

数字化工厂可以理解为是数字化模型、方法和工具构成的综合网络。

模型是指通过主观意识,借助实体或者虚拟表现,构成客观阐述形态结构的一种表达目的的物件。从广义上讲,如果一件事物能随着另一件事物的改变而改变,那么此事物就是另一件事物的模型。模型的作用就是表达不同概念的性质,一个概念可以使很多模型发生不同程度的改变,但只要很少模型就能表达出一个概念的性质,所以一个概念可以通过参考不同的模型,从而改变性质的表达形式。值得注意的是,当模型与事物发生联系时会产生一个具有性质的框架,此性质决定模型怎样随事物变化。这一特征对于实现工厂的生产和规划来说,有着毋庸置疑的重要意义。

根据调查的任务和目的,各个数字化工厂模型描述了要检查的项目,也就是系统的资源及它们的过程和产品。工厂的模型建造中包含建筑物、布局、基础设施、工作系统或技术系统等方面,包括特定于产品的属性、物流过程、技术过程和信息流向模型的形成。基于数字化工厂的布局设计与仿真、工艺规划、仿真优化三个功能,建立数字化工厂模型的目的在于将整个工厂的图像(厂房、设备、流程等)作为工厂规划设计的三维技术资料使用。工程师可以利用计算机在厂房规划时对设计规划方案进行修改,节约规划时间和成本,实现最优化配置。详细点说就是建立一个统一的管理原材料、设备、工厂和生产流程的IT设计平台。当工厂设计人员得到这些数据时,可以使用平台模拟实物工厂,这样就可以缩短工厂规划设计时间,提高工厂规划设计的质量,避免后期施工过程的一大部分设计问题。数字化模型的准确性关系到对实际系统真实反映的精度,对于后续的产品设计、工艺设计以及生产过程的模拟仿真具有较大的影响。因此,数字化建模技术作为数字化工厂的技术基础,其作用十分关键。要想建立数字化工厂,就必须结合数字化工厂的相关模型,从而实现数字化生产。

3.1 数字化工厂的方法

在数字化工厂中,常使用不同的建模、分析和可视化方法来执行各个模型的创建和应用。下面给出数字化工厂方法的概述,这些方法均与实际应用有关,但并不囊括所有的方法,而只是示例性地将方法用于数字化工厂规划和运营的不同任务中,并将基于模型的方法等同于该方法的模型,例如创建用于过程建模的过程模型、用于 3D 可视化方法的 3D 模型以及用于离散事件过程仿真的离散事件仿真模型等。

3.1.1 信息和数据收集方法

数字化工厂中模型和方法的特点在于尽可能全面的数字化,这就要求规划所需的所有信息都必须以数字形式提供。根据信息的类型,可以使用不同的信息和数据收集方法。例如,在现有工厂中,有必要在现有空间中安排新对象。但是,当前如果没有足够质量的数字化布局用于进一步的数字化规划,则需要进行现场分析。因此,详细规划所缺少的设备和系统元素的性能数据可能必须通过现场测量来确定。

信息和数据的收集包括手动收集、从选定的信息源提取数据或使用特殊输入设备自动收集。作为数据获取的一部分,必须为相应的规划提供充分的收集数据。例如手动记录信息以及随后在计算机上进行数据采集或集成数据采集,然后检查收集数据的准确性、可用性、一致性、合理性和完整性以及收集过程本身的准确性。

根据是为任务确定的数据还是为其他目的先前已经收集的数据,可将数据分为主要数据和次要数据。由于主要是针对此需求进行收集的,因此主要数据比次要数据更符合当前需求。

根据数据的加工程度,可以将数据分为第一手数据和第二手数据。第一手数据主要指可直接获取的数据,第二手数据主要指经过加工整理后得到的数据。

1. 第一手数据的获取

第一手数据的获取包括调查法、人工观察法和自动观察法。调查法主要用于实证研究,也可用于收集公司数据,旨在从个人或群体中找出观点、行为、流程、数据流或组织结构。调查法分为口头访谈、网络调查或书面问卷等。

人工观察法按观察者本人是否参与观察活动可分为参与观察和非参与观察。在参与观察的情况下,要收集的信息由数据主体自己在指定的时间段以书面形式确定,可以使用报告方法或 notes 程序。报告方法可采用自由书写的日报形式,也可采用指定的活动目录和日报表的形式实施。与报告方法不同,notes 程序通过流程链接到一个对象,如文件或传输项,要记录处理类型、输入、输出和处理时间以及工作人员的姓名等。

与参与观察相反,非参与观察的观察者与参与者一起记录有关过程的信息,并以此方式确定实际发生的过程。但是,必须考虑通过观察对一个人的表现可能产生的影响。非参与观察的典型方法有时间记录(使用时间测量设备记录时间)、相对简单的多时刻记录数学采样技术,以及重量、大小、长度和面积的测量和编号计算等;也包括在机器上收集与过程相关的数据,例如占用时间或故障、生产订单、库存水平和人员等。在目前的工厂中,手动数据收集通常通过分散的数据采集来完成,例如,通过移动数据采集设备、车间数据采集系

统或直接从机器控制系统获得机器数据。如果使用这些系统进行纯自动数据收集,则可称其为自动观察法。

自动观察法实际上也与人工观察法中已经提到的非参与观察法相关联。它们在数字化工厂中具有相对较高的优先级,因为它们允许在更短的时间间隔内使用在真实工厂中收集的数据,错误率更低,并且在数字化工厂模型中几乎没有介质损坏。可以通过技术系统自动收集以下数据。

(1) 简单的计数(如确定对象或事件是否存在)。

(2) 测量值(如确定离散和连续以及模拟和数字信号的测量值)。

(3) 自动识别对象,例如使用条形码或电子标签自动 ID 识别,或者基于对象的大小、位置和形状等进行识别。

通常,技术系统会根据测量类型、可测量尺寸、与被测物体的接触程度、测量原理、测量方法和要测量数据本身的表示形式而有所不同。它们基于一个或多个传感器,这些传感器连接到相应的评估电子设备,以便将测量的信号转换为数字数据。

2. 第二手数据的获取

从公司内部或外部数据库收集数据的重要方法是文档分析。要分析的文档包含公司的所有组织、技术和系统负荷数据,这些数据可以是电子或纸质形式(即光学可读)。工厂的文档包括财产和建筑物数据、技术系统数据、生产程序、零件清单、工作计划、交货单、库存清单、工资单,甚至是自动注册时间、自动测量设备的记录等。

3.1.2 表示与设计方法

表示与设计方法主要包括旨在描述和呈现实际情况的工厂规划方法,而不是定量分析。表示和设计方法有助于规划人员更清晰地理解系统。因此,表示的可理解性、清晰度和唯一性决定了它的接受程度。

表示与设计方法通常包括用于创建过程或结构模型的方法,还包括位置和基础结构描述。表示和设计方法可以纯粹是描述性的。德国工程师协会认为“描述性模型描述了要检查的物体,但是它不是可执行文件,因此不能自动进行评估,而需要人类对其进行解释”。

在数字化工厂中构建模型时,常用的方法有过程和过程建模方法、信息和数据建模方法、状态建模方法和结构或拓扑建模方法。所有的表示和设计方法也可以用作可视化方法。

此外,面向对象的表示与设计方法通常或多或少地组合了上述方法,例如软件开发以及系统分析和设计中常用的面向对象的统一建模语言(unified modeling language, UML)。这种建模语言提供了用于对系统进行建模的不同的结构和行为图,例如类结构图、序列图、状态图和活动图。

1. 过程和过程建模方法

1) 生产模型概述

过程是一个有序的活动序列,它通过可用于执行该过程的资源和人力对过程对象进行转换。面向过程的生产模型有工作计划、物料链、价值链和流程系统等。

(1) 工作计划。工作计划将任务分为多个工作流程,规定了各个流程所需的资源和时

间。工作计划与图纸和零件清单相似,是最重要的装配和生产文件之一。

(2) 物料链。物料链是物料流的抽象表示方法,物料的采购、供应、入库、出库和生产都包含在其中。

(3) 价值链。企业的价值创造是通过一系列活动构成的,这些活动可分为基本活动和辅助活动两类。基本活动包括内部后勤、生产作业、外部后勤、市场、销售、服务等,辅助活动则包括采购、技术开发、人力资源管理和企业基础设施等。这些互不相同但又相互关联的生产经营活动,构成了一个创造价值的动态过程,即价值链。价值链模型将产品在工厂或供应链中各点的价值可视化。在模型中,与产品价值无关的要素将被忽略,例如管理成本、员工培训费等不随产品量改变的固定成本将被舍去。

(4) 流程系统。流程系统由工厂各层级的功能链构成,功能链由单个流程的功能组成。流程系统描述特定流程对象的属性或状态随时间和空间所发生的变化。这些流程对象可以是物质、信息或能量。

2) 通用模型概述

面向过程的通用模型包括结构化分析与设计技术(SADT)图、流程链模型、网络计划、UML 活动图等。汉诺威大学工厂系统和物流研究所开发的漏斗模型也是一种经过实践检验的模型,用于描述工厂的订单流程。

(1) SADT 图(见图 3.1)。SADT 图用于说明和精确描述流程。每个流程都带有一个框,四个方向有若干个箭头。



图 3.1 SADT 图的基本元素

(2) 流程链模型。在流程链模型中,过程被描述为一组链接的流程,并为其分配描述以及参数。流程链模型可以像 SADT 图一样,在层次结构上细化各个流程链元素。流程链模型特别适用于流程设计任务。在流程设计任务中,需要优化子流程链的接口,并且将子流程链之间的关系反映出来。在流程设计过程中对结构元素的更改,将会对上下游其他结构元素产生直接或间接的影响。

(3) 网络计划。网络计划由类似于 SADT 图的链接活动组成。可以根据活动最早和最晚开始时间及工作量来对活动之间的依赖关系进行参数化。与 SADT 图相反,该计划中仅记录了少量的信息。

(4) UML 活动图。UML 是一种建模语言。活动图本质上是一种流程图,用于描述活动的序列,即系统从一个活动到另一个活动的控制流。UML 提供了活动图的建模方法。该图适合表示状态及其关系的影响

用于过程和过程建模的方法或多或少地支持行为、过程和功能详细建模,并可能带有有关过程输入和输出变量的附加信息。它们用于业务流程建模、进出货物之间的物流以及跨地点和公司边界(供应链)的价值流。

2. 信息和数据建模方法

信息和数据建模的表示和设计方法可以映射数据和信息流、数据结构以及信息对象及其相互之间的关系。这些方法,尤其是数据流程图或实体关系模型(E-R 模型),创建了静态信息关系的清晰描述,后者主要用于数据库设计并使数据库可以独立于特定数据库系统进

行设计。对于建模,它们使用对象(实体)以及它们之间的关系进行建模,采用带有节点和边的图形(E-R图)。

E-R图中有四个成分:矩形框表示实体,在框中记入实体名;菱形框表示联系,在框中记入联系名;圆角矩形框表示实体或联系的属性,将属性名记入框中;对于主属性名,则在其名称下画一下画线。实体与属性之间、实体与联系之间、联系与属性之间用直线相连,并在直线上标注联系的类型。

图 3.2 就是从数据库系统中摘录的产品零件清单的 E-R 图示例,该系统用于存储产品系列的零件清单。这种数据模型典型地用在信息系统设计的第一阶段,如可在需求分析阶段用来描述信息需求和/或要存储在数据库中的信息的类型。

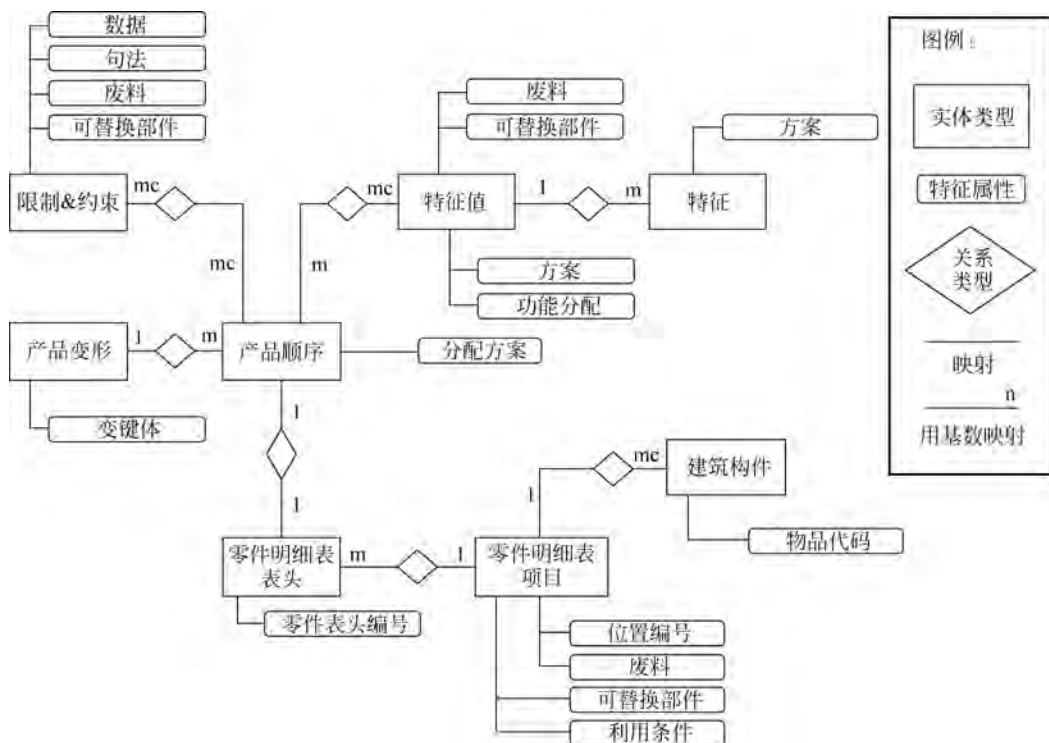


图 3.2 描述规划数据的 E-R 数据模型示例

上述用于信息和数据建模的方法常在数字化工厂中使用,例如使用这些方法以数据模型的形式指定产品、过程和资源以及它们之间的关系,尤其是用于数据库规划的建模。

3. 状态建模方法

状态建模的设计方法包括状态机和 Petri 网法。通过状态建模和状态转换,它们可以描述并发和同步过程。由于它们可用于表示子流程之间的因果关系,因此还可用于对控制规则进行建模。

Petri 网的结构元素包括库所(place)、变迁(translation)和有向弧(arc)。库所使用圆来标识,用于描述可能的系统局部状态;变迁使用矩形标识,用于描述修改系统状态的事件;有向弧可以从库所节点指向变迁节点,或者从变迁节点指向库所节点。有向弧描述的库所

和变迁之间的联系等价于自动机中的状态转移函数,表示使事件发生的局部状态(因)或事件发生所引起的局部状态的变化(果)。

4. 结构或拓扑建模方法

结构或拓扑建模法可以支持产品结构的映射或产品组的分配以及生产系统结构的描述等。通过这种方式,可以描述组件之间的空间或逻辑分配。Gudehus 在物流系统空间结构的抽象表示中采用物流结构图,将系统结构与运营和行政服务中心和区域以及物料和信息流进行映射。

物料和信息流、库存和缓冲的吞吐量也可以采用结构图。此外,组织结构图、施工图、建筑图甚至布局图中都可采用结构建模的表示和设计方法,它们在拓扑结构上与原始系统相似。在软件开发中,结构图或 N-S 图用于描述结构化程序的手段,并可减少结构错误。

3.1.3 数学规划与分析方法

与表示和设计方法相反,数学规划和分析方法的主要目的是制定可量化的关系,采用数学函数和计算规则来获得相关关系和结果的模型。

本节中考虑的规划和分析方法以数学优化中使用的数学方法类型为基础,未给出所有已知数学方法的完整细分和描述,也未给出用于计算物流或生产物流关键指标或确定设备尺寸的特定数学方法,仅从实践的角度简要说明了一些重要的方法,及其典型的应用领域。

1. 数学优化方法

优化模型由许多解决方案和一个或多个要最大化或最小化的目标函数组成。数学优化方法用分析模型描述问题并对其进行定量分析。优化方法可以基于目标函数的数量(单准则或多准则)、目标函数和限制函数的线性(线性或非线性)、变量((混合)整数或(混合)二进制值的范围),并根据基础数据的随机性(确定性或随机性)来确定。

在最简单的情况下,存在确定性的单准则线性优化模型,且目标函数 $F(x)$ 和所有用于描述限制的函数 $g(x)$ 都是线性函数,变量的取值范围只能假设非负实数值。毫无疑问,可以根据制定的目标功能确定所需的解决方案。例如,由 Dantzig 开发的单纯形法用于解决线性优化或线性规划的任务。

生产和物流中的许多决策问题本质上是组合优化问题。组合优化问题是通过用数学方法的研究去寻找离散事件的最优编排、分组、次序或筛选等,其变量是离散分布的。对于结构化的组合优化问题,其解空间的规模能够得到控制,对于这样的问题,使用精确算法就可以求得最优解。而当问题的规模逐渐扩大时,求解这些问题最优解需要的计算量与存储空间的增长速度非常快,会带来所谓的“组合爆炸”,使得在现有的计算能力下,通过各种枚举方法、精确算法寻找并获得最优解几乎变得不可能。这时候,启发式算法应运而生。下面简单介绍一下精确算法、启发式算法、元启发式算法和近似算法。

(1) 精确算法。精确算法指能够求出问题最优解的算法。对于难解的组合优化问题,当问题的规模较小时,精确算法能够在可接受的时间内找到最优解;当问题的规模较大时,精确算法一方面可以提供问题的可行解,另一方面可以为启发式方法提供初始解,以便能搜索到更好的解。精确算法主要包括分支定界法、割平面法、动态规划法等。

(2) 启发式算法。启发式算法指通过对过去经验的归纳推理以及实验分析来解决问题

的方法,即借助于某种直观判断或试探的方法,以求得问题的次优解或以一定的概率求其最优解。通用性、稳定性以及较快的收敛性是衡量启发式算法性能的主要标准。启发式算法可分为传统启发式算法和元启发式算法。传统启发式算法包括构造型方法、局部搜索算法、松弛方法、解空间缩减算法等。

(3) 元启发式算法。元启发式算法是启发式算法的改进,是随机算法与局部搜索算法相结合的产物。元启发式是一个迭代生成过程,通过对不同概念的智能组合,该过程以启发式算法实现对搜索空间的探索 and 开发。在这个过程中,学习策略被用来获取和掌握信息,以有效地发现近似最优解。元启发式算法包括禁忌搜索算法、模拟退火算法、遗传算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法、人工鱼群算法、人工蜂群算法、人工神经网络算法等。

(4) 近似算法。近似算法没有严格的定义,一般来说能求出可行解的算法都能归为近似算法。常见的近似算法有贪婪算法、局部搜索算法、松弛算法、动态规划法等。

根据优化目标的不同优化问题可分为单目标优化和多目标优化。单目标优化的情况下,只有一个目标,任何两个解都可以依据单一目标比较其好坏,可以得出没有争议的最优解;多目标优化与单目标优化相对,同时存在多个最大化或是最小化的目标函数,并且,这些目标函数并不是相互独立的,也不是相互和谐融洽的,它们之间会存在或多或少的冲突,使得不能同时满足所有的目标函数。由于容易存在目标间的内在冲突,一个目标的优化是以其他目标劣化为代价的,因此很难出现唯一最优解,取而代之的是在它们中间做出协调和折中处理,使总体的目标尽可能地达到最优。

随机优化问题指考虑的问题中带有随机因素影响并且不可忽略,需要利用概率统计、随机过程以及随机分析等工具。处理随机因素的第一种方法是期望值方法,将随机的因素用它的期望值代替,将问题转化为确定性问题考虑。第二种方法是在概率意义下考虑优化问题。例如在置信区间范围内考虑优化问题,将问题转换为概率约束或者是机会约束的优化问题;又如考虑极大化某些事件的概率问题,也称为相关机会约束问题。第二种方法相对于第一种方法的优点是考虑到各种风险的影响,缺点是使问题的处理变得相对困难。

现实世界中的许多优化问题都表现出动态性质,即待求解的问题或优化的目标会随时间而发生变化,例如在工作调度问题中,新的任务不断到达,需要立即加入到当前调度中。动态优化的基本思想是将优化问题引入时间过程,从而将其解释为寻求最佳策略的 n 阶段过程。这些可参考运筹学的相关文献。

2. 图论方法

图论是数学的一个分支,它以图为研究对象。图论中的图是由若干给定的点及连接两点的线所构成的图形。这种图形通常用来描述某些事物之间的某种特定关系,用点代表事物,用连接两点的线表示相应两个事物间具有这种关系。

图论描述了关于加权有向图和无向图的情况,因此可以解决组合问题。网络图可用于生产和物流计划中的一种图形理论方法,可以系统地表示和分析复杂的过程序列。网络计划技术描述了一种基于图论的过程分析、描述、计划、控制和监视过程,是指以网络图为基础的计划模型,其最基本的优点就是能直观地反映工作项目之间的相互关系,使一项计划构成一个系统的整体,为实现计划的定量分析奠定了基础。同时,它运用数学最优化原理,揭示整个计划的关键工作,并巧妙地安排计划中的各项工作,从而使计划管理人员依照执

行的情况信息,有科学根据地对未来做出预测,使计划自始至终在人们的监督和控制之中,使用尽可能短的工期、尽可能少的资源、尽可能好的流程、尽可能低的成本来完成所控制的项目。

3. 统计和随机方法

统计方法指用以收集数据、分析数据并由数据得出结论的一系列方法,常见的有描述性统计方法、探索性统计方法和推断统计方法。描述性统计方法是指通过图表的方式对数据进行处理显示,进而对数据进行定量的综合概括的统计方法。描述性统计信息可用于描述和显示一维或多维数据,例如条形图、柱形图、条形图或饼图。简单的探索性统计方法可用箱形图等来表示,以表征统计数据的中位数、分布和极值(最小值,最大值)。算术平均值或数据分布等也是简单的探索性统计方法。探索性统计通常使用可以确定大数据中的关系的方法,包括相关性分析、回归分析或数据转换等,以表示数据的规律性。

生产和物流领域中常使用 ABC 分析法、XYZ 分析法和 PQ 分析法等。ABC 分析法可分析物品的存储区域,针对特定功能对系统中的商品进行分析和分类。首先根据特征值(如年消耗量)的总和,进行基于值的排序和总值中所占百分比的计算;然后将各个特征的累积比例分为三类,A 为高相关性,B 为正常至中等相关性,C 为低相关性;通常,少量的元素具有较高的相关性,而大量的元素具有较低的相关性,从而可对其进行分类管理。ABC 分析法要分析的特征可以是成本、销售、消耗、价格或商品储存和存取的次数等。除了 ABC 分析之外,还可以用 XYZ 分析法对诸如消费结构或需求动态等定性特征进行分类。XYZ 分析法利用数据波动情况从而分辨出不同货物特征;同时针对不同特征,因地制宜,选择最适合的方法来指定合适的管理政策,包括诸如库存、预测等。PQ 分析法即产品数量分析,是一个简单有效的工具。它可以用来对生产的产品按照数量进行分类,然后根据分类结果对生产车间进行布局优化。

与描述性和探索性统计方法相反,推断统计方法是根据样本数据来推断总体数据特征的统计方法。如要对产品的质量进行检验,通过抽取部分个体(即样本)进行测量,然后根据获得的样本数据对所研究的总体特征进行推断。推断统计方法包括总体参数估计和假设检验。当研究中从样本获得一组数据后,如何通过这组信息对总体特征进行估计,也就是如何从局部结果推论总体的情况,称为总体参数估计。

总体参数估计可分为点估计和区间估计。点估计是用样本统计量来估计总体参数,因为样本统计量为数轴上某一点值,估计的结果也以一个点的数值表示。因为这种估计是单个的数值,存在误差,而且对误差也不能准确地计算。另外,点估计无法指出对总体参数给予正确估计的概率有多大。所以,这种点估计只能作为一种不精确的估计,更好的办法是对总体参数进行区间估计。区间估计是根据样本统计量,利用抽样分布的原理,用概率表示总体参数可能落在某数值区间之内的推算方法。区间估计的种类有很多,主要有总体平均值的区间估计、总体百分数的区间估计、标准差和方差的区间估计、相关系数的区间估计。

假设检验是统计学中一种较为严密的批判性思维,指根据样本统计量得出的差异作出一般性结论,判断总体参数之间是否存在差异的推论过程。假设检验分为参数检验和非参数检验。若进行假设检验时总体的分布形式已知,需要对总体的位置参数进行假设检验,

称其为参数假设检验。若对总体分布形式所知甚少,需要对未知分布函数的形式及其他特征进行假设检验,通常称之为非参数假设检验。因此,推断统计分析统计数据和检验统计假设,并通过概率计算来处理随机事件的定律。推断统计方法包括统计估计方法,用于从样本值中推断关联种群的特征值(度量),从而通过适当的频率分布来描述可用的数据材料。例如,估计方法用于确定全球人员需求。如果要为仿真确定原始数据并为确定仿真模型的分布准备原始数据,则也存在类似情况。统计测试程序的目的是检查现有偏差是否具有随机性,以及可以将其归因于什么。在测试方法中,始终将两个样本的测量值或一个样本的测量值与已知种群的大小进行比较。 χ^2 检验是此处常用的统计检验。

随机过程理论在自动控制、管理科学等方面广泛的应用。随机过程是一连串随机事件动态关系的定量描述。数学上的随机过程可以简单地定义为一组随机变量,即指定参数集。例如,灯泡的寿命是随机函数,具体取决于工作时间以及可能的其他工作条件。统计学研究不确定性事件(即随机事件)在理论上出现的可能性。马尔可夫过程是一类重要的随机过程,特点是仅从当前过程状态获得有关未来过程的知识,即未来只与现在有关,与过去无关。它的原始模型马尔可夫链,由俄国数学家马尔可夫于1907年提出,是研究离散事件动态系统状态空间的重要方法,它的数学基础是随机过程理论。人们在实际中常遇到具有下述特性的随机过程:在已知它所处状态的条件下,它未来的演变不依赖于它以往的演变。这种在已知“现在”的条件下,“将来”与“过去”独立的特性称为马尔可夫性,具有这种性质的随机过程叫作马尔可夫过程。

4. 定量评价方法

解决方案的评估和选择取决于所考虑的对象,可以是系统、计划,也可以是工具、报价或提供者等,应尽可能采用可比较的定量评价。定量评价方法是通过数学计算得出评价结论的方法,是指按照数量分析方法,从客观量化角度对科学数据资源进行的优选与评价。定量方法为人们提供了一个系统和客观的数量分析方法,结果更加直观和具体。

效用分析是一种常用的方法,它主要用于存在多维目标,而且并非所有决策结果都可以通过货币量化的情况下。根据 Zangermeister 的定义,效用价值分析试图分析许多复杂的替代行动方案,以便根据决策者的偏好对其进行排序。在一般的决策问题中,决策者对方案的选择通常是比较不同方案的期望货币收益值的大小,然后选择其中的较大者为最佳方案。但在许多场合,情况并不是这样,最佳方案的选择往往因决策者的价值判断而异。因为对于同等收益,在不同风险的情况下,决策可能不同;在同等风险的情况下,不同的人对待风险的态度也不同,其决策也将不同。

但效用价值分析的应用存在的问题在于,对目标标准权重的主观评估和对部分收益的确定,因此只是所谓的客观评估。此方法的使用在于更易于理解和验证的决策过程。首先基于决策团队要对评估的目标确定标准,对每个标准进行加权;对每个单独标准相对于其他目标标准的重要性(每个标准的相对重要性)进行主观评估,然后根据实现程度对解决方案变体的目标标准进行分级;基于此评级,通过将评级乘以目标标准的权重和每个解决方案变体的总效用值,再乘以评级标记乘以权重来确定部分收益。由于等级和权重的微小变化通常会导致解决方案变体的排名发生变化,因此建议对最重要的评估标准的等级和权重的变化进行总体效用值的最终敏感性分析。

各种技术方案的经济效益进行计算、分析和评价,包括投资、运营成本或服务成本以及资本回报或投资的摊销期等,可参阅工程经济学的相关文献。

3.1.4 仿真方法

仿真(或模拟)的字面含义是对真实事物进行模仿,泛指以实验或训练为目的,用原本的系统、事务或流程建立一个模型,将其予以系统化与公式化,以便对其关键特征或行为/功能做出模拟。

仿真方法的一个突出优点是能够解决用解析方法难以解决的十分复杂的问题。如有些问题不仅难以求解,甚至难以建立数学模型,当然也就无法得到分析解。仿真可以用于动态过程,可以通过反复实验求优。与实体实验相比,仿真的费用是比较低的,而且可以在较短的时间内得到结果。

仿真的主要特征是时间建模,映射随机事件的可能性,通过系统结构和参数变化进行模型的实验性以及结果的可重复性。

本书在连续的、时间控制的、事件离散的仿真之间进行区分,以便映射时间行为并更新仿真模型中的时间。在连续系统仿真的情况下,时间和状态变量可以通过连续函数来描述。在离散时间模型仿真中,在每个仿真步骤中,仿真时间都会增加固定值 Δt 。在事件离散仿真中,状态变化仅在离散时间发生,具体取决于事件的发生。

由于连续系统和离散事件系统的数学模型有很大差别,所以仿真方法可分为连续系统仿真、离散时间仿真、离散事件仿真三大类。

1. 连续系统仿真

过程控制系统、调速系统、随动系统等系统称作连续系统,它们的共同之处是系统状态变化在时间上是连续的,可以用方程式(常微分方程、偏微分方程、差分方程)描述系统模型。

满足以下条件的系统,称为连续系统。

- (1) 系统输出连续变化,变化的时间间隔为无穷小量。
- (2) 存在系统输入或输出的微分项。
- (3) 系统具有连续状态。

根据动态系统要检测的各个属性和各个任务的不同,要采用的建模方法也会有所不同,根据建模的类型,可将其分为有限元模型、多体模型、人体工程学模型和连续系统模型。

连续系统仿真是对连续系统进行仿真试验的方法,有限元法、多体建模、人体工程学仿真都属于连续系统仿真。

1) 有限元法

有限元法在实际应用中也往往被称为有限元分析,是利用数学近似的方法对真实物理系统(几何和载荷工况)进行模拟。它利用简单而又相互作用的元素(即单元),用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统,其基本思想是把连续的几何机构离散成有限个单元,并在每一个单元中设定有限个节点,从而将连续体看作仅在节点处相连接的一组单元的集合体;同时选定场函数的节点值作为基本未知量,并在每一单元中假设一个近似插值函数,以表示单元中场函数的分布规律;再建立用于求解节点未知量的有限元方程组,从而将一个连续域中的无限自由度问题转化为离散域中的有限自由度问题。

