

无线可充电传感器网络充电调度算法研究

郑翔¹, 孙霞¹, 许彤彤²

(1.安徽理工大学, 安徽 淮南 232001; 2.阜阳师范大学, 安徽 阜阳 236037)

【摘要】 提供一种新的算法, 研究无线传感器网络的规模 and 最优移动充电设备数之间的关系, 并进一步阐释在一次充电调度中必须充电节点的选择方案。最后, 通过实验方式对算法中的核心参数进行研究, 对整个算法的合理性进行验证, 证明该算法具有优越的性能。

【关键词】 无线传感器网络; 无线充电; 移动充电设备; 充电调度; 磁耦合谐振

Research on Wireless Charging Sensor Network Charging Scheduling Algorithm

Zheng Xiang¹, Sun Xia¹, Xu Tongtong²

(1. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China)

【Abstract】 With the help of wireless power transmission technology, power can be transmitted from wireless charging devices to sensors, providing a new model for extending network life. However, many studies now ignore the effects of uncertainties such as topological changes. In this research, a new algorithm is developed to study the relationship between the size of wireless sensor network and the optimal number of mobile charging devices, and further explore the energy threshold value of the charging nodes in the two consecutive charging schedules. Next, a specific scheme for mobile charging device movement and node selection during the entire charging schedule is given. Finally, the rationality of the whole algorithm is verified by experiments, and the core parameters of the algorithm are studied. It proves that the algorithm has excellent performance.

【Key words】 WSN; wireless charging; mobile charging device; charging schedule; magnetic coupling resonance

[中图分类号] TP393

[文献标识码] A

[文章编号] 1674-3229(2020)01-0035-05

0 引言

随着物联网技术的不断发展, 为了保证无线传感器网络的工作性能, 人们加大了对节点供电的研究力度^[1]。文献[2-4]从无线传感器网络自身入手, 探究了无线传感器网络节点最佳部署方式和最优能量供应方式, 但没有对充电过程做出进一步阐释。文献[5]研究了无线可充电传感器网络中节点能量消耗问题, 提出了不同的避免节点发生故障的充电方案。但从其结果上来看, 并没有将节点故障率降至最低。因为在普通的TSP模型中, 无线充电能力没有得到充分利用。文献[6-7]重点探究了无

线传感器网络中的移动充电设备路径规划问题, 从而降低移动充电器的移动时延。但其仅仅探究了移动充电设备的行驶路径, 并没有对其他调度细节做出规划和设计。当一个无线传感器网络节点数较多时, 若只部署一个移动充电设备很难完成系统的充电要求。文献[8-9]研究了多个移动充电设备协同为无线传感器网络充电的合理调度问题, 但其并没有平衡移动充电设备数与无线传感器网络规模的关系。

本文深入研究了移动充电设备数与节点数之间的关系, 并且通过实验方式实证研究了发送充电请求的能量阈值大小, 在python软件上验证该算

【收稿日期】 2019-10-14

【基金项目】 国家自然科学基金资助项目(51874010, 61170060); 安徽理工大学第五批中青年学术骨干(校人事[2015]29号); 安徽省质量工程MOOC项目(2015MOOC043)

【作者简介】 郑翔(1992-), 男, 安徽理工大学电气与信息工程学院硕士研究生, 研究方向: 物联网技术、无线传感网络、无线充电; 孙霞(1978-), 女, 安徽理工大学电气与信息工程学院副教授, 硕士生导师, 研究方向: 物联网技术、智能控制技术等。

法。不难看出,此充电系统具有较高的稳定性和较长的网络生存周期,对于当前无线传感器网络的充电方式具有借鉴意义和应用价值。

1 网络模型

本文提出一种多移动充电设备(Multi-mobile charging device)通过无线充电技术为无线传感器网络补充能量的网络模型。在网络中心处安置一个维护站,作为MCD完成一次充电调度后的停留地与能量补充点。在一次充电调度中,每个MCD都会为一部分传感器节点充电,当MCD完成一次充电调度返回维护站时即开始准备下一轮充电调度,这时能量达到警戒阈值的传感器节点就会向基站发送充电请求,基站发送指令给MCD、MCD遍历这些传感器节点为其充电。假设一次充电调度为 $\Pi_{p,l,i}^m$, m 为充电调度的轮数, l 为MCD的序号, i 为被遍历的传感器节点序号。MCD给一个传感器节点充电完成后,在其驶向下一个传感器节点的过程中可以选择其他没有发送充电请求但是能量不是很充足的传感器节点进行充电。图1为网络模型图。

