

# 无线可充电传感器网络中充电规划研究进展<sup>\*</sup>

胡 诚<sup>1,2</sup>, 汪 芸<sup>1,2</sup>, 王 辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(计算机网络和信息集成教育部重点实验室(东南大学), 江苏 南京 211189)

<sup>2</sup>(东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

通讯作者: 汪芸, E-mail: yunwang@seu.edu.cn, <http://www.seu.edu.cn>



**摘 要:** 传感器网络作为当代信息获取的重要手段之一,受到各国各界的广泛关注.在传感器网络中,能量问题一直是限制其广泛应用的重要约束和挑战.由于无线充电技术和智能移动节点的发展,使得综合使用这两种技术能够彻底解决传感器网络中的能量问题.这类采用无线充电方案的传感器网络称为无线可充电传感器网络.其中,充电规划影响无线可充电传感器网络在解决能量问题时的成本和效果,因此成为研究的热点.综述了最近几年无线可充电传感器网络研究中充电规划设计,从软、硬件层面的 6 个不同维度对这些方案进行分类概述和对比分析,总结在不同应用场景下进行充电规划设计的一般性思路,并通过 3 个实例进行演示,验证该设计思路的易用性和实用性.

**关键词:** 无线可充电传感器网络;移动充电节点;服务站节点;充电规划;充电方案

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 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.软件学报,2016,27(1):72–95. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4883.htm>

英文引用格式: Hu C, Wang Y, Wang H. Survey on charging programming in wireless rechargeable sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(1): 72–95 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4883.htm>

## Survey on Charging Programming in Wireless Rechargeable Sensor Networks

HU Cheng<sup>1,2</sup>, WANG Yun<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education (Southeast University), Nanjing 211189, China)

<sup>2</sup>(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Wireless sensor networks (WSNs) as powerful tools for information acquisition have been receiving wide attention. Due to size and cost restrictions of the sensor nodes, energy problem has been a fundamental constrain and challenge faced by many applications of WSNs. To solve the energy problem, researchers jointly apply the emerging techniques of wireless power transfer and intelligent mobile vehicles to develop a new paradigm of wireless rechargeable sensor networks (WRSNs). In designing WRSNs, a first and foremost problem is the charging programming capability. A well-designed charging programming can maintain a WRSN working continuously at a low cost. This paper surveys the latest research on charging programming in WRSNs from 6 different dimensions. In each dimension, different types of charging programming are analyzed and compared. Based on these analyses, design principles in different applications are proposed. These principles are applied to design charging programming in 3 realistic WSNs and the usability of these principles is demonstrated.

**Key words:** wireless rechargeable sensor network; mobile charger; service station; charging programming; charging scheme

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(60973122); 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB320705); 东南大学优秀博士学位论文基金

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (60973122); National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2009CB320705); Scientific Research Foundation of Graduate School of Southeast University

收稿时间: 2015-01-23; 修改时间: 2015-07-30; 采用时间: 2015-08-17; jos 在线出版时间: 2015-11-03

CNKI 网络优先出版: 2015-11-04 17:10:01, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20151104.1710.002.html>

信息的生成、获取、存储、传输、处理及应用是现代信息科学的六大组成部分,其中,信息的获取是信息技术产业链上重要的环节之一<sup>[1]</sup>,没有高效率、高质量的信息获取手段,信息化也就成为无源之水、无本之木。随着现代微电子技术、微机电系统、纳米材料、无线通信技术、信号处理技术、计算机网络计算、无线充电技术、能量收集技术及快速充电技术等迅速发展,无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)受到包括学术界、军界及工业界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>,成为信息获取最重要和最基本的技术之一。

经过几十年的发展,无线传感器网络逐渐走出实验室,广泛地应用于环境、建筑设施、动植物及人体等的追踪和监控,具体应用包括海洋监测<sup>[4]</sup>、火山观测<sup>[5]</sup>、生态系统监测<sup>[6]</sup>、城市设施监测<sup>[7]</sup>、建筑状况监测<sup>[8]</sup>、智能电网监测<sup>[9]</sup>、桥梁监测<sup>[10,11]</sup>、车辆跟踪<sup>[12]</sup>、智能交通<sup>[13]</sup>、室内定位<sup>[14]</sup>、室温监控<sup>[15]</sup>、灾难救助<sup>[16]</sup>、智能园艺<sup>[17]</sup>、精确农业<sup>[18]</sup>、红杉树观测<sup>[19]</sup>、大鸭岛海燕监测<sup>[20]</sup>及人体健康监测<sup>[21]</sup>等等。这些应用对传感器网络提出一个共同的要求,即,传感器网络能够持续、有效地工作。特别是在偏远地区或自然环境恶劣地区,传感器网络通常很久才会受到人为的维护和更新,甚至自部署起就没有人工参与。为了能够完成监测任务,网络还需要保持连通性、覆盖性等要求,这对传感器节点的能量维持提出巨大的挑战。而由于传感器节点通常体积较小,能够携带的电池电量较少,因此,能量问题已成为传感器网络研究的一大瓶颈,是任何无线传感器网络应用都必须面临的约束和挑战。

针对传感器网络的能量问题,各国学者进行了大量的研究,这些工作大致可以分为节能方法<sup>[22,23]</sup>、能量收集方法<sup>[24]</sup>及无线充电方法<sup>[25]</sup>这三大类。节能方法是指通过减少传感器节点单位时间或单位工作量的能耗来延长其生命期的方法。节能方法通常会牺牲一定的网络性能,如增加网络延迟、减少数据可靠性等,从而在很大程度上增加网络的生命期。但是由于传感器节点能量仍然有限,因此这类方法对网络生命期的增加是有限的。能量收集方法是指传感器节点通过自身配备的能量转换模块,从环境中收集能量来延长其生命期的方法。由于环境能量密度低,为了达到一定的能量获取率,传感器节点需要配备体积较大的能量转换器,并且能量转换效率低,能量获取过程不可控且难以精确预测。无线充电方法是指网络中配备主动性的充电电源节点,可以为任意传感器节点进行无线充电以延长其生命期的方法。采用这类方法需要在网络中部署静态的充电站,或者移动充电节点和服务站节点。由静态或移动充电节点主动为传感器节点提供高效、及时的充电服务,充电过程可控、可预测。虽然采用能量收集方法和无线充电方法在理论上都能保证传感器节点持久地、正常地工作,但是当应用需要传感器网络提供持续高质量的监控、追踪服务时,采用能量收集方法难以保证服务质量,此时采用无线充电方法可以有效地保证充电的及时性,进而保证传感器网络的服务质量。

因此,本文主要考虑传感器网络中采用无线充电方法的研究,这类传感器网络称为无线可充电传感器网络<sup>[26]</sup>。在无线可充电传感器网络中,最核心的问题之一是充电规划的设计,即:使用什么样的充电设备、怎样为传感器网络进行充电,从而达到充电代价最小、网络效用最高等目标。

本文的主要目标是研究在不同应用场景下的无线可充电传感器网络中,如何设计合理、高效的充电规划方案。为了实现这个目标,首先研究现有工作在不同应用中的充电规划设计。根据充电规划软、硬件层面的 6 个不同维度将现有工作分类。对每种类型的充电规划方案,对比分析各自的优缺点和适用的场景,进而提出在不同条件下,设计无线可充电传感器网络中充电规划的一般性设计思路。将该思路应用在 3 个典型的传感器网络环境中,进行合理的充电规划设计。

本文第 1 节回顾无线充电技术的历史与现状,比较不同类型无线充电技术的优缺点;分析无线可充电传感器网络研究的主要问题与挑战。第 2 节针对无线可充电传感器网络中的充电规划问题,从 6 个不同维度对现有工作进行介绍、对比及分析,并指出每个维度中不同类型方案的适用场景。基于第 2 节的分析与总结,第 3 节提出无线可充电传感器网络中充电规划的一般性设计思路,并举例进行分析。第 4 节总结全文。

## 1 无线充电技术与无线可充电传感器网络

无线可充电传感器网络采用合理的充电规划方案,使用主动性充电节点为传感器节点进行无线充电,从而极大地缓解了传统传感器网络面临的能量问题。其中,无线充电技术是构建可充电传感器网络的物理基础,而充

电规划方案设计则是解决传感器节点能量紧缺的理论核心。

### 1.1 无线充电技术历史与前景

无线充电技术最早起源于 19 世纪末, Tesla 在没有任何电气连接的条件点亮 25 英里以外的氖气照明灯, 这次实验是人们第一次实现无线充电技术; 他还计划通过在纽约长岛建立电厂, 实现电力的无线传输<sup>[27]</sup>, 然而, 由于技术和资金的问题, 计划最终失败, 他的技术也没有能够商用化。

20 世纪末期, 由于笔记本电脑、掌上电脑及手机等智能设备的普及, 包括电动汽车的兴起, 导致工业界对无线充电的需求日益强烈. 应此需求, 许多研究人员进行无线能量传输技术的研究, 并提出多种可行的方案, 如电感耦合技术(inductive coupling)<sup>[28]</sup>、电磁辐射技术(electromagnetic radiation)<sup>[29]</sup>及磁耦合谐振技术(magnetic resonant coupling)等, 这些技术各有优劣, 具体比较见表 1<sup>[25]</sup>. 其中, 磁耦合谐振技术由于其高效率、无需对准、全方向、允许阻挡及不受环境影响等优势, 受到各界广泛关注. 磁耦合谐振技术最早由美国麻省理工学院的 Kurs 等人在 2007 年提出, 实验中, 他们采用两个直径约 60cm 的线圈天线来发送和接收电力, 实现对 2m 外 60W 灯光的供电, 并且达到 40% 的供电效率<sup>[30]</sup>. 由于线圈体积太大, 2008 年 8 月, Intel 西雅图实验室改进了装置的设计, 推出平面型无线供电装置, 并实现 1m 距离下给 60W 灯泡供电, 并达到 75% 的供电效率. 利用这种装置, 他们能够对 0.7m 外的 12W 功耗的笔记本电脑进行无线供电, 并达到 50% 的供电效率(包括整流器等部件的损耗在内)<sup>[31]</sup>. Kurs 等人还对单对单能量传输方式进行扩展, 提出单对多能量传输技术, 并通过实验表明: 虽然单对多能量传输方式对每个对象的能量传输效率较低, 但是总体的能量传输效率要略高于单对单能量传输的效率<sup>[32]</sup>.

**Table 1** Comparisons between different techniques of wireless charging

表 1 不同无线充电技术的比较

无线能量传输技术		优点	缺点	实例
电感耦合技术 (inductive coupling)		实现简单, 在极近的距离 有较高的传输效率	有效传输距离很近, 需要传输双方精确对准	电子牙刷, 手机和 手提电脑的充电板
电磁辐射技术 (EM radiation)	全向	接收端体积小	传输效率随距离增加 急剧衰减, 接收效率很低	在超低功耗 传感器网络中使用
	定向	可以在很远的距离内 保持较高的传输效率	传输双方不能有障碍物 阻挡, 设备体积很大	SHARP 无人机
磁耦合谐振技术 (magnetic resonant couplant)		米级保持较高传输效率, 无需对准, 全方向, 允许阻挡, 不受环境影响	传输效率随距离 增加快速衰减	电动汽车充电, 植入和 可穿戴传感器充电

采用不同的无线充电技术, 也出现不同的无线充电技术标准. 目前, 消费电子产品主流的无线充电标准有 3 种<sup>[33-35]</sup>: Qi 标准、A4WP(alliance for wireless power)标准及 PMA(power matters alliance)标准. 此外, 苹果公司等还单独设立标准. 其中, Qi 标准是全球首个推动无线充电技术的标准化组织——无线充电联盟(wireless power consortium, 简称 WPC)<sup>[36]</sup>推出的无线充电标准, 采用电感耦合技术, 需要近距离接触, 攻克无线充电“通用性”的技术瓶颈; A4WP 标准由美国高通公司、韩国三星公司及 Powermat 公司共同创建, 采用磁耦合谐振技术, 可以实现较远距离的能量传输, 并且支持一对多的充电; PMA 标准由 Duracell Powermat 公司发起, 采用“电感耦合技术”, 可以透过内建无线充电芯片或 WiCC 无线充电卡来进行充电. 目前, Qi 标准是无线充电的主流, 支持的公司和创新的产品也最多; 而 A4WP 标准和 PMA 标准为了与 Qi 标准对抗, 于 2014 年 2 月宣布兼容, 意味着无线充电标准将走向统一. 关于这 3 种标准采用的无线充电技术, 引用 NXP 半导体智能模拟产品线总经理 Kim 在 IIC-China 会上的话来说<sup>[37]</sup>, “虽然今天 Qi 标准仍是无线充电的主流, 但是 2016 年磁耦合谐振式无线充电会超过电感耦合式无线充电. 因为前者可以实现松耦合、一对多充电, 可以做更薄的线圈以及可以通过蓝牙来通信等很多优势”. 随着这些标准的成熟, 全球无线充电市场将呈现井喷式增长, 应用范围涉及家电领域、汽车领域、医疗器械领域、消费电子领域以及油气、船舶等特殊行业<sup>[38-40]</sup>. 而商业投资也能促进天线尺寸的有效减小, 从而可以整合在较小的电子设备中. 例如, NXP 已经可以做出 3.4mm×3.56mm 的 A4WP 接收端芯片. 因此从技术上讲, 无线传感器节点完全可以配备无线充电模块, 并采用磁耦合谐振等技术实现无线充电, 从而达到无限的生命期.

