

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241285

# 计及非理想传输的虚拟电厂设备异构通信网络接入选择算法

陈智雄<sup>1,2</sup>, 唐逸凡<sup>1</sup>, 苏新鹏<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003; 2. 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)可利用异构网络实现分布式新能源聚合调度, 实现综合效益提升。为了提高 VPP 在不同网络下的丢包与时延等非理想传输能力, 提出面向异构通信网络的设备接入优化算法。首先, 分析总结了 VPP 设备充放电容量、出力特性、接入网络时延、网络承载能力等约束条件, 考虑异构网络下设备接入的丢包率和时延理论性能构建了以收益损失最小化为目标的优化模型。然后, 利用分层求解和贪婪算法进行模型求解, 获得设备的接入方式。最后, 仿真验证了所提模型和算法的有效性和可靠性。结果表明, 所提算法可提高网络接入容量并降低系统收益损失, 实现收益最大化。

**关键词:** 虚拟电厂; 功率调度; 无线接入; 异构通信网络; 数据丢包; 通信时延

## Heterogeneous communication network access selection algorithm for virtual power plants considering non-ideal transmission

CHEN Zhixiong<sup>1,2</sup>, TANG Yifan<sup>1</sup>, SU Xinpeng<sup>1</sup>

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
2. Key Laboratory of Electric Power Internet of Things Technology of Hebei Province, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Virtual power plants (VPPs) can leverage heterogeneous networks to aggregate and dispatch distributed renewable energy resources, thereby enhancing overall system benefits. To improve the VPP's performance under non-ideal transmission conditions, such as packet loss and delay across different networks, a device access optimization algorithm for heterogeneous communication networks is proposed. First, the constraints of VPP devices, such as charging/discharging capacity, power generation characteristics, access network delay, and network carrying capacity are analyzed and summarized. An optimization model is then developed to minimize revenue loss by considering the packet loss rate and theoretical delay performance under heterogeneous networks. Next, the hierarchical solution and greedy algorithm are used to solve the model to obtain the access mode of the device. Finally, simulations verify the effectiveness and reliability of the proposed model and algorithm. The results show that the proposed algorithm improves the network access capacity, reduces system revenue loss, and maximizes overall gains.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61601182).

**Key words:** virtual power plant (VPP); power scheduling; wireless access; heterogeneous communication network; packet loss; communication delay

## 0 引言

随着我国“双碳”目标的推进, 大量分布式新能源正逐步成为电力系统重要的组成部分<sup>[1-4]</sup>。为满足新型电力系统供需匹配和灵活运行的需求, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)通过整合分布于不同

地理位置的分布式能源(如太阳能、风能)及储能系统等, 构建具有弹性和高效性的虚拟发电实体, 提升电力系统的灵活调节能力。

无线通信网络易于部署和扩展, 设备接入灵活, 被广泛应用于 VPP 设备接入的网络中。但是开放共享的传播环境以及随机的信道衰落和噪声, 使得无线网络产生传输时延和数据丢包, 会对 VPP 调度运行产生不确定性, 从而减少预期收益。因此有必要建模分析和解决非理想网络接入对 VPP 及其调度

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61601182); 中央高校科研业务费专项基金资助(2023MS113)

性能的影响。

在研究 VPP 运行时，要求各分布式能源之间相互配合，从而实现可靠、灵活且高质量电能的输出<sup>[5-8]</sup>。针对分布式设备的 VPP 内部调度运行问题，文献[9]提出一种多能互补的源网荷储一体化虚拟电厂的优化调度策略。文献[10]将新型电力系统中的风、光、负荷等能源进行聚合，提出了基于 VPP 交易电价、电量的调度算法。文献[11]面向不同运行场景，建立了日前电力市场出清过程的新经济调度框架。上述研究针对多个应用场景，分析了网络拥塞等对 VPP 调度的影响，但是没有考虑 VPP 调度过程中通信不确定性所造成的收益损失。

上述研究大多只针对电力系统内部的运行调度机制，为了进一步加强 VPP 对分布式新能源的调度能力，考虑调度过程中网络通信数据拥塞和系统容量波动等不利影响，文献[12]使用仿真方法分析量化了通信网络性能对电网运行的影响。文献[13]提出了一种基于通信数据丢包建模和修正的分布式调度算法。文献[14]设计了 VPP 分层调度通信架构，以最小化因数据包丢失导致的收益减少为目标，优化设备在异构通信网络中的接入点分配，提出了一种 VPP 协调调度模型。文献[15]提出了基于 5G 通信和共享储能的实时调控优化策略，研究了因大量分布式资源接入电网而引起的调控时延和偏差问题。文献[16]提出了一种基于云边协同架构的集中-分散混合控制的信息物理模型，对传统电网模型进行了优化。文献[17]研究了通信丢包对于可再生能源的预测以及电动汽车调度的影响。

以上研究在电网智能化领域进行了深入探讨，并对电力系统通信调度的优化作出了重要贡献。然而，当前的研究在考虑影响虚拟电厂调度过程中通信不确定性因素方面尚不充分，特别是对丢包率和时延影响的考量不够全面。基于此背景，本文深入研究了异构通信组网条件下通信不确定性对虚拟电厂调度的影响。本文的主要工作包括以下几个方面。

1) 分析并构建了异构网络通信时延和数据丢包的数学模型。该模型不仅对不同网络传输机制下因数据碰撞、重新传输而导致的数据丢包进行了分析，还充分考虑了设备的接入时延。

2) 建立了异构网络下 VPP 分布式设备接入的约束和收益模型。模型考虑了分布式设备出力特性与充放电限制，并量化了通信不确定性如时延、丢包率对 VPP 收益的影响。

3) 针对优化模型，采用分层分析法对问题进行求解，并进行了仿真实验，对比分析了不同应用场

景和算法下的参数影响规律。结果表明，提出的算法可提高设备接入能力，降低系统收益损失。

## 1 系统模型

### 1.1 VPP 通信调度框架

VPP 通信调度网络的结构如图 1 所示，主要包括设备响应层、群体接入层和顶层调度层。处于设备响应层的储能设备、风光发电设备、电动汽车等分布式设备，通过群体接入中心的异构无线接入节点(access point, AP)与 VPP 建立连接，实现上行设备采集数据和下行调度指令的双向传输交互。

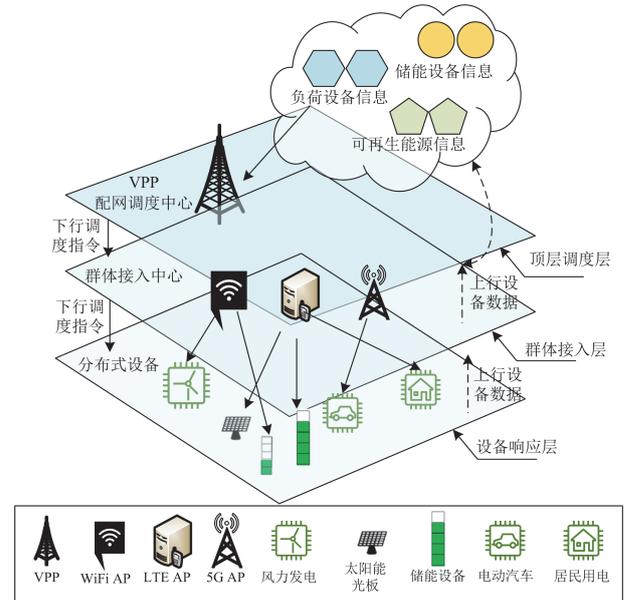


图 1 VPP 异构通信调度架构

Fig. 1 VPP heterogeneous communication scheduling architecture

上行链路中，储能和电动汽车等设备向 VPP 上传准确的实时状态信息  $u_n = \{q, S_t, \eta_{ch}, \eta_{dis}, T\}$ ，其中  $q$  为设备实时功率负荷； $S_t$  为实时充电状态； $\eta_{ch}$  和  $\eta_{dis}$  分别为充、放电效率； $T$  为电动汽车在充电站的最大剩余停留时间。VPP 根据接收的设备状态信息  $u_n$  和通信时延  $t_n$  等，执行调度算法并获得最佳的下行调度动作  $d_n$ ，实现 VPP 综合收益最大化。