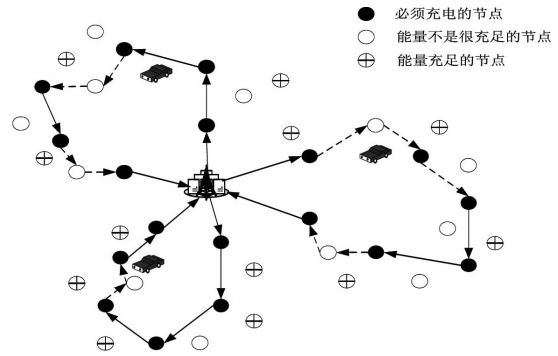


图1 网络模型图

1.1 无线充电模型

MCD在给传感器节点充电的过程中遵循(1)式所示模型^[10]。

$$E_i^m = \eta P_r \tau_i \quad (1)$$

其中 E_i^m 表示第 m 次充电调度中,第 i 个传感器节点接收的能量, η 为充电效率, P_r 为发送功率, τ_i 为充电时间。本无线可充电传感器网络采用磁耦合谐振技术^[11]。图2为该模型的电气连接图,共分为左右两个部分,左侧表示MCD上的硬件设计框图,右侧表示传感器节点上的硬件设计框图。

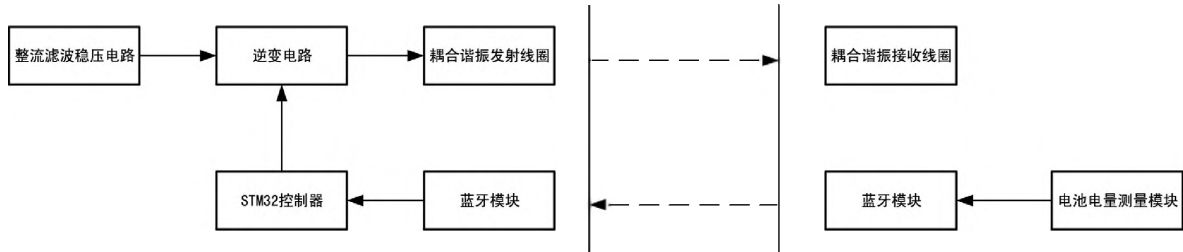


图2 电气连接图

1.2 充电调度

MCD在一定时间内从维护站出发完成一轮充电调度回到维护站的过程称为一个充电调度周期。在此期间,MCD和节点的剩余能量都不得低于某一特定的值。一次充电调度完成到下一次充电调度开始的时间间隔称为调度间隔^[12]。

1.3 传感器节点与MCD的能量限制

为了保证无线传感器网络稳定,必须使传感器节点是有能量的。若传感器节点的能量低于阈值 E_{\min} , 节点即将死亡,因此必须保证传感器节点能量时刻不低于 E_{\min} 。(2)式为传感器节点的能量约束式。MCD完成一次充电调度需携带的能量如(3)式所示,其储存的能量主要用于MCD在传感器节点间的行驶和给传感器节点充电。 $E_m(i)$ 为第 m 次充电

调度开始时传感器节点 i 剩余能量, p_i 为传感器节点的能量消耗功率, p_w 为MCD的移动功率, L 为哈密顿环的长度, N 为在一次充电调度中遍历的传感器节点数, $\tau_m(i)$ 为在第 m 次充电调度中移动充电设备给第 i 个传感器节点充电的时间。

$$E_m(i) - p_i t_m(i) \geq E_{\min} \quad (2)$$

$$E_p = p_w L + \sum_{i=1}^N P_r \eta \tau_m(i) \quad (3)$$

2 MMCD优化调度算法

2.1 为无线传感器网络分配MCD

在一个较大的无线传感器网络中,若只用单个MCD,很难满足系统的充电需求,并且在此唯一的MCD发生故障时,无线传感器网络得不到及时的能量补充,系统就会崩溃。因此考虑采用MMCD优化

