形状

描述已自动生成

现代设计理论课程报告

徽标, 公司名称

描述已自动生成

题　　目： 物联网智能设计在数字孪生中的应用

学生姓名： 李翔、黄梓瑞、李睿则、钱洁君、孙俊凯

指导教师：　　　蔡池兰

日 期：　 2025年1月1日

目 录

1 引言 1

2 数字孪生概述 2

2.1 数字孪生的定义和发展 2

2.2 有关实现数字孪生的关键技术 4

2.2.1 物联网技术 4

2.2.2 大数据分析 4

2.2.3 云计算 4

2.2.4 关键技术总结 5

2.3 有关数字孪生的具体应用 5

3 物联网技术概述 6

3.1 物联网技术定义与发展 6

3.2 物联网的未来趋势 8

3.2.1 从智能到自主 8

3.2.2 数据与价值的深度融合 8

3.2.3 人机共生的新生态 8

4 物联网技术数字孪生中的运用 8

5 物联网技术数字孪生中的挑战与方向 10

5.1 数据管理与处理挑战 10

5.2 安全性与可靠性问题 11

5.3 系统的可扩展性与能源效率 11

6 总结 11

物联网智能设计在数字孪生中的应用

李翔、黄梓瑞、李睿则、钱洁君、孙俊凯

上海第二工业大学智能制造与控制工程学院 上海 201209

摘要：本文综述了物联网（IoT）及其相关技术的发展现状，重点探讨了数字孪生技术在工业4.0中的应用。首先，介绍了物联网的基本概念和当前发展概况，并分析了其行业现状和发展前景。其次，详细阐述了数字孪生的定义、优势以及在制造业中的具体应用案例。接着，讨论了数字孪生网络的发展趋势及其研究方向。此外，本文还探讨了边缘计算与区块链技术对物联网的影响，强调它们在未来物联网架构中的重要性。最后，指出了当前物联网在数字孪生中面临的主要挑战，并提出了未来的研究方向。

关键词：数字孪生、物联网、智能设计

**The Application of IoT Intelligent Design in Digital Twins**

Li Xiang、Huang Zirui、Li Ruize、Qian Jiejun、Xun Junkai

**Abstract：**This article reviews the development status of the Internet of Things (IoT) and its related technologies, with a focus on the application of Digital Twin technology in Industry 4.0. Initially, it introduces the fundamental concepts of IoT and provides an overview of its current development, analyzing the present industry status and future prospects. Subsequently, it elaborates on the definition of Digital Twins, their advantages, and specific case studies of their applications within manufacturing. The article then discusses the development trends of Digital Twin networks and their research directions. Furthermore, it explores the impact of edge computing and blockchain technology on IoT, emphasizing their importance in the future IoT architecture. Finally, it identifies the main challenges currently faced by IoT in the context of Digital Twins and suggests directions for future research.In summary, this review highlights the integration and advancement of IoT and Digital Twin technologies, offering insights into how these innovations are shaping the landscape of modern industries, particularly in the era of Industry 4.0.

**Key Words：**Digital Twins、Internet of Things、Intelligent Design

# 引言

20世纪80年代，美国提出了数字孪生的前身，一种从地球监测太空中飞机状态的方法。2002年Grieves初步提出数字孪生的3维模型，随后，2014年Grieves再次提到了数字孪生的可用性之后[1]，各个领域开始有了更多的目光聚集在数字孪生上面。并且随着新一代信息通信技术迅猛发展，特别是物联网（Internet of Things，IoT），人工智能（Artificial Intelligence，AI），云计算，大数据等，数字化开始经历了数字化使能、数字化辅助、数字化控制和链接、网络-物理集成四个渐进阶段[2]。通过物联网技术部署各种类型的传感器收集的现实世界中的物理实体在不同生命阶段的数据，其中的数据涵盖设计、制造、运行直至退役的全过程[3]，数字化中的数字孪生能够有效反映物理实体的物理特性[4]。通过采集的物理实体的数据[5]，数字孪生也能根据数据来进行监测，诊断，优化和预测[6]，拥有实时分析、高精度、高保真度、可追溯性和高集成度等特性[7]，被许多公司和领域用来发现问题提高效率[8]。

在数字孪生中，物联网技术是它的最为关键的部分。通过物联网技术，数字孪生能够进行虚实互应，虚实交流，即物联网技术在数字孪生能够充当桥梁的作用，如图 1数字孪生桥梁—物联网技术所示。所以，想要实现船舶制造车间数字孪生的前提就是物联网技术的应用。



图 1数字孪生桥梁—物联网技术

# 数字孪生概述

## 数字孪生的定义和发展

美国宇航局在20世纪80年代提出一种从地球监测太空中飞机状态的方法，这个方法是数字孪生的前身，但是这个概念偏向于物理双胞胎，而不是DT。他们提到的方法将建造同一台机器的两个相同的副本，一个保留在地球上，另一个发送到太空。 地球上的双胞胎将受到尽可能接近与太空中的双胞胎相同的条件。 由于两个双胞胎之间的制造缺陷存在差异，并且无法确保两个双胞胎处于相同的操作条件下，因此该方法会产生许多不准确性。[9]随后2002年由Grieves提出：“一组虚拟信息结构，从微观原子层面到宏观几何层面全面描述潜在或实际的物理制造产品。 在最佳情况下，通过检查物理制造产品可以获得的任何信息都可以从其数字孪生中获得。 数字孪生概念模型包含三个主要部分：a）真实空间中的物理产品，b）虚拟空间中的虚拟产品，c）将虚拟和真实产品联系在一起的数据和信息的连接。”标志着数字孪生正式形成[10]。

