

上篇：原理技术篇

- 第1章 数字孪生概念及发展
- 第2章 数字孪生体系架构
- 第3章 数字孪生相关技术
- 第4章 面向智能制造的数字孪生
- 第5章 面向智慧城市的数字孪生
- 第6章 面向智慧能源的数字孪生
- 第7章 数字孪生的挑战与趋势

第 1 章 数字孪生概念及发展

1.1 数字孪生的起源和概念定义

1.1.1 数字孪生的起源

随着新一代信息技术和工业技术的飞速发展,诸如航空航天和工业制造等领域的设备日益复杂化。例如,无人机、卫星、工业自动化机器人和风力发电机等典型设备的集成度和智能化水平持续提升。这些复杂设备在设计、制造、测试、运行和维护等全生命周期各阶段的成本急剧攀升。同时,设备的复杂性也增加了故障发生、性能退化和功能失效的风险,使得对复杂设备的状态评估和未来性能预测成为关键的研究领域。

在设备运行的可靠性和经济性方面,传统的维护方式已经难以满足需求。为此,预测性健康管理(prognostics and health management,PHM)系统受到越来越多的关注。PHM通过实时监测设备状态,预测可能的故障和性能退化,提供预防性的维护策略,已逐步成为复杂设备自动化后勤保障的核心技术。然而,随着传感器技术和物联网的进步,以及复杂设备所处环境的动态变化,监测数据量急剧增加。这些数据具有高速传输、多源异构和高变异性的典型工业大数据特征。当前的PHM体系和关键技术主要基于设备在理想状态下的监测数据,难以满足在动态变化条件下对设备实时状态的精确评估和预测需求。这就需要新的技术手段来解决上述挑战。

数字孪生(digital twin)技术的提出为解决复杂设备的状态监测和预测提供了新的思路。数字孪生的概念最初由Grieves M. W.教授于2003年在美国密歇根大学的产品全生命周期管理(product lifecycle management,PLM)课程中提出。当时,这一概念被称为“镜像空间模型”(mirrored space model)。该模型的核心思想是创建一个物理产品的数字化镜像,使之能够映射和反映物理产品在全生命周期中的状态和行为。随着时间的推移,数字孪生的概念逐渐得到深化和推广。2006年,Grieves在他的著作中进一步阐述了数字孪生的概念,强调了物理产品与其数字化等价物之间的信息交互和同步。数字孪生被定义为包含物理空间、虚拟空间和两者之间的数据连接三个主要部分。通过这种方式,数字孪生不仅可以模拟和预测物理产品的性能,还可以通过反馈机制优化产品设计和运营。2010年,美国国家航空和航天局(NASA)在其太空技术路线图中首次正式引入了数字孪生的概念。NASA旨在利用数字孪生技术实现航天器的全面诊断和预测功能,以确保在整个使用寿命期间的持续安全运行。具体而言,NASA希望通过高保真的物理模型、历史数据和实时传感器数据的融合,创建航天器的精确

虚拟模型。这个虚拟模型能够实时反映航天器的状态,预测其健康状况和剩余使用寿命,并在必要时提供维护和修复建议。随后,数字孪生技术在航空航天领域得到了进一步的发展。NASA 与美国空军联合提出了面向未来飞行器的数字孪生范例。他们将数字孪生定义为一个集成了多物理场、多尺度和概率性仿真的过程。通过这一过程,能够对飞行器进行全生命周期的监测和预测,包括健康状态评估、故障预测、性能优化等。美国空军研究实验室(AFRL)在 2011 年将数字孪生技术应用于飞机结构的寿命预测。他们创建了一个包含材料特性、制造规格、控制系统、建造过程和维护信息的详细计算机模型。通过结合历史飞行数据和实时监测数据,进行虚拟飞行测试,以评估飞机的最大负载能力,确保适航性和安全性。这种方法不仅减轻了全生命周期的维护负担,还提高了飞机的可用性和可靠性。

