基于 Stackelberg 博弈的无人机辅助无线供能物联网能量优化

黄旭民[1,2]，张旸[1]，余荣[1]，蒋丽[1]，田辉[3]，吴远[2,4]

（1. 广东工业大学自动化学院，广东 广州 510006；
2. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室，澳门 999078；
3. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室，北京 100876；
4. 澳门大学计算机与信息科学系，澳门 999078）

摘 要：无人机结合无线能量传输的技术可为物联网终端设备提供能量供应。为了解决充电用户与无人机之间自由公平的能量交易问题，提出一种基于 Stackelberg 博弈的能量交易方案，赋予用户主方角色，由其决策服务奖励，各无人机作为从方通过能量供应来竞争获取奖励，参考无线能量传输过程中的平均信道增益决策服务用户的充电时长。运用逆向归纳法分析并求解 Stackelberg 均衡解。实验仿真表明，所提方案可有效减少用户在能量交易中的经济开销，提高用户满意度，实现用户侧能量优化。

关键词：无人机；无线能量传输；Stackelberg 博弈；用户侧能量优化
中图分类号：TN925
文献标志码：A
DOI: 10.11959/j.issn.1000–436x.2022231

Stackelberg game based energy optimization for unmanned aerial vehicle assisted wireless-powered Internet of things

HUANG Xumin[1,2], ZHANG Yang[1], YU Rong[1], JIANG Li[1], TIAN Hui[3], WU Yuan[2,4]

1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China
2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China
3. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
4. Department of Computer and Information Science, University of Macau, Macau 999078, China

Abstract: The technology integrating unmanned aerial vehicles (UAV) with wireless power transfer is applied to provide energy supply for Internet of things devices. A Stackelberg game scheme was further proposed to tackle the problem on free and fair energy trading between a charging user and multiple UAV. The user played as a game leader and determined the rewards while each UAV played as a game follower, which competed for the rewards through the energy supply, and refered to the average channel gain during the wireless power transfer to determine the charging time for the user. The Stackelberg equilibrium solution was analyzed and derived by the backward induction method. Simulation results show that the proposed scheme can effectively reduce the economic cost for the user in the energy trading, thereby improving user satisfaction and achieving the user-side energy optimization.

Keywords: UAV, wireless power transfer, Stackelberg game, user-side energy optimization

0 引言

全球物联网终端设备（IoTD, Internet of things device）数量将从 2021 年的 100 亿上升到 2030 年的 254 亿[1]。目前，IoTD 主要以电池作为工作能源，存在耗尽电量的风险，运行性能和

收稿日期：2022–07–08；**修回日期**：2022–10–28
通信作者：余荣，yurong@gdut.edu.cn
基金项目：国家重点研发计划基金资助项目（No.2020YFB1807802）；国家自然科学基金资助项目（No.62001125，No.61971148）
Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1807802), The National Natural Science Foundation of China (No.62001125, No.61971148)

续航时长受到电池容量的严格限制。因此，物联网需要一种有效的能量供应方法，以随时随地为大量 IoTD 及时充电。结合无线能量传输（WPT, wireless power transfer）技术，无人机（UAV, unmanned aerial vehicle）可以灵活地为 IoTD 供应能量，一种新型的网络范例——无人机辅助的无线供能物联网[2-3]被提出。UAV 被指派前往 IoTD 所在区域上空悬停，通过广播射频信号对 WPT 范围内的 IoTD 进行无线充电。利用无人机部署容易、机动性强和应用范围广的特点，配合时下高效的 WPT 技术如无线射频充电（能量传输距离为几十米至几千米[4]），UAV 辅助的无线供能方法能够快速地为大规模 IoT 网络提供可持续和经济的能量供应。

关于 UAV 在无线通信网络的应用，部分研究工作首先聚焦 UAV 作为中继支持地面无线网络的数据通信，相关文献分别围绕最小化系统或者 UAV 总能耗[5-6]、最小化用户间最大时延[7]、最小化 UAV 参与协助干扰时的系统总能耗[8]、最小化系统中断概率[9]、最大化计算效率[10]、最大化用户群体的最小平均吞吐量等优化目标[11]，提出研究思路与解决方案。随后，部分研究工作进一步关注 UAV 作为中继既传输能量也接受信息的场景，在此方面，不同文献也基于不同优化目标提出了一系列理论研究。例如，文献[12]研究如何基于不同 IoTD 对不同 UAV 的个体偏好信息和给定不同 UAV 给予不同 IoTD 的能量供应，运用马尔可夫决策和随机匹配理论设计一种动态的 UAV 调度方案，在不同时刻派遣不同 UAV 飞往不同的 IoTD 处为其提供能量补充。文献[13]考虑一架 UAV 服务多个 IoTD 的场景， UAV 在每个任务执行周期中，一边广播射频信号为所有 IoTD 充电，一边处理部分 IoTD 上传的计算任务；通过联合优化 UAV 广播充电时隙、各 IoTD 的发射功率和任务卸载决策，以最小化所有 IoTD 的总能耗。类似地，文献[14]讨论基于单 UAV 的能量补充与数据收集场景，提出一种 UAV 侧优化的方案，研究如何在单一工作流方式下最小化 UAV 的总能耗。另外，文献[15]研究基于无人机集群的（上行链路）数据传输与（下行链路）能量传输联合优化，决策变量包括各无人机的 3D 空间位置、无人机–用户配对、服务顺序和时间分配，优化目标是最大化网络所有 IoTD 的总吞吐量。值得一提的是，以上文献都未讨论移动的 UAV 飞行轨迹如何适配接下来的数据与能量管理计划。为此，文献[16]在已知不同区域 IoTD 充电需求条件下，考虑如何挑选最小数量的 UAV 来执行全网的充电任务，并且优化不同 UAV 经最短路径飞往指定区域，提高所有 UAV 的总体能量利用率的同时尽可能地缩小它们之间的能耗差异水平。文献[17]同样讨论基于单 UAV 的能量补充与数据收集场景，引入信息年龄来测量一次完整的 UAV 数据采集过程的质量，运用深度强化学习工具来联合优化 UAV 的飞行轨迹、飞行时间以及数据采集和能量供应的策略，从而最小化 UAV 在任务执行期间的总能耗。

相较于现有文献，本文重点解决 UAV 辅助的无线供能物联网中的自由能量交易问题。大多数文献基于集中式决策来管控全网 IoTD 和 UAV，默认它们接受系统的统一调度管理，这忽略了 IoTD 与 UAV 的个体理性，无法支持 IoTD 与 UAV 之间自由公平的能量交易。为了决策能量交易策略，每个 IoTD 通过事先预测自身能耗情况结合 UAV 的要价情况，动态地调整能量需求。反过来说，每架 UAV 根据 IoTD 的奖励，决策是否为其提供充电服务以及提供多少能量。另一方面，大多数文献的优化目标未从用户的角度出发，现有研究缺少用户侧的能量优化方案。IoTD 希望在满足能量需求的同时尽可能减少经济付出，从而提高个体效用。因此，本文对基于 Stackelberg 博弈的无人机辅助无线供能物联网能量优化进行研究。在赋能 IoTD 和 UAV 理性决策能力条件下，本文运用 Stackelberg 博弈方法建模并解决一个 IoTD 如何合理地与多架邻近的 UAV 进行能量交易的问题，最终提出以用户为中心的能量交易方案。

