

文章编号: 2095-4980(2024)09-0944-08

电力物联网中时延能耗均衡的 MEC 资源调度策略

黄东海, 亢中苗, 吴赞红

(广东电网有限责任公司 电力调度控制中心, 广东 广州 510080)

摘要: 针对电力物联网中(PIoT)海量智能设备接入导致的流量激增问题, 提出一种时延能耗均衡的边缘计算(MEC)资源调度策略。综合考虑信道条件、电力设备安全温度保护机制和设备能耗等因素, 以兰道尔(Landaer)原理为基础构建设备侧的能耗模型和热功耗约束。在保证队列稳定性的前提下, 通过联合优化任务卸载决策、传输功率和计算资源分配, 最小化系统长期平均时间能耗。为解决随机优化问题, 引入李雅普诺夫(Lyapunov)理论, 将问题转化为每个时隙的确定性优化问题。仿真结果表明, 该策略相对于基准方案能够降低系统能耗, 并实现能耗与时延之间的均衡。

关键词: 电力物联网; 边缘计算; 任务卸载; 资源分配; 能耗优化

中图分类号: TM73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024023

MEC resource scheduling strategy for delay and energy consumption balancing in Power Internet of Things

HUANG Donghai, KANG Zhongmiao, WU Zanhong

(Power Dispatching Center, Guangdong Power Grid Company, Guangzhou Guangdong 510080, China)

Abstract: Aiming at the traffic surge problem caused by massive smart device access in Power Internet of Things(PIoT), a resource scheduling strategy of Mobile Edge Computing(MEC) with delay and energy consumption equalization is proposed. Considering the channel conditions, the safety temperature protection mechanism of electric equipment and the energy consumption of equipment, the energy consumption model and thermal power consumption constraints on the equipment side are constructed based on the Landaer principle. Under the premise of ensuring queue stability, the long-term average time energy consumption of the system is minimized by jointly optimizing the task offloading decision, transmission power and computational resource allocation. To solve this stochastic optimization problem, Lyapunov theory is introduced to transform the problem into a deterministic optimization problem for each time slot. Simulation results show that this strategy is able to reduce the system energy consumption relative to the baseline scheme and achieve an equilibrium between energy consumption and delay.

Keywords: Power Internet of Things; Mobile Edge Computing; task offloading; resource allocation; energy consumption optimization

电力物联网(PIoT)作为物联网技术在电力系统中的应用形式, 通过构建连接用户、各环节设备的智慧物联体系, 实现对电网、设备、用户状态信息的动态采集、实时感知和智能分析^[1]。然而, 智能巡检、在线监测等PIoT应用产生的海量感知数据对PIoT的网络性能提出了更高的要求^[2]。通过将感知数据上传至云端进行处理, 会占用大量通信资源并产生严重的传输时延, 无法满足PIoT“全面感知、互联互通、高效协同”的要求^[3]。因此, 如何对海量数据进行实时有效的处理成为当前PIoT面临的核心挑战之一。

目前, 移动边缘计算(MEC)以其低时延、高可靠性等特点被广泛应用于解决不同场景下海量智能设备接入所导致的数据流量激增问题^[4]。其中, 文献[5]针对车联网场景下紧急任务与流媒体应用数据并发带来的额外任务卸载能耗与时延问题, 基于非正交多址技术和李雅普诺夫(Lyapunov)理论构建动态任务卸载框架, 并基于精确势

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-02-26

基金项目: 南方电网公司科技基金资助项目 [036000KK52220016(GDKJXM-20220247)]

