



上海电机学院  
硕士学位论文

智能电网中无线可充电传感器网络充  
电规划研究

作者 俞立春  
校内导师 吕红芳 副教授  
校外导师 贾廷纲 教授级高级工程师  
研究方向 电机与智能电器

2019 年 01 月 10 日

# 上海电机学院

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《智能电网中无线可充电传感器网络充电规划研究》，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，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：俞立春

日期：2019 年 4 月 2 日

# 上海电机学院

## 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，同意学校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。本人授权上海电机学院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。

本学位论文属于

不保密☐.

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：俞立春

指导教师签名：[Signature]

日期：2019 年 4 月 2 日

日期：2019 年 4 月 2 日

分类号 ..TM732..

密 级 .....

U D C ..621.3..

编 号 ..11458..

上海电机学院硕士专业学位论文

# 智能电网中无线可充电传感器网络充 电规划研究

## Research on Charging Planning for Wireless Rechargeable Sensor Networks in Smart Grid

硕 士 研 究 生	俞立春
学 号	166001010210
校 内 导 师	吕红芳
企 业 导 师	贾廷纲
工 程 领 域	电气工程
申 请 学 位	工程硕士
所 在 单 位	电气学院
答 辩 日 期	2019 年 1 月 10 日
授 予 学 位 单 位	上海电机学院

## 智能电网中无线可充电传感器网络充电规划研究

### 摘 要

随着无线可充电传感器网络技术的不断发展，其应用领域也越来越广泛。近年来，无线可充电传感器网络在智能电网中扮演着极其重要的角色，长期有效地监测电力设备的运行状态，对输电线路的故障预警以及定位，提高了智能电网的安全性以及稳定性。但传感器节点所携带的能量有限，为了使网络能够长期有效地工作，设计合理的充电优化方案对提高网络的稳定性具有重要的现实意义。

目前，对于无线可充电传感器网络充电规划方面已取得一些成果，大部分学者将移动充电车作为充电器，进行充电规划研究，有效地提高了充电车的能量利用率以及延长了网络的生命周期。本文在此基础上，研究充电车对监测智能电网的传感器网络充电规划问题，具体研究如下：

(1)介绍无线可传感器网络在智能电网中的应用，对无线可充电传感器网络的充电规划方案进行分析，阐述了移动充电问题以及求解方法，针对实际情况，介绍了不同的移动充电车充电策略。

(2)针对网络节点因能量耗尽失效的问题，给出了在无线可充电传感器网络静态模式下，小规模无线可充电传感器网络的充电方案。针对蛙跳算法后期易陷入局部收敛以及青蛙质量不高的问题，引入柯西变异算子以及精英策略，提出一种用于小规模网络的ACSFLA(Accelerated Shuffled Frog Leaping Algorithm，ACSFLA)算法，对充电方案进行优化。仿真结果显示：该算法求解速度快，有效地提高了充电车的能量利用率，降低了充电车行驶距离。

(3)在大规模无线可充电传感网络动态模式下，建立带时间窗的充电优化方案，并将启发式算法以及ACSFLA算法结合设计一个用于大

规模网络的多充电车优化算法 MMCSA(Multiple Mobile charger Charging Scheduling Algorithm, MMCSA), 采用最小充电数量以及节点位置凸包对初始路径进行构造, 并提出充电车行驶距离增量最小以确定节点的最佳插入位置, 最后通过 AFSFLA 算法对路径进行重优化, 从而实现完整的动态多充电车充电规划。仿真实验结果表明: 本文所提出的 MMCSA 算法不仅求解速度快, 而且有效的减少了充电车使用数量, 降低了移动能耗, 提高了能量利用效率。

**关键词:** 无线传感器, 能量利用率, 蛙跳算法, 路径优化, 时间窗

## **Research on Charging Planning for Wireless Rechargeable Sensor Networks in Smart Grid**

### **ABSTRACT**

With the continuous development of wireless chargeable sensor network technology, its application field is more and more extensive. In recent years, wireless rechargeable sensor network plays an extremely important role in smart grid. It can effectively monitor the operation status of power equipment for a long time and improve the security and stability of smart grid by early warning and location of transmission line faults. However, the energy carried by sensor nodes is limited. In order to make the network work effectively for a long time, it is of great practical significance to design a reasonable charging optimization scheme to improve the stability of the network.

Currently, some achievements have been made in the charging planning of wireless rechargeable sensor networks. Most scholars use mobile charging vehicles as chargers to conduct charging planning research, which effectively improves the energy rate of the charging vehicle and prolongs the life cycle of the network. Based on this, this paper studies the charging network to charge sensor network monitoring planning for smart grid. The specific research is as follows:

(1) This paper analyzes the application of wireless sensor network in smart grid, and explores the mobile charging problem and solve method based on the charging scheme of wireless rechargeable sensor network. Additionally, different charging strategies of mobile charging vehicle are introduced according to the actual situation.

(2) Aiming at the problem of network node failure due to energy exhaustion, the charging scheme of small-scale wireless rechargeable sensor network in static mode of wireless rechargeable sensor network is

proposed in this paper. Considering the problem that the frog leaping algorithm is easy to fall into local convergence and the frog quality is not high, the Cauchy mutation operator and the elite strategy are introduced to propose an ACSFLA (Accelerated Shuffled Frog Leaping Algorithm, ACSFRA) algorithm to solve the optimization problem of charging. The simulation results show that the algorithm solves the problem quickly, effectively improves the energy utilization rate of the charging car and reduces the driving distance of the charging car.

(3) In the dynamic mode of large-scale wireless rechargeable sensor network, this paper proposes a charging optimization scheme with time window combining the heuristic algorithm and ACSFRA algorithm to design a multi-charging vehicle optimization algorithm MMCSA (Multiple) for large-scale network. Mobile charger Charging Scheduling Algorithm (MMCSA) adopts the minimum charge quantity and node position convex hull to construct the initial path, and proposes that the charging vehicle travel distance increment is minimum to determine the optimal insertion position of the node. Finally, the path is re-optimized by the AFSFLA algorithm to achieve a complete dynamic multi-charging vehicle charging plan. The simulation results show that the MMCSA algorithm not only solves the optimization problem fast, but also effectively reduces the number of charging vehicles, reduces the mobile energy consumption, and improves the energy utilization efficiency.

**KEY WORDS:** wireless sensors, energy efficiency, shuffled frog leaping algorithm, path optimization, time window



## 目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 无线可充电传感器网络概述	1
1.2.1 无线可充电传感器网络	1
1.2.2 无线可充电传感器网络的应用现状	2
1.3 无线可充电传感器网络充电规划研究现状	3
1.4 无线可充电传感器网络充电规划挑战	5
1.5 本文主要工作	6
第二章 无线可充电传感器网络应用及充电规划	7
2.1 引言	7
2.2 智能电网与无线可充电传感器网络	7
2.2.1 智能电网	7
2.2.2 无线可充电传感器网络在智能电网中应用	9
2.3 移动充电规划方案	11
2.3.1 不同网络规模的充电规划分类	11
2.3.2 充电规划方法	12
2.4 移动充电问题与求解	13
2.4.1 问题描述	13
2.4.2 问题求解方法	14
2.4.3 精确算法	15
2.4.4 传统启发式算法	16
2.4.5 现代启发式算法	17
2.5 移动充电策略	18
2.6 本章小结	20
第三章 基于改进的蛙跳算法的单移动充电车充电规划	21
3.1 引言	21
3.2 网络结构与优化问题描述	21

3.2.1 网络模型	21
3.2.2 节点工作模式	22
3.2.3 充电车工作模式	24
3.2.4 充电优化问题描述	25
3.3 算法的设计	27
3.3.1 蛙跳算法	27
3.3.2 ACSFLA 算法	28
3.3.3 算法实现	30
3.3.4 算法程序流程图	31
3.4 实验结果与分析	32
3.4.1 环境参数设置	32
3.4.2 性能指标	32
3.4.3 仿真结果分析	33
3.5 本章小结	36
<b>第四章 大规模无线可充电传感器网络充电规划</b>	<b>37</b>
4.1 引言	37
4.2 网络模型与优化问题描述	37
4.2.1 网络模型	37
4.2.2 多充电车工作模式	38
4.2.3 问题描述	38
4.2.4 基本假设	39
4.2.5 充电车的充电优化模型	39
4.3 MMCSA 算法设计	42
4.3.1 基于节点能量阈值的时间窗计算	42
4.3.2 基于最少充电车的路径构造	44
4.3.3 充电车行驶距离增量最小的最佳插入位置	46
4.3.4 ACSFLA 算法对充电车充电的路径优化	46
4.4 MMCSA 算法实现	50
4.5 仿真实验	51
4.5.1 性能指标	51
4.5.2 参数设置	52
4.5.3 仿真结果	53

4.6 本章小结·····	57
第五章 总结与展望·····	59
5.1 总结·····	59
5.2 展望·····	60
参 考 文 献·····	61
致 谢·····	67
攻读硕士学位期间取得的研究成果·····	69

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

物联网的出现改变了人类的社会生产和生活方式<sup>[1]</sup>，加速了社会智能化的发展，它是将智能识别技术与信息和通信技术广泛地融合于互联网中，因此众多专家对无线传感器网络<sup>[2]</sup>(Wireless Sensor Networks, WSNs)技术越来越重视。起初，WSNs 是应用于军事上，通过 WSNs 监控战场的实时情况和预知入侵状况<sup>[3,4]</sup>等。并且 Deborah Estrin 教授揭开了传感器网络研究的序幕<sup>[5]</sup>。将智能化的网络节点带入 WSNs 中，并且在基础设施的状态检测、生态监测以及军事国防领域中得到了广泛地应用。

随着科学技术不断地创新和发展，无线传感器网络将嵌入式计算机、无线通信和数据处理等技术融合在一起，并且利用不同功能的传感器节点之间的合作对环境进行实时监测和信息采集，再将这些数据通过计算机处理之后，最后传送到用户界面终端。并且，无线传感器网络被认为是当下最有前景的技术之一。

近年来，智能电网的概念越来越普及，无线传感器网络技术与智能电网也变得密不可分，它对于智能电网的发展给予了理论支撑以及技术支持<sup>[6]</sup>。通常将无线可充电传感器网络节点布置在智能电网中，对电网进行长期监测，能够在第一时间得知电网的运行状况以及设备状况。例如在智能电网变电站上，将传感器节点分布在需要监测的地方，各节点之间采用单跳或者多跳的方式将所检测的信息传输到用户端，确保变电站的良好状况，从而提高智能电网的稳定性<sup>[7]</sup>。但对于传感器节点来说，自身的能量是有限的，最终会因为能量耗尽而停止工作。这对传感器网络稳定运行会产生重大影响，且对智能电网的安全性以及稳定性也有所波及。为了避免网络节点能量耗尽而停止工作的问题，因此，近年来对于不同规模的传感器网络的充电规划问题得到了大量学者的关注和研究<sup>[8]</sup>，最佳的充电方案能够让无可充电传感器网络长期有效地监测智能电网的运行状态，保证电网的安全，因此对于无线可充电网络充电规划问题研究具有重要的意义。

### 1.2 无线可充电传感器网络概述

#### 1.2.1 无线可充电传感器网络

融合无线充电技术的 WSNs 称为无线可充电传感器网络<sup>[9]</sup>(Wireless Rechargeable

Sensor Networks, WRSNs), 是一种新型的无线传感器网络, 与 WSNs 相比, 在节点方面, WRSNs 所用的传感器节点尺寸更小, 提高了使用灵活性; 对于网络方面来说, 提高了网络可拓展性; 在成本方面, WRSNs 则更加便宜。并且在许多领域都有着广泛地应用, 例如在军事、医疗、救灾等领域都有所涉及。它的出现给人们生活带来了方方面面的影响, 人们根据需求通过传感器节点对各种环境进行监测, 实时监控环境的变化, 将监测的数据通过节点逐步地传递到用户端, 并进行评估判断, 给人们社会生活带来了巨大的安全和方便。无线可充电传感器网络技术被 MIT 称为改变世界的十大新技术之一<sup>[10]</sup>。

无线可充电传感器网络通过将数据作为核心以及采用能耗低的动态拓扑结构, 来增强网络的可靠性, 并且无线可充电传感器网络集成了传统无线传感器网络的优点, 通过结合无线能量补充技术<sup>[11]</sup>, 来弥补和完善传统无线传感器网络的不足之处:

1) 安全性。当传感器节点分布在特殊或者危险的环境中, WRSNs 则不需要人为地去完成节点的电池更换以及维护, 只要远距离地利用外在的充电设备给予节点充电, 这不仅保证了人们的安全, 也实现了 WRSNs 的稳定运行。

2) 网络维护成本。在以往传感的 WSNs 中, 将一次性电池安装在节点内来维持节点监测以及信息的传递功能的能量, 在节点电池能量耗尽之前, 需要及时更换, 若在传感器节点分在恶劣环境中, 这对于更换电池将是一项艰巨的任务, 而 WRSNs 则可以利用能量传输技术对节点能量补充来使网络维护成本变低。

3) 社会环境。与传统的无线传感器网络相比较, 对于 WRSNs 只需充电器对节点进行能量补充, 无需频繁对节点更换电池, 减少了废弃电池的产量, 从而降低对环境污染的影响。

4) 网络稳定性。对于传感器节点能量有限问题上, 传统的网络需要不断的更换电池来维护节点的持续工作, 经常出现节点不及时更换而导致网络不稳定甚至出现瘫痪情况, 而 WRSNs 改善了这一情况, 提高了网络运行的稳定性。

5) 良好的服务。在传统的 WSNs 中, 人们通过能量管理手段来缓解节点能量有限的问题, 降低网络的能量消耗, 核心思想是对节点的工作时间进行优化调度, 有时工作, 有时不工作, 然而这对网络的服务质量造成了严重影响。而 WRSNs 则可以延长节点执行监测任务时间, 在需要的时间内节点可以处于持续的工作的状态, 提供更加优质的服务。

### 1.2.2 无线可充电传感器网络的应用现状

随着工业技术不断发展, 无线可充电传感器技术也变得越来越成熟可靠<sup>[12]</sup>, 发

展的规模也越来越大，目前在医疗、环境、工业、交通以及物流等领域，取得了良好的应用效果，具体应用状况<sup>[13]</sup>如下：

1)在医疗方面，无线可充电传感器节点可以做的很小，将其植入病人体内，可以快速知道病人的病情状况<sup>[14]</sup>，及时做出相应的治疗方案。由于采用无线充电技术，则无需考虑节点能量耗尽失效的问题，给医疗护理带来巨大的方便性。

2)在环境方面，由于工业不断发展，生态环境也变的越来越差，结合 WRSNs 的特点，可以将节点部署到一些恶劣环境中，来长期有效地监测环境变化，收集和传递数据，及时对监测的环境做出绿化方案。

3)在工业方面，由于计算机网络技术的飞速发展，工业生产也开始面向智能化，由此无线可充电传感器网络技术必不可少，对生产设备的监控，以及快速的传达指令，智能化操控生产线，实现只用计算操作就可以完成一线的流水线生产<sup>[15]</sup>，提高了生产效率。对于一些危险工业生产来说，提高了工人的个人保障。

4)在交通方面，通过 WRSNs 对马路上的车辆行驶状况以及路况进行监测，实时远程监控，对车速限制的监控，以便于减少交通事故，并且 WRSNs 具有无需考虑节点布置在特殊环境的优点，可以在交通系统中任何想要的监测的位置进行部署节点，以便于实现现代化智能交通。

5)在物流方面，结合射频识别技术（Radio Frequency Identification, RFID）和 WRSNs 技术对货物不定时地监测，传递运输过程中货物的温度、位置以及其他状况信息<sup>[16]</sup>，根据采集的信息及时进行反馈操作，保证货物的质量，尤其在运输贵重物品时，提高了物流行业的可靠性以及实现物流系统智能化。

### 1.3 无线可充电传感器网络充电规划研究现状

近年众多学者在小规模无线可充电传感器网络中研究了单充电车的充电方案，将最小化充电代价或最大化网络效用作为主要目标，来设计合适的充电方案。而其中网络效用是指能够实现数据采集、目标检测和追踪等效用；充电代价是指充电车所消耗的总成本以及充电车在为网络节点充电过程中所消耗的总能量。

文献[17]基于单电车来实现无线可充电传感器网络的充电规划设计，其中网络部分节点是以不变的速率持续产生数据，并将产生的数据发送到基站，若这些数据无法传输到基站，则此时称网络死亡。文章为了让网络生命周期最大化，考虑了网络路由以及充电车的充电策略。在路由方面，通过采用参数的路由策略，来调节传感器节点的负载均衡和最小能量之间的关系，采用启发式方法以及联合优化方法来解决这个问题。但是，文中并没有考虑充电车在充电过程中所消耗的时间以及能量的

问题。文献[18]充电车不仅可以为网络节点充电，还可以在充电回路中在某一个节点处收集周围的网络节点的信息数据，即将充电车当作一个移动基站。文章以最大化整个无线可充电网络的效用值为优化目标，考虑流约束、能量均衡约束、电量约束、带宽约束及充电车在某节点的停留时间的约束，其中将网络中每个传感器节点在充电车完成一轮充电调度时，节点收集的数据总量的二阶可导非减凹函数定为效用函数，通过设计一个分布式的方案来解决该优化问题。但是，文中的求解方法仅用了传统的启发式算法，求解过程较为复杂，并且得到的解并不一定是最优的。

不仅如此，在大规模网络中大部分采用多充电车联合充电来设计充电规划方案，以最小化充电车的数量或最大化充电车能量利用率以及充电效率为优化目标，能量为约束，来实现多个充电车相互配合为网络节点进行充电。

文献[19]考虑网络规模较大时，单个充电车的所携带的能量有限，当网络节点分布在一条直线上时，充电车能够行驶的最远距离也有限，单个充电车不能够给予远处网络节点充电。因此文章通过多个充电车之间无损能量交换来协同充电，前驱的充电车能量可以通过后备的充电车进行能量补给，使得前驱的充电车移动的更远，以此来逐级传送能量，在充足的充电车数量时，让最前方的充电车能够达到任何位置，且同时给予网络节点充电。文献[20]采用最小权重哈密尔顿回路的策略，将文献[21]中的研究成果应用到二维传感器网络中。文献[22]采用多个充电车为在智能电网监测的传感器网络节点进行充电，其中每一辆充电车可为充电范围内所有网络节点进行能量补充。文章先通过线性规划法来确定充电车为网络节点最佳充电位置，然后以充电车和节点距离关系来进行分簇，最后对于每个簇中构造最短的哈密尔顿回路，每辆车沿着构造的回路中的节点进行充电。以上文献没有考虑充电车在尽可能多的给节点充电时所剩余的能量，造成充电车的能量没有得到充分利用。

在充电车自身携带能量有限方面，文献[23]考虑网络节点能耗相同，且充电车在充电过程中移动需要的能量和为节点充电的能量是共享的能量，让充电车为尽可能多的网络节点给予充电。且在充电范围内网络节点，充电车可以同时充电，因此该问题则可以转换成覆盖 TSP 问题（Covering Salesman Problem），即以覆盖最多的网络节点为目标来规划一条充电回路。文章先通过 PSO 算法来确定充电车为网络节点充电的圆心位置；然后以充电车能量为约束，利用 LKH 算法来构造遍历这些圆心的最小 TSP 回路，若充电车能量不足够给予下一节点充电，则减少前一步所覆盖的网络节点数目；重复此过程，且充电车的总能量始终大于充电调度的总能耗。文献[24]利用单个充电车节点进行能量补充，且充电车的为节点充电时间以及充电过程中的移动时间一定。文章通过假定充电车的总的充电时间，以最大化监测的总效用

为目标，来设计合适的充电方案。文章采用贪心策略和随机策略来初步确定待充电的网络节点；然后构造能够遍历所有网络节点的最短密尔顿回路，并以贪心策略来安排各个网络节点的充电时间；判定网络效用是否最大化，若当前的网络效用能够继续增加，则继续增加网络节点，重复此过程直到没有节点加入。文献[25,26]研究了多充电车如何协作充电，规划合理的充电路径，使得充电车充电效率最高，延长网络生命周期。文献[27]将充电车分为两类，一类直接对网络节点进行充电，另外一类是对前一类的充电车进行能量补给，通过两者的联合充电，来提高网络效用。以上文献并没有考虑到充电节点的停止工作的时间，因而在充电调度过程中会出现节点死亡现象。

## 1.4 无线可充电传感器网络充电规划挑战

对于研究无线可充电传感器网络充电规划，其主要目的是尽量避免网络节点因能耗耗尽而停止工作，从而影响网络的监测功能，甚至导致大面积网络瘫痪。而纵观已有的学术研究中，大部分是利用移动充电设备来对网络节点进行能量补充。近年，一部分学者研究以移动充电车作为充电器，来执行充电任务，并且对充电车的调度进行研究，达到延长网络生命周期。对于充电规划研究主要包括两个部分，第一个是 WRSNs 系统中的硬件设施<sup>[28,29]</sup>，主要针对充电车自身携带的最大能量以及运用充电车的数量，其次是基站的功能和位置分布以及网络节点的传输和能耗方式。第二个是针对充电车所采取的充电策略，即一轮充电调度内，充电车从基站出发，给予节点充电，然后回到基站进行自身能量补给，在此过程中研究充电车如何选取网络节点的选取和规划充电路线。