图 2 2002 年至 2024年 WoSCC 检索的有关数字孪生出版物的数量

Web of Science Core Collection（WoSCC）是现在有名的文献搜索引擎，图3为2002 年至 2024年 WoSCC 检索的有关数字孪生出版物的数量，可以发现，从2002年提出定义到2015年，有关具体到数字孪生这个方向的出版物数量都比较少，不过在此期间有些出版物类似于数字孪生但是名字不一样，例如digital model[11] ，digital shadow[12] ，hardware-in-the-loop[13]  and digital thread[14] 等。到了2015年，由于物联网技术的提升，数字孪生重新来到人们的视野，Rosen提出数字孪生能够通过物联网来实现一个非常现实的模型，并展示了模型工作流程的状态以及他们自己在现实世界中与环境交互的行为[15]。2016年，G. N.Schroeder提出数字孪生是真实产品的虚拟表示。它包含从产品生命周期开始直至产品废弃的产品信息。数字孪生是信息物流系统（Cyber Physical System，CPS）中物理设备、机器或产品的对应部分，具有与产品的整个生命周期相关的信息[16]。2017年，Brenner and Hummel提出数字孪生是真实工厂、机器、工人等的数字副本，它是创建的，可以独立扩展、自动更新，并且在全球范围内实时可用[17]。更有甚者在2017年就超前将数字孪生用于根据需求动态调整产值，例如Graessler and Poehler提出的数字孪生将它自己的网络物理设备，连接到信息物理生产系统（Cyber Physical Production System，CPPS），并试图通过数据库的动态调整值来模拟人类员工，这些值代表属性、偏好、工作时间表和技能组等[18]。从此，数字孪生有关课题开始井喷式爆发。经过不断的完善，在2018年，陶飞提出数字孪生的五维模型，五维数字孪生模型可表示为公式（1）[19]。

MDT = （ PE , VM , Ss , DD , CN ） （1）

其中PE为物理实体，VM为虚拟模型，Ss为业务，DD为DT数据，CN为连接。

因为孪生数据是数字孪生的关键驱动因素[20]；并且在现代社会各方面产品-服务一体化的背景下，越来越多的企业开始意识到服务的重要性[21]。所以该公式在Grieves的三维模型（物理实体，虚拟模型，两者的连接）的基础上多了数字孪生的数据和业务。Lee and Kim提出数字孪生中的物理对象或流程的近实时数字图像有助于优化业务绩效，其中物联网（IoT）和服务互联网（Internet of Service，IoS）两个概念相结合，实现基于数字孪生的智能工厂[22]。在文章中，他们提到了物联网在数字孪生中的重要性。Luo提到数字孪生是整个系统的完整虚拟原型和一对一的映射关系。因此，在建模方面需要一种多领域的数字建模方法来建立机床设计与实际环境一致的模型；在数据方面需要实时、准确的数据映射方法；在数据分析方面需要一种有效的机器学习算法来挖掘从传感器和控制系统收集的数据[23]。从此开始数字孪生开始慢慢朝着与人工智能结合的方向研究，让数字孪生系统自动根据数据决策。2019年，Leng提到数字孪生中的每个物理设备都将拥有其网络部分作为真实设备的数字表示，从而最终形成数字孪生模型。因此，数字孪生可以监视和控制物理实体，而物理实体可以发送数据来更新和同步其虚拟模型[24]。2020年，Jones提到数字孪生是一个将物理实体与虚拟实体相结合的系统，利用虚拟和物理环境的优势来实现整个系统的利益[25]。2021年，陶飞提出数字孪生是表示工业过程及其组成部分的方法，换句话说，就是“真实”和“数字”世界之间的桥梁[3]。表 1有关数字孪生定义的部分高引用文章 为WoSCC 检索的部分高引用的有关数字孪生定义的文章。检索方式，主题：digital twin；研究方向：Engineering or Computer Science or Telecommunications or Automation Control Systems；排序：被引频次最高优先。

表 1有关数字孪生定义的部分高引用文章

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ref. | Definition | Citation |
| [2] | 将物理空间和虚拟空间无缝集成的技术，可以实现智能制造和工业4.0的目标。 | 1588 |
| [26] | 数字孪生驱动的产品服务是一种基于物理产品、虚拟产品和连接数据的方法，以实现复杂产品的实时监测、能源消耗分析和预测、用户管理行为分析、智能优化更新、产品故障分析和预测、产品维护策略、虚拟维护、虚拟操作等九种服务。 | 1421 |
| [27] | 通过计算技术模拟现实世界中的物体或系统的技术。 | 864 |
| [28] | 将物理实体在虚拟世界中进行建模的方法，以模拟其行为并优化生产过程。 | 800 |
| [29] | 利用数字化技术对现实世界中的物体、系统等进行建模，并在虚拟环境中进行仿真分析的技术。 | 785 |
| [30] | 在计算机技术上建立一个虚拟的、与真实物理系统相对应的数字化模型，可以对真实系统进行仿真、预测和优化。 | 756 |
| [31] | 通过计算机技术基于实际系统的数据和信息建立的虚拟模型，用于模拟物理系统的行为和性能。 | 741 |
| [32] | 一种计算机化的模型，通过结合基于模型的方法和数据分析方法，可以提供端到端的可见性和业务连续性，并帮助组织制定预测性决策和应急响应计划。 | 656 |
| [33] | 利用数字技术对物理系统进行建模和仿真，从而实现对其行为和性能的预测和优化的过程。 | 645 |
| [3] | 根据传感器更新和历史数据驱动的复杂模型，可以镜像几乎每个产品、过程或服务的各个方面。 | 612 |
| [34] | 基于物理实体的虚拟模型，在计算机中模拟现实世界中的物体、系统或过程，并且可以通过实时数据采集、分析和反馈来优化实际系统的运行，提供更好的工程解决方案。 | 567 |
| [35] | 通过计算机技术建立一个虚拟的、数字化的模型，模拟现实世界中的物理系统或过程。 | 554 |
| [36] | 模拟现实世界中的物体、系统或者过程，并利用人工智能等技术对其进行实时监测、分析和优化的一种技术手段。 | 554 |
| [37] | 基于虚拟建模技术的概念，它可以将现实世界中的物体、系统或过程进行数字化仿真，并生成一个与其相对应的虚拟模型。 | 521 |
| [38] | 通过计算机技术建立的一个虚拟模型，它能够对实际物体或系统进行全面、准确地模拟和预测。 | 461 |
| [39] | 包括数字孪生模型和数字孪生系统两个部分，其中数字孪生模型是对物理实体的虚拟复制，而数字孪生系统则是由硬件设备、软件平台和网络连接组成的整体系统。 | 313 |
| [40] | 一种数字化技术，建立物理系统在虚拟空间中的代表（即“数字双胞胎”），实现实时监测、分析和优化。 | 309 |
| [41] | 通过建立虚拟模型来模拟现实世界中的实体对象的方法。 | 122 |

