

摘要

提高可再生能源在电力系统中的占比是应对能源与环境压力、实现碳中和目标的一种关键手段。可再生能源的随机出力与难以调控将导致区域内电力供需不平衡，从而造成电力资源的浪费或紧缺，因此，在各区域之间进行能源交易以缓解供需失衡变得尤为必要。对于能源交易过程中存在的电力传输容量限制、多方转运等特性，需要设计适用的交易策略以实现能源的优化配置。同时，还需要建立对各区域而言有益且公平的交易机制，以维持长期稳定的交易状态。因此，合理地设计交易模型成为促进可再生能源消纳以及平衡各区域电力供需至关重要的基础。

本文以合作联盟整体收益最大为目标，构建了基于合作博弈的可再生能源交易模型。首先，对联盟成员之间的利益关系进行分析，引入合作博弈理论，并提出与个体利益、信息安全相关的协议规则（CP1-CP4）以保证交易隐私受保护且能为联盟成员带来效益。其次，获得博弈各方的能源供需量，运用网络流算法实现电力传输线路容量限制下的能源交易优化配置，以最大化绿色能源效益为原则制定博弈各方一致认可并接受的动态定价策略。最后，针对跨区域可再生能源市场交易下的收益分配问题设计了一种考虑环境影响因子与贡献因子的加权 Shapley 值法，该方法可以更公平地分配合作收益。

通过 MATLAB 完成了模型的仿真，并基于实验结果对交易模型的效率和公平性进行分析。实验结果表明本文提出的基于合作博弈跨区域可再生能源交易模型完善了传统交易模型，它不仅大幅度提高了交易过程产生的合作盈余，而且实现了收益的公平分配，这将鼓励更多的成员长期积极地参与交易，从而维持合作联盟的稳定和交易的可持续性发展。

关键词：跨区域能源交易；合作博弈；网络流算法；Shapley 值

Abstract

Increasing the penetration of renewable energy in power systems is crucial to achieve carbon neutrality and release the pressure of energy and environment. Renewable energy generation is assumed to be an uncontrolled and intermittent process, therefore, it's difficult to balance demand and supply in high penetration of renewable energy. It will lead to power resources in waste or shortage. So, it is necessary to alleviate this imbalance through energy trading between regions. In this context, considering the characteristics of power transmission capacity limitation and multi-party transshipment in the energy trading, we should design an appropriate trading strategy to achieve the optimal allocation of energy. At the same time, it is also necessary to establish a beneficial and fair trading mechanism for each region to maintain a long-term and stable trading. Therefore, the rational design of the trading model is important to promote the consumption of renewable energy and balance the power supply and demand in various regions.

To maximize the overall profit of the cooperative coalition, a renewable energy trading model based on cooperative game is constructed in this paper. Firstly, through analyzing the interest relationship between coalition members, this paper introduces cooperative game theory. Four protocol rules (CP1-CP4) related to individual interests and information security are proposed to ensure that trading is privacy-protected and brings benefits to coalition members. Secondly, the energy supply and demand of all parties is obtained, and the optimal allocation of energy under the capacity limit of power transmission lines through the network flow algorithm is realized. Next, a dynamic pricing strategy that is unanimously recognized and accepted by all parties in the game is formulated. The pricing strategy is based on the principle of maximizing green energy efficiency. Finally, a weighted Shapley value method considering environmental impact factors and contribution factors is designed for the gain distribution under the inter-regional renewable energy market trading, which can distribute the cooperative income more equitably.

The simulation of the model is completed by MATLAB, and the efficiency and fairness of the trading model are analyzed based on the experimental results. The experimental results show that the inter-regional renewable energy trading model based on the cooperative game proposed in this paper further improves the traditional trading model. Our model greatly improves the cooperative surplus generated in the trading and realizes a fair distribution of benefits, thereby encourages coalition members to

participate in trading more actively and maintain the stability and the sustainability of the coalition.

Key words: inter-regional energy trading, cooperative game, network flow algorithm, Shapley value.

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究目的与意义.....	2
1.2 国内外研究现状分析.....	3
1.2.1 可再生能源交易研究现状分析.....	3
1.2.2 跨区域电力交易研究现状分析.....	5
1.2.3 博弈论在电力系统中的应用研究现状分析.....	5
1.3 本文工作及主要创新点.....	7
第二章 相关知识概述.....	9
2.1 合作博弈相关知识概述.....	9
2.1.1 博弈论基础.....	9
2.1.2 博弈论分类.....	10
2.2 网络流模型及应用概述.....	12
2.2.1 网络流模型基础.....	12
2.2.2 最大流问题基本算法.....	13
2.3 本章小结.....	15
第三章 跨区域可再生能源交易建模与仿真.....	16
3.1 跨区域可再生能源交易问题.....	16
3.1.1 问题描述.....	16
3.1.2 模型符号及假设.....	17
3.1.3 目标函数.....	18
3.2 跨区域交易模型的建立.....	19
3.2.1 合作协议分析.....	19
3.2.2 动态定价机制.....	27
3.3 能量交易网络流优化.....	28
3.3.1 网络流模型.....	28
3.3.2 资源分配网络流算法.....	29
3.4 供需能量仿真过程.....	31
3.4.1 需求曲线.....	31
3.4.2 仿真参数设置及结果.....	31
3.5 实验参数与结果.....	33
3.5.1 实验参数设置.....	33
3.5.2 实验结果分析.....	34
3.6 本章小结.....	36
第四章 考虑多因素的合作收益分配方法.....	37

4.1 初始收益结算.....	37
4.2 经典 Shapley 值法.....	38
4.3 改进 Shapley 值法的设计.....	38
4.3.1 考虑因素.....	39
4.3.2 方法设计.....	39
4.4 实验参数与结果.....	40
4.4.1 初始收益.....	40
4.4.2 改进 Shapley 值法.....	42
4.5 本章小结.....	44
第五章 总结与展望.....	45
5.1 全文工作总结.....	45
5.2 后续工作展望.....	46
参考文献.....	47
致 谢.....	51
附录 A 攻读硕士学位期间的研究成果.....	52

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

随着社会的发展，人们加大化石燃料的用量以满足日益增加的电力需求，从而带来更多温室气体与空气污染物的排放^[1]，这为能源资源和环境都带来了严峻的挑战。同时，高能耗产业的加速发展，也使得能源变得稀缺，能源的供给与需求之间逐渐显现出矛盾。中国作为能源消费大国，能源资源逐渐成为中国经济增长的重要制约因素^[2]。如何提升能源利用率，使得社会经济发展具有可持续性，是当下备受关注的问题。此外，电力需求持续上升、电力间歇性短缺，迫切需要一种更加绿色经济的发电方式。

可再生能源发电作为一种相较于传统发电方式而言成本较低且符合可持续性发展理念的新型发电方式成为了应对这些问题的关键。近年来，在各国政府的激励措施与政策下，可再生能源得到较为充分的发展^[3]。另一方面，新能源在全球各地的分布不均匀^[4]，其出力通常呈现间歇性等特性^[5]，使得新能源的供需之间很难达到平衡。在加快清洁能源开发利用的同时，水电、风电、光伏发电出现送出难、消纳难问题^[6]。2020年弃水、弃光、弃风电量合计519.7亿千瓦时^[7]，即可再生能源消纳问题仍旧十分突出，“三弃”问题的缓解迫在眉睫。

随着可再生能源在电力系统中的比例不断提高，各国掀起一股电力市场改革的新浪潮。进行可再生能源电力交易，运用好互连电力通道发挥交易市场在电力资源配置中的决定性作用成为解决消纳问题和提升经济效益的必然选择。目前，已经有越来越多的人关注到能源互联网，它的出现使得跨区域可再生能源电力交易有了存在的支撑与发展的契机。能源互联网以各国、各大洲之间的主要网架为基础^[8]，它以电力系统为核心，通过运用先进技术结合实时的前沿信息进行能量的自由传输^[9,10]。在能源互联网中，通过共享可再生能源缓解区域内部供需不均衡的现象、减轻资源匮乏区域的电力负担同时降低发电成本、在使各国消纳问题得到缓解的同时可以促进各国的经济转型。为了增加能源交易的效率，许多国家正在发展远距离高压输送电力技术。例如，中国已经拥有了特高压传输技术，并且正在开始建立中欧之间的远距离传输路线。这使得远距离能源交易和远距离能源交易市场具有了现实可行性，并进一步推进了电力市场的改革。此外，中国正在发展能源物联网、分布式能源等，正在为实现迈向“能源互联网”的美好愿景

