

传感网中基于空间约束的充电调度优化研究

达明翔^{1,2}, 徐力杰^{1,2}

(1. 南京邮电大学 计算机学院; 2. 江苏省大数据安全与智能处理重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 在无线可充电传感网中, 如何优化充电成本是一个重要且具有挑战性的问题。基于由设备发起的合作充电服务模型, 对充电位置受限的无线可充电传感网中面向综合充电成本最小化的充电调度优化问题进行了研究。首先, 对目标问题进行建模, 并证明了问题的NP困难性; 其次, 提出一个2-近似的多项式时间算法, 解决了单充电站情形下的目标问题; 再次, 针对多充电站情形下的目标问题设计了一个基于贪心策略的高效解决方法。仿真实验结果表明, 单充电站情形下所提算法与其他3种对比算法相比, 产生的综合充电成本分别平均降低了15.40%、3.86%和1.78%; 多充电站情形下所提算法与其他3种对比算法相比, 产生的综合充电成本分别平均降低了51.31%、12.48%和75.22%, 验证了所提算法性能的优越性。

关键词: 无线可充电传感网; 合作充电服务模型; 空间限制; 综合充电成本最小化; 充电调度优化

DOI: 10.11907/rjdk.241317

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2025)006-0079-08



Research on Charging Scheduling Optimization Based on Space constraint in Sensor Networks

DA Mingxiang^{1,2}, XU Lijie^{1,2}

(1. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications;
2. Jiangsu Key Laboratory of Big Data Security & Intelligent Processing, Nanjing 210023, China)

Abstract: In wireless rechargeable sensor networks (WRSNs), how to minimize charging cost is an important and challenging issue. Based on the device-initiated cooperative charging service model, the charging scheduling optimization problem of comprehensive charging cost minimization in WRSNs with limited charging locations is studied. To this end, the target problem is first modeled and its NP-hardness is proved. Then, a 2-approximation polynomial time algorithm is proposed to solve the target problem with single-charging-station case. Next, an efficient greedy-based solution is devised to solve the target problem with multiple-charging-station case. Finally, simulation experiment results show that the comprehensive charging cost produced by the proposed algorithm in single charging-station case can be 15.40%, 3.86% and 1.78% lower than the other three baselines, respectively, and the comprehensive charging cost produced by the proposed algorithm in multiple-charging-station case can be 51.31%, 12.48% and 75.22% lower than the other three baselines, respectively, which verifies the performance superiority of the proposed algorithms.

Key Words: wireless rechargeable sensor networks; cooperative charging service model; space limitation; comprehensive charging cost minimization; charging scheduling optimization

0 引言

在过去的几十年里, 无线传感器网络(Wireless Sensor

Networks, WSNs)得到了学术界的广泛研究。然而, 在传统的无线传感器网络中, 传感器节点由于电池容量有限, 通常需要频繁更换电池以维持传感器网络的长期运行, 导致高额的网络维护成本, 同时也降低了网络服务质量

收稿日期: 2024-04-23

扫描二维码阅读全文:

基金项目: 国家自然科学基金项目(62072254, 62372249)

作者简介: 达明翔(1998-), 男, 南京邮电大学计算机学院硕士研究生, 研究方向为物联网/传感网、边缘计算; 徐力杰(1983-), 男, 博士, 南京邮电大学计算机学院副教授, 研究方向为物联网/传感网、边缘计算、移动与分布式计算等。本文通讯作者: 徐力杰。



(Quality of Service, QoS)。近年来,无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术的快速发展使得无线可充电传感器网络(Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSNs)的实现成为可能。在无线可充电传感器网络中,传感器节点可以由静态部署的充电器或可移动的充电器提供长距离的持续无线能量供应。如何为无线可充电传感器网络设计高效的充电调度优化策略是一个重要且具有挑战性的问题。

近年来,无线可充电传感器网络中的充电成本优化问题受到了较多关注^[1-3]。尤其是由设备发起的合作充电服务模型的提出,使得充电成本优化问题变得更加具有挑战性^[4-5]。尽管如此,这些工作都假设每个充电站可以同时为无限多个传感器节点提供充电服务,忽略了充电站充电位置数量的限制,而空间约束在实际应用中难以被忽略。上述不足使得现有以合作充电服务模型为基础进行的成本优化研究工作仅停留在理论层面,不能很好地为实际工程应用服务。本文基于一个新颖的由设备发起的合作充电服务模型,研究在充电站充电位置空间受限的情况下如何进行充电调度策略优化,以最小化无线可充电传感器网络的综合充电成本。这里的综合充电成本不仅包括充电服务费用,还包括所有传感器节点充电过程中往返移动所消耗的总成本。

本文研究弥补了现有相关工作忽略空间约束的不足,提升了合作充电服务模型在解决成本优化问题时的实际工程应用价值。具体而言,首先,对基于充电位置约束的综合充电成本优化问题进行了建模,并证明了该问题的NP困难性;其次,针对单充电站情形下的目标问题,提出了一个高效的多项式时间近似算法,并证明其近似比为2;再次,基于单充电站情形下目标问题的解决方法,提出了一个高效的多项式时间算法,解决了多充电站情形下的目标问题;最后,通过大量仿真实验,验证了所提出的算法在性能上相较于其他常见方法的优越性。

1 相关工作

近年来,无线可充电传感器网络中的充电调度优化问题受到了众多研究者的广泛关注,主要包括以下3个方面:

(1)静态充电器部署优化。文献[6]研究了传感器静止时,在能量约束下如何将数个静止的充电器放置在不同的候选位置上并调整充电器的充电功率分配以最大化充电质量,并提出了一个近似算法,求解了该问题。同时,研究了传感器可移动情况下的充电器放置问题,并提出了相应算法。文献[7]研究了如何确定传感器节点部署位置和传感器的充电分配方案以使总充电效用最大化。该研究将问题形式化为一个路径约束下的凸优化问题,然后利用区域离散化方法和充电离散化方法将原问题转化为一个

