

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.007

无线充电设备能量受限的 WRSNs 周期性充电规划*

陈花^{1,2} 魏振春^{1,2} 韩江洪^{1,2} 石雷^{1,2}

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009)

摘要:研究无线充电设备(wireless charging equipment, WCE)的充电能量和行驶能量均有限的情况下使用WCE为传感器节点周期性充电问题。对于每一个充电周期,旨在最大化充电周期时间的同时最小化WCE充电和行驶能量的总消耗值,以最小的WCE能量消耗功率保证无线可充电传感器网络(wireless recharging sensors networks, WRSNs)永久性工作下去。通过分析传感器节点能量约束和WCE行驶及充电约束,建立以最小化WCE能量消耗功率为优化目标的优化模型。充电问题为NP-Complete问题,使用混沌粒子群算法(chaos particle swarm optimization, CPSO)求解优化问题得到WCE充电路径和节点充电时间,并设计了由2种数据路由和3种节点分布类型组合成的6种WRSNs仿真场景,与基本遗传算法(genetic algorithm, GA)对比,其收敛速度至少提升了1倍。

关键词:无线可充电传感器网络;无线充电设备;能量受限;周期性充电;充电路径

中图分类号: TN925+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Periodic charging strategy of energy-constrained wireless charging equipment in WRSNs

Chen Hua^{1,2} Wei Zhenchun^{1,2} Han Jianghong^{1,2} Shi Lei^{1,2}

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: The problem of applying the wireless charging equipment (WCE) for charging the sensor periodically is investigated in this paper, in which the charging energy and the traveling energy of the WCE are assumed limited. For each charging period, the total consumed energy of the WCE for charging and travelling is minimized when maximizing the charging period. In this way, the wireless recharging sensors network (WRSNs) can work permanently by using the minimum energy of the WCE. The optimization model of minimizing the energy of WCE is built based on analyzing the energy constraint of sensor nodes and the charging and travelling constraints of WCE. The charging problem is a NP-Complete problem in this paper. Combining with the optimization model, the chaotic particle swarm optimization algorithm (CPSO) is applied to solving this optimization problem for getting the charging route of WCE and charging time of sensor node. Furthermore, six simulation scenes of WRSNs which are consisted of two kinds of data routing and three kinds of nodes distribution are designed. The convergence rates of CPSO is double the convergence rates of genetic algorithm (GA) at least.

Keywords: wireless recharging sensors networks; wireless charging equipment; limited energy; charging periodically; charging route

1 引言

无线传感器网络(wireless sensors networks, WSN)作为信息获取的重要手段之一,受到广泛关注,已有学者提

出了WSN检测目标的定位算法^[1]、WSN野外监测系统通信协议的研究^[2]、WSN中的数据路由策略^[3-4]及MAC层协议设计^[5]等研究成果。WSN的能量问题一直是限制其广泛应用的重要约束和挑战,无线充电方法^[6]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。这类采用无线充电方案的无线传感器网络被称为无线可充电传感器网络^[7](wireless recharging sensors networks, WRSNs)。

充电规划影响 WRSNs 在解决能量问题时的成本和效果,已成为研究的热点。文献[8-12]均基于无线充电设备(wireless charging equipment, WCE)充电能力有限但足够的情况,文献[8]介绍了周期性充电的概念,其中传感器节点的剩余能量在一个时间周期内表现出一定的周期性。并证明周期性充电是实现 WRSNs 永久存活下去的充分必要条件。文献[9-12]中 WCE 周期性沿着遍历所有传感器节点的 TSP 充电回路进行充电,且充电顺序和持续时间都相同。文献[13]中 WCE 在电量一定的情况下通过二分查找的方法求取最需要补充能量的传感器节点,尽可能地延长 WRSNs 寿命。文献[14]假设 WCE 的移动和充电共享有限的能量且传感器节点功耗相同,采用单个 WCE 为尽可能多的传感器节点充电的充电策略。文献[13-14]对 WCE 的能量统一做了约束,但是提出的充电策略均不能像周期性充电策略一样保证 WRSNs 永久生存下去。文献[15]研究在目标监控传感器网络中,单个 WCE 的总工作时间一定的充电策略。该策略只能尽量地延长 WRSNs 的工作时长,不能保证该网络永久生存下去。

本文研究 WCE 初始用来行驶的能量(行驶能量)和提供给节点充电的能量(充电能量)是分开且有限的情况下,使用 WCE 为传感器节点周期性充电问题。对于每一个充电周期,旨在最大化充电周期时间的同时最小化 WCE 充电和行驶能量的总消耗值,以最小的 WCE 能量消耗保证 WRSNs 永久性工作下去,故将一般充电周期内消耗的 WCE 充电和行驶的能量总和作为优化目标,简称为 WCE 能量消耗功率。首先分析传感器节点能量补给约束和 WCE 充电约束,建立以最小化 WCE 能量消耗功率为优化目标的优化问题,求解 WCE 最优的节点充电序列和充电时间。文献[14]已经证明该类充电规划问题是 NP-Complete 问题,因此本文提出了混沌粒子群算法(chaos particle swarm optimization, CPSO)。每个节点所获得的能量主要由两个因素决定:1) WCE 和传感器节点间的距离;2) 传感器节点的能量消耗功率的大小。因此本文设计了由 2 种节点数据路由和 3 种节点分布类型组合成的 6 种 WRSNs 仿真场景。