在应用有限元法的领域中,有关载荷下强度和变形的组件检查起着重要作用。

例如,图 3.3 是对渐开线直齿轮接触动态特性的有限元分析的网格划分方法,两种网格划分方法分别为自由网格划分和映射网格划分。自由网格划分对实体模型无特殊要求。任何几何模型,无论形状是否规则都可以进行自由网格划分,如四边形、三角形和四面体单元都支持自由网格划分。与自由网格划分相比,映射网格对所包含的单元形状有限制,而且必须满足特定的规则。映射面网格只包含四边形或三角形单元,而映射体网格只包含六面体单元。如果要得到映射网格,则必须将模型生成具有一系列相当规则的体或面才能进行映射网格划分。

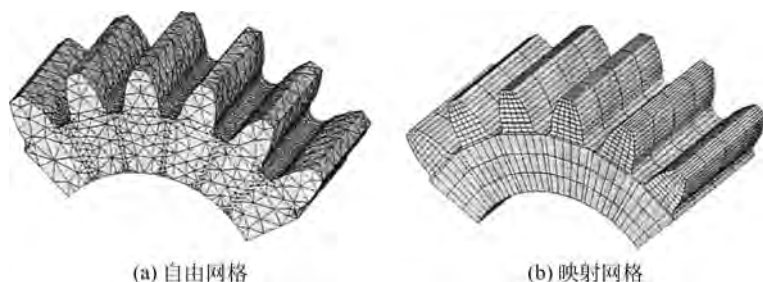


图 3.3 渐开线直齿轮接触动态特性的有限元分析的网格划分

有限元法也可以用于高速切削加工的模拟。在金属切削加工过程中,我们应当掌握金属切削过程的变化规律,用来指导实际生产。金属切削过程中切屑的变形规律和切削力的研究属于金属切削加工的基础理论研究范畴,对于金属切削加工技术的发展起到很大的促进作用。有限元法由于具有很多试验方法无法比拟的优势,在研究金属切削过程中获得了广泛应用,并获取了试验难以得到的重要数据。

有限元方法也可以用于冲压成型的模拟。板料成形过程是一个复杂应力应变状态下的随性流动过程,这个大挠度、大变形过程的板料冲压成形过程中可能产生拉裂、起皱和回弹等成形缺陷。由于板料冲压成形过程本质上是一个多体接触的动态力学的分析问题,这类问题一般都是非常复杂的,因此在实际成形过程中,要想合理预测出板料的冲压成形性能,仅仅凭借经验是很难做到的。因此,冲模的制造和模板试模的成本就被大大地提高了。更有甚者,如果工艺判断失误,还有可能导致模具的报废。将先进的计算机模拟技术对冲压零件成形过程的数值模拟技术应用到当前板料冲压成形生产过程中,可以充分认识实际冲压零件的成形过程,在冲压过程中存在的问题可以被及时发现,从而可以改进模具设计,这样就可以大大缩短调试模具的周期并且可以很大程度上降低制模成本。

以上介绍的案例是有限元法在数字化工厂的一部分应用场景,主要是对生产过程中的场景进行的模拟,尤其是实验成本高或技术不成熟的场景。不过有限元法也并不能做到完美地模拟实际生产过程中的每个细节,只能为实际的生产提供参考。

2) 多体建模

了解多体建模之前,我们先来了解多体系统动力学。多体系统动力学是研究多体系统(一般由若干个柔性和刚性物体相互连接所组成)运动规律的科学。多体系统动力学包括多刚体系统动力学和多柔体系统动力学。多体系统动力学分析涵盖建模和求解两个阶段,其中建模包括从几何模型形成物理模型的物理建模、由物理模型形成数学模型的数学建模

两个过程,求解阶段需要根据求解类型(运动学/动力学、静平衡、特征值分析等)选择相应的求解器进行数值运算和求解。

多体动力学建模软件通过自动构造微分方程来描述多体系统的运动,并对其进行数值求解,从而对运动和相互作用力进行预测。多体动力学的建模结果包括实体的位置、速度、加速度及链接等约束条件,以及在定义位置上的反作用力和摩擦力等,此外还包含对系统施加的外力及接触力等。通过建模,可计算系统的动态行为或系统内部各件部分的受力情况并根据结果进行设计。可将建模结果作为输入数据来进行结构分析或耐久分析等。通过多体柔性动力学模型的分析,也可以对柔性体的变形及应力和变形率进行确认,从而使其灵活运用于其他多种形态。

利用多体动力学建模技术,即使不制造实际的机械系统,也能制造出设想的模型并进行模拟试验,这样可以大大节省产品设计及开发工程所需的费用和时间。实际上多体动力学建模可以广泛地应用于已知的各大领域里的机械系统问题,像航空宇宙、产业机械、建筑机械、电气电动机械、国防产业、汽车领域的震动分析、需要精密控制的机器人等机械系统仿真、引擎内润滑油或洗衣机内流体的机械系统相互作用力分析等。

3) 人体工程学仿真

运动学仿真的一种特殊形式是使用移动人的模型进行仿真,以进行人体工程学检查。它可以在设计早期对产品的人机因素进行分析和评价,利用计算机建立人体和机器的计算模型,融入人体生理特征,模拟人操作机器的各种动作,进而将人机相互作用的动态过程可视化,通过结合人机工程学的各种评价标准和算法,对产品(机)的人机因素进行量化分析和评价。这一方面可以大大降低产品开发的成本,为产品创新提供强有力的支持;另一方面可以大大降低一些危险性产品的测试风险。

数字化的人体模型是在计算机中以图形化方式生成并显示的具有真人生理特征的人体模型,它能够在虚拟世界里完成特定任务。面向计算机辅助人机工程的人体建模需要以人体测量尺寸作为参考来建立人体的几何模型和骨架模型,以运动模型作为姿态与行为动作实现的基础。人体各个部位的测量尺寸确定了个体之间和群体之间的人体尺寸差别,用来研究人的形态,是工业产品造型设计和人机环境系统工程设计的基础。它包括结构尺寸和动态尺寸两方面,决定了人体占据的几何空间和活动范围。我们可以参考查阅国家标准 GB/T 10000—1988《中国成年人人体尺寸》和 GB/T 13547—1992《工作空间人体尺寸》中给出的人体静态测量尺寸来确定所需人体模型的尺寸。《中国成年人人体尺寸》中列出了 7 个百分位,涵盖了人体的主要尺寸、水平尺寸、头部、手部、足部、坐姿和立姿共 47 项人体尺寸数据;《工作空间人体尺寸》中给出了站姿、坐姿、跪姿、爬姿、俯卧姿等人体相关尺寸项目。

现如今,装配线的自动化仍然是离散型产品生产中最困难的工作之一,因为大多数装配操作是按照人工装配操作来设计的,人体复杂的传感系统能够很容易协调双臂工作。但在某些场合下要想机械手实现同样的功能投入很大,甚至有些目前无法实现。无论是加工单元、装配单元,还是其他辅助单元,都会或多或少涉及人工操作,特别是自动化水平较低的装配流水线,这也是为什么我们仍需要人机工程学仿真,即人体仿真这一技术。

人体工程学仿真主要验证人体在特定工作环境中的行为表现是否同时满足人体工程

学的要求和生产的需求：一方面，基于满足人们的价值需求来改进工作方法，以减少作业的工作量，提高作业的安全与舒适程度，减少工伤或累积损伤疾病的发生，增加工人对工作的满意度；另一方面，通过作业调研与测定方法衡量完成某项或者一系列操作需要的时间，找出无效时间并区分有效时间及其性质和数量，用于制定工人完成一项任务的标准时间。

人体工程学仿真的最终目的是使人、机、物、时间、空间、环境等得到有效的控制和充分利用，从而保证工作质量，使整个系统处于受控状态，以降低消耗，提高产品质量和生产效率，扩大企业的经济效益和竞争力。一般来说，人体工程学仿真会涉及以下几方面的研究内容：更改作业流程；改进工厂与工位的设备布局；简化操作；有效结合材料、机器设备和人力；创造良好的工作环境等。

在进行产品设计、作业空间设计时，可以基于系统的人体模型数据库，设定具有不同参数及属性的人体的站姿、坐姿等各种姿态，并进行视野分析、可达性（可触及范围）研究、工作范围定义等；在进行作业分析、动作分析等时，使用系统提供的高级运动命令来控制人体的动作行为，并进行诸如工作姿态、单手提举物体、双手抓取的疲劳程度等人体工程评价。另外，可以基于 MTM 工时标准快速分析动作所需时间。以上均为决策人员对布局和作业进行改进时提供定性与定量的科学依据，而不是仅仅依靠主观臆断。

2. 离散时间仿真

与连续时间仿真相反，时间控制的仿真假定在每个仿真步骤中模拟时间都增加了“预定的恒定时间增量 Δt ”。时间增量的持续时间对性能以及仿真的正确性和准确性非常重要。 Δt 太小会降低性能，从而增加计算时间。 Δt 过大会导致精度损失和误差。如果 Δt 很小，则可以说是准连续模拟。

当观察对象的个别事件不可行并且由于要在不连续的时间间隔内考虑要改变的状态而不必进行连续模拟时，可应用离散时间仿真。

离散时间仿真的典型例子是经济问题或后勤物资和能源流，通常与离散的生产设施结合使用。例如，Junge 研究了通过将事件离散的物流模拟与热建筑模拟相结合来考虑机器的物料和能量流模拟，从而研究了节能生产过程。

3. 离散事件仿真

离散事件仿真是根据事件在离散的时间点上变化的规律，来预测系统变化的方法。在一个离散的系统中，总是能够找到一个时间点来标注系统的变化，比如研究对象进入系统和离开系统的时间点，进入队列和离开队列的时间点，开始加工和完成加工的时间点等。这些时间点的时间轴上是离散而非连续的，而系统状态仅在离散的时间点上发生变化。

离散事件仿真与连续系统仿真的不同之处在于时间进度是通过触发状态变化的原子事件进行映射的。在事件列表中使用时间戳管理要处理的事件，根据列表中第一个事件的时间戳设置仿真时间，然后处理事件。这样，可以很好地映射具有离散运动对象的系统，例如物流或生产系统。

根据所考虑对象的级别和复杂性，仿真模型的详细程度会发生变化。离散事件系统仿真广泛用于生产调度、资源利用、计算机网络系统的分析和设计等方面。

3.1.5 可视化方法

数据和事实的可视化是知识转移和人际交流的重要前提,它已渗透到所有科学学科以及日常生活。可视化可以手动生成或计算机生成,包括简单的线条图、商业图形以及完全计算机动画的三维视频。

可视化包括通过将数据转换为符号和几何信息来创建数据和事实的图形说明,它不一定必须基于计算机。可视化是所有形式的数据可视化图示的总称,包括静态图形模型以及二维或三维动画的显示。可以使用的可视化方法在尺寸、表示方式、表示形式、图形表示(缩放和投影)、时间表示和交互方式上有所不同。

可视化方法的选择应考虑到表现力(正确再现数据中包含的信息)、有效性(选择合适的方法,以使观看者可以直观理解的方式传达信息)和适当性(查看者在创建和解释可视化信息时付出与收益之间的关系)。

使用可视化方法一般取决于选择因素,例如数据的类型和结构、处理目标(可视化的目标)、查看者和工作人员的知识以及视觉感知技能以及所用资源的属性(例如硬件和软件)等。德国工程师协会对其解释如下:“必须权衡所提到的因素,以实现高质量的可视化。选择因素,例如表现力、有效性和适当性,并非彼此独立。表现力差或不足的可视化很难有效。美学方面显著影响观看者的动机,因此间接影响可视化的有效性。此外,可能必须遵守目标人群的公司设计法规或文化差异。迄今为止,这些复杂的事实和场景只能部分可视化,并且通常无法使用特定的简单规则来描述。”实际应用时,应注意选择合适的可视化方法,三维、高分辨率动画模型对于广告有效,但通常无法提供有关工厂关键人物的任何信息。

下面简要介绍了静态和动态可视化方法。“静态”和“动态”是指表示形式的变化(单个图像对运动图像)或空间、时间的变化。

1. 静态可视化

经典的静态可视化方法(二维或三维)的特征是空间和时间都没有变化,如简单的图像模型(例如图像、部分或全部示意图)、显示模型(例如直方图、条形图和饼图)、显示图(例如图表和网络)和流体图(例如电路图、流程图)等。由于它们可以使用语法和语义进行表达,因此静态图形模型只能处理静态问题、简单的时间依赖性(例如程序流程图)或逻辑和时间相关的相互关系流程链(例如 SADT 图或事件驱动的关系)。除了经典的静态可视化(其中空间和时间参数不发生任何更改)之外,时间图还可以表示状态随时间的变化,包括折线图或甘特图。

由于计算机图形学的发展,如今的静态模型不再只是二维设计,而是在部分真实感的表示中阐明了空间条件。

2. 动态可视化

动态可视化基于可变显示,例如对空间和时间的参数值进行了修改。动画是运动序列随时间的二维或三维表示,要显示的信息可以通过符号、图标或逼真的图像来说明。根据可视化空间本身的需要,动态可视化经历了从时间或逻辑关系可视化(监视)到简单的二维模型布局(2D 动画)再到三维模型(3D 动画)的发展历程。将三维空间中的几何对象建模添加到时间行为的定义中也称为 4D 建模。

1) 监视

监视方法用于规划以及工厂运营,也用于软件技术系统的关键指标或状态的可视化。监视一词来自计算机和操作系统评估领域,是指借助计量方法收集有关程序执行信息的过程,其目标是监视具有相应过程的计算机或工厂的运行,并深入了解其动态内部过程。

根据应用领域和规划的视觉描述,可选择不同的图形表示来说明过程行为,包括与时间有关的图表,例如时间序列、可视化的模拟显示(例如液位指示器或温度计)或简单的符号和文本。在这种情况下,可视化的一种典型形式是甘特图,如用于检查机器人的运动或显示订单处理中的资源使用情况。

2) 2D 和 3D 动画

动画用作数字化工厂的一部分,以说明工厂初始静态模型内的动态变化。“动画描述了图像序列的创建和呈现,其中变化需要视觉效果。在视觉效果下,位置随时间变化,物体的形状、颜色、透明度、结构和图案的变化,可以理解照明的变化以及相机位置、方向和焦距的变化。”根据此定义,计算机动画“通过使用计算机和适当程序合成运动和动画图像的技术来达成协议”。动画本身可以在平面中二维地进行,也可以在空间中三维地完成。

在仿真中使用动画,一方面涉及知识的获取(改善系统的理解、检测模型错误以及支持系统关系分析),另一方面涉及知识的转移(改善项目团队中的沟通、培训人员和通过明确说明增加接受度),具体取决于用于仿真工具的动画组件的实现。仿真和动画模型可以相同,也可以不同。动画本身可以实现与仿真同时发生的模拟并发动画(也称为并行或在线动画)和模拟后动画(也可以是回放动画),后者晚于实际的模拟运行。

3.1.6 其他方法

1. 集成

集成有聚合而成的意思,也指集约度很高的生产工艺、生产设备及产品。集成对于新时代的制造业尤为重要。一方面,从各国的工业战略来看,先是德国工业 4.0 强调三大集成(横向集成、纵向集成和端到端集成)(详见本书 1.2.1 节所述),随后美国工业互联网、我国智能制造战略等亦明确强调集成的重要性。例如在我国的《国家智能制造标准体系建设指南(2018 年版)》中,“集成”一词出现频次高达 88 次,并且该指南指出智能制造的关键是实现贯穿企业设备层、单元层、车间层、工厂层、协同层不同层面的纵向集成,跨资源要素、互联互通、融合共享、系统集成和新兴业态不同级别的横向集成,以及覆盖设计、生产、物流、销售、服务的端到端集成,由此可见集成对于实现智能制造的重要性。另一方面,数字化工厂的本质是集成,其内涵亦强调模型、方法、数据网络的集成。因此,对于工业企业的数字化工厂实践来说,必然要理解、学习掌握数字化工厂的集成方法。

关于数字化工厂的集成方法,学术界进行了较多的研究。Durakbasa 等提出利用数字化工厂的智能网络开发出制造业智能集成系统的策略方法,并以此来促进生产的高效增长; Dobrin 等提出了一个基于协同环境的集成平台,可以改进设计和原型的制作活动,从而使得位于不同地理区域的研究人员可以通过共享资源和研究成果来改进产品; Cheng 等基于数字孪生概念和制造服务理论,提出了工厂信息物理集成的系统框架,以互连的物理元素、虚拟模型、数据和服务的集成来有效促进工厂的智能生产; Aleksandrov 等为了实现资产管理的数字化、便捷化,提出了利用基于通用技能(企业积累的知识经验、技术等)的抽

象,将高层次的管理系统与中小型制造企业的生产执行系统进行垂直集成,形成基于技能的资产管理系统。综上所述,已有研究基于不同的阶段性目的,结合现实需求,提出了不同的数字化工厂集成方法,最终都可以为企业带来一定的好处。

综合来看,工业企业在进行数字化工厂实践的过程中,没有固定的集成方法。企业应将数字化工厂理论知识及方法与企业的实际状况和现实需求结合起来,开发出适合自己的集成方法,以数字化工厂的集成方法为企业带来效益。

2. 协作

数字化工厂需要规划或研究对象(系统知识)的数字表示。采用基于计算机的访问实现协作或电子协作甚至虚拟协作是一个基于 IT 的网络工程,其中包含从产品创建到生产计划再到工厂运营的所有任务和信息。

从最广泛的意义上讲,电子协作涵盖了所有形式的基于计算机的同步或异步协作,包括系统地联合处理,涉及至少两个参与者(可能在时间和/或空间上分离)使用和分发电子文档。

虚拟协作工程是指产品开发、生产计划和运营中工程的任务和流程,通过虚拟工作环境和工程平台来支持整个公司中的分散团队。

为了实施电子协作和虚拟协作工程,必须安装端到端的协作工作流程,以便使用适当的方法为参与工作流程的参与者提供正确的信息。

根据协作的目的和强度、所涉及的参与者之间的(业务)流程处理的不同,将由不同的方法和工具来支持。沟通作为最弱的合作形式,本质上与所涉及行为者之间的信息交换有关,而协作则旨在共享资源。例如,基于云提供商的请求,保留、使用和释放 IT 资源(例如服务器或软件应用程序),从而在云计算中创建现代 IT 合作解决方案。合作是最强有力的协作形式,意味着参与的行为者追求将要实现的目标。协作的范围取决于协作过程的范围、目标的共性以及组合之间的三角形的时间和空间接近度。

根据合作的程度,沟通、协调与合作可以使用各种支持功能,分为简单的通信手段、公共信息空间与知识管理、工作流管理和工作组计算。

1) 通信手段

通信手段主要服务于数据和信息的传输。传统通信手段,如信件、杂志;电视或电话等,支持伙伴(一个或多个发射者和一个或多个接收者)之间的通信。IT 技术补充甚至取代了部分传统通信技术,如电子邮件、聊天、互联网或语音和视频会议之类的交流手段。电子邮件支持在不同时间、在两个或多个参与者之间进行异步信息交换,视频会议则用于在分散位置工作的合作伙伴实时交换信息。基于 IT 的通信方式支持业务流程的无缝处理。当然为了完整起见,除了技术上的交流手段外,还存在自然的交流手段,例如语言、手语或姿势等非语言的交流手段。

2) 公共信息空间与知识管理

合作过程的基础是针对性的数据、信息和知识的交换和处理。公共信息空间可以为项目团队定义和管理信息对象,并允许它们一起使用。

社交媒体可在互联网用户之间交换思想、图像、数据和软件等内容,包括论坛、博客、Wiki、社交网络或信息门户。现代 Web 服务也包含在 Web 2.0 中,构成了实现此类交互社

区的基础。参与者可以彼此建立关系并创建自己的内容。

为了实现公共信息空间,公司还使用数据库系统以及知识管理的方法和工具。例如应用 PDM(product data management,产品数据管理)系统作为产品开发中使用的技术数据库和通信系统,该系统支持与产品结构的创建、修改、版本控制和归档有关的所有活动,可保存和管理有关产品及其开发过程的必要信息,并使它们对公司的所有领域透明可用。PDM 系统代表了产品开发过程中要使用的所有工具的集成平台。

根据德国标准 VDI 5610(2009 年)的定义,知识管理包括流程的组织,在此过程中,信息、知识和经验得到识别、生成、存储、分发和应用。知识将信息和与应用相关的见解和关系结合在一起,因此它是描述信息之间关系的“基于目的的信息网络”的“基础充分的知识”。它不仅包括技术知识,还包括员工的知识的过程的知识。公司知识库知识管理的核心功能涉及知识的计划、识别和评估,新知识的产生、知识的存储,以及知识的分布和应用。例如,Willm 描述了在数字工厂环境中知识管理的使用,及其如何支持数字化工厂内部专家的合作。

数据管理通常以结构化方式管理知识并使其可访问来支持知识管理。专家系统也是用于支持知识管理的计算机辅助系统,是模拟合格专家的专业知识和推理能力的程序。专家系统的目的是以自动化和可处理的方式存储专家通过行动和经验收集的知识,从而使它们在任何时候都可重复使用。但是,与预期相反,由于记录和维护工作量太大,专家系统尚未普及。最新的方法有所谓的自学习认知系统。该系统作为人工智能的一个子领域,能够从大量数据中得出结论,例如有关客户购买行为或最有前途的癌症治疗方法的结论。

3) workflow 管理和工作组计算

workflow 管理和工作组计算都属于计算机支持的协同工作。该领域作为跨学科研究领域,包括信息系统、信息学、社会学、信息管理、人事管理、组织科学、心理学和通信科学领域。

workflow 管理用于协调团队中的活动,并处理 workflow 或业务流程(称为 workflow)的操作实施,目的是将文档、信息或任务传递给各个流程参与者。

IT 支持的 workflow 实施可以理解为 workflow,要确定哪些文档、信息和任务将由哪些参与者、何时以及按照哪些规则、以什么顺序处理。因此,workflow 是用于控制和监视业务流程的工具。

关于 workflow 的定义,可参考 workflow 管理联盟,它致力于在制造商、用户、顾问和科学家网络中处理 workflow 的进展。

workflow 管理系统作为基于 IT 的 workflow 管理,其实施的目的是为公司所有常规流程提供一致的结构化支持。与 workflow 管理系统相比,组件软件系统允许对流程进行非结构化且更灵活的处理。根据团队的时空划分(在同一时间、同一地点或在不同时间、不同地点),使用不同的系统。典型的组件软件工具支持小组工作的主要方式是通过项目服务器共同创建、存储、进行版本控制和管理项目文档,可以通过 Intranet 或 Internet 进行访问。在所谓的社交业务应用程序中,经典的组件解决方案与社交媒体互相促进,共同发展。前面提到的通信技术手段,例如电子邮件、聊天或视频会议系统,也可以用来支持工作组的计算。

3. 模型的建立和使用

前面阐述了在数字化工厂中使用的各种不同方法。数字化工厂的集成目标是按如下方式将各个异构模型联网：根据要执行的任务，可以在同一个工作环境中的整个系统生命周期中进行跨团队、完全由 IT 支持的无冗余工作。用户为自己的行动框架创建模型所需的各个技术和与问题相关的模型，并基于一致且始终最新的信息基础为任务调用相关信息。

要联网的模型一方面由所考虑对象的产品、过程和资源（系统知识）确定；另一方面必须以基于 IT 的方式支持规划和运营管理的组织步骤，以确保模型的一致使用，并因此使用合适的模型进行映射。

与所使用的建模方法不同，必须注意模型创建和使用的不同场景以及质量保证，以便在数字化工厂中进一步开发和维护模型。这更加适用于在工业 4.0 中将模型用作数字孪生模型。为此，需做到以下几点。

- (1) 创建建模约定和标准。
- (2) 确保实施模型的有效性和可信度。
- (3) 创建端到端模型管理和可持续模型文档。
- (4) 开发具有定义里程碑的过程模型，以进行协作式 IT 或基于模型的计划和行动。
- (5) 通过开发接口标准（如 CAD 数据）和互操作性概念，为在协作工程平台中一致地创建模型和使用模型创造前提条件。

3.2 数字化工厂的技术

回顾制造业的发展历史，统览历次工业革命，可以看到每一次技术的发展与聚集所起到的爆发式推动作用。同样，作为制造业发展的新一次里程碑——数字化网络化智能化技术，必将引领制造业的再一次转型与升级。

数字化工厂的兴起历程表明，技术是数字化工厂的先驱、关键和推动力量。本节将数字化工厂技术划分为基础性技术、支撑性技术和赋能性技术，构建起数字化工厂的技术架构与技术体系，从技术视角解读数字化工厂。

3.2.1 数字化工厂的技术体系

数字化工厂是工业 4.0 的重要组成部分，也是实现智能制造的基础。数字化工厂技术与工业 4.0、智能制造所需技术具有相通性。在构建数字化工厂的技术体系时，参考和借鉴二者的相关理论也是可行的。

基于此，按照技术对于数字化工厂的重要程度分为三类：基础性技术、支撑性技术和赋能性技术，如图 3.4 所示。

(1) 基础性技术。基础性技术即作为数字化工厂起步运行应当具有的技术，是制造企业在进行数字化工厂建设之前应提前预备好的技术。主要包括智能传感技术、测量与识别技术、智能装备与工业自动化、工业软件、工业网络信息安全。

(2) 支撑性技术。支撑性技术是数字化工厂建设的关键技术。这些技术的掌握程度直接决定数字化工厂建设的快慢与成败，同时拥有这些技术也能快速提升制造企业的竞争力。它主要包括工业大数据，工业物联网与工业互联网，云计算、雾计算与边缘计算，数字

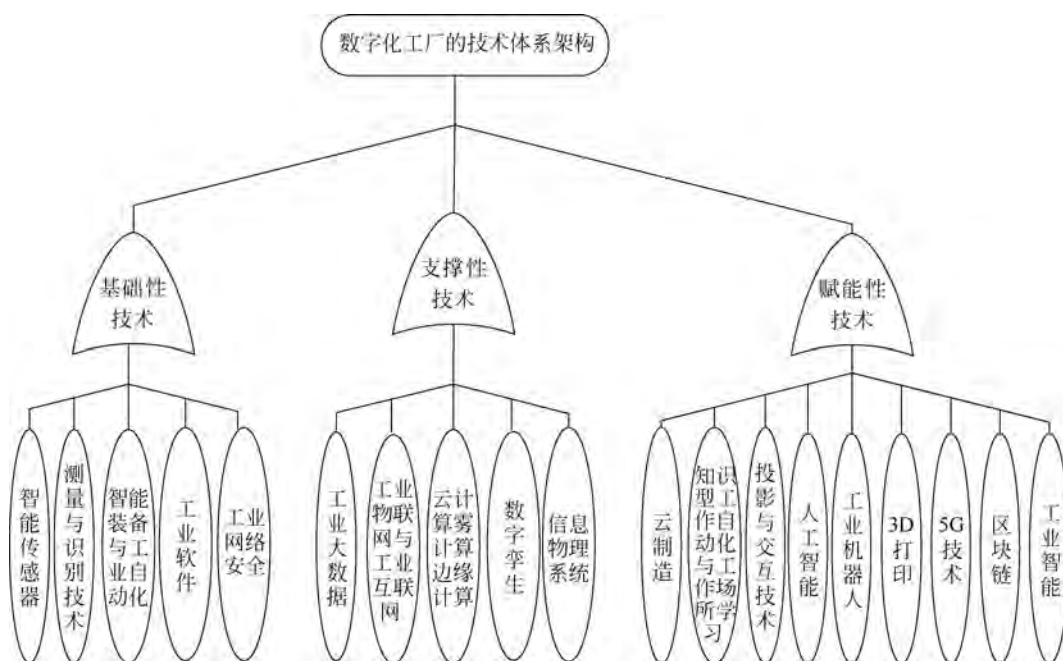


图 3.4 数字化工厂的技术体系

孪生,信息物理系统。

(3) 赋能性技术。赋能即赋予事物力量或者能量。在数字化工厂的规划与实施过程中,一些新技术的应用会大大节省人力、物力和财力,使数字化建设路径得以缩短,让企业可以较快地完成转型与变革,提升自身竞争力。例如工业机器人的应用,取代了工厂一部分人力劳动,提高了工作效率和产能,进而提升了企业的利润与竞争力。这些技术主要有云制造、知识办公型自动化与工作场所学习、投影与交互技术、人工智能、工业机器人、3D 打印、5G 技术、区块链、工业智能。

3.2.2 基础性技术

1. 智能传感器

智能传感器由传感元件、信号调理电路、控制器(或处理器)组成,具有数据采集、转换、分析甚至决策功能。智能化可提升传感器的精度,降低功耗和体积,简化组网方式,从而扩大传感器的应用范围,使其发展更加迅速有效。

1) 智能传感器的概念

智能传感器是集成了传感器、制动器(能将某种形式的能量转换为机械能的驱动装置)与电子电路的智能器件,或是集成了传感元件和微处理器并具有监测与处理功能的器件。智能传感器最主要的特征是输出数字信号,便于后续计算处理。智能传感器的功能包括信号感知、信号处理、数据验证和解释、信号传输和转换等,主要的组成元件包括 A/D 和 D/A 转换器、收发器、微控制器、放大器等。

目前,传感器经历了三个发展阶段:1969 年之前属于第一阶段,主要表现为结构型传感器;1969 年之后的 20 年属于第二阶段,主要表现为固态传感器;1990 年到现在属于第

三阶段,主要表现为智能传感器。

智能传感器的构成示意图如图 3.5 所示。数据转换在传感器模块内完成,这样,微控制器之间的双向连接均为数字信号,可以采用可编程只读存储器来进行数字传输。智能传感器的主要特征是指令和数字双向通信、全数字传输、本地数字处理、自测试、用户定义算法和补偿算法。

