

• 研究进展 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0061

元宇宙空间的新型智能服务业态： 经济规律、运作模式与交付方法

段刚¹ 樊宸² 王爽^{2*} 高庆³

1. 荣科科技股份有限公司, 沈阳 110000

2. 东南大学 计算机科学与工程学院, 南京 211189

3. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191

[摘要] 元宇宙作为虚实融合的新一代数字生态,正重塑智能服务业态。本文聚焦其经济规律、运作模式与交付方法,揭示元宇宙服务经济遵循“认知价值主导服务价值”规律,用户价值认同源于现实体验、虚拟精神价值及虚实联动融合认同。运作模式上,构建具备自主进化能力的服务架构,通过服务需求关联关系挖掘与虚实空间决策调度闭环,形成服务价值引导架构重塑、服务协同促进价值实现的闭环机制。交付智能方面,提出服务资源族群网络智能调度与分层协同博弈决策,解决数据感知、资源匹配及鲁棒决策等难题,构建弹性可进化、可靠低时延的智能服务网络,为元宇宙智能服务高效运行与资源调度提供理论支撑。

[关键词] 元宇宙;价值规律;服务架构;资源调度;博弈模型

1 虚实融合下的新价值规律

元宇宙作为虚实融合的新一代数字生态,正以前所未有的深度与广度重塑服务网络的运行模式与安全范式。在这一高度沉浸化与智能化的环境中,各类服务资源以动态、多模态的虚拟形态存在,并通过实时传感与通信机制与物理实体深度联动,构建出虚实交融的复杂服务系统。作为一种虚拟化的数字连续空间,元宇宙融合了人工智能^[1-3]、数字孪生^[4,5]、区块链^[3]及虚拟现实等多种软硬件技术,具备高度沉浸式体验、虚实开放交互与数字化身份等显著特征。它不仅代表了多项前沿技术的集成创新,更是推动现代服务业向数字化、专业化、智能化和生态化转型的重要技术载体。

元宇宙空间的服务经济规律与传统互联网的经济规律之间有着较大的差异。传统的互联网主要围绕着“互联网+”平台,通过将传统产业与互联网行业靠拢和融合,从而实现经济发展的新增长点,在我国经济由高

速增长向高质量发展的背景下,互联网经济更是为实体产业的发展与转型提供了强大动力^[6]。而在元宇宙空间中,服务经济规律主要体现为围绕数字服务的创造、交换与消费等一系列在数字环境中进行的经济活动,其价值属性不再依赖于实体产业或商品,而是取决于用户对某种虚拟产品的认同程度。以广受美国用户欢迎的游戏《第二人生》^[7]为例,玩家利用游戏内提供的工具和材料自主创造内容,并在虚拟世界中完成交易与销售,既为典型的元宇宙经济行为,也构成该领域研究的核心对象。“认知价值主导服务价值”是当前元宇宙服务经济中的一个普遍现象与重要趋势,具体而言,这是指元宇宙服务的价值不由传统物理属性(如实体商品的材料、功能)或成本决定,而由用户主观认知与心理认同主导。即用户对虚拟服务的“认知上的价值”(如稀缺性、品牌认同、情感共鸣、社交属性)成为定价与价值交换的核心依据,而非服务本身的技术成本或实体功能。

收稿日期:2025-09-17; 修回日期:2025-12-04

* 通信作者, Email: shuangwang@seu.edu.cn

本文受到国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFF0902800)的资助。

引用格式: 段刚,樊宸,王爽,等. 元宇宙空间的新型智能服务业态:经济规律、运作模式与交付方法. 中国科学基金,2026,40(1):178-188.

Duan G, Fan C, Wang S, et al. New intelligent service format in the metaverse space: Economic law, operation mode and delivery method. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2026, 40(1): 178-188. (in Chinese)

在原有的经济规律下,服务价值提供服务的基础功能,但在新的经济规律下,用户是否认同其价值、愿意为其付费,取决于用户的认知价值,即服务价值的大小转由认知价值决定,而非技术成本或功能本身。用户对服务的价值认同是用户认知价值形成的前提与过程,最终形成的认知价值是用户的价值认同的结果与体现。

这种“认知价值主导”规律可视为传统“感知价值”理论在数字经济与虚拟空间情境中的拓展。在消费者感知价值四维模型中,消费者感知价值是对价格、质量、情感与社会意义的综合权衡,同时在消费价值理论中进一步提出“功能、社会、情感、认知、条件”五维消费价值模型,其中“认知价值”体现了消费者对新奇性、认知满足与意义认同的追求。由此可见,虚拟商品或数字服务的价值不仅来源于功能效用与稀缺性,更依赖用户对其象征意义与社会认同的认知结构。在元宇宙与虚拟社交环境中,用户的支付决策与消费行为往往受到符号化、情境化的认知评价影响,这种价值判断与传统物理商品的边际效用规律不同,更接近于注意力经济与体验经济框架。而在注意力经济理论中,人们的注意力正成为稀缺资源,因此个体的认知投入可直接转化为经济价值。在本文框架下,“认知价值”指用户基于知识、意义建构与符号认同而形成的价值判断,其核心是对虚拟服务或数字资产的概念性理解与心理归属。不同于传统的“感知价值”与“体验价值”,认知价值强调用户对服务内在逻辑、象征意义与文化语境的认知加工。从层次上看,感知价值属于感官与情绪层的判断,体验价值位于交互与情境层,而认知价值则处于意义与信念层,与感知价值和体验价值相比,认知价值的层次更加高级与抽象,体现了用户在虚拟空间中对符号、身份与社会关系等概念的理解与建构。所以,“认知价值主导”规律的理论基础,可视为“感知价值理论—注意力经济理论—数字商品定价理论”的综合延伸。在可量化层面,认知价值可通过以下三类指标进行判定:(1)认知投入度。用户在虚拟环境中形成知识、理解机制的深度,可通过停留时长、学习行为、内容创作参与率等行为指标衡量。(2)符号认同度。用户对虚拟物品或身份的文化、社交或品牌认同强度,可通过情感倾向分析、虚拟资产保有率、社交互动频次等指标反映。(3)意义匹配度。用户主观意义构建与虚拟服务所传递符号体系的一致性,可通过语义分析建模进行量化。

在游戏平台Roblox^[8]中,数字创作所使用的素材多为低分辨率像素,不同产品在物理属性上差异甚微,但其价格却因稀缺性、品牌认同等因素存在显著差异,并获得了用户的高度“价值认同”。同样地,在教育领域,

