

基于复杂流程工业网络的电力需求响应模型研究

——青年基金（61702369）结题技术报告

丁月民、李晓卉、段权珍等

（一）技术部分

1. 研究工作主要进展、结果和影响。

（1）主要研究内容。

本项目研究面向工业用户的电力需求响应模型，探索智能电网双向信息交互与动态电价背景下的工业需求响应理论及方法，其整体目标是通过自适应优化的方式，降低工业用户的整体电能开销。该项目的研究主要从三个方面逐次展开，包括：智能电网广域需求响应信息交互方法、邻域及用户侧需求响应通信及感知方法、以及工业用户自适应需求响应模型。各部分研究内容的具体阐述如下：

内容 1：智能电网广域需求响应信息交互方法研究

需求响应广域信息交互方法的研究，对智能电网广域网的结构、以及信息传输的方法进行探索。本部分内容的研究，包括面向电网广域网的需求响应信息多播路由方法、最小化传输时延的需求响应信息传输方法、以及需求响应约束条件下的信息传输方法等，并搭建了智能电网广域信息交互仿真平台，对上述方法的性能进行分析验证；仿真结果表明，上述方法可以有效的改善电网供应侧与用户侧需求响应信息交互的实时性。

内容 2：智能电网邻域及用户域需求响应信息传输技术研究

邻域及用户域需求响应信息采集及传输技术的研究，重点对智能电表及智能终端在需求响应中的关键作用进行探讨。本部分内容的研究，包括邻域网络拓扑生成方法、邻域需求响应信息实时可靠传输方法、邻域资源受限设备身份认证方法、用户域需求响应通信，以及工业用户高压信号采集方法等。同时，开发了基于 SEP 2.0 (IEEE 2030.5)标准的需求响应通信协议栈及原型机，并搭建了智能电网工业控制系统实验平台。

内容 3：工业用户自适应需求响应模型研究

工业用户自适应需求响应模型的研究，主要在上述两项研究内容的基础上，重点探讨智能电网实时动态电价背景下的工业生产流程自适应优化方法与策略。本部分内容的研究，提出了基于多 Agent 深度学习的工业用户需求响应能源管理方法、实时电价驱动的需求响应方法、电动汽车充电调度方法等，并通过仿真分析的手段，验证了上述方法在降低工业用户电能开销方面的有效性。

（2）取得的主要研究进展、重要结果、关键数据等及其科学意义或应用前景。

1) 智能电网广域需求响应信息交互研究进展及成果

智能电网广域网构建了电网运维中心、发电站、电力传输、以及智能变电站之间的通信桥梁，是确保智能电网广域控制可靠性的关键基础设施。其对广域需求响应信息交互的实时性有着严格

要求。这种实时性的要求不仅能确保智能电网电力需求与供应之间的实时动态平衡，还能保证智能电网频率的稳定和电力控制的可靠性。但是，智能电网广域需求响应信息交互技术的前期研究，仍然存在一定的问题：

① 目前传统广域网需求响应通常都采取单一点对点单播控制。然而，随着智能电网中 PMU 等各种监测电力网络运行的设备不断增加，存在大量一对多的控制需求，电网上行的监测数据流和下行的控制数据流的双向数据流频繁互动，单一点对点的单播模式已不能满足日益增长的智能广域需求响应应用，需要在智能电网广域需求响应中实现自适应的一对多的多播传输；

② 电网广域需求响应的基础是实时状态估计，实时状态估计的准确性依赖各种监测测量数据的实时传送，然而针对不同业务类型的各种监测数据而构造的多播同时运行在广域网中容易引起网络拥塞，进而导致大量数据包延时，严重影响到电网的稳定性。目前需求响应多播的研究主要集中在单个多播的路径优化上，以达到通过设计较好的多播路由优化单个多播的传播时延。多个多播共存下的时延优化以及通信资源调度尚未在设计中考虑；

③ 电网广域需求响应的稳定性不仅依赖于多播数据传输的实时性，也依赖于不同电力用户的需求响应能力。例如大型工厂等电力消耗较大的工业电力用户往往分布在距离控制中心较远的郊区，但其需求响应能力对电网的稳定性影响较大；居民区等电力消耗较小的电力用户常常分布在距离控制中心较近的城镇区，但其需求响应能力对电网的稳定性影响较小。因此，构造广域需求响应多播不仅要考虑时延约束，还需考虑电力用户需求响应能力的差异性，避免出现需求响应能力大的用户通信时延较大，引起较大电网频率波动，进而影响电网稳定性。

