



基于 5G+MEC 的电网边缘计算平台任务安全性调度方法

谢石木林¹, 白杰², 张翔¹, 汤泽毅¹, 粘为帆¹, 刘旭杰¹

(1. 国网信通亿力科技有限责任公司, 福建 福州 350001;

2. 国网信息通信产业集团有限公司, 北京 100052)

摘要: 为保证电网边缘计算平台任务调度的安全性以及任务调度所需的数据质量, 提出基于 5G+MEC 的电网边缘计算平台任务安全性调度方法。结合机密性服务和完整性服务, 构建任务调度安全等级模型, 约束调度任务队列调度传输过程中的风险, 实现 5G 核心网的安全传输; 确认优先级队列类型, 选择最小化队列与最大队列, 进行数据资源最大化支持、MEC 设备端的任务调度, 构建分布式任务调度模型, 并利用 Lyapunov 候选函数提升任务调度的稳定性, 通过交替方向乘子法求解模型, 获取任务安全性调度最优解。测试结果表明, 应用该方法后, 风险概率结果均在 0.15~0.35 的范围波动, MEC 设备提供的相关数据与核心服务器调度任务的拟合程度均高于 0.92; 任务调度数据的质量分值也高于 0.94。

关键词: 5G+MEC; 平台任务; 安全性调度; 队列优先级; 调度最优解

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022262

Task security scheduling method for 5G+MEC based grid edge computing platform

XIE Shimulin¹, BAI jie², ZHANG Xiang¹, TANG Zeyi¹, NIAN Weifan¹, LIU Xujie¹

1. State Grid Info-Telecom Great Power Science and Technology Co., Ltd., Fuzhou 350001, China

2. State Grid Information & Telecommunication Group Co., Ltd., Beijing 100052, China

Abstract: In order to ensure the security of task scheduling of grid edge computing platform and the data quality required by task scheduling, a task security scheduling method of grid edge computing platform based on 5G + MEC was proposed. Combined with confidentiality service and integrity service, the security level model of task scheduling was constructed to restrict the risk in the process of scheduling and transmission of scheduling task queue, so as to realize the secure transmission of 5G core network. The priority queue type was confirmed, the minimum queue and the maximum queue was selected, the maximization of data resources and the task scheduling of MEC equipment was supported, and a distributed task scheduling model was built. Using Lyapunov candidate function to improve the stability of task scheduling, and the model was solved by alternating direction multiplier method to obtain the optimal solution of task security scheduling. The test results show that after the application of this method, the risk probability results fluctuate in the range of 0.15~0.35, and the fitting degree between the relevant data provided by MEC equipment and the scheduling task of core server is higher than 0.92, the quality score of task scheduling data is also higher than 0.94.

Key words: 5G + MEC, platform task, security scheduling, queue priority, scheduling optimal solution

0 引言

MEC 平台是一种开放的计算平台,引入多种数据源,集成了多种功能,包括网络能力、计算能力、存储能力等^[1]。边缘计算平台能够极大地提升数据的处理能力,降低云端的计算负荷,并且由于其靠近用户响应侧,响应速度更快,在边端即可完成任务计算。电力系统是一个运行复杂的系统,会产生海量的数据以及大量的运行和管理任务^[2],因此,在当下建设智能电网的目标下,5G 被大量用于电网运行管理,并且和 MEC 作为 5G 新基建的核心特征,能够实现高密度、海量和低时延的任务处理。MEC 依据 5G 网络就近部署,在网络的边缘部署计算执行平台和存储服务器^[3],实现电力数据、任务的计算和调度。由于 MEC 平台是开放性平台,在计算和交互过程中,一旦被恶意篡改,会导致电力系统产生较大损失,因此,保证边缘计算平台在任务调度过程中的安全性尤为重要^[4]。简琤峰等^[5]和马垵银等^[6]针对任务调度展开研究,分别利用改进的天牛须粒子群算法和基于深度强化学习与概率性能感知的方法完成任务调度。但是上述方法在实现调度过程中,对于调度的安全性仍需进一步验证。因此,本文提出基于 5G+MEC 的电网边缘计算平台任务安全性调度方法,该方法结合 5G 网络的优势,实现 MEC 服务器与边缘计算设备之间的任务调度,并且,在边缘计算设备端构建安全等级模型,用于保证任务调度过程中的安全性。