元宇宙空间的利用也改变了传统的教学方式,能够为学生提供更沉浸式、互动性强的学习体验。这种创新模式不仅能提升课堂参与度,更有助于知识吸收。在元宇宙空间中,学生们可以更加关注自己认同或感兴趣的教育内容与学习体验,从而更加符合自身的教育目标。因此,元宇宙下的教育模式更有利于实现学生个性化的培养模式,从而达到高质量的实施和有效的教学^[9]。相似的情况也发生在医疗教育领域,现有的研究^[10]表明,在医学院采用了元宇宙的条件下,工作者们的意图更会受到感知价值及享乐动机的影响,凸显了元宇宙技术在重塑知识流程方面的变革潜力。这种认同来源于三个层面:现实世界的实体体验认同、虚拟世界的精神价值认同,以及虚实联动的融合认同。在实体体验认同方面,元宇宙虽为虚拟世界,但需依托物理世界的感官交互技术实现沉浸式交互,从而模拟现实交互的逻辑与物理规则。用户对这种“拟真体验”的认同,本质上是对现实世界认知的延伸,这种现实体验的真实性构成了用户建立信任与认同的基础。在精神价值认同方面,元宇宙的核心是“数字化身份与自主创造”,用户通过虚拟角色实现现实中无法达成的目标,这种精神满足感构成了独立于现实的价值维度。在虚实联动的融合认同方面,元宇宙通过数字孪生、区块链等技术实现“虚实资源的双向映射”,用户对服务的认同需同时依赖“虚拟效率提升”与“现实价值落地”,两者的联动形成“1+1>2”的融合认同。例如,社交网络中的“大V”枢纽价值,既源于虚拟社交影响力,也依赖其对现实商品/服务的导流能力(如图1所示),两者的联动形成“1+1>2”的融合认同。对元宇宙用户而言,其所在的虚实融合关系网络与服务资源网络,凭借特定的拓扑结构,尤其适合表征此类认同机制,如图1所示。

由于认知价值依赖用户主观认同,而认同会随场景、群体、时间动态变化,因此在这种新型的价值规律下,一旦出现热点事件导致用户对于某一资源的认同度发生激增,传统的固定架构便无法快速响应需求波动。为了解决用户认知的高度动态性与传统静态架构的刚性约束之间的冲突,需构建一种能够实现自主进化的架构,通过服务需求关联关系挖掘和虚实调度闭环,使架构能主动适配认知价值的变化。

2 有生命力的运作模式:服务架构的自主进化

服务运作模式致力于提升服务价值、服务效率与服务体验,涵盖服务交互、交易、交付与治理等多个方面。元宇宙的服务架构是为支撑一个持久化、沉浸式、可互操作、由用户生成内容驱动的虚拟共享空间而设计的一

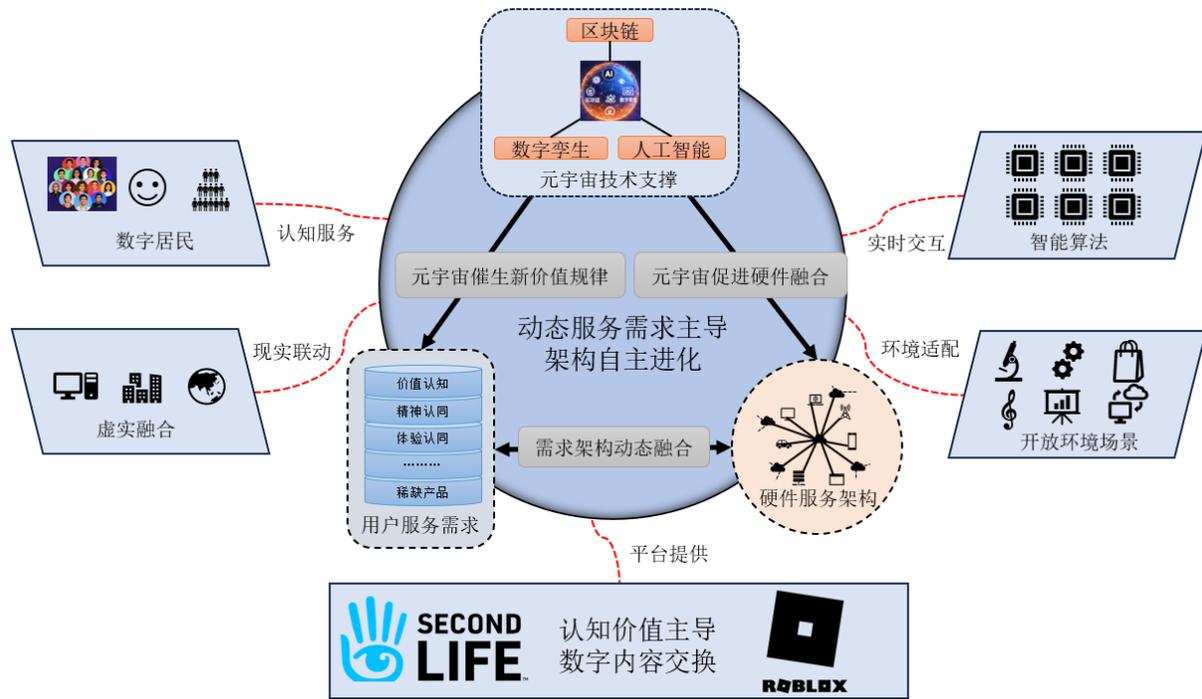


图1 认知价值主导元宇宙空间下的价值规律
 Fig.1 The Law of Value in a Metaverse Space Dominated by Cognitive Value

套分布式、高并发、低延迟、可扩展的软件系统与基础设施的集合,作为资源调度的基础框架,为交付智能的资源调度提供底层支撑。它不仅仅是传统游戏或云服务的升级,还是一个融合了计算、网络、渲染、AI、区块链等多种技术的综合性数字基础设施,为资源调度提供了动态适配的技术框架、协同机制与能力边界。元宇宙服务架构的核心特征在于其自主进化性,即系统可在外部环境或内部状态发生变化时,自动感知—评估—重构,以维持服务连续性与价值适配性。元宇宙服务架构的自主进化指架构本身具备感知内部状态和外部环境、进行分析决策并执行自我优化与演化的能力,从而在无人直接干预或仅需高阶目标指导下,持续地适应变化、提升效能、保障稳定并实现对应的目标。其自主进化的触发条件主要包括三类:(1)认知价值偏移触发。当用户群体对服务内容、交互方式或虚拟资产的认同结构发生显著变化时,系统需主动重构资源映射与交互逻辑,以维持认同价值的一致性。(2)资源约束触发。当算力、带宽、存储或虚实映射节点出现瓶颈或扰动时,架构通过自适应负载重分配与拓扑重构实现稳定性恢复。(3)风险事件触发。面对安全入侵、数据漂移、算法偏差等扰动,系统通过异常检测与反馈学习机制进行局部自愈与架构再配置。自主进化的边界范围体现在三个层面:(1)结构边界——可在服务编排与虚实资源映射层内动态调整,但不突破底层硬件与协议层定义的安全边界;(2)功能边界——支持在任务调度、服务组合、交互

界面层进行自我优化,而非替代核心业务逻辑的人机决策;(3)认知边界——以用户价值认同与系统安全约束为上限,防止演化行为引发认知偏移或伦理风险。根据“认同价值主导服务价值”这一客观经济规律,元宇宙空间下的服务架构采用以服务价值引导架构重塑、服务协同促进价值实现为闭环的运作模式。该模式强调两个层面:首先,遵循服务经济的内在规律,提出一种能够自主进化、面向服务价值增值的智能服务架构。该架构具备动态适应能力,能够在服务价值关系发生变化(如新服务内容出现、新需求产生或新用户加入)时,以价值寻优为目标实现自主调整与重构。其次,服务价值与服务架构之间并非静态映射,而是需要通过高效协同机制,在个性化、关联化、模糊化的服务需求与异构、分散、片段化的服务资源之间实现低时延、高可靠的服务协同,从而完成价值交付(如图2所示)。

相比传统的数字服务架构,元宇宙服务架构的差异在于:前者以静态模块化复用与被动调度为特征,而后者以动态感知、认知驱动与价值导向自组织为核心机制。传统架构依赖规则配置与人工调优,其适应性主要体现为资源层弹性;而元宇宙架构则通过语义层、认知层反馈实现“目标认知—架构演化”的闭环,进而实现价值规律与技术系统的深度耦合。

