

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.007

# 边缘计算在综合能源系统运行控制中的应用

Application of edge computing in integrated energy system operation control

杨冬梅<sup>1</sup>,何国鑫<sup>2\*</sup>,朱金大<sup>1</sup>,王琦<sup>2</sup>,耿健<sup>1</sup>,王俊<sup>1</sup>,李宁<sup>2</sup>  
YANG Dongmei<sup>1</sup>,HE Guoxin<sup>2\*</sup>,ZHU Jinda<sup>1</sup>,WANG Qi<sup>2</sup>,  
GENG Jian<sup>1</sup>,WANG Jun<sup>1</sup>,LI Ning<sup>2</sup>

(1.南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,南京 211106; 2.南京师范大学 电气与自动化工程学院,南京 210023)

(1.NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**摘要:**随着大数据、云计算、物联网、移动互联网、人工智能等新技术的发展,综合能源服务的内涵不断延伸。综合能源系统服务管理对象多、处理数据量大、隐私安全要求高,传统集中式的云计算架构难以满足应用要求,以分布式为特征的边缘计算技术为解决该问题提供了新的思路。从实际业务需求出发,分析了综合能源系统运行控制面临的困难与挑战,构建了基于物联网的综合能源系统分层协同控制架构,从感知层、网络层、平台层、应用层4个层面剖析了边缘计算技术的适用性与价值点,然后以工业园区为例,提出了基于多边协同的区域综合能源系统运行控制模型与求解方法,最后对边缘计算在综合能源服务中的应用前景进行了展望。

**关键词:**大数据;物联网;人工智能;边缘计算;云计算;综合能源系统;运行控制

中图分类号:TK 01\*8;TP 399;TM 71 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2022)01-0049-07

**Abstract:** With the development of new technologies, e. g., big data, cloud computing, Internet of Things, mobile Internet, and artificial intelligence, integrated energy services are expected to witness its connotation expansion. Integrated energy systems entail services and management for large-scale targets, processing massive data, as well as high demands on privacy and security, which has push conventional centralized cloud computing architecture beyond its application scope. Distributed edge computing blazes a new trail for solving this predicament. The difficulties and challenges encountered by the integrated energy system in its operation and control are analyzed, considering the actual business requirements. Based on the Internet of Things, a layered collaborative control architecture for the system is built, which consists of a perceptive layer, a network layer, a platform layer and an application layer. The feasibility and value of edge computing technologies applied in the four layers are investigated. Furthermore, taking industrial parks as examples, a multilateral collaborative operation and control model for regional integrated energy systems is proposed and its solving methodology is given as well. Finally, the application prospects of edge computing technologies in integrated energy services are made.

**Keywords:** edge computing; IoT; edge computing; cloud computing; integrated energy system; operation control

## 0 引言

当前,我国已进入新一轮能源革命的新时代,能源供给朝着低碳化、分布式、多元化方向发展,电能终端能源消费中的占比不断提高。“大云物移智”等新兴技术的蓬勃发展正在推动能源信息系

统、物理系统、社会系统的深度融合,同时催生出能源市场新体系、能源交易新模式、能源合作新生态。在此背景下,综合能源系统的概念被提出并受到国内外广泛关注,它是能源互联网的物理载体,不是电力、热力和天然气等能源子系统组成元件的简单叠加,还包括冷热电三联供、能源路由器等支撑多能源之间转换的核心元件<sup>[1-3]</sup>。复杂的系统结构使得对综合能源系统开展运行控制难度较大。

单一能源系统中广泛采用的集中式控制模式很难适用于综合能源系统。边缘计算技术为解决

收稿日期:2021-07-08;修回日期:2021-09-09  
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0905000);江苏省政策引导类计划(国际科技合作)项目(BZ2019057)

综合能源系统运行控制难题提供了新的思路,它是对云计算的补充和延伸,通过网络边缘侧的智能处理,融合网络、计算、存储及信息化技术,在网络边缘提供服务,适用于具有海量数据特征的业务动态管理、边缘化安全隐私防护等技术需求<sup>[4]</sup>。

