

数据要素市场研究综述：价值、定价与交易

杨明^{1,2}, 冯宏霖^{1,2}, 王鑫^{1,2}, 霍吉东^{1,2}, 焦绪国^{3,4}, 张恒⁵

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省计算中心(国家超级计算济南中心),

算力互联网与信息安全教育部重点实验室, 山东 济南 250014;

2. 山东省计算机网络重点实验室, 山东省基础科学研究中心(计算机科学), 山东 济南 250014;

3. 青岛理工大学信息与控制工程学院, 山东 青岛 266520;

4. 浙江大学工业控制技术全国重点实验室, 浙江 杭州 310027;

5. 江苏海洋大学计算机工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 随着算力网络的兴起, 以算力为中心的新型基础设施成为推动信息经济发展的关键引擎。数据是数字经济时代重要的生产要素, 是构建新发展格局的重要支撑。数据要素市场作为连接数据和算力网络的纽带显得尤为关键, 其稳健运行直接关系到算力网络的可持续发展, 为信息经济体系提供了关键支撑。因此, 以数据产品为起点, 介绍了其在数据要素市场中所涉及的流程和这些部分之间的内在联系。之后, 深入研究了数据要素市场的3个关键方面的现有工作, 即数据价值、数据定价和数据交易。数据价值评估方面, 针对数据相对价值评估, 介绍了指标体系、指标权重和价值指数等关键环节的相关工作, 针对数据资产价值评估, 介绍了成本法、收益法、市场法等传统方法和基于机器学习的新兴方法。数据定价模型方面, 将现有方法划分为数据集产品定价和数据服务产品定价两大类, 总结了7种定价方式, 并进一步分析了各个方法的优缺点及适用场景。数据交易系统方面, 从系统架构的角度分析了集中式和分布式两种架构在数据交易市场中的应用, 之后介绍了场内交易和场外交易两种交易模式的现状及前景。

关键词: 数据交易; 数据价值; 数据定价; 数据市场

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.2096-109x.2024036

收稿日期: 2024-01-18; **修回日期:** 2024-03-19

通信作者: 王鑫, xinwang@qlu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62203249); 山东省自然科学基金(ZR2021QF115); 泰山学者计划(tsqn202211203); 山东省高等学校青创科技支持计划(2022KJ290); 山东省科技型中小企业创新能力提升项目(2023TSGC0108); 济南市新高校20条项目(202228077)

Foundation Items: The National Natural science Foundation of china (62203249), Shandong Provincial Nature Science Foundation of China (ZR2021QF115), Taishan Scholars Program (tsqn202211203), Shandong Provincial Higher Education Youth Innovation Team Development Project (2022KJ290), Shandong Provincial Innovation Capability Improvement Project for Small and Medium-sized Scientific and Technological Enterprises (2023TSGC0108), "20 New Universities" Project of Jinan City (202228077)

引用格式: 杨明, 冯宏霖, 王鑫, 等. 数据要素市场研究综述: 价值、定价与交易[J]. 网络与信息安全学报, 2024, 10(3): 1-19.

Citation Format: YANG M, FENG H L, WANG X, et al. Survey of data factor market: value, pricing, and trading[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2024, 10(3): 1-19.

Survey of data factor market: value, pricing, and trading

YANG Ming^{1,2}, FENG Honglin^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, HUO Jidong^{1,2}, JIAO Xuguo^{3,4}, ZHANG Heng⁵

1. Key Laboratory of Computing Power Network and Information Security, Ministry of Education, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Provincial Computing Center (National Supercomputing Jinan Center), Jinan 250014, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Networks,

Shandong Fundamental Research Center for Computer Science, Jinan 250014, China

3. School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China

4. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

5. School of Computer Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China

Abstract: With the rise of computing power networks, a novel infrastructure centered around computational power has emerged as a key driver in the development of the information economy. Data, recognized as a crucial production factor in the digital era, serves as a vital pillar for constructing new development paradigms. The data factor market, acting as the link between data and computational power networks, is particularly critical. Its robust operation directly affects the sustainable development of computational power networks and is provided with crucial support for the information economy system. Therefore, the data products were treated as the focal point, while the processes involved in the data factor market and the inherent connections among these components were introduced. Subsequently, the existing work on three key aspects of the data factor market was studied, including data value, data pricing, and data transactions. Regarding data value assessment, key aspects such as relative data value evaluation were discussed, introducing indicator systems, indicator weights, and value indices. For data asset value assessment, traditional methods such as the cost method, income method, and market method were discussed, as well as emerging methods based on machine learning. In terms of data pricing models, existing methods were categorized into two main types: pricing for dataset products and pricing for data service products. Seven pricing methods were summarized, and the advantages, disadvantages, and applicable scenarios of each method were further analyzed. Regarding data transaction systems, the applications of centralized and distributed architectures in the data trading market were analyzed from the perspective of system architecture. The current status and prospects of both on-exchange and over-the-counter trading modes were then introduced.

Keywords: data trading, data value, data pricing, data market

0 引言

在信息时代,大数据、物联网、人工智能等技术的蓬勃发展推动了数据交易的迅速崛起。数据不再仅仅是信息的简单堆积,而是一种可以被精确测量、高效分析和灵活交易的战略性资产^[1]。2022年12月,中共中央国务院正式印发了《关于构建数据基础制度更好发挥数据要素作用的意见》(又称《数据二十条》)。将数据作为生产要素意味着我国对数据要素价值释放提出了更高的目标,有助于加速构建数据交易市场体系,明确释放数据要素价值的方向。

这一趋势的背后,算力网络的兴起催生了以算力为核心的新型基础设施,为推动信息经济提

供了强大支持^[2]。算力网络作为数字基础设施的一部分,与数据要素市场紧密相连^[3]。《数据二十条》提出,数据基础设施的构建将支撑数据、算法、算力等核心资源的一体化流通,减少数据产权在不同平台上的混淆和争议,从而将数据交易所及其参与主体有机的连接起来。数据要素市场的价值、定价和交易需要借助强大的算力支持,从而推动数字化时代的商业决策、创新和战略执行。算力交易的安全问题直接关系到数据的可信性,进而影响数据要素市场的公正交易^[4]。

为确保算力网络的稳定运行和可持续发展,深刻理解数据要素市场的特点和规律是至关重要

的。深入了解数据要素市场有助于构建更加安全可信的算力交易体系,从而推动整个算力网络的安全能力建设。这种全面的了解为建立一个坚固而可靠的计算资源交换生态系统奠定了基础,对于推进整个算力网络的安全基础设施建设是不可或缺的。

本文以数据产品的价值化为出发点,围绕数据要素市场中数据价值、数据定价和数据交易3个主要阶段系统梳理了现有的研究,旨在为算力网络的安全交易提供理论支持和实践指导,推动算力网络安全能力建设迈向新的阶段。

1 数据要素市场

在数据要素市场中,数据产品扮演着流通的主导角色。数据产品是以数据为核心,经过处理、分析和整合,旨在满足特定需求或解决特定问题而设计和生产的产品。作为信息处理和分析的产物,数据产品通过提炼、整合和展现数据,为数据要素市场注入了新的动力和价值。这种注入不仅使数据产品成为市场中的核心流通物品,同时也推动了整个市场的发展和繁荣。

在数据要素市场中,数据产品经历了从一个难以衡量真实价值的产品到最终通过交易实现流通的复杂过程,涉及许多关键环节,如图1所示。

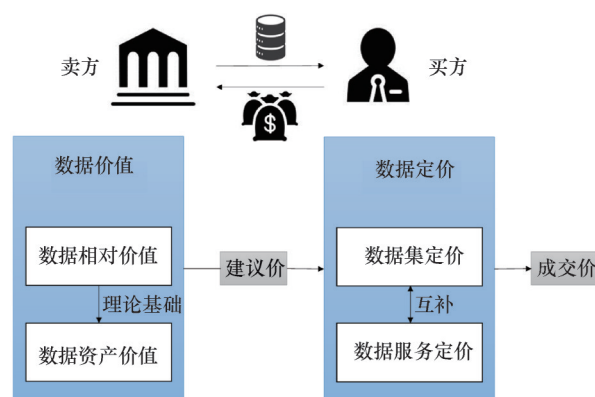


图1 数据要素市场
Figure 1 Data factor market

数据价值评估是实现数据交易的前提,也是数据经济发展的基础^[5]。价值评估要对数据的各个方面进行客观评估,不仅涵盖了数据的量化属性,还包括了其潜在的创新和社会价值^[6]。

数据的流通和利用离不开有效的数据定价机制,通过合理的定价机制,将数据的战略、经济和市场价值转化为可衡量的数字^[7]。数据定价机制不仅仅是给数据贴上价格标签,还需要考虑数据的特性、市场需求、数据质量等多个维度^[8]。

为了实现数据的流通和定价,高效安全的数据交易系统显得至关重要^[9]。数据交易是指数据所有者将其数据资源提供给其他组织或个人,以获取相应价值的过程。相关研究表明,我国2022年数据交易行业市场规模达到876.8亿元,占全球数据市场交易规模的13.4%,呈现快速增长的趋势。数据交易作为连接数据拥有者和数据消费者的桥梁,实现了数据的流通和变现,推动了信息共享、市场合作和商业创新^[10]。

在数据要素市场中,数据价值、数据定价和数据交易构成相互关联的3个重要部分。首先,数据价值作为基础,是数据产品在市场上的实际或潜在贡献,直接影响着其市场吸引力。其次,数据定价是在充分考虑数据价值的基础上,通过科学合理的定价机制来确保数据产品的市场定位和竞争力。最后,数据交易是在数据价值和数据定价的基础上进行的,通过买卖双方的协商达成,实现数据产品的流通和交换。这三者之间的协同作用,为数据要素市场的健康发展和高效运行提供了关键支持。