具体地，IoTD 参考未来能耗情况，作为唯一主方先决策出给予所有 UAV 的总奖励。基于公平性原则，各 UAV 分配到的奖励与提供的能量成正比。接下来，各 UAV 作为从方，根据分配所得奖励和 WPT 过程中平均信道增益决策给予 IoTD 的充电时长。在 Stackelberg 博弈模型中，享受充电服务的 IoTD 被赋予信息优势和决策主动权，这有助于其提高个体效用和用户满意度，实现用户侧能量优化。本文的主要贡献如下。

1) 设计一种支持 IoTD 与 UAV 之间自由能量交易的系统模型。充电服务平台采用 UAV 辅助的无线供能方式为 IoTD 提供充电服务，在能量交易过程中 IoTD 和 UAV 自主决策策略，最大化各自的个体效用。

2) 提出一种基于单主多从 Stackelberg 博弈模型的能量交易方案。在以用户为中心的能量交易过程中，IoTD 作为唯一主方，由其决策给予所有 UAV 的总奖励。每架 UAV 作为从方，通过能量供应公平地竞争获取奖励，它们参考 WPT 过程中的平均信道增益以决策提供给 IoTD 的充电时长。

3) 通过理论方法求解与分析 Stackelberg 博弈模型的均衡状态。在讨论各 UAV 参与能量交易的条件后，考虑所有 UAV 参与条件下，求解 IoTD 的最优策略，并分析不同 UAV 数量对最优策略的影响。最后，通过实验仿真证明所提方案优于现有基准方案，可有效减少 IoTD 经济开销，提高用户满意度。

1　系统模型

现在的 IoTD，如手机、平板电脑和智能手表等手持设备以及工业传感器和移动机器人等工业设备，通常由有限容量的电池供电。这些 IoTD 容易面临能量耗尽的风险，需要及时的充电服务。为了延长网络中 IoTD 的使用时间，充电服务平台被专门设立，采用 UAV 辅助的无线供能方式为全网 IoTD 提供充电服务。现有文献[15-16]已经提出了多架 UAV 可按需调度飞往同一区域，为区域内的 IoTD 提供能量供应。每架 UAV 可以在 WPT 范围内广播射频信号，同时为多个 IoTD 进行充电。本文进一步扩展 UAV 辅助的无线供能场景，当某个 IoTD 处于多架 UAV 的共同 WPT 范围内，为了获得更多的能量供应，可按需地、有序地接受来自多架 UAV 的多次充电服务。并且，在本文场景中，IoTD 作为能量交易买方，在获得必要的先验知识后，可自主理性地决策能量交易份额，这有利于提高用户满意度，实现充电服务定制化和用户侧能量优化。所有 UAV 和 IoTD 在入网时需要在充电服务平台上注册获得合法身份，充电服务平台也实时掌握派出的 UAV 的状态信息，建立知识库储备先验知识，用于辅助充电服务过程的相关决策。无人机辅助的无线供能物联网如图 1 所示。

物联网终端设备。根据历史记录，每个 IoTD 阶段性地预测未来能耗情况，若发现接下来将出现电量不足现象，IoTD 会向充电服务平台发送充电请求，被平台记录入服务名单中。在获知响应服务请求的邻近 UAV 及其相关信息后，IoTD 自主决策是否雇佣一架或者多架 UAV 来为自己充电，并提供承诺的服务奖励。多 UAV 充电场景在实际应用中是常见的，例如，当某 IoTD 出现紧急情况需要快速充电时，或者当单架 UAV 携带的电量无法满足 IoTD 的能量补充计划时，IoTD 希望与多架 UAV 先后进行能量交易，并标明此充电请求为较高等级。另外，每个 IoTD 不会简单地选择充满电，对于充电用户，需要基于不同的内外因素来综合决策补充多少能量。内部因素包括当前时段的初始能量状态和预估的未来能量消耗，外部因素主要涉及与不同 UAV 进行能量交易的经济成本。通过考虑以上因素，IoTD 按需地调整与各 UAV 的能量交易份额，解决能量需求和能量交易费用之间的权衡问题。

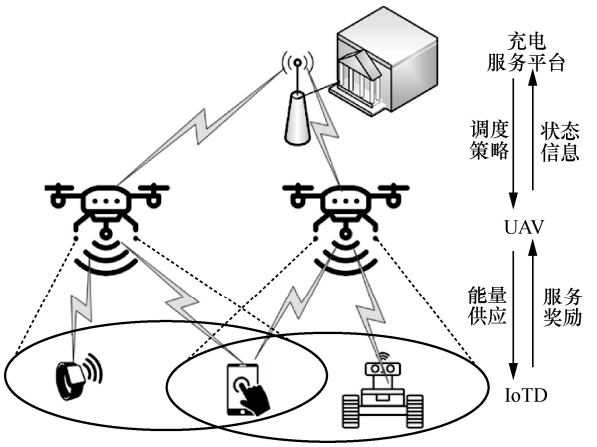

图 1　无人机辅助的无线供能物联网

无人机。当充电服务平台累计接收到一组充电请求后，一定数量的 UAV 按照调度策略飞往指定位置悬停，准备为 WPT 范围内的 IoTD 充电。在一次完整的充电服务过程中，每架 UAV 获得两方面的经济收入。一方面，UAV 接收来自充电服务平台的经济补贴，以补偿出发点（如充电站）与悬停位置之间往返的飞行能量消耗。另一方面，UAV 在悬停位置与 IoTD 进行自由能量交易，根据能量交易份额获得交易收入。在到达悬停位置后，各 UAV 根据服务名单询问服务对象。某 IoTD 可能收到单架或者多架 UAV 的询问，将一一回复 UAV。在收到 IoTD 回复时，各 UAV 根据能量交易收入与自身充电能耗状况决策出服务 IoTD 的充电时长并回复给 IoTD。在收到 IoTD 确认需要充电服务的回复后，此 UAV 周期性地发送消息包询问 IoTD 是否可以开始充电。只有当 IoTD 回复可以时，两者之间的 WPT 通道才被激活，IoTD 开始接收来自此 UAV 的射频信号的能量。通过利用一次完整的询问应答过程，既可以实现单架 UAV 广播射频信号同时为多个准

备好的 IoTD 充电，也可以确保单个 IoTD 依次有序地接收来自多架 UAV 的充电服务。

充电服务平台。充电服务平台根据充电请求地理分布和不同等级要求，自行设计算法决策出合适的无人机数量与关联的悬停位置，尽量确保发送较高等级充电请求的 IoTD 能够处于多架 UAV 的共同 WPT 范围。一方面，充电服务平台记录来自终端设备的充电请求和收集其位置坐标信息；另一方面，如文献[15]所述，为了实现集中式 UAV 管理，充电服务平台实时地与 UAV 保持通信，掌握它在提供能量供应时的状态信息，如位置坐标、姿态信息、信道状态信息等，借助这些辅助信息进行集中式决策。充电服务平台将这些收集的数据存储于知识库作为先验知识，当 IoTD 用户在充电服务平台注册了可信的服务代理，被授权合法接入知识库后，可获取指定 UAV 的先验知识用于辅助后续的决策过程。