通过上述内容和表 1可以发现，无论在论文中有关数字孪生定义的介绍如何变化，最基本的定义往往都离不开三部分。

* + 1. 实体对象：现实中的产品，系统，设施，环境等
    2. 虚拟模型：在计算机环境中创建一个与现实世界中的实体对象相对应的虚拟模型
    3. 虚实互联：将计算机环境中的虚拟模型与现实世界的实体对象之间建立紧密的双向连接，实现两者之间的实时数据交换、同步和反馈。

要实现上述三部分，需要通过整合物联网技术，大数据分析，云计算等多项关键技术。

## 有关实现数字孪生的关键技术

### 物联网技术

物联网（IoT）是指通过各种传感器、通信技术和互联网连接起来的各种物品之间的互联互通。这些物品可以是物理设备、家用电器、车辆等等，它们可以通过无线网络相互交流，并能够收集、传输和处理数据。随着科技的进步，物联网技术（IoT）现已成为许多现有工业系统的运作或者为系统变革提供有前景的解决方案。但是物联网是一个复杂的网络物理系统，它将各种设备集成在一起，并具有感知、识别、处理、通信和联网能力，特别是现在传感器和执行器越来越强大、价格低廉且体积小，使得它们的应用无处不在。同时，工业界对部署物联网设备以开发诸如自动化监控、控制、管理和维护等工业应用有着浓厚的兴趣。并且，由于技术与工业基础设施的迅速发展，物联网将在各个行业得到广泛应用[42]。

物联网技术是实现数字孪生的基础，保证数字孪生的虚实交互。本文将在第三章详细概述。

### 大数据分析

大数据分析是指利用计算机技术对大规模的数据进行收集、存储、处理和分析的过程。随着信息技术的发展，越来越多的数据被生成并储存下来，这些数据包含了各种各样的信息，如果能够有效地挖掘和利用这些数据，就可以为企业和个人带来巨大的价值。例如通过大数据分析，企业可以发现隐藏在数据中的规律和趋势，从而预测未来的走向，优化业务流程，提高效率和效益。大数据分析也可以帮助企业更好地了解社会和市场状况，制定更科学的政策和战略[43]。因此，大数据分析已经成为了一个热门的研究方向和应用领域。并且，由于科技的发展，数据量也愈发巨大，传统的数据处理方法已经无法胜任，所以也需要开发新的技术和算法来应对这一挑战。

大数据分析是数字孪生的关键技术，通过大数据分析，可以研究如何实现数字孪生对于模型的优化问题，预测问题等。

### 云计算

云计算作为一种创新的计算模式，通过互联网为用户提供各种按需服务，包括存储、计算、网络带宽、数据分析、人工智能等。与传统的本地计算模式相比，云计算不仅能够显著降低企业和个人在硬件、软件以及维护等方面的投资和成本，还能够提高资源利用率和业务运作的灵活性。在云计算的架构中，资源被高度虚拟化，允许按需进行动态分配和释放。这种虚拟化技术使得用户可以根据具体需求随时扩展或缩减所需的计算资源，从而避免了过度投资或资源浪费。云计算的可扩展性和灵活性使其特别适合大规模数据处理、高性能计算、物联网（IoT）和人工智能（AI）等应用场景。在大数据分析方面，云计算平台可以处理海量的数据集，帮助企业从中挖掘出有价值的商业洞察。在高性能计算领域，云计算能够提供强大的计算资源支持，从而推动科学研究、工程模拟、金融建模等领域的创新。云计算的全球化特性使得其服务能够跨越地理位置限制，用户无论身处何地都可以随时随地访问所需的资源和服务。云计算不仅为企业带来更多选择，也为个人用户创造了更多机会。例如，个人用户可以通过云存储服务随时备份和分享自己的文件；开发者可以借助云平台快速构建和部署应用程序；而在智能家居和智能办公等领域，云计算也在不断推动数字化转型，提升日常生活和工作的效率[44]。

云计算是数字孪生的重要技术，通过云平台等，用户可以远程操控数字孪生虚拟模型，以用来实现远程操控物理实体模型。

### 关键技术总结

数字孪生技术依托物联网、大数据分析、云计算等关键技术，能够通过实时数据采集与分析，建立与物理实体对应的虚拟模型，实现虚实结合与动态优化。物联网提供数据支持，云计算为系统提供强大计算能力和远程操控的实现，而大数据分析则通过挖掘隐藏的规律优化系统性能，从而帮助数字孪生去提升预测与决策水平。随着技术的不断进步，数字孪生将在制造、城市管理、智能交通等领域得到更加广泛的应用。未来，数字孪生将通过更高效的数据处理、更智能的分析决策，为各行各业提供更精准、可靠的解决方案。并且，科技的发展将会推动数字孪生向智能化、自动化和可持续发展迈进。

## 有关数字孪生的具体应用

数字孪生技术通过在虚拟空间中创建物理实体的精确模型，实现了对现实世界对象或系统的仿真、监控和优化。这种技术广泛应用于多个领域，包括制造业中的产品设计与生产流程优化，通过提前发现潜在问题来提高效率和降低成本；在智慧城市中，数字孪生用于交通管理、能源分配及环境监测等方面，以实现资源的有效利用和城市管理的智能化；在医疗健康领域，它帮助医生进行个性化治疗方案的设计，并支持远程医疗服务的发展；此外，在航空航天、建筑施工等领域也展现出了巨大的应用价值。通过对实时数据的收集分析以及高级算法的支持，数字孪生不仅能够提供对当前状态的准确描述，还能预测未来趋势并提出改进建议，从而推动各行业的数字化转型。数字孪生在不同行业的应用如表3所示。

