基于联盟博弈的双边点对点能源交易

Aitazaz Ali Raja 和 Sergio Grammatico

arXiv:2301.12271v1 [cs.GT] 28 Jan 2023

摘要—**本文提出一种双边点对点（P2P）能源交易方案，适用于单合约和多合约市场设置，二者均建模为指派博弈，即一类特殊的联盟博弈。所提出的市场建模方法能够高效计算市场均衡，同时保留联盟博弈所具备的理想经济属性。此外，我们的市场模型允许买方对不同的能源卖方具有异质偏好（产品差异化），这些偏好可以是经济、社会或环境方面的。为解决联盟博弈中的可扩展性问题，我们设计了一种新颖的分布式协商机制，利用均衡解的几何结构来提高收敛速度。我们的算法使市场参与者（产消者）能够就一组“稳定”且“公平”的双边合同达成共识，从而鼓励产消者参与。该协商过程在时变通信网络上执行，所需信息几乎最少，进而保护隐私。我们利用算子理论工具严格证明了该机制的收敛性。数值模拟展示了所提协商协议的优势，并表明协商步骤的平均执行时间远快于基准。**

I 引言

MODERNIZATION在智能电网框架下，电力系统正迅速实现去中心化。由于分布式能源资源（DER）的日益普及以及通信与控制技术的部署，这一转型很大一部分发生在消费者侧。这些技术使消费者能够通过对自身能源行为进行知情控制，与电网进行主动互动，因此被称为“产消者”。

为了充分发挥自身潜力，产消者应更积极地参与能源市场。目前，产消者直接参与批发能源市场在技术和经济上都不可行。因此，小规模产消者会与零售商等聚合实体互动，将剩余能源输送至电网 [1]。与向产消者收取的买入价格相比，零售商通常为产消者出售的能源提供低得多的价格，例如上网电价（FiT） [2]。为确保产消者能够发挥具有经济吸引力的作用，点对点（P2P）能源交易代表了一种颠覆性的需求侧能源管理策略 [3]。事实上，P2P市场使产消者能够按照自己的交易条件在本地交换能源。对交易的这种直接控制使产消者能够进行有利可图的互动，从而鼓励更多参与者加入 [4]。此外，这种需求侧的本地能源交换还为系统运营商带来显著收益，例如有助于削峰 [5], 、减少电网容量投资，并提高整体系统可靠性 [1]。

然而，设计一种全面的点对点能源市场机制面临着巨大的数学挑战；该机制既要寻求市场均衡，又要将参与者 [6] 以自利为导向的决策态度纳入其中。尽管这些机制在数学上较为复杂，但仍需具备良好的可解释性，以便普通人（例如居民产消者）参与。沿着这一方向，研究人员近期提出了若干有趣的模型。在相关文献中，点对点能源市场采用了多种架构，大致可分为集中式市场（基于社区的交易）、分散式市场（双边交易）及其组合。集中式市场架构的特点包括：市场参与者通过辅助平台进行间接互动，市场参与者不承担协商角色，并且由中央统一评估单一的全市场能源交易价格。在 [5] Moret 和 Pinson 的研究中，他们提出了一种集中式本地能源市场，其中产消者群体（能源共同体）通过社区管理者与彼此及系统运营商进行互动，以开展能源交易。在 [7], Morstyn 和 McCulloch 的研究中，能源被视为一种异质产品，可根据其来源属性进行区分。平台代理通过设定价格来最大化社会福利，从而实现市场集中化，并促成产消者之间以及产消者与批发电力市场之间的能源交易。在 [8], Vazquez、Al-Skaif 和 Rueda 的研究中，他们提出了一种基于社区的市场，将决策过程建模为三个连续步骤，并使用分布式优化求解；能源通过本地交易池以单一出清价格进行交易。

去中心化 P2P 市场允许买方与卖方直接进行双边互动，每份双边合同的能源交易价格也可能不同。在 [9], 中，Sorin、Bobo 和 Pinson 提出了一种去中心化市场架构，该架构基于多双边经济调度，并支持产品差异化；通过求解分布式优化问题获得最终解。Morstyn、Teytelboym 和 McCulloch 在 [10], 中提出了另一种去中心化 P2P 市场，并将其构建为一个旨在形成稳定双边合同网络的匹配市场。在这两项研究中，产消者都可以签订双边合同，即每笔能源交易都可以采用不同的价格。在 [11], 中，Nguyen 还提出了一种去中心化 P2P 市场，其出清机制基于交替方向乘子法。在工业信息学领域，无论是集中式还是去中心化架构，点对点能源平台都受到了广泛关注。近期， [12],中的作者提出了一种双层市场，对应于区域间和区域内的交互；其中，配电系统运营商作为各区域的代表，区域间的能源交易价格则由集中式方式确定。在 [13], 中，作者

Aitazaz Ali Raja 和 Sergio Grammatico 任职于荷兰代尔夫特理工大学 Delft Center for Systems and Control。（电子邮箱：a.a.raja@tudelft.nl; s.grammatico@tudelft.nl）。本研究部分得到了 NWO 研究项目 P2P-TALES（资助编号：647.003.003）以及欧洲研究委员会研究项目 COSMOS（802348）的支持。

还提出了一种用于能源社区之间及其内部能源交易的两级市场。每个社区由一名聚合商代表，由其决定社区间交易价格；社区内交易则采用固定价格。这两项研究都提出了基于分布式优化的市场解决方案，但不允许产消者（点对点）层面进行双边经济互动。 [14] 分析了一种去中心化 P2P 市场，该市场支持双边交易，但其重点在于产消者的交易偏好，而非机制设计。文献 [15]还探讨了在点对点平台中采用区块链实现，以保障隐私和安全性。上述大多数研究都未讨论所提出交易策略的经济属性，而这些属性对任何市场机制的实际应用都至关重要。接下来，我们将论证所提出的点对点市场机制的可行性。该机制支持去中心化的（完全点对点）互动，同时也能确保理想的经济属性。

市场设计：电力市场设计所需具备的关键属性包括市场效率、激励相容性、成本回收和收入充足性 [16]。遗憾的是，根据赫维茨不可能定理，任何市场机制都无法同时满足这四项属性，因此必须进行权衡。集中式电力市场通常基于节点边际定价进行出清，而节点边际定价只能满足成本回收和收入充足性。同样，在若干点对点市场设计中采用的VCG机制满足市场效率、激励相容性和成本回收，但可能导致市场运营商出现财务赤字。在我们所研究的点对点市场设计场景中，参与者是规模相对较小的产消者，通常不具备施加市场力的能力，因此我们可以合理地假设其诚实报价，从而确保激励相容性。其他市场属性则可以通过规范联盟博弈的解来满足，因此规范联盟博弈为点对点市场的设计提供了所需的数学基础。有关联盟博弈的类别（规范联盟博弈、联盟形成和联盟图）的详细信息，请参阅 [17] 。在联盟博弈的一般设置中，具备所需属性的解（如核心）面临可扩展性问题，因为必须考虑所有可能的子联盟，即对于 N个智能体，需要考虑 $2^N - 1$ 。基于这些考虑，本文将点对点电力市场建模为指派博弈，这是联盟博弈的一个特殊类别，其解仅需联盟对的信息。这在保留所需市场属性的同时，解决了可扩展性问题 [18]。此外，我们的模型还支持双边互动：买方不仅可以表达对卖方的偏好，还可以表达对能源来源的偏好；在我们看来，这体现了点对点交易的真正精神。具体而言，本文提出了一种易于解释的去中心化（双边）点对点能源市场。该市场通过利用联盟博弈论中的相关概念进行机制设计，并证明均衡解的合理性，从而实现对能源的异质化处理。

联盟博弈论为具有自利动机的主体之间的合作互动提供了严谨的分析工具，事实上，近年来它受到了智能电网研究人员的广泛关注。例如，文献 [4] 提出了一种点对点能源交易方案，产消者通过组建联盟，以（集中式）中间市场价格相互交易能源，从而确保联盟的稳定性 [19]。在 [20],中，作者针对产消者之间的点对点能源交换建立了联盟形成博弈，并证明由此形成的联盟结构是稳定的。交换价格由中央拍卖人基于双向拍卖机制确定。文献 [21], 还提出了另一种联盟形成博弈，使产消者能够优化点对点能源交易中的电池使用。研究结果表明，该方案稳定、最优且以产消者为中心。文献 [22] 提出，产消者通过联盟形成进行去中心化双边谈判，以实现能源交换，但未考虑基于合作博弈论的稳定性。联盟形成博弈也被用于电动汽车（EV）的协作充电。文献 [23] 考虑了位于不同区域且放电价格各异的电动汽车。基于这一价格差异，电动汽车形成联盟结构以交换能源。随后，文献 [24], 针对私人充电桩建立了联盟形成博弈，通过共享资源为电动汽车提供最优充电服务。在这两项研究中，所考虑的博弈均为非超可加博弈，因此采用合并与分裂协议来形成稳定的联盟结构。该协议不确定交换价格，只确定稳定匹配。表I对比了我们的点对点市场模型与最相关文献的特点。需要指出的是，表I中的稳定性是基于合作博弈论考量的；只有当论文明确讨论了市场属性方面的保证时，我们才会标记其存在。

