

引用格式:张凯瑞,明昊,高赐威.基于 CPSS 视角的需求响应能力评估综述[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):28-46.

Citation: ZHANG Kairui, MING Hao, GAO Ciwei. A review of demand response capability assessment based on CPSS perspective[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 28-46.

## 基于 CPSS 视角的需求响应能力评估综述

张凯瑞,明昊,高赐威

(东南大学电气工程学院,江苏南京 210098)

**摘要:**对信息—物理—社会系统与需求响应评估的结合进行综述。首先对信息物理系统的历史和框架进行分析。接着总结了现有的需求响应研究现状,包括需求响应潜力评估的意义、分类和评估方法。对于需求响应能力评估的数据来源进行总结,包括问卷调查和运行数据采集。在信息—物理—社会系统与需求响应结合方面,分别分析需求响应的物理域、信息域和社会域基础,介绍相应的建模方法和研究内容。最后,对未来的研究展望进行讨论,包括市场考核机制、快速仿真与建模技术以及综合能源下的需求响应管理。

**关键词:**信息—物理—社会系统;需求响应;潜力评估;信息网络;新型电力系统;用户行为

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.003 **中图分类号:** TK-9 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0028-19

### A review of demand response capability assessment based on CPSS perspective

ZHANG Kairui, MING Hao, GAO Ciwei

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The combination of cyber-physical-social systems and demand response assessment is reviewed. First, the history and framework of cyber-physical systems are analyzed. Then, summaries are provided for the existing research on demand response, including the significance, classification, and evaluation methods of demand response potential assessment, as well as the data sources for demand response capability assessment, including questionnaire surveys and operational data collection. In terms of the combination of cyber-physical-social systems and demand response, the physical domain, information domain and social domain foundation of demand response are analyzed respectively, and the corresponding modeling methods and research contents are introduced. Finally, prospects are provided for market assessment mechanisms, rapid simulation and modeling technologies, and demand response management under integrated energy systems.

**Key words:** cyber-physical-social systems; demand response; potential assessment; information networks; new power systems; user behavior

随着“双碳”政策的不断推进,中国正加快建设以新能源为主体的新型电力系统<sup>[1]</sup>。为平衡可再生能源不确定的先天特性,对可调节资源的需求随之上升<sup>[2]</sup>。为了发掘并接入更多可调节资源,在内部,中国正加强智能电网构建,为各主体的交互建立坚实的设施基础;在外部,中国正加快电力体制改革,

通过推进电力市场建设,发掘新型市场主体与商业模式,引导可调节资源的开发,实现对能源产业的优化配置<sup>[3]</sup>。智能电网是利用智能监测技术、控制技术、通信技术以及自愈技术装备起来的电力网络。它可以为电力生产者和消费者提供更便捷的服务和更灵活的选择,实现个体产消者与系统的交

收稿日期:2024-01-01;修回日期:2024-01-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金(52207081);江苏省自然科学基金青年基金(BK20210244)

通信作者:明昊(1990—),男,博士,副教授,主要从事电力市场、需求侧响应、大数据分析等方面的研究;E-mail: haoming@seu.edu.cn

互,并具有电力和信息双向流动性的特点<sup>[4]</sup>。

究其本质,智能电网是一种典型的信息物理系统(cyber-physical systems,CPS),是在实体物理电网的基础上,依托通信检测技术而构建,是信息网络与物理网络的融合产物<sup>[5]</sup>。在构建电力市场,提升电网交互性的背景下,需求侧的加入为电力系统注入了新的活力。通过提供需求响应,用户需求侧灵活性资源能够为系统提供削峰填谷与系统备用等辅助服务,降低系统运行成本<sup>[6]</sup>。但个体产消者的行为存在着严重的不确定性,受自然环境、电价信号、用户心理等社会因素的共同影响<sup>[7]</sup>。为此,薛禹胜院士和余星火教授在2017年指出:在开放市场的环境下,智能电网的构建需要考虑互动参与者心理评估的社会元素的影响,在CPS的基础上,构建能源层面的信息物理社会系统(cyber-physical-social systems,CPSS)<sup>[8]</sup>。

智能电网是一个高度自动化与广泛分布的能量交换网络,依靠通信技术实现信息的实时交互与设备上的近乎瞬时平衡。作为集信息、通信、智能控制技术为一体的高效管理平台,在用户侧接入的背景下,智能电网体现出物理域、信息域和社会域交融的特征<sup>[9]</sup>。

在物理域层面,柔性负荷的接入(如空调、电动汽车和数据中心)为系统带来了更强的弹性<sup>[10]</sup>。柔性负荷通过其时间转移特性、储能特性和空间转移特性,为系统提供响应服务,使系统逐渐由“发输配”管理转向“发输配用”的综合结构<sup>[11]</sup>。

在信息层面,中国已安装了4亿至5亿块智能电表,获得了大量的系统运行数据。引入了包括深度学习<sup>[12]</sup>、迁移学习<sup>[13]</sup>、联邦学习<sup>[14]</sup>等多种计算机技术对大数据进行分析,并能够在信息样本不足且考虑用户隐私保护的情况下,实现需求侧资源响应能力的评估。

在社会层面,市场组织与商业模式的发展使得用户及其集群代理能够成为具有售电/用电双重身份的产销者。而用户的社会属性、行为偏好、营销模式等外部因素的多样性导致了用户用电行为的复杂性。用户行为直接决定需求响应的结果,因此在对用户社会行为进行分析的同时,需要考虑用户在有限信息与有限理性的背景下的决策不确定性,以保障系统运行的稳定性<sup>[15]</sup>。

对需求响应(demand response,DR)的评估有助于指导政府的能源规划<sup>[16]</sup>,降低电力系统运行成

本,优化虚拟电厂、综合能源代理等聚合商商业模式<sup>[17]</sup>,实现多方共赢的局面。本文基于能源层面的CPSS构建体系,分析了需求侧资源在新型电力系统下对各方主体的价值,纵向与横向分析了需求侧资源评估在信息—物理—社会领域的关联关系。最后对考虑不确定性的市场考核与DR调用、考虑响应反馈的模型交互参数识别、考虑综合能源的DR管理进行了拓展,展望了未来CPSS与DR融合的研究方向。

## 1 CPSS研究现状

随着计算机、通信、控制等技术的不断发展,社会、经济、生态等因素不断融入原有的工程系统中,系统复杂程度显著提高<sup>[18]</sup>。通过提高系统的灵活性,增强系统的安全性与适应能力,控制系统正由传统的侧重于物理系统或物理信息系统转向信息物理社会系统。

### 1.1 CPSS历史沿革

信息—社会—物理(cyber-social-physical,CSP)系统最早在20世纪90年代末被提出,作为一种管控复杂系统的通用框架,如图1所示。该系统涉及了人类与社会环境、制度等多方要素的互动关系,由实体物理系统、社会环境以及连接社会系统与物理系统的信息系统共同构成<sup>[19]</sup>。CSP系统最早由中国科学院智能控制与系统工程中心应用于交通领域,用以实现交通系统和自动驾驶的平行管控<sup>[20]</sup>。在此之后,CSP系统还被应用于社会计算与人肉搜索领域<sup>[21]</sup>,并在2010年正式被更名为信息—物理—社会系统(CPSS)。在国外,有学者在研究交通领域的CPS系统与人类互动的关系时提出了信息—物理—人类系统(cyber-physical-human systems,CPHS),将CPHS定义为包含人类与CPS系统互动的一类系统,该定义与CPSS完全相同,主流的研究还是将该系统定义为CPSS<sup>[22]</sup>。

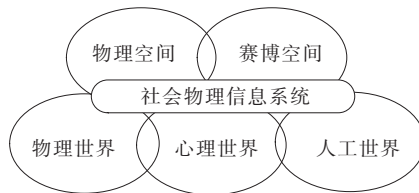


图1 信息—社会—物理系统的原理架构

Figure 1 The principle architecture of CSP systems

CPSS的哲学基础是卡尔·波普尔的“3个世界”

理论。在该体系下,宇宙由物理世界(第1世界)、心理世界(第2世界)、人工世界(第3世界)共同组成。第1世界代表了客观的物质基础和物理现象;第2世界反映了主体对于世界的认识和态度,包含了人类的意识与习惯;第3世界是人类在认识自然的基础上进行的改造自然实践,包含人类历史发展过程中的文化、文明与科学技术等人工产物。3个世界的交互形成了物理空间与信息空间,2个空间的融合形成了CPSS。

在物联网与云计算的不断发展下,人类和社会行为的多样性使得物理系统及其模型之间的映射关系变得复杂,系统不再是单向地由中心发布指令,再由子系统予以绝对执行。由于人的行为难以用明确的规划与清晰的模型来描述,适用于传统物理信息系统的“牛顿定律”难以在互动性的系统架构中实现对参与主体行为的描述,系统控制逻辑逐步向“默顿定律”转变<sup>[23-24]</sup>。“默顿定律”泛指由美国社会学家默顿命名的各种能够引导系统行为的“自我实现预言”。该预言可以理解为系统为引导用户开展某项行为而进行的价值承诺。在系统激励与用户对效用趋利的共同作用下,实现对系统的调控。“默顿系统”的最大特征是:即使给定当前的状态和控制,系统下一时刻的状态也无法通过计算被精确地预测。这便是考虑实际用户社会行为后的系统典型特征,即系统无法直接控制,只能间接影响<sup>[25]</sup>。

信息网络的进步是CPSS发展的最大动力。在互联网技术迅速发展,影响到企业、银行等机构的信息安全时,文献[26]提出开展CSP系统的研究,希望使用该系统实现在线信息的收集和处理。此后,人肉搜索的现象在世界范围内逐渐出现。作为一种集合网民力量,进行信息与资源搜索的社会化方法,人肉搜索展现出社会群体通过信息化网络所能够发挥的巨大力量与作用,而其衍生出的涉及道德伦理、隐私保护与人权的问题也引发了社会的广泛关注,促使了相关研究机构对CPSS的研究<sup>[27]</sup>。在2007年由中国科学院专家团队制定的《中国至2050年科技发展路线图》中明确指出,要将CPSS纳入“国家安全”“信息技术”和“智能制造”路线图<sup>[28]</sup>。发展至今,中国已对CPSS形成了较为完善的研究体系,覆盖了城市交通<sup>[29]</sup>、智能制造<sup>[30]</sup>、企业管理<sup>[31]</sup>、农业<sup>[32]</sup>等各学科领域。同时,近年来受到广泛关注的元宇宙领域也可以被视作一种CPSS的实

现,而CPSS即为元宇宙的科学抽象<sup>[33]</sup>。

## 1.2 CPSS框架

根据“3个世界”理论,CPSS需要将社会信号、物理环境、个体状态等相关信息纳入系统中,通过整合物理世界、心理世界、人工世界的各项资源,实现对系统的平行化、透明化、智能化、泛在化管理<sup>[34]</sup>。随着大数据、人工智能与数字孪生技术的发展,智能采集设备与运行设备已逐渐从各方面融入人类的社会文化生活与工业生产<sup>[35]</sup>。海量的数据被终端设备所采集,人类的行为已无法逃离各种智能算法与推荐技术的影响,甚至受到了某种程度上的“控制”,与信息共生将成为未来社会的必然趋势<sup>[36]</sup>。人一机一物的协同将是提升决策水平,实现信息空间与物理空间融合的关键所在,可以认为CPSS的关键元素是人一机一物之间的协同。CPSS架构协同如图2所示。