调度算法为无线传感器网络充电。但并不意味着MCD越多越好,设备数过多时会增加不必要的成本,设备数不够时又不能满足充电需求。本算法旨在找出满足系统稳定性的前提下最少的MCD数。现以一个较大规模无线可充电传感器网络为例,假定在一次充电调度中所有节点都需要充电,这时为其调配 p 个MCD。大的无线传感器网络被分成了 p 个小网,给前 $p-1$ 个MCD分配相同数量的节点,并将剩余节点分配给最后一个MCD,这是为了保证每个MCD的充电负荷大致相同。因为前 $p-1$ 个网具有相同节点数,这里首先确定访问点顺序,然后建立哈密顿环需要强调的是,当MCD运动到哈密顿环中的最后一个节点时,节点剩余能量必须不低于 E_{\min} 。以此得出关系式(9),该算法涉及到的参数及其含义如表1所示。

表1 算法中涉及的参数及其含义

符号	含义
v	MCD运行速度
$d_{i-1,i}$	第 $i-1$ 个节点到第 i 个节点之间的距离
\bar{L}	子哈密顿环的长度
t_c	节点剩余能量耗至 E_{\min} 所需的时间
p	MCD数
E_s	传感器节点的电池容量
q	第一警戒阈值
q'	第二警戒阈值
T_m	第 m 次充电调度,MCD完成一次充电调度持续的时间

在第 m 次充电调度中,任意一个传感器节点将剩余能量用至最低所需要的时间,如(4)式所示。

$$t_c = \frac{E_m(i) - E_{\min}}{P_i} \quad (4)$$

只需知道MCD到达一个传感器节点的时间,给其充电的时间和向下一个传感器节点行驶的时间,就可以推算出到达下一个传感器节点的时间,如(5)式所示。

$$t_m(i) - t_m(i-1) + \tau_m(i-1) + \frac{d_{i-1,i}}{v} (2 \leq i \leq n) \quad (5)$$

某一个MCD在其充电调度中,到达哈密顿环中最后一个传感器节点的时间不得大于最后一个节点能量用尽的时间,如(6)式所示。

$$t_m\left(\frac{n}{p} - 1\right) + \frac{d_{\frac{n}{p}-1, \frac{n}{p}}}{v} \leq t_c \quad (6)$$

以哈密顿环中第一个传感器节点为例,MCD从基站行驶到第一个传感器节点的时间即为到达该

传感器节点的时间,如(7)式所示。

$$t_m(1) = \frac{d_{0,1}}{v} \quad (7)$$

MCD在哈密顿环中第一个传感器节点停留的时间即为为其充电的时间,如(8)式所示。

$$\tau_m(1) = \frac{E_m(1) - P_i t_m(1)}{P_r \eta} \quad (8)$$

在哈密顿环中,传感器节点数需与MCD数满足如(9)式所示的不等关系。

$$d_{\frac{n}{p},0} \geq \bar{L} - [t_c - \sum_{i=1}^p \tau_m(i)]v \quad (9)$$

2.2 无线传感器网络中充电节点分类

在无线传感器网络中存在三种类型的节点:第一类是能量达到预先设定阈值的节点,其剩余能量已经不足以支撑一个完整的充电调度周期,必须为其充电;第二类是能量不够充足,最好适当给其补充一部分能量;第三类是能量很充足的节点,在当次充电调度中不必为其充电。我们首先要确定将传感器电池还剩多少能量定为向基站发送充电请求的阈值能量。每一个节点都必须满足:当节点能量达到阈值预警时,MCD必须已经到达该节点,并对该节点进行充电。即满足(10)关系式,此时的警戒阈值称为第一警戒阈值。

$$\frac{qE_s - E_{\min}}{P_i} \geq t_m(i-1) + \tau_m(i-1) + \frac{d_{i-1,i}}{v} \quad (10)$$

除此之外,还有一种节点也是必须充电的节点,虽然在当次充电调度中这些节点的能量足以支撑到此次充电调度结束,但是在下一次充电调度中,MCD到来之前,这些节点能量已经耗尽,所以此类节点在当次充电调度中也是必须充电的节点。此类节点满足的关系式如(11)式所示。这些节点满足的警戒阈值为第二警戒阈值。式(12)为一个充电调度周期总时间的计算式。

$$q'E_s - T_m P_i - E_{\min} \geq P_i [t_{m+1}(i) + T_m] \quad (11)$$

$$T_m = t_m(N) + \tau_m(N) + \frac{d_{N,0}}{v} \quad (12)$$

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真环境与参数设置

实验采用软件python3.6进行仿真和调试,计算机配置为Intel(R) Core(TM) i3-4130 CPU@3.40GHz, 4.00 GB RAM。100个节点随机分布在100m×100m被监测区域内,基站和维护站均位于

