

元宇宙与平行系统：发展现状、对比及展望

田永林^{1,2}, 陈苑文^{1,3}, 杨静^{1,3}, 王雨桐^{1,2}, 王晓^{2,4}, 缪青海³, 王子然⁵, 王飞跃^{1,2}

- (1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;
2. 青岛智能产业技术研究院, 山东 青岛 266109;
3. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049;
4. 安徽大学人工智能学院, 安徽 合肥 230601;
5. 普渡大学, 美国 西拉法叶 IN 47907-2050)

摘要: 随着人工智能和虚拟现实等技术的发展, 数字化技术正不断丰富和改变着人们的生活体验与生产方式, 并成为管控复杂系统的有力工具。元宇宙与平行系统为数字化系统的建设提供了可行途径, 在科学研究和产业应用中获得了广泛关注。综述了元宇宙与平行系统的发展现状, 分析了两者的区别与联系, 并对其未来发展进行了展望, 预期为智能产业、智能经济及智能社会的发展提供一定的参考与借鉴。

关键词: 元宇宙; 平行系统; ACP 方法; 平行网络; 平行交通; 平行制造; 平行管理; 平行哲学; 人工智能创作内容
中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202313

Metaverses and parallel systems: the state of the art, comparisons and prospects

TIAN Yonglin^{1,2}, CHEN Yuanwen^{1,3}, YANG Jing^{1,3}, WANG Yutong^{1,2},
WANG Xiao^{2,4}, MIAO Qinghai³, WANG Ziran⁵, WANG Fei-Yue^{1,2}

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China
3. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. School of Artificial Intelligence, Anhui University, Hefei 230601, China
5. Purdue University, West Lafayette IN 47907-2050, USA

Abstract: With the development of technologies such as artificial intelligence and virtual reality, digital technology is continuously changing and enriching human experiences and production methods, and has become a powerful tool for controlling and managing complex systems. Metaverses and parallel systems provide feasible ways for the construction of digital systems and have gained much attention in scientific research and industrial applications. The development status of the metaverses and parallel systems were reviewed, the differences and connections between them were analyzed, and their future development was prospected, which was expected to provide reference and inspiration for the development of intelligent industries, intelligent economies, and intelligent societies.

Key words: metaverse, parallel system, ACP method, parallel network, parallel transportation, parallel manufacturing, parallel management, parallel philosophy, AI generated content

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-03-03

通信作者: 王晓, xiao.wang@ahu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2018AAA0101502); 国家电网有限公司总部科技项目资助: 人在回路的大电网调控混合增强智能基础理论

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018AAA0101502), The Science and Technology Project of State Grid Corporation of China: Fundamental Theory of Human-in-the-Loop Hybrid-Augmented Intelligence for Power Grid Dispatch and Control

0 引言

元宇宙 (metaverse) 一词最早出现于美国著名作家尼尔·斯蒂芬森 (Neal Stephenson) 1992 年创作的科幻小说《雪崩》^[1]中, 但其概念起源可追溯到更早期的控制论^[2] (cybernetics) 及其催生的赛博空间 (cyberspace)。赛博空间由控制论英文名称的前缀 cyber 和空间 (space) 两个词组合而成, 该名词最早出现在威廉·吉布森 (William Gibson) 于 1982 年出版的短篇小说《全息玫瑰碎片》^[3]中, 并随着他更具代表性的《神经漫游者》^[4]一书的广为流传而被大众广泛认知^[5]。赛博空间的概念催生了名为镜像世界 (mirror worlds) 的软件技术概念^[6], 即通过模拟人类活动和人类环境的软件模型实现现实世界向虚拟世界的映射和互动。随即于 1992 年衍生出的科幻小说《雪崩》描述的“元宇宙”这一赛博朋克学术语, 实际是平行于真实世界的社会化赛博空间。在元宇宙中, 用户可以基于匿名的身份随时随地接入虚拟空间, 通过在虚拟空间中交互和创造, 进行内容的生产和消费。

自 2021 年 10 月 Facebook 正式宣布更名为 Meta 以来, 元宇宙及其相关概念获得了全社会的广泛关注。产业层面上, 科技公司纷纷开始布局元宇宙项目, 围绕娱乐、社交、办公等领域展开的元宇宙应用层出不穷; 政策层面上, 中、美、日、韩、欧等国家和地区也在积极探索元宇宙相关政策与法规。随着人工智能、虚拟现实、人机交互、区块链以及分布式系统等技术的发展, 元宇宙已经从文学术语转变为一类新兴技术的综合性名词, 探索并构建元宇宙背后的智能科学与技术体系成为学术研究和产业应用中的重要课题。

目前, 学术界和产业界对元宇宙的定义尚未统一。现有研究人员从交互技术^[7]、数字及虚拟环境^[8-9]、互联网新形态^[10]等多种角度对元宇宙进行了阐述, 解读视角虽有差异, 但学术和产业界研究人员对元宇宙融合虚实空间的属性已形成基本共识。从科学与技术的角度看, 元宇宙本质上是通过对虚拟空间的开发, 实现人类活动、想象力与创造力的拓展, 从而试图把过去无法商品化的注意力 (attention) 和信用度 (trust) 转化为可批量化生产、可规模化流通的新型商品^[11-12]。相比于数字孪生侧重对工程系统的建模和控制, 元宇宙则关注包含人类行为在内的复杂社会系统, 从而实现了数字孪生所在的信

息物理系统 (cyber physical system, CPS) 到图 1 所示的社会物理信息系统^[13] (cyber physical social system, CPSS) 的拓展。

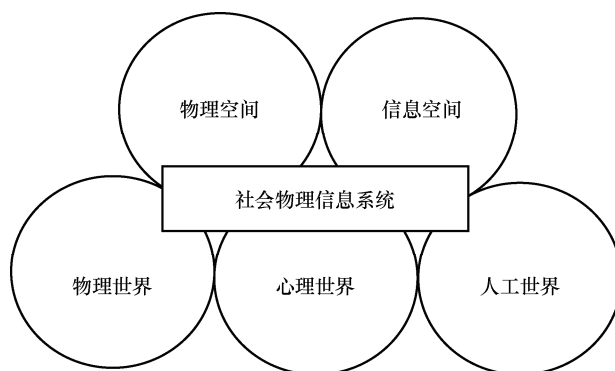


图 1 社会物理信息系统

息物理系统^[14]的早期想法萌生于王飞跃在 1982 年基于蒙特卡洛方法 (Monte Carlo method) 和高斯随机场 (Gaussian random field) 的材料缺陷研究, 该研究利用计算手段实现对物理系统的分析、实验和验证^[15-16]。随后, 他在 1994 年提出的影子系统^[17] (shadow systems) 中, 提出了融合物理空间和信息空间的系统控制方法, 影子系统针对火星制氧厂的系统验证问题, 提出“当地简单, 远程复杂”的设计理念, 通过构建远程影子系统克服了通信和计算资源受限的困难, 实现对实际系统的智能控制。此后, 王飞跃^[14]于 2004 年正式提出面向复杂系统管控的平行系统的概念、框架和互动过程, 平行系统以 CPSS 为研究对象, 以 ACP (人工系统, artificial systems, A; 计算实验, computational experiments, C; 平行执行, parallel execution, P) 为核心方法, 其主要思想是利用虚实交互的平行执行, 实现复杂系统的管理与控制, 进而引导真实系统持续渐进向目标状态演化。