数字孪生的核心理念在于创建物理产品或系统的数字化复制品,这个数字复制品与物理实体在整个生命周期中保持同步。通过实时的数据交换,数字孪生能够反映物理实体的当前状态,并预测其未来的行为和性能。这一技术的实现依赖于高精度的物理建模、先进的仿真技术、大数据分析和物联网等多种技术的融合。

1.1.2 数字孪生的概念详解

数字孪生技术代表了一种在数字环境中复制并模拟实体物体、过程或系统的方法。这项技术使我们能够通过数字平台洞察物理对象的实时状态,并对其预设的组件进行详细控制。作为物联网的重要组成部分,数字孪生结合了实时物理数据和高级计算技术,如人工智能、机器学习及复杂的数据分析,以在数字环境中构建一个动态的、与物理对象同步更新的模拟实体。在数字孪生的操作中,关键在于其能够模拟物理实体并实时更新以反映实体的变化。这种同步主要依靠各种类型的传感器,如压力传感器、位置传感器和速度传感器,这些传感器负责提供必要的操作数据。此外,数字孪生平台也能够整合来自历史数据记录和其他网络资源的数据,提供一个综合的数据视图以供分析和学习。通过深度学习算法,数字孪生能够从复杂的数据输入中学习并预测物理实体的行为,进而实现几乎实时地在虚拟环境中再现物理状态。这种技术的实用性不仅限于单个实体,也适用于成批的物理对象,其中模拟可以基于同类对象的集体数据进行优化。

起初,数字孪生的概念被用于描述产品的制造和实时虚拟展示,但由于技术限制,它并未得到广泛应用。随着传感器技术、硬件及软件能力的发展,以及计算处理能力的显著提高,数字孪生开始在实时监控产品和设备运行中发挥重要作用。从产品的全生命周期角度来看,数字孪生技术能够在设计、制造、运行监测、维护及后勤保障的每个阶段为产品的管理和优化提供支持。例如,在产品的设计阶段,数字孪生可以利用综合的生命周期管理数据帮助设计师优化产品性能。在制造阶段,通过虚拟技术可以模拟内部状态变量,精确刻画制造过程,从而简化生产并提高产品质量。在产品的运营阶段,通过全面监控运行参数,数字孪生可以提前识别故障和性能退化,指导维护决策,延长产品寿命。在后勤保障方面,基于丰富的数据和虚拟传感技术,可以精确地诊断故障,使维护更加高效。

实现数字孪生依赖于多个技术领域的进步,这些领域包括高性能计算、先进的传感技术、数字仿真、智能数据分析和增强现实(AR)或虚拟现实(VR)的可视化技术。这些技术合作,能够为物理实体创建一个高度精确的数字映射,从而实现对其的动态监测和维护。数字孪生不仅仅是技术上的挑战,它还涉及数据安全、隐私保护及高昂的技术实施成本等问题。尽管如

此,随着技术的成熟和成本的降低,预计未来几年数字孪生将在多个行业中得到更广泛的应用。具体而言,在环境管理和可持续发展领域,数字孪生技术能够模拟复杂的生态系统和工业过程,帮助企业评估其活动对环境可能产生的潜在影响。通过这种方式,企业可以预测和减少废物产生,优化能源利用效率,并实现更高效的自然资源管理。例如,水资源管理可以利用数字孪生来模拟水流和水质变化,从而制定更有效的水资源保护措施。在医疗领域,数字孪生正被用来创建个人健康的虚拟模型,这些模型能够模拟疾病进展和治疗反应。这使得医生能够为患者定制治疗方案,预测治疗结果,并避免不必要的副作用。此外,这项技术也在帮助医疗设备制造商设计更有效的医疗设备,通过虚拟测试来加快产品上市的速度。同时,数字孪生技术正被用于城市规划和管理,帮助城市规划者和政策制定者理解城市系统的运作,并预测未来发展的各种可能性。通过模拟交通流量、人口增长和基础设施发展,决策者可以更有效地规划未来的城市布局和公共服务,以适应预期的变化。

