

变电站无人机机巡边缘计算框架设计及资源调度方法

胡金磊¹, 朱泽锋¹, 林孝斌¹, 黎阳羊¹, 刘 剑², 沈若瑾²

(1. 广东电网有限责任公司清远供电局, 清远 511500; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘 要: 变电站无人机巡检时, 对计算和存储资源进行科学调度有助于快速分析设备缺陷。针对无人机巡检图像分析需要的计算资源及存储资源, 基于工业物联网构建了包括数据分析服务器、无人机、物联网终端设备在内的 2 层边缘计算框架模型; 根据变电站机巡的特点, 建立了面向任务以及待巡检设备的数据模型及巡检流程; 应用 Stackelberg 多层博弈算法, 以计算量为资源调度的定价依据, 将物联网终端自身的数据资源和计算资源作为分配资源的约束条件, 并从理论上证明效用函数满足凸函数条件, 也存在纳什均衡点, 并通过仿真验证了无人机与数据分析服务器最优价格曲线交点即为资源调度的纳什均衡点。实际应用结果表明, 变电站数据网络传输以及计算量大幅度降低, 全站巡检时间由 15 h 下降为 12 h。该方法可以为今后推进高效、安全的变电站无人化运维提供依据。

关键词: 变电站; 无人机; 巡检; 边缘计算; 工业物联网; 资源调度

Framework Design and Resource Scheduling Method for Edge Computing in Substation UAV Inspection

HU Jinlei¹, ZHU Zefeng¹, LIN Xiaobin¹, LI Yangyang¹, LIU Jian², SHEN Ruojin²

(1. Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Qingyuan 511500, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Scientific scheduling of computation and storage resources can be helpful to analyzing equipment defects quickly during substation UAV inspection. The computation resources and storage resources are required in the process of analyzing UAV inspection images, thus a two-layer edge computing framework model including data analysis servers, UAVs and terminal equipment of the internet of things is built based on the industrial internet of things (IIoT). According to the characteristics of substation inspection, a data model of task-oriented and equipment to be inspected is established, the resource state is analyzed, and the control flow of inspection is proposed. By using Stackelberg multilayer game algorithm and computing volume as the pricing basis of resource scheduling, the data resources and computation resources of the terminal of IIoT are taken as the constraints for resource allocation. Theoretically, it is proved that the utility function satisfies the convex function condition and the Nash equilibrium point exists. In the simulation analysis, the change of task allocation and the relationship between utility function, revenue function and calculation allocation during iteration are analyzed. The results reveal that the intersection point of optimal price curves of UAV and data analysis server is the Nash equilibrium point of resource scheduling. The practical application results show that the transmission and calculation amount of substation data network are greatly reduced, and the inspection time of the whole station reduces from 15 hours to 12 hours. This method can provide the basis for the efficient and safe operation and maintenance of unmanned substation.

Key words: substation; unmanned aerial vehicle; inspection; edge computing; industrial internet of things; resource scheduling

0 引言

随着无人机在输、配电线路巡检中的广泛应用, 一线巡检人员的工作量大幅减少^[1]。基于图像

的智能缺陷识别技术逐步成熟, 使得缺陷识别的准确率稳步上升, 其应用时机也逐步成熟, 将进一步推进电力智能化巡检工作的开展^[2-3]。

目前, 变电站机器人巡检已得到了大范围应用, 基于图像的设备状态和缺陷分析技术以及基于红外的发热缺陷诊断技术已经较为成熟^[4-5]。由于机器人自身的限制, 它只能对地面附近各类仪表进行

基金资助项目: 国家重点研发计划(2018YFB0904300); 南方电网公司科技项目(031800KK52180080)。
Project supported by Key R&D Program of China (2018YFB0904300), Technical Program of China Southern Power Grid (031800KK52180080).

巡检,对于设备高处的缺陷数据采集通常无能为力。

电力无线专网的研究应用正在深入推进,已经从最初强调信号的覆盖^[6]发展到对工业物联网(industrial internet of thing, IIoT)数据结构的整理^[7]、业务的贯通^[8]、编码的设计^[9]以及在线装置的小型化^[10]等方面由此,物联网应用的通信基础已基本具备,无人机飞行的灵活性使其不但可以搜集到更多位置的缺陷数据,也是理想的 IIoT 数据搜集及分析任务发起、组织和协调的装备平台。

边缘计算适用于具有海量数据特征的业务动态管理、边缘化安全隐私防护等技术需求^[11],其中下行数据代表云服务,上行数据代表万物互联服务。有数据表明,在物联网产生的数据中,45%的数据都将在网络边缘进行处理^[12]。边缘计算在电力需求响应以及主动配电网中的应用已初见成效^[13-14]。现有的边缘计算资源、存储资源多是静态设置与分配,而变电站人工巡检遵循“巡检—发现—确认—上报”的过程,因此,机器人与无人机的应用最终是要利用其可移动性来取代人工巡检。可以看到,巡检中即时发现问题、分析问题具有典型的动态特征,传统的边缘计算静态资源配置已无法满足要求。因此,需要根据无人机巡检过程中检测到的数据及时发现问题,并动态分配边缘计算的计算资源及存储资源,实现问题的就地发现、分析以及上报,从而最大程度地替代人工工作,为推进无人化巡检奠定基础。

基于 IIoT 终端的感知技术是现代智能运维、运维分析技术的基石,而通过物联代理等终端智能化技术可以实现 IIoT 终端间的协同工作^[15],获取尽可能多的巡检数据。基于软件内容、数据动态按需加载与卸载^[16],边缘计算可以对计算及存储资源进行分析与调度,尽早得出分析结论。泛在网络的关键是数据的获取与分析^[17],从而代替人的工作,计算资源和存储资源的科学调度既与 IIoT 的数据模型建立有关,也与结果的呈现有关,具有重要的研究价值。

文章首先建立了面向变电站机巡需求的边缘计算体系结构,重点是感知延伸层的结构设计;随后建立对应的边缘计算数据模型;重点研究了在该模型下的 Stackelberg 多层博弈资源调度方法,在边缘计算框架下对计算资源和存储资源进行调度,在减少网络数据传输量和服务器计算负担的条件下,确保在无人机飞行过程中计算与分析工作可以按时完成。

