

# 用电大数据共享关键技术与研究展望

周杨泽<sup>1</sup>, 苏运<sup>2</sup>, 姚睿洋<sup>1</sup>, 徐琴<sup>2</sup>, 秦大林<sup>1</sup>, 张宁<sup>3</sup>, 王毅<sup>1\*</sup>

(1. 香港大学深圳研究院, 深圳市南山区 518063; 2. 国网上海市电力公司, 上海市浦东新区 200540;  
3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市海淀区 100084)

## Key Technologies and Research Prospects of Smart Meter Data Sharing

ZHOU Yangze<sup>1</sup>, SU Yun<sup>2</sup>, YAO Ruiyang<sup>1</sup>, XU Qin<sup>2</sup>, Qin Dalin<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>3</sup>, WANG Yi<sup>1\*</sup>

(1. The University of Hong Kong Shenzhen Institute of Research and Innovation, Nanshan District, Shenzhen 518063, China;  
2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200540, China;  
3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** In the era of the digital economy, data has become a new key factor of production. Distribution networks are going through a digital transformation that has reshaped the landscape of consumer interaction, load forecasting, and energy management. However, high data barriers exist in the power sector, which is mainly attributed to legal regulations, business competition, and sharing platform limitations, posing significant obstacles to effective utilization of smart data. Therefore, it is essential to break down these barriers and promote data sharing to activate data production factors. In response to these three issues, privacy-preserving technologies are first summarized from two perspectives, namely privacy-preserving data query and data analysis, to ensure that data owners “feel free” to share their data. The existing overall data value quantification methods are classified into three perspectives: economic theory, information theory, and data science. The data value allocation schemes are concluded so that data owners are “willing” to share data. Furthermore, the platform designs based on blockchain and non-blockchain paradigms are proposed to ensure users “can” share their data. In addition, this work elaborates on the practical attempts made by energy enterprises such as China Southern Power Grid, State Grid Corporation of China, and ENN Natural Gas in the aspect of data sharing. Finally, the upcoming challenges of future smart meter data sharing are analyzed and summarized.

**KEY WORDS:** smart meter data; data sharing; privacy preserving; data value quantification; sharing platform

**摘要:** 数字经济时代, 数据成为新的关键生产要素; 配用电

系统也正处于数字化转型阶段, 在用户互动、电量预测和用电管理等方面均被赋予全新内涵。数据壁垒高起给电力大数据分析带来较大的阻碍, 亟须打破数据壁垒、促进数据共享, 从而盘活生产要素。数据壁垒高起主要有法律规定、业务竞争和共享平台 3 方面原因。针对这些问题, 该文首先从数据查询、数据分析 2 个角度对隐私保护技术进行归纳, 使用电数据的拥有者“放心”共享; 然后, 从经济学、信息论、数据科学 3 个角度阐述现有的数据总价值量化的研究思路, 并总结价值再分配方案, 使数据拥有者“愿意”共享; 在此基础上, 从基于区块链的平台以及非区块链支持的平台两个方面提出使用户“能够”共享的平台设计思路; 另外, 阐述中国南方电网、国家电网、新奥能源等企业在数据共享方面所做出的实践尝试; 最后, 对未来配用电数据大共享面临的挑战进行分析和总结。

**关键词:** 用电大数据; 数据共享; 隐私保护; 价值量化; 共享平台

## 0 引言

2021 年 10 月, 国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》, 要求“加快建设新型电力系统”, 强调“推进工业领域数字化、智能化、绿色化融合发展”<sup>[1]</sup>。在未来新型电力系统中, 售电市场的不断放开客观上要求开展以用户为中心的售电服务以提升自身竞争力。用户侧将在未来新型电力系统中扮演重要角色, 通过现代信息与数字化技术提升用户侧智能化水平, 促进用户侧与电网互动, 实现海量需求侧资源的实时监测和精准控制, 是促进新能源消纳、建设新型电力系统的重要举措。

2023 年 2 月, 中共中央、国务院印发《数字中国建设整体布局规划》, 要求“加快数字中国建设”, 强调“促进数字经济和实体经济深度融合”<sup>[2]</sup>。新

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2403300); 国家自然科学基金项目(52477130)。

National Key R&D Program of China (2022YFB2403300); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52477130).

型电力系统的数字化转型将成为数字中国建设的重要组成部分。在配用电侧，智能电表普及率不断提高。目前，我国智能电表的普及率已经接近 100%，细粒度用电数据的大规模采集使需求侧步入大数据时代，为电力用户行为分析、预测、决策提供更多信息。如图 1 所示，未来数字化配

网中将涌现越来越多的参与主体，包括配电网运营商、电力零售商、用户、负荷集成商、数据服务商等，使售电市场中的商业模式愈加繁荣，更有竞争性<sup>[3]</sup>。参与主体需要充分共享和利用海量用电大数据，实现配电网智能管理、改善用户服务、提升整体能效。

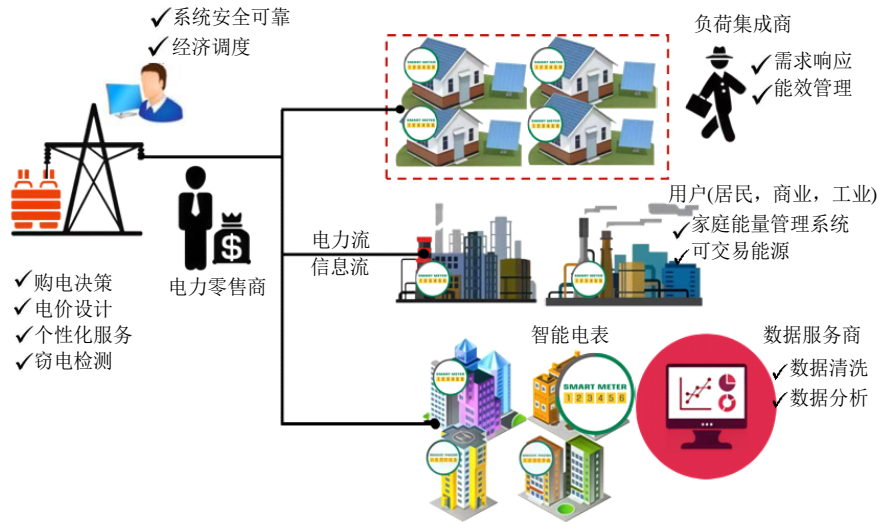


图 1 用电系统数字化转型下多元化参与者与商业模式

Fig. 1 Diversified participants and business models under the digital transformation of power distribution systems

2020 年 3 月，中共中央、国务院印发《关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见》，首次将数据作为生产要素，要求“加快培育数据要素市场”，“提升社会数据资源价值”<sup>[4]</sup>。2022 年 12 月，《中共中央国务院关于构建数据基础制度更好发挥数据要素作用的意见》(“数据二十条”)对外公布，进一步要求“充分激活数据要素价值，赋能实体经济发展”<sup>[5]</sup>。自此，数据成为土地、劳动力、资本和技术等传统生产要素之外新的关键生产要素。电力系统服务千家万户、覆盖各行各业，数字化新型电力系统产生的海量数据，在经过深加工之后，所提取出的信息与知识，为整个电力系统的实时监测、优化运营等提供支撑，也能够为除电力之外的其他行业提供服务，从而实现数据价值。国家电网和中国南方电网已分别成立大数据中心和数字电网研究院，致力于盘活数据资产。数据成为新的关键生产要素后，需要重点关注如何利用先进的数据分析与机器学习技术，将原始的“生数据”转化为可用的“熟数据”，并以此实现数据的价值。

### 1 核心挑战与研究框架

在纵深推进电力市场化改革大背景下，在配用电侧，除电力用户和配电网运营商(电网公司)之外，

将涌现电力零售商(售电公司)、负荷聚合商等多样化的市场参与主体，也存在增量配电网等多元化的业务，电网公司不再垂直一体化地拥有所有用户用电数据。如图 2 所示，用户用电数据归属于多样化的参与主体，例如电力零售商或增量配电网运营商拥有其服务用户的用电数据；甚至由于用户在不同电力零售商之间切换，导致同一用户不同时间段的

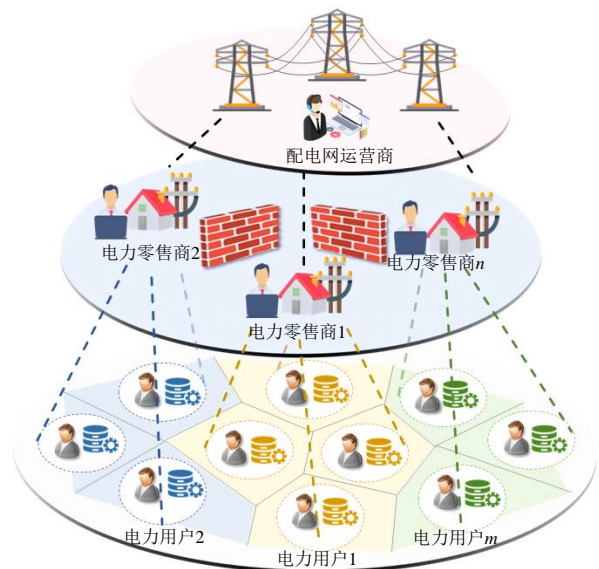


图 2 未来配用电侧的数据壁垒

Fig. 2 Data barrier in the future distribution network

用电数据也分属于不同电力零售商。这就出现用电大数据呈现“条块分割”的形态，导致数据壁垒高起。目前电力行业的数据壁垒高墙渐起，主要有法律规定、业务竞争和共享平台3方面的原因。

1) 法律规定：2021年8月，全国人大常委会通过《中华人民共和国个人信息保护法》，对个人信息的收集、存储、使用、加工、传输等进行了明确的规定和约束；2018年5月，欧洲生效了《通用数据保护条例》(general data protection regulation, GDPR)，对所有欧盟个人关于数据保护和隐私进行了规范。用电数据关乎电力用户隐私，用户数据的共享面临较大法律风险。

2) 业务竞争：在新型电力系统中，不同的数据拥有者(如不同电力部门、不同参与主体)需要开展不同的业务，可能存在一定的竞争关系，他们一般不愿意共享数据以提升其他数据拥有者的竞争力。

3) 共享平台：电力数据分布于不同主体、不同部门之间，数据“条块分割”，互不协调，难以构建统一高效的用电大数据共享架构，加高了数据壁垒。

综上，传统的大多数电力大数据分析方法一般假设海量多元化的电力数据完全可获取，对数据隐私、价值等问题关注不够，在实践过程中面临数据壁垒。因此，如图3所示，需要面向用电大数据共享设计隐私保护与价值量化算法、开发相应的数据共享支撑平台，让用电数据的拥有者“放心”(隐私保护)、“愿意”(价值量化)且“能够”(共享平台)共享数据。

