



## 负荷网络系统下基于状态空间协同的异质热控负荷集群管控

武昕 尤兰

### Management and Control Heterogeneous Thermal Control Load Cluster Based on State Space Coordination in Load Network System

WU Xin, YOU Lan

引用本文:

武昕, 尤兰. 负荷网络系统下基于状态空间协同的异质热控负荷集群管控[J]. *现代电力*, 2023, 40(1): 82–91. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0202

WU Xin, YOU Lan. Management and Control Heterogeneous Thermal Control Load Cluster Based on State Space Coordination in Load Network System[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(1): 82–91. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0202

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0202>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于相空间重构和长短期记忆算法的电力系统无功负荷预测模型

Reactive Load Forecasting Model Based on PSR-LSTM in Power System

现代电力. 2020, 37(5): 470–477 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0235>

#### 考虑柔性电负荷和热负荷的综合能源系统容量优化配置

Optimal Configuration of Integrated Energy System Capacity Considering Flexible Electrical Load and Thermal Load

现代电力. 2021, 38(4): 412–421 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0334>

#### 基于负荷聚集商的多家庭能量管理系统建模

Energy Management Modeling for Multiple Families Based on Load Aggregator Services

现代电力. 2018, 35(2): 16–21 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I2/16>

#### 基于队列分析的改进空调负荷控制策略及其评估

Improved Air-conditioning Load Control Strategy and Evaluation Based on State-queue Analysis

现代电力. 2019, 36(2): 56–65 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I2/56>

#### 基于非侵入式负荷监测的家庭智慧用能管理研究

Research on the Home Intelligent Energy Management System Based on Noninvasive Load Monitoring

现代电力. 2022, 39(4): 496–504 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0140>

#### 基于预切换状态的电热水器负荷群调控策略

Control Strategy of Water Heater Group Based on Pre-switching State

现代电力. 2019, 36(5): 68–75 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/68>

# 负荷网络系统下基于状态空间协同的 异质热控负荷集群管控

武昕, 尤兰

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206)

## Management and Control Heterogeneous Thermal Control Load Cluster Based on State Space Coordination in Load Network System

WU Xin, YOU Lan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,  
Changping District, Beijing 102206, China)

**摘要:** 为了最大化调动同一区域变电站下有效电气连接的负荷资源, 提出了考虑异质热控负荷集群联合控制的负荷网络系统架构。以相同电气连接的端侧负荷构成网络系统的物理感知层; 受区域分散性和参数异质性限制, 实际发生有效功率转移的负荷资源有限, 引入边缘数据中心, 解析异质热控负荷物理设备层级的共性, 虚拟聚合同一区域变电站下物理分散的负荷, 建立多负荷状态空间协同的联合控制模型; 云端电网数据中心综合考量热控负荷可调节容量和工作状态, 经过两次分配确定最佳任务参与组和每组任务量; 以同质聚合组作为基本控制单元, 开发边缘侧面向异质负荷集群的协同管控模型, 发布统一控制指令, 协调端侧负荷参与能源服务。最后以算例验证所提系统和异质热控负荷联合控制模型的有效性。

**关键词:** 能源服务; 负荷网络系统; 异质负荷; 管控; 状态空间协同; 联合控制

**Abstract:** To perform the maximized scheduling of load resources that were effectively connected in the same regional substation, a framework for the load network system, in which the joint control of heterogeneous thermal control load cluster was considered, was proposed. Firstly, the physical perception layer of the network system was constituted by the end-side loads with the same electrical connection. Secondly, restricted by regional dispersibility and parameter heterogeneity, the load resources, in which the effective power transfer practically occurred, were limited, thus, the edge data centre was brought in to analyze the generality of the equipment layer of heterogeneous thermal control load and the physically dispersed loads of the same regional substation were virtually aggregated, and a joint control model of multi-load state space coordination was established. Thirdly, the adjustable capacity and operating state

of the thermal control load were comprehensively considered in cloud-end power grid data centre, and after the secondary distribution the optimal task participating group and the task load of each group were determined. The fourth, taking the homogeneous aggregation group as the basic control unit, and a collaborative control model of heterogeneous loads was developed on the edge side to issue the unified control instructions to coordinated the end load participating in energy services. Finally, by means of computing example, the effectiveness of both the proposed system and the heterogeneous load joint control model are verified.

**Keywords:** energy services; load network system; heterogeneous load cluster; management and control; state space collaboration; joint control

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0202

## 0 引言

随着我国经济社会的快速发展和“十四五”规划纲要“碳达峰、碳中和”目标的提出, 未来电力系统将呈现“双高、双峰”特征。一方面, 到2060年, 我国清洁能源占一次能源的比重达90%, 以风、光为主的新能源定位由补充能源转变为主力能源, 作为市场主体参与电力电量平衡, 新能源的波动性、随机性和不确定性给高比例清洁能源接入下的电力系统带来了挑战; 另一方面, 我国作为能源消费大国, 冬夏2季电力需求量巨大, 2060年电能占终能源消费比重达到60%, 全社会用电量达到17万亿kW·h, 需求侧电力资源丰富<sup>[1-2]</sup>。为此, 从需求侧促进可再生能源电力消

纳利用, 构建有序化、聚合化、市场化的需求侧资源管理体系, 引导电力用户优化用电方式, 推动形成可再生能源与需求侧资源双向互动, 成为保障清洁能源大规模入网下电力系统安全稳定运行的重要途径<sup>[3-4]</sup>。

空调和热水器是重要的需求侧可调节资源<sup>[5-6]</sup>, 结合负荷特性, 通过合理的管控, 能为电网提供辅助服务。目前已有不少研究致力于空调和热水器建模和控制, 文献 [7] 在高比例可再生能源接入背景下, 构建双层聚合空调负荷管控模型参与电力系统频率调节; 文献 [8] 利用变频空调进行一次频率调节, 定频空调执行二次调频, 所提策略能高效结合需求侧空调资源保障电网频率稳定; 文献 [9] 采用时变互补特性对分散的空调负荷进行聚合, 提出分时段聚合空调调控架构; 文献 [10] 采用状态队列对空调负荷进行聚合管控; 文献 [11-12] 将模型预测控制和模糊控制理论应用于空调集群控制, 论证了空调的可控性。在热水器管控方面, 有文献引入 k 均值和强化学习对负荷进行管控<sup>[13-14]</sup>, 文献 [15] 提出了无模型下的热水器控制方法, 都得到了很好的实验结果。进一步地, 有学者同时对空调和热水器的管控进行了研究。文献 [16] 对空调和热水器的时域特性进行分析, 基于贝叶斯网络为负荷建立时域行为概率模型, 制定合理的联合调控策略消纳清洁能源。文献 [17] 基于可调负荷的精细化模型, 建立智能化家庭能源管理系统 (home energy management system, HEMS) 负载控制策略优化模型; 文献 [18] 研究了异质负荷集群的模型构建、容量评估和控制。