2　基于 Stackelberg 博弈的能量交易

通过预测未来能耗，某 IoTD 按需地向邻近的多架 UAV 请求多次充电服务。为了研究单 IoTD 与多 UAV 之间的能量交易过程，本文基于两阶段的单主多从 Stackelberg 博弈模型讨论两者之间交互时的策略选择。IoTD 作为主方决定给予所有 UAV 的服务奖励，每架 UAV 作为从方根据奖励分配决定服务 IoTD 的充电时长。系统参数如表 1 所示。

2.1　Stackelberg 博弈模型

IoTD 位于多架 UAV 的共同 WPT 范围内，可按需地请求多 UAV 为其无线充电。根据地理位置，此 IoTD 能够接收来自一组无人机 $\mathcal{I}=\{1,2,\cdots,i,\cdots,I\}$ 的射频信号。首先介绍 UAV $i(i\in\mathcal{I})$ 的效用函数。在 WPT 时，UAV i 与地面的 IoTD 建立空–地通信链路既可能是视线线路（LoS, line-of-sight）通信链路，也可能是非视距（NLoS, non-line-of-sight）通信链路。假设建立 LoS 通信链路的概率为 p_i^{LoS}，则建立 NLoS 通信链路的概率为 $1-p_i^{\mathrm{LoS}}$，p_i^{LoS} 的值与于通信环境、硬件配置和 IoTD 与 UAV 之间的相对仰角 θ_i 相关。采用笛卡儿坐标系，设 IoTD 的位置坐标为 $(x_0,y_0,0)$，UAV i 的位置坐标为 (x_i,y_i,z_i)。两者之间的相对位置关系表示为欧氏距离 $d_i=\sqrt{(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)+z_i^2}$，相对仰角 $\theta_i=\left(\frac{180}{\pi}\right)\arcsin\left(\frac{z_i}{d_i}\right)$。借鉴文献[18]，$p_i^{\mathrm{LoS}}$ 的计算式为

$$p_i^{\mathrm{LoS}}=\frac{1}{1+\alpha\exp(-\beta(\theta_i-\alpha))} \tag{1}$$

其中，α 和 β 是常数。文献[19]提出自由空间下 LoS 和 NLoS 通信链路的路径损耗模型为

$$\begin{cases} L_i^{\mathrm{LoS}}=\gamma^{\mathrm{LoS}}\left(\dfrac{4\pi f_{\mathrm{c}}d_i}{s}\right)^2 \\ L_i^{\mathrm{NLoS}}=\gamma^{\mathrm{NLoS}}\left(\dfrac{4\pi f_{\mathrm{c}}d_i}{s}\right)^2 \end{cases} \tag{2}$$

其中，f_{c} 和 s 分别代表载波频率和光速，γ^{LoS} 和

表 1　　**系统参数**

参数	含义	参数	含义
$\cap$	IoTD 周边的所有无人机的集合	η_i^{t}	UAV i 在空间中的 WPT 效率
p_i^{LoS}	UAV i 与 IoTD 建立 LoS 通信链路的概率	ρ_i	IoTD 单位时间内从 UAV i 获取的能量
θ_i	IoTD 与 UAV 之间的相对仰角	P_i^{H}	UAV i 悬停功率
d_i	IoTD 与 UAV 之间的距离	R	IoTD 提供给所有 UAV 的总奖励
f_{c}	载波频率	c_i	UAV i 单位时间的充电成本
s	光速	κ	单位能量的经济成本
γ^{LoS}	视线线路通信链路下的大尺度路径损耗系数	E_{th}	IoTD 能量供应阈值
γ^{NLoS}	非视距通信链路下的大尺度路径损耗系数	λ , μ	IoTD 效用函数中自定义的常数
$\bar{g}_i$	UAV i 与 IoTD 通信的平均信道增益	$\boldsymbol{t}$	所有 UAV 的策略集合
t_i	UAV i 服务 IoTD 的充电时长	$\boldsymbol{t}_{-i}$	除 UAV i 外其他 UAV 的策略集合
e_i	IoTD 从 UAV i 获得的能量	t_i^*	UAV i 的最优充电时长
η^{c}	IoTD 侧将射频率能量转直流的功率转换效率	R^*	IoTD 提供的最优服务奖励

γ^{NLoS} 分别是对应 2 种通信链路的大尺度路径损耗系数并且有 $\gamma^{\mathrm{LoS}} < \gamma^{\mathrm{NLoS}}$。进一步，可以得到 IoTD 与 UAV i 的平均信道增益为

$$\bar{g}_i = \left(p_i^{\mathrm{LoS}} L_i^{\mathrm{LoS}} + p_i^{\mathrm{NLoS}} L_i^{\mathrm{NLoS}}\right)^{-1} = \left(\frac{4\pi f_{\mathrm{c}} d_i}{s}\right)^{-2} \left(p_i^{\mathrm{LoS}} \gamma^{\mathrm{LoS}} + p_i^{\mathrm{NLoS}} \gamma^{\mathrm{NLoS}}\right)^{-1} \tag{3}$$

在随机环境下，即使已知 IoTD 与 UAV i 的具体位置，仍旧无法准确地知道接下来两者之间的通信链路将会是 LoS 还是 NLoS。为了同时考虑这 2 种条件，本文借鉴文献[15]和文献[19]，采用平均信道增益进行 WPT 建模。

若 UAV i 确定服务 IoTD 的充电时长 t_i，IoTD 将从此 UAV 补充获得以下能量

$$e_i = \eta^{\mathrm{c}} \eta_i^{\mathrm{t}} P_i^{\mathrm{W}} \bar{g}_i t_i = \rho_i t_i \tag{4}$$

其中，η^{c} 是在 IoTD 侧将射频能量转为直流的功率转换效率，η_i^{t} 是 UAV i 在空间中的 WPT 效率，P_i^{W} 为 UAV i 恒定的 WPT 功率，$\rho_i = \eta^{\mathrm{c}} \eta_i^{\mathrm{t}} P_i^{\mathrm{W}} \bar{g}_i$ 是 IoTD 单位时间内从 UAV i 获取的能量，也可以表示为 UAV i 服务 IoTD 的充电能力。在充电服务时，IoTD 位置始终不变且 UAV i 在悬停位置也基本保持不变。在悬停状态通过 WPT 给 IoTD 充电时， UAV i 除了消耗 WPT 功率 P_i^{W}，还需要消耗悬停功率 P_i^{H}，故 UAV i 的总功率为 $P_i^{\mathrm{H}} + P_i^{\mathrm{W}}$。基于公平原则，任意 UAV 在能量交易过程中所获得的收入与它给 IoTD 提供的能量成正比。本文假设 UAV i 获得的奖励由其能量供应占比决定，表示为 $\frac{R\rho_i t_i}{\sum_{i=1}^{I} \rho_i t_i}$，其中 R 是 IoTD 承诺提供给所有参与能量交易的 UAV 的总奖励。综上所述，UAV i 的效用函数等于所分配的奖励减去充电服务成本，表示为

$$U_i = \frac{\rho_i t_i}{\sum_{i=1}^{I} \rho_i t_i} R - c_i t_i \tag{5}$$

其中，$c_i = \kappa\left(P_i^{\mathrm{H}} + P_i^{\mathrm{W}}\right)$，$\kappa$ 是单位能量的经济成本。在以上激励机制中，IoTD 鼓励不同的 UAV 通过供应不同能量来竞争获取服务奖励。

