

RAG-PHI: 检索增强生成驱动的平行人与平行智能

田永林^{1,2}, 王兴霞^{1,2,3}, 王雨桐^{1,2}, 王建功⁴, 郭超^{1,2}, 范丽丽⁵, 沈甜雨⁶, 武万森⁷, 张红梅⁸,
朱正秋⁷, 王飞跃^{1,2,3,9}

- (1. 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, 北京 100190;
2. 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;
3. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049;
4. 中国航空系统工程研究所, 北京 100029;
5. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081;
6. 北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029;
7. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073;
8. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006;
9. 澳门科技大学创新工程学院, 澳门 999078)

摘要: 大模型技术的发展为融合生物人、数字人和机器人的平行人系统构建提供了崭新思路和智能基础。但是, 在面临复杂系统的管控任务时, 仍然存在着知识更新受限、专用能力不足以及信息隐私泄露等问题。为此, 提出了检索增强生成驱动的平行人与平行智能框架——RAG-PHI, 打造了开放式数据平台, 为平行人系统接入实时知识、行业知识及私有知识; 构建动态路由检索, 进行上下文抓取和平行人能力重组; 引入上下文提示学习增强思维与行为能力。进一步, 面向平行人的组织管理、培训评估和运营生产模式, 提出了基于RAG-PHI架构的平行人社区、平行人学校和平行人工厂架构, 形成了检索增强生成和基础大模型协同驱动下的平行人生态, 促进智业时代的生产力提升。

关键词: 检索增强生成; 平行人; 平行智能; 大模型

中图分类号: TP39

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.2024015

RAG-PHI: RAG-driven parallel human and parallel intelligence

TIAN Yonglin^{1,2}, WANG Xingxia^{1,2,3}, WANG Yutong^{1,2}, WANG Jiangong⁴, GUO Chao^{1,2}, FAN Lili⁵,
SHEN Tianyu⁶, WU Wansen⁷, ZHANG Hongmei⁸, ZHU Zhengqiu⁷, WANG Fei-Yue^{1,2,3,9}

1. State Key Laboratory for Multi-modal Artificial Intelligence Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. China Institute of Aviation Systems Engineering, Beijing 100029, China
5. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
6. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China
7. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China
8. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China

收稿日期: 2024-02-03; 修回日期: 2024-03-03

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (No.2020B090921003); 广州市智能网联汽车重大科技专项 (No.202007050002); 中国科协青年人才托举工程 (No.YESS20220372); 澳门特别行政区科学技术发展基金资助项目 (No.0093/2023/RIA2)

Foundation Items: The Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province(No.2020B090921003), The Key Research and Development Program of Guangzhou(No.202007050002), The Young Elite Scientists Sponsorship Program of China Association of Science and Technology(No.YESS20220372), The Science and Technology Development Fund of Macau Special Administrative Region(No.0093/2023/RIA2)

9. Faculty of Innovation Engineering, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

Abstract: The advancement of large models offers new perspectives and foundation intelligence for building parallel human ecosystems comprised of biological humans, digital humans, and robotic humans. However, challenges such as time-limited updates to knowledge, inadequate specialized capabilities, and risks of information privacy leakage persist in the management and control of complex systems. To tackle these issues, a retrieval-augmented generation-driven parallel human and parallel intelligence framework (RAG-PHI) is introduced. It proposes to establish an open data platform that facilitates the integration of real-time, industry-specific, and private knowledge into the parallel human system. It develops dynamic routing and retrieval for context capture and the reconfiguration of parallel human capabilities, along with introducing context-aware prompt learning to enhance cognitive and behavioral skills. Furthermore, towards the organization and management, training and evaluation, operation and production of parallel human, the structures of parallel human community, parallel human school, and parallel human factory are proposed by the RAG-PHI architecture. These are designed to foster a parallel human ecosystem powered by RAG and large foundation models, thereby enhancing productivity in the age of intelligent industries.

Key words: retrieval-augmented generation, parallel human, parallel intelligence, large model

0 引言

在大数据、大算力及大模型快速发展的背景下,人工智能正经历着显著的技术突破,不断从专业领域的研究扩展到通用人工智能(artificial general intelligence, AGI)领域,进而转化为促进生产力创新的工具,并在个人生活、工作、出行、教育等多个领域发挥重要作用。其典型代表包括具备通用能力的Transformer架构^[1]、大型语言模型ChatGPT^[2-3]、视觉感知大模型SAM^[4]、图像视频生成大模型SORA^[5-7]等。这些模型在带给人们便利和生产力提升的同时,也促进了对AGI背景下的人类角色和社会分工的思考^[8],对人机协作方式的探索成为研究热点^[9-10]。

对人类活动空间的准确理解是构建人机协作系统的基础之一。在传统视角下,这一空间被认为是包含生存环境、多样性生物及自然规律等的物理维度。随着网络和计算机技术快速发展,人类活动开始拓展到虚拟网络空间,物理信息系统出现并获得大规模应用。在此基础上,为了建模人类社会关系和社会活动对物理信息空间的复杂影响,文献[11-19]引入了社会空间的概念,将人、机器、信息紧密结合与协调,形成了社会物理信息系统,这为分析和预测未来社会分工提供了一个全面的理论框架。在社会物理信息系统(cyber-physical-social systems, CPSS)框架中,未来社会的分工将由生物人类、机器人以及网络空间中的数字人共同形成,进而建立基于平行人的平行社会^[18,20-22]。在这一社会结构