1 变电站机巡边缘计算架构

1.1 典型边缘计算架构

IIoT 的推进使得物联网终端数量急剧膨胀,对 IIoT 终端的数据采集、数据分析需求也大幅度增加。当前,边缘计算是实现 IIoT 的重要技术手段^[18],常见的边缘计算平台及架构包括 ParaDrop、Cloudlet、PCloud^[19-21]。结合边缘计算,IIoT 可以分为感知延伸层、网络层和应用层^[22],其计算架构如图 1 所示。其中,感知延伸层由多种类型的传感器及智能物联网终端设备组成;网络互联层包括互联子层和业务支撑及运维管理子层;高级应用层提供个性化、定制化的高级智能服务,可为多种行业应用提供数据支撑和决策支持。

1.2 变电站机巡特点

基于无人机开展变电站的智能巡检工作,可以弥补机器人巡检的盲区,充分利用 IIoT 数据开展分析,提高缺陷识别的准确率。主要特点如下:

1) 集群协同性。由于无人机的续航及负载能力有限,因此变电站中的机巡通常由多台无人机协同完成。多台无人机可能是同种机型;携带负载也可能有差异,如可见光设备、红外设备或激光雷达设备等。

2) 可预测性。变电站机巡的目的明确,巡检对象清晰。由于变电站空间有限,因此无论是人工巡检还是自动巡检,其巡检航线都是经过认真设计的,其飞行时间、线路、位置等参数都是可以预测的。

3) 时空局部性。随着无人机巡检目标的变化,参与 IIoT 数据采集与分析的节点之间将有所区别,从而形成了时空上的角色差异与变化,以机巡任务为依据,其时间局限性较为突出。此外,变电站的空间也存在一定的局限性。

4) 巡检互动化。现有的变电站机巡多是根据人工或事先编辑好的固定巡检路径开展工作的,且

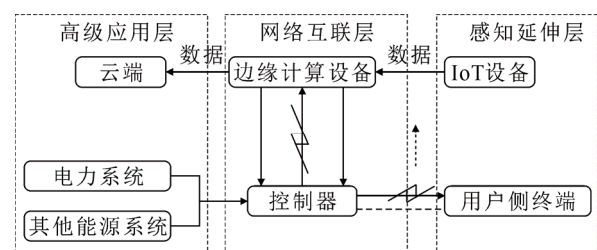


图 1 IIoT 边缘计算架构

Fig.1 Edge computing framework for IIoT

仅限于对自身采集的数据开展分析。通过与物联网的数据相结合, 可以从更多维度来科学评判设备的健康状态。基于边缘计算, 可以快速对设备缺陷进行诊断, 并依据诊断结果来调整无人机的飞行路径, 从而形成互动的巡检态势, 进而提高机巡的效能。

无人机是承载巡检任务的主体, 因此也是启动边缘计算任务的触发节点。

1.3 边缘计算结构设计

边缘计算的基本理念是使得计算任务在接近数据源的计算资源上运行, “边缘”指从数据源到云计算中心数据路径之间的任意计算资源和网络资源^[11]。边缘计算的3层模型组成都可以为应用提供相应的资源与服务^[23], 变电站中的物联网边缘设备包括一次系统的电压电流互感器和二次系统的电能表、集中器等各类终端^[22], 而无人机作为边缘服务器, 需要提供更为强大的数据分析及资源调度功能。边缘计算对于无人机机巡而言非常重要, 可以极大地缓解网络带宽与数据中心的压力, 并增强服务的响应能力^[23]。当然, 由于存储和计算量有限, 边缘计算难以基于大样本数据进行训练, 因此算法与参数更新都有困难^[22]。为此, 可以将云计算与边缘计算结合起来, 以解决问题。

在变电站机巡任务中, 无人机是边缘计算任务的发起设备, 其系统结构如图2所示。在典型的物联网边缘计算条件下, 可由多台无人机协同来实时采集各类数据, 进而执行部分或全部计算任务。及时的现场诊断可以提高现场边缘终端的组合概率, 从而更准确地诊断缺陷与故障, 而且还能降低云计算中心计算和带宽的负载。

从资源调度的角度出发, 边缘设备主要调度的是计算和存储资源。通过泛在无线网络的覆盖, 在变电站中可以将边缘服务器进行互联, 从而将所覆盖区域的边缘设备协同起来, 以共同完成巡检任务。除了无人机以外, 站内还有固定服务器可以提供更为强大的计算及存储资源。

IIoT中运用了边缘计算资源协同优化算法, 需要与边缘设备采集的数据和巡检任务密切结合, 变电站边缘计算架构如图3所示。ED_x表示边缘设备, 而ES_x表示边缘服务器。无人机可以充分运用变电站内与当前巡检任务无关的边缘设备终端来计算和存储资源, 多台无人机之间既可以配合对某台设备开展联合巡检(如设备1), 也可以像ES2那样在一次巡检过程中对设备1和设备2同时开展巡检。