图 2 给出了 VPP 与设备的上下行数据传输过程。显然，调度需要考虑通信数据的非理想传输。上行数据传输链路中，由于网络丢包和传输延迟，VPP 不能准确及时、有效地采集设备实时状态信息，进而无法获得最佳的决策和调度指令。同理，下行传输中，如果 VPP 的调度指令无法准确及时接收，设备将无法按计划执行其调度安排。

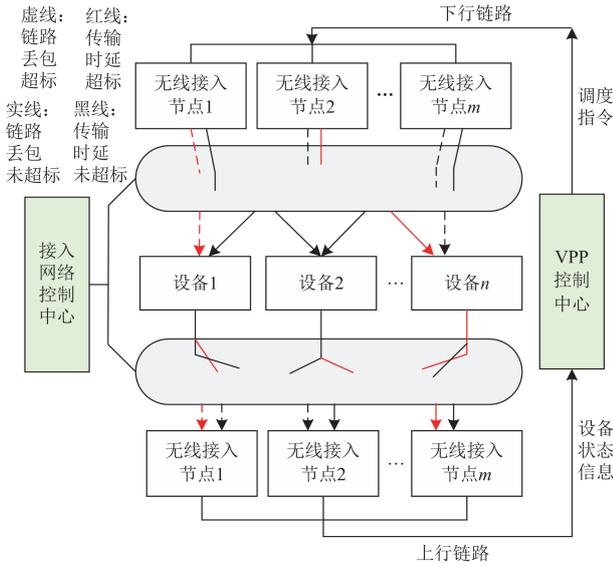


图2 VPP通信网接入框架

Fig. 2 Framework of VPP communication network access

设备调度过程中, 设备侧、电厂侧和运营商侧的交互步骤如图3所示。VPP根据电能调度需求, 在执行整个调度的过程中, 包含了以下4个步骤: ①VPP下发设备实时状态信息采集指令、②能源设备数据回传、③VPP计算得出调度策略以及④VPP下发调度指令。这中间均产生了相应的通信时延以及数据丢包, 时延包括了数据接入时延、数据传输时延、数据处理时延。能源设备还需要周期回传数据。

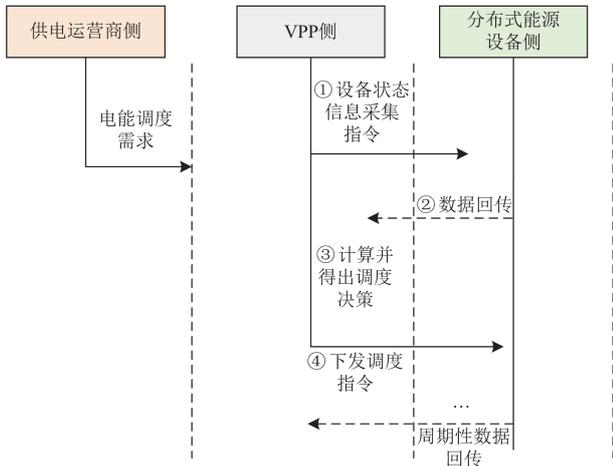


图3 VPP通信交互过程

Fig. 3 VPP communication interaction process

## 1.2 分布式设备充放电约束模型

VPP通过聚合并调度分布式新能源设备获得收益。为了分析调度的关键影响因素, 需要分析并建模关键设备的充放电特性及参数, 从而在满足各自充放电等约束条件下进行调度。

风力发电机组输出功率与自然界风速有关<sup>[18]</sup>。

$$q_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{in} \\ q_{WT}^{rate} \left( \frac{v - v_{in}}{v_{rate} - v_{in}} \right) & v_{in} < v \leq v_{rate} \\ q_{WT}^{rate} & v_{rate} < v \leq v_{out} \\ 0 & v > v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $q_{WT}$  为风力发电机组输出功率;  $v$  为自然界风速;  $v_{in}$  为风力发电机组切入风速;  $q_{WT}^{rate}$  为风力发电机组额定输出功率;  $v_{rate}$  为风力发电机组额定风速;  $v_{out}$  为风力发电机组切出风速。

光伏发电装置的输出功率与光照强度有关。

$$q_{PV} = \begin{cases} q_{PV}^{rate} \frac{s}{s_{rate}} & 0 \leq s \leq s_{rate} \\ q_{PV}^{rate} & s > s_{rate} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q_{PV}$  为光伏发电设备输出功率;  $q_{PV}^{rate}$  为光伏发电设备额定输出功率;  $s$  为光照强度;  $s_{rate}$  为额定光照强度, 根据国际通用的标准测试条件, 其大小一般为  $1000 \text{ W/m}^2$ 。

当VPP无法准确及时地获得设备状态信息时, VPP可根据设备的历史状态分布数据来下发指令。不失一般性, 假设分布式发电设备的历史状态服从Weibull分布, 概率密度函数  $f$  为

$$f(q_{w,t}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{q_{w,t} - q_{w,e} - \mu}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中:  $q_{w,t}$ 、 $q_{w,e}$  分别为  $t$  时刻的输出功率和额定功率;  $\mu$ 、 $\sigma$  分别为设备功率预测误差的均值和方差。

分布式设备调度的前提条件是: 设备实时功率  $q$  与计划调度功率  $q'$  的差值  $\Delta q$  处于可行调度区域  $\varphi$  内。对于储能设备,  $\varphi$  进一步受到设备的充放电行为和状态荷电状态(state of charge, SOC)上下限的限制<sup>[19]</sup>。

$$q' = q'_{ch} - q'_{dis} \quad (4)$$

$$S_{t+1} = \begin{cases} S_t + \frac{\eta_{ch} \odot q'_{ch} \Delta t}{E} & q'_{ch} > 0 \\ S_t + \frac{\eta_{dis}^{-1} \odot q'_{dis} \Delta t}{E} & q'_{dis} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (6)$$

式中:  $q'_{ch}$  和  $q'_{dis}$  分别为充、放电功率;  $S_t$  为  $t$  时刻的SOC; “ $\odot$ ” 为哈达玛积;  $\eta_{ch}$  和  $\eta_{dis}$  分别为充、放电效率;  $E$  为设备储能容量;  $\Delta t$  为时间间隔;  $S_{max}$ 、 $S_{min}$  分别为设备SOC的上、下限。

电动汽车设备调度还受到在充电站的充电时间

限制。如果电动汽车计划在充电站停留时间不超过时间间隔  $\Delta t$ ，则表示其无法参与调度。当被调度的电动汽车离开充电站时，必须满足其 SOC 要求，其可行调度区域  $\varphi$  进一步受到限制<sup>[14]</sup>。

$$y \leq \frac{T}{\Delta t}, y \in \{0,1\} \quad (7)$$

$$\Delta q = (q - q') \odot y \quad (8)$$

$$S_{\text{exit}} \leq \eta_{\text{ch}} \odot q_{\text{max}} \cdot (T - \Delta t) + S_{t+1} \quad (9)$$

式中： $T$  为设备在充电站最大停留时间； $y$  为二元变量，如果设备  $n$  计划在充电站停留的时间不超过  $\Delta t$ ，那么  $y=0$ ，否则  $y=1$ 。车辆在调度后立即以最大充电功率  $q_{\text{max}}$  充电，车辆在退出充电站时的 SOC 应大于其最低电量  $S_{\text{exit}}$  要求。

### 1.3 VPP 调度的网络时延性能分析

VPP 与分布式能源设备的双向交互时延和通信网络的接入算法、设备数量与覆盖距离等参数相关。传输时延主要由数据包长度、编码效率以及信道带宽等因素决定。假设蜂窝网络覆盖范围为半径  $R_{\text{co}}$ ，区域内均匀分布的  $n$  个分布式设备有接入需求。在第  $i$  次随机接入过程中， $n_i$  个发起随机接入请求设备的碰撞概率为<sup>[20]</sup>

$$P(n_i) = 1 - \left( \frac{N_q - 1}{N_q} \right)^{n_i - 1} \quad (10)$$

式中： $N_q$  为接入节点提供的前导序列的数量。

则在该接入过程中，设备的平均接入时延  $D_{\text{arv}}$  可表示为<sup>[20]</sup>

$$D_{\text{arv}} = \frac{\sum_{i=1}^X n_i \times (1 - P(n_i)) \times (i - 1) \times T'}{n} + 4D_s \quad (11)$$

