

分类号_____

学校代码 10487

学号 M201671902

密级_____

华中科技大学

硕士学位论文

无线传感器网络的路由和 周期性充电调度的联合设计

学位申请人： 涂方蕾

学 科 专 业： 电子与通信工程

指 导 教 师： 彭凯 副教授

答 辩 日 期： 2018 年 5 月 26 日

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree for the Master of Engineering**

**Joint Design of Routing and Periodic Charging
Scheduling for Wireless Sensor Networks**

Candidate : Tu Fang Lei

Major : Electronic and Communication Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Peng Kai

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P.R.China

May 26, 2018

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：涂方蕾

日期：2018年5月26日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐， 在 _____ 年解密后适用本授权书。

不保密 ☒。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：涂方蕾

日期：2018年5月26日

指导教师签名：彭凯

日期：2018年5月26日

摘要

近些年来，无线传感器网络及其相关的技术发展迅速，在军事、农业生产、医疗卫生以及智能交通等领域都有着十分广泛的应用。但是在无线传感网中，传感器的能量补给效率一直是限制其发展的重要瓶颈。为了延长网络的使用寿命，传统的研究从周期性充电，按需充电等多个方面入手。这些研究都能一定程度地提高网络的充电效率，但各自也存在一些局限性，如充电等待时间较长，灵活性较差等，适应的情况不广。

本论文基于之前对传感器的能量补给的研究，结合网络自身的特点，兼顾路由构造和周期性能量补给的问题，首次提出对路由构造和周期性充电调度进行联合设计的算法，设计与充电调度更为适合的路由结构，能更有效地提高网络充电效率，并且充电任务更为均衡，能够适应较大规模的无线传感网，具有一定的扩展性与适应性。

根据热点节点耗电快的特点，本文提出对无线传感网的路由通信情况进行设计，生成一棵负载均衡的路由树，合理分摊热点节点的通信量。同时，本文采取按耗电速率划分节点充电周期的思路，按需充电，避免对能量充足传感器节点的访问。路由算法与充电调度相适应，使得每个节点被充电时都剩余尽可能少的电量，最大化利用电池的容量。本文还实现了多无人机充电路径的规划，并行调度，大大降低了充电时间。最后，本文优化了充电路径和充电任务调度，实现了充电任务的负载均衡。

最后我们从多个方面进行了实验仿真，以充电任务的平均工作时间和最大工作时间为评价标准评断算法的优劣。结果验证，本算法大幅度提高了充电效率，且充电任务更为均衡，能够有效地延长无线传感网的使用寿命，使得无线传感网的应用更加广泛。

关键词： 无线传感器网络；路由构造；周期性调度；路径规划

Abstract

Recent years, wireless sensor network and its related technologies are rapidly developing, which are widely used in military field, agricultural production, intelligent transportation and so on. However, in the wireless sensor network, energy has always been an important bottleneck restricting its development. In order to prolong the lifetime of the network, researchers have carried out a lot of research from many aspects, including periodic charging, charging on demand, etc. These strategies can effectively improve the charging efficiency of the network, but they also have some limitations, such as long waiting time for charging, poor flexibility, etc, that can not adapt to many situations.

Based on the previous research, considering the problems of route construction and periodic energy supply, this article firstly proposes an algorithm for joint design of route construction and periodic charging scheduling, combining some features of the network, which can improve network charging efficiency more effectively. Besides, the algorithm is more balanced and can adapt to large-scale wireless sensor networks, with a certain degree of adaptability.

According to the characteristics that the hot-spot nodes have a faster energy consumption rate in the network, this article proposes a strategy for designing the routing communication of the wireless sensor network to generate a peaceful routing tree, which can distribute the traffic of hot-spot nodes reasonably, and reduce the power consumption rate of hot-spots. At the same time, we propose the idea of periodically charging the sensor node, charging on demand, to avoid access to energy-rich sensor nodes to reduce the length of charging route. The routing algorithm adapts to the charging schedule, leaving as little power as possible when the node is charged, to optimize the charging efficiency. And this article realizes the planning of multiple charging paths of UAVs with parallel scheduling, which greatly reduces the charging time. This article also considers the optimization of charging route and task scheduling, to balance the load for charging tasks.

Finally, we carried out experimental simulations from various aspects, using the average working time and maximum working time to judge the merits of the algorithm. The results verified that this algorithm greatly improves the charging efficiency and the charging task is more balanced, that can effectively extend the lifetime of wireless sensor networks and promote the wide application of wireless sensor networks.

Key words : Wireless sensor network; routing structuring; periodic scheduling; path planning

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 选题背景与意义.....	1
1.2 国内外研究概况.....	2
1.3 论文主要内容与章节安排.....	4
2 问题分析与整体设计	
2.1 网络阐述与建模.....	6
2.2 算法整体设计.....	7
2.3 关键技术介绍.....	10
2.4 本章小结.....	14
3 算法设计与实现	
3.1 充电周期规划.....	15
3.2 通信路由算法设计.....	17
3.3 周期性充电任务调度.....	22
3.4 多无人机的调度规划.....	26
3.5 解的优化：禁忌搜索.....	28
3.6 本章小结.....	29
4 测试与分析	

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

4.1 网络基本架构搭建.....	31
4.2 路由构造算法的实验与分析.....	31
4.3 算法总体实验与分析.....	34
4.4 本章小结.....	38
5 总结与展望	
5.1 工作总结.....	39
5.2 课题展望.....	40
致 谢.....	41
参考文献.....	42

1 绪论

1.1 选题背景与意义

在过去多年里,具有无线连接功能的传感器网络被众多领域应用,例如:环境监测、医疗护理、目标追踪以及军事领域等。无线传感器网络^[1-2]是一种以多跳方式连接,分布式部署的传感器组成的通信网络。网络中的每个传感器节点都可以独立地感知、收集和处理一定范围内被监测的信息。随着技术的发展,如今的传感器已经可以采集诸如声音、图像、电磁、湿度、温度、压力等信息^[3-5]。

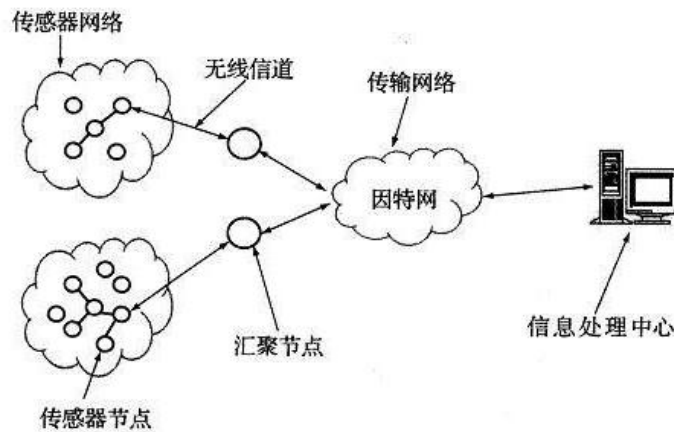


图 1-1 典型的无线传感器网络拓扑图

虽然无线传感器网络应用前景广阔,但因为传感器耗能较高,导致目前无线传感器网络应用局限于在短期的科学研究和工业监测。近几年,随着电子技术的飞跃式发展,传感器的成本也越来越低,能量成本已经成为了制约无线传感器网络普及的最大瓶颈。我们认为具体原因有两个:一方面是因为传感器不断地在进行数据收集和通信,需要大量的能量维持;另一方面是传感器的电池容量一直没有得到大程度的提升。以目前的电池技术,需要不断更换电池或者充电才能维持网络的正常能量供给。无线传感器网络有时需要布置在人迹罕至、环境恶劣的森林、山区等地点,用以收集温度、湿度等信息,此时若用人力对节点进行能量补给,那么成本必将十分昂贵。

近年来,随着技术的成熟,低成本的无人机正快速走向民用,在国民经济的许多

领域都发挥着巨大的作用^[6-8]。无人机可以远程部署，并通过摄像头、麦克风等传感器感知环境信息，实现远距离的数据通信。磁共振^[9]等无线充电技术^[10-11]可以在一定的距离范围之内给传感器节点充电，只需要抵达传感器的附近区域就可以十分方便的给传感器充电。如果结合现有的无人机技术，那么只需要一个装有定位系统并携带大块电池和无线充电器的无人机，就可以周期性地沿着设定好的路线对网络中的传感器依次充电，并且可以忽略地形对飞行速度的影响，使充电任务更加自动化，更加便利和节约成本，从而满足低成本长期能量供给的需求。

综上所述，利用无人机搭载无线充电器的方式，按照事先设定的路线对传感器节点充电，能解决之前能量采集技术和充电方案都无法攻克的传感器网络的能量补给问题，大幅降低其原本高昂的能量成本，从而消除其大规模商用的最后障碍。因此，本论文结合无人机，进行路由和周期性充电调度联合设计的研究工作具有广阔的前景和重要的价值。

1.2 国内外研究概况

目前比较成熟的能量补给解决方案有以下两种：一种是传统的解决方案，减少传感器的能耗，来达到减少能量补给周期，间接达到降低能量补给成本的目标。比如低功率硬件架构^[12]，低复杂度的软件实现^[13]，低功耗无线通信^[14]，动态路由技术，和移动数据采集。这类传统的解决方案的缺点也十分明显：没有解决因电池容量而造成的瓶颈问题。

另外一种解决方案是利用能量采集技术^[15-16]。通过从周围环境捕捉机械、热量、光电、电磁等能量来给传感器节点供电。与传统的解决方案不同的是，该技术使得传感器能够获得可再生能源，这从根本上解决了传感器必须依赖电池供电的问题。能量采集技术是被认为是现今较有潜力的一个技术。Liu 等^[17]提出了在可再生能源存在的前提下，一种提高系统通信吞吐量的算法。然而，随着环境的变化，能源资源分布呈现出很大的差异。目前能量采集技术收获的能量效率较低，并且容易受到环境变化的影响。例如，在风能收集系统中，风速决定能量采集技术的效率，而天气极大地影响风速。

由于能量采集技术受环境的影响较大,可以为传感器节点提供稳定可靠能量的移动充电策略获得了越来越多的关注。Xie 等^[18]设计了一种场景,移动充电车辆在传感器网络中周期性移动,以无线充电的方式给每个传感器节点电池充电。论文的优化目标是最大限度地提高无线充电车(WCV)的空闲时间的比例,并将该问题转化为旅行商问题。论文还证明了最短汉密尔顿回路(Hamiltonian cycle)^[19-20]是无线充电车的最优路径。如图 1-2 所示,该论文的方法是对网络中的所有节点,按照汉密尔顿回路确定的顺序进行充电,并根据节点的耗电速率计算充电等待时间。

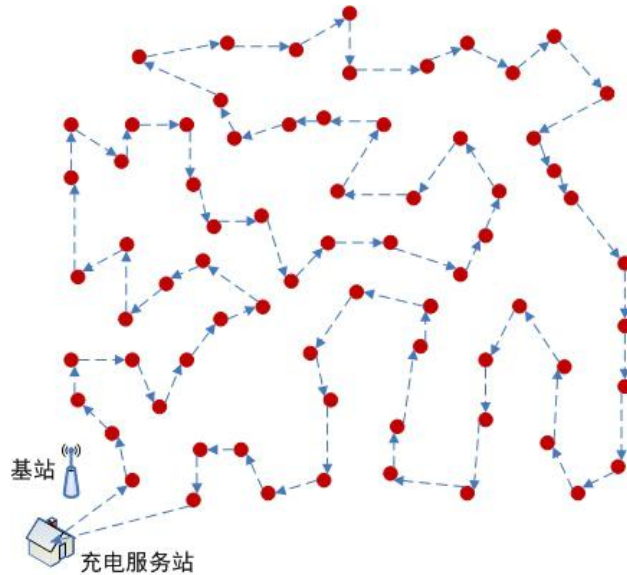


图 1-2 遍历充电策略

单个无线充电车辆无法满足十分庞大的传感器网络的能量补给需求,于是 Wang 等^[21]提出协调多个无线充电车辆来完成充电任务。相比于单个车辆,该方案可以提供更高的健壮性和鲁棒性。论文还研究了在确保没有节点能量耗尽的情况下,如何最小化多个车辆的总移动成本,并且将优化问题转化为带有截止期限的多旅行商问题(TSP 问题)^[22-23]。

考虑到传感器节点能量补给周期不同,He 等^[24]提出了一种同步充电协议,该协议不仅能够减小充电者的移动路程,还可以有效降低传感器节点的充电时延。根据传感器的能量消耗速率,论文中构造了一套嵌套的 TSP 行程,即在每次充电循环中,只对剩余能量较低的传感器充电。此外,论文还提出了同步充电的概念,按照在 TSP 路