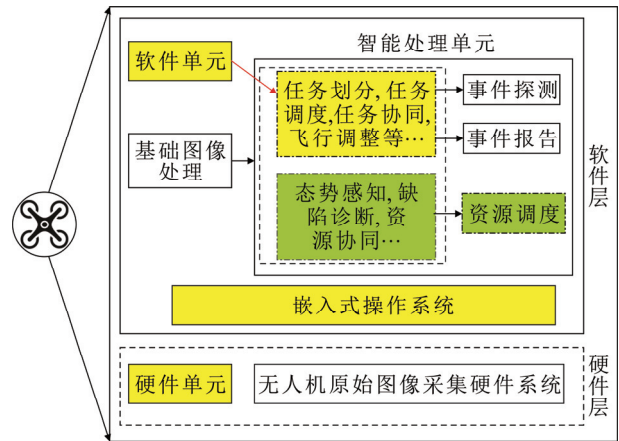


图2 边缘服务器系统结构图

Fig.2 Edge server system framework

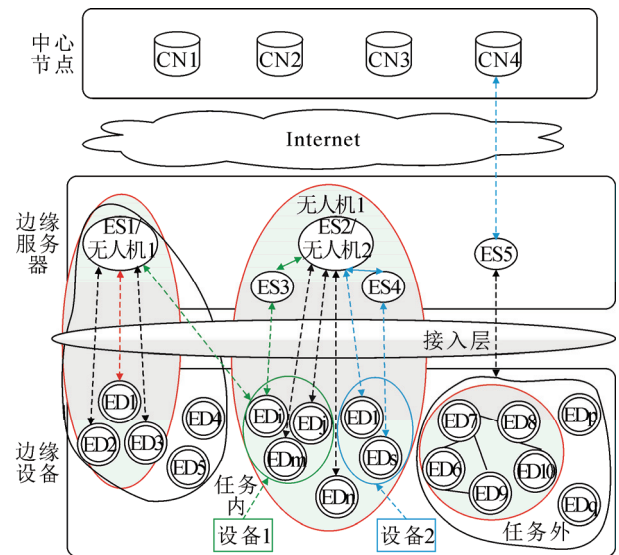


图3 变电站边缘计算架构

Fig.3 Edge computing framework in substations

2 机巡边缘计算数据模型

2.1 数据来源

变电站机巡的目的是为了发现设备缺陷, 当前的技术手段主要以可见光和红外检测为主, 数据来源有限, 对缺陷诊断的精确程度也存在不足。从IIoT的角度考虑, 设备缺陷诊断数据的来源更为多元化:

1) IIoT 固定终端。变电站内有大量的监控系统智能终端, 包括摄像头、红外设备等, 在用户侧还存在多种多样的智能电器, 这类终端通常很少移动或仅能在有限范围内活动(如摄像头的云台转动), 是物联网边缘设备的典型实例。

2) IIoT 移动终端。无人机及机器人作为物联网终端具有更大的空间灵活性。无人机以及机器人主要以搭载红外及可见光设备为主, 数据也是以对

应的图像数据为主。

3) SCADA (supervisory control and data acquisition)系统。SCADA 中有大量的设备运行数据,在 IIoT 条件下,选择、抽取合适的运行数据,并与现场巡检数据相结合,可以更好地诊断设备缺陷与故障。

4) IIoT 云平台。下行的云服务会根据无人机机巡的任务下发对应巡检所需的支撑数据,可能包括设备典型缺陷库、变电站历史巡检数据等。

由以上数据来源可以看到,边缘计算所需数据量比较大,数据类型也比较多,合理划分数据分析边界对于减少数据分析量、提高数据分析效率具有重要的意义。图 3 是采用的边缘计算架构,在机巡任务执行前,可基于边缘计算设定飞行线路及参数;在机巡任务执行过程中,边缘计算可即时提供缺陷的分析结果。在飞行过程中,可以根据整个机巡任务,将每一个待巡检设备划分为一个子任务。

在异构、弹性数据的设备缺陷分析方面,文献 [24]提出了一种基于符号动力学的分析方法,可以在小样本数据下提高数据分析的效率。本文将探讨根据数据来源建立描述模型,以及基于该模型的资源调度算法。

2.2 面向机巡任务的数据模型

机巡任务一经确定,待巡设备就可以确定了,对应所需的数据范围也可以确定,从而可以获取诊断数据及关联数据,并在此基础上对资源数据进行初步划分。由此,数据模型要依据机巡任务建立,如图 4 所示。图 4 中,飞行控制数据与飞行任务直接相关,资源数据与数据分析相关,而诊断数据和关联数据则是为提高对缺陷和故障准确率的参考。

3 边缘计算资源调度算法

3.1 变电站机巡控制流程

边缘计算资源调度算法既要选择合适的计算框架,也要选择合适的数据分析集,还要能与机巡工作的诊断目标相结合,是整体变电站机巡的一部分。根据前面的讨论,得到变电站机巡的总体控制流程如图 5 所示。

3.2 资源调度算法

在边缘计算中最核心的是资源调度算法,包括计算资源和存储资源。现有的资源调度算法大多是基于 5G 环境的,从卸载决策、资源分配和系统实现等多个方面讨论[25]。其中,卸载决策主要分为本