式中： $X$  为随机接入的总次数； $D_s$  为平均传输时延，可用理论估计，假设其满足均匀分布，两端设备在经过 TCP 协议握手连接后，建立会话过程，信息的平均传输时延为  $4D_s$ ； $T'$  为传输周期。

WiFi 网络采用 IEEE802.11n 标准，区域内用户遵循 CSMA/CA 协议竞争接入信道<sup>[21]</sup>，平均接入时延  $D_{\text{wi}}$  为

$$D_{\text{wi}} = D_B + D_c + D_v \quad (12)$$

$$D_c = n_{\text{bp}} t_c \quad (13)$$

式中： $D_c$  为碰撞时延； $D_B$  为平均退避时延； $D_v$  为数据成功传输时延； $n_{\text{bp}}$  为数据包发送碰撞的次数； $t_c$  为每一次碰撞花费的时间。

$$t_c = t_p + \frac{H+L}{C} + t_{\text{ELIFS}} \quad (14)$$

式中： $t_p$  为物理层前导码和报头传输时间； $H$  为媒体访问控制层帧长度； $L$  为数据包长度； $C$  为信道比特率； $t_{\text{ELIFS}}$  为短帧的持续时间<sup>[22]</sup>。

平均退避时延  $D_B$  表示传输成功之前每一次退避经历的总时延，每次退避时延又等于退避计时器  $b_i$  与时隙长度  $t_{\text{slot}}$  均值的乘积。

$$D_B = \sum_{i=0}^{n_c} \mathbb{E}[b_i] \mathbb{E}[t_{\text{slot}}] \quad (15)$$

式中： $\mathbb{E}[\cdot]$  表示期望运算；退避计时器  $b_i$  是在  $[0, CW_i - 1]$  中均匀分布的； $W_i$  为协议中确定的争用窗口。 $b_i$ 、 $t_{\text{slot}}$  的期望值可表示为

$$\mathbb{E}[b_i] = \frac{CW_i - 1}{2} \quad (16)$$

$$\mathbb{E}[t_{\text{slot}}] = P_{\text{NS}} t_{\text{NS}} + P_{\text{NC}} t_{\text{NC}} + P_{\text{E}} t_{\text{E}} \quad (17)$$

式中： $P_{\text{NS}}$  为用户不传输数据时，在剩下的  $N-1$  个用户中某一个用户成功传输的概率； $P_{\text{NC}}$  表示在剩下的  $N-1$  个用户中发生碰撞的概率； $t_{\text{NS}}$ 、 $t_{\text{NC}}$  和  $t_{\text{E}}$  为事件发生所对应的时间<sup>[21]</sup>。

$$P_{\text{NS}} = (N-1) \tau_s (1 - \tau_s)^{N-2} \quad (18)$$

$$P_{\text{NC}} = 1 - P_{\text{NS}} - P_{\text{E}} \quad (19)$$

式中： $\tau_s$  为用户在一个随机时隙尝试传输数据的概率，假设为一个常数，则信道空闲的概率  $P_{\text{E}}$  可表示为

$$P_{\text{E}} = (1 - \tau_s)^{N-1} \quad (20)$$

根据 CSMA/CA 协议，数据成功传输时延  $D_v$  与 ACK 帧长度  $A$ 、信道比特率  $C$ 、短帧间的持续时间  $t_{\text{SIFS}}$  等直接相关。

$$D_v = t_p + \frac{H+L}{C} + t_{\text{SIFS}} + \frac{A}{C} \quad (21)$$

### 1.4 VPP 调度的通信丢包性能建模

在能源设备与 VPP 交互过程中，若同一个 AP 连接的设备过多，势必会造成数据传输时延以及碰撞丢包数量的增加。用  $p$  表示设备与 VPP 数据交互过程中非理想通信发生的概率。

$$p = \prod_{C_{m,n} \neq 0} C_{m,n} \omega_m \quad (22)$$

式中： $C_{m,n}$  为 AP 的连接矩阵第  $m$  行第  $n$  列所对应的元素，其中行  $m$  对应 AP，列  $n$  对应设备。若设备  $n$  连接到了 AP <sub>$m$</sub>  进行数据收发，则  $C_{m,n}=1$ ，否则  $C_{m,n}=0$ ； $\omega_m$  为对应设备产生丢包与延迟的概率。

对于 WiFi 网络<sup>[23-24]</sup>，有

$$\omega_m = \omega_{m,\text{co}} + \omega_{m,\text{SNR}} + \omega_{\text{delay}} + \omega_{m,\text{co}} \omega_{m,\text{SNR}} \omega_{\text{delay}} - \omega_{m,\text{co}} \omega_{m,\text{SNR}} \omega_{\text{delay}} - \omega_{m,\text{SNR}} \omega_{\text{delay}} \quad (23)$$

式中： $\omega_{m,\text{SNR}}$  为当信号的信噪比低于中断阈值时当

前传输数据会产生的丢包率;  $\omega_{\text{delay}}$  表示传输的业务数据实际传输和处理时延  $D(t)$  不超过理论时延  $D_{\text{co}}$  的概率;  $\omega_{m,\text{co}}$  为 WiFi 网络下因碰撞而发生的设备丢包概率, 随着数据碰撞概率  $\alpha$  的增加而增加,  $\alpha$  与设备数量呈正相关。

$$\omega_{m,\text{co}} = \alpha^{i_{\text{max}}+1} \quad (24)$$

式中:  $i_{\text{max}}$  为重传次数最大限制。根据 CSMA/CA 协议, 第一步, 每个竞争设备从  $[0, W_i]$  中随机选择一个整数作为计数器, 当计数器倒数到 0 时, 触发传输。第二步, 当重传包再次发生碰撞时, 计数器从  $[0, 2^i W_i - 1]$  中随机选择, 计数器进行倒数。若再次发生碰撞, 则继续重复第二步, 直到  $i$  达到最大退避阶段  $i'_{\text{max}}$ 。

这个过程可以将其看作一个马尔可夫链<sup>[25]</sup>, 通过解决马尔可夫链的稳态分布可以得到关于设备传输数据包的概率  $\tau$ 、带宽  $B$  和碰撞概率  $\alpha$  的非线性方程。

$$\tau = 2(1-2\alpha)(1-\alpha^{i_{\text{max}}+1})/B \quad (25)$$

$$\alpha = 1 - (1-\tau)^{N-1} \quad (26)$$

$$B = W_i(1-(2\alpha)^{i_{\text{max}}+1})(1-\alpha) + (1-2\alpha) \cdot [W_i 2^{i_{\text{max}}} \alpha^{i_{\text{max}}+1} (1-\alpha^{i_{\text{max}}-i'_{\text{max}}}) + 1 - \alpha^{i_{\text{max}}+1}] \quad (27)$$

$\omega_{\text{delay}}$  应该小于传输业务对应的最大可容忍错误率  $\varepsilon$ 。

$$\omega_{\text{delay}} = P\{D(t) < D_{\text{co}}\} \leq \varepsilon \quad (28)$$

$$D(t) = \sum_{i=1}^N \frac{L}{v_i} \quad (29)$$

$$v_i = B_i \log_2(1 + S_{\text{SNR}}) \quad (30)$$

$$D_{\text{co}} = \begin{cases} D_{\text{arv}} & \text{LTE/5G} \\ D_{\text{wi}} & \text{WiFi} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $v_i$  为第  $i$  个设备的数据传输速率;  $B_i$  为第  $i$  个设备的信道带宽;  $S_{\text{SNR}}$  为信噪比。