博弈理论获得最优的资源分配策略。文献[6]则基于增强现实，采用多智能体深度强化学习获得动态环境下的资源分配和任务卸载策略。然而，现有研究大多专注于 5G 公网场景，并不完全适配于 PIoT 的业务场景和需求。考虑将 MEC 引入 PIoT 中，为电力设备提供实时数据分析、智能控制和能源管理等功能，文献[7]提出了一种考虑卸载成本的配电网能量管理业务云边协同调度方法。然而，PIoT 网络中存在大量异构设备，这些设备的硬件条件和任务对时延的容忍度具有差异性且存在多终端资源竞争。当大量任务在设备本地计算时，由于芯片引起的热量具有级联效应，芯片的超负荷计算会导致设备温度升高，降低设备性能，导致计算任务中断^[8]，增加任务处理时延。而当大量任务卸载到边缘处理，MEC 服务器有限的资源可能无法满足高负载的计算需求，导致大量任务积压在 MEC 队列中，超出任务可容忍时延并增加设备和 MEC 服务器的能量消耗。因此，为保证任务的稳步处理，需要设计合理的资源调度策略，并充分考虑时延与能耗的权衡。

为解决上述问题，提出一种在线节能任务卸载与资源调度算法(Online Energy Saving Task Offloading and Resource Management, OE-TORM)，综合考虑电力设备的安全温度阈值，引入兰道尔(Landaer)原理阐述热量产生和设备计算能力之间的关系并建立电力设备的能耗模型^[9]，考虑到任务产生的随机性及信道的时变性，基于 Lyapunov 理论动态优化系统长期平均总能耗，并通过其参数 V 平衡时延与能耗之间的关系，在任务可容忍时延范围内实现系统能耗最小化。

1 系统模型

如图 1 所示，PIoT 边缘计算系统由多个智能电力设备和一个具有多核的 MEC 服务器组成。 $\kappa = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$ 为电力设备集合。

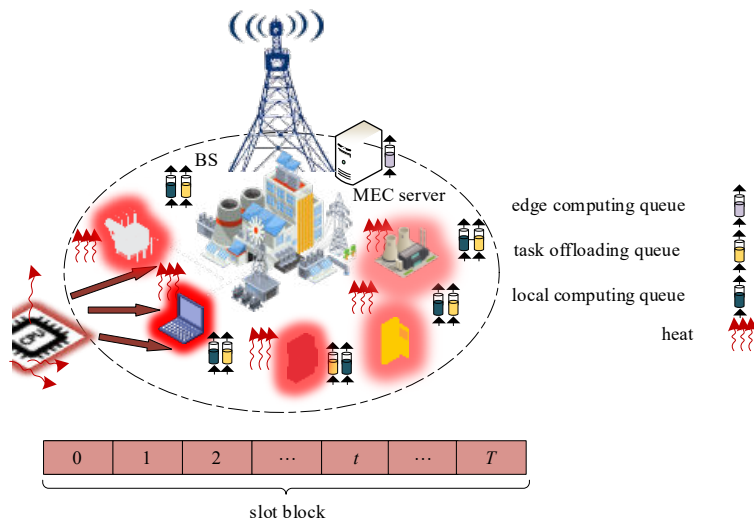


Fig.1 System model
图1 系统模型图

将时间周期划分为 T 个等长的离散时隙，每个时隙的长度为 τ 。假设任务到达服从均值为 $E[\lambda_k(t)] = \bar{\lambda}_k(t)$ 的泊松分布。为避免因长时间持续处理任务，设备温度过热导致的计算中断问题，设备将部分任务卸载至 MEC 服务器处理。

1.1 电力设备侧计算模型

假设每个数据包的长度为 l ，则设备 k 产生的数据大小为 $A_k(t) = \lambda_k(t) \cdot l$ ， $a_k^m(t)$ 和 $a_k^l(t)$ 分别为 MEC 服务器和本地处理的数据大小。则：

$$A_k(t) = a_k^l(t) + a_k^m(t) \tag{1}$$

根据 Landaer 原理可知，芯片的发热功率等于其计算功率^[9]，则时隙 t 设备 k 的能耗为：

$$E_k^l(t) = F_0 \omega E_t K_{AP} c_k^l(t) \tag{2}$$

式中： $c_k^l(t)$ 为任务量大小； K_{AP} 为逻辑运算次数； F_0 为晶体管扇出； $E_t = GL_{\text{bound}}$ ， $L_{\text{bound}} = k_B T_{\text{env}} \ln 2$ 为 Landaer 极