2 数据价值评估

数据价值评估是构成数据拥有者和数据消费者之间公平合理交易的基础。如何全面客观地评估数据的真实价值,是亟须解决的关键问题^[11]。

国内学者对数据价值评估的研究主要分为两个方向:一是评估数据的相对价值水平,二是评估数据资产的价值,即数据进入数据交易市场的建议价。

2.1 数据相对价值评估

数据的相对价值指的是在给定的评估维度和指标下,数据在多个维度的表现与其他数据相比的程度。通过对数据相对价值的评估,可以更清晰地了解数据在特定条件下的重要性和效用^[12]。这有助于将数据进行定位和排序,使决策者能够更准确地理解每个数据对整体价值的贡献^[13]。

2.1.1 价值评估指标体系

对数据的相对价值进行评估,首要任务是确定价值评估的维度和指标。通过仔细选择与需求相关的维度(如数据质量、实用性和战略价值),以及对应的具体指标(如数据一致性、数据可靠性等),来确保评估全面准确^[14]。

在国内学术领域,许多学者积极探索建立标准化、统一化的数据价值指标体系,旨在为数据评估提供更系统、一致的框架。

2019年,国家市场监督管理总局和中国国家标准化管理委员会联合发布了《电子商务数据资产评价指标体系》^[15],以系统性、典型性、动态性和可操作性为原则构建了适用于数据价值评估指标体系,如图2所示。

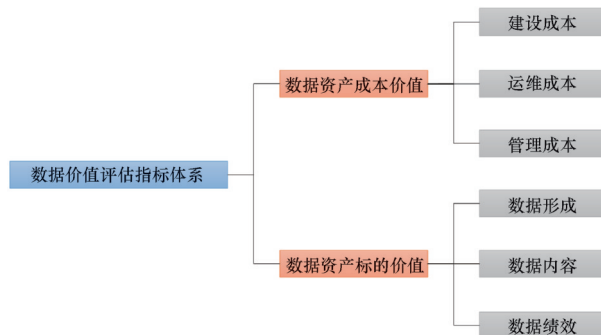


图2 数据价值评估指标体系

Figure 2 Data value evaluation indicator system

李永红等^[16]提出,对数据价值的影响因素可综合考虑两方面:一是数据量与数据质量;二是数据分析能力。主要包括企业规模、数据覆盖范围、数据完整性、数据外部性、数据时效性、数据相关性,以及信息系统、人才技能、消费者需求等因素。

与此同时,还有一部分学者更加注重实际应用场景的差异性,根据特定需求和背景,设计定制化的数据价值指标体系。这种个性化的设计能够更好地适应各行各业对数据的独特要求,为决策提供更有针对性的数据支持。

宋杰鲲等^[17]针对企业数据资产价值,构建了包含数据成本、表观价值和服务价值3个维度在内共11个指标的体系,如图3所示。

胥婷等^[18]通过专家调查法确定了医疗健康领域的的数据价值评估指标,如图4所示。

这两种研究相辅相成,标准化体系为跨行业、跨领域提供了普适性,而个性化设计方法则更加灵活,能够更好地满足不同行业和特定领域的实际需求^[19]。未来的研究方向将集中在更深入地整合这两种取向,以实现通用标准更贴近实际需求的目标,并推动数据价值评估方法的灵活性和个性化发展。

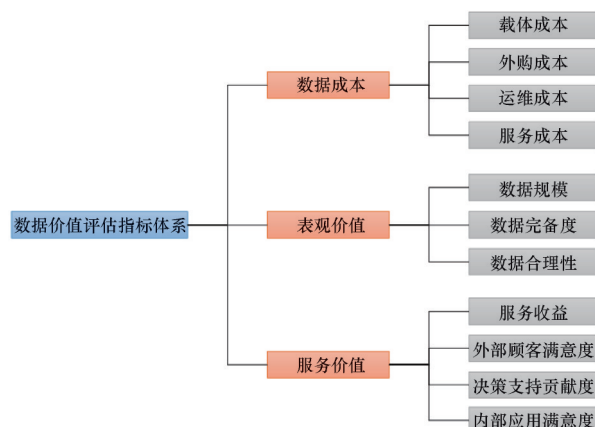


图3 企业数据资产价值评估指标体系

Figure 3 The index system for evaluating the value of enterprise data assets

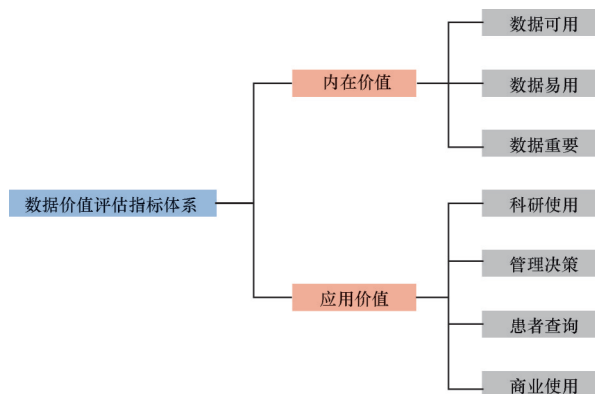


图4 医疗健康数据价值评估指标体系

Figure 4 The value evaluation index system of medical and health data

2.1.2 价值评估指标权重

在确定了评估价值指标体系后,接下来的关键步骤是对各个指标进行权重的评估。这一过程通常采用专业方法,如层次分析法、熵值法,通过专家意见或数学模型为不同指标赋予适当的权重,以确保评估的客观性和准确性。

张志刚等^[20]从成本和应用两个角度评估了价值的主要影响因素。他们运用层次分析法构建

指标评价体系,将复杂问题逐层分解,建立层次结构。随后对各层次进行两两比较,得到各元素之间的权重,通过综合计算得出最优方案。结合专家评分法得到的各个指标得分,最终确定了数据资产价值的计算模型。

杨亚霖^[21]将企业价值分为获利能力价值和潜在获利能力价值。他运用熵值法确定潜在获利能力价值中各个指标的权重,通过计算各指标的信息熵来衡量指标之间的不确定性和随机性,从而确定各指标的权重。相比主观赋权,这种方法更具客观性和可靠性,有助于提高企业价值评估结果的合理性和准确性。

左文进等^[22]创新性地聚焦于用户感知价值,引入大数据资产感知价值维度的划分以及价格质量比率概念。他运用多维偏好线性规划分析模型求解评价指标权重,弥补了评估专家专业能力的不足,体现了以用户需求为中心的理念。

2.1.3 数据价值指数

数据价值指数是价值指标数值与价值指标权重的加权组合,代表数据的相对价值水平。此外,国内许多学者也探索通过其他方法来计算数据价值评估指数,以使结果更加客观和准确。

吴江等^[23]首先通过层次分析法评估了3个维度指标的权重,将不确定性和模糊性引入决策过程,之后建立模糊隶属度函数描述各因素之间的模糊关系,并结合模糊综合评价法量化各个指标的分数,得到了铁路数据资产的评价结果。

张弛^[24]提出了基于颗粒度、多维度、活性度、规模度、关联度5个特征维度的数据价值分析模型,并通过深度学习方法计算各个特征维度的值。

王静等^[25]使用实物期权法,通过层次分析理论计算了标的资产影响因素的权重,并基于B-S模型对互联网金融标的资产价值进行评估。

王子焉等^[26]提出了基于灰色关联分析和随机森林回归的专利价值预测模型。通过熵值修正G1确定指标的权重,计算灰色关联度筛选出样本集,最后训练随机森林回归模型预测专利的价值评估结果。

2.2 数据资产价值评估

数据资产价值广泛地体现数据在整个商业体系中的重要性和实际应用的广度。数据资产价值考虑了数据对企业战略目标的贡献,包括对决策支持、市场竞争力和创新能力等因素的影响^[27]。由于数据与无形资产的基本特性类似,因此国内学者普遍使用成本法、收益法和市场法来对数据资产价值进行评估。

2.2.1 成本法

成本法基于生产费用价值论,将数据的重置成本作为其价值计量基础,数据的价值等于创建或替代该数据的成本,涵盖了数据获取、处理、存储等环节的费用。成本法的经营理念在于理性消费者在条件允许的情况下,不愿以超过当前构建成本的价格购买数据资产。

闭珊珊等^[28]基于重置成本,在评估时结合了一系列杠杆作用因素,对4种子因素加权平均之后得到了价值评估模型:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i (1 + R_i) I_i M_i E_i \quad (1)$$

其中, P 表示数据资产价值, C_i 表示数据集的重置成本, n 表示数据集个数, R_i 为成本投资收益率, I_i 为固有价值因素修正系数, M_i 为市场价值因素修正系数, E_i 为环境约束因素修正系数。

邹贵海等^[29]针对电网数据,构建了两阶段的修正成本法的评估方法。第一阶段,根据数据商品的成本范围,修正数据资产的成本价格;第二阶段,通过对比成本价与市场价确定最终的价格区间。

成本法适用于市场不活跃、数据独特或者难以获取市场参照的场景,其优势在于相对简单,但存在无法充分反映数据的未来潜在价值,且过度依赖成本数据等问题。

2.2.2 收益法

收益法通过测算数据资产未来带来的经济效益,并利用折现率计算其现值,从而得出数据资产的价值。其核心原理在于理性消费者对数据资产进行投资时,所愿支付的价格不应高于未来通过数据资产获得的回报。数据的价值被视为其未来可能带来的经济效益,这可能包括提高决策质量、创造新机会等方面的潜在价值^[30]。