由于磁耦合谐振技术的种种优势以及相应标准的逐渐成熟, 基于磁耦合谐振技术进行无线充电的可充电

传感器网络受到广泛关注.然而,使用该无线充电技术还面临着有效充电距离较近的问题.由于线圈尺寸小以及频率等限制,因此要达到较高充电效率必须保证充电源与传感器节点在充电过程中保持较近的距离.为此,许多研究者采用配备大容量电池和充电线圈的移动充电节点来解决这个问题.例如:文献[41]介绍采用无人飞行器(unmanned aerial vehicles,简称 UAV)为地面传感器节点进行无线充电的设计和实现;文献[42]使用商用移动机器人和无线充电模块实现为传感器节点充电;文献[43]设想使用火星漫游车为部署在火星表面上的传感器节点进行充电,等等.与部署静态充电桩的方案相比,使用移动充电节点可以大大增强充电过程的灵活性和可控性,因此成为近年来的研究热点.

## 1.2 无线可充电传感器网络及其挑战

本文主要讨论使用移动充电节点基于磁耦合谐振技术为传感器网络提供能量补充的研究工作.一个典型的无线可充电传感器网络如图 1 所示,包括若干传感器节点、若干移动充电节点(mobile charger,简称 MC)、一个基站节点(base station,简称 BS)及一个服务站节点(service station,简称 SS)这 4 个部分.其中,传感器节点和基站节点组成传感器网络,主要负责数据的采集、转发、存储及处理;服务站节点和移动充电节点组成充电系统,主要负责提供传感器网络的能量供应.

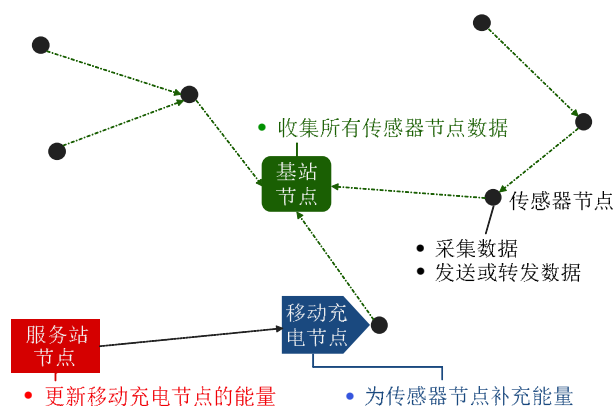


Fig.1 Demo of a wireless rechargeable sensor network

图 1 无线可充电传感器网络示意图

在无线可充电传感器网络中,充电系统的充电使命是要保证传感器网络中所有的传感器节点在目标生命期内不会因为能量耗尽而停止工作.为了完成充电使命,需要设计相应的充电规划,一个充电规划确定充电系统的各项参数和算法设计,它包括硬件配置和软件配置两个部分.其中,硬件配置是指 MC 和 SS 的各项参数设置,例如 MC 的数量、速度、总能量、充电功率及 SS 的位置等;而软件配置是指 MC 采用的充电方案,即,MC 如何最大化利用其充电能力来完成充电使命.由于 MC 的能量通常是有限的,因此它在执行一定量的充电任务后需要回到 SS 补充自身的能量;MC 相邻两次回到 SS 之间的过程称为一轮充电调度.如果对于给定的无线传感器网络,其充电系统无法完成充电使命,则称该充电规划不可调度;反之,如果存在某种充电方案,使得使用现有的 MC 能够完成充电使命,那么称该充电规划可调度,相应的充电方案为可行充电方案.

目前,在无线可充电传感器网络的研究中,主要的问题和挑战包括以下两个方面.

### (1) 充电规划的设计.

虽然无线可充电传感器网络在理论上可以永远保持正常工作,但是它与有线网络存在本质的差别,即:有线网络中各节点的能量是持续足量供应的,而无线可充电传感器网络则需要优化的充电规划才能实现永久存活的目标.由于充电系统的充电能力有限,表现在 MC 的移动速度、充电功率及总能量也是有限的,因此在设计充电规划时,首先需要回答的问题是要完成一个传感器网络充电使命,至少需要具备什么样能力的充电系统.正是由于 MC 的充电能力有限,为了保证传感器网络持久、有效地工作,MC 的充电路径规划和充电时机选择便成为

充电规划的核心问题:前者解决 MC 按什么顺序为哪些传感器节点充电,后者解决 MC 何时为每个传感器节点充多少电.由于 MC 需要从 SS 处补充能量,因此,SS 最优位置的部署也是一个很重要的问题.

## (2) 传感器网络协议的设计.

有些研究为传感器网络设计特殊的协议来配合充电规划,以达到最好的效果.在这些工作中,传感器节点如何预测 MC 的充电行为,以建立能量预算?如何确定传感器节点的数据率和路由,使得能量消耗与能量补充达到平衡?如何协同使用传感器节点的节能方法和 MC 的充电行为,使得网络效用达到最大化?这一系列问题都亟需解决.

由于路径规划是 NP 完全问题,因此充电规划本身也是一个 NP 完全问题,而综合考虑传感器网络协议设计则更加复杂.传感器网络的一些特性,例如传感器节点的功耗往往不恒定、传感器网络能耗极不平衡等,也增加了保证所有传感器节点不死亡的难度.此外,在设计充电规划时,需要尽可能地减少传感器网络带宽和资源的占用,否则,充电的收益会大打折扣.进一步地,在解决这些问题的过程中,往往需要达到最小化充电代价、最大化网络效用等目标,这些挑战使得计算这些问题的最优解几乎不可能,因此往往只能寻求近似解.

## 2 无线可充电传感器网络中充电规划研究现状

由于无线可充电传感器网络在解决能量问题方面具有日渐成熟的理论和实验基础,因此近年来受到广泛关注和深入研究.在无线可充电传感器网络中设计充电规划,从本质上讲都是为了提高网络的效能,同时最小化充电的代价.围绕这些目标,现有工作使用能力不同的硬件设备,采用不同的充电技术,最终设计出适应不同应用场景的充电规划.

本节根据无线可充电传感器网络中设计充电规划的 6 个不同维度对现有工作进行分类,分类标准及各类方案的特点见表 2,涉及充电规划的硬件配置和软件配置两大部分.其中,硬件配置部分考虑的维度包括 MC 的数量、MC 的充电能力约束、MC 的充电范围及 SS 的位置;软件配置部分考虑的维度包括优化对象及充电方案的周期性.每个维度中不同类型的方案都基于一定的理论和实验支撑,但却适用于不同的应用场景.下面根据表 2 中 6 个不同维度,选取最近几年相关工作进行分类概述和对比分析.为了避免工作的重复介绍,对于每个维度的不同类型方案只列举几个典型的代表.

**Table 2** Classifications of charging programming in WRSNs

表 2 无线可充电传感器网络中充电规划分类

硬件配置	按 MC 个数分	基于单 MC 的方案		基于多 MC 的方案
	按充电范围分	单对单充电的方案		单对多充电的方案
	按 MC 充电能力分	MC 充电能力无限的方案	MC 充电能力有限但足够的方案	MC 充电能力有限且不够的方案
	按 SS 部署方案分	SS 预部署的方案		SS 动态部署的方案
软件配置	按优化对象分	只考虑传感器网络的方案	只考虑充电系统的方案	联合优化的方案
	按充电周期分	周期性充电的方案		按需充电的方案

### 2.1 按MC个数分类

按 MC 的个数,现有工作可以分为两大类:基于单 MC(single mobile charger,简称 SM)的方案和基于多 MC (multiple mobile chargers,简称 MM)的方案.

#### 2.1.1 基于单 MC 的方案(类型 SM)

目前,大多数工作采用 SM 类型的方案,这些工作的主要目标是通过设计充电规划来最大化网络效用或最小化充电代价.网络效用是指利用传感器网络能够达到的功效和作用,比如数据采集、目标监测和追踪等;充电代价是指 MC 的总成本以及 MC 为传感器网络充电过程中消耗的总能量.

文献[42]基于单个 MC 实现一个无线可充电传感器网络原型系统,其中,一部分传感器节点以固定速率产生数据,并将这些数据发送到基站节点,当这些数据无法送达时,则称为网络死亡.文献[42]通过联合考虑网络路由和 MC 充电策略,达到最大化网络生命期的目标.路由方面,采用一种基于参数的路由策略,从而使传感器节点能

够在负载均衡和最小能量之间进行调节;充电策略方面,该文假设 MC 移动不消耗时间和能量,并提出两种启发式方法和一种联合优化方法来解决这个问题.文献[44]将系统中的 MC 作为移动基站,即:MC 在为传感器节点充电的同时,还能停留在充电回路中某些特定的点处收集周围传感器节点发送的数据.该文同时考虑了流约束、能量均衡约束、电量约束、带宽约束及在每个停留点停留时间的约束等,目标是最大化整个传感器网络的效用值.其中,效用函数定义为关于每个传感器节点在一轮充电调度中收集数据总量的二阶可导非减凹函数.针对该优化问题,该文提出一个分布式的解决方案.

### 2.1.2 基于多 MC 的方案(类型 MM)

MM 类型的方案采用多个 MC 为传感器网络充电,这些 MC 相互配合或独立负责一部分传感器节点的充电,主要目标是最小化充电代价,包括最小化 MC 的数量或者最大化 MC 的充电效率等.

文献[45]考虑传感器节点部署在一条直线上的情况,由于单个 MC 充电能力有限,它能够到达的最远距离也有限,当网络规模较大时,单个 MC 无法为远处传感器节点充电.因此,该文考虑采用多个能量有限的 MC 进行协同充电,即:MC 之间可以无损地进行能量交换,后备 MC 移动一段距离后,将剩余的一部分能量传递给前驱 MC,使之能够移动得更远.这样,能量经过逐级传送,只要 MC 数量足够多,在最前方的 MC 可以到达任意远的地方,并为路过的传感器节点充电.文献[46]进一步通过构造最小权重哈密顿回路的方式,将文献[45]中的成果推广到二维传感器网络中.文献[47]考虑在智能电网监测传感器网络中应用多个 MC 为传感器节点充电,其中,每个 MC 可以为充电范围内所有传感器节点充电.该文首先采用线性规划方法找到为这些传感器节点充电的最佳位置,再依据它们与不同 MC 的距离关系将这些位置分簇,最后构造每个簇中遍历这些位置的最短哈密顿回路,每个 MC 沿着这些回路为一个簇中沿途传感器节点充电.虽然这种方法是基于 RF 技术进行充电,但是原理同样适用于其他充电方式.文献[48]研究在保证所有传感器节点永远不死亡的前提下,使用最少数量的 MC 来为整个网络供电,并确定这些 MC 的具体充电方案.该文基于一种周期性贪心充电方案,推导出单个 MC 能保证一组传感器节点不死亡的充分条件.根据此条件,将所有传感器节点按一定序列进行划分,从而构造出若干充电回路,这些充电回路上的传感器节点能量能够被单个 MC 及时补充.最后,根据两条启发式规则将这些充电回路分配给最少数量的 MC 进行调度.

### 2.1.3 分析与比较

在无线可充电传感器网络中,MC 是相对代价很高的设备,在单个 MC 能够胜任充电任务的条件下,一般不会通过增加 MC 数量来提高充电服务质量.因此,在小规模传感器网络的充电时主要采用 SM 类型的方案,它的优点在于成本较低,充电规划相对简单.但是,由于单个 MC 的充电能力有限,比如受到移动速度、充电功率及总能量的限制,即使采用单对多充电技术(将在下一小节介绍),单个 MC 仍无法处理中、大规模的传感器网络充电任务.因此,MM 类型的方案主要适用于中、大规模传感器网络中,它的优点在于每个 MC 的代价比较小,这些 MC 可以并行处理网络中的充电任务,减少充电延迟,充电规划的可扩展性好,并且可以通过协作完成单个 MC 无法完成的工作(例如文献[45]考虑的情况).但是 MM 类型的方案总的代价较高,并且规划复杂度远远高于 SM 类型的方案.

## 2.2 按充电范围分类

根据 MC 充电范围,现有工作可以分为两大类:使用单对单充电技术(one to one charging,简称 OO)的方案和使用单对多充电技术(one to many charging,简称 OM)的方案.

### 2.2.1 单对单充电的方案(类型 OO)

OO 类型的方案中 MC 同时最多只为一个传感器节点充电,为了达到较高的充电效率,通常让 MC 移动到离目标传感器节点很近的位置为其充电,如图 2 右图所示,此时充电效率可以视为定值.这类工作通常将充电路径规划转换成变种的 TSP 问题(traveling salesman problem)<sup>[49,50]</sup>或 DVRP 问题(distance-constrained vehicle routing problem)<sup>[51,52]</sup>,再利用已有的方案来解决相应的问题.

