
第 1 章

智能制造概述

1.1 智能制造的提出与内涵

智能制造的提出与研究跟制造技术的不断发展和生产模式的不断演变密切相关。对智能制造的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代,当时有学者将智能制造定义为“通过集成知识工程、制造软件系统和机器人控制来对制造技工的技能与专家知识进行建模,以使智能机器可自主地进行小批量生产”。从这一定义可以看出,对智能制造最初的解读聚焦于智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统,是一种面向生产制造过程的工程技术。随着技术的发展与时代的演变,对智能制造内涵的解读逐步丰富。本节围绕制造业生产模式的演变,介绍智能制造概念的提出与内涵。

1.1.1 制造业生产模式的演变

制造业是经济的重要组成部分,生产模式的演变与发展对经济增长、资源利用和环境保护等方面都具有重要的影响。生产模式是指企业体制、经营、管理、生产组织和技术系统的形态和运作方式,具体表现为与一定的社会生产力发展水平相适应的生产系统和管理方式的集成。生产模式依赖于生产组织方式,而生产组织方式则由企业性质决定。

从 17 世纪开始至 1830 年,在专业化协作分工、蒸汽动力机和工具机的基础上,出现了制造企业的雏形——工场式的制造厂,人类社会的生产率开始大幅提升。1900 年,制造业成为一项重要产业,其主要生产模式是“少品种、单件小批生产”。在这种生产模式下,当时处于世界领先地位的轿车企业每年也只能制造几百辆汽车,而且制造的汽车没有两辆是完全相同的。原因在于所有的承包商都不采用标准的计量器具进行测量,汽车装配高度依赖装配工的熟练程度。1905 年,欧洲已有几百家类似的企业采用单件生产方式少量地制造汽车,这些独立承担大部分生产任务的小工厂没有能力开发新技术,而且产量低、成本高。这种生产模式无法满足市场的新需求。

20 世纪 20 年代,“互换性”和“大批大量生产”等概念被引入制造系统,“科学管理”理论与当时的电气化、标准化与系列化结合,产生了机械自动流水线生产,出现了“少品种、大批大量生产”的模式,成为各国纷纷仿效的制造生产模式。这种新的生产模式及其技术支持零件的互换性,给制造业带来了一场重大变革,有效推动了工业化进程和经济高速发展,为社

会提供了大量的经济产品,促进了市场经济的发展。其主要特征包括少品种、大批量生产、塔形多层次的垂直领导和严格的产品节拍控制。其市场特征与少品种单件小批生产模式相同,都是卖方市场。刚性生产线大大提高了生产效率,从而降低了产品成本,但这是以损失产品的多样性为代价的。

20世纪50年代,大量生产方式达到顶峰。人们对“少品种、大批量生产方式”的优缺点有了进一步的认识。大批量生产模式产品的竞争表现为效率加质量的竞争。一方面,大批大量生产方式的规模效益使企业受益匪浅,比如日本,由于政府的干预与调控,制造企业进行管理改革,大量引进和采用高新技术成果,狠抓商品化生产,发挥人的作用,发展企业间的合作,对外开拓国际市场,在汽车、家电、钢铁及微电子器件等产量大的行业,利用批量法则,以规模生产的产品和营销优势迅速扩大在国际市场的占有份额,从而发展为能与美国抗衡的经济大国。另一方面,人们也认识到刚性自动流水线存在许多自身难以克服的缺点,市场的多变性、产品品种和过程的多样性对刚性生产线提出了挑战。为此,人们从技术角度形成成组技术和以计算机与系统技术为基础的制造自动化,试图改进这一模式的不足。

20世纪80年代,人们已经将少品种、大批大量生产模式的优点发挥到极限,同时这种生产模式与市场需求变化间的矛盾越来越明显,并且成为制约制造业发展的重要因素。随着科学技术与社会经济的发展,“多品种、小批量生产方式”逐步成为市场主流。其主要特点是产品种类多、变换快,生产中同时加工的零件种类繁多,可以缩短生产周期,实现均匀化生产,可以降低库存,对市场变化的适应力强。但是生产组织和计划管理工作复杂、难度较大。该生产模式是柔性化、系统化、数字化和网络化的生产方式,其本质是用大量生产的成本来生产满足不同需求的大批用户的个体化、多样性产品。