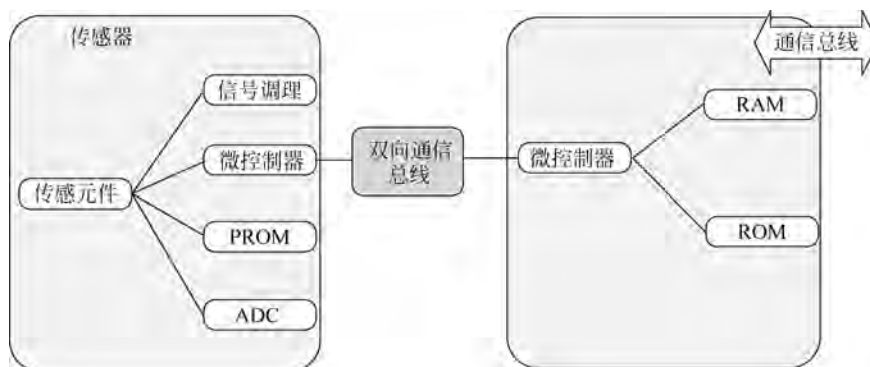


图 3.5 智能传感器的构成

2) 智能传感器的特点

智能传感器的特点是精度高、分辨率高、可靠性高、自适应性高、性价比高。智能传感器通过数字处理获得高信噪比,保证了高精度;通过数据融合神经网络技术,保证在多参数状态下具有对特定参数的测量分辨能力;通过自动补偿来消除工作条件与环境变化引起的系统特性漂移,同时优化传输速度,让系统工作在最优的低功耗状态,以提高其可靠性;通过软件进行数学处理,使智能传感器具有判断、分析和处理的功能,系统的自适应性高;可采用能大规模生产的集成电路工艺和 MEMS(micro-electro-mechanical system,微机电系统)制造工艺,性价比高。

3) 智能传感器的关键技术

智能传感器的发展态势可根据 MEMS、CMOS(complementary metal oxide semiconductor,互补金属氧化物半导体)和光谱学来分类研究。MEMS、CMOS 是智能传感器制造的两种主要技术。MEMS 传感器最早应用于军事领域,可进行目标跟踪和自动识别领域中的多传感器数据融合,具有特定的高精度和识别、跟踪、定位目标的能力。CMOS 技术是主流的集成电路技术,不仅可用于制作微处理器等数字集成电路,还可制作传感器、数据转换器、用于通信目的的高集成度收发器等,具有可集成制造和低成本的优势。

4) 应用发展趋势

智能传感器代表新一代的感知和自知能力,是未来智能系统的关键元件,其发展受到未来物联网、智慧城市、智能制造等强劲需求的拉动,如图 3.6 所示。智能传感器通过在元器件级别上的智能化系统设计,将对食品安全应用和生物危险探测、安全危险探测和报警、局域和全域环境检测、健康监视和医疗诊断、工业和军事、航空航天等领域产生深刻影响。

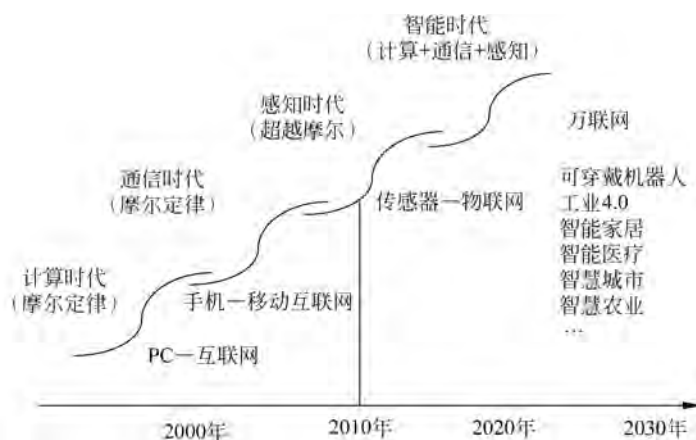


图 3.6 智能传感器的发展受需求拉动的曲线

2. 测量与识别技术

3.1.1 节讲到数字化工厂的信息和数据收集方法，其中自动观察法对于数字化的实现具有良好的适用性。该方法通过自动测量和识别对象便可获得所需观察的数据信息，当然这是需要技术来支撑实现的。除了上述的智能传感器技术外，测量与识别技术还包括三维激光扫描技术、动作捕捉技术、识别技术，下面将分别予以介绍。

1) 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术又称实景复制技术，是利用激光高速、实时、自动获取给定区域目标表面三维坐标的测量技术。三维激光扫描技术可获取任何复杂的现场环境及空间目标的三维立体信息，快速重构目标的三维模型及线、面、体、空间等各种数据，再现客观事物真实的形态特性。它是一种大面积高密度的非接触式主动测量技术，其非接触的数据获取方式能在不触及扫描对象的情况下进行数据采集。作为一种新兴的空间数据获取技术，三维激光扫描技术已广泛应用于各种领域。

在工厂数字化建设的过程中，我们首先做的就是要对工厂进行模型的数字化。传统测量方法在测量这种结构复杂的工厂时，会产生非常大的工作量；运行时很多区域是人员危险区，不能靠近测量；在测量过程中会漏掉诸多细节，并且有的结构是无法用传统测量实现的，这时我们就需要将目光转向更先进和准确的测量方式——三维激光扫描技术。三维激光扫描仪能够高精度、大范围地对工厂进行扫描，只需要很短的时间就能够获得厂房的三维点云图像。在有了精确的三维点云图像以后，就可以进行建模了。在这个基础上建模不仅大大降低了建模的难度，加快了建模的速度，而且能够1:1的精确还原真实的工厂，如图3.7所示。例如，某工厂需要对厂房进行改造扩建，需要拆除、更换、新增大量的设备和管线。现有的比较完整的图纸只有当年原始装置的管道轴测图，厂里的多次技改和多年工厂运营维护的相关资料并不完整，并且也与实际有较大出入。而改扩建设计质量的关键取决于对现状的了解程度，已有图纸与现状不符且现场情况复杂，给设计带来了很大难度。此时，若利用三维激光扫描技术则可以方便、快捷、准确地建立工厂三维模型。

2) 动作捕捉技术

在计算机辅助生产规划中，要使用数字人体模型来模拟手的活动。这种类型的仿真非

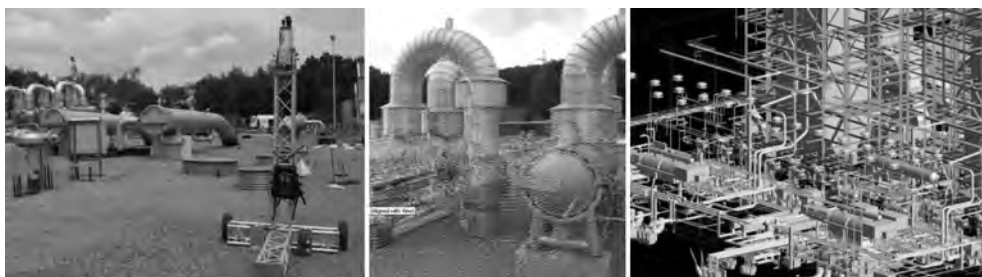


图 3.7 三维激光扫描在数字化工厂中的应用

常耗时且昂贵,因为必须使用逆运动生成运动数据(根据所需的最终位置计算运动数据)。动作捕捉是在运动物体的关键部位设置跟踪器,由动作捕捉系统捕捉跟踪器位置,再经过计算机处理后得到三维空间坐标的数据。当数据被计算机识别后,可以应用在动画制作、步态分析、生物力学、人机工程等领域。

数字运动记录方法提供了另一种方式来更快、更经济地获取此类数据:一方面,光学方法可用于记录数字运动数据;另一方面,有些方法可记录测量对象关节的角度,以进行数据采集。为此,可以使用外骨骼(附在受试者身体上的杆)或附在关节点上的测角仪(用于确定角度的测量仪器)。为了更容易操作,这些传感器通常集成在防护服中,以确保传感器在对象身上的适当放置。

具有人体感应器的运动记录方法已被证明可用于汽车工业中人体工程学人体工学评估的运动记录,因为即使当对象被系统或身体部位覆盖时,它们仍可实时提供可靠的运动数据。为了评估从人机工程学角度获得的运动数据,卡塞尔大学采用了市场上可买到的系统进行人机工程学设计,方法是将传感器放置在测试对象穿着的运动捕捉服中的相关肢体处。传感器是可商购的,在单个组件中结合了几种测量方法和信号处理方法,因此可以弥补单个测量方法的弱点(如陀螺仪传感器的漂移)。传感器数据通过电子设备实时汇总,这些电子设备也集成到运动捕捉服中并无线传输至收集运动数据的计算机。

从对象的定义起始位置开始,所有运动都将转换为数字三维数据。以这种方式获得的数据最终可以在数字化工厂中使用或进行人体工程学分析。

3) 基于射频识别的自动识别技术

识别技术也称为自动识别技术,通过被识别物体与识别装置之间的交互,自动获取被识别物体的相关信息,并提供给计算机系统供进一步处理。通常,工业识别包括视觉识别和射频识别(RFID)。条形码/二维码读取都属于视觉识别的一部分,通过视觉产品可视化地识读视场范围内的条形码/二维码,并依据算法进行解码,将码值传送至控制系统,使控制系统能对产品进行识别并给出控制指令,进行柔性化控制和生产。相较于条形码而言,二维码能存储的信息量更大,能表示更多的数据类型,也具有更优的防错容错能力,因此有更广泛的应用前景。视觉识别的应用比较多地受到现场照明条件、遮挡等因素的影响,对视觉产品的选择提出了较高的要求。

射频识别技术是自动识别技术的一种,通过无线射频的方式达到非接触的目标识别。利用无线射频的方式对电子标签或射频卡进行读写,从而达到数据交换和识别目标的目的。一般而言,RFID系统由五个组件构成,包括传送器、接收器、微处理器、天线和标签。

传送器、接收器和微处理器通常都被封装在一起,又统称为阅读器,所以工业界经常将RFID系统分为阅读器、天线和标签三大组件。这三大组件一般都可由不同的生产商生产。RFID源于雷达技术,所以其工作原理和雷达极为相似:首先阅读器通过天线发出电磁波;标签接收到信号后发射内部存储的标识信息;阅读器再通过天线接收并识别标签发回的信息;最后,阅读器将识别结果发送给主机。

无线射频识别的工作原理如图3.8所示,它基于无线射频原理,通过无线电信号识别特定目标并读写相关数据,而无须识别系统与特定目标之间建立机械或光学接触。与视觉产品相比,RFID具备读取和写入功能,可承载的信息量较大,并且具备批量识别功能。RFID按工作频率可分为低频、高频、超高频和微波。

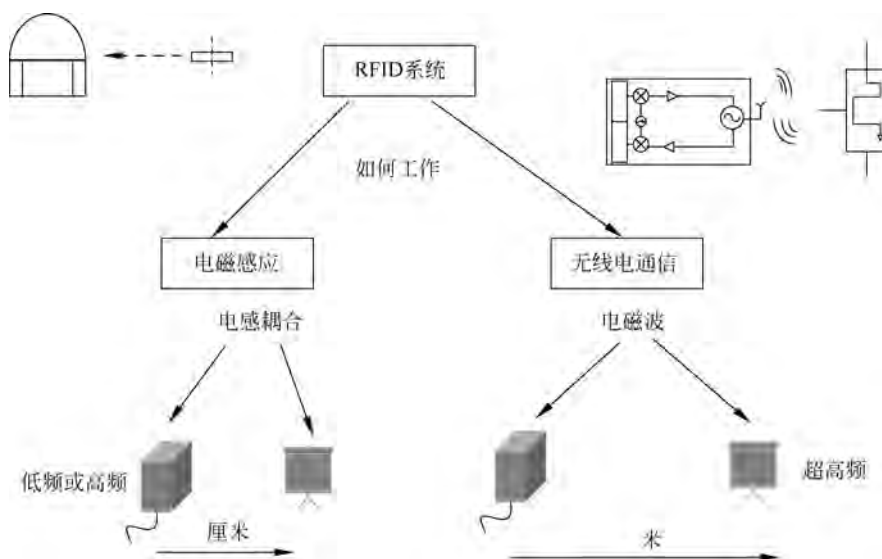


图 3.8 RFID 的工作原理示意图

一个RFID系统包括用于控制读写指令的读写设备、用于在读写器和发送应答器之间传递射频信号的天线、用于存储信息的发送应答器、用于通信协议转换的通信处理器。

与一般的条码识别技术相比,RFID在实时更新资料、存储信息量、使用寿命、工作效率、安全性、灵活性等方面都具有优势。RFID能够在减少人力物力财力的前提下,更便利地更新现有的资料,使工作更加便捷;依据计算机等对信息进行存储,可存储信息量大,可保证工作的顺利进行;使用寿命长,只要工作人员在使用时注意保护,它就可以进行重复使用;改变了从前对信息处理的不便捷,可同时识别多目标,大大提高了工作效率;设有密码保护,不易被伪造,安全性较高;具有更强的抗干扰能力,能识别运动中的物体(这一点非常适合物流产业),并且可识别小型化以及多样化物体,所以能够满足各种类型产品的需求。但RFID技术出现时间较短,在技术上还不是非常成熟。由于超高频RFID电子标签具有反向反射性特点,使得其在金属、液体等商品中应用比较困难。RFID电子标签相对于普通条码标签价格较高,为普通条码标签的几十倍。如果使用量大的话,就会导致成本太高,在很大程度上降低了市场使用RFID技术的积极性。

RFID技术为自动识别开辟了新的可能性,这对于数字化工厂也非常有用。除了经典的

对象识别,它还可以改善工艺流程,实现可追溯性、工艺简化以及防盗保护等。在一些数据密集型应用程序中,例如“供应链记录”或“产品寿命记录”,也可以为最终用户带来相应的好处,如供应链(社会和生态方面)或汽车贸易(租赁、维护、修理、转售或回收)中的透明度。

RFID 智能手持终端是一种集合射频识别技术和数字化技术的无线便携设备,具有容量储存大、使用时间长、识别功能强大、硬件模块快捷选配、软件模块灵活定制等特点,广泛应用于物流仓储和流通管理中的入库清点、物资上架、盘库点仓、物资出库、检索查询等环节。将 RFID 芯片嵌入或贴在货物上,作为物联网终端节点,可实现对货物的自动感知、定位、追踪、管理、控制,形成货物联网体系。这不仅解决了物资数量爆发性增长带来查找困难的现状,还可使库管人员高效快速地清点库存,缩短盘库时间,更是解决了出库入库物资数量错误的痛点问题。RFID 与自动化技术灵活地结合在电商物流的分拣环节,能够直面解决仓配分拣混乱的痛点,实现更大效能的分拣,大幅度降低人工成本。

商品要流通,万物要识别,必须得有一个身份标签而且具备唯一性,这个身份就是 RFID 赋予的。比如服装行业与 RFID 物联网技术相结合,具体到一件服装上,用一张标签就可以精准快速地获得面料、织法、制造商、生产地、价格和配送信息等,甚至还有制衣裁剪的现场视频链接,这些信息来自网点的客服管理系统和制造商的库存管理系统,具有较高的灵活性和完整性。RFID 标签成了这件服装独一无二的新的“身份证”,要用来解决在服装的流转和销售环节的防伪、防盗、防窜货和全方位的追踪溯源等方面的难题。RFID 防伪溯源系统多用于电子、酒类、珠宝等高档产品,让假货无处遁形,同时也骤减了在流转环节的人力成本的飙升。

工业 RFID 在工业现场有很多应用,比如某些药厂配有低温冷库储存人体血浆等重要物质。血浆需要长期储存在低温环境中,冷库温度在 -30°C 左右。药厂在制药的过程中要提取血浆中某些活性成分,而在提取之前需要明确血浆的来源、储存时间等,还需要对血浆进行检验检测并记录检测结果,所有的操作都需要对血浆进行识别。因此药厂自然需要一种可靠的识别技术,能确保经过长时间低温储存后信息依然能被可靠地识别出来。由于低温环境的特殊要求,药厂最终选择了 RFID 作为识别技术。相比于药厂之前采用的条码识别,RFID 标签能在 -30°C 的环境中长期储存,冷凝等作用不影响 RFID 的读取,使读取率大提高,从而提高了药厂生产的透明性和可追溯性。

3. 智能装备与工业自动化

实现数字化工厂的重要前提之一是增加可以用自动化手段进行数据采集,从而取代手工数据录入的设备数量。机器设备可以通过传感器或 RFID 标签不停地收集数据,并进行数据交换。但是,一台“智能的”设备不仅可以接收和处理信息,而且还可以在不需要人参与的情况下就做出决策。例如,一台设备有产能富余,而另一台没有,这两台设备可以相互识别出这一状况并开展相互帮助。

当然,“智能的”设备有的时候指的是机器的智能服务和维护。技师通常会定期对机器、工厂和其他资产进行检查和保养,或者在机器出现问题的时候进行维修。一些事前没有预计到的问题或机器停机会导致生产延迟和很高的维修成本。

4. 工业软件

1) 工业软件的特征

随着智能制造、工业 4.0 和工业互联网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。工业软件也开始结合大数据、虚拟现实、人工智能等先进技术,在研发设计、生产制造、服务管理和维护反馈等工业各环节中凸显出更重要的作用。工业软件是指主要用于或专用于工业领域,为提高工业研发设计、业务管理、生产调度和过程控制水平的相关软件与系统,其本质是工业知识软件化。新型工业软件承担着对各类工业数据进行处理、分析和应用的重要功能,是智能制造和工业互联网体系中负责优化、仿真、呈现、决策等关键职能的主要组成部分。

制造行业在信息化发展初始,工业软件就扮演了不可或缺的重要角色。新型工业软件区别于通用的应用软件,主要具备五个特征。

(1) 与行业结合紧密。相对于其他应用软件,工业软件更加强调对物理世界的深刻理解、行业物理模型的精确契合。

(2) 继承性强。与 IT 通用软件相比,工业软件需要行业经验和长期积累,专业性强,应用面较窄。好的工业软件必须由专业团队多年工作研发,并不断继承完善。

(3) 可靠性高。工业软件与制造业的生产过程和机器设备结合,流程复杂,需要高可靠性保证过程与动作的正确性。

(4) 开发要求高。工业软件产品对开发、集成、管理要求十分严密,需监控软件的全生命周期,包括软件开发的全过程;

(5) 研发难度大。工业软件的开发工作量巨大,需不断积累完善,对开发人员的 IT 技能水平与工业专业水平要求均较高。

2) 工业软件的分类

伴随着信息化的进程,工业软件产品体系发展逐渐成熟。工信部在发布的《“十四五”智能制造发展规划(征求意见稿)》中,将工业软件划分为六类:研发设计类、生产制造类、经营管理类、控制执行类、行业专用软件和新型软件(见图 3.9)。研发设计类软件主要包括计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)、计算机辅助工艺过程设计(CAPP)、计算机辅助制造(CAM)、产品全生命周期管理(PLM)等;生产制造类软件主要包括制造执行系统(MES)、高级计划排产系统(APS)等;经营管理类软件包括企业资源计划(ERP)、供应链管理、客户关系管理、电子商务等;控制执行类软件包含工业操作系统、工业控制软件等;行业专用类软件包含面向特定行业、特定环节的模式库、工艺库等基础知识库,面向石化、冶金等行业的全流程一体化优化软件等;新型软件包含工业 App、云化软件等。

3) 工业软件的发展方向

在智能制造、工业互联网等先进制造体系中,工业软件主要承担计算与分析功能,其产业体系较为成熟,未来新型工业软件将向仿真化、大数据化、集成化和云化的方向发展。

第一,仿真软件将成为新型工业软件未来的发展重点,复杂系统仿真成为重要方向。得益于计算处理、数据支持、图形化等基础支撑技术的持续提升,面向多相多态介质、多物理场、多尺度等复杂耦合仿真的新型工业软件日渐丰富,其实现形式主要有两种:一是通过开放的数据接口标准进行多仿真系统耦合的联合仿真。如法国达索系统公司推出的

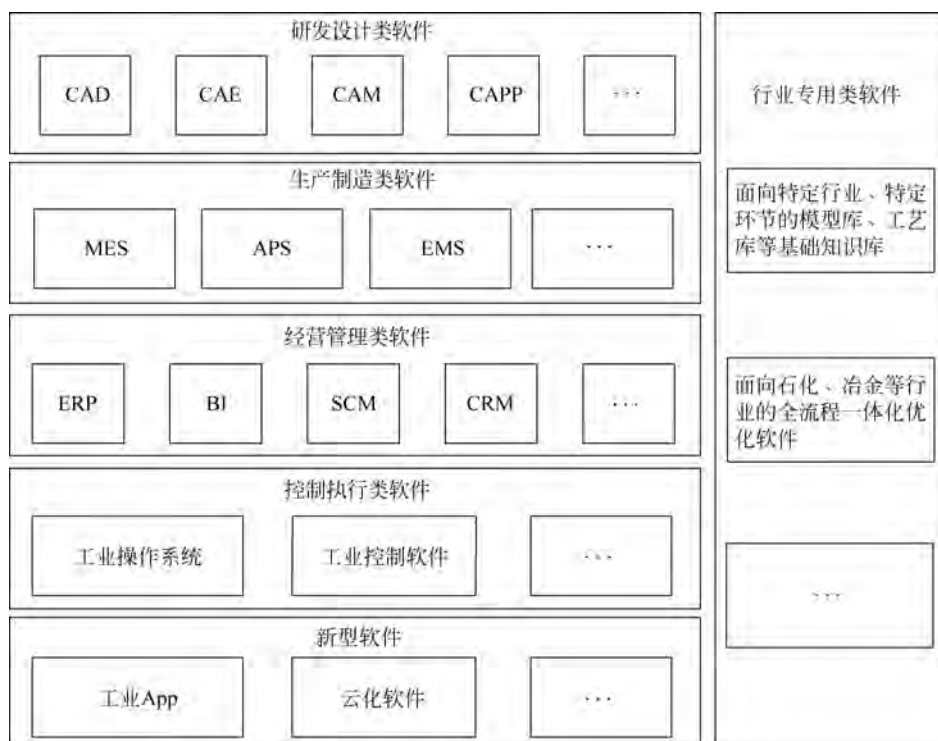


图 3.9 软件的分类

Dymola 仿真平台,基于 FMI/FMU 接口联合 AMESim、PROOSIS、Simulink 等十几种不同建模工具和机电分系统进行仿真。二是增加仿真模块,通过单系统实现多领域仿真,从而扩展工业仿真软件的应用领域。

第二,新型工业软件引入大数据等先进技术应用,加强分析与计算能力。企业管理和生产管理等传统工业软件与大数据技术结合,通过对设备、用户、市场等数据的分析,提升了场景可视化能力,实现了对用户行为和市场需求的预测和判断;大数据与工业具体需求结合产生新型工业数据分析软件,实现了产品良率监测、设备预测性维护管理、产线动态排产等多种工业智能化场景应用。

第三,工业软件系统将以 PLM 等关键软件为中心集成化,推动工厂内“信息孤岛”聚合为“信息大陆”。传统工业软件以 ERP 为中心进行数据打通,未来新型工业软件将基于全生命周期管理软件 PLM 进行系统性集成。如西门子打造了基于 PLM 架构的全集成数字能力解决方案,其 PLM 产品可实现外部设计工具、分散研发团队、MES 与控制系统、第三方管理软件等多系统的集成,实现了工厂从底层到上层的信息贯通。

第四,基于 SaaS 模式的工业软件成为重要趋势,但主要面向中低端产品。当前向云平台迁移的工业软件主要为 CRM 和 SCM 两种,未来企业管理软件与设计仿真软件将加速向云迁移,其中 ERP 由于包含大量敏感本地数据将以混合云为主要形式,CAD、CAE、CAM、CAPP 将率先探索中低端 SaaS 云服务市场,MES 云化方案尚处在起步探索阶段。

5. 工业网络安全

工业基础设施构成了我国国民经济、现代社会以及国家安全的重要基础。超过 80%的

涉及国计民生的关键基础设施依靠工业控制系统来实现自动化作业。工业控制系统(industrial control systems, ICS)的安全已是国家安全战略的重要组成部分,其安全事件已经能够直接影响物理世界,对人身安全、环境安全、经济安全甚至国家安全产生重大影响。

传统的工业控制系统是孤立的系统,使用专用的硬件和软件来运行特定的控制协议。基于数字化企业要求的新型工业控制系统,由于采用了通用通信协议,被设计成符合工业标准系统(标准对外公开)、大量采用了传统 IT 的通用操作系统、数据库和网络协议,这种设计在安全事件频发的今天为工业控制网络带来便利的同时也大大增加了工业控制系统的风险因素。

因此,针对数字化工厂部署有效的安全解决方案,成为构建智能工厂系统不可或缺的环节。需要关注的是,工业网络安全的解决方案部署,并不是单一针对硬件或软件的部署与改动。高成熟度的 ICS 信息安全解决体系,是在遵守不断改进的法律法规前提下,循环交替地提升安全解决方案。

信息网络是工业 4.0 的支撑。既然工业 4.0 发端于工业,却受益和影响至整个社会,就不再仅仅是工业控制问题,而是战略控制问题。这就需要施行必要的战略举措,包括加强顶层安全战略设计、建立国家网络风险意识、完善相关法规制度、健全开放式产品验证和检验机制、进行全民安全素质教育、培育国家与民间网络攻防能力和有效聚合各种社会力量等。

3.2.3 支撑性技术

3.2.3.1 工业大数据

1. 内涵及边界

针对大数据技术,我国电子技术标准化研究院发布了白皮书,指出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。工业大数据以产品数据为核心,极大延展了传统工业数据的范围,同时还包括工业大数据的相关技术和应用。

工业大数据的边界可以从数据来源、工业大数据的应用场景两大维度进行明确。

从数据的来源看,工业大数据主要包括三类。

第一类是企业运营管理相关的业务数据。这类数据来自企业信息化范畴,包括企业资源计划、产品生命周期管理、供应链管理、客户关系管理和能源管理系统等,此类数据是工业企业传统意义上的数据资产。

第二类是制造过程数据,主要是指工业生产过程中,装备、物料及产品加工过程的工况状态参数、环境参数等生产情况数据,通过 MES 系统实时传递。目前在智能装备大量应用的情况下,此类数据量增长最快。

第三类是企业外部数据,包括工业企业产品售出之后的使用、运营情况的数据,同时还包括大量客户名单、供应商名单、外部的互联网等数据。从工业大数据的应用场景看,工业大数据是针对每一个特定工业场景,以工业场景相关的大数据集为基础,集成工业大数据系列技术与方法,获得有价值信息的过程。工业大数据应用的目标是从复杂的数据集中发现新的模式与知识,挖掘得到有价值的信息,从而促进工业企业的产品创新、运营提质和管

理增效。根据行业自身的生产特点和发展需求,工业大数据在不同行业中的应用重点以及所产生的业务价值也不尽相同。

从工业大数据的应用场景看,针对流程制造业,企业利用生产相关数据进行设备预测性维护、能源平衡预测及工艺参数寻优,可以降低生产成本、提升工艺水平、保障生产安全。对于离散制造业,工业大数据的应用促进了智慧供应链管理、个性化定制等新型商业模式的快速发展,有助于企业提高精益生产水平、供应链效率和客户满意度。

2. 工业大数据与智能制造、工业互联网的关系

关于工业大数据与智能制造的关系,一方面智能制造是工业大数据的载体和产生来源,其各环节信息化、自动化系统所产生的数据构成了工业大数据的主体;另一方面,智能制造又是工业大数据形成的数据产品最终的应用场景和目标。工业大数据描述了智能制造各生产阶段的真实情况,为人类读懂、分析和优化制造提供了宝贵的数据资源,是实现智能制造的智能来源。工业大数据、人工智能模型和机理模型的结合,可有效提升数据的利用价值,是实现更高阶的智能制造的关键技术之一。

工业大数据与工业互联网的关系与智能制造的场景有所区别,工业互联网更为关注制造业企业如何以工业为本,通过“智能+”打通、整合、协同产业链,催生个性化定制、网络化协同、服务化延伸等新模式,从而提升企业、整体行业的价值链或是区域产业集群的效率。与智能制造相似的是,工业互联网既是工业大数据的重要来源,也是工业大数据重要的应用场景。尤其在工业互联网平台的建设中,工业大数据扮演着重要的角色。

工业大数据是一个至关重要的技术领域,它包括对企业的业务分析与优化,可引领企业增长。对于企业,它意味着如何在传统 BI(bussiness intelligence,商务智能)的基础上形成敏捷的 BI,然后再进行互联网数据关联;通过应用大数据、工业大数据的分析来创造透明度,通过验证试验来了解市场、企业的运作和细分客户,采用灵活的方式形成新的商业模式、产品及服务。

企业管理自身的数据、行业数据以及外界数据的能力是企业核心竞争力的重要组成部分。用大数据来进行业务的优化、市场的分析、风险的主动防范、引领企业增长是应用大数据的意义所在,如图 3.10 所示。

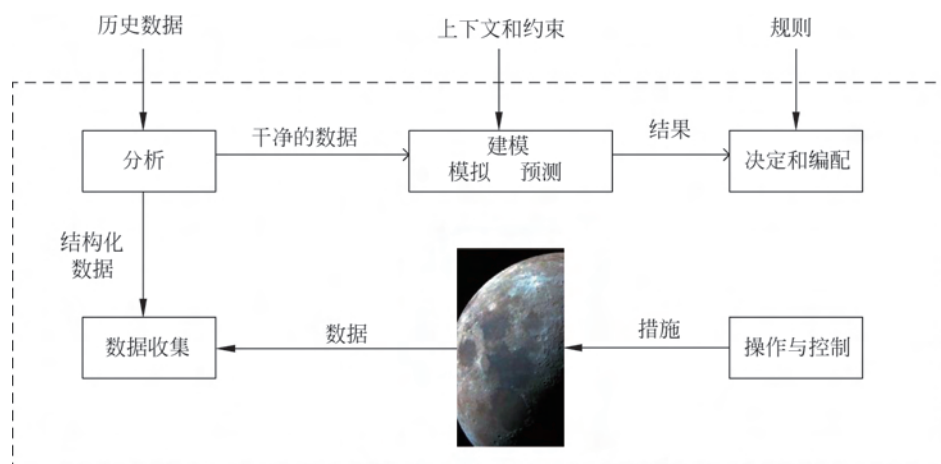


图 3.10 基于大数据所形成增值链的分析和一体化框架

3. 工业大数据技术参考架构

如图 3.11 所示,工业大数据技术参考架构从技术层级上具体划分为五层。



图 3.11 工业大数据技术参考架构

(1) 数据采集层。数据采集层包括工业时序数据采集与治理、结构化数据采集与治理和非结构化数据采集与治理。海量工业时序数据具有 7×24 小时持续发送、存在峰值和滞后等波动、质量问题突出等特点。数据采集层的数据源主要包括通过 ETL (extract transform load) 方式同步的企业生产经营相关的业务数据、实时或批量采集的设备物联网数据和从外部获取的第三方数据。

(2) 数据存储与管理层。数据存储与管理层包括大数据存储技术和管理功能。利用大数据分布式存储的技术,构建在性能和容量都能线性扩展的时序数据存储、结构化数据存储和非结构化数据存储等。