1.2 数字孪生的关键特征

1.2.1 实时性：数据的实时更新与反馈

实时性在数字孪生技术中通常是指系统能够在非常短的时间内接收、处理和反馈来自物理实体的数据。在工业应用中,这意味着系统能够即时反映出生产线、机器设备或物流系统的当前状态,并根据变化调整相应的操作或预测未来可能的故障点。实时性的高低直接影响数字孪生系统的响应速度和精准度,进而决定了其在预测维护、系统优化和故障诊断中的有效性。为了实现数据的实时更新,需依赖几个技术支柱。

(1) 高效的数据采集系统: 利用高精度的传感器网络,实时捕捉关于物理实体的各种参数,如温度、压力、振动等。

(2) 快速的数据传输解决方案: 通过高速的通信协议和网络设施,如5G或专用的光纤网络,确保数据快速安全地从源头传输到处理中心。

(3) 强大的数据处理能力: 使用高性能的计算技术,如边缘计算,使数据分析和处理可以近源执行,进而减少数据传输时间,加快响应速度。

在数字孪生系统中,不仅数据的更新需要实时性,数据的反馈机制也同样重要。这包括从系统中得到的分析结果能够迅速反馈至操作端,实现对物理系统的实时控制或调整。例如,在智能制造环境中,根据实时数据分析结果自动调整生产线速度或更换不达标的部件,可以显著提高生产效率和产品质量。这种即时的反应不仅限于制造业,同样适用于其他需要快速响应的环境。例如,在自动化生产线上,实时数据监控和反馈可以减少停机时间,提前预警潜在的机械故障,优化生产流程。在智能交通系统中,通过实时监控交通流量和车辆状态,可以动态调整交通信号灯,优化路线规划,减少交通拥堵。在远程医疗监控中,通过实时数据监测患者的生命体征,可以即时响应突发医疗事件,提供及时的医疗干预。这种从传感器到用户界面的快速数据流通不仅增强了操作的灵活性,还提高了系统的整体可靠性和效率。

数字孪生的实时性对于应急响应尤其重要,如在自然灾害监测和响应中,实时数据可以帮助决策者快速了解情况,做出反应,从而最大限度地减少人员伤亡和财产损失。例如,在洪水

监测中,通过实时分析水位和流速数据,相关部门可以迅速做出决策,实施疏散计划。此外,实时监控还可以应用于环境保护领域,如通过实时跟踪工业排放,环保机构可以及时检测并处理违规排放事件,有效保护环境。实时数据的管理和分析要求强大的后端支持,包括数据存储、数据安全和高效的数据处理能力。随着大数据和云计算技术的发展,数字孪生系统能够利用这些技术进行大规模数据的实时分析和存储,而不会受限于本地硬件资源。同时,随着人工智能技术的进步,机器学习模型可以在分析大量实时数据时,不断学习和适应,从而提高预测的准确性和系统的响应速度。

总的来说,实时性是数字孪生技术的核心特征之一,它使得数字孪生系统能够在多个行业中发挥关键作用,从智能制造到智慧城市管理,从环境监控到医疗健康,实时性都在推动这些领域向更高效、更智能的方向发展。随着相关技术的持续进步,数字孪生的实时性将得到进一步提升,从而带来更多的应用可能和社会价值。

1.2.2 互动性：与物理实体的动态交互

在数字孪生技术中,互动性不仅强调了数据的实时流动和控制能力,而且还涉及了模型与物理实体之间的实时反馈机制。这种机制允许系统根据接收到的数据不断更新和调整虚拟模型,使之能够更准确地映射和预测物理实体的行为和状态。例如,在汽车行业中,汽车的数字孪生模型可以收集从传感器和车载系统传来的数据,分析汽车的性能,并在检测到潜在问题时即刻通知维修团队或驾驶者,从而提前采取行动防止事故的发生。此外,互动性还使数字孪生模型能够参与到决策制定过程中,成为优化操作和提高系统整体表现的关键工具。在航空航天领域,飞机的数字孪生模型可以实时接收来自飞机各系统的数据,分析飞行性能,预测系统故障,并在必要时调整飞行计划或进行远程故障排除,以确保飞行安全。