陈芳等^[31]通过剩余法从总收益中提取与数据资产相关的剩余收益。考虑数据资产的所有权不明确以及数据安全等风险，他们巧妙地区分了数据资产的折现率和整体无形资产的折现率，从而构建了一个数据资产评估模型：

$$V = \sum_{t=1}^n (E - E_w - E_f - E_i)_t (1 + i)^{-t} \quad (2)$$

其中， V 代表数据资产价值， E 表示企业的现金流， E_f 是固定资产的贡献值， E_w 表示流动资产的贡献值， E_i 表示其他资产的贡献值， n 是收益期， i 是折现率。

高华等^[32]根据数据资产的应用场景将评估方法划分为有交易和无交易两类。对于有交易场景的价值评估，他们在成本价值和应用价值的基础上引入了风险因素，通过结合层次分析法和超额收益法，系统计算了数据资产的价值。

尽管收益法得到广泛应用，且被学者和资产评估业务接受，但也存在难以独立评估数据资产、对未来效益的不确定性和折现率选择主观性等缺点。

2.2.3 市场法

市场法通过参考市场上类似资产的交易价格来确定资产的价值，基于相似的资产在市场上应该具有相似的市场价值的理念。这种方法在存在足够市场活跃度和相似可比资产的情况下得到广泛应用。

李永红等^[16]首先通过层次分析法确定价值因素的权重，之后通过灰色关联分析法确定可比资产，最终得到基于市场法的数据资产价值评估模型：

$$V = V_1 \cdot K_1 + V_2 \cdot K_2 + V_3 \cdot K_3 + V_4 \cdot K_4 + V_5 \cdot K_5 \quad (3)$$

其中， V 表示需要进行评估的数据资产价值， $V_1 \sim V_5$ 表示可比数据资产的价值， $K_1 \sim K_5$ 表示可比数据资产的权重。

以上 3 种方法的优缺点，如表 1 所示。

2.2.4 基于机器学习的数据价值评估方法

随着人工智能的迅猛发展，学者积极探索将机器学习与传统数据价值评估方法相结合的可能性，这一趋势在数据科学领域引起了广泛关注。这种融合的目标是借助机器学习的强大能力，提高对数据价值的精准评估和预测能力，以更好地满足日益复杂和多样化的市场需求。

倪渊等^[33]针对价值评估主观化的问题，提出了以资源和资产双重视角为基础的 AGA-BP (adaptive genetic algorithm-back propagation) 神经网络智能化数据资源价值评估模型。

沈俊鑫等^[34]提出了基于模型堆叠集成 GBDT (gradient boosting decision tree) 算法的数据资源价值评估方法，通过综合敏感性分析，构建了全面的评估指标体系，利用 GBDT 和 Stacking 集成学习算法来测算数据价值。

机器学习算法具有处理大规模、复杂数据集的优势，其强大的模式识别能力和自适应性使其在数据资源价值评估中具备巨大潜力^[35]。同时，随着机器学习在数据市场中的广泛应用，数据隐私、安全性和可解释性等方面也成为研究的焦点，以确保机器学习在数据价值评估中的应用是可靠和可信的。未来可期望进一步深入研究机器学习与传统价值评估方法的有机结合，为数据价值评估领域带来新的可能性和挑战^[36]。

3 数据定价模型

通过数据价值评估，数据所有者可以确定其数据集的参考价，为数据在市场上的潜在价值提供了初步的估计。而最终的成交价并非事先确定，是在实际数据交易的过程中通过市场竞争和双方协商达成的，这需要数据定价方法来完成。数据定价方法的关键在于确保数据交易的公正、

表 1 数据价值评估方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of data value evaluation methods

方法	理论基础	优点	缺点
成本法	资产的构建成本，重点考虑重置成本和贬值	计算简单，提供明确的计量基础	无法全面反映潜在价值，忽略了数据的实际经济效益
收益法	基于未来经济效益，通过折现计算现值	直观便于理解，能够反映长期价值	直接产生的收益难以计算，需要估计未来收益风险因素
市场法	市场上相似资产的交易价值	直接反映市场实际交易情况	市场不活跃时难以应用

透明和有效性^[37]。通过明确数据定价机制,可以建立一个公正的数据市场生态,促进数据资源的合理配置,为企业提供更精准的商业决策支持^[38]。

在传统的市场中,数据集的买卖一直是主要的交易形式。随着科技的不断进步,尤其是机器学习等新兴技术的广泛应用,人们对于更深层次的数据分析和处理服务的需求逐渐上升^[39]。传统的数据市场结构难以满足这一变化中的需求差异,因而新的交易形式应运而生^[40]。这一趋势推动了数据服务的兴起,从而使数据服务的定价和交易机制成为数据市场领域的研究热点。

数据集定价针对的是对原始数据的需求。这类需求可能包括对大规模、全面、高质量数据的获取,以满足特定领域的研究、模型训练或者其他直接使用的目的^[41]。数据服务定价针对的是基于数据分析和处理提供的服务。这类需求可能包括对已处理数据的进一步分析、挖掘、可视化等服务^[42]。这样的差异化定价策略有助于更好地满足多样化的市场需求。

Pei^[43]在其研究中指出,评估一个定价模型是否科学合理应该从以下几个方面进行。

1) 真实性:定价模型应当反映真实市场条件,如数据交易中的购买者都是自私的,数据交易的最终价格是最大化买家真实效用价值的价格。

2) 公平性:定价策略应确保收益的公正分配,避免歧视性定价。

3) 收益最大化:在定价模型中,根据不同的目标进行优化,如成本最低、利润最高或销售额最大。

4) 无套利:定价机制应避免机制漏洞,防止市场中存在不需要投入资金却能获得正收益的机会。

5) 隐私保护:使用加密和匿名化等技术来确保市场交易中隐私信息的保护。

6) 计算效率:选择高效的算法和数据结构,降低计算复杂度以提高定价模型的计算效率。

本节旨在深入研究数据市场中的两大核心问题:数据集产品定价和数据服务产品定价,结合

定价模型的6个关键要素,分析它们在数据交易系统中的作用和相互关系。

3.1 数据集产品定价

3.1.1 基于博弈论的定价

博弈论是研究决策制定者之间相互影响的数学分支,专注于分析策略性互动的情境。它在经济学、政治学、生物学等领域得到广泛应用,为理解和优化决策过程提供了理论框架^[44]。

博弈论作为当前主流的数据定价方法之一,主要原因在于其可以解决多方利益关系、信息不对称的问题,满足博弈的动态性以及策略的均衡和收益最大化。在复杂的数据定价过程中,博弈论通过模拟和分析多个参与者之间的相互作用,可以更好地理解他们之间的策略选择和博弈过程,为建立实际情况下的定价模型提供支持。博弈论能够有效处理信息不对称的情况,通过提供分析工具来解决合作和竞争策略^[45]。博弈论强调博弈的动态性,从而捕捉动态环境下的数据定价过程。此外,博弈论关注博弈的均衡点,有助于找到交易市场达到均衡状态的定价策略,并同时考虑参与者的收益最大化^[46]。

目前,交易中比较适用的博弈方法是 Stackelberg 博弈和讨价还价博弈。Stackelberg 博弈是一种序贯博弈,其中领导者在追随者之前做出决策,影响着追随者的最佳响应策略。讨价还价博弈是一种交互式的博弈形式,通过反复的提议和回应来达成协议。

Liu 等^[47]设计了一个包含两个阶段的 Stackelberg 博弈模型,以解决数据消费者和市场代理的定价和购买问题。在第一阶段,作为领导者的市场代理选择数据所有者中的赢家,并确定其定价策略。在第二阶段,作为追随者的数据消费者决定购买的数据量。最后通过逆向归纳法求解了各个阶段博弈的最佳决策。

Xiao 等^[48]构建了一个包含数据供应商、服务提供商和用户的 Stackelberg 博弈数据市场模型。在第一阶段,用户和数据供应商分别确定数据和价格。在第二阶段,服务提供商为了最大化利润决定所请求的数据效用。通过博弈论的分析,证明存在唯一的纳什均衡,使每个参与

者都能选择最优的均衡策略,从而实现最优定价。

Jung 等^[49]构建了一个基于差分隐私实现隐私保护的数据市场框架。在该框架中,市场代理通过鲁宾斯坦讨价还价博弈调解数据提供者和数据消费者之间的协商。数据提供者可以将隐私侵犯的风险反映到价格中,而数据消费者则通过考虑所需数据的准确性和可用预算来确定数据的价格。这一设计旨在确保交易公平性的同时实现参与者的共同收益最大化。

赵丽等^[50]通过重置成本法和收益现值法分别确定了数据资产评估价格区间的下限值和上限值,之后构建了基于价格区间的三阶段讨价还价博弈,通过逆向归纳法求解博弈的纳什均衡,得到使各自共同收益最大化的均衡价格。

Stackelberg 博弈适用于数据市场中领导者与跟随者关系较为清晰、市场相对静态、信息对称度较高的场景。而讨价还价博弈则适用于数据市场中存在多方参与、信息不对称、交互式决策的场景。这些博弈论方法为数据市场提供了灵活、适应性强的定价策略,能够更好地满足不同场景下的需求^[51]。

3.1.2 基于拍卖的定价

拍卖机制作为一种有效的数据定价方式,凭借其突出的竞争性定价特性,确保数据价格由市场供需关系决定,更准确地反映了数据在市场中的实际价值^[52]。通过引导市场参与者自主报价,拍卖机制推动数据价格的发现,避免了过高或过低估计,有效提升了市场运作效率^[53]。其适应性和灵活性使其能够灵敏地满足各种类型数据和多样化市场需求,从而促进数据交易的公平性和高效性。