1 电网边缘计算平台任务安全性调度方法

1.1 基于 5G+MEC 的安全性分布式任务调度模型

1.1.1 模型结构

本文采用分布式任务调度模型完成电网边缘计算平台任务安全性调度,该调度通过 MEC 核心服务器和边缘计算平台(MEC 平台)协同完成;

核心服务器在实行任务调度的过程中,会与多个 MEC 平台之间发生任务调度,该调度主要在服务器端执行,也可通过边缘计算设备端辅助执行,任务安全调度模型如图 1 所示。

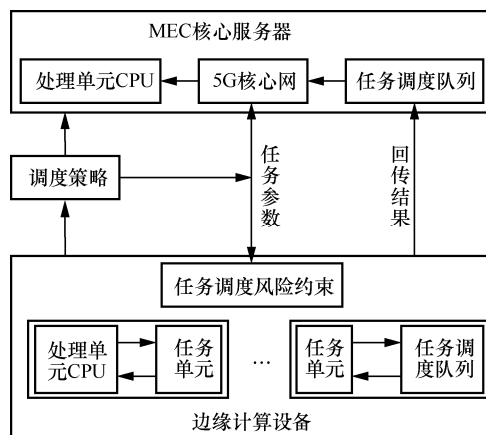


图 1 任务安全调度模型

需要执行调度的任务类别位于 MEC 核心服务器端,MEC 平台则作为 MEC 设备端,包括任务单元和处理单元。任务单元与处理单元互为支撑,MEC 核心服务器选取任务调度列表中的任意一项任务后,将其相关数据通过 5G 核心网传送到 MEC 设备^[7],共同确定任务调度策略;调度策略确定后,两者依据策略分别执行各自需执行的任务调度内容,最后 MEC 设备端的调度执行结果需回传至核心服务器端。

1.1.2 任务调度风险约束

MEC 设备任务调度过程中,每一个任务调度之间存在时间差,即表示各个任务的调度时间间隔 t ,在每一个时间间隔下,任务的调度会随之更新^[8],因此本文通过任务队列模型描述任务调度过程。任务在调度过程中,MEC 设备需向 MEC 核心服务器提供相关数据,该数据用 $\{x_i | i=1,2,\dots,N\}$ 表示,则 $x_i(t)$ 表示 t 时刻任务调度形成的数据信息,对该信息实行优先级划分,将其分配至相对应的队列中。队列类型数量用 Q 表示,包含优先级由高至低的队列数据,其集合



为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。正在执行调度的任务队列用 q_i 表示, 执行调度的 MEC 设备用 $s(q_i)$ 表示, 其在任务调度完成后, 通过 5G 核心网将调度的结果传送至 MEC 核心服务器^[9]。在该传送过程中, 会面临欺骗和篡改等恶意攻击, 通过该类攻击能够控制边缘计算设备的部分权限, 篡改任务数据, 因此, 本文为保证边缘计算平台任务调度的安全性^[10], 结合机密性服务和完整性服务, 构建任务调度安全等级模型, 约束调度任务队列调度传输过程中的风险^[11], 实现 5G 核心网的安全传输。

机密性和完整性服务算法分别用 C_s 和 I_s 表示, 且 $C_s = \{c_s(1, c, f), c_s(2, c, f), \dots, c_s(N(C_s)c, f)\}$, $I_s = \{i_s(1, c, f), i_s(2, c, f), \dots, i_s(N(I_s)c, f)\}$, $N(j)$, $j \in \{C_s, I_s\}$ 表示数量, 且对应安全性服务可使用算法; $N(C_s)$ 表示数量, 其对应机密性加密算法。其中, c 和 f 分别表示 CPU 核数和其频率, 且属于安全性服务。