针对单个多播路由的优化问题，项目组提出了基于多播路由的广域网实时通信架构与优化模型，该项研究主要包括以下三部分内容：其一是以最小化端到端通信延时为目标，提出了基于发布-订阅的广域网多播路由通信框架（如图 1 所示），以降低广域网通信带宽负载；其二是在上述通信框架的基础上，建立了考虑带宽约束的端到端时延约束优化模型，并提出了基于拉格朗日松弛的求解方法。该方法实现了广域网端到端通信时延的约束优化，同时避免了网络拥塞；其三是针对电网广域网通信架构，提出了基于迭代计算的广域网多播路由实现方法，为理论成果在广域网中的应用提供了技术方案。

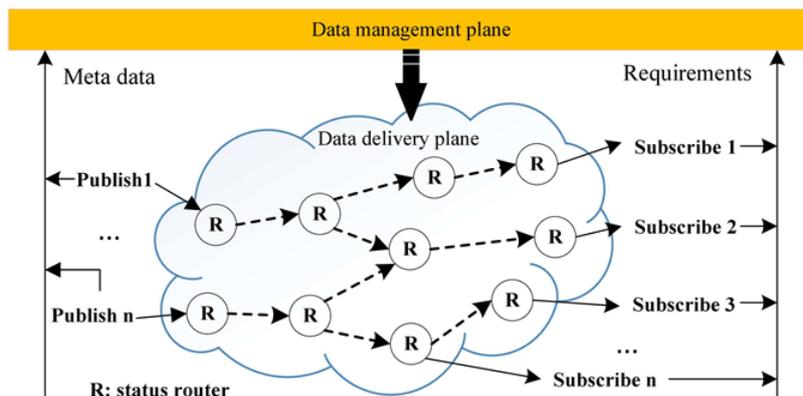


图 1 基于发布-订阅的广域网多播路由通信框架

针对多个智能电网应用程序共存的要求，通信网络能够同时容纳多个组播通信，且具有低延迟。这种要求会导致多组播树中的一些共享链路拥塞，从而降低组播延迟性能，如图 2 所示。为了解决这一问题，课题组提出了一个通用的框架来处理智能电网中具有共享链路的多组播树中的组播路由延迟，称为介数带宽比构树方法（简称 BCBT）。该方法将组播延迟问题表述为有约束的 BCBT 优化问题。在流量较小的情况下采用最短路径树组播路由，在组播链路发生拥塞时切

换到 BCBT 组播路由，从而缓解了最短路径树多播引起的拥塞。同时，提出了一种基于启发式的贪心算法来求解 BCBT 优化问题，仿真结果验证了该方法的有效性。

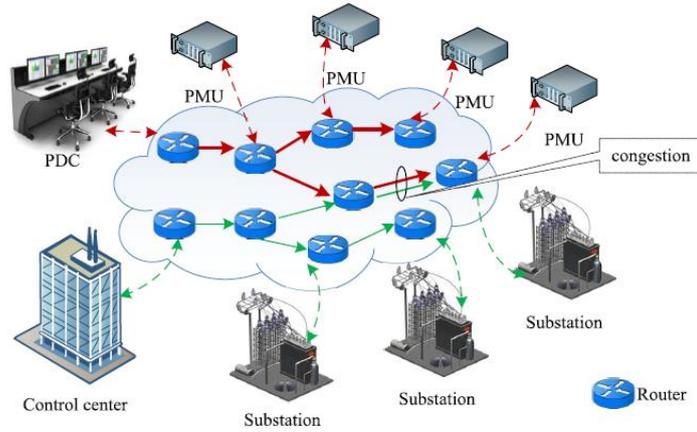


图 2 多个多播树共享链路示意图

针对多个多播共存下，控制中心之间的通信资源调度问题，课题组也展开了基于加权循环调度的电网广域控制中心间的通信资源调度的相关研究。引入加权循环调度来合理分配网络通信资源，权重的设计需要考虑主站间通信业务流的特点，如图 3 所示。其有三个特征：PMU 采样频率；PMU 数据包大小；需求响应控制数据流特征。调度具体步骤是：第一步将多个队列流量归一化。根据当前轮次队列业务流大小确定当前多个队列业务流的均方差，该步骤可以确定所有队列的业务流离散程度；第二步是确定迭代权重，当电网中的 PMU 采样发生改变或需求响应控制数据流发生改变时，为了自适应地感知变化，及时根据 PMU 新的采样频率和数据包大小调整调度算法中的权重。