以上对空调和热水器的研究只考虑了控制算法的理论可行性, 并且研究对象多为同质负荷集群, 仅能保证该种负荷的聚合可控。实际情况中, 负荷的可控性不仅与负荷的物理特性有关, 还需要考虑地理分散负荷的电气连接, 即只有相同区域变电站下的热控负荷才能响应系统的统一调节, 转移功率, 参与能源服务。因此, 在考虑负荷分布情况下, 需求侧实际可调控的负荷资源是有限的、参数是异质的, 不可能有数量足够的同质负荷同时提供辅助服务。为了实现大规模的功率转移, 需要尽可能多地调动有限范围内的所有可控负荷, 即一方面需要考虑同种负荷的异质特性, 另一方面要考虑占比较大的空调和热水器负荷的联合控制问题。

针对上述问题, 为进一步将热控负荷的聚合管控算法推向实例化, 本文基于文献 [19] 的分组协同方法, 提出面向异质热控负荷集群状态空间协同下的负荷网络系统架构, 考虑可控范围内负荷种类的多样性和参数的各异性, 基于电网-聚合商-负荷 3 方利益考量, 构建考虑通信时延和数据存储的云-边-端协同结构, 建立空调和热水器的异质热控负荷集群联合控制算法, 对同一区域变电站下热控负荷进行聚合管控, 充分挖掘可调负荷潜力。

## 1 负荷网络系统架构

需求侧空调和热水器等热控负荷物理分散, 单个负荷特性曲线具有功率较小、周期性跃变的特点, 因此需要对其进行聚合管控, 才能为电网提供诸如清洁能源消纳和供需失衡调节等能源服务。然而, 在考虑电气连接的情况下, 实际可控的负荷资源是有限的, 只有同一区域变电站范围内的负荷响应了调节指令, 才能实现负荷功率转移, 参与系统调度。因此, 为了尽可能多地调动负荷资源, 最大化挖掘负荷潜力, 需要考虑可控区域内负荷的异质性, 即同种类负荷参数的异质性和不同种类负荷的协同性。仅通过热控负荷的聚合控制算法不能解决上述问题, 需要借助负荷网络系统才能将理论算法推向实例化。

本文构建的负荷网络系统架构如图 1 所示。为了最大程度地虚拟聚合一定地理区域范围内的可调异质负荷, 管理控制需求侧负荷资源参与能源服务, 依托电网-聚合商-负荷 3 方实体, 形成了云-边-端协同的多层结构。负荷网络系统的物理设备是相同电气连接下的可调异质热控负荷, 即在考虑需求侧占比较大的热控负荷联合控制时, 空调和热水器集群构成了感知层。端侧负荷将自身基本的物理设备参数和运行状态参数进行上传, 同时接收负荷网络系统下发的控制指令; 不同区域变电站环境、不同负荷参数差异较大, 控制物理分散的负荷发生大规模功率转移, 需要在同一电气连接下。为了高效地调动异质负荷资源, 引入边缘数据中心对分散负荷进行虚拟聚合, 实际中可由负荷聚合商承担。边缘数据中心存储负荷信息, 根据异质负荷的参数各异性, 完成负荷集群的聚合分组, 评估各组热控负荷的可调节容量,

并上传至电网数据中心；电网作为云端数据中心，结合应用层待消纳的清洁能源出力和聚合商上传的负荷可调节容量进行任务一次分配，确定任务参与组。边缘数据中心对选中的任务参与组进行二次分配，并建立基于状态空间协同的空调和热水器聚合模型，开发具有强鲁棒性的控制算法，为各组发布统一的控制指令。端侧负荷根据统一指令，简单调整自身状态，所有负荷同时响应系统调节，出现大规模的功率转移，实现为电网提供能源服务的目的。

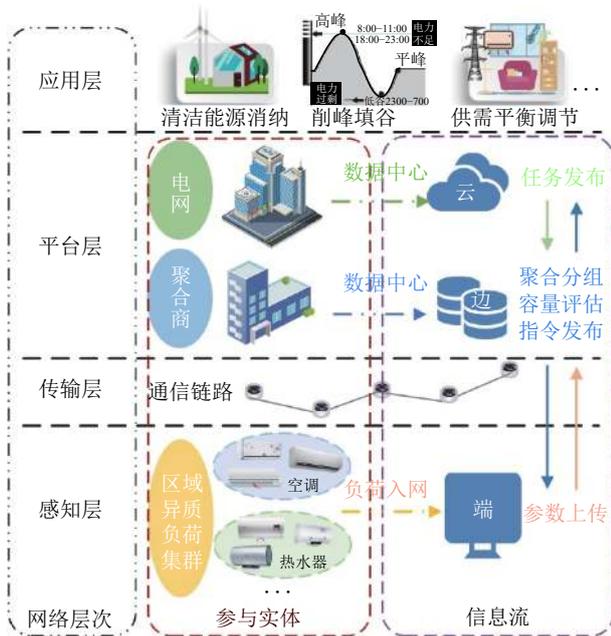


图1 负荷网络系统架构

Fig. 1 Architecture of load network system

物理感知层决定了聚合系统的可控性，但是对于聚合系统中的单个设备，温度设定值或加热时间变化带来的功率变化很小，不能支撑负荷参与能源服务的实际应用，为了最大化挖掘负荷潜力，需要建立多种负荷协同的统一控制算法，在物理感知层形成稳定可控的负荷聚合模型。

## 2 异质热控负荷集群协同管控算法

为了尽可能地调动需求侧地理分散的可控负荷资源，需要对同一区域变电站下的异质热控负荷进行联合聚合控制，最大化挖掘可调负荷潜力。本文在负荷网络系统多层架构下提出了适用于空调和热水器状态空间协同的聚合控制算法，包括异质负荷聚合分组、聚合模型构建、容量评估、

任务分配和聚合管控算法。

### 2.1 异质热控负荷聚合分组

端侧负荷将自身参数上传至边缘数据中心，数据中心根据参数各异性进行分组，将物理分散、参数混杂的热控负荷虚拟聚合为多个同质组，每组负荷参数相同或相差不大，便于构建聚合模型，作为需求响应的基本控制单元参与系统调度。

#### 2.1.1 空调集群聚合分组

根据空调等效热参数模型可知，决定空调负荷物理性能的设备参数包括：平均设定温度  $T_{set,ac}$ 、平均热阻  $R_{ac}$ 、平均热容  $C_{ac}$  和平均功率  $P_{ac}$ 。其中  $T_{set,ac}$  可通过负荷上传直接获取； $R_{ac}$ 、 $C_{ac}$  和  $P_{ac}$  可以通过建筑面积  $S_{ac}$  计算得到<sup>[20]</sup>：

$$\begin{cases} R_{ac} = (0.002 \cdot S_{ac})^{-1} \\ C_{ac} = 0.04 \cdot S_{ac} \\ P_{ac} = 0.056 \cdot S_{ac} \end{cases} \quad (1)$$