综上所述，将无线可充电传感器网络充电规划问题以及所面临的挑战归结于以下两个方面：

1) 针对网络硬件方面，考虑网络节点空间分布随机性、节点执行任务时所产生的能耗不均衡性、基站的位置以及数量的多少都将归入充电规划研究范围内。为了提高网络效用以及网络运营的经济性，现有的研究成果与节能技术相结合，对节点能量管理进行研究，这类规划研究转换成 NP 问题的研究，从而变得更加复杂。对于求解这类问题，往往无法得到最优解，且求解难度非常大。

2) 针对充电车充电策略方面，以确保节点不因能量耗尽而失效为前提<sup>[30,31]</sup>，将提高充电车的能量利用率和延长网络生命周期作为主要目标。对于 WRSNs 来说，对于给予网络节点充电的带有较多的约束条件限制，且对充电车自身也存在约束，只有在这些约束下，来设计出合理的充电规划方案，在理想的状态下，使得 WRSNs 中不



存在节点死亡失效的情况，提高网络节点的存活率，延长网络生存周期<sup>[32,33]</sup>。并且还需考虑网络规模，结合自身的充电能力来设计充电策略，然后优化充电车行驶路径，来提高充电效率。综合以上因素，网络充电节点的选取以及充电路径的规划成为研究的核心问题。

## 1.5 本文主要工作

综合以上所述，本文所研究的无线可充电传感器网络充电规划问题，主要针对网络规模的大小且保证节点不因能量耗尽而停止工作的情况下，建立两种不同的优化方案，并设计两种算法对方案进行优化，本文具体的研究内容如下：

第一章：绪论。首先介绍了无线可充电器网络的背景，根据应用领域和研究现状，来分析目前充电规划面临的挑战，最后对本文主要内容进行安排。

第二章：无线可充电传感器网络应用及充电规划。介绍了智能电网以及无线可充电传感器网络在智能电网中的应用；接着阐述 WRSNs 中充电规划分类以及三种经典的规划方法；然后研究充电规划问题与车辆路径问题之间的关系，介绍了目前常用的求解算法；最后根据不同网络规模，提出两种不同的充电策略。

第三章：研究小规模网络中节点能量耗尽而失效的问题，在对节点的充电时间上的约束以及充电车自身能量的约束，建立以充电路径距离最短为优化目标的单移动充电车的充电优化方案，提出 ACSFLA 算法对该方案进行优化，通过仿真实验评估算法的有效性。

第四章：针对大规模网络节点分布多，使用多移动充电车策略对网络节点进行能量补充，为了使充电车的能量能够充分利用，对节点的能耗不均的情况，设定节点能量上限和下限，建立带时间窗的多充电车充电优化方案，并通过设计的 MMCSA 算法对该方案进行优化，通过仿真实验来验证本文算法的优越性。

第五章：总结与展望。

## 第二章 无线可充电传感器网络应用及充电规划

### 2.1 引言

随着电力工业不断发展，许多国家将传统电网与新技术融合，提高电网的安全性和可靠性，提出“智能电网”的概念。且有大量的电力设备分布在电网中，这些设备的好坏对电网的稳定具有重要的影响，而传感器节点能够有效监测设备的故障情况，因此无线可充电传感器网络在智能电网中有着广阔的应用前景。

本章针对智能电网中无线传感器网络的应用做了简单的介绍，且为了让无线可充电传感器网络能够有效的运行，实行其监测功能，并研究了移动充电规划的问题，其中包括移动充电问题求解方法和移动充电车策略的安排，为本文的研究做了铺垫。

### 2.2 智能电网与无线可充电传感器网络

#### 2.2.1 智能电网

智能电网是在传统电网的基础上进行延伸和发展，依然以传统电网的输电、变电、配电以及二次系统中发电以及用电等环节所组成的一体化网络。近年来，社会不断发展，能源不断被开发与利用，电网的发展也越来越壮大，人们对电的需求也不断增加，电网则不断优化产业结构来应对社会发展，并且国家不断提倡可持续发展，推动着电力工业逐步转型。因此，智能电网对于未来电力行业转型来说是必然选择。

电网中融合其他信息化技术从而形成最基本的电网智能化<sup>[35]</sup>，从而可以有效调节电力系统的各个环节；而智能电网是目前人造的规模最大且具有较复杂结构的能量输送网络，因此良好的智能化应用体系能够提高智能电网安全可靠，且能够让其经济高效地运行。将能源利用率最大化和为用户提供更大的增值服务作为主要目的，来提高电网管理体系和电网自动运行控制。为了确保智能电网的建设，要将所融合技术和管理结构以及实验评估进行标准规范化<sup>[36]</sup>。图 2-1 为智能电网的构架。

以往，传统的电网与用户不存在信息交互或者只是单方面对用户进行单向传递控制命令<sup>[37]</sup>；此外，相较于智能电网，传统电网的控制方式太过于单一化，从送电端到受电端的单向控制，因此传统电网的电能量传输有着较多的网络损耗；并且在运营维护方面，通常采用人为方式进行核对，若设备突然出现问题，此时需要人工的手段来分析故障，通常采用以往的经验来分析故障，有时环境的因素可能需要大量的时间才能对设备进行恢复，因此传统电网存在着恢复功能弱的问题。针对以上电

网存在的不足，智能电网技术则是在不断地完善传统电网中的问题，在控制方式方面，智能电网采用双向互动方式，即在发电、输电、配电与用户之间进行双向反馈<sup>[38]</sup>。智能电网不仅将用电方与电网构成了联系，也提高了电能质量和降低网络损耗，对智能化的电器产品的发展有着深远的影响。以下列出智能电网优点如表 2-1 所示。

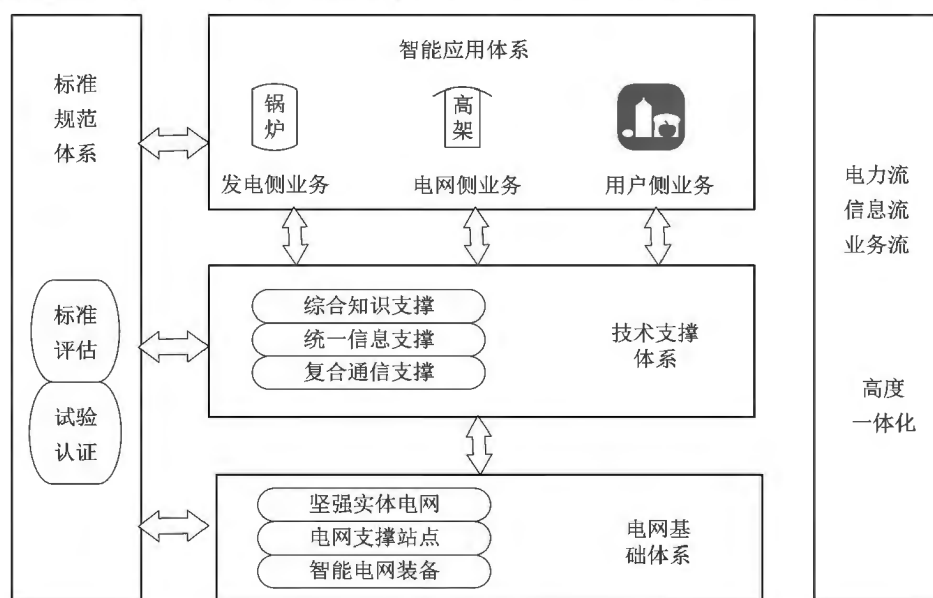


图 2-1 智能电网的构架  
Fig.2-1 Smart grid architecture

表 2-1 智能电网的优点  
Table 2-1 Advantages of smart grid

特点	分析
坚韧性	智能电网能够不受外界恶劣条件影响，保持电网稳定运行；且自身出现故障时，通过应急供电，维持电网的稳定。
修复性	能够预防故障以及及时解决故障能力，具有较强的自我修复能力。
兼容性	能够将可再生能源、分布式电源以及微电网通过合理方式进行并网，具有较强的兼容性，实现用户与电网一体化
经济性	通过电力市场的运营，合理地对资源分配，提高电网资源利用率，实现经济最大化
规范性	通过规范化的平台，实行电网信息共享，并对资源标准化、规范化地进行管理
实用性	通过不断优化产业结构，使得运营成本变低，提高实用性

### 2.2.2 无线可充电传感器网络在智能电网中应用

近年来智能电网的发展速度很快，无论是技术方面还是工程运行方面，都得到关键性的突破，为了使网络运行更加稳定，提高电网互动水平，都离不开无线可充电传感器网络技术。该技术在智能电网具有很高的实用性[39]，在发电端、配电网以及用户端起着关键性作用。

1)在智能电网的发电端通常是风力发电厂和太阳能发电厂，而 WRSNs 则发挥其监测功能实时地监测两者的运行状况以及电能质量。

风力发电厂是电能重要来源之一，且风力资源是可再生的清洁能源，而风力存在随机性，会受到实时的当地环境影响，间接影响发电能力。若利用 WRSNs 对外部环境实时监测，通过获取的信息，对发电厂快速地做出调整方案，提高风力发电的稳定性和可靠性。

同样，通过 WRSNs 对太阳能发电厂所处的环境的温度和辐射强度进行监测，来对应调整太阳能板的方向，充分利用太阳能，提高发电效率。

电能质量对于用户安全有着至关重要的影响，为了提高电能质量，选择 WRSNs 技术对电能质量监测是最直接、最有效的方式。

2)在配电网中，结合已有的通信网络和 WRSNs 来监测电网中特殊环境和特殊设备，来实现远程操作配电环节，促进配电网智能化，提高配电网系统的可观测性和供电的稳定性。

如图 2-2 为配电网的结构图。图中可以清晰地看出，整个配电网分为三个层面，第一层是由 WRSNs 中的节点组成，对配电网中存在的设备、配电线路、用户进行收集数据以及监督而形成的数据采集层。第二层则是至关重要的一层，称为网络层。它是利用数据网络传输协议来对第一层的数据进行系统化处理以及传输；第三层为应用层，它主要通过 Web 服务器和应用服务器来对网络层传输上来的数据进行系统化分析，从而能够直观数据分析来决定配电网的决策与控制。

3)在智能电网的用户端的组成分为三个部分，第一部分为无线可充电传感器网络部分，专门收集和汇总第二部分的智能用电器的运行状态以及用户用电的数据，然后将这些数据通过第三部分的接入网传输到远方的总站中。通过总站分析和处理得到的信息，再回馈到用户端，形成两者之间的信息交互系统，以便提高用户用电经济性。

为了加深了解，图 2-3 为用户端结构图。其中最底层为智能交互终端，具体作用是监测特殊的用电系统，收集用电设备的数据，并对数据进行汇总分析比较，若存在用电不当，可以及时地改进，通过人为或者智能控制来优化用电设备，提高用电

效率<sup>[41]</sup>；第二层主要是有集中器、电表以及主站组成，其作用是用户的用电计费以及汇总通过电表中得到数据，并在主站中分析处理，从而起到对用户信息监测的作用。最上层为无线接入网络，主要目的将用户与主站的建立联系，执行通信功能。

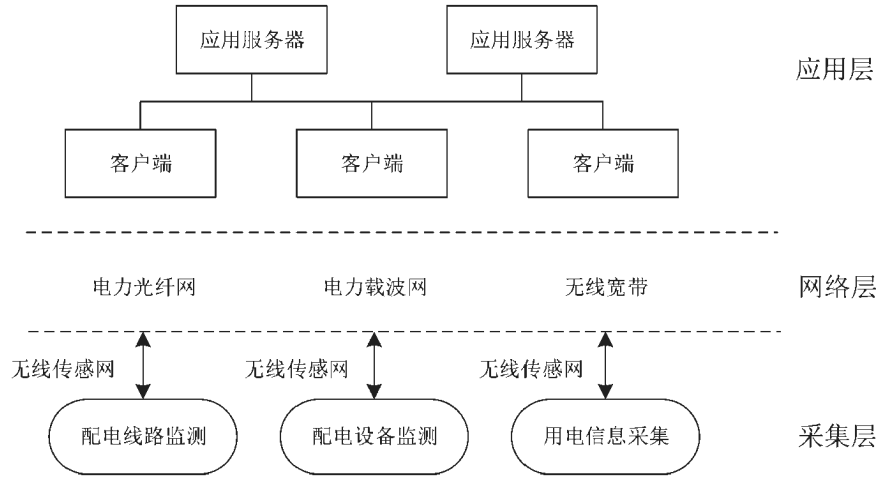


图 2-2 配电网的结构图

Fig.2-2 Structure diagram of distribution network

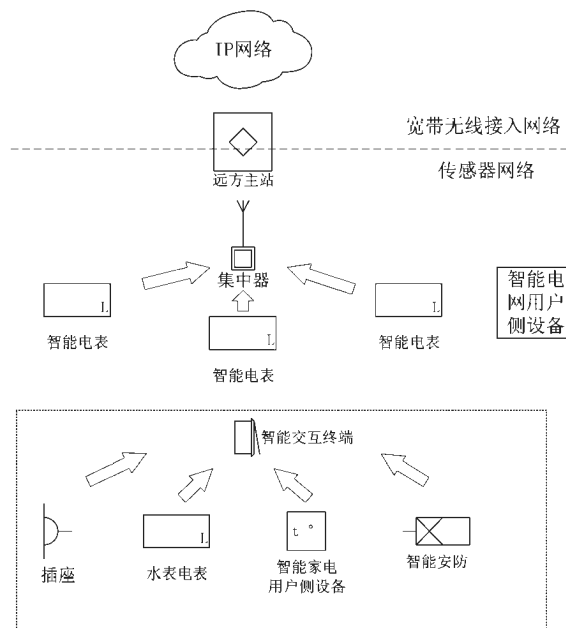


图 2-3 用户端结构图

Fig.2-3 Client structure diagram

## 2.3 移动充电规划方案

### 2.3.1 不同网络规模的充电规划分类

综合分析国内外无线可充电传感器网络的充电规划发展情况，将这些研究划分为两大类：其一为单移动充电车（Single Mobile Charger, SMC）的充电规划；其二为多移动充电车（Multiple Mobile Charger, MMC）的充电规划。如图 2-4 所示，为充电规划分类图。

根据所需要监测的环境大小来布置不同规模的无线可充电传感器网络，将自身携带能量存储装置的充电车当作为网络节点充电的充电器，根据传感器网络的大小，来安排充电车的数量。针对小规模网络中，为了节约充电成本，一般采用单充电车进行对网络节点充电，根据节点能耗率的不同，对节点能量进行约束，设计单充电车的静态的充电规划，通常都将此类规划问题转换成旅行商问题。并且在单充电车规划中，考虑到时间和节点功能问题，分为周期性充电和非周期充电。在大规模网络中，通常采用多充电车协作充电，以达到增强充电能力以及降低充电延迟时间的目的。

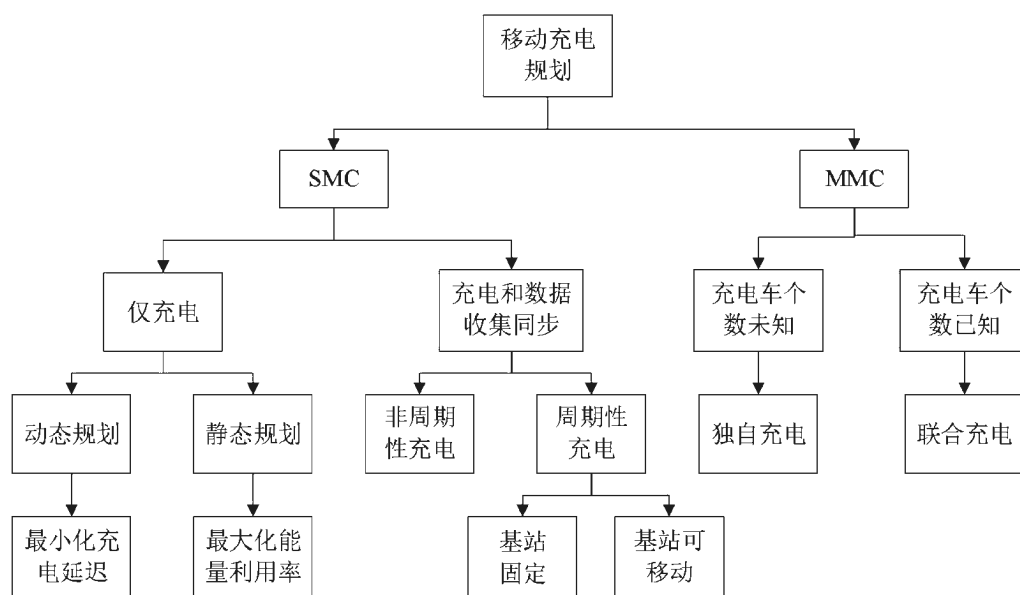


图 2-4 充电规划分类图

Fig.2-4 Classification of charging plans

目前，国内外对于 WSRNs 中充电规划问题的研究，已有了显著的成果。把提高充电车的充电效率以及能量利用率，作为当前已有的研究工作中研究主题。文献[40]考虑网络节点能耗不均衡，将网络节点分簇，按节点需求程度进行降序排列，采用

SMCC 算法来实现单充电车的充电规划，提高充电的能量利用率，延长网络生命周期。且在大规模网络中，构建时间窗充电优化方案，利用 MMCDP-TW 算法来优化，有效的提高了充电车的充电效率。

### 2.3.2 充电规划方法

针对充电车规划问题，核心研究内容是充电车在离开基站之后，充电车对节点充电时的路径规划，综合分析已有的文献，将其分为以下三类：

#### 1)请求式

请求式充是最具针对性的充电规划方法，若节点的剩余能量达到一定程度时，则会向基站发送充电需求命令，然后派遣充电车给予节点充电。基于这种规划的思想，文献[41]提出了 NJNP 算法，该算法核心思想为最近优先充电规则，即对于充电车周围节点发送充电请求时，充电车会以离距离最近的节点先进行充电，以此规则直到完成所有请求充电的节点的充电任务。但是该算法缺点是存在时间延迟以及充电过程中路劲距离过长，导致充电车回到基站的时间变长。

文献[42]设计一种新的充电调度算法，采用分簇充电思想进行设计，从而来解决充电延迟的问题。文献[43]为了给予更多节点充电，通过对充电车的最大行驶时间约束，并且对需要充电的节点利用聚类算法将其进行分成 K 簇对每一个簇内节点进行充电。该方法降低了 NJNP 算法中造成充电车较长的行驶距离。

#### 2)询问式

询问式作为最普及的充电规划方法，其基本思想是通过基站收集节点的所有信息，接着构造一条覆盖所有节点的路径，并且要求路径最短，然后充电车按照规划好的路径进行对节点进行充电，在移动过程中，通过给定节点阈值来判断节点是否加入充电行列中。

此方法在小规模网络中有着很高的可靠性，当网络规模变大，若充电车还继续为没有到达能量阈值的节点充电，此类节点不但变多，则会产生大量的行驶路径，使得充电车能量消耗在行驶消耗上，且会增加节点的充电延迟，影响充电效率，因此不适用于大规模网络中。

#### 3)统筹式

统筹式规划方法是近年来才提出的新方法，其基本思想是充电车具备基站收集信息的能力，在充电车在给予节点能量补充的同时，当大部分节点剩余能量降低到一定程度时，充电车能够收集到此类节点的信息，并对这些节点加入到充电安排中，进行统一充电。

但是在实际工程应用中，无线可充电传感器网络的网络节点是根据监测环境而决定分布位置的，存在随机性。统筹式充电规划方法只考虑节点的状态，并没有考虑到网络节点的分布情况，若充电对下一类节点充电时，这类节点恰好分布在网络的各个边缘位置，这对充电车来说，造成大量的能量浪费；对于节点来说，传输信息距离变远，造成充电延迟，且网络在持续执行监测任务，也会消耗能量，间接造成下一轮需要充电节点可能出现能量耗尽而死亡。

## 2.4 移动充电问题与求解

### 2.4.1 问题描述

纵观已有的充电规划研究中，部分可以将充电规划问题转换成一种带有多约束的车辆路径问题（Vehicle Routing Problem, VRP）。1959 年 VRP 被首次提出<sup>[44]</sup>，并将其与物流问题联系在一起。对于充电车动态规划问题可以还原成动态车辆路径问题（Dynamic Vehicle Routing Problem, DVRP），即以车辆行驶路径最短，成本最低为优化目标，以车辆容量为约束条件，来对车辆路径进行优化，完成对客户的装载任务。对于在 WRSNs 中多充电车的充电规划问题（Multiple mobile Charger Routing Problem, MCRP）看成 DVRP 以及 TSP 组合优化问题。

如图 2-5a)为 DVRP 的路径示意图，图中共有 11 个客户需要装载服务，采用一辆车完成物流调度所形成的最短路径。图 2-5 b)为多充电车并行充电的路径示意图，由于需要充电网络节点规模较大，若采用单辆充电车，则需要快速完成第一轮调度后，不间断地继续执行第二调度，这会导致严重的充电延迟，充电能力低下，因此常规的规划方法已经无法满足需求，因而采用多充电车对 WRSNs 中的节点进行并行充电，本文也是采用策略并对其改进，来完成大规模 WRSNs 中充电规划问题。

