DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)04-0169-05.

配网调度网络发令多任务实时解耦自动控制方法

齐彩娟，车 彬，韦冬妮，杨 钊，杨 燕
(国网宁夏电力有限公司经济技术研究院,宁夏 银川 750004)

摘 要: 网络发令多任务分解的好坏直接影响任务控制质量,因此研究配网调度网络发令多任务实时解耦自动控制方法。依据配网调度网络发令架构,分析网络发令多任务过程,并依据发令任务耦合度,采用基于动态解耦的配网调度网络发令任务分解方法,实现发令多任务解耦分解,并将解耦分解后的发令多任务调度问题,转换成获取配网发令多任务调度时网络节点能量最优的网络服务曲线问题,为提高网络服务曲线的能量效率,确保网络进行发令多任务调度的均衡性,采用局部匀速调度算法,全面考虑网络节点进行发令多任务传输调度的时间间隔,在各时间间隔中都进行一次能量最佳的时间槽分类,实现发令多任务传输的协调调度。实验结果表明,该方法可对配网用户停电时间以及停电次数进行合理发令多任务控制,控制效果同实际一致,控制后网络负载均衡性以及稳定性佳。

关键词: 配网调度网络;发令多任务;实时解耦控制;节能能量;最优网络服务;时间槽
中图分类号:TP273 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)04-0169-05

A Real-time Decoupling Automatic Control Method for Dispatching Network of Distribution Network

QI Cai-juan, CHE Bin, WEI Dong-ni, YANG Zhao, YANG Yan
(Economic and Technical Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750004 China)

Abstract: The quality of multi task decomposition of network dispatching directly affects the quality of task control, so the real-time decoupling automatic control method of dispatching network dispatching multi task is studied. According to the command architecture of the distribution network dispatching network, the multi task process of network command is analyzed. Based on the coupling degree of the command tasks, the dynamic decoupling based method for the decomposition of the command tasks of the distribution network dispatching network is adopted to achieve the decoupling decomposition of the command multi task. The problem of the command multi task scheduling after the decoupling decomposition is transformed into the network service curve problem of obtaining the optimal energy of the network nodes when the distribution network sends the command multi task scheduling, In order to improve the energy efficiency of the network service curve and ensure the balance of the network scheduling for multi task transmission, the local uniform scheduling algorithm is adopted, and the time interval of the network node scheduling for multi task transmission is fully considered. In each time interval, the time slot classification with the best energy is conducted to achieve the coordinated scheduling of multi task transmission. The experimental results show that this method can reasonably control the outage time and outage times of distribution network users, and the control effect is consistent with the actual situation. After control, the network load balance and stability are good.

Keywords: distribution network dispatching network; start multi-tasking; real-time decoupling control; energy saving; optimal network service; slot of time

0 引言

当前配网调度网络呈现出负荷时空化、设备电子化,信息动态化等多元特征,不仅加大了电网的运行难度,同时也提高了配网的调度复杂程度[1-2]。在配网不断发展且新能源也不断介入的情况下,其规模也不断提升,运行形式愈发复杂,设备所需调度工作量也急剧提升,调控发令任务难度较大[3]。传统调度工作发令形式已经无法满足不断提升的配网设备需要与供电可靠性,工作人员处于大量无序、主次混杂的调度过程中。耗费极大资源梳理调度发令任务主次与先后顺序,极易造成发令任务流量并行和阻塞,同时带有强烈逻辑性的连续调度复杂任务被强行粉碎,使调控发令任务的品质和有效性受到严重损害[4-5],导致配网调度网络发令任务指示的下发出现问题。有学者依据任务粒度和解耦阈值,设计一种配网调度发令任务动态解耦控制方法,有效分解配网众多发令任务,该方法有效降低配网调度发令任务的风险和故障

*基金项目:国网宁夏电力有限公司科学技术项目(SCTHT/21-J5-223)
收稿日期:2023-10-09

密度[6]，但是不同种类的发令任务分解情况存在差异，控制可靠性较弱；有学者将配网调度网络发令任务分解为多个EDA任务流，通过任务流传输能量实现配网发令任务调度[7]，该方法具有较好的调度发令收发准确率，但是发令任务数据主要依靠人工输入获取，人为出错可能性较大。