取单位面积热阻为  $0.002^{-1}/(^\circ\text{C}/\text{kW})$ ，单位面积热容  $0.04/(\text{kW}\cdot\text{h}/^\circ\text{C})$ ，单位面积功率  $0.056/\text{kW}$ ，可以计算得到任一房间面积下空调的关键参数值。

#### 2.1.2 热水器集群聚合分组

结合热水器的能量交互模型，决定热水器负荷性能差异性的参数包括：平均功率  $P_{dewh}$ 、平均设定温度  $T_{set,dewh}$ 、温度死区  $\Delta$ （影响温度区间值）、水箱体积  $V$ 、散热系数  $G$ 、用户实时用水量  $W_D(t)$  和热容  $C_{dewh}$ 。其中热容是与水箱内水的密度  $\rho$ 、比热容  $C_p$  以及水箱体积有关的参数，计算公式见式（2）<sup>[21]</sup>，其他参数可通过热水器直接上传。

$$C_{dewh} = \rho c_p V \quad (2)$$

### 2.2 异质热控负荷聚合模型构建

聚合分组将物理分散的负荷资源分成了多个同质聚合组，即基本的可控单元。边缘数据中心根据每组负荷参数、空调和热水器的模型共性开发统一的热控负荷同质聚合模型，即状态空间协同的异质热控负荷聚合模型，便于统一指令的发布，最大化调度需求侧可控的负荷参与能源服务。

根据2.1节所述的空调和热水器关键参数和设备电路特性，空调和热水器物理设备级动态温度模型可以用公式（3）表示，蒙特卡洛聚合功率可由公式（4）得到。为了便于后续状态空间模型的推导，同一物理参数不再以下标区分空调和热水器。

$$\dot{T}_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{C_i R_i} (T_{out,i} - T_i(t) - s_i(t) P_i R_i) \\ \frac{1}{C_i} [s_i(t) P_i - G_i (T_i(t) - T_{out,i}(t)) - \rho c_p W_{D,i}(t) (T_i(t) - T_{in,i}(t))] \end{cases} \quad (3)$$

$$P_A(t) = \frac{P}{\eta} \sum_{i=1}^N s_i(t) \quad (4)$$

式中： $T_i(t)$  是第  $i$  台热控负荷温度值； $C_i$ 、 $R_i$ 、 $P_i$  分别是第  $i$  台设备的热容、热阻和功率； $T_{out,i}(t)$  是环境温度； $s_i(t)$  是负荷状态变量，0 表示关闭，1 表示开启； $N$  是一个同质组的负荷数量； $G$  是热水器水箱散热系数； $\rho$  是水的密度； $c_p$  是水的比热容； $W_{D,i}(t)$  是用户用水量； $T_{in,i}(t)$  是进水水温； $P_A(t)$  是  $N$  台负荷的预估聚合功率； $\eta$  是负荷能效比。

通过式 (3) 可知，空调和热水器虽然关键参数不同，但是均可以用一阶微分方程表示其温度动态变化，即基于热控负荷模型共性，可以推导负荷集群的统一动态响应。将热控负荷的状态进行离散划分，考虑空调和热水器开关切换关系，即公式 (5)，可以得到自由响应下负荷稳态转移情况。

$$s_i(t) = \begin{cases} 0 & s_i(t-\tau) = 1, T_i(t) < T_{i,\min}(t) \\ 1 & s_i(t-\tau) = 0, T_i(t) > T_{i,\max}(t) \\ s_i(t-\tau) & \text{其他} \\ 0 & s_i(t-\tau) = 1, T_i(t) > T_{i,\max}(t) \\ 1 & s_i(t-\tau) = 0, T_i(t) < T_{i,\min}(t) \\ s_i(t-\tau) & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\tau$  是热控负荷状态采样的时间间隔； $T_{i,\min}(t)$  和  $T_{i,\max}(t)$  分别为热控负荷温度设定点下限和上限。

根据负荷开关切换律，空调和热水器温度状态转移图分别用图 2(a) 和 (b) 表示。其中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别表示负荷温度设定点下限之下、温度设定点之间和温度设定点上限之上的温度区间。

令  $X_{on}(t, T)$  和  $X_{off}(t, T)$  分别代表在时间  $t$  与温度  $T$  的开启状态和关闭状态的负荷分布情况。那么在  $t$  时刻穿过温度  $T$  的负荷通量  $F_{on/off}(t, T)$  可以表示为

$$F_{on/off}(t, T) = X_{on/off}(t, T) \left[ \frac{\delta T}{\delta t} \right]_{on/off} \quad (6)$$

温度对时间的偏导定义为负荷转移率<sup>[22]</sup>，用  $\alpha_{on/off}$  表示，考虑温度设定点  $T_{set}$  变化带来的负荷分布变化，空调和热水器的负荷通量可以表示为

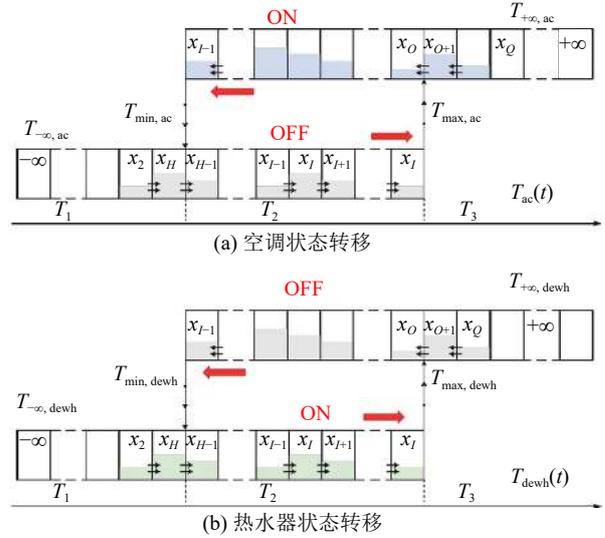


图 2 混合状态离散时间模型的温度状态转移图

Fig. 2 Temperature state transition diagram of mixed state discrete time model

公式 (7) 所示。

$$F_{on/off}(t, T) = X_{on/off}(t, T) \left[ \frac{\delta T}{\delta t} \right]_{on/off} - X_{on/off}(t, T) \cdot \left[ \frac{dT_{set}}{dt} \right]_{on/off} = X_{on/off}(t, T) [\alpha_{on/off} - \dot{T}_{set}(t)] \quad (7)$$