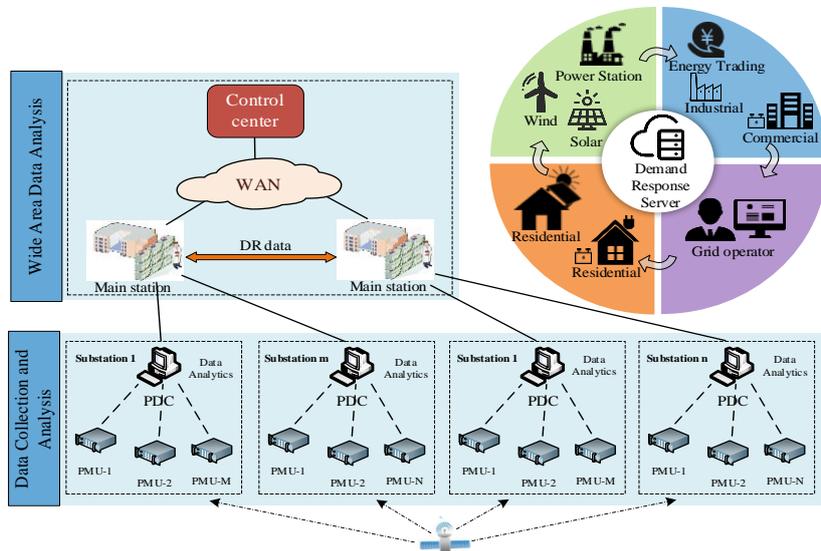


图 3 主站间通信业务流示意图

针对不同需求响应能力的电网用户对电网稳定性影响差异较大的特点，项目组展开需求响应能力约束下的广域多播路由研究，如图 4 所示。由于考虑需求响应能力和通信时延约束的多播路由优化问题是一个 NP 完全问题，通常采用启发式方法求解该问题。课题组在典型的基于时延约束的多播路由算法 KPP 基础上，提出和设计了综合考虑智能需求响应设备的需求响应能力、时

延和多播开销的多播路由树构造方法。该方法包括四个基本步骤：①根据广域网拓扑构建满足时延优化目标中约束条件的闭合图，即包括源节点和目的节点的完全图；②根据算法的启发函数求出该完全图的最小生成树；③根据需求响应能力调整多播树；④把完全图的最小生成树还原到原网络，去掉可能存在的环。

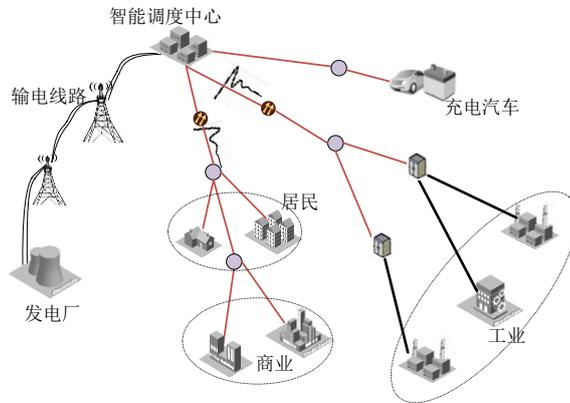


图 4 智能电网中含有不同电力用户的多播通信示意图

2) 智能电网邻域及用户域需求响应信息传输技术研究进展及成果

智能电网邻域网是连接电能供应商与用户侧的桥梁，而电网用户域网络是工业用户实时监控生产流程能耗状况并进行需求响应优化的途径。由此可见，电能邻域及用户域的双向信息传输技术，是电网用户侧需求响应的重要组成部分，也是确保工业用户需求响应顺利开展的关键技术之一。但是，智能电网邻域及用户域信息交互技术的前期研究，仍然存在以下问题：

① 在确保邻域网健壮性方面，无线 Mesh 网络相较于传统的星型与树型网络，具有较大的技术优势，但是仍缺乏来源于实际电网邻域网的无线 Mesh 网络拓扑结构，使得需求响应信息实时传输技术的研究缺乏有效的测试与分析场景。目前，研究中所采用的分析场景，在网络规模与拓扑结构方面与实际应用场景之间存在较大的差距；

② 邻域网覆盖范围较大（大约 5-25 平方公里），通常涵盖数百到上万个网络节点，但是邻域网的通信带宽通常限制在 1 Mbps 以内；如何在带宽受限的情况下，实现邻域网中需求响应信息的实时有效传输，也是该方向需要解决的难点之一；

③ 工业生产环境中的通信协议众多、存在大量私有协议、碎片化严重，使得不同厂家生产设备之间的兼容性较低。另外，现存的工业生产设备大部分不具备需求响应信息交互的能力，很大程度上限制了工业需求响应能源管理的自动化与智能化水平。

针对目前缺乏无线 Mesh 网络场景的问题，项目组展开研究，综合考虑智能电网邻域网的技术特点，如信号传输距离、通信带宽、网络规模、覆盖面积等，提出了面向电网邻域网的无线 Mesh 网络拓扑生成方法，同时在网络构建过程中参考复杂网络中的局部世界模型（local-world model），确保了所生成无线 Mesh 网络拓扑的无尺度特性，并从理论角度对网络的特性进行了论证分析。