表 2数字孪生有关应用

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Application areas | Ref. | Content |
| AirCraft | [45] | 文章利用数字孪生的超高保真的特点对飞机进行实时监控模型，采用数字孪生模型对健康状况进行评价飞机结构的状态和寿命预测。 |
| Transportation | [46] | 文章通过一种基于车辆到云端通信的数字孪生框架，用于连接车辆并实现高级驾驶员辅助系统，将物理世界中的实体及其交互映射到虚拟世界中来实现实时监控和同步。 |
| [47] | 文章通过基于数字孪生和深度迁移学习的故障诊断方法给出了汽车车身生产线故障诊断案例研究。 |
| [48] | 文章在真实世界实验中评估了太阳能汽车经过数字孪生系统优化分析后的能源消耗，误差仅为5.17%，表明数字孪生模型能够准确地模拟实体。 |
| Energy | [49] | 文章利用投影变换方法构建天然气和电力系统的能源管理的数字孪生模型，更好地模拟和预测能源系统的性能和行为。 |
| [50] | 文章基于数字孪生技术框架实现对海上风力发电机组支撑结构的实时监测、故障诊断和操作优化。 |
| City | [51] | 文章通过分析六个具有卓越表现的城市以及三个正在崛起的城市，展示了这些城市的数字孪生体和预期效益。 |
| Healthcare | [52] | 文章提出数字孪生技术在医疗保健行业的使用有所增加，能够通过数字孪生技术改善患者护理、延长预期寿命并减少医疗费用成本。 |
| Manufacture | [53] | 文章介绍了一种数字孪生技术的应用框架，并通过焊接生产线的例子来说明其实用性和有效性。 |
| [54] | 文章使用AutomationML标准建立了一个被用于模拟和预测工业组件的行为的数字孪生模型。 |
| [55] | 文章结合了数字孪生等技术提出了一种新用于模拟复杂系统的数据处理、行为等方面的仿真技术，可以用于开发、优化、验证等应用场景。 |
| Building | [56] | 文章通过实验收集超过25,000个传感器读数实例，并利用这些数据创建了一个有限的建筑物立面元素数字孪生模型来进行管理和维护建筑物。 |

总结以上所述文章和内容可以发现，数字孪生架构可分为展示层，孪生系统层，支撑技术层，数据资源层，感知层，物理层六个层次，一层一层向上递进，如图 3 数字孪生架构。



图 3 数字孪生架构

数字孪生系统利用感知层的物联网和传感器数据采集实体对象层的物理产品，设施和环境等，数据通过通信网络传输到数据层后，在数据库中存储与保证数据安全，根据数字孪生的部分支撑技术进行分析、优化，最终通过虚拟互联层的仿真系统，并利用展示层的智慧大屏、办公桌面或可视化看板进行展示，实现对物理对象的实时监控、分析和优化。

# 物联网技术概述

## 物联网技术定义与发展

“Internet of Things (IoT)”一词最初由 Kevin Ashton 提出，描述如何通过“向日常物品添加射频识别和其他传感器”来创建物联网， 随着时间的推移，该术语已演变为将物联网描述为通过任何形式的传感器连接的实体网络[57]。物联网可以被视为一个系统，可以是物理的、虚拟的或两者的混合，由大量活动的传感器、特定物联网协议、网络通信等组成。通过物联网，设备可以与其他连接的设备和应用程序交换数据，或者从其他设备收集数据并在本地处理数据，或者将数据发送到集中式服务器或基于云的应用程序后端来处理数据，或者在本地执行某些任务和其他任务[58]。物联网能够通过在各个领域创建新的智能应用程序、服务和产品，同时确保交换的信息和内容的保护和隐私，为环境、社会、个人和企业带来好处。

物联网的核心是物与物以及人与物之间的信息交互，基本特征可概括为全面感知、可靠传送和智能处理。全面感知是指利用传感器技术，射频技术等技术能够对物体进行感知、捕获、测量等方式获取和采集物体信息。可靠传送是指将物体通过各种通信网络随时随地的与相信未来进行可靠的信息交互和共享。智能处理是指将利用感知捕获等方式获取采集到的物体信息数据利用各种智能计算技术例如边缘计算等进行分析并处理[59]，实现智能化的决策。

1995 年，比尔盖茨在《未来之路》一书中提及物联网概念，但受限于当时无线网络、硬件和传感设备的发展，未引起世人关注。

1999 年，由美国 Auto-ID 首次提出了 “物联网” 的概念，主要是基于物品编码、RFID 技术和互联网。同年，“物联网” 一词出现，麻省理工学院自动识别实验室的负责人凯文・阿什顿在给宝洁公司高管的演示中提到该术语，以此说明射频识别跟踪技术的潜力。

2005 年，在突尼斯召开的信息社会世界峰会（WSIS）上，国际电信联盟（ITU）发布了《ITU Internet Report 2005：Internet of Things》，正式提出了 “物联网” 的概念。

2007 年，第一部 iPhone 手机出现，为公众提供了一种与世界和连网设备互动的全新方式。

2009 年，圣裘德医疗中心第一个使用网络发送数据的心脏起搏器推出，此后连网胰岛素泵和其他医疗植入物陆续推出。同年，IBM 提出物联网战略 -“智慧地球”，标志着物联网进入到快速发展期。谷歌启动了自动驾驶汽车测试项目。

2017 - 2019 年，物联网开发变得更便宜、更容易、也更被广泛接受，自动驾驶汽车不断改进，区块链和人工智能开始融入物联网平台，智能手机 / 宽带普及率的提高将继续使物联网成为未来一个吸引人的价值主张。

2020 年，随着 5G 的慢慢普及，物联网开始迎来一波爆发，国家企业都纷纷在 5G 和物联网的风口中寻找到突破点，开启万物互联的智能世界。

图片包含 图形用户界面

描述已自动生成

图 4物联网应用场景分类[60]

2024 年 11 月 3 日，第九届世界物联网大会在北京国家会议中心开幕，并发布《世界万物智联数字经济白皮书》。数据显示，2024 年中国建成承载物联网的 5G 基站有望超过 430 万个，“物” 的连接数有望突破 30 亿。

图表, 条形图

描述已自动生成

图 5中国物联网连接数情况[61]