限, T_{env} 为环境温度, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K) 为玻尔兹曼常数。考虑到电力设备的资源有限, 当任务量超过其处理能力时, 任务进入缓冲区排队等待。动态更新每个时隙本地计算缓冲队列 $R_k(t)$, 如式(3)所示, 其中 $[x]^+ = \max(x, 0)$ 。

$$R_k(t+1) = [R_k(t) - c_k^l(t)]^+ + a_k^l(t) \quad (3)$$

$r_k^m(t)$ 为时隙 t 设备 k 将任务卸载到 MEC 服务器的传输速率, 其中 h_k 为传输增益, W 为信道带宽, P_k^u 为输出功率。

$$r_k^m(t) = \tau \cdot W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_k^u(t) h_k}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

则任务传输能耗表示为:

$$E_k^u(t) = \tau \cdot P_k^u(t) \quad (5)$$

若上一时隙任务还未完成卸载, 任务进入传输队列 $U_k(t)$ 中等待卸载。同步更新每个时隙的 $U_k(t)$ 如下:

$$U_k(t+1) = [U_k(t) - r_k^m(t)]^+ + a_k^m(t) \quad (6)$$

根据设备的热产生原理^[9], 处理设备 k 任务的总热功耗:

$$Q_k^{\text{total}}(t) = F_0 \omega E_l K_{\text{AP}} c_k^l(t) / \tau + \phi P_k^u(t) (1 - \eta) \quad (7)$$

式中: ϕ 为传热比; η 为功率放大器的效率。根据热传导理论, 智能设备的表面温度 $T_{k,\text{sur}}(t)$ 在一维非稳态过程中随 t 变化^[10], 由式(8)给出:

$$T_{k,\text{sur}}(t) = \frac{Q_k^{\text{total}}(t)}{h_{\text{air}} A} \left(1 - e^{-\frac{z\tau}{c_{\text{chip}} m}} \right) + \left(T_{k,\text{sur}}^0(t) - T_{\text{env}} \right) e^{-\frac{z\tau}{c_{\text{chip}} m}} + T_{\text{env}} \quad (8)$$

式中: h_{air} 为空气传热系数; L 为散热器长度; D 为智能设备背板厚度; $T_{k,\text{sur}}^0(t)$ 为设备 k 的初始表面温度, 且 $T_{\text{env}} \leq T_{k,\text{sur}}^0(t) < T_{\text{safe}}$; $z = 1 / \left(\frac{L}{k_1 A} + \frac{D}{k_2 A} + \frac{1}{h_{\text{air}} A} \right)$ 。为避免由设备温度过高导致任务处理中断, 设备温度必须小于温度阈值, 则 $T_{k,\text{sur}}(t) < T_{\text{safe}}$, 即:

$$Q_k^{\text{total}}(t) < C \quad (9)$$

$$C = h_{\text{air}} A / \left(1 - e^{-\frac{z\tau}{c_{\text{chip}} m}} \right) \cdot \left(T_{\text{safe}} - T_{\text{env}} - \left(T_{k,\text{sur}}^0(t) - T_{\text{env}} \right) e^{-\frac{z\tau}{c_{\text{chip}} m}} \right) \quad (10)$$

在每个时隙更新 $T_{k,\text{sur}}^0(t+1) = T_{k,\text{sur}}(t)$ 。

1.2 MEC 服务器侧模型

假设 MEC 服务器的 J 个核并行处理任务。则设备 k 在 MEC 服务器上总的计算任务量为:

$$c_k^m(t) = \tau \sum_{j=1}^J f_{k,j}^m(t) / \rho \quad (11)$$

式中: $f_{k,j}^m(t)$ 为时隙 t 内 MEC 服务器的第 j 个核分配给设备 k 的计算资源; ρ 为处理每比特任务的 CPU 周期数。

ζ_m 为芯片电容系数, MEC 服务器在时隙 t 处理任务的总能耗可以表示为:

$$E^m(t) = \tau \cdot \zeta_m \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left(f_{k,j}^m(t) \right)^3 \quad (12)$$

