

专 业 学 位 硕 士 学 位 论 文

WRSN 中多车实时协同充电调度研究

**Research on Multi-vehicle Real-time Collaborative Charging
Scheduling in Wireless Rechargeable Sensor Networks**

作 者 姓 名: _____ 王志远 _____

工 程 领 域: _____ 软件工程 _____

学 号: _____ 31617039 _____

指 导 教 师: _____ 林驰 _____

完 成 日 期: _____ 2018 年 3 月 29 日 _____

大连理工大学

Dalian University of Technology

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：_____

作者签名：_____ 日期：_____年____月____日

摘 要

近年来,随着无线电力传输技术的快速发展,无线传感器也越来越贴近我们的生活,而关于无线传感器网络的研究受到越来越研究者和研究团体的重视。无线传感器网络由大量的传感器节点构成,这决定了无线传感器网络的瓶颈在于能量的限制。从而,该领域的研究重点集中在节点的能量控制和补充问题。而结合电力传输技术后诞生的无线可充电传感器网络在很大程度上解决了这个问题。利用具有机动性的能量源为节点补充能量,延长节点的工作时间。

在网络结构确定的情况下,一个杰出的充电调度策略成为了无线可充电传感器网络的研究核心,而评判一个充电调度策略的依据则是结合使用该算法的网络性能。在本篇论文中,提出适用于具有多个移动能量源的传感器网络的调度算法。在该算法中,综合考虑网络中的时间因素、空间因素和网络的链路结构,设计出一种对节点请求综合的评判和衡量标准,得出充电服务优先级序列。在多能量源的调度上采用聚类算法思想,为每个能量源指定负责服务的区域以及多能量源之间的相互通信和协作机制。根据区域内节点的请求情况,为节点补充能量。在算法确立后,通过大量的比较实验,验证了该算法可行性和优越性。

在仿真实验中,将本文提出算法与经典 **Pushwait** 和 **Hierarchical** 算法进行比较。通过实验得出的结果表明,经过在相同网络设定下的仿真实验,通过多方面性能的对比后可以得出结论,该算法在节点存活率、充电成功率和吞吐率等方面对网络系统的性能有显著提高,证明该算法在无线可充电网络中优越性和可行性。

关键词: 传感器网络; 调度算法; 无线充电

Research on Multi-vehicle Real-time Collaborative Charging Scheduling in Wireless Rechargeable Sensor Networks

Abstract

Recently, thanks to the rapid development of wireless power transmission technology, wireless sensors are much close to our daily life. And the researches about wireless sensor networks (WSNs) get more attention by researchers and research groups. As known, WSNs are constituted by plenty of sensor nodes, which decide that the bottleneck of WSNs is the limitation of energy. Therefore, researches about this domain are focus on the control and replenishment of energy. Combining with wireless power transmission technology, the concept of wireless rechargeable sensor networks (WRSNs) is proposed and overcomes the problem of energy to a great extent by using the wireless mobile chargers (WMCs) to replenish the nodes and prolonging working time of nodes.

Under certain network structures, an outstanding scheduling scheme becomes the core of research in WRSNs. Furthermore, the evaluation basis for scheduling scheme is the performance of networks. In the proposed scheme, it synthetically considers the temporal factor, spatial factor and the structure of link. It shows an evaluation standard for sensor and gets the service priority queue. In the terms of multi- vehicle, it contains the thought of clustering algorithm and assign the service area and mechanisms of communication and cooperation for each vehicle which is regarded as a WMC. And WMCs will charge the nodes according to the request from nodes in the area. Then, there are plenty of simulations to verify the feasibility and superiority.

In simulations, it is compared with typical algorithm Pushwait and Hierarchical. In the same network setting, the conclusion can be reached after the comparison of the performance. And the result shows that the proposed algorithm has better performance on survival rate, successful rate, throughput and other properties. And it verifies the feasibility and superiority as well.

Key Words: Sensor Networks; Scheduling Algorithm; Wireless Charging

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
1 绪论.....	1
1.1 无线传感器网络.....	1
1.2 无线电力传输技术.....	4
1.3 无线可充电传感器网络.....	6
2 相关研究.....	8
2.1 离线算法和线上算法.....	8
2.2 周期式算法与协同式算法.....	9
2.3 其他分类研究.....	9
3 多车实时协同充电调度算法.....	11
3.1 相关定义和符号.....	11
3.2 网络结构和问题定义.....	12
3.2.1 网络结构.....	12
3.2.2 问题定义.....	15
3.3 多车实时协同充电调度算法（TSL）设计.....	15
3.3.1 算法优化目标.....	15
3.3.2 节点能量警戒值的确定.....	16
3.3.3 网络分区与区域再划分.....	17
3.3.4 模式转换与目标节点选择.....	25
3.3.5 利用排队论分析算法.....	31
4 仿真实验结果分析.....	34
4.1 足球场场景.....	34
4.1.1 实验参数.....	34
4.1.2 实验结果.....	36
4.2 带环境障碍场景.....	39
4.2.1 实验参数.....	39
4.2.2 实验结果.....	41
4.3 实验分析总结.....	44
结 论.....	45
参 考 文 献.....	46

攻读硕士学位期间发表学术论文情况	50
致 谢	51
大连理工大学学位论文版权使用授权书	52

1 绪论

本文的研究背景为无线可充电传感器网络（Wireless Rechargeable Sensor Networks, WRSNs）。无线可充电传感器网络是无线传感器网络（Wireless Sensor Networks, WSNs）和无线电力传输技术（Wireless Power Transmission, WPT）的结合，是一个更加符合生活生产需要的网络概念。

1.1 无线传感器网络

无线传感器网络是由多种具有不同功能的无线传感器节点所构建的网络，这些传感器节点被随机地分布在一块区域内，布置后这些节点通常是不可移动的，而该区域则为无线传感器网络所覆盖区域。这些节点在无人为操作的状态下通过节点间的通信感知的方式组织形成一个大的网络信息系统，节点相互之间传输信息的手段是无线通信。节点间相互协作，基本的功能是处理信息、检测信息和收集信息，构成一个同时具备处理功能、转发功能、收集功能的复杂的网络系统，而监测环境中的变量或信息的功能受益于高度集成的小型传感器，检测对象的信息经过处理，通过无线通信传输的方式由节点发送出去，而这以特点也使得网络系统的基本配置更加适用于实际生活中的网络工作，因为节点的工作和通信可以不受地形限制，甚至还可以将信息同步地发送到公用网络上，无需经过人为地进行实地收集，这使得无论是网络开发还是场景应用都变得更加便捷。它与计算机技术和通信技术共同构成信息技术中的三大支柱。

一个网络系统之所以能够快速地发展，其根本原因就是网络本身所具有的性质和优点。而无线传感器网络本身具有一系列的优势，在数据要求上，传感器采集到的数据可以更加精准，在传输数据的实时性上通过远距离传输也有更好地保证，数据的误差处理能力由于传感器本身的数据格式处理也有较好的效果；在网络应用上，网络所能覆盖的范围更广，并且实现远距离操作。因此无线传感器网络相比有线网络，具有更好地稳定性和便捷性。无线传感器网络受到的越来越多的研究团体的关注，而随着硬件集成技术的快速发展，通用微型传感器的功能愈来愈多元化，也更加适用于大规模的网络研究或项目实现。无线传感器网络技术在军用和民用的领域都具有不错的发展趋势。最近的应用领域有灾情检测和预警、军事上目标定位、监测气候变化等。

由于无线传感器网络在国际上被认为是继互联网之后的第二大网络，2003 年美国《技术评论》杂志评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术，传感器网络被列为第一。在现代意义上的无线传感器网络研究及其应用方面，我国与发达国家几乎同步启动，它已经成为我国信息领域位居世界前列的少数方向之一。在 2006 年我国发布

的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》中，为信息技术确定了三个前沿方向，其中有两项就与传感器网络直接相关，这就是智能感知和自组网技术。当然，传感器网络的发展也是符合计算设备的演化规律。一个网络的系统的蓬勃发展必定是由网络自身所具有的优势决定的。而无线传感器网络具有许多显而易见的优点，在数据要求上，采集到的数据更加精准，在传输数据的实时性上也有更好地保证，数据的误差处理能力也较好；在网络应用上，网络所能覆盖的范围更广，并且实现远距离操作。因此无线传感器网络相比有线网络，具有更好地稳定性和便捷性。无线传感器网络受到的越来越多的研究团体的关注，而随着硬件集成技术的快速发展，通用微型传感器的功能愈来愈多元化，也更加适用于大规模的网络研究或项目实现。无线传感器网络技术在军用和民用的领域都具有不错的发展趋势。最近的应用领域有灾情检测和预警、军事上目标定位、监测气候变化等。



图 1.1 无线传感器网络

Fig. 1.1 Wireless sensor network

无线传感器网络作为新的传感器网络，其发展是在最近才开始兴起的。在 1999 年，题为“传感器走向无线时代”的论述为人们敞开了无线传感器网络这一新的大门。2004 年，一期杂志专集：传感器的国度，论述无线传感器网络的发展和可能的广泛应用。由此，无线传感器网络正式走进人们的视野并凭借其自身的创新性和可能性瞬间吸引了大批研究学者们的关注，这一想法将无线传输技术融入到了传感器网络中，以无线的传输方式取代有线，减少了通讯线的多余，使信息传输的距离更远，而且节点移动起来也十

分的方便,这使得无线传感器在构建新的网络时有了巨大的优势。此外,传感器网络一般应用在人烟稀少的室外环境,通过有线的传输方式构建的网络很容易由于意外的环境因素使得通讯线中断,导致通讯受阻,使得整个网络性能下降甚至引发网络瘫痪,而无线网络则避开了这一因素,使得节点间通讯得到保障,使网络的整体安全性更高。

由于无线传感器网络的结构决定了其自身的诸多特点:

(1) 大规模

为了获取精确信息,在监测区域通常部署大量传感器节点,可能达到成千上万,甚至更多。传感器网络的大规模性包括两方面的含义:一方面是传感器节点分布在很大的地理区域内,如在原始大森林采用传感器网络进行森林防火和环境监测,需要部署大量的传感器节点;另一方面,传感器节点部署很密集,在面积较小的空间内,密集部署了大量的传感器节点。

传感器网络的大规模性具有如下优点:通过不同空间视角获得的信息具有更大的性价比;通过分布式处理大量的采集信息能够提高监测的精确度,降低对单个节点传感器的精度要求;大量冗余节点的存在,使得系统具有很强的容错性能;大量节点能够增大覆盖的监测区域,减少洞穴或者盲区。

(2) 自组织

在传感器网络应用中,通常情况下传感器节点被放置在没有基础结构的地方,传感器节点的位置不能预先精确设定,节点之间的相互邻居关系预先也不知道,如通过飞机播撒大量传感器节点到面积广阔的原始森林中,或随意放置到人不可到达或危险的区域。这样就要求传感器节点具有自组织的能力,能够自动进行配置和管理,通过拓扑控制机制和网络协议自动形成转发监测数据的多跳无线网络系统。

在传感器网络使用过程中,部分传感器节点由于能量耗尽或环境因素造成失效,也有一些节点为了弥补失效节点、增加监测精度而补充到网络中,这样在传感器网络中的节点个数就动态地增加或减少,从而使网络的拓扑结构随之动态地变化。传感器网络的自组织性要能够适应这种网络拓扑结构的动态变化。

(3) 动态性

传感器网络的拓扑结构可能因为下列因素而改变:1、环境因素或电能耗尽造成的传感器节点故障或失效;2、环境条件变化可能造成无线通信链路带宽变化,甚至时断时通;3、传感器网络的传感器、感知对象和观察者这三要素都可能具有移动性;4、新节点的加入。这就要求传感器网络系统要能够适应这种变化,具有动态的系统可重构性。

(4) 可靠性

无线传感器网络特别适合部署在恶劣环境或人类不宜到达的区域，节点可能工作在露天环境中，遭受日晒、风吹、雨淋，甚至遭到人或动物的破坏。传感器节点往往采用随机部署，如通过飞机撒播或发射炮弹到指定区域进行部署。这些都要求传感器节点非常坚固，不易损坏，适应各种恶劣环境条件。

由于监测区域环境的限制以及传感器节点数目巨大，不可能人工“照顾”每个传感器节点，网络的维护十分困难甚至不可维护。传感器网络的通信保密性和安全性也十分重要，要防止监测数据被盗取和获取伪造的监测信息。因此，传感器网络的软硬件必须具有鲁棒性和容错性。

（5）以数据为中心

互联网是先有计算机终端系统，然后再互联成为网络，终端系统可以脱离网络独立存在。在互联网中，网络设备用网络中惟一的 IP 地址标识，资源定位和信息传输依赖于终端、路由器、服务器等网络设备的 IP 地址。如果想访问互联网中的资源，首先要知道存放资源的服务器 IP 地址。可以说现有的互联网是一个以地址为中心的网络。

传感器网络是任务型的网络，脱离传感器网络谈论传感器节点没有任何意义。传感器网络中的节点采用节点编号标识，节点编号是否需要全网惟一取决于网络通信协议的设计。由于传感器节点随机部署，构成的传感器网络与节点编号之间的关系是完全动态的，表现为节点编号与节点位置没有必然联系。用户使用传感器网络查询事件时，直接将所关心的事件通告给网络，而不是通告给某个确定编号的节点。网络在获得指定事件的信息后汇报给用户。这种以数据本身作为查询或传输线索的思想更接近于自然语言交流的习惯。所以通常说传感器网络是一个以数据为中心的网络。

例如，在应用于目标跟踪的传感器网络中，跟踪目标可能出现在任何地方，对目标感兴趣的用戶只关心目标出现的位置和时间，并不关心哪个节点监测到目标。事实上，在目标移动的过程中，必然是由不同的节点提供目标的位置消息。

1.2 无线电力传输技术

无线电力传输也称无线能量传输或无线功率传输，它通过电磁感应和能量转换来实现。无线电力传输主要通过电磁感应、电磁共振、射频、微波、激光等方式实现非接触式的电力传输。根据在空间实现无线电力传输供电距离的不同，可以把无线电力传输形式分为短程、中程和远程传输三大类。

无线电力传输技术最具影响力的代表就是特斯拉的最著名的发明——“特斯拉线圈”，这是一种分布参数高频共振变压器，可以获得上百万伏的高频电压。特斯拉线圈

的线路和原理都非常简单，但要将它调整到与环境完美的共振很不容易，特斯拉就是特别擅长这项技艺的人。

特斯拉后来发明了所谓的“放大发射机”，现在称之为大功率高频传输线共振变压器，用于远距离的无线输电试验。值得一提的是：特斯拉把地球作为内导体，地球电离层作为外导体，通过他的放大发射机，使用这种放大发射机特有的径向电磁波振荡模式，在地球与电离层之间建立起大约 8 赫兹的低频共振，利用环绕地球的表面电磁波来传输能量。

这一系统与现代无线电广播的能量发射机制不同，而与交流电力网中的交流发电机与输电线关系类似，当没有电力接收端的时候，发射机只与天地谐振腔交换无功能量，整个系统只有很少的有功损耗，而如果是一般的无线电广播，发射的能量则全部在空间中损耗掉了。

后人从理论上完全证实了这种方案的可行性，证明这种方案不仅可行，而且效率极高，对生态安全，并且不会干扰无线电通信。只不过涉及到世界范围内的能量广播和免费获取，在现有的政治和经济体制下，无人实际问津这种主张。