元宇宙与平行系统都提出了通过对虚拟空间的探索扩充现实世界的想法, 为复杂系统的建模分析和内容生产方式变革提供了新的思路。在一定程度上, 元宇宙是随着大数据、人工智能、数字孪生技术的发展自然演进出的一种新形态, 可成为构建平行系统的一种技术途径。为进一步探索元宇宙和平行系统在复杂系统建模和管控中的应用潜力, 本文对元宇宙和平行系统的定义及特征、发展历程、研究及应用现状展开介绍, 分析了元宇宙和平行系统的区别与联系, 并展望了二者未来的发展趋势, 预期为相关领域学者和从业人员提供一定的借鉴和思路。

1 元宇宙的发展历程及应用现状

元宇宙 (metaverse) 是“元 (meta)”与“宇宙 (universe)”后缀的组合,描述了一种与物理世界相连的虚拟环境^[8]。自2021年Facebook更名为Meta以来,元宇宙受到了产业界、学术界、媒体及公众的广泛关注。下面对元宇宙的定义及特征、发展历程、研究及应用现状展开详细阐述。

1.1 元宇宙的定义及特征

元宇宙一词的字面意思是超越现实世界,其本质是“形而上”。“元”字赋予了人们极大的想象空间,也引发了不同从业者、专家和机构对元宇宙的多样化定义。

在产业界,交互游戏平台 Roblox 将元宇宙描述为一个连接每个人的虚拟世界,并定义了八大特征:身份、朋友、沉浸感、低时延、多样性、不限地点、经济和文明。Facebook 首席执行官扎克伯格设想的元宇宙是一个由众多可交互虚拟社区构成的世界,在元宇宙中人们能通过虚拟现实等设备建立全方位和多维度的交互体验,并依赖元宇宙经济系统,完成社交、娱乐、体育健身、购物等多样化活动。其所定义的八大特征包括:临场感、数字化身、个人空间、瞬间移动、连通性、隐私安全、虚拟物品和自然交互。英伟达的元宇宙旨在将现实世界复制到虚拟空间中,通过实时仿真与多用户协同,提高生产效率。

在学术界, Lee L H 等人^[8]认为元宇宙是一种融合了物理和数字的虚拟环境,由互联网、Web 技术及扩展现实 (extended reality, XR) 等技术的结合推动。在元宇宙中,所有个人用户都拥有自己的数字化身,从而在虚拟世界中获得全新的生活体验。Mystakidis S^[7]将元宇宙看作一种能够与虚拟环境、数字物体和人进行多感官交互的技术。Saritas M T 等人^[18]认为元宇宙主要是由技术上的创新形成的多用户平台,从计算机技术的角度看,元宇宙创造了超越物理现实的数字环境。陈钟^[9]认为目前对元宇宙的认识呈现出逐渐进化的特点,从具有感官体验的网络空间,到具备社会属性的平行世界,再进化到承载社会愿景的高维超现实新型世界。武强等人^[10]将元宇宙的基本要素体量定义为“协作关系、技术体系、经济系统”。周鑫等人^[19]认为元宇宙是一种具有深度沉浸性、高度自由性且与现实世界密切相关的虚拟世界,其以云计算、物联网、通信技

术、区块链、虚拟现实等技术为基础,通过对网络空间的全面升级,实现社会信息、价值在虚拟世界和现实世界之间的流通。

总体上,伴随着智能科学与技术的发展进步,元宇宙这一“形而上”的哲学概念已逐渐技术化和工程化。元宇宙的科学抽象是社会物理信息系统,通过连通物理世界、心理世界和人工世界形成虚实交互的平行空间,借助对人工世界的开发,实现人类活动和想象力的延伸。

1.2 元宇宙的发展历程

元宇宙的名词概念产生于1992年的文学作品《雪崩》,但在此之前,科学研究和文学创作中已有了相关概念的雏形。元宇宙的渊源可以追溯到诺伯特·维纳1948年出版的《控制论》^[2]。《控制论》源于维纳的循环因果思想,其核心问题是对信息、信息传输和信息处理的研究,探索动物与机器内部或彼此之间的控制与通信。《控制论》对通信与控制的研究为人类想象力向虚拟空间的拓展提供了理论基础,也促进了对人类与机器交互问题的研究。随后,计算机的小型化和应用普及、图形界面的诞生、网络技术和自由软件运动的兴起等因素,打开了普通民众参与和探索网络空间的通道。文学作品《全息玫瑰碎片》^[3]和《神经漫游者》^[4]创造并普及了赛博空间的概念,并于1991年催生了名为镜像世界的软件技术概念^[6]。控制论的提出、计算机软硬件的发展,以及文学创作中的科幻概念,为元宇宙概念的诞生提供了基础。

虚拟空间中的内容创作以及虚实世界的交互机制是元宇宙发展过程中的主要内容。在内容创作方面, Dionisio J D N 等人^[20]总结了虚拟世界的早期发展历程,并将其分为5个阶段。第一阶段为20世纪70年代以文本表示的虚拟世界。这一类作品通常设定特定的世界观,玩家通过输入命令、生成文本来完成一系列虚拟行为。典型代表包括《龙与地下城》和《指环王》等,这些作品尽管玩法十分简单,但已经具备了元宇宙虚拟世界的诸多重要元素,如互动、角色、身份、任务、开放式世界等。第二阶段为20世纪80年代的2D图形化虚拟世界。这一时期,计算机技术的进一步发展催生了基于图形界面交互的网络游戏。图形化界面增强了用户的感官体验,同时增强了多用户之间以及用户与环境之间的交互。典型代表包括卢卡斯影业受《神经漫游者》启发创作的第一款图形化线上游戏《栖息地》。第

三阶段为 20 世纪 90 年代的 3D 图形化虚拟世界。计算能力和图形技术的进步使虚拟世界的建设空前活跃, 用户创作内容 (user generated content, UGC)、3D 图形、开放式世界观和集成音频相继被引入虚拟世界的构建。虚拟世界的真实感、多样性、用户参与度以及体验感都得到了进一步增强。这一阶段涌现了大量以元宇宙概念为基础的虚拟世界, 如 1994 年的 Web World、1995 年的 Active Worlds、1996 年的 Onlive! Traveler 等。第四阶段为 21 世纪前 10 年引入虚拟经济系统的 3D 虚拟世界。虚拟经济系统的出现进一步提升了虚拟世界与真实世界的一致性, 同时, 也为玩家引入了激励机制, 进一步激发了用户的创作热情。第五阶段为当前去中心化虚拟世界的发展方向。去中心化系统增强了系统整体稳定性, 同时赋予了用户对资产的所有权, 实现了对用户创造力的进一步解放。点到点共享虚拟世界项目 Solipsis^[21]以及 Open Cobalt、Open Wonderland、Open Simulator 等用于构建虚拟世界的分布式互联协作工具相继被推出, 进一步增强了虚拟世界创作的生态开放性。