(3) 数据分析层。数据分析层包括基础大数据计算技术和大数据分析服务功能。在此之上构建完善的大数据分析服务功能来管理和调度工业大数据分析,通过数据建模、数据计算、数据分析形成知识积累,以实现工业大数据面向生产过程智能化、产品智能化、新业态新模式智能化、管理智能化以及服务智能化等领域的数据分析。

(4) 数据服务层。数据服务层是利用工业大数据技术对外提供服务的功能层,包括数据访问服务和数据分析服务。数据服务层提供平台各类数据源与外界系统和应用程序的访问共享接口,其目标是实现工业大数据平台的各类原始、加工和分析结果数据与数据应用和外部系统的对接集成。

(5) 数据应用层。数据应用层主要面向工业大数据的应用技术,包括数据可视化技术和数据应用开发技术。数据应用层通过生成可视化、告警、预测决策、控制等不同的应用,从而实现智能化设计、智能化生产、网络化协同制造、智能化服务和个性化定制等典型的智能制造模式,并将结果以规范化数据形式存储下来,最终构成从生产物联网设备层级到控制系统层级、车间生产管理层级、企业经营层级、产业链上企业协同运营管理的持续优化闭环。

此外运维管理层也是工业大数据技术参考架构的重要组成,贯穿从数据采集到最终服务应用的全环节,为整个体系提供管理支撑和安全保障。

4. 工业大数据平台

工业大数据平台涵盖了 IT 网络架构和云计算基础架构等基础设施,专家库、知识库、业务需求库等资源,以及安全、隐私等管理功能。除此之外,工业大数据平台还包含关联工业大数据实际应用的三方面角色,即数据提供方、数据服务消费方、数据服务合作方,如图 3.12 所示。



图 3.12 工业大数据平台参考架构

数据提供方是能提供三大类主要数据来源的角色,包括各类人员、工业软件、生产设备装备、产品、物联网、互联网、其他软件等多类对象,以及企业活动、人员行为、装备设备运行、物联网和互联网运行等多种活动。多类对象的多种活动产生的数据都将通过工业大数据平台直接或间接地提供给数据消费方。

数据服务消费方是在工业大数据的五大应用场景中,利用目标数据,有目的地进行设计、生产、制造、服务提供、个性化定制等活动的角色,主要是从事产品研发设计、生产制造、产品服务的企业或个人,直接或间接地从数据提供方处获得数据,并进行加工处理,以达到特定的目标。

数据服务合作方主要服务于数据提供方和数据消费方,为双方中的角色主体提供其所需要的技术支持、软硬件支持、智力资源的支持等,主要包括工业软件提供商、网络提供商、大数据技术供应商、服务提供商、组织机构、专家学者等角色,根据双方的需求提供相应的

针对性服务。

3.2.3.2 工业物联网与工业互联网

1. 工业物联网

1) 发展背景与内涵

在过去的几十年里,无线技术的发展催生了一种名为物联网的新范式。1991年, Kevin Ashton 在美国麻省理工学院首次提出了“物联网”的概念,指将所有物品通过射频识别等信息传感设备与互联网连接起来,实现智能化识别和管理的网络。2005年,国际电信联盟 (ITU) 发布了《ITU 互联网报告 2005: 物联网》,对“物联网”的含义进行了扩展,指出世界上所有的物体都可以通过 Internet 主动进行信息交换。随着物联网的发展成熟,其内涵和外延也在不断发生变化。

2017年发布的国家标准 GB/T 33745—2017《物联网术语》以及2018年发布的国际标准 ISO/IEC 20924: 2018 Information technology-Internet of Things(IoT) Vocabulary 均给出了物联网的定义,即“通过感知设备,按照既定协议,连接物、人、系统和信息资源,实现对物理和虚拟世界的信息进行处理并做出反应的智能服务系统”,其中“物”指物理实体。国际标准 ISO/IEC 22417: 2017 Information technology-Internet of things (IoT)-IoT use cases 中提出物联网的应用场景包括交通、家居、公共建筑、办公、工业、农业、渔业、穿戴、机车、智慧城市等 14 方面。

依据物联网的相关定义及对其在工业领域中应用现状的深入研究,我国电子技术标准化研究院在白皮书中给出了工业物联网的定义:工业物联网是通过工业资源的网络互连、数据互通和系统互操作,实现制造原料的灵活配置、制造过程的按需执行、制造工艺的合理优化和制造环境的快速适应,达到资源的高效利用,从而构建服务驱动型的新工业生态体系。工业物联网表现出六大典型特征:智能感知、泛在连通、精准控制、数字建模、实时分析和迭代优化。

物联网不仅在智能家居、医疗保健、交通和环境等许多物联网应用中具有广泛的优势,还能通过降低成本实现更高效、更优化的监测和控制,在行业中产生了重大影响,也由此产生了工业物联网(IIoT)的概念。学者 Khanc 等认为工业物联网是由智能和高度连接的工业组件组成的网络,部署这些组件是为了通过实时监控、高效管理和控制工业流程、资产和运营时间来实现高生产率和降低运营成本。工业物联网系统允许行业收集和分析大量数据,这些数据可以用来提高工业系统的整体性能,提供各种类型的服务,还可以降低资本支出和运营费用的成本。

如图 3.13 所示,工业物联网的目的是实现物与物、物与人及所有的物品与网络的连接,方便识别、管理和控制。物联网清晰地描述了一种唯一确定的物理对象间的连接,物品能够通过这种连接自主地相互联系,这种交互作用发生在其与机器之间、对象与对象之间。

物联网的提出突破了将物理设备和信息传送分开的传统思维,实现了物与物的交流,体现了大融合理念,具有很大的战略意义。工业物联网是工业 4.0 的核心基础,有无处不在的传感器,这些传感器进行互联以后就形成了大量的数据,然后回到数字中枢,进行数据的清洗、整理、挖掘和数据再增值。过去的大数据在服务业企业运用得比较多,工业企业很多

数据没有被完全挖掘出来,现在一个新的市场正在形成,就是通过工业物联网形成大量数据,来重新产生价值。所以工业 4.0 的第一个基础技术领域是工业物联网。

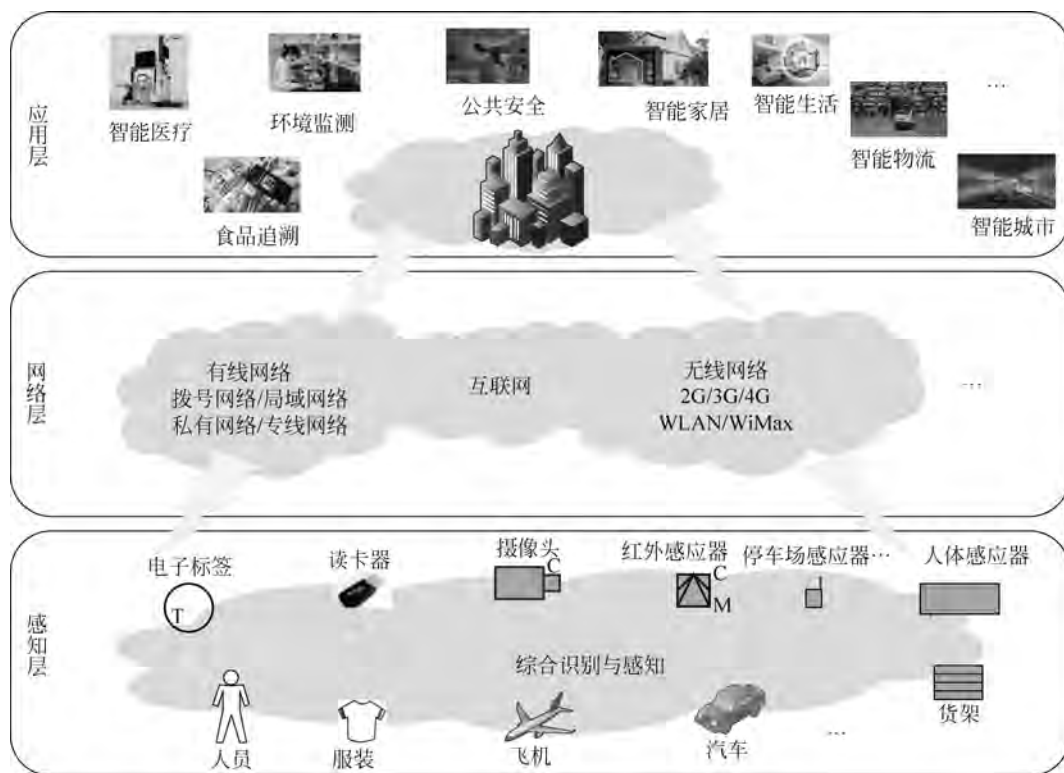


图 3.13 物联网原理示意图

2) 工业物联网的参考体系架构

工业物联网的参考体系架构(见图 3.14)是工业物联网系统组成的抽象描述,为不同工业物联网结构设计提供参考。工业物联网参考体系架构是依据 GB/T 33474—2016《物联网参考体系结构》中的物联网概念模型给出的,从系统的角度给出了工业物联网系统各功能域中主要实体及实体之间的接口关系。

工业物联网的参考体系架构由用户域、目标对象域、感知控制域、服务提供域、运维管控域和资源交换域组成。

目标对象域主要为在制品、原料、流水线、环境、作业工人等,这些对象被感知控制域的传感器、标签所感知、识别和控制,以获取其生产、加工、运输、流通、销售等各个环节的信息。

感知控制域采集的数据最终通过工业物联网网关传送给服务提供域。

服务提供域主要包括通用使能平台、资产优化平台和资源配置平台,可提供远程监控、能源管理、安全生产等服务。

运维管控域从系统运行的技术性管理和法律法规的符合性管理两大方面保证工业物联网其他域的稳定、可靠、安全运行等,主要包括工业安全监督管理平台和运行维护管理平台。

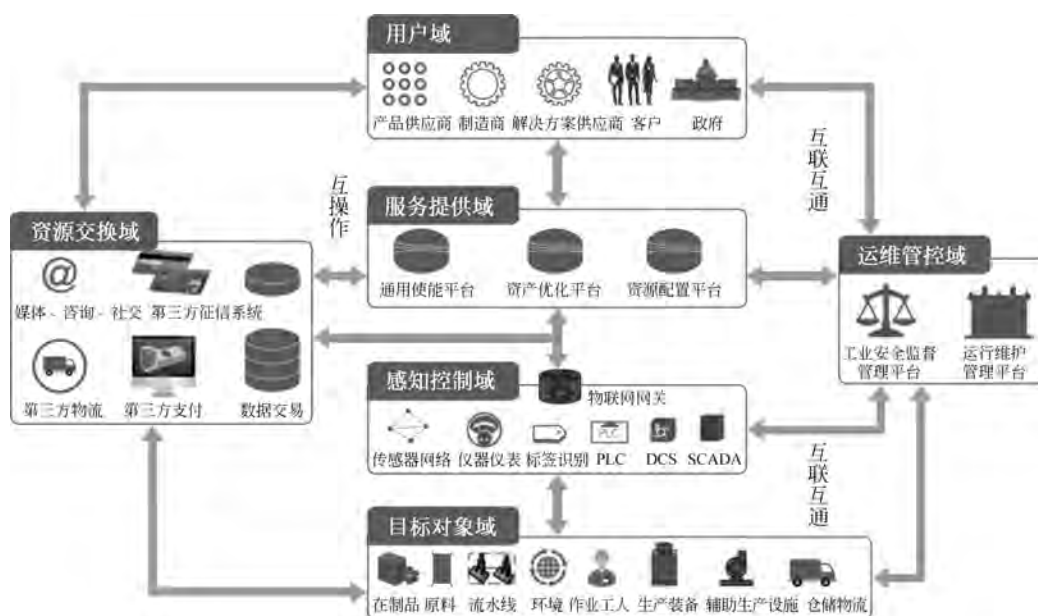


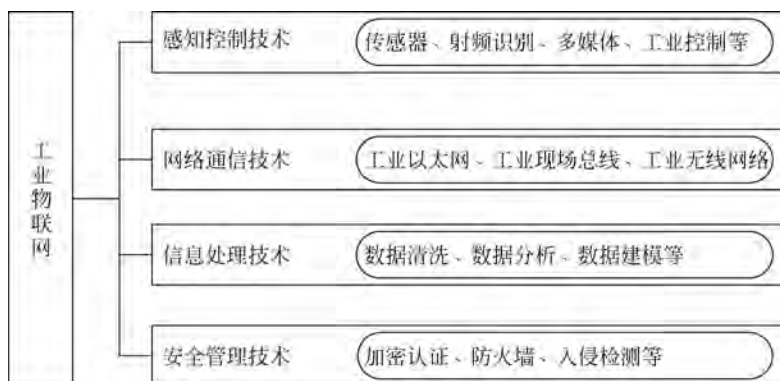
图 3.14 工业物联网的参考体系架构

资源交换域根据工业物联网系统与其他相关系统的应用服务需求,实现信息资源和市场资源的交换与共享功能。

用户域用于支撑用户接入工业物联网、适用物联网服务接口系统,具体包括产品供应商、制造商、解决方案供应商、客户和政府等。

3) 工业物联网的技术体系。

工业物联网的技术体系(见图 3.15)主要分为感知控制技术、网络通信技术、信息处理技术和安全管理技术。感知控制技术主要包括传感器、射频识别、多媒体、工业控制等,是工业物联网部署实施的核心;网络通信技术主要包括工业以太网、工业现场总线、工业无线网络等,是工业物联网互联互通的基础;信息处理技术主要包括数据清洗、数据分析、数据建模和数据存储等,为工业物联网的应用提供支撑;安全管理技术包括加密认证、防火墙、入侵检测等,是工业物联网部署的关键。



(1) 感知控制技术。工业传感器能够测量或感知特定物体的状态和变化,并转化为可传输、可处理、可存储的电子信号或其他形式的信息,是实现工业物联网中工业过程自动检测和自动控制的首要环节。射频识别是一种非接触类型的自动识别技术,其主要原理是利用无线电磁信号传输特性和空间耦合原理,来完成对目标物体的自动识别过程。工业控制系统包括监控和数据采集系统、分布式控制系统和可编程逻辑控制器等其他较小的控制系统。

(2) 网络通信技术。工业以太网、工业现场总线、工业无线网络是目前工业通信领域的三大主流技术。工业以太网是指在工业环境的自动化控制及过程控制中应用以太网的相关组件及技术。工业现场总线是近年来迅速发展起来的一种工业数据总线。它诞生之初是为了解决智能仪器仪表、控制器、执行器等现场设备间的数字通信以及这些现场控制设备和高级控制系统之间的信息传递问题。现在被广泛应用的现场总线几十余种。现场总线技术的出现给工业自动化带来了一场革命,它结构简单,方便控制系统的设计、安装、投运、正常生产运行及检修维护,可以节省硬件数量与投资、节省安装费用以及提高系统的可靠性,为用户提供了灵活的系统集成主动权。工业无线网络则是一种新兴的利用无线技术进行传感器组网以及数据传输技术的网络。无线网络技术的应用可以使得工业传感器的布线成本大大降低,有利于传感器功能的扩展,其核心技术包括时间同步、确定性调度、跳信道、路由和安全技术等。

(3) 信息处理技术。信息处理技术是对采集到的数据进行数据解析、格式转换、元数据提取、初步清洗等预处理工作,再按照不同的数据类型与数据使用特点选择分布式文件系统、关系数据库、对象存储系统、时序数据库等不同的数据管理引擎实现数据的分区选择、落地存储、编目与索引等操作。

(4) 安全管理技术。不同的工业物联网系统会采取不同的安全防护措施,主要包括预防(防止非法入侵)、检测(万一预防失败,则在系统内检测是否有非法入侵行为)、响应(如果查到入侵,应采取什么行动)、恢复(如何尽快恢复受破坏的数据和系统)等阶段。

2. 工业互联网

1) 发展背景及内涵

随着互联网、大数据、云计算、物联网、人工智能等新信息技术的快速发展,新的生产方式和组织方式推动着全球工业体系的智能化转型。2012年美国GE公司董事长Jeffrey R. Immelt首次提出了工业互联网的概念,即基于开放的全球网络将设备、人员和数据分析连接起来。这一概念的目标是通过大数据的使用和分析,提升航空、医疗和其他工业设备的智能,降低能耗,提高效率。2013年6月,通用电气提出工业互联网革命概念,为大量工业应用提供运维服务,利用互联网、大数据等关键技术提升服务质量。随后,为了将工业互联网的概念应用到实际应用场景中,美国AT&T、CISCO、GE、IBM和Intel等五家领先的工业公司成立了工业互联网联盟,2015年提出工业互联网是物联网、机器、计算机和人的互联网,可使用先进的数据分析实现智能工业运营和变革性的业务成果。它体现了全球工业生态系统、先进计算和制造、普适传感和泛在网络连接的融合。工业互联网的概念在过去十年中已经发展到包含由数万亿无处不在的可寻址设备组成的全球互联网络,并共同代表物理世界。工业互联网联盟的目标是打破技术壁垒,促进物理世界和数字世界的融合。因此,工业互联网将在智能制造、医疗、交通等领域产生创新的工业产品和系统。工业互联网联盟于2017和2019年发布了工业互联网参考架构(IIRA)V.1.8和V.1.9。IIRA提供了

基于标准的架构模板和方法,以便工业物联网系统架构设计师可以基于公共框架和概念设计自己的系统。

我国政府在新的发展背景下也提出了促进信息化和工业化深度融合的战略,加快发展先进制造业和经济。2016年,我国成立了工业互联网产业联盟,旨在建立一个行政、产业和学术协同提升的公共平台。工业互联网联盟将工业互联网重新定义为互联网、新信息技术和产业体系深度融合形成的产业和应用生态。我国工业互联网产业联盟致力于研究工业互联网的相关内容,于2016和2020相继发布了《工业互联网体系架构1.0》和《工业互联网体系架构2.0》版本,其中给出了工业互联网的内涵:作为全新工业生态、关键基础设施和新型应用模式,通过人、机、物的全面互联,实现全要素、全产业链、全价值链的全面连接,正在全球范围内不断颠覆传统制造模式、生产组织方式和产业形态,推动传统产业加快转型升级、新兴产业加速发展壮大。工业互联网联盟认为工业互联网是实体经济数字化转型的关键支撑,是实现第四次工业革命的重要基石,能够化解综合成本上升、产业向外转移风险,推动产业高端化发展,推进创新创业。

工业互联网是指工业互联的网,而不是工业的互联网。在企业内部,要实现工业设备(生产设备、物流装备、能源计量、质量检验、车辆等)、信息系统、业务流程、企业的产品与服务、人员之间的互联,实现企业IT网络与工控网络的互联,实现从车间到决策层的纵向互联;在企业间,要实现上下游企业(供应商、经销商、客户、合作伙伴)之间的横向互联;从产品生命周期的维度,要实现产品从设计、制造到服役,再到报废回收再利用整个生命周期的互联。这实际上与工业4.0提出的三个集成的内涵是相通的。

工业互联网将智能机器或特定类型的设备与嵌入式技术和物联网结合起来,例如对机器和车辆配备智能技术,包括机器与机器互联(machine to machine, M2M)技术,实现制造装备和其他设备间的数据传输。工业互联网也应用于交通项目,例如无人(或自主)驾驶汽车和智能轨道交通系统。

2) 工业互联网参考架构

为了应对工业互联网发展中的挑战,整合工业互联网的技术、概念和应用,工业互联网联盟提出了工业互联网参考架构(IIRA),如图3.16所示。IIRA主要通过工业互联网架构框架IIAF来表现。IIAF由框架和表示两个模块构成;框架模块基于对于问题的识别、评估和解决,以视图和模型两种方式将解决方案予以呈现;IIRA可以将其思想、成果等应用于IIoT系统,使得系统架构得以扩展、丰富和发展,而获得发展的IIoT系统又会将实践中新的思想、技术等反馈给IIoT,促进IIRA的改进提升。IIAF是IIRA的基础,可以用来展示IIoT系统中的关键部分。IIRA中的模型及其表示展示了参考体系结构的关键思想,其建立提供了将智能设备、机器、人员、过程和数据互联在一起的公共体系结构。

图3.16说明了工业互联网参考架构及其应用的关键思想。

识别利益相关方并确定关注点有四个视角,分别为业务视角(需求模型)、使用视角(用例模型)、功能视角(功能模型)和实现视角(部署模型)。工业互联网的其他体系结构可以根据这四个视角,然后结合特定需求来扩展自己的视角。这些视角按照图3.17所示的顺序排列,较高层次的视角可以指导较低层次的视角并对其施加要求。

相关学者认为工业互联网作为传统工业体系和新型信息技术的结合体,需要包括智能传感与控制技术、网络互联技术、数据处理技术、安全技术在内的多种关键技术支撑。

在新工业革命和新一代信息通信技术的催动下,主要国家在推进制造业数字化、智能

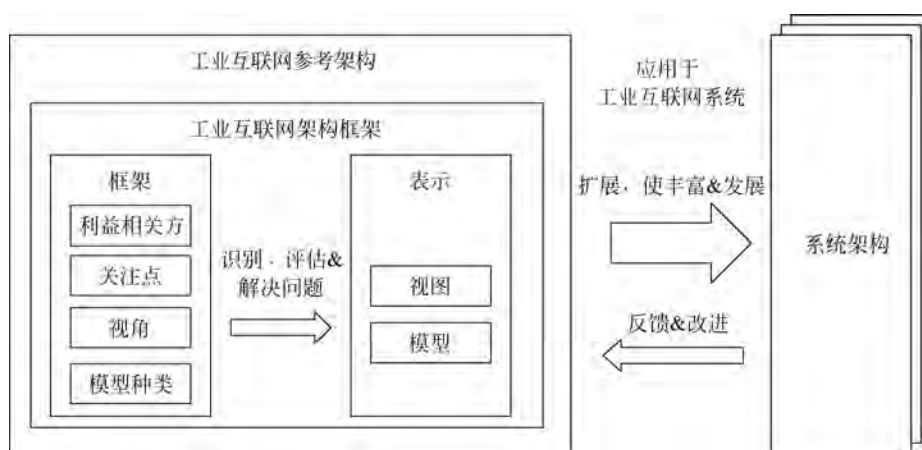


图 3.16 IIRA 结构和应用

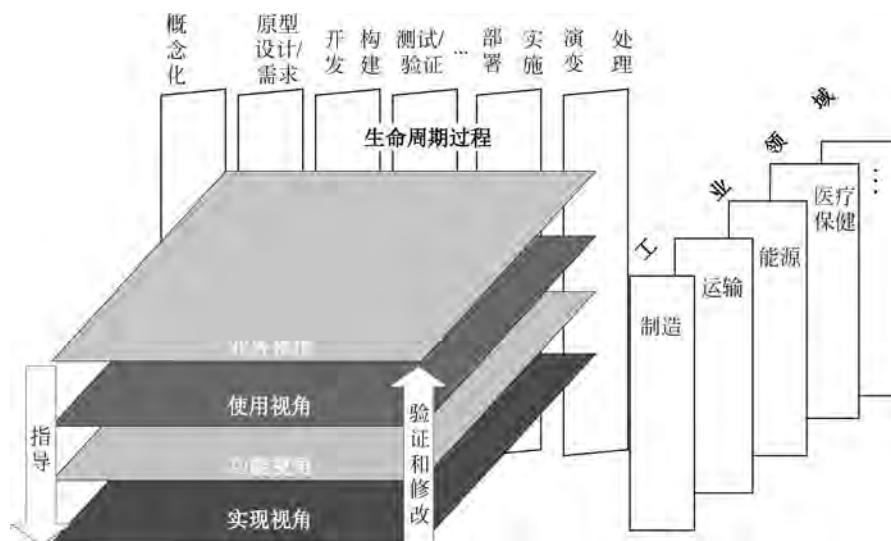


图 3.17 IIRA 观点、应用范围与系统生命周期流程的关系

化转型的过程中,不约而同地把参考架构设计作为重要抓手,如德国推出工业 4.0 参考架构、美国推出工业互联网参考架构、日本推出工业价值链参考架构,其核心目的是以参考架构来凝聚产业共识与各方力量,指导技术创新和产品解决方案的研发,引导制造企业开展应用探索与实践,并组织标准体系建设与标准制定,从而推动一个创新型领域从概念走向落地。

我国工业互联网产业联盟于 2016 年 8 月发布了《工业互联网体系架构(版本 1.0)》(以下简称“体系架构 1.0”)(见图 3.18)。体系架构 1.0 提出了工业互联网网络、数据、安全三大体系,其中“网络”是工业数据传输交换和工业互联网发展的支撑基础,“数据”是工业智能化的核心驱动,“安全”是网络与数据在工业中应用的重要保障。基于三大体系,工业互联网重点构建三大优化闭环,即面向机器设备运行优化的闭环,面向生产运营决策优化的闭环,以及面向企业协同、用户交互与产品服务优化的全产业链、全价值链的闭环,并进一步形成智能化生产、网络化协同、个性化定制、服务化延伸等四大应用模式。

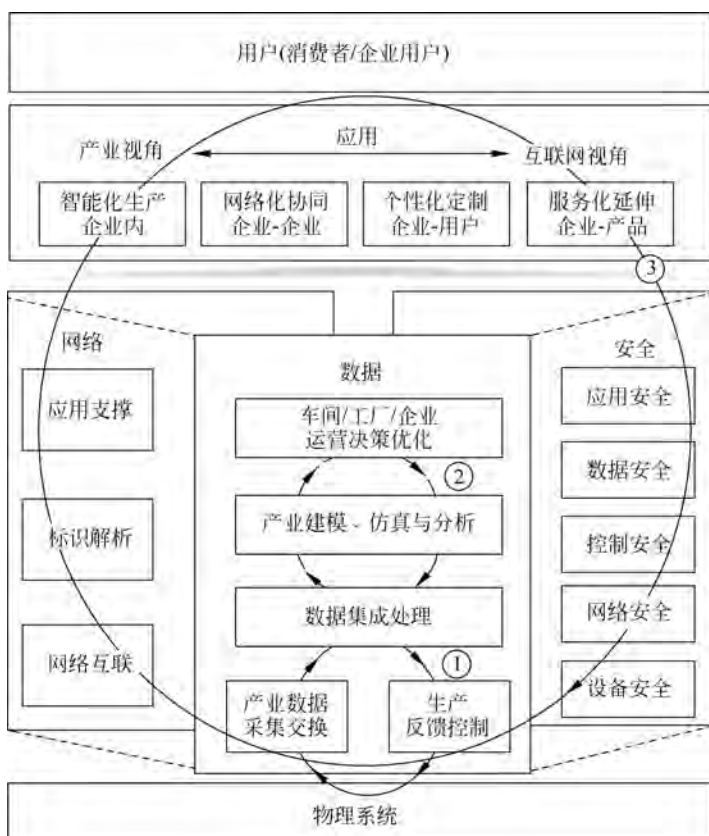


图 3.18 工业互联网体系架构 1.0

随着工业互联网的深入发展,要求工业互联网由理念与技术验证走向规模化应用推广,旨在为企业应用提供一套可供开展实践的方法论,从战略层面为企业开展工业互联网实践指明方向;结合规模化应用需求对功能架构进行升级和完善;提出更易于企业应用部署的实施框架;重点是强化与现有制造系统的结合,明确各层级的工业互联网部署策略以及所对应的具体功能、系统和部署方式,以便对企业实践提供更强的参考作用。

基于上述四方面考虑,工业互联网产业联盟组织研究提出了工业互联网体系架构 2.0 (以下简称“体系架构 2.0”),旨在构建一套更全面、更系统、更具体的总体指导性框架。在发展和演进的同时,体系架构 2.0 也充分继承了体系架构 1.0 的核心思想:一是体系架构 2.0 仍突出数据作为核心要素;二是体系架构 2.0 仍强调数据智能化闭环的核心驱动及其在生产管理优化与组织模式变革方面的变革作用;三是体系架构 2.0 继承了三大功能体系。考虑到体系架构 1.0 中网络、数据、安全在数据功能上存在一定重叠,如网络体系包含数据传输与互通功能,安全体系中包含数据安全功能,因此在体系架构 2.0 中以平台替代数据,重点体现 1.0 中数据的集成、管理与建模分析功能,形成网络、平台、安全三大体系,但功能内涵与 1.0 基本一致。

工业互联网体系架构 2.0 包括业务视图、功能架构、实施框架三大板块,如图 3.19 所示,形成以商业目标和业务需求为牵引,进而明确系统功能定义与实施部署方式的设计思路,自上向下层层细化和深入。

业务视图明确了企业应用工业互联网实现数字化转型的目标、方向、业务场景及相应的数字化能力,主要用于指导企业在商业层面明确工业互联网的定位和作用,提出的业务需求和数字化能力需求对于后续功能架构设计是重要指引。功能架构明确企业支撑业务实现所需的核心功能、基本原理和关键要素,主要用于指导企业构建工业互联网的支撑能力与核心功能,并为后续工业互联网实施框架的制定提供参考。实施框架描述各项功能在企业落地实施的层级结构、软硬件系统和部署方式。实施框架结合当前制造系统与未来发展趋势,提出了由设备层、边缘层、企业层、产业层四层组成的实施框架层级划分,明确了各层级的网络、标识、平台、安全的系统架构、部署方式以及不同系统之间的关系。实施框架主要为企业提供工业互联网具体落地的统筹规划与建设方案,进一步指导企业技术选型与系统搭建。

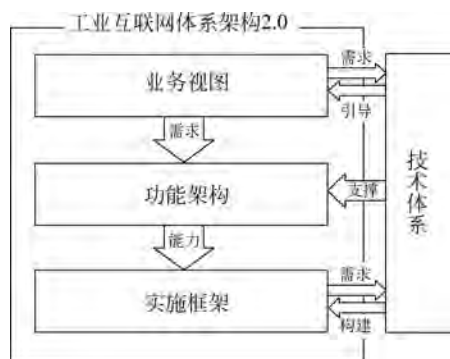


图 3.19 工业互联网体系架构 2.0

3) 工业互联网技术体系

我国工业互联网产业联盟认为工业互联网技术体系是支撑功能架构实现、实施框架落地的整体技术结构,其超出了单一学科和工程的范围,需要将独立技术联系起来构建成相互关联、各有侧重的新技术体系,在此基础上考虑功能实现或系统建设所需的重点技术集合。同时,以人工智能、5G 为代表的新技术加速融入工业互联网,不断拓展工业互联网的能力内涵和作用边界。

工业互联网的核心是通过更大范围、更深层次的连接实现对工业系统的全面感知,并通过对获取的海量工业数据的建模分析,形成智能化决策,其技术体系由制造技术、信息技术以及两大技术交织形成的融合性技术组成。制造技术和信息技术的突破是工业互联网发展的基础,例如增材制造、现代金属、复合材料等新材料和加工技术不断拓展制造能力边界,云计算、大数据、物联网、人工智能等信息技术快速提升人类获取、处理、分析数据的能力。制造技术和信息技术的融合强化了工业互联网的赋能作用,催生了工业软件、工业大数据、工业人工智能等融合性技术,使机器、工艺和系统的实时建模和仿真,产品和工艺技术隐性知识的挖掘和提炼等创新应用成为可能。