在 5G 传输风险等级模型中, 定义安全等级的函数为风险概率, 其在任意时间间隔下的分布情况需满足泊松概率分布, 基于此可采用指数分布 5G 传输的风险概率, 其计算式为:

$$P(q_i, sl_i^l) = 1 - \exp(-\lambda^l (1 - sl_i^l)), l \in (c_s, i_s) \quad (1)$$

其中, sl_i^l 为安全等级, 对应第 i 个加密算法, 且属于安全性服务 l ; λ 为风险系数, 其为负值时, 表示设备发生入侵概率, 该概率随着 $1 - sl_i^l$ 的增加而增加; q_i 为正在执行调度的任务队列。因此, 给定的任务调度序列 $Q(t)$ 的 5G 传输风险概率计算式为:

$$P(Q(t)) = 1 - \prod_{l \in (c_s, i_s)} (1 - P(q_i, sl_i^l)) \quad (2)$$

$$P(Q(t)) = 1 - \prod_{q_i \in T} (1 - P(q_i)) \quad (3)$$

$P(Q(t))$ 的风险概率结果需满足安全约束条件:

$$P(Q(t)) \leq \theta \quad (4)$$

其中, θ 为安全约束, 该值可依据任务数据的敏感程度设定, 其取值范围为 $[0, 1]$, 结果越接近 1, 表示安全约束标准越高。

1.2 分布式任务调度模型

1.2.1 模型构建

在整个任务调度过程中, 以保证调度的安全性为基础, 综合衡量任务队列优先级、队列容量、调度时间、调度能耗^[12], 确认优先级队列类型, 选择最小化队列与最大队列, 满足队列容量、调度时间、调度能耗的约束下, 实现在最小化调度时间完成任务调度的最大化, 其目标函数为:

$$\arg \min \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} T_{CE} P(Q(t)) q_s \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} B_{CE} \leq B$$

$$\max U_i = \sum_{i \in Q} x_i \cdot u_i(t) P(Q(t)) q_s \quad (6)$$

其中, 式 (5) 为调度时间最小化, 式 (6) 为任务调度最大化; T_{CE} 为任务调度、结果反馈以及 5G 传输风险造成的预期时延, 对应任务 i , 且在 t 间隔下; τ 为时间变化幅度; B_{CE} 和 B 均为能量消耗, B_{CE} 对应任务分别调度至 MEC 设备和 MEC 核心服务器后两者的处理, B 对应预算; $u_i(t)$ 为效用, 对应任务 i , 且在 t 间隔下; q_s 为最大队列优先级队列类型。

由于任务的调度需要 MEC 核心服务器端和 MEC 设备端协同完成, 因此, 两者在执行任务调度时^[13], MEC 核心服务器端希望 MEC 设备端能够最大限度提供任务的相关数据量。但是, 如果任意一个 MEC 设备能够无约束地为核心服务器完成任务, 则会影响整个模型的任务调度性能^[14]。因此, 处理考虑式 (4) 和式 (5) 的目标函数外, 还需结合 MEC 核心服务器的任务调度目标函数为数据资源 $x_i(t)$ 最大化支持、MEC 设备端的任务调度质量, 且后者结合任务量和设备能耗后确定,

两者的目标函数计算式分别为:

$$\max_{x_i} \sum_{i=1}^N \ln(1+x_i T) \quad (7)$$

$$\max_{x_i} \alpha_i x_i T - \beta_i B_{CE}, \forall 1 \leq i \leq N \quad (8)$$

其中, α_i 和 β_i 均为权衡参数, 属于边缘计算设备 i ; 边缘计算设备 i 能耗用 $B_{CE} = q f_i^3 t$ 表示, 其中 f_i 为时钟频率, 对应边缘计算设备的任务执行所需。