边缘计算在传统电力网络、泛在物联网中已有部分研究成果。文献[5]提出了一种将边缘计算技术应用于电力自动化需求响应业务的设想,设计了自动化需求响应边缘计算节点的分层结构框架。文献[6]提出了边缘计算与泛在物联网智能感知技术结合的思路,定义了泛在物联网边缘算法的可分解性与下沉系数。文献[7]分析了边缘计算技术与主动配电网和电力信息物理安全系统的相似之处及融合方式,提出了基于边缘计算指标的调控模型评价体系。文献[8]提出了一种面向可再生能源的分布式边缘计算管理架构,提高了分布式能源控制的响应速度。

边缘计算在综合能源系统中的研究刚刚起步,主要集中在对单一主体资源的管理和控制,对多主体资源的管理和控制有待进一步研究。本文从实际业务需求出发,首先分析综合能源系统运行控制面临的困难与挑战;接着构建基于物联网的综合能源系统分层协同控制架构,结合不同层次的应用需求,剖析边缘计算技术的适用性与价值点;然后以工业园区为例,提出基于多边协同的区域综合能源系统运行控制模型与求解方法;最后对边缘计算技术在综合能源服务中的应用前景进行展望。

### 1 综合能源系统运行控制面临的主要挑战

综合能源系统具有终端感知泛在化、通信网络复杂化、业务处理精益化、服务对象多样化的特点,如图1所示。本文从感知层、网络层、平台层、应用层4个方面梳理综合能源系统运行控制面临的新形势、新困难与新的技术需求。

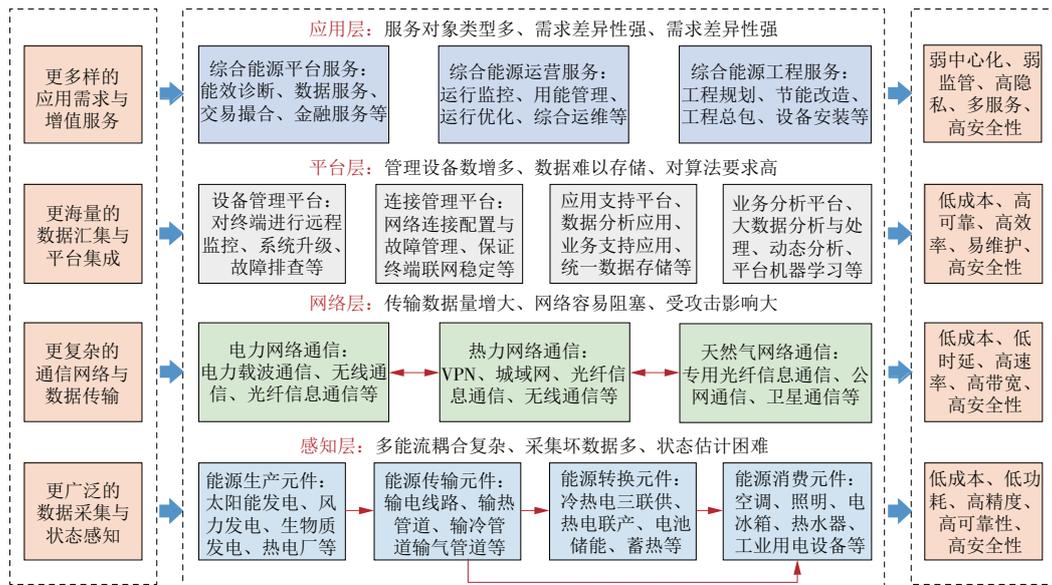


图1 综合能源系统运行控制面临的主要困难及挑战

Fig.1 Main difficulties and challenges encountered by the integrated energy system in operation and control

#### 1.1 综合能源系统的精准状态估计

基于采集的各类能源元件数据,根据某种准则(多采用最小二乘法)对未知变量进行赋值,实现对整个综合能源系统运行状态的准确感知。

电力系统的状态估计已较为成熟,热力、燃气系统的状态估计思路则有所不同,侧重于对局部系统(如单台机组)动态运行特性的刻画,少有类似于电网对系统网络和节点支路信息的综合估计。

文献[9-10]提出了电-热、电-气耦合网络状态估计技术,但可推广性有待验证,估计精度也有待进一步提高。此外,由于不同能源系统采集终端的智能化水平参差不齐,存在不良数据多、处理难度

大等问题,给精准感知系统运行状态造成困难。

#### 1.2 网络攻击威胁下的低时延数据传输

传统电力网络、热力网络、天然气网络信息壁垒明显,各网络之间进行信息交换的必要性不足。结合自身特点,各网络形成了适用的通信方式、信息安全防护手段等,但前期缺乏整体统筹规划。