而努力^[11]。

在全球能源互联的背景下，远距离可再生能源交易应运而生。目前对于可再生能源市场交易的研究大多是集中在交易的效率、安全性、稳定性^[12-14]。然而，全球能源互联背景下规模增大、传输距离变长、历经多方转运，这些已经成为可再生能源交易效率提高的瓶颈。在这种背景下，如何按照各个交易主体的实际能源需求及其出力情况平衡好交易主体之间的利益关系、在满足不同物理限制的要求下实现能源的优化配置、在提升经济效益的前提下保证局部利益均衡，是促进可再生能源电力交易持久发展必须解决的问题。因此，本研究将在当前传统交易模型与交易机制的基础上，对跨区域可再生能源交易的建模与优化展开研究。

1.1.2 研究目的与意义

随着可再生能源电力的迅速发展，能源结构优化进程被进一步推动。当前，可再生能源发电已经成为我国一种主要的新型发电方式，其在环境和效益方面表现出的优势十分明显。另一方面，在可再生能源的持续开发过程中逐渐出现一些问题，其中最主要的是面临着可再生能源电力无法充分吸收与利用的问题。针对该现象，国家与能源局作出一系列鼓励可再生能源持续开发与利用的规划。

中国的可再生能源电力发展势头迅猛，且已经处于市场中的主导位置^[15]。尽管如此，电力系统调峰不够灵活、可再生能源资源分布不均匀，以及各区域电力需求与供给之间无法达到平衡状态、电力输送通道建设技术不够完善与先进、可再生能源电力市场交易机制设计不够合理，以及区域间可再生能源电力市场存在协调障碍等因素导致显著的弃电、限电问题仍有待解决。要符合可再生能源“健康发展”“可持续性发展”的绿色理念，就必须重视起这些问题，提出更多实质性的使可再生能源长久发展的市场消纳机制。

此外，当前国内的可再生能源电力交易市场仍旧需要改善，我们还需要长期的将电力体制改革作为一项重要工作进行。想要在开放性的竞争市场中长久的占据一席之地，关键在于如何制定一个合理的、公平的、高效的电力交易机制。特别是，电力交易过程中如何分配总体利润以及优化资源分配一直是各个学者关注的重点。中国售电市场改革的上一个阶段更加关注于发电主体，主要集中于对配电及发电主体进行研究^[16,17]。随着社会经济的不断进步，对于中国电力市场的改革与发展我们也应该关注售电主体，特别是如何结合策略或方法完善传统电力交易。传统的交易模型对于今天日渐复杂的可再生能源交易市场已经不再适用，我们应该将关注点转移到交易过程中各个参与主体之间的相互制约关系上。博弈论——强调参与主体之间产生的间接影响，它所涉及到的一些数学工具与交易机制对于今天的多主体交易与多因素考虑的可再生能源电力交易市场更加适用，它

可以很好的协调各个参与主体之间的制约关系。充分运用好博弈理论可以使得电力交易市场趋向稳定状态，同时使各个参与主体能够从交易中获取应得的利益。博弈论与电力交易的结合即利用博弈理论的特点与性质约束好交易市场并规范好资源分配机制与利润结算机制，这不仅能够促进可再生能源的消纳，而且还能够最大化整个交易过程的收益，同时最终收益的分配过程也会具备更佳的公平性。

因此，本文拟构建一个公平可行的跨区域可再生能源电力交易模型，系统研究合作协议、定价机制、资源分配算法以及收益分配方法，以建立一个完整且公平性与效益性较高的交易模型，从而整合可再生能源资源，同时为参与者创造额外的效益。该模型将为全球能源互联背景下的远距离可再生能源电力交易提供参考。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 可再生能源交易研究现状分析

随着市场中可再生能源份额增大，研究可再生能源交易的人增多。目前，国内外学者重点关注它的效率以及可靠性^[18-20]。例如：分布式能源系统中存在多种类型的能源，因此魏、刘等人考虑多种能源效应的多交易，并提出能源交易中 Stackelberg 博弈模型优化所有参与者的利益。其中，多个综合能源系统与多个终端用户共同协作，由多能源系统主导交易，用户则自主做出决策，使能源供应者与需求者之间达到均衡状态^[21,22]。同样涉及综合能源系统，文献^[23]则是利用 AMOWOA 算法实现整个系统运行的优化调度。为了管理能源网络中的消费者，文献^[24]的作者建立社区能源共享模型。产消者通过能源协调器对自身的分布式能源进行操作，价格设定则与文献^[21,22]相反，即由用户对能源的供需量决定交易价格以此保证参与用户的最大收益。同样，为了优化定价与能源调度，文献^[25]提出混合能源交易市场，即用户可同时参与本地交易市场与外部交易市场，以获得双向交易的机会，并表现出比传统电网交易更好的灵活性。此外，另一种交易形式：文献^[26]对跨行业背景下通过局域网进行本地能源的交易进行研究，提出一种考虑电网拓扑和网络约束的分布式能源交易市场清算方法，能够减少计算资源与负担，加快结算速度，更适用于参与数量较多的在线交易市场。对于能源电能质量层面，文献^[27]以最大化配电网电能质量评估指标为目标，利用网架优化措施通过随机森林算法对所建模型求解。

上述文献通过优化交易模型提高交易效率和可靠性，使得电力发展更加经济、安全具有可持续性，但随着分布式与集中式能源系统的渗入，电力系统日渐复杂，难以管理，从而出现交易稳定性、安全性、信息真实、隐私性等问题。因此文献

[28-30]基于区块链建立一个安全可靠且适用的能源交易框架,确保信息的真实唯一并为用户带来更低的交易费用。同样,为了降低隐私风险,文献[31]利用数字签名算法实现了通信实体在能源交易系统中的匿名身份认证。而文献[32]则通过分散能源交易算法解决交易过程中实体隐私的侵犯问题,保证交易过程的稳定和安全。

现有研究大部分关注的是能源的优化机制、经济效果^[33-35],然而,在能源交易的发展下,保证交易的公平性却显得尤为重要。例如在供求不平衡的市场下,能源流动^[36]、动态价格以及收益与成本的分配都将成为参与者之间竞争的引发因素,而在这样的竞争下,公平性的缺失将导致一部分人效益受损从而降低参与交易的积极性,不利于电力市场的长期发展。因此,近年来,能源交易的公平性也得到关注。

例如: Park 等人提出以贡献值为依据分配现供资源^[37],但其更关注于能源交易过程中需求方的能源分配,而忽略了供给方之间的资源分配和收益分配的合理性。文献[38]则同时考虑了需求方和供给方的效益,提出在智能电网中建立公平的可再生能源贸易激励机制。当家庭把多余的能量贡献给其他家庭时,其信誉值增加,当它从其他家庭获得能量时,信誉值减少,然而却难以将模型应用于联盟能源盈余的情况。文献[39]提出一种在竞争激烈的市场中实现微网间能源交易的分布式机制,卖方按照买方出价比例决定能源分配比例。相反,文献[40]针对能源交易提出集中式交易机制,并为用户提供一种全分布式博弈方法,其中交易量由各卖方决定而交易价格由各买方设定。文献^[39,40]提出的资源配置方案相对公平,但同一时间交易价格的区别性使得同一能源拥有不同价值,从而间接造成参与者之间的不公平。此外,文献[41,42]均以实现系统能源的充分利用为目标,前者对储能系统和柔性负荷进行协调,后者进行对等能源交易,二者均提升了能源的消纳能力,但却忽略了部分参与者的收益。文献[43]则研究了微电网能源交易的信用评级问题,将信用评级与利润联系起来,以此建立一个安全可信的能源交易市场,但其首先保证零售商的效益最大化再考虑消费者的收益。