综上所述,人类的文明与进步与生产模式的发展演变密不可分,其发展路径可以体现为:从手工作业到机器作业,从作坊到工厂;从单件生产方式到大量生产方式,之后形成柔性化、系统化和智能化的生产方式。生产模式发展演变的根本原因都是应对新兴的消费需求与挑战,提升相对滞后的生产力。当前,新的工业革命已带来越来越深入的变革,其核心就是推进智能制造。

1.1.2 智能制造的提出

随着科学技术与社会经济的发展,数字化、网络化大大减轻了人的脑力活动的强度。一方面,随着技术与设备的不断发展,企业的自动化程度越来越高,生产线与生产设备内部的信息流量迅速增加;另一方面,随着市场竞争越来越激烈,来自用户的个性化需求日趋增长,产品包含的设计信息与工业信息量激增。这些因素导致企业必须对迅速变化的市场需求做出快速响应,从而导致制造过程与管理工作的信息量剧增,企业的关注点逐步转向提升制造系统对大规模信息的高效采集、分析与处理能力,这不仅需要数字化、网络化技术,还需要智能化技术。这些智能化技术被深度应用于生产制造的各环节,便形成了智能制造。智能制造是信息化与工业化深度融合的大趋势。

1.1.3 智能制造的内涵

“优质、高效、低耗、绿色、安全”是制造技术发展的主题,也是制造业发展过程中一直追

求不变的目标。其中,“优质”是指制造的产品具有符合设计要求的优良质量或提供优良的制造服务;“高效”是指在保证质量的前提下,在尽可能短的时间内,以高的工作效率和快的工作节拍完成生产,快捷响应用户需求;“低耗”是指以尽可能低的经济成本和资源消耗完成产品制造或提供制造服务;“绿色”是指综合考虑环境影响和资源效益完成生产制造;“安全”是指在生产过程中,通过多方协同运作,保证生产者、技术装备和生产设施及生产活动的安全性。在不同的生产模式发展阶段,这五个方面的具体内涵和意义都在与时俱进地发生变化。

对于智能制造而言,其内涵则演变为“柔性、智能、协同、绿色、透明”五个方面。“柔性”是指通过深入管控每个环节,更好地解决制造过程中的问题,从而使制造系统更加敏捷和柔性,满足用户的定制化要求;“智能”是指机器智能可以与人更好地配合,分担一部分思考和决策工作,并尽可能少犯错;“协同”是指制造系统内各子系统、制造过程的各环节,以及自身与上下游相互协同;“绿色”是指实现更优的资源利用,更少地消耗能源和资源;“透明”是指使原本不可见的设备衰退、质量风险、资源浪费等问题变得可见,通过预测性的手段进行避免。

在制造强国战略研究中,智能制造的内涵表述如下:智能制造是新一代信息技术与先进制造技术的深度融合,它的根本任务是推进制造业的数字化、网络化、智能化转型升级。智能制造是一个大系统,贯穿产品、生产、服务等制造全生命周期的各环节,在工业互联网和云平台支撑下,各环节交融成为智能集成制造系统。因此,智能制造主要由智能产品、智能生产、智能服务三大功能系统,以及智能制造云和工业互联网网络两大支撑系统组合而成。在此背景下,制造业的创新内涵包含四方面:一是产品创新,二是生产技术创新,三是产业模式创新,四是这三方面集成形成的制造系统集成创新。智能制造是制造业创新发展的主要途径。

1.2 智能制造领域的核心概念

制造是指将原材料加工成适用的产品或工具的过程。制造活动包含一切“将原材料变成适用的产品”的相关活动。当智能技术用于制造活动中时,便形成了通俗意义上的“智能制造”。

1.2.1 智能制造

智能制造可定义为把智能化技术运用于设计、生产、管理、服务等各类制造活动,形成具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能新型生产方式,以满足企业提高效率、降低成本、绿色可持续等具体目标。

对智能制造概念的解读可归纳总结如下:“智能制造是面向产品的全生命周期,以新一代信息技术为基础,以制造系统为载体,在其关键环节或过程中具有一定自主性的感知、学习、分析、决策、通信和协调控制能力,能动态地适应制造环境的变化,从而实现预定的优化目标。”

