

面向异构移动可充电设备的最大返岗时间最小化无线充电调度

徐佳, 刘婧怡, 徐力杰, 刘林峰

引用本文

徐佳, 刘婧怡, 徐力杰, 刘林峰. 面向异构移动可充电设备的最大返岗时间最小化无线充电调度[J]. 计算机科学, 2025, 52(10): 336-347.

XU Jia, LIU Jingyi, XU Lijie, LIU Linfeng. [Wireless Charging Scheduling with Minimized Maximum Return-to-Work Time for Heterogeneous Mobile Rechargeable Devices](#) [J]. Computer Science, 2025, 52(10): 336-347.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[量子元启发式算法及其应用综述](#)

Review of Quantum-inspired Metaheuristic Algorithms and Its Applications
计算机科学, 2025, 52(10): 190-200. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.250500127>

[面向长尾异构数据的个性化联邦学习框架](#)

Personalized Federated Learning Framework for Long-tailed Heterogeneous Data
计算机科学, 2025, 52(9): 232-240. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240700116>

[无线可充电传感器网络中异构感知的限时移动充电调度](#)

Time-constrained Mobile Charging Scheduling for Heterogeneous Sensing in Wireless Rechargeable Sensor Networks
计算机科学, 2025, 52(6): 355-364. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240400186>

[面向边缘智能应用的多出口深度神经网络随机优化方法](#)

Stochastic Optimization Method for Multi-exit Deep Neural Networks for Edge Intelligence Applications
计算机科学, 2025, 52(4): 85-93. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.241000097>

面向异构移动可充电设备的最大返岗时间最小化无线充电调度

徐佳 刘婧怡 徐力杰 刘林峰

南京邮电大学江苏省大数据安全与智能处理重点实验室 南京 210023

摘要 随着无线可充电设备的广泛应用,无线功率传输技术成为提高设备续航能力的关键技术。然而,目前大部分研究工作聚焦于优化充电效率、充电成本等充电本身的性能,任务驱动的充电调度的研究尚不充分;另外,大部分充电系统假设充电器或可充电设备是同构的;进一步地,现有工作对移动可充电设备的充电调度问题关注较少。针对实际情况中可充电设备的异构性,提出了异构无线充电模型,形式化了异构无线可充电传感网中的移动可充电设备最大返岗时间最小化问题。首先,在忽略设备移动时间和移动能耗的前提下,研究了简化的最大返岗时间最小化问题,并提出了一个近似算法。为解决具有更大难度的最大返岗时间最小化问题,基于该近似算法的思想,提出了一个启发式算法。大量模拟实验和实物实验的结果表明,所提出的算法相对于其他算法有显著优势,可以减少最多 38.78% 的设备最大返岗时间。

关键词: 无线可充电传感网;移动可充电设备;充电调度;异构无线充电;启发式算法

中图分类号 TP393

Wireless Charging Scheduling with Minimized Maximum Return-to-Work Time for Heterogeneous Mobile Rechargeable Devices

XU Jia, LIU Jingyi, XU Lijie and LIU Linfeng

Jiangsu Key Laboratory of Big Data Security and Intelligent Processing, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract With the widespread application of wireless rechargeable devices, wireless power transfer technology has become a key enabler for enhancing device battery life. However, most existing research focuses on optimizing charging efficiency, charging costs, and other charging-related performance metrics. Task-driven charging scheduling has received limited attention. In addition, the majority of charging systems assume homogeneity either in chargers or rechargeable devices, and there is a lack of focus on charging scheduling for mobile rechargeable devices. Considering the heterogeneity of rechargeable devices in real-world scenarios, this paper proposes a heterogeneous wireless charging model and formalizes the problem of minimizing the maximum return-to-work time of mobile rechargeable devices in heterogeneous wireless rechargeable sensor networks. Initially, it studies the simplified problem of minimizing the maximum return-to-work time under the assumption of ignoring device movement time and energy consumption, and proposes an approximation algorithm. To address the more challenging problem of minimizing the maximum return-to-work time, this paper proposes a heuristic algorithm based on the idea of this approximate algorithm for this problem. The results of extensive simulation and field experiments demonstrate that the proposed algorithm has significant advantages over other algorithms. The proposed algorithm can reduce at most 38.78% maximum return-to-work time of devices comparing with the benchmark algorithms.

Keywords Wireless rechargeable sensor network, Mobile rechargeable devices, Charging scheduling, Heterogeneous wireless charging, Heuristic algorithm

1 引言

近年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)的应用范围越来越广,可以测量环境条件,如温度、声音、污染水平、湿度和风力^[1],并广泛应用于健康监测、空气质量监测、水质监测、自然灾害监测、威胁检测、事件监控^[2-4]等

领域。然而,传感器节点由电量有限的电池提供能源,传感器的使用寿命会严重影响无线传感网的生命周期^[5-6]。

为了延长网络的生命周期,学者做了许多研究。无线功率传输技术(Wireless Power Transfer, WPT)^[7]是一种有前景的能延长网络寿命的技术,已经有很多关于其能量传输效率和可扩展性的研究。目前有大量文献^[8-14]研究如何利用

到稿日期:2024-08-21 返修日期:2024-11-10

基金项目:国家自然科学基金(62372249,62072254,62272237)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62372249,62072254,62272237).

通信作者:徐佳(xujia@njupt.edu.cn)

WPT 技术解决 WSNs 中节点的能量供给问题。比如, Kurs 等^[15]提出了一种多节点的充电方案,通过适当调整发送器和接收器线圈的工作频率,可以同时为多个传感器充电,从而实现高能量传输效率和更广的能量传输范围。Wu 等^[16-17]研究了在基于磁共振的多跳无线充电模型下的充电优化问题,多跳无线充电技术使得传感器节点不仅能从充电器接收能量,还能将能量传递给其他的传感器节点。Jin 等^[18]将基于微波的 WPT 无线功率传输技术运用于城市公交系统,为电动汽车充电。将 WPT 技术与 WSNs 结合,便能产生无线可充电传感网络(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSN)^[19]。

现有的关于 WRSN 中的充电方案大多集中于优化充电效率或充电成本、优化调度策略,以提升任务效用,或考虑缩短移动充电器的充电行程时间,往往忽略了充电时间对网络的影响。然而,充电具有排他性^[20],即实际中很多可充电设备^[21-22]由于其硬件特性,无法同时进行充电和事件感知或监测。长时间充电会直接影响 WRSN 中设备的任务执行,导致 WRSN 中设备的工作效率降低。因此,优化可充电设备的充电时间是 WRSN 中一个重要的研究主题。

此外,由于可充电设备和无线充电器可能不是同一时间购买的,可充电设备或者充电器的性能具有差异。而目前多数研究都假设可充电设备或充电器是同构的,没有考虑到可充电设备或充电器之间性能的差异性。

考虑以下场景:在某些大型 WRSN 中(如大规模侦察或运输无人机群),有大量的设备在短时间内存在充电需求。然而,由于设备需要占据一定的空间^[23],在充电器的充电范围内的充电位置是有限的,无法同时为大量的设备充电,因此可能会发生设备排队等待的情况,此时需要设计高效的充电队列来合理安排设备的充电顺序,以优化充电时间。

为解决上述问题,本文提出了一种异构无线充电模型,图 1 展示了该模型的一个简单实例。

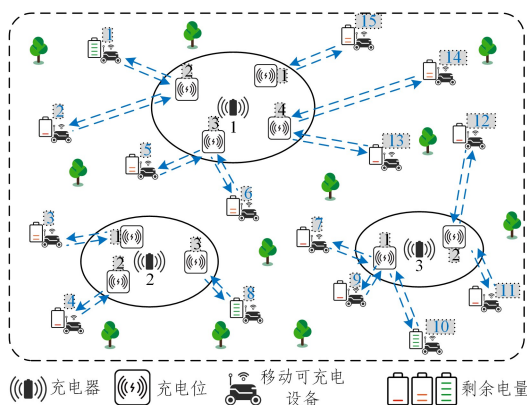


图 1 异构 WRSN 示意图

Fig. 1 Illustration of heterogeneous WRSN

本文考虑多个充电器为网络中的移动可充电设备提供充电服务。每个充电器具有多个充电位,设备在每个充电位可以接收到不同的充电功率。网络中存在一批需要充电的异构移动可充电设备,具有不同的充电需求,设备可移动至对应的充电位进行充电,并在充电完后返回原始位置,即图 1 中移动可充电设备沿着对应的路径移动到各自的充电位。例如,

图 1 中 1 号设备和 2 号设备将前往 1 号充电器的 2 号充电位进行充电。考虑到充电位有限,设备可以在充电位排队等待充电,即 1 号设备和 2 号设备将在 1 号充电器的 2 号充电位上排队一次充电,在完成充电后原路返回。本文基于上述场景,提出了一个新颖的充电时间优化问题,即最大返岗时间最小化问题(Maximum Return-to-Work Time Minimization, MRTM),该问题通过决策移动可充电设备的充电位和充电顺序,使得所有设备的最大返岗时间最短。其中,返岗时间指可移动设备充电结束返回原位置的时间,即充电开始时间、充电时间、返回时间的总和。

然而,MRTM 问题是一个具有挑战的问题:本文的异构 WRSN 中的 MRTM 问题类似于带有不同释放时间和交货时间约束的平行机调度问题,该问题是 NP 难的^[24]。此外,不同的调度策略可能会导致可充电设备的实际充电量发生变化,使得本文提出的充电调度问题比带有不同释放时间和交货时间约束的平行机调度问题更加困难。

本文的主要贡献总结如下:

1)提出了一个新颖的异构 WRSN 模型,为异构的移动可充电设备确定调度方案,决策其充电位和充电顺序,使得设备的最大返岗时间最小化。本文是第一个研究异构 WRSN 中移动可充电设备的最大返岗时间最小化问题的。