受资源限制, MEC 服务器无法同时处理所有任务。当卸载的任务量超过其处理能力时, 任务进入缓冲区排队等待, 动态更新每个时隙 MEC 服务器处的缓冲队列 $H_k(t)$:

$$H_k(t+1) = [H_k(t) - c_k^m(t)]^+ + r_k^m(t) \quad (13)$$

在时隙 t 中系统总能耗可以表示为：

$$E^{\text{total}}(t) = \sum_{k=1}^K [E_k^l(t) + E_k^{\text{tr}}(t)] + E^m(t) \quad (14)$$

2 问题阐述

在本节中，将多设备任务卸载和资源调度策略建模为一个随机优化问题，如式(15)所示。

$$\begin{cases} \text{P: } \min_{a, c^l, p^{\text{tr}}, f^m} \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^{T-1} E \{ E^{\text{total}}(t) \} \\ \text{s.t } C_1: Q_k^{\text{total}}(t) < C, \forall k \\ C_2: P_k^{\text{tr}}(t) \geq 0, \forall k \\ C_3: 0 \leq f_{k,j}^m(t) \leq F_{\max}^m, \forall k, j \\ C_4: c_k^l(t) \geq 0, \forall k \\ C_5: \text{所有队列 } R_k(t), U_k(t) \text{ 和 } H_k(t) \text{ 都是稳定的} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $a = \{ \{ a_k^l(t) \}, \{ a_k^m(t) \} \}$ ；约束 C_1 为安全功率约束；约束 C_3 为计算资源约束； C_5 为任务队列稳定性约束。在问题 P 中任务卸载与资源分配之间耦合^[11]，且本文所考虑网络环境为动态的，引入 Lyapunov 理论将原问题转化为每个时隙内的确定性优化问题。提出一种在线节能任务卸载与资源管理算法，如表 1 所示。

表 1 算法 1 伪代码

Table 1 Pseudocode for algorithm 1

algorithm 1 online energy-saving task uninstillation and resource management algorithm
initialize: $t=0, R(0)=0, U(0)=0, H(0)=0, T$;
1) loop
2) generate tasks to scale for each user $\lambda_k(t)$;
3) the sub-problem of user offloading solved according to equation(21);
4) according to equation (23), the local computation task $c_k^l(t)$ and the unloading transmission power $P_k^{\text{tr}}(t)$ are solved;
5) according to equation (25), (26), schedule the computing resource $f_{k,j}^m(t)$ of the edge server;
6) update all queues in the system $R(t), U(t), H(t)$;
7) $t = t + 1$;
8) until $t > T$

2.1 在线节能任务卸载与资源管理算法

定义 Lyapunov 函数如下：

$$L(\theta(t)) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K R_k^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K U_k^2(t) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K H_k^2(t) \quad (16)$$

式中 $\theta(t) = [R_k(t), U_k(t), H_k(t)]$ ，则时隙 t 的 Lyapunov 漂移函数为：

$$\Delta L(\theta(t)) = E \{ L(\theta(t+1)) - L(\theta(t)) | \theta(t) \} \quad (17)$$