在文献[37-43]的研究中,其中一些无法保障交易效益的最大化,另一些无法确保参与成员之间资源配置的合理性,还有一些无法公平对待各参与者为交易做出的贡献(例如对能源合作的贡献)。因此,需要对每个参与者的决策过程进行建模,同时考虑效益最优性和公平性。Hougaard 等人^[44]提出了一种高效的能源交易模型,该模型以成本的公平分摊为目标,并保证了交易过程收益最大。该模型已提出基于价格的定价机制来使联盟效益最大,基于联盟内部分配收益来分摊公共成本,使成本分摊具有一定的公平性。尽管如此,但该模型未考虑能源交易过

程收益分配的公平性，进而影响成本分摊，从而可能导致已有成员退出绿色能源市场或新成员无意愿进入市场。

针对文献[44]模型存在的问题，本文进一步考虑交易过程的公平性，并对合作协议与资源配置方法进行改进，研究收益公平分配。通过能源交易联盟收益的二次分配，为联盟成员分配相应的收益，新加入成员也能得到公平对待。本文构建的模型不仅可以保持联盟已有成员之间交易的公平性，而且能够提升联盟的吸引力，并最终促进能源交易的长期发展。

1.2.2 跨区域电力交易研究现状分析

目前国内外针对跨区跨省电力交易的研究主要集中在交易机制、可再生能源配额和绿色证书制度以及路线优化等^[45-49]。其中，文献[45]针对跨区与可再生能源交易路径构建了简化的拓扑模型，并基于图论网络流算法实现了输电成本的分摊。文献[46]则以高低匹配撮合为交易策略，建立了一个跨区跨省电力交易模型。该模型在考虑含有通道容量约束的电力输送路径时分别建立了虚拟买/虚拟卖方节点以及买/卖方节点。整个交易模型以中国跨区域跨省电力交易规则为基础，最终以中国“三北”地区为案例分析了申报的弃电数量与交易电价以及通道容量分别会对可再生能源消纳产生的影响。为了研究可再生能源配额和绿色证书制度的应用与绿色证书交易以及跨区域跨省电力市场这两者之间的关系，文献[47]引入配额制制定了一个跨区域跨省可再生能源电力交易模型，并基于微观经济学等相关理论搭建了一个火电-绿电联合交易模型。该模型解决了政府无法科学合理设置配额比例的问题，同时促进了可再生能源的消纳与整合。文献[48]则考虑了动态嵌套耦合原理，建立了中长期水资源丰富地区与水资源匮乏地区的电力交易模型，以随机对偶动态规划算法对交易模型求解。相比于不考虑跨省跨区域电力交易模型，该模型购电成本有所降低并且能够提高清洁能源的利用率。同样，为了优化电力调度与价格，文献[49]基于共享的跨区域电力交易市场，对售电方处于单一电力市场中进行价格竞争的策略，以及处于多类型电力市场中进行电量组合的优化方法展开研究。

综合上述分析，目前结合博弈理论构建跨区域可再生能源交易模型的学者较少。本文将基于博弈论构建交易模型并引入最大流算法求解跨区域可再生能源交易过程中出现的资源分配问题。

1.2.3 博弈论在电力系统中的应用研究现状分析

为充分挖掘经济效益、协调好参与主体之间的矛盾，许多学者提出在模型构建过程中引入博弈论。博弈论一般应用于多方主体之间存在利益相交的情况，各

方的关系既可以是非合作关系也可以是合作关系。前者强调的是个体效益，后者则强调集体效益并注重各方能够一致同意并遵守的合作协议。目前，国内外学者在进行能源电力系统博弈研究时，对非合作博弈与合作博弈均广泛涉及。

文献[50]建立了一个 Stackelberg 主从博弈模型。其中，跟随角色和主导者角色分别由用户和运营商承担。跟随者通过协调多种类型的负荷对主导者提出的削峰需求作出响应，同时，主导者对跟随者进行一定的价格补偿。该模型很好的优化了拥有多方博弈主体的工业园区综合能源系统。文献[51]以多产消代理商与市场运营商作为博弈主体构建了主从博弈模型，并通过双层 kriging 云模型算法对该模型求解，实现了能源的高效管理。同样基于非合作博弈论，文献[52]建立了多微网电力交易模型。其中，考虑了服务费作为交易的影响因子。该模型具备普遍适用性，为多微网电力交易提供了一定的指导意义。由于收益与参与各方的报价密切相关，且竞价过程为非合作博弈过程。因此，文献[53,54]基于非合作博弈建立了一个电厂优化报价问题模型。该模型在应对不完全信息下多人博弈问题时表现出良好的效果。

与非合作博弈有着明显的区别，合作博弈不仅要保证个体效益，而且要确保集体利益的最优，且其关注合作协议与模型的收益分配。为了平抑因为能源需求预测无法十分精准从而导致的能源数量偏差，文献[55]建立了一个供给侧以多对象进行价格竞争、需求侧以多对象进行资源共享的综合能源市场策略。其中，在需求侧建立了一个能源枢纽模型来优化其内部运营、在其外部则建立了一个基于合作博弈理论的能源交易模型进行资源共享。而文献[56]则基于合作博弈理论，追求电动汽车代理商与电动汽车使用者之间产生的利润达到最优，提出了一种使得电动汽车在进入充放电状态时能够按照秩序进行的优化模型，交易过程中涉及到的电价由粒子群算法求解得到。文献[57]则是针对用户侧储能侧以及电网侧储能问题进行研究。首先，对储能过程中涉及到的收益与成本进行分析，并建立了电网侧储能效益-成本模型、与用户侧储能效益成本模型，用以降低用户侧的需量电费。其次分析了用户侧储能与电网侧储能的博弈关系，基于合作博弈论以最大化用户侧与电网侧成员合作形成的合作剩余为目标建立了优化模型。同样，为了追求整体效益最大，文献[58]建立了以售电商业公司、电力需求用户、光伏发电站和储能电站以及发电商为主体对象的电力市场。合作联盟以光伏发电站和储能充电站为博弈主体，两者共同遵循市场协议接受同一交易电价并在交易过程中进行独立决策。此外，另一种合作博弈的运用形式：文献[59]为了使得配电网架规划工作中涉及到的各项指标设计更加均衡合理，以网架规划中的技术可行性、可靠性与经济性为博弈主体，运用合作博弈论构建出了一种网架规划策略。而文

献[60]则以发电侧可再生能源电厂储能为研究主体，基于合作博弈论建立了一个能量共享机制，并以此提升储能效率，同时优化计算了可再生能源电厂储能容量。文献[61]中涉及到的博弈主体分别是政府部门、发电公司以及电力用户。该论文以为政府部门在征收足量税收的同时降低环境污染程度、为发电公司降低发电成本增添售电收入、为电力用户降低用电成本且确保供电稳定为目标构建了电力交易模型。

上述文献主要关注点是基于合作博弈对模型进行构建与优化从而提升模型的效率。然而，模型收益分配部分在合作博弈过程中也有着十分重要的地位。

文献[62]基于合作博弈建立了含有冷热电联供系统的综合能源微电网，该模型以联盟收益最优为目标函数，建模过程中考虑了电价、冷热电联供发电成本、购买与售出电成本以及过程中涉及到的运维成本，最后采用人工蜂群算法解决能源共享问题。尤其是，在综合能源收益分配部分引用 Shapley 值方法合理分配收益。整个模型不仅增加了成员的参与积极性，而且保证了交易过程的公平性，同时也提升了个体投资商的收益。

综上所述，大多数学者会将博弈论运用到带有竞争色彩的电力市场中以形成多个主体之间的博弈关系，以寻求最适合自身的最优决策。该类博弈关系仍旧强调集体效益，但一味的关注集体效益最大忽略个体效益，难免造成个体的不满。因此，在博弈关系中保证局部利益也是十分必要的。

