

2023 工业元宇宙白皮书

工业元宇宙协同发展组织
工业和信息化部工业文化发展中心
2023 年 12 月

主要参编单位与组织

工业和信息化部工业文化发展中心
工业元宇宙协同发展组织
广东工业大学
南昌大学工业互联网实验室
杭州灵伴科技有限公司
联想新视界（北京）科技有限公司
中兴通讯股份有限公司
广东省电信规划设计院有限公司
工业云制造（四川）创新中心有限公司
苏州海赛人工智能有限公司
北京蓝亚盒子科技有限公司
亮风台（上海）信息科技有限公司
青葵智造（北京）科技发展有限公司
北京高校邦数字科技有限公司
北京映科数智科技有限公司
广州博日信息科技有限公司
广州壹宸宇宙文化传播有限公司
广州玄五文化科技有限公司

（排名不分先后）

主要起草人

柯 斌	王 斌	简 奋	李 潭	向文杰	张信扬
刘波涛	张星智	白欲立	田日辉	周琴芬	戚 晨
江洪峰	赵俊辉	王 鹏	张黎黎	刘 刚	谢成鸿
曾哲君	殷 涛	吴 仑	张春艳	孙晓田	陈 琳
张 宏	刘永亮	周宇琪	郭 谨	阳少林	张 兵
陆景学	夏宏飞	李真真	郭增杰	杨佳能	刘郁恒
李 嵘	魏杉杉	沈 翀	张克进	刘洪强	赵 勇
陈南江	宋伟宁	林燕文	韦 宁	陈秋宇	李 祺
陈雨婷	贾 敏	林 澜	钟家发	郝雪梅	

(排名不分先后)

版权声明

本白皮书版权由工业和信息化部工业文化发展中心、工业元宇宙协同发展组织共有。

使用说明：未经工业和信息化部工业文化发展中心或工业元宇宙协同发展组织同意，不得以任何方式复制、抄袭、影印、翻译本文档的任何部分。凡转载或引用本文的观点、数据，请注明“来源：工业和信息化部工业文化发展中心或工业元宇宙协同发展组织”。违反上述声明者，编者将追究其相关法律责任。

前 言

工业元宇宙是利用虚拟现实、人工智能、区块链等先进技术构建的复杂先进的新数字化工业经济系统，它具有高度沉浸式的交互体验，将有效市场和高效生产结合，能够实现工业资源的优化配置，推动工业的数字化、智能化转型。

当前，全球工业元宇宙处于起步阶段，各国都在抢占先机。为了更好地把握工业元宇宙的发展机遇，推动中国工业的转型升级，在工业和信息化部工业文化发展中心的指导下，工业元宇宙协同发展组织撰写了《2023 工业元宇宙白皮书》。本白皮书充分参考了国内外相关研究成果和案例，结合编写组对工业元宇宙的理解，从工业元宇宙的概念内涵、核心技术、产业应用场景、机遇挑战、人才及法律法规等方面的趋势进行分析，以期政府、企业、研究机构等提供有益的参考和借鉴。

由于产业发展尚处初期、编写时间有限等因素，内容或有疏漏，敬请谅解。期待与读者共同探讨、共同成长，共同迎接工业元宇宙的美好未来。

目录

第一章 概念内涵篇	1
第一节 从风洞到工业元宇宙	1
一、 发展背景	1
二、 工业元宇宙的内涵定义	7
三、 工业元宇宙的关键特征	8
四、 虚拟仿真、数字孪生与工业元宇宙的关系	9
第二节 工业元宇宙的体系结构与技术体系工业元宇宙的体系结构	14
一、 工业元宇宙的体系架构	14
二、 工业元宇宙的五维技术体系	17
第三节 工业元宇宙助推我国工业高质量发展	23
一、 工业元宇宙与新型工业化	23
二、 工业元宇宙与工业互联网	26
第二章 核心技术篇	31
第一节 新一代人工智能技术	31
一、 新一代人工智能技术发展现状与展望	31
二、 新一代人工智能技术核心技术与技术特征	34
三、 新一代人工智能技术在工业元宇宙领域应用和案例	40
第二节 数字孪生技术	43
一、 数字孪生技术发展现状与展望	43
二、 数字孪生技术核心技术与技术特征	46
三、 数字孪生技术在工业元宇宙领域的应用与实现路径	50
四、 数字孪生技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例	53
第三节 交互技术	55
一、 交互技术发展现状与展望	55
二、 交互技术的核心技术和技术特征	58
三、 交互技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径	61
四、 交互技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例	63
第四节 3D引擎技术	67

一、 3D 引擎技术发展现状和展望	67
二、 3D 引擎技术核心技术和技术特性	69
三、 3D 引擎技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径	72
四、 3D 引擎技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例	75
第五节 区块链技术	77
一、 区块链技术发展现状和展望	77
二、 区块链技术的核心技术和技术特性	79
三、 区块链技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径	82
四、 区块链技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例	92
第六节 物联网技术	95
一、 物联网技术发展现状和展望	95
二、 物联网技术的核心技术和技术特征	97
三、 物联网技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径	100
四、 物联网技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例	102
第七节 新型工业技术	105
一、 云化 PLC 技术与工业元宇宙	105
二、 先进工控网络技术与工业元宇宙	108
三、 具身智能技术与工业元宇宙	111
四、 机器人化制造技术与工业元宇宙	113
第三章 产业应用篇	117
第一节 工业元宇宙在工业流程各环节的应用	117
一、 工业元宇宙在研发设计环节的应用	117
二、 工业元宇宙在工业生产环节的应用	123
三、 工业元宇宙在供应链环节的应用	131
四、 工业元宇宙在销售&服务环节的应用	138
第二节 工业元宇宙在工业系统各层级的应用	143
一、 工业元宇宙在工业系统-设备层级中的应用	143
二、 工业元宇宙在工业系统-产线层级中的应用	150
三、 工业元宇宙在工业系统-工厂层级中的应用	156
四、 工业元宇宙在工业系统-产业链层级中的应用	162

第四章 机遇挑战篇	167
第一节 工业元宇宙的发展机遇	167
一、 工业元宇宙推动智能制造的全面升级	167
二、 工业元宇宙助力新兴工业经济社会模式构建	170
第二节 工业元宇宙面临的挑战与应对办法	175
一、 聚焦核心技术创新与融合	175
二、 配套并完善数字基础设施	182
三、 创建工业元宇宙运行机制	185
四、 培养工业元宇宙创新人才	188
五、 推进完善元宇宙法律法规	197
参考资料	204
附录	206

第一章 概念内涵篇

2010 年以来，连普通大众应该都能感觉到，著名科幻作家刘慈欣在《三体》中所描述的“技术爆炸”似乎正在发生：大量的新概念新技术铺天盖地地涌现——云计算、大数据、物联网这些出现仅仅 10 余年的技术目前已经在我们生活中司空见惯，互联网+、区块链、虚拟现实、数字孪生也在快速渗入各行各业，而近两年进入我们视野的元宇宙、AIGC、具身智能则以风卷般的速度一日一更新地创造让大家瞠目结舌的全新体验。

面对日新月异的技术发展，无论个人还是组织，都会手忙脚乱地思考该如何跟上技术浪潮。任何新技术的诞生都不是空中楼阁、凭空创造。面对新技术，我们不一定都需要从零开始系统掌握。洞悉技术的发展脉络与原理本质，便能在浪潮之巅看清产业前沿和应用落地的未来。对待本书聚焦的工业元宇宙也是如此。

本章我们将剖析工业元宇宙如何从早期的风洞、实物仿真一步步经过数字化、网络化和智能化的历程发展到如今人机物有机融合的虚拟世界，以帮助从业者更好去理解工业元宇宙的内涵与特征，以及更好去结合工业的需求开展创新应用。

第一节 从风洞到工业元宇宙

一、发展背景

无论是风洞还是工业元宇宙，都离不开仿真的本质。“仿真”是人类对物理世界进行“模拟”的活动。“仿真”和“模拟”在英文中都对应“Simulation”，但在汉语中“模拟”偏动词，是指人类用一个系统模仿另一个真实系统的过程，早在三国时期的古籍中便已出现。远到我们古已有之的盆景盆栽和园林假山，近到现代小朋友喜欢的玩具赛车和娃娃布偶，都是人类通过建立模型对真实世界进行模拟的典型例子。而“仿真”偏名词，代表了这一系列的模拟活动，在我国航天部门最早出现并在 70 年代逐步推广至航空、军队部门并广泛在学术科研与产业应用中使用。

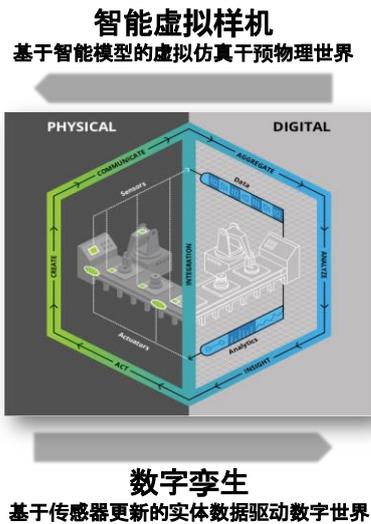
仿真在工业界出现的最早形态是实物仿真，通过建立逼真的实物与环境模型对工业对象进行研究和使用的，从而实现难以复现的工业现场进行实验并减少返工迭代的时间与成本。风洞便是实物仿真的著名实例，以人工的方式产生并且控

制气流，用来模拟飞行器或实体周围气体的流动情况，并量度气流对实体的作用效果。相对运动的气流环境会让飞行器实物模型（实物样机）的各模块“误以为”正在大气中飞行，进而产生真实的空气动力学响应与控制动作，从而使得研究者可以在实际静止的风洞环境中开展低成本的重复性试验验证，提升最终实际航行的成功概率。随着三维转台等姿态控制系统的逐步成熟，驾驶模拟器也开始在航空航天、汽车船舶等工业部门出现，结合风洞/水洞的流体仿真系统，让飞行员/船员可以在仿真环境中逼真的训练对设备的驾驶操作，见图 1。



图 1 驾驶模拟器

从风洞开始，仿真科学飞速发展成以相似理论为基础构建对象模型并开展运行时分析与评估的系统性方法，并在航空航天、汽车船舶、钢铁冶金等这类环境高危高热、场景难以复现、试验成本过高的工业领域中得到广泛深入的应用。随着 20 世纪 90 年代工业软件、计算机仿真等技术的逐步成熟，仿真从基于实物系统模型的实物仿真快速演进至局部、全局数字模型的半实物仿真/虚拟仿真，并逐步作为虚拟样机取代实物样机参与到工业产品的研发、试验、生产、销售和训练全生命周期中去，见图 2。



对比项	数字孪生	虚拟样机
基础技术	计算机建模与仿真、CAx/DFx、传感器(网络)、工业网络/互联网	系统建模方法、分布交互仿真、CAx/DFx、复杂系统工程、人工智能
核心目标	在计算机的虚拟空间中构建出与物理孪生类似的数字化映像,通过对物体实体传感信号的接入,实现模拟的环境感知和模拟决策	将不同工程领域的开发模型结合在一起,从外观、功能和行为上模拟真实产品,解决全系统、全生命周期中的人/组织、经营管理和技术,信息流、知识流、控制流、服务流集成优化
典型应用	故障预测与消除、设备资产管理、工艺流程改进	数字化研发设计、虚拟仿真试验、虚拟装配和模拟操作训练

图2 数字孪生与虚拟样机对比

数字孪生是虚拟仿真向虚实交互发展的重要里程碑阶段。在具备物联网/工业互联网的实时工业现场数据采集能力之前,工业界的虚拟仿真多数还是事前的预先模拟和计算,如在飞机试飞之前反复虚拟试验来验证其飞行控制的准确性、在汽车实开之前预测其动力性能和续航里程,并不能够根据工业现场的实际情况来动态调整和实时计算,见图3。

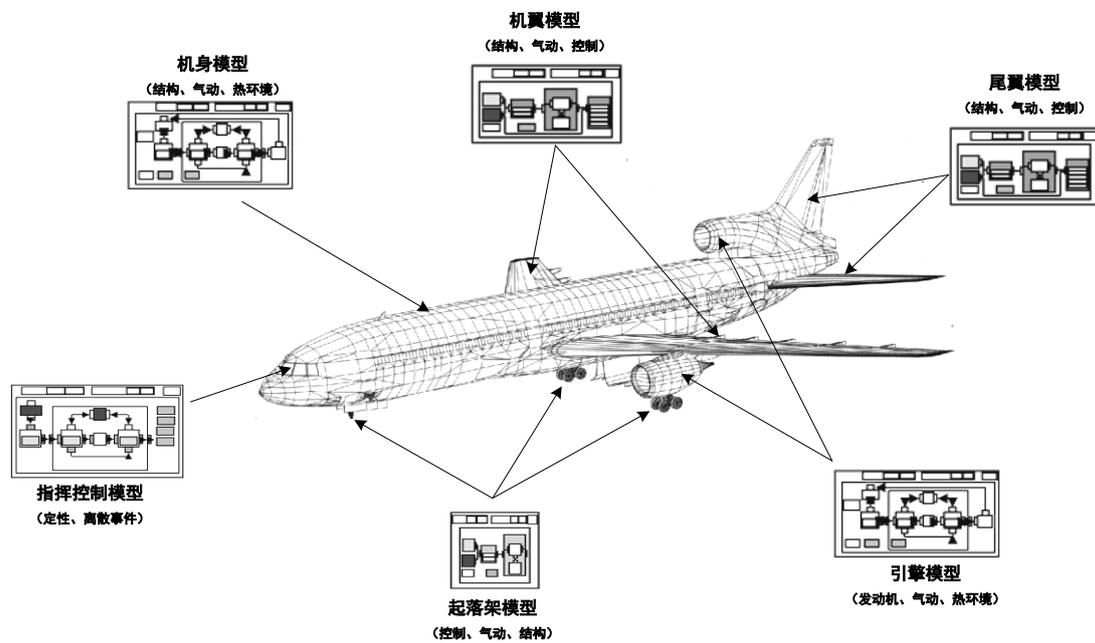


图3 虚拟试验飞机

数字孪生正是伴随着实时数采能力成熟而诞生的新型虚拟仿真形态,基于传感器更新的实体数据来驱动数字世界从而达到仿真结论的动态修正和演进优化。

数字孪生是目前工业界应用虚拟仿真的主要形态。在可以预见的将来，多数工业产品都会同步交付一个产品数字孪生给到用户，不仅用于产品原理和功能性能展示，更能在产品运行使用阶段提供产品监控与故障维护等多种基于预测性虚拟仿真的服务。

关注元宇宙的人们通常会认为小说《雪崩》是元宇宙概念的起点，1992年美国科幻作家尼尔·史蒂芬森(Neal Stephenson)便描述了一个“戴上耳机和目镜，找到连接终端，就能够以虚拟分身的方式进入由计算机模拟、与现实世界平行的虚拟空间。”然而我国“航天之父”钱学森老先生早在1990年讨论“Virtual Reality”中文译名的时候，便提出了“灵境”这一富有中国味的概念，通过数字化的仿真手段让人们如身临其境地去感知虚拟的世界，见图4。通过前面对仿真的讨论可知，无论是史蒂芬森的雪崩还是钱老的灵境，本质上都是希望让人能够在仿真的宇宙世界中逼真地去感知、交互和创造，最理想的境界甚至是让元宇宙中的人们像风洞中的飞行器一般“误以为”在真实的世界里面活动。

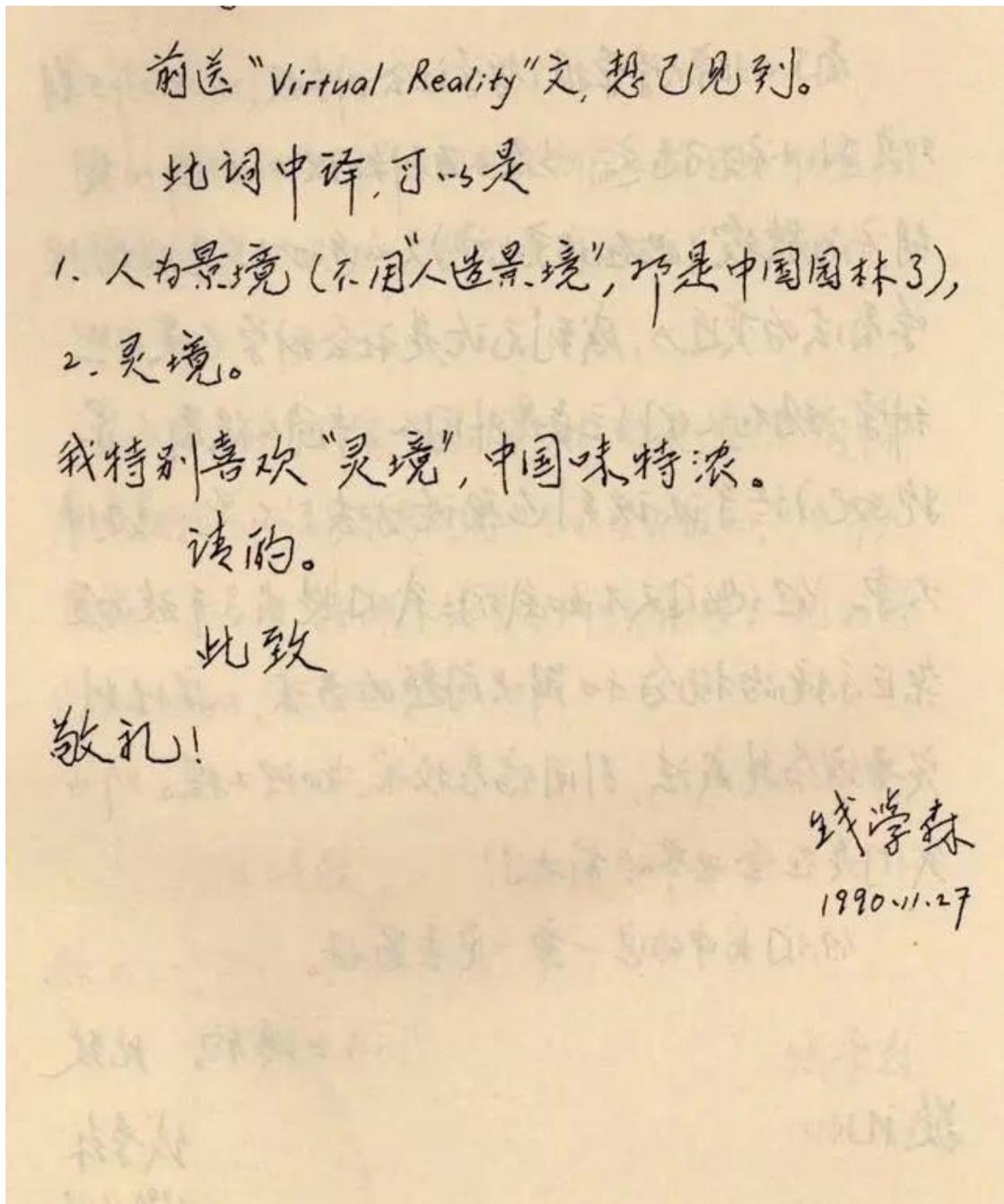


图4 钱学森老先生关于“Virtual Reality”中文译名讨论

如同工业互联网的虚实交互能力催生数字孪生一样，元宇宙的兴起和落地也得益于VR/AR/MR、新一代人工智能、区块链/NFT、自然语言处理/NLP等先进信息技术的成熟，让冰冷的工业仿真系统与人类用户之间的交互变得越来越自然流畅，让“人在回路”的人机物融合系统有了真正实现的曙光。

2021年初，游戏公司Roblox将“Metaverse”写入招股书，以“元宇宙第一股”的概念成功上市，成为了引爆元宇宙概念的起点。同年，Facebook正式更名

为 Meta，高调进军元宇宙相关产业，将元宇宙热度推向新的高潮。一时间，元宇宙成为了时下最热门的话题，受到了空前追捧，被视为互联网科技行业的新一代“风口”，各大热衷于追逐新概念的互联网公司、巨头和资本争相入局，涌入元宇宙产业新赛道，见图 5。



图 5 关于元宇宙话题的讨论

目前，产学研各界对元宇宙的理解角度大体分为两派：一派强调“崭新的虚拟世界”，在数字空间里构建新世界以虚促实，这在社交网络、游戏文创等领域较为多见；而在工业制造、城市建设等领域的元宇宙则更强调“人、虚拟世界、现实世界融合构成的宇宙”。作为工业领域元宇宙落实与拓展的积极参与者，我们对元宇宙的理解是后者观点。

宏观地讲，元宇宙是综合运用数字技术群构建的人、虚拟世界、现实世界融合的场景系统。具体地讲，元宇宙是整合多种数字新技术群而产生的新型虚实相融的互联网应用和社会形态，是一种去中心化、用户沉浸式参与、数据资产可拥有/拓展、“虚实融合”的三维化互联网。

也正是由于元宇宙的上述特性，包括中国航天科工集团、中国石油化工集团等工业集团都敏锐地洞悉到元宇宙能够为工业中的人机物深度融合提供全新的赋能，特别在“人在回路”的层面，让工业用户从以往的“数据观察者和结论接受者”变成了可以深度介入仿真过程和实时自然交互的“系统参与者和数据创造者”，进而适用于大量依赖专家定性知识、模型数据难以量化、人机交互复杂紧密的工业场景。2022年下半年以来，以李伯虎院士为代表的工业学术界，以及以工信部/工业文化发展中心为代表的政府部门，均高度重视并大量投入于工业元

宇宙相关的内涵技术、产业发展和政策配套。

二、工业元宇宙的内涵定义

工业元宇宙的定义会有很多解释，李伯虎院士在世界元宇宙大会上给出基本内涵定义为：工业元宇宙是指在新发展理念指引下，在新一代人工智能技术引领下，借助新时代各类新技术群跨界融合，实现工业领域中“人、虚拟空间与现实空间”虚实映射/交互/融合、以虚促实、以虚强实的工业全要素链、全产业链和全价值链三链智慧、协同、开放、服务、互联的复杂数字工业经济系统，见图 6。



图 6 工业元宇宙：人/虚拟世界/现实世界融合构成的复杂数字工业经济系统

具体来说，我们认为工业元宇宙有三层内涵：

一是，是虚实共生、综合集成的新型工业数字空间，是工业现实物理空间与其虚拟平行空间的合集，通过对工业实体及生产过程的数字化映射、模拟，构建而成的新型数字化应用环境；

二是虚实协同、全沉浸式的新型工业智慧互联网系统，使能工业互联网中新型数字化工业系统，人与机器、机器与机器、机器实体与数字虚拟体的全面智慧互联和互操作，使工业互联网中实体空间向虚体空间延伸、时空一致向预测性时间延伸和价值延伸；

三是数字经济与实体经济融合发展的新型工业经济载体，对工业过程和场景的虚拟空间全面部署，实现虚实映射、虚实交互、虚实融合、以虚强实、以虚促实，促进数/实融合的工业高质量新发展。

三、工业元宇宙的关键特征

工业元宇宙的六“新”特征为，见图 7：



图 7 工业元宇宙的关键特征

新技术。基于新型互联网，在新发展理念指引下，借助新时代的 8 类新技术群，尤其是在新一代人工智能技术引领下，借助新网络技术、新信息通信技术、新智能科学技术及新工业领域专业技术等 4 类新技术群跨界深度融合的数字化、网络化、云化、智能化技术为支撑技术，将工业领域人、虚拟空间与现实空间中的工业全要素链、全价值链、全产业链(三链)智慧地连接融合在一起，提供虚实融合的智慧资源、智慧产品与智慧能力随时随地按需服务的一种新型智慧服务互联工业经济系统的一类新技术。

新模式。一种虚实映射、虚实交互、虚实融合、以虚强实、以虚促实，工业全要素链、全价值链、全产业链(三链)“数字化、物联化、服务化(云化)、协同化、定制化、柔性化、绿色化和智能化”的去中心化的云边协同的智慧协同互联新模式。

新业态。物互联，智能引领，数(据)/知(识)驱动，虚实融合，虚实互动，协同服务，跨界创新。

新特征。对全系统及全生命周期活动中虚实融合的要素/流自主智能地感知、互联、协同、学习、分析、认知、决策、控制、执行与创新。

新要素/流。工业全系统及全生命周期活动中的虚实融合的人、技术/设备、组织、数/知、材料、资金（六要素）及人才流、技术流、产业流、数/知流、物流、资金流（六流）。

新目标。支持工业系统数字化转型与智慧化升级，实现“创新、绿色、开放、共享、个性”制造产品及服务。

四、虚拟仿真、数字孪生与工业元宇宙的关系

有部分学者认为，元宇宙的概念并不新鲜，只不过是“新瓶装旧酒”，与近年来火爆的数字孪生技术并无差别。在我们看来，任何新技术的诞生都不是空中楼阁、凭空创造。工业元宇宙与元宇宙、数字孪生、仿真以及与工业现实世界，都是一脉相承、密不可分却又各自侧重的关系，见图 8。

工业元宇宙继承了仿真技术对“现实物理世界的逼真模拟”，也强化了数字孪生关注的“数据/模型”以及“虚实交互”，并充分吸收了元宇宙作为一种“人在回路”数字经济系统在自然人机交互、数字化资产以及社交网络等方面的特点，实现了对工业现实世界中六要素六流的虚实有机融合。

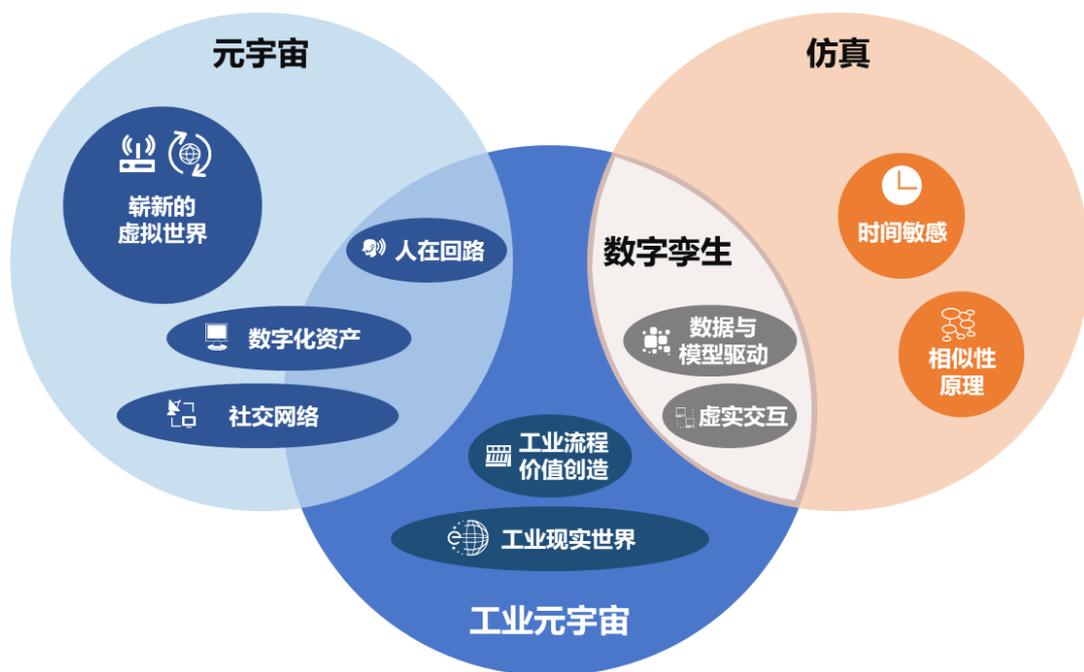


图 8 工业元宇宙与元宇宙、数字孪生、仿真之间的关系

在我们看来，仿真是一种模拟物理世界的技术，是以相似理论为基础构建对象模型并开展运行时分析与评估的系统性方法，将完整的物理机能与确定性规律相结合，根据当前边界与状态来计算下一状态。仿真具备两个关键性特征：一是相似性原理。仿真模型必须在几何、功能、性能等方面与被仿真对象相似，对仿真模型开展的研究才足以表征被仿真对象的真实特性，从而产生有实际指导意义的分析预测结果；二是时间敏感。时间相关是仿真计算区别于常规科学计算的核心特征。按照时间步长或者时序事件 step by step 逐步推演计算得到结果是典型的仿真过程，也由此会出现化学、生物等领域仿真中用于“慢放”转瞬间分子反应过程的欠实时仿真，以及工业、交通等领域仿真中用于“快进”预测未来生产过程或者拥堵情况的超实时仿真，见图 9。狭义来讲，传统的虚拟仿真技术多数是离线、前置的仿真，用于事前分析、预测物理对象的表现。当在工业互联网等实时通信技术以及高性能计算能力的支持下，虚拟仿真系统可以实时接收现场数据并同步计算反馈结果的时候，便演进到了虚实交互的数字孪生阶段。



图 9 仿真关键性特征

数字孪生技术是在传统仿真技术上发展起来的一种整合多物理、多尺度、多学科属性，面向产品全生命周期过程，对物理实体的数字副本进行仿真、诊断及预测以接收来自物理实体的实时数据并更新的在线模拟技术。虚拟仿真技术是实现数字孪生诸多关键技术的核心部分，是数字孪生创建和运行的有效支撑。而相较于传统虚拟仿真技术，数字孪生具备的核心特性包括：一是虚实交互。在工业互联网等实时通信技术的支持下，数字孪生在能够反映物理世界的同时，接收物理世界的实时信息反过来实时驱动物理世界，其本体与孪生体之间能够实现相互

反馈和数据的双向传输，对比传统的仿真技术，数字孪生技术具有动态性和双向性；二是**数据与模型驱动**。数字孪生除了构建物理对象的相似模型来驱动仿真之外，还掌握大量实时现场数据，结合愈渐成熟的机器学习等新一代人工智能技术，可以实现数据与模型混合驱动的计算模式——通过现场数据来训练与修正孪生模型进而达到更加准确实时的仿真结果。

从实际应用来看，无论是传统虚拟仿真还是数字孪生，其模拟和研究的对象多数为设备、环境等物理系统，“人”多数作为系统用户对仿真结果进行观察和决策响应，本质上人并没有实际参与到仿真系统的具体计算和运行中去。尤其是工业场景，出于实时性和安全性考虑，“人”多数时候是观察者和决策者，并不在仿真交互的回路中。然而工业中存在大量人在回路的应用场景，如车辆驾驶中人的操作习惯对整体系统有决定性的交互影响、服装工厂中工人手工车缝效率与整厂产能间的关系等等。如何让人在回路的系统仿真更加准确有效、人-物理世界-数字空间的融合交互更加顺畅自然，元宇宙技术的出现为上述问题的解决提供了可能。

元宇宙的概念内涵众说纷纭，笔者也并不准备给出一个元宇宙的准确定义，但从工业产品全生命周期的视角进行分析，针对工业元宇宙的形成过程建立虚拟工业世界要素与现实工业世界要素的融合模型，元宇宙的如下几点核心特征为工业元宇宙的落地提供了一些支撑，见图 10：



图 10 元宇宙的核心特征

（一）人在回路

人在回路是元宇宙之所以能够在 Meta、Roblox 等社交游戏平台大受欢迎的核心原因。通过 VR/AR 等虚拟现实技术以及 NLP、大模型等人机交互能力的支持，

会让用户在元宇宙的虚拟世界里沉浸式地体验和自然轻松的交互。这些特性在工业中同样适用。

除此之外，在工业元宇宙中，人在回路更重要的是指工业人员能够通过人工智能模型、数字替身等智能体参与到从工业产品研发，一直到工业产品使用情况跟踪等各个阶段，并在相应的阶段发挥“人”的作用。这点特别体现在工业产品的设计和生产过程中。对于工业中所采用的人工智能模型来说，因为模型的智能是基于在大型数据集上的上万次训练，这很容易使得智能模型对特定数据集产生依赖，并由于工业环境的复杂多变、工业数据的实时大规模更新等原因，会使得人工智能模型产生偏差，从而极大地影响生产效率，甚至可能引发大规模工业事故，所以通过“人”让模型顺应环境等其他多变因素具备一定的可行性。

不仅如此，由于智能模型在工业上应用的保守性，有些工业生产人员是通过视觉、嗅觉等其他人体感官经验去控制一些工艺的启停，这样能够大大降低生产成本。例如，一些冶金行业人员根据炉内的焰火等其他现象判断炉内的熔炼情况，这比一般的人工智能模型更加高效和划算。

（二）数字化资产

NFT/数字化藏品在元宇宙的很多应用中扮演了重要角色，但其本质上是通过区块链、NFT等加密技术让元宇宙中易于拷贝复制的数字化内容变成可唯一定义价值并且交易的数字化资产。特别是将跟人/动作紧密相关的行为经验转换为价值好和可流转的数字资产。

举例来说，在烹饪方面，同样是扬州炒饭，五星级大厨用同样食材炒出来的菜肴通常都要比普通人的要美味许多。这种技艺和经验不是简单通过菜谱就能记录与复制的，而且要学习大厨炒制的动作窍门以及火候调料的精髓。这些内容配合元宇宙中动作捕捉、NFT等技术，就可以相对容易地将大厨的细微操作进行有效记录并唯一化定义，从而形成可传播、复现甚至交易的元宇宙菜谱。

对应地，在工业实际应用中，涉及大量工装操作、工序调度的工艺流程也是工业中十分重要的一环，且很多企业将自己的工艺流程转化为一种专利技术，虽然同样工业产品在外观上可能一致，但是不同的工艺流程对产品的成本、质量和寿命等方面有极大的影响。所以，为了打造出工业产品在工业元宇宙中的唯一数字替身，并且将对应的工业知识软件化，就需要将工业产品的制造过程作为产品

唯一标识的一部分。

此外，与现实的工业世界不同的是，工业元宇宙强调去除“中心特权”。从金融的角度上来说，区块链、NFT 等技术能够提高金融安全性和透明度，释放流动性和增长机会，并支持一体化和标准化的经济体系。从产业角度来说，去中心化能够防止垄断，增强企业的科技创新能力。

（三）社交网络

现实世界中的工业是一个十分庞大的经济体系，其中很多工业环节如联合研发、工艺会签、协同操作等，往往需要以团队协作的方式参与。例如在工业产品研发时，身处异地的工作人员可以通过自己的数字替身进入工业元宇宙与其他数字人开展实时讨论并进行 3D 建模和仿真，解决了人员在线沟通效率低下、产品试制周期长等现实问题；在工业产品制造时，利用数字孪生等技术使得员工可以在工业元宇宙中执行沉浸式的质量管理和人工调度等任务，有效提高了人员的操作和管理效率；在工业产品销售和服务时，员工能够在远程沉浸式地为客户提供高质量的使用指导与维修服务，降低了工业产品的维护成本；在企业内部管理时，企业人员可以在工业元宇宙中创建内部虚拟会议室等，在其中进行沉浸式的交谈，解决企业内部的矛盾，提高企业管理效率。同样，对应在工业元宇宙中，各类工种通过数字替身连接在同一个虚拟空间中相互交流与协作，完成自己的工作任务。类似的连接还体现在客户方与服务方之间，客户可以连接至工业元宇宙中沉浸式的参观工业产线，之后再根据自己的需求寻找合适的乙方，实现精准对接。

工业元宇宙即元宇宙相关技术在工业领域的落地应用，则主要强调人在回路这一核心理念对现实工业空间场景（如研发设计、生产制造、营销售后等环节）进行复现。在工业元宇宙中，除了能够为人们提供工业场景的沉浸式体验外，还能够帮助企业将全生命周期中的工业流程转化为专利技术以打造数字化藏品，发挥虚拟世界的去中心化优势以构建高度融合的新型社会网络。随着数字孪生技术在深度和广度上的不断发展，作为未来工厂的工业元宇宙也在多方面实现了虚实空间的协同联动。工业元宇宙的构建需要数字孪生技术的支持，其正常运行需要以数字孪生技术作为基础，依托数字孪生技术还原物理世界，工业元宇宙能够有效地实现数据和模型的混合驱动，连接物理资产和数字世界，全面部署现实工业环境的虚实交互。

第二节 工业元宇宙的体系结构与技术体系

工业元宇宙的体系结构

一、工业元宇宙的体系架构

工业元宇宙是复杂先进的新数字化工业经济系统，其体系架构自下而上主要包括六个层次，即基础层、感知层、通信层、边缘层、云端层和应用层，见图 11。

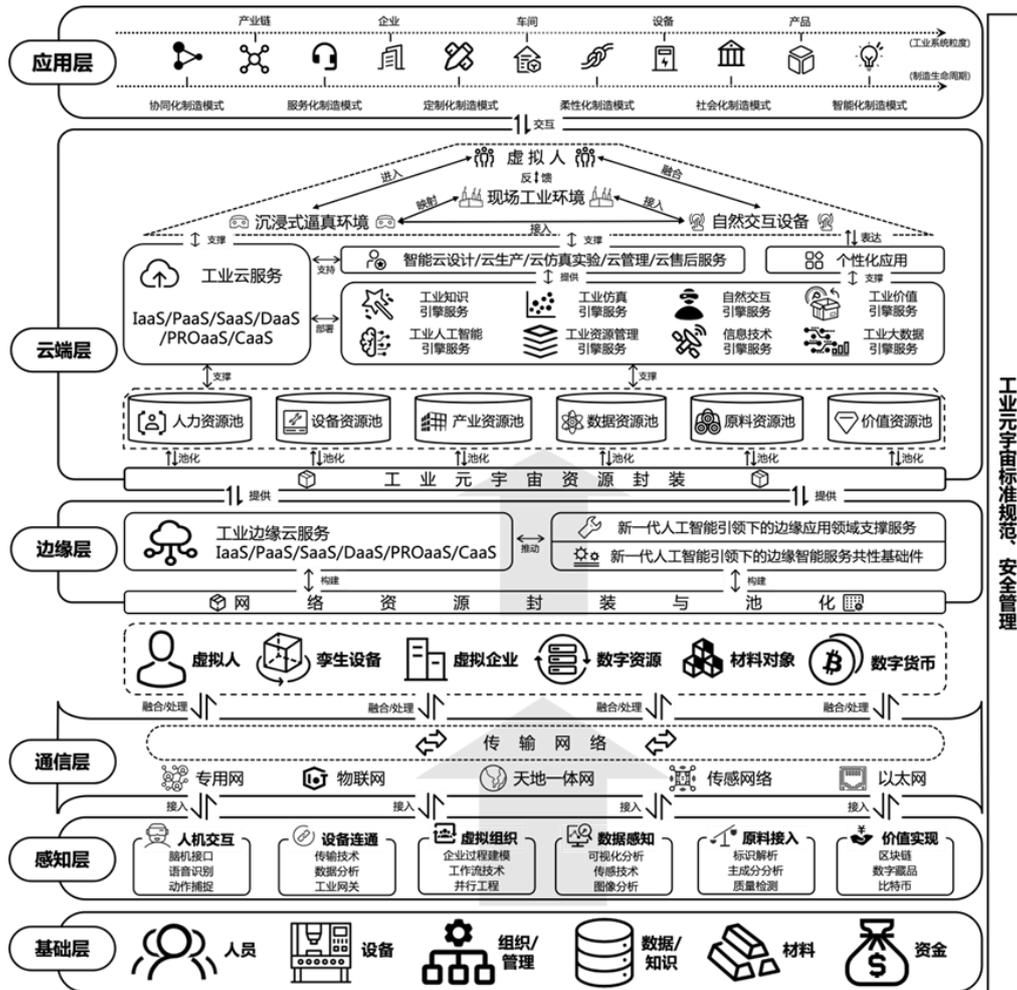


图 11 工业元宇宙的体系架构

首先，基础层以物理工业空间中的人、设备、组织/管理、数据/知识、材料、资金等工业六要素作为主要对象进行构建，为工业元宇宙中虚拟资源的封装与池化提供最底层的实体支撑。基础层不仅仅是对这六要素的静态描述，更是一个动态的生态系统，负责捕获和处理实体层面的信息，为工业元宇宙中虚拟资源的封装与池化提供坚实而可靠的基础。通过深度集成和互操作性，基础层的建设旨在打破信息孤岛，将实体层的复杂性转化为数字化的清晰结构，为上层层次的虚拟

化和智能化奠定坚实的基础。

其次，感知层通过人机交互技术、设备连通技术、虚拟组织技术、数据感知技术、原料接入技术和价值实现技术等各类技术与基础层的六要素一一对应，对基础层的工业六要素进行感知与接入。其中，随着技术应用的不断演进，感知层的人机交互技术不仅仅限于操作，还可结合虚拟现实（VR）、增强现实（AR）及混合现实（MR）等技术，使得工业元宇宙的用户能够更直观、全面地与虚拟环境和虚拟设备进行互动；设备联通技术的深入应用则可将各类工业设备联结成一个有机整体，实现高效协同生产；虚拟组织技术可使得工业元宇宙中的组织与管理抽象化和虚拟化，帮助企业更加灵活有效地完成组织合作；数据感知技术可及时捕捉到工业环境中各个方面的数据，并通过先进的数据分析算法为生产决策提供支持，帮助企业实时监测和记录生产过程中的数据流动；原料接入技术可实现原材料的流动和库存状态的实时掌握，实现供应链系统的无缝对接，帮助企业实现智能化的供应链管理；价值实现技术可将工业元宇宙中的各项资源转化为具体的价值，实现虚拟化资源与实际市场需求的紧密衔接。

再次，通信层完成工业六要素的接入，依托物联网、天地一体网、未来互联网等传输网络，将六要素的各类信息进行高效化传输，融合处理成为工业元宇宙中的虚拟化对象，例如，将基础层的人员抽象为虚拟人、将基础层的组织/管理抽象为虚拟企业等。通信层作为连接现实物理世界与工业元宇宙的关键纽带，为工业六要素之间的信息交流提供更为便捷、灵活和高效的方式。其中，物联网技术通过在人、设备、组织等工业六要素上部署传感器和智能设备，实现实时数据的采集和传输，为工业元宇宙的信息汇总提供基础；天地一体网通过实时的数据共享，实现全球范围内生产活动的协同推进，使得工业元宇宙中的不同实体可以跨地域限制进行合作；未来互联网高速、低延迟的特性进一步加强了通信层的能力，提高生产过程的实时性和灵活性，使得工业元宇宙中各要素之间的通信更加可靠高效。此外，通信层还可以通过优化传输协议、网络拓扑结构和数据压缩算法等技术手段，确保海量数据的快速传输，以为工业元宇宙中的各类应用提供充足的信息支持。

之后，边缘层对虚拟后的六要素信息进行处理，该层能够为工业元宇宙中工业数据的智能化处理与实时传输提供各类边缘侧服务。然而边缘层的功能不仅仅

局限于简单的数据传输，更是通过对智能化的处理和服务，使得工业元宇宙能够在本地实现更为灵活和智能的运作。例如，边缘层强大的实时数据处理能力，可以在数据生成的源头进行本地处理和分析，实时检测异常状况并采取及时的纠正措施，避免事故发生或提前预警，提高生产线的可靠性和稳定性；此外，边缘层利用边缘计算技术，将计算任务从中心云转移到距离数据源更近的地方进行处理，这样的架构能够减少数据传输的延迟，降低对云端资源的依赖。

进一步，云端层作为工业元宇宙的智慧大脑，发挥着集中管理、智能分析和资源优化的核心作用。云端层对虚拟化的工业六要素进行封装和池化，形成人力、设备、产业、数据、原料、价值资源池，云端层将所有工业元宇宙资源抽象为各类服务提供给用户，满足用户根据实际情况按需获取的需求，以达到人-机-环境三者虚实融合的有机统一。它不仅是工业元宇宙集中管理的平台，更是一个智能化的数据聚合和处理中心，支持全系统生命周期的创新型应用，如产品设计、生产规划、供应链管理等，促进工业数字化转型的全面发展。

最终，应用层面向整个工业元宇宙中的用户实现全系统生命周期的创新型应用，促进工业数字化转型。应用层主要面向于工业元宇宙的工业系统粒度和制造生命周期两个部分。其中，在工业系统粒度方面，产业链层的创新型应用关注产业链上下游之间的数字化协同。通过实时的供需链数据共享和分析，促进产业链中的企业协同制造，从而提高整体效率。企业层的创新型应用致力于企业内部的数字化转型，通过整合生产、销售和管理数据，实现企业内各功能部门的高效协同。车间层的创新型应用关注生产流程的智能化和柔性化。通过实时监测设备状态和生产数据，实现车间内各工站之间的协同工作。设备层的创新型应用通过设备的联网和自主决策，实现设备之间的智能协同。产品层的创新型应用致力于产品设计和制造的个性化，通过数字化的产品设计工具，支持客户参与产品设计，实现按需定制的生产。在制造全生命周期方面，在协同化制造模式下，应用层通过提供协同工具，促进整个制造生命周期中的合作和协同。服务化制造模式强调制造过程中的服务化和可配置性，可提供云服务平台，支持企业按需选择和配置生产服务。定制化制造模式注重产品的个性化生产，通过提供虚拟设计和模拟工具，使客户能够参与产品设计过程，实现按需定制。柔性化制造模式关注生产过程的灵活性和适应性，通过实时监测和分析生产数据，调整生产流程，适应需求

的变化。社会化制造模式注重对外部环境的开放性，通过连接供应商、合作伙伴和客户，实现更广泛的信息共享和资源协作。智能化制造模式是整个制造生命周期的未来趋势，可通过嵌入先进的数据分析、人工智能和机器学习技术，实现智能决策、自动优化和预测性维护，推动整个制造生命周期的智能化转型。

以上六层级之间环环相扣，关系十分密切，即下一层是实现上一层的基础，上一层则是对下一层功能的扩展，共同形成工业元宇宙的体系架构。该体系架构具有如下新特色：

（1）在新一代人工智能技术引领下，以 AI 驱动的工业元宇宙中全要素链、全产业链、全价值链（三链）的智慧融合。

（2）是边缘端与云端协同形成的新架构。

（3）是以云计算、人工智能、大数据、新互联网、区块链、建模仿真等为代表的新技术与新工业技术的融合。

（4）实现了全系统虚拟化和服务化，尤其是感知层、接入层、通讯层的虚拟化和服务化。

（5）实现了以用户为中心的虚实融合六要素的智慧共享服务。

（6）体系架构中的各层均具有新时代下的新内涵和新内容。

实现了虚实融合、以虚强实，系统跨域的再创新。

二、工业元宇宙的五维技术体系

值得指出，工业元宇宙尚处于不断演进与发展的阶段。我们认为目前的工业元宇宙技术体系是一个五维的技术体系群。包括整体架构子体系、支撑技术子体系、安全技术子体系、标准技术子体系、工业软件子体系，见图 12。

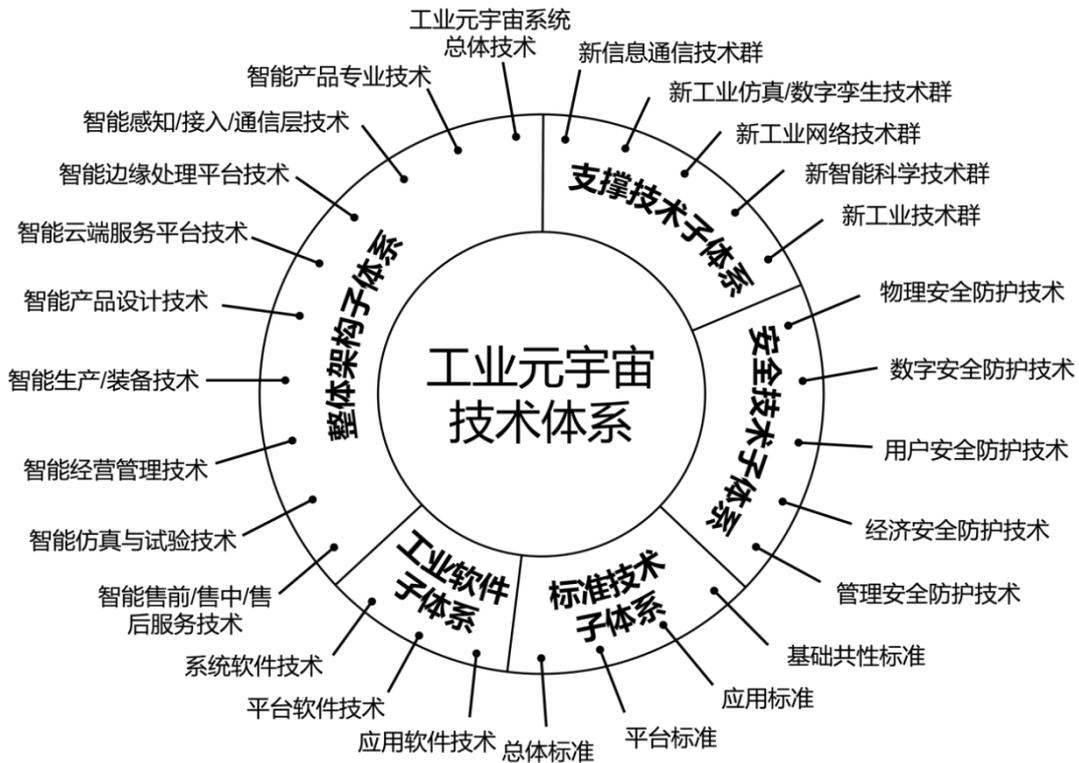


图 12 工业元宇宙技术体系

（一）工业元宇宙技术体系的整体架构子体系

工业元宇宙技术体系的整体架构子体系，是在新一代人工智能技术引领下，包括工业元宇宙系统总体技术、智能产品专业技术、智能感知/接入/通信层技术、智能边缘处理平台技术、智能云端服务平台技术、智能产品设计技术、智能生产/装备技术、智能经营管理技术、智能仿真与试验技术、智能售前/售中/售后服务技术等，见图 13。

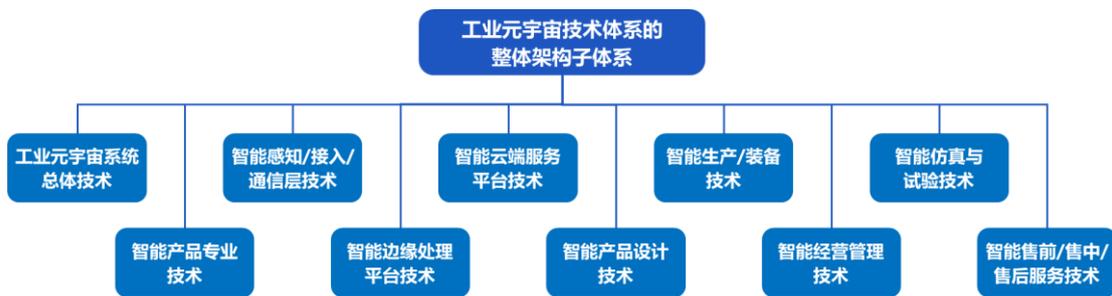


图 13 工业元宇宙技术体系的整体架构子体系图

1. 工业元宇宙系统总体技术

包括新一代人工智能技术引领下的智能制造新模式、商业模式、系统架构技术、系统集成方法论、工业价值实现技术、系统开发与应用实施及水平与能力评估技术等。

2. 智能产品专业技术

包括面向互联化、服务化、协同化、个性化（定制化）、柔性化、社会化、去中心化的新一代人工智能技术引领下的智能数字化产品专业技术。

3. 智能感知/接入/通信层技术

包括新一代人工智能技术引领下的各类信息感知技术、意识交互技术、视觉输出技术、普适物联技术；传统的互联网、物联网、车联网、卫星网、天地一体化网、未来互联网、物理安全防护技术等。

4. 智能边缘处理平台技术

包括新一代人工智能技术引领下的边缘资源、产品、能力/感知通讯虚拟化/服务化技术；服务化的边缘人工智能引擎技术、边缘智能制造大数据引擎/仿真引擎/区块链引擎；云边协同技术、边缘制造技术、边缘技术安全防护技术等。

5. 智能云端服务平台技术

虚拟化制造服务云端环境的构建/管理/运行/评估技术；智能虚拟化制造云可信服务技术；制造知识/模型/大数据管理、分析与挖掘技术；服务化的智能制造云端智能引擎/工业仿真引擎；新一代人工智能引擎技术、普适自然交互技术；智能化的信息技术引擎/工业场景渲染引擎；去中心化的工业价值引擎；平台标准技术、云端技术安全防护技术等。

6. 智能产品设计技术

包括面向群体智能的设计技术、面向跨媒体推理的设计技术、物理与数字云端交互协同技术、基于云计算的产品协同设计仿真技术/人机工程仿真技术、基于数据驱动与知识指导的设计预测、分析和优化技术、云 CAX/DFX 技术、智能虚拟样机技术、云设计标准等。

7. 智能生产/装备技术

包括智能工业机器人、智能柔性生产、智能机床、智能 3D 打印、面向跨媒体推理的智能生产工艺、基于大数据的智能云生产技术、基于群体智能的生产调度仿真技术/生产性物流规划仿真技术、云生产标准等。

8. 智能经营管理技术

包括基于数据驱动与知识指导的智能项目管理、企业管理、质量管理、基于 NFT 的工业价值交易技术；基于大数据的智能云供应链管理、云物流管理、云资

金流管理、云销售管理技术、云营销标准、云管理标准、商业安全、管理安全防护技术、面向过程的工业要素标识技术、去中心化体系构建技术等。

9. 智能仿真与试验技术

包括基于数据驱动与知识指导的智能建模与仿真技术、数字孪生技术、单件/组件/系统的智能试验技术；基于大数据的仿真与试验技术、智能仿真云技术、云仿真标准等。

10. 智能售前/售中/售后服务技术

包括基于数字孪生的虚拟运维技术；基于大数据的智能售前/售中/售后综合保障服务技术、智能增值服务技术、智能云装备故障诊断和预测健康管理技术、云服务标准等。

(二) 工业元宇宙的支撑技术子体系

工业元宇宙支撑技术子体系包括新信息通信技术群、新工业仿真/数字孪生技术群、新工业网络技术群、新智能科学技术群、新工业技术群等，见图 14。



图 14 工业元宇宙的支撑技术子体系

1. 新信息通信技术群

包括新一代人工智能技术引领下的云计算、物联网/CPS、服务计算、高效能计算、大数据处理、电子商务、系统安全技术、网络通讯、区块链、NFT 等。

2. 新工业仿真/数字孪生技术群

包括新一代人工智能技术引领下的机理/非机理建模、智能仿真平台/系统，仿真应用工程、AR/VR/MR 等。

3. 新工业网络技术群

包括新一代人工智能技术引领下的移动网络 5G/6G、卫星网络、天地一体化网络、未来网络等。

4. 新智能科学技术群

包括新一代人工智能技术引领下的脑科学、认知科学、人机融合智能、类脑

智能、群体智能、跨媒体智能、自主无人智能、脑机接口等。

5. 新工业技术群

包括新一代人工智能技术引领下的先进工艺、元器件、材料、质量、3D 打印、智能机器人、智能机床及产品设计/生产/管理/试验/销售/保障/服务等基础技术和、连续/离散/混合工业应用专业技术。