在工业互联网技术体系中(见图 3.20),信息技术勾勒了工业互联网的数字空间。新一代信息通信技术一部分直接作用于工业领域,构成了工业互联网的通信、计算、安全基础设施;另一部分基于工业需求进行二次开发,成为融合性技术发展的基石。在通信技术中,以 5G、WiFi 为代表的网络技术提供了更可靠、快捷、灵活的数据传输能力,标识解析技术为对应工业设备或算法工艺提供了标识地址,保障了工业数据的互联互通和精准可靠;边缘计算、云计算等计算技术为不同工业场景提供了分布式、低成本数据计算能力;数据安全和权限管理等安全技术保障了数据的安全、可靠、可信。信息技术一方面构建了数据闭环优化的基础支撑体系,使绝大部分工业互联网系统可以基于统一的方法论和技术组合构建;另一方面打通了互联网领域与制造领域技术创新的边界,统一的技术基础使互联网中的通用技术创新可以快速渗透到工业互联网中。

融合技术驱动了工业互联网物理系统与数字空间的全面互联与深度协同。制造技术



图 3.20 工业互联网技术体系总图

和信息技术都需要根据工业互联网中的新场景、新需求进行不同程度的调整,才能构建出完整可用的技术体系。工业数据处理与分析技术在满足海量工业数据存储、管理、治理需求的同时,基于工业人工智能技术形成了更有深度的数据洞察,与工业知识整合共同构建了数字孪生体系,支撑分析预测和决策反馈;工业软件技术基于流程优化、仿真验证等核心技术将工业知识进一步显性化,支撑工厂/产线虚拟建模与仿真、多品种变批量任务动态排产等先进应用;工业交互和应用技术基于 VR/AR 改变了制造系统的交互使用方式,通过云端协同和低代码开发技术改变了工业软件的开发和集成模式。融合技术一方面构建出了符合工业特点的数据采集、处理、分析体系,推动了信息技术不断向工业核心环节渗透;另一方面重新定义了工业知识积累、使用的方式,提升了制造技术优化发展的效率和效能。

4) 工业互联网与其他概念的关系

(1) 工业互联网与工业物联网的关系。

工业物联网是工业互联网的基础。工业物联网指的是物联网在工业上的应用;工业互联网涵盖了工业物联网,进一步延伸到企业的信息系统、业务流程和人员。

工业互联网的概念实际上与国外提出的万物互联,将人、流程、数据和事物结合在一起,使得网络连接变得更加相关、更有价值的理念有相似之处,相当于是工业企业的万物互联。

(2) 工业互联网与智能制造的关系。

工业互联网的核心是互联,是制造企业实现智能制造的关键使能技术之一。根据智能制造金字塔模型,企业推进智能制造包含四个层次、十个场景。

智能制造的四个层次及核心内容如下。

第一层是推进产品的智能化和智能服务,从而实现商业模式创新。在这一层,工业互联网可以支撑企业开发智能互联产品,基于物联网提供智能服务。

第二层是如何应用智能装备、部署智能产线、打造智能车间、建设智能工厂,从而实现生产模式的创新。在这一层,工业互联网技术可以帮助企业实现机器与机器互联,实现从设备联网到产线的数据采集以及从车间的智能监控到生产无纸化等。

第三层是智能研发、智能管理和智能物流与供应链,以实现企业运营模式的创新。在这一层,工业互联网的主要作用是实现企业内的信息集成和企业间的供应链集成。

第四层是智能决策。在这一层,工业互联网的作用是实现异构数据的整合与实时分析。

智能制造的主要核心内容与应用场景主要包括智能产品、智能研发、智能装备、智能产线、智能车间、智能工厂、智能管理、智能供应链与物流、智能服务以及智能决策等。

(3) 工业互联网与工业大数据的关系。

工业互联网平台需要管理海量和异构的,结构化、半结构化和非结构化的数据,包括来自各种设备、已服役的产品、信息系统和社交媒体的数据。对于工业企业而言,这些数据就是工业大数据,需要用专业的平台来存储、分析、展现这些数据,通过数据驱动,实现对产品、制造工艺和设备进行监控、控制和优化等功能。这样的平台就是工业大数据平台。应该说,工业大数据平台是工业互联网平台的一个子集。

3.2.3.3 云计算、雾计算、边缘计算与边缘云计算

1. 云计算

云计算是分布式计算的一种,根据 ISO/IEC 17788《信息技术-云计算-概览与词汇》的定义:云计算是一种将可伸缩、弹性、共享的物理和虚拟资源池以按需自服务的方式供应和管理,并供网络访问的模式。云计算模式由关键特征、云计算角色和活动、云能力类型和云服务类别、云部署模型、云计算的共同关注点组成。云计算是分布式计算、效用计算、负载均衡、并行计算、网络存储、备份冗余和虚报化等计算机技术混合演进并进升的结果。

云计算系统由云平台、云存储、云终端、云安全四个基本部分组成。云平台从用户的角度可分为公有云、私有云、混合云和多云四种类型。从提供服务的层次可分为基础设施即服务(infrastructure as a service,IaaS)、平台即服务(platform as a service,PaaS)和软件即服务(software as a service,SaaS)三种云计算服务类型。近几年来,云计算正在成为信息技术产业发展的战略重点,全球的信息技术企业都在纷纷向云计算转型。

2. 雾计算

雾计算的概念最初是由美国纽约哥伦比亚大学的 Savatore Sofo 教授提出的,当时的意图是利用“雾”来阻挡黑客入侵。雾计算可理解为本地化的云计算。

3. 边缘计算

边缘计算并未形成统一的定义。ISO/IEC JTC1/SC38 对边缘计算给出的定义是:边缘计算是一种将主要处理和数据存储放在网络边缘节点的分布式计算形式。边缘计算产业联盟对边缘计算的定义是指在靠近物或数据源头的网络边缘侧,融合网络、计算、存储、应用核心能力的开放平台,就近提供边缘智能服务,满足行业数字化在敏捷连接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求。国际标准组织欧洲电信标准化协会对其的定义为:边缘计算是在移动网络边缘提供 IT 服务环境和计算能力,强调靠近移动用户,以减少网络操作和服务交付的时延,高用户体验。

上述边缘计算的各种定义虽然表述上各有差异,但基本都在表达一个共识:在更靠近终端的网络边缘上提供服务。这种运算既可以在大型运算设备内完成,也可以在中小型运算设备、目的端网络内完成;用于边缘运算的设备可以是智能手机这样的移动设备、PC 智能家居等家用终端,也可以是 ATM 机、摄像头等终端。如果说云计算是集中式大数据处理,那么边缘计算可以理解为边缘式大数据处理。

4. 边缘云计算

目前对云计算的概念都是基于集中式的资源管控给出的,即使采用多个数据中心互联互通形式,依然将所有的软硬件资源视为统一的资源进行管理、调度和售卖。随着 5G、物联网时代的到来以及云计算应用的逐渐增加,集中式的云已经无法满足终端侧“大连接,低时延,大带宽”的云资源需求。结合边缘计算的概念,云计算将必然发展到下一个技术阶段,就是将云计算的能力拓展至距离终端更近的边缘侧,并通过云边端的统一管控实现云计算服务的下沉,提供端到端的云服务。边缘云计算的概念也随之产生。

边缘云计算技术及标准化白皮书(2018 年)给出了边缘云计算的定义:边缘云计算简称边缘云,是基于云计算技术的核心和边缘计算的能力,构筑在边缘基础设施之上的云计算平台。它可形成边缘位置的计算、网络、存储、安全等能力全面的弹性云平台,并与中心云和物联网终端构成“云边端三体协同”的端到端的技术架构,通过将网络转发、存储、计算、智能化数据分析等工作放在边缘处理,降低响应时延,减轻云端压力,降低带宽成本,并提供全网调度、算力分发等云服务。

边缘云计算的基础设施包括但不限于分布式数据中心、运营商通信网络边缘基础设施、边缘侧客户节点(如边缘网关、家庭网关等)等边缘设备及其对应的网络环境。

图 3.21 表述了边缘云计算的基本概念。边缘云作为中心云的延伸,将云的部分服务或者能力(包括但不限于存储、计算、网络、AI、大数据、安全等)扩展到边缘基础设施之上。中心云和边缘云相互配合,实现中心-边缘协同、全网算力调度、全网统一管控等能力,真正实现“无处不在”的云。

未来边缘计算和云计算是相辅相成、相互配合的。边缘计算的定位是拓展云的边界,把计算力拓展到离“万物”一公里以内的位置。将边缘计算和云计算相结合,目前业界有很多尝试,也是技术研究的一大热点。

云计算、雾计算、边缘计算和边缘云计算可以为数字孪生体提供计算基础设施。

3.2.3.4 数字孪生

1. 数字孪生产生的背景及定义

业界认为数字孪生(digital twin,DT)概念(见图 3.22)最早由当时的 PLM 咨询顾问 Michael Grieves 博士(现任佛罗里达理工学院先进制造首席科学家)于 2002 年 10 月在美国制造工程协会管理论坛上提出,即“与物理产品等价的虚拟数字化表达”,但当时并没有准确命名。2005 年,Michael Grieves 博士将该概念模型命名为镜像空间模型,2006 年又将其命名为信息镜像模型。2009 年,数字孪生这一名称首次出现在美国空军实验室提出的“机身数字孪生”概念中。2010 年,NASA(National Aeronautics and Space Administration,美国国家航空航天局)在《建模、仿真、信息技术和处理》和《材料、结构、机械系统和制造》两份技术路线图中直接使用了“数字孪生”这一名称。2011 年,NASA 先进材料和制造领域首

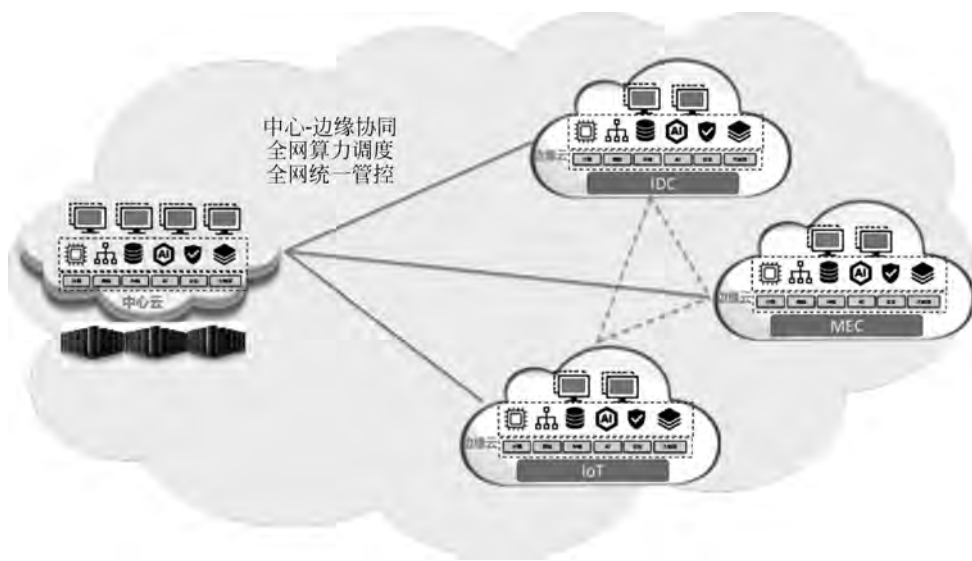


图 3.21 边缘云计算示意图

席技术专家 John Vickers 提出将其命名为数字孪生。同年,Michael Grieves 博士在其新书 *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management* 中引用了 John Vickers 所建议的“数字孪生”这一名称,作为其信息镜像模型的别名,并一直延续至今。2013 年,美国空军将数字孪生和数字线程作为游戏规则改变者列入其《全球科技愿景》。

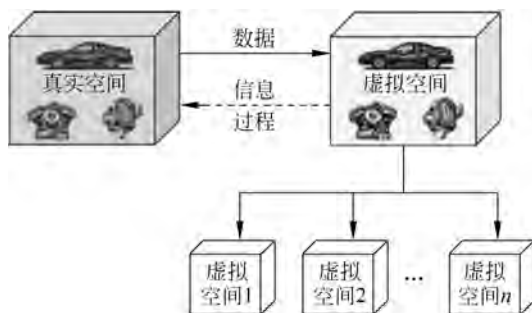


图 3.22 数字孪生体的最初概念模型及其术语名称的前身——PLM 的概念化理想

Michael Grieves 博士最初仅对数字孪生的模型进行了定义,即由物理实体、虚拟实体以及两者之间的连接共同组成,并没有对其具体定义进行描述。而后,NASA 撰写的空间技术路线图中对数字孪生定义如下:数字孪生是一种面向飞行器或系统的高度集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真模型,能够充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,在虚拟空间中完成映射,从而反映实体装备的全生命周期过程。NASA 对于数字孪生的定义受到了广泛的关注和认可,在此基础上,不同领域的研究人员也提出了自己的理解和定义,具体如表 3.1 所示。

表 3.1 数字孪生的重要概念和解释汇总

提 出 方	概 念 内 容	时 间
美国空军研究实验室等	机身数字孪生体是一个由数据、模型和分析工具构成的集成系统。该系统不仅可以在整个生命周期内表达飞机机身,并可以依据非确定信息对整个机队和单架机身进行决策,包括当前诊断和未来预测	2009 年
美国国家航空航天局	数字孪生是一种面向飞行器或系统的高度集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真模型,能够充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,在虚拟空间中完成映射,从而反映实体装备的全生命周期过程	2010 年
Michael Grieves	信息镜像模型作为概念化 PLM 的框架,揭示了物理产品和虚拟产品二元性的含义。使用虚拟产品代替物理产品的能力体现了信息镜像模型的价值	2011 年
美国空军	数字孪生是系统的虚拟表达,作为实际运行的单个系统实例在整个生命周期中应用的数据、模型和分析工具的集成系统	2013 年
美国国防部	数字线程:一个可扩展、可配置和组件化的企业级分析框架,基于数字系统模型的模板,可以无缝加速企业数据信息知识系统中授权技术数据、软件、信息和知识的受控交互;通过访问和集成不同数据并转换为可操作信息,可在系统整个生命周期中为决策者提供支持。 数字孪生:数字线程支持的、已建系统的、多物理场、多尺度和概率集成仿真,通过使用最佳可用模型、传感器更新和输入数据来镜像和预测其对应物理孪生体全生命期内的活动和性能	2014 年
西门子	数字孪生是产品或生产工厂的精确虚拟化模型,它展示了产品和生产全生命周期的演进,用于理解、预测和优化对应物的性能特点	2016 年
德勒	数字孪生体是某一物理实体(或过程)的历史和当前行为的数字化描述。这是一种持续进化的描述,有助于优化业务绩效	2017 年
IBM 公司	数字孪生是对物理对象或系统在全生命期内的虚拟表达,并通过使用实时数据实现理解、学习和推理	2017 年
ISO 23247	数字孪生体:是现实事物(或过程)具有特定目的的数字化表达,并通过适当频率的同步使物理实例与数字实例之间趋向一致	2019 年
中国北京航空航天大学等/陶飞等	数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、忠实映射、高保真度特性,能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段	2018 年
中国电子信息产业发展研究院	数字孪生是综合运用感知、计算、建模等信息技术,通过软件定义,对物理空间进行描述、诊断、预测、决策,进而实现物理空间与赛博空间的交互映射	2019 年
安世亚太	数字孪生是现有或将有的物理实体对象的数字模型,通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态,通过优化和指令来调控物理实体对象的行为,通过相关数字模型间的相互学习来进化自身,同时改进利益相关方在物理实体对象生命周期内的决策	2019 年
中国北京航空航天大学/张霖	数字孪生是物理对象的数字模型,该模型可以通过接收来自物理对象的数据而实时演化,从而与物理对象在全生命周期保持一致	2020 年
中国电子标准化研究院	数字孪生是基于传感器更新、运行历史、物理模型等孪生数据,完成从物理实体到信息虚体的模型映射,以及从信息虚体反馈至物理实体的过程。数字孪生能够实现仿真、监测、诊断、预测、迭代优化等数字孪生服务	2020 年

对于国内的研究,中国电子信息产业发展研究院给出了数字孪生的概念及模型,如图 3.23 所示。我国电子标准化研究院和信息物理系统发展论坛不仅给出了 Digital twin 的定义,同时也给出了 Digital twin 与 Digital twins 的关系,如图 3.24 所示。其中,数字孪生包括物理实体、信息虚体(数字孪生体:孪生数据、数字模型;数字主线;数字孪生服务)以及上述任意二者之间的交互对接。数字主线(Digital Thread)负责以统一的模型为核心,构建包含产品全生命周期与全价值链的数据流,疏通信息孤岛,驱动知识生成,建立统一的数据、信息、知识的传递和访问规则。

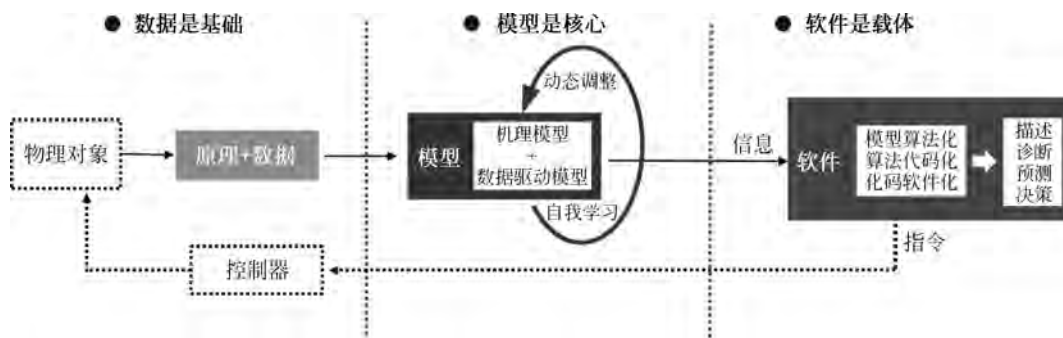


图 3.23 数字孪生的概念模型

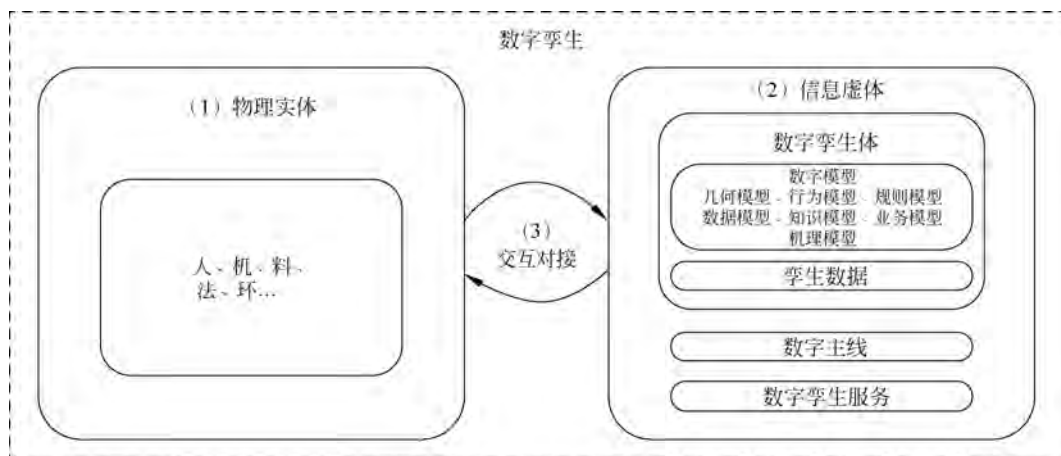


图 3.24 数字孪生与数字孪生体的关系

数字孪生体能够将物理实体的各项参数进行映射,具备与物理实体交互、决策的能力,由孪生数据、数字模型组成。孪生数据能够通过传感器更新、运行历史、物理模型等将物理空间的显性、隐性数据在信息空间集中汇聚、呈现,是构建数字孪生体的核心要素。数字模型能够在信息空间再现物理实体的物理属性、功能、行为和性能等,支撑数字孪生体完成相关服务。

通过数字孪生技术,可设计数字孪生接口与互操作规范,定义数字孪生间的相互逻辑关系,从数字孪生图谱中选择数字孪生体,确定数字孪生体内部的数据传递关系、模型融合机制和同步建模等级,实现多数字孪生体的协同与处理。通过定义多个数字孪生体的交互

关系,可使多个数字孪生体互联协同,形成更复杂更高级别的数字孪生体。数字孪生可在物理空间和信息空间之间建立准实时联系,实现互联互通互操作,在信息空间中对物理空间实体进行描述、诊断、预测,从而优化资源配置效率。

2. 数字孪生的特征

数字孪生的典型特征可以概括为数据驱动、模型支撑、软件定义、精准映射、智能决策。

(1) 数据驱动。数字孪生的本质是在比特的汪洋中重构原子的运行轨道,以数据的流动实现物理世界的资源优化。

(2) 模型支撑。数字孪生的核心是面向物理实体和逻辑对象建立机理模型或数据驱动模型,形成物理空间在赛博空间的虚实交互。

(3) 软件定义。数字孪生的关键是将模型代码化、标准化,以软件的形式动态模拟或监测物理空间的真实状态、行为和规则。

(4) 精准映射。通过感知、建模、软件等技术,实现物理空间在赛博空间的全面呈现、精确表达和动态监测。

(5) 智能决策。未来数字孪生将融合人工智能等技术,实现物理空间和赛博空间的虚实互动、辅助决策和持续优化。

3. 数字孪生与数字主线

1) 数字主线的概念

随着产品复杂度和业务复杂度的增加,企业正在或即将面临数据量急剧增加的挑战,这些数据散落在各个孤立的信息系统、桌面计算机或工控设备甚至各种杂乱无章的纸质单据中。因此,工业企业迫切需要做的是让这些数据流动起来,真正为企业所用。因此,数字主线概念开始获得关注。Digital Thread 也被译为数字线程、数字链、数字线等,其概念最先于 2003 年由美国空军和洛克希德·马丁公司在联合研发的 F-35 闪电 II 项目中提出。

数字主线是指可扩展、可配置和组件化的企业级分析通信框架。基于该框架可构建覆盖系统生命周期与价值链全部环节的跨层次、跨尺度、多视图模型的集成视图,进而统一模型驱动系统的生存期活动,为决策者提供支持。根据美军方对数字主线的定义和解释,其目标就是要在系统全生命期内实现在正确的时间、正确的地点,把正确的信息传递给正确的人。这一目标和 20 世纪 90 年代 PDM/PLM 技术和理念出现时的目标完全一致,只不过数字主线是要在数字孪生环境下实现这一目标。

2) 实现数字主线的需求

数字主线需要在数字孪生环境下实施。实现数字主线有如下需求。

(1) 能区分类型和实例;支持需求及其分配、追踪、验证和确认;支持系统跨时间尺度各模型视图间的实际状态纪实、关联和追踪。

(2) 支持系统跨空间尺度各模型视图间的关联和与时间尺度模型视图的关联。

(3) 记录各种属性及其值随时间和不同的视图的变化。

(4) 记录作用于系统以及由系统完成的过程或动作。

(5) 记录使能系统的用途和属性。

(6) 记录与系统及其使能系统相关的文档和信息。

3) 数字孪生与数字主线的关系

从概念上来说,数字主线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。数字主线和数字孪生体之间的关系如图 3.25 所示。从图 3.25 可以看出,能够实现多视图模型数据融合的机制或引擎是数字主线技术的核心。因此,在数字孪生体的概念模型中,将数字主线表示为模型数据融合引擎和一系列数字孪生体的集合。

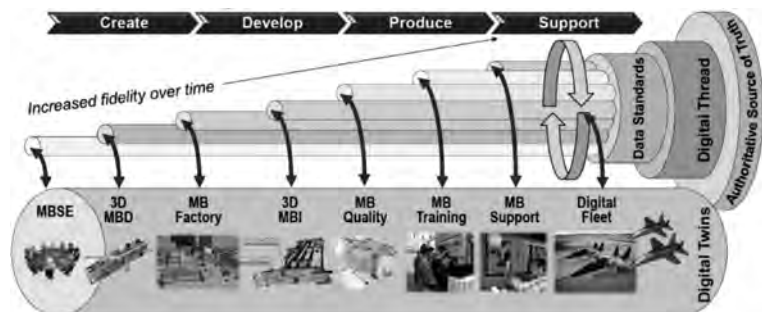


图 3.25 数字孪生与数字主线的关系

在应用场景上,美国通用电气公司认为数字主线概念的产生及在工业互联网等领域的应用起到了先驱作用。通用航空认为需要创建一个穿插于从初创概念到实际操作设计过程中的“数字主线”,来处理其中的数据。2015 年,通用电气公司率先推出了全球第一个工业互联网平台——Predix,并将数字孪生与数字主线融入其中,如图 3.26 所示。

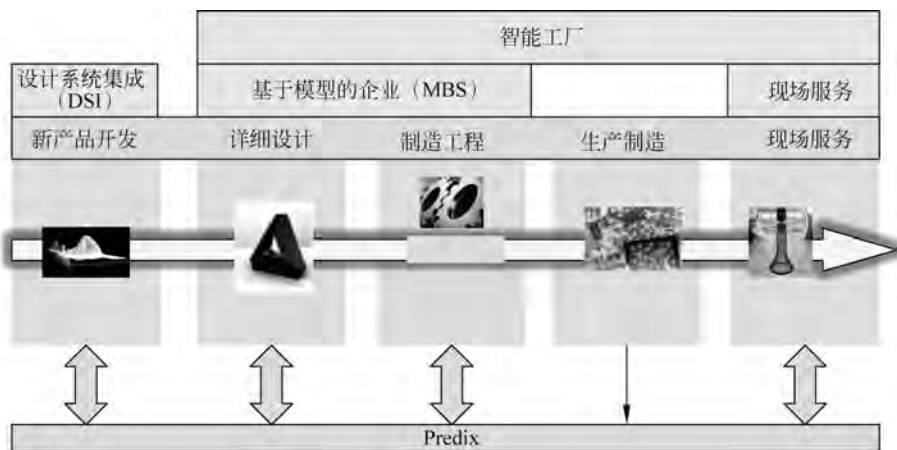


图 3.26 通用电气的 Predix 数字主线

综上所述,数字主线与数字孪生联系密切。数字主线试图打通产品全生命周期(研发、制造、营销、服务等)和企业的全价值链(用户、供应链、物流等)中的数据链路,以业务为核心对这些数据进行解耦、重构和复用,以达到客户体验、服务、商业模式等的统一提升。图 3.27 很好地诠释了这一理念。例如,设计者可以快速在线看到设计的产品在生产制造、销售客户等流程的问题,使问题可快速直接反馈给设计师,便于维修和优化等。

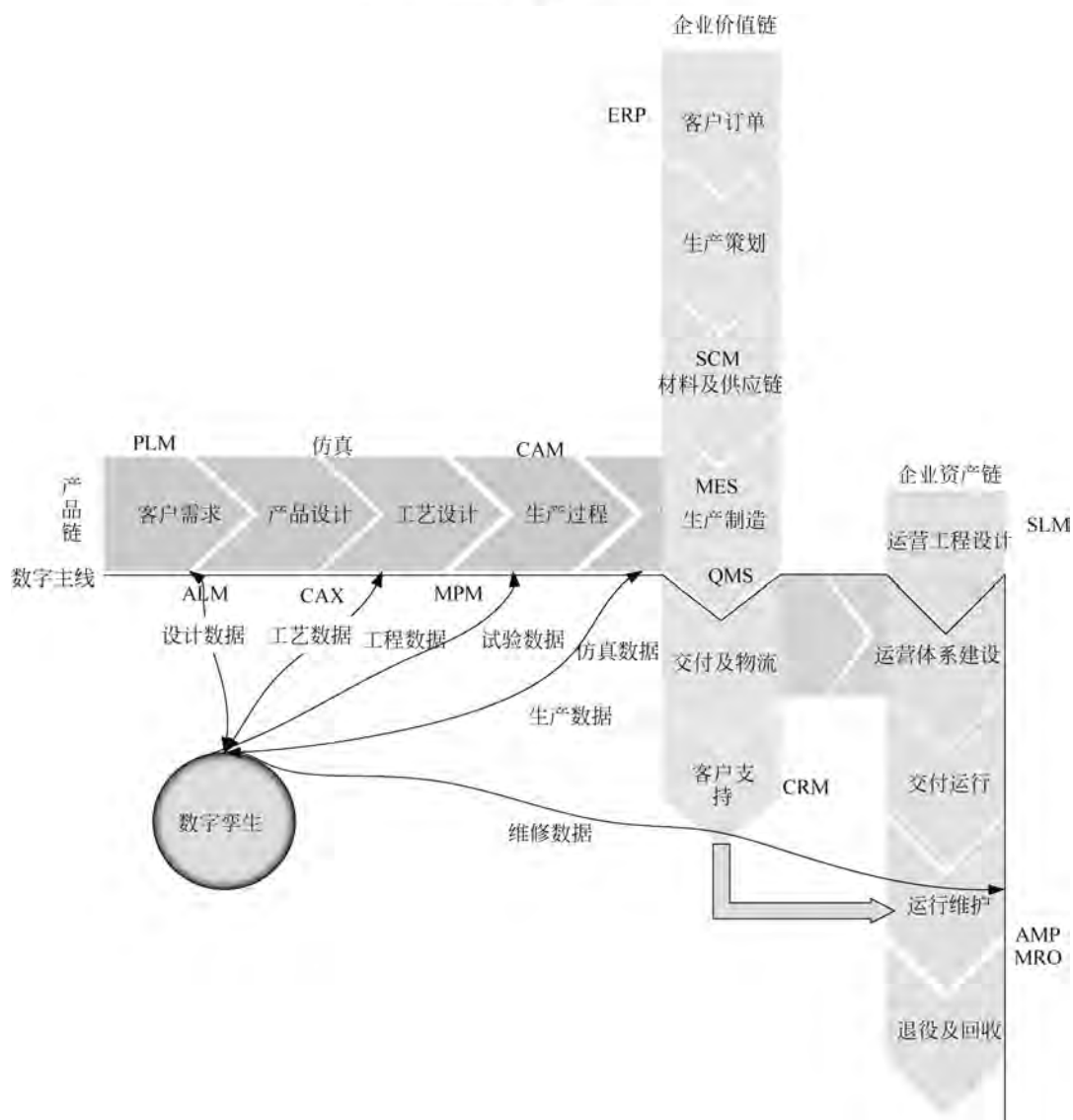


图 3.27 产品数字孪生与数字主线

4. 数字孪生的应用场景

1) 数字化设计：数字孪生+产品创新

达索、PTC、波音等公司综合运用数字孪生技术打造了产品设计数字孪生体，在赛博空间进行体系化仿真，实现了反馈式设计、迭代式创新和持续性优化。目前，在汽车、轮船、航空航天、精密装备制造等领域已普遍开展原型设计、工艺设计、工程设计、数字样机等形式的数字化设计实践。

