

考虑算力-电热耦合的边缘数据中心能量优化管理

文亚凤¹, 程祖铭^{1*}, 刘欣雅¹, 孙毅¹, 宋玮琼², 张影²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 国网北京市电力公司, 北京市 西城区 100051)

Energy Optimization Management of Edge Data Centers Considering Computing Power-electrothermal Coupling

WEN Yafeng¹, CHENG Zuming^{1*}, LIU Xinya¹, SUN Yi¹, SONG Weiqiong², ZHANG Ying²

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

China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Xicheng District, Beijing 100051, China)

ABSTRACT: Growing user demand for computing power has spawned a large number of edge data center deployments, which have correspondingly increased energy costs and carbon emissions. In order to solve above problems, this paper presents an energy optimization management considering the coupling characteristics of computing power and electrothermal behaviors in edge data centers. Firstly, a collaborative energy management model is proposed, which integrates modules of task migration, battery power regulation, quality of service (QoS), renewable energy consumption and power management. A task migration strategy based on internal Central Processing Unit temperature sensing and computing power adjustment is designed to avoid overheating and task blocking. Secondly, an optimization problem is formulated to minimize the long-term operating cost of edge data centers. Lastly, leveraging the Lyapunov optimization algorithm, the aforementioned issues are transformed into short-term online optimization problems. Simulation analysis demonstrates that the proposed method can effectively reduce the overall operational costs while ensuring long-term stable operation.

KEY WORDS: edge data center; renewable energy; task migration; computing power-electrothermal coupling; Lyapunov optimization

摘要: 用户日益增长的算力需求催生出大量数据中心边缘化部署, 其相应的能耗成本不断增加, 碳排放量大幅上升。为解决上述问题, 该文提出考虑边缘数据中心算力-电热耦合特性的能量优化管理方法。首先, 提出包含边缘数据中心内负载处理、任务迁移、电池电量调控、边缘数据中心网络服

务质量(quality of service, QoS)、可再生能源消纳与功率管理多个子系统的协同能量管理模型, 并设计考虑主机内部中央处理单元(central processing unit, CPU)温度感知与算力调节的任务迁移策略, 避免任务迁移可能导致的主机过热与任务阻塞问题; 其次, 构建以边缘数据中心长期运营成本最小化为目标的优化问题; 最后, 基于李亚普诺夫优化技术, 将上述问题转化为短期在线求解问题。仿真分析表明, 所提方法能够有效降低数据中心整体运营成本, 并保证数据中心长期稳定运行。

关键词: 边缘数据中心; 可再生能源; 任务迁移; 算力-电热耦合; 李亚普诺夫优化

0 引言

近年来, 随着云计算、人工智能等计算密集型技术的不断推广, 用户对算力的需求越来越大, 数据处理过程逐渐向边缘侧转移, 在这一挑战下, 边缘数据中心应运而生。然而, 边缘数据中心的大量部署会导致能源消耗持续增长、碳排放量大幅增加。预计在 2030 年, 国内数据中心用电量将达到 2 667 亿 kW h^[1]。因此, 应进一步优化边缘数据中心能耗, 实现其低碳、降本、增效发展。

数据中心运行的能耗成本占总成本的绝大部分, 其中任务负载处理系统与制冷系统用能约占总能耗的 80%^[2]。负载处理系统所用电量最终大部分将转化为热量, 因此数据中心内部计算设备具有电热耦合特性。如何利用数据中心的电热耦合特性, 设计负载处理系统与制冷系统的协同优化策略, 实现任务负载处理优化的同时, 热负荷高效管理, 受到学者广泛关注。文献[3]提出一种基于预测的热感知虚拟机分配技术, 利用神经网络模型来预测服务

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5700-202411271A-1-1-ZN)。 Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5700-202411271A-1-1-ZN)。

器的片上温度,从而优化虚拟机分配,避免主机过热。文献[4]采用一种考虑工作负载特征和冷却系统配置的机器学习模型,为虚拟机放置寻找目标服务器,提高制冷系统效率。文献[5]提出一种基于主机周边环境温度感知的虚拟机放置技术,通过感知主机周边温度优化虚拟机放置,以降低制冷系统能耗。文献[6]以最小化主机温度与能耗为目标,优化虚拟机放置策略,减少数据中心内部热点的产生。为了进一步降低成本,部分学者考虑将数据中心产生的余热再利用。文献[7]通过整合数据中心的余热回收系统,提出一种基于数据中心微电网的电热联合调度方案,综合考虑多种供电与产热设备协同优化。文献[8]分析数据中心时间、空间与能量灵活性潜力,分别对应于负载的时、空转移和余热回收,并提出一种数据中心和电力系统协调的运行框架,以降低运行成本。文献[9]构建一个集制冷、制热、供电于一体,并联合余热回收的数据中心能源体系结构,设计带有余热回收的跟随电负荷策略和运营成本意识能源管理策略。然而,传统电热耦合特性仅考虑设备用能与热量之间的转化关系,无法充分发挥算力的可调节潜力,且难以满足边缘数据中心所在场景。主机功耗大小主要受中央处理器(central processing unit, CPU)执行算力多少的影响,这些算力能耗最终会转化为热量进而影响制冷系统功率。通过主机之间算力的调度可以实现热负荷的转移与削减,因此主机算力与电热具有一定的耦合关系^[10],合理的任务迁移策略能够充分发挥算力-电热耦合特性的调节潜力,进一步优化数据中心能耗。

目前数据中心负载迁移相关方法已有深入研究。文献[11]充分应用数据中心工作负载处理的灵活性与储氢系统高存储潜力,提出了数据中心与储氢系统相结合的协同响应框架,用于解决风力供应的反峰特性和不确定性波动,有效提高风电利用效率。文献[12]提出一种基于工作负载感知的调度方法,该方法可以根据运行时的任务计算需求,自适应地开启和关闭服务器,从而减少数据中心整体计算能耗。文献[13]设计一种基于能量消耗水平的自适应动态阈值方法来确定任务迁移时间,并基于相关性和利用率策略选择要迁移的虚拟机,最大限度地减少迁移过程中应用程序的性能损失,降低迁移成本。文献[14]构建一种由小型数据中心组成的绿色节点网络,每个节点包括计算、储能与可再生能源发电设备,通过设计节点之间数据和能量的迁移

模型,实现各节点之间能量共享,有效提高可再生能源消纳率。文献[15]基于信息-能源流耦合性,提出联合任务卸载、功率控制与云边计算负载迁移策略,实现网络购电成本的空间转移、削减。文献[16]建立一种基于有向图的多数据中心协同规划模型,该模型考虑工作负荷流和能量流的紧密耦合,以协同优化每个数据中心的结构和容量及多个数据中心之间的互联线路和管道,实现多数据中心的协调规划。文献[17]建立一种地理分布式数据中心碳排放模型,在多区域可再生能源互补的基础上,通过双维时空任务迁移机制,分别在粗尺度和细尺度上最小化排放。然而,上述工作没有考虑任务迁移与硬件性能之间的相互影响。仅以时延、队列长度等为阈值设计的任务迁移策略,可能会导致部分主机温度过高;而仅以硬件温度等为阈值可能会导致违反服务等级协议(service-level agreement, SLA),因此需要综合考虑两者的影响设计合适的迁移策略。

由于边缘数据中心更加靠近用户侧,每间隙接收的服务请求次数波动性大,因此对其优化运行会面临缺乏系统先验知识,时间尺度要求高,难以实现日前精确调控等问题。为解决上述问题,目前学者主要采用李亚普诺夫优化技术设计在线调控策略。文献[18]在李雅普诺夫优化的基础上,提出一种只依赖于当前系统状态的在线优化算法,确保数据中心长期稳定运行,同时保证电池队列与负载队列的稳定性。文献[19]为了保证数据中心能够满足用户长期服务质量(quality of service, QoS)的需求,采用李亚普诺夫优化技术将长期问题转化为短期问题,实现问题求解。文献[20]为降低可再生能源出力的间歇性对系统的影响,设计一种基于李亚普诺夫优化技术的在线优化算法,实现可再生能源出力与电池充放电随机性的匹配。然而上述工作未能综合考虑数据中心内多个子系统运行队列的相互影响,仅优化负载或电池等单一队列难以满足实际运行需求。

