

信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化

司方远^{1,2} 汪晋宽¹ 韩英华² 赵强²

摘要 针对能源电力系统的优化管理与控制问题,提出了一种信息物理融合的智慧能源系统(Intelligent energy systems, IES)多级对等协同优化方法.在信息物理融合能源系统(Cyber-physical energy systems, CPES)的基础上,构建了智慧能源系统的局域和广域两级协同优化架构.综合考虑产消者能源实体对等交互过程中的社会福利、供求平衡和需求意愿等因素,基于 Stone-Geary 函数和双向拍卖机制构建了智慧能源系统能量优化模型,给出了通过收敛判定域引导的全局随机寻优与区域定向寻优策略,有效地提高了算法的局部搜索能力.此外,通过双向拍卖机制的理性定价以及智能合约的辅助服务,有效地实现了用户友好的对等交易模式.仿真实例表明,在社会福利最大化的前提下可获得产消者电力资源最优分配结果,进一步验证了本文方法的有效性和可行性.

关键词 信息物理融合能源系统,智慧能源系统,产消者,协同优化,双向拍卖机制,智能合约

引用格式 司方远,汪晋宽,韩英华,赵强.信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化.自动化学报,2019,45(1):84-97

DOI 10.16383/j.aas.2018.c180368

Multilevel Peer-to-Peer Co-optimization for Cyber-physical Intelligent Energy Systems

SI Fang-Yuan^{1,2} WANG Jin-Kuan¹ HAN Ying-Hua² ZHAO Qiang²

Abstract A multilevel peer-to-peer co-optimization method for cyber-physical intelligent energy systems (IES) is proposed to analyze the optimal control and management problem of energy power systems. On the basis of the cyber-physical energy system (CPES), a co-optimization architecture of local and wide-area levels for intelligent energy system is constructed. With the help of Stone-Geary utility function and double auction mechanism, an energy optimization model for intelligent energy system is constructed in consideration of social welfare, supply-demand balance and demand willingness in the peer-to-peer interaction process of prosumers. At the same time, the local search ability of the intelligent optimization algorithm is further improved by the guidance of convergence judgment domain as well as the combination strategy of global random search and directional search. In addition, the user-friendly peer-to-peer trading mode is effectively realized through rational pricing of double auction mechanism and the auxiliary services of smart contract. Simulation results show that the optimal allocation of power resources can be obtained under the premise of maximizing social welfare, which further illustrates the effectiveness and feasibility of this method.

Key words Cyber-physical energy systems (CPES), intelligent energy systems (IES), prosumers, collaborative optimization, double auction, smart contract

Citation Si Fang-Yuan, Wang Jin-Kuan, Han Ying-Hua, Zhao Qiang. Multilevel peer-to-peer co-optimization for cyber-physical intelligent energy systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 84-97

收稿日期 2018-05-30 录用日期 2018-08-27
Manuscript received May 30, 2018; accepted August 27, 2018
国家重点研究发展计划(2016YFB0901900),河北省自然科学基金(F2017501107),东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室开放课题(2017RALKFKT003),东北大学秦皇岛分校校内基金(XNB201803, XNK201603)资助
Supported by National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901900), Natural Science Foundation of Hebei Province (F2017501107), Open Research Fund from the State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University (2017RALKFKT003), and Foundation of Northeastern University at Qinhuangdao (XNB201803, XNK201603)

本文责任编辑 王占山
Recommended by Associate Editor WANG Zhan-Shan
1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819 2. 东北大学秦皇岛分校 秦皇岛 066004
1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819 2. Northeastern University

随着分布式可再生能源技术的推广及售电侧市场逐步开放,电力能源在生产、传输、存储、消费和交易等各个环节呈现出信息与物理深度融合的特点,电力网络基础设施作为物理系统便于与集通信、计算和控制于一身的信息系统无缝集成和互动.因此,信息物理融合系统(Cyber-physical systems, CPS)^[1-2]正是上述特定集成和交互问题的解决方案,而信息物理融合能源系统(Cyber-physical energy systems, CPES)^[3]已成为当前工业与能源领域研究的热点问题,并推动着能源电力系统从数字化、信息化向智能化、金融化的方向发展.

at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004

目前, 微电网、智能电网以及能源互联网都是典型的 CPES 系统. 其中, 微电网和智能电网取得成功的关键在于利用 CPES 实现信息系统与电力能源物理系统的高效互动, 以有效提供经济、安全和可持续的能源供应^[4-6]. 而能源互联网的技术需求源于能源供需矛盾和新型大规模可再生能源的接入, 同时强调通过能量枢纽和能源路由器实现能源流、信息流和业务流的深度融合^[7-9]. 此外, 能源的本质是服务于人类社会的. 反过来, 人类活动直接参与调控能源生产、消费与交易过程. 为此, Zhang 等^[10] 提出并诠释了社会能源概念, 结合能源的生产、消费过程 and 环境保护等方面深入剖析了人类活动与能源系统的交互作用. 考虑这种交互, 人类将有机会向社会挖掘第五燃料——节能. 文献 [11] 从复杂系统理论角度结合知识自动化理念进一步提出了基于信息-物理-社会融合系统的能源 5.0. 因此, 能源系统迫切需要与新的 CPS 技术相融合, 以构建满足人类社会需求的智慧能源系统 (Intelligent energy systems, IES)^[12-14]. IES 系统的精髓是智慧, 是集信息网络和能源物理网络于一体, 综合考虑能源的社会和技术双重属性, 拥有自组织、自协调、自治理等功能, 具有开放、共享和即插即用等特征, 并满足安全、经济和可持续等社会需求的未来能源形式, 是智慧时代背景下能源革命的迫切需要.

在此背景下, 分布式能源管理方法近年来受到了广泛关注和深入研究. Roche 等^[15] 对用于电网能源管理的几种多智能体系统进行了对比分析. Duan 等^[16] 采用协同合作多智能体系统, 针对电力基础设施中利益相关者的互操作性, 提出了一种未来电力零售市场运行机制. Vergados 等^[17] 将大量电力消费者聚类分别作为单一虚拟集群参与市场, 并通过减少负荷预测的不确定性来降低总能源成本. 文献 [18] 基于 Nikaido-Isoda 松弛算法进一步实现了零售电力市场的一般框架. 分布式能源通过考虑纳什均衡的价格竞标策略参与电力市场, 从而最大化售电利润.

上述文献虽然以双边或多边等形式考虑来自自由化的电力市场运行, 但涉及的能源实体均为单纯的发电侧或单纯的负荷侧, 且交互过程受双方调度中心的制约: 1) 大量发电或负荷实体的接入将导致调度中心的计算复杂度增加、运行效率降低, 难以满足电力资源优化配置的高效性和实时性; 2) 调度中心拥有发、配电设备的完全控制权, 导致能源的社会属性受到制约, 难以满足用户的个性化需求; 3) 调度中心的信任机制依赖于第三方背书, 交易实体与中心机构间容易产生信任问题, 难以确保能源交易的有效性 with 公平性; 4) 调度中心存在信息安全隐患, 中心机构一旦受到攻击, 其树形结构将导致大量信

息泄露及整个调度系统的瘫痪, 难以维护用户的隐私和能源交易的安全性.

针对上述问题, 新兴的弱中心化策略为分布式智慧能源系统能量优化调度提供了可行的技术路径. 作为虚拟货币核心技术的区块链技术^[19-20], 其特点可以归纳为: 分布式、自治、可编程、可追溯、去信任、按照智能合约执行等^[21-22], 所强调的分布式特性与分布式电力交易系统的构造不谋而和, 可编程的智能合约可解决电力能源灵活交易执行等问题. 另外, 区块链的加密机制和算法可维护产消者的隐私和电力交易的安全性, 进一步实现用户友好的电力能源交易模式.

此外, IES 系统的构建还需兼顾可再生能源和智能负荷的整合配置以及更加灵活的分布式能源优化调度和交易机制. 因此, 构建集能源生产者、能源消费者、能源买家以及能源卖家多重角色于一体的产消者 (Prosumer)^[23-25] 成为实现 IES 系统分布式能源管理的可行解决方案. 然而, 如何构建新型产消者市场分布式交易模型, 以及采用何种求解策略目前还是一个开放性的问题.

针对这一问题, Zhang 等^[26] 利用双边非合作博弈竞价搭建了产消者对等能源交易平台, 结果表明基于产消者的对等能源交易形式有助于能源的合理利用以及改善本地能源的供需平衡. 文献 [27] 基于对偶内点法求解实时电力市场平衡交易问题, 结果显示不同的控制参数对算法收敛性影响较大. 针对含风电场的电力系统的优化调度问题, 文献 [28] 提出了含风电场的实时调度模型, 重点研究了混沌量子粒子群优化方法 (Chaos quantum-behaved particle swarm optimization, CQPSO), 结果表明引入混沌初始化和混沌扰动可有效避免陷入局部最优. 针对含多种分布式能源的中压微电网优化调度问题, 文献 [29] 提出了考虑经济和环境等因素的协同优化模型, 重点研究了带有自适应权重和加速度系数的粒子群算法优化方法 (Particle swarm optimization with adaptive weight and acceleration coefficients, AWCPSO), 有效地提高了算法的收敛精度.