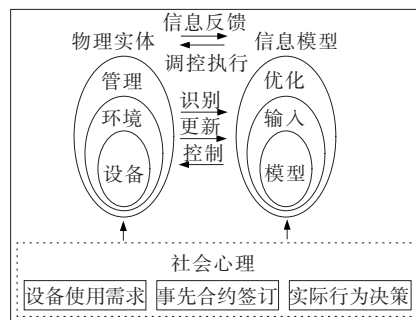


图2 CPSS架构协同

Figure 2 Collaborative diagram of CPSS architecture

与CPS相比,CPSS进一步拓展了信息的多元性,将社会系统中的意愿与偏好行为分析纳入了研究内容<sup>[37]</sup>。整体来看,CPSS中的C意为“Cyber”,代表着现实的信息域,是系统的感知器,对应着人工世界;P意为“Physical”,代表着现实的物理域,是一切活动的基础,对应着物理世界;S意为“Social”,代表着现实的社会域,是系统交互性的体现,对应着心理世界<sup>[38]</sup>。

作为一种框架结构,CPSS代表的是一种考虑社会行为偏好的实体设备与信息平台交互逻辑,网络系统与物理实体之间的指令与反馈将实现虚实互动的平行交互,交互的结果将重新指导系统对三者关系的构建。一方面,系统存在着融合空间下多维度人机交互及其融合的问题,另一方面,系统也存在着“自上而下”的知识驱动和“自下而上”的数据驱动相结合的运作机制。在大数据时代下,知识

是指导人类和机器学习工作的一系列指令或规则集合<sup>[39]</sup>。一个完备的自动化系统将能够实现信息的生成、采集,基于信息实现控制决策的生成与下发,并根据实践的结果进行反馈,实现决策能力的优化与系统的循环。知识驱动下的全流程自动化是面向社会物理信息系统的新研究框架,关键点是将复杂系统的不确定性、多样性、复杂性(uncertainty, diversity, complexity, UDC)特征转变成智能控制系统的敏捷、聚焦、收敛(agility, focus, convergence, AFC)特性<sup>[38]</sup>。为此,必须将知识自动化嵌入到基于 ACP 的平行智能框架和流程中,该框架结构如图 3 所示,由学习与训练、实验与评估、控制与管理 3 个运行模式连接而成。

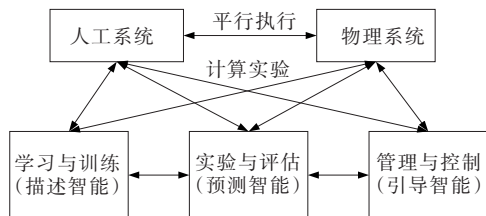


图 3 平行智能框架<sup>[40]</sup>

Figure 3 Parallel intelligence framework

人工系统是广义的知识模型,可以看成传统的数学建模或解析建模的扩展;计算实验是分析、预测、选择复杂决策的途径,是仿真模拟的升华;平行执行是由虚实互动构成的新型反馈控制机制,由此指导行动、锁定目标。人工系统和实际系统之间闭环反馈、虚实互动、平行执行可以实现复杂系统的有效管控,在迭代与反馈的过程中实现系统的全流程自动化运行。

## 2 DR 响应潜力评估研究

需求响应潜力的评估是对需求响应开展实际应用的前提。目前对需求响应潜力的定义尚未达成统一共识,基于不同研究重心,不同的学者提出了诸如“DR 容量”“响应能力”“可调度容量”“可调节潜力”“负荷调控潜力”“负荷灵活性”<sup>[41-43]</sup>等。最通用的定义为:在约定的控制方式下,用户以基线负荷为基准,能够增加/削减负荷的能力<sup>[44]</sup>。

### 2.1 DR 能力评估的意义

面向不同市场主体的责任与义务,DR 响应潜力评估有着相应的意义。根据从上到下的结构,在政府层面,开展 DR 潜力评估有助于其了解社会已有存量资源,评估结果对其制定电价政策与进行市

场改革有着重要参考价值<sup>[45]</sup>。DR 资源存量也会影响政府的能源规划,有助于解决国内广泛存在的短时尖峰负荷平衡需求<sup>[46]</sup>。研究表明,若在供给侧建设调峰电厂和配套电网,所需的投资成本高达约 1 万元/kW,而在需求侧开展 DR 削减尖峰负荷的投资成本仅为前者的 14%~20%<sup>[47]</sup>,将大大减少全社会整体投资。在电网运营层面,DR 潜力评估有助于调度中心制定运行调度计划,也对系统设计市场机制引导 DR 参与削峰填谷、促进新能源消纳以及降低系统运营成本有着重要参考意义<sup>[48]</sup>。在代理聚合商层面,DR 潜力评估结果将直接影响聚合商参与市场的意愿<sup>[49]</sup>。聚合商也将根据评估结果优化其商业模式,提高市场资源配置效率。在用户层面,DR 潜力评估将有助于用户认识自身参与市场的调节潜力,进而激发用户参与市场活动的意愿,有助于从根本上提高 DR 管理的有效性。

### 2.2 DR 潜力分类与能力评估方法

根据不同的目的,可以从响应类型、时间尺度、资源维度 3 个角度对 DR 资源进行分类。

#### 2.2.1 按照响应类型分类的 DR 潜力

按照类型划分,DR 潜力可以划分为理论 DR 潜力、技术 DR 潜力、经济 DR 潜力和可用 DR 潜力 4 类,如图 4 所示。在容量关系上,理论 DR 潜力 $\geq$ 技术 DR 潜力 $\geq$ 经济 DR 潜力 $\geq$ 可用 DR 潜力<sup>[50]</sup>。

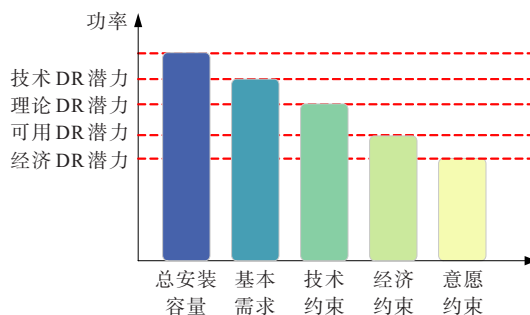


图 4 不同类型 DR 潜力示意

Figure 4 Different types of demand response potential

1) 理论 DR 潜力。理论 DR 潜力是指理论上负荷的最大调节潜力,等于基线负荷与最大响应点的差值<sup>[51]</sup>。在原理上,理论 DR 潜力等于所有可调设备完全关闭或开启时的响应量。对于电动汽车和储能等新型双向负荷来说,以其处于充电状态为例,理论上可通过增大充电功率实现上下调节,即理论上调 DR 潜力为最大充电功率和当前运行功率的差值。而下调节则可通过切换至放电状态来实现,即理论下调 DR 潜力为当前运行功率与最大放

电功率之和<sup>[52]</sup>。相比于纯用电负荷,储能类负荷具备双向调节能力,其理论DR潜力更大。理论DR潜力的评估结果较为粗糙,通常可用于判断负荷是否适合参与DR,进而确定DR的实施对象<sup>[50]</sup>。理论DR潜力还可以为政府提供规划参考,可以反映资源的分布格局。文献[51]评估了德国典型负荷的理论DR潜力,其2050年的负荷削减潜力为0.8~1.6 GW,负荷转移潜力为20~43 GW。文献[53]评估了欧洲30个电力消费领域的理论总DR潜力,每小时可提供负荷削减量61 GW,负荷增加68 GW。

2) 技术DR潜力。技术DR潜力是指考虑技术控制约束后的DR潜力。由于可调节负荷在实际调控过程中存在着诸如负荷可转移时间、DR最大响应时间、负荷最大中断次数等约束,技术DR潜力较于理论DR潜力的可靠性与适用性更强,适合于电网运营机构在制定市场机制时进行参考。该评估结果也可以向大众公布,对于聚合商判断是否加入市场,分析收益与设计商业模式时有着重要参考价值。文献[54]通过对负荷用电过程的定性分析以及对问卷调查结果的定量计算,结果表明在考虑技术约束下,蒙西地区的第二产业高峰负荷转移的技术DR潜力小于总负荷的10%。文献[55]对丹麦工业、商业以及居民用户的技术DR潜力进行了评估与未来发展模拟。

3) 经济DR潜力。经济DR潜力是在技术DR潜力的基础上,考虑实施DR所需的前期投资与运行成本后的DR潜力<sup>[50]</sup>。对于聚合商与用户而言,开展DR的前提是获取更高的经济效益或者更大的社会效用。若响应不能带来更高的收益,经济DR潜力将在技术DR潜力的基础上进一步缩减。经济DR潜力评估结果将辅助DR实施者评估项目收益,直接影响其参与市场的积极性。由于经济DR潜力由市场价格信号与商业代理模式共同影响,因此该评估结果属于聚合商与用户的内部信息。文献[56]通过研究不同的工业过程及其技术和经济特性,评估了德国部分工业领域的技术DR潜力和经济DR潜力。文献[57]通过对工厂运营商、研究机构、设备制造商等信息的收集,确定了制冷系统的特征参数,评估了德国曼海姆市制冷系统的经济DR潜力。

4) 可用DR潜力。在经济DR潜力的评估中,往往基于“理性经济人”模型假设分析用户的行为,可用DR潜力是在经济DR潜力的基础上,引入行为经济学,分析有限理性用户的意愿与偏好后的DR

潜力<sup>[58]</sup>。由于DR来源于用户的实际动作,即使参与DR存在着额外的收益,对经济不敏感的用户也可能在锚定效应下选择不参与或不完全参与响应,实际响应结果往往低于预期结果<sup>[15]</sup>。可用性DR潜力评估一般应用于对评估精度要求较高的场景,例如聚合商在考虑对用户资源进行选择性的聚合与响应指令下发。值得注意的是,由于系统运营机构无法直接接触用户,且无权了解聚合商与用户间的代理商业模式,因此难以评估可用DR潜力。文献[57]通过调查问卷分析用户的响应意愿估算可用DR潜力相对技术DR潜力的权重系数,进而评估了德国曼海姆市制冷系统的可用DR潜力,约为2.8 GW,相当于德国最大电力需求的4%~6%。文献[59]采用弹性系数法评估了空调负荷集群在不同激励和价格条件下的可用DR潜力。

以上文献评估了不同类型的DR潜力。不同的DR潜力类型在不同的使用场景下服务不同的主体。现有研究多侧重于理论DR潜力和技术DR潜力的评估,对经济DR潜力和可用DR潜力的研究不够深入。经济DR的评估与聚合商所开展的商业模式相关,可用DR的评估与用户行为相关。对此二类DR潜力的评估需要采用跨学科的研究模式,开拓新型的逻辑架构。