根据式 (3) 推导得到空调和热水器的负荷转移率  $\alpha_{on/off}$  的表达式：

$$\begin{cases} \alpha_{on,ac} = \frac{1}{CR} (T_{out} - T - PR) \\ \alpha_{off,ac} = \frac{1}{CR} (T_{out} - T) \\ \alpha_{on,dewh} = \frac{1}{C} [P - G(T - T_{out}) - \rho c_p W_D (T - T_{in})] \\ \alpha_{off,dewh} = \frac{1}{C} [-G(T - T_{out}) - \rho c_p W_D (T - T_{in})] \end{cases} \quad (8)$$

单独观察一个状态空间  $T+dT$ ，其流入流出通量和负荷浓度如图 3 所示。

由图 3 可知，热控负荷的负荷浓度变化率和该区间内通量对温度的倒数有以下关系：

$$\frac{\partial X_{on/off}(t, T)}{\partial t} = - \frac{\partial F_{on/off}(t, T)}{\partial T} = - \frac{\partial [X_{on/off}(t, T) (\alpha_{on/off} - \dot{T}_{set}(t))]}{\partial T} \quad (9)$$

为了进一步得到空调和热水器统一的聚合模型，利用有限差分法，离散化强迫响应的连续偏微分系统模型，进而用有限维度状态空间描述空调和热水器聚合系统。

对于热控负荷状态转移率大于温度设定点偏转移率时，采用后向差分，反之采用前向差分。通

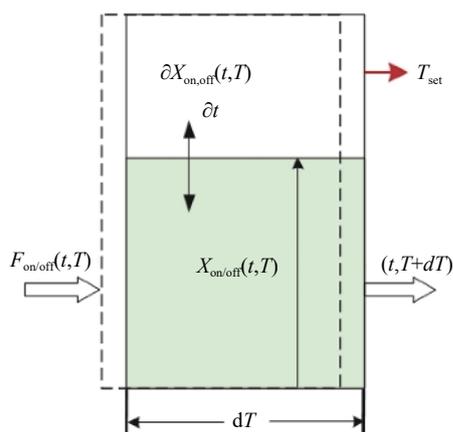


图3 热控负荷强迫响应的负荷通量与负荷浓度变化

Fig. 3 Forced response of thermal control load to the variation of load flux and load concentration

过实验可得空调和热水器负荷转移率的一般情况，见公式（10）

$$\begin{cases} \alpha_{on,ac} \leq 0 \\ \alpha_{off,ac} \geq 0 \\ \alpha_{on,dewh} \geq 0 \\ \alpha_{off,dewh} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

结合图2状态转移和前后差分离散化关系式，空调关闭状态使用后向差分，开启状态使用前向差分；热水器开启状态使用后向差分，关闭状态使用前向差分。将上述关系离散化可得到：

$$\dot{x}_{k,ac}(t) = \begin{cases} -\frac{\bar{\alpha}_{off} - \dot{T}_{set}(t)}{\Delta T} (x_k(t) - x_{k-1}(t)), & k = 2, 3, \dots, H, H+2, \dots, I \\ -\frac{\bar{\alpha}_{on} - \dot{T}_{set}(t)}{\Delta T} (x_{k+1}(t) - x_k(t)), & k = I+1, \dots, O-1, O+1, \dots, Q \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{x}_{k,dewh}(t) = \begin{cases} -\frac{\bar{\alpha}_{on} - \dot{T}_{set}(t)}{\Delta T} (x_k(t) - x_{k-1}(t)), & k = 2, 3, \dots, H, H+2, \dots, I \\ -\frac{\bar{\alpha}_{off} - \dot{T}_{set}(t)}{\Delta T} (x_{k+1}(t) - x_k(t)), & k = I+1, \dots, O-1, O+1, \dots, Q \end{cases} \quad (12)$$

基于改进的空调和热水器离散化状态演变，从而得到空调和热水器的状态空间协同聚合模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{x}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{u}(t) = \dot{T}_{set}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $\mathbf{x}(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_Q(t)]^T$ 为同质组聚合方程的状态向量； $\mathbf{u}(t)$ 是与温度设定值变化率 $\dot{T}_{set}(t)$ 相关的控制信号； $\mathbf{y}(t)$ 是聚合功率输出；系数 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 取值见附录公式（A1）、（A2）、（A3）所

示。

## 2.3 异质热控负荷容量评估和任务分配

### 2.3.1 容量评估

为负荷分配合理的消纳任务需要准确地评估负荷可调节容量<sup>[23]</sup>，通过稳态下的开启状态占空比衡量负荷未受控状态下的功率值，作为该同质组负荷可调节潜力评估指标，如式（14）所示<sup>[18]</sup>：

$$\begin{aligned} P_{As}(t) &= \frac{P}{\eta} \cdot \frac{\tau_{on}(t)}{\tau_{on}(t) + \tau_{off}(t)} \cdot N \approx \frac{P}{\eta} \cdot \frac{T_{out}(t) - T_{set}(t)}{PR} \cdot N \\ &\approx \frac{N}{\eta R} (T_{out}(t) - T_{set}(t)) \end{aligned} \quad (14)$$

式中： $P_{As}(t)$ 是热控负荷稳态聚合功率； $N$ 是同质组负荷台数； $\tau_{on}(t)$ 和 $\tau_{off}(t)$ 是热控负荷工作循环周期开启和关闭时间，表达式如式（15）和（16）所示。

$$\tau_{on}(t) = R \cdot C \cdot \ln \left( \frac{PR + T_{set} + \frac{\Delta}{2} - T_{out}(t)}{PR + T_{set} - \frac{\Delta}{2} - T_{out}(t)} \right) \quad (15)$$

$$\tau_{off}(t) = R \cdot C \cdot \ln \left( \frac{T_{out}(t) - T_{set} - \frac{\Delta}{2}}{T_{out}(t) - T_{set} + \frac{\Delta}{2}} \right) \quad (16)$$

式中： $\Delta$ 是热控负荷温度死区。

考虑温控负荷系统的随机性，各同质组负荷的可调节容量可表示为

$$P_{A^-}^j(t) = \begin{cases} \sigma_1 \frac{P_{As}^j}{P_A^j} P_A^j(t), & P_A^j(t) > P_{As}^j \\ \frac{P_{As}^j}{P_A^j} P_A^j(t), & P_A^j(t) \leq P_{As}^j \end{cases} \quad (17)$$

$$P_{A^+}^j(t) = \begin{cases} \frac{P_{As}^j}{P_A^j} P_A^j(t), & P_A^j(t) > P_{As}^j \\ \sigma_2 \frac{P_{As}^j}{P_A^j} P_A^j(t), & P_A^j(t) \leq P_{As}^j \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 是调节因子； $P_A(t)$ 即每个组预估聚合功率，可由式（4）得到； $P_{A^-}$ 和 $P_{A^+}$ 分别是式（14）中温度设定值最小 $T_{set,min}$ 和最大 $T_{set,max}$ 时的稳态功率值，第 $j$ 组负荷的可调节容量可表示为 $[P_{A^-}(t), P_{A^+}(t)]$ 。