而在现代社会，越来越多的电子产品为人们的工作生活带来了极大的便捷，但传统的电力传输方式大多是通过导线或插座将电力传输到终端产品。随着移动设备、无线数据传输、无线网络技术的日益普及，人们希望能摆脱传统电力传输方式的束缚，解除纷乱电源线带来的困扰。由于现在的可移动移动设备大多具有全球定位系统、越来越完善的软件及长期续航等基础需求，所以尽管能量源在组成上有所进步，但能量的供应仍然无法充分满足需求，因此就要求人们要有更便捷的能量补给的手段。可以设想一下，在人们的生活中不会再出现电源插头这种借口，取而代之的是随处可见的无线充电板，无论人们是在餐厅吃饭、在车站等地铁还是在公园里休息，只要在人们闲暇时间将人们的电子设备放在上面就可以实现充电，然后在即将离开的时候只需将设备带走，一切都变得轻松和便捷。而且，这种设备比常用到的电源插头更具有安全性，电流不会暴露在直接可以触摸到的空间，更不会发生触电危险和由电引起灾害的情况。对于生活设备而言，由于不会存在反复的插拔和暴力使用的情况，所以设备的日常使用损耗程度就会大大的降低，从长远的角度来看，日常电子设备的使用寿命就会更长。由此可见，应用了无线充电技术的电子设备在为人们的生活带来便利的同时还保障了日常生活的安全。由此，无线电力传输技术成为 21 世纪最值得期待的技术，无线充电产品成为人们关注的新焦点。目前，全球许多国家都在研究开发无线电力传输技术，探索无线电力传输系统在不同领域的应用，致力于将其实用化。

1.3 无线可充电传感器网络

随着无线充电技术的日益进展,人们开始对无线充电传感器网络产生了兴趣。简单来说,无线充电传感器网络就是将无线充电技术应用到传感器网络中,这种设想必定会推进无线充电技术的进一步发展,但是也给研究人员带来了新的挑战。由于在按需充电的框架下,每一个来自传感器节点的充电请求都可以被理解成是一个系统中的任务请求,而实际的问题就被转化为充电任务的调度物体。通常情况下,传感器在无线传感器网络的动力与电池,它有约束能源容量,导致有限的网络生命周期。这是一个长期持久的,基本的问题所面临的传感器网络。为了能够有效地解决这些问题,近年来,越来越多的学者们将研究方向调整向开发能源保护计划,例如,能源收集协议等的数据聚集协议,但是该协议虽然轻微地延长了能源源持续供电工作时间,然而有限的电池容量的问题依然有待解决。网络的生命周期依然是研究中的困境,这被认为是阻碍了广泛部署的核心原因,同样影响无线传感器网络的生命周期。在按需充电的框架下,由于节点在整个大的网络中是随机分布的,在环境的影响下,建造一个足够涵盖整个无线网络的监控设备是不现实的,所以由节点自身来主动地监控携带的能量源的使用情况以及能量信息,这一功能可以由节点自身来实现也可以由精确度高的每个节点都要配备的专属伴随模块来实现。当节点检测到其剩余能量值小于某一个预设好的警戒线时,就会产生一个新的充电请求,并且通过无线通讯的方式发送给移动能量源,其中的移动能量源就是负责给区域内的节点进行能量补给的专用设备。负责充电的移动能量源可以由配备充电发射器的可移动装置来充当,而在所有的传感器节点上只需要额外添加充电接收器即可。在设计的过程中,假定有一些时间消耗是可以忽略不计的,例如传输任务请求所需要的时间,这主要是因为整个无线网络的覆盖范围大以及移动能量源移动速度的限制,同移动能量源在旅途上所花费的时间相比,其他的时间显得无关紧要。而对于每一个移动能量源来说,在其内部都需要有一个专属的任务队列来存储接收到的任务请求,移动能量源会根据它自身所遵循的充电调度算法对整个任务队列进行处理,并且进行后续的服务。直观地说,在一个点播式移动充电系统的充电过程中,任务请求来源于传感器节点并传输给移动能量源,移动能量源根据自身的方法选择出一个最优先的任务请求,并且对该任务请求对应的传感器节点进行充电。

在按需充电架构下,存在着很多的不确定性,在时间层面上,节点发送任务请求的时间是不确定的;在空间层面上,移动能量源的当前位置和到节点的距离是不确定的。所以,在这样的一种情况下,对于调度算法的实时性有这很强烈的需求,算法应当根据

当前的任务队列里的信息，选择出当前情况下最适合的充电请求，即选择一个节点作为目标充电节点。

在这个网络中，节点的能量补给任务是由移动能量源负责的，如果一旦节点的能量耗尽，节点将不能继续进行工作，这就要求移动能量源必须在节点能量耗尽之前及时为节点充电，在有限的时间内保证尽可能多的可以继续工作的节点的数量，这就调度算法在设计的过程中仔细考虑。一个好的充电策略也就成为了无线充电算法中最重要的部分。

2 相关研究

随着无线可充电传感器网络的快速发展,越来越多的研究者被该领域的无限潜力所吸引,并且投入到该领域的研究之中^[1-10]。在这样一个蓬勃的研究氛围中,前人们创造出了许许多多引人注目的研究成果,而这些成果为之后的研究打下了坚实的基础,研究领域被拓宽,研究课题也越来越深入无线可充电传感器网络的本质,更加切实符合网络的基本需求,研究基础也更加符合实际的要求,具有现实意义。在这样的大环境中,前人们取得了一系列具有深远影响的成就,创造出许多凝聚了研究成果的文章和资料^[11-19]。

而在这些经典的探索和研究中,根据研究内容的不同的关注点和侧重点,有多种的分类方法。根据算法的线上运行状态可以分为离线算法和线上算法;而根据算法的直观的充电调度模式可以分为周期性调度算法和协同式调度算法;而根据算法研究对象是否为对无线能量车的行为调度可以分为调度式算法和非调度式算法。接下来我们将对这些比较常见的分类情况进行简要的介绍。

2.1 离线算法和线上算法

大多数的研究都集中与对无线移动充电器(Wireless Mobile Charger, WMC)的行为调度和路径规划方面,这里无线移动充电器则充当移动能量源的角色。通常,这一类问题会被转化成旅行者问题。而通过对接请求、信息处理、调度操作和动作执行这一系列操作的不同处理手段可以将研究的方法大致地分为两大类:离线算法^[20-22]和线上算法^[23-30]。

而这里离线算法和线上算法都具有各自的特点。离线算法通常是累计一定量的充电请求或者充电请求累计达到某限制条件后,开始执行对移动能量源的规划和调度。例如,张等人^[21]提出的 Pushwait 算法,他们首先研究在一个无限长的一维无线传感器网络中被证明达到最优的算法,之后将限制条件逐步移除扩展到二维的无线传感器网络空间;Madhja 等人^[22]通过优化分配的解决方法来解决该问题,并提出了 DC 和 DCLK 协议。根据不同的网络结构,选择不同的适用于网络的协议,对网络进行不同的分配策略。相比于离线算法,线上算法的特点是每当收到充电请求都会对网络计划进行变动,对移动能量源的路径进行重新的计算规划或者在之前的基础上进行调整,对移动能量源的动作行为进行新的评估和调度,以达到在动态的环境下,完成一种动态的应对和优化办法,更倾向于网络中各种元素之间的协作。例如,何等人^[23]通过察机器人充电延迟与充电距离之间的差异,提出了一种基于树状结构的充电器调度方案,最小化机器人的行驶距离,

避免了机器人多余的能量消耗；陈等人^[24]探究在固定时间内，规划移动能量源的充电路径，使得在该段时间内的充电节点数目达到最大化；林等人^[25,26]通过对优化目标的设计和优化，在一系列研究下提出了在二维空间下单移动能量源的优秀的调度算法 P2S 和 TADP，而这两个算法也对后续的研究打下了重要的基础。

2.2 周期式算法与协同式算法

根据调度算法对移动能量源的行为调度的表现方式的不同进行划分，可以将算法分为周期式算法和协同式算法。而周期式算法和协同式算法也是该领域研究中的重要分类标准和依据。

周期式算法通常是调度算法在网络中为移动能量源规划好一个近似固定的路径，而该路径一般体现为一个回路，而在该路径回路上一般包括基站的位置，使得移动能量源在工作的过程中能得到能量的补充，保证后续网络的正常运行。而在路径上还包括传感器节点的位置或者距离传感器节点比较近的网络中移动能量源的停靠点，继而移动能量源可以循环的在这一个固定的路径上移动，呈周期性地为网络中的节点进行能量补充。例如，谢等人^[31-33]在研究中提出最小容纳区域（SED）的概念：一个能够包含所有节点的最小的区域。在覆盖区域中选定多个在充电时允许移动能量源停驻的位置，并根据这些位置计算规划出移动能量源周期性的调度路径。类似地，付等人^[34]提出无线充电路径规划方法，将网络划分为不同的同心圆，而将同心圆的重叠部分作为移动能量源的停驻区域。

而协同式算法通常体现为网络中的多种结构之间的相互协调工作，根据网络中元素的综合判断设计出一种带有通信协作的调度算法。而该种调度算法包含了任务上的协作、信息上的沟通以及能量上的共享。例如，李等人^[35]提出 J-RoC 解决方案，把调度策略和路由协议结合起来。移动能量源在为某个待充电的传感器节点补充能量之前会，预先规划出可能的充电路径上通信的消耗，节点则按照当前工作下的协议来选择通过哪一条传输路径来传递信息可以达到较低的能量消耗。Madhja 等人^[36]提出一种多车下的分层调度算法，在算法中特定的情况下允许移动能量源之间进行能量交换，通过移动能量源这种方式的协作，尽可能多的提高能量的利用率，减少移动能量源返回进行能量补充的次数。

2.3 其他分类研究

除了这两大类主要的研究方向外，许多的研究学者也探究不同的研究角度去解决和优化这一类问题^[37-41]。所谓它山之石可以攻玉，这类另辟蹊径的研究思想，同样得到了良好的效果，对该类问题的研究同样起到了至关重要的影响力。例如，Rout 等人^[37]通

过研究发现,在不同的路径上,节点由于获取的能量和消耗的能量不对等,导致了不同的能量利用率,设计了一种基于马尔可夫决策过程的可持续性数据采集树,在优化网络的同时降低了网络的能耗;Deng 等人^[38]通过对链路和能量消耗约束的结合研究,试图通过认真处理时空耦合链路和电池容量约束,共同优化采样率和电池电量,通过对原始问题的等价解耦,提出在联合速率和电池控制范围内的分布式 DSCC 算法。

无线可充电传感器网络的研究在前人的不断努力下上升到了一个崭新的高度,但是这还远远不够,无线可充电传感器网络是一个综合性的庞大的研究分支,这一领域研究综合了软件和硬件的思想精髓,是通信调度和算法研究的有机结合,也是理论知识和生活实际的一个完美沟通。所以,这一领域的研究最终也是以服务我们的日常生活为目标的。这一事实既体现了这一领域研究的重大意义和无限活力,也预示了该领域研究过程中充满着无线的潜力和挑战。因此,这一领域的研究不能止步不前,仍然还有很长的路需要去开拓。受到该领域的吸引和前人的启发,本文在这一大的背景下展开了研究和探索。

3 多车实时协同充电调度算法

在前人的工作的启发下,本文提出了一种适用于具有多个移动能量源的无线可充电传感器网络的实时协同充电调度算法,该算法对于给定的多车无线传感器网络中移动能量源的路径规划和行为调度进行了分析,并对整个无线传感器网络系统的性能进行了优化并制定了优化目标。本章则详细介绍算法的设计和內容。

3.1 相关定义和符号

在本文的算法设计过程中,利用了一些关键定义和公式符号来简化算法中元素的表示和设计过程,定义和符号的汇总见表 3.1,表 3.1 如下:

表 3.1 相关定义和符号
Tab. 3.1 Related definitions and symbols

符号	表示含义
X	无线传感器网络的长
Y	无线传感器网络的宽
N	传感器节点的集合
$ N $	传感器节点的数目
$ N _a$	正常工作(存活)的传感器节点的数目
N_i	编号为 i 的传感器节点
W	无线移动能量源的集合
$ W $	无线移动能量源的数目
W_j	编号为 j 的无线移动能量源
η	能量利用率
δ	节点存活率
ε	无线充电效率
q_i	节点 i 的能量消耗速率
q_r	节点能量接收速率
q_c	移动能量源充电时能量消耗率
q_m	移动能量源旅行时能量消耗率
$C^{(n)}$	节点的电池容量
$C^{(w)}$	移动能量源的电池容量
e_i	节点 i 的剩余能量

表 3.1 相关定义和符号 (续)
Tab. 3.1 Related definitions and symbols (Cont)

符号	表示含义
E_j	移动能量源 j 的剩余能量
θ	节点的能量警戒值
v	移动能量源的移动速度
ψ_j	移动能量源 j 的任务队列
$ \psi_j $	移动能量源 j 的任务数目
t_i	节点 i 的剩余生存时间
d_i^j	节点 i 到移动能量源 j 的距离
$d_{m/n}$	节点 m 到节点 n 的距离
l_i	节点 i 的链路数目
$\lambda_j^t(i)$	节点 i 在 j 任务队列中的时间优先级
$\lambda_j^d(i)$	节点 i 在 j 任务队列中的空间优先级
$\lambda_j^e(i)$	节点 i 在 j 任务队列中的评估优先级
α	时间评估权重
β	空间评估权重
γ	链路评估权重
Ω_k	第 k 个网络区域
R	邻居网络区半径
ξ	网络子区域任务重叠率

3.2 网络结构和问题定义

3.2.1 网络结构

在本篇文章的研究中, 针对的是具有多个移动能量源的无线可充电传感器网络。而研究中具体的网络设定是一个半监控的大规模无线传感器网络, 而目标网络中的组成元素大致分为三类: 基站, 无线移动能量源, 无线传感器节点。如图 3.1 所示, 为无线充电传感器网络的一个结构模拟图。在这里, 对于每一类元素都给予一定的限制和基本描述:

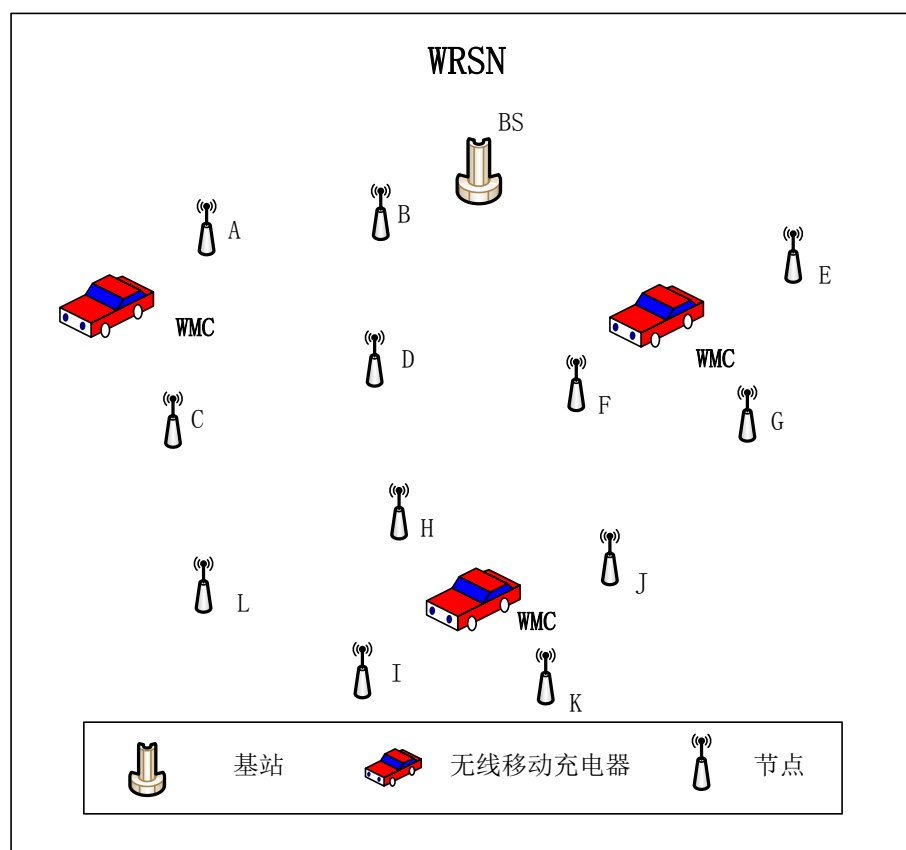


图 3.1 WRSN 结构图

Fig. 3.1 Structure diagram of WRSN

(1) 第一个基本元素——基站：通常我们定义的基站是是无线电台站的一种形式，是指在一定的无线电覆盖区中，通过移动通信交换中心，与移动电话终端之间进行信息传递的无线电收发信电台。而在本研究过程中，基站定义为与网络核心控制相关的设备的统称，包括计算中心、通信电台以及能量中心等核心设备，具体可以看作是超级计算机、无线电收发信电台以及充电桩等设备的集合统称。在整个网络中，基站可以看作是网络的大脑，负责网络中的大量的复杂的计算功能，并且负责调控网络中其他元素的各种工作状态和行为活动等，同时还是网络中所有能量的主要来源。网络中基站既作为网络中最为核心的元素，也是网络系统对外交互的主要桥梁。而在这里，研究中的网络设定中，基站是不可移动的，并且所在位置信息是全网络中共享的，这样保证了基站这一核心本身的稳定性，也保证了其在网络中的权威性；