我国《智能制造科技发展“十二五”专项规划》对智能制造的定义为:面向产品全生命周

期,实现泛在感知条件下的信息化制造,是在现代传感技术、网络技术、自动化技术、拟人化智能技术等先进技术的基础上,通过智能化的感知、人机交互、决策和执行技术,实现设计过程智能化、制造过程智能化和制造装备智能化等。

工业和信息化部 2016 年发布的《智能制造发展规划(2016—2020 年)》中将智能制造明确定义为:智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合,贯穿设计、生产、管理、服务等制造活动的各环节,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的新生产方式。

根据上述定义,可以从技术和制造系统两个角度解读智能制造这一概念。

从技术角度看,智能制造是先进制造技术与新一代信息技术、新一代人工智能等新技术深度融合形成的新一代制造技术,涉及工程技术基础和基础性设施条件,以及智能制造系统性集成和应用使能方面的关键技术。

从制造系统角度看,智能制造将实现以产品全生命周期价值链数字化为主线的端到端集成,构建一种物理、虚拟相融合的新型制造系统。智能制造背景下的生产将是一种物理与数字对象融合交互、实际生产与虚拟仿真映射孪生,从而可以在动态变化条件下进行自适应调整,保持优化运行的新型智能生产方式。

需要特别注意的是,不能把智能制造简单地视为智能化前沿技术的应用,它应该是基于人和社会可持续发展,能够实现持续增长的制造发动机。智能制造系统也并非要求智能化技术完全取代人,而是实现高度智能化制造系统中的人机共生。

1.2.2 智能制造核心使能技术

智能制造核心使能技术是实现设计过程、制造过程和制造装备智能化,使信息技术、智能技术与装备制造技术深度融合与集成的重要手段,是实现动态感知、实时分析、自主决策和精准执行等功能的关键方法和技术。

1. 传感器

传感器是一种能够感受被测量并按照一定的规律转换为可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。传感器本质上是一种检测装置,采用敏感材料和元件感知被测量的信息,并将感知到的信息由转换元件按照一定规律和使用要求转换为电信号或其他形式输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制在要求。

传感器的分类方法较多,按用途可分为振动传感器、压力传感器、位移传感器、液位传感器、能耗传感器、速度传感器、加速度传感器、射线辐射传感器、热敏传感器等。

振动传感器是测试技术应用中的关键部件之一,主要作用是接收机械量并将其转化为与之成比例的电量。由于它是一种机电转换装置,有时也被称为换能器、拾振器等。

振动传感器并不是直接将原始要测的机械量转化为电量,而是将原始要测的机械量作为振动传感器的输入量,然后由机械接收部分接收,形成另一个适合转化的机械量,最后由机电变换部分转化为电量。因此一个传感器的工作性能是由机械接收部分和机电变换部分的工作性能决定的。

随着高速数控机床在金属加工行业应用的日益普及,设备的安全稳定性问题愈发突出。其中,在影响设备正常运行的诸多要素中,高速主轴因素占比较大,主轴的支承核心是高速

精密主轴轴承,其性能优劣直接影响高速主轴的工作性能及主轴的加工精度。因此对主轴轴承异常声的控制、检测和评定成为设备维护、保养的重要内容,这也是设备制造、使用及维护领域亟待解决的重要问题之一。

在机床的主轴上安装振动传感器(图 1-1),可以监测机床的运行状态。当收集数据的数量与规模达到一定程度时,可以通过大数据分析技术,结合实际操作经验,对机床设备进行预见性维护,确定机床连续运行高速主轴的潜在故障,保证设备安全、高效运行,从而节省维修费用,缩短停机时间,提高设备综合利用率。



图 1-1 振动传感器

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,各种传感器用于监视和控制生产过程中的参数,使设备工作于正常状态或最佳状态,进而使产品实现最优质量。