各个边缘计算设备在任务执行过程中, 需满足式 (9) 的最大频率约束条件; 边缘计算设备向核心服务器提供任务数据时, 需满足式 (10) 数据的质量约束条件, 两个约束条件的计算式分别为:

$$f_i \leq f_i^{\max}, \forall 1 \leq i \leq N \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N \mu_i x_i t \geq C \quad (10)$$

其中, $f_i^{\max}$ 为允许的频率上限值; μ_i 为数据质量分值, 对应边缘计算设备; C 为要满足的质量分值, 为常数。

1.2.2 任务调度优化

任务调度优化主要目标是最小化任务队列和提高调度的稳定性。在对任务队列实行调度过程中, 由于队列 Q 需要不断更新, 因此, 为保证队列调度的稳定性, 本文采用李雅普诺夫 (Lyapunov) 候选函数提升任务调度的稳定性。

定义 t 时刻的虚拟队列 $P(t)$, 任务队列调度稳定性与 Lyapunov 候选函数的大小有关, 后者值越大则前者稳定性越差, 在调度过程中, $Q(t)$ 和 $P(t)$ 两个队列应该分别保持有界和与一个常数 k 接近, 为了保证任务队列的最小化以及稳定性, Lyapunov 候选函数的计算式为:

$$L(t) = \frac{1}{2} (Q(t)^2 + (P(t) - k)^2) \quad (11)$$

其中, k 为常数, 用于保证 $P(t)$ 接近程度。

由于任务调度和结果反馈, 以及 5G 传输而带来的时延问题, 任务调度队列会发生动态变化, 其方式为递归状态; 在递归状态下, 随着时间的

变化 $Q(t)$ 的队列积压会发生变化, 其计算式为:

$$Q(t+1) = [Q(t) - C'_t - E'_t + X_e(t)]^+ \quad (12)$$

其中, C'_t 和 E'_t 均为数量集合, C'_t 对应 MEC 核心服务器处理的调度任务, E'_t 对应边缘计算设备的任务处理; $X_e(t)$ 为 t 时刻的新增调度任务。

在调度过程中^[15], 被调度的任务会随着时间的增加而逐渐出现上述队列积压情况, 在此过程中, 边缘计算设备和 MEC 核心服务器也会被分配调度任务, 完成调度任务后, 任务队列表中删除该任务。 $P(t)$ 随着时间的增加, 其计算式为:

$$P(t+1) = [P(t) - B_{CE} + e(t)]^+ \quad (13)$$

其中, $e(t)$ 为能量预算。

为保证任务队列调度的稳定性, 需保证调度过程中 Lyapunov 函数由 t 至 $t+1$ 时刻中的漂移最小化, 其计算式为:

$$\Delta(L(t)) = E[L(t+1) - L(t)] \quad (14)$$

其中, $\Delta(L(t))$ 为最小化漂移。

在整个调度过程中, 核心服务器执行任务调度时的任务数量集合、MEC 设备处理的任务数量集合、新增加的任务均为有界状态, 并且限制常数 ψ 大于 0, 此时所有 t 时刻均满足式 (14):

$$\Delta(L(t)) \leq \frac{1}{2} [(C'_t + E'_t)^2 + X_e(t)^2 + B_{CE}^2 + e(t)^2] - E[Q(t)(C'_t + E'_t) + (P(t) - k)B_{CE}] \quad (15)$$

其中,

$$\psi = \frac{1}{2} [(C'_t + E'_t)^2 + X_e(t)^2 + B_{CE}^2 + e(t)^2] \quad (16)$$

其中, $\Delta(L(t)) < 0$ 时, 表示模型的调度处于稳定状态。因此, $\Delta(L(t))$ 需满足式 (17):

$$\Delta(L(t)) \leq \theta - E[Q(t)(C'_t + E'_t) + (P(t) - k)B_{CE}] \quad (17)$$