2) 虚拟工厂：数字孪生+生产制造全过程管理

西门子、洛马等国外公司以及华龙迅达、东方国信、石化盈科等国内公司，在赛博空间打造了映射物理空间的虚拟车间、数字工厂，推动了物理实体与数字虚体之间数据的双向动态交互，并根据赛博空间的变化及时调整生产工艺，优化生产参数，提高生产效率。

3) 设备预测性维护：数字孪生+设备管理

通用、空客等公司开发的设备数字孪生体并与物理实体同步交付,实现设备全生命周期数字化管理,同时依托现场数据采集与数字孪生体分析,提供了产品故障分析、寿命预测、远程管理等增值服务,提升用户体验,降低运维成本,强化企业核心竞争力。

4) 智慧城市：数字孪生+城市运行管理

通过建设城市数字孪生体,以定量与定性结合的形式,在数字世界推演天气环境、基础设施、人口土地、产业交通等要素的交互运行,绘制“城市画像”,支撑决策者在物理世界实现城市规划“一张图”、城市难题“一眼明”、城市治理“一盘棋”的综合效益最优化布局。

5) 车联网：数字孪生+V2X

以百度、谷歌、腾讯等为代表的企业,积极探索数字孪生技术在车联网中的应用,有效实现了车与人、车、路、设施的全面连接,极大推动了自动驾驶的智能化水平、交通安全保障水平和公共交通服务效率的提升。

6) 智慧医疗：数字孪生+医疗服务

达索、海信等公司尝试将数字孪生与医疗服务相结合,实现人体运行机理和医疗设备的动态监测、模拟和仿真,可加快科研创新向临床实践的转化速度,提高医疗诊断效率,优化医疗设备质控管理。

3.2.3.5 信息物理系统

信息物理系统是美国科学基金会在 2006 年提出的新技术概念,并将此项技术体系作为新一代技术革命的突破点。同时,德国的工业 4.0 战略也将信息物理生产系统作为核心技术,其实质是信息物理系统在生产系统中的应用。无论是德国的工业 4.0 战略还是美国的工业互联网计划,都将信息物理系统作为智能化转型的核心技术,并据此设定各自的战略转型目标。

1. 国内外信息物理系统的概念研究

1) 国外的信息物理系统概念

2006 年美国国家科学基金会举办了第一届信息物理系统(CPS)研讨会,会议首次对 CPS 的定义进行了阐述:信息物理系统是网络环境中的通信(Communication)、计算(Computation)和控制(Control)与实体系统在所有尺度内的深度融合。这个定义给出了信息物理系统的三个基本元素,也就是人们最常提到的 3C 技术要素。

美国国家科学基金会从功能性的角度阐述了信息物理系统的内涵,即实体系统里面的物理规律以信息的方式来表达。而广义的信息物理系统的内涵是:对实体系统内变化性、相关性和参考性规律的建模、预测、优化与管理。

信息物理系统的技术基础包括物联网、普适计算和执行机构,它们定义了实体系统的功能性。网络空间中的来源、关系和参考构成了实体系统运行的基础,是信息物理系统在网络空间中的管理目标,其中建立面向实体空间内的比较性、相关性和因果性的对称性管理是核心的分析手段。

信息物理系统的最终目标是对实体系统的状态和活动的精确评估、对实体系统之间关系的挖掘和管理以及根据情况进行的决策优化。网络空间中的管理是对实体空间中 3V 的精确管理,即可视性(Visualizability)、差异性(Variation)和价值性(Value),如图 3.28 所示。

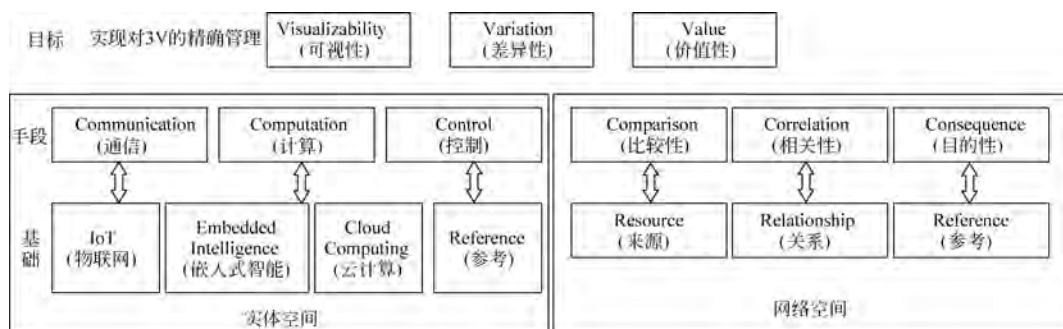


图 3.28 信息物理系统的基础架构

为了进一步理解信息物理系统的概念,本书整合了一些权威机构给出的定义,如表 3.2 所示。

表 3.2 信息物理系统的重要定义

国家或组织	定义	侧重点
美国国家科学基金会	信息物理系统是在物理、生物和工程系统中,相互协调、互相监控和由计算核心控制着的每一个联网的组件,计算被深深嵌入每一个物理成分,甚至可能进入材料。这个计算的核心是一个嵌入式系统,通常需要实时响应,并且一般是分布式的	3C 技术的有机融合与深度协作
美国国家标准与技术研究院	信息物理系统集成了计算、通信、传感器和带有物理系统的驱动器,以满足不同精度要求的实时交互功能,包括人机交互	信息物理系统独立单元所具备的功能及之间的交互
德国国家科学与工程院	信息物理系统是一种开放的、组网的新型系统,该系统通过使用传感器获取物理世界状态的数据,并将这些数据进行解释,使之可用于基于网络的服务中,同时通过使用执行器对物理世界的进程产生直接的影响,并控制装置、物体和服务的行为	数据在信息物理系统中获取、处理、反馈的行为

2) 我国的信息物理系统概念

2017 年 3 月,中国电子技术标准化研究院联合信息物理系统发展论坛成员单位,共同研究、编撰形成了《信息物理系统白皮书(2017)》,白皮书指出信息物理系统是通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术,构建了物理空间与信息空间中人、机、物、境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统,实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化。基于硬件、软件、网络、工业云等构建的智能复杂系统依托数据的自动流动(隐性数据、显性数据、信息、知识),为物理空间实体“赋予”一定范围内的资源优化“能力”。因此,信息物理系统的本质就是构建一套信息空间与物理空间之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能体系,提高资源配置效率,实现资源优化,如图 3.29 所示。从逻辑内涵角度看,无论是制造业数字化转型,还是工业互联网、两化融合,其本质都是在信息空间和物理空间之间构建一套闭环赋能体系,而构建这套闭环赋能体系的技术体系就是信息物理系统。

白皮书认为信息物理系统更是数据价值提升与业务流程再造的规则体系。信息物理系统将物理空间“研发设计—生产制造—运营管理—产品服务”等各业务环节以及设备、产

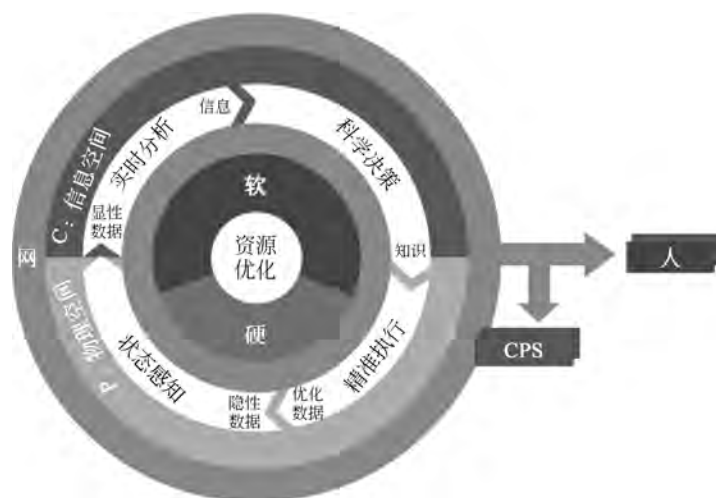


图 3.29 《信息物理系统白皮书(2017)》提出的信息物理系统的本质

线、产品和人等物理实体,在信息空间相对应地构建起数字孪生设计、数字孪生工艺、数字孪生流程、数字孪生生产线、数字孪生产品等,实现产品全生命周期流程在信息空间的数字孪生重构,并通过数字主线实现各数字孪生体之间的数据贯通;通过“数据+模型”,即数据到信息到知识到策略的转化,创造新的服务模式并执行,由此构建起了数据价值提升与业务流程再造的规则体系。这套规则体系具体来说包括业务数据化、知识模型化、数据业务化、决策执行化,即实现“业务—(数据化)—产生数据—(模型化)—高价值数据—(业务化)—反哺业务”的逻辑闭环,如图 3.30 所示。

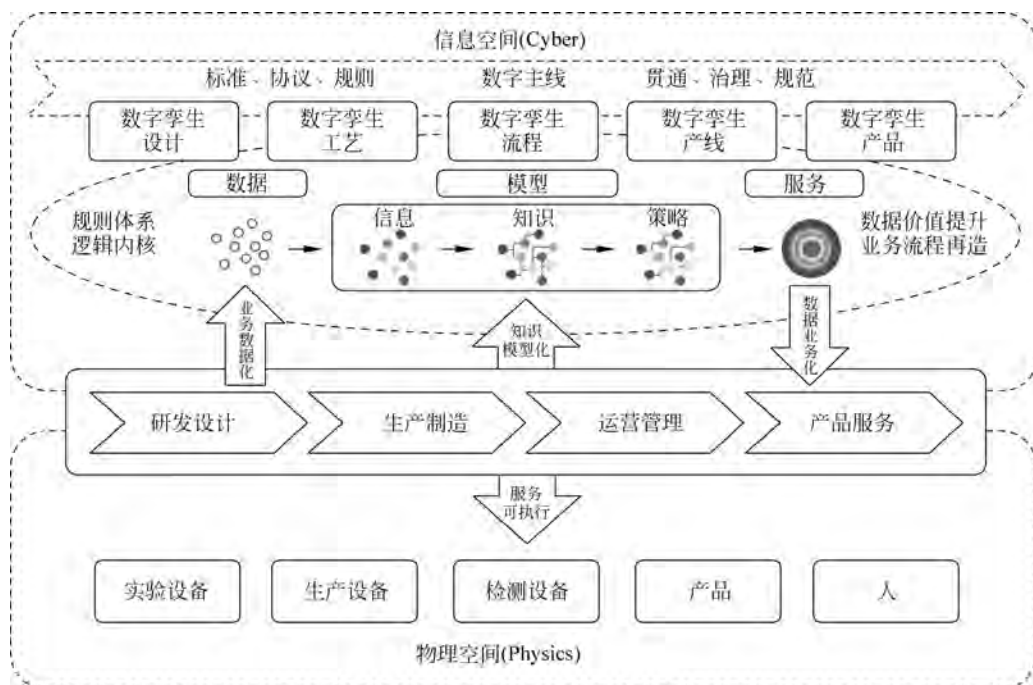


图 3.30 信息物理系统的数据价值提升与业务流程再造的规则体系

根据白皮书,可以从以下几方面来理解这套规则体系。

(1) 数据:业务数据化,实现隐性数据显性化。信息物理系统通过集成先进感知、计算、通信等技术,将“研发设计—生产制造—运营管理—产品服务”等各业务环节及制造资产中蕴含在背后的隐性数据在信息空间不断显性化,使得数据能够“可见”,实现业务流程的数据化。业务数据化是构建信息物理系统的基础,将“一切业务数据化”是实现在信息空间对业务全流程重构和优化的前提。业务数据化可分为资产数字化、流程数字化,即推动工业设备上云和业务系统上云,在信息空间构建与物理空间相对应的全流程业务逻辑及设备资产。

(2) 模型:知识模型化,实现隐性知识显性化。数字化模型是这些规则、逻辑、知识的数字化体现,将各类经验、知识、方法不断模型化、数字化并沉淀在云端,可以将杂乱无章的数据提炼成可理解的信息、转化为相互关联的知识、寻找到实现目标的策略。模型可分为机理模型(模型驱动)和大数据分析模型(数据驱动),是数据价值增值的“培养皿”,也是构建数字孪生的核心。模型嵌入数字孪生体中,提升了物理世界与信息世界的相互映射、高效协同。

(3) 服务:数据业务化,实现隐性价值显性化。信息物理系统是数据价值提升与业务流程再造的规则体系,这套规则体系的逻辑内核为基于模型(机理模型、大数据分析模型)的数据增值服务,简单说就是“数据+模型=服务”。基于“数据+模型”的核心逻辑一方面实现了“数据信息—知识—策略”的价值提升;另一方面,各类业务环节数据的统一汇聚、调用,打破了传统业务线性化流程的制式枷锁,实现了业务流程的重构与再造。当把海量数据加入到数字化模型中,进行反复分析、学习、迭代之后,可以带来“描述物理世界发生了什么、诊断为什么会发生、预测下一步会怎么样、决策该怎么办等”的高价值服务。将这种高价值服务以工业 App 等新型载体的形式呈现出来并反哺到业务流程中,把蕴含在大量数据背后的隐性价值不断显性化,即实现了数据的业务化。这一方面能够优化现有的业务流程及业务体系,另一方面能够拓展业务空间,带来新的经济增长点。

(4) 执行:服务可执行,实现显性价值的落地。业务数据化实现了生产全流程环节隐性数据在信息空间的显性化;知识模型化将物理空间的各类经验、规律、方法等隐性知识以数字化模型的形式在信息空间不断显性化,并通过“数据+模型”带来的数据增值服务;数据业务化将蕴含在大量数据背后的隐性价值不断显性化;而服务价值的落地应用必须要与物理空间中的物理实体相结合,使其符合物理空间的运行规律和逻辑,确保服务能够执行。

2. 信息物理系统的技术体系

下面分别引用一些研究者提出的 5C 技术架构和我国电子技术标准化委员会提出的信息物理系统技术体系来介绍这一概念。

1) 国外的信息物理系统技术体系

信息物理系统是一个具有清晰架构和使用流程的技术体系,针对工业大数据的特点和分析要求,能够实现数据收集、汇总、解析、排序、分析、预测、决策、分发的整个处理流程;可对实体系统进行流水线式的实时分析,并在分析过程中充分考虑机理逻辑、流程关系、活动目标、商业活动等特征和要求。

信息物理系统技术体系包括五个层次的构建模式:智能感知层、信息挖掘层、网络层、

认知层以及配置执行层。这个 5C 的分析构架设计的目的是满足实体空间与网络空间相互映射和相互指导过程中的分析和决策要求,其特征如图 3.31 所示。

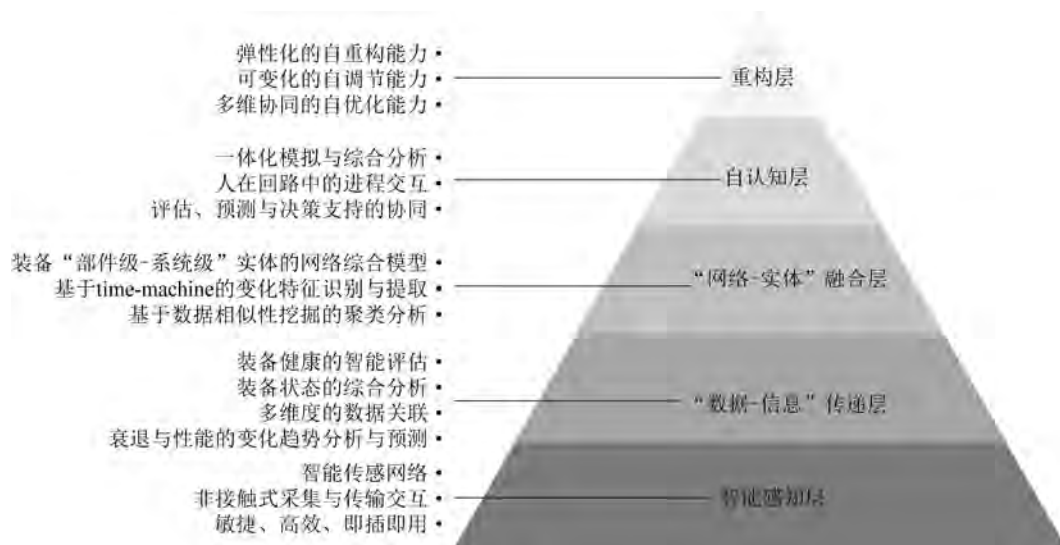


图 3.31 信息物理系统的 5C 构架

(1) 智能感知层。从信息来源、采集方式和管理方式上保证了数据的质量和全面性,建立了支持信息物理系统上层建筑的数据环境基础。除了建立互联的环境和数据采集的通道,智能感知的另一核心在于按照活动目标和信息分析的需求自主地进行选择性和有所侧重的数据采集。

(2) “数据-信息”传递层。从低价值密度的数据到高价值密度信息的转换过程,可以对数据进行特征提取、筛选、分类和优先级排列,保证了数据的可解读性,包括对数据的分割、分解、分类和分析过程。

(3) “网络-实体”融合层。重点在于网络环境中信息的融合和网络空间的建模,将机理、环境与群体有机结合,构建能够指导实体空间的建模分析环境,包括精确同步、关联建模、变化记录、分析预测等。

(4) 自认知层。在复杂环境与多维度参考条件下面向动态目标,根据不同的评估需求进行多元化数据的动态关联、评估、预测结果,实现对实体系统运行规律的认知以及物、环境、活动三者之间的关联、影响分析与趋势判断,形成“自主认知”的能力;同时结合数据可视化工具和决策优化算法工具为用户提供面向其活动目标的决策支持。

(5) 重构层。根据活动目标和认知层中的分析结果,对运行决策进行优化,并将优化结果同步到系统的执行机构中,以保障信息利用的时效性和系统运行的协同性。

除了技术架构的层级和流程化,信息物理系统的应用也具有清晰的层级化特征。下面从零部件级、设备级、生产系统这三个维度来分析现代工业系统如何实现智能化。

(1) 零部件级。目前大多关注的是精密性,即如何通过更加精密的传感器,实现更加精密的动作。智能的零部件需要具备自预测性和自省性,外部环境的变化或者自身的衰退都会造成精密性发生变化。智能的零部件可以将设备的状态和可能造成的后果反馈给操

作者。

(2) 设备级。现在关注的是设备性能以及设备能否连续生产质量达标的产品。智能的设备需要具备自比较性,它既包括设备与自身历史最优状态的对标,也包括在不同环境下、不同集群内与其他设备之间的对标,这样可以清晰地了解设备目前状态的好坏与否。如果设备状态不好,还可以进一步了解故障发生在哪里以及是哪种原因造成的。

(3) 生产系统。通过实现最大的生产性来提升设备的综合效率,目前主要关注的是系统中各个设备、工序之间的配合。而智能化发展的方向应当是更大价值链的优化,比如当上游产生了质量误差,可以及时发现并在下游进行补偿。过程当中如果有设备出现质量问题,也能用其他的途径进行改善,实现具有强韧性的系统,即系统内部可以通过协同性的优化,把问题的影响降到最小。

无论是零部件级还是生产系统级的信息物理系统体系应用,都是由最基本的信息物理系统单元构成的,如图 3.32 所示。信息物理系统基本单元又分为智能控制单元、智能管理单元和认知环境。其中,智能控制单元和智能管理单元分别面向局部设备和局部系统,而认知环境为二者提供具有自成长性的智能化能力支撑,是实现智能化由局部到系统应用推广的关键。

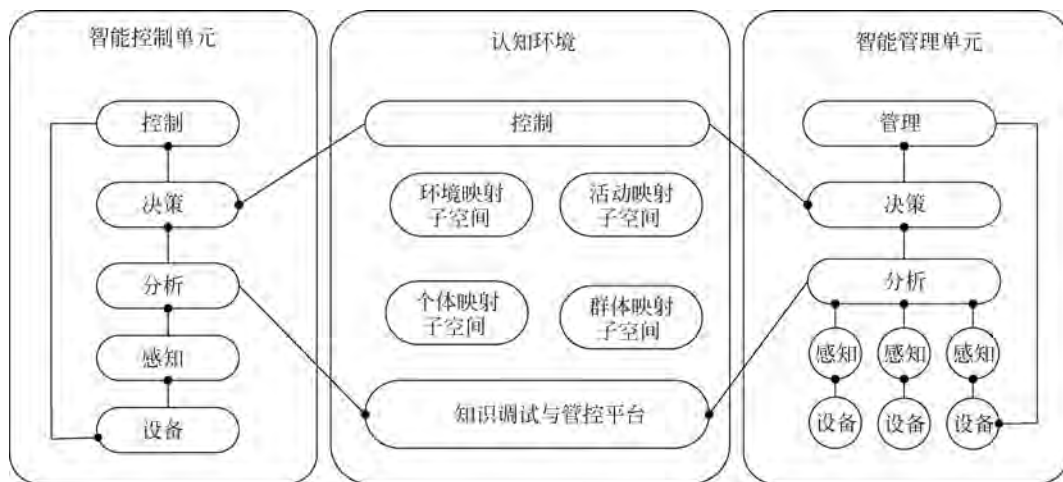


图 3.32 信息物理系统的基本单元

2) 我国的信息物理系统技术体系

2020 年 8 月 28 日,中国电子技术标准化研究院在北京召开了新一代信息技术标准论坛——信息物理系统分论坛,会议发布了《信息物理系统建设指南 2020》(以下简称《指南》)。《指南》通过产品复杂度、应用复杂度以及业务复杂度三个维度来阐述信息物理系统建设的技术支撑体系。

(1) 产品复杂度维度。产品复杂度既包括产品本身的复杂性,也包括对产品运营维护的复杂性。产品本身的复杂性体现在设计和生产流程复杂,此过程往往涉及机械、电子、电磁、力学、软件等多个学科的协同应用,具有产品机理产生难、设计和建模过程复杂、产品功能性能指标要求高等特点。产品运营维护的复杂性体现在产品的运行环境具有多样性,特别是在高压、高温、高腐蚀等情形下,对产品功能性能的监测有很大的挑战。产品复杂性的

问题主要依靠信息物理系统综合技术体系中的仿真技术来解决。

(2) 应用复杂度维度。在制造企业中信息物理系统的应用有多种情境和方式,总体来说可以分为单元级应用、系统级应用和 SoS 级应用。信息物理系统在不同情境下应用的核心是保证数据的自由流动,但是制造业现场却具有系统异构性、协议多样性、网络复杂性和数据海量性等特点。在这种情况下保证数据采集、传输、计算与应用的通畅和有效是一个挑战,这就需要信息物理系统综合技术体系中的数据产生与应用技术来解决。

(3) 业务复杂度维度。制造业发展的新模式为个性化定制、智能化生产、网络化协同和服务化延伸,其核心就是知识的产生、积累、应用与实践。知识的产生可能聚焦于某一个业务场景,但更多的是在跨业务场景和全周期场景中产生。对现阶段来说,工业知识产生与演进规律不明、分析挖掘困难、决策优化机制欠缺、知识管理和认知能力弱是制造业中普遍存在的问题,这就需要信息物理系统综合技术体系中认知和决策领域的技术来解决。

《指南》认为对信息物理系统关键技术的描述不能从单方面、单一维度来考虑,必须具有全局思维,从数字孪生这一核心技术出发,结合产品复杂度、应用复杂度和业务复杂度三个维度展开思考,才能较全面地阐述信息物理系统建设过程中涉及的关键支撑技术,如图 3.33 所示。

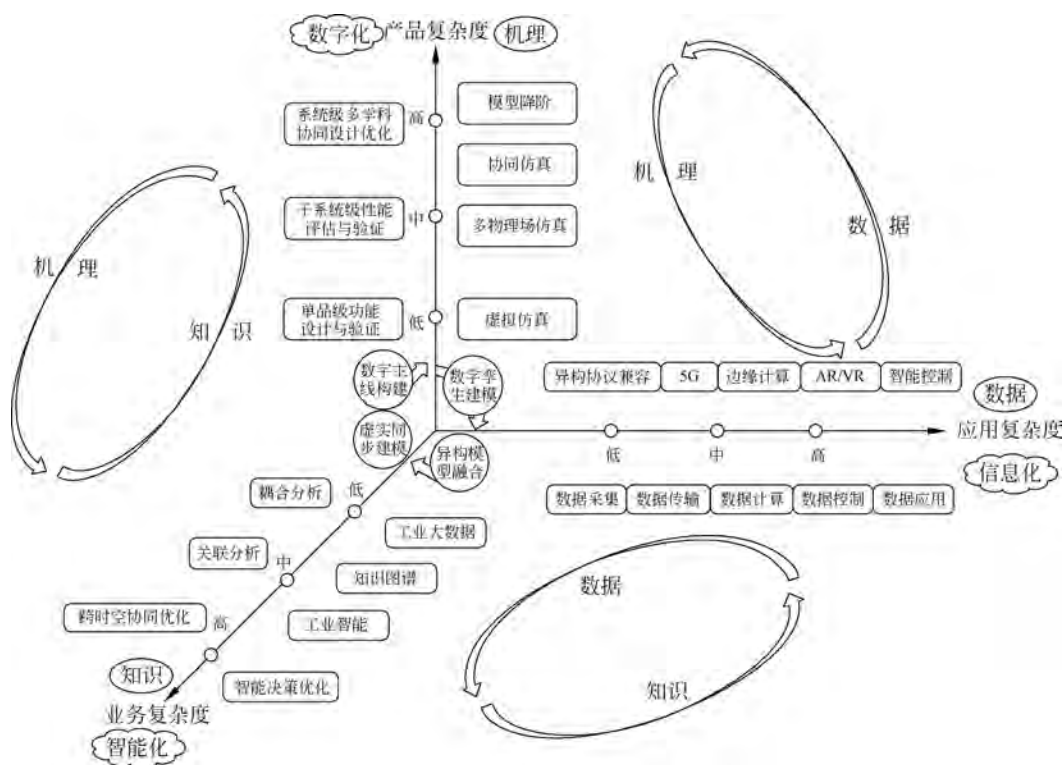


图 3.33 信息物理系统建设的技術总覽圖

通过对以数字孪生技术为核心的三个复杂度维度的分解,可以看到信息物理系统是综合了虚拟仿真、数据分析、认知决策等多个领域关键技术的技术体系,可以很好地实现“机理—数据—知识”的多模态耦合分析,通过机理、知识与数据模型的指导、修正、完善、迭

代、反馈调控、验证等耦合作用,形成全面多模态的融合方法与机制。

3. 信息物理系统的建设路径

我国电子技术标准化研究院在《指南》中给出了面向我国企业的信息物理系统的通用功能架构、3大核心要素,并按照信息物理系统建设的难易程度给出了4种典型建设模式,倡导企业综合考虑问题的复杂度和处理问题的难度,选择适合自身发展的信息物理系统模式,以期为企业“如何建设信息物理系统”提供思路。

1) 信息物理系统的通用功能架构

《指南》指出信息物理系统应围绕感知、分析、决策与执行闭环,面向企业设备运维与健康管理、生产过程控制与优化、基于产品或生产过程的服务化延伸需求建设,并基于企业自身的投入选择数据采集与处理、工业网络互联、软硬件集成等技术方案。信息物理系统的通用功能架构由业务域、融合域、支撑域和安全域构成,业务域是信息物理系统建设的出发点,融合域是解决物理空间和信息空间交互的核心,支撑域提供技术方案,安全域为建设信息物理系统的保障,如图3.34所示。

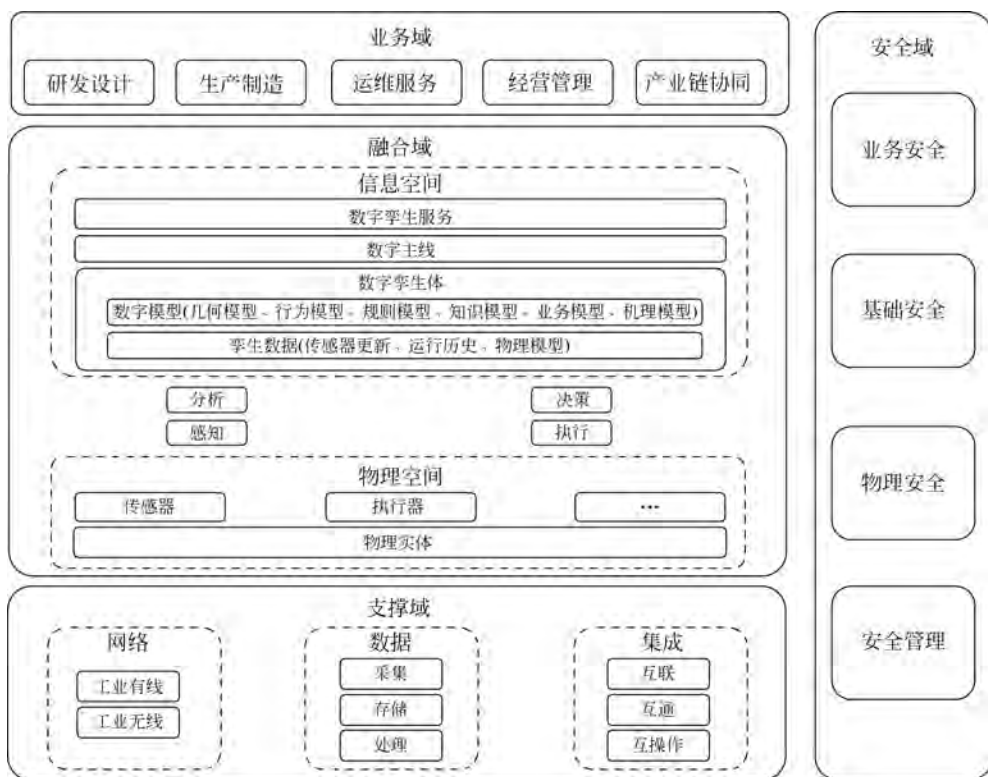


图 3.34 信息物理系统的通用功能架构

业务域是驱动企业建设信息物理系统的关键所在。业务域覆盖企业的研发设计、生产制造、运维服务、经营管理、产业链协同等全过程,企业可根据面临的挑战,按业务或按场景梳理分析创值点。