数字孪生的互动性也扩展到了复杂的环境管理和监控系统中。例如,在环境保护项目中,数字孪生技术可以用来监控湿地或森林的生态状态,实时跟踪环境变化,并通过模型预测未来的环境趋势。这些信息可以帮助环保人员制定更有效的保护措施,调整保护策略,以应对快速变化的环境条件。互动性的高级应用还表现在医疗健康领域中。在个性化医疗服务中,病人的数字孪生模型可以实时接收来自监测设备的健康数据,如心率、血压等,模型通过对这些数据的分析,能够预测潜在的健康风险,甚至在紧急情况下自动通知医疗人员进行干预。这种技术的应用极大地提高了对慢性患者的监护质量,同时也优化了医疗资源的分配。

最终,数字孪生的互动性体现了其作为一种多功能平台的能力,不仅能实时监控和反馈,还能主动参与到控制和优化流程中。随着技术的不断进步,预计数字孪生将在更多领域展示其强大的互动性能,为各行各业带来革命性的改变。这种前所未有的互动能力标志着数字孪生技术正迅速成为未来技术革新的重要推动力。

1.2.3 精确性：高精度仿真

在数字孪生技术的核心特性中,精确性占据了至关重要的位置,尤其是在高精度仿真的领域。这种精确性使得数字孪生模型能够以极高的细节和准确度复制其物理对应物。这不仅包括基本的几何形状和外观的精确复制,还扩展到了操作行为、系统反应,以及在不同工况下的性能表现的精确模拟。由此,高精度仿真成为一个强大的工具,用于产品开发、性能优化、故障

诊断和预测维护。随着技术的进步,尤其是云计算、大数据、物联网、人工智能等新技术的集成,仿真技术已进入了一个新的发展阶段。这一阶段的仿真技术不仅数字化、网络化,还逐渐服务化和智能化,形成了一个逐渐完备的体系。数字孪生仿真技术的发展涵盖了多种类和分支,从对象、架构到粒度维度,呈现出丰富的多样性。

在仿真的对象上,可以大致分为工程系统仿真、自然系统仿真、社会系统仿真和生命系统仿真。工程系统仿真主要关注实际工程状态的模拟,如制造过程的仿真,它涵盖了产品制造的整个生命周期。自然系统仿真则着眼于对自然场景的真实模拟,包括动态、随机的自然过程,如气候变化或自然灾害的仿真,这对于预测和应对自然灾害具有重大意义。社会系统仿真关注复杂的社会行为和经济模型,有助于决策者快速理解系统状态和及时处理各种情况。生命系统仿真则专注于通过数字化方法研究和构建的人体模型,如数字人体,这种仿真有助于深入了解人体系统的信息处理和相互作用。

军事系统仿真在应用中也十分广泛,从战争模拟到作战演练,再到装备使用和维护培训,这些仿真应用不仅节约了大量经费,还提高了训练的效率和安全性。在仿真粒度上,分为单元级仿真、系统级仿真和体系级仿真,每个层级针对不同的仿真需求提供了专门的解决方案。仿真系统的架构涵盖从集中式到分布式等多种类型,集中式仿真适合中小型系统,便于管理和设计;而分布式仿真则适用于大规模系统,如城市交通系统或复杂的工业生产链。这种分布式架构有助于处理来自不同系统部分的大量数据,实现复杂系统的高效仿真。