2 WRSNs 结构和问题描述

2.1 WRSNs 结构

设在被监测区域内分布着 N 个传感器节点,节点通

过多跳的方式将信息传输到基站 B,该多跳单基站网络如图 1 所示。每个传感器节点上都装有一块统一型号的可充电电池,电池满荷时能量为 E_{\max} ,如果低于 E_{\min} 则节点无法正常工作,且初始时刻各节点电池电量均为满荷状态。传感器节点负责采集和传输信息,部分传感器节点同时承担网络路由中继的任务。整个 WRSNs 中配有一个 WCE 对传感器节点进行充电。这里考虑 WCE 初始行驶能量和充电能量是分开且有限的,WCE 在能量不足时可回到维护站 S 补充能量。

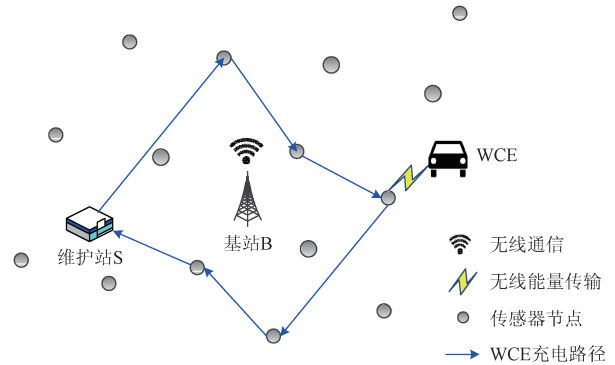


图 1 无线可充电传感器网络

Fig. 1 Wireless recharging sensors networks

2.2 问题描述

WCE 初始行驶能量和充电能量是分开且有限的,因此充电策略需要考虑以下几点:1) 基于行驶能量受限的 WCE,当网络规模较大时,WCE 在一个回路里遍历完整个网络节点的方案是不能实现的。2) 基于 WCE 充电能量有限,且网络中分布的节点能量消耗功率不均衡:通常靠近基站中心的节点能量消耗功率更大,而偏远的节点能量消耗功率较小。节点补充电量和充电时机需要综合考虑。3) 考虑到充电规划要保证 WRSNs 持久、有效地工作,本文研究的充电规划是基于周期性的。周期性充电规划的充电周期分为初始充电周期和一般充电周期,初始充电周期内,WCE 遍历路径及充电策略与一般充电周期相同,唯一不同的是,初始充电周期开始时,每个节点的能量均为 E_{\max} 。针对以上几点,在分析和建立优化问题模型之前,首先需要引入以下 3 个概念。

定义 1 一般充电周期

若在一段时间 T 内,无线传感器节点满足:在这段时间开始时各无线传感器节点的能量等于这段时间结束时无线传感器节点的能量,即每个节点被补充的能量等于消耗的能量;在这段时间内,任何时刻各无线传感器节点的能量都不低于 E_{\min} 。这段时间 T 就称为一个一般充电周期。

定义 2 充电调度

若在一段时间内,WCE 满足:在这段时间开始时

WCE 从维护站 S 出发,这段时间结束时 WCE 回到维护站;在这段时间内,任何时刻 WCE 的剩余行驶能量和剩余充电能量都不小于零;在这段时间内,不重复为同一节点充电,遍历路径为最小哈密顿回路。这段时间就称为一轮充电调度。

定义3 调度间隔

一轮充电调度完成到下一轮充电调度开始之间的间隔时间简称为调度间隔,即 WCE 在维护站 S 停留的时间。

在一个充电周期内为了保障 WRSNs 中全部的无线传感器节点得到足够的能量补充,WCE 至少被调度一次,且各无线传感器节点至少被充电一次。

3 建模与算法

初始时刻,每个无线传感器节点的能量储备为 E_{max} ,整个充电周期分为充电周期开始时刻每个无线传感器节点的能量储备为 E_{max} 的初始充电周期和充电周期开始时刻每个节点的能量储备均小于 E_{max} 的一般充电周期。首先讨论一般充电周期,并以第 1 个一般充电周期为例展开讨论,余下一般充电周期均与第 1 个一般充电周期一样,是第 1 个一般充电周期的延拓。

3.1 一般充电周期

将 WRSNs 中随机分布的 N 个传感器节点按照能量消耗功率由小到大的顺序编号,并表示为集合 $W = \{\theta | \theta \in [1, N], \theta \in N^*\}$,节点 θ 的能量消耗功率为 P_θ ,WCE 行驶速度为 V ,行驶能量消耗功率为 P_c ,充电功率为 U , \bar{E}_i 、 \bar{E}_c 分别表示 WCE 初始携带的行驶能量和充电能量。假设一般充电周期由 k 轮充电调度组成, $E_i(i)$ 、 $E_c(i)$ 分别表示 WCE 第 i 轮充电调度消耗的行驶能量和充电能量。依据充电调度的定义,WCE 需要满足式(1)和(2),每轮充电调度消耗的行驶能量和充电能量分别小于等于初始行驶能量和初始充电能量。

$$E_i(i) \leq \bar{E}_i \tag{1}$$

$$E_c(i) \leq \bar{E}_c \tag{2}$$

设一个一般充电周期为 T ,一般充电周期内被充电 n 次的节点 θ ,第 j 次充电时长表示为 $t_\theta(j)$, $j \in [1, n]$, $j \in N^*$, t_θ 表示节点的总充电时间,根据一般充电周期的定义,可得:

$$t_\theta = \sum_{j=1}^n t_\theta(j) \tag{3}$$

$$P_\theta * T = U * t_\theta \tag{4}$$

WCE 第 j 次到达节点 θ 时该节点剩余能量为 $E_\theta(j)$,充电完毕即 WCE 离开时刻剩余能量为 $\bar{E}_\theta(j)$,即:

$$(U - P_\theta) * t_\theta(j) = \bar{E}_\theta(j) - E_\theta(j) \tag{5}$$

$$E_{min} \leq E_\theta(j) < \bar{E}_\theta(j) \leq E_{max} \tag{6}$$

由式(6)可知,在一次充电中最多从 E_{min} 充到 E_{max} ,当节点 θ 在周期 T 内消耗的能量大于 $(n - 1) * (E_{max} - E_{min})$ 则至少分为 n 次充电调度为其充电,这里节点 θ 取充电为 n 次,每次都最大能力的给节点补充能量,减少 WCE 行驶的路程,如式(7)所示。且可知充电调度轮数 k 值等于集合 W 节点中最大的充电次数。

$$(n - 1) * (E_{max} - E_{min}) < P_\theta * T \leq n * (E_{max} - E_{min}) \tag{7}$$

由式(7)变换可得:

$$\frac{(n - 1) * (E_{max} - E_{min})}{P_\theta} < T \leq \frac{n * (E_{max} - E_{min})}{P_\theta} \tag{8}$$

在保证集合 W 中的所有节点均满足式(8)的前提下, T 取可行区域的最大值,优化目标即 WCE 能量消耗功率的表达式为 $\min \sum_1^k (E_i(i) + E_c(i)) / T$ 值越小。记集合 W 中 $n = 1$ 的节点个数为 Z ,其中能量消耗功率最大值记为 ρ , T 的求取如式(9)。且可由式(8)得知编号大于 Z 的节点充电次数 $n > 1$ 。

$$T = \rho * (E_{max} - E_{min}) \tag{9}$$

$t_v(i)$ 表示第 i 轮充电调度与第 $i + 1$ 轮充电调度之间的调度间隔, t_i 表示 WCE 行驶时间。则:

$$t_i = \frac{\sum_1^k E_i(i)}{P_c} \tag{10}$$

$$\sum_1^N t_\theta = \frac{\sum_1^k E_c(i)}{U} \tag{11}$$

$$T = \sum_1^N t_\theta + t_i + \sum_1^k t_v(i) \tag{12}$$

由约束条件(1)、(2)、(4)、(6)、(7)、(9)、(12)和优化目标 WCE 能量消耗功率建立优化问题 OPT-1,其中 E_{max} 、 E_{min} 、 P_θ 、 \bar{E}_i 、 \bar{E}_c 为常数, ρ 、 $t_v(i)$ 、 $t_\theta(j)$ 、 t_i 为优化变量。由约束(9)、(12)可知 4 个优化变量之间的关系,优化变量 ρ 与 T 之间的关系如式(9),又 T 与 $t_v(i)$ 、 t_i 、 $t_\theta(j)$ 的函数关系如式(12),则称优化变量 ρ 为全局优化变量。优化变量 t_i 与 WCE 行驶路程消耗的能量即 $\sum_1^k E_i(i)$ 成正比,即称受 WCE 行驶能量约束的 t_i 由充电路径的长度决定,本文通过求解以 $\min(\sum_1^k E_i(i))$ 为优化目标,约束条件有(1)、(7)、(9)、(10)的优化问题 OPT-2 获得最优的充电路径,优化变量充电路径为离散的。在充电路径确定的情况下,各节点的充电次数 n 、行驶时间 t_i 和充电周期 T 均为已知,由式(11)可知 $\sum_1^N t_\theta$ 与 $\sum_1^k E_c(i)$ 成正比,则调度间隔 $t_v(i)$ 和节点充电时间 $t_\theta(j)$ 可通过求解以 $\min(\sum_1^k E_c(i))$ 为优化目标,约束条件为(2)、(4)、(5)、(6)、(11)、(12)的优化问题 OPT-

3 获得最优值,优化变量 $t_v(i)$ 、 $t_\theta(j)$ 为连续的。

在一般充电周期内被充电 n 次的节点 θ ,一般充电周期能量-时间变化图 2 所示。

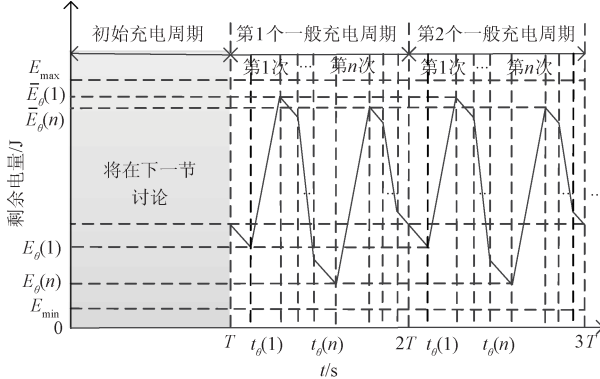


图2 节点 θ 一般充电周期

Fig.2 Recharging cycle of sensor node θ

3.2 初始充电周期

初始充电周期开始时,每个节点的电量均为 E_{max} 。保证传感器节点 θ 在初始充电周期结束时刻的剩余电量等于该节点在第 1 个一般充电周期开始时刻的电量,这里用 E_θ 表示,便可完成这两类充电周期的衔接。由于初始充电周期与一般充电周期仅存在传感器节点剩余电量上的不同,初始充电周期的描述如下。