对于蜂窝网络, 接入节点控制所有的通信资源, 并按照一定的规则将这些资源分配给设备。LTE 采用正交频分多址, 将整个时频资源分割成更小的微时隙, 为用户提供访问<sup>[26]</sup>。根据 3GPP 标准, 长度为 1 ms 的子帧中有  $b_{\text{RB-sf}}$  个时隙, 为控制通道保留  $R_{\text{B}}$  个时隙, 剩余  $b_{\text{RB-sf}}^s$  个时隙用于传输数据, 每个  $R_{\text{B}}$  携带  $r_{\text{RB}}$  bit 的数据。因此设备所需的总  $R_{\text{B}}$  为

$$b_n = \lceil r/r_{\text{RB}} \rceil \quad (32)$$

式中:  $b_n$  为每个设备传输数据需要的时隙数;  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整;  $r$  为发送的总比特数。

假设每个设备需要  $b_n$  个时隙来传输数据, 剩余  $b_r$  个时隙处于空闲状态,  $N_m$  为 AP 所能服务的最大设备数量, 则因传输资源有限而不能满足其他设备业务需求的丢包率  $\omega_m$  可表示为<sup>[26-28]</sup>

$$\omega_m = \frac{N_m - \min\left(\frac{b_r}{b_n}, N_m\right)}{N_m} \cdot \omega_{\text{delay}} \quad (33)$$

$$b_r = t_d b_{\text{RB-sf}}^s - k[r/r_{\text{RB}}] \quad (34)$$

式中:  $k$  表示在最大截止时间  $t_d$  之前有  $k$  个用户已完成数据发送。

### 1.5 VPP 调度的收益建模

VPP 调度侧的优化目标是将因分布式能源设备访问接入产生的时延抖动、数据丢包等因素引起的收益损失  $O$  最小化。VPP 根据配电运营商的需求, 向分布式设备发布功率调节指令, 从运营商处获得奖励, 并为参与响应的设备支付调度费用。从配电运营商处获得的奖励和调度支付之间的差就是 VPP 所获得的净收益。虚拟电厂收益模型  $F(d_n, u_n)$  如式 (35) 所示。

$$F(d_n, u_n) = \begin{cases} \sum (R - \mu_n) \Delta q_n, & \Delta q_n \in \varphi \\ -\infty, & \Delta q_n \notin \varphi \end{cases} \quad (35)$$

式中:  $d_n$ 、 $u_n$  分别为虚拟电厂下发的通信指令和分布式设备上传的设备状态信息;  $R$  为供电运营商向虚拟电厂支付的调度费用;  $\mu_n$  为虚拟电厂向分布式设备  $n$  所支付的成本(单位为元/kW);  $\Delta q_n$  为对应设备的实际功率调整量;  $\varphi$  为设备可行调度集, 当  $\Delta q_n \notin \varphi$  时, 用  $-\infty$  来表征当前设备不可调度。

考虑到设备与 VPP 通信过程中可靠性与有效性问题, 将数据丢包与通信时延两个影响因素进行量化。

$$O = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_p - \mathbf{F}_{\text{up}} \\ \mathbf{F}_p - \mathbf{F}_{\text{down}} \\ \mathbf{F}_p - \mathbf{F}_{\text{updown}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{\text{up}} \odot (\mathbf{I}_{N \times 1} - \mathbf{p}_{\text{down}}) \\ (\mathbf{I}_{N \times 1} - \mathbf{p}_{\text{down}}) \odot \mathbf{p}_{\text{down}} \\ \mathbf{p}_{\text{up}} \odot \mathbf{p}_{\text{down}} \end{bmatrix} \approx (\mathbf{F}_p - \mathbf{F}_{\text{up}}) \mathbf{p}_{\text{up}}^T + (\mathbf{F}_p - \mathbf{F}_{\text{down}}) \mathbf{p}_{\text{down}}^T \quad (36)$$

式中:  $\mathbf{F}_p$  为理想无差错传输时 VPP 获得的收益; VPP 根据不同网络接入时延  $t_n$  与分布式设备上传的设备状态信息  $u_n$ , 选择收益最大化的通信指令  $d_n$ ;  $\mathbf{p}_{\text{up}}$ 、 $\mathbf{p}_{\text{down}}$  分别为上、下行非理想传输发生的概率, 由于上下行同时出错的概率较小,  $\mathbf{p}_{\text{up}}$  与  $\mathbf{p}_{\text{down}}$  乘积接近于 0, 因此对模型作近似简化, 忽略上下行同时出错时的收益损失  $\mathbf{F}_{\text{updown}}$ ;  $\mathbf{F}_{\text{up}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{down}}$  分别为上、下行非理想传输情况下 VPP 的收益情况。将它们分

别与  $F_p$  作差, 表示非理想通信带来的收益损失。设备  $n$  接收并执行指令  $d_n$  的收益  $F_{p,n}$  期望值为

$$F_{p,n} = \mathbb{E}_{u_n} [\max_{d_n} F(d_n, u_n, t_n)] \quad (37)$$

上行非理想传输时, VPP 无法及时准确地收到设备的状态信息, 此时 VPP 基于设备  $n$  的历史状态分布和时延概率分布来做出调度策略, 使其收益期望最大化。

$$F_{up,n} = \max_{d_n} \mathbb{E}_{u_n} [F(d_n, u_n, t_n)] \quad (38)$$

下行非理想传输时, 由于设备无法准确及时收到调度指令, 此时如果调度指令因为数据丢包或延时过大而被丢弃, VPP 则需要完全承受收益损失, 此时的收益期望可表示为

$$F_{down,n} = \mathbb{E}_{u_n} [F(d_n, u_n, t_n)] \quad (39)$$

不同的分布式设备的功率特性以及充放电状态不同, 设备参与调度不仅需要设备当前的实时功率能够支持调度需求, 同时还要满足自身的充放电限制。为了衡量通信不确定性给 VPP 调度运作带来的收益风险, 考虑分布式设备的出力特性以及设备的通信丢包与时延, 使得 VPP 设备接入的竞争收益损失最小, 目标函数可表示为

$$\min_{\Delta q_n \in \varphi} O \quad \text{s.t. 式(4)一式(34)} \quad (40)$$

该模型考虑了 VPP 在调度过程中分布式设备受到的充放电约束与通信性能约束, 为了降低 VPP 通信调度成本, 为不同区域的分布式设备选择合适的接入方式, 最终达到最小化通信损失  $O$  的目的。

## 2 优化求解算法

为了求解式(40), 可以将优化模型分解成多个子问题, 再分别对每个子优化问题进行求解。从而将复杂问题进行简化, 提高求解速度。算法分解逻辑如图 4 所示。

首先, 收益损失  $O(C_l, C_{-l})$  是关于第  $l$  层网络层的设备连接矩阵  $C_l$  和其他层设备的关联矩阵  $C_{-l}$  的函数,  $C_l = [C_{l_1}^T, C_{l_2}^T, \dots, C_{l_n}^T]^T$ , 将问题分解为多个有序的子问题, 如式(41)所示。

$$\min_{C_l, C_{-l}} O = \sum O(C_l, C_{-l}) \quad (41)$$

即一个网络层  $l$  的设备优化接入被视为一个子问题, 当第  $l$  层的设备进行优化时, 其他层的变量可视为固定参数, 并按照顺序进行求解。

目标问题分解后, 对每个网络层  $l$  连接的设备  $m$  进行优化。考虑到设备丢包和网络时延, AP 决定是否连接其覆盖区域内的设备。每个 AP 的目标如式(42)所示。

$$\min_{C_l, C_{-l}} O(C_l, C_{-l}) = \sum_{m \in l} \min_{C_m} O(C_m, C_{-l}) \quad (42)$$