为了提高配网调度网络复杂发令任务的控制效果，需要对发令多任务进行合理分解，分解的好坏对发令任务控制效果具有重要的影响。因此对发令多任务进行解耦，将发令多任务，转换成发令单任务，再进行任务控制，可提高配网发令任务控制效率。本文提出一种新的配网调度网络发令多任务实时解耦自动控制方法，有效分解网络发令多任务，提高配网运行调度的可靠性。

1 配发令多任务实时解耦自动控制

1.1 配网调度网络发令架构

配网调度网络发令架构如图1所示。配网调度网络发令中的运行操作管控模块负责管理整个调度操作流程，它主要包括操作票管控、预令管控、直接处理等子模块；检修管控模块负责系统的检测运行，其涵盖了正、异常数据报送、调度通知等子模块；其他操作由其定值执行模块负责；配网调度网络的发令与现场厂站的收令均通过与WEB端连接实现；网络不同端应用的时间均以北京时间为标准；移动终端通过统一移动平台完成信息对外发令任务的公布；操作员能够即时查看配网调度运行信息，远程、及时掌握调度数据，进行配网发令任务调度。

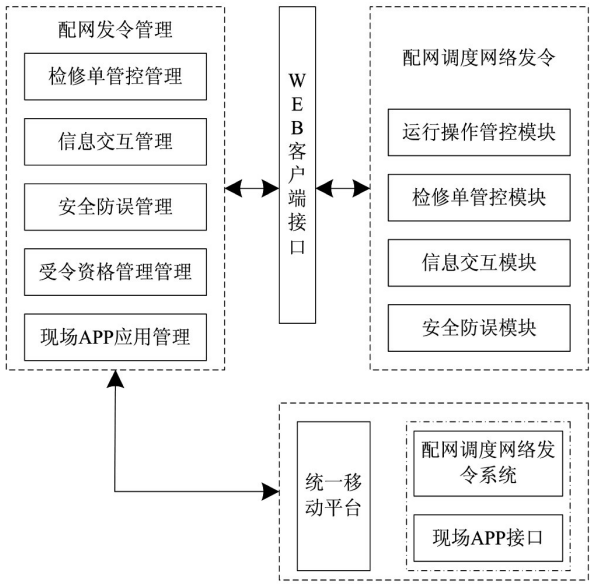


图1 配网调度网络发令的应用架构

以网络发令中运行操作管控模块中的“直接处理”为例，分析该发令子模块的发令实现过程，见图2。其中，审核命令票的数据来源于操作票管控拟定步骤，该操作需通过多方工作人员审核才能够继续下一步；调度下令时，首先需要检测受令端网络，若其状态异常则予以调度、受令端网络异常的提示，针对逐项令仅可逐项下令，对于完成合序的同序号操作可同时下令；现场复诵时，受令端复诵内容和所下令存在差异时，可通过自动提醒修改复诵内容至其与调度所下令相同后，提交到发令端；通过调度确认受端复诵内容是否相同于调度所下令，完成确认后继续下一步骤；现场回令是在完成处理后，受令端填写处理完成时间并提交至调度；在完成现场回令才能进行调度收令，结束该条指令的处理；受令端通过现场确认调度收令，等待下次下令；当命令票内全部命令完成现场确认进行归档。

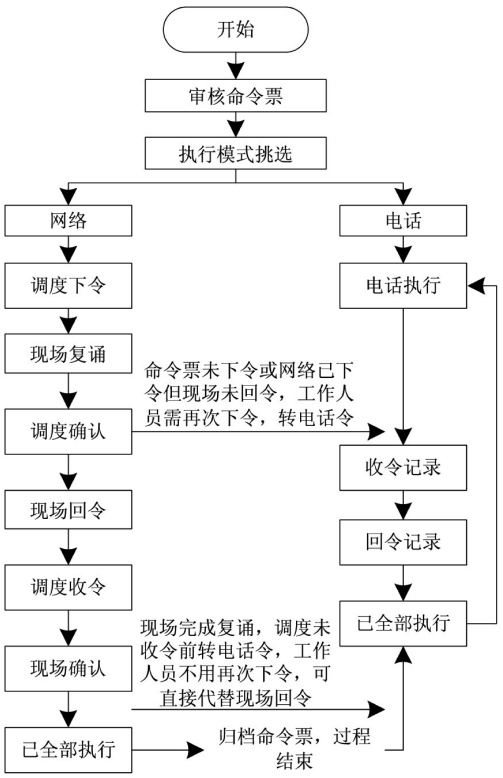


图2 发令过程

1.2 配网调度网络发令多任务解耦

1.2.1 配网调度网络发令任务描述

为了便于调度，将2.1小节研究的配网调度网络发令多任务构建为统一的描述函数：

$$T_i = T_i\left\{t_{is}, t_{ix}, t_{im}, t_{ia}, t_{io}, t_{ir}, t_{if}, t_{ie}, t_{id}, t_{ib}, t_{iq}, t_{in}, t_{ig}, t_{il}\right\} \quad (1)$$