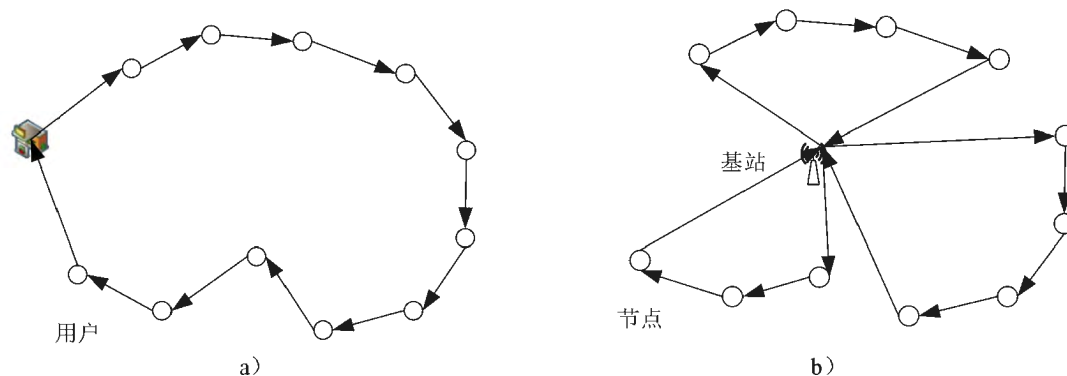


图 2-5 DVRP 与 MCRP 的路径示意图  
Fig.2-5 Schematic diagram of DVRP and MCRP



综上所述，将本文研究的问题归结为：有一辆或者无数辆充电车从基站出发，携带一个能够存贮能量的电池，对网络节点进行点对点的充电，通过充电车携带能量以及最大工作时间等约束下，来调度充电车，在充电车能量耗尽前必须返回到基站。并对充电车进行能量补充，以便下一轮的充电调度。

针对移动充电车的路径规划问题，文献[45]研究网络节点周期性充电，假设充电车所携带的能量无限，将一轮充电调度中充电车的工作时间最少作为优化目标。但实际应用中，充电车能量都是有限的，因此最大化能量利用率变成首要目标。文献[46]中充电车每次为节点充满电和同一个网络节点可以被多次充电且充电总能量不超过其一轮充电调度时间内能耗量，设置两个不同常数近似比，利用近似算法，提高了在周期充电中充电效率。

由于充电车能量利用率与其充电路径有着密不可分的关系，文献[47]主要研究充电车路径规划，基于等边三角形强覆盖性，规划单个MC的充电路径。实验结果显示设计出新的路径增加了节点存活数、提高了充电效率以及能量利用率。文献[48]同样以充电路径规划为主，结合TSP问题，对于相邻的节点提出一种自适应分类，对充电车停下充电次数进行优化，从而使充电车的移动延迟和节点的充电延迟降低。

综上所述，无线可充电传感器网络充电规划问题就是从基站派出一辆充电车或者多辆充电车，然后将网络中节点分配给充电车，每辆充电车存在一条独立的充电路径。由于现实应用中<sup>[49]</sup>，所采用的充电车所携带的能量都是有限的，因此通常将最大化能量利用率作为充电规划的主要目标。目前研究此类问题主要包含两个主要内容：其一如何调度充电车，怎样设计合适的充电策略；其二，怎样选取充电节点，以及约束条件的取舍。

结合以上的概述，我们所研究的充电规划问题由以下几个部分组成：

- 1)节点方面：网络节点的规模，以及节点的采用的能耗模型；
- 2)充电车方面：充电车的数量，以及所携带能量的最大容量
- 3)约束条件方面：最大工作时间，充电车能量；
- 4)优化目标方面：充电路径最短，能量利用率，充电效率等。

## 2.4.2 问题求解方法

近年来，许多的专家学者们将无线传感器网络规划问题转换成车辆路径优化问题，考虑网络节点以及充电车的情况，建立合理的约束条件以及优化目标，针对网络规模，构建不同的规划方案，并设计出各种方法进行求解。结合分析各类文献综

述，将求解以及优化充电方案算法分成两类：其一，为精确算法，核心思想采用数学手段来求解充电规划问题，针对具体的充电方案给出精确解。然而在 WRSNs 网络规模变大时，此算法的运算量也会呈指数增大。其二，为启发式算法，是通过直观或者经验，将问题的解向最优解逼近的算法。而随着数学领域的发展和创新，启发式算法逐步细化分为传统启发式算法和现代启发式算法<sup>[50]</sup>。开发充电调度算法对于求解充电规划问题具有重要的意义。

如图 2-6 是求解方法分类图，可以直观的看出各种算法之间的关系，根据不用类型将其细致分类。

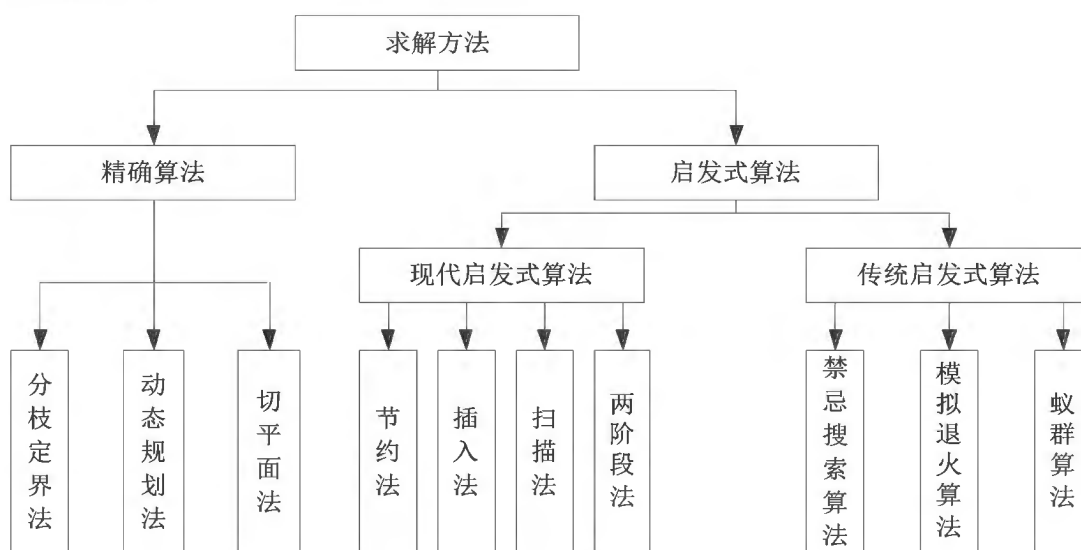


图 2-6 求解方法分类图

Fig.2-6 Solving method classification diagram

### 2.4.3 精确算法

#### (1)分枝定界法

分枝定界法<sup>[51]</sup>被提出，对于求解小规模 WRSNs 的充电规划问题具有重要影响，早年，它常用于车辆路径问题，其主要思想是采用从大到小的策略，即通过将解的空间规模变小，分解成许多个分枝子空间，并对每个小分枝内逐步寻优，给出当前最优解，将分解出的分枝中寻优得到的最好解与当前最优解进行比较，若分枝得到最优解比当前解要差，则剪去此分枝。以此操作重复得到最优解。之后学者们利用此方法来求解带时间窗的组合优化问题，实验结果表明，当节点数不断增加时，算法的求解复杂度明显增大，因此该算法不适用于求解大规模 WRSNs 的充电规划问题。

## (2) 动态规划法

动态规划算法一种适合于求解规模小的路径规划问题，将最佳化原理理念灌入到算法中，也就是通过数学逻辑将所有相关的决策的小问题进行系统化处理，通过推演法则将最具优势的决策筛选出来，具体的步骤如下：

- 1) 运用数学逻辑，分析处理任何有关系的局部问题；
- 2) 分析处理最后阶段的各状态，从中得到最好的决策方案；
- 3) 从最后一阶段开始，结合倒递推法思想逐步向前一阶段递推，并对每一个阶段进行分析，实现在每个阶段得到最优的决策。

## (3) 切平面法

切平面法所采用的核心思想与分枝定界法相近，主要应用于线性规划问题。最初是被人应用到求解大型 TSP 问题中，后来又被人应用在大规模无线传感器网络中的充电路径优化。该算法优势在于可以通过加入新的约束来不断将求解问题线性化，从而能够快速得到最优解

### 2.4.4 传统启发式算法

#### (1) 节约算法

节约算法在 1954 年被提出，该算法是求解充电路径优化一类问题的最为经典的启发式算法之一。该算法的核心思想是：将最大化节省传感器节点之间的距离作为目标，逐步将未被规划到充电路径的节点并入到充电路径上，以此规则将所有未被安排充电的网络节点全规划到充电路径上。节约算法两节点的节约值的计算公式与意义如下所示：

$$s(i, j) = d(i, 0) + d(0, j) - d(i, j)$$

其中  $d(i, 0)$  表示从节点  $i$  到基站的距离， $d(i, j)$  表示传感器网络节点  $i$  到网络节点  $j$  的距离。首先，通过点对点直来直往的方式，来构造可行性的初始路径。然后通过计算相邻的两两节点之间的距离节约值，将计算出的值逐次降序排列。最后结合节约值和约束条件，来整合路径。具体流程如图 2-7 所示。

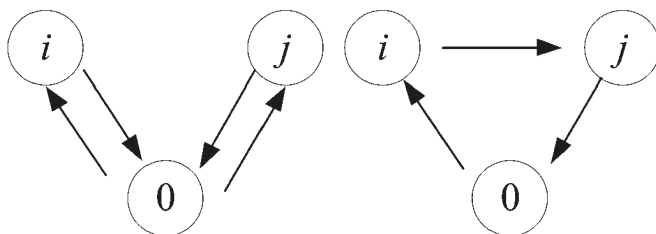


图 2-7 节约算法示意图  
Fig 2-7 Schematic diagram of saving algorithm

## (2)插入算法

插入算法是指在路径规划中，算法在第  $k$  次迭代时，将未被安排充电的节点插入到充电路径中<sup>[52]</sup>。该算法的核心在于如何在第  $k+1$  次迭代时，将未安排充电的网络节点安排到充电路径中以及选择最佳的插入位置。因此该算法核心部分<sup>[53]</sup>分为两步：第一步是选取节点充电阶段，即未充电的节点安排到路线中；第二步在充电路径上如何选取网络节点的最佳插入位置；重复此过程直至节点都插入到路径中为止。

假设一条路径为  $R_p = \{c_1, c_2 \cdots c_m\}$ ，下一个加入到当前路径的节点选取，计算所有未被安排充电的节点的最佳的插入点；将选取的网络节点插入到  $R_p$  中的任意两节点边上，重新计算充电车所需要行驶的路径总距离，计算出路径距离最短的那个插入位置作为最佳插入位置。然后逐次计算未被安排充电的节点加入到路径上的距离，选择距离最短的那个节点作为下一个插入节点，重复此过程，直到不满足约束条件，则开辟新的充电路径，按照以上规则继续安排节点插入到路径上，直到所有节点都被安排到充电路径上进行充电。

## (3)扫描算法

扫描算法是 1974 年被提出，主要采用平面几何的求解方法来解决实际问题。该算法的核心思想是：先将无线可充电传感器网络中节点的区域位置用极坐标方式来表示，然后随机选取一个网络节点当作起始点，将充电车所携带的能量作为约束条件或者其他约束条件，以起始点顺时针或者逆时针方向将整个传感器网络进行区域划分。最后分别派遣充电车对划分的区域进行充电，再在每一个区域内规划充电路径。重复以上过程，直到所有节点都被安排充电。

## (4)两阶段法

两阶段法是在规划充电路径时，将其分成两个求解阶段，第一阶段以最小路径来生成初始解，再用  $\text{opt}$  算法对每条路径进行局部优化。第二阶段采用交换策略对每条路径中的节点进行交换，从而使得充电车路径距离变短，然后再对网络节点交换后的路径进行优化。该方法的核心思想是将经验知识和主观的评估去求解优化模型，具备判断优化后的结果和参数的能力，提高求解优化模型的可行性。

### 2.4.5 现代启发式算法

现代启发式算法，也叫智能优化算法<sup>[54]</sup>，其基本思想是在算法运行时，每一次迭代得到的适应度值与当前最优值比较，进行更新替换，与传统的启发式算法不同的是它不要求适应度值持续下降，允许适应度值大小上下浮动，且存在不可行解，

主要对解空间进行全局寻优，从而跳出局部优化。

### (1) 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法 (Tabu Search, TS)，最早由 Glover 提出，其核心思想是：在算法起始阶段，将给定的初始解和候选解构成领域结构，然后在初始解的邻域中形成多个候选解。最后将最佳候选解与当前最优解进行比较，若当前最优解略差于最佳候选解的目标值，则将其禁忌特性忽略，然后将当前最优解替换。假设所述的候选解不存在，则忽视候选解集中非禁忌的最佳候选解与当前解的优劣，直接将最佳候选解作为新的当前最优解。将禁忌表与上述两种情况中相应的对象结合，并通过对禁忌表中的对象的任期进行修改来完成搜索。不断重复上述操作，直到满足迭代次数为止。

### (2) 模拟退火算法

模拟退火算法 (Simulated Annealing, 简称 SA)，它是在 20 世纪 50 年代，学者们结合热力学退火原理而开发出的智能算法，近年学者们将其用来求解路径优化问题。该算法的核心思想是：将优化模型中的目标函数当作 SA 算法中的能量函数，结合固体物质的退火原理，在热平衡条件下，在物质内部以不同状态进行分布，在合理的退火操作下，则会得到能量最低的物体基态。在 SA 算法解决优化问题是，算法中的能量函数是可以接受改进的，并且在能量函数趋向恶化状态时，也可以以某种概率接受此状态，从而避免陷入局部最优。

### (3) 蚁群算法

蚁群算法<sup>[55]</sup> (ant colony optimization, 简称 ACO)，是一种模仿蚂蚁觅食行为的智能优化算法。通过结合蚁群觅食原理，将其应用于解决带有多约束的路径优化问题。该算法求解无线可充电传感器网络充电路径问题的基本步骤为：

- 1) 初始化，设置算法参数，读取传感器网络节点分布信息，将相连的同一网络节点的边的距离进行降序排列；
- 2) 根据约束条件来进行判定；
- 3) 调整比例参数；
- 4) 局部搜索中，是否有新最优值生成，如有则更新；
- 5) 全局搜索，更新全局最优值；
- 6) 是否达到迭代次数，若满足，退出程序，否则重复操作步骤 2-5。

## 2.5 移动充电策略

本文研究的无线可充电传感器网络是用在智能电网<sup>[56]</sup>环境下，为了长期有效地

对智能电网发电、输电、变电的状态检测以及故障信息传递，从而保证智能电网的安全性，因此保证无线可充电传感器网络的稳定运行<sup>[57]</sup>是十分重要的问题。所以对网络节点补给问题也就变的很严峻，针对监测智能电网的无线可充电传感器网络的工作环境和和规模大小，本文主要任务是在不同网络规模下采用单和多充电车来完成网络节点的能量补给任务。以下来具体介绍单辆和多辆充电车的充电规划方案。

### 1)单充电车工作

单充电车的策略是在网络规模较小时，通过一辆携带能量有限的充电车为网络节点进行能量补给。而在大部分情况下，充电车在给予节点充电的过程中会受到时间和网络节点所处的位置的影响。例如在监测智能电网的部分场景中，由于节点分布的特殊因素，充电车只能以固定的路径对节点进行充电；在某些节点充电时，要求具有高时效性，充电要在规划的时间内完成充电任务且按时抵达下一个充电节点。除此之外，充电车在时间约束的条件下，能够让充电车及时回到基站补充能量。

但是，对于充电车的充电规划也面临着许多挑战，其中，由于节点因传输距离所产生的能耗不同，因而节点的充电需要程度不一样，所以如何选择合适的节点进行充电是一个重要问题<sup>[58]</sup>。其次，在实际生活中，充电车的能量无可能是无限的，因此，在充电车给予网络节点充电的最大工作时间内，要使充电车能量利用率最大化，行驶路径最短，给尽可能多的节点进行充电。

### 2)多充电车工作

当监测的智能电网规模变大时，无线可充电传感器网络规模也变大，所需要充电的网络节点数目变多，由于单充电车能量有限，已经无法保证在网络节点失效前及时给予充电，若只用单充电车的来完成充电任务，对于充电车的行驶速度、充电效率以及携带的能量要求过高，所导致的充电代价会呈指数增加。因此，采用多充电协作充电来完成大规模网络中的充电任务将变得更加具有时效性。

对于采用多充电车来规划大规模网络节点充电任务优势在于，多充电车可以并行给予网络节点充电，独自安排充电任务，具有高效的充电能力。且目前学者们将多充电车的 MCRP 向 DVRP 转换。本文每一辆充电能够为多个节点给予充电，且通过多约束条件，将网络节点合理的规划到充电回路中，每辆车独立地实施规划好的充电方案。

以上所述是本文充电规划的主要思路，考虑智能电网中有设备发生故障，而监测智能电网的无线可充电网络不能及时传递信息，无法及时对故障进行处理，可能导致智能电网出现不稳定情况，甚至影响整个电力系统。因此保证无线可充电传感器网络稳定变得更加重要。本文将无线可充电传感器节点布置在智能电网中所需要监

测的设备上，且网络节点传输数据的能耗不均，本文通过时间和充电车能量的约束来进一步规划充电调度问题，具体研究的充电规划思路如表 2-2 所示。

表 2-2 充电规划思路  
Table 2-2 Charging planning ideas

网络规模	网络节点部署密度	MC 个数	网络稳定性	网络生命周期	节点可控性	节点能耗均衡性
小	较稀疏	一辆	连通性良好	保证网络对	基站可以收	不均衡
大	较密集	多辆		电网内设备监测的时间	集节点的所 有信息	

并且，本文设计的规划方案内容要考虑以下几点：

1) 充电车给予节点充电时，充电车会受到自身能量限制为节点充电，直到充电车不足以为下一节点充电则返回基站；

2) 将充电车在基站补给的时间不加入充电调度的工作时间，且一轮充调度之后必须返回基站；

3) 充电车要在节点停止工作的时间内对其进行充电。

因此，基于以上几点考虑，本文的需要解决的具体问题是：

1) 如何选取合适的充电节点；

2) 根据网络节点参数，选择哪种充电策略；

3) 以节点不因能量耗尽失效为前提，最大化充电车能量利用率和减少移动距离

## 2.6 本章小结

本章的主要是对现有的研究进行综述，总结研究思路，奠定下文研究工作的基础。首先，研究了智能电网背景以及 WRSNs 在智能电网中的应用；然后总结无线传感器网络中充电车充电规划的问题，并将该问题简化为经典的动态车辆路径问题，针对该问题，研究了解决该问题的传统算法以及启发式算法，介绍了各类算法的概念，以及求解路径优化的原理。最后研究根据充电车数量的不同划分移动充电策略并做了简要分析。

### 第三章 基于改进的蛙跳算法的单移动充电车充电规划

#### 3.1 引言

无线可充电传感器网络在监测智能电网的智能变电站时，通常网络节点因能量耗尽失效的问题，本章给出了在无线可充电传感器网络静态模式下，采用单移动充电车充电策略，在保证网络节点不因节点能量耗尽，建立一个小规模的无线可充电传感器网络的充电优化方案。针对蛙跳算法后期易陷入局部收敛以及寻优速度慢的问题，引入精英策略以及柯西变异算子，提出 ACSFLA 算法 (Accelerated Shuffled Frog Leaping Algorithm) 对充电优化方案进行优化。

#### 3.2 网络结构与优化问题描述

##### 3.2.1 网络模型

本文在智能电网中智能变电站环境下，主要研究是用于监测智能变电站的无线可充电传感器网络，由于智能变电站设备繁多，本文主要监测智能变电站高压开关柜、一次设备以及避雷器等，根据这些主要设备位置分布传感器节点，构成一个小规模的无线可充电传感器网络。网络采用基站固定、节点数据传输多跳式的 WRSNs。一般情况下，网络节点为了完成监测任务需求，所处的位置因监测环境影响而无规则分布，而本文通过一个方形平面设计网络模型，如图 3-1，图中布置一个固定的基站  $S$ ，不仅能够收集网络中各节点的信息，也可以为充电车 MC 提供能量补给以及维护的功能。还有  $n$  个随机分布的传感器节点，因此，无线可充电传感器网络可看成一个带权的无向图  $Z = (C, Y)$  来表示，其中  $C = (N_0, N_1, N_2, N_3, \dots, N_n)$  是  $n$  个传感器节点的集合， $Y = l(N_i, N_j) (i \neq j = 0, 1, 2, \dots, n)$  是任意两个节点之间的树杈长度集合，而两节点之间的距离为欧式距离  $d_{ij} = \sqrt{(y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ 。



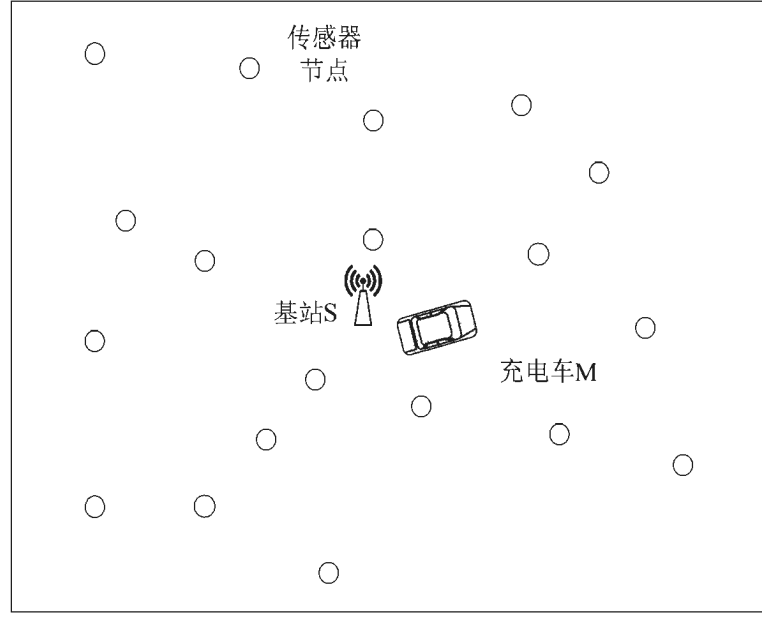


图 3-1 监测智能变电站的无线可充电传感器网络

Fig.3-1 Wireless rechargeable sensor network for Smart Substation Monitoring

### 3.2.2 节点工作模式

在监测小规模智能电网的 WRSNs 中，网络节点随机分布在不同设备上，且节点采用同一规格型号，网络节点同时具有互相传递信息的功能，以便将远程信息快速传递到基站中，为了方便阐述，将 WRSNs 中第  $i$  个节点记为  $N_i$ ，用  $C = (N_0, N_1, N_2, N_i, \dots, N_n)$  表示为小规模网络中  $n$  个网络节点集合，其中  $N_0$  表示基站，每个节点最开始的能量为  $E_{\max}$ ，为了使网络持续稳定的运行，避免节点死亡情况，对节点本身设置能量阈值  $E_{\min}$ 。