1) 初始充电周期内,WCE 按照一般充电周期充电电路行驶,时间也为 T 。

2) 设 WCE 第 j 次到达节点 θ 且节点 θ 剩余能量为 $E'_\theta(j)$,WCE 本次在节点 θ 停留的时间为 $t_\theta(j)$, $t_\theta(j) = t1_\theta + t2_\theta$ 其中 $t1_\theta$ 表示 WCE 停留在该节点但没有为其充电的时间, $t2_\theta$ 表示 WCE 为该节点充电的时间。

3) 如果 $E'_\theta(j) - P_\theta \cdot t_\theta(j) \geq \bar{E}_\theta(j)$,即本次不需要充电, $t_\theta(j) = t1_\theta$ 、 $t2_\theta = 0$ 。

4) 如果 $E'_\theta(j) - P_\theta \cdot t_\theta(j) < \bar{E}_\theta(j)$,则该次充电时间函数式如式(13)所示。

$$E'_\theta(j) + (U - P_\theta) \cdot t2_\theta = \bar{E}_\theta(j) + P_\theta \cdot t1_\theta \quad (13)$$

5) 节点 θ 的初始充电周期与一般充电周期衔接充电情况如图 3 所示。初始充电周期,WCE 在第 m 次到达节点 θ 时,第 1 次为其补给能量,前 $m-1$ 次到达,节点 θ 均不需要充电。第 m 次之后节点 θ 的初始充电周期充电情况与一般充电周期充电情况相同。

3.3 CPSO 算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 基于群体智能的启发式全局搜索技术,以其简单、易实现等优点广泛应用于连续函数优化问题,且利用离散 PSO 算法解决旅行商问题取得了较好的效果,但是与其他全局优化算法一样,PSO 存在易陷入局部极值束缚的特点。

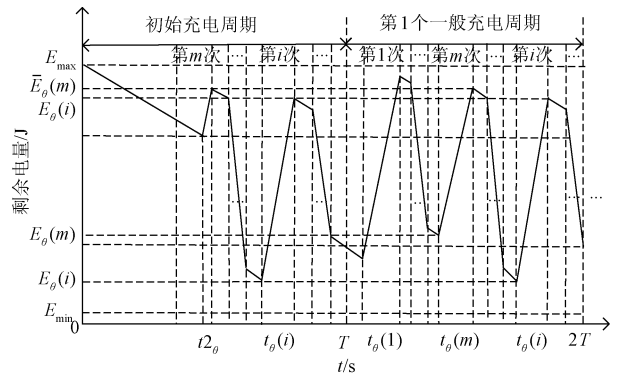


图3 节点 θ 初始充电周期

Fig.3 Initial charging cycle of sensor node θ

本文采用混沌搜索来完成惰性粒子的重新初始化,混沌搜索的主要思想是利用混沌运动的遍历性以当前整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为基础通过某特定格式迭代产生混沌序列,然后通过载波的方式将混沌变量的值域放大到优化变量的取值范围空间,这种嵌入混沌序列的混合粒子群优化算法简称为 CPSO。CPSO 算法仅对个体粒子重新初始化,保持了 PSO 算法迭代中运算和结构简单的特点,且通过微粒自适应更新机制确保了全局搜索性能和局部搜索性能的动态平衡。文献[16]仿真实验通过与基本遗传算法 (genetic algorithm, GA) 和 PSO 对比,验证 CPSO 算法解决局部搜索性能有显著提高。

混沌搜索的数学过程如下。

如果有粒子停滞时,产生一个 D 维随机初始向量 $y_0 = [y_{0,1}, y_{0,2}, \dots, y_{0,D}]'$, $y_{0,d} \in [0,1]$,且各分量值之间有微小差别,用向量 y_0 作为迭代初始值。根据 Logistic 方程开始混沌序列迭代,得到迭代序列 $y_{n,d}$ 。

$$y_{n+1,d} = \mu y_{n,d} (1 - y_{n,d}) \quad (14)$$

式中: $n = 0, 1, \dots, N_D$, $d = 1, 2, \dots, D$ 。式(14)可以迭代产生局部最优解周围的多个邻域,然后通过载波方式,计算如下:

$$y'_{n,d} = x_{i,d} + R_{i,d} (2y_{n,d} - 1) \quad (15)$$

根据式(15)将混沌迭代变量 $y_{n,d}$ 转化为优化变量 $y'_{n,d}$,即将混沌变量 $y_{n,d}$ 的取值放大到一个以粒子当前位置 $x_{i,d}$ 为中心,以 $R_{i,d}$ 为半径的区域上,其中 $R_{i,d}$ 为混沌搜索半径, $y'_{n,d}$ 根据函数变量 $x_{i,d}$ 的初始化范围确定,取值区间如下:

$$y'_{n,d} \in [x_{i,d} - R_{i,d}, x_{i,d} + R_{i,d}] \quad (16)$$

计算函数适应值 $f(y'_n)$ 并更新在混沌迭代过程中的历史最优适应值 f^* 和历史最优位置 x_i^* 。如果 f^* 优于 F_i ,则用位置 x_i^* 和速度 v_i^* 替换此粒子的原有位置和速度,其中:

$$v_i^* = \frac{x_i^* - x_i}{\|x_i^* - x_i\|} \quad (17)$$

嵌入混沌序列的 CPSO 算法流程如下。

1) 设置最大进化代数, 随机初始化每个粒子的位置和速度。

2) 计算每个粒子的适应度 F_i , 更新个体历史最优适应度 F_{pbest} 和全局历史最优适应度 F_{gbest} 。

3) 更新个体历史最优位置和全局历史最优位置。

4) 判定每个粒子是否停滞, 采用如下判定标准:

$$\Delta F_i = (F_i - F_{pbest}) / F_i \quad (18)$$

式中: δ 为预先设定的常数阈值, N_c 为预先设定的常数。如果迭代中连续 N_c 次不满足条件 $\Delta F_i < \delta$, 则跳至步骤 5); 否则, 粒子运动停滞, 进入混沌如下搜索过程:

(1) 设置当前迭代计数器 $G_c = 1$ 和最大迭代次数 N_{max} ;

(2) 按式(14)产生混沌序列, 并按式(15)将其放大到优化取值空间;

(3) 计算函数适应值 $f(y_n')$ 并更新最优 f^* 和 x_i^* ;

(4) 更新迭代计数器 $G_c = G_c + 1$ 并跳转至步骤(2), 直至 $G_c > N_{max}$;

(5) 用位置 x_i^* 和速度 v_i^* 替换此粒子的原有位置和速度。

5) 计算每个粒子的新速度值, 并移动粒子到新的位置上。

6) 如果满足收敛准则, 则停止; 否则, 转步骤 2)。

OPT-2 优化问题可以采用离散 CPSO 求解, OPT-3 优化问题可以采用连续 CPSO 求解。OPT-3 优化问题是基于充电路径确定的情况下, 则 OPT-1 优化问题的求解可以转化为在求解 OPT-2 优化问题中嵌套求解 OPT-3 优化问题, 本文将离散 CPSO 中嵌套连续 CPSO 称为混沌嵌套粒子群算法, 求解 OPT-1 优化问题的步骤如下。

1) 令 $Z = N$ 。N 表示 WRSNs 中的传感器节点总个数, Z 表示被充电 1 次的节点个数。

2) 如果 $Z = 0$, 则转到步骤 7)。否则根据式(9)计算一般充电周期 T , 式(8)计算各节点的充电次数 n 以及充电调度轮数 k 。

3) 采用离散 CPSO 得到最优充电路径:

(1) 以 $\min(\sum_1^k E_c(i))$ 为优化目标, 每个粒子表示一个充电路径;

(2) 根据嵌入混沌序列的 CPSO 算法流程步骤 1) ~ 6), 得出最优充电路径;

4) 最优充电路径约束判定:

(1) 如果最优充电路径不满足式(1), 则 $Z--$, 并转到步骤 2);

(2) 如果最优充电路径满足式(1), 转到步骤 5)。

5) 在充电路径确定的情况下, 采用连续 CPSO 得到 WCE 的充电策略, 包括各节点的充电时间和充电间隔:

(1) 以 $\min(\sum_1^k E_c(i))$ 为优化目标, 粒子各维采用浮点编码法, 每个浮点表示相应 $t_v(i)$ 或 $t_\theta(j)$ 的值;

(2) 嵌入混沌序列的 CPSO 算法流程步骤 1) ~ 6), 得出最优的 $t_v(i)$ 和 $t_\theta(j)$ 值。

6) 最优充电策略约束判定:

(1) 如果 $t_v(i)$ 和 $t_\theta(j)$ 值不满足式(2)、(6), 则 $Z--$, 并返回步骤 2);

(2) 如果优化结果满足式(2)、(6), 记录当前充电路径、充电策略和优化目标 $\min \frac{\sum_1^k (E_t(i) + E_c(i))}{T}$ 值, 然后 $Z--$, 转到步骤 2)。

7) 取记录中优化目标 $\min \sum_1^k (E_t(i) + E_c(i)) / T$ 的最小值为最终的优化结果。

4 仿真与数据分析

仿真实验采用数学软件 MATLAB R2012a 进行调试, 计算机配置为英特尔 Core i7-6700K CPU, 4.01 GHz, 16 G RAM。

在 1 000 m × 1 000 m 区域内分布 20 或 50 个传感器节点, 传感器节点数据产生率范围为 [10, 40] Kbps, 节点的数据产生率与功率之间的函数关系参照文献 [17]。基站位于坐标 (500, 500) 处, 维护站 S 位于坐标 (0, 0) 处, WCE 的出发点为维护站。相关仿真参数的选取参考文献 [9, 18-19], $E_{max} = 10.8$ kJ, $E_{min} = 540$ J, $V = 8$ m/s, $P = 1$ J/m, $\dot{E}_t = 4.5$ KJ, $\dot{E}_c = 54$ KJ。

WRSNs 中 20 个节点随机的数据产生率分别为 34、36、39、13、37、33、15、37、22、20、11、25、13、34、10、39、31、36、23、23 Kbps, 节点的分布和充电调度路径如图 4 所示, 一个充电周期内 WCE 被调度两次, 其中 20 号节点在

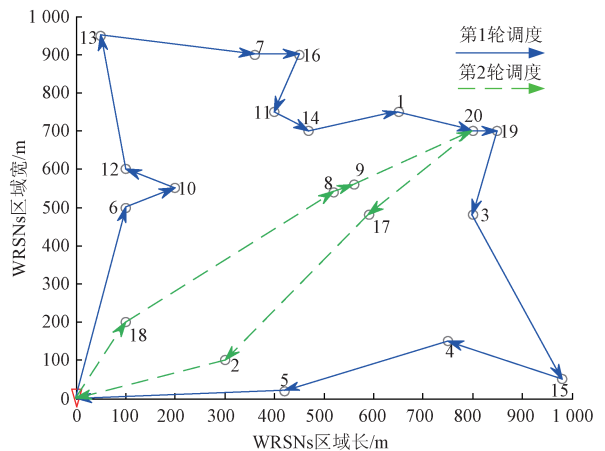


图 4 20 个节点的充电路径

Fig. 4 Optimal charging route of 20 sensor nodes

两次充电调度中均被充电,其他节点只充电一次。通过仿真计算得:一般充电周期时长为 10 828.98 s,第 1 轮充电调度时长为 6 973.62 s,第 2 轮充电调度时长为 3 855.36 s,两次充电调度 WCE 消耗的充电能量分别为 46.94 和 19.75 kJ,消耗的行驶能量分别为 4.02 和 2 kJ,最优 WCE 能量消耗功率为 6.72 J/s。

