

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231155

计及能源交易下基于纳什议价模型的多微网合作 博弈运行优化策略

田海东¹, 何山^{1,2}, 艾纯玉¹, 樊小朝³, 胡兵³, 徐立军³

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网技术自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017; 3. 新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要: 以能源交易为背景, 针对多微电网合作中的运行优化问题, 提出了基于 Nash 议价模型的合作博弈策略, 旨在实现微电网之间的合作, 以最大化整体利益, 同时考虑能源交易和成本优化。首先, 将各微电网视为博弈参与者, 构建了基于 Nash 议价理论的多微电网合作博弈模型, 通过选择能源交易策略和运行策略来影响其能源成本和效益。其次, 采用交替方向乘法(alternating direction multiplier method, ADMM)求解此多参与者优化问题, 通过将原问题分解为子问题并引入乘子变量来实现迭代求解。最后, 在每次迭代中, 各微电网根据其局部信息更新能源交易和运行策略, 并利用乘子变量进行信息交换和博弈协调, 以达到全局一致性。结果表明, 该策略在多微电网合作中能够实现整体性能的提升, 有效促进了可再生能源的消纳水平, 平衡了各参与者的利益, 同时降低了能源成本。

关键词: 多微网系统; 能源交易; 合作博弈; Nash 议价

Optimization strategy for cooperative game operation of multi-microgrids based on the Nash bargaining model considering energy trading

TIAN Haidong¹, HE Shan^{1,2}, AI Chunyu¹, FAN Xiaochao³, HU Bing³, XU Lijun³

(1. Key Laboratory of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Technology of Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Xinjiang University, Ministry of Education, Urumqi 830017, China; 3. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: In the context of energy trading, a cooperative game strategy based on the Nash bargaining model is proposed for the operation optimization problem in multi-microgrid cooperation, aiming to achieve cooperation among microgrids to maximize the overall benefits while considering energy trading and cost optimization. First, each microgrid is considered as a game participant, and a multi-microgrid cooperative game model based on the Nash bargaining theory is constructed to influence its energy costs and benefits by choosing strategies for energy trading and operation. Secondly, the alternating direction multiplier method (ADMM) is used to solve this multi-participant optimization problem by decomposing the original problem into sub-problems and introducing multiplier variables to achieve iterative solutions. Finally, in each iteration, each microgrid updates its energy trading and operation strategy based on its local information and uses the multiplier variables for information exchange and game coordination to achieve global consistency. The results show that this strategy can realize overall performance improvement in multi-microgrid cooperation, effectively promote the level of renewable energy consumption, balance the interests of each participant, and reduce the energy cost at the same time.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52266018).

Key words: multi-microgrid systems; energy trading; cooperative games; Nash bargaining

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52266018); 新疆自治区重点研发计划项目资助(2022B01003-3); 新疆自治区重点实验室开放课题(2023D04029); 新疆自治区研究生创新项目资助(XJ2023G051)

0 引言

随着能源需求的不断增加和能源结构的不断变化,微电网(microgrid, MG)作为一种新型的能源供应和管理模式,逐渐受到了广泛的关注^[1-3]。MG系统由多个分布式能源资源、负荷和储能设备组成,能够实现自主运行和互联互通,具有高度的灵活性和可靠性^[4-6]。然而,随着微电网技术的不断进步,独立MG系统可以通过共同的连接点耦合在一起,形成多微网(multi-microgrid, MMG)系统^[7-10],实现更高级别的相互作用,使得不同MG能够在更广泛的范围内进行协同。类似于单个微网,MMG也是受控制的整体单元,与配电网相互配合,以确保稳定的电力供应,满足功率需求^[11-13]。MMG通过微电网之间的能源互补以及灵活的交易和协调来实现利益的平衡,能够更好地解决新能源的局部消费和利用难题、降低社会成本及实现系统整体的优化目标^[14-15],不同微电网之间在结构、供需水平以及利益相关方面存在着差异^[16-17]。

目前,许多学者已经在可再生能源发电、能源调度与管理、能源交易等不同层面对微电网进行了研究,并取得了一定的研究成果。文献[18]针对微电网中可再生能源发电不确定性对调度的影响,提出了一种基于电源分类的两阶段优化调度策略,采用了蒙特卡洛方法来估计考虑不确定性的成本函数的期望值和方差,最后通过算例分析证明了所提方法的有效性。文献[19]提出了一种考虑多因素的能量管理优化策略,在确保系统功率平衡的前提下,采用改进粒子群算法进行求解,以获得最优的能量优化策略。文献[20]提出了一种基于点对点(peer-to-peer, P2P)能源交易的多微网系统最优调度策略,利用Nash议价机制鼓励单一微电网积极地进行能源交易并实现公平的利益共享。文献[21]为有效实现微电网内能源的高效利用和资源的合理配置,提出了一种基于主从博弈的能量交易优化模型,以售电用户为主导者、购电用户为跟随者,并结合微分进化算法求解该模型。然而,文献[18-21]主要针对传统的独立微电网展开研究,对于多能源微网间的协同运行问题尚未得到充分探讨,未能全面涵盖多能源微电网的复杂性和交互性。

由于微网联盟内各主体存在复杂的利益竞争关系,已有研究表明博弈优化模型可以较好地处理能源交易过程中复杂的利益问题。文献[22]提出了一种多能源微电网在可再生能源、电力负荷和微电网与公用电网之间的电力交易价格等多种不确定性下的时序协调运行方法。文献[23]分析了配电网运营

商与多综合能源微网间的博弈关系,构建了基于能源交易的混合博弈优化模型,并利用二分法结合交替方向乘法(alternating direction multiplier method, ADMM)对模型求解,验证了模型的有效性。文献[24]构建了含有共享储能的多微网联盟博弈优化配置模型,通过对比联盟合作收益与各成员收益,判断联盟的稳定性,并利用Shapley法进行收益的分配。文献[25]针对多微网系统的能量互换问题,建立了考虑能量共享的多微电网协同博弈优化调度模型,采用一致性优化算法求解所建立模型,验证了用户侧和供电侧进行实时交易价格与微网交易价格的等价性,并利用Shapley值法完成了利益分配。文献[26]构建了基于电价/功率交互约束协议的多微网合作博弈优化模型,为实现各微网间的协调,引入效益妥协算法,以达成一个统一的多微网能量管理策略。文献[27]考虑了独立微网间缺乏市场竞争力,构建了多微电网间的合作博弈优化模型,采用纳什讨价还价理论协调各微网间的利益分配,并分析了微网间的最优交易权与电价。然而,上述文献在考虑电能交互和多利益主体关系的同时,忽略了参与主体间其他能源交互(热能或者天然气能)所涉及的博弈关系,在对区域多能源微网系统进行建模时,未充分考虑电能、热能、天然气能等多种能源间的耦合交互关系,未能有效地展现出多能源微网的优势和其存在的价值。并且文献[24-25]提到的利益分配机制在面对微网规模庞大的情况下将出现“组合爆炸”的难题,进而导致计算量大、效率低。

基于上述文献研究,本文引入微电网服务商(microgrid service providers, MSP)以满足系统对用户侧的能源需求,利用能量流动枢纽对MSP进行建模。考虑到合作联盟内各微网主体间的能源P2P交易,提出了一种计及能源交易下基于Nash议价模型的多微网系统合作博弈优化策略,并利用交替方向乘法求解多参与者优化问题,通过将原问题分解为子问题并引入乘子变量来实现迭代求解。最后仿真结果表明,本文所提策略在多微电网合作中能够实现整体性能的提升,有效提高了可再生能源的消纳水平,平衡各参与者的利益,同时降低了能源成本。

1 多微电网服务商与能源交易

1.1 微电网服务商能量流动

微电网服务商致力于满足用户的能源需求,依赖于上级电力和天然气网络来供应能源。为满足不同能源需求,MSP需要维护多种能源设备,包括能源生产装置(如太阳能光伏电池板和风力发电机)、

用于转换能源形式的设备(如电-气转换装置和电-热转换装置)以及能源存储设备(如储电和储气装置)。通过这些能源设备, MSP 能够根据用户的需求进行能源生产、转换和存储。例如, 当用户需要电能时, MSP 可以利用太阳能光伏电池板和风力发电机进行电力生产, 并将其供应给用户。当用户需要热能时, MSP 可以通过电力-热能转换装置将电能转换为热能, 并通过储热装置进行储存和供应。本文研究考虑的 MSP 能量流动模型如图 1 所示。