项目组所提出的网络拓扑生成过程主要包括两个步骤：①在网络中部署少量初始节点，构成电网邻域网初始连通图；②向网络中循环添加具有随机位置的网络节点，新节点参考局部世界模型的连接建立方式，计算与其通信范围内各邻居节点的连接概率，并根据连接概率以随机的方式与 m 个邻居节点建立连接。网络建立过程如图 5 所示，当网络中节点数目达到设置值 N 时，

网络拓扑结构生成结束，并形成如图 1(c)所示的具有无尺度特性的网络拓扑结构。该方法的提出为智能电网需求响应信息邻域实时传输技术的研究，提供了契合实际电网邻域网特性的分析与测试场景。

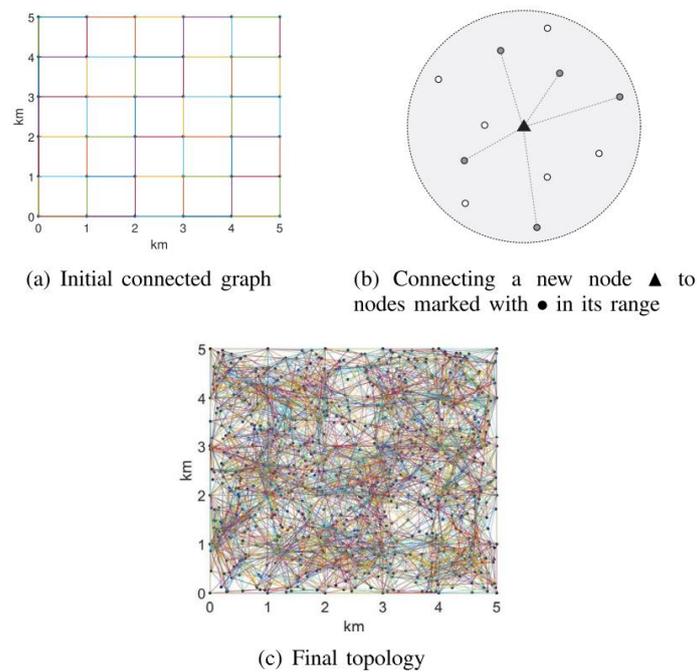


图 5 邻域网无尺度拓扑结构生成过程

在构建无线 Mesh 邻域网络拓扑结构的基础上，项目组针对电网邻域带宽资源受限、覆盖范围广、且节点数目众多等特点，对邻域需求响应信息传输技术进行研究，重点解决非可靠无线传输链路条件下，电网需求响应信息的实时可靠传输方法，其场景描述如图 6 所示。

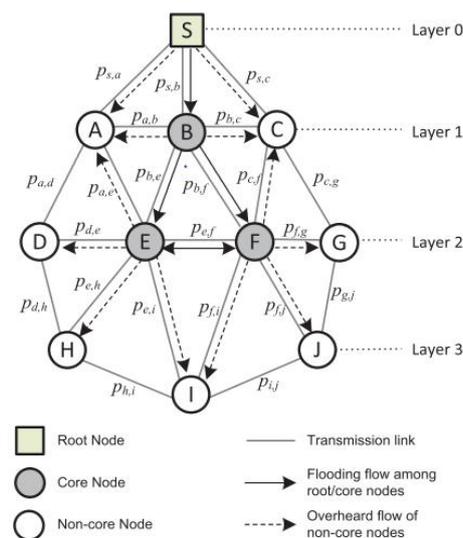


图 6 非可靠链路下需求响应信息传输场景

在研究过程中，项目组充分考虑到智能电网邻域网的核心网络节点为智能电表这一特殊性：一方面，智能电表在安装后位置相对固定，因此整个邻域网具有相对稳定的网络拓扑结构；另一

方面，智能电表之间的无线链路，存在不可避免的丢包、误码等问题。基于上述特点，项目组制定了基于网络拓扑结构的需求响应信息实时广播方法，其核心思想是根据邻域网络拓扑结构 $G(V, E)$ 、链路丢包率 p 、以及系统可靠性指标 α 等，构建可靠性约束条件及目标函数，将邻域需求响应信息实时可靠传输问题，转化为约束条件下的优化问题，从而计算出邻域网中最适合进行需求响应信息传输的核心节点，并确保网络中每个节点成功接收需求响应信息的概率大于可靠性指标。

图 7 以包含 1000 个节点的邻域网为示例，对核心节点的选取过程进行展示，验证了所提出方法在选取网络核心节点方面的有效性，进一步的网络仿真分析也确定了需求响应信息传输的可靠性与实时性。同时，为了进一步分析所提出方法的优越性，项目组搭建了仿真平台，以节点数目为 2000、3000、4000、5000 的邻域网为实验对象，以传统随机洪泛、RA-MPR 为参照，分析验证了所提出算法在通信带宽、时延等方面性能的优越性。