径中的顺序，同步充电节点请求序列。但该方案仍存在问题：在最后一个行程中，必须遍历所有的节点，而这个行为可能导致最先被充电的节点在最后一个行程还没结束时，能量已经耗尽。

除此之外，部分论文研究了如何利用一个或者多个的移动收集设备对节点充电，同时进行短距离数据采集的问题。在众多数据采集策略中，一种常见的策略是基于锚点的移动数据采集。Zhao 等^[25]提出利用流动性进行数据采集和能量补给的联合设计。论文设计了一种称作 SenCar 的多功能移动设备。该设备不仅是一个数据采集器，能短距离通信采集数据，还是一个能量传输设备，在移动的过程中，通过无线充电的方式，对传感器进行能量补给。在基于锚点的方案的基础上，Zhao 等^[26]采用网络效用来表征数据收集性能，并且将问题转化为在保证网络生存期和数据收集延迟的前提下网络效应的最大化问题。

然而，充电速率随时间而变化的事实对获得最佳的数据收集策略提出了很大的挑战。考虑到能量消耗来源的多样性和能量补给的时变特性，Guo 等^[27]提出了一种无线能量补给和基于锚点数据采集的联合框架。该论文的主要贡献在于它首次研究了锚点的选址策略以及访问锚点的顺序。

随着技术的发展，基于磁共振耦合的无线能量传输技术^[28-29]突破了不能同时对多个传感器充电的限制。Xie 等^[30]关注于多节点无线能量传输技术，并且利用该技术解决了无线传感器网络中能量传输的扩展性问题。它设计了一个无线充电车辆在无线传感网中周期性巡回，并且以无线能量传输的方式对节点充电。Liang 等^[31]研究了大型无线传感网中，如何最小化充电设备数量的问题。论文提出了一种灵活的按需充电算法，进一步提升了系统的扩展性和适用性。

1.3 论文主要内容与章节安排

在本论文中，我们结合无线传感网中传感器耗电速率不同，以及部分传感器耗电相对较快等自身特点，首次提出对路由构造和周期性充电调度进行联合设计的算法，设计与充电调度更为适应的路由结构，按需充电，使得每个节点被充电时都能剩余尽可能少的电量，以获得充电效率方面的优化。并且，我们还引入无人机实现多充电路

径的规划，并行调度，达到降低充电时间的目的。

全文的章节安排如下：

第一章，主要介绍了本论文的选题背景和意义，分析了国内外对于无线传感网路由和充电调度的研究现状以及存在的难点，以及本论文的主要内容和章节结构。

第二章，分析了无线传感网的充电问题，对问题进行建模。主要介绍了论文算法的设计思路，以及算法的总体设计。并简要介绍了本文需要用到的关键技术。

第三章，主要介绍了算法的详细流程，主要包括节点的通信路由构造，充电任务的周期规划，以及无人机的路径规划三个部分。

第四章，主要介绍了实验仿真过程，并详细的分析了实验结果。最终，实验证明本文所设计的算法能较大幅度提升传感器节点的充电效率，且充电任务更为均衡，能够适应较大规模的无线传感网，具有一定的扩展性与适应性。

第五章，对本文的研究内容进行归纳和总结，并对未来研究的方向进行展望。

2 问题分析与整体设计

2.1 网络阐述与建模

假定总数为 K 的无线传感器网络节点被随机分散在一定区域 G 中完成相应的工作，携带无线充电器的无人机需要及时给电量不足的节点充电。无人机的最大单次飞行距离能够满足从基地到离基地最远节点的一个来回。充电器是一个配有谐振线圈，以及能够存储足够能量的可充电电池的功率发射装置的无线设备。设节点电量充满所需的最长时间为 T_1 。假设网络中所有节点的充电时间相同，均为 T_1 。我们假设无线充电器的电量充足，能够满足一轮充电所需要的电量。无人机按照预先设定的路径，依次访问待充电的节点，在节点处停留 T_1 的时间，待节点电量充满，继续访问下一个节点。图 2-1 为无线传感网的基本模型。

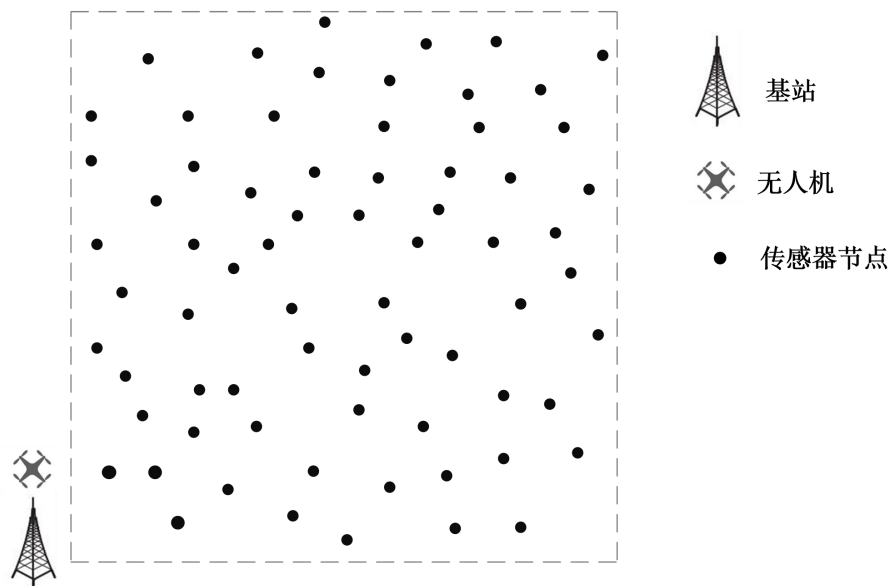


图 2-1 无线传感网基本模型

我们假设所有的节点都是相同的，初始状态都是满电量的，并且网络的地理拓扑结构相对稳定。传感器以一定的速率从外部环境中采集数据，并采用多跳的方式将数据传送给基站。在这种情况下，我们可以假定每个传感器在采集环境数据方面耗电基本相同。而一般传感器的电量消耗主要用于数据传输，例如 MICA2 传感器，光传感

器采集数据的功率为 1.5mW ；而发送和接受数据的电流分别为 25mA 和 8mA ，电压为 2V 时对应的数据传输功率分别为 $25\text{mA} \times 2\text{V} = 50\text{mW}$ 和 $8\text{mA} \times 2\text{V} = 16\text{mW}$ ；从数据上来看 MICA2 传感器的电量消耗主要用于数据传输。而节点传输数据消耗的电量与传输的数据量有关，并且传输的数据量与通信的子节点数成正相关关系。故此，可以假定节点的耗电速率与其子节点数成正比。因此，在确定网络的通信路由情况后，可以认定全网的节点耗电速率基本不变，并且可以根据网络中节点的子节点数，计算其相对耗电速率。叶子节点的耗电速率相对最低。

2.2 算法整体设计

2.2.1 设计思路

网络中电量最先耗尽的传感器决定了无线传感器网络的运行时间。传感器的电量消耗主要用于数据传输，节点耗尽电能的时间由传输通信量决定。因处于通信热点位置，信息转发量大而耗电快的节点，被称为热点节点。一般情况下，节点采集到的信息都要交由基站进行备份和处理，因此靠近基站的节点的通信量远大于其他节点，其电量消耗速度远大于网络边缘节点的耗电速率，需要频繁地对这些热点节点充电。针对这种情况，我们将对网络的通信路由进行设计，希望能减少热点节点的通信量，降低其充电周期，平衡全网的通信量，同时，希望每个节点被充电时都剩余尽可能少的电量，最大化利用电池的容量。

传感器采用电池供电机制，而电池电量是有限的，不能支持节点长期持续性运作。因此，需要根据节点的耗电速率划分对应的充电周期对传感器进行充电或者更换电池。如果不及时对相应的节点充电，可能会造成网络部分数据丢失，甚至有一定概率造成整个传感器网络瘫痪等严重后果。因此，针对无线传感器网络节点耗电速率不同的情况，我们提出对传感器节点按耗电速率划分不同充电周期的充电方案。传感器节点消耗电池能量的速率 r_i 不同，所对应的充电服务周期 T_i 也不同。

除此之外，我们还要合理地规划无人机的传感器节点充电任务。如果无人机在一次充电任务中对所有节点充电，那么完成任务所需要的时间非常长，可能会出现热点

节点不能及时得到充电而出现断电停止工作的情况，因此需要采用多轮充电的策略。在多轮充电任务中，每轮任务只对电量不足的传感器充电，电量较充足的节点在本次任务中先不对其充电，每个节点充电的频率基本正比于其耗电的速率。当节点的充电周期规划完成后，我们需要规划无人机的充电任务，明确无人机每次出动需要访问哪些节点。每一次任务无人机都从基站出发，遍历本次任务中需要访问的所有节点，每个节点只能访问一次，然后再回到基站，则本次充电任务结束。要求每次调度无人机访问全部节点的总耗时最小。那么这就可以看作一个 PVRP 问题^[32-34]。由于无人机单次飞行距离有限，每次无人机的充电任务可被看作单次路径长度受限的 PVRP 问题。

本问题的目标是减少每次任务中无人机的飞行时间，即减少无人机的总飞行路径。并且需要满足以下几个约束条件：

在一次充电任务中，

1. 调度表中规定的本次任务需要充电的每个节点都至少被无人机访问一次
2. 无人机到达节点完成充电后必须离开这个节点
3. 一个节点只能由一架无人机充电
4. 无人机服务路线上的节点充电需要的电量之和不能大于无人机携带充电器的总电量
5. 单次飞行路线的总距离不能大于无人机单次飞行的最大距离
6. 无人机的最大服务时间不能超过单次充电任务的服务时间限制

基于无人机的无线传感器网络周期性充电规划问题是本文的研究重点。研究内容主要包括传感器的充电节点任务分配问题和无人机每次飞行任务的路径规划问题，又结合了降低热点节点热度的路由构造问题，以及平衡任务时间的负载均衡问题，共同构成路由和周期性充电调度的联合设计。这是一个联合路由设计的 PVRP 问题，整个问题可以分为路由构造问题、周期规划问题、距离受限的 PVRP 问题三个子问题，共同组成复合问题。确定路由结构、无人机每次充电任务的节点集合和充电任务路径的最优解是解决整个问题的关键。

2.2.2 算法总体流程

经过上一节的设计后，算法的主要流程是：设计路由构造算法，初始化无线传感器网络路由通信情况。根据传感器不同的耗电速率对传感器进行初次分类，并得到门限于节点数；然后通过构造路由算法，生成一棵负载均衡的路由树来降低热点节点的耗电速率，平衡整个网络的通信量，并更新节点的充电周期分类情况，以此设计充电任务调度表。根据充电任务调度表可以知道无人机每次任务需要访问的节点，规划无人机的访问路径，当单次任务时间超过充电最小间隔，则采用负载均衡算法平衡无人机每次充电任务的强度。

算法的具体细节如下：

(1)构造路由通信情况，以通信量为输入设计代价函数，生成一棵负载均衡的路由树，平衡全网的耗电速率，使得树上节点的充电周期变长，以降低总充电时长。对于同一无线传感网网络，每次构造路由后得到的通信路由可能不同；

(2)构造节点的初始分类，根据各个节点的耗电速率将节点进行初步分类，划分到不同的充电服务周期区间，得到多个初始节点集合，建立初始充电任务调度表；

(3)进行充电任务的负载均衡，依据聚类算法划分处在同一充电服务周期的节点，并将划分好的节点子集分配到不同的充电任务中，更新充电任务调度表。通过均衡多轮充电过程的充电任务，来保证不会在一轮充电过程中给太多的节点充电；

(4)将不同周期的充电任务节点集合的充电路径问题看作一个个 VRP 问题,求解这些 VRP 问题，得到集合的充电路径，并进行无人机的调度规划，得到初始解；

(5)重复上述步骤多次，得到多个解，取充电时间最小的作为最优解，与采用 Dijkstra 作为路由构造部分的算法作比较，取两者较小值作为解。

(6)解的优化

6.1 定义初始解 s 的邻域 $N(s)$ ；

6.2 采用禁忌搜索算法，求出邻域 $N(s)$ 的最优解 s^* ；

6.3 用 s^* 替换初始解 s 。

2.3 关键技术介绍

2.3.1 VRP 问题

将无线传感器网络 W 抽象成一个图 G ， G 中的顶点即为传感器节点，则访问传感器网络节点的问题便转化为如何遍历 G ，使得路径最短，可以将该问题转化为VRP^[35-36]问题（车辆路径问题）。解VRP问题的常见算法有动态规划，Sweep算法，模拟退火算法等。其中Sweep算法^[37](Sweep Algorithm)是用于求解不限车辆数目的VRP问题的一种启发式算法，正适用于本论文中多无人机的情况。该算法的本质是将距离近的节点划分到一个子路径中，主要步骤如下：