中,各类参与者彼此协作,共同促进社会的全面发展和进步。

目前,在大模型技术的支撑下,数字人和机器人已表现出类似于人类的感知、决策、控制和交互能力。其中,以ChatGPT^[3,23]为代表的聊天机器人已经得到大规模的实际应用且大幅提升了知识工作效率,VoxPoser等^[24]具身智能技术也在机器人领域表现出广泛的应用潜力。然而,大模型技术在变革人们生产和工作方式的同时,也在可靠性、可控性以及实时性等方面面临诸多挑战,单纯依赖大模型技术已经不足以满足多元化社会中平行人系统的建设需求。因此围绕大模型技术,探索能够有效增强大模型能力的方法十分必要。特别是从人类认知机制的角度出发,思考强化通用人工智能的方法。在人类的决策产生过程中,不仅涉及感知推理等过程,还经常依靠记忆机制对事件、规则、外部知识等信息进行记载和回顾,以提升决策过程的合理性和可靠性。大模型技术提供了良好的思维推理能力,但仍缺乏获取即时、专业以及私有信息的能力。为解决这一问题,检索增强生成(retrieval-augmented generation, RAG)技术^[25]应运而生,其通过向大型模型提供额外知识实现对外部信息源的整合,增强模型的决策和创造能力,并提供决策信息支撑的条件,为构建更加智能和通用的平行人提供了新的研究思路和方法基础。

本文首先介绍平行人与平行智能的理论框架背景;然后,给出基于RAG的平行人构建框架;最后,围绕平行人的组织管理、培训评估和运营生

产, 给出平行人社区、平行人学校和平行人工厂的构建方案。

1 平行人与平行智能

平行人是社会物理信息空间中由生物人、数字人和机器人所构成的混合实体^[26], 平行人与平行系统结构如图1所示。值得注意的是, 平行人中的三类人并没有严格的划分界限, 而是各有侧重。其中, 生物人即自然人, 具有思维与行为的综合属性且具有社会性; 数字人作为生物人的思维, 尤其是理性思维的延伸, 主要存在于网络空间中; 机器人作为人类行动能力的延伸, 主要存在于物理空间中。在数字人和机器人的发展历程中, 数字人从早期依赖语法和规则的聊天机器人(如用于辅助心理治疗的聊天数字人 Eliza 和 3 次问鼎“勒布纳人工智能奖”的 ALICE 聊天机器人等)不断进化到基于深度学习技术的私人语音助手(如苹果公司的 Siri、亚马逊公司的 Alexa、谷歌公司的 Google Assistant、微软公司的 Cortana), 目前进入以大模型为基础的通用性数字人时代(如 OpenAI 公司开发的 ChatGPT^[3,23]、百度公司开发的文心一言以及谷歌公司开发的 Gemini^[27]等)。机器人的发展过程是从早期的机械化(如 1910 年, 德国 Friedrich Kaufman 制造的由发条驱动的吹喇叭的士兵机器人)到具备传感、通信和信息处理能力的自动化机器人(如早稻田大学的 WABOT-1 机器人、本田公司生产的 ASIMO 机器人、法国 Aldebaran Robotics 公司生产的 NAO 机器人、美国波士顿动力公司生产的 Petman 机器人等), 再到深度学习驱动的智能机器人(如香港汉森机器人公司生产的 Sophia 机器人、优必选生产的 Walker 服务机器人), 目前进入大模型技术驱动的新一代智能机器人阶段(如斯坦福大学的 VoxPoser^[28]和 Mobile ALOHO^[29]机器人系统)。典型的数字人和机器人案例如图2所示。

平行人基于平行智能的 ACP (artificial systems, computational experiments, parallel execution) 理论^[30-33]构建了生物人、数字人与机器人的协同组织与管控体系, 其集成在 CPSS 之中, 并依托于人工系统和实际系统所形成的虚实互动空间。为了形成三类人之间的高效协作并提升解决复杂问题的能力, 平行人系统利用虚实平行系统进行学习培训, 使其掌握对实际场景和问题的应对能力。在此基础上, 利用大量的人工场景在平行人系统中进行实验与评

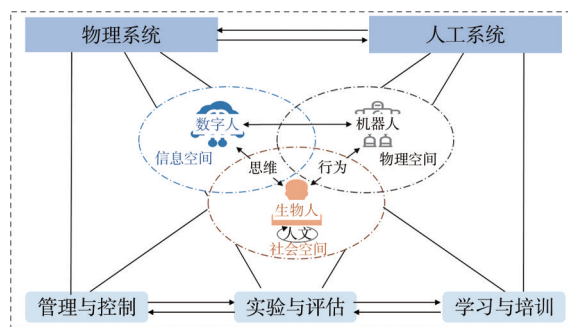


图1 平行人与平行系统结构

估, 一方面形成针对具体问题的解决思路, 另一方面建立对平行人能力的认知。最后, 利用虚实平行执行在实际系统对平行人行为进行引导, 实现对复杂系统的高效精准管控。随着平行人系统整体智能水平的提升, 数字人以及机器人在社会分工中所占据的比例将日益提升, 从而形成数字人承担绝大多数工作(如80%以上)、机器人完成部分工作(如15%以下)、生物人负责少部分工作(如5%以下)的状态。平行人的工作模式也将在大多数情况下呈现为由数字人和机器人主导的自主模式, 并在遇到异常问题时, 切换到人类远程或少量参与的平行模式, 如果问题紧急或难以解决, 则进入以生物人为主的应急模式, 使系统运行回归正常^[34]。

2 基于RAG的开放式平行人构建系统

综合考虑基础大模型的通用能力和人类生活的个性化和多样化需求, 本文旨在构建基于RAG的开放式平行人架构 RAG-PHI (retrieval-augmented generation-driven parallel human and parallel intelligence framework), 通过融合丰富数据库和大模型底座, 建立不同类型数字人和机器人的快速、低成本构建方案。基于RAG的平行人架构如图3所示, 包括开放式知识库构建、动态检索与能力重组, 以及思维与行为能力增强3个部分。