引理 1：在任何控制算法下，对于所有 t ，所有 $\theta(t)$ 的可能值以及所有参数 $V \geq 0$ ，Lyapunov 漂移加惩罚项都遵循以下上界：

$$\begin{cases} \Delta L(\theta(t)) + VE \{ E^{\text{total}}(t) | \theta(t) \} \leq \\ B + \sum_{k=1}^K E \{ R_k(t) a_k^l(t) + U_k(t) a_k^m(t) | \theta(t) \} + \\ \sum_{k=1}^K E \{ V c_k^l(t) F_0 \omega E_t K_{AP} - R_k(t) c_k^l(t) + \\ V \tau \cdot P_k^{\text{tr}}(t) + [H_k(t) - U_k(t)] r_k^m(t) | \theta(t) \} + \\ \sum_{k=1}^K E \left\{ \sum_{j=1}^J \left[V \tau \zeta_m (f_{k,j}^m(t))^3 - \tau \frac{H_k(t)}{\rho} f_{k,j}^m(t) \right] | \theta(t) \right\} \end{cases} \quad (18)$$

式中： V 为 Lyapunov 控制参数，可表征队列稳定性和系统平均时间总能耗之间的平衡；在所有时隙中， B 为常数

且满足式(19):

$$B \geq \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K E \{ a_k^l(t)^2 + c_k^l(t)^2 | \theta(t) \} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K E \{ a_k^m(t)^2 + r_k^m(t)^2 | \theta(t) \} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K E \{ r_k^m(t)^2 + c_k^m(t)^2 | \theta(t) \} \quad (19)$$

2.2 瞬时优化子问题

将问题 P 解耦为任务卸载决策、设备侧资源分配, 服务器侧资源分配 3 个子问题求解。

2.2.1 在线任务卸载决策

将在线任务卸载决策子问题表述为问题 P1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{P1: } \min_a \sum_{k=1}^K [R_k(t) a_k^l(t) + U_k(t) a_k^m(t)] \\ \text{s.t. } a_k^l(t) + a_k^m(t) = A_k(t) \end{array} \right. \quad (20)$$

由于问题 P1 为一个线性规划问题, 因此可以直接求解出最优的任务卸载决策。

$$\left\{ \begin{array}{l} a_k^{l*}(t) = A_k(t), \quad a_k^{m*}(t) = 0, \quad \text{if } (R_k^l(t) \leq U_k^m(t)) \\ a_k^{l*}(t) = 0, \quad a_k^{m*}(t) = A_k(t), \quad \text{if } (R_k^l(t) > U_k^m(t)) \end{array} \right. \quad (21)$$

2.2.2 设备侧资源分配

综合考虑设备有限的计算资源和安全中断保护机制, 将设备侧资源分配子问题表述为问题 P2:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{P2: } \min_{c^l, P^u} \sum_{k=1}^K \{ V c_k^l(t) F_0 \omega E_i K_{AP} - R_k(t) c_k^l(t) + V \tau \cdot P_k^u(t) + [H_k(t) - U_k(t)] r_k^m(t) \} \\ \text{s.t. } Q_k^{\text{total}}(t) < C, \forall k \\ P_k^u(t) \geq 0, \forall k \\ c_k^l(t) \geq 0, \forall k \end{array} \right. \quad (22)$$

由于问题 P2 为非凸的, 因此联合拉格朗日乘子法和卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件进行求解, 获得最优本地处理任务量和最优传输功率如下:

引理 2: 若 $[U_k(t) - H_k(t)] \tau W \cdot \frac{h_k}{\sigma^2 \ln 2} > V \tau + \alpha_k$, 则存在最优传输功率 $P_k^{u*}(t) > 0$, 满足式(23):

$$[U_k(t) - H_k(t)] \tau W \cdot \frac{h_k}{(\sigma^2 + P_k^{u*}(t) h_k) \ln 2} = V \tau + \alpha_k^* \quad (23)$$

否则, $P_k^{u*}(t) = 0$ 。此外, $\alpha_k^* = 0$, 满足 $Q_k^{\text{total}}(t) < C$, $c_k^{l*}(t) < \frac{\tau(C - P_k^{u*}(t) - P_{\text{system}}(t))}{F_0 \omega E_i K_{AP}}$ 。