(1) 以起始点作为极坐标的原点，以此原点建立一个极坐标系，然后计算出需要遍历节点的极坐标，随后按照极坐标的角度大小进行排序。

(2) 从最小角度的节点开始，按照顺时针或者逆时针任一方向，将节点逐个加入到同一条子路径中，直到加入某节点不满足给定的条件，结束这条路径的构造。

(3) 重复上个步骤，直到所有的节点都加入到路径中。

(4) 对于每个路径中的节点访问，可以看做一个个单独的TSP问题，通过解TSP的算法对得到的子路径进行优化处理。其中，解TSP问题的常见算法有：遗传算法^[38]，分支限界法，蚁群算法^[39]，lkh算法^[40]等。在本实验中，考虑到单位工作时间内需要充电的节点数目较少，采用了遗传算法。

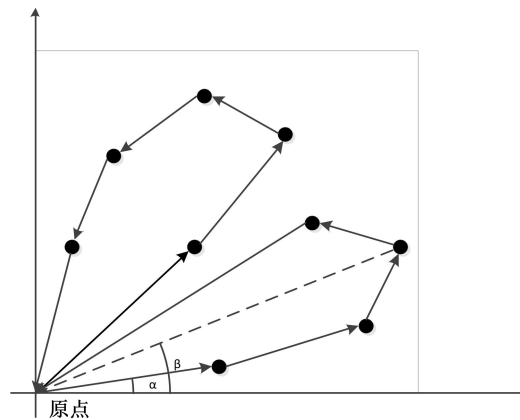


图 2-2 Sweep 算法

图 2-2 为 Sweep 算法的基本过程。很明显，极角为 α 的明显比为 β 的小，故会先访问极角为 α 的点，之后再去访问极角为 β 的点。

2.3.2 聚类算法

聚类算法的本质是按照特定的标准把给定的数据集合划分成多个集合，使得同一个集合内的数据特征尽可能相近。根据划分的标准不同，有多种聚类算法^[41]，如基于层次的聚类算法，基于划分的聚类算法^[42-43]等。其中，基于划分的聚类算法需要事先指定聚类的质心或者数目，再经过多次迭代运算，逐渐减少目标函数的 SSE(Sum of Squares for Error)。

2.3.2.1 基本 K-means 算法

基本 K-means 算法^[44]是一种硬聚类算法。它是把数据点到原型的某种距离作为优化的目标函数，利用函数求极值的方法得到迭代运算的调整规则^[45]。该算法一般以欧式距离作为相似度测量标准，求对应某一初始聚类中心向量最优分类，使得目标函数最优。一般采用误差平方和准则函数作为目标函数。

基本 K-means 算法的基本步骤：

1. 随机生成 k 个初始点作为质心
2. 计算各个数据到质心的距离，按照距离大小将数据分配到各个集合中
3. 计算各个集合中的数据的平均值，将其作为新的质心
4. 回到第二步，直到所有的集合不再改变

该算法很重要的一步就是挑选合适的初始质心。一般是随机选取初始质心，但是这样子效果往往很不好。一种常用的方法是：多次运行算法。每次挑选一组不同的初始质心，然后挑选具有最小 SSE 的集合。

一般目标函数达到最优或者达到给定的迭代次数，算法即可终止。当采用欧式距离作为度量时，目标函数一般为最小化簇中所有数据点到质心的距离的平方和，如下：

$$\min \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} \text{dist}(c_i, x)^2 \quad (2.1)$$

图 2-3 为对没有标记的数据进行 k-means 算法得到的分类，采用欧式距离作为距离测量，“+”字是最终迭代位置，颜色相同表示聚类到同一个簇中。如图所示，距离相近的节点最后被聚到同一个簇中。

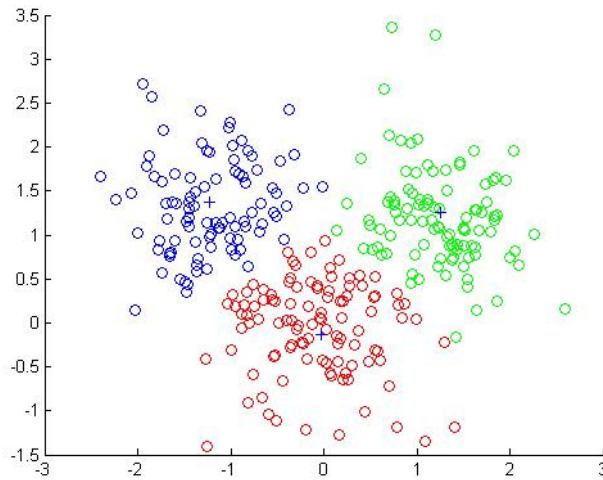


图 2-3 聚类算法

K-means 算法试图找到使 SSE 准则函数最小的簇。当分割后的簇大小比较相近时，结果较好。并且该算法非常适合处理大数据集合。缺点在于，算法不仅需要提前确定聚类的数目，总是陷入局部最优的情况，而且孤立点和初始质点的选择对结果的影响很大。

2.3.2.2 二分 K-means 算法

二分 k 均值 (bisecting k-means) [46] 算法的主要思想是：将全部的数据作为一个大类，然后将这个集合分割成两个小类。之后选择能最大程度降低代价函数 SSE 的类，划分为两个小类。循环上述步骤，直到类的数目等于给定的数目为止。

衡量聚类性能的是聚类的 SSE。该值越小，表示数据点越接近于它们的质心，说明聚类效果越好。因此，需要对 SSE 最大的簇再一次划分，因为 SSE 越大，表示该簇聚类效果越不好，所以我们首先需要对这个簇进行划分。

相对于基本 K-means 算法,二分 K-means 聚类的优点有:1. 二分 K 均值算法的运行速度比 K-means 算法要快,因为减少了相似度计算;2. 没有初始质心的问题,这里不存在随机点的选取,且每一步都保证了误差最小。

2.3.3 优化算法

按照设计的算法得到一个解之后,我们还需要对解进行优化,得到一个比当前解更优的解。常见的优化算法有遗传算法,局部搜索,禁忌搜索等。

局部邻域搜索是一种简单的贪心搜索方法,它是从爬山法改进而来。其基本的思想是:搜索当前解的邻域解,如果邻域最优解的值优于当前解,则将当前解更新为邻域最优解,继续在邻域中进行搜索;否则,当前的解就最终解,结束算法。算法的优点在于易于实现,但是初始解与邻域结构对结果的影响很大,并且也只能得到局部最优解。

禁忌搜索^[47](Tabu Search 或 Taboo Search, 简称 TS)由局部邻域搜索改进而来,模拟了人类的记忆过程,能够进行全局寻优。为了能进行全局搜索,禁忌搜索允许接受较差的解,借此获得更大的搜索范围。禁忌搜索引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态,进而保证多样化的有效探索以最终实现全局优化^[48]。

禁忌搜索的基本思路是:在搜索过程中,将近期访问过的解放在禁忌表中,在之后的若干步中避开这些解,避免落入局部最优的情况。

禁忌搜索的一般步骤^[49]:

- (1)随机产生一个初始解 x , 初始禁忌表。
- (2)判断算法是否满足终止条件? 若满足,则结束算法并输出优化结果;否则,继续以下步骤。
- (3)给定生成邻域解的方法,并分别计算邻域解的值。
- (4)判断邻域解是否满足藐视准则? 若满足,则用满足藐视准则的最佳状态 y 替代 x 成为新的当前解,并用与 y 对应的禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象,同时用 y 替换“best so far”状态,然后转步骤 6; 否则,继续以下步骤。

(5)判断候选解对应的各对象的禁忌属性，选择候选解集中非禁忌对象对应的最佳状态为新的当前解，同时用与之对应的禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象元素。

(6)转步骤 2。

2.4 本章小结

本章首先对算法的条件做了一些设定，对无线传感网的充电问题进行了建模，然后介绍了本文的设计思路，和算法的主体设计及相关细节。针对传感器节点耗电速率不同的情况，提出对节点按耗电速率划分不同充电周期进行充电的想法；对于热点节点通信量大，耗电快的情况，设计路由算法降低其耗电速率，平衡全网的通信量；并且将多无人机的充电任务转化为单次路径长度受限的 PVRP 问题进行解决。

本章还简单介绍了本文需要用到的一些关键技术，包括 VRP 问题的解法，聚类算法和优化算法。Sweep 算法是用于求解不限车辆数目的 VRP 的一种启发式算法，适用于多无人机路径的规划，大幅度减少无人机的行进距离，降低无人机的飞行时间；聚类算法对节点按照地理位置分类，使单个充电任务中的节点的地理位置尽可能相近，减少无人机的行进距离；禁忌算法一种全局逐步寻优算法，按照算法求得初始解后，可以利用禁忌算法，在解的邻域中搜索一个更优的解。

3 算法设计与实现

3.1 充电周期规划

假设传感器节点被随机放置在划定好的工作区域中。初始条件下所有节点的电量均满，电池容量为 B 。所有节点同时开始工作。初步确定路由之后，在节点和节点数据采集率都一样的假设下，根据各个节点的通信量，计算节点的耗电速率，得到节点的充电周期，然后按照充电周期对其分类。

无线传感器网络的节点众多，按照耗电速率分类之后，每次只对到达充电周期的饥饿节点进行充电，不对能量充足的节点充电，可以最大化利用电池容量，提高充电效率。本文采用 Esync^[22]中提到的 power- α 分类算法，初步构造充电节点子集。方法步骤如下：

(1) 确定节点的分类级数 m

$$m = \left\lceil \log_{\alpha} \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right\rceil \quad (3.1)$$

其中 r_{\max} 和 r_{\min} 分别表示节点的最大耗电速率和最小耗电速率， α 是比 1 大的整数参数。 $\lceil x \rceil$ 返回比 x 大的第一个整数。

(2) 计算各个节点的充电周期 T_i

$$T_i = \frac{B}{r_i} \quad (3.2)$$

其中最小的充电周期为 $T_{\min} = \frac{B}{r_{\max}}$ ，最大充电周期为 $T_{\max} = \frac{B}{r_{\min}}$ 。

(3) 根据充电周期初步划分充电节点子集

将所有节点的充电周期升序排列，划分为 m 个区间。则各个区间表示如下：

$$\left(T_{\min}, \alpha T_{\min} \right], \left(\alpha T_{\min}, \alpha^2 T_{\min} \right], \dots, \left(\alpha^{m-1} T_{\min}, T_{\max} \right] \quad (3.3)$$

子集从左到右依次标记为 $C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_m$ 。

最后，所有的节点都被划分到 m 个区间内，每个区间的长度呈 α 指数增长。充电周期落在同一区间的节点，构成一个充电节点子集，统一设置该子集中所有节点的充电周期为区间的下限，我们称这些充电周期为门限周期。

同一节点子集内最大耗电速率与最小耗电速率的比值上限由 α 决定。节点充电时，充电效率与节点剩余电量有关。在最坏的情况下，子集中的节点剩余 $\frac{\alpha-1}{\alpha}$ 电量， α 越小充电效率越低。本文中设置 $\alpha = 2$ ，最坏的情况下节点在充电时还剩余一半电量； $r_{\min} = 1$ ，表示叶子节点的耗电速率。

图 3-1 是一幅根据节点的耗电速率划分不同充电周期的示意图。其中，处于同一虚线范围内节点的充电周期落在同一区间。靠近基站的节点由于传输的通信量较其他的节点多，其耗电速率也较快。

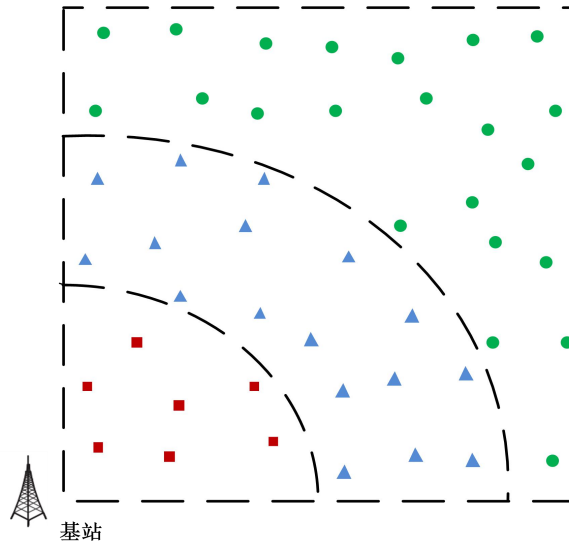


图 3-1 充电周期划分

根据以上分类算法可以导出周期性工作的充电任务调度表。整个充电循环的长度是所有子集的充电周期的最小公倍数，记为 L 。每次充电循环中调度方案都是相同的，分配的充电任务循环重复。将时间划分为长度 T 的固定时间间隔，即“时隙”，表示单位工作时间长度。充电循环长度是时隙的整数倍，每个时隙中无人机会为低电量节点子集充电。一个时隙是两次充电任务的最小时间间隔，一个时隙结束之前，被分配的充电任务应该完成，以保证下一个时隙中任务能及时开始并顺利完成。