2)考虑了异构 WRSN 中 MRTM 的一个特例问题,该问题等价于带有不同释放时间的平行机调度问题,该特例问题存在近似解。对此,本文提出了一种近似算法。

3)在上述特例问题的近似算法基础上,为 MRTM 问题设计了一个启发式算法。

4)进行了大量的模拟实验和实物实验,通过与同类算法的对比,验证了本文算法的性能。在模拟实验中,本文算法可以减少最多 38.78% 的设备最大返岗时间。

本文第 2 章介绍了相关工作;第 3 章提出了系统模型并形式化了 MRTM 问题;第 4 章给出了 MRTM 问题的一个特例,并提出了一种近似算法;第 5 章针对原始的 MRTM 问题,提出了一种有效的启发式算法;第 6 章通过实验评估了算法的性能;第 7 章进行了实物实验;第 8 章针对一些特殊情况进行了讨论;最后总结本文。

2 相关工作

人们对无线充电进行了广泛的研究,用于决策充电器的放置^[25]、移动充电器^[11]或移动可充电设备^[8,26-27]的调度,并以充电成本^[9]、充电时间^[28-29]、充电效用^[10,30]、任务效用^[31]等为优化目标。下面简要回顾与本文密切相关的异构可充电传感网络的调度、移动可充电设备调度、时间敏感充电调度和任务驱动充电调度方面的工作,此外,还简要回顾了带有释放时间和交付时间的平行机调度问题。

1)异构可充电传感网络的调度。Priyadarshani 等^[32]考虑了网络中充电节点异构性的情况,提出了一种基于部分充电模型的多节点按需充电方案,以延长网络寿命。Lin 等^[33]研究三维异构无线可充电网络中无线充电车和无人机协作的充电问题。Jia 等^[34]研究了异构无线可充电传感网络中以移动充电车的能量成本最小化为目标的充电路径规划问题。

然而,上述研究的问题场景与本文存在区别,上述研究均假设充电节点是固定的,考虑优化充电效用。而本文考虑充电设备的移动性并优化设备的充电时间,因此上述研究无法解决本文的问题。此外,上述工作均没有考虑异构性,如设备的移动能耗、充电需求等因素,会影响到设备的充电调度方案,进而对设备的充电时间产生影响。

2) 移动可充电设备的调度。Li 等^[25]研究了具有特定的停留-移动的行为模式的可穿戴设备的充电问题,提出了一种最大限度减少充电成本的充电器放置问题。Chen 等^[26]研究了一种为移动设备充电的移动充电器充电路径优化问题,在固定时间范围内使路径中充电节点数量最大。上述问题只考虑了可充电设备有限的移动性,即设备沿着预定义或基于历史数据的路线移动,应用场景较为受限,本文假设可充电设备可在网络中任意移动,因此上述研究不适用于本文的场景。Xu 等^[9]从合作充电经济学的角度,提出了一种为移动可充电设备充电的无线充电服务模型。然而,该工作仅优化了充电成本和移动成本,没有考虑充电时间和移动时间对感知任务的影响。Wang 等^[10]研究了为移动可充电设备充电的无线充电网络的鲁棒调度问题,以最大化总体充电效用。Sun 等^[30]提出了一种动态无线可充电传感网络模型,研究了在该模型下充电效用最大化问题。上述两项工作限制了设备的移动性,设备只允许在一定范围内移动,场景较为受限,并且只关注设备的充电效用,均没有从时间的角度考虑充电调度问题,忽略了充电时间对设备任务效用的影响。

3) 时间敏感充电调度。Yang 等^[11]研究了具有截止时间约束的多节点充电的移动充电器调度问题,最大限度地提高整体有效充电效用,并最大限度地减少行驶时间。Xu 等^[29]研究了一对多充电方案下的多移动充电器的调度,以最小化移动充电器的最大充电行程总时间。Chen 等^[33]研究了为移动设备充电的移动充电器调度问题,在移动充电器行程的时间约束下最大化充电路径的节点数量。上述研究大多调度移动充电器为节点充电,优化移动充电器的行驶时间和充电时间,但忽略了实际情况下充电器和可充电设备可能存在的异构性对设备的充电位选择,进而对充电调度方案产生的影响。此外,在本文的场景中,可充电设备在网络中移动,并且允许设备在充电位上排队。因此,上述问题的解法并不适用于本文的时间优化调度问题。

4) 任务驱动充电调度。Zhang 等^[12]提出了面向任务的能量调度问题,调度有向充电器和节点以最大化从一组任务获得的总效用。Wu 等^[13]提出了协作任务驱动的移动充电调度问题,以最大化整体任务效用。Ding 等^[31]研究了部署无线充电器以实现在部署成本约束下的执行任务效用最大化问题。Qi 等^[36]研究了异构无人机网络中协作执行多任务问题,通过决策任务的优先顺序从而进行资源分配,以最大化任务执行效用。上述工作皆是通过充电调度直接优化任务效用。然而本文是从移动设备的任务执行角度出发,通过优化移动可充电设备的充电时间,实现设备的最大返岗时间最小化,从而使设备有更多的时间在网络中执行任务,因此上述研究也无法解决本文所提出的问题。

5) 带有释放时间和交付时间的并行机调度。Al-Shayea

等^[37]研究了一种具有释放时间和交付时间,并且受机器周期性不可用约束的两个相同并行机调度问题,最大限度地缩短完工时间。Schutten 等^[38]考虑了具有释放时间、到期时间和簇设置时间的独立作业的调度问题,最大限度地减少工作的延迟。Liu 等^[39]考虑了一个具有不同释放时间、处理时间、交付时间的在线调度问题。Li 等^[40]考虑了具有不同释放时间和交付时间的并行机调度问题,以最小化最大完成时间。然而,在上述调度问题中,工件的释放时间、交付时间以及加工量只与工件有关,而在本文的问题中,设备的充电量包括移动能耗,而移动能耗又与设备和充电器之间的距离有关,因此实际的到达时间和充电时间还与具体的调度方案相关。因此,上述工作都无法解决本文的问题。

综上所述,目前缺少针对异构无线可充电传感网中最大返岗时间最小化充电调度的研究。

3 系统模型与问题形式化

3.1 系统模型

设网络中有 n 个异构的移动可充电设备(下文简称为设备) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 要充电,不同设备的电池容量、充电需求、移动速度和单位距离的移动能耗不同。设备 $s_i \in S$ 的电池容量为 E_i^{\max} ,充电需求为 E_i ,移动速度为 v_i ,单位距离的移动能耗为 e_i^v 。在二维平面区域内部署了 m 个静态充电器 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 。为了避免由于设备互相遮挡造成的充电效率降低,同时考虑到设备在充电时需要占据一定的空间,本文假设在每一个充电器 c_j 处部署若干固定的充电位。不失一般性,假设充电器 c_j 有 ρ_j 个充电位^[15]。为了方便起见,设充电器 c_j 的第 k ($k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}$) 个充电位为 γ_{jk} ,设备在充电位 γ_{jk} 处接收到的充电功率为 P_{jk} 。通常充电器的充电范围较小,文献[41-42]使用由 Powercast 生产的 TX91501 无线充电器^[22]进行了测试实验,结果表明,当充电器与可充电设备(功率接收器)的距离在 0.7 m 内时,设备可以接收到显著功率,当距离大于 1 m 时,设备接收到的功率会显著减小。因此,这里假设任意两个充电器的充电范围不存在交集,即每个充电位只能接收到所属充电器所发射的充电功率。

给定一组需要充电的设备集合 S ,每个设备 s_i 将自己所处的位置、电池容量 E_i^{\max} 、充电需求 E_i 以及剩余电量 E_i^r 发送给基站。基站计算充电调度方案,并将充电调度方案发送给设备。设备在接收到基站的调度信息后,将移动到所分配的充电器的充电位上进行充电。需要注意的是,设备在收到调度信息时,可能正在执行相应的任务,无法立即出发前往充电器充电,因此每个设备的出发时间可能不同。设备 s_i 的出发时间用 r_i 表示,该出发时间可以简单地理解为设备的空闲时间。设备 s_i 与充电器 c_j 之间的路径长度为 d_{ij} 。由于通常充电位与充电器之间的距离远小于移动距离^[23],因此本文统一用 d_{ij} 近似表示设备 s_i 与充电器 c_j 的各个充电位之间的距离。设备 s_i 移动到充电器 c_j 的各充电位的移动时间可计算为:

$$t_{ij}^v = \frac{d_{ij}}{v_i} \quad (1)$$

设备 s_i 移动到充电器 c_j 的各充电位的移动能耗为:

$$E_{ij}^v = e_i^v d_{ij} \quad (2)$$

设备充完电后,需返回初始位置继续工作,因此设备充完电后还需要花费 t_{ij}^v 时间返回,并同样消耗能量 E_{ij}^v 。需要注意的是,上文提到的设备的充电需求,并不是指设备需要从充电器实际获取的能量,而是设备完成充电并返回初始位置后与充电前的剩余能量 E_i^r 相比所增加的能量。因此,设备实际上获得来自充电器的能量为 $E_i + 2E_{ij}^v$ 。设备 s_i 在充电位 γ_{jk} 处所花费的充电时间为:

$$t_{ijk}^c = \frac{E_i + 2E_{ij}^v}{P_{jk}} \quad (3)$$

由于充电器及其充电位的数量有限,在面对大规模充电请求时,可能存在设备排队等候充电的情况。令 S_{jk} 表示在充电位 γ_{jk} 处充电的设备子集。由于每个设备的出发时间、移动距离和移动速度都不同,因此设备到达充电位的时间也都不同。令充电调度方案为 Ω ,令 $\Omega_{jk} = (\omega_{jk}(1), \omega_{jk}(2), \dots, \omega_{jk}(|S_{jk}|))$, $\Omega_{jk} \in \Omega, c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}$ 表示在充电位 γ_{jk} 上设备的充电队列,其中 $\omega_{jk}(l)$ 表示充电位 γ_{jk} 上充电顺序为 l 的设备。设二元决策变量 $X = \{x_{ijkl} \mid s_i \in S, c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}, l \in \{1, \dots, |S_{jk}|\}\}$ ($x_{ijkl} \in \{0, 1\}$), $x_{ijkl} = 1$ 表示将设备 s_i 调度到充电位 γ_{jk} 上按顺序 l 进行充电,否则,令 $x_{ijkl} = 0$ 。设在充电位 γ_{jk} 上充电顺序为 $l-1$ 的设备为 $s_{i'}$, $s_{i'} = \omega_{jk}(l-1)$, 充电位 γ_{jk} 上的充电顺序为 l 的设备 s_i , 即 $s_i = \omega_{jk}(l)$, 其充电开始时间 $t_{ijk}^s(l)$ 可由下式计算:

$$t_{ijk}^s(l) = \begin{cases} r_i + t_{ij}^v, & l=1 \\ \max\{t_{ijk}^s(l-1) + t_{ij}^v, r_i + t_{ij}^v\}, & l>1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, t_{ij}^v 为设备 $s_{i'}$ 的充电时间。