WCE 第 1 个一般充电周期的充电策略如表 1 所示。从表 1 中可以看出 19 号节点在 WCE 到达时剩余电量值为 540 J,即达到了传感器节点工作的门限值,且只充电 1 次,所以该节点为瓶颈节点。20 号节点在 WCE 第 1 轮充电调度到达时剩余电量值为 540 J,但是其功率比瓶颈节点大,即使如第 1 轮充电调度内补充能量至 E_{max} 也不足以维持节点整个充电周期正常工作,因此在第 2 充电调度内也需要为其充电。

表 1 第 1 个一般充电周期内 20 个节点的充电策略
Table 1 Charging strategy of 20 sensor nodes in the first recharging cycle

节点序号	节点功率/ ($J \cdot s^{-1}$)	WCE 到达时刻/s	充电时间/s	充电前电量/J	充电后电量/J
6	0.09	50.991	122.62	9 830.13	10 800
10	0.13	184.79	176.59	9 410.34	10 800
12	0.18	372.556	239.35	8 927.51	10 800
13	0.19	647.27	261.44	8 758.94	10 800
7	0.10	940.11	132.46	9 753.30	10 800
16	0.48	1 081.57	643.35	5 958.95	10 800
11	0.17	1 740.73	229.24	9 004.88	10 800
14	0.24	1 978.58	326.44	8 267.20	10 800
1	0.03	2 323.70	41.08	10 472.62	10 800
20	1.17	2 380.59	1 501.34	540	10 800
19	1.11	3 886.93	1 486.57	540	10 800
3	0.06	5 396.06	89.08	10 093.23	10 800
15	0.29	5 531.76	393.29	7 767.95	10 800
4	0.08	5 950.12	101.59	9 994.89	10 800
5	0.09	6 087.18	122.60	9 830.34	10 800
18	0.87	6 994.76	1182.58	2 372.54	10 800
8	0.01	8 231.37	132.99	9 749.13	10 800
9	0.13	8 368.84	173.37	9 435.23	10 800
20	1.17	8 569.99	77.11	5 333.28	5 860.25
17	0.63	8 677.52	846.40	4 558.07	10 800
2	0.04	9 571.72	55.77	10 356.16	10 800

图 5 所示为 50 个传感器节点的充电调度路径,WCE 被调度 3 次,其中 50 号节点在 3 次充电调度中均被补充能量,49 号节点在第 1 充电调度和第 2 充电调度中被补充能量,其他节点均只被充电 1 次。通过仿真计算得:一般充电周期时长为 22 950.68 s,第 1 充电调度时长为

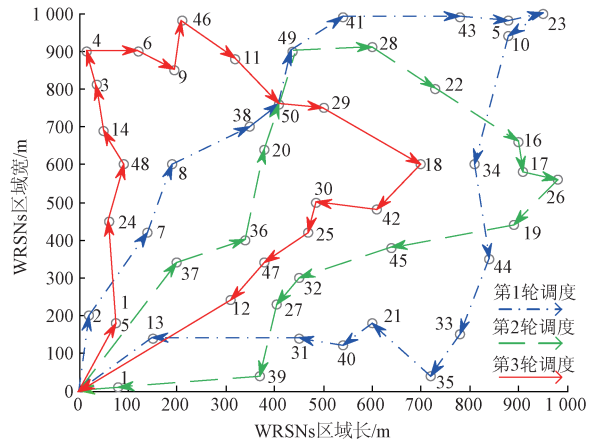


图 5 50 个节点的充电路径

Fig. 5 Optimal charging route of 50 sensor nodes

4 917.46 s,第 2 充电调度时长为 8 015.44 s,第 3 充电调度时长为 10 017.77 s。3 次充电调度 WCE 消耗的充电能量分别为 25.55、52.62 和 53.47 kJ,消耗的行驶能量分别为 1.98、3.30 和 3.68 kJ,最优 WCE 能量消耗功率为 6.13 J/s。

本文通过与基本遗传算法对比来验证改进算法的性能,原因如下:1)基本遗传算法和粒子群算法都是进化算法,有很多的共同点,如都属于随机搜索算法,都隐含并行性等;2)本文借鉴文献[16]中的混沌搜索思想,混沌搜索产生的混沌序列有助于解决粒子群算法过早的收敛于局部最优点的问题,而基本遗传算法具有良好的全局搜索能力,可以快速搜索出全体解空间,不陷入局部最优解的快速下降陷阱;3)基本遗传算法已经有了较成熟的收敛性分析方法,基本遗传算法不仅可以求解连续问题还可以用于求解离散问题,本文的优化问题 OPT-2 为离散问题,优化问题 OPT-3 为连续问题,所以适用于求解本文的优化问题 OPT-1。