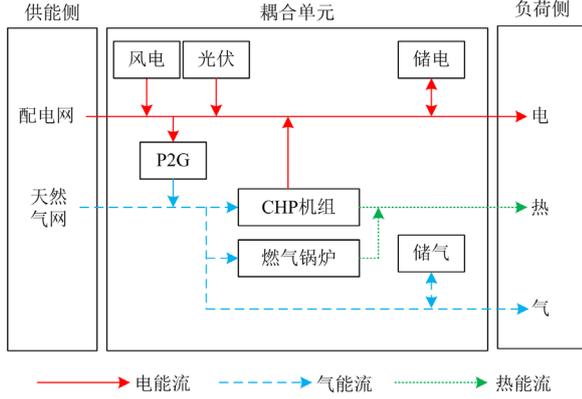


图 1 微电网服务商能量流动模型

Fig. 1 Energy flow model for microgrid service providers

MSP 作为能源供应的中心, 其输入端连接上级电网、气网, 输出端直接向用户端的电、气、热负荷提供能源。为更好地消纳风、光等多种能源, MSP 通常配置了风电、光伏发电等新能源发电单元, 并通过电转气(power-to-gas, P2G)装置将新能源发电的多余电能转化为天然气, 利用储气装置进行储存。同时, MSP 还配置了热电联产(combined heat and power, CHP)机组和燃气锅炉(gas boiler, GB)等设备, 以实现多种能源的耦合转换和生产。此外, MSP 模型也包含输电线路、输气/热管道以及储电、储气等设备。

供能侧: 能量流动框架的输入端与系统网络的关系为

$$\begin{cases} P_{in}^e = S_{line}^e - P_{new} + S_{P2G} \\ P_{in}^g = S_{line}^g - \eta_{P2G} \cdot S_{P2G} + S_{CHP} + S_{GB} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{in}^e 、 P_{in}^g 分别为输入系统网络的电功率、气功率; η_{P2G} 为 P2G 设备的能源转换因子; P_{new} 为新能源发电单元的输出功率; S_{P2G} 、 S_{CHP} 、 S_{GB} 分别为 P2G 设备、CHP 机组及燃气锅炉的输入功率; S_{line}^e 、 S_{line}^g 分别为电网及气网的输电、气功率。

负荷侧: 能量流动框架的输出端与系统网络的关系为

$$\begin{cases} P_{out}^e = S_{line}^e + \eta_{CHP}^e \cdot S_{CHP} - P_{ES}^{in} + P_{ES}^{out} - P_e^{DR} \\ P_{out}^h = \eta_{CHP}^h \cdot S_{CHP} + \eta_{GB} \cdot S_{GB} - P_h^{DR} \\ P_{out}^g = S_{line}^g - P_{GS}^{in} + P_{GS}^{out} - P_g^{DR} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{out}^e 、 P_{out}^h 、 P_{out}^g 分别为系统网络输出的电、热、气功率; η_{CHP}^e 、 η_{CHP}^h 分别为热电联产机组的发电效率和产热效率; η_{GB} 为 GB 的产热效率; P_{ES}^{in} 、 P_{ES}^{out} 分别为储电设备的充、放电功率; P_{GS}^{in} 、 P_{GS}^{out} 分别为储气罐的存、放功率; P_e^{DR} 、 P_h^{DR} 、 P_g^{DR} 分别为负荷侧需求响应管理的电、热、气功率改变量, 由于只考虑电能和天然气的需求响应管理, 故 $P_h^{DR} = 0$ 。

1.2 微电网服务商能源交易

本文研究的多微网服务商(multi-microgrid service provider, MMSP)合作联盟结构如图 2 所示。为避免远距离输送热能造成大量热能损失, 因此, 热能的供应不依赖上级热能管道, 仅考虑系统自产, 同时 MSP 可直接从上级配电网和天然气网购买电能与天然气, 考虑到区域 MSP 与上级配电网与天然气网的末端相连, 超出了上级配电网与天然气网的维护范围, 为确保上级配电网与天然气网进行正常的能量流动去向, 假设仅可购买能源而无法销售给上级网络。为实现区域多 MSP 间的合作联盟, MSP 间建设了区域级电能输送网络和热力输送管道, 避免了能量无序传输以及频繁通过上级能源网所引起的调度问题, 同时促进了微电网内部主体之间的合作运营。

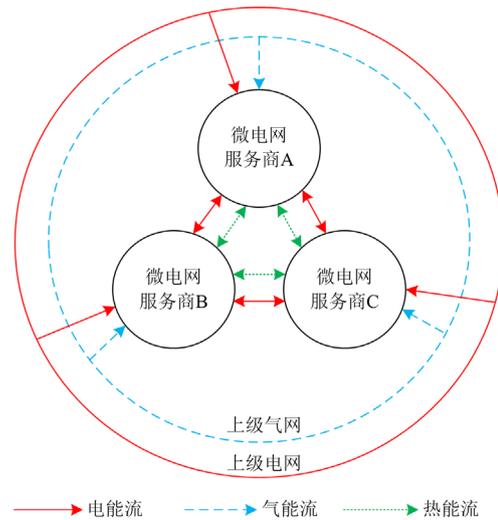


图 2 多微电网系统合作联盟结构图

Fig. 2 Structure of the cooperative alliance for multi-microgrid systems

MSP 具备对应的新能源发电和储能设备,为满足用户的能源需求,可选择不同的供能方式和路径。此外, MSP 还有两种购能方式。

1) 与上级配电网或天然气网购能来满足能源需求。

在此模式下,微电网服务商只能从上级能源网络购买能源,购买价格以阶梯型价格为基准,不可调整。

2) 与其他 MSP 进行能源交易。

当采用合作模式时,能源交易方式允许多 MSP 之间实现合作并相互支持,通过议价交易,各 MSP 可以灵活地满足各自的能源需求,同时降低能源采购成本,合作机制在 MMSP 联盟系统内具有重要的经济和可靠性优势。

2 多微电网服务商运行优化模型

2.1 目标函数

由于上级配电网和天然气网存在能量输送限制,并且各 MG 间的热能系统相对分散,为了实现 MG 之间的合作互联, MSP 需要额外投资建设电力网络和热力管道来实现合作联盟的协同合作。本文假设仅由单一投资方完成联盟内各 MG 间互联网络和传输通道的建设。依据传输通道内的能量传输容量,投资方应向联盟内各 MSP 收取相应的费用,此外,该费用应由购能微网和售能微网共同承担。

当日前优化过程中,将调度时间间隔设置为 1 h, T 为调度周期(24 h),目标是使每个微电网服务商的全天运行成本最小化。

$$\min U_i^C = U_i^{\text{BUY}} + U_i^{\text{OP}} + U_i^{\text{NET}} + U_i^{\text{P2P}} + U_i^{\text{DR}} \quad (3)$$

式中: U_i^C 为第 i 个微电网服务商的总成本; U_i^{BUY} 为微电网服务商向上级能源网购买能源的费用; U_i^{OP} 为微电网服务商运行成本,其包括 P2G 装置购买 CO_2 的费用和储电储气装置运行损耗成本; U_i^{NET} 为向投资方支付的能源输送费用; U_i^{P2P} 为与联盟内其他微电网间的能量交易成本; U_i^{DR} 为负荷侧需求响应管理费用。

$$U_i^{\text{BUY}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{ub}}^e \cdot P_{\text{ub}}^e + C_{\text{ub}}^g \cdot P_{\text{ub}}^g) \quad (4)$$

式中: C_{ub}^e 、 C_{ub}^g 分别为向上级能源网购电、购气成本; P_{ub}^e 、 P_{ub}^g 分别为向上级能源网购电、购气功率。

$$U_i^{\text{OP}} = \sum_{t=1}^T (C_i^{\text{P2G}} + C_i^{\text{ES}} + C_i^{\text{GS}}) \quad (5)$$

式中: C_i^{P2G} 为 P2G 装置运行成本; C_i^{ES} 、 C_i^{GS} 分别为系统内储电、储气设备的使用费用。

$$U_i^{\text{NET}} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, j \neq i}^M (\alpha \cdot P_{i-j}^{\text{P2P,e}} + \beta \cdot P_{i-j}^{\text{P2P,h}}) \quad (6)$$

式中: M 为参与合作博弈的局中人数量,即 MSP 数量; α 、 β 分别为电能、热能管道传输成本系数; $P_{i-j}^{\text{P2P,e}}$ 、 $P_{i-j}^{\text{P2P,h}}$ 分别为联盟内微网 i 向微网 j 输送的电功率与热功率。

$$U_i^{\text{P2P}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, j \neq i}^M (P_{i-j}^{\text{P2P,e}} \cdot q_{i-j}^e + P_{i-j}^{\text{P2P,h}} \cdot q_{i-j}^h) \quad (7)$$

式中, q_{i-j}^e 、 q_{i-j}^h 分别为联盟内微网 i 向微网 j 输送的电功率价格与热功率价格。

$$U_i^{\text{DR}} = \sum_{t=1}^T (C_z^{\text{CUT}} \cdot P_z^{\text{CUT}} + C_z^{\text{TRAN}} \cdot P_z^{\text{TRAN}} \cdot \mu_{z,t}^{\text{TRAN}}) \quad (8)$$