基于上述分析, 如何构建产消者市场的分布式交易模型, 以及如何有效应用模型信息指导优化算法的搜索过程以提高计算效率, 是 IES 系统优化运行亟待解决的问题. 本文提出了一种信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化方法. 基于经济学 Stone-Geary 效用函数和双向拍卖机制构建了分布式产消者群体电力资源优化分配的效用函数. 采用邻域再调度粒子群 (Neighborhood re-dispatch particle swarm optimization, NR-PSO) 算法^[30], 通过收敛判定域的引导并结合全局随机寻优与区域定向寻优的策略, 进一步提高了算法的收敛速度, 在

最大化社会福利的同时确保实时电力供求平衡。此外,为解决分布式电力交易的信任问题并维护产消费者的隐私和电力交易的安全性,引入可编程的智能合约技术进一步实现用户友好的电力交易模式。最后,仿真实例验证了本文方法的有效性和可行性。

1 问题描述

1.1 问题分析

IES 具有以下组合特征: 1) 混合. 如前所述, IES 是能源电力系统与 CPS 的结合. 因此, 在建模、设计、优化和分析的过程中需要有效的理论来推理动态的、离散的或连续的混合系统. 2) 异构. 由于 IES 的组件的种类和结构不一, 系统需要考虑多个网络平台 and 不同计算模型接口间的互操作性. 3) 分布式. 在 IES 架构下, 物理层包含了大量的分布式产消费者或产消费者联盟; 信息层则需要提供相应的分布式计算, 例如: 并行计算以及云计算等社会计算^[31]. 而金融层主要由分布式智能合约及分布式账本构成, 以实现分布式对等电力交易服务. 4) 大规模. 由于产消费者不断向 IES 渗透, 系统的规模不断扩张, 终将导致传感器、执行器、计算和通信设备的集群互联并产生海量相关数据. 5) 动态. IES 所处的能源政策等社会环境在不断发展, 因此系统的设计和运行必须考虑在这种动态环境下的自适应能力. 6) 人在环路 (Human-in-the-loop). 在 IES 系统电力市场交易中, 产消费者作为理性人可根据自身需求产生理性的购电意愿, 同时对交易的电能理性报价. 因此, IES 系统有必要将人在环路的角色和接口设计视为一个核心方面。

1.2 IES 多级对等协同优化架构

基于上述特征, 本文提出了 IES 多级对等协同优化架构, 如图 1 所示. 由下至上将系统分为三层网络^[32-33]: 能源物理系统网络层、能源信息系统网络层以及能源金融系统网络层。

在能源物理系统网络层, 每一个电力用户被视为一个产消费者单元, 由智能电表、能量枢纽、可再生能源发电装置 (如家用小型风力发电机、光伏面板)、储能设施 (如蓄电池) 以及智能负荷 (如智能家用电器、电动汽车) 等组成. 其中, 每个用户与其他用户相比, 各自的负荷特征存在较大差别, 且呈现出明显的波动性, 而在小范围内一天中可再生能源出力被认为是等量的, 这种供需差额将导致用户产生购/售电意愿, 且二者呈显著的正相关, 即差额越大, 用户的意愿越强烈. 因此, 有必要将若干个用户结成产消费者联盟 (图 1), 通过局域协调, 充分满足用户意愿. 然而局域协调很难实现联盟内能源供需平衡, 导致整个联盟产生向其他联盟或主电网购/售电的意愿,

因此需要通过广域协调进一步最小化能源供需的整体偏差. 其中, 能源路由器可作为能源聚合器, 完成局域协调后电能的导出或导入。

在能源信息系统网络层, 基于现有通信技术或下一代通信技术, 智能电表和能源路由器又可作为信息聚合器实时采集其他节点的能源信息, 并以数字货币 (Digital currency) 的形式完成电力交易. 此外, 能源路由器参与分布式电力优化调度. 一方面, 在产消费者联盟内, 能源路由器根据产消费者节点的能源信息协调所有节点的对等电力交易. 另一方面, 在产消费者联盟间, 底层产消费者节点可通过能源路由器与其他联盟内产消费者节点达成对等电力交易。

能源金融系统网络层基于区块链技术向用户提供可编程智能合约和分布式交易记录等服务, 其信任机制不是来源于第三方的背书, 而是所有用户对于共识机制的认同. 因此, 用户可根据自身资源情况制定合约实现对等电力交易, 并记录交易结果。

需要强调的是, 虽然系统为分层架构, 但三层网络间并不独立, 而是通过能量流、信息流与业务流优化互动, 且每一层的运行过程均受到人类意愿的制约。

1.3 IES 系统的运行

结合平行系统理论^[34], 构建 IES 系统电力调度体系, 如图 2 所示. 纵向来看, 系统可分为实际能源系统层、平行交互层和人工能源系统层. 其中, 人工能源系统通过平行交互的方式利用社会计算成果引导实际系统运行, 从而激励产消费者参与对等电力交易, 实现电力资源的有效配置. 横向来看, 实际能源系统与人工能源系统均以社会福利最大为系统的控制目标输入, 系统控制器由面向产消费者节点的局域协调控制器和面向联盟路由器的广域协调控制器构成, 二者组合互动, 以提高用户满意度。

IES 系统的电力调度依赖于事件驱动的信息交互体系. 图 3 为 $[t, t+1]$ 时段两个联盟构成的信息交互体系, 图中编号代表的事件如下:

图 3(a): t 时刻, 联盟内所有产消费者向本地能源路由器发送供需差额数据;

图 3(b): 局域范围内, 本地能源路由器根据差额数据以局域社会福利最大为目标协调对等电力交易, 各产消费者制定交易电量, 并根据双向拍卖机制理性报价, 同时向金融系统网络发送交易请求信息;

图 3(c): 金融系统认证交易信息后向能源路由器发送交易合约, 并记录交易结果;

图 3(d): 本地能源路由器通过局域协调控制器执行合约规定的局域电力调度任务;

图 3(e): 局域协调后, 部分仍存在供需差额的产消费者再次向本地能源路由器反馈差额数据;

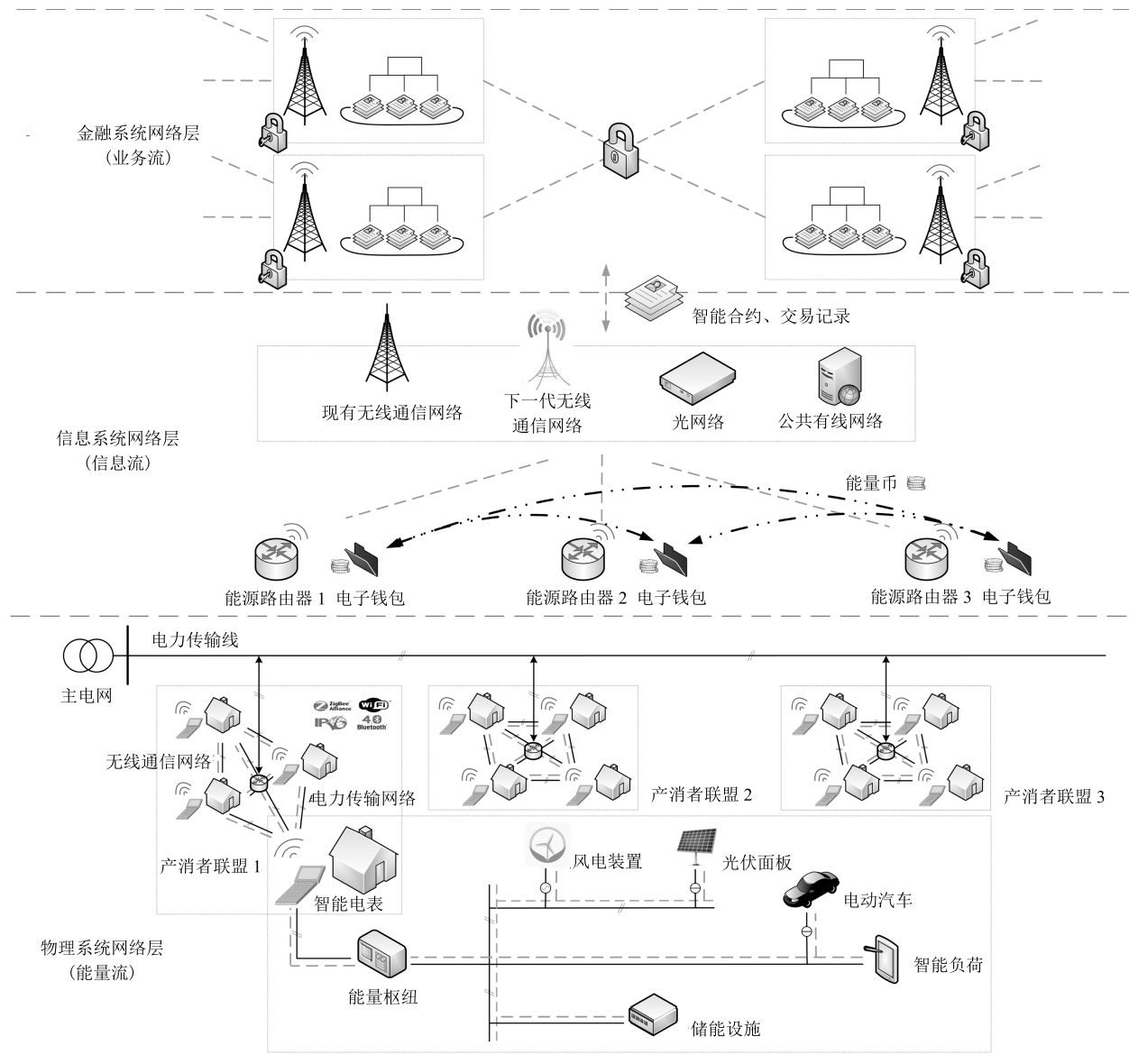


图 1 IES 系统多级对等协同优化架构

Fig. 1 The architecture of multilevel peer-to-peer co-optimization in IES

图 3(f): 广域范围内, 各能源路由器根据反馈数据以广域社会福利最大为目标协调不同联盟间产消者对等电力交易, 各产消者制定交易电量, 并根据双向拍卖机制理性报价, 同时向金融系统网络发送交易请求信息;