据我们所知，关于点对点市场合作博弈理论建模的文献，尚未通过研究最广泛且最易于理解的一类联盟博弈（即规范联盟博弈）来发展双边点对点模型。除了博弈建模所提供的数学严谨性外，其直观易懂的解释也是点对点市场设计的一项重要特征，旨在鼓励技术知识有限的小型产消者参与。尽管规范博弈似乎是对双边市场建模最自然的方法，但其应用受到计算复杂度高的阻碍，而且可能不存在能够稳定联盟的合同价格，即核心集可能为空。为解决这些问题，我们在此将点对点能源交易建模为规范联盟博弈，该模型支持双边能源交易合同，并保证存在代表市场竞争均衡的稳定 合同价格。此外，协商机制使市场参与者能够高效、便捷地就稳定 且公平 的合同价格达成结算。

贡献：我们的主要贡献总结如下：

- 我们将点对点能源交易建模为一种双边匹配博弈（合作博弈）。这种建模方式易于解释，并允许产品差异化，以适应买方的异质偏好。这一新颖的建模方式确保存在一组“稳定”的双边合同，使其达到均衡（第三节）。此外，我们的市场建模还确保该机制具备理想的经济属性，包括市场效率、成本回收和收入充足性；

表I采用联盟博弈论与最先进技术的比较

特征	[4]	[20]	[21]	[22]	本文
双边合同	×	×	×	✓	✓
对以下方面的保证					
市场属性	✓	×	×	×	✓
产品差异化	×	×	×	×	✓
分布式计算	×	×	×	✓	✓
市场稳定性	✓	✓	✓	×	✓

这些经济属性包括市场效率、成本回收和收入充足性；

- 我们构建了双边点对点能源市场的单合约 和多合约 设置，它们具有不同的计算负担和特点（III-B节和III-C节）；
- 我们提出了一种新颖的分布式协商机制，该机制以不动点迭代的形式实现，买卖双方通过一个可能随时间变化的通信网络进行本地通信。我们利用核心 解的几何结构以及算子理论，通过线性运算构建算法，从而显著降低协商的计算复杂度，效果远胜于 [25], [26]。我们证明，该机制收敛到指派博弈核心中的收益分配（第四节）；
- 我们以一种通用形式提出算法，使其能够快速收敛，并允许参与者协商核心集内部的“公平”合约 [18]。该机制的信息需求水平能够保护市场参与者的隐私。此外，我们的算法基于共识协议，而非对偶变量（例如 [11]），以便在参与者之间达成统一的价格向量；共识协议更易于分析，也更容易嵌入实际硬件。

记号与定义：给定映射 $M:\ \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$，$\mathrm{fix}(M) := \{x \in \mathbb{R}^n \mid x = M(x)\}$ 表示其不动点集合。Id 表示恒等算子。对于闭集 $C \subseteq \mathbb{R}^n$，映射 $\mathrm{proj}_C:\ \mathbb{R}^n \to C$ 表示到 C的投影，即 $\mathrm{proj}_C(x) = \arg\min_{y\in C} \|y - x\|$。过投影算子记为 $\mathrm{overproj}_C := 2\mathrm{proj}_C - \mathrm{Id}$。对于集合 S，其幂集记为 2^S。$A \otimes B$表示矩阵 A与 B. I_N的克罗内克积，后者表示维数为 $N \times N$的单位矩阵。对于 $x_1, \ldots, x_N \in \mathbb{R}^n$，$\mathrm{col}((x_i)_{i\in(1,\ldots,N)}) := \left[x_1^\top, \ldots, x_N^\top\right]^\top$. $\mathrm{dist}(x, C)$ 表示 x到闭集 $C \subseteq \mathbb{R}^n$ 的距离，即 $\mathrm{dist}(x, C) := \inf_{y\in C}\|y - x\|$。对于闭集 $C \subseteq \mathbb{R}^n$ 和 $N \in \mathbb{N}$，$C^N := \prod_{i=1}^N C$。连续映射 $M:\ \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ 是关于 $\mathbb{R}^n$上的范数 $\|\cdot\|$ 的拟压缩映射，当且仅当对所有 $(x, y) \in (\mathbb{R}^n \setminus \mathrm{fix}(M)) \times \mathrm{fix}(M)$，均有 $\|M(x) - y\| < \|x - y\|$。

II. 联盟博弈与指派博弈背景

A. 合作博弈

首先，我们介绍联盟博弈论的一些数学背景，然后介绍指派博弈这一类特殊的合作博弈。合作博弈由一组主体构成，这些主体以 $\mathcal{I} = \{1, \ldots, N\}$为索引，通过合作获得高于非合作行动所带来收益的个人回报。此类合作产生的效用由特征函数 v定义。

定义 *1*（合作博弈）：令 $\mathcal{I} = \{1, \ldots, N\}$ 为一个主体集合。合作博弈是一个二元组 $\mathcal{G} = (\mathcal{I},\ v)$，其中$v:\ 2^{\mathcal{I}} \to \mathbb{R}$ 是一个特征函数，为每个联盟 $S \subseteq \mathcal{I}$赋予一个实数值 $v(S)$。$v(\mathcal{I})$是所谓的大联盟的价值。按照惯例，$v(\varnothing) = 0$。□

在合作博弈中，联盟 S所产生的价值$v(S)$会作为收益分配给 S 的成员。对于每个 $i \in S$，收益向量 $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^{|S|}$的元素 x_i 表示智能体 i 在价值 $v(S)$中所占的份额。对于具有大联盟 $\mathcal{I}$ 的博弈，我们假设每个智能体$i \in \mathcal{I}$ 都是理性的，并要求获得有效收益向量。从数学上讲，这意味着每个智能体提出的收益向量都必须属于其有界集合。

定义 *2*（有界集合）：对于合作博弈 $\mathcal{G} =(\mathcal{I},\ v)$，集合

$$\mathcal{X}_i := \left\{ x \in \mathbb{R}^N \mid \begin{array}{l} \sum_{j\in\mathcal{I}} x_j = v(\mathcal{I}), \\ \qquad \sum_{j\in S} x_j \geq v(S), \forall S \subset \mathcal{I} \text{ s.t. } i \in S \end{array} \right\} \tag{1}$$

表示智能体 $i \in S$ 的有界集合。□

由（1）可知，有界半空间是闭凸的，是一种具有特殊几何结构的多胞体，因此我们可以将有界集合表示为有界半空间的交集。

定义 *3*（有界半空间）：对于合作博弈 $(\mathcal{I},\ v)$ 和联盟 $S \subset \mathcal{I}$，有界半空间是集合$H(S) := \{x \in \mathbb{R}^N \mid \sum_{i\in S} x_i \geq v(S)\}$. 此外，令集合

$$\mathcal{H}_i := \{H(S) \mid S \subset \mathcal{I}, i \in S\} \tag{2}$$

表示与智能体 i的理性且有效收益对应的所有有界半空间的集合，即（1）中的有界集合 $\mathcal{X}_i$。□

现在，利用定义 3 中的半空间，我们可以将有界集合写作 $\mathcal{X}_i = \bigcap_{S\subset\mathcal{I}|i\in S} H(S)$。

由于理性的智能体 i 只会同意其有界集合 $\mathcal{X}_i$ 中的收益，因此，双方同意的收益应属于所有主体的有界集合的交集。有趣的是，这个交集对应于核心这一解概念，它与大联盟 [17] 的稳定性有关。

定义 *4*：（核心）：合作博弈（$\mathcal{I}, v$）的核心 $\mathcal{C}$ 是以下收益向量的集合：

$$\mathcal{C} := \{x \in \mathbb{R}^N \mid \sum_{i\in\mathcal{I}} x_i = v(\mathcal{I}), \sum_{i\in S} x_i \geq v(S), \forall S \subseteq \mathcal{I}\}, \tag{3}$$

其中，术语 $\sum_{i\in\mathcal{I}} x_i = v(\mathcal{I})$ 确保效率，$\sum_{i\in S} x_i \geq v(S)$ 则体现收益的理性。□

由（3）可知，核心集 $\mathcal{C}$ 是闭合且凸的，是一种具有特殊几何性质的多胞体。这些性质使我们能够像定义中那样，利用有界集合来表示核心

2：事实上，我们可以将核心写作 $\mathcal{C}=\bigcap_{i=1}^{N}\mathcal{X}_i$。
下文中，我们只考虑大联盟，因此采用核心 $\mathcal{C}$ 作为解概念。接下来，我们介绍一类称为指派博弈的可转移效用（TU）合作博弈的背景知识。