文献[53]考虑了传感器节点的能耗动态变化的情况,采用一个单对单充电的 MC 为网络充电.由于 MC 的充电能力有限,因此在每一轮充电调度中无法满足所有传感器节点的充电需求,从而提出最大化充电吞吐量

(charging throughput)的问题,即,在每一轮为尽可能多的传感器节点充电.该文提出一种离线算法和一种在线算法,在MC充电能力的约束下选择为哪些传感器节点充电,最后采用基于最小支撑树的启发式TSP解法确定MC的充电路径.文献[54]利用多个单对单充电的MC为网络提供能量,并首次提出最少化MC问题(minimum mobile chargers problem,简称MMCP),即:给定无线可充电传感器网络和单个MC的参数,确定最少所需的MC个数及其充电方案,从而保证所有传感器节点永远不死亡.该文首先证明MMCP问题的NP完全性,然后将MMCP问题转换成DVRP问题,并采用已有的DVRP解法来解决MMCP问题.

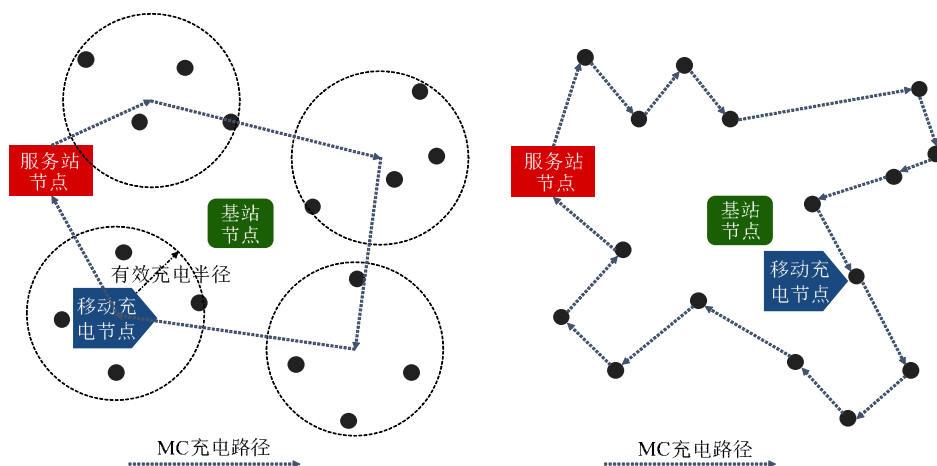


Fig.2 Demos of OO scheme (right) and OM scheme (left)

图2 单对单充电方案(右图)和单对多充电方案(左图)示意

### 2.2.2 单对多充电的方案(类型 OM)

OM 类型的方案采用单对多充电技术<sup>[32]</sup>,即,MC 可以同时为充电范围内多个传感器节点进行充电,如图 2 左图所示.这类工作主要是将充电问题转换成充电覆盖问题,即,MC 在哪些位置进行充电能够覆盖尽可能多的传感器节点.在此约束上,进一步提出优化充电方案和提高网络效用的措施.

文献[55]假设网络包含若干个站点,每个站点可以部署一个或多个可充电传感器节点,MC 可以为一个站点的所有传感器节点同时充电;每个传感器节点有多个传输能级,对应不同的通信距离.该文的目标是如何将一定数量的传感器节点分配到各个站点;对于每个站点的传感器节点,怎样决定其下一跳路由及相应的传输能级,使得所有节点产生的数据都能送达基站节点,并且充电效率最高.为解决这个问题,该文提出采用一种迭代的方式,每次迭代构造最小能量-负载集中的路由树,决定每个站点中传感器节点的路由策略;然后将给定的传感器节点放置到这些站点中去,评估优化目标值,直到相邻两次迭代的结果变化小于一定阈值.文献[56,57]基于 WISP 平台<sup>[58]</sup>进行研究,考虑 MC 同时可以读取传感器节点的 RFID 信号,并为信号范围内的传感器节点充电.由于传感器节点的电量高于一定值时才能进行数据的发送和接收,故充电请求的延迟极大地影响到通信的延迟,因此需要尽可能地减小.文献[56,57]通过规划 MC 的最优充电回路以及相应的停留充电位置,使得为所有传感器节点的平均充电延迟最小化.为达到这个目标,提出一种线性规划方法和一种启发式近似算法来解决该问题.

### 2.2.3 分析与比较

目前,基于磁耦合谐振充电技术的工作多采用 OO 类型的方案,这类工作可以充分利用 MC 的移动性来保持很高的充电效率,减少充电过程中的能量损失,但其缺点在于,总的移动距离相对较高,消耗在移动上的能量较多,且在只有单个 MC 时,方案的可扩展性差,当传感器节点较多时,无法保证充电规划的可调度性.少数基于磁耦合谐振技术的工作采用 OM 类型的方案,主要目标是解决 OO 类型方案的可扩展性问题.在特殊条件下,如在传感器节点部署较为密集时,这种方式可能节约一定的时间和能量,然而前提是能够解决单对多充电中电磁干



扰的问题.对于传感器节点部署较稀疏的情况,大多数 OM 类型的方案采用电磁辐射充电技术,但是由于这类充电技术充电效率相对较低,因此只适用于超低功耗传感器网络.总之,OM 类型的方案适用于特定的传感器网络(如密集分布的传感器网络、超低功耗传感器网络等),主要的优点是能够在一定程度上解决充电规划可扩展性问题.

### 2.3 按MC充电能力分类

MC 的充电能力主要受到其移动速度、充电功率及总能量等参数的影响.根据 MC 充电能力,现有工作可以分为三大类:MC 充电能力无限(energy unlimited,简称 EU)的方案、MC 充电能力有限但足够(energy limited but sufficient,简称 LS)的方案、MC 充电能力有限且不够(energy limited and insufficient,简称 LI)的方案.

#### 2.3.1 MC 充电能力无限的方案(类型 EU)

EU 类型的方案考虑最理想的情况,即,MC 的能量无穷大(例如 MC 能够在充电过程中通过能量收集方式<sup>[24]</sup>来为自己补充能量)或移动时间、充电时间可忽略不计等.在这种条件下,无线可充电传感器网络甚至不需要配置服务站节点,MC 可以在网络中随机或者按一定规则地移动,持续地为传感器网络提供充电服务.对于传感器节点而言,可以预测 MC 的能量提供模型,从而调整自己的能耗,达到最大化网络效用的目的.

文献[59]考虑在一个事件检测应用的无线可充电传感器网络中如何调整传感器节点的睡眠策略,使得所有传感器节点都不会死亡,并且最大化网络的效用.网络效用定义为事件检测率的非减凹函数.该文假设每一轮充电调度中 MC 的工作时间一定,首先不考虑 MC 的移动时间,把该问题归结到一个最大覆盖的问题,且当目标函数是非减凹函数时,可以采用贪心算法来解决.然后再考虑移动时间的影响,仍然采用贪心的方式来得出最大同时工作的传感器节点数量,并且保证 MC 能够为这些传感器节点充电.文献[60]将所有传感器节点采集数据的对数之和作为系统效用函数.该文假设传感器节点能够精确预知自己未来的能量收益,设计了一种迭代的方法来计算节点每一时刻的最优能量预算,然后根据该预算,分布式求解网络效用最大化的优化方程.虽然该文针对的是能量收集传感器网络,但是算法同样适用于无线可充电传感器网络.文献[61,62]考虑了一个目标监测传感器网络,假设该网络是冗余部署的,这些传感器节点的充电时间和放电时间服从一定的分布,目标是通过调节每个传感器节点的睡眠和工作时间来最大化网络效用,文献[61,62]提出的网络效用定义为一个关于事件检测率的非减连续凹函数.为了解决这个问题,建立了马尔可夫模型进行分析,并据此提出一种分布式基于阈值的激活策略,能够达到近似最优的睡眠调度.文献[63]假设 MC 和传感器网络都能够转换太阳能进行能量补充,而对于太阳能转换率很小或者能耗过大的传感器节点,则需要 MC 对其进行无线充电,并且每个 MC 始终只停留在一个传感器节点处为其进行无线充电.该文研究了给定 MC 数量,选择哪些传感器节点进行充电,从而能够最大化整个网络的吞吐量.该文将该问题描述成一个混合整数规划(mixed integer linear programming)问题,并提出一种启发式算法来解决.仿真结果表明,该算法能够达到最优吞吐量的 85.9%.

#### 2.3.2 MC 充电能力有限但足够的方案(类型 LS)

LS 类型的方案假设 MC 的充电能力足够为任意数量的传感器节点进行一轮充电,但是每轮充电调度结束以后需要回到 SS 进行自身的能量补充,因此这类方案仍需考虑如何最小化 MC 的总能耗.为了最小化充电代价,每一轮充电回路通常是以 SS 为起止点的哈密尔顿回路.

文献[64]采用单个 MC 为传感器网络充电,将 MC 的充电路径规划与传感器节点的路由策略结合起来进行优化,在保证所有传感器节点永远不死亡的前提下,最小化传感器网络和充电系统的总能耗,即,最小化 MC 的休息时间比率.该文假设 MC 能够为整个传感器网络充电,即,不考虑 MC 的总能量约束,从而构造出一个以 SS 为起止点、遍历所有传感器节点的充电回路,周期性地对所有传感器节点进行充电.文献[65]对文献[64]进行了扩展,将网络区域划分成均匀的六边形单元,其中,MC 采用单对多的充电技术,可以为每个单元内的所有传感器节点同时充电.该文的目标是通过联合优化 MC 的充电回路、充电时间及传感器网络的路由,使得 MC 的休息时间比率最大.该文将该问题描述成一个优化问题,并通过离散化、线性化等技术将优化方程进行简化处理,使得该优化问题在多项式时间内可解.文献[66]基于一种周期性贪心充电方案,提出充电规划可调度的一个充分条件,如果该条件能够满足,说明在当前配置下存在能够保证所有传感器节点不死亡的充电方案.判定该充分条



件,生成可行充电方案的计算时间复杂度都极低.基于 3 条启发式规则,该文提出充电规划可调度的一个必要条件,如果该条件无法满足,说明在当前配置下任何充电方案都不能完成充电使命.该充分条件和必要条件之间存在一定的判定空洞,可以采用服务降级、增加 MC 个数等方案来进行处理.

### 2.3.3 MC 充电能力有限且不够的方案(类型 LI)

LI 类型的方案认为 MC 的充电能力不足以为整个传感器网络供能,因此这类方案的目标通常是利用 MC 有限的充电能力,在每一轮充电调度中,选择对网络效用提高最显著的传感器节点充电来最大化网络效用(例如网络生命期、目标监测率等).

文献[67]假设所有传感器节点功耗相同,采用单个 MC 为尽可能多的传感器节点充电.这里,MC 的移动和充电共享有限的能量.由于 MC 可以同时为充电范围内所有传感器节点充电,因此该文将该问题归约成覆盖 TSP 问题(covering salesman problem)<sup>[68]</sup>,即,规划一条充电回路来覆盖最多的传感器节点.该文首先采用 PSO 算法计算覆盖最多传感器节点的圆心位置,即,MC 停下来为传感器节点充电的位置;然后采用 LKH 算法构造遍历这些圆心的最小 TSP 回路,检查能量是否足够,如果不够就减少第 1 步覆盖的传感器节点数,重复该过程,直到充电调度的总能耗小于 MC 的总能量.文献[69]考虑了在目标监控传感器网络中,采用单个 MC 为传感器节点提供能量,并且该 MC 的总工作时间一定,即,充电时间加移动时间一定.该文的目标是给定 MC 的工作时间预算,如何确定合适的传感器节点及其充电方案,使得监测的总效用最高.为了解决这个问题,该文首先采用贪心策略和随机策略为 MC 选择合适的待充电传感器节点,使这些传感器节点能够覆盖最多的目标并且与已加入的传感器节点距离在一定范围内;然后生成遍历所有传感器节点的最短哈密顿回路,并根据总的工作时间预算来贪心地分配各个传感器节点充电时间;评价当前的网络效用,如果效用仍能增加,那么继续该过程,直到没有传感器节点能够加入.文献[70]使用多个 MC 为传感器网络进行充电,特别研究了这些 MC 之间如何进行协调,按什么路径进行充电,从而达到提高充电效率、延长网络生命期、提高网络效用等目标.该文提出 4 种充电协议来控制 MC 的充电行为,即 CC,DC,DCLK 和 CCGK,其中,CCGK 为集中式并且需要全局信息,CC 为集中式但只需要局部信息,DCLK 为分布式且只需要局部信息,而 DC 为分布式且不需要任何传感器网络的信息.仿真结果表明:DCLK 虽然只需要局部信息,但却能够获得与 CCGK 类似的性能.文献[71]进一步考虑将 MC 分类,其中一类 MC 只为一个区域的传感器节点充电,另一类 MC 只为前一类 MC 进行充电.文章指出:通过这种协作的方式,可以比不进行协作的策略取得更高的网络效用.