图 3(g): 金融系统认证交易信息后向各能源路由器发送交易合约, 并记录交易结果;

图 3(h): 各能源路由器通过广域协调控制器执行合约规定的广域电力调度任务, 并准备下一时段的信息交互。

其中, 基于区块链技术的能源金融系统网络层通过数据加密、时间戳、共识机制等技术手段, 在不依赖第三方可信背书的情况下实现用户友好的分布

式电力交易^[35-36]。

2 协同优化策略

针对上述 IES 系统, 综合考虑多级产消者对等互动过程中的社会福利、供求平衡和交易信息等因素, 重构优化问题的目标函数, 并采用智能算法进一步提高求解速度。同时, 基于智能合约技术实现用户友好的电力交易模式。

2.1 社会福利问题

在 IES 系统中, 产消者节点与联盟路由器节点实时执行由人工系统引导的电能交易以及电价定价。为量化用户对商品的需求效用, 爱尔兰统计学家

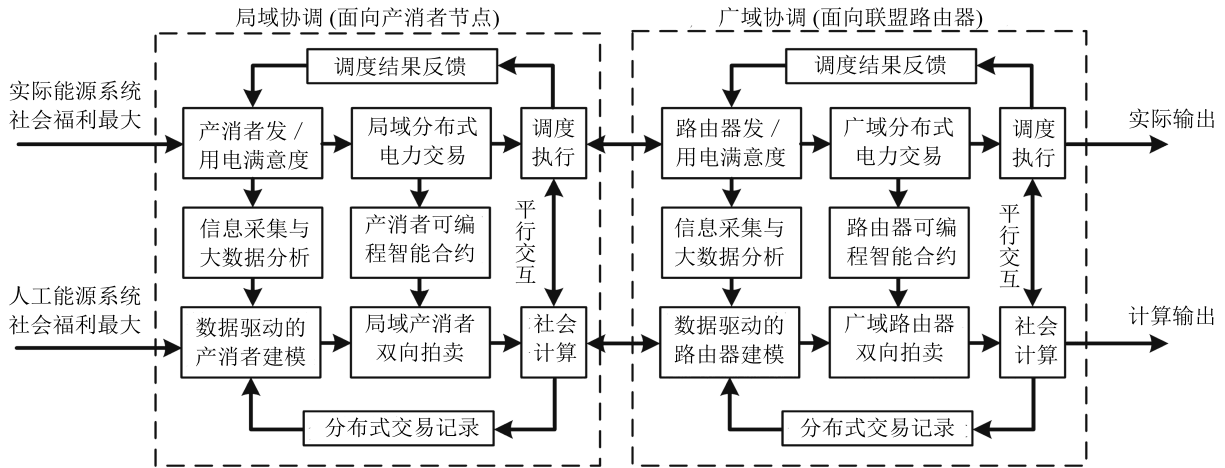


图 2 IES 系统电力调度体系

Fig. 2 The power dispatching architecture of IES

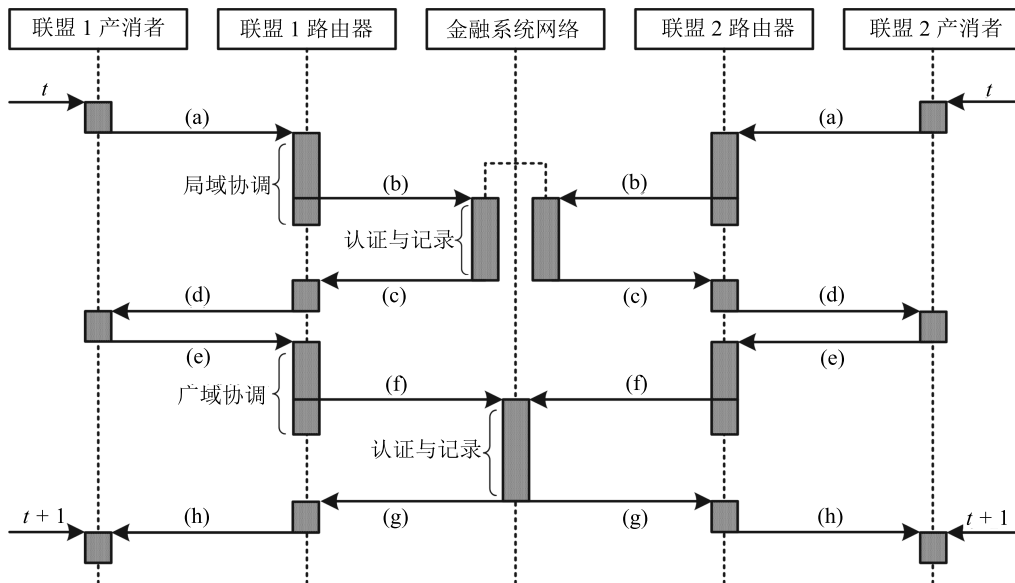


图 3 IES 系统信息交互体系

Fig. 3 The information interaction architecture of IES

Geary 在文献 [37] 中通过整合生活成本恒定效用指数,首次提出了 Stone-Geary 效用函数.在此基础上,文献 [38] 利用该效用函数模型描述电动汽车用户对车用电能的需求与其收入及电价的关系,更准确地反映了用户的消费偏好.由于电能作为商品可被用于电力交易,同时产消者节点作为理性人可根据自身需求产生理性购电意愿,产消者需求电量可以分为实际需求电量和基本需求电量,因此采用 Stone-Geary 效用函数来描述产消者对电能的需求效用.

当买方节点 i ($i = 1, 2, \dots, I$) 的发电量小于所需负荷,该节点需要向发电量丰富或负荷量较小的卖方节点 j ($j = 1, 2, \dots, J$) 请求电力交易,设实际

需求量为 $\sum_{j=1}^J cha_{ij}$ (每个买方节点 i 的需求量由 J 个卖方节点提供),基本需求量为 cha_i^{\min} ,每个买方节点的购电意愿为 w_i ,则 IES 系统的 Stone-Geary 效用函数为

$$U = \prod_{i=1}^I \left(\sum_{j=1}^J cha_{ij} - cha_i^{\min} \right)^{w_i} \quad (1)$$

对式 (1) 的最后一项进行单调变换——取对数,可得到表征每一个买方节点购电意愿的效用函数.

$$U(cha_{ij}) = w_i \ln \left(\sum_{j=1}^J cha_{ij} - cha_i^{\min} \right) \quad (2)$$

考虑 $cha_{ij} = cha_i^{\min}$ 情况下买方节点购电意愿的效用函数为零, 将式 (2) 修改为

$$U(ch_{a_{ij}}) = w_i \ln \left(\sum_{j=1}^J ch_{a_{ij}} - cha_i^{\min} + 1 \right) \quad (3)$$

对于卖方节点的效用函数, 这里考虑用二次函数来表征. 其中, 交易双方的效用函数均为正向递增的可微严格凹函数, 这里将社会福利问题定义为调度时间范围内最大化双方节点效用函数之差. 另外, 根据上述框架又将社会福利问题具体分为面向产消者节点的局域协调社会福利问题和面向联盟路由器节点的广域协调社会福利问题, 以充分挖掘可再生能源的利用效率, 提高系统全局经济效益.

2.1.1 局域协调 (节点级)

在每一个产消者联盟内, 定义产消者买方节点 $x = 1, 2, \dots, X$, 卖方节点 $y = 1, 2, \dots, Y$, 双方交易的电量分别为 cha_{xy}^L 和 dis_{yx}^L , 则买方节点的效用函数表达如下:

$$U_x(ch_{a_{xy}}^L) = w_x^L \ln \left(\eta \sum_{y=1}^Y ch_{a_{xy}}^L - cha_x^{L \min} + 1 \right) \quad (4)$$

其中, $U_x(ch_{a_{xy}}^L)$ 表示 x 产消者节点总电力需求, η 为联盟内电力传输效率, $w_x^L = (state_x^L)^2$ 表示 x 产消者节点的购电意愿, $state_x^L$ 为当前 x 产消者节点的能量状态, 即电能供需之差. $cha_x^{L \min}$ 为 x 产消者节点基本购电需求. L 为表示局域协调相关变量的上标.

对于产消者卖方节点, 其成本函数表达如下:

$$W_y(dis_{yx}^L) = l_1 \sum_{x=1}^X (dis_{yx}^L)^2 + l_2 \sum_{x=1}^X dis_{yx}^L \quad (5)$$

其中, l_1, l_2 为卖方节点的售电成本系数, 且 $l_1 > 0$.