1.3 本文工作及主要创新点

本文以全球能源互联网的快速发展为背景，引入了跨区域可再生能源电力交易的概念。考虑到传统电力生产会带来不小的环境污染、现有的可再生能源电力生产带来的资源浪费过大，而一般的交易机制难以达到使交易者均满意的程度，本论文基于合作博弈的思想对电力交易内部展开研究。以下三点为本文创新点：

(1) 采用最大流算法对交易过程中存在的能源共享问题进行建模并求解，该策略在最大限度消纳可再生能源的前提下实现了交易资源的优化配置。

(2) 设计了一种与资源分配结果相关的动态定价策略，该策略使合作联盟创造的收益最大化。

(3) 考虑了每个区域在合作中所作边际贡献以及其自身能源供应对环境产生的影响来公平分配合作收益，以尽可能使每个区域对交易结果满意并维持交易联盟的可持续性。

本文具体工作由以下五章节内容构成：

第一章节，以可再生能源以及全球能源互联网迅速发展为时代背景，介绍并

分析了与目前跨区域可再生能源交易相关的研究动态,并以此为基础提出本文的研究内容。

第二章节,对模型涉及到的相关方法和理论进行了简单介绍,其中包括对合作博弈相关理论、网络流算法的介绍。

第三章节,首先,引入合作博弈的思想,以可再生能源供给方与可再生能源需求方为博弈主体建立合作联盟。其次,设计了四条交易基本准则与动态定价策略并对其进行了逻辑推导与分析。接着通过最大流算法制定了能源共享策略并对其中建模与求解过程做了详细描述。最后对可再生能源超额需求的仿真过程和案例进行介绍。

在算例部分,我们以六个建立有物理连通路经的区域作为参与主体进行交易,并通过算法对模型存在的资源配置问题进行求解,最后对该调度结果进行分析讨论。

第四章节,首先,呈现了有关初始结算的计算方法。其次,简要介绍了经典 Shapley 值法的基本思想与性质。然后,对第三章搭建的电力交易模型结算部分进行优化——通过采用考虑多因素的加权 Shapley 值法重新分配联盟合作收益。

在算例部分,采用加权 Shapley 值法对该资源配置下产生的合作剩余进行二次分配。最终得到六个区域在当前策略下的个体效益情况。最后,与传统交易模型实验结果进行对比分析,验证了本文所做工作确实在最大化交易效益的前提下保证了个体在效益获取方面的满意度。

第五章节,对本文基于合作博弈论提出的交易模型进行归纳总结,并从模型高效性和模型公平性两个方面分别进行阐述。最后进一步规划了后续论文工作。

第二章 相关知识概述

2.1 合作博弈相关知识概述

2.1.1 博弈论基础

博弈论 (Game Theory) —— 对策论 (Theory of Interactive Decision), 主要研究当两个独立对象的行为彼此影响时各方应该如何做出决策。其经济主体之间的关联和相互作用是博弈论着重突出的部分。

博弈指的是在某些特定约束或者特定规则条件下, 团体或者个体根据一定的顺序在自己可以选择的方案或者确定的策略中进行最优抉择并将其执行以满足自身需求的过程。小至棋局博弈, 大至企业之间的商业竞争以及国家之间的谈判, 均可归属至博弈领域。

博弈论有别于先前的一些均衡理论。区别在于前者强调主体之间产生的直接关联和影响而非间接影响。在由传统的一般均衡理论形成的交易中, 生产者与需求者在各自决定如何选择交易或者是生产之后, 会由交易机制来平衡这种交易状态, 使得交易最终达到均衡。其中交易参与者之间的关系是相互关联但彼此间接影响, 而这并不属于博弈论的关注领域。若供给者与需求者之间需要完成资源优化配置或者是产生价格商议过程, 此时二者彼此影响处于博弈状态, 此类问题则属于博弈论领域。尽管如此, 传统一般均衡理论和博弈论二者关系仍旧是十分紧密的, 且两种理论均于 20 世纪中期诞生并一直共同发展至今。

一般情况下, 博弈由参与主体、信息、结果、策略、收益、行为、均衡等构成。其中最基本的元素是收益、参与主体、策略。下面对博弈论几个基本概念下定义^[63]。

(1) 参与主体:

想要通过参与博弈获取利润的各个博弈成员统称为参与主体。独立的个体以及联盟都可以成为参与主体。各个主体运用自身知识做出相关决策, 以达到获取最大利润的目标。若 k 个参与主体, 则参与主体的集合 $K = \{1, 2, \dots, k\}$ 。

(2) 策略:

参与主体拥有的各种可选择的决策的并集称为策略, 该策略往往包含不同的单个决策。每个参与主体的决策集合可以不一样, 策略集合若由 N 表示, 则 $N = (N_1, N_2, \dots, N_k)$ 。其中单个策略集合 $n = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ 。

(3) 信息:

相互博弈的过程中, 各个成员所掌握的与此次博弈相关的信息。例如除自己

以外的其他博弈成员会在这次博弈过程中做出怎样的决策或者是如何去应对。对参与者而言，这些信息十分的重要，拥有这些信息可以使得他们更好的观察博弈方的行为并及时调整自己的行为，从而使得自己在博弈过程中更占优势。

(4) 收益：

每个参与主体在经过博弈并选择相应的策略后会得到相应的由博弈过程产生的利润。由于每位参与主体间彼此影响，其所获利润也均受到彼此影响。当然，各参与者均以自身利润最大化去完成博弈过程。若用 r 表示整个博弈过程所获总体收益，则 $r = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ 。

(5) 均衡：

在博弈过程的最后可能会达到一种对各方而言都相对较优的状态，即均衡——全部博弈成员最优策略的组合。

2.1.2 博弈论分类

随着社会经济持续向前发展，经济运行日益复杂，其博弈程度也日渐增强。博弈论在金融、经济等领域的渗入以及相关方面的研究也随之加深。在未来博弈论的发展将以合作博弈论、进化博弈论以及非合作博弈论为主。

接下来我们将对相关博弈论进行分类。

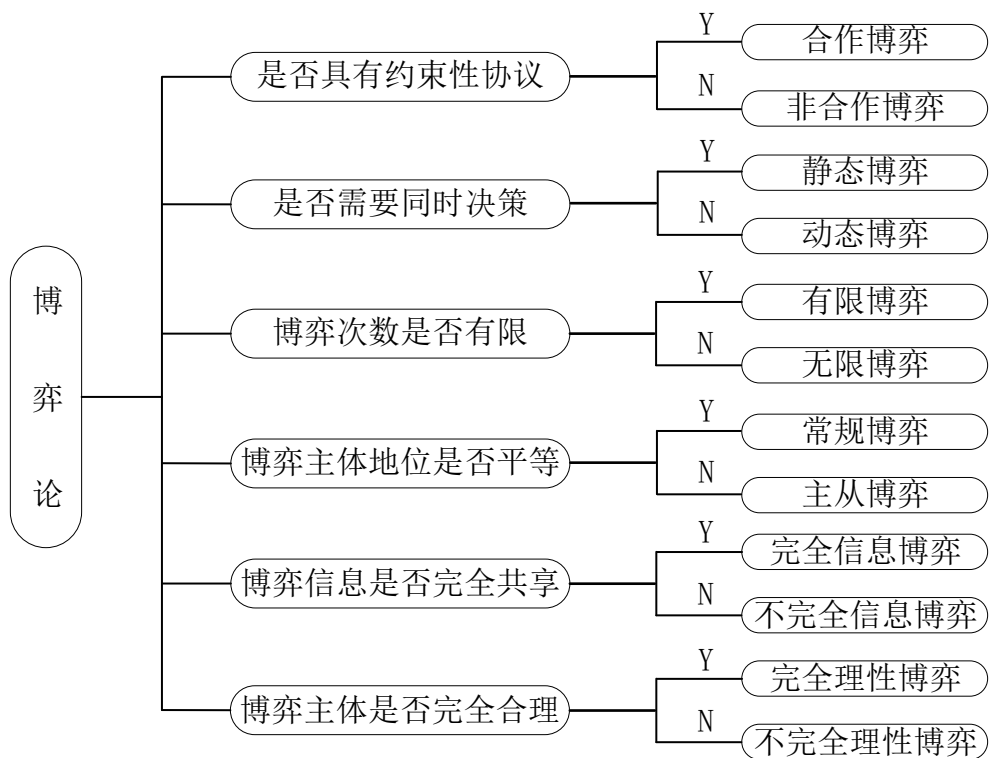


图 2-1 博弈论分类

下面简单介绍两种比较经典的博弈并对两者的区别进行分析。

(1) 非合作博弈

非合作博弈是博弈论的一个重要组成部分。非合作博弈主要关注个体自身在策略环境下能获取到的最大利益，合作因素与集体利益在该过程中则彰显较少。整个过程只和博弈者自身的行为有关，各个参与主体均以自身利益最大为目标进行博弈。