### 2.3.4 分析与比较

从理论上说,通过合理的充电规划,EU 和 LS 类型的方案可以保证网络中所有传感器节点永远不死亡.其中,EU 类型的方案对 MC 的要求最高,需要 MC 随时有可用的能量为传感器网络充电.但在实际中,这个条件难以满足,即使 MC 采用能量收集的方法,MC 仍不能保证持续、稳定的电力来源.因此,EU 类型的方案面临着物理实现方面的严峻挑战.LS 类型的方案则通过引入服务站节点来减少对 MC 的要求,提高实用性.缺点在于,MC 和 SS 的部署代价较高,并且需要较为精细的规划.LI 类型的方案对 MC 和 SS 的要求最低,因此最容易实现,但其只能提供尽力而为的服务,无充电服务质量保证.当采用 LI 类型的方案时,可以考虑与传感器网络的节能方法配合使用,以期达到更好的效果.

## 2.4 按 SS 部署方式分类

根据 SS 部署方式,现有工作可以分为两大类:SS 预部署(service station predetermined,简称 SP)的方案和 SS 动态部署(service station deployable,简称 SD)的方案.

目前,绝大多数工作假设 SS 部署在传感器网络中的某个固定位置,该位置在传感器网络部署之前已经确定,称为 SS 预部署的方案.这类方案不依赖于各个传感器节点的物理位置、拓扑结构以及功能等,因此部署简单、方便.然而受传感器网络自身传输特点的影响,各个传感器节点间的能耗极不均衡,即,存在所谓的能量空洞现象<sup>[72]</sup>.特别地,在多对一传输的传感器网络中,即数据需要汇总到一个基站节点的前提下,文献[73]通过建立分析模型证明能量空洞问题是无法避免的.能量空洞现象大大加剧了传统传感器网络的能量问题,在大多数传感器节点仍保留较多能量的条件下,由于部分传感器节点的死亡导致网络不连通,从而大大缩短了网络生命期.为

为了避免能量空洞的产生或减少能量空洞的影响,许多研究提出采用网络分簇<sup>[74]</sup>或不均衡的网络部署<sup>[75]</sup>等方案,这些方案会增加协议的复杂度,提高了部署难度和代价。

在无线可充电传感器网络中,由于充电系统的引入,虽然理论上可以解决能量空洞问题,但该问题仍然会极大地影响充电规划,包括 SS 的部署。在 MC 充电能力有限的情况下,由于 MC 在每一轮充电调度中都是从 SS 出发,并在该轮结束时回到 SS,因此 SS 的位置会极大地影响每一轮充电回路的长度。由于传感器网络能耗极不均衡,因此在很多工作中(例如下文将介绍的 OD 类型的方案),每一轮充电调度只服务能量快要耗尽的传感器节点,这样可以大大降低充电代价。此时,如果将 SS 部署在传感器网络能耗热点区域,就能极大地减少充电回路总长度,从而进一步降低充电代价。基于这一出发点,文献[76]提出一种 SS 动态部署的方案。如图 3 所示:当 SS 的迁移代价小于迁移后节能的期望时,将 SS 迁移到传感器网络能耗热点区域。这种方案的优点在于,配合 OD 类型的方案使用时可以使充电代价大为减少;缺点在于,需要了解传感器网络的物理位置和拓扑结构等信息,基于这些信息才能得出最佳的部署位置,并且要求 SS 可以进行部署。

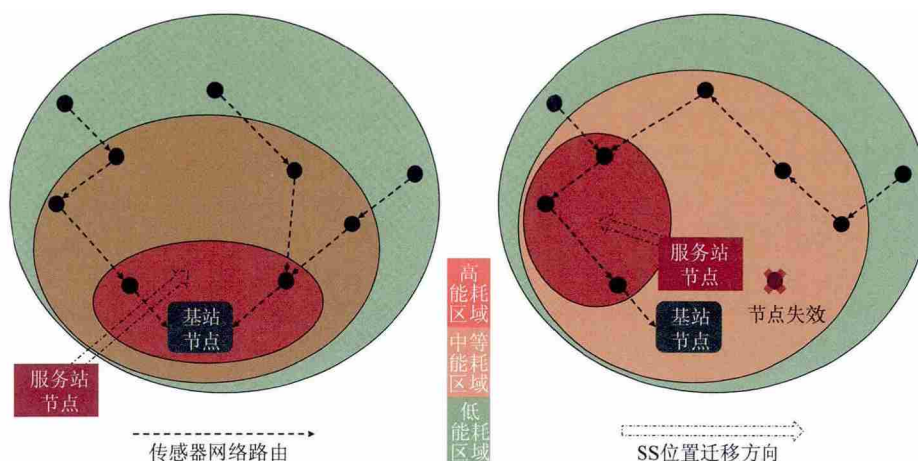


Fig.3 Demo of an SD scheme

图 3 SS 动态部署方案示意

## 2.5 按优化对象分类

根据优化对象,现有工作可以分为三大类:只考虑传感器网络协议设计(wireless sensor network only,简称 WO)的方案、只考虑充电系统充电规划(charging system only,简称 CO)的方案和联合充电规划和传感器节点行为同时进行优化(joint optimization,简称 JO)的方案。

### 2.5.1 只考虑传感器网络的方案(类型 WO)

WO 类型的方案是从传感器节点的角度出发,将 MC 的充电服务抽象成传感器节点在一定时间内获得能量的函数,通过传感器节点的协议设计管理能量消耗,从而最大化网络效用。这里的网络效用包括传感器网络生命周期、传感器网络总数据吞吐量及传感器网络的事件检测率等。WO 类型的方案往往假设 MC 的能量无限,因此大多同时为 EU 类型的方案。

文献[77]考虑在能量收集传感器网络中,当传感器节点能量获取率随时间变化会产生较大波动时,如何进行流量和路由的优化,使得网络的对数总数据率最大,且实时地与最优值保持较小的误差。基于能量收集的传感器网络需要解决的一个重要问题就是如何保证算法快速收敛。文献[78]考虑在一段有限时间内,给定传感器节点能量获取模型,如何优化传感器节点功耗和路由,使得网络总带宽最大。最大化网络带宽需要考虑每个传感器节点每一时刻的能耗是否会导致后续能量不足,因此存在时间耦合特性。由于该问题的 NP 完全性,文献[78]首先假设传感器节点能够预知整个时间范围内的能量获取,最大化它在这段时间内可发送的数据量。但是由于准确地预知能量获取不可能,因此再假设当整个时间范围内的能量获取范围可预知时,利用已有方法求取每一时刻

能耗,根据估计值与当前实际值的比较,计算出实际的能耗.最后,在保证传感器节点每一时刻的能耗不超过估计值的条件下,计算最优路由.文献[79]假设传感器节点间路由为一有向无环图,通过睡眠调度的方式来构造一个传感器网络时空拓扑结构,使得每个传感器节点最终能将数据传输到基站节点.该文的目标是最小化时空拓扑结构的总代价,即所有传感器节点在活跃期间发送、接收所有数据的代价之和.该文采用贪心的方式,提出3种启发式方法来解决这个问题.文献[80]考虑部署若干个固定的RF电源为其中移动传感器节点充电的场景,目标是使移动传感器节点在一定移动模型下,最大化其正常工作的时间期望.文献[81]考虑所有传感器节点单位时间内共享一定的能量补充,目标是分配这些能量,使得事件的丢失率最小化.其中,能量和事件按泊松过程到达,由于传感器节点能量不足以及信道不通等原因,会导致事件丢失.该文设计了3种分配方法来降低事件的丢失率,即,平均分配、最优分配及近似公平分配.虽然该文针对能量收集传感器网络,但其模型也可用于无线可充电传感器网络.文献[82]考虑了在超低功耗的传感器节点上使用基于RF信号的能量收集器,传感器节点没有电池,因此仅能使用获取的能量进行数据的采集和传输.针对这些限制,该文提出一种组网方法以及数据传输协议.整个过程由基站节点来进行监控和维护.文献[83]利用无线可充电传感器网络对若干个兴趣点中发生的事件进行监控,目标是最大化成功检测到事件占有所有发生事件的百分比,即,每个兴趣点处事件检测率QOM的加权和.该文把时间离散化,将单位时间内传感器节点获取的能量等效为活跃的时间槽数,并对其工作时间槽的选择进行周期性调度.该文假设事件的到达时间和持续时间服从指数分布,并证明覆盖一个兴趣点的所有传感器节点的QOM值等价于把这些传感器节点合并成一个传感器节点得到的QOM值,从而极大地简化了QOM的计算,最终采用贪心算法求解.

#### 2.5.2 只考虑充电系统的方案(类型CO)

CO类型的方案认为,充电规划应当独立于传感器节点的项协议设计,因此主要研究MC的充电回路规划、MC的充电方案设计以及MC的充电能力和数量的确定等,主要的优化目标是最小化充电代价,包括最小化MC的数量、最小化MC的各项参数值及最大化MC的充电效率等.

文献[84]认为,无线可充电传感器网络的一个很大的优势在于,充电策略可以交给MC设计,而无需传感器节点的参与.这样,充电规划与路由策略等无关,具有通用性和扩展性.该文提出移动充电节点的派遣判定问题(charger dispatch decision problem,简称CDDP),并证明它是NP完全的.针对CDDP问题,该文提出一种移动充电协议,并通过实验对比传感器网络在采用不同路由协议时,是否引入MC的影响.结果表明:使用MC对传感器节点充电可以极大地提高网络性能,包括提高网络的生命期、连通度及覆盖度等.文献[85]采用多个有限能量的MC为无线可充电传感器网络充电,目标是在考虑传感器节点能耗不均衡的条件下确定最少的MC数量,以保证所有传感器节点不死亡.该文在每一轮首先确定该轮需要充电的传感器节点集合,并构建基于这些传感器节点位置的最小支撑树,根据MC的充电能力限制对该树进行分解,得到若干子树,每个子树上的传感器节点都能被一个MC在一轮中充完电.这样,子树的个数即该轮所需MC的个数.所有轮中,所需MC的最大个数即为问题的解.文献[86]采用4种典型的全覆盖的路径遍历类型(space-filling curves),即SCAN,HILBERT,S-CURVES以及Z-curve,并研究采用这些路径遍历方法对无线充电过程的影响.该文通过仿真实验比较了采用这些遍历方式时的充电位置个数、总充电路径长度、存活节点个数、平均充电延迟以及充电效率等参数.结果表明,C-CURVES(ad)在各项参数上均优于其他方法.

#### 2.5.3 联合优化的方案(类型JO)

JO类型的方案通过同时考虑充电系统的充电规划和传感器网络的协议设计,来使两者行为能够更好地互相配合.在MC的充电能力范围内,最大化网络效用;或者在保证传感器节点数据及时传输的条件下,最大化MC的充电效率.

文献[87]将MC同时作为移动基站节点,即:MC在为传感器节点充电时,同时进行数据收集,从而达到较高的网络效用.这里,网络效用与收集到的数据总量及其权重有关,是一个严格凹增、二阶可导的函数.该文将时间分片,在每个时间片内,采用二分法选择能量最少的传感器节点集合进行充电,使得遍历这些传感器节点的总路程在一定的阈值内.对于数据收集问题,该文在每个传感器节点的能量、数据率约束下,求解最大化网络效用的

优化问题.文献[88]将 MC 同时作为移动基站,并且可以停留在任意一点为周围传感器节点充电,任何传感器节点都能通过动态路由将所有的数据最终传递到 MC.该文的目标是通过联合优化 MC 的充电回路、停留点选择及传感器网络路由等,最大化 MC 在 SS 处的休息时间比率.为解决该问题,该文采取先不考虑 MC 移动时间,再加入移动时间的思路,提出一个近似最优解.文献[89]将 MC 同时作为移动基站节点,承担数据收集和能量供应两项任务.假设已知 MC 的充电回路,并且该回路可以覆盖所有传感器节点的有效充电位置.该文解决在哪些位置停留、停留多久的问题.同时,为了最小化整个系统的总能耗,该文在解决该问题时还考虑优化传感器网络的路由,使网络路由与充电行为结合,最终给出一个近似最优解.文献[90]建立了一个离散的无线可充电传感器网络模型,其中,传感器节点位于网格的顶点,它们的电量、功耗及 MC 的充电功率均为离散值.假设传感器节点在每个时间槽内按一定概率独立地睡眠或正常工作,MC 沿网格线移动,按一定概率随机地为附近的传感器节点充电.该文建立了马尔可夫模型来分析传感器节点的睡眠概率,并提出两种充电策略,包括 MC 的充电策略和传感器节点的睡眠策略,从而尽可能地延长网络生命期,且保证较好的网络性能,如传感器节点平均睡眠率、失效率及对随机运动物体的检测概率等.