2. 工业互联网

工业互联网是工业和互联网融合发展的产物,是一种将机器、物品、控制系统、信息系统、人互联的网络,属于泛互联网的范畴。智能设备、先进数据分析工具、人机交互接口是工业互联网的三大元素。机器、数据和人共同构成工业互联网生态系统。工业互联网利用设备联网,通过网络实时地监测设备数据、生产数据、物流数据,并对这些数据进行分析 and 挖掘,从而指导生产、优化设备运行、减少能耗、帮助决策,为智能制造提供信息感知、传输、分析、反馈和控制等技术支持。工业互联网的核心是基于全面互联形成数据驱动的智能。

工业互联网平台是面向新时代数字化、网络化、智能化的制造需求,基于大规模数据采集与分析,构建服务体系,用于支持制造资源高效配置的开放式、专业化工业云平台,是加速制造业创新体系和发展模式转变的重要引擎。如图 1-2 所示,工业互联网平台基本框架由基础设施层(IaaS)、平台层(PaaS)和应用层(SaaS)三大层级构成。

基础设施层是工业互联网平台的运行基础,由信息技术基础设施提供商为平台建设及运营提供虚拟化的计算资源、网络资源、存储资源,为工业互联网平台的功能运行、能力构建及服务供给提供高性能的计算、存储、网络等云基础设施。

平台层是工业互联网平台的核心,由平台建设运营主体、各类微服务组件提供商、边缘

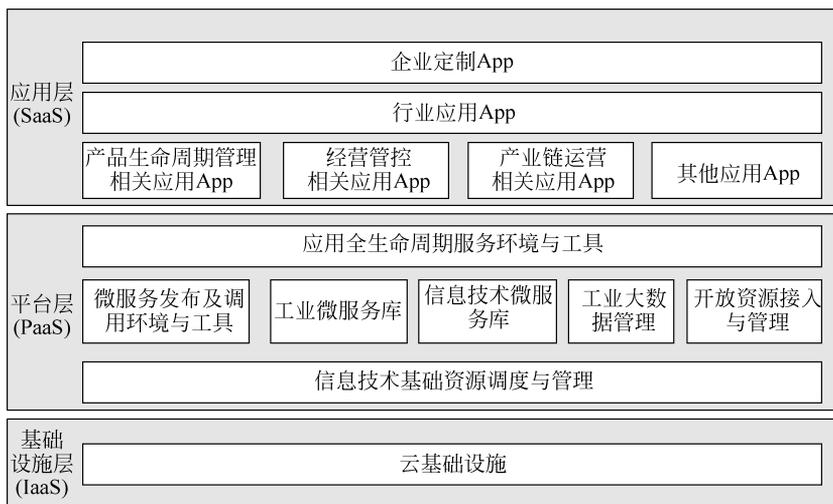


图 1-2 工业互联网平台基本框架示意图

解决方案提供商等共同建设,提供应用全生命周期服务环境与工具、信息技术微服务库、工业大数据管理等功能,依托强大的大数据处理能力、开放的开发环境工具,向下接入社会开放资源,向上支撑工业 App 的开发部署与运行优化,发挥类似“操作系统”的重要作用。

应用层是工业互联网平台的关键,通过激发全社会力量,依托各类开发者基于平台提供的环境工具、资源与能力,围绕特定应用场景形成一系列工业 App,通过实现业务模型、技术、数据等的软件化、模块化、平台化,加速工业知识复用和创新。各类工业 App 的大规模应用将有效促进社会资源的优化配置,加快构建基于平台的开放创新生态。

3. 虚拟现实/增强现实/混合现实

虚拟现实(virtual reality, VR)是一种可以创建和体验虚拟世界计算机仿真系统的技术,它利用计算机生成一种完全的模拟环境,使用户沉浸到该环境中。虚拟现实技术就是利用现实生活中的数据,通过计算机技术产生的电子信号,将其与各种输出设备结合,使其转化为用户能感受到的现象,这些现象可以是现实中真真切切的物体,也可以是人类肉眼看不到的物质,通过三维模型表现出来。从理念上看,VR 的核心特征是沉浸、互动和想象,也就是通过对现实的捕捉和再现,将真实的世界和虚拟的世界融为一体,从而将用户引入兼具沉浸、互动与想象的虚拟世界。当前及未来众多行业都会与 VR 进行深度融合。