数字孪生的概念因其形象和通俗易懂而引发了广泛的关注,进一步推动了人们对仿真技术价值和重要性的认识。这些仿真技术的理论、方法和技术体系的不断完善,为数字孪生的研究和应用提供了坚实的基础和强大的支撑,使得数字孪生技术在各个行业的应用前景更加广阔。

1.2.4 可扩展性:模型与系统的可适应性

在数字孪生技术的发展中,可扩展性是一项至关重要的特性,使得数字孪生模型能够适应不断变化的需求和扩大的应用范围。这种特性确保了数字孪生技术可以从监控单一设备或过程扩展到整个工厂或更广泛的网络系统。可扩展性不仅体现在技术层面,还包括模型的设计理念 and 架构的灵活性,使得技术能在不同应用环境中持续有效地发挥作用。

在现代工业和商业环境中,系统和设备不断升级和变化,一个固定的模型很难适应所有可能的变化。因此,数字孪生模型必须设计得足够灵活,能够适应从小规模到大规模的变化,包括技术升级、业务扩展或运营需求的改变。例如,在制造业中,一条生产线可能会增加新的机器或改变生产工艺,数字孪生模型需要能够随之调整,以保持其有效性和准确性。

实现高度可扩展的数字孪生模型依赖多个关键要素。

(1) 模块化设计。通过模块化设计,数字孪生系统可以将复杂系统分解成多个小的、独立的部分。每个模块负责系统中的一个特定功能或过程,可以独立更新和维护,而不影响整个系统的其他部分。这种设计使得添加新的功能或扩展现有功能变得更加容易和灵活。

(2) 云计算支持。云计算平台为数字孪生提供了弹性的计算资源和数据存储能力,使得数字孪生模型可以根据需要轻松扩展计算能力和存储空间,无须在本地系统进行昂贵的硬件升级。

(3) 标准化的数据交换接口。为了保证在系统扩展过程中数据的一致性和兼容性,需要

建立标准化的数据交换接口。这些接口确保了新加入的设备或系统能够无缝集成到现有的数字孪生架构中,实现数据顺畅流通。

(4) 动态配置能力。数字孪生系统应具备动态配置的能力,允许用户根据实际需求调整系统设置。这包括对模型参数的调整、仿真条件的变更及报告模板的定制等。

在不同行业中,数字孪生的可扩展性展现出其广泛的应用价值。

(1) 制造业。在制造业中,随着产品线的扩展或技术的更新,数字孪生模型可以相应地扩展,包括新增机器的集成、生产能力的提升及新材料的使用。

(2) 能源管理。在能源行业中,数字孪生模型可以从监控单一的发电机组扩展到整个电网的管理,帮助优化能源分配并预测需求和供应变化。

(3) 城市基础设施。对于城市管理,数字孪生模型可以从监控单一的交通路口扩展到覆盖全城的交通系统,帮助城市规划者优化交通流量和减少拥堵。

(4) 医疗健康。在医疗行业中,数字孪生模型可以从监测单一患者的健康状态扩展到管理整个医院的医疗设备和患者照护过程,进而提高医疗服务的效率和质量。

通过这些应用示例可以看出,可扩展性是数字孪生技术成功实施的关键,它使得该技术不仅能满足当前的业务需求,还能预见并适应未来的挑战。

1.2.5 模块性：系统组件的独立与协作

模块性在数字孪生技术中提供了一种强大的机制,以支持系统的可扩展性、维护性和创新性。它通过允许各个组件独立而高效地工作,同时确保它们能够无缝协同,从而提高了系统的操作效率,并提升了整体的系统稳定性和可靠性。模块性使得每个部分或组件可以独立操作,同时保持与整个系统的整合能力。这种设计不仅增强了系统的灵活性和可管理性,还极大地简化了维护和升级过程。随着技术的进一步发展,模块性将继续在数字孪生领域发挥关键作用,推动更广泛的技术整合和应用创新。