#### 2.5.4 分析与比较

在上述 3 种类型的方案中,JO 类型方案的整体效率最高,因为它同时考虑传感器网络和充电系统的约束,从而使两者的行为能够相互配合,但是这类方案专用性太强,只能对特定的应用和目标进行优化,缺少通用性和可扩展性,并且对网络的稳定性要求过高,通常对传感器网络作如下要求:传感器节点不失效或失效率低、通信链路稳定且延迟可控及数据产生率不随时间而变化等,这些要求在现实环境中通常难以实现,因此,JO 类型方案的实用性有待实际考察.WO 类型的方案将充电行为抽象为传感器节点获取的能量与时间的函数,传感器节点根据预测的函数模型对自身行为进行调整,以达到最高的收益.因此在这种方式中,最核心的问题在于传感器节点预测的能量获取函数模型是否可靠,可靠性一方面受预测算法的影响,另一方面取决于 MC 的充电行为是否能够被精确地建模.对于周期性充电的方案,可以采用这种方式;而对于按需充电的方案,这种方式往往难以保证效率.CO 类型的方案通用性最好,将传感器网络协议设计与充电系统的充电规划解耦,一方面,传感器节点不需要关心具体的充电方案,降低了对传感器节点的要求;另一方面,MC 不需要关心传感器节点采用何种协议,只需要传感器节点能够准确地估计剩余工作时间等状态即可进行规划.这类方案最大的缺点在于,需要定期查询传感器节点的剩余能量,因此会产生额外的通信代价,或者需要假设传感器节点功耗恒定或可预测.

### 2.6 按充电周期分类

根据充电周期,现有工作可以分为两大类:周期性充电(charging as a whole,简称 AW)的方案和按需充电(charging on demand,简称 OD)的方案.

#### 2.6.1 周期性充电的方案(类型 AW)

AW 类型的方案是指 MC 每一轮充电调度的持续时间、充电回路及充电顺序都相同,从而保证传感器节点能量也是周期性地发生变化,永远不会死亡.因此,当使用单个 MC 时,AW 类型的方案每一轮对所有的传感器节点充电,且其充电周期受到传感器节点的生命期和 MC 硬件参数的双重影响.而当使用多个 MC 时,每个 MC 可以只为一部分传感器节点进行周期性充电,如图 4 右图所示.

文献[91]的充电方案是让 MC 周期性地沿着起止点为 SS,遍历所有传感器节点的 TSP 回路进行充电,每次将每个传感器节点充电至满电量并立即离开,以此构造可更新的能量循环(renewable energy cycle),即,每个传感器节点的能量在每个周期的相同时刻都是相同的.构造优化方程对问题求解,不但能够获得最优解,同时也能判定是否存在可更新的能量循环,即:在该文给出的约束下,是否存在一个可行的充电方案.文献[92]进一步考虑传感器节点采用动态路由的方式,扩展文献[91]中可更新的能量循环概念,即:传感器节点可以按照不同的路由进行数据传输,从而达到更高的充电效率.该文根据 MC 为不同传感器节点充电的状态将一个周期分为不同的阶段,并对每一阶段的网络路由进行优化求解,从而得到一个更新周期内多个路由状态.相比于只使用一种路由,在每一阶段传感器网络使用不同的路由可以降低总体能耗,延长能量循环的周期,从而增加 MC 的休息时间比率.

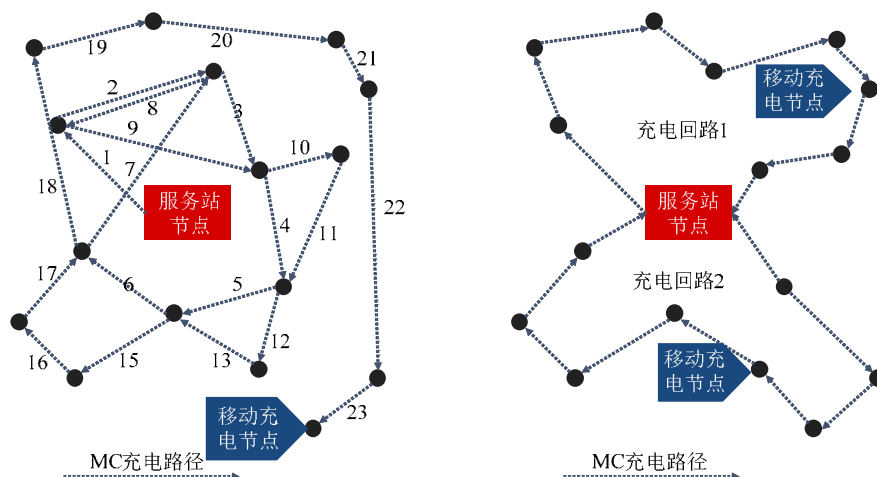


Fig.4 Demos of an AW scheme (right) and an OD scheme (left)

图4 周期性充电方案(右图)和按需充电方案(左图)示例

### 2.6.2 按需充电的方案(类型 OD)

OD 类型的方案充分考虑了传感器网络中能耗不均衡的特点,每一轮只对最需要充电的传感器节点集合充电,因此,其每一轮充电调度都可能不同,如图 4 左图所示.采用这类方案时,要想保证所有传感器节点不死亡,MC 必须知道每个传感器节点的功耗和剩余能量,并从理论上分析哪些传感器节点需要充电.如果传感器节点的信息不可知,或者只能从概率上分析,那么最终的充电方案也只能保证在一定概率下所有传感器节点不会死亡.

文献[93]中,MC 采取按需充电的方案,即:需要充电的传感器节点向 MC 发送充电请求,MC 根据请求队列中传感器节点的位置远近,按照可抢占的最近任务优先(nearest-job-next with preemption,简称 NJNP)策略对这些传感器节点进行充电.该文在理论上分析了这种按需充电方案的充电延迟和 MC 在单位时间内服务的传感器节点数,并据此提出系统参数设置方法,使得传感器节点及时被充电的概率达到设定的目标值.文献[94]同时优化了 MC 的充电回路和对传感器节点的充电延迟.该文将传感器节点按能耗高低组织成多个交织的 TSP 回路,每次 MC 沿着最需要充电的回路为传感器节点充电,通过这种方式可以大大缩短充电回路的总距离.文章提出能量同步措施来指导 MC 为回路上的哪些传感器节点充多少电,与贪心充电策略相比,采用这种方式可以大大缩短每个传感器节点的充电时间,从而降低整体的充电延迟.文献[95]采用多个 MC 为传感器网络进行充电,当传感器节点剩余能量少于一定阈值时,会向中央调度节点发送充电请求.该文研究了两种按需充电策略,即,最近邻优先策略(nearest-charger-first scheduling)和最轻负载优先策略(recent-rarest-charger-first scheduling),将产生的充电请求分配给相应的 MC.该文在不同条件下的传感器网络中进行仿真,通过比较充电能力与充电延时的指标表明:最近邻优先策略更适用于充电请求均匀分布在网络中的情况,而最轻负载优先策略更适用于充电请求集中分布的情况.

### 2.6.3 分析与比较

只使用单个 MC 进行充电时,AW 类型的方案不考虑传感器网络能耗不均衡的特点,每一轮都对所有传感器节点充电,因此,每个传感器节点的剩余能量呈现周期性变化,如图 5 上图所示.AW 方案的优点是规划简单,可以离线计算,运行效率高,很容易保证所有传感器节点不死亡,并从理论上容易得出一些高效的判定结果.然而根据第 2.4 节的分析,当网络能耗不均衡时,每一轮实际上只有少数传感器节点需要充电,其他大多数传感器节点的剩余能量非常充足,如果同时为这些传感器节点充电,则 MC 的移动实际上消耗了大量的能量.为了提高 MC 的整体充电效率,可以使用多个 MC 或者 OD 类型的方案.OD 类型的方案每次只为需要充电的传感器节点充电,这样,功耗低的传感器节点很久才会充一次电,并且每个传感器节点的剩余能量每一轮都是变化的,如图 5 下图所示.OD 类型方案的优点在于,当传感器网络能耗极不均衡时,可以大大减少 MC 的总充电回路长度,提高 MC

的充电效率.另外,OD 类型方案比 AW 类型方案的鲁棒性要强,能够适应传感器节点的动态加入、退出等异常情况.OD 类型方案的缺点在于,需要经常查询传感器节点的功耗和剩余能量,通信开销大;或者为了避免这些通信开销,只能从概率上保证所有传感器节点不死亡.

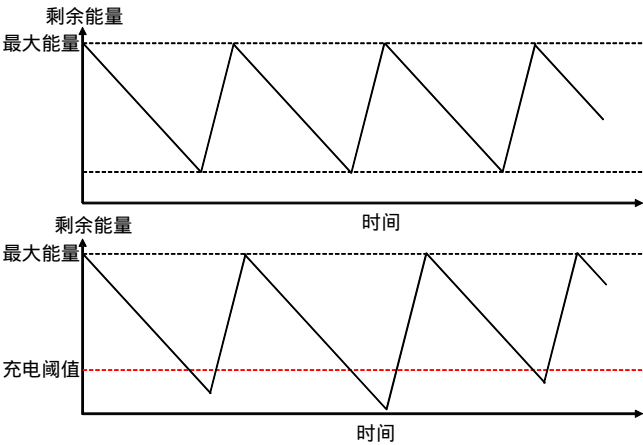


Fig.5 Residual energy of a sensor node in applying an AW scheme (top) and an OD scheme (bottom)

图 5 采用 AW 方案(上图)和 OD 方案(下图)时,传感器节点每轮调度的剩余能量

2.7 小 结

上述工作的详细分类见表 3,其中,“—”表示该工作未提及相关假设.

Table 3 Categories of current works on charging programming

表 3 现有工作分类

文献	MC 个数	充电范围	充电能力	SS 部署	优化对象	充电周期
[60–62,77–79,81–83]	—	—	EU	—	WO	—
[80]	—	OM	EU	—	WO	—
[47]	MM	OM	EU	—	CO	AW
[95]	MM	OO	EU	—	CO	OD
[63]	MM	OO	EU	—	WO	—
[45,48,54,71]	MM	OO	LI	SP	CO	AW
[70,85]	MM	OO	LI	SP	CO	OD
[56,57]	SM	OM	EU	—	CO	OD
[55]	SM	OM	EU	—	WO	—
[86]	SM	OM	LI	SP	CO	AW
[67]	SM	OM	LI	SP	CO	OD
[65,88]	SM	OM	LS	SP	JO	AW
[59]	SM	OM	LI	SP	WO	AW
[93]	SM	OO	EU	—	CO	OD
[87,90]	SM	OO	EU	—	JO	OD
[84]	SM	OO	LI	SP	CO	AW, OD
[53,69]	SM	OO	LI	SP	CO	OD
[42]	SM	OO	LI	SP	JO	OD
[66]	SM	OO	LI, LS	SP	CO	AW
[76]	SM	OO	LS	SD	CO	OD
[94]	SM	OO	LS	SP	CO	OD
[64,91,92]	SM	OO	LS	SP	JO	AW

根据以上分析可知:在不同的应用场景中,可以采用不同的充电规划方案.对于可以采用同一个维度多种充电规划方案的传感器网络,从成本和实现难易程度的角度出发,在一般情况下,各维度的不同类型方案适用范围可作如下排序(“>”表示左方案适用范围大于右方案).



SM>MM                      OO>OM                      LI>LS>EU  
 SP>SD                      WO>CO>JO                      AW>OD

该偏序关系可以用于冲突方案的选择.例如:对于一个无线可充电传感器网络,如果从一个维度上判断可以使用 SM 方案,而从另一个维度上判断只能使用 MM 方案,则最终只能选择 MM 方案.另一方面,从成本与收益的对立关系角度来看,适用范围越广的方案在特定的情况下往往在网络效用、充电效率等方面表现得越差.例如:对于一个无线可充电传感器网络,如果既可以使用 AW 方案也可以使用 OD 方案,则为了减少充电代价,最终可以选择 OD 方案.因此,最终方案的确定需要根据各方面因素综合进行选择.本文旨在给出指导性的建议,具体内容将在下一节详细加以讨论.

### 3 无线可充电传感器网络中充电规划设计

#### 3.1 充电规划的一般性设计思路

上一节基于现有研究中 6 个不同的维度,分析了不同类型的充电规划的优缺点.本节从网络设计者的角度出发,提出充电规划的一般性设计思路,根据不同类型的传感器网络,选择合适的充电规划方案,整体思路如下所述.

首先,在网络部署之前,根据应用类型和目标可以确定传感器节点是否能被 MC 控制以及传感器网络的目标生命期;其次,结合具体的部署环境,可以确定传感器网络部署的规模和部署的密度;再次,确定传感器网络使用的组网通信协议,并对实际环境进行建模仿真,从而确定传感器网络能耗均衡性和传感器网络的稳定性;然后根据这些信息,本文提出表 4 所示的充电规划方案建议以确定充电规划的具体设计;最后,将整个无线可充电传感器网络进行实际的部署、调试和使用.

Table 4 Generalized design principles of charging programming

表 4 充电规划一般性设计思路

传感器节点可控性	MC 无权查询传感器节点状态	MC 可以查询传感器节点状态	MC 可以控制传感器节点行为
	WO	CO	JO
传感器网络目标生命期	有目标生命期要求 EU, LS		尽力而为的网络 LI
传感器网络规模	中大规模 MM		小规模 SM
传感器网络部署密度	密度高或者分簇聚集 OM		稀疏分布 OO
传感器网络能耗均衡性	能耗不均衡 OD, SD		能耗均衡 AW, SP
传感器网络稳定性	网络状态稳定或者可预测 JO		网络状态不可预测 MM, WO, CO

从表 4 中可以看出,传感器网络的各项参数和特点直接或间接地决定了充电系统所采用的充电规划类型.具体分析如下(其中,建议的方案指的是最适合应用场景的充电规划方案,而非唯一可行方案).