式中, C_z^{CUT} 、 C_z^{TRAN} 分别为能源 z 的可削减、可转移负荷补偿费用(z 指电、气、热能,下同); P_z^{CUT} 、 P_z^{TRAN} 分别为能源 z 的可削减负荷功率和可转移负荷在 t 时刻转入或转出的负荷; $\mu_{z,t}^{\text{TRAN}}$ 为能源 z 的可转移负荷转移状态,为 0-1 变量,当 $\mu_{z,t}^{\text{TRAN}}$ 为 0 时,表示 t 时刻仅转出负荷,当 $\mu_{z,t}^{\text{TRAN}}$ 为 1 时,表示存在转入负荷。

2.2 约束条件

1) 需求侧响应约束

在需求侧响应(demand response, DR)中,负荷可以通过 3 种手段进行调节,即限电、移峰和替代。针对 MMG 具备多种能源替代消费的优势,仅考虑电/气能源需求响应中的可削减负荷和可转移负荷。

$$\begin{cases} -\tau_z^{\text{CUT}} \cdot P_z^{\text{load},i} \leq P_z^{\text{CUT},t} \leq \tau_z^{\text{CUT}} \cdot P_z^{\text{load},i} \\ -\tau_z^{\text{TRAN}} \cdot P_z^{\text{load},i} \leq \Delta P_z^{\text{TRAN},t} \leq \tau_z^{\text{TRAN}} \cdot P_z^{\text{load},i} \\ \sum_{t=1}^T I_z^{\text{CUT}} \leq N_{z,\text{max}}^{\text{CUT}} \\ \sum_{t=1}^T I_z^{\text{TRAN}} \leq N_{z,\text{max}}^{\text{TRAN}} \\ \sum_{t=1}^T \Delta P_z^{\text{TRAN},t} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: τ_z^{CUT} 、 τ_z^{TRAN} 、 $P_z^{\text{load},i}$ 分别为能源 z 的可削减负荷功率、可转移负荷功率及总负荷; $\Delta P_z^{\text{TRAN},t}$ 为能源 z 在 t 时刻可转移负荷的变化量; I_z^{CUT} 、 I_z^{TRAN} 分别为能源 z 负荷的可削减次数和可转移次数; $N_{z,\text{max}}^{\text{CUT}}$ 、 $N_{z,\text{max}}^{\text{TRAN}}$ 分别为最大可削减次数和最大可转移次数。

2) 储能装置约束

在调度周期结束后,为了满足下一个调度周期的

需求, 储电/气装置需要保留一定的调节裕量。因此, 调度周期结束时, 应将储电/气装置的容量恢复为初始电/气量。确保在下一个调度周期开始时, 储电/气装置具备足够的能量储备, 以应对系统的能源需求。

$$\begin{cases} E_{ES,i}^{\min} \leq E_{ES,i}^t \leq E_{ES,i}^{\max} \\ W_{GS,i}^{\min} \leq W_{GS,i}^t \leq W_{GS,i}^{\max} \\ E_{ES,i}^t = E_{ES,i}^{t+T} \\ W_{GS,i}^t = W_{GS,i}^{t+T} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $E_{ES,i}^t$ 、 $W_{GS,i}^t$ 分别为 t 时刻储电、储气装置的实时容量; $E_{ES,i}^{\max}$ 、 $E_{ES,i}^{\min}$ 分别为储电装置的容量上、下限; $W_{GS,i}^{\max}$ 、 $W_{GS,i}^{\min}$ 分别为储气装置的容量上、下限; $E_{ES,i}^{t+T}$ 、 $W_{GS,i}^{t+T}$ 分别为一个调度周期结束后储电、储气装置的实时容量。

3) 能源设备运行约束

$$\begin{cases} \chi^X \cdot P_{\min}^X \leq P^X \leq \chi^X \cdot P_{\max}^X \\ 0 \leq P_{gc}^{\text{new}} \leq P_{gc}^{\text{new,max}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: χ^X 为 0-1 变量, 表示该设备是否投入运行, $\chi^X = 1$, 表示投入运行, $\chi^X = 0$, 表示不投入运行; P^X 为系统内某设备运行时的功率; P_{\max}^X 、 P_{\min}^X 分别为其最大功率与最小功率; P_{gc}^{new} 、 $P_{gc}^{\text{new,max}}$ 分别为新能源发电并网的实际功率与最大发电功率。

4) 各主体 P2P 能源交易约束

联盟内各主体间的电、热能源交易量(接收或输出)须在传输功率的上、下限内, 并且各主体间的接收、输出能源量相等, 即

$$\begin{cases} -P_{i-j,\max}^{\text{P2P},z} \leq P_{i-j}^{\text{P2P},z} \leq P_{i-j,\max}^{\text{P2P},z} \\ P_{i-j}^{\text{P2P},z} + P_{j-i}^{\text{P2P},z} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{i-j}^{\text{P2P},z}$ 表示联盟内微电网 i 向 j 输送的第 z 种能源功率, 即电功率与热功率; $P_{i-j,\max}^{\text{P2P},z}$ 表示联盟内各主体间交易电、热功率的最大值。

5) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{ub,i}^c + P_{gc}^{\text{new},i} + P_{CHP,i}^c + P_{ES,i}^{\text{out}} + P_{DR,i}^c = \\ \sum_{j=1, j \neq i}^M P_{i-j}^{\text{P2P},c} + P_{load,i}^c + P_{ES,i}^{\text{in}} \\ P_{CHP,i}^g + P_{GB,i}^g + P_{GS,i}^{\text{in}} + P_{load,i}^g = P_{ub,i}^g + P_{GS,i}^{\text{out}} + P_{DR,i}^g \\ P_{CHP,i}^h + P_{GB,i}^h + P_{DR,i}^h = \sum_{j=1, j \neq i}^M P_{i-j}^{\text{P2P},h} + P_{load,i}^h \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{CHP,i}^c$ 、 $P_{CHP,i}^h$ 分别为 CHP 机组运行输出的电、

热功率; $P_{CHP,i}^g$ 为输入 CHP 机组的天然气的量; $P_{ES,i}^{\text{in}}$ 、 $P_{ES,i}^{\text{out}}$ 分别为储电设备充、放电功率; $P_{DR,i}^c$ 、 $P_{DR,i}^g$ 、 $P_{DR,i}^h$ 分别为系统需求响应后的电、气、热负荷功率; $P_{GB,i}^g$ 为输入燃气锅炉的天然气的功率; $P_{GB,i}^h$ 为燃气锅炉产热功率; $P_{GS,i}^{\text{in}}$ 、 $P_{GS,i}^{\text{out}}$ 分别为储气设备的存、放气功率; $P_{load,i}^c$ 、 $P_{load,i}^g$ 、 $P_{load,i}^h$ 分别为电、气、热负荷的总功率。

3 合作联盟与 Nash 议价模型求解

3.1 Nash 议价模型

本文假设微电网服务商具有自主选择与其他 MSP 进行能源交易的类型和交易量的权利。然而, 为了参与合作能源交易, MSP 需要与区域内其他服务商进行沟通和协商, 以制定适当的电力或热能交易策略, 进一步降低自身成本。如果无法达成降低成本的协议, 该服务商将拒绝与其他 MSP 进行能源交易。因此, 将最小化 MSP 运行成本优化问题视为一个合作博弈模型。为达到最佳结果, 各服务商可以利用 Nash 议价交易方法进行协商, 以进一步降低系统运营成本。

Nash 议价作为一种合作谈判理论, 其核心思想包括个体理性、帕累托最优、对称性、不变性和独立性, 强调了个体理性和资源分配的公平性, 为有效合作提供了有利的分析工具。在谈判过程中, 博弈者可以运用 Nash 议价的原则追求最优解, 实现合作最大化, 从而达到共赢的目的。

在 Nash 议价模型中, 每个 MSP 需要制定自己的交易策略, 包括交易量和交易价格, 以最大程度地降低自身成本。通过与其他服务商进行协商, 共同制定一种合理的交易方案, 以实现整体的成本最小化目标。Nash 议价的标准模型数学表达式为

$$\begin{cases} \max \prod_{i=1}^M [U_i^c - U_i^0] \\ \text{s.t. } U_i^c - U_i^0 \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_i^c 为 Nash 议价主体的效益; U_i^0 为局中人参与合作博弈前的最优成本, 即合作博弈中 Nash 议价的谈判破裂点; $U_i^c - U_i^0$ 表示各主体参与合作博弈后得到的支付效益。

3.2 Nash 议价模型等价转换

Nash 议价模型式(14)的优化变量为联盟内各主体间的能源交易量及交易价格, 也为一个非凸且非线性多变量耦合优化问题, 直接求解相对困难, 因此, 本文将其转换为顺序求解优化的两个子问题