基于上述分析,目前边缘数据中心优化管理面临以下挑战:基于算力-电热耦合的边缘数据中心能量管理策略,涉及多种可调节负荷,难以对其进行精确建模;现有任务迁移策略未能充分发挥任务负载的时空灵活性潜力,且可能导致数据中心负载堆积、温度过高等问题;边缘数据中心靠近用户侧,导致服务请求波动性较大,且可再生能源的接入显著影响系统运行稳定性,因此传统的日前调控策略

无法满足系统的稳定运行需求,需要设计系统在线调控策略;信息技术(information technology, IT)子系统的离散操作与冷却子系统的连续操作相互耦合,形成了高维状态空间,导致求解难度显著增加。针对上述问题,本文工作与创新点概括如下:

1) 针对现有基于电热耦合特性的数据中心优化策略难以充分发挥负荷可调节潜力的问题,本文基于算力-电热耦合特性,提出包含边缘数据中心内部负载处理、任务迁移、电池电量调控、边缘数据中心网络 QoS、可再生能源消纳与功率管理多个子系统协同的能量管理模型,实现边缘数据中心运营成本最小化。

2) 针对现有任务迁移策略未能充分考虑任务迁移与硬件性能之间的相互影响,提出一种综合考虑主机内部 CPU 温度感知与主机算力调节的任务迁移策略。该策略可在每个时隙内感知 CPU 温度来确定任务迁移方向;通过迁移主机需处理负载来调节主机算力,并对主机接收与迁移的任务量进行限制,以避免任务迁移可能导致的热点与任务阻塞问题,实现制冷成本大幅降低。

3) 针对数据中心长期运行的稳定性问题,采用李亚普诺夫优化技术,设计系统运行在线调控算法,综合考虑数据中心内部工作负载、电池电量与边缘数据中心网络 QoS 等多种因素的长期稳定性。采用广义 Benders 算法对问题进行解耦,解决高维状态空间下混合整数规划问题难以求解的问题,并实现结果的快速收敛,满足时效性需求。

1 多系统协同优化模型

系统模型如图 1 所示。边缘数据中心内包含多个子系统,其中储能系统可从电网中获取电量,也可以存储可再生能源系统的发电量。任务处理系统的主机集合为 $i \in \{1,2,3,\dots,N\}$,不同主机之间采用光纤与交换机相连,以满足内部任务负载迁移的需

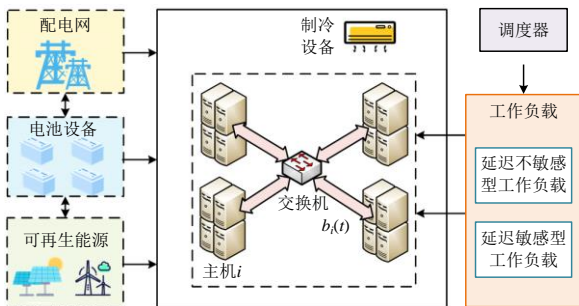


图 1 系统模型
Fig. 1 System model

求。为简化分析,将主机视为一个整体,内部不再考虑单个服务器的影响。假设系统在离散时间内运行,并由 $t=\{0,2,3,\dots,T-1\}$ 表示,每个时隙的持续时间为 15 min。

1.1 工作负载队列迁移模型

负载可以大致分为两种类型:对延迟不敏感型工作负载和延迟敏感型工作负载。本文仅考虑延迟不敏感型负载^[21],而延迟敏感型负载也可以通过控制决策来合并,即主机应该在响应时间限制下首先处理延迟敏感型工作负载。

假设每个主机运行参数完全相同。对于主机 i 分别用 $a_i(t)$ 与 $b_i(t)$ 表示每个时隙接收和处理的工作负载总量,并满足以下约束:

$$\sum_{i=1}^N a_i(t) = A_i(t), \forall i, t \quad (1)$$

式中 $A_i(t)$ 为时隙 t 主机 i 接收的工作负载总量。对于延迟不敏感型工作负载,可以适当地将部分负载安排在更有利的时隙或主机处理,以利用系统状态的时空变化。但是,仅考虑主机的任务分配可能会导致部分主机任务堆积,造成其温度不断上升,难以满足数据中心稳定性运行需求。因此,本文提出一种考虑主机内部 CPU 温度感知与主机算力调节的任务迁移策略,在每个时隙内感知主机内部温度来确定任务迁移方向;通过迁移主机需处理的负载来调节主机算力,并对主机接收与迁移的任务量加以限制,避免任务迁移可能造成的主机过热与任务阻塞问题。

将数据中心内主机分为两类,一类为温度较低主机,可以在本时隙接收其他主机的负载;另一类主机温度过高自身硬件性能受到影响,需将自身负载迁移到温度较低的主机进行计算,以降低内部 CPU 温度。分别以 $T_{i,q}^{cpu}$ 、 T_w^{cpu} 表示第 i 个主机在第 t 个时隙的 CPU 温度与任务转移温度阈值(一般取 75°C),当主机内 CPU 温度 $T_{i,q}^{cpu} \geq T_w^{cpu}$ 时,将其负载迁移到温度较低的主机进行处理,如图 2 所示。

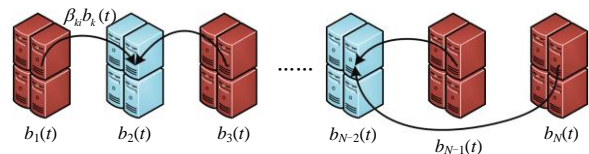


图 2 主机任务迁移示意图
Fig. 2 Migration diagram of host tasks

对于主机 i , 定义其每个时隙工作负载队列阻塞值 $Q_i(t)$ 与迁移向量 β_{ik} , β_{ik} 表示负载从第 i 个主机

迁移到第 k 个主机，负载队列变化如图 3 所示。

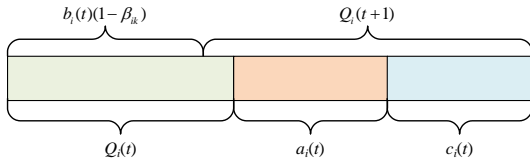


图 3 主机阻塞队列动态变化

Fig. 3 Dynamic change of host blocking queue

队列中的阻塞工作负载按照先到先得的原则进行处理，以确保所有工作负载都能在一段时间内处理完毕。阻塞队列动态描述如下：

$$Q_i(t+1) = \{Q_i(t) - b_i(t)[1 - \beta_{ik}(t)]\}^+ + a_i(t) + c_i(t), \forall i, t, k \neq i \quad (2)$$

$$c_i(t) = \sum_{k=1}^N \beta_{ki}(t) b_k(t), k \neq i \quad (3)$$

式中 $c_i(t)$ 为本时隙主机接收的负载总量。主机之间的任务负载迁移必须满足以下约束条件：

$$\begin{cases} \sum_i \beta_{ik}(t) = 1, T_i^{\text{cpu}}(t) \geq T_w^{\text{cpu}}, i \neq k \\ \sum_i \beta_{ik}(t) = 0, T_i^{\text{cpu}}(t) < T_w^{\text{cpu}}, i \neq k \end{cases} \quad (4)$$

式(4)表示，对于主机 i ，如果其 CPU 温度高于 T_w^{cpu} 则将本时隙待处理负载量 $b_i(t)$ 转移至主机 k ，且只能转移至唯一的主机 k 中 ($\sum_i \beta_{ik}(r) = 1$)；如果其 CPU 温度低于 T_w^{cpu} ，则 $\sum_i \beta_{ik}(r) = 0$ ，表示主机 i 只能接收负载，因此主机 i 在时隙 t 中不能同时转移或者接收负载。