1.3 模型求解

构建模型后, 采用交替方向乘子法求解模型, 该方法是一种约束问题的最优求解方法, 该算法在求解过程中, 通过内外两部分循环迭代, 完成



模型求解,其步骤如下。

输入: 初始内外迭代循环次数 ϕ 和 φ 、时间间隔 t 以及激励参数 $\mathcal{G}_i$, 其取值分别为 0、1 s 和 0。

输出: 安全调度结果。

(1) 通过外部迭代循环,获取 MEC 核心服务器的任务调度参数 x^ϕ , 同时更新激励参数 $\mathcal{G}^{\phi+1}$, 并将更新结果扩散至每一个 MEC 设备端。

(2) 实行内部迭代循环,通过 MEC 核心服务器求解对偶参数 $\xi^\phi(\varphi+1)$, 并完成该参数的更新,同时扩散至每一个 MEC 设备端。

(3) 调整此时的激励参数 $\mathcal{G}_i^\phi$ 。

(4) 循环执行上述步骤,求解并更新任务安全性调度最优解 x_i^ϕ , 同时更新激励参数 $\mathcal{G}_i^\phi$ 。

2 实验分析

为判断本文方法的边缘计算平台任务调度性能和效果,将本文方法用于某智能电网企业,对其边缘计算任务实行安全调度,并获取相关的调度结果,依据该结果判断本文方法的性能和应用效果。

本文方法在实行任务安全调度前,需先确定安全风险等级,该等级决定模型的执行效率,等级越高执行效率越低,等级越低执行效率越高,同时风险概率也越高,因此,确定最合理的安全等级,在保证风险概率最小的情况下,实现模型最高的执行效率。获取本文方法在不同的安全等级下,对不同数量的任务调度队列实行调度的执行速度,安全调度执行效率测试结果如图 2 所示。

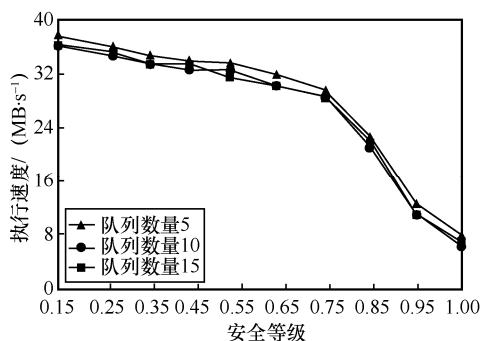


图2 安全调度执行效率测试结果

分析图 2 可知,在相同的安全等级下,随着调度任务队列数量的增加,安全调度执行效率之间的差距较小,因此,任务的队列数量对于执行效率的影响较小;在相同的任务队列数量下,随着安全等级的增加,执行效率逐渐下降,当安全等级为 0.75 时,执行效率为 30 MB/s 左右;当安全等级继续下降为 0.95 时,执行效率显著下降,为 12 MB/s 左右;综合衡量整个安全等级对应的执行效率和风险概率要求,安全等级为 0.15 时的结果与 0.75 时的结果差距较小。因此,确定模型的安全等级约束为 0.75,并用于后续测试。

为衡量本文方法的任务调度安全性,获取本文方法在不同的任务队列数量下,随着攻击次数的逐渐增加,算出 MEC 设备任务调度的风险概率结果,并将其与任务调度前全部由核心节点进行计算的性能作对比,任务调度前后的风险概率测试结果如图 3 所示。