综合能源系统的多主体、多应用特性要求系统通信网络具有低时延、高速率、高安全性的服务能力,以实现海量数据的快速传输,满足各主体之间广泛的信息交换需求。然而,通信网络越开放,受到恶意攻击的风险越大,如在未来多能源之间的交易环节,兼顾交易的快速性和安全性颇具挑战;另

一方面,不可能完全摒弃各独立网络已有的通信基础,有必要在其基础上实现通信功能的灵活扩展。

### 1.3 面向业务决策的数据管理与计算分析

平台层利用先进的技术手段,对下实现设备与数据的高效管理,对上提供基于智能数据分析的业务决策支持。相较于单一的能源系统,综合能源系统管理设备多,故障风险和影响范围扩大,需要做好设备健康维护,确保终端联网稳定。

此外,系统运行过程中会产生大量数据,存储需求大,亟须形成低成本、智能化的多源数据管理模式。海量数据蕴藏着有待挖掘的潜在价值,需利用人工智能、大数据分析等方法进行计算分析,得到明确的决策结果,有效支撑相关业务开展。

### 1.4 多方利益协调的综合能源服务长效机制

建立综合能源服务可持续发展的长效机制,才能最终实现其商业价值。综合能源系统面临服务对象类型多、需求差异性大、利益均衡难度大、多主体协同困难等挑战,导致工程规划、建设、运营等关键环节存在脱钩现象,难以给出面向全生命周期的价值提升方案,进而掣肘了综合能源服务的发展。因此,亟须打破各主体之间的合作壁垒,通过多样化的服务驱动,增强多主体之间的协同性;同时,利用新的技术手段,保障用户隐私和服务安全。

## 2 基于物联网的综合能源系统分层控制

### 2.1 传统集中式控制模式的局限性

电力、热力、燃气等单一能源系统多采用垂直一体化的集中式控制模式,如智能电网调度控制采用“纵向国、网、省三级调度+横向设置生产控制大区和管理信息大区”的总体方案;供热系统则多为城市级调度,主要包括热网集控中心、通信网络、换热站等;燃气系统与供热系统类似,通常由调度中心监控系统、天然气门站、调压箱等组成。

可见,传统控制模式的共同特点是设置集中控制中心,类似于人的“大脑”,依赖复杂的通信网络来收集系统全局信息,并通过强大的集中控制器或统一的云计算来处理大量的数据。这种方式容易获取系统运行的全局最优方案,但并不适用于以分布式为典型特征的综合能源系统,主要体现如下。

(1)通信时延严重,成本高。综合能源系统中,分布式能源、多能负荷具有明显的波动性、不确定性特征,受到扰动后运行状态将迅速变化,此时运行数据通过庞大的通信网络进行传输,会产生严重的通信时延,导致问题无法及时发现与处理,给系统稳定运行带来严峻挑战。

(2)对故障的敏感性高,可靠性及可扩展性差。

系统中某条通信线路发生故障,控制中心就无法再获得全局信息和制定正确的控制策略,可靠性很低;集中式控制模式不能支持分布式资源的即插即用,进一步限制了各类可调节资源的接入运行,难以满足综合能源系统对运行控制灵活性的要求。

### 2.2 边缘计算在运行控制中的适用性

近年来,物联网、大数据、4G/5G无线通信等技术快速发展,推动了互联网产业的深刻变革,也给能源行业变革提供了一些新的思路。未来,综合能源系统中的各种感知、控制、存储、服务设备也将实现互联互通,云计算不可能成为所有设备的“大脑”,需要将一定的计算资源进行下放,重新构建包含多个智能体的系统运行控制体系结构。

边缘计算是一种新的计算模式,核心思想是在数据的源头进行分析和处理,使得各类设备拥有自己的“大脑”,如图2所示。需要强调的是,边缘计算并非完全取代云计算的职能,而是对云计算的补充和延伸:云计算的强大数据处理和存储能力为边缘计算提供支持;同时,边缘计算可有效应对海量数据和隐私数据处理,为云计算减负,从而满足低功耗、低时延、高隐私、高速率等技术需求。