当网络开始运行时，节点开始进行收发数据，图3-2为数据传输示意图。例如节点  $N_i$  在任意  $t$  时刻的监测数据产生率为  $r_i(t) \text{ kbit/s}$ ，节点  $N_i$  接收节点  $N_k$  的数据功率为  $w_{k,i}(t) \text{ kbit/s}$ ，节点  $N_i$  传输到基站的数据率为  $w_{i,s}(t) \text{ kbit/s}$ ，节点  $N_i$  数据传输到节点  $N_j$  的数据率为  $w_{i,j}(t) \text{ kbit/s}$ 。

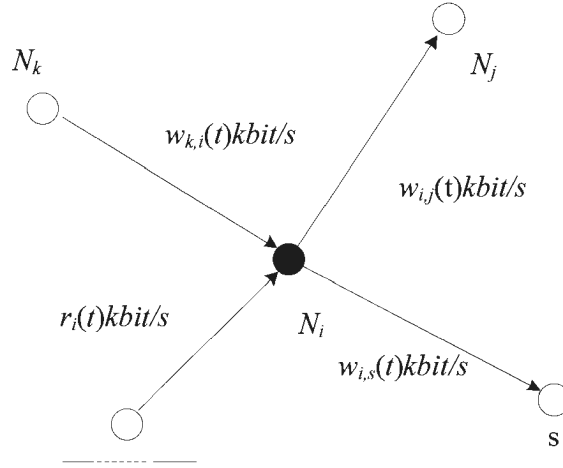


图 3-2 数据传输示意图

Fig.3-2 Schematic diagram of data transmission

本文主要研究的节点能耗模型如图 3-3 所示，该能耗模型由发送电路、放大电路以及接收电路组成。

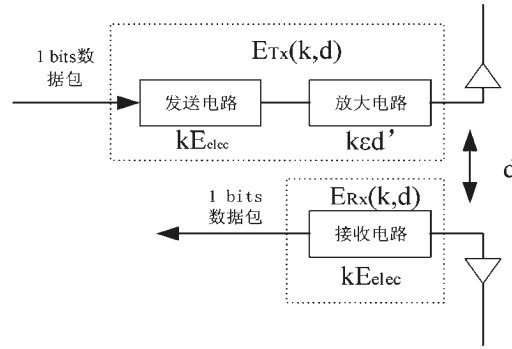


图 3-3 能量消耗模型

Fig.3-3 Structure of energy consumption

在此模型中，节点的能耗是跟两节点之间的传输距离息息相关，根据节点之间距离大小分别采用自由空间模型以及多路径衰减模型<sup>[59]</sup>，若当前节点传输数据到下一节点距离很远，则采用能量损耗参数为 4 的多路径衰减模型，当两节点之间距离比较近时，则采用损耗参数为 2 的自由空间模型。当节点需要传输  $k$  比特数据到另外一个节点时，且传输距离为  $d$ ，则传输数据产生的能耗如公式(3-1)：

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} k \times E_{elec} + k\epsilon_{fs} \times d^2, & d < d_0 \\ k \times E_{elec} + k\epsilon_{mp} \times d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (3-1)$$

接收  $k$  比特消耗的能量为：

$$E_{Rx} = kE_{elec} \quad (3-2)$$

$E_{elec}$  —— 发送信号的能量；

$\varepsilon_{fs}$  —— 能量消耗的参数；

$\varepsilon_{mp}$  —— 多路径衰减能耗参数；

$d_0$  —— 事输送距离的阈值；

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \quad (3-3)$$

则传感器节点传输  $k$  比特数据以及传输距离为  $d$ ，对于网络节点  $i$  所产生的能耗率为：

$$p_i(k, d, t) = \begin{cases} k(r_i(t) + w_{i,s}(t))E_{elec} + k\varepsilon_{fs} \times d^2 + kw_{j,i}(t)E_{elec} & , d < d_0 \\ k(r_i(t) + w_{i,s}(t))E_{elec} + k\varepsilon_{mp} \times d^4 + kw_{j,i}(t)E_{elec} & , d \geq d_0 \end{cases} \quad (3-4)$$

### 3.2.3 充电车工作模式

在无线可充电传感器网络中，所有的网络节点带有一块能量接收装置可充电电池，其能量有限，最大存储量  $E_{max}$ ，传感器节点在信息来回传递过程中都会消耗能量，假设  $E_{min}$  为节点能量的临界阈值，当节点剩余能量值降低到  $E_{min}$  以下时，则会向基站  $S$  发出充电请求指令  $M$ ， $M = \{N_i, t_{ri}, RE_i, E_{max}\}$ ，其中  $x_i$  是申请需求的节点， $t_{ri}$  是节点发送充电请求的时刻， $RE_i$  是节点的剩余能量， $E_{max}$  是节点能量的最大存储量，当基站收到节点充电申请时，会立即派遣一辆充电车去给节点充电，直到把节点能量充满为止，若是有其他节点在当前充电过程中发出充电请求，小车会自行收集信息，依次为下一节点充电，最后回到基站补充能量，此为一个充电调度。

在保证所有申请节点不死亡的前提下，最大化能量利用率，能量利用率最大相当于在行驶中充电车行驶路径最短，建立一个单充电车为无线可充电传感器网络的充电模型如图 3-2，假设小车携带一个容量为  $E_{max}^M$  的电池，可供自身行驶和为节点充电，小车可以为网络中的节点依次充电，行驶速度为  $v_c$  为匀速，为节点充电的功率为  $p_c$ ，行驶过程中的充电车消耗能量的功率为  $g_c$ ，由于小车自身携带的能量是有限的，所以小车最大一次的充电返程时间看作一个充电周期为  $T$ 。

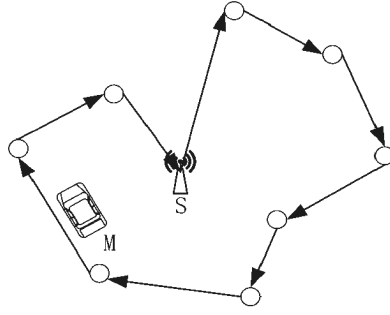


图 3-4 移动充电原理示意图  
Fig.3-4 Schematic diagram of mobile charging

考虑在静态模式下的传感器网络中，经常出现部分传感器节点由于未及时得到充电服务，而暂停工作，影响网络的稳定性，因此本文考虑在基站收到部分节点充电申请命令时，然后小车在为这些节点充电，在小车有限的能量情况下，最大化给予所需节点充电，选择最优路径，使得充电车能源利用率最高。

### 3.2.4 充电优化问题描述

本文将监测智能电网中智能变电站的无线可充电传感器网络看成一个赋予权值的无向树图  $Z = (C, Y)$  和充电车的电池总能量  $E_{\max}^M$ ，静态模式下，要使充电车的能量利用率最大化问题就是求解一条最优的充电路径  $D_M$  问题，则将优化目标定为

$$\min D_M = \sum_{i \neq j}^C d_{ij} \quad (3-5)$$

小车所充过电的节点的集合为  $V^C (V^C \in V)$ ，小车根据充电路线逐次为节点充电，最后回到基站补充能量，并使得充电车电池的能量利用率达到最大。且在充电车给节点所充的总能量以及小车行驶所需要的能量之和不能超过小车自身携带的电池能量，则有约束条件：

$$en(c) + E_c \leq E_{\max}^M \quad (3-6)$$

$$en_i = E_{\max} - RE_i \quad (3-7)$$

$$en(c) = \sum_{i=0}^C en_i \quad (3-8)$$

式中：

$en(c)$ ——充电过程中所遍历的所有节点的所充能量的总和；

$en_i$ ——单个节点所需要充的能量记为；

$E_{\max}$  ——节点能量的最大存储量

$E_c$  ——充电车在给节点充电过程中行驶所消耗的总能量。

$$E_c = \sum_{i \neq j}^C d_{ij} / v_c * g_c \quad (3-9)$$

式中：

$v_c$  ——充电车的移动速度；

$g_c$  ——充电过程中充电车的能量消耗功率。

并且，充电车 M 在给网络中节点充电时，需要消耗时间，行驶过程也要消耗时间，且在完成充电任务之后需要回到基站进行能量补充，所以要将一次充电往返过程时间限制在周期 T 以内，即：

$$\sum_{i \neq j}^C d_{ij} / v_c + en(c) / p_c \leq T \quad (3-10)$$

式中

$p_c$  ——充电车为节点的充电功率；

然后，本文为了保证智能电网的安全可靠性，需要确保无线可充电传感器网络的稳定，因此对无线可充电传感器网络进行充电时间约束，来保证网络中请求充电的节点不会因充电车未及时给予补充能量，使得能量耗尽而停止工作，则有：

$$t_{ri} \leq t_i \leq t_{di} \quad (3-11)$$

$$t_{di} = t_{ri} + RE_i / p_i \quad (3-12)$$

式中：

$t_i$  ——小车开始给节点  $x_i$  充电的时刻；

$t_{ri}$  ——节点向基站发出充电申请的时刻；

$t_{di}$  ——在节点发出充电请求的时刻开始。

最后，充电车所充电的节点集合应该属于整个传感器节点的集合。

$$V^c \subseteq V \quad (3-13)$$

综上所述，本文所研究的用于监测智能电网环境中智能变电站的无线可充电传感器网络充电规划问题，归结于以上的约束条件来求出一条最优路径，而一般多约束条件求解充电车最优充电路径问题都是一个较难的旅行商问题（Travelling Salesman Problem, TSP）。针对这类问题求解，一般的启发式算法不能保证解的质量，且算法寻优速度较慢，因此本文采用蛙跳算法对该问题进行求解，并且为了提高青蛙的质量，以及针对算法后期的局部收敛的问题，因而本文采用精英策略以及

引入柯西变异算子,对蛙跳算法进行改进,并对改进的算法命名 ACSFLA(Accelerated Shuffled Frog Leaping Algorithm , ACSFLA) 算法。通过该算法对充电优化模型进行求解,提高最优值的质量,得到最佳的充电方案。

### 3.3 算法的设计

#### 3.3.1 蛙跳算法

蛙跳算法(Shuffled Frog Leaping Algorithm, SFLA)是一种通过仿青蛙觅食过程而衍生出的智能优化算法。算法的基本想法为在青蛙种群觅食过程中存在着相互竞争的关系,以此竞争法则来达到进化各种群的目的<sup>[60,61]</sup>。结合本文的研究内容,来简单阐述SFLA的基本步骤:首先设置算法参数,即种群规模  $M = S \times N$  以及算法迭代次数,将种群分为  $S$  个子群以及将每一个子群设有  $N$  只青蛙个体,将子群中的青蛙个体坐标记为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ , 即表示第  $i$  只青蛙个体在  $D$  维空间的坐标。然后将路径距离作为适应度值,计算青蛙个体适应度值,以降序对适应值进行排序,并均匀分给每个子群;最后在局部子群中按照设置的迭代次数  $Ne$  进行局部搜索,直到满足设置的全局迭代次数  $MAXGE$ , 则完成此次搜索,得出全局最优值,即最小的路径距离。

在蛙跳算法进化过程中,当种群中将局部子群中的最差青蛙个体的适应值与产生的新个体的适应值进行比较,若优于最差个体的适应值,则将其替换;通过数次替换最差青蛙个体,则之后子群中所产生的新的青蛙都将比替换掉的最差青蛙质量要好,在迭代过程中,局部子群的青蛙个体都将不断进化。若略差于子群中最差个体的适应值时,则将子群中最优值  $X_b$  以全局最优的适应值  $X_g$  来进行更换。其更新策略如下:

$$D = rand() * (X_b - X_w) \quad (3-14)$$

$$X'_w = X_w + D \quad (3-15)$$

式中:

$D$ ——更新的步长;

$rand()$ ——[0,1]之间的均匀随机数。

当所有的子群都完成搜索后,将所有青蛙混合在一起,重新划分子群,判断此时的结果是否满足收敛条件,如果满足则算法结束。

### 3.3.2 ACSFLA 算法

在传统的 SFLA 中，最差青蛙被限制在当前位置与子群中最优青蛙的线性区域中，子群中的最差青蛙只向该子群中的最优青蛙学习，这会使算法中种群的多样性减少并且学习机制不完善。在求解充电路径规划问题上，通常侧重于算法的求解效率，能够快速得到完整的充电方案，避免对网络节点的充电延迟，而影响整体的网络的稳定性。而基本的 SFLA 算法在求解中，种群中的最差青蛙个体的更新策略单一，每一次局部搜索只在局部内进行更新替换，影响整体算法的求解速度，且在算法搜索后期，会降低种群中解的多样性，容易陷入局部最优，降低了求解精度，从而得到冗余的路径，使得规划出的充电路径距离变长，影响充电车的能量利用效率。

针对最差个体青蛙进化策略单一，本文通过引入精英策略来提高解的多样性和求解效率。主要目的是为了让种群中的最优解不退化，预防种群中的最优青蛙个体朝着坏的方向发生变异。该策略主要想法是能够不断产生最适应青蛙个体，并通过最优解的个体信息对下一代的青蛙个体不断更新，来避免算法的最优解发生退化。选出每个种群中的最差青蛙个体以圆弧方式  $360^\circ$  搜索，并将这类青蛙作为圆心，以及各个相对应的子群中最差个体与最优青蛙之间的距离作为半径。通过这种方式搜索，来达到种群中最差青蛙不断地向较好的青蛙学习，保持着自身的最适应性，加快收敛速度。

针对 SFLA 在后期的搜索中，很容易陷入局部收敛的情况，导致求出的充电方案中充电车存在大量的能量浪费，存在大量的交叉路径。为了避免冗余路径的生成，本文引入柯西分布变异算子，以达到避免算法后期出现局部最优的目的，从而将求出的解的质量提高。柯西分布是数学领域内比较常见的一种分布，其中一维的柯西分布的函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{t}{t + x^2}, -\infty < x < +\infty \quad (3-16)$$

式中：

$x$  ——随机变量。

当  $t=1$  时，式 (3-16) 为标准的柯西分布，图 3-3 所示为标准柯西分布概率密度函数曲线。

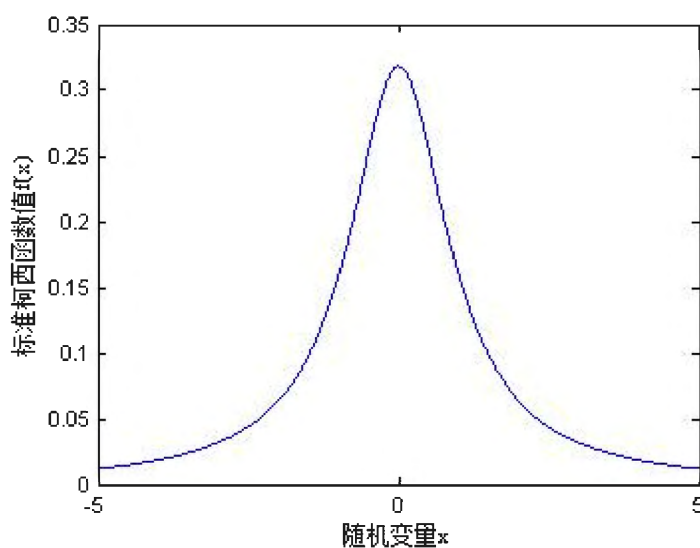


图 3-5 标准柯西分布概率密度函数曲线

Fig.3-5 Standard Cauchy distribution probability density function curve

由图 3-5 可见，曲线的两端长扁形状且趋于零，因此，利用柯西分布可以避免改进的 SFLA 在后期易陷入局部最优的情况。本文利用柯西分布随机变量生成函数作为变异算子。其表达式见 (3-17)

$$\eta = \tan\left[\left(\xi - 0.5\right)\pi\right] \quad (3-17)$$

综上所述，将精英策略和柯西分布变异算子引入到 SFLA 中，得到改进的蛙跳算法 (Accelerated Shuffled Frog Leaping Algorithm, ACSFLA)，种群中青蛙的更新策略如下。

$$D = \eta \cdot \text{rand}() \cdot (x_b - x_w) \quad (3-18)$$

$$x'_w = x_w + \text{rand}() \cdot r_{\max} \cdot e^{j\theta} + D$$

(3-19)

式中：

$r_{\max}$  ——同种群中最差青蛙与较好青蛙之间的距离；

$e$  ——自然指数；

$\theta$  ——  $(0^\circ, 360^\circ)$  区间内的随机数。

考虑到 SFLA 进化过程中，会出现全局最优解持续处于不更新的现象，造成算法早熟，因此本文引入了 Minkowski 距离，使得全局最优解不断更新换代，保证解的精度，加快算法寻优速度，且能够让全局最优的青蛙分别向各个子群中的最好的青蛙以及除最差青蛙以外的青蛙进行多个方向学习，提高全局最优青蛙的质量。根据公



式 (3-20) 对全局最优青蛙个体的更新。

$$X'_g = c_1 \cdot rand() \cdot M(X_g, X_j) + c_2(X_g - X_{bj}) \quad j \in N \quad (3-20)$$

式中：

$X_j$ ——局部除了最差青蛙以外的其他青蛙；

$X_{bj}$ ——子群中最优青蛙；

$M$ —— $X_g$  向其他子群除最差青蛙以外学习的Minkowski距离；

$c_1$ ——更新的权值。

综上，在基本的SFLA算法的基础上，为了提高算法中的青蛙粒子质量，引入精英策略，避免算法后期陷入局部收敛，加入柯西变异算子，为了加快全部寻优的速度则引入Minkowski距离。具体算法程序流程如下：

1) 初始化算法，其中包括了种群的规模大小  $M$ 、子群的个数  $S$ 、相应的迭代步长  $D$ 、子群迭代次数  $Ne$  和种群的迭代次数  $MAXGE$ ；

2) 对种群的  $M$  只青蛙中，计算每一只青蛙的适应值，按照降序的排列的方法，将其平均的分到子群  $S$  中，置子群的迭代次数  $it$  为 0，通过精英策略对子群中最差的青蛙进行更新，并且在更新的过程中加入柯西变异算子，每更新一次  $it=it+1$ 。

3) 判断子群中新个体的适应值是否大于子群中最差的青蛙的适应值，如果大于则用新个体替换子群中最差的青蛙进行更新，如果新个体的适应值没有得到改进，则使用全局最优青蛙替换子群中的最优青蛙继续产生新的解。

4) 当子群迭代完成后，将所有的青蛙一起混合后，重新分到  $S$  个子群中，重新进行分组，重复以上的步骤直到满足全局的迭代次数  $MAXGE$ ，算法结束。

### 3.3.3 算法实现

本章主要为了实现用于监测智能变电站设备所构成的无线可充电传感器网络的充电规划。考虑到在电网中智能变电站中的设备位置分布无规则性，直接影响到传感器节点的分布，因而本章假设事先知道所有提出申请的网络节点的位置、距离、能量等信息，得到网络节点的分布情况，给予达到阈值下限的节点进行能量补充，让小车在能量约束的条件下，陆续给需要的节点充电最后能够回到基站，且将充电车的行驶时间控制在  $T$  以内，使得充电车的电池利用率最大化。通过改进的蛙跳算法对充电路径进行优化。基本步骤如下：

1) 初始化  $n$  个网络节点坐标，计算各个节点之间的距离，生成距离矩阵。

2) 设置算法参数，产生初始种群，将种群中的每个青蛙个体的看成一条遍历  $n$

个节点的路径，将其编码为  $X = (x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 。

3) 根据蛙跳算法分组策略对初始种群进行分组，将种群分为  $S$  个子群。

4) 将充电车的路径长度当作蛙跳算法的适应度函数，计算适应值，并对每只青蛙个体的适应度值进行排序。

5) 计算局部最优值和最差值，调整最差值，将最差青蛙个体向其他种群最优青蛙个体学习，根据式 (3-18)、式 (3-19) 对个体进行更新，循环迭代到指定次数并保存。