2.1 开放式知识库构建

开放式知识库将多种类型的信息组织成知识库的形式, 并以插件的方式接入平行人系统中, 为数字人和机器人构建多样输入来源。大模型的构建通常利用公开的多样化数据, 其丰富和海量的语料使得大模型本身具备了较为深厚的常识储备以及对知识进行表征和推理的能力。然而, 由于大模型的训练成本较高, 仅仅依靠大模型难以高效地对新知识进行持续学习。大模型的通用能力虽然赋予了其对

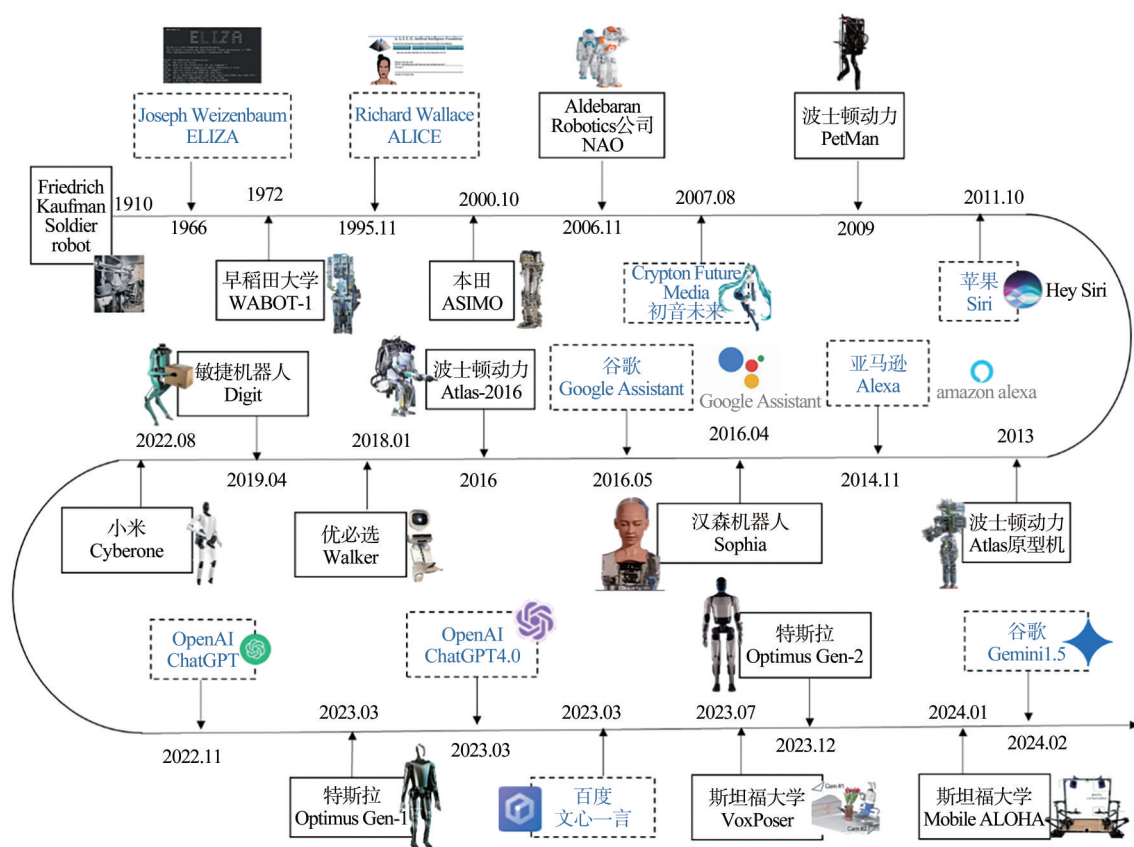


图2 典型的数字人和机器人案例

各个专用领域的一定认识，然而仍缺少专业级的水准。出于对安全和隐私保护的考虑，大模型难以接触一些私有的数据资源。而RAG能够有效地解决上述问题，从而实现对大模型的能力增强。

本文从RAG增强大模型能力的角度，将外在知识库归纳为三大类实时知识、行业知识和私有知识。实时知识旨在为平行人提供超出大模型训练时限之外的知识库，包括新的文字作品（如书籍、小说、文章等）、影视作品（如电影、电视连续剧等）、最新事件和政策等。实时知识强调了“新”，使基于大模型的平行人能够获取对最新内容的接入能力。行业知识包括行业标准规范、行业术语、行业工具说明、行业案例等，通过聚集特定任务和特定领域的知识，为大模型提供能力增强，使其在发挥通用能力的同时，展示出专家级的行业洞察和理解力以及对特定工具的操控能力。行业知识重点强调“专”，针对领域“小问题”，通过高质量知识向量库赋予大模型系统、快速解决问题的能力。私有知识库在数据隐私和安全敏感场景中十分常见，如企业数据、个人数据以及政务数据等。在平行人的构建过

程中，如何使数字人及机器人能在学习到个性化的企业或个人思维与行为模式的同时，避免数据隐私泄露带来的风险，是基于通用大模型平台的平行人构建中所面临的一个难题。RAG技术的出现为解决这一问题提供了有效手段，其避免了大模型重训练或微调所带来的算力资源负担，使在本地部署模型并基于私有知识库打造隐私安全下的平行人方案成为可能。私有知识强调了“秘”这一特点，通过将数据控制在本地，从而提高对数据隐私的可控性。