B. 指派博弈

指派博弈对双边一对一匹配市场进行建模，其主要目标是在市场双方之间寻找最优匹配，例如将买方与卖方匹配 [18]。因此，我们将市场双方的主体集合分别称为买方和卖方，并分别记为 $\mathcal{I}_\mathcal{B}$ 和 $\mathcal{I}_\mathcal{S}$。这里，每个卖方 $j\in\mathcal{I}_\mathcal{S}$ 都拥有一种商品，并声明其价值至少为 c_j；而对于每个买方 $i\in\mathcal{I}_\mathcal{B}$，卖方 j的商品对其而言的最高价值为 $h_{i,\ j}$。于是，为最简单的有意义的 联盟（即买卖双方）赋予价值的特征函数如下：

$$v(i,j)=\max\{0,h_{i,j}-c_j\}. \tag{4}$$

这里，我们略微滥用一下记号，用 $v(i,\ j)$表示 $v(\{i,j\})$。我们注意到，任何对双方都有利的匹配都必须满足 $h_{i,\ j}>c_i$。此外，单边联盟不产生价值，即 $v(S)=0$ 当 $S\subseteq\mathcal{I}_\mathcal{B}$ 或$S\subseteq\mathcal{I}_\mathcal{S}$时，因此只有混合联盟才有意义。有趣的是，仅凭买卖双方配对就足以完全确定市场。基于这一观察，我们为所有配对 $(i,\ j)\in\mathcal{I}_\mathcal{B}\times\mathcal{I}_\mathcal{S}$定义分配矩阵 $M=[v(i,\ j)]$。

定义 *5*（特征函数）：设 $\mathcal{I}_\mathcal{B}=\{1,\dots,N_\mathcal{B}\}$ 和 $\mathcal{I}_\mathcal{S}=\{1,\dots,N_\mathcal{S}\}$ 分别为买方集合和卖方集合。设 $M=[v(i,\ j)]_{(i,j)\in\mathcal{I}_\mathcal{B}\times\mathcal{I}_\mathcal{S}}$ 为分配矩阵，其中 $v(i,\ j)$如式 (4) 所示。给定 $\mathcal{B}\subseteq\mathcal{I}_\mathcal{B}$ 和 $\mathcal{S}\subseteq\mathcal{I}_\mathcal{S}$，令 $\mathcal{P}(\mathcal{B},\ \mathcal{S})$ 为 $\mathcal{B}$ 与 $\mathcal{S}$ 之间所有可能匹配配置的集合，其中，匹配配置是由双边匹配构成的集合，使得每个卖方（买方）至多与一个买方（卖方）匹配。于是，特征函数 v_M：$\mathcal{I}_\mathcal{B}\cup\mathcal{I}_\mathcal{S}\to\mathbb{R}$定义为：$v_M(\mathcal{B}\cup\mathcal{S})=\max_{P\in\mathcal{P}(\mathcal{B},\mathcal{S})}\sum_{(i,\ j)\in P}v(i,\ j)$. □

现在，我们正式定义指派博弈。

定义 *6*（指派博弈）：设 $\mathcal{I}_\mathcal{B}=\{1,\dots,N_\mathcal{B}\}$和 $\mathcal{I}_\mathcal{S}=\{1,\dots,N_\mathcal{S}\}$ 分别为买方和卖方的集合。指派博弈是一个二元组 $\mathcal{M}=(\mathcal{I}_\mathcal{B}\cup\mathcal{I}_\mathcal{S},v_M)$，其中特征函数 v_M 如定义 5 所示。□接下来，我们将式 (3) 中的核心重新表述为适用于指派博弈的形式。

定义 *7*（指派博弈的核心）：指派博弈 $(\mathcal{I}_\mathcal{B}\cup\mathcal{I}_\mathcal{S},v_M)$ 的核心 $\mathcal{C}_M$ 是如下集合：

$$\begin{aligned}\mathcal{C}_M:=\{(x',x'')\in\mathbb{R}^{N_\mathcal{B}}\times\mathbb{R}^{N_\mathcal{S}}\mid{}&\textstyle\sum_{i\in\mathcal{I}_\mathcal{B}}x'_i+\sum_{j\in\mathcal{I}_\mathcal{S}}x''_j=\\&v_M(\mathcal{I}_\mathcal{B}\cup\mathcal{I}_\mathcal{S}),x'_i+x''_j\geq v(i,j)\text{ for all }(i,j)\in\mathcal{I}_\mathcal{B}\times\mathcal{I}_\mathcal{S}\}.\end{aligned} \tag{5}$$

注*1*（核心的非空性 [18]）：指派博弈（如定义 6 所示）的核心非空。□需要指出的是，指派博弈的核心由双方配对联盟定义，而非式 (3) 中的所有可能联盟，这大大降低了解决指派博弈的复杂度。因此，与一般的联盟博弈论相比，指派博弈为构建双边点对点市场提供了一种更实用的方法。

对于一个最优匹配对 $(i,j)\in\mathcal{I}_\mathcal{B}\times\mathcal{I}_\mathcal{S}$，收益 (x'_i,x''_j) 决定合同价格 $\lambda_{i,j}$。在双边交易中，买方 i 向卖方 j 支付其最初报价与其收益之间的差额，即 $\lambda_{i,j}=h_{i,\ j}-x'_i$。为简洁起见，下文中我们使用买方和卖方的集体收益向量，即 $x=\text{col}(x',x'')$，其中 $x'\in\mathcal{I}_\mathcal{B}$和 $x''\in\mathcal{I}_\mathcal{S}$。我们指出，对于建模为联盟博弈的P2P市场，采用集中式方法计算核心中的收益并不可取，因为核心集并非单点集，而且不同的核心收益可能有利于市场的不同一方（买方或卖方）。事实上，每个核心集都有一个买方最优点和一个卖方最优点，分别位于两端 [18]。因此，中央运营者可能出现偏袒行为，进而损害市场参与者的信任。此外，在实际中，双边协议应由自利代理直接协商达成。因此，在第四节中，我们提出一种分布式求解机制，由智能体协商并自主达成相互协议，即就收益向量及相应的交易价格达成共识。最后，让我们形式化定义共识集这一概念。

定义 *8*（共识集）：共识集 $\mathcal{A}\subset\mathbb{R}^{N^2}$定义如下：

$$\mathcal{A}:=\{\text{col}(\boldsymbol{x}_1,\dots,\boldsymbol{x}_N)\in\mathbb{R}^{N^2}\mid\boldsymbol{x}_i=\boldsymbol{x}_j,\forall i,j\in\mathcal{I}\}. \tag{6}$$

□

III. 点对点市场作为指派博弈

A. 建模

本节将介绍双边点对点能源市场的两种指派博弈设置，即单合同市场和多合同市场。市场参与者分为买方和卖方，其中卖方是拥有能源来源（包括可再生能源（RES）和/或储能（ES））的产消者，并且在某一交易时段有剩余能源可供交易；而买方也可以只是消费者。市场由中央协调者（市场运营商）运营，该协调者掌握买方和卖方报价的完全信息，并负责最大化整体市场福利。图 1 展示了所提出的点对点能源市场结构的高层概念。令 c_j 表示卖方 $j\in\mathcal{I}_\mathcal{S}$ 每单位能源（例如 1 千瓦时）的估值，并令 s_j 表示报价的能源总量；那么，卖方 j 的报价由一对数值 $(c_j,\ s_j)$ 表示。类似地，我们用 d_i 表示买方 $i\in\mathcal{I}_\mathcal{B}$ 的能源需求，用 $\alpha_{i,\ j}p_i$ 表示其对卖方 j 所提供能源的估值，其中，$\alpha_{i,\ j}$ 是买方 i 赋予卖方 j的偏好因子。偏好因子使买方能够区分不同的能源报价，其取值可取决于多种指标，例如能源来源（绿色与棕色）、卖方位置、用户评分等。此外，p_i 是买方 i 愿意为每单位能源支付的基准价格，因此其出价表示为 $(\alpha_{i,\ j}p_i,\ d_i)$。接下来，我们对买方和卖方的估值施加一些实际限制，使点对点市场设置在经济上更能吸引参与者。

产消者通常通过零售商向电网出售能源，因此，若报价高于零售商的报酬，卖方加入点对点市场将更为有利。

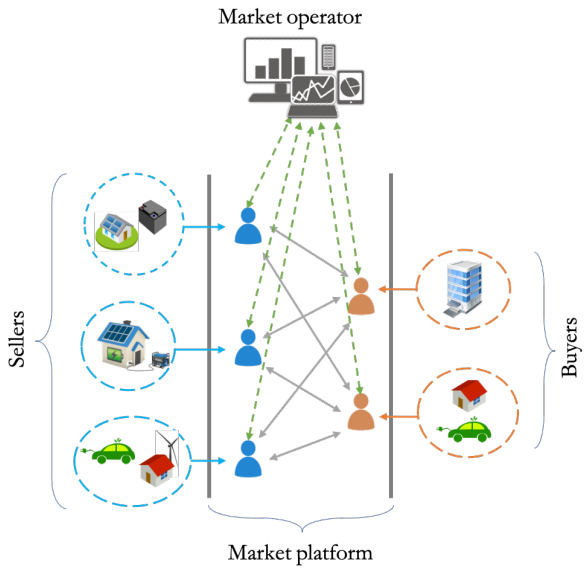

图 1. 双边点对点能源市场示意图。

此外，买方的理性要求其报价不得高于从电网获得能源的成本。令 g_b 和 g_s 分别表示电网提供能源的买入价格和销售价格。那么，买方 i 向卖方 j 提出的能源价格应高于电网的买入价格，但不得超过电网的销售价格，即:

$$\alpha_{i,j} p_i \in (g_b, g_s]. \tag{7}$$

类似地，我们要求卖方 j 的销售价格满足类似的限制，

$$c_j \in [g_b, g_s). \tag{8}$$

我们指出， [20] 中也采用了类似的假设。这些假设是合理的，因为上网电价呈下降趋势，并且在某些地区已被取消 [4]。然而，如果电网提供的上网电价非常高，就会影响产消者参与点对点市场。