为实现上述目标,新的服务框架需紧密结合元宇宙信息系统的实际需求,深入识别和解析用户需求的多样性,框架的具体技术路线涵盖三类核心架构:服务需求

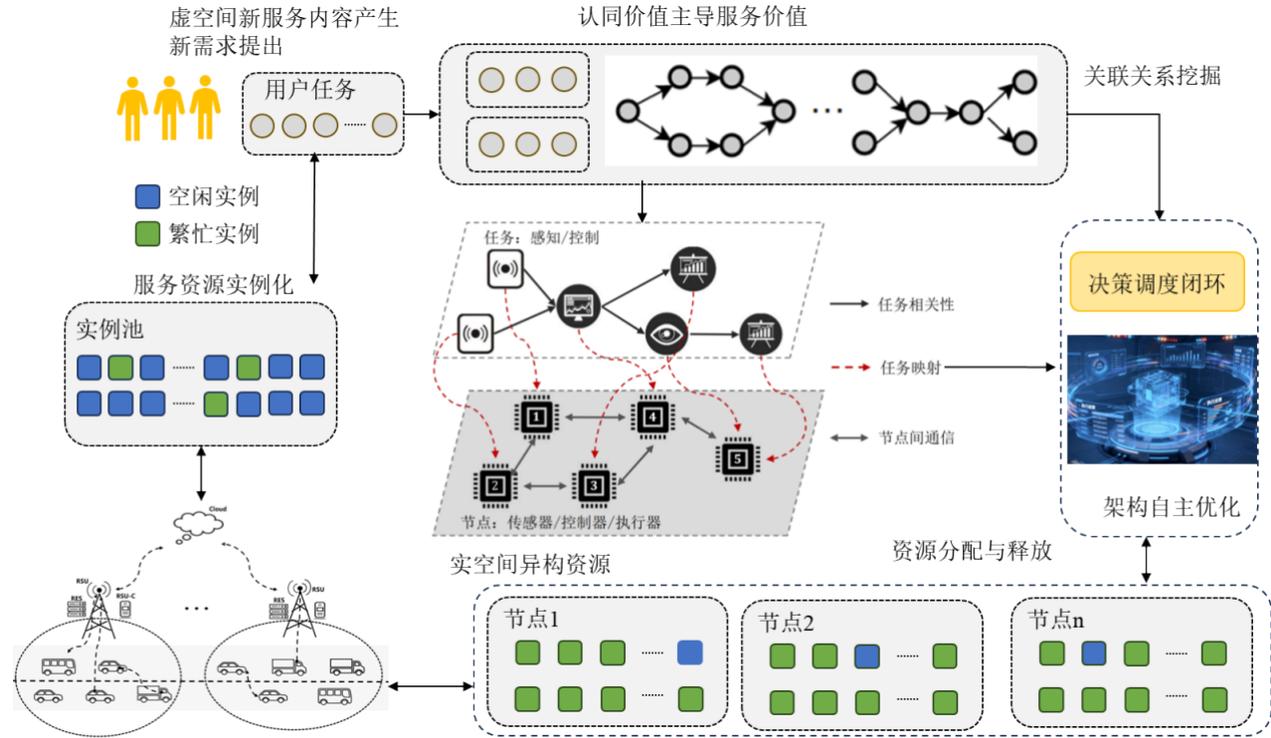


图2 虚实空间下服务架构自主进化框架

Fig.2 Autonomous Evolution Framework for Service Architecture in Virtual-physical Spaces

关联关系挖掘、基于启发式调度的服务架构,以及依托深度强化学习的智能服务架构。这些机制共同推动服务架构具备持续演进与自主进化的能力,形成真正具有“生命力”的运作模式。

2.1 服务需求关联关系挖掘

元宇宙场景中,物理世界与虚拟世界的高度交互推动了应用对象的数量与类型呈指数级增长,从沉浸式社交、虚拟经济到工业元宇宙与数字孪生,服务对象和服务资源的多样性不断扩张。服务间关系呈现出动态性、隐含性与高维性。针对以上特性,元宇宙空间下的服务需求关联关系挖掘存在以下问题:(1)任务间的串行/并行依赖与潜在的资源共享关系难以在统一框架下进行建模;(2)跨平台服务在语义、接口与数据格式上存在显著差异,导致“资源孤岛”问题长期存在,阻碍了跨域服务链的构建与协同优化;(3)输入数据的真实性和一致性难以保障——传感器数据中存在噪声与缺失,用户评价文本中掺杂主观性与模糊性,语义信息之间也常产生冲突。

针对建模难问题,现有分布式服务预测研究场景设置与实际脱节,未能适配单端/多端等典型应用场景^[11];目前的联邦聚合算法通用^[12],缺乏针对场景和模型的优化,忽略了模型参数传输环节的隐私安全隐患^[13]。为解决该问题,莫磊等^[14]提出了一种结合分布式训练

框架与差分隐私保护技术的服务需求预测方法,在保障隐私安全的前提下提升模型预测性能。

针对资源孤岛问题,在安全要求严格的端边云场景中,传统的BMC(Baseboard Management Controllers)/SNMP(Simple Network Management Protocol)方案暴露出不足:一是功能覆盖面窄,仅能访问少量基础传感器数据,缺乏统一配置、执行指令的能力^[15];二是安全防护能力不足,特别是在SNMP v1/v2c明文传输的情况下,容易导致敏感信息泄漏^[16];三是多协议、多工具环境中的集成不畅,增加了端边云协同管理的复杂性和潜在安全风险^[17]。为解决该问题,李璇等^[18]提出的服务器BMC的SNMP接口系统及其实现方法,构建了接口定义层、命令处理层、数据交互层、安全控制层和应用集成层的模块化体系,该系统在不改变已有硬件架构的前提下,将访问控制、数据加密、事件通知、日志审计贯穿管理生命周期,从而在端边云多层协调中,保障各节点计算任务的配置、执行与状态同步安全可靠,有效防止跨域、越权访问和链路窃听窃改,提高节点异常响应与任务迁移决策的速度。同时,系统的应用集成层中通过与Web管理界面、IPMI(Intelligent Platform Management Interface)接口、Redfish接口联动,使得系统能够利用多种管理通道访问相同的节点信息和控制功能,从而实现

针对语义冲突问题,传统的真值挖掘方法通常依赖单一数据类型或结构化数据,缺乏有效的非结构化文本数据处理能力^[19];现有的真值挖掘方法大多是基于概率图模型(Probability Graph Model, PGM),通过设置先验参数推断概率对不同的场景建模,模型训练和推断过程计算资源消耗巨大,无法满足元宇宙众包环境中高并发和实时性的需求^[20];基于PGM的方法由于模型先验参数固定,难以灵活适应用户生成内容的多样性和动态性,限制了其在元宇宙环境中满足用户个性化服务高标准需求的能力^[21]。为解决该问题,王爽等^[22]提出了一种元宇宙众包环境下多源非结构化文本服务的真值挖掘方法,该方法解决了现有技术在处理非结构化文本数据时计算复杂度高、建模难度大以及适应性差等问题。