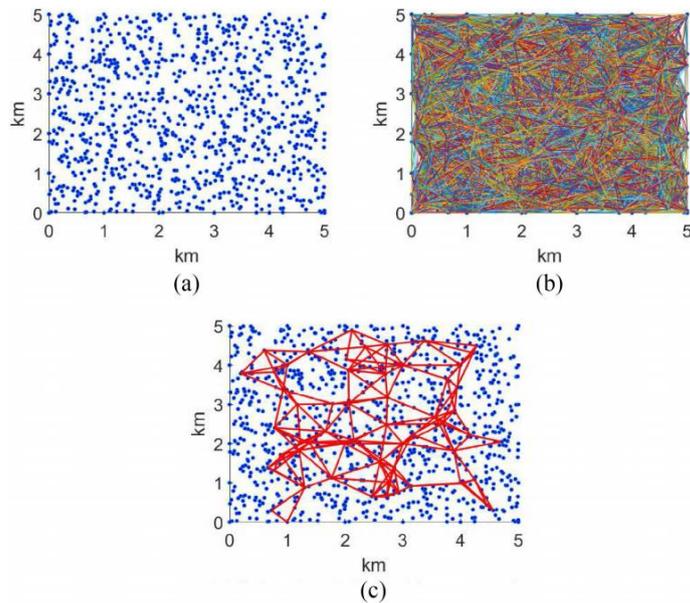


图 7 核心节点计算结果示例

针对智能电网工业用户域通信协议种类繁多，且碎片化严重等问题，项目组在研究过程中特别注重遵循智能电网领域的标准化通信协议，开发了基于国际标准 SEP 2.0 的用户侧需求响应通信协议栈及需求响应智能终端原型机，并搭建了演示系统，如图 8 所示。SEP 2.0 协议是专门为智能电网用户侧信息交互而设计的开放标准，已经通过 IEEE 标准工作组的认证，编号为 IEEE Std 2030.5。该标准在开放互联网协议架构的基础上，对电网用户智能终端的基本功能集、数据表示方式、以及交互流程等做了详细规定。

在开发过程中，项目组经过对比分析，最终选用了 TI 公司的 SimpleLink Wi-Fi CC3220 LaunchPad 嵌入式开发板为基础平台，在该平台已经提供的 WiFi、TCP/IP 通信、Web 服务等功能的基础上，针对 SEP 2.0 的功能需求做了进一步完善，实现了 SEP 2.0 标准中规定的服务发现 mDNS、TLS 加密、XML 文件打包/解析处理、URI 查询等功能，并开发了 MeteringReading、Pricing、Billing 等功能集。同时，开发了基于 SEP 2.0 的用户侧智能终端原型机 2 台，实现了电网需求响应所要求的实时电价、动态计量、以及智能检测等功能。由于 SEP 2.0 采用开放的互联网架构，所开发的智能终端具备与手机、平板、电脑等多种设备的交互功能，且中间无需网关进行协议转换。



图 8 SEP 2.0 通信协议栈及原型机

同时，项目组开发了基于 IEC 61850 国际标准的智能电网工业控制系统实验平台，如图 9 所示。该平台基于开源项目 libiec61850 搭建而成，由上位控制主机、智能终端设备、流量监控主机、模拟攻击主机、以及网络交换机构成，实现了对 IEC61850 GOOSE、MMS、以及 SV 的兼容性测试、网络性能分析、以及安全分析等功能。



图 9 智能电网工业控制系统实验平台

3) 智能电网工业用户自适应需求响应模型研究进展及成果

工业用户是智能电网中的主要电能消费者之一。参考国家能源局 2019 年的统计数据，我国第二产业（广义工业）总用电量为 49362 亿千瓦时¹，占全年总用电量的 68%。如此大体量的电能需求，会对电能供应侧形成巨大的压力。因此，研究面向工业生成流程的电力需求响应模型，对于缓解工业负载对电网供应侧的压力、平衡电网中的电能供求关系，具有重要的现实意义。但是，工业用户需求响应模型的研究，存在较大的技术难点：

① 面向工业生产流程的电力需求响应，不同于家居、建筑等需求响应场景，其用电设备之间存在着较高的关联性，属于强耦合系统。在工业生产过程中，针对单一用电设备的需求响应优化，可能会引起关联设备的电力负载发生变化，因此具有较高的不确定性。

¹ http://www.gov.cn/xinwen/2020-01/21/content_5471157.htm

② 工业用户的首要目标是完成生产任务，面向工业用户的需求响应管理，须在不影响整体生产进程的前提下进行。另外，工业用户对系统的可靠性具有严格要求，且生产流程多种多样，差异性较高。上述特性为工业需求响应模型的研究带来了一定的困难。

