



基于边云协同的建筑能源系统分布式供需协同优化

徐占伯^{1*}, 周春翔¹, 吴江¹, 刘坤¹, 管晓宏^{1,2}

1. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 西安 710049

2. 清华大学自动化系智能与网络化系统中心, 北京 100084

* 通信作者. E-mail: zbxu@sei.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-01-31; 修回日期: 2022-05-31; 接受日期: 2022-06-23; 网络出版日期: 2023-03-14

国家自然科学基金 (批准号: 62122062, 62192750, 62192755) 资助项目

摘要 建筑能源系统能耗总量巨大且用能弹性高, 具有很大的节能优化潜力, 其提效节能被认为是降低能源电力系统终端碳排放、实现“2030 碳达峰、2060 碳中和”国家战略目标的重要途径之一。然而, 建筑能源系统节能优化面临人员行为与系统能耗交互影响、多种能源介质时空多尺度耦合与供需能量平衡等建模挑战, 以及系统决策空间随建筑规模指数增长的维数灾计算复杂性挑战。针对上述挑战, 本文从信息物理融合的角度出发, 提出了基于节点-流量模型的建筑能源系统分布式优化模型, 刻画了电、气、热等能源物理网络与信息网络的交互影响, 实现了局部数据采集和计算的一体化结构设计, 支撑边云协同计算体系。进而, 设计了基于边云协同的分布式迭代优化算法, 证明了算法的收敛性, 可实现建筑能源系统供需协同优化, 并大大降低了对全局信息的依赖性和通信需求。本文以 6 种不同规模下实际建筑系统的数值测试结果, 验证了所提方法的性能和有效性, 特别在大规模建筑能源系统上具有良好的应用前景。

关键词 建筑能源系统, 信息物理融合系统, 边云协同计算, 供需协同优化, 系统优化

1 引言

建筑能源系统运行能耗总量巨大, 约占社会总能耗的 30%^[1]。建筑运行受天气、室内人员需求和行为等影响, 其用能主要消耗于制冷、制热、照明等系统, 具有巨大的弹性调节空间^[1], 因此建筑能源系统节能优化受到了各国政府、学术界和工业界的广泛关注, 被认为是解决或缓解能源问题以及由此带来的环境污染问题最有效、最无争议的手段之一^[2]。同时, 以建筑能源系统节能优化为技术支撑, 构建绿色社区、生态建筑, 也是完成碳达峰、碳中和国家战略目标的重要组成部分^[3]。

典型的建筑能源系统包括电、热、冷、气、可再生等多种能源、存储和能耗设备, 供应侧通常包含区域配电网、光伏或风力发电等可再生新能源、分布式自治供能机组 (如天然气驱动的冷热电联产

引用格式: 徐占伯, 周春翔, 吴江, 等. 基于边云协同的建筑能源系统分布式供需协同优化. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 517-534, doi: 10.1360/SSI-2022-0053
Xu Z B, Zhou C X, Wu J, et al. Edge-cloud framework-based distributed optimization of a building energy system with supply-demand coordination (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 517-534, doi: 10.1360/SSI-2022-0053

机组), 同时还有蓄电池、蓄冰罐等储电储热设备; 在需求侧, 通常包含空调、照明、数据中心、电梯等电、热负荷. 建筑能源系统节能优化一般指在基本不改变能源生产和消耗设备的情况下, 通过全面感知环境、人员和能源信息, 实现系统信息流和能量流的双向流动与交互, 优化和协调电、热、冷、气、可再生等多种能源介质和储能及能耗设备的运行, 满足室内人员舒适需求并显著降低能源消耗和运行成本. 建筑能源系统供需之间受室内人员行为和舒适需求、环境等因素影响巨大, 使电、热、冷、气、可再生等多种能源介质相互耦合, 构成了复杂的关联网络化能源供需系统, 因此为实现系统整体能效提升, 研究建筑能源系统供需协同优化尤为重要.

近年来, 针对建筑能源系统供需协同优化, 各国研究机构和学者们开展了深入研究, 并已取得了丰硕的研究成果. 具体而言, 可分为如下几类.

第一, 基于仿真的建筑能源系统优化. 此类方法主要以 EnergyPlus^[4], TRNSYS^[5] 等建筑能耗模拟软件作为仿真程序, 并结合数学规划或启发式算法优化运行策略. 文献 [6] 使用 EnergyPlus 仿真教室温度变化, 以此优化通风系统运行、保证人员舒适; 文献 [7] 利用 TRNSYS 软件对建筑能耗与投资进行评估和权衡. 其他典型的应用还包括将建筑能耗模拟软件的输出数据与多元回归^[8]、多目标优化^[9]、模型预测控制^[10]、智能算法^[11] 等算法结合, 优化建筑能源系统多种能源和能耗设备的运行策略. 总体而言, 此类算法目前仍面临仿真软件输入参数难以准确获取、仿真计算资源需求大等挑战, 使仿真软件难以直接应用于策略优化过程, 缺乏仿真和优化过程的闭环融合, 导致此类方法在精度、效率、实时性等方面难以满足实际工程需求.

第二, 集中式优化方法. 研究学者们将建筑能源系统看作一个建筑微网, 从能量交互和管理的角度, 研究了集中式建筑能源系统优化方法. 比如, 文献 [12] 建立了混合整数线性模型, 基于供需曲线, 优化了建筑能源系统中储能设备运行策略, 实现建筑系统与电网的高效交互, 提高了储能设备能效; 文献 [13] 建立了集中式的供能、储能和能耗协同优化模型, 求解得到系统最优运行策略; 文献 [14] 使用模型预测控制方法, 降低了建筑系统运行成本, 同时改善了人员舒适性. 然而, 在实际建筑系统, 尤其是大规模建筑中, 集中式优化算法面临全局信息难获取、计算复杂性高等挑战, 难以高效应用.

第三, 分布式优化方法. 随着可再生能源、微电网、分布式储能等能源互联关键技术^[15] 的不断发展, 针对上述集中式方法存在的缺陷, 许多学者深入研究了建筑能源系统分布式优化算法. 文献 [16] 提出了针对储能设备的分布式优化算法, 解决了供需匹配问题; 文献 [17] 提出了基于多智能体的微电网分布式优化方法, 提高了系统整体能效; 针对分布式能源系统而言, 各能量单元间的信息通信机制非常重要, 文献 [18] 将事件驱动的方法引入微电网经济分配, 以节约通信带宽; 文献 [19] 对通信过程的丢包问题开展研究, 确保了所提分布式优化方法的鲁棒性; 文献 [20] 提出一种系统控制矩阵构造方法, 实现对含分布式电源的微电网状态的优化控制, 保证系统稳定运行. 上述分布式优化方法在一定程度上克服了集中式方法难以获取全局信息和计算复杂性高的不足, 但当考虑建筑能源系统设备容量和能量平衡等全局约束时, 已有分布式方法难以保证快速收敛, 因此很难直接应用于工程实际系统.

随着大数据和物联网等信息技术的不断发展, 信息物理融合系统 (cyber-physical system, CPS) 为建筑能源系统供需协同优化提供了新的结构和技术支撑. CPS 支持能量流和信息流在配电网、城市热网、气网、可再生新能源 (光伏或风力发电) 等网络化能源系统供应侧和制冷 (热)、照明等需求侧的双向流动和交互, 实现能源互联^[21], 使得供需协同优化成为可能. 信息物理融合系统已应用于多类系统的提效节能, 比如, 文献 [22] 建立了基于信息 - 物理 - 能源 - 经济系统的四元模型, 解决了多能协调控制与优化问题; 文献 [23] 提出了一个基于 CPS 的能源系统分布式感知与控制模型, 可对复杂网络实现有效的分布式决策; 文献 [24] 从 CPS 的角度提出了能源互联网的多层体系结构, 并从感知、通信、计算和控制 4 个方面分析了能源互联网的未来发展需求; 文献 [25] 提出了一个基于 CPS 的城市

供水系统网络化模型,分析了供水管网的结构特性和可控性,并提高了供水管网的鲁棒性.虽然上述创新研究已经取得了丰硕的成果,但是网络化能源系统中电、热、冷、气、可再生等多种能源介质的耦合与转化、信息和物理系统的相互影响并未被精细刻画,这导致在网络化能源系统中的各个节点很难有效利用信息,也很难最大化系统整体的效能.

建筑能源系统通常规模较大且系统结构复杂,难以集中获取整个建筑人员,环境以及能源、存储和能耗设备状态等信息,导致了集中式供需协同优化不仅面临计算复杂性挑战,更面临信息交互模式和结构复杂性挑战;此外,由于建筑能源系统通常具有供需时空耦合、多种能源介质转化和能量平衡等全局约束,无中心的分布式优化方法无法保证收敛,难以直接应用.因此,针对上述问题,边云协同机制应用于建筑能源系统供需协同优化具有如下重要作用:(1)边云协同机制为建筑能源系统供需协同优化提供了信息分布式计算和交互的结构基础,也为信息系统和物理系统的深度融合奠定了基础^[26].通过设计云中心和各个边缘节点信息交互的内容和模式,可在中心协调信息的作用下实现局部信息的本地采集与计算,大大降低通信资源需求和对全局信息的依赖;(2)边云协同机制为建筑能源系统供需协同优化提供了算法设计基础^[27].基于边云协同机制,可实现有中心协调机制的分布式优化,可以解决无中心分布式优化方法难以高效处理上述全局约束的难题,同时边云协同机制可协同发挥边缘节点和云中心各自的计算能力优势,通过云中心发送的中心协调信息,实现对边缘节点的高效管理,提升计算和通信效率,降低时延,提高系统整体优化水平^[28].

虽然信息物理融合系统和边云协同机制为建筑能源系统分布式优化提供了技术和结构支撑,但实现供需协同优化仍面临如下挑战:第一,建筑能源系统中能源、存储和能耗设备相对分散,且房间末端的用能设备多样,使得各种设备的准确信息难以完全及时获取;第二,建筑能源系统中,室内人员舒适和行为需求,使得电、热、冷、气等多种能源介质和资源相互耦合,同时储能设备的存在,使得系统供需之间存在时间尺度耦合,如何建立建筑能源系统中多能耦合模型,实现多能转化和交互的精细化描述,是必须要解决的建模难题;第三,上述两个挑战导致在建筑能源系统,尤其是大规模建筑能源系统中,难以利用集中式算法求解,因此如何有效刻画信息物理融合系统结构下信息系统和物理系统的相互影响,对于系统建模和分布式优化算法信息交互机制的设计尤为重要.