在能量交易中，IoTD 主要解决充电服务过程中能量需求和服务奖励之间的权衡问题。令 $C(t)$ 表示 IoTD 在 t 时段的能耗实际值，对应预估值为 $\hat{C}(t)$。本文采用 N 步的移动平均法来预测每一个 t 时段的能耗情况。在 t 时段开始时，IoTD 预测接下来一个完整 t 时段内能耗为

$$\hat{C}(t) = \hat{C}(t-1) + \frac{1}{N}[C(t-1) - C(t-N-1)] \tag{6}$$

假设当前为 t 时段，初始时刻 IoTD 检测到剩余能量为 E_0，IoTD 基于 $\hat{C}(t)$ 和 E_0 设定一个阈值以约束本次充电服务的能量供应 $E_{\mathrm{th}} = \frac{\varepsilon \hat{C}(t)}{E_0}$，其中，$\varepsilon$ 是 IoTD 设置的比例系数，要求 $\sum_{i=1}^{I} \rho_i t_i \geqslant E_{\mathrm{th}}$。本文将 IoTD 获得能量供应的用户满意度建模为一个关于 $\sum_{i=1}^{I} \rho_i t_i$ 与 E_{th} 之间差值的对数函数。综上所述，IoTD 的效用函数为

$$V = \lambda \ln\left(1 + \mu\left(\sum_{i=1}^{I} \rho_i t_i - E_{\mathrm{th}}\right)\right) - R \tag{7}$$

其中，λ 和 μ 是 IoTD 自定义的常数。

本文将单 IoTD 和多 UAV 之间的策略交互建模为一个两阶段的单主多从 Stackelberg 博弈模型，在用户侧实现能量优化研究。IoTD 作为主方决定所有 UAV 的总奖励 R，各 UAV 作为从方用充电时长 t_i 来响应回复 IoTD，并且在所有 UAV 之间还存在一个非合作博弈。具体定义如下。

第一阶段：奖励设置。IoTD 调节对所有 UAV 的奖励 R，以最大化效用函数 V。

$$R^* = \arg\max_{R} V\left(R, \boldsymbol{t}\right)$$

其中，$\boldsymbol{t} = \{t_1, \cdots, t_I\}$ 是所有 UAV 的策略集合。

第二阶段：能量供应。根据总奖励 R 和其他 UAV 的策略集合 $\boldsymbol{t}_{-i}$ (即 $\boldsymbol{t}_{-i} \cup t_i = \boldsymbol{t}$)，每架 UAV i 优化充电时长 t_i 以最大化效用函数 U_i。

$$t_i^* = \arg\max_{t_i} U(t_i, \boldsymbol{t}_{-i})$$

2.2　Stackelberg 均衡求解与分析

Stackelberg 博弈的目标是找到唯一的 Stackelberg 均衡。在此均衡状态下，主方在给定各从方的最优策略下可最大化个体效用，此时 IoTD 和所有的 UAV 都没有单方面改变当前策略的动机。将 Stackelberg 均衡解定义如下。

定义 1　Stackelberg 均衡。当且仅当 IoTD 和每

架 UAV 分别满足以下不等式时，策略组 $(R^*,\boldsymbol{t}^*)$ 是 Stackelberg 均衡。

$$\begin{cases} V(R^*,\boldsymbol{t}^*) \geqslant V(R,\boldsymbol{t}^*) \\ U_i(t_i^*,\boldsymbol{t}_{-i}^*,R^*) \geqslant U_i(t_i,\boldsymbol{t}_{-i}^*,R^*), \forall i \in \mathcal{I} \end{cases}$$

接下来，本文运用逆向归纳法来求解所提模型的 Stackelberg 均衡。根据建立的 Stackelberg 博弈模型，先分析出各 UAV 作为从方参与服务 IoTD 的条件并探讨特殊条件下所有 UAV 的总策略，随后求解 IoTD 作为主方的最优策略并定量分析不同 UAV 数量对此策略的影响。相较于原始方法，所提方法在条件分析与策略讨论方面进行了创新。

首先，从从方角度讨论任意 UAV i 的最优策略 t_i^*。求取 UAV i 的效用函数 U_i 关于 t_i 的一阶、二阶导数，可得

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U_i}{\partial t_i} = \dfrac{\rho_i \sum\limits_{j \neq i}^{I} \rho_j t_j}{\left(\sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i\right)^2} R - c_i \\ \dfrac{\partial^2 U_i}{\partial t_i^2} = -\dfrac{2\rho_i^2 \sum\limits_{j \neq i}^{I} \rho_j t_j \sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i}{\left(\sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i\right)^3} R < 0 \end{cases} \tag{8}$$

由 $\dfrac{\partial^2 U_i}{\partial t_i^2} < 0$ 可知，效用函数 U_i 是关于 t_i 的严格凹函数，这意味着在给定 R 和 $\boldsymbol{t}_{-i}$ 条件下，UAV i 存在唯一的最优策略 t_i^* 使 U_i 最大化。基于一阶最优性条件，令 $\dfrac{\partial U_i}{\partial t_i} = 0$ 可得

$$\frac{R\left(\sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i^* - \rho_i t_i^*\right)}{\left(\sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i^*\right)^2} = \frac{c_i}{\rho_i} \tag{9}$$

将 $\sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i^* = \sum\limits_{j \neq i} \rho_j t_j^* + \rho_i t_i^*$ 代入式(9)，求解 t_i^* 可得

$$t_i^* = \left[\sqrt{\frac{RX}{\rho_i c_i}} - \frac{X}{\rho_i}\right]^+ \tag{10}$$

其中，$X = \sum\limits_{j \neq i} \rho_j t_j^*$，$[\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$。不妨先假设对于任意 UAV i 满足 $t_i^* > 0, \forall i$。在式(9)等号两边分别对所有 UAV 进行累加操作，可得

$$\frac{(I-1)R\sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i^*}{\left(\sum\limits_{i=1}^{I} \rho_i t_i^*\right)^2} = \sum_{i=1}^{I} \frac{c_i}{\rho_i} \tag{11}$$

化简可得

$$\sum_{i=1}^{I} \rho_i t_i^* = \frac{(I-1)R}{\sum\limits_{i=1}^{I} \dfrac{c_i}{\rho_i}} \tag{12}$$

进一步地，将式(12)代入式(9)，可得

$$t_i^* = \frac{(I-1)}{\rho_i \sum\limits_{i=1}^{I} \dfrac{c_i}{\rho_i}} R - \frac{c_i (I-1)^2}{\left(\rho_i \sum\limits_{i=1}^{I} \dfrac{c_i}{\rho_i}\right)^2} R \tag{13}$$