令最大返岗时间 T 为集合 S 中的设备返回其原位置的最大时间,即

$$T = \max_{s_i \in S, c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}} (t_{ijk}^s(l) + t_{ijk}^c + t_{ij}^v) \quad (5)$$

其中, $s_i = \omega_{jk}(l)$ 。

本文中的常用符号如表1所列。

表1 常用符号

Table 1 Frequently used notations

| 符号 | 描述 |
|-----------------------|--|
| S, n | 移动可充电设备集合,设备的数量 |
| C, m | 充电器集合,充电器的数量 |
| E_i^{\max} | 设备 s_i 的电池容量 |
| E_i | 设备 s_i 的充电需求 |
| E_i^r | 设备 s_i 的剩余电量 |
| v_i | 设备 s_i 的移动速度 |
| e_{ij}^v | 设备 s_i 单位距离的移动能耗 |
| r_i | 设备 s_i 的出发时间 |
| ρ_j | 充电器 c_j 的充电位数量 |
| γ_{jk} | 充电器 c_j 的第 k 个充电位 |
| P_{jk} | 设备在充电位 γ_{jk} 处接收到的充电功率 |
| d_{ij} | 设备 s_i 与充电器 c_j 各个充电位之间的距离 |
| t_{ij}^v | 设备 s_i 移动到充电器 c_j 各个充电位的移动时间 |
| E_{ij}^v | 设备 s_i 移动到充电器 c_j 的移动能耗 |
| t_{ijk}^c | 设备 s_i 在充电位 γ_{jk} 处花费的充电时间 |
| S_{jk} | 在充电位 γ_{jk} 处充电的设备子集 |
| Ω, Ω_{jk} | 充电调度方案,充电位 γ_{jk} 的充电队列 |
| $\omega_{jk}(l)$ | 充电位 γ_{jk} 上充电顺序为 l 的设备 |
| $t_{ijk}^s(l)$ | 充电位 γ_{jk} 上充电顺序为 l 的设备充电开始时间 |
| T_i, T | 设备 s_i 的返岗时间,所有设备的最大返岗时间 |

3.2 问题定义与难度分析

问题的目标是最小化设备的最大返岗时间。MRTM可

形式化为:

$$\min T$$

$$\text{s. t. } \sum_{c_j \in C} \sum_{k=1}^{\rho_j} \sum_{l=1}^{|S_{jk}|} x_{ijkl} = 1, \forall s_i \in S \quad (6)$$

$$x_{ijkl} \in \{0, 1\}, \forall s_i \in S, c_j \in C, k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}, l \in \{1, 2, \dots, |S_{jk}|\} \quad (7)$$

其中,约束(6)和约束(7)保证任意设备能且只能在一个充电位处以唯一充电顺序充电。

此外,为了保证上述问题有解,首先设备 s_i 的剩余电量要能够支持其移动到距离其最远的充电器,即

$$E_i^r \geq \max_{c_j \in C} E_{ij}^v, \forall s_i \in S \quad (8)$$

其次,在设备 s_i 充完电返回其原始位置时,应满足其充电需求,即

$$E_i \leq E_i^{\max} - \max_{c_j \in C} E_{ij}^v - E_i^r, \forall s_i \in S \quad (9)$$

若无法满足条件(8)和条件(9),则可以进行简单的预处理,从集合 S 中删除不满足条件(8)和条件(9)的设备。

定理1 MRTM是NP难的。

证明:给出 MRTM 的一个特例:一组可充电设备 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。对于任意设备 $s_i \in S$, 其充电需求为 E_i 。一组静态充电器 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, 充电器 $c_j \in C$ 有 ρ_j 个充电位, 设备 s_i 在充电位 γ_{jk} ($k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}$) 处接收到的功率为 P_{jk} 。每个设备具有不同的出发时间 r_i , 即各个设备到达充电位的时间不同。不考虑设备的移动时间和移动能耗。若设备 s_i 在充电位 γ_{jk} 处进行充电, 则充电所需的时间为 E_i / P_{jk} 。问题的目标是确定所有设备的充电调度方案, 以实现所有设备的最大返岗时间最小化。在这个特例中, 最大返岗时间与最大充电完成时间相等。

下面给出具有不同释放时间的统一平行机调度问题 (Uniform-machines Scheduling with Release Times)^[24] 的实例。有 μ (等于上述充电位的数量) 台连续可用的统一平行机 C , 有 n 个不抢占的工件需要加工。每台机器一次只能处理一个工件, 每个工件只能在一台机器上处理。工件 s_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 在释放时间 r_i 变得可用, 并且有 E_i 个单元需要被处理。机器 γ_{jk} ($\gamma_{jk} \in C$) 在单位时间内能处理 P_{jk} 个单元。如果作业 s_i 被分配给机器 γ_{jk} , 则需要花费 E_i / P_{jk} 个单位时间处理。该问题的目标是确定所有工件的调度方案, 使得最大完工时间最小化。

显然, MRTM 的特例等价于具有不同释放时间的统一平行机调度问题。由于具有不同释放时间的统一平行机调度问题是 NP 难的, 因此 MRTM 也是 NP 难的。

4 简化问题的算法设计

由于 MRTM 问题的难度较大, 首先研究最大返岗时间最小化问题的简化版本, 即不考虑设备的移动时间和移动能耗。然后, 基于该简化问题的解决思路, 提出 MRTM 问题的解决方案。该简化问题在设备与充电器较为接近的情况下仍然具备一定的实用性。一般无人车或移动机器人的移动速度为 $0 \sim 2 \text{ m/s}$, 如 Clearpath Robotics 的 Dingo 无人车的最大移动速度为 1.3 m/s ^[43]。若移动距离为 200 m (通常选择距离较近的充电器), 移动时间约为 154 s 。该无人机搭载对应的铅

酸电池和锂电池模块,充电时间分别为 4h,8h。因此,在某些情况下,忽略设备的移动时间是可接受的。此外,设备的移动能耗相比设备电池容量也很小。Dingo 无人车的电池容量为 $10\text{A} \times 5\text{V} \times 3600\text{s} = 180\text{kJ}$,其最大续航里程为 $2\text{h} \times 3600 \times 1.3\text{m/s} = 9.36\text{km}$,其移动能耗约为 20J/m ,无人车移动 200m 消耗的能量约为 4kJ ,仅占电池容量的 2% 。

由于忽略了设备的移动时间,设备 s_i 到达充电位的时间等于其出发时间 r_i 。由于忽略了设备的移动能耗,若设备 s_i 调度到充电位 γ_{jk} 处充电,其花费的充电时间为 $t_{ijk}^c = E_i / P_{jk}$ 。设在充电位 γ_{jk} 上充电顺序为 $l-1$ 的设备为 $s_{i'}$, $s_{i'} = \omega_{jk}(l-1)$ 。充电位 γ_{jk} 上充电顺序为 l 的设备为 s_i , $s_i = \omega_{jk}(l)$,其开始充电时间 $t_{jk}^s(l)$ 根据下式计算:

$$t_{jk}^s(l) = \begin{cases} r_i, & l=1 \\ \max\{t_{jk}^s(l-1) + t_{ijk}^c, r_i\}, & l>1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, t_{ijk}^c 为设备 $s_{i'}$ 的充电时间。

设备 s_i 的返岗时间为:

$$T_i = t_{jk}^s(l) + t_{ijk}^c \quad (11)$$

最大返岗时间为:

$$T = \max_{s_i \in S, c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}} (t_{jk}^s(l) + t_{ijk}^c) \quad (12)$$

简化的最大返岗时间最小化 (Simplified Maximum Return-to-work Time Minimization, SMRTM) 问题的目标是在满足所有设备充电需求的前提下,最小化最大返岗时间 T 。为了保证上述问题有解,需要保证设备的充电需求不能大于其最大能接收的能量,即

$$E_i \leq E_i^{\max} - E_i^p, \forall s_i \in S \quad (13)$$

可以在求解问题前,进行简单的预处理,即从集合 S 中删除无法满足条件(13)的设备。

定理 2 SMRTM 是 NP 难的。

证明:根据 SMRTM 的定义可知,SMRTM 等价于定理 1 中所述的 MRTM 的特例,而定理 1 已经证明 MRTM 的特例等价于具有不同释放时间的统一平行机调度问题,是 NP 难的,因此 SMRTM 也是 NP 难的。

下面设计一个近似算法来求解 SMRTM 问题,称为 Simplified Maximum Return-to-work Time Minimization Algorithm(SMRTMA)。该近似算法的大致思想是:将设备的出发时间,也就是充电前的到达时间看作充电完成后的额外时间。将设备根据到达时间的非递增顺序进行排序,得到设备序列。在每次迭代中,选择能使设备当前充电完成时间最小化的充电位,并加入充电队列,所有设备选择结束后,对每个充电位的充电队列进行反转,得到每个充电位的充电队列。