针对上述挑战,本文开展了如下工作:首先,本文从信息物理融合角度出发,建立了节点-流量模型.将建筑能源系统中多种能源、存储和能耗设备作为边缘节点,并设计各节点模型,描述该节点的多种能量转化关系和目标函数;设计流量模型,描述各节点间信息流和能量流的交互关系.协同节点和流量模型,可有效刻画建筑能源系统中多种能源介质和系统供需的多重耦合本质、节点及节点间的能量平衡、信息系统和能源系统的相互影响等.所提的节点-流量模型具有分布式结构,设计了基于局部数据采集和计算的一体化结构,可支撑边云协同计算架构,避免了对全局信息的依赖性.其次,本文以节点-流量模型为基础,提出了基于节点间能量传输平衡的边云信息交互机制.在此机制下设计了基于边云协同的分布式迭代优化算法,实现了各节点分布式协同优化决策,并证明了该算法的最优收敛性.最后,本文以实际建筑能源系统运行数据为基础,利用 6 种不同规模的建筑能源系统数值测试案例,验证了所提方法的性能.数值结果说明本文所提方法相比于集中式方法,可在不显著降低系统性能的同时,极大缩短求解时间(在大规模数值测试案例中,可缩短超过 90% 的计算时间),且具有较好的泛化性能和广阔的实际工程应用前景.

本文其余部分安排如下:第 2 节介绍了供需协同优化问题的节点-流量模型;第 3 节介绍了边云信息交互机制,并证明了所提分布式迭代优化算法的收敛性;第 4 节将所提方法应用于 6 类典型数值测试案例,并通过数值结果说明了算法的性能;第 5 节对本文进行了总结.

2 问题描述与建模

本文研究建筑能源系统供需协同优化问题. 如图 1 所示, 考虑系统内多种能量流及多种能源设备和能源介质之间的转化和耦合, 在包含 K 个时段的调度周期内, 在满足用户需求的前提下, 以最小化系统运行成本为目标, 协调供、储、需各环节间能量交互, 实现供需系统运行策略的协同优化. 本文以系统各类能源、储能、能耗设备为节点, 以节点之间的能量、信息交互为边, 构建图网络模型 $G = \langle \mathbf{V}, \mathbf{E} \rangle$, 其中, \mathbf{V} 是系统内所有节点的集合 $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$, 包括配电网节点、光伏节点、储电节点、房间群节点等; \mathbf{E} 是连接节点的有向边的集合 $\mathbf{E} \subseteq \mathbf{V} \times \mathbf{V}$, 包括电能交互、冷(热)量交互及信息交互.

由于热平衡过程本质上与冷平衡过程一致, 相关的节点和流量模型相似, 因此本文以夏季供冷模式为例介绍系统模型, 关于热平衡建模不再赘述. 本文基于不同物质能量类型, 将夏季建筑能源系统拆分为电能网络、冷量网络和信息网络三层结构. 由于人员需求和环境影响, 不同网络间相互关联与耦合, 具体能量交互关系见图 1. 依据三类网络的物理构成, 本文定义七类边缘节点: (1) 房间群节点 (R) 指建筑内所有房间的整体集合; (2) 暖通空调节点 (HVAC) 包括暖通空调相关设备, 以及制冷和制冰两种工作模式; (3) 配电网节点 (PG) 描述建筑能源系统与电网之间的电能交互过程; (4) 以光伏节点 (PV) 为例, 代表一般系统中可能包含的可再生能源; (5) 天然气驱动的冷热电联产节点 (CCHP), 为建筑同时供应电能和冷量; (6) 储电节点 (SE) 由蓄电池组成; (7) 储冷节点 (SI) 以蓄冰的形式实现冷量的存储和供应. 另外, 房间群节点是所有房间子节点所需能量的统一入口, 一方面实现对各个子房间能量需求信息的汇聚与上传; 另一方面接收云中心的协调信息, 并按照本地决策分配能量至各子房间. 依据三类网络的拓扑结构, 本文定义三类边: 电能流、冷量流、信息流, 分别代表电能、冷量和信息在各个节点间的交互关系. 为了避免随着节点数目的增多导致集中式求解面临的指数复杂度^[29]问题, 本文建立节点-流量模型, 把集中式优化问题划分为多个子优化问题. 其中, 节点模型归属于各个“边缘节点”, 刻画了每个节点多种能量间的动态转化关系, 并保证节点的能量平衡, 其优化目标为最小化节点运行成本, 包括节点的能量消耗成本和与其他节点间的能量交互成本; 流量模型则建立在“边”的基础上, 刻画了节点间电能、冷量以及信息的交互过程, 保证了节点间的能量平衡与信息的安全交互. 以上两类能量平衡保证了系统整体的供需平衡, 下面将对具体模型进行详细介绍.

2.1 节点模型

2.1.1 配电网节点

配电网节点是建筑能源系统的重要电能来源, 可根据不同时段的电价与负荷需求决策建筑能源系统与配电网间的电能交互过程. 该节点的优化目标是在调度周期 K 内, 电网净注入的电能成本和与其相连节点间的能量交互成本之和最小. 同时, 配电网节点需要满足自身运行约束以及节点之间的能量交互约束. 具体如下:

$$\min \sum_{k=1}^K (c_b^k e_b^k - c_s^k e_s^k + \lambda_{pv,pg}^k e_{pg \leftarrow pv}^k + \lambda_{se,pg}^k e_{pg \leftarrow se}^k - \lambda_{pg,se}^k w_{pg \rightarrow se} e_{pg \rightarrow se}^k + \lambda_{cchp,pg}^k e_{pg \leftarrow cchp}^k - \lambda_{pg,R}^k w_{pg \rightarrow R} e_{pg \rightarrow R}^k - \lambda_{pg,hvac}^k w_{pg \rightarrow hvac} e_{pg \rightarrow hvac}^k), \quad (1)$$

$$0 \leq e_b^k \leq E_b^k \cdot z_b^k, \quad 0 \leq e_s^k \leq E_s^k \cdot z_s^k, \quad z_b^k + z_s^k \leq 1, \quad (2)$$

$$e_b^k + e_{pg \leftarrow pv}^k + e_{pg \leftarrow cchp}^k + e_{pg \leftarrow se}^k = e_s^k + e_{pg \rightarrow hvac}^k + e_{pg \rightarrow R}^k + e_{pg \rightarrow se}^k, \quad (3)$$

$$0 \leq e_{pg \leftarrow se}^k \leq LC \cdot z_{pg \leftarrow se}^k, \quad 0 \leq e_{pg \rightarrow se}^k \leq LC \cdot z_{pg \rightarrow se}^k, \quad z_{pg \leftarrow se}^k + z_{pg \rightarrow se}^k \leq 1, \quad (4)$$

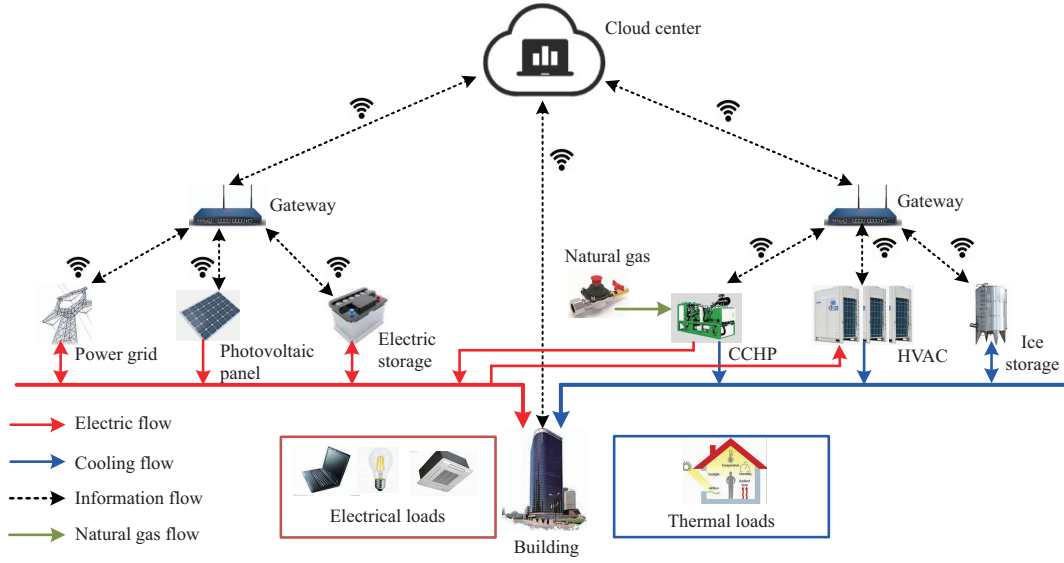


图 1 建筑多能流信息流耦合图网络

Figure 1 Coupling graph network of multi-energy flow and information flow of a building

其中, K 为优化问题调度周期; 下标 pg 代表配电网节点, pv 代表光伏节点, se 代表储电节点, $cchp$ 代表冷热电联产节点, R 代表房间群节点, $hvac$ 代表暖通空调节点; c_b^k, c_s^k 分别为 k 时段配电网节点买、卖电价格; e_b^k, e_s^k 分别为 k 时段买、卖电量; $\lambda_{m,n}^k, w_{m \rightarrow n}^k$ 分别为 k 时段电能由 m 节点传输至 n 节点的交互成本和传输效率; E_b^k, E_s^k 分别为 k 时段最大买、卖电量; $z_b^k, z_s^k, z_{pg \leftarrow se}^k, z_{pg \rightarrow se}^k$ 为 k 时段该节点与电网和与储电节点间电能交互的 0-1 决策变量, 取 1 表示存在电能交互, 否则取 0; $e_{m \leftarrow n}^k, e_{m \rightarrow n}^k$ 分别为 k 时段 m 节点接收自或输送至 n 节点的电量; LC 代表传输线容量上限. 式 (2) 为与电网交互的电量上下限约束和电网运行状态约束, 式 (3) 为节点能量平衡约束, 式 (4) 为电量传输约束, 包括传输线容量约束和单向传输约束, 即该节点与储电节点在同一时段只能按单一方向传输能量.