子模函数最大化问题,并提出了一个常数近似比的算法,求解了原问题。文献[8]研究了传感器网络充电基站部署位置优化问题,通过优化充电基站的部署位置以降低成本。该研究基于贪心策略和传感器节点之间的位置关系,提出了一种新的算法以规划充电基站的部署位置。文献[9]研究了给定有限数量定向充电器和若干候选位置,如何确定充电器部署位置以及定向充电器充电方向的角度,在满足连通性约束的情况下使得总充电效用最大化。该研究将原问题的解空间近似转化为了有限空间,提出了一个常数近似比的算法并进行了求解。文献[10]研究了满足网络区域内任意点上电磁辐射强度不超过特定阈值的约束下,多静态充电器支持的无线可充电传感器网络中的充电效用最大化问题。该研究首先通过区域离散化将原问题转化为多维0/1背包问题,然后提出了一个近似算法,求解了问题。文献[11]研究了给定2维平面上的一组定向充电器和一组充电任务,如何确定充电器天线方向和天线指向不同方向的时间以最大化完成所有充电任务的总充电效用。该研究将问题转化为划分拟阵约束下的子模函数最大化问题,先后提出了集中的离线算法和分布式的在线算法并求解了原问题。文献[12]研究了给定一组定向充电器和一组静态传感器,如何确定每个充电器的部署位置、充电器指向和每个指向保持的时间,以使总充电效用最大化。该研究首先近似处理充电器的非线性充电功率,然后通过构造最大覆盖集均匀分区的方法将无限的充电器部署位置和充电器方向解空间化简为有限的解空间,又运用几何学方法进一步化简充电器部署位置的解空间,从而将问题转化为混合整数非线性规划问题,最后提出了一个基于线性规划的贪心算法并求解了问题。文献[13]研究了无线充电器定向充电的鲁棒容错部署问题,降低了传感器网络中充电器和传感器节点故障概率,提升了网络鲁棒性。为了应对充电器故障问题,该研究提出了具有连续性和无限性约束的鲁棒覆盖充电器放置问题,通过区域划分和主要策略提取方法将问题转化为无性能损失的整数规划问题,提出了对数近似比的贪心算法并求解了问题。

(2)移动充电器路径优化。文献[14]研究了如何混合利用传感器的部分充电与完全充电策略以延长无线可充电传感器网络的寿命,该工作提出了一个混合部分充电与完全充电策略,即MPF,MPF充电策略由评估模块、调整模块和选择模块组成。MPF利用车载移动充电器为传感器充电,评估模块、调整模块和选择模块联合给出移动充电器的移动充电路径和为每个传感器分配的能量。文献[15]调度了移动充电器以联合优化多节点充电场景中的失效传感器数量和能量利用效率。该工作引入部分充电机制,充电器通过多次充电为每个传感器充满电。该研究基于部分充电机制提出了多节点时空部分充电算法,实现了失效传感器数量最小化和能量利用效率最大化之间的权衡。文献[16]提出一种在线能量补充策略(OMRN),该

策略基于互感模型和连续平面上的重心法选址问题,根据线圈之间的距离找出移动充电器的最优驻点,让多个节点能量接收达到均衡,以减少总充电时长,使充电效率最大化。文献[17]研究了给定可一对多同时充电的移动充电器,如何调度移动充电器以最大化能量利用效率。该研究提出了一种重叠移动充电模式 OMC, OMC 首先用 K-means 方法将传感器划分为若干无重叠的子集,然后将每个子集中的传感器进一步划分为有重叠的传感器组,移动充电器移动至不同位置、停留不同时间以便为每个传感器组充电。文献[18]研究如何在异构的无线可充电传感器网络中通过优化移动充电车充电路径,以联合最小化充电能量消耗和移动充电车移动能量消耗。该研究提出了一种基于计算几何的算法,生成多个供充电车停留的充电位置。算法具有 $\ln N$ 近似比,其中 N 为传感器个数。通过计算经过网络中所有充电位置的最短哈密顿环以构造充电路径,求解了原问题。文献[19]提出一种强化学习的方法以最大化无线可充电传感器网络的覆盖贡献。该研究提出的强化学习再充电 RLRL 方法帮助移动充电器学习传感器网络中传感器的能量消耗趋势、充电花费和覆盖效果,以更好地调度充电器。文献[20]提出高维多目标动态充电路径方案模型,通过最小化路径距离、死亡节点数量、通信延迟以及最大化无线充电车剩余能量,以减少死节点数量,延长 WRSNs 的生命周期。

(3) 传感器移动合作充电调度。文献[4]提出一种新颖的由设备发起的合作充电服务模型,并在此模型基础上研究了充电成本最小化问题。在该模型中,充电站作为基础设施由充电服务提供商(Charging Service Provider, CSP)进行部署并运营维护。具体而言,基站定期获取网络中各个传感器节点的剩余电量,根据特定的充电优化目标制定充电调度策略,然后分发给所有传感器节点。基于从基站接收到的充电调度策略,每个传感器节点将会移动到分配的目标充电站进行充电。同时,用户向 CSP 发送充电服务请求,CSP 将根据调度策略通知相应充电站为移动到达的传感器节点提供相应的充电服务。充电完成后,传感器节点将从充电站返回原部署位置继续执行监控任务。最后,用户将按照请求的充电服务时间向 CSP 支付相应的充电服务费用。通过部署充电基础设施,由设备发起的合作充电服务模型为按需无线充电服务提供了一个灵活的商业框架。文献[5]在此合作充电服务模型基础上进一步考虑了设备的停止工作时间约束,提出了一个高效的时空移动合作充电调度机制以优化充电成本。