式中，t_{is}、t_{ix}、t_{im}、t_{ia}分别为发令任务的状态、特征(耦合、非耦合)、性质、实际启动时间，t_{io}表示完成发令任务函数，t_{ir}、t_{if}、t_{ie}、t_{id}、t_{ib}分别为发令任务的最大执行时间、最早启动时间、最迟启动时间、截止时间、周期，t_{iq}、t_{il}分别为发令任务的映像、均衡因子，t_{in}为可迁移性，t_{ig}为优先级。

1.2.2 基于解耦水平的发令任务耦合度计算

假设配网调度网络发令过程包含n个发令任务，整体发令任务解耦水平即是上下级发令任务的任务解耦水平

值Ψ的和：

$$\Psi=\sum_{T_i=1}^{n}\Psi_{T_i} \tag{2}$$

式中，Ψ值表示解耦程度，其值越大则解耦程度越大，表示发令任务的独立性越强。

因为上、下级发令任务的依赖情况存在显著差异，所以需要利用不同的方法计算不同级发令任务的解耦程度。已知下级发令任务具有独立性，其任务数量与Ψ值呈正相关关系，则下级发令任务的解耦水平值Ψ_{T_i}'为：

$$\Psi_{T_i}'=\frac{LLM}{AM} \tag{3}$$

式中，LLM为总下级发令任务数，AM为总发令任务数。

上、下级发令任务间具有依赖性，上级任务对下级任务的依赖性愈多，其Ψ值也愈小，上级发令任务的解耦水平值Ψ_{T_i}''为：

$$\Psi_{T_i}''=\sum_{j=1}^{K}\left[\frac{1}{AM}\times\left(1-\frac{Dep_j}{LLM}\right)\right] \tag{4}$$

式中，K为粒度系数，Dep_j为对第j个下级发令任务存在依赖的总上层发令任务数。

1.2.3 基于动态解耦的配网调度网络发令任务分解

在分解配网调度网络发令任务时，解耦的匮乏性与过度性均会导致发令任务出现风险。所以在分解发令任务时，需要先设定一个解耦阈值，然后按照任务的粒度对该阈值进行动态调整，直至所分解的任务同时符合任务粒度阈值与解耦阈值，以发令关联矩阵为前提在分解时聚类发令生成新发令任务。由于差异种类的发令任务分解情况存在差异，无法通过经验获取发令任务粒度和解耦水平，所以采用集合G_r描述第r类发令任务的粒度。由于发令多任务的独特性，在实际开发中配网调度网络可根据发令数调整任务粒度，所以引入调整参数η_0，各种发令的任务粒度均值通过λ_r描述，设第r类发令任务中存在a个已成功下发的指令，λ_r的公式表示为：

$$\lambda_r=\left(\frac{1}{a}\sum_{i=1}^{a}W_a\times G_a\right)\times\eta_0 \tag{5}$$