在元宇宙的内容创作方式上, 可以分为 3 个阶段。第一阶段是专业创作内容 (professional generated content, PGC), 元宇宙基础设施和剧情的发展规则等由专业人士提前完成构建, 用户参与元宇宙之中, 并遵循规则推进剧情的发展。第二阶段是用户创作内容的阶段, 用户可以根据自身需求进行元宇宙个人形象以及元宇宙场景的创造, 个性化内容的创作为元宇宙的多样性带来了巨大提升。第三阶段是人工智能创作内容 (AI generated content, AIGC)。从变分自编码器和生成式对抗网络技术^[22], 到目前以多模态大模型为代表的自动内容创作方法, 如 DALL-E^[23]、Stable diffusion^[24]等, 文本生成、图像生成、三维模型生成、音频生成、视频生成和场景生成等领域的 AIGC 技术正不断取得突破, 并不断被应用。AIGC 技术的发展极大降低了内容创作的门槛, 提高了内容创作效率, 有望极大加速元宇宙内虚拟基础设施的建设。

在交互方式上, 交互的维度和空间也在发生变化, 从早期基于指令的交互方式, 到图像化界面普及下基于图形界面的交互方式, 再到近期随着计算机图形学、人工智能、神经科学的发展和应用产生的多维度交互方式, 如手势交互、自然语言交互、增强现实和脑机接口等。其中, 虚拟现实技术自 20 世纪 80 年

代被提出以来, 就得到了航天和军事等领域研究人员的关注, 并被开发形成了早期产品。近年来, 随着传感器技术、显示技术以及系统集成技术的发展, 虚拟现实设备逐渐小型化, 并陆续走向普通消费者, 为随时随地接入三维元宇宙世界提供了一条途径。

元宇宙虚拟世界表示、交互方式及内容创作方式的演变如图 2 所示。其中, 元宇宙中的虚拟世界构建经历了从文本到 2D 再到 3D 的形式演变。与此同时, 交互方式也由命令行转变为图形界面再到最近的虚拟现实、增强现实以及混合现实等更加自然的方式^[7]。在内容创作上, 从早期的专业创作内容逐步过渡到用户创作内容的形式, 且有望在未来进入人工智能创作内容的范式。

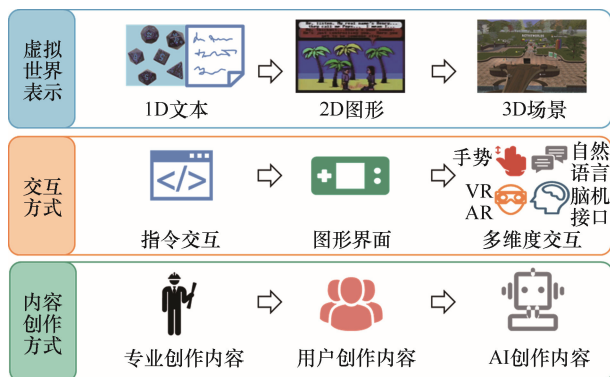


图 2 元宇宙虚拟世界表示、交互方式及内容创作方式演变

1.3 元宇宙的研究及应用现状

元宇宙的构想不断在诸多影视作品中被描绘, 如《头号玩家》《阿凡达》《黑客帝国》等, 与此同时, 元宇宙在实际产业中的应用也引发了强烈关注, 已有很多公司开始布局元宇宙在社交、办公、娱乐、工业方面的应用, 并推出了一系列的产品。社交方面, Meta 推出的 Horizon Workrooms 使用户可以在元宇宙中与同事进行交互。办公方面, 微软发布的 Mesh for Microsoft Teams 结合了 Microsoft Mesh 的混合现实功能和 Microsoft Teams 的生产工具, 能提供新一代的 2D 与 3D 结合的会议和协作体验。会议中, 用户可定制自己的虚拟形象并对其进行自由控制。娱乐方面, 游戏公司 Roblox 以开放式的创作平台, 为玩家提供数字内容创作空间, 目前其已成为世界上最大的多人在线创作游戏平台。在工业方面, 英伟达建立了工程师的元宇宙——Omniverse, 提供丰富的 3D 设计和协作工具, 可实现多种场景下的仿真平台构建。除了以上领域, 元宇宙在教育^[25-27]、医疗^[28-30]、智慧城市^[31]、智慧制造^[32-33]等领域的科学探索及应用也受到了学者的

广泛关注。

元宇宙体现出明显的多学科、交叉学科和跨学科特性^[34], 其发展依赖多种相关技术的进步, 如: 人机交互、人工智能、区块链、物联网、边缘/云计算、电子游戏、网络技术、硬件设备技术等^[8,35]。分布式自治组织与运营 (decentralized autonomous organizations and operations, DAOs) 和区块链技术为元宇宙的组织和协调提供了手段, 物联网、5G 等技术为节点间的连通创造了条件, 电子游戏、AR 及 VR 等技术提供了元宇宙对外交互的窗口, 云计算和分布式计算等技术作为执行技术支撑元宇宙的运转, 人工智能则为各个环节提供创新驱动力。

元宇宙具有高可拓展性, 因此对新技术拥有强大的包容能力。目前, 人工智能技术展现出向通用智能演化的潜力, 继 AlphaGo 战胜人类顶级围棋选手引发人们对人工智能的广泛关注之后^[36], 以 ChatGPT 等大模型为代表的人工智能应用以比拟人类的创造力和交互能力再一次激起了研究和产业应用热潮^[37]。元宇宙中的内容创作和人机交互方式正面临巨大变革。在内容创作方面, AIGC 技术已经在文本、图像、视频以及多模态协同生成等任务中展现出良好的效果和应用前景, 元宇宙中的创作方式继从 PGC 向 UGC 转变之后, 有望迎来以 AIGC 为主流的新形态。未来, 在 AIGC 技术的支撑下, 用户将实现更高效、便捷的高质量大规模内容生成, 从而加速元宇宙场景基础设施的建设。在人机交互方面, ChatGPT 以及 GPT-4^[38]等 Transformer^[39]大模型技术实现了基于文本和图片等多模态数据的任务理解、自然对话以及准确推理等功能。大模型技术在元宇宙数字化化身等方面的应用, 有望打造更加自然和沉浸式的人机交互方式。

2 平行系统概述

平行系统利用 ACP 方法进行人工系统与实际系统的平行交互^[14,40], 从而将具有高不确定性 (uncertainty)、多样性 (diversity) 和复杂性 (complexity) 的系统, 变得敏捷 (agility)、聚焦 (focus) 和收敛 (convergence)^[41]。

2.1 平行系统的定义及特征

平行系统指由某一实际系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统组成的共同系统, 其通过实际系统与人工系统的相互连接、虚实交互, 对二者之间的行为进行对比和分析, 完成对各自未来

状况的“借鉴”和“预估”, 实现实际系统的有效管理与控制^[42-43]。

平行系统摒弃传统的“单一世界”观, 采用“多重世界”的观点, 不要求虚拟系统与实际系统完全相同或高精度逼真, 只要求它们在规模、行为和系统特性等方面具有一致性^[14]。因此, 平行系统一方面简化了虚拟系统的构建, 使复杂系统的建模变成可能; 另一方面由于虚拟系统抽取了系统与研究问题相关的特征, 更有利于问题的研究与解决。而且平行系统将实验过程转移到虚拟空间, 解决了真实场景实验成本过高和不可反复进行等问题。另外, 人工系统和实际系统是双向交互的, 有利于系统对外部环境的变化及时做出改变。一方面根据虚实两系统的运行结果, 调整虚拟系统, 使其更符合真实系统规律; 另一方面根据虚拟系统中计算实验的结果, 引导实际系统向虚拟系统收敛。