在基于拍卖的数据定价研究中,可根据参与者数量和角色将其分为两种类型:单边拍卖和双边拍卖。

在单边拍卖中,唯一的卖方向多个潜在的买方提供数据,并通过竞争性投标来决定最终数据价格。

尹鑫等^[54]设计了一种基于第二价格密封拍卖的大数据定价方法。在拍卖开始前,投标者向注册中心提交身份验证,并进行秘密投标。交易

所计算成交价后,公布获胜者身份和需支付的第二高价,确保拍卖过程的安全和有效。

An 等^[55]提出了一种多轮假名证明拍卖机制,旨在最大化数据所有者和消费者的社会福利,确保参与者之间的有效数据交换。为了抵御假名竞价攻击,拍卖机制中数据量是通过包的大小来进行交易的。理论分析证明,只有当投标方的出价与要价相等时,投标方才能获得最大的效用,成功实现激励相容性、假名竞价证明和计算效率等目标。

随着数据交易的不断发展,双边拍卖在数据定价中更为流行,主要得益于其能更好地应对复杂的多方关系。在双边拍卖中,多个数据提供方和多个潜在买方同时参与,这反映了真实市场中的多方博弈和竞争态势。

Cao 等^[56]提出了一种迭代拍卖机制,协调数据交易、引导自私的数据代理最大化收益,同时避免直接访问代理的私人信息。该机制首先由系统设计者向代理宣布数据分配和定价/报销规则。随后,每个代理根据规则计算并提交出价,以最大化个体效用。系统设计者依据提交的标书和规则计算数据分配结果,最后根据结果调整相关规则,宣布新规则,进入下一轮拍卖。整个迭代过程直至系统设计者观察到收敛。迭代拍卖机制实现了参与者的共同收益最大化,同时具有激励性,每个代理参与其中的效用都是非负的,因此有动力服从该机制。

Li 等^[57]在他们的研究中引入了一个具有稀疏信息的经纪人,用于有效管理和调整交易市场。在此框架下,他们提出了一种迭代双边拍卖方案,通过经纪人解决了交易计算资源的分配问题,并设计了特定的价格规则,以鼓励交易双方以真实的方式出价。该方法允许逐步提取隐藏信息,实现最优的计算资源分配和交易价格,旨在保护隐私的同时最大化社会福利。

3.1.3 基于数据质量的定价

基于数据质量的定价方法通过考虑数据的质量特征来确定数据价格的模型。这种定价方法通常依赖于对数据可用性、准确性、完整性、一致性等质量指标的评估,从而为数据的不同质量水平制定不同的价格策略^[58]。版本控制是数据定

价的重要策略，数据销售者可以根据买家的需求将数据定制为不同的版本。数据质量的高低直接影响数据在市场中的价值，因此基于数据质量的定价方法旨在确保买方能够根据其需求和对数据质量的要求来选择适当的数据，并在价格上反映出数据的实际价值^[59]。

Heckman等^[60]提出了一种线性模型来设定数据集的价格：

$$\text{Price} = \text{Fixed cost} + \sum_i w_i \cdot \text{factor}_i \quad (4)$$

其中， factor_i 是一系列评估数据质量的因素，包括但不限于数据的使用年限、数据的周期性、数据量和数据的准确性， w_i 是相关的权重。

本方法实施的难点在于需要足够的数据集的公开价格来估计模型参数 w_i 。

Yu等^[61]提出了一个双层数学规划模型，综合考虑数据质量和数据版本策略的数据定价问题。该模型以数据质量的多维性和维度间相互作用为出发点，制定了多版本数据策略。在模型中，数据所有者充当领导者，制定数据产品版本数、数据质量和价格，而消费者则作为追随者选择理想的数据产品，以最大化自身效用。最后通过遗传算法进行求解，结果证明在考虑多维度数据质量的情况下，多版本策略有助于更好地实现市场细分，提高盈利性和可行性。

Yang等^[62]提出了一种以数据质量为基础的大数据市场定价模型。首先对影响数据质量的各维度指标进行了分析，构建了一个线性评价模型。接着从数据科学的角度探讨了质量水平对大数据分析的影响，制定了数据质量的效用函数。最后从消费者行为的角度分析消费者的支付意愿，制定了基于质量效用函数的优化定价方案。

3.1.4 基于元组和信息熵的定价

基于信息熵和元组的定价方法是一种综合运用信息熵和元组理论的数据定价策略。信息熵通常用于衡量数据集中信息的丰富性和复杂性。元组代表数据集中的个体记录或样本，不同的元组可能对整个数据集的信息贡献不同，具有不同的重要性。

该方法结合信息熵计算数据集中各个特征的信息贡献，同时考虑元组在整体数据中的重要

性，为数据定价提供了基于信息理论和数据结构的创新途径。

Li等^[63]提出了一种基于信息熵的信息度量方法：

$$H_{\text{ind}}(\text{Tup}) = - \sum_{t_i \in \text{Tup}} p(t_i) \log_b p(t_i) \quad (5)$$

其中， Tup 是一个数据集的一个非空子集， $H_{\text{ind}}(\text{Tup})$ 表示其信息熵， $p(t_i)$ 表示 Tup 中第 i 个数据出现的概率。

彭慧波^[64]结合分级机制提出了基于信息熵的数据集隐私含量度量方法，将待交易的数据集按照隐私含量分为10个隐私风险级别，并使用数据引用指数作为影响数据定价的重要因素，得到了以元组为单位的数据价格计算公式：

$$p_i = P_s \left(\frac{\theta_i}{\theta} \alpha + \frac{r_j}{r} \beta \right) \quad (6)$$

其中， p_i 是第 i 个元组的价格， P_s 表示待交易数据集的供给价格， θ_i 表示第 i 个元组的隐私含量， r_j 表示第 j 个用户的数据引用指数， r 表示所有用户数据引用指数之和。

Shen等^[65]提出了基于元组粒度的个人数据正向分级和反向定价模型，通过调查影响数据价值的属性，分析了数据元组价格随数据成本、价值权重、数据参考指数、信息熵、信用等级等因素的变化规律，数据包中第 i 个数据元组的价格计算公式：

$$p_i = P_s \left(\frac{w_i}{w} \alpha + \frac{q_i}{q} \beta + \frac{r_j}{r} \gamma \right) \quad (7)$$

其中， P_s 表示数据包的供给价格， w_i 是第 i 个数据元组的价值权重， q_i 表示第 i 个元组的信息熵， r_j 表示第 j 个用户的数据参考指数， α 、 β 、 γ 分别为3个指标的权重。

3.2 数据服务产品定价

3.2.1 基于查询的定价

基于查询的定价是面向数据查询服务的灵活定价方法。随着数据量的急剧增加和数据集的多样性，用户通常不再需要整个数据集，而是只对其中的特定信息或统计结果感兴趣^[66]。基于此背景，产生了对数据查询服务的需求，即用户希望能够通过提出特定的查询条件获取所需的数据摘要、统计信息或定制化的结果。

在基于查询的定价模型中,卖家根据用户的查询需求对数据集的查询结果进行定价。这一方法的核心思想是将数据定价与实际查询的复杂性和价值相联系起来,使定价更为个性化和精确。该模型的特点在于卖方可以为每个数据视图设定独立的价格,而买方则能够根据自身需要进行任意查询,获取所需的数据^[67]。同时,该模型具备一定的智能性,能够通过制定视图的价格生成其他任意视图的价格。

Koutris 等^[68]提出了基于查询定价的数据市场原型,给定一个查询,算法选择可用于回答该查询的最便宜的答案视图集,这些视图的价格之和就是查询的价格。他们还提出了查询定价需要满足的两个属性:①抗套利,整体的价格应小于或等于所有部分的单价总和,来确保整体购买不会因为拆分购买而变得更便宜;②免贴现,当确定每个视图的价格时,整体数据库的价格应在各视图价格之和的基础上有一个折扣。

Zheng 等^[69]提出了基于在线查询的群体感知数据定价机制。在数据交易中,数据供应商通过提供原始数据服务来获取收入,而数据消费者可以通过单数据查询、多数据查询和范围查询等方式购买数据服务。该定价模型包括版本控制机制和在线定价机制。通过版本控制机制,数据商品生成多个版本,以满足数据消费者不同的置信度需求。在线定价机制以实现收益最大化为目标,确定每个基础数据商品的基本价格。

Deep 等^[70]提出了一套实时定价系统,其主要目标是通过减少不确定性来计算查询包的价格。该系统支持有效的历史感知定价,使每位买家可以根据当前情况对查询进行定价,同时还可以基于过去的查询进行收费。这一框架允许数据卖家选择不同的定价函数,并明确了关系和控制查询价格的属性级参数,以更精细地为数据的不同部分分配值。

Miao 等^[71]对不完全数据查询的定价问题进行深入研究,充分考虑了数据的贡献/使用、数据完整性以及查询的质量等多方面因素,引入了两个新的价格函数,分别为用法和完备性感知价格函数(UCA 价格)以及质量、用法和完备性感知价格函数(QUCA 价格),并设计了高效的

算法用于计算查询价格。

3.2.2 基于机器学习的定价

基于机器学习的定价方法充分利用数据分析和预测算法,为企业提供了更为智能和灵活的定价策略^[72]。通过对市场趋势、竞争状况和消费者行为的深度分析,机器学习模型能够实现个性化定价,根据不同消费者的特征和行为模式调整价格,从而提高市场细分和满足多样化的需求^[73]。实时调整、定价优化和需求响应等特性使企业能够更迅速地适应市场变化,同时通过竞争分析和风险管理,帮助企业在不确定的商业环境中做出更明智的定价决策。