B. 单合同市场

在单合同点对点市场设置中，买方和卖方签订一对一双边合同，为双方产生一定效用（价值）。设买方 $i \in \mathcal{I}_\mathcal{B}$ 和卖方 $j \in \mathcal{I}_\mathcal{S}$ 签订一份双边合同，则该合同产生的价值为，

$$v(i,j) = \max\{0, \alpha_{i,j} p_i - c_j\} \min\{s_j, d_i\} \tag{9}$$

下面详细说明式 (9) 中双边合同价值的构造。首先，只有当买方对能源的估值高于卖方的需求时，合同才可行，即$\alpha_{i,j} p_i > c_j$。若 $s_j \geq d_i$，则每个交易单位产生的福利为 $\alpha_{i,j} p_i - c_j$其中，交易总量为 d_i。此时，双边合同签订后，卖方的剩余能源（$s_j - d_i$）将售予电网。类似地，若 $d_i > s_j$。需要指出的是，不可行合同的价值为零。由于我们的点对点市场采用双边结构，因此可以用矩阵形式表示可能合同的价值，这进一步使我们能够将市场福利最大化建模为一个分配问题。令 $M = [v(i, j)]_{(i,j)\in\mathcal{I}_\mathcal{B}\times\mathcal{I}_\mathcal{S}}$ 为分配矩阵，其中每个元素 $v(i, j)$ 表示买方 i 与卖方j之间双边合同的价值。接着，将相应的指派博弈记为$\mathcal{M} = (\mathcal{I}_B \cup \mathcal{I}_S, v_M)$。市场运营商使用的指派博弈 $v_M(S)$ 的特征函数可由以下分配问题给出，其中每个 $S \subseteq \mathcal{I}$:

$$\mathbb{P}(S): \begin{cases} \max\limits_{\mu} \sum\limits_{i\in\mathcal{I}_\mathcal{B}\cap S} \sum\limits_{j\in\mathcal{I}_\mathcal{S}\cap S} v(i,j)\mu_{i,j} \\ \text{s.t.} \sum\limits_{i\in\mathcal{I}_\mathcal{B}\cap S} \mu_{i,j} \leq 1 \qquad \forall j \in \mathcal{I}_\mathcal{S} \cap S \\ \sum\limits_{j\in\mathcal{I}_\mathcal{S}\cap S} \mu_{i,j} \leq 1 \qquad \forall i \in \mathcal{I}_\mathcal{B} \cap S \end{cases} \tag{10}$$

匹配因子为 $\mu_{i,j} \in \{0, 1\}$，其中 $\mu_{i,j} = 1$ 表示买方 i 与卖方 j之间的匹配。问题 (10) 确定买方与卖方之间的最优分配，而对匹配因子施加的约束确保每个买方只与一个卖方匹配，即一对一匹配。利用问题 (10) 中分配问题的求解结果，市场运营商可以像在 (3) 中那样评估博弈的核心。我们注意到，尽管问题 (10) 中的分配问题属于组合优化问题，但由于其特殊结构，可以在多项式时间内使用专门设计的算法（如匈牙利算法）求解。接下来，我们列出双边点对点市场设计的显著特点:

- 存在性：始终存在一组双边合同，能够满足所有自利参与者的要求。换言之，双边点对点能源市场的核心始终非空（注1）。
- 产品差异化：买方可以根据期望的标准（例如绿色能源），通过偏好因子 $\alpha_{i,j}$优先选择卖方或卖方类别。
- 机制属性：市场建模确保了出清机制具备理想的经济属性。
- 社会最优性：双边合同使市场整体福利最大化，且合同价格由买方和卖方内部协商确定。

C. 多合同市场

第三节 III-B节中提出的点对点市场建模是一种单步单合同双边市场，其中每个买方只能与一个卖方进行能源交易，反之亦然。因此，尽管所提出的建模使整体福利最大化，但市场双方的参与者仍可能无法完全满足能源交易需求。因此，本节将单合同点对点能源市场扩展为允许买卖双方签订多份合同，从而实现能源交易需求的完全满足。

对于分配市场，我们通过将能源需求或报价划分为固定大小的单位（数据包）（例如 1 千瓦时），来建模买方与卖方之间的多份合约。因此，匹配发生在这些能源单位之间。另一种理解这种设置的方式是：每个市场参与者（买方或卖方）在市场中由多个智能体表示，

每个智能体提供或需求单个能源单位。因此，市场中代表每位参与者的智能体数量等于其报价或需求的能源单位数量。为提高灵活性，在我们的多合约模型中，允许参与者为每个交易单位关联不同的交易特征（例如估值、能源来源）。例如，卖方可以提供来自可再生能源（绿色）和储能（可能为棕色）的能源单位；类似地，买方可以对关键任务所需的能源出价较高，对可延迟任务所需的能源出价较低。在数学表述中，我们将每个智能体视为独立的卖方或买方，因此合约产生的结果值 $v(i,\ j)$ 与单个交易单位（$d_i = s_i = 1$ 单位）的式（9）中的表达式相似，即 $v(i,\ j)$ = 最大值$\{0, \alpha_{i,j}p_i - c_j\}$，相应的指派博弈 $\mathcal{M} = (\mathcal{I}_B \cup \mathcal{I}_S,\ v_M)$ 则通过式（10）中的指派问题求解。

在多合约设置中，除了最大化整体福利外，我们还可以通过调整粒度划分的程度，最大化双边点对点能源市场内部的能源交易量。具体而言，如果所有合约均可行且 $\sum_{i\in\mathcal{I}_\mathcal{B}} d_i > \sum_{j\in\mathcal{I}_\mathcal{S}} s_j$，那么通过选择合适的单个能源单位大小，我们可以确保所有报价的能源都能在点对点能源市场内进行双边交易。

然而，这种多合约设置带来的额外功能需要付出更高计算负担的代价，因为代表每个能源单位交易的智能体数量增加了。我们注意到，由市场运营商确定的适当能源单位大小，可以限制智能体数量及其相关的计算负担。此外，单合约和多合约设置可应用于不同场景。例如，前者更适合在较大规模下实施，而后者则能为本地化实施带来额外功能，适用于参与者较少的场景，例如能源社区。

IV. 分布式求解机制

市场运营商求解式（10）后，在我们设计的第二阶段，参与者彼此协商，就交易价格达成双边协议。我们的目标是使参与者能够自主地就一组双边合同价格达成共识，从而任何一方都不会对合同提出异议。因此，我们提出了一种新颖的协商机制，能够实现更快的收敛速度，因而适用于单合同和多合同市场设置。我们在分布式架构中对算法进行建模：掌握完全信息的中央市场运营商首先将式（1）中的有界集合信息传递给相应的智能体（市场参与者）。了解有界集合意味着每个智能体只知道自身联盟的取值。收到所需信息后，每个智能体以分布式方式为所有智能体提出收益分配方案。我们证明，即使可用信息有限，所提出的解决机制也能收敛到稳定收益分配。图2详细展示了所提出的双边点对点电力市场机制。具体而言，我们设计了一种分布式不动点算法，智能体可以利用该算法就式（10）中点对点市场核心内的收益分配达成共识（6）。

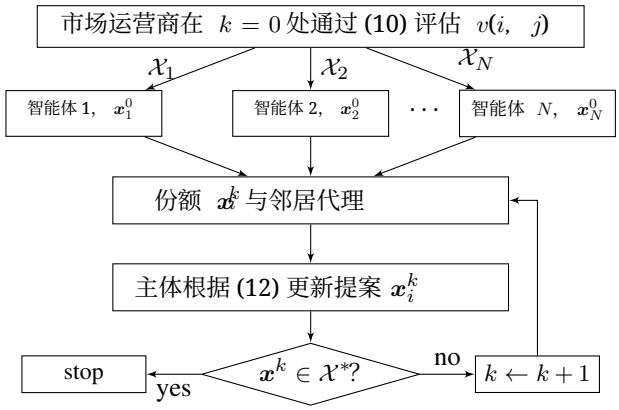

图 2. 我们提出的双边点对点市场机制流程图。

A. 分布式协商机制

我们考虑一个双边协商过程，在每个协商步骤 k中，买方（卖方）可以与一组邻近卖方（买方）沟通，以协商其收益。因此，我们用二分图 $G^k = (\mathcal{I}_\mathcal{B} \times \mathcal{I}_\mathcal{S}, \mathcal{E}^k)$表示时变网络中的通信关系，其中，对于 $i \in \mathcal{I}_\mathcal{B}$和 $j \in \mathcal{I}_\mathcal{S}$，$(i,\ j) \in \mathcal{E}^k$ 表示在迭代 k时买方 i 与卖方 j 之间存在一条活跃链路，此时二者称为邻居。我们假设在每次迭代 k 中，智能体 i 只能观察其邻居智能体的提案。此外，我们假设每对买方和卖方在长度为 Q （任意大）的时间段内至少沟通一次，以确保智能体能够充分频繁地沟通。换言之，我们假设长度为 Q 的时间段内通信图的并集是连通的。这一假设在多智能体协调中相当常见，例如 [27,假设3.2]。