注意到当且只当满足式(14)时，$t_i^* > 0, \forall i$ 成立

$$\frac{c_i}{\rho_i} < \frac{\sum\limits_{i=1}^{I} \dfrac{c_i}{\rho_i}}{I-1}, 1 \leqslant i \leqslant I \tag{14}$$

为了简化，将式(14)转换为

$$\frac{c_m}{\rho_m} < \frac{\sum\limits_{i \neq m} \dfrac{c_i}{\rho_i}}{I-2} \tag{15}$$

其中 m 是数组 $\left\{\dfrac{c_i}{\rho_i}\right\}_{i \in \mathcal{I}}$ 中最大元素的对应索引。若条件式(15)不满足，那么将存在一个子集 $\mathcal{J} \subseteq \mathcal{I}$ 表示为最终愿意参与服务 IoTD 的 UAV 集合，换言之，满足 $t_i^* > 0, \forall i \in \mathcal{J}$ 且 $t_i^* = 0, \forall i \notin \mathcal{J}$。将 $\mathcal{J}$ 代入式(13)，t_i^* 重新表示为

$$t_i^* = \frac{(J-1)}{\rho_i \sum\limits_{i \in \mathcal{J}} \dfrac{c_i}{\rho_i}} R - \frac{c_i (J-1)^2}{\left(\rho \sum\limits_{i \in \mathcal{J}} \dfrac{c_i}{\rho_i}\right)^2} R, \forall i \in \mathcal{J} \tag{16}$$

其中，J 表示集合 $\mathcal{J}$ 的元素个数。在给定 $\left\{\dfrac{c_i}{\rho_i}\right\}_{i \in \mathcal{I}}$ 条件下，为了求解集合 $\mathcal{J}$，本文借鉴文献[20]设计出迭代算法 1。

算法 1　求解集合 $\mathcal{J}$ 算法

1) 初始化阶段。已知集合 $\left\{\dfrac{c_i}{\rho_i}\right\}_{\forall i \in \mathcal{I}}$，将集合中的元素按从小到大排序，对应的索引被保存到一个

新的集合 $\mathcal{L}$ 。初始化 $\mathcal{J}=\{\mathcal{L}[0],\mathcal{L}[1]\}$ 和 $i=2$ 。

2) 迭代阶段。更新集合 $\mathcal{J}$ ，$\mathcal{J}=\mathcal{J}\cup\mathcal{L}[i]$ 。如果 $\frac{c_{\mathcal{L}[i]}}{\rho_{\mathcal{L}[i]}}<\frac{\sum_{0\leqslant j\leqslant i-1}\frac{c_{\mathcal{L}[j]}}{\rho_{\mathcal{L}[j]}}}{i-1}$ ，更新 $i=i+1$ 并重复此步骤。否则，转到下一步。

3) 算法终止。$\mathcal{J}=\{\mathcal{L}[j],j=0,1,\cdots,i-1\}$ ，算法结束。

迭代算法 1 以逐一访问形式判断每架 UAV 是否参与能量交易，当某架 UAV 不满足参与条件时，后续 UAV 不需要再进行判断，愿意参与的 UAV 即可确定，算法最多需要执行 *I*–2 次，因此迭代算法的复杂度为 $\mathcal{O}(I-2)$ 。在确定集合 $\mathcal{J}$ 后，可根据式(16)求得最终解 t_i^* 并且发现 $t_i^*\propto R,\forall i\in\mathcal{J}$ 和 $\sum_{i\in\mathcal{J}}\rho_i t_i^*\propto R$ 。为了简化问题分析，在接下来的主方最优策略分析中，本文假定 $t_i^*>0,1\leqslant i\leqslant I$ 始终成立，即满足条件式(15)。此时，可以得到

$$\sum_{i=1}^{I}\rho_i t_i^*=R\left(\frac{I(I-1)}{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}}-\frac{(I-1)^2}{\left(\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}\right)^2}\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}\right)=\frac{(I-1)R}{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}}=\phi R \tag{17}$$

在合法接入充电服务平台的知识库后，IoTD 掌握集合 $\mathcal{I}$ 中所有 UAV 的先验知识，可以预测出每架 UAV 的 t_i^* 从而得到 $\sum_{i=1}^{I}\rho_i t_i^*=\phi R$ 。随后，IoTD 将 $\sum_{i=1}^{I}\rho_i t_i^*$ 代入自身效益函数 V 更新可得

$$V=\lambda\ln\left(1+\mu\phi R-\mu E_{\text{th}}\right)-R,R_{\min}\leqslant R\leqslant R_{\max} \tag{18}$$

其中，$R_{\min}=\frac{E_{\text{th}}}{\phi},R_{\max}=\frac{E_{\max}-E_0}{\phi}$ 分别表示 R 的下界和上界，$E_{\max}$ 为 IoTD 的电池容量。通过研究效用函数 V 关于 R 的一阶、二阶导数来讨论其函数凹凸性

$$\begin{cases}\frac{\partial V}{\partial R}=\frac{\lambda\mu\phi}{1+\mu\phi R-\mu E_{\text{th}}}-1\\ \frac{\partial^2 V}{\partial R^2}=-\frac{\lambda\mu^2\phi^2}{(1+\mu\phi R-\mu E_{\text{th}})^2}<0\end{cases} \tag{19}$$

$\frac{\partial^2 V}{\partial R^2}<0$ 证明函数 V 是关于 R 的严格凹函数。这意味着基于一阶最优性条件 $\frac{\partial V}{\partial R}=0$ 和 R 的可行域，可推导出 R 的最优值为

$$R^*=\begin{cases}R_{\min},\lambda-\frac{1}{\mu\phi}+\frac{E_{\text{th}}}{\phi}<R_{\min}\\ R_{\max},\lambda-\frac{1}{\mu\phi}+\frac{E_{\text{th}}}{\phi}>R_{\max}\\ \lambda-\frac{1}{\mu\phi}+\frac{E_{\text{th}}}{\phi},\text{其他}\end{cases} \tag{20}$$

本文进一步分析不同数量的 UAV 对 IoTD 的最终付出的服务总奖励 R^* 的影响。依据式(14)，增加某个 UAV j 为此 IoTD 提供充电服务，此 UAV 满足

$$\frac{c_j}{\rho_j}<\frac{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}+\frac{c_j}{\rho_j}}{I-1} \tag{21}$$

化简得到

$$\frac{c_j}{\rho_j}<\frac{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}}{I-2} \tag{22}$$

此时，根据式(17)，所有 UAV 可提供能量供应为

$$\sum_{i=1}^{I}\rho_i t_i^*+\rho_j t_j^*=\frac{IR}{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}+\frac{c_j}{\rho_j}}=\phi' R \tag{23}$$

易知，有

$$\phi'-\phi=\frac{I}{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}+\frac{c_j}{\rho_j}}-\frac{I-1}{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}}=\frac{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}-(I-1)\frac{c_j}{\rho_j}}{\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}\sum_{i=1}^{I}\frac{c_i}{\rho_i}+\frac{c_j}{\rho_j}}>0 \tag{24}$$