P1(微网联盟合作博弈成本最小化)和子问题 P2(合作联盟主体收益分配最大化),依次顺序求解。Nash 议价模型式(14)等效为

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^M \ln(U_i^C - U_i^0) \\ \text{s.t. } U_i^C - U_i^0 \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

合作联盟中,由于参与博弈的各主体间进行能源交易的交易能源量累加总和为 0,能源交易价格相等,即

$$\sum_{i=1}^M U_i^{\text{P2P}} = 0 \quad (16)$$

令 $U_i^{\text{Nash}} = U_i^C - U_i^0$, 则

$$\sum_{i=1}^M U_i^{\text{Nash}} = \sum_{i=1}^M [(U_i^{\text{BUY}} + U_i^{\text{OP}} + U_i^{\text{NET}} + U_i^{\text{DR}}) - U_i^0] \quad (17)$$

令 $U_i^{\text{MMG}} = U_i^{\text{BUY}} + U_i^{\text{OP}} + U_i^{\text{NET}} + U_i^{\text{DR}}$, 由于 U_i^0 是博弈者参与合作博弈前的最优成本,也是一个固定值,则式(17)可以转化为

$$\min U^{\text{MMG}} = \sum_{i=1}^M (U_i^{\text{BUY}} + U_i^{\text{OP}} + U_i^{\text{NET}} + U_i^{\text{DR}}) \quad (18)$$

式(18)表示子问题 P1 的目标函数,利用分布式优化算法进行迭代求解,得到参与博弈各主体的优化运行策略,将求得的解 $P_{i-j}^{\text{P2P},z*}$ 、 $U_i^{\text{BUY}*}$ 、 $U_i^{\text{OP}*}$ 、 $U_i^{\text{NET}*}$ 、 $U_i^{\text{DR}*}$ 代入到式(15),可得子问题 P2 的目标函数,如式(19)所示。

$$\max \sum_{i=1}^M \ln \left[\sum_{t=1}^T \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M (P_{i-j}^{\text{P2P},z*} \cdot q_{i-j}^z) + U_i^{\text{MMG}*} - U_i^0 \right] \quad (19)$$

式中:带“*”的变量均为子问题 P1 的最优解; $U_i^{\text{MMG}*}$ 表示合作联盟子问题 P1 中求得的最优效益; q_{i-j}^z 为能源交易价格。

3.3 分布式优化算法求解

在求解 Nash 议价模型时,可将模型的求解等价求解两个子问题:子问题 P1 关注微网联盟的合作博弈成本最小化,通过合理分配资源来最小化合作过程中的成本,确保微网联盟整体效益最大化;子问题 P2 关注合作联盟主体收益分配的最大化,合理划分各个主体在合作中所获得的收益,以满足各方的利益和公平性。本文采用交替方向乘子法(ADMM)将原问题分解为两个较小的子问题,构建了一个分布式优化架构,用于解决多区域微电网服务商的能源交易问题,并通过交替更新变量和引入乘子来逐步求解,通过顺序依次求解 P1 和 P2,可以获得原始问题的最优解。由于采用了顺序优化的方法,解决过程首先集中在微网联盟合作博弈成本

最小化(P1),待其达到迭代收敛后,再求解合作联盟各主体间收益分配最大化(P2)。

3.3.1 微网联盟合作博弈成本最小化(P1)

根据 3.2 节可以得到子问题 P1 的表达式。

$$\begin{cases} \min U^{\text{MMG}} = \sum_{i=1}^M (U_i^{\text{BUY}} + U_i^{\text{OP}} + U_i^{\text{NET}} + U_i^{\text{DR}}) \\ \text{s.t. 式(2)一式(4)、式(6)一式(11)} \end{cases} \quad (20)$$

求解子问题 P1 时,将联盟内各主体间的能源交易功率 $P_{i-j}^{\text{P2P},z}$ 作为耦合变量,并使其满足 $P_{i-j}^{\text{P2P},z} = -P_{j-i}^{\text{P2P},z}$, z 指交易能源种类,即联盟内主体 i 与主体 j 间达成了电热功率交易的共识。利用 ADMM 算法求解微网联盟合作博弈成本最小化子问题 P1,具体如下所述。

1) 构建子问题 P1 的增广拉格朗日函数 L_i^{P1} 。

$$\begin{aligned} \min L_i^{\text{P1}} = & U_i^{\text{MMG}} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \phi_{i-j}^{\text{P1}} \cdot (P_{i-j}^{\text{P2P},z} + P_{j-i}^{\text{P2P},z}) + \\ & \frac{\rho^{\text{P1}}}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \|P_{i-j}^{\text{P2P},z} + P_{j-i}^{\text{P2P},z}\|_2^2 \end{aligned} \quad (21)$$

式中, ϕ_{i-j}^{P1} 、 ρ^{P1} 分别表示子问题 P1 特征函数的拉格朗日乘子和惩罚参数(设为 10^{-4})。

2) 子问题 P1 中,各个主体更新自身的交易能源策略,各主体间达成仅交换交易能源信息的协议。每一步只更新一个变量,固定另外两个变量,通过式(22)进行交替重复更新。

$$\begin{cases} P_{i-j}^{\text{P2P},z}(k+1) = \arg \min L_i^{\text{P1}} \begin{bmatrix} \phi_{i-j}^{\text{P1}}(k), \\ P_{i-j}^{\text{P2P},z}(k), P_{j-i}^{\text{P2P},z}(k) \end{bmatrix} \\ P_{j-i}^{\text{P2P},z}(k+1) = \arg \min L_j^{\text{P1}} \begin{bmatrix} \phi_{j-i}^{\text{P1}}(k), \\ P_{i-j}^{\text{P2P},z}(k), P_{j-i}^{\text{P2P},z}(k) \end{bmatrix} \\ \phi_{i-j}^{\text{P1}}(k+1) = \phi_{i-j}^{\text{P1}}(k) + \rho^{\text{P1}} (P_{i-j}^{\text{P2P},z} + P_{j-i}^{\text{P2P},z}) \end{cases} \quad (22)$$

式中, k 表示子问题 P1 的更新迭代次数。

3) 联盟内主体 i 与主体 j 通过式(22)先后更新其决策变量 $P_{i-j}^{\text{P2P},z}(k+1)$ 、 $P_{j-i}^{\text{P2P},z}(k+1)$,重复循环迭代,直至各主体交替更新得到其能源交易策略变量,最后按照拉格朗日乘子规则交替更新变量 $\phi_{i-j}^{\text{P1}}(k+1)$,令子问题 P1 的迭代更新次数 $k = k + 1$,判断基于 ADMM 的子问题 P1 的收敛情况,当交替更新使其达到收敛条件后,终止迭代,否则将继续下一轮迭代更新,直至达到收敛,收敛条件如式(23)所示。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \|P_{i-j}^{\text{P2P},z}(k+1) - P_{i-j}^{\text{P2P},z}(k)\|_2^2 \leq \delta^{\text{P1}} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \|P_{i-j}^{\text{P2P},z}(k) - P_{j-i}^{\text{P2P},z}(k)\|_2^2 \leq \varepsilon^{\text{P1}} \end{cases} \quad (23)$$

式中, δ^{P1} 、 ε^{P1} 分别表示子问题 P1 设定的对偶残差收敛值及其原始残差。

3.3.2 合作联盟各主体收益分配最大化(P2)

根据 3.2 节可得子问题 P2 的表达式为

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^M \ln \left[\sum_{t=1}^T \sum_{j=1, j \neq i}^M (P_{i-j}^{P2P, z^*} \cdot q_{i-j}^z) + U_i^{MMG^*} - U_i^0 \right] \\ \text{s.t.} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, j \neq i}^M (P_{i-j}^{P2P, z^*} \cdot q_{i-j}^z) + U_i^{MMG^*} \geq U_i^0 \\ U_i^{MMG^*} = U_i^{BUY^*} + U_i^{OP^*} + U_i^{NET^*} + U_i^{DR^*} \end{cases} \quad (24)$$

求解子问题 P2 时, 将联盟内各主体间的能源交易价格 q_{i-j}^z 作为耦合变量, 即 $q_{i-j}^z = q_{j-i}^z$, 表明联盟内主体 i 与主体 j 间达成了电热功率交易价格的共识。利用 ADMM 求解合作联盟各主体收益分配最大化子问题 P2, 具体如下所述。

1) 构建子问题 P2 的增广拉格朗日函数 L_i^{P2} 。

$$\begin{aligned} \min L_i^{P2} = & -\ln \left[\sum_{t=1}^T \sum_{j=1, j \neq i}^M (P_{i-j}^{P2P, z^*} \cdot q_{i-j}^z) + U_i^{MMG^*} - U_i^0 \right] + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M \phi_{i-j}^{P2} \cdot (q_{i-j}^z + q_{j-i}^z) + \frac{\rho^{P2}}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \|q_{i-j}^z + q_{j-i}^z\|_2^2 \end{aligned} \quad (25)$$