(三) 工业元宇宙的安全技术子体系

工业元宇宙的安全技术子体系是在新一代人工智能技术引领下,包括物理安全防护技术、数字安全防护技术、管理安全防护技术、经济安全防护技术、用户安全防护技术等,见图 15。



图 15 工业元宇宙技术体系的安全技术子体系

1. 物理安全防护技术

包括新一代人工智能技术引领下的物理环境安全、硬件设备安全、未来网络通信链路安全、安全电磁兼容环境等。

2. 数字安全防护技术

包括新一代人工智能技术引领下的网络访问控制技术、数据库的备份与恢复技术、信息加密技术、反病毒技术、入侵防护技术、系统安全技术等。

3. 用户安全防护技术

包括新一代人工智能技术引领下的交互行为分析技术、行为辨识技术、用户隐私保护技术、虚拟人身份认证技术等。

4. 经济安全防护技术

包括新一代人工智能技术引领下的工业内容安全标识解析技术、工业价值安全交易制度、虚拟货币安全防护技术等。

5. 管理安全防护技术

包括新一代人工智能技术引领下的工业元宇宙安全法则、工业元宇宙安全制度、工业元宇宙安全文化等。

（四）工业元宇宙的标准技术子体系

工业元宇宙的标准技术子体系是在新一代人工智能技术引领下，包括总体标准、应用标准、平台标准、基础共性标准等，见图 16。

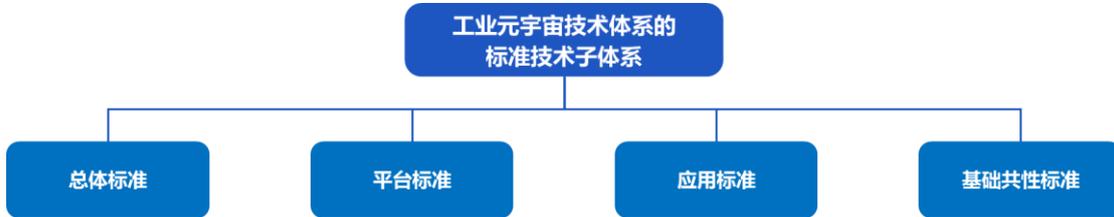


图 16 工业元宇宙技术体系的标准技术子体系

1. 总体标准

包括新一代人工智能技术引领下的去中心化体系架构标准、运营与服务标准、评估与咨询标准、集成与互操作标准、经营与管理标准、虚拟与池化标准等。

2. 平台标准

包括新一代人工智能技术引领下的智慧资源/能力感知、物联接入、虚拟化、服务化、协同化标准；智慧制造环境构建/运行/评估标准；制造知识/模型/大数据/过程要素管理标准；普适人机交互标准以及去中心化的工业价值实现标准等。

3. 应用标准

包括新一代人工智能技术引领下的云设计/仿真/生产/试验/营销/服务/管理标准以及数据驱动和知识指导标准等。

4. 基础共性标准

包括新一代人工智能技术引领下的信息分类与编码标准、参考模型标准、基础术语标准以及信息/功能安全标准等。

（五）工业元宇宙的工业软件子体系

工业元宇宙的工业软件子体系是在新一代人工智能技术引领下，包括系统软件、平台软件、应用软件等，见图 17。



图 17 工业元宇宙技术体系的工业软件子体系

1. 系统软件技术

包括新一代人工智能技术引领下的智能制造服务器操作系统技术、沉浸式桌面操作系统技术、移动终端操作系统技术和自适应嵌入式操作系统技术、面向新形态计算机的操作系统技术、制造业编程语言技术等。

2. 平台软件系统

包括新一代人工智能技术引领下的智能制造资源/能力感知软件技术、物联网软件技术、智能制造资源/能力虚拟化/服务化软件技术；智能虚拟化制造服务环境的构建/管理/运行/评估软件技术；智能虚拟化制造系统可信服务软件技术；制造知识/模型/大数据管理、分析与挖掘软件技术；普适人机交互软件技术；异构数据知识图谱构建及管理软件技术等。

3. 应用软件技术

包括新一代人工智能技术引领下的智能制造产品设计软件技术、生产软件技术、管理软件技术、仿真与实验软件技术及服务软件技术、工业可视化编程软件技术等。

第三节 工业元宇宙助推我国工业高质量发展

一、工业元宇宙与新型工业化

我国正处于全面建设社会主义现代化国家开局起步的关键时期，即在中国，正开启“全面建设社会主义现代化国家”的高质量发展阶段；正贯彻“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念；正构建“以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进”的新发展格局。工业是国民经济的主体，是立国之本，兴国之器，强国之基。在我国新征程上，工业发展的机遇与挑战并存，任重道远。

党的二十大报告提出了一个目标：“到 2035 年基本实现新型工业化”。这一目标强调坚持将发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国。全国新型工业化推进大会传达了习近平总书记的重要指示：“新时代新征程，以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业，实现新型工业化是关键任务。”当前世界正处于百年未有之大变局加速演进期，工业化的全球格局和技术内涵都在发生深刻变革，大国博弈日趋复杂。只有适应时代要求和形势变化，加快推进新型工业化建设，做强做优做大实体经济，提升产业链供应链韧性

与能力，才能构建新的大国竞争优势。因此，我们可以明确看到，我国工业战线的新征程是“推进新型工业化”，旨在促进新型工业化的高质量发展。

新型工业化是指在新的科技革命和产业变革背景下，以高新技术为引领，以提高工业生产效率和经济效益为目标，实现产业结构优化升级、资源环境友好型和社会可持续发展的具有中国特色的新型工业化道路。

党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央从党和国家事业全局出发，对推进新型工业化道路、全面建成社会主义现代化强国作出了一系列的战略部署，具有深远的历史意义和重大的现实意义。其中主要包括推进新型工业化的发展规划、出台工业互联网发展行动计划、加强产业政策和国际合作等措施，更具体地剖析如下。

（一）我国推进新型工业化的发展规划

通过提升制造业的数字化、网络化/云化和智能化水平，推动制造业向中高端延伸，加强制造业的创新能力和核心竞争力，推动传统产业向新型工业化转型，培育新兴产业和新业态。为实现这些目标，我国提出了六点主要任务，包括促进工业经济稳定增长、加快建设现代化产业体系、提升产业链供应链的韧性和安全水平、健全产业科技创新体系、推动高端化智能化绿色化发展以及全面提升企业竞争力。这些举措将有助于构建制造强国和网络强国，促进我国经济高质量发展和转型升级，从而推进新型工业化发展，见图 18。



图 18 我国推进新型工业化的主要任务

（二）工业互联网发展行动计划

工业互联网发展行动计划与工业元宇宙相互支持。工业互联网发展行动计划

是我国推进新型工业化的重要措施，其目标是推动工业互联网建设，实现制造业的数字化、网络化/云化和智能化，提高制造业的效率和质量，推动制造业向中高端延伸，提高制造业的创新能力和核心竞争力。为实现这些目标，《工业互联网发展行动计划》规划了一系列主要任务，包括推动工业互联网平台建设、加强数字化转型、推动产业升级、加强技术创新、推动人才培养和推动国际化发展。而工业元宇宙则提供了实现这一目标的技术和平台基础。工业互联网平台可以连接制造业的各个环节和参与主体，实现实时数据共享和协同，而工业元宇宙则通过虚拟模拟环境将这些数据可视化和可操作化，为制造业提供更高效、智能和灵活的生产方式。

（三）产业政策支持

我国高度重视推进新型工业化，为此出台了一系列政策支持，如支持国有企业、民营企业、大中小微等各类企业的产业政策、人才政策、知识产权保护政策和环保政策等，为制造业的数字化、网络化/云化和智能化提供了重要支持，推动了制造业向工业元宇宙转型。产业政策支持将推动工业元宇宙的应用和发展。

（四）加强国际合作

我国在推进新型工业化的过程中，加强国际合作是非常重要的部分。为此，我国采取了一系列措施，包括加强国际合作机制建设、推动“走出去”战略、加强国际标准制定、推动国际产能合作、加强人才交流和推动贸易自由化等。这些措施有助于推动我国制造业向国际化方向发展，提高我国制造业在国际市场的竞争力。同时，工业元宇宙的实施需要跨越国界的数据共享和合作，因此国际合作具有重要意义。通过加强国际合作机制的建设，推动标准制定和产能合作，以及促进人才交流和贸易自由化，可以推动工业元宇宙的国际化应用，促进工业元宇宙的国际化发展。

工业元宇宙是推动制造业实现新型工业化的重要抓手，它将数字化技术与工业相结合，为工业发展带来新的机遇和挑战。工业元宇宙可以为新型工业化提供一个数字化的平台，通过数字化技术实现生产过程的优化、智能化管理和资源的高效利用。利用数字孪生技术，工业元宇宙可以将实体生产线排版重构到虚拟环境中，实现实体与虚拟场景完美融合，见图 19。这为企业提供了一个真实还原全过程的平台，可以在其中进行反复模拟优化，提升各项生产指标效率。同时，它

也使工程人员能够实现远程监控管理，有效提高运营效率。此外，工业元宇宙采用模块化设计理念，通过在虚拟中添加模块实现生产线扩展升级，大幅降低了现实环境的试错成本。工业元宇宙可以帮助企业实现产能优化升级及资源精准配置，实现智能生产管理。这就为推进新型工业化提供了强大助力，能够助力企业实现智能化转型升级，从而提升国家整体制造业水平，实现高质量发展。

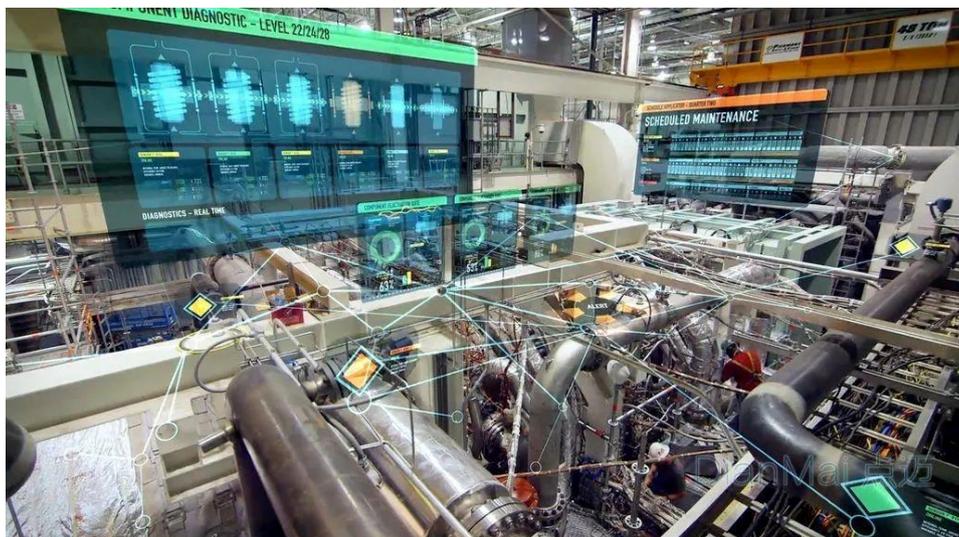


图 19 通用电气（GE）的数字化工厂，通过工业互联网技术实现了全球范围内设备的连接和数据共享

二、工业元宇宙与工业互联网

（一）概念区分与联系

工业互联网是通过 5G、边缘计算等新一代信息通信技术与新一代人工智能的深度融合，构建人、机、物全面互联的网络开发平台，其以实体联网、数据联网以及服务联网，提供数字化、网络化、智能化的智能生产、制造、管理支撑。核心是发展具备感知、分析、决策、控制和管控一体化的信息物理系统，实现高效、智能、优质和快速的市场响应，推动制造业转型升级，见图 20。



图 20 工业互联网平台架构图

工业元宇宙是将 XR、AI、IoT、云计算、数字孪生等元宇宙相关技术与实体经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态。通过连接虚拟空间与现实世界，工业元宇宙构建起覆盖全产业链和全价值链的全新制造和服务体系，降低成本并提高生产效率，助力工业高质量发展。

从技术角度来看，工业元宇宙应是工业互联网的升级版。工业互联网的技术核心在于利用互联网、大数据、物联网、区块链等技术，实现工业全流程中的人、机、物、系统等全面连接，促进数据要素的充分流动和共享。工业元宇宙在数据要素充分连接和共享的基础上，还包括时空引擎+实时渲染+大规模建模技术、自然交互技术、区块链技术、网络通讯与算力技术、人工智能技术、物联网/传感技术，以及数字孪生技术等构成。

从内涵特征来看，与工业互联网相比，工业元宇宙更加注重虚拟世界与现实世界的交互融合，让数据信息更深入地服务于企业运营、资源调度、人员协同等方面。工业元宇宙不仅延续了工业互联网的基础设施构建，还在此基础上扩展了更多的应用场景和功能，为企业提供更全面、更智能的数字化服务。

总之，工业互联网和工业元宇宙之间存在密切的联系，但也有明显的区别。

工业互联网主要强调基础设施的构建和物理硬件的联动，而工业元宇宙则在此基础上进一步强化了虚拟世界与现实世界的联动，为企业提供更高效、更智能的数字化服务。

（二）省部级政策与导向

党的十九大报告指出，“加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合。”2017年国务院常务会议审议通过《深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》，促进实体经济振兴，加快转型升级。工业互联网正成为领军企业竞争的新赛道、全球产业布局的新方向、制造大国竞争的新焦点。2018年以来，“工业互联网”连续六年被写入政府工作报告，工业互联网对推动制造强国、数字中国建设、促进制造业高质量发展的支撑作用愈发明显。

2017年，在工业和信息化部指导下，工业互联网产业联盟组织编写了《工业互联网平台白皮书》提出要基于工业互联网平台，建立虚实映射、实时监控、智能诊断、协同优化的数字孪生，实现对工业对象和工业流程的全面洞察。《国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》提出发展工业互联网，推动网络应用从虚拟到实体、推动低成本、模块化工业互联网设备和系统的部署应用，云化研发设计、生产管理和运营优化软件。2020年3月，工信部印发《中小企业数字化赋能专项行动方案》指出应用人工智能、增强现实/虚拟现实等新兴技术，集成建模、仿真等通用操作系统，夯实数字化平台；同年12月《工业互联网创新发展行动计划（2021-2023年）》（工信部信管〔2020〕197号）提出加快工业机理模型、知识图谱建设。支持建设云仿真、数字孪生、数据加工、故障预测与健康诊断（PHM）等技术专业型平台，开展基于数字孪生、人工智能、区块链等技术的产品模型构建与数据分析，打造设备预测性维护、装备能效优化、产品衍生服务等模式。2021年12月，《国家发展改革委等部门关于推动平台经济规范健康持续发展的若干意见》（发改高技〔2021〕1872号）鼓励平台企业拓展“互联网+”消费场景，促进虚拟现实等智能产品普及应用；《“十四五”数字经济发展规划》（国发〔2021〕29号）提出探索发展跨越物理边界的“虚拟”产业园区和产业集群，加快产业资源虚拟化集聚、平台化运营和网络化协同，构建虚实结合的产业数字化新生态。2022年4月《工业互联网专项工作组2022年工

作计划》(工厅信管〔2022〕256号)提出深化“平台+数字孪生”“平台+人工智能”“平台+区块链”等新技术融合发展;10月发布《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022—2026年)》(工信部联电子〔2022〕148号),明确围绕重点垂直行业领域,推动虚拟现实和工业互联网深度融合,支持虚拟现实技术在设计、制造、运维、培训等产品全生命周期重点环节的应用推广,强化与数字孪生模型及数据的兼容,促进工业生产全流程一体化、智能化。2023年5月《工业互联网专项工作组2023年工作计划》(工信厅信管函〔2023〕141号),推进智慧工厂、智慧园区建设,推动设备完整性管理和预测性维修、生产工艺报警优化管理等场景的试点建设推广。

党的二十大报告指出,推动战略性新兴产业融合集群发展,构建一批新的增长引擎。发展虚实融合互促的工业元宇宙,将进一步加速制造业高端化、智能化、绿色化升级,是新型工业化建设的重要发力点之一。截至2023年9月,围绕元宇宙领域,全国17个省份、直辖市和国家部委已出台超过90项政策,国家级和地方层面的产业扶持政策和项目不断落地,为元宇宙产业未来发展奠定了坚实基础,营造了良好环境。

工信部等五部门联合印发《元宇宙产业创新发展三年行动计划(2023—2025年)》,提出以构建工业元宇宙、赋能制造业为主要目标,培育三维交互的工业元宇宙,围绕工业元宇宙+产线、工厂、园区多维度,构建虚实结合的产线数字孪生体,打造工业元宇宙虚拟装配空间,布局建设工厂级元宇宙平台,发展虚实结合的新型园区建设模式。

《上海市数字经济发展“十四五”规划》《上海市培育“元宇宙”新赛道行动方案(2022-2025年)》提出研究部署未来虚拟世界与现实社会相交互的平台,打造数字孪生工厂,支持建设高精度、可交互的虚拟映射空间对工业制造全环节进行建模仿真、沙盘推演,支持虚拟生产协作平台在工业制造领域的应用,实现产品仿真设计、测试验证和优化等方面的应用。

《四川省元宇宙产业发展行动计划(2023-2025年)》,提出以工业元宇宙为主线推动四川元宇宙产业发展,构建工业元宇宙全生命周期制造体系、全系列产品体系、全场景应用体系、全链条服务体系,打造四川元宇宙典型应用场景。

《浙江省元宇宙产业发展行动计划(2023—2025年)》《浙江省元宇宙产业

发展 2023 年工作要点》提出实施“元制造”融合赋能，围绕“产业大脑+未来工厂”，推进“设计—研发—制造—销售—管理”全生命周期数字化协同和全要素虚实共生，打造一批工业元宇宙应用场景。

《江苏省元宇宙产业发展行动计划（2024—2026 年）》提出要加快 XR、数字孪生等元宇宙技术在工业关键流程深度应用，打破时空与虚实边界，实现跨越时空的远程智能协作，全息洞察的数字化管理。鼓励各类工业园区推动区内企业开展产线级、工厂级、园区级元宇宙应用，探索虚实结合的新型园区建设运营模式。

第二章 核心技术篇

第一节 新一代人工智能技术

人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。它是计算机科学的一个分支,旨在生产出一种能以人类智能相似的方式做出反应的智能机器。人工智能领域的研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。人工智能可以对人的意识、思维的信息过程进行模拟。

新一代人工智能技术是指基于深度学习、神经网络等先进技术,具有更高级别的智能、更快速的学习和更广泛的应用领域。新一代 AI 技术是指基于深度学习等大数据技术和人工智能技术,结合机器学习、计算机视觉、自然语言处理等技术,打造更加智能、更加高效、更加可靠的人工智能系统。

一、新一代人工智能技术发展现状与展望

(一) 新一代人工智能技术的发展现状和价值

工业元宇宙正成为推动制造业数字化转型的重要推动力。在这一大背景下,人工智能技术作为关键的驱动力之一,为工业元宇宙的发展注入了新的活力。工业元宇宙中,人工智能的应用已经不再局限于理论探讨,而是在实践中取得了显著的成果。其中,预测性维护是一个典型的例子,通过人工智能技术,企业能够实现对设备状态的实时监测和故障预测。这不仅降低了生产中断的风险,提高了设备的利用率,还节约了维护成本,见图 21。

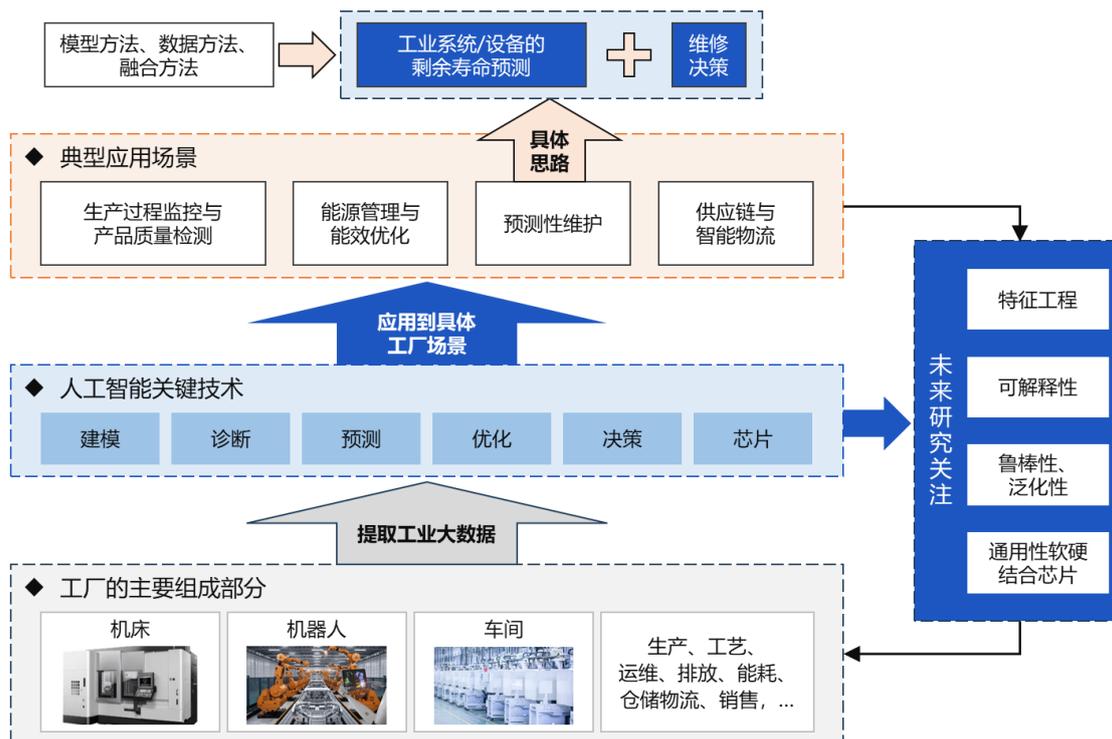


图 21 工业人工智能的整体研究框架

质量控制是工业元宇宙中另一个显著的领域。结合视觉识别和人工智能算法，系统能够在高速生产线上检测并识别产品表面的缺陷，有效防范次品流入市场。这不仅提高了质检的速度，更保障了产品的质量，为企业树立了可靠的品牌形象；在供应链管理方面，工业元宇宙与人工智能的融合使得供应链变得更加智能、透明。实时库存监控、需求预测以及供应链可视化等功能，使企业能够更好地应对市场的变化，减少库存压力，提高交付的准时性。

人工智能技术促进工业元宇宙中协同机器人和自主系统的发展。机器人在生产线上的协同工作，以及自主系统对生产环境的实时响应，使得制造过程更为智能和灵活。数字孪生技术的进一步应用，将实际设备的数字模型与实时数据相结合，为人工智能提供更丰富的环境数据，促使 AI 系统更好地理解 and 适应实际生产场景。

新一代人工智能技术在工业元宇宙领域的应用价值主要体现在以下：

1. 提高生产效率

通过智能化技术，工业元宇宙可以更快、更准确地处理和分析生产数据，提高生产效率。同时，人工智能技术还可以帮助企业优化生产流程，减少浪费，降低成本。

2. 增强产品质量

人工智能技术可以通过对生产数据的分析和预测,帮助企业及时发现和解决生产过程中的问题,从而提高产品质量。

3. 提升客户服务水平

工业元宇宙中的客户服务可以通过人工智能技术实现更加智能化、个性化的服务。例如,通过自然语言处理技术,机器人可以与客户进行语音交互,提供更加便捷的服务体验。

4. 促进企业数字化转型

随着互联网技术的发展,数字化转型已经成为企业发展的必然趋势。新一代人工智能技术可以帮助企业实现数字化转型,提高企业的竞争力和创新力。

(二) 新一代人工智能技术的技术创新和展望

1. 深度学习技术

深度学习是新一代人工智能技术的核心,它可以通过神经网络模型对大量数据进行学习和训练,从而实现了对复杂数据的处理和分析。在工业元宇宙领域,深度学习技术可以帮助企业实现对生产数据的自动化处理和分析,提高生产效率和产品质量。

2. 自然语言处理技术

自然语言处理技术是新一代人工智能技术的另一个重要方向,它可以通过对人类语言的处理和分析,实现人机交互和语音识别等功能。在工业元宇宙领域,自然语言处理技术可以帮助企业实现更加智能化、个性化的客户服务,提高客户满意度。

3. 虚拟现实技术

虚拟现实技术是新一代人工智能技术的另一个重要应用领域,它可以通过计算机生成三维虚拟环境,使人们可以在其中进行各种操作和交互。在工业元宇宙领域,虚拟现实技术可以帮助企业实现对生产环境的模拟和优化,提高生产效率和质量。

4. 机器视觉技术

机器视觉技术是新一代人工智能技术的另一个重要应用领域,它可以通过计算机视觉技术实现对图像和视频的处理和分析。在工业元宇宙领域,机器视觉技

术可以帮助企业实现对生产过程的自动化监控和检测,提高生产效率和产品质量。

二、新一代人工智能技术核心技术与技术特征

(一) 新一代人工智能技术的核心技术 (见图 22)



图 22 新一代人工智能技术的核心技术

1. 生成式模型与自监督学习

生成式模型作为一种强大的学习范式,通过学习数据分布从而生成新的、具有相似分布的数据。与此同时,自监督学习注重模型的自主学习,通过设计自动生成的任务来进行模型训练,而不依赖外部标签。这两者都聚焦于无监督学习的范畴,通过模型在学习过程中的自主性来提高对未标记数据的学习效果。

(1) 生成式模型

生成式预训练模型是一类利用预训练策略,在大规模数据上学习到丰富表示的生成模型。这类模型通常在大量未标记的数据上进行自监督预训练,然后在具体任务上进行微调,以适应特定的监督学习或其他任务。目标是,学到高维数据的在低维空间的一个有效表示(representation)。因此这个过程通常会约束模型将数据映射到一个低维的特征空间。此外,生成式预训练通常还会对模型的输入进行一定的扰动,来增加生成任务的难度,这些过程都是为了防止模型学到一些平凡解。根据扰动的不同,大多数生成式预训练方法可以大致分为自回归模型、自编码模型以及二者的混合模型。

(2) 自监督学习

自监督学习是一种无监督学习的范畴,其中模型通过从输入数据自动生成标签或目标,然后利用这些自动生成的目标进行学习。在自监督学习中,模型的目标是最大化输入数据中的信息,而无需外部提供的标签。大量未标记的数据通常容易获得,而自监督学习使得模型能够从这些未标记数据中学到有用的表示,从

而提高模型的泛化能力。也为数据稀缺问题提供了一种可行的途径，使得模型能够从大量未标记的数据中获益。

生成式模型与自监督学习在技术特性上有相似之处。首先，它们都属于无监督学习范式，不需要外部标签，通过模型自身学习数据的结构和特征。其次，生成式模型中的生成器和自监督学习中的自动生成任务都强调模型在学习过程中的自主性。在生成式模型中，生成器自主地生成数据，而在自监督学习中，模型通过自动生成任务标签进行自主训练。这种自主性的学习方式为模型提供了更大的灵活性，使其能够更好地应对未标记数据的挑战。因此，这两者共同探索了模型在无监督情境下学习的可能性，为新一代人工智能技术的发展奠定了基础。

(3) 大型生成模型

随着 stable Diffusion 开源和 ChatGPT 接口的开放，生成式模型发布呈井喷之势。生成式模型种类繁多，发布速度也非常快。生成式模型按照任务模态、领域可以分为九大类：文本到文本、文本到 3D 视图、图像到文本、文本到视频、文本到语音、文本到文本、文本到代码、文本到科研以及其他模型。

2. 强化学习与模型解释性

强化学习与模型解释性密切相关。具体而言，强化学习强调在与环境的交互中通过试错学习来做出决策。模型解释性在这里变得至关重要，因为解释性能够帮助理解模型为何做出特定的决策，从而提高信任度、可控性和安全性。强化学习的决策可能在复杂环境中引起不确定性。模型解释性的研究旨在提高对模型决策的理解，帮助解释模型在特定环境中学到的策略和行为。

(1) 强化学习概念

强化学习是一项独特的机器学习任务，其可与婴儿学习过程进行类比。婴儿通过与环境的互动，如哭闹、吮吸、爬走，逐渐探索并理解周围世界的特性。类似的，强化学习算法通过与环境的交互，不断尝试和调整策略，以最大化预期奖励。一个引人注目的例子是由 DeepMind 研发的 AlphaGo，该围棋程序不是通过死记硬背固定套路，而是通过与围棋环境的对弈，通过尝试和错误的过程，逐渐提高对局的理解水平，最终达到超越人类的水平。

(2) 强化学习面临的挑战

强化学习 (Reinforcement Learning, RL) 已被证实适用于复杂的环境交互类问题, 如机器人控制^{错误!未找到引用源。}、游戏 AI⁰ 等。然而, 作为一种机器学习方法, RL 同样面临着缺乏可解释性的挑战, 主要体现在以下四个方面⁰:

安全敏感领域中的应用受限: 由于缺乏可解释性, RL 策略难以保证其可靠性, 存在潜在的安全隐患。在安全敏感任务 (如医疗、驾驶等) 中, 这一问题变得不容忽视。因此, 为了避免模型不可靠性带来的危险, RL 在安全敏感任务中主要限制于辅助人类决策, 例如机器人辅助手术⁰、辅助驾驶等⁰。

真实世界知识的学习困难: 尽管 RL 在一些仿真环境中表现出色, 如 OpenAI Gym, 但这些仿真环境主要集中在简单的游戏上, 与真实世界存在较大差异。此外, RL 应用难以避免对环境的过拟合, 当发生过拟合时, 模型可能学到环境的背景信息而非真正的知识。这导致了在真实世界中训练 RL 模型的困难, 以及难以确定在虚拟环境中训练的模型是否学到真实规律。

相似任务的策略泛化困难: RL 策略通常与环境强耦合, 难以泛化到相似环境。即使在相同环境下, 微小的环境参数变化也可能极大地影响模型性能。这一问题影响了模型的泛化能力, 难以确定模型在相似任务中的表现。

对抗攻击的安全隐患难以应对: 对抗攻击⁰是一种通过将微小的恶意扰动加入到模型输入中生成对抗样本的攻击技术。对抗样本对人类来说可能不会影响判断, 甚至难以察觉, 然而对于模型而言, 对抗样本可能导致模型输出产生极大偏差。对抗攻击已经扩展到 RL, 成为 RL 算法的安全隐患。对抗攻击的有效性进一步凸显了 RL 缺乏可解释性的问题, 同时也表明 RL 模型可能未能真正学到知识。

3. 迁移学习与多模态处理

迁移学习与多模态处理在新一代人工智能技术中具有紧密联系。迁移学习强调知识如何在不同任务之间转移, 而多模态处理涉及整合来自多种感知方式的信息。这两者的结合使得模型能够更好地适应不同领域的数据和任务, 为未来的研究提供了广泛的应用前景。

(1) 迁移学习

传统的机器学习方法对源领域数据和目标领域数据同分布的要求相当苛刻, 然而, 迁移学习在这一点上做出了突破性的贡献, 它放宽了同分布的限制, 使得已经积累的知识能够成功地迁移到不同但相似的领域中。这一特性使得迁移学习

成为解决目标领域中训练样本不足问题的有力工具。通过利用源领域的知识，迁移学习为在目标领域中开展有效学习提供了新的可能性。

在迁移学习的两个领域之间，可以共享的信息越多、相似度越高，知识迁移学习的效果就越好，反之，效果越差，甚至会给目标领域数据的学习带来不好的影响，即产生负迁移现象。迁移学习可以分为四类⁰：基于实例的迁移学习、基于映射的迁移学习、基于网络的迁移学习以及基于对抗的迁移学习。

(2) 多模态处理

多模态信息融合处理技术是一项综合匹配应用技术，专注于采集、处理、融合多源数据信息。这项技术面临着多种挑战，包括不同数据源的格式和记录方式的差异，以及应用源存在不同模式的复杂性。在这个背景下，如何有效整合来自不同传感装置的数据，以获取高精度、强抗干扰性的感知信息成为数据信息融合的核心问题。

迁移学习和多模态处理的结合涉及在不同任务或领域之间共享知识，以提高性能或加速学习。迁移学习与多模态处理的结合方式可以分为四类，即特征共享与融合、迁移学习的目标任务与源任务、多模态信息对齐以及共享模态无关的表示。

4. 模型轻量化与边缘计算

模型轻量化和边缘计算都是解决在资源受限的设备上执行人工智能任务的有效手段。模型轻量化通过各种方法在保持性能不受太大影响的前提下减小模型的复杂度。其主要是降低模型的体积、减少参数数量以及降低计算需求，从而提高模型的运行效率，尽可能地适应边缘设备的运算条件。

(1) 模型轻量化

模型轻量化 (Model Lightweighting) 是一种通过减小机器学习或深度学习模型的体积、复杂度和计算资源需求，以提高模型在资源受限环境中的性能的方法。模型轻量化旨在保持或提高模型的准确性的同时，减小模型的体积，使其更适用于移动设备、嵌入式系统、边缘计算等资源有限的场景。模型量化的具体方法有：网络剪枝、权重量化以及知识蒸馏等。

(2) 边缘计算

边缘计算（Edge Computing）是一种分布式计算模型，其主要特点是将计算和数据存储靠近数据源、终端设备或者数据的发生地，以便更快速地响应和处理数据，减少数据传输到云端的时延和网络负载。边缘计算的目标是提高系统的实时性、降低网络带宽的使用以及增强隐私和安全性。

边缘计算将计算任务移到靠近数据源的边缘设备上，有效缓解数据延迟问题和云端计算量大的难题。同时两者都对实时性增强、功耗减小方面起着积极的作用。

（二）新一代人工智能技术的技术特征

《新一代人工智能发展规划》中提出“新一代人工智能”是一种“基于新的信息环境、新技术和新的发展目标的人工智能”，并给出新一代人工智能技术的特征是“大数据智能、跨媒体智能、人机混合增强智能、群体集成智能和自主智能无人系统”等⁹，见图 23。



图 23 新一代人工智能技术的技术特征

1. 大数据智能

大数据智能是指通过利用大数据技术和方法，结合人工智能（AI）和机器学习（ML）等先进技术，对海量、多样、高维的数据进行分析、挖掘和应用，以产生深刻的业务洞察、智能决策和业务创新的过程。大数据智能的核心目标是从大数据中提炼有价值的信息，以推动智能决策、优化业务流程、提升用户体验等方面的能力。

2. 跨媒体智能

跨媒体智能 (Cross-Media Intelligence) 指的是通过整合和分析多种媒体形式的信息 (如文本、图像、音频、视频等), 利用人工智能 (AI) 和机器学习 (ML) 等技术从中提取有意义的知识和智能。这涉及到多模态数据的处理和深度分析, 以获得对信息更全面、深刻的理解。

在虚拟助手的领域, 跨媒体智能为语音、图像和文本的处理带来了全新的可能性。通过综合考虑多种媒体信息, 系统实现了对用户指令更为全面的理解, 从而提供更智能、更个性化的服务。这项技术使得虚拟助手能够更加贴近用户需求, 为用户提供更加定制化的支持和反馈。

3. 人机混合增强智能

人机混合增强智能是指通过将人类智能与计算机智能有效地融合和增强, 创造出一种合作性更强、智能水平更高的整体系统。这包括人机协同工作、人机交互、增强现实 (AR) 和虚拟现实 (VR) 等技术的整合, 以提高工作效率、决策水平和用户体验。

4. 群体集成智能

群体集成智能是近年来在人工智能学科中迅速发展的一個领域。其核心思想是通过研究分散、自组织的生物群体智慧, 实现分布式、去中心化的智能行为, 主要应用于无人机、机器人集群的协同作业。作为新一代人工智能的重要方向, 自 20 世纪 80 年代的提出以来, 群体智能已经成为信息、生物、社会等多个学科领域的交叉研究热点和前沿。科技部在《科技创新 2030 “新一代人工智能” 重大项目指南》中, 明确将“群体智能”列为人工智能领域的五大持续攻关方向之一。

5. 自主智能无人系统

自主智能无人系统是一个新兴的跨学科领域, 其发展依赖于大数据、人工智能以及其他科学技术的不断进步, 旨在构建具备集成任务、运动规划、决策和推理能力的无人系统。这些系统具备自主性、智能性和协作性等特征。自主智能无人系统能够在没有或仅有有限人工参与的情况下完成各种通用任务, 其中典型的应用包括自动驾驶汽车、智能制造机器人, 以及用于陪伴或提供安慰的机器人等。

这一领域的前沿研究集中在推动自主系统在复杂环境中的智能决策和自主行动的能力。通过整合大数据和人工智能技术, 自主智能无人系统不仅能够适应

多样性任务的需求，还能够在执行过程中不断学习和优化。这使得这些系统能够更加灵活、智能地应对不同场景的挑战。

值得注意的是，这一领域的代表性应用，如自动驾驶汽车、智能制造机器人等，已经成为当今科技发展的亮点。这些自主智能无人系统的不断创新推动了科技的边界，并为未来智能化社会的构建提供了前所未有的机遇。

三、新一代人工智能技术在工业元宇宙领域应用和案例

新一代人工智能和工业元宇宙之间存在深刻的相互关系，具体而言，工业元宇宙为人工智能技术在工业领域赋能，而人工智能则为工业元宇宙的发展提供关键的技术支持。它们之间存在诸多交集与相互促进的方面，主要体现在数据驱动的智能化生产、智能决策与优化、数字化仿真与虚拟建模等方面。

（一）数据驱动的智能化生产

对于数据驱动的智能化生产，人工智能技术在这一过程中发挥关键作用，通过数据分析、模式识别和预测算法，可以实现生产过程的实时监控、质量控制和异常检测，从而提高生产效率和产品质量。具体应用案例有：

1. 基于云平台的高端电器连接件智能工厂

航天电器、航天云网及西门子联合打造了基于云平台的高端电器连接件智能工厂，通过智能网关将设备数据、产线数据及企业数据上传云平台，应用大数据挖掘与分析技术对质量、销售、采购、生产等数据进行挖掘分析，从而为工艺优化及企业的运营决策提供指导。应用VR技术对厂房、产线、物流进行建模，搭建虚拟工厂，实现远程监控，并利用仿真工具对产线布局设计、物流设计、节拍计算等进行仿真，搭建数字孪生模型，为产线提供优化指导。

2. 生产调度指挥中心

江铜贵冶以数智工厂为切入点，借助IoT连接和管理700多种共1万台设备。通过AI、动态规划、数据挖掘等算法与MES深度结合，成功打造了生产调度指挥中心。这不但有效的解决了铜冶炼配料场景中的各类复杂问题，同时也将预期经营成本降低20%。

（二）智能决策与优化

在智能决策与优化方面，工业元宇宙需要快速做出复杂决策以应对生产中的各种挑战，如生产计划调整、设备维护等。人工智能的决策支持系统可以通过深

度学习、强化学习等技术，从大量数据中学习并做出智能决策，实现生产过程的自动化优化和智能化管理。具体应用案例有：

1. 包钢冶炼监控系统

智能云网及南昌大学等高校携手打造包钢冶炼监控系统，通过 INDICS-Twin 数字孪生工具构建转炉炼钢冶炼虚拟场景，后接入真实的包钢过程数据作为驱动，构建几何模型、物理模型以及深度学习模型，实现数据驱动的物料配比优化、工艺参数优化以及冶炼成本优化。

2. 数字孪生热处理智能工厂

重庆新兴通用传动有限公司推出数字孪生热处理智能工厂，通过构建炉内温度场、渗碳分析等模型，以实现实时数据驱动模型运行，建立生产工艺参数预警机制，提高温度场及碳势分析的可控性，将炉内生产状态模型分析结果可视化呈现，使用户直观观察炉内的温度场变化和产物渗碳过程，从而提高产品质量和产品合格率。

3. 5G+废钢判级系统

济源钢铁在行业内率先打造了 5G+废钢判级系统，用机器视觉识别和 AI 远程判定代替人工现场作业，将废钢识别准确率提高到 90%。这不仅开启了废钢判定的智能新时代，而且每年预估节约成本 2000 万元。

（三）数字化仿真与建模

数字化仿真与虚拟建模方面，通过机器学习算法和大数据分析，可以建立高度准确的生产过程模型，实现虚拟建模和仿真。这些模型可以用于预测生产过程中的变化、优化设备配置和生产流程，从而提高生产效率和资源利用率。具体应用案例有：

1. 混流装配线

针对混流装配线运行机制复杂问题，采用仿真手段进行分析，先是基于 Sketchup 构建静态 3D 模型，还原生产线环境，确定场地、物料等约束条件；再通过传感器等实时感知物理工厂内的运行状态并转化为数字信息，并上传至虚拟工厂进行仿真和迭代优化；虚拟工厂对物理工厂实时监控，并根据优化结果对物理工厂的生产环节进行调控，见图 24。



图 24 常州“超级虚拟工厂”的显示大屏可以实时显示相关企业的生产信息

2. 数字人

随着生成式人工智能的发展，数字人将成为数字空间的主角，其应用领域可分为“体力—智力”和“幕后—台前”两个维度⁰，一方面是从体力到智力的提升，例如，美国开发的全新聊天机器人 ChatGPT 不仅在与人类的交流中展现出超越以往聊天机器人的智能水平，还可以被应用于撰写邮件、论文、剧本，制定商业提案，创作诗歌、故事等各类任务。另一个重要的方面是从幕后走向台前的飞跃。随着 3D 建模等呈现技术的不断完善，人工智能正逐渐具备走上舞台与人类进行沟通交流的能力。在过去两年中，虚拟偶像、虚拟主播、虚拟演员等大量涌现，与传统的虚拟数字人有所不同，“他们”无需事先准备好动画，也越来越不需要“中之人”进行实时操控，而是能够通过机器学习的方式自主进行互动与表演。在工业元宇宙场景中加入能够讲解和互动的数字人来代替人类讲解员和工作人员，能够降低人力成本、提高效率，为用户提供随时可及的帮助和指导，见图 25。



图 25 NVIDIA 推出承载着其“元宇宙”愿景的全新虚拟化身平台，由这个平台生成的“迷你玩具版黄仁勋” Toy-Me，能与人自然地问答交流

第二节 数字孪生技术

数字孪生，英文名为 Digital Twin（数字双胞胎），也被称为数字映射、数字镜像。最早由美国 DARPA 提出，到 2012 年 NASA 将其列为了驱动未来发展的关键技术之一，并提出定义：“数字孪生是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据，集成多学科、多尺度的仿真过程，它作为虚拟空间中对实体产品的镜像，反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程。”

一、数字孪生技术发展现状与展望

（一）数字孪生技术的发展现状和价值

数字孪生技术逐渐成熟，随着数字孪生技术的不断发展，越来越多的企业和研究机构开始关注和应用该技术。随着工业 4.0 时代的到来，数字化、智能化、网络化成为工业发展的新趋势，数字孪生技术作为实现工业数字化转型的关键技术之一，其可构建真实世界的数字映像模型，支撑工业元宇宙虚拟世界建设基础，工业元宇宙为制造业实际生产应用提供可交互的虚拟空间，数字孪生是创造虚拟世界和真实世界载体的关键，为工业元宇宙的发展提供了技术支持。

工业元宇宙应用场景不断拓展，随着工业领域的不断发展，工业元宇宙的应用场景也在不断拓展。数字孪生技术在工业元宇宙领域的应用范围不断扩大。从最初的航空航天领域，到现在的汽车、能源、制造等各个领域，数字孪生技术都得到了广泛应用。同时，数字孪生技术也在不断发展和完善，为工业元宇宙的发

展提供了更强大的技术支持，见图 26。



图 26 宝马的虚拟数字工厂，用虚拟指导现实，提高生产效率

李伯虎院士在《工业元宇宙：工业发展新阶段的赋能者》一文中提到“工业数字孪生是工业系统的数字化镜像。主要包括感知、建模、仿真、分析、诊断、预测、优化、执行等技术。它为工业元宇宙提供虚实交互、虚实协同提供技术支撑。并通过仿真反映相对应的工业实体装备的全生命周期过程。工业数字孪生是产品/产线产业链仿真、预测、优化、执行的重要手段。工业元宇宙则融合脑机接口、虚拟人、沉浸式交互等数字技术，催生数字孪生向沉浸式、交互式、智能化拓展，推进新数字孪生人机共融、以虚促实、以虚强实。”

数字孪生技术在工业元宇宙领域的应用价值主要体现在以下几个方面：

1. 提高工业生产效率

数字孪生技术可以对生产线进行实时监控和优化，提高生产效率。通过数字孪生技术，企业可以更好地了解生产过程中的问题和瓶颈，及时进行调整和优化，提高生产效率和质量。

2. 降低生产成本

数字孪生技术可以实现对生产过程的精确控制，减少浪费和成本。通过数字孪生技术，企业可以更好地了解生产过程中的成本构成和影响因素，及时进行调整和控制，降低生产成本。

3. 促进创新

数字孪生技术可以为工业元宇宙的发展提供技术支持和创新动力。通过数字孪生技术,企业可以更好地了解市场需求和用户反馈,及时进行产品设计和改进,促进创新和发展。

4. 提高安全性

数字孪生技术可以提高工业生产的安全性。通过数字孪生技术,企业可以实现对生产过程的实时监控和预警,及时发现和解决安全隐患,提高生产安全性。

5. 推动数字化转型

数字孪生技术是实现工业数字化转型的关键技术之一。通过数字孪生技术,企业可以实现生产过程的数字化、智能化和网络化,推动工业数字化转型的进程。

(二) 数字孪生技术的技术创新和展望

数字孪生技术在工业元宇宙领域的技术创新主要体现在对工业设备的精确建模、实时数据采集和处理、虚拟现实与增强现实技术的应用、人工智能与机器学习的结合以及跨平台协作与共享等方面。这些技术创新将为工业元宇宙的发展提供更强大的技术支持和创新动力。

1. 高精度建模与仿真

数字孪生技术通过对工业设备、生产线等进行高精度建模,实现对实际工业系统的精确复制。这使得我们可以在数字世界中对工业系统进行仿真和预测,以优化设计方案、提高生产效率等。

2. 实时数据采集与处理

数字孪生技术通过物联网技术,实时采集工业设备的运行数据,包括温度、压力、流量等。然后,利用大数据分析技术对采集的数据进行处理,以实现设备的实时监控、故障预测等功能。

3. 虚拟现实与增强现实技术

数字孪生技术结合虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,使得我们可以在虚拟环境中对工业设备进行操作和维修。这不仅可以提高工作效率,还可以降低由于误操作带来的风险。

4. 人工智能与机器学习

数字孪生技术结合人工智能和机器学习技术,可以对工业设备的运行数据进行深度学习,以预测设备的故障和性能退化。这可以帮助企业提前进行设备维护,

避免生产中断。

5. 跨平台协作与共享

数字孪生技术可以实现不同部门、不同企业之间的数据共享和协作。通过数字孪生平台，不同部门可以实时获取设备的运行数据，进行跨部门协作，以提高生产效率和质量。

二、数字孪生技术核心技术与技术特征

(一) 数字孪生技术的核心技术 (见图 27)

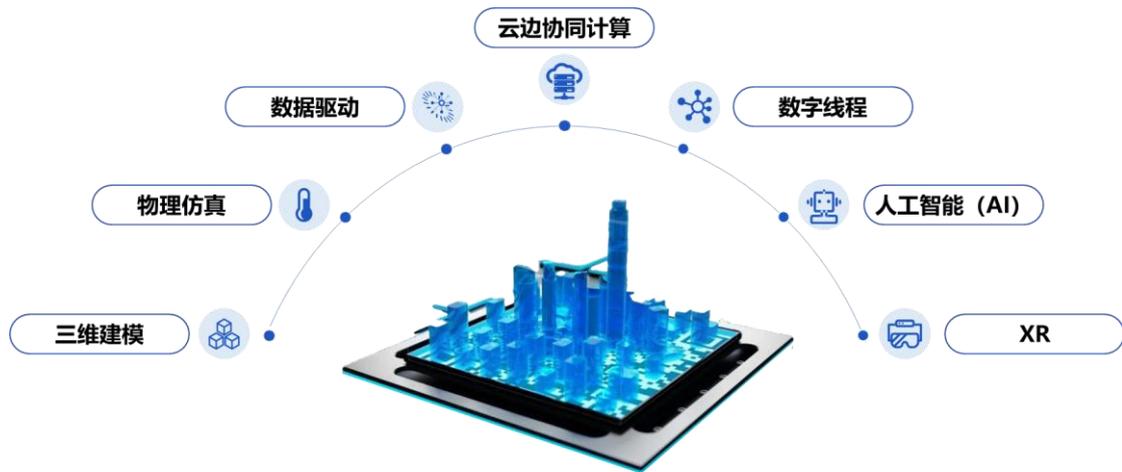


图 27 数字孪生技术的核心技术

1. 三维建模

三维建模技术是数字孪生的核心，通过使用计算机模拟和 3D 建模工具，将现实世界中的物体、设备、流程等以数字化的方式精确地构建出来。这种建模不仅包括几何形状、尺寸和位置等基本信息，还涉及材料属性、纹理、颜色等细节，以及物体之间的相对位置和运动关系。通过三维建模，数字孪生可以构建出与物理世界高度逼真的虚拟模型，为后续的仿真、优化和管理提供基础数据。

2. 物理仿真

物理仿真技术是数字孪生的重要组成部分，它利用数学模型和计算机模拟技术，对物理世界中的现象进行精确的再现和分析。包括力学、热学、电磁学等基本物理规律，还可以模拟复杂的化学反应、流体动力学等复杂现象。通过物理仿真，数字孪生可以预测物理系统的行为和性能，从而在设计、优化和控制过程中做出更加准确的决策。

3. 数据驱动

数据驱动技术是数字孪生实现智能化的关键，它通过机器学习、数据挖掘和深度学习等技术，利用历史数据来预测未来的趋势和行为。可以帮助数字孪生系统自动识别出有用的信息和模式，从而更加高效地进行决策。例如，在工业制造领域，数据驱动技术可以帮助预测设备的故障和维护需求，从而提高生产效率和降低成本。

4. 云边协同计算

云边协同计算技术是数字孪生实现大规模数据处理的关键技术之一。它通过将计算任务分配到云端和边缘设备，实现高效的数据处理和存储，从而支持实时数据处理和管理。这种技术可以处理大量的数据，包括传感器数据、图像数据、视频数据等，同时还可以实现数据的实时分析和可视化，为决策提供及时、准确的数据支持。

5. 数字线程

数字线程技术是数字孪生实现物理系统和数字模型之间双向映射和交互的关键。它通过将物理系统的各种数据流映射到数字孪生中，实现数字孪生与物理系统之间的双向映射和交互。这种技术可以帮助数字孪生系统实时监控物理系统的状态和行为，同时还可以将数字孪生的分析和决策结果反馈到物理系统中，实现物理系统和数字孪生之间的协同工作。

6. 人工智能（AI）

人工智能是研究使用计算机来模拟人的某些思维过程和智能行为的学科，主要包括计算机实现智能的原理、制造类似于人脑智能的计算机，使计算机能实现更高层次的应用。人工智能研究领域包括机器人、图像识别和语言识别。使用基于人工智能的数字孪生工具可以自动分析获取的工业数据，提供有价值的工业知识见解，对结果进行预测，避免潜在的风险。

7. XR

代表“扩展现实”，用来描述包括虚拟现实（VR）、增强现实（AR）和混合现实（MR）在内的多种现实性技术。虚拟现实通过戴上专用的头戴式显示设备，将用户完全沉浸在计算机生成的虚拟环境中，用户无法感知真实世界，而是被包围在计算机模拟的虚拟环境中，可以与该环境进行互动。增强现实通过将数字信息

叠加在用户对真实世界的视图上，来增强或扩展用户对环境的感知，用户可以看到真实世界，同时在屏幕上看到与其相关的数字信息、图像或虚拟对象。混合现实技术结合了 VR 和 AR 的元素，用户可以在现实世界中与数字孪生体互动，同时保持对真实环境的感知。

（二）数字孪生技术的技术特征（见图 28）



图 28 数字孪生技术的技术特征

1. 互操作性

数字孪生技术可以实现在不同的软件、平台和系统之间进行无缝的交互操作，使得物理实体和数字空间可以相互映射、动态交互和连接。这种互操作性使得数字孪生在各领域的应用中，能够实现不同软件工具、不同平台和系统之间的无缝集成和协同工作，提高工作效率和减少资源浪费。这种互操作性还使得数字孪生在实现跨领域的信息共享和协同创新方面具有巨大的潜力。

2. 实时性

数字孪生技术需要以实时的方式处理和更新数据，以便实现与物理实体之间的同步和交互。这种实时性使得数字孪生能够及时地反映物理实体的状态和行为，同时也可以将数字模型中的数据和信息及时地反馈到物理实体中，实现双向的互动和同步。这种实时性还要求数字孪生具备高性能的数据处理能力和快速响应速度，以确保数字模型与物理实体之间的实时互动和高度同步。

3. 可扩展性

数字孪生技术具有可扩展性，可以随着物理实体规模和复杂性的增加而扩展其数字模型。这种可扩展性使得数字孪生能够适应不同规模和复杂性的物理实体，

从而广泛应用于各种领域，如航空航天、汽车制造、医疗健康等。这种可扩展性还使得数字孪生能够在物理实体发生变化时，及时地更新数字模型，保持数字模型与物理实体之间的对应关系。