假定所有节点分成 m 类，第 C_i 子集中的节点的充电周期记作 p_i ，则第 C_i 子集在

$\frac{n_i p_i}{T}$ 时隙被充电，其中 $n_i = 1, 2, \dots, \frac{L}{p_i}$ 。

下面以 $B=10$ ， $r_{\max} = 10$ ， $r_{\min} = 1$ ， $\alpha = 2$ 为例，实现节点初始子集的构造和充电任务调度表的规划。

$m = \left\lceil \log_2 \frac{10}{1} \right\rceil = 4$ ，则节点子集分为 $[1,2], [2,4], [4,8], [8,10]$ ，依次标记为 C_1, C_2, C_3, C_4 。

针对以上子集初始划分和时隙设计，充电任务安排如下：

表 3-1 充电任务安排

时隙	1	2	3	4	5	6	7	8
分类	C_1	C_1, C_2	C_1	C_1, C_2, C_3	C_1	C_1, C_2	C_1	C_1, C_2, C_3, C_4

所有传感器节点被分为 C_1, C_2, C_3, C_4 四类，每一类的充电周期分别是 $p_1 = T$ ， $p_2 = 2T$ ， $p_3 = 4T$ ， $p_4 = 8T$ 。充电循环的长度是 $L = 8T$ ，意味着有 8 个时隙。循环中的每个时隙的充电节点子集安排如上表所示。

3.2 通信路由算法设计

无线传感器网络稳定工作的时间由耗电最快的节点决定。而耗电主要来源于节点间的数据通信，热点节点因参与的信息交换和通信过程较多，耗电相对较快。因此，需要设计一种路由算法，生成一棵负载均衡的路由树，平衡整个网络的节点通信路由情况，降低热点节点的耗电速率，减少无人机的出动充电频率，提高充电效率。

根据上节中划分充电周期的方法，在不改变充电周期的情况下，这个节点能够支持的子节点规模的最大值是已知的。这个数值定义为门限于节点数。其意义是，若节点的子节点个数为某个门限于节点数时，当其子节点数再增加一个，就会被划分到下一个充电周期。按 3.1 节所述，门限于节点数一般为 $2^n (n=0,1,2,\dots)$ ，将被路由算法使用。路由算法通过使节点的子节点数都尽可能靠近而不超过门限于节点数，达到均衡

全网通信量的目的。

根据无线传感网的通信特点，当任意两个节点之间的距离不大于最大通信距离，就可以通信。在路由构造中，能够通信的两个节点之间的权值相等，设为 1，不能直接通信的两个节点之间的权值设为无限大，表示两者之间不可达。

借鉴 Dijkstra 算法的思想，结合门限子节点个数定义，路由构造算法具体步骤如下：

(1)遍历整个传感器网络，得到全部节点的通信拓扑图，计算两个节点之间是否能够相互通信，设置节点之间的权值；

(2)设置三个节点集合：集合 S 将放入已加入到生成树的节点；集合 K 将放入未加入生成树的节点中与集合 S 中节点相邻的节点；集合 T 将放入剩余的节点。引入一个辅助变量 D，表示节点的子节点个数。算法不断的从 K 中选择节点加入到生成树中，并随时更新这 3 个集合；

(3)将基站 v_0 设为根节点，写入集合 S，更新集合 K 和 T；

(4)指派集合 K 中选中的节点 i 加入到生成树上。考察集合 K 中所有候选的加入点，找综合代价最小的候选节点。当选定的节点 i 指派给一个候选父亲节点 j 的时候，点 j 和其所有父亲节点的子节点数都会增加。这甚至会使得某些父亲(或祖先)节点因为子节点个数刚好超过门限子节点数使得充电周期减半。当节点 i 指派给节点 j 之后，引起的代价可以被量化出来。每个节点维护一个自身代价 W_i ，节点自身的代价与子节点数和其子节点数距离门限子节点数的差值两者都有关系。子节点数越多，代价越高；子节点数距离门限子节点数越近，代价越高。综合代价是指从根节点到节点的路径代价 W，即从根节点到该节点的路由路径中所有节点的代价之和。

代价的具体算法如下：

假定当选定的节点 i 指派给一个候选父亲节点 j 时，节点 j 的子节点数变为 n。则其需要传输 n 个子节点数的数据，其相对于叶子节点的耗电速率为 n，此时节点 j 所在充电周期的门限子节点数 N 为

$$N = 2^{\lceil \log_2 n \rceil} \quad (3.4)$$

该节点的上一个充电周期的门限子节点数 N_1 为

$$N_1 = 2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1} \quad (3.5)$$

该节点的子节点数离上一个门限子节点数的距离 D 分别为

$$D = n - N_1 = n - 2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1} \quad (3.6)$$

其中, $\lceil \log_2 n \rceil$ 表示不比 $\log_2 n$ 小的最小整数。

该节点自身的代价 W_i 定义为:

当 $D = 1$, 即 $n - 2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1} = 1$ 时, 表示增加子节点数目后, 节点的充电周期恰好减半, 此时代价应较大:

$$W_i = (K * M)^2 = (K * \lceil \log_2 n \rceil)^2 \quad (3.7)$$

当 $D \neq 1$ 时, 表示增加子节点数目后, 该节点的充电周期暂时不变, 此时代价随着子节点数的增长而增长:

$$W_i = (K * \frac{D}{N_1} * M)^2 = (K * \frac{n - 2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1}}{2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1}} * \lceil \log_2 n \rceil)^2 \quad (3.8)$$

其中, $\frac{D}{N_1}$ 表示该节点的子节点数在相邻两个门限子节点数 N_1 到 N 区间长度的占比; M 的作用是表示子节点数多的节点的代价更大; K 为系数, 保证 W_i 大于 1, 此处可设为总节点数。

代价函数的图形如图 3-2 所示。从图中可以明显地看出, 当节点 i 被指派给节点 j 后, 如果节点 j 的子节点数刚过门限子节点数, 充电周期减半时, 比如子节点数从 2 到 3 的时候, 节点的充电周期减少, 节点代价明显增大。如果节点的充电周期还在同一个周期内, 比如子节点数在 $[6, 8]$ 区间内, 节点代价逐渐增大。该图形表示, 算法倾向于添加父节点的子节点数与门限子节点数相距较大的节点到生成树中, 使得生成树中的节点的子节点数尽可能靠近而不超过门限子节点数, 均衡全网的通信量。对于热点节点来说, 算法倾向于将它的子节点连接到它周围的节点, 使这些节点的子节点数尽量相等, 降低热点节点的耗电速率。

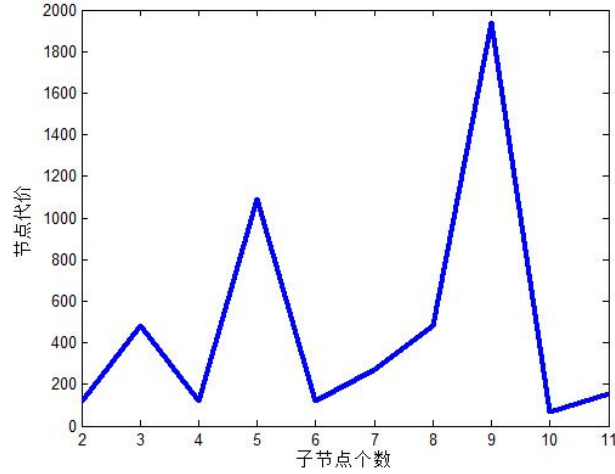


图 3-2 代价函数折线图

综合代价 W 表示为该路径上所有节点的代价之和，即：

$$W = W_{a_1} + W_{a_2} + \dots + W_{a_n} \quad (3.9)$$

其中， a_1, a_2, \dots, a_n 为该路径上的节点。

遍历集合 K 中的所有候选点，将其指派给能与其通信的候选父亲节点，分别计算指派后从根节点到候选节点整条路径的综合代价，并记录下来。然后从所有的结果中挑选出综合代价最小的候选节点加入集合 S ，并更新集合 S 中的节点代价。根据代价公式可知，算法倾向于选择加入子节点后，节点都还处于同一充电周期的路径。

(5)重复步骤(4)，直到 S 中包含所有节点为止。

当部分候选路径的综合代价相等时，算法是从中随机选择的，因此，对于同一个通信网络，多次运行路由构造算法，得到的结果可能是不一样的。算法不一定能保证每次都能达到减少充电时间的目的。这里可以通过多次运行算法的方法，比较最后的充电时间，取最小值，尽量使路由构造的效果更好。再与采用 Dijkstra 作为路由构造部分的算法作比较，取两者较小值作为最后的充电时间。

Algorithm1 路由构造算法

1: **Input:** 包含全部节点的集合 A ，集合 S ， K ， T

2: **Output:** 节点的路由结构

```
3:  $S \leftarrow v_0$ 
4:  $K \leftarrow \text{neighbour}(v_0)$ 
5:  $T \leftarrow T \setminus \text{neighbour}(v_0)$ 
6: while ( $S \neq A$ ) do
7:   for  $v_j \leftarrow K$  do
8:      $W_j \leftarrow 0$ 
9:     while ( $v_j \neq \text{null}$ ) do
10:       $D = n - N_1 = n - 2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1}$ 
11:      if  $D = 1$  then
12:         $W_i = (K * \lceil \log_2 n \rceil)^2$ 
13:      else
14:         $W_i = (K * \frac{n - 2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1}}{2^{\lceil \log_2 n \rceil - 1}} * \lceil \log_2 n \rceil)^2$ 
15:      end if
16:       $v_j \leftarrow \text{parent}(v_j)$ 
17:       $W_j \leftarrow W_j + W_i$ 
18:    end while
19:  end for
20:  找出  $W_j$  最小的节点  $v_j$ 
21:   $S \leftarrow S \cup v_j$ 
22:   $K \leftarrow K \cup \text{neighbour}(v_j)$ 
23:   $T \leftarrow T \setminus \text{neighbour}(v_j)$ 
24: end while
```

算法 1 路由构造算法

按照以上算法步骤，可以确定无线传感器网络节点的多跳通信路径。此时，每个节点的通信情况已知，可以以此计算出每个节点的相对耗电速率。确定节点平衡后的耗电速率，即可按照 3.1 中介绍的算法，计算每个节点的充电周期 T_i ，并根据节点的充电周期，将节点划分到指定的充电周期区间中。充电周期落在同一区间的节点，初步构成一个充电节点子集，该子集的所有节点的充电周期统一为区间的下限。

3.3 周期性充电任务调度

在充电循环中，无人机每次根据节点的充电周期，选择性的给一部分传感器节点充电。这也就要求对于同一节点连续两次的充电行为的时间间隔不能大于该节点电量耗尽的时间，否则就可能会发生断电情况。虽然路由算法均衡了全网的通信量，网络中节点的电量仍不是同时耗尽的。并且，按照 $\text{power-}\alpha$ 算法初步分类后，不同充电周期的节点个数是不均衡的。每次都对同一充电周期所有节点充电并不是一个高效的策略，特别是在每一个充电循环的最后一次任务中需要一次性访问所有节点，这样可能会影响其他充电任务，导致其他充电任务不能按时开始。

我们采用多轮充电的策略，每一轮对部分节点充电，即对在该轮缺电的节点充电。耗电速率快的节点被充电的频率高于耗电速率慢的节点。这样基本做到了每个节点充电的频率正比于耗电的速率。

3.3.1 充电任务的负载均衡

充电任务的节点集合确定后，确定节点的访问路径问题可以看做是一个 VRP 问题。当对 VRP 问题求解出现不可行解时，充电任务不能保证在一个时隙中完成，需要利用负载均衡来对子集进行重构。

根据表 3-1 所示，求解 VRP 问题时，时隙 1、3、5、7 是一个 VRP 问题，时隙 2、6 是一个 VRP 问题，时隙 4 和时隙 8 是单独的两个 VRP 问题，将这四个 VRP 问题标记为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 。可以很明显的看出，这四个问题中的节点个数随标号的增大而增多， Q_1 包含的节点数最少， Q_4 包含的节点数最多。在最后一个充电周期内，需要