### 2.3.2 任务分配

1) 1次分配。

电网作为云端数据中心，结合待消纳可再生

能源出力与聚合商上传的可调节容量，进行一次任务分配（预分配），确定任务最佳参与组，即将总任务分配给合适的聚合组，结合用户当前负荷使用状态，如热水器的热水器使用情况，以最小化功率改变为目标，选取任务最佳参与组。如式（19）所述。

$$f = \min \sum_{t=0}^T \left\| P_{\text{des}}(t) - \sum_{j \in \Theta} P_A^j(t) \right\| \quad (19)$$

式中： $P_{\text{des}}(t)$  是一次分配总任务； $j$  是参与任务的聚合组，根据目标函数能确定最佳参与组，得到 1 次分配的  $M$  个参与组集合  $\Theta = \{j = 1, 2, \dots, M\}$ 。

### 2) 2 次分配。

聚合商根据式（17）和（18）确定的每个组可调节容量，进行 2 次任务分配，即

$$P_T^j(t) = \begin{cases} P_{A^+}^j(t), & \Delta^j(t) \geq P_{A^+}^j(t) - P_A^j(t) \\ P_{A^-}^j(t), & \Delta^j(t) \leq P_{A^-}^j(t) - P_A^j(t) \\ P_A^j(t), & 0 < \Delta^j(t) < P_{A^+}^j(t) - P_A^j(t) \\ P_A^j(t), & 0 > \Delta^j(t) > P_{A^-}^j(t) - P_A^j(t) \end{cases} \quad (20)$$

$$\Delta^j(t) = \frac{P_A^j(t)}{\sum_{j \in \Theta} P_A^j} \left( P_{\text{des}} - \sum_{j \in \Theta} P_A^j \right) \quad (21)$$

至此，每个聚合组得到了最佳消纳任务  $P_T^j(t)$ 。

## 2.4 异质热控负荷聚合管控

每组负荷得到任务后，根据建立的统一模型，即公式（13），以温度设定值变化作为控制输入，选择合适的系统控制方法可以高效地完成对负荷聚合管控。滑模控制具有响应快、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识的优点。文献 [19] 将其应用于空调组的控制，控制效果良好。本文在建立统一模型的基础上，将滑模控制不失一般性地应用于异质空调和热水器集群的联合控制。

考虑系统稳定性，建立李雅普诺夫函数：

$$e(t) = P_{\text{des}}(t) - y(t) \quad (22)$$

$$v(t) = \frac{1}{2} e^2(t) \quad (23)$$

为维持系统稳定性，需保证  $\dot{v}(t) \leq 0$ ，因此设计滑模控制定律，具体推导证明可见文献 [22]。

$$u(t) = -\kappa(t) \text{sat} \left\{ \frac{e(t)}{\varepsilon} \right\}, \kappa(t) > \left| \frac{P_{\text{des}}^j(t) - f^j(\alpha, X)}{g^j(X)} \right| \quad (24)$$

式中： $f^j(\alpha, X)$ 、 $g^j(X)$ 、 $\text{sat} \left\{ \frac{e}{\varepsilon} \right\}$  分别为与第  $j$  组参

数相关的函数，见公式（25）—（27）：

$$f^j(\alpha, X) = \frac{P^j}{\eta^j} (\alpha_{\text{off}}^j(T_{\text{out}}^j, T_{\text{max}}^j) X_{\text{off}}^j(t, T_{\text{max}}^j) + \alpha_{\text{on}}^j(T_{\text{out}}^j, T_{\text{min}}^j) X_{\text{on}}^j(t, T_{\text{min}}^j)) \quad (25)$$

$$g^j(X) = \frac{P^j}{\eta^j} (X_{\text{off}}^j(t, T_{\text{max}}^j) + X_{\text{on}}^j(t, T_{\text{min}}^j)) \geq 0 \quad (26)$$

$$\text{sat} \left\{ \frac{e}{\varepsilon} \right\} = \begin{cases} \text{sgn}(e), & |e(t)| > \varepsilon \\ \frac{e}{\varepsilon}, & |e(t)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (27)$$

式中： $X_{\text{on}}^j(t, T_{\text{min}}^j)$  代表  $t$  时刻、 $j$  组空调分布在  $T_{\text{min}}$  摄氏度且处于 on 状态的空调数量； $X_{\text{off}}^j(t, T_{\text{max}}^j)$  代表  $t$  时刻、 $j$  组空调分布在  $T_{\text{max}}$  摄氏度且处于 off 状态的空调数量。

算法流程如附图 A1 所示。

## 3 算法仿真

本文以聚合商为边缘数据中心实体，对同一区域变电站下异质热控负荷进行虚拟聚合和协同控制，以某光伏电厂 12:00—13:00 的出力为跟踪目标，考虑 1h 内环境温度基本不发生变化，实验中取  $T_{\text{out}} = 30^\circ\text{C}$ ，验证本文所提空调和热水器联合控制算法消纳清洁能源的有效性。异质热控负荷集群将参数上传至边缘数据中心，数据中心依据参数差异对其聚合分组，评估各组可调节容量并与电网数据中心交互，进行消纳任务的分配，基于异质热控负荷状态空间协同下的系统模型，聚合商对聚合组发布统一控制指令，所有负荷同时响应指令，出现大规模功率转移，最终实现光伏出力的消纳。

### 3.1 聚合分组

空调和热水器虽然同属于热控负荷，能基于温度状态转移对其进行建模和控制，但是单个物理设备的关键参数不同，为此需要不同的数据中心存储负荷上传的参数，分别对其进行聚合分组，以便开发精细化程度更高的统一聚合控制模型。

根据 2.1.1 节的描述，决定任一空调组聚合特性的参数包括房间面积  $S$ 、空调温度设定值  $T_{\text{set}}$ 、热阻  $R$ 、热容  $C$ 、功率  $P$  以及每组的负荷台数  $N$ 。本文同一区域变电站下有 24 组共 1500 台空调，表 1 列出部分组参数。

决定任一热水器组聚合特性的参数包括功率

表1 空调数据中心分组

Table 1 Grouping of air conditioning data center aggregation

序号	组	$S/m^2$	$T_{set}/^{\circ}C$	$R/^{\circ}C/kW$	$C/(kW \cdot h/^{\circ}C)$	$P/kW$	$N/台$
1	ac-1	250	20	2	10	14	100
2	ac-4	200	26	2.5	8	11.2	100
3	ac-6	150	22	3.33	6	8.4	100
4	ac-9	100	24	5	4	5.6	100
5	ac-24	50	22	10	2	2.8	10