针对上述问题，课题组设计并提出了基于多 Agent 深度强化学习的工业用户需求响应模型。该模型将工业用户的电力需求响应问题，抽象为部分可观察的马尔可夫博弈过程(Partially Observable Markov Game Process, POMG)，以工业生产流程拓扑结构、生产目标任务、以及电网动态电价为输入，以需求响应优化为目标，通过多 Agent 深度强化学习的方式，获取电网动态电价下的最优生产调度策略。

研究过程中，项目组首先建立面向工业生产流程的标准化表示模型，如图 10 所示。具体建模方法参考国际标准 IEC-TS-62872²，该模型有效屏蔽了不同生产过程之间的差异性，从而将流程各异的生产过程抽象为统一的表示形式，降低了电力需求响应模型设计的复杂性。在该模型中，用于工业生产的电力设备用 M 表示；设备所生产的产品由 B 进行缓存；FEMC 代表工业用户内部的能源管理系统；FEMC 通过智能电表/网关获取智能电网实时电价信息，通过用户侧局域网络收集生产过程的能耗状态信息，并进行需求响应优化调度。

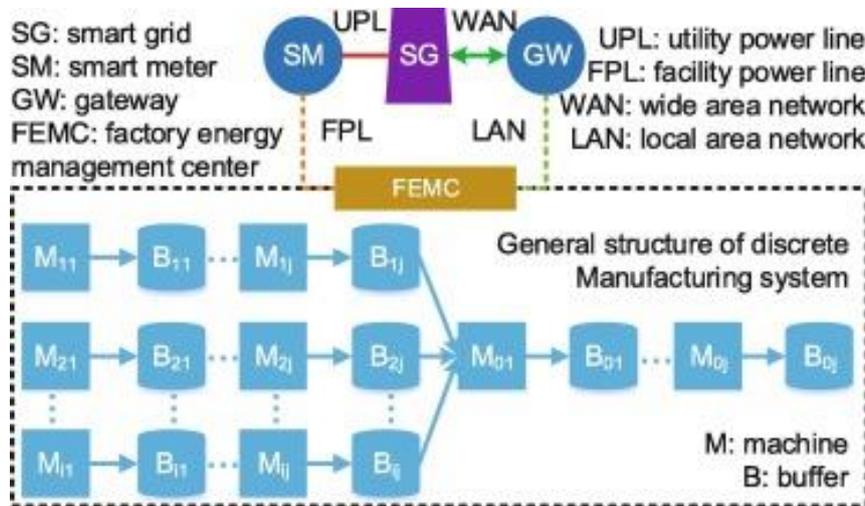


图 10 工业用户能源管理系统表示模型

同时，项目组将工业生产流程中，各用电设备交互作用下的需求响应优化问题，转换为部分可观察的马尔可夫博弈问题，并提出了基于 Actor-Critic 策略的多 Agent 强化学习优化方法，如图 11 所示。该方法中，每个工业用电设备与一个 Agent 模型、一个 Critic 模型相关联；其中 Agent 模型根据生产设备运行状态局部信息，选取本地最优控制策略；Critic 模型除掌握设备本地信息外，还可以通过用户域通信网络，收集工业生产流程的全局信息，并在训练过程中对 Agent 模型所选取控制策略的性能进行评估。

同时，项目组以锂电池装配流程为案例，搭建了仿真平台，对所提出方法的需求响应性能等进行分析。仿真结果表明，所提出的需求响应模型，在不影响生产任务的前提下，可以有效降低工业用户的电能开销（10%左右）。

² IEC-TS-62872:2015. Industrial-process measurement, control and automation system interface between industrial facilities and the smart grid, Standard, International Electrotechnical Commission (IEC).

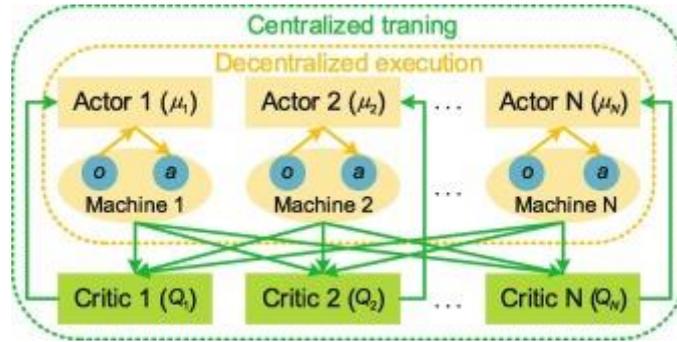


图 11 基于 Actor-Critic 的多 Agent 强化学习优化方法

2. 存在的问题、建议及其他需要说明的情况。

(1) 本项目研究面向工业用户的需求响应模型及方法，建立了较为完备的工业需求响应理论体系。但是也应当指出，该方向的进一步深入研究，面临一定的实际困难。其中，比较重要的一点是，缺乏代表性的工业实验场景及大规模实际生产数据作为支撑。由于工业生产的特殊性，用户对实际工业流程、生产数据的共享持谨慎态度，对新技术的接纳程度较低；在一定程度上限制了该方向的进一步发展以及成果的应用；