4. 保真度

数字孪生要求虚拟物体不仅要保持对实体几何结构的高度模拟，还要在状态、相位和时态方面进行模拟，尽力保证数字虚拟模型与物理实体之间的相似度。这种保真度使得数字孪生能够提供更准确、更可靠的模拟和分析结果，从而帮助用户做出更精确的决策。这种保真度还使得数字孪生能够实现更精细的控制和优化，例如在制造过程中实现实时的质量控制和工艺优化。

5. 闭环性

数字孪生中的数字虚拟体用于描述物理实体的可视化模型和内部机制，可以监控物理实体的状态数据，进行分析推理，优化工艺参数和运行参数，并实现决策功能。

6. 可见性

数字孪生能够实现机器操作的可见性，以及制造工厂或者机场中大型的互联系统的可见性。这种可见性使得数字孪生能够更好地理解和监控物理实体的行为和状态，从而提高生产过程的质量和安全性。这种可见性还使得数字孪生能够更好地发现潜在问题和瓶颈，实现及时的预警和干预。

7. 预测性

使用多种建模技术（基于物理和基于数学的），数字孪生模型能够用于预测机器未来的状态。这种预测性使得数字孪生能够提供更准确、更可靠的预测和分析结果，从而帮助用户做出更明智的决策。这种预测性还使得数字孪生能够在产品设计、优化和控制方面提供更多的支持和指导，实现更高效的产品开发和生产过程。

8. 双向性

数字孪生不仅是个静态的数字模型，物理产品和数字孪生之间虚实交融，实现双向的闭环信息反馈。更好地协调和优化物理实体和数字模型之间的交互，从而提高生产效率、降低能耗和提高产品质量。

9. 持续性

数字孪生和物理产品之间的互动是不间断的，贯穿产品的全生命周期。这种持续性使得数字孪生能够更好地管理和优化物理实体的全生命周期过程，从而提高生产效率、降低能耗和提高产品质量。这种持续性还使得数字孪生能够在产品的整个生命周期内提供更全面和准确的信息和支持，实现更高效的产品开发和生产过程。

三、数字孪生技术在工业元宇宙领域的应用与实现路径

（一）数字孪生技术在工业元宇宙领域的应用

目前数字孪生已经广泛应用于千行百业，陶飞教授就曾在论文中介绍了数字孪生在航空航天、电力、汽车、石油天然气、健康医疗、船舶航运、城市管理、智慧农业、建筑建设、安全急救、环境保护等 11 个领域。

1. 制造业

数字孪生技术可以帮助企业更好地管理产品质量，降低成本，提高效率。例如，通过数字孪生技术可以创建产品的虚拟模型，企业可以在虚拟模型上进行产品测试和验证，发现产品存在的问题和改进的空间，从而减少生产成本和提高产品质量。

2. 航空航天领域

数字孪生技术可以帮助航空航天领域的企业进行飞行器的设计和优化。例如，通过数字孪生技术可以创建飞行器的虚拟模型，企业可以在虚拟模型上进行模拟飞行和性能测试，优化飞行器的设计和性能，提高航空器的安全性和效率。

3. 能源领域

数字孪生技术可以帮助能源领域的企业进行油气勘探和开发。例如，通过数字孪生技术可以创建油气藏的虚拟模型，企业可以在虚拟模型上进行模拟勘探和开发，预测油气藏的储量和开发难度，从而制定更科学合理的油气开发方案。

4. 智慧城市

数字孪生技术可以帮助城市管理部门更好地管理和规划城市资源，提高城市治理效率。例如，通过数字孪生技术可以创建城市的虚拟模型，城市管理部门可以在虚拟模型上进行城市规划模拟，预测城市未来的发展状况，制定更科学合理的城市规划方案。

5. 医疗领域

数字孪生技术可以帮助医生更好地诊断疾病，提高治愈率，同时也可以让患者更快地接受治疗，缩短治疗时间。例如，通过数字孪生技术可以创建患者的虚拟模型，医生可以在虚拟模型上进行手术模拟，提高手术操作水平，还可以通过虚拟模型预测手术效果，制定更精确的治疗方案。

面向制造业全生命周期，数字孪生技术可以在研发设计、生产制造、运维服务、市场营销等发挥重要作用，以便帮助企业提高研发效率、生产效率、产品质量和服务水平，降低成本和提高市场竞争力。

（1）研发设计阶段

数字孪生技术可以在产品的设计阶段创建虚拟模型，进行计算机上的模拟和测试，以验证产品的性能和可靠性。设计师和工程师可以在产品开发早期发现问题并进行优化，降低后期修改的成本和时间。同时，通过数字孪生技术，可以实现产品创新设计和工艺流程优化，提高产品质量和研发效率。

（2）生产制造阶段

数字孪生技术可以模拟整个生产过程，优化生产流程和资源配置。有助于缩短生产周期、提高生产效率、降低制造成本并提高产品质量。同时，通过数字孪生进行生产过程的故障诊断和预测性维护，能提高设备的可靠性和维修效率，减少停机时间。

（3）运维服务阶段

在产品的运维服务阶段，数字孪生技术可以实时监控产品的运行状态和性能参数，预测产品的使用寿命和故障概率。有助于及时进行维护和维修，提高产品的可靠性和使用寿命。同时，通过数字孪生技术，企业可以实现产品远程监控和预测性维护，减少现场维护工作量和成本。

（4）市场营销阶段

在市场营销阶段，数字孪生技术可以构建产品的虚拟原型，将产品的外观、性能和特点展示给潜在客户。这可以提高产品的知名度和市场竞争力，吸引更多的潜在客户。同时，通过数字孪生技术，企业可以实现个性化定制和产品优化，满足客户的个性化需求并提高客户满意度。

（二）数字孪生技术在工业元宇宙领域应用的实现路径

构建数字孪生在制造业的全面应用需要从多个方面进行技术实现，包括数据

采集与融合、建立数字孪生模型、实现生产过程的数字孪生、优化供应链管理、实现产品质量控制、实现个性化定制以及持续优化和迭代等。同时需要考虑数据安全与隐私保护、技术架构与系统设计、人员培训与知识转移以及合作伙伴与生态系统等方面的问题。

1. 数据采集与融合

首先需要采集各种与制造业相关的数据,包括生产设备数据、工艺流程数据、产品数据等。并通过数据清洗和格式转换,确保数据的准确性和一致性。同时,需要建立统一的数据模型,将这些数据融合在一起,以便后续的分析 and 处理。

2. 建立数字孪生模型

利用采集的数据,利用计算机辅助设计(CAD)等工具,建立产品的数字孪生模型。该模型应包含产品的所有必要细节和特性,例如尺寸、材料、重量等。数字孪生模型需要能够模拟产品的生命周期,包括产品的使用、维护、报废等各个阶段。这需要进行建模和仿真。

3. 实现生产过程的数字孪生

在生产过程中,通过将生产设备、生产线、工厂等物理实体转化为数字模型,实现生产过程的数字化映射。结合生产数据和实时监控,对生产过程进行精细控制和优化。

4. 优化供应链管理

利用数字孪生技术,可以实时监控和预测供应链中的各个环节,包括原材料采购、库存管理、物流运输等。通过数字孪生模型,企业可以更好地了解供应链中的各种因素和环节,实现更加精准的预测和决策,提高供应链的效率和可靠性。

5. 实现产品质量控制

通过数字孪生技术,可以在生产过程中实现对产品质量的实时监控和预测。这种质量控制方法可以更准确、更快速地检测出产品的问题,提高产品质量和生产效率。

6. 实现个性化定制

利用数字孪生技术,可以根据客户需求实现产品的个性化定制。客户可以通过数字孪生模型对产品进行修改和定制,企业可以根据客户需求进行快速响应和生产。

7. 持续优化和迭代

根据实践应用的效果和反馈，不断优化数字孪生模型和数据分析算法，提高数字孪生的准确性和可靠性。同时，根据新技术和新需求的发展，持续扩展和更新数字孪生模型和应用。

四、数字孪生技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例

（一）国内优秀案例

1. 基于“5G+VR+数字孪生”的热处理工厂远程运维系统

以航天云网公司支持重庆新兴构建面向热处理工厂的远程运维为例，见图 29。借助数字孪生技术对工厂的内部环境进行 3D 模型制作，对工厂整套设备生产工艺流程进行全貌展示，并结合 VR 终端实现工厂环境、设备运行状态的远程可视化巡检。利用“5G+数字孪生”融合技术，进行工厂全貌三维模型展示，实现生产制造状态实时透明化。技术人员无须到达工厂现场，便可对工厂环境、设备运行状态进行远程、实时的安全巡检。提高了设备运维效率 25%；通过对工艺数据可视化展现及对产品质量实时分析预测报警，让作业人员能精准控制热处理过程的工艺，提升了产品合格率 5%；实时监控、远程异常处理，极大的减少了安全隐患，降低了安全事故发生率 95%。

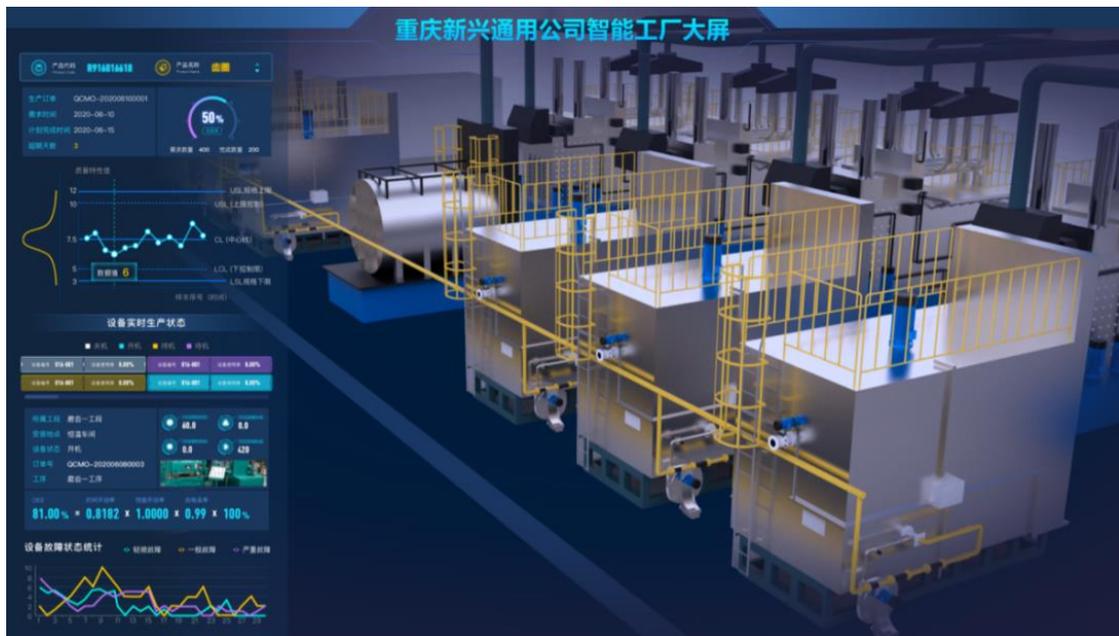


图 29 重庆新兴通用公司智能工厂大屏，利用“5G+数字孪生”融合技术，进行工厂全貌三维模型展示，实现生产制造状态实时透明化

2. 河南航天-数字孪生驱动的黑灯工厂

695 厂基于“5G+工业互联网”数字孪生黑灯工厂：依托边缘云平台的数字孪生工具，建设了数字孪生系统，实现产线、设备的孪生建模和数据连接，融合数字孪生、边缘云等多维度应用，打造了一套行业领先、模式先进的无人化生产加工系统，实现机床利用率大于 85%，一次交验合格率大于 99.9%，计划准时完成率大于 95%，产能在现有基础上翻番的建设目标，形成多品种小批量柔性混线、应急批产生产模式。

3. 盈科视控为华创微钻打造的数字孪生车间

基于自研的仿真技术，依托数字孪生，对微钻车间的自动化搬运设备、原料库、产品库、生产机床和行架等对多个实体对象仿真，利用 3D 引擎进行渲染建模，等比例复现车间原貌，实现三维可视化展示。通过传感器、视频采集的方式获取设备能耗、AGV 工况、稼动率、库存等信息，动态图标展示车间设备状况。同时在数字孪生平台首页，可实时查看微钻车间的产量、经济效益等系统分析数据，反馈车间的生产概况。数字孪生对车间设备的精准管控，使设备运维变得更加快速可靠，使自动化车间更加稳定，见图 30。



图 30 华创微钻车间数字化展示

(二) 国外优秀案例

1. 日本船舶技术研究协会船体结构高精度数字孪生模型

日本船舶技术研究协会在日本最大私人基金会之一的日本财团 (Nippon

Foundation) 支持下启动了“船体结构高精度数字孪生模型研发”项目,联合 6 家造船企业以及大学、航运公司、国家海事研究机构和日本船级社等单位共同参与,共同研究数字孪生技术,旨在把船舶海上航行时船体状态在网络空间再现,提高船舶安全性。通过创建一个船舶的网络物理系统,包含现实世界的信息,可以实现利用船舶结构数字模型同化船上测量数据,高精度地评估船舶的健康状况。船上测量包括遇到波浪的信息、船体张力和船舶在波浪中的运动,见图 31。

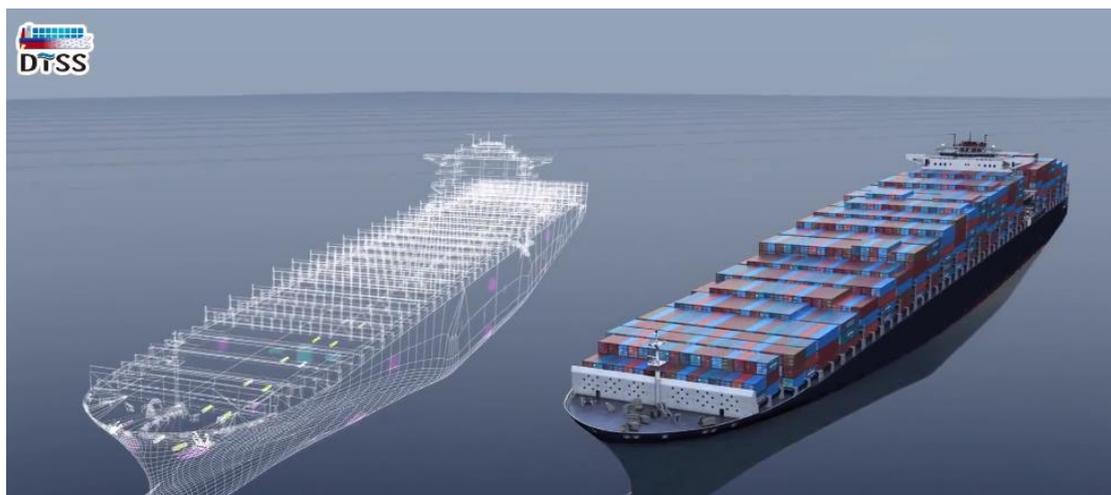


图 31 日本船舶技术研究协会船体结构高精度数字孪生模型

第三节 交互技术

一、交互技术发展现状与展望

(一) 交互技术发展现状

工业元宇宙是元宇宙的相关技术在工业场景的应用和拓展。工业元宇宙以工业互联网和智能制造为支撑,综合利用人工智能、大数据、人机交互等技术将现实工业环境中的研发设计、生产制造、市场销售、售后服务等环节和场景在虚实融合的空间中实现全面拓展,构建出一个 3D、可交互的、数实融合的智慧型空间,形成出全新的制造和服务体系,达到降低成本、提高生产效率、高效协同的效果。

人机交互技术在工业制造中的已经得到了广泛的应用,可以有效地提高生产效率、促进产品质量提升,降低人工成本。在人工智能、XR 等产业的高速发展下,人机交互正在发生前所未有的变革,重构了人类与设备、人与系统、人与人

之间的互动方式、定义了新的交互场景，带来了新的交互体验。给工业生产中的
人机交互带来革命性的创新，最显而易见的表现便是交互方式与交互设备的变革。

工业元宇宙是多模态交互技术的重要应用领域之一，多模态交互技术是指通过
多种不同的交互方式，如语音、手势、眼球跟踪、凝视等，来进行人机交互。
在工业元宇宙中，多模态交互技术可以使得人与机器的交互更加自然、直观和高
效。

在一些新型 VR/AR 的设备中，已经利用多模态的人机交互手段来进行更自然
的人机交互协作，见图 32。

			
苹果 Vision Pro	微软 HoloLens	PICO	亮风台 HiAR H100, G300等
眼球运动 手势 语音命令	手势 凝视 语音	手柄	触摸板 语音 手势 凝视

图 32 常见的人机交互方式

苹果的 Vision Pro 的三大交互方式，分别为眼球运动、手势、语音命令。
其中手+眼控制是主要的交互模式，眼动用来做目标选择，手势用来做确认。这
也是比较独特的采用无手柄交互的头显产品。

微软的 HoloLens 用户主要通过手势、凝视和语音三种交互方式来满足用户
的交互需要。凝视类比鼠标的作用，可以选择目标；然后通过手势和语音来与内
容进行交互。其交互组合有两种，一种是凝视+手势；一种是凝视+语音两种模式。

PICO 总体上还是以手柄的交互方式为主，自研的多模态追踪算法方案
Centaur，将场景跟踪与手势识别融合，手柄+裸手的交互模式的优化思路，解决
了手柄在遮挡情况下识别难的问题，为 XR 交互提供了新的思路。

亮风台 HiAR H100, G300 等设备主要通过触摸板、语音、手势、凝视等综合
的交互方式，通过自研的场景跟踪算法以及大空间定位算法，解决了虚实融合场
景中的目标定位问题。通过多模态的交互方式，满足不同工业应用场景下的需求。

（二）交互技术的技术展望

人机交互技术是工业元宇宙的重要的技术组成部分，未来人机交互技术将更

加的智能化、个性化、融合化,为工业制造的多场景应用带来更多的便利和效率。从整体发展趋势上,从现在人机协作的阶段过渡到人机融合阶段到最终的人机一体的话阶段。

机器向着更加智能化方向发展,人与机器的协作关系也向“人机融合”更进一步。在人机融合阶段,人类和计算机开始真正融合在一起,通过脑机接口将人类的意识与计算机连接起来,实现人类的意识和计算机的智能互相交流以解决更加复杂的任务。

再进一步会进化到人机一体化阶段,在这个阶段,人类和计算机已经彻底融合在一起,共同智能体。在执行上,人与机器可以同空间同时间合作;在信息传递上,人与机器进行无障碍的信息传递,并且可以共同学习进步。这种新的共同智能不仅可以完成更为复杂的任务,还可以自我学习和自我进化。

1. 从交互体验上,更强调的是“自然”的人机交互

在工业应用场景中,随着交互设备和交互技术的多元化,以及工业场景体验要求的升级,自然交互的需求越来越变得重要。自然交互技术是以人的**自然表现形式**为基础,目标是让人们不需要借助任何其他设备或进行特殊的操作,通过计算机、智能设备和人工智能技术等实现人机之间的交互。用户可以通过自己的语言、姿势、手势、眼动等方式进行与“机器”之间的交互,自然的交互技术将更加智能、更好地理解人们的需求。

2. 从交互模式上,更强调的是“多模态”的人机交互

交互方式呈现出由孤立到融合的趋势,根据不同交互通道的特点和场景适用性,人们广泛探索触控、语音、手势、人脸、眼动、脑机等多种交互方式的融合应用,以适应不同情景需要。多模态的交互方式具有多通道数据融合、自适应的特点。用多模态技术提高机器感知和认知人类意图的准确度,同时构建一个更加真实的虚拟空间,连接真实世界进行即时、多感官互动,从而满足工业中多场景应用的需求。

3. 从交互场景上,强调是在“虚实融合”的空间中的沉浸式交互

在工业元宇宙环境中,人机交互场景将由现实世界二维平面信息交互拓展到“虚实融合”的3D空间。现实世界中的人可以通过VR/AR等显示设备沉浸在一个虚实融合的环境中,可以在虚实的数字空间、虚实融合的空间,以及现实空间

之间做无缝切换。无论是从虚到实，还是由实入虚，人机交互的广度和深度都将超越目前的人机交互水平。

4. 从交互对象上，更强调的是多角色的交互

元宇宙时代的新型人机交互还呈现出交互对象数量增加、交互关系更加复杂的趋势。在虚拟的空间中，人可以借助数字分身将虚拟人作为自己的交互载体，与其他角色发生交互活动。在虚实融合空间中，则构建出“自然人-虚拟人-机器”多角色交互的场景。虚拟人与机器交互、虚拟人与虚拟人交互、机器与机器交互，多交互模式并存的状态。

二、交互技术的核心技术和技术特征

目前工业元宇宙中的通用交互方式包括语音交互、眼球跟踪、手势交互、触感、脑机接口等，见图 33。



图 33 工业元宇宙中的通用交互方式

(一) 核心技术

1. 手势交互

对各类交互方式比较而言，手势被认为是一种更自然、更有创意和更直观的方式，随着穿戴式智能设备中传感技术的不断演进，手势识别的基本条件也越发成熟。

在工业应用环境中，围绕智能头显或者智能眼镜，手势识别的研究对象是非

接触式的、能够使用户以徒手方式进行操作的空中手势，其本质是一种不给用户手势交互带来任何不便的自然人机交互方式。

2. 肢体识别

肢体动作识别是一种人机交互技术，通过使用传感器、标记、摄像头算法等自动检测和识别人类肢体动作。肢体动作可以是任何人类肢体的运动，包括手臂、手、腿和身体的运动。它的目的是将人体的肢体运动转换为计算机可读的数据，并通过计算机算法和模型进行分析和处理，以确定正在执行的特定动作。

在工业应用中，通过外部摄像头或者动捕设备可以不知人体全身的动作和姿态数据，提供更全面的交互数据的输入。

3. 语音识别

语音识别技术是将人的语音转化为计算机可理解的形式，是人机自然交互技术中的关键环节。语音识别技术有着广泛的应用，比如在智能家居、机器人、车载音乐系统、翻译设备、语音导航等领域。

语音识别的精度和速度取决于实际应用环境，但在安静环境、标准口音、常见词汇场景下的语音识别率已经满足了常规的应用要求。但对于强噪声、超远场、强干扰、多语种等场景下的语音识别还需要很大的提升。

4. 眼球跟踪

眼动跟踪法是一种用于研究人类视觉过程的技术。它通过测量眼睛在观察过程中的运动轨迹来获取有关个体对视觉刺激的注意和兴趣的信息。可以反映人的潜意识。这种技术可以用来研究人类在不同情境下的视觉注意、视觉搜索、阅读和认知过程等方面的行为。

5. 脑机接口

近年来，脑机接口（BCI）作为一项变革性的新兴人机交互技术引发了研究热潮，与感官互联有着密切的联系。迄今为止脑机接口技术主要分为输入式 BCI 与输出式 BCI 两类，输入式 BCI 能够将人类大脑的中枢神经系统产生的感知、认知转化为指令信号，提供给外部机器设备进行通信和控制；输出式 BCI 则指从外部设备或机器向大脑输入电、磁、光等刺激或神经反馈。其本质都是在记录与语音或注意力等功能相关的神经活动，翻译成机器可以读懂的语言。随着工程技术的进步，脑机接口技术不断发展，其可靠性和易用性也在不断提高。

（二）技术特征

工业元宇宙是智慧、协同、开放、服务、互联的复杂数字工业经济系统。智能交互通过实现以人为本的自然交互和体系设计，为构建虚实共生的工业元宇宙环境，搭建了一座跨越人与系统间鸿沟的桥梁，在技术方面有以下几个特征：

1. 时空融合

在工业元宇宙应用中，所有的虚拟对象、数字内容都是和现实世界是相关联的。在感官上有更真实，更自然、更沉浸感的交互体验；在协作方式上可以实现跨时间，跨空间、跨媒介的多人、多终端的共享。

工业元宇宙将可以通过数字孪生即时将现实实际在虚拟世界中复刻；通过构建亲临现场感的远程作业模式，提升生产经营者对作业环境的实时感知，时空界限变得模糊；可以实现多用户沉浸式远程生产监控、作业操作指导等。

工业元宇宙可以通过对现实世界的映射、化身等技术，支撑企业打造多种虚拟化形象、虚拟场景，打破时空界限与用户进行更高效的交流，更精准地获取用户产品使用信息。

2. 模态融合

多模态人机交互技术融合了多种输入方式，通过将不同输入方式的数据进行融合和处理，实现更准确、智能的交互响应，提高用户体验。用户可以根据自己的喜好和习惯选择最方便的交互方式。

在自主交互层面，大模型和认知智能的蓬勃发展赋予元宇宙超智能演化的能力，开启多元平行世界，为不同的人创造个性化的工业元宇宙的工作现场。多模态人机交互技术可以根据用户的交互行为进行自适应学习，逐渐了解用户的习惯和需求，提供个性化的交互服务。

在虚实交互层面，用户可以使用数字分身支撑跨时空自然交互交流，多层元宇宙技术变革开启深度沉浸式交互体验，达到全场域的多模态融合。

3. 人机融合

工业元宇宙是未来制造工厂数字化下一阶段的展现形式。人机融合将是制造系统的组成单元，并且与其他的未来制造技术和模式相互融合发展。人类和计算机相互协作，相互融合，将各自的优势结合起来，完成复杂的任务。

在人机交互过程中，经过输入、信息处理、输出、反馈过程，形成人机交互

的闭环。“人”能够及时地把信息传递给工业设备或者系统；而反向，工业设备或者系统也可以把信息及时反馈给“人”，并且人能够根据反馈的信息做出判断和执行。

三、交互技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径

（一）智能交互技术在工业元宇宙领域的应用

1. 采购供应

（1）供应商管理

远程进行供应商的预审、体系评审、质量问题解决、供应链协调，对供应商现场操作进行过程的记录、定期查看等。提高供应商质量、实现全面质量管理。

（2）工程建造

对工程现场进行建造/制造过程的全时段监督，既有现场局部过程，也有全局视角。同时可通过对无人机、摄像头画面进行 AR 信息叠加，简单明了知晓建造的关键点。

2. 教育培训

（1）实物叠加培训

在实物上直接叠加之前教师的所有操作过程步骤、注意事项、参考位置、参考视频等，指导参训人员快速熟悉培训内容，减少设备组装拆装时间、提高培训效率与质量。

（2）远程教学

使用 AR 远程协作，满足高危险、限制性、远程的现场区域的实时讲解，降低培训的成本、扩展参训人员的参训场景、提高培训的质量。

3. 生产制造

（1）装配指导

在实物上直接叠加增强装配过程中的数字内容，如三维部件、装配位置、装配方向、注意事项、使用工具等，完成定制化产品、新产品试制、员工培训的装配指导。

（2）作业单执行

使用 AR 硬件，解放一线作业人员双手：获取工作单、获取工作单的相关的文档、提示过程中的重要信息、提示作业过程的设备、环境的告警等。

4. 运营维护

(1) 作业记录

使用 AR 硬件，解放一线作业人员双手：获取点巡检计划、记录点巡检清单、记录执行中发现的问题，展示重要提示信息等。

(2) 数字化辅助

使用 AR 眼镜上的图像传感器、红外传感器等外设收集数据，进行 AI 判断，与预期数据进行自动化比对，并提示现场人员，从而提高现场作业的效率和质量，保证安全生产。

5. 客户服务

(1) AR 远程专家指导

实时建模产生的客户现场的数字孪生，将服务专家的操作指示直接融合于客户现场，缩短故障处理时间、减少差旅成本、提高一次性修复率。

(2) AR 客户自服务指导

客户依据自服务手册的 AR 应用，直接在实物上叠加常见故障的处理、耗材替换等，甚至在专家远程指导下进行自服务。从而减少客户的停机时间，提高客户满意度。

6. 市场营销

(1) 产品说明书

对传统纸质的产品说明书进行变革，使用 AR 技术直接在实物上进行数字内容的叠加增强，使得产品相关说明书更易客户理解。

(2) AR 展示沙盘

对传统展示沙盘，产品展厅进行变革，使用 AR 技术直接在沙盘或展厅环境中进行数字孪生内容的叠加增强，使得产品、园区展示更具真实感和科技感。

(二) 智能交互技术在工业元宇宙领域的实现路径

智能交互技术在工业元宇宙领域的应用需要从以下几个方面入手。包括搭建基于工业元宇宙的“端云一体”的人机交互平台、确定应用场景和目标、现场场景数据采集、人机交互系统开发等几个步骤。

1. 搭建基于工业元宇宙的“端云一体”的人机交互平台

针对目前国内工业网互联网智能人机交互系统的现状，完成“端云一体”的

基础能力建设，鼓励开展虚拟/增强现实头戴显示技术，以及三维空间识别和注册定位技术、手势识别、语音识别等基础技术的构建；建设工业元宇宙智能交互云平台基础能力，提供全面基础业务编辑、内容生成、内容管理等工具；完善基于工业 AR/VR 的数据管理和处理能力，在云端构建基础的空间互联网数据管理系统，包括数据采集工具链，三维场景采集能力等。

2. 确定应用场景和目标

根据交互场景的不同，要确认任务的类型，比如是单人的交互任务，还是多人的交互任务，是小空间的交互任务，还是大空间的交互任务等；现场环境的基本状态，确认现场物理环境，包括光照情况、噪声情况、环境的纹理情况、参与人员的多少情况等。现场业务调研和分析：了解整体业务流程和交互目标。

3. 现场场景数据采集和处理

数据采集：根据具体的应用场景，进行现场环境的数据采集。包括现场的 3D 场景的模型数据、现场的声音数据、现场的视频和图像数据。

数据处理：利用建模软件或者相关的 3D 重建的算法实现对于现场 3D 结构的重建；对于声音数据进行入库。

4. 技术选型和确认

根据交互任务，选取不同的技术方案。主要包括交互设备的选型，是采用智能头盔，还是智能眼镜，还是平板电脑等；交互技术的确认，是采用哪些多模态的交互方式，交互信息的采集和输入方式等。

5. 人机交互系统开发

交互系统和外部数据的接口对接：主要对接工厂的信息化系统，以及 IoT 的设备，或者交互系统外部的数据，打通人机交互的数据通道。

交互界面的设计：根据任务的不同进行交互界面的设计和开发。注意交互设计的简约性；具备清晰的导航以及反馈和反应速度；遵循无障碍设计原则，具备良好的可访问性，可以帮助所有用户都能够方便地访问和使用产品。

交互业务开发：根据需求进行交互任务的开发工作。

四、交互技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例

（一）国内优秀案例

1. 国家电网建德供电公司数字运维

以国家电网建德供电公司为例,在其日常作业中,面临工作人员往返路程远、合格员工少、数据查询慢、监控记录难、信息化程度低等多重困难。利用元宇宙技术与产品服务于建德市供电公司电网巡检需求,提供了电网巡检 AR 远程协作系统解决方案。围绕 AR 智能终端,通过场景识别、手势识别、语音识别等交互技术,构建了 AR 远程通信与协作系统,在远程巡检、点检等场景中,协助工作人员快速检测设备状态,并连接数据系统高效统计分析,提升工作效率。

2. 上海汽车集团股份有限公司 AR 车辆手册

上海汽车集团股份有限公司 AR 车辆手册升级现有的汽车说明方式。“AR 车辆手册”的核心是围绕图像识别与定位技术,针对特定车型制作的模板,来开发的移动端场景识别引擎。基于不变性特征描述子方法,利用语音和触摸交互方式,用户可以方便地和系统进行交互。AR 车辆手册系统动态详解汽车的构造与功能,让用户快速上手并轻松获悉汽车“隐藏”技能,方便学习与处理突发问题。

3. 三一重机远程排放

三一集团引进 AR 技术,将 AR、实时音视频、4G/5G 无线通信等技术相融合,为处于不同地点的一线现场人员和服务中心专家、售后团队成员建立一体化的 AR 远程交互协作空间,搭建售后服务体系故障解决、产品改进与培训的数字化赋能平台。

传统客户服务模式下,服务工程师需要反复奔赴现场,花费大量时间清除故障;而服务工程师还会因为经验不足,需向异地专家寻求技术支持,而异地专家无法获取现场“第一视角”、导致维修过程与动作不可视,导致两者沟通不畅继而难以高效指导排故。

三一工程师遇到难以解决的故障时,借助 AR 技术,利用 AR 场景定位以及交互技术,识别故障部位,实时检索相关案例,并将现场“第一视角”情况传输至后方,由专家指导排故,即时判定故障责任,提高服务工作效率,见图 34。



图 34 通过“工业 AR 远程协助系统”，一位技术专家可以在后方通过大屏幕，指导千里之外的人员维修设备

4. 陕汽重卡落地“远程 SQE”

如何提高供应链评审效率，解决工业现场数字化难题？成为陕汽重卡面临的一大考验！主机厂 SQE 不能前往供应商生产现场，远程线上评审逐步替代现场评审。陕汽重卡引入技术和产品，率先采取远程协作供应商评审，采用事前文件送审、线上远程评审的方式，提升供应商管理及问题分析的工作效率、降低管理成本。截至目前，AR 远程协作已覆盖陕汽重卡近 200 家供应商企业，见图 35。



图 35 亮风台助力陕汽重卡落地“远程 SQE”，开启供应商管理全新工作方式

5. 陕西水电 AR 智能运维

国能集团旗下水电站分布广、距离远、设备种类复杂，而且往往处于交通不便利的山区，很多工作开展耗时耗力，包括技术监督、故障维修、整改验收、项目验收等。传统水电运维方式在路上浪费了大量时间，差旅和人力成本很高。而现场运维管理也是困难重重，存在监督不到位、消极巡检、无法及时准确掌握现场设备运行状况和缺陷处理困难等问题。

通过 AR 远程多人交互和协作系统应用让后端管理人员和专家进行准确高效沟通。还将双方信息系统深度打通，形成融合，实现设备信息可视化和运维过程全记录，一举多得，解决了上述传统水电运维过程中的诸多困扰。

在设备信息可视化方面，AR 远程智能运维系统能够实现与电力系统对接，现场运维人员通过佩戴亮风台 AR 智能眼镜 HiAR G200，可解放双手、快速识别设备，在作业现场直接充分获取设备出厂信息、维护历史记录、运维日志等数字化信息，对电力设备运行系统数据进行整体分析判断，实现运维过程中及时、就地的可视化信息支持，辅助完成设备故障的高效处理，保障水电设备的安全稳定经济运行，见图 36。



图 36 陕西水电 AR 智能运维，信息可视化，设备信息尽收眼底

6. 宁德核电站 AR 智慧项目

宁德核电站积极响应国家能源数字化转型的政策，其 AR 智慧项目将前沿的 AR 和 AI 技术与核电站场景进行深入结合，运用全球首款一体式 5G 工业 AR 智能眼镜 X-Craft 代替原有的纸质化单据，深入数字化转型，在核电检修、巡检作业、安全监管、设备验收等环节实现标准化作业指导、无纸化巡检、远程监管与指挥、远程验收等场景，目前已经产生较大经济、社会价值。经济方面，AR 技术将使整体工作效率提升 25%，设备运行时间延长 20%，误操作减少 30%，流程优化 20%，并降低各种作业风险，减少至少 100 万的风险损失，有效提升一线运维管理能力。

社会方面，打破“卡脖子”痛点，本案例和产品所有核心器件全国产化，实现自主可控。系统搭载国内领先的 YodaOS 系统，封装语音 AI、视觉 AI、人机交互等核心底层系统应用，真正做到全栈技术自研，彻底解决关键核心技术受制于人的问题，推动自主创新能力再上新台阶，实现“从 0 到 1”的原创成果。

第四节 3D 引擎技术

在当今不断推进数字化和虚拟化的时代，3D 引擎正逐渐成为连接现实与虚拟、创造沉浸式体验的核心技术之一。3D 引擎，这个源于游戏设计领域的技术平台，在过去几十年迅猛发展的驱动下，已经不再局限于娱乐游戏的制作，而是涉足了教育、建筑、医疗、设计、电商、影视制作、工业、军事模拟以及更为广阔的虚拟世界建造等各个领域。随着全球化信息时代的深入发展，3D 引擎的重要性显得愈发突出，它提供了一个能够精准模拟现实世界物理规律，实现高度自由创意表达的数字创作空间，成为了信息技术产业链中的重要组成部分。

工业元宇宙作为一个新兴的概念，正在利用 3D 引擎重塑产业结构，迎接数字经济和虚拟现实技术的新浪潮。工业元宇宙是指将先进的信息技术，特别是 3D 可视化技术、增强现实（AR）、虚拟现实（VR）和混合现实（MR）技术应用于工业领域，建设互动性强、体验感丰富的虚拟工业空间环境。通过创建高度仿真的数字孪生体，企业能在这些虚拟环境中进行产品设计、模拟运营、远程维护、培训教育等一系列活动，极大提高了设计效率、降低了生产成本，并创造了全新的商业价值。

然而，随着国际大厂如 Unity 和 Unreal 引擎在全球市场的强势布局，国内 3D 引擎的发展面临着艰巨的挑战和激烈的竞争。Unity 在中国设立合资企业的事件，不仅为其在中国进一步渗透市场铺平了道路，而且也给国内 3D 引擎产业的发展敲响了警钟。在全球信息技术竞争加剧的背景之下，国产 3D 引擎如何锐意创新，坚定自主研发，把握政策与市场机遇，形成具有国际竞争力的技术优势和市场话语权，成为一个迫切需要思考和解决的战略课题。

一、3D 引擎技术发展现状和展望

（一）3D 引擎技术发展现状和价值

3D 引擎技术在工业元宇宙领域的发展现状呈现出积极的趋势。随着元宇宙

概念的兴起和技术的不断发展，3D 引擎技术在工业元宇宙领域的应用越来越广泛。目前，许多企业已经开始尝试将 3D 引擎技术应用于工业元宇宙领域。例如，一些汽车制造商已经开始使用 3D 引擎技术来模拟汽车的生产过程，从而优化生产流程和提高生产效率。此外，一些建筑公司也开始使用 3D 引擎技术来模拟建筑物的设计和建造过程，从而优化建筑设计并降低建筑成本，见图 37。



图 37 3D 引擎技术用于模拟建筑物设计

同时，随着计算机硬件性能的提升和实时渲染技术的发展，3D 引擎能够在实时中渲染出逼真的场景，为用户提供更加流畅的体验。这些技术对于游戏、培训、设计等领域有着巨大的潜力，也将在工业元宇宙领域发挥重要作用。

然而，3D 引擎技术在工业元宇宙领域的发展也面临着一些挑战。例如，需要不断优化技术性能以适应大规模应用的需求，同时也需要解决跨平台兼容性和数据安全等问题。

（二）3D 引擎技术的技术创新和展望

3D 引擎技术在工业元宇宙领域的应用价值非常显著，它不仅可以优化生产流程、提高产品质量、降低生产成本，还可以增强企业竞争力并实现跨平台协作。3D 引擎技术在工业元宇宙领域的应用价值主要体现在以下几个方面：

1. 优化生产流程

通过 3D 引擎技术，企业通过模拟优化生产流程，实现生产过程的可视化和监控，并支持远程写协作和沟通，同时还支持智能化决策。

2. 提高产品质量

3D 引擎技术可以帮助企业进行产品设计和优化，从而提高产品质量。通过虚拟环境中的模拟和测试，企业可以发现并解决产品设计中的问题，避免在实际生产过程中出现错误，提高产品的可靠性和稳定性。

3. 降低生产成本

通过虚拟化的生产环境，企业可以在实际生产前进行模拟和优化，从而减少实际生产过程中的成本损失，降低生产成本。

4. 增强企业竞争力

3D 引擎技术可以帮助企业构建高度逼真的虚拟生产环境，提高企业的形象和品牌价值，增强企业的竞争力。此外，通过 3D 引擎技术，企业可以为客户提供更优质的产品和服务，吸引更多的客户，扩大市场份额。

5. 实现跨平台协作

3D 引擎技术通常支持多个平台，如 PC、游戏主机和移动设备，这使得企业可以在不同的设备上进行虚拟化的生产和协作，提高了项目的可扩展性和灵活性。

二、3D 引擎技术核心技术和技术特性

（一）3D 引擎核心技术（见图 38）



图 38 3D 引擎核心技术

1. 图形渲染技术

图形渲染技术是 3D 引擎的核心技术之一，负责将 3D 模型转换为可以在屏幕上显示的 2D 图像。这个过程设计多个步骤：首先是几何处理，包括模型的变换、

光照计算和视图转换；接着是光栅化，将几何图形转为像素阵列；最后是像素处理，包括纹理映射、遮挡剔除、着色、光影处理等。现代图形渲染还会使用多种高级技术，如全局光照、实时阴影、反射、抗锯齿、深度模糊等，为了提升性能和效率，渲染引擎会使用图形处理单元（GPU）对这些计算密集型的任务进行加速。得益于 GPU 性能的快速发展，实时高仿真渲染大规模普及是图形渲染技术的发展趋势。

2. 物理模拟系统

物理模拟系统在 3D 引擎中提供了对现实世界规则的模拟，如碰撞检测、刚体动力学、软体动力学、流体动力学、布料模拟等。这一系统的精确度直接影响到虚拟世界的真实感和互动性。在工业应用中，物理模拟是实现虚拟原型测试和仿真的必不可少的工具，用于评估产品在真实世界中的性能。

3. 动画技术

动画技术使得 3D 模型能够进行各种动作。在 3D 引擎中，动画技术包括了骨骼动画、形态目标动画、逆向动力学等多种技术。这些技术使得角色和物体可以在 3D 环境中自然地移动和互动。在工业领域，这些技术可以用来模拟机械装置的运动，或者在 VR 培训系统中模拟人物动作等。

4. 场景管理

场景管理是指 3D 引擎对于虚拟世界中的环境、物体、光照等元素进行组织和优化的能力。这包括了场景图、空间分割技术以及遮挡剔除技术等。场景管理技术对于保证复杂场景下的渲染性能至关重要。

5. 音视频处理

3D 引擎中，音视频处理技术负责生成与场景中发生的时间匹配的音效和视频效果。这包括了声音效果的 3D 空间化、环境音的模拟、音效与物理时间的同步等。在工业元宇宙中，逼真的环境声音和适宜的背景音乐可以大大提升用户的沉浸感。

6. 用户交互

用户交互式 3D 引擎中的一个重要组成部分。它涉及输入设备（如键盘、鼠标、触控屏、运动感应器）的支持和处理，以及用户界面（UI）的设计和实现。对于工业元宇宙应用而言，直观且高效的交互设计可以极大地提升用户体验，

特别是在模拟训练和在线协作方面。

7. AR/VR 技术融合

AR（增强现实）和 VR（虚拟现实）技术的集成对于现代 3D 引擎来说日益重要。这些技术提供了新的交互和展示方式，为 3D 应用增加了沉浸感和新颖性，符合元宇宙发展的方向。3D 引擎必须能够支持头戴显示器、追踪设备和手势控制等硬件设备，以及适配这些设备的特定渲染技术和性能优化。

8. 网络同步与多用户交互

多用户参与和网络同步对于在线游戏和工业远程协作而言至关重要。3D 引擎需要保证在不同网络条件下的数据同步和实时性，支持多用户协作和竞争，处理网络延迟和数据包丢失等常见网络问题。

9. 集成开发环境（IDE）

一个优秀的 3D 引擎提供的集成开发环境是开发者实现创意的重要平台。IDE 通常包括可视化编辑器、代码编辑和调试工具、资源管理器和发布工程管理等，它们的设计和性能直接影响到开发过程的效率和便捷性。在工业应用中，这意味着快速的从概念到产品原型的转换，以及可靠和高效的开发流程。

（二）3D 引擎技术的技术特征（见图 39）

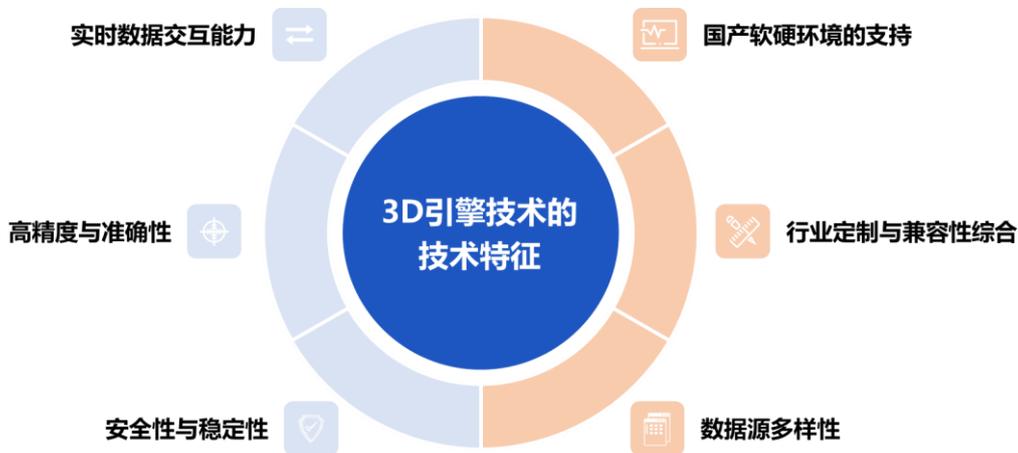


图 39 3D 引擎技术的技术特征

1. 实时数据交互能力

工业级 3D 引擎需要能够处理和响应实时数据，这对于确保虚拟环境与现实世界之间的同步至关重要。例如，在数字孪生技术中，实时数据交互确保虚拟模型能够反映出物理设备的即时状态。这也使得 3D 引擎在远程监控、预测维护等场景下能够提供及时的视觉反馈和决策支持。

2. 高精度与准确性

工业应用对 3D 视觉内容的精度和准确性有极高的要求，因为它们直接关系到后续生产过程和产品的性能。3D 引擎必须能够以极高的精细度渲染物体和场景，并支持精确的几何计算。从产品设计模拟到制造过程的控制，精度和准确性都是工业元宇宙不容妥协的标准。

3. 安全性与稳定性

工业级应用中的 3D 引擎必须极具安全性和稳定性。在涉及关键基础设施和敏感数据的情况下，任何安全漏洞都可以导致严重的后果。此外，稳定性是工业级 3D 应用的一个核心需求，因为任何系统崩溃或异常都可能产生昂贵的停工成本。因此，工业级 3D 引擎的开发必须遵循严格的质量保证流程，并实施全面的安全措施。

4. 数据源多样性

在工业环境中，3D 引擎需要能够整合和处理来自各种来源的数据，包括传感器数据、设计文件、操作历史记录等。它必须能够支持多种数据格式的输入和转换，并将它们无缝融合到虚拟环境中。数据源的多样性要求 3D 引擎具有足够的灵活性和可扩展性，以应对多变的工业需求。

5. 行业定制与兼容性综合

为了满足特定行业的需求，工业级 3D 引擎必须提供定制化的功能和优化。例如，一款专门为汽车行业涉及的 3D 引擎可能需要在车辆碰撞模拟方面有特殊的优化。此外，兼容性也是企业选择 3D 引擎的一个重要考虑因素，引擎需要能够与企业现有的 IT 架构和工具链无缝对接。

6. 国产软硬环境的支持

在国产化趋势加强的今天，工业级 3D 引擎需要考虑与国产软件和硬件环境的兼容性。从操作系统到硬件平台，国产 3D 引擎应当优先支持本土的技术生态系统，减少外国技术和产品的使用，提升信息安全，同时也能够推动国产技术产业的发展。这需要引擎开发者紧跟国内硬件技术的进展，并积极适应国内软硬件的更新换代。

三、3D 引擎技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径

（一）3D 引擎在工业元宇宙中的应用场景

在工业元宇宙的构建中，3D 引擎作为连接现实与虚拟空间的核心枢纽，其应用场景日益丰富多样，以下是几个典型的应用实例：

1. 设计与仿真

工业设计是一个负责且费时的过程，使用 3D 引擎可以建立数字化的产品模型，并通过虚拟仿真测试产品的性能。这使得设计师能够在产品实物制作之时，就对设计方案进行评估和优化。例如，汽车行业就广泛采用 3D 引擎进行车辆设计和碰撞测试，减少了实车测试的次数和成本。

2. 生产管理与维护

3D 引擎可以用来构建生产线的数字孪生模型，从而实现生产过程的可视化管理。生产线上各种设备的状态能够实时同步到虚拟模型上，通过检测数据来预测设备的维护需求，提早安排维护工作以避免生产中断。此外，借助 3D 引擎，复杂的生产流程可以被有效地模拟和优化。

3. 培训与教育

3D 引擎为工业培训提供了一个安全无风险的环境。使用者可以在完全符合真实物理特性的虚拟空间内进行操作练习，如模拟工厂设备操作流程，增强操作手的技能与反应能力。这种虚拟培训可以大幅减少实际操作中的错误发生，提升工作效率。

4. 安全演练与应急管理

通过 3D 引擎模拟的虚拟环境可以进行消防安全、紧急疏散等安全培训演练。在模拟的环境中，可以设定各种突发情况，让工作人员了解在紧急情形下应当如何快速并且正确地作出反应，提升紧急事件的应对能力。

5. 虚拟展览与销售推广

3D 引擎还可以用来创建逼真的产品展示平台，实现产品的在线展览，见图 40。借助虚拟现实技术，顾客可以在线上虚拟展厅中近距离地观察和体验产品，极大地丰富了销售手段和顾客的购买体验。例如，房地产行业通过 3D 引擎构建虚拟看房系统，提供比传统平面图更为直观的空间感受。



图 40 成都历史名人虚拟博物馆

通过以上实际应用场景的分析，我们可以看到 3D 引擎在工业元宇宙中的广泛应用前景以及潜在的价值所在。未来，随着技术的不断创新和完善，结合特定行业场景的深度定制与专业化开发，3D 引擎在工业元宇宙领域的实践将会更加多元和高效。

（二）3D 引擎技术在工业元宇宙领域应用的实现路径

在实现 3D 引擎技术在工业元宇宙中的应用与实习过程中，需要通过一系列有序的步骤确保项目的成功。以下是实施路径与工程应用的主要方面：

1. 引擎选择和技术评估

在项目启动时，选择合适的 3D 引擎是关键步骤之一。这需要针对项目的具体需求，对比各种引擎的性能指标、兼容性、易用性、支持与维护等方面进行综合评估。在工业元宇宙项目中，重要的评估因素还包括引擎的实时渲染能力、物理模拟的准确性，以及是否支持大规模数据的处理和国产化软硬件环境等。

2. 3D 内容创作与融合

创建逼真的 3D 内容是构建工业元宇宙的基础。开发团队需要利用 3D 引擎内置的工具和外部软件创建高质量模型、精细材质和复杂动画。此外，为了提升效率，还需要进行内容的重用和共享，并实现不同内容源之间的融合，例如结合现有的 CAD 数据和 3D 扫描技术生成的模型。

3. 交互设计与用户体验优化

为了使工业元宇宙的用户能够直观地理解和操作，需要设计易于使用的交互界面并实现流畅、自然的用户体验。交互设计包括设备操作的有效性、菜单布局的合理性，以及反馈系统的即时性。用户体验的优化则涉及到提升视觉表现、优化操作流程和确保系统响应速度。

4. 系统架构开发与实施

当完成上述准备工作后，就需要开始实际的系统架构开发。这包括搭建端到端的工程框架、集成后端服务、确保数据流畅传输、加强系统的扩展性和可维护性。在此过程中，不断测试和优化是确保系统稳定运行的关键。

5. 测试与部署，维护与安全保障

一个复杂项目的测试不应被忽视，包括功能测试、性能测试、用户接受测试（UAT）等。在系统部署后，要对其进行持续的监控和维护，这包括处理可能出现的技术问题、更新内容和优化系统性能。同时，确保系统的安全性是至关重要的，这涉及到数据加密、访问控制以及对抗网络攻击等措施。

6. 员工培训与技术支持

为确保工业元宇宙顺利运营，员工需要接受有关 3D 引擎和虚拟环境交互的专业培训。技术支持也是不可或缺的，这包括提供文档、在线帮助以及专线支持服务等，以帮助用户迅速解决使用中的疑问或问题。

7. 项目持续改进与更新

随着技术的进步和市场的变化，工业元宇宙的应用也需要不断地进行改进和更新。这包括更新 3D 内容、引入新的交互技术、升级系统架构或者扩展服务功能等。通过持续的改进，可以确保项目始终保持竞争力并满足用户的新需求。

四、3D 引擎技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例

（一）国内优秀案例

中国作为全球最大的制造业国家，其对 3D 引擎技术的应用同样在快速发展。国内的 3D 引擎因其本土化优势正逐渐被广泛应用于多个行业，特别是在工业元宇宙的实践中展现出独特的应用价值。

1、Varjo 与沃尔沃联合使用 Unity 打造的元宇宙

Varjo 和沃尔沃联合使用 Unity 技术，为沃尔沃的汽车工厂园区创建了数字孪生。工程师和设计师可以通过交互式 3D 模型在 VR 中准确地展示他们的设想，

模拟车机的设计流程和车外环境。这种从头到尾在元宇宙中的工作流程为沃尔沃带来了更好的协作方式、更快的设计迭代和开发速度。

Unity 结合车厂的需求打造的定制化编辑工具：这个案例中，Unity 能够结合车厂的需求，打造符合广大车厂的定制化编辑工具，让用户体验到更加丰富的人车交互效果。比如当前画面上的车机模型、车的状态都可以在中控台通过 3D 画面控制，整个功能实现都是通过 Unity 渲染创作出来的。

（二）国外优秀案例

1. 波音公司虚拟装配线空间

波音公司使用 3D 引擎构建了虚拟装配线，使工程师能在设计飞机之前，先在虚拟环境下测试装配工艺。这个应用减少了物理原型的需求，显著节约了成本和时间，提高了设计的可行性和生产效率。

2. 宝马汽车虚拟销售营销系统

宝马利用先进的 3D 渲染技术来进行汽车设计和预销售营销。这使得顾客可以实时定制他们的车辆，并在虚拟环境中体验。通过这种创新的销售方式，宝马提高了顾客满意度并扩大了市场份额。

3. 埃尔朗根大学医学院 VR 手术模拟训练

在医疗领域，德国埃尔朗根大学医院使用 VR 技术帮助外科医生进行手术前的模拟练习。这项技术提供了一种无风险的学习环境，帮助医生提高手术技能，从而提高了手术成功率并减少了手术并发症，见图 41。