## 物联网的未来趋势

### 从智能到自主

设备将具备更强决策能力，根据实时数据和情境变化做出最优选择。例如，智能家居系统能预测用户需求，提前做好准备。

当前，物联网正在从智能迈向自主，中国物联网的发展非常迅猛，新需求、新技术和新品牌巨头正驱动着物联网行业的发展。一方面，行业集中度逐渐提高，头部玩家占据越来越高的市场份额；另一方面，物联网又是一个非常碎片化的行业，随着中国经济社会的发展，越来越多行业会涌现出来。在实现 “自主” 的过程中，目前最大的挑战并不是技术，而是对每个行业的真正需求和痛点的深入挖掘。英特尔作为芯片和底层软件供应商，和合作伙伴一起合作设计出更多的设备以及解决方案，去满足各个行业从智能到自主的过程中的需求，更好地解决行业迈向自主之后的痛点。

### 数据与价值的深度融合

数据成为新石油，驱动社会运转。在物联网时代，数据将成为新的石油，驱动着整个社会的运转。随着万物互联的深入，数据的收集、处理和应用将达到前所未有的规模。[7]企业将能够通过这些数据洞察市场趋势、优化产品设计、提升用户体验。更重要的是，这些数据将促进不同行业之间的跨界融合，创造出全新的商业模式和价值空间。

促进不同行业跨界融合，创造全新商业模式和价值空间。数字化与物联网融合正在驱动着商业模式的变革与创新。通过大数据分析、人工智能和物联网的融合应用，企业能够更好地洞察客户需求、优化运营效率、开拓新的盈利空间。例如，在制造业中，物联网技术与数字化转型的结合，可实现设备远程监控、生产过程优化、智能仓储等，提高生产效率和产品质量；在城市管理中，通过采集各项公共服务数据，结合大数据分析，可以实现智能交通管理、能源优化调配、环境监测等，提升城市的整体运行效率和居民的生活质量。

### 人机共生的新生态

智能设备成为生活、工作乃至思想的一部分，与人类一起探索未知、创造未来。最终，物联网时代将引领我们走向一个人机共生的新生态。在这个生态中，智能设备将不再是简单的工具或助手，而是成为我们生活、工作乃至思想的一部分。他们将理解我们的情感、需求甚至愿望，并与我们一起探索未知、创造未来。这种共生关系将极大地拓展人类的认知边界和行动能力，使我们能够以前所未有的方式感知世界、理解世界并改变世界[62]。

例如，在机器人产业中，随着科技发展，机器人产业也将从最初的生产制造，转变为人机共生的新型业态。机器人产业规模持续壮大，在制造业、服务业、特种领域等都有广泛应用。中国电信多维度切入机器人产业，以 5G 赋能设备，助力机器人系统运作；以物联智慧感应，促使机器人灵活运用；以大模型之力，参与机器人研发生产。同时，解决跨行业技术融合问题，助推机器人产业腾飞，不断深化技术融合，持续拓展应用领域，加强综合型人才培养。

# 物联网技术数字孪生中的运用

如下图 6 物联网基本架构，其由感知层、网络层和应用层等层级构成。其中，感知层负责对物理空间中的相关数据以及信息进行采集，实现人与物、物与物之间的信息交互;网络层利用无线与有线网络对所采集的数据进行编码、认证以及传输，形成协同感知的互联网络;应用层除了提供基于物联网的多种应用，还实现了物联网与各行业信息化需求的结合[63]。

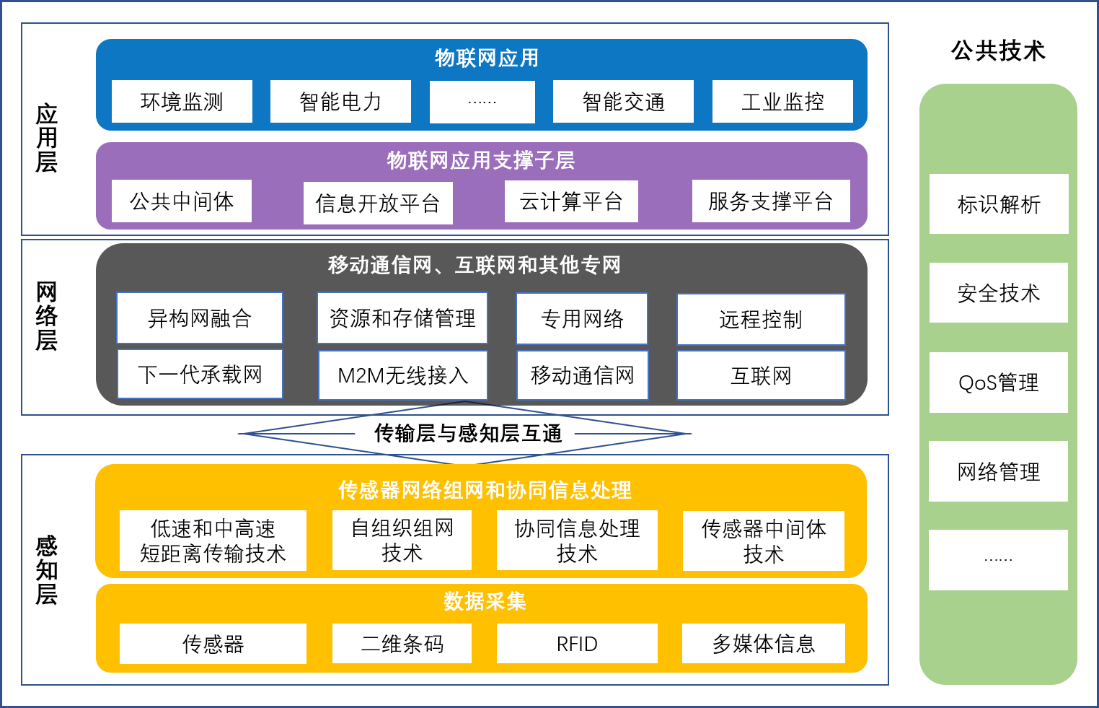


图 6 物联网基本架构

物联网与数字孪生数据由特定接口、协议编织紧密 “纽带”，实现数据无缝流动与协同处理。如下物联网设备依 MQTT、CoAP 等轻量级通信协议将海量实时数据推送至数字孪生平台前置网关，经数据清洗、格式转换 “梳妆打扮” 后注入孪生模型；数字孪生平台基于 HTTP、WebSocket 等协议反馈控制指令、优化策略至物联网终端执行层，驱动物理设备调整运行参数、执行任务动作，达成双向闭环交互。