假设*1* (Q–连通图)：对于所有 $k \in \mathbb{N}$，并图 $(\mathcal{I}_\mathcal{B} \times \mathcal{I}_\mathcal{S},\ \cup_{l=1}^{Q} \mathcal{E}^{l+k})$ 在某个整数 $Q \geq 1$ 时强连通。□通信图 G^k 中的边（链路）通过邻接矩阵 $W^k = [w_{i,j}^k]$ 赋予权重，其中元素 $w_{i,\ j}^k$ 表示智能体 i 分配给智能体 j 的收益提案的权重，$\boldsymbol{x}_j^k$ 其中，对于某个 j，$w_{i,\ j}^k = 0$ 意味着智能体 i 在迭代 k 时不与智能体 j 协商，即 $(i,\ j) \notin \mathcal{E}^k$。我们注意到，在点对点市场中，买方（卖方）彼此之间不进行协商，因此，对于所有 $(i,\ j) \in \mathcal{I}_\mathcal{B}(\mathcal{I}_\mathcal{S})$，$w_{i,\ j}^k = 0$，。此外，为确保所有智能体对最终收益分配具有足够的影响力，我们假设邻接矩阵为对角线元素为正的双随机矩阵，这意味着智能体始终会给自己的上一轮提案赋予一定权重。

假设*2* （随机邻接矩阵）：对于所有 $k \geq 0$，通信图 G^k 的邻接矩阵 $W^k = [w_{i,j}^k]$ 是双随机的，即 $\sum_{j=1}^{N} w_{i,\ j} = \sum_{i=1}^{N} w_{i_j} = 1$，其对角元素均严格为正，即 $w_{i,\ i}^k > 0$，对于所有满足 $i \in \mathcal{I}$ 的情形，只要 $\exists\, \gamma > 0$ 使得 $w_{i\,j}^k \geq \gamma$ 或 $w_{i,\ j}^k > 0$ [27, 假设3.3]。□

我们进一步假设，通信矩阵 W^k 的元素取值于一个有限集，因此可得到有限多个邻接矩阵。

假设*3*（有限多个邻接矩阵）：通信图的邻接矩阵 $\{W^k\}_{k\in\mathbb{N}}$ 属于 $\mathcal{W}$，这是一个满足假设2的矩阵有限族，即 $W^k \in \mathcal{W}$ 对所有 $k \in \mathbb{N}$均成立。□

关于邻接矩阵的这一假设纯粹出于技术考虑，使我们能够利用文献中的重要结果来证明我们的协商机制的收敛性。我们指出，邻接矩阵的集合可以任意大，因此，假设3对我们的协商机制不存在实际限制；下面将介绍该机制。

在每个协商步骤 k 中，智能体 i 通过提出一个面向所有主体的收益分配 $\boldsymbol{x}_i^k \in \mathbb{R}^N$ 进行协商。为了评估提案，他们首先对邻居智能体的估计值取平均值，$\boldsymbol{x}_j^k$使得 $(i,\ j) \in \mathcal{E}^k$，其中权重由邻接矩阵 W^k $\sum_{j=1}^N w_{i,\ j}^k \boldsymbol{x}_j^k$ 给出。接下来，智能体 i 利用部分博弈信息，以有界半空间 $H_i^k \in \mathcal{H}_i$ （如式（2）所示）或式（1）中的有界集合的形式表示。智能体从集合 $\mathcal{H}_i$ 中选择半空间，使得每个有界半空间在每 Q 个协商步骤中至少出现一次，并满足 Q，如假设1所示。在实践中，选择这些半空间的一种方式是由每个智能体任意确定一个预定义序列。最后，智能体 i 将平均值 $\hat{\boldsymbol{x}}_i^k := \sum_{j=1}^N w_{i,\ j}^k \boldsymbol{x}_j^k$ 投影到有界半空间上。因此，算法可表示为

$$\boldsymbol{x}_i^{k+1} = \mathrm{proj}_{H_i^k}(\hat{\boldsymbol{x}}_i^k). \tag{11}$$

式 (11) 中的协议允许主体在每个协商步骤提出一个对其自身可接受的收益。我们进一步推广式 (11) 中的迭代，将投影算子 proj(·) 替换为一类特殊的算子，即拟压缩映射。这一推广使主体能够选择任意拟压缩映射算子 T_i^k 来评估收益提案 $\boldsymbol{x}_i^k$，从而实现更快地收敛到式 (5) 中的核心内部。后者是一项重要特征，因为核心内部与指派博弈中收益的公平性相关。具体而言，对于每个

$i \in \mathcal{I}$ $\boldsymbol{x}_i^{k+1} =$,
T_i^k $\boldsymbol{x}_i^k$

我们提出协商协议 (ˆ)，其集体形式可表示为不动点迭代

$$\boldsymbol{x}^{k+1} = \boldsymbol{T}^k(\boldsymbol{W}^k \boldsymbol{x}^k), \tag{12}$$

其中，$\boldsymbol{T}^k(\boldsymbol{x})$: $=$col$(T_1^k(\boldsymbol{x}_1)\ldots, T_N^k(\boldsymbol{x}_N))$，$\boldsymbol{W}^k$: $=W^k \otimes I_N$ 表示一个邻接矩阵。在式 (12) 中，我们要求拟压缩映射算子 T_i^k 以 (2) 中的 $H_i^k \in \mathcal{H}_i$ 作为不动点集，即 fix$(T_i^k) = H_i^k$。

假设*4* （拟压缩映射）：对于 (12) 中的 $k \in \mathbb{N}$, $\boldsymbol{T}^k$，满足 $T_i^k \in \mathcal{T}$，其中 $\mathcal{T}$ 是一族有限的拟压缩算子，且 fix(T_i) $= H_i$，其中 $H_i \in \mathcal{H}_i$ 属于 (2)。□这里，为了在迭代 (12) 中使用协商机制，智能体可以选择任意满足假设4的算子 T_i。如第五节所示，这一选择会影响收敛速度，也会影响核心中的具体极限点。拟压缩映射的示例包括对闭凸集 C 的投影 proj$_C(\cdot)$，以及投影算子与超投影算子的凸组合，即$T =$ ($1-\beta$)proj$_C(\cdot)$ $+\beta$overproj$_C(\cdot)$，其中 $\beta \in [0,1)$。

我们还假设，在（12）的每 Q 次迭代中，每个 $\boldsymbol{T}^k \in \mathcal{T}^N$ 至少出现一次，其中 Q 如假设1所述。

假设*5*：令 Q 为假设1中的整数。对于所有 $n \in \mathbb{N}$、$\bigcup_{k=n}^{n+Q}\{\boldsymbol{T}^k\} = \mathcal{T}^N$ $\mathcal{T}$ 4 □，式（12）中的算子 $(\boldsymbol{T}^k)_{k\in\mathbb{N}}$ 均满足，其中条件如假设 中所述。接下来，我们将对式（12）中的协商机制的主要收敛结果进行形式化表述。

定理*1* （协商机制的收敛性）：设假设 1−5 成立。设 $\mathcal{X}^* := \mathcal{A} \cap \mathcal{C}_M^N$，其中 $\mathcal{A}$ 如 (6) 中所示，且 $\mathcal{C}_M$ 为 (5) 中的核心。那么，从任意 $\boldsymbol{x}^0 \in \mathbb{R}^{N^2}$ 出发，由 (12) 中的迭代生成的序列 $(\boldsymbol{x}^k)_{k=0}^\infty$ 收敛到某个 $\bar{\boldsymbol{x}} \in \mathcal{X}^*$。□

我们在附录中给出定理1的证明。我们指出，将该机制表述为不动点迭代并用算子来描述，使我们能够利用算子理论的结果，从而使收敛分析具有一般性且简洁明了。

B. 技术讨论

定理1表明，由我们的协商机制生成的所有主体反复提出提案，最终会就一个属于边界集交集（即核心）的收益达成协议。该核心收益使我们能够计算稳定的合约价格。设买方 i和卖方 j 的收益分别为 x_i 和 x_j，那么，合同价格为$\lambda_{i,\ j} = \alpha_{i,\ j} p_i - x_i$。我们注意到，指派博弈的核心具有一种特殊结构：其边界上有两个极端点，即买方最优和卖方最优。买方最优收益对卖方而言是最差的核心收益，反之亦然。因此，核心内部的收益对应着更公平的分配，并且可以通过式（12）中提出的算法，就这种分配达成共识。

现在说明一下我们算法中增强其实用性的特点。首先，在谈判过程中，市场参与者不需要掌握博弈的完整信息，只需知道由式（1）中的有界集合表示的自身合同取值，因此能够保护隐私。与 [26], 中提出的算法相比，我们机制较低的信息需求是一项显著优势，因为后者要求每个参与者掌握式（3）中相应核心集的完全信息。其次，将半空间 $H_i \in \mathcal{H}_i$ 作为式（12）中算子 $T_i \in \mathcal{T}$ 的不动点集，使我们能够将 $\mathcal{T}$ 设计为一组线性算子。例如，设 $\mathbf{e}_k$ 为定义该有界半空间的不等式的系数向量，即 $H_i^k = \{y \in \mathbb{R}^N \mid \mathbf{e}_k^\top y \geq \eta\}$. 。于是，我们可以将式（11）中的迭代写成

$$\boldsymbol{x}_i^{k+1} = \hat{\boldsymbol{x}}_i^k + \frac{\eta - \mathbf{e}_k^\top \hat{\boldsymbol{x}}_i^k}{\|\mathbf{e}_k\|^2}\mathbf{e}_k,$$