最经典的非合作博弈——纳什均衡，它是广泛博弈过程全部成员最优策略的组合，是一种完全信息静态博弈。静态博弈是指博弈者在同一个时间各自做出行为与反应，因此各成员并不了解其他博弈方到底在同一时间做出了什么样的决策。与之相反，动态博弈则是指博弈过程中各个博弈成员做出反应的时间各不相同，因此，后面做出反应的成员可以通过观察前面成员作出的反应以及时调整自己的决策，从而使得自己在整个博弈过程中更占优势。完全信息博弈，即在博弈过程中对全部博弈成员将作出的策略和他们所含的博弈策略区间都非常清楚。不完全信息则是指对这些信息并不充分了解。我们通过将这几种类型进行组合可以得到四种非合作博弈类型。

(2) 合作博弈

合作博弈同样是博弈论的一个重要构成部分。合作博弈被广泛应用于商业、军事以及经济领域，主要用来解决公共成本该如何分摊的问题或者合作收益该如何分配的问题。分配过程可以确保所有成员的经济利益不会因此受到任何损伤。

与非合作博弈相反，集体性是合作博弈着重突出的性质，博弈过程中各个参与者一致地接受某些约束条件，全部成员均以总体收益最大为目标追求合作的效率与公平。参与合作博弈的过程中各个参与成员的利益不会减少，反而通常情况下参与主体的利益能得以增加。因此通过合作整个联盟总体收益增加，即正和博弈——合作博弈过程产生合作剩余。此时必然涉及总体利益如何分配的问题，而合作博弈的一个重要研究内容也正是收益的公平分配。

(3) 合作博弈与非合作博弈的区分

参与主体间是否可以一致的接受某些约束条件并共同遵守该规则是区分合作博弈与非合作博弈的重要标志。其中，组建联盟是合作博弈的必然行为，其目的是寻找到某种组合下可以达到合作协议约束下目标的联盟，至于其中联盟是如何逐渐形成的却并不清楚。例如，对于核的定义，它只是用来检验联盟是否稳定的指标值。相反，非合作博弈的研究重点刚好落在此处。基于此，纳什曾经认为如果合作博弈与非合作博弈的关系如此密切，那么可以尝试将前者退回到后者作

进一步剖析。在他的这个构想中，合作博弈并不是自由的，反而在博弈进行过程中会形成具有约束力的协议。

事实上，在博弈过程开始前已经存在许多所谓的合作协议，前者是具有约束力且可以构建成一些模型的，后者则更多以交流或者是承诺的形式展现。值得注意的是，纳什认为二者同样都应该被认为是构成博弈的元素，并应该用分析前者的方式对后者进行分析。因而后来被称为纳什规则。换句话说也就是将合作博弈中同样具有约束力但并未形成规范的约束或者协议清晰条理化，从而完成合作博弈到非合作博弈之间的转变。同时，这一发现是 1994 纳什荣获诺贝尔经济奖的主要原因。

本文模型中应用到的是合作博弈相关理论，其中涉及到个体理性与集体理性等相关性质。合作博弈理论和非合作博弈理论在本质上具有明显的差异：非合作博弈理论并不在意博弈各方之间是否存在具备约束性质的规则或者合作协议，而合作博弈理论则允许这种规则的存在并则将其作为博弈过程的一部分。也正是因为非合作博弈理论中，各方仅基于个体理性做出符合自身利益的个体决策，因此各方作出的相关行为或者决策更加简单并易于标准化和进行逻辑分析。所以相较之下非合作博弈理论发展的速度更快。

然而，个体理性仅仅是人类行为决策上的基础理性，在现实生活中，各方处于联合状态的集体性决策非常普遍，因此，合作博弈理论也一直向前发展。本文正是从中选取了合作博弈相关理论并将其应用于模型构建之中，对可再生能源交易过程中的合作协议设计方案以及合作收益分配问题进行合作博弈研究。

2.2 网络流模型及应用概述

2.2.1 网络流模型基础

网络流理论作为图论的一个重要部分，起初被应用在网络优化问题上。T. E. Harris 于 1955 年提出找寻处于网络中的相连两点通路上最大输送量的问题。D. R. Fulkerson 与 L. R. Ford 于第二年求解出该问题，同时出现了相关的网络流理论。网络流是一个值得关注与研究的领域，它不仅融合了图形学还需要应用到数学学科与计算科学。此外，随着网络流理论不断发展，其涉及领域逐渐增多。当下，在交通运输、土木工程、计算机等方面却已有着许多成功的研究。其研究以下面几类为主。

(1) 最小费用流问题

最小费用流问题的研究是指对缩减流通成本问题的研究。例如，在货物运输的问题中，通常要求以完成配送任务为前提，查找一个使总运输费用最小的方案。

(2) 最短路径问题

若对于货物运输问题，只关注单位货物的运输成本，那么此时最小费用流问题转为最短路径问题。

(3) 最大流问题

流通能力是最大流问题关注的重点。该问题与输送费用无关且仅追求网络流图中通道流量达到最大。

网络最大流问题为典型的组合优化问题，其主要应用于现实生活中的运输问题、某类问题的子问题以及可以通过线性规划转换成最大流问题的问题。

由于本文模型在资源配置部分仅追求可再生能源消纳量达到最大，即在网络流模型中追求通道流量达到最大。因此，本文选取最大流问题对交易模型资源配置部分进行求解。

2.2.2 最大流问题基本算法

事实上，理想的单一源点汇点网络图以及无向网络图在现实生活中出现的概率较小，通常多源点多汇点的网络图与现实事件更为相符。对于这些非理想状态的网络图一般有以下几种处理方法：通过构造虚拟的节点将非单一的源点和汇点网络图转换成单一源点汇点网络图；将无向网络图转换成有向网络图，同时按照当前网络流分流的规则对源点流向汇点的最大流进行查找。接下来我们对最大流算法进行介绍。

(1) 增广路算法

增广路，即一条由源点 S 至汇点 T 的有向路径，该路径的每一条前向边均为非饱和边。增广路算法思想是指持续不断的往增广路上增加流量，直到无法查找到可增广路为止。按照选取增广路各类策略，可将该类算法分成一般增广路算法、最短增广路算法。

① 一般增广路算法：

增广路的选取在一般增广路算法中是没有次序和特定规则的。在选取增广路时不需要比较路径上的容量是该算法的优点，因此其选取路径的效率相对较高。但该算法并不具有稳定的算法性能，也不适合应用在规模较大的问题上。其经典算法为 Ford-Fulkson 算法，一般步骤如下所示：

step1: 首先对全部边所含容量进行初始化操作，并将最大流初始化为 0 值，同时规定原图 G 为第一个剩余网络。

step2: 查找剩余网络中由源点 S 至汇点 T 的一条增广路 p ，若查找到，则 step3，否则，step5。

step3: 查找增广路中容量最小的边, 记录下该值并将其增加至当前最大流中并转 step4。

step4: 更新剩余网络 G , 转 step2。

step5: 当前可行流 f 即为所求。

②最短增广路算法

每次的增广工作均是在最短增广链上进行是该算法的特点。也正是因为总是在由源点至汇点的最短路径上进行剩余网络增广工作, ‘乒乓’现象出现的概率由此降低, 其迭代次数也随之降低。该算法为启发式算法, 其中以 Ahuja-Orlin 最短增广路算法与 Dinic 算法应用较广。下面给出最短增广路算法步骤:

step1: 首先对容量网络和网络流进行初始化。

step2: 构建剩余网络与层次网络, 若层次网络中不存在汇点, 此时算法结束。

step3: 持续使用广度优先搜索 (BFS) 对层次网络增广直到不存在增广路。每次增广工作后, 去除由流量改进而饱和的弧。

step4: 转 step2。

(2) 预留推进算法

Karzanov 于 1973 年提出“预留”概念, 预留推进算法最初应用于分层网络阻塞问题上。增广路算法中在增广路上推进流的前提是遵循流量守恒, 而在预留推进算法中则是以消除活结点为中心思想即需要持续的执行推进工作和重新标号的工作将预流消除掉并转化成流。可以根据活节点的选取方案不同对预留推进算法进行分类, 其中比较典型的代表有先进先出 (FIFO) 和最高标号 (HLPP)。本文列出其中最高标号 (HLPP) 一般步骤如下:

step1: 运用广度优先搜索 (BFS) 预处理得到距离标号。

step2: 设定与源点相关的所有弧 (v_s, v_i) 的流量为对应剩余网络容量, 同时标记到达的点 b 为活动节点并将其放至优先队列。

step3: 在优先队列里面持续取点 a 并推流, 且到达点 b 要符合 $h(u) = h(v) + 1$ 。

step4: 如果执行推流操作之后仍旧存在余流, 那么执行重标号同时设置 $h(b)$ 为 $\min\{h(a)\}$ 并将其放至优先队列, 转 step3。

step5: 若优先队列中无点, 此时算法结束。

表 2-1 5 种常见算法的时间复杂度^[64-67]

	增广路算法			预留推进算法	
算法名称	Ford-Fulkson 算法	Dinic 阻塞流算法	Ahuja-Orlin 最短增广路算法	先进先出算法	最高标号算法
时间复杂度	$O(nmU)$	$O(n^2m)$	$O(n^2m)$	$O(n^3)$	$O(n^2\sqrt{m})$

表 2-1 呈现的是理论上 5 种最大流算法的时间复杂度。其中，以 n 表示节点数，以 m 表示边数，以 U 表示边最大容量。

考虑到本文构建的网络流模型的规模及其问题，同时根据表 2-1，Dinic 算法在保证效率较高的同时实现相对简单，所以我们最终选取该算法用以求解本文资源分配问题。

2.3 本章小结

本章介绍了模型中应用到的合作博弈论和最大流问题相关知识。包括对博弈论的发展与定义以及其中两种比较经典的博弈论进行介绍与区分。此外，对最大流算法进行讨论，例如，按照算法原理将最大流算法分成增广路算法和预留推进算法并针对其内容进行了简单介绍。

第三章 跨区域可再生能源交易建模与仿真

在清洁能源蓬勃发展的今天,对于可再生能源交易,不仅要追求交易的效益,也要确保可再生能源交易市场能够保持活力持续发展。因此,本章设计了一个基于合作博弈的跨区域可再生能源电力交易模型,其中包括博弈各方一致认可并遵守的合作协议 (Cooperative Protocol, CP)、动态定价策略以及考虑电力输送通道容量限制的可再生能源电力分配方案。该合作协议可以保证交易的顺利进行、定价策略保障了合作联盟的利益、可再生能源分配方案能够在该模型中实现资源的合理配置。同时,我们对交易过程中涉及到的合作协议进行逻辑推导与分析以验证交易是隐私受保护且有益、有效的。

3.1 跨区域可再生能源交易问题

3.1.1 问题描述

如图 3-1 所示,本文设定合作联盟由 n 个不同区域组成,每个区域在时段 t 均处于可再生能源盈余或赤字状态,区域之间建立有直接或间接互通的能量传输通道,每一条能量传输通道均设置有传输最大容量限制。整个合作联盟形成一个大的互联电网,可再生能源交易自动发生于合作联盟内。我们根据目前常见的发电形式将模型主体的发电方式设定为传统发电厂发电与可再生能源发电两种。传

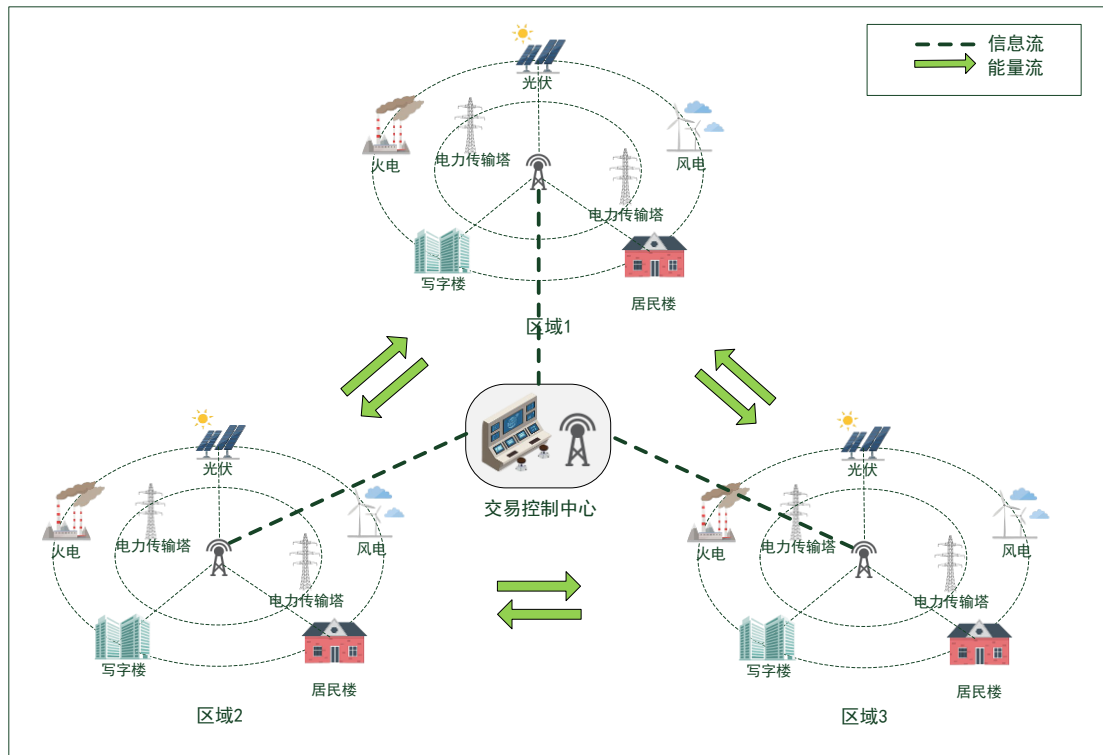


图 3-1 跨区域可再生能源交易示意图

统发电主要是火电，可再生能源发电主要是光伏发电和风力发电。实际上，可再生能源电厂一旦建成，启动其用以发电的成本会远小于传统发电厂发电的成本。因此，当每一个区域内部产生电力需求时，优先启用自身可再生能源发电厂满足其电力需求。可再生能源电厂无法满足的超出部分或者由于可再生能源发电的不确定性导致的剩余部分，这里将其统称为可再生能源超额需求，考虑向交易控制中心申请资源分配。

交易控制中心是整个大电网的核心部分，其中设有一个需求-价格响应机制（Demand-Price Response, DPR）。每个区域将自身固定的传统发电厂单位产电价格、可再生能源超额需求量、区域相关线路及其最大容量限制等参数向交易控制中心进行实时反馈并根据自身情况向市场申请购买或出售，然后等待 DPR 按照交易机制做出决策并向各个区域发出指令，最后 DPR 市场未能完成的超额需求量返回至各个区域内，而对于交易无法满足的剩余部分则考虑启用区域自身传统发电厂。若某区域是有可再生能源剩余的联盟成员则按照交易指令通过直接或间接的能量传输通道将能源输送至能源匮乏区域，以此完成自身能源的消纳并从中获得利益。若某区域是有可再生能源需求的联盟成员则根据 DPR 发出的指令进行操作，若被允许进入交易则在原地接受电力输送，若不被允许进入交易则启用自身传统发电厂。这样设定是为了响应政府支持可再生能源发展的有关政策尽可能消纳整合可再生能源，同时追求合作利益。