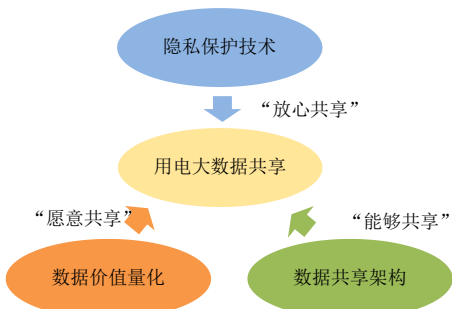


图3 用电大数据共享基本框架  
Fig. 3 Frame work of smart meter data sharing

如图4所示，以未来自由开放的售电市场为例，其中可能存在若干个电力零售商，他们分别拥有自己服务或代理用户的用电数据<sup>[6]</sup>。若大数据分析技术能够被分布式地执行，保护数据隐私，那就能够极大规避法律风险。大数据分析模型(如神经网络模型)可以在不同电力零售商本地进行训练，然后在信息交换中心进行信息汇总和下发，通过电力零售商

和信息交换中心之间的信息交互，就可以间接实现数据共享。基于此，如果电力零售商能够通过间接共享数据获取一定的利益，那电力零售商就愿意主动共享数据，削弱业务竞争带来的阻碍。最后，如果借助数据共享系统进一步提高数据分析与价值量化的效率，并将数据共享记录透明化地保存(如区块链)，将进一步保障数据共享的可行性。

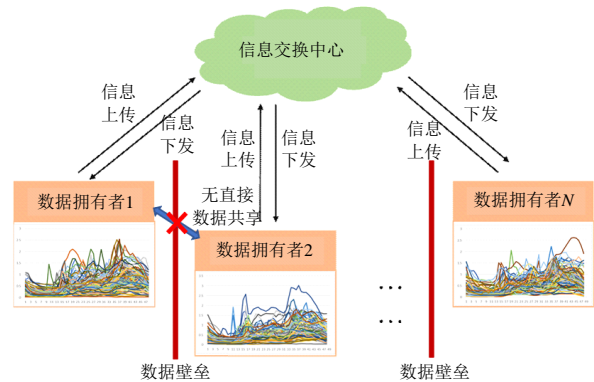


图4 电力零售商之间的数据壁垒  
Fig. 4 Data barriers among retailers in future electricity market

## 2 隐私保护的数据共享

为使数据拥有者“放心”共享数据，需要在数据共享过程中对用户的隐私进行保护。如表1<sup>[7-38]</sup>所示，隐私保护问题可以分为隐私保护的数据查询以及隐私保护的数据分析。

表1 隐私保护的数据共享技术

Table 1 Privacy preserving data sharing technology			
问题	具体技术	参考文献	
隐私保护的数 据查询	加密技术	基于身份的加密	[7-8]
		基于属性的加密	[9-10]
		基于无证书的加密	[11-12]
	差分隐私	—	[13-14]
隐私保护的数 据分析	同态加密	完全同态加密	[15-21]
		部分同态加密	[22-23]
	联邦学习	横向联邦学习	[24-25]
		纵向联邦学习	[26-29]
	零知识证明	—	[30-31]
分割学习	—	[32-33]	
多方安全计算	—	[34-36]	
			[37-38]

### 2.1 隐私保护的数据查询

用电大数据中包含着海量用户信息，在用电数据进行上传以及下载的过程中，若不采用隐私保护的数据查询技术，用户隐私信息极易被恶意窃取甚至篡改。现有的隐私保护的数据查询主要有两

种途径, 分别为加密技术及差分隐私(differential privacy)。

### 2.1.1 加密技术

加密技术通过有效的加密算法将数据转换为密文进行共享, 从而实现隐私保护的数据查询。常见的加密方法包括基于身份的加密(identity-based encryption)、基于属性的加密(attribute-based encryption)、基于无证书的加密(certificatelless verifiable-encryption)及可搜索加密(searchable-encryption)。

其中, 基于身份的加密所使用的密钥是基于用户的身份信息生成的。用户可以使用其身份信息(例如用户名)作为公钥, 而私钥则由加密系统管理员生成和分配。例如, 为实现智能电表与电网运营商之间的安全通信, 文献[7]利用基于身份的加密技术, 提出一种只需在智能电表端进行少量计算操作的匿名密钥分发方案。该方案使用一个私钥匿名访问服务提供商提供的服务, 而无须在身份验证期间借助可信锚点。文献[8]提出一种面向智能电网的基于身份的数据聚合协议, 它不仅可以防止未经授权的读取和细粒度分析, 还可以防止意外错误和恶意篡改消息。

基于属性的加密使用的密钥是基于用户的属性信息生成的, 无须关注接收者的身份, 只有符合属性要求的用户才能解密密文, 保证了数据的机密性。文献[9]指出在智能电网中, 除数据本身外, 共享数据的访问策略也可能是敏感的, 其中包含所保护的底层数据的信息。其通过属性加密对访问策略以及共享的数据进行加密, 实现共享策略与数据的双重混淆。文献[10]提出基于多机构属性加密的智能电网中的安全数据共享方案。其中, 该方案将访问策略和属性集转换为两个向量, 当且仅当这两个向量正交时, 用户才可获得共享的数据。

基于无证书的加密使用的密钥是基于用户的公钥和一系列系统参数生成的, 无须依赖传统的证书机制来验证用户的身份。在这种加密方案中, 用户的私钥并不直接由可信第三方颁发, 而是通过一系列算法和用户的身份信息、系统参数等共同生成。为解决大规模电网终端接入带来的安全问题, 文献[11]提出一种无证书安全加密机制, 以解决传统基于身份的密码算法密钥更新问题, 提升系统的安全管理控制能力。文献[12]为智能电网中的高级量测体系提出一种安全且高效的无证书签密方案,

该方案提供隐私保护、机密性、数据完整性、可验证性, 并降低了对第三方(例如, 中央单元、变电站、数据集中器等)可信任程度的依赖。

可搜索加密则是在加密数据时, 将某些属性或关键字加入到密文中, 使搜索和查询时可以在密文上进行操作, 无须将密文解密。智能电表具有高更新率以及具有特定结构与属性的特点, 基于此, 文献[13]设计一种高空间搜索效率以及低信息披露的可搜索加密算法。文献[14]针对用户上传加密数据至云端, 并针对云边端编排架构网络中下载包含特定关键字的文档的场景, 提出一种支持多关键字子集检索的可搜索加密方案。

### 2.1.2 差分隐私

差分隐私是一种常用的保护隐私的手段, 由于其实现的简易性以及防御各种攻击的适用性而得到广泛的认可。对于随机算法  $M$ , 假设集合  $S$  为算法  $M$  所有输出的集合, 则对于任意两个相邻数据集  $D$  和  $D'$ (两者差 $|D|=1$ ), 若满足:

$$\Pr[M(D) \in S] \leq e^{\epsilon} \Pr[M(D') \in S] + \delta \quad (1)$$

则称该随机算法  $M$  提供 $(\epsilon-\delta)$ 的差分隐私保护, 其中 $\delta$ 为松弛因子, 它代表隐私保护不受约束的概率。 $\delta \geq 0$  为隐私预算, 其数值大小直接反映差分隐私保护的强度。当 $\delta=0$  时, 随机算法  $M$  提供 $\epsilon$ 的差分隐私保护<sup>[39]</sup>。

文献[15]指出差分隐私最初是针对大数据集提出的, 对于少量智能电表数据聚合上传的场景, 传统的差分隐私方案无法保证其适用性。即使对于改进过的差分隐私方案, 文献[15]建议在智能电表数据聚合上传时也需要达到千个级别。文献[16]提出一种数据卖方根据数据买方所出价格添加不同预算的差分隐私再进行数据共享的框架。文献[17]提出一种保护差分隐私的深度神经网络训练方法。文献[18]介绍一种保护差分隐私的配电网最优潮流算法, 该算法可保护用户隐私, 防止未经授权访问最优潮流解, 例如电流和电压值。文献[19]通过向有功功率输出与容量添加噪声, 提出一种基于分布式隐私保护的共识控制方法, 以实现微电网的有功功率共享和频率调节。文献[20]提出增强差分隐私保护的方法并与区块链技术相融合来保护能源交易市场中参与者的隐私。文献[21]提出本地化差分隐私随机响应机制, 使高敏感度用户和普通用户分别实现满足本地化差分隐私的用户行为隐私保护。

## 2.2 隐私保护的数据分析

面对未来复杂多变的用户用电结构与模式,对海量细粒度用电数据进行智能分析是推进电力系统智能化管理的基础。然而,由于隐私保护法律限制、市场竞争关系和其他相关因素,数据壁垒逐渐高起,使传统的集中式数据分析方法在实际应用中受阻。主流隐私保护的数据分析包括同态加密(homomorphic encryption)、零知识证明(zero-knowledge proof)、联邦学习(federated learning)、分割学习(split learning)、多方安全计算(multiparty secure computing)。

### 2.2.1 同态加密

同态加密的设计目的是在不需要解密密文的情况下,能够对数据进行加法或乘法运算,从而实现数据的计算外包,同时完全保护数据隐私<sup>[40]</sup>。具体而言,假设用户拥有明文数据  $x$ ,需要第三方机构帮助计算  $f(x)$ 并返回给用户,其中,  $f(x)$ 通常为有限次加法和乘法组成。此时通过同态加密性质的加密操作  $\text{Enc}$  和解密操作  $\text{Dec}$ ,以及密钥  $k$  便可实现以下功能。首先,用户通过密钥对明文数据  $x$  进行加密获得密文  $C_T$ 。然后,第三方在密文上进行计算,表示为  $\text{Ev}()$ ,并将计算结果  $R$  返回给用户。此时,同态性质可表现为用户对  $R$  用密钥  $k$  进行解密会获得  $f(x)$ ,因而实现了隐私保护的数据计算外包。

$$\begin{cases} C_T = \text{Enc}(k, x) \\ R = \text{Ev}[f(x), C_T] \\ \text{Dec}(k, R) = f(x) \end{cases} \quad (2)$$

同态加密可分为完全同态加密和部分同态加密。完全同态加密可实现对密文的任意计算,包括加法、乘法和比较等运算。文献[22]提出分布式直流潮流计算方法,其中,采用完全同态加密实现不同的能量管理系统之间隐私保护的协同。为实现用户负荷数据与分布式资源之间的数据共享,文献[23]采用完全同态加密获取负荷数据统计信息。而部分同态仅可实现特定一种或几种运算。文献[24]引入 Paillier 算法(支持加法同态性),设计一个共识方案,用于分布式微电网的经济调度,以在通信过程中不泄露敏感信息。文献[25]设计一种基于 Paillier 同态加密的电力交易数据加密方案。该方案结合电力交易业务流程和数据传输特征与 Paillier 算法同态特性,提出二次加密的框架以提高数据交互的安全性。

在实际运用中,同态加密在用电大数据共享的场景下仍然面临以下挑战需要解决。首先,同态加

密的计算开销通常较高,特别是在大规模数据共享场景下,需要计算的安全参数较大时,加、解密时间远远高于对称加密算法;其次,全同态加密仍处于开发阶段,现有的一些同态算法只支持有限次的乘法操作,限制了其在用电大数据共享中的应用。未来的研究需要充分考虑加密效率和加密后数据的处理能力。