式中, ϕ_{i-j}^{P2} 、 ρ^{P2} 分别表示子问题 P2 特征函数的拉格朗日乘子和惩罚参数(设为 1)。

2) 子问题 P2 中, 各主体更新自身的能源交易价格策略, 各主体间达成仅交换迭代更新后的价格信息的协议, 通过式(26)进行交替更新。

$$\begin{cases} q_{i-j}^z(w+1) = \arg \min L_i^{P2} \left[\phi_{i-j}^{P2}(w), \right. \\ \left. q_{i-j}^z(w), q_{j-i}^z(w) \right] \\ q_{j-i}^z(w+1) = \arg \min L_j^{P2} \left[\phi_{j-i}^{P2}(w), \right. \\ \left. q_{i-j}^z(w), q_{j-i}^z(w) \right] \\ \phi_{j-i}^{P2}(w+1) = \phi_{j-i}^{P2}(w) + \rho^{P2} (q_{i-j}^z + q_{j-i}^z) \end{cases} \quad (26)$$

式中, w 表示子问题 P2 的更新迭代次数。

3) 联盟内主体 i 与主体 j 通过式(26)先后更新其决策变量 $q_{i-j}^z(w+1)$ 、 $q_{j-i}^z(w+1)$, 重复循环迭代, 最后按照拉格朗日乘子规则交替更新变量 $\phi_{i-j}^{P2}(w+1)$, 令子问题 P2 的迭代更新次数 $w = w+1$, 判断 P2 的收敛情况, 当交替更新使其达到收敛条件时, 终止迭代, 否则将继续下一轮迭代更新, 直至达到收敛, P2 的收敛条件如式(27)所示。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \|q_{i-j}^z(w+1) - q_{i-j}^z(w)\|_2^2 \leq \delta^{P2} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \|q_{i-j}^z(w) - q_{j-i}^z(w)\|_2^2 \leq \varepsilon^{P2} \end{cases} \quad (27)$$

式中, δ^{P2} 、 ε^{P2} 分别表示子问题 P2 设定的对偶残差收敛值及其原始残差。

4 算例分析

4.1 基础条件

为验证所提方法的有效性, 选取某地区多个微电网区域作为研究对象, 选定了 3 个不同类型的微电网系统, 分别为居民型微电网(MG-A)、商业型微电网(MG-B)和工业型微电网(MG-C), 并对 MMSP 合作博弈优化策略进行分析, 其中, MG-A 与 MG-B 均以光伏发电为主, MG-C 以风电为主, 并将其系统内的热电联产机组(CHP)设定在“以热定电”模式下运行, 以反映该地区供热机组装机占比较高、热负荷水平较高以及冬季供热时间较长的实际情况。每个微电网系统由不同的微电网服务商 A、B 和 C 进行运营管理, 即 MSP-A、MSP-B、MSP-C。

在能源交易方面, 各区域向上级能源网购电、购气, 且购能价格均为阶梯型价格, 具体电、热价格详见表 1。

表 1 购能价格

Table 1 Purchase price of energy

交易能源	类型	时段	价格/(元/kWh)	
购电	峰时	11:00—22:00	1.20	
		08:00—10:00	0.75	
		23:00—24:00		
	谷时	01:00—07:00	0.40	
		峰时	08:00—12:00	0.394
			17:00—19:00	
购气	平时	06:00—07:00	0.308	
		13:00—16:00		
	谷时	20:00—23:00	0.227	
		24:00—05:00		

4.2 基础负荷数据

图 3 为联盟内各微网系统的基本负荷情况, 可以观察到由于各 MG 间用户属性各不相同, 因此三个 MG 的电、热、气负荷特性有所不同。在居民型 MG-A 中, 因其规划的特征, 故新能源发电方式仅为光伏发电, 在 07:00—11:00、18:00—22:00 时段内, 电、气负荷较为集中, 其他时段明显降低, 而热负荷使用量在夜间较高。在商业型 MG-B 中, 对于电、气、热负荷需求均集中在 08:00—21:00 时段, 此时 MG-B 需要合理调度和供应电、气、热等能源, 以满足商业用户的各项运营需求, 而在夜间, 负荷水平较低, 需求相对较少, 针对 MG-B 的规划的特征, 系统内仅安装光伏发电, 发电时段为

06:00—18:00。在工业型 MG-C 中，以工业用户为主要对象，并采用风电作为新能源类型，其电、气、热负荷需求均较大，用电设备和生产过程对能源的消耗相对较大，超过 MG-A 和 MG-B 能源需求的两倍以上，其能源负荷需求在 08:00—19:00 时段内较大，其他时段内相对较小。

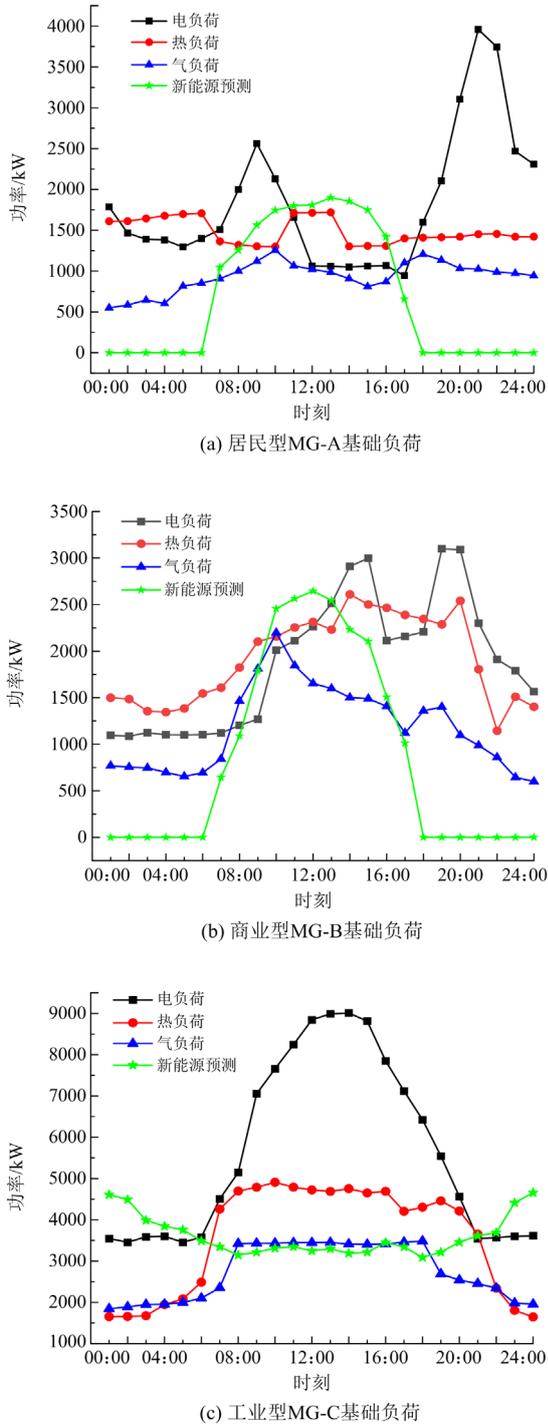


图3 多微电网系统基础负荷

Fig. 3 Multi-microgrid system base load

通过对图3的分析可以更好地了解各MG系统在冬季典型日的负荷分布和新能源出力情况，为优化能源传输与交易策略提供有益参考，分析结果有助于更好地理解微电网系统之间的差异性，为合作运行策略的制定提供了实际依据。同时，图3所示的负荷曲线也为后续仿真分析提供了重要数据基础。

4.3 联盟内各MSP间能源交易

根据图4所示的电、热负荷交易情况，微电网服务商基于日前能源市场的Nash议价交易实现了合作运行以及电、热负荷的购、售。在不同的时段内，各微电网区域采取了灵活的能源策略。