由于平均工作负载延迟与阻塞队列平均长度成正比，因此工作负载队列必须稳定，以保证延迟性能，构建稳定性约束如下：

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}\{Q_i(t)\} < \infty, \forall i \quad (5)$$

此外，每个主机需要根据其处理能力控制计划处理的工作负载的上限，保证任务队列在合理范围内。因此，可以考虑以下约束条件：

$$\bar{a}_i \geq a_i^{\min}, \forall i, t \quad (6)$$

$$0 \leq a_i(t) \leq a_{i, \max}, \forall i, t \quad (7)$$

$$0 \leq b_i(t) \leq b_{i, \max}, \forall i, t \quad (8)$$

式中： \bar{a}_i 定义为 $\bar{a}_i \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}\{a_i(t)\}$ ，表示主机 i 长期任务接收次数平均值； a_i^{\min} 为主机 i 需要接收

的最小任务请求次数平均值。式(6)可以看作是边缘数据中心网络 QoS 约束，为保证到达的任务能够及时分配到各个主机进行处理，主机 i 的长期任务接收次数平均值 \bar{a}_i 必须大于需要接收的最小任务请求次数平均值 a_i^{\min} ，以避免部分任务被过度延期。 $a_{i, \max}$ 和 $b_{i, \max}$ 分别为主机 i 每个时隙最大可接收和处理的工作负载量。

1.2 储能队列模型

边缘数据中心部署有储能设备，可以存储来自可再生能源的发电量与从电力市场购买的电量^[22]。用 $E(t)$ 表示整个边缘数据中心在时隙 t 内电池的储能情况。电池储能队列可以表示为：

$$E(t+1) = E(t) + D(t), \forall t \quad (9)$$

$$0 \leq E(t) \leq E_{\max}, \forall t \quad (10)$$

式中 E_{\max} 为电池容量的上下限； $D(t)$ 为电池在每个时隙 t 的充放电电量， $D(t) > 0$ 表示充电， $D(t) < 0$ 表示放电。分别以 D_{\max} 、 D_{\min} (都为正值) 表示每个时隙充放电量的最大和最小值。为保证电池电量维持在允许范围内，电池的充放电电量 $D(t)$ 必须满足以下约束：

$$D(t) \leq \min[D_{\max}, E_{\max} - E(t)], \forall t \quad (11)$$

$$D(t) \geq -\min[D_{\min}, E(t)], \forall t \quad (12)$$

式(11)表示，电池的最大充电量不能超过本时隙电池的剩余容量；式(12)表示电池的最大放电量不能超过本时隙电池的剩余电量。频繁的充放电会引起电池损耗，电池损耗成本为

$$C(t) = C_b |D(t)| \quad (13)$$

式中 C_b 为衡量充放电引起的损耗成本系数。

1.3 负载处理能耗模型

对于主机 i ，在时隙 t 中，其计算能耗 $P_i(t)$ ^[23] 可以表示为

$$P_i(t) = P_{\text{idle}} + (P_{\text{peak}} - P_{\text{idle}}) \frac{b_i(t)(1 - \beta_{ik})}{b_{i, \max}} \quad (14)$$

式中 P_{idle} 、 P_{peak} 分别为主机的基础能耗与满载能耗。整个边缘数据中心在时隙 t 的计算能耗可以表示为

$$P(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) \quad (15)$$

1.4 边缘数据中心温度模型

本文假设目标边缘数据中心采用风冷，并配有变频空调、高架送风和顶板回风结构。此外，还采用了冷通道密封技术，以防止再循环效应，详细结构可参考文献[24]。

根据一阶等效热参数模型^[25]可得到主机 i 进气温度时段首末变化关系如下:

$$T_i^{\text{air}}(t) = T_{\text{out}}(t) - q(t)R_1 - [T_{\text{out}}(t) - q(t)R_1 - T_i^{\text{air}}(t-1)]e^{-\Delta t/(R_1 C_1)} \quad (16)$$

$$q(t) = q_{\text{co}}(t) - \zeta P(t) \quad (17)$$

$$T_{\text{temp}}^{\min} \leq T_{\text{in}}(t) \leq T_{\text{temp}}^{\max} \quad (18)$$

式中: $T_i^{\text{air}}(t)$ 为主机 i 在第 t 个时隙的进气温度; $T_{\text{out}}(t)$ 为边缘数据中心内第 t 个时隙的环境温度; R_1 和 C_1 为常量, 分别表示空调负荷的等效热阻和等效热容; $q(t)$ 为数据中心在 t 时段的等效制冷量; $q_{\text{co}}(t)$ 为数据中心内变频空调在 t 时段的制冷量; ζ 为主机热量与功耗的比值; T_{temp}^{\min} 和 T_{temp}^{\max} 分别为保证数据中心正常运行的机房温度的上、下限。机房空调为变频空调, 空调功耗与空调制冷量关系为:

$$P_{\text{co}}(t) = \alpha_1 q_{\text{co}}(t) + \alpha_2 \quad (19)$$

$$0 \leq P_{\text{co}}(t) \leq P_{\text{co}}^{\max} \quad (20)$$

式中: α_1 、 α_2 为常数; $P_{\text{co}}(t)$ 为数据中心在 t 时段的空调功耗; P_{co}^{\max} 为机房空调的额定功耗。

CPU 工作会产生大量的热量, 其温度不仅受能耗的影响, 还受热阻、热容以及进气温度的影响。因此, 主机 i 在时隙 t 中的 CPU 温度 $T_i^{\text{cpu}}(t)$ 可以用电阻-电容模型(RC 模型)定义为

$$T_i^{\text{cpu}}(t) = P_i(t)R_2 + T_i^{\text{air}}(t) + [T_i^{\text{ini}}(t) - P_i(t)R_2 - T_i^{\text{air}}(t)]e^{-\Delta t/(R_2 C_2)}, i=1, \dots, N; t=1, \dots, T \quad (21)$$

式中: R_2 和 C_2 分别为主机 CPU 的热阻(K/W)和热容(J/K), 文献[26]指出, R_2 和 C_2 为常量, 其值与系统调度操作无关; T_i^{ini} 为该主机 CPU 的初始温度。

为了保证主机运行可靠性, 必须维持主机 i 的 CPU 温度在一定范围内。

$$T_i^{\text{cpu}} \leq T_{\text{up}} \quad (22)$$

式中 T_{up} 为 CPU 最高温度。综上所述, 系统的功耗平衡为

$$\{P_{\text{co}}(t) + P(t)\}\Delta t + D(t) - R(t) = G(t) \quad (23)$$

式中 $R(t)$ 为时隙 t 从可再生能源中获取的电量。

1.5 边缘数据中心系统成本模型

数据中心时隙 t 的电价用 $f(t)$ 来表示。从电力市场中获取的总电量为 $G(t)$, 电力成本为

$$V(t) = f(t) \cdot G(t), \forall i, t \quad (24)$$

$V(t) > 0$ 时数据中心会从外部电网购电, $V(t) < 0$ 时系统可将自身多余电量卖出。每个时隙系统总成

本模型为

$$\begin{cases} \Psi[a(t), b(t), \beta_{ik}(t), D(t), P_{\text{co}}(t)] = \sum_{t=1}^T [V(t) + C(t)] \\ \text{s.t. 式(2), (4)---(9), (10), (12), (18), (20), (22), } \forall i, t \end{cases} \quad (25)$$

式中 $a(t)$ 、 $b(t)$ 、 $\beta_{ik}(t)$ 、 $D(t)$ 、 $P_{\text{co}}(t)$ 分别为负载接收变量、负载处理变量、负载转移变量、电池充放电变量与空调功率控制变量。

系统目标函数为最小化边缘数据中心长期总运营成本。基于上述系统模型, 将成本最小化问题表述为一个随机优化问题。

$$\begin{cases} \text{P1: } \min_{u(t)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}\{\psi(t)\} \\ \text{s.t. 式(2), (4)---(9), (10), (12), (18), (20), (22), } \forall i, t \end{cases} \quad (26)$$