2.2 虚实空间决策调度闭环

在获得服务关联关系之后,如何高效完成资源—任务的映射与调度,是服务架构自主进化的核心。异构多源服务环境具有高动态与多约束并存的特征。资源状态、用户需求、网络带宽及电价等变量常以“突发事件”的形式影响服务运行,使得调控机制不仅要具备敏捷感知与快速响应的能力,还需在全局效益上实现多目标协调。异构多源服务环境下的服务调控不仅要同时满足时间、能耗、隐私等多维度约束,还需应对跨区域资源间的复杂依赖关系与动态变化。不同场景下的虚实空间决策调度闭环存在以下问题:(1)为解决传统的基于共享总线的多核系统面临的存储带宽、互连时延、功耗极限等瓶颈,NoC(Network on Chip)因其更好的可扩展性、灵活性、并行性和通信效率,被作为一种新的互连架构^[23],然而NoC实时系统面临能效性和可靠性以及通信冲突问题。(2)云边缘三层计算架构下多隐私级别 workflow 调度面临资源与隐私匹配失衡、跨节点传输耗时过高、动态环境适配不足问题。(3)在地理分布式数据中心中,多 workflow 调度需要同时考虑任务依赖关系与电价动态特性,电价在不同地域和时间段差异显著,直接影响系统整体运行成本,导致满足截止时间约束的电力开销成本大问题。

针对能效性和可靠性以及通信冲突问题,由于网络结构的特性,网络拥塞与瞬态故障会显著影响通信效率和系统可靠性。现有研究仅考虑网络竞争^[24]、可靠性^[25]和能耗^[26],但很少同时优化这三个指标。为解决该问题,Mo等^[27]考虑到多个处理器、片上路由器和链路可能发生瞬时故障的情况,提出基于系统可靠性和通信效率优化的节能调度方法:在满足系统的可靠性阈值的前提下,降低任务执行和通信能耗,引入一种基于冲突感知的调度机制,该机制综合利用了引入冲突松弛时间

和任务调度的方法,以减少通信冲突和通信时延。

针对动态环境适配不足问题,在实际应用场景中,存在大量仅能在本地设备处理的隐私敏感型任务。现有研究很少关注具有多隐私等级的工作流任务调度问题,且资源分配方面仅考虑边缘服务器或云边服务器架构,未涵盖普通本地端设备。为解决该问题,同时考虑到通信带宽的匮乏,还要尽量减少任务之间的数据传输时间,Wang等^[28]提出基于聚类的工作流调度算法,此算法综合考虑任务的隐私特点以及计算资源的异构性,以构建服务决策与资源适配的映射机制为核心主线,围绕隐私合规保障、完成时间最小化以及服务智能化调控三大目标展开,致力于形成可扩展、可适应且高效的自适应调控机制。在5类科学工作流的对比实验中,新的方案都取得了最佳的效果,具体来说,在Cybershake workflow 中,相对百分比偏差(Relative Percentage Deviation, RPD)低至41.80,在Epigenomics workflow 中,RPD为168.44,且当任务数从150增至300时,算法的RPD波动小于8%,稳定性优于对比算法。同时,在效率方面,算法的CPU时间处于可接受范围,如在Epigenomics workflow 中仅为1.418 ms,在Montage workflow 中仅为108.254 ms。

针对地理分布式数据中心成本高问题,地理分布式数据中心为海量 workflow 应用提供计算与存储服务,由此产生的高额电力成本会随地理位置和时间动态变化,现有研究为云环境中的 workflow 调度提供了宝贵见解^[29],但忽略了电价的时空差异性及其地理分布特性。已有方法大多仅关注能耗最小化或执行时间优化^[30],较少深入刻画电价波动对调度结果的影响。为解决该问题,Wang等^[31]提出一种面向电力成本优化的多 workflow 调度方法,将任务特征、资源状态与电价变化协同建模,系统性地揭示任务执行与电价动态之间的耦合关系,能够动态刻画多 workflow 之间的资源竞争与成本变化关系,最终通过逼近最优策略,获得不同调度方案对电力成本的作用规律,并构建起一套用户需求—资源映射的分布式优化体系,显著提升了跨域数据中心环境下 workflow 调度的智能化水平与整体效能。在消融实验中,通过移除 workflow 排序模块,最终RPD上升18%,证明了该方案基于松弛时间、工作量和资源竞争的排序策略的有效性。在移除任务排序模块之后,最终的RPD上升22%,凸显了方案子截止期划分对避免资源误分配的关键作用。将智能电价策略替换为负载均衡策略则导致RPD急剧上升41%,充分证明了考虑地域电价动态对成本最小化的核心价值。通过与HEFT(Heterogeneous earliest finish time)、ECWSD(Energy-aware Cloud Workflow Scheduling with geo-distributed Data)和DEWS(Deadline-constrained

Energy-aware Workflow Scheduling)算法的对比,最终在Epigenomics工作流上,所提方案在不同工作流数量、任务数和截止时间宽松度下均表现出最低且最稳定的RPD。在Genome工作流上,该方案同样保持了领先的整体性能。此外,通过效率分析表明,该方案虽因模型计算而比启发式算法耗时更长,但其计算成本对于24小时的调度周期是可接受的,且其带来的电力成本节约远高于计算开销。

总体而言,自主进化的服务架构通过定义规则、动态适配、保障稳定,为资源调度构建了“可信赖、可扩展、能进化”的动态适配的技术框架、协同机制与能力边界。通过服务框架,资源调度可以实现高效调用跨域资源,同时能满足元宇宙的动态需求与复杂约束。

3 面向交付智能的实体资源调度决策

元宇宙的交付智能指基于沉浸式交互环境、区块链经济体系与分布式基础设施,通过智能算法与数字孪生技术实现虚拟资产、服务及体验的精准、可信、实时投送的技术体系。交付智能基于沉浸式交互环境、区块链经济体系与分布式基础设施,通过智能算法与数字孪生技术,实现虚拟资产、服务及体验精准、可信、实时投送的

技术体系,其核心是通过虚实融合的感知、实体资源调度决策,满足用户对高沉浸感和低延迟的需求。为满足沉浸式体验与实时交互的需求,服务节点必须在高动态、低时延的严格约束下完成资源发现、聚合与任务调度。面对虚拟实体动态加入退出、服务链路频繁重构、攻击来源难以追溯等挑战,传统集中式、预设策略的安全管理方式已显不足^[32]。因此,亟需从根本上突破单一安全域内的静态控制逻辑,构建具备感知、分析、响应能力的自主协同调度决策模型,形成动态评估、主动防御与自我优化的服务架构,从而最终建立起弹性可进化、可靠低时延的智能服务网络,为元宇宙的持续稳定运行提供坚实支撑(如图3所示)。

3.1 服务资源族群网络智能调度

随着感知、优化和控制技术的发展,服务信息系统通过与智能交通系统、供需关系基础设施和供需服务资源调度网络的集成得到了显著的增强。服务资源族群网络智能调度面临如下问题:(1)服务关系供需资源调度网络产生了大量异构、多源的数据,对数据的采集、融合和处理任务提出了很大的挑战,使得多层次交互的服务网络集群数据驱动感知难。(2)将服务资源网络看作是服务实体连接的网络结构,各个服务实体之间存在较