6) 局部达到预定的迭代次数之后，输出局部最优值，并与其他种群中的局部最优值进行对比。达到全局迭代次数之后，输出最优值，从而得到一条最优的路径。

### 3.3.4 算法程序流程图

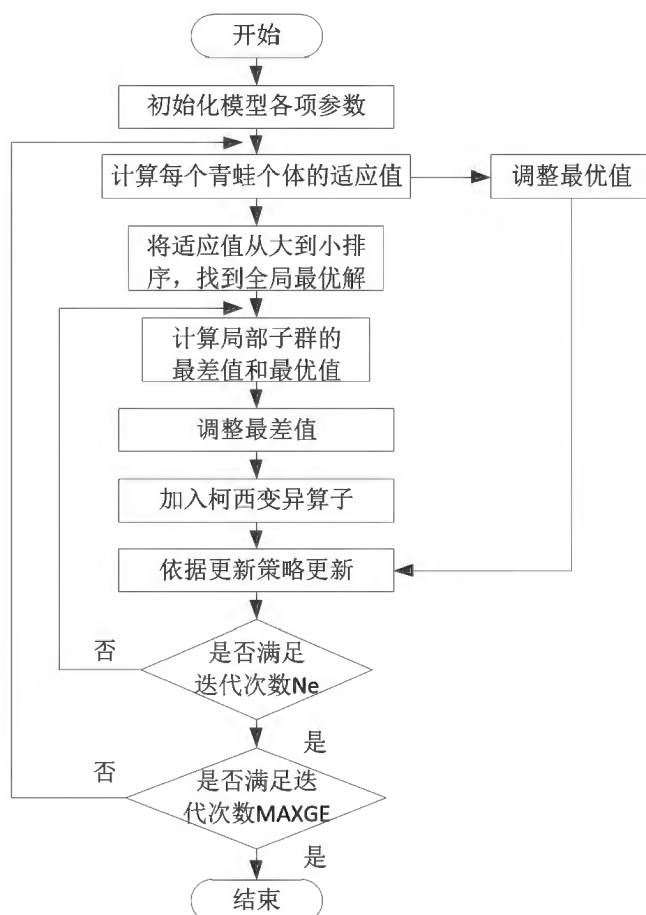


图 3-6 优化流程图

Fig.3-6 Optimized flow chart

### 3.4 实验结果与分析

#### 3.4.1 环境参数设置

本文设计的用于监测智能电网中智能变电站的无线可充电传感器网络规模为  $100m \times 100m$ ，在此区域内根据监测设备的位置分布 40~80 个传感器节点，基站 S 位置位于网络 (50,50)。具体参数见表 3-1。

表 3-1 实验参数表  
Table 3-1 Experimental parameter table

名称	参数值
网络大小	$100m \times 100m$
传感器数目	40 ~ 80
S 位置	(50,50)
节点能量规格	200J
充电车速度	4m / s
节点收传数据能耗	100nJ / bit
能量阈值	60J
充电速率	4J / s
监测周期	$1 \times 10^5 s$

根据以上设置的参数进行仿真实验，仿真实验在 win10 系统、intel 酷睿系列的 CPU、8G 内存、500G 硬盘的电脑上的 MATLAB 2014b 下仿真，设置 ACSFLA 的迭代次数 MAXGE=50，Ne=50，M=50，S=20。以原始的蛙跳算法（SFLA）和改进的蛙跳算法（ACSFLA）作对比。除此之外，再与蚁群算法<sup>[62]</sup>（ant colony optimization, ACO）比较，ACO 算法是一种模仿蚂蚁在觅食过程中的行为，其算法思想为在充电车选择充电节点的过程中，任意选择一条路径并留下信息素，信息素的浓度越高，蚂蚁选择这条路径概率也越大，如此反复从而选择出最优的路径，是较早的路径优化智能算法。

#### 3.4.2 性能指标

针对提出的 ACSFLA 算法，本文采用三个标准来验证算法的有效性，一个为算法收敛速度，然后充电车的充电路径距离，最后一个为能量利用率<sup>[63]</sup>：

##### （1）收敛速度

为了能够有效验证本文算法的实用性，将收敛速度作为衡量优化算法的性能指标之一，在算法求解问题过程中，收敛速度快，则体现了该算法求解速度快慢，能

够快速求解出充电方案，而迭代图则能直观的反应算法的收敛速度的快慢。

### (2) 路径距离

充电车在完成一次充电任务之后，返回到基站，所行驶的总的距离。

$$D_M = \sum_{i \neq j}^C d_{ij} \quad (3-21)$$

### (3) 能量利用率

在一次充电过程中，充电车对节点充电的总能量与充电过程中所消耗的总能量之比，将能量利用率记为  $\Delta$ ：

$$\Delta = en(c) / (E_c + en(c)) \quad (3-22)$$

其中： $en(c)$  是小车完成充电任务所遍历的节点所充的能量； $E_c$  是充电车行驶消耗的总能量； $\Delta$  是充电车为节点充电所消耗的能量与充电车行驶消耗的总能量和所充节点总能量的比值。

## 3.4.3 仿真结果分析

### (1) 算法收敛速度

在监测智能电网中智能变电站区域内，根据变电站主要设备位置，分布 40 传感器节点进行仿真实验，为了体现本文算法的有效性，通过 Matlab 将每种算法运行多次，结果如下：

图 3-7 为网络节点数 40 时，各算法进化特性图，可以很清晰的看出 SFLA 优化后的结果要优于 ACO，但是收敛速度要略慢于 ACO，而本文的算法无论是优化出来的结果还是收敛速度都要优于其他两种算法。从而表明本文算法在求解小规模监测智能电网的优越性。

### (2) 路径距离

为了进一步说明本文算法的有效性，对节点 40~80 区域内，通过 SFLA 算法、ACO 算法和 ACSFLA 算法优化后的路径距离进行对比，从图 3-8 曲线变化上面来看，在节点数量少的时候，SFLA 算法和本文的 ACSFLA 算法表现都很优越。在节点数不断增大到 60 时，本文 ACSFLA 算法相较于 SFLA 算法优化后的路径距离降低了 93m，相较于 ACO 算法降低了 201m。横观图中变化曲线，在 65 节点前 ACO 算法优化效果明显比其他两算法要差，所求得结果并不是很理想。当节点数增加到 65 个之后，SFLA 算法求解的充电路径最长，这是由于 SFLA 算法后期陷入局部收敛，而纵观曲线，ACSFLA 算法优化的路径一直都比其他两种要短。

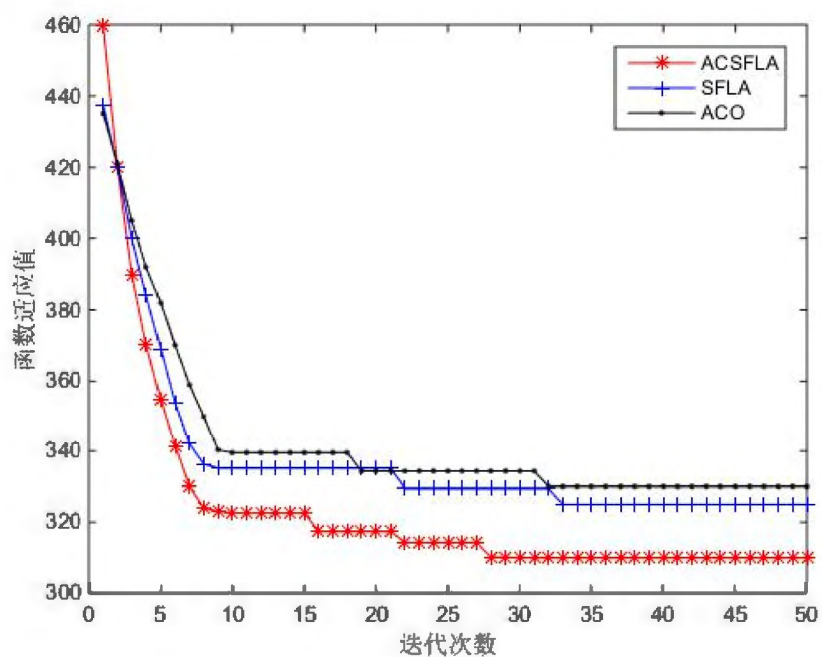


图 3-7 各算法进化特性  
Fig.3-7 Evolutionary characteristics of various algorithms

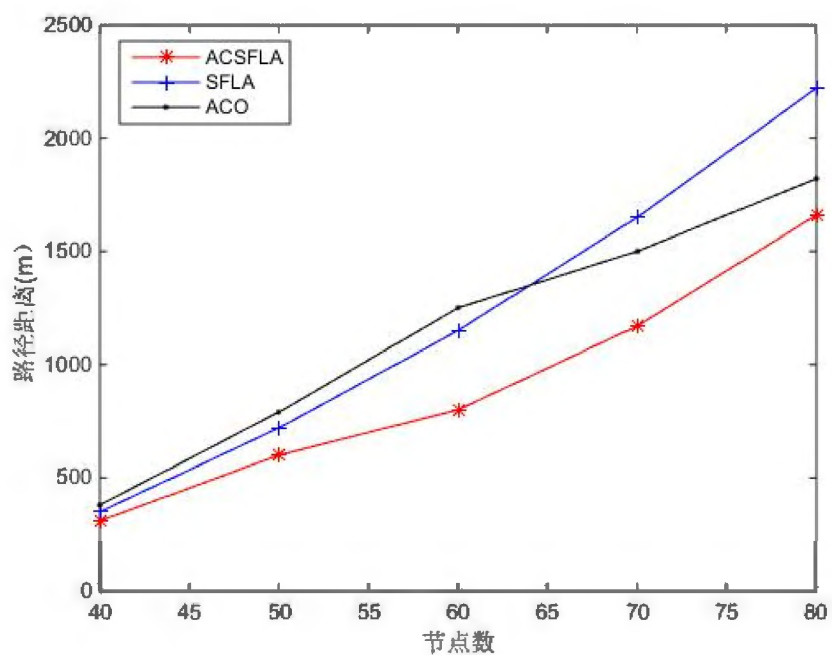


图 3-8 充电路径变化曲线  
Fig.3-8 Charge path change curve

### (3) 能量利用率

图 3-9 为 SFLA 算法与 ACSFLA 算法在网络节点 40~80 区域内充电车能量利用率的变化曲线。从图中可以直观看出，伴随着传感器节点的增加，充电车为更多的节点提供充电服务，因此单个充电车能量利用率也不断的变大。

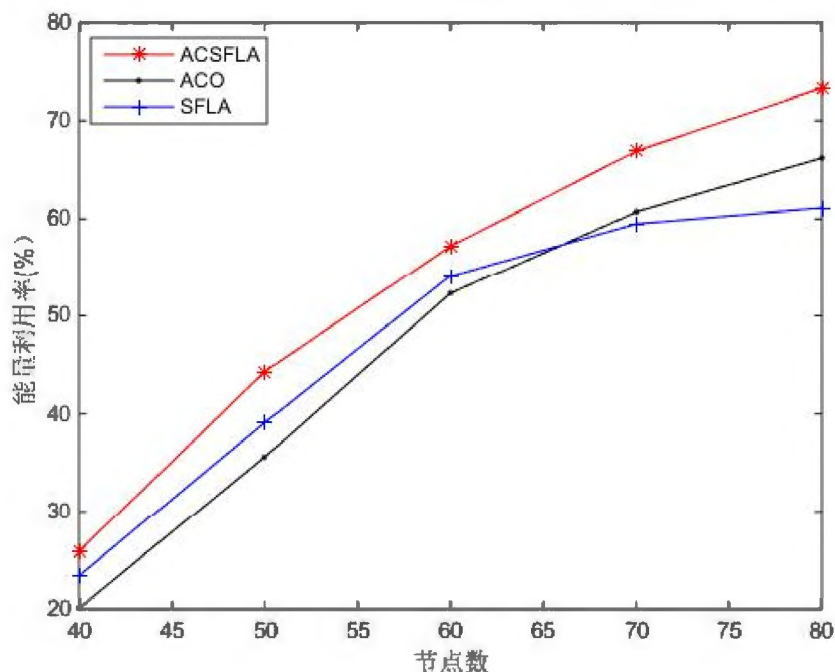


图 3-9 能量利用率变化曲线  
Fig.3-9 Energy utilization change curve

在监测的智能电网规模很小时，ACO 算法下的充电车的利用率最低，随着网络变大，节点数量增加，曲线变化逐渐趋近于本文算法，表 3-2 为 60 点以及 80 节点三种算法的优化后的能量利用率比较，在节点数增加到 60 时，ACSFLA 相较于 SFLA 提升了 3.2%，而 ACO 算法优化结果依然不理想。当节点增加到 80 个时，相较于仅次自身的 ACO 算法高了 7.3%，而此时 SFLA 算法下能量利用率最低，这是由于 SFLA 算法后期时，陷入了局部最优，导致寻优的精度不高。而 ACSFLA 算法下的能量利用率一直比其他两种算法下的能量利用率高，综上所述，验证了本文改进算法的有效性。

表 3-2 算法优化后的能量利用率比较  
Table 3-2 Comparison of energy utilization ratio after optimization

节点数	SFLA	ACO	ACSFLA	ACSFLA 与 SFLA 提升率	ACSFLA 与 ACO 提升率
60	54.1	52.3	57.3	3.2	5
80	61.1	66.2	73.5	12.2	7.3

### 3.5 本章小结

本章主要研究了用于监测智能电网中智能变电站的小规模无线可充电传感器网络中充电调度问题，针对实际应用，考虑到充电车携带的能量有限，因此本章在研究过程中将充电车的电池利用率转换成求解最短路径问题，建立单移动充电车的充电优化方案，并通过引入精英策略、柯西变异算子以及 Minkowski 距离来对基本蛙跳算法进行改进，提出 ACSFLA 算法对其进行优化。在小规模网络模型中，与基本蛙跳算法和蚁群算法（ACO）作对比分析，仿真结果表明，本文的 ACSFLA 算法性能要优于 SFLA 算法以及 ACO 算法，能够在一定程度上提高了充电车的电池利用率且充电路径最短。

## 第四章 大规模无线可充电传感器网络充电规划

### 4.1 引言

在研究用于监测智能变电站的小规模无线可充电传感器网络的充电规划问题的基础上，以充电车的能量限制和节点的停止工作的时间限制，建立优化模型，提出了 ACSFLA 算法进行优化求解。当智能变电站中所需要的监测区域变大时，设备随之增加，无线可充电传感节点覆盖也会相应变多，网络规模也变大，如果仅用单个充电车进行充电任务，这对于充电车自身的要求会很高，不仅要求充电车的移动速度要快，充电下功率要高以及自身携带的能量也要很大，在实际应用不仅会导致充电车自身成本变高，也会让部分节点得不到及时充电，因能量耗尽而停止工作。因此，在这些因素下，采用多个能力较弱的充电车对网络节点进行能量补给，不仅经济实用，也能够快速给予需要的节点进行能量补充，延长网络的生命周期。

本章采用多充电车充电的策略对大规模无线可充电传感器网络动态模式下，进行充电规划研究，建立带时间窗多充电车充电优化方案。为了能够快速有效地求解带时间窗的组合优化问题，本文将启发式算法和以及 ACSFLA 算法结合，提出 MMCSA (Multiple Mobile charger Charging Scheduling Algorithm, MMCSA) 算法对该方案进行优化，从而得到最佳的充电方案。

### 4.2 网络模型与优化问题描述

#### 4.2.1 网络模型

在智能变电站环境下，无线可充电传感器网络持续的数据信息传输，有效地提高了智能变电站稳定性，从而保障了整个智能电网的安全性，随着监测智能变电站的区域以及设备变大增多，而监测智能变电站的传感器网络也相应变大，对于传感器网络系统的维护也变的更加重要。本章用于监测的智能电网中智能变电站环境的传感器网络仍是多跳的 WRSNs，传感器的节点针对需求随机分布，且在网络内存在一个固定的基站以及多辆充电车。如图 4-1 所示是在大规模 WRSNs 中采用多充电车的充电规划场景，在每个调度周期，充电车只能采用依次为单一节点充电，并且每个充电车都是独立进行充电调度任务。



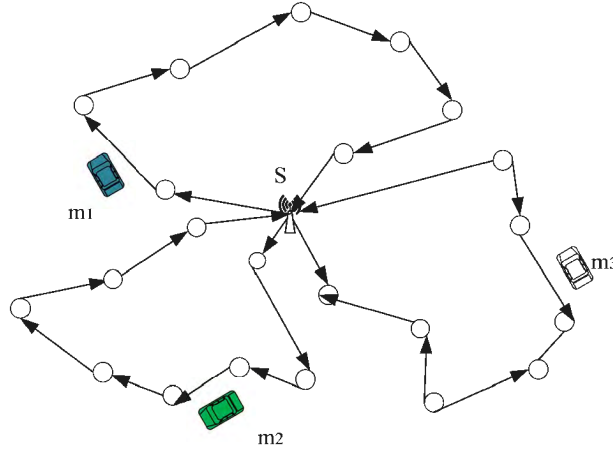


图 4-1 多移动充电车工作场景  
Fig.4-1 Model of multiple mobile charger

假设给定的 WRSNs 中的有尽可能多的充电车，且在网络中心放置一个基站，网络节点随机分布，当 WRSNs 开始运行的时候，节点因为所处的位置不同，所消耗的能量也不同，随着时间推移，网络节点因剩余能量低向基站发出充电指令，为了维护网络能够持续稳定的运行，且网络规模变大，节点数目分布众多，则需要派遣多辆充电车对网络节点进行充电。本章在第三章的基础上，对充电策略进行深入研究，从静态规划问题，深入到动态规划问题，设计合理的充电规划方案，减少充电车的冗余路径，提高充电车的能量率。

#### 4.2.2 多充电车工作模式

在大规模的无线可充电传感器网络中，拥有  $K$  辆充电车  $M$ ，充电车的集合用  $M = (m_1, m_2, m_3, \dots, m_k)$  其中集合中的  $m_k$  表示第  $k$  辆充电车，对于多辆车并行对节点充电的问题，即主要研究对充电车的路径优化，将此类问题看成 DVRP 问题。针对本章的研究内容，在一轮调度周期内，充电车  $m_k$  从基站满能量出发，携带的能量为  $E_{\max}$ ，根据基站收集的信息，对需要充电的节点进行能量补充，用  $\tau_i^k$  记做充电车  $m_k$  给予节点  $N_i$  的补给时间，用  $\tau_{\text{tour}}^k$  表示充电车的行驶时间。由于本文采用的都是能量有限的充电车，所有在完成充电任务之后必须回到基站进行能量补给，为了方便研究，将充电车补给时间忽略不计<sup>[64]</sup>。

#### 4.2.3 问题描述

本文所要解决的充电规划问题可具体表述如下：基站  $S$  有携带能量相同的  $K$

辆充电车，充电车的最大能量为  $E_{\max}$ ，现有  $n$  个网络节点（1,2...,  $n$ ）的充电任务需要完成，第  $i$  个网络节点的剩余的能量为  $E_i$ ，第  $k$  辆车完成节点  $i$  的任务需要的时间为  $\tau_i^k$ ，行驶时间为  $\tau_{tour}$ ，且节点的  $i$  的最佳充电时间是在能量阈值为  $[E_u, E_d]$  内开始，每个节点只能由一辆车一次完成充电任务，每辆车从基站出发，完成充电任务后最终回到基站。最终目标满足每辆充电车的能量限制，时间的限制等一系列的约束条件找出充电车完成充电任务中自身移动能耗最低的最优路径方案，使得充电车的能量利用率最大化。

#### 4.2.4 基本假设

为了将多辆车充电路径问题具体转化为数学模型，本文建立如下的基本假设：

- （1）只有一个基站，且每条充电线路的开始和结束位置都是在基站，所有的充电车必须在规定的时间内返回到基站；
- （2）基站和网络中的节点位置坐标都是已知；
- （3）充电车都为同一种车型，且携带的最大能量已知。
- （4）充电车在进行充电服务过程中，节点所需充电的总能量不得超过充电的携带能量；
- （5）每个节点必须且只能被充电一次；
- （6）每个节点都有一个固定的能量阈值上下限  $[E_u, E_d]$ ，到达节点的时间最好在能量约束的时间范围内；

#### 4.2.5 充电车的充电优化模型

当监测电网的传感器网络开始执行监测任务时，由于节点是根据所监测的智能电网中设备位置而分布，考虑到节点能耗采用的空间多路径衰减模型，在监测任务过程中，WRSNs 中的节点能耗率各不相同，因此在一段时间后，WRSNs 中传感器节点各自剩余能量也不同，网络中存在部分节点剩余能量很多，也有部分节点承担收集和传输信息作用，造成节点能耗过快，剩余能量很低，因此需要为这类节点安排充电。由于充电车移动会消耗能量，考虑到充电车能量利用率，若充电车在节点剩余能量合适的区间内安排充电，即不过早为节点充电，也不过迟为节点充电而导致节点失效，因此在充电调度中，充电车一次为节点提供 60% 的能量，相较于充电车两次为节点提供 30% 的能量，减少了充电车移动能耗，充电车的能量利用率更高。因此本文在充电过程中，对节点设定能量阈值上、下限，

即节点剩余能量若在上限值之上，充电车则不会对其给予能量补充，在接近某一下限时，则必须安排充电车给予能量补给。

综上所述，本文将时间窗<sup>[65]</sup>的概念带入到充电规划问题，在时间窗内安排充电车充电。对于带时间窗的充电优化问题包含了 TSP 和 VRP 的特性，图 4-2 是一个带时间窗的充电优化模型的图形模型以及解决方案。图中有基站 S，即用三角表示，圆形表示网络节点，总共分为三条路径，充电车开始对节点充电时，例如在 P3 路径中，网络节点 8 的时间窗为 $[t_{u8}, t_{d8}]$ ，节点 5 的时间窗为 $[t_{u5}, t_{d5}]$ 。对于下一充电节点约束可表达为：当节点 8 充电之后，节点 8 的开始充电时间与补充能量的时间以及充电车行驶时间之和，要早于节点 N<sub>5</sub> 最晚的充电时间  $t_{d5}$ ，且对充电开始时间也存在约束，即充电车为节点充电时，不得早于  $t_{u5}$ ，若早，则需要等待直到  $t_{u5}$ ，开始进行充电服务。