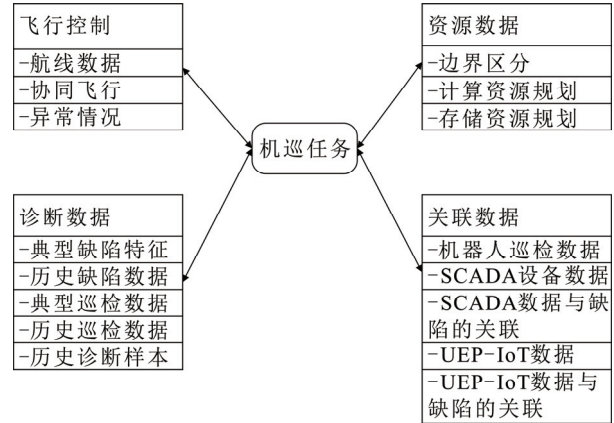


图 4 机巡任务数据模型

Fig.4 Data model for UAV inspection

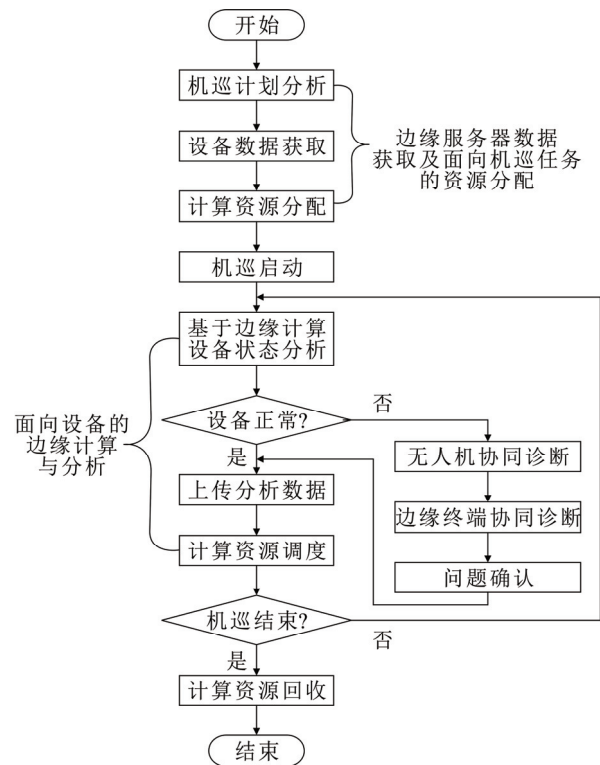


图 5 变电站机巡控制流程图

Fig.5 Flowchart of substation UAV inspection control

地执行、完全卸载和部分卸载 3 类,变电站机巡的特定场合下采用部分卸载更合适。卸载的决策目标主要分为降低时延、降低能量消耗以及权衡时延与能量 3 方面[26-28]。

与现有 5G 条件下的边缘计算应用不同的是,变电站机巡条件下参与的边缘终端、边缘服务器的类型、数量以及资源情况相对比较稳定。从变电站机巡分析的需求出发,最敏感是计算资源和存储资源。从图 6 的控制流程图可知,本文采用 2 阶段主从式 Stackelberg 多层博弈方法来实现变电站机巡的

资源调度。

3.3 基于 Stackelberg 模型的无人机资源调度

3.3.1 Stackelberg 博弈模型

本文采用多主多从的 Stackelberg 多层博弈方法^[29]作为资源调度算法, 将边缘服务器作为领导者, 而边缘设备作为跟随者。

假定无人机一次机巡工作有 J 个子任务, 协同巡检也可以作为一个子任务看待。每个子任务 J_l 可以表示为: $J_l = \{D_l, C_l, T_l^{\max}\}$, 其中 $l \in [1, J]$ 是子任务的序号, D_l 是子任务中需要处理的数据量, C_l 是完成子任务需要的计算量, T_l^{\max} 是完成子任务的最长时间限制。考虑到变电站中可以应用 5G 以及电力无线专网, 通信带宽有保障, 参与物联网数据分析的终端数量有限, 再加上无人机为确保安全其飞行速度也有严格控制, 因此, 执行子任务可以不考虑数据传输的时间。

变电站中无人机巡检耗时最多的是计算, 也是资源调度的主要目标对象。假定在子任务 l 中有边缘服务器序号集合为: $M(l) = \{1, 2, \dots, m(l)\}$, 边缘设备序号集合为: $H(l) = \{1, 2, \dots, n(l)\}$ 。显然, 每个边缘设备都有自己的计算工作和存储要求, 不会因为参与边缘计算而受到影响, 由此假定步骤 l 中某个边缘设备 h , $h \in H(l)$, 用于边缘计算的计算任务为 $c_l(h)$, 计算速率为 $\omega_l(h)$, 计算所需数据为 $d_l(h)$, 对应的最大存储为 $d_l^{\max}(h)$, 则每个参加边缘计算设备的执行时间为

$$t_l(k) = \frac{c_l(h)}{\omega_l(h)}$$

$$\text{st. } t_l(h) \leq T_l^{\max}, d_l(h) \leq d_l^{\max}(h), \quad (1)$$

$$D_l \geq \sum_{j=1}^{n(l)} d_l(j)$$

在 Stackelberg 博弈阶段, 边缘设备应尽可能承担计算任务, 但新增计算量后, 不应增加边缘设备对电源或后备电池的需求。边缘设备无法承担的计算量由边缘服务器承担, 由于无人机执行复杂的计算可能会增加功耗, 因此优先由边缘服务器中对巡检时间不敏感的设备执行, 如服务器。

在变电站机巡作业中, 设定对于其中序号为 θ 的边缘服务器的价格策略为

$$p_\theta = \gamma \frac{d_l(\theta)}{c_l(\theta)}, 1 \leq \theta \leq m(l)$$

$$\text{st. } D_l = \sum_{h=1}^{m(l)} d_l(h) \quad (2)$$

式中: θ 为边缘服务器的序号; γ_θ 为对应的价格系数。由式(2)可知, 优先在边缘设备上执行数据量小、计算量大的分析任务, 而数据传输量大、计算量偏小的分析在边缘服务器上执行。由此, 边缘服务器发布的计算任务向量定义为 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_{m(l)})$ 。假定 $q_{\phi, \theta}$ 表示为当前用户 ϕ 向边缘服务器 θ 的计算任务分配结果, $q_{\phi, -\theta}$ 表示用户 ϕ 向除边缘服务器 θ 外的计算任务分配结果, 则定义 $\mathbf{q}_\phi = (q_{\phi, \theta}, q_{\phi, -\theta})$ 为当前用户 ϕ 的计算任务分配结果矢量, $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_{n(l)})$ 是所有边缘设备计算任务分配结果组合。

边缘设备和边缘服务器之间的竞争博弈分为 2 个阶段。在第 1 阶段中, 边缘服务器首先声明自己的计算任务向量 \mathbf{p} , 并公告给所有的边缘设备, 边缘设备据此制定自己的计算任务分配结果 \mathbf{q} , 纳什均衡就是这个典型非合作博弈问题的解。在第 2 阶段, 双方将通过对策略的调整来对结果做进一步优化, (\mathbf{p}, \mathbf{q}) 表示边缘服务器任务发布与边缘设备计算分配结果的策略分布, 也是 Stackelberg 博弈的一个解。