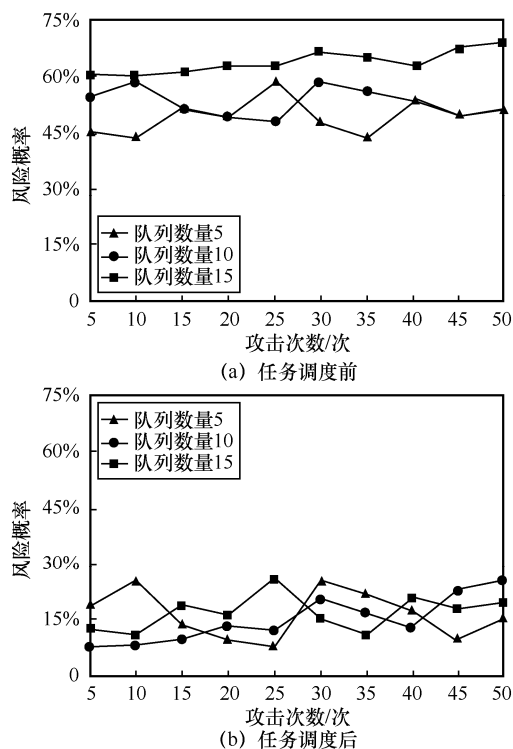


图3 任务调度前后的风险概率测试结果

分析图 3 可知,任务调度前全部由核心节点进行计算,在不同任务队列数量下,随着攻击次

数的逐渐增加, 风险概率结果呈现逐渐升高的趋势, 风险概率高于 0.45。而应用本文方法进行任务调度后, 风险概率结果呈现较为稳定的波动状态, 均在低于 0.35 的范围波动。该结果满足式(4)的安全约束标准, 因此, 本文方法具备良好的安全性, 能够保证任务的安全调度。

本文模型在实行调度过程中, 需通过核心服务器和 MEC 设备协同完成, MEC 设备需为核心服务器提供相关的任务调度数据。因此, 本文采用校正 R^2 值作为评价指标, 评价 MEC 设备提供的相关数据与核心服务器调度任务的拟合程度(期望标准为 0.9 以上), 以此衡量本文方法的调度性能, 调度性能测试结果如图 4 所示。

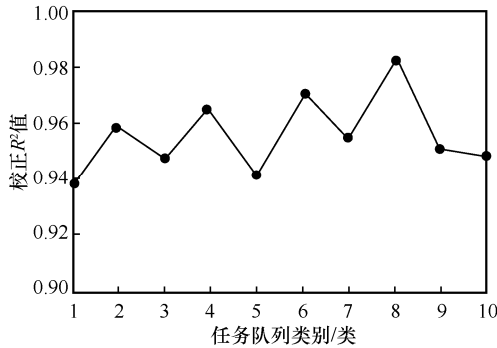


图4 调度性能测试结果

分析图 4 测试结果可知, 随着任务队列类别的不断增加, 校正 R^2 值的结果均在 0.92 以上, 即使调度任务队列的类别达到 10 类时, 校正 R^2 值的结果依旧为 0.95 左右。因此, 本文方法具备良好的调度性能, MEC 设备提供的相关数据与核心服务器调度任务的拟合程度均高于 0.92。

为进一步测试本文方法的调度性能, 以负载均衡作为评价指标, 衡量本文方法在不同的边缘设备数量下, 随着新增任务的逐渐增加, 均衡效果测试结果如图 5 所示。该评价指标的计算式为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^M (X_i - \bar{X})^2 / M} \quad (18)$$

其中, M 为数量, 对应边缘计算设备; X_i 和 $\bar{X}$ 均为 MEC 设备的调用次数, X_i 对应第 i 个, $\bar{X}$ 对

应全部; σ 为负载标准方差, 该值越大表示均衡效果越差, 反之则均衡效果越好(期望标准为低于 0.15)。

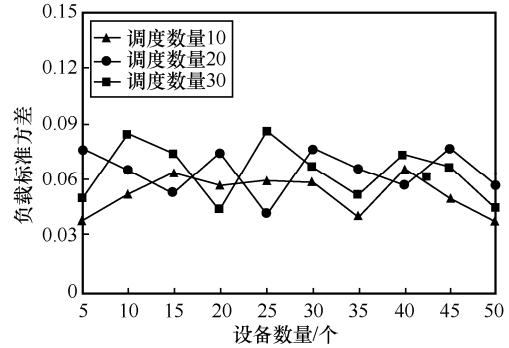


图5 均衡效果测试结果

分析图 5 可知, 在不同的 MEC 设备数量下, 随着调度任务数量的逐渐增加, σ 的计算结果均在 0.1 以下波动, 没有发生较大的波动变化。因此, 本文方法具备良好的均衡效果, 该结果也间接表明本文方法在调度过程中具备良好的稳定性。