如算法 1 所示,首先定义充电位的空闲时间 T_{jk}^{avail} ,并初始化为 0,并且令每个充电位上的充电的设备子集为空,充电队列为空(第 1-5 行)。根据 r_i 值的非递增顺序对设备进行排序,得到一个设备序列(第 6 行)。根据新得到的设备序列,依次为设备选择充电位(第 7-12 行)。对于每个设备,选择能使其充电完成时间最小的充电位(第 8 行),相应地更新充电位的空闲时间(第 11 行)。在所有设备选择完之后,对每个充电位上的设备序列进行反转(第 14 行),重新初始化每个充电位上的充电空闲时间和充电顺序(第 15 行),并计算每个设备

的开始充电时间(第 17 行),得到每个设备的充电完成时间,记录充电顺序(第 18 行),即最大返岗时间,更新充电位的充电空闲时间(第 19 行)。最后,输出充电调度方案,以及每个设备的开始充电时间和返岗时间(第 22 行)。

算法 1 SMRTMA

输入:充电器集合 C ,充电器的充电位数量 ρ_j ,充电位功率 P_{jk} ,待充电设备集合 S ,设备的充电需求 E_i ,设备的出发时间 r_i

输出:充电队列 Ω_{jk} ,设备开始充电时间 $t_{jk}^s(l)$,设备返岗时间 T_i

1. for each $c_j \in C$ do
2. for each $k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}$ do
3. $T_{jk}^{\text{avail}} = 0, \Omega_{jk} = \emptyset, S_{jk} = \emptyset$;
4. end for
5. end for
6. 根据设备的出发时间非递增排序,得到设备序列 S' ;
7. for each $s_i \in S'$ in order do
8. $\gamma_{jk} = \arg \min_{\gamma_{j'k'}, c_{j'} \in C, k' \in \{1, \dots, \rho_{j'}\}} \{T_{j'k'}^{\text{avail}} + t_{ij'k'}^c\}$;
9. $S_{jk} = S_{jk} \cup \{s_i\}$;
10. 将设备 s_i 加入 Ω_{jk} 队列;
11. $T_{jk}^{\text{avail}} = T_{jk}^{\text{avail}} + t_{ijk}^c$;
12. end for
13. for each $\Omega_{jk} \in \Omega$ do
14. 将队列 Ω_{jk} 反转;
15. $T_{jk}^{\text{avail}} = 0, l = 1$;
16. for each $s_i \in \Omega_{jk}$ in order do
17. $t_{jk}^s(l) = \max\{T_{jk}^{\text{avail}}, r_i\}$;
18. $T_i = t_{jk}^s(l) + t_{ijk}^c; l = l + 1$;
19. $T_{jk}^{\text{avail}} = t_{jk}^s(l) + t_{ijk}^c$;
20. end for
21. end for
22. return $\Omega_{jk}, t_{jk}^s(l), T_i, \forall s_i \in S, c_j \in C, k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}, l \in \{1, 2, \dots, |\Omega_{jk}|\}$ 。

定理 3 SMRTMA 的时间复杂度为 $O(n \log n + n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$,其中 $\sum_{c_j \in C} \rho_j$ 为充电位数量。

证明:SMRTMA 主要过程包含排序和 3 个 for 循环。第 1 个 for 循环(算法 1 第 1-5 行)初始化需要 $O(\sum_{c_j \in C} \rho_j)$,排序(算法 1 第 6 行)需要 $O(n \log n)$,第 2 个 for 循环(算法 1 第 7-12 行)需要 $O(n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$,第 3 个 for 循环(算法 1 第 13-21 行)需要 $O(n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$,因此,SMRTMA 的时间复杂度为 $O(n \log n + n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$ 。

定理 4 SMRTMA 对于 SMRTM 问题具备 $1 + \alpha + \frac{\sqrt{(1-\alpha)^2 + 4(\sum_{c_j \in C} \rho_j - 1)(P_{\max}/P_{\min})}}{2}$ 的近似比,其中

$\alpha = r_{\max} / \max\{r_{\max}, T_{\max}\}, r_{\max} = \max_{s_i \in S} r_i, T_{\max}$ 表示设备充电完成时间最大值, $P_{\max} = \max_{c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}} P_{jk}, P_{\min} = \min_{c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}} P_{jk}$ 。

证明:设 SMRTMA 所求出的设备的最大返岗时间为 T ,需要注意的是,在这个场景下,设备的返岗时间与充电完成时间是等价的。根据 SMRTMA 的求解过程,将设备开始充电前的出发时间 r_i 看作设备充电完成后的额外时间 r_i' ,显然 $r_i = r_i'$,并令 T' 表示将出发时间后移后的设备最大返岗时间。

通过时间后移,将原来的不同到达时间问题转换为不同离开时间调度问题,因此下列等式成立:

$$T = T' \quad (14)$$

假设最大返岗时间是由于设备 $s_\epsilon \in S$ 在充电位 $\gamma_{j_\epsilon, k_\epsilon}$ ($c_{j_\epsilon} \in C, k_\epsilon \in \{1, \dots, \rho_{j_\epsilon}\}$) 上充电,即 $T_\epsilon' = T'$ 。并且对于其返岗时间,由 $T_\epsilon' = \mathbb{T}_\epsilon + r_\epsilon'$, 其中 $\mathbb{T}_\epsilon = t_{j_\epsilon, k_\epsilon}^l + t_{j_\epsilon, k_\epsilon}^r$, 表示其充电完成时间。根据 SMRTMA, 设备 s_ϵ 调度到充电位 $\gamma_{j_\epsilon, k_\epsilon}$ 时的最大充电完成时间最小, 显然, 若将该设备调度到其他充电位上时, 所需的充电时间会更长。由于忽略了设备的移动能耗, 在这里, 任一设备所需的充电量都为 E_i , 与其调度到哪一个充电位无关。假设对设备 s_ϵ 调度之前, 每个充电位 γ_{jk} 上已有的设备序列所需补充的电量总和由 E_{jk}^{sum} 表示, 则有:

$$T' = T_\epsilon' = \mathbb{T}_\epsilon + r_\epsilon' \leq \frac{E_{jk}^{\text{sum}}}{P_{jk}} + \frac{E_\epsilon}{P_{jk}} + r_\epsilon', c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\} \quad (15)$$

$$P_{jk} \mathbb{T}_\epsilon \leq E_{jk}^{\text{sum}} + E_\epsilon \quad (16)$$

当且仅当 $j = j_\epsilon, k = k_\epsilon$ 时, 不等式(15)和(16)的等号成立。此外, 每个充电位所补充的电量之和必定小于所有设备所需要补充的电量之和, 因此, 可以得到:

$$P_{jk} \mathbb{T}_\epsilon \leq \sum_{s_i \in S} E_i \quad (17)$$

下面考虑该场景中, 最优调度下设备的最大离岗时间为 T^* , T^* 表示将最优调度所得的充电序列反转之后的最大完成时间。同样地, 有:

$$T^* = T^{*'} \quad (18)$$

类似地, 最优调度下, 充电位 γ_{jk} 上设备所需补充的电量总和用 $E_{jk}^{\text{sum}*}$ 表示, 假设在充电位 γ_{j_0, k_0} 上的充电序列最长, 即处于序列末尾的设备具有最长的充电完成时间, 则

$$\frac{E_{j_0, k_0}^{\text{sum}*}}{P_{j_0, k_0}} = \max_{c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}} \left\{ \frac{E_{jk}^{\text{sum}*}}{P_{jk}} \right\} \quad (19)$$

因此有

$$P_{jk} \frac{E_{j_0, k_0}^{\text{sum}*}}{P_{j_0, k_0}} \geq E_{jk}^{\text{sum}*}, c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\} \quad (20)$$

对不等式(20)进行累加, 即累加所有充电位上的总充电时长, 有

$$\sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} P_{jk} \frac{E_{j_0, k_0}^{\text{sum}*}}{P_{j_0, k_0}} \geq \sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} E_{jk}^{\text{sum}*} = \sum_{s_i \in S} E_i \quad (21)$$

又因为 $T^{*'} \geq \frac{E_{j_0, k_0}^{\text{sum}*}}{P_{j_0, k_0}}$, 有

$$T^{*'} \geq \frac{\sum_{s_i \in S} E_i}{\sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} P_{jk}} \quad (22)$$

由式(17)得到 $\mathbb{T}_\epsilon \leq \sum_{s_i \in S} E_i / P_{jk}$, 结合不等式(22), 有

$$\frac{\mathbb{T}_\epsilon}{T^{*'}} \leq \frac{\sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} P_{jk}}{P_{jk}} \quad (23)$$

由式(15), $T' = T_\epsilon' = \mathbb{T}_\epsilon + r_\epsilon', r_\epsilon = r_\epsilon' \leq r_{\max}$, 其中 $r_{\max} = \max_{s_i \in S} r_i$; 根据定义, $T^* = T^{*'} \geq \max\{r_{\max}, \mathbb{T}_{\max}\}$, 其中 \mathbb{T}_{\max} 表示设备充电完成时间最大值。因此, 有

$$\frac{T'}{T^{*'}} \leq \frac{\mathbb{T}_\epsilon}{T^{*'}} + \frac{r_\epsilon'}{T^{*'}} \leq \frac{\sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} P_{jk}}{P_{jk}} + \frac{r_{\max}}{\max\{r_{\max}, \mathbb{T}_{\max}\}} \quad (24)$$

$$\leq \frac{\sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} P_{jk}}{P_{jk}} + \frac{r_{\max}}{\max\{r_{\max}, \mathbb{T}_{\max}\}} \quad (24)$$

又由于式(14)和式(18), 有

$$\frac{T}{T^*} \leq \frac{\sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} P_{jk}}{P_{jk}} + \frac{r_{\max}}{\max\{r_{\max}, \mathbb{T}_{\max}\}} \quad (25)$$