式中 $U(t)=[a(t), b(t), \beta_{ik}(t), D(t), P_{\text{co}}(t)]$ 为系统控制决策向量。问题 P1 提供了系统最优控制策略, 但是由于缺乏系统运行先验知识, 所提问题 P1 难以求解。此外, 还存在时间耦合约束式(2)、(6)和(9), 使得求解更加困难。为解决上述问题采用李亚普诺夫优化技术, 提出一种求解 P1 的在线算法, 该算法能够在不了解任何系统先验知识的情况下做出在线控制决策, 并对其性能进行理论分析。

2 计及算力电热耦合的边缘数据中心能量在线管理算法

2.1 基于李亚普诺夫的在线调度算法

李亚普诺夫优化技术的目的是将时间平均约束转换为队列稳定性约束。为了处理式(6)中的长期平均速率约束, 可将其转换为类似式(5)的队列稳定性约束。创建虚拟队列 $J_i(t)$, 如下式所示:

$$J_i(t+1) = [J_i(t) + j_i(t)]^+ \quad (27)$$

式中: $[\cdot]^+ = \max\{a, 0\}$; $j_i(t) = a_i^{\text{min}} - a_i(t)$, $j_i(t) > 0$ 与 $j_i(t) < 0$ 分别表示数据到达与离开的过程。基于队列稳定性理论 $\bar{j}_i \leq 0$ 是所有虚拟队列保持稳定的必要条件。给定 $\bar{j}_i(t) = a_i^{\text{min}} - \bar{a}_i(t)$, 式(6)中的约束等同于以下虚拟队列的稳定性约束:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \mathbb{E}\{J_i(t)\} < \infty, \forall i, t \quad (28)$$

时间耦合约束式(9)需要转换为时间平均约束, 创建虚拟电池队列 $X(t)$ 跟踪数据中心的电池能级:

$$X(t) = E(t) - \theta(t) \quad (29)$$

$$\theta(t) = D_{\text{min}} + V f_{\text{max}} \quad (30)$$

式中: $\theta(t)$ 为扰动参数; $f_{\text{max}} = \max_{1 \leq t \leq T} \{f(t)\}$; V 为

一个值为正的控制参数，且符合以下约束：

$$0 < V < V_{\max} \quad (31)$$

$$V_{\max} = (E_{\max} - D_{\min} - D_{\max}) / (f_{\max} - f_{\min}) \quad (32)$$

式中 f_{\max} 、 f_{\min} 分别为电网电价的最大值与最小值。虚拟电池能量队列可用下式表示：

$$X(t+1) = X(t) + D(t) \quad (33)$$

本文给定式(6)和(9)中队列稳定性的约束条件，使用李亚普诺夫优化技术对提出的问题进行变换。定义李亚普诺夫函数如下：

$$L[\vec{\Theta}(t)] \triangleq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [X(t)]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [J(t)]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [Q(t)]^2 \quad (34)$$

式中 $L[\vec{\Theta}(t)]$ 为一个度量虚拟电池队列、工作负载队列与长期平均速率队列的稳定性标量。此外，定义条件李雅普诺夫单时隙漂移如下：

$$\Delta L[\vec{\Theta}(t)] \triangleq \mathbb{E}\{L[\vec{\Theta}(t+1)] - L[\vec{\Theta}(t)] \mid \vec{\Theta}(t)\} \quad (35)$$

式中 $\Delta L[\vec{\Theta}(t)]$ 为两个时隙之间的差值。只需最小化每个时隙的 $\Delta L[\vec{\Theta}(t)]$ ，即可保证虚拟电池队列、工作负载队列和长期平均速率队列稳定。但是，为了在保持队列稳定的同时优化系统总成本，创建如下漂移加罚函数：

$$\Delta_V[\vec{\Theta}(t)] = \Delta L[\vec{\Theta}(t)] + V \mathbb{E}\{\psi \mid \vec{\Theta}(t)\} \quad (36)$$

通过调整参数 V ，可以实现系统成本和队列稳定性之间的权衡。例如，取较大的 V 值，成本会更小，但队列允许的波动范围更大。引入以下引理来获得优化目标。

引理 1： 假设随机事件，包括可再生能源到达和数据到达在所有时间段上都是平稳和独立的，对于任何满足问题 P1 的可行资源管理解决方案，可得李亚普诺夫漂移加惩罚函数的上界如下：

$$\begin{aligned} \Delta_V[\vec{\Theta}(t)] \leq & V \mathbb{E}\{\psi \mid \vec{\Theta}(t)\} + \mathbb{E}\{X(t)D(t) \mid X(t)\} + \\ & \sum_{i=1}^N \mathbb{E}\{Q(t)[a_i(t) - [b_i(t) - c_i(t)]] \mid Q(t)\} + \\ & \sum_{i=1}^N \mathbb{E}\{J_i(t)[a_i^{\min} - a_i(t)] \mid J_i(t)\} + B \end{aligned} \quad (37)$$

式中 B 为一个满足下式的有限常数。

$$\begin{aligned} B = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{ \max[D_{\min}^2, D_{\max}^2] + [a_i^{\min} - a_i(t)]^2 + \\ & [a_i(t) + c_i(t)]^2 + b_i(t)^2 \} \end{aligned} \quad (38)$$

引理 1 给出李亚普诺夫漂移加惩罚函数的上界。基于李亚普诺夫优化技术，本文提出边缘数据中心在线调控算法，其目标为在每个时间段上最小

化上述上界。具体为，根据机房储能队列和工作负载队列的当前状态，解决机房电池充放电决策、负载分配决策、负载处理决策、空调运行优化决策与工作负载迁移决策，问题描述如下：

$$\begin{cases} \text{P2: } \min_{\{u(u)\}} X(t)D(t) + V\psi + \sum_{i=1}^N \{Q_i(t) \cdot \\ [a_i(t) - [b_i(t) - c_i(t)]] + J_i(t)[a_i^{\min} - a_i(t)]\} \\ \text{s.t. 式(4), (7), (8), (10), (12), (18), (20), (22), } \forall i, t \end{cases} \quad (39)$$

式(39)中 $a_i(t)$ 与其他控制变量独立，且约束中没有与 $a_i(t)$ 相关的变量。因此，可以从式(39)中提取 $a_i(t)$ 相关项得到工作负载分配子问题。余下形成功率分配、负载处理与迁移的联合优化子问题。算法流程如图 4 所示。

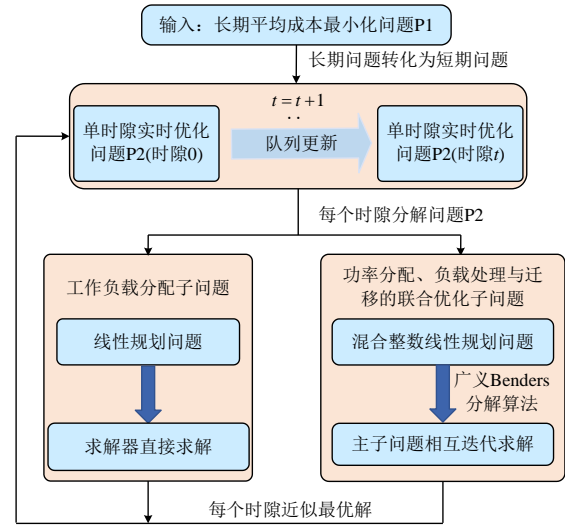


图 4 基于李亚普诺夫的在线调控算法流程图

Fig. 4 Flow chart of online control algorithm based on Lyapunov

2.2 可行性分析

针对本文所提优化策略，并结合文献[19,22]数据中心在线调控算法思路，得出以下两个定理：

定理 1： 对于边缘数据中心，在任意时隙 t ，电池电量总是有界的^[19]。

$$0 < E(t) < E_{\max} \quad (40)$$

定理 2： 将问题 P1 和 P2 的平均预期总成本分别定义为 ψ^* 和 $\hat{\psi}$ ^[27]。 $\hat{\psi}$ 的上限为

$$\hat{\psi} \leq \frac{1}{V} B + \psi^* \quad (41)$$

2.3 最优化负载分配子问题求解

由于负载分配变量 $a_i(t)$ 的独立性，可从问题 P2 中分离出其相关项，并形成如下最优化负载分配问题：

$$\begin{cases} \min_{\{a_i(t)\}} \sum_{i=1}^N [Q_i(t) - J_i(t)] a_i(t) \\ \text{s.t.} \quad 0 \leq a_i(t) \leq a_{i,\max} \end{cases} \quad (42)$$