2.1.2 光伏节点

光伏节点将太阳辐射转化为电能, 为建筑能源系统供能. 因本文考虑的是运行优化调度问题, 所以不考虑光伏设备的投资成本^[30], 本文中优化目标仅包含光伏设备运行过程中与其相连节点的能量交互成本, 模型如下:

$$\min \sum_{k=1}^K (-\lambda_{pv,pg}^k w_{pv \rightarrow pg} e_{pv \rightarrow pg}^k - \lambda_{pv,se}^k w_{pv \rightarrow se} e_{pv \rightarrow se}^k - \lambda_{pv,R}^k w_{pv \rightarrow R} e_{pv \rightarrow R}^k - \lambda_{pv,hvac}^k w_{pv \rightarrow hvac} e_{pv \rightarrow hvac}^k), \quad (5)$$

$$p_{pv}^k \cdot \tau = e_{pv \rightarrow se}^k + e_{pv \rightarrow hvac}^k + e_{pv \rightarrow R}^k + e_{pv \rightarrow pg}^k, \quad (6)$$

其中, p_{pv}^k 为 k 时段光伏节点的发电功率; τ 为时段长度. 光伏节点可向储电节点、暖通空调节点和房间群节点供电, 或通过配电网节点卖出, 因此, 其节点能量平衡可用式 (6) 描述.

2.1.3 冷热电联产节点

冷热电联产节点利用天然气产生电能和冷、热能, 耦合电量和冷、热量平衡. 本文以夏季建筑的

能源优化为例, 故仅考虑冷热电联产机组产电、产冷过程. 其优化目标包括所消耗天然气的成本及与相连节点间的能量交互成本, 具体模型如下:

$$\min \sum_{k=1}^K (c_n^k V_{ng}^k - \lambda_{cchp,pg}^k w_{cchp \rightarrow pg} e_{cchp \rightarrow pg}^k - \lambda_{cchp,se}^k w_{cchp \rightarrow se} e_{cchp \rightarrow se}^k - \lambda_{cchp,R}^k w_{cchp \rightarrow R} e_{cchp \rightarrow R}^k - \lambda_{cchp,hvac}^k w_{cchp \rightarrow hvac} e_{cchp \rightarrow hvac}^k - \mu_{cchp,R}^k f_{cchp \rightarrow R} q_{cchp \rightarrow R}^k - \mu_{cchp,si}^k f_{cchp \rightarrow si} q_{cchp \rightarrow si}^k), \quad (7)$$

$$z_c^k \cdot \underline{x}_c \leq x_c^k \leq z_c^k \cdot \overline{x}_c, \quad z_c^k = \begin{cases} 1, & x_c^k > 0, \\ 0, & x_c^k = 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$p_{cchp}^k = P_c \cdot x_c^k, \quad q_{cchp}^k = (a \cdot x_c^k + b \cdot z_c^k) \tau, \quad V_{ng}^k = (c \cdot x_c^k + d \cdot z_c^k) \tau, \quad (9)$$

$$p_{cchp}^k \cdot \tau = e_{cchp \rightarrow pg}^k + e_{cchp \rightarrow hvac}^k + e_{cchp \rightarrow R}^k + e_{cchp \rightarrow se}^k, \quad q_{cchp}^k = q_{cchp \rightarrow si}^k + q_{cchp \rightarrow R}^k, \quad (10)$$

其中, c_n^k 为 k 时段天然气单价; V_{ng}^k 为 k 时段消耗天然气体积; $\mu_{m,n}^k$ 和 $f_{m \rightarrow n}$ 分别为 k 时段冷量由 m 节点传输至 n 节点的交互成本和传输效率; x_c^k 为 k 时段机组负荷率; $\underline{x}_c, \overline{x}_c$ 分别代表机组开机的最小和最大负荷率; z_c^k 为代表开关机状态的 0-1 决策变量, 取 1 代表机组开机, 否则取 0; p_{cchp}^k, q_{cchp}^k 分别为 k 时段机组发电功率与制冷量; P_c 为机组额定功率; a, b, c, d 为与额定功率相关的机组参数, 可结合实际运行数据由线性拟合得到^[31]; 下标 si 代表储冷节点. 式 (7) 为节点优化目标, 式 (8) 为机组负荷率约束和开关机约束, 式 (9) 为能量输出约束及天然气消耗约束, 式 (10) 为节点能量平衡约束.

2.1.4 储电节点

储电节点通过蓄电池的充放电实现系统电能的存储和供应, 该节点的运行成本为电池在充放电过程中的寿命损耗成本和与相连节点间的能量交互成本. 具体节点模型为

$$\min \sum_{k=1}^K (C_b^k - \lambda_{se,R}^k w_{se \rightarrow R} e_{se \rightarrow R}^k - \lambda_{se,hvac}^k w_{se \rightarrow hvac} e_{se \rightarrow hvac}^k + \lambda_{pg,se}^k e_{se \leftarrow pg}^k - \lambda_{se,pg}^k w_{se \rightarrow pg} e_{se \rightarrow pg}^k + \lambda_{pv,se}^k e_{se \leftarrow pv}^k + \lambda_{cchp,se}^k e_{se \leftarrow cchp}^k), \quad (11)$$

$$s_b^{k+1} \cdot E = (s_b^k \cdot E + \tau \cdot p_{bc}^k \cdot \alpha_b - \tau \cdot p_{bd}^k / \beta_b) \mu_b, \quad (12)$$

$$z_{bc}^k \cdot \underline{p}^{bc} \leq p_{bc}^k \leq z_{bc}^k \cdot \overline{p}^{bc}, \quad z_{bd}^k \cdot \underline{p}^{bd} \leq p_{bd}^k \leq z_{bd}^k \cdot \overline{p}^{bd}, \quad z_{bc}^k + z_{bd}^k \leq 1, \quad (13)$$

$$\underline{V}_b \leq s_b^k \leq \overline{V}_b, \quad s_b^0 = s_b^K = V_b^0, \quad (14)$$

$$z_{bc}^k - z_{bc}^{k-1} = z_{bc,c}^k - z_{bd,da}^k, \quad z_{bd}^k - z_{bd}^{k-1} = z_{bd,d}^k - z_{bc,ca}^k, \quad z_{bc,c}^k + z_{bd,d}^k \leq 1, \quad z_{bc,c}^k + z_{bd,da}^k \leq 1, \quad z_{bc,ca}^k + z_{bd,d}^k \leq 1, \quad (15)$$

$$C_b^k = \frac{1}{2} (z_{bc,c}^k + z_{bd,d}^k) (b_{b,c} / b_{b,l}), \quad (16)$$

$$0 \leq e_{se \leftarrow pg}^k \leq LC \cdot z_{se \leftarrow pg}^k, \quad 0 \leq e_{se \rightarrow pg}^k \leq LC \cdot z_{se \rightarrow pg}^k, \quad z_{se \rightarrow pg}^k + z_{se \leftarrow pg}^k \leq 1, \quad (17)$$

$$e_{se \leftarrow pv}^k + e_{se \leftarrow pg}^k + e_{se \leftarrow cchp}^k = p_{bc}^k \cdot \tau, \quad e_{se \rightarrow R}^k + e_{se \rightarrow pg}^k + e_{se \rightarrow hvac}^k = p_{bd}^k \cdot \tau, \quad (18)$$

其中, C_b^k 为 k 时段电池折损成本; s_b^k 为 k 时段电池荷电状态 (state of charge, SOC); E 为最大储电量; α_b, β_b 分别为充、放电系数; μ_b 为电量衰减系数; p_{bc}^k, p_{bd}^k 分别为 k 时段电池充、放电功率; $\overline{p}^{bc}, \underline{p}^{bc}$ 与 $\overline{p}^{bd}, \underline{p}^{bd}$ 分别为充放电功率上下限; $\overline{V}_b, \underline{V}_b$ 为电池 SOC 上下限; V_b^0 为电池始末 SOC; z_{bc}^k, z_{bd}^k 为代表电池充、放电状态的 0-1 决策变量, 取 1 表示在 k 时段进行充(放)电, 否则取 0; $z_{bc,c}^k, z_{bd,d}^k$ 为用于

计算电池充、放电成本的 0-1 决策变量, 取 1 表示计入成本, 否则取 0; $z_{bc,ca}^k, z_{bd,da}^k$ 为辅助变量; $b_{b,c}, b_{b,l}$ 分别代表电池总价值和电池总寿命. 式 (11) 为节点优化目标, 式 (12)~(14) 为电池充放电约束与始末状态约束, 式 (15) 和 (16) 为电池循环寿命成本约束, 式 (17) 为电量传输约束, 式 (18) 为节点能量平衡约束, 即接收来自配电网节点、冷热电联产节点和光伏节点的电能输入, 进行充电存储, 同时需要在需要放电的时段向房间群节点、配电网节点和暖通空调节点输出电能, 实现电能输入与输出的平衡.

2.1.5 储冷节点

储冷节点通过蓄冰的方式对冷量进行存储, 与光伏节点类似, 在运行优化调度问题中不考虑蓄冷设备的投资成本^[32], 仅考虑与相连节点间的能量交互成本, 节点模型如下:

$$\min \sum_{k=1}^K (\mu_{cchp,si}^k q_{si \leftarrow cchp}^k + \mu_{hv,ac,si}^k q_{si \leftarrow hv,ac}^k - \mu_{si,R}^k f_{si \rightarrow R} q_{si \rightarrow R}^k), \quad (19)$$

$$q_i^{k+1} = (q_i^k + q_{si \leftarrow hv,ac}^k + q_{si \leftarrow cchp}^k - q_{si \rightarrow R}^k) \mu_q, \quad (20)$$

$$q_i^k + q_{si \leftarrow hv,ac}^k + q_{si \leftarrow cchp}^k \leq V_q, \quad 0 \leq q_i^k \leq V_q, \quad q_i^0 = q_i^K = V_q^0, \quad (21)$$

其中, q_i^k 为 k 时段储冷量; μ_q 为冷量衰减系数; V_q 为最大储冷量; V_q^0 为始末储冷量; $q_{m \rightarrow n}^k, q_{m \leftarrow n}^k$ 分别为 k 时段 m 节点输送至或接收自 n 节点的冷量. 式 (20) 和 (21) 分别为储冷约束与始末状态约束, 其中储冷约束描述了储冷量的动态变化过程.