(2) 第二个基本元素——无线移动能量源：在网络中，无线移动能量源是配备了特定一系列装置的移动载具。而在本研究中，我们将移动能量源设定为具有自动驾驶功能的移动能量车。而移动能量车配有无无线通讯工具、具有一定计算能力的计算机以及能

量存储装置等设备。其中，无线通讯工具为了保证移动能量车与基站、其他能量车以及传感器节点的通讯，以便无线能量车能实时地接收到来自基站的控制信息和来自节点和其他无线能量车的请求和协作信息。无线能量车能够实时的共享网络中无线能量车的位置和节点的位置，而且根据自身所配备的定位装置能够实时地确定自己的所在地理位置，并将自己的能量信息和位置信息共享出去，而这一信息主要是由基站和其他的无线能量车捕获，应用于整个网络的调度和无线能量车之间的沟通协作。无线能量车所配备的能量存储装置，一是为了能量车本身的移动、通讯、计算等行为提供基础能源，二是为了将能量传输给待充电的无线传感器节点，以维持节点的正常工作所需的能量。而这里能量是通过无线能量传输的方式传输给传感器节点的，在这方面考虑到所需要克服的网络的地理因素，所以采用了无线能量补充的方式，并且更符合于实际的网络需要。无线能量车是网络中的唯一具备可移动性的单位，在网络中充当的角色可以看作是能量的搬运工。通过无线能量车自身的能量监控装置可以事实获知本身剩余的能量存储，当能量低于一定程度时，无线能量车将会立即返回基站进行能量补充。而这里由于充电装置的存在，这部分充电将利用接触式充电来实现。当能量充满后，立即返回网络中，继续执行任务；

(3) 第三个基本元素——无线传感器节点：在网络中，无线传感器节点是最小的一个单位，是一种微型的嵌入式设备，是整个网络信息的来源和网络功能的直接执行者。每一个传感器节点都配备有任务所需的传感器、一定的能量存储装置、小功率的通讯设备和具有简单计算能力的计算装置。传感器节点通过传感器感知网络中所监控的信息，例如，温度、湿度、光照等物理信息，之后将信息进行简单的转码和处理转发出去，之后供专业的分析人员和网络的监控人员使用，即需要兼备监测数据的采集和转换、数据的管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作等基本操作或功能。传感器节点正因为要满足这些需求具备一系列的特点，包括体积小、能耗低等。一旦传感器节点的位置安置好之后，除了根据网络需求人为地去移动节点重新布置节点外，节点的位置是不可变的。当节点布置完成后，网络的拓扑结构也随之构建完成。当节点的能量随着工作消耗低至一定程度时会向网络中广播带有自己标识的充电请求信息，当该信息被移动能量车或者基站接收后会迅速被网络所共享，经过计算调度后为其进行能量的补充。而节点同样通过无线能量传输的方式从无线能量车那里接受能量，从而保证整个网络系统的正常运行。

3.2.2 问题定义

在上述的网络结构下，可以概括出传感器节点能量补充这一功能实现的网络内部工作流程：在无线传感器网络中，当传感器节点的能量随着时间消耗到一定值时，传感器节点将会向网络中广播带有可识别信息的充电请求，当基站或无线能量车接收到请求后，经过符合某一规则或方法的判断后，由一辆无线能量车为该节点进行能量补充。经过对这一过程的分析后，可以发现每一个无线能量车需要到达请求的节点的位置，而且已请求的节点位置在一段时间内仍然会是处于请求的状态，而在不确定的时间会增加新的请求节点，即增加新的需要无线能量车到达的位置。那么上述过程可以看作是一种动态式的旅行商问题（TSP）。旅行商问题是数学领域中著名问题之一。假设有一个旅行商人要拜访有限个城市，他必须选择所要走的路径，路径的限制是每个城市只能拜访一次，而且最后要回到原来出发的城市。路径的选择目标是要求得的路径路程为所有路径之中的最小值。而旅行商问题本身则是一个非确定性多项式完全（NPC）问题，我们无法用特定的多项式求出该问题本身的最优解，换言之，我们需要通过一定方法寻找到该问题的近似解。

接下来，我们将问题描述符号化：

在长为 X ，宽为 Y 的无线传感器网络中，部署有限的传感器节点和无线能量车，节点集合为 N ，能量车集合为 W ，能量承载能力分别为 $c^{(n)}$ 和 $c^{(w)}$ 。当节点 i 的能量达到节点能量警戒值 θ 时，节点 i 发送充电请求，能量车 j 接收充电请求并生成任务队列 ψ_j ，能量车以 v 的移动速度在前往节点为节点充电。那么问题的关键，即问题定义，是：如何规定一种调度方法使得能量车可以为节点补充能量并且达到较好地网络整体效果。

3.3 多车实时协同充电调度算法（TSL）设计

针对前一节所定义的问题，本文中提出一种基于按需方式的多车实时协同充电调度算法，并在算法中提出优化的目标作为对网络性能以及充电效果优劣的一种评估方式，并且以优化该目标为算法的目标。

3.3.1 算法优化目标

经过对问题的解读和分析，首先为待解决问题设立了两个优化目标：能量利用率 η 和节点存活率 δ ，两个优化目标的具体定义分别如下：

（1）最大化能量利用率 η

这里我们将节点所获得的能量定义为有效能量，而在该过程中产生的充电消耗、移动消耗和能量车的剩余能量的能量总和看作总的能量消耗，并通过二者的比值计算出能量利用率 η ，具体的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 \max \eta &= \frac{E_N}{E_{charge} + E_{move} + E_W} \\
 &= \frac{t \sum_{i=1}^{|N|} q_i + \sum_{i=1}^{|N|} e_i}{\frac{(t \sum_{i=1}^{|N|} q_i + \sum_{i=1}^{|N|} e_i) q_c}{q_r} + q_m \left(t - \frac{t \sum_{i=1}^{|N|} q_i + \sum_{i=1}^{|N|} e_i}{q_r} \right) + \sum_{j=1}^{|W|} E_j} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

约束条件为:

$$\begin{aligned}
 0 &< q_i, q_c, q_r, q_m \\
 0 &< e_i \leq C^{(n)} \\
 0 &< E_j \leq C^{(w)}
 \end{aligned}$$

其中, E_N 与 E_W 分别代表节点的能量总和与能量车的能量总和, E_{charge} 与 E_{move} 分别代表能量车在充电时消耗的能量总和与移动时消耗的能量总和。 q_i, q_c, q_r, q_m 分别代表节点 i 的能量消耗速率、移动能量源充电时能量消耗率、节点的能量接收效率和移动能量源旅行时能量消耗率, e_i 和 E_j 分别代表节点的剩余能量和无线能量车的剩余能量, $C^{(n)}$ 和 $C^{(w)}$ 分别表示节点的电池容量和无线能量车的电池容量。

(2) 节点存活率 δ

某一时刻的节点存活率具体计算公式如下:

$$\max \delta = \frac{\int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \frac{|N|_a}{|N|} dt}{2\Delta t} \quad (3.2)$$

约束条件为:

$$0 < |N|_a \leq |N|$$

其中, $|N|_a$ 代表正常工作节点的个数, $|N|$ 代表网络中布置的节点的总数。

如公式所示, 某一时刻的节点存活率可以表示为当前时刻正常工作节点的数目与网络中部署的节点的总数的比值, 而整个系统的节点存活率可以表示为多个时间采样观测时刻的节点存活率, 但是为了排除其误差性我们可以将其表示成该时刻时间邻域内的平均值。

3.3.2 节点能量警戒值的确定

在整个网络的运行中, 节点发送请求的唯一触发条件为节点的能量低于能量警戒值 θ , 而该警戒值的确定需要进行一定的思考。该警戒值的确定必须考虑两种极端情况:

(1) 当警戒值设置过大时

当警戒值设置过大时, 每当无线能量车为节点完成充电离开后, 由于警戒值过大, 节点在正常工作比较短的一段时间后, 剩余能量就将降到警戒值的水平, 节点会很快地再此发送出请求。这样则造成无线能量车过于频繁为节点充电的一种情况, 导致在旅程

中花费的能量和在充电过程中损耗的能量过多。根据能量利用率的计算公式，由于分母部分变大，比值将会变小，导致能量利用率降低。

(2) 当警戒值设置过小时

当警戒值设置过小时，在每次节点发出请求后，由于警戒值过低，节点在继续工作很短一段时间后就会能量耗尽，而在这段时间内，移动能量源还不足以移动到节点处为节点进行能量补充，这就导致节点在某一段时间内无法正常工作。

因此，在能量警戒值的确定过程中需要一个边界条件来确立警戒值的约束。在本文的研究中，考虑到的一个极端情况是，当节点和无线能量车的距离是网络中的最大距离时，如果仍要保证节点能够在能量消耗光时能够得到无线能量车的能量补充，则要使得节点从警戒值消耗到能量为 0 时的时间恰好为无线能量车的移动时间，而无线能量车的移动时间计算如下：

$$T = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{v} \quad (3.3)$$

其中， X 和 Y 分别为网络区域的长和宽， v 为无线能量车的移动速率，则通过该时间的计算公式，我们可以得出警戒值的计算公式，具体如下：

$$\theta = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{|N|} q_i}{|N|}}{C^{(n)}} = \frac{\sum_{i=1}^{|N|} q_i}{C^{(n)} |N|} \quad (3.4)$$

其中， $C^{(n)}$ 代表节点的电池容量， q_i 代表能量的消耗率。

3.3.3 网络分区与区域再划分

在具有多个无线能量源的无线传感器网络中，无线能量源的调度工作的难度和复杂度远远大于单能量源的网络。本文研究中采用了分治和协作的思想，将大的无线传感器网络分成几个小的子无线传感器网络，之后为每个子传感器网络配备一个移动能量车为该区域内的节点进行充电服务。通过这种思想等价于将一个多能量源无线传感器网络划分为多个子单能量源无线传感器网络。而通过这种转化思想，整个算法的复杂度相当于降低了一个数量级；而从网络的能量消耗情况而言，无线能量车的移动范围从整个网络范围缩小到了一个相对小的范围，在任务请求率一定的情况下，总的移动消耗也会降低；从存储信息的角度而言，无线能量车所接收到底充电请求的数目会降低，对于无线能量车的计算能力和队列维护两方面而言，由于计算给予系统的压力都会减小。

那么，如何对网络区域进行合理的划分则成了该过程的核心问题。而考虑到在网络布置成功后，节点的不可移动以及网络的空间属性，受到聚类算法的启发，本文采用类聚类分区的算法进行网络区域划分。聚类分析又被称为群分析，它是研究（样品或指标）分类问题的一种统计分析方法，同时也是数据挖掘的一个重要算法。聚类分析起源于分

类学，在古老的分类学中，人们主要依靠经验和专业知识来实现分类，很少利用数学工具进行定量的分类。随着人类科学技术的发展，对分类的要求越来越高，以致有时仅凭经验和专业知识难以确切地进行分类，于是人们逐渐地把数学工具引用到了分类学中，形成了数值分类学，之后又将多元分析的技术引入到数值分类学形成了聚类分析。聚类分析内容非常丰富，有系统聚类法、有序样品聚类法、动态聚类法、模糊聚类法、图论聚类法、聚类预报法等。

在本文中利用到的分区算法是通过节点的坐标，将整个网络分为已知的有限个小的子网络，而由于我们是为每个子无线传感器网络配备一个无线能量车，那么子网络的数量则可确定，即为无线能量车的数目 $|W|$ 。算法的详细内容如下表 3.2:

表 3.2 区域划分算法
Tab. 3.2 Domains dividing algorithm

Algorithm 1 Domains Dividing Algorithm
INPUT: Node set N , WMC set W
OUTPUT: All subdomains Ω_k
1: $K \leftarrow W $;
2: Define $P_k(\bar{x}_k, \bar{y}_k)$ as the clusters center of Ω_k ;
3: Initialize P_k ;
4: for $i \leftarrow 1$ to K do
5: Randomly select a node $N_j(x_j, y_j)$ as $N'_i(x_j, y_j)$;
6: if $N'_i \neq N'_{i-1}$ to N'_1 then
7: $\bar{x}_i \leftarrow x_i$;
8: $\bar{y}_i \leftarrow y_i$;
9: else
10: Re-select a node as N'_i ;
11: $i \leftarrow i - 1$;
12: end if
13: end for
14: ChangeFlag $\leftarrow 1$;
15: while ChangeFlag = 1 do
16: ChangeFlag $\leftarrow 0$;
17: for $i \leftarrow 1$ to K do

表 3.2 区域划分算法（续）
Tab. 3.2 Domains dividing algorithm (Cont)

```

18:    $P'_i \leftarrow P_i$ ;
19: end for
20: for  $i \leftarrow 1$  to  $|N|$  do
21:   Calculate distances between  $N_i$  to all  $P_k$ ;
22:   Choose the nearest one as  $P_j$ ;
23:   Add  $N_i$  to  $\Omega_k$ ;
24:   Refresh  $P_j$  by Equation (3.5) and Equation (3.6);
25: end for
26: for  $i \leftarrow 1$  to  $K$  do
27:   if  $P'_i \neq P_i$  then
28:     ChangeFlag  $\leftarrow 1$ ;
29:   end if
30: end for
31: end while
32: return All  $\Omega_k$ 

```

通过分析上述算法可以看出，算法是以初始 $|W|$ 个节点的坐标作为子区域的聚类中心，再依次遍历剩余的所有节点的位置信息。每次遍历到一个新的节点，都会将该节点加入到距离最近的聚类中心所在的子区域内，并且在每次加入一个新的节点后都会重新计算聚类中心。而在上述算法中，重新计算聚类中心的算法如下面公式 3.5 和公式 3.6 所示：

$$\begin{aligned}\bar{x}'_k &= \frac{\sum_{i=1}^{|\psi_k|} x_i}{|\psi_k|} \\ &= \frac{\bar{x}_k(|\psi_k|-1) + x'_i}{|\psi_k|}\end{aligned}\quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}\bar{y}'_k &= \frac{\sum_{i=1}^{|\psi_k|} y_i}{|\psi_k|} \\ &= \frac{\bar{y}_k(|\psi_k|-1) + y'_i}{|\psi_k|}\end{aligned}\quad (3.6)$$

其中, x'_i 为新的节点的横坐标, y'_i 为新的节点的纵坐标, \bar{x}_k 为加入新节点前聚类中心的横坐标, \bar{y}_k 为加入新节点前聚类中心的纵坐标, \bar{x}'_k 为加入新节点前聚类中心的横坐标, \bar{y}'_k 为加入新节点前聚类中心的纵坐标。

在算法计算操作结束后, 为每个子区域分配一个无线能量车, 作为该区域所属的能量车接收区域内的节点充电请求。网络进入正常工作状态。

该分区效果可以满足网络的正常工作需要, 但是在一些特殊情况下我们需要运用到多能量车的网络的优势, 通过能量车与能量车之间的协作, 完成单独能量车所服务不到的网络情况和解决不了的充电调度情况。分区过程如图 3.2 所示。

而这里所提到的特殊情况主要包括两种情形:

(1) 移动能量车本身的能量限制

在整个无线传感器网络中, 所有充电调度的驱动是来自节点的充电请求, 而所有调度行为的基础是能量。在这个网络中, 唯一可以移动的网络元素就是无线能量车, 所以在网络中无线能量车的重要程度是远高于传感器节点的。

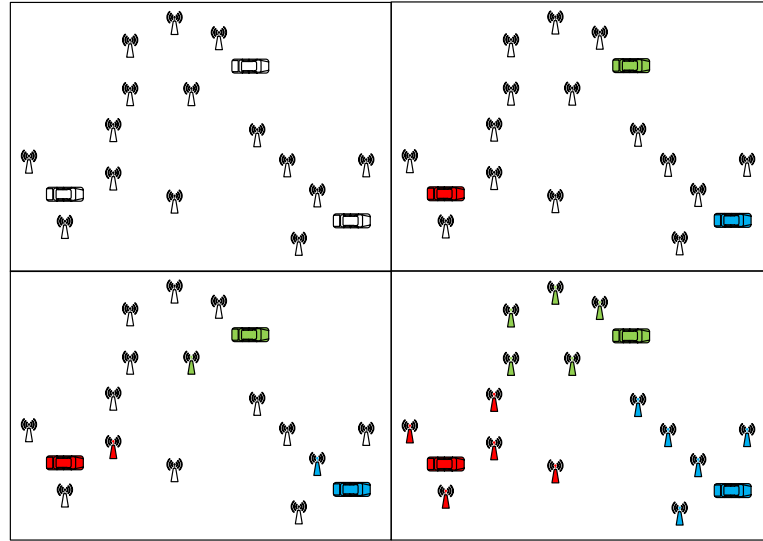


图 3.2 区域划分示意图

Fig. 3.2 Schematic diagram of dividing

在网络设定中我们允许节点的能量消耗至 0 的情况存在, 但绝对不允许无线能量车的能量消耗为 0。因此, 我们为无线能量车需要增加一种保护机制, 即保护在整个网络的运行中无线能量车的能量状态一直要处于高于 0 的状态, 这样网络才能达到正常运转。那么, 想要保证这种状态, 换言之就是要避免无线能量车的能量消耗为 0 的状态出现。

而无线充电车能量紧急的状况只有两种：去往节点的路上能量耗尽和为节点充电完毕后能量不足以返回基站进行自身的能量补给。那么我们只需要为无线能量车添加一种预判断机制，而预判断的时机为每次为节点充电完毕后无线能量车还没有移动的那一时刻，节点会判断能量是否能够到达下一个节点并且为下一个节点充电之后能量仍然足够能量车自身返回基站进行自身能量补充。根据该判定，只要保证上一次无线能量车能够在满足要求的状态下工作，为当前或者上一个节点充电完毕后不会出现能量消耗为 0 的状态出现。而，根据逻辑归纳的思想，无线能量车在初始时电量是足够的，所以可以证明在整个网络工作过程中都不会出现能量消耗为 0 的情况出现。而这一判定标准我们可以用下面的公式 3.7 来表示：

$$\text{Target} \leftarrow \begin{cases} BS, & (\frac{E_j - \frac{c^{(n)} - e_i}{\varepsilon} - \frac{q_c d_i^j}{v}}{q_m} < \frac{d_i^j + d_i^{BS}}{v}) \\ N_i, & (\frac{E_j - \frac{c^{(n)} - e_i}{\varepsilon} - \frac{q_c d_i^j}{v}}{q_m} \geq \frac{d_i^j + d_i^{BS}}{v}) \end{cases} \quad (3.7)$$

其中，不等号左边是无线能量车假使为节点充电完毕后还能行进的时间，不等号右边是无线能量车行驶到目标节点再返回基站所需要的总的旅行时间。

但是为了避免这种情况的发生，会有一段时间内，无限能量车所在的区域的请求无法被满足，可能导致部分比较急迫的节点能量消耗为 0。

(2) 来自节点的充电请求不能被服务

由于网络中节点的请求到达是难以寻找规律的，所以可能会出现的一种情况是优先级比较低的节点或者优先级高但过于紧迫的节点，这类节点会在无线能量车为其服务之前将能量耗尽，那么这类节点对于该无线能量车来说就是不可服务的，即依照任务队列中任务请求的服务顺序下来，总会出现无线能量车来不及为其充电的节点。而面对这种情况会使得无线能量车无法或放弃对该节点的能量补充。下面给出一个节点是否可服务的近似判断依据，依照在任务队列中的顺序为任务队列中的节点添加新标记，原编号为 i 的节点 N_i 在无线能量车 j 的任务队列中的编号为 n_i^j ，如公式 3.8 所示：

$$\text{Action} \leftarrow \begin{cases} \text{serve}, & (t_i \geq \frac{d_{n_1^j}^j + \sum_{k=2}^i d_{n_k^j/n_{k-1}^j}}{v}) \\ \text{remove}, & (t_i \geq \frac{d_{n_1^j}^j + \sum_{k=2}^i d_{n_k^j/n_{k-1}^j}}{v}) \end{cases} \quad (3.8)$$

其中，不等号左边是节点 i 的剩余工作时间，不等号右边是无线能量车依次赶到节点 i 所用的时间，这里忽略了为节点 i 之前的节点充电所消耗的时间，因为 i 之前的节点有可能存在不能服务的状态。

针对于这两种特殊情况，我们提出一种协作概念，即允许特殊情况下特殊的无线能量车在空闲时跨区域服务，进行节点能量的补充。而这里我们定义邻居能量车的概念，在一个子区域的聚类中心的一定距离内，所存在的不属于原来的子区域划分的无线能量车被定义为该区域的邻居能量车，而该距离被定义为邻居网络区半径 R ，相对的初始被划分给子区域的能量车被称作为所属能量车。在这里给出邻居网络区半径的一个计算方式，即，取所有的子区域的聚类，构建一个哈密尔顿回路，所有的连接两个聚类中心的哈密尔顿路径被视作哈密尔顿边，而临界状态下邻居网络区半径的值为哈密尔顿回路的平均值。邻居网络区半径的具体计算公式如下面公式 3.9 所示：

$$R = \frac{\sum_{k=1}^{|W|} L_k}{|W|} \quad (3.9)$$

其中， L_k 为以第 k 个聚类中心为起点的顺时针方向的哈密尔顿线段的长度。

在确定了邻居网络区半径和邻居能量车后，所在区域的所属能量车会根据两种不同的特殊情况与邻居车进行不同的协作：在第一种情况下，所属能量车将会返回基站进行自身能量补充，此时会将所有的充电请求发送给邻居能量车，当所属能量车能量补充完毕返回网络后，所属能量车和邻居能量车会进行任务再划分，即邻居能量车将后半充电请求发送给所属能量车，此时两能量车不会再接收来自邻居子区域的充电请求；在第二种情况下，所属能量车无法为不能服务节点进行能量补充，所属能量车会将这部分不能服务的充电请求发送给邻居能量车，邻居能量车在接收到这部分充电请求后，将其加入到自己的任务队列重新进行规划，将重新规划后仍然不能服务的充电请求再此返还给所属能量车。

随着时间推移，系统不断运行，我们考虑到的一种情况，当所属能量车与邻居能量车经过大量通信和任务的转发后，所属能量车和邻居能量车的任务队列和服务范围的重复覆盖率将大大提高。由于每次任务转发和所属能量车返回基站再返回服务的网络子区域的过程中，都相当于是由邻居能量车暂时将服务区域部分扩大或者成倍扩大，而邻居能量车的任务队列也会兼容了原所属能量车任务队列的部分或者全部。所以在这种情况下，针对这两个子区域而言，相当于彼此交融并且合成了一个大的子区域，而该大的子区域是由两辆无线能量车同时为区域内的所有的节点进行服务的，我们将这种情况称之为网络的退化或者是回溯。而退化与回溯的区别取决于系统的性能变化，如果网络局部性能变得更差则称之为退化，对于网络局部性能的其他变化情况，我们统一视为网络的回溯。那么，无论是网络的回溯情况还是网络的退化情况虽然是避免不了的，但是却是我们不想看到的情况，而且我们可以通过一定的机制对此进行改善。而在这里，我们提

出了一种区域再划分的方法来解决这两种情况，即将两个或者若干个融合的网络子区域重新划分为单独的子区域，为区域内的传感器节点重新分配直接服务的能量车，即为每个区域从融合的两辆或者若干辆能量车中重新分配所属能量车和邻居能量车。

表 3.3 区域再划分算法

Tab. 3.3 Domains re-dividing algorithm

Algorithm 2 Domains Re-dividing Algorithm
<p>INPUT: Subdomain set Ω'</p> <p>OUTPUT: New set Ω''</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: $K \leftarrow \Omega'$; 2: New node set N'; 3: for $k \leftarrow 1$ to Ω' do 4: Get clustering center P_k; 5: Add nodes to N'; 6: end for 7: for $i \leftarrow 1$ to N' do 8: Calculate distances between N_i to all P_k; 9: Choose the nearest one as P_j; 10: Add N_i to Ω_k; 11: Refresh P_j by Equation (3.5) and Equation (3.6); 12: end for 13: for $k \leftarrow 1$ to Ω' do 14: Add Ω_k to Ω''; 15: end for 16: return Ω'';

根据上述情况我们可以知道，区域再划分机制是需要触发条件的，即当两个网络子区域的任务的重叠率达到一定程度的时候，就会引起网络的退化或者回溯情况，导致这两个网络子区域服务的实质变成是融合成了一个大的网络子区域。而网络的任务重叠率，可以体现在无线能量车之间的通信任务数目的占比，当一个无线能量车委托给邻居能量车的任务数目占原任务队列的比值越高时，说明两个子区域之间的兼容情况越严重，网络子区域的任务重叠率越高，越倾向与网络的退化和回溯情况。这里，根据定义我们给

出任务重叠率 ξ 的计算公式，即所属能量车和邻居能量车共同服务的请求任务数目与所属能量车的任务总数的比值，具体公式如 3.10 所示：

$$\xi = \frac{|\psi_i \cap \psi_j|}{|\psi_i|} \quad (3.10)$$

其中， ψ_i 为所属能量车任务队列集合， ψ_j 为邻居能量车任务队列集合。而 ξ 值因子区域不同而不同。而下面给出若干个网络的区域再划分算法，如表 3.3 所示。根据上述算法可以看出，区域再划分的过程是将待划分的子区域看作一个大的区域，之后对该大区域进行新的区域划分，在确立已知的原聚类中心的基础上，将大区域内的传感器节点划分到新的子区域内。而当节点的分配完成后，则确定了新的子区域。再划分示意图如图 3.3。

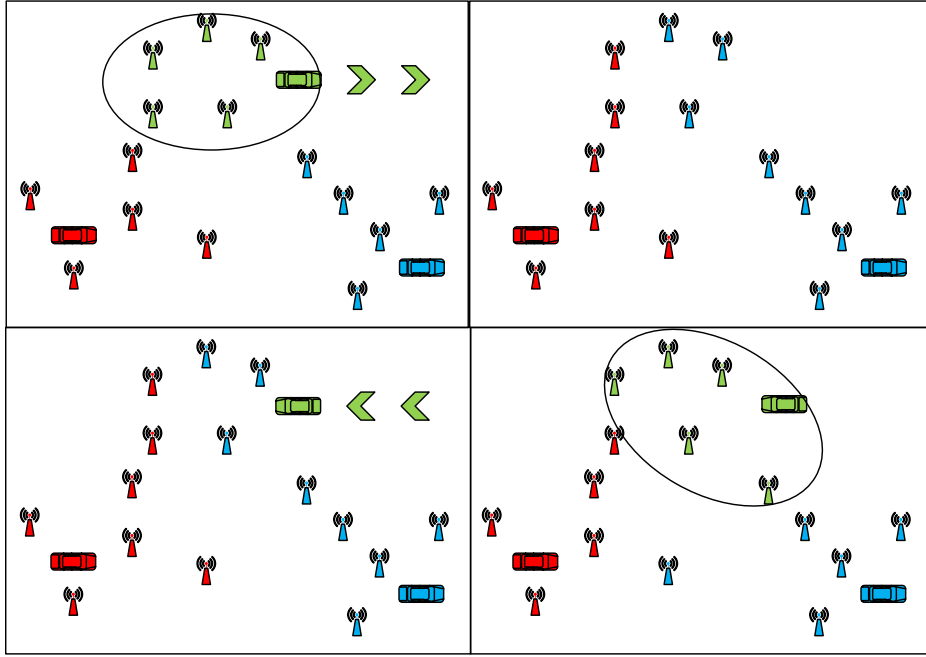


图 3.3 再分区示意图

Fig. 3.3 Schematic diagram of re-dividing

经过上述的区域划分和区域再划分，达到了一定范围内的能量车之间的相互协作，并且对网络其他部分的工作无影响，保证网络的整体稳定性的同时，达到局部性能的提高。

3.3.4 模式转换与目标节点选择

在整个充电过程中，最核心的一步是无线能量源在接收请求后，如何从众多请求中通过评估标准和调度算法选择一个合适的充电请求进行服务，为发送该请求的节点进行能量补充。根据前面章节的问题分析，我们可以看出该调度算法的执行是由节点产生充电请求、无线能量车服务请求驱动的，而在之前章节我们也提到了无线可充电传感器网络中的按需式充电，在这种模式下，网络系统在足够长的时间后会达到一种稳定的状态，即充电请求的产生与服务达到平衡。根据这种特点，我们可以将网络系统的工作状态划分为两种情况：非稳定状态和稳定状态。而针对网络系统存在两种的两种状态，本文设计出一种带有模式转换的充电调度算法，而对应网络系统的两种状态分别设计出加速模式和稳定模式。而在本算法中，提出一种综合考虑时间、空间和网络结构的评估优先级来对每个节点的服务优先级的值进行评估，通过优先级的排序选择一个节点作为目标充电节点，无线能量车将立即移动为该节点进行能量补充。

而算法模式的转换情况主要体现在算法对网络工作状态的判定和算法模式转换的触发。根据对网络系统的分析，我们可以推测出，当网络处于稳定状态时，充电请求的产生率与服务率接近相等的状态，那么在无线能量车的任务队列中，请求任务单位时间因请求增加的任务数和因完成减少的任务数接近相等，因此，在网络处于稳定状态时，无线能量车的任务队列中的任务数目近似不变。由此，我们可以根据能量车的任务队列的长度变化判断网络系统是否处于稳定状态，并且随之地进行调度算法模式的转换。

而无论在加速模式还是稳定模式，算法的基础都是考虑时间、空间和链路结构这三方面的影响因素。

在时间影响因素方面，最直接的影响参数就是节点剩余工作时间。节点的剩余工作时间是指在当前时刻，节点在不接受能量补充的情况下，节点能量在正常工作状态下消耗至 0 这一过程中所用的时间。值得注意的是，在计算节点剩余时间时，并不与能量警戒值相关联，两个概念相互之间不存在因果关系。而根据定义，这里给出节点剩余时间的计算公式，如下所示：

$$t_i = \frac{e_i}{q_i} \quad (3.11)$$

其中， t_i 表示第 i 个节点的剩余工作时间， e_i 表示当前时刻，第 i 个节点剩余的能量， q_i 表示第 i 个节点的正常工作状态下的能量消耗率。

在空间影响因素方面，最直接的体现就是节点到接收该节点充电请求的无线能量车之间的距离。而对于不同的无线能量车来说，到同一节点的距离是不完全相同的，所以对于不同的无线能量车而言，同一节点在空间因素上需要考虑到的影响程度是不相同的，