表 3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **交互方向** | **常用通信协议** | **数据处理关键环节** | **设备响应操作示例** |
| 物联网至数字孪生 | MQTT（消息队列遥测传输） | 主题订阅、消息解包、数据校验 | 传感器数据依主题分类汇入孪生模型对应变量更新 |
| CoAP（受限应用协议） | 资源发现、请求 - 响应处理 | 智能照明传感器数据触发孪生建筑照明场景模拟优化 |
| 数字孪生至物联网 | HTTP（超文本传输协议） | 请求封装、指令下发 | 孪生工厂模型优化排程指令经 HTTP 下达设备控制系统 |
| WebSocket | 全双工通信建立、实时推送 | 智慧交通系统实时调控指令推送至路口信号灯控制器 |

在智能港口作业场景，龙门吊、输送带、堆场传感器（载重、位置、风速等）经物联网实时回传数据。一旦风速超阈值危及吊运安全，数据即刻激活孪生港口模型预警机制，更新设备运行状态，智能调整吊运计划、堆场货位分配，防患于未然且保障物流周转高效流畅；在智慧城市环保领域，空气监测站、水质传感器、垃圾处理设施物联网终端 “编织” 数据网，机器学习算法深挖历史与实时环境数据，精准预测污染趋势，据此智能规划环卫清扫路线、优化污水处理工艺参数，助力城市生态环境 “蝶变”；在医疗健康赛道，患者的可穿戴监测设备（心电、血糖、睡眠监测仪）、医院影像设备（CT、MRI）、电子病历系统借物联网 “互联互通”，融合多源数据 “浇灌” 数字孪生患者模型，全方位模拟病情进展，赋能医生精准诊断、靶向治疗，改写医疗 “模糊诊疗” 困境；在某汽车制造巨头打造数字孪生工厂，生产线上万计设备 “植入” 物联网芯片。基于设备工况、物料流转数据智能优化排程，设备综合利用率提升 35%，产品不良率从 8% 锐减至 3%，以精益制造 “弯道超车” 竞品；在都市能源管网布控物联网智能表计、管网传感器，数字孪生能源系统 “实时把脉”，借数据分析精准调配能源供给，故障定位从 “地毯式排查” 缩至分钟级精准定位修复，能耗强度年均降低 12%，护航城市 “能源动脉” 稳健运行；在头部医疗机构搭建数字孪生远程诊疗平台，物联网串起基层检查设备与院内专家端。专家依托患者孪生模型 “远程触诊”，复杂病症确诊率提升 40%；手术前模拟手术全程，风险可控性剧增，弥合城乡医疗资源 “天堑”。

# 物联网技术数字孪生中的挑战与方向

在物联网技术支持下，数字孪生为各行各业的智能化进程带来了巨大的变革。然而，尽管数字孪生系统在多个领域展示出极大的潜力，但其实施与优化过程中仍然面临一些深刻的挑战。这些挑战不仅源自技术本身的复杂性，还与跨领域合作、标准化进程及大规模应用中所需的精确度和实时性息息相关。

## 数据管理与处理挑战

在数字孪生系统中，数据是驱动一切操作的核心。从物联网设备收集的数据需要经过实时处理与反馈，以确保系统能够准确地反映物理实体的状态并预测未来趋势。然而，由于设备种类繁多，且大多数设备由不同厂商制造，这就导致了数据的格式、协议和精度存在显著差异。如图 7常用的数字孪生系统框架图，传感器获取的数据可能有不同的测量单位，且缺乏统一的数据标准导致在数字孪生系统中整合和解析这些信息时产生困难[64]。为了确保系统能够在复杂的环境中可靠运行，如何制定统一的通信协议和数据标准，以及如何进行高效的数据清洗与融合，成为了亟需解决的课题。

图示

描述已自动生成

图 7常用的数字孪生系统框架图

同时，物联网设备的数据不仅仅是静态的，它们随着时间的推移持续变化，如图 8数据的实时同步流所示，系统中的信息需要实时传输并被处理。数据的延迟问题尤为突出，尤其是在需要高频次更新的应用场景中，如智能制造和自动驾驶系统。为保证这些系统的实时响应能力，数据的处理不仅要及时，而且要高效。然而，面对大量传感器数据的实时处理需求，如何在保证低延迟的同时不牺牲数据的完整性与精度，仍然是当前技术研究中的一大难题[65]。

图示, 工程绘图

描述已自动生成

图 8数据的实时同步流

## 安全性与可靠性问题

随着物联网技术的广泛应用，数字孪生系统面临的安全挑战也日益严峻。物联网设备是数字孪生的核心数据源，这些设备通过网络将数据传输至云端或边缘服务器。然而，这些数据在传输过程中可能遭遇外部攻击，或因设备漏洞而被篡改，影响整个数字孪生系统的可靠性[66]。当涉及到工业应用时，如智能制造或智能城市，任何数据的泄露或篡改都可能带来不可估量的经济损失和安全隐患。

在这样的背景下，如何加强系统的安全防护，特别是在数据传输和存储过程中，成为了一个至关重要的问题。区块链技术作为一种去中心化的数据安全技术，被提出作为解决方案之一。它能够为物联网设备提供可靠的数据验证和防篡改功能，通过智能合约确保数据的完整性与合法性。然而，区块链的实施在实时性和资源消耗上仍然面临诸多挑战[67]。例如，在大规模物联网环境下，如何平衡区块链的计算开销与系统的实时处理需求，将是未来研究的重点。

另外，尽管数字孪生技术能够提供高精度的模型与预测，但这些模型往往依赖于大量历史数据的支持。物联网设备提供的数据常常伴随着噪声或信息缺失，而这种不完备的数据可能导致模型偏差，从而影响系统的决策支持能力。如何提高数据的准确性和仿真模型的可靠性，是数字孪生系统实现预期目标的关键[68]。