$P$ 、热水器温度设定值  $T_{set}$ 、温度死区  $\Delta$ 、水箱体积  $V$ 、水箱散热系数  $G$ 、用水量  $W_D$  以及每组的负荷台数  $N$ 。本文同一区域变电站下有 24 组共 2600 台热水器，表 2 列出部分组参数。

表2 热水器数据中心分组

Table 2 Grouping of water heater data center aggregation

序号	组	$P/kW$	$T_{set}/^{\circ}C$	$\Delta/^{\circ}C$	$V/m^3$	$G/W \cdot ^{\circ}C$	$W_D/(m^3/d)$	$N/台$
1	dewh-1	0.8	50	5	40	[0.788~0.919]	[0.7~1.05]	100
2	dewh-6	2	55	5	80	[1.125~1.116]	[1.05~1.4]	100
3	dewh-7	1.5	55	5	60	[0.956~1.116]	[1.4~1.7]	100
4	dewh-11	2.5	60	5	60	[1.313~1.5]	[1.7~2.0]	100

表 2 所列参数同一组内热水器散热系数和用水量均服从均匀分布，通过记录用户一个月用水习惯，可以获取热水器 24 h 用水概率分布、一天内用水建模概率，如图 4 所示，进而可以获取不同组（日均  $1 m^3$ 、 $1.4 m^3$ 、 $1.7 m^3$  和  $2 m^3$ ）在算例时间内（12:00—13:00）的具体用水量。

所得聚合效果如图 5 所示。图 5 (a) 为空调虚拟聚合结果图，图 5 (b) 为热水器的虚拟聚合结果。根据图 5 可得，分散的空调负荷被聚合为 4 个同质组，热水器聚合为 8 个组，依据参数相似性能将物理分散的异质负荷资源虚拟聚合为可控整体，便于对分散资源进行管控。

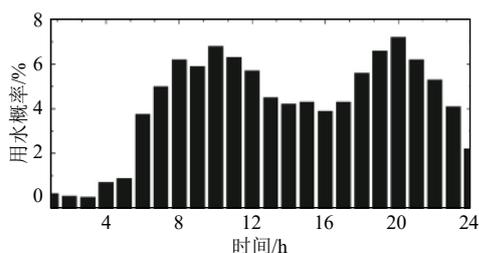
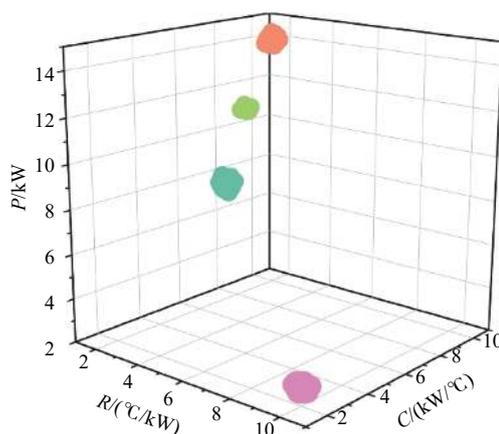
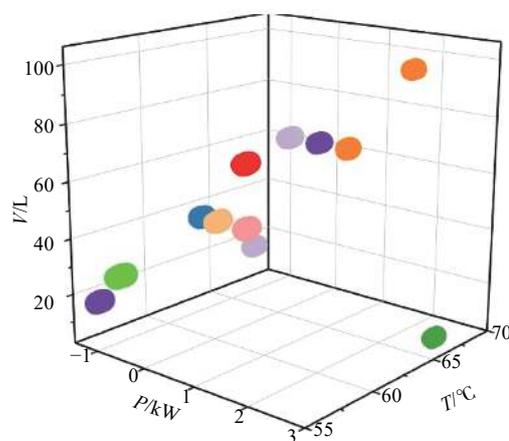


图4 热水器 24h 用水概率建模

Fig. 4 Probabilistic modeling of 24-hour water consumption of water heater



(a) 空调聚合分组结果



(b) 热水器聚合分组结果

图5 物理分散负荷虚拟聚合

Fig. 5 Virtual aggregation of physically distributed load

### 3.2 容量评估和任务分配

在聚合商进行聚合分组之后，需要评估各个聚合组的可调节容量，进而为其分配合适的消纳任务，根据 2.2 节所述任务分配算法，考虑任务完成度，对光伏出力进行二次分配，一次分配时选择最佳空调和热水器参与组，即考虑各组可调节容量和用户舒适度，选取的最佳参与组为：ac-2；ac-5；ac-13；ac-15；ac16；ac-19；ac-21；ac-22；ac-24；dewh-1；dewh-4；dewh-6；dewh-7；dewh-9；dewh-10；dewh-12；dewh-13；dewh-14；dewh-15；dewh-16；dewh-20；dewh-21；dewh-23。结果如图 6 所示。

通过一次分配，电网给需求侧负荷资源的总任务量与未干预之前的功率趋势吻合，进而确保调节过程对负荷的影响最小，其中趋势是由蒙特卡洛随机分布得到的预估聚合功率。

获得总任务量后，根据每组分配算法，获取每个任务组的任务，如图 7 所示。

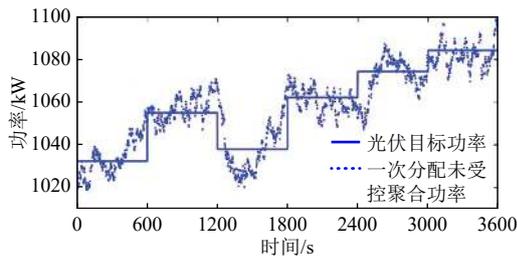
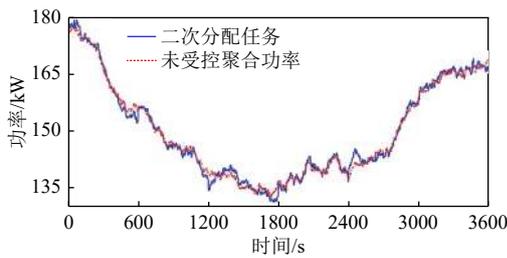
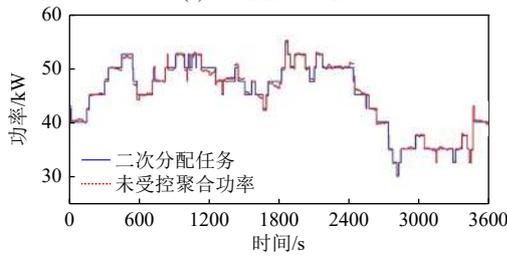