本文工作与上述研究相比,具有以下创新、改进和补充之处:①大部分已有研究工作在优化目标上侧重于提升充电效用、充电能量利用效率和传感器网络寿命,而忽视了降低传感器网络运行成本,而在实际工程应用中,无线可充电传感器网络的运行成本是无法忽略且非常关键的优化目标,本文工作致力于优化网络综合充电成本,以更

贴近实际工程需要;②已有研究大多基于传统的传感器网络模型,未能考虑完善的充电服务付费模式,无法满足实际应用需求;③现有工作考虑物理空间限制较少,忽略了实际场景中充电站可同时容纳传感器充电的充电位置数量是有限的,而本文充分考虑了充电站充电位置数量的限制,从而使得研究更加具有实际意义。

2 系统建模与数学优化模型

2.1 系统模型与假设

本文基于文献[4]提出的合作充电服务模型,考虑一个位于二维平面的无线可充电传感器网络,该传感器网络由一个基站、 n 个可移动可充电的传感器节点、 m 个位置固定的充电站和 k 个随机分布的静态兴趣点组成。根据特定的应用需求,传感器节点 $U=\{u_1, \dots, u_n\}$ 被部署于网络中以监测 k 个已知的兴趣点集合 $\rho=\{\rho_1, \dots, \rho_k\}$, m 个充电站 $S=\{s_1, \dots, s_m\}$ 作为基础设施由 CSP 负责部署和运营维护,且每个充电站都配备一个全向无线充电器。为了保证充电效率,这里假设每个传感器节点必须从其工作位置主动移动到一个充电站的充电位置处进行充电,在充电完成后返回原工作位置继续执行兴趣点监测任务。在上述充电过程中,充电站为每个到达的传感器设备提供短距离的全向无线充电服务。

模型中充电服务费用和充电服务时间成正比,这里用 $\bar{c}$ 表示任意充电站的单位充电服务时间所需的充电费用。基于全向无线充电技术,任意充电站 s_j 可以同时为多个到达的传感器节点提供固定功率的充电服务,也即在同一公共时间段内,在 s_j 处同时充电的多个传感器节点可以分摊该时段的充电费用。基于实际应用场景,这里假设每个充电站可以提供给传感器节点进行同时充电的物理空间是有限的,即每个充电站有固定数量的充电位置。进一步地,假设传感器节点在同一充电站每个充电位置处的充电接收功率近似相同,且每个充电位置任意时刻最多只能容纳一个传感器节点进行充电。

将传感器节点在任意充电站任意充电位置的充电接收功率定义为 P_r , 并且用 L_j 表示任意充电站 s_j 的充电位置数量, p_j^k 表示充电站 s_j 的第 k 个充电位置,其中 $k \in \{1, \dots, L_j\}$ 。定义 $T_m(u_i, s_j)$ 和 $E_m(u_i, s_j)$ 分别为传感器 u_i 从工作位置移动到充电站 s_j 的移动时间和相应的移动耗电量。在上述模型中,传感器节点充电完成后将会原路返回至原工作位置,因此传感器节点从工作位置移动到充电站和从充电站返回工作位置的路径是对称的,即传感器节点 u_i 从工作位置移动到充电站 s_j 后返回原工作位置的往返移动时间和往返移动耗电量可以分别表示为 $2T_m(u_i, s_j)$ 和 $2E_m(u_i, s_j)$ 。任意传感器节点 u_i 都负责监测兴趣点集合 ρ 中的一个子集,假设 u_i 监测的兴趣点集合是 $\rho(u_i) \subseteq \rho$ 。

在合作充电服务模型中,通过基于低功耗广域网

(Low Power Wide Area Network, LPWAN)技术的单跳广播,基站将会定期向所有传感器节点发布充电命令,以获取每个传感器节点的剩余电量信息用于充电调度决策。这里,可以基于网络中的历史流量数据动态预测传感器节点的剩余电量,从而决定基站在什么时刻向所有传感器节点发布充电命令。由于充电位置的数量有限($\sum_{j=1}^m L_j < n$),多个传感器节点可能会被指派到同一个充电位置。为了保证任意充电站的任意充电位置在任意时刻都至多停留一个传感器节点进行充电,被指派到同一个充电位置的多个传感器节点可以在收到充电调度策略后,采用在工作位置延迟等待一段时间再出发前往充电位置的方式以实现充电位置的独占性。假设 U_j^k 为已经指派到充电站 s_j 第 k 个充电位置 p_j^k 上的传感器节点集合,不难发现,可以很容易找到一个 U_j^k 中各节点在工作位置的延迟等待时间分配策略,从而实现一个针对充电位置 p_j^k 而言的最高效的充电调度策略(这些节点依次无缝交替地到达充电位置 p_j^k),此时 s_j 将会为充电位置 p_j^k 连续提供 $\sum_{u_i \in U_j^k} T_c(u_i, s_j)$ 的充电服务时间,其中 $T_c(u_i, s_j)$ 表示传感器节点 u_i 在充电站 s_j 的充电时间:

$$T_c(u_i, s_j) = (E_{exp}(u_i) - E_r(u_i) + 2E_m(u_i, s_j)) / P_r \quad (1)$$

其中, $E_{exp}(u_i)$ 和 $E_r(u_i)$ 分别表示 u_i 的预期工作电量和当前剩余电量, $E_{exp}(u_i) - E_r(u_i) + 2E_m(u_i, s_j)$ 表示 u_i 的充电需求。