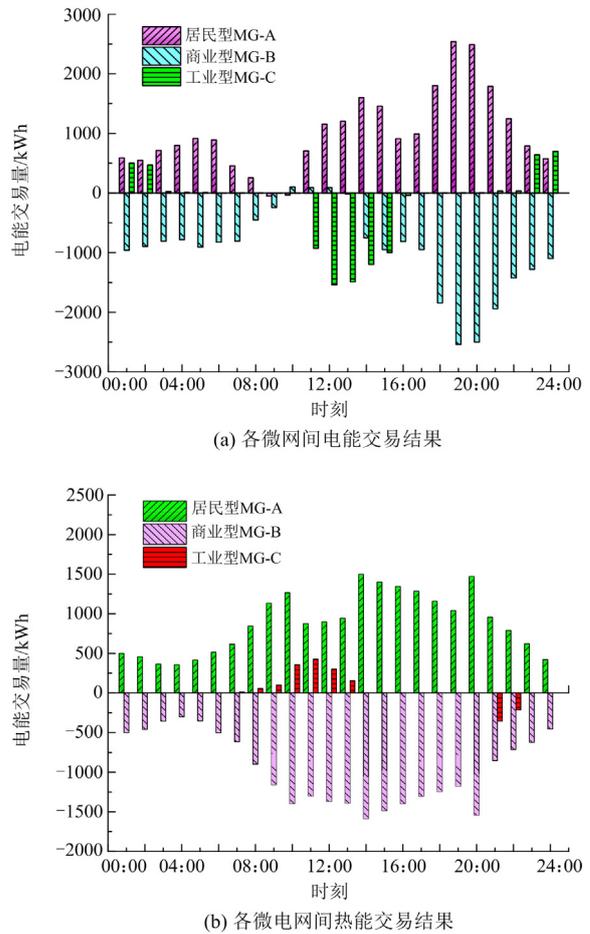


图4 主体间能源交易结果

Fig. 4 Inter-major energy trading results

MG-A 属于居民型微网，电、热负荷间联系较为紧密，其 CHP 机组在调度周期 T 内出力均保持较高水平，在一定程度上反映了居民日常生活和用能习惯，并将多余的电、热负荷售出，以降低自身运行成本。

由于在 09:00—13:00 时段光照充足，商业型 MG-B 超过了用电需求，造成光伏发电所产电能过

剩, 故优先选择出售给联盟内其他微网区域, 以降低成本。在其他时段, MG-B 主要通过外购能源来满足负荷需求。

工业型 MG-C 采用风力发电作为主要的新能源形式, 该微电网在风能资源较为充足的情况下, 能够实现较高的风电利用率, 在 01:00—02:00 和 20:00—24:00 时段内, 风力较大, 风电机组发出的电能超出本地负荷需求, 因此将不能消纳的电能出售给其他微网区域, 从而实现资源的优化配置。而在 09:00—16:00 时段内, MG-C 所需电能主要由联盟内其他微网进行供给, 造成系统内 CHP 机组出力受阻, MG-C 需要通过外购热能来满足该时段的热能需求, 确保热负荷得到满足, 保持微电网的整体稳定运行。

综上所述, 各微电网区域根据自身负荷特点和新能源出力水平, 灵活选择能源交易策略, 实现了能源的高效调配和互利共赢。

合作联盟内各 MSP 总成本的优化迭代收敛曲线如图 5 所示, 可以观察到第 23 次迭代时, 基本达到收敛状态。由于联盟内各 MSP 间的电、热能源购售情况各有不同, 导致 MSP-A、MSP-B、MSP-C 间进行博弈, 使得各 MSP 的总成本收敛趋势存在明显的差异, 即 MSP-A 的总成本随迭代次数的增加而逐渐减小, 直至达到平衡, 而 MSP-B、MSP-C 的总成本逐渐增加, 也反映了联盟内 3 个 MSP 之间的博弈过程。

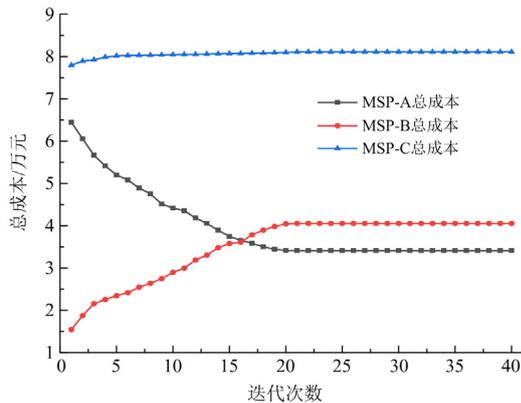


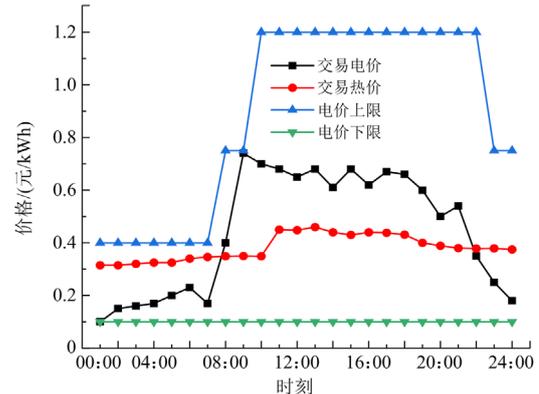
图 5 各微电网服务商总成本迭代收敛曲线

Fig. 5 Iterative convergence curves of total cost for each microgrid service provider

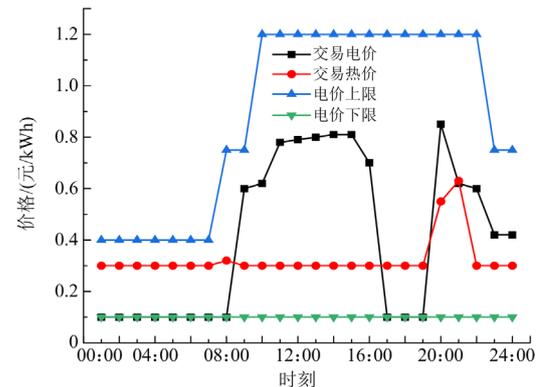
在达到 Nash 均衡状态后, 使得联盟内各 MSP 均得到更低的总成本。因此, 服务商的策略不再改变, 达成了稳定的博弈均衡状态。最终, 经过优化迭代达到平衡后, MSP-A、MSP-B、MSP-C 的总成本分别为 34 107.5 元、40 547.4 元、81 102.7 元。

以上分析表明, 通过优化迭代和博弈过程, 各 MSP 在联盟内实现了总成本的最优化, 根据自身情况灵活调整能源交易策略, 以降低自身成本, 并实现资源的有效配置和利用。最终达成的博弈均衡状态使得每个 MSP 都能够获得相对较低的总成本, 从而实现了联盟内的互利共赢。

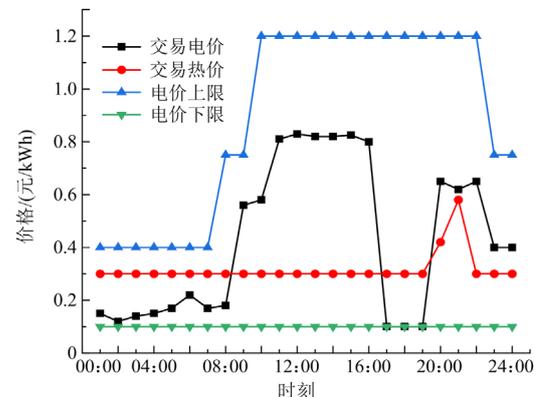
联盟内各主体间的电、热负荷交易价格如图 6 所示。各 MSP 通过 Nash 议价交易制定的价格在整



(a) MSPA-B间的电热交易价格



(b) MSPA-C间的电热交易价格



(c) MSPB-C间的电热交易价格

图 6 各主体间电、热交易价格

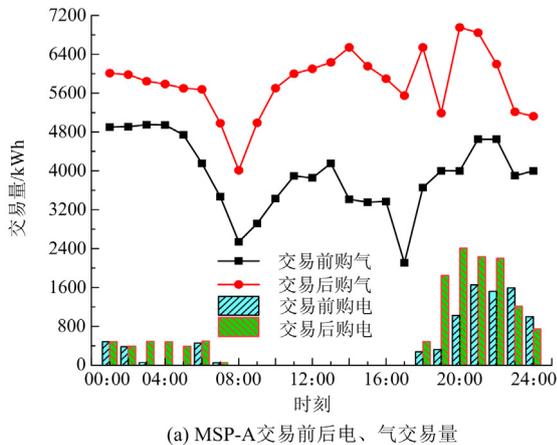
Fig. 6 Electricity and heat trading prices among microgrid service providers

个调度周期 T 内均处在该地区电价的上下限之间，且在非服务时段都较低，不存在依赖于上级电网的风险。因此，区域 MSP 间可以通过 Nash 议价交易来获取更多以较低购电价格购买的能源，或者出售过剩的电、热负荷以降低成本。通过对交易价格定价和交易策略进行灵活调整，各 MSP 之间可以实现资源的最优配置、降低成本和提高整体运行效率，并推动合作共赢的能源议价交易。