2.2 动态检索与能力重组

开放式知识库在经过分段和嵌入编码后，便可形成用于返回针对特定查询的相关检索信息的知识向量库，这有效改善了基于大模型的平行人知识更新和知识增强问题。考虑到单一向量库的资料局限性，在解决实际问题时，往往需要联合多个不同类型的向量库。因此，如何构建向量库的选择和检索机制成为一个关键问题。本节将介绍基于动态路由的向量库选择方案以及面向特定查询的混合检索机制。前者将形成知识的自动选择方案，后者则为灵活的数字人及机器人能力和性格构建提供了基础。

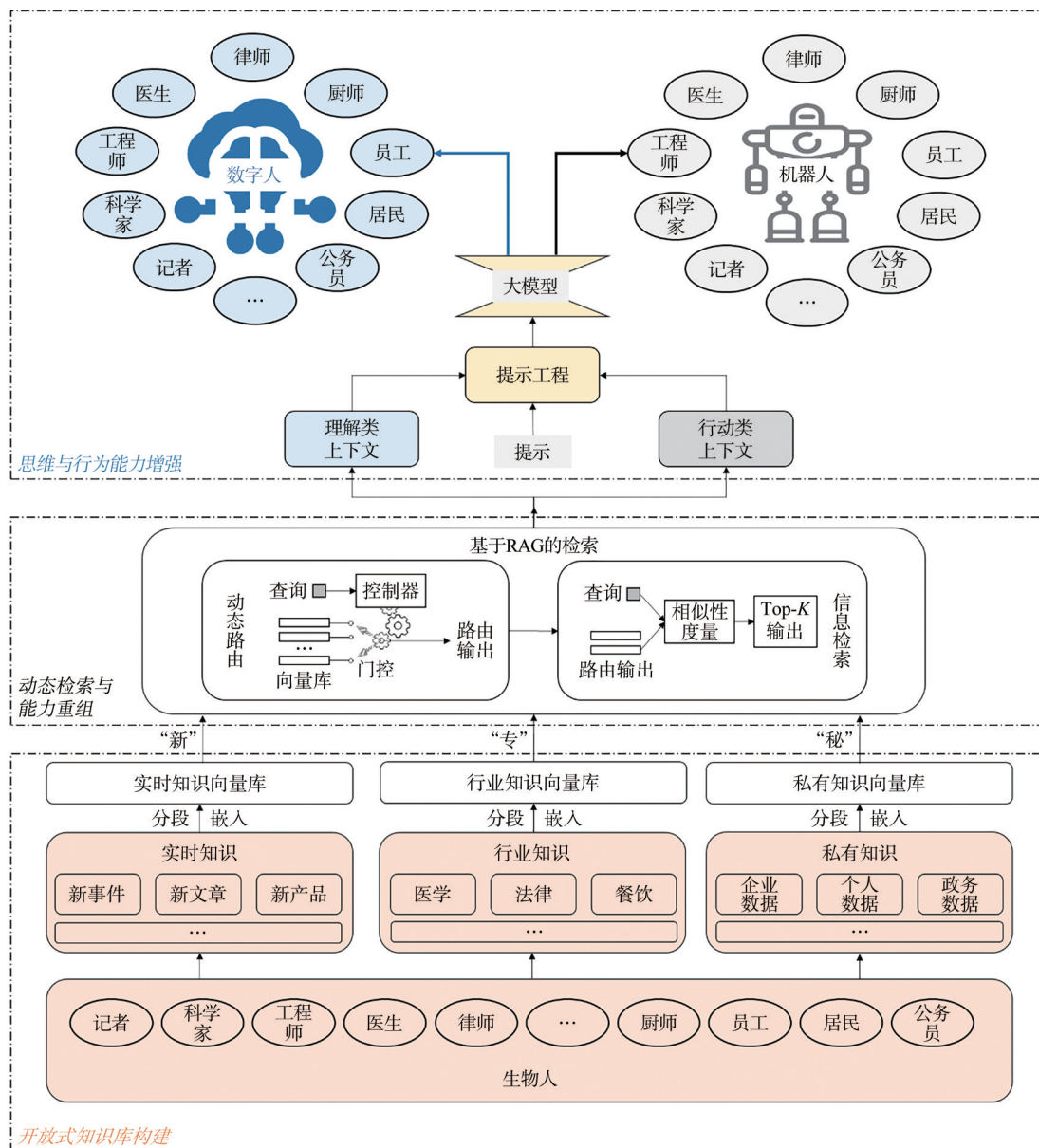


图3 基于RAG的平行人架构

动态路由机制适用于具有较大数量的向量库场景，此时基于全部分析的检索会导致信息稀疏性问题，即相关但非关键数据会占据检索结果的主要比重。为此，先从向量库层面对相关内容进行选择，从而仅添加必要的信息，以提升数据的检索效率和检索结果的价值。动态路由机制的结构组成主要包括路由控制器和门控单元，其中路由控制器以查询输入为条件，生成用于多个向量库选择的决策指令；门控单元通过访问控制，将被选择的向量库接入可用于后续检索环节的数据库中。

混合检索机制旨在从多个与查询相关的高价值数据库中获取局部上下文信息，以产生用于完成特

定任务的前提输入和证据支撑。混合检索利用相似性度量从前期动态路由器接入的向量数据库中匹配相关的信息片段，并通过排序和筛选机制产生最为相关的若干上下文。这为数字人以及机器人提供了一种可定制的能力重组方案。在向量数据库的支撑下，特定领域的知识可以实现一定程度的解耦，无论是人的思维模式、行为习惯，还是具体行业的知识，在基于RAG-PHI框架里，都会借由个人数据、行业数据等载体被量化和存储为灵活统一的知识库。在此基础上，在生物人中被深度耦合的个人性格和技能背景等因素成为可自由分解和重组的选项，并在混合检索后，实现能力的重组。