由于联盟内产消者买方的意愿是使其效用函数最大, 而产消者卖方的意愿是使其售电成本最小, 从整个联盟的角度看, 为充分满足双方意愿并实现联盟内有效的市场均衡^[39], 联盟需处理社会福利最大化问题以合理分配产消者的交易电量. 因此, 面向产消者节点的局域协调社会福利问题 (Local coordination of social welfare problem, LCSWP) 可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{cha_{xy}^L, dis_{yx}^L} \sum_{x=1}^X U_x(ch_{a_{xy}}^L) - \sum_{y=1}^Y W_y(dis_{yx}^L) \\ & \text{s.t.} \quad cha_x^{L \min} \leq \eta \sum_{y=1}^Y ch_{a_{xy}}^L \leq cha_x^{L \max} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{x=1}^X dis_{yx}^L \leq dis_y^{L \max} \\ & \eta dis_{yx}^L = ch_{a_{xy}}^L \\ & ch_{a_{xy}}^L \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $cha_x^{L \max} = state_x^L$ 和 $dis_y^{L \max} = state_y^L$ 分别表示 x 产消者节点最大购电量和 y 产消者节点最大售电量, 均不超过当前节点能量状态. 显然, 优化问题的目标函数为严格凹函数, 约束条件为严格凸函数, 因此, 优化问题存在唯一最优解. 令 $\mathbf{C}_x = \{cha_{xy}^L | x = 1, 2, \dots, X\}$, $\mathbf{D}_y = \{dis_{yx}^L | y = 1, 2, \dots, Y\}$, 采用拉格朗日乘子法构建式 (6) 的拉格朗日乘子函数式如下:

$$\begin{aligned} L_1(\mathbf{C}_x, \mathbf{D}_y, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = & \sum_{x=1}^X U_x(ch_{a_{xy}}^L) - \sum_{y=1}^Y W_y(dis_{yx}^L) + \\ & \sum_{x=1}^X \alpha_x (cha_x^{L \min} - \eta \sum_{y=1}^Y ch_{a_{xy}}^L) + \\ & \sum_{x=1}^X \beta_x (\eta \sum_{y=1}^Y ch_{a_{xy}}^L - cha_x^{L \max}) + \\ & \sum_{x=1}^X \gamma_x (\sum_{x=1}^X dis_{yx}^L - dis_y^{L \max}) + \\ & \sum_{y=1}^Y \sum_{x=1}^X \lambda_{xy} (\eta dis_{yx}^L - ch_{a_{xy}}^L) - \\ & \sum_{y=1}^Y \sum_{x=1}^X \mu_{xy} ch_{a_{xy}}^L \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\alpha_x, \beta_x, \gamma_x, \lambda_{xy}, \mu_{xy}$ 为式 (4) 的拉格朗日乘子, 对应的集合分别为 $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}$. 根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件可知, LCSWP 的最优解应满足以下条件:

$$\begin{aligned} \nabla_{ch_{a_{xy}}^L} L_1 = & \frac{\eta w_x^L}{\eta \sum_{y=1}^Y ch_{a_{xy}}^L - cha_x^{L \min} + 1} - \\ & \eta \alpha_x + \eta \beta_x - \lambda_{xy} - \mu_{xy} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\nabla_{dis_{yx}^L} L_1 = -2l_1 dis_{yx}^L - l_2 + \gamma_y + \eta \lambda_{xy} = 0 \quad (9)$$

对于 LCSWP, 人工系统有必要获取联盟内所有产消者节点效用函数和成本函数的完整信息, 并利用式 (8) 和式 (9) 求解局域社会福利最大时的最优交易电量.

2.1.2 广域协调 (路由级)

考虑到用户不同的负荷特征以及可再生能源有限的容量配置, 仅通过局域协调仍很难实现联盟内供需平衡, 因此产消者需要通过能源路由器与联盟外产消者进行广域协调, 以进一步消除供需差额. 定义参与广域协调的产消者买方节点 $m = 1, 2, \dots, M$, 卖方节点 $n = 1, 2, \dots, N$, 在广域协调的基础上, 双方交易的电量分别为 cha_{mn}^W 和 dis_{nm}^W , 则各节点的效用函数表达如下:

$$U_m(cha_{mn}^W) = w_m^W \ln \left(\rho \sum_{n=1}^N cha_{mn}^W - cha_m^{W \min} + 1 \right) \quad (10)$$

$$W_n(dis_{nm}^W) = e_1 \sum_{m=1}^M (dis_{nm}^W)^2 + e_2 \sum_{m=1}^M dis_{nm}^W \quad (11)$$

其中, $U_m(cha_{mn}^W)$ 表示 m 产消者节点总电力需求, ρ 为联盟间电力传输效率, $w_m^W = (state_m^W)^2$ 表示 m 产消者节点的购电意愿, $state_m^W$ 为 m 产消者局域协调后的能量状态. $cha_m^{W \min}$ 表示 m 产消者节点基本购电量, e_1 和 e_2 为产消者卖方节点的售电成本系数, 且 $e_1 > 0$, W 为表示广域协调相关变量的上标.

由此, 面向联盟路由器的广域协调社会福利问题 (Wide-area coordination of social welfare problem, WCSWP) 可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{cha_{mn}^W, dis_{nm}^W} & \sum_{m=1}^M U_m(cha_{mn}^W) - \sum_{n=1}^N W_n(dis_{nm}^W) \\ \text{s.t.} & cha_m^{W \min} \leq \rho \sum_{n=1}^N cha_{mn}^W \leq cha_m^{W \max} \\ & \sum_{m=1}^M dis_{nm}^W \leq dis_n^{W \max} \\ & \rho dis_{nm}^W = cha_{mn}^W \\ & cha_{mn}^W \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $cha_m^{W \max} = state_m^W$, $dis_n^{W \max} = state_n^W$. 对式 (12) 构建拉格朗日乘子函数式 L_2 , 并根据 KKT 条件可知, WCSWP 的最优解应满足以下条件:

$$\begin{aligned} \nabla_{cha_{mn}^W} L_2 &= \frac{\rho w_m^W}{\rho \sum_{n=1}^N cha_{mn}^W - cha_m^{W \min} + 1} - \\ & \rho \alpha_m + \rho \beta_m - \lambda_{mn} - \mu_{mn} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\nabla_{dis_{nm}^W} L_2 = -2e_1 dis_{nm}^W - e_2 + \gamma_n + \rho \lambda_{mn} = 0 \quad (14)$$

由此, 可利用式 (13) 和式 (14) 求解广域社会福利最大时的最优交易电量.

上述局域协调和广域协调的实质是实现电力资源的最优分配, 通过人工系统量化产消者节点间和联盟路由器节点间的电力交易量, 并引导实际系统完成交易电量的传输. 然而, 无论是买方节点还是卖方节点考虑的都是自身经济效益最大化的问题, 仅根据人工系统提供的电量分配不足以满足节点的经济效益需求. 为解决这一问题, 还需要制定合理的定价机制以激励各节点理性报价并参与系统资源优化配置过程.

2.2 双向拍卖机制

在 IES 系统中, 考虑产消者作为理性人, 可根据实际交易电量理性报价, 同时为提高各节点的经济效益, 采用双向拍卖机制^[40] 制定电力成交价格. 对于系统内所有节点, 定义买方节点 $i = 1, 2, \dots, I$, 卖方节点 $j = 1, 2, \dots, J$, 此时买方节点实际购入电量为 cha_{ij} , 买方购价为 buy_{ij} , 卖方节点实际出售电量为 dis_{ji} , 卖方售价为 $sell_{ji}$. 由于买方节点购电意愿越大, 其购电消费预算越大, 这里考虑用买方节点购价替代购电意愿, 为获取更加符合实际消费情况的买方节点报价, 买方节点的需求电量以实际购入电量为基准, 则表征所有买方节点购电消费偏好的 Stone-Geary 效用函数为

$$U' = \prod_{i=1}^I \left(\sum_{j=1}^J cha_{ij} \right)^{buy_{ij}} \quad (15)$$

对式 (15) 进行单调变换 — 取对数, 可得到表征同样偏好的效用函数.

$$U'(cha_{ij}) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J buy_{ij} \ln(cha_{ij}) \quad (16)$$

由此, 最优交易价格即成交价格可通过求解下面的资源优化配置问题 (Optimal allocation problems, OAP) 得到.

$$\max_{cha_{ij}, dis_{ji}} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [buy_{ij} \ln cha_{ij} - sell_{ji} dis_{ji}] \quad (17)$$

由于在优化定价的同时, 需要确保局域协调和广域协调的社会福利最大, 则式 (17) 的优化问题需要服从式 (6) 或式 (12) 的约束条件. 构建拉格朗日乘子函数式 L_3 , 并根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件可知, OAP 的最优解应满足以下条件:

$$\nabla_{cha_{ij}} L_3 = \frac{buy_{ij}}{cha_{ij}} - \xi \alpha_i + \xi \beta_i - \lambda_{ij} - \mu_{ij} = 0 \quad (18)$$

$$\nabla_{dis_{ji}} L_3 = -sell_{ji} + \gamma_j + \xi \lambda_{ij} = 0 \quad (19)$$

其中, $\xi = \eta$ 或 $\xi = \rho$ 表示产消者节点间或联盟路由器间电力传输效率. 对比式 (8), (9) 和式 (13), (14) 可知

$$buy_{ij} = \frac{\xi w_i cha_{ij}}{\xi \sum_{j=1}^J cha_{ij} - cha_i^{\min} + 1} \quad (20)$$

$$sell_{ji} = 2r_1 dis_{ji} + r_2 \quad (21)$$

其中, $w_i = w_x^L$ 或 $w_i = w_m^W$ 表示买方节点的购电意愿, $cha_i^{\min} = cha_x^{\min}$ 或 $cha_i^{\min} = cha_m^{\min}$ 表示买方节点基本购电量, $r_1 = l_1$ 或 $r_1 = e_1$, $r_2 = l_2$ 或 $r_2 = e_2$ 表示卖方节点的售电成本系数.