### 2.2.2 零知识证明

零知识证明作为一种先进的密码学协议,在隐私保护数据分析领域展现出其独特优势。该协议允许证明者在不暴露除命题真实性以外的任何额外信息的前提下,向验证者证明某一命题的正确性。这一特性使在确保原始数据不被泄露的同时,能够对数据的特定属性或计算结果进行有效的验证,从而实现数据隐私的保护。零知识证明技术在保证新型电力系统数据质量方面具有显著优势,在调度协同、市场交易等方面均展现出应用潜力<sup>[41]</sup>。在调度协同方面,文献[32]设计了基于零知识验证算法的私有数据业务交互机制。结合智能合约技术,自动完成数据加密和零知识凭证的整个网络验证过程,并实现秘密场景下的数据安全交互。在市场交易方面,文献[33]提出一种安全的电力数据交易方案,其运用零知识证明技术,旨在确保数据的可用性和一致性,同时严格保护数据内容不被泄露。在实际运用中,零知识证明同样面临着计算复杂度和通信复杂度高的挑战。由于零知识证明设计复杂的密码学底层原语和多次验证的特性,难以直接应用于海量物联网数据互通。因此,在使用零知识证明进行关键隐私认证时,需要精心设计交互流程,以确保有效性和效率。

### 2.2.3 联邦学习

联邦学习是一种使用分布式优化方法在多方合作时保护数据隐私的机器学习技术,在这个框架下,参与者可以在数据不离开本地的同时,协同构建一个高性能模型<sup>[42]</sup>。联邦学习可分为横向联邦学习与纵向联邦学习,前者将来自不同用户的数据进行联合,而后者将来自不同用户的特征进行联合。

在横向联邦学习方面,文献[26]研究联邦学习框架下的保护隐私的协作预测方法,该框架包括数据转换技术、基于分解的方法等。文献[27]将具有相似用电特性的用户进行聚类,并运用基于联邦学习的长短期记忆循环神经网络实现短期负荷预测。文献[28]提出基于数据分解的多区域个性化联邦负

荷预测方案，负荷序列中的低频分量作为联邦变量参与全局模型训练，高频与趋势分量则在本地进行学习。文献[29]运用联邦学习的方法设计用电异常检测系统，并且实现一种基于客户端模型参数的自动化异常检测方法，以解决联邦学习全局模型易受低质量数据影响的问题。在纵向联邦学习方面，文献[30]将纵向联邦学习的协作学习框架用于检测配电网中的虚假数据注入攻击。用户端模型采用注意力模块提取空间特征，服务器端通过双向长短期记忆网络提取时间特征。文献[31]针对 XGBoost 设计纵向联邦学习框架，实现更高精度的电力负荷预测。

由于联邦学习框架涉及多方参与者与中心服务器的频繁交互过程，通信成本成为实际部署中需要考虑的关键问题。当参与者数量过多时，传输大量模型参数会导致通信网络阻塞<sup>[43]</sup>。为解决这一问题，一些文献采用模型压缩<sup>[44]</sup>及知识蒸馏<sup>[45]</sup>等方法有效减小通信开销。除此之外，系统的异构性将会导致各参与者通信能力及计算速度有所差异，常规

的联邦学习框架多采用同步的方式进行模型更新，这会对联邦学习的收敛速度有所影响。一些文献提出采用异步<sup>[46]</sup>或者半异步<sup>[47]</sup>的方式进行模型更新，从而减小计算速度慢以及通信质量差的参与者对于联邦学习的影响。此外，安全的联邦学习框架设计也是联邦学习在电力系统的应用中的重要课题。联邦学习在电力系统应用中，会面临许多信息攻击的威胁，例如拜占庭攻击，恶意节点向其他节点发送错误参数，导致整体联邦学习精度下降<sup>[48]</sup>。

### 2.2.4 分割学习

在分割学习中，机器学习模型被分为两个部分，分别被保留于客户端与服务器端。如图 5 所示，分割学习主要有 3 种常见模式。以模式 1 为例，在前向传播的过程中，客户端首先执行前向传播并将模型输出上传至服务器，服务器侧的模型继续前向传播得到最终输出。其中，模式 2 与 3 为模式 1 的变体，模式 2 最终服务器需要将前向传播后的编码内容传回本地模型，本地模型前向传播得到预测结果；模式 3 则整合了多个本地模型的输入特征。

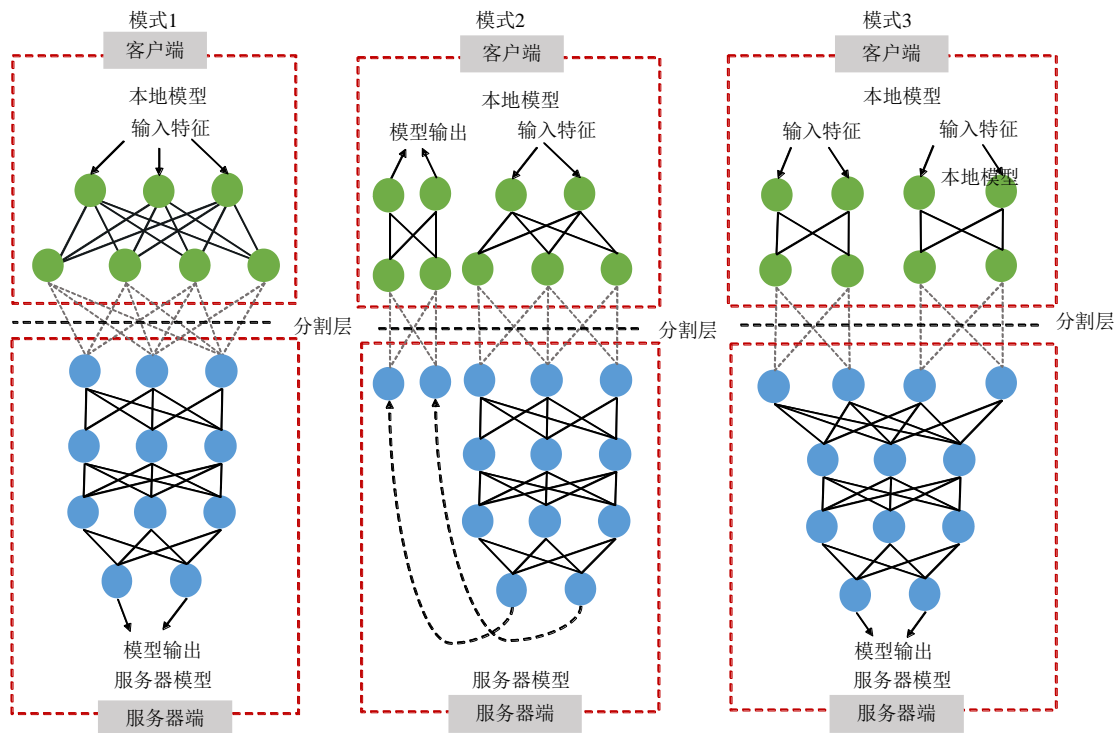


图 5 分割学习示意图

Fig. 5 Illustration of split learning

目前，分割学习于电力系统中的应用尚且处于起步阶段。文献[34]结合堆叠自编码器和分割学习，实现隐私保护的窃电监测。文献[35]通过分割学习，实现家庭用户仅需将本地编码上传，同时进行多个家庭以及多层级的负荷预测。文献[36]通过分割学

习解决在智能电表部署大规模机器学习模型所遇到的计算资源和内存受限的问题。目前，分割学习在电力系统中的应用尚且处于起步阶段，在未来，可将分割学习与物联网云边协同技术相结合，开发适配电网云边端架构的算法，实现隐私保护的电力

数据分析。

### 2.2.5 多方安全计算

多方安全计算实现了无须第三方参与的情况下，多个参与者协作计算某一函数，并保证每个参与者仅接收自己计算的结果，并且无法从计算的交互数据中推断任何其他参与者的输入和输出数据。多方安全计算在电力系统优化调度、市场出清等方面都得到充分的应用。文献[37]设计一种基于多方安全计算的安全二次规划算法，用于计算点对点(peer-to-peer, P2P)能源市场清算结果。文献[38]将多方安全计算引入多能源系统分布式优化中，结合交替方向乘子法与同态加密实现隐私保护的分布式最优能量流求解。

综上，基于隐私保护的数据查询尚且处于起步阶段，大多研究主要聚焦于如何应用现有加密算法实现隐私保护的数据查询，并未考虑到如何在设计隐私保护的查询方案时充分考虑电力数据采集、传输的特性。在隐私保护的前提下，对海量细粒度用电数据进行智能分析已得到充分关注与探索。然而，由于电力系统数据量大且参与主体较多的特点，目前的技术在实际应用会面临通信堵塞等问题。此外，现有的研究还未充分考虑针对能源系统具体场景的多种隐私保护方法有机结合的问题。

## 3 用电大数据的价值量化

电力零售商之间的互相竞争关系是数据壁垒高起的重要原因，极大阻碍了彼此之间的数据共享；若分享数据能够获取一定的经济利益，那么电力零售商就“愿意”共享数据，加强相互合作，从而打破数据壁。所以，数据价值量化作为构建公平的数据市场的重要一环，受到国内外学者的广泛关注和研究。数据价值量化包括数据总价值量化和价值再分配两个环节。

### 3.1 数据总价值量化

如表 2<sup>[49-61]</sup>所示，数据生产要素的价值可参考传统资产从经济学角度出发进行量化。除经济学角度，数据生产要素还具有易于复制、非排他等特性，同时可以从信息论和数据科学的角度进行量化。

#### 3.1.1 经济学视角

数据生产要素的交易形式可以分为直接数据交易与数据服务交易。前者对应将原始数据直接从卖方转移至买方，而后者则是交易数据衍生品，即对数据处理之后获得的信息。对于数据价值的分

表 2 数据总价值量化研究视角

Table 2 Perspectives about the researching of data value quantification

学科	量化角度	参考文献
经济学视角	成本法	
	收益法	[49-50]
	市场法	
信息论视角	数据质量	[51-53]
	数据信息量	[51,54]
	数据实效性	[55]
	数据隐私含量	[16]
	数据标准程度	[52-53]
	数据传播程度	[52-53,56]
数据科学视角	预测精度的影响	[57-60]
	决策成本的影响	[61]

析，可分为数据能给购买者带来的经济利益，与购买者愿意为信息支付的成本。从经济学角度，上述两种含义分别对应数据的使用价值与价值<sup>[62]</sup>。

数据生产要素的价值量化可以沿用传统资产量化方法，包括成本法、收益法和市场法<sup>[49-50]</sup>。成本法的数据价值量化主要从数据采集、传输、存储、管理的成本为基础依据实施定价。收益法则是根据数据所能带来的收益确定数据的价值。市场法则是根据现有数据市场上，类似数据资产在市场中的成交价来确定数据资产的价值。买卖双方往往会采取不同角度对数据价值量化的策略。例如，对于卖方，其往往倾向于成本法与市场法；而对于买方，则通常会采用收益法与市场法。经济学角度的数据价值更多的是一种事前数据价值量化，即数据在交易与使用前确定数据的价值。