为测试本文方法的调度效果, 以调度的数据质量作为衡量标准, 测试本文方法在完成不同数据量的提供时, 质量分值结果(期望标准为 0.88 以上)。调度数据的质量分值测试结果如图 6 所示。

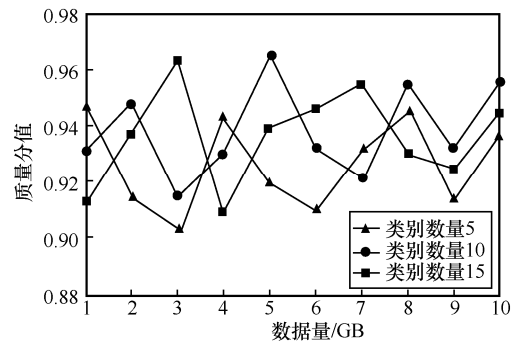


图6 调度数据的质量分值测试结果

分析图 6 可知, 随着提供给数据量的逐渐增加, 质量分值的结果均在期望标准结果以上, 即使数据量在 10 GB 时, 质量分值也达到 0.94 以上; 并且任务类别的增加, 并没有影响数据的质量结果。因此, 本文方法具备良好的任务调度效果, 在保证安全的情况下, 实现任务的高质量调度。



3 结束语

电力系统在实行边缘计算时, 需要依据边缘计算设备和核心服务区协同完成计算任务的调度, 边缘计算设备需提供与任务相关的数据, 该数据需通过网络传送至核心服务器, 为保证在整个调度过程中的安全性, 本文提出基于 5G+MEC 的电网边缘计算平台任务安全性调度方法。经测试, 本文方法具备良好的安全性能, 能够保证调度过程中网络的安全通信, 调度性能良好, 负载标准方差值均在期望标准以下, 并且调度后的任务数据具备良好的质量。

参考文献:

- [1] 王旭亮, 武宇亭, 任宏丹. 基于 5G+MEC 的数字化 PaaS 赋能平台在智慧安防的应用研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(6): 6-11, 15.
WANG X L, WU Y T, REN H D. Research on application of digital PaaS enabling platform based on 5G+MEC in intelligent security[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(6): 6-11, 15.
- [2] 庞慧, 赵巍. 5G 网络下的大数据高效 HCS 模型及算法仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(7): 350-353, 379.
PANG H, ZHAO W. Big data efficient hybrid cloud storage model and algorithm simulation under 5G network[J]. Computer Simulation, 2020, 37(7): 350-353, 379.
- [3] 李蕾, 闻征涛, 任容玮. 基于 5G 和 MEC 边缘云的智慧商超[J]. 电信科学, 2019, 35(S2): 143-148.
LI L, WEN Z T, REN R W. Intelligent quarterly super based on 5G and MEC edge cloud[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(S2): 143-148.
- [4] 张蕾, 刘云毅, 张建敏, 等. 基于 MEC 的能力开放及安全策略研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(6): 1-5.
ZHANG L, LIU Y Y, ZHANG J M, et al. Research on capability exposure and security strategy based on MEC[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(6): 1-5.
- [5] 简铮峰, 裘科意, 张美玉. 一种面向边缘计算 QoE 的服务组合及调度方法[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(7): 1397-1403.
JIAN C F, QIU K Y, ZHANG M Y. Two-stage edge service composition and scheduling method for edge computing QoE[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(7): 1397-1403.
- [6] 马培银, 郑万波, 马勇, 等. 一种基于深度强化学习与概率性能感知的边缘计算环境多工作流卸载方法[J]. 计算机科学, 2021, 48(1): 40-48.
MA Y Y, ZHENG W B, MA Y, et al. Multi-workflow offloading method based on deep reinforcement learning and probabilistic performance-aware in edge computing environment[J]. Computer Science, 2021, 48(1): 40-48.
- [7] 乐光学, 戴亚盛, 杨晓慧, 等. 边缘计算多约束可信协同任务迁移策略[J]. 电信科学, 2019, 35(11): 36-50.
YUE G X, DAI Y S, YANG X H, et al. Multi-constrained trusted cooperative task migration strategy for edge computing[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(11): 36-50.
- [8] 官国飞, 宋庆武, 刘恢, 等. 基于边缘计算的配网管理和运维体系研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10): 90-96.
GUAN G F, SONG Q W, LIU H, et al. Research on distribution network management and operation and maintenance system based on edge computing[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(10): 90-96.
- [9] 薛艳芬, 高继梅, 范贵生, 等. 边缘计算中基于能耗感知的容错协同任务执行算法[J]. 计算机科学, 2021, 48(S1): 374-382.
XUE Y F, GAO J M, FAN G S, et al. Energy-aware fault-tolerant collaborative task execution algorithm in edge computing[J]. Computer Science, 2021, 48(S1): 374-382.
- [10] 方娟, 章佳兴. 基于负载均衡的 CPU- GPU 异构计算平台任务调度策略[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(7): 782-787.
FANG J, ZHANG J X. Task scheduling strategy of CPU- GPU heterogeneous computing platform based on load balancing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(7): 782-787.
- [11] 陈莹, 黄永彪, 谢瑾. 基于可靠性的多核系统硬实时任务并行调度[J]. 控制工程, 2021, 28(1): 176-182.
CHEN Y, HUANG Y B, XIE J. Reliability-based parallel scheduling of hard real-time tasks for multicore systems[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(1): 176-182.
- [12] 吕颖, 贾育培, 罗治强, 等. 计算资源共享的调度计划安全校核多应用并行计算调度[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 596-604.
LYU Y, JIA Y P, LUO Z Q, et al. Security check of scheduling plan based on shared computing resources[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 596-604.
- [13] 夏军, 袁帅, 杨逸. 基于异构多核平台低能耗周期任务调度算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(10): 2980-2984.
XIA J, YUAN S, YANG Y. Scheduling algorithm for periodic tasks with low energy consumption based on heterogeneous multi-core platforms[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(10): 2980-2984.
- [14] 王雪纯, 黄少平, 许爱东, 等. 基于相似性匹配的电网边缘终端数据隐私保护方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(1): 80-85.
WANG X C, HUANG S P, XU A D, et al. A similarity matching

based data privacy-protection scheme for edge terminal in smart grid[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(1): 80-85.

- [15] 李万清, 刘辉, 李忠金, 等. 移动边缘计算环境下面向安全和能耗感知的服务 workflow 调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(7): 1831-1842.

LI W Q, LIU H, LI Z J, et al. Security and energy aware scheduling for service workflow in mobile edge computing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(7): 1831-1842.

[作者简介]



谢石木林 (1987-), 男, 国网信通亿力科技有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信、人工智能、电气工程自动化等。

白杰 (1981-), 男, 国网信息通信产业集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信、5G 应用和物联网技术等。

张翔 (1978-), 男, 国网信通亿力科技有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为软件工程、人工智能、电气工程自动化等。

汤泽毅 (1995-), 男, 国网信通亿力科技有限责任公司助理工程师, 主要研究方向为软件工程、人工智能、电气工程自动化等。

粘为帆 (1996-), 男, 国网信通亿力科技有限责任公司助理工程师, 主要研究方向为软件工程、电力通信技术、人工智能等。

刘旭杰 (1994-), 男, 国网信通亿力科技有限责任公司助理工程师, 主要研究方向为软件工程、人工智能、电气工程自动化等。