此外, 根据文献[44]提出的算法的推论2的扩展, 可以得到以下不等式:

$$\frac{T}{T^*} \leq 1 + \frac{(\sum_{c_j \in C} \rho_j - 1) P_{\max}}{\sum_{c_j \in C, k=1}^{\rho_j} P_{jk}} \quad (26)$$

不等式(25)和不等式(26)得到的比值与充电器的功率相关。接下来, 尝试将两者比值表示为与充电功率无关的不等式。令 $\alpha = r_{\max} / \max\{r_{\max}, \mathbb{T}_{\max}\}, \beta = (\sum_{c_j \in C} \sum_{k=1}^{\rho_j} P_{jk}) / P_{jk}$, 其中 $\sum_{c_j \in C} \rho_j$ 表示 m 个充电器的总充电位数, 为了方便表示, 令 μ 表示充电位的总数量, 即 $\mu = \sum_{c_j \in C} \rho_j$ 。根据不等式(25)和不等式(26), 有 $\frac{T}{T^*} \leq \alpha + \beta, \frac{T}{T^*} \leq 1 + \frac{\mu - 1}{\beta} \times \frac{P_{\max}}{P_{jk}}$, 令 $\varphi = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}, \frac{T}{T^*} \leq 1 + \varphi \frac{\mu - 1}{\beta}$, 因此有

$$\frac{T}{T^*} \leq \min\left\{\alpha + \beta, 1 + \varphi \frac{\mu - 1}{\beta}\right\} \quad (27)$$

下面求解不等式(27)。令 $f = \beta^2 + (\alpha - 1)\beta - (\mu - 1)\varphi$ 。由于 $(\alpha - 1)^2 + 4(\mu - 1)$ 显然大于0, 因此 $f = 0$ 有两个解, 即 $\beta_1 = ((1 - \alpha) + \sqrt{(1 - \alpha)^2 + 4(\mu - 1)\varphi}) / 2, \beta_2 = ((1 - \alpha) - \sqrt{(1 - \alpha)^2 + 4(\mu - 1)\varphi}) / 2$, 显然, $\beta_2 < 0 < \beta_1$, 因此当 $\beta > \beta_1$ 时, $f \geq 0, \alpha + \beta \geq 1 + \varphi \frac{\mu - 1}{\beta}$, 因此 $\frac{T}{T^*} \leq 1 + \varphi \frac{\mu - 1}{\beta_1}$; 当 $0 < \beta < \beta_1$ 时, $\alpha + \beta < 1 + \varphi \frac{\mu - 1}{\beta}, \frac{T}{T^*} \leq \alpha + \beta$ 。分别带入 β_1 , 可得 $\frac{T}{T^*} \leq \frac{1 + \alpha + \sqrt{(1 - \alpha)^2 + 4(\mu - 1)\varphi}}{2}$ 。因此, 算法的近似比满足:

$$\frac{T}{T^*} \leq \frac{1 + \alpha + \sqrt{(1 - \alpha)^2 + 4(\sum_{c_j \in C} \rho_j - 1)(P_{\max} / P_{\min})}}{2} \quad (28)$$

其中, $\alpha = \frac{r_{\max}}{\max\{r_{\max}, \mathbb{T}_{\max}\}}, r_{\max} = \max_{s_i \in S} r_i, \mathbb{T}_{\max}$ 表示设备充电完成时间最大值, $P_{\max} = \max_{c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}} P_{jk}, P_{\min} = \min_{c_j \in C, k \in \{1, \dots, \rho_j\}} P_{jk}$ 。

5 最大返岗时间最小化问题的算法设计

简化的最大返岗时间最小化问题由于不考虑设备的移动时间和移动能耗, 应用性有所局限。本章研究原始的最大返岗时间最小化问题 MRTM。MRTM 与带有释放时间以及交货时间的平行机调度问题 (Uniform-machine Scheduling Problem with Unequal Release Dates and Delivery Times) 有一定相似度, 其中, 该问题中不同设备的移动时间可以理解为平行机调度问题中作业的不同释放时间, 设备充完电后的返回移动时间可以理解为平行及调度问题中工件加工结束后的交付时间。目前类似的问题解法大多为启发式算法, 还没有提出可行的近似算法。

然而,本文所提出的 MRTM 问题与上述带有释放时间以及交货时间的平行机调度问题依然有所不同。带有释放时间以及交货时间的平行机调度问题的目标为最小化最大完工时间,而在 MRTM 问题中,设备的最大返岗时间并不能与完工时间等价,因为设备的最大返岗时间还包括设备充电完成后的返回时间,返回时间也不等价于作业的交货时间,因此 MRTM 问题的难度更高。在大多数平行机调度问题中,尽管每个作业可能会选择调度到不同的机器上,但是在不同机器上进行处理,其工作量是相同的。然而在本文的充电调度问题中,由于每个设备到不同的充电位的移动能耗 E_{ij}^v 不同,因此设备调度到不同的充电位上可能会产生不同的实际充电量 $E_i + 2E_{ij}^v$ 。在平行机调度问题中,设备的释放时间和交货时间往往只与设备相关,但是在 MRTM 问题中,设备的移动往返时间不仅与设备自身相关,还与充电位相关,设备选择不同的充电位会导致不同的移动时间。因此,在分配问题的角度上,由于分配/调度方案的不同,设备实际的充电量可能会不同,同时也会有不同的移动时间 t_{ij}^v ,会进一步影响设备的到达时间和返回时间。

在平行机调度问题中,一般作业的到达时间以及工作量不会随着分配或调度方案的不同而发生变化,因此本文的异构场景会使得该问题与平行机调度问题存在差异,从而更加难以解决。

此外,第 4 章中 SMRTM 问题等价于带释放时间的统一平行机调度问题。SMRTMA 是将充电前的时间移到充电结束后进行时间反转,同时也反转充电位上的充电队列,消除充电前的时间。然而在本问题中,充电前后都存在移动时间,即使按照同样的思路,对充电前后时间进行反转,也无法消除充电前的移动时间,使得难以根据类似的思路确定充电位上设备的充电队列。

接下来根据算法 1 的思路,给出一种解决 MRTM 问题的启发式算法,称为 Maximum Return-to-work Time Minimization Algorithm(MRTMA)。算法的基本思想是:先不考虑设备的往返时间,根据设备出发时间的非递增顺序进行排序,得到设备序列。在每次迭代中,选择能使其充电完成时间最小的充电位,不是加入充电队列,而是加入该充电位的充电设备子集中。所有设备选择结束后,不再简单地对每个充电位的充电队列进行反转,而是根据每个充电位的设备子集,按照设备的到达时间,即出发时间和移动时间之和非递减排序,得到最终的充电队列。

MRTMA 如算法 2 所示。

算法 2 MRTMA

输入:充电器集合 C , 充电器的充电位数量 ρ_j , 充电位功率 P_{jk} , 待充电设备集合 S , 设备的充电需求 E_i , 设备的出发时间 r_i

输出:充电队列 Ω_{jk} , 设备开始充电时间 $t_{jk}^s(l)$, 设备返岗时间 T_i

1. for each $c_j \in C$ do
2. for each $k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}$ do
3. $T_{jk}^{avail} = 0, \Omega_{jk} = \emptyset, S_{jk} = 8\emptyset$;
4. end for
5. end for
6. 根据设备的出发时间非递增排序,得到设备序列 S' ;

7. for each $s_i \in S'$ in order do
8. $\gamma_{jk} = \arg \min_{\gamma_{j'k'}, c_{j'} \in C, k \in \{1, \dots, \rho_{j'}\}} \{T_{j'k'}^{avail} + t_{ij'}^c\}$;
9. $S_{jk} = S_{jk} \cup \{s_i\}$;
10. $T_{jk}^{avail} = T_{jk}^{avail} + t_{ijk}^c$;
11. end for
12. for each $c_j \in C$ do
13. for each $k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}$ do
14. $T_{jk}^{avail} = 0$;
15. 对 S_{jk} 中的设备,根据出发时间和移动时间之和 $r_i + t_{ij}^v$ 的非递减顺序排序;
16. $l = 1$;
17. for each $s_i \in S_{jk}$ in order do
18. $\Omega_{jk} = \Omega_{jk} \cup \{s_i\}$;
19. $t_{jk}^s(l) = \max\{T_{jk}^{avail}, r_i + t_{ij}^v\}$;
20. $T_i = t_{jk}^s(l) + t_{ijk}^c + t_{ij}^v$;
21. $T_{jk}^{avail} = t_{jk}^s(l) + t_{ijk}^c$;
22. $l = l + 1$;
23. end for
24. end for
25. end for
26. return $\Omega_{jk}, t_{jk}^s(l), T_i, \forall s_i \in S, c_j \in C, k \in \{1, 2, \dots, \rho_j\}, l \in \{1, 2, \dots, |S_{jk}|\}$.