当有合适的 UAV 新加入为此 IoTD 提供充电服务时，参数 ϕ 增大，这意味着 IoTD 在付出相同的服务奖励 R 条件下，可以获得更多的能量供应。接下来，讨论 ϕ 增大对于 IoTD 的 R^* 影响。根据式(20)，R^* 在合理区间内为

$$R^*=\lambda-\frac{1}{\mu\phi}+\frac{E_{\text{th}}}{\phi}=\lambda-\frac{1}{\phi}\left(\frac{1}{\mu}-E_{\text{th}}\right) \tag{25}$$

在式(7)所示的 IoTD 的效用函数中，要求当

$\sum_{i=1}^{I}\rho_i t_i = 0$ 时，$1-\mu E_{\text{th}} > 0$，进而有 $\frac{1}{\mu} - E_{\text{th}} > 0$。因此，当 ϕ 增大时，R^* 也随之增大。最终，可以得到结论：当参与能量供应的 UAV 数量增加时，IoTD 根据效用最大化原则理性地提高 R^*，以有效激励更多 UAV，从而获得更多能量供应，提高个体效用。

3　性能评估

3.1　方案对比

为了验证所提方案的有效性，本节将通过实验仿真来分析和评估方案性能。假设某 IoTD 处于 I =3 架 UAV 的共同 WPT 范围内，UAV 部分参数参考 DJI M300，例如，其悬停功率上限为 60 W，飞行高度上限设置为 5 m。每架 UAV 配备 Powercast 公司的无线充电开发工具包，支持 3 W 以上的发射功率（如 TX91501-3W-ID 产品）。为了提高 WPT 效率，IoTD 与任意 UAV 的距离限制为 10 m 之内，传输、接收能量的效率和平均信道增益模型借鉴文献[21]，式(1)~式 (3) 中，$\alpha = 4.88$，$\beta = 0.43$，$f_{\text{c}} = 2.5$ GHz，$\gamma^{\text{LoS}} = 0.1$，$\gamma^{\text{NLoS}} = 23$。对于 IoTD，效用函数 V 中的 $\lambda = 1.83\times10^6$，$\mu = 1$ 和 $E_{\text{th}} = 30$ mJ。

为了体现本文方案的优越性，将所设计方案与其他 3 种基准方案进行比较。本文利用 Stackelberg 博弈方法建模并求解 IoTD 与多 UAV 能量交易时的最优能量交易份额 ϕR^*，各 UAV 通过公平竞争获取与能量供应成正比的奖励。为了获取相同的能量 ϕR^*，存在以下 3 种基准方案。具体地，方案 1 中 IoTD 要求各 UAV 平均供应 $\frac{\phi R^*}{I}$ 份能量，当 $U_i \geqslant 0$ 时，UAV i 才愿意参与能量供应的原则，IoTD 给予 UAV i 的最低奖励为 $\frac{c_i \phi R^*}{I\rho_i}$，此时有 $U_i = 0, \forall i$。方案 2 中 IoTD 也平均分配能量，为了确保所有 UAV 均参与能量供应，IoTD 给予各 UAV 的单位充电时长奖励为 $\max\left(\{c_i\}_{\forall i}\right)$。方案 3 中 IoTD 按照能耗优先原则，分配各 UAV 供应 $\frac{\phi R^*}{\left(c_i \sum_{\forall i}\frac{1}{c_i}\right)}$ 份能量，IoTD 给予各 UAV 的单位充电时长奖励为 $\max\left(\{c_i\}_{\forall i}\right)$。

在图 2 中，Δc 表示所有 UAV 的 c 值的变化量，当所有 UAV 的 c 都变大时，即在满足相同的能量需求时，IoTD 需要付出更多的服务奖励，此时 IoTD 理性地降低 R^*，减少能量需求，避免过高的经济开销带来个体效用 V 的减少。因此，所有方案得到的 R^* 均随着 Δc 增大而减少。另外，从图 2 中可以看出，方案 1 严格要求所有 UAV 让利于 IoTD，使 IoTD 能够付出最小的服务奖励，此方案为理想方案，在现实应用中因缺乏公平性难以实现。相反地，本文方案以 IoTD 作为 Stackelberg 博弈的主方，在已知所有 UAV 的先验知识下优化服务奖励，由于占据信息优势和决策主动权，本文方案的 IoTD 在不同 Δc 条件下付出的服务奖励始终低于方案 2 和方案 3。例如，当 $\Delta c = 10\%$ 时，本文方案相对于这 2 种基准方案分别下降约 8%和 21%。通过方案对比可知，本文方案优于现实中可用的基准方案，有效地降低了 IoTD 在能量交易中的经济开销，从而提高用户满意度，实现用户侧能量优化。

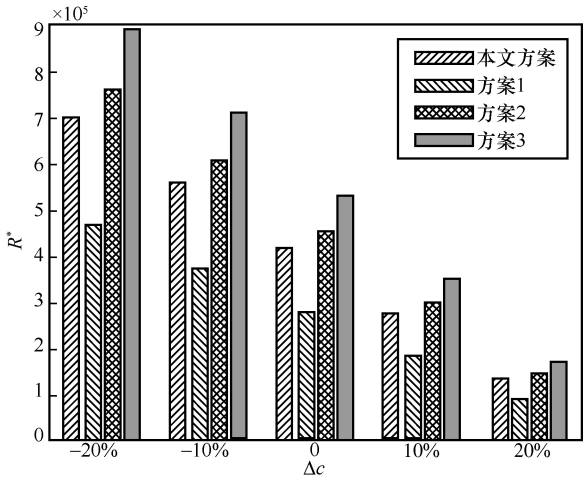

图 2　不同方案随不同 UAV 的充电开销 c 变化的 R^* 对比

3.2　参数影响

以下实验仿真分析不同系统参数对于 Stackelberg 博弈模型的主方（IoTD）和各从方（UAV）的策略影响。

在本文 Stackelberg 博弈模型中，作为主方的 IoTD 决策给予所有 UAV 的总奖励 R，从而获得不同的效用值 V。由图 3 可知，IoTD 在不同 λ 与 R 条件下会得到不同的 V，并且总是存在一个最优的 R（即 R^*）使 V 最大化（即 V^*）。基于式(7)，λ 对于 V 的计算起积极作用，因而在相同 R 条件下，V 随着 λ 增大而增大。λ 增大意味着 IoTD 可以通过获取