式中:  $C_m$  为第  $m$  个 AP 的设备连接向量。

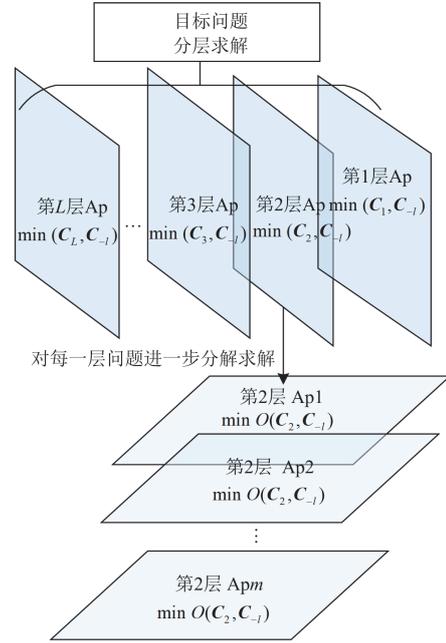


图 4 优化问题分解

Fig. 4 Optimization problem breakdown

对目标问题的分解算法如图 5 所示。首先, 在优化设备访问之前, 对每个设备的理论预期收益进行预计算, 然后, 将评估结果作为参数, 将参数传

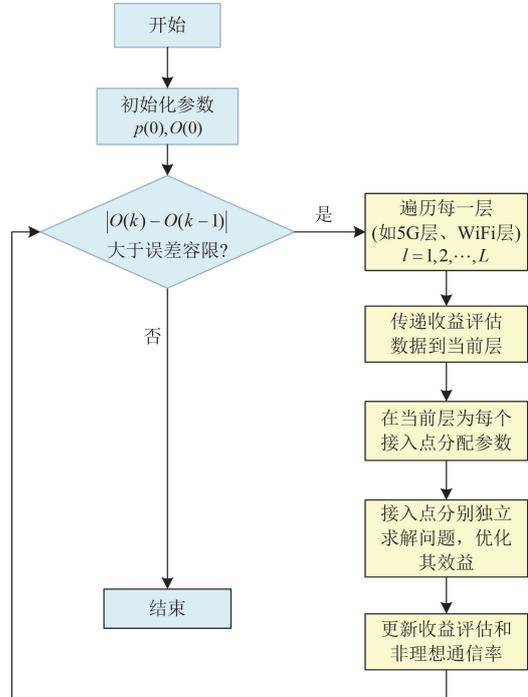


图 5 目标问题迭代求解

Fig. 5 Iterative solution of target problem

递给当前网络层中的 AP, 每个 AP 对分解后的子问题进行逐一求解, VPP 对接收优化后的非理想通信概率  $p$  更新,  $p$  包含了此次迭代后的时延概率与丢包率, 计算收益减少  $O$ 。不断迭代循环, 直到  $O$  和  $p$  收敛。

将问题分解后, 使得整个目标问题求解更加方便。但是, 子问题仍然是一个混合整数非线性规划问题, 采用启发式选择算法, 对每层网络的设备接入进行优化迭代, 算法流程图如图 6 所示。

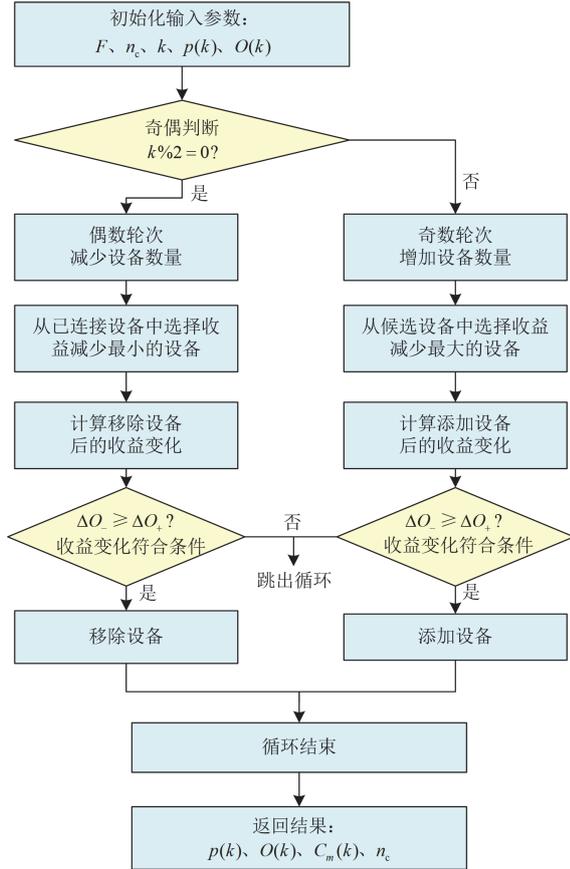


图 6 启发式选择算法流程

Fig. 6 Flow chart of heuristic selection algorithm

设  $n_d$  表示与 AP 相连的设备集。当前网络层需要减少设备连接时, 区别于只考虑丢包的模型, 结合设备与所选择网络层的时延参数, 选择设备集  $n_d$  中时延与丢包性能表现最佳的设备  $n'$  (即引起收益减少最小的设备), 减少一个设备的连接, 第  $m$  个 AP 的丢包率与时延概率都有所下降, 即非理想通信概率从  $\omega_m$  下降到  $\omega'_m$ , 剩余与 AP 连接的设备的非理想通信概率 ( $n_d - n'$ ) 降低了  $\omega'_m / \omega_m$ 。因此, 如果设备  $n'$  断开连接, 设备集  $n_d$  的收益减少变化  $\Delta O_- = \Delta O_{n_d - n'}$ , 可以表示为

$$\Delta O_- = \Delta O_{n_d - n'} = \sum_{\text{up,down}} O_{n_d - n'} \times (1 - \omega'_m / \omega_m) \quad (43)$$

同理, 设备发生时延和丢包的概率因断开连接而增加  $1/\omega_m$ , 因断连  $n'$  而导致 VPP 新增的收益损失  $\Delta O_+$ , 也即是  $O_{n'}$  更新为

$$\Delta O_+ = \Delta O_{n'} = \sum_{\text{up,down}} O_{n'} \times \left( \frac{1}{\omega_m} - 1 \right) \quad (44)$$

由于  $\Delta O = \Delta O_+ - \Delta O_-$ , 如果  $\Delta O_- > \Delta O_+$ , 则设备  $n'$  的脱连使得 VPP 系统整体的时延与丢包有所改善, 收益变化  $O$  降低 ( $\Delta O < 0$ ), 第  $m$  个 AP 拒绝设备  $n'$  的连接, 算法重复直到  $\Delta O_+$  超过  $\Delta O_-$ 。

当需要在某个网络层中添加设备时, 首先, 从候选设备集  $n_c$  中选出时延与丢包性能表现最差的设备  $n'$  (即引起收益减少最大的设备)。连接器件  $n'$  后, 第  $m$  个 AP 的丢包从  $\omega_m$  上升到  $\omega'_m$ 。最初与第  $m$  个 AP 连接的设备  $n_m$  的非理想通信概率增加, 所选器件  $n'$  的收益损失  $O_{n'}$  下降。AP 计算先前连接设备的收益变化 ( $\Delta O_+ = \Delta O_{n_m}$ ) 和所选设备的收益变化 ( $\Delta O_- = \Delta O_{n'}$ )。如果  $\Delta O_-$  超过  $\Delta O_+$ , 则接受设备  $n'$  的连接。重复迭代, 直到  $\Delta O_+$  超过  $\Delta O_-$ 。

$$\Delta O_+ = \Delta O_{n_m} = \sum_{\text{up,down}} O_{n_d} \times \left( \frac{\omega'_m}{\omega_m} - 1 \right) \quad (45)$$

$$\Delta O_- = \Delta O_{n'} = \sum_{\text{up,down}} O_{n'} \times (1 - \omega'_m) \quad (46)$$

将原优化问题拆分为顺次求解的子问题, 通过启发式选择算法为每层网络进行设备接入选择, VPP 每次只需要在单个网络层中优化设备接入, 降低了目标问题的复杂性。

### 3 算法仿真与结果分析

#### 3.1 VPP 异构通信网络性能仿真分析

为了探讨设备与 VPP 数据传输过程中, 时延因素与数据丢包对 VPP 调度的影响, 将根据 1.2 节和 1.3 节的建模和仿真分析。WiFi 可根据 IEEE 802.11 标准设置, 竞争窗口  $W_0$  为 32,  $i_{\max}$ 、 $i'_{\max}$  分别为 6、5, 由低信噪比造成的丢包  $\theta_{\text{m,SNR}}$  设置为 0.1。

蜂窝网络中,  $t_d = 1000$  ms, 带宽为 5 MHz,  $b_{\text{RB-srf}}^s = 100$ ,  $r_{\text{RB}} = 168$  bit,  $r = 256$  bit。对于 5G 网络,  $r_{\text{RB}} = 2016$  bit,  $b_{\text{RB-srf}}^s = 100$ ,  $r = 256$  bit, 带宽为 20 MHz, 采用 64 正交幅度调制方法。