模块性的核心优势在于它允许系统设计者和运维团队对数字孪生模型进行部分更新而不需要重构整个系统。这意味着可以针对特定模块进行优化或调整,以响应外部环境的变化或内部需求的更新,而不会影响到系统的其他部分。例如,如果一个制造流程需要更新或替换某种特定的传感器模块,系统管理员可以仅对该部分进行修改,而无须重新配置整个监控系统。此外,模块性设计还提供了更好的故障隔离性。在复杂的数字孪生系统中,某个模块的故障不必导致整个系统崩溃。相反,问题可以被局限在单个模块中,从而降低了系统整体的风险并增强了系统的可靠性。这种设计也使得进行故障诊断和后续的维护工作更为便捷,因为系统的每个部分都是可识别和可访问的。

在实际应用中,模块性使得数字孪生技术能够适用于多种不同规模和复杂度的项目。例如,在大型工业应用中,一个庞大的化工厂可能会有成百上千个不同的传感器和机器设备。通过模块化的设计,每一部分都可以作为一个独立的单元进行监控和管理,同时所有单元的数据可以集成到一个全面的控制系统中,从而实现高效的整体操作。

模块性还极大地促进了跨学科和跨行业的合作。不同的模块可以由各自的团队或专家设计和优化,然后通过标准化的接口集成到一个统一的系统中。这种合作模式不仅优化了资源的使用,还激发了创新,因为各方可以专注于自己最擅长的领域,而不必分心于整个系统的每一个细节。

1.2.6 互操作性：不同系统间的协同工作能力

互操作性是指数字孪生系统能够与其他系统和技术平台进行有效的沟通和协作，确保信息和数据能够在不同的系统之间无缝传递。互操作性是实现综合性解决方案的基础，它允许从不同来源收集的数据能够被整合和分析，从而提供更全面的洞察和优化决策。互操作性的实现对于现代企业尤其重要，因为它们通常需要将传统的 IT 系统与新兴的物联网(IoT)设备、移动应用和云服务等多种技术集成在一起。例如，在一个制造企业中，数字孪生技术可能需要集成来自生产线的传感器数据、ERP 系统的库存信息及 CRM 系统的客户需求数据。只有当这些系统能够互相“交谈”并理解彼此的数据时，数字孪生才能发挥其全部潜力，实现生产效率的最大化和响应时间的最小化。

实现良好的互操作性需要标准化的通信协议和数据格式。这些标准化措施能够确保不同系统之间的信息得到正确解读和处理，无论这些系统的开发商或者支持技术平台如何。例如，采用通用的数据交换格式如 XML 或 JSON，以及通信协议如 MQTT 或 AMQP，可以帮助不同系统之间建立稳定可靠的数据交流渠道。此外，API(应用程序编程接口)的使用也是实现系统互操作性的关键。通过开放 API，不同的软件和硬件可以通过预先定义的方法来互相交互，这为创建可互操作的环境提供了必要的灵活性和扩展性。在数字孪生环境中，API 允许系统组件查询彼此的状态或触发对方的操作，从而实现更为动态和响应性的交互模式。

在实际应用中，互操作性使得数字孪生系统可以在多个层面上增值。例如，在智能城市项目中，交通管理系统、公共安全监控和能源管理系统可能需要相互协作，以优化交通流、预防紧急事件并有效分配能源。只有当这些系统能够无缝整合，才能实现这一目标，提高城市管理的整体效率和居民的生活质量。

进一步地，互操作性还支持了更广泛的数据分析和机器学习应用。当不同来源的数据能够集成到一个统一的平台时，企业可以运用先进的分析工具来发现潜在的趋势和模式，以及未被发现的效率提升机会。这种深度的数据洞察力是现代企业在竞争中脱颖而出的关键。