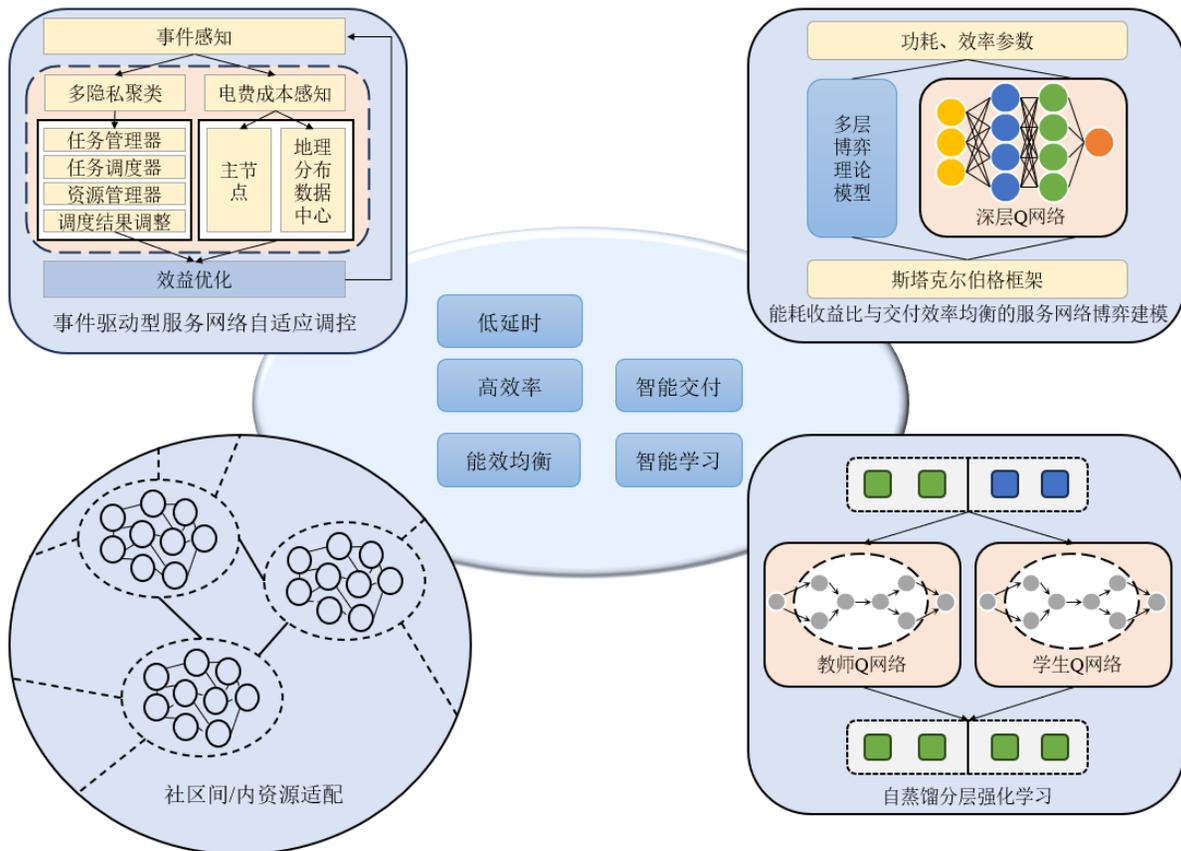


图3 元宇宙空间下的智能交付调度机制

Fig.3 Intelligent Delivery Scheduling Mechanism in the Metaverse Space

频繁的资源运输与信息传输关系,将服务系统相关需求实体与资源实体之间进行通信互联,实现智能层面的需求—资源关系匹配协同发展难。(3)在服务网络的具有固定拓扑关系的运输连接结构上,同时被调配的不同调配资源个体会面临通路选择的问题,在通路载荷和效益代价函数的约束下,不同调配资源个体出现竞争现象,提升具有广泛复杂连接形式的服务网络资源调配综合效益,最小化运输消耗,快速准确完成服务资源的调配难。

针对数据驱动感知难问题,复杂服务网络中的相互作用是由于服务实体的多样性、系统动力学的可变性以及具有多维关联的大规模服务数据等固有系统特性而产生的,大多数现有的工作在学习服务网络中的相互作用时忽略了层次特征^[33],为了模拟服务网络中复杂的相互作用,Zhang等^[34]提出了一种分层交互注意学习方法,包括层内注意学习模块和跨层注意学习模块,所提出的方法遵循生成式自监督学习框架,以减少对服务数据有限标签的依赖,通过学习具有多个潜在图结构相互作用的图特征来获得有效的分层潜在变量。

针对需求—资源关系匹配协同发展难问题,在服务资源网络的具体应用中,资源调配是一个关键的研究问题。一般情况下的资源调配问题是资源目标单位面对有限离散路径的决策问题,基于深度Q学习资源调配算法不能解决一般化服务资源网络拓扑结构的现有技术缺陷^[35],高庆等^[36]提出了一种基于虚拟节点构建的服务网络资源调配方法,使得深度Q学习算法可以对一般化网络拓扑结构下的服务网络资源调配问题进行求解,具有较强泛化性。

针对服务资源的调配难问题,出于网络安全和生产利益考虑,为解决服务网络资源调配中的信息层级共享和层间单向传递,一般采用强化学习深度Q网络的方法进行资源目标个体调配决策,但该方法无法表征不同服务数据包之间的个体差异与层级结构关系^[37],宏观角度上现有网络算法不能有效利用层级关系对全局决策进行调控,导致资源目标个体在不同转移规则下被视作同一类待调配资源。为解决该问题,针对工业网络中两个独立站点之间的每个连接具有有限的通信带宽以及每个站点具有有限的计算/存储能力并且只能访问其本地信息的实际场景,Zhang等^[38]提出了一种信息分层级的服务资源智能调度方法,解决了复杂服务网络中资源包具有不同决策优先级的最优资源调度问题,并利用马尔可夫博弈将资源调度问题建模为层次优化问题。为了验证效果,该团队利用复杂工业网络案例进行仿真,具体而言,实验中采用了一个由 $N=20$ 个节点组成的静态

复杂工业网络。决策优先级层级设定为 $L=2$,共考虑 $n=20$ 个资源包。其中5个资源包具有较高决策优先级,15个资源包具有较低优先级。当高优先级或低优先级资源包到达目标节点时,将分别获得+12/+10的奖励。相较于传统的基于图的Q网络算法,该方案在不同的节点尺寸上平均可以减少10%的耗时,相应的奖励评价可以增加35%,最终的吞吐量也可以提高13%。

3.2 服务资源族群网络分层协同博弈决策

元宇宙正逐步将现实世界中的服务业务、服务流程以及服务交互无缝融入高度沉浸式的虚拟化环境之中,在为用户带来前所未有体验的同时,更为服务生态注入新活力。目前针对服务资源族群网络协同决策建模时,通常将网络考虑为基于客观物理规律被动运行的系统。然而,对于服务资源网络中移动通信、交通控制、气象预报、医疗救助等各类复杂系统,其被控对象通常包含多个智能体。此类智能体行为不仅受客观物理规律限制,而且受主观利益或目标驱动,因此需要利用博弈理论对此类系统中协同、合作、矛盾和冲突等复杂行为进行建模与分析。此外,元宇宙背景下服务环境中的服务资源族群通常具备规模大、有层次、需求间存在约束关系、各子网络信息不对称等特点。此外,系统中各服务资源网络决策通常不止需要考虑当前时刻系统的整体状态,还要充分利用历史决策信息与历史系统状态数据。针对大规模资源包调度中策略空间复杂、决策效率低的特点,服务资源族群网络分层协同博弈决策面临如下两类问题:(1)元宇宙背景下服务资源族群规模大、有层次、需求间存在约束关系、各子网络信息不对称,导致决策效果差。(2)工业信息物理系统(Industrial Cyber-Physical Systems, ICPS)中涉及多制造线智能体(Manufacturing Line Agent, MLA)与多工业终端智能体(Industrial Terminal Agent, ITA)的协同制造场景,信息延迟仍不可避免,鲁棒决策难。