#### 3.1.2 信息论视角

与传统资产价值量化方法不同，数据具有易复制、非排他、价值外部性(与其他数据产品结合而获得价值)、场景特异性(价值与使用场景高度相关的特性)。因此，从信息论的角度对数据进行价值量化，则是数据生产要素的特有途径。文献[51]通过香农熵衡量信息含量，噪声比衡量数据质量，并将两个指标乘积定义数据质量对数据价值进行量化。文献[54]纵向联邦学习的场景中，通过计算特征的条件互信息，实现任务特定但与模型无关的数据价值量化方案。该工作在数据价值量化的过程中考虑了数据之间的相互影响，若不同客户的数据具有较高相似性，则后至客户的数据价值将会受到影响。文献[55]提出信息年龄的概念来衡量数据的实效性。

在此工作中，目标用户根据数据供应商的定价策略选择最佳数据更新时间，并向数据提供商支付与数据新鲜度(由信息年龄定义)相关的费用。文献[16]通过数据中包含用户隐私程度以及可用性程度对数据进行价值量化。用户通过向原始数据中加入差分隐私噪声，从而模糊用户个人信息。所添加的噪声强度越高，则数据所出售的价格越低。

此外，部分工作基于信息论，从多个角度衡量数据的价值。文献[52-53]从数据质量、数据结构、数据传播程度、数据标准程度等多方面衡量数据的价值。文献[56]将数据的价值分为内在价值、商业价值、使用价值等。在衡量数据内在价值时，同样考虑了数据的质量以及数据传播程度。

### 3.1.3 数据科学视角

通过数据的交易、共享或者挖掘获取信息，使电力系统中的利益主体在决策中所面临的不确定性减少，最终获得的系统收益则为数据所带来的价值。由于现今的电力零售商主要通过数据驱动的预测技术尽可能减少不平衡成本，所以常见的衡量用电大数据价值的思想为：根据数据集对预测精度的提升定义数据价值。文献[57]提出面向可再生能源预测的数据市场，通过最小二乘法估计能源预测的模型参数，并使用均方误差量化可再生能源商所出售的数据价值。在此基础上，文献[58]拓展出“回归市场”的概念，在回归市场中，数据价值根据数据对平台发布的预测任务的贡献来度量。文献[59]提出“Lasso 回归市场”，通过在回归任务的损失函数中加入 Lasso 正则化项，筛选出对预测结果更有价值的特征，从而提高能源预测的表现，并以 Lasso 项衡量数据集的价值。类似地，文献[60]从数据削弱不确定性对数据买方经济利益的影响的角度定义电力数据价值。例如，可再生能源商购得用户用电大数据使概率性负荷预测的置信区间长度减小，而该减小量能够对应地为数据买方带来能源市场收益的增加。

为进一步定义数据的“货币化”价值及考虑到数据价值是与其使用场景紧密相联系的<sup>[63]</sup>，部分用电大数据价值的量化结合特定的应用场景，遵循“先预测，后决策”两步走的研究路径：首先，针对不同数据集，独立地构建预测模型；然后，根据不同预测精度下的运行成本量化数据集价值。文献[51]使用香农熵和噪声比衡量数据质量，并构建从数据集的香农熵和噪声比到模型预测精度的映

射。通过对不同精度的光伏功率预测结果进行机组启停优化，得到预测精度到成本的映射，从而实现数据价值的量化。从数据削弱不确定性的角度出发，文献[61]以太阳光电为背景，将负荷预测误差的标准差的减少量作为不确定性的衡量指标，然后，建立风电商和太阳能电商的决策收益优化问题，量化了用电数据的价值。

## 3.2 数据价值再分配

用于构建模型的数据来自于多个主体(如多个电力零售商)，每个主体对于最终成本降低的“贡献度”大小也需要进一步精准衡量，保证多主体之间的公平性。只有实现收益在多个数据贡献者之间公平公开地进行分配，才能进一步调动更多的数据拥有者参与到数据共享中。

### 3.2.1 夏普利值

夏普利值(Shapley value)作为合作博弈论中经典的收益分配方法，其基本思想便是根据合作博弈参与者对合作联盟总目标的贡献程度分配收益，在数据价值再分配研究领域中也已经受到了广泛使用<sup>[64]</sup>。若将参与数据共享的主体(电力零售商、能源系统等)视为合作博弈中的参与者，不同场景下的数据分析目标(例如损失函数的减少等)作为合作收益，则夏普利值可以合理分配数据共享带来的经济收益。其中，夏普利值可以写作<sup>[65]</sup>：

$$\varphi_r = \sum_{S \in \mathcal{N} \setminus \{r\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{N!} [V(S \cup \{r\}) - V(S)] \quad (3)$$

式中： $N$  为所有参与者集合； $V(S)$  为用户群  $S$  所产生的收益； $V(S \cup \{r\})$  为用户群  $S$  和  $r$  产生的收益； $\varphi_r$  为用户  $r$  所带来的贡献。如图 6 所示，当有 3 个参与者  $\{s_1, s_2, r\}$  时，式(3)中的  $S$  为集合  $\{s_1, s_2\}$  的子集。需要加权平均  $S$  为不同组合情况下参与者  $r$  的加入对于收益的影响，才可得到最终参与者  $r$  的贡献。文献[66]按照此方式构建电力用户和电力零售商的合作博弈模型，通过算例对比多种收益分配方式，证明按照夏普利值分配收益更有益于激励用户分享用电大数据，从而破除数据壁垒。

然而，夏普利值的计算时间复杂度较高，当数据交易主体增多时，计算耗时指数级增加，尤其在数据价值量化的研究背景下，合作博弈中的效益函数常常涉及多个数据集的组合和机器学习模型的重新训练，使夏普利值的计算更加复杂。因此，夏普利值常常需要进行近似计算。文献[67]提出快速

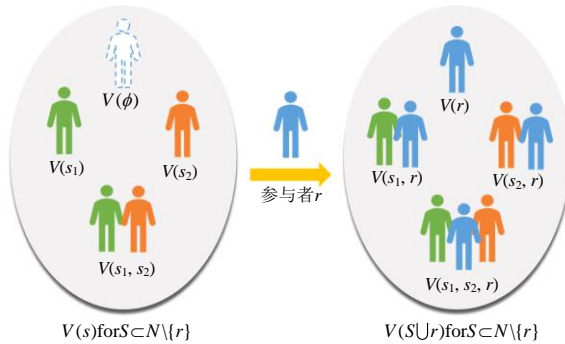


图6 当3个参与者进行数据共享情况下夏普利值的计算

Fig. 6 Illustration of the calculation of

Shapley value when there are three participants

计算分布式夏普利值的解析表达式,能够应用于典型机器学习问题(线性回归、二分类和非参数密度估计)。文献[68]则在横向联邦学习的框架下,利用各个模型的梯度信息进行夏普利值的近似计算。文献[69]实现在纵向联邦学习的框架下,利用模型传输的编码信息进行夏普利值的加速计算。由此可见,夏普利值作为经典的收益分配方法,其思想以及多种近似计算方法也被广泛应用于数据价值研究之中,亦可作为未来研究的参考。

### 3.2.2 影响函数

除夏普利值外,影响函数(influence function)同样用于数据价值再分配。与夏普利值更多用于特征级别的价值再分配不同,影响函数主要用于样本级的价值再分配。影响函数主要是通过对样本权重施加某一微小扰动,通过梯度分析微小扰动对模型误差的影响实现样本级的价值再分配。文献[70]提出基于影响函数的激励机制,即最小化因获取数据而支付的费用和估计误差的加权之和,来实现数据成本和模型误差的平衡。文献[71]通过影响函数衡量训练数据集中的样本重要性并在训练过程中进行加权,对影响函数较高的样本给予更多权重,从而实现预测精度的提高。然而,由于影响函数涉及到海森矩阵及其求逆的计算,也存在计算量较大的问题。现有部分研究也通过避免对海森矩阵进行显式求逆来加速影响函数计算,例如海森向量积<sup>[72]</sup>。

综上,现有研究已从多学科角度对数据总价值量化方法进行了探究,但不同的总价值量化角度相对独立,且不同方案衡量出的数据总价值存在较大差异,亟须探索融合不同的数据总价值量化方案的多维度的数据总价值量化方法。在数据价值再分配方面,现有研究主要关注分配的公平性。然而,目

前主流的再分配角度都涉及边际贡献率的计算,导致极高的计算复杂度,例如夏普利值和影响函数的海森矩阵求逆的指数级计算复杂度。高计算复杂度的问题严重限制了数据再分配方案在大规模主体参与数据共享的实际场景中的应用。

## 4 用电大数据共享平台

除隐私保护和价值量化外,数据共享还需依托一个高效可靠的数据共享平台。由于用电大数据拥有者种类繁多、条块分割,难以构建一个统一的数据共享平台。现有的关于数据共享平台的研究可以分为基于区块链的数据共享以及非基于区块链的共享平台。

### 4.1 基于区块链的共享平台

区块链是一种分布式数据库技术,以链条的形式记录交易数据。在区块链中,每个区块包含交易信息和前一个区块的哈希值。这种链条式的设计和哈希计算的不可逆性使区块链中存放的数据具有不可篡改的性质,鉴于其安全性,区块链技术目前已被广泛应用于加密货币、智能合约等领域。

区块链技术的去中心化、透明性、公平性及公开性等特性与智能电网理念契合<sup>[73]</sup>,因此,区块链在智能电网中的应用与融合也受到国内外学者的关注。目前,区块链已在智能电网中应用于多方能源交易<sup>[74]</sup>、智能电网调度运行<sup>[75]</sup>、信息物理系统安全<sup>[76]</sup>等方面。在能源交易方面,区块链支持的P2P能源交易将交易记录储存在区块中,具有不依赖于中介的优势<sup>[77-78]</sup>;在电网调度运行方面,区块链和智能合约支持的架构可以促进电网中能源的去中心化优化和控制,如分布式最优潮流计算<sup>[79]</sup>和微电网电压调节<sup>[80]</sup>;在信息物理系统安全方面,区块链可以保护信息系统中数据交换免受恶意的篡改与攻击,从而防止对应物理电网中的动作偏差。例如,文献[81]利用区块链保护继电器的信息交换过程的信息安全。

近年来,得益于智能电表的广泛普及,用户侧用电数据大量积累,使用电数据共享逐渐成为国内外区块链学者的新研究方向。区块链在电力数据共享方面具有天然的优势,具体而言,区块链的不可篡改性能够很好地保证数据的安全,可溯源性则保证了所有的交易信息在链上都得以记录,去中心化的特性保证了数据能够分布式管理<sup>[82-83]</sup>。文献[84]提出基于区块链与数据池的电力数据存储与共享

方法，只在区块中存储数据的哈希值，而将数据存储在数据池中，以实现数据跨平台跨域安全共享。文献[85]提出一种融合云计算与轻量化分布式区块链技术的通信数据安全保护机制，以解决电力数据共享中存在的篡改、信息泄露、网络攻击的风险。类似地，文献[86]提出安全可溯源的用户用电数据共享方案，详细探究了面向电力用户数据的智能合约。在此方案中，智能合约用以规范细粒度用电数据使用政策，而数据使用的记录将存储于区块中，始终不可修改且保持透明，同样保证了电网运营者在使用电力用户数据时的可追溯性。为了鼓励数据共享，文献[87]通过私有区块链为电网运营者构建共享平台，设计激励机制鼓励运营者上传数据，并惩罚低质量数据的提供者。文献[88]则从访问控制机制入手，利用 PageRank 机制对参与数据共享的电力用户数据进行补偿，从而激励数据共享。从安全高效的角度，文献[89]提出边缘区块链授权的安全数据访问控制方案，减轻了终端用户的计算负担。