3.3.2 效用函数及纳什均衡点

针对边缘设备 h , 定义其总体效用函数为 $F_h(\mathbf{p}, q_h, q_{-h})$ 。由于变电站巡检是以缺陷、故障检出为目标, 因此以变电站巡检子任务的故障损失为参考定义基于计算数据量的效用函数, 表达式为

$$\ln(d_l(h)) = \alpha \beta \lg(1 + d_l(h)) \quad (3)$$

式中: α 为待巡检设备出现故障后造成的损失, 可以用产电比法估计; β 为检出设备缺陷的概率^[30], 两者均大于 0。

当数据量增大时, 边缘服务器处理分析速度降低, 效用减小。则分析时延花费函数可以表示为

$$E_j(\theta) = \begin{cases} \frac{\rho_\theta}{D_j - \sum_{h=1}^{n(l)} d(\theta, h)}, & D_j > \sum_{h=1}^{n(l)} d(\theta, h) \\ \infty, & D_j \leq \sum_{h=1}^{n(l)} d(\theta, h) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ_θ 是与边缘服务器设备相关的参数常量; D_j 是对应的边缘服务器 θ 的最大分配任务; $d(\theta, h)$ 是第 h 个边缘设备在边缘服务器 θ 中分配的任务。

由此, 可以得到总体效用函数为:

$$F_h(\mathbf{p}, q_h, q_{-h}) = \alpha \beta \lg \left(1 + \sum_{\mu=1}^{m(l)} d(\mu, h) \right) - \sum_{\mu=1}^{m(l)} p_\theta d(\mu, h) - \sum_{\omega=1}^{n(l)} \frac{\rho_\theta}{D_j - \sum_{\omega=1}^{n(l)} d(\mu, \omega)} \quad (5)$$

对边缘服务器而言，若 θ 的最优分配策略是 p_j^* ，则最大收益满足，其中收益函数为

$$G_\theta = p_\theta \sum_{k=1}^{n(l)} d(\theta, k).$$

对 $F_h(p, q_h, q_{-h})$ 求 2 阶偏导，有

$$\frac{\partial^2 F_\theta(p, q_h, q_{-h})}{\partial d(\theta, h)} = -\frac{\alpha\beta}{\left(1 + \sum_{\mu=1}^{n(l)} d(\mu, h)\right)^2} < 0 \quad (6)$$

由此可知，边缘设备的效用函数是严格的凸函数，以边缘设备与边缘服务器为参与方的非合作博弈问题可以达到纳什均衡。达到纳什均衡后，每个参与者的效用函数都将达到最大值，且参与者单方面改变自身的策略不会增加自身的收益。

3.3.3 问题求解

以 τ 为时间变量，考虑当前时刻和下一时刻 $\tau+1$ ，则迭代算法可以收敛到非合作博弈的纳什均衡点，对应的计算数据量迭代方程可以表示为

$$d^{\tau+1}(\theta, h) = d^\tau(\theta, h) + v_\theta d(\dot{\theta}, h) \quad (7)$$

式中： $d(\dot{\theta}, h)$ 为用户计算数据量的梯度，即 $F_h(p, q_h, q_{-h})$ 对 $d(\theta, h)$ 的一阶偏导数； v_θ 为计算量调整的步长，为一张无人机照片数据量的平均大小； $d^{\tau+1}(\theta, h)$ 和 $d^\tau(\theta, h)$ 分别表示在 τ 和 $\tau+1$ 时刻的计算数据量。

在边缘设备达到纳什均衡后，边缘服务器根据用户的计算量分配结果，并通过价格迭代来调节自身的价格，从而影响边缘服务器的边际效益。价格迭代方程为

$$p_\theta(\tau+1) = p_\theta(\tau) + \gamma_g \left(\frac{\partial G_\theta(p(\tau), q(\tau))}{\partial p_\theta(\tau)} \right) \quad (8)$$

式中， γ_g 为价格的调整步长，可选定一个小的变化量 $\varepsilon=10^{-4}$ 来评估价格调整的边界效用。

$$\frac{\partial G_\theta(p(\tau), q(\tau))}{\partial p_\theta(\tau)} \approx \frac{G_\theta(\dots, p_\theta(\tau) + \varepsilon, \dots) - G_\theta(\dots, p_\theta(\tau) - \varepsilon, \dots)}{2\varepsilon} \quad (9)$$

纳什均衡的迭代计算过程如下：

1) 在每个子任务执行前的时刻 τ ，边缘服务器根据式(2)、式(8)以及式(9)的边际效用制定价格策略。

2) 在边缘设备收到价格策略信息后，在时间间隔 $\Delta\tau$ 内，根据式(7)调节自身对计算数据量的需求策略，直到边缘设备的效用达到最大值，全体边缘设备达到纳什均衡为止。在这个过程中，边缘服务器的价格策略保持不变。

3) 若此时所有边缘服务器的效用都达到了最

大值，则停止迭代；否则在下一个时刻 $\tau+1$ 回到步骤 1)，继续进行迭代计算。

4 算法仿真

4.1 实验设计

实验设定边缘服务器包括 1 台数据分析服务器和 2 台无人机，边缘设备包括摄像头、传感器、在线监测装置等。针对某个特定的子任务，假定有 5 个边缘设备参与边缘计算，且初始时刻 5 个边缘设备的计算数据量都为 0。初始条件下，数据分析服务器、无人机 1 和无人机 2 的起始价格策略即定价分别为 0.1、0.15 和 0.2。然后逐步调整边缘服务器的价格策略，过程中边缘设备计算数据量不会超过其最大存储，计算时间始终在任务时间限制以内。然后根据价格步长 $\gamma_g=0.1$ 逐步改变价格， $v_\theta=0.01$ ，无人机 1、无人机 2 和数据分析服务器的分析时延常量 ρ_θ 分别为 1、1 和 10，最大任务分配分别为 8、10、20。仿真工具采用 MATLAB R2017a。

4.2 仿真结果

首先分析边缘服务器在制定和公布价格策略后，边缘设备基于非合作竞争的数据量调整过程；然后分析边缘服务器的价格调整情况。

图 6 给出边缘设备迭代过程中边缘服务器计算任务的变化。由图 6 可见，在迭代过程中无人机 1 分配的任务随迭代次数增加逐渐增大，在 6.973 时达到最大，稳定值为 6.775；无人机 2 分配的任务增长到 8.846 时达到最大，稳定值为 8.726。数据分析服务器分配计算任务增加到 16.261 时稳定。