对于决策效果差问题,传统方法难以有效协调不同社团之间的资源分配,尤其是在节点之间通信受限的情况下,无法获得社团间的稳定均衡调配策略,导致整体网络效益低下^[39],当网络拓扑发生变化时(如新增节点或通信中断),传统方法往往无法及时调整策略。传统方法忽略网络层次动态变化特性^[40],为解决该问题,高庆等^[41]提供了一种面向服务资源族群网络的动态反馈分层协同决策方法,首先进行协同决策问题数学建模与动态反馈策略设计,基于博弈理论、最优控制、动态规划相关知识,完成各服务资源族群动态反馈策略求解。

对于鲁棒决策难问题,尽管路由器作为信息同步媒介具有相对较低的通信延迟,但在协同制造系统

(Collaborative Manufacturing Systems, CMSs)中,信息延迟仍不可避免——尤其在现实应用场景中^[42]。因此,CMSs中的决策者无法获取实时信息,现有研究已在多博弈者动态系统^[43,44]领域展开相关探索,并进一步延伸至具有层次结构的系统^[45]。Zhang等^[46]解决了多博弈者鲁棒分层博弈问题,并分析了斯塔克伯格—纳什—鞍点均衡,但高层存在的多博弈者的鲁棒分层博弈仍未被研究。为解决该问题,Cai等^[47]通过将干扰因素建模为以最优方式恶化其他智能体性能的理性博弈者,采用博弈论视角实现纳什—斯塔克伯格—纳什—鞍点(NSNS)均衡,从而解决鲁棒决策问题——其中所有博弈者的信息均通过动态反馈形式获取。该研究进一步分析了NSNS均衡的存在性,并证明了闭环系统的输入—状态稳定性,最后通过数值算例的仿真验证了所提方法的有效性。

总体而言,资源调度通过执行架构目标、反馈运行数据、提出进阶需求,成为架构自主进化的上层实现,既可以验证架构是否能支撑元宇宙服务的复杂需求,同时又通过实际问题推动架构技术边界的持续拓展,最终实现“服务价值引导架构重塑”的闭环机制。

4 元宇宙下医疗救助服务案例分析

本节通过构建一个完整的医疗元宇宙案例^[48],以说明本文提出的自主进化服务架构与智能交付调度机制在真实场景中的协同运行方式。案例面向城市级应急医疗服务场景,展示如何借助虚实融合空间实现高价值认知驱动的资源匹配,以及跨域资源的智能调度与分层协同博弈决策。如图4所示,该医疗元宇宙案例主要

分为四个步骤:虚实同步与服务需求关联挖掘、虚实决策调度闭环、资源族群网络智能调度和分层协同的博弈决策。

步骤1:虚实同步与服务需求关联挖掘。在现实世界中,有一位心脑血管疾病患者,佩戴了专用的医疗健康监测设备,该设备收集患者的生命体征,包括心率数值、血氧浓度等,同时设备还上报患者的真实世界位置。通过设备采集上报的信息,元宇宙在虚拟空间中对虚拟患者建模,虚拟患者和真实的患者共享生命体征信息,同时虚拟患者在虚拟空间中还与城市环境数据融合,环境数据中包含了城市的交通信息、最近可用的医疗资源以及对应医院的负载情况。通过这种虚实同步,实现对患者所需的医疗服务需求进行及时响应。当患者的体征数据异常时,系统将在服务需求图谱中自动识别其对应的心脑血管疾病症状,同时根据当前需求构建了一条服务链:“紧急医疗评估—远程医生介入—无人机派送AED(Automated External Defibrillator)等辅助医疗器械—最近救护车派遣—最近医院心内科接诊”,该完整医疗关联服务链的构建过程依赖本文提出的非结构化多源真值挖掘、语义冲突分析与隐私级别识别机制。

步骤2:虚实决策调度闭环。根据服务需求构建的医疗关联服务链,系统进入调度闭环阶段。在虚拟空间中,相应的虚拟医院根据虚拟患者的生命体征给出了其对应的急救优先级。在现实世界中,最近的救护车边缘节点根据虚拟空间中计算的急救优先级和城市交通信息重新规划救援路径和预计到达时间。同时,根据当前的各节点的任务分配情况,服务架构触发自主进化,对节点的任务进行重构,此时,系统可以启用无人机派送

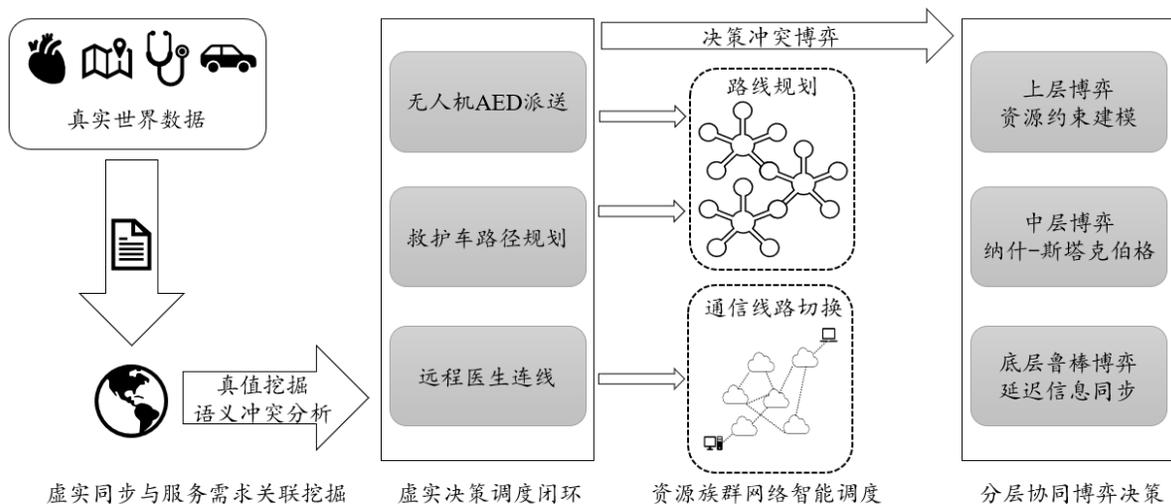


图4 元宇宙下医疗救助服务案例示例
Fig.4 Examples of Medical Assistance Services in the Metaverse

AED的并行任务流并在远程医生端开启远程视频急救指导。除此之外,根据动态更新的救援路径和预计到达时间,系统还可以进一步更改决策,选择更远但移动速度更快的救护车作为主执行资源。此时的决策通过上文提到的强化学习与冲突感知调度机制得到优化。