(2) 基于在该项目研究过程中所面临的实际问题，我们提出两点建议：① 构建工业数据开放共享机制，吸引更多理论功底深厚且缺乏行业背景的学者投身该领域的研究工作；② 建设基于物理机理的工业流程开放虚拟仿真平台，为工业需求响应模型的验证、评估、以及优化等，提供便捷。

(二) 成果部分

1. 项目取得成果的总体情况。

(1) 发表 SCI 检索论文 10 篇，其中 8 篇第一/通信作者为项目组核心成员

- [1] **Ding, Yuemin**; Li, Xiaohui; Tian, Yu-Chu*; Ledwich, Gerard; Mishra, Yateendra; Zhou, Chunjie; Generating scale-free topology for wireless neighborhood area networks in smart grid, *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2019, 10(4): 4245-4252.
- [2] **Ding, Yuemin**; Tian, Yu-Chu*; Li, Xiaohui*; Mishra, Yateendra; Ledwich, Gerard; Zhou, Chunjie; Constrained broadcast with minimized latency in neighborhood area networks of smart grid, *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2020, 16(1): 309-318.
- [3] **Li, Xiaohui**; Tian, Yu-Chu*; Ledwich, Gerard; Mishra, Yateendra; Zhou, Chunjie; Minimizing Multicast Routing Delay in Multiple Multicast Trees With Shared Links for Smart Grid, *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5427-5435.
- [4] Lu, Renzhi; Li, Yi-Chang*; Li, Yuting; Jiang, Junhui; **Ding, Yuemin***; Multi-agent deep reinforcement learning based demand response for discrete manufacturing systems energy management, *Applied Energy*, 2020, 276: 115473.
- [5] Lu, Renzhi; Bai, Ruichang; Huang, Yuan*; Li, Yuting; Jiang, Junhui; Ding, Yuemin; Data-driven real-time price-based demand response for industrial facilities energy management, *Applied Energy*, 2021, 283: 116291.

- [6] Zhang, Hongwei; Wang, Jinsong*; Ding, Yuemin; Blockchain-based decentralized and secure keyless signature scheme for smart grid, *Energy*, 2019, 180: 955-967.
- [7] **Duan, Quanzhen**; Wang, Xuan; Huang, Shengming*; Ding, Yuemin; Meng Zhen; Shi Kai; 0.55-1.8 V, 7.5 nW, 225.5 mV, CMOS-only subthreshold voltage reference, *Electronics Letters*, 2019, 55(6): 306-308.
- [8] **Duan, Quanzhen**; Li, Weidong; Huang, Shengming*; Ding, Yuemin*; Meng, Zhen; Shi, Kai; A Two-Module Linear Regulator with 3.9-10 V Input, 2.5 V Output, and 500 mA Load, *Electronics*, 2019, 8(10): 1143.
- [9] Cai, Bin; Mao, Shan-Li; **Li, Xiaohui***; Ding, Yuemin; Dynamic energy balanced max flow routing in energy-harvesting sensor networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, 13(11): 1550147717739815.
- [10] Shi, Yifang; Xue, Mengfan; **Ding, Yuemin***; Peng, Dongliang; Improved Multitarget Tracking in Clutter Using Bearings-Only Measurements, *Sensors*, 2018, 18(6): 1772.
- (2) 发表 EI 检索论文 10 篇, 均由项目组核心成员担任第一/通信作者
- [11] Zhu, Zihao; **Li, Xiaohui***; Ding, Yuemin; Liu, Zhenxing; Demand response capacity constrained optimization of multicast routing in smart grid, *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2020, 19(1): 33-41.
- [12] Lu, Yaqi; **Ding, Yuemin***; Duan, Quanzhen; Li, Xiaohui; Tian, Yu-Chu; Upper-middleware development of smart energy profile 2.0 for demand-side communications in smart grid, *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Washington D.C., USA, 21-23 Oct. 2018.
- [13] Gao, Shipeng; **Ding, Yuemin***; Lu, Yaqi; Han, Li; Zhou, Lei; Chen, Chao; Yu, Xiaohan; Huang, Xuefei; A Lightweight Fingerprint-based Device Authentication Architecture for Wireless Industrial Automation Networks, *International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI)*, Shenyang, China, 23-27 Jul. 2019.
- [14] Tan, Xin; **Li, Xiaohui***; Liu, Zhenxing; Ding, Yuemin; Burst Traffic Awareness WRR Scheduling Algorithm in Wide Area Network for Smart Grid, *International Conference on Communications and Networking in China*, Shanghai, China, 29 Nov.-1 Dec. 2019.
- [15] Long, Dan; **Li, Xiaohui ***; Ding, Yuemin; Liu, Zhenxing; A Comparative Study of Multicast Routing under DR Constraint for Smart Grids, *Chinese Control Conference (CCC)*, Wuhan, China, 25-27 Jul. 2018.
- [16] Zhu, Zihao; **Li, Xiaohui***; Ding, Yuemin; Huang, Pei; Liu, Zhenxing; A Comparative Study of Multicast Routing minimizing bandwidth under delay constraint for Smart Grids Communication, *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 22-24 Aug. 2020.
- [17] Shi, Bin; Hu, Yujie; Duan, Quanzhen; Han, Li; **Ding, Yuemin***; A Crowdsourcing-based Localization Scheme with Ultra-Wideband Communication, *The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Singapore, 18-21 Oct. 2020.
- [18] Hao, Zhao; **Li, Xiaohui***; Ding, Yuemin; An Improved PSO Algorithm for node localization