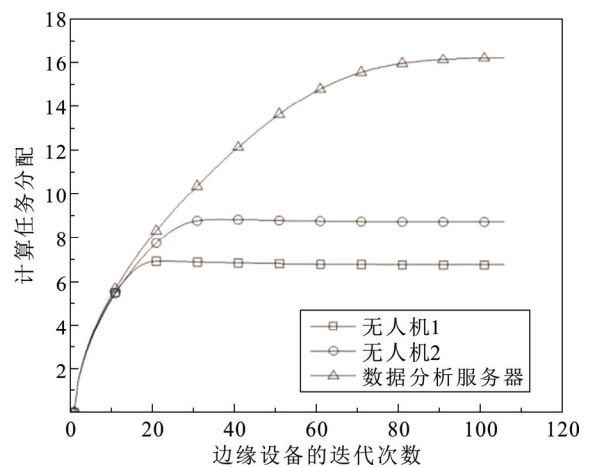


图 6 无人机及数据分析服务器的任务分配变化

Fig.6 Task allocation changes for UAVs and data analysis server

图 7 给出了迭代过程中边缘设备效用函数的变化。从图 7 中可以看出, 随着分配计算任务的逐渐增加, 故障损失和边缘服务器分析时延带来的花费都是先逐渐增加后趋于稳定。边缘设备的效用函数先增后减, 在收敛的过程中逐渐减小直至达到纳什均衡点。

图 8 给出迭代过程中 2 架无人机收益函数和数据分析服务器收益函数的变化。无人机的收益函数呈现先增后减的原因是, 无人机的运算能力有限, 数据量过大会使无人机的功耗增加, 同时其运算速度下降, 因此与数据分析服务器相比, 无人机会更早达到饱和, 边缘设备为增加效用将会转而增大数据分析服务器计算任务分配。

图 9 给出的是在无人机 1 价格策略固定为 0.15 时无人机 2 的最优价格曲线和数据分析服务器的最优价格曲线。2 条曲线的交叉点就是纳什均衡点。因为在该点处的价格策略能够同时满足 2 个边缘服

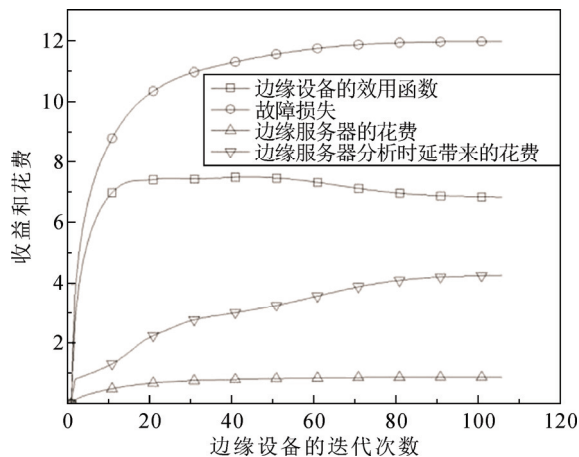


图 7 迭代过程中边缘设备的效用函数变化

Fig.7 Edge devices' utility changes during iteration

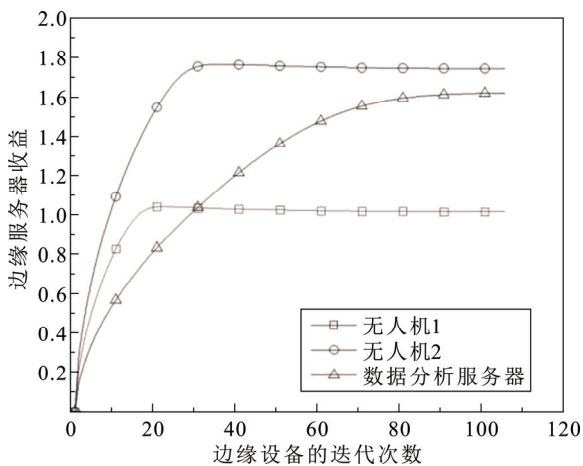


图 8 迭代过程中边缘服务器的收益函数变化

Fig.8 Edge servers' revenue changes during iteration

务器的效用最大, 因此如果此时任意一个服务器单方面改变当前的价格都会降低改服务器自身效用。2 条曲线交叉点处的坐标分别对应无人机 2 和数据分析服务器的最优价格策略。

图 10 给出的是 3 台边缘服务器的最优价格曲面。以无人机 1 为例, 其最优价格策略是无人机 2 和数据分析服务器定价的二元函数, 在以无人机 1、无人机 2、数据分析服务器定价为 x 、 y 、 z 轴的 3 维坐标系中, 绘制无人机 1 的最优价格曲面, 同理可得到无人机 2 和数据分析服务器的最优价格曲面。3 个曲面的交叉点就是非合作竞争中的纳什均衡点 p^* , 在均衡点处的坐标对应无人机 1、无人机 2 和数据分析服务器的最优价格策略。

4.3 现场测试及结果分析

本项目在清远供电局某 220 kV 变电站投入试运行, 有 3 台无人机, 其中 1 台备用。主要优化评价指标及结果如下:

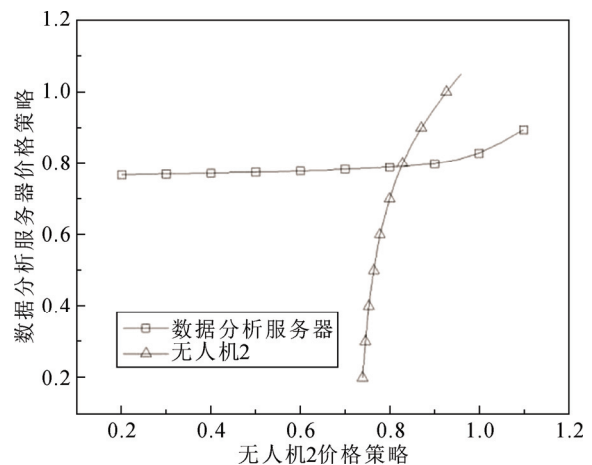


图 9 无人机 2 和数据分析服务器的最优价格策略

Fig.9 Optimal pricing scheme of UAV 2 and analysis server

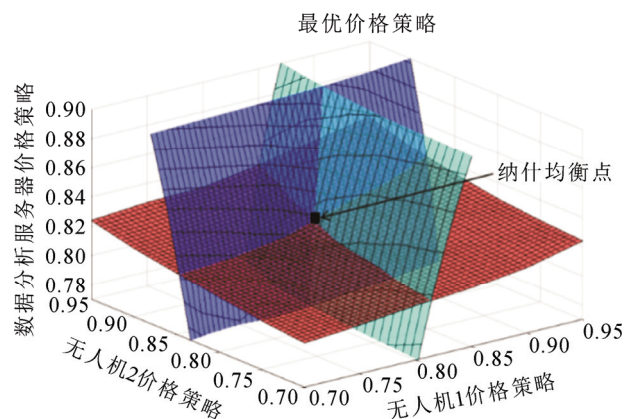


图 10 3 台边缘服务器的最优价格曲面

Fig.10 Optimal pricing surface for 3 edge servers

1) 分析平均时间。根据不同计算模式下各 20 个架次的数据分析时间统计, 2 种计算模式的平均时间基本相等。这是由于在 2 种计算模式下, 计算工作在无人机飞行的过程中穿插进行, 由此, 变化和差异并不大。

2) 网络数据传输量。巡检没有发现缺陷情况下设备图像数据一个季度更新和存储即可, 巡检发现缺陷及故障数据则需要传输全部图像数据。在这种存储策略条件下, 在未发现缺陷或故障的条件下, 数据传输量减少了 31.2%; 巡检发现缺陷或数据的条件下, 数据传输量减少了 12.4%。

3) 边缘服务器计算量。以计算任务 $c_i(h)$ 作为衡量标准, 在巡检没有发现缺陷的情况下, 边缘服务器总计算量减少了 15.2%; 巡检发现缺陷或数据的条件下, 边缘服务器总计算量减少了 6.2%。

本次测试中采用的物联网设备都是已有设备, 综合考虑边缘设备的续航能力, 计算量的调度保留了一定余量, 随着边缘设备计算能力, 存储能力的进一步加强, 采用边缘计算对变电站无人机巡检数据传输及边缘服务器计算量的优化效果将更加明显。

应用无人机和机器人协同巡检后, 对机器人巡检点位及线路进行了优化, 全站无人化巡检时间由以前的 15 h 左右缩短到 12 h 左右, 巡检效率提升明显, 缺陷检出效率的数据还需要进一步数据积累与验证。

5 结论

1) 提出了基于边缘计算框架, 基于 IIoT 的无人机巡检数据模型。

2) 应用多主多从 Stackelberg 多层博弈方法, 在边缘设备和边缘服务器间可以合理分配计算工作量以及对应匹配的图像数据。

3) 通过理论推导和仿真验证了无人机与数据分析服务器最优价格曲线交点即为资源调度的纳什均衡点。

4) 实际应用结果表明, 在未发现缺陷或故障的条件下, 网络数据传输量减少了 31.2%, 边缘服务器总计算量减少了 15.2%; 巡检发现缺陷或数据的条件下, 网络数据传输量减少了 12.4%, 边缘服务器总计算量减少了 6.2%; 全站巡检时间由 15 h 下降为 12 h。

参考文献 References

[1] 刘 壮, 杜 勇, 陈 怡, 等. ± 500 kV 直流输电线路直线塔无人

机巡检安全距离仿真与试验[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 426-432.
LIU Zhuang, DU Yong, CHEN Yi, et al. Simulation and experiment on the safety distance of typical ± 500 kV DC transmission lines and towers for UAV inspection[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 426-432.

- [2] MATIKAINEN L, LEHTOMAKI M, AHOKAS E, et al. Remote sensing methods for power line corridor surveys[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2016, 119: 10-31.
- [3] PAVANI R A, SCAFF W, MIGUEL D S, et al. Double conical wheels based mobile robot for aerial power distribution lines inspection[C]// International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. [S.l.]: IEEE, 2015, 203: 92-98.
- [4] 陈安伟, 乐全明, 张宗益, 等. 基于机器人的变电站开关状态图像识别方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 101-105.
CHEN Anwei, LE Quanming, ZHANG Zongyi, et al. An image recognition method of substation breakers state based on robot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 101-105.
- [5] 周立辉, 张永生, 孙 勇, 等. 智能变电站巡检机器人研制及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 85-88, 96.
ZHOU Lihui, ZHANG Yongsheng, SUN Yong, et al. Development and application of equipment inspection robot for smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 85-88, 96.
- [6] 刘 锐, 于 佳, 赵高峰, 等. 低自干扰的电力无线专网高可靠性规划方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 162-167, 96.
LIU Rui, YU Jia, ZHAO Gaofeng, et al. High-reliability planning method with low self-interference for electric wireless network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 162-167, 96.
- [7] 曹津平, 刘建明, 李祥珍. 面向智能配用电网络的电力无线专网技术方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 76-80.
CAO Jingping, LIU Jianming, LI Xiangzhen. A power wireless broadband technology scheme for smart power distribution and utilization networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 76-80.
- [8] 国网泛在电力物联网建设大纲[EB/OL]. [2019-03-08]. <http://baijiahao.baidu.com/s?id=1627631245232851888&wfr=spider&for=pc>.
Ubiquitous power internet of things construction outline of State Grid Corporation of China[EB/OL]. [2019-03-08]. <http://baijiahao.baidu.com/s?id=1627631245232851888&wfr=spider&for=pc>.
- [9] 张军永, 黄小庆, 曹一家, 等. 输变电设备物联网的设备编码标识[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 92-96.
ZHANG Junyong, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Equipment encode-identification in internet of power transmission and transformation equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 92-96.
- [10] 李 剑, 张 劲, 王 灿, 等. 变电设备物联网一体化智能监测装置研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3881-3887.
LI Jian, ZHANG Jin, WANG Can, et al. Research on integrated smart monitoring devices for internet of power transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3881-3887.
- [11] 施巍松, 孙 辉, 曹 杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
SHI Weisong, SUN Hui, CAO Jie, et al. Edge computing-an emerging computing model for the internet of everything[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.
- [12] 施巍松, 张星洲, 王一帆, 等. 边缘计算: 现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(1): 69-89.
SHI Weisong, ZHANG Xingzhou, WANG Yifan, et al. Edge computing: state-of-the-art and future directions[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(1): 69-89.
- [13] 李 彬, 贾滨诚, 曹望璋, 等. 边缘计算在电力需求响应业务中的应用展望[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 79-87.
LI Bin, JIA Bincheng, CAO Wangzhang, et al. Application prospect of edge computing in power demand response business[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 79-87.
- [14] 龚钢军, 罗安琴, 陈志敏, 等. 基于边缘计算的主动配电网信息物理系统[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3128-3135.
GONG Gangjun, LUO Anqin, CHEN Zhimin, et al. Cyber physical system of active distribution network based on edge computing[J].