2.3 NR-PSO 算法实现

由于传统基于梯度的求解方法难以确定合适的搜索步长, 在最优值附近容易产生锯齿现象, 此外, 传统的智能优化方法在新的迭代周期通常采取随机初始化搜索或遍历搜索策略, 导致算法的求解效率降低, 故本文采用 NR-PSO 算法求解上述局域协调和广域协调组合互动模型. 利用优化模型信息构造算法搜索过程的收敛判定域, 通过收敛判定域的引导并结合全局随机寻优与区域定向寻优的策略, 进一步提高算法局部搜索能力及收敛速度.

PSO 算法作为一种并行进化算法, 具有收敛速度快、全局搜索能力强等优势, 在各领域中被广泛应用. 粒子通过不断调整位置和速度更新公式来寻找全局最优解. 然而, 由于受迭代后期随机振荡现象的影响, 在全局最优值附近的粒子搜索过程需较长时间才能最终收敛, 故传统 PSO 算法存在局部搜索能力弱、易陷入局部最优等缺点. 其进化方程组如下:

$$v_{u,d}^{k+1} = \omega v_{u,d}^k + c_1 r_1 (p_{u,d}^k - x_{u,d}^k) + c_2 r_2 (p_{g,d}^k - x_{u,d}^k) \quad (22)$$

$$x_{u,d}^{k+1} = x_{u,d}^k + v_{u,d}^{k+1} \quad (23)$$

其中, ω 为惯性权重, c_1 和 c_2 为学习因子, r_1 和 r_2 为区间 (0,1) 上的随机数, $p_{u,d}^k$ 为第 k 代第 u 个粒子第 d 维个体历史最优位置, $p_{g,d}^k$ 为第 k 代第 d 维粒子群体全局最优位置, $v_{u,d}^k$ 和 $x_{u,d}^k$ 为第 k 代第 u 个粒子第 d 维的速度和位置.

针对本文优化问题, 定义空间维度为 D , 对于局域协调, $D = X + Y$. 对于广域协调, $D = M + N$. 解空间的宽度表示为 $W = \sum_{d=1}^D x_d^{\text{up}} - x_d^{\text{low}}$, 其中 x_d^{up} 和 x_d^{low} 分别表示搜索空间的上界和下界粒子位置. 对于买方节点, $x_d^{\text{up}} = cha_x^{\text{max}}$ 或 $x_d^{\text{up}} = cha_m^{\text{max}}$, $x_d^{\text{low}} = cha_x^{\text{min}}$ 或 $x_d^{\text{low}} = cha_m^{\text{min}}$ 分别

表示局域协调或广域协调下买方节点的可行购电量粒子范围. 对于卖方节点, $x_d^{\text{up}} = dis_y^{\text{max}}$ 或 $x_d^{\text{up}} = dis_n^{\text{max}}$, $x_d^{\text{low}} = 0$ 分别表示局域协调或广域协调下卖方节点的可行售电量粒子范围. 同时, 将粒子周围区域定义为收敛判定域, 定义 s 为收敛因子, 由此可获得收敛判定域宽度 $W_{\text{conv}} = sW$.

此外, 定义 e 为邻域因子, 且 $e > s$, 用 $W_{\text{neigh}} = eW$ 表示邻域再调度的解空间宽度. 第 k 代第 u 个粒子位置 $x_{u,d}^k$ 和全局最优粒子位置 $p_{g,d}^k$ 之间的距离可以表示为 $dist_u = \sum_{d=1}^D (x_{u,d}^k - p_{g,d}^k)$. 迭代过程中, 若 $dist_u < W_{\text{conv}}$, 可按区域定向寻优的位置更新公式搜索.

$$x_{u,d}^{k+1} = p_{g,d}^k + RW_{\text{neigh}}, \quad R \in [-1, 1] \quad (24)$$

在迭代前期, 按全局随机寻优的位置更新公式搜索可加快收敛速度. 而在迭代中后期, 转为由收敛判定域引导的区域定向寻优过程以进一步提高算法局部搜索能力. 由此, 求解局域协调和广域协调组合互动模型的 NR-PSO 算法的具体步骤如下:

步骤 1. 初始化粒子种群参数, 生成初始位置 $x_{u,d}^0$ 和初始速度 $v_{u,d}^0$;

步骤 2. 根据 LCSWP 的目标函数和约束求解, 并判断是否满足终止条件, 若满足, 停止迭代, 否则转到步骤 3;

步骤 3. 当迭代 $k \leq \varepsilon k_{\text{max}}$ 时, 按全局随机寻优的式 (22) 和式 (23) 更新所有粒子的位置和速度, ε 为迭代控制参数;

步骤 4. 当迭代 $k > \varepsilon k_{\text{max}}$ 时, 若粒子位置与全局最优粒子位置的距离小于收敛判定域宽度, 即 $dist_u < W_{\text{conv}}$, 则按式 (24) 更新粒子位置;

步骤 5. 生成新种群, 返回步骤 2;

步骤 6. 当 $k = k_{\text{max}}$ 时, 输出局域协调优化结果;

步骤 7. 结合局域协调优化结果判断是否需要广域协调, 若不需要转到步骤 8, 否则根据 WCSWP 的目标函数和约束求解, 重复步骤 3~6, 输出广域协调优化结果;

步骤 8. 根据两次寻优结果, 代入式 (20) 和式 (21), 输出各节点最优交易电量及最优定价.

2.4 基于智能合约的对等电力交易

上述流程经两次求解局域协调和广域协调优化问题, 分别得到各节点最优交易电量及最优定价信息. 在 IES 多级对等协同优化架构下, 对于系统内所有买方节点 i 和卖方节点 j , 基于智能合约的对等电力交易具体流程如下:

节点 i 预测其分布式可再生能源将在短时间 $[t_0, t_1]$ 内波动, 或电力负荷的突然增加需要更多

的电力供应. 经过上一节所述的局域协调和广域协调等社会计算后, 将自动通过智能合约在能源金融系统网络层发布需求电量、需求时段以及交易报价等信息, 且系统中所有节点都可以接收到需求信息. 信息发布要求节点 i 处理自己的公钥 $i_{\text{Publickey}}$ 和私钥 $i_{\text{Privatekey}}$, 生成用于交易验证和信息传输的地址 $T_{i\text{-add}} = \text{hash}(i_{\text{Publickey}})$, 其中, $i_{\text{Publickey}} = \text{hash}(i_{\text{Privatekey}})$, $T_{i\text{-add}}$ 代表节点 i 的加密地址, 是经过 SHA256 和 Base58 哈希计算之后的结果. 发布的需求信息如下:

$$Q_{\text{initial},i} = (\text{cha}_{ij} \parallel \text{buy}_{ij} \parallel [t_0, t_1] \parallel i_{\text{Publickey}} \parallel T_{i\text{-add}}) \quad (25)$$

其中, cha_{ij} 和 buy_{ij} 分别代表 $[t_0, t_1]$ 时段节点 i 的需求电量和最优报价.

节点 j 接收到节点 i 的需求信息并计算可以出售的电量, 即在 $[t_0, t_1]$ 时段为节点 i 提供相应的电量 dis_{ji} , 并通过生成相应的地址发送响应信息

$$Q_{i\text{-add},j} = (\text{dis}_{ji} \parallel \text{sell}_{ji} \parallel [t_0, t_1] \parallel \text{LT}_{\text{ID}} \text{Sign}.j(\text{cha}_{ij}, [t_0, t_1], \text{LT}) \parallel j_{\text{Publickey}} \parallel T_{j\text{-add}}) \quad (26)$$

式中, LT_{ID} 是节点 j 在区块链中上一个交易信息的记录地址, $\text{Sign}.j(\text{cha}_{ij}, [t_0, t_1], \text{LT})$ 是节点 j 在本次交易和上次交易内容的基础上通过 $j_{\text{Publickey}}$ 生成的加密签名. 节点 j 接收到节点 i 的需求信息后, 用自己的私钥 $i_{\text{Privatekey}}$ 对 j 发送的消息摘要进行解密, 得到 $Q_{i\text{-add},j}$ 的全部内容. 同时, 通过 $j_{\text{Publickey}}$ 获取签名 $\text{Sign}.j$ 中的详细信息.

由于存在多个电力供应节点, 节点 i 确认交易的原则是最大限度地满足自身电力需求, 因此, 如果 i 接受 j 提供的电量, 则 i 把智能合约脚本发送给 j . 如果不接受, 则终止交易.

此外, 为确保资源避免出现“二次支付”现象, 记录交易内容的脚本信息必须包括区域电力网络运营商的签名 $\text{Sign}.DEO$. 因此, 交易记录的脚本应包含交易双方的签名, 区域电力网络运营商的签名以及交易内容摘要表示如下:

$$\text{Script} = (\text{Sign}.i \parallel \text{Sign}.j \parallel \text{Sign}.DEO \parallel (\text{dis}_{ji}, [t_0, t_1], \text{buy}_{ij})) \quad (27)$$

一旦 Script 由三方完成签名, 则 i 需要按智能合约进行支付, j 需要按智能合约向 i 传送约定量的电能. 交易完成后, 本次交易信息被广播到整个能源金融系统网络. 在所有节点验证交易信息之后, 本次交易信息将被写入当前区块.