(50,50)处。网络模型如图3所示。

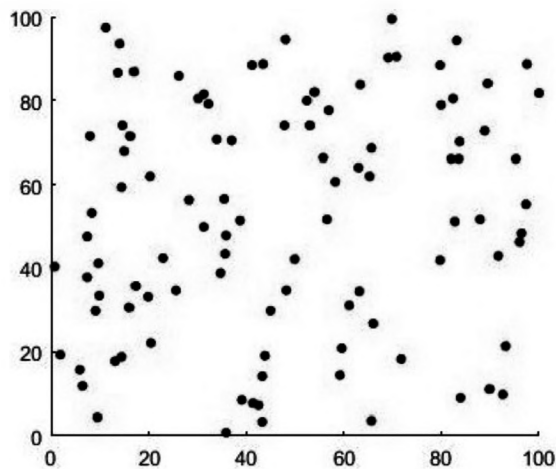


图3 网络模型

实验参数设置如下:节点电池容量 $E_s=50\text{J}$, 节点能量最低阈值 $E_{\min}=5\text{J}$, MCD 运行速度 $v=0.5\text{m/s}$, MCD 移动功率 $p_w=6\text{J/m}$, 无线充电线圈发射功率 $p_r=8\text{J/s}$, 节点最小能量消耗功率 $p_{i\min}=0.005\text{J/s}$, 节点最大能量消耗功率 $p_{i\max}=0.015\text{J/s}$, 充电效率 $\eta=0.5$ 。

3.2 节点数与充电能量阈值的关系

无线传感器网络的节点数与充电能量阈值之间存在一定的关系。当一个MCD负责充电的节点数变化时,第一警戒阈值和第二警戒阈值会随之发生变化。

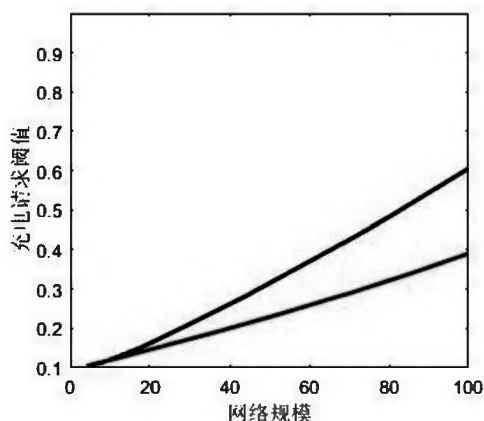


图4 能量阈值 q 和 q' 的变化情况

从仿真结果可以看出,无线传感器网络的节点数和充电能量阈值关系如图4所示。图中的上面一条线代表第二充电阈值 q' 随着网络规模大小变化时的变化情况,而下面的线代表第一充电阈值 q 随着网络规模大小变化时的变化情况。可以看出随