2.1.6 暖通空调节点

暖通空调节点耦合电量和冷量平衡. 在电量方面, 接收来自配电网节点、光伏节点、储电节点、冷热电联产节点的电能与暖通空调设备在制冷或制冰过程中的耗电量实现平衡; 在冷量方面, 该节点由电生冷, 暖通空调设备工作在制冷模式下可为房间群节点供冷、保证人员舒适, 或工作在制冰模式下将生产的冷量存储至储冷节点, 实现冷量平衡. 其目标函数与模型约束如下:

$$\min \sum_{k=1}^K (\lambda_{pg,hvac}^k e_{hvac \leftarrow pg}^k + \lambda_{pv,hvac}^k e_{hvac \leftarrow pv}^k + \lambda_{cchp,hvac}^k e_{hvac \leftarrow cchp}^k + \lambda_{se,hvac}^k e_{hvac \leftarrow se}^k - \mu_{hv,ac,R}^k f_{hv,ac \rightarrow R} q_{hv,ac \rightarrow R}^k - \mu_{hv,ac,si}^k f_{hv,ac \rightarrow si} q_{hv,ac \rightarrow si}^k), \quad (22)$$

$$0 \leq e_{hvac}^k \cdot \text{cop}^k \leq z_h^k \cdot P_h \cdot \tau, \quad 0 \leq e_{ice}^k \cdot \text{cop}_i^k \leq z_i^k \cdot P_h \cdot \mu_{chiller} \cdot \tau, \quad z_h^k + z_i^k \leq 1, \quad (23)$$

$$e_{hvac}^k + e_{ice}^k = e_{hvac \leftarrow pv}^k + e_{hvac \leftarrow pg}^k + e_{hvac \leftarrow cchp}^k + e_{hvac \leftarrow se}^k, \quad (24)$$

$$e_{hvac}^k \cdot \text{cop}^k = q_{hv,ac \rightarrow R}^k, \quad e_{ice}^k \cdot \text{cop}_i^k = q_{hv,ac \rightarrow si}^k, \quad (25)$$

其中, e_{hvac}^k, e_{ice}^k 分别为 k 时段暖通空调设备制冷、制冰耗电量; $\text{cop}^k, \text{cop}_i^k$ 分别为 k 时段暖通空调设备制冷、制冰的性能系数 (coefficient of performance, COP); P_h 为额定制冷功率; $\mu_{chiller}$ 为制冰效率; z_h^k, z_i^k 分别为代表 k 时段设备工作状态处于制冷和制冰的 0-1 决策变量, 取 1 表示处于对应工作模式, 否则取 0. 式 (23) 为制冷、制冰量约束, 在同一时段内设备仅能处于一种工作模式; 式 (24) 和 (25) 为节点能量平衡约束, 包括电量平衡、制冷量平衡与制冰量平衡.

2.1.7 房间群节点

房间群节点是建筑运行所需电能与冷量的统一入口, 满足所有子房间的电需求与冷需求, 连接系统供需两侧, 其模型为

$$\min \sum_{k=1}^K (\lambda_{pg,R}^k e_{R \leftarrow pg}^k + \lambda_{pv,R}^k e_{R \leftarrow pv}^k + \lambda_{cchp,R}^k e_{R \leftarrow cchp}^k + \lambda_{se,R}^k e_{R \leftarrow se}^k + \mu_{cchp,R}^k q_{R \leftarrow cchp}^k + \mu_{hvac,R}^k q_{R \leftarrow hvac}^k + \mu_{si,R}^k q_{R \leftarrow si}^k), \quad (26)$$

$$e_{R \leftarrow pg}^k + e_{R \leftarrow pv}^k + e_{R \leftarrow cchp}^k + e_{R \leftarrow se}^k = \sum_{i=1}^{N_r} e_{R \rightarrow i}^k, \quad (27)$$

$$q_{R \leftarrow cchp}^k + q_{R \leftarrow hvac}^k + q_{R \leftarrow si}^k = \sum_{i=1}^{N_r} q_{R \rightarrow i}^k, \quad (28)$$

其中, N_r 为子房间总数; $e_{R \rightarrow i}^k$ 和 $q_{R \rightarrow i}^k$ 分别为 k 时段房间群节点输送至第 i 个子房间的电量和冷量. 式 (27) 和 (28) 为房间群节点能量平衡约束, 包括电量平衡和冷量平衡.

2.1.8 房间子节点

在需求侧, 房间围护结构与内外环境之间具有复杂的传热过程: 一方面, 房间的电热需求依赖于房间内具有随机特性的人员活动和具有个性化差异的舒适度要求; 另一方面, 房间内温度通过围护结构受到外界环境与相邻房间或区域内的温度影响, 且该热传递过程非线性, 给建模工作带来困难.

本文考虑由 M 面墙体围成的单层有窗房间, 围护结构中除地板外均与室外空气直接接触, 房间朝向和开窗方位因房间不同而存在差异; 室外环境方面, 考虑室外空气与墙体外表面的热对流过程、墙体外表面向内表面的简化热传导过程和日光对墙体外表面或透过窗户对墙体内表面的简化热辐射过程; 室内环境方面, 考虑室内空气与墙体内表面和与窗户间的热对流过程, 以提供舒适的温度区间和充足的照度水平为目标; 室内人员、设备方面, 考虑人员散热、照明等设备的散热及耗电过程. 建立以下房间传热约束、冷需求约束、电需求约束和室内温度、照度等约束, 并结合供需两侧能量交互信息建立房间子节点的能量平衡约束, 构成包含多种能量耦合关联关系的约束模型:

$$C_a \rho_a V_{\text{room}} (t_{a,i}^{k+1} - t_{a,i}^k) = \tau \left[\sum_{j=1}^M h_{w,j} S_{w,j} (t_{w,j,i}^k - t_{a,i}^k) + h_{\text{win}} S_{\text{win}} (t_o^k - t_{a,i}^k) + G_{\text{fcu},i}^k C_a (t_{\text{fcu},i}^k - t_{a,i}^k) + q_{\text{in},i}^k \right], \quad (29)$$

$$C_w \rho_w S_{w,j} l_w (t_{w,j,i}^{k+1} - t_{w,j,i}^k) = \tau \left[h_{w,j} S_{w,j} (t_{a,i}^k - t_{w,j,i}^k) + \frac{\kappa}{l_w} S_{w,j} (t_{wo,j,i}^k - t_{w,j,i}^k) + H_{\text{rad,in}}^k \right], \quad (30)$$

$$C_w \rho_w S_{w,j} l_w (t_{wo,j,i}^{k+1} - t_{wo,j,i}^k) = \tau \left[h_{wo,j} S_{w,j} (t_o^k - t_{wo,j,i}^k) + \frac{\kappa}{l_w} S_{w,j} (t_{w,j,i}^k - t_{wo,j,i}^k) + H_{\text{rad,out}}^k \right], \quad (31)$$

$$z_{o,i}^k \cdot \underline{T}_1 + (1 - z_{o,i}^k) \cdot \underline{T}_0 \leq t_{a,i}^k \leq z_{o,i}^k \cdot \overline{T}_1 + (1 - z_{o,i}^k) \cdot \overline{T}_0, \quad (32)$$

$$q_{\text{in},i}^k = Q_{l,i}^k + Q_{c,i}^k + Q_{p,i}^k, \quad Q_{l,i}^k = e_{l,i}^k \cdot \mu_l, \quad Q_{c,i}^k = e_{c,i}^k \cdot \mu_c, \quad Q_{p,i}^k = a_i^k \cdot \mu_p, \quad (33)$$

$$e_{\text{fcu},i}^k = P_{\text{rated}} \cdot \tau \cdot \sum_{u=1}^U x_u^k (g_u / G_{\text{rated}})^3, \quad G_{\text{fcu},i}^k = \sum_{u=1}^U x_u^k \cdot g_u, \quad \sum_{u=1}^U x_u^k \leq 1, \quad (34)$$

$$e_{c,i}^k = p_{c,i} \cdot \tau \cdot o_i^k, I_d^k + e_{l,i}^k \cdot I_{\text{light}} \geq I_{\text{load},i} \cdot z_{o,i}^k, \quad (35)$$

$$e_{d,i}^k = e_{\text{fcu},i}^k + e_{l,i}^k + e_{c,i}^k, q_{d,i}^k = \tau G_{\text{fcu},i}^k C_a (t_{a,i}^k - t_{\text{fcu},i}^k), \quad (36)$$