而这一事实将会应用到任务请求的传递和区域的划分上，详细内容将会在后面的章节进行介绍。根据网络中已知的节点信息和无线能量车的信息，很容易可以计算出任一节点 i 到任一无线能量车 j 的距离，具体的计算公式如下所示：

$$d_i^j = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3.12)$$

其中， x_j 和 x_i 分别表示无线能量车 j 的横坐标和节点 i 的横坐标， y_j 和 y_i 分别表示无线能量车 j 和节点 i 的纵坐标。

而在网络结构方面，这里考虑到的一个实际因素就是节点的重要性。在网络中，一个节点的重要性可以体现在多个方面，而最具代表性的就是节点在网络拓扑中的边数，即该节点的邻居节点的数目，定义为 l_i 。邻居节点的数目越多，说明该节点越具有中心作用，对网络影响程度越大，在网络拓扑中的重要程度也越大。

在确定上述三个影响因素后，我们考虑将三种影响因素综合考虑形成一个统一的标准进行评估。然而，由于每个无线能量车在网络中所处的地理位置和在网络中的影响区域不同，我们应当从每个无线能量车的调度出发，作为第一视角对节点进行考量和评估。那么首先，需要明确的一点是，在配备多车的无线传感器网络中，某一个无线能量车能够接受网络中所有的无线传感器网络中的充电请求的情况出现的概率是微乎其微的，所以根据网络的动态情况，每个无线能量车需要维护的请求的任务队列都是不相同的。因此，每一个无线能量车只需要对它自身请求队列 ψ_j 中的任务请求进行评估和排序即可，从而选择出下一个目标节点作为移动目标，为其进行能量补充，保证节点继续工作。

在设计评估标准和评估计算公式时，时间属性和空间属性是具有单位的差异和属性上的差异的，所以我们考虑到对这两个属性进行归一化处理并预先完成离散化，以达到优先级的一种划分，而节点链路数本身是离散的，所以我们将节点链路数进行微调即可参与到公式的设计中。下面分别给出时间和空间的归一离散化计算公式。对于时间因素，我们定义节点 i 在无线能量车 j 的队列中的时间优先级 $\lambda_j^t(i)$ 来作为时间因素的衡量比较标准，具体公式如下所示：

$$\lambda_j^t(i) = \left\lceil \frac{t_i - t_-}{t_+ - t_-} \right\rceil = \left\lceil \frac{(t_i - t_-)|N|}{t_+ - t_-} \right\rceil \quad (3.13)$$

其中， t_+ 和 t_- 分别定义为剩余工作时间最大的节点的剩余工作时间的值和最小的值。通过分析可以看出，当节点的剩余工作时间越小时，公式计算得出数值越小，而实际上我们知道，剩余工作时间越小，节点需要充电的迫切性就越高。所以当计算得出值越小时，节点的空间优先级越高。同样的，我们在空间因素上定义节点 i 在无线能量车 j 的队列中的空间优先级 $\lambda_j^d(i)$ 来作为空间因素的衡量比较标准，具体公式如下所示：

$$\lambda_j^d(i) = \left\lceil \frac{d_i - d_-}{\frac{d_+ - d_-}{|N|}} \right\rceil = \left\lceil \frac{(d_i - d_-)|N|}{d_+ - d_-} \right\rceil \quad (3.14)$$

其中, d_+^j 和 d_-^j 分别定义为距离无线能量车 j 距离最大的节点的距离值和最小的距离值。通过分析可以看出, 当节点距离无线能量车越近时, 公式计算得出的数值越小, 而实际上, 对于距离越近的节点, 无线能量车更倾向于为其充电, 因为在移动中的消耗会更小, 所以公式计算值越小, 节点的空间优先级越高。

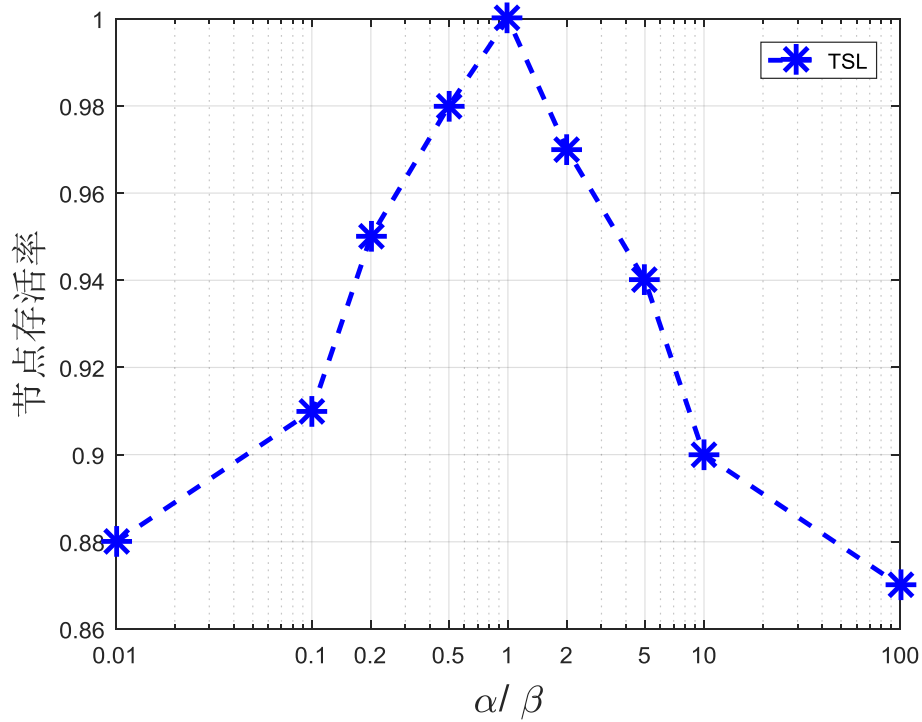


图 3.4 评估权重值

Fig.3.4 Evaluation weight

在此基础上, 本文提出了评估优先级的概念作为无线能量车评估请求任务的标准, 也是所谓筛选节点的依据。在这里, 定义节点 i 在无线能量车 j 的任务队列中的评估优先级为 $\lambda_j^e(i)$, 具体的计算公式如下:

$$\lambda_j^e(i) = \alpha \lambda_j^t(i) + \beta \lambda_j^d(i) + \frac{\gamma}{l_i} \quad (3.15)$$

其中, α 、 β 、 γ 分别为时间评估权重、空间评估权重和链路评估权重, 这三个权重值与网络的设置相关, 而三个权重值的取值可以通过预实验来进行验证。例如, 当 $\gamma = -1$ 时, α 、 β 的比值关系图如 3.4 所示。

通过观察我们可以得出，当节点的剩余工作时间越小、到无线能量车距离越近或邻居节点数越多时，评估优先级的计算数值会越小，节点的评估优先级则越高，这符合我们充电筛选的逻辑。

经上述分析，这里对算法中无线能量车对任务请求和节点的筛选部分进行描述：

在无线传感器网络中的某一时刻，无线能量车 j 的请求任务队列 ψ_j 中具有 $|\psi_j|$ 个充电任务请求，无线能量车对请求任务队列中的每个节点计算其评估优先级，选择出优先级数值最小，优先级最高的请求任务节点，并将该节点作为下一个目标充电节点。详细算法如表 3.4。

分析表中算法可以看出，在整个过程中最核心的部分是评估优先级的计算，在这里综合考虑了时间、空间、网络结构这三方面因素，每个无线能量车都得出一个根据评估优先级而确定的任务队列，并依次从中选择目标节点，而其中不可服务的节点将会被发送给邻居能量车。若邻居能量车仍然无法为其服务，该节点将等到所属能量车完全空闲时才能对其进行能量补充，将其唤醒。

而由于网络最后会趋近于一个平稳状态，网络的能量补充和消耗达到一个平衡值，系统达到一个稳定状态，无线能量车的任务队列长度到达一个稳定状态，很难出现完全空闲的状态。不可服务的节点可近似看作不可被唤醒的节点。

而当无线能量车的任务队列长度稳定时，算法将从加速模式切换到稳定模式。在稳定模式下，算法将规划当前队列中的请求任务作为任务组整体服务，而将局部问题转化为一个已知有限个点的位置进行路径规划的问题，以达到在比较短时间对所有的能够满足的请求节点进行能量补充。而在规划的过程中能量车在非特殊情况下不会改变规划好的路径上的下一个充电目标节点，由于每次服务完一个节点后能量车都会重新计算每个任务请求的评估优先级。

当且仅当新进节点评估优先级高于原目标节点且不影响原目标节点时将新节点插入到服务队列中，作为下一个目标节点。而判定是否插入的条件如下公式：

$$\text{action} = \begin{cases} \text{insert}, & (t_n - \frac{d_n^j + d_{n/m}}{v} - \frac{c^{(n)} - e_m}{q_m} \geq 0) \\ \text{none}, & (t_n - \frac{d_n^j + d_{n/m}}{v} - \frac{c^{(n)} - e_m}{q_m} < 0) \end{cases} \quad (3.16)$$

其中， n 节点为原目标节点， m 节点为新节点。则算法的稳定模式可由算法表述，如表 3.5 所示，在算法的稳定模式中，算法的初始情况是建立在加速模式的一个结果中的，而根据对队列长度 $|\psi_j|$ 的判断，算法切换到稳定模式。在稳定模式中，算法会新建一个路径集合 L_j ，经过判断后生成最后的路径。

表 3.4 基于评估优先级的调度算法

Tab. 3.4 Scheduling algorithm based on evaluation priority

Algorithm 3 Evaluation Priority Scheduling Algorithm
<p>INPUT: Domains Ω_k, WMC set W</p> <p>OUTPUT: Target nodes N_i for each WMC</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: Initialize parameters: α, β, γ; 2: Initialize WMCs; 3: $K \leftarrow W$; 4: for $i \leftarrow 1$ to K do 5: Add W_i to Ω_j; 6: end for 7: for $j \leftarrow 1$ to K do 8: Get task queue ψ_j; 9: for $i \leftarrow 1$ to ψ_j do 10: Calculate t_i by Equation (3.10); 11: Calculate d_i^j by Equation (3.11); 12: Calculate $\lambda_j^t(i)$ by Equation (3.12); 13: Calculate $\lambda_j^d(i)$ by Equation (3.13); 14: end for 15: for $i \leftarrow 1$ to ψ_j do 16: Calculate $\lambda_j^d(i)$ by Equation (3.14); 17: end for 18: Sort ψ_j; 19: Get top node: N_i; 20: Test N_i by Equation (3.8); 21: if serve then 22: return Target N_i; 23: else 24: Send to neighbor WMC_k; 25: Re-select in ψ_j; 26: end if 27: end for

表 3.5 稳定模式下的算法

Tab. 3.5 Scheduling algorithm in stable mode

Algorithm 4 Stable Mode of Scheduling Algorithm
INPUT: WMC set W
OUTPUT: Travel path L_j
1: Initialize parameters: α, β, γ ;
2: Initialize WMCs;
3: Judge by $ \psi_j $;
4: Run according to Algorithm 3;
5: for $j \leftarrow 1$ to $ W $ do
6: New path L_j ;
7: for N_p, N_q in ψ_j do
8: Select min d_p^q not in L_j ;
9: Add d_p^q to L_j ;
10: end for
11: end for
12: Select node by Equation (3.16);
13: Get L_j ;

图 3.5 所示为网络的一个流程示意图。

为了方便对算法的理解，此处隐去网络中的基站。在示意图的初始阶段中，网络处于正常工作中的某一状态，此时，网络中存在若干已经发送请求的传感器节点，根据节点在网络中的位置情况，来自节点的充电请求已经保存在对应的无线能量车中。根据无限能量车维护的任务队列，无线能量车开始根据算法中的机制为节点进行能量补充并规划路径。

而在无线能量车工作的某一时刻，网络中有新的节点请求将产生。在该模式下，在可抢占的时刻，无线能量车会将新加入的请求节点加入到任务队列中，对于符合判定标准的节点，为节点选择一个合适的充电时机，并根据节点的拓扑变化，微调之前设计好的充电路径。其中，标记颜色的点为请求节点，对应颜色的能量车维护该节点的任务，箭头标记的节点为新加入的节点。

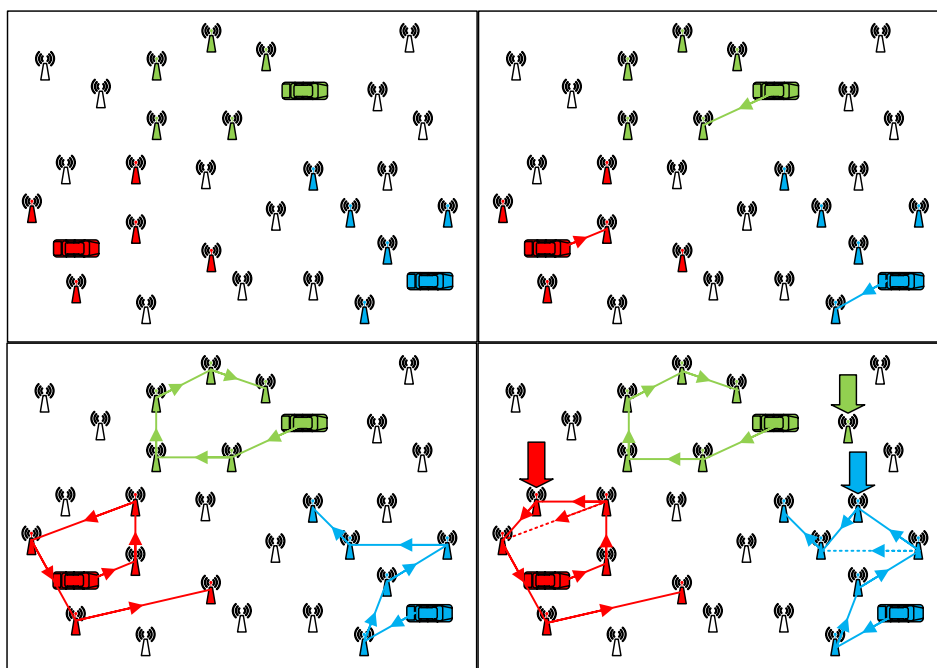


图 3.5 流程示意图

Fig. 3.5 Flow diagram

3.3.5 利用排队论分析算法

排队论(Queuing Theory)，是研究系统随机聚散现象和随机服务系统工作过程的数学理论和方法，又称随机服务系统理论，为运筹学的一个分支。排队论，或称随机服务系统理论，是通过对服务对象到来及服务时间的统计研究，得出这些数量指标（等待时间、排队长度、忙期长短等）的统计规律，然后根据这些规律来改进服务系统的结构或重新组织被服务对象，使得服务系统既能满足服务对象的需要，又能使机构的费用最经济或某些指标最优。它是数学运筹学的分支学科。也是研究服务系统中排队现象随机规律的学科。广泛应用于计算机网络，生产，运输，库存等各项资源共享的随机服务系统。排队论研究的内容有 3 个方面：统计推断，根据资料建立模型；系统的性态，即和排队有关的数量指标的概率规律性；系统的优化问题。其目的是正确设计和有效运行各个服务系统，使之发挥最佳效益。

在研究过程中我们发现，该问题的研究过程可以近似看作排队论其中的一个多服务问题的模型的演化问题。在整个无线传感器网络系统中，每一个无线能量车可以看作一个服务窗口，而传感器节点的充电请求可以看作待服务的顾客。充电请求的到达可以近似看作服从带有参数 λ 的泊松分布，而服务时间服从于带有服务率 μ 的负指数分布，因此该算法下的服务模型可以看作是 $M/M/n/TSL$ 排队论模型。而在该模型中，当系统