2.2.3 MEC 服务器侧资源分配

将服务器侧资源调度子问题表示为问题 P3:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{P3: } \min_{f^m} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \left[V \zeta_m (f_{k,j}^m(t))^3 - \frac{H_k(t)}{\rho} f_{k,j}^m(t) \right] \\ \text{s.t. } 0 \leq f_{k,j}^m \leq F_{\text{max}}^m, \forall k, j \end{array} \right. \quad (24)$$

将该问题分解为 J 个独立的子问题求解, 并导出设备 k 占用其计算资源时的最优中央处理器(Central Processing Unit, CPU)频率闭式解, 如式(25)所示:

$$f_{k,j}^{m*}(t) = \min \left(\sqrt{\frac{H_k(t)}{3\rho V \zeta_m}}, F_{\text{max}}^m \right) \quad (25)$$

由于在一个时隙, 一个 CPU 核仅服务于一个设备, 因此 $\forall k, j$, CPU 核调度的最优频率可通过以下方法解决:

$$f_{k,j}^{m*}(t) = \begin{cases} f_{k,j}^{m*}(t), & O(f_{k,j}^{m*}(t)) = \min_{k' \in K} O(f_{k',j}^{m*}(t)) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

其中 $O(f_{k,j}^{m*}(t))$ 如式(27)所示：

$$O(f_{k,j}^{m*}(t)) = V \zeta_m (f_{k,j}^{m*}(t))^3 - \frac{H_k(t)}{\rho} f_{k,j}^{m*}(t) \quad (27)$$

3 仿真分析

本节通过相关仿真实验对所提方案的性能进行评估。假设电力设备数量 $K=4$ ，任务的到达率为每秒 [20, 160] 个，信道带宽 $W=20$ MHz，其余仿真参数如表 2 所示^[10]。

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

parameter	value
transistor fan-out F_0	4
transistor activity factor ω	0.2
logical operand per bit of the task K_{AP} /(cycles·bit ⁻¹)	10^8
the environment temperature T_{env}/K	300
safe temperature T_{safe}/K	318
radiator area A/cm^2	1
air heat transfer coefficient $h_{air}/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	26.3
chip specific heat $c_{chip}/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1 030
chip quality m/g	1
heat sink thermal conductivity $k_i/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	401
thermal conductivity of the smart device backplane $k_2/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	130
radiator length L/mm	2
initial device surface temperature $T_{sur}^0(0)/K$	T_{env}
MEC maximum CPU frequency of the core F_{max}^m /(cycles·s ⁻¹)	10 G
number of MEC cores J	[2, 10]
number of CPU cycles per bit ρ /(cycles·bit ⁻¹)	737.5
chip capacitance factor ζ_m	10^{-28}

然后，将所提算法与 3 种基准方案进行比较，即仅本地计算：任务仅在本地执行；仅边缘计算：任务全部卸载到边缘执行；基于精确势博弈的信道接入和功率控制决策联合优化算法(Joint optimization algorithm of Channel Access and Power Control decision based on exact potential game, JCAPC)：任务被卸载到边缘进行处理，区别于仅边缘计算，JCAPC以设备侧数据缓冲区的稳定性为前提优化了设备的传输功率^[5]。为了观察所提方案在不同任务到达率下的能耗和时延性能，根据 Little 定律，将时间平均时延近似为式(28)，可以看出时延与队列长度成正比。

$$D_k = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^{T-1} E \{R_k(t) + U_k(t) + H_k(t)\}}{\bar{\lambda}_k} \quad (28)$$

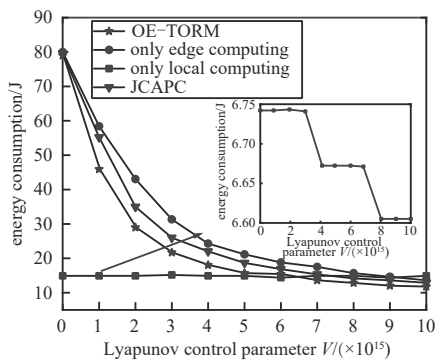


Fig.2 Relationship between system energy consumption and control parameters V
图 2 系统能耗与控制参数 V 的关系图