#### 4.2 非基于区块链的共享平台

除了基于区块链的数据共享平台，还有部分基于加密、云计算技术的数据共享平台。文献[90]提出一种基于信用的智能电网数据共享系统。该方案将日常数据分类扩展到进一步的类别，如区域数据和用户数据。由于数据采集的分类，数据收集者更容易根据隐私级别来分配奖励。信用形式的奖励进一步激励消费者，使消费者愿意分享自己的隐私数据。文献[91]从不同类型数据的存储结构设计和数据共享流程设计两个方面，设计基于能源互联电力大数据的共享系统。针对传统智能电网数据安全存储策略所面临的安全挑战，文献[92]提出基于云计算的智能电网数据安全存储与共享平台。该平台引入动态密钥机制，通过该机制有效获取密钥链中的初始密钥信息，并动态地生成密钥，从而显著增强了数据安全性。为了弥补能耗数据、电网测量数据无法直接共享给第三方或个人用户的问题，文献[93]为智能电网提出一种隐私保护的能源消耗数据共享框架。在该框架中，分别设计了两种基于 Paillier 算法的机制，以实现隐私保护的数据采集和特定时期或地区能耗数据的均值安全计算。为了满足电网系统中数据可用性和实用性的需求，以实现数据安全和高

效共享，文献[94]搭建一种基于联邦学习的电网数据安全共享平台，并通过差分隐私、安全多方计算、同态加密和函数加密 4 种安全共享方法，确保电网数据共享的安全性和可行性。

综上，用电大数据共享平台主要可分为基于区块链的共享平台与非基于区块链平台。基于区块链的共享平台因其去中心化、透明性、公平性和公开性等特点而备受关注。然而，目前基于区块链的电力数据共享平台设计仍停留在简单应用阶段，未考虑电力系统特性及实际应用中的效率问题。相比之下，非基于区块链的平台更多地依赖隐私保护技术，如加密和差分隐私技术。这类方案面临的挑战与 2 节提到的加密和差分隐私技术类似，主要涉及计算复杂度和通信阻塞等问题。

## 5 现有实践

用电大数据共享技术尚且处于起步阶段，但目前已有部分企业进行初步尝试。下文将介绍中国南方电网、国家电网在电力数据产品上线方面的尝试，以及新奥天然气股份公司在燃气数据共享方面的案例。

### 5.1 中国南方电网数据产品交易

2021 年 3 月，南方电网发布《中国南方电网有限责任公司数据资产定价方法(试行)》。该方法是中国能源行业的首个数据资产定价方法，为电力数据共享与交易提供了切实可行的方法指导<sup>[95]</sup>。该方法所采用的数据定价方案以成本法为基础，在兼顾电网数据的成本与市场供需的基础上，提出多维度的数据价值评估方案<sup>[96]</sup>。同年，南网制定《数据资产管理暂行办法》明确数据权属，规范数据生产要素使用。在系列标准文件发布之后，南网各级子公司基于各自业务需求，面向政府、企业、金融机构、个人等领域，通过电力数据与产业、人口、金融等多源数据融合，形成系列电力数据产品<sup>[97]</sup>。

2024 年 8 月 29 日，南方电网公司举行 2024 年首批电力数据产品集中上架数据交易所仪式。在该仪式中，共有 17 款电力数据产品上线，并发布至广州、深圳、贵阳、海南等地的数据交易平台<sup>[98]</sup>。本次上线的产品涵盖“绿色低碳”“城市治理”等七大“数据要素×”的场景。例如，在城市治理方面，南方电网推出“基于用电特征信息的企业行为分析”产品，政府借助该数据产品可以更好地掌握企业发展动态，为政策制定与规划发展提供数据支持。

## 5.2 国家电网数据产品交易

从2021年起,国家电网推出多款数据产品并入驻全国各地数据交易所,在推动盘活数据要素、促进数据要素流通方面做出诸多尝试。

2021年3月,北京国际大数据交易所正式成立。2022年4月,国网北京正式入驻北京国际大数据交易所,并联合建设了“能源数据专区”。同年,全国能源行业的首笔线上数据交易达成,国网北京所推出的数据产品为北京实创环保发展有限公司建设的中关村环保科技示范园提供电力数据服务,支撑园区数字化、智慧化管理<sup>[99]</sup>。2021年11月25日,上海数据交易所揭牌成立仪式在沪举行<sup>[100]</sup>。揭牌当日,国网上海挂牌了一款“企业电智绘”的数据产品,并与中国工商银行上海分行达成交易,中国工商银行可通过企业用电行为、电费缴纳情况、用电水平等评估报告,进行辅助授信、信贷反欺诈。2024年3月12日,国网浙江在浙江大数据交易服务平台上线用户侧储能潜力分析数据产品,并完成浙江省首例“电力+能源”数据产品交易,是浙江省电力数据要素交易流通及数据要素市场建设的一次重要尝试<sup>[101]</sup>。

## 5.3 新奥燃气数据共享

新奥天然气股份有限公司提出一套基于横向联邦学习的天然气用量预测框架,并设计了激励机制以鼓励燃气公司和供暖站参与到联邦学习框架之中<sup>[102]</sup>。在该框架中,参与者的收益将分为因其数据质量的奖励与模型贡献奖励。在横向联邦场景中,参与者的数据质量定义为用户数据量占总数据集的权重、用户数据特征与标签相关性两个指标的乘积。而模型贡献则通过比较对称平均绝对百分比误差进行评估,计算每个参与者的本地模型的边际贡献。最终,参与者将分别收获由于其数据质量与模型贡献两个维度的激励。

自2022年12月起,新奥在两个城市级别燃气子公司采用所提出的激励机制,鼓励燃气公司和供暖站参与横向联邦学习。其中,两个城市级别燃气子公司分别包括4个和47个供暖站。测试结果表明,在所提出的联邦学习框架下,由A公司和B公司共同训练的天然气用量预测精度有了显著提高。天然气用量预测精度提高所带来额外收益被作为激励分配给各燃气公司和供暖站。这一尝试是首个基于联邦学习的激励机制在能源领域的成功应用。在未来,新奥集团还将展开关于抵御恶意参与者、提升其收

益分配的公平性的激励设计的研究,进一步挖掘数据价值,使数据所能发挥的效益最大化。

## 6 研究展望

目前对于隐私保护、数据价值量化、共享平台3个方面均有一定的探索,但仍有部分问题亟须解决。首先,在隐私保护方面可着力于抗量子加密共享、个性化建模方法、分布偏移自适应方法。而在价值量化方面,本研究将从宏观、微观两个角度剖析可研究方向。在共享平台方面,针对现有基于区块链平台的不足,可从轻量化设计和自动高效价值分配两个角度进一步改进。

### 6.1 隐私保护的数据共享技术

目前,隐私保护技术在用电大数据共享方面已经得到充分重视和研究。然而,随着未来信息技术的发展,例如量子计算,对隐私保护技术的要求将进一步提高。此外,随着新型电力系统的不断建设,在电力系统中应用隐私保护技术时,需要考虑不同层面数据异质性,构建个性化的模型。

#### 6.1.1 隐私保护下的抗量子加密共享方法

隐私保护下的抗量子加密共享方法作为当前信息安全领域的前沿研究方向,正面临着量子计算技术快速发展的挑战。随着量子时代的逐步到来,现有的加密共享方法因其抗量子性不足,难以长期保证数据的安全性。尤其对于电力大数据这一关乎国家安全和民生的关键数据资源,其在抗量子加密方面的隐私保护显得尤为重要。为解决这个问题,亟须深入探讨量子计算对加密技术的影响,积极探索新的抗量子加密共享方法,以确保电力大数据在量子时代下的隐私和安全。此外,致力于抗量子加密方法的性能和效率优化,使其能够更好地适应电力大数据的实际应用场景,为构建安全、可靠的智能电网提供强有力的理论支撑和技术保障。

#### 6.1.2 隐私保护下的个性化建模方法

联邦学习框架的应用面临着数据分布异构的挑战,现有研究对该问题进行了初步探索,文献[103]提出向全局模型聚合过程中加入正则项,以应对数据异构和系统异构的双重挑战。文献[104]通过建立全局模型和本地模型的双层优化问题,以实现个性化联邦学习。但是,目前缺乏融合用电特征的个性化建模方法。针对数据分布异构所导致的局部优化与全局优化冲突的问题,现有的模型个性化方法缺少用户特征的融入,无法做到精细化建模。为了解

决这个问题，亟须构建自适应的联邦学习框架，结合用电特征对用户群体进行不同程度的个性化建模，相关研究仍比较缺乏。

为了解决上述问题，未来研究可以将联邦学习与自监督学习<sup>[105]</sup>等技术进行结合，构建基于表征学习<sup>[106]</sup>与对比学习<sup>[107]</sup>的用户特征表征提取模型，基于用户表征特性设计个性化建模框架。此外，可以研究基于知识蒸馏<sup>[108]</sup>、集成学习<sup>[109]</sup>、迁移学习<sup>[110]</sup>等技术用于个性化建模，从模型结构设计与协同训练范式等方面提升全局知识与个性化知识的耦合深度。

### 6.1.3 隐私保护下的分布偏移自适应方法

现有的联邦学习研究多侧重于数据在空间层面的非独立同分布问题，而忽视用电数据在时间层面的分布变化问题。由于用户侧用电设备与形式的更新，用电行为与模式在时间尺度上发生较大变化，导致静态的模型所刻画的函数映射关系在动态变化的数据分布场景下失效。在保护隐私的前提下，目前仍缺乏应对分布偏移的自适应技术。未来研究可以着眼于隐私保护的分布偏移识别、理解与适应等技术。首先，可以将数据联合分布由边缘分布和条件分布表示，考虑联邦学习场景下的群体与个体的分布偏移情况，基于用户模型更新梯度信息、预测误差信息与用户表征信息，提出隐私保护的边缘分布偏移与条件分布偏移的实时监测技术<sup>[111]</sup>；其次，未来研究可以考虑结合隐私保护技术与可解释性机器学习技术提出针对分布偏移的量化与归因技术，切实回答“数据分布如何偏移”及“数据分布偏移多少”等问题<sup>[112]</sup>；最后，未来研究还可以考虑结合联邦学习与在线学习<sup>[113]</sup>及持续学习<sup>[114]</sup>等技术，提出全局模型与本地模型交互式在线更新方法，让模型能高效地适应数据分布变化从而提升泛化性。

## 6.2 用电大数据价值量化

电力大数据的价值不清导致数据拥有者缺乏共享数据的动力和收费标准。在事前数据价值量化角度，可从宏观上构建电力大数据价值量化指标体系，综合量化数据总价值。在事后数据价值量化角度，可从微观上研究基于数据使用场景的收益导向价值量化方法，准确量化实际场景中的数据价值。宏观与微观价值评估方案可有机融合实现多维度数据总价值量化，从而在多个数据拥有者之间达成关于数据总价值的共识。基于此，设计高效且公平