Chen 等^[74]提出了基于机器学习感知模型的创新定价方法,其中市场以出售具有不同精度的机器学习模型为主,而非直接销售数据集。在这一定价机制中,价格与模型准确性紧密相关,根据注入模型实例的噪声方差来制定费用,这样的设计使买方能够在价格和准确性之间做出选择,充分体现了版本控制的概念。通过详细的仿真验证,研究团队证实了该方案能够实现无套利和最大化收益的目标。

Alsheikh 等^[75]构建了基于机器学习服务的物联网市场模型,并提出了独立销售和捆绑销售两种最优定价方案。他们将物联网服务质量定义为购买数据量与机器学习算法准确性之间的映射,在物联网服务中引入了捆绑销售,构建了优化模型,以获取最佳的捆绑服务订阅费用和数量,实现服务提供商的利润最大化。并提出了基于 Shapley 值的激励分配方案,按照服务提供商的贡献公平分配所产生的利润。

Jiao 等^[76]研究了数据分析服务中可能存在的数据易腐性问题,即所需数据的价值可能随着时间而下降,对数据服务质量产生影响。为此,提出了非易腐服务和易腐服务的两种以提供商为中心的销售模式,并在两个模型中分别建立了最优定价和利润最大化模型,以获取数据分析服务的最佳价格和分配。

Xu 等^[77]提出了专为移动医疗场景中机器学习设计的在线数据评估和定价模型。首先采用贝叶斯机器学习模型,引入了基于熵概念的新型度量,以评估数据对机器学习模型训练的影响。之

后根据评估结果确定支付作为对用户贡献数据的补偿，将支付决策过程建模为以利润最大化为目标的上下文多臂强盗问题，并提出了一种数据定价机制发现最优价格，同时满足激励性、鲁棒性、无套利和数据隐私保护的要求。

3.2.3 基于隐私补偿的定价

基于隐私补偿的定价方法致力于协调信息共享与隐私保护的创新策略。数据的交易和共享往往伴随着潜在的隐私泄露风险，在这一模型中，个体或组织愿意分享敏感信息，期望在提供数据的同时，获得金钱、服务或其他权益的回报，因此必须采用系统性的方法来衡量并适当补偿由此可能引发的隐私损失。

差分隐私通过向数据引入噪声的技术，以防止在个别个体数据中识别出特定信息。将这一技术与隐私补偿的定价模型相结合，使定价模型具备精准性，可根据差分隐私级别、数据敏感性以及价值等因素进行个性化定价，从而确保对隐私风险的补偿在经济和社会层面上都具有合理性。

Shen 等^[78]提出了一种基于差分隐私的大数据定价方法，采用了差异化定价策略，根据数据的方差水平进行差异化的价格制定，以确保具有更高隐私程度的数据能够享有更低的定价。该方法设计了正向定价和反向定价两种独特的机制，公平合理地为用户所有者提供细粒度的隐私补

偿，在隐私保护和数据效用之间实现平衡。

Zhang 等^[79]提出了专注于单一数据所有者的私有数据查询机制。该机制为常规查询，如计数、中位数和线性预测器等，生成准确的输出。在假设数据所有者真实宣布其隐私保护要求的前提下，该机制有效地提高了查询的准确性，并实现了激励相容、个人理性和预算可行性。

Niu 等^[80]对基于私有相关数据的汇总统计定价框架进行深入的研究。该框架在保持无套利定价的同时，创新性地提出了两种隐私补偿方法。在自底向上的方案中，经纪人首先满足每个卖家的隐私补偿需求，然后决策以何种价格向买家出售统计数据。而在自顶向下的设计中，经纪人首先确定出售给买方的数据聚合产品的总价，然后从总价中划拨一部分用于满足卖家的隐私补偿，补偿与其隐私损失成正比。

Jin 等^[81]专注于解决移动人群传感场景下的位置隐私泄露问题。在提出的方案中，数据所有者首先根据个人隐私偏好向数据中引入随机噪声。接着，每位数据所有者根据注入的随机噪声的代价、均值和方差进行出价。最终，通过启发式算法选取对边际效用贡献最大的数据所有者，促进数据所有者与平台之间的位置隐私交易，合理补偿数据所有者的感知成本和隐私损失。

本节总结了7种数据定价方法的优缺点和运用场景，如表2所示。

表2 数据定价方法的优缺点和运用场景

Table2 Advantages and disadvantages of data pricing methods and application scenarios

方法	理论基础	优点	缺点	适用场景
基于博弈论的定价	研究决策制定者之间相互影响,分析策略性互动	有效处理信息不对称,能够模拟多方博弈过程	计算需求较高,实施困难且效率较低	多方利益关系、信息不对称、策略博弈
基于拍卖的定价	竞争性定价	通过市场机制实现价格发现	需要设计有效的拍卖机制,信息不对称可能影响效果	多样化市场需求
基于数据质量的定价	通过数据质量评估制定价格	可解释性高,有助于提高数据质量	复杂度高,各个指标间关系难以量化	数据质量指标容易量化
基于元组和信息熵的定价	信息论理论和元组理论	信息熵定义价值更直观	考虑的维度较少且量化困难	适合私人数据
基于查询的定价	根据查询需求设定不同价格	灵活适应用户需求,能够设定基础视图的价格	实现较复杂,需要卖方对查询需求进行评估	用户对数据查询需求多样化
基于机器学习的定价	数据分析和预测算法	实现个性化定价,提高市场细分和满足多样化需求	需要较大计算资源和时间和高质量的标注训练数据	实时动态调整定价,差异化定价
基于隐私补偿的定价	差分隐私机制	补偿隐私损失引发的风险,考虑数据敏感性	噪声影响数据质量	平衡隐私和经济利益

4 数据交易系统

4.1 系统架构

数据交易系统通过买卖数据来促进数据流通和共享的平台。这种系统旨在连接数据提供者和数据消费者,使其能够有效地进行数据交换,从而满足不同实体的需求。在构建和运营数据交易系统时,选择合适的系统架构对于确保高效、安全的数据交易至关重要。

4.1.1 集中式数据交易系统

2015年,我国首家大数据交易所—贵阳大数据交易所正式成立,截至2022年9月,已经建立了47家数据交易场所。这一发展趋势标志着我国数据交易市场的蓬勃发展,各个平台在推动数据流通和促进信息共享方面发挥着重要作用。

我国数据交易场所主要采用集中式数据交易模式。这些平台通常充当数据拥有者和数据需求者之间的中介角色,负责数据的处理和存储。除了基本的数据交易功能外,这些平台还为用户提供了多种服务,包括但不限于API接口、数据包购买、云服务、解决方案提供以及定制化数据服务等。

在集中式数据交易系统中,所有的数据流通和处理都集中在一个中心化的平台上^[82]。该平台负责管理和协调数据供应商与数据购买方之间的关系,处理交易事务、确保安全性,并提供相关的服务和工具。

如果没有中介参与,买卖双方直接交易可能引发多方面的问题^[83]。首先,信任是一个重要的难题,缺乏中介可能导致数据提供方和数据购买方之间的信任缺失。直接交易使双方难以核实对方的真实意图和数据质量,增加了交易的不确定性,从而降低了参与的积极性。此外,直接交易也会增加数据的安全风险。缺乏专业中介提供的安全保障,数据容易受到未经授权的访问或攻击,可能导致敏感信息泄露,对数据提供方和购买方都构成潜在威胁^[84]。另外,如果没有中介,卖家需要自行构建交易市场,这将增加交易的成本和复杂性。对于有多个卖家的情况,市场的建设和管理会变得更加困难,容易出现信息不对称和不公平竞争等问题,进而影响整个交易生态系统的健康运行。

在集中式交易平台中,中介可以根据用户的购买需求选择不同的定价机制。通过这些机制,中介能够在保障交易安全的同时,推动数据市场的有效运作。不同的定价机制也为数据交易各方提供了更多选择,从而促进了交易的公平性和效率^[85]。

然而,随着数字时代的来临,集中式模式逐渐显露出一些问题,尤其是在面对隐私保护和数据安全性方面存在挑战^[86]。首先,单点故障是一个显著的问题,一旦中心服务器发生故障,整个系统可能陷入瘫痪状态,服务不可用。其次,依赖性较高,用户和服务提供者对中心平台的依赖性使得系统容易受到单一故障的影响,可能导致整个生态系统的瘫痪。此外,集中式系统容易成为攻击目标,一旦被攻破,可能导致大量敏感数据的泄露,带来严重的隐私风险。这些问题都需要在设计和运营集中式数据交易系统时得到充分考虑和解决。

为了解决集中式数据市场所存在的问题,去中心化的数据市场迎来了崭新的发展^[87]。近年来,随着区块链技术的不断成熟,去中心化数据市场在底层架构上找到了良好的支持,使其更具前景和潜力,其架构设计能够回避对可信中介的依赖,摆脱了单点故障和性能瓶颈的困扰,同时提高了数据交易的透明度和可信度。这种技术趋势为数据市场的未来提供了更加可靠和创新的发展路径。

4.1.2 分布式数据交易系统

随着信息技术的不断演进,分布式系统的理念逐渐渗透到数据领域。分布式数据库、区块链等新技术的涌现为分布式数据交易提供了坚实的技术基础。区块链技术的进步使实现去中心化的数据管理变得更为切实可行,通过分布式账本技术实现了数据的安全、透明和难以篡改。因此,分布式数据交易系统成为适应新时代需求的一项创新选择,强调了隐私保护和用户权益的至关重要性^[88]。