的服务能力大于系统的请求生成能力时，系统存在稳定状态，即，当系统的服务率大于总的请求到达率时系统最后会趋近于稳定，用一个不等式关系来表示如公式 3.16 所示：

$$\frac{\lambda}{n\mu} < 1 \quad (3.16)$$

其中， λ 表示请求到达率， μ 表示每个窗口的服务率， n 表示窗口的个数。

由此，我们可以得出该系统的状态流图，如下图 3.6 所示：

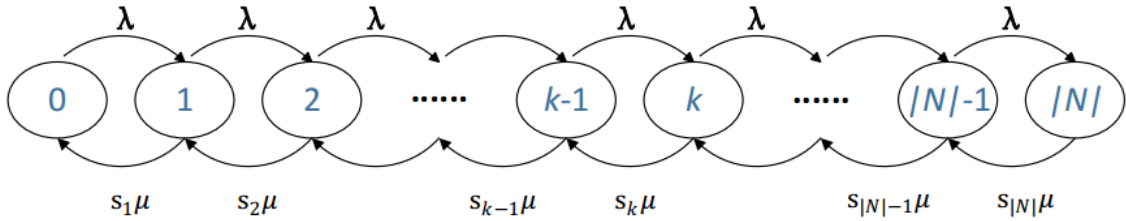


图 3.6 状态流图

Fig. 3.6 State flow-chart

在图 3.5 中，每个状态中的数字 (0,1,2...|N|) 代表的是当前状态下系统当中的充电请求数，而由于网络中节点的总个数为 |N| 个，所以系统中充电请求的最大值为 |N|。而 s_k 代表在当前状态下，工作的无线能量车的个数，而该数值通过理论来计算的公式如 3.17 所示：

$$s_k = \begin{cases} \sum_{i=1}^k \frac{C_{k-1}^{i-1}}{2^{k-1}} i, & (0 < k < |W|) \\ \sum_{i=1}^{|W|} \frac{C_{|W|-1}^{i-1}}{2^{|W|-1}} i, & (|W| \leq k \leq |N|) \end{cases} \quad (3.17)$$

其中， C 表示组合数。

而通过排队论知识可以计算出不同状态图的概率，即任一取一个时刻作为观测时刻，系统处于某一状态的可能性大小。根据排队论，我们可以得出下面关于系统状态 k 和该状态的概率 P_k 公式：

$$P_k = \frac{\rho_1^k}{\prod_{i=1}^k s_i} P_0 \quad (3.18)$$

其中， $\rho_1 = \frac{\lambda}{\mu}$ ，而根据概率归一化原理，我们又可以的到下面算式：

$$\sum_{k=0}^{|N|} P_k = 1 \quad (3.19)$$

由此，我们可以计算得出：

$$P_0 = \left(\sum_{k=0}^{|N|} \frac{\rho_1^k}{\prod_{i=1}^k s_i} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

通过排队论的一些性质，我们可以得到系统内一些属性的理论数值，例如，平均等待队列长度 L_q ：

$$L_q = \sum_{k=0}^{|N|} k P_k \quad (3.21)$$

单能量车情况下的服务时间：

$$T_s^k = \begin{cases} \frac{d_1^j}{v} + \frac{c^{(n)} - e_1}{q_r}, & (k = 0) \\ \frac{d_{k/k-1}}{v} + \frac{c^{(n)} - e_1}{q_r}, & (k > 0) \end{cases} \quad (3.22)$$

平均服务时间：

$$\bar{T}_s = \sum_{k=0}^{|N|} T_s^k P_k \quad (3.23)$$

4 仿真实验结果分析

在本次研究中,我们将本文算法与经典 Pushwait 和 Hierarchical 算法进行对比试验,而在试验过程中我们模拟了两种实验场景:足球场和带环境障碍。而两种场景的网络结构的区别是,足球场无障碍,节点分布更加均匀,网络结构呈网状;带环境障碍由于障碍中无法布置节点,只能在周边布置节点,网络结构呈带状或环状。在实验过程中我们着重关注并对比了多个方面的系统性能,并且在两个不同的场景中比较的性能的侧重点不相同,接下来,将分别详细介绍两个实验的具体情况和实验结果,并对实验结果进行分析。

4.1 足球场场景

在足球场仿真实验中,考虑到足球场这一场景的特点,适合做常规的性能比较和研究,我们着重考虑在外界干扰较小的情况,尤其是地形障碍方面几乎无影响的情况下,算法的基本情况和个方面的性能所能达到的基本情况。

4.1.1 实验参数

本场景仿真实验的实验设定如下表 4.1 所示:

表 4.1 足球场实验参数
Tab. 4.1 Parameters of football field

参数名称	实验数值
网络范围	300m*150m
节点数目	40
能量车数目	4
节点能量消耗率	0.02-0.03 mAh/s
能量车移动消耗	10 mAh/s
能量车充电消耗	500 mAh/s
充电效率	0.90
节点能量警戒值	0.30
能量车移动速率	5 m/s

如表所见，在本次足球场的实验中，模拟的网络范围是 $300\text{m} \times 150\text{m}$ 的无线传感器网络，在网络中布置的传感器节点的数目为 40 个，配备的无线能量车的数目为 4 辆，节点的能量消耗率设置的范围是 $0.02\text{--}0.03 \text{ mAh/s}$ ，无线能量车在移动状态下的能量消耗率为 10 mAh/s ，在充电状态下能量消耗率为 500 mAh/s ，充电效率为 0.90 ，节点能量警戒线的设置为 0.30 ，能量车的移动速度设定为 5 m/s 。实验场景模拟图如下图 4.1 所示：

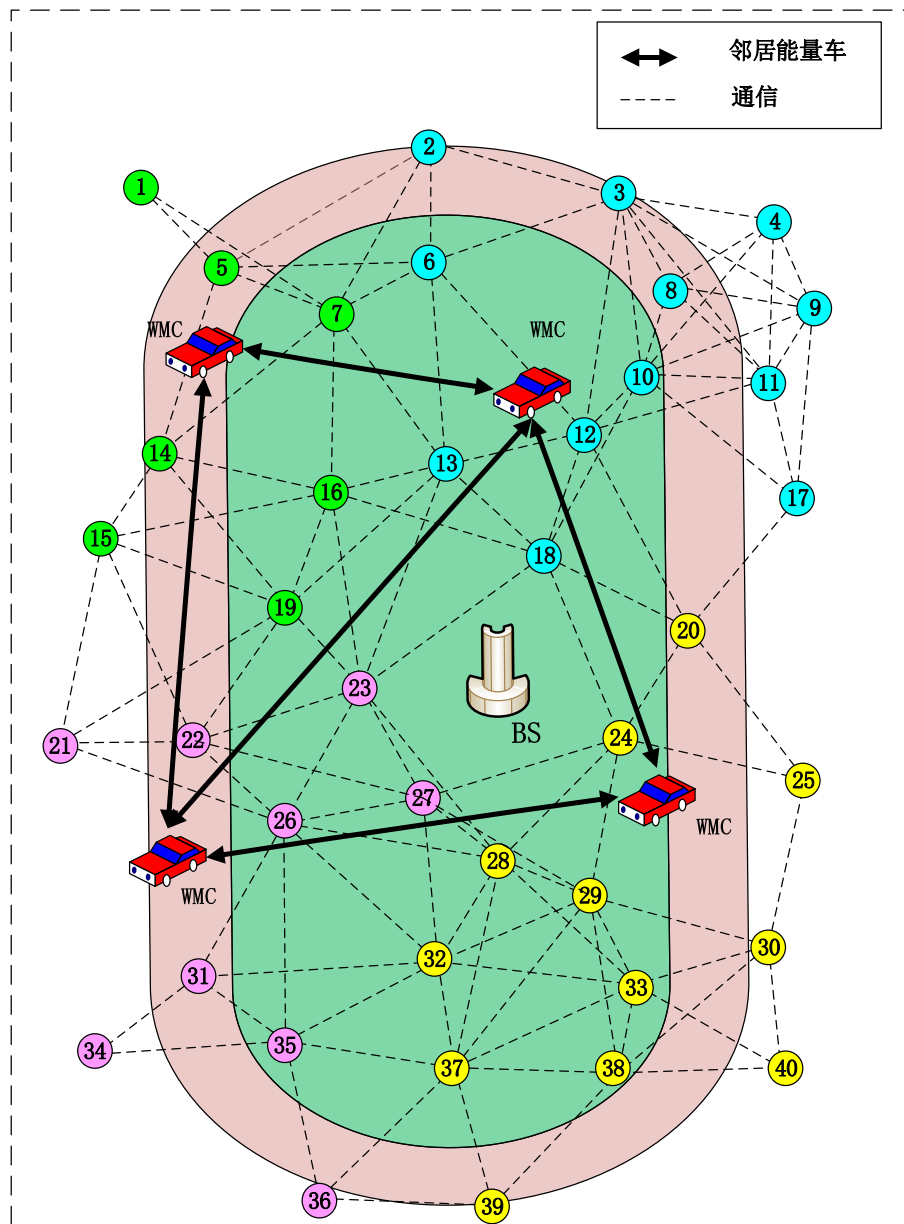


图 4.1 足球场地模拟图

Fig. 4.1 Simulation of the football field

4.1.2 实验结果

在足球场的实验场景中，实验主要对比了三方面的性能：吞吐率、能量利用率和节点存活率。其中能量利用率和节点存活率是本算法优化的目标，所以将这两项算法评估指标放在了外界影响较小的足球场实验环境，这有助于更真实地探究出算法的理论化性能的水平。具体的实验结果图分别如下：

如图 4.2 所示，该图是三个算法在能量利用率上的对比结果：

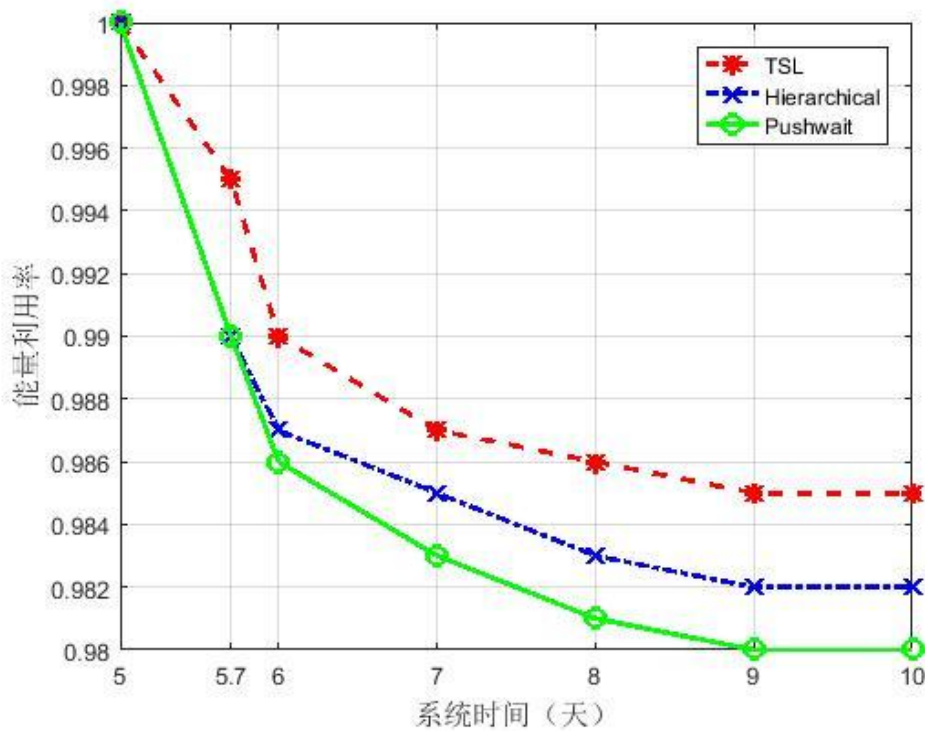


图 4.2 能量利用率对比

Fig. 4.2 Comparison of energy usage efficiency

如图 4.2 所示，当系统时间运行到 5.7 天时，曲线开始偏转，说明此时开始有大量的节点发出充电请求，从这一时刻开始无线能量车开始了充电行为，而伴随着充电行为，将有能量随着无线充电本身的效率而流失，随着时间的增加，能量利用率曲线下滑斜率变大，说明，此时无线能量车在网络中移动的距离随之增大，同时可能伴有节点的能量消耗为零。继续随着时间推移，曲线斜率绝对值逐渐减小，曲线区域平缓，说明系统趋于稳定的工作状态，节点能量的获取和网络中充电和移动的消耗达到了一种平衡的状态，

而整个网络系统的运行也随之变得稳定。通过观察三条曲线可以发现，本文提出的 TSL 算法的能量利用率方面略高于其他两个算法，而另外两个算法中，Hierarchical 算法小优。在网络开始时，曲线间彼此的差距逐渐增大，但随着时间推移，网络整体趋于平稳，彼此之间的差值也趋近于一个稳定的数值。

如图 4.3 所示，该图是三个算法在节点存活率上的对比结果：

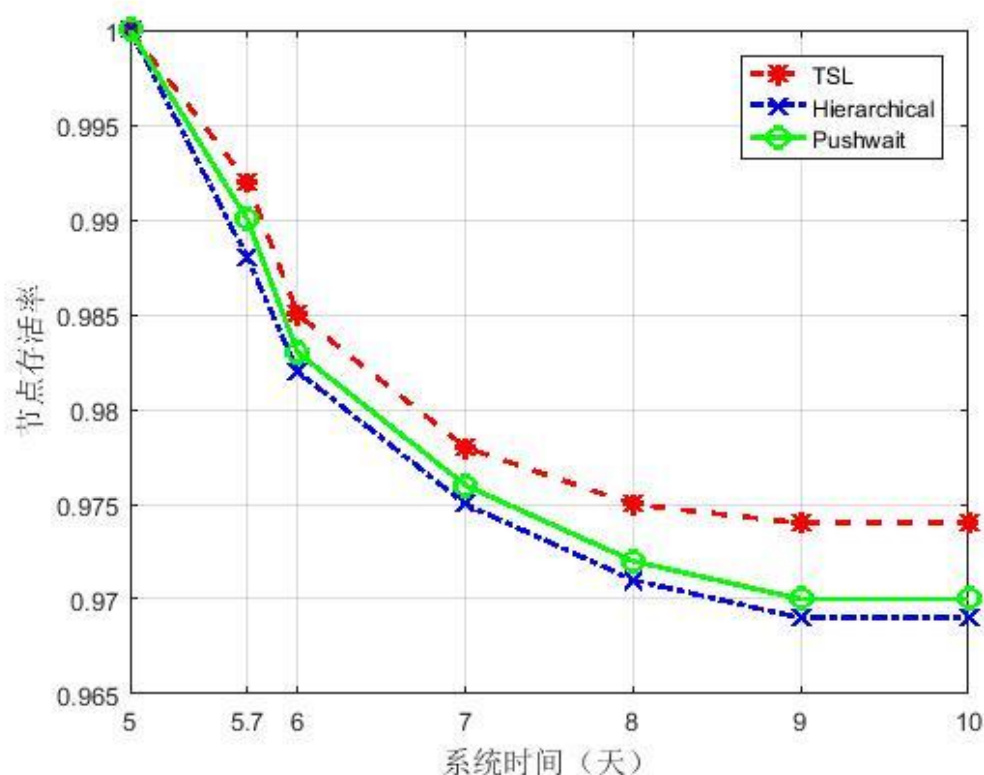


图 4.3 节点存活率对比

Fig. 4.3 Comparison of survival rate

如图 4.3 所示，当系统时间运行到 5.7 天时，曲线开始偏转，说明此时开始有大量的节点发出充电请求。由于节点间的能量消耗率范围在 0.02-0.03 mAh/s，数值在范围上比较接近，因此会出现节点充电请求大规模爆发的情况，然而无线能量车的服务能力有限和通信的延迟，所以导致部分节点能量耗尽，但随着系统继续运行，系统最终趋于稳定。而在整个网络运行的过程中，TSL 算法的节点存活率一直较优，而另两个算法中 Hierarchical 算法略高。在系统的开始阶段，三条曲线同时衰减，随着网络系统的继续运行，曲线同样趋于平缓，最后达到系统的稳定状态。