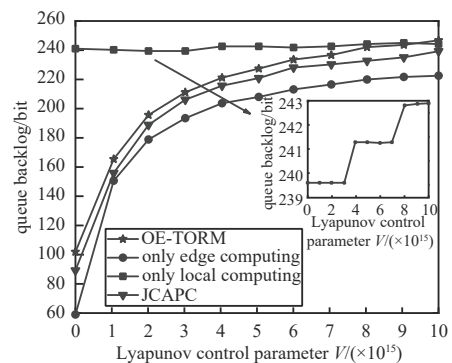


Fig.3 Relationship between queue backlog and control parameters V
图 3 队列积压与控制参数 V 的关系

图 2 和图 3 展示了参数 V 与系统时间平均能耗和队列积压的关系。可以看出随着 V 的增加系统总能耗呈下降趋势，而队列积压呈上升趋势。这是因为 V 作为权重，其大小决定了目标函数值的优劣。当 V 较小时，系统总能耗较大，但时延相对较低；反之，随着 V 的增大，目标函数惩罚越重，总能耗随之减小。因此，合理的 V 值可以使时延与能耗达到均衡。此外，由于 OE-TORM 同时考虑了设备和 MEC 服务器侧系统队列的稳定性，并动态分配每个时隙的资源，OE-TORM 算法在时延和能耗性能方面优于基准算法。

从图 4 可以看出，系统能耗随 λ 的增加而增加。与基准方案相比，OE-TORM 在能耗方面表现最优。当 $\lambda = 14 \times 10^7$ 左右时，仅本地执行的能耗小于仅边缘计算和 JCAPC。因为随着 λ 的增加，本地计算资源逐渐达到瓶颈，无法处理更多的任务，能耗增加趋势趋于平缓。

从图 5 可以看出，队列时延随 λ 的增加而增大。仅边缘计算的队列积压大于 JCAPC，因为在 JCAPC 中优化了设备侧的传输功率控制策略，可以根据设备侧数据缓冲区的拥塞情况自动调整数据吞吐量，从而保证队列的稳定性，减少队列积压。

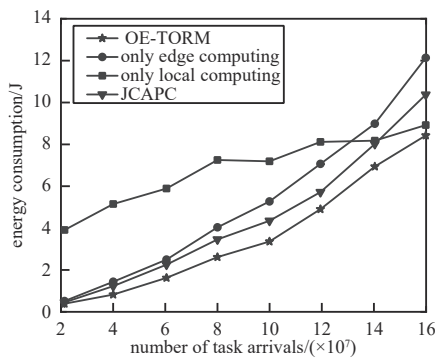


Fig.4 Relationship between energy consumption and task arrival rate

图4 能耗与任务到达率的关系

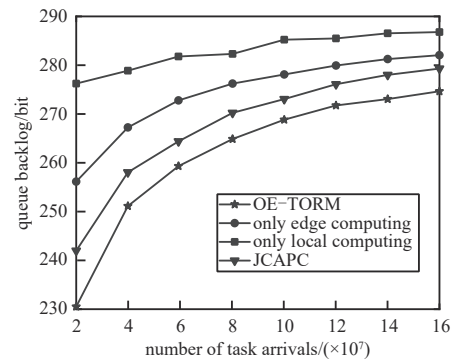


Fig.5 Relationship between queue backlog and task arrival rate

图5 队列积压与任务到达率的关系

4 结论

本文研究了 PiOT 网络中的动态资源调度问题。通过引入 MEC 设计了一种在线节能任务卸载与资源调度算法。考虑到电力设备的安全温度阈值和系统队列稳定性，根据 Landaer 原理构建设备侧的热功耗中断约束模型，基于 Lyapunov 理论和拉格朗日乘子法，将系统能耗最小化问题解耦为一系列确定性优化子问题进行求解。仿真表明，相较于基准方案，所提方案在减小系统能耗和时延方面具有更好的性能。