ACP 是平行系统的核心方法。其中, 人工系统代表广义的知识模型, 是数学或解析建模的延伸; 计算实验是分析、预测系统行为以及制订决策的途径, 是仿真的升级; 平行执行代表由虚实互动组成的新型反馈控制机制, 便于采取行动、锁定目标。其实施步骤如下: (1) 利用多智能体等方法构建与复杂系统相对应的人工系统; (2) 利用计算实验, 设计各类智能体的组合及交互规则, 产生并分析场景数据, 求得各类场景下的最优策略; (3) 通过人工系统与实际系统平行执行, 利用虚拟系统引导和管理实际系统^[42]。上述每一部分又可依据复杂性分为 3 个层次^[43-44]: (1) 数字孪生、软件孪生、虚拟孪生; (2) 仿真 (simulation)、模拟 (emulation)、仿效 (imitation); (3) 决策生成、决策推荐、决策支持; 3 个部分分别对应各自的 3 种层次, 构成平行系统的 3³ 种基本形态。简单理解, 影子系统和数字孪生对应平行系统的简单形态, 镜像世界或元宇宙对应平行系统的复杂形态^[45]。

平行系统可以根据不同的意图连接成 3 种不同的操作模式^[14,46], 如图 3 所示。(1) 学习与培训。在该模式中, 人工系统被当作学习和培训员工的平台, 促使相关人员能够在各种虚拟场景中快速掌握复杂系统的各种演化状态和应对措施。(2) 实验与评估。此模式下, 人工系统被用作“计算实验室”, 计算分析各种现象出现的原因以及各种措施可能造成的结果, 以便为决策提供依据。(3) 管理与控制。此模式的主要目的是通过虚实互动的方式管理

和控制实际系统。一方面,人工系统与真实系统的差别被当作人工系统的误差反馈信号,对人工系统进行修正,使其趋向于真实系统;另一方面,将实际系统中的新问题和需求实时输入人工系统,人工系统根据此信息进行实验、测试和完善,获得最优的解决策略^[47],并将此策略实施于真实系统,从而达到引导优化真实系统的目的。

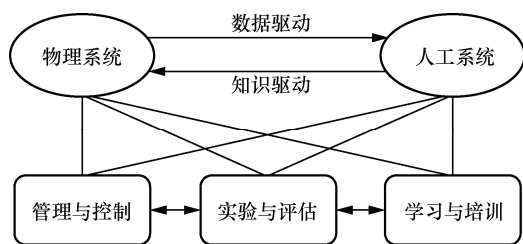


图3 平行系统运行模式

2.2 平行系统的发展历程

对平行系统的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代,之后于 2004 年由王飞跃正式提出。1982 年,王飞跃在浙江大学力学系研究设计断裂力学的金属平板断裂拉伸实验时,面临资金和资源短缺等问题,于是提出了用计算实验代替物理实验,完成材料疲劳测试任务的初步思路^[48-49]。他使用蒙特卡洛方法和高斯随机场模拟具有几何缺陷的矩形板的振动行为^[15-16],并利用结合最佳格点集的最小二乘法在非线性动态系统中求得较好解^[50]。1994 年,在参与美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)国际空间站自动组装的研发以及月球火星无人工厂的设计与控制中,王飞跃再次面临既无数据又无“真”可仿的“仿真”问题,故提出将模型作为数据生成器和可视化工具的影子系统^[17]。在卡尔·波普尔的“三个世界”思想的影响下,王飞跃关于计算实验和影子系统的想法逐步发展为平行系统理论,并于 2004 年发表“平行系统方法与复杂系统的管理和控制”和“人工社会、计算实验、平行系统:关于复杂社会经济系统计算研究的讨论”两篇论文,正式提出平行系统、平行智能等概念,并给出 ACP 方法的理论与体系^[14,40]。

随后,该理论在控制、交通、医疗、制造、农业等领域取得了广泛应用和显著效果。2010 年,宁滨等人^[51]面向城市轨道交通中亟待解决的安全、高效、可靠运行等关键问题,形成了一套自下而上的城市轨道交通平行控制和管理方法。2012 年,王飞

跃^[52]提出利用 ACP 方法应对物理域、网络域和感知域的军事行动。2013 年,王飞跃^[53]提出平行控制方法,为复杂系统的智能管理与控制提供了一种数据驱动的计算控制方法。2013—2017 年,原中国人民解放军军械工程学院(现中国人民解放军陆军工程大学)、中国科学院自动化研究所等知名院校和机构先后提出了平行武器装备系统、平行能源、平行情报等应用框架^[47, 54-55]。2017 年, Li L 等人^[56]结合了现有多种机器学习理论框架的优点提出了平行学习这种新型的机器学习框架。同年,袁勇等人^[57]将平行系统理论与区块链技术结合,为传统区块链增加计算实验与平行决策功能,提出了平行区块链的框架体系。2017—2019 年,以平行理论为基础的平行感知、平行医疗、平行网络、平行制造等技术和应用框架纷纷诞生^[58-61]。2019 年,西安交通大学、中国科学院自动化研究所、清华大学等单位的科研人员联合提出平行测试技术,在 *Science Robotics* 上发表焦点文章,引起了广泛的关注和讨论^[62]。近年来,数字孪生和元宇宙的兴起进一步推动了该理论的发展,平行系统仍然是当下的研究热点^[63-69]。

2.3 平行系统的研究及应用现状

平行系统已经形成了完整的理论、技术和应用体系,其发展和应用历程如图 4 所示。本节主要介绍平行系统在网络、管理、制造、交通等几方面的应用现状以及平行哲学思想。

2.3.1 平行网络

针对如今网络面临的运营高可靠要求、多种协议并存、网络故障高代价、试验成本昂贵等挑战,软件定义网络(software defined network, SDN)采用控制与转发分离的思想,可以轻松实现网络系统的功能修改、调整、扩展和性能提升,使得网络变为可池化的资源并可作为服务提供出去,增强了网络的稳定性、可靠性和扩展性^[61]。但 SDN 仍不能解决复杂网络的动态优化和控制问题。

数字孪生网络构建物理网络的实时镜像,能够通过基于虚拟层的仿真,实现 SDN 管理和控制层无法实现的复杂网络的动态控制和优化^[70]。平行网络在数字孪生网络的基础上,通过一个或多个人工网络与实际网络之间进行信息传递及相互优化,以及对网络系统控制面、转发面和应用层功能进行重新定义抽象,使网络管理软件可编程,对不同层次