增强现实(augmented reality, AR)是虚拟现实的扩展,它将虚拟信息与真实场景相融合,使二者能够在同一画面及空间中存在,增强用户对现实世界的感知。增强现实技术是促使真实世界信息和虚拟世界信息之间内容融合的新技术,将原本在现实世界空间范围中难以体验的实体信息在计算机等科学技术的基础上,实施模拟仿真处理,将虚拟信息内容在真实世界中加以有效应用,并且在这一过程中能够被人类感官感知,从而实现超越现实的感官体验。

混合现实(mixed reality, MR)是虚拟现实技术的进一步发展,通过在现实场景中呈现虚拟场景信息,在现实世界、虚拟世界和用户之间搭起一个交互反馈的信息回路,以增强用户体验的真实感。混合现实的关键点是与现实世界进行交互和信息的及时获取。

VR 与 AR 在本质上是相通的,即“3D”与“交互”。但 VR 与 AR 的应用趋势不同,VR

与 AR 使用的构建 3D 场景的技术及其展现设备不同,VR 更趋于虚幻和感性,更易应用于娱乐方向;而 AR 更趋于现实和理性,更易应用于比较严肃的场景,比如工作和培训;MR 是基于前两者发展出的混合技术形式,是一种既继承了两者的优点,又摒除了两者大部分缺点的新兴技术。

VR、AR 和 MR 涉及的关键技术主要包括可视化技术、传感系统、跟踪系统、用户界面和处理单元,它们的相互关系示意图如图 1-3 所示。

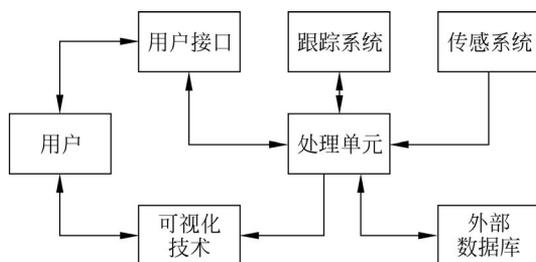


图 1-3 VR、AR 和 MR 涉及的关键技术及相互关系示意图

可视化技术的作用是将真实环境以数字化信息进行可视化呈现,常用的可视化技术有头部固定显示、手持式装置、投影装置等。

传感系统通过各种传感器为 AR 和 MR 从环境中获取信息,在多数场景下使用一个或多个摄像头或立体摄影机作为主要输入。

跟踪系统用于将数字化对象准确定位于真实环境中的对象,在 AR 系统中多采用基于标记的三角定位技术校正数字对象的位置。

用户界面用于实现系统和用户之间的双向通信,交互基于键盘、鼠标、手写板等多种硬件,以及手势识别、语音识别、听觉信号、力反馈等各种交互技术。

处理单元负责 VR、AR 和 MR 的软件运行。在 AR 和 MR 中,处理单元还要与相关的数据源连接以获取真实世界的实时数据。

在智能制造中 VR、AR 和 MR 技术可应用于多种场景,如标准作业程序、交互式虚拟试验、操作技术培训等。

4. 数字孪生

从智能制造的角度看,数字孪生是指充分利用物理模型、传感器实时动态数据感知更新、静态历史数据等,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,从而反映对应实体装备的全生命周期过程。

现实中,由于多种影响因素,真实产品不能与数字化模型保持完全一致,基于理想数字化模型的仿真分析,其有效性受到了明显的限制。数字孪生将物理世界的真实参数重新反馈到虚拟世界,从而完成仿真实验和动态调整。

数字孪生的基本特征是虚实映射。通过对物理实体构建数字孪生模型,实现物理模型和数字孪生模型的双向映射。任何物理实体都可以创建数字孪生模型。对于不同的物理实体,其数字孪生模型的用途和侧重点差异很大。