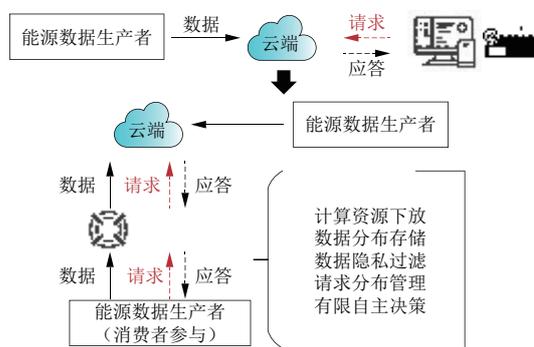
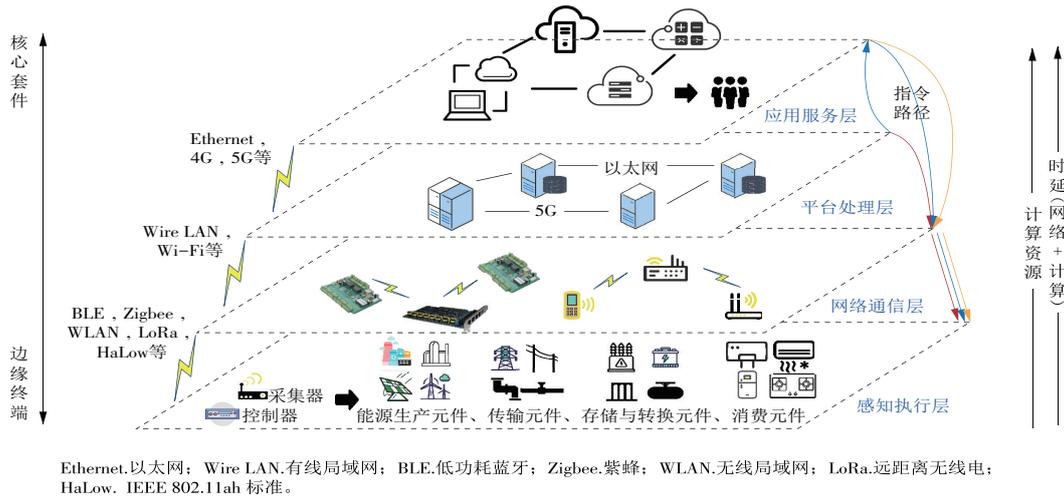


图2 边缘计算模式

Fig. 2 Edge computing model

### 2.3 综合能源系统分层协同控制架构

基于前述分析,提出基于物联网的综合能源系统分层协同控制架构:(1)感知执行层:所有关键设备均装有采集器和控制器,确保及时收集终端信息和执行控制指令;(2)网络通信层:主要包括各种网关,数量由综合能源系统的实际规模决定,保障一定区域内的通信网络稳定互联;(3)平台处理层:主要由分布式服务器组成,部分服务器具有数据存储功能,服务器之间通过以太网(Ethernet)、5G通信等方式实现互联;(4)应用服务层:与传统云计算相似,为不同类型的客户提供应用服务,但有所区别的是,其本身也是集中式与分布式结合的,微型云存储、分布式云计算等新应用方式可提高云服务的灵活性。控制架构如图3所示,主要优点如下。



Ethernet.以太网; Wire LAN.有线局域网; BLE.低功耗蓝牙; Zigbee.紫蜂; WLAN.无线局域网; LoRa.远距离无线电; HaLow. IEEE 802.11ah 标准。

图3 基于物联网的综合能源系统分层协同控制架构

Fig. 3 Hierarchical collaborative control architecture of integrated energy systems based on Internet of Things

2.3.1 实现层间快速通信

通信时延主要包括网络数据传输时延和计算处理时延。快速发展的物联网通信技术可有效降低海量数据的传输时间,表1给出了几种主流物联网通信技术的性能对比<sup>[11-12]</sup>。综合能源系统中,设备元件分布范围广,尤其是电力线路、燃气管道、热力管道等覆盖距离长,可通过LoRa、低功耗SigFox等技术实现广域信息采集和传输;工业园区、商业楼宇、居民住宅等小型综合能源系统则通过传统局域网、Zigbee网、BLE、窄带物联网(NB-IoT)等技术将数据汇集至网关。