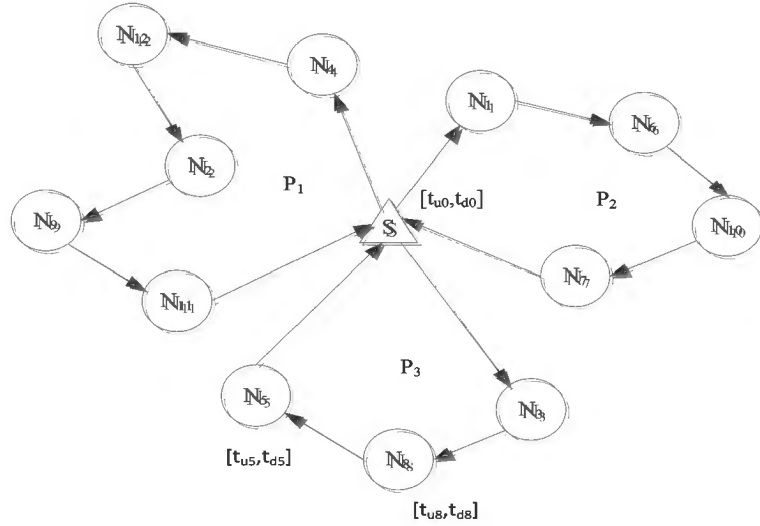


图 4-2 带时间窗的图形模型  
Fig.4-2 Graphical models with time windows

综上所述，本章将节点  $i$  开始进行充电的时间用  $T_{ik}$  表示；充电车从节点  $i$  行驶到节点  $j$  的时间用  $t_{ijk}$  来表示；充电车因提前到达网络节点而等待的时间用  $t_{ik}$  表示。传感器节点  $N_i$  的在通过本文设定的节点的能量阈值，来计算时间窗 $[t_u, t_d]$ 。定义变量如式(4-1)所示：

$$x_{ki} = \begin{cases} 1 & , \text{充电车 } k \text{ 给 } N_i \text{ 充电} \\ 0 & , \text{否则} \end{cases} \quad x_{ijk} = \begin{cases} 1 & , \text{充电车 } k \text{ 从 } N_i \text{ 移动到 } N_j \\ 0 & , \text{否则} \end{cases} \quad (4-1)$$

以充电车的能量为约束，建立带时间窗的多充电车的充电优化模型如下：

$$\min Z = Z_T + Z_s \quad (4-2)$$

其中：

$$Z_T = \sum_i \sum_j \sum_K k Q_T d_{ij} x_{ijk} \quad (4-3)$$

$$Z_s = p_u \sum_i \max(t_u - T_{ik}, 0) + p_d \sum_i \max(T_{ik} - t_d, 0) \quad (4-4)$$

式中：

$\min Z$  ——移动能耗最小；

$Z_T$  ——移动能耗；

$Q_T$  ——充电车能量消耗率；

$Z_s$  ——时间窗充电代价；

$p_u$  ——等待惩罚因子；

$p_d$  ——迟到惩罚因子；

$$\begin{cases} \sum_k y_{ki} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, |p^k| \\ \sum_i x_{ijk} = y_{ki}, \quad j = 1, 2, \dots, |p^k| \\ \sum_j x_{ijk} = y_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, |p^k| \end{cases} \quad (4-5)$$

$$\begin{cases} t_{ijk} = \frac{d_{ij}}{v_c} \\ T_{jk} = T_{ik} + t_{ijk} + t_{ik} \end{cases} \quad (4-6)$$

其中，式(4-2)表示为一轮调度中，最小化充电车移动能耗，且加入惩罚因子，在违反时间窗时，给予一定的能量惩罚，也为本文的优化目标；式(4-5)表示为所需要充电的节点在一轮调度中只被一辆车充电；式(4-6)表示充电车在充电调度中从节点*i*移动到*j*的时间，以及充电车为节点*j*开始充电的时间。

然后，对于充电车本身可以独立完成充电任务，在一轮充电调度之后，充电车必须回到基站来补充能量，在调度过程中将充电车的行驶时间和充电时间之和用 $\tau^k$ 来表示，即充电车一轮调度的工作总时间。

$$\tau_{tour}^k + \sum_{i=1}^s \tau_i^k = \tau^k \quad (4-7)$$

对于每一个能量有限的移动充电车，在进行一次往返充电过程中，所充节点的总能耗以及移动所消耗的能量不得超过充电车的所携带的能量，即

$$Q_T \tau_{tour}^k + p_c \sum_{i=1}^s \tau_i^k \leq E_{\max}^M \quad (4-8)$$

最后，在节点进行能量补给之前，节点的剩余能量不会低于最低工作电量  $E_{\min}$ ，则有约束条件：

$$E_{\max} - E_{\min} \geq p_i \times (\tau^k - \tau_i^k) \quad (4-9)$$

根据以上分析，得到完整的带时间窗的充电优化问题如下：

$$\begin{aligned} \min: & Z \\ \text{sit:} & \sum_k y_{ki} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, |p^k| \\ & \sum_i x_{ijk} = y_{ki}, \quad j = 1, 2, \dots, |p^k| \\ & \sum_j x_{ijk} = y_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, |p^k| \\ & \tau_{tour}^k + \sum_{i=1}^s \tau_i^k = \tau^k \\ & Q_T \tau_{tour}^k + p_c \sum_{i=1}^s \tau_i^k \leq E_{\max} \\ & E_{\max} - E_{\min} \geq p_i \times (\tau^k - \tau_i^k) \end{aligned}$$

带时间窗无线可充电传感器充电优化模型是一个组合优化问题，有两个目标：最小化使用车辆数；最小化所有车辆的移动总能耗。为了能够快速求解这一问题，因此本章结合启发式算法和 ACSFLA 算法提出一种大规模网络充电路径优化算法，命名为 MMCSA (Multiple Mobile charger Charging Scheduling Algorithm, MMCSA)，通过设计的 MMCSA 算法来求解带时间窗的充电优化问题。

### 4.3 MMCSA 算法设计

#### 4.3.1 基于节点能量阈值的时间窗计算

由于在智能变电站环境中，电力设备的重要程度不同以及所处位置的不同，节点向基站发送充电请求的时间先后也不同。本章根据不同已知能量阈值的条件下，将节点发送的充电信号的时间和节点达到最小剩余电量的时间通过时间窗<sup>[66]</sup>进行描述，通过计算不同节点传感器的能耗率，即为每个节点下的时间窗，图 4-3 给出了不同节点传感器的时间窗。

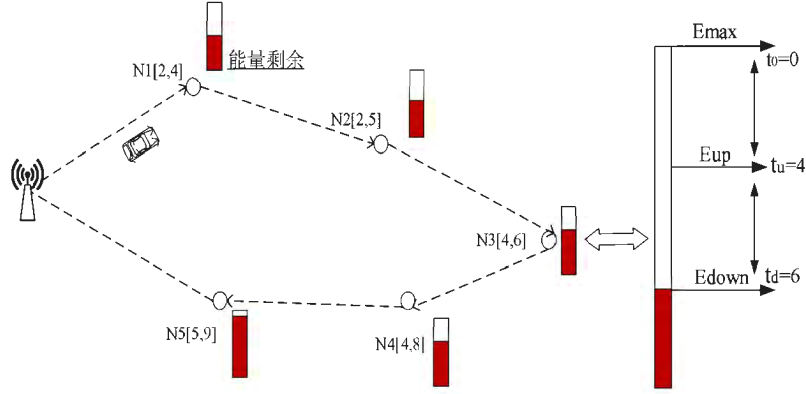


图 4-3 传感器节点时间窗  
Fig. 4-3 The time window of the sensor node

图 4-3 为在时间窗下移动充电车为传感器充电的回路。在左侧图中小车是从基站出发，移动充电车对不同的传感器节点进行能量供给，对不同的节点能量供给时间即为相应节点的时间窗。在右侧图中给出的是节点  $N_3$  在时间窗  $[4,6]$  下对应的节点剩余能量，即充电小车在时间间隔 4 到 6 之间给节点  $N_3$  充电。在图中  $t_0$  为在该时刻下，节点本身的剩余能量足够供给传感器的运作，节点  $N_2$  的能耗为  $p_2$ ，在时间窗上限  $t_u$  下，节点剩余的能量能够维持节点能量供给，在这个时间之前节点不发送充电信号。而在超过时间窗下限  $t_d$  之前，如果节点不发送充电请求，则超过此时间，节点剩余能量减小为零而死亡。

如果在只要节点有能量消耗就发相应的充电请求信号，这样会有大量的能量消耗，而使用时间窗时为充电的节点设置了剩余能量阈值上限  $E_u$  和剩余能量下限  $E_d$ ，当节点中传感器的剩余能量高于  $E_d$  与节点的剩余能量低于  $E_u$ ，就发出相应的充电请求，这样不仅节省了大量的能量消耗和减少能量交换次数，有利于提高节点的电池寿命并且对充电小车的能量利用更加高效。

假设节点剩余能量下限  $E_u = \beta E_{\max}$  ( $\beta$  值由人员的经验与实际情况进行确定)，节点  $N_i$  相应的剩余能量为  $E_i$ ，在节点的剩余能量达到下限阈值之前，移动充电车必须要为相应的节点进行充电，约束条件如下：

$$\frac{d_{is}}{v_c} \cdot p_i \leq E_i \leq E_{\max} \quad (4-10)$$

式中：

$d_{is}$ ——基站与节点  $N_i$  之间的距离；

$p_i$ ——节点能量消耗速率

$v_c$ ——充电车的速率。

所以节点  $N_i$  的时间窗  $[t_d, t_u]$  为:

$$\begin{cases} t_d = \begin{cases} \frac{E_i - E_u}{p_i}, & E_i > E_u \\ 0, & E_i \leq E_u \end{cases} \\ t_u = \frac{E_i - E_d}{p_i} \end{cases} \quad (4-11)$$

对于充电节点的剩余能量阈值上限的设置, 如果设置得过低会导致在每轮充电过程中需要进行充电的节点传感器较多, 如果得不到相应的移动充电车对其进行充电, 出现由于能量过低而死亡的现象。而如果相应的剩余能量上限设置得过高, 这时每一轮需要充电的节点则会较少, 如果派大量的充电移动车对其补充电能时, 则会造成大量的能量损耗, 相应的小车得不到充分的利用。所以需要选择适当的充电上限。

首先计算节点需要充电的概率如下:

$$p(x_E) = \begin{cases} \frac{E_u - E_i}{E_{\max} - E_i}, & E_i < E_u \\ 0, & E_i \geq E_u \end{cases} \quad (4-12)$$

则可求得需要充电的节点数量为:

$$l = \sum_{i=1}^n p(x_E) \cdot x_E \quad (4-13)$$

式中,  $x_E$  表示  $E_i \leq E$  的情况, 其约束条件为:

$$x_E = \begin{cases} 1, & E_i < E_u \\ 0, & E_i \geq E_u \end{cases} \quad (4-14)$$

综上可得, 节点需要充电的能量上限为:

$$E_u = \frac{l v_c + \sum_{i=1}^n \frac{d_{iS} \cdot p_i}{E_{\max} \cdot v_c - d_{iS} \cdot p_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{v_c}{E_{\max} \cdot v_c - d_{iS} \cdot p_i}} \quad (4-15)$$

因此, 根据式(4-15)可以通过网络节点能量的上、下限  $E_d$  以及  $E_u$ , 计算节点的充电时间窗。

#### 4.3.2 基于最少充电车的路径构造

在智能变电站环境下, 传感器网络在监测设备一段时间之后, 节点之间数据

传递产生能耗，且各个传感器节点空间位置分布不同，对应信息传递所消耗的能量也不同，通过能量阈值来计算节点时间窗，利用节点时间窗的约束，来构造初始路径，本文选择与基站S相连的初始路径数量与对应的种子节点数作为移动充电车的可行路径，种子节点的选择有以下两种原则：（1）与基站相距最远，（2）时间窗的约束最短，在本文中，通过基站距离最长和路径的数量最少对种子的节点进行挑选。

考虑到实际情况，本文对化移动充电车的规模  $K$  最小作为优化目标，即移动充电车的初始路径数最小化，具体可以通过公式（4-16）得到。

$$P = K_{\min} = \frac{E_d}{E_{\max}^M} \quad (4-16)$$

式中：

$E_d$  ——总的节点需求量；

$E_{\max}^M$  ——每辆车所携带的能量

显然，充电车队规模  $K$  大于  $K_{\min}$ 。如果种子节点数由  $P = K_{\min}$  确定的，即最初的初始路径数即为最小值，那么可以在一定程度上减少算法中消除冗余路径的过程。

显然，移动充电车的规模  $K$  最小，其对应的初始路径就为最少的，这样不仅减少了种群的优化规模，并且在一定程度上减小了算法的优化时间。

为了让初始路径以最小的形状，包含更多的节点，因此在初始路径上种子节点的选择利用了节点位置的凸包<sup>[67]</sup>。凸包就是在一组平面上的点，求一个包含所有点的最小凸多边形，结合本文情况，满足时间窗约束以及距离基站最远两个条件来选择种子节点。用  $W$  集合表示已归入充电安排的节点集合， $\bar{W}$  表示未安排充电的节点集合。

初始路径建立具体步骤描述如下：

- 1) 建立  $V_C$  和  $\bar{V}_C$  集合，初始化集合  $W$  为空。
- 2) 选择距离基站S最远的节点  $z \in V_C$  作为第一个种子节点，更新集合  $W = W \cup \{z\}$ ，并通过连接种子节点  $z$  和基站建立一条初始路径。
- 3) 下一个种子节点在  $\max\{d_{z_j}, d_{z_i}\}$  中进行选择，从而使选择的种子节点在较大程度上分散在相应的位置上，建立路径时在新种子节点中进行选择，并更新  $V_C$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $W$  和  $\bar{W}$ 。
- 4) 重复步骤（3）（4），直至  $W$  中的种子节点数量达到  $k_{\min}$ 。



#### 4.3.3 充电车行驶距离增量最小的最佳插入位置

在初始路径构造阶段之后，将对未充电节点插入到最佳位置安排充电，而在部分文献如[68]的研究中，最佳插入位置通常由最小化行驶总路径距离来确定，导致了重复计算总的充电行驶距离，增大算法求解难度，针对这一问题，本文提出充电车行驶距离增量最小来选择未充电的节点最佳插入位置，在一定程度上减少了算法计算量。

$$\min \Delta d = d_{ih} + d_{jh} - d_{ij} \quad (4-17)$$

式中：

$h$ —— $h \in \bar{W}$  所有待插入的节点；

$\Delta d$ ——由插入节点  $h$  引起的充电车行驶距离的增量；

本章选择没有被选中充电的节点作为算法中两个插入阶段的候选节点。首先在第一个阶段中，忽略节点的约束条件，将在路径之外的充电节点插入到较优的位置上，直到不在路径上的节点插入完为止。这个过程相当于将  $\bar{W}$  中在路径之外的节点插到已完成的初始路径当中，直到  $\bar{W} = \emptyset$ 。之后再对所有被插入到初始路径当中的所有节点进行约束检验，检验每个节点被分配到当前路径之前判断插入节点是否会造成超过充电车所携带的能量或时间窗约束，如果插入到初始路径的节点违反了相应的约束则剔除此节点，即从已选中的节点集合  $W$  移动到未被选中的节点集合  $\bar{W}$ ，直到重新获得可行的并满足约束的路径。

在插入过程中的第二阶段，对路径中剩余能量、节点能量的需求和未被选中的节点与可行初始路径间距等因素进行了考虑，从上一阶段未被选中的节点集合  $\bar{W}$  中重新插入到已确定的路径当中，考虑以上的距离因素，将已选入到集合  $W$  当中的节点与刚被选中的节点进行距离的降序排列，于此同时将  $\bar{W}$  中的节点也进行  $d_{zi}$  降序排列，之后再集合  $\bar{W}$  中距离最近节点  $i$  插入到剩余能量最大新的路径上，并且进行相应的节点能量约束验证，如果能满足相应的约束，则将相应的节点从集合  $\bar{W}$  中移动到集合  $W$  当中，否则，所有未被选中的节点不能成功的插入到新的路径当中则再利用 ACSFLA 算法对集合  $\bar{W}$  中待充电节点的充电路径进一步优化。

#### 4.3.4 ACSFLA 算法对充电车充电的路径优化

青蛙新个体  $X'_w$  是 ACSFLA 算法的重要组成部分，其作用是在当前青蛙个体  $X_w$  能够对已有较差青蛙个体进行替换。而用于连续优化问题的无规律的随机青蛙

个体并不能直接用于离散的带时间窗的车辆路径问题中，因此，需要针对带时间窗的充电优化模型设计了一种合适的  $X'_w$ 。

本章中，所设计的青蛙新个体  $X'_w$  具体操作为：将需要的进行替换的青蛙与已存在的青蛙个体的最优青蛙个体通过交叉与重组，生成新的青蛙个体  $X'_w$ ，本节用图4-4进行了简单的案例分析：其中P1为等待替换的青蛙个体，P2代表所有青蛙中的最优的青蛙个体。图中为所有该时刻的初始优化路径，如P1有三条初始的路径，即  $R1:3\ 1\ 7$ ， $R2:2\ 5\ 6$  和  $R3:4\ 2\ 8\ 9$ 。如图中步骤a所示，从P1和P2中选择一条初始路径，在例子当中， $R2$  为P1选中的初始路径， $R3$  为P2选中的初始路径。之后，对于已选中的青蛙个体，将另一青蛙粒子从初始路径当中进行移除，例如，在步骤a中，对于P1，随机对节点3和节点7从初始路径P2中进行切除，生成C1。相同地，对于包含节点5和节点6的P1也从P2中进行切除，生成C2。

由于在带时间窗的充电优化模型中，每个节点都要插入到初始路径中的恰当位置，所以下一个阶段就是将已切除的节点重新选入到初始路径当中。如图的步骤b，算法对已切除的节点7和节点3重新考虑到C1中，同时，将节点5和6重新考虑到C2中。首先哪个节点被选中是随机进行的，即将已切除的节点7和节点3重新插入到C1的顺序不确定。插入节点之后要对移动充电车的自身剩余能量和时间窗的约束进行验证，如果不满足约束，则插入的节点不能被插入。插入位置的选择与上一小节相同、第二次的插入阶段也与上一小节的插入阶段相同。在此例中，如图中步骤c所示，节点3和7都被插入到C1中的恰当位置。若没有找到可行的插入点，则建立一条新的路径。例如，节点6不能被插入到P2的当前路径中，因此创建了新的路径。

对于ACSFLA算法中子群的所生成的  $X'_w$ ，根据式(3-18)和(3-19)进行，计算青蛙子群中的最优青蛙个体和所生成的  $X'_w$  对应的适应度值（移动能耗），若  $X'_w$  对应的值小于子群中的最优值，则用  $X'_w$  将子群最优青蛙个体替换，重复此操作，直到满足迭代次数，得出最优解，最终得到最佳充电方案。

综上所述，通过设计的MMCSA算法求解带时间窗的充电路径优化问题，每一辆车采用相同的约束进行路径求解，以下再通过一个简单的算例来补充说明，例如在随机分布10个传感器节点，构成20m×20m规模的WRSNs，安排多个充电车对此网络内节点进行充电调度，在此调度内，充电车所携带的能量为4J，速度为3 m/s，以及移动能耗率为0.04 J/m。通过基站来获取节点的详细信息，计算其时间窗，具体的参数设置如表4-1，根据这些数据信息，通过算法优化后得出合

理的充电规划。

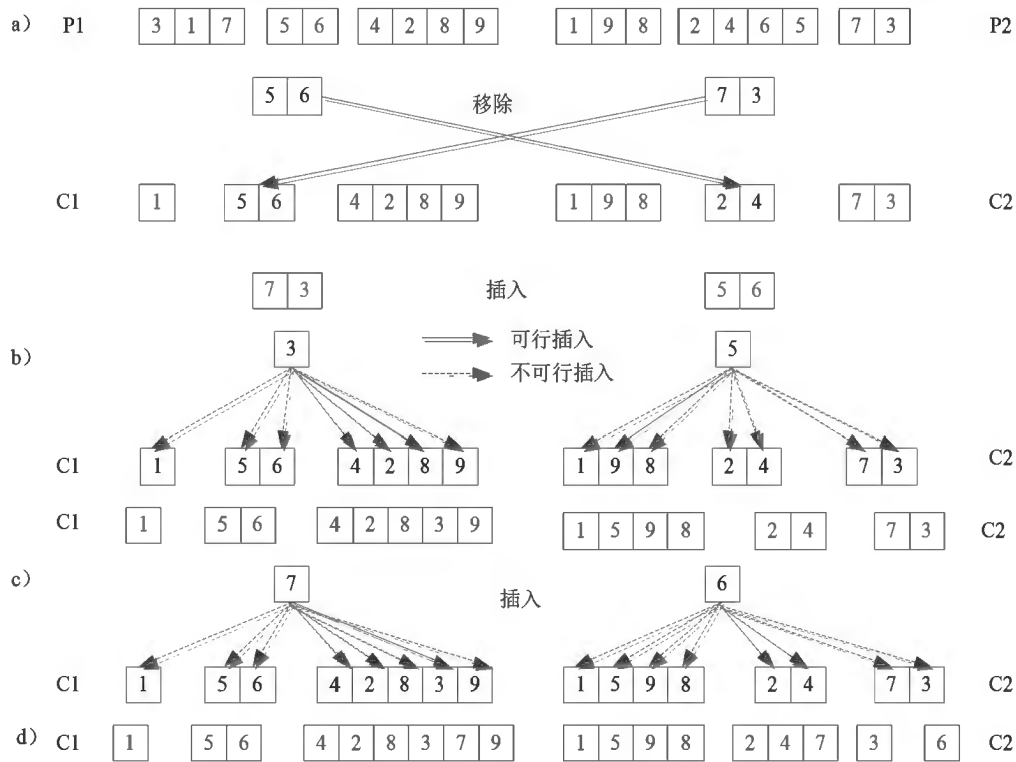


图4-4 ACSFLA优化示意图

Fig. 4-4 Schematic diagram of ACSFLA optimization

表 4-1 节点与充电车的参数  
Table 4-1 Parameters of node and charging vehicle

节点 ( $N_i$ )	X 坐标	Y 坐标	充电时间上限	最晚充电下限	需求量	充电时间
0	10	10	0	0	0	0
1	19.1	12	6.4	0.7	0.8	0.3
2	18.3	5.4	13.8	8	0.6	0.1
3	14.3	6.4	13.3	8.7	0.4	0.4
4	2.1	6.2	2.6	1.3	1.6	0.1
5	15.1	16.5	4.4	0.1	0.8	0.1
6	4.5	13.9	7.5	3.5	0.9	0.1
7	7	18.8	4	1.6	1.7	0.3
8	11.9	2.5	8.4	3.5	1.3	0.3
9	8.5	16.1	9.4	3.8	1.1	0.2
10	4	1.5	36	0.7	1.8	0.3