步骤3:资源族群网络智能调度。在决策进行调度时,系统进入资源族群网络的任务执行阶段。该场景的服务资源族群网络中包括了无人机路线规划、救护车的调度选择和路径规划,以及远程医生通信通道切换。在无人机派送任务中,其路径规划需要在城市网络拓扑中选择无拥堵线路,同时无人机资源被分配为一个高优先级资源包,使其在深度Q网络机制中获得优先路径分配。救护车的优先度低于无人机,其被分配为中优先级资源包,调度时可以根据交通状况动态调整路线,同时还考虑驾驶员疲劳、车辆剩余能耗及道路封闭等多维因素,在其决策过程中可以引入分层注意机制避免局部拥塞的误判。远程医生通信资源为软资源包,仅需要考虑实时的网络通道质量,通过虚拟端与现实端通道自动切换,保证信息低时延传输。通过服务资源族群网络的智能调度机制,系统实现了多资源族群的协同调配,从而保证高优先级任务资源优先服务,并且低优先级资源在不冲突的情况下并行执行。

步骤4:分层协同博弈决策。在系统决策时,存在多种博弈情况,包括高优先级救援任务与中低优先级调度任务的资源竞争,无人机之间与救护车之间的路径竞争,医院科室之间的资源竞争以及智能体之间的信息延迟与优势利用冲突等。针对这些资源竞争,系统采用分层协同博弈模型解决冲突。在上层博弈中,由医疗应急指挥中心智能体进行资源约束建模,实现“紧急程度—成本—资源负载”的多目标平衡。在中层博弈中,多救护车之间通过纳什—斯塔克伯格模型获得最优派遣组合。在底层鲁棒博弈中,系统需要处理因网络延迟导致信息不同步的问题,最终形成鲁棒、稳定、收敛的策略。最终,系统获得稳定的全局均衡策略,实现城市级资源的高效运行。案例的场景展现了自主进化架构显著提升动态场景下的服务适应性,智能调度与分层博弈机制能在复杂资源竞争环境中获得稳定可控的最终收益。

5 总结与展望

本文聚焦元宇宙空间的新型智能服务业态,系统探讨了其经济规律、运作模式与交付方法。研究表明,元宇宙作为虚实融合的新一代数字生态,其服务经济遵循“认知价值主导服务价值”规律,用户价值认同源于现实体验、虚拟精神价值及虚实联动的融合认同,需构建具

备复杂动态网络特征的服务架构。在运作模式方面,元宇宙服务架构需具备自主进化能力,通过服务需求关联关系挖掘与虚实空间决策调度闭环,形成以服务价值引导架构重塑、服务协同促进价值实现的闭环机制。面向交付智能,研究提出服务资源族群网络智能调度与分层协同博弈决策,构建了弹性可进化、可靠低时延的智能服务网络。该研究为元宇宙智能服务的高效运行与资源调度提供了理论支撑,在未来,元宇宙智能服务研究可从多维度深化:在服务需求挖掘层面,需拓展多模态数据融合能力,整合虚拟行为与物理传感器数据,构建动态关联更新机制以捕捉突发性需求,并通过元迁移学习提升跨场景泛化能力;虚实调度闭环需强化多目标动态权重平衡与虚实干扰感知补偿,结合联邦学习实现跨域协同;资源调度应引入弹性拓扑感知与异构资源统一抽象,以用户体验指标优化调度策略;博弈决策需适配不完全信息场景,采用博弈分解—聚合策略提升大规模计算效率,并嵌入伦理约束项平衡公平与效率。同时,需通过多场景实证数据验证方法有效性,推动元宇宙服务向动态化、跨域化与人性化方向发展。

参考文献

- [1] Kliestik T, Kral P, Bugaj M, et al. Generative artificial intelligence of things systems, multisensory immersive extended reality technologies, and algorithmic big data simulation and modelling tools in digital twin industrial metaverse. *Equilibrium Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, 2024, 19(2): 429—461.
- [2] Marques WR, Rocha MTG, Silva ALF, et al. Metaverse, artificial intelligence and EaD in education: Possibilities and limitations of DICT in the first quarter of the 21st century. *Concilium*, 2023, 23(17): 36—50.
- [3] Truong VT, Le LB. Security for the metaverse: Blockchain and machine learning techniques for intrusion detection. *IEEE Network*, 2024, 38(5): 204—212.
- [4] Li X, Yang Y, Xie BH, et al. AI-driven metaverse digital twin cities: Prototype platform design for integrated virtual urban ecosystems and services. 2024 3rd International Conference on Automation, Robotics and Computer Engineering (ICARCE). China. IEEE, 2024: 393—399.
- [5] Gallist N, Hagler J. Tourism in the metaverse: Digital twin of a city in the Alps. *Proceedings of the 22nd International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*. Vienna Austria. ACM, 2023: 568—570.
- [6] 王范. 互联网经济对中国经济增长影响研究. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
- [7] Demirci B, Yaşa Özeltürkay E, Gülmez M. Metaverse users' purchase intention in second life. *Journal of Metaverse*, 2024, 4(1): 84—93.
- [8] Mancuso I, Petruzzelli AM, Panniello U, et al. A microfoundation perspective on business model innovation: The cases of roblox and meta in metaverse. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2023, 71: 12750—12763.
- [9] Oulahyane K, Youssfi M, Benmoussa N. Embracing metaverse education: Transforming the landscape of learning. 2024 IEEE 12th International Symposium on Signal, Image, Video and Communica-