进一步地,定义 U_j 为指派到充电站 s_j 进行充电的传感器节点集合,即 $U_j = \bigcup_{k=1}^{L_j} U_j^k$ 。对于具有 L_j 个充电位置的任意充电站 s_j 而言,在 $U_j^1, U_j^2, \dots, U_j^{L_j}$ 已知的情况下,同样可以很容易找到一个 U_j 中各节点在工作位置的延迟等待时间分配策略,从而实现一个针对充电站 s_j 而言最高效的充电调度策略(对于任意 $k \in \{1, \dots, L_j\}$, U_j^k 中的节点依次无缝交替地到达充电位置 p_j^k ,且 s_j 每个充电位置所指派节点中第一个到达的时间相同),此时 s_j 将会为充电位置 $p_j^1, \dots, p_j^{L_j}$ 连续提供 $\max_{k \in \{1, \dots, L_j\}} \sum_{u_i \in U_j^k} T_c(u_i, s_j)$ 的充电服务时间。

综上,面向充电费用最小化的充电调度策略本质上就是决定 U 中每个传感器节点分配至哪个充电站的哪个充电位置,这是因为已分配到同一个充电站各充电位置的所有节点一定能够找到一个在工作位置的延迟等待时间分配策略,以实现最佳调度策略所应具备的特性,即同一个充电站不同充电位置之间的充电开始时间同步性和每个充电位置的无缝独占性。

2.2 数学优化模型

用 $\hat{U}$ 表示传感器节点的一个充电调度策略,即 $\hat{U} = \{U_j^k | j \in \{1, \dots, m\} \& k \in \{1, \dots, L_j\}\}$,并且定义 $F(\hat{U})$ 表示该策略所对应的综合充电成本。具体如下:

$$F(\hat{U}) = C_{ch} + \lambda C_m \quad (2)$$

其中, C_{ch} 表示所需支付的充电服务费用, C_m 表示所有

传感器节点充电过程中往返移动所消耗的总成本, λ 表示一个权衡系数,通常由实际应用需求所确定。 C_{ch} 的计算公式如下:

$$C_{ch} = \bar{c} \cdot \sum_{j=1}^m \max_{k \in \{1, \dots, L_j\}} \sum_{u_i \in U_j^k} T_c(u_i, s_j) \quad (3)$$

假设传感器节点的移动成本与移动距离成正比,定义 $d(u_i, s_j)$ 为传感器节点 u_i 从部署的工作位置到充电站 s_j 之间的移动距离, q_i 为传感器节点 u_i 移动单位距离所消耗的成本,则 C_m 的计算方式如下:

$$C_m = 2 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{u_i \in U_j} q_i d(u_i, s_j) \quad (4)$$

为了便于描述,定义 $N = \{1, \dots, n\}$, $M = \{1, \dots, m\}$, $L = \{1, \dots, L_j\}$,主要目标是考虑如下基于充电位置约束的综合充电成本优化问题。

问题1(基于充电位置约束的综合充电成本优化):给定一个由 n 个传感器节点 $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ 和 m 个充电站 $S = \{s_1, \dots, s_m\}$ 组成的无线可充电传感器网络,其中任意充电站 s_j 具有 L_j 个充电位置($j \in M$),如何找到一个满足所有传感器节点充电需求的充电调度策略 $\hat{U} = \{U_j^k | j \in M \& k \in L\}$,以使得综合充电成本 $F(\hat{U})$ 最小化。

问题1可以被形式化建模如下:

(问题1): $\min F(\hat{U})$

$$\begin{cases} \bigcup_{j=1}^m \bigcup_{k=1}^{L_j} U_j^k = U \\ s.t. \begin{cases} U_t^p \cap U_h^q = \emptyset, \\ \forall t, h \in M \& p \in L^t, q \in L^h \& p_t^p \neq p_h^q \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

其中,第一个约束保证所有传感器节点的充电需求都被满足,第二个约束保证每个传感器节点只会被调度分配到唯一的充电位置。为了简便且不失一般性,假设在每次充电时每个传感器节点都有足够的剩余能量移动到任意一个充电站。问题1的目标是找到一个 U 的最优划分 $\hat{U}$ 以最小化 $F(\hat{U})$ 。

对于问题1的困难性有如下结论:

定理1 问题1是NP难的。

证明: 为了证明定理1,可以考虑问题1的一个简化特例,即传感器网络拓扑中充电站的数量只有一个。由于所有传感器节点都只能前往唯一的充电站,其往返移动成本都是固定且已知,故目标函数 $F(\hat{U})$ 中的传感器节点移动成本 C_m 将变为一个固定常数,记为 C ,即 $F(\hat{U}) = C_{ch} + C$ 。可以很容易地证明上述简化特例和经典的最小时间跨度排序问题是等价的。最小时间跨度排序问题的定义如下:给定 n 个工件的处理时间 $p_1, \dots, p_n$ 以及整数 m ,如何找到一个将工件分配给 m 个同型机的分配策略,以使得完工时间(也被称为时间跨度)达到最小化。由于最小时间跨度排序问题是经典的NP难题,因而更一般化的问题1也一定是NP难的。证明完毕。

3 解决方法

3.1 单充电站情形下的算法设计

为了求解目标问题,首先考虑单充电站情形下基于充电位置约束的综合充电成本优化问题,如问题2所示。

问题2(基于单充电站充电位置约束的综合充电成本优化问题):给定一个由 n 个传感器节点 $U=\{u_1, \dots, u_n\}$ 和一个充电站 s_1 组成的无线可充电传感器网络,其中充电站 s_1 具有 L_1 个充电位置,如何找到一个满足所有传感器节点充电需求的充电调度策略 $\hat{U}=\{U_1^k | k \in L^1\}$,使得综合充电成本 $F(\hat{U})$ 最小化。这里, U_1^k 表示指派到网络中单个充电站 s_1 第 k 个充电位置 p_1^k 上的传感器节点集合。