式中，W_a为权值。

通过集合Ψ_r描述第r类发令任务的解耦水平，则各种发令任务的解耦水平均值为：

$$\varepsilon_r=\frac{1}{a}\sum_{i=1}^{a}W_a\times\Psi_r \tag{6}$$

1.2.4 配网调度网络发令任务分解流程

Step1：输入待分解的配网调度网络发令任务的依赖关系矩阵、λ_r与ε_r；

Step2：计算所有配网调度网络发令任务的解耦值Ψ；

Step3：计算所有配网调度网络发令任务的G；

Step4：判断Ψ是否大于ε_r，是则进入Step5，否则跳至Step8；

Step5：判断G是否小于λ_r，是则进入Step6，否则跳至Step 11；

Step6：若$\varepsilon_r=\varepsilon_r+\upsilon$($\upsilon$为步长)则返回Step4；否则增加阈值；

Step7：依据配网调度网络发令任务的Ψ值按照从小到大的顺序进行排列，挑选解耦值最大的任务；

Step8：聚合Step7获取的解耦值最大任务中关联系数排名前Ω个的任务包，获取新发令任务，其他的则为剩余任务；

Step9：用新发令任务替换原始输入的发令任务，构建剩余发令任务的依赖关系矩阵，并计算其Ψ值；

Step10：计算剩余发令任务的G，并跳转Step4；

Step11：输出配网调度网络发令任务分解集合Ξ。

1.3 配网调度网络发令任务调度

配网调度网络发令多任务数据同时在网络中传输过程中，容易导致网络负载失衡，因此配网多任务调度需要在多发令任务同时执行时，确保总体配网调度网络能耗满足均衡标准。因此，对上小节获取的发令任务的分解集合Ξ进行调度时，将发令多任务调度问题变换为配网调度网络节点能量的最优网络服务曲线构建问题，确保总体配网调度网络能耗均衡性。在配网调度网络发令过程中，通过配网调度网络节点可以阶段性地得到不同的调度发令包，并把所得调度发令包存放到整个网络系统中。

综上，设定X个配网调度网络节点的发令任务调度服务请求函数为$D(s)=\sum_{i=1}^{X}D_i(s)\Xi$，($s\in[0,S+d_0]$)，其中$D(s)$为单调递增阶梯函数，$S$为调度周期，$s$为时刻，$d_0$为延迟约束，调度延迟函数表示为$C(s)=\sum_{i=1}^{X}C_i(s)_i$。设网络服务曲线为$Q(s)$，则其函数所需符合条件如下：

(1) $Q(0)=0$；

(2) $Q(S+d_0)=D(S^+)$；

(3) $C(s)\leqslant Q(s)\leqslant D(s)(0\leqslant s\leqslant S+d_0)$。

面向网络节点多发令任务的调度过程，假设累计发令任务量函数为$D_i(s)(i=1,2,\cdots,X)$，通过该函数的运算，则可确定调度发令包B_{ij}的实际值，并以此为基础得到如下定理。

定理：对某满足约束的时分发令任务调度$\{S_{ij}|i=1,2,\cdots,X;j=1,2,\cdots,Y\}$，必然包含网络服务曲线$Q(s)$，且该曲线对应的时分发令任务调度为$\{T_{ij}|i=1,2,\cdots,X;j=1,2,\cdots,Y\}$。

证明：根据以上定理展开评判，其中$Q(s)$的构造形式需符合：在$1\leqslant i\leqslant X$的情况下，任意条件函数$j=1,2,\cdots,Y$，均能够通过直线段连接点(s_{ij},b_{ij})、$(s_{i-1},b_{i-1,j})$完成表达。

综上所述，配网调度网络节点接收发令任务时，不会受时间增加的影响降低接收发令任务量。因此网络服务曲线 $Q(s)$是一种单调递增连续函数。并设单调递增函数 $Q(s)$递增时没有通过单调增加展开，可获取到时间区域 $(s_1,s_2)\subset[0,s]$，且针对$\forall s_3\in(s_1,s_2)$，存在$Q(s_1^+)=Q(s_3)=Q(s_2^-)$，但该情况会间接导致发令任务调度时，在无发令任务接收的情况下，配网调度网络簇头节点出现在发令任务调度的时间区间内。此时需通过能量延迟权衡原则展开综合计算，有效提高网络服务曲线的能量效率，确保网络进行发令多任务调度的均衡性。

面向上述发令任务调度过程，通过局部匀速调度算法，解决配网调度网络发令任务调度能量优化问题。调度前需要合理划分广播时间，不同广播时间中不同传感器节点向簇透节点反馈发令任务包。但是广播时间内的网络发令调度服务需求曲线以及传输延迟曲线都具有不确定性，则在当前广播时间间隔中，能量转移规划的最佳方案具有稳定性。因此，采用在线传输计划算法，确保不同时间间隔中，配网调度网络发令多任务传输终端能量是最佳的。

将在线传输计划算法采用的发令任务调度能量－速率函数表示为：

$$U_i(r)=e_iU_0(r)\times S_{ij}\ (i=1,2,\cdots,X) \tag{7}$$

式中，$U_0(r)$、e_i分别表示配网调度网络服务速率 r、节点 v_i 的凸递增函数、能量扩展系数。

设 l_i是配网调度网络节点 v_i和其簇头的固定长度，则有 $e_i\propto N_il_i$，N_i表示配网调度网络噪声的能量谱密度，由于每个配网调度网络节点，在一定的调度时间内均被调度了一次，则得出平均能量的速率方程如下：

$$\overline{u}(r)=\frac{1}{X}\sum_{i=1}^{X}e_iU_0(r)=\overline{e}\,U_0(r) \tag{8}$$