其中, C_a, ρ_a 分别为室内空气比热容和空气密度; V_{room} 为房间体积; $t_{a,i}^k$ 为 i 房间 k 时段室内空气温度; $h_{w,j}, h_{wo,j}$ 分别为第 j 面墙的内、外墙面换热系数; $S_{w,j}$ 为第 j 面墙面积; $t_{w,j,i}^k, t_{wo,j,i}^k$ 代表 k 时段 i 房间第 j 面墙的内、外墙面温度; $h_{\text{win}}, S_{\text{win}}$ 分别为窗户的换热系数和面积; t_o^k 为 k 时段室外空气温度; $G_{\text{fcu},i}^k, t_{\text{fcu},i}^k$ 分别代表 k 时段 i 房间中风机出风质量流量与出风温度; C_w, ρ_w, l_w, κ 分别为墙体比热容、密度、厚度和导热系数; $H_{\text{rad,in}}^k, H_{\text{rad,out}}^k$ 分别为 k 时段内、外墙面所受的太阳辐射量; $z_{o,i}^k$ 表示 k 时段第 i 房间占用情况的 0-1 量, 取 1 代表房间被占用, 否则取 0; \bar{T}_1 和 \underline{T}_1 为有人占用时的室内空气温度上下限; \bar{T}_0 和 \underline{T}_0 为无人占用时的室内空气温度上下限; $q_{\text{in},i}^k$ 为 k 时段 i 房间内部总产热量, 包括照明发热量 $Q_{l,i}^k$ 、办公设备发热量 $Q_{c,i}^k$ 和人员发热量 $Q_{p,i}^k$; $e_{l,i}^k, e_{c,i}^k$ 分别为 i 房间 k 时段照明、办公设备耗电量; o_i^k 为 i 房间 k 时段人员数目; μ_l, μ_c, μ_p 分别为照明、设备、人员发热系数; $e_{\text{fcu},i}^k$ 为 k 时段 i 房间的风机耗电量; $P_{\text{rated}}, G_{\text{rated}}$ 分别为风机额定功率与额定出风量; U 为风机总挡位数; x_u^k 为 0-1 决策变量, 取 1 代表风机处于对应工作挡位, 否则取 0; g_u 代表风机第 u 档出风质量流量; $p_{c,i}$ 为 i 房间人均设备功率; I_d^k 为 k 时段日光照射度; I_{light} 为灯具单位能耗产生的照度; $I_{\text{load},i}$ 为 i 房间的照度需求; $e_{d,i}^k$ 为 k 时段 i 房间的电需求; $q_{d,i}^k$ 为 k 时段 i 房间的冷需求. 式 (29)~(32) 为房间热过程约束, 式 (33) 为房间内产热约束, 式 (34) 为室内风机盘管的耗电约束与运行约束, 式 (35) 为室内办公设备及照明耗电约束, 式 (36) 为房间电、冷需求约束. 式 (29)~(36) 描述了 k 时段第 i 个房间子节点的电、冷需求的关联耦合约束. 如式 (36) 所示, k 时段第 i 个房间子节点的电需求 $e_{d,i}^k$ 和冷需求 $q_{d,i}^k$ 分别对应于房间群节点模型式 (27) 和 (28) 中的 $e_{R \rightarrow i}^k$ 和 $q_{R \rightarrow i}^k$. 因此, 式 (29)~(36) 建立了式 (27) 和 (28) 中房间群节点输出至房间子节点的电量、冷量之间的关联关系, 可和式 (26)~(28) 协同起来共同构成房间群节点的优化模型.

2.2 流量模型

基于上文建立的节点模型, 本小节考虑节点之间的能量与信息交互过程, 具体分为电能交互、冷量交互和信息交互 3 部分, 依据实际系统的能量交互关系和管线承载能力, 模型如下:

$$0 \leq e_{m \rightarrow n}^k \leq LC, 0 \leq e_{m \leftarrow n}^k \leq LC, w_{m \rightarrow n} e_{m \rightarrow n}^k = e_{n \leftarrow m}^k, \quad (37)$$

$$0 \leq q_{m \rightarrow n}^k \leq LC, 0 \leq q_{m \leftarrow n}^k \leq LC, f_{m \rightarrow n} q_{m \rightarrow n}^k = q_{n \leftarrow m}^k, \quad (38)$$

$$\mathbf{x}_{m \leftarrow n}^k = z_f^k \cdot \mathbf{x}_{m \leftarrow n}^{k-1} + (1 - z_f^k) \cdot \mathbf{D} \cdot [\mathbf{x}_n^k, \mathbf{x}_n^{k-1}, \dots, \mathbf{x}_n^{k-v}]^T, \Pr(z_f^k = 1) = y, \Pr(z_f^k = 0) = 1 - y, \quad (39)$$

其中, $w_{m \rightarrow n}, f_{m \rightarrow n}$ 分别代表 m 节点与 n 节点之间电能、冷量传输效率; $\mathbf{x}_{m \leftarrow n}^k$ 是 k 时段由 m 节点接收到来自 n 节点的信息向量; z_f^k 是 0-1 整数变量, $z_f^k = 0$ 代表 k 时段信息成功接收, 否则 $z_f^k = 1$; 延迟矩阵 \mathbf{D} 共有 $v+1$ 维, 其中仅有一个元素是 1, 其余元素为 0; v 为最长延迟时段; y 为信息丢包概率. 式 (37) 和 (38) 分别代表电能传输约束和冷量传输约束, 二者保障了节点间能量传输的平衡, 进而保证了系统整体的供需平衡与平稳运行, 式 (39) 代表了边缘节点与云中心间的信息交互过程与应急机制, 是实现边云协同的重要基础.

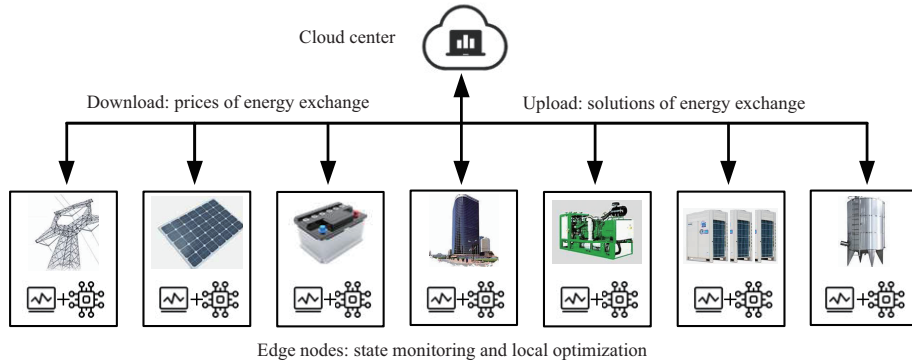


图 2 (网络版彩图) 边云信息交互机制

Figure 2 (Color online) Edge-cloud information interaction mechanism

3 基于边云协同的分布式迭代优化算法及软硬件系统实现方案

3.1 基于边云协同的分布式迭代优化算法

为实现建筑能源系统供需协同优化, 在满足建筑能耗需求的同时充分利用系统多能互补特性、降低系统运行成本, 需要将所有节点协同考虑, 以实现系统整体优化. 然而, 建筑系统通常包含成百上千间房间, 同时空调系统末端、照明等能耗设备一般分散在各个房间, 因此及时、精确地获取建筑能源系统的全局信息非常困难, 这使得集中式优化算法难以直接应用. 此外, 如第 2 节模型所示, 建筑能源系统供需协同优化问题往往包含海量离散和连续决策变量, 以及房间动态热过程和包含储能的供需能量平衡等复杂动态约束, 这导致应用动态规划、分枝定界等传统优化算法将面临决策空间随问题规模指数增长的维数灾挑战.

针对如上两个难题, 本文在第 2 节所提模型基础上, 设计了边云信息交互机制 (如图 2 所示), 设置云中心, 即集中式的信息协调中心, 实现建筑能源系统各节点间的信息交互和数据协调, 降低了对全局信息的依赖性和通信需求; 同时, 云中心协同各节点优化模型对能量交互决策进行迭代更新, 以获得问题最优解. 下文将具体介绍边云信息交互机制.

在本文所提交互机制下, 边缘节点的优化模型为第 2 节所提的节点模型. 每个节点模型目标函数中的节点间能量交互价格信息从云中心获取, 同时结合该节点局部的环境, 人员需求以及能源、能耗和储能设备等状态信息, 以并行计算的方式完成本地优化计算, 获取节点的优化运行策略. 在边缘节点优化计算过程中, 所有的本地状态信息不需要与云中心交互, 仅需要将优化后的与其他节点能量交互的信息发送回云中心, 作为云中心更新协调信息的依据. 上述模式在边缘节点不仅实现了局部数据采集和计算的一体化结构设计, 也大大减少了云中心获取全局信息的通信需求, 并降低云中心的计算需求. 云中心在接收到各个节点发来的节点间能量交互信息后, 以第 2 节所提的流量模型, 按式 (41)~(43) 更新系统中所有相连节点间能量交互的价格信息, 并将集中协调信息下发至各个边缘节点, 形成云中心“协同计算”与边缘节点“分布式本地计算”交替进行的迭代求解过程, 在此过程中, 所有边缘节点可通过同步或异步的机制与云中心完成交互更新, 而不依赖特定的时间次序或节点次序, 具体流程见算法 1. 下文将说明上述算法可收敛至问题的最优解.

依照本文所提算法, 每个节点模型目标函数中的节点间能量交互价格可定义为能量交互的边际价格. 依据边际价格的物理意义^[33], 可知如果以系统各节点间能量交互的最优边际价格为基础, 求解每

算法 1 基于边云协同的分布式迭代优化算法

步骤一: 初始化能量交互价格 λ, μ .

步骤二: 各边缘节点基于当前交互价格完成本地优化计算, 即求解节点模型, 将计算获得的能量交互策略上传云中心.

步骤三: 若交互价格满足式 (40) 或算法已达到最大迭代次数, 转步骤五, 否则继续. 式中 r 代表边云协同中的迭代次数, ε 为精度阈值.

$$\|\lambda^{r+1} - \lambda^r\| + \|\mu^{r+1} - \mu^r\| < \varepsilon, \quad (40)$$

步骤四: 云中心根据边缘节点 i 和 j 之间的能量交互策略, 由式 (41) 计算交互价格修正方向 $g_{\lambda,i,j}^r$ 和 $g_{\mu,i,j}^r$; 根据式 (42) 选择修正步长 s^r , 其中, $L_i^*(\lambda, \mu)$ 为边缘节点 i 的子优化问题目标值, $g^r = (g_{\lambda}^r, g_{\mu}^r)$; 一并代入式 (43) 对交互价格进行修正更新, 并将新交互价格下发至节点 i 和 j , 转步骤二.

$$g_{\lambda,i,j}^r = e_{j \leftarrow i}^r - w_{i \rightarrow j} e_{i \rightarrow j}^r, \quad g_{\mu,i,j}^r = q_{j \leftarrow i}^r - f_{i \rightarrow j} q_{i \rightarrow j}^r, \quad (41)$$

$$0 < s^r < \frac{(\phi^* - \sum_{i=1}^7 L_i^*(\lambda, \mu))}{\|g^r\|^2}, \quad (42)$$

$$\lambda_{i,j}^{r+1} = \lambda_{i,j}^r + s^r g_{\lambda,i,j}^r, \quad \mu_{i,j}^{r+1} = \mu_{i,j}^r + s^r g_{\mu,i,j}^r, \quad (43)$$

步骤五: 评估所得策略精度, 算法结束.