3 实验与分析

本文以城市低压配电网中某小型住宅区域的 IES 系统为例验证所提优化模型和方法的有效性. 该区域 IES 系统的光伏和风机装机容量分别为 60 kW 和 40 kW, 参与 IES 系统服务的产消者规模为 60 户住宅. 该区域的基本负荷水平、光伏、风机出力曲线如图 4 所示. 为简化模型, 考虑将产消者群体分为 4 组, 每组中的可再生能源装机容量均匀分配. 根据上述数据构建 IES 系统多级对等协同优化模型并进行仿真实验. $T = 24$ h, 以 5 min 为周期进行 IES 系统实时多级对等电力交易. 实验基于 MATLAB R2016a 编程环境, 计算主机为 Intel Core i7 CPU, 主频为 3.4 GHz, 运行内存为 16 GB.

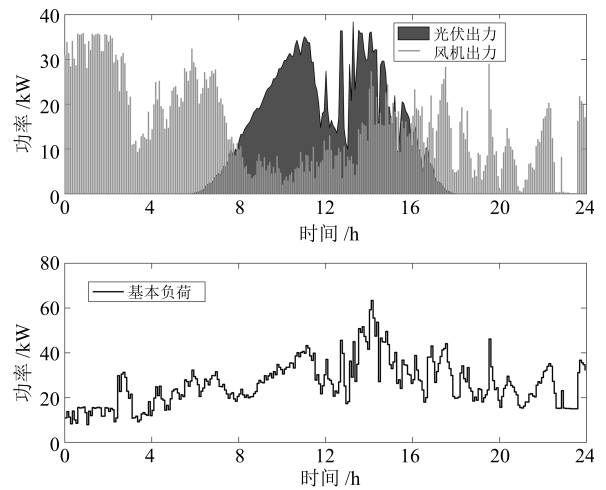


图 4 光伏、风机出力及基本负荷水平曲线

Fig. 4 Renewable energy output and basic load curves

3.1 系统参数

在 NR-PSO 算法中, 种群规模 $u = 200$, 最大迭代次数 $k_{\text{max}} = 20$, 收敛因子 $s = 0.01$, 邻域因子 $e = 0.03$. 基本购电需求 $\text{cha}_x^L \text{min} = 0.002$ kWh, $\text{cha}_m^W \text{min} = 0.015$ kWh. 其他相关参数如表 1 所示.

表 1 优化模型相关参数

Table 1 The values of related parameters

参数	取值
η	0.9
l_1	0.01
l_2	0.015
ρ	0.8
e_1	0.03
e_2	0.045

3.2 结果与讨论

3.2.1 算法性能分析

基于 IES 系统多级对等协同优化模型, 为验证本文方法的有效性, 分别采取 NR-PSO 算法、CQPSO^[28] 算法、AWCPSO^[29] 算法以及迭代下降算法^[40] 求解系统一个周期内的优化问题, 算法的收敛特性如图 5 所示。

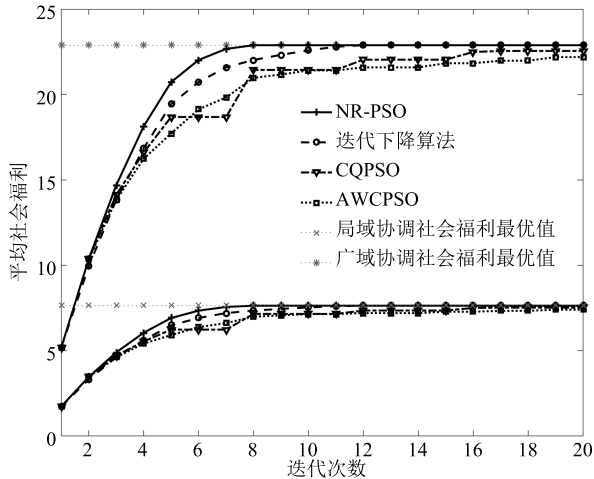


图 5 算法性能的对比较分析

Fig. 5 Performance comparison and analysis of different algorithms

结果表明, CQPSO 算法和 AWCPSO 算法需要更多的迭代次数才能最终收敛。其中, CQPSO 算法针对量子粒子群易陷入局部最优问题, 利用混沌的遍历性, 使粒子的搜索范围覆盖整个解空间, 同时在迭代过程中多次引入扰动机制使粒子位置跳出局部最优。然而, 该方法的遍历搜索和扰动过程大幅增加了迭代过程的计算负担, 从而降低了求解效率。AWCPSO 算法通过自适应减小权重和加速度系数, 指导迭代过程中粒子飞行的速度和方向, 可在一定程度上减小迭代后期随机振荡现象的影响。但在新的迭代周期随机初始化搜索, 使得算法寻优过程依然十分缓慢, 迭代下降算法平均在第 12 次迭代收敛。然而在全局最优值附近, 每次迭代后目标函数值行进的距离越来越小, 产生锯齿现象, 从而降低算法在迭代后期的收敛速度。而通过收敛判定域引导并结合全局随机寻优与区域定向寻优策略的 NR-PSO 算法, 平均在第 8 次迭代 ($\varepsilon = 0.2$) 收敛至相应的社会福利最优值, 相比迭代下降算法减少了 33% 的迭代次数, 有效地提高了算法局部搜索能力及收敛速度。

此外, 仿真还对比了 NR-PSO 算法迭代控制参数 ε 不同取值下的迭代次数和总计算时间, 如表 2 所示。结果显示, 迭代次数和总计算时间随 ε 取值

的削减而逐渐减小。在 ε 取 0.2 时达到最佳的迭代次数 (8 次) 和总计算时间 (162.64 s), 进一步验证了 NR-PSO 算法的有效性。

表 2 不同控制参数下的迭代次数和计算时间
Table 2 The number of iterations and calculation time with different control parameters

ε	迭代次数 (次)	总计算时间 (s)
0.8	20	483.46
0.6	15	369.90
0.4	11	281.34
0.2	8	162.64

考虑 IES 系统实时电力交易以及一段时间内各产消者节点的实时信息交互, 由计算结果进一步可知, 当算法迭代控制参数 ε 取值小于 0.4 时, 算法总求解时间均不超过本文的优化调度周期 5 min。因此, 该算法能够满足系统的实时性要求。

3.2.2 供求平衡分析

本文以 4 个不同联盟产消者的协同优化结果为例, 具体分析电力供求平衡情况。通过供求平衡分析, 不仅可以了解产消者间交易电量情况, 而且可以了解 IES 系统多级对等协同优化模型的实时运行状况。

如图 6~9 所示, 实际能量状态表示当前时段内负荷与可再生能源出力之间的偏差电量, 正值表示需要购买的电量, 负值表示需要出售的电量。局域协调交易电量表示该产消者与联盟内其他产消者交易电量情况。广域协调交易电量表示该产消者通过能源路由器与其他联盟产消者交易电量情况。

IES 系统通过局域协调与广域协调的组合互动来保障实时电力供求平衡。在每一个调度周期开始时刻, 产消者向本地能源路由器发送其供需差额数据。本地能源路由器根据该数据进行局域双向拍卖, 并基于 NR-PSO 算法求解局域协调优化问题, 以最大限度满足各产消者基本需求电量约束及局域社会福利最大化目标。然而部分产消者的实际需求电量未得到满足, 则需再次向本地能源路由器反馈差额数据。此时局域范围内已无可调度电量, 则本地能源路由器需请求与其他路由器进行广域双向拍卖, 并再次调用优化算法求解广域协调优化问题, 以保障本地产消者电力供求平衡及广域社会福利最大化。

然而, 在某些时段局域协调和广域协调的组合互动仍然不能实现严格的供求平衡, 例如图 6 中的 21:00~23:00 时段, 图 7 中的 13:00~15:00 和 23:00~24:00 时段, 图 8 中的 1:00~3:00 和 23:00~24:00 时段, 以及图 9 中的 17:00~19:00