一个典型的数字孪生系统包括用户域、数字孪生体、测量与控制实体、现实物理域和跨域功能实体五个层次(图 1-4)。

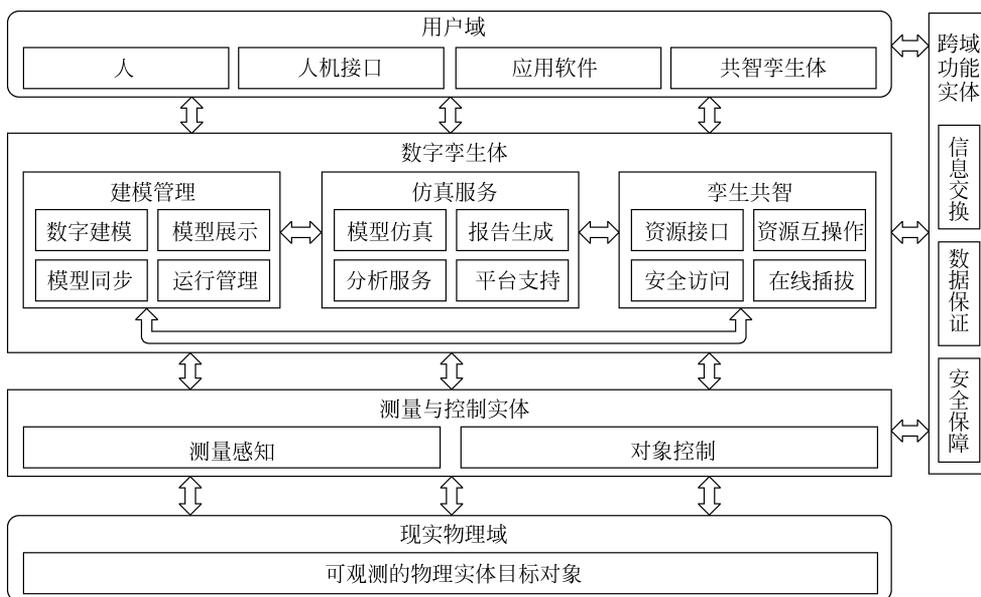


图 1-4 数字孪生系统的通用参考架构

第一层是使用数字孪生体的用户域,包括人、人机接口、应用软件,以及其他相关的数字孪生体。第二层是与物理实体目标对象对应的数字孪生体,是反映物理对象某一视角特征的数字模型,并提供建模管理、仿真服务和孪生共智三类功能。第三层是测量与控制实体,实现对物理对象的测量感知与控制。第四层是与数字孪生对应的物理实体目标对象所处的现实物理域,测量与控制实体和现实物理域之间有测量数据流和控制信息流的传递。第五层是跨域功能实体,包括信息交换、数据保证、安全保障三种类型。

从数字孪生的系统架构可以看出,建模、仿真和基于数据融合的数字线程是数字孪生的三项核心技术。

建模的目的是将人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。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。不同的建模者从某个特定视角描述一个物理实体的数字孪生模型实际上可能有很大差异。一般而言,细颗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。

仿真是验证和确认人们对物理世界或问题理解正确性和有效性的手段。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。仿真作为工业领域必不可少的重要技术,已被广泛应用于各工业领域,是推动工业技术快速发展的核心技术。随着智能制造新一轮工业革命的兴起,工业仿真软件与先进技术结合,在研发设计、生产制造、试验运维等环节发挥着更重要的作用。

数字线程是指一种信息交互的框架,能够打通原来多个竖井式的业务视角,联通设备全生命周期的互联数据流和集成视图。数字线程通过强大的端到端的互联系统模型和基于模型的系统工程流程进行支撑和支持。数字线程能有效地评估系统在其生命周期中当前和未来的能力,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,并在整个生命周期中应用模型实现可预测维护。

5. 工业机器人

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置,具有柔性好、自动化程度高、可编程性好、通用性强等特点。

国际上关于工业机器人的定义主要有两种。国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)定义工业机器人为一种具有自动控制的操作和移动功能,能完成各种作业的可编程操作机。美国机器人协会(Robotic Industries Association, RIA)定义工业机器人为一种可以反复编程和多功能的,用于搬运材料、零件、工具的操作机;或者为了执行不同任务而具有可改变和可编程动作的专门系统。

在智能制造领域,工业机器人作为一种集多种先进技术于一体的自动化装备,体现了现代工业技术的高效益、软硬件结合等特点,成为柔性制造系统、自动化工厂、智能工厂等现代化制造系统的重要组成部分。