的收益再分配架构，在多主体共享数据的场景下，实现数据收益的合理分配。

### 6.2.1 宏观数据价值量化

数据价值量化思路主要沿用传统资产价值量化方法，并未考虑电力数据的特征，且使用对象和可行程度存在差异，无法形成一套完整有效的量化方案。针对电力数据，首先，需要梳理电力大数据的相关数据库，基于安全、绿色、公平、经济等不同电力市场优化目标形成不同的数据库；此后，基于各目标下数据库内数据特征建立模型，提取适用于安全、经济、公平、绿色目标的数据价值指标因子及一级指标；最后，通过加权聚合等方法，得到各级指标和总体得分，实现数据价值的量化。

### 6.2.2 微观数据价值量化

数据价值最终要体现在决策成本降低或效益提升上来，电力系统的决策需要负荷、新能源出力、电价等的预测作为基础。数据的价值可以直接反映在负荷预测的精度提升上，但是，精度的提升无法直接明确地对应到数据的“货币化”价值。因此，需要针对负荷预测所服务的下游问题，例如电力零售商、配电网运营商的优化决策问题，探究决策的数据价值评估，量化数据共享的降本增效价值。然而，在“先预测，后决策”的研究路径下，预测模型训练与下游优化问题相互独立。模型的训练目标为预测误差最小，而非使最终系统的运行成本最低，因此，无法充分挖掘数据价值。未来可开展关于实现预测决策一体化建模以量化并分配数据共享创造的额外价值的研究。

文献[115]提出可微分优化网络层，基于优化问题的 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件与隐函数定理，实现了优化问题目标函数对预测结果的求导，将预测与决策打通。文献[116]针对多能源系统日前调度的优化问题，设计预测决策一体化的数据价值量化框架，促进了不同能源部门间的数据共享。该工作将数据价值定义为数据共享与不共享系统调度成本的差异。该框架基于所有参与者均诚实且需要可信第三方主体，如何设计分布式且可防止恶意主体参与数据共享仍有待研究。

在完成数据总价值量化之后，需要对数据共享参与者进行收益的分配。然而，若通过夏普利值进行计算，需要进行指数级优化问题的求解，使这一方案难以进行实际应用。因此，未来需要在高效的收益分配方面进行探究，例如，借助内点法将用户

优化问题放置于图形处理器(graphics processing unit, GPU)并行求解<sup>[117]</sup>与利用代理模型近似夏普利值<sup>[118]</sup>实现计算简化。

### 6.3 区块链融合的数据共享技术

现阶段关于区块链融合的数据共享研究缺少针对考虑隐私保护机器学习模型的优化设计。隐私保护的机器学习框架较传统的中心式机器学习框架往往需要多主体的频繁通信,导致高昂的通信成本。而传统的公有区块链中多节点执行共识机制本就需要消耗较多的计算资源,因此,亟须构建融合机器学习模型的高效共识机制;其次,现有研究缺少考虑数据价值分配的智能合约。由于区块链智能电网数据共享环境复杂,涉及数据请求者、提供者、挖矿节点以及其他支持服务提供者,无法运用传统的交易转账过程,智能合约需要对具体数据共享场景进行个性化的设计,实现数据共享收益的高效分配,而目前尚缺乏考虑多元数据共享场景的智能合约构建方法。

为解决上述问题,未来研究可从轻量化设计和自动高效价值分配两个角度出发。在轻量化设计方面,可研究轻量化的共识机制设计<sup>[119]</sup>,通过降低区块链节点之间的共识过程提升效率<sup>[120]</sup>;也可以从轻量化的存储、加密过程、区块链结构优化出发提升效率<sup>[121]</sup>。而区块链网络价值分配则需要综合考虑数据价值量化指标和节点工作量量化指标的合理评估,保证多数据主体和多网络节点之间的收益公平分配。

## 7 结论

配用电系统步入大数据时代,然而,增量配电网、电力零售市场等改革使配用电侧出现众多参与主体,配用电侧产生的海量用电数据将分属不同主体,由于法律制度、业务竞争、共享平台等原因,不同主体之间的数据壁垒高起,很多集中式的数据分析方法无法满足未来配电网数字化转型的实际需求。

因此,本文提出从保护数据隐私、量化数据价值、构建共享平台3个方面入手,设计了让数据拥有者“放心”“愿意”且“能够”共享数据的框架,真正打破数据壁垒、整合数据资源,为用电数据共享提供理论支撑和切实解决方案。此外,本文还探讨了隐私保护的用户行为分析与预测、宏观与微观结合的数据价值量化与分配、区块链融合的数据共

享框架等,为未来的研究方向提供了指引。这些研究方向将有助于打破数据“条块分割”的格局,促进数据共享,盘活生产要素。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-26) [2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).  
The State Central, The People's Republic of China. Notice of the State Council on printing and distributing the action plan for carbon peaking before 2030[EB/OL]. (2021-10-26)[2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm)(in Chinese).
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院印发《数字中国建设整体布局规划》[EB/OL]. (2023-02-27)[2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/27/content\\_5743484.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/27/content_5743484.htm).  
The State Central, The People's Republic of China. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council issued the overall layout plan for the construction of digital China[EB/OL]. (2023-02-27) [2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/27/content\\_5743484.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2023-02/27/content_5743484.htm)(in Chinese).
- [3] 张晓萱, 薛松, 杨素, 等. 售电侧市场放开国际经验及其启示[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 1-8.  
ZHANG Xiaoxuan, XUE Song, YANG Su, et al. International experience and lessons in power sales side market liberalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 1-8(in Chinese).
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见[EB/OL]. (2020-04-09)[2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/2020-04/09/content\\_5500622.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2020-04/09/content_5500622.htm).  
The State Central, The People's Republic of China. Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on building a more perfect market - based allocation system and mechanism for factors of production [EB/OL]. (2020-04-09)[2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/2020-04/09/content\\_5500622.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2020-04/09/content_5500622.htm)(in Chinese).
- [5] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院关于构建数据基础制度更好发挥数据要素作用的意见[EB/OL]. (2022-12-19)[2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/2022-12/19/content\\_5732695.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2022-12/19/content_5732695.htm).

- The State Central, The People's Republic of China. Opinions of the CPC Central Committee and the State Council on establishing a data-base system to maximize a better role of data elements[EB/ OL]. (2022-12-19)[2024-09-03]. [http://www.gov.cn/zhengce/2022-12/19/content\\_5732695.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2022-12/19/content_5732695.htm)(in Chinese).
- [6] WANG Yi, BENNANI I L, LIU Xiufeng, et al. Electricity consumer characteristics identification: a federated learning approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3637-3647.
- [7] TSAI J L, LO N W. Secure anonymous key distribution scheme for smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 906-914.
- [8] WANG Zhiwei. An identity-based data aggregation protocol for the smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2428-2435.
- [9] HUR J. Attribute-based secure data sharing with hidden policies in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(11): 2171-2180.
- [10] ZHANG Leyou, REN Juan, MU Yi, et al. Privacy-preserving multi-authority attribute-based data sharing framework for smart grid[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 23294-23307.
- [11] LIAO Huimin, LILili, XUAN Jiaying, et al. Application of cryptographic technology based on certificateless system in electricity internet of things[C]//2020 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE). Shenzhen: IEEE, 2020: 417-423.
- [12] RAMADAN M, ELBEZ G, HAGENMEYER V. Verifiable certificateless signcryption scheme for smart grids[C]//2023 7th International Conference on System Reliability and Safety (ICRSRS). Bologna: IEEE, 2023: 181-189.
- [13] LI Jiangnan, NIU Xiangyu, SUN J S. A practical searchable symmetric encryption scheme for smart grid data[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE, 2019: 1-6.
- [14] FAN Kai, CHEN Qi, SU Ruidan, et al. MSIAP: a dynamic searchable encryption for privacy-protection on smart grid with cloud-edge-end[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2023, 11(2): 1170-1181.
- [15] EIBL G, ENGEL D. Differential privacy for real smart metering data[J]. *Computer Science-Research and Development*, 2017, 32(1): 173-182.
- [16] CHHACHHI S, TENG Fei. Market value of differentially-private smart meter data[C]//2021 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington: IEEE, 2021: 1-5.
- [17] ABADI M, CHU A, GOODFELLOW I, et al. Deep learning with differential privacy[C]//Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. Vienna: Association for Computing Machinery, 2016: 308-318.
- [18] DVORKIN V, FIORETTO F, VAN HENTENRYCK P, et al. Differentially private optimal power flow for distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2186-2196.
- [19] FAN Bo, WANG Xiongfei. Distributed privacy-preserving active power sharing and frequency regulation in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3665-3668.
- [20] GAI Keke, WU Yulu, ZHU Liehuang, et al. Privacy-preserving energy trading using consortium blockchain in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3548-3558.
- [21] 曹辉. 智能电网本地化差分隐私保护研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- CAO Hui. Research on local differential privacy in smart grid[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020(in Chinese).
- [22] CHENG Zheyuan, YE Feng, CAO Xianghui, et al. A homomorphic encryption-based private collaborative distributed energy management system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 5233-5243.
- [23] ALHARBI K N, LIN Xiaodong, SHAO Jun. A privacy-preserving data-sharing framework for smart grid[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(2): 555-562.
- [24] CHEN Wei, LIU Lu, LIU Guoping. Privacy-preserving distributed economic dispatch of microgrids: a dynamic quantization-based consensus scheme with homomorphic encryption[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(1): 701-713.
- [25] 臧禹, 吕干云, 贾德香. 基于 Paillier 同态加密的电力交易数据加密方案[J]. *电气自动化*, 2023, 45(1): 39-41, 46.
- ZANG Yu, LYUGanyun, JIA Dexiang. Power transaction data encryption scheme based on Paillier homomorphic encryption[J]. *Electrical Automation*, 2023, 45(1): 39-41,