分布式数据交易系统以去中心化的架构为基础,借助区块链技术或其他分布式账本技术来实现。数据的交易和管理分散在网络中的多个节点上,有效消除了单一中心的风险,提升了系统的

安全性和可靠性。分布式数据交易系统具备一系列显著的优势^[89]。首先,其去中心化特性降低了系统的单点故障风险,提升了系统的可靠性和韧性。其次,分布式系统通常更加透明,所有参与者都能够查看和验证交易,从而提高了整个系统的可信度。此外,通过加密和隐私保护技术,分布式系统更好地保护用户数据隐私,减缓了数据泄露的风险。最后,由于其去中心化的特性,分布式系统对审查的抗性更强,有助于维护用户的隐私权益。

在国内外,越来越多的学者开始考虑如何将区块链等分布式技术有机结合到数据交易中,为这一领域的发展注入新的活力。

Dai等^[90]提出了基于区块链的数据交易生态系统。在这个系统中,买方无须访问完整的数据集,仅需获取数据分析的结果以支持数据驱动的决策。这种设计巧妙地将数据保护的焦点从整个数据集转移到数据处理的阶段,解决了传统数据交易中对数据集完整性的保护挑战。研究团队构建了基于SGX的可信执行环境,并设计了一套安全协议,以确保源数据和分析结果的安全性。

Zhang等^[91]提出了以区块链为基础的数据交易系统,专注于支持私人数据查询。系统操作流程始于数据所有者提交数据,随后经过数据消费者的请求,执行拍卖采购机制和差分隐私查询机制,最终完成支付和查询答案的传递。通过仿真验证了系统在机密性、数据完整性、公平代理和隐私保护等方面的可行性。

Yao等^[92]专注于工业互联网,提出了去中心化的数据交易平台。在该平台中,他们引入了云挖掘机制,以协助轻量级物联网设备将庞大的计算任务卸载给云服务商,将云服务商与矿工之间的计算资源管理和定价问题建模为Stackelberg博弈,采用多智能体强化学习算法来求解纳什均衡。

Li等^[93]提出了以区块链为基础的安全去中心化交易模型,其主要目标在于解决买卖双方和代理节点之间的信任问题。通过充分运用区块链中的智能合约和加密技术,他们成功平衡了对用户隐私信息的保护与数据交易安全性的需求。此

外,他们提出了以区块链为基础的安全成本感知数据缓存算法,以有效降低数据缓存的传输延迟和成本。

牛淑芬等^[94]针对云存储电子医疗中的安全存储和共享问题,提出了基于可搜索加密和代理重加密的区块链数据共享方案。该方案通过在服务器上存储密文、在私有链中保存密文哈希值、在联盟链上维护关键字索引,有效实现了医疗数据的安全储存与共享。在联盟链中应用可搜索加密技术,实现对关键字的安全搜索,同时引入代理重加密技术,确保其他数据用户对患者数据的隐私安全共享。

然而,分布式数据交易系统也面临一些挑战和缺点。首先,数据分散存储在不同的节点上,可能导致数据访问速度较慢^[95]。其次,分布式系统通常更加复杂,设计、部署和维护都需要更多的资源和技术支持。在分布式环境下,协调不同节点之间的合作可能更加复杂,需要解决一致性和同步等问题^[96]。最后,尽管分布式系统可以提高安全性,但也面临新的安全挑战,例如智能合约漏洞和分布式拒绝服务攻击。在未来的研究和发展中,需要寻找解决这些问题的创新性方法,以推动分布式数据交易系统在性能、复杂性和安全性方面取得更大的突破。

4.2 交易模式

在数据交易中,交易活动主要可分为场内与场外交易两种模式,这两种交易模式在交易环境、参与方特性以及监管制度等方面存在明显区别。

4.2.1 场内交易

场内交易指在交易平台上进行的标准化、规范化的大数据产品买卖活动。这些交易受到交易所的规则和监管制度的严格约束,交易的流程、定价机制等都在交易所内部进行。场内交易具有高度透明性和标准化合约的优势。由于受到交易所的监管,交易规则清晰,为市场提供了有序的交易环境^[97]。标准合约简化了交易流程,提高了市场效率。然而,场内交易相对缺乏灵活性,受到规则的限制,难以适应个性化需求,而且可能伴随较高的交易手续费。

国内多个数据交易场所积极探索场内数据交

易的多元化。上海数据交易所首创“数商”模式，将数据流通环节分成 15 种不同职能的数商企业，数商企业为帮助数据提供方形成数据产品，体现出在数据要素市场建设中的主导作用。西部数据交易中心围绕数据产品交易服务和数字资产交易服务两条主线，探索交易规则、交易模型、交易环境等创新。深圳数据交易所引入“信用”机制，通过动态信用评级降低企业合规门槛，构建可信交易环境。

4.2.2 场外交易

场外交易是指直接发生在交易所之外的大数据产品交易。这可能包括一些非标准化的数据产品或个性化需求，无法在交易所内找到相应的标准合约。场外交易通常更为灵活，直接由参与方之间协商交易条件，不受交易所的直接监管。交易双方可以自行协商交易条件，促进了更直接、高效的交易沟通和谈判。然而，场外交易存在较高的风险，由于缺乏交易所监管，需要参与方自行承担风险。此外，缺乏统一的标准合约可能导致交易流程较为复杂，信息不对称也增加了交易的不确定性。2022 年场外数据交易规模约为 1 000 亿元，是场内交易规模的 50 倍，场外交易依然是现有数据交易的主要形式。

《数据二十条》提出，要建立合规高效、场内外结合的数据要素流通和交易制度。如何规范引导场外交易，培育壮大场内交易，是数据交易场所面临的一个重要挑战。

在场内交易方面，国家相关部门需要确保相关制度符合法规和政策，尤其是在数据隐私、安全、知识产权等方面的法规。建立有效的监管机构负责监督场内交易市场的运作，以确保市场的透明度、公平性和合规性。同时，加强数据分级管理，确保对不同敏感级别的数据采取相应的安全措施和管理策略，以提高整体数据管理的可持续性。

在场外交易方面，对于社会和个人数据，鼓励释放社会公共数据的价值，引导公共数据产品通过数据交易场所进行交易。对于企业数据，行业龙头企业可与数据交易平台相联合，推动数据的高效流通，促进行业数据和数据交易场所的互联互通。

这些举措旨在构建合理、高效、合规的数

据要素交易系统，促进各类数据在市场中的流通与交易，形成政府、企业、个人多方参与的数据流通交易共同体。通过发挥数据要素的作用，推动全面高质量发展，为数字经济提供坚实支撑。

5 结束语

本文深入剖析了国内外关于数据要素市场价值、定价和交易 3 个核心方面的相关研究。在算力网络崛起的大背景下，这些研究为构建健康的数据市场、促进数字经济的可持续增长提供了坚实的理论支持。值得关注的未来研究方向包括进一步提升数据交易的公正性和透明度、深化对灵活差异化定价策略的探索以及加强算力交易安全性的研究。这些方向将有助于全面地推动数据要素市场的发展，满足不断演变的市场需求。

参考文献:

- [1] XU C, SI Y Y, ZHU L H, et al. Dynamic data transaction in crowdsensing based on multi-armed bandits and shapley value[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2022, 7(3): 609-618.
- [2] 贾庆民, 丁瑞, 刘辉, 等. 算力网络研究进展综述[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(5): 1-12.
- [3] JIA Q M, DING R, LIU H, et al. Survey on research progress for compute first networking[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2021, 7(5): 1-12.
- [4] JIA R, DAO D, WANG B, et al. Towards efficient data valuation based on the shapley value[EB]. arXiv Preprint arXiv: 1167-1176, 2019.
- [5] GHORBANI A, ZOU J. Data shapley: equitable valuation of data for machine learning[EB]. arXiv Preprint, 2019, arXiv: 1904.02868.
- [6] JAIN A, PATEL H, NAGALAPATTI L, et al. Overview and importance of data quality for machine learning tasks[C]//Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. New York: ACM, 2020: 3561-3562.
- [7] DARWISH T S J, ABU BAKAR K, KAIWARTYA O, et al. TRADING: traffic aware data offloading for big data enabled intelligent transportation system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 6869-6879.
- [8] 侯鹏, 李智鑫, 张飞, 等. 金融数据安全治理智能化技术与实践[J]. 网络与信息安全学报, 2023, 9(3): 174-187.
- [9] HOU P, LI Z X, ZHANG F, et al. Technology and practice of intelligent governance for financial data security[J]. Chinese Journal of