着无线传感器网络规模的增大 q' 是稳定在 q 的上方的,这和预期的结果是相同的,可以根据此结果确定发出充电请求的能量阈值。

3.3 网络规模与充电设备数量的关系

网络规模和最优移动充电设备数之间的关系,仿真结果如图5所示。

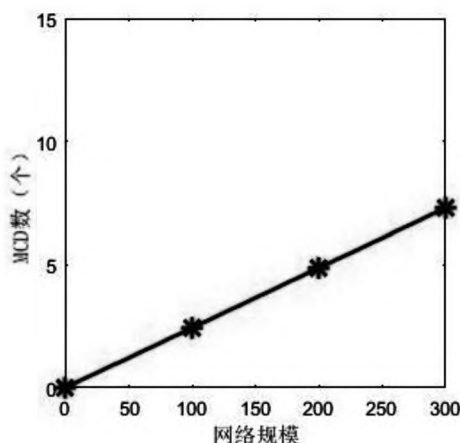


图5 网络规模和最优移动充电设备数之间的关系

根据算法得出网络规模和最优MCD数之间的关系,不难发现,从本实验采用的100个节点的网络规模来看,最优的MCD数是3个。

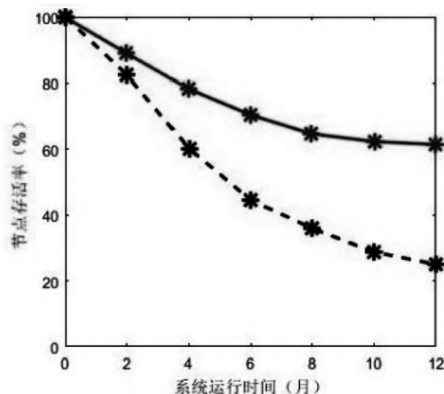


图6 网络性能测试图

图6是网络性能测试图,通过将本文中的MMCD算法与已有的EDF算法作对比,不难看出,随着系统运行时间的增加,无线传感器网络中节点存活率更高,存活率高则说明算法更优。从仿真结果可以看出,本文算法和已有算法相比,在提高网络寿命方面明显更优。

4 结论

针对当前大规模无线可充电传感器网络能量供应方式的不足,综合考虑了MCD数量和最低充电能量阈值的影响,研究如何调度最少的MCD来给具

有生命周期的传感器节点高效充电的问题。本文提出一种新的近似算法,通过仿真实验得出结论,不仅证明了该算法具有较好的性能,而且对算法涉及到的核心参数进行了研究。与现有算法相比,本算法具有较长的网络寿命。

[参考文献]

- [1] 赵仕俊,路嘉鑫,张朝晖.无线传感器网络一维区域随机覆盖研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2010,35(4):71-75.
- [2] Du R, Xiao M, Fischione C. Optimal Node Deployment and Energy Provision for Wirelessly Powered Sensor Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018,37(2):407-423.
- [3] Yang M, Wang A, Sun G, et al. Deploying charging nodes in wireless rechargeable sensor networks based on improved firefly algorithm[J]. Computers & Electrical Engineering, 2017,72(11):719-731.
- [4] Lin C, Wu G, Obaidat M S, et al. Clustering and Splitting Charging Algorithms for Large Scaled Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. Journal of Systems and Software, 2016,113(3):381-394.
- [5] Zhu J, Yong F, Ming L, et al. Adaptive Online Mobile Charging for Node failure Avoidance in Wireless Rechargeable Sensor Networks[J]. Computer Communications, 2018, 126(8):28-37.
- [6] Wang C, Li J, Ye F, et al. A Mobile Data Gathering Framework for Wireless Rechargeable Sensor Networks with Vehicle Movement Costs and Capacity Constraints[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 65(8):2411-2427.
- [7] Han G, Qian A, Liu L, et al. Impacts of traveling paths on energy provisioning for industrial wireless rechargeable sensor networks[J]. Microprocessors & Microsystems, 2015, 39(8):1271-1278.
- [8] Tao Z, Xu W, Liang W, et al. Improving charging capacity for wireless sensor networks by deploying one mobile vehicle with multiple removable chargers[J]. Ad Hoc Networks, 2017, 63(8):79-90.
- [9] Liang W, Xu Z, Xu W, et al. Approximation Algorithms for Charging Reward Maximization in Rechargeable Sensor Networks via a Mobile Charger[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(5):3161-3174.
- [10] 徐新黎,皇甫晓洁,王万良,等.基于无线充电的Sink轨迹固定WSN路由算法[J].仪器仪表学报,2016,37(3):570-578.
- [11] 李天旭,肖硕.可充电无线传感器网络中的最大流算法研究[J].微电子学与计算机,2018,35(10):122-132.
- [12] 陈花,魏振春,韩江洪,等.移动充电设备能量受限的WRSNs周期性充电规划[J].电子测量与仪器学报,2017,31(7):1031-1039.

(上接第34页)

- [3] 王小祥.浅谈NRF2401的应用[J].数字技术与应用, 2017(10):106-107.
- [4] 朱嵘涛,徐爱钧,叶传涛.STC15单片机和nRF2401的无线门禁系统设计[J].单片机与嵌入式系统设计, 2014(6):57-60.
- [5] 耿树芳,王宁,张雪莹,等.一种基于STM32的智能家居无线网关设计[J].廊坊师范学院学报(自然科学版),2018, 18(4):26-30.
- [6] 辛洁,孙运强,张伦.基于ATmega16和nRF2401的无线射频收发系统设计[J].电子测试,2009(4):60-64.
- [7] 靳晓芳,张北宁,宋金宝.基于RFID技术的标签识别系统的设计与开发[J].中国传媒大学学报(自然版), 2013(2):35-38.