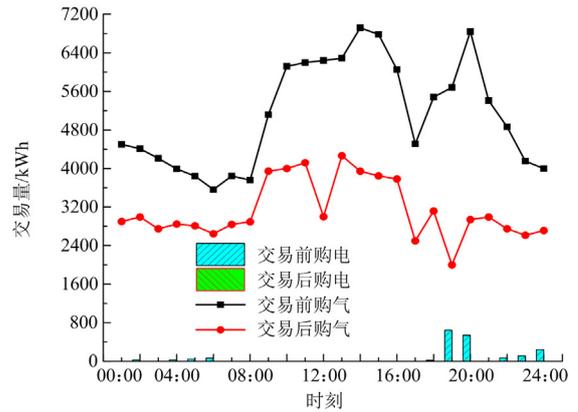
4.4 MSP 与上级能源网间的交易

联盟内各 MSP 参与能源交易前后与上级能源系统间的电、气交易情况见图 7 所示。图 7(a)表示 MG-A 在能源议价交易前后的电、气负荷交易情况，在 07:00—17:00 时段内，由于光照充足，所以此时光伏发电出力较大，通过 Nash 议价交易，在 02:00—06:00 及 18:00—22:00 时段内，由于 MSP-A 需要满足系统内 CHP 机组的长时间较高强度运行，并向外输电、热功率，因此 MSP-A 需要向上级电网购买更多的电能来满足负荷需求。同时，在整个调度周期 T 内，MSP-A 向上级气网的购气量也明显增加，以支持其热负荷需求。

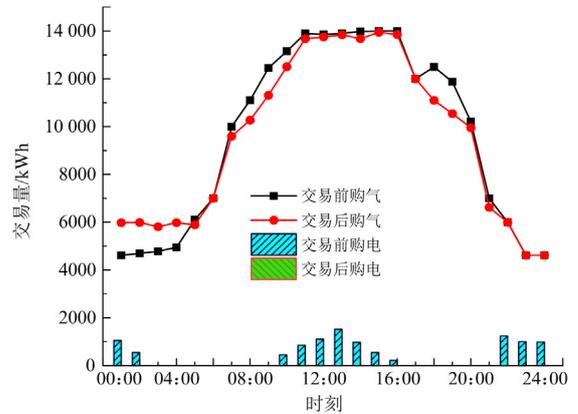
图 7(b)表示 MG-B 在能源议价交易前后的电、气负荷交易情况，可以看出，MSP-B 通过向联盟内其他 MSP 购能以满足负荷需求，使系统内各耗能设备在较低水平运行。在 Nash 议价交易后，由于 MSP-B 通过能源议价交易获得了更多且更低价的购能机会，因此 MSP-B 与上级电网、气网间的购电量、购气量大幅降低，从而降低了自身对上级能源网的依赖程度。图 7(c)表示 MG-C 在能源议价交易前后的电、气负荷交易情况，在 11:00—16:00 时段内，MSP-C 通过向联盟内其他 MSP 进行能源购售，将 MG-C 内过剩的风电出力进行消纳利用，从而减少了 MSP-C 与上级电网间的购电量，也表明 MSP-C 通过能源议价交易有效地利用了风电的剩余能源、降低了购电需求。



(a) MSP-A交易前后电、气交易量



(b) MSP-B交易前后电、气交易量



(c) MSP-C交易前后电、气交易量

图 7 各 MSP 交易前后电、气交易量

Fig. 7 Volume of electricity and gas traded before and after each MSP transaction

综上所述，通过 Nash 议价交易，MSP-A、MSP-B、MSP-C 在电、气负荷交易量方面都实现了一定程度的优化和降低。各主体通过灵活的议价交易，获得了更多的购能优势，同时降低了与上级能源网之间的能源交易量，从而提高了资源的利用效率和经济性。

4.5 各 MSP 参与能源交易前后新能源消纳情况

联盟内各主体进行能源议价交易前后的新能源消纳情况如图 8 所示。

观察图 8 可知，联盟内各主体参与能源交易后对新能源的消纳率较交易前明显升高，在参与交易前，MSP-A、MSP-B、MSP-C 分别在 12:00—16:00、09:00—13:00、01:00—02:00 及 20:00—24:00 时段内，有一部分新能源出力未被完全消纳，存在弃风弃光现象，由于各主体的新能源发电功率远超系统内各用能设备(P2G、CHP 机组等)耗能之和，导致 3 个系统内新能源出力均未被完全消纳。然而，

通过联盟内的能源议价交易, 各区域 MSP 间建立了一种基于能源交易机制的合作互联交易市场, 自由进行各主体间的能源交易, 使得之前无法消纳的风能和光能功率得到充分的消纳, 弃风、弃光现象有所缓解。

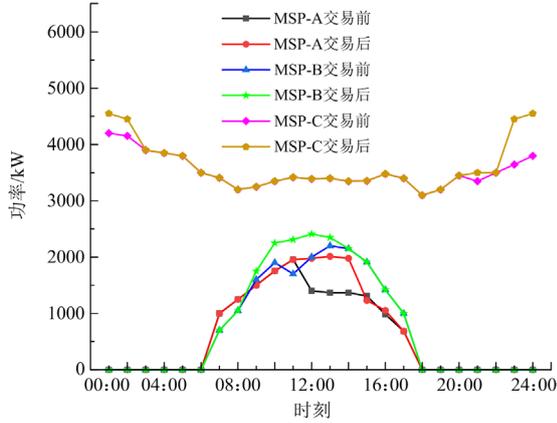


图 8 各 MSP 交易前后新能源消纳情况

Fig. 8 New energy consumption before and after each MSP transaction

不同情景下各 MSP 参与合作议价进行能源交易前后购能情况与弃风、弃光量如表 2 所示。

情景 A: 各 MSP 未参与合作运行, 即各主体独立运行且仅与上级能源系统进行能源交易;

情景 B: 各 MSP 参与合作运行, 即本文所指区域多微网系统进行议价交易。

表 2 不同情景下 MSP 购能情况与弃风、弃光量

Table 2 MSP energy purchase under different scenarios with wind and PV abandonment

kWh				
类型	MSP	购电量	购气量	弃风、弃光量
情景 A	MSP-A	7984.7	90 457.2	2168.9
	MSP-B	1989.4	121 724.3	1694.6
	MSP-C	2314.2	236 345.6	2612.1
情景 B	MSP-A	12 658.1	136 425.7	874.2
	MSP-B	0	71 654.9	568.4
	MSP-C	0	228 451.2	749.7

根据表 2 的结果显示, 在参与合作运行进行能源交易前, 联盟内 MSP-A、MSP-B、MSP-C 分别与上级能源网进行能源交易, 购电量分别为 7984.7、1989.4、2314.2 kWh, 购气量分别为 90 457.2、121 724.3、236 345.6 kWh, 同时由于新能源出力过剩, 存在弃风、弃光现象, 弃风、弃光量分别为 2168.9、1694.6、2612.1 kWh。

各 MSP 参与合作博弈进行 Nash 议价交易后,

MSP-B 和 MSP-C 内所需电能主要由 MSP-A 进行交易出售以及自身设备产电, 因此, MSP-B 和 MSP-C 不再向上级电网购买电能, 并且购气量相对于参与 Nash 议价交易前亦有明显下降。而 MSP-A 既需要满足自身 CHP 机组的较高运行水平, 又需要向联盟内其他 MSP 出售电、气, 因此, MSP-A 多购买的电量和气量分别为 4673.4 kWh 和 45 968.5 kWh。同时, 通过能源交易, 各 MSP 将之前弃风、弃光能源出力以更有效的方式消纳, 缓解了弃风、弃光。

4.6 联盟内各 MSP 的总成本分析

基于 4.5 节设定的情景 A 与情景 B, 为验证本文所提方法的经济成本及收益, 表 3 给出了基于 A、B 两种情景下的各 MSP 成本。

对各 MSP 参与 Nash 议价进行能源交易前、后进行详细的分析可知: 交易前的 MSP-A、MSP-B 和 MSP-C 总成本分别为 35 433.1 元、41 101.9 元和 82 667.1 元; 在此期间, 各主体主要依靠向上级能源网购买所需的电、气能源, 导致各主体的总成本较高。

表 3 不同情景下 MSP 成本

Table 3 MSP costs under different scenarios

元							
类型	MSP	购电成本	购气成本	运行成本	过网费用	交易费用	总成本
情景 A	A	7074.5	27 607	751.6	0	0	35 433.1
	B	1468.5	38 984	649.4	0	0	41 101.9
A	C	2384.6	78 451	18 31.5	0	0	82 667.1
情景 B	A	12 154.3	42 864.1	779.8	254.5	-21 945.2	34 107.5
	B	0	22 397.6	726.4	228.9	17 194.5	40 547.4
B	C	0	75 303.6	1954.2	90.4	3754.5	81 102.7

而参与 Nash 议价进行能源交易后, MSP-A、MSP-B 和 MSP-C 的总成本分别降低了 1325.6 元、554.5 元和 1564.4 元。其中, MSP-A 在交易后的交易费用为负, 表示 MSP-A 向联盟内其他主体出售能源的占比较高, 获得了收益, 进一步降低了总成本。MSP-B 和 MSP-C 通过能源议价交易, 将自身设备所需的电能全部从 MSP-A 购买获得, 以致于不再向上级能源网购电, 因此, MSP-B 和 MSP-C 的购电成本降为 0, MSP-A 的购电成本增加。MSP-B 的能源交易费用为 17 194.5 元, 说明其所需电、气能源仍向上级能源网进行大量购买, 尽管购能成本有所降低, 但最终总成本仍然低于各 MSP 独立运行时的总成本。由于 MSP-C 同时向联盟内其他 MSP 进行购能和售能, 获得收益, 使得 MSP-C 的交易费用低至 3754.5 元, 进一步降低了总成本。