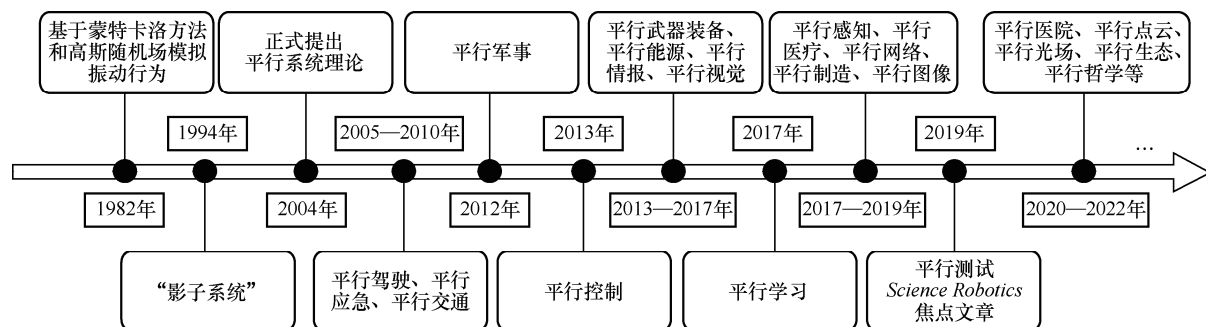


图4 平行系统的发展与应用历程

需求、不同服务内涵的网络进行实时的决策指导和行为优化，从而实现对复杂网络的管理控制和调度以及网络性能的提升，满足用户不断变化的网络需求^[71-72]。

2.3.2 平行管理

泰勒科学管理方法是当前各行各业的主要管理手段，具有规范化、标准化和制度化的特点。该方法通过“秒表”的方式解决了生产任务工作量和效率的量化问题，但也使得管理研究与实践陷入了“囚笼效应”“红桃皇后效应”“蝴蝶效应”和“循环因果效应”等多重困境。而且，伴随当前以人工智能为代表的智能科技带来的脑力劳动解放，泰勒科学管理方法难以实现对脑力和知识工作的量化，且难以处理人和组织的人性与社会问题。

平行管理^[63]通过“三个世界”“循环因果”和“平行空间”的管理新思维，以人工智能大模型等新一代智能技术为“秒表”将知识工作进行量化，使智慧管理成为可描述、可计算、可实验、可估计、可验证、可比较、可执行的可编程管理体系，结合DAOs、分布式自主科学（decentralized science, DeSci）以及新型的组织、协调和执行技术，将科学管理从传统的案例教学转变为智能高效的场景工程。平行企业^[73]是平行管理的典型案例，通过对企业的采购、生产、销售等流程进行建模，利用计算实验定量分析不同岗位、资源变化对企业成本和效益的影响，并借助虚实互动与平行执行促进企业高效运行。

2.3.3 平行制造

当今制造业面临着客户需求日益多样化和个性化、较高的社会和工程复杂性导致的生产系统难以建模、规划和生产周期难以满足快速变化的市场环境等难题。平行制造基于网络空间的大规模数

据，利用知识自动化技术，分析、提取客户需求和流行趋势，并通过众包等技术，打破个人才能和地域距离的限制，使消费者参与到设计、生产的全过程中。在生产车间中，构建虚拟制造系统，利用虚实双空间的交互和推演，完成生产规划、工艺工程、制造等流程的有效控制和实时优化^[58]。参考文献^[33,67,74]指出，结合工业大模型、DAOs、区块链等技术，未来的制造工厂将由数字人、机器人取代自然人，完成几乎全部的脑力劳动和体力劳动。自然人只需专注于更有创造力和更复杂的工作，从而实现对知识资源分配的优化。制造业是实现工业5.0的重要部分，平行机器^[75]、平行无人系统^[76]、平行能源^[77]、平行区块链^[57]将从资源、劳动力、网络安全等各个方面为高效、可持续、智能、安全的平行制造的实现提供强有力的支撑。

2.3.4 平行交通

复杂交通系统面临交通网络难刻画、数据难获取、系统难解析、模型庞杂难求解等痛点。对此，中国科学院自动化研究所构建了基于ACP的平行交通平台DeCAST^[78]，包括TransWorld、PRECOM、RoadScope等功能模块，通过实际系统和对应的人工系统之间的交互，对信号灯、交通流等元素进行调度和优化，对交通系统的管理者和用户进行“虚拟”培训，通过平行执行将最优方案应用于实际系统，引导实际系统的管理与控制。

智慧交通的构建一方面依赖交通基础设施的升级改善，另一方面也需要自动驾驶等车端技术形成安全绿色的智慧出行方案。在复杂多变的交通环境中进行精准可靠感知以及灵活自主决策是自动驾驶面临的难点。基于平行系统理论构建的平行视觉^[79]与平行雷达^[80]等感知方法，以可控的数据生成方式增强数据规模和多样性，从而降低数据构建成本，提升智能车辆在复杂环境下的感知水平。在驾

驶决策方面, 平行驾驶^[81]集成物理实体车辆和描述、预测及引导3类虚拟车辆, 通过人工交通环境中的模拟, 积累知识经验, 并通过虚实车辆互动引导真实世界中的车辆驾驶过程。

2.3.5 平行哲学

作为智能科学和智能技术的本源, 新时代通用人工智能、元宇宙等技术的突破, 必须从经典哲学的核心“存在”和“变化”拓展到“相信”。平行哲学^[82-83]突破哲学家雅思贝斯的“轴心时代”理念, 使用“老IT(工业技术)”“旧IT(信息技术)”和“新IT(智能技术)”齐力开发物理世界、心理世界和人工世界, 解决资源不均衡、信息不均衡和智力不均衡的问题, 从而迈入第三轴心时代。平行哲学以智能技术为基础, 辅之平行思维、平行认知和平行哲学, 基于ACP方法实施平行实验和平行执行, 实现智能产业的可信、可靠和可用, 提高效益, 降低成本, 引领人类思维和现实社会走进虚实互动的平行生态和联邦生态^[84]。

3 元宇宙与平行系统的区别与联系

元宇宙和平行系统都随着信息技术的发展被提出, 都将物理空间扩展到虚拟空间, 对现实世界进行建模, 但不以模拟现实为唯一目的, 两者都存在虚实交互。但元宇宙与平行系统也有明显的区别: 元宇宙期望虚拟空间能够给人类带来新的体验, 在这个空间中人们可以超越空间的限制, 实现方便的互联; 而平行系统则期望通过虚拟空间对现实世界中复杂、难以直接研究的系统进行建模, 从而解决现实世界中复杂系统的管理与控制难题。两者在起源发展、核心思想、研究重点、现实应用等方面都存在不同。

(1) 元宇宙和平行系统的起源不同。元宇宙发源于虚拟现实技术, 侧重于通过内容创建吸引用户, 是市场驱动的发展模式。在早期阶段, 元宇宙主要由专业图形动画企业创作内容, 即PGC, 随着信息技术的发展, 用户创作内容成为新时期元宇宙的一大特点。目前, 随着ChatGPT等大规模生产模型的出现, 人工智能创作内容成为热点, 其也将为元宇宙的发展提供重要支撑。平行系统发源于控制论, 受到默顿定律的启发, 是由科学研究和应用驱动的发展模式。早期阶段, 平行系统主要是建立真实世界的影子系统, 是系统仿真方法的拓展。进入21世纪, 平行系统理论与方法快速发展, 并日臻完