由于 $\{d[J_i(t) - Q_i(t)]a_i(t) / da_i(t) = J_i(t) - Q_i(t)\}$ 在任何时隙都是一个与 $a_i(t)$ 无关的常数，因此子问题可以分为两种情况。当 $J_i(t) - Q_i(t) > 0$ ，原式关于 $a_i(t)$ 单调递增，此时的最优控制策略为 $a^*(t) = 0$ ；当 $J_i(t) - Q_i(t) \leq 0$ 时，原式关于 $a_i(t)$ 单调递减，这种情况下的最优控制策略为 $a^*(t) = a_{i,\max}$ 。综上所述工作负载最优调度策略为

$$a^*(t) = \begin{cases} a_{i,\max}, & J_i(t) \leq Q_i(t) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (43)$$

2.4 功率控制与负载处理联合优化问题求解

通过将负载分配变量 $a_i(t)$ 从问题 P2 中分离，可形成余下空调功率控制、电池能量管理与负载迁移处理联合优化问题，具体为

$$\begin{cases} \min_{\{b(t), D(t), P_{co}(t), \beta_{ik}(t)\}} C[b(t), D(t), P_{co}(t), \beta_{ik}(t)] = \\ X(t)D(t) - \sum_{i=1}^N \{Q_i(t)[b_i(t) - c_i(t)]\} + V\psi \\ \text{s.t. 式(4), (8), (10), (12), (18), (20), (22), } \forall i, t \end{cases} \quad (44)$$

上述问题中存在变量间的耦合关系，难以直接求解，但给定整数变量 $\beta_{ik}(t)$ 后，原问题转化为凸问题。因此，可以将式(44)进一步归类为混合整数线性规划问题(mixed integer linear programming, MILP)。解决上述问题的最优算法包括分支定界算法与广义 Benders 分解(generalized Benders decomposition, GBD)算法等线性分解算法。一般来说，GBD 算法适用于特定形式的大规模组合优化问题，例如问题为可分离问题，因此本文选取 GBD 算法求解上述问题。下文介绍针对式(44)的 GBD 算法的基本思想。

为了采用 GBD 算法，原问题必须满足以下两个条件：

- 1) 凸问题：给定离散变量，问题必须为凸。
- 2) 线性可分性：给定连续变量，问题在离散变量上必须是线性的。

显然子问题式(44)符合上述两个条件。算法的详细过程可以参考文献[28]，本文仅作简略介绍。对式(44)采用 GBD 算法解耦，可得到子问题式(45)、(46)与松弛主问题式(47)。

$$\begin{cases} \min_{\{b(t), D(t), P_{co}(t), \beta_{ik}^{k-1}(t)\}} C[b(t), D(t), P_{co}(t), \beta_{ik}^{k-1}(t)] = \\ X(t)D(t) - \sum_{i=1}^N \{Q_i(t)[b_i(t) - c_i^{k-1}(t)]\} + V\psi \\ \text{s.t. 式(4), (8), (10), (12), (18), (20), (22), } \forall i, t \end{cases} \quad (45)$$

式(45)的解可为原问题式(44)提供上界(upper bound, UB)，并为松弛主问题添加可行割约束，如果式(45)无可行解，则转向求如下子问题：

$$\begin{cases} \min_{\{b(t), D(t), P_{co}, \beta_{ik}^{k-1}, \theta\}} \sum_{i=1}^M \theta_i \\ \text{s.t. } \theta_i \geq 0 \end{cases} \quad (46)$$

式中 θ 为松弛因子，式(46)的解可为主问题添加不可行割约束。

$$\begin{cases} \min_{\{\beta_{ik}, \theta, \zeta\}} \zeta \\ \text{s.t. 式(5)} \\ \text{C1: } \mathcal{L}[b(t)^{k-1}, D(t)^{k-1}, P_{co}(t)^{k-1}, \beta_{ik}] \leq \zeta, k \in S_t^{\text{feasible}} \\ \text{C2: } \tilde{\mathcal{L}}[b(t)^{k-1}, D(t)^{k-1}, P_{co}^{k-1}, \beta_{ik}, \theta] \leq 0, k \in S_t^{\text{infeasible}} \end{cases} \quad (47)$$

式中 S_t^{feasible} 与 $S_t^{\text{infeasible}}$ 分别为迭代过程中问题可行和不可行解迭代数集合。主问题的目标为求解任务转移变量 β_{ik} 的最优值。采用可行割约束集合 C1 和不可行割约束集合 C2 从主问题的可行区域内去除不可行解和非最优解。对于不满足约束集合 C1 的解，可以证明其不是式(44)的最优整数解；同样，对于不满足约束集合 C2 的解，可以证明其为式(44)的不可行整数解。

迭代求解主问题与两个子问题，直到上下界相同，以得到第 t 个时隙内主问题与子问题的近似最优解。

3 仿真设置与结果分析

本文基于 MATLAB R2019b 仿真平台进行仿真，仿真环境为 Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz, 32G 内存。参考华为《面向 5G 的边缘数据中心基础设施白皮书》，考虑单个边缘数据中心，内置 10 台主机，彼此通过光纤相连，每个主机峰值功耗和空闲功耗分别为 2、1.2 kW。每次充放电操作的电池损耗成本 C_b 设置为 0.1 元/(kW h)^[29]。电价采用 2022 年 2 月深圳执行的分时电价价目^[30]，且为了获得 15 min 间隔的电价数据，本文对其进行等间隔取样，并添加了一些噪声作为模拟数据。可再生能源采用光伏发电。根据实验数据的可用性，总模拟周期设置为 500 个时隙，每个时隙为 15 min。

其他系统参数汇总见表 1。

表 1 系统参数
Table 1 System parameters

参数	数值
空调负荷的等效热阻 $R_1/(^{\circ}\text{C}/\text{kW})$	2.5
空调负荷的等效热容 $C_1/((\text{kW}\cdot\text{h})/^{\circ}\text{C})$	1.5
主机 CPU 等效热阻 $R_2(\text{K}/\text{W})$	0.35
主机 CPU 等效热容 $C_2(\text{J}/\text{W})$	340
边缘数据中心正常运行机房温度的下限 $T_{\text{temp}}^{\text{min}}/\text{K}$	290.15
主机服务最大处理速率 $b_{i,\text{max}}/(\text{次}/\text{s})$	2 500
主机接收最小请求次数 $a_{i,\text{max}}/(\text{次}/\text{s})$	1 500
边缘数据中心正常运行的机房温度的上限 $T_{\text{temp}}^{\text{max}}/\text{K}$	298.15

数据中心工作负载到达情况来自谷歌所发布的真实实例^[18]。选取示例内部分主机 500 个时隙内延迟忍耐型行任务请求量作为本实验相关数据，具体如图 5 所示。数据中心内每台主机的服务最大处理速率 $b_{i,\text{max}}$ 为 2 500 次请求/s。