个节点模型, 则可获得建筑能源系统供需协同优化的全局最优解. 而根据式 (41)~(43) 更新节点间能量交互价格的过程, 正是利用流量模型寻找最优边际价格的过程, 原因如下: 流量模型对于建筑能源系统供需协同优化问题是耦合各个节点的全局约束, 如果我们引入拉格朗日乘子对流量模型进行松弛, 则各个边缘节点的子问题将相互独立, 可独立求解. 引入的乘子代表了各节点间的能量交互边际价格. 式 (41)~(43) 实则代表了乘子按照次梯度法的更新过程, 文献 [34] 已证明上述更新过程理论上可收敛至原问题的最优解, 因此本文基于节点-流量模型提出的边云协同分布式迭代优化算法可保证收敛至建筑能源系统供需协同优化问题的最优解. 第 4 节将结合算法 1 的终止准则, 基于 6 种不同规模的数值测试案例, 说明所提算法的性能和有效性.

3.2 边云协同软硬件系统实现方案

如图 3 所示, 本文所提边云协同机制的软硬件系统框架自下而上可分为边缘节点层、通信层和云中心层, 层间可由有线通信或无线通信经 RS485, WLAN 等接口技术进行数据交互. 其中, 边缘节点层包含建筑能源系统内多个能源、存储和能耗设备节点; 云中心层包含云端服务器与数据库存储; 通信层连接边缘节点层和云中心层, 包含数据上传与下发的信息交互接口.

具体而言, 边缘节点层中每个边缘节点均由设备子层、计算子层和应用子层构成: 设备子层分别包括光伏设备、储电设备、冷热电联产设备等各类能源、存储和能耗设备, 温湿度传感器、风速计、智能电表、智能水表、摄像头等多源传感设备以及工控机等边缘计算设备, 为系统运行、系统状态监测和本地优化计算提供设备基础; 计算子层收集来自设备子层的人员、环境和设备运行状态等信息, 建立本文 2.1 小节提出的节点模型并利用 Gurobi 求解器完成本地优化求解; 应用子层基于工控机等边缘计算设备, 分布式存储本地采集和计算所得的相关信息, 同时实现与云中心的信息交互, 即将能量交互信息经通信层路由及网关设备的转发上传至云中心以支撑中心协调信息的计算, 同时以同步或异步的机制接收云中心下发的交互价格信息 λ, μ , 指导计算子层迭代求解.

云中心层中的云中心节点具有上述相同的子层结构, 不同在于云中心依托服务器等硬件设备, 在其计算子层和应用子层分别运行所提分布式迭代优化算法的能量交互价格更新及边云交互信息收发部分, 实现对边缘节点上传信息的预处理、基于流量模型的协同信息梯度更新以及数据库存储, 最终把经式 (41)~(43) 更新后的交互价格信息通过通信层下发至边缘节点层, 完成单次迭代求解过程.

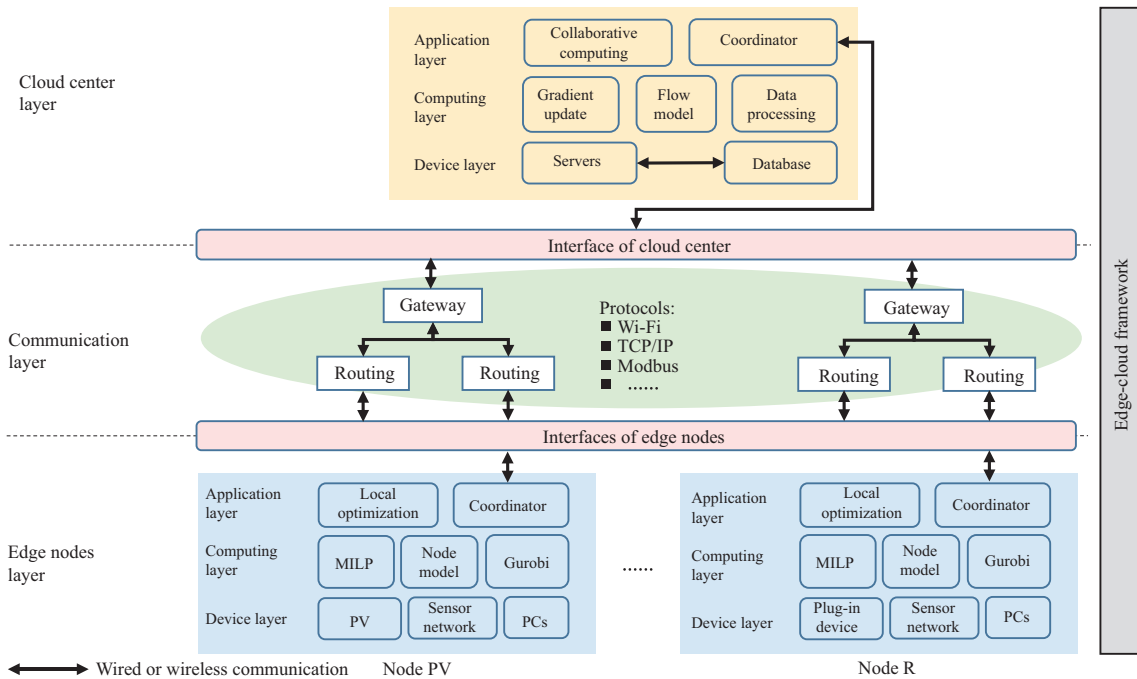


图 3 (网络版彩图) 边云协同软硬件框架
 Figure 3 (Color online) Edge-cloud framework

通信层是连接边缘节点层和云中心层的关键环节, 由路由器、网关等通信设备经有线或无线的传输方式实现对边缘节点信息的上传和对云中心协调信息的下发, 支持 Wi-Fi, TCP/IP 等常用通信协议, 并具备丢包重发、拥塞控制等基础通信机制, 具体的通信方式可根据实际情况灵活选择, 以确保稳定性和经济性。

上述硬件设备与软件算法共同构成边云协同机制的软硬件系统框架并支撑基于边云协同的建筑能源系统分布式供需协同优化方法, 可广泛应用于不同规模的建筑能源系统以实现节能提效。

4 数值测试分析与结果

4.1 数值测试参数说明

本文基于夏季的办公楼宇环境进行数值测试, 楼宇供应侧电能来源包括配电网、光伏发电、冷热电联产机组和储电设备, 冷量来源包括冷热电联产机组、暖通空调设备和储冷设备, 系统节点间依据能量交互关系共设有电能传输线 14 条, 冷量传输线 5 条; 需求侧房间节点彼此独立。

数值测试时段为全天 24 小时, 平均划分为 24 时段, 即 $K = 24$ 。本测试考虑北京地区夏季分时电价^[35], 具体为 0~6 时: 0.3515 元/度, 7~10 时: 0.8135 元/度, 11~18 时: 0.4883 元/度, 19~22 时: 0.8135 元/度, 23~24 时: 0.3515 元/度, 卖电价格固定为 0.457 元/度^[35]。冷热电联产节点中, 天然气价格为 2.05 元/立方米^[35]。根据本文采用数据的实际系统设备性能, 分别将暖通空调节点中制冷 COP 设为 2.71, 制冰 COP 设为 2.25, 制冰效率系数设为 0.85。24 小时内的光伏节点出力 and 室外温度变化如图 4 和 5 所示。储电节点初始储电量设为额定储量的 60%, 储冷节点初始储冷量设为额定储量的 50%。本文取 6 种不同规模的数值测试案例, 分别包含 4 个、20 个、40 个、60 个、80 个和 100 个房间

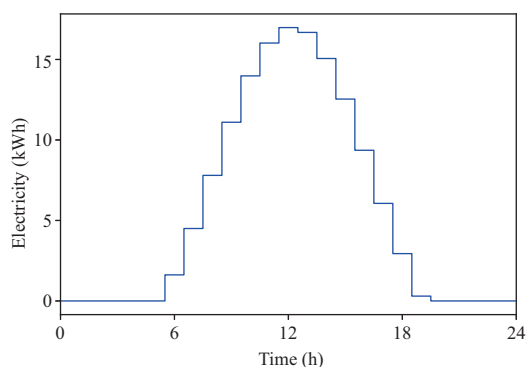


图 4 光伏出力

Figure 4 Photovoltaic output

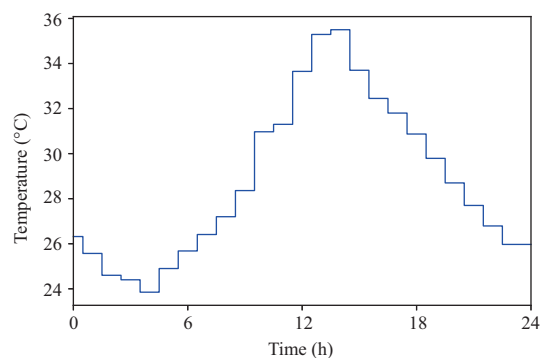


图 5 室外温度

Figure 5 Outdoor temperature

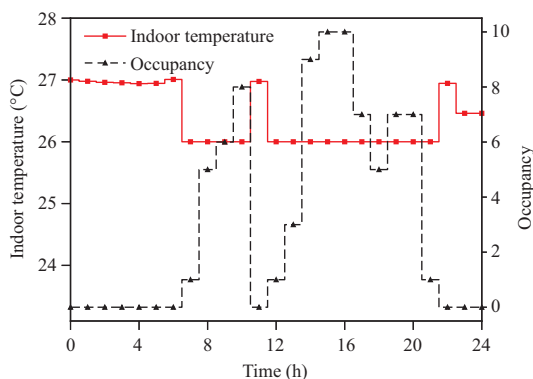


图 6 室内温度动态过程

Figure 6 Dynamic temperature of indoor air

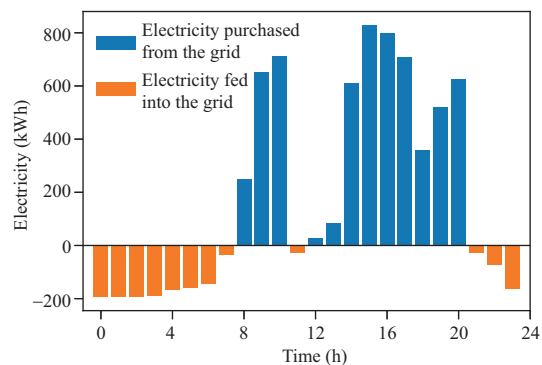


图 7 配电网调度结果

Figure 7 Scheduling results of power grid

子节点,对本文所提算法与集中式算法的精度和计算效率进行对比分析。

4.2 运行策略性能分析

利用本文所提模型和算法求解上述数值测试案例,结果表明本文所提方法能够在满足人员舒适需求和负荷需求的前提下有效降低系统运行成本。如图 6 所示,在有人员占用的时段内,空调的最优运行策略使得室温在 26°C ,提供了满足人员舒适需求的工作温度;而在无人占用时,因无人员舒适需求的约束,室温主要受室外空气温度变化的影响。