图 6 一次分配结果

Fig. 6 Results of the first allocation



(a) 第5组空调分配结果



(b) 第21组热水器分配结果

图 7 二次分配结果

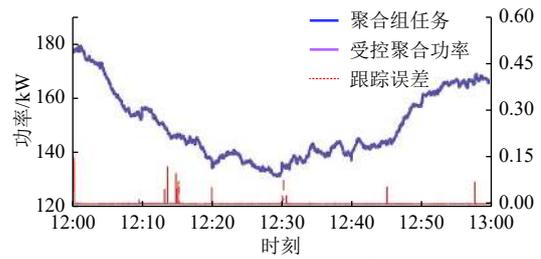
Fig. 7 Results of the second allocation

图 7 分别是 ac-5 和 dewh-21 的二次分配结果。经过一次分配和二次分配，每个负荷聚合组所得任务已经基本符合负荷未加干预时的工作状态，因此只需稍微改变温度设定点，即可参与响应。

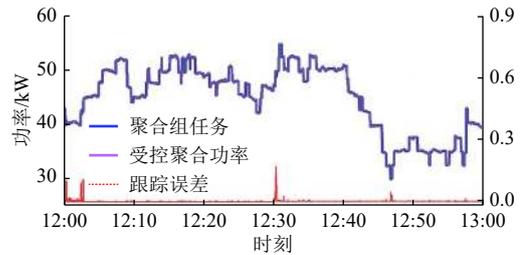
### 3.3 追踪控制

通过 2.3 节所述方法，能对已经获得任务后的每个聚合组进行控制，算例给出空调和热水器组对于滑模控制器呈现的追踪效果，负荷控制追踪效果如图 8 所示。

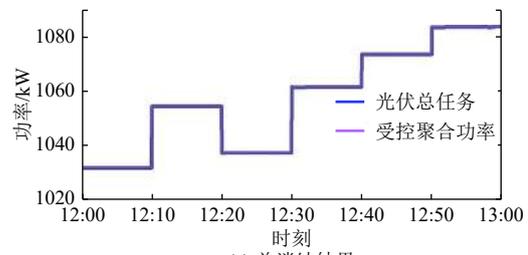
图 8 (a) 是 ac-5 基于 2 次分配任务的控制消纳效果，从图中可以看出其消纳光伏的误差最大不超过 0.15 kW，跟踪精度高；图 8 (b) 是 dewh-21 的跟踪效果，最大跟踪误差不超过 0.2 kW；图 8 (c) 是协同空调和热水器组所得的总跟踪效果，在 9 组空调和 14 组热水器的联合调控下，对光伏出力的消纳效果较好；从图 8 (d) 容易得到，对光伏的消纳误差最大不超过 3 kW，证明了本文算法的优良性。



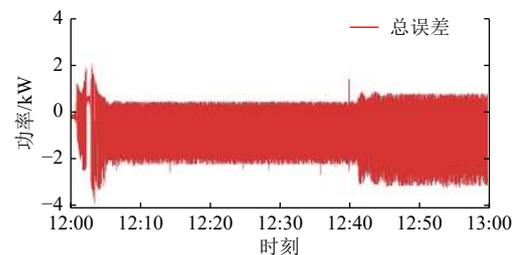
(a) 第5组空调消纳结果



(b) 第21组热水器消纳结果



(c) 总消纳结果



(d) 总消纳误差

图 8 跟踪效果及误差

Fig. 8 Tracking results and errors

### 3.4 空调和热水器联合控制性能分析

本文基于负荷网络系统平台架构，考虑空调和热水器 2 类需求侧重要的热控负荷资源的联合控制问题。以文献 [18] 所提热控负荷管控算法作对比，在本文光伏出力跟踪目标下，文献 [18] 方法对空调温度设定点的改变影响较大。如图 9 (a) 所示，在负荷网络系统架构下，空调和热水器联合控制时，本文算法的平均空调温度设定点的改变量不超过 0.1℃，而文献 [18] 算法中温度设定点改变量最大可达到 0.48℃，对用户舒适度影响明显增加。

图 9 (b) 分析了极端天气下本文算法的性能，假设环境温度  $T_{out}=40^{\circ}\text{C}$ ，此时端侧-边缘侧-数据

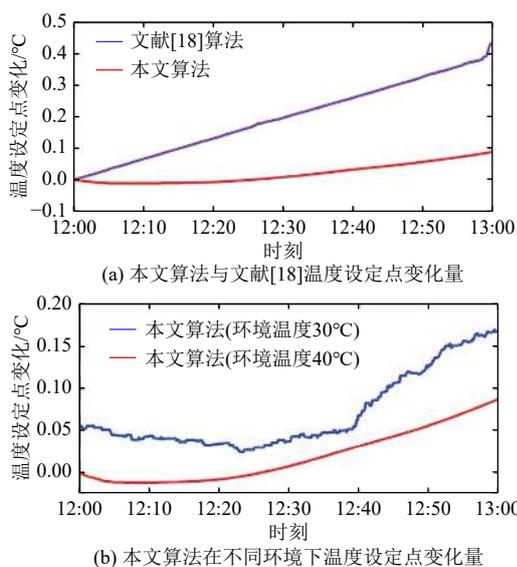


图9 温度设定点变化对比

Fig. 9 Comparison of the variation at temperature setpoint

中心正常进行参数上传和指令下发,以某天中12:00—13:00为实验时间段,图9(b)蓝色曲线表示了极端天气下空调温度设定点的改变情况,与稳态案例( $T_{\text{out}}=30^{\circ}\text{C}$ )相比,温度设定点波动程度明显加剧,但是变化阈值小于 $0.175^{\circ}\text{C}$ ,小于用户死区 $\Delta=0.5^{\circ}\text{C}$ ,优于文献[18]中温度设定点改变量,即不会对用户体感温度带来影响,保障了用户满意度。

从图中可以明显看出,在负荷网络系统架构下,研究热水器和空调系统内部的负荷转移特性,构建统一的负荷聚合模型,对空调和热水器进行联合控制,能有效保障用户参与能源服务过程中的舒适度。

## 4 结语

本文提出的负荷网络系统下空调和热水器联合管控算法中,结合负荷特性,建立了空调和热水器基于状态空间协同的聚合控制模型,在有限可调负荷的情况下,最大程度地调动了负荷资源,完成了最大化清洁能源消纳目标。

在未来的研究中,我们将调用更多的可调节资源,如将抽水蓄能电站看做大容量可调节负荷,与需求侧热控负荷结合,最大限度地挖掘负荷潜力,为电网提供辅助服务。

(本刊附录请见网络版,印刷版略)