更多能量而提高用户满意度，在衡量能量需求与经济开销时，此时 IoTD 倾向于优先满足能量需求，从而理性地提高 R^*，所得 V^* 也随之提高。

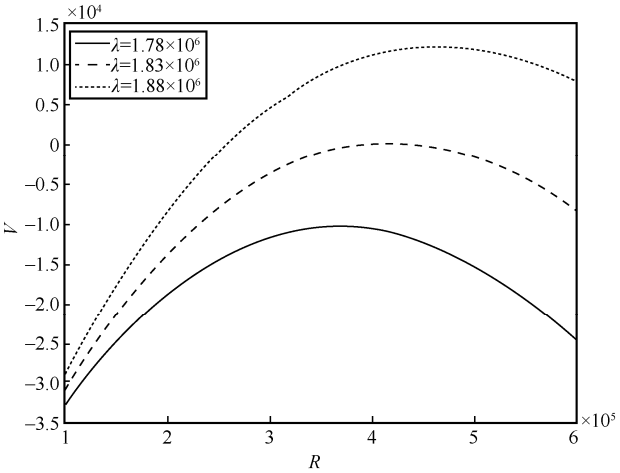

图 3　不同 λ 下效用值 V 随总奖励 R 的变化

图 4~图 6 分别展示了不同 UAV 数量、不同 UAV 的充电开销 c 和充电能力 ρ 变化对 IoTD 最终付出的服务总奖励 R^* 影响。图 4 展示了当更多合适 UAV 加入为 IoTD 提供充电服务时，R^* 会出现不同程度的增加，验证了 2.2 节的分析结果。这与实际应用中的直觉认识相一致，IoTD 在花费相同的经济成本条件下可以与更多的 UAV 进行能量交易，从而获得更多的能量供应，使 IoTD 自然愿意提高服务总奖励以尽可能地满足自身的能量需求，确保个体效用最大化。另外，根据式(20)，能量供应阈值 E_{th} 的提高也有助于增大 R^*。在图 5 中，当所有 UAV 的 c 都变大时，这要求 IoTD 付出更多服务奖励以有效地激励 UAV 进行能量供应，此时不利于 IoTD 与 UAV 之间交易能量，因此 IoTD 理性地选择降低 R^*。在图 6 中，$\Delta\rho$ 表示所有 UAV 的 ρ 值的变化量，当所有 UAV 的 ρ 都变大时，说明 WPT 效率提高，这有利于 UAV 向 IoTD 传输能量，IoTD 在付出相同的服务奖励时，可以获得更多的能量供应，此时 IoTD 更愿意提高 R^*，争取满足更多能量需求以提高用户满意度，进而提高个体效用 V。图 7 展示了 UAV 充电能力和充电开销对 IoTD 选择能量供应的影响。如前所述，所有 UAV 的 c 对能量交易起消极作用，所有 UAV 的 ρ 对能量交易起积极作用。例如，当 $\Delta c=-50\%$ 时，如果 $\Delta\rho$ 从减少 10%变化为增大 10%，ϕR^* 将可以提高约 39%。

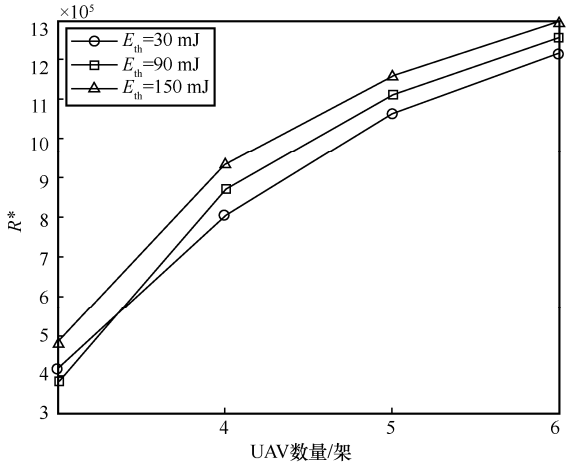

图 4　UAV 数量对 R^* 的影响

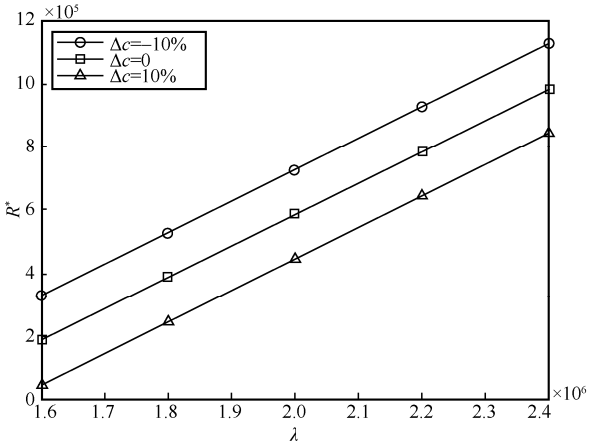

图 5　UAV 充电开销对 R^* 的影响

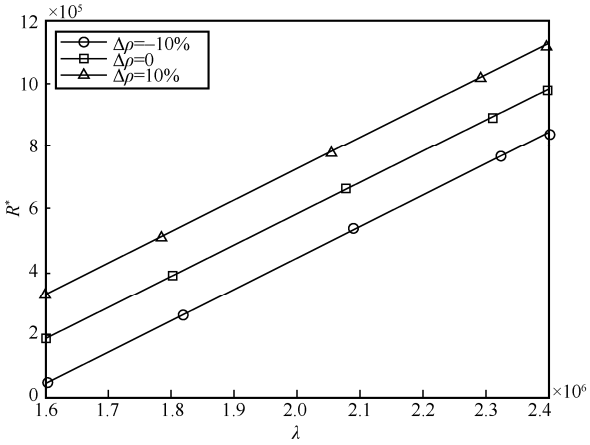

图 6　UAV 充电能力对 R^* 的影响

接下来，为了观察从方的策略变化，不妨选取第 1 架 UAV 作为观察对象。根据式(10)，此 UAV 的最优充电时长 t^* 会随着 IoTD 给予的总奖励 R、其他 UAV 的策略选择 X，以及自身的 ρ 和 c 变化而变化。从图 8 中可知，t^* 会随着 c 增大而减少，

相反地，会随着 ρ 增大而增大，这符合现实的认知规律。因此，当 $\Delta c=0$ 时，若 $\Delta\rho$ 从 10%降低至 –10%，对应的 t^* 将减少超过 50%。另外，从图 9 中可知，不断提高的 R 有助于增大 t^*，而 X 的作用视 R 的情况而定。例如，当 R 比较小时，若 X 增大，IoTD 没有足够的动机提高 t^*；但当 R 比较大时，若 X 增大，IoTD 为了争取足够多的服务奖励，选择跟随其他 UAV 的策略提高自身的 t^*。