首先分析时延概率与丢包概率与设备数量的关系。图 7 为 5G、LTE 和 WiFi 网络下, 非理想通信发生概率  $p$  (包含时延概率与丢包概率) 随着接入设

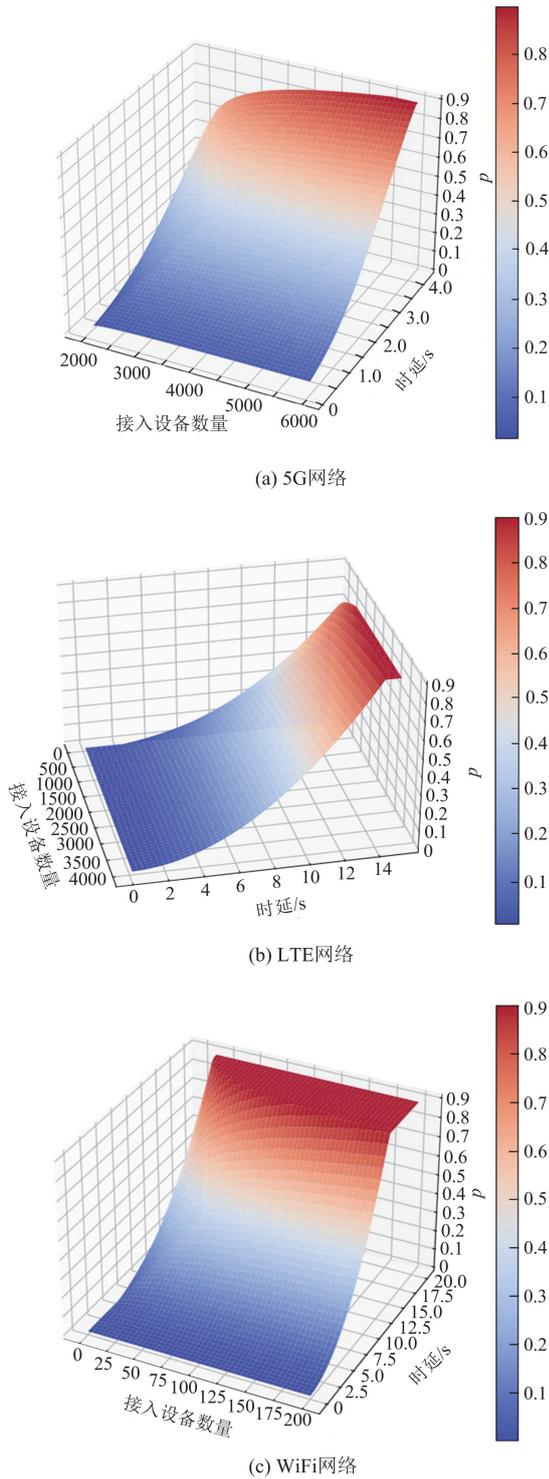


图 7  $p$  随接入设备数量波动示意图

Fig. 7  $p$  fluctuating with the number of connected devices

备数量的波动情况。对比可知，在同样的时延与丢包概率下，5G 网络接入的设备数量最多，同时网络整体时延波动也较小。这是由于 5G 网络采用了更为扁平化的设计架构，采用了毫米波频段、大规模多进

制输入输出(multiple-input multiple-output, MIMO)、波束赋形等技术，提升网络容量和传输能力，减少了传输时延与丢包。LTE 网络性能次之，LTE 使用较低频段的频谱，虽然覆盖范围广，但整体性能比 5G 却要差一些。WiFi 网络使用非授权的 2.4 GHz 和 5 GHz 频段，更容易受到其他设备的干扰，且使用 CSMA/CA 机制来管理设备间的通信，设备在发送数据前需要侦听信道是否空闲，增加了通信时延，但是 WiFi 在成本上有明显的优势。

如图 8 所示，分别为 5G、LTE 和 WiFi 网络下不同信噪比下的网络接入时延。蜂窝网络的 RB 大小为 180 KHz，随机接入前导序列数量为 54，随机接入机会间隔为 5 ms，平均传输时延  $D_s$  为 5 ms，小尺度衰落采用瑞利模型，AP 覆盖范围内设备接入数量为 100~1000。WiFi 网络重传上限  $M$  为 6，物理层帧头长度为 192 bit，帧头传输时间  $t_p$  为 1.28  $\mu$ s，设备数据包长度  $L$  为 2 Mbit。

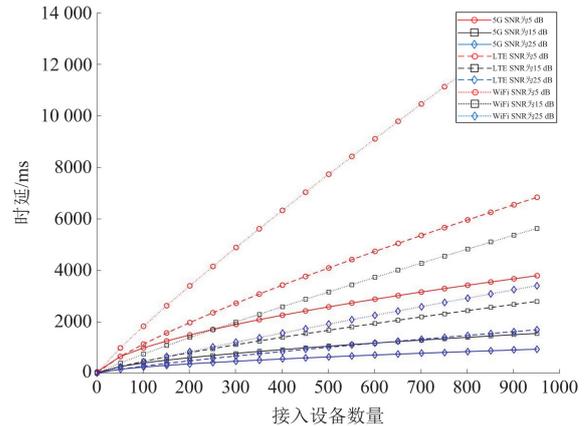


图 8 网络接入时延与设备数量关系图

Fig. 8 Diagram of the relationship between network access latency and the number of devices

对比仿真结果，在同样设备接入数量下，5G 网络的时延显著低于 LTE 和 WiFi；WiFi 受到频谱管理和接入机制等，时延最高。

### 3.2 VPP 异构网络调度算法仿真分析

为了对比分析不同的应用场景的调度特点，设置了居民区、发电区和储能区等 3 个调度区域，设备数量与调度参数如表 1 所示。其中，AP 位置均匀随机生成，保证每个区域内都有 3 种不同的接入网络。VPP 每成功调度一个设备，可以从供电运营商处获得 0.5 元/kW 的奖励，根据不同设备的时延和丢包的性能，设备的响应成本从[0.3,0.6]元/kW 之间选择。

表 1 设备数量与调度参数设置

Table 1 Settings of numbers of devices and dispatch parameter

区域类型	设备数	实时功率/kW	可连接的 AP
居民区	300	1~2	5G/LTE/WiFi
发电区	10	200~2000	5G/LTE/WiFi
储能区	300	10~20	5G/LTE/WiFi

每个设备可能连接到不同网络层的 AP, 一共有 4 层接入网络层, 分别是两层 5G 网络, 一层 LTE 与一层 WiFi 网络, 对应的每一层 AP 的数量分别为 8、8、12、15。

图 9 为调度区域内不同设备与 AP 的分布示意图, 圆圈表示 AP, 不同的颜色代表了不同层的 AP, 三角形表示分布式设备。

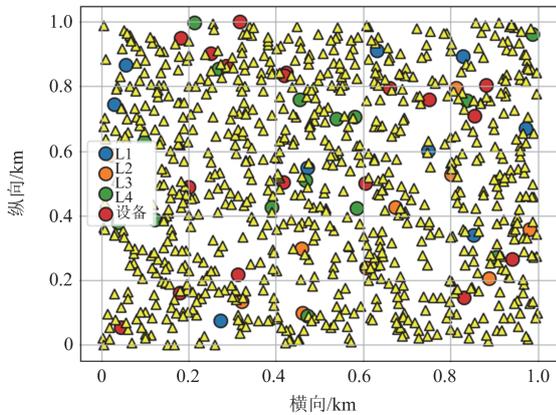
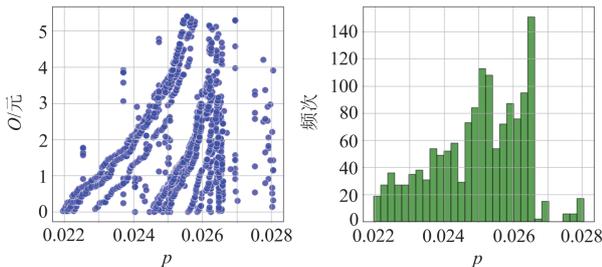