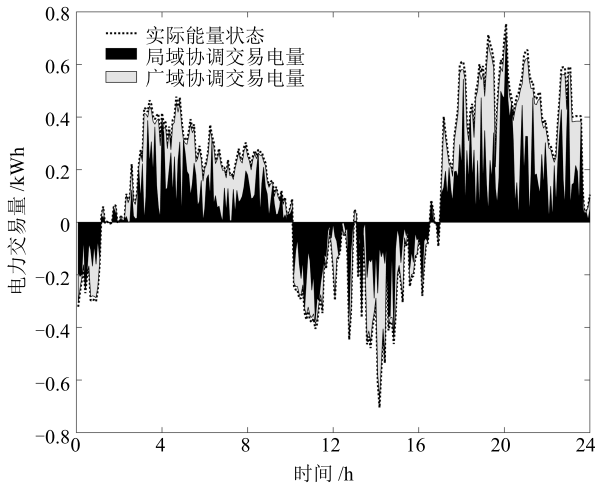


图 6 联盟 1 产消者 3 实时电力供求平衡

Fig. 6 Real-time supply and demand balance of 3rd prosumer in the first union

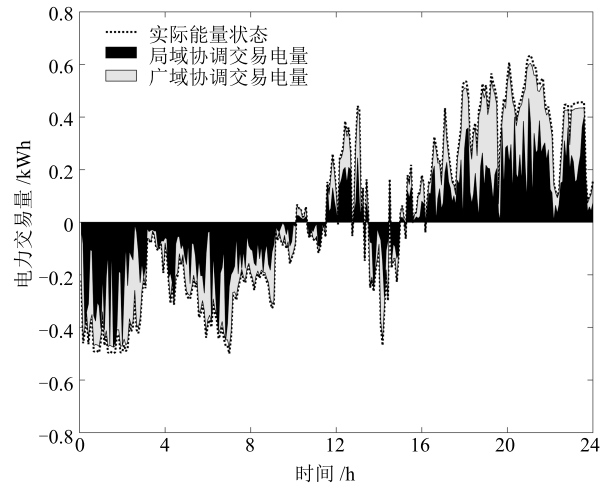


图 8 联盟 3 产消者 6 实时电力供求平衡

Fig. 8 Real-time supply and demand balance of 6th prosumer in the third union

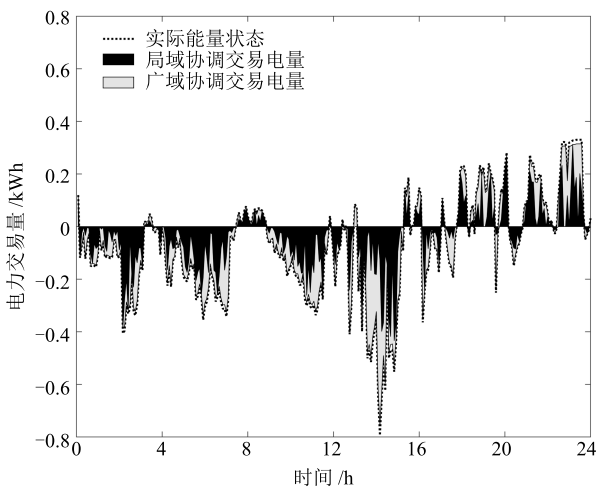


图 7 联盟 2 产消者 10 实时电力供求平衡

Fig. 7 Real-time supply and demand balance of 10th prosumer in the second union

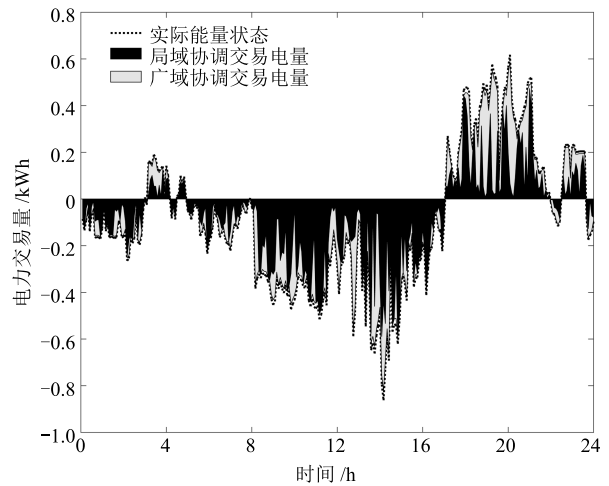


图 9 联盟 4 产消者 14 实时电力供求平衡

Fig. 9 Real-time supply and demand balance of 14th prosumer in the fourth union

时段等. 一方面, 受可再生能源出力不确定性和用户负荷随机性的影响, 产消者的偏差电量呈现出相应的波动性. 另一方面, 在上述时段系统内参与交易的一方需要处理多方请求信息, 然而这些供应方或需求方给出的供应量或需求量的累加不能完全消除偏差电量, 从而导致该时段的供求失衡. 此时, 无法消除的少量偏差电量可通过与主电网交易或通过调度储能设施的充放等方式来弥补.

3.2.3 多级对等电力交易结果

以联盟 1 中产消者 3 节点在 3:15~3:40 时段内的交易结果为例, 进一步分析 IES 系统中产消者多级对等电力交易的具体过程, 如表 3 所示.

根据 IES 系统的信息交互流程, 在产消者向金融系统网络发布交易信息时, 买方根据当前的偏差电量制定报价策略, 密封交易信息摘要并发布. 卖方接收需求信息, 并根据买方报价制定售电策略. 需要指出的是, 在 3:15~3:20 时段的偏差电量为 0.457 kWh, 而从卖方购买的总电量为 0.453 kWh, 这主要是由于当前时段没有适合的卖方或卖方不愿提供额外的 0.004 kWh 电量. 其他时段的交易信息及结果如表 3 所示. 多级对等电力交易结果说明, 基于智能合约的辅助服务可实现用户友好的电力交易模式, 其分布式对等交易结构有效地解决了用户与中心机构之间的信任问题, 同时维护了用户的隐私和电力交易的安全性.

表 3 联盟 1 产消者 3 某时段多级对等电力交易结果

Table 3 Multilevel peer-to-peer power trading results of the third prosumer node in the first union at a certain time

时段	偏差电量 (kWh)	买方报价 (元/kWh)	买方密封交易信息摘要	卖方	购买电量 (kWh)	卖方收益 (元)	买方支付 (元)
3:15	0.457	0.348	eb45cc1d1c684ae290d373e18b260d95	联盟 1 产消者 2	0.097	0.034	0.158
—	—	—	a378420878294a04965be0a999054616	联盟 1 产消者 11	0.082	0.029	—
—	—	—	d9f7bf9a2b054722913725c4335a802f	联盟 2 产消者 5	0.144	0.050	—
—	—	—	e00a77da2c944828b304543a749562d3	联盟 3 产消者 3	0.130	0.045	—
3:20	0.441	0.327	77298613587a49b5ae3d79a66b20b3f7	联盟 1 产消者 4	0.002	0.001	0.144
—	—	—	0928c7e54bb04ab9a9405046982b1ece	联盟 2 产消者 8	0.128	0.042	—
—	—	—	836cdb97cb5c4eb5a10cde523126ce51	联盟 3 产消者 13	0.201	0.065	—
—	—	—	1b9ce86e11a0493a928491ae96ff1531	联盟 4 产消者 7	0.110	0.036	—
3:25	0.385	0.296	700d192ebcc94008bf2834f13ebfe180	联盟 1 产消者 6	0.084	0.025	0.114
—	—	—	1e25a82f6df84e13a0585f717800f703	联盟 1 产消者 15	0.124	0.037	—
—	—	—	5ceb8c3095014a7b90f43b8e977c8fd0	联盟 3 产消者 9	0.092	0.027	—
—	—	—	23d398b02ba14c84a585faf63aa05f39	联盟 4 产消者 1	0.085	0.025	—
3:30	0.426	0.324	8bd98c74da514150914b09951289d1dd	联盟 1 产消者 5	0.039	0.013	0.138
—	—	—	2c39321d56564099af552d0f605f7ece	联盟 2 产消者 10	0.123	0.040	—
—	—	—	84e0e44dd96e4957ae25c95c1668e7d2	联盟 3 产消者 6	0.046	0.015	—
—	—	—	75d10e745eb44602a352f65b3b5e084a	联盟 4 产消者 6	0.218	0.070	—
3:35	0.377	0.291	e7318fc4dda44955ac1083961c703939	联盟 1 产消者 12	0.090	0.026	0.110
—	—	—	d2a7c521239b4afa9f078a7402c4b246	联盟 1 产消者 7	0.059	0.017	—
—	—	—	2a2cbf7036854a7bafcb34fbd868bea1	联盟 1 产消者 4	0.081	0.024	—
—	—	—	b84c13d1b952407a9c1589d35d2d5ee4	联盟 4 产消者 1	0.147	0.043	—

4 结论

针对能源电力系统的优化管理与控制问题, 提出了信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化方法. 该方法基于 Stone-Geary 函数和双向拍卖机制重构了电力资源优化分配问题的目标函数, 更好地反映了分布式电力交易中的产消者偏好. 同时, 利用收敛判定域引导的全局随机寻优与区域定向寻优策略, 进一步提高了算法的收敛性. 在保障系统社会福利最大化的前提下, 有效地实现了产消者电力资源的优化分配, 促进了电力资源的经济合理利用. 此外, 通过智能合约的辅助服务, 进一步实现了用户友好的电力交易模式.