- tions (ISIVC). Marrakech, Morocco. IEEE, 2024; 1—6.
- [10] Abdulmuhsin AA, Owain HO, Alkhwaldi AF. Understanding the academic use of KM-driven metaverse technology: Insights from medical colleges. *Journal of Science and Technology Policy Management*, 2024. doi: 10.1108/JSTPM-12-2023-0229.
- [11] Zhao ZL, Pacheco L, Santos H, et al. Predictive UAV base station deployment and service offloading with distributed edge learning. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, 18(4): 3955—3972.
- [12] Mills J, Hu J, Min GY. Multi-task federated learning for personalised deep neural networks in edge computing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2022, 33(3): 630—641.
- [13] Mehta S, Aneja A. Securing data privacy in machine learning: The FedAvg of federated learning approach. 2024 4th Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON). Pimari Chinchwad, India. IEEE, 2024; 1—5.
- [14] 莫磊, 顾一凡, 曹向辉, 等. 一种基于分布式训练和差分隐私的轨迹预测方法: 中国, 2025107891113. 2025-06-13.
- [15] Nendi ND, Maulana F. Monitoring traffic berbasis SNMP pada jaringan perumahan permata *Puri* harmoni 2. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 2024, 5(3): 735—740.
- [16] Gamess E, Hernandez S. Performance evaluation of SNMPv1/2c/3 using different security models on raspberry pi. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2021, 12(11): 1—9.
- [17] Jadhav HB. Securing cloud-based IoT architectures: A multi-protocol approach. *Computer Fraud and Security*, 2024; 41—46.
- [18] 李璇, 朱玉鸽, 周健鑫, 等. 一种服务器BMC的SNMP接口系统及其实现方法: 中国, 202511003940.0. 2025-07-21.
- [19] Rahimi Z, Shamsfard M. A neuro symbolic approach for contradiction detection in Persian text. *JUCS - Journal of Universal Computer Science*, 2023, 29(3): 242—264.
- [20] Yu DR, Yang B, Wei QH, et al. A probabilistic graphical model based on neural-symbolic reasoning for visual relationship detection. 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New Orleans, LA, USA. IEEE, 2022; 10599—10608.
- [21] Wan HW, Yang QQ, Tang JC, et al. Knowledge-aided semantic communication leveraging probabilistic graphical modeling. 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall). Washington, DC, USA. IEEE, 2024; 1—5.
- [22] 王爽, 韩磊磊, 陈龙. 元宇宙众包环境下多源非结构化文本服务的真值挖掘方法: 中国, 202411712102.6. 2025-06-27.
- [23] Dinesh Kumar TR, Sivasaravana Babu S, Sheriff M, et al. Watermarking three-dimensional NOC architecture to detect malicious intellectual property// 2024 7th International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT). Kollam, India. IEEE, 2024; 165—170.
- [24] Sun HB, Xie TX, Zhu ZH, et al. Minimizing communication conflicts in network-on-chip based processing-In-memory architecture// 2023 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). Antwerp, Belgium. IEEE, 2023; 1—6.
- [25] Jaster S, Haase J, Göhringer D, et al. Improving reliability in network-on-chip with trust-based adaptive routing approaches// 2024 IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NorCAS). Lund, Sweden. IEEE, 2024; 1—7.
- [26] Reddy BNK, Kumar AS. Evaluating the effectiveness of Bat optimization in an adaptive and energy-efficient network-on-chip routing framework. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2024, 188: 104853.
- [27] Mo L, Li XM, Kritikakou A, et al. Contention and reliability-aware energy efficiency task mapping on NoC-based MPSoCs. *IEEE Transactions on Reliability*, 2025, 74(1): 2010—2026.
- [28] Wang S, Yuan ZA, Zhang XD, et al. Cloud-edge-end workflow scheduling with multiple privacy levels. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2024, 189: 104882.
- [29] Mangalampalli S, Hashmi SS, Gupta A, et al. Multi objective prioritized workflow scheduling using deep reinforcement based learning in cloud computing. *IEEE Access*, 2024, 12: 5373—5392.
- [30] Jayanetti A, Halgamuge S, Buyya R. Multi-agent deep reinforcement learning framework for renewable energy-aware workflow scheduling on distributed cloud data centers. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2024, 35(4): 604—615.
- [31] Wang S, Zhang H, Wu TX, et al. Electricity cost minimization for multi-workflow allocation in geo-distributed data centers. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2025, 18(3): 1397—1411.
- [32] Barkat H, Lalwani S. Security threats and it's mitigation for metaverse in HR management. 2024 International Conference on Cybernation and Computation (CYBERCOM). Dehradun, India. IEEE, 2024; 178—183.
- [33] Jain V, Richter A, Fokow V, et al. A hierarchical feature-based time series clustering approach for data-driven capacity planning of cellular networks. *IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking*, 2025, 3: 921—947.
- [34] Zhang KX, Gao Q, Ogorzalek M, et al. Data-driven information perception for complex industrial networks of service based on hierarchical interactive graph variational inference. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2025; mc.7908.
- [35] Ling J, Xia JJ, Zhu FS, et al. DQN-based resource allocation for NOMA-MEC-aided multi-source data stream. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2023, 2023(1): 44.
- [36] 高庆, 张可昕, 吕金虎, 等. 一种基于虚拟节点构建的工业互联网资源调配方法: 中国, CN202211250383.9. 2023-01-10.
- [37] Ullah I, Ali Q, Ashraf M, et al. Advanced virtual network embedding: Combining graph attention network and DRL for optimal resource utilization// 2025 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). Fukuoka, Japan. IEEE, 2025; 550—555.
- [38] Zhang KX, Gao Q, Lü JH, et al. A subgraph-based hierarchical Q-learning approach to optimal resource scheduling for complex industrial networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2024, 71(5): 2146—2156.
- [39] Mallick S, Das S, Ray AK. A collaborative decision based approach with PU's random arrivals for an energy-harvesting UAV-CR network// 2024 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Dubai, United Arab Emirates. IEEE, 2024; 879—884.
- [40] Ma YJ, Du G, Zhang YY. Dynamic hierarchical collaborative optimisation for process planning and scheduling using crowdsourcing strategies. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(8): 2404—2424.

- [41] 高庆,李瑾宏,吕金虎,等. 基于分层强化学习的社团服务网络资源调度方法及装置:中国,CN2025107528435. 2025-06-06.
- [42] Yang F, Feng T, Xu FM, et al. Collaborative clustering parallel reinforcement learning for edge-cloud digital twins manufacturing system. *China Communications*, 2022, 19(8): 138—148.
- [43] Liu PF, Wang L, Shan Z, et al. A dynamic game strategy for radar screening pulsewidth allocation against jamming using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(5): 6059—6072.
- [44] Fan SZ, Zhang HB, Wang ZH, et al. Mobile devices strategies in blockchain-based federated learning: A dynamic game perspective. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2023, 10(3): 1376—1388.
- [45] Cai XJ, Gao Q, Peng P. Dynamic feedback strategies design of discrete-time game-based control systems// 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC). Tianjin, China. IEEE, 2023: 8076—8081.
- [46] Zhang YW, Zhang SC, Zhao B, et al. Multi-player robust control of Stackelberg games via adaptive dynamic programming// 2022 IEEE 11th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). Chengdu, China. IEEE, 2022: 1364—1368.
- [47] Cai XJ, Gao Q, Wang W, et al. Robust decision-making for collaborative manufacturing in ICPSs via hierarchical games. *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*, 2024, 2: 71—80.
- [48] Yang YH, Zhou ZB, Li XC, et al. Metaverse for healthcare: Technologies, challenges, and vision. *International Journal of Crowd Science*, 2023, 7(4): 190—199.

New Intelligent Service Format in the Metaverse Space: Economic Law, Operation Mode and Delivery Method

Gang Duan¹ Chen Fan² Shuang Wang^{2*} Qing Gao³

1. *Bringspring Science and Technology Co., Ltd., Shenyang 110000, China*

2. *School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China*

3. *School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

Abstract The metaverse, as a new generation of digital ecosystems integrating virtual and real worlds, is reshaping the landscape of intelligent services. This paper focuses on its economic principles, operational models, and delivery methods, revealing that the metaverse service economy follows the principle of “cognitive value driving service value.” User value recognition stems from real-world experiences, virtual spiritual value, and the integrated recognition of virtual-physical synergy. Operationally, it constructs a service architecture with autonomous evolution capabilities. Through service demand correlation mining and a closed-loop virtual-physical space decision-making and scheduling system, it forms a closed-loop mechanism where service value guides architectural restructuring and service collaboration facilitates value realization. Regarding intelligent delivery, it proposes networked intelligent scheduling and hierarchical collaborative decision-making for service resource clusters. This addresses challenges in data perception, resource matching, and robust decision-making, constructing an elastic, evolvable, reliable, and low-latency intelligent service network. This provides theoretical support for the efficient operation and resource allocation of intelligent services in the metaverse.

Keywords metaverse; law of value; services architecture; resource scheduling; game model

王 爽 东南大学计算机科学与工程学院副教授。在*IEEE Transactions on Computers*、*IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*、《计算机学报》等期刊及International Conference on Service-Oriented Computing (ICSOC)、International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)、International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)等国际会议上发表论文多篇,主持国家自然科学基金青年科学基金项目(C类)、江苏省自然科学基金项目,参与国家重点研发计划青年科学家项目。

段 刚 高级工程师,现任荣科科技股份有限公司董事长。主要研究方向为大数据和人工智能技术。主持发布了《DBJ41/T 284-2024河南省城市信息模型(CIM)基础数据标准》。

(责任编辑 张 强)

* Corresponding Author, Email: shuangwang@seu.edu.cn