若 $\hat{\boldsymbol{x}}_i^k \notin H_i^k$ [28, 例 28.16]。该闭式表达式大幅降低了我们算法的计算负担，因为在每次迭代中都无需求解优化问题。显然，隐私保护和较低的计算负担都是市场机制非常理想的特性。

V. 数值模拟

在本节中，我们模拟产消者采用第四节所设计的协商机制参与所提出的双边点对点能源市场。我们针对峰值价格时段且光伏发电量可观的情况进行分析，

表 II买方和卖方概况

对.....的关注				
买方	环境	评级	**卖方**	能源
B1	✓	×	S1	光伏（绿色）
B2	×	×	S2	储能（棕色）
B3	×	✓	S3	光伏（绿色）
B4	✓	✓	S4	化石能源（棕色）

并将其与通过聚合商和零售商与电网交易的传统方式进行比较，以展示我们算法的有效性并说明其为产消者带来的经济效益。接下来，市场运营商应考虑产消者层面的需求和能源生产变化来确定时段长度。在经济分析中，我们采用一周内每天四个用电高峰时段的小时级时段；在收敛分析中，我们考虑了100种产消者需求和发电情景，并报告样本的平均值和离散程度。此外，由于我们关注市场机制的经济和算法设计，因此不考虑网络约束（ [4], [19]中也采用了相同做法），并指出纳入网络约束不会影响最终的市场属性。

A. 仿真设置：

我们考虑 4 个存在能源缺口的居民产消者和 4 个有盈余的居民产消者，在每个时段分别充当买方和卖方。在市场的不同场次中，产消者可根据其能源画像在卖方和买方角色之间转换。不过，在每个场次（时段）内，产消者只能充当买方或卖方。每个产消者的能源缺口和盈余均在 $[2, 8]$ 范围内。接下来，我们有意构建产消者的画像，以展示多样化的参与情况，并突出点对点市场设计的各种特征。为了在给定时段购买能源，买方 i 进入点对点市场，并提交其出价和需求（$\alpha_{i,\ j} p_i,\ \ d_i$），如式 (9) 所示，其中，因子 $\alpha_{i,\ j}$ 表示其对卖方 j所提供能源的偏好估值。在设计偏好因子时，我们让买方在 $\{0, \cdots, 5\}$ 的范围内指定其对环境的关注程度（对绿色能源的偏好） α_i^{g}，并通过 $\gamma_i^{\mathrm{r}} \in \{0, 1\}$指定其对卖方用户评分的关注程度 $\alpha_j^{\mathrm{r}} \in \{0, \cdots, 5\}$，其中 0 表示对相应因子不关心。令卖方的能源类型j表示为 $\gamma_j^{\mathrm{g}} \in \{0, 1\}$，其中 1 表示绿色能源，则偏好因子计算为 $\alpha_{i,\ j} = 1 + 0.1(\alpha_i^{\mathrm{g}}\gamma_j^{\mathrm{g}} + \alpha_j^{\mathrm{r}}\gamma_i^{\mathrm{r}})$。对于在画像中纳入环境关注的买方，$\alpha_i^{\mathrm{g}}$的值随机选取，相关信息见表 II；每位卖方的消费者评分则从 $[3, 5]$ 范围内随机选取。需要指出的是，我们设计的偏好因子具有任意性，市场运营商可采用不同的设计，以纳入其他考量因素。

买方选择能源的基础估值 p_i，使其出价高于电网的买入价格 $g_{\mathrm{b}} = 0.05$£/kWh，且不高于电网的销售价格 $g_{\mathrm{s}} = 0.17$ £/kWh，如条件 (7) [2]所示。此外，卖方选择其估值 c_j 低于电网的销售价格 g_{s}，如 (8) 所示。

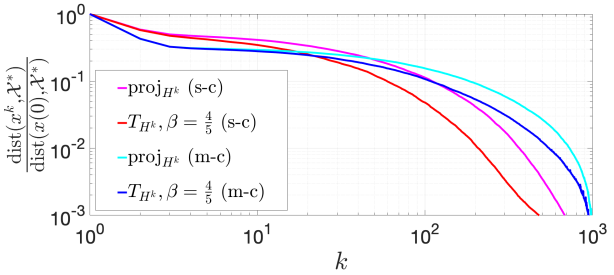

图 3. 分布式双边协商中 $\mathbf{dist}(\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{k}}, \boldsymbol{\mathcal{X}}^*)/\mathbf{dist}(\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{0}}, \boldsymbol{\mathcal{X}}^*)$ 使用算子 $\mathbf{proj}_{\boldsymbol{H}^{\boldsymbol{k}}}$ 和 $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{H}^{\boldsymbol{k}}} := (\mathbf{1} - \boldsymbol{\beta})\mathbf{proj}_{\boldsymbol{H}^{\boldsymbol{k}}}(\cdot) + \boldsymbol{\beta}\mathbf{overproj}_{\boldsymbol{H}^{\boldsymbol{k}}}(\cdot)$ 单合约 (s-c) 和多合约 (m-c) 市场设置下的轨迹。

B. 双边点对点能源市场

在我们的P2P市场设置中，第一阶段，市场运营商执行式（10）所 formulates 的最优匹配，从而得到最优买卖双方配对。接下来，参与者采用式（12）中的协商机制，共同确定双边合同价格。在图3中，我们针对某一特定时段，展示了在单合约和多合约市场设置下，使用算子$\mathrm{proj}_{H^k}(\cdot)$和 $T_{H^k} := (1 - \beta)\mathrm{proj}_{H^k}(\cdot) + \beta\mathrm{overproj}_{H^k}(\cdot)$的协商算法的收敛情况。我们报告了100个样本收敛轨迹的平均值，这些轨迹通过改变能源报价、需求条件以及半空间序列，即每个智能体的协商策略（见第四节-A）获得。可以观察到，算子 T_{H^k} 能够实现更快的收敛，正如我们在第四节中所述。值得注意的是，在多合约市场中，随着能源粒度划分水平的提高，协商的收敛速度会降低。在图4中，我们绘制了样本轨迹的分布，以展示使用算子 T_{H^k}时单合约和多合约设置下最好与最差的收敛场景。接下来，我们对算法的计算性能进行基准测试。我们选择文献 [29] 中提出的一种用于联盟博弈收益分配的静态分布式讨价还价算法作为基准。在图5中，我们展示了我们的算法和基准算法的轨迹。由于基准算法在每次迭代中使用整个有界集合，而不是式（2）中的有界半空间，因此它在初始阶段推进得更快。然而，从长期来看，我们提出的算法表现更好。我们的方法对信息的需求较低，因此协商步骤的执行速度显著更快。在该仿真场景中，协商步骤的平均执行时间约为基准算法的 $40\times$ 倍快。现在，为了评估产消者的经济效益，我们针对用电高峰时段设置P2P市场，并在图6中分别展示卖方和买方收入与成本的平均变化。与通过电网/零售商进行交易相比，在两种市场设置下，卖方的收入均更高，买方的成本均更低。我们还观察到，对于参与者类别相似（例如居民用户）且双方（买方和卖方）均有充分参与的市场，单合约市场和多合约市场的经济表现相当。这是因为能源的类似剩余量和需求会减少P2P市场之外的交易。我们还指出，从单合约市场转向多合约市场可以最大化P2P市场内部交易的能源总量，从而提高整体市场福利，但并不能保证所有参与方都获得个体收益。这是因为式（5）核心集中的随机收益分配可能会将买卖双方配对所产生价值的更大份额分配给市场任一方。在图6中，卖方2就是一个例子。在图7中，我们观察到，所提出的P2P市场设计会大力促进产消者参与双边能源交易，尤其是多合约设置会增加内部能源交易。

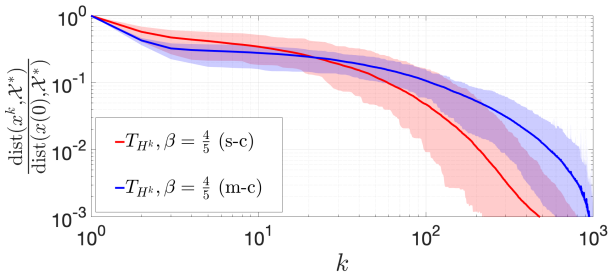

图 4. 图 3 中各轨迹的采样均值，阴影区域表示样本的离散范围。

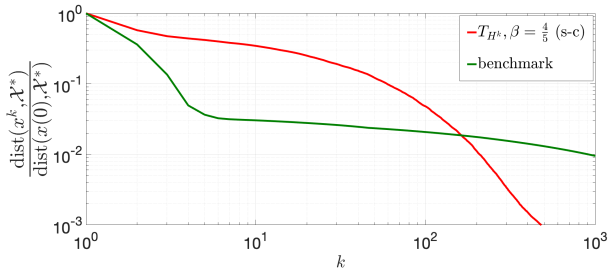

图 5. 对比 $\mathbf{dist}(\boldsymbol{x^k}, \boldsymbol{\mathcal{X}^*})/\mathbf{dist}(\boldsymbol{x^0}, \boldsymbol{\mathcal{X}^*})$ 我们提出的分布式双边协商（红色）与基准（绿色）的轨迹。