如图 4.4 所示，该图是三个算法在吞吐率上的对比结果：

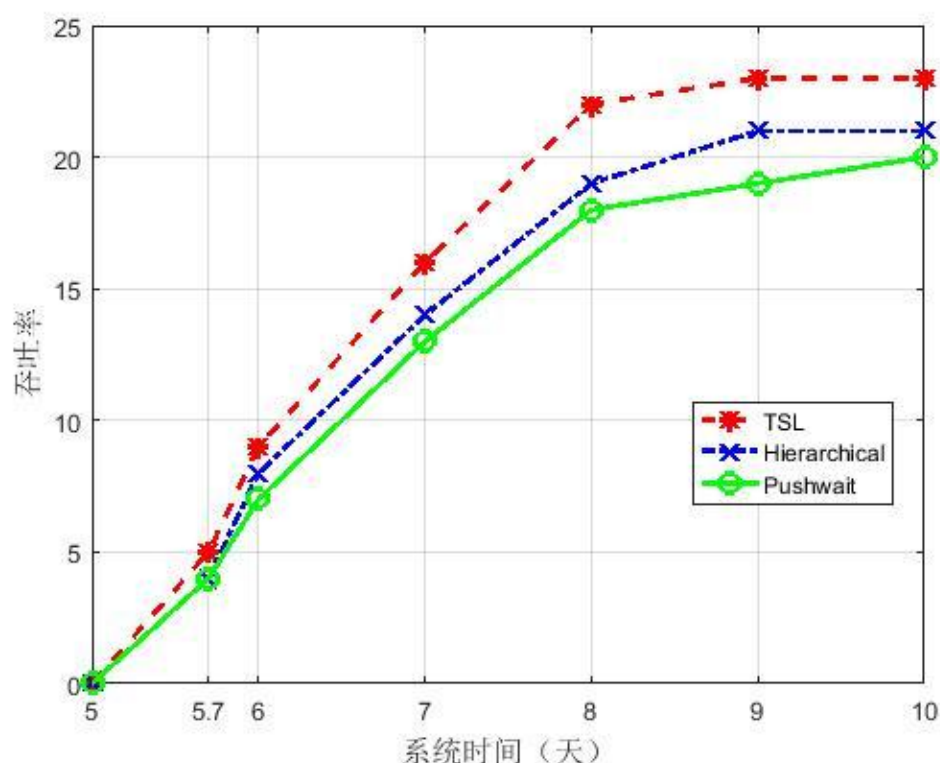


图 4.4 吞吐率对比

Fig. 4.4 Comparison of throughput

吞吐率本身是计算机领域的概念，但是现在被许多领域所引申使用。吞吐率是一种关于计算机或数据通信系统(如网桥、路由器、网关或广域网连接等)数据传输率的测度。吞吐率通常是对一个系统和它的部件处理传输数据请求能力的总体评价。例如，一个服务器的吞吐率依赖于它的处理器类型、网络接口卡的类型、数据传输总线的大小、磁盘速度、内存缓冲器的体积，以及软件对这些部件进行管理的有程度。在通信系统中，这个测度通常基于每秒能处理的数据位数或分组的数目，它依赖于网络的带宽和交换部件(如路由器或集线器)的速度。网络上两个端点设备间的吞吐率依赖于计算机、网络接口卡和连接它们的网络。

吞吐率作为一个重要的衡量指标，最主要应用在并行处理上，属于系统结构中最重要一个变量，它的定义是：单位时间的吞吐量，吞吐量是指对网络、设备、端口、虚电路或其他设施，单位时间内成功地传送数据的数量（数据总量以比特、字节、分组等测量）。

吞吐率在性能测试中指单位时间内在网络上传输的数据量。是衡量网络性能的主要指标。

所以在这里，我们引用吞吐量这一指标来衡量我们传感无网络的指标。如图 4.4 所示，三条曲线同时呈现上升趋势，上升的速率先快后慢，最后仍然是趋于稳定。这符合网络的运行趋势，在网络运行初期，系统中并无节点发送充电请求，所以吞吐率为零。当系统继续运行，有能量消耗率相对较大的节点的能量消耗到达警戒值，开始发出充电请求，此时无线能量车的任务队列中只有少数请求任务，而无线能量车的服务能力此时要大于节点充电请求的到达率。随着系统继续运行，有越来越多的传感器节点发送充电请求，而此时的请求到达率要高于无线能量车的服务率，同时由于无线能量车在旅途上消耗时间，有部分节点可能会出现能量耗尽的情况。而到了系统的后期，剩余节点数目、充电请求到达率和无线能量车的服务率达到平衡，吞吐率数值趋于稳定。而在网络的运行过程中，TSL 算法的吞吐率仍然处于较高的水平。

通过以上实验结果，我们可以得出结论，在足球场这种外界影响较小的环境中，TSL 算法可以收到较好的效果，在吞吐率、能量利用率和节点生存率方面较优于其他两个算法。

4.2 带环境障碍场景

带环境障碍场景是一个受地理因素影响较大的场景，由于节点的配置，在水面无法布置节点。而这一点对于网络最大的影响就是，网络结构不再像足球场场景中那样呈现网状，而是呈现环状或带状。节点分布在网络中处于一种不均匀的状态，在调度过程中，无线能量车所移动的距离要远大于在无阻碍的均匀的网络环境中的情况。在带环境障碍场景下，实验所关注的三个系统性能分别是：任务队列长度、充电成功率和平均服务时间。

4.2.1 实验参数

本场景仿真实验的实验设定如下表 4.2 所示。如表 4.2 所见，在本次带环境障碍的实验中，模拟的网络范围是 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的无线传感器网络，在网络中布置的传感器节点的数目为 30 个，配备的无线能量车的数目为 3 辆，节点的能量消耗率设置的范围是 $0.02\text{--}0.03 \text{ mAh/s}$ ，无线能量车在移动状态下的能量消耗率为 10 mAh/s ，在充电状态下能量消耗率为 500 mAh/s ，充电效率为 0.90，节点能量警戒线的设置为 0.30，能量车的移动速度设定为 5 m/s 。

表 4.2 带环境障碍实验参数
Tab. 4.2 Parameters of surrounding of barrier

参数名称	实验数值
网络范围	100m*100m
节点数目	30
能量车数目	3
节点能量消耗率	0.02-0.03 mAh/s
能量车移动消耗	10 mAh/s
能量车充电消耗	500 mAh/s
充电效率	0.90
节点能量警戒值	0.30
能量车移动速率	5 m/s

实验场景模拟图如下图 4.5 所示：

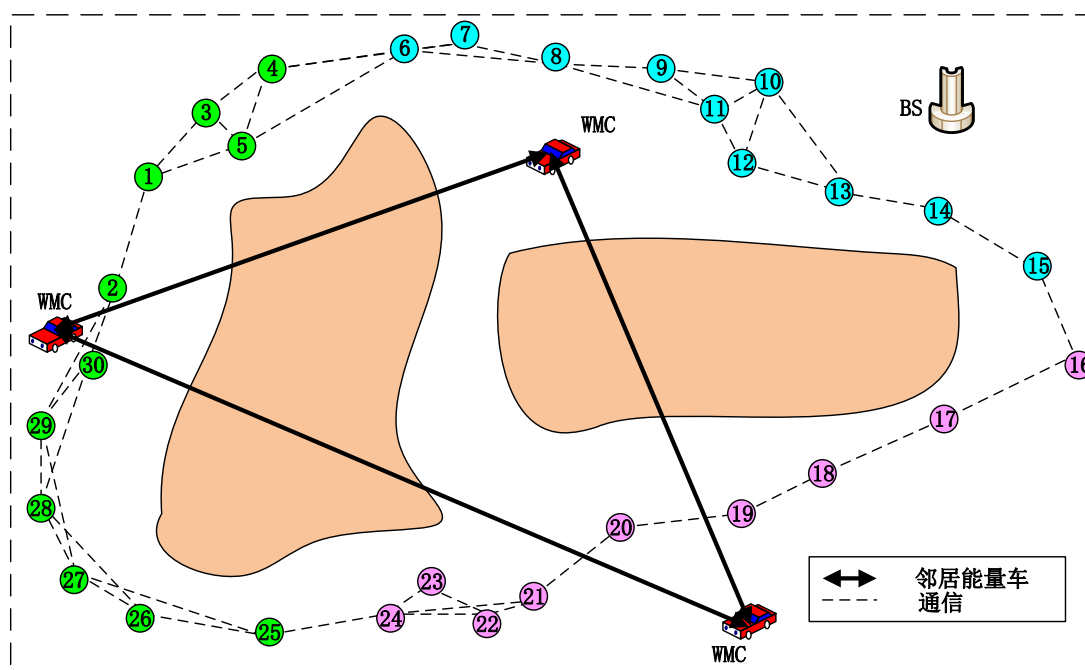


图 4.5 带环境障碍模拟图

Fig. 4.5 Simulation diagram of barrier

4.2.2 实验结果

在带环境障碍的场景下，我们探究在特殊环境下，算法对网络性能的提升程度。即比较网络临界时的性能指标的值，包括实验所关注的三个系统性能分别是：任务队列长度、充电成功率和平均服务时间。

如图 4.6 所示，该图是三个算法在任务队列长度上的对比结果：

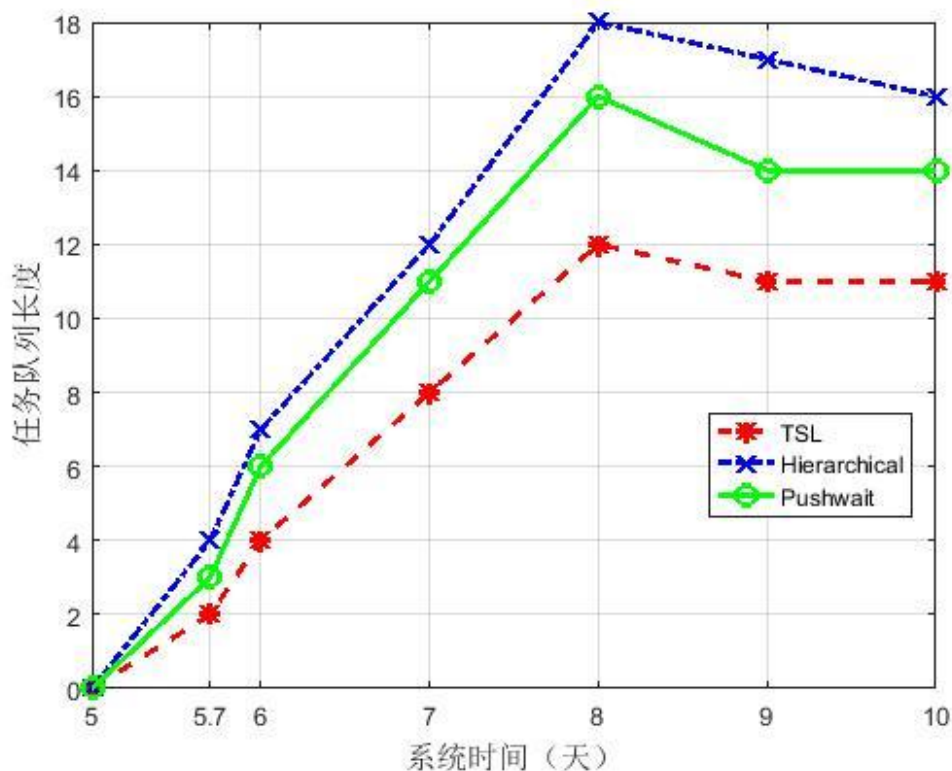


图 4.6 任务队列长度对比

Fig. 4.6 Comparison of task queue

如图 4.6 所示，在系统运行在第 5 到 6 天时，网络中开始有节点发送充电请求。在任务开始产生的初期，由于请求节点数目较小，最开始任务队列的长度也较小，随着系统时间的推移，越来越多的节点开始发送充电请求，并且任务的增长到达率开始增加，无线能量车的任务队列长度随之开始增长，但是增长到峰值时，开始下降，这说明在峰值的时刻有节点由于没有获得能量补充，能量耗尽后就不再继续工作。随着有节点进入休眠状态或者死亡状态，网络中活跃的节点的数目开始减少，发送的充电请求的数目开始减少，无线能量车的任务队列长度开始减小并且趋于稳定，此时，网络的运行状态趋

近于稳定。经过观察可以发现，三个算法普遍具有较大的任务队列长度值，这一点体现了在具有障碍的网络中，同样的算法的性能也会发生变化。然而，队列长度本身反应的是充电请求任务在无线能量车的任务队列中滞留的情况，若最大任务队列长度越小，则反映出网络更强的服务能力和任务处理能力。观察整个曲线可以发现，TSL 算法在整个网络运行过程中都保持着较低的任务队列长度，这体现了该算法的优越性。然而，值得注意的是，Pushwait 算法相比较于 Hierarchical 算法，有更低的任务队列长度，这反应了 Pushwait 算法在带环境障碍这一实验场景下，具有更好的网络性能。然而，这与在足球场环境下的实验结果恰好相反。在足球场仿真实验环境下，Hierarchical 算法表现出来比 Pushwait 算法更好的系统性能。试着去分析，这一问题的所在，Pushwait 算法本身是由一维网络扩展到二维网络的，而带环境障碍这一环境影响下，导致的网络结构呈带状或环状更接近于一维直线的网络环境，因此，可以解释为什么 Pushwait 算法在带环境障碍场景下具有更好的性能。

在图 4.7 中，反映的是三个算法在充电成功率上的对比结果：

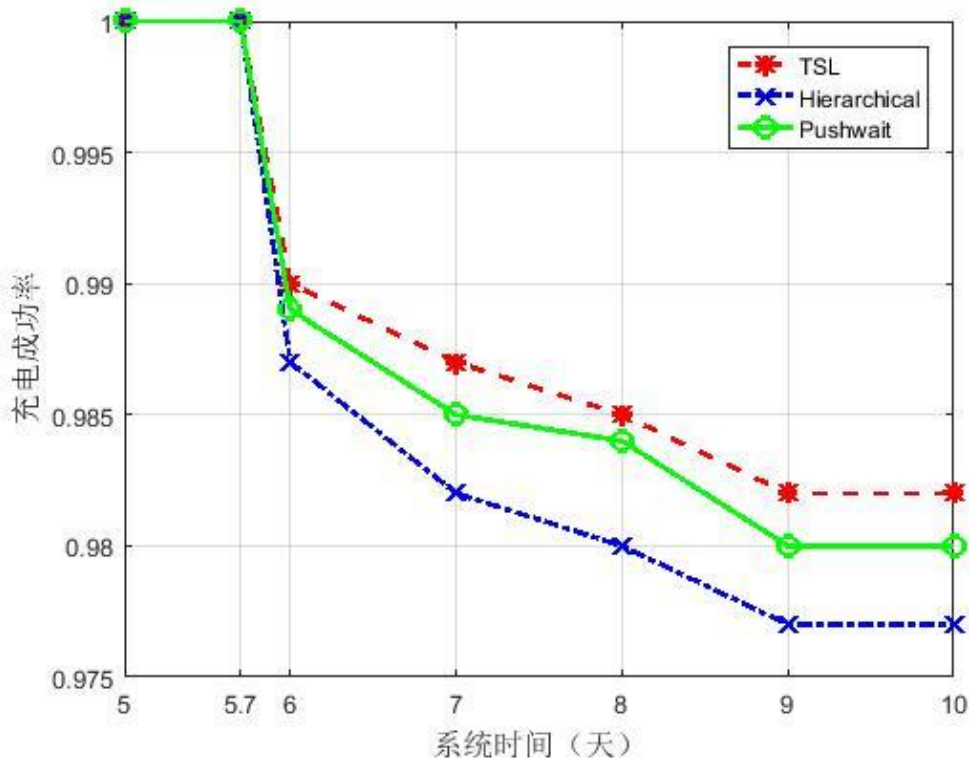


图 4.7 充电成功率对比

Fig. 4.7 Comparison of successful charging rate

在这里给出充电成功率的定义,充电成功率是指在整个传感器网络工作的过程中无线能量车服务的任务请求的总数目与传感器节点发出的请求的总数目的比值,这一性能属性反映了算法的稳定性和链路的稳定性。一个稳定的算法可以保证在正常的工作状态下,传感器节点可以以一个合适的频率发送充电任务请求,而不是导致请求的大规模爆发或者传感器节点的大规模死亡。通过观察图 4.7 可以发现,在网络的初期,由于只有一少部分的节点发送充电请求,而无线能量车很快相应节点的充电请求任务,在短时间内就可以为待充电节点进行能量补充。随着网络系统继续运行,越来越多的传感器节点发送出充电请求,由于无线能量车有限的服务能力,部分请求被滞留在无线能量车的任务队列中,导致未被服务的充电请求和传感器节点越来越多,根据充电成功率的定义,这种情况下出现了许多未成功的充电请求,充电成功率随之降低。当充电成功率降低到一定程度后,不会再继续降低,由于网络趋近于平衡,充电成功率也被稳定在一个固定的数值附近。与任务队列长度类似,充电成功率也反映了网络的服务能力和任务处理能力,而充电成功率越高,则说明在此调度方式下,系统具有更好的性能。而,通过图 4.7 可以看出, TSL 算法在充电成功率方面同样具有较好地表现。