各设备在不同规模的数值测试案例中运行策略特点类似,因此本文以 40 房间为例予以说明。如图 7~11 所示:(1)在无人占用的非工作时段(0~6 时,23~24 时),需求侧负荷水平较低,因此配电网节点将多余电量卖出以降低建筑能源系统运行成本;而在有人占用的工作时段(7~22 时),因用电设备增多且需要保持室内人员舒适,需求侧负荷较大,配电网节点主要通过买电来保证电能供应。(2)由于在高负荷、高电价时段(7~10 时,19~22 时),储能、冷热电联产机组和光伏发电的边际成本更低,因此房间群节点尽可能多地利用储能、冷热电联产机组和光伏发电量来满足需求侧的电、冷需求;而在高负荷、较低电价时段(11~18 时),房间群节点则更多地使用来自配电网的电能。(3)储电设备和储冷设备均在中、低电价时段或低负荷时段(1~6 时,11~18 时,23~24 时)蓄能,并将该部分能量在高电价

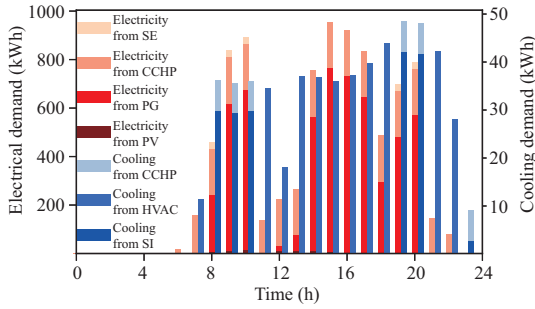


图 8 建筑侧调度结果

Figure 8 Scheduling results of the building

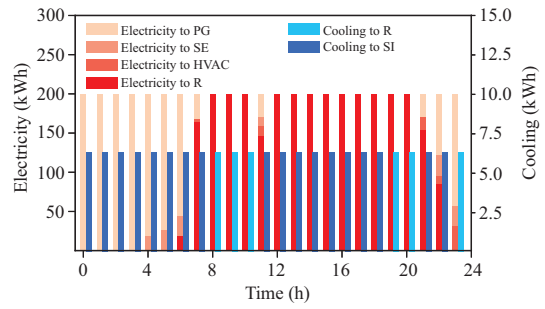


图 9 冷热电联产机组调度结果

Figure 9 Scheduling results of CCHP

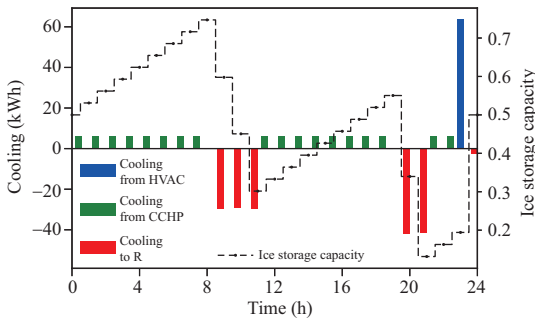


图 10 储冷设备调度结果

Figure 10 Scheduling results of ice storage

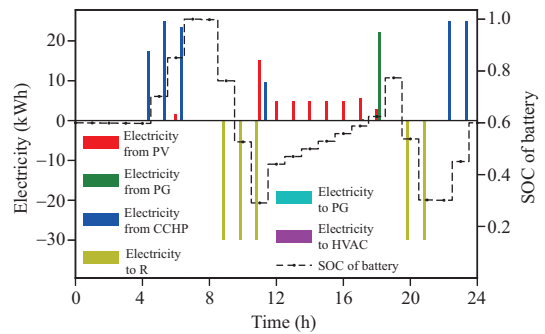


图 11 储电设备调度结果

Figure 11 Scheduling results of electric storage

且高负荷 (7~10 时, 19~22 时) 时使用, 实现需求响应优化. 综上, 通过对建筑能源系统中多种能源、能耗和储能设备运行策略的供需协同优化, 可实现多能互补、提高对新能源的利用效率, 降低系统运行成本.

4.3 基于边云协同的分布式迭代优化算法性能分析

为了更好地对比分析本文所提基于边云协同的分布式迭代优化算法的性能, 本文在测试过程中, 也将建筑能源系统供需协同优化的集中式问题在相同计算机硬件条件下求解, 获得集中式问题的最优解, 以评价本文所提分布式算法的近优解性能. 本文在 CPU 为 i7-8550U、8G 内存的硬件平台上使用 Pycharm 集成开发环境进行 Python 语言编码, 获得数值测试结果见表 1. 可以看到, 随着问题规模的不断扩大, 所提算法结果与最优解之间的误差呈下降趋势, 且均保持在 0.1% 以下, 具有很高的精度.

表 1 中对 75 次迭代下的分布式算法求解耗时与集中式算法求解耗时进行了对比. 可以看出: 对于房间数目较少的数值测试案例, 基于边云协同的分布式迭代优化算法相较于集中式求解算法在时间花费上并无优势, 且房间规模较小时, 硬件算力需求容易满足; 随着房间数目增加, 集中式求解时间呈指数形式增长, 硬件算力需求也随之升高, 本测试所用的硬件平台仅可完成 80 房间测试案例的集中式计算, 规模更大测试案例将导致内存溢出, 无法求解; 相反, 分布式迭代优化算法随着问题规模增大, 求解时间呈线性增长. 因此, 相较于集中式求解, 本文所提方法对于中大规模的问题求解效率更高, 且所需的全局信息很少, 更适合应用于实际建筑能源系统协同优化.

表 1 数值测试结果对比表

Table 1 Comparison of numerical results

		Number of rooms					
		4	20	40	60	80	100
Centralized solution	Energy cost (¥)	209.26	1595.38	3571.54	5548.57	7523.18	–
	Time cost (s)	11.57	40.62	72.18	179.77	1152.99	–
Decentralized solution	Energy cost (¥)	209.39	1595.46	3571.72	5548.45	7524.27	9501.03
	Time cost (s)	18.01	32.84	39.71	64.35	93.08	99.13
Gap (%)		0.062	0.005	0.005	0.002	0.014	–

表 2 通信数据量定量分析结果

Table 2 Quantitative analysis of communication data volume (dimensions)

	Number of rooms					
	4	20	40	60	80	100
Centralized algorithm	3058	9410	17350	25290	33230	41170
Proposed algorithm	2208	3744	5664	7584	9504	11424
Saving (%)	27.80	60.21	67.35	70.01	71.40	72.25

表 3 与传统建筑能源系统需求响应优化的运行成本对比分析结果

Table 3 Comparison of energy costs between the demand response optimization and the proposed method

	Number of rooms					
	4	20	40	60	80	100
Energy cost with demand response (¥)	529.41	2907.61	6130.84	9354.08	12577.32	15800.55
Energy cost saving with the proposed method (%)	60.45	45.13	41.74	40.68	40.18	39.87

参照本文数值测试案例, 传统的集中式方法首先需要收集来自各个能源、存储和能耗设备运行的状态信息, 共计 $(30 + 205n)$ 维, 其中 n 为需求侧房间数目; 经集中优化计算后输出 $(1440 + 192n)$ 维决策信息, 下发至各能源、存储和能耗设备以指导系统运行, 对通信带宽和通信设备性能带来挑战; 而在本文所提方法中, 边缘节点只需上传 $(912 + 48n)$ 维能量交互信息至云中心, 以更新中心协调信息, 继而云中心下发 $(912 + 48n)$ 维边际价格信息至各边缘节点完成迭代求解过程. 本文 6 种不同规模数值测试案例的通信数据量如表 2 所示, 可以看出, 相比于集中式方法, 本文所提方法可显著节约通信资源需求, 其节约比例随着房间数目增加而增大, 当房间数目相对较大时, 通信资源节约的比例超过 70%. 数值测试结果说明本文所提方法不仅大大降低了通信带宽需求, 也可显著降低通信设备的初始投资成本, 易于在实际中应用推广.

由于供需协同优化目前在实际中缺乏算法和实现方式的支撑, 因此本文结合实际数据, 将本文所提的供需协同优化方法与传统建筑能源系统需求响应优化进行了对比, 说明供需协同优化的节能降费效果. 上述测试中的传统建筑能源系统需求响应优化问题在模型参数、分时电价、暖通空调运行 COP 和需求侧房间的电、冷、热需求等方面均与供需协同优化各案例保持一致.