表4-1中的第一列数据表示的基站与节点的编号，0代表是基站S，第二、三列

数据分别表示基站以及网络节点的坐标，本文假设节点之间的距离为欧式距离，且  $d_{ij} = d_{ji}$ ， $i \neq j$ ，距离满足三角不等式；第四列表示节点的所需要的充电能量，第五、六列分别是节点充电时间的上下限；第七列是节点的充电时间。

通过这些数据在 matlab2014b 上进行仿真，本次实验进行多次随机测试，取得最优的结果如表 4-2 所示。

表 4-2 最优实验结果  
Table 4-2 The best solution

路径标号	充电车	节点数	充电顺序	移动能耗	最优解
1	$m_1$	2	$N_0 \rightarrow N_5 \rightarrow N_1 \rightarrow N_0$	1.34J	
2	$m_2$	2	$N_0 \rightarrow N_{10} \rightarrow N_4 \rightarrow N_0$	1.06J	
3	$m_3$	3	$N_0 \rightarrow N_7 \rightarrow N_6 \rightarrow N_9 \rightarrow N_0$	1.56J	
4	$m_4$	3	$N_0 \rightarrow N_8 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3 \rightarrow N_0$	1.73J	5.69J

表中可以看出最优解为 5.69J，共生成了 4 条充电路径，由这几条路径回路组成充电车的充电路径，经检验，所有路径均满足多约束的条件。其最佳的充电路径方案如图 4-5 所示。

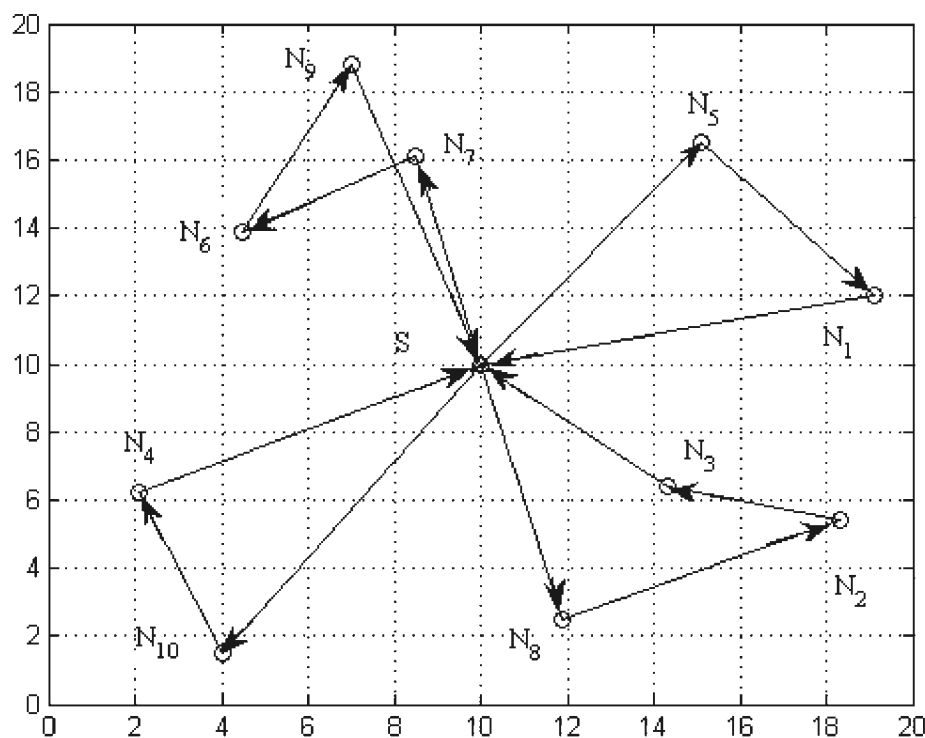


图 4-5 充电路径示意图  
Fig.4-5 Schematic diagram of charging path

## 4.4 MMCSA 算法实现

综上所述，采用凸包算法选择种子节点构造初始路径，再根据充电车行驶距离的增量来确定最佳插入位置，通过时间窗和充电车能量的约束来进行判断移除的节点，最后通过 ACSFLA 算法再次对路径优化，完成动态模式下多充电车充电方案设计，该方案是传感器网络持久运行的较好的能量补充方案，保证了在无线可充电传感器网络中节点能耗不均衡的情况下，让充电车能够及时对节点补充能量。算法实现了用于监测智能变电站的大规模无线可充电传感器网络多移动充电车并行充电的动态规划，相比于第三章的小规模网络的静态规划，更侧重于实际应用，提高了网络可靠性。

具体的实现步骤如下：

- 1) 初始化，读取网络节点信息，包括节点的坐标以及能量，计算节点的时间窗；
- 2) 通过公式 (4-16) 确定最少车辆数量，然后按照凸包算法选择种子节点，构造初始路径；
- 3) 不考虑充电车的能量约束和时间窗的约束，将不在路径上的节点插入到最佳位置，直到所有节点都被安排到路径上为止；
- 4) 对预处理的路径上的节点进行充电车能量约束和时间窗约束进行检查，将不符合条件的节点，全部移除；
- 5) 将移除的节点按与新路径的距离增量大小进行降序排列，然后重新插入到可行性的路径上，得到的新路径进行约束检查，将不符合要求的节点移除。
- 6) 根据构造的初始路径，生成 $m$ 个初始青蛙，即初始充电车的充电方案；
- 7) 根据优化模型的目标函数，计算每个青蛙个体的适应度值；
- 8) 比较适应度值大小，将青蛙个体根据式 (3-18) 与 (3-19) 进行更新；调整最优值；
- 9) 判断是否满足迭代次数，若满足，结束算法，若不满足，根据更新策略，进行下一次的迭代，直到满足迭代次数为止。

具体的优化流程图4-6所示：

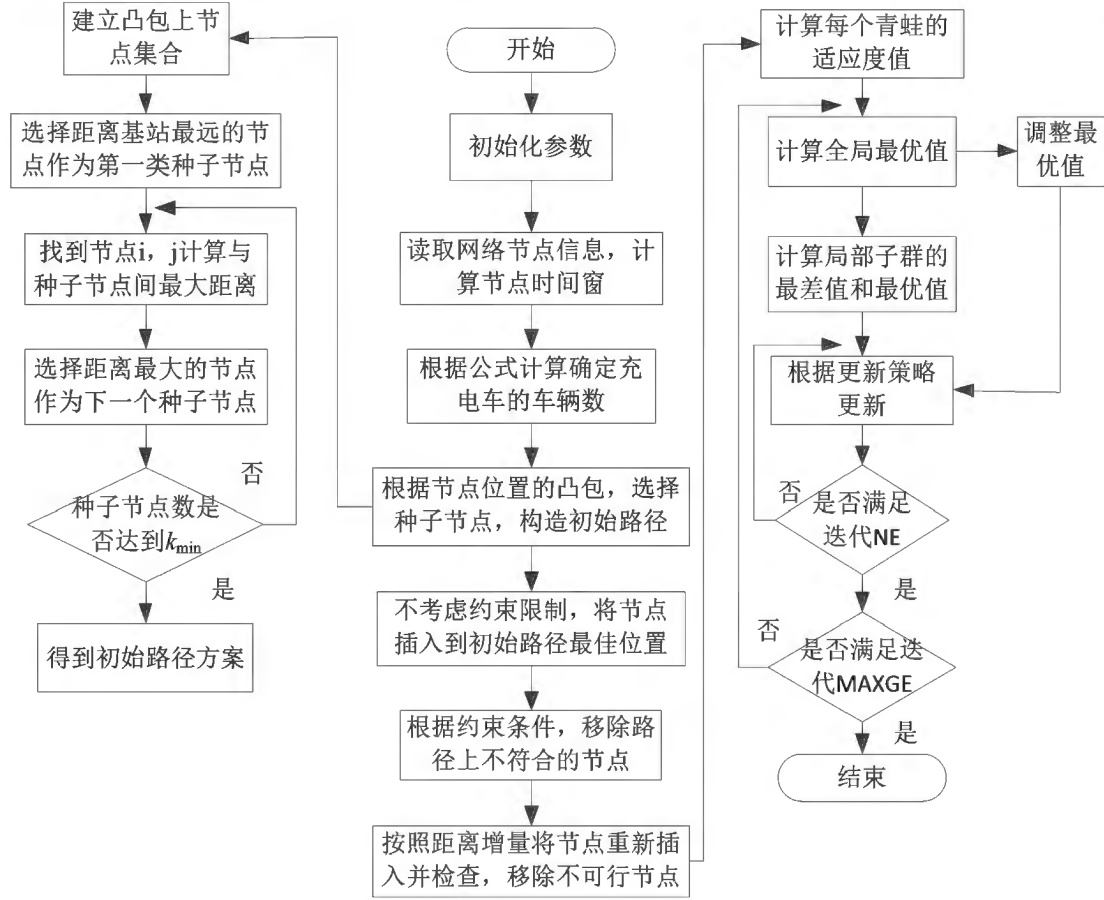


图4-6 优化流程图

Fig. 4-6 Optimization flow chart

## 4.5 仿真实验

### 4.5.1 性能指标

为了验证本文 MMCSA 对于求解带时间窗的充电优化方案的有效性，将仿真结果与近年来求解该问题的禁忌搜索算法<sup>[69]</sup> (Tabu Search Algorithm, TS)进行比较分析，通过算法收敛速度、移动的能耗、电池能量利用率和车辆数 4 种性能指标对比，来衡量算法的优越性。

#### (1) 收敛速度

为了能够有效验证本文算法的实用性，将收敛速度作为衡量优化算法的性能指标之一，在算法求解问题过程中，收敛速度快，则体现了该算法求解速度快慢，能够快速求解出充电方案，而迭代图则能直观的反应算法的收敛速度的快慢。

#### (2) 充电车数量

在一次充电周期中，移动充电车数量  $K$  的多少能够直接反应算法的优越性，在同一环境下，充电车数目越多，则说明所生成的充电路径越多，充电代价越大，所产生的移动能耗也越大，因此充电车数量是评估算法性能的重要指标之一。

### (3) 移动能耗

在完成一轮充电调度之后，充电车在充电路径上所消耗的能量：

$$E_t = \sum \sum \sum Q_t d_{ij} x_{ijk} \quad (4-12)$$

### (4) 能量利用率

网络节点所充电的能量与充电过程中充电车所消耗的总能量的比值：

$$\eta = \frac{en(c)}{en(c) + E_c} \quad (4-13)$$

式中：

$en(c)$ ——传感器节点接收到的能量；

$E_c$ ——为传感器节点提供的能量和充电过程中的损耗，以及行驶路径上消耗的能量。

## 4.5.2 参数设置

本文用于监测智能电网中智能变电站的传感器网络节点分布在  $1000m \times 1000m$  的区域内，其中基站  $S$  部署在平面中央，其他的参数取值如表 4-3 所示。

表 4-3 实验仿真参数表  
Table 4-3 Parameter settings

参数	值	描述
节点	100 ~ 600	传感器节点数量
$E_{\max}$	$1 \times 10^4 J$	传感器节点的电池容量
$E_{\max}^M$	$3 \times 10^6 J$	移动充电车的电池能量
$Q_T$	$10 J / m$	充电车行驶的能量消耗率
$v_c$	$1 m / s$	移动充电器的行驶速度
$\beta$	0.15	充电阈值系数

根据以上设置的参数进行仿真实验，仿真实验在 win10 系统、intel 酷睿系列的 CPU、8G 内存、500G 硬盘的电脑上的 MATLAB 2014b 下仿真，设置 ACSFLA 的迭代次数 MAXGE=60，Ne=60，M=20，S=20。

### 4.5.3 仿真结果

#### (1) 算法收敛速度

表 4-4 与表 4-5 为 100 个节点的优化后的结果，从表中数据看出虽然本文的 MMCSA 算法和 TS 算法优化的充电方案所需要的充电车数量是一样的，但是 TS 算法优化后产生的移动总能耗是要大于本文算法，从而显现出本文 MMCSA 算法优化的效果要优于 TS 算法。

表 4-4 100 个节点 MMCSA 算法最优仿真结果  
Table 4-4 Optimal simulation results of 100 node MMCSA algorithm

目标 结果	最优解	车辆数	达到最优解代数
计算结果	37256	7	29
路径编号	充电节点顺序		
1	0-16-97-3-83-82-85-0		
2	0-80-81-78-96-63-62-69-55-53-58-56-60-59-0		
3	0-6-32-33-38-47-42-41-43-48-26-23-18-19-17-25-0		
4	0-21-22-20-24-27-30-29-34-36-39-28-14-15-12-13-9-11-8-0		
5	0-54-57-49-65-68-64-61-72-66-50-40-46-45-51-52-31-35-37-44-0		
6	0-10-5-75-2-1-99-100-92-94-95-98-7-4-89-91-88-86-84-0		
7	0-93-90-67-74-76-79-73-77-71-70-87-0		

表 4-5 100 个节点 TS 算法最优仿真结果  
Table 4-5 Optimal simulation results of 100 node TS algorithm

目标 结果	最优解	车辆数	达到最优解代数
计算结果	41154	7	37
路径编号	充电节点顺序		
1	0-67-62-60-69-55-53-58-56-54-59-49-65-68-64-61-72-66-44-0		
2	0-74-57-40-46-45-51-50-52-31-35-32-6-47-42-41-43-0		
3	0-48-38-23-26-28-39-37-36-34-33-29-30-27-24-22-21-20-0		
4	0-15-13-25-9-11-8-12-14-0		
5	0-16-19-18-17-10-5-99-100-92-4-3-94-97-95-98-7-1-0		
6	0-2-75-89-91-93-84-76-79-77-87-71-0		
7	0-70-73-81-85-78-82-83-86-88-90-96-63-80-0		

图 4-7 为网络随机分布 100 节点时，两种算法在进行求解时的迭代图，求解的适应度值为移动总能耗，从迭代图中可以看出本文的算法优化的结果要比 TS



要好，并从曲线的变化来看，本文的 MMCSA 算法收敛速度明显比 TS 要快很多，从而表明了本文算法的优越性。

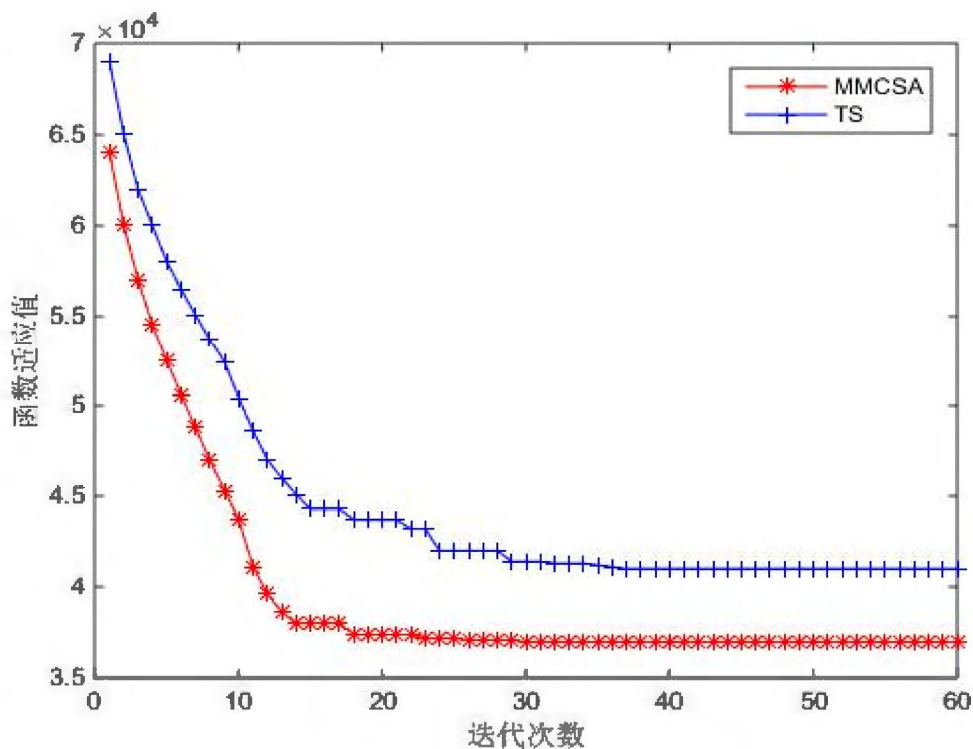


图 4-7 两种算法的进化特性

Fig.4-7 The evolutionary characteristics of the two algorithms

## (2) 所需要的车辆数

为了进一步证明本文算法的实用性，将节点数目成倍数增加 600 个分别进行仿真实验。

图 4-8 为两种算法所需要的充电车的个数，当传感器节点数目增加时，网络中所需要的充电车数量也会随着增加。因为节点数目增加，需要的充电的节点也会随着变多，这就要求充电车数量增加，从图中两条曲线变化来看，100 节点时两种算法优化后的车辆数是一样的，在节点数增加到 400 时，本文 MMCSA 算法比 TS 算法求解出来的充电方案少用了 6 辆充电车，表明了本文算法优化后能够充分利用了充电车的所携带的能量。纵观来看，随着节点成倍的增加，很明显本文的 MMCSA 算法优化后需要的车辆数都是少于 TS 算法所需要的车辆数，从而表明本文算法的优越性。

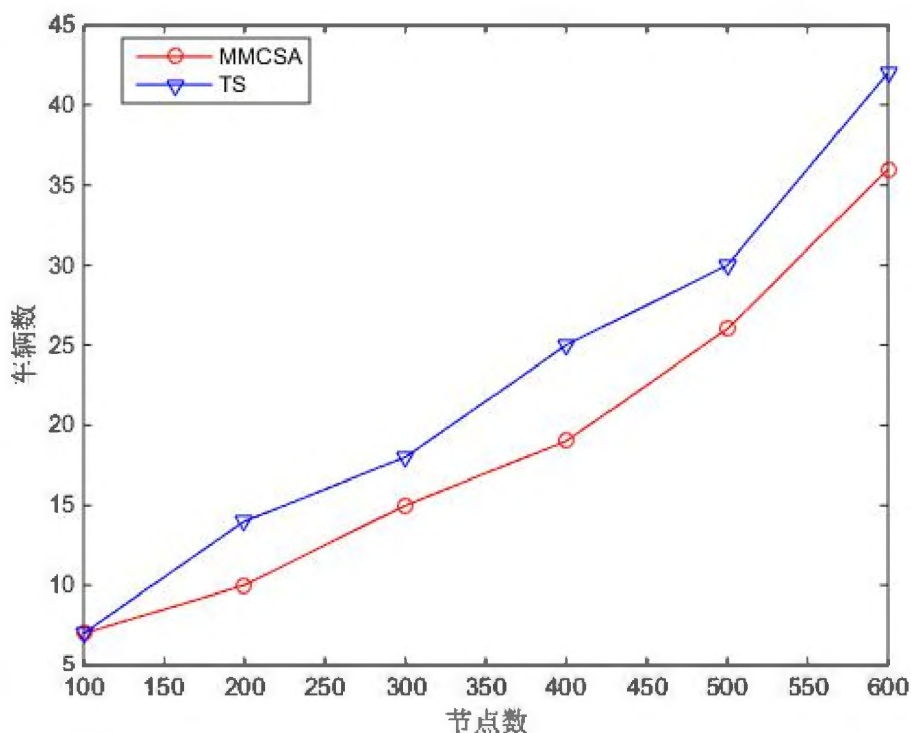


图 4-8 所需车辆数目对比图

Fig.4-8 Comparison of required vehicle numbers

### (3) 移动能耗

如图 4-9 所示, MMCSA 相对于 TS, 移动能耗的对比图, 在 100 个节点时本文算法与 TS 算法相差最小, 优化结果相近。在节点数增加到 300 时, 本文 MMCSA 算法所求的结果比 TS 算法的结果减少了 12104J 的移动能耗。随着 WRSNs 中节点分布的规模变大, 数量增多时, 对于移动充电车来说, 需要更多的充电车来完成充电调度任务, 造成充电车总的行径距离也变大, 因而增加了充电车的总的行驶消耗的能量。纵观图中曲线变化, 本文的 MMCSA 算法的优化后所产生的移动能耗都要小于 TS 算法, 从而表明本文算法的优越性。

