 智能制造评价理论研究现状及未来展望 [J]. 中国工程科学, 2022, 24 (02): 56-63.

高等职业教育科普教育系列教材

区块链概论 73594

大数据概论 73698

智能制造概论 75022

人工智能概论

汽车文化概论

生命健康教育概论



机工教育微信服务号

上架指导 智能制造

策划编辑◎杨晓昱 / 封面设计◎马精明

ISBN 978-7-111-75022-2



01 >

9 787111 750222

定价：49.00元