融合域是企业建设信息物理系统的核心,由物理空间、信息空间和两个空间之间的交

互对接构成。物理空间应包括传感器、执行器以及制造全流程中的人、设备、物料、工艺过程/方法、环境等物理实体,是完成制造任务的关键组成要素。信息空间负责将物理实体的身份、几何、功能、机理、运行状态等信息进行数字化描述与建模,形成数字孪生体,基于数字主线对物理实体提供映射、监测、诊断、预测、仿真、优化等功能服务。两个空间之间的交互对接由感知、分析、决策、执行组成的闭环构成。感知应实现对外界状态的数据获取,将蕴含在物理空间中的隐性数据转化为显性数据。分析应对显性数据进一步处理,将采集到的数据转化为信息。决策应对信息进行综合处理,是指在一定条件下,为达成最终目的所做的最优决定。执行是对决策的精准实现,是将决策指令转换成可执行命令的过程,一般由控制系统承载。

支撑域数据包括数据的采集、存储和处理。企业在建设前应面向价值需求,规划采集数据的范围、类型、格式、频率、采集方式等,避免不同解决方案供应商的“模板式”业务系统采集无用数据,导致存储资源浪费、同一数据多次采集等窘境。网络为数据在信息物理系统中的传输提供通信基础设施,企业应基于需求,选择主流的现场总线、工业无线等协议。企业信息物理系统的建设离不开硬件与硬件、硬件与软件、软件与软件之间的集成,集成方式并无优劣之别,企业可根据规模、复杂度、业务实时性需求等方面选择适宜的集成技术。

安全域是指企业建设信息物理系统时应考虑数据的保密与安全,可从业务安全、基础安全、物理安全和安全管理等方面出发,分析面临的威胁和挑战,实施安全措施。

2) 信息物理系统建设的 4 种模式

基于认知决策的控制机制是信息物理系统的核心,即信息空间是信息物理系统建设的核心,认知决策是为了更精准的控制。因此信息物理系统的 4 种建设模式应基于信息空间中的分析与决策能力划分,其 4 种模式如图 3.35 所示。

模式	定义	感知		分析		决策		执行	
人智	人基于经验解决已知问题,机器按人的指令执行;数字孪生体能够实现物理空间在信息空间的映射	通过传感器、RFID等方式采集数据		通过上下限、坏值剔除等方式进行数据筛选,并转换成有逻辑的信息展示;人基于经验和机器状态进行决策		人操作机器、软件等执行			
		机器	人	数字孪生体		人		机器	人
辅智	机器基于已有知识解决已知问题并避免其再发生,未知问题由人未解决;数字孪生体能够具备逻辑分析能力	面向已知问题的数据采集		建立知识库、专家系统等,机器基于已有的知识进行决策处理,并通过数据分析模型等对未知问题进行识别,提示人进行处理		已经问题机器自动执行,未知问题人操作机器控制			
		机器	人	数字孪生体		人		机器	人
混智	机器基于机理、模型等推理识别未知问题,并与人协同解决未知问题;数字孪生体间能够实现协同运行	以需求为导向的数据采集,异构数据融合		建立机理模型、数据分析模型以及模型间的关系,个体模型能在信息空间进行协作;已知问题机器基于知识库决策处理,未知问题由机器基于模型给出建议,达到人机协同		已知问题机器自动执行,未知问题由机器驱动人共同执行			
		机器	人	数字孪生体		人		机器	人
机智	机器基于自决策、自执行等解决未知问题,并避免其再次发生;数字孪生体具备与物理空间实时交互的能力	基于业务需求,自主调整数据采集的数量、频率、内容		建立高级模型分析,模型间通过特征关联、协同推理等方式进行多对象多目标分析;已知问题机器基于知识库决策处理,未知问题机器可根据物理空间的变化自主处理				已知问题机器自动执行,未知问题机器自动控制	
		机器		数字孪生体		人		机器	人

图 3.35 信息物理系统建设的 4 种模式

信息物理系统建设按照其核心“认知决策”能力从低到高分别为人智、辅智、混智和机智 4 种模式,循序渐进、层层递进,感知、分析、决策、执行是建设的方法论,其中分析和决策是建设的核心。由图 3.35 可见,人、机器、数字孪生体是信息物理系统建设的三要素,4 种模式从低到高代表机器和数字孪生体在整个信息物理系统体系中占比越来越高,人的占比越来越小。也就是人在信息物理系统中慢慢地由操作者向高级决策者转变,机器和数字孪生体代替人处理重复性、复杂性的问题,最终实现人机协同。

3.2.4 赋能性技术

1. 云制造

云制造是在云计算、物联网、虚拟化和服务导向型技术等支持下的一种先进制造模式,它可以将制造资源转化为可全面共享和流通的服务。云计算涵盖了整个产品生命周期中的设计、模拟、制造、测试和维护,因此通常被看作是一个平行的、网络化的、智能化的制造系统(“制造云”)。而这个系统可以更加智能地管理生产资源和能力,因此可以为所有类型的终端用户按需提供制造服务。在云制造中,各种生产资源和加工能力可以被智能地感知到并连接到云中。射频识别和条码之类的物联网技术可以用来自动管理和控制这些资源,使它们可以进行数字化共享。服务导向型技术和云计算为云制造的概念提供了重要支持,因此可以将制造资源和能力虚拟化、封装并分发到可以访问、调用和实现的各种服务中。此类服务可以按照预先定义的特定规则进行分类和聚合。

现在,有许多不同种类的制造云被用于处理各种各样的制造服务,不同的用户可以通过虚拟制造环境或平台来搜索、访问和调用合适的服务。云部署模式、制造资源建模、需求和服务匹配等才是云制造中的关键问题。由于应该为服务共享建立虚拟制造环境或解决方案,因此需要公共、私有、社区和混合云等云部署方法,以便终端用户随时利用其服务。例如,混合云是一种多种云的混合体,其可以提供多种部署模式,也具备灵活部署以及易于访问跨业务应用程序的优势。例如,机器和装配线等制造资源也需要被建模,以便分配和共享服务。德国电气和电子制造商协会和一些类似的德国协会组织已经发展出一种先进的方法,他们不仅在德国工业 4.0 产品和服务(参考体系结构模型工业模型)中创建了参考体系结构,还描述了几个为了数据和资源能连续使用而建立的设备管理或执行架构。然而,这样的开发是具有挑战性的,因为大量的物理制造实物的类型和异构格式迥异,而这可能会为其发展带来难以预见的建模复杂性。云制造中的制造需求和服务匹配非常重要。这些匹配不仅包括服务提供商和客户的最佳解决方案,还包含服务计划、调度和执行。

2. 知识型工作自动化与工作场所学习

1) 知识型工作自动化

知识型工作自动化技术可以应用在复杂产品的研制过程中,目前已经在航天、航空、船舶、导弹、发动机、电子、核工业等多个领域、多个型号研制中得到应用。

当系统具备智能特征时,很多研发设计工作可以由系统自动完成,即知识型工作自动化。它改变了以往知识工作者 80% 的设计工作都是体力劳动,20% 的设计工作是创新性的智力活动的现状。在智能的知识型工作自动化系统中,80% 的体力劳动由系统代替人来自动完成。

2) 工作场所学习

工作场所学习是 2016 年公布的管理科学技术名词,它是指在参与真实任务并有熟练成员直接或间接指导的活动中获得知识和技能的途径。工作场所学习的内涵相较于“学校本位教育”,工作场所学习是发生在工作场所之中的学习,它可以看作是传统“学校本位教育”的延伸与扩展。随着社会经济的发展以及人类对工作场所学习理论与实践的不断探索与研究,工作场所学习的内涵和形式都发生了很大的变化,即从最初强调知识与技能的获得,到注重个体之间的交互,再到强调组织中的学习过程。因此可以将工作场所学习分为个人工作场所和协作工作场所学习两种。

(1) 个人工作场所学习。

由于计算机技术的发展,数字化工厂成为一种个人工作场所学习的良好选择之一。在这种数字化的标准工作场所中,越来越多的性能密集型任务可以在个人工作场所中得到学习和执行,主要包括以下几种。

- ① 整个车间的布局规划。
- ② 创建 CAD 设计图。
- ③ 对产品或与设备相关的静态碰撞测试。
- ④ 运动学仿真。
- ⑤ 材料流动模拟或准备 VR 演示。

单个工作站的设备通常包括一个大型屏幕(17~21 英寸全屏)以及标准版本的键盘和鼠标。由于所用软件的功能,仅在特殊情况下才需要使用不同的专用设备。根据用户的喜好或任务的复杂性,可以并行使用两个屏幕来简化大型模型的创建,例如布局规划或仿真。

设计和规划部门的绘图板在多年前被 CAD 工作站所取代,并被具有大尺寸全屏幕或两屏的单个工作站所替代。由于所有设计数据都必须作为 CAD 模型提供,因此任何仍可使用的绘图板仅用于查看大幅图。之所以使用大格式,是因为它们比屏幕上显示的图像更好地阐明了关系,在屏幕上不能同时显示详细信息和概览。

各个工作站通常使用高分辨率的 A3 或 A4 彩色打印机作为在纸张上输出数据的输出设备;A0 绘图仪可用于大型模型。对于较长的文本,以纸质文件呈现仍然是首选的方法。

在上述工作环境中,可以实现个人工作场所学习。

(2) 协作工作场所学习。

随着智能化时代的到来,组织接触到的任务往往是复杂、庞大和新颖的,跨部门、跨学科的团队协作式工作已成为常态,而且由于任务的新颖性,需要团队在学习协作,在协作中完成任务。跨部门、跨学科团队的协作具有非常不同的特征,具体取决于参与者的空间距离和协作的时间参考(同步或异步)。常见的解决方案包括视频会议系统、电子投影屏或交互式电子白板。在新冠疫情期间,协作式工作场所学习被广泛应用,如企业应用办公软件进行远程协作办公、开会,学校利用软件进行远程在线授课和研讨学习等。

此外,跨部门、学科团队还针对数字规划的需求量身定制了特殊的技术系统,以用于学习和工作。在许多大型公司和研究机构中,建立了所谓的多投影室,以便新员工接受培训学习,以及同时处理和讨论团队中不同的项目。通过实时投影产品数据、设备数据、协议、分析数据或工作计划,可以在跨学科的基础上有效地解决复杂的问题。

在上述工作环境中可以实现协作工作场所学习。

3. 投影与交互技术

1) 投影技术

投影技术支持以模型作为协作媒介的跨部门、学科团队交流,例如使用会议室中的 2D 投影仪投影来进行团队合作交流。如今 2D 投影仪已大大取代了高架投影仪或活动挂图等简单的投影技术。

对于某些问题的讨论可以使用 3D 投影。例如要显示图形模型则需要用专用软件显示在投影仪上。戴上特殊的眼镜,观看者会获得立体观感,使他们能够“在工厂内游走”。这种效果对于虚拟游览(漫游)特别有趣,可以识别房间中的规划错误(例如碰撞)。在 3D 产品分析中,一些小细节因 3D 投影而特别清晰。然而,实践经验表明,虽然 3D 投影不需要很多的额外规划,但目前应用范围有限。

2) 交互技术

交互技术旨在实现人与物理设备的互动交流。近年来,为改善交互性,虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)和混合现实(mixed reality, MR)应用程序的各种输入和输出设备应运而生。

(1) 虚拟现实。

虚拟现实是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统,利用计算机生成一种模拟环境,采用多源信息融合的交互式方式,使使用者沉浸在该环境中。该技术集成了计算机图形技术、计算机仿真技术、人工智能、传感技术、显示技术、网络并行处理等技术的最新发展成果,是一种由计算机技术辅助生成的高技术模拟系统。虚拟现实中的“现实”泛指在物理意义或功能意义上存在于世界上的任何事物或环境,它可以是可实现,也可以是难以实现的或根本无法实现的;而“虚拟”是指用计算机生成的意思。因此,虚拟现实的本质是指用计算机生成的一种特殊环境,人可以通过使用各种特殊装置将自己“投射”到这个环境中,并操作、控制环境,以实现特殊的目的。人是这种环境的主宰。

VR 模型包括用于诊断和操作支持的医疗技术、用于清晰展示设计效果的步入式 3D 架构模型、用于销售产品的虚拟展示或用于培训的 VR 实训系统。

作为数字化工厂的一部分,VR 还允许对规划的系统进行虚拟检查(遍历),例如检查规划的建筑物在空间上的设计方式、主要的照明条件以及未来的工作条件。

目前应用程序的计算能力还不足以显示整个生产车间的高分辨率虚拟检查结果以及完整设计数据中的原始颜色、阴影和反射,为此需要专门准备 CAD 数据。目前的 VR 系统在任何情况下都不能长期工作,而是需要进一步的职业医学和劳动科学检查,以了解对人的身心压力的影响,以便能够为长期操作的可用性做出可靠的论证。

(2) 增强现实。

增强现实是在虚拟现实基础上发展起来的新技术,通过计算机系统提供的信息增加用户对现实世界感知,并将计算机生成的虚拟物体、场景或系统提示信息叠加到真实场景中,从而实现对现实世界的增强。与 VR 相比,AR 可以实时显示虚拟信息,并与观看者的真实环境相叠加。简单来说,就是将计算机生成的二维或三维信息覆盖在现实世界之上,实现对现实世界的补充。AR 允许计算机生成的三维模型实时叠加到现实世界的环境中,然后

对模型进行交互地操纵或探测,就好像它是现实世界的一部分一样。AR 有三个特征:一是真实世界和虚拟世界的信息集成,即虚实融合;二是具有实时交互性;三是在三维尺度空间中定位增添虚拟物体,即三维跟踪注册。

AR 技术可以很好地增强人对外界信息的接收理解,可以将很多人无法直接看到的东西直观地展现出来。比如一个发动机的内部构造,利用 AR 技术,只需要一个显示装置,就能在无须拆解的情况下,看到内部的构造以及运作原理。

AR 在工业中的应用主要有产品展示、技能培训、AR 远程协助、AR 数字化说明书等应用。利用 AR 进行的产品展示,具有很多实物展示所难以达到的功能,它可以在不拆卸的情况下展示物品的内部结构;在没有能源供给的情况下,利用虚拟成像,使人们看到机器运作起来的样子;可以通过高亮等方式强调产品的某些部件,进行标注解释。在技能培训方面,AR 技术可以利用直观的视频提示来对工人进行指导(见图 3.36),减少工人的失误概率,同时提高培训效率,降低员工的培训成本。在远程协助方面,通过视频通话的形式,协助方可以通过 AR 直接在视频上对部件做标记,并同步展示在被协助方的显示装置上,使远程协助更加实时、直观,协助者也有更多的参与能力。AR 数字化说明可以在进行 AR 识别时,自动识别出设备的故障并进行标记提醒。



图 3.36 AR 技术指导工人操作

(3) 混合现实。

除了 AR 之外,混合现实也经常被当同义词使用。20 世纪 90 年代初,米尔格拉姆和基希诺提出了 mixed reality 一词。他们认为混合现实环境是“将现实世界和虚拟世界的对象,在虚拟连续体极值之间的任何位置的环境一起呈现在一个显示器中”。MR 技术可以增强用户对现实世界的感知和互动,表示虚拟内容与真实内容的混合。与 AR 相比,它代表了现实与虚拟之间的连续性。

MR 包括增强现实和增强虚拟,指的是合并现实和虚拟世界而产生的可视化环境。在这个可视化环境里,物理世界中的真实对象和数字世界中的虚拟对象共存,并实时互动。增强现实和增强虚拟是现实和虚拟之间的一个渐变的过程。

目前,AR、VR 及 MR 技术在智能制造、互联网、游戏、文物数字重建、医疗等领域都得到了广泛的应用。

3) 互动媒体

互动媒体是借助于投影技术、互动技术(VR、AR 及 MR 技术)实现模型之间、人与设备之间的交互。在互动媒体中,其用于在 3D 模型中创建和导航的输入设备包括 3D 鼠标、数

据手套等,输出设备包括快门眼镜、头戴式显示器等。

(1) 输入设备。

① 3D 鼠标。

3D 鼠标在市场上有不同的版本,可以使用特殊的操作元素(例如旋钮和可编程功能键)在 3D 模型中进行直观快速的导航,并在 CAD 工作站上进行简单的数据输入。3D 鼠标通常最多可控制六个自由度,用户可定义设置鼠标的速度,以在 3D 空间中移动。

② 数据手套。

当使用手持数据手套时,通过手和手指的移动,可以直观地实现在房间中的定位和 3D 模型的操纵。数据手套配有特殊的传感器,可检测位置和方向的变化并将其投影到 3D 模型中。位置的变化作为控制信号传输到 3D 模型,因此可以与 3D 模型进行交互。数据手套通常与数据头盔结合使用,以在 VR 模型中导航。如果需要,数据手套还可以支持触觉反馈。触摸 3D 世界中的对象时,会向用户提供反馈。触觉反馈是基于各种刺激技术方案[例如,通过气垫(气动)或通过电刺激]实现的。

(2) 输出设备。

以下输出设备主要用于查看 3D 模型。

① 快门眼镜。

快门眼镜是采用 IR 与 RF 通信方式与 3D 电视进行通信,通过液晶眼镜实现 3D 效果的一种 3D 眼镜。当观看者的视线方向改变时,定位眼镜会改变视角。根据所使用投影方法(主动或被动立体声)的不同,可使用不同的眼镜。

彩色的无源立体投影基于通过光的偏振和偏振滤光镜在光学上对部分图像的分离,使右眼和左眼的图像重叠,并且光线以线性或圆偏振方式投射。像眼镜一样,投影机前面的栅格(偏振滤光片)彼此偏移 90° 或旋转 45° ,因此仅透射右偏振光。在线性极化的情况下,观看者将其头部姿势改变,比如将头向侧面倾斜,眼镜和投影仪之间的偏振使不再匹配,这会导致立体声信息的丢失。通过圆形偏振,观看者即使头部倾斜也不会失去立体感,因为光的偏振不仅发生在一个方向上。但是,此技术需要更高的精度,并且投影仪和眼镜中的偏振滤镜之间需要更好的协调。

彩色有源立体投影使用特殊的快门眼镜,其眼镜由两个液晶显示器组成,一个用于左眼,另一个用于右眼,可以在渗透性和非渗透性之间进行电子切换,从而可以使左眼或右眼变暗。这样就可以在监视器上进行立体观看,并在其上交替显示左部分图像和右部分图像。在此过程中,眼镜会同步切换。为了使观看者看不到切换,必须非常迅速地进行部分图像之间的改变。因此,监视器必须显示至少 120Hz 的垂直频率,以便与眼镜同步(每只眼睛每秒 60 帧)。由于快门眼镜的切换与刷新率相关,因此图形卡和眼镜之间必须存在连接,以确保同步。这可以通过电缆或红外发射器以及眼镜上的相应接收器来完成。

② 头戴式显示器(数据眼镜)。

头戴式显示器将 3D 图像直接投射在观看者的眼前,观看者意识不到现实世界的存在,会沉浸在虚拟世界中,从而有种置身其中的感觉。根据设备的不同,输出设备可以是全封闭头盔,也可以是带有两个显示器的眼镜,计算机可以在上面显示图像。头部的运动在相应的传感器系统上进行,从而导致模型中视觉的直接变化。

特殊眼镜允许在 AR 区域中使用计算机显示的真实对象图像作为附加信息,同时还可以感知真实世界。大众汽车公司使用特殊的 AR 系统进行汽车维修。该系统包括带有数据眼镜的背心,并辅以用于语音输入和输出以及无线电传输的特殊技术。超便携式 PC 配备有摄像头,并附加有一个固定 PC 作为 AR 系统。

目前的研究旨在尽可能地与 3D 模型进行交互,而无须交互介质(例如 3D 眼镜或数据手套)。手和手指的运动应通过摄像头实时识别,并将信息传输到计算机。

4. 人工智能

1) 概念

“人工智能”一词最初是在 1956 年达特茅斯会议上提出的。从那以后,研究者们发展了众多理论和原理,人工智能的概念也随之扩展。人工智能(artificial intelligence, AI),是利用数字计算机或者数字计算机控制的机器模拟、延伸和扩展人的智能,感知环境、获取知识并使用知识获得最佳结果的理论、方法、技术及应用系统。人工智能相关技术的研究目的是促使智能机器会听(如语音识别、机器翻译等)、会看(如图像识别、文字识别等)、会说(如语音合成、人机对话等)、会行动(如机器人、自动驾驶汽车等)、会思考(如人机对弈、定理证明等)、会学习(如机器学习、知识表示等)。人工智能是对人的意识、思维的信息过程的模拟。人工智能不是人的智能,但能像人那样思考,也可能会超过人的智能。

2) 发展历程

早在 1950 年,图灵在《计算机器与智能》中阐述了对人工智能的思考,并提出以图灵测试对机器智能进行测量。1956 年,美国达特茅斯学院举行的人工智能研讨会上首次提出了人工智能的概念:让机器能像人类一样认知、思考并学习。这标志着人工智能的开端。

人工智能在 20 世纪 50 年代末和 80 年代初两次进入发展高峰,但受制于技术、成本等因素先后进入低谷期。近年来,随着大数据、云计算、互联网、物联网等信息技术的发展,泛在感知数据和图形处理器等计算平台推动以深度神经网络为代表的人工智能技术的飞速发展,人工智能在算法、算力和数据三大因素的共同驱动下迎来了第三次发展浪潮。人工智能的发展历程如图 3.37 所示。

3) 人工智能技术与应用

3.1 节讲到的仿真方法适用于中小型生产工厂。然而当仿真对象是复杂的大型生产工厂,要对整个工厂进行完全仿真或者欲以现代的物流流控制实现单个对象的自治性最大化,就需要更高级的技术——人工智能——来助力。因此,人工智能正在被应用于仿真,以分析动态系统的行为,具体包括多智能体系统、神经网络和机器学习。

(1) 多智能体系统。

多智能体技术的应用研究起源于 20 世纪 80 年代,并在 90 年代中期获得了广泛的认可,发展至今,已然成为分布式人工智能领域中的一个热点话题,其智能性主要体现在感知、规划、推理、学习以及决策等方面。多智能体系统的目标是让若干个具备简单智能却便于管理控制的系统通过相互协作实现复杂智能,使得在降低系统建模复杂性的同时,提高系统的鲁棒性(Robust)、可靠性、灵活性。目前,采用智能体技术的多智能体系统已经广泛应用于交通控制、智能电网、生产制造、无人机控制等众多领域。

那么到底什么是多智能体系统?首先要明确的是,智能体是处于某个特定环境下的计

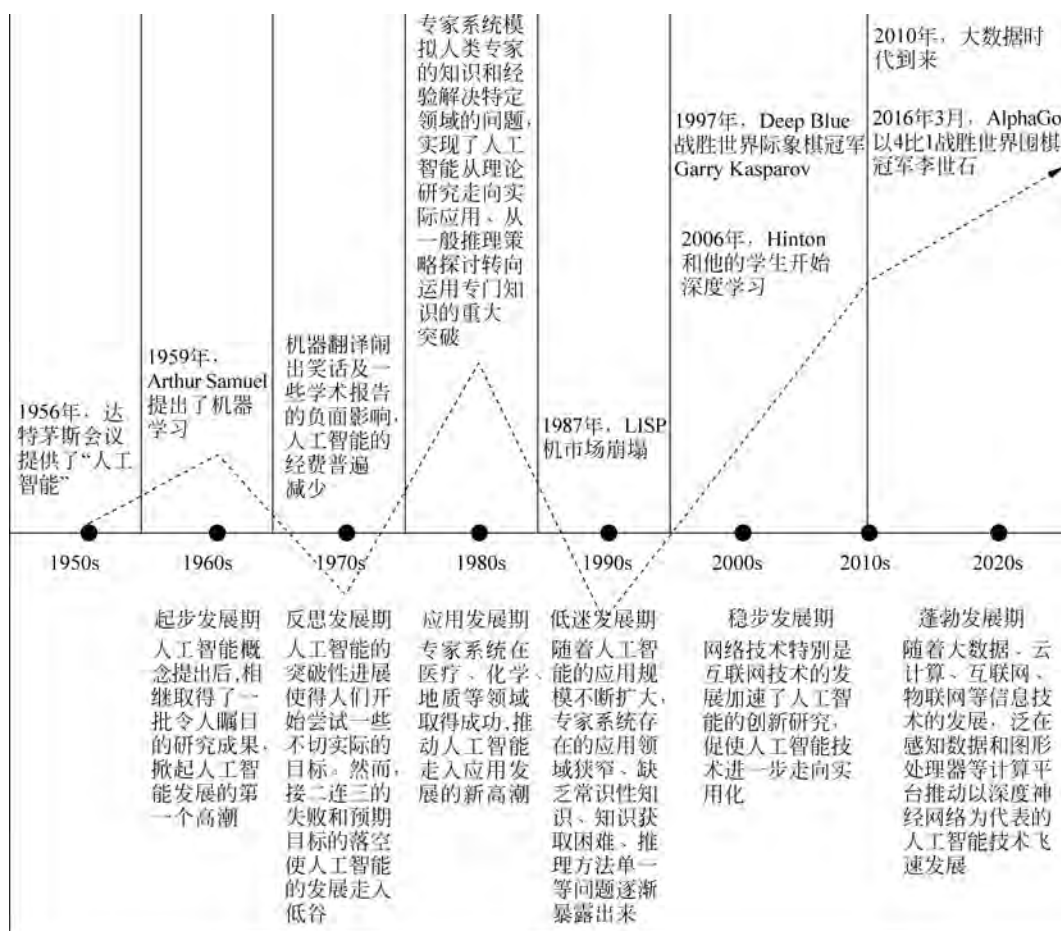


图 3.37 人工智能的发展历程图

计算机系统，该系统可以根据自身对环境的感知，按照已有的知识或通过自主学习，与其他智能体进行沟通协作，在其所处的环境中自主完成设定的目标。通常，单个智能体求解问题的能力通常是十分有限的，但是如果将多个自治的智能体组合起来，协作求解某些问题的能力通常会变得很强大。而多智能体系统就是指可以相互协作的多个简单智能体为完成某些全局或者局部目标使用相关技术组成的分布式智能系统。其中，多智能体技术在构建多智能体系统中充当至关重要的作用。

多智能体系统提供了一种新的方法来控制大规模分布式和自适应复杂系统，如生产控制、过程控制、智能人机交互、分布式计算、驾驶员辅助和车辆控制等。

多智能体技术一直都是分布式人工智能领域中最重要研究方向之一。在经历了20年的多智能体技术高速发展时期后，如何结合实际的应用背景构建更加灵活、更具有适应性的多智能体模型，如何降低多层次复杂系统的协作和沟通代价成为现阶段面临的迫切任务。相信多智能体技术经过不断地研究和完善，将会在智能控制、智能家居、智能故障诊断等诸多前沿领域发挥至关重要的推动作用，进一步推动人工智能体的发展，为复杂系统的优化仿真和控制提供更高效的方法。

(2) 神经网络。

神经网络是一种在模拟大脑神经元和神经网络结构、功能基础上而建立的一种现代信息处理系统,通常用于模式识别、预测评估、检测分析、拟合逼近、优化选择、博弈游戏等。神经网络在学习和构建非线性复杂关系的模型方面具有相当的优势。在数字化工厂中,许多输入和输出之间的关系是非线性的、复杂的。神经网络在学习了初始化输入及其关系之后,可以将未知数据之间的未知关系模型化,从而使得计算机能够预测未知数据。

与许多其他预测技术不同,神经网络不会对输入变量施加任何限制(例如如何分布)。此外,许多研究表明,神经网络可以更好地模拟具有高波动性和不稳定方差的数据,因为它具有学习数据中隐藏关系而不在数据中强加任何固定关系的能力。神经网络由矩阵来描述,输入、输出和权值可看成向量或矩阵;由多个感知器层组成,感知器层又由多个感知器组成;每一个感知器都拥有输入标量与输出标量,即 $y = f(wx + b)$,其中 f 称为传递函数。取用不同的传递函数可以达到不同的目标。

在数字化工厂内,可以使用神经网络进行产量预测评估、检测分析、质量控制、图像识别。将神经网络与质量控制图结合,并使用大量历史样本对神经网络进行训练,可建立故障诊断模型,再通过统计过程控制的数学方法,可用于对实际数据进行诊断。

在训练神经网络学习时通常使用在监督学习方式下的误差反向传播算法,这个学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播组成:正向传播,权值不变;反向传播,权值修正,从而逐渐提升模型的准确率。在基于神经网络的可重组制造系统质量控制方法研究中,针对 RMS 的系统特点,提出的基于神经网络的质量控制方法可以对生产过程进行质量控制和快速诊断分析。不同算法存在着各自的不足,例如反向传播算法存在局部极小化问题、收敛性问题、层数选择问题和过拟合问题。因此在数字化工厂中,不同应用领域要选取不同的神经网络算法。

在有关数字化工厂的问题中,有学者分析了神经网络在汽车工厂研究中的使用。基于神经网络的特性,可以据此绘制出各个制造单元的图,并通过各个模拟对其进行训练,以便它们再现各个单元的可能行为。在较高级别的仿真中,各个神经网络相互连接,从而显示了整个工厂的行为,不仅可以模拟工厂的总产量,并且可以跟踪生产时间和单个产品的时间,得到有关单个产品的平均或可能交货时间的陈述。可以使用神经网络对行为进行模拟并根据其效果进行评估,但是只能使用神经网络在有限的程度上分析行为的原因。

(3) 机器学习。

如今,随着人工智能技术的不断发展,尤其是以深度学习为代表的机器学习算法及以语音识别、自然语言处理、图像识别为代表的感知智能技术取得了显著进步。专用人工智能即面向特定领域的人工智能,由于其具备任务单一、需求明确、应用边界清晰、领域知识丰富、建模相对简单等特征,陆续实现了单点突破,在计算机视觉、语音识别、机器翻译、人机博弈等方面可以接近、甚至超越人类水平。