- Network and Information Security, 2023, 9(3): 174-187.
- [8] 王标, 刘兴洋, 许卡, 等. 政府开放数据的国家安全风险评估模型研究[J]. 网络与信息安全学报, 2020, 6(6): 80-87.
- WANG B, LIU X Y, XU K, et al. Research on national security risk assessment model of open government data[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2020, 6(6): 80-87.
- [9] WANG X, HE J P, CHENG P, et al. Differentially private maximum consensus: design, analysis and impossibility result[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2019, 6(4): 928-939.
- [10] WANG X, ISHII H, DU L K, et al. Privacy-preserving distributed machine learning via local randomization and ADMM perturbation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 4226-4241.
- [11] 穆超, 王鑫, 杨明, 等. 面向物联网设备固件的硬编码漏洞检测方法[J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(5): 98-110.
- MU C, WANG X, YANG M, et al. Hard coded vulnerability detection approach for IoT device firmware[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2022, 8(5): 98-110.
- [12] YU K P, TAN L, ALOQAIFY M, et al. Blockchain-enhanced data sharing with traceable and direct revocation in IIoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7669-7678.
- [13] CHEN F, WANG J H, JIANG C K, et al. Blockchain based non-repudiable IoT data trading: simpler, faster, and cheaper[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1958-1967.
- [14] WANG K, XU C H, ZHANG Y, et al. Robust big data analytics for electricity price forecasting in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Big Data, 2019, 5(1): 34-45.
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电子商务数据资产评价指标体系: GB/T 37550—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Data asset evaluation index system for electronic commerce: GB/T 37550—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [16] 李永红, 张淑雯. 数据资产价值评估模型构建[J]. 财会月刊, 2018 (9): 30-35.
- LI Y H, ZHANG S W. Establishment of the value evaluation model of data assets[J]. Finance and Accounting Monthly, 2018(9): 30-35.
- [17] 宋杰鲲, 张业蒙, 赵志浩. 企业数据资产价值评估研究[J]. 会计之友, 2021(13): 22-27.
- SONG J K, ZHANG Y M, ZHAO Z H. Research on the valuation of enterprise data assets [J]. Friends of Accounting, 2021(13): 22-27.
- [18] 胥婷, 吴丹麦, 魏明月, 等. 开放数据视角下健康医疗数据价值评估指标体系研究[J]. 医学信息学杂志, 2022, 43(1): 16-22.
- XU T, WU D M, WEI M Y, et al. Study on the index system of healthcare data value evaluation from the perspective of open data [J]. Journal of Medical Informatics, 2022, 43(1): 16-22.
- [19] YANG M, FENG H L, WANG X, et al. Data pricing with privacy loss compensation for cyber-physical systems: a stackelberg game based approach[J]. Internet Technology Letters, e443.
- [20] 张志刚, 杨栋枢, 吴红侠. 数据资产价值评估模型研究与应用[J]. 现代电子技术, 2015, 38(20): 44-47, 51.
- ZHANG Z G, YANG D S, WU H X. Research and application of data asset value assessment model[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(20): 44-47, 51.
- [21] 杨亚霖. 基于熵值法的创业板企业价值评估研究: 以圣邦股份为例[D]. 北京: 中央财经大学, 2022.
- YANG Y L. Research on the value evaluation of GEM enterprises based on entropy method [D]. Beijing: Central University of Finance and Economics, 2022.
- [22] 左文进, 刘丽君. 基于用户感知价值的大数据资产估价方法研究[J]. 情报理论与实践, 2021, 44 (1): 71-77, 88.
- ZUO W J, LIU L J. Research on big data asset valuation method based on customer perceived value[J]. Information Studies: Theory & Application, 2021, 44 (1): 71-77, 88.
- [23] 吴江, 马小宁, 邹丹, 等. 基于AHP-FCE的铁路数据资产价值评估方法[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 80-86.
- WU J, MA X N, ZOU D, et al. Value evaluation method for railway data assets based on AHP-FCE[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(12): 80-86.
- [24] 张驰. 数据资产价值分析模型与交易体系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- ZHANG C. Research on value analysis model and transaction system of data assets[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [25] 王静, 王娟. 互联网金融企业数据资产价值评估: 基于B—S理论模型的研究[J]. 技术经济与管理研究, 2019(7): 73-78.
- WANG J, WANG J. Research on value evaluation of data assets of Internet financial enterprises—based on B-S theoretical model[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2019(7): 73-78.
- [26] 王子焉, 倪渊, 张健. 基于灰色关联分析—随机森林回归的网络平台专利价值评估方法研究[J]. 情报理论与实践, 2019, 42 (10): 109-116.
- WANG Z Y, NI Y, ZHANG J. Research on patent value assessment method of network platform based on grey relational analysis and random forest regression[J]. Information Studies (Theory & Application), 2019, 42(10): 109-116.
- [27] RANFTL R, LASINGER K, HAFNER D, et al. Towards robust monocular depth estimation: mixing datasets for zero-shot cross-dataset transfer[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(3): 1623-1637.
- [28] 闭珊珊, 杨琳, 宋俊典. 一种数据资产评估的CIME模型设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(9): 27-34.
- BI S S, YANG L, SONG J D. Design and implementation of cime model for data assets assessment[J]. Computer Applications and

- Software, 2020, 37(9): 27-34.
- [29] 邹贵林, 陈雯, 吴良峥, 等. 电网数据资产定价方法研究: 基于两阶段修正成本法的分析[J]. 价格理论与实践, 2022(3): 89-93, 204.
- ZOU G L, CHEN W, WU L Z, et al. Research on grid power data asset pricing method—analysis based on two-stage modified costing [J]. Price (Theory & Practice), 2022(3): 89-93, 204.
- [30] ZHAO Z B, ZHANG Q Y, YU X L, et al. Applications of unsupervised deep transfer learning to intelligent fault diagnosis: a survey and comparative study[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3525828.
- [31] 陈芳, 余谦. 数据资产价值评估模型构建: 基于多期超额收益法[J]. 财会月刊, 2021(23): 21-27.
- CHEN F, YU Q. Construction of data asset value evaluation model-based on multi-period excess return method[J]. Finance and Accounting Monthly, 2021(23): 21-27.
- [32] 高华, 姜超凡. 应用场景视角下的数据资产价值评估[J]. 财会月刊, 2022(17): 99-104.
- GAO H, JIANG C F. Data asset value assessment from the perspective of application scenarios[J]. Finance and Accounting Monthly, 2022(17): 99-104.
- [33] 倪渊, 李子峰, 张健. 基于 AGA-BP 神经网络的网络平台交易环境下数据资源价值评估研究[J]. 情报理论与实践, 2020, 43(1): 135-142.
- NI Y, LI Z F, ZHANG J. Research on data resources value assessment model based on AGA-BP neural network in the background of network platform transaction[J]. Information Studies (Theory & Application), 2020, 43(1): 135-142.
- [34] 沈俊鑫, 赵雪杉. 基于动态 Stacked-GBDT 算法的数据资源价值评估方法研究[J]. 科技管理研究, 2023, 43(1): 53-61.
- SHEN J X, ZHAO X S. Research on data resource value assessment method based on dynamic stacked-GBDT ensemble learning[J]. Science and Technology Management Research, 2023, 43(1): 53-61.
- [35] GUPTA P, DEDEOGLU V, KANHERE S S, et al. TrailChain: Traceability of data ownership across blockchain-enabled multiple marketplaces[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2022, 203: 103389.
- [36] 刘峰, 杨杰, 齐佳音. 区块链密码学隐私保护技术综述[J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(4): 29-44.
- LIU F, YANG J, QI J Y. Survey on blockchain privacy protection techniques in cryptography[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2022, 8(4): 29-44.
- [37] TANG H Y, QIAO Y N, YANG F, et al. dMOBAs: a data marketplace on blockchain with arbitration using side-contracts mechanism[J]. Computer Communications, 2022, 193: 10-22.
- [38] 贾靖宇, 谭畅, 刘哲伟, 等. 差分隐私的隐私观与隐私目标[J]. 网络与信息安全学报, 2023, 9(5): 82-91.
- JIA J Y, TAN C, LIU Z W, et al. Privacy view and target of differential privacy[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2023, 9(5): 82-91.
- [39] 任奎, 孟泉润, 闫守琨, 等. 人工智能模型数据泄露的攻击与防御研究综述[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(1): 1-10.
- REN K, MENG Q R, YAN S K, et al. Survey of artificial intelligence data security and privacy protection[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2021, 7(1): 1-10.
- [40] WANG X, FANG C R, YANG M, et al. Resilient distributed classification learning against label flipping attack: an ADMM-based approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(17): 15617-15631.
- [41] LIANG W, FAN Y K, LI K C, et al. Secure data storage and recovery in industrial blockchain network environments[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6543-6552.
- [42] ALKADI O, MOUSTAFA N, TURNBULL B, et al. A deep blockchain framework-enabled collaborative intrusion detection for protecting IoT and cloud networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(12): 9463-9472.
- [43] PEI J. A survey on data pricing: from economics to data science[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2022, 34(10): 4586-4608.
- [44] WANG E, CAI J T, YANG Y J, et al. Trustworthy and efficient crowdsensed data trading on sharding blockchain[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(12): 3547-3561.
- [45] CONG Z C, LUO X, PEI J, et al. Data pricing in machine learning pipelines[J]. Knowledge and Information Systems, 2022, 64(6): 1417-1455.
- [46] LI Q B, WEN Z Y, WU Z M, et al. A survey on federated learning systems: vision, hype and reality for data privacy and protection[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2023, 35(4): 3347-3366.
- [47] LIU K, QIU X Y, CHEN W H, et al. Optimal pricing mechanism for data market in blockchain-enhanced internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 9748-9761.
- [48] XIAO Z, HE D, DU J Y. A stackelberg game pricing through balancing trilateral profits in big data market[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(16): 12658-12668.
- [49] JUNG K, PARK S. Privacy bargaining with fairness: privacy-price negotiation system for applying differential privacy in data market environments[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1389-1394.
- [50] 赵丽, 李杰. 大数据资产定价研究: 基于讨价还价模型的分析[J]. 价格理论与实践, 2020(8): 124-127, 178.
- ZHAO L, LI J. The pricing research of big data asset: analyzed based on the bargaining model analysis based on bargaining model[J]. Price (Theory & Practice), 2020(8): 124-127, 178.