首先定义每个充电位 γ_{jk} 的空闲时间 T_{jk}^{avail} ,并初始化为 0,并且初始化每个充电位上的充电设备子集为空,充电队列为空(第 1—5 行)。根据设备的出发时间非递增排序,得到设备序列(第 6 行)。对于每个设备,选择能使其充电完成时间最小的充电位,将其加入对应充电位的设备子集中,相应地更新充电位的空闲时间(第 7—11 行)。在所有设备选择完之后,更新每个充电位上的空闲时间(第 14 行),根据每个设备的出发时间和移动时间,对每个设备子集进行排序(第 15 行),初始化充电顺序 l (第 16 行),根据排序后的设备子集序列,依次加入充电队列,记录充电顺序,并更新每个设备的开始充电时间,得到返岗时间(第 17—23 行)。最后,输出充电调度方案,以及每个设备的开始充电时间和返岗时间(第 26 行)。

定理 5 MRTMA 的时间复杂度为 $O(n^2 \log n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$,其中 $\sum_{c_j \in C} \rho_j$ 为充电位数量。

证明:MRTMA 主要过程包含排序和 3 个 for 循环。其中,第一个 for 循环(第 1—5 行)初始化需要 $O(\sum_{c_j \in C} \rho_j)$,排序(第 6 行)需要 $O(n \log n)$,第 2 个 for 循环(第 7—11 行)需要 $O(n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$,第 3 个 for 循环(第 12—25 行)需要 $O(n^2 \log n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$,是因为除了 3 个 for 循环嵌套外,还需要对设备子集进行排序(第 15 行)。因此,MRTMA 的时间复杂度为 $O(n^2 \log n \sum_{c_j \in C} \rho_j)$ 。

6 性能评估

本章通过进行模拟实验来验证 SMRTMA 和 MRTMA 的性能,研究了重要参数对算法性能的影响,包括充电器的数量、可充电设备的数量和设备的移动能耗。

6.1 实验设置

为了进行模拟实验,将无线充电器和可充电设备随机分布

在 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的二维平面中。对于设备的电池容量,选择 $1.2\text{V}/2.5\text{Ah}$ 电池^[26],即电池容量为 $1.2\text{V} \times 2.5\text{A} \times 3600\text{s} = 10.8\text{kJ}$ 。充电器的有效充电范围半径为 $0.7 \sim 1\text{m}$,并确保在模拟中,充电器的充电范围不会相交。此外,移动可充电设备的移动能耗和移动速度值的设置参考了 Clearpath Robotics 的无人车^[43]的数值,使得模拟实验更加接近真实场景。其余默认参数值如表 2 所列。在实验中,将改变一些关键参数的值来讨论其对算法的影响。所有的模拟实验均在配备 AMD Ryzen™ 5 2500U 和 8GB 内存的 Windows 计算机上运行。每次的实验结果都是经过 100 次模拟后的平均值。

表 2 实验默认参数

Table 2 Default settings of parameters

| 参数 | 默认值 |
|--------------|----------------|
| m | 150 |
| n | 30 |
| E_i^{\max} | 10.8 kJ |
| E_i | [5000J, 8000J] |
| v_i | [1 m/s, 2 m/s] |
| e_i^v | [10J/m, 20J/m] |
| r_i | [0, 10 min] |
| ρ_j | [2, 4] |
| P_{jk} | [1 W, 3 W] |

本文将 SMRTMA 和 MRTMA 分别与以下算法进行比较。

1) IBC(Improved BC):通过改进文献[9]中的 BC 以适应本文的场景。在每次迭代中,遍历所有未分配的设备,计算设备调度到每个充电位上产生的最大返岗时间增量,选择使得最大返岗时间增量最小的充电位,并将设备调度到该充电位上。当分配了所有的设备时,迭代终止。

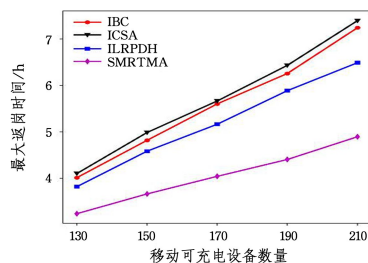
2) ICSA(Improved CSA):通过改进文献[23]中的 CSA 以适应本文的场景。在每次迭代中,ICSA 遍历所有未分配的设备,对于每个设备,都选择使其实际充电量最小的充电位作为拟选择的充电位。然后计算每个设备调度到拟选择的充电位上产生的最大返岗时间增量。之后将具有最大返岗时间增量最小的设备分配到你拟选择的充电位上。当分配了所有的设备时,迭代终止。

3) ILRPDH(Improved LRPDH):通过改进文献[40]中的 LRPDH 以适应本文场景。首先,计算设备与充电器的平均距离和平均充电功率,根据平均距离和平均充电功率计算设备的出发时间、移动时间与充电时间之和,并按该值非递增排序,依次为设备选择使其充电完成时间最小的充电位;然后,根据设备的实际往返移动时间和充电时间之和非递增排序,决策设备的充电顺序。

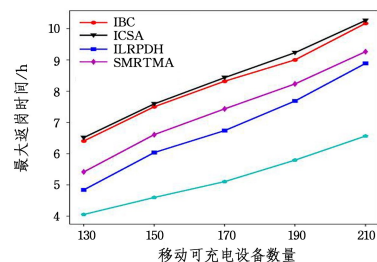
6.2 最大返岗时间

首先,将可充电设备的数量从 130 变化到 210,如图 2 所示。所有算法输出的最大返岗时间随着移动可充电设备数量的增加而增加,设备数量增多,会导致多个设备在同一个充电位排队,进而延长设备的充电完成时间,导致设备的返岗时间增大。图 2(a)显示了忽略移动时间和移动能耗的前提下的模拟结果。与 IBC, ICSA 和 ILRPDH 相比, SMRTMA 平均

减少了设备最大返岗时间的 26.65%, 28.34% 和 21.38%。IBC 总是选择使得最大返岗时间增量最小的充电位,在一定程度上能保证问题的局部最优,但是并没有考虑到设备的出发时间和到达顺序。ICSA 总是选择实际充电量最小的设备,然后选择使最大返岗时间增量最小的充电位和设备,但在忽略移动时间和移动能耗的场景下,实际充电量就是设备的充电需求,从某种程度上说,充电需求小的设备会使得最大返岗时间增量更小,因此 IBC 与 ICSA 对于本文的问题性能比较相似。ILRPDH 进一步考虑到了设备不同的出发时间和到达顺序,并根据相应的规则决策设备的充电顺序,但与 SMRTMA 相比,仍然存在不足,因为其设备的决策顺序依据平均功率计算充电时间,而 SMRTMA 是根据每个充电位的空闲时间。图 2(b)显示了 MRTM 问题下的模拟结果。与 IBC, ICSA, ILRPDH 和 SMRTMA 相比, MRTMA 平均减少了设备最大返岗时间的 37.04%, 38.01%, 29.15% 和 23.03%。由于考虑了移动时间和移动能耗,设备与充电器的距离以及设备的单位移动能耗都能影响设备的到达时间和充电完成时间,而 IBC 和 ICSA 都不考虑设备的充电顺序,只是考虑当前的决策能使得返岗时间增量最小。ILRPDH 首先根据出发时间、移动时间和充电时间数值之和来决定设备的决策顺序,然后移动时间和充电时间都是根据平均距离和平均功率计算的。SMRTMA 仅考虑了设备的出发时间,选择使其当前充电完成时间最小的充电位,选择结束后,反转每个充电位的充电队列,显然没有考虑到设备的移动能耗和移动时间对设备充电顺序的影响。但与其他对比算法相比, SMRTMA 在 MRTM 问题场景下,性能依然较好。



(a) SMRTM 问题中不同最大返岗时间下的移动可充电设备数量



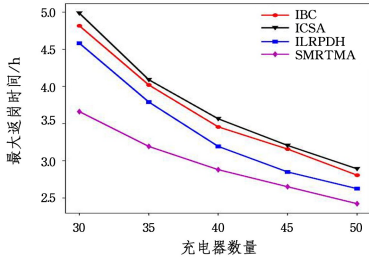
(b) MRTM 问题中不同最大返岗时间下的移动可充电设备数量

图 2 不同最大返岗时间下移动可充电设备的数量

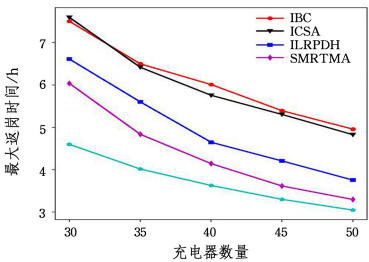
Fig. 2 Number of rechargeable mobile devices versus max return-to-work time

接下来,将充电器的数量从 30 增加到 50,如图 3 所示。设备的最大返岗时间会随着充电器数量的增多而减少,充电器数量增多,同时充电位的数量增多,从而每个充电位所需要服务的设备减少,因此每个充电位上的充电队列会相应变短,

充电完成时间减少,设备的最大返岗时间也大幅减少。考虑忽略移动时间和移动能耗,与 IBC, ICSA 和 ILRPDH 相比, SMRTMA 平均减少了设备最大返岗时间的 18.19%, 20.25% 和 12.07%。在原始 MRTM 问题场景下,与 IBC, ICSA, ILRPDH 和 SMRTMA 相比, MRTMA 平均减少了设备最大返岗时间的 38.78%, 37.70%, 24.22% 和 13.90%。



(a) SMRTM 问题中不同最大返岗时间下的充电器数量



(b) MRTM 问题中不同最大返岗时间下的充电器数量

图3 不同最大返岗时间下的充电器数量

Fig. 3 Number of wireless chargers versus max return-to-work time

此外,还讨论了设备的单位移动能耗对最大返岗时间的影响,对于一些可以搭载或搬运重物的移动可充电设备^[43],其移动能耗会随着承载物体重量的增加而增加,并缩短设备的运行时间。此外,在某些大规模场景下,如展览会,设备的移动距离会变长,设备的实际充电量也随之变大。因此,移动能耗对于设备的最大返岗时间的影响是很重要的。将设备的单位移动能耗从 $[10, 20]$ J/m 变化到 $[50, 60]$ J/m,如图4所示。显然,随着设备单位移动能耗的增加,其最大返岗时间线性增加。一方面,设备的移动时间与单位移动能耗是线性关系;另一方面,设备的充电时间为 $(E_i + 2d_{ij}e_j^v)/P_{jk}$,与单位移动能耗也是线性关系。与 IBC, ICSA, ILRPDH 和 SMRTMA 相比, MRTMA 平均减少了设备最大返岗时间的 37.28%, 34.69%, 28.40% 和 42.03%。需要注意的是, SMRTMA 的斜率最大,是因为该算法在考虑调度方案时,并没有考虑到设备的移动性,只是在计算时考虑了设备的移动时间和移动能耗。在这种情况下,设备的移动能耗对于结果的影响会增大。