与此同时,机器学习、知识图谱、自然语言处理等多种人工智能关键技术也从实验室走向了应用市场,如图 3.38 所示。

机器学习主要研究计算机等功能单元,是通过模拟人类学习方式获取新知识或技能,或通过重组现有知识或技能来改善其性能的过程。深度学习作为机器学习研究中的一个

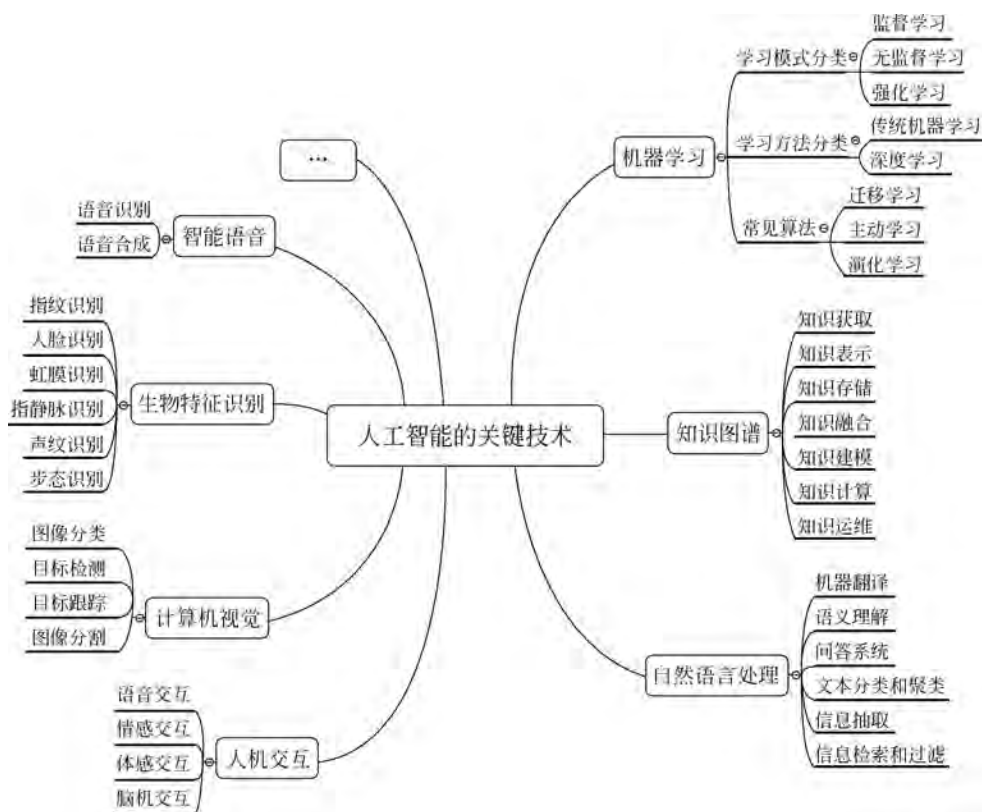


图 3.38 人工智能的关键技术

新兴领域,于2006年被提出。深度学习又称为深度神经网络(层数超过3层的神经网络),是机器学习中一种基于对数据进行表征学习的方法。在传统机器学习中,手工设计特征对学习效果很重要,但是特征工程非常烦琐,而深度学习基于多层次神经网络,能够从大数据中自动学习特征,具有模型规模复杂、过程训练高效、结果训练准确等特点。知识图谱本质上是结构化的语义知识库,是一种由节点和边组成的图数据结构,以符号形式描述物理世界中的概念及其相互关系。自然语言处理是研究能实现人与计算机之间用自然语言进行有效通信的各种理论和方法。人机交互主要研究人和计算机之间的信息交换,包括人到计算机和计算机到人的两部分信息交换。计算机视觉是使用计算机模仿人类视觉系统的科学,让计算机拥有类似人类提取、处理、理解和分析图像以及图像序列的能力。生物特征识别是指通过个体生理特征或行为特征对个体身份进行识别认证的技术。智能语音主要研究通过计算机等功能单元对人的语音所表示的信息进行感知、分析和合成。

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,它能自动执行工作,是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器,具有可编程、拟人化、通用性的特点。它可以接受人类指挥,也可以按照预先编排的程序运行。现代工业机器人还可以根据人工智能技术制定的原则纲领行动。

工业机器人由主体、驱动系统和控制系统三个基本部分组成。主体即机座和执行机

构,包括臂部、腕部和手部;有的机器人还有行走机构。大多数工业机器人有 3~6 个运动自由度,其中腕部通常有 1~3 个运动自由度。驱动系统包括动力装置和传动机构,用以使执行机构产生相应的动作。控制系统按照输入的程序对驱动系统和执行机构发出指令信号,并进行控制。

由于工业机器人具有一定的通用性和适应性,能适应多品种及中、小批量的生产,因此自 20 世纪 70 年代起,常与数字控制机床结合在一起,成为柔性制造单元或柔性制造系统的组成部分。

6. 3D 打印

3D 打印是快速成型技术的一种,它以数字模型文件为基础,运用粉末状金属或塑料等可黏合材料,通过逐层打印的方式来构造物体。

3D 打印通常是采用数字技术材料打印机来实现的,常在模具制造、工业设计等领域被用于制造模型,后逐渐用于一些产品的直接制造,现在已经有使用这种技术打印而成的零部件。该技术在珠宝、鞋类、工业设计、建筑、工程和施工、汽车、航空航天、牙科和医疗产业、教育、地理信息系统、土木工程、枪支以及其他领域都有应用。

7. 5G 技术

5G 即第五代移动通信技术,由于其对新兴技术的潜在影响,已经成为各行各业关注的热点,尤其是对联网设备的开发、制造和使用的物联网领域。这些设备包括小型心率监视器、自动驾驶汽车、智能家电,智能工厂使用的设备等。它们共同使用传感器、芯片和处理器来收集、传输和分析数据,同时与网络上的其他设备进行交互。

虽然全球联网设备的数量已经开始快速增加,但 5G 网络的推出预计将大大加速消费者和企业对物联网产品和服务的采用。

1) 何谓 5G

5G 是一组新兴的全球电信标准,通常使用高频频率提供网络连接。与 4G 通信技术相比,5G 延迟更短,速度更快,容量更大。

重要的是,5G 描述了用于构建未来尖端网络基础设施的一系列标准和技术。

2) 5G 的主要优势

预计 5G 将会增强网络带宽,其速度比当前蜂窝移动网络或家用光纤和有线服务快 10~100 倍。减少延迟或者初始数据传输和网络响应之间的延迟,也应该是 5G 的一个重要优势,特别是对于需要近乎实时通信的服务,例如在高速公路上行驶的自动驾驶汽车。更高频谱的新增容量也有望帮助服务提供商有效管理不断增长的客户对物联网应用的需求,包括像高速高清视频下载这样简单的用户需求。

3) 5G 的技术创新

在技术创新方面,网络切片和移动边缘计算成为 5G 突出的新技术。在网络切片方面,5G 网络平台可针对虚拟运营商、业务、用户甚至某种业务数据流的特定需求配置网络资源和功能,定制剪裁和编排管理相应的网络功能组件,形成各类“网络切片”,满足包括物联网在内的各种业务应用对 5G 网络的连接需求。在移动边缘计算方面,5G 引入了移动边缘计算技术,通过与内容提供商和应用开发者的深度合作,在靠近移动用户侧就近提供内容分发服务,使应用、服务和内容部署在高度分布的环境中,更好地支持低时延和高带宽的业务

需求。

通过这些新技术的引入,5G 将促进用户交互方式再次升级,为用户提供高清视频、VR/AR(虚拟现实/增强现实)、沉浸式游戏等更加极致的业务体验。5G 与家居、医疗、汽车、教育、旅游等行业的融合渗透,将深刻改变人们的生活方式,带来远程医疗、车联网、智能家居、云桌面等新应用,为人们在居住、工作、休闲、交通等方面提供便利。5G 还将提升社会治理能力和效率,给城市管理、照明、抄表、停车、公共安全与应急处置等行业带来新型智慧应用,实现社会治理现代化。总体上看,5G 的广泛应用将深刻改变人类信息社会的生产和生活方式,促进工业 4.0 的演进。

4) 5G 的主要驱动力

5G 的主要驱动力不仅是消费者对更快网络需求的不断增长,而且还包括工业环境中联网设备的激增。这些行业越来越依赖联网设备来收集和分析数据,以提高业务流程的效率和生产力,并不断改进产品和服务。

5G 预计帮助企业更有效地管理物联网所产生的日益增长的信息量,并改善机器人辅助手术或自动驾驶等关键任务服务所需的近乎即时通信。同样,预计 5G 网络可以灵活地处理各种联网设备,包括那些不一定需要实时通信但仍然需要周期性低功耗数据传输的设备。

5) 5G 带来的改变

(1) 智能工业:5G 技术在工业数据采集和控制场景中也将得到广泛应用。在生产操作过程中,可以通过 5G 网络控制来实现精准执行,确保工业设备的准确操作和较高的产品质量。

(2) 增强和虚拟现实(AR/VR):现在,AR/VR 技术的使用越来越广泛,这也意味着需创建完全模拟的数字环境以及数字工具在日常环境中的叠加。面向消费者的游戏、工业制造和医疗服务只是 AR/VR 早期的使用案例。5G 有望成为减少延迟和提高速度的关键促成因素,从而使这些带宽密集型服务成为可能。

(3) 自动驾驶汽车和智能基础设施:自动驾驶汽车的发展离不开 5G 的物联网成熟度。实际上,为了实现实时感知和安全,自动驾驶汽车需要足够的网络速度和容量以及近乎瞬间的延迟。虽然通往 5G 自动驾驶的道路仍在进行中,但车辆联网仍然达到了历史最高水平。

(4) 医疗保健:从用于身体健康监测的可穿戴设备到高科技诊断仪器,传感器技术的发展为医疗保健行业提供了一个前所未有的机会。其他类型的联网医疗设备,如移动机器人、手术助手甚至外骨骼,也都有助于提高医疗服务效率和患者的治疗效果。预计到 2023 年,医疗机器人市场将达到 170 亿美元,高于 2018 年的 65 亿美元,复合年增长率为 21%。

(5) 低功耗设备:并非所有连接到 5G 网络的设备都需要超快的速度。事实上,许多低功耗设备将依赖 5G 来增加容量。从农业环境中的水位监测器到住宅物业中的电力管理系统等,低功率设备很可能成为物联网早期经常采用的用例之一。

总而言之,5G 的应用创新不能仅突出 5G 本身的技术优势,还要加快实现 5G 技术与业务的融合,推动行业的整体创新发展。

8. 区块链

区块链(blockchain)是一种由多方共同维护,使用密码学保证传输和访问安全,能够实现数据一致存储、难以篡改、防止抵赖的记账技术,也称为分布式账本技术。典型的区块链以块-链结构存储数据。作为一种在不可信的竞争环境中低成本建立信任的新型计算范式和协作模式,区块链凭借其独有的信任建立机制,正在改变诸多行业的应用场景和运行规则,是未来发展数字经济、构建新型信任体系不可或缺的技术之一。区块链是一系列现有成熟技术的有机组合,它对账本进行分布式的有效记录并且提供完善的脚本,以支持不同的业务逻辑。

典型的区块链系统中,各参与方按照事先约定的规则共同存储信息并达成共识。为了防止共识信息被篡改,系统以区块为单位存储数据,区块之间按照时间顺序、结合密码学算法构成链式数据结构;通过共识机制选出记录节点,由该节点决定最新区块的数据,其他节点共同参与最新区块数据的验证、存储和维护;数据一经确认,就难以删除和更改,只能进行授权查询操作。按照系统是否具有节点准入机制,区块链可分为许可链和非许可链。在许可链中,节点的加入和退出需要区块链系统的许可。根据拥有控制权限的主体是否集中,许可链可分为联盟链¹和私有链²。非许可链则是完全开放的,亦可称为公有链,节点可以随时自由加入和退出。

区块链的核心技术包括分布式账本、共识机制、智能合约和密码学。

1) 分布式账本

分布式账本技术本质上是一种可以在多个网络节点、多个物理地址或者多个组织构成的网络中进行数据分享、同步和复制的去中心化数据存储技术。

2) 共识机制

区块链是一个历史可追溯、不可篡改、可解决多方互信问题的分布式(去中心化)系统。分布式系统必然面临着一致性问题,而解决一致性问题的过程称为“共识”。分布式系统的共识达成需要依赖可靠的共识算法。共识算法通常解决的是分布式系统中由哪个节点发起提案以及其他节点如何就这个提案达成一致的问题。根据传统分布式系统与区块链系统间的区别,共识算法分为可信节点间的共识算法与不可信节点间的共识算法。

3) 智能合约

智能合约是一种旨在以信息化方式传播、验证或执行合同的计算机协议。智能合约允许在没有第三方的情况下进行可信交易。这些交易可追踪且不可逆转,其目的是提供优于传统合同方法的安全性,并减少与合同相关的其他交易成本。

4) 密码学

信息安全及密码学技术是整个信息技术的基石。区块链中也大量使用了现代信息安全和密码学的技术成果,主要包括哈希算法、对称加密、非对称加密、数字签名、数字证书、同态加密和知识证明等。

9. 工业智能

随着新一轮信息革命与产业变革的蓬勃兴起,工业的智能化发展成为全球关注的重点,提升工业智能化水平成为全球共识与趋势。世界主要发达国家政府及组织高度重视工业智能,积极出台相关战略政策,促进人工智能在生产制造及工业领域的应用发展。我国

政府双侧发力,推动人工智能与制造业的融合发展:一方面积极推动人工智能技术为制造业发展注入新动力,另一方面将制造业作为人工智能落地的重点行业,在《互联网+人工智能三年行动实施方案》《新一代人工智能发展规划》《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划》等十余个文件中均提出将制造业作为开展人工智能应用试点示范的重要领域之一。

当前,工业经济数字化、网络化、智能化发展成为第四次工业革命的核心内容。作为助力本轮科技革命和产业变革的战略性技术,以深度学习、知识图谱等为代表的新一轮人工智能技术呈现出爆发趋势,工业智能迎来了发展的新阶段。通过海量数据的全面实时感知、端到端的深度集成和智能化建模分析,目前工业智能将企业的分析决策水平提升到了全新高度。然而,目前工业智能仍处于发展探索时期,各方对工业智能的概念、类型、应用场景、技术特点及产业发展等尚未形成共识。

1) 工业智能的定义

工业智能(亦称工业人工智能)是人工智能技术与工业融合发展形成的,贯穿于设计、生产、管理、服务等工业领域各环节,实现模仿或超越人类感知、分析、决策等能力的技术、方法、产品及应用系统。可以认为,工业智能的本质是通用人工智能技术与工业场景、机理、知识的结合,以实现设计模式创新、生产智能决策、资源优化配置等创新应用。它需要具备自感知、自学习、自执行、自决策、自适应的能力,以适应变幻不定的工业环境,并完成多样化的工业任务,最终达到提升企业洞察力,提高生产效率或设备产品性能等目的。

为了更好地分析工业智能的功能范围,工业互联网产业联盟提出了工业智能的基本框架(见图 3.39):构建一个四象限横纵坐标轴,其中横轴为计算的复杂度,是指计算机算法的时间复杂度,与工业机理的复杂性和算法的实现效率直接相关;纵轴是影响因素的多少,与相关问题涉及的变量个数直接相关。据此可将工业问题分解为四类:一是多因素复杂问题,二是多因素简单问题,三是少因素简单问题,四是少因素复杂问题。

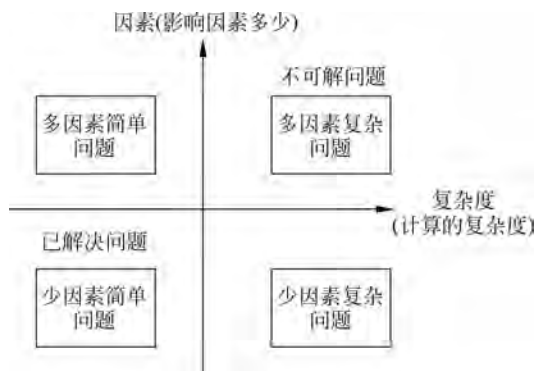


图 3.39 工业领域相关问题分类

工业系统自下而上包括设备/单元级、车间级、企业级、协同级等四个层级,如图 3.40 所示,其对应的工业问题也呈现一定的规律性分布。具体地,设备/单元级和车间级工业问题的影响因素通常较少,但和工业机理密切相关,导致计算复杂度较高,其中设备/单元级问题的复杂度更是普遍高于车间级;企业级和协同级的工业问题并没有过于复杂的机理,但

影响的因素较多,其中协同级问题的影响因素普遍多于企业级。除各层级在体系中的范围性分布外,还存在部分影响因素多、复杂度高的点状问题。

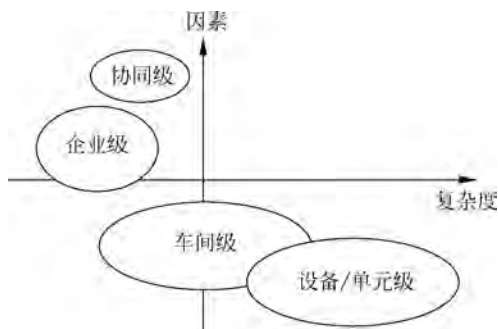


图 3.40 工业领域问题的制造系统层级分布

深度学习和知识图谱是当前工业智能实现的两大技术方向(见图 3.41),正不断拓展可解工业问题的边界。当前工业智能主要体现在以知识图谱为代表的知识工程以及以深度学习为代表的机器学习两大技术领域,其中深度学习侧重于解决影响因素较少但计算高度复杂的问题,如产品复杂缺陷质量检测;而知识图谱侧重于解决影响因素较多但机理相对简单的问题,如供应链管理等。多因素复杂问题可以分解为多因素简单问题和少因素复杂问题进行求解,例如产品设计等。两大驱动技术的发展使工业领域内多因素简单问题与少因素复杂问题的可解范围进一步扩大,同时使部分多因素复杂问题也实现可解。

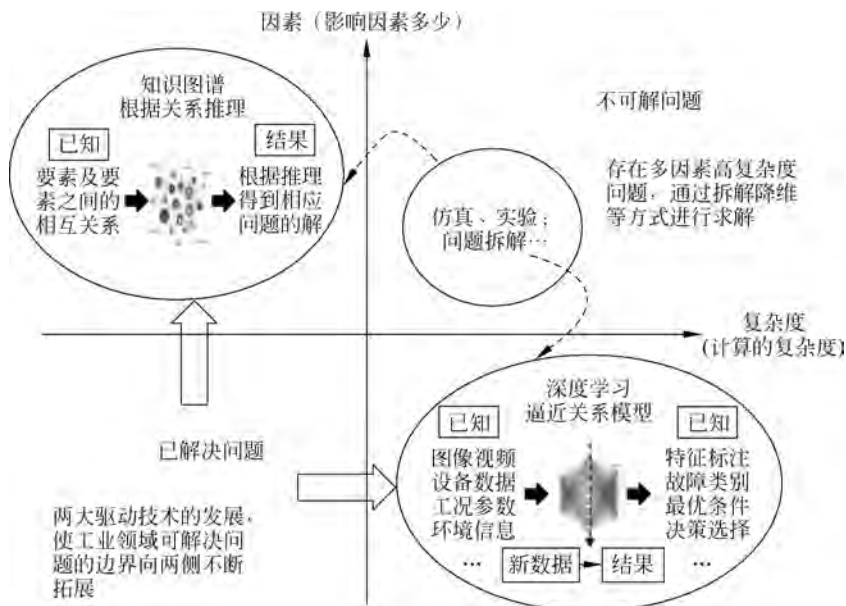


图 3.41 当前工业智能两大技术方向

2) 工业智能的关键技术

工业智能依靠通用技术与专用技术协同实现智能化应用。一方面,通用技术以工业互联网和工业大数据为核心,整体上遵循人工智能的数据、算力和算法三要素的逻辑,包含智

能算力、工业数据、智能算法和智能应用四大模块,以工业大数据系统的工业数据为基础,依托硬件基础能力和训练、推理运行框架,完成工业数据的建模和分析,其本质是实现工业技术、经验、知识的模型化,为两大核心技术赋能,从而实现各类创新的工业智能应用。此外,工业智能的部署方式一般有公有云、私有云、边缘和设备四种,其整体系统管理和安全防护一般托管给其嵌入的边缘或设备系统,或者是其作为组成部分的工业互联网平台。另一方面,通用技术往往无法满足工业场景与问题的复杂性与特殊性要求,现阶段依然存在大量特性问题需要解决,符合工业领域需求的技术定制化是工业智能两大关键技术未来的发展趋势。工业智能的关键技术架构如图 3.42 所示。



图 3.42 工业智能的关键技术架构

工业智能的技术整体遵循数据、算力和算法三要素的逻辑,由底层至上包括芯片、编译器、计算框架、算法四方面。从技术角度来看,工业智能即是依靠算法作用在工业数据和(或)工业机理/知识/经验等工业智能使能要素中,通过对要素进行分类、回归等本质作用,映射至设计、生产、管理服务等工业环节或场景下,形成智能化应用。一方面,工业智能的技术仍然以人工智能算法为核心,不仅需要满足人工智能算法作用的本质需求,工业问题数字化和抽象化的方法论也是算法作用的关键。此外,算法的突破使人工智能解决问题的能力不断深化,同时与工业问题转化相互匹配,构成了工业智能发展的本质推动因素。另一方面,通用技术往往无法满足工业场景复杂性与特殊性要求,即应用面临的四类问题,需要通过技术创新与工业化适配解决。

3) 工业智能的典型应用

工业智能在工业系统各层级各环节已形成了相对广泛的应用,其细分应用场景可达到

数十种(见图 3.43)。参考美国国家标准与技术研究所对智能制造的划分标准,在所建框架内将工业智能的应用场景按产品、生产、商业三个维度进行了划分。

工业智能主要通过四大技术解决上述问题:一是诸如库存管理、生产成本管理等问题,由于其流程或机理清晰明确且计算复杂度较低,因此可以将此类任务的执行过程固化并通过专家系统解决。二是设备运行优化、制造工艺优化、质量检测等问题,往往机理相对复杂,但并不需要大量的数据和复杂的计算,因此通常是机器学习作用的领域。三是需求分析、风险预测等环节,需要依靠大量数据的推理作为决策支持,因此其计算复杂度相较于前两种体系更高,但是其问题原理或是不同对象间的关系相对清晰,因此可利用知识图谱技术来解决问题。四是前沿机器学习作为近年来人工智能发展的核心技术体系,其主要目的就是解决问题机理不明、无法使用经验判断理解、计算极为复杂的问题,如无人操作、不规则物体分类、故障预测等;而对于产品智能研发、无人操作设备等更为复杂的问题,通常需要多种方法组合进行求解。

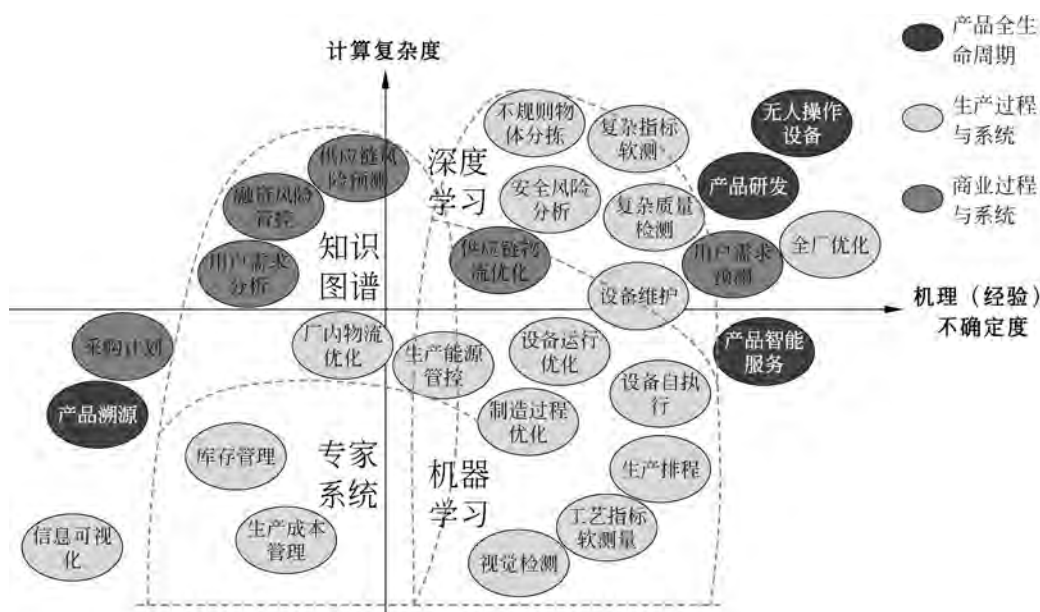


图 3.43 工业智能应用的总体视图

3.2.5 关键技术趋势

针对业界数字化转型所需的最新技术,追踪 2021 年关键技术趋势,其中包括 IT 与 OT 技术的深度融合、运营弹性成为关键目标、远程操作成为新常态、自动化运营演变为自主运营、边缘计算平台成为边缘自动化平台以及其他技术趋势。本节讨论的技术对 2021 年工业领域的发展产生了重要的影响。

1. IT 与 OT 技术的深度融合

信息技术和运营技术的融合(IT/OT 融合)正在迅速发展,因为工业组织意识到它是数字化转型的成功关键。OT 和 IT 之间的连接和/或融合对于企业竞争至关重要。如今,业界对更紧密的集成和更多信息获取的需求日益增长。基于此,它们开始利用工业物联网和

工业 4.0 相关的技术和方法,包括 5G 网络、云和边缘计算、增材制造、高级分析、数字孪生、AR、VR、人工智能(AI)等新兴技术。

此外,IT/OT 网络安全是 IT/OT 融合的重要内容之一。关注 IT/OT 网络安全有助于填补现有的安全漏洞,并确保整个企业的安全级别一致。越来越多的融合还包括电力和自动化的集成,这涉及融合有关电气资产(例如电机控制中心)和生产过程的信息,以帮助提高制造工厂整个生命周期的可持续性。电力和自动化之间的融合还提供了一种集成的数字化方法,可提高互操作性和灵活性、提高生产效率、减少计划外停机时间并提高整体赢利能力。

ARC 咨询小组认为,这种 IT 与 OT、IT 网络安全与 OT 网络安全、电力与自动化之间的融合将成为永久性的,而不是一种趋势,代表着深度的技术融合。2021 年,寻求引入创新解决方案,这些技术将超越融合并融合到单一产品中。

2. 运营弹性成为关键目标

公司数字化转型的目标之一是确保有弹性的运营,以提高当今企业应对风险的能力。其中包括日益增加的网络安全威胁、新的监管合规要求以及更严格的工厂和人员安全要求。在这次新冠疫情之前,制造商就已面临着市场的不确定性、需求的快速波动、供应链中断等的挑战,以及敏捷、高效和可持续发展的需求。然而,当前的新冠疫情放大了这些挑战,导致制造商将运营弹性作为关键的企业目标。

为了实现运营弹性,公司必须经常打破物理和组织界限,以便充分地吸引员工、连接团队并增强实时协作。运营弹性还需要对供应链进行实时管理,以保持其完整性、敏捷性和灵活性,使供应链能够响应市场需求和材料可用性的变化。公司正在部署新的方法来防止计划外停机和资产故障,确保产品实现,保护人员并增强安全架构。

从 2021 年开始,制造商将寻求进一步提高其运营弹性,以减少供应链脆弱性,降低安全风险,提高远程运营绩效并优化整个工厂生命周期的生产。

3. 远程操作成为新常态

近年来,远程运营管理已经成为海上油气生产和海上风电场等特定行业的主流。然而因新冠疫情对于社交距离有要求,工业企业需要做好远程运营的准备,企业员工也应适应居家办公的模式。这需要拥有适当的网络安全工具,这些工具提供实时可见性和控制,以帮助应对完全远程访问操作的挑战。理想情况下,联网和远程劳动力的支持技术应该促进协作并减少书面工作,为来自不同地方的个人提供信息安全访问,并支持与远程专家的互动。自动化和 IT 供应商都已加紧努力,通过创新解决方案帮助满足这些需求。

除了提高效率和为员工提供更安全的工作环境外,这些解决方案还帮助公司获取和管理知识,整合和部署新的工作流程。例如,AR 允许远程用户查看工厂中的任何资产,并以数字方式叠加相关信息。AR 设备(以平板电脑、智能手机、智能眼镜或“可穿戴”计算机的形式)感知远程工作人员正在查看的内容并显示手头操作所需的数据。

在 2021 年后,技术供应商将继续增强其远程操作解决方案,而不是短期趋势,即使在 COVID-19 大流行的影响已经过去之后,工业组织也可能会在不同程度上继续实施远程操作。

4. 自动化运营演变为自主运营

在新冠疫情的驱动下,行业迫切需要新的运营模式。随着数字化的深入发展,新兴的开放过程自动化标准以及 IT/OT 融合;对于选定的单元操作,制造商有机会从“自动化”转向“自主”操作。这使人们可以自由地执行更多增值任务,并可以提高运营工厂的可靠性和可预测性。当前,当发生不可预测的事情时,人工操作员会决定该怎么做。未来,自治系统可能会做出这些决定,而人类将充当观察者和监督者。

由人工智能、机器学习以及历史和实时数据支持的自治系统还可以帮助获取当今经验丰富的操作员和技术人员的知识,从而有助于在一定程度上减轻人口老龄化对于工厂运营和业务可持续性的影响。在 2021 年后,制造商将继续在将运营从自动化转向自主方面取得进展。

5. 边缘计算平台成为边缘自动化平台

边缘计算平台和应用程序继续快速增长,但这些通常需要具备专业技能的企业 IT 人员来安装、编程、操作和支持它们。这导致了边缘自动化平台的开发,旨在提供边缘计算的全部功能和优势。这些功能包括在数据收集点或附近实时收集、分析、处理和存储数据。关键区别在于,没有特定 IT 技能的人员将能够支持这些新的边缘自动化平台。

边缘自动化平台至关重要,因为工业加工和制造应用中使用的边缘计算平台通常由 OT 组授权,即安装、编程、操作和维护自动化设备(如 PLC、PAC、DCS、传感器和其他仪器),这极大地节省了时间和人员成本。此外,边缘自动化平台旨在持续运行,无需专门的现场或远程 IT 支持。

6. 其他值得关注的趋势

ARC 咨询集团目前正在关注的其他潜在变革性技术趋势和方法包括:智能视觉系统和视频分析等;增材制造在生产环境中变得越来越主流;5G 网络在工业、基础设施和智慧城市中的部署不断增加;应用程序的容器化;连接资产的生命周期管理和优化。ARC 咨询小组将继续研究和评估这些最新的技术和方法,并见证它们对工业、基础设施和智慧城市的数字化转型的影响。

3.3 本章小结

本章基于数字化工厂的内涵对其涉及的主要方法和技术进行了整合归类和分析。数字化工厂的方法是以其本身所具备的特性和功能等为企业所面临的问题提供一种解决方案,侧重于数字化工厂的实际应用;数字化工厂的技术犹如“经络”一般贯穿于数字化工厂整体,数字化工厂的模型、方法及工具等均需要技术要素的嵌入结合,才能发挥数字化工厂的应有的功能和价值。本章介绍了几种主要的数字化工厂方法,同时构建了数字化工厂的技术体系架构,并将其涉及的主要技术进行了分类。