2.3 思维与行为能力增强

对开放多元知识库进行混合型检索后所得到的上下文, 能够实现对既有大模型能力的快速增强。根据上下文在平行人系统中的作用, 可以将上下文分为理解型上下文和行动类上下文, 前者侧重于对信息的处理, 主要用于数字人推理能力的增强; 后者侧重于对实体工具的操控以及动作产生, 主要用于机器人行为能力增强。

为了将上下文信息输入大模型中, 同时保障原有任务的顺利完成, RAG-PHI 架构利用基于提示工程的大模型引导技巧, 将用户原有提示与上下文信息进行融合, 从而得到增强后的文本或多模态输入。提示可以综合考虑实际场景和大模型本身特点进行灵活设计, 以促进大模型对当前任务的理解。此外, 在需要进行决策和行动的应用场景中, 考虑到对任务逻辑的直接描述存在一定困难, 因此可以借鉴案例教学的思想来检索与任务相关的案例信息, 从而建立上下文学习机制。

3 平行人社区: 基于联邦智能的 RAG-PHI 组织管理技术

平行人社区旨在构建一个能够有效组织松散孤立资源和管理多样平行人的联邦生态, 其一方面关注如何借助社区资源实现平行人的构建, 另一方面关注如何在构建好的平行人的基础上, 进行有效的平行人组织与管理。平行人社区参考架构如图4所示。

在松散资源组织方面, 平行人社区主要利用联

邦智能技术^[35-38]实现跨中心、跨节点的隐私安全的数据共享, 为 RAG-PHI 的构建提供丰富的资源。联邦智能技术包括联邦数据、联邦控制、联邦管理和联邦服务4个功能模块, 其中联邦数据模块主要致力于在不同数据节点间建立数据的标准化接入功能, 通过统一数据分段和嵌入编码过程, 提升知识库的规范程度, 为知识的融合提供格式基础; 联邦控制模块为 RAG-PHI 构建过程中的知识库接入、通信、路由等环节提供技术支撑; 联邦管理模块主要针对平行人的具体构建需求(如平行人的类型、业务能力、应用场景)来组织知识库、模型及计算节点, 进行资源分配; 联邦服务模块将平行人应用到不同领域, 通过需求分析, 整合拟定平行人的构建方向和目标, 并借助各类 API 的集成形成服务平台, 为用户和场景赋能。

在平行人组织管理方面, 平行人社区主要基于可信分布式自治组织(true-distributed autonomous organization, TAO)^[37,39-41]构建社区决策和协作生态。组织管理的目标在于将民主决策和价值保障引入平行人应用中。组织管理手段主要包括联邦共识、联邦激励、联邦合约和联邦安全, 其中联邦共识通过民主投票来对平行人的应用场景、承接业务等进行规划, 在社区内形成一致意见; 联邦激励则将平行人产生的收益与社区贡献度进行绑定, 从而实现价值共享和利益均衡; 联邦合约旨在通过智能合约建立社区管理流程的自动化; 联邦安全则通过区块链和加密等手段, 保障信息的存储和传输安全。

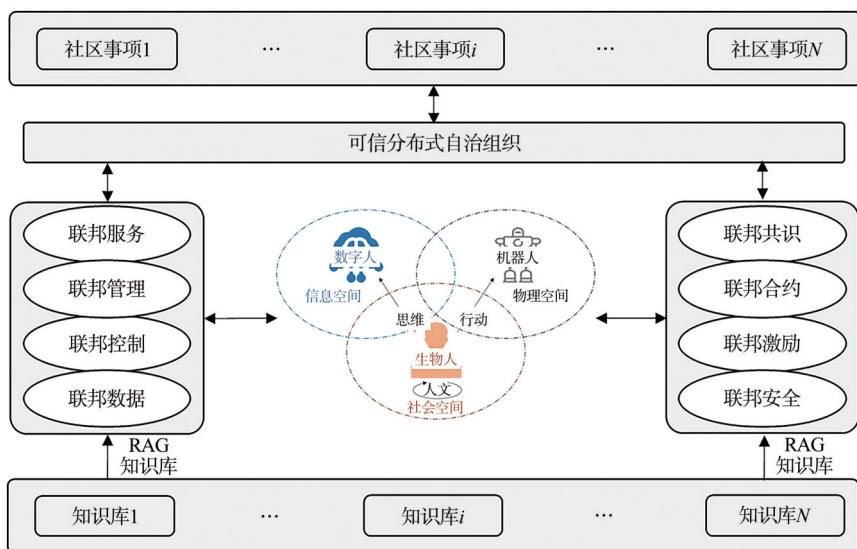


图4 平行人社区参考架构

4 平行人学校：基于场景工程的RAG-PHI训练评估技术

仅基于RAG-PHI体系构建的平行人往往难以应对复杂多样的实际场景。一方面是单组平行人的能力依旧存在不足；另一方面，不同类型的平行人之间的交互协作能力无法保障。为此，本文提出了基于场景工程的RAG-PHI训练评估框架，通过多样化场景的生成，为平行人的能力评估提供测试场，并基于测试反馈对平行人的能力进行针对性训练。平行人学校参考架构如图5所示。