## 系统的可扩展性与能源效率

随着物联网设备数量的迅猛增长，数字孪生系统的可扩展性成为了一个不可忽视的问题。大规模设备接入的增加，要求系统具备强大的计算能力和高效的资源管理方案[69]。尤其是在工业互联网（IIoT）等领域，设备数量庞大，数据流量巨大，如何在保证系统稳定运行的前提下，实现海量设备的管理和数据处理，成为了当前技术的研究难点。为了应对这一挑战，分布式计算和边缘计算被提了出来。通过将部分数据处理任务下放至边缘设备，可以有效降低中心节点的负担，减少网络传输的延迟。

边缘计算虽然在处理速度上提供了优势，但仍面临着设备资源受限的问题。边缘设备的计算能力、存储空间和电池寿命往往远低于中心服务器，因此如何高效利用这些有限资源，尤其是在需要长期运行的环境下，成为了数字孪生系统设计中的一个关键因素[70]。在能源效率方面，物联网设备的优化设计也至关重要。随着越来越多的智能设备接入系统，如何在确保计算和通信性能的同时，降低能耗，成为了可持续发展的一项重要任务。

# 总结

物联网技术在数字孪生中发挥着关键作用，通过实时数据采集、处理与融合以及高精度模型构建，实现了智能制造、智能城市和医疗健康等领域的高效应用；然而，这也面临着数据管理与处理挑战、安全性和可靠性问题以及系统可扩展性和能源效率的限制。未来需通过技术创新和优化来解决这些问题，推动物联网技术在数字孪生中的广泛应用和发展。