References

- 1 Yu X H, Xue Y S. Smart grids: a cyber-physical systems perspective. *Proceedings of the IEEE*, 2016, **104**(5): 1058–1070
- 2 Xue Y S, Yu X H. Beyond smart grid-cyber-physical-social system in energy future (point of view). *Proceedings of the IEEE*, 2017, **105**(12): 2290–2292
- 3 Guan Xiao-Hong, Zhao Qian-Chuan, Jia Qing-Shan, Wu Jiang, Liu Ting. *Cyber-Physical Energy Systems*. Beijing: Science Press, 2016.
(管晓宏, 赵千川, 贾庆山, 吴江, 刘焱. 信息物理融合能源系统. 北京: 科学出版社, 2016.)
- 4 Yang Xin-Fa, Su Jian, Lv Zhi-Peng, Liu Hai-Tao, Li Rui. Overview on micro-grid technology. *Proceedings of the CSEE*, 2014, **34**(1): 57–70
(杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 刘海涛, 李蕊. 微电网技术综述. 中国电机工程学报, 2014, **34**(1): 57–70)
- 5 Wu Y, Tan X Q, Qian L P, Tsang D H K, Song W Z, Yu L. Optimal pricing and energy scheduling for hybrid energy trading market in future smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, **11**(6): 1585–1596
- 6 Farraj A, Hammad E, Deepa K. A cyber-physical control framework for transient stability in smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, **9**(2): 1205–1215
- 7 Wang Yi, Zhang Ning, Kang Chong-Qing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(22):

- 5669–5681
(王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望. 中国电机工程学报, 2015, **35**(22): 5669–5681)
- 8 Zhang H G, Li Y S, Gao D W, Zhou G J. Distributed optimal energy management for energy internet. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(6): 3081–3097
- 9 Sun Qiu-Ye, Teng Fei, Zhang Hua-Guang. Energy internet and its key control issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 176–194
(孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题. 自动化学报, 2017, **43**(2): 176–194)
- 10 Zhang J J, Gao D W, Zhang Y C, Wang X, Zhao X Y, Duan D L, et al. Social energy: mining energy from the society. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(3): 466–482
- 11 Deng Jian-Ling, Wang Fei-Yue, Chen Yao-Bin, Zhao Xiang-Yang. From industries 4.0 to energy 5.0: concept and framework of intelligent energy systems. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(12): 2003–2016
(邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 赵向阳. 从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念、内涵及体系框架. 自动化学报, 2015, **41**(12): 2003–2016)
- 12 Vrba P, Mařík V, Siano P, Leitão P, Zhabelova G, Vyatkin V, et al. A review of agent and service-oriented concepts applied to intelligent energy systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, **10**(3): 1890–1903
- 13 Palensky P, Widl E, Stifter M, Elsheikh A. Modeling intelligent energy systems: co-simulation platform for validating flexible-demand EV charging management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, **4**(4): 1939–1947
- 14 Cheng Le-Feng, Yu Tao, Zhang Xiao-Shun, Yin Lin-Fei, Qu Kai-Ping. Cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and its knowledge automation: framework, techniques and challenges. *Proceedings of the CSEE*, 2018, **38**(1): 25–40
(程乐峰, 余涛, 张孝顺, 殷林飞, 瞿凯平. 信息-物理-社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战. 中国电机工程学报, 2018, **38**(1): 25–40)
- 15 Roche R, Blunier B, Miraoui A, Hilaire V, Koukam A. Multi-agent systems for grid energy management: a short review. In: Proceedings of the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, USA: IEEE, 2010. 3341–3346
- 16 Duan R, Deconinck G. Future electricity market interoperability of a multi-agent model of the smart grid. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Chicago, USA: IEEE, 2010. 625–630
- 17 Vergados D J, Mamounakis I, Makris P, Varvarigos E. Prosumer clustering into virtual microgrids for cost reduction in renewable energy trading markets. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2016, **7**: 90–103
- 18 Marzband M, Javadi M, Domínguez-García J L, Moghadam M M. Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2016, **10**(12): 2999–3009
- 19 Di Battista G, Di Donato V, Patrignani M, Pizzonia M, Roselli V, Tamassia R. Bitcoveview: visualization of flows in the Bitcoin transaction graph. In: Proceedings of the 2015 IEEE Symposium on Visualization for Cyber Security. Chicago, USA: IEEE, 2015. 1–8
- 20 Nguyen Q K. Blockchain — a financial technology for future sustainable development. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development. Taiwan, China: IEEE, 2016. 51–54
- 21 Zhang Ning, Wang Yi, Kang Chong-Qing, Cheng Jiang-Nan, He Da-Wei. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications. *Proceedings of the CSEE*, 2016, **36**(15): 4011–4022
(张宁, 王毅, 康重庆, 程将南, 贺大玮. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探. 中国电机工程学报, 2016, **36**(15): 4011–4022)
- 22 Ping Jian, Chen Si-Jie, Zhang Ning, Yan Zheng, Yao Liang-Zhong. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract. *Proceedings of the CSEE*, 2017, **37**(13): 3682–3690
(平健, 陈思捷, 张宁, 严正, 姚良忠. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制. 中国电机工程学报, 2017, **37**(13): 3682–3690)
- 23 Sun Qiu-Ye, Zhao Mei-Yi, Chen Yue, Ma Da-Zhong. Optimal energy flow of multiple energy systems in energy internet. *Proceedings of the CSEE*, 2017, **37**(6): 1590–1598
(孙秋野, 赵美伊, 陈月, 马大中. 能源互联网多能源系统最优功率流. 中国电机工程学报, 2017, **37**(6): 1590–1598)
- 24 Sun Q Y, Han R K, Zhang H G, Zhou J G, Guerrero J M. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(6): 3006–3019
- 25 Di Giorgio A, Liberati F. Near real time load shifting control for residential electricity prosumers under designed and market indexed pricing models. *Applied Energy*, 2014, **128**: 119–132
- 26 Zhang C H, Wu J Z, Zhou Y, Cheng M, Long C. Peer-to-Peer energy trading in a microgrid. *Applied Energy*, 2018, **220**: 1–12
- 27 Wang Yong-Fu, Zhang Bo-Ming, Sun Hong-Bin, Xia Qing, Huang Yong-Hao, Meng Yuan-Jing, et al. A new method for balancing trade based on interior-point algorithm. *Power System Technology*, 2004, **28**(1): 48–50, 55
(王永福, 张伯明, 孙宏斌, 夏清, 黄永皓, 孟远景, 等. 基于内点法的实时平衡交易算法. 电网技术, 2004, **28**(1): 48–50, 55)
- 28 Wang Kui, Zhang Bu-Han, Zhou Yang, Li Jun-Fang. Real-time dispatch in wind power integrated system based on chaos quantum-behaved particle swarm optimization. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, **35**(22): 141–146
(王魁, 张步涵, 周杨, 李俊芳. 基于混沌量子粒子群算法的含风电场电力系统实时调度. 电力系统自动化, 2011, **35**(22): 141–146)
- 29 Chen J Y, Wang J, Chen Q, Wu D. Optimal dispatch of medium-voltage microgrid using an adaptive PSO algorithm. In: Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, China: IEEE, 2015. 324–329

- 30 Li Y L, Shao W, You L, Wang B Z. An improved PSO algorithm and its application to UWB antenna design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, **12**: 1236–1239
- 31 Wang Fei-Yue, Wang Xiao, Yuan Yong, Wang Tao, Lin Yi-Lun. Social computing and computational societies: the foundation and consequence of smart societies. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(5–6): 460–469
(王飞跃, 王晓, 袁勇, 王涛, 林懿伦. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然. *科学通报*, 2015, **60**(5–6): 460–469)
- 32 Sun Qiu-Ye, Wang Bing-Yu, Huang Bo-Nan, Ma Da-Zhong. The optimization control and implementation for the special energy internet. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(18): 4571–4580
(孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 马大中. 狭义能源互联网优化控制框架及实现. *中国电机工程学报*, 2015, **35**(18): 4571–4580)
- 33 Sun Qiu-Ye. *The Energy Internet*. Beijing: Science Press, 2015.
(孙秋野. 能源互联网. 北京: 科学出版社, 2015.)
- 34 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293–302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. *自动化学报*, 2013, **39**(4): 293–302)
- 35 Zhang Jun, Gao Wen-Zhong, Zhang Ying-Chen, Zheng Xin-Hu, Yang Liu-Qing, Hao Jun, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(9): 1544–1554
(张俊, 高文忠, 张应晨, 郑心湖, 杨柳青, 郝君, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望. *自动化学报*, 2017, **43**(9): 1544–1554)
- 36 Cheng S, Zeng B, Huang Y Z. Research on application model of blockchain technology in distributed electricity market. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on New Energy and Future Energy System (NEFES)*. Kunming, China: IOP Publishing Ltd, 2017. 1–11
- 37 Geary R C. A note on “a constant-utility index of the cost of living”. *The Review of Economic Studies*, 1950, **18**(1): 65–66
- 38 Xiang Ding, Song Yong-Hua, Hu Ze-Chun, Xu Zhi-Wei. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **33**(31): 15–25
(项顶, 宋永华, 胡泽春, 徐智威. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究. *中国电机工程学报*, 2013, **33**(31): 15–25)
- 39 Friedman D, Rust J. *The Double Auction Market: Institutions, Theories and Evidence*. Boulder, CO, USA: Westview Press, 1993.
- 40 Iosifidis G, Koutsopoulos I. Double auction mechanisms for resource allocation in autonomous networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, **28**(1): 95–102



司方远 东北大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为能源系统优化运行与控制.

E-mail: fangyuan@stumail.neu.edu.cn
(**SI Fang-Yuan** Ph.D. candidate at the College of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers optimal operation and control of energy systems.)



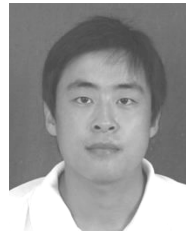
汪晋宽 东北大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为智能控制与自适应信号处理. 本文通信作者.

E-mail: wjk@mail.neuq.edu.cn
(**WANG Jin-Kuan** Professor at the College of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers adaptive signal processing and intelligent control. Corresponding author of this paper.)



韩英华 东北大学秦皇岛分校计算机与通信工程学院教授. 主要研究方向为智能电网的优化运行与控制.

E-mail: yghan@126.com
(**HAN Ying-Hua** Professor at the School of Computer and Communication Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao. Her research interest covers optimal operation and control of the smart grid.)



赵强 东北大学秦皇岛分校控制工程学院讲师. 主要研究方向为智能电网的优化运行与控制.

E-mail: learner_2003@163.com
(**ZHAO Qiang** Lecturer at the School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao. His research interest covers optimal operation and control of the smart grid.)