- 46(in Chinese).
- [26] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.  
KANG Chongqing, XIA Qing, ZHANG Boming. Review of power system load forecasting and its development [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11(in Chinese).
- [27] SAVI M, OLIVADESE F. Short-term energy consumption forecasting at the edge: a federated learning approach[J]. IEEE Access, 2021, 9: 95949-95969.
- [28] 焦润海, 褚佳杰, 李俊良, 等. 基于数据分解的多区域个性化联邦负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(05): 1691-1704.  
JIAORunhai, CHUJiajie, LI Junlinag, et al. Personalized federated multi-region load forecasting method based on data decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(05): 1691-1704(in Chinese).
- [29] 余清波. 基于联邦学习的用电异常检测系统设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
YU Qingbo. Design and implementation of electricity anomaly detection based on federated learning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021(in Chinese).
- [30] KESICI M, PAL B, YANG G Y. Detection of false data injection attacks in distribution networks: a vertical federated learning approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(6): 5952-5964.
- [31] MAO Zhengxiong, LI Hui, HUANG Zuyuan, et al. Full data - processing power load forecasting based on vertical federated learning[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2023, 2023(1): 9914169.
- [32] ZHANG Zhoujie, TAO Lei, CUI Can, et al. Research on the security sharing method of power grid dispatching control data based on Alliance Blockchain and Zero-Knowledge Proof technology[C]//2022 IEEE 5th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Chongqing: IEEE, 2022: 1645-1649.
- [33] LIU Zewei, HU Chunqiang, XIA Hui, et al. SPDTS: a differential privacy-based blockchain scheme for secure power data trading[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(4): 5196-5207.
- [34] ALROMIH A, CLARK J A, GOPE P. Privacy-aware split learning based energy theft detection for smart grids[C]//24th International Conference on Information and Communications Security. Canterbury: Springer, 2022: 281-300.
- [35] IQBAL A, GOPE P, SIKDAR B. Privacy-preserving collaborative split learning framework for smart grid load forecasting[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2025.
- [36] LI Yehui, QIN Dalin, POOR H V, et al. Introducing edge intelligence to smart meters via federated split learning[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 9044.
- [37] ZHOU Xin, WANG Bin, GUO Qinglai, et al. Bidirectional privacy-preserving network-constrained peer-to-peer energy trading based on secure multiparty computation and blockchain[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 602-613.
- [38] SI Fangyuan, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Distributed optimization for integrated energy systems with secure multiparty computation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(9): 7655-7666.
- [39] ZHAO Jingwen, CHEN Yunfang, ZHANG Wei. Differential privacy preservation in deep learning: challenges, opportunities and solutions[J]. IEEE Access, 2019, 7: 48901-48911.
- [40] ACAR A, AKSU H, ULUAGAC A S, et al. A survey on homomorphic encryption schemes: theory and implementation[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2018, 51(4): 79.
- [41] 许伦, 刘文杰, 李昀, 等. 零知识证明在新型电力系统中的应用分析及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 114-130.  
XU Lun, LIU Wenjie, LI Yun, et al. Application analysis and prospect of zero-knowledge proof in new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 114-130(in Chinese).
- [42] 安芸帙, 崔明建, 韩一宁, 等. 基于数据隐私保护自适应联邦学习的分布式光伏有功可调节能力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(21): 8281-8295.  
AN Yunzhi, CUI Mingjian, HAN Yining, et al. A distributed PV active power adjustability evaluation method based on self-adaptive privacy-preserving federated learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(21): 8281-8295(in Chinese).
- [43] CAO Xuanyu, BAŞAR T, DIGGAVI S, et al. Communication-efficient distributed learning: an overview[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(4): 851-873.

- [44] ROTHCHILD D, PANDA A, ULLAH E, et al. FetchSGD: communication-efficient federated learning with sketching[C]//Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. Vienna: PMLR, 2020: 8253-8265.
- [45] WU Chuhan, WU Fangzhao, LYU Lingjuan, et al. Communication-efficient federated learning via knowledge distillation[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2032.
- [46] CHEN Yujing, NING Yue, SLAWSKI M, et al. Asynchronous online federated learning for edge devices with non-IID data[C]//2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Atlanta: IEEE, 2020: 15-24.
- [47] MA Qianpiao, XU Yang, XU Hongli, et al. FedSA: a semi-asynchronous federated learning mechanism in heterogeneous edge computing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(12): 3654-3672.
- [48] 李祉岐, 张琼尹, 李宁, 等. 新型电力系统中联邦机器学习面临的网络威胁[J]. *中国信息化*, 2024(1): 49-50, 48.  
LI Zhiqi, ZHANG Qiongyi, LINing, et al. Network threats faced by federated machine learning in new power systems[J]. *China Informatization*, 2024(1): 49-50, 48(in Chinese).
- [49] WANG Jianxiao, GAO Feng, ZHOU Yangze, et al. Data sharing in energy systems[J]. *Advances in Applied Energy*, 2023, 10: 100132.
- [50] 刘国磊. 典型应用场景下电网企业数据资产价值测度研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.  
LIU Guolei. Research on value measurement of data assets of power grid enterprises in typical application scenarios[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2023(in Chinese).
- [51] YU Mingkai, WANG Jianxiao, YAN Jie, et al. Pricing information in smart grids: a quality-based data valuation paradigm[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(5): 3735-3747.
- [52] VISCUSI G, BATINI C. Digital information asset evaluation: characteristics and dimensions[M]//CAPORARELLO L, DI MARTINO B, MARTINEZ M. *Smart Organizations and Smart Artifacts: Fostering Interaction Between People, Technologies and Processes*. Cham: Springer, 2014: 77-86.
- [53] HARWICH E, LASKO-SKINNER R. Making NHS data work for everyone[R]. London: Reform, 2018.
- [54] HAN Xiao, WANG Leye, WU Junjie. Data valuation for vertical federated learning: a model-free and privacy-preserving method[J]. arXiv preprint arXiv: 2112.08364, 2021.
- [55] ZHANG Meng, ARAFA A, HUANG Jianwei, et al. How to price fresh data[C]//2019 International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT). Avignon: IEEE, 2019: 1-8.
- [56] LANEY D B. Infonomics: how to monetize, manage, and measure information as an asset for competitive advantage[M]. New York: Routledge, 2017.
- [57] GONÇALVES, PINSON P, BESSAR J. Towards data markets in renewable energy forecasting[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 533-542.
- [58] PINSON P, HAN Liyang, KAZEMPOUR J. Regression markets and application to energy forecasting[J]. *TOP*, 2022, 30(3): 533-573.
- [59] HAN Liyang, PINSON P, KAZEMPOUR J. Trading data for wind power forecasting: a regression market with lasso regularization[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 212: 108442.
- [60] WANG Bohong, GUO Qinglai, YANG Tianyu, et al. Data valuation for decision-making with uncertainty in energy transactions: a case of the two-settlement market system[J]. *Applied Energy*, 2021, 288: 116643.
- [61] WANG Bohong, GUO Qinglai, YANG Tianyu, et al. Evaluation of information value for solar power plants in market environment[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan: IEEE, 2020: 3574-3580.
- [62] CHEN Ye, WANG Bohong, GUO Qinglai, et al. Information value based on the scenario of wind power trading in electricity markets[C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Changsha: IEEE, 2019: 429-434.
- [63] 尹传儒, 金涛, 张鹏, 等. 数据资产价值评估与定价: 研究综述和展望[J]. *大数据*, 2021, 7(4): 14-27.  
YI Chuanru, JIN Tao, ZHANG Peng, et al. Assessment and pricing of data assets: research review and prospect[J]. *Big Data Research*, 2021, 7(4): 14-27(in Chinese).

- [64] GHORBANI A, ZOU J. Data shapley: equitable valuation of data for machine learning[C]//Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning. Long Beach: PMLR, 2019: 2242-2251.
- [65] JIA Ruoxi, DAO D, WANG Boxin, et al. Towards efficient data valuation based on the Shapley value[C]//Proceedings of the 22nd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. Naha: PMLR, 2019: 1167-1176.
- [66] HAN Liyang, KAZEMPOUR J, PINSON P. Monetizing customer load data for an energy retailer: a cooperative game approach[C]//2021 IEEE Madrid PowerTech. Madrid: IEEE, 2021: 1-6.
- [67] KWON Y, RIVAS M A, ZOU J. Efficient computation and analysis of distributional Shapley values[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. San Diego: PMLR, 2021: 793-801.
- [68] WEI Shuyue, TONG Yongxin, ZHOU Zimu, et al. Efficient and fair data valuation for horizontal federated learning[M]//YANG Qiang, FAN Lixin, YU Han. Federated Learning: Privacy and Incentive. Cham: Springer, 2020: 139-152.
- [69] FAN Zhenan, FANG Huang, ZHOU Zirui, et al. Fair and efficient contribution valuation for vertical federated learning[J]. arXiv preprint arXiv: 2201.02658, 2022.
- [70] CAI Yang, DASKALAKIS C, PAPANITRIOU C. Optimum statistical estimation with strategic data sources[C]//Proceedings of the 28th Conference on Learning Theory. Paris: PMLR, 2015: 280-296.
- [71] WANG Chenxi, ZHOU Yangze, WEN Qingsong, et al. Improving load forecasting performance via sample reweighting[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 3317-3320.
- [72] 杨江北. 区块链技术在电力系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(8): 98-99.  
YANG Jiangbei. Application of blockchain technology in the power system[J]. Application of IC, 2024, 41(8): 98-99(in Chinese).
- [73] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4023.  
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4023(in Chinese).
- [74] LI Zhetao, KANG Jiawen, YU Rong, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8): 3690-3700.
- [75] 杨佳峰, 沈峰, 李夏琼, 等. 多链式区块链下计及多类型柔性负荷的电力系统低碳经济调度策略研究[J]. 电力与能源, 2024, 45(4): 411-417, 454.  
YANG Jiafeng, SHEN Feng, LI Xiaqiong, et al. Research on low-carbon economic dispatch strategy for power systems considering multiple types of flexible loads under multi-chain blockchain framework[J]. Power & Energy, 2024, 45(4): 411-417, 454(in Chinese).
- [76] ZHUANG Peng, ZAMIR T, LIANG Hao. Blockchain for cybersecurity in smart grid: a comprehensive survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(1): 3-19.
- [77] KOUNELIS I, STERI G, GIULIANI R, et al. Fostering consumers' energy market through smart contracts[C]//2017 International Conference in Energy and Sustainability in Small Developing Economies (ES2DE). Funchal: IEEE, 2017: 1-6.
- [78] HAHN A, SINGH R, LIU C C, et al. Smart contract-based campus demonstration of decentralized transactive energy auctions[C]//2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington: IEEE, 2017: 1-5.
- [79] MÜNSING E, MATHER J, MOURA S. Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks[C]//2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Maui: IEEE, 2017: 2164-2171.
- [80] DANZI P, ANGJELICHINOSKI M, STEFANOVIĆ Č, et al. Distributed proportional-fairness control in microgrids via blockchain smart contracts[C]//2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Dresden: IEEE, 2017: 45-51.
- [81] SIKERIDIS D, BIDRAM A, DEVETSIKIOTIS M, et al. A blockchain-based mechanism for secure data exchange in smart grid protection systems[C]//2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas: IEEE, 2020: 1-6.
- [82] 胡畔, 薄珏, 刘育博, 等. 基于区块链技术的智能电网数据管理框架研究[J]. 东北电力技术, 2021, 42(4):