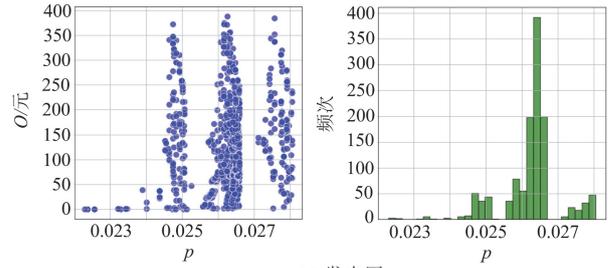
图 9 设备、AP 分布与接入情况

Fig. 9 Distribution and access of devices and APs

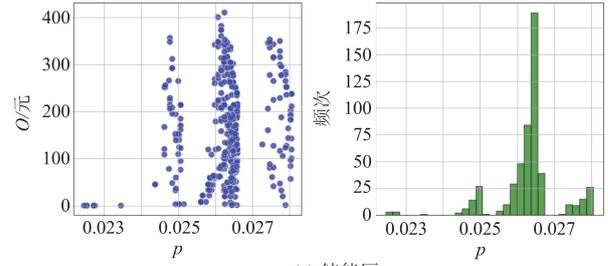
仿真结果通过计算收益损失  $O$  对 VPP 的设备调度情况进行了可视化。在不同区域内进行网络接入优化时, 如果设备能够被 VPP 有效调度, 则可以获得相应的收益。对于业务紧急性较高的设备, 会优先匹配性能更好的网络, 而对业务质量要求较低的设备, 则可以选择成本较低的网络。通过计算最终的收益损失  $O$ , 可以直观地展示通信不确定性因素对 VPP 调度效率的影响, 突出网络性能与调度效率之间的关系。如图 10 所示, 分别为 3 个区域执行优化算法后, VPP 总收益损失  $O$  与非理想通信概率  $p$  的关系, 当前  $p$  只考虑了数据传输丢包概率。



(a) 居民区



(b) 发电区



(c) 储能区

图 10 VPP 收益损失与  $p$  迭代结果

Fig. 10 VPP revenue loss and  $p$  iteration results

基于图 10 的仿真基础, 图 11 进一步考虑了时延与丢包对 VPP 调度收益的影响。在图 11 中非理想通信概率  $p$  不再仅仅代表丢包率, 还包括时延概率。随着算法的执行, 设备的接入情况也随之进行迭代变化, 与图 10 中仅考虑丢包的情况相比, 相同的地区, 图 11 的结果更加收敛且集中, 收敛速度更快, VPP 收益损失的目标函数  $O$  也明显减少。

相较之下, 图 10 的迭代结果相对离散, 表现出更高的丢包率和更大的收益损失  $O$ 。从这一对比可以看出, 综合考虑时延与丢包因素的优化算法能够显著提升调度的效率, 减少通信不确定性对收益的负面影响。VPP 的收益波动减小, 整体运行更加高效, 最终实现收益损失最小化的目标。

同时, 从图 10 和图 11 中都可以看出, 居民区由于设备功率  $q_n$  较小, VPP 的收益波动范围也较小; 且居民区接入设备数量众多, 说明其更适合采用经济成本较低的 WiFi 和 LTE 接入网络。而在发电区和储能区, 由于电能调度量较大, 因此更适合以 5G 为主, LTE 与 WiFi 为辅的异构通信接入网络。

图 12 对比了两种方案下非理想通信概率  $p$  随着迭代次数变化的情况。每 50 次迭代作为一个索引点, 表 2 中展示了两种方案的优化结果均值。从结果可以看出, 考虑了时延因素的方案在迭代趋于稳定后, 非理想通信发生的概率较低, 且目标函数收益损失  $O$  也显著减少。图 13 展示了两种方案下最终的设备接入量, 可以明显看出, 同时考虑时延和丢包的方案二相比于仅考虑丢包的方案一性能有明显提升, 设备接入量增加了约 100 个。

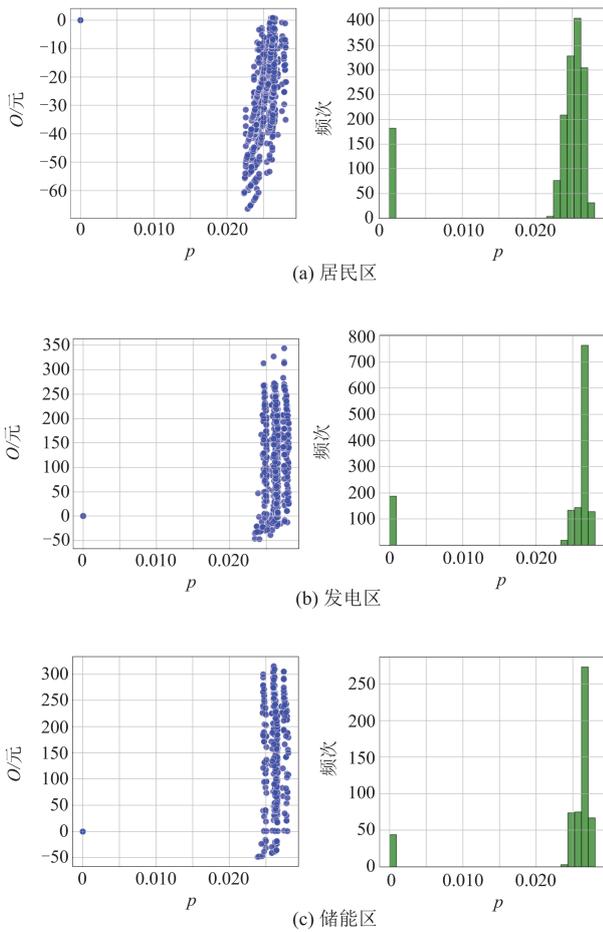


图 11 VPP 收益损失与  $p$  (含时延) 迭代结果  
Fig. 11 VPP revenue loss and  $p$  (including latency) iteration results

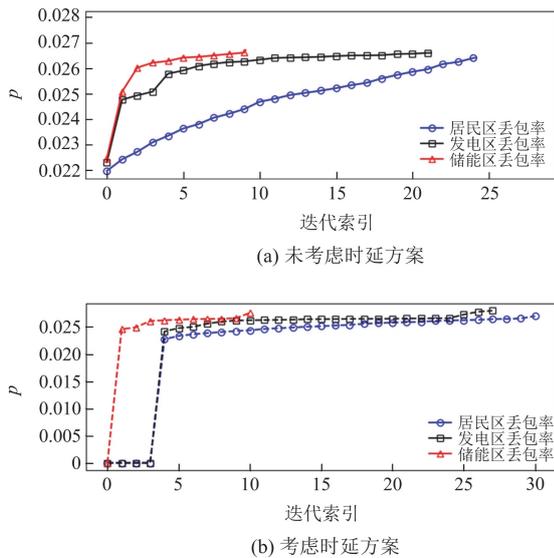


图 12 非理想通信概率随迭代的变化情况  
Fig. 12 Non-ideal communication probability vs. iteration

表 2 优化结果均值

Table 2 Mean value of optimization results

方案	区域	平均非理想通信概率	平均收益损失/元
方案一 (丢包)	a	0.0250	1.9858
	b	0.0263	133.2802
	c	0.0263	161.6699
方案二 (丢包 + 时延)	a	0.0222	0.5099
	b	0.0227	98.9042
	c	0.0241	127.9949

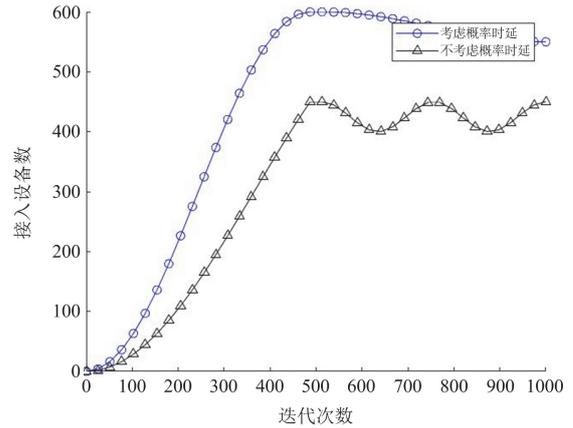


图 13 设备最终接入情况  
Fig. 13 Final access status of the device

上述结果表明，本文提出的模型和优化算法具有优异的性能。通过对分布式设备接入的优化与调度，不仅提升了设备的接入量，还显著降低了 VPP 收益损失，有效抑制了新型电力系统调度过程中的不确定性。