问题2可以被形式化建模如下:

$$\begin{aligned} & \text{(问题2): } \min F(\hat{U}) \\ & s.t., \begin{cases} \bigcup_{k=1}^{L_1} U_1^k = U \\ U_1^p \cap U_1^q = \emptyset, \forall p, q \in L^1 \text{ \& } p \neq q \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $F(\hat{U}) = \bar{c} \cdot \max_{k \in L^1} \sum_{u_i \in U_1^k} T_c(u_i, s_1) + \lambda C_m$, 这里 $C_m = 2 \cdot \sum_{u_i \in U} q_i d(u_i, s_1)$ 表示所有传感器节点的总移动成本且为一个固定常数。因此,问题2的目标本质上是对充电服务费用 $\bar{c} \cdot \max_{k \in L^1} \sum_{u_i \in U_1^k} T_c(u_i, s_1)$ 进行最优化。

与定理1证明类似,可以很容易证明问题2也是NP难的。设计算法1以求解问题2,具体过程如下:

算法1: 基于单充电站的充电服务费用优化算法

输入: $U, s_1, L_1, F(\cdot), \bar{c}, T_c(u_i, s_1) (i \in \{1, \dots, n\})$

输出: 最优充电调度策略 $\hat{U}$

1. $U_1^1 = U_1^2 = \dots = U_1^{L_1} = \emptyset$;

2. $T_1^1 = T_1^2 = \dots = T_1^{L_1} = 0$;

// T_1^k 为充电位置 p_1^k 当前累计分配的充电时间

3. FOR $i = 1$ to n

4. $temp = 1$;

5. FOR $j = 2$ to L_1

6. IF $T_1^j < T_1^{temp}$ THEN

7. $temp = j$;

8. END IF

9. END FOR

10. $U_1^{temp} = U_1^{temp} \cup \{u_i\}$;

11. $T_1^{temp} = T_1^{temp} + T_c(u_i, s_1)$;

12. END FOR

13. RETURN $\hat{U} = \{U_1^k | k \in L^1\}$;

算法1本质上是一个迭代的贪心过程,其核心思想是每一轮将一个传感器节点分配给当前累计充电服务时间最短的充电位置,通过 n 轮迭代后最终得到充电调度策略 $\hat{U}$ 。

定理2 假设 $\hat{U}$ 是执行算法1产生的充电调度策略,则一定有 $F(\hat{U}) \leq 2F(U^*)$, 其中 U^* 表示问题2的最优充电调

度策略。算法1的时间复杂度为 $O(nL_1)$ 。

证明: 假设 p_1^K 是算法1执行完毕后累计充电服务时间最长的充电位置,即 $K = \arg \max_{k \in L^1} T_1^k$, 则算法1得到的 $C_{ch} = \bar{c} \cdot T_1^K$ 。进一步地,假设 u^* 是算法1执行过程中最后一个被分配到充电位置 p_1^K 上的传感器节点,由于算法1在每一轮都是将传感器节点分配到当前累计充电服务时间最短的充电位置上,这意味着 $T_1^K - T_c(u^*, s_1) \leq \min_{k \in L^1} T_1^k$ 成立,而 $\min_{k \in L^1} T_1^k \leq (\sum_{k=1}^{L_1} T_1^k) / L_1$, 因此一定有:

$$T_1^K - T_c(u^*, s_1) \leq (\sum_{k=1}^{L_1} T_1^k) / L_1 \quad (7)$$

定义 U^* 为问题2的最优充电调度策略, $F(U^*)$ 是最优充电调度策略产生的最优目标函数值,则其中充电服务费用的最优值可以表示为 $C_{ch}^* = F(U^*) - \lambda C_m$ 。由于 $(\sum_{k=1}^{L_1} T_1^k) / L_1 \leq C_{ch}^* / \bar{c}$ 以及 $T_c(u^*, s_1) \leq C_{ch}^* / \bar{c}$ 显然成立,结合式(6),可得:

$$C_{ch} = \bar{c} \cdot T_1^K \leq 2 \cdot C_{ch}^* = 2 \cdot F(U^*) - 2 \cdot \lambda C_m \quad (8)$$

根据式(7)可得:

$$F(\hat{U}) = C_{ch} + \lambda C_m \leq C_{ch} + 2 \cdot \lambda C_m \leq 2 \cdot F(U^*) \quad (9)$$

因此,对于问题2,一定有 $F(\hat{U}) \leq 2F(U^*)$ 。由于算法1一共进行了 n 轮迭代,每轮迭代进行 $L_1 - 1$ 次比较,因此时间复杂度为 $O(nL_1)$ 。证明完毕。

3.2 多充电站情形下的算法设计

基于问题2的解决方法,进一步考虑求解问题1,即多充电站情形下的目标问题。

问题1与问题2的主要区别是充电站数量。在单充电站情形下,传感器节点对于充电站的选择是唯一的,每个传感器节点的往返移动距离固定,这意味着问题2的目标本质上是对充电服务费用的优化。在多充电站情形下,传感器节点对于充电站的选择便不再唯一,不仅需要考虑到传感器节点派往哪个充电站可以取得相对更低的充电服务费用,还需要考虑充电站的选择对于移动成本的影响,因为一个看似可以产生较低充电服务费用的充电站选择可能因为传感器节点与充电站的距离过远而产生高昂的移动成本,如何实现两者的权衡优化是问题1的目标。

基于算法1,提出一个基于贪心策略的方法(算法2)以解决问题1,其核心思想是每一轮将一个传感器节点分配给当前累计综合充电成本最小的充电位置,通过 n 轮迭代后最终得到充电调度策略 $\hat{U}$ 。算法2的具体过程如下:

算法2 基于多充电站的综合充电成本优化算法

输入: $U, S, L_j (j \in M), F(\cdot), \bar{c}, q_i (i \in N), d(u_i, s_j)$ 及 $T_c(u_i, s_j) (i \in N, j \in M)$

输出: 最优充电调度策略 $\hat{U}$

1. FOR each $j \in M$ and $k \in L_j$

2. $U_j^k = \emptyset$;