### 2.2.2 按照时间尺度分类的DR潜力

不同时间尺度下的DR潜力评估有着其特有的应用需求。整体来看,可将其分为超短期、短期和中长期3个时间尺度。

1) 超短期潜力。超短期DR潜力评估时间尺度一般为分钟级到小时级,由于涉及实时运行稳定性问题,常用以服务于电网实时调度及负荷聚合商辅助服务市场交易策略的制定。文献[60]提出了面向实时电价下的生产者和消费者的多阶段综合响应模型,从而评估用户参与实时市场的DR潜力。文献[61]以电动汽车为研究对象,综合考虑用户出行需求和电池损耗,建立了实时DR潜力的评估模型。文献[62]利用并行梯度决策树构建温控负荷集群,预估日内超短期DR潜力。

2) 短期潜力。短期DR潜力评估时间尺度一般为日级到星期级<sup>[16]</sup>,服务于电网日(星期)运行计划制定与负荷聚合商参与日前市场。文献[63]通过考虑响应时间裕度和荷电状态裕度,评估了电动汽车型虚拟电厂的日前DR潜力。文献[64]提出了基于分位数回归的日前DR潜力概率预测模型,并采用家庭智能管理系统对用户的响应行为进行了模拟。

### 3) 中长期潜力。

中长期DR潜力评估的时间尺度为月级到年级<sup>[16]</sup>,服务于电力系统规划以及容量市场交易,通常需要综合考虑未来各类用户的负荷增长、削峰率、用户参与率等来建立评估模型。如文献[65]综合分析用户的长期DR潜力、中期DR潜力以及响应水平,建立了基于中长期时间维度DR潜力的系统动力学模型,为DR激励机制设计提供了参考依据。文献[51]通过对德国各行业未来电力需求、灵活负荷比例等进行分析,进而评估了德国2035年和2050年各类负荷的DR潜力。文献[66]对中国某区域电网2013—2022年的DR潜力进行了评估,并推广评估了华北分部所有区域电网的DR潜力。

以上文献评估了不同时间尺度的DR潜力,但目前针对超短期DR潜力研究较少。超短期DR潜力评估的难点在于用户在给定外部激励信号下的响应行为受到很多因素的耦合影响,且具有明显的时变特性。

#### 2.2.3 按照资源维度分类的DR潜力

在资源维度上,可以将DR分为单一用户和聚合层面2个维度<sup>[67]</sup>。中小用户需要了解自身资源秉性,与聚合商签订代理条约;聚合商需要分析资源经济特性与性能特性,制定代理的商业模式。

##### 1) 单一用户潜力评估。

在对单一负荷的可调负荷进行评估时常采取精细化建模的手段,分析负荷的运行特性与响应特性。不同类型的用户有着不同的负荷特性,现有研究常将其划分为工业负荷、商业负荷和居民负荷。

##### ① 工业负荷。

工业负荷容量大、负荷稳定、控制手段完备,拥有集中控制的现实基础。工业负荷的用电行为较为固定,可以对部分负荷拉闸限电或重新安排生产作业时间来提供DR<sup>[68]</sup>。

按照响应方式可以将工业负荷分为可调节负荷、可中断负荷与可转移负荷<sup>[69]</sup>。可调节负荷的功率在生产过程中可以灵活调节,对功率的调控不会对正常生产造成影响。电弧炉是一种典型的可调节负荷,在调节炉温的同时,不会对炉中的冶炼反映产生影响<sup>[70]</sup>。可中断负荷的生产工序可以中断,不会对产品质量与设备寿命造成影响,存在调节次数上限。电解铝负荷是一种典型的可中断负荷,该负荷响应速率快,用电计划的调整仅会对产量造成影响<sup>[71]</sup>。可转移负荷的功率可以通过生产计划的重新安排移动到其他时段,大多生产线都可以通过

生产计划调整实现负荷转移。

对单一工业负荷的DR潜力评估需要结合具体的生产流程与生产指标,考虑控制信号与约束的情况下具体分析。文献[72]分析了某钢铁厂中的连续调节负荷、离散调节负荷与转移调节负荷,以总负荷最小化为目标,考虑生产过程中的运行约束与功率约束,建立优化调度模型,评估了该钢铁厂在不同时段的调节潜力。文献[73]对西班牙一家火腿厂的冷却系统进行技术分析,结果表明该火腿厂的削峰DR潜力可达到总功率的50%以上。文献[74]以一种汽车装配制造系统为例,基于Promodel软件平台,利用马尔可夫决策过程对系统在DR计划下的状态演变进行建模评估。

随着智能工厂战略的不断推进,大部分工业设备已经配备了测量、控制和通信基础设施,获得了海量生产与设备运行数据<sup>[75]</sup>,未来工业负荷的生产过程建模上,建模将进一步精细化,实现数据驱动下的单一工业用户DR潜力的评估。

##### ② 商业负荷。

商业可调节负荷主要是温控负荷与照明负荷,可以通过控制空调温度与照明强度来提供DR服务<sup>[76]</sup>。与工业负荷相比,商业负荷的约束更少,调节潜力更多由市场与用户之间的经济激励决定。

温控负荷由于具有热惯性,能够体现出储能性质,可以适当对功率进行调整或进行短暂中断,因此具备调节潜力。典型的温控负荷包含空调负荷与热水器负荷两类。空调可通过改变预设温度或开关状态实现功率调节,在建筑的蓄热效应下,也有学者将温度的时滞建模为一种虚拟储能。热水器负荷具有较强的储能特性,其用电时间可以实现较大范围的转移。楼宇照明负荷是一项重要的可调节资源,具有较快的响应速度。文献[77]对楼宇空调系统物理设备建模,将其视为虚拟储能,研究了其控制策略。文献[78]将空调负荷视作灰箱模型,采用粒子群算法进行了辨识。

不同商业楼宇的可调负荷种类较为类似,均以温控负荷与照明负荷为主,其DR潜力的差异主要由楼宇的经营管理模式决定,反映在用户的体验舒适度。因此商业楼宇DR潜力的评估多在用户舒适度约束与经济效益最大化的背景下进行开展。但现有模型的假设过于强硬,难以在实际应用中开展。

##### ③ 居民负荷。

居民用户可调节负荷的分类尚未明确,较为主

流的分类方法是按照负荷特性将其分为可平移、可削减和温控负荷3类<sup>[79]</sup>。可削减负荷的功率可进行调节,以照明设备为主<sup>[80]</sup>。可平移负荷在提前通知的情况下其运行时段可进行转移,但是用电量保持不变,以洗碗机、洗衣机设备为主。温控负荷是指受到温度影响并且可在一定温度范围内进行功率调节的负荷<sup>[81]</sup>,以空调、热水器等具有储热能力的设备为主。

与其他种类的负荷相比,居民负荷的DR潜力与实际环境具有很强的相关性,响应不确定性强。同时由于单体负荷容量较低,居民负荷需要由聚合商聚合后才能参与市场。目前对单一用户DR潜力的评估主要集中于工商业用户,但也有文献采用非侵入式负荷分解算法对单一用户的空调负荷DR潜力进行了评估。

## 2) 聚合用户潜力评估。

聚合后的需求侧资源体量更大,控制可靠性更强,更能适用于电力市场交易与电力系统规划。在对聚合用户DR潜力进行评估时,需要考虑负荷间的时空耦合性与响应的不确定性。根据负荷特性,可将聚合分为同类负荷聚合与异类负荷聚合。

### ① 同类负荷聚合。

同类负荷拥有类似的负荷特性,通常在单体负荷DR评估模型的基础上推广得到,以温控负荷与电动汽车负荷为代表。

温控负荷聚合方面,文献[82]基于典型的单体空调模型,引入并基于闵可夫斯基求和算法得到了变频空调集群DR潜力。文献[83]利用参数辨识方法对温控负荷分类,对各类负荷分别建立潜力分析模型,再聚合形成动态的集群潜力评估模型。文献[84]在典型温控负荷模型的基础上,研究了不同温度调整量与响应规模下的DR潜力评估潜力。文献[85]分析了用户在电价信号与舒适度偏好共同影响下的响应动作,提出了基于概率密度估计的大规模异构空调负荷DR潜力评估方法。文献考虑实际运行指令下发场景,分析了响应持续时间、信息通知时间等要素对DR潜力的影响。

在电动汽车聚合方面,文献[86]将电动汽车集群聚合为广义储能设备,在数据驱动下采用闵可夫斯基求和算法建立了电动汽车充电站日前和实时DR潜力预测模型。文献[87]在电动汽车集群并网模型的基础上,提出了考虑并网功率约束和充放电计划的插电式电动汽车集群DR潜力评估模型。文

献[88]基于蒙特卡洛和二项分布法,在考虑时空分布特性的电动汽车出行活动的基础上,评估了电动汽车集群的DR潜力。

### ② 异类负荷聚合。

整体而言,对异类负荷的聚合有两种思路。一是在同类负荷聚合的基础上进行分类叠加;二是考虑异类负荷的耦合相应特性进行评估。

直接叠加的方法应用范围广,但精度有限,适用于区域理论DR潜力评估。文献[89]以佛山市为例,分析了重点行业DR潜力系数,为评估区域DR潜力提供数据支撑。文献[90]采用叠加法评估了河南省各行业的削峰DR潜力。

在考虑响应耦合特性进行评估时常采用求解可行域的方法。文献[91]建立了考虑时间耦合特性的虚拟电池模型,在极端能量场景下以经济效益为优化目标,通过求解功率可行域评估了电动汽车和暖通空调两类负荷的聚合DR潜力。文献[92]采用Fourier-Motzkin消元法推导出异类负荷的精确聚合可行域,该方法下的约束条件数量与资源数量呈线性关系,降低了模型计算复杂度。

在聚合层面上,DR潜力评估仍然面临以下几个困难:由于海量资源的聚合,DR潜力评估计算复杂度很高,迫切需要研究高效的降维聚合DR潜力评估方法;不同负荷资源具有不同的响应速度和容量等特性,很难用统一的模型进行建模,因此聚合DR的潜力难以准确评估;现有文献对于多种类、多场景下异构负荷之间的耦合响应特性缺乏深入的分析和研究。未来可以结合态势感知、分析推演等技术,分析异构负荷之间的耦合响应特性<sup>[93]</sup>,建立精确的聚合DR潜力评估模型。

## 2.3 DR能力评估的数据来源

目前对DR潜力评估的数据来源可划分为问卷调查数据和运行采集数据两类。

在基于问卷调查的数据层面,美国布拉特尔集团(Brattle Group)通过对不同类型居民进行问卷调查,以获取各类用户参与DR的意愿度<sup>[94]</sup>。根据对家庭收入的调查结果,文献[95]分析了用户能源使用和收入与参与需求响应之间的关系。此外,文献[96]还在调查结果的基础上分析了影响用户参与需求响应的主要因素,通过问卷调查方式能够在项目实施初期较准确地反映用户参与DR的意愿度。然而,基于问卷调查的方法存在一些局限性,包括耗时长、工作量大,且难以评估用户DR潜力的变化情况。