单合约市场和多合约市场的经济表现具有可比性。这是因为相似的能源剩余量和需求会减少P2P市场之外的交易。我们还指出，从单合约市场转向多合约市场可以最大化P2P市场内部交易的能源总量，从而提高整体市场福利，但并不能保证所有参与方都获得个体收益。这是因为式（5）核心集中的随机收益分配可能会将买卖双方配对所产生价值的更大份额分配给市场任一方。在图6中，卖方2就是一个例子。在图7中，我们观察到，所提出的P2P市场设计会大力促进产消者参与双边能源交易，尤其是多合约设置会增加内部能源交易。

现在，从式（10）可以看出，允许产品差异化（例如基于环境或社会因素）能够提高市场的整体社会福利，相较于仅考虑经济因素的情形。这一提升源于用户满意度的提高，而用户满意度是通过满足其个人偏好实现的。因此，我们将用户满意度定义为：在本研究的 100 个情景中，具有绿色能源偏好的买方与绿色能源卖方匹配的次数。图 8 将这一用户满意度与仅考虑经济因素的传统市场进行了比较。图中显示，产品差异化能够提高用户满意度，从而鼓励产消者参与。

最后，表III列出了所提出的点对点市场机制中主体协商过程的计算时间，以数值方式展示其随市场规模变化的可扩展性。需要指出的是，由于采用了分布式实现，各主体的协商协议会在各自的计算资源上并行运行。这里的仿真是在安装于

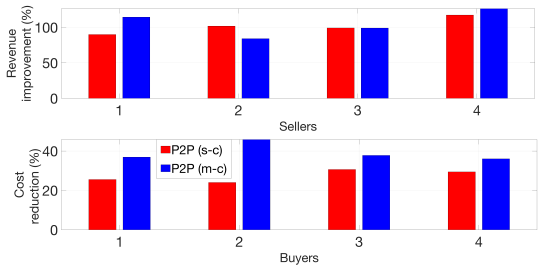

图 6。 相较于与电网交易，单合约（s-c）和多合约（m-c）点对点设置下的平均收入提升（卖方）和平均成本降低（买方）。

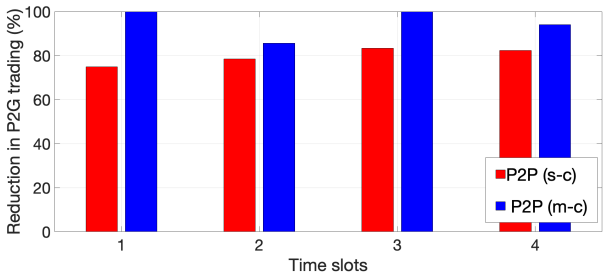

图 7。 通过单合约（s-c）和多合约（m-c）点对点市场设置，减少与电网交易的能源量。

一台配备 2.3 GHz 英特尔酷睿 i5 处理器和 8GB RAM 的笔记本电脑上的 MATLAB 2020b 中执行的。这些数值结果有助于根据预期的产消者参与程度（例如能源社区的规模），决定此类市场应在实际能源交付前多久开始运行。此外，我们可以得出结论，采用指派博弈建模为实际实施规模合理的 P2P市场提供了可能，同时确保合约价格代表竞争性市场均衡。还需指出，监管机构也可以系统地确定市场规模，例如依据地理因素，并对已安装发电源的发电容量设置资格标准。这类监管限制常见于交易机制中。例如，在澳大利亚昆士兰州，如果产消者安装的太阳能电池板容量超过 5kW，就不能参与上网电价计划 [21]。

VI. 结论

我们将点对点能源交易建模为时变通信网络上的指派博弈（合作博弈），并提出了一种新颖的分布式协商算法，将其作为出清机制，以保证交易价格在联盟博弈论意义上稳定，并满足所需的经济属性。所提出的双边点对点能源市场设计，即单合约和多合约设计，通过使点对点交易成为有利选择，鼓励产消者参与，同时兼顾其经济和社会优先事项。此外，实现产品差异化可提升用户满意度，并提高整体市场福利。最后，通过副收缩算子实现的协商机制能够加快收敛至共识

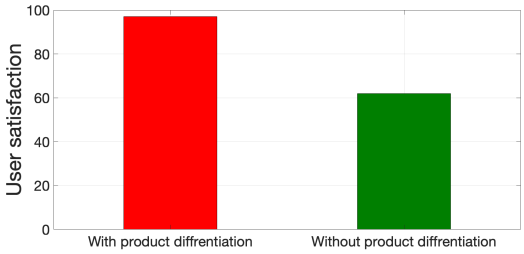

图8。 在有无产品差异化的点对点市场设置中，偏好绿色能源的买方的用户满意度。

表III不同市场规模下每个代理的平均协商时间

主体	40	60	80	100
协商时间（秒）	4.1437	10.5930	19.9979	43.9713

所达成的一组双边合同价格代表竞争均衡，且属于核心。

我们这项工作的一个有趣扩展方向，是为实时市场设计在线机制，使核心集能够随时间变化，从而适应可再生能源发电和需求的短期不确定性。

附录

为了证明定理1中所述的式（12）收敛，我们首先给出关于拟压缩映射的一些有用结果。

引理*1*（ [30], 定理1）：设 $\mathcal{T}$ 是一个有限个拟压缩映射组成的族，满足 $\bigcap_{T\in\mathcal{T}}\mathrm{fix}(T) \neq \varnothing$。那么，由 $\boldsymbol{x}^{k+1} := T^k(\boldsymbol{x}^k)$ 生成的序列 $(\boldsymbol{x}^k)_{k\in\mathbb{N}}$ 收敛到该序列中无限次出现的拟压缩映射的公共不动点。 □

引理*2*（双随机矩阵（ [31], 命题5 ））：若 W 是一个双随机矩阵，则在假设2下，由矩阵 $W\otimes I_n$ 定义的线性算子关于混合向量范数 $\|\cdot\|_{2,\,2}$ 是一个拟压缩映射。 □

引理*3*（拟压缩算子的复合（ [31],命题1））：设 $T_1,\ T_2 : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ 是关于同一范数 $\|\cdot\|$ 的拟压缩映射，且 $\mathrm{fix}(T_1)\cap \mathrm{fix}(T_2) \neq \varnothing$。那么，复合算子 $T_1\circ T_2$ 关于范数 $\|\cdot\|$ 是一个拟压缩映射，且 $\mathrm{fix}(T_1\circ T_2) = \mathrm{fix}(T_1)\cap\mathrm{fix}(T_2)$。 □

引理*4*（拟压缩映射的堆叠向量（ [31], 命题4））：假设每个映射 $T_1,\dots,T_m$ 相对于 $\|\cdot\|_2$都是拟压缩映射。那么，映射 $\boldsymbol{T}:=\mathrm{col}(T_1,\dots,T_N)$ 相对于$\|\cdot\|_{2,2}$是拟压缩映射。 □

利用这些性质，我们现在证明，由式（12）中的迭代生成的算子序列是一个拟压缩映射，且其不动点集是在这些算子不动点集交集中的一个共识。

引理*5*：设 Q 为假设1中的整数。设$\boldsymbol{T}_1,\dots,\boldsymbol{T}_Q$为拟压缩算子，且$\bigcap_{r=1}^{Q}\mathrm{fix}(\boldsymbol{T}_r) =: C$，并设 $W_QW_{Q-1}\cdots W_1$ 为邻接矩阵的复合，其中 $W_r\in\mathcal{W}$，且$\mathcal{W}$如假设3所述。设 $\boldsymbol{W}_r := W_r\otimes I_N$。那么，复合映射 $\boldsymbol{x}\mapsto(\boldsymbol{T}_Q\boldsymbol{W}_Q\circ\cdots\circ\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{W}_1)(\boldsymbol{x})$

(i) 关于范数$\|\cdot\|_{2,\,2}$是拟压缩映射；

(ii) $\mathrm{fix}(\boldsymbol{T}_Q\boldsymbol{W}_Q\circ\cdots\circ\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{W}_1) = \mathcal{A}\cap C$，