式中，$\overline{e}=\frac{1}{X}\sum_{i=1}^{X}e_i$。

分析上式的运算结果可得，$\overline{u}(r)$是递增函数，通过恒速能量改进理论，确保配网调度节点在一定调度时间中的局部能量均衡。

通过上述运算可以令配网调度网络节点调度的发令任务包被缓存操作，并依据式(8)的运算结果，得到当前网络节点进行发令多任务调度能量优化的调度算法。依据节点能量优化的服务需求，获取各调度任务包所属的时间窗，进而依据在该时间窗中实现发令任务调度。

由于上述方法只进行了配网调度网络发令任务能量调度的周期划分，而没有通过能量最优的方式令发令任务调度向时间槽过渡。因此为了解决该问题，必须在各周期中进行一次能量最优的时间槽划分，以完成局部匀速调度算法的改进。

网络节点进行发令多任务调度时的时间槽计算公式为：

$$Min\sum_{i=l_0}^{X}E_i=\sum_{i=l_0}^{X}\frac{S_{ik_0}}{|h_i|^2}\left(2^{\frac{B_{ik_0}}{S_{ik_0}}}-\overline{u}(r)\right) \tag{9}$$

$$\sum_{i=l_0}^{X}S_{ik_0}=Q^{-1}\left(\sum_{i=1}^{X}\sum_{j=1}^{k_0}B_{ij}\right)-k\Delta d \tag{10}$$

式中，S_{ik_0}为分配给配网调度网络节点的发令多任务时间槽，$S_{ik_0}>0$，$i=l_0,\cdots,N$，E_i为网络节点进行发令多任务调度所需能量，h_i为平滑衰减系数，B_{ik_0}为最小调度能耗，Q^{-1}为逆向计算系数，$\triangle d$为采样周期。

2 实验分析

为测试本文方法的解耦控制效果，采用 Matlab 软件完成测试。在仿真软件中搭建配网调度网络，网络节点呈均匀分布，具体参数如表 1 所示。

表 1 具体参数

参数名称	数值
网络节点数/个	250
通信半径/m	70
单位功耗/J	1.5
传输功率/W	0.22
最大时延/s	0.65
带宽/Hz	108
数据包大小/bits	4 000

利用本文方法对实验的用户调度查询过程中的发令多任务进行解耦控制时，在并行时间分别为 50 s、100 s 的情况下，用户调度查询时的平均响应时间，如图 3 所示。通过图 3 结果可以看出，不同并发条件下，利用本文方法对该配网调度网络进行发令多任务过程中，网络响应用户调度查询的平均响应时间较短。

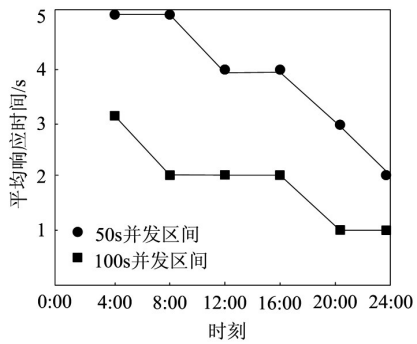


图 3 平均响应时间分析结果

为检验本文方法控制效果，以网络用户停电时间、次数为发令任务，实验结果如表 2 所示。本文方法可对配网用户停电时间以及停电次数进行合理发令控制，达到和实际效果一致的控制效果。

表2 用户停电时间、次数分析

时刻	用户停电时间		用户停电次数	
	时间/ms	发令	次数	发令
4:00	8	直接发令	2	直接发令
8:00	10	等待1 min发令	1	等待下一次再发令
12:00	9	等待1 min发令	1	等待下一次再发令
16:00	8	提前1 min发令	0	直接发令
20:00	10	提前1 min发令	1	直接发令
24:00	10	直接发令	0	直接发令

为测试本文方法的控制性能，采用负载均衡作为评价指标，其计算公式为：

$$L_{LBF}=\frac{X_c}{\sum_{i=1}^{X_c}\left(X_i-\kappa\right)^2} \tag{11}$$

式中：L_{LBF}表示配网调度网络内的所有感知节点量的方差导数，其值与网络负载均衡性能呈正相关关系；配网调度网络节点数用X_c、X_i表示，前者对应配网调度网络，后者对应簇头节点；κ表示所有簇头节点的平均数。