对所有的传感器充电。求解 VRP 问题时，先求解节点个数少的问题，节点个数少的问题更可能拥有可行解，求解顺序按问题的标号顺序进行，一旦出现某个问题无可行解，进行以下负载均衡算法。本文采用开始就对所有的充电任务进行负载均衡，确保多个充电任务的任务量相近。

负载均衡算法的主要思想是将充电任务平衡到所有时隙中去，以使每个时隙中的充电节点个数大致相同。依据聚类算法，将初始分类到同一个充电周期的节点集合划分为一个个子集。充电周期越长的集合，可以分越多的子集。每一轮充电任务都会在每个类挑选一个子类，这些子类都要在这一轮中充电。假设有 I 个充电周期，对于第 i 个充电周期的节点集合，该集合的所有节点需要在 2^i 轮充电中都充电一次。因此，我们将第 i 个类分为 2^i 个子类，在 2^i 轮充电过程中，每轮充电给其中的一个子类充电，保证了每轮充电的传感器数目大致相等。

算法的主要步骤如下：

(1) 采用二分 K 均值聚类算法，将第 i 个充电周期的节点集合 C_i 平均分为 2^i 个子集，记作 C_{ij} ， $j=1,2,\dots,2^i$ 。在每次迭代中，算法会选择一个集合并将它分成相似的两个子集，规定每一步都划分最大的集合，来均衡子类节点的规模，并均衡循环中的充电任务。

(2) 采用贪婪算法，将子类 C_{ij} 合理的分散到每个时隙中，节点集合 C_i 的子类会被分散到 $\frac{p_i}{T}$ 个时隙中。

① 首先产生数量为 $\frac{L}{T}$ 的空时间调度表，标记为 $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k, \dots, \psi_{\frac{L}{T}}$ 。算法会经过 m 次迭代完成时间调度表，每次迭代算法会将子类安排到时间表中。

② 定义子类 C_{ij} 和调度表 ψ_k 之间的距离是子类 C_{ij} 和调度表 ψ_k 中最接近的两个节点的距离，记作 $\delta(C_{ij}, \psi_k)$ 。距离值越小就表示合并越有利，充电时间表中安排的所有

子类的完整路径是很短的。算法倾向于将距离值小的子类安排在同一个调度表中。为了避免陷入局部最优而全局较差的情况，我们将子类和与其距离最近的两个调度表中的随机一个安排在一起。需要注意的是，对于集合 C_i ，任一调度表内最多只包含一个子类 C_{ij} 。

③在第 $2^i + 1$ 次迭代中，算法会考虑调度表中前 2^i 个时间调度表，重复分配集合 C_i 的 2^i 个子类到之后的调度表。一旦 C_{ij} 子类分配到 ψ_k 时间表 ($k < 2^i$)，它也将被分配到 $\psi_{k+k'2^i}$ ，其中 $k'=1,2,\dots,\frac{L}{2^i T}-1$ 。

最终，每一个时间调度表 ψ_k 包含从第 i 个充电周期的节点集合 C_i 中划分的子类。划分到同一时间调度表的不同集合的子类在地理位置上相近，能够形成较好的充电路径来减少无人机飞行的总路径。

如图 3-3 所示，红色框内的节点表示单个工作日需要访问的节点集合。充电周期相同的节点形状相同。节点处于同一个虚线椭圆中，表示经由聚类算法后，这些节点被安排在同一个子类中，即处于同一椭圆的节点都会在同一充电任务中被访问。安排充电任务时，会从每个充电周期的小类中挑选一个子类进行访问，将处于同一充电周期的节点分散到多轮充电任务中，保证了充电任务的负载均衡。

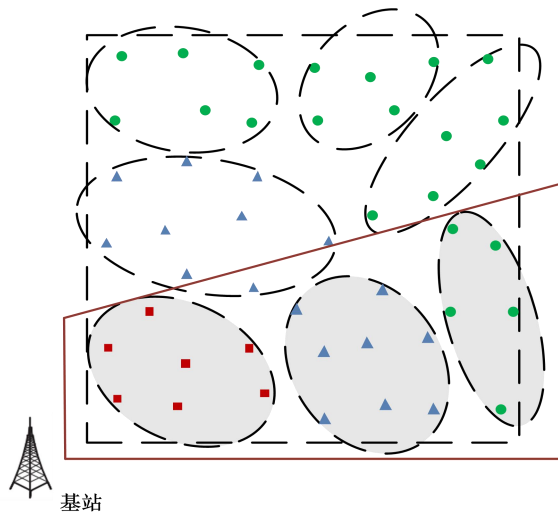


图 3-3 负载均衡后的充电任务调度

算法的伪代码如下：

Algorithm2 负载均衡

```

1: Input: 节点集合  $C_i (i=1, \dots, I)$ 

2: Output: 时间调度表  $\psi$ 

3: for  $i \leftarrow 1$  to  $I$  do
4:   for  $j \leftarrow 1$  to  $2^i$  do
5:     Bisecting K-means( $C_i$ )
6:   end for
7:   得到集合  $C_i$  的子集  $C_{ij}$ 
8: end for
9: for  $i \leftarrow 1$  to  $I$  do
10:  for  $j \leftarrow 1$  to  $2^i$  do
11:    找出  $C_{ij}$  与  $\psi_k$ , 使得  $\min(\delta(C_{ij}, \psi_k))$ 
12:    for  $k' \leftarrow 1$  to  $\frac{L}{2^i T} - 1$  do
13:       $\psi_{k+k'2^i} \leftarrow \psi_k \cap C_{ij}$ 
14:    end for
15:  end for
16: end for

```

算法 2 负载均衡算法

根据以上方法，对前例进行负载重构，得到的结果如下表 3-2 所示：

表 3-2 负载均衡后的任务表

时隙	1	2	3	4	5	6	7	8
分类	$C_1, C_{21},$ C_{31}, C_{41}	$C_1, C_{22},$ C_{32}, C_{42}	$C_1, C_{21},$ C_{33}, C_{43}	$C_1, C_{22},$ C_{34}, C_{44}	$C_1, C_{21},$ C_{31}, C_{45}	$C_1, C_{22},$ C_{32}, C_{46}	$C_1, C_{21},$ C_{33}, C_{47}	$C_1, C_{22},$ C_{34}, C_{48}

从上表中可以看出，经过负载均衡后，每次充电任务的节点数目大致相同且数量

合理，避免出现节点不能被及时充电的情况，也优化了工作时间的安排。

3.4 多无人机的调度规划

确定了每个工作周期需要充电的节点集合之后，接下来需要对无人机的飞行路径进行调度规划，在满足给定的所有节点都被访问的条件下，最小化无人机的飞行时间。由于无人机自身也是电池供电，电量有限，出动一次所能飞行的时间和距离受约束，因此，不仅需要考虑多无人机的并行调度，还要考虑单次飞行路径的长度受限。

3.4.1 多路径规划

充电任务的节点集合确定之后，如何遍历这些节点集合就是一个 VRP 问题。设当前求解的充电任务包含的节点个数为 a 个，基站设为 0 号节点，求解充电任务的 VRP 问题。求解该问题可以有如下方案：

方案一算法步骤如下：

(1)对本次充电任务中包含的所有节点 a 跑一次 TSP 算法，取离基站最远的节点为 1 号节点，得到一条环路 $\text{cycle} = \{1, 2, 3, \dots, a, 1\}$ ；

(2)从 0 号节点开始，不断按照 cycle 中的顺序向第一条路径中加入节点。当加入节点 b 时会导致超出无人机单次飞行距离时停止加入节点。此时第一条路径即为 $\{0, 1, 2, \dots, b-1, 0\}$ ；

(3)从 b 号节点开始按同样的方式构造第二条路径直到所有的节点都被安排至某条路径。得到初始解 s 路径集合。

方案二算法步骤如下：

采用 Sweep 算法进行路径的构造，具体步骤如下：

(1)以基站的某条水平线为极轴对本次充电任务包含的所有节点按极角大小进行编号，小号代表极角较小的节点；

(2)节点从 1 号开始按编号顺序依次加入到已包含基站的某条路径；

(3)当节点 b 加入该条路径超出无人机单次飞行距离时停止加入该节点，重新构造一条包含基站的路径接收该节点 b ；

(4)从 $b+1$ 号节点开始, 继续向新的路径中按顺序加入节点;

(5)直至所有节点都被分配到某条包含基站的路径;

(6)对于得到的所有路径分别运行 TSP 算法, 对路径进行优化, 得到初始解 S 路径集合。

以上两种算法的主要思想都是尽量使每一条路径的长度都尽可能地接近无人机的最大单次飞行距离, 使得无人机每次飞行都尽可能地访问更多的待充电节点。得到无人机充电的路径集合之后, 需要结合无人机的数量来规划无人机的出行安排。

3.4.2 多无人机调度

假设: 无人机的数量为 K 架, 并且每架无人机都是一样的, 没有损坏。每次充电任务需要访问的路径数 M 。一架无人机可以返回基地更换电池后再次出动。

情况一: 充电任务需要访问的路径数小于无人机个数, 即 $M < K$, 那么只需派遣出 M 架无人机即可完成本次充电任务。

情况二: 充电任务需要访问的路径数大于无人机个数, 即 $M > K$, 在这种情况下需要做出合理的规划。

(1)对本次充电任务的路径按照路径的长度由大到小进行排序, 前 K 条路径先派遣全部 K 架无人机进行充电任务。

(2)由于路径长度不一, 因此无人机返回基地的时间也不一样。每当有一架无人机返回基地时, 便派遣更换电池后的无人机按顺序访问剩余路径。

(3)所有路径都访问过一次, 则算法执行结束。

经过调度规划后, 可以有效的提高无人机的出动效率, 减少充电耗费的时间, 及时为无线传感器网络节点补充电量。

经过上述步骤后, 最后得到的是在一个周期内, 单位时间内每架无人机的飞行路径集合。如果出现无人机在工作期间损坏的情况, 可以安排其他先返回基地的无人机继续被损坏的无人机的剩余路径, 保证充电任务能够继续进行, 再安排工作人员回收损坏的无人机。

3.5 解的优化：禁忌搜索

经过上一节的算法求解，可以得到初始解 S 。 S 是无人机的飞行路径集合 R ，集合中两个任意不同的路径设为 $r_j = (... , w_{j-1}, w_j, w_{j+1}, ...)$ 和 $r_i = (... , v_{i-1}, v_i, v_{i+1}, ...)$ ，路径中的元素代表传感器节点。将初始解设定为当前解，可以利用禁忌搜索算法，在迭代允许次数内在解的邻域中搜索更优的邻域解 s' ，进而找到邻域中的最优解 s^* 。

3.5.1 定义解的邻域

搜索算法的目标是得到比当前解耗时更短的路径规划。进行禁忌搜索算法之前，需要先明确每次搜索的范围，给出明确的邻域定义。

假设路径集合的邻域设为 $N(s)$ ，它包含给定邻域定义内所有可实现的解。对邻域的定义可以以节点为对象，也可以以集合为对象。

以节点为对象定义邻域有以下两种方式：

(1)插入节点：将第 l 天路径 r_i 中的一个节点 v_i 去除，并把 v_i 插入同一天的另一条路径 r_j 中。插入后路径变为 $r_i = (... , v_{i-1}, v_{i+1}, ...)$ 和 $r_j = (... , w_{j-1}, v_i, w_j, w_{j+1}, ...)$ 。插入的这条路径 r_j 可以属于同一架无人机，也可以属于其他无人机。

(2)交换节点：将第 l 天路径 r_i 中的一个节点 v_i 与路径 r_j 中的一个充电周期相同的节点 w_j 交换，也可以将第 l 天路径 r_i 中的一个节点 v_i 与第 k 天的路径 r_j 中的一个充电周期相同的节点 w_j 交换。交换后路径变为 $r_i = (... , v_{i-1}, w_j, v_{i+1}, ...)$ 和 $r_j = (... , w_{j-1}, v_i, w_{j+1}, ...)$ 。

在搜索过程中也有一些行为是禁忌，比如将 v_i 从 r_i 中去除之后在随机迭代过程中又被插入同一条路径就被视为禁忌。

以集合为对象定义邻域有以下两种方式：

(1)插入集合：将第 l 天时充电任务中的子类 C_{ij} (或 C_{i, γ_i}) 从第 l 天中去除，并把 C_{ij} (或

C_{i,γ_i})插入到其他任意一天的充电任务中。

(2)交换集合：将第 l 天时充电任务中的子类 C_{ij} (或 C_{i,γ_i}) 与第 k 天的另外任意一个充电周期相同的子类交换。

产生邻域解时，需要保证节点的充电频率不变，避免出现某些节点两次充电任务时间相差太长而断电停止工作的情况。

3.5.2 禁忌搜索算法

确定解的邻域之后，通过以下启发式的禁忌搜索算法返回最优解 s^* 。

这里选择交换集合的方式产生邻域解。在确定邻域解后，需要先判断解是否满足无人机的约束条件，然后计算交换的路径总长度。

禁忌搜索算法步骤如下：

(1)按照上一节的算法步骤得到初始解 s 的邻域 $N(s)$ ，判断邻域 $N(s)$ 是否满足无人机的约束条件，如果满足，进行下一步操作，否则，重新生成邻域；