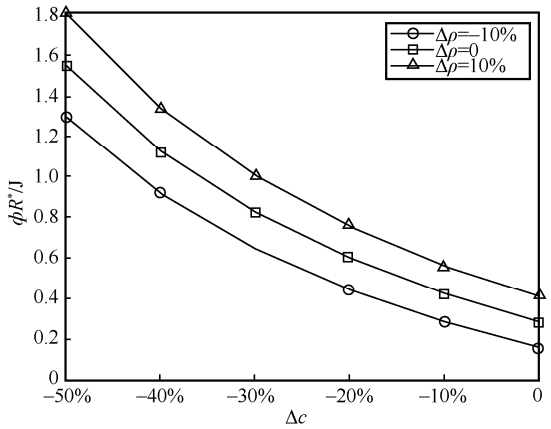

图 7　UAV 充电能力和充电开销对 IoTD 选择能量供应的影响

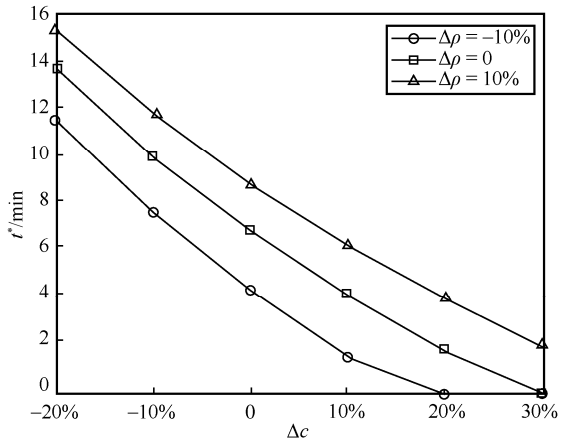

图 8　充电能力和充电开销对 t^* 的影响

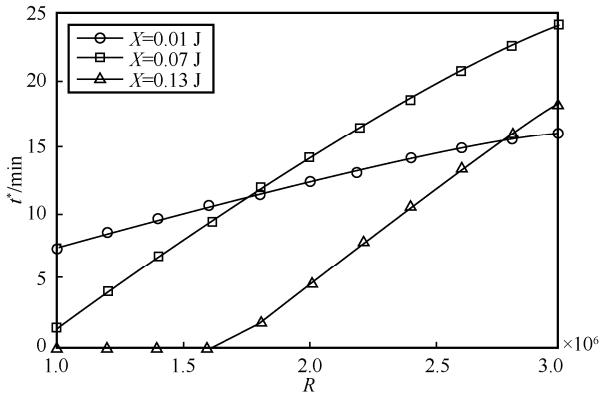

图 9　充电总奖励和其他 UAV 的策略选择对 t^* 的影响

4　结束语

本文提出一种基于 Stackelberg 博弈的 UAV 辅助无线供能物联网能量交易方案。为了研究用户与 UAV 之间的自由公平能量交易，Stackelberg 博弈模型以 IoTD 作为主方和各 UAV 作为从方，在兼顾各 UAV 个体理性条件下最大化 IoTD 的个体效用。在以用户为中心的能量交易过程中，IoTD 决策给予所有 UAV 的总奖励。每架 UAV 通过能量供应公平地竞争获取奖励，它们参考 WPT 过程中的平均信道增益以决策提供给 IoTD 的充电时长。随后，本文通过理论方法求解与分析 Stackelberg 博弈模型的均衡解。仿真结果表明，本文方案有利于减少用户在能量交易中的经济开销，提高用户满意度，实现用户侧能量优化。后续工作将会采用人工智能方法精准预测物联网终端设备的能耗情况，进一步研究多用户与多 UAV 之间的能量交易问题。

参考文献：

[1] VAILSHERY L S. IoT connected devices worldwide 2019-2030[R]. 2021.

[2] XIE L F, CAO X W, XU J, et al. UAV-enabled wireless power transfer: a tutorial overview[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(4): 2042-2064.

[3] LIU Y L, DAI H N, WANG Q, et al. Wireless powering Internet of things with UAVs: challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2022, 36(2): 146-152.

[4] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.

[5] 崔高峰, 徐媛媛, 张尚宏, 等. 基于最小能耗的多无人机无线网络安全数据卸载策略[J]. 通信学报, 2021, 42(5): 51-62.
CUI G F, XU Y Y, ZHANG S H, et al. Secure data offloading strategy for multi-UAV wireless networks based on minimum energy consumption[J]. Journal on Communications, 2021, 42(5): 51-62.

[6] LI M S, CHENG N, GAO J, et al. Energy-efficient UAV-assisted mobile edge computing: resource allocation and trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 3424-3438.

[7] ZHOU Y, PAN C H, YEOH P L, et al. Communication-and-computing latency minimization for UAV-enabled virtual reality delivery systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(3): 1723-1735.

[8] WANG T S, LI Y, WU Y. Energy-efficient UAV assisted secure relay transmission via cooperative computation offloading[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(4): 1669-1683.

[9] 杨君一, 李博, 张钦宇. 基于物理层网络编码的无人机中继网络资源优化[J]. 通信学报, 2021, 42(9): 12-20.
YANG J Y, LI B, ZHANG Q Y. Resource optimization for UAV relay

networks based on physical-layer network coding[J]. Journal on Communications, 2021, 42(9): 12-20.

[10] HU Z Z, ZENG F Z, XIAO Z, et al. Computation efficiency maximization and QoE-provisioning in UAV-enabled MEC communication systems[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(2): 1630-1645.

[11] 郎磊, 王荆宁, 王一, 等. 无人机辅助通信中基于用户轨迹的无线资源和航迹优化[J]. 通信学报, 2022, 43(3): 225-232.
LANG L, WANG J N, WANG Y, et al. Radio resource and trajectory optimization for UAV assisted communication based on user route[J]. Journal on Communications, 2022, 43(3): 225-232.

[12] SU C X, YE F, WANG L C, et al. UAV-assisted wireless charging for energy-constrained IoT devices using dynamic matching[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 4789-4800.

[13] 卢为党, 詹悦者, 花俏枝, 等. 基于无人机无线能量传输的边缘计算系统能耗优化方法研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 899-905.
LU W D, ZHAN Y Z, HUA Q Z, et al. Energy consumption optimization in UAV wireless power transfer based mobile edge computing system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 899-905.

[14] DU Y, YANG K, WANG K Z, et al. Joint resources and workflow scheduling in UAV-enabled wirelessly-powered MEC for IoT systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10187-10200.

[15] YE H T, KANG X, JOUNG J, et al. Joint uplink-and-downlink optimization of 3-D UAV swarm deployment for wireless-powered IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(17): 13397-13413.

[16] WU P F, XIAO F, HUANG H P, et al. Adaptive and extensible energy supply mechanism for UAVs-aided wireless-powered Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 9201-9213.

[17] 刘玲珊, 熊轲, 张煜, 等. 信息年龄受限下最小化无人机辅助无线供能网络的能耗：一种基于 DQN 的方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(5): 847-856.
LIU L S, XIONG K, ZHANG Y, et al. Energy minimization in UAV-assisted wireless powered sensor networks with AoI constraints: a DQN-based approach[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2021, 57(5): 847-856.

[18] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.

[19] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of things communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7574-7589.

[20] YANG D J, XUE G L, FANG X, et al. Incentive mechanisms for crowdsensing: crowdsourcing with smartphones[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(3): 1732-1744.

[21] BOR-YALINIZ R I, EL-KEYI A, YANIKOMEROGLU H. Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.

[作者简介]

黄旭民（1990– ），男，广东普宁人，博士，广东工业大学副教授，主要研究方向为车联网、移动边缘计算、区块链和深度学习。

张旸（1998– ），广东廉江人，女，广东工业大学硕士生，主要研究方向为无线网络资源管理、移动边缘计算和深度学习。

余荣（1979– ），男，广东饶平人，博士，广东工业大学教授，主要研究方向为边缘计算、深度学习、区块链、数字孪生、网联汽车、智能电网和物联网。

蒋丽（1986– ），女，四川简阳人，博士，广东工业大学副教授，主要研究方向为移动区块链、移动边缘计算、D2D 通信、数字孪生网络以及 B5G 和 6G 网络的资源管理。

田辉（1963– ），女，河南郑州人，博士，北京邮电大学教授，主要研究方向无线资源管理、智能边缘计算、移动社交网络。

吴远（1981– ），男，浙江杭州人，博士，澳门大学教授，主要研究方向为无线网络资源管理、绿色通信与计算、移动边缘计算、边缘智能。