图 41 德国埃尔朗根大学医院用 HoloLens 2+西门子医疗进行人体器官解剖渲染

通过分析这些案例，可以明显看出，引入 3D 引擎技术为企业带来了巨大的运营优势，包括成本节约、效率提高、客户满意度增加等。此外，这些案例还证明了 3D 引擎技术具有跨越行业界限的广泛适用性和强大的市场潜力。

第五节 区块链技术

一、区块链技术发展现状和展望

（一）区块链技术的发展现状和价值

在工业元宇宙领域，区块链技术已逐渐成为愈加重要的底层支撑基础技术，目前全国各大科技公司和初创企业都在积极探索区块链技术在工业元宇宙领域的应用。区块链技术的去中心化、防篡改、数据安全、交易透明等特点为工业元宇宙的构建提供了强大的技术基础。

区块链技术在供应链管理、产品追溯、数字版权保护等领域已经广泛应用，在工业制造过程中，利用区块链技术，可以实现实时追踪产品的生产、运输、销售等全过程，确保产品的质量和安全。工业制造的数字版权保护方面，区块链技术有效保障了创作者的权益。

区块链技术在工业元宇宙领域的应用价值主要体现在以下几个方面：

1. 提升供应链透明度和效率

通过区块链技术，企业可以实时掌握供应链的各个环节，在确保供应链信息的可追溯性、优化库存管理、强化物流运输管理、促进信息共享和协同作业、降低交易成本和风险、提高产品质量和可靠性等过程中发挥作用。提高供应链的透明度和效率。

2. 增强产品质量和安全

区块链技术可以实现对产品全过程的追踪，包括生产、运输、销售等，确保产品的质量和安全，降低质量风险和成本，全面记录和评估产品质量，实现供应链的透明化和规范化，强化质量标准和规范的执行，提高消费者信心和市场占有率。

3. 降低交易成本

区块链技术的去中心化特性可以降低交易的成本，包括信任建立、合同签订、支付结算等环节的成本，切实帮助企业提高交易效率和降低运营成本。在降低交

易认证成本，减少网络和平台市场的运营支出，同时也释放市场机遇，促进市场的创新和发展。

4. 促进创新和合作

区块链技术在工业元宇宙领域的应用可以有效地促进创新和合作，帮助企业优化合作模式和提高效率，降低合作成本和风险，提高合作的可信度和可靠性。激励创新，优化合作模式，降低成本，促进多方参与合作，同时也提高合作的可信度和可靠性，推动项目的成功实施和发展。

(二) 区块链技术的技术创新和展望

区块链技术的未来发展机遇将与区块链的技术创新密不可分。随着技术的不断发展和进步，区块链技术的应用前景会更加广阔。

1. 深化跨链技术

当前存在多个独立的区块链网络，未来的发展趋势是实现不同区块链之间的互操作性，使得数据和价值可以在不同链上自由流通。跨链技术将是未来区块链技术发展的重要方向之一。

2. 加强隐私保护

随着区块链技术的普及，隐私保护将成为越来越重要的问题。未来的区块链技术需要提供更加完善和强大的隐私保护功能，如零知识证明、环签名等。

3. 优化共识机制

共识机制是区块链技术中的核心部分，未来的区块链技术需要优化共识机制，采用新型共识机制，并结合其他技术，加强安全性和隐私保护，提高网络的吞吐量、降低延迟、增强安全性等。

4. 智能合约的普及

智能合约是区块链技术的核心应用之一，未来的区块链技术将进一步扩大智能合约的应用范围和场景，完善智能合约的编写和执行，并结合其他技术，实现跨链智能合约，建立完善的智能合约监管机制，便于更好普及和推广。

5. 区块链与物联网的结合

物联网将是未来发展的重要趋势之一，区块链技术与物联网的结合可以实现更加安全、高效的设备通信和数据管理。

6. 区块链与大数据的结合

区块链技术可以提供不可篡改的数据存储和验证功能，与大数据技术结合可以提供更加全面和可信的数据分析和决策支持。

7. 区块链与金融的结合

金融领域是区块链技术的重要应用领域之一，未来的区块链技术将进一步扩大在金融领域的应用范围和场景，如数字货币、证券交易等。

二、区块链技术的核心技术和技术特性

（一）区块链技术的核心技术

区块链的核心技术包含分布式网络、智能合约、共识机制、去中心化、隐私保护等，见图 42。区块链的核心技术共同构成了区块链系统的基础，使得区块链能够实现去中心化、安全可靠、透明和不可篡改等特性。



图 42 区块链技术的核心技术

1. 分布式网络

分布式网络是区块链技术的核心组成部分，区块链技术采用分布式网络架构，它实现了所有节点的相互通信和协作，形成了一个自组织的、去中心化的网络。这种网络架构确保了区块链技术的去中心化特性和高度安全性。

2. 密码学原理

区块链技术利用密码学原理确保交易的安全性和可信度。密码学原理在区块链技术中扮演着至关重要的角色，它利用哈希函数、公钥和私钥等密码学概念确保交易的安全性和可信度。这些概念的应用使得区块链中的数据无法被篡改和伪造，从而保障了交易的真实性和可信度。

3. 共识机制

区块链技术中的共识机制用于协调多个节点之间的行动，共识机制是区块链技术中协调多个节点之间行动的关键部分。通过共识机制，所有节点能够达成一致，确保交易被正确地记录和验证。常见的共识机制包括工作量证明（Proof of Work）和权益证明（Proof of Stake）等，它们在激励节点参与网络维护和保证网络安全方面发挥着重要作用。

4. 数据库技术

区块链技术使用数据库技术来存储和查询交易数据。在区块链中，每个节点都拥有自己的数据库副本，这些副本相互同步以确保数据的完整性和一致性。

5. 智能合约

智能合约是一种自动执行合同条款的协议，它被写入区块链中并由网络中的节点执行。智能合约的运用可以实现复杂的业务逻辑和自动化流程，提高交易的效率和安全性。

6. 去中心化应用（DApp）

DApp 是运行在区块链上的应用程序，它们利用区块链技术的去中心化特性来实现无需信任的中心化功能。通过 DApp，用户可以更加便捷地使用区块链技术进行各种交易和操作。

7. 跨链技术

跨链技术用于连接不同的区块链网络，使得它们可以相互通信和协作。这有助于解决区块链之间的互操作性问题，扩展区块链技术的应用范围。

8. 隐私保护技术

为了保护用户的隐私，区块链技术还采用了隐私保护技术，如零知识证明、环签名等。这些技术可以确保交易数据的安全性和隐私性，防止信息泄露和被恶意攻击。

（二）区块链技术的技术特征

区块链技术是一种去中心化、分布式的数据库技术，具有去中心化、开放性、独立性、安全性和匿名性等特征，见图 43。其中去中心化是最为重要的特点，它通过多节点共同验证和记录数据，没有一个中心机构或结构，使得区块链去中心化且无需信任中介机构。这些特性和核心技术的运用使得区块链技术具有很高的

应用价值和发展前景。

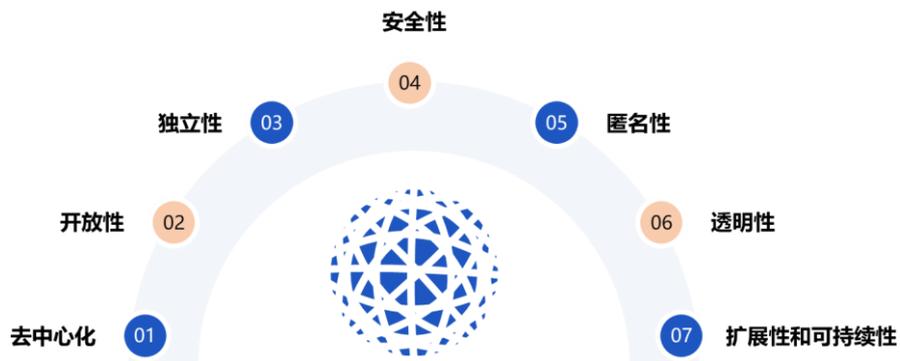


图 43 区块链技术的技术特征

1. 去中心化

区块链技术不依赖于任何中央机构或第三方信任机构，而是通过分布式核算和存储方式，使得各个节点实现了信息自我验证、传递和管理。这种方式避免了中心化管理的缺陷，如单点故障和信任问题。

2. 开放性

区块链技术的基础是开源的，除了交易各方的私有信息被加密外，区块链的数据对所有人开放，任何人都可以通过公开的接口查询区块链数据和开发相关应用。这使得整个系统信息高度透明，增强了参与各方的信任度。

3. 独立性

基于协商一致的规范和协议（类似比特币采用的哈希算法等各种规范和协议），整个区块链系统不依赖其他第三方，所有节点能够在系统内自动安全地验证、交换数据，不需要任何人为的干预。区块链技术独立于任何外部机构或硬件设施，只要不能掌控全部数据节点的 51%，就无法肆意操控修改网络数据，这使区块链本身变得相对安全，避免了主观人为的数据变更。

4. 安全性

区块链技术通过密码学和共识机制等手段，保证交易数据的安全和完整性，一旦数据被记录在区块链上，就无法篡改。这使得数据的安全性得到了极大的保障。

5. 匿名性

除非有法律规范要求，单从区块链技术上来讲，各节点用户无须公开自己身份，同一链条上的其余节点用户都能够实现共同监督。区块链技术可以通过密码

学实现匿名性,保护用户的隐私和安全。除非有法律规范要求,单从技术上来讲,各区块节点的身份信息不需要公开或验证,信息传递可以匿名进行。

6. 透明性

区块链技术可以实现交易数据的公开透明,所有的参与者都可以查看和验证交易数据。这种方式增强了交易的透明度,使得参与各方的信任度得到进一步提升。

7. 扩展性和可持续性

区块链技术可以根据需要扩展和升级,以适应不断变化的应用需求和技术发展。同时,区块链技术也具有可持续性,可以与其他技术和系统无缝集成。

三、区块链技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径

(一) 区块链技术在工业元宇宙领域的应用 (见图 44)



图 44 区块链技术在工业元宇宙领域的应用

1. 构建工业元宇宙的信任体系

区块链技术可以作为工业元宇宙的信任体系,通过分布式账本和智能合约等技术,确保工业元宇宙中的数据和交易的可信性和安全性。

(1) 数字身份验证

利用区块链技术进行数字身份验证,可以确保元宇宙中实体的身份和权益得到有效保障。通过区块链的分布式账本特性,可以实现身份信息不可篡改和可追溯,从而建立可靠的信任体系。

(2) 供应链管理和物流跟踪

通过应用区块链技术，可以实现供应链的透明化和实时监控，提高供应链的可靠性和安全性。物流跟踪可以确保物品从生产到消费的全程可追溯，从而建立消费者对产品的信任。

(3) 资产管理

通过应用区块链技术，可以实现资产的数字化、智能化和自动化管理，提高资产管理效率和风险管理水平。通过区块链的透明性和不可篡改性，可以确保资产信息的真实性和准确性，从而建立投资者对资产的信任。

(4) 公益事业

通过应用区块链技术，可以实现公益事业的透明化和公正性，提高公益事业的公信力和参与度。通过区块链技术，可以确保公益资金的来源和去向的真实性和透明性，从而建立公众对公益事业的信任。

2. 实现工业元宇宙的数据共享和交换

区块链技术可以实现工业元宇宙中数据的共享和交换，通过去中心化的方式，使得数据更加透明和可信。

(1) 工业物联网 (IIoT)

区块链技术可以处理异构设备间的通信，降低组网成本，提高设备的利用率和维护效率。同时能提供精准、高效的供应链金融服务。通过应用区块链技术，可以实现设备间的安全通信和数据共享，促进工业物联网的发展。

(2) 跨企业协同

区块链技术可以用于不同企业之间的协同工作，实现信息的共享和信任的建立，提高工作效率。在工业元宇宙中，跨企业的协同工作是常态，通过区块链技术可以实现更高效的数据共享和交换，促进企业的发展。

(3) 知识产权保护

区块链技术可以用于知识产权的保护，确保创新成果不被抄袭或侵犯。在工业元宇宙中，知识产权的保护尤为重要，通过区块链技术可以更好地保护创作者的权益和创意成果。

(4) 工业设计

区块链技术可以用于工业设计领域，保护设计师的知识产权和创意成果。通过应用区块链技术，可以确保证据的真实性和原创性，从而维护创作者的权益和

信任。

(5) 质量保证

区块链技术可以用于质量保证领域，实现产品质量的全程监控和可追溯，提高产品质量和消费者满意度。通过区块链技术，可以确保产品的真实性和可靠性，从而建立消费者对产品的信任。这些功能都需要实现数据的共享和交换，通过区块链技术可以更好地满足这些需求。

3. 优化工业元宇宙的供应链管理

区块链技术可以优化工业元宇宙的供应链管理，通过智能合约等技术，实现供应链的自动化和智能化。

(1) 物流和库存管理

区块链技术可以实时监测和管理工业元宇宙中的物流和库存信息，从而提高供应链的透明度和效率。通过区块链技术，可以实现物流信息的实时更新和共享，减少库存积压和浪费，降低运营成本。

(2) 采购管理

区块链技术可以实现采购信息的公开透明和不可篡改，从而提高采购过程的公正性和合理性。通过区块链技术，可以实现供应商和采购商之间的直接沟通和信任建立，降低采购成本和风险。

(3) 销售管理

区块链技术可以实现销售信息的不可篡改和透明化，从而提高销售过程的公正性和可信度。通过区块链技术，可以实现销售渠道的畅通和高效运营，提高销售效率和客户满意度。

(4) 订单管理

区块链技术可以实现订单信息的不可篡改和透明化，从而提高订单处理的速度和准确性。通过区块链技术，可以实现订单状态的实时更新和共享，提高订单处理效率和客户满意度。

(5) 支付管理

区块链技术可以实现支付信息的透明化和不可篡改，从而提高支付的安全性和效率。通过区块链技术，可以实现支付过程的自动化和快速化，降低支付成本和风险。

4. 保障工业元宇宙的网络安全

区块链技术可以保障工业元宇宙的网络安全，通过加密算法和共识机制等技术，确保工业元宇宙中的数据和交易的安全性。

(1) 身份认证和访问控制

区块链技术可以实现去中心化的身份认证和访问控制，确保只有授权的用户可以访问和操作工业元宇宙中的数据和资源。通过区块链技术的加密算法和共识机制，可以确保证实身份和权限的有效性和安全性。

(2) 数据安全

区块链技术可以实现数据的安全存储和传输，防止数据被篡改或泄露。通过区块链技术的加密算法和分布式存储机制，可以确保数据的完整性和机密性，保障工业元宇宙中的数据安全。

(3) 网络安全

区块链技术可以保护工业元宇宙中的网络安全，防止网络攻击和病毒入侵。通过区块链技术的共识机制和智能合约，可以检测和防御网络攻击，提高工业元宇宙的网络安全性和稳定性。

(4) 应用安全

区块链技术可以保护工业元宇宙中的应用安全，防止应用被篡改或攻击。通过区块链技术的智能合约和去中心化特性，可以确保应用的完整性和安全性，保障工业元宇宙中的应用安全。

(5) 设备安全

区块链技术可以保护工业元宇宙中的设备安全，防止设备被恶意攻击或操纵。通过区块链技术的去中心化和共识机制，可以确保设备的可靠性和安全性，保障工业元宇宙中的设备安全。

5. 推动工业元宇宙的创新应用

区块链技术可以推动工业元宇宙的创新应用，通过去中心化和开源等方式，鼓励更多的开发者和企业参与工业元宇宙的开发和应用。

(1) 智能制造

区块链技术可以与智能制造技术结合，实现制造过程的智能化和自动化。通过区块链技术的去中心化和智能合约，可以优化制造流程和降低成本，提高生产

效率和产品质量。

(2) 供应链金融

区块链技术可以实现供应链金融的数字化和智能化，为供应链上的企业提供更加便捷和安全的金融服务。通过区块链技术的透明化和不可篡改，可以降低金融风险 and 成本，提高金融服务的质量和效率。

(3) 数字版权保护

区块链技术可以用于数字版权保护，确保创作者的权益和创意成果不被侵犯。区块链技术中的加密算法和智能合约技术在数字版权保护和交易中担任了重要的技术保障角色。

(4) 工业设计

区块链技术可以与工业设计结合，实现设计过程的透明化和智能化。通过区块链技术的去中心化和智能合约，可以优化设计流程和提高设计质量，为工业设计领域的创新应用提供支持。

(5) 能源管理

区块链技术可以实现能源管理的智能化和高效化，优化能源生产和消费模式。通过区块链技术的智能合约和去中心化特性，可以提高能源利用效率和降低能源成本，促进能源行业的创新发展。

(二) 区块链技术在工业元宇宙领域应用的实现路径

区块链技术在工业元宇宙领域的应用需要从多个方面入手，包括确定应用场景和目标、搭建区块链平台、确定数据交互方式、实现数字身份验证、建立信任机制、实现数据共享和交换、优化供应链管理、引入人工智能技术等，见图 45。



图 45 区块链技术在工业元宇宙领域应用的实现路径

1. 确定应用场景和目标

首先需要确定区块链技术在工业元宇宙领域的应用场景和目标,例如供应链管理、生产制造、物流等。同时需要明确区块链技术在该场景下的具体应用,例如数据共享、防伪溯源、数字身份验证等。

(1) 深入了解工业元宇宙的特性和应用场景

深入了解工业元宇宙的特性和应用场景,包括生产制造、供应链管理、物流等。这有助于确定区块链技术在工业元宇宙中的具体应用目标和切入点。

(2) 分析工业元宇宙的需求和痛点

针对不同的应用场景,需要深入分析工业元宇宙的需求和痛点。例如,在供应链管理中,需要解决物流信息不透明、信任缺失等问题;在生产制造中,需要解决生产过程的数据共享、质量监控等问题。

(3) 确定区块链技术的优势和局限性

区块链技术具有去中心化、安全性高等优势,但也存在一些局限性,如性能瓶颈、隐私保护等问题。因此,需要根据工业元宇宙的需求和区块链技术的特点,确定区块链技术在工业元宇宙中的最佳应用场景。

(4) 考虑业务需求和实际应用情况

在确定应用场景和目标时,需要考虑业务需求和实际应用情况。例如,对于一些需要高度安全性和信任的场景,如供应链管理、生产制造等,可以考虑使用区块链技术来提高数据的安全性和可信度。

(5) 与相关方沟通和合作

最后需要与相关方进行沟通和合作,包括工业元宇宙的开发商、供应商、物流公司等。通过共同探讨和研究,确定区块链技术在工业元宇宙中的最佳应用场景和目标。

2. 搭建区块链平台

(1) 选择合适的区块链技术

根据应用场景和目标,选择合适的区块链技术,包括公有链、联盟链或私有链等。同时需要考虑区块链技术的性能、安全性、易用性等方面的因素。

(2) 确定区块链平台的架构

根据应用场景和目标,确定区块链平台的架构,包括底层技术架构、网络拓

扑结构、节点类型等。

(3) 搭建区块链平台的基础环境

搭建区块链平台的基础环境，包括服务器、网络设备、安全设备等。同时需要进行必要的配置和部署，如安装和配置网络设备、设置节点等。

(4) 实现区块链平台的共识机制

实现区块链平台的共识机制是搭建平台的关键步骤之一。需要根据应用场景和目标，选择合适的共识机制，如工作量证明（POW）、权益证明（POS）等。

(5) 实现区块链平台的智能合约

实现智能合约是区块链平台的核心技术之一。需要根据工业元宇宙的应用场景和目标，编写相应的智能合约，以实现数据共享、交换、防伪溯源等功能。

(6) 集成其他必要的技术和工具

为了使区块链平台更好地服务于工业元宇宙领域的应用，需要集成其他必要的技术和工具，如分布式存储技术、加密算法库、API 接口等。

3. 确定数据交互方式

根据工业元宇宙的特性，确定数据交互的方式和标准。例如使用智能合约实现自动化数据交换，或者使用 API 接口进行数据传输等。

(1) 确定数据来源和类型

首先需要确定数据来源和类型，包括传感器数据、生产数据、物流数据等。同时需要了解数据的格式、标准等。

(2) 确定数据交互的目标和场景

根据工业元宇宙的应用场景和目标，确定数据交互的目标和场景。

(3) 选择合适的数据交互协议

选择合适的数据交互协议，如 MQTT、CoAP 等，以实现数据的传输和通信。同时需要考虑协议的性能、安全性、易用性等方面的因素。

(4) 设计数据交互的架构

根据应用场景和目标，设计数据交互的架构，包括数据的采集、传输、存储、分析等环节。同时需要考虑架构的可靠性、可扩展性等方面的因素。

(5) 实现数据接口的标准化

可以采用现有的数据接口规范，如 RESTful API、WebSocket 等，也可以根

据实际需求自定义数据接口规范。

4. 实现数字身份验证

在区块链平台上实现数字身份验证机制，确保只有经过授权的用户才能访问和操作工业元宇宙中的数据和资产。

(1) 确定数字身份验证的目标和场景

根据工业元宇宙的应用场景和目标，确定数字身份验证的目标和场景。例如，在供应链管理中，需要对供应商、制造商、物流等各环节的人员进行身份验证，以确保数据的机密性和完整性。

(2) 选择合适的数字身份验证方案

选择合适的数字身份验证方案，如基于公私钥和数字证书的数字身份验证、基于生物特征的数字身份验证等。同时需要考虑方案的可靠性、安全性、易用性等方面的因素。

(3) 搭建数字身份验证平台

搭建数字身份验证平台是实现数字身份验证的关键步骤之一。平台需要支持多种数字身份验证方案，能够存储和管理用户的数字身份证明信息，并提供相应的验证服务。

(4) 实现数字签名和验证

在数字身份验证过程中，需要进行数字签名和验证。用户提供其数字身份证明信息，并使用私钥进行签名，验证节点使用公钥进行验证。这样可以确保信息的完整性和不可篡改性。

(5) 实现区块链与数字身份验证的结合

将区块链技术与数字身份验证相结合，可以利用区块链技术的去中心化特性和数据共享机制，实现更高效和可靠的数字身份验证。可以将用户的数字身份信息存储在区块链上，并使用智能合约来实现数字身份的验证和管理。

5. 建立信任机制

通过区块链技术的去中心化特性和共识机制，建立工业元宇宙中的信任机制。例如使用加密算法保证数据安全，使用共识机制保证交易的合法性和可信度。

(1) 设计合理的区块链结构

区块链技术是一种从顶向下实现的技术，是可以设计、可以编程的。因此，

建立一个合理的区块链结构是建立信任机制的基础。这需要考虑如何设计区块、如何选择合适的共识机制、如何确保数据的安全性和可信度等因素。

(2) 选择合适的共识机制

共识机制是区块链系统中实现不同节点之间建立信任、获取权益的数学算法。选择合适的共识机制是建立信任机制的关键步骤之一。例如，工作量证明(POW)和权益证明(POS)是两种常用的共识机制，可以根据应用场景和目标进行选择。

(3) 实现智能合约

智能合约是区块链技术的核心特性之一，可以实现数据的自动执行和验证。通过编写智能合约，可以确保交易的合法性和可信度，从而建立信任机制。

(4) 实现数据的安全性和可信度

在工业元宇宙领域中，数据的安全性和可信度是建立信任机制的关键因素之一。

6. 实现数据共享和交换

通过区块链技术实现工业元宇宙中数据的共享和交换，包括数据的安全存储、访问控制、共享机制等。

(1) 确定数据共享和交换的目标和场景

根据工业元宇宙的应用场景和目标，确定数据共享和交换的目标和场景。

(2) 选择合适的数据共享和交换方案

选择合适的数据共享和交换方案，如基于区块链的数据共享和交换、基于中心化数据平台的数据共享和交换等。同时需要考虑方案的可靠性、安全性、易用性等方面的因素。

(3) 搭建数据共享和交换平台

搭建数据共享和交换平台是实现数据共享和交换的关键步骤之一。平台需要支持多种数据格式、协议和标准，能够实现不同数据源之间的数据传输和交换。

(4) 实现数据的安全性和可信度

在数据共享和交换过程中，需要进行必要的数据安全保护，包括数据加密、访问控制、身份验证等。

(5) 实现数据的标准化和规范化

为了使不同来源的数据能够相互融合和交换，需要实现数据的标准化和规范

化。可以采用现有的数据标准和规范，如 XML、JSON 等，以实现不同数据之间的交互和整合。

7. 优化供应链管理

利用区块链技术优化工业元宇宙中的供应链管理，实现供应商、制造商、物流等各环节的透明化和可追溯。

(1) 建立基于区块链的供应链追溯系统

通过区块链技术，可以建立分布式账本，实现全程可追溯的供应链管理。通过追溯系统，可以对原材料、生产过程、物流运输、销售等全过程进行监管和记录，确保货物的质量和安全。企业和消费者可以通过扫描商品上的二维码，获得该商品的生产过程、运输路径和销售记录等信息。

(2) 应用智能合约实现自动化和智能化

智能合约可以为供应链管理中的交易、支付、物流等环节提供自动化的解决方案，从而提高供应链管理的效率和准确性。智能合约可以自动执行合约内容，避免人为干预和操作错误，同时也可以实现货款的自动支付和物流的自动化跟踪。

(3) 提高资金流转的安全性和效率

区块链技术可以为供应链管理中的资金流转带来更高的安全性和效率。通过区块链技术，可以实现供应链管理中的资金流转的去中心化和安全性，避免资金的滞留和损失。同时，也可以实现货款的自动支付，提高供应链管理的效率和可靠性。

(4) 实现信息的透明化和可追溯性

区块链技术的去中心化和不可篡改性，可以为供应链管理带来更高的透明度和追溯性。通过区块链技术，可以实现对原材料、生产过程、物流运输、销售等全过程的监管和记录，确保货物的质量和安全，提高供应链管理的效率和可靠性。

(5) 促进多方协作和信任建立

区块链技术可以促进供应链各参与方之间的多方协作和信任建立。通过区块链技术的分布式账本特性，各参与方可以共享和验证交易数据，实现更高效的信息传递和协同作业。同时，区块链技术也可以降低信任成本，减少沟通成本和误解，提高供应链管理的效率和可靠性。

8. 引入人工智能技术

结合人工智能技术加速区块链在工业元宇宙中的应用，例如利用机器学习算法优化智能合约的执行效率，利用人工智能技术进行数据分析和预测等。

(1) 数据采集和处理

利用人工智能技术，可以自动采集和处理工业元宇宙中的各种数据，包括生产数据、销售数据、供应链数据等。通过数据采集和处理，可以更好地了解生产过程、市场需求和供应链情况，为决策提供数据支持。

(2) 智能合约的编写和执行

利用人工智能技术，可以更加智能地编写智能合约，使其更加符合实际需求。同时，也可以通过人工智能技术来监测和执行智能合约的执行情况，确保合约的正确性和执行效率。

(3) 人工智能技术优化供应链条管理

人工智能技术可以进一步优化供应链管理，通过数据分析和预测，可以更加准确地预测市场需求和供应情况，从而更好地规划和管理供应链。

(4) 监测生产过程

通过人工智能技术，可以对生产过程进行实时监测和优化，包括生产设备的运行状态、生产原材料的供应情况等。通过监测生产过程，可以及时发现和解决问题，提高生产效率和产品质量。

(5) 预测维护和故障

利用人工智能技术，可以对工业设备进行预检维护和故障检测，提前发现和解决问题，避免生产中断和设备损坏。

四、区块链技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例

(一) 国内优秀案例

1. 腾讯云区块链服务 BaaS

腾讯云推出的区块链服务 BaaS，可以帮助企业快速搭建基于区块链的应用，降低企业应用区块链的门槛。在工业元宇宙领域，腾讯云区块链服务 BaaS 可以帮助企业实现供应链管理、产品溯源等场景的应用，见图 46。



2. 蚂蚁链

蚂蚁链是蚂蚁集团推出的区块链产品，致力于为企业提供安全、可信的数字基础设施。在工业元宇宙领域，蚂蚁链可以帮助企业实现供应链管理、版权保护等场景的应用，见图 47。



3. 京东智臻链

京东智臻链是京东集团推出的区块链产品，为企业提供可信的数字解决方案。在工业元宇宙领域，京东智臻链可以帮助企业实现产品溯源、品质溯源等场景的

应用，见图 48。



图 48 智臻链防伪追溯平台架构图

4. 宝武钢铁

宝武集团积极探索和应用区块链技术，基于供应链体系打造通宝产品，基于区块链等工业元宇宙技术基础上，开发了“5G AR 远程装配”应用场景，打造了“AR 智能运维系统”，还投资建设数字孪生工程，见图 49。通过以上应用场景的成功应用，提高了企业的生产效率和质量控制水平，同时推动了区块链技术在工业领域的应用和发展。



图 49 宝武现场运维人员佩戴亮风台最新 5G AR 智能眼镜进行设备运维工作

（二）国外优秀案例

1. IBM Food Trust

IBM Food Trust 是 IBM 推出的区块链产品，致力于实现食品溯源和供应链管理。通过应用区块链技术，IBM Food Trust 可以帮助企业实现食品溯源和供应链管理的透明化和可信化，提高食品安全和质量控制水平。

2. Maersk & IBM Blockchain

Maersk 是全球最大的集装箱运输公司之一，与 IBM 合作开发了基于区块链的供应链解决方案 TradeLens。通过应用区块链技术，TradeLens 可以帮助货主、物流公司和政府等各方实现供应链的可视化和透明化，提高物流效率和安全性。

3. Walmart & IBM Blockchain

Walmart 是全球最大的零售商之一，与 IBM 合作开发了基于区块链的食品安全解决方案。通过应用区块链技术，该解决方案可以帮助企业实现食品溯源和质量控制，提高食品安全和风险管理水平。

第六节 物联网技术

物联网(Internet of Things, 简称 IoT)概念于 1998 年由美国麻省理工学院最早提出。早期的物联网通常指基于射频识别技术(Radio Frequency Identification, 简称 RFID), 物体按照约定的通信协议, 并与互联网相结合, 形成物体互联互通的网络, 实现物体信息自动识别与管理。

一、物联网技术发展现状和展望

（一）物联网技术的发展现状和价值

物联网技术在工业元宇宙领域的应用逐渐普及。随着物联网技术的不断发展, 越来越多的企业开始将物联网技术应用于工业元宇宙领域, 物联网技术在工业元宇宙中的应用已经从简单的数据采集和传输, 发展到对生产过程的智能化控制和优化, 以实现生产过程的智能化、自动化和高效化。

物联网技术为工业元宇宙提供了更广阔的发展空间。通过物联网技术, 可以实现工业设备的远程监控、故障预测、优化控制等功能, 提高生产效率和产品质量。同时, 物联网技术还可以与人工智能、大数据等技术进行融合, 形成更加智

能化的工业元宇宙应用场景，为工业元宇宙的发展提供更强大的技术支持和创新动力。

物联网技术在工业元宇宙领域的应用价值主要体现在以下几个方面：

1. 实现生产过程的可视化

通过物联网技术，可以实时收集工业设备的数据，并在元宇宙中进行可视化展示。这使得生产过程更加透明，便于管理者和操作人员实时了解生产情况，及时发现并解决问题。

2. 提高生产效率

物联网技术可以实现设备的自动化控制和优化，减少人工干预，提高生产效率。同时，通过对生产数据的分析和预测，可以提前发现潜在的问题，避免生产中断，进一步优化生产过程。

3. 降低运维成本

物联网技术可以实现设备的远程监控和维护，减少现场运维人员的工作量，降低运维成本。同时，通过对设备数据的分析和预测，可以提前发现并解决问题，减少维修成本。

4. 促进智能化转型

物联网技术是实现工业 4.0 和工业元宇宙的关键技术之一。通过物联网技术的应用，可以推动工业领域的智能化转型，提高企业的竞争力和创新能力。

5. 实现跨部门协作

物联网技术可以实现不同部门之间的数据共享和协作，打破信息孤岛，提高工作效率。同时，通过元宇宙平台，可以促进不同部门之间的沟通和交流，加强团队协作。

（二）物联网技术的技术创新和展望

1. 边缘计算和云计算的结合

物联网技术需要处理大量的数据，而边缘计算和云计算的结合可以有效地提高数据处理效率。在工业元宇宙中，通过边缘计算和云计算的结合，可以实现数据的实时处理和分析，提高决策的准确性和效率。

2. 5G/6G 通信技术的应用

5G/6G 通信技术具有低时延、高带宽、广接入等特点，可以满足工业元宇宙

中大量数据传输的需求。通过 5G/6G 通信技术的应用，可以实现物联网设备的远程监控和控制，提高生产效率和质量。

3. 人工智能技术的结合应用

人工智能技术可以实现对物联网采集数据的智能分析和预测，为工业元宇宙中的决策提供更准确的数据支持。通过人工智能技术的应用，可以实现设备的自动化控制和优化，提高生产效率和质量。

4. 区块链技术的结合应用

区块链技术可以保证数据的安全性和可信度，为工业元宇宙中的数据共享和协作提供更可靠的技术支持。通过区块链技术的应用，可以实现数据的可追溯性和不可篡改性，保证数据的真实性和可信度。

5. 虚拟现实和增强现实技术的应用

虚拟现实和增强现实技术可以为工业元宇宙中的生产和运维提供更直观和真实的体验。通过虚拟现实和增强现实技术的应用，可以实现物联网设备的远程操作和维护，提高生产效率和质量。

二、物联网技术的核心技术和技术特征

物联网技术作为工业元宇宙建设的核心技术之一，通过感知层、网络层、应用层协同合作，为工业元宇宙中万物互联和虚实互动提供了技术保障。关键技术涉及感知、微电子、微机电、网络通信、人工智能、云计算等诸多技术领域。为了系统分析、梳理工业元宇宙中物联网技术体系，这里将其划分为感知技术、支撑技术、共性技术、网络通信技术和应用技术，见图 50。

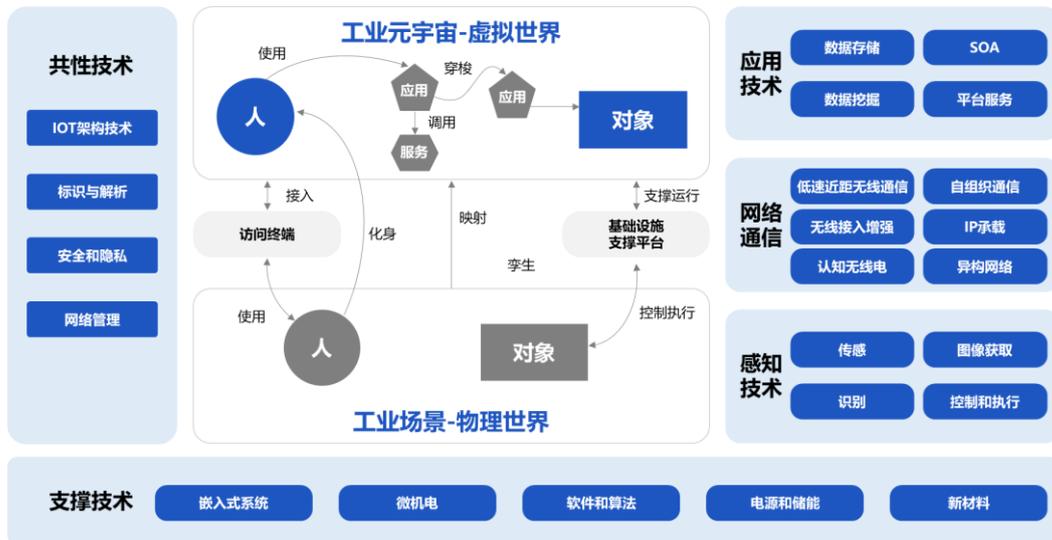


图 50 工业元宇宙物联网技术体系

（一）物联网技术的核心技术

1. 感知技术

感知技术主要包括传感和识别技术。传感和识别技术是物联网感知物理世界，获取数据，实现工业元宇宙与物理世界交互的首要环节。传感技术将物理世界中的生物量、物理量、化学量，转化成可供设备识别、处理的数字信号；识别技术实现对物体状态、标识和位置等信息的获取。

物联网感知技术中，典型技术即射频识别技术。射频识别技术是一种较为常用的自动识别技术，是由一个阅读器和多个应答器(标签)组成的信息系统。其原理为阅读器与标签之间进行非接触式的数据通信，达到识别目标的目的。射频识别技术让物体具备“开口说话”的能力，赋予了物联网可追踪的特点。射频识别技术应用非常广泛，典型应用如生产设备防盗、工厂门禁管制、停车管理、生产线自动化、物料管理等。

此外，光敏、声敏、气敏、化学、压敏等各类传感器在工业场景中应用也较为常见。通过传感器实时收集声、光、温、电、动力、化学、生物、位置等各种物体、环境的状态数据，实现生产自动检测和自动控制。例如通过激光雷达、毫米波雷达、摄像头等感应器的结合，在工业机器人自动制造、自动驾驶智能识别等场景的应用越来越广泛。

2. 支撑技术

物联网支撑技术主要包括微机电系统、嵌入式系统、电源和储能、新材料技术及软件和算法等技术。

微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, 简称 MEMS)是指尺寸在几毫米乃至更小的一类技术装置，是一个独立的智能软硬件系统。微机电系统主要由传感器、作动器和微能源三大部分组成，拥有属于自己的数据传输通路、专属存储功能、操作系统和专门的应用程序，从而形成一个庞大的传感网。^[2]常见的产品包括微机电麦克风、微马达、微泵、微振子、微机电加速度计、微机电压力传感器、微机电陀螺仪、微机电温湿度传感器等以及它们的集成产品。微机电系统将信息的采集、存储、处理和执行集成管理，形成多功能的微型系统，并集成于大尺寸系统中，可大幅度地提高系统可靠性和自动化、智能化水平。

嵌入式系统是以计算机技术为基础，以应用为中心，按物联网对设备可靠性、

成本、功能、功耗等综合要求，定制裁剪软硬件功能模块的嵌入式计算机技术，是实现物联网物体智能的重要基础。

电源和储能是物联网关键支撑技术之一，无论是融入服饰的可穿戴设备，还是生产线上的传感器，使用场景决定了它们的设计趋于微型化。同时，特定的使用场景，也决定了无源无线的供能方式将成为物联网电源和储能技术研究的重要方向。随着物联网技术的发展，未来“温差能”“微光能”“振动能”“射频能”的芯片和模组都将投入使用，这种具备自供能特性的芯片和模组在满足产品设计需求的同时，还拥有免布线、低成本、免维护的特点，可以维系传感器长久在线工作，为元宇宙感知层面的搭建奠定了重要基础。

物联网新材料技术的主要研究内容包括小型化的纳米技术、高可靠性的抗氧化技术和低功耗的集成电路技术。目标是性能比传统材料的更完善，更耐用。例如小型化的纳米技术是研究尺寸在 0.1~100 纳米间的物质组成体系的运动规律和相互作用，以及其在实际应用中效果的技术。目前，新材料技术在物联网技术中的应用主要体现在射频识别设备研发，传感器设备的微小化设计等方面。

3. 共性技术

物联网共性技术主要包括网络层诸多技术，如标识和解析、安全和隐私、网络管理技术等。

物联网标识和解析技术是对物理实体、通信实体和应用实体被赋予的或其本身固有的属性，进行正确解析的技术。是工业物联网网络架构的重要组成部分，是维护工业物联网稳定运行的重要基础设施。标识解析技术根据标识查询网络位置，从而实现人与物、物与物之间的通信寻址，或直接查询物体的相关信息。

信息和网络安全是物联网的应用系统走向成熟的重要标志，也是实现物联网大规模应用的必要条件。通过物联网安全和隐私架构设计，完善加密和管理机制，对物联网的访问机制进行控制，维护网络系统的正常运行，在物联网系统发生异常时，可以对存在有恶意潜入的病毒木马进行定向清理，及时排除风险，保障物联网的信息安全。

4. 网络通信技术

网络通信技术主要实现物联网数据信息和控制信息的双向传递，是实现物联网功能的重要技术环节。主要包括基于分布式动态分组技术、新型分布式无线传

感网络组网结构、无缝连接断开和网络自平衡技术、可靠性高的物联网单元冗余技术等。

实现物联网就必须要求互联网能适应更大的信息量，并提供更多的终端服务。目前，IPv6 技术已突破了这些难点，因为 IPv6 技术具有近乎无尽的地址存储空间，能够保存并传送海量的数据。使用互联网的 IPv6 技术，不但能够为人提供服务，而且还可以为各种硬件设施互联提供服务。

（二）物联网技术的技术特征

物联网技术在工业元宇宙领域的应用具有连接性、实时性、智能化和安全性等技术特征，为工业元宇宙的发展提供了重要的技术支持。

1. 连接性

物联网技术通过各种传感器、射频识别技术等，实现设备之间的连接和数据传输，为工业元宇宙提供全面的数据支持。

2. 实时性

物联网技术可以实现实时数据采集和传输，确保数据的及时性和准确性，为工业元宇宙的实时监控和决策提供支持。

3. 智能化

物联网技术结合人工智能、大数据等技术，实现对设备数据的智能分析和处理，为工业元宇宙提供智能化的管理和控制。

4. 安全性

物联网技术通过加密技术、身份认证等手段，确保设备之间的通信和数据的安全性，防止数据泄露和攻击。

5. 可靠传递

物联网技术通过各种通信技术，如近距离无线通信技术、移动通信技术、卫星通信技术等，实现物体信息的可靠传输。

三、物联网技术在工业元宇宙领域的应用和实现路径

（一）物联网技术在工业元宇宙领域应用

物联网技术在工业元宇宙领域的应用涵盖了设备连接与数据采集、生产过程监控与优化、能源管理、供应链管理和远程维护与故障排除等方面。这些应用可以提高工业生产的效率和质量，降低成本和风险，为工业元宇宙的发展提供重要

的技术支持。

1. 设备连接与数据采集

物联网技术通过各种传感器和通信技术，将工业设备连接在一起，实现设备之间的数据采集和传输。这使得工业元宇宙能够实时监控设备的运行状态和数据，为设备的故障预测、性能优化等提供支持。

2. 生产过程监控与优化

物联网技术可以实现对生产过程的实时监控，通过收集和分析生产过程中的数据，对生产过程进行优化和控制。这可以提高生产效率和质量，减少浪费，改进服务交付，降低生产和送货的费用。

3. 能源管理

物联网技术可以实现对工业设备的能源消耗进行实时监测和管理，通过优化能源使用，降低能源消耗和成本。

4. 供应链管理

物联网技术可以实现对供应链的实时监控和管理，通过收集和分析供应链中的数据，对供应链进行优化和控制。这可以提高供应链的透明度和效率，减少库存和运输成本。

5. 远程维护与故障排除

物联网技术可以实现设备的远程维护和故障排除，通过实时监测设备的运行状态和数据，及时发现并解决问题。这可以提高设备的可靠性和可用性，减少停机时间和维修成本。

（二）物联网技术在工业元宇宙领域应用实现路径（见图 51）

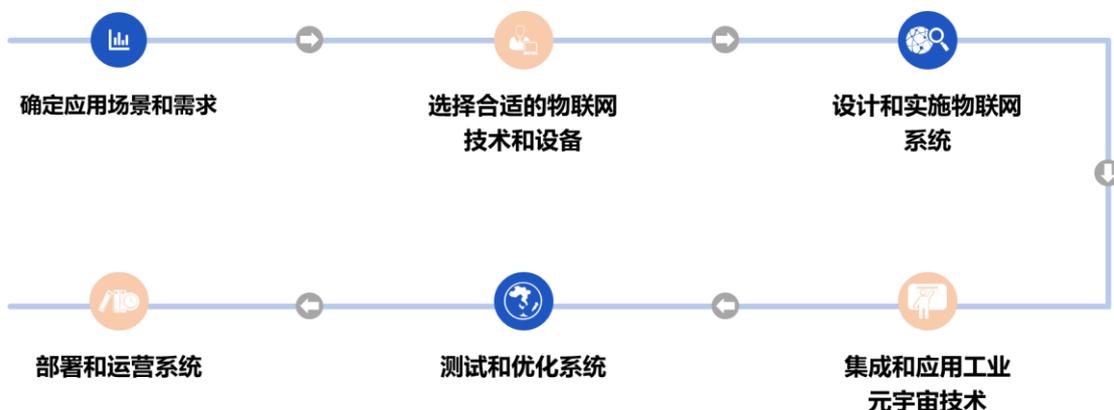


图 51 物联网技术在工业元宇宙领域应用实现路径

1. 确定应用场景和需求

首先需要明确物联网技术在工业元宇宙领域的应用场景和需求，例如设备连接与数据采集、生产过程监控与优化、能源管理、供应链管理等。

2. 选择合适的物联网技术和设备

根据应用场景和需求，选择合适的物联网技术和设备，包括传感器、通信技术、数据处理技术等。

3. 设计和实施物联网系统

根据选定的技术和设备，设计和实施物联网系统，包括设备连接、数据采集、数据传输、数据处理和分析等。

4. 集成和应用工业元宇宙技术

将物联网系统与工业元宇宙技术进行集成和应用，包括数字孪生技术、虚拟现实技术、增强现实技术等，实现工业元宇宙的数字化、智能化管理和控制。

5. 测试和优化系统

对设计和实施完成的物联网系统进行测试和优化，确保系统的稳定性和可靠性，提高系统的性能和效率。

6. 部署和运营系统

将测试和优化完成的物联网系统部署到实际应用场景中，并进行日常运营和维护，确保系统的正常运行和数据的及时更新。

四、物联网技术在工业元宇宙领域应用的优秀案例

（一）国内优秀案例

1. 案例：华为松山湖南方工厂

华为松山湖南方工厂是华为 Mate/P 系列手机生产线，具有高度自动化、少品种、大批量的生产特点。工厂内利用物联网+5G+云端 MES 平台+人工智能建设工厂元宇宙平台，贯通生产工艺流、商业信息流和工程数据流，对产线 186 个生产设备中 138 个设备进行改造，具备预测性维护、智能物流、柔性制造、自动测试、AI 质检等功能，提高了检测效率和产品质量，见图 52。



图 52 华为松山湖南方工厂 AGV 小车实现园区自动化配送

2. 案例：中兴通讯南京滨江工厂

中兴通讯南京滨江工厂打造基于物联网技术的工业元宇宙数字化工厂。滨江工厂重点打造了智能车间、工厂数字化运营、智能仓储及配送、5G 智慧园区四大业务功能板块，规划了 16 大类、60 余项物联网+工业融合创新应用，从传统的资源配置向场景驱动配置转变，从传统的人工操作为主向自动化、远程化、无人化升级，从传统的线下管理向线上、在线、智能在线升级，见图 53。

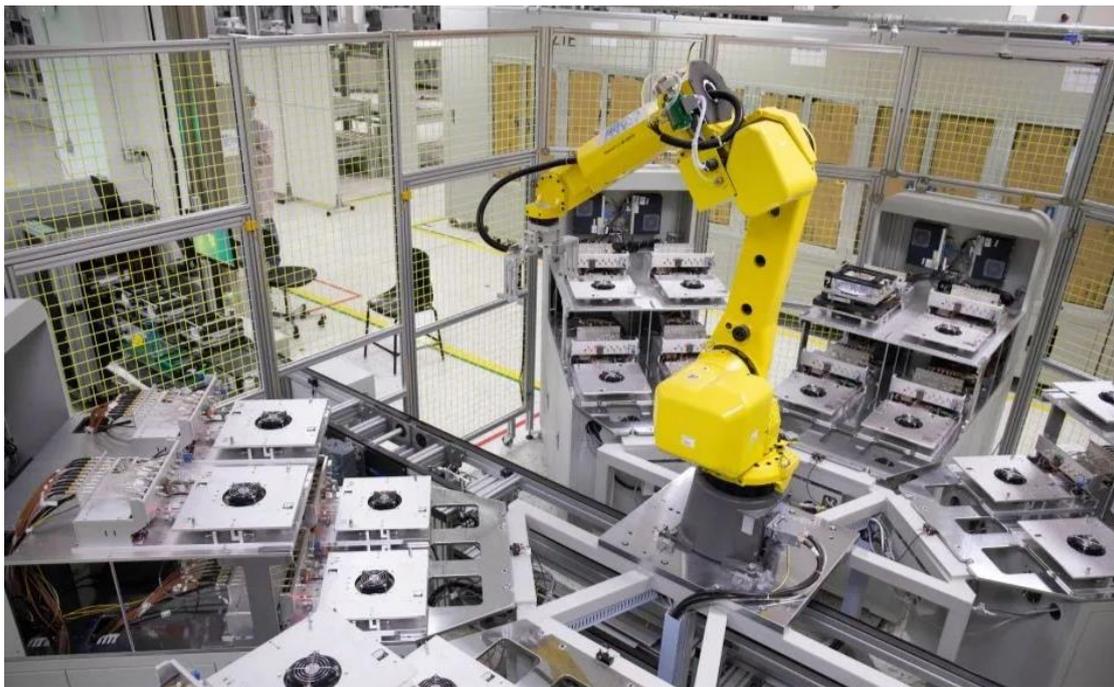


图 53 中兴通讯南京滨江基地“5G 全连接智能工厂”正在工作的机械手臂

3. 案例：中国石油数字化工业仓储

以电子标签仓位卡为切入点，代替应用企业原先的纸质仓位卡，通过元宇宙平台，对每一单物资做到全流程信息显示管控。能通过 API 接口与企业 ERP 系统、MES 系统等打通或本地化部署，打破目前企业各类系统相互独立形成信息孤岛的现象，可一键管理所有前端电子标签的信息显示，提升前端信息显示的准确性，提高信息内容更新效率，实现物资管理智能化。

（二）国外优秀案例

1. 案例：英伟达与宝马联手打造虚拟汽车工厂

英伟达与宝马联手用 Omniverse 平台构建虚拟工厂。通过 Omniverse 平台与物联网技术融合应用，设计者可以获得全球 31 座工厂的各类产品数据，有效解决了设计规划耗时、产品无法兼容和数据更新滞后的问题。在设计阶段可以体验建立后的真实工厂样子，并可以基于模型进行优化设计；在物理世界中生产任何东西之前，可以进行模拟生产，确保工厂顺利运转并提高生产效率，见图 54。

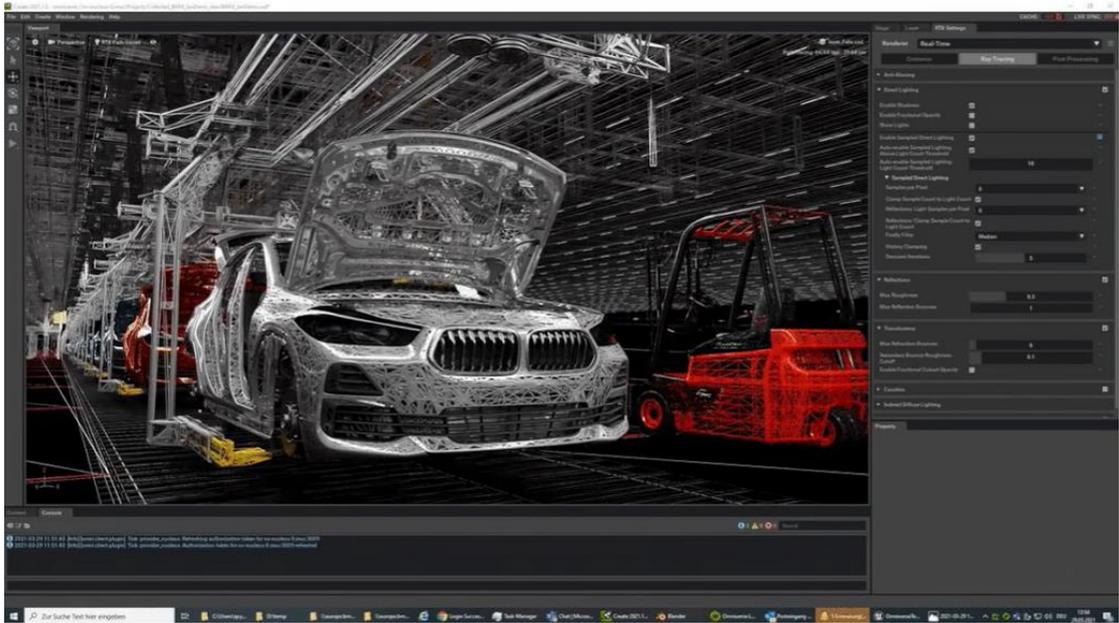


图 54 宝马基于英伟达 Omniverse 平台打造的未来工厂，NVIDIA Omniverse 使用户能够从多个不同的角度查看虚拟工厂

第七节 新型工业技术

随着科技的迅猛发展，工业界正迎来一场颠覆性的革命。工业元宇宙及其相关的新型工业技术成为引领这一变革的关键元素。工业元宇宙是指通过数字化、虚拟化和现实世界的融合，构建起一个全新的工业生态系统。在这个虚拟的世界中，物理和数字世界相互交织，实现了无缝连接、实时数据共享和智能决策的能力。而新型工业技术则为工业元宇宙的实现提供了强大的支撑。这些新型工业技术能够实现众多设备之间的通信和协作，从海量数据中提取关键信息，为工业元宇宙的设备协同和智能决策提供支持，推动工业生产高效化、可持续性发展。

一、云化 PLC 技术与工业元宇宙

（一）云化 PLC 技术的内涵

可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)作为一种专门为工业环境应用而设计的数字运算操作电子系统，是一种具有微处理器可将控制指令随时载入内存进行储存与执行的数字运算控制器，是工业自动化控制的核心。在传统的工业应用中，由于 PLC 控制所需的传感器、服务器等都是通过有线网络

进行连接，这导致了其存在灵活性差、可扩展性弱、实时性不强以及数据易丢失等问题，已经难以满足现代工业应用日益增长的智能化需求。新兴下一代 PLC 技术——云化 PLC 是指在云端运行的可编程控制器，通过统一通信协议、统一组网技术、统一通信接口和应用云端化，采用软件定义的 PLC 直接连接到工业互联网平台中，以达到云距离控制的目的。云化 PLC 技术不仅能够同时将应用、数据信息输入至机器人和云，实现智能化和自我感知，还可以通过应用程序编程接口和生态系统应用于工业互联网，实现工业控制的无线化，是 PLC 技术云端化的重要转变。