(2)初始化禁忌列表，删除禁忌列表中包含的邻域解；

(3)在邻域 $N(s)$ 中找到路径总长度最小的解 s' ，如果 s' 结果比 s 要好，则令 $s=s'$ ；

(4)重复步骤(1),(2),(3),进行 n 次迭代；

(5)返回 s ，得到最优解。

通过以上算法步骤，可以得到有关周期性的无人机充电路径的最优解。

3.6 本章小结

本章主要介绍了算法的详细流程，主要包括节点的通信路由构造，充电任务的周期规划，以及多无人机的路径规划三个部分。路由构造部分通过构造负载均衡的路由树，减少热点节点的通信量，降低其充电周期，减少无人机的出动次数。然后，根据传感器节点的通信量确定其耗电速率，将其划分到不同的充电周期，按需充电，避免对能量充足节点的访问，减少充电总路径。充电任务的周期规划主要是为了均衡充电任务。通过聚类算法，将某个充电周期的节点集合划分成一个个子集，然后分配到不

同的工作日中，使得每个工作日的充电任务量基本相等，避免出现某个充电任务时间过长，影响后面任务的进行，甚至出现部分传感器不能得到及时地充电而耗尽电量停止工作的情况。无人机的路径规划则是通过规划多架无人机的调度任务，减少无人机的飞行距离，降低飞行时间，有效提高充电效率。最后采用禁忌搜索算法对结果进行优化，得到一个更优的无人机充电路径。

4 测试与分析

4.1 网络基本架构搭建

本实验模拟了一个面积为 $1\text{km} \times 1\text{km}$, 其中均匀分布有若干个传感器节点的无线传感网络。基站设在区域的左上角, 编号为零。无人机携带的充电器能够满足一次充电任务中传感器节点充电所需的总电量。网络中的节点为连通的, 即所有的节点都将自己的信息传递给基站。实验的默认参数如下: 传感器节点的数目为 200 个, 单个节点的充电时间为 0.5 小时, 无人机的数量为 4 架, 飞行速度为 1m/s 。

下面将本文的算法简称为 JRPCS(Joint Design of Routing and Periodic Charging Scheduling)。其中, JRPCS-1 表示单无人机情况, JRPCS-M 表示多无人机情况。

本文将与 Esync^[22]中提出的周期性同步充电方法进行比较, 验证本文中算法的优劣。Esync^[22]提出的周期性同步充电方法是先按 $\text{power-}\alpha$ 分类算法划分节点的充电周期, 然后在某次充电任务中对该充电周期区间的所有节点充电, 将节点的访问路径问题转化为 TSP 问题求解, 按照预先设定的路径周期性地对网络中的节点充电。假定两种算法中充电设备的移动速度相同, 我们采用充电任务的平均工作时间和最大工作时间的长短来衡量 JRPCS 算法的优劣。其中单个节点的充电时间, 传感器节点数量和无人机数量等参数均可变, 为可变参数。

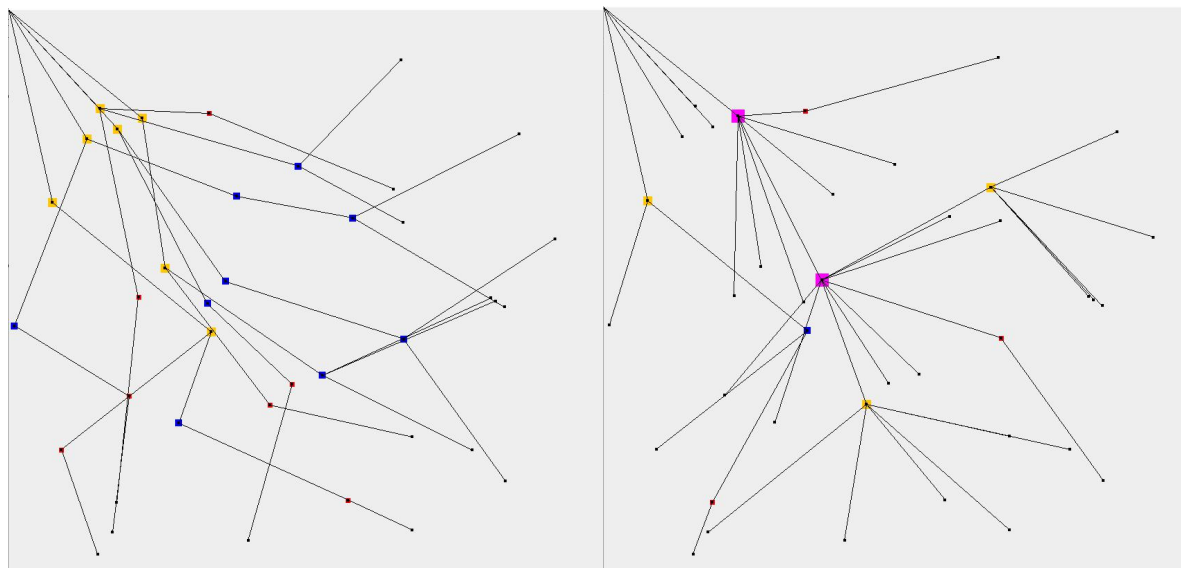
4.2 路由构造算法的实验与分析

我们对 JRPCS 算法的路由构造部分进行单独实验, 测试算法的路由构造部分是否对结果有优化。保证算法除去路由构造的其他部分不变, 排除其他因素影响, 分别运行 Dijkstra 算法和本论文的路由构造算法构造路由, 采用相同的无人机路径规划算法对无线传感器网络充电, 比较两者的平均工作时间。实验采用控制变量法, 从节点数目、节点的充电时间、无人机数量和传感器节点电池容量四个方面, 以充电任务的平均工作时间的长短来评判算法的优劣。

根据路由通信的特点以及网络节点的地理拓扑结构, 设置 Dijkstra 算法中相互通

信节点之间的路径权值为 1，不能通信节点之间路径的权值为无限大，表示不可达。运行 Dijkstra 算法，得到网络的通信路由情况，求解所有节点的子节点数，计算其充电周期。

如图 4-1 所示，40 个无线传感器节点均匀地分布在网络中，其通信范围为 300。左图为本论文路由构造算法构造的通信路由树，右图为 Dijkstra 算法构造的路由树。图中节点的子节点数越多，充电周期越小。由图 4-1 可知，左图中节点的充电周期较为均衡，靠近基站的热点节点的充电周期基本相等，且不同节点间充电周期相差较小；右图中节点的通信量集中在某些点中，导致这部分节点的充电周期很小，网络中不同节点的充电周期相差较大。由此可见本文的路由构造算法达到了降低热点节点的通信量，平衡全网路由的目的。



(a)路由构造算法的路由树

(b)Dijkstra 构造的路由树

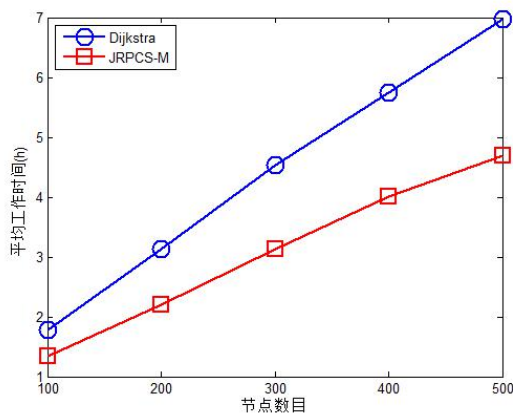
图 4-1 路由树

图 4-2 为平均工作时间的实验结果对比图。其中，正方形形的图案表示本论文中算法的数据，圆形的图案表示路由构造部分采用 Dijkstra 算法的实验数据。

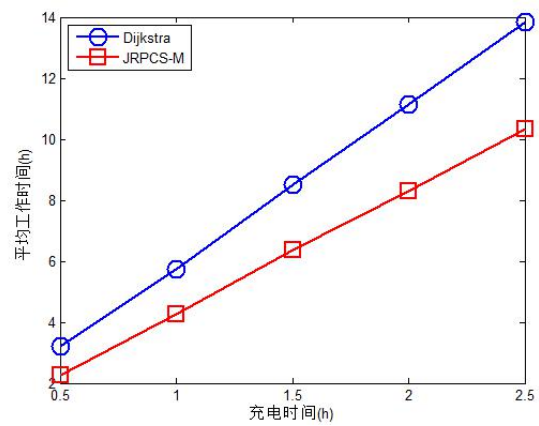
图 4-2(a)为网络中传感器节点数量与平均工作时间的关系图。当网络中节点数目增加时，整个充电任务明显变重。如图所示，采用 Dijkstra 算法的平均工作时间明显比采取 JRPCS-M 算法的平均工作时间大，且随着传感器节点个数的增加，增长速

率明显增加。说明，当其他条件不变时，只改变整个网络中传感器的节点个数，本论文所采取的算法的结果更优。

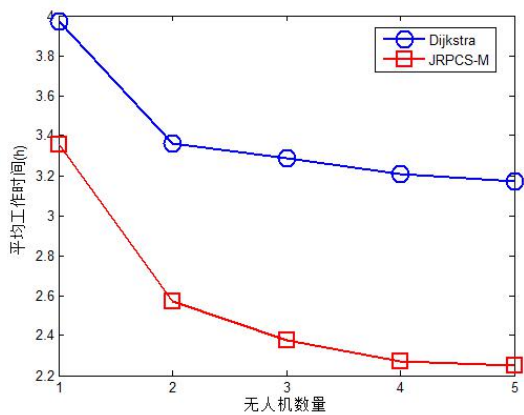
图 4-2(b)为单个节点的充电等待时间与平均工作时间的关系图。随着单个节点的充电等待时间的增加，整个充电时间也会随之增加。如图所示，随着充电时间的增加，Dijkstra 和 JRPCS-M 算法的平均时间都有一定程度的增加，但 JRPCS-M 算法增长速率更小。



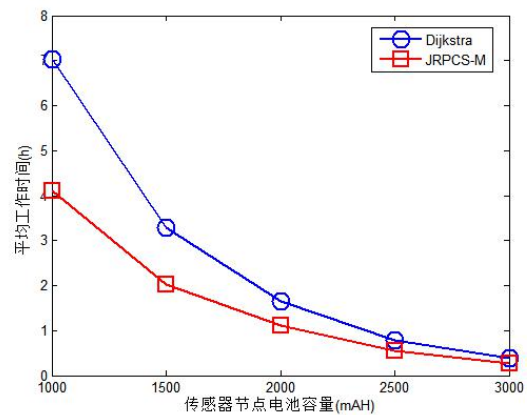
(a)节点数目与平均工作时间关系图



(b)充电时间与平均工作时间关系图



(c)无人机数量与平均工作时间关系图



(d)电池容量与平均工作时间关系图

图 4-2 平均工作时间关系图

图 4-2(c)为无人机数量与平均工作时间的关系图。当无人机数量增加时，单架无人机的飞行距离会减少，从而降低无人机的工作时间。由图可知，随着无人机数量的增加，Dijkstra 和 JRPCS-M 算法的平均时间都在减少，但本论文的 JRPCS-M 算法的

平均工作时间减小速率更大。两种算法的平均工作时间随着无人机数量的增加，都趋于某个定值，这是因为我们的算法思想是每次先规划好一条不超过无人机最大飞行距离的路径，再安排下一条路径，当无人机数量超过规划好的路径数量，工作时间基本不会变化。

图 4-2(d)为单个传感器节点电池容量与平均工作时间的关系图。保证其他条件不变，当传感器节点电池容量增加时，传感器节点的充电周期变大，充电频率降低。如图所示，随着节点电池容量不断增加，虽然 Dijkstra 算法的平均时间都是 JRPCS-M 算法的 1.4 倍左右，但因为两种算法平均时间差值不断减小，JRPCS-M 算法的优化效果不断降低。

实验分别改变节点数目，节点的充电时间，无人机数量和传感器的电池容量，以充电任务的平均工作时间为评价标准判断算法的优劣。从实验结果可得，本论文 JRPCS-M 算法路由构造部分明显降低了平均工作时间，说明算法是有效的。但是随着传感器电池容量不断增大，算法的优化效果越来越弱。

4.3 算法总体实验与分析

本小节将 JRPCS-M 算法与 Esync^[22]中提出的周期性同步充电方法进行实验对比，该论文是根据耗电速率先将节点划分到不同的充电周期区间，然后在一次充电任务中对该充电周期的所有节点进行充电。