表1 主要物联网通信技术性能对比

Table 1 Comparison of main IoT communication technologies

通信技术	通信范围/m	数据吞吐量/(bit·s <sup>-1</sup> )	功耗
Zigbee网	30~100	20 k~250 k	低
BLE	10~1 500	125 k~2 000 k	低
无线Wi-Fi	15~100	54 M~1 300 M	中等
NB-IoT	1 000~10 000	< 200 k	低
LoRa	2 000~20 000	10 k~50 k	低
低功耗SigFox	3 000~50 000	< 100	低

网关对获取的信息进行打包,通过有线局域网、Wi-Fi等上送至平台层进行处理。平台内置丰富的算法组件,数据处理量大、计算任务重,因此对数据传输的速度和质量要求较高。除了目前已广泛使用的Ethernet以及4G通信等技术,正在逐步走向商业化推广应用的5G通信技术可实现通信的进一步加速,数据传输速率可达0.1~1.0 Gbit/s,最高速率是低功耗蓝牙的1 000倍<sup>[13]</sup>,有望在支持低功耗海量设备连接、高可靠延时接入、热点大容量覆盖、连续广域覆盖等方面提升网络通信的综合性能。

2.3.2 实现控制指令的多路径并行处理

在高速通信的基础上,边缘计算通过拓宽综合能源系统运行控制指令下发执行的路径,实现多路径并行处理,提高控制响应速度,降低计算时延。

(1)从云-云交互到云-边交互,再到边-端交互。综合能源系统需要类似电力系统三级调度的集中式控制中心,如城市级综合能源管控系统,可与其他城市进行信息交换,实现多能互补,以充分发挥城市间不同能源的互补调节能力,保障能源稳定供应。此路径与传统集中式控制模式相似,由云数据中心制定调度方案,经边缘侧任务分配,最终将指令下发到各终端设备执行。

(2)从边-云交互、云-边交互到边-端交互。边缘侧具有部分自主决策权限,如底层为微电网系统,微网能量管理系统可根据内部运行情况形成控制方案,上传至云数据中心进行审批,审批通过后再下发到各终端执行。此路径下顶层控制中心决策权弱化为审批权,计算量大大减少,可确保不影响全局安全稳定的控制指令得到快速响应和执行,从而提高综合能源系统的运行效率。

(3)从边-边交互到边-端交互。边缘侧进行自主决策,指令直接下发至终端执行。此路径适用于用户隐私要求高、响应速度要求高且无需进行云审批的场景,如用户请求查看电、热、气能源消费数据及参与市场的收益情况,或对空调、冷热电三联供进行合理的出力调整等。在确保安全的前提下保证对用户服务响应的及时性,提升用户体验。

2.3.3 实现分级多层次决策的高效协作

计算、存储和通信资源可分布是边缘计算的基本特征。通过对这些分布式灵活性资源的有效组织和利用,多层之间实现高效协作,体现如下。

(1)层层数据过滤,有效保护隐私。对于用户隐私性要求较高的业务,可选择在本地边缘计算节点进行计算,必要时仅将经过处理的特征量发送至云数据中心或其他边缘节点,从而避免泄露用户的真实数据,更好地保护用户隐私。

(2)计算迁移灵活,减缓传输压力。对各类能源终端元件产生的数据进行预处理,过滤无用数据,避免海量数据侵占带宽资源,造成传输阻塞;对边缘设备计算力进行动态评估和任务划分,防止边缘设备任务过载,影响系统性能。

(3)集中分布协同,提高决策效率。云计算与边缘计算协同的控制方式,既保留了传统集中式控制计算能力强、存储空间大等强项,又可发挥分布式控制响应灵活、可扩展性好的显著优势<sup>[14]</sup>。

### 3 基于物联网的综合能源系统分层控制

以工业园区为例,进一步说明边缘计算技术对综合能源系统运行控制水平的提升作用,部署有边缘设备的工业园区综合能源系统如图4所示。工业园区能耗大,集办公与生产等功能于一体,涉及的能源设备众多,通常由工业企业统一进行能源系统投资、运营,决策权力相对集中,便于统一开展综合能源服务,以实现降低用能成本、提高能源利用效率等目标。