3. END FOR

4. FOR $r = 1$ to n

5. FOR each $i \in N$

```

6.   FOR  $j = 1$  to  $m$ 
7.     FOR  $k = 1$  to  $L_j$ 
8.       计算出  $C_{ch}^{ijk}(r)$  及  $C_m^{ijk}(r)$ ;
       //  $C_{ch}^{ijk}(r)$  和  $C_m^{ijk}(r)$  分别表示在第  $r$  轮迭代时如
       果将  $u_i$  分配到充电位置  $p_j^k$  所得到的当前  $C_{ch}$  和  $C_m$  值
9.     END FOR
10.  END FOR
11. END FOR
12.  $(i^*, j^*, k^*) = \arg \min_{i \in N \& j \in M \& k \in L^j} (C_{ch}^{ijk}(r) + \lambda C_m^{ijk}(r));$ 
13.  $U_j^k = U_j^k \cup \{u_{i^*}\};$ 
14.  $N = N \setminus \{i^*\};$ 
15. END FOR
16. RETURN  $\hat{U} = \{U_j^k | j \in M \& k \in L^j\};$ 

```

在每一轮迭代过程中,算法2以当前得到的综合充电成本 $F(\hat{U})$ 最小化为贪心准则选择出一个当前最优的传感器节点 u_i 及所分配的充电位置 p_j^k , 一共执行 n 轮迭代直到所有传感器节点完成充电位置分配为止。不难发现,算法2的时间复杂度是 $O(n^2mL)$, 其中 $L = \max_{j \in M} L_j$ 。

4 实验与结果分析

4.1 实验设置

在实验中,如不作另行说明,则是将设置传感器节点总数 $n=200$, 充电站数量 $m=10$ 。在单充电站情形下,设置充电位置数量 $L_1=10$; 在多充电站情形下 ($m=10$), 每个充电站的充电位置数量 L_j 设置为 10 到 20 之间的随机值, 表示为 $L_j = \text{rand}(10, 20)$ 。此外, 每个传感器节点的可充电电池容量设置为 $1.5V \times 2A \times 3600 \text{ sec} = 10800 J$ 。对于每个传感器节点 u_i , 设置剩余电量 $E_r(u_i) = \text{rand}(2000 J, 3799 J)$, 预期电量 $E_{exp}(u_i) = \text{rand}(8500 J, 10299 J)$ 。进一步地, 设置每个传感器节点的单位距离移动电量消耗速率为 $10 J/m$, 并设置 $P_r=5 W$, 单位时间充电价格 $\bar{c}=1$, 任意传感器节点 u_i 的单位距离移动成本 $q_i = \text{rand}(1, 2)$ 。同时, 不失一般性地, 设置权衡系数 $\lambda = 1$ 。本文所有实验结果都是通过运行 50 次取平均值而得到。

4.2 对比算法

由于现有相关工作基本上都未考虑到充电位置的空间限制, 因而无法直接应用以解决本文目标问题。为了验证算法1的性能, 为算法1设计如下3个对比算法, 分别是单充电站随机算法、充电位置排序算法、传感器和充电位置同时排序算法。①单充电站随机算法的基本思想是将所有传感器按默认顺序排序, 然后遍历传感器序列, 每次为一个传感器随机选择一个充电位置; ②充电位置排序算法的基本思想是传感器按默认顺序排序, 从0号开始为充电位置有序编号, 按充电位置编号递增顺序, 将每个传感器依次分配到各充电位置, 当充电位置编号用尽时从0号位置重新开始; ③传感器和充电位置同时排序算法的基本

思想是传感器按充电时间递增顺序排序, 从0号开始为充电位置有序编号, 按充电位置编号递增顺序, 将每个传感器依次分配到各充电位置, 充电位置编号用尽时从0号位置重新开始。

为了验证算法2的性能, 为算法2设计如下3个对比算法, 分别是多充电站随机算法、充电成本优先的贪心算法、移动成本优先的贪心算法。①多充电站随机算法的基本思想是传感器按任意顺序排序, 每个传感器放入随机充电站的随机充电位置; ②充电成本优先的贪心算法的基本思想是传感器按任意顺序排序, 遍历传感器序列, 每个传感器被调往当前充电时长最小充电站的充电位置, 不考虑传感器移动成本; ③移动成本优先的贪心算法的基本思想是传感器按任意顺序排序, 遍历传感器序列, 将每个传感器优先分配到距离最近的充电站, 确定充电站后将传感器分配到当前充电时间最短的充电位置。

4.3 实验结果

首先分析单充电站情形下算法1的实验结果。依次以传感器节点数量、充电站的充电位置数量和单位时间充电价格作为变量, 进行算法1与3个对比算法的性能比较。

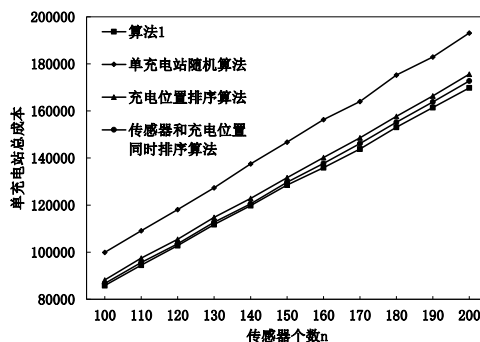


Fig. 1 Impact of sensor number on total cost (single charging station case)

图1 传感器个数变化对总成本的影响(单充电站)

图1显示了当传感器个数 n 从 100 增加到 200 时总的综合充电成本变化情况。横轴是传感器节点的数量, 纵轴是综合充电成本。图中曲线呈上升趋势, 主要原因是充电位置数量和充电功率不变, 传感器节点数量上升了, 使得总体成本上升。在传感器节点数量变化过程中, 算法1产生的总成本始终低于其他3个对比算法产生的总成本。算法1产生的总成本比单充电站随机算法产生的总成本平均低 12.61%、比充电位置排序算法产生的总成本平均低 2.88%、比传感器和充电位置同时排序算法产生的总成本平均低 1.22%。