云端 PLC 技术作为传统 PLC 技术的革新发展，其具备了传统 PLC 的所有特点，例如：可靠性、抗干扰性强，轻便性、低耗性好，通用性强、控制程序可变、使用方便，易编程性和简易性等。同时，云化 PLC 相较于传统 PLC，还具备了实时性和可扩展性的特点。

1. 实时性

云化 PLC 通过无线方式连接工业互联网平台，使得 PLC 可远距离线上操作，且传输时延更低。操作系统支持最小 50us 的循环时间，以适应高实时控制的要求。

2. 可扩展性

云化 PLC 可实现硬件和软件的分离，通过软件来调配硬件，且在工业应用中可无锁定性地选择供应商，并允许在不影响其他内容的前提下对组件进行修改，以实现可扩展性、统一通信协议、统一组网技术和统一通信接口。

下表对比了云化 PLC 与传统 PLC 的区别，见表 1。

表 1 云化 PLC 与传统 PLC 对比

	传统 PLC	云化 PLC
实时性	运算周期为 ms 级别	运算周期为 us 级别
容量	小	大
通信协议	不同型号 PLC 对应不同协议	网关软件，支持丰富的工业协议
软、硬件	硬件和软件不可分离	硬件和软件的分离，可通过软件来配置硬件
编程语言	指令表语言、功能模块语言、顺序功能图	图形化编程环境和运维管理

	云语言	
扩展性	性能差，可能因需求升级导致大规模	的应用场景，可通过软件升级支持配置

（二）云化 PLC 的应用现状

在 2021 年召开的第五届未来网络发展大会上，全球首个广域云化 PLC 技术试验成果正式发布。该技术依托未来网络试验设施 (CENI) 在沪宁两地间构建确定性广域网环境，并开展试验验证。本次试验中，云化 PLC 采用通用架构如鲲鹏 CPU、欧拉操作系统、基于 IEC61499 标准的 PLC 集成开发及运行环境部署在上海；而由 4 个 DIP 设备组成的确定性广域网环境传输路径可达近 600 公里，在重载背景流量冲击下，可实现 20us 以内的时延抖动控制，且网络时延可有效保障在 4ms 以内，满足了典型云化 PLC 业务的需求。本次创新试验加速了工业网络 IP 化的进程，为更多企业数字化转型提供了案例参考，并通过先进工业网络加速了数据资产的生产、流动和价值变现。

相较于传统硬件 PLC 而言，云化 PLC 的优势显著。其具备统一的云端编程环境，可实现基于 ITIL 的流程框架、运维自动化；其处理数据能力强，可实现较大范围内的统一控制；其支持离线仿真和多协议通信，可实现更加灵活的性能扩展；其还可支持不同厂家的标准化接口 IO/传感器模块。例如，中兴通讯滨江工厂基于独家 NodeEngine 5G 云网一体化技术，利用 NodeEngine 更低时延的特性，搭建了一套基于 NodeEngine 的云化 PLC，替换生产线上多个传统硬件 PLC，实现了 QCe11 产线的云化 PLC 改造。经过三个多月的试运行，改造工程已经实现了 QCe11 产线的产能设计目标，完全满足实际生产需求。

云化 PLC 的设计与应用不仅仅是为赋能现实工业的智能制造，其更大的意义在于，他带给我们思维模式上的突破。云化 PLC 依托 5G 网络技术用无线的方式解决了实时性的问题，借助云化让 PLC 不再受物理位置的束缚。云化与 5G 的结合，让分布式控制系统的规模化、扁平性和分散性，都达到了史无前例的量级，见图 55。既然传统 PLC 设备可以实现云化，那么意味着其他物理设备同样具备云化的可能。多个云化 PLC 产品的落地，说明工业领域的软硬件解耦已经发生，通用性的硬件和开放式的软件正在变成“新常态”。



图 55 基于 5G 云边协同的工业控制操作系统（云化 PLC）

（三）云化 PLC 与工业元宇宙

工业元宇宙的核心之一是将各种设备连接到云平台，实现设备之间的互联互通和数据的集中管理。云化 PLC 可作为现场设备的物理接口，实现现场设备和传感器数据的实时采集，并将其上传至云平台。通过对云化 PLC 上传的数据进行智能化分析，工业元宇宙可实现对设备运行状态的实时监控和预测性维护。

1. 实时通信

由于云化 PLC 可支持丰富的工业协议，允许不同设备之间进行实时数据传输和通信，所以可实现系统资源的智能分配和使用，提高生产效率和产品质量。而这种跨设备协同与优化的能力，正是实现工业元宇宙中的智能化生产和全面优化的关键所在。

2. 数据安全

此外，云化 PLC 遵循相关的隐私法规和标准，能够使用多层次的安全措施，如数据加密、身份认证、访问控制等，以确保设备和数据安全，为企业在工业元宇宙中安全地共享和利用数据提供了保障。

综上所述，云化 PLC 通过提供数据采集与监控、设备互联互通与安全隐私保护等特性，推动了工业元宇宙的发展，赋能企业实现数字化转型和智能化生产。

二、先进工控网络技术与工业元宇宙

（一）先进工控网络技术的内涵

工业数据通信与控制网络(简称“工业控制网络”)是近年来发展形成的自动控制领域涉及局域网、广域网和分布式计算等多方面技术的网络技术。工控网络融合了通信节点(主要是上位机控制器)、通信网络和通信协议三个要素。其中,以传感器、执行器作为网络节点,以现场总线或工业以太网作为通信媒介,组建开放、数字化的通信设备系统,以执行相应的控制任务。作为网络技术在工业控制领域的延伸,工业控制网络实现了计算机网络、通信技术与自动控制技术的有机结合。

工业控制网络的发展经历了从传统控制网络到现场总线、工业以太网以及无线网络的过程,其克服了传统的工业控制方式中存在的各个弊端,具备了以下特点:

1. 实时性

作为连接工业现场测量控制设备的一类特殊通信网络,不仅能够完成非实时信息的通信,还可支持实时信息的传输。

2. 互操作性

能够满足相连接设备或系统之间的信息交流需求,实现设备间、系统间的信息传递与沟通的互操作。

3. 系统开放性

可实现在同样设定标准下,远距离设备之间的开放互连。

4. 通信高效性

满足规模庞杂,信息量需求巨大,数据类型繁多的复杂系统的高效通信。

5. 无监督性

可自动建立连接以进行设备、系统间的数据和信息的传输与交流,实现智慧无人化管理。

（二）先进工业控制网络应用现状

随着工业互联网、人工智能等新一代信息技术的飞速发展,工业领域企业的经营方式发生了较大的变化,而工控网络技术也在不断更迭与发展。例如,随着工业互联网、人工智能等新一代信息技术的飞速发展,工业领域企业的经营方式也发生了很大的变化。对于工控网络技术,也在同时更迭与发展,如更高的带宽

是高性能工业控制网络的要求。要增加带宽，首先要分散控制数据，在将来，分散控制系统会产生增加二十到三十倍的制造信息。在自动化控制和通信设施中，应注意新旧处理体系和技术，否则网络很可能无法承载，从而产生瓶颈效应。以太网的标准带宽是 10Mbps，而近期有学者研究高速以太网，其速度能达到百兆甚至千兆，从而能够为企业大范围内的主干网络提供支撑。

目前无线技术的应用范围只能局限在数据的采集与监控方面（SCADA）。但随着无线网络技术可靠性的增强，无线技术将会有更广范围的应用。现在已有不少企业工业级的无线网络设备面世，可以提供约 100Mbit/s 的数据传输速率。传输距离方面，如果在 5GHz 频率下使用合适的天线，可以达到 20km。未来扩展的 IEEE802.11n 将进一步规范无线网络在工业环境中的标准，到时数据通信将更可靠、速率也将更高，可达 640Mbit/s。

无线通信将在未来快速地增长，且与有线通信技术相辅相成。具有稳定、可靠和安全的有线通信方式不会消失，无线通信方式将在不方便接线或者接线实现成本高的地方发挥重大作用。由于有线和无线通信都支持传输控制协议/网际协议，这两种通讯方式如果能够有机地结合在一起，发挥各自优势，这将为提高通信效率提供新的解决方案。

（三）先进控制网络与工业元宇宙

纵观当今工业控制网络的发展趋势及市场需求，未来工业控制网络的发展趋势与工业元宇宙的发展需求具有相对一致性。具体来说，即随着工业元宇宙的发展，工业控制网络作为实现设备互联和数据通信的基础，必须向着高效、可靠、安全的方向持续演进与创新。主要包含以下几个发展方向。

1. 提高通信实时性

工业元宇宙需要实时获取和传输大量的设备数据，以支持实时监控和决策。工业控制网络提高通信实时性主要是使操作系统和交换技术支持实时通信。操作系统基于优先级策略对实时和非实时传输提供多队列排列方式。交换方式支持高优先级的数据包接入高优先级的端口，以便高优先级的数据包能够快速进队到传输队列中。这样，工业元宇宙可以及时获取设备的状态和性能数据，实现实时监控和预测维护，提高生产的实时性和响应能力。

2. 提高通信可靠性

工业元宇宙需要可靠的通信网络来实现设备之间的互联和数据的可靠传输。工业控制网络主要基于不同的网络交互技术构成的，故需进行不同类型网络站点之间的通信。通过设计具有可靠性的虚拟自动化网络以构筑深层防御系统，可保证设备之间的稳定通信，并防止数据的丢失和延迟。这样，工业元宇宙可以在确保数据完整性和一致性的前提下获取设备数据，支持不同设备间互联互通。

3. 提高系统安全性

工业元宇宙需要防止潜在的网络攻击和数据泄露，以提高生产的安全性和可信度。工业控制网络中的通信威胁主要来自于统一的网络结构中的系统故障、电磁干扰、高温辐射、恶意攻击等。因此，必须在工业控制网络中设计有一套明确的通信规则来定义通信的时间和对象，实现身份验证、数据加密和威胁监测等安全机制。这样，工业元宇宙可以在保护设备和数据安全的前提下实现数据的共享和协同工作。

三、具身智能技术与工业元宇宙

(一) 具身智能技术内涵

具身智能(Embodied AI)是一种基于物理身体进行感知和行动的智能系统，其通过智能体与环境的交互获取信息、理解问题、做出决策并实现行动，从而产生智能行为和适应性。近年来，生成式人工智能(AIGC)孕育了ChatGPT和文心一言等通用视觉语言大模型，使得人工智能的研究从静态数据驱动向智能体交互的方向转变。然而，要实现真正的通用人工智能，仅仅依靠语言模型远远不够，还需使得物理实体具备在物理世界中运动、感知环境和内部状态，并与周围环境进行交互的能力。

具身智能的核心思想是将智能体与物理实体相结合，以通过物理身体的感知和行动来实现智能体的表现。其主要具有以下几个特点：

1. 环境感知

智能体通过感知环境中的物理信号来了解周围的物理、位置、形状等关键信息，为后续的决策和运动提供基础。

2. 运动控制

智能体可通过控制器来接受传感器的信息并做出规划，向关节发出指令驱动执行器动作。

域展现出巨大的潜力。通过结合感知、学习和运动控制，具身智能使得机器能够更好地理解环境、与人类进行交互，并实现复杂任务的执行。随着技术的进一步发展和创新，具身智能有望在未来的人工智能应用中发挥越来越重要的作用，为人类创造更智能、高效和便利的生活和工作环境。

（三）具身智能技术的应用现状

具身智能即构建能够通过自我学习掌握各种技能并执行现实生活中的种种通用任务的高端机器人，被视为人工智能领域的下一个挑战。而工业元宇宙作为一个追求数字化、智能化和自动化的工业生产理念，正是与具身智能所望实现的性能不谋而合。

1. 智能化决策

具身智能作为一种高级机器人技术，具备自我学习和掌握各种技能的能力，可以虚拟代理形式在工业元宇宙系统中实现智能化决策和优化，为工业元宇宙提供更加高级、灵活和智能的生产能力。

2. 人机协作

工业元宇宙的核心理念即“人在回路”，强调人-机-环境三者的良性互动，而具身智能具备类似人类的感知，能够理解人类的指令和意图，并做出相应的反应和动作，实现了人机协作的新模式。

3. 数据驱动

具身智能还能够为工业元宇宙提供数据驱动的能力，并利用这些数据进行智能化处理，帮助工业元宇宙实现更智能、准备和自适应的生产管理。

四、机器人化制造技术与工业元宇宙

（一）机器人化制造技术的内涵

机器人化制造技术是以机器人为核心，辅以自动化技术、控制技术、传感技术等先进技术，将人类智慧和知识经验融入感知、决策、执行等制造活动中，赋予机器人化制造装备在线学习和知识进化能力，从而实现生产线智能化、柔性化和高效化。机器人化制造正成为智能制造发展的重要引擎，推动着制造业向数字化、网络化和可持续化方向迈进。机器人化制造技术具有以下特点：

1. 柔顺性

机器人化制造技术可根据实际生产需求进行重新编程和资源调整，以适应不

同产品类型、工艺流程或生产环境的变化。

2. 灵活性

机器人化制造技术能够在不同任务和工作环境下快速适应并给出应对措施，并与其他设备和系统进行协同工作。

3. 开放性

机器人化制造技术通过标准化接口和通信协议与各种设备、系统和平台进行无缝集成和交互。

4. 易于重构

机器人化制造技术能够根据工艺变化进行机器人的重新布局和配置，实现最佳的生产效率和质量。

5. 可并行协同作业

多个机器人之间可并行协同作业，共同完成复杂的制造任务，加快产品的生产周期。

(二) 机器人化制造技术的应用现状

随着技术的不断进步和应用的深入，机器人化制造技术在更多领域发挥着重要作用，已成为制造业前沿的研究热点技术。世界各国对机器人化智能制造高度重视，美国颁布无尽前沿法案，重点关注机器人和先进制造技术；欧盟明确提出要实现 50 μm 精度的加工机器人；我国则提出“中国制造 2025”战略，促进实现人-机-环境的共融。

在产业界，机器人化制造技术通过无处不在的机器人，无处不在的传感，无处不在的智能，以实现无处不在的制造。例如，在汽车制造行业，特斯拉和法拉利等公司通过机器人化制造技术实现了高度自动化的生产线，以提高制造效率和产品质量，见图 57。

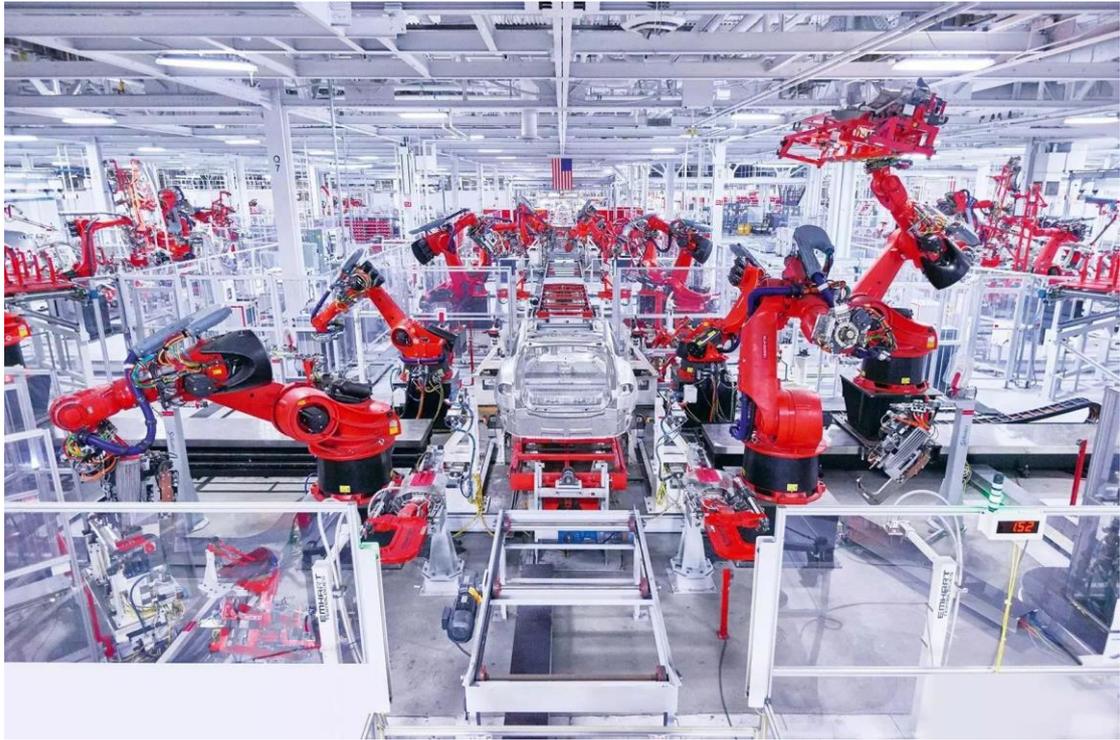


图 57 特斯拉自动化工厂

在电子制造行业，富士康和苹果等公司利用机器人化制造技术实现精确的零部件组装，以提高生产线的稳定性和产品一致性。在学术界，华科、清华、上交、浙大、天大等高校，通过机器人机械学与加工工艺、技术共融，在大型构件制造技术及装备方面取得了较好进展，见图 58。

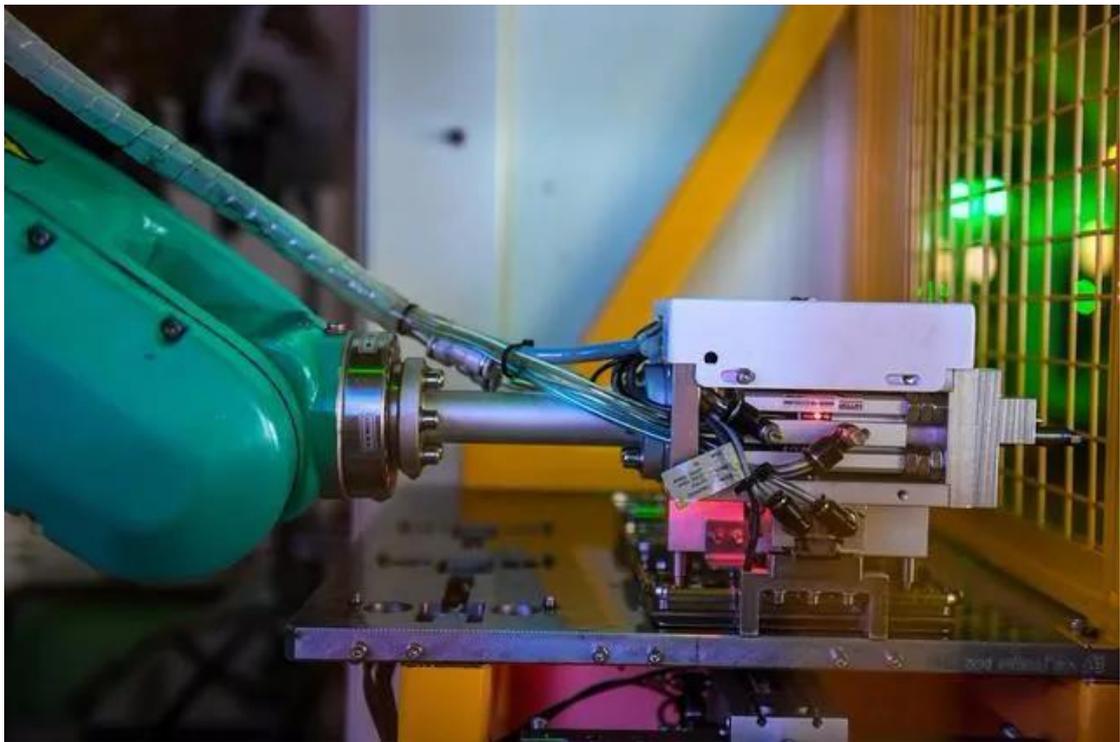


图 58 在富士康的熄灯工，从自动上料、零件加工、智能补正、自动检测到智慧物流的完整生产流程均由机器人自主操作，可实现关灯状态下的全自动化作业

Science Robotics、MIT 科技评论等聚焦“机器人集群、用于机器人的人工智能、灵巧机器人”等研究方向。Science Robotics 期刊上提出了未来机器人面临的十大挑战，包含新材料、仿真、能源、机器人集群以及人工智能等等。MIT 科技评论了机器人领域的十大突破技术，位于榜首的是灵巧机器人。实现灵巧机器人是未来面临的重大机器人技术难度，这是一个非常值得探索的学术研究方向。

（三）机器人化制造技术与工业元宇宙

机器人化制造技术的科学内涵即使得单个的机器能够实现能工巧匠，多个机器能够实现多机协作，人机可以实现自然交互。而这些内涵正与工业元宇宙的发展需求相契合，为工业元宇宙提供了丰富的赋能机会。

1. 高效生产

机器人化制造技术在工业元宇宙的发展中可以实现高效生产。单个机器具备高度精确性和技能，能够有效提高生产线的效率和质量，减少错误和浪费。而多个机器的协作能力则进一步增强了生产线的效率，实现了并行操作和优化资源利用。这种高效生产能力可以满足工业元宇宙中快速变化的市场需求，并提供定制化和个性化的生产能力。

2. 人机交互

机器人化制造技术依托自然交互的人机界面，实现了人与机器之间的紧密合作。这种互动和协作实现了人机协同的交互创新，为工业元宇宙可以提供平台和工具，让人们与机器人共同解决问题，提出创新的想法和改进方案。

3. 数据驱动

机器人化制造技术的数据驱动能力为工业元宇宙提供了智能化的决策支持。机器人通过传感器和数据采集系统收集大量的实时数据，这些数据可以用于监测生产过程、产品质量和设备状态。基于这些数据，工业元宇宙可以进行数据分析和挖掘，提取有价值的信息，支持决策制定和生产过程的优化。这种数据驱动的智能决策能力可以提高生产效率、资源利用效率和能源效率，对于工业元宇宙的可持续发展至关重要。

第三章 产业应用篇

工业元宇宙应用场景大体可以分为工业产品全生命周期以及工业系统粒度两个维度，见图 59。从工业系统粒度上看，工业元宇宙可面向设备级应用、产线级应用、工厂级应用以及产业链应用。从工业产品全生命全生命周期上看，工业元宇宙在研发阶段、生产阶段、供应链阶段、销售阶段以及服务阶段均发挥着至关重要的作用。

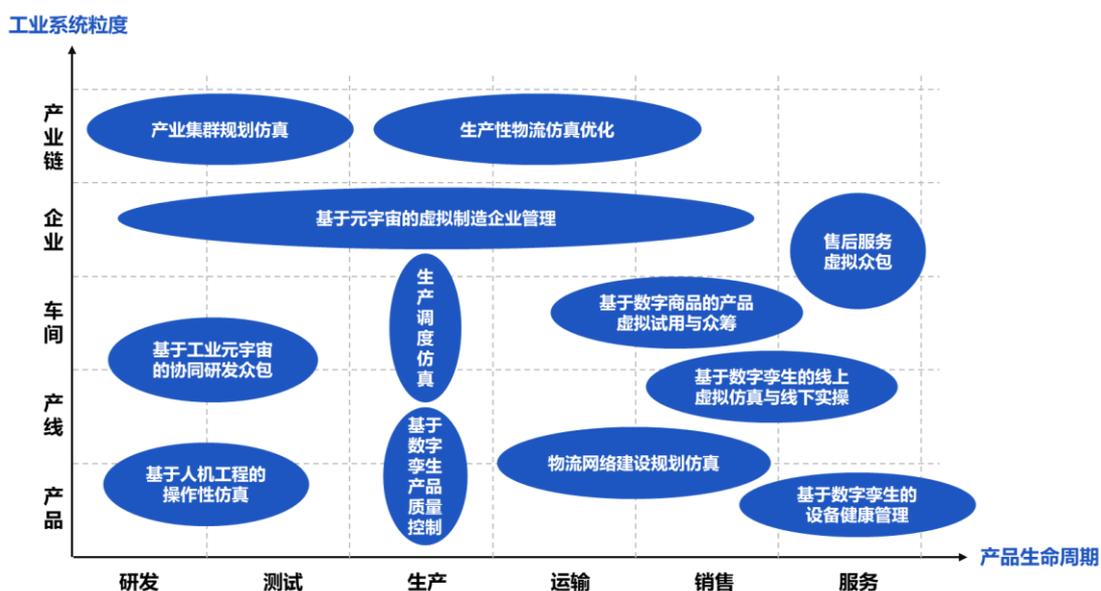


图 59 工业元宇宙应用场景

第一节 工业元宇宙在工业流程各环节的应用

一、工业元宇宙在研发设计环节的应用

(一) 工业元宇宙在研发设计环节的应用特点

1. 沉浸式体验

通过对产品、产品零部件、生产环境、用户使用环境等进行精准的 3D 建模，设计者可以通过 AR/VR 技术“真实”地对产品原型进行直观的拖拉拽组合、分解、重构，在模拟环境中进行“真实”的操控，实现身临其境的交互体验、全方位的观察与操作、实时反馈与优化、强化团队合作与沟通以及实现创新设计与传统设计的结合，进而提供更高效、精准、创新的设计体验。

2. 跨时空协作

各个领域的设计者，可以通过自己最喜欢的熟悉的设计工具，参与到元宇宙

协同设计中，元宇宙协同设计平台将会透明地提供文件格式转换、异构系统交互、设计流程管理等能力，突破物理空间限制，增强了团队成员之间的沟通和协作，通过共享文档、资料和经验，设计师可以更快地了解项目背景和需求；同时，团队成员在不同时间段内进行工作，避免了时间冲突和资源争夺等问题，进一步降低了沟通成本和差旅成本，提高了工作效率。

3. 支持众包式

设计师和用户可在元宇宙中进行沉浸式协同，根据反馈实时进行设计迭代，提高双方的沟通效率和产品设计质量。而且，AIGC 引擎能够根据用户的自然语言命令，快速生成产品原型，甚至可以“涌现”出其不意的设计方案。同时，众包式技术应用鼓励开放式创新，通过广泛征集外部创意和资源，将研发设计的过程变得更加开放和动态，提高创新的开放性和广泛性，在一定的程度上可提高协作效率、优化资源配置，并激发创造力。

4. 仿真驱动

元宇宙设计平台能够提供多模态的仿真能力，每一个设计者的创意都能够非常高效地在虚拟空间中验证其技术可行性、生产可行性、用户交互的友好性。进而预测、优化研发设计，在一定的程度上可以减少物理原型成本。同时，仿真驱动可以综合运用多学科知识，使得设计师可以在多个层面上对产品进行模拟和分析，更全面地了解产品的性能和特点，进而提高设计的效率和可靠性，降低成本和减少风险，为工业元宇宙的研发设计带来更多的优势和可能性。

5. 数据驱动

数据驱动的产品设计，目标产品的上一代或相关产品，甚至包括竞品的用户行为数据、销量数据、质量数据、渠道反馈、供应链数据等都被集成到工业元宇宙中。基于这些历史数据，分析式 AI 技术将为设计者提供各种维度的分析，预测各种产品特性的成本、质量影响，预测用户的反馈，推动产品的持续迭代优化。通过对数据的分析和挖掘，并基于大量数据的分析和机器学习算法的应用，预测产品的性能，进而帮助设计师提高设计效率，预测产品性能并强化团队协作。

（二）工业元宇宙在研发设计环节的应用场景（见图 60）



图 60 工业元宇宙在研发设计环节的应用场景

1. 元宇宙数字资产模型构建

数字资产模型包括几何模型、数据模型和机理模型，这几类模型深度融合，形成自组织、自演进的生命体。其中，元宇宙数字资产是推动工业元宇宙全价值链应用的基础和核心。

在工业制造行业，数字资产模型构建可以帮助工厂实现从概念设计到生产全过程数字化建设。设计师可以通过沉浸式体验技术对制造产品进行全方位的观察和交互，利用多模态仿真技术实现对产品性能进行预测和优化，从而提高设计效率和产品质量。同时，数字资产模型构建还可以帮助企业实现生产过程的数字化，通过模拟生产流程和优化生产计划，降低生产成本和减少资源浪费。

2. 实时 3D 动态渲染

融合 AR/VR 技术，提供沉浸式交互和数据驱动的实时 3D 动态渲染能力。涉及的范围比较广，包括对大规模 3D 模型的数据处理和渲染，实现复杂的视觉效果和高沉浸感的交互体验。实时 3D 动态渲染的核心是利用高性能计算、云计算和边缘计算等技术，对大量的 3D 模型数据进行处理、渲染和存储。

工业制造行业，可通过实时 3D 动态渲染助力企业实现整个生产过程全生命周期的高可视化。通过将产线的三维模型数据通过相关接口集成到实时渲染系统中，在中控平台可直观地显示整个产线设备的生产状态，以监控生产过程，同时，过程中支持预测产线在生产过程中潜在的问题和风险，进而提高生产效率、降低成本、减少资源浪费，并实现更精准的质量控制。

3. 多模态仿真

多模态仿真的核心是融合了物理引擎、固态仿真、流体仿真、电磁仿真、多物理场耦合、复杂系统动力学建模、智能体仿真等多种技术的仿真能力，构建多模态仿真的模型和环境，对不同工业场景进行全方位的仿真和预测。

在工业制造行业，多模态仿真可以帮助企业实现从产品设计到生产制造的全过程仿真。设计师可以通过虚实融合技术对产品进行全方位的观察和交互，利用增强现实技术对产品性能进行测试和验证，利用人工智能技术对生产过程进行模拟和优化。这有助于提高设计效率和产品质量，减少生产成本和资源浪费。

4. 虚拟产品协同设计

传统的协同设计存在如下几个问题：（1）对于产品设计与工艺规划，设计周期长、错误率高；（2）身处异地、单机设计思维受限；（3）CAD 模型数据量大，模型打开、浏览、操作速度慢、流畅性差。为此，可利用虚拟现实、增强现实、云计算等技术，可以实现设计团队在虚实融合的场景中进行实时的协同设计和评审，从而提高设计效率、缩短产品开发周期、降低开发成本。

工业场景中终端采用 PAD/手机/Windows PC 和 XR 眼镜客户端，支持跨地域、跨企业的设计师通过佩戴终端设备实时查看高精度 3D 模型，研讨过程可支持设计师对模型放大、缩小和旋转，实现对模型的查看和设计修改，修改和评审过程中 3D 模型（增量模型）经云渲染后的视频流，实时通过云渲染平台的云 XR 内容分发模块推流给所有接入的 XR 客户端进行同步观看和评审。

5. 众包式 UGC 产品设计

众包式产品设计 UGC——实现设计产品的数量激增，利用虚拟现实、增强现实、云计算等技术，实现大众参与、共享创造力的产品设计过程，通过拖拉拽快速实现产品设计，并进行模拟仿真，避免大量物理实验，提升设计效率。

众包式 UGC 产品设计的核心是利用虚拟现实和增强现实技术，将用户引入到虚拟环境中，实现大众参与的产品设计过程。设计师可以在虚拟环境中发布设计任务或设计征集赛吸引用户的设计参与度。用户可以通过虚拟现实设备进入虚拟环境，与设计师进行实时的沟通和协作，提出自己的想法和建议。这些用户生成的内容（UGC）可以实时反馈给设计师，设计师可以根据用户的设计理念和整体反馈进行修改和优化。

6. 数据采集、集成和融合分析

基于工业互联网相关技术实现海量数据的实时采集。通过在设备、生产线和产品上布置传感器，实时监测温度、压力、位移等各种参数，支持将设备参数等数据传输到云端进行处理。同时，基于云计算和大数据技术，可以对采集的海量

数据进行集成和融合分析。通过对不同来源、不同格式的数据进行统一管理和标准化处理，实现数据的整合和共享。

在数据采集、集成和融合分析的过程中，工业元宇宙还提供了沉浸式的体验和交互方式。利用虚拟现实和增强现实技术，提高用户了解工业制造过程中各种参数和状态的直观效果，支持与现场进行实时交互。进而提高工作效率和准确性，减少人工干预和错误率。

7. AIGC 驱动模型生成

AIGC 驱动模型生成可以通过机器学习算法对工业制造行业生产过程中的历史数据进行训练和学习，从而得到生产过程的规律和趋势。并支持基于这些规律和趋势，AIGC 可以驱动海量生产线模型生成、场景生成，如设备维护模型、生产计划模型、质量控制模型等。这些模型可以根据实际情况进行自动调整和优化，从而适应不同的生产环境和需求。

同时，AIGC 驱动模型生成还可以利用深度学习技术对产品设计进行自动优化。通过对产品设计参数进行自动调整和优化，可以得到更加符合市场需求和用户期望的产品设计方案，进而大大提高产品设计的效率和准确性，减少设计成本和时间。

（三）工业元宇宙在研发设计环节的应用案例

1. 案例：联想新视界（北京）科技有限公司

以联想新视界支持中国商飞构建的飞机设计典型过程仿真系统为例，该系统构建了飞行场景机理数据驱动的多模态仿真能力，服务于飞机研发过程中的整机和关键子系统的仿真验证。打通了 GIS 地理数据、卫星天气数据接口、机理数据接口等，实现了以数据驱动的飞行机理仿真、场景三维仿真以及飞行环境仿真，并以云渲染方式提供大型场景的多终端设备互动，支撑多人在线协同的三维虚拟评审，见图 61。

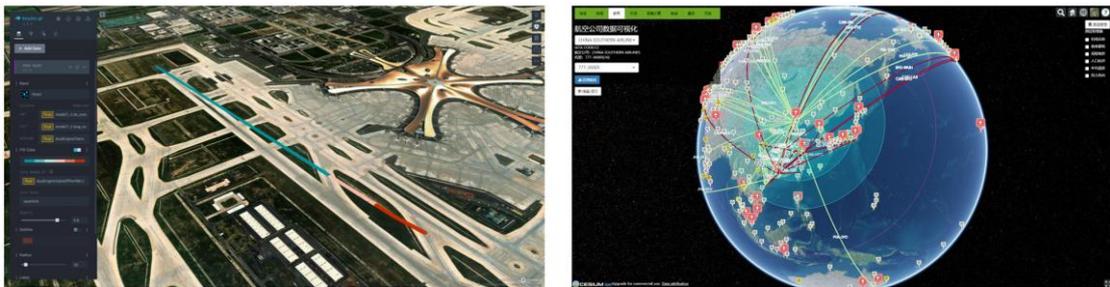


图 61 飞机设计典型过程仿真系统

2. 案例：中兴通讯股份有限公司

中兴通讯助力某大型智能制造企业构建基于云渲染的远程协同评审业务系统，将云渲染及轻量化技术结合，助力设计人员采用离线软件对设备进行设计，完成后可一键对设备模型进行导出并导入工业协同设计评审系统，支持邀请各地专家进行评审参加会议，通过云渲染平台分发视频流方式到 Pad、PC 等移动终端，助力各地设计师通过不同移动终端对 CAD 模型进行查看与操作。通过上述业务极大地提升了设计效率，远程协同评审方式大大降低了专家出差成本，而通过云渲染的方式可保证设计人员在高保密性的环境中实现协同设计评审，并将所有数据保存在云端，确保沟通交流的安全性和隐私性。

3. 案例：西门子中国研究院

基于西门子数字孪生的夹具创成式设计解决方案，可以更加快速的根据需求进行工业设计。通过从历史设计，历史文档，以及工程师经验中进行知识获取，形成设计知识的数字孪生。在此基础上，根据新的设计需求，综合分析生成新的选择设计，并可以结合仿真工具的验证以及设计工程师的优化迭代，进而在极短时间内生成符合设计要求的工业设计。此外，在虚拟调试方面，西门子基于混合现实的远程协同调试方案通过以下多个场景的串联实现方案的整体展示。

(1) 场景一：在进行远程在线虚拟调试之前，现场工程师使用混合现实设备对当前现场进行深度扫描，此过程可以将现实环境重建到虚拟仿真环境中，并且通过空间错点技术将现实世界的位置坐标和虚拟环境进行对齐，为远端的仿真设计做准备。

(2) 场景二：远端仿真工程师在获取现场采集的数据后开始进行现场环境的三维重建，三维重建过程实现了原始 RGBD 数据到 3D 点云最后到 3D Mesh 模型的转变，使得工程师可以将逼真的环境模型和机器人 CAD 模型在同一个仿真环境中进行工艺设计和仿真建模。

(3) 场景三：当机器人工艺设计在远端仿真环境完成之后，仿真工程师通过远程通信技术和现场工程师的混合现实设备进行连接，开启跨地域在线调试过程通过识别在第一步现场环境扫描确定的错点位置，虚拟的机器人 AMR 模型在现场进行显现复位，随着远端仿真数据同步到现场，机器人的仿真动作在现场进行实时同步，完成虚拟调试和验证。

(4) 场景四：最后调试验证的混合现实仿真过程，穿戴混合现实设备的人员可以离线观看演示，非穿戴混合现实设备的现场人员通过视频串流技术可以在屏幕上实时观察仿真内容，也进一步实现多人视野共享的讨论协作。

二、工业元宇宙在工业生产环节的应用

(一) 工业元宇宙在工业生产环节的应用特点

1. 沉浸式体验

工业元宇宙通过提供沉浸式的虚拟环境，让用户能够身临其境地体验工业生产过程。这种体验方式有助于用户更好地理解 and 掌握生产流程，提高生产效率。

2. 实时交互

工业元宇宙平台支持实时交互，用户可以在虚拟环境中进行操作和调整，对生产过程进行实时监控和调整。这种交互方式有助于提高生产过程的可控性和灵活性。

3. 高度逼真

工业元宇宙平台能够提供高度逼真的虚拟环境，模拟真实的工业生产场景。这种逼真程度有助于用户更好地理解 and 掌握生产过程中的细节和难点，提高生产质量。

4. 跨平台支持

工业元宇宙平台支持跨平台应用，可以在不同的设备上运行，如 PC、游戏主机和移动设备等。这种跨平台支持有助于提高生产过程的可扩展性和灵活性。

5. 优化生产流程

通过工业元宇宙平台，企业可以在虚拟环境中模拟生产流程，发现和解决生产过程中的问题，优化生产流程，提高生产效率。

(二) 工业元宇宙在工业生产环节的应用场景

在生产环节中，工业元宇宙的作用在于收集全生产要素的数字资产数据后，同步构建生产场景的数字孪生场景，实现生产全流程的数字化监控、仿真和持续优化，见图 62。全生产要素就是指“人机料法环测”六大要素：

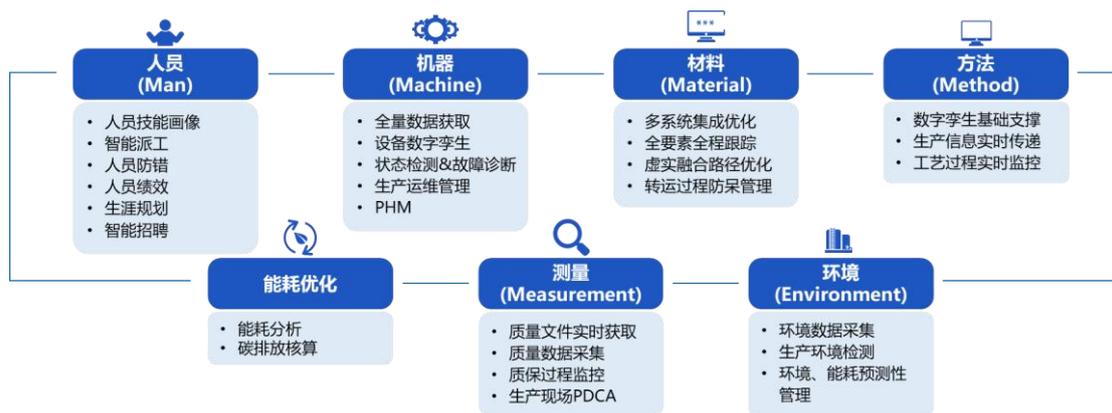


图 62 工业元宇宙在工业生产环节的应用场景

1. 人员 (Man): 操作者对质量的认识、技术熟练程度、身体状况等

(1) 人员技能画像

人员技能的评价对于提升生产效率和产品质量具有至关重要的作用。可通过数字孪生技术建立虚拟仿真环境、对现场人员技能数据（包括操作者对质量的认识、技术熟练程度等）进行采集、采集的数据通过可视化技术呈现给评价人员、基于数据分析技术对人员的技能进行量化评价、评价的结果反馈给相关人员，让产线员工了解自己的技能水平以找到提升方向，实现可视、量化评价人员技能的目的。

(2) 智能派工

数字化派工和人员定岗是一项重要的应用，具体需要工厂/园区建立数字化派工系统，将实际生产过程中的各类数据录入系统，建立全面、准确的数据库；通过数字化派工系统的大数据分析技术对录入的数据深入分析，实现自动派工或半自动派工；然后将人员信息和岗位需求进行匹配，系统可自动或半自动地生成派工方案（方案包括员工的姓名、工号、岗位名称、工作内容、工作时长等信息）；基于数字化派工的结果，企业可以实现更加精准的人员定岗。数字化系统派工完成后可以实现对派工情况的实时监控和调整。

(3) 人员防错

在工业制造行业，园区/产线对人员防串岗、防错配和行为全监控是非常有必要的。通过在工厂/园区建立数字化监控系统，将实际生产过程中的数据录入系统，建立全面、准确的数据库，实现对防串岗、防错配和行为全监控。

通过数字化监控系统，实时监控人员的工作地点和工作内容，确保人员没有串岗或者从事错误的工作任务；通过视频监控技术，实时获取生产现场的人员行

为数据（包括操作步骤、操作时间、操作质量等）；园区/产线评价人员基于数字化监控系统采集的数据对人员行为进行评价，并通过数据分析技术对数据进行深入挖掘和分析，以达到优化生产过程和提高产品质量的目的。

（4）人员绩效

基于行为量化实现绩效管理可实现更加全面、客观的人员绩效评估和管理，进而提高生产效率和质量。可通过建立数字化绩效管理系统，将实际生产过程中的数据录入系统，建立全面、准确的数据库；系统可采集人员行为数据（包括操作步骤、操作时间、操作质量等），并支持对采集到的行为数据进行量化和分析，得出人员的行为特征和表现结果，评出员工的行为特征和表现绩效；基于系统设定的激励与奖惩机制对员工的行为表现进行嘉奖和惩处。这不仅可以提高企业的生产效率和水平，还可以帮助企业更好地管理和利用人力资源。

（5）生涯规划

在工业元宇宙的环境中，可构建虚拟的员工生涯规划室，实现对员工的档案、培训、转岗、流动的管理。其中，员工生涯规划中的培训环节可通过虚拟现实、混合现实和增强现实等各类应用模拟各类复杂环境，呈现设备内部构造，实现重复观察设备操作过程，支持重复使用耗材实践，达到现实场景中达不到的训练效果，同时在培训过程中系统能全程记录操作过程并给出评价，实现教考评一体，提升培训效率。

（6）智能招聘

工业领域对于智能招聘的需求比较大，旨在通过数字化技术，实现更精准、更高效的人员招聘和管理，进而提高生产效率和水平。可通过如下几个关键步骤实现智能招聘：建立数字化招聘系统——分析招聘需求——筛选候选人——面试与评估——招聘决策与录用通知——入职培训与跟踪。基于此可实现工业元宇宙中生产环节的智能招聘，在一定的程度上可提高企业的招聘效率和水平，进而帮助企业更好地管理和利用人力资源。

2、机器(Machine)：机器设备、测量仪器的精度和维护保养状况等

（1）全量数据获取

生产环节涉及到的设备数据复杂多样，包括各种传感器、机器、生产线等产生的海量多源异构数据。为了有效利用这些数据，需要进行数据抽取（ETL）工

作，将数据从原始格式转化为统一的格式，便于后续的数据分析和利用。以下是实现海量多源异构设备全量数据 ETL 获取的几个关键步骤：数据采集——数据传输——数据转换——数据存储——数据监控和管理——数据服务和应用。基于以上几个关键步骤以提高厂区/车间数据处理效率和质量，实现将数据转化为有价值的信息和知识，为工业生产提供强有力的支持。

(2) 设备数字孪生

设备/产品运行建模和数据建模是实现生产环节优化和提升的关键步骤。通过建立模型，可以对设备/产品的运行状态进行仿真和预测，进一步优化其性能和效率。以下是实现设备/产品运行建模和数据建模，以及运行状态仿真的几个关键步骤：设备/产品运行建模——数据建模——运行状态仿真——数据分析和优化——实时监控和预警——可视化和交互，进而提高设备/产品的性能和效率，可以帮助企业更好地管理和利用资源，进一步优化生产过程。

(3) 状态检测&故障诊断

异常监控、报警、故障判定和故障根因分析是生产环节中的重要环节。通过实时监控设备或生产线的运行状态，可及时发现异常情况，进行报警和故障判定，分析故障根因，以便采取相应的措施进行修复和预防。可通过异常监控——报警和故障判定——故障根因分析——修复和预防措施——数据记录与分析的流程对工厂/园区设备状态进行监测与故障诊断，进而提高生产效率和产品质量，降低维修成本和减少停机时间，为企业创造更大的价值。

(4) 生产运维管理

在工业元宇宙的典型应用场景中，生产运维管理是至关重要的环节，主要包括台账管理、运维决策、远程运维、系统自愈、运维周期优化等多个功能。通过数据分析和预测技术，实现对设备状况和生产需求的预测和评估，进而提高设备的可靠性和使用寿命，降低运维成本，减少停机时间，提高运维的智能化水平，减少人工干预和错误判断，提高生产过程的可靠性和稳定性。

(5) PHM

PHM 是一种综合性的技术，涵盖设备分级分类、产线设备预测性维护；产品全生命周期管理、远程运维及自愈合诊断等多个方面。可通过数据收集与处理——特征提取与建模——故障预测与识别——健康状态监测与评估——维护策略

制定与实施——持续改进与优化的流程提高运维的智能化水平，减少人工干预和错误判断，提高生产过程的可靠性和稳定性。

3. 材料(Material)：材料的成分、物理性能和化学性能等

(1) 多系统集成优化

为实现生产、仓储、运输管理多终端信息优化集成，可通过工厂/园区建立统一的信息平台，将生产、仓储和运输等部门的数据和信息进行集中管理和整合；然后，通过跨部门的信息共享，及时了解其他部门的需求，协调资源分配和生产计划；合理地规划和管理信息流，促进信息的流通和共享，提高生产协同的效率；同时，考虑到不同终端的需求和特点要进行多终端适配和集成；对不同终端收集到的信息进行数据挖掘和分析实现对多系统集成效果进行不断的优化和改进。

(2) 全要素全程跟踪

全要素全程跟踪涉及到从原料采购到产品送达全过程流体、载体、流程、流向、流量全监控，通过实时监控和数据分析，可以及时发现潜在问题和异常情况，并采取相应的措施进行调整和优化，同时为了更好地实现全监控，需要对收集到的数据进行处理和分析，提高生产的智能化水平，减少人工干预和错误判断。

(3) 虚实融合路径优化

在工厂/园区实现虚实融合的路径优化主要包括分拣策略、线路负载、配送路径的实时仿真计算与优化，通过在厂区/园区建立仿真模型，并实时采集设备运行数据、仓库库存等数据，基于优化算法实现对厂区的动态调整分拣策略。在一定的程度上可提高生产效率和厂区的智能化水平，减少人工干预和错误判断，降低成本，确保生产过程的可靠性和稳定性。

(4) 转运过程防呆管理

在生产环节为保证生产安全和效率，可实现在原料、制件、工具、制成品防磕碰、防错配、防偷盗进行监测与防控，通过碰撞监测与预警、防错配技术、数据分析与预测、智能调度与协同、人员培训与意识提升等多个方面实现对转运过程进行防呆管理，以保障生产的安全性和效率性，降低生产成本和风险。

4. 方法(Method)：这里包括生产工艺、设备选择、操作规程等

(1) 数字孪生基础支撑

在生产环节为满足 SDM、MBD 数据应用精准度及时效性，需要对产线进行全

域、全生命周期、全类型数据 ETL (提取、转换、加载)。通过统一数据标准、数据清洗、数据校验与修正等多个过程实现对数据精准度的提升;基于实时数据采集、数据传输优化、数据存储与处理优化实现增强数据的时效性;为实现全域数据的集成,以打通信息孤岛、连接系统;通过数据存储与管理、数据挖掘与利用实现对产线全生命周期数据的分析,以上有助于提高生产效率、降低成本、优化资源配置以及提升产品质量等方面的决策能力。

(2) 生产信息实时传递

排产调度计划、工艺文件的端-云双向实时传递是实现高效、精准和实时的生产管理的重要部分。排产调度计划涉及到各个生产任务的时间安排、资源分配和优先级设置等,通过工业元宇宙相关技术实现排产调度计划进行数字化和智能化管理;工艺文件包含了各个生产环节的具体操作步骤、技术要求和注意事项等,排产调度计划和工艺文件的端-云双向实时传递,可以实现生产环节的高效协同和实时优化,进而提高生产效率,降低生产成本,还可以提高产品质量和减少生产事故的发生。

(3) 工艺过程实时监控

对产线工艺过程实时监控、防错、报警、异常实时上报,可实现对生产过程的全面监控和智能化管理,实现提高产线生产效率、降低成本、保障产品质量和提升生产安全性。利用物联网技术和传感器等设备对生产现场的数据进行实时采集和监控,实现对工艺生产流程的实时监控;同时基于智能化技术和数据分析方法,对生产过程中的错误进行预防和纠正;建立完善的报警和异常上报机制,对生产过程中的异常情况进行及时响应和处理。在一定的程度上可以加强对产线数据的隐私保护和安全管理,确保数据的准确性和安全性。

5. 环境(Environment): 工作地的温度、湿度、照明和清洁条件等

(1) 环境数据采集

生产环节中环境数据包括温度、湿度、压力、流量等,而对环境、能耗数据的全量采集与异构数据融合可实现对生产过程的全面监控和智能化管理。通过数据融合技术,可以将不同来源的数据进行整合和统一处理,消除数据之间的差异和矛盾,提高数据的准确性和可靠性。

(2) 生产环境检测

生产环境的监测主要包括生产工况/能耗实时监测、异常上报、常见环境异常自适应补偿控制等。通过物联网技术和各种传感器，实时监测生产设备的运行状态、工艺参数以及能耗数据，同时，基于生产环境监测系统将检测到的异常数据上传分析处理，确保异常情况得到及时处理，并支持基于人工智能和机器学习算法对生产环境监测进行自适应补偿控制，确保生产过程的稳定、高效和安全。

(3) 环境、能耗预测性管理

在环境、能耗预测性管理中，基于跨域协同的工况、环境、能耗预测及边缘自决策技术，可以实现生产过程的优化和能源的高效利用。通过人工智能和大数据技术对生产过程中的工况、环境、能耗等数据进行全面采集和分析；基于机器学习和数据挖掘技术，支持对未来的环境和能耗数据进行预测；通过边缘计算和自决策技术，可以将一部分计算和控制任务转移到边缘设备上，实现实时响应和快速控制，有助于提高生产效率、降低成本、保障产品质量和提升生产安全性。

6. 测量(Measurement): 主要指测量时采取的方法是否标准、正确

(1) 质量文件实时获取

通过实时访问企业级 OT 系统，并将质量文件实时下达至边缘，以确保生产过程中的质量控制和一致性。企业级 OT 系统包含了大量的质量文件，如质量标准、检验规程、工艺参数等，可利用物联网和云计算等技术，实现对企业级 OT 系统的实时访问和共享，同时，结合元宇宙的边缘计算技术，可以将质量文件实时下达至边缘设备，实现质量的实时监控和控制。

(2) 质量数据采集

为确保生产环节产品质量和生产效率，通过质保工具、日志和检测数据的实时采集与分析，实现对生产过程的全面监控和优化。在工业元宇宙平台中，可将质保工具与传感器和设备进行连接，实现对产品质量的实时监控和数据采集；同时，再将生产设备与元宇宙平台连接，实时采集设备的运行日志，采集的数据通过监测数据平台可实时监控设备生产运行状态，进而实现对生产过程和产品质量的全面监控和优化。

(3) 质保过程监控

生产环节的质保过程监控可进一步确保产品质量和生产效率，可通过全要素监控、防错技术应用、实时异常上报和边缘协同分析与自决策等手段，实现全面

的质量管理和控制。基于各类传感器和监控采集实时数据，结合工业元宇宙关键技术对数据进行分析处理，实现对产线运作过程的实时响应和快速控制，在一定的程度上可提高生产效率、降低成本、提升产品质量和客户满意度。

（4）生产现场 PDCA

生产环节的生产现场 PDCA 是指通过 IT-OT 协同分析，实现 TQM（全面质量管理）和 PDCA（计划-执行-检查-行动）控制全覆盖的过程。PDCA 是一种循环的质量管理方法，通过不断迭代和改进，实现产品质量和生产效率的持续提升。

7. 能耗优化

精准的能耗分析，可以有效地降低生产成本、提高能源利用效率、减少环境污染，能耗分析也是实现“双碳”目标（碳达峰、碳中和）的关键环节之一。通过采集与能耗相关的各种数据（包括电力、燃气、蒸汽等能源使用数据，以及设备运行数据、工艺参数等），实时监测各生产环节的能耗和碳排放情况；利用机器视觉算法或大数据分析等技术，识别出潜在的能耗瓶颈和碳排放源；建立碳排放核算体系，对生产过程中的碳排放量进行精确计算；分析能耗与碳排放之间的关联关系，找出影响碳排放的关键因素；根据能耗和碳排放分析结果，提出针对性的优化建议和改进措施。通过精准的能耗分析和碳排放核算，可以有效地降低生产过程中的碳排放量，为实现“双碳”目标做出积极贡献。