- 11-12, 23.  
HU Pan, BO Jue, LIU Yubo, et al. Research on technical framework of smart grid data management based on block chain[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(4): 11-12, 23(in Chinese).
- [83] 缪宇峰, 胡翔, 赵莉莉, 等. 区块链视角下的电能质量数据管理技术研究[J]. 华电技术, 2021, 43(1): 45-51.  
MIAO Yufeng, HUXiang, ZHAOLili, et al. Research on power quality data management technology from the perspective of blockchain[J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 45-51(in Chinese).
- [84] 曾飞, 杨雄, 苏伟, 等. 基于区块链与数据湖的电力数据存储与共享方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 48-54.  
ZENG Fei, YANG Xiong, SU Wei, et al. Power data storage and sharing method based on blockchain and data lake[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 48-54(in Chinese).
- [85] 宋秉虎, 杨明祥, 李祥, 等. 基于云区块的电力工程供应链数据共享技术研究[J]. 电子设计工程, 2026, 34(01): 106-110.  
SONGBinghu, YANG Mingxiang, LI Xiang, et al. Research on data sharing technology for power engineering supply chain based on cloud blockchain [J]. Electronic Design Engineering, 2026, 34(01): 106 - 110(in Chinese).
- [86] WANG Yuntao, SU Zhou, ZHANG Ning, et al. SPDS: a secure and auditable private data sharing scheme for smart grid based on blockchain[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7688-7699.
- [87] REIJSBERGEN D, MAW A, DINH T T A, et al. Securing Smart grids through an incentive mechanism for blockchain-based data sharing[C]//Proceedings of the Twelfth ACM Conference on Data and Application Security and Privacy. Baltimore: Association for Computing Machinery, 2022: 191-202.
- [88] SAMUEL O, JAVAID N, AWAIS M, et al. A blockchain model for fair data sharing in deregulated smart grids[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Waikoloa: IEEE, 2019: 1-7.
- [89] YANG Wenti, GUAN Zhitao, WU Longfei, et al. Secure data access control with fair accountability in smart grid data sharing: an edge blockchain approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(10): 8632-8643.
- [90] KAPADE N. Credit based system for fair data sharing in smart grid[C]//2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). Coimbatore: IEEE, 2017: 1-5.
- [91] DONG Shiwen, XU Menghan, ZHOU Aihua, et al. Research on architecture of power big data high-speed storage system for energy interconnection[C]//2021 IEEE 4th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). Shenyang: IEEE, 2021: 588-592.
- [92] JIANG Xin, YANG Qifan, JI Wen, et al. Smart grid data security storage strategy based on cloud computing platform[C]//2021 6th International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). Kunming: IEEE, 2021: 69-74.
- [93] WANG Huijian, YU Hang, ZHENG Haijie, et al. A privacy-preserving energy consumption data sharing framework for smart grids[C]//2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Changsha: IEEE, 2020: 1609-1613.
- [94] YANG Huiting, BAI Yunxiao, ZOU Zhenwan, et al. Research on the security sharing model of power grid data based on federated learning[C]//2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Xi'an: IEEE, 2021: 1566-1569.
- [95] 钟书丽, 韩世蛟, 张瑶瑶, 等. 公共数据有偿服务的正当性与实践路径研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2024, 26(1): 44-53.  
ZHONG Shuli, HAN Shijiao, ZHANG Yaoyao, et al. Research on the legitimacy and practice path of public data paid service[J]. Journal of UESTC (Social Sciences Edition), 2024, 26(1): 44-53(in Chinese).
- [96] 韩逸飞. 能源行业首个数据资产定价方法出炉—数据资产交易有望在电网领域破局[N]. 中国能源报, (2021-03-15)[2024-11-20]. [https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-03/15/content\\_2038542.htm](https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-03/15/content_2038542.htm).  
HAN Yifei. The first data asset pricing method in the energy industry released - data asset trading expected to break through in the power grid[N]. China Energy News, (2021-03-15) [2024-11-20]. [https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-03/15/content\\_2038542.htm](https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-03/15/content_2038542.htm)(in Chinese).
- [97] 李文华. 释放电力大数据价值加快数据资产化进程: 数据要素产业发展之路如何走深走实? [N]. 中国能源报, (2021-08-09) [2024-11-20]. <https://paper.people.com.cn/>

- zgnyb/html/2021-08/09/content\_25875110.htm
- LI Wenhua. Unlocking the value of big data in power industry, accelerating the process of data assetization [N]. China Energy News, (2021-08-09) [2024-11-20]. [https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-08/09/content\\_25875110.htm](https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-08/09/content_25875110.htm)(in Chinese).
- [98] 董梓童. 南方电网公司 17 款电力数据产品集中上架 [N]. 中国能源报, (2024-09-02) [2024-11-20]. [https://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2024-09/02/content\\_26079339.htm](https://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2024-09/02/content_26079339.htm).
- DONG Zitong. Southern power grid company launches 17 electricity data products [N]. China Energy News, (2024-09-02) [2024-11-20]. [https://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2024-09/02/content\\_26079339.htm](https://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2024-09/02/content_26079339.htm)(in Chinese).
- [99] 科技日报. 全国能源行业首个电力大数据合作与交易框架协议落地 [N], (2022-09-09) [2024-11-20]. [https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/ztbd/xzjj/szjjrc/sjyy/202209/t20220909\\_96974.html](https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/ztbd/xzjj/szjjrc/sjyy/202209/t20220909_96974.html).
- Science and Technology Daily. First national energy industry electricity big data collaboration and trading framework agreement settled [N], (2022-09-09) [2024-11-20]. [https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/ztbd/xzjj/szjjrc/sjyy/202209/t20220909\\_96974.html](https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/ztbd/xzjj/szjjrc/sjyy/202209/t20220909_96974.html)(in Chinese).
- [100] 中华共和国中央人民政府. 上海数据交易所成立仪式暨 2021 上海全球数商大会在沪举行 [EB/OL]. (2021-11-25) [2024-11-20]. [https://paper.people.com.cn/zgcsbwap/html/2021-11/29/content\\_25891172.htm](https://paper.people.com.cn/zgcsbwap/html/2021-11/29/content_25891172.htm).
- The State Central, The People's Republic of China. Shanghai data exchange establishment ceremony and the 2021 Shanghai Global Digital Business Conference held in Shanghai [EB/OL]. (2021-11-25) [2024-11-20]. [https://paper.people.com.cn/zgcsbwap/html/2021-11/29/content\\_25891172.htm](https://paper.people.com.cn/zgcsbwap/html/2021-11/29/content_25891172.htm)(in Chinese).
- [101] 中共嘉兴市委嘉兴市人民政府. 国内能源领域首次储能数据产品场内交易在海宁落地 [EB/OL]. (2024-03-21) [2024-11-20]. [https://www.jiaxing.gov.cn/art/2024/3/21/art\\_1578786\\_59637123.html](https://www.jiaxing.gov.cn/art/2024/3/21/art_1578786_59637123.html).
- People's Government of Jiaxing Municipal. First domestic energy storage data product exchange in Haining [EB/OL]. (2024-03-21) [2024-11-20]. [https://www.jiaxing.gov.cn/art/2024/3/21/art\\_1578786\\_59637123.html](https://www.jiaxing.gov.cn/art/2024/3/21/art_1578786_59637123.html) (in Chinese).
- [102] SUN Hao, TANG Xiaoli, YANG Chengyi, et al. HiFi-gas: hierarchical federated learning incentive mechanism enhanced gas usage estimation [C] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vancouver: AAAI Press, 2024: 22824-22832.
- [103] LI Tian, SAHU A K, ZAHEER M, et al. Federated optimization in heterogeneous networks [J]. Proceedings of Machine Learning and Systems, 2020, 2: 429-450.
- [104] DINH C T, TRAN NH, NGUYEN T D. Personalized federated learning with moreau envelopes [C] // Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing System. Vancouver: Curran Associates, 2020: 21394-21405.
- [105] ZHANG Kexin, WEN Qingsong, ZHANG Chaoli, et al. Self-supervised learning for time series analysis: taxonomy, progress, and prospects [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024, 46(10): 6775-6794.
- [106] BUI D, MALIK K, GOETZ J, et al. Federated user representation learning [C] // ICLR 2020 Conference Blind Submission. Addis Ababa: ICLR, 2023: 1-11.
- [107] QIN Dalin, LIU Guobing, LI Zengxiang, et al. Federated deep contrastive learning for mid-term natural gas demand forecasting [J]. Applied Energy, 2023, 347: 121503.
- [108] HINTON G, VINYALS O, DEAN J. Distilling the knowledge in a neural network [J]. arXiv preprint arXiv: 1503.02531, 2015.
- [109] WANG Xiaoqian, HYNDMAN R J, LI Feng, et al. Forecast combinations: an over 50-year review [J]. International Journal of Forecasting, 2023, 39(4): 1518-1547.
- [110] PAN S J, YANG Qiang. A survey on transfer learning [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(10): 1345-1359.
- [111] WU Ruihan, GUO Chuan, SU Yi, et al. Online adaptation to label distribution shift [C] // Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems. Red Hook: Curran Associates, 2021: 867.
- [112] MACHLEV R, HEISTRENE L, PERL M, et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques for energy and power systems: review, challenges and opportunities [J]. Energy and AI, 2022, 9: 100169.
- [113] KUZNETSOV V, MOHRI M. Time series prediction and online learning [C] // 29th Annual Conference on Learning Theory. San Diego: PMLR, 2016: 1190-1213.
- [114] HADSELL R, RAO D, RUSU A A, et al. Embracing

- change: continual learning in deep neural networks [J]. Trends in Cognitive Sciences, 2020, 24(12): 1028-1040.
- [115] AMOS B, KOLTER J Z. OptNet: differentiable optimization as a layer in neural networks[C]// Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning- Volume 70. Sydney: PMLR, 2017: 136-145.
- [116] ZHOU Yangze, WEN Qingsong, SONG Jie, et al. Load data valuation in multi-energy systems: an end-to-end approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(5): 4564-4575.
- [117] ŚWIRYDOWICZ K, DARVE E, JONES W, et al. Linear solvers for power grid optimization problems: a review of GPU-accelerated linear solvers[J]. Parallel Computing, 2022, 111: 102870.
- [118] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[J]. Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates, 2017: 4768-4777.
- [119] 韩拙璞, 丁涛, 穆程刚, 等. 基于异步共识区块链的企业与个人碳核算方法与智能合约设计[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 66-82.
- HAN Zhuopu, DING Tao, MU Chenggang, et al. Asynchronous consensus blockchain-based method and smart contract for corporate and personal carbon accounting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 66-82(in Chinese).
- [120] LI Chunlin, ZHANG Jing, YANG Xianmin, et al. Lightweight blockchain consensus mechanism and storage optimization for resource-constrained IoT devices z[J]. Information Processing & Management, 2021, 58(4): 102602.
- [121] STEFANESCU D, MONTALVILLO L, GALÁN-GARCÍA P, et al. A systematic literature review of lightweight blockchain for IoT[J]. IEEE Access, 2022, 10: 123138-123159.



周杨泽

在线出版日期: 2025-02-14。

收稿日期: 2024-09-09。

作者简介:

周杨泽(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为大数据、负荷预测, yzzhou@connect.hku.hk;

苏运(1987), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与优化, oppenvi@163.com;

姚睿洋(1999), 男, 博士研究生, 研究方向为加密、隐私保护, ryyao@connect.hku.hk;

徐琴(1984), 女, 硕士, 研究方向为电力系统运行与优化, xuqinsgcc@163.com;

秦大林(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为大数据、负荷预测, qindalin@connect.hku.hk;

张宁(1985), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源、电力系统规划及运行、多能源系统, ningzhang@tsinghua.edu.cn;

\*通信作者: 王毅(1992), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为大数据、能源互联网、负荷预测, yiwang@eee.hku.hk。

(编辑 乔宝榆, 张蕾)