图2显示了充电位置个数变化对各算法总的综合充电成本的影响。横轴是充电位置个数, 纵轴是综合充电成本。4条曲线总体呈下降趋势, 主要原因是充电位置个数增加, 同一时刻有更多的空间容纳更多传感器同时充电, 从而分摊了充电服务费用。随着充电位置个数的增加, 算

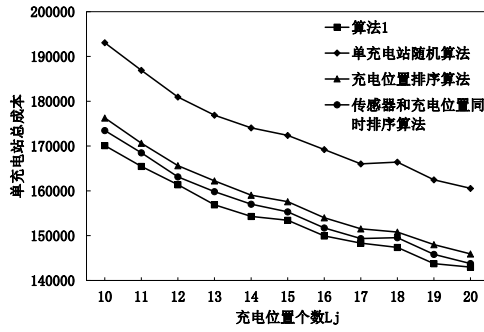


Fig. 2 Impact of number of charging locations on total cost (single charging station case)

图2 充电位置个数变化对总成本的影响(单充电站)

法1产生的总成本始终低于其他3个对比算法产生的总成本。算法1产生的总成本比单充电站随机算法产生的总成本平均低11.26%、比充电位置排序算法产生的总成本平均低2.74%、比传感器和充电位置同时排序算法产生的总成本平均低1.37%。

图3显示了单位时间充电价格 $\bar{c}$ 的变化对总的综合充电成本的影响。横轴表示单位时间充电价格,纵轴是综合充电成本。曲线总体呈上升趋势,因为单价提升,充电服务费用随之提升,带动总成本提升。随着单位时间充电价格的上升,算法1产生的总成本始终低于其它三个对比算法产生的总成本。算法1产生的总成本比单充电站随机算法产生的总成本平均低22.34%、比充电位置排序算法产生的总成本平均低5.97%、比传感器和充电位置同时排序算法产生的总成本平均低2.77%。

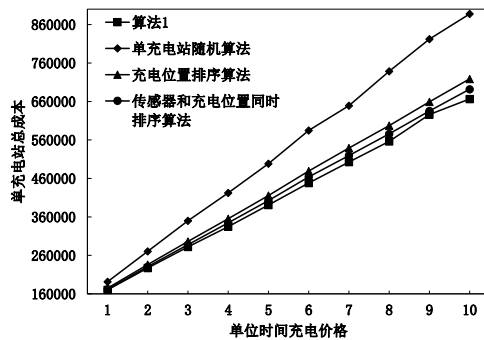


Fig. 3 Impact of price per unit time on total cost (single charging station case)

图3 单位时间充电价格变化对总成本的影响(单充电站)

图1—图3的实验结果表明,相较于其他3个对比算法,算法1总是能够得到更低的综合充电成本。综合考虑多种自变量因素,算法1产生的总成本比单充电站随机算法产生的总成本平均低15.40%、比充电位置排序算法产生的总成本平均低3.86%、比传感器和充电位置同时排序算法产生的总成本平均低1.78%。由此可见,算法1整体优于其他对比算法。

接下来,分析多充电站情形下算法2的实验结果。通过依次将传感器节点数量、充电站数量、单位时间充电价

格作为变量,进行算法2与3个对比算法的性能比较。

图4显示了传感器个数变化时总的综合充电成本变化情况。横轴表示传感器个数,纵轴表示综合充电成本。随着传感器个数的增加,算法2产生的总成本始终低于其他3个对比算法产生的总成本。算法2产生的总成本比多充电站随机算法产生的总成本平均低41.66%、比充电成本优先的贪心算法产生的总成本平均低11.83%、比移动成本优先的贪心算法产生的总成本平均低79.96%。

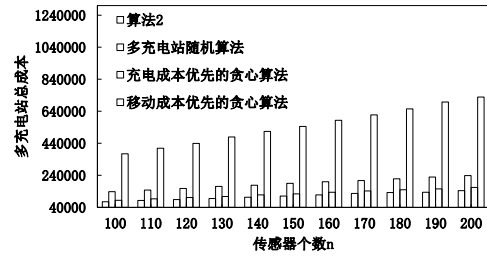


Fig. 4 Impact of sensor number on total cost (multiple charging station case)

图4 传感器个数变化对总成本的影响(多充电站)

图5显示了随着充电站数量的增加,总的综合充电成本变化情况。横轴代表充电站数量,纵轴是综合充电成本。随着充电站数量的增加,算法2产生的总成本远低于其他3个对比算法。算法2产生的总成本比多充电站随机算法产生的总成本平均低54.98%、比充电成本优先的贪心算法产生的总成本平均低16.43%、比移动成本优先的贪心算法产生的总成本平均低80.37%。

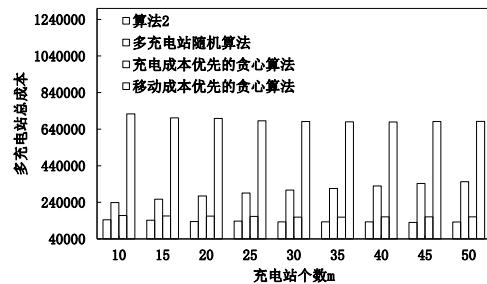


Fig. 5 Impact of number of charging stations on total cost (multiple charging station case)

图5 充电站个数变化对总成本的影响(多充电站)

图6显示了随着单位时间充电价格的上升,总的综合充电成本变化情况。横轴表示单位时间充电价格,纵轴表示综合充电成本。随着单位时间充电价格的提高,算法2产生的总成本始终远低于其他对比算法产生的总成本。算法2产生的总成本比多充电站随机算法产生的总成本平均低57.29%、比充电成本优先的贪心算法产生的总成本平均低9.17%、比移动成本优先的贪心算法产生的总成本平均低65.34%。