善, 同时侧重于建立现实世界的描述、在人工系统进行实验预测、通过从人工系统到现实世界的反馈进行引导3个方面。目前平行系统已经广泛应用于多个行业和领域。

(2) 元宇宙和平行系统的核心思想不同。元宇宙强调虚拟世界的逼真性, 同时又期望虚拟世界能够给人带来沉浸式的新体验。元宇宙拓展了对世界的描述能力和手段, 将长期以来现实世界难以商品化的注意力和信用度转换为可批量化生产、可规模化流通的新型商品。平行系统强调解决现实世界复杂系统的管理和控制问题, 不以模拟现实系统为唯一目的, 利用人工系统实现对现实系统的等价或等效描述, 借助计算实验和平行执行实现对复杂系统行为的预测和引导。

(3) 元宇宙和平行系统的研究重点不同。元宇宙注重虚拟空间给人带来的感受, 因此元宇宙的很大一部分研究集中于扩展现实、脑机接口、人机交互等能给人带来沉浸感的技术。而平行系统则强调虚拟空间对解决现实复杂问题的帮助, 因此平行系统的研究更多集中于对复杂系统的建模、控制策略的评估、最优策略的推荐等方面。“虚实交互”在元宇宙中主要体现为虚拟环境和人类玩家之间的交互, 虚拟环境需不断对人类的行为做出响应; 而在平行系统中, 则主要体现在虚拟系统和现实系统之间的交互, 虚拟系统的参数通过对现实世界的观测来确定, 而虚拟系统中执行的大量计算实验又为现实系统的控制和管理提供方案。

(4) 元宇宙和平行系统在现实中的应用场景不同。自提出以来, 元宇宙这一概念被不断应用于科幻小说、影视作品、电子游戏等。随着元宇宙相关技术的进步, 目前出现了元宇宙社交、元宇宙办公等应用。总体来说, 这些应用主要服务人类, 提高人们的体验感。而平行系统主要应用于交通管控、医疗诊断、智能家居、智慧农业与智慧城市等领域, 这些领域更加注重解决现实中的复杂工程和社会问题, 以提高实际系统的生产效率、保障用户权益、促进健康良性发展为主要目标。

4 总结与展望

随着计算机、互联网、人工智能和人机交互等技术的发展, 元宇宙这一因文学作品《雪崩》而闻名的概念, 已逐渐演化为新一代互联网技术的代

表,并在办公、社交及娱乐等领域衍生出了诸多应用。元宇宙强调以人为中心的体验升级,本质上构建了实例化的社会物理信息系统,将抽象的注意力和信用度概念在虚拟空间中量化,通过虚实平行空间拓展了人类的思维和想象力。平行系统面向具有较高工程复杂性和社会复杂性的实际系统管控问题,提出了以社会物理信息系统为研究空间,以ACP为核心方法的闭环体系,其从实际问题出发,通过人工系统构建平行空间,利用计算实验实现方案发散,最后借助平行执行与虚实交互向实际问题的解决方案收敛。平行系统构建集描述、预测与引导为一体的系统化闭环方案,为元宇宙等虚实融合系统构建了智能科学与技术体系。

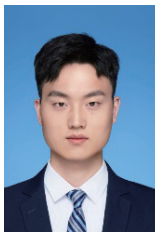
参考文献:

- [1] STEPHENSON N. Snow crash[M]. New York: Bantam Books, 1992.
- [2] WIENER N. Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine[M]. New York: John Wiley & Sons, 1948.
- [3] GIBSON W. Burning chrome[J]. Omni, 1982, 4(10): 72-83.
- [4] GIBSON W. Neuromancer[M]. New York: Ace Science Fiction Books, 1984.
- [5] 托马斯·瑞德. 机器崛起: 遗失的控制论历史[M]. 王晓, 郑心湖, 王飞跃, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
THOMAS R. Rise of the machines: the lost history of cybernetics[M]. Translated by WANG X, ZHENG X H, WANG F Y. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [6] GELERTER D. Mirror worlds: or the day software puts the universe in a shoebox...how it will happen and what it will mean[M]. New York: Oxford University Press, 1991.
- [7] MYSTAKIDIS S. Metaverse[J]. Encyclopedia, 2022, 2(1): 486-497.
- [8] LEE L H, BRAUD T, ZHOU P, et al. All one needs to know about metaverse: a complete survey on technological singularity, virtual ecosystem, and research agenda[J]. arXiv preprint, 2021, arXiv: 2110.05352.
- [9] 陈钟. 元宇宙的现状、挑战与发展[J]. 人工智能, 2022, 9(5): 1-11.
CHEN Z. Metaverse: status, challenges and development[J]. AI-View, 2022, 9(5): 1-11.
- [10] 武强, 季雪庭, 吕琳媛. 元宇宙中的人工智能技术与应用[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(3): 324-334.
WU Q, JI X T, LYU L Y. Artificial intelligence technologies and applications in the metaverse[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(3): 324-334.
- [11] WANG X, YANG J, HAN J P, et al. Metaverses and DeMetaverses: from digital twins in CPS to parallel intelligence in CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(4): 97-102.
- [12] WANG F Y. Parallel intelligence in metaverses: welcome to Hanoi![J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(1): 16-20.
- [13] WANG F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85-88.
- [14] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [15] WANG F Y, HE F B. Large amplitude vibrations of rectangular plates with random geometric imperfections[C]//Proceedings of International Conference on Vibration Problems in Engineering. [S.l.:s.n.], 1986: 385-390.
- [16] WANG F Y. Monte Carlo analysis of nonlinear vibration of rectangular plates with random geometric imperfections[J]. International Journal of Solids and Structures, 1990, 26(1): 99-109.
- [17] WANG F Y. Shadow systems: a new concept for nested and embedded co-simulation for intelligent systems[J]. Tucson, Arizona State, 1994.
- [18] SARITAS M T, TOPRAKLIKOGU K. Systematic literature review on the use of metaverse in education[J]. International Journal of Technology in Education, 2022, 5(4): 586-607.
- [19] 周鑫, 王海英, 柯平, 等. 国内外元宇宙研究综述[J]. 现代情报, 2022, 42(12): 13.
ZHOU X, WANG H Y, KE P, et al. Review of meta universe reserch at home and abroad[J]. Journal of Modern Information, 2022, 42(12): 13.
- [20] DIONISIO J D N, GILBERT R. 3D virtual worlds and the metaverse: current status and future possibilities[J]. ACM Computing Surveys, 2013, 45(3): 1-38.
- [21] KELLER J, SIMON G. Toward a peer-to-peer shared virtual reality[C]//Proceedings of 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2002: 695-700.
- [22] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial networks[J]. Communications of the ACM, 2020, 63(11): 139-144.
- [23] RAMESH A, DHARIWAL P, NICHOL A, et al. Hierarchical text-conditional image generation with clip latents[J]. arXiv preprint, 2022, arXiv: 2204.06125.
- [24] ROMBACH R, BLATTMANN A, LORENZ D, et al. High-resolution image synthesis with latent diffusion models[C]//Proceedings of 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2022: 10674-10685.
- [25] KYE B, HAN N, KIM E, et al. Educational applications of metaverse: possibilities and limitations[J]. Journal of Educational Evaluation for Health Professions, 2021, 18.
- [26] SINGH J, MALHOTRA M, SHARMA N. Metaverse in education: an overview[J]. Applying Metalytics to Measure Customer Experience in the Metaverse, 2022: 135-142.
- [27] HWANG G J, CHIEN S Y. Definition, roles, and potential research issues of the metaverse in education: an artificial intelligence perspective[J]. Computers and Education: Artificial Intelligence, 2022, 3.
- [28] YANG D, ZHOU J, CHEN R, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. Clinical eHealth, 2022, 5: 1-9.
- [29] SUN M, XIE L, LIU Y, et al. The metaverse in current digital medicine[J]. Clinical eHealth, 2022.
- [30] YANG D, ZHOU J, SONG Y, et al. Metaverse in medicine[J]. Clinical eHealth, 2022, 5: 39-43.
- [31] ALLAM Z, SHARIFI A, BIBRI S E, et al. The metaverse as a virtual form of smart cities: opportunities and challenges for environmental, economic, and social sustainability in urban futures[J]. Smart Cities, 2022, 5(3): 771-801.
- [32] WANG Y T, TIAN Y L, WANG J G, et al. Integrated inspection of