在该模型中，对于有可再生能源需求的区域而言，可以以低于传统发电厂的价格进行交易，否则这些区域将要花费更高的成本来满足电力需求；对于有可再生能源剩余的区域而言，可以从中获取额外利益，否则由于可再生能源不可大规模存储等特性，这些区域将遭受经济损失。因此能源赤字区域与能源盈余区域形成联盟，以此来降低各自的成本或增加各自的利润，同时整个合作联盟利益也将得以提升。在该交易模型中，交易控制中心不仅负责规划线路进行合理的资源配置以平衡各区域的可再生能源超额需求，而且还充当了收益结算者的角色负责将整体合作利益公平的分配给每位成员。其中各个环节的交易决策工作均由交易控制中心按照各区域实时提交的反馈信息、模型设定的动态定价策略、特定的资源配置方式以及结算规则来进行。

3.1.2 模型符号及假设

表 3-1 模型符号

N	合作联盟成员集合， $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ；
S_i	联盟内成员形成的组合，且该组合包含成员 i ；

B_t	在时段 t 的交易中，需求侧成员形成的集合；
$D_{i,t}$	成员 i 在时段 t 产生的可再生能源超额需求；
P_i	成员 i 启用传统发电厂发电的固定单位电价；
p_t	在时段 t 自动发生的交易中产生的动态交易电价；
$p_{i,t}$	成员 i 在时段 t 的购买价格或售出价格，且 $p_{i,t} = p_t$ ；
$M_{i,t}$	成员 i 在时段 t 的可再生能源净量交易；
$M_{i,t}^{buying}$	成员 i 在时段 t 的可再生能源购买量；
$M_{i,t}^{selling}$	成员 i 在时段 t 的可再生能源售销量；
$A_{i,t}$	成员 i 在时段 t 启用传统发电厂发电的数量；
$\bar{c}_{i,t}$	处于单一状态时，成员 i 在 t 时段产生的实际电力成本；
$c_{i,t}$	处于合作状态时，成员 i 在 t 时段产生的实际电力成本；
$\bar{g}_{i,t}$	成员 i 在时段 t 进行电力交易时由初始结算方案分配所得收益；
$g_{i,t}$	成员 i 在时段 t 进行电力交易时由二次结算方案分配所得收益；

3.1.3 目标函数

假设整个交易时段 T 由多个相等的小时段 t 组成，在每一个当前时段 t ，各个区域主体对于是否要加入联盟均为自主决策，而只要加入合作联盟就有机会进入交易并获利。同时，我们假设不同时段联盟内自发进行的电力交易之间互不影响、相互独立。由于可再生能源生产具有间歇性，各个区域自身所需电力与所能产出的电力之间难以达到平衡。又因为可再生能源电力生产单价远小于传统发电厂电力生产单价，所以超额需求首先将由联盟内自动进行的电力交易满足，交易无法满足的部分再由自身传统发电厂满足。假设区域 i 在 t 时段产生的可再生能源超额需求由 $D_{i,t}$ 表示，那么，当区域 i 在时段 t 产生额外的可再生能源需求时， $D_{i,t}$ 为正数，当区域 i 在时段 t 拥有额外的可再生能源剩余时， $D_{i,t}$ 为负数。

每个区域加入联盟的目标均是期望通过博弈使自己在交易过程中能够获取的利益达到最优。对于处于可再生能源需求侧的成员而言，电力生产成本越少越好；对于处于可再生能源供给侧的成员而言，电力售卖利益越多越好。因此，本文将合作联盟内区域 i 在时段 t 所产生的交易利益设定为目标函数

$$\min_{p_{i,t}} p_{i,t} D_{i,t} \quad (3.1)$$

若区域 i 拥有可再生能源剩余，即 $D_{i,t} < 0$ ，则当交易价格 $p_{i,t}$ 越大时，目标函数结果得以更小，区域 i 获利更多。同理，当区域 i 有可再生能源需求时，即 $D_{i,t} > 0$ ，

则当交易价格 $p_{i,t}$ 越小时，目标函数结果得以更小，区域 i 电力成本更少。因此，每个区域 i 在交易中均是为了使目标函数（3.1）最小化。

由于单一状态区域与其他区域未建立电力互连通道，其电力需求只能由自身传统发电厂满足，若有可再生能源剩余也无法及时消纳。而处于合作状态的成员则可以通过合作联盟内自发进行的交易以更低的成本平衡其电力需求（需求侧）或消纳其剩余电力以赚取更高的利益（供给侧）。基于此，本文将区域 i 在 t 时段因为加入合作联盟而减少的成本（增加的利益）设定为：

$$\bar{g}_{i,t} = \bar{c}_{i,t} - c_{i,t} \quad (c_{i,t} \leq \bar{c}_{i,t}) \quad (3.2)$$

本文主要以公式（3.2）的结果体现参与合作联盟建立电力互连通道的优势。

3.2 跨区域交易模型的建立

3.2.1 合作协议分析

各区域通过建立电力通道相互连接，共同合作，每个区域都具有自身动态的可再生能源超额需求需要通过参与合作联盟去平衡。本文提出四条合作协议（CP1 - CP4）以保证在联盟中自动形成的交易是隐私受保护且有益、有效的。接下来本文将围绕这四条合作协议展开讨论。

CP1：合作匿名性——联盟成员是何身份对交易过程无任何影响

联盟成员向交易控制中心申请购买或售出时，不使用真实身份，而是通过匿名身份将提交的相关数据匿名化。任一联盟成员仅掌握自己的信息，而无法知晓其他具体成员向交易控制中心提交的信息，交易控制中心虽然能够知晓所有成员的数据却也无法得知相应的数据属于哪一位成员。以此断开联盟成员与所提交数据之间的联系，从而起到保护成员隐私的作用。

显然，这是公平对待全部成员同时维护成员信息安全的合理要求。首先，该协议保证任一联盟成员是否能从联盟内被允许进入交易以及进入交易后匹配的交易对象是谁与该成员所含身份无关。其次，该协议保证任一成员在博弈过程中所获资源多少与利益大小均只与自身提交的信息、交易过程中能量调度策略以及收益结算方案的设计相关，而与其所含身份无关。如：交易控制中心只能获取与处理各参与主体的能源供需量、传统发电厂产电单价、相关的连通路径及其输送容量限制，而并不清楚各个主体实际的能源供需及其出力情况，也不需要参与主体提交任何与身份相关的数据。如若不然，交易过程将存在信息泄露的风险，甚至产生不公平的交易行为，因为每个参与主体均有自己的交易偏好，在制定自己的行为策略时，将会考虑到其他更多的附属因素，从而导致交易过程中不公平现

象的产生。

CP2: 价格唯一性—— $p_{i,t} = p_{j,t} (i \in N, j \in N)$ ，即处于同一时段的成员交易价格唯一。

价格唯一性确保同一时段出售的可再生能源具有相同的价值，保证买卖双方交易过程中的公平性。若我们区别对待不同的交易成员，同一时段向不同成员设置不同的购/售价格，那么我们该如何将更高价格的可再生能源安排给某一买方成员去进行购买，或是如何将更高价格的可再生能源安排给某一卖方成员去进行出售？这个问题在我们的模型中会比较复杂，因为通常情况下，买方成员想要与价格更低的卖方成员进行交易匹配，卖方成员也想要尽可能降低自身售卖价格以避免自己在交易市场中失去吸引力从而遭受经济损失。

另一方面，为同一时段 t 且同为买方的成员设置不同的交易价格将使得一些买方要支付更高的价格去购买与其他成员同样的能源，这意味着交易的不公平。而为同一时段 t 且同为卖方的成员设置不同的交易价格将使得一些卖方的可再生能源价值要低于另一些卖方的能源，这意味着进行能量交易与对方的身份有关系。即，对 CP2 的违反意味着同时打破 CP1，因为我们强调交易过程中资源分配的多少与所获利益的大小仅与交易机制设计有关，即整个交易过程应同一对待全部参与者。