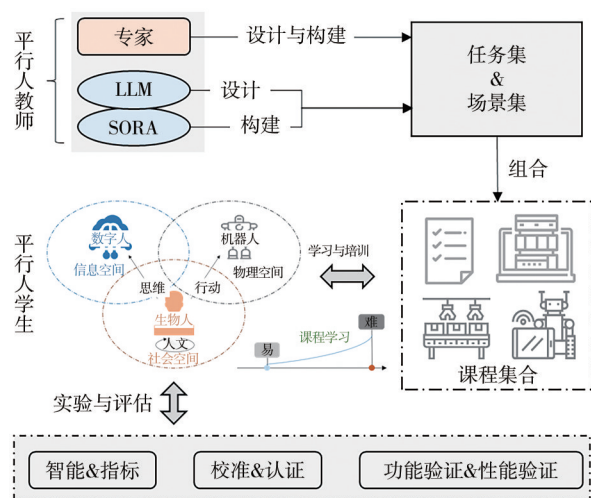


图5 平行人学校参考架构

针对RAG-PHI评估的场景工程，以平行人的具体智能性要求和应用指标为出发点，借助Unity等计算机图形学技术、SORA等^[5-7]人工智能生成内容技术以及实体场景构建技术，为平行人系统建立丰富测试场景，对功能和性能进行验证。针对需要与人类价值或自然人能力进行对齐的地方，场景工程将对平行人系统实施校准并在通过校准后进行认证，从而打造可信、可用、可靠的平行人工智能系统^[42-43]。

对于能力提升环节，场景工程可提供持续学习机制，遵循人类学习的一般性经验，通过时空长尺度范围的训练场景设计来营造课程学习机制^[44]，以循序渐进地引导平行人系统的能力构建。同时，为了提高平行人系统的泛化能力，采用虚实互动的方式，利用实际场景数据，通过场景增强技术扩充场景规模，并基于平行训练和平行学习方法提高训练的效率和模型通用性。

5 平行人工厂：基于面向人类操作系统的RAG-PHI运营生产技术

为了适应企业和工厂日益增长的复杂需求，相关研究人员提出了工业5.0理论^[45-47]，该理论利用各种先进技术（如大数据、工业物联网等）建立更加弹性和面向人类的工业发展新模式^[48-50]。但是，日益增长的劳动成本、复杂多变的工业定制化需求、稀缺的专业人士、私有数据的安全性等制约了工业5.0的发展。在此背景下，本文提出了基于RAG-PHI运营生产技术的平行人工厂，强调如何实现基于平行人的智能工业协作体系，推动复杂工业系统的自动化、数字化、智能化管理进程。平行人工厂参考架构如图6所示。

针对智慧工厂在运营过程中的生产质量管理、设备运维、生产监控系统等任务特点，平行人工厂采用以下工作原理。

首先，生物人提出需求并发送给基于智能体的数字人助理；然后，基于RAG-PHI，数字人自主地生成相应的解决方案，并通过内部通信网络发送给机器人；在接收到来自数字人的指令后，机器人在物理空间中完成生物人提出的需求。在整个任务的实现过程中，存在自主模式、平行模式、专家模式3种机制。在约85%的情况下，平行人工厂以自主模式运行，此时数字人的主要任务为实时监控系统的运行状态；在约15%的情况下，系统会触发平行模式，此时数字人与机器人将一起解决出现的异常情况；在约5%的情况下，专家模式被触发，生物人将参与解决异常情况。

6 基于RAG-PHI的元餐厅系统Metaurant

RAG为多样化能力构建提供了基础，有助于实现个性化服务。本节以智慧餐饮为例，介绍基于RAG-PHI的元餐厅系统Metaurant。该系统主要包括3个部分：生物人厨师、数字人厨师和机器人厨师。其中，生物人厨师通过汇集不同地域和文化的典型菜肴为元餐厅系统提供知识库；数字人厨师利用菜谱数据库知识与大模型，实现对用户需求的响应以及新菜谱生成；在此基础上，机器人厨师通过操纵各类烹饪器具，自动完成菜品制作。在元餐厅系统中，可以通过替换不同的菜品数据库实现对烹饪风格的转换，同时还可以利用大模型的理解和生成能力，实现对用户饮食营养的分析，并通过科学