为了验证 CPSO 算法对于网络结构的适应性,本文考虑了传感器网络常用的能耗最小化路由和能耗均衡路由,3 种代表性的节点分布类型:均匀分布、Gamma 分布、正态分布。3 种节点分布类型均随机生成 100 组 WRSNs,在每 100 组同类型分布网络下,分别采用能耗最小化路由和能耗均衡路由进行数据传输,构成了 6 种分布-路由类型的无线可充电传感器网络各 100 组。

对以上 6 种分布-路由类型的 100 组无线可充电传感器网络,每一组分别用 CPSO 和 GA 仿真跑 100 次,记录其中最优化的一次优化数据,统计数据如图 6、7 所示。图 6 为基于能耗均衡路由下的 3 种分布类型的 WRSNs 的两种算法仿真数据的对比,图 7 为两种算法基于能耗最小化路由下的 3 种分布类型的 WRSNs 的仿真数据对比。图 6 和 7 中横轴均表示网络组数,纵轴均表示优化

目标 WCE 能量消耗功率,优化目标值越小表示该算法性能越优;带标记的折线表示 CPSO 算法仿真数据,不带标记的折线表示 GA 算法的仿真数据,在此基础上 3 种节点分布类型的 WRSNs 仿真数据用不同的线型区分。

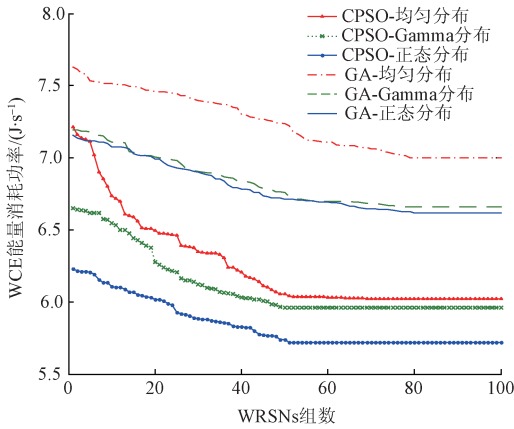


图6 能耗均衡路由两种算法对比

Fig. 6 The comparison of two algorithms with balance energy consumption date routing schemes

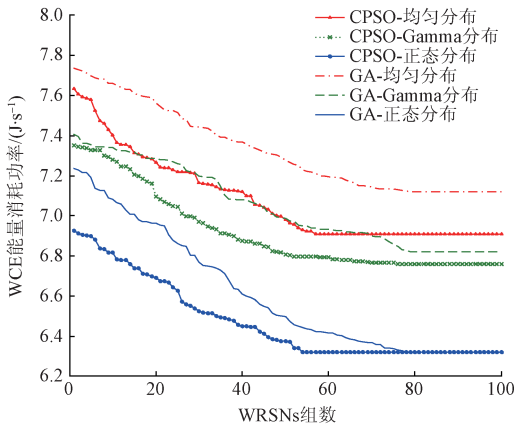


图7 能耗最小化路由两种算法对比

Fig. 7 The comparison of two algorithms with minimum energy consumption date routing schemes

同一组 WRSNs 在相同的分布 - 路由类型的情况下, CPSO 解得的优化目标值均小于 GA 解得的优化目标值。说明基于 3 种典型的节点分布情况和能耗最小化路由、能耗均衡路由两种基本路由工作情况, CPSO 算法求解出来的充电规划路径比 GA 算法求解的效果好。

CPSO 算法相较于 GA 算法迭代收敛过程中呈现最小优势的情况如图 8 所示,图 8 为图 7 中第 90 组 WRSNs 下两种算法的仿真进化过程, CPSO 第 30 代已收敛于全局最优,收敛速度是 GA 的 2 倍,且收敛过程中极少陷于局部最优。

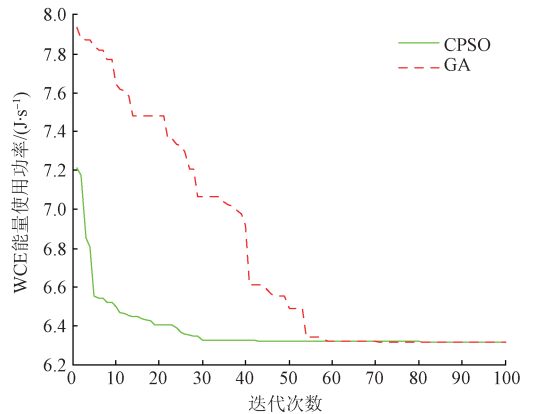


图8 CPSO 与 GA 进化过程对比

Fig. 8 The comparison of optimization process between CPSO and GA

5 结论

本文研究无线可充电传感器网络中无线充电设备能量受限的充电规划问题,提出周期性的充电规划。该充电规划可以实现在一个充电周期内 WCE 分一次充电调度或多次充电调度给传感器节点补给能量, WRSNs 中全部传感器节点均能得到维持工作所需能量的补充。通过采用 CPSO 求解 OPT-1 优化问题,获得 WCE 的充电路径和充电策略,并分析与基本 GA 对比的仿真实验统计数据,得到 CPSO 在求解过程中的优越性。在接下来的工作中,将深入研究能量受限 WCE 的充电规划的可调度性及相应的不可调度的解决方案。

参考文献

[1] 张新荣,熊伟丽,徐保国. 采用 RSSI 模型的无线传感器网络协作定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1008-1015.
ZHANG X R, XIONG W L, XU B G. Cooperative localization algorithm applying RSSI model in wireless sensor network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 1008-1015.