- 考察传感器节点的可控性.

如果 MC 无权查询传感器节点状态(例如 MC 无通信功能),则只能采取 WO 类型的方案,即:让 MC 按照随机充电或周期性充电等方案对传感器网络进行充电,由传感器节点自己来建立能量获取模型、估计能量预算及控制工作占空比,从而实现应用目标.如果 MC 可以查询传感器节点的状态,则为了减轻传感器节点的压力,可以采用 CO 类型的方案,即:让 MC 来设计充电方案,虽然消耗一定的网络带宽,但却可以更高效地完成充电任务.如果 MC 可以控制传感器节点行为,则可以采用 JO 类型的方案,即:将充电行为和传感器节点的行为进行联合优化,从而达到更高的效率.

- 考察传感器网络部署密度.

如果传感器节点分布密集,或者呈簇状分布,且每个簇内分布密集,则可以采用 OM 类型的方案,即:MC 采用



单对多充电技术进行充电,这样能够减少总移动距离,提高充电效率.如果传感器节点分布稀疏,则由于受到充电效率的限制,采用单对多充电技术几乎不会获得额外收益,相反地,还有可能降低充电效率,因此采用 OO 类型的方案最佳.

• 考察传感器网络规模.

如果网络规模较小,则只需要采用单个 MC 就能完成充电任务,即,采用 SM 类型的方案;如果网络规模较大,并且对充电系统有明确的服务质量要求(例如指定目标生命周期),则只能增加 MC 的数量,采用 MM 类型的方案.

• 考察传感器网络能耗均衡性.

它是传感器节点功耗差异在时间上的累积.当网络内传感器节点能耗极不均衡时,各传感器节点的充电需求差异也极大,因此采用 OD 类型的方案较为合适.如果 SS 可部署,则辅以 SD 类型的方案能够达到更高的充电效率;当网络内传感器节点能耗相当(例如星形结构的传感器网络)时,则 SS 的位置只需要部署在网络内的任意位置,并且由于传感器节点充电需求相当,可以采用 AW 类型的方案,从而简化了充电规划的设计.

• 考察传感器网络目标生命周期.

如果应用要求该传感器网络正常工作持续一定时间,则需要配置充电能力较强的 MC 来保证任务的完成,因此采用 EU 或 LS 类型的方案,或者使用多个充电能力较弱的 MC;然而在战场环境或者极端环境下,网络的部署并不要求达到很长的生命周期,仅仅需要网络能够尽量地保持存活,同时收集尽可能多的信息,这时采用 LI 类型的方案更加实际和经济.

• 考察传感器网络的稳定性.

在理想的状况下,网络状态稳定,或者有轻微变化但是可以预测,此时传感器节点功耗稳定,通信链路质量好,可以采用高效的充电规划方案.例如 JO 类型的方案,此时很容易保证所有传感器节点不死亡.然而如果网络状态不可预测,即,传感器节点频繁地死机、重启,通信误码率高等,则避免使用以上方案,取而代之以 WO,CO 等类型的方案;并且,如果仍然需要达到目标生命周期,则需要配置能力较高的 MC,或者采用多个 MC 来保证充电任务能够完成.

最后,在有些应用场景中,当有多种方案可供选择时,可以参照第 2.7 节的偏序关系,结合充电代价最小化等目标,选择满足应用需求的最合适的方案.

3.2 应用举例

以上充电规划的一般性设计思路,可以帮助设计者在不同的应用场景中快速确定合适的充电规划方案.对于已部署的传感器网络,经过一定的改造,例如增加无线充电模块、引入 SS 和 MC 等,也能够实现无线充电方案.下面分别列举 3 例进行说明.

3.2.1 金门大桥监控传感器网络

Kim 等人<sup>[1]</sup>在金门大桥上部署了由 64 个传感器节点组成的传感器网络,用于监控大桥的健康状况.传感器网络部署在金门大桥的南塔和主桥身,所有传感器节点连续地采集数据,并通过一条 46 跳的路由将数据发送到终端进行存储和处理.由于没有稳定、持续的电源输入,该传感器网络中的传感器节点,特别是靠近终端的传感器节点,将很快耗尽能量而停止工作.因此,可以根据充电规划的一般性设计思路,部署充电系统,采用无线充电的方法保证整个传感器网络能够持续、稳定地工作.具体来说,该传感器网络的各项参数及特点总结见表 5.

Table 5 Charging programming of the WRSN for monitoring the Golden Gate Bridge  
表 5 金门大桥监控传感器网络的充电规划方案选择

	传感器节点 可控性	传感器网络 目标生命周期	传感器 网络规模	传感器网络 部署密度	传感器网络 能耗均衡性	传感器网络 稳定性
传感器 网络特点	MC 可以估算 传感器节点 功耗,进而估计 传感器节点状态	需要保证在一段 时间内传感器网络 能够持续地对大桥 状态进行监控	传感器网络 只需要沿着 桥体部署, 规模较小	传感器节点 部署密度低, 呈线型拓扑	传感器节点能耗 极不均衡,越靠近 终端的传感器, 节点能耗越高	传感器节点成本 高,失效率低;通信 链路和路由稳定
建议方案	CO	LS	SM	OO	OD, SD	JO

根据表 5 和第 2.7 节给出的偏序关系,可以在该网络中应用 CO&LS&SM&OO&SD&OD 方案.一个可行的充电规划如下所述:采用单个 MC 为该传感器网络充电,SS 部署在终端附近;MC 根据传感器节点在路由中的位置及数据产生率等信息估算每个传感器节点的功耗.同时,传感器节点在发送数据时,可以每隔一段时间捎带自己的剩余能量信息;MC 每一轮为该轮剩余能量少于一定阈值的传感器节点充电,对于每个传感器节点,MC 移动到其附近为其充电,具体充电方案可以参考文献[10],但要保证 MC 的充电能力足够完成最大充电负载时的一轮充电调度.

3.2.2 精密园艺传感器网络

Riquelme 等人<sup>[17]</sup>在西班牙南部的一个农场部署若干传感器网络来监控农田的环境,每块农田约部署 10 个异构的传感器节点,呈星型分布.其中,数据采集节点(包括土壤监测传感器节点等)定期地采集数据,并将数据发送到网关节点;网关节点则通过远距离通信将数据发送到远处的终端节点进行存储和处理,网关节点配置可充电电池和太阳能板,因此无需人为充电;数据采集节点则只配置可充电电池,由于农场的面积较大(1 000 公顷),并且土壤监测传感器节点被放置在地下 20cm~40cm 处,由人力进行传感器节点的电力补充十分耗时、耗力.因此,可以根据充电规划的一般性设计思路,部署充电系统,采用无线充电的方法保证整个传感器网络持续、稳定地工作.具体来说,该传感器网络的各项参数及特点总结见表 6.

Table 6 Charging programming of the WRSN for precision horticulture

表 6 精密园艺传感器网络的充电规划方案选择

	传感器节点 可控性	传感器网络 目标生命期	传感器 网络规模	传感器网络 部署密度	传感器网络 能耗均衡性	传感器网络 稳定性
传感器 网络特点	MC可以查询 传感器 节点状态	需要保证在一段时间内 传感器网络能够持续地 对农田状态进行监控	每块农田的传感器 网络规模小,农田 之间距离较大	传感器节点 部署密度低, 呈星型拓扑	传感器节点 能耗均衡	传感器节点成本 高,失效率低;通信 链路较为稳定
建议方案	CO	LS	SM	OO	AW, SP	AW, JO

根据表 6 和第 2.7 节给出的偏序关系,可以在该网络应用 CO&LS&SM&OO&SP&AW 方案.一个可行的充电规划如下所述:在每块农田内部署一个 SS,SS 的位置可以在网络内部的任意位置;在每块农田内部采用单个 MC,周期性地为所有传感器节点进行无线充电,具体充电方案可以参考文献[66];MC 根据传感器节点的平均功耗和总能量估算传感器节点的生命期,从而确定充电周期;MC 按以 SS 为起止点、遍历所有传感器节点的路径依次对这些传感器节点充电;保证 MC 的充电能力足够完成每一轮充电调度.

3.2.3 车辆监控与追踪传感器网络

Ekman 等人<sup>[12]</sup>利用部署在瑞典哥特兰岛南部公路沿线的传感器网络对车辆进行监测与追踪,该网络中传感器节点包括地震波传感器节点、声波传感器节点、雷达传感器节点及数据中继节点.该传感器网络依公路走势构建成一棵最小支撑树,作为数据传输骨干,所有类型传感器节点将数据通过多跳的方式传输给两个移动终端节点.由于沿着公路部署,该传感器网络的维护较为容易,特别是移动终端节点可以频繁地经过这些传感器节点.因此,可以考虑在这些移动终端节点上配置无线充电模块,在路过传感器节点时为其充电,从而保证这些传感器节点的能量供应.具体来说,该传感器网络的各项参数及特点总结见表 7.

Table 7 Charging programming of the WRSN for vehicular monitoring and tracing

表 7 车辆监控与追踪传感器网络的充电规划方案选择

	传感器节点 可控性	传感器网络 目标生命期	传感器 网络规模	传感器网络 部署密度	传感器网络 能耗均衡性	传感器网络 稳定性
传感器 网络特点	MC可以查询 传感器节点 状态,并可以 控制传感器 节点行为	需要保证在一段 时间内传感器网络 能够持续地对车辆 进行监控和追踪	传感器网络 沿着道路部署, 规模较大	传感器节点 部署密度很低, 呈树状拓扑	传感器节点 能耗受监控 路段上车辆 因素影响, 能耗不均衡	传感器节点 成本高,失效率低; 通信路由因移动节点的 变化而动态变化
建议方案	JO	EU	MM	OO	OD, SD	MM, WO

根据表 7 和第 2.7 节给出的偏序关系,可以在该网络应用 WO&EU&MM&OO&OD 方案.与前两例不同的是:本例中,MC 并非专为网络充电而设计,它既可以是定期巡逻的警车,也可以是定点经过的公交车,由于这些车辆的电量远远大于传感器节点的电量,因此可以认为其充电能力是无限的,从而不需要部署 SS.一个可行的充电规划如下所述:MC 经过路边传感器节点时作短暂的停留,既可以是一个固定的时间,也可以是不定的时间(例如,MC 在等红灯时为附近的传感器节点充电);由于 MC 的主要任务不是为传感器网络充电,因此并不能根据各个传感器节点的需求进行充电方案设计和调整,只能由传感器节点自己建立能量获取模型,并控制自身能耗,例如采用文献[59]的方案;为了保证传感器节点的存活,只需要 MC 数量及遍历频率达到一定阈值即可,该阈值与传感器节点的最大功耗和充电系统的相关参数有关.

## 4 总结与展望

本文主要介绍无线可充电传感器网络中充电规划的相关工作,并从 6 个不同的维度对这些工作进行分类、对比及分析,抽取出充电规划较为通用性的设计原则,从而提出在不同应用场景中充电规划的一般性设计思路.本文选取 3 个实际部署的传感器网络应用,基于该思路分别设计这些传感器网络的充电规划方案,表明该设计思路的易用性和实用性.

虽然无线可充电传感器网络中充电规划问题已得到广泛、深入的研究,但仍有以下问题值得进一步探索.

### (1) 充电规划方案的选择

现有工作针对不同传感器网络提出各类充电方案,包括周期性充电方案和非周期性充电方案、基于单 MC 充电方案和基于多 MC 充电方案等.然而现有研究还不能指出在什么样的情况下,采用何种类型的充电方案更优.例如,现有工作指出:当传感器节点能耗极不均衡时,采用非周期性充电方案比采用周期性充电方案的充电代价更低,然而却未给出传感器节点能耗不均衡度的度量方法以及当传感器节点能耗不均衡度达到多少时更适合采用非周期性充电方案.又如,现有文献指出:当传感器网络规模较大时,采用单个能力强的 MC 的成本反而比采用多个能力弱的 MC 更高,然而未指出当传感器网络规模(及其总能耗)达到多大时采用单个 MC 成本更低.总之,在同一维度下,怎样对充电规划方案进行定量、精准地选择,是研究的一大挑战.

### (2) 低功耗传感器网络的研究

虽然无线可充电传感器网络能够从理论上去除传感器网络的能量约束,然而其成本与传感器网络的总能耗直接相关,因此,低功耗传感器网络仍是未来研究的重要问题,特别是在传感器节点使用无源通信技术(backscatter/ambient backscatter)的情况下,如何简化拓扑和路由的建立、简化通信协议、减少通信干扰、提高传输成功率等,都是研究的难点.

### (3) 对充电能力不足情况的处理

现有研究在充电能力有限且不足的情况下,大多采用尽力而为的充电方案.然而传感器网络中各节点由于其数据采集类型、数据重要性、所处地理位置、所处拓扑位置等的不同,存在着天然的优先级差异.因此,如何确定影响传感器网络最终效用的核心因素,如何根据这些因素进行传感器节点优先级的划分,以及如何根据优先级来制定保证传感器网络效用最大化的降级服务方案,是值得研究的内容.