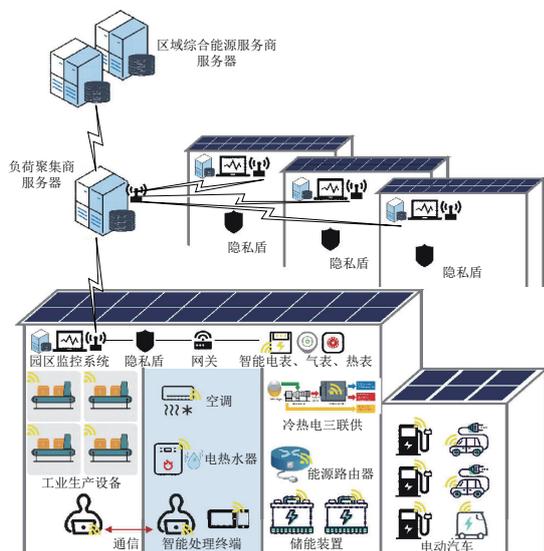


图4 部署有边缘设备的工业园区综合能源系统

Fig. 4 Integrated energy system for the industrial park with edge devices

目前,大多园区配有监控系统,但功能以信息监测为主,不能实现对电、冷、热、气等各能源元件出力的灵活控制,难以支撑边缘计算的部署应用。

#### 3.1 单个工业园区的运行控制模型

在一定的时间内,工业园区可获取利用的

能源总量是有限的,因此,其控制问题可描述为:对园区各种边缘设备元件进行组织管理,根据外部环境变化动态确定各元件的运行策略,实现客户效用最大化并满足相关的约束条件。具体模型如下

$$\max = \sum_i \sum_j (m_{ij} n_{ij}), \quad (1)$$

$$\sum_i \sum_j (P_{ij} n_{ij}) \leq P, \quad (2)$$

$$\forall i: \sum_j n_{ij} = 1, \quad (3)$$

式中: $i$ 为冷热电三联供、能源路由器等边缘设备元件编号, $i=1,2,\dots,a$ ; $j$ 为设备元件的运行模式, $j=1,2,\dots,b$ (以空调为例,包括全功率运行、关闭、半功率运行等不同模式,部分设备如照明设备仅有打开和关闭2种模式); $n_{ij}$ 为设备 $i$ 的第 $j$ 个模式状态,如果选择了模式 $j$ 则为1,否则为0; $P_{ij}$ 为设备 $i$ 在模式 $j$ 下运行的功耗; $P$ 为所有设备额定功率的总和; $m_{ij}$ 为设备 $i$ 以模式 $j$ 运行时客户的效用或满意度。

该模型为线性整数规划模型,确保在任一时间断面下同一设备元件具有确定的运行模式,每种运行模式下客户的用能舒适度不同,消耗的功率也不同,便于电、冷、热、气不同能源系统的能量折算与全局优化,有关的算例验证和分析详见文献[15]。

#### 3.2 多个工业园区协同的多阶段求解方法

单个工业园区的运行决策结果通过隐私盾进行敏感信息过滤,将部分信息上传至负荷聚集商。负荷聚集商是电网、热网、气网集中式控制中心与园区用户之间重要的协调机构,可将多个工业园区的能源资源聚合起来,发掘并利用资源可调节能力,争取参与区域能源交易市场调节的机会,还可为园区用户提供多能互补互济、综合运维等服务。

区域综合能源服务商由传统电力系统调度中心、热网集中监控中心等发展而来,在更宽的区域范围、更大的能源规模方面提供运行保障。

由此可见,边缘计算应用背景下,传统单一的集中式决策主体裂变为多个决策主体,促使区域综合能源系统运行控制问题演变成典型的多阶段优化问题。通常基于最优化原理(贝尔曼原理)来求解此问题<sup>[16]</sup>,即将此优化过程转换为一系列单阶段决策问题,然后利用各阶段之间的转移和约束关系,逐个求解单阶段优化问题。基于贝尔曼原理,分布式优化问题可转化为多阶段求解问题,即通过先求解局部子系统的优化解而逐渐获得整个系统的优化解,如图5所示。