## 参考文献

- [1] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告[R]. 北京: 中国碳达峰碳中和成果发布暨研讨会, 2021.
- [2] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369–379.  
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369–379(in Chinese).
- [3] 李云卿. 系统推进“十四五”时期电力需求侧管理高质量发展[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 1–3.  
LI Yunqing. Systematically promoting high quality development of demand side management during the “14th Five-Year Plan” period[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 1–3(in Chinese).
- [4] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2–11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2–11(in Chinese).
- [5] 吴润基, 王冬晓, 谢昌鸿, 等. 空调负荷参与配电网电压管理的分布式控制方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(06): 215–222.  
WU Runji, WANG Dongxiao, XIE Changhong, et al. Distributed control method for air-conditioning load participating in voltage management of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(06): 215–222(in Chinese).
- [6] 余洋, 权丽, 贾雨龙, 等. 考虑爬坡特性与预测区间优化的电热水器集群功率区间预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 88–96.  
YU Yang, QUAN Li, JIA Yulong, et al. Interval prediction of aggregated power for electric water heaters considering ramp characteristic and prediction interval optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 88–96(in Chinese).
- [7] 姚垚, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4987–4998, 5296.  
YAO Yao, ZHANG Peichao, WANG Yongquan. A two-layer control method for thermostatically controlled loads to provide fast frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4987–4998, 5296(in Chinese).
- [8] JIANG Tingyu, JU Ping, WANG Chong, et al. Coordin-

- ated control of air-conditioning loads for system frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 548–560.
- [9] 陈璐, 杨永标, 徐青山. 基于时变互补特性的聚合空调调控及恢复策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(13): 39–47. CHEN Lu, YANG Yongbiao, XU Qingshan. Coordinated control and recovery strategy for aggregated air-conditioner based on time-variant complementary characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(13): 39–47(in Chinese).
- [10] 朱兰, 黄超, 唐陇军, 等. 基于队列分析的改进空调负荷控制策略及其评估[J]. *现代电力*, 2019, 36(2): 56–65. ZHU Lan, HUANG Chao, TANG Longjun, *et al.* Improved air-conditioning load control strategy and evaluation based on state queue analysis[J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(2): 56–65(in Chinese).
- [11] MAHDAVIN, BRASLAVSKY J H. Modelling and control of ensembles of variable-speed air conditioning loads for demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4249–4260.
- [12] SHAH Z A, SINDI H F, UI-Haq A, *et al.* Fuzzy logic-based direct load control scheme for air conditioning load to reduce energy consumption[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 117413–117427.
- [13] ALVAREZ M Z, AGBOSSOU K, CAEDENAS A, *et al.* Demand response strategy applied to residential electric water heaters using dynamic programming and k-means clustering[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 524–533.
- [14] PEIRELINCK T, HERMANS C, SPIESSENS F, *et al.* Domain randomization for demand response of an electric water heater[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1370–1379.
- [15] LIU M, PEETERS S, CALLAWAY D S, *et al.* Trajectory tracking with an aggregation of domestic hot water heaters: combining model-based and model-free control in a commercial deployment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5686–5695.
- [16] 孙毅, 黄绍模, 李泽坤, 等. 考虑时域特性的异构温控负荷联合调控策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4722–4734. SUN Yi, HUANG Shaomo, LI Zekun, *et al.* Joint control strategy of heterogeneous temperature control load considering time domain characteristics[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4722–4734(in Chinese).
- [17] 陈中, 李云倩, 冷钊莹, 等. 典型家用大功率负载精细化建模及能量管理策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(22): 135–143. CHEN Zhong, LI Yunqian, LENG Zhaoying, *et al.* Coordinated control strategy of multi-DC emergency power support to improve frequency stability of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(22): 135–143(in Chinese).
- [18] HU Jianqiang, CAO Jinde, CHEN M Z Q, *et al.* Load following of multiple heterogeneous TCL aggregators by centralized control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(4): 3157–3167.
- [19] 武昕, 梁凯鑫, 焦点, 等. 面向清洁能源跟踪的空调分组协同方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 68–77. WU Xin, LIANG Kaixin, JIAO Dian, *et al.* Collaborative method of air conditioner grouping for clean energy tracking[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 68–77(in Chinese).
- [20] JUDKOFF R, BARKER G, HANCOCK E, *et al.* Buildings in a test tube: Validation of the short-term energy monitoring (STEM) method[C]//*Proc ASES National Solar Conf Forum*, 2001: 1–11.
- [21] VRETTOS E, KOCH S, ANDERSSON G. Load frequency control by aggregations of thermally stratified electric water heaters[C]//*2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, Germany, 2012: 1–8.
- [22] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(4): 1318–1327.
- [23] ZHANG J, Domínguez-García A D. Evaluation of demand response resource aggregation system capacity under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4577–4586.

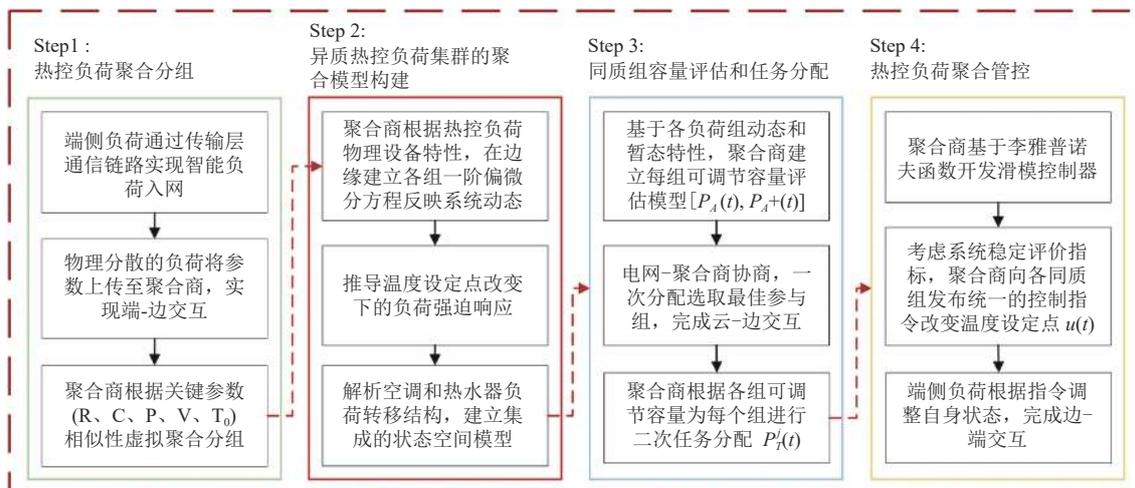
收稿日期: 2021-07-23

作者简介:

武昕(1986), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能用电及信息处理、电力系统通信与信号处理技术, E-mail: wuxin07@ncepu.edu.cn;

尤兰(1996), 女, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为智能用电与负荷管理, E-mail: youlan\_12@ncepu.edu.cn.





附图 A1 算法流程图

Fig. A1 The flowchart of the proposed algorithm