在基于运行采集数据分析层面,研究人员通常通过提取用电特征与 DR 之间的关系来建立用户潜力模型,文献[97]用价格弹性系数来衡量用户参与 DR 项目的响应潜力。然而,在缺乏负荷特征信息的情况下,该价格弹性系数的准确性有待验证。文献[98]则基于非侵入式技术获取不同类型用能设备的数据,并构建了这些设备的物理模型。在模型构建过程中,为了训练或拟合出精确的模型,并进一步分析用户的响应行为,需要大量的历史样本数据<sup>[99]</sup>。当数据不足时,则需要对数据进行处理或补充。文献[100]假设基于用户参与需求响应的降负荷率满足一定概率分布,提出了在数据不足的情况下,基于概率密度估计的需求响应潜力,并将其应用于直接控制的温控负荷群。

基于问卷调查的数据迁移性差,往往需要针对特定的研究内容设计特定的问卷,难以有效利用历史数据。此外问卷价值不仅取决于用户反馈的可靠性,还取决于问卷的设计水平。基于运行采集的数据数量庞大,但会存在样本信息维度不足的问题,某些场景下还需要利用已有数据生成训练数据。对于有部分历史响应数据的需求响应聚合商,可以通过历史响应数据与用户自身用能特点进行关联分析所在区域用户的响应潜力。但是对尚未执行过需求响应项目的用户,或新环境和机制的改变,聚合商无法由历史响应数据获知该部分用户参与需求响应项目的积极性等信息。

### 3 CPSS 与 DR 的结合

作为一种架构体系,已有不少学者开展了有关 CPSS 与电力系统融合的研究。文献[101]将电力市场参与主体分为生产单元、消费单元和传输单元,采用混合系统对设备融合层建模,建立了运营成本最小化的优化调度模型。文献[102]在 CPSS 视角下分析了城市配电网与城市建筑的融合,提出了未来配电网韧性提升的展望。文献[103]在分析碳市场现有机制的基础上,从决策推演、当量协调、信息采集方面,利用 CPSS 设计了碳市场框架。CPSS 的应用研究重点在于如何将研究对象的物理系统、信息系统与社会系统进行交叉融合。在 CPSS 与 DR 融合的研究领域,用户侧实际能够参与调节的可调节资源是研究的物质基础,参与各方所能获得的运行参数与市场信息是一切活动的联通桥梁,各方主体的利益诉求是一切社会交互活动的

源头,如图 5 所示。

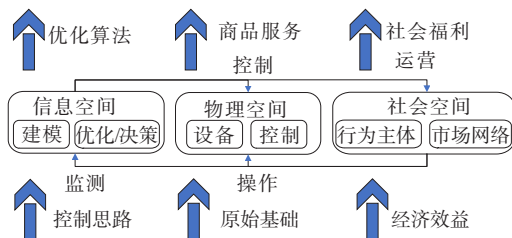


图 5 信息—物理—社会系统架构与元素

Figure 5 Architecture and elements of CPSS

#### 3.1 物理域的交叉融合

在电力电子设备的接入下,配用电系统的物理结构出现了变化。原有的单向传输能量系统逐渐向蜂窝状的交直流双向混合配电网转变。DR 研究领域的物理系统包含各项可调节资源的基础物理模型构建,分析其运营模式。

中国已装设了 4~5 亿块智能电表,建设了坚强的电网。同时在城镇电气化与新能源转型的政策支持下,大量负荷资源接入电网,存在着参与市场调节的潜力。数据表明,截至 2023 年 9 月,中国新能源汽车保有量达 1 821 万辆。同时在电力市场改革的背景下,售电公司、虚拟电厂运营商与综合能源系统代理大量成立,为下沉市场的代理构建了良好的基础<sup>[104]</sup>。但由于缺乏相应的商业模式,同时缺乏对信息的利用,当前以聚合代理为商业模式的主体还难以在电力市场中实现长期盈利。

在需求响应评估时,物理域涉及工业领域、建筑生活领域、交通领域、储能系统与以数据中心和 5G 基站为代表的新基建。各领域的 DR 潜力与响应密度各不相同。工业领域是 DR 最重要的来源,包含非连续生产负荷与连续生产负荷<sup>[105]</sup>。非连续生产负荷可以通过更改生产计划等措施进行负荷削减或转移,具有可调节潜力大、响应完成度高的优点。连续生产负荷对供电可靠性较高,难以自由调节。建筑生活领域是 DR 的重要来源,具体包含公共建筑、商业建筑、居民建筑和空调、照明两类典型柔性负荷,目前已成为 DR 中最热门的调控资源<sup>[106]</sup>。交通领域的 DR 与电动汽车负荷的上涨密切相关。根据电动汽车充电地点和充电需求紧急程度的不同,一般可将其分为目的地充电需求和紧急型充电需求<sup>[107]</sup>,前者具有较大的灵活性与调节潜力。储能系统是当下的热点研究方向,由于具有供蓄和快速功率调节潜力,储能系统能够在不影响其他主体运行模式的情况下实现平抑电网波动、削峰



填谷、提高电网韧性的目的。随着未来相关技术的发展,低成本的储能将会在电力系统中占据重要地位。新基建领域是数字社会下的新型负荷需求<sup>[108]</sup>。有关数据表明,数据中心和5G基站在2025年的用电量均会达到社会总用电量的2%以上。此类设备响应度高,通过调节能耗实现峰谷平抑。

对物理域模型的构建有2种常见方法:基于设备物理特性构建其运行模型;基于设备外特性构建其控制模型。

在基于物理特性构建运行模型层面,空调负荷、电动汽车负荷与数据中心基站受到了广泛关注。空调负荷具备储热蓄冷的物理特性,是一种极具调节潜力的需求侧资源。文献[109]从启停控制、温度设定值控制和占空比控制3个方面对比分析了空调负荷的控制手段,验证了空调负荷的调节能力。文献[110]提出了空调负荷虚拟储能的概念,并基于双耦合偏微分方程组搭建了空调群的状态空间模型。电动汽车作为一种具备储电特性的需求侧资源,其调节能力不容忽视。文献[111]从电动汽车充电站的集群角度对电动汽车的可调潜力进行评估,基于闵可夫斯基求和实现了模型的封装。随着互联网技术的发展,数据中心基站负荷也成了一种具备调节潜力的需求侧资源。文献[112]在不影响基站安全运行的前提下,设计了考虑基站备用需求的储能可调容量评估方法,验证了数据基站的调节能力;文献[113]研究了基站休眠和负载迁移的影响,细化了基站负荷模型。

在基于外特性构建运行模型层面,主要应用于工业负荷与储能负荷。工业负荷的评估常考虑其调节范围,文献[114]对电解铝、矿热炉、多晶硅产业设备的调节能力进行了建模,在考虑运行约束上分析了产业调节潜力。储能系统的调节来源于主体的充放电策略,现有对储能系统的物理建模常基于其最大容量与荷电状态,分析其在市场环境最优运行收益下其响应行为。

### 3.2 信息域的交叉融合

用以驱动应用的数据和信息是智能电网的命脉。从用户计量到配电、输电、发电和市场运营,所收集到的数据都将改善其他层运行模式。市场参与成员的行为差异与存在价值也都与其对信息的利用模式相关。在智能电网运营过程中,分析以适时的方式与那些需要使用或有权了解数据的参与者共享数据,并达到实时是智能电网的基本要素。

在对用户侧进行控制管理时,信息域的对象指

的是运行控制所必需的二次系统环节<sup>[115]</sup>。这些环节包括一系列装置或系统,如信息感知、监测、控制和保护装置。这些装置或系统具备多种属性,其中包括信息服务质量、数据采集与传输量以及时延特性等。在配用电网络中,用以关联物理元件,实现通信与功能下发的配电终端单元、馈线终端单元、配电变压器监控终端单元、配电自动化及配电管理系统等也是信息域的设备基础。如图6所示,物理域与信息域的交叉融合构成了传统的CPS<sup>[116]</sup>。信息域的功能不仅可以有效调控物理域,还可能由于信息域故障和网络攻击而对物理域产生不良影响。物理域的电能供应是确保信息域设备正常工作的基础保障。

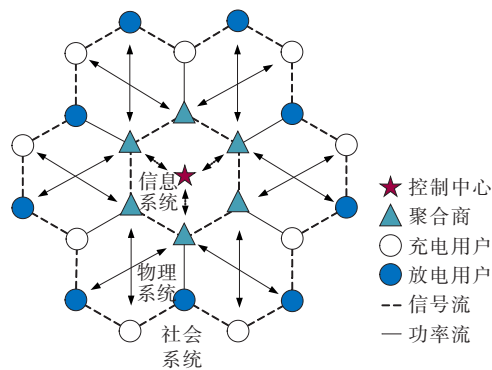


图6 CPSS 通信网络<sup>[36]</sup>

Figure 6 Communication network of the CPSS

信息域拥有着感知环境不确定性的能力。在DR管理中,由于用户侧负荷、阳光辐射功率的高度不确定性,其预测误差一直远高于大电网的同类预测问题,为系统运行带来了附加平衡成本。在CPSS运行中,由自然环境和用户行为带来的不确定性都需要由信息系统传输到处理中心,这种多端的不确定性还会对协同交互过程造成的影响<sup>[117]</sup>。随着数据量的爆炸,边缘计算也成为信息域的研究对象<sup>[118]</sup>。边缘计算最初起源于传媒领域,其核心思想是在靠近物或数据源的一侧建立网络、计算、存储和应用为一体的开放平台,以实现就近服务提供。然而,由于电力系统属于安全关键基础设施,泛在电力物联网在网络架构、安全属性、算法框架、数据处理等方面与常规物联网存在差异。目前有学者提出利用区块链技术对边缘化的需求响应进行管理。

### 3.3 社会域的交叉融合

社会域的交叉融合是CPSS研究中的关键。人的行为难以用简化的数学模型进行描述,主要体现

在 2 个方面。一方面,社会主体的行为状态难以被直接识别,外界无法完全掌握主体的意图、偏好、性格,即使构建了相关评估模型也难以识别模型参数。另一方面,由于存在着信息不对称与决策成本等无法量化的因素,实际主体的决策不可能符合经济学研究中的“理性人”假设,反映出有限理性的特征。

现有用户的用电行为特征研究主要包含行为特点分析、负荷预测与异常检测 3 个部分<sup>[119]</sup>。行为本身则可以分为显性行为 and 隐性行为两类。在对行为进行建模时,常利用信息数据分析的方法描述行为主体、环境、结果等内在特性及其相互关系。典型的行为建模流程如图 7 所示。首先,采集原始的用电量、气象等数据作为输入,利用相关的数据处理模型进行数据处理。处理后的结果作为输入,通过用电特征提取模型,提取出与用电相关的特征。然后,将提取的特征作为输入,通过用电群体分类模型对用电用户进行分类。这样可以将用电用户划分为不同的群体。最后,在数据采集与预处理、用电特征提取、用电行为分类这 3 个环节的输入输出基础上,通过关联模型分析用电特征的影响因素和影响程度。这样可以深入研究和理解用电特征的形成原因,并确定其相关因素的重要性程度。