- Power System Technology, 2018, 42(10): 3128-3135.
- [15] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 9-20, 53.
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Optimal operation control strategy of microgrid based on double-lead carbonbattery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20, 53.
- [16] 倪益民, 杨松, 樊陈, 等. 智能变电站合并单元智能终端集成技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 95-99.
NI Yimin, YANG Song, FAN Chen, et al. Discussion on integration technology of merging unit and intelligent terminal in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 95-99.
- [17] 张平, 苗杰, 胡铮, 等. 泛在网络研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(5): 1-6.
ZHANG Ping, MIAO Jie, HU Zheng, et al. A survey of ubiquitous network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(5): 1-6.
- [18] 蔡月明, 封士永, 杜红卫, 等. 面向泛在电力物联网的边缘节点感知自适应数据处理方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1715-1722.
CAI Yueming, FENG Shiyong, DU Hongwei, et al. Novel edge-ware adaptive data processing method for the ubiquitous electric power internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1715-1722.
- [19] WILLIS D, DASGUPTA A, BANERJEE S. Paradrop: a multi-tenant platform to dynamically install third party services on wireless gateways[C]//Proceedings of the 9th ACM Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture. New York, USA: ACM, 2014: 43-48
- [20] SATYANARAYANAN M, BAHL P, CACERES R, et al. The case for VM-based cloudlets in mobile computing[J]. IEEE Pervasive Computing, 2009, 8(4): 14-23
- [21] JANG M, SCHWAN K, BHARDWAJ K, et al. Personal clouds: Sharing and integrating networked resources to enhance end user experiences[C]//Proceeding of the 33rd IEEE Infocom. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 2220-2228
- [22] 张亚健, 杨挺, 孟广雨. 泛在电力物联网在智能配电系统应用综述及展望[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 1-12.
ZHANG Yajian, YANG Ting, MENG Guangyu. Review and prospect of ubiquitous power internet of things in smart distribution system[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 1-12.
- [23] 赵梓铭, 刘芳, 蔡志平, 等. 边缘计算: 平台、应用与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(2): 327-337.
ZHAO Ziming, LIU Fang, CAI Zhiping, et al. Edge computing: platforms applications and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(2): 327-337.
- [24] 邓晓衡, 关培源, 万志文, 等. 基于综合信任的边缘计算资源协同研究[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3): 449-477.
DENG Xiaoheng, GUAN Peiyuan, WAN Zhiwen, et al. Integrated trust based resource cooperation in edge computing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(3): 449-477.
- [25] 谢人超, 廉晓飞, 贾庆民, 等. 移动边缘计算卸载技术综述[J]. 通信学报, 2018, 39(11): 1-18.
XIE Renchao, LIAN Xiaofei, JIA Qingmin, et al. Survey on computation offloading in mobile edge computing[J]. Journal on Communications, 2018, 39(11): 1-18.
- [26] JIA M, CAO J, YANG L. Heuristic offloading of concurrent tasks for computation-intensive applications in mobile cloud computing[C]//Computer Communications Workshops. [S.l.]: [s.n.], 2014: 352-357.
- [27] YOU C, HUANG K. Multiuser resource allocation for mobile-edge computation offloading[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Washington, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [28] MUÑOZ O, PASCUAL-ISERTE A, VIDAL J. Optimization of radio and computational resources for energy efficiency in latency-constrained application offloading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4738-4755.
- [29] 姜永, 陈山枝, 胡博. 异构无线网络中基于 Stackelberg 博弈的分布式定价和资源分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(1): 61-68.
JIANG Yong, CHEN Shanzhi, HU Bo. Stackelberg games-based distributed algorithm of pricing and resource allocation in heterogeneous wireless networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(1): 61-68.
- [30] 刘剑, 刘开培, 周仕杰, 等. 基于 LS-SVM 的变压器最优维护周

期研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 94-103.
LIU Jian, LIU Kaipei, ZHOU Shijie, et al. Research on optimal transformer maintenance scheme based on LS-SVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 94-103.



HU Jinlei
Ph.D.
Senior engineer

胡金磊

1981—, 男, 博士, 高工
从事电力系统运行与维护工作
E-mail: 165330119@qq.com



ZHU Zefeng
Senior engineer

朱泽锋

1986—, 男, 学士, 高工
从事电力系统运行与维护工作
E-mail: 45488735@qq.com



LIN Xiaobin
Senior engineer

林孝斌

1988—, 男, 学士, 高工
从事电力系统运行与维护工作
E-mail: 83198624@qq.com



LI Yangyang

黎阳羊

1990—, 男, 学士, 工程师
从事电力系统运行与维护工作
E-mail: 744696264@qq.com



LIU Jian
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

刘剑(通信作者)

1976—, 男, 博士, 副教授
从事配电网运维分析与评估
E-mail: lj_eec@whu.edu.cn



SHEN Ruojin

沈若瑾

1999—, 女, 学士
从事电力系统可靠性分析方向研究
E-mail: 347784856@qq.com

收稿日期 2020-05-16 修回日期 2020-09-23 编辑 何秋萍