图 4.8 反映了三个算法在平均服务时间上的对比结果。

平均服务时间是指从节点向无线能量车发送充电请求的一刻算起直到该请求被服务,节点能量得到补充的这一时间段的长度。平均服务时间包含了响应时间和充电时间,是二者的总和。而这里的响应时间与计算机中的相应时间有所不同,计算机中响应时间是计算机对用户的输入或请求做出反应的时间。系统响应时间的计算要考虑到用户的数目,用户数目越多,响应时间必须越快,不然就难以保证每一个用户都有可以接受的响应时间。

响应时间和时间片的大小有关,一般情况是:时间片越短,响应时间越快。而在无线充电过程中的响应时间主要是指,无线能量车在接收到传感器节点的充电请求后,到达目标节点所消耗的时间,这一时间值一方面受无线能量车的移动速度影响,另一方面受到调度过程中需要无线能量车行进的距离影响。服务时间越短,证明算法在调度上的合理性越好。

根据图 4.8 所示,在网络的初期平均服务时间开始增加,但随着时间的增加,增长的速率越来越慢,最后趋于一个稳定的值。在网络系统的运行过程中, TSL 保持着更低的平均服务时间。

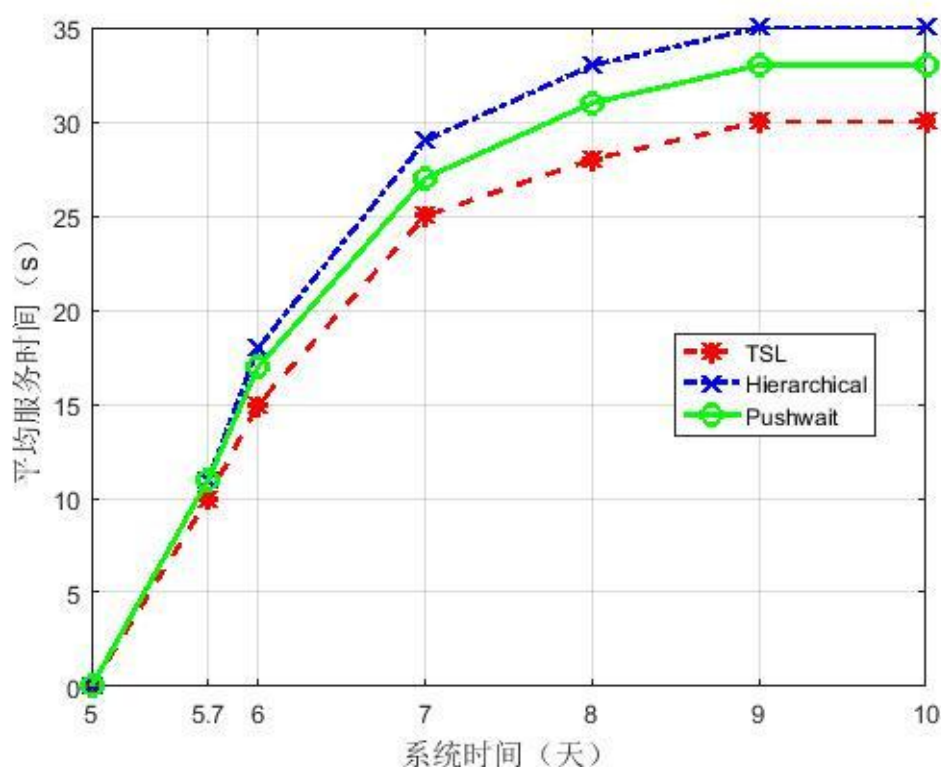


图 4.8 平均服务时间对比

Fig. 4.8 Comparison of average service time

4.3 实验分析总结

在本次研究的实验部分设置了两个场景：足球场场景和带环境障碍场景。在这两个仿真实验场景中，都将本文提出的 TSL 算法与经典 Pushwait 和 Hierarchical 算法进行比较，考察的系统性能包括：吞吐率、能量利用率、节点存活率、任务队列长度、充电成功率和平均服务时间。在不同的场景中，TSL 算法都表现出了更好的性能。而在另外两个算法中，Hierarchical 算法在网状网络结构的足球场场景中具有更好的性能，Pushwait 算法在环状或带状网络结构的带环境障碍场景中具有更好的性能。

结 论

本篇论文提出了一个应用于多能量源无线充电传感器网络的多车实时协同充电调度算法（TSL）。在研究过程中提出具有实际意义的优化目标，并且以优化目标为算法核心，提出新的调度算法。该算法适用于点播式充电架构，首先对整个无线传感器网络通过利用聚类算法的思想进行区域划分，将整个网络区域划分为多个子网络区域，为每个区域指派一个无线能量车作为所属能量车，并且根据邻居区域半径选择出邻居能量车。每个能量车维护自己的任务队列，并通过评估优先级对任务队列进行排序并且选择一个合适的目标节点作为下一个服务节点。在评估优先级的计算过程中，综合考虑了时间因素、空间因素和网络结构的影响。在算法提出后，在两种不同的实验场景中与经典的 Pushwait 和 Hierarchical 算法进行比较。通过实验结果表明，TSL 算法在吞吐率、能量利用率、节点存活率等性能方面都有良好的表现，这也证明了算法的实用性和优越性。

在本篇论文的设计中只考虑到的场景是：整个无线充电传感网络中的节点都是分布在一个平面的空间中，即二维情况，但是在我们的日常生活中，能够满足节点都在一个近似为二维空间的情况还是有限的，而更多的情况则是分布在有高低差的三维空间下。所以，该领域的研究也会陆续转向在三维情况中的研究，利用具有升降功能的设备进行新的调度设计，实现更贴近日常生活无线传感器网络的能量补充方案。

参 考 文 献

- [1] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4):114-124.
- [2] Sharma V, Mukherji U, Joseph V, et al. Optimal Energy Management Policies for Energy Harvesting Sensor Nodes[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4):1326-1336.
- [3] Tan R, Xing G, Liu B, et al. Exploiting data fusion to improve the coverage of wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(2):450-462.
- [4] Lin C, Wu G, Xia F, et al. Energy efficient ant colony algorithms for data aggregation in wireless sensor networks[J]. Journal of Computer & System Sciences, 2012, 78(6):1686-1702.
- [5] Luo H, Tao H, Ma H, et al. Data Fusion with Desired Reliability in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2011, 22(3):501-513.
- [6] Ren P, Wang Y, Du Q. CAD-MAC: A Channel-Aggregation Diversity Based MAC Protocol for Spectrum and Energy Efficient Cognitive Ad Hoc Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2):237 - 250.
- [7] Tang L, Sun Y, Gurewitz O, et al. PW-MAC: An Energy-Efficient Predictive-Wakeup MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]// IEEE International Conference on Computer Communications. 2011:1305 - 1313.
- [8] Peng Y, Li Z, Zhang W, et al. Prolonging Sensor Network Lifetime Through Wireless Charging[J]. Real Time Systems Symposium IEEE, 2010, 41(3):129-139.
- [9] Dai H, Wu X, Xu L, et al. Using Minimum Mobile Chargers to Keep Large-Scale Wireless Rechargeable Sensor Networks Running Forever[C]// International Conference on Computer Communications and Networks. 2013:1-7.
- [10] He L, Gu Y, Pan J, et al. On-demand Charging in Wireless Sensor Networks: Theories and Applications[C]// 2013 IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS). IEEE, 2013:28-36.
- [11] Guo S, Wang C, Yang Y. Mobile data gathering with Wireless Energy Replenishment in rechargeable sensor networks[J]. 2013, 12(11):1932-1940.
- [12] He L, Cheng P, Gu Y, et al. Mobile-to-mobile energy replenishment in mission-critical robotic sensor networks[J]. Proceedings - IEEE INFOCOM, 2014:1195-1203.

- [13] Zhang Y, He S, Chen J. Data Gathering Optimization by Dynamic Sensing and Routing in Rechargeable Sensor Networks[C]// IEEE Communications Society Conference on Sensing and Communication in Wireless Networks. 2013:273-281.
- [14] Cheng P, He S, Jiang F, et al. Optimal Scheduling for Quality of Monitoring in Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(6):3072-3084.
- [15] Dai H, Jiang L, Wu X, et al. Near Optimal Charging and Scheduling Scheme for Stochastic Event Capture with Rechargeable Sensors[C]// IEEE, International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. 2013:10-18.
- [16] Angelopoulos C M, Nikolettseas S, Raptis T P, et al. Efficient energy management in wireless rechargeable sensor networks[C]// ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. ACM, 2012:309-316.
- [17] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. Wireless power transfer and applications to sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(4):140-145.
- [18] Ren X, Liang W, Xu W. Maximizing charging throughput in rechargeable sensor networks[C]// International Conference on Computer Communication and Networks. 2014:1-8.
- [19] Dai H, Wu X, Xu L, et al. Using Minimum Mobile Chargers to Keep Large-Scale Wireless Rechargeable Sensor Networks Running Forever[C]// International Conference on Computer Communications and Networks. 2013:1-7.
- [20] Shu Y, Yousefi H, Cheng P, et al. Near-optimal Velocity Control for Time-bounded Mobile Charging in Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(7):1699-1713.
- [21] Zhang S, Wu J, Lu S. Collaborative Mobile Charging[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(3):654-667.
- [22] Madhja A, Nikolettseas S, Raptis T P. Distributed Wireless Power Transfer in Sensor Networks with Multiple Mobile Chargers[J]. Computer Networks, 2015, 80:89-108.
- [23] He L, Cheng P, Gu Y, et al. Mobile-to-mobile energy replenishment in mission-critical robotic sensor networks[C]// INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE. IEEE, 2014:1195-1203.
- [24] Chen L, Lin S, Huang H. Charge me if you can: charging path optimization and scheduling in mobile networks[J]. 2016:101-110.
- [25] Lin C, Wang Z, Han D, et al. TADP: Enabling temporal and distant priority scheduling for on-demand charging architecture in wireless rechargeable sensor Networks[J]. Journal of Systems Architecture, 2016, 70:26-38.

- [26] Lin C, Han D, Deng J, et al. P2S: A Primary and Passer-by Scheduling Algorithm for On-demand Charging Architecture in Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 8047–8058.
- [27] He L, Kong L, Gu Y, et al. Evaluating the On-Demand Mobile Charging in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(9):1861–1875.
- [28] Wang C, Li J, Ye F, et al. A Novel Framework of Multi-Hop Wireless Charging for Sensor Networks Using Resonant Repeaters[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(3):617–633.
- [29] Shu Y, Kang G S, Chen J, et al. Joint Energy Replenishment and Operation Scheduling in Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1):125–134.
- [30] Liu T, Wu B, Wu H, et al. Low-Cost Collaborative Mobile Charging for Large-Scale Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(8):2213–2227.
- [31] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case[C]// INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE. IEEE, 2012:1350–1358.
- [32] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. On traveling path and related problems for a mobile station in a rechargeable sensor network[C]// Fourteenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc NETWORKING and Computing. ACM, 2013:109–118.
- [33] Xie L, Shi Y, Hou Y T, et al. Making sensor networks immortal: an energy-renewal approach with wireless power transfer[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(6):1748–1761.
- [34] Fu L, Cheng P, Gu Y, et al. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks[J]. 2013, 12(11):2922–2930.
- [35] Li Z, Peng Y, Zhang W, et al. J-RoC: A Joint Routing and Charging scheme to prolong sensor network lifetime. [C]// IEEE International Conference on Network Protocols, ICNP 2011, Vancouver, Bc, Canada, October. 2011:373–382.
- [36] Madhja A, Nikolettseas S, Raptis T P. Hierarchical, collaborative wireless energy transfer in sensor networks with multiple Mobile Chargers ☆[J]. Computer Networks, 2016, 97:98–112.
- [37] Rout R R, Krishna M S, Gupta S. Markov Decision Process-Based Switching Algorithm for Sustainable Rechargeable Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8):2788–2797.

- [38] Deng R, Zhang Y, He S, et al. Maximizing Network Utility of Rechargeable Sensor Networks With Spatiotemporally Coupled Constraints[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5):1307-1319.
- [39] Liang W, Xu W, Ren X, et al. Maintaining Large-Scale Rechargeable Sensor Networks Perpetually via Multiple Mobile Charging Vehicles[J]. Acm Transactions on Sensor Networks, 2016, 12(2):1-26.
- [40] Dong L, Shu W, Li X, et al. Three Dimensional Comprehensive Analytical Solutions for Locating Sources of Sensor Networks in Unknown Velocity Mining System[J]. IEEE Access, 2017, 5(99):11337-11351.
- [41] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion:a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]// ACM, 2000:56-67.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

1 mTS: Temporal- and Spatial-Collaborative Charging for Wireless Rechargeable Sensor Networks with Multiple Vehicles, Chi Lin, Zhiyuan Wang, Jing Deng, Lei Wang, Jiankang Ren, and Guowei Wu, IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2018), 2018, 录用。（本硕士学位论文第三章）

致 谢

从题目开题到论文完成历时了几个月的时间，本篇毕业论文的工作也终于圆满结束。在此撰写论文的过程中，虽然经历了各种各样的困难，但是幸运的是这一路走来都有老师和同学的陪伴。所以在这里我还要对他们表达由衷的感谢。

首先要诚挚地感谢我的导师。老师作为我的研究生导师同时也是本篇论文的指导教师，在日常的生活中是我的良师益友，本篇论文也是在老师耐心的指导下完成的。在这两年的研究生的学习中，老师在生活上给予了我无微不至的照顾和关怀，在实验室中的大事小情老师都挂记在心里，为我们更换各种设备，尽可能地完善硬件条件，为我们营造了良好的学习和科研的环境。在科研上，老师的培养理念针对于每个同学都有不同的要求和指导，可谓是因材施教。在研究课题的过程中，老师经常是指引了大体的方向，而细节的设计则是由学生完全自由地发挥，而在提出一个新的算法和方案时，老师对其中的每一步给予提示，循循善诱，激发学生的实践能力和创新能力。而在最终的解决方案敲定时，同样是由老师为设计进行把关，从多个角度评价该算法的优劣，及时指出待提高的角度和可行性。在这两年的相处中，最敬佩的是老师的敬业精神和一丝不苟的科研态度，而从中学到的东西足够我们受用一生。

其次，我还要感谢室友和实验室的同学们。在毕业设计过程中，偶尔遇到困难，进度一筹莫展的时候，总有室友的鼓励和实验室同学们的帮助。让我能够稳下心来继续思考问题的关键所在，保障按照计划继续顺利进行。

此外，还要感谢在该领域做出研究贡献的前辈们。在阅读相关的文献时，我从前辈们的精妙设计中不断接受启发，每一个闪光点都让我叹为观止，每一篇文章都让我受益匪浅，从中真的学到了很多。

感谢我的老师、实验室同学和许多帮助过我的人，在研究生生活中的照顾和陪伴，让我的研究生生活丰富多彩，而这段经历将成为我人生中宝贵的财富，也将成我难忘的回忆。

由于个人的学术水平还存在局限，论文之中可能还存在诸多有待改进的地方，在此希望各位老师能为本篇论文提出宝贵的意见和建议！

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，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。

学位论文题目：_____

作者签名：_____日期：_____年____月____日

导师签名：_____日期：_____年____月____日