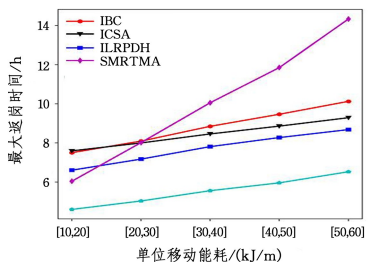
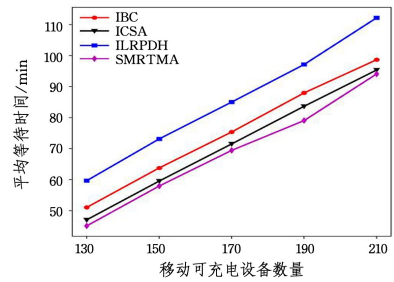


图4 不同最大返岗时间下的单位移动能耗

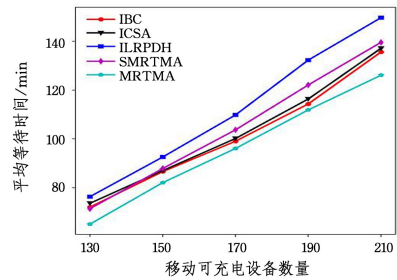
Fig. 4 Unit moving energy versus max return-to-work time

6.3 平均等待时间

在本文的问题场景下,允许设备在充电位处排队,等待充电。通过评估设备的等待时间,可以在一定程度上判断设备调度方案是否合理。分别在 SMRTM 和 MRTM 问题场景下进行模拟,将设备数量从 130 变化到 210,如图5所示。随着设备数量的增加,设备的平均等待时间也增加。这是因为随着设备数量增多,每个充电位上的充电队列也会变长,从而影响设备的平均等待时间。SMRTMA 平均减少了设备平均等待时间的 8.71%, 3.33% 和 19.67%, MRTM 平均减少了设备平均等待时间的 5.33%, 6.57%, 8.10% 和 13.89%。此外, ILRPDH 会根据设备的充电时间和移动时间之和最大优先原则决策设备的充电顺序,使得具有较长充电时间的设备排在充电队列前面,进而导致设备的等待时间变长。



(a) SMRTM 问题中不同移动可充电设备数量下的平均等待时间



(b) MRTM 问题中不同移动可充电设备数量下的平均等待时间

图5 不同移动可充电设备数量下的平均等待时间

Fig. 5 Average waiting time versus number of rechargeable mobile devices

6.4 运行时间

本文还对比了在大规模模拟下, IBC, ICSA, ILRPDH, SMRTMA 和 MRTMA 的运行时间,如表3和表4所列。可以看出,随着可充电设备数量的增加,所有算法的运行时间都显著增加。IBC 和 ICSA 会依次为设备选择充电位,每次选择时,都会遍历所有未被分配的设备,并对所有的充电位计算返岗时间增量,因此会增加算法的运行时间。此外, MRTMA 和 SMRTMA 可以通过较快的运算得到更好的充电调度方案。改变设备的数量, IBC, ICSA 和 ILRPDH 的运行时间分别是 MRTMA 运行时间的 23.34 倍、13.18 倍和 1.61 倍,而 SMRTMA 的运行时间略优于 MRTMA。改变充电器的数量, IBC, ICSA 和 ILRPDH 的运行时间分别是 MRTMA 运行时间的 20.91 倍、13.86 倍和 1.40 倍,同样地, SMRTMA 的运行时间略优于 MRTMA。

表3 移动可充电设备数量与运行时间

Table 3 Number of rechargeable mobile devices versus running time (ms)

| 算法 | 设备数量 | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 |
| IBC | 41.12 | 10.17 | 30.88 | 32.84 | 41.44 |
| ICSA | 12.30 | 30.88 | 32.84 | 41.44 | 70.12 |
| ILRPDH | 2.42 | 2.95 | 4.08 | 5.95 | 7.02 |
| SMRTMA | 1.35 | 1.58 | 2.24 | 3.35 | 3.89 |
| MRTMA | 1.55 | 1.78 | 2.76 | 3.64 | 4.06 |

表4 充电器数量与运行时间

Table 4 Number of wireless chargers versus running time (ms)

| 算法 | 设备数量 | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| IBC | 42.4 | 55.66 | 59.48 | 64.31 | 73.33 |
| ICSA | 30.88 | 36.16 | 39.83 | 45.25 | 39.58 |
| ILRPDH | 2.95 | 3.27 | 4.28 | 4.41 | 4.82 |
| SMRTMA | 1.58 | 1.78 | 2.07 | 2.21 | 2.41 |
| MRTMA | 1.78 | 2.29 | 2.79 | 3.57 | 4.29 |

7 实物实验

本章进行了实物实验,以评估所有算法。由于在第6章的模拟实验中评估了设备数量和充电器数量对算法性能的影响,因此在实物实验中不做额外评估。本文在一个测试平台上实现了所有算法,该测试平台由9个移动可充电设备、3个充电器(Powercast生产的TX 91501功率发射器^[22])和1个AP组成,该AP连接到笔记本电脑,用于报告从移动可充电设备收集的能量数据,如图6所示。



图6 测试平台

Fig. 6 Test-bed

本文在40m×40m的平面区域内进行了实验。充电器的坐标是(10,10),(30,10)和(20,30),充电器的充电位数分别是2,3和2,同样地,在实验中确保各个充电器的充电功率互不影响。9个移动可充电设备的坐标分别为(3,16),(5,25),(6,36),(17,17),(22,3),(25,33),(27,22),(35,24)和(36,13),并确保各个设备在移动过程中不会相互碰撞进而对

实验产生影响。在上述模拟实验中,设置充电器的功率为1~3W,在实物实验中,TX 91501具有3W的EIRP输出功率,而经过实物实验,如图6(d)所示,通过调整设备与充电器之间的距离,如0.1~0.5m,设备能接收到实际充电功率仅在20~40mW。根据模拟实验的结果,在实物实验中,会使得充电时间长达几十个小时。因此,通过改变参数设置来缩短实物实验中的充电时间。在实物实验中,设备的充电需求设置为[250J,400J]。移动能耗为[5J/m,10J/m]。其他参数与模拟实验一致,如表2所列。此外,设置充电器的充电范围为半径0.5m的圆形区域,比设备的移动距离小得多,因此使用充电位所属的充电器坐标来表示每个充电位的坐标。设备和充电器的具体参数以及每个充电位的充电功率总结如表5和表6所列。根据上述参数设置,通过上述对比算法得到相应的调度方案,然后得到最大返岗时间。

表5 移动可充电设备的参数

Table 5 Parameters of rechargeable mobile devices

| 移动可充电设备 | 充电需求/J | 移动能耗/(J/m) | 移动速度/(m/s) | 出发时间/min |
|---------|--------|------------|------------|----------|
| s_1 | 312 | 5.9 | 1.4 | 3.1 |
| s_2 | 296 | 8.2 | 1.0 | 1.8 |
| s_3 | 268 | 8.9 | 0.7 | 9.9 |
| s_4 | 383 | 6.4 | 0.5 | 7.7 |
| s_5 | 267 | 6.6 | 1.5 | 2.6 |
| s_6 | 357 | 9.2 | 1.6 | 4.1 |
| s_7 | 269 | 5.9 | 1.2 | 3.4 |
| s_8 | 298 | 5.1 | 0.9 | 7.8 |
| s_9 | 335 | 7.0 | 1.3 | 9.1 |

表6 所有算法的调度结果

Table 6 Scheduling result of all algorithms

| 充电器 | 充电位 | 充电功率/mW | IBC/ICSA | ILRPDH | SMRTMA/MRTMA |
|----------|---------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| c_1 | γ_{11} | 23 | (s_4) | (s_4) | (s_1) |
| | γ_{12} | 31 | (s_1) | (s_2) | (s_4) |
| | γ_{21} | 24 | (s_8) | (s_1) | (s_7) |
| c_2 | γ_{22} | 40 | (s_5, s_2) | (s_6) | (s_5, s_9) |
| | γ_{23} | 29 | (s_9) | (s_9, s_5) | (s_8) |
| c_3 | γ_{31} | 21 | (s_6) | (s_8) | (s_6) |
| | γ_{32} | 37 | (s_7, s_3) | (s_3, s_7) | (s_2, s_3) |
| 最大返岗时间/h | | | 8.62 | 8.22 | 7.92 |

MRTMA的调度结果如图7所示,其中正方形表示充电器,圆点表示移动可充电设备。表6中的第4~6列分别显示了IBC/ICSA,ILRPDH和SMRTMA/MRTMA的调度结果,结果表示为每个充电位的充电队列。例如,对于MRTMA的调度结果,充电位 γ_{22} 的充电队列为 $\Omega_{22} = (s_5, s_9)$,即 $\omega_{22}(1) = s_5, \omega_{22}(2) = s_9$ 。需要注意的是,在实物实验中,SMRTMA的调度结果与MRTMA的调度结果一样,SMRTMA先按照设备出发时间的非递增顺序选择充电位,然后将充电位的充电队列反转;而MRTMA根据设备出发时间的非递增顺序选择充电位,再根据每个充电位的设备子集中设备的出发时间和移动时间之和的非递减顺序生成充电队列。在实物实验中,由于设备数量不够多,每个充电位上的充电队列较短,恰好设备的参数计算得出根据出发时间和移动速度排序后与反转后的顺序一样,从而使得SMRTMA反转后的充电队列与MRTMA排序后的队列一样。实物实验结果表明,与IBC