图4—图6的实验结果表明,相较于其他3个对比算法,算法2总是能够得到更低的综合充电成本。综合考虑多种自变量因素,算法2产生的总成本比多充电站随机算

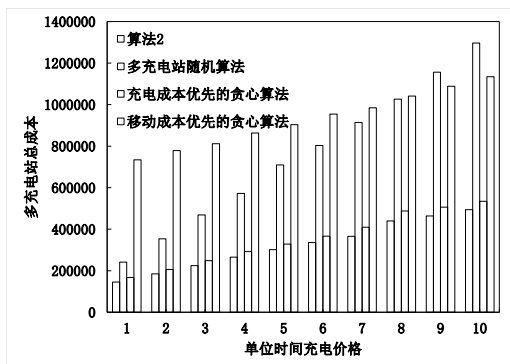


Fig. 6 Impact of price per unit time on total cost (multiple charging station case)

图6 单位时间充电价格变化对总成本的影响(多充电站)

法产生的总成本平均低 51.31%、比充电成本优先的贪心算法产生的总成本平均低 12.48%、比移动成本优先的贪心算法产生的总成本平均低 75.22%。由此可见,算法 2 整体优于其他对比算法。

5 结语

本文研究聚焦于在充电位置数量受限的无线可充电传感器网络中,实现综合充电成本最小化。具体而言,探讨了如何制定一个充电调度策略,在满足所有传感器节点能量需求的同时,优化由充电服务费用及传感器移动开销构成的总成本。首先,对问题进行了数学建模,并证明了其为 NP 难问题;其次,提出了一种针对单充电站情况的 2-近似算法,以及在多充电站环境下基于贪心策略的多项式时间解决方案;最后,通过仿真实验证实了所提出方法的有效性。

本文研究工作弥补了现有工作的不足,充分考虑了网络中的充电位置空间约束,具有一定的实际应用价值。但同时,也存在一些待改进之处,如考虑的充电计费模型相对简单,即假设所有充电站提供单位时间充电服务所需的充电费用相同,且尚未对算法 2 的近似性能保证进行理论分析。未来研究中,将进一步探索不同的充电计费模型对目标问题的影响,并设计和优化多充电站情况下的高效近似算法。

参考文献:

- [1] FANG X, CHENG Y, WANG G. A new base station deployment method for WRSN based on greedy algorithm[C]//2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference(WPTC), 2020:411-413.
- [2] LIU F. A genetic algorithm based scheduling scheme for WRSN[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET), 2020:751-755.
- [3] LIU H, ZHONG L, LIU Z, et al. A multi-objective genetic optimization algorithm for charger selection in static charger deployment scheme for WRSN[C]//2022 IEEE 14th International Conference on Advanced Info-comm Technology(ICAIT), 2022:230-235.
- [4] 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), 2021: 685-695.

- [5] XU L, SHA H, DA M, et al. Spatio-temporal mobile cooperative charging for low-power wireless rechargeable devices[C]//2022 IEEE 19th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS), 2022: 40-48.
- [6] ZHANG S, QIAN Z, WU J, et al. Wireless charger placement and power allocation for maximizing charging quality[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(6): 1483-1496.
- [7] WU T, YANG P, DAI H, et al. Charging oriented sensor placement and flexible scheduling in rechargeable WSNs[C]//IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications, 2019:73-81.
- [8] WAN P, CHENG Y, WU B, et al. An algorithm to optimize deployment of charging base stations for WRSN[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019(1): 1-9.
- [9] YU N, DAI H, CHEN G, et al. Connectivity-constrained placement of wireless chargers[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(3): 909-927.
- [10] DAI H, LIU Y, YU N, et al. Radiation constrained wireless charger placement[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2021, 29(1): 48-64.
- [11] DAI H, SUN K, LIU A X, et al. Charging task scheduling for directional wireless charger networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(11): 3163-3180.
- [12] DAI H, WANG X, LIN X, et al. Placing wireless chargers with limited mobility[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(6): 3589-3603.
- [13] XU J, ZHOU K, WU S, et al. Robust fault-tolerant placement of wireless chargers for directional charging[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023(1): 1-15.
- [14] LIN C, ZHOU Y, DAI H, et al. MPF: prolonging network lifetime of wireless rechargeable sensor networks by mixing partial charge and full charge[C]//2018 15th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON), 2018: 1-9.
- [15] LIU T, WU B, ZHANG S, et al. An effective multi-node charging scheme for wireless rechargeable sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications, 2020:2026-2035.
- [16] PAN Q, FENG Y, DAI W, et al. An effective strategy of mobile charger stagnation point for WRSNs based on one-to-many resonant charging mode[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(10): 1502-1508.
- [17] 潘琪, 冯勇, 戴伟. 一对多充电方式下 WRSN 移动充电器驻点选择策略[J]. 传感技术学报, 2020, 33(10): 1502-1508.
- [17] ZHANG S, LIANG Y, QIAN Z, et al. Overlapped mobile charging for sensor networks[C]//2020 IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2020: 1213-1214.
- [18] 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, 2022: 1838-1847.
- [19] SHANG C, CHANG C Y, LIAO W H, et al. RLR: joint reinforcement learning and attraction reward for mobile charger in wireless rechargeable sensor networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(18): 16107-16120.
- [20] ZENG Y Q, WANG Q, ZHANG J B, et al. Many-objective dynamic scheme in wireless rechargeable sensor networks[J]. Journal of Chinese Computer System, 2023, 44(6): 1162-1169.

曾佑仟, 王茜, 张景波, 等. 无线可充电传感器网络下的高维多目标动态充电规划[J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(6): 1162-1169.

(责任编辑: 孙娟)