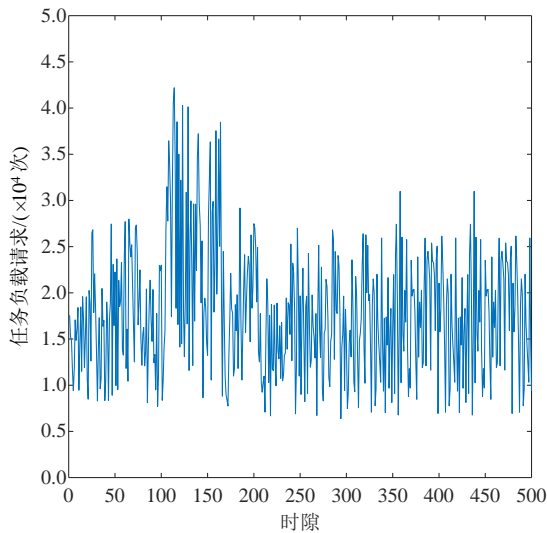


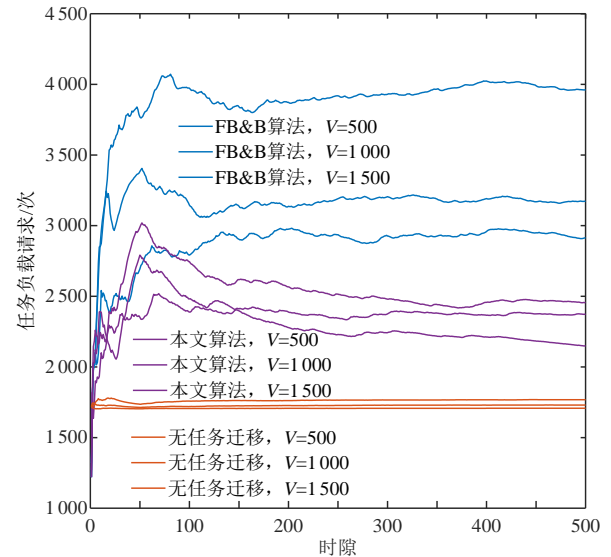
图 5 每时隙任务负载到达情况

Fig. 5 Task load arrival status per time slot

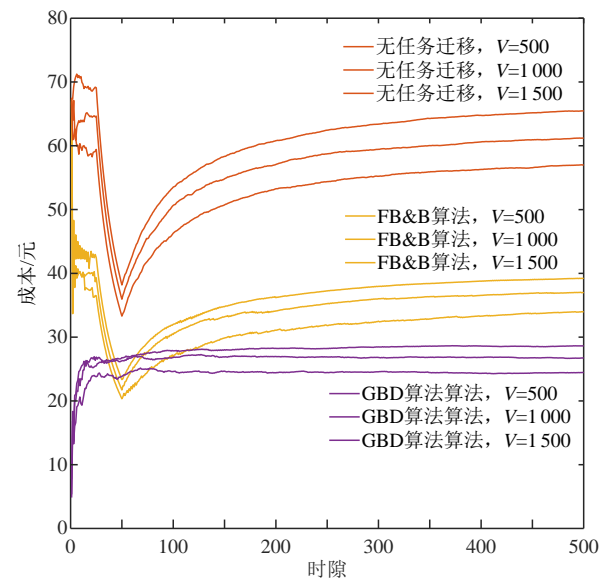
为了更好地验证所提算法与策略，考虑以下对比场景：1) 本文所提基于算力-电热耦合特性的能量管理策略；2) 不考虑主机之间任务迁移策略，只考虑总体成本优化；3) 采用快速分支定界(faster branch-and-bound, FB&B)算法^[31]代替 GBD 算法求解原问题。不同的场景有相同的初始数据队列长度和电池能级。

图 6(a)显示了所提策略和对比场景任务队列长度平均值随时间的变化，不同 V 值下队列长度均能够快速收敛，验证本文所提策略可以保证边缘数据中心稳定运行，且所用 GBD 算法比 FB&B 算法时延更低，收敛速度更快。无任务迁移场景下系统无需求解任务迁移变量，因此收敛速度相对较快。

图 6(b)显示 3 种算法每时隙平均成本随 V 的变化，本文所提算法成本始终维持在一定范围之内，验证所提定理 2。在第 500 个时隙，当控制参数 V 设置为 500、1 000 和 1 500 时，本文所提策略的总成本比场景 2 分别低 28.02%、27.78% 和 26.98%，比场景 3 分别低 57.16%、56.33% 和 55.26%。产生上述结果的原因：场景 2 不考虑任务迁移策略，部分主机温度过高，导致空调系统能耗增加 50% 以上(如图 7 所示)，因此数据中心整体能耗显著提升；本文所提算法相比于场景 2 所采用的 FB&B 算法时效性更好，收敛速度更快，更好地利用了边缘数据中心算力-电热耦合特性，进一步减少任务堆积，降低运营成本。



(a) 多场景任务队列长度



(b) 总成本随时间平均值

图 6 多场景任务队列长度和总成本随时间平均值变化图

Fig. 6 Average data queue length and total cost change over time in different scenarios

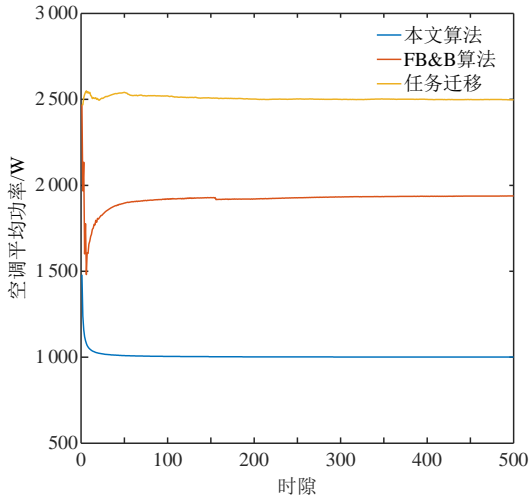


图7 不同场景空调系统能耗随时间的平均值变化图
 Fig. 7 Time evolution of air conditioning system energy consumption in different scenarios

图8为控制参数 V 分别为 500、1 000、1 500 时, 10 个主机在 500 个时隙内接收到的平均任务次数。由图可知, 所有主机接收到的平均任务次数均高于所需最小平均速率 a_i^{min} , 满足边缘数据中心网络 QoS 约束。此外, V 值越大, 主机平均任务接收量越低, 符合 V 值越大能耗越低。

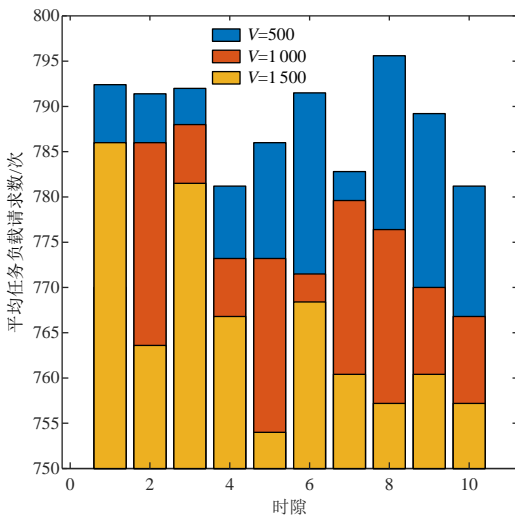


图8 500 时隙内平均任务请求数(次)
 Fig. 8 Average number of task requests in 500 time slots (times)

图9截取了部分时隙内电池电量与电价之间的动态变化关系。由图可知, 当电网电价较低时, 系统会优先从电网购电, 并将多余的电量存储在电池中, 电池电量相应升高; 当电网电价较高时, 系统优先使用可再生能源发电量以及上一时隙储备的电量, 并减少从电网的购电量, 电池电量相应降低, 且储能系统电量随着时间的变化总是维持在一定范围内, 验证了定理 1。所提策略能有效降低边缘

数据中心购电成本, 并提高可再生能源消纳率。

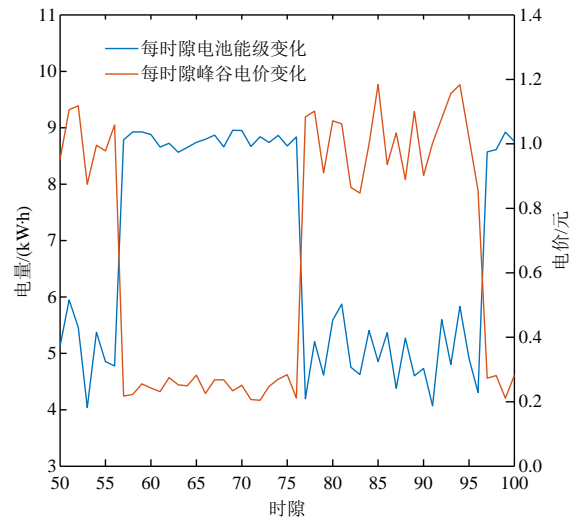


图9 电池能级与电价之间变化关系
 Fig. 9 Relation between battery energy level and electricity price