其中 $\mathcal{A}$ 是式 (6) 中的共识集。 □

证明：(i)：由引理2和引理3可直接得出。(ii)：根据引理2和引理3，$\mathrm{fix}(\boldsymbol{T}_Q\boldsymbol{W}_Q\circ\cdots\circ\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{W}_1) = \mathrm{fix}(\boldsymbol{T}_Q)\cap\cdots\cap\mathrm{fix}(\boldsymbol{T}_1)\cap\mathrm{fix}(\boldsymbol{W}_Q)\cap\cdots\cap\mathrm{fix}(\boldsymbol{W}_1)$。同样，根据引理2，$3\bigcap_{r=1}^{Q}\mathrm{fix}(\boldsymbol{W}_r) = \mathrm{fix}(\boldsymbol{W}_Q\cdots\boldsymbol{W}_1)$，且由于复合 $\boldsymbol{W}_Q\cdots\boldsymbol{W}_1$ 是强连通的，根据Perron-Frobenius 定理，$\mathrm{fix}(\boldsymbol{W}_Q\cdots\boldsymbol{W}_1) = \mathcal{A}$。此外，由于$\bigcap_{r=1}^{Q}\mathrm{fix}(\boldsymbol{T}_r) = C$，$\mathrm{fix}(\boldsymbol{T}_Q\boldsymbol{W}_Q\circ\cdots\circ\boldsymbol{T}_1\boldsymbol{W}_1) = \mathcal{A}\cap C$。有了这些结果，我们现在可以证明定理1。证明：(定理1) 定义$\boldsymbol{x}^k$ 的子序列，对所有 $k\in\mathbb{N}$，为 $\boldsymbol{z}^t = \boldsymbol{x}^{(t-1)Q}$，其中每个 $t\geq 2$ 对应的 Q是假设1和假设5中的整数。然后，

$$\boldsymbol{z}^{t+1} = \boldsymbol{T}^{tQ-1}\boldsymbol{W}^{tQ-1}\circ\cdots\circ\boldsymbol{T}^{(t-1)Q}\boldsymbol{W}^{(t-1)Q}\boldsymbol{z}^t \qquad (13)$$

对于 $t\geq 2$。由引理4和引理5 $\boldsymbol{x}\longmapsto \boldsymbol{T}^{tQ-1}\boldsymbol{W}^{tQ-1}\circ\cdots\circ\boldsymbol{T}^{t-1\ Q}\boldsymbol{W}^{(t-1)Q}\ \boldsymbol{x}\quad t\geq 2$的断言1可知，映射()( )均为拟压缩映射。此外，在假设3下，这类映射只有有限个。进一步地，根据引理5的断言2，每个映射的不动点集为 $\mathcal{X}^*$。因此，根据引理1，式(13)中的迭代收敛到某个 $\bar{z}\in\mathcal{X}^*$。 ■

参考文献

[1] T. Morstyn、N. Farrell、S. J. Darby 和 M. D. McCulloch，“利用点对点能源交易平台激励产消者组建联合发电厂”，*Nature Energy*，第 3 卷，第 2 期，第 94–101 页，2018年。[2] L. Han、T. Morstyn 和 M. McCulloch，“运用合作博弈论激励产消者联盟开展能源管理”，*IEEE*电力系统汇刊，第 34 卷，第 1 期，第 303–313 页，2018年。[3] W. Tushar、T. K. Saha、C. Yuen、D. Smith 和 H. V. Poor，“电力网络中的点对点交易：综述”，*IEEE*智能电网汇刊，第 11 卷，第 4 期，第 3185–3200 页，2020年。[4] W. Tushar、T. K. Saha、C. Yuen、P. Liddell、R. Bean 和 H. V. Poor，“通过可持续用户参与实现点对点能源交易：一种博弈论方法”，*IEEE Access*，第 6 卷，第 62 932–62 943 页，2018年。[5] F. Moret 和 P. Pinson，“能源共同体：面向未来电力市场的社区与公平性方法”，*IEEE*电力系统汇刊，第 34 卷，第 5 期，第 3994–4004 页，2018年。[6] W. Tushar、C. Yuen、H. Mohsenian-Rad、T. Saha、H. V. Poor 和 K. L. Wood，“通过点对点能源交易转型能源网络：博弈论方法的潜力”，*IEEE*信号处理杂志，第 35 卷，第 4 期，第 90–111 页，2018年。[7] T. Morstyn 和 M. D. McCulloch，“由产消者偏好驱动的点对点能源交易多类别能源管理”，*IEEE*电力系统汇刊，第 34 卷，第 5 期，第 4005–4014 页，2018年。[8] J. L. Crespo-Vazquez、T. A. Skaif、A. M. Gonzalez-Rueda 和 M. Gibescu，“在不确定性条件下采用分散式决策的基于社区的能源市场设计”，*IEEE*智能电网汇刊，第 3053 卷，第 c 期，第 1–11 页，2020年。[9] E. Sorin、L. Bobo 和 P. Pinson，“采用共识方法的产品差异化点对点电力市场”，*IEEE*电力系统汇刊，第 34 卷，第 2 期，第 994–1004 页，2019年。[10] T. Morstyn、A. Teytelboym 和 M. D. McCulloch，“用于点对点能源交易的双边合同网络”，*IEEE*智能电网汇刊，第 10 卷，第 2 期，第 2026–2035 页，2019年。[11] D. H. Nguyen，“点对点能源市场的最优解分析与分散式机制”，*IEEE*电力系统汇刊，2020年。[12] M. H. Ullah 和 J.-D. Park，“智能电网中用于点对点能源共享的两级分布式市场出清方案”，*IEEE*工业信息学汇刊，第 18 卷，第 1 期，第 66–76 页，2021年。[13] S. Cui、Y.-W. Wang、Y. Shi 和 J.-W. Xiao，“面向大量社区产消者的高效点对点能源共享框架”，*IEEE*工业信息学汇刊，第 16 卷，第 12 期，第 7402–7412 页，2019年。

[14] T. AlSkaif、J. L. Crespo-Vazquez、M. Sekuloski、G. van Leeuwen 和 J. P. Catal˜ao，“面向住宅能源系统的基于区块链的完全点对点能源交易策略”，IEEE工业信息学汇刊，第 18 卷，第 1 期，第 231–241 页，2021年。[15] N. R. Pradhan、A. P. Singh、N. Kumar、M. Hassan 和 D. Roy，“基于灵活权限赋予（fpa）的区块链框架：用于点对点能源交易并进行性能评估”，IEEE工业信息学汇刊，2021年。[16] F. C. Schweppe、M. C. Caramanis、R. D. Tabors 和 R. E. Bohn，《电力现货定价》。Springer Science & Business Media，2013年。[17] W. Saad、Z. Han、M. Debbah、A. Hjørungnes 和 T. Bas¸ar，“通信网络的联盟博弈论”，IEEE信号处理杂志，第 26 卷，第 5 期，第 77–97 页，2009年。[18] L. S. Shapley 和 M. Shubik，“指派博弈 I：核心”，《国际博弈论杂志》，第 1 卷，第 1 期，第 111–130 页，1971年。[19] W. Tushar、T. K. Saha、C. Yuen、T. Morstyn、M. D. McCulloch、H. V. Poor 和 K. L. Wood，“智能电网中用于点对点能源交易的激励型博弈论方法”，《应用能源》，第 243 卷，第 10–20 页，2019年。[20] W. Tushar、T. K. Saha、C. Yuen、T. Morstyn、H. V. Poor、R. Bean 等，“电网影响下的点对点能源交易”，IEEE智能电网汇刊，第 11 卷，第 2 期，第 1407–1418 页，2019年。[21] W. Tushar、T. K. Saha、C. Yuen、M. I. Azim、T. Morstyn、H. V. Poor、D. Niyato 和 R. Bean，“点对点能源交易的联盟形成博弈框架”，《应用能源》，第 261 卷，文章 114436，2020年。[22] F. Luo、Z. Y. Dong、G. Liang、J. Murata 和 Z. Xu，“基于多智能体联盟与区块链的有源配电网分布式电力交易系统”，IEEE电力系统汇刊，第 34 卷，第 5 期，第 4097–4108 页，2018年。[23] R. Yu、J. Ding、W. Zhong、Y. Liu 和 S. Xie，“车网互动网络中的插电式混合动力汽车充放电协作：一种联盟博弈方法”，IEEE物联网期刊，第 1 卷，第 6 期，第 578–589 页，2014年。[24] Y. Wang、Z. Su、J. Li、N. Zhang、K. Zhang、K.-K. R. Choo 和 Y. Liu，“面向车载网络的基于区块链的安全协作私人充电桩共享服务”，IEEE车辆技术汇刊，2021年。[25] A. A. Raja 和 S. Grammatico，“时变网络中鲁棒联盟博弈的收益分配”，IEEE控制网络系统汇刊，提前在线发表。[26] D. Bauso 和 G. Notarstefano，“联盟博弈中的分布式 n人可接近性与共识”，IEEE自动控制汇刊，第 60 卷，第 11 期，第 3107–3112 页，2015年。[27] A. Nedic、A. Olshevsky 和 W. Shi，“时变图上分布式优化的几何收敛实现”，《优化学会优化杂志》，第 27 卷，第 4 期，第 2597–2633 页，2017年。[28] H. H. Bauschke 和 P. L. Combettes，《希尔伯特空间中的凸分析与单调算子理论》，第 2 版。Springer，2017年。[29] A. Nedi´c 和 D. Bauso，“动态联盟特征函数博弈：参与者邻居之间的分布式议价”，IEEE自动控制汇刊，第 58 卷，第 6 期，第 1363–1376 页，2013年。[30] L. Elsner、I. Koltracht 和 M. Neumann，“序贯与异步非线性拟压缩映射的收敛性”，《数值数学》，第 62 卷，第 1 期，第 305–319 页，1992年。[31] D. Fullmer 和 A. S. Morse，“计算有限个拟压缩映射的公共不动点的分布式算法”，IEEE自动控制汇刊，第 63 卷，第 9 期，第 2833–2843 页，2018年。