此方法优点在于,可将每个阶段的运行决策方案进行存储记忆,一旦出现相同的场景,则可立即从存储设备中取出方案并执行,避免重复计算。例

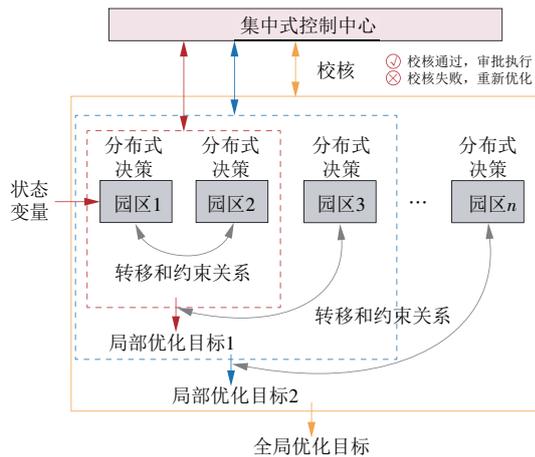


图5 多阶段优化求解方法

Fig. 5 Multi-stage optimization solution

如：园区储能装置多数情况下执行峰谷套利的运行模式，只有在紧急功率支撑、需求响应等场景下会突然改变运行方式，因此，可将峰谷套利的分布式决策方案存储到园区本地服务器，方便随时调用，可有效缩短优化计算时间，减少决策延迟。

## 4 应用展望

边缘计算与综合能源服务的理念均非常前沿，目前基础理论框架尚未完善，离商业化推广应用还存在一定的距离，应进一步思考并梳理技术应用面临的挑战和机遇。

### 4.1 融合边缘计算的综合能源信息物理模型

一方面，综合能源系统是多学科交叉的信息物理融合系统，对其运行机理的深入分析需要基于精准状态估计的系统模型作为支撑。目前仍在不断探索电力、热力、燃气等能源系统的多时间尺度统一建模技术<sup>[17-18]</sup>，模型中对信息技术和社会因素的拓展考虑也有待加强；另一方面，边缘计算是综合性较强的科学，覆盖数据通信、存储、计算、能耗优化等多个技术领域，涉及传感、芯片、软硬件平台、数据聚合等多个产业，需要基于现有成熟的理论基础和技术条件进行延伸，提出多维度 and 综合性的边缘计算理论。边缘计算支持实现感知层更广泛的数据采集和状态感知，有利于综合能源系统模型的有效构建与优化，对于指导开展基于边缘计算技术的综合能源服务应用研究和开发工作具有重要意义，是目前亟须解决的首要关键性问题。

### 4.2 基于资源动态分配的安全防护体系

以物联网为基础的综合能源系统设备数量和类型众多，计算资源和存储能力受限，给系统运行安全带来极大挑战。边缘计算支持将数据就近保存到本地计算设备上，可以为不同层级的隐私保护

算法提供充足的计算资源，有效保护云、边、端之间的数据隐私；同时，园区、居民等用户可通过就地平台追踪各能源设备元件的运行状况，及时发现潜在的安全漏洞，消除安全隐患；另外，由于边缘设备对终端具有较高的控制权限，面临的网络环境也更加复杂，因此其本身也更容易受到恶意攻击，需要重新审视和分析边缘计算架构下能源系统运行面临的安全威胁，建立综合安全防护体系，确保物理安全、网络安全、数据安全和应用安全。

### 4.3 数据和服务双驱动的综合能源服务模式

2019年，国家电网有限公司印发《关于推动综合能源服务业务发展2019—2020年行动计划的通知》，明确提出综合能效服务、供冷供热供电多能服务、分布式清洁能源服务和专属电动汽车服务四大重点业务领域。就业务推进来看，多数项目沿用“以服务驱动”的单边商业模式，如用户提出冷、热、电综合供应的需求，通过按需定制、易扩展的方式向相关服务商进行购买。未来，边缘计算将更加侧重于“以数据驱动”，用户向数据拥有者或利益相关方提出数据请求，由云数据中心或附近的边缘终端将处理的结果反馈给用户，用户依据反馈情况决定是否购买服务或参与市场交易，形成云端交互、端端交互的多边商业模式<sup>[19]</sup>。其中，如何最大化多个相关方的利益是未来面临的一大挑战。

## 5 结束语

本文总结了综合能源系统运行控制面临的困难，分析了传统集中式控制模式的局限性和边缘计算的适用性，提出了基于物联网的综合能源系统分层协同控制架构。在此架构基础上，给出了单个工业园区综合能源系统的运行控制模型以及多个工业园区协同的多阶段优化问题求解方法。最后从系统建模、安全防护、商业模式3个方面，展望了边缘计算在综合能源服务中的应用前景。

### 参考文献：

- [1]董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.  
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: Basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [2]韩峰,张衍国,严矫平,等.综合能源服务业务和合作模式[J].华电技术,2019,41(11):1-4.  
HAN Feng, ZHANG Yanguo, YAN Jiaoping, et al.