值得注意的是，该协议保证的是在短时间段内交易价格确定且唯一。在长时间段内，由于区域内部随机且不可控的可再生能源出力会导致动态的超额能源需求，因此在交易过程中，为使经济效益最大，交易价格会随能源配置的结果发生改变。

CP3: 合作有益性—— $\sum_{i \in N} g_{i,t} \geq 0$ 即处于合作状态的各个成员创造的收益总和高于所有处于单一状态的成员创造的收益总和。

首先，该协议保证任何成员参与的交易不会使自己遭受损失。当联盟成员 i 有能源盈余时，该协议保证它不会被迫从联盟内购买能源，同时也不会强迫成员 i 提供本用以满足自身电力需求的可再生能源进行出售。实际上，交易控制中心根据成员 i 申报的超额需求数量对其进行合理的资源分配，分配的资源数量限制在 $[0, -D_{i,t}]$ 之间。当联盟成员 i 有能源需求时，该协议保证它不会被迫从联盟中出售能源，同时也不会强迫它购买大于 $D_{i,t}$ 的能量，实际上交易控制中心根据联盟成员 i 申报的超额需求等信息作出合理的决策。同样，该数量被限制在 $[0, D_{i,t}]$ 之间。对于整个交易而言，该协议保证 $\sum_{i \in N} M_{i,t} = 0$ 且 $0 \leq \frac{M_{i,t}}{D_{i,t}} \leq 1$ ，即购买量与售出

量均处于平衡的状态。

另一方面，从价格机制的设定公式（3.3）可知，对于购方而言，购买的价格不会超过自身启用传统发电厂发电的单位电价。通常情况下，它可以以更低的价格满足自身部分的或全部的电力需求。对于售方而言，出售的价格不会为负数，所以其总是能够获得一些利益。因此，成员参与联盟并不会遭受经济损失。即，处于合作状态的各个成员创造的收益总和会高于所有处于单一状态的成员创造的收益总和。

CP4：新成员的加入，联盟总体收益不被减少。——通常情况下，联盟若得以扩展，该联盟总体合作收益将因外部成员的加入而得以提升。

新成员的进入，将使联盟产生以下几种变化：

Case1：若当前联盟正处于可再生能源盈余的状态，由于外部成员 k 以可再生能源赤字状态进入联盟并以任意价格消纳过剩的可再生能源，其较少的超额需求导致包含成员 k 的联盟在完成 t 时段交易后，该联盟整体仍旧处于一个可再生能源盈余的状态。当进入联盟的外部成员 k 为可再生能源盈余状态，显然，包含 k 成员的该联盟整体仍旧处于一个可再生能源盈余的状态。综上，即

$$\text{当 } \sum_{i \in S} D_{i,t} \leq 0, \text{ 同时 } \sum_{i \in S \cup k} D_{i,t} \leq 0。$$

Case2：若当前联盟正处于可再生能源盈余的状态，由于外部成员 k 处于可再生能源赤字状态进入联盟并以任意价格消纳过剩的可再生能源，其较大的超额需求导致包含成员 k 的联盟在完成 t 时段交易后，该联盟整体已经处于一个可再生能源赤字的状态。即

$$\text{当 } \sum_{i \in S} D_{i,t} \leq 0, \text{ 同时 } \sum_{i \in S \cup k} D_{i,t} \geq 0。$$

Case3：若当前联盟正处于可再生能源赤字的状态，外部成员 k 处于可再生能源赤字状态进入联盟并以相对原联盟成员较高的价格优先占得原交易中传统价格较低成员的可再生能源资源，完成 t 时段交易后，联盟整体仍旧处于一个可再生能源赤字的状态。若外部成员 k 处于可再生能源赤字状态进入联盟并以相对原联盟成员较低的价格进入，此时，由于资源有限，成员 k 价格较低无抢占优势，因此成员 k 无法进入交易，联盟状态不因成员 k 的进入而产生变化，因此仍旧处于一个可再生能源赤字的状态。若外部成员 k 处于可再生能源盈余状态，但盈余部分不足以满足整个联盟的超额需求，此时联盟仍旧处于一个可再生能源赤字的状态。综上，即

$$\text{当 } \sum_{i \in S} D_{i,t} \geq 0, \text{ 同时 } \sum_{i \in S \cup k} D_{i,t} \geq 0。$$

Case4: 若当前联盟正处于可再生能源赤字的状态，外部成员 k 处于可再生能源盈余状态进入联盟并以相对充足的资源满足联盟的超额需求，完成 t 时段交易后，联盟整体已经处于一个可再生能源盈余的状态。即

$$\text{当 } \sum_{i \in S} D_{i,t} \geq 0, \text{ 同时 } \sum_{i \in S \cup k} D_{i,t} \leq 0.$$

令 P_k 表示新成员 k 的传统发电厂的单位产电价格， $p_{s,t}$ 代表原始联盟 S 中成员在进行可再生能源交易时的交易价格， $p_{S \cup k,t}$ 代表当前包含 k 成员联盟交易价格。同时，我们令 Δp 表示新成员 k 的传统发电厂发电价格与原始联盟中成员进行可再生能源交易价格之间的差值，即 $\Delta p = P_k - p_{s,t}$ 。

此外，我们假设外部成员 k 进入联盟后，原始联盟中产生的合作收益与当前包含 k 的新联盟中产生的合作收益间的差值为 f 且令 $f = f_{S \cup k} - f_S$ 。其中 $f_{S \cup k}$ 代表当前包含 k 的新联盟 $S \cup k$ 中产生的合作收益， f_S 代表原始联盟中成员产生的合作收益， S 代表原始联盟成员集 $S = \{1, 2, \dots, s\}$ ， $S \cup k$ 代表当前包含 k 成员的新联盟成员集 $S \cup k = \{1, 2, \dots, s, k\}$ 。

为了区分购买和售卖收益，我们令 $f_{S, buy}$ 表示联盟 S 中产生的购买收益； $f_{S, sell}$ 表示联盟 S 中产生的售出收益； $f_{S \cup k, buy}$ 代表联盟 $S \cup k$ 中产生的购买收益； $f_{S \cup k, sell}$ 代表联盟 $S \cup k$ 中产生的售出收益。此外，我们令成员 s 代表当前交易中传统发电厂发电价格被设置为交易价格的成员，而 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_S\}$ 代表各成员传统发电厂发电价格集合。

对于 Case1 一共会出现以下 3 种情况：

①成员 k 为可再生能源需求者，且其传统发电厂生产电力的固定电价低于原交易价格。

$$\Rightarrow P_k < p_{s,t}, \text{ 同时 } 0 < D_{k,t} < |\sum_{i \in S} D_{i,t}|$$

$$\text{那么有 } \sum_{i \in S \cup k} D_{i,t} = D_{k,t} + \sum_{i \in S} D_{i,t} \leq 0$$

$$\begin{cases} f_{S, buy} = M_1 \times (P_1 - p_{s,t}) + M_2 \times (P_2 - p_{s,t}) + \dots + M_{S-1} \times (P_{S-1} - p_{s,t}) \\ f_{S, sell} = (M_1 + M_2 + \dots + M_{S-1} + M_S) \times p_{s,t} \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_{S \cup k, buy} = M_1 \times (P_1 - P_k) + M_2 \times (P_2 - P_k) + \dots + M_{S-1} \times (P_{S-1} - P_k) + M_S \times (P_t - P_k) \\ f_{S \cup k, sell} = (M_1 + M_2 + \dots + M_{S-1} + M_S + D_{k,t}) \times P_k \end{cases}$$

$$\text{又 } \because f = f_{S \cup k, buy} - f_{S, buy} + f_{S \cup k, sell} - f_{S, sell}$$

$$\begin{aligned} \text{则 } f &= (P_1 - P_k - P_1 + p_{s,t}) \times (M_1 + M_2 + \dots + M_{S-1}) + M_S \times (p_{s,t} - P_k) \\ &= (p_{s,t} - P_k) \times (M_1 + M_2 + \dots + M_S) \end{aligned}$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/867145201052006031>