参考文献：

- [1] 仝杰,齐子豪,蒲天骄,等. 电力物联网边缘智能:概念、架构、技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2024,44(14):5473-5496. (TONG Jie, QI Zihao, PU Tianjiao, et al. Edge intelligence to power Internet of Things: concept, architecture, technology and application[J]. Proceedings of the CSEE, 2024,44(14):5473-5496.) doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.231196.
- [2] SUN Haoran, GENG Suiyan, LIU Jiayan, et al. Joint device association and trajectory optimization for multi-UAV enabled power transmission and distribution scenarios[C]// 2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI). Wuhan, China: IEEE, 2023:546-550. doi:10.1109/EEI59236.2023.10212838.
- [3] HUANG Guozheng, CHEN Gang, YI Jin, et al. Workload modelling method of edge computing terminals for distribution service under power Internet of Things[C]// 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chongqing, China: IEEE, 2021:430-435. doi:10.1109/ACPEE51499.2021.9436893.
- [4] 李飞翔, 李宁, 刘明哲, 等. 基于边缘计算技术的智能无人系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(1):80-86. (LI Feixiang, LI Ning, LIU Mingzhe, et al. Intelligent unmanned system based on Edge Computing technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(1):80-86.) doi:10.11805/TKYDA2021402.
- [5] 曾耀平, 江伟伟, 刘月强, 等. 面向车辆边缘网络中的任务动态卸载算法[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(14):267-274. (ZENG Yaoping, JIANG Weiwei, LIU Yueqiang, et al. Dynamic offloading algorithm for tasks in vehicle edge networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(14):267-274.) doi:10.3778/j.issn.1002-8331.2304-0351.
- [6] CHEN Xing, LIU Guizhong. Energy-efficient task offloading and resource allocation via deep reinforcement learning for augmented reality in mobile edge networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(13): 10843-10856. doi: 10.1109/IIOT.2021.3050804.

- [7] 姚楠,刘子全,秦剑华,等. 基于电力物联网的边缘计算任务卸载优化[J]. 科学技术与工程, 2022,22(16):6577-6584. (YAO Nan,LIU Ziquan,QIN Jianhua,et al. Offloading optimization of the edge computing task based on the power Internet of Things[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(16):6577-6584.) doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2022.16.025.
- [8] LUO Jia,CHEN Qianbin,TANG Lun,et al. Adaptive resource allocation considering power consumption outage:a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023,72(6):8111-8116. doi:10.1109/TVT.2023.3237730.
- [9] YANG Jing,ZHONG Yi,GE Xiaohu,et al. Power-consumption outage challenge in next-generation cellular networks[C]// 2019 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM). Waikoloa,HI,USA:IEEE, 2019:1-6. doi:10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013860.
- [10] YANG Jing,GE Xiaohu,THOMPSON J,et al. Power-consumption outage in beyond fifth generation mobile communication systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021,20(2):897-910. doi:10.1109/TWC.2020.3029051.
- [11] LU Junyu,LI Qiang,GUO Bing,et al. A multi-task oriented framework for mobile computation offloading[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2022,10(1):187-201. doi:10.1109/TCC.2019.2952346.

作者简介:

黄东海(1994-),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为电力通信、电力物联网、光网络传输技术.
email:743553069@qq.com.

亢中苗(1986-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力通信、光传输网络、电力通信网络管控技术等.

吴赞红(1973-),男,学士,高级工程师,主要研究方向为电力通信、光网络传输技术等.

(上接第943页)

作者简介:

吉用华(1997-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为卫星通信,email:1221014533@njupt.edu.cn.

张晨(1985-),男,博士,高级工程师,主要研究方向天地一体化网络、卫星资源分配.

张更新(1967-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为天地一体化网络、卫星物联网.