- QoM, QoP, and QoS for AOI industries in metaverses[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2071-2078.
- [33] YANG J, WANG X X, ZHAO Y D. Parallel manufacturing for industrial metaverses: a new paradigm in smart manufacturing[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2063-2070.
- [34] WANG F Y. The DAO to MetaControl for MetaSystems in metaverses: the system of parallel control systems for knowledge automation and control intelligence in CPSS[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(11): 1899-1908.
- [35] 邢杰, 赵国栋, 徐远重, 等. 元宇宙通证[M]. 北京: 中译出版社, 2021.
- XING J, ZHAO G D, XU Y Z, et al. Metaverse pass[M]. Beijing: China Translation Publishing House, 2021.
- [36] WANG F Y, ZHANG J J, ZHENG X H, et al. Where does AlphaGo go: from church-Turing thesis to AlphaGo thesis and beyond[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(2): 113-120.
- [37] VAN DIS E A M, BOLLEN J, ZUIDEMA W, et al. ChatGPT: five priorities for research[J]. Nature, 2023, 614(7947): 224-226.
- [38] BUBECK S, CHANDRASEKARAN V, ELDAN R, et al. Sparks of artificial general intelligence: early experiments with GPT-4[J]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2303.12712.
- [39] 田永林, 王雨桐, 王建功, 等. 视觉 Transformer 研究的关键问题: 现状及展望[J]. 自动化学报, 2022, 48(4): 957-979.
- TIAN Y L, WANG Y T, WANG J G, et al. Key problems and progress of vision transformers: the state of the art and prospects[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(4): 957-979.
- [40] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统: 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
- WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [41] WANG F Y, WANG X, LI L X, et al. Steps toward parallel intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(4): 345-348.
- [42] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.
- YANG L Y, CHEN S Y, WANG X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [43] 王飞跃. 智能控制五十年回顾与展望: 傅京孙的初心与萨里迪斯的雄心[J]. 自动化学报, 2021, 47(10): 2301-2320.
- WANG F Y. Intelligent control in 50 years: from K. S. FU's vision to G. N. SARIDIS' inspiration[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(10): 2301-2320.
- [44] 王飞跃. 从 AlphaGo 到平行智能: 启示与展望[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 72-74.
- WANG F Y. From AlphaGo to parallel intelligence: insights and prospects[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(7): 72-74.
- [45] 王飞跃. 数字医生与平行医疗: 从医疗知识自动化到系统化智能医学[J]. 协和医学杂志, 2021, 12(6): 829-833.
- WANG F Y. Digital doctors and parallel healthcare: from medical knowledge automation to intelligent metasystems medicine[J]. Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital, 2021, 12(6): 829-833.
- [46] WANG F Y, DING W W, QIN R, et al. Parallel philosophy for MetaOrganizations with MetaOperations: from Leibniz's monad to HanoiDAO[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2022, 9(3): 658-666.
- [47] 葛承堃, 朱元昌, 邸彦强, 等. 装备平行仿真理论框架研究[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(1): 48-56.
- GE C L, ZHU Y C, DI Y Q, et al. Theoretical framework for equipment parallel simulation[J]. Journal of Command and Control, 2017, 3(1): 48-56.
- [48] 王飞跃. 积累疲劳损伤破坏的可靠性准则[R]. 1982.
- WANG F Y. Reliability criteria for accumulated fatigue failure damage[R]. 1982.
- [49] 王飞跃. 用计算机模拟疲劳实验的设想[J]. 断裂力学, 1982.
- WANG F Y. The vision of fatigue experiments by computer simulation[J]. Fracture Mechanics, 1982.
- [50] 王飞跃, 王景美, 谢贻权. 最佳格点集在最小二乘法中的应用[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1988, 22(3).
- WANG F Y, WANG J M, XIE Y Q. An application of good lattice points in least square method[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1988, 22(3).
- [51] 宁滨, 王飞跃, 董海荣, 等. 基于 ACP 方法的城市轨道交通平行系统体系研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 22-28.
- NING B, WANG F Y, DONG H R, et al. Parallel systems for urban rail transportation based on ACP approach[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(6): 22-28.
- [52] 王飞跃. 面向赛博空间的战争组织与行动: 关于平行军事体系的讨论[J]. 军事运筹与系统工程, 2012, 26(3): 5-10.
- WANG F Y. Organization and action of war in cyberspace: discussion on parallel military system[J]. Journal of Military Operations Research and Systems Engineering, 2012, 26(3): 5-10.
- [53] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 293-302.
- WANG F Y. Parallel control: a method for data-driven and computational control[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 293-302.
- [54] 王飞跃. 情报 5.0: 平行时代的情报体系[J]. 情报学报, 2015, 34(6): 563-574.
- WANG F Y. Intelligence 5.0: parallel intelligence in parallel age[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2015, 34(6): 563-574.
- [55] 马世乾, 崇志强, 何富林, 等. 平行能源系统: 博弈的复杂社会技术系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 59-65, 85.
- MA S Q, CHONG Z Q, HE F L, et al. Parallel energy systems: a game method for composite social-technical systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(8): 59-65, 85.
- [56] LI L, LIN Y L, ZHENG N N, et al. Parallel learning: a perspective and a framework[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(3): 389-395.
- [57] 袁勇, 王飞跃. 平行区块链: 概念、方法与内涵解析[J]. 自动化学报, 2017, 43(10): 1703-1712.
- YUAN Y, WANG F Y. Parallel blockchain: concept, methods and issues[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(10): 1703-1712.
- [58] 王飞跃, 高彦臣, 商秀芹, 等. 平行制造与工业 5.0: 从虚拟制造到智能制造[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 10-22.
- WANG F Y, GAO Y C, SHANG X Q, et al. Parallel manufacturing