[2] 雷斌,张鑫. 基于 WSN 野外监测系统应用层通信协议的研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34 (2): 43-46.
LEI B, ZHANG X. Research on the application layer protocol of field monitoring system based on wireless sensor network [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(2): 43-46.

[3] 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.

- XU X L, HUANG F X J, WANG W L, et al. Wireless charging routing algorithm in WSN with a path-fixed sink[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 570-578.
- [4] 朱永红, 丁恩杰, 胡延军. PSO 优化的能耗均衡 WSNs 路由算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 78-86.
- ZHU Y H, DING EN J, HU Y J. Energy balance routing algorithm for WSNs optimized with PSO [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 78-86.
- [5] 邵蔚, 殷晓敏. 一种基于预约机制的 WSN 节能 MAC 协议[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 134-137.
- SHAO W, YIN X M. Energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks based on reservation mechanism[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(8): 134-137.
- [6] XIE L, SHI Y, HOU Y T, et al. Wireless power transfer and applications to sensor networks [J]. Wireless Communications IEEE, 2013, 20(4): 140-145.
- [7] HARB A. Energy harvesting: State-of-the-art [J]. Renewable Energy, 2011, 36(10): 2641-2654.
- [8] YANG Y, WANG C. Wireless rechargeable sensor networks[J]. Springerbriefs in Electrical & Computer Engineering, 2015.
- [9] SHI Y, XIE L, HOU Y T, et al. On renewable sensor networks with wireless energy transfer [J]. IEEE Infocom, 2012, 1(3): 10-18.
- [10] SHI Y, XIE L, HOU Y T, et al. On traveling path and related problems for a mobile station in a rechargeable sensor network [C]. Fourteenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2013: 109-118.
- [11] 韩江洪, 丁煦, 石雷, 等. 无线传感器网络时变充电和动态数据路由算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(12): 1-10.
- HAN J H, DING X, SHI L, et al. Research on the time-varying charging and dynamic data routing strategy for rechargeable wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(12): 1-10.
- [12] XU J Y, WEI Z C, HAN J H, et al. Researches on the dynamic data routing and recharging schemes for rechargeable wireless sensor networks deployed in 3-dimensional spaces [J]. Wireless Networks, 2017, 23(4): 1-10.
- [13] PENG Y, LI Z, ZHANG W, et al. Prolonging sensor network lifetime through wireless charging [C]. IEEE Real-time Systems Symposium, 2010: 129-139.
- [14] LI K, LUAN H, SHEN C C. Qi-ferry: Energy-constrained wireless charging in wireless sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications & Networking Conference, 2012: 2515-2520.
- [15] WANG J, WU X, XU X, et al. Programming wireless recharging for target-oriented rechargeable sensor networks [C]. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2014: 367-371.
- [16] 孟红记, 郑鹏, 梅国晖, 等. 基于混沌序列的粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 263-266.
- MENG H J, ZHENG P, MEI G H, et al. Particle swarm optimization algorithm based on chaotic series [J]. Control and Decision, 2006, 21(3): 263-266.
- [17] 丁煦, 韩江洪, 石雷, 等. 可充电无线传感器网络动态拓扑问题研究[J]. 通信学报, 2015, 36(1): 129-141.
- HAN JH, DING X, SHI L, et al. Problem of the dynamic topology architecture of rechargeable wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2015, 36(1): 129-141.
- [18] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [19] HU C, WANG Y. Minimizing the number of mobile chargers in a large-scale wireless rechargeable sensor network[C]. IEEE WCNC, 2015: 1297-1302.

作者简介



陈花, 2014 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生。主要研究方向为物联网, 无线传感器网络。

E-mail: 260387818@qq.com

Chen Hua received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2014. She is now a M. Sc. candidate in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. Her research area is Internet of Things and wireless sensor network.



魏振春, 分别在 2000 年、2008 年于合肥工业大学获学士、博士学位, 现为合肥工业大学计算机与信息学院副教授, 硕士生导师。主要研究方向为物联网, 无线传感器网络。

E-mail: weizc@hfut. edu. cn

Wei Zhenchun received B. Sc. and Ph. D. both from Hefei University of Technology in 2000 and 2008, respectively. He is now an associate professor and M. Sc. supervisor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His research interest is Internet of Things and wireless sensor networks.



韩江洪, 1982 年于合肥工业大学获学士学位, 现为合肥工业大学教授, 博士生导师。安全关键工业测控技术教育部工程研究中心专家组成员, 并担任中国仪器仪表学会微型计算机学会理事长、安徽省政府技术专家委员会委员、安徽省信息化协会执行会长。主要从事网络与通信、嵌入式系统、无线网络等领域的研究。

E-mail: hanjh@hfut.edu.cn

Han Jianghong received B. Sc. from Hefei University of Technology in 1982. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Hefei University of Technology. He is now serving as a member of the professional panel of the Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measurement and Control Technology, Ministry of Education. He is the chairman of Control Society (CACIS). He is also a member of the Technical

Committee and the chief executive officer of the Information Association of Anhui Province. His main research interest is networking, wireless communications, embedded systems and wireless sensor networks.



石雷, 分别在 2002 年、2005 年和 2012 年于合肥工业大学获学士学位、硕士学位、博士学位, 现为合肥工业大学计算机与信息学院副教授, 硕士生导师。主要研究方向为无线网络。

E-mail: thunder10@163.com

Shi Lei received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all from Hefei University of Technology in 2002, 2005 and 2012, respectively. Now, he is an associate professor and M. Sc. supervisor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His main research interest is wireless networks.