- [51] WANG X, HE J P, CHENG P, et al. Privacy preserving collaborative computing: heterogeneous privacy guarantee and efficient incentive mechanism[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(1): 221-233.
- [52] KUMAR P, KUMAR R, SRIVASTAVA G, et al. PPSF: a privacy-preserving and secure framework using blockchain-based machine-learning for IoT-driven smart cities[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021, 8(3): 2326-2341.
- [53] M P, SHARMA A, V V, et al. Prediction of the price of ethereum blockchain cryptocurrency in an industrial finance system[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2020, 81: 106527.
- [54] 尹鑫, 田有亮, 王海龙. 面向大数据定价的委托拍卖方案[J]. *电子学报*, 2018, 46(5): 1113-1120.
- YIN X, TIAN Y L, WANG H L. Delegation auction scheme for big data pricing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(5): 1113-1120.
- [55] AN D, YANG Q Y, YU W, et al. Towards truthful auction for big data trading[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE 36th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-7.
- [56] CAO X Y, CHEN Y, RAY LIU K J. Data trading with multiple owners, collectors, and users: an iterative auction mechanism[J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks*, 2017, 3(2): 268-281.
- [57] LI Z N, YANG Z Y, XIE S L. Computing resource trading for edge-cloud-assisted Internet of Things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3661-3669.
- [58] 张娴, 朱建明, 隋智源, 等. 数字货币交易匿名性与监管的博弈分析[J]. *网络与信息安全学报*, 2022, 8(5): 150-157.
- ZHANG X, ZHU J M, SUI Z Y, et al. Analysis on anonymity and regulation of digital currency transactions based on game theory[J]. *Chinese Journal of Network and Information Security*, 2022, 8(5): 150-157.
- [59] HE L, LIU Y Z, ZHANG J. An occupancy-informed customized price design for consumers: a stackelberg game approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1988-1999.
- [60] HECKMAN J R, BOEHMER E, PETERS E H, et al. A pricing model for data markets[J]. *iConference 2015 Proceedings*, 2015.
- [61] YU H F, ZHANG M X. Data pricing strategy based on data quality [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 112: 1-10.
- [62] YANG J, ZHAO C C, XING C X. Big data market optimization pricing model based on data quality[J]. *Complexity*, 2019, 2019: 5964068.
- [63] LI X J, YAO J G, LIU X, et al. A first look at information entropy-based data pricing[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2053-2060.
- [64] 彭慧波. 数据交易中定价机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- PENG H B. Research on pricing mechanism in data transaction[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [65] SHEN Y C, GUO B, SHEN Y, et al. A pricing model for big personal data[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2016, 21(5): 482-490.
- [66] LU Y L, HUANG X H, ZHANG K, et al. Blockchain empowered asynchronous federated learning for secure data sharing in Internet of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4298-4311.
- [67] KHORASANY M, MISHRA Y, LEDWICH G. A decentralized bilateral energy trading system for peer-to-peer electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(6): 4646-4657.
- [68] KOUTRIS P, UPADHYAYA P, BALAZINSKA M, et al. Query market demonstration[J]. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 2012, 5(12): 1962-1965.
- [69] ZHENG Z Z, PENG Y Q, WU F, et al. An online pricing mechanism for mobile crowdsensing data markets[C]//*Proceedings of the 18th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM, 2017: 1-10.
- [70] DEEP S, KOUTRIS P. QIRANA: a framework for scalable query pricing[C]//*Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Management of Data*. New York: ACM, 2017: 699-713.
- [71] MIAO X Y, GAO Y J, CHEN L, et al. Towards query pricing on incomplete data[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2022, 34(8): 4024-4036.
- [72] 周传鑫, 孙奕, 汪德刚, 等. 联邦学习研究综述[J]. *网络与信息安全学报*, 2021, 7(5): 77-92.
- ZHOU C X, SUN Y, WANG D G, et al. Survey of federated learning research[J]. *Chinese Journal of Network and Information Security*, 2021, 7(5): 77-92.
- [73] 张宝, 田有亮, 高胜. 基于博弈论抗共谋攻击的全局随机化共识算法[J]. *网络与信息安全学报*, 2022, 8(4): 98-109.
- ZHANG B, TIAN Y L, GAO S. Global randomized consensus algorithm resist collusion attack based on game theory[J]. *Chinese Journal of Network and Information Security*, 2022, 8(4): 98-109.
- [74] CHEN L J, KOUTRIS P, KUMAR A. Towards model-based pricing for machine learning in a data marketplace[C]//*Proceedings of the 2019 International Conference on Management of Data*. New York: ACM, 2019: 1535-1552.
- [75] ABU ALSHEIKH M, HOANG D T, NIYATO D, et al. Optimal pricing of internet of things: a machine learning approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(4): 669-684.
- [76] JIAO Y T, WANG P, FENG S H, et al. Profit maximization mechanism and data management for data analytics services[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(3): 2001-2014.
- [77] XU A R, ZHENG Z Z, WU F, et al. Online data valuation and pricing

- ing for machine learning tasks in mobile health[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 850-859.
- [78] SHEN Y C, GUO B, SHEN Y, et al. Personal big data pricing method based on differential privacy[J]. Computers & Security, 2022, 113: 102529.
- [79] ZHANG M X, BELTRAN F, LIU J M. Selling data at an auction under privacy constraints[EB]. arXiv preprint arXiv: 2005.09248, 2020.
- [80] NIU C Y, ZHENG Z Z, WU F, et al. Unlocking the value of privacy: trading aggregate statistics over private correlated data[C]//Proceedings of the Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. New York: ACM, 2018: 2031-2040.
- [81] JIN W Q, XIAO M Y, LI M, et al. If you do not care about it, sell it: trading location privacy in mobile crowd sensing[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1045-1053.
- [82] WANG X, ISHII H, DU L K, et al. Privacy-preserving distributed machine learning via local randomization and ADMM perturbation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 4226-4241.
- [83] 杨冠群, 刘荫, 徐浩, 等. 基于区块链的电网可信分布式身份认证系统[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(6): 88-98.
- YANG G Q, LIU Y, XU H, et al. Credible distributed identity authentication system of microgrid based on blockchain[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2021, 7(6): 88-98.
- [84] 高振升, 曹利峰, 杜学绘. 基于区块链的访问控制技术研究进展[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(6): 68-87.
- GAO Z S, CAO L F, DU X H. Research progress of access control based on blockchain[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2021, 7(6): 68-87.
- [85] TAN T M, SARANIEMI S. Trust in blockchain-enabled exchanges: Future directions in blockchain marketing[J]. Journal of the Academy of Marketing Science, 2023, 51(4): 914-939.
- [86] ZHOU L Y, QIN K H, TORRES C F, et al. High-frequency trading on decentralized on-chain exchanges[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 428-445.
- [87] DEEPA N, PHAM Q V, NGUYEN D C, et al. A survey on blockchain for big data: approaches, opportunities, and future directions [J]. Future Generation Computer Systems, 2022, 131: 209-226.
- [88] MIYACHI K, MACKEY T K. hOCBS: a privacy-preserving blockchain framework for healthcare data leveraging an on-chain and off-chain system design[J]. Information Processing & Management, 2021, 58(3): 102535.
- [89] ROECK D, STERNBERG H, HOFMANN E. Distributed ledger technology in supply chains: a transaction cost perspective[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(7): 2124-2141.
- [90] DAI W Q, DAI C K, CHOO K K R, et al. SDTE: a secure blockchain-based data trading ecosystem[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 15: 725-737.
- [91] ZHANG M X, LIU J M, FENG K Y, et al. SmartAuction: a blockchain-based secure implementation of private data queries[J]. Future Generation Computer Systems, 2023, 138: 198-211.
- [92] YAO H P, MAI T L, WANG J J, et al. Resource trading in blockchain-based industrial Internet of Things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3602-3609.
- [93] LI C L, LIANG S Y, ZHANG J, et al. Blockchain-based data trading in edge-cloud computing environment[J]. Information Processing & Management, 2022, 59(1): 102786.
- [94] 牛淑芬, 刘文科, 陈俐霞, 等. 基于联盟链的可搜索加密电子病历数据共享方案[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 204-214.
- NIU S F, LIU W K, CHEN L X, et al. Electronic medical record data sharing scheme based on searchable encryption via consortium blockchain[J]. Journal on Communications, 2020, 41(8): 204-214.
- [95] BASUKIE J, WANG Y C, LI S Y. Big data governance and algorithmic management in sharing economy platforms: a case of ride-sharing in emerging markets[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 161: 120310.
- [96] VAN WAARDE H J, EISING J, TRENTLMAN H L, et al. Data informativity: a new perspective on data-driven analysis and control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(11): 4753-4768.
- [97] ZHENG X, CAI Z P. Privacy-preserved data sharing towards multiple parties in industrial IoTs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(5): 968-979.

[作者简介]



杨明 (1981-), 男, 山东东营人, 博士, 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 研究员、博士生导师, 主要研究方向为密码学、云安全、大数据安全、物联网安全。



冯宏霖 (1997-), 男, 山东淄博人, 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 研究生, 主要研究方向为数据交易、数据定价。



王鑫（1992-），男，山东邹平人，博士，齐鲁工业大学（山东省科学院）副研究员、硕士生导师，主要研究方向为人工智能安全、数据隐私保护、工业物联网。



焦绪国（1988-），男，山东潍坊人，博士，青岛理工大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为能源系统与智能控制。



霍吉东（1986-），男，山东德州人，齐鲁工业大学（山东省科学院）助理研究员，主要研究方向为并行计算、大数据智能处理。



张恒（1981-），男，江苏连云港人，博士，江苏海洋大学教授、博士生导师，主要研究方向为系统安全与控制和人工智能算法安全。