# 引文

1. Grieves M, Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches, 2017: 85-113.
2. Qi Q, Tao F, Hu T, et al. Enabling technologies and tools for digital twin[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 3-21.
3. Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on industrial informatics, 2018, 15(4): 2405-2415.
4. Söderberg R, Wärmefjord K, Carlson JS, Lindkvist L. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production. CIRP Ann-Manuf Technol2017;66(1):137–40.
5. Zaccaria V, Stenfelt M, Aslanidou I, Kyprianidis KG. Fleet monitoring and diagnostics framework based on digital twin of aero-engines. Proceedings of ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition; 2018,June 11-15 2018.
6. Cai Y, Starly B, Cohen P, Lee YS. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing. Procedia Manuf 2017;10:1031–42.
7. Zhang D, Liu Z, Li F, et al. The rapid construction method of the digital twin polymorphic model for discrete manufacturing workshop[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 84: 102600.
8. Tao F, Zhang M, Nee AYC. Digital twin driven smart manufacturing. Elsevier-Academic Press; 2019.
9. Shafto M, Conroy M, Doyle R et al (2012) Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. Technol-ogy Area 11, National Aeronautics and Space Administration,pp 1–38
10. Grieves M, Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches, 2017: 85-113.
11. Atalay, M., Murat, U., Oksuz, B., Parlaktuna, A. M., Pisirir, E., & Testik, M. C. (2022). Digital twins in manufacturing: systematic literature review for physical–digital layer categorization and future research directions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *35*(7), 679–705. https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.2022762
12. Schuh, G., C. Kelzenberg, J. Wiese, and T. Ochel. 2019. “Data Structure of the Digital Shadow for Systematic Knowledge Management Systems in Single and Small Batch Production.” Procedia CIRP 84: 1094–1100. doi:10.1016/j.procir.2019.04.210.
13. Lee, C.G., Park, S.C., 2014. Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. Journal of Computational Design and Engineering 1, 213–222
14. West TD, Blackburn M (2017) Is digital thread/digital twin affordable? A systemic assessment of the cost of DoD’s latest manhattan project. In: Complex adaptive systems conference with theme: engineering cyber physical systems, Chicago, Illi-nois, USA, pp 47–56. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.003
15. Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.D., 2015. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. IFAC-PapersOnLine 48, 567–572.
16. Schroeder, G., Steinmetz, C., Pereira, C.E., Muller, I., Garcia, N., Espindola, D., Rodrigues, R., 2016. Visualising the digital twin using web services and augmented reality, in: 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN).IEEE, pp. 522–527.
17. Brenner, B., Hummel, V., 2017. Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen - University. Procedia Manufacturing, 7th Conference on Learning Factories,CLF 2017 9, 198–205. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.039
18. Graessler, I., Poehler, A., 2017. Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system, in: Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2017 IEEE International Conference On. IEEE, pp. 289–293.
19. Tao F, Zhang M, Liu Y, Nee AYC. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. CIRP Ann-Manuf Technol 2018;67(1):169–72.
20. Qi Q, Tao F, Zuo Y, Zhao D. Digital twin service towards smart manufacturing.Procedia CIRP 2018;72:237–42.
21. Tao F, Qi Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst 2019;49(1):81–91.
22. Lee, H., Kim, T., 2018. Smart factory use case model based on digital twin. ICIC Express Letters, Part B: Applications 9, 931–936.https://doi.org/10.24507/icicelb.09.09.931
23. Luo, W., Hu, T., Zhu, W., Tao, F., 2018. Digital twin modeling method for CNC machine tool, in: 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Presented at the 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ICNSC.2018.8361285
24. Leng, J., Zhang, H., Yan, D., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., 2019. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing 10, 1155–1166.
25. Jones D, Snider C, Nassehi A et al (2020) Characterising the digital twin: a systematic literature review. CIRP J Manuf Sci Technol 29(A):36–52
26. Tao F, Cheng J, Qi Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 3563-3576.
27. Jones D, Snider C, Nassehi A, et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review[J]. CIRP journal of manufacturing science and technology, 2020, 29: 36-52.
28. Qi Q, Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison[J]. Ieee Access, 2018, 6: 3585-3593.
29. Liu M, Fang S, Dong H, et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications[J]. Journal of manufacturing systems, 2021, 58: 346-361.
30. Ghobakhloo M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0[J]. Journal of manufacturing technology management, 2018, 29(6): 910-936.
31. Lu Y, Liu C, Kevin I, et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues[J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2020, 61: 101837.
32. Ivanov D, Dolgui A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0[J]. Production Planning & Control, 2021, 32(9): 775-788.
33. Maddikunta P K R, Pham Q V, Prabadevi B, et al. Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications[J]. Journal of industrial information integration, 2022, 26: 100257.
34. Tao F, Qi Q, Wang L, et al. Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison[J]. Engineering, 2019, 5(4): 653-661.
35. Alcácer V, Cruz-Machado V. Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems[J]. Engineering science and technology, an international journal, 2019, 22(3): 899-919.
36. Barricelli B R, Casiraghi E, Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications[J]. IEEE access, 2019, 7: 167653-167671.
37. Boje C, Guerriero A, Kubicki S, et al. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research[J]. Automation in construction, 2020, 114: 103179.
38. Pan Y, Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends[J]. Automation in Construction, 2021, 122: 103517.
39. Tao F, Xiao B, Qi Q, et al. Digital twin modeling[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 64: 372-389.
40. VanDerHorn E, Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation[J]. Decision support systems, 2021, 145: 113524.
41. Zhang Y, Ji J C, Ren Z, et al. Digital twin-driven partial domain adaptation network for intelligent fault diagnosis of rolling bearing[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 234: 109186.
42. Rath K C, Khang A, Roy D. The role of Internet of Things (IoT) technology in Industry 4.0 economy[M]//Advanced IoT technologies and applications in the industry 4.0 digital economy. CRC Press, 2024: 1-28.
43. Ghani NA, Hamid S, Hashem IA, Ahmed E. Social media big data analytics: A survey. Computers in Human behavior. 2019 Dec 1;101:417-28.
44. Butt UA, Mehmood M, Shah SB, Amin R, Shaukat MW, Raza SM, Suh DY, Piran MJ. A review of machine learning algorithms for cloud computing security. Electronics. 2020 Aug 26;9(9):1379.
45. Tuegel E J, Ingraffea A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011(1): 154798.
46. Wang Z, Liao X, Zhao X, et al. A digital twin paradigm: Vehicle-to-cloud based advanced driver assistance systems[C]//2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). IEEE, 2020: 1-6.
47. Xu Y, Sun Y, Liu X, et al. A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning[J]. Ieee Access, 2019, 7: 19990-19999.
48. Bai L, Zhang Y, Wei H, et al. Digital twin modeling of a solar car based on the hybrid model method with data-driven and mechanistic[J]. Applied Sciences, 2021, 11(14): 6399.
49. Yan M, Gan W, Zhou Y, et al. Projection method for blockchain-enabled non-iterative decentralized management in integrated natural gas-electric systems and its application in digital twin modelling[J]. Applied Energy, 2022, 311: 118645.
50. Wang M, Wang C, Hnydiuk-Stefan A, et al. Recent progress on reliability analysis of offshore wind turbine support structures considering digital twin solutions[J]. Ocean Engineering, 2021, 232: 109168.
51. Csukás M S, Szabó R Z. The many faces of the smart city: Differing value propositions in the activity portfolios of nine cities[J]. Cities, 2021, 112: 103116.
52. Elayan H, Aloqaily M, Guizani M. Digital twin for intelligent context-aware IoT healthcare systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(23): 16749-16757.
53. Zheng Y, Yang S, Cheng H. An application framework of digital twin and its case study[J]. Journal of ambient intelligence and humanized computing, 2019, 10: 1141-1153.
54. Schroeder G N, Steinmetz C, Pereira C E, et al. Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(30): 12-17.
55. Fuller A, Fan Z, Day C, et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research[J]. IEEE access, 2020, 8: 108952-108971.
56. Khajavi S H, Motlagh N H, Jaribion A, et al. Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings[J]. IEEE access, 2019, 7: 147406-147419.
57. Ng I C L, Wakenshaw S Y L. The Internet-of-Things: Review and research directions[J]. International Journal of Research in Marketing, 2017, 34(1): 3-21.
58. Ray P P. A survey on Internet of Things architectures[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2018, 30(3): 291-319.
59. Sharma M, Tomar A, Hazra A. Edge computing for industry 5.0: fundamental, applications and research challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024.
60. 王海涛,张翚.物联网发展应用概况及相关问题探讨[Z].电信快报:网络与通信,2019(8):6-10.
61. 王兰,陆春吉.物联网行业现状和发展前景的分析[J].通讯世界,2017(2):25-26.
62. Furstenau, Leonardo B,Rodrigues, Yan Pablo Reckziegel,Sott, Michele Kremer,et al.Internet of things: Conceptual network structure, main challenges and future directions[J].DIGITAL COMMUNICATIONS AND NETWORKS,2023,9(3):677-687.
63. 彭木根,蒋逸轩,曹傧,等.区块链赋能泛在可信物联网：架构、技术与挑战[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2023,35(03):391-404.
64. FULLER A, FAN Z, DAY C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research[J/OL]. IEEE Access, 2020, 8: 108952-108971. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2998358.
65. PANG T Y, PELAEZ RESTREPO J D, CHENG C T,. Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an ‘Industry 4.0’ Shipyard[J/OL]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1097. DOI:10.3390/app11031097.
66. EL SADDIK A, LAAMARTI F, ALJA’AFREH M. The Potential of Digital Twins[J/OL]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2021, 24(3): 36-41. DOI:10.1109/MIM.2021.9436090.
67. QI Q, TAO F, HU T. Enabling technologies and tools for digital twin[J/OL]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 3-21. DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
68. HANANTO A L, TIRTA A, HERAWAN S G. Digital Twin and 3D Digital Twin: Concepts, Applications, and Challenges in Industry 4.0 for Digital Twin[J/OL]. Computers, 2024, 13(4): 100. DOI:10.3390/computers13040100.
69. WU Y, ZHANG K, ZHANG Y. Digital Twin Networks: A Survey[J/OL]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 13789-13804. DOI:10.1109/JIOT.2021.3079510.
70. TAO F, ZHANG H, LIU A. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art[J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415. DOI:10.1109/TII.2018.2873186.