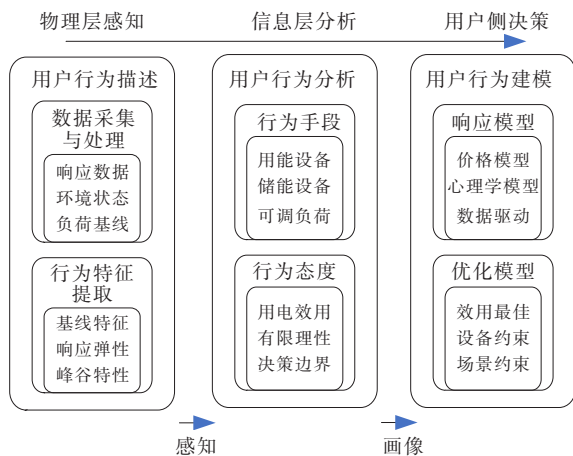


图 7 用户行为模型框架

Figure 7 Model structure of user behaviors

用户用电模型构建的关键在于准确提取用电特征,以综合描述用户的用电行为。特征提取方法主要分为直接特征提取和间接特征提取 2 种。

直接特征提取方法通过聚类方法将相似的日负荷曲线聚为一类,并将聚类中心作为典型的用电特征,例如 k-means 聚类<sup>[120]</sup>、层次分析<sup>[121]</sup>和模糊 C 均值聚类<sup>[122]</sup>等。然而,这种方法在面对大规模用户数据时,计算复杂度会显著增加,导致聚类中心选

择困难、聚类效果下降,难以适应海量数据的情况。

间接特征提取方法是从用户负荷曲线中抽象提取能够体现用户用电特征的指标,并将这些指标量化为用电特征向量数据。常用的间接特征提取方法包括主成分分析<sup>[123]</sup>、奇异值分解<sup>[124]</sup>、隐马尔可夫链<sup>[125]</sup>等。间接特征提取的目的是通过数据降维来挖掘负荷数据中的潜在用电信息,从而实现较少的计算成本。在矩阵降维过程中,间接特征提取方法需要考虑矩阵维数和降维指标权重,以确定最优的降维方法。目前,机器学习领域的各种聚类算法被广泛应用于用电特征的提取。然而,当计算过程中存在许多特征异常值时,会导致特征提取的精度不足。

在对社会域用户行为模拟层面,传统的 CPS 研究中常将人的行为视作物理系统的一部分,假设人的行为目标与系统一致。但个体的主观行为常常缺乏对全局的考虑。依托计算机技术的发展,多代理建模(multi-agent based modeling)和强化学习(reinforcement learning)等机器学习方法被广泛应用于社会行为建模。文献[126]使用 Q-Learning 算法对空调负荷对价格的需求响应行为进行建模。但机器学习方法的“黑盒”性质限制了大数据处理技术在工程问题中的应用。为了解决这个问题,文献[127]提出了一种混合仿真方法,将实验经济学和计算经济学相结合。该方法通过实验经济学仿真来提取真实人的行为规律,并基于这些规律建立具有相同统计特性的多代理随机模型。通过这种方式,只需少量实验人来反映特殊决策者,就可以生成大量多代理模型。混合仿真方法既保留了实验经济学的优势,又克服了其在实验规模上的限制,并确保参与者行为在重复实验中的统计一致性,提高了实验经济学方法的工程实用性。

社会域关系是由多个因素推动的,包括能源政策、商业模式、政治因素、电价政策和互联网共享经济等。存在着角色可变性、效用个性化、商业模式多元化 3 个显著特点。从微观的业务流程来看,主体之间的社会关系体现为特定商业模式驱动下的利益链<sup>[128]</sup>。例如,聚合服务提供商将用户聚合起来参与大电网的需求响应,利益链上包括用户、聚合服务提供商和电网企业。从宏观的全局视角来看,随着工业应用程序的发展,泛在物联网的未来模式可以类比于手机社交应用程序<sup>[129]</sup>。当系统发展到一定规模时,将形成复杂的社会关系网络和人工智能网络。这些社会关系网络和人工智能网络将在能源领

域发挥重要作用,推动能源产业的发展和变革。

在不同领域之间的相互关系层面上,社会域的信号需要通过信息域进行传播。信息域起着社会域复杂博弈关系的传递和交流的作用。然而,如果信息域出现故障,也会影响社会域信号的传播。物理域资源是社会域交互活动的基础。物理域的安全可靠性对社会域具有重大影响。社会域的需求是物理域电能传输的驱动力。社会域的活动方式和开放程度也会影响物理域资源的利用途径和效率。社会域和物理域之间的相互关系是相互影响的,彼此之间的变化和特征都会对另一个领域产生重大影响。

## 4 研究重点展望

### 4.1 考虑不确定性的市场考核机制

DR响应行为存在着较大的不确定性,在市场环境下,由不确定性带来的成本由提供服务的主体承担,需要开展对考核机制的研究。

在现货市场模式下,参与主体和响应量都无法提前预定,只能由市场根据效益最优原则进行决策。然而,在实际的实施过程中,由于参与主体的种类多样、数量庞大,以及用电习惯的差异,需求响应的效果将受到多方面因素的影响。这对需求响应考核机制的建立提出了更高的要求<sup>[130]</sup>。此外,需求响应行为的不确定性增大,计量实时水平不足等因素进一步增加了考核的难度,也需要考核方法具备一定的过程兼容性<sup>[131]</sup>。因此,在现货市场模式下,需要建立一套综合考核机制,考虑不同参与主体和响应量的特点,同时应对不确定性和实时计量水平的挑战,以确保需求响应的效果和可持续性。现有考核模式常以响应量为考核指标,缺乏对多维响应指标的研究。当用户的用电行为发生不同于以往的改变或调整响应策略时,很容易出现不符合实际情况的考核结果<sup>[132]</sup>。无论是针对典型的居民用户、工业能源系统,还是考虑可再生能源的两级托管需求响应,在现货市场模式下仅以响应电量作为唯一指标来考核其响应情况存在明显的局限性。这种考核方式不利于激发响应能力强、响应过程稳定的优质电力用户的积极性。

### 4.2 快速仿真与建模技术

在数字化的浪潮下,数字孪生新技术与国民经济各产业融合不断深化,引发了业界的广泛关注。如今,数字孪生技术在电力行业的应用也越来越普遍<sup>[133]</sup>。尽管数字孪生在中国推广得很快,但作为关

键点建模与仿真技术没有得到应有的重视。快速仿真与建模是智能电网运行的核心软件,其中包括风险评估、自愈控制。自愈控制是第4次工业革命智能化中很重要的组成部分。智能化的特点是有自调节能力、自恢复能力等自行决策功能。智能电网要有自愈的能力,也应具有优化的功能,能为自身运行提供数字支持和预测分析能力。现有的仿真与建模技术存在一些限制,首先数据驱动的预测方法需要考虑外部因素,如天气和电价等,虽然可以提供技术支持,但由于缺乏对设备的细致建模和行为因素的考虑,预测精度有限。在规划初期缺乏相关数据的地区,这种方法很难进行。此外,目前的机理驱动预测方法大多只建立了部分典型设备的用能模型,缺乏对行为特征的影响分析。这使得难以支持对终端全局设备的用户用能特性进行建模和分析。

未来的研究可以改进数据驱动的预测方法,加强对设备的细致建模和行为因素的考虑,提高预测精度。针对缺乏数据的地区,可以探索其他数据获取和模型建立的方法。在此基础上发展机理驱动的预测方法,不仅建立典型设备的用能模型,还要考虑行为特征的影响分析,支持对终端全局设备的用户用能特性进行建模和分析。

### 4.3 考虑综合能源的DR管理

当前的DR潜力评估研究大多限于电力领域,但随着电、气、热、冷等不同能源形式之间的耦合不断加深,未来将出现包含分布式电源(如分布式光伏、微型燃气轮机、冷热电联产系统等)、分布式储能、柔性负荷和电动汽车等多能源虚拟电厂的快速发展<sup>[134]</sup>。然而,不同能流之间存在差异,且存在相互转换和耦合作用,综合系统的响应机制更加复杂。此外,不同能流的响应表现出不同的时间尺度特征,因此多能源虚拟电厂具有多时间尺度的特点,需要协调不同时间尺度上的需求响应潜力<sup>[135]</sup>。未来的研究可以从以下2个方面展开。

1) 研究多能源虚拟电厂的响应机制。需要分析不同能源流的响应特性和能源之间的转换特性,建立多能源耦合的综合响应机制模型。此外,由于气-热网络的动态特性,还需要提出多能源虚拟电厂的动态响应机制模型。

2) 研究多能源虚拟电厂需求响应潜力的时空分布。需要分析不同能源流响应的的时间尺度差异,研究多能源虚拟电厂协调不同时间尺度的需求响应资源方式,并在此基础上评估多能源虚拟电厂需

求响应潜力的时空分布特性。

通过开展这些研究,可以更好地理解和利用综合能源的需求响应潜力,为能源系统的智能化和可持续发展提供支持。

## 5 结语

本文主要介绍了信息物理社会系统与需求响应评估的结合。首先对信息物理系统的历史沿革和系统框架进行了分析。接着总结了现有关于需求响应的研究现状,包括需求响应潜力评估的意义、分类和评估方法。对于需求响应能力评估的数据来源也进行了总结,包括问卷调查和运行数据采集。在信息物理社会系统与需求响应结合方面,分别分析了需求响应的物理域、信息域和社会域基础,并介绍了相应的建模方法和研究内容。最后,对未来的研究展望进行了讨论,包括市场考核机制、快速仿真与建模技术以及综合能源下的需求响应管理。综上所述,本文对信息物理社会系统与需求响应评估的结合进行了全面的介绍和分析,并展望了未来的研究方向。

## 参考文献:

- [1] 印欣,张锋,阿地利·巴拉提,等.新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J].发电技术,2023,44(1):115-124.  
YIN Xin, ZHANG Feng, ADILI Balati, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 115-124.
- [2] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.  
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [3] 余贻鑫.面向21世纪的智能电网[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(6):551-556.  
YU Yixin. A brief description of the basics of the smart grid[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(6): 551-556.
- [4] 张东霞,苗新,刘丽平等.智能电网大数据技术发展研究[J].中国电机工程学报,2015,35(1):2-12.  
ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.
- [5] 吴问足,赵玉柱,刘国伟,等.考虑电网辅助服务的分布式能源聚合体优化方法[J].电力科学与技术学报,2023,