工业机器人的组成结构是功能实现的基础。工业机器人一般由3个部分、6个子系统组成,如图1-5所示。

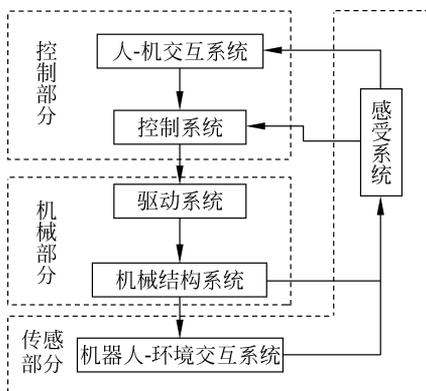


图 1-5 工业机器人的组成结构

(1) 控制部分是工业机器人的核心,决定了生产过程的加工质量和效率,便于操作人员及时准确地获取作业信息,按照加工需求对驱动系统和执行机构发出指令信号并进行控制。该部分包括工业机器人的人-机交互系统和控制系统。

人-机交互系统是人与工业机器人进行信息交换的设备,主要包括指令给定装置和信息显示装置。人-机交互技术应用于工业机器人的示教、监控、仿真、离线编程和在线控制等方面,可优化操作人员的操作体验,提高人机交互效率。

控制系统是根据机器人的作业指令程序及从传感器反馈的信号,支配工业机器人的执行机构完成规定动作的系统。控制系统根据是否具备信息反馈特征可分为闭环控制系统和开环控制系统;根据控制原理可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统;根据控制运动的形式可分为点位控制系统和连续轨迹控制系统。

(2) 机械部分是工业机器人的基础,其结构决定了机器人的用途、性能和控制特性。该部分包括工业机器人的驱动系统和机械结构系统。

机械结构系统包括基座和执行机构,有些机器人还具有行走机构,是机器人的主要承载

体。机械结构系统的强度、刚度及稳定性是机器人灵活运转和精确定位的重要保证。

驱动系统包括工业机器人动力装置和传动机构,按动力源分为液压、气动、电动和混合动力驱动,其作用是提供机器人各部位、各关节动作的原动力,使执行机构产生相应的动作。驱动系统可以与机械系统直接相连,也可通过同步带、链条、齿轮、谐波传动装置等与机械系统间接相连。

(3) 传感部分是工业机器人的信息来源,能够获取有效的外部 and 内部信息以指导机器人的操作。该部分包括工业机器人的感受系统和机器人-环境交互系统。

感受系统是工业机器人获取外界信息的主要窗口。机器人根据布置的各种传感元件获取周围环境状态信息,对结果进行分析处理后控制系统对执行元件下达相应的动作命令。感受系统通常由内部传感器模块和外部传感器模块组成:内部传感器模块用于检测机器人自身状态,外部传感器模块用于检测操作对象和作业环境。

机器人-环境交互系统是工业机器人与外部环境中的设备进行相互联系和协调的系统。在实际生产环境中,工业机器人通常与外部设备集成为一个功能单元。该系统能够帮助工业机器人与外部设备建立良好的交互渠道,共同服务于生产需求。

1.2.3 智能制造系统

智能制造系统是指将智能化技术融入人和资源形成的系统,使制造活动可以实时、动态地适应内外部需求与制造环境的变化,从而满足系统的优化目标,如高效率、低成本、节能降耗等,从而持久地为社会创造新的价值。它在制造过程中能以一种高度柔性 with 集成度不高的方式,借助计算机模拟人类专家的智能活动进行分析、推理、判断、构思和决策等,从而取代或者延伸制造环境中人的部分脑力劳动。同时,收集、存储、完善、共享、集成和发展人类专家的智能。

关于智能制造系统的关键词还有系统、人、资源、需求、环境变化、动态适应、优化目标。资源包括原材料、能源、设备、工具、数据等;需求可以是外部的(例如,社会的需求),也可以是内部的;环境包括设备工作环境、车间环境、市场环境等。

如图 1-6 所示,智能制造系统是一个相对的概念。系统可以是一个加工单元或生产线,一个车间,一个企业,一个由企业及其供应商和客户组成的企业生态系统;动态适应意味着能够对环境变化实时响应;优化目标涉及企业运营的目标,如效率、成本、节能降耗等。至于系统所需的各种手段均隐含其中。



图 1-6 智能制造系统的层次