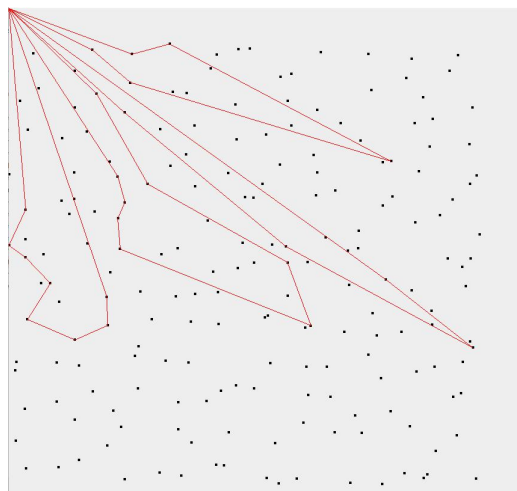


图 4-3 无人机路线图

如图 4-3 所示：基站在左上角，200 个无线传感器节点均匀地分布在传感器网络中，红色折线为无人机的充电路线。多架无人机从基站出发，沿着图中的红色路线并行飞行，在黑色节点处停留对节点充电，然后继续访问下一个节点，最后回到基地。图中有四条红色路径，若无人机的数量为 4 及其以上时，则派四架无人机同时从基站即可完成任务。若无人机的数量少于 4 时，则安排先返回的无人机从基站再次出发，访问接下来的路径，直到所有的路径都被访问。

图 4-4 为平均工作时间的实验结果对比图。其中，正方形的图案表示多无人机情况下 JRPCS-M 算法的数据，圆形的图案表示 JRPCS-1 算法的数据，三角形的图案表示 Esync^[22] 中算法的实验数据。

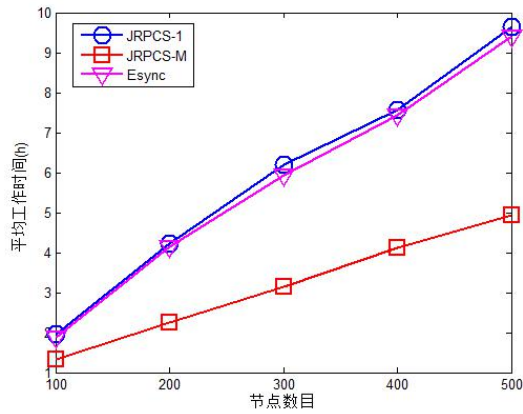
图 4-4(a)为网络中传感器节点数量与平均工作时间的关系图。如图所示，采用 Esync^[22]算法的平均工作时间明显比 JRPCS-M 算法的大，且随着传感器节点数量的增加，增长速率相对更大。说明当其他条件不变时，只增加网络中传感器的节点数量，在多无人机情况下 JRPCS-M 算法的结果更优，增长速度更小。JRPCS-M 算法在大规模的无线传感网中更有优势。而在单无人机情况下的 JRPCS-1 算法的平均工作时间比 Esync^[22]的要稍微长一点，这是因为无人机的飞行距离有限，部分充电任务的飞行总距离超出了无人机的单次飞行距离，无人机需要多次返回基地，更换电池，增加了飞行距离。

图 4-4(b)为单个传感器节点的充电等待时间与平均工作时间的关系图。当单个节点的充电时间增加时，工作时间也会相应增加。如图所示，随着充电等待时间的增加，JRPCS-M 算法的平均工作时间更小，且增长的速率更小。这是因为，本文采取的是多无人机并行调度，同时对多个传感器节点充电，相对于每次只能对单个传感器节点充电，充电等待时间带来的影响更小。

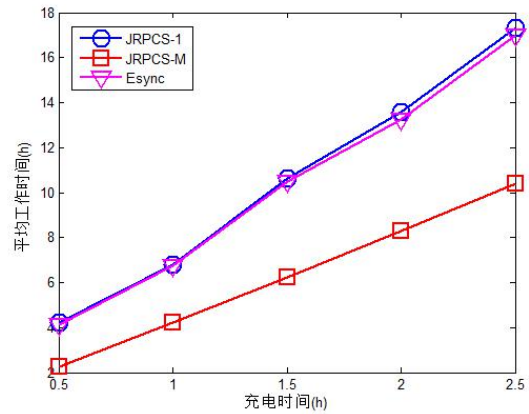
图 4-4(c)为无人机数量与平均工作时间的关系图。随着无人机数量的增加，平均时间越来越小，且降低速率越来越慢，直到保持平稳。说明，在一定范围内增加无人机的数量，能有效降低充电问题的平均时间，但达到一定数量后，无人机的平均运行时间就会趋于平稳。

图 4-4(d)为单个传感器节点电池容量与平均工作时间的关系图。随着电池容量的

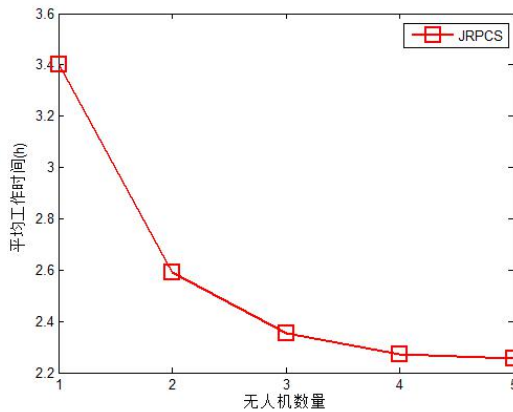
增大,传感器的使用寿命不断增加,但是耗电速率保持不变。如图所示,随着容量的增大,两者的平均工作时间都在不断降低,但 JRPCS-M 算法的平均工作时间明显比 Esync^[22]算法的时间要少。当其他条件不变时,只改变网络中传感器节点的电池容量,本算法的平均工作时间更少,充电效率更高。



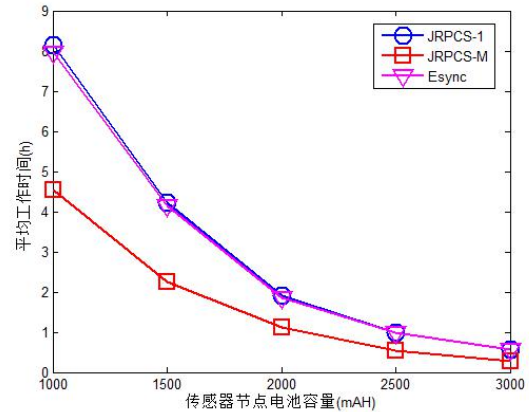
(a)节点数目与平均工作时间关系图



(b)充电时间与平均工作时间关系图



(c)无人机数量与平均工作时间关系图



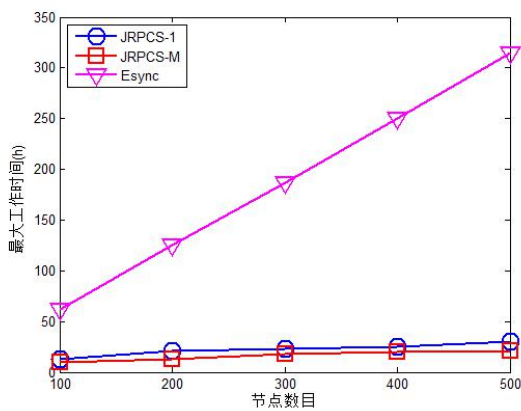
(d)电池容量与平均工作时间关系图

图 4-4 平均工作时间关系图

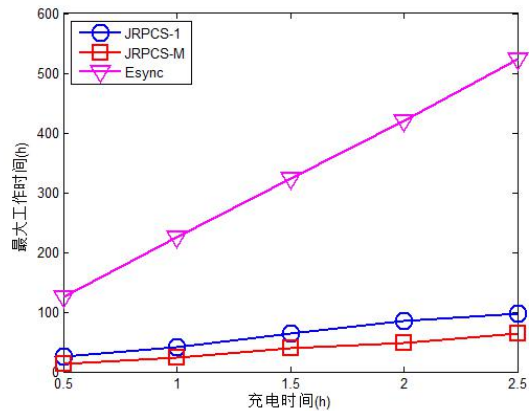
由于本实验采取的是一种均衡分配充电任务的算法,单位工作时间之间的任务量相近,因此,在总任务量一定的情况下,最大工作时间相对较低。而 Esync^[22]算法则会在最后一个工作日对所有的节点充电。我们也选取最大工作时间的长短来评价算法的优劣。图 4-5 为两者最大工作时间的实验结果对比图。

图 4-5(a), (b)分别为网络中传感器节点数量和单个节点的充电时间与最大工作时

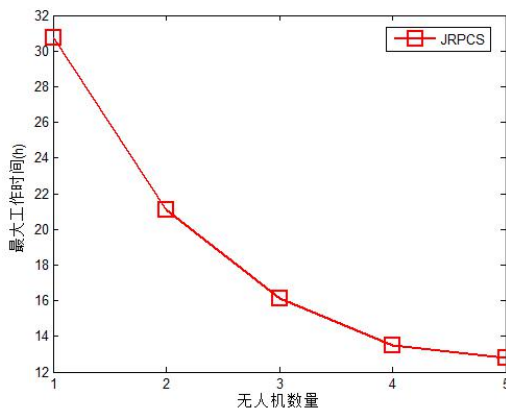
间的关系图。如图所示，无论是单无人机还是多无人机的情况，本算法的最大工作时间明显比 $\text{Esync}^{[22]}$ 的小，且增长速率更低。而且， $\text{Esync}^{[22]}$ 的最大工作时间较大，如果超出了单位工作时间的时长，将对后面的充电任务产生较大影响。例如，可能出现耗电快的节点得不到及时充电而断电停止工作的情况。当只增加网络中传感器节点数量或者单个节点的充电时间时，本文算法的最大工作时间增长幅度较小，说明本文的算法有更强的扩展性和适应性，能适应规模更大的无线传感网。



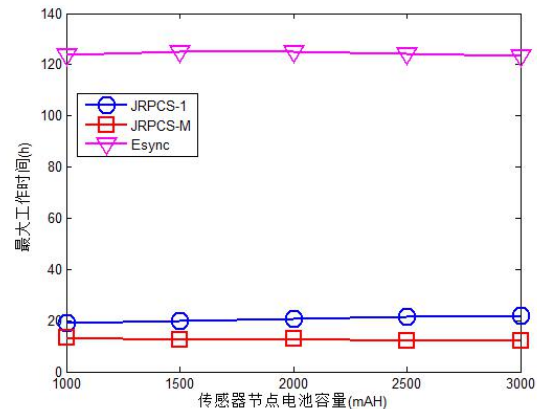
(a) 节点数目与最大工作时间关系图



(b) 充电时间与最大工作时间关系图



(c) 无人机数量与最大工作时间关系图



(d) 电池容量与最大工作时间关系图

图 4-5 最大工作时间关系图

图 4-5(c) 为无人机数量与最大工作时间的关系图。从图中明显看出，随着无人机数量增加，最大工作时间降低明显，且降低速率越来越小，说明，适当增加无人机数量能有效地降低最大工作时间。

图 4-5(d)为单个传感器节点电池容量与最大工作时间的关系图。随着电池容量的增大,两种算法的最大工作时间基本没有变化。由此可见,传感器的电池容量对最大工作时间的的影响较小。Esync^[22]中的算法会在最后一轮中对所有的节点充电,所以传感器的电池容量基本不会影响到最大工作时间。

实验分别改变节点数目,节点的充电时间,无人机数量和传感器的电池容量,以平均工作时间和最大工作时间的长短评价算法的优劣。由实验结果可知,多无人机情况下本算法相对于 Esync^[22],有效地降低了平均工作时间,提高了充电效率。本算法的最大工作时间也较小,变化速率较低,且工作任务基本能在规定的时间内完成,说明本论文算法较为均衡。

4.4 本章小结

本章主要介绍了算法的实验过程以及对实验结果进行了分析。我们应用各种配置参数进行了大量的仿真实验,从节点数目,节点的充电时间,无人机数量,传感器节点的电池容量四个方面,以平均工作时间和最大工作时间为评价标准评价算法的优劣。对整个算法以及其路由构造方案都进行了实验,并将本算法与 Esync^[22]中提到的算法对比和分析。最终实验证明路由构造部分能有效地降低平均工作时间。与 Esync^[22]相比,算法大幅度减少了无线传感网充电问题的平均工作时间和最大工作时间,提高了充电效率,且充电任务更为均衡,能够适应更大规模的无线传感网,具有较强的扩展性与适应性。