1.3 数字孪生的发展历程

1.3.1 初始阶段和关键发展

数字孪生技术的发展历程显著地标志着其从最初的理论探索逐渐过渡到实际应用，并最终演进到行业标准的制定。这一过程受到了众多因素的推动，包括技术进步、工业需求及经济环境的变化，这些因素共同塑造了数字孪生技术的成长路径。这种技术进步不仅优化了制造流程，还加速了新产品的市场推出速度，从而在全球范围内重塑了传统产业的竞争格局。

数字孪生概念的提出旨在通过创建物理对象的精确虚拟模型来优化制造和运营流程。这一思想的提出是在产品生命周期管理(PLM)技术已相对成熟的背景下，寻求通过虚拟化手段进一步提升产品设计和维护的效率。2009年，美国空军实验室对这一概念进行了进一步的发展，并引入了“机身数字孪生”这一术语。随后，在2010年，NASA正式采用了这一术语，并将

其纳入其技术发展路线图中,这标志着数字孪生概念开始在航天领域得到系统化的应用。

数字孪生的初期概念主要集中在模拟和仿真技术上,随着时间的推移,互联网技术的普及、大数据的兴起及人工智能技术的突破,为数字孪生的进一步发展提供了强大的技术支持。特别是物联网技术的应用,使得从传感器等终端收集的实时数据大量涌现,这些数据的集成与分析极大地丰富了数字孪生的功能,使其能够进行更加复杂的模拟和预测,广泛应用于航空、能源、汽车等多个行业。

在 2010—2020 年,数字孪生技术经历了领先应用期,逐渐从理论走向实践。特别是在航空航天和国防领域,数字孪生开始发挥关键作用。此外,随着云计算和机器学习技术的成熟,数字孪生在工业互联网中的应用也得到了显著推动。同期,国际标准化组织如 ISO、IEC 和 IEEE 等开始关注并制定相关的技术标准,以促进这一技术的健康发展和国际协同。

进入 2020 年后,数字孪生技术步入了一个新的发展阶段,这一阶段的特征是技术的深度开发和广泛应用。不仅限于制造业,数字孪生技术开始在智慧城市、数字政府等领域展示其潜力。Gartner 的研究报告显示,数字孪生技术正迅速成为主流技术,预计未来几年将在全球范围内得到广泛应用。

此外,数字孪生被认为是第四次工业革命中的通用目的技术(GPT)。它不仅能够支持设备和系统的优化管理,还能为数字化转型提供强有力的技术支持,成为连接物理世界和数字世界的关键桥梁。预计在 21 世纪 20 年代,随着技术的不断成熟和应用的不断深入,数字孪生将成为一个普遍存在的技术实践,广泛应用于各个行业和生活各个方面。四次工业革命概览如表 1-1 所示。

表 1-1 四次工业革命概览

工业革命	第一次 (1750—1850)	第二次 (1850—1950)	第三次 (1950—2020)	第四次 (2020—2080?)
特点/名称	机械化/机械时代	电气化/电气时代	数字化/信息时代	智能化/智能时代
理论基础	机械还原论	能量守恒论	控制论+系统工程论+信息论	量子信息论
典型观点	人是机器	永动机不可行	信息是用来消除不确定性的	万物源自比特
能量源	煤炭	电力	核能	可再生能源/可控核聚变
动力装置	蒸汽机	内燃机/电动机	核动力/喷气式推进	(待发明)
信息传输/处理	信号塔	电话/电报/无线电	电子计算机	量子计算机
设计范式	手工作坊→单人	单人→小团队	传统系统工程	基于数字孪生体的现代系统工程
生产管理	单台机器生产	基于装配流水线的大规模生产	基于计算机的自动化生产	基于数字孪生体和工业互联网的智能工厂
通用目的技术	蒸汽机	内燃机/电动机	计算机/互联网	AI/数字孪生体/IoT

1.3.2 各国的政策和技术发展

在数字孪生技术的全球发展中,美国始终处于领先地位,以战略性规划和全面的实践推动其在多个领域的应用。美国政府和私营部门的紧密合作形成了强大的推动力。自从密歇根大