通过负载均衡评价本文方法的性能，本文方法的控制性能越佳，则负载均衡性能越好，期望标准为大于等于0.01。

实验测试本文方法控制不同配网发令多任务时，总体网络的负载均衡性，结果如图4所示。通过图4可以看出，在不同发令任务数下，随着访问次数的增加，网络负载均衡结果变化也存在差异，但是负载均衡结果均高于期望标准，负载均衡结果最高约为0.035且波动较小，波动区间为[0.022，0.035]，该结果表明本文方法对配网调度网络多任务的控制效果较好。

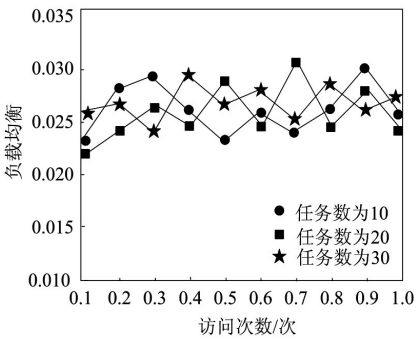


图4 负载均衡结果

为测试应用本文方法控制后，实验配网调度网络的稳定性，采用网络可靠性为指标展开实验，网络可靠性涵盖了配网调度网络的节点连接可靠性、联通率及容量。设置实验配网调度网络的可靠性期望标准大于0.9时，网络变化平稳。应用本文方法控制配网调度网络多任务过程中，随着发令包数量的不断提升，配网调度网络的可靠性结果如图5所示。通过图5可以得出，在不同的用户数量下，随着发令包数量的不断增加，本文方法控制下的配网调度网络的可靠性变化也存在差异，但是网络可靠性值均高于0.94，该结果说明，本文方法对配网调度网络多任务进行解耦控制后，配网稳定性较高，可确保配网调度网络的节点连接可靠性、联通性以及容量为最佳。

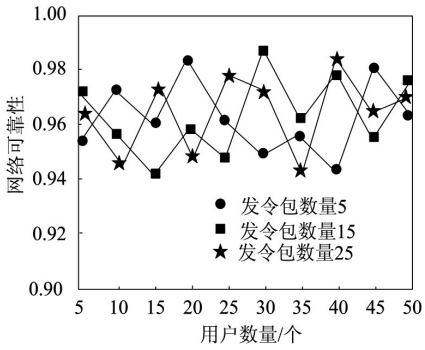


图5 网络可靠性测试结果

3 结束语

本文提出配网调度网络发令多任务实时解耦自动控制方法，在解耦方面设定了解耦阈值，有效规避解耦不足或过度情况的发生，同时将解耦阈值与任务粒度相结合，实现多任务的动态解耦，提升了配网调度网络发令过程的开发效率。在调度方面应用了局部匀速调度算法，通过构建配网调度网络节点能量最优网络服务曲线实现发令任务调度，具有较强的实用性。未来还可以从解耦优化的角度出发继续深入研究，以增强任务完成质量，减少发令成本。

参考文献：

[1] 邝祝芳，陈清林，李林峰，等.基于深度强化学习的多用户边缘计算任务卸载调度与资源分配算法[J].计算机学报，2022，45(4)：812-824.

[2] 宋祖尧，戴月明.移动云计算环境下多工作流任务调度的联合优化方法[J].计算机应用研究，2020，37(8)：2261-2265.

[3] 赵全东，郝文娟.基于SDN的电力通信网络覆盖优化算法研究[J].能源与环保，2021，43(11)：227-232.

[4] 熊杰，羿应棋，陈伯达，等.考虑P2G的增量配电网日前动态经济调度[J].电力电容器与无功补偿，2019，40(6)：79-86.

[5] 冯起，薛喜红，任龙，等.考虑云端距离的科技服务边缘计算资源均衡调度算法[J].自动化技术与应用，2024，43(8)：95-98，104.

[6] 陈艳波，张智，徐井强，等.广义快速分解潮流计算方法[J].电力系统自动化，2019，43(6)：85-91.

[7] 王静，陈岚，张贺，等.基于EDA多任务流的调度算法研究[J].计算机工程，2021，47(2)：146-151.

作者简介：齐彩娟(1990-)，女，硕士，高级工程师，研究方向：电力物联网规划与研究。