#### 4 结论

针对 VPP 异构网络中的设备接入优化问题，本文在考虑设备充放电约束和通信不确定性因素的基础上，构建了混合整数非线性规划模型，并通过启发式选择算法对设备接入过程优化。最终得到以下结论。

- 1) 不同区域的设备接入场景中，通信时延和丢包率对 VPP 调度有显著影响。通过灵活选择接入网络类型，模型根据设备业务的紧急性，优化了网络资源的分配，实现了业务保障与成本最小化的目标。
- 2) 随着设备接入数量的增加，网络传输资源的限制导致丢包率和时延明显上升，影响了 VPP 的整体收益。本文提出的优化算法通过匹配不同优先级设备与适当的网络性能，减少了通信不确定性对 VPP 收益的负面影响，使收益趋于动态平衡。
- 3) 优化模型从异构通信网络的角度出发，综合

考虑了丢包和时延对设备调度的双重作用, 相较于仅考虑丢包的传统模型, 更接近实际情况。虽然该模型尚未充分考虑因频繁切换网络接入带来的成本问题, 但未来结合历史数据预测和区域设备调度的聚类分析, 可进一步提高算法的收敛速度和迭代效率, 提升模型的完整性与实际应用价值。

### 参考文献

- [1] NEEVATIKA V, NARENDREA K, SAKET G, et al. Review of sub-synchronous interaction in wind integrated power systems: classification, challenges, and mitigation techniques[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 1-25.
- [2] 仪忠凯, 侯朗博, 徐英, 等. 市场环境下灵活性资源虚拟电厂聚合调控关键技术综述[J]. *中国电力*, 2024, 57(12): 82-96.  
YI Zhongkai, HOU Langbo, XU Ying, et al. Aggregation and operation key technology of virtual power plant with flexible resources in electricity market environment: review[J]. *Electric Power*, 2024, 57(12): 82-96.
- [3] 骆钊, 耿家璐, 黎博文, 等. 考虑碳-绿证交易机制的虚拟电厂分布鲁棒优化调度[J]. *电力建设*, 2023, 44(10): 137-148.  
LUO Zhao, GENG Jialu, LI Bowen, et al. Distributionally robust optimal dispatching for virtual power plants considering carbon-green certificate trading mechanism[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(10): 137-148.
- [4] 王卫南, 艾芊, 李晓露, 等. 基于改进共识算法的虚拟电厂主从多链交易匹配机制[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 69-80.  
WANG Weinan, AI Qian, LI Xiaolu, et al. Virtual power plant master-slave multi-chain transaction matching mechanism based on improved consensus algorithm[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(5): 69-80.
- [5] 程杉, 傅桐, 李沛洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 1-12.  
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 1-12.
- [6] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 30-44.  
ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 30-44.
- [7] 刘军, 朱世祥, 柳盼攀, 等. 考虑系统频率安全稳定约束的风储联合频率响应控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 73-84.  
LIU Jun, ZHU Shixiang, LIU Panpan, et al. Coordinated control strategy for wind turbine and energy storage equipment considering system frequency safety and stability constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 73-84.
- [8] 俞晓荣, 徐青山, 杜璞良, 等. 融合注意力机制与 SAC 算法的虚拟电厂多能流低碳调度[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 233-246.  
YU Xiaorong, XU Qingshan, DU Puliang, et al. Optimizing multi-energy flow scheduling of hydrogen-inclusive virtual power plants based on deep reinforcement learning under dual-carbon targets[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(5): 233-246.
- [9] 王千淳, 杜欣慧, 吴莹莹, 等. 考虑碳交易的多能互补虚拟电厂优化调度运行策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(11): 22-30.  
WANG Qianchun, DU Xinhui, WU Yingying, et al. Optimal dispatching operation strategy of multi-energy complementary virtual power plant considering carbon trading[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(11): 22-30.
- [10] 方燕琼, 甘霖, 艾芊, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(14): 61-69.  
FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(14): 61-69.
- [11] MING H, XIE L, CAMPI M C, et al. Scenario-based economic dispatch with uncertain demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1858-1868.
- [12] DUAN J, CHOW M Y. Robust consensus-based distributed energy management for microgrids with packet losses tolerance[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 281-290.
- [13] YANG Z, HU J, AI X, et al. Transactive energy supported economic operation for multi-energy complementary microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 4-17.
- [14] FENG C, WANG Y, WANG X, et al. Device access optimization for virtual power plants in heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(2): 1478-1489.
- [15] 陈珂, 袁金斗, 焦梦婷, 等. 考虑 5G 通信和共享储能的产消者实时调控优化策略[J]. *电力需求侧管理*,

2024, 26(1): 54-60.

CHEN Ke, YUAN Jindou, JIAO Mengting, et al. Real-time regulation and optimization strategy of prosumers considering 5G communication and shared energy storage[J]. *Power Demand Side Management*, 2024, 26(1): 54-60.

[16] 司羽飞, 谭阳红, 汪泓, 等. 面向电力物联网的云边协同结构模型[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(24): 7973-7979, 8234.

SI Yufei, TAN Yanghong, WANG Feng, et al. Cloud-edge collaborative structure model for power internet of things[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(24): 7973-7979, 8234.

[17] ZHOU B, ZHANG K, CHAN K W, et al. Optimal coordination of electric vehicles for virtual power plants with dynamic communication spectrum allocation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(1): 450-462.

[18] 刘自发, 张子腾. 考虑多主体博弈的配电网源网荷储协同规划[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 5046-5058.

LIU Zifa, ZHANG Ziteng. Collaborative planning of source-grid-load-storage in distribution network considering multi-agent game[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 5046-5058.

[19] ZHANG J, WANG P, ZHANG N. Frequency regulation from distributed energy resource using cloud-edge collaborations under wireless environments[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 367-380.

[20] 陈新虎, 张泰, 裴二荣, 等. 捕获效应对LTE授权辅助接入网络的影响[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(3): 1083-1093.

CHEN Xinhu, ZHANG Tai, PEI Errong, et al. Impact of capture effect on LTE-licensed assisted access networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(3):1083-1093.

[21] CHEN Q, YU G, MAAREF A, et al. Rethinking mobile data offloading for LTE in unlicensed spectrum[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(7): 4987-5000.

[22] BANCHS A. Analysis of the distribution of the backoff delay in 802.11 DCF: a step towards end-to-end delay guarantees in WLANs[C] // *Quality of Service in the Emerging Networking Panorama: Fifth International Workshop on Quality of Future Internet Services*, 2004, Barcelona, Catalonia, Spain: 54-63.

[23] CHATZIMISIOS P, BOUCOUVALAS A C, VITSAS V. IEEE 802.11 wireless LANs: performance analysis and protocol refinement[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2005: 1-12.

[24] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.

[25] BAZZI A, MASINI B M, ZANELLA A, et al. On the performance of IEEE 802.11p and LTE-V2V for the cooperative awareness of connected vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(11): 10419-10432.

[26] MADUENO G C, NIELSEN J J, KIM D M, et al. Assessment of LTE wireless access for monitoring of energy distribution in the smart grid[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(3): 675-688.

[27] POPOVSKI P, TRILLINGSGAARD K F, SIMEONE O, et al. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: a communication-theoretic view[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 55765-55779.

[28] MIUCCIO L, PANNO D, RIOLO S. Joint control of random access and dynamic uplink resource dimensioning for massive MTC in 5G NR based on SCMA[J]. *IEEE Internet Things*, 2020, 7(6): 5042-5063.

收稿日期: 2024-09-23; 修回日期: 2025-02-17

作者简介:

陈智雄(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力物联网、电力线通信; E-mail: zxchen@ncepu.edu.cn

唐逸凡(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为虚拟电厂无线协作通信; E-mail: tf776699@163.com

苏新鹏(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力通信。E-mail: 2630524817@qq.com

(编辑 张颖)