V 是权衡系统成本和延迟性能的可调参数。由图 10 可知, V 值越大, 系统总成本更小, 但负载请求次数队列堆积更大; V 值越小, 系统总成本更大, 但队列堆积更小。然而, V 的最大值受电池容量的限制。因此, 需要仔细选择 V 的值, 以保证工作负载性能的同时最小化系统成本。参数 V 的值与电池容量之间的关系如图 11 所示, 系统所需平均电池电量随 V 的值增加而增加, 当增加 V 以降低系统成本时, 需要更大的电池容量, 意味着每次充放电能力也要相应提高, 电池损耗成本也相应提高。因此 V 的值应该取 1 000, 在满足边缘数据中心网络 QoS 的同时, 尽量降低系统运营成本。

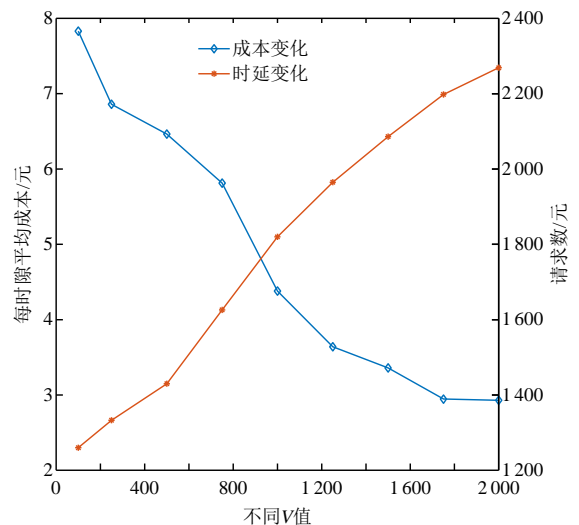


图10 权衡参数 V 对系统成本与任务处理的影响
 Fig. 10 Weighing the impact of parameter on system cost and task processing

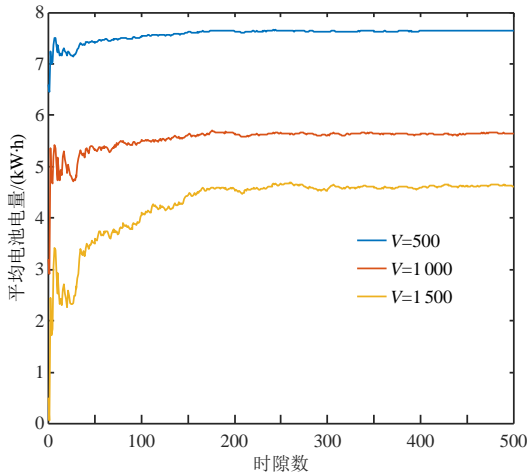


图 11 权衡参数 V 对平均电池电量的影响
Fig. 11 Impact of tradeoff parameter V on average battery capacity

图 12 展示了不同权衡参数 V 的值对可再生能源消纳的影响。由图可知，随着权衡参数 V 值的增加，不同场景下可再生能源的利用率逐渐上升，且本文所提策略能够更加有效的利用可再生能源，这是由于本文所提策略能够充分利用算力的可调节潜力，实现可再生能源在不同时间段的消纳。相比于未采用可再生能源的场景，本文所提策略能够减少 27% 的成本；相比于采用 FB&B 算法求解问题，本文所用算法由于更强的时效性，可减少 8.5% 的平均成本，验证本文所提策略有效性。但是需要注意的是，由于负载请求队列长度受到权衡参数 V 的影响，因此不能无限增大 V 值，需要选择合适的 V 值。

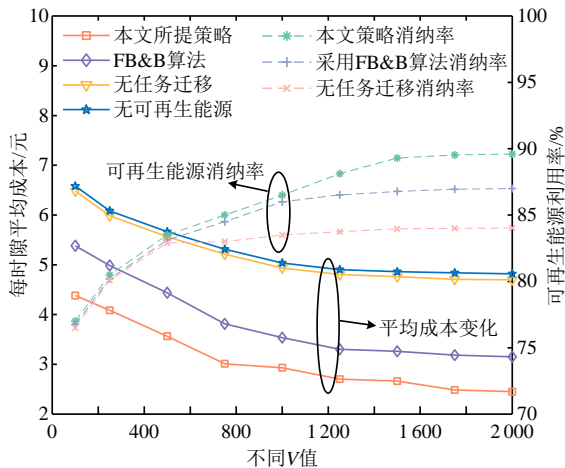


图 12 权衡参数 V 对可再生能源消纳的影响
Fig. 12 Weigh the impact of parameter V on renewable energy consumption

图 13 为不同场景下边缘数据中心内某个主机 CPU 温度平均值随时间的变化，由图可知不同场景下主机 CPU 温度趋于稳定，且本文所提策略显著降低了 CPU 的总体平均温度，原因是基于算力-电

热耦合特性的任务迁移策略，优化了不同主机之间的任务分配，避免主机在某个时隙内温度过高，且相比于采用 FB&B 算法本文采用的算法收敛更快，更好的利用了算力的时空可调节特性。

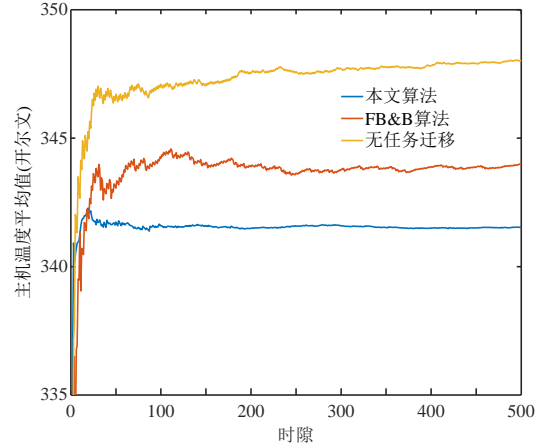


图 13 CPU 温度随时间变化图

Fig. 13 Average CPU temperature change over time

图 14 选取了第 88 与 89 两个时隙内所有主机 CPU 温度的变化值，展示了本文所提算力-电热耦合策略对 CPU 温度的影响。可以看出，第 88 个时隙内系统编号为 2、3、4、8 与 10 的主机温度均高于阈值，通过将其算力迁移到温度低于阈值的主机 1、5、6、7 与 8 内执行后，其温度显著降低。通过算力迁移的方法优化数据中心内部工作负载分配，避免部分主机过热，降低边缘数据中心整体能耗，验证了本文所提算法的有效性。

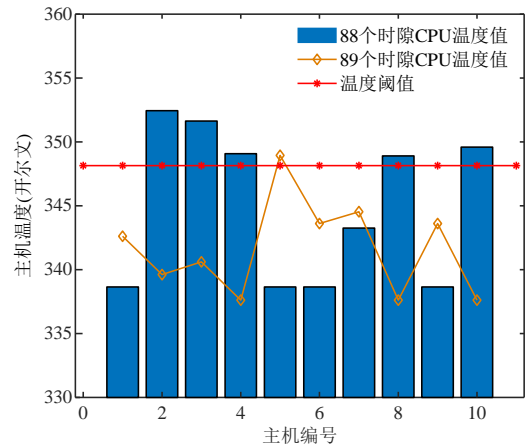


图 14 任务迁移策略对主机 CPU 温度的影响

Fig. 14 Impact of task migration on CPU temperature

4 结论

本文研究了基于算力-电热耦合特性的边缘数据中心能量优化管理策略，提出了综合考虑主机内部 CPU 温度感知与算力调节的任务迁移策略，通过仿真分析验证了本文模型的有效性与优越性，并

得出结论如下:

1) 针对现有边缘数据中心能耗优化策略难以充分发挥算力可调节潜力的问题, 本文提出的基于算力-电热耦合特性的边缘数据中心能量优化策略, 能够综合考虑边缘数据中心内部负载处理、任务迁移、电池电量调控、边缘数据中心网络 QoS、可再生能源消纳, 协同管理多个子系统, 实现系统整体运营成本降低 25%。

2) 针对现有任务迁移策略可能造成主机任务堆积、形成热点与空调能耗剧烈上升等问题, 设计考虑主机内部 CPU 温度感知与算力调节的任务迁移策略, 能够避免主机出现温度过高与任务堆积的问题, 实现空调系统能耗降低 60%。

3) 针对现有日前调控策略难以满足边缘数据中心内多个子系统长期稳定运行需求的问题, 设计基于李亚普诺夫优化技术的边缘数据中心在线调控算法, 能够保证边缘数据中心内储能系统、任务负载处理系统与用户 QoS 长期保持稳定, 且相比于 FB&B 算法, 本文所提算法能够实现快速收敛。

参考文献

- [1] 朱子恒, 张策, 丁肇豪, 等. 数据中心纳入全国碳排放权交易市场机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5562-5574.
ZHU Ziheng, ZHANG Ce, DING Zhaohao, et al. Incorporating data centers into china's national carbon emissions trading system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5562-5574(in Chinese).
- [2] 丁肇豪, 曹雨洁, 张素芳, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(一): 数据中心能耗模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3161-3177.
DING Zhaohao, CAO Yujie, ZHANG Sufang, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet(I): energy demand management model of data center[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3161-3177(in Chinese).
- [3] AKBAR S, LI Ruixuan, WAQAS M, et al. Server temperature prediction using deep neural networks to assist thermal-aware scheduling[J]. Sustainable computing: Informatics and Systems, 2022, 36: 100809.
- [4] XIAO Peng, NI Zhenyu, LIU Dongbo, et al. A power and thermal-aware virtual machine management framework based on machine learning[J]. Cluster Computing, 2021, 24(1): 2231-2248.
- [5] CHOI S H, KIM S Y, KIM Y G, et al. AMBITION: Ambient temperature aware VM allocation for edge data centers[J]. IEEE Access, 2023(11): 68501-68511.
- [6] GUO Chao, XU Kai, SHEN Gangxiang, et al. Temperature-aware virtual data center embedding to avoid hot spots in data centers[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(1): 497-511.
- [7] DING Zhaohao, CAO Yujie, XIE Liye, et al. Integrated stochastic energy management for data center microgrid considering waste heat recovery[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2198-2207.
- [8] WU Zhaoyuan, CHEN Lin, WANG Jianxiao, et al. Incentivizing the spatiotemporal flexibility of data centers toward power system coordination[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2023, 10(3): 1766-1778.
- [9] WAN Jianxiong, ZHOU Jie, GUI Xiang. Sustainability analysis of green data centers with CCHP and waste heat reuse systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2021, 6(1): 155-167.
- [10] TAO Ran, ZHAO Dongmei, XU Chenyu, et al. Resilience enhancement of integrated electricity-gas-heat urban energy system with data centres considering waste heat reuse[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 183-198.
- [11] LONG Xinxin, LI Yuanzheng, LI Yang, et al. Collaborative response of data center coupled with hydrogen storage system for renewable energy absorption [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 986-1000.
- [12] HU Biao, SHI Yinbin, CHEN Gang, et al. Workload-aware scheduling of real-time jobs in cloud computing to minimize energy consumption[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(1): 638-652.
- [13] MA Zhoujun, MA Di, LV Mengjie, et al. Virtual machine migration techniques for optimizing energy consumption in cloud data centers[J]. IEEE Access, 2023, 11: 86739-86753.
- [14] DE MELO DA SILVA M, GAMATIÉ A, SASSATELLI G, et al. Optimization of data and energy migrations in mini data centers for carbon-neutral computing[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2023, 8(1): 68-81.
- [15] 孙毅, 陈恺, 左强, 等. 考虑 5G 通信负荷协同优化的云边计算网络能量管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9020-9033.
SUN Yi, CHEN Kai, ZUO Qiang, et al. Energy management model of cloud-edge computing network considering the coordinated optimization of 5G communication load[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9020-9033(in Chinese).
- [16] ZHANG Shenxi, LYU Jiawei, JIN Wenguang, et al. Coordinated planning of multiple energy hubs considering the spatiotemporal load regulation of data centers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4193-4207.
- [17] YANG Ting, JIANG Han, HOU Yucheng, et al. Carbon management of multi-datacenter based on spatio-temporal task migration[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2023, 11(1): 1078-1090.
- [18] ZHANG Guanglin, ZHANG Shun, ZHANG Wenqian,

- et al. Distributed energy management for multiple data centers with renewable resources and energy storages [J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2022, 10(4): 2469-2480.
- [19] LIU Lilan, ZHANG Zhizhong, WANG Ning, et al. Online resource management of heterogeneous cellular networks powered by grid-connected smart micro grids[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 8416-8430.
- [20] YAN Dongxiang, CHEN Yue. A distributed online algorithm for promoting energy sharing between EV charging stations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1158-1172.
- [21] 杨挺, 姜含, 侯昱丞, 等. 基于计算负荷时-空双维迁移的互联多数据中心碳中和调控方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 164-176.
- YANG Ting, JIANG Han, HOU Yucheng, et al. Study on carbon neutrality regulation method of interconnected multi-datacenter based on spatio-temporal dual-dimensional computing load migration[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 164-176(in Chinese).
- [22] 陈敏, 高赐威, 郭庆来, 等. 互联网数据中心负荷时空可转移特性建模与协同优化: 驱动力与研究架构[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6945-6958.
- CHEN Min, GAO Ciwei, GUO Qinglai, et al. Modeling and coordinated optimization for spatiotemporal load regulation potentials of internet data centers: motivation and architecture[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6945-6958(in Chinese).
- [23] PEDRAM M, PAKBAZANIA E. Minimizing data center cooling and server power costs[C]//International Symposium on Low Power Electronics and Design. San Francisco: Association for Computing Machinery, 2009: 145-150.
- [24] FAN Wenhao, SU Yi, LIU Jie, et al. Joint task offloading and resource allocation for vehicular edge computing based on V2I and V2V modes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(4): 4277-4292.
- [25] ZHANG Weizhe, YADAV R, TIAN Yuchu, et al. Two-phase industrial manufacturing service management for energy efficiency of data centers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 7525-7536.
- [26] 吴云芸, 方家琨, 艾小猛, 等. 计及需求响应的数据中
心联盟共享储能规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 42-50.
- WU Yunyun, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Shared energy storage planning for data center alliance considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 42-50(in Chinese).
- [27] YAN Dongxiang, CHEN Yue. A distributed online algorithm for promoting energy sharing between EV charging stations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1158-1172.
- [28] LEE Mengyuan, MA Ning, YU Guanding, et al. Accelerating generalized benders decomposition for wireless resource allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(2): 1233-1247.
- [29] GUO Yuanxiong, FANG Yuguang. Electricity cost saving strategy in data centers by using energy storage[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(6): 1149-1160.
- [30] 深圳市发展和改革委员会. 深圳市发展和改革委员会关于进一步完善我市峰谷分时电价政策有关问题的通知[EB/OL]. (2021-12-31)[2024-06-14]. http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/tzgg/content/post_9493597.html.
- [31] TANAKA S, TAKII K. A faster branch-and-bound algorithm for the block relocation problem[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1): 181-190.



文亚凤

在线出版日期: 2025-01-24。

收稿日期: 2024-06-26。

作者简介:

文亚凤(1968), 女, 工学硕士, 副教授, 主要研究方向为电子信息与通信技术, wyf@ncepu.edu.cn;

*通信作者: 程祖铭(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力信息与通信技术, 1171992038@qq.com;

孙毅(1972), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为需求响应, 电力信息与通信技术。

(责任编辑 邱丽萍)