in indoor Long-Narrow Confined Space, *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, China, Hubei, Wuhan, 31 May-2 Jun. 2018.

[19] Chen, Yan; **Li, Xiaohui***; Ding, Yuemin; Xu, Jinpeng; Liu, Zhenxing; An Improved DV-Hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks, *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, China, Hubei, Wuhan, 31 May-2 Jun. 2018.

[20] Gao, Jieyu; **Li, Xiaohui***; Ding, Yuemin; Su, Qian; Liu, Zhenxing; WiFi-Based Indoor Positioning by Random Forest and Adjusted Cosine Similarity, *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 22-24 Aug. 2020.

(3) 发表中文核心期刊论文 3 篇

[21] 谭鑫; **李晓卉***; 刘振兴; 丁月民; 赵敏; 王琦; 基于电网的采样感知加权循环调度算法, *计算机应用*, 2019, 39(07): 2061-2064.

[22] 段平刚; **李晓卉***; 丁月民; 刘振兴; 基于无线智能燃气抄表物联网的能量感知路由, *计算机工程与设计*, 2020, (10): 2713-2717.

[23] 陈岩; **李晓卉***; 丁月民; 刘振兴; 面向输电线故障信息传输的多播路由, *计算机工程与设计*, 2020, (01): 21-26.

(4) 授权发明专利 2 项

[24] 黄胜明; 王焯; 段权珍; 丁月民; 一种低功耗低电压低温漂的亚阈值基准电压产生电路, 授权号 ZL201811440576.4, 中国, 2020-10-09.

[25] **段权珍**; 丁月民; 黄胜明; 刘慧敏; 苏林; 郭天; 一种基于双采样技术的高压信号采样电路, 授权号 ZL201710311485.X, 中国, 2020-07-07.

3. 人才培养情况。

培养硕士研究生 6 人:

[1] 卢亚琪, 毕业硕士, 论文题目: 基于 SEP2.0 的智能电网用户侧通信技术研究, 天津理工大学, 导师: **丁月民**, 答辩时间: 2020.03.

[2] 高世鹏, 毕业硕士, 论文题目: 基于 UWB 的工业物联网轻量指纹构建及认证方法研究, 天津理工大学, 导师: **丁月民**, 答辩时间: 2020.03.

[3] 龙丹, 毕业硕士, 面向智能电网通信的可靠路由研究面向智能电网通信的可靠路由研究, 武汉科技大学, 导师: **李晓卉**, 答辩时间: 2019.05.

[4] 陈岩, 毕业硕士, 基于 WSN 的输电线路故障位置实时监测系统, 武汉科技大学, 导师: **李晓卉**, 答辩时间: 2019.05.

[5] 谭鑫, 毕业硕士, 面向电网广域监测主站的实时通信调度分析, 武汉科技大学, 导师: **李晓卉**, 答辩时间: 2020.05.

[6] 段平刚, 毕业硕士, 智能电网通信网络拓扑安全及路由研究, 武汉科技大学, 导师: **李晓卉**, 答辩时间: 2020.05.

4. 其他需要说明的成果。

(1) 开发智能电网需求响应协议栈及智能终端原型机 2 个;

- (2) 搭建智能电网工业控制系统实验平台 1 套；
- (3) 获国家电网天津公司科技进步二等奖 1 项，2018 年；
- (4) 部分成果通过省部级技术鉴定。

5. 项目成果科普性介绍或展示网站。

<https://www.yuemin.cc/research.html>