### (4) 充电规划在其他领域的应用

充电规划问题实际上是一个受限资源的调度问题,因此其解决方案可以用于解决类似的问题,如物流运输、服务分发等.以空调公司的售后服务为例,空调公司需要向用户提供有偿或免费的售后维修服务.以小区为基本单位,每个小区在一定时间内会产生售后服务请求,这些请求需要在一定的时间内处理,否则空调公司将被投诉.对每个小区而言,随着未服务时间的延长,产生售后服务请求的家庭数量也会增加,从而导致该小区所需的售后服务总时间增加.而空调公司每位员工每天的工作时间一定,在派出进行售后服务时,这些工作时间主要分为两个部分:交通用时和服务用时.因此,与无线可充电传感器网络中充电方案设计类似,空调公司需要建立各个小区的服务请求模型,从而确定每位员工的最优服务调度,即:何时按什么顺序为哪些小区进行服务,使得所有小区的售后服务请求不过期.另外,如果一位员工不能够满足所有小区的服务需求,则需要确定最少需要雇

佣多少名员工以及每位员工的最优服务调度.这些实际问题与充电方案设计问题有相似的约束和目标,因此可以借鉴相关的理论和方法.但是同时,这些问题也具有各自的特点,因此在研究中面对的难点和侧重点有所不同.

总之,无线可充电传感器网络中的充电规划问题具有重要的研究意义和应用背景,目前还处在研究的起步阶段.相信随着硬件技术的成熟和相关理论的发展,无线充电方案最终将得到普遍应用,使得无线传感器网络能够大规模地广泛部署,为连接现实世界和数字世界架起畅通的桥梁.

## References:

- [1] Li XW, Xu YJ, Ren FY. Techniques for Wireless Sensor Networks. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. 1–10 (in Chinese).
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008,52(12):2292–2330. [doi: 10.1016/j.comnet.2008.04.002]
- [3] Wang W. Establish the ubiquitous network society of the 21st century. *Information Network*, 2005,7:1–4 (in Chinese with English abstract).
- [4] Schmitt S, Will H, Hillebrandt T, Kyas M. A virtual indoor localization testbed for wireless sensor networks. In: Knightly EW, ed. *Proc. of the 10th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. Piscataway: IEEE, 2013. 239–241. [doi: 10.1109/SAHCN.2013.6644985]
- [5] Werner-Allen G, Johnson J, Ruiz M, Lees J, Welsh M. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network. In: Gayitel E, Baydere S, Havinga P, eds. *Proc. of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks*. Piscataway: IEEE, 2005. 108–120. [doi: 10.1109/EWSN.2005.1462003]
- [6] Cerpa A, Elson J, Estrin D, Girod L, Hamilton M, Zhao J. Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2001,31(2-Supplement):20–41. [doi: 10.1145/844193.844196]
- [7] Mehta V, El Zarki M. A bluetooth based sensor network for civil infrastructure health monitoring. *Wireless Networks*, 2004,10(4): 401–412. [doi: 10.1023/B:WINE.0000028544.49457.eb]
- [8] Xu N, Rangwala S, Chintalapudi KK, Ganesan D, Broad A, Govindan R, Estrin D. A wireless sensor network for structural monitoring. In: Stankovic JA, ed. *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. New York: ACM Press, 2004. 13–24. [doi: 10.1145/1031495.1031498]
- [9] Matta N, Rahim-Amoud R, Merghem-Boulahia L, Jrad A. A wireless sensor network for substation monitoring and control in the smart grid. In: Guerrero JE, ed. *Proc. of the 2012 IEEE Int'l Conf. on Green Computing and Communications*. Piscataway: IEEE, 2012. 203–209. [doi: 10.1109/GreenCom.2012.39]
- [10] Hu X, Wang B, Ji H. A wireless sensor network-based structural health monitoring system for highway bridges. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2013,28(3):193–209. [doi: 10.1111/j.1467-8667.2012.00781.x]
- [11] Kim S, Pakzad S, Culler D, Demmel J, Fenves G, Glaser S, Turon M. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In: Abdelzaher T, ed. *Proc. of the 6th Int'l Symp. on Information Processing in Sensor Networks*. New York: ACM Press, 2007. 254–263. [doi: 10.1109/IPSIN.2007.4379685]
- [12] Ekman M, Pålsson H. Ground target tracking of vehicles in a wireless ground sensor network. In: Ng GW, Bar-Shalom Y, eds. *Proc. of the 15th Int'l Conf. on Information Fusion*. Piscataway: IEEE, 2012. 2392–2399.
- [13] Kafi MA, Challal Y, Djenouri D, Doudou M, Bouabdallah A, Badache N. A study of wireless sensor networks for urban traffic monitoring: Applications and architectures. *Procedia Computer Science*, 2013,19:617–626. [doi: 10.1016/j.procs.2013.06.082]
- [14] Gu Y, Lo A, Niemegeers I. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *Communications Surveys & Tutorials*, 2009,11(1):13–32. [doi: 10.1109/SURV.2009.090103]
- [15] Risteska Stojkoska B, Popovska Avramova A, Chatzimisios P. Application of wireless sensor networks for indoor temperature regulation. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014,2014:1–10. [doi: 10.1155/2014/502419]
- [16] Khalil IM, Khreishah A, Ahmed F, Shuaib K. Dependable wireless sensor networks for reliable and secure humanitarian relief applications. *Ad Hoc Networks*, 2014,13:94–106. [doi: 10.1016/j.adhoc.2012.06.002]

- [17] Riquelme JAL, Soto F, Suardiaz J, Sánchez P, Iborra A, Verab JA. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009,68(1):25–35. [doi: 10.1016/j.compag.2009.04.006]
- [18] Xia JF, Tang ZZ, Shi XQ, Fan L, Li HZ. An environment monitoring system for precise agriculture based on wireless sensor networks. In: Ma HD, Stojmencic I, eds. *Proc. of the 7th Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks*. Piscataway: IEEE, 2011. 28–35. [doi: 10.1109/MSN.2011.16]
- [19] Tolle G, Polastre J, Szewczyk R, Culler D, Turner N, Tu K, Burgess S, Dawson T, Buonadonna P, Gay D, Hong W. A macroscope in the redwoods. In: Redi J, ed. *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. New York: ACM Press, 2005. 51–63. [doi: 10.1145/1098918.1098925]
- [20] Mainwaring A, Culler D, Polastre J, Szewczyk R, Anderson J. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: Raghavendra CS, Sivalingam KM, eds. *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. New York: ACM Press, 2002. 88–97. [doi: 10.1145/570738.570751]
- [21] Rajba S, Raif P, Rajba T, Mahmud M. Wireless sensor networks in application to patients health monitoring. In: Hussain A, ed. *Proc. of the IEEE Symp. on Computational Intelligence in Healthcare and e-health*. Piscataway: IEEE, 2013. 94–98. [doi: 10.1109/CICARE.2013.6583075]
- [22] Anastasi G, Conti M, Di Francesco M, Passarella A. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2009,7(3):537–568. [doi: 10.1016/j.adhoc.2008.06.003]
- [23] Bin W, Wenxin L, Liu L. A survey of energy conservation, routing and coverage in wireless sensor networks. In: Zhong N, Callaghan V, Ghorbani AA, Hu B, eds. *Proc. of the 7th Int'l Conf. on Active Media Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 59–70. [doi: 10.1007/978-3-642-23620-4\_10]
- [24] Harb A. Energy harvesting: State-of-the-Art. *Renewable Energy*, 2011,36(10):2641–2654. [doi: 10.1016/j.renene.2010.06.014]
- [25] Xie LG, Shi Y, Hou YT, Lou A. Wireless power transfer and applications to sensor networks. *Wireless Communications*, 2013, 20(4):140–145. [doi: 10.1109/MWC.2013.6590061]
- [26] Yang YY, Wang C. *Wireless Rechargeable Sensor Networks*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 1–53. [doi: 10.1007/978-3-319-17656-7]
- [27] Tesla N. Apparatus for transmitting electrical energy. United States Patent 1119732, 1914-12-01.
- [28] Wang G, Liu W, Sivaprakasam M, Humayun MS, Weiland JD. Power supply topologies for biphasic stimulation in inductively powered implants. In: Fujii N, ed. *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Circuits and Systems*. Piscataway: IEEE, 2005. 2743–2746. [doi: 10.1109/ISCAS.2005.1465194]
- [29] He SB, Chen JM, Jiang FC, Yau DKY, Xing GL, Sun YX. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(10):1931–1942. [doi: 10.1109/TMC.2012.161]
- [30] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, Joannopoulos JD, Fisher P, Soljačić M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 2007,317(5834):83–86. [doi: 10.1126/science.1143254]
- [31] Sample AP, Meyer D, Smith JR. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2011,58(2):544–554. [doi: 10.1109/TIE.2010.2046002]
- [32] Kurs A, Moffatt R, Soljačić M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices. *Applied Physics Letters*, 2010,96(4): 044102. [doi: 10.1063/1.3284651]
- [33] Zhang JS, He H. Application and market of wireless charge technique. *Magnetic Components and Power Supply*, 2013,(11): 136–142 (in Chinese with English abstract).
- [34] Si T. Techniques of wireless charging. *PC Professional*, 2014,(7):93–97 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1006-3145.2014.07.022]
- [35] Zhou LH. Wireless charging. *New Economy Weekly*, 2014,(5):50–53 (in Chinese with English abstract).
- [36] Wireless Power Consortium. Creating the standard for wireless charging. 2014. <http://www.wirelesspowerconsortium.com>
- [37] Electronic Enthusiasts. Wireless charging in A4WP era. 2014 (in Chinese). <http://www.elecfans.com/dianyuan/353432.html>
- [38] Cheng LM, Cui YL. Survey of magnetic coupling resonant based wireless power transmission technology. *Electrotechnics Electric*, 2013,(12):1–5 (in Chinese with English abstract).

- [39] Fan XM, Mo XY, Zhang X. Research status and application of wireless power transfer via coupled magnetic resonances. *Trans. of China Electrotechnical Society*, 2013,28(12):75–82 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-6753.2013.12.010]
- [40] Shu YC, Cheng P, Gu Y, Chen JM, He T. TOC: Localizing wireless rechargeable sensors with time of charge. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2015,11(3):44. [doi: 10.1145/2700257]
- [41] Griffin B, Detweiler C. Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV. In: Papanikolopoulos N, ed. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE, 2012. 2660–2665. [doi: 10.1109/ICRA.2012.6225205]
- [42] Peng Y, Li Z, Zhang WS, Qiao D. Prolonging sensor network lifetime through wireless charging. In: Brandt S, Baker T, eds. *Proc. of the 31st Real-Time Systems Symp.* Piscataway: IEEE, 2010. 129–139. [doi: 10.1109/RTSS.2010.35]
- [43] Liu CH, Chau KT, Zhang Z, Qiu C, Lin F, Ching TW. Multiple-Receptor wireless power transfer for magnetic sensors charging on Mars via magnetic resonant coupling. *Journal of Applied Physics*, 2015,117(17):17A743. [doi: 10.1063/1.4918624]
- [44] Guo S, Wang C, Yang Y. Mobile data gathering with wireless energy replenishment in rechargeable sensor networks. In: Marsan MA, Colombo G, eds. *Proc. of the INFOCOM*. Piscataway: IEEE, 2013. 1932–1940. [doi: 10.1109/INFOCOM.2013.6566993]
- [45] Zhang S, Wu J, Lu S. Collaborative mobile charging for sensor networks. In: Su JS, ed. *Proc. of the 9th Int'l Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems*. Piscataway: IEEE, 2012. 84–92. [doi: 10.1109/MASS.2012.6502505]
- [46] Zhang S, Wu J, Lu S. Collaborative mobile charging. *IEEE Trans. on Computers*, 2015,64(3):654–667. [doi: 10.1109/TC.2013.2297926]
- [47] Erol-Kantarci M, Mouftah HT. Suresense: Sustainable wireless rechargeable sensor networks for the smart grid. *IEEE Wireless Communications*, 2012,19(3):30–36. [doi: 10.1109/MWC.2012.6231157]
- [48] Hu C, Wang Y. Minimizing the number of mobile chargers in a large-scale wireless rechargeable sensor network. In: Marca JRB, ed. *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* Piscataway: IEEE, 2015. 1297–1302. [doi: 10.1109/WCNC.2015.7127656]
- [49] Held M, Karp RM. The traveling-salesman problem and minimum spanning trees. *Operations Research*, 1970,18(6):1138–1162. [doi: 10.1287/opre.18.6.1138]
- [50] Reinelt G. TSPLIB—A traveling salesman problem library. *ORSA Journal on Computing*, 1991,3(4):376–384. [doi: 10.1287/ijoc.3.4.376]
- [51] Li CL, Simchi-Levi D, Desrochers M. On the distance constrained vehicle routing problem. *Operations Research*, 1992,40(4):790–799. [doi: 10.1287/opre.40.4.790]
- [52] Nagarajan V, Ravi R. Approximation algorithms for distance constrained vehicle routing problems. *Networks*, 2012,59(2):209–214. [doi: 10.1002/net.20435]
- [53] Ren X, Liang W, Xu W. Maximizing charging throughput in rechargeable sensor networks. In: Jiang CJ, Zhou XB, eds. *Proc. of the 23rd Int'l Conf. on Computer Communication and Networks*. Piscataway: IEEE, 2014. 1–8. [doi: 10.1109/ICCCN.2014.6911792]
- [54] Dai HP, Wu XB, Xu LJ, Chen GH, Lin S. Using minimum mobile chargers to keep large-scale wireless rechargeable sensor networks running forever. In: Rouskas G, ed. *Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Computer Communications and Networks*. Piscataway: IEEE, 2013. 1–7. [doi: 10.1109/ICCCN.2013.6614207]
- [55] Tong B, Li Z, Wang GL, Zhang WS. How wireless power charging technology affects sensor network deployment and routing. In: Cellary W, Zhang XD, eds. *Proc. of the IEEE 30th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems*. Piscataway: IEEE, 2010. 438–447. [doi: 10.1109/ICDCS.2010.61]
- [56] Fu LK, Cheng P, Gu Y, Chen JM, He T. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks. In: Marsan MGAM, ed. *Proc. of the INFOCOM*. Piscataway: IEEE, 2013. 2922–2930. [doi: 10.1109/INFOCOM.2013.6567103]
- [57] Fu LK, Cheng P, Gu Y, Chen JM, He T. The optimal charging in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2015, 1–13. [doi: 10.1109/TVT.2015.2391119]
- [58] Sample AP, Yeager DJ, Powledge PS, Mamishev AV, Smith JR. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2008,57(11):2608–2615. [doi: 10.1109/TIM.2008.925019]
- [59] Dai HP, Jiang LT, Wu XB, Yau DKY, Chen GH, Tang SJ. Near optimal charging and scheduling scheme for stochastic event capture with rechargeable sensors. In: Ramanathan P, Sun YX, eds. *Proc. of the IEEE 10th Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*. Piscataway: IEEE, 2013. 10–18. [doi: 10.1109/MASS.2013.60]