（三）工业元宇宙在工业生产环节的应用案例

1. 案例：工业云制造（四川）创新中心有限公司

以工业云制造（四川）创新中心有限公司支持德阳某制造企业数字孪生系统为例，见图 63。聚焦企业综合能源管控需求，以数字孪生技术为手段、能源基础数据为核心、物联感知设备为依托，针对水电气消耗、燃机发电余热利用、光伏发电、雨水回收、地源热泵、空压站等关键环节，构建企业源网荷储关键设备设施数字孪生体，全面接入实时物联监测数据和异常报警信息，通过虚实映射，实现能源设备设施的数据模型监测和 VR 仿真控制，实现能源设备故障和能耗指标异常的实时报警及 VR 远程处置，实现限电时期的可视化智能排产和用能调度。通过企业数字孪生系统建设，提高企业日常能源供应综合管控能力，提升限电情况下生产用能保障和应急处置的精细化调配能力。



图 63 德阳某制造企业数字孪生系统

以工业云制造（四川）创新中心有限公司支持乐山某化工园区数字孪生系统为例，见图 64。聚焦园区安全生产管控需求，构建园区全场景数字化三维仿真模型，接入园区安全基础信息、物联感知数据、视频监控画面、应急调度预案，通过虚实映射，实现风险隐患分级分色呈现、重大危险源状态同步感知、有毒有害气体泄漏动画展示，实现应急资源空间分布展示和应急路线空间动画演示。通过园区数字孪生系统建设，赋能园区全域实时可视化的安全生产感知管控，使主管部门实时直观掌握园区安全生产运行情况，将管理做到“看得见，管得着”，有效提升园区的生产安全监测能力、安全异常预警能力、应急调度处置能力。



图 64 化工园区数字孪生系统

2. 案例：中兴通讯股份有限公司

中兴通讯基于 ZTE XR Explore 为中兴通讯滨江 5G 智能制造基地员工作业培训业务场景打造了 AR 编辑器，基于 AR 编辑器将设备模型的 3D 场景、动画制作、事件交互等零部件进行高效编辑，实现快速编辑发布 MR 虚拟实训的 3D 内容和场景，通过简单的拖拉拽等方式，零代码地实现工厂 3D 互动培训内容。同时 AR 编辑器支持 3D 模型、视频、图片和动画的编辑，无需操作人员掌握专业的操作技能，即可编辑 MR 内容和场景，MR 场景可通过 MR 客户端实时预览查看。

三、工业元宇宙在供应链环节的应用

（一）工业元宇宙在供应链环节的应用特点

1. 实时可视化的全过程可视化

工业元宇宙可以支持企业实现实时可视化的全过程可视化，提供一个全面的风险管理系统，实施一体化的管理，提高效率，减少成本。

2. 精准控制

工业元宇宙可以帮助企业控制产品从研发到实施的所有过程，帮助企业快速建立产品优势，促进品牌的建立，支持企业开展营销，提高客户满意度，降低企业的用户服务成本。

3. 智能优化

借助 AI、机器学习和深度学习等工具，工业元宇宙可以联合分析供应链中的数据，从工业元宇宙中提取信息，获得能够帮助做出更好的商业决策的见解。

4. 跨设备通信

工业元宇宙通过连接物理和数字系统，将设备、机器人和传感器等一切物理资源连接起来。各种设备、机器和工作站之间可以互相通信，从而能够使用多个设备来协同完成任务。

5. 数据安全和隐私保护

工业元宇宙需要关注数据安全和隐私保护。数据交换和数据使用都需要遵循相关的安全标准，确保系统设计清晰并具有确定性，从而支持系统的智能化和自主学习。

（二）工业元宇宙在供应链环节的应用场景

在供应链阶段，工业元宇宙将企业信息数字化和物理世界中的企业经营结合起来，贯穿产品供应全价值链，以虚拟企业的方式构建多产品体系、跨地域、跨组织的多方互动的开放式协同与管理平台。供应链优化的重点在于仓储物流体系的建设，工业元宇宙利用相关技术实现物流全过程自动感知识别以及各环节信息系统的交互集成，以生成精确的调度配置方案，提高整个供应链体系的效率，见图 65。



图 65 工业元宇宙在供应链环节的应用场景

1. 运营管理

(1) 供应链控制塔

供应链智能控制塔是供应链运作的指挥中心。控制塔提供全方位视角，打通端到端的数据链接，能更全面地从客户、区域、运输、物料、产品，工厂等不同维度来审视供应链的业务问题和改进点。

(2) 供应链体系压力模拟测试和实时优化

建立供应链风险因子评估模型，并通过仿真技术模拟制造企业供应链体系受人为事件等干扰后一段时间内的运行效果，以测算上游供应部分中断后企业经营情况的变化，通过优化算法提供对供应链的优化决策指导。

2. 订单管理

(1) 订单可视化

整合订单相关数据，产生一个订单执行的统一视图，从订单执行到仓库出库、运输全流程，都可在该订单状态中一览无余。同时实时了解全流程各个操作节点的时效及节点操作人员，以便跟踪订单执行并及时发现延误可能。

(2) 订单自动化

订单自动化主要包括订单自动录入和订单自助履约，通过自动录入功能实现邮件等订单的自定义维护以及 OCR/RPA 数据自提取；通过订单自动履约端到端集成从销售到供应链到制造工厂的订单修改管理，实现不同区域、供应链 ERP 系统、自有工厂、ODM 的订单修改的自动化管理，缩短订单履约周期。

(3) 订单自主纠错

在订单流转过程中，以及由系统层面的异常导致的订单履约延迟时，能够对错误原因进行可视化呈现；能够通过机器学习部分替代人做出错误修正；能够通过数据统计和分析，指导后续流程设计。

3. 计划排产

(1) 整合计划

统筹需求履行、工厂制造、缺料管理、出货控制四大计划系统，制定订单交付优先级的统一政策（例如：给出承诺的订单享有较高优先级；且当较高优先级的订单能够满足交货需求且无生产单时，可将物料和产能释放到较低优先级订单，保证产能充分被利用）；同步出货计划及产能，统一计划与执行，精准预测出货日期，合理制定工作安排计划。

(2) 智能排程

通过多重自动化流程实现对客户需求的实时响应，提高 PSD 精准度；通过大量数据共享共用，促进各个计划有效协同，互为参照，及时调整；通过机器学习等先进算法最优化调整生产参数，根据需要调整排程并为用户建立可视化分析。

(3) 智能预测

通过对根据产品的历史订单、库存、市场趋势以及产品的分类属性等数据进行分析，识别和确定影响需求走势的关键因子（比如季节性、节假日因素，产品换代规律），在此基础上采用多种机器学习算法拟合，最后将多个模型输出的预测融合作为需求预测自动输出。

4. 采购管理

(1) 智能物料采购

基于重大市场营销活动产品的销售历史数据、实时数据、渠道 Forecast、产品产能等数据进行综合分析以及数字模型的仿真推演，智能预测物料及产品需求，实现采购模式最优化。

(2) 供应链协同

集成供应商内部高粒度数据，包括生产数据、工单、流水号及条形码信息。实现每日更新关键部件的端到端库存数据，保证关键物料不会丢失；基于系统的假设分析模拟工具，对各种业务场景中的问题进行预分析和预警，对结果进行实时分析并提出最佳执行方法。

(3) 采购计划协同

首先是计划发布协同，GSM 定期向供应商发布最新的预测需求；其次是供应数据协同，供应商定期反馈未来一段时间内的供应状况、物料到货计划以及库存

积压情况，将采购计划协同实时应用到生产计划以及订单交付中，从而缩短预测周期，增加公司利润机会。

(4) 采购执行

从研发、预测、订单到物流、库存、质量、出货、售后信息全面协同协作。从数据传输，业务数据，比对结果差异到异常实时跟踪，实现不同层次的可视化，提升透明度。全流程实现信息多维度、精细化共享、业务数据实时传递，实现供应与生产的高度配合，提高企业与供应商的作业效率。

5. 仓储物流

(1) 智能云仓

依托物联网、人工智能等技术，打造入仓、仓储、分拣到发货及售后等智能化仓库全作业环节，实现企业内部仓储物流移动化、透明化，建立安全共享的云仓新业务模式，整合合作伙伴需求，协同采购，发挥规模采购优势。

(2) 统仓共配解决方案

整合各大快递品牌，将物流快递件集中到一处，再进行配送。通过各大快递品牌的整合，实现车辆、人力、场地的优化，缩小快递员的派送区域，提高派送密度，把单一包裹派送转变为多品牌包裹配送，从而实现 1+1>2 的配送能力升级。

(3) 仓储智能路径规划

智能仓储路径规划是指在仓储操作过程中，通过智能化算法计算最佳路径，使物品快速、准确地到达目标位置，并实现仓库空间的最佳利用。例如，电商仓储系统采用 RFID 技术和视觉识别技术，实现了智能化的商品管理和快速配送，通过路径规划算法，可以将相同商品集中存储在同一储位，从而提高仓库空间利用率和操作效率。

(4) 货物入库自动绑定无感化

通过搬运叉车将待搬运货架送至 RFID 扫描区进行扫描，RFID 扫描区自动采集待入库产品条码，扫描后在入库单中自动识别出该产品的编码、名称、规格型号和数量，自动记录入库的时间并生成产品的入库单更新库存信息。

(5) 智能物流网络规划选址

通过多维度数据的智能整合（供应链物流网络流量和流向，备选城市或地区的位置，库房运营成本，地区经济和人力状况，气候特点，交通情况，以及供应

商物流网络的匹配程度等数据)，构建高效实用的 RPA (Robotic Process Automation) workflows, 支持 “虚拟” 方案场景仿真, 结合模型推荐的分析结果, 帮助确定最优选址方案。

(6) 智能城配路径规划

基于数据挖掘和策略学习的路径优化 AI 解决方案, 实现优化的运单分配, 高效地调度司机和车辆; 通过建设由高速运算能力支持的 What-if 决策和先进仿真模块支撑的实时业务监控和 KPI 评估平台, 实现对业务的智能优化, 达成成本的节约和客户体验的提升。

(三) 工业元宇宙在供应链环节的应用案例

1. 案例：联想（北京）有限公司

面对联想供应链缺乏端到端可视化、缺乏端到端的数据分析和智能决策支持等问题, 联想结合了自身业务经验和行业的最佳实践, 打造了一个端到端的智能控制中心——供应链智能控制塔, 见图 66。通过供应链智能控制塔的搭建, 提高了交货的准时性; 通过需求感知和引导, 提升了需求和供应匹配度, 整体提升了销售业绩; 大幅减少呆滞库存, 提升库存周转率和呆滞库存管理效率; 提高了订单满意率, 缩短了订单端到端交付周期, 提升了客户满意度。

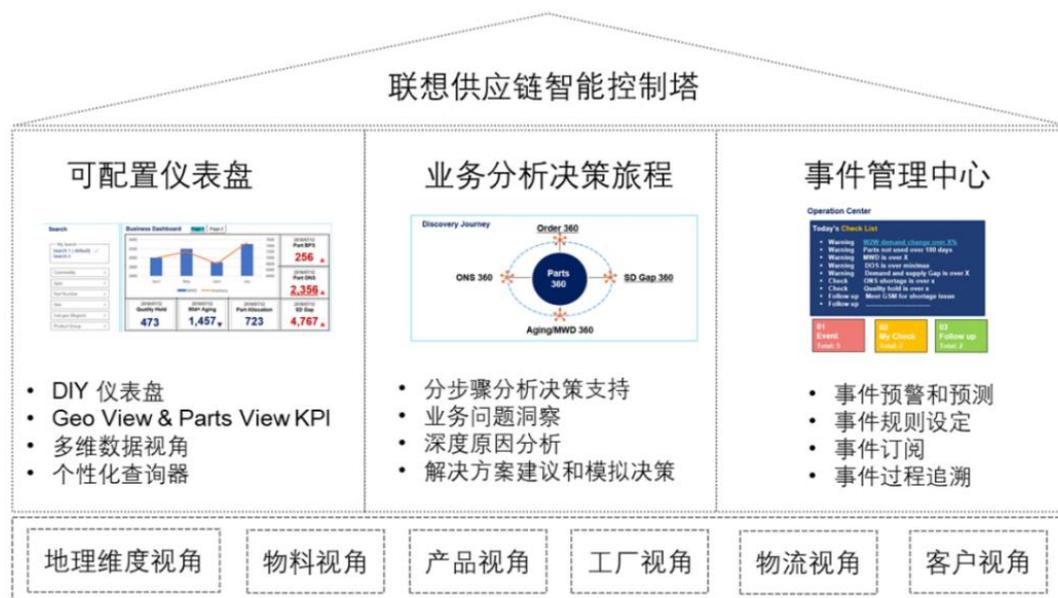


图 66 供应链智能控制塔模型

2. 案例：联想新视界（北京）科技有限公司

联想新视界帮助联想天津产业园打造了天津智慧中央仓数字孪生系统, 系统

对 7 号仓库的南库进行了数字孪生，对接了立库内堆垛机、RGV、拆垛机械手、货物、AGV 等设备，可实时查看设备的实际运行路线和状态信息，设备故障时可进行实时报警；通过全库建模仿真，方便仓库管理人员全方位查看立库整体情况，为后续海关查验、生产进度控制、立库整体监控打下坚实基础，见图 67。此外，通过立库智能终端，向参观客户展示中央仓数字孪生系统，并支持以遥控手柄的方式进行立库的漫游查看，为客户带来极端沉浸式的数字孪生视觉体验。

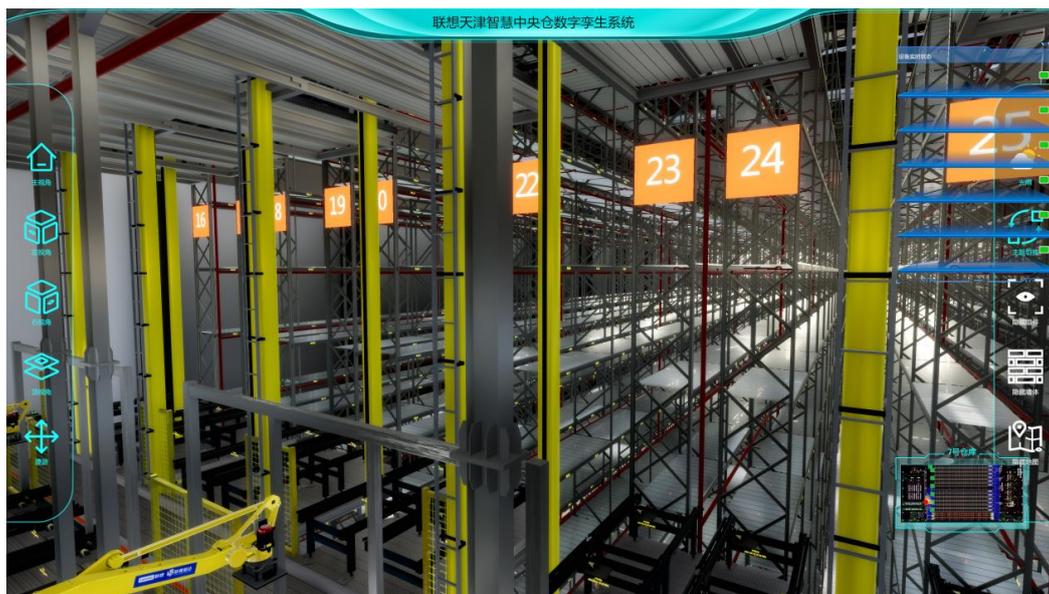


图 67 联想天津智慧中央仓数字孪生系统

3. 案例：中铨数字科技有限公司

基于众铨链的数字供应链协同平台 2.0-以汽车 4S 店库融项目为例。中铨融合了区块链、物联网、云计算和大数据等多种技术，打造了自主可控的基于众铨链的数字供应链协同平台，见图 68。该平台，一是通过区块链技术对订单、合同、单据等数据进行可信存证和多方交叉校验；二是通过集成电子合同技术，实现线上化签署电子凭证，确保合同的真实性和完整性；三是聚合核心企业 ERP 系统数据、电子发票、物流、仓储数据等三方数据服务，实现贷前数据风控筛查，形成白名单。四是利用物联网技术，实现车辆智能仓监管、实现监管车辆电子围栏应用，确保质押资产的安全。这些手段有效满足银行风险控制要求，形成包括贸易的真实性、货物的可处置性、经过交叉检查确保信息的真实性、业务的封闭性、全生命周期的线上化的信用体系，也打造了供应链金融的新模式。

基于众链的数字供应链协同平台 2.0 架构

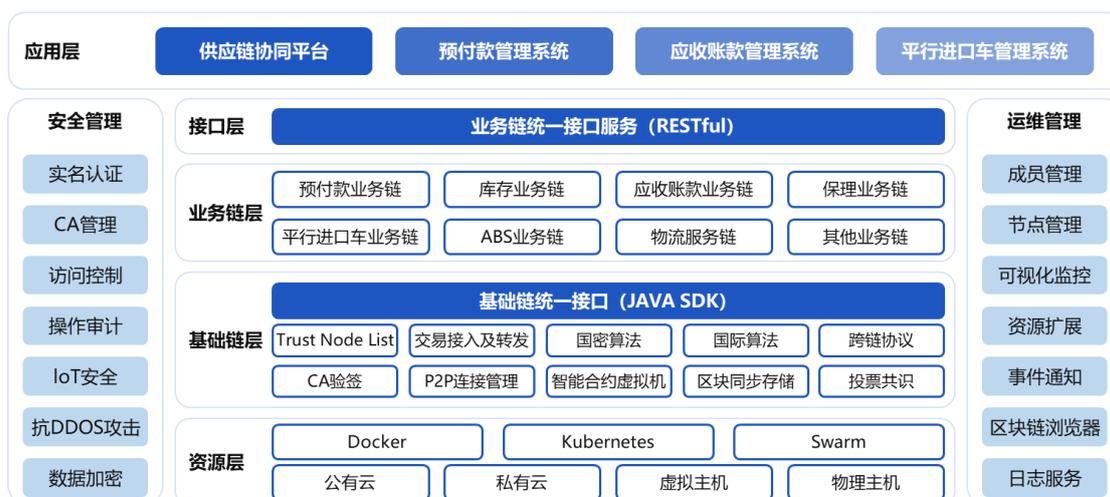


图 68 基于众链的数字供应链协同平台 2.0 架构

四、工业元宇宙在销售&服务环节的应用

(一) 工业元宇宙在销售&服务环节的应用特点

1. 增强产品展示的维度

工业元宇宙通过虚拟现实技术，能够让消费者更直观地感受产品，增加参与性，帮助企业触达用户。这有助于消费者更好地理解 and 掌握产品的特点和优势，提高购买意愿。

2. 优化销售流程

工业元宇宙可以提供沉浸式的虚拟环境，让消费者在购买前能够体验产品的使用效果，从而更好地了解产品的性能和特点。这种体验方式有助于提高消费者的购买决策效率，优化销售流程。

3. 提高销售效率

通过工业元宇宙平台，企业可以实现对销售过程的数字化管理和监控，提高销售效率。同时，工业元宇宙平台还可以支持跨平台应用，方便消费者在不同的设备上购买操作，提高销售的便捷性。

4. 增强客户体验

工业元宇宙平台可以提供高度逼真的虚拟环境，让消费者在购买前能够体验产品的使用效果。这种逼真程度有助于提高消费者的购买体验，增强客户满意度。

5. 数据驱动与创新

元宇宙中的一切行为都可以被记录和分析，为品牌提供了更多的数据支持和

洞察。品牌可以根据用户的偏好、行为、反馈等数据，进行更精准的营销策略和个性化定制。元宇宙为品牌提供了一个无限可能的创意空间，品牌可以利用元宇宙中的各种技术工具，打造更具吸引力和影响力的营销内容和形式，突破传统营销的局限。

（二）工业元宇宙在销售&服务环节的应用场景（见图 69）

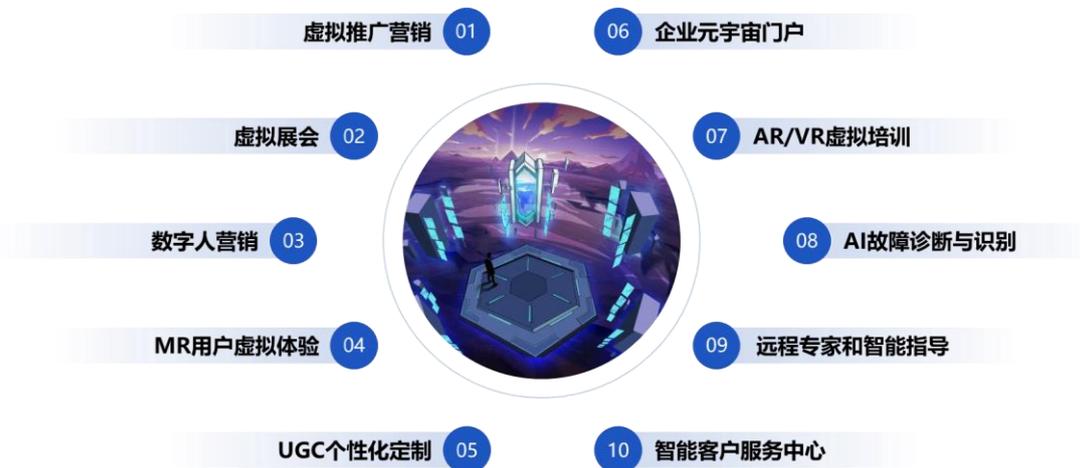


图 69 工业元宇宙在销售&服务环节的应用场景

1. 虚拟推广营销

数字商品、虚拟互动、虚拟人导游，可将产品的图文、平面视频、全景视频、三维模型在 PC、移动、VR 设备等多端展示和可视化交互，支撑按照需求设置不同风格的虚拟场地，打造极致逼真的沉浸感，提升品牌传播速度。

2. 虚拟展会

通过虚拟展览对现实展会进行 1:1 还原，支持参观者的展厅随意漫游，也可按照特定路线进行浏览，提供展品的沉浸式观感和智能讲解服务。此外，还能基于大数据分析能力，帮助参展商与客商进行交易配对，提供交易支持和服务。

3. 数字人营销

虚拟数字人的应用场景包括电商直播、虚拟偶像以及品牌营销等，主要分为服务型数字人以及偶像型数字人两类。服务型虚拟人包括智能客服、语音机器人、虚拟助手等。偶像型虚拟人以虚拟主播、品牌代言人、潮流体验官等身份为主，应用在广告杂志拍摄、综艺节目、品牌宣传内容发布等领域。

4. MR 用户虚拟体验

MR 用户虚拟仿真体验包括虚拟试衣、虚拟试妆等。借助计算机信息处理与

图形学技术，对用户体态信息进行扫描处理并生成三维人体模型，为虚拟模型穿上服装产品以达到虚拟试穿的效果；通过计算机视觉技术识别用户脸部特征，通过图像处理以及 AI 实时地将化妆品效果叠加到用户面部，达到虚拟试妆效果。

5. UGC 个性化定制

通过人工智能机器算法推荐，把实际内容生产任务进行下放，允许用户进行自主的个性化定制内容生产。通过 UGC 进行产品运营，引导用户自发产出合适的内容，微博、朋友圈、知乎、贴吧、论坛、SNS 等产品都属于常见的 UGC（用户生成内容）平台。

6. 企业元宇宙门户

实现工业元宇宙系统全流程体验，包括：研发生产协同设计、产线数字孪生&仿真优化、供应链协同和优化、仓储物流数字孪生&仿真优化、产品生命周期服务+用户体验、园区智慧化管理、零碳工厂+绿色园区。提升用户对企业、产品的理解和信任感的提升。

7. AR/VR 虚拟培训

对生产及运维人员进行设备使用/维修培训，通过电子说明书、爆炸图等技术沉浸式直观体验设备的使用方法、拆解与维修手段等。

8. AI 故障诊断与识别

通过构建人工智能数据驱动的设备健康监测模型，从大数据中提取物理模型中无法获取的隐藏故障特征，评估设备的健康状态；通过人工智能深度学习进行声纹、CV 等识别，对设备异常进行云端智能诊断服务，提供故障信息参考，辅助维修技师对可能存在的故障进行判断。

9. 远程专家和智慧指导

可对一线运维人员建立音视频通话，进行远程专家指导。专家通过圈点标注等形式直接发送到一线 AR 眼镜端，便于运维人员理解故障原因，使运维人员快捷、高效地完成运维任务。

通过知识图谱、远传 AR 和 AIGC 技术，自动实现故障识别和根因分析定位，通过人机交互接口智能化地响应运维人员的查询，反馈精准的故障辅助信息，如故障设备型号、处理步骤等，提升故障处理及维修效率。

10. 智能客户服务中心

通过文本或语音驱动数字人，完成客户的问答及咨询服务，7*24 小时全天候在线，秒级响应客户咨询，还原面对面真实会话场景，为访客提供沉浸式的咨询体验。

（三）工业元宇宙在销售&服务环节的应用案例

1. 案例：中兴通讯股份有限公司

以中兴通讯支持滨江工厂智能制造基地搭建的 XR Explore 能力平台为例，该平台实现了基于增强现实的销售展示，体验者可通过手机、PAD 对设备进行 360° 全方位的查看，增强了用户对产品的沉浸式体验，打开了产品销售新模式，见图 70。针对新品模型样机，通过 MR 眼镜或 PAD、手机扫描样机模型进行物体识别，在物理模型上叠加对应数字模型和文字/图片/视频说明，展示新品内部结构、关键器件及特色功能，辅以 3D 模型动画和解说，让客户轻松了解新品，减轻了销售人员的解说难度。

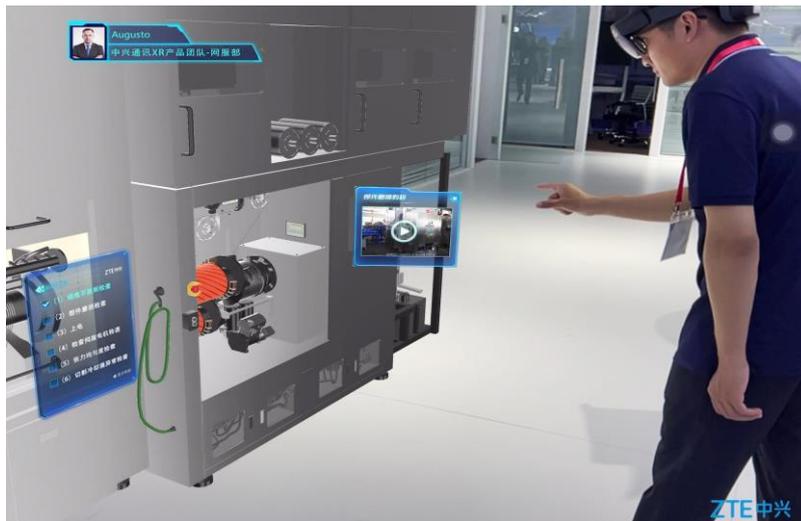


图 70 基于增强现实的销售模式

2. 案例：大连海大智龙科技有限公司

以大连海大智龙科技的航海工业仿真训练平台为例，该平台实现了全任务一体化交互协同航海工业仿真训练、海上立体协同搜救仿真、具备智能评估和智能货物积载功能的船舶驾驶台资源协同训练模拟器，满足了多种业务培训需求，如船员培训、引航员培训、VTS 操作员培训、GMDSS 无线电操作员培训，以及其它特殊业务培训（拖轮作业、渔业操作、冰区航行、内河航行、游艇操纵、溢油应急、搜寻救助、海上交火等），以及科技馆、博物馆、军工文旅大型体验；还可用于港航工程论证、智能船用设备验证等科学研究，见图 71。



图 71 航海工业仿真训练平台

3. 案例：青岛慧拓智能机器有限公司

矿山元宇宙智能座舱是慧拓基于虚拟现实技术和体感模拟技术针对露天矿区行车安全、驾驶技巧培训所研发的一款产品。用户在驾驶舱内可通过操纵方向盘、油门、刹车、档位杆及控制面板上的各种按钮等装置，实现对模拟驾驶座舱中虚拟矿卡的控制。虚拟矿卡的实时状态信息可在控制面板的各类仪表盘同步显示，其姿态角信息可实时反馈至驾驶舱底层的六轴动感平台，使虚拟矿卡姿态得到实时展示，用户可在驾驶舱内真切体验到矿卡行进的颠簸、震动等状态。当用户使用 VR 头显设备时，可沉浸式体验在 1:1 的虚拟矿区中驾驶和操纵矿卡，从而培训自身驾驶和操纵真实矿卡的技能。产品具备矿山驾驶培训、驾驶技能测评、矿山驾驶体验及科研教学等多种用途。

4. 案例：亮风台（上海）信息科技有限公司

以亮风台支持某大型炼铁厂原料输送综合管理系统为例，通过建设数字孪生、数据分析和 AR 管理三大功能平台，实现产线原料输送业务场景的全覆盖。数字孪生平台可以运用 3D 可视化的方式展现设备、生产、人员等综合信息；在及时报警发现问题后，数据分析平台可以通过了解问题发生的原因、查询设备历史记录和未来预测数据，进行综合、全面地分析决策；AR 管理平台可以发布运维任务，通过“现场工人佩戴 AR 眼镜进行运维作业、四足机器人自动执行运维任务以及大数据算法模型分析自动判断运维结果”，实现“人-机-法”混合运维的新型工业元宇宙模式，见图 72。



图 72 四足机器人自动执行运维任务、现场工人佩戴 AR 眼镜进行运维作业

5. 案例：广州博日信息科技有限公司

以广州博日科技支撑电力行业元宇宙实训空间为例，见图 73。以国产自主开源引擎为基础，打造行业轻量级实训引擎，在不借助任何穿戴设备的情况下，完成在线技能操作训练，颠覆性打造“意识记忆”+“肌肉记忆”智慧实训新模式；①利用 AI 实训大模型对作业项目、典型应用场景的关键动作、易错点、风险点、工艺流程等进行识别、训练，AI 自动生成训练方案；②在元宇宙实训空间匹配训练方案给出具体训练方式，通过 AI 陪练、AI 评价和自主训练三种方式完成；元宇宙实训空间重点应用于技能人员实操能力训练、工艺传承、设备运维检修、安全（习惯性违章、安全意识训练）、预案推演等行业应用；具体包括：AI 训练识别、AI 陪练、AI 评价、无代码场景构建、无代码流程构建、三维资产库管理、单人专项训练及多人协同训练等功能，目前在电力行业的技能培训、安全培训、新员工培养、智慧党建等场景得到广泛应用。



图 73 电力行业元宇宙数字化实训空间

第二节 工业元宇宙在工业系统各层级的应用

一、工业元宇宙在工业系统-设备层级中的应用

（一）工业元宇宙在设备层级中技术应用原理

在设备级应用中，工业元宇宙可通过设备数字孪生等技术对设备提供远程预测性维护，帮助装备生产厂家实现从“卖产品到卖服务”的转型。

构建数字孪生系统的核心是设备的动态数字孪生模型(DTM)模型。DTM模型包含物理实体的静态属性(几何模型)、实时状态(IOT数据模型)和发展变化规律(机理模型),支持数字世界对物理世界的全真模拟和优化预测,也支持优化的结果反向控制物理设备。能够实现设备在物理空间和数字空间中的闭环优化和升级,实现真正的“以虚促实”和“以虚强实”。动态数字孪生模型包括了的基本属性、行为、事件、算法等元素。DTM的基本原理如下:

1. 模型搭建

从物理设备中采集数据,并映射到数字孪生空间。

(1) 构建物理设备的三维几何模型

通过对产线/车间物理设备的数据进行实时采集和处理,并将其映射到虚拟的数字孪生空间中,以模拟物理设备的运行状态、性能参数以及其与外部环境的交互等。因此,通过构建物理设备的三维几何模型可实现物理设备在数字空间的镜像,实现对物理设备的实时监控、故障预测和优化运行等功能。

(2) 确定模型的数据点位信息

首先,深入理解物理设备的结构、功能、运行原理和性能参数等;然后,选择合适的传感器采集数据(其中,传感器可监测设备的运行状态、位置、速度、温度、压力等关键参数);将采集到的数据映射到数字孪生空间中,建立相应的数字孪生模型,同时要确定模型的数据点位信息,包括设备的几何形状、尺寸、位置、运动轨迹等;为保证数字孪生模型的准确性和可靠性,还需要根据验证结果进行修正和优化。

(3) 进行模型状态的更新或执行特定动作

根据实时的IOT采集数,在工业系统中,通过各种物联网设备和传感器进行数据采集,如生产设备的运行状态、工艺参数、产品质量等,同时需要将数据实时传输至数字孪生模型中进一步预处理和分析数据,并根据分析处理信息预判和决策,以触发执行特定操作,实现工业系统的智能化和高效化。

(4) 响应反馈并更新记录

通过物联网(IoT)设备和传感器网络持续监测物理设备的状态和运行数据,可实现对事件的类型和严重程度进行分类,进而向相关人员发送报警信息,响应工作人员迅速了解情况并采取有效措施,对于非关键性事件,数字孪生模型会记

录事件并生成相应的报告。

2. 模型优化

根据从物理世界采集和积累的历史数据进行数字孪生体的优化。

(1) 设定设备的运行优化指标

通过物联网（IoT）设备和传感器网络从物理设备中采集历史运行数据（包括设备的状态、性能参数、能源消耗等），基于数字孪生模型进行数据清洗、标准化和特征提取等步骤，以提取出与设备运行性能相关的特征，进而设定设备的运行优化指标，同时，现场传感器等设备实时监控物理设备的运行状态和性能参数，并将实时数据与设定的优化指标进行比较和分析，实现优化设定设备的运行指标。

(2) 发现和定义设备运行的机理模型

基于物联网（IoT）设备和传感器网络采集设备的运行数据，通过对数据处理和分析的结果，可以发现设备运行的机理模型（包括设备的物理模型、数学模型和控制系统等）。通过机理模型深入理解设备的运行状态和行为，并经过验证和修正投入实际生产使用。

(3) 运用机器学习、预测回归、知识图谱实现过程优化

通过训练模型识别模式、预测趋势和检测异常，实现优化设备的运行效率和性能；而建立数学模型，对设备的运行参数进行回归分析，可以预测设备的未来性能和趋势；同时，数字孪生模型结合知识图谱技术，展示工业系统的知识和数据，为员工提供全面的信息和指导，进而实现加速员工对新设备的熟悉程度，提高工作效率和准确性。

3. 闭环反向控制

根据模型优化的结果，可进一步确定反向控制参数、命令及流程，通过边缘控制单元反向控制物理设备，实现闭环优化。

(1) 确定优化工艺流程

数字孪生模型通过物联网（IoT）设备和传感器网络采集工业系统中各个设备的运行数据和工艺参数，同时，实时监控获取产线作业的数据，实现基于数字孪生模型进行预测与决策。根据预测和决策的结果，数字孪生模型可以设定优化目标，为了实现这些目标，数字孪生模型通过闭环反向控制来实现优化目标。

(2) 确定工艺优化参数

在数字孪生模型获取产线实时监测的数据进一步分析时，根据实时监控的数据和预测结果，对工艺参数和控制策略进行实时调整。这种调整是反向的，即根据实际运行数据和预测结果来调整工艺参数和控制策略，以达到最优的效果。在反向控制过程中，数字孪生模型会不断调整和优化模型的参数和算法，以提高预测和控制的效果，以适应实际需求的变化和技术的发展。

(3) 整合形成控制命令，下发给边缘控制单元

基于以上对参数与工艺流程优化后，数字孪生模型将优化目标和控制策略整合形成控制命令，以实现工艺流程的优化和控制，通过数字孪生模型将控制命令下发给边缘控制单元，边缘控制单元接收到控制命令后，将其转换为具体的控制信号和动作，并实时执行。这包括调节设备的参数、启动或停止设备等。

4. 仿真推演

在数字空间中进行仿真推演数字孪生模型（DTM）可以通过仿真推演支持基于动态 DTM 模型的数字空间仿真推演，见图 74。DTM 模型具有单体化、对象化、动态化、实时化、语义化等特点，并支持自学习、自生长、自演进。

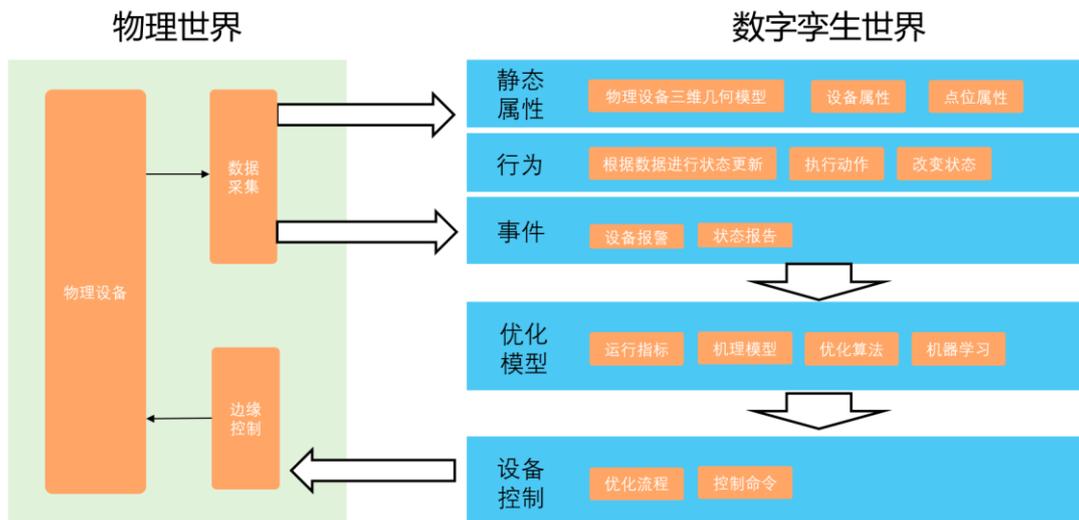


图 74 物理世界到数字孪生世界的映射过程

(二) 工业元宇宙在设备层级中应用场景

1. 设备状态监测

通过各种传感器、数据采集技术和分析工具对设备的工作状态、运行参数、健康状况进行实时监测和分析，以实现设备的预测性维护、优化运行和可靠性评

估等目标。进而实现对生产设备的实时监测和控制，根据设备的运行状态优化工艺参数，提升 OEE。

2. 关键设备实时仿真

根据设备实时数据和机理模型，通过数字孪生技术对关键设备进行实时动态仿真，并对仿真特定参数和环境下的工况和设备 OEE 等指标实时监控、故障预测和优化运行，并保持持续优化。

3. 实时故障诊断

通过数字孪生技术对设备进行实时监控和故障诊断，以实现设备的预测性维护、优化运行和可靠性评估，同时对于在异常监控、报警、故障判定、故障根因分析过程中，可及时制定合理的检修计划和备件更换计划，确保设备的正常运行和减少停机时间，提高设备的可靠性和使用寿命，降低企业的运营成本和风险。

4. 智能巡检

基于移动式智能巡检机器人、集控中台和大数据分析系统，实现数据采集、存储、处理、多维度趋势分析到数据应用的一站式巡检运维数据服务。在自动化装配车间，配件的安装分为不同工序可由多个机械臂和自动化仪器独立完成，不需要人工干预，但需要管理员定期对各装配工位机械设备运行情况进行检查，可通过 AR 智慧巡检实现日常产线的巡检作业。

5. AR 远程协作

基于 AR 和音视频技术，面向设备运维、远程目击和售后服务等场景，让远程专家突破地域限制，如临现场，即时传递专家智慧到现场、提高排故效率，减少协作成本。同时，通过协作数据的积累和智能分析，形成专家知识库，使协作更加智能化。例如：操作员使用 AR/MR 眼镜，研发专家远程使用 PC，遇到故障求助专家，双方登录 AR 远程专家指导应用，发起呼叫工人和专家组建会议，工人眼镜端第一视频传给专家，专家沉浸式对现场作业工人进行指导。

6. 设备运维管理

通过数字孪生模型可实现对产线/园区日常生产过程中进行智能化台账管理、运维决策、远程运维、系统自愈、运维周期优化，同时可实现自动生成保养计划，定期设备点检，计划工单下发。实现提高设备的可靠性和使用寿命，提高维护工作的效率和准确性，降低企业的运营成本和风险，减少现场维护的工作量和成本

的目的。

7. 设备健康度量

通过设备数字孪生模型以实时监控产线设备的运行状态和性能指标，可在可靠性、劣化趋势评价、剩余寿命预测、设备健康度画像等进行评估，帮助企业更好地了解产线设备的状况、预测设备的寿命和性能，并支持制定更加科学合理的维护策略和决策支持，实现资源节约型和环境友好型的智能制造。

8. 设备预测性维护

通过大数据建模、计算和分析等技术对设备进行预测性维护，以实现设备的预测性故障预警、减少因大规模停机造成的生产损失、提高设备的可靠性和使用寿命，同时支持给出相应的预防措施和解决方案，直接将对故障的预测转化成预防的计划安排，降低故障发生的概率。

（三）工业元宇宙在设备层级中应用案例

1. 案例：网易股份有限公司

以网易伏羲智能装载机平台为例，伏羲装载机机器人基于具身智能技术，通过智能系统与环境的互动数据，不断提升机器人的智能化水平，见图 75。该机器人主要用于混凝土搅拌站，采用无人驾驶技术，可实现智能路径规划、主动避障、自主作业等功能。智能调度平台利用数字孪生技术搭建搅拌站智能管理系统，实现对搅拌站和装载机的监测和控制，全面提高了搅拌站生产效率和工作安全，大幅降低了运营成本。伏羲装载机机器人支持 3D 场景实时重建，高质量的 3D 场景渲染技术，配合拖拽交互显示功能，可有效辅助操控人员在远程对挖土地形进行 360 度无死角观察。并通过采用鱼眼摄像头水平放置在装载机座舱顶部，通过拼接和去畸变算法合成为一个主视角的图像。此拼接图像的水平 FOV 超过 150°，可为装载机提供左右两侧的图像，实现了 360° 检测。



图 75 网易伏羲装载机器人

2. 案例：国家电网有限公司技术学院分公司

国家电网有限公司技术学院分公司搭建了一种直流专业自主学习平台——国网学堂直流家园，直流家园平台按课程标题和内容标签实现了学习资源的分类梳理，并建立了知识图谱、数字化转型、精益化管理等 MOOC 体系。平台按直流专业关键技能项形成专业知识图谱，分为一次设备、二次设备、辅助设备 3 大类，换流阀、换流变、直流测量装置、直流开关设备、其他一次设备、站控制与保护、极控制与保护、阀控制与保护、阀冷系统、消防系统、站用电等其他辅助设备 11 小类，变知识体系导向为“设备引领、可视化体验”，支持多维学习，分类清晰，系统呈现设备知识，提升用户在线学习质量，优化学习体验。通过直流家园平台统筹开展公司直流专业人才库、课件库、题库、专家智库等资源建设，搭建线上资源管理与服务平台，提高直流专业资源利用率。针对每类直流设备组织开展培训短视频开发上线工作，将设备知识点进行生动形象的展示，提高学习资源趣味性和吸引力，丰富直流专业课程库。积极助力直流运维“全科医生”、直流检修“专科医生”的“双百”培养计划，提升直流运维检修人员队伍整体水平。

3. 案例：杭州大森魔岩

研发了 AIGC 数智机器人，通过将虚拟世界和实际工业环境相融合，实现了机器人和人工智能的协同工作，从而达到更高效、可持续和智能的工业生产的目

标。在电力变电站监测和维护中，数智机器人结合数字孪生模型和人工智能技术来提高电力系统的可靠性和安全性。数智机器人被用于定期巡检电力变电站的关键设备，这些机器人配备了多种传感器，可监测温度、湿度、油质等重要参数。通过与云计算结合，将这些数据上传到数字孪生模型中，这个模型用于设备状态监测和故障预测。若检测到温度升高等异常情况，机器人会立即通知运维人员，并提供详细的报告，以便及时采取措施。在故障发生时，数智机器人能够自主定位问题并进行初步维修，数字孪生模型为机器人提供参考，加速了故障诊断和修复过程，有助于尽快恢复电力供应。此外，数智机器人还可监控安全状况，例如火灾、泄漏或危险气体检测，数字孪生模型可用于模拟应急情景，以提高机器人和人员对紧急情况的应对能力，从而降低事故风险。

二、工业元宇宙在工业系统-产线层级中的应用

（一）工业元宇宙在产线层级中技术应用原理

1. 虚实映射与交互

工业元宇宙通过构建虚拟的数字孪生模型，将真实的工业产线映射到虚拟空间中。这种映射不仅包括产线的物理结构，还包括产线的运行状态、工艺流程等信息。同时，工业元宇宙还支持虚拟与现实的交互，即通过虚拟环境对真实产线进行操作和调整，实现虚实之间的双向映射和交互。

2. 实时数据采集与处理

工业元宇宙通过各种传感器和数据采集设备，实时采集产线运行过程中的数据。这些数据包括设备状态、工艺参数、产品质量等信息。通过对这些数据的处理和分析，工业元宇宙能够实现对产线运行状态的实时监控和预测，为产线优化和调整提供依据。

3. 智能决策与优化

基于实时数据采集和处理，工业元宇宙能够实现智能决策和优化。通过对产线运行数据的分析，可以发现产线运行中的问题和瓶颈，提出针对性的优化建议。同时，工业元宇宙还能够根据历史数据和趋势预测，为产线未来运行提供预测性决策支持。

4. 远程监控与运维

工业元宇宙通过构建远程监控系统，实现对产线的远程监控和运维。通过虚

拟现实技术，运维人员可以在远程对产线进行操作和调整，实现对产线的远程管理和控制。这种远程监控和运维方式有助于提高运维效率，降低运维成本。

（二）工业元宇宙在产线层级中应用场景

工业元宇宙的核心目标是建设数字孪生车间：通过物理车间与虚拟车间的双向真实映射与实时交互，实现物理车间、虚拟车间、车间服务系统的全要素、全流程、全业务数据的集成和融合，在车间孪生数据的驱动下，实现车间生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等在物理车间、虚拟车间、车间服务系统间迭代运行。

1. 基于数字孪生车间的智能生产与精准服务

（1）产品质量实时控制与分析

基于统计过程控制(Statistical Process Control)等方法，借助数理统计方法对生产过程进行分析评价，根据反馈信息及时发现系统性因素出现的征兆，并采取措施消除其影响，使过程维持在仅受随机性因素影响的受控状态，以达到控制质量的目的。

（2）车间能耗优化及预测

利用车间内无所不在的传感器、电子标签、监控器数据，通过各种先进的数据分析工具挖掘数据价值，为达到能耗优化目标，基于影响各个耗能的因素构建耗能公式，计算不同模式下的耗能对比情况，确定能耗最优方案，通过算法进行能耗预测分析，提前进行能耗策略调整。

（3）物料智能跟踪与配给

引入物联网技术，帮助搬运载体感知获取配送过程中的实时信息；建立搬运载体与配送任务的实时状态信息数字模型，建立两者的实时信息交互机制；通过任务动态分配方法和算法，快速从任务池中为有任务请求的搬运载体选取最匹配的配送任务，促进车间物料高效配送。

（4）协同生产工艺分析

利用计算机技术，特别是多媒体技术、网络与通信技术、分布式处理技术等，为生产各方群体建立一个协同工作环境。采用人机协同的方式，对工艺设计问题进行协同、快速、有效地处理。

（5）智能生产运行优化

在现有信息化平台的基础上,从企业海量生产数据中快速获取有价值的信息,通过优化算法对其进行深入的挖掘和分析,为全流程各环节的优化决策系统提供科学依据,以实现综合考虑敏捷、环保、安全和高效等多个目标的生产优化运行。

2. 基于数字孪生车间的制造执行与生产调度精准化

(1) 生产资料透明化

实现现场作业指令、执行过程、物料流转、质量检测、设备状态、生产工艺、工具、物料等的生命周期监测,实时查看所有生产资料的运行状态,实现真正的透明工厂。

(2) 物料及工艺检测

根据生产排程结果,准备所需的生产资料,进行原料、辅料等可用状态及数量检查、NC 程序下发及完整性校验,进行检测标准工艺参数下发。借助专家经验以及各种数理统计方法及工具对检测结果进行分析,判断物料品质是否在正常范围内。

(3) 产品全生命周期追溯

利用 RFID 建立物料、托盘、加工参数、检测结果之间的关系,通过一物一码追溯系统,追溯产品从生产、加工开始,到制作、质检、包装等产品全周期信息,实现原料进厂、产品生产、仓储物流、终端销售、市场消费的全程可视化管

理,增强企业对产品生产过程的把控以及质量问题溯源。

(4) 产品质量档案

利用机器视觉检测技术,基于图像自动识别产品质量与生产过程状态,实现对于物料、产品的质量检测,生产过程的状态识别,以及生产车间现场管理,收集产品质量数据,并进一步实时反馈改进生产工艺,形成质量大数据及产品质量档案。

(5) AGV 协同调度

在 AGV 数量多、运输路线较多且运输较纷繁复杂的应用场景下,通过 AGV 调度系统同时对多部 AGV 实行中央监管、控制和协同调度,使物料运输系统更加人性化、自动化、无人化。

3. 基于数字孪生车间的工艺优化和仿真

(1) 零配件辅助装配

在产线的装配环节利用 AR 技术进行辅助装配引导，将虚拟三维引导信息和真实装配环境结合，为用户打造一个虚实融合的装配环境，使其能在线实时获取与装配过程相关的多种类操作引导信息，从而提高产品装配效率，缩短产品装配时间。

(2) 非接触式检测手段工艺

针对难以采用接触式检测或无法采用安装传感器等接触方式进行检测的对象（例如测量高速旋转轴的振动、转矩等），通过光电式传感器、电涡流式传感器、超声波检测仪表、核辐射检测仪表等非接触式检测工艺进行检测。

(3) 产线规划仿真验证及工艺参数仿真

在产线实际投入生产前在虚拟环境中进行模拟仿真和测试，包括节拍平衡性验证、装配动态干涉、人机交互舒适度分析，电气程序虚拟调试等，最终实现找出生产线的瓶颈并进行改善。在生产过程中进行生产工艺参数仿真，验证生产工艺以及工序的合理性。

(4) 生产过程仿真监控

通过 PLC、传感器等获取设备运行状态、工艺参数，通过工业协议解析与自动化设备控制系统进行信息交互，实现设备参数、工艺参数的数据采集。对产线设备以及线体、节拍等进行数字孪生建模，实现面向工业现场的生产过程仿真监控。

(5) C2M 柔性生产体系构建

从基础数据、计划模型、物流模型、标准作业和工艺规范等方面着手，自主构建节拍化、单个流、信息化、移动连续生产的柔性装配生产体系。从而达到提高产能、缩短装配周期、减少场地占用、加快物流周转速度、提高市场个性化适应能力等方面的良好效果。

(三) 工业元宇宙在产线层级中应用案例

1. 案例：亮风台（上海）信息科技有限公司

以亮风台支持某大型钢铁厂热轧产线智慧点检系统为例，首先运用点云采集技术来掌握产线环境全貌，生成空间点云坐标系；其次，通过虚实叠加技术把设备点检的作业流程、数据、信息、知识等留在现场，使虚拟的数据、信息可以在设备周围呈现。整条产线从原来的设备逐个扫码、逐项任务处理的传统模式，向

空间元宇宙化、空间漫游交互化智能升级。一线作业人员不仅可以在现场获取来源于各个系统散落的数据，也可以清晰地了解到“老师傅”留存的设备运维经验和重要提醒等信息。实时处理流程、实时查看数据、实时结果上传，让在第一现场完成所有工作闭环成为现实，见图 76。



图 76 工程师佩戴亮风台 AR 智能眼镜进行现场巡检

2. 北京大视景科技有限公司

面向钢铁企业的轧钢产线这种典型的线性生产单元，根据对轧钢产线生产实际情况并结合视频融合监控系统的点位部署要求，方案采用三维视频融合技术，在平台中展现轧钢产线重要生产流程中的监控视频画面，形成真正意义上钢厂虚拟监看系统。方案以实时视频融合画面为底座，并通过一个视频画面展示在智造中心大厅的大屏上。同时，系统具有良好的可扩展性，与各种业务数据应能开发对接，可叠加产线中各设备和生产的 IOT 传感器参数，能够支持物联网信息融合、信息管理、标绘标注等，形成一张实时长条带 MR 地图，单画面超 8K 分辨率输出。大视景科技的虚实融合技术将孤立的视频流融合绘制到统一虚拟世界，并进行时空关联，实现具有革命性的海量视频“一张图”新理念。平台还支持物联网接入和海量视频的后端分析与多级联动，建立实景数字孪生世界，满足智能安防、智能制造、无人值守、应急指挥调度等工业领域的核心行业应用需求。

3. 案例：大连奥托股份有限公司

汽车生产线数字孪生系统包括真实世界的物理产线、虚拟世界的数字孪生产线和连接两者的数据采集与交互三组模块。数据采集与交互模块应用 S7、KRL、OPCUA 及其他设备专有协议与物理工厂的变频器、工业机器人、自动化设备、夹具、输送设备、传感器以及可编程控制器(PLC) 通信,采集设备运行状态、生产、能耗、节拍、故障异常等信息,将采集到的数据存入数据处理单元,同时传递给 3D 虚拟工厂。3D 虚拟工厂读取到物理工厂信息后,应用 3D 引擎驱动虚拟设备数字孪生体跟随物理工厂设备同步运动。UI 界面使用图表形式展示生产、能源消耗、设备异常等关键数据和数据整合分析结果。通过数据处理单元的数据整合及分析对采集物理工厂的数据进行科学的算法分析,进行节拍优化、安全距离检测、工艺质量优化、远程协同等操作,提升产线效能。

4. 案例：中车大连机车车辆有限公司

中车大连机车牵头联合中车大连电牵公司江苏中车数字公司和德国克鲁斯(CLOOS)焊接机器人公司三方项目团队共同打造了一条智能化焊接产线,以中车精益管理沉淀为基础,集成多种智能设备,具有柔性化、防呆防错、缺失预警、多维度精准统计、结构化工艺指导、作业资料快速学习、质量全流程追溯、无缝交接的八大优势,实现工艺、质量、物料全过程的优化控制、智能调度、状态监控、质量管控,增强生产过程透明度,提高了转向架构架焊接质量及生产效率,变革构架物料转运及制造方式。产线建设基于数字化、信息化、自动化、柔性化要求,生产由数字驱动,能实现混线生产及不同产品的快速切换,通过构架焊缝自动焊接技术应用,节约了人力成本同时实现了大部分焊缝船型位置焊接,焊接过程实时跟踪,同时采用随行工装及立库冷却模式,实现产品在夹紧状态下的冷却,减少工件的焊接变形,整体构架组焊质量及稳定性得到提升;产线中的自动化立体仓储系统节省厂房空间。项目中还应用焊接产线仿真技术,实现现场与虚拟工厂的数据的实时交换,全面提高制造现场数字化管理水平。