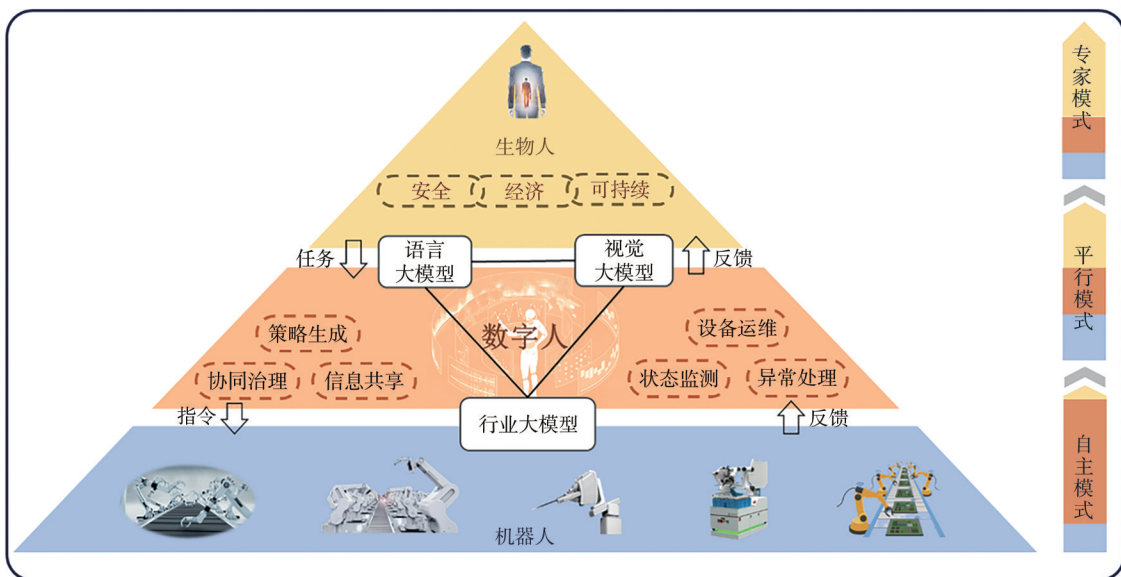


图6 平行工厂参考框架

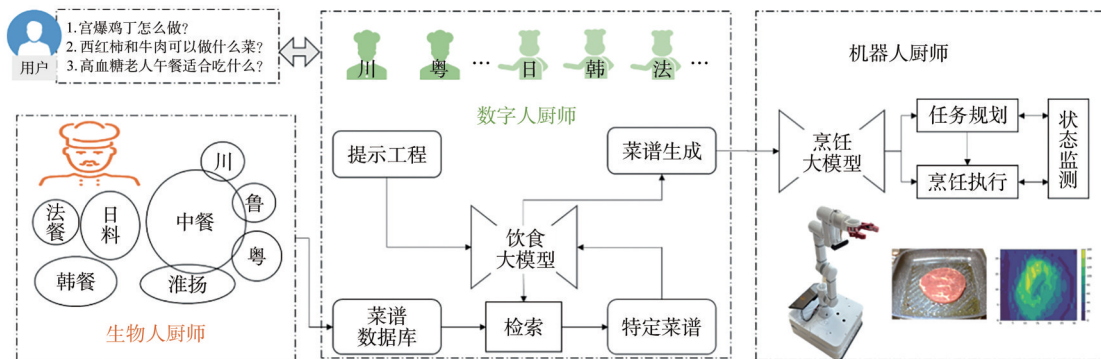


图7 基于RAG-PHI的元餐厅架构

的营养搭配促进健康饮食理念的实施。基于 RAG-PHI 的元餐厅架构如图 7 所示。

7 结束语

随着通用人工智能与具身智能技术的发展，集成生物人、数字人与机器人的平行人系统有望逐步深入人们的工作和日常生活，开启人机协同工作的新模式。在此背景下，本文总结了大模型在平行人构建过程存在的知识欠缺问题，并从实时知识、行业知识和私有知识 3 个方面介绍了检索增强生成方法在辅助大模型进行思维与行动方面的作用。在此基础上，提出了检索增强生成驱动下的平行人构建范式 RAG-PHI，并围绕平行人的组织管理、培训评估以及运行生产提出了平行人社区、平行人学校和平行人工厂框架。旨在通过上述设计，为平行人的大规模应用提供架构支撑，利用平行智能加速智

业时代的生产力提升。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] WU T Y, HE S Z, LIU J P, et al. A brief overview of ChatGPT: the history, status quo and potential future development[J]. CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(5): 1122-1136.
- [3] WANG F Y, MIAO Q H, LI X, et al. What does ChatGPT say: the DAO from algorithmic intelligence to linguistic intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 575-579.
- [4] KIRILLOV A, MINTUN E, RAVI N, et al. Segment anything [EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2304.02643.
- [5] YU H, LIU X, TIAN Y, et al. Sora-based parallel vision for smart sensing of intelligent vehicles: from foundation models to foundation intelligence[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(2): 3030-3033.
- [6] WANG F Y, MIAO Q, LI L, et al. When does Sora show: the beginning of TAO to imaginative intelligence and scenarios engineering[J]. IEEE/

- CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(4): 809-815.
- [7] LI X, MIAO Q, LI L, et al. Sora for scenarios engineering of intelligent vehicles: V&V, C&C, and beyonds[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(2): 3025-3029.
 - [8] 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.
 - [9] SHEN Y L, SONG K T, TAN X, et al. HuggingGPT: solving AI tasks with ChatGPT and its friends in hugging face[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2303.17580.
 - [10] TIAN Y L, LI X, ZHANG H, et al. VistaGPT: generative parallel transformers for vehicles with intelligent systems for transport automation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(9): 4198-4207.
 - [11] WANG F Y. CAST Lab: a cyber-social-physical approach for traffic control and transportation management[J]. Intelligent Control and Systems Engineering Center in Chinese Academy of Sciences, 1999.
 - [12] WANG F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85-88.
 - [13] ZHANG J J, WANG F Y, WANG X, et al. Cyber-physical-social systems: the state of the art and perspectives[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2018, 5(3): 829-840.
 - [14] 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.
 - [15] YANG J, WANG X, TIAN Y L, et al. Parallel intelligence in CPSSs: being, becoming, and believing[J]. IEEE Intelligent Systems, 2023, 38(6): 75-80.
 - [16] WANG F Y. Forward to the past: CASTLab's cyber-social-physical approach for ITS in 1999: history and perspectives[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15(4): 171-175.
 - [17] 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.
 - [18] 秦蕊, 梁小龙, 李娟娟, 等. 平行科研院所: 从数字化转型到智能化变革[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 212-221.
QIN R, LIANG X L, LI J J, et al. Parallel scientific research institutes: from digital transformation to intelligent revolution[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 212-221.
 - [19] 田永林, 陈苑文, 杨静, 等. 元宇宙与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 智能科学与技术学报, 2023(1): 121-132.
TIAN Y L, CHEN Y W, YANG J, et al. Metaverses and parallel systems: the state of the art, comparisons and prospects[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023(1): 121-132.
 - [20] 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, 2023, 53(4): 2138-2147.
 - [21] WANG Y T, WANG X, WANG X X, et al. The ChatGPT after: building knowledge factories for knowledge workers with knowledge automation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(11): 2041-2044.
 - [22] 卢经纬, 郭超, 戴星原, 等. 问答ChatGPT之后: 超大预训练模型的机遇和挑战[J]. 自动化学报, 2023, 49(4): 705-717.
LU J W, GUO C, DAI X Y, et al. The ChatGPT after: opportunities and challenges of very large scale pre-trained models[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(4): 705-717.
 - [23] 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.
 - [24] HUANG W, WANG C, ZHANG R, et al. VoxPoser: composable 3D value maps for robotic manipulation with language models [C]// Proceedings of PMLR. New York: PMLR, 2023: 540-562.
 - [25] LEWIS P, PEREZ E, PIKTUS A, et al. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2020: 9459-9474.
 - [26] 王飞跃, 王雨桐. 数字科学家与平行科学: AI4S和S4AI的本源与目标[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(1): 27-33.
WANG F Y, WANG Y T. Digital scientists and parallel sciences: the origin and goal of AI for Science and Science for AI[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(1): 27-33.
 - [27] TEAM G, ANIL R, BORGEAUD S, et al. Gemini: a family of highly capable multimodal models[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2312.11805.
 - [28] HUANG W L, WANG C, ZHANG R H, et al. VoxPoser: composable 3D value maps for robotic manipulation with language models[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2307.05973.
 - [29] FU Z P, ZHAO T Z, FINN C. Mobile ALOHA: learning bimanual mobile manipulation with low-cost whole-body teleoperation[EB]. arXiv preprint, 2024, arXiv: 2401.02117.
 - [30] WANG F Y. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach[J]. IEEE Intelligent Systems, 2007, 22(5): 65-67.
 - [31] 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.
 - [32] WANG X X, CHENG X, LU J W, et al. Fault diagnosis for sucker rod pumping systems: a parallel system approach[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2022, 6: 743-747.
 - [33] 田永林, 陈苑文, 杨静, 等. 元宇宙与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(1): 121-132.
TIAN Y L, CHEN Y W, YANG J, et al. Metaverses and parallel systems: the state of the art, comparisons and prospects[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(1): 121-132.
 - [34] YANG J, WANG Y T, WANG X X, et al. Generative AI empowering parallel manufacturing: building a "6S" collaborative production ecology for manufacturing 5.0[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024(99): 1-15.
 - [35] 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): 305-311.
WANG F Y, WANG Y F, CHEN Y Z, et al. Federated ecology: from federated data to federated intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(4): 305-311.
 - [36] 朱静, 王飞跃, 王戈, 等. 联邦控制: 面向信息安全和权益保护的分布式控制方法[J]. 自动化学报, 2021, 47(8): 1912-1920.
ZHU J, WANG F Y, WANG G, et al. Federated control: a distributed control approach towards information security and rights protection[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(8): 1912-1920.
 - [37] 康孟珍, 王秀娟, 李冬, 等. 基于联邦学习的分布式农业组织[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(2): 288-297.
KANG M Z, WANG X J, LI D, et al. Distributed agricultural organization based on federated learning[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(2): 288-297.
 - [38] TIAN Y L, WANG J G, WANG Y T, et al. Federated vehicular transformers and their federations: privacy-preserving computing and coop-

eration for autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 7(3): 456-465.

- [39] LI J J, LIANG X L, QIN R, et al. From DAO to TAO: finding the essence of decentralization[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 4283-4288.
- [40] LIANG X L, LI J J, QIN R, et al. TAO-based data governance in intelligent transportation systems[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 5306-5311.
- [41] LI J J, WANG F Y. The TAO of blockchain intelligence for intelligent web 3.0[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(12): 2183-2186.
- [42] LI X, YE P J, LI J J, et al. From features engineering to scenarios engineering for trustworthy AI: I&I, C&C, and V&V[J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(4): 18-26.
- [43] LI X, TIAN Y L, YE P J, et al. A novel scenarios engineering methodology for foundation models in metaverse[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(4): 2148-2159.
- [44] WANG X, CHEN Y D, ZHU W W. A survey on curriculum learning[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(9): 4555-4576.
- [45] WANG X X, YANG J, WANG Y T, et al. Steps toward industry 5.0: building “6S” parallel industries with cyber-physical-social intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(8): 1692-1703.
- [46] WANG F Y. New control paradigm for industry 5.0: from big models to foundation control and management[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(8): 1643-1646.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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, 2023, 53(4): 2188-2199.
- [50] 彭绍明, 熊刚, 沈震, 等. 平行车间调度模型构建和系统设计[J]. 智能科学与技术学报, 2023(2): 254-266.
- PENG S M, XIONG G, SHEN Z, et al. Parallel workshop scheduling model and system design[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023(2): 254-266.

[作者简介]



田永林 (1994-), 男, 中国科学院自动化研究所博士后, 主要研究方向为平行系统、自动驾驶、场景工程。



王兴霞 (1996-), 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智能、平行油田、故障诊断。



王雨桐 (1994-), 女, 博士, 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助理研究员, 主要研究方向为计算机视觉、图像异常检测。



王建功 (1996-), 男, 博士, 中国航空系统工程研究所工程师, 主要研究方向为航空智能、大模型、计算机视觉。



郭超 (1992-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为机器创作、人机协作、智能机器人系统、深度学习、强化学习。



范丽丽 (1991-), 女, 博士, 北京理工大学信息与电子学院博士后, 主要研究方向为计算机视觉、跨模态感知与理解、类脑认知与决策。



沈甜雨 (1996-), 女, 博士, 北京化工大学信息科学与技术学院副教授, 主要研究方向为机器视觉、智能感知与智能机器人系统。



武万森 (1996-), 男, 国防科技大学系统工程学院博士生, 主要研究方向为多模态深度学习、大语言模型、平行智能。



朱正秋 (1994-), 男, 博士, 国防科技大学系统工程学院讲师, 主要研究方向为群智计算、群体智能、对话式AI智能体。



张红梅 (1987-), 女, 就职于北方自动控制技术研究所, 主要研究方向为智能控制、平行智能、大模型技术。



王飞跃 (1961-), 男, 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主任、澳门科技大学特聘教授, 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。