- [60] Zhang Y, He S, Chen J. Data gathering optimization by dynamic sensing and routing in rechargeable sensor networks. In: Knightly EW, ed. Proc. of the 10th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2013. 273–281. [doi: 10.1109/SAHCN.2013.6644996]
- [61] Kar K, Krishnamurthy A, Jaggi N. Dynamic node activation in networks of rechargeable sensors. In: Znati T, ed. Proc. of the INFOCOM. Piscataway: IEEE, 2005. 1997–2007. [doi: 10.1109/INFCOM.2005.1498477]
- [62] Kar K, Krishnamurthy A, Jaggi N. Dynamic node activation in networks of rechargeable sensors. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2006,14(1):15–26. [doi: 10.1109/TNET.2005.863710]
- [63] He TJ, Chin KW, Soh S. On using wireless power transfer to increase the max flow of rechargeable wireless sensor networks. In: Tan HP, Palaniswami M, eds. Proc. of the IEEE 10th Int'l Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. Piscataway: IEEE, 2015. 1–6. [doi: 10.1109/ISSNIP.2015.7106916]
- [64] Xie LG, Shi Y, Hou YT, Sherali HD. Making sensor networks immortal: An energy-renewal approach with wireless power transfer. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2012,20(6):1748–1761. [doi: 10.1109/TNET.2012.2185831]
- [65] Xie LG, Shi Y, Hou YT, Lou WJ, Sherali HD, Midkiff SF. On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case. In: Ko YB, Lee SJ, eds. Proc. of the 9th Annual IEEE Communications Society Conf. on the Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2012. 10–18. [doi: 10.1109/SECON.2012.6275766]
- [66] Hu C, Wang Y. Schedulability decision of charging missions in wireless rechargeable sensor networks. In: Tham CK, ed. Proc. of the 11th Annual IEEE Int'l Conf. on Sensing, Communication, and Networking. Piscataway: IEEE, 2014. 450–458. [doi: 10.1109/SAHCN.2014.6990383]
- [67] Li K, Luan H, Shen CC. Qi-Ferry: Energy-Constrained wireless charging in wireless sensor networks. In: Sari H, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Piscataway: IEEE, 2012. 2515–2520. [doi: 10.1109/WCNC.2012.6214221]
- [68] Current JR, Schilling DA. The covering salesman problem. Transportation Science, 1989,23(3):208–213. [doi: 10.1287/trsc.23.3.208]
- [69] Wang J, Wu XM, Xu XL, Yang YC, Hu XM. Programming wireless recharging for target-oriented rechargeable sensor networks. In: Chang NB, ed. Proc. of the IEEE 11th Int'l Conf. on Networking, Sensing and Control. Piscataway: IEEE, 2014. 367–371. [doi: 10.1109/ICNSC.2014.6819654]
- [70] Madhja A, Nikolettseas S, Raptis TP. Distributed wireless power transfer in sensor networks with multiple mobile chargers. Computer Networks, 2015,80:89–108. [doi: 10.1016/j.comnet.2015.01.018]
- [71] Madhja A, Nikolettseas S, Raptis TP. Hierarchical, collaborative wireless charging in sensor networks. In: Marca JRB, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Piscataway: IEEE, 2015. 1285–1290. [doi: 10.1109/WCNC.2015.7127654]
- [72] Lian J, Naik K, Agnew GB. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2006,2(2):121–145. [doi: 10.1080/15501320500201276]
- [73] Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. Pervasive and Mobile Computing, 2007,3(3):233–254. [doi: 10.1016/j.pmcj.2006.11.001]
- [74] Liu AF, Zhang PH, Chen ZG. Theoretical analysis of the lifetime and energy hole in cluster based wireless sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2011,71(10):1327–1355. [doi: 10.1016/j.jpdc.2011.05.003]
- [75] Wu X, Chen G, Das SK. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2008,19(5):710–720. [doi: 10.1109/TPDS.2007.70770]
- [76] Hu C, Wang Y, Zhou L. Make imbalance useful: An energy-efficient charging scheme in wireless sensor networks. In: Zu QH, Vargas-Vera M, Hu B, eds. Proc. of the Pervasive Computing and the Networked World. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 160–171. [doi: 10.1007/978-3-319-09265-2\_18]
- [77] Liu RS, Sinha P, Koksai CE. Joint energy management and resource allocation in rechargeable sensor networks. In: Mandyam G, ed. Proc. of the INFOCOM. Piscataway: IEEE, 2010. 1–9. [doi: 10.1109/INFCOM.2010.5461958]
- [78] Chen SB, Sinha P, Shroff NB, Joo C. Finite-Horizon energy allocation and routing scheme in rechargeable sensor networks. In: Ni L, Zhang WJ, eds. Proc. of the INFOCOM. Piscataway: IEEE, 2011. 2273–2281. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935044]



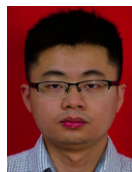
- [79] Li F, Chen SY, Tang SJ, He X, Wang Y. Efficient topology design in time-evolving and energy-harvesting wireless sensor networks. In: Ramanathan P, Sun YX, eds. Proc. of the IEEE 10th Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. Piscataway: IEEE, 2013. 1–9. [doi: 10.1109/MASS.2013.34]
- [80] Dai HP, Xu LJ, Wu XB, Dong C, Chen GH. Impact of mobility on energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks. In: You XH, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Piscataway: IEEE, 2013. 962–967. [doi: 10.1109/WCNC.2013.6554694]
- [81] Zhang SQ, Seyedi A. Harvesting resource allocation in energy harvesting wireless sensor networks. CoRR, 2013,1306.4997:1–10.
- [82] Seah WKG, Olds JP. Data delivery scheme for wireless sensor network powered by RF energy harvesting. In: You XH, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Piscataway: IEEE, 2013. 1498–1503. [doi: 10.1109/WCNC.2013.6554785]
- [83] Dai HP, Wu XB, Xu LJ, Chen GH. Practical scheduling for stochastic event capture in wireless rechargeable sensor networks. In: You XH, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Piscataway: IEEE, 2013. 986–991. [doi: 10.1109/WCNC.2013.6554698]
- [84] Angelopoulos CM, Nikolettseas S, Raptis TP, Raptopoulos C, Vasilakis F. Efficient energy management in wireless rechargeable sensor networks. In: Zomaya A, ed. Proc. of the 15th ACM Int'l Conf. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York: ACM Press, 2012. 309–316. [doi: 10.1145/2387238.2387291]
- [85] Liang WF, Xu WZ, Ren XJ, Jia XH, Lin XL. Maintaining sensor networks perpetually via wireless recharging mobile vehicles. In: Aschenbruck N, Kanhere S, Akkaya K, eds. Proc. of the IEEE 39th Conf. on Local Computer Networks. Piscataway: IEEE, 2014. 270–278. [doi: 10.1109/LCN.2014.6925781]
- [86] Han GJ, Qian AH, Liu L, Jiang JF, Zhu C. Impacts of traveling paths on energy provisioning for industrial wireless rechargeable sensor networks. Microprocessors and Microsystems, 2015, 1–8. [doi: 10.1016/j.micpro.2015.07.002]
- [87] Zhao M, Li J, Yang YY. A framework of joint mobile energy replenishment and data gathering in wireless rechargeable sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2014,13(12):2689–2705. [doi: 10.1109/TMC.2014.2307335]
- [88] Xie LG, Shi Y, Hou YT, Lou WJ, Sherali HD. On traveling path and related problems for a mobile station in a rechargeable sensor network. In: Chockalingam A, Manjunath D, eds. Proc. of the 14th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2013. 109–118. [doi: 10.1145/2491288.2491291]
- [89] Xie LG, Shi Y, Hou YT, Lou WJ, Sherali H, Midkiff SF. Bundling mobile base station and wireless energy transfer: Modeling and optimization. In: Marsan MGA, ed. Proc. of the INFOCOM. Piscataway: IEEE, 2013. 1636–1644. [doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566960]
- [90] Wang C, Yang YY, Li J. Stochastic mobile energy replenishment and adaptive sensor activation for perpetual wireless rechargeable sensor networks. In: You XH, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Piscataway: IEEE, 2013. 974–979. [doi: 10.1109/WCNC.2013.6554696]
- [91] Shi Y, Xie LG, Hou YT, Sherali HD. On renewable sensor networks with wireless energy transfer. In: Ni L, Zhang WJ, eds. Proc. of the INFOCOM. Piscataway: IEEE, 2011. 1350–1358. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5934919]
- [92] Shi L, Han J, Han D, Ding X, Wei ZC. The dynamic routing algorithm for renewable wireless sensor networks with wireless power transfer. Computer Networks, 2014,74:34–52. [doi: 10.1016/j.comnet.2014.08.020]
- [93] He L, Gu Y, Pan JP, Zhu T. On-Demand charging in wireless sensor networks: Theories and applications. In: Ramanathan P, Sun YX, eds. Proc. of the IEEE 10th Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. Piscataway: IEEE, 2013. 28–36. [doi: 10.1109/MASS.2013.51]
- [94] He L, Fu LK, Zheng LK, Gu Y, Cheng P, Chen JM, Pan JP. Esync: An energy synchronized charging protocol for rechargeable wireless sensor networks. In: Wu J, Cheng XZ, eds. Proc. of the 15th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2014. 247–256. [doi: 10.1145/2632951.2632970]
- [95] Wang J, Si TZ, Wu XM, Hu XM, Yang YC. Sustaining a perpetual wireless sensor network by multiple on-demand mobile wireless chargers. In: Wang CH, ed. Proc. of the IEEE 12th Int'l Conf. on Networking, Sensing and Control. Piscataway: IEEE, 2015. 533–538. [doi: 10.1109/ICNSC.2015.7116093]

## 附中文参考文献:

- [1] 李晓维,徐勇军,任丰原.无线传感器网络技术.北京:北京理工大学出版社,2007.1-10.
- [3] 王玮.建立 21 世纪无所不在的网络社会——浅谈日本 U-Japan 及韩国 U-Korea 战略.信息网络,2005,(7):1-4.
- [33] 张继松,何虹.无线充电技术的应用及市场.磁性元件与电源,2013,(11):136-142.
- [34] 斯特.无线充电技术.个人电脑,2014,(7):93-97. [doi: 10.3969/j.issn.1006-3145.2014.07.022]
- [35] 周路菡.无线充电:指向方便与安全.新经济导刊,2014,(5):50-53.
- [37] 电子发烧友.什么才是主流标准,无线充电迎来 A4WP 时代.2014. <http://www.elecfans.com/dianyuan/353432.html>
- [38] 程丽敏,崔玉龙.磁耦合谐振式无线电能传输技术研究进展.电工电气,2013,(12):1-5.
- [39] 范兴明,莫小勇,张鑫.磁耦合谐振无线电能传输的研究现状及应用.电工技术学报,2013,28(12):75-82. [doi: 10.3969/j.issn.1000-6753.2013.12.010]



胡诚(1988 - ),男,安徽马鞍山人,博士生,主要研究领域为分布式系统,无线可充电传感器网络.



王辉(1988 - ),男,博士生,主要研究领域为分布式系统,可靠性分析.



汪芸(1967 - ),女,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布计算,容错计算,传感器网络.