表 3 列出了本文所提供供需协同优化方法和传统建筑能源系统需求响应优化的运行成本对比分

析结果, 我们可以发现相比于传统建筑能源系统需求响应优化, 本文所提供供需协同优化方法可实现 39.87%~60.45% 的运行成本节约。上述的运行成本节约主要由于本文所提方法实现了供、储、需各个环节的协同优化和对多种能源介质的互补综合利用, 提高了系统整体能效, 从而降低了系统运行成本, 具体表现在: (1) 综合利用多种能源介质的互补特性, 确定最优的能源介质转化和使用策略, 相比于传统建筑能源系统需求响应优化, 可以在保证供需能量平衡前提下, 带来更多运行成本节约的空间; (2) 充分挖掘并利用了储能设备和负荷需求的时间耦合特性, 结合谷峰电价差, 最大化运行成本节约, 相比于传统建筑能源系统需求响应优化, 由于考虑了需求特性和供-储-需协同, 增大了系统的弹性和对分时电价的响应能力, 为运行成本优化提供了更大空间。整体而言, 相比于传统建筑能源系统需求响应优化方法, 本文所提供供需协同优化方法可实现 40% 以上的成本节约。其中, 针对 4 房间案例, 由于供能系统的冗余和弹性较大, 本文所提方法具有更多的供需协同优化空间, 因此相比于传统建筑能源系统需求响应优化方法可节约超过 60% 的运行成本。

综上, 相比于集中式优化算法, 通过表 1 和 2 分别验证了本文所提基于边云协同的分布式迭代优化算法在求解效率、计算精度和通信资源节约等方面的有效性; 通过表 3 可看出供需协同优化在建筑能源系统节能优化中具有巨大潜力。本文所提方法可广泛应用于实际建筑能源系统节能优化, 尤其是针对大规模建筑能源系统具有良好性能。

5 总结

建筑能源系统的节能优化与高效运行是建设绿色智慧城市的重要组成部分, 也是实现“2030 碳达峰、2060 碳中和”国家战略目标的重要途径。随着多微网的发展建设与建筑规模的不断扩大, 如何刻画多种能源介质与能源设备之间的耦合关系并解决因庞大的决策集带来的维数灾难挑战成为能源供需系统节能优化必须解决的关键问题。本文提出一种基于边云协同的分布式迭代优化算法, 以“节点-流量模型”来刻画建筑能源系统, 依据节点间能量交互关系把大规模系统多能耦合问题进行解耦, 分解为多个子问题; 构建边缘节点与云中心的信息交互机制, 并提出分布式迭代优化算法, 在较短时间内、较少通信和算力资源占用下即可获得大规模问题的供需协同优化策略, 同时保证了算法收敛性与最优性。以多种不同规模案例进行了数值测试, 验证了所提算法在精度和计算效率上均具有较好性能。

参考文献

- 1 Tsinghua Building Energy Research Center. 2020 Annual Report on China Building Energy Efficiency. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. 7-8 [清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2020 (农村住宅专题). 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. 7-8]
- 2 Lizana J, Friedrich D, Renaldi R, et al. Energy flexible building through smart demand-side management and latent heat storage. *Appl Energy*, 2018, 230: 471-485
- 3 Guan X H, Xu Z B, Jia Q S, et al. Cyber-physical model for efficient and secured operation of CPES or energy Internet. *Sci China Inf Sci*, 2018, 61: 110201
- 4 Crawley D B, Lawrie L K, Winkelmann F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build*, 2001, 33: 319-331
- 5 Beckman W A, Broman L, Fiksel A, et al. TRNSYS the most complete solar energy system modeling and simulation software. *Renew Energy*, 1994, 5: 486-488
- 6 de Abreu-Harbach L V, Chaves V L A, Brandstetter M C G O. Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate. *Building Environ*, 2018, 135: 257-268

- 7 Villa-Arrieta M, Sumper A. A model for an economic evaluation of energy systems using TRNSYS. *Appl Energy*, 2018, 215: 765–777
- 8 Østergård T, Jensen R L, Maagaard S E. A comparison of six metamodeling techniques applied to building performance simulations. *Appl Energy*, 2018, 211: 89–103
- 9 Naderi E, Sajadi B, Behabadi M A, et al. Multi-objective simulation-based optimization of controlled blind specifications to reduce energy consumption, and thermal and visual discomfort: case studies in Iran. *Building Environ*, 2020, 169: 106570
- 10 Gholamibozanjani G, Tarragona J, Gracia A, et al. Model predictive control strategy applied to different types of building for space heating. *Appl Energy*, 2018, 231: 959–971
- 11 Zhang W, Maleki A, Rosen M A, et al. Optimization with a simulated annealing algorithm of a hybrid system for renewable energy including battery and hydrogen storage. *Energy*, 2018, 163: 191–207
- 12 Niu J D, Tian Z, Lu Y K, et al. Flexible dispatch of a building energy system using building thermal storage and battery energy storage. *Appl Energy*, 2019, 243: 274–287
- 13 Ouammi A, Dagdougui H, Sacile R. Optimal control of power flows and energy local storages in a network of microgrids modeled as a system of systems. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2014, 23: 128–138
- 14 Freund S, Schmitz G. Implementation of model predictive control in a large-sized, low-energy office building. *Building Environ*, 2021, 197: 107830
- 15 Zha Y B, Zhang T, Huang Z, et al. Analysis of energy Internet key technologies. *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 702–713 [查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 702–713]
- 16 Xu Y L, Wu W C, Zhou J G. A distributed task allocation based on a winner-take-all approach for multiple energy storage systems coordination in a microgrid. *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 11: 686–695
- 17 Kofinas P, Dounis A I, Vouros G A. Fuzzy Q-learning for multi-agent decentralized energy management in microgrids. *Appl Energy*, 2018, 219: 53–67
- 18 Song C, Yu M, Tan W. Event-triggered-based consensus approach for economic dispatch problem in a microgrid. *Sci Sin Inform*, 2018, 48: 1395–1408 [宋超, 禹梅, 谭文. 基于事件触发的微电网经济分配一致性算法. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48: 1395–1408]
- 19 Duan J, Chow M Y. Robust consensus-based distributed energy management for microgrids with packet losses tolerance. *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 11: 281–290
- 20 Sun Q Y, Zhang Y, Wang R, et al. Optimized configuration of controllers of microgrids based on controllability. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 1066–1082 [孙秋野, 张一, 王睿, 等. 基于能控性的微电网控制器的优化配置. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1066–1082]
- 21 Zhou X X, Zeng R, Gao F, et al. Development status and prospects of the Energy Internet. *Sci Sin Inform*, 2017, 47: 149–170 [周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47: 149–170]
- 22 Sun Q Y, Hu J W, Zhang H G. Modeling and application of we-energy in energy Internet. *Sci Sin Inform*, 2018, 48: 1409–1429 [孙秋野, 胡旌伟, 张化光. 能源互联网中自能源的建模与应用. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48: 1409–1429]
- 23 Ilic M D, Xie L, Khan U A, et al. Modeling of future cyber-physical energy systems for distributed sensing and control. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2010, 40: 825–838
- 24 Guo J H, Hu Z W, Zhang Y, et al. An overview on cyber-physical systems of energy interconnection. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities*, 2017. 15–21
- 25 Wei Y S, Li S Y. Water supply networks as cyber-physical systems and controllability analysis. *IEEE/CAA J Autom Sin*, 2015, 2: 313–319
- 26 Ren J, Zhang D, He S, et al. A survey on end-edge-cloud orchestrated network computing paradigms. *ACM Comput Surv*, 2019, 52: 1–36
- 27 Lee J, Ko H, Kim J, et al. DATA: dependency-aware task allocation scheme in distributed edge clouds. *IEEE Trans Ind Inf*, 2020, 16: 7782–7790
- 28 Yuan Y, Islam M S, Yuan Y, et al. EcRD: edge-cloud computing framework for smart road damage detection and warning. *IEEE Internet Things J*, 2020, 8: 12734–12747
- 29 Guan X H, Zhai Q Z, Papalexopoulos A. Optimization based methods for unit commitment: Lagrangian relaxation versus general mixed integer programming. In: *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2003. 1095–1100

- 30 Yan Q, Zhang B, Kezunovic M. Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation. *IEEE Trans Smart Grid*, 2018, 10: 2096–2106
- 31 Lai Z L. Simulation of quasi-steady state model for BCHP system. Dissertation for Master's Degree. Beijing: Tsinghua University, 2009 [赖中练. 热电冷联产系统准稳态模拟. 硕士学位论文. 北京: 清华大学, 2009]
- 32 Heidari A, Mortazavi S S, Bansal R C. Stochastic effects of ice storage on improvement of an energy hub optimal operation including demand response and renewable energies. *Appl Energy*, 2020, 261: 114393
- 33 Mankiw N G. *Principles of Economics*. Stamford: Cengage Learning, 2014. 4–5
- 34 Fisher M L. The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. *Manage Sci*, 1981, 27: 1–18
- 35 Guan X H, Xu Z B, Jia Q S. Energy-efficient buildings facilitated by microgrid. *IEEE Trans Smart Grid*, 2010, 1: 243–252

Edge-cloud framework-based distributed optimization of a building energy system with supply-demand coordination

Zhanbo XU^{1*}, Chunxiang ZHOU¹, Jiang WU¹, Kun LIU¹ & Xiaohong GUAN^{1,2}

1. *Ministry of Education Key Laboratory for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*

2. *Center for Intelligent and Networked Systems, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

* Corresponding author. E-mail: zbxu@sei.xjtu.edu.cn

Abstract Because of a large demand for building operation and its flexibility, building energy systems have considerable energy-saving potential, which provides a technical path toward the national strategic goal of “peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality.” However, building energy management may face challenges such as the complicated interaction between the occupants’ requirements and system demand, multiscale spatiotemporal coupling and energy balance among multiple energy media, and high computational complexity caused by the curse of dimensionality. Therefore, to overcome these challenges, in this paper, we develop a cyber-physical energy system model by proposing a node and traffic model to formulate the building energy management problem with supply–demand coordination, which captures the interaction between the information network and the physical network of electricity, heating, and cooling, and supports the edge-cloud computing framework by integrating the local data collection and computation. Furthermore, we develop an edge-cloud framework-based distributed algorithm to solve the problem and show the optimality of the developed algorithm. The performance of the method proposed in this paper is demonstrated using six case studies with different problem scales. The results show that the proposed method has good performance in accuracy and computational efficiency, which is particularly suitable for solving large-scale problems.

Keywords building energy system, cyber-physical system, edge-cloud computing, supply-demand coordination, system optimization