5 总结与展望

5.1 工作总结

本文研究了无线可充电传感器网络的充电规划问题。其中包括传感器的充电节点任务分配和无人机充电任务的路径规划，问题中又结合了降低热点节点热度的路由构造问题，以及平衡任务时间的负载均衡问题，共同构成路由和周期性充电调度的联合设计。

具体工作主要有：

(1) 根据节点划分充电周期的特点，设计路由算法，使节点的子节点数尽可能靠近而不超过门限于节点数，平衡整个网络的通信负载，减少热点节点的通信量，达到降低热点节点的充电周期的目的。为了保证路由算法的有效性，我们多次运行路由算法，取运行结果的最小值，与依靠 Dijkstra 算法构造的路由进行比较，取两者较小值作为最后的结果，有效提高充电效率。

(2) 根据耗电速率划分节点的充电周期区间，再依据聚类算法将处于同一充电区间的节点划分为多个子类，每次充电过程中都周期性地给从每个充电周期的节点中选取一个子类进行充电，保证充电任务的均衡，是一种较为均衡的周期性充电调度方法。

(3) 将无人机引进无线传感网的充电问题中。依据无人机飞行距离有限的特点，将每次充电任务的路径规划问题转化为路径受限的 VRP 问题。本文提出多种算法对多架无人机进行路径规划，比如 Sweep 算法，合理地进行无人机的调度规划，减少无人机的飞行时间。

(4) 利用禁忌算法，从解的邻域获得一个更优解，对结果进行优化。

本文的主要贡献在于进行了路由构造和充电调度的联合设计，依据节点划分充电周期的特点设计全网的通信路由，降低热点节点的通信量，平衡全网的通信负载；再利用聚类算法进行周期性的充电任务规划，均衡每日的工作任务，实现负载均衡；最后对无人机的飞行路径进行规划，尽量减小无人机的飞行距离，有效地降低无线传感网的充电时间。最后，我们应用各种配置参数进行了大量的仿真实验，实验结果证实

了我们的算法的有效性和竞争力。

5.2 课题展望

传感器网络可以采集诸如声音、湿度、温度、压力和光强度等信息,应用前景广泛。但是能量问题一直是限制无线传感网发展的瓶颈。如何有效地提高充电效率一直是研究的重点。本文就此,设计了一系列的算法提高充电效率,为充电问题提供了一种高效的解决方法。但是,实际的传感网网络情况相较更为复杂,地理环境更为复杂;节点的耗电速率存在波动,与算法设计存在一些区别等等,都是今后研究需要注意的。与此同时,本文还有一些没有完成的工作,可以供以后的研究参考,具体如下:

(1)本文在设计路由算法时,对于已经加入到路由树的路径,添加父节点的任意邻居节点作为它的子节点的代价均相等,没有考虑如何挑选邻居节点使结果更优,在以后的设计时可以考虑进去,设计一个更为均衡的路由树。

(2)在无人机路径规划中,可能存在规划的路径数目少于无人机数目的情况,导致部分无人机不能得到有效地利用,在后续的设计中,可以考虑如何更好地规划路径,降低闲置的无人机数量,进一步提高充电效率。

(3)除了本文所提到的充电规划,还有很多其他的充电策略。比如:冗余节点的布置。在一个地点布置多个传感器节点,这些节点轮流工作,等效于一个电池容量更大的节点。另外还存在多基站的布置和路由的情况,在全网中,可以设置多个基站组建多个子网,减少热点节点的能耗。这些充电策略都是今后可以研究的方向。

相信随着硬件技术和充电协议的发展,能量问题对无线传感器的限制会越来越小,无线传感器的应用会更广泛。

致 谢

四月，总是阳光灿烂。四月，总要曲终人散。四月，我们拒绝伤感。花儿谢了芬芳，迎来硕果飘香。毕业带来别离，我们走向辉煌。在这里，我要向那些陪伴我研究生两年的老师同学表示感谢，感谢他们陪伴了我两年的时光。

首先，我要感谢我的导师彭老师，很高兴能在他的门下学习，感谢他在研究生期间对我的教导。同时，还要感谢实验室的胡老师，在学术研究上给予了不少帮助。是在他们的指导下，我才能顺利完成这次毕设。为了能够很好地完成这次毕业设计，胡老师多次找我讨论算法和毕设内容，对我论文的撰写进行指导。

我在大四上的后半学期，就提前进入实验室学习，逐渐开始接触实验室的科研项目。虽然刚开始的时候，我对科研项目所使用的算法很不熟悉，但是，在导师和学长的帮助下，慢慢对实验室的科研项目上手了，从完成刚开始布置的一些小任务，到对项目的整个框架有了一定的把握。还要感谢实验室的学长学姐，当我还对一切都很陌生时，是他们热心地帮助我融进实验室的氛围里。并且在接下来的两年多时间里，和实验室的小伙伴们互帮互助，一起搞科研、一起找实习、一起找工作，让我不断的成长。

在华中科技大学里，我度过了六年的大学美好时光，对我来说这是人生一个很重要的阶段。在这里，我遇到了很多可爱的人：有同寝室的小伙伴们，有交心的闺蜜，还有很多在生活，学习上帮助我的同学。感谢那些曾经和我组队做项目的小伙伴，还有那些曾经帮助过我的学长、学姐、学弟和学妹，他们毫不保留地在学习和生活上照顾我，让我在成长的路上少走了不少错路。在这里，我要向所有那些帮助过我的人非常诚挚地说一声感谢。

最后，我要感谢华中科技大学，这所学校里的人，这所学校里的事。感谢在这所学校里发生的一切，给了我美好的回忆，伴随我成长。

参考文献

- [1] 倪明选, 刘云浩, 朱燕民. 无线传感网络的基础理论及关键技术研究. 中国基础科学, 2008, 10(1): 24-28.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. Computer networks, 2002, 38(4): 393–422.
- [3] R. Szewczyk, A. Mainwaring, J. Polastre et al. An analysis of a large scale habitat monitoring application. In Proc. of ACM SenSys, 2004: 214–226.
- [4] 孙荣丽, 王睿, 崔莉. 交通无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展, 2014, 48(2): 360-366.
- [5] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. Computer networks, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [6] Luo Z, Liu Z, Shi J. A Two-Echelon Cooperated Routing Problem for a Ground Vehicle and Its Carried Unmanned Aerial Vehicle. Sensors, 2017, 17(5).
- [7] Savuran, H, Karakaya, M. Route Optimization Method for Unmanned Air Vehicle Launched from a Carrier. Lecture Notes on Software Engineering. 2015: 279–284.
- [8] Manyam S G, Casbeer D W, Sundar K. Path planning for cooperative routing of air-ground vehicles. American Control Conference. IEEE, 2016:4630-4635.
- [9] Peng Y, Li Z, Zhang W, et al. Prolonging Sensor Network Lifetime Through Wireless Charging. in : IEEE Real-Time Systems Symposium. IEEE Computer Society, 2010:129-139.
- [10] Hui S Y. Planar Wireless Charging Technology for Portable Electronic Products and Qi. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6):1290-1301.
- [11] Li K, Luan H, Shen C C. Qi-ferry: Energy-constrained wireless charging in wireless sensor networks. in : Wireless Communications and NETWORKING Conference. IEEE, 2012:2515-2520.
- [12] Pasha M A, Derrien S, Sentieys O. Toward ultra low-power hardware specialization of

- a wireless sensor network node. in : Multitopic Conference, 2009. INMIC 2009. IEEE 13th International. IEEE, 2009: 1-6.
- [13] Liang X, Li W, Gulliver T A. Energy efficient modulation design for wireless sensor networks. in : Communications, Computers and Signal Processing, 2007. PacRim 2007. IEEE Pacific Rim Conference on. IEEE, 2007: 98-101.
- [14] Dutta P K, Culler D E. System software techniques for low-power operation in wireless sensor networks. in : Proceedings of the 2005 IEEE/ACM International conference on Computer-aided design. IEEE Computer Society, 2005: 925-932.
- [15] Kansal A, Hsu J, Zahedi S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks. *Acm Transactions on Embedded Computing Systems*, 2007, 6(4):32.
- [16] Mitcheson P D, Yeatman E M, Rao G K, et al. Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(9):1457-1486.
- [17] Liu R S, Fan K W, Zheng Z, et al. Perpetual and fair data collection for environmental energy harvesting sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(4):947-960.
- [18] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. Making sensor networks immortal: an energy-renewal approach with wireless power transfer. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(6):1748-1761.
- [19] Curran S J, Gallian J A. Hamiltonian cycles and paths in Cayley graphs and digraphs — A survey. *Discrete Mathematics*, 1996, 156(1-3):1-18.
- [20] Wang D. Embedding Hamiltonian Cycles into Folded Hypercubes with Faulty Links. *Journal of Parallel & Distributed Computing*, 2001, 61(4):545-564.
- [21] Wang C, Li J, Ye F, et al. Multi-vehicle coordination for wireless energy replenishment in sensor networks. in : Parallel & distributed processing (IPDPS), 2013 IEEE 27th international symposium on. IEEE, 2013: 1101-1111.
- [22] He L, Fu L, Zheng L, et al. Esync: An energy synchronized charging protocol for

- rechargeable wireless sensor networks. in :Proceedings of the 15th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing. ACM, 2014: 247-256.
- [23]Zhao M, Li J, Yang Y. Joint mobile energy replenishment and data gathering in wireless rechargeable sensor networks. in : Teletraffic Congress. IEEE, 2011:238-245.
- [24]Zhao M, Yang Y. Optimization-Based Distributed Algorithms for Mobile Data Gathering in Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(10):1464-1477.
- [25]Guo S, Wang C, Yang Y. Joint Mobile Data Gathering and Energy Provisioning in Wireless Rechargeable Sensor Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(12):2836-2852.
- [26]Shi Y, Xie L, Hou Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer. in :INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE. IEEE, 2011: 1350-1358.
- [27]Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case. in :Sensor, mesh and ad hoc communications and networks (SECON), 2012 9th annual IEEE communications society conference on. IEEE, 2012: 10-18.
- [28]Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. Multi-node wireless energy charging in sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(2):437-450.
- [29]Liang W, Xu W, Ren X, et al. Maintaining Large-Scale Rechargeable Sensor Networks Perpetually via Multiple Mobile Charging Vehicles. Acm Transactions on Sensor Networks, 2016, 12(2):1-26.
- [30]Gillett B E, Miller L R. A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem.Operations Research, 1974, 22(2):340-349.
- [31]崔雪丽, 马良, 范炳全. 车辆路径问题(VRP)的蚂蚁搜索算法. 系统工程学报, 2004, 19(4):418-422.
- [32]Gendreau M, Iori M, Laporte G, et al. Erratum: A Tabu search heuristic for the

- vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *Networks*, 2008, 51(2):4-18.
- [33]Tan C C R, Beasley J E. A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem. *Omega*, 2009, 12(5):497-504.
- [34]Cacchiani V, Hemmelmayr V C, Tricoire F. A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 2014, 163(Pt 1):53.
- [35]Yu B, Yang Z Z. An ant colony optimization model: The period vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2011, 47(2):166-181.
- [36]Reinelt G. The Traveling Salesman Problem: Computational Solutions for TSP Applications. *Of Lecture Notes in Computer Science*, 1994, 50.
- [37]Shia X H, Lianga Y C, Leeb H P, et al. Particle swarm optimization-based algorithms for TSP and generalized TSP. *Information Processing Letters*, 2007, 103(5):169-176.
- [38]Liu F, Zeng G. Study of genetic algorithm with reinforcement learning to solve the TSP.. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3):6995-7001.
- [39]Zhou Y. Runtime analysis of an ant colony optimization algorithm for TSP instances. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009, 13(5):1083- 1092.
- [40]Helsgaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic. *European Journal of Operational Research*, 2000, 126(1): 106-130.
- [41]孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究. *软件学报*, 2008, 19(1):48-61.
- [42]Wang R, Liu G, Zheng C. A Clustering Algorithm based on Virtual Area Partition for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. in : *International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2007:372-376.
- [43]张敏, 于剑. 基于划分的模糊聚类算法. *软件学报*, 2004, 15(6):858-868.
- [44]Macqueen J. Some Methods for Classification and Analysis of MultiVariate

Observations. in : Proc. of, Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. 1967:281-297.

[45]K-means_百度百科. <<https://baike.baidu.com/item/K-means/4934806>>.

[46]Hartigan J A. A K-Means Clustering Algorithm. Appl Stat, 1979,28(1):100-108.

[47]Glover F, Laguna M. Tabu Search. General Information, 2006, 106(2):221-225.

[48]吴璟莉, 李陶深. 遗传算法与禁忌搜索算法的混合策略在 VRPTM 问题上的应用. 计算机工程与应用, 2004, 40(18):54-57.

[49]董宗然, 周慧. 禁忌搜索算法评述. 软件工程, 2010(z1):96-98.