- Integrated energy service and cooperation modes [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 1-4.
- [3] 杨晓巴,陶新磊. 综合能源技术路线研究[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 22-25.  
YANG Xiaosi, TAO Xinlei. Research on integrated energy technical route[J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 22-25.
- [4] 施巍松,张星洲,王一帆,等. 边缘计算:现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(1): 69-89.  
SHI Weisong, ZHANG Xingzhou, WANG Yifan, et al. Edge computing: State of the art and future directions [J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(1): 69-89.
- [5] 李彬,贾滨诚,曹望璋,等. 边缘计算在电力需求响应业务中的应用展望[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 79-87.  
LI Bin, JIA Bincheng, CAO Wangzhang, et al. Application prospect of edge computing in power demand response business[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 79-87.
- [6] 周峰,周晖,刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 70-82.  
ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development of intelligent perception key technology in the ubiquitous internet of things in electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 70-82.
- [7] 龚钢军,罗安琴,陈志敏,等. 基于边缘计算的主动配电网信息物理系统[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3128-3135.  
GONG Gangjun, LUO Anqin, CHEN Zhimin, et al. Cyber physical system of active distribution network based on edge computing[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3128-3135.
- [8] LI W, YANG T, DELICATO F C, et al. On enabling sustainable edge computing with renewable energy resources [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(5): 94-101.
- [9] 董今妮,孙宏斌,郭庆来,等. 热电联合网络状态估计[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1635-1641.  
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation for combined electricity and heat networks [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1635-1641.
- [10] 董今妮,孙宏斌,郭庆来,等. 面向能源互联网的电-气耦合网络状态估计技术[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 400-408.  
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation of combined electric-gas networks for Energy Internet [J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 400-408.
- [11] Wireless connectivity options for IoT applications: Technology comparison [EB/OL]. (2020-04-21) [2021-08-01]. <https://www.bluetooth.com/blog/wireless-connectivity-options-for-iot-applications-technology-comparison/>.
- [12] KUMAR P R, WAN A T, SUHAILI W S H. Exploring data security and privacy issues in Internet of Things based on five-layer architecture [J]. International Journal of Communication Networks and Information Security, 2020, 12(1): 108-121.
- [13] 陈兆雁,柴宜,平常,等. 基于5G边缘计算的可调节负荷互动技术研究[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 9-13.  
CHEN Zhaoyan, CHAI Yi, PING Chang, et al. Research on adjustable load interaction technology based on 5G edge computing[J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 9-13.
- [14] DOLUI K, DATTA S K. Comparison of edge computing implementations: Fog computing, cloudlet and mobile edge computing [C]//2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS). IEEE, 2017: 1-6.
- [15] ZHANG X, YANG D, DU W, et al. Research on operation optimization method of regional integrated energy system [C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT Asia). IEEE, 2019: 3299-3304.
- [16] WEI Q, SHI G, SONG R, et al. Adaptive dynamic programming based optimal control scheme for energy storage systems with solar renewable energy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5468-5478.
- [17] 孙浩,陈永华. 综合能源系统多能流联合仿真技术研究[J]. 华电技术, 2020, 42(5): 66-72.  
SUN Hao, CHEN Yonghua. Research on multiple energy flow co-simulation technology applied in integrated energy system[J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 66-72.
- [18] 孙浩,傅金洲,鄢小虎,等. 区域综合能源仿真优化系统的研制[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 8-13.  
SUN Hao, FU Jinzhou, YAN Xiaohu, et al. Research and development of integrated community energy simulation-optimization system[J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 8-13.
- [19] 李彬,杨帆,赵燕玲,等. 基于边缘物联代理的综合需求响应关键技术研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 56-62.  
LI Bin, YANG Fan, ZHAO Yanling, et al. Research on key technologies for integrated demand response based on edge IoT agent[J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 56-62.

(本文责编:刘芳)

#### 作者简介:

杨冬梅(1983),女,高级工程师,硕士,从事综合能源系统、高效蓄冷蓄热、电池储能系统能量管理等研究, yangdongmei@sgepri.sgcc.com.cn;

何国鑫\*(1994),男,工程师,硕士,从事能源信息物理系统、储能技术在电力系统中的应用,综合能源系统仿真与运行控制等研究, heguoxin@sgepri.sgcc.com.cn.

\*为通信作者。