- and industries 5.0: from virtual manufacturing to intelligent manufacturing[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(21): 10-22.
- [59] 孟祥冰, 王蓉, 张梅, 等. 平行感知: ACP 理论在视觉 SLAM 技术中的应用[J]. *指挥与控制学报*, 2017, 3(4): 350-358.
- MENG X B, WANG R, ZHANG M, et al. Parallel perception: an ACP-based approach to visual SLAM[J]. *Journal of Command and Control*, 2017, 3(4): 350-358.
- [60] 王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 等. 平行手术: 基于 ACP 的智能手术计算方法[J]. *模式识别与人工智能*, 2017, 30(11): 961-970.
- WANG F Y, ZHANG M, MENG X B, et al. Parallel surgery: an ACP-based approach for intelligent operations[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2017, 30(11): 961-970.
- [61] 王飞跃, 杨柳青, 胡晓娅, 等. 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构[J]. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47(7): 811-831.
- WANG F Y, YANG L Q, HU X Y, et al. Parallel networks and network softwarization: a novel network architecture[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2017, 47(7): 811-831.
- [62] LI L, WANG X, WANG K F, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(28).
- [63] 王飞跃. 平行管理: 复杂性管理智能的生态科技与智慧管理之 DAO[J]. *自动化学报*, 2022, 48(11): 2655-2669.
- WANG F Y. Parallel management: The DAO to smart ecological technology for complexity management intelligence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(11): 2655-2669.
- [64] LU J W, WANG X X, CHENG X, et al. Parallel factories for smart industrial operations: from big AI models to field foundational models and scenarios engineering[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(12): 2079-2086.
- [65] SHEN Y, LIU Y H, TIAN Y L, et al. Parallel sensing in metaverses: virtual-real interactive smart systems for “6S” sensing[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(12): 2047-2054.
- [66] WANG X X, CHENG X, LU J W, et al. Metaverses-based parallel oil fields in CPSS: a framework and methodology[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 53(4): 2138-2147.
- [67] YANG J, LI S M, WANG X X, et al. DeFACT in ManuVerse for parallel manufacturing: foundation models and parallel workers in smart factories[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 53(4): 2188-2199.
- [68] WANG J G, WANG X, TIAN Y L, et al. Parallel training: an ACP-based training framework for iterative learning in uncertain driving spaces[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, accepted.
- [69] 杨静, 王晓, 王雨桐, 等. 平行智能与 CPSS: 三十年发展的回顾与展望[J]. *自动化学报*, 2023, 49(3): 614-634.
- YANG J, WANG X, WANG Y T, et al. Parallel intelligence and CPSS in 30 years: an ACP approach[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 614-634.
- [70] 孙滔, 周铖, 段晓东, 等. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术[J]. *自动化学报*, 2021, 47(3): 569-582.
- SUN T, ZHOU C, DUAN X D, et al. Digital twin network(DTN): concepts, architecture, and key technologies[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(3): 569-582.
- [71] 王飞跃, 杨坚, 韩双双, 等. 基于平行系统理论的平行网络架构[J]. *指挥与控制学报*, 2016, 2(1): 71-77.
- WANG F Y, YANG J, HAN S S, et al. The framework of parallel network based on the parallel system theory[J]. *Journal of Command and Control*, 2016, 2(1): 71-77.
- [72] WANG F Y, YANG L Q, CHENG X, et al. Network softwarization and parallel networks: beyond software-defined networks[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(4): 60-65.
- [73] 秦蕊, 曾帅, 李娟娟, 等. 基于深度强化学习的平行企业资源计划[J]. *自动化学报*, 2017, 43(9): 1588-1596.
- QIN R, ZENG S, LI J J, et al. Parallel enterprises resource planning based on deep reinforcement learning[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(9): 1588-1596.
- [74] WANG F Y, YANG J, WANG X X, et al. Chat with ChatGPT on industry 5.0: learning and decision-making for intelligent industries[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(4): 831-834.
- [75] 白天翔, 沈震, 刘雅婷, 等. 平行机器: 一种智能机器的管理与控制框架[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(2): 181-191.
- BAI T X, SHEN Z, LIU Y T, et al. Parallel machine: a framework for the control and management for intelligent machines[J]. *Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(2): 181-191.
- [76] 白天翔, 王帅, 沈震, 等. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用[J]. *自动化学报*, 2017, 43(2): 161-175.
- BAI T X, WANG S, SHEN Z, et al. Parallel robotics and parallel unmanned systems: framework, structure, process, platform and applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(2): 161-175.
- [77] 邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 等. 从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念、内涵及体系框架[J]. *自动化学报*, 2015, 41(12): 2003-2016.
- DENG J L, WANG F Y, CHEN Y B, et al. From industries 4.0 to energy 5.0: concept and framework of intelligent energy systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(12): 2003-2016.
- [78] ZHAO C, LV Y S, JIN J C, et al. DeCAST in TransVerse for parallel intelligent transportation systems and smart cities: three decades and beyond[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2022, 14(6): 6-17.
- [79] WANG K F, GOU C, ZHENG N N, et al. Parallel vision for perception and understanding of complex scenes: methods, framework, and perspectives[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2017, 48(3): 299-329.
- [80] LIU Y H, SHEN Y, FAN L L, et al. Parallel radars: from digital twins to digital intelligence for smart radar systems[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(24): 9930.
- [81] WANG F Y, ZHENG N N, CAO D P, et al. Parallel driving in CPSS: a unified approach for transport automation and vehicle intelligence[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(4): 577-587.
- [82] 王飞跃. 平行哲学: 智能产业与智慧经济的本源及其目标[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 308-318.
- WANG F Y. Parallel philosophy: origin and goal of intelligent industries and smart economics[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 308-318.
- [83] 王飞跃. 平行哲学与智能技术: 平行产业与智慧社会的对偶方程与测试基础[J]. *智能科学与技术学报*, 2021, 3(3): 245-255.
- WANG F Y. Parallel philosophy and intelligent technology: dual equations and testing systems for parallel industries and smart societies[J]. *Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, 3(3): 245-255.
- [84] 王飞跃, 王艳芬, 陈蕙竹, 等. 联邦生态: 从联邦数据到联邦智能[J]. *智能科学与技术学报*, 2020, 2(4): 305-313.
- WANG F Y, WANG Y F, CHEN Y Z, et al. Federal ecology: from federal data to federal intelligence[J]. *Journal of Intelligent Science and Technology*, 2020, 2(4): 305-313.

[作者简介]



田永林（1994—），男，中国科学院自动化研究所博士后，主要研究方向为自动驾驶、多模态感知、场景生成。



王晓（1988—），女，博士，安徽大学人工智能学院教授，青岛智能产业研究院院长，主要研究方向为社交网络分析、社交交通、网络运动组织和多智能体建模。



陈苑文（2000—），女，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室硕士生，主要研究方向为机器人交互感知与控制。



缪青海（1979—），男，中国科学院大学人工智能学院副教授，主要研究方向为智能系统、平行智能、机器学习等。



杨静（1998—），女，中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室博士生，主要研究方向为平行制造、社会制造、人工智能和社会物理信息系统。



王子然（1993—），男，博士，普渡大学工程学院助理教授、博士生导师，主要研究方向为数字孪生、智能汽车和自动驾驶。



王雨桐（1994—），女，博士，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员，主要研究方向为计算机视觉、图像异常检测。



王飞跃（1961—），男，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任，主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。