- 38(4):205-213.  
WU Wenzu, ZHAO Yuzhu, LIU Guowei, et al. Research on the optimization method of distributed energy polymer considering grid ancillary services[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 205-213.
- [6] 赵黎.考虑消费者有限理性行为的动态定价研究[D].上海:上海交通大学,2012.  
ZHAO Li. A study on dynamic pricing considering consumers' bounded rational behavior[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [7] XUE Y S, YU X H. Beyond smart grid-cyber-physical-social system in energy future point of view[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12): 2290-2292.
- [8] 宋梦,周佳妮,高赐威,等.CPSS视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行:研究述评与展望[J].电力系统自动化,2023,47(23):105-121.  
SONG Meng, ZHOU Jiani, GAO Ciwei, et al. High-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks from cyber-physical-social system perspective: research review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 105-121.
- [9] 雷旭,马鹏飞,宋智帅,等.计及风电预测误差的柔性负荷日内调度模型[J].发电技术,2022,43(3):485-491.  
LEI Xu, MA Pengfei, SONG Zhishuai, et al. A flexible intraday load dispatch model considering wind power prediction errors[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 485-491.
- [10] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等.微电网技术在主动配电网中的应用[J].电力自动化设备,2015,35(4):8-16.  
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [11] 赵洋,王瀚墨,康丽,等.基于时间卷积网络的短期电力负荷预测[J].电工技术学报,2022,37(5):1242-1251.  
ZHAO Yang, WANG Hanmo, KANG Li, et al. Short term power load prediction based on time convolutional networks[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2022, 37(5): 1242-1251.
- [12] 王毅星.基于深度学习和迁移学习的电力数据挖掘技术研究[D].杭州:浙江大学,2019.  
WANG Yixing. Power data mining technology based on deep learning and transfer learning[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [13] 周振宇,王墨,廖海君,等.电力物联网5G云一边一端协同框架与资源调度方法[J].电网技术,2022,46(5):1641-1651.  
ZHOU Zhenyu, WANG Zhao, LIAO Haijun, et al. 5G cloud-edge-end collaboration framework and resource scheduling method in power internet of things[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1641-1651.
- [14] 张智.计及偏差考核与需求响应的售电公司运营策略

- 优化研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- ZHANG Zhi. Research on operation strategy optimization of electricity retailers considering energy deviation settlement and demand response[D].Hangzhou: Zhejiang University,2022.
- [15] LU X X, LI K P, XU H C, et al. Fundamentals and business model for resource aggregator of demand response in electricity markets[J]. *Energy*, 2020, 204: 117885.
- [16] 王凌云, 徐健哲, 李世春, 等. 考虑电—气—热需求响应和阶梯式碳交易的综合能源系统低碳经济调度[J]. *智慧电力*, 2022, 50(9): 45-52.
- WANG Lingyun, XU Jianzhe, LI Shichun, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy system considering electricity-gas-heat demand response and tiered carbon trading[J]. *Smart Power*, 2022, 50(9): 45-52.
- [17] 王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2006, 3(2): 26-34.
- WANG Feiyue. On the modeling, analysis, control and management of complex systems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2006, 3(2): 26-34.
- [18] XUE X, ZHOU D, YU X, et al. Computational Experiments for Complex Social Systems: Experiment Design and Generative Explanation[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11(4): 1022-1038.
- [19] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3): 630-638.
- [20] WANG F Y, ZENG D, HENDLER J A, et al. A study of the human flesh search engine: crowd-powered expansion of online knowledge[J]. *Computer*, 2010, 43(8): 45-53.
- [21] SMIRNOV A, KASHEVNIK A, SHILOV N, et al. Context-aware service composition in cyber physical human system for transportation safety[C]//2013 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Tampere, Finland: IEEE, 2013.
- [22] 陈梓瑜. 考虑信息物理社会因素的主动配电网安全运行研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- CHEN Ziyu. Research on safe operation of active distribution network considering cyber-physical social factors[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [23] 刘春艳, 张守亮, 胡元元, 等. 一种面向智能电网的交流电源失真度校准方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(9): 138-144.
- LIU Chunyan, ZHANG Shouliang, HU Yuanyuan, et al. Calibration method for AC power supply distortion oriented to the smart grid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(9): 138-144.
- [24] 王飞跃. 社会信号处理与分析的基本框架: 从社会传感网络到计算辩证解析方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43(12): 1598-1611.
- WANG Feiyue. A framework for social signal processing and analysis: from social sensing networks to computational dialectical analytics[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2013, 43(12): 1598-1611.
- [25] WANG F Y, CARLEY K M, ZENG D, et al. Social computing: from social informatics to social intelligence[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2007, 22(2): 79-83.
- [26] WANG X, ZHENG X H, ZHANG Q P, et al. Crowdsourcing in ITS: the state of the work and the networking[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(6): 1596-1605.
- [27] 中国科学院先进制造领域战略研究组. 中国至2050年先进制造科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 4-40.
- Strategic Research Group for Advanced Manufacturing Technology, CAS. Roadmap for the development of advanced manufacturing technology from China to 2050 [M]. Beijing: Science Press, 2009: 4-40.
- [28] LI L, WANG X, WANG K F, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(28): 4106.
- [29] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 21-33.
- LÜ Yisheng, CHEN Yuanyuan, JIN Junchen, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 21-33.
- [30] 姚锡凡, 黄宇, 黄岩松, 等. 自主智能制造: 社会—信息—物理交互、参考体系架构与运作机制[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(2): 325-338.
- YAO Xifan, HUANG Yu, HUANG Yansong, et al. Autonomous smart manufacturing: social-cyber-physical interaction, reference architecture and operation mechanism[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(2): 325-338.
- [31] WANG S, XIAO P S, CHAI H F, et al. Research on construction of supply chain financial platform based on blockchain technology[C]//Proceedings of the IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), Beijing, China: IEEE, 2021.
- [32] WANG X, YANG J, HAN J P, et al. Metaverses and DeMetaverses: from digital twins in CPS to parallel intelligence in CPSS[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2022, 37(4): 97-102.
- [33] 秦瑞琳, 周昌乐, 晁飞. 机器意识研究综述[J]. *自动化学报*, 2021, 47(1): 18-34.
- QIN Ruilin, ZHOU Changle, CHAO Fei. A survey on machine consciousness[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(1): 18-34.

- [34] 孙伟卿,郑钰琦.能源5.0:迈入虚实互动的平行化时代[J].自动化仪表,2020,41(1):1-9+15.  
SUN Weiqing, ZHENG Yuqi. Energy 5.0: Entering the parallel era of virtual and real interaction[J]. Automated Instruments,2020,41(1):1-9+15.
- [35] ZHANG T, CONG Y, DONG J H, et al. Partial visual-tactile fused learning for robotic object recognition[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems,2022,52(7):4349-4361.
- [36] 陈梓瑜,朱继忠,刘云,等.基于信息物理社会融合的新能源消纳策略[J].电力系统自动化,2022,46(9):127-136.  
CHEN Ziyu, ZHU Jizhong, LIU Yun, et al. Renewable energy accommodation strategy based on cyber-physical-social integration[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(9):127-136.
- [37] 王飞跃.指控5.0:平行时代的智能指挥与控制体系[J].指挥与控制学报,2015,1(1):107-120.  
WANG Feiyue. CC 5.0: intelligent command and control systems in the parallel age[J]. Journal of Command and Control,2015,1(1):107-120.
- [38] CHENG L F, YU T, ZHANG X S, et al. Parallel cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and knowledge automation: concepts, architectures, and challenges[J]. IEEE Intelligent Systems, 2019,34(2):54-64.
- [39] WANG F Y, WANG X, LI L X, et al. Steps toward parallel intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016,3(4):345-348.
- [40] WANG F Y, ZHANG J J, WANG X. Parallel intelligence: toward lifelong and eternal developmental AI and learning in cyber-physical-social spaces[J]. Frontiers of Computer Science,2018,12(3):401-405.
- [41] 葛鑫鑫,付志扬,徐飞,等.面向新型电力系统的虚拟电厂商业模式与关键技术[J].电力系统自动化,2022,46(18):129-146.  
GE Xinxin, FU Zhiyang, XU Fei, et al. Business model and key technologies of virtual power plant for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(18):129-146.
- [42] 郑若楠,李志浩,唐雅洁,等.考虑居民用户参与度不确定性的激励型需求响应模型与评估[J].电力系统自动化,2022,46(8):154-162.  
ZHENG Ruonan, LI Zhihao, TANG Yajie, et al. Incentive demand response model and evaluation considering uncertainty of residential customer participation degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 154-162.
- [43] 孙毅,毛焯华,李泽坤,等.面向电力大数据的用户负荷特性和可调节潜力综合聚类方法[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6259-6271.  
SUN Yi, MAO Yehua, LI Zekun, et al. A comprehensive clustering method of user load characteristics and adjustable potential based on power big data[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(18):6259-6271.
- [44] WANG F, XIANG B, LI K P, et al. Smart households' aggregated capacity forecasting for load aggregators under incentive-based demand response programs[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56(2):1086-1097.
- [45] 冯昊,徐海栋,孙飞飞,等.计及需求侧响应能力的受端电网储能优化配置方法[J].浙江电力,2023,42(12):107-116.  
FENG Hao, XU Haidong, SUN Feifei, et al. An optimal allocation method of receiving-end power grid energy storage considering demand-side response capability[J]. Zhejiang Electric Power,2023,42(12):107-116.
- [46] 黎立丰,刘春晓,朱浩骏,等.考虑网络安全约束的可再生能源消纳能力评估方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(4):162-168.  
LI Lifeng, LIU Chunxiao, ZHU Haojun, et al. Absorptive capability evaluation method of renewable energy considering security constraints of power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 162-168.
- [47] 李建林,梁策,张则栋,等.新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J].高压电器,2023,59(7):104-116.  
LI Jianlin, LIANG Ce, ZHANG Zedong, et al. Analysis of energy storage policies and business models in new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 104-116.
- [48] 刘雁行,乔如好,梁楠,等.基于负荷准线和深度强化学习的含电动汽车集群系统新能源消纳策略[J/OL].上海交通大学学报:1-31[2023-12-13]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.529>.  
LIU Yanxing, QIAO Ruyao, LIANG Nan, et al. New energy consumption strategy for cluster systems containing electric vehicles based on load alignment and deep reinforcement learning[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-31[2023-12-13]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.529>.
- [49] 张靖琛,江全元,耿光超,等.基于区块链的负荷聚合商及居民用户多方共治交易模式[J].电力系统自动化,2024,48(1):109-118.  
ZHANG Jingchen, JIANG Quanyuan, GENG Guangchao, et al. Blockchain-based multi-party co-governance transaction mode for load aggregator and residential users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1):109-118.
- [50] DRANKA G G, FERREIRA P. Review and assessment of the different categories of demand response potentials [J]. Energy, 2019, 179: 280-294.
- [51] 杨萃,曾凯林,余雁琳,等.电能市场下负荷聚合商参