5. 案例：杭州灵伴科技有限公司

以杭州灵伴科技宁德核电 AR 智慧项目为例。其运用全球首款一体式 5G 工业 AR 智能眼镜 X-Craft 代替原有的纸质化单据,深入数字化转型,在核电检修、巡检作业、安全监管、设备验收等环节实现标准化作业指导、无纸化巡检、远程

监管与指挥、远程验收等场景，通过全球首个 5G+AR+AI 元宇宙全栈生态体系以及元宇宙智慧工业体系（灵伴元宇宙智慧工业平台）赋能其智慧工业平台建设，解决宁德核电站人机交互、远程专家支持、虚拟培训、智能辅助检修、风险提醒、厂区漫游智慧巡检、远程见证验收等场景需求，集成了零代码部署服务、远程会议、增强现实、人工智能、培训知识库管理等，确保各功能模块协同高效运作，见图 77。



图 77 灵伴元宇宙智慧工业平台

三、工业元宇宙在工业系统-工厂层级中的应用

（一）工业元宇宙在工厂层级中技术应用层次划分

在工厂级应用中，工业元宇宙以物理实体工厂为建模对象，通过工厂数字孪生等技术实现对工厂的全天候实时智能化管理。工厂级元宇宙平台的目标是，打造低时延、高保真、智能决策的数字孪生系统，推动多类型工业软件集成，推进物流、资金流和信息流的融合应用。广泛采用沉浸交互设备实现工厂的智能巡检、远程协作等应用，打造生产运行监测系统，实现工厂生产运营各环节信息全面感知、实时优化和实时反馈。形成持续优化的业务闭环。

工厂级元宇宙应用如下图所示，从应用深度可以分为数字孪生、虚实共生、以虚促实三个层次，见图 78。

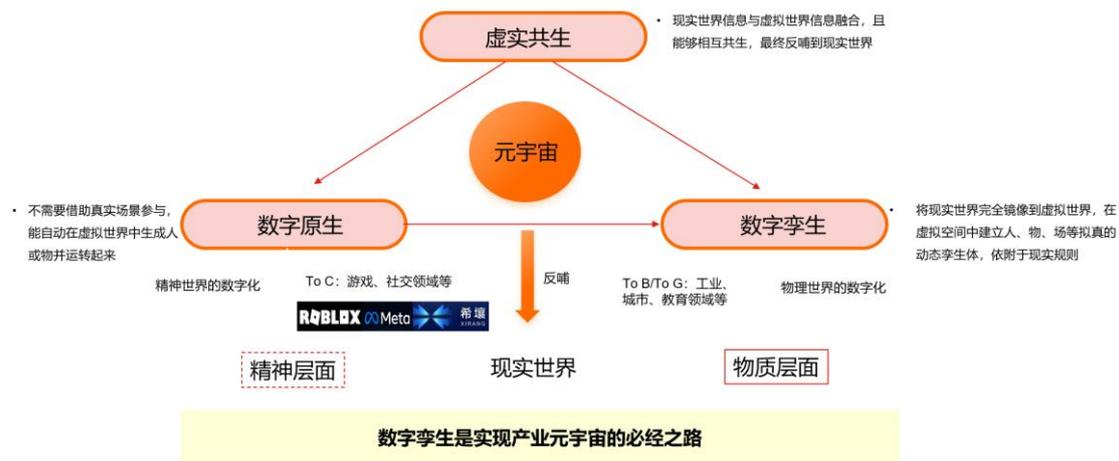


图 78 工业元宇宙技术应用层次

1. 数字孪生

第一层，就是数字孪生，即构建物理工厂在虚拟空间中的数字镜像，也就是数字孪生体，实现物理世界中的所有数据、业务流程进行充分的融合，包含所有 IT 和 OT 域数据的融合、研产供销服等关键流程环节的融合、人机料法环测等所有生产要素的融合。工厂的数字孪生体，是通过不同的设备级、产线级的数字资产模型（上文所述的 DTM 模型）有机组合而成，这些 DTM 模型中，就包含了几何模型、数据模型和机理模型，可以完全反映物理世界（真实工厂）的历史状态、实时状态和发展变化的规律，为全面的数字化和智能化构建了坚实的基础。

2. 虚实共生

第二个层次是虚实共生，核心就是在根据数字孪生层建立的数据和智能化模型，实现在虚拟空间进行仿真推演、预测和智能决策。包括数字化的产品设计、产线和工艺流程的仿真优化、虚拟试产测试、供应链仿真模拟、ARVR 辅助安装培训、远程服务等工业元宇宙典型场景，实现产品用户体验、质量、营销等的全面提升。推动工厂智能化进程，实现业务流程的精准响应、实时优化和智能决策。

3. 以虚促实

第三个层次，是以虚促实、以虚强实，在虚拟空间中进行的仿真、优化、决策的结果，要通过反控机制，反馈到物理世界中，实现物理世界（真实工厂）的持续优化。这里的反控机制，可以通过 PLC、DCS 等直接控制产线设备的动作，也可以通过边缘控制器实现 AI 算法推理应用，去驱动各种智能检测设备（AOI、CV 质检等）和自动化设备（AGV、机械手）。如在流程工业中，可以通过自动控制

各种管道阀门，调整复杂反应过程中的温度、压力、流速、催化剂等工艺参数，实现产品产量或品质的提升。

（二）工业元宇宙在工厂层级中应用场景

1. 园区一张图

园区一张图是通过建设面向智慧园区的数字孪生世界，实现对园区基本信息、产能情况、运营情况、物业管理、安全防控等全要素的可查、可管、可追踪，将不同维度的信息在数字孪生世界中进行汇集、认知、决策、协同，有效增强园区管理者的管理效率和对园区资源的掌控，辅助园区决策者推进园区规划、政策制定和协同作业。

2. 园区数字孪生

接入工厂已有 BIM/CIM/3DMAX/CAD 模型，实现智慧园区 1:1 还原的虚拟仿真以及建筑、物体、道路、设备等在全三维场景下的交互及查看。通过云渲染等技术实现园区周边地理影像（包括绿化、植被修饰、交通主干道、周边其他虚化建筑）的还原，以及光照系统、和粒子特效的制作。

3. 智慧人行态势

综合人脸识别系统、周界、巡更等安防系统，结合访客系统对园区的人群进行控制，包括人员聚集、人脸布控（白名单、黑名单）、人数抓拍统计、特殊人员预警、特殊行为预警（徘徊、翻墙等）、调取预警人员的人行轨迹。

4. 设备及能耗管理

综合厂区内电梯、摄像头、用电设备、用水设备等设备设施型号、图片、厂家、历史运行、告警和维保等信息记录，对设施的数量、在线率、告警事件等进行统计分析，综合统计显示厂区当日、当月内水电表能耗的情况，并支持用量可视化趋势查看。

5. 安全及应急管理

显示厂区内视频告警事件的情况，包括各类事件的状态，类型及历史趋势等，事件、任务概览；事件类型/状态统计、任务状态统计；进行厂区内可燃物、有毒有害气体等的监控，发生危险情况时进行实时预警，及时定位危险来源，进行应急处置。

6. AR/VR 虚拟培训

通过 AR/VR 技术定期为员工进行安全培训，对厂内的危险源进行标注及说明，同时在 VR 和 AR 漫游中，让员工了解危险源的位置、影响范围、绿色通道、发生安全事故时的应急措施、逃生路线等。

7. 物流调度管理

集成工厂内部主要的道路信息，通过和物流系统通讯，实时读取厂内运输车辆的位置坐标信息，并在三维工厂模型上动态跟踪展示车辆的位置信息变化，协助物流调度人员动态掌控公司内部的物资调拨情况和厂内车辆位置。

8. 工厂级生产控制塔

建立工厂级生产控制塔，有效及时调度物资供应、物料配套、厂内运输、库存等情况，通过数据展现及大数据分析科学决策，保证生产正常进行。

(三) 工业元宇宙在工厂层级中应用案例

1. 案例：中冶京诚信息技术有限公司

以中冶京诚的钢铁行业数字孪生工厂全生命周期管理平台为例，见图 79。该平台充分考虑钢铁制造作为典型的长流程工业，生产工序众多，工艺流程复杂，大型设备集中，且工艺参数繁多且耦合性强的特点，全面整合了企业数据，通过数字化编码系统解决了工厂唯一标识和数据表达的问题，实现了设计、采购、施工、运维各阶段数据贯通，在此基础上构建了钢铁行业数字孪生平台，实现了工厂整体运营监控、生产工艺监控与仿真、设备运维管理、三维管网安全监控、数字化环保监控、物流调度管理、应急联动指挥、虚拟培训考核等功能。秉承“一张地图、一个平台、一个中心”理念，打造全生命周期数字孪生工厂建设解决方案。不仅可以满足钢厂的全流程数字化管控需求，也可以在单一工艺段（如炼钢、轧钢车间）推广应用，对推进钢铁工业数字化转型升级具有开创性的意义。



图 79 数字孪生工厂

2. 案例：南通海赛未来数字科技有限公司

以海赛未来建设的某智慧梁场数字孪生管理平台为例，见图 80。该平台将 AI、BIM、数字孪生、物联网、大数据等技术深度融合，实现建筑工业领域全生命周期、全要素智能化管理。平台构建移动平台模型，模拟场区全流程施工工艺，并与梁场场区数据模型交互联动，使用户能快速了解各施工场景的施工工艺流程及方法；支持模型与视频监控联动，实现对各监控区质量、安全、进度等施工管控，并对钢筋加工、混凝土搅拌、浇筑脱模、张拉养护等全过程进行视频监管；具备数字化智能蒸养管控功能，结合蒸汽养护区的模型场景，展示蒸汽养护的施工工艺全过程，实时显示当前蒸养状态，反馈蒸养情况。该平台用数字化、可视化、系统化展现建设项目全貌，用新思路、新技术为传统施工企业带来了新突破，帮助企业实现数字化转型升级，提升企业竞争力。



图 80 智慧梁场数字孪生管理平台

3. 案例：成都森海灵犀科技有限公司

成都森海灵犀科技为某自来水厂搭建了一套完整的数字孪生系统，通过数字孪生系统对供水系统的各种设备进行实时监测和管理，包括水泵、调节阀、水箱等。通过模拟实验和预测分析，准确判断设备的状态和健康情况，提前预防问题的出现，降低维修成本和系统停机时间。此外，利用传感器实时监测供水系统中的水质参数，包括 PH 值、浊度、余氯含量等。基于分析模型，可以对水质进行预测和评估，提前发现水质问题，优化水质调节策略，保证水质安全和健康。通过模拟计算对供水系统的水源、供水能力、用水需求等进行预测分析，以保证供水计划的合理性、科学性和高效性。同时利用传感器和采集数据，监测供水系统中的环境参数，如温度、湿度、CO2 含量等。通过数据分析和模拟计算，可以实现环境模拟和预测，优化供水系统的环境控制策略，提高供水系统的安全和可靠性。

4. 案例：南京维赛客网络科技有限公司

新疆新华水电投资股份有限公司作为中核集团数字化转型先行者，由于厂区位较远，很多客户及来访者受地域限制，故考虑搭建线上展示及交流平台需求，将整体厂区(含水利大坝)进行虚拟沙盘展示，将工厂车间进行仿真还原展示并搭建公司线上多媒体峰会厅，见图 81。面对该需求，南京维赛客网络科技帮助新疆新华水电投资股份有限公司搭建了水利站外景元空间、工厂厂区元空间、整体布

局沙盘元空间以及多媒体峰会厅元空间于一体的综合性智慧元宇宙系统，降低了异地参观成本，将不可实际展示的可变参数通过虚拟的方式进行展示，另外通过虚拟人 1 对 1、1 对多的接待交流，深度实时挖掘客户需求提高效率。



图 81 多媒体峰会厅

5. 案例：宁波未知数字科技有限公司

针对某化工厂安全生产问题，未知数字提出数字孪生+增强现实系统，助力化工厂安全生产管理。根据企业设定的规定巡检路线及定点巡检节点，设定数字巡检流，结合 5G+FTTR+多模态混合定位部署，巡检人员仅需根据数字标准作业流引导完成巡检工作。保存各类缺陷相关参数及对应图片，建立缺陷库，当佩戴 AR 眼镜的巡检员在巡检过程中采集到相关数据，平台将自动识别相应缺陷并标注分类，工作人员可以按照缺陷类型或者时间进行查询，很好地掌握环境缺陷的概况及变化情况。面对危急情况时，通过一体化工业防爆背包上的环境传感器实时监测环境相关有毒气体浓度数据，并传输至 AR 眼镜中进行显示，便于巡检人员第一时间掌握周围环境状况信息，保障人身安全的同时，分析周围存在的问题与隐患。同时进行生命体征监控，如监测到异常，将第一时间将人员的移动轨迹、传感器数据视频信号同步回传至指挥中心，帮助制定紧急救援方案。

四、工业元宇宙在工业系统-产业链层级中的应用

（一）工业元宇宙在产业链层级中技术应用分类

产业链级应用中，工业元宇宙能够帮助构建产业级数字大脑，使能服务产业链治理与供应链优化，做到产业链、供应链管理实时、准确、可控、可调，助力

企业打通堵点、疏通难点，推进供应链转型。实现从各个企业“孤立建设”到智能制造生态系统协同发展。

智能制造的实现是一个逐级推进的复杂工程，涉及企业执行装备层、控制层、管理层、企业层等企业系统架构的纵向集成，涉及本企业研发、生产、供应、销售、服务等产品全价值链的横向集成，还需要进一步推动企业上下游之间、行业之间的更大范围协同，具体包括：

1. 上下游产业链企业和用户共同参与

在上游，将制造业数据导入云端，利用新一代信息技术和平台连接产业上中下游，形成智能预测与快速反馈结合；在下游，请客户和最终用户共同参与面向细分市场的产品需求规划，汇集制造资源和解决方案，形成共生共荣的智能制造生态系。

2. 智能装备、物流仓储、软件企业和服务商等细分行业的协同创新

限于资金投入不足、技术研发周期较长以及工艺壁垒较高等因素，单个系统解决方案尚难以同时满足各个细分行业的智能制造发展需要，因此需要行业自身，以及关联行业之间加强协同和创新，强化智能制造系统解决方案供应能力。最终，由多个提供单一产品或服务的供应商共同构建整个协作系统，造就全新的智能制造产业链，形成融合发展的生态圈。

3. 政产学研用联动的创新体系

政府通过财政资助、建立标准和制度，发挥统领和激励作用，企业通过深化供应链上下游紧密合作、加大自身研发力度，强化创新主体作用；高校与研究机构通过多种方式加强和企业的合作，发挥组织牵头和技术支撑作用。在全社会的范围内，形成产、学、研、用的智能制造联动体系，发挥各级创新机构的最大效能，减小风险，放大成果。

（二）工业元宇宙在产业链层级中应用场景

1. 供应链智能控制塔

供应链智能控制塔是供应链运作的指挥中心。控制塔提供全方位视角，打通端到端的数据链接，能更全面地从客户、区域、运输、物料、产品，工厂等不同维度来审视供应链的业务问题和改进点，支撑产业链上下游企业间设计、采购、生产、销售、物流、售后等全过程信息协同。

2. 合作伙伴协同

实现工业数据全链条可视化，接入供应商内部库存等数据，帮助制造企业实现供应商物料管控；进行供应商分级管理，根据级别不同进行不同等级的信息协同，有针对性地与合作伙伴进行数据开放。

3. 服务供应链协同

通过机器学习进行主动需求预测，实现多层次多场景下对服务备件整个生命周期，以及采购计划期内准确的需求趋势分析和需求周期性波动预测。提供智能化的分货补货以及再平衡，帮助计划人员找到最合理的分货策略，如计划周期，分货激活条件，分货优先级等。

4. 细分行业协同

在单个系统解决方案供应商无法满足行业智能化转型需求时，需要行业内部以及细分行业之间进行协同研发攻关，由多个提供单一产品或服务的供应商共同构建协作合作系统。

5. 产学研协同

通过创新联合体、产业技术研究院、产学研创新战略联盟等多样的产学研融通平台组织模式进行关键技术联合攻关。通过集聚整合各类创新要素和互补性资源，有效克服了关键共性技术攻关活动中“组织失灵”和“市场失灵”的问题，降低了技术攻关过程的高风险和不确定性。

（三）工业元宇宙在产业链层级中应用案例

1. 案例：浙江中科视传科技有限公司

浙江中科视传致力于通过院校的职业人才培养，推动数字产业规模化生产，打造线上线下(虚拟与现实)的通道，形成与现实世界紧密相连且互补的数字世界。在元宇宙产业领域，企业以数字内容生产、数字场馆建设、线上交互及数字内容平台开发为主。产业项目有：地理地貌仿真还原、数字海洋世界、影视动画、青岛城市数字景观、北京世园会奇幻光影森林、数维东方--延安市数字南泥湾项目、数字虚拟人等，见图 82。于 2022 年由延安市南泥湾管委会倡议，联合中国传媒大学、中国美术学院、中国少年儿童造型艺术学会在延安成立延安华创数字文旅产业研究院针对全国红色文旅数字化转型开展相关研究和项目落地工作。



图 82 海洋生物、场景仿真

2. 案例：睿珀智能科技有限公司

睿珀智能科技搭建数字赋能中心平台，基于数据基座 + 交易市场 + 运营模式，结合物联网、人工智能、数字孪生、元宇宙等新一代数字技术，为中小企业提供了低成本、高效率、高安全的行业数字化解决方案，同时赋能政府机构多维度治理，引导政策更精准、有效的服务到每一家企业，实现投入产出闭环、平台运营收益持续反哺产业的效果。通过串联企业运行的各环节数据，实现数据要素化、资产化，助力企业内部诊断和制定发展目标，并通过隐私计算共享生产数据，实现数据资产变现，加快企业数字化转型。为政府和企业搭建供需关系，用数字技术自动连接客户资源、订单合同、供应链协同金融贷款等领域，给企业送订单、送服务，激活区域产业经济以地方企业需求为中心，吸引更多的市场主体参与，实现赋能中心自我造血、独立运营的能力，实现地方政府的投入产出闭环，政策性收益持续反哺产业，见图 83。



图 83 未来数字员工工作案例

第四章 机遇挑战篇

第一节 工业元宇宙的发展机遇

一、工业元宇宙推动智能制造的全面升级

（一）工业元宇宙推动智能制造全面升级

工业元宇宙是一个虚拟与现实相融合的数字化世界，旨在促进工业领域的创新与发展。工业元宇宙的构建需要深入理解和掌握工业制造的各个环节，通过虚拟现实技术将生产流程、工艺、设备等数字化，实现数字孪生，通过虚拟仿真技术进行模拟和优化，以实现更高效、更灵活、更智能的制造。在数字化世界中可以实时监控生产过程，预测设备故障，优化工艺流程，从而降低成本、提高效率、提升质量。

智能制造是基于新一代信息技术与先进制造技术深度融合，贯穿于设计、生产、管理和服务等制造活动的各个环节，是致力于推动制造业数字化、网络化和智能化转型升级的新型生产方式。

工业元宇宙则更像是智能制造的未来形态，以推动虚拟空间和现实空间联动为主要手段，更强调在虚拟空间中映射、拓宽实体工业能够实现的操作，通过在虚拟空间的协同工作、模拟运行指导实体工业高效运转，赋能工业各环节、场景，使工业企业达到降低成本、提高生产效率的目的，促进企业内部和企业之间高效协同，通过增强现实技术将虚拟世界与现实世界相结合，实现人机交互、智能决策和自动化生产，助力工业高质量发展，实现智能制造的进一步升级。

因此，工业元宇宙是智能制造的未来图景，其将推动工业领域的数字化转型和创新发展，工业企业可以实现生产过程的数字化、智能化和可视化，提高生产效率和产品质量，降低成本和能源消耗，从而实现可持续发展。

（二）工业元宇宙在智能制造中的价值体现（见图 84）



图 84 工业元宇宙在智能制造中的价值体现

1. 优化工业制造生产流程

工业元宇宙通过数字孪生技术，能够模拟产品的生产流程，提前发现生产过程中的瓶颈和问题，从而优化生产流程，提高生产效率。

（1）实现生产过程的可视化

工业元宇宙通过构建虚拟智能工厂，能够让生产过程变得更加可视化，让生产人员能够更加直观地了解生产线的运行情况，及时发现和解决问题。

（2）实现生产资源的优化配置

工业元宇宙通过对生产资源的数字化建模和仿真，能够实现资源的优化配置，提高生产效率。例如，通过对设备维护需求的预测，可以及时进行维修和更换，避免设备故障对生产的影响。

（3）实现生产过程的自动化和智能化

工业元宇宙通过数字孪生技术、人工智能等技术，能够实现生产过程的自动化和智能化，提高生产效率和产品质量。例如，通过机器学习和图像识别技术，可以实现自动化检测和分类，减少人工干预和错误。

（4）实现个性化定制生产

工业元宇宙通过 XR、AI 等技术，能够实现产品的个性化定制生产，满足消费者多样化的需求。

（5）实现生产过程的协同和共享

工业元宇宙通过云计算、物联网等技术，能够实现生产过程的协同和共享，提高生产效率和质量。例如，不同部门之间可以通过工业元宇宙平台进行实时沟通和协作，共同解决生产中的问题。

2. 提升工业生产设备利用率

通过实时监控设备和机器的运行状态，工业元宇宙能够预测设备的维护需求，及时进行维修和更换，从而提高设备利用率，降低故障率。

（1）监控设备运行状态

通过实时监控设备的运行状态，工业元宇宙能够及时发现设备故障的迹象，提前进行维修和更换，避免设备在生产过程中出现停机情况，从而提高设备利用率。

（2）优化设备维护计划

工业元宇宙通过分析设备的历史运行数据，能够预测设备的维护需求，制定更加合理的设备维护计划，从而避免设备在维护过程中的过度维修和保养不足，降低设备维修成本。

(3) 自动化设备管理

借助工业元宇宙平台，可以实现设备的自动化管理。通过物联网技术实现设备的远程监控和管理，通过数字孪生技术实现设备的虚拟仿真和优化等，从而减少人工干预，提高设备管理的效率和精度。

(4) 预测设备故障

通过分析设备运行数据和历史维护记录，工业元宇宙能够预测设备可能出现的故障，提前进行干预和修复，从而避免设备在生产过程中出现停机情况，确保生产线的稳定性和持续性。

3. 个性化定制生产工业品

(1) 构建虚拟产线模型

在工业元宇宙中，可以根据实际生产环境搭建虚拟产线模型，实现生产环境的数字化映射。这使得生产过程中的各种要素和环节能够在虚拟环境中得到呈现和模拟。

(2) 实现人机交互

借助 XR、AI 等技术，用户可以在工业元宇宙中与虚拟产线模型进行交互，进行产品设计、生产过程观摩、参与产品体验等。这种交互方式使得用户能够更加深入地参与到产品的设计和生产过程中。

(3) 实时监控和反馈

在生产过程中，工业元宇宙可以实时监控设备的运行状态和生产数据，同时用户也可以通过反馈系统将问题和建议直接提交给生产方。这种反馈机制使得产品的设计和生产过程能够更加贴近用户的需求和期望。

(4) 模拟生产流程

根据用户的需求进行个性化的生产计划和调度，实现灵活的生产响应。

4. 全面降低制造成本

通过优化生产流程、提升设备利用率和个性化定制生产等方式，工业元宇宙能够降低生产成本，提高企业的盈利能力。

（1）实现全面自动化和智能化

借助工业元宇宙平台，可以实现智能制造的全面自动化和智能化。这种自动化和智能化可以提高生产效率和质量，同时也可以降低人工成本和误差率。

（2）简化供应链管理

借助工业元宇宙平台，可以实现供应链管理的优化。例如，通过实时监控库存情况，实现库存预警和自动补货等，避免库存积压和缺货现象的发生同时也可以通过优化物流路线和调度方式降低物流成本和提高物流效率。这种优化可以提高企业的生产效益和市场竞争力同时也可以降低成本和风险。

（3）降低设备维修成本

通过工业元宇宙的虚拟产线模型和实时监控反馈机制，可以实现设备的预测性维护和预防性维护，提前发现和解决设备故障问题，降低设备维修成本。

（4）提高资源利用效率

工业元宇宙可以实现资源的数字化管理和优化配置，提高资源利用效率。例如，通过数字化管理实现原材料、能源等资源的合理分配和利用，降低资源浪费和成本支出。

二、工业元宇宙助力新兴工业经济社会模式构建

（一）工业元宇宙与新型工业经济社会模式

工业元宇宙与新兴的工业经济社会模式之间存在密切的关系。工业元宇宙是工业互联网演进的高阶形式，其基本内涵是通过实现工业实体的虚实映射和业务流程的虚实交互，构建全数字化的工业应用环境，创立工业文明新范式。

工业元宇宙是元宇宙技术在工业领域的应用，通过将物理世界的工业机理和逻辑映射到虚拟空间，形成全新的工业生态，工业元宇宙对产业数字化转型、优化资源配置、提升生产效率、创新商业模式、增强供应链协同性和促进工业创新等方面都产生了明显作用。同时，元宇宙将数字技术创新推上另一个高度，在这个过程中不断催生出新的交互模式。随着技术的不断进步和应用场景的不断扩展，工业元宇宙不断打破传统的工作和社交方式，使得人们可以更加便捷地进行沟通交流和研究学习等活动，为数字经济带来了新的商业模式和新的增长点。

工业元宇宙与新兴的工业经济社会模式之间存在密切的关系。工业元宇宙是元宇宙技术在工业领域的应用，它基于元宇宙核心基础设施和应用理念，通过促

进生产效率提升、创新商业模式、推动产业协同发展、促进绿色可持续发展等方式构建服务于工业经济的新型工业体系、工业生态和工业模式。工业元宇宙为构建新型的工业经济社会模式提供了重要的支持和推动作用。

（二）工业元宇宙助力新工业模式构建（见图 85）



图 85 工业元宇宙助力新工业模式构建

1. 生产效率提升

借助工业元宇宙的虚拟产线模型和实时监控反馈机制，企业可以优化生产流程、提高生产效率、降低生产成本，实现更高效、更灵活的生产方式。这种生产效率的提升可以带来更快速的市场响应速度和更优质的产品质量，提高企业的竞争力。

（1）优化产品设计

通过元宇宙技术，工业设计师可以在虚拟环境中进行产品的设计和模拟，更加直观地了解产品的性能和外观。这样的方式可以减少实地试验的时间和成本，提高生产效率。

（2）减少生产错误

传统的工业生产中，人们需要通过实地考察、试验和调整来完成产品的设计和和生产，这样的过程耗时耗力，而且容易出现错误。而有了元宇宙技术，工业设计师可以在虚拟环境中进行多次试验和调整，从而减少了实地试验的时间和成本，提高了生产效率。

（3）提升产品质量

在传统的工业生产中，产品的质量往往需要通过实地试验和调整来保证。而

有了元宇宙技术，工业设计师可以在虚拟环境中对产品进行全面的模拟和测试，可以更加准确地评估产品的性能和质量。通过元宇宙技术，工业设计师可以在产品设计的早期阶段就发现和解决潜在的问题，从而提升产品的质量和可靠性。

（4）增强协同效率

企业可以共享资源、技术和信息，实现协同发展，提高整个产业的竞争力和效益。这种产业协同发展模式可以促进产业链的完善和升级，提高整个产业的附加值和效益。

（5）促进创新创业

工业元宇宙可以为工业领域的创新创业提供更加便捷、更加智能化的平台和服务，推动工业领域的创新发展。

2. 创新商业模式

工业元宇宙可以创新商业模式，如虚拟展厅、虚拟试衣间等数字化销售方式，实现产品的数字化展示和销售。这种数字化销售模式可以突破传统销售方式的限制，提高销售效率和客户体验，同时也能够满足消费者的个性化需求。此外，工业元宇宙还可以通过数字资产交易、定制化生产等方式创新商业模式，为企业带来更多的商业机会和收益。

（1）数字化销售

通过元宇宙技术，可以实现数字化销售，即通过虚拟方式来展示和销售产品，突破传统销售方式的限制，提高销售效率和客户体验。

（2）租赁模式创新

在工业元宇宙中，企业可以实现设备的租赁和能源的租赁。这种方式可以降低企业的成本和提高资源使用效率，同时也可以解决企业产能过剩和产能不足的问题。

（3）云制造模式

工业元宇宙可以将企业既有的生产能力和生产任务转变为结构化、信息化的云制造指标，并在平台上进行汇聚。

（4）创新服务模式

在工业元宇宙中，企业可以实现产品的数字化服务，即通过虚拟环境来对产品进行全面的监测和维护。这种方式可以提高企业的服务质量和客户体验，同时

也可以促进企业的数字化转型和创新发展。

3. 产业协同发展

(1) 实现信息共享

工业元宇宙可以实现企业之间的信息共享，即企业可以通过元宇宙平台来共享资源、技术和信息，从而促进企业之间的协同合作。这种方式可以减少企业之间的信息不对称和沟通成本，提高整个产业的竞争力和效益。

(2) 推动产业链完善

工业元宇宙可以推动产业链的完善和升级，即通过元宇宙平台来实现产业链各个环节的协同合作，从而形成数字化的产业生态圈。

(3) 促进创新创业

通过元宇宙技术，创新创业者可以更加准确地评估产品的性能和质量，提高创新创业的成功率和效益。

(4) 加强人才培养

工业元宇宙可以为工业领域的人才培养提供更加智能化的平台和服务，推动工业领域的人才培养和发展。通过元宇宙技术，学生可以更加直观地了解工业生产过程和技术，提高学习效果和实践能力。

4. 绿色可持续发展

工业元宇宙可以实现生产过程的模拟和预测，提前发现和解决潜在的环境污染和资源浪费问题。这可以帮助企业实现绿色生产，提高可持续发展能力，同时也能够促进整个社会的环保意识和发展。通过工业元宇宙的技术应用，可以推动工业领域的绿色发展和可持续发展，为构建新型的工业经济社会模式贡献力量。

(1) 优化能源利用

工业元宇宙技术可以优化能源的利用，即通过智能化的能源管理平台来监测和控制能源的使用，从而减少能源的浪费和消耗。这种方式可以降低企业的能源成本和提高能源使用效率，同时也有助于减少环境污染和促进可持续发展。

(2) 促进循环经济

工业元宇宙可以促进循环经济的发展，即通过元宇宙平台来实现废旧物品的回收、再利用和循环，从而减少废旧物品对环境的污染和对资源的浪费。这种方式可以促进资源的循环利用，提高资源的利用效率和附加值，同时也有助于减少

环境污染和促进可持续发展。

(3) 推动清洁生产

工业元宇宙可以推动清洁生产的发展，即通过元宇宙技术来实现生产过程的智能化和绿色化，从而减少生产过程对环境的污染和对资源的浪费。这种方式可以提高企业的生产效率和产品质量，同时也有助于减少环境污染和促进可持续发展。

(4) 强化环境监管

工业元宇宙可以强化环境监管，即通过元宇宙技术来实现对环境污染的监测和控制，从而加强对环境污染的监管和管理。这种方式可以提高环境监管的效率和准确性，同时也有助于减少环境污染和促进可持续发展。

5. 人才培养与创新创业

工业元宇宙可以为人才培养提供更加逼真的模拟训练环境，通过增强现实、虚拟现实等技术提升教育培训效果。

(1) 虚拟实践平台

工业元宇宙可以为企业提供虚拟实践平台，即通过虚拟现实技术来模拟工业生产过程和场景，使员工可以在实际操作前掌握必要的技能和知识。这种方式可以提高员工的培训效率和掌握技能的速度。

(2) 创新教育方式

工业元宇宙可以创新教育方式，即通过虚拟现实技术来将传统的课堂教学转变为沉浸式、体验式的教学模式，从而更好地激发学生的学习兴趣和创新精神。这种方式可以提高学生的创新能力和综合素质。

(3) 创业支持平台

工业元宇宙可以为创业者提供创业支持平台，即通过元宇宙平台来为创业者提供政策咨询、项目对接、融资支持等服务，从而帮助创业者更好地实现创新创业。这种方式可以降低创业者的创业风险和门槛，提高创业的成功率和效益。

(4) 人才交流与合作

工业元宇宙可以实现人才交流与合作，即通过元宇宙平台来为企业和人才之间搭建桥梁，从而促进企业和人才之间的合作和交流。这种方式可以为企业提供更多的人才选择和机会，同时也为人才提供了更多的发挥自己才能的平台和机会。

第二节 工业元宇宙面临的挑战与应对办法

一、聚焦核心技术创新与融合

(一) 工业元宇宙中的关键核心技术 (见图 86)



图 86 工业元宇宙中的关键核心技术

1. 数字孪生技术

数字孪生技术是工业元宇宙的核心技术之一，它通过收集现实世界系统或实体的信息，在虚拟空间中创建与之相对应的数字化模型。这个模型可以包含系统或实体的各种物理、化学、力学等特性以及其环境因素，以至达到实际系统的全要素镜像。数字孪生技术有助于在元宇宙中模拟和优化工业生产过程。

2. 虚拟化技术

虚拟化技术是实现工业元宇宙的重要手段，它通过虚拟现实技术、增强现实技术等，将现实世界和虚拟世界相融合，实现生产过程的可视化、可控制和可优化。

3. 人工智能技术

人工智能技术在工业元宇宙中扮演着重要角色，它可以帮助企业实现数据驱动的决策，提高生产效率和产品质量。例如，通过机器学习和深度学习等技术，可以对数据进行挖掘和分析，从而优化生产流程和提高产品质量。

4. 区块链技术

区块链技术在工业元宇宙中可以发挥数据共享、价值转移、信任构建等功能，

它有助于实现多方协同和数据安全共享。通过区块链技术，企业可以实现实时的生产监控和预测性维护，提高生产效率和产品质量。

5. 计算机图形技术

计算机图形技术在工业元宇宙中发挥着重要作用，它可以帮助企业实现更逼真的虚拟场景和更自然的交互体验。例如，通过高级图形渲染和实时交互技术，可以在元宇宙中创建更为逼真的产品模型和生产场景。

6. 算力技术

算力技术是支撑工业元宇宙的关键技术之一，它主要涉及高性能计算、云计算等技术。这些技术可以提供强大的计算和存储能力，以支持大规模的虚拟化和渲染任务，同时保证元宇宙的稳定性和可扩展性。

（二）工业元宇宙的关键技术的突破和融合（见图 87）



图 87 工业元宇宙的关键技术的突破和融合

1. 提高技术自主性

加强自主研发，提高工业元宇宙关键技术的自主性。政府和企业可以加大对相关技术的投入和支持，鼓励科研机构和企业加强技术研发和创新，掌握核心技术，减少对外部技术的依赖。

（1）加强自主研发

加大对工业元宇宙关键技术的研发投入，鼓励企业、高校和研究机构加强自主研发，掌握核心技术。通过自主研发，可以突破技术瓶颈，提高自主创新能力。

(2) 培养技术人才

培养具备高素质和技术能力强的技术人才，加强技术研发和创新。通过培养技术人才，可以增强自主创新能力，推动工业元宇宙关键技术的突破和融合。

(3) 建立技术创新体系

建立以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系。加强企业与高校、研究机构的合作，针对工业元宇宙关键技术的深度研发与应用。

(4) 加强知识产权保护

加强对工业元宇宙关键技术的知识产权保护，鼓励企业申请专利、保护知识产权。通过加强知识产权保护，可以促进技术的创新和应用，提高自主创新能力。

(5) 技术成果转化

加强技术成果的转化和应用，将技术转化为实际的生产力和竞争力。通过加强技术成果转化，可以提高技术的应用效果和经济效益，推动工业元宇宙关键技术的快速发展。

2. 加强技术融合

工业元宇宙中的各种技术进行融合，形成协同效应。例如，将人工智能、区块链、云计算等技术与虚拟现实、增强现实等技术相结合，实现技术的综合应用，提高工业元宇宙的智能化、安全性和可靠性。

(1) 推动多学科交叉融合

工业元宇宙涉及多个学科领域，包括计算机科学、电子工程、机械工程、物理科学等。因此，需要推动多学科交叉融合，促进不同领域之间的交流和合作，共同研究和发展工业元宇宙关键技术。

(2) 加强技术研发与创新

鼓励企业、高校和研究机构积极开展技术研发与创新，提升工业元宇宙关键技术的自主性和原创性。

(3) 建设技术交流平台

建设技术交流平台，促进不同领域之间的技术交流和合作，分享最新的研究成果和技术进展，推动工业元宇宙关键技术的共享和协同发展。

(4) 培养复合型技术人才

工业元宇宙关键技术的突破和融合需要依靠具备多学科背景和技术能力的

复合型技术人才。需要加强人才培养和引进，建立完善的人才培养体系，培养具备多学科背景和技术能力的复合型技术人才。

(5) 加强技术应用与创新

鼓励企业加强技术应用和创新，推动工业元宇宙关键技术在工业制造、医疗健康、文化娱乐等领域的应用和发展。

3. 优化基础设施

优化网络和算力等基础设施，提高数据传输速度和数据处理的需求。同时，加强数据中心、云计算中心等基础设施建设，提高数据存储和计算能力。

(1) 提升硬件性能

在工业元宇宙中，需要处理大量的数据和进行复杂的计算，因此需要不断提升硬件设备的性能，包括计算机、服务器、网络设备等，以满足工业元宇宙对基础设施的高要求。

(2) 建设高速网络

工业元宇宙需要实现实时的数据传输和交互，因此需要建设高速、稳定、可靠的网络基础设施，以便实现快速的数据传输和高效的通信。

(3) 推动云计算和边缘计算

云计算可以提供强大的计算和存储能力，而边缘计算可以减少网络延迟和数据传输量，提高系统的响应速度和效率。因此，需要推进云计算和边缘计算的融合，实现数据和计算的分布式处理和存储，以提高工业元宇宙系统的整体性能。

(4) 增强数据安全

工业元宇宙涉及大量的敏感数据和机密信息，因此需要加强数据安全保护，建设完善的数据安全体系，包括数据加密、访问控制、安全审计等方面，保障工业元宇宙系统的安全性和稳定性。

(5) 促进互通互联

工业元宇宙需要实现各种设备和系统的互通互联，因此需要制定统一的接口标准和协议，促进不同设备和系统之间的无缝对接和协同工作，提高工业元宇宙系统的整体效率和性能。

4. 推动行业标准制定

制定工业元宇宙的行业标准和规范，推动各行业之间的协作和交流。通过制

定统一的标准和规范，可以促进各种技术的兼容性和互操作性，降低技术门槛和成本。

(1) 建立多方参与的标准制定机制

工业元宇宙的概念涉及到多个领域和行业，包括硬件设备、软件系统、数据交换和安全等多个方面。因此，需要建立一个多方参与的标准制定机制，吸纳来自不同领域和行业的专家和企业的意见和建议，形成一个广泛共识的标准制定过程。

(2) 优先制定关键技术标准

在工业元宇宙的关键技术方面，需要优先制定标准，包括数字孪生、物联网、数字设计与仿真、增强现实/虚拟现实/混合现实(AR/VR/MR)等前沿技术的标准，以促进技术的规范化和标准化。

(3) 参与国际标准制定

在制定工业元宇宙标准的过程中，可以参考国际上已经存在的相关标准，如ISO、IEC 等国际标准组织发布的相关标准，以推动工业元宇宙标准的国际化发展。

(4) 鼓励企业参与标准制定

鼓励企业积极参与到工业元宇宙标准的制定中来，可以让企业更好地了解和应用新技术，同时也能够增强企业在市场上的竞争力。

(5) 强化标准的实施和监督

制定好标准后，需要强化标准的实施和监督，确保标准得到有效执行和遵守。同时也要对标准的实施情况进行监测和评估，及时发现问题并进行改进。

5. 加强人才培养

加大对工业元宇宙相关人才的培养力度，培育一批具备技术研发、设计、管理和运营能力的高素质人才。同时，加强人才引进和交流，吸引更多优秀人才投身于工业元宇宙领域。

(1) 强化高等教育培养

鼓励高等院校开设工业元宇宙相关课程，培养学生对工业元宇宙的认知和技能，包括数字孪生、物联网、AR/VR/MR 等技术的基础知识和应用能力。

(2) 加强职业培训和继续教育

鼓励企业、科研机构 and 职业培训机构开展工业元宇宙相关培训，提高从业人员的专业技能和实践能力。同时，提供继续教育机会，使从业人员能够不断更新知识和技能，适应工业元宇宙技术的快速发展。

(3) 推动产学研一体化

鼓励企业、高校和研究机构建立紧密的合作关系，共同推动工业元宇宙关键技术的研发和应用。通过联合培养人才、共建实验室等方式，加强人才培养和实践能力的提升。

(4) 培养创新精神和实践能力

鼓励学生在掌握基本理论和技术的基础上，培养创新意识和实践能力。开展创新项目，引导学生实践操作，提高创新能力和解决难题的动手能力。

(5) 完善人才激励机制

建立完善的人才激励机制，鼓励优秀人才脱颖而出。通过评选优秀人才、奖励成果等方式，激发人才的创新热情和积极性。

6. 探索应用场景

加大对工业元宇宙在各个领域的应用场景，推动其与实体经济的深度融合。例如，在制造业领域，可以通过工业元宇宙实现生产过程的虚拟化、智能化和可视化，提高生产效率和产品质量。

(1) 深入了解行业需求

要深入了解不同行业的需求和痛点，特别是对工业制造、医疗健康、文化娱乐等领域的需求进行深入调研，以寻找工业元宇宙关键技术的应用场景。

(2) 发掘潜在应用场景

通过分析工业元宇宙关键技术的特点和优势，发掘潜在的应用场景。例如，利用数字孪生技术可以对工厂进行模拟和优化，利用 AR/VR 技术可以开展虚拟手术训练等。

(3) 与行业合作共同探索

与相关行业进行合作，共同探索工业元宇宙关键技术的应用场景。通过与行业合作，可以深入了解实际应用中的问题，共同研发和应用相关技术。

(4) 利用示范项目推动应用

通过示范项目，将工业元宇宙关键技术应用到具体的行业中，展示其优势和

效果。同时也可以通过示范项目，促进相关技术的推广和应用。

(5) 加强技术宣传和推广

通过技术宣传和推广，让更多的人了解工业元宇宙关键技术的潜力和应用场景。同时也可以通过技术交流合作，吸引更多的企业和机构参与相关技术的研发和应用。

(6) 不断优化和完善技术

在探索应用场景的过程中，不断优化和完善工业元宇宙关键技术。通过实际应用中的反馈和评价，发现技术的不足之处，并进行改进和优化。

7. 加强国际合作

加强与国际先进技术机构和企业的合作，共同推动工业元宇宙关键技术的突破和融合。通过国际合作，可以共享资源和技术成果，加快技术研发和应用进程。

(1) 建立国际合作机制

与国际上相关机构和企业建立合作机制，共同推动工业元宇宙关键技术的研发和应用。可以通过建立联合实验室、共同开展研究项目等方式，加强国际合作和交流。

(2) 参与国际标准制定

积极参与国际标准制定组织的工作，共同制定工业元宇宙关键技术的国际标准。通过参与标准制定，可以推动我国在工业元宇宙领域的发言权和影响力。

(3) 共享技术和资源

通过共享技术和资源，加强国际合作和交流。可以共享研究成果、技术资源和实践经验等，促进工业元宇宙关键技术的全球发展和应用。

(4) 培养国际化人才

培养具备国际视野和跨文化交流能力的人才，为工业元宇宙关键技术的国际合作提供人才保障。可以通过开展国际交流项目、吸引海外人才等方式，加强国际化人才的培养和引进。

(5) 加强文化交流和理解

在工业元宇宙关键技术的国际合作中，加强文化交流和理解也非常重要。可以促进不同文化背景和国家之间的交流和合作，共同推动工业元宇宙关键技术的发展和应用。

（6）注重知识产权保护

在工业元宇宙关键技术的国际合作中，注重知识产权保护也非常重要。可以通过申请专利、保护知识产权等方式，保护自己的合法权益，同时也可以通过技术许可、转让等方式，实现技术共享和互利共赢。

二、配套并完善数字基础设施

工业元宇宙技术的发展，需要完善的数字基础设施，见图 88。

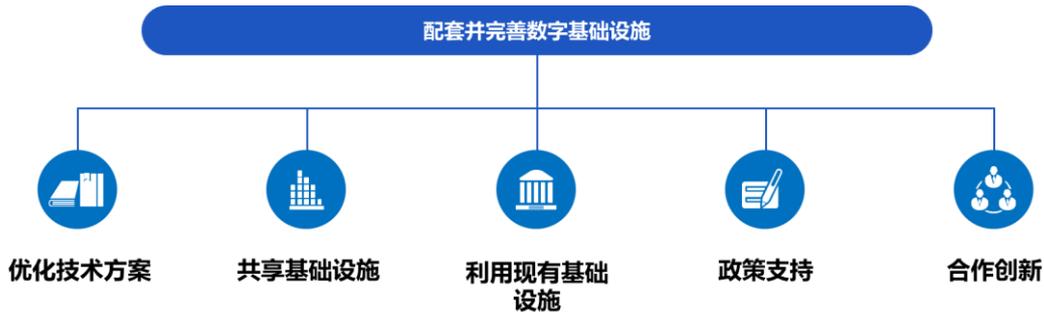


图 88 配套并完善数字基础设施

（一）优化技术方案

通过不断优化技术方案，降低数字化基础设施的建设成本。例如，可以研发更高效的数据处理技术和存储技术，提高设备的性能和稳定性，从而减少基础设施的投入成本。

1. 采用先进的数据处理技术

在数字化基础设施中，数据处理技术是至关重要的。采用高效、快速的数据处理技术可以缩短数据处理时间，提高数据处理效率，从而降低数字化基础设施的建设成本。例如，可以采用分布式计算、云计算等技术来提高数据处理能力。

2. 优化数据存储技术

数据存储技术也是数字化基础设施的重要环节。通过采用高性能、大容量的存储设备和技术，可以降低数据存储的成本。同时，也可以采用数据压缩、重复数据删除等技术来减少存储空间的使用，降低存储成本。

3. 研发低功耗设备

在数字化基础设施中，设备的功耗也是一个重要的问题。通过研发低功耗设备，可以降低能源消耗和运营成本。例如，可以采用更高效的芯片、优化设备散热设计等技术来降低设备的功耗。

4. 构建可扩展的系统

在数字化基础设施中，可扩展性是非常重要的。构建可扩展的系统可以适应业务需求的变化和发展，避免重复投资和浪费资源。例如，可以采用模块化设计、微服务等可扩展性设计方法来构建系统。

5. 利用开源软件

通过利用开源软件，可以避免购买高昂的商业软件授权费用。同时，开源软件也具有较高的灵活性和可定制性，可以满足不同业务需求。

（二）共享基础设施

通过共享技术设施，可以降低工业元宇宙的建设成本。例如，多个企业可以共同建设数字化基础设施，共享资源和技术，从而降低各自的投入成本。

1. 建立基础设施共享平台

企业和机构可以共同建立基础设施共享平台，将各自的数字化基础设施资源进行集中管理和共享，降低数字化基础设施的重复建设成本。

2. 联合采购和建设

多个企业可以联合采购数字化基础设施，共同建设和维护。通过联合采购和建设，降低成本，提高质量和稳定性。

3. 共享数据中心

建立共享数据中心，将各个企业的数据集中管理和处理。通过共享数据中心，可以避免各个企业重复建设数据基础设施，降低数字化基础设施的建设成本。

4. 利用云计算技术

通过利用云计算技术，可以将计算、存储和网络等资源进行动态分配和管理。云计算的资源共享，有效地降低数字化基础设施的建设成本。

5. 加强技术合作

企业和机构可以加强技术合作，共同研发和应用工业元宇宙的关键技术。通过技术合作，可以共享技术和资源，降低数字化基础设施的建设成本，同时也可以提高数字化基础设施的应用效果和经济效益。

（三）利用现有基础设施

针对现有设施进行数字化改造和升级，能够有效提升设施的使用服务寿命。例如，可以利用现有的通信网络、数据中心等基础设施，进行优化和升级，从而减少新的投入成本。

1. 升级和改造现有设施

对现有的基础设施进行升级和改造,使其满足工业元宇宙发展的需求。例如,可以升级网络设施、数据处理设施等,提高其性能和稳定性。

2. 利用现有的通信网络

现有的通信网络已经覆盖了广泛的地区和用户,可以将其作为工业元宇宙基础设施的一部分,从而降低数字化基础设施的建设成本。

3. 利用现有的数据中心

现有的数据中心具有丰富的资源和服务,可以将其作为工业元宇宙基础设施的一部分,从而降低数字化基础设施的建设成本。

4. 整合现有资源

将现有资源进行整合,形成共享的、高效的基础设施。例如,可以将多个企业的计算资源进行整合,形成共享的计算基础设施。

5. 利用开源软件

开源软件可以降低数字化基础设施的建设成本。通过利用现有的开源软件,可以避免购买高昂的商业软件授权费用。

(四) 政策支持

政府可以通过给予税收优惠、资金支持等政策措施,鼓励企业和机构投资工业元宇宙的数字化基础设施建设。通过政策支持,可以降低建设成本,推动工业元宇宙的发展。

1. 给予资金支持

政府定向资金支持,帮助企业承担部分数字化基础设施的建设成本。例如,可以提供贷款、贷款担保、直接补贴等资金支持措施,鼓励企业和机构投资工业元宇宙的数字化基础设施建设。

2. 税收优惠政策

政府有计划地给予税收优惠政策,降低企业负担,企业能够有更多的建设资金用于基础建设例如,可以减免数字化基础设施建设和运营的税费,或者提供税收返还等优惠政策。

3. 建立联合基金

政府可以联合企业、高校和研究机构等建立联合基金,共同投资工业元宇宙

的数字化基础设施建设。通过联合基金，可以集中资金资源，降低数字化基础设施的建设成本。

4. 优化审批流程

政府可以优化审批流程，简化数字化基础设施建设和运营的审批手续，提高审批效率。通过优化审批流程，可以降低数字化基础设施的建设成本，推动工业元宇宙的发展。

5. 加强宣传和推广

政府可以通过加强宣传和推广来提高企业和公众对工业元宇宙数字化基础设施的认识和重视程度。通过宣传和推广，可以促进更多的企业和机构投资工业元宇宙的数字化基础设施建设，扩大应用规模。

（五）合作创新

通过企业、高校和研究机构的合作创新，共同研发和应用工业元宇宙的关键技术，降低研发成本。同时也可以通过合作创新，共享技术和资源，提高数字化基础设施的利用效率。

1. 建立合作创新平台

企业和机构可以共同建立合作创新平台，集中优势资源和技术力量，进行数字化基础设施的研发和应用。

2. 联合研发平台

企业和机构可以联合进行数字化基础设施的研发和应用，共同攻克技术难题，提高研发效率。通过联合研发，可以共享研发成本和技术成果，降低数字化基础设施的建设成本。

3. 共享技术成果

合作创新过程中，各个参与方可以共享技术成果和知识产权。通过共享技术成果，可以避免重复研发和资源浪费，降低数字化基础设施的建设成本。

4. 优化供应链管理

合作创新过程中，可以优化供应链管理，提高供应链的效率和稳定性。完善的供应链管理，是数字化基础建设过程中重要的一环。

三、创建工业元宇宙运行机制

（一）创建健康持续的工业元宇宙运行机制

1. 构建标准体系

工业元宇宙设计的技术和标准众多，需要建立一套完善的标准体系，包括交换标准、安全标准、应用接口标准等，以规范工业元宇宙的发展和保障各方的利益。同时要注重标准的更新和维护，以适应工业元宇宙的持续发展。

2. 加强基础设施建设

工业元宇宙需要强大的基础设施支持，包括高性能计算资源、物联网设备、传感器等。需要加强基础设施建设，提高数据处理和分析能力，以满足对海量数据的处理和分析需求。同时要注重基础设施的优化和升级，以适应工业元宇宙的不断发展。

3. 注重数据安全和隐私保护

工业元宇宙涉及大量数据和隐私信息，需要建立完善的数据安全和隐私保护机制，保障数据的安全性和可靠性。同时要建立健全的数据治理体系，明确数据的合规使用和安全保护。

4. 推进应用创新

工业元宇宙需要不断推进应用创新，结合工业领域的实际需求，开发出更具针对性的应用场景和解决方案。鼓励企业和开发者进行技术创新和模式创新，推动工业元宇宙在工业领域的广泛应用。同时要注重应用的优化和升级，以满足工业领域的不断变化的需求。

5. 加强人才培养

工业元宇宙的发展需要具备丰富的人才储备。需要加强人才培养，建立完善的人才培养体系，培养一批具备技术实力和实践经验的专业人才，以满足工业元宇宙在研发、应用和维护等方面的需求。同时要注重人才的引进和交流，吸引更多的人才加入到工业元宇宙的发展中来。

6. 搭建开源开放平台

搭建开源开放平台可以集聚各类创新资源，推动工业元宇宙的持续发展。可以通过搭建开源社区、提供开源框架等方式，鼓励企业和开发者积极参与，共同推动工业元宇宙的创新和发展。同时要注重平台的维护和升级，以满足工业元宇宙的不断发展的需求。

7. 建立创新载体

建立创新载体可以鼓励企业进行技术创新和模式创新，推动工业元宇宙的持续发展。可以建立孵化器、加速器等创新载体，提供良好的创新环境和资源支持，促进工业元宇宙的创新和发展。同时要注重载体的开放和共享，吸引更多的企业和开发者加入到创新中来。

8. 实现全面互联和信息共享

在工业元宇宙中，需要实现不同系统、不同设备之间的全面互联和信息共享。可以通过各种连接方式和协议，实现互通互联和信息共享提高生产效率。同时要建立健全的信息安全体系保障信息的隐私和安全。

9. 持续优化和完善运行机制

随着工业元宇宙的发展和应用深化，需要不断优化和完善运行机制，包括对现有机制的评估和改进引入新的技术和方法等以确保工业元宇宙能够持续健康地发展，同时要关注工业元宇宙与社会环境等方面的关系实现可持续发展。