综上所述,参与 Nash 议价进行能源交易后,各 MSP 通过更优化的能源配置和交易方式,有效降低了购能成本,实现了更高效、经济的能源资源管理。尽管面临一些额外的费用,但通过灵活的能源交易,降低了总成本,推动了多微电网系统的可持续发展并提升了能源利用效率。

5 结论

在多能源交易市场的背景下,本文探讨了区域多微电网系统的运行,构建了基于 Nash 议价理论 MSP 与多种能源交易的合作博弈模型,并进行了深入研究。

1) 建立了基于 Nash 议价理论的微电网服务商与多种能源交易的合作博弈模型。通过考虑不同主体的利益和交互行为,该模型能够准确刻画多能源交易市场中微电网服务商的博弈策略。

2) 在多微网系统中,对微电网服务商的运行优化策略进行了深入研究。采用交替方向乘子法 (ADMM) 求解模型,通过将原问题分解为子问题并引入乘子变量来实现迭代求解,实现了多微网系统的协调运行,从而降低了系统的总成本,并提高了运行的经济性和灵活性。

3) 各主体通过灵活的议价交易,获得了更多的购能优势,实现了能源的高效调配和互利共赢,同时降低了与上级能源网间的能源交易量,并充分利用了新能源剩余出力,缓解了弃风、弃光,从而提高了资源利用效率和经济性。

4) 各微电网服务商通过更优化的能源配置和交易方式,实现了更高效、更经济的能源资源管理,总成本得到明显降低,并推动了多微网系统的可持续发展并提升了能源利用效率。

后续研究中,在各主体间进行 P2P 能源交易过程中,将考虑能源交互传输损耗对博弈模型的影响以及储能系统在交易过程中的作用。

参考文献

- [1] 陈厚合, 贺昌慧, 张儒峰, 等. 工业园区微电网参与配电市场的策略性能量管理双层优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2671-2683.
CHEN Houhe, HE Changhui, ZHANG Rufeng, et al. Bi-level optimization of strategic energy management for industrial park microgrid participating in distribution market[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2671-2683.
- [2] ZHONG Keifeng, XIE Shengli, XIE Kan, et al. Cooperative P2P energy trading in active distribution networks: an MILP-based Nash bargaining solution[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1264-1276.
- [3] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69-79.
YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 69-79.
- [4] 侯慧, 王晴, 薛梦雅, 等. 计及源荷不确定性及需求响应的离网型微电网两阶段日前经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 73-85.
HOU Hui, WANG Qing, XUE Mengya, et al. Two-stage economic day-ahead dispatch of an islanded microgrid considering uncertainty and demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 73-85.
- [5] 刘任, 刘洋, 许立雄, 等. 计及分布式需求响应的多微电网系统协同优化策略[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 72-83.
LIU Ren, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Multi-microgrid system collaborative optimization strategy considering distributed demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 72-83.
- [6] 张程, 匡宇, 刘佳静, 等. 考虑需求侧管理的风光燃储微网两阶段优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 13-22.
ZHANG Cheng, KUANG Yu, LIU Jiajing, et al. Two-stage optimal scheduling of a wind, photovoltaic, gas turbine, fuel cell and storage energy microgrid considering demand-side management[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 13-22.
- [7] 刘迎澍, 陈曦, 李斌, 等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3804-3820.
LIU Yingshu, CHEN Xi, LI Bin, et al. State of art of the key technologies of multiple microgrids system[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3804-3820.
- [8] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1321, 1538.
LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and Stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1307-1321, 1538.
- [9] 黄柯蒙, 刘继春. 计及需求响应和热电联产的多微电网联盟优化调度方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 107-115.
HUANG Kemeng, LIU Jichun. Optimal dispatch method of multi-microgrid alliance considering demand response & CHP[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 107-115.
- [10] 李蕊睿, 李奇, 蒲雨辰, 等. 计及功率交互约束的含电-氢混合储能的多微电网系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 53-64.
LI Ruirui, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system considering power interaction constraints[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 53-64.

- [11] 符杨, 邢馨月, 李振坤, 等. 基于主从博弈的微电网群多阶段鲁棒优化规划[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 1-8. FU Yang, XING Xinyue, LI Zhenkun, et al. Multi-stage robust optimization planning of microgrid clusters based on master-slave game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 1-8.
- [12] JIA Yuchen, WEN Peng, YAN Yongsheng, et al. Joint operation and transaction mode of rural multi microgrid and distribution network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 14409-14421.
- [13] 田海东, 何山. 基于主从博弈的配电网与多微网双层优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 55-66. TIAN Haidong, HE Shan. Double-layer optimization of distribution networks and multi-microgrids based on master-slave game[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 55-66.
- [14] HOTALING C, BIRD S, HEINTZELMAN M D, Willingness to pay for microgrids to enhance community resilience[J]. Energy Policy, 2021, 154: 112248.
- [15] 赵军, 张敏, 张世锋, 等. 计及碳交易和新能源不确定性的多微网合作运行优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 62-71. ZHAO Jun, ZHANG Min, ZHANG Shifeng, et al. Optimization strategy of multi-microgrid cooperative operation considering carbon trading and renewable energy uncertainties[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 62-71.
- [16] SALYANI P, NOUROLLAHI R, ZARE K, et al. A cooperative game approach for optimal resiliency-oriented scheduling of transactive multiple microgrids[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 89: 104358.
- [17] 李崎勇, 赵新哲, 郑一飞, 等. 基于纳什谈判考虑能源共享的区域综合能源系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 22-32. LI Jiyong, ZHAO Xinzhe, ZHENG Yifei, et al. Optimal configuration of a regional integrated energy system considering energy sharing based on Nash negotiation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 22-32.
- [18] 杨茂, 王金鑫. 考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 973-985. YANG Mao, WANG Jinxin. Optimal scheduling of islanded microgrid considering uncertain output of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 973-985.
- [19] 刘浩, 张晓滨, 黄晨曦, 等. 高渗透率光伏微电网能量优化管理策略的研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 129-135, 143. LIU Hao, ZHANG Xiaobin, HUANG Chenxi, et al. Research on energy optimization management strategies for high permeability photovoltaic microgrids[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 129-135, 143.
- [20] WEI Chun, SHEN Zhuzheng, XIAO Dongliang, et al. An optimal scheduling strategy for peer-to-peer trading in interconnected microgrids based on RO and Nash bargaining[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117024.
- [21] 王瀚琳, 刘洋, 许立雄, 等. 基于主从博弈理论的社区微电网-配网能量交易模型研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 68-75. WANG Hanlin, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Research on community micro-grid distribution network energy trading model based on leader-follower game theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 68-75.
- [22] LI Zhengmao, XU Yan. Temporally-coordinated optimal operation of a multi-energy microgrid under diverse uncertainties[J]. Applied Energy, 2019, 240: 719-729.
- [23] 陈乐飞, 朱自伟, 王凯, 等. 基于混合博弈的配电网与多综合能源微网优化运行[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2229-2243. CHEN Lefei, ZHU Ziwei, WANG Kai, et al. Optimal Operation of distribution networks and multiple integrated energy microgrids based on mixed game theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2229-2243.
- [24] 蒋从伟, 欧庆和, 吴仲超, 等. 基于联盟博弈的多微网共享储能联合配置与优化[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 11-21. JIANG Congwei, OU Qinghe, WU Zhongchao, et al. Joint configuration and optimization of multi-microgrid shared energy storage based on coalition game[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 11-21.
- [25] LÜ Zhilin, LAI Yongfa, XIAO Yang, et al. Cooperative game consistency optimal strategy of multi-microgrid system considering flexible load[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(3): 7378-7399.
- [26] 李得民, 吴在军, 赵波. 多微电网系统的合作博弈模型及其优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5140-5154. LI Demin, WU Zaijun, ZHAO Bo. Cooperative game model and optimal dispatch strategy of multi-microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5140-5154.
- [27] CHEN Weidong, WANG Junnan, CHEN Jijia, et al. Research on day-ahead transactions between multi-microgrid based on cooperative game model[J]. Applied Energy, 2022, 316: 119106.

收稿日期: 2023-09-05; 修回日期: 2023-11-16

作者简介:

田海东(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多微网系统能量管理; E-mail: 1785813036@qq.com

何山(1974—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网控制; E-mail: A2741453682@163.com

艾纯玉(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为混沌控制。E-mail: 2741453682@qq.com

(编辑 姜新丽)