- 与负荷削减投标策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 2-9.
- YANG Ping, ZENG Kailin, YU Yanlin, et al. Strategy of load aggregator participating in load curtailment bidding under power market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 2-9.
- [52] 李章允. 电力需求响应潜力评估及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- LI Zhangyun. Evaluation of electric power demand response potential and its application[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [53] GILS H C. Assessment of the theoretical demand response potential in Europe[J]. Energy, 2014, 67: 1-18.
- [54] PANG Y X, HE Y X, JIAO J, et al. Power load demand response potential of secondary sectors in China: the case of western Inner Mongolia[J]. Energy, 2020, 192: 116669.
- [55] KWON P S, ØSTERGAARD P. Assessment and evaluation of flexible demand in a Danish future energy scenario[J]. Applied Energy, 2014, 134: 309-320.
- [56] PAULUS M, BORGGREFE F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 432-441.
- [57] GREIN A, PEHNT M. Load management for refrigeration systems: potentials and barriers[J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 5598-5608.
- [58] 李雅婷, 唐家俊, 张思, 等. 考虑多重不确定性因素的售电公司购电决策模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 33-41.
- LI Yating, TANG Jiajun, ZHANG Si, et al. Decision-making model of electricity procurement and sale for electricity retailers considering multiple uncertain factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 33-41.
- [59] QI N, CHENG L, XU H L, et al. Practical demand response potential evaluation of air-conditioning loads for aggregated customers[J]. Energy Reports, 2020, 6: 71-81.
- [60] 裴润生, 赖绮瑄, 梁活航. 计量设备故障下交流微电网缺失电量智能追补[J]. 供用电, 2023, 40(5): 92-99.
- PEI Runsheng, LAI Qixuan, LIANG Huohang. Smart catch-up for missing power in AC microgrid under metering equipment failure[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(5): 92-99.
- [61] 任鑫芳, 张志朝, 许李天伦, 等. 计及电动汽车与温控负荷需求响应的分层能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 77-86.
- REN Xinfang, ZHANG Zhichao, XU Litianlun, et al. Optimal scheduling of hierarchical energy systems with electric vehicles and temperature-controlled load demand response[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 77-86.
- [62] 王溪. 基于大数据分析方法的温控负荷可调度容量预测及应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- WANG Xi. Forecast and application of schedulable capacity of TCLs based on big data analysis method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [63] 王宜立, 张蓉馨, 杨再鹤, 等. 基于双向出行链的电动汽车平抑电网波动策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 50-60.
- WANG Yili, ZHANG Rongxin, YANG Zaihe, et al. Stabilizing power fluctuation strategy based on two-way travel chain of electric vehicle[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 50-60.
- [64] XIANG B, LI K P, GE X X, et al. Day-ahead probabilistic forecasting of smart households' demand response capacity under incentive-based demand response program[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC), Beijing, China: IEEE, 2019.
- [65] 王蓓蓓, 杨雪纯, 杨胜春. 基于中长期时间维度的需求响应潜力及效果的系统动力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6368-6377.
- WANG Beibei, YANG Xuechun, YANG Shengchun. Demand response performance and potential system dynamic analysis based on the long and medium time dimensions[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6368-6377.
- [66] 徐艳春, 张进, 汪平, 等. 考虑配电网静态电压稳定性的微电网优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(8): 87-101.
- XU Yanchun, ZHANG Jin, WANG Ping, et al. Optimal configuration of microgrid considering static voltage stability of distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 87-101.
- [67] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662-1677.
- WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [68] 张丽, 刘青雷, 张宏伟. 基于改进二进制粒子群算法的家庭负荷优化调度策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 118-128.
- ZHANG Li, LIU Qinglei, ZHANG Hongwei. Home load optimization scheduling strategy based on improved binary particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 118-128.
- [69] 冉博路, 张姝, 黄河等. 基于二次聚类的工业用户负荷可调节潜力特征提取与综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 157-168.
- RAN Bolu, ZHANG Shu, HUANG He, et al. Feature extraction and comprehensive evaluation method of

- industrial user load adjustability potential based on secondary clustering[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(18):157-168.
- [70] 王海博. 计及钢铁生产短流程需求响应潜力的供需互动调度策略研究[D]. 济南:山东大学,2022.  
WANG Haibo. Research on supply-demand interaction dispatching strategy considering demand response potential of short production process of steel enterprises [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [71] 王成龙. 计及电解铝负荷参与需求响应的电力系统低碳经济调度[D]. 武汉:华中科技大学,2022.  
WANG Chenglong. Low-carbon economic dispatch of power system considering electrolytic aluminum load for demand response[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [72] GAN L, CHEN X Y, WU L, et al. A method to evaluate the power dispatching potential of energy intensive steel enterprises[C]//2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), Weihai, China: IEEE, 2020.
- [73] ALCÁZAR-ORTEGA M, ÁLVAREZ-BEL C, ESCRIVÁ-ESCRIVÁ G, et al. Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 84-91.
- [74] SUN Z Y, LI L. Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov decision process [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65: 184-193
- [75] GERAMI N, GHASEMI A, LOTFI A, et al. Energy consumption modeling of production process for industrial factories in a day ahead scheduling with demand response[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2021, 25: 100420.
- [76] 王密密. 新型电力系统中电力需求响应潜力评估模型及应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.  
WANG Mimi. Potential assessment model and application research of power demand response in new electric power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [77] 张冲标,高博,漆淘懿,等. 基于变频空调的虚拟储能建模与控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 240-249.  
ZHANG Chongbiao, GAO Bo, QI Taoyi, et al. Modelling and control of virtual energy storage based on the inverter air conditioner[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(4): 240-249.
- [78] 朱明,夏宇栋,常凯,等. 基于粒子群优化算法的空调负荷灰箱模型辨识[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 214-221.  
ZHU Ming, XIA Yudong, CHANG Kai, et al. Identification of grey box model for air conditioning load based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(4): 214-221.
- [79] 马龙飞. 考虑用户行为模式的居民用户可调节潜力分析模型[D]. 北京:华北电力大学,2023.  
MA Longfei. Analysis model of adjustable potential of residential users considering user behavior patterns[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [80] 涂京,周明,宋旭帆,等. 居民用户参与电网调峰激励机制及优化用电策略研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 443-453.  
TU Jing, ZHOU Ming, SONG Xufan, et al. Research on incentive mechanism and optimal power consumption strategy for residential users' participation in peak shaving of power grid[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 443-453.
- [81] 麻恒远,马恒瑞. 考虑新能源消纳的网—站—车协同优化调度[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(3): 103-108.  
MA Hengyuan, MA Hengrui. Grid-station-vehicle cooperative optimal scheduling considering new energy consumption[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(3): 103-108.
- [82] LIN S F, LIN M C, LIU D F, et al. An evaluation method for the response flexibility of aggregated inverter air conditioners[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31: e12689.
- [83] 张俊成,黎敏,刘志文,等. 配电网用户侧多类型柔性资源调节能力评估方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(9): 96-103+119.  
ZHANG Juncheng, LI Min, LIU Zhiwen, et al. An evaluation method for multi-type flexible resource regulation capability on the user side of distribution networks[J]. *Electric Power*, 2023, 56(9): 96-103+119.
- [84] 惠红勋. 温控负荷参与电力系统动态响应的建模与控制方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.  
HUI Hongxun. Modelling and control of thermostatically controlled loads for participating in dynamic response of power systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [85] XIE D J, HUI H X, DING Y, et al. Operating reserve capacity evaluation of aggregated heterogeneous TCLs with price signals[J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 338-347.
- [86] 安佳坤,杨书强,王涛,等. 电动汽车聚合下的微能源互联网优化调度策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(5): 80-88.  
AN Jiakun, YANG Shuqiang, WANG Tao, et al. Optimal scheduling strategy for micro energy internet under electric vehicles aggregation[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 80-88.
- [87] ZHANG H C, HU Z C, XU Z W, et al. Evaluation of achievable vehicle-to-grid capacity using aggregate PEV model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(1): 784-794.
- [88] 刘勇,李全优,戴朝华. 电动汽车充电负荷时空分布建模



- 研究综述[J].电测与仪表,2022,59(8):1-9.
- LIU Yong, LI Quanyou, DAI Chaohua. Review on the spatiotemporal distribution modeling of electric vehicle charging load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(8):1-9.
- [89] 王岩.佛山电力需求响应关键技术研究及平台实现[D].北京:华北电力大学,2017.
- WANG Yan. Research on key technology and platform implementation of electric power demand response for Foshan city[D]. Beijing: North China Electric Power University,2017.
- [90] 刘军会,杨钦臣,齐苗苗.河南省主要行业电力需求侧响应削峰潜力评估[J].河南电力,2020(S2):52-57.
- LIU Junhui, YANG Qinchen, QI Miaomiao. Evaluation of peak-shaving potential of power demand side response in main industries of Henan Province[J]. Henan Electric Power,2020(S2):52-57.
- [91] 黄奇峰,方凯杰,黄艺璇,等.面向台区虚拟增容的需求侧资源多目标优化调度方法[J].供用电,2023,40(11):61-68.
- HUANG Qifeng, FANG Kaijie, HUANG Yixuan, et al. Multi-objective optimization scheduling method of demand side resources for virtual capacity expansion in substation area[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(11):61-68.
- [92] WEN Y L, HU Z C, YOU S, et al. Aggregate feasible region of DERs: exact formulation and approximate models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2022,13(6):4405-4423
- [93] 孙毅,李泽坤,许鹏,等.异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7146-7158+7488.
- SUN Yi, LI Zekun, XU Peng, et al. Research on key technologies and development direction of heterogeneous flexible load modeling and regulation[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(24):7146-7158+7488.
- [94] FARUQUI A, SERGICI S. Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments[J]. Journal of Regulatory Economics, 2010, 38(2):193-225.
- [95] TORSTENSSON D, WALLIN F. Potential and barriers for demand response at household customers[C]//The 7th International Conference on Applied Energy(ICAIE), Amsterdam, Netherlands, 2015.
- [96] 万祺兰.瑞典居民用户需求响应的潜力和障碍的调查与研究[J].电力需求侧管理,2015,17(6):62-64.
- WAN Qilan. Potential and obstacles of residents user demand response in Sweden[J]. Power Demand Side Management,2015,17(6):62-64.
- [97] 刘迪,孙毅,李彬,等.计及调节弹性差异化的产消群价格型需求响应机制[J].电网技术,2020,44(6):2062-2070.
- LIU Di, SUN Yi, LI Bin, et al. Price-based demand response mechanism of prosumer groups considering adjusting elasticity differentiation[J]. Power System Technology,2020,44(6):2062-2070.
- [98] 孙秋野,刘月,胡旌伟,等.基于GAN的非侵入式自能源建模[J].中国电机工程学报,2020,40(21):6784-6794.
- SUN Qiuye, LIU Yue, HU Jingwei, et al. Non-intrusive we-energy modeling based on GAN technology[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(21):6784-6794.
- [99] 李想,王鹏,刘洋,等.考虑类别不平衡的海量负荷用电模式辨识方法[J].中国电机工程学报,2020,40(1):128-137+380.
- LI Xiang, WANG Peng, LIU Yang, et al. Massive load pattern identification method considering class imbalance[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(1):128-137+380.
- [100] 谢敦见.温控负荷的需求响应潜力评估及其协同优化管理研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- XIE Dunjian. Demand response evaluation and coordinated optimization of thermostatically controlled loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2019.
- [101] 李鹏,陈元峰,周钱雨凡,等.电力市场环境下信息物理社会融合的电力系统优化调度[J].中国电机工程学报,2023,43(9):3354-3366.
- LI Peng, CHEN Yuanfeng, ZHOU Qianyufan, et al. Optimal dispatch of power system based on cyber-physical-social integration under the power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3354-3366.
- [102] 宋梦,周佳妮,高赐威,等.CPSS视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行:研究述评与展望[J].电力系统自动化,2023,47(23):105-121.
- SONG Meng, ZHOU Jiani, GAO Ciwei, et al. High-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks from cyber-physical-social system perspective: research review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(23):105-121.
- [103] 陈家兴,王春玲,刘春明.基于改进碳排放流理论的电力系统动态低碳调度方法[J].中国电力,2023,56(3):162-172.
- CHEN Jiaying, WANG Chunling, LIU Chunming. Dynamic low-carbon dispatching method of power system based on improved carbon emission flow theory[J]. Electric Power,2023,56(3):162-172.
- [104] 马裕泽.计及需求侧管理的综合能源系统多目标运行优化研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- MA Yuze. Multi objective operation optimization of integrated energy system considering demand-side management[D]. Beijing: North China Electric Power University,2021.
- [105] 葛津铭,刘志文,王朝斌,等.考虑需求响应的高比例光伏配电网低碳调度[J/OL].电网技术:1-10[2024-0107].