10. 加强网络综合治理

工业元宇宙的健康发展需要加强网络综合治理。这包括打击网络犯罪、防止网络攻击、保护知识产权等方面的工作。通过加强网络综合治理，可以建立一个安全、稳定、健康的网络环境，为工业元宇宙的发展提供保障。

(二) 工业元宇宙运行机制中数据安全与隐私保护

健康持续的工业元宇宙运行机制需要确保数据安全和隐私保护，需要建立机制确保数据安全和保护隐私。

1. 建立严格的数据安全政策和标准

工业元宇宙平台应该制定和实施严格的数据安全政策和标准，包括数据加密、访问控制、安全审计等，以确保数据的机密性、完整性和可用性。

2. 保障用户数据自主控制权

工业元宇宙平台应该提供用户对自身数据的自主控制权，包括数据的访问、使用和共享等。用户应该有权了解自身数据的用途和范围，并能够自主决定是否同意数据的使用。

3. 采用分布式技术体系

工业元宇宙平台可以采用分布式技术体系，如区块链、隐私计算、分布式身份等，以实现数据的安全可信存储和流通。这些技术可以提供可追溯、不可篡改

的数据链，保障数据的真实性和完整性。

4. 加强数据治理和监督

工业元宇宙平台应该建立完善的数据治理和监管机制，包括数据的收集、存储、处理、传输和销毁等环节。平台应该明确数据的所有权和使用权，并保障用户对自身数据的知情权和同意权。

5. 建立应急响应计划

工业元宇宙平台应该建立完善的应急响应计划，以应对可能出现的突发事件，如数据泄露、系统故障等。应急响应计划应该包括预警机制、应对措施和恢复计划等，以确保事件的及时发现和处理。

6. 培训和提升意识

工业元宇宙平台应该对相关人员进行培训和意识提升，以增强员工对数据安全的重视程度，提高他们的数据安全意识 and 技能水平。

7. 合作与第三方审计

工业元宇宙平台可以与第三方审计机构合作，以提供独立的评估和建议，帮助发现并改进潜在的安全风险和问题。审计机构可以对应对措施进行监督和指导，以确保数据安全和隐私保护的有效性。

8. 不断完善和更新数据安全和隐私保护方面的政策、法律法规

随着工业元宇宙的发展和深化应用，数据安全和隐私保护的挑战也会不断变化，因此，工业元宇宙平台应该不断更新和完善相关技术、政策和措施，以适应不断变化的环境和需求。

四、培养工业元宇宙创新人才

工业元宇宙已经成为了一个重要的研究领域。工业元宇宙，是指通过数字化、网络化和智能化手段，实现物理世界与虚拟世界的深度融合，从而形成一个全新的产业形态。在这个元宇宙中，人才的角色显得尤为重要。他们不仅需要具备深厚的专业知识，还需要有创新思维和跨学科的能力，以应对不断变化的工业环境。

工业元宇宙的发展也带来了一系列的挑战，尤其是对人才的需求。这些挑战包括技术挑战、人才培养过程的挑战等。为了应对这些挑战，我们需要探讨如何培养创新型的工业元宇宙人才。

（一）工业元宇宙产业发展对人才需求和挑战

工业元宇宙是一个新兴产业，目前市场上具备相应技能和经验的人才相对较少。同时，由于工业元宇宙的技术更新迅速，对于新进入该领域的人才要求也较高，导致人才短缺问题较为突出。

1. 工业元宇宙产业发展对人才的需求

(1) 技术人才需求

工业元宇宙是一个技术密集型产业，需要各种技术人才来支撑其发展。包括区块链技术、3D建模和渲染、交互设计、人工智能、物联网等技术人才。这些技术人才需要具备深入的专业知识和实践经验，能够独立或团队合作解决复杂的技术问题。

(2) 创新人才需求

工业元宇宙是一个不断创新和探索的产业，需要具备创新思维和创新能力强的人才。这些人才能够根据市场需求和技术趋势，提出新的创意和解决方案，推动工业元宇宙的创新发展。

(3) 跨界人才需求

工业元宇宙涉及到多个领域的知识和技术，需要具备跨界能力的人才。这些人才能够跨越不同领域，整合各种资源，解决复杂的问题，推动工业元宇宙的跨领域合作。

(4) 人才素质要求高

高素质的人才，囊括技术、创新、跨界融合等方方面面的能力。这些人才需要不断学习和更新自己的知识，以适应工业元宇宙的快速发展。

2. 应对工业元宇宙创新人才不足的具体措施

(1) 加强人才培养和引进

通过加强教育和培训，培养更多的工业元宇宙技术人才和创新人才。同时，积极引进具备丰富经验和技能的人才，提高整个行业的素质和水平。

(2) 推动跨界合作

通过跨界合作，整合不同领域的人才和资源，共同推动工业元宇宙的发展。同时，鼓励人才在不同领域之间流动和合作，提高跨界能力和综合素质。

(3) 加强实践经验积累

通过实践经验积累，提高人才的实践能力和解决问题的能力。鼓励企业提供

实习和实践机会，让人才在实践中学习和成长。

(4) 建立人才库和交流平台

通过建立人才库和交流平台，促进人才之间的交流和合作，提高整个行业的素质和水平。同时，通过人才库和交流平台，可以更好地发现和挖掘具备潜力的创新人才。

工业元宇宙产业发展需要大量高素质信息化人才培养，企业及相关机构需要加强人才培养和引进、推动跨界合作、加强实践经验积累、建立人才库和交流平台等措施，以应对人才需求的挑战。

(二) 如何培养创新型工业元宇宙人才

工业元宇宙的发展过程中，人才的培养愈加重要。随着技术的不断更新迭代，对于掌握元宇宙技术的专业人才的需求越来越大。因此，高等教育和职业教育肩负着培养具备先进技术人才的重大责任。如何培养学生的实践能力，尤其是以元宇宙技术创新人才培养为基础，以及如何通过“岗课赛证”四个维度来促进人才培养，都是应对工业元宇宙创新型人才培养的重要课题。

1. 高校高等教育阶段是培养创新型人才的基础阶段

高校高等教育阶段是培养工业元宇宙创新型人才的基础阶段。通过开设相关课程、强化实践教学、鼓励科研创新、加强师资队伍建设、建立校企合作机制以及推广创新教育理念等措施，可以提高学生的创新能力和实践能力，为工业元宇宙的发展提供强有力的人才支持。

(1) 开设工业元宇宙相关课程

高校可以开设与工业元宇宙相关的课程，如虚拟现实技术、增强现实技术、人工智能等。这些课程可以帮助学生了解工业元宇宙的基本概念、技术原理和应用场景，为培养创新型人才打下基础。

(2) 强化工业元宇宙实践教学

高校应该注重实践教学，通过实验、课程设计、实习等方式，让学生有机会亲身实践和体验工业元宇宙的开发和应用。

(3) 鼓励科研创新

高校可以鼓励学生参与科研项目，尤其是与工业元宇宙相关的项目。通过科研创新，学生可以深入了解工业元宇宙的技术原理和应用前景，提高其科研能力

和创新能力。

(4) 加强师资队伍建设

鼓励高校加强师资队伍建设，引进具备丰富经验和技能的教师，提高教学质量和水平。同时，可以组织教师参加学术会议、研讨会等活动，提高教师的学术水平和教学能力。

(5) 建立校企合作机制

高校可以与企业建立校企合作机制，共同培养工业元宇宙创新型人才。通过校企合作，学生可以接触到实际项目和案例，了解市场需求和商业运作模式，提高其就业竞争力和创新能力。

(6) 推广创新教育理念

高校应该推广创新教育理念，注重培养学生的创新思维和创新能力。可以通过开设创新课程、组织创新活动、鼓励学生参加竞赛等方式，提高学生的创新能力和实践能力。

2. 职业教育是培养创新型人才的重要环节

职业教育在培养工业元宇宙人才中扮演着重要的角色。在这个阶段，可以通过“岗课赛证”四个维度来促进人才培养，以更好地满足工业元宇宙领域的需求。

(1) 岗

“岗”是指岗位，需要根据工业元宇宙的岗位需求，设定相应的教育和培训目标。具体来说，需要了解工业元宇宙领域中不同岗位的职责和要求，然后针对这些岗位的需求，制定相应的教育和培训计划。例如，针对虚拟现实工程师这一岗位，可以制定以虚拟现实技术为核心的课程体系，以帮助学生掌握虚拟现实技术的理论和应用。

(2) 课

“课”是指课程，需要开设与岗位需求相匹配的课程，以确保学生能够学到真正需要的知识和技能。在职业教育阶段，应该注重课程的实用性和针对性，以便学生能够将所学知识应用到实际工作中。例如，可以开设虚拟现实技术、游戏开发、计算机图形学等相关课程，以帮助学生掌握工业元宇宙领域所需的核心技能。

(3) 赛

“赛”是指比赛，可以通过组织相关的比赛，激发学生的学习兴趣，同时也能够让他们在比赛中提高自己的技能。比赛可以促使学生将所学知识应用于实际问题解决中，从而更好地掌握知识和技能。例如，可以组织虚拟现实技术比赛、游戏开发比赛等，以激励学生发挥自己的才能和创新精神。

(4) 证

“证”是指证书，可以通过发放证书，来确认学生的学习成果，同时也能够激励他们更加努力地学习。证书是一种认可和肯定，它可以为学生今后的就业和发展提供有力的支持。例如，可以与工业元宇宙领域的相关机构合作，为学生提供相关的认证考试和培训课程，以帮助他们获得相应的证书。

3. “新”教学模式在培养工业元宇宙创新人才发挥关键作用

工业元宇宙是一个充满创新和创意的领域，需要具备想象力、创新思维和创新能力强的人才来推动其发展和应用。这些人才需要具备独特的创新素养和实际操作能力，能够通过创新的方式解决工业元宇宙领域中的问题，并提供创新的解决方案。

(1) OBE (Outcomes-Based Education) 理念为基础

OBE 教育理念强调在教学过程中，以学生为中心，以成果为导向，注重学生的个性发展和实践能力的培养。

确定预期成果：要明确课程体系的预期成果，即学生通过学习应该具备的知识、技能和素质。这些预期成果应该与工业元宇宙领域的发展趋势和行业岗位需求相匹配。

构建能力素养模型：根据预期成果，构建能力素养模型，包括专业知识、技能水平、工作经验以及个人素质等多个方面。这个模型应该以行业岗位能力要求为基础，同时考虑学生的个性发展和个人成长需求。

设计课程体系：根据能力素养模型，设计课程体系，包括课程模块、实践环节和评估标准等。课程体系的设计应该注重学生的主体地位和个性发展，同时强调实践性和应用性。

制定教学策略：根据课程体系，制定相应的教学策略，包括教学方法、教学资源、教师团队等。教学策略应该注重学生的主动学习和合作学习，鼓励学生进行探究性学习和创新实践。

实施教学评价：在教学过程中，实施教学评价，及时了解学生的学习情况、反馈和问题，并根据评价结果调整教学策略和课程体系。评价应该以成果为导向，注重学生的实际操作能力和解决问题的能力。

持续改进：根据教学评价结果和行业动态，持续改进课程体系和教学策略，确保其始终与行业岗位要求相匹配，并能够适应学生个性发展和个人成长的需求。

(2) PBL 项目式教学创新模型

PBL (Project-Based Learning) 项目式教学强调以学生为中心，在真实情境中引入真实的、具有挑战性的问题开展围绕项目的探究活动，帮助学生在理论和实践层面达成共识，让教学从重理论轻实践、重学轻用实现向“在学中做，做中学”学以致用的教学模式转型，见图 89。

同步科学教学流程：PBL 项目式教学具体实施时，老师需要提前根据课程内容进行项目式教学设计，针对学生专业所要达成的能力模型，匹配学科针对的就业岗位，并以工作职责中典型工作任务为导向编排完成，学生将担任主角进行分组积极协作。同时，整个教学过程始终以项目为主线延伸脉络开展讲与练，并把学生的最终学习成果项目交付设为结束节点，在此期间，老师将始终对学生学习进度进行持续性的评估并对最终呈现结果进行综合评价。

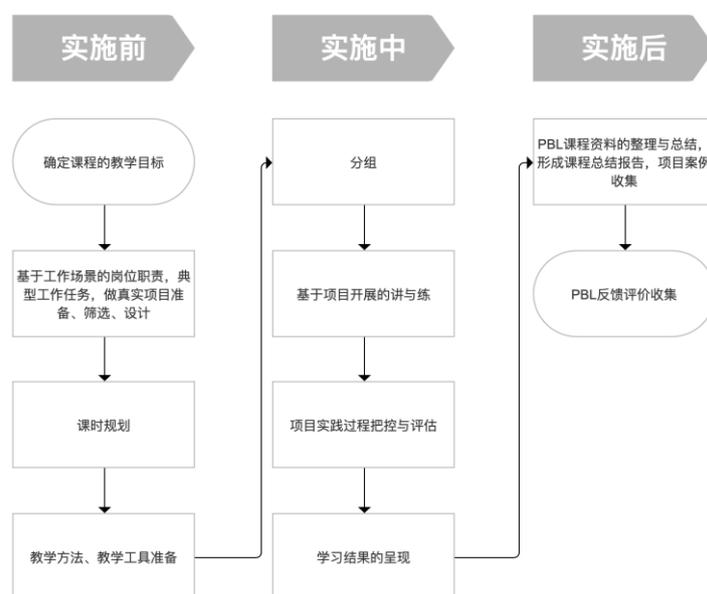


图 89 PBL 教学流程

实际场景课堂设计：PBL 项目式教学紧密围绕真实工作场景，针对学科课程面向的岗位，就典型工作任务做分布式项目收集、筛选与设计，同时，精细化课

时安排，保障具体到课时目标与教学目标的高度一致，并采用定制化教学工具进行项目设计，进一步明晰教学目标与教学环节，提高课堂教学效率，有效确保教学实践的连续性、真实性和价值感，促进 PBL 教学的落地和实施。

由“教”到“练”的重心转变：PBL 教学采用分组方式，通过清晰的角色分工释放学生个性化培养的最大空间，老师的角色也由“讲师”向“教练”转型，以具有挑战性和驱动性的问题引导学生探索，促进学生主动、探究、合作式学习。通过充分发挥学生主体的作用，将课堂教学的核心由“教师中心”变为“学生中心”，让教学实现从以传授知识为重心的“教”到以学生掌握知识、运用知识、提高运用知识解决问题能力为重心的“练”的转变。

“成果”和“复盘”并重：PBL 教学在教学实践中，学生将呈现以项目最终解决方案或产品为形式的学生成果，在知识、技能、协作等方面进行进一步的提炼、反思，不仅有助于检验学生当下学习效果，更对学生概括和理解新知识的应用场景，培养高级思维能力具有重要意义。

（3）三实(APEX)训练方法

三实(APEX)方法，即实例分析(Analyze the real case)、实境训练(Practice in real scenario)、实战检验(Evaluate based on industry standard)，是产学融合实践能力提升的训练方法，见图 90。



图 90 三实(APEX)训练方法

实例分析：学生利用大量真实案例的数据进行模拟复盘，真正掌握所学知识点，理解使用场景，锻炼发现和解决实际问题的能力，提高理解和判断能力，达到学以致用目的。

实境训练：老师带领学生一起完成大量真实项目，实施基于 PB 的以学生为中心的教学模式，激发学生思考与创新。开放项目强调如何将所学知识点通过打散

组合应用于解决实际问题。

实战检验：学生通过真实案例的学习，在具备一定专业能力的基础上，以小组的形式完成综合项目实战，最终进行答辩，老师贴合产业的实际需求定制项目标准及答辩规则，整个项目全程由学生独立思考、自主完成。这一过程中，小组成员分工不同，需完成各自任务，最后进行内容整合，组长的协调组织能力得到极大锻炼、学生幻灯片制作能力和表达演讲能力得到极大提升。

APEX 方法强调学习即体验 (Learning-as-a-experience)，注重学习过程中学习者体会和经验获得、身体感觉和心灵悟得；不仅关注学到知识，更关注知识转化为能力。

通过三实(APEX)训练方法达到四纵贯通，即产业技术和资源条线贯通、线上和线下学习条线贯通、教学与练习贯通和产业需求与反馈条线贯通。

三实(APEX)训练法在专业领域引入行业头部和创新企业，贡献数据、案例和师资导师等资源，通过平台型教育企业的教学设计转化成学校实施的实践训练，包括课程体系和教学实践方式方法，达到了资源与优势互补。

(4) 3A 教学模式

3A 教学模式，即交替渐进 (Alternate progress)，主动刻意 (Active dedicated) 和阶段成就认可 (phased Achievement)，见图 91。

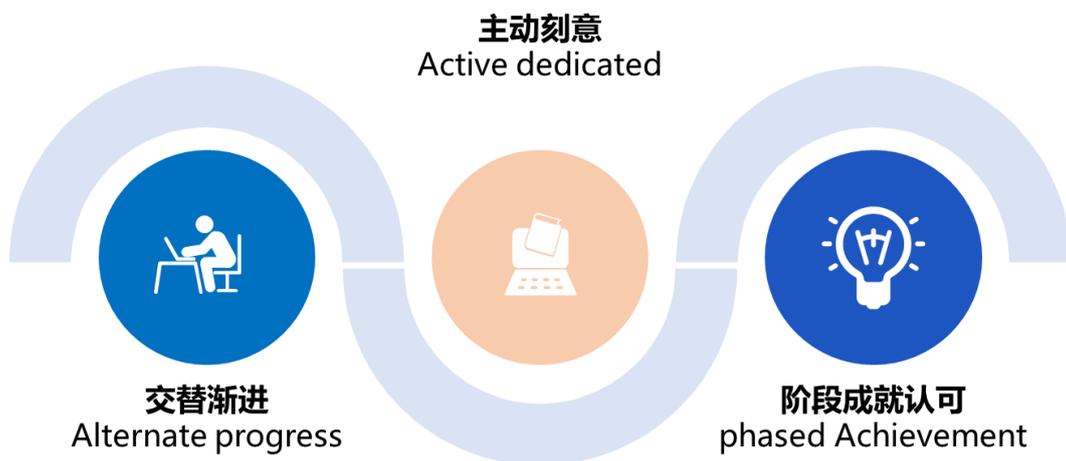


图 91 3A 教学模式

交替渐进方法：按照学习认知规律并结合项目知识点、理论知识讲授与动手实践交替螺旋上升式推进，步步为营，真正做到理论与实践融合。根据 Bloom 认知层次分类，认知学习从低到高分成六个层次：记忆、理解、应用、分析、评价

与创造，交替渐进的意图就是通过项目阶段内的讲授环节强化记忆与理解，通过动手实践提高应用与分析能力，通过项目质量管理加强评价能力，这种学中做、做中学模式通过知识内化与技能提升不断螺旋上升迭代，让学生的知识学习有场景支持而不再枯燥，让实践项目是有理论支撑的手脑并用而不再是简单“动手”。

主动刻意方法：根据职教学生特点和技能要求，利用刻意练习原理，通过有效的针对性地设计项目任务，让学生在难度梯度不断提升的过程中重复训练，达到技能提升和目标。刻意练习主张在“恰好”可获得新技能的“学习区”内有目的练习，而不是在已经掌握的熟练技能的“舒适区”盲目练习。因此在项目中，完成项目交货并不是唯一目标，更重要的是在过程中运用正确的方法保证学习效果，避免在舒适区内的无效重复，任务的模块和阶段划分既要保证技能练习的专注性和可重复性，又要保证阶段间的提升性，激发学生主动性，达到技能精熟。

阶段成就认可方法：根据项目实践进展，阶段性对学生成果予以反馈和认可，激发学生成就感，提高信心和减少焦虑感，从而提升学习效果。在上述主动刻意练习过程中也强调反馈，但是更多的是在项目过程中的及时有效反馈，是保证学生有效完成项目实践的重要手段，而阶段性成就认可更多地强调学习即体验(LaaE, Learning-as-an-Experience)，为学生营造一种积极的情感体验，注重实践过程中学生的体会和经验的获得。众多的教育理论和实践研究表明，正向反馈和成就认可很大程度正向反馈学习者的情感，包括动机、兴趣、自信、态度等，从而提升了学习效率和效果。例如教育心理学之父美国心理学家桑代克(Edward Lee Thorndike)的三大学习定律中的效果率(Law of Effect)强调了学习者的感受如何决定学习的效果，发现如果个体由于动作跟随着情境中一个满意的变化，效果就会更好。

3A 模式之间并不是孤立的，而是相辅相成，交替渐进的项目设置保证理论实践融合、合理有效的“成就认可点”嵌入，其过程实现采用主动刻意方法，通过合适的“学习区”设置助力技能精进，阶段性成就认可不断给学生注入信心，进入下一阶段学习，进入良性螺旋式上升过程。在整个过程中，交替渐进方法形成了项目框架，主动刻意学习塑造了过程实体，而阶段成就认可帮助形成闭环。

(三) 工业元宇宙创新人才培养案例

高校与企业紧密合作，抓住了元宇宙这个充满无限可能的行业发展方向。为

了推动元宇宙产业的发展，双方结合各自的资源和优势，建立了项目资源库。在项目资源库的建设过程中，高校和企业双方发挥各自的优势，进行了深入的合作。高校拥有丰富的教学资源和科研实力，而企业则具有丰富的市场经验和产业资源。双方通过相互配合，共同调研和研讨，将这些项目资源转化为适合教学的项目。

案例：AI+智能岛上海科技大学 3D 模型商业项目（以下简称智能岛项目）

智能岛项目是张江人工智能岛平台的元宇宙展示项目，作为国内首个“5G+AI”全场景商用示范园区，张江人工智能岛率先应用全国最具代表性的人工智能企业核心技术和产品，并以整个园区为载体，为技术与技术、产品与产品间的交流提供平台。此项目实战充分发挥校企双方各自资源优势，企业派出有行业实战经验和项目管理能力的企业师资，采用多种教学模式结合，全面提升学生元宇宙虚拟现实技术能力和职业素养等综合能力，帮助学生建立对元宇宙、虚拟现实技术等行业认知，见表 2。

项目旨在提升学生以下方面的能力：建立学科认知、项目管理能力、实操能力、职业素养提升，提升客户沟通、时间管理和团队合作等职业素养。

表 2 智能岛项目交替渐进式阶段划分

阶段	课程安排	学时
第一阶段	VR 行业认知和全景数字校园项目实战	40
第二阶段	VR+建筑类课程	160
	VR+数字校园项目实战	96
第三阶段	AI+智能岛上海科技大学 3D 模型商业项目 实战	120

五、推进完善元宇宙法律法规

（一）推动元宇宙科技伦理观先行

元宇宙是一个由各种技术构建的虚拟世界，其运行和规则应该受到伦理观念的指导和约束。元宇宙与伦理之间是相互依存、相互促进的。坚持合乎法规的伦理观念，才能保障元宇宙的健康、可持续发展。

2022 年 3 月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于加强科技伦理治理的意见》，指出：科技伦理是开展科学研究、技术开发等科技活动需要遵循的价值理念和行为规范，要进一步完善科技伦理体系，提升科技伦理治理能力，

有效防控科技伦理风险，不断推动科技向善、造福人类。

元宇宙伦理管理主要包括数据伦理和人工智能伦理。合理合规的伦理观念才能够切实做到保障用户的利益和安全、促进公平、公正、包容的发展，推动社会治理和法律法规的完善。

1. 数据伦理

在元宇宙中，数据是重要的资源，因此数据伦理是元宇宙伦理观的重要组成部分。数据伦理关注数据的收集、处理、利用和共享等方面，确保数据的合法性和公正性，以保护用户的权益和隐私。

(1) 数据收集的合法性和公正性

数据伦理要求在元宇宙中收集数据时，必须遵循合法、公正、透明原则，确保用户对数据的知情权和同意权。同时，应尊重用户的隐私权，避免过度收集和滥用用户数据。

(2) 数据处理的准确性和安全性

数据伦理要求在处理数据时，必须遵循个人隐私、安全的原则，确保数据的准确性和完整性。同时，应遵守相关法律法规和伦理规范，防止数据泄露和滥用。

(3) 数据利用的公正性和公平性

数据伦理要求在利用数据时，必须尊重用户的权益，避免侵犯用户的隐私权和知识产权。同时，应遵守相关法律法规和伦理规范，确保数据的合法性和公正性。

(4) 数据共享的公平性和透明度

数据伦理要求在共享数据时，必须遵循公平、公正、透明原则，确保数据的合法性和公正性。

2. 人工智能伦理

人工智能在元宇宙中发挥着重要作用，因此人工智能伦理也是元宇宙伦理观的重要内容。人工智能伦理关注人工智能的研发、应用和使用等方面，确保人工智能的合法性和公正性，以避免技术滥用和侵犯他人权益。

(1) 尊重人类尊严和权利

人工智能伦理要求在元宇宙中尊重人类的尊严和权利，避免对人类造成伤害或侵犯。人工智能系统应该遵循道德和伦理原则，尊重人类的意愿和隐私，确保

人类的权益得到保护。

(2) 公正和公平

人工智能伦理要求在元宇宙中实现公正和公平。这意味着人工智能系统的决策应该基于公正、透明和可解释的算法和规则，避免歧视和不公平现象。同时，人工智能系统应该为所有人提供平等的机会和资源，确保每个人都能受益于人工智能技术的发展。

(3) 可解释性和透明度

人工智能伦理要求提高人工智能的可解释性和透明度。这意味着用户应该能够理解人工智能系统的决策过程和结果，以便更好地信任和使用人工智能技术。同时，人工智能系统的设计和开发过程也应该公开透明，以使用户和监管机构能够监督和控制人工智能技术的发展。

(4) 责任和可追溯

人工智能伦理要求在元宇宙中实现责任和可追溯。这意味着人工智能系统的决策和行为应该受到监管机构的监督和管理，确保人工智能技术的使用符合法律法规和伦理规范。同时，人工智能系统的设计者和开发者也应该对人工智能系统的决策和行为负责，确保人工智能技术的使用符合社会公正和人类福祉。

(二) 加强元宇宙平台数据治理办法

元宇宙是一个由各种技术逐步共同建设而成的生态系统，其中涉及到大量的数据产生、存储、传输和使用。这些数据不仅包括用户的个人信息、交易数据等敏感数据，还涉及到元宇宙的运行和管理数据。

2021年实施的《数据安全法》中数据分类分级保护制度规定根据数据在经济社会发展中的重要程度，以及一旦遭到篡改、破坏、泄露或者非法获取、非法利用，对国家安全、公共利益或者个人、组织合法权益造成的危害程度，对数据实行分类分级保护。除了分类分级保护制度，《数据安全法》还对数据风险评估预警、数据安全预警处理规定了相应的处理机制。

数据治理是元宇宙平台、企业对于数据使用的一整套管理行为，包括但不限于使用法律法规、管理制度、标准规范、技术工具等一系列手段。完善的数据治理，应当遵循全覆盖原则、匹配性原则、持续性原则和有效性原则，才能确保元宇宙中的数据安全和合规使用，推动元宇宙的健康发展。

1. 构建数据分级分类制度

元宇宙中，数据量庞大且种类繁多。为了有效地管理和利用这些数据，首先需要对数据进行分级分类。根据数据的性质、重要性、敏感度等因素，可以将数据分为不同的级别，如公开、受限、机密等，或者按照数据所属行业领域进行分级管理，依照多种视角和维度，依据科学、点面结合等原则分级分类，并针对不同级别的数据采取不同的管理和保护措施。

2. 重要数据识别机制

在元宇宙中，一些数据可能具有特殊的重要性，如用户身份信息、交易数据等。对这些数据进行特殊保护和管理，是确保元宇宙安全和稳定运行的关键。因此，需要对这些重要数据进行识别，并采取额外的保护措施。

3. 角色权限及访问控制

在元宇宙中，不同用户和实体可能具有不同的角色和权限。为了确保数据的正确使用和防止不当操作，需要建立角色权限及访问控制机制。根据用户的角色和权限，确定其对数据的访问和使用权限，确保数据的正确使用和保护。

4. 敏感数据分级管控

在元宇宙中，一些数据可能具有高度的敏感性和隐私性，如用户的个人信息、交易数据等。对于这些敏感数据，需要进行特殊的管控和保护。根据数据的敏感程度，可以将其分为不同的级别，并采取相应的管控措施，如加密、脱敏、访问控制等。

5. 场景化数据安全

在元宇宙中，不同的应用场景可能对数据的安全要求不同。例如，在游戏场景中，可能需要对游戏数据进行保护；在交易场景中，可能需要保护交易数据的安全。因此，需要根据不同的应用场景，采取相应的数据安全措施，确保元宇宙中的数据的安全。

（三）虚实融合应用的“技术中立”本质回归

元宇宙领域中，虚拟的元宇宙应用场景，涉及多种技术的共同参与而开展相应的社会和经济活动，同时也会收集用户的个人数据以及后续数据的传输、使用和共享等。

《个人信息保护法》规定，个人基因、指纹、声纹、掌纹、耳郭、虹膜、面

部识别特征等生物识别信息属于敏感个人信息，处理敏感个人信息应当取得个人的单独同意，还应当向个人告知处理敏感个人信息的必要性以及对个人权益的影响；只有在具有特定的目的和充分的必要性，并采取严格保护措施的情形下，个人信息处理者方可处理敏感个人信息；个人信息处理者处理敏感个人信息应当事前进行个人信息保护影响评估，个人信息保护影响评估包括个人信息的处理目的、处理方式等是否合法、正当、必要，对个人权益的影响及安全风险，所采取的保护措施是否合法、有效并与风险程度相适应。

元宇宙法律法规中，应该严格要求，在各类技术的使用上，应当回归“技术中立”的本质属性，技术知识一种工具和手段，各种技术和工具的应用必须遵循技术中立的原则，不偏袒任何一方，不涉及任何价值判断。

1. 明确并制定技术标准和规范

政府和监管机构需要制定相关技术标准和规范，明确元宇宙中各种技术手段和工具的应用范围、使用方式、安全保障等方面的要求。这些标准和规范应该确保技术的中立性和公平性，避免技术被滥用或误用。

2. 加强元宇宙各类技术研发和应用

政府和企业需要加强技术研发和应用，提高元宇宙中的技术水平和应用能力。同时，也需要加强对技术的监管和评估，确保技术的安全性和可靠性。

3. 建立技术监管和合规管理机制

政府和监管机构需要建立有效的技术监管机制，加强对元宇宙中各种技术手段和工具的监管力度，确保技术的合规使用和公平交易。

(1) 人工智能技术合规

2023年8月15日起正式施行的《生成式人工智能服务管理暂行办法》，是全球首个生成式人工智能立法。该办法要求提供和使用生成式人工智能服务，不得形成算法权力，不得侵害他人人格权和个人信息权益，要提高生成式人工智能服务的透明度，提高生成内容的准确性和可靠性。AIGC（人工智能创作内容）创作的内容要严格按照《管理暂行办法》中的要求规范执行。

(2) 算法技术合规

《互联网信息服务算法推荐管理规定》在总则篇第一条规定：为了规范互联网信息服务算法推荐活动，弘扬社会主义核心价值观；在信息服务规范篇第十一

条又规定：算法推荐服务提供者在首页首屏、热搜、精选、榜单类、弹窗等重点环节积极呈现符合主流价值导向的信息。

《互联网信息服务算法推荐管理规定》第十五条规定，算法推荐服务提供者不得利用算法对其他互联网信息服务提供者进行不合理限制，或者妨碍、破坏其合法提供的互联网信息服务正常运行，实施垄断和不正当竞争行为。

《禁止网络不正当竞争行为规定（公开征求意见稿）》第十三条规定：经营者不得利用数据、算法等技术手段，通过影响用户选择或者其他方式，实施流量劫持、干扰、恶意不兼容等行为，妨碍、破坏其他经营者合法提供的网络产品或者服务正常运行。第二十一条规定：经营者不得利用数据、算法等技术手段，通过收集、分析交易相对方的交易信息、浏览内容及次数、交易时使用的终端设备的品牌及价值等方式，对交易条件相同的交易相对方不合理地提供不同的交易信息，侵害交易相对方的知情权、选择权、公平交易权等，扰乱市场公平交易秩序。

（3）数字身份合规

区块链分布式存储、不可篡改、匿名等特性很好的契合了元宇宙中人们“去中心化”的需求，区块链技术、非对称加密再加上自动执行的智能合约就很好的构建了去中心化非对称方式的分布式数字身份，它用分布式基础设施改变应用厂商控制数字身份的模式，让用户控制和管理数字身份，通过将数据所有权归还用户从根本上解决隐私问题，分布式数字身份便于将数字资产所有权与数字身份进行绑定，实现虚拟世界中数字资产所有权的安全和跨链有效流转。

（四）数字人合规化管理和伦理规范

1. 平台合规和服务商合规

平台合规是指数字人平台在运营过程中需要遵守的法律法规和行业规范。这包括但不限于数据安全、个人信息保护、网络安全等方面的规定。平台需要确保用户数据的安全，防止数据泄露和滥用，同时也需要遵守相关的广告法规，确保广告内容的合规性。

服务商合规是指为数字人提供技术、内容等服务的服务商需要遵守的法律法规和行业规范。服务商需要确保其提供的技术和服务符合相关的法律法规和行业标准，同时也要遵守商业道德，不得进行不正当竞争或侵犯他人权益。

数字人合规中要重视侵权和诈骗行为，《民法典》第一千一百九十七条规定

了网络服务提供者的连带责任，在平台从打赏中拿走部分收益时，就很有可能构成“网络服务提供者知道或者应当知道网络用户利用其网络服务侵害他人民事权益”，在未采取必要措施的情况下与商家承担连带责任。

2. 数字人合规化管理

数字人合规化管理需要遵守相关的法律法规和行业标准，确保数字人的制作、使用、传播等全过程的合规性。同时，监管部门也需要加强对平台的监管，确保其运营的合规性。

(1) 运营合规

平台需要遵守相关的法律法规和行业标准，确保数字人的制作、使用、传播等全过程符合法律和道德规范。平台不得制作、传播不良信息或进行恶意攻击等行为，需要保护用户数据的安全，防止数据泄露和滥用。

(2) 内容合规

平台需要确保数字人的内容符合法律法规和行业标准，不得含有违法、不良、误导等内容。平台需要对数字人的内容进行审核和管理，确保其内容的合规性。

(3) 知识产权合规

平台需要尊重他人的知识产权，不得侵犯他人的著作权、专利权等。对于数字人的制作和使用，需要遵守相关的知识产权法律法规，确保其合法性和合规性。

(4) 隐私保护合规

平台需要遵守相关的隐私保护法律法规，保护用户的个人信息和隐私。对于数字人的制作和使用，需要获取用户的同意和授权，不得非法收集、使用或泄露用户的个人信息。

(5) 反垄断合规

平台需要遵守相关的反垄断法律法规，不得进行不正当竞争或垄断行为。对于数字人的制作和使用，需要遵守公平竞争的原则，不得利用平台优势进行不正当竞争。

参考资料

- 【1】沈冬梅. 射频识别技术研究与应用案例探析. [J] 数码世界, 2017. 12
- 【2】刘陈, 景兴红, 董钢. 浅谈物联网的技术特点及其广泛应用. [J] 科学咨询, 2011(9):86-86
- 【3】张金钟, 阿炜, 许亚萍, 张超. 元宇宙物联网技术探秘. [J] 中国安防, 2022(11)
- 【4】GSMA. 《The mobile economy 2020 (2020 年移动经济)》
- 【5】工业和信息化部电信研究院《物联网白皮书(2011)》
- 【6】中国信息通信研究院《物联网白皮书(2020)》
- 【7】中国信息通信研究院《中国“5G+工业互联网”发展报告》
- 【8】Johannink T, Bahl S, Nair A, Luo JL, Kumar A, Loskyll M, Ojea JA, Solowjow E, Levine S. Residual reinforcement learning for robot control. In: Proc. of the 2019 Int' l Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Montreal: IEEE, 2019. 6023 - 6029. [doi: 10.1109/ICRA.2019. 8794127]
- 【9】Vinyals O, Babuschkin I, Czarnecki WM, et al. Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning. Nature, 2019, 575(7782): 350 - 354. [doi: 10.1038/s41586-019-1724-z]
- 【10】刘潇, 刘书洋, 庄韞恺, 高阳. 强化学习可解释性基础问题探索和方法综述. 软件学报, 2023, 34(5):2300-2316
- 【11】Kassahun Y, Yu BB, Tibebu AT, Stoyanov D, Giannarou S, Metzen JH, Vander Poorten E. Surgical robotics beyond enhanced dexterity instrumentation: A survey of machine learning techniques and their role in intelligent and autonomous surgical actions. Int l Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2016, 11(4): 553 - 568. [doi: 10.1007/s11548-015-1305-z]
- 【12】Kiran BR, Sobh I, Talpaert V, Mannion P, Al Sallab AA, Yogamani S, Pérez P. Deep reinforcement learning for autonomous driving: A survey. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6): 4909 - 4926. [doi: 10.1109/TITS.2021.3054625]
- 【13】Goodfellow IJ, Shlens J, Szegedy C. Explaining and harnessing adversarial examples. In: Proc. of the 3rd Int' l Conf. on Learning

Representations. San Diego, 2015.

【14】Tan, C., Sun, F., Kong, T., Zhang, W., Yang, C., Liu, C. (2018). A Survey on Deep Transfer Learning. In: Kůrková, V., Manolopoulos, Y., Hammer, B., Iliadis, L., Maglogiannis, I. (eds) Artificial Neural Networks and Machine Learning - ICANN 2018. ICANN 2018. Lecture Notes in Computer Science(), vol 11141. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01424-7_27

【15】李伯虎,柴旭东,侯宝存等.云制造系统3.0——一种“智能+”时代的新智能制造系统[J].计算机集成制造系统,2019,25(12):2997-3012.DOI:10.13196/j.cims.2019.12.02.

【16】张维佳.工业元宇宙促进制造业创新变革[N].中国电子报,2023-10-13(004).DOI:10.28065/n.cnki.ncdzb.2023.001305.

附录

元宇宙产业创新发展三年行动计划 (2023—2025年)

元宇宙是数字与物理世界融通作用的沉浸式互联空间，是新一代信息技术集成创新和应用的未来产业，是数字经济与实体经济融合的高级形态，有望通过虚实互促引领下一代互联网发展，加速制造业高端化、智能化、绿色化升级，支撑建设现代化产业体系。当前，全球元宇宙产业加速演进，为抢抓机遇引导元宇宙产业健康安全高质量发展，有力支撑制造强国、网络强国和文化强国建设，制定本行动计划。

一、指导思想

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的二十大精神，完整、准确、全面贯彻新发展理念，加快构建新发展格局，把实施扩大内需战略与供给侧结构性改革有机结合，以构建工业元宇宙、赋能制造业为主要目标，以新一代信息技术融合创新为驱动，以虚实相生的应用需求为牵引，以培育元宇宙新技术、新产品、新模式为抓手，发挥有为政府和有效市场合力，统筹发展和安全，系统性谋划、工程化推进、产业化落地，推动元宇宙产业高质量发展。

二、基本原则

坚持创新驱动。释放元宇宙集成创新动能，带动相关技术跨界融合发展。坚持补短板 and 锻长板并重，加速元宇宙关

键核心技术突破，推动产业加速向高端化迈进。

坚持场景牵引。开拓元宇宙应用场景，以场景建设带动元宇宙技术与产品落地应用，形成需求牵引供给、供给创造需求的高水平发展局面。

坚持融合互促。把握元宇宙虚实融合的特征，构建物理世界的虚拟映射，激发数字技术赋能、叠加、倍增作用，提升数字空间和物理世界生产力。

坚持安全可靠。统筹发展与安全，加强政策引导和标准引领，推动元宇宙治理体系建设。筑牢产业基础，增强产业链供应链韧性，提升安全保障能力。

坚持开放协作。深化国际交流合作，主动参与国际治理，实现互利共赢。加强产学研用协作，有效配置资源，推动创新链产业链资金链人才链深度融合。

三、发展目标

到 2025 年，元宇宙技术、产业、应用、治理等取得突破，成为数字经济重要增长极，产业规模壮大、布局合理、技术体系完善，产业技术基础支撑能力进一步夯实，综合实力达到世界先进水平。培育 3—5 家有全球影响力的生态型企业 and 一批专精特新中小企业，打造 3—5 个产业发展集聚区。工业元宇宙发展初见成效，打造一批典型应用，形成一批标杆产线、工厂、园区。元宇宙典型软硬件产品实现规模应用，在生活消费和公共服务等领域形成一批新业务、新模式、新业态。

长期看，元宇宙关键核心技术实现重大突破，形成全球领先的元宇宙产业生态体系。打造成熟的工业元宇宙，开拓虚实互促的制造业增长新模式。建成泛在、通用、无感的元宇宙空间，推动实现人类生产生活方式的整体跃升。形成安全高效的元宇宙治理体系，营造健康可持续发展的产业发展环境。

四、重点任务

（一）构建先进元宇宙技术和产业体系

1.加强关键技术集成创新。强化人工智能、区块链、云计算、虚拟现实等新一代信息技术在元宇宙中的集成突破，推动智能生成算法、分布式身份认证、数据资产流通等元宇宙关键技术在国家重大科技项目中的布局。发展关键基础软件，开发面向元宇宙的操作系统和中间件，突破建模软件、绘制引擎、物理仿真引擎、沉浸式视音频编解码引擎，构建一站式元宇宙开发平台。突破高端电子元器件，加快图形计算芯片、高端传感器、声学元器件、光学显示器件等基础硬件的研发创新。

专栏 1 提升关键技术

数据流通技术。持续攻关区块链、隐私计算等技术，探索数据资产的价值发现、确权保护、授权流通，推进以区块链为核心的数据治理和数据资产跨平台流通技术体系，实现数据流通到价值流通的转变，构建元宇宙信任基础设施。

内容生产技术。打造适用元宇宙的智能内容生产工具，发展智能采集、智能渲染、智能编码、智能审核、智能驱动、智能生成与智能编辑，提高内容生产效率和质量，实现多人实时协同、端边云一体渲染的内容生产。

数字孪生技术。重点发展实时化仿真、物理精准仿真、云化建模仿真、数据驱动混合建模、群体智能优化仿真等技术，研发模型封装、资产管理壳等模型互操作技术，建立面向特定行业、特定环节的模型库、工艺库等基础知识库。

感知交互技术。突破手势、眼动、头部追踪、动作捕捉等体感交互技术，攻关语音、情感交互技术，前瞻布局新型显示、肌电传感等，实现基于自然交互的人、物、场同步，推动多通道感知交互的融合发展。

网络与计算技术。推动 5G-A/6G、千兆光网/万兆光网、FTTR、高速无线局域网、卫星互联网、云网融合等新型网络技术创新，加快高性能计算、异构计算、智能计算、量子计算、类脑计算等突破，推动云网、算网协同发展。

2.丰富元宇宙产品供给。拓展元宇宙入口，加速 XR 头显、裸眼 3D 等沉浸显示终端的规模化推广，丰富基于手机、计算机、电视机等终端的元宇宙应用，支持脑机接口等前沿产品研发。创新数字人、虚拟空间开发工具组件，推动数字人制作便捷化、精细化、智能化，推广虚拟会议室、展厅、营业厅、社交空间等产品。培育写作、绘画、编曲等智能内容生成产品。发展全息实时通讯、3D 实景地图等超高沉浸感产品。

3.构筑协同发展产业生态。着力培育元宇宙龙头企业和专精特新中小企业，打造产业创新联合体，构建大中小企业融通发展、产业链上下游协同创新的生态体系。鼓励地方结合产业基础，建设一批元宇宙创新应用先导区、科技园区、产业园，构建特色化的元宇宙产业集群。支持建立元宇宙开源社区，鼓励用户积极参与元宇宙技术创新和内容生产，建立健全数字内容流通新机制、新模式、新业态。

专栏 2 培育产业生态

开发元宇宙“名品”。持续完善元宇宙产业图谱，编制元宇宙优秀产品目录，助力企业拓展市场合作渠道。面向细分领域，打造一批标杆产品，征集发布典型应用案例和场景。举办元宇宙专题竞赛、产业峰会，推广优秀技术产品、解决方案。

培育元宇宙“名企”。建立元宇宙企业梯次培育库，培育遴选专精特新“小巨人”、单项冠军和领航企业。发挥元宇宙创新探索方阵、联盟等行业组织作用，探索成立元

宇宙产业生态联合体，打造安全可靠产业生态。

创建元宇宙“名区”。选取产业基础好的地区设立元宇宙创新应用先导区，依托高水平研究机构和企业建设元宇宙科技园区，立足各地特色和产业优势打造特色产业园，引导产业链上下游集聚发展。在元宇宙虚拟时空打造特色功能区，加速现实经济主体和模式在元宇宙空间的重构。

打造元宇宙“名人”。培育一批知名数字人，打造数字人标杆产品和品牌。发掘具有创新精神的元宇宙优秀企业家，培育一批有带动效应的领军技术专家及优秀创作者。成立元宇宙产业百人会，打造元宇宙产业交流平台，汇聚高端智慧推动产业发展。

（二）培育三维交互的工业元宇宙

4.探索推动工业关键流程的元宇宙化改造。建设工业元宇宙基础通用模型数据库，打造高精度、可交互的工业虚拟映射空间。建设工业元宇宙仿真设计与验证平台，布局生产环节应用，提升设计阶段有效性和生产阶段效率。探索基于元宇宙的产线运维、产品检测新模式，强化预测性维护，提高运维检测效率和服务质量。打造基于工业元宇宙的营销平台和虚拟培训系统，提供沉浸式销售和培训环境。

5.加快重点行业工业元宇宙布局。针对家电、汽车、船舶、航空航天、重大技术装备、电子信息制造等离散型制造业，加速实现基于工业元宇宙的跨行业协同。构建重点行业机理模型库，开发面向不同产品的个性化全生命周期管理系统。针对钢铁、纺织、电力等流程型制造业，推动工业元宇宙在物料配方优化、工艺模拟仿真等关键场景中的应用，强化流程排产、物料计算、材料追踪等预测性服务能力。

6.探索工业元宇宙创新应用模式。建设工业元宇宙数字身份管理平台，构建全链路可信识别服务体系。加快推动工

业数据要素资产化，打造工业数据资产服务平台，探索工业数据确权、定价、交易和流通机制。探索供应链金融应用模式，围绕资产设备、订单数据等开展供应链金融服务。打通产业链供应链各环节数据壁垒，打造三维立体、虚实融合的动态监测、预警、运营和决策等应用。创新研究工业元宇宙应用评估方法，建立分级分类的成熟度评价体系。

专栏3 工业元宇宙赋能

工业元宇宙+产线：推动人、机器、数据等关键要素的融合，构建虚实结合的产线数字孪生体。打造工业元宇宙虚拟装配空间，推动零配件辅助装配。丰富非接触式检测手段，利用虚拟仿真设备实现三维自动化、智能化质检。建设工艺仿真模型库，引导规范产线操作，提供专家远程协同指导。

工业元宇宙+工厂：布局建设工厂级元宇宙平台，打造低时延、高保真、智能决策的数字孪生系统。推动多类型工业软件集成，推进物流、资金流和信息流的融合应用。广泛采用沉浸交互设备实现工厂的智能巡检、远程协作等应用，打造生产运行监测系统，实现工厂生产运营各环节信息全面感知和实时反馈。

工业元宇宙+园区：打破传统时空限制，促进虚拟空间集聚，发展虚实结合的新型园区建设模式，提升工业园区产业规划和布局能力。探索工业园区的虚拟运营模式，优化园区空间布局、设施配套、资源调配等协同服务能力。建立基于工业元宇宙的科技创新和招商引资平台，创新园区服务模式。

（三）打造沉浸交互数字生活应用

7.推广沉浸交互的生活消费场景。建设文旅元宇宙，围绕文化场馆、旅游景区和街区、节事活动等应用场景，提供数字藏品、数字人讲解、XR导览等产品和服务。打造数字演艺、“云旅游”等新业态，打造数智文旅沉浸式体验空间。构建商品三维模型、数字人导购、虚拟商场，提升沉浸式购物体验。加快元宇宙在广电视听场景的应用，推动建立元宇宙形态的节目制播体系，建立虚拟制作、虚实融合工具池及

公共服务平台，促进节目生产工具迭代和创新，打造未来电视新模式，提升媒体服务能力，丰富人民精神世界。

8.打造虚实融合的公共服务场景。加快数字人客服、实景导航等在政务服务应用，构建面向公众的一体化元宇宙政务服务体系。推动数字孪生技术在电力行业的应用，构建全域全时数字孪生电网，促进电力企业元宇宙化转型，提升供电服务水平。推进构建虚拟教室、虚拟实验室等教育教学环境，鼓励通过平台共享虚拟仿真实验实训资源，扩大优质教育资源覆盖面。积极稳妥推进数字孪生等技术开展临床研究，支持元宇宙企业与医疗机构加强研发合作。

9.支撑智慧安全的应急保障场景。推动元宇宙与自然灾 害预警预报、高危企业园区监管执法、灾害事故预测推演、应急救援处置等应急管理领域的创新融合，探索建设虚实一体的数字洪区、虚拟危化园区、数字矿山、灾害事故模拟推演等场景应用，为精准监测、智能预警、精细管控、科学救援提供支撑。建设实时监测、沉浸映射的智慧城市，赋能安全防范、管网诊断等重点场景，提升城市治理效能。

（四）构建系统完备产业支撑

10.完善产业标准体系。开展元宇宙标准化路线图研究，建设元宇宙产业标准规范体系，全面梳理元宇宙产业链标准化需求，分级分类推动标准规范制定。围绕基础共性、互联互通、安全可信、隐私保护和行业应用等，组织开展国家标准、行业标准和团体标准制定和预研。鼓励各应用行业推进

细分领域标准制定工作。深入开展标准宣贯推广，促进标准落地实施。推动元宇宙标准化组织建设，鼓励业界积极参与国际标准化工作。

11.提升创新支撑能力。支持建设元宇宙重点实验室、制造业创新中心、内容制作基地等载体，加强基础技术研究，加快共性技术突破。打造元宇宙中试平台，强化新技术产品测试验证能力，加速优秀成果产业化落地。构建元宇宙产品评估评测体系，提升元宇宙产品和服务质量。健全元宇宙知识产权保护体系，提供高质量、专业化知识产权服务。引导金融资本支持元宇宙发展，推动减税降费政策向元宇宙相关产业倾斜，营造健康可持续的产融合作环境。

12.打造一流基础设施。建设5G-A/6G、千兆光网/万兆光网、FTTR、卫星互联网等新型网络，满足元宇宙高速率、低时延、全域立体覆盖的应用需求。建设云边一体、算网一体、智能调度、绿色低碳的新型算力，为元宇宙超高内容拟真度、实时交互自由度提供算力保障。发展元宇宙信任基础设施，试点去中心化场景应用，支撑元宇宙可信存储需求。打造元宇宙基础设施综合管理平台，实现计算、存储和通信能力的分布式协同，提升运营效率与可靠性。

专栏4 强化产业基础

强化标准引领。成立元宇宙标准工作委员会，加快重点和亟需标准制定，促进不同元宇宙系统互联互通。强化标准应用，鼓励制定团体标准，选择条件成熟的行业和地区开展试验研制和试点推广。

构建产权体系。支持元宇宙产业重点领域知识产业优先审查，实施专利导航服务行动，鼓励企业加强知识产权合作。加速数字资产、数字人、数字内容等新兴领域产

权归属研究。

加速成果转化。建设元宇宙创新成果产业化公共服务平台，建设一批元宇宙成果孵化创新中心，支持建设高水平元宇宙中试产业基地，加快共性技术转移和推广应用。组织专场对接活动，集中发布新技术、新成果和新产品，提高元宇宙工程化速率。

加强金融支持。引导中小企业发展基金等投资基金支持元宇宙产业发展，健全基金管理制度，完善基金市场化运作机制。引导建立元宇宙产业基金，用好国家产融合作平台，降低融资成本，支持企业做大做强。

（五）构建安全可信产业治理体系

13.完善元宇宙协同治理机制。持续完善元宇宙政策法规，加强元宇宙风险跟踪研判，打造部门协同、社会参与的治理体系。明晰元宇宙监管主体职能，完善内容审查、风险处置、违规处理等规则流程。开展元宇宙伦理研究，将主流价值和伦理要求贯穿技术研发应用全过程。加强元宇宙行业自律，提升企业合规能力和社会责任意识，压实主体责任。加强社会监督，防范概念过度炒作，保障产业公平健康发展。

14.强化安全保障能力建设。加强元宇宙安全技术研究，常态化开展安全风险评估，建立安全风险事件处置机制。指导元宇宙企业加强信息安全管理，建立健全违法信息监测、识别和处置机制，遏制虚假有害信息传播，切实防范网络诈骗等违法活动。建立元宇宙数据治理框架，加强数据安全和出境管理，规范对用户信息的收集、存储、使用等行为，提升数据安全治理能力和个人信息的保护水平。

五、保障措施

（一）强化统筹协调。统筹协调各部门，加强产业、创新、财政、金融、区域等政策协同，协同推进元宇宙技术攻

关、标准制定、治理体系建设等工作。深化央地协作，鼓励地方结合实际制定针对性强、可操作的政策措施，优化产业布局，因地制宜推动元宇宙技术创新和产业发展。

（二）优化人才培养。支持高等院校加强元宇宙相关学科专业人才培养，深入推进产学研合作，鼓励企业与高校、科研机构联合培养人才，支持建设元宇宙技术技能人才实训基地，增强高水平人才供给。加强人工智能、区块链、虚拟现实等新一代信息技术融合创新海外高层次人才引进力度。选拔和支持一批元宇宙相关领域高水平管理、技术、技能人才，提高企业人才集聚能力。

（三）深化国际合作。深度参与元宇宙国际治理规则和标准制定，结合我国治网主张，推动建立多边、民主、透明的国际元宇宙治理体系。做好国际元宇宙治理规则与国内衔接，提升国内元宇宙企业的国际化水平。加强元宇宙国际交流合作，集聚全球创新资源，拓展国际市场应用，推动国内国际双循环相互促进。