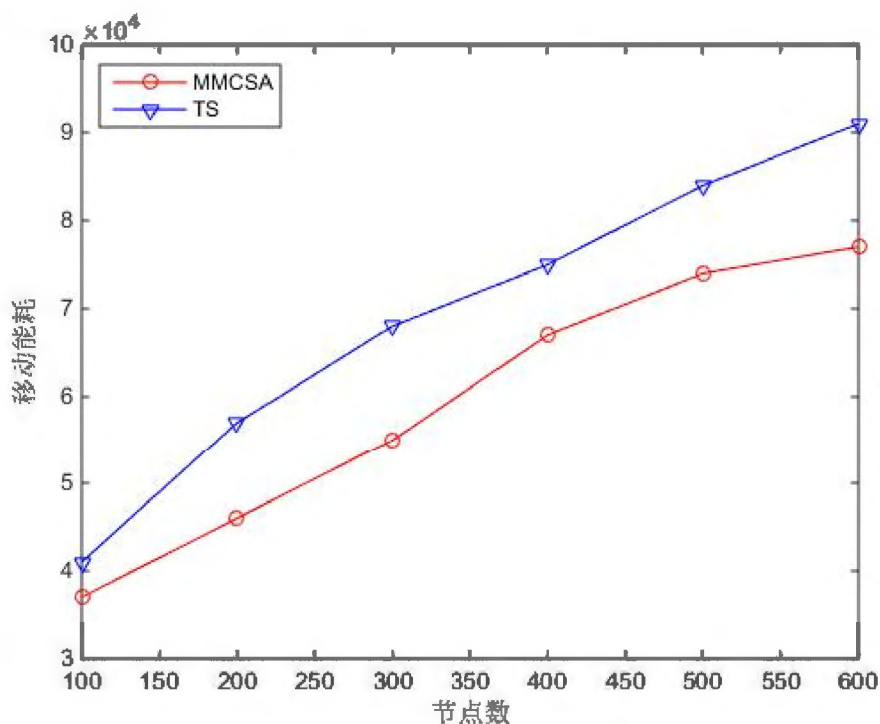


图 4-9 传感器节点数对移动能耗的影响

Fig.4-9 The influence of the number of sensor nodes on the energy consumption

#### (4) 能量利用率

如图 4-10，为本文 MMCSA 算法与 TS 优化后的能量利用率对比图，随着传感器节点的增加，充电车所充电的节点也随着增加，所以能量利用率也会随着增加，从图中也可以直观的看出，节点数 100 增加 300 时，本文算法与 TS 的优化结果都很接近，但节点数目增加到 400 时，本文算法相较于 TS 算法的能量利用率提高了 8%。且节点数增加到 400~600 后，TS 算法优化的结果相较于本文算法明显偏差大了很多，这是由于规模越来越大，节点数目太多，求解复杂度变高，TS 陷入了局部最优，导致求解出的路径过多，充电车数量大，使得充电车的移动能耗增多，且存在一辆车只负责几个节点充电，大大降低了充电车的能量利用率。综上所述，本文的算法在大规模网络中求解效果更好。

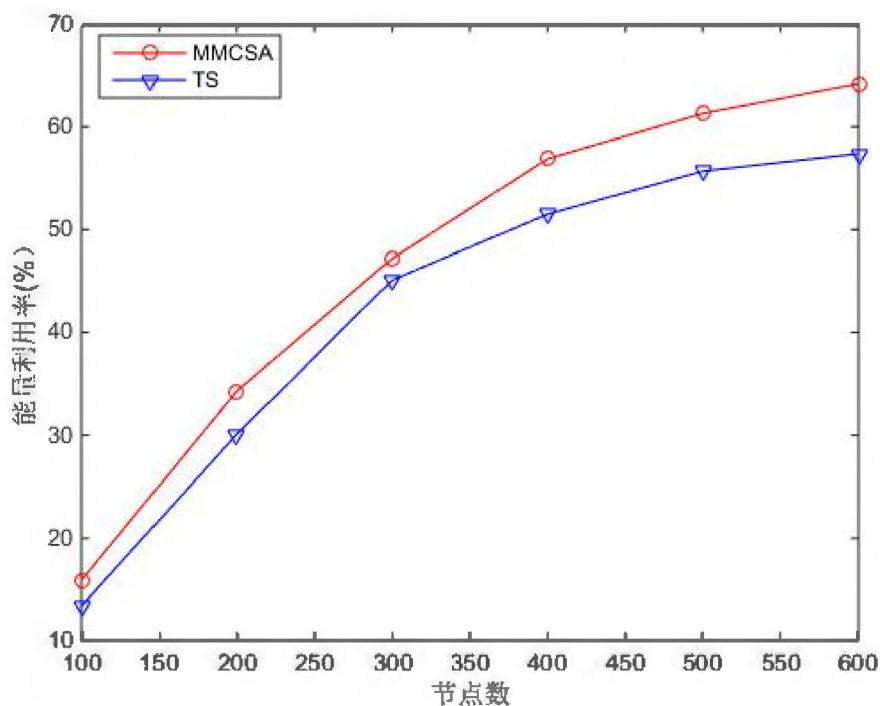


图 4-10 能量使用率

Fig.4-10 Rate of energy consumption

## 4.6 本章小结

本章研究在智能电网中大规模网络动态模式下多充电车的充电规划，对网络模型以及优化问题进行描述，考虑到让充电车能够最大化利用携带的能量，尽可能的减少移动能耗，建立带时间窗的充电路径优化模型，且考虑网络规模很大，优化算法求解的复杂度变大，因而结合启发式算法和 ACSFLA 算法，命为 MMCSA 算法，采用最少充电车数量以及网络节点凸包对初始路径进行构造，并提出充电车行驶距离增量最小来确定要加入充电序列的节点，最后通过 ACSFLA 算法进行路径重优化，来实现大规模网络动态充电规划，通过 4 个性能指标证明了本文算法的优越性。



## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

本文主要针对不同规模的 WRSNs 展开研究，分别研究了监测智能电网的小规模 WRSNs 的单充电车充电规划，以及大规模的 WRSNs 的充电规划，具体研究如下：

(1)结合分析 WRSNs 在智能电网中的应用，根据应用环境讨论 WRSNs 的充电规划方案，总结了移动充电问题以及求解方法，针对实际情况，介绍了不同的移动充电车充电策略。

(2)首先考虑移动充电车携带能量的有限性，受到小车自身能量的约束，建立合适的约束条件。其次考虑到节点的位置分布不同，因而各个节点到基站的距离各不相同，本文网络节点采用多跳式传输方式，因此每个节点传输信息时所产生的能耗都不尽相同，在一轮监测周期内，通过节点经典的能量消耗模型计算能耗，并分析整个网络中节点能量需求的总体情况，根据设置的阈值将部分节点列入充电序列，并利用改进的蛙跳算法求得遍历充电序列的最短路径。最后在仿真验证中，考虑从算法求解运行的迭代图、充电车的路径距离以及电池能量利用率，与已有的路径优化算法进行比较分析，本文的 ACSFLA 算法不仅求解速度快，且缩短了充电行驶距离，提高了充电车的能量利用率。

(3)针对大规模无线可充电传感器网络动态模式下，单个移动充电车往往无法满足，所以本文采用多充电车的充电策略。为了让充电车能够充分利用电池能量，减少移动能耗，则建立带时间窗的充电路径模型。根据能量阈值计算节点的时间窗。且考虑大规模网络中节点分布过多，对于优化算法求解复杂度会大大加大，因此本文结合启发式算法和 ACSFLA 算法对模型求解，采用最小充电数量以及节点位置凸包对初始路径进行构造，并提出充电车行驶距离增量最小来确定节点的最佳插入位置，最后通过 AFSFLA 算法对路径进行重优化，从而实现完整的动态多充电车充电规划。且仿真实验结果表明：本文 MMCSA 算法不仅求解速度快，而且有效的减少了充电车使用数量，降低了移动能耗，提高了能量利用效率。

## 5.2 展望

目前对于 WRSNs 的充电规划研究在不断地深入，完善和改进了充电策略，对于我们来说，能够将设计的充电规划方案落实到实际应用中，则是自身的巨大突破，我们需要阅读大量的文献，来加深对该问题的了解。但由于时间的限制，本文对该研究课题的深度还存在一些不足，还有许多细节方面还学要加工和改善：

(1)针对本文设计出的充电规划方案，采用的是单对单的充电模式，即在充电车为节点充电过程中，充电车只对单一的节点充电，此充电模式较为简单，可以在此研究的基础上，更加深入研究单对多的充电方式，这样不仅可以减少冗余路径而且具有非常高的充电效率。

(2)针对第四章设计的带时间窗的充电规划方案，依然有着不足之处，在多充电车并行实现充电任务时，时常出现充电车能量用不完，在一轮充电调度任务周期内，会造成多余的充电成本。在规划路径初始阶段，由于多约束条件，在求解时可能出现不可行解，造成多处额外一条路径，即额外多使用一辆充电车。对此，我们可以在现有的研究基础上，考虑使用不同规格的充电车，对 WRSNs 网络进行动态式充电，根据基站收集的信息，对网络进行划分，针对于区域密则派遣大容量的充电车，疏的则采用小容量的充电车，实现充电车能量资源的合理调度分配。

(3)本文课题研究中，所采用的充电的车的速度是匀速的，我们可以在此基础上，考虑采用变速的充电车，对于网络节点来说，当节点的能量下降到一定程度，迫切请求充电时，小车能够加速行驶到节点附近给予快速充电，这样减少了充电延时，避免节点突然死亡，因而对 WRSNs 的生命周期也有着重要影响。

## 参 考 文 献

- [1] 韩超.无线传感器网络在智能电网中的应用[J].通讯世界,2017(01):173-174.
- [2] Al-Anbagi I, Erol-Kantarci M, Mouftah H T. Priority- and Delay-Aware Medium Access for Wireless Sensor Networks in the Smart Grid[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(2):608-618.
- [3] 苏圣超,赵曙光.基于能耗均衡的无线传感器路由算法[J].计算机科学,2018,45(10):111-114.
- [4] 李志杰.无线传感器网络的研究现状及主要应用[J].南方农机,2018,49(18):152+175.
- [5] Zhang Q, Sun Y G, Yang T, et al. Applications of wireless sensor networks in smart grid[J]. Electric Power, 2010.
- [6] 薛国超.无线传感器网络与物联网的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2018(09):71-72.
- [7] 坎香,金海峰.无线传感器网络研究[J].电子技术与软件工程,2017(23):30-31.
- [8] Yufei, Wang, Weimin, et al. Study on security of Wireless Sensor Networks in smart grid[C]// International Conference on Power System Technology. IEEE, 2010:1-7.
- [9] 渠帅军.智能配电网中无线传感器网络路由协议的研究[D].上海电机学院,2017.
- [10] 何金鑫.基于无线传感网络的智能变电站环境监测系统设计[D].安徽理工大学,2016.
- [11] 王杰.用于智能电网的无线传感器网络能量问题研究[D].合肥工业大学,2015.
- [12] 李超.三维无线传感器网络无线充电策略和动态路由算法研究[D].合肥工业大学,2015.
- [13] 李瑞华.基于物联网技术智能电网在线监测系统研究[D].河南科技学院,2018.
- [14] 王家骊.基于 WSN 的智能变电站监测系统研究[D].大连理工大学,2016.
- [15] 毕建刚,张涛,王峰,吴旭涛,是艳杰.基于无线传感网络的变电站分布式智能在线监测技术[J].电网与清洁能源,2012,28(11):52-55+60.
- [16] 崔梦瑶.可充电无线传感器网络的充电规划设计[D].吉林大学,2018.
- [17] 吕杨.无线可充电传感器网络充电规划研究[D].吉林大学,2017.
- [18] Haipeng Dai, Xiaobing Wu, Guihai Chen, Lijie Xu, Shan Lin. Minimizing the



- number of mobile chargers for large-scale wireless rechargeable sensor networks[J]. Computer Communications, 2014, 46.
- [19] 陈琛. 无线可充电传感器网络充电调度研究[D]. 浙江工业大学, 2017.
- [20] 陈花. WCE 能量受限、节点能耗不均衡的 WRSN 周期性充电规划[D]. 合肥工业大学, 2017.
- [21] 杨怀宇. 大规模可充电无线传感器网络充电车的路径优化[D]. 扬州大学, 2016.
- [22] 胡诚, 汪芸, 王辉. 无线可充电传感器网络中充电规划研究进展[J]. 软件学报, 2016, 27(01): 72-95.
- [23] 徐俊逸. 移动充电设备能量受限的无线传感器网络充电策略[D]. 合肥工业大学, 2016.
- [24] 吉书瑶. 用于智能电网的无线可充电传感器网络充电规划[D]. 上海电机学院, 2018.
- [25] Ye X , Liang W . Charging utility maximization in wireless rechargeable sensor networks[J]. Wireless Networks, 2017, 23(7): 2069-2081.
- [26] Jiang L , Dai H , Wu X , et al. On-demand Mobile Charger Scheduling for Effective Coverage in Wireless Rechargeable Sensor Networks[M]// Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services. Springer International Publishing, 2014.
- [27] 胡诚. 无线可充电传感器网络中充电规划及其可调度性研究[D]. 东南大学, 2015.
- [28] 陈波. 大型土木结构中无线传感器网络充电节点路径优化策略研究[D]. 湖北工业大学, 2016.
- [29] 陈晶晶, 陈虹微. 基于 WRSN 的无线充电小车的充电调度算法的优化设计[J]. 龙岩学院学报, 2018, 36(02): 23-29.
- [30] Drishya H , Samuel S J , Fernando I A . Efficient wireless multi-node power charging for sensor networks with wireless charging vehicle using packet scheduling algorithm[C]// International Conference on Communication & Signal Processing. IEEE, 2016.
- [31] Chen T Y , Wei H W , Cheng Y C , et al. An Efficient Routing Algorithm to Optimize the Lifetime of Sensor Network Using Wireless Charging Vehicle[C]// IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc & Sensor Systems. IEEE Computer Society, 2014.
- [32] 徐新黎, 崔永婷, 皇甫晓洁, 陈琛. 能量受限的多移动设备无线充电路径规划方法[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(04): 793-799.

- [33]Chen S H , Cheng Y C , Lee C H , et al. Extending sensor network lifetime via wireless charging vehicle with an efficient routing protocol[C]// Southeastcon. IEEE, 2016.
- [34]余玲飞,戴锡笠,刘洪涛.无线传感器网络中受时间窗限制的移动充电调度算法[J].计算机应用研究,2017,34(09):2763-2767+2772.
- [35]Wang C , Li J , Ye F , et al. Improve Charging Capability for Wireless Rechargeable Sensor Networks Using Resonant Repeaters[C]// 2015 IEEE 35th International Conference on Distributed Computing Systems. IEEE, 2015.
- [36]Yoon S K , Kim S J , Kwon U K . Random energy charging for reviving sensors in wireless sensor network[C]// Enabling Technologies for Smartphone & Internet of Things. IEEE, 2012.
- [37]宁涛,焦璇,魏瑛琦,梁旭.基于量子蚁群算法的随机需求的动态车辆路径问题[J].大连交通大学学报,2018,39(05):107-110.
- [38]孙小军,介科伟.求解带时间窗动态车辆路径问题的改进蚁群算法[J].大连理工大学学报,2018,58(05):539-546.
- [39]Wenzheng Xu†, Weifa Liang‡, Xiaohua Jia¶, et al. Maximizing Sensor Lifetime in A Rechargeable Sensor Network via Partial Energy Charging on Sensors[C]// IEEE International Conference on Sensing. IEEE, 2016.
- [40]赵晓侠,鞠成恩.基于改进蚁群算法的农业运输车辆路径优化研究[J].安徽农业科学,2016,44(33):237-238.
- [41]张文博,苏秦,程光路.基于动态需求的带时间窗的车辆路径问题[J].工业工程与管理,2016,21(06):68-74.
- [42]王东.改进多种群遗传算法的研究及其在车辆路径优化的应用[D].广西大学,2016.
- [43]Ren X , Liang W , Xu W . Maximizing charging throughput in rechargeable sensor networks[C]// International Conference on Computer Communication & Networks. IEEE, 2014.
- [44]Ma Y , Liang W , Xu W . Charging Utility Maximization in Wireless Rechargeable Sensor Networks by Charging Multiple Sensors Simultaneously[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, PP(99):1-14.
- [45]林颂晨.计及配网特性的大规模电动汽车实时最优充电调度[D].广西大学,2016.
- [46]杨进,马滨亮,马良.改进蛙跳算法求解低碳 TSP 问题的算法[J].系统工程,2015,33(11):135-139.

- [47]赵芳,张桂珠.基于新搜索策略的混合蛙跳算法[J].计算机应用与软件,2015,32(08):224-228.
- [48]姚应龙.混合蛙跳算法及其应用研究[D].深圳大学,2015.
- [49]Tu W, Xu X, Ye T, et al. A Study on Wireless Charging for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks[J]. *Sensors*, 2017, 17(7):1560.
- [50]梁承姬,崔佳诚,丁一.基于混合蚁群算法的车辆路径问题研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(03):94-99.
- [51]姬丽娟.带硬时间窗的车辆路径问题研究[D].兰州理工大学,2018.
- [52]张敬敏,马丽,李媛媛.求解 TSP 问题的改进混合蛙跳算法[J].计算机工程与应用,2012,48(11):47-50.
- [53]杨进,马滨亮,马良.改进蛙跳算法求解低碳 TSP 问题的算法[J].系统工程,2015,33(11):135-139.
- [54]吴新杰,王静文,黄国兴,刘延东.一种求解旅行商问题的改进蛙跳算法[J].小型微型计算机系统,2015,36(05):1078-1081.
- [55]郭小燕,王联国,代永强.基于分段混合蛙跳算法的旅行商问题求解[J].计算机工程,2014,40(01):191-194+198.
- [56]Hiermann G, Puchinger J, Ropke S, et al. The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 252(3):995-1018.
- [57]Nalepa J, Blocho M. Adaptive memetic algorithm for minimizing distance in the vehicle routing problem with time windows[J]. *Soft Computing*, 2016, 20(6):1-19.
- [58]江泽昌,刘天羽,吴星,王义东.基于精英策略改进的混合蛙跳算法[J].上海电机学院学报,2018,21(01):14-19.
- [59]Afshar-Nadjafi B, Afshar-Nadjafi A. A constructive heuristic for time-dependent multi-depot vehicle routing problem with time-windows and heterogeneous fleet[J]. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2017, 29(1):29-34.
- [60]许珮.带时间窗的物流配送中心车辆路径优化问题[D].北京邮电大学,2017.
- [61]杨鹏,邹浩,徐贤浩.带时间窗集送货需求可分车辆路径问题的改进蚁群算法[J].系统工程,2015,33(09):58-62.
- [62]涂伟健.无线传感器网络的充电模型优化设计[D].杭州电子科技大学,2017.
- [63]程羽波.无线可充电传感器网络中的移动充电调度算法[D].南京邮电大学,2017.
- [64]龚向阳.传感器网络移动充电策略设计与实现[D].北京邮电大学,2018.

- [65] 刘洪涛. 无线传感器网络移动充电算法研究与设计[D]. 电子科技大学, 2016.
- [66] Qu Y , Xu K , Wang H , et al. Lifetime maximization in rechargeable wireless sensor networks with charging interference[C]// IEEE International Performance Computing & Communications Conference. IEEE Computer Society, 2015.
- [67] 刘创, 王珺, 吴涵. 无线可充电传感器网络的移动充电问题研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(03): 162-167.
- [68] 丁煦. 可充电无线传感器网络能耗模型及充电策略研究[D]. 合肥工业大学, 2015.
- [69] 蒋波. 基于遗传算法的带时间窗车辆路径优化问题研究[D]. 北京交通大学, 2010.



## 致 谢

本文无论是从论文选题、研究方法、研究方案的确定还是撰写的每一个进程都是在吕红芳老师耐心的指导下完成的。光阴似箭，匆匆之间研究生生涯就要结束了，回顾过去的两年时间里，有幸的结识了对待学术较为认真学长与学弟们，感谢与他们讨论时给的意见与帮助。在学术研究过程中，遇到过许多的困难，所以感谢时光让我认识各位授课老师给予的谆谆教导。在老师的帮助下，较为荣幸参与了企业的项目与工作。在这个过程中不仅使我理论水平和知识体系得到了进一步的充实，而且对我的科研水平与实践能力有大的帮助。吕老师幽默大方，对事严谨，从研一开始吕老师就教导我们如何挑选文献、阅读文献，这为我之后顺利的开展研究工作奠定了基础。

两年半，弹指一挥间，相逢的时光总是匆匆，由衷的感谢学长在背后默默的帮助，感谢父母在遇到困难时候的鼓励，感谢电机学院提供的学习环境，感谢老师以其引导式的教学方式引导我开启科研的大门，感谢课题组老师在科研过程中给予的谆谆教导，感谢贾廷纲老师在工作上的关照与在项目中的指导。



## 攻读硕士学位期间取得的研究成果

发表论文

- [1]俞立春，吕红芳，李俊甫，何力.无线可充电传感器网络充电路径优化[J]. 上海电机学院学报，2018(4).
- [2]俞立春，吕红芳.基于改进蛙跳算法的无线传感器网络的充电路径优化[J].科技经济导刊,2018(25).