- <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0602>.  
GE Jinming, LIU Zhiwen, WANG Zhaobin, et al. Low-carbon dispatch of high-proportion photovoltaic distribution network considering demand response[J/OL]. Power System Technology: 1-10[2024-01-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0602>.
- [106] 唐冬来,李擎宇,龚奕宇,等.基于5G通信技术的商业楼宇需求响应方法[J].江西科学,2023,41(5):951-954+1004.  
TANG Donglai, LI Qingyu, GONG Yiyu, et al. Demand response method of commercial buildings based on 5G communication technology[J]. Jiangxi Science, 2023, 41(5):951-954+1004.
- [107] 刘东奇,谢金焕,王耀南.车联网中多主体参与的电动汽车预充电路径规划[J/OL].控制理论与应用:1-12[2024-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20230330.0901.016.html>.  
LIU Dongqi, XIE Jinhuan, WANG Yaonan. Electric vehicle pre-charging path planning with multi-agent participation in the Internet of Vehicles[J/OL]. Control Theory & Applications: 1-12[2024-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20230330.0901.016.html>.
- [108] 刘伟泽,向月.计及负荷转移需求响应的低碳数据中心光储容量优化配置[J/OL].电力自动化设备:1-14[2024-01-07]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202311015>.  
LIU Yize, XIANG Yue. Optimal allocation of optical storage capacity in low-carbon data centers taking into account load transfer demand response[J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-14[2024-01-07]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202311015>.
- [109] 周磊.空调负荷的动态需求响应理论及其应用研究[D].南京:东南大学,2017.  
ZHOU Lei. Research on dynamic demand response theory and application of air conditioning load[D]. Nanjing:Southeast University,2017.
- [110] 马思思.基于中央空调系统调控建模的虚拟电厂定制方法及运行策略研究[D].南京:东南大学,2020.  
MA Sisi. Research on virtual power plant customization method and operation strategy based on central air conditioning system control modeling[D]. Nanjing: Southeast University,2020.
- [111] 童宇轩,胡俊杰,杜昊明,等.基于虚拟电池模型的外逼近闵可夫斯基热泵负荷调节可行域聚合方法[J/OL].电网技术:1-17[2024-01-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1580>.  
TONG Yuxuan, HU Junjie, DU Haoming, et al. Feasible region aggregation method of external approximation Minkowski heat pump load regulation based on virtual battery model[J/OL]. Power System Technology: 1-17[2024-01-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1580>.
- [112] 彭宇翔,黄倩,李捷,等.基于虚拟电厂的分布式5G基站可调资源聚合技术及应用[J].广西电力,2023,46(2):41-47.  
PENG Yuxiang, HUANG Qian, LI Jie, et al. The adjustable resources aggregation technology and its application in distributed 5G base station based on virtual power plant[J]. Guangxi Electric Power, 2023, 46(2):41-47.
- [113] 刘子豪.基于通信负载迁移的5G基站储能系统优化运行策略研究[D].北京:华北电力大学,2023.  
LIU Zihao. Research on optimal operation strategy of 5G base station energy storage system based on communication load migration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [114] 鲍益.高耗能电解铝负荷参与电力系统调频及辅助服务策略研究[D].武汉:武汉大学,2019.  
BAO Yi. Research on leveraging the flexibility of industrial loads for power system frequency operation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [115] 张文浩.面向信息物理融合电力系统弹性提升的运行与控制方法研究[D].广州:华南理工大学,2021.  
ZHANG Wenhao. Investigation on operation and control methods for resilience improvement of cyber-physical power system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [116] 薛禹胜,吴巨爱,谢东亮,等.关于在决策推演中计入博弈行为的评述[J].电力系统自动化,2023,47(16):1-9.  
XUE Yusheng, WU Juai, XIE Dongliang, et al. Review on considering gaming behaviors in decision-making simulation deduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16):1-9.
- [117] 黄荣基.考虑社会网络效应和消费者有限理性行为的定价研究[D].合肥:中国科学技术大学,2019.  
HUANG Rongji. Research on pricing considering social network effect and consumers' bounded rational behavior[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [118] 王玲玲.基于移动边缘计算的车联网任务卸载策略研究[D].济南:山东师范大学,2023.  
WANG Lingling. Research on task offloading strategy of Internet of vehicles based on mobile edge computing[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2023.
- [119] 孔祥玉,马玉莹,艾芊,等.新型电力系统多元用户的用电特征建模与用电负荷预测综述[J].电力系统自动化,2023,47(13):2-17.  
KONG Xiangyu, MA Yuying, AI Qian, et al. Review on electricity consumption characteristic modeling and load forecasting for diverse users in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 2-17.
- [120] 刘姣姣.基于k-means算法的电力负荷数据聚类方法分析[J].光源与照明,2022(6):160-162.  
LIU Jiaojiao. Analysis of power load data clustering

- method based on k-means algorithm[J]. *Lamps & Lighting*,2022(6):160-162.
- [121] 刘涛.基于层次分析法的220 kV千佛智能变电站设计研究[D].郑州:郑州大学,2022.
- LIU Tao. Study on the design of 220 kV QianFo intelligent substation based on analytic hierarchy process [D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2022.
- [122] 杨炜炜.FCM聚类结合RBF神经网络的短期电力负荷预测[D].焦作:河南理工大学,2021.
- YANG Weiwei. Short-term load forecasting based on FCM clustering combined with RBF neural network[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2021.
- [123] 赵舫,盛青,王新刚,等.基于主成分分析合作博弈的电网负荷智能预测方法研究[J].*电网与清洁能源*,2022,38(2):48-52+60.
- ZHAO Fang, SHENG Qing, WANG Xingang, et al. A study on the intelligent load forecasting method of power grids based on principal component analysis and cooperative game[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022,38(2):48-52+60.
- [124] 高彩亮.基于奇异值分解和支持向量机的负荷预测新方法[J].*科技广场*,2012(3):105-108.
- GAO Cailiang. One new approach of load forecasting based on singular value decomposition and support vector machine[J].*Science Mosaic*,2012(3):105-108.
- [125] 蔡新雷,董锴,崔艳林,等.基于马尔科夫链理论的电动汽车集群充电负荷建模及可调能力评估[J].*南方电网技术*,2023,17(9):29-37.
- CAI Xinlei, DONG Kai, CUI Yanlin, et al. Charging load modeling and dispatchable capability evaluation of electric vehicle cluster based on Markov chain theory[J]. *Southern Power System Technology*,2023,17(9):29-37.
- [126] DEGHANPOUR K, NEHRIR M H, SHEPPARD J W, et al. Agent-based modeling of retail electrical energy markets with demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*,2018,9(4):3465-3475.
- [127] XUE Y S, WU J A, XIE D L, et al. Experimental study on EV purchases assisted by multi-agents representing a set of questionnaires[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,2014:449-459.
- [128] 赵艺丹.价格折扣的不同描述方式对消费者购买意愿的影响的实证研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- ZHAO Yidan. An empirical study of the effects of different description ways of price discount on consumer purchase intention[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2015.
- [129] 唐哲.泛在物联网服务聚合系统的设计与研究[D].北京:北京邮电大学,2015.
- TANG Zhe. Design and research of service composition system based on ubiquitous Internet of Things[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2015.
- [130] 高志远,周竞,庄卫金,等.负荷侧调节能力的市场化交易类型分析与展望[J].*供用电*,2023,40(10):89-94.
- GAO Zhiyuan, ZHOU Jing, ZHUANG Weijin, et al. Analysis and prospect of marketization trading types for load side regulation capability[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(10):89-94.
- [131] JIAN X H, ZHANG L, MIAO X F, et al. Designing interruptible load management scheme based on customer performance using mechanism design theory [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2018,95:476-489.
- [132] 孙志媛,孙艳,刘默斯,等.考虑碳流需求响应的电力系统低碳运行策略[J].*中国电力*,2023,56(11):95-103.
- SUN Zhiyuan, SUN Yan, LIU Mosi, et al. Low-carbon operation strategy of power system considering carbon flow demand response[J]. *Electric Power*, 2023, 56(11):95-103.
- [133] 冯东豪,蒋国栋,刘涛等.电网数字孪生分析模型建模及应用[J/OL].*电力系统及其自动化学报*:1-10[2024-01-07].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001382>.
- FENG Donghao, JIANG Guodong, LIU Tao, et al. Modeling and application of power grid digital twin analysis model[J/OL]. *Journal of Electric Power Systems and Automation*: 1-10[2024-01-07]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001382>.
- [134] 高波,李飞,史轮等.基于实时碳强度评估的社区综合能源系统低碳互动管理策略[J/OL].*上海交通大学学报*:1-22[2024-01-07].<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.329>.
- GAO Bo, LI Fei, SHI Lun, et al. Low-carbon interactive management strategy for community integrated energy systems based on real-time carbon intensity assessment [J/OL]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*: 1-22 [2024-01-07]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.329>.
- [135] 李强,王璇,琚诚等.基于广义储能的多时间尺度综合能源系统优化调度模型[J/OL].*南方电网技术*:1-10[2023-11-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20231120.1054.002.html>.
- LI Qiang, WANG Xuan, JU Cheng, et al. Optimal scheduling model of multi-time scale integrated energy system based on generalized energy storage[J/OL]. *Southern Power System Technology*: 1-10[2023-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20231120.1054.002.html>.