(ICSA)和 ILRPDH 相比, MRTMA(SMRTMA)分别降低了 8.12%和 3.65%的最大返岗时间。

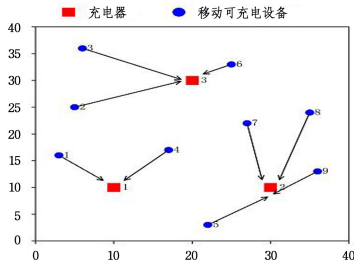


图7 SMRTMA/MRTMA 的调度结果

Fig. 7 Scheduling result of SMRTMA/MRTMS

8 讨论

在 3.2 节中,问题形式化时提出了两个约束条件,分别为式(8)和式(9),以保证设备不至于在移动中耗尽能量,能满足其能量需求并确保其能量需求不超过其电池容量,避免充电资源的浪费。这里进一步讨论如何处理不满足条件(8)和条件(9)的设备。若设备因为不等式(8)被排除,则说明该设备的剩余电量只允许其移动到网络中的某一些距离其最近的充电器,而无法支持其移动到更远的充电器处进行充电。那么在这种情况下,可以考虑借助其他的移动设备,如移动小车等,将设备运送到对应的充电位置。由于其他移动设备的移动速度可能与设备自身的移动速度不同,需要更新设备对应的移动时间,并且移动能耗也产生了相应的变化,因此设备的充电需求也发生了相应的改变。若设备是因为不等式(9)而被排除,则说明设备的充电需求 E 较大,需要适当降低自己的充电需求,此时设备应当重新向基站发送充电请求,基站将根据更新后的请求产生调度方案。上述处理方法只需要根据对应的需求修改删除设备相关的信息,并将其重新加入到设备集合中。前文所提出的算法依旧是可行的,可以根据处理后修改的信息得到可以满足所有设备充电需求的可行调度方案。

结束语 本文提出了一种异构无线可充电传感网络模型,并建立了设备最大返岗时间最小化的充电调度问题。首先考虑了该问题的一个简单实例,忽略设备的移动时间和移动能耗,将设备不同出发时间看作设备充完电后的额外时间,并提出了一个近似算法。然后,基于该近似算法为原始问题设计了一个启发式算法,先不考虑设备的移动时间,根据设备的出发时间为设备选择充电位,再对每个充电位的设备子集根据设备的出发时间和移动时间之和确定每个设备的充电顺序,确定充电队列。最后进行了大量的模拟实验和实物实验,实验结果表明,与其他对比算法相比,本文算法最多可以减少 38.78%的最大返岗时间。

参考文献

[1] ULLO S L, SINHA G R. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors [J]. *Sensors*, 2020, 20(11):3113.
 [2] BILAL M, KANG S G. An authentication protocol for future

sensor networks[J]. *Sensors*, 2017, 17(5):979.
 [3] FEINBERG S, WILLIAMS R, HAGLER G S W, et al. Long-term evaluation of air sensor technology under ambient conditions in Denver, Colorado[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(8):4605-4615.
 [4] PASTOR-APARICIO A, SEGURA-GARCIA J, LOPEZ-BALLESTER J, et al. Psychoacoustic annoyance implementation with wireless acoustic sensor networks for monitoring in smart cities [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 7(1):128-136.
 [5] MARRIWALA N, RATHEE P. An approach to increase the wireless sensor network lifetime[C]//2012 World Congress on Information and Communication Technologies. Piscataway, NJ: IEEE, 2012:495-499.
 [6] ZHOU P, WANG C, YANG Y. Self-sustainable sensor networks with multi-source energy harvesting and wireless charging[C]//IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2019:1828-1836.
 [7] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. *Science*, 2007, 317(5834):83-86.
 [8] WU T, YANG P, DAI H. Charging on the Move: Scheduling Static Chargers with Tunable Power for Mobile Devices[C]//2021 IEEE/ACM 29th International Symposium on Quality of Service (IWQOS). Piscataway, NJ: IEEE, 2021:1-10.
 [9] XU J, HU S, WU S, et al. Cooperative charging as service: Scheduling for mobile wireless rechargeable sensor networks [C]//2021 IEEE 41st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Piscataway, NJ: IEEE, 2021:685-695.
 [10] WANG X, DAI H, HUANG H, et al. Robust scheduling for wireless charger networks[C]//IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2019:2323-2331.
 [11] YANG P, WU T, DAI H, et al. MORE: Multi-node mobile charging scheduling for deadline constraints[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2020, 17(1):1-21.
 [12] ZHANG J, GAO H, CHEN Q, et al. Task-oriented Energy Scheduling in Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2023, 19(4):1-32.
 [13] WU T, YANG P, DAI H, et al. Collaborated tasks-driven mobile charging and scheduling: A near optimal result[C]//IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2019:1810-1818.
 [14] XUX L, CHEN C, HUANGFU X J, et al. Wireless charging scheduling algorithm of single mobile vehicle with limited energy[J]. *Computer Science*, 2018, 45(3):110-116.
 [15] KURS A, MOFFATT R, SOLJAČIĆ M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(4):044102.
 [16] WU S, DAI H, XU L, et al. Comprehensive Cost Optimization for Charger Deployment in Multi-hop Wireless Charging [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(8):4563-4577.
 [17] WU S, XU L, DAI H, et al. Optimizing Comprehensive Cost of

- Charger Deployment in Multi-hop Wireless Charging[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*,2023,19(4):1-24.
- [18] JIN Y,XU J,WU S, et al. Enabling the Wireless Charging via Bus Network; Route Scheduling for Electric Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(3):1827-1839.
- [19] HE S,CHEN J,JIANG F, et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*,2012,12(10):1931-1942.
- [20] SUN Y,LIN C,DAI H, et al. Trading off charging and sensing for stochastic events monitoring in WRSNs [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*,2021,30(2):557-571.
- [21] GHARBI A,HAOUARI M. An approximate decomposition algorithm for scheduling on parallel machines with heads and tails [J]. *Computers & Operations Research*,2007,34(3):868-883.
- [22] Powercast[EB/OL]. [2024-05-18]. <http://www.powercastco.com>.
- [23] WU S,DAI H,LIU L, et al. Cooperative scheduling for directional wireless charging with spatial occupation [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*,2024,23(1):286-301.
- [24] KOULAMAS C,KYPARISIS G J. Makespan minimization on uniform parallel machines with release times[J]. *European Journal of Operational Research*,2004,157(1):262-266.
- [25] LI Y,CHEN Y,CHEN C S, et al. Charging while moving; Deploying wireless chargers for powering wearable devices[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12):11575-11586.
- [26] CHEN L,LIN S,HUANG H, et al. Charging path optimization in mobile networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*,2022,30(5):2262-2273.
- [27] LIU T,WU B,XU W, et al. RLC: A reinforcement learning-based charging algorithm for mobile devices[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*,2021,17(4):1-23.
- [28] LIN C,YANG Z,DAI H, et al. Minimizing charging delay for directional charging [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*,2021,29(6):2478-2493.
- [29] XU W,LIANG W,JIA X, et al. Minimizing the maximum charging delay of multiple mobile chargers under the multi-node energy charging scheme[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*,2020,20(5):1846-1861.
- [30] SUN Y,LIN C,YANG W, et al. Charging dynamic sensors through online learning[C]//*IEEE INFOCOM 2023-IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway, NJ: IEEE, 2023:1-10.
- [31] DING X,GUO J,WANG Y, et al. Task-driven charger placement and power allocation for wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*,2021,119:102556.
- [32] PRIYADARSHANI S,TOMAR A,JANA P K. An efficient partial charging scheme using multiple mobile chargers in wireless rechargeable sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*,2021,113:102407.
- [33] LIN C,GUO C,DENG J, et al. 3DCS: A 3-D dynamic collaborative scheduling scheme for wireless rechargeable sensor networks with heterogeneous chargers[C]//*2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Piscataway, NJ: IEEE,2018:311-320.
- [34] JIA R,WU J,LU J, et al. Energy saving in heterogeneous wireless rechargeable sensor networks[C]//*IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway, NJ: IEEE,2022:1838-1847.
- [35] CHEN L,LIN S,HUANG H. Charge me if you can; Charging path optimization and scheduling in mobile networks[C]//*Proceedings of the 17th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. ACM,2016:101-110.
- [36] QI N,HUANG Z,ZHOU F, et al. A task-driven sequential overlapping coalition formation game for resource allocation in heterogeneous UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*,2023,22(8):4439-4455.
- [37] AL-SHAYEA A M,SALEH M,ALATEFI M, et al. Scheduling two identical parallel machines subjected to release times, delivery times and unavailability constraints [J]. *Processes*, 2020, 8(9):1025.
- [38] SCHUTTEN J M J,LEUSSINK R A M. Parallel machine scheduling with release dates, due dates and family setup times [J]. *International Journal of Production Economics*, 1996, 46:119-125.
- [39] LIU P,LU X. Online Scheduling on Two Parallel Machines with Release Times and Delivery Times[C]//*International Conference on Combinatorial Optimization and Applications*. Berlin: Springer,2013:96-105.
- [40] LI K,YANG S. Heuristic algorithms for scheduling on uniform parallel machines with heads and tails[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*,2011,22(3):462-467.
- [41] DAI H,WANG X,LIU A X, et al. Optimizing wireless charger placement for directional charging[C]//*IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway, NJ: IEEE,2017:1-9.
- [42] WANG Z,TAO J,XU Y, et al. Toward the Minimal Wait-for Delay for Rechargeable WSNs with Multiple Mobile Chargers [J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*,2023,19(4):1-24.
- [43] Clearpath Robotics Dingo [EB/OL]. [2024-05-18]. <https://clearpathrobotics.com/>.
- [44] KOULAMAS C,KYPARISIS G J. Scheduling on uniform parallel machines to minimize maximum lateness[J]. *Operations Research Letters*,2000,26(4):175-179.



XU Jia, born in 1980, Ph.D, professor, Ph.D supervisor, is a senior member of CCF (No. 18435S). His main research interests include crowdsourcing, edge computing and wireless rechargeable sensor networks.