

有矩形障碍物的物流射频识别网络优化研究

李军军^{1,2†}, 黄有方², 吴华锋¹, 杨勇生³, 肖英杰¹

(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306;

3. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306)

摘要: 针对存在矩形障碍物的物流射频识别网络, 综合考虑覆盖率、负载平衡程度、成本, 建立了网络优化模型. 将矩形障碍物对阅读器识别能力的影响问题, 归结为线段与矩形对角线的交叉问题. 讨论了快速排斥实验对判断是否交叉的影响程度. 为减少计算量, 提高算法寻优能力, 基于Sigmoid函数设计了“跨立实验”执行概率. 迭代前期, “跨立实验”执行概率低, 加快算法探索速度; 迭代后期, “跨立实验”执行概率高, 提高算法开发精度. 仿真实验表明, 该方法具有较佳的搜索性能.

关键词: 矩形障碍物; 射频识别; 网络优化; 跨立实验; 执行概率

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

On the optimization of logistics radio frequency identification network with rectangular obstacles

LI Jun-jun^{1,2†}, HUANG You-fang², WU Hua-feng¹, YANG Yong-sheng³, XIAO Ying-jie¹

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

3. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: By comprehensively considering the coverage rate, load balance and the cost, we build a network optimization model for the logistics radio frequency identification (RFID)-based network with rectangular obstacle. The effect from the rectangular obstacle on the identification ability of readers is attributed to the intersection problem of the line segment and the rectangular diagonal, and the impact from the quick rejection test on the determination of intersection is discussed. To reduce the computational complexity and improve the search capability, we introduce the straddle test and design its execution probability based on the sigmoid function. In the prophase of the iterative process, the execution probability of straddle test is set to a low value for accelerating the exploration speed. In the anaphase, the execution probability of straddle test is set to a high value for improving the exploitation precision. Simulation results show that the proposed method can achieve better searching ability.

Key words: rectangular obstacle; radio frequency identification (RFID); network optimization; straddle test; execution probability

1 引言(Introduction)

射频识别(radio frequency identification, RFID)系统由电子标签(tag)、阅读器(reader)和数据管理系统构成, 电子标签和阅读器通过射频通信实现非接触式数据传输, 并高效地获取目标信息^[1]. 在物流RFID网络系统中, 贴有标签的物品可能随机地布置着, 如何有效地放置阅读器, 使阅读器可以读取多个标签信息同时减小冲突, 是RFID应用的一个关键问题. 目前, 已有很多学者对RFID网络优化进行了研究^[1-6], 如: E

Di Giampaolo等^[2]综合考虑覆盖率、覆盖重合程度、总功率、网络成本, 建立了RFID网络优化模型; 刘快和纪志成^[6]建立了考虑覆盖率和负载平衡性能的RFID网络优化模型; 文献[3-6]采用改进的粒子群算法用于求解RFID网络优化问题.

但物流RFID的工作环境很可能不是非常理想, 可能存在金属等RFID较难穿透的物体, 即障碍物. 文献[7-9]对存在障碍物的传感器部署问题(与RFID网络优化问题相近)进行了研究, 但目前对于存在障碍物

收稿日期: 2013-03-11; 录用日期: 2013-07-19.

†通信作者. E-mail: jsliljj@163.com; Tel.: +86 21-38282966.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279099); 上海市科学技术委员会基金资助项目(12ZR1412500); 上海市教委科研创新基金重点项目资助(13ZZ124); 上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“曙光计划”基金资助项目(12SG40); 交通运输部应用基础研究资助项目(2013329810300).

的RFID网络优化研究还很少.

考虑到矩形是障碍物的一种典型形状, 本文研究存在矩形障碍物的物流RFID网络优化. 将阅读器对标签的感知问题, 转化为以阅读器、标签为端点的线段与矩形障碍物两对角线线段的交叉问题. 分析了“通过快速排斥实验”与“线段与矩形相交”的等价概率, 及“快速排斥实验”、“跨立实验”的计算量, 以Sigmoid函数为基础, 设计了“跨立实验”的执行概率. 并对“跨立实验”执行比例的期望值(某一代“跨立实验”执行比例的期望值指: 这一代“跨立实验”执行次数/线段相交判断次数)、平均期望值(算法所有迭代代数的“跨立实验”执行比例期望值的平均值)进行了分析计算. 考虑到问题的复杂性, 本文采用粒子群算法来求解. 通过仿真案例计算, 验证了本文提出的RFID网络优化方法.

2 存在矩形障碍物的物流RFID网络优化问题(Logistics RFID network optimization problem with rectangular obstacle)

2.1 矩形障碍物的影响(Influence of rectangular obstacles)

为便于描述, 举一个简单的例子, 如图1, 某物流RFID网络所处区域为矩形, 长 L , 宽 W , 4个顶点的坐标分别为 $(0, 0)$, $(L, 0)$, (L, W) , $(0, W)$. 该区域内有一矩形障碍物, 长 L_1 , 宽 W_1 , 障碍物4个顶点为

$$A(x_A, y_A), B(x_B, y_B), C(x_C, y_C), D(x_D, y_D).$$

障碍物的4条边分别平行于存储空间的4条边, 则 $x_A = x_D$, $x_B = x_C$, $y_A = y_B$, $y_C = y_D$. 假定阅读器、标签都在障碍物以外区域.

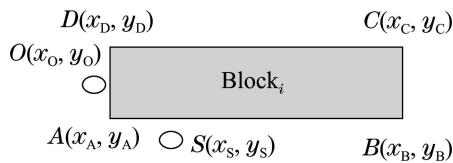


图1 障碍物示意图

Fig. 1 Diagram of obstacle

由于存在障碍物, 若某阅读器 $S(x_S, y_S)$ 能识别某标签 $O(x_O, y_O)$, 要求以阅读器 S 、标签 O 为端点的线段 SO 与障碍物没有交叉(假设RFID对此障碍物没有穿透感知能力, 也不考虑衍射现象). 为方便, 本文用 $E_m(SO, ABCD) = 0, 1$ 分别表示线段 SO 与矩形障碍物 $ABCD$ 不相交、相交.

显然, $E_m(SO, ABCD) = 0$ 要求线段 SO 与矩形 $ABCD$ 的两对角线线段 AC, BD 都不交叉. 而两线段是否相交, 可用“快速排斥实验”、“跨立实验”进行判断^[10]. 比如, 对于线段 SO 与线段 AC , 这两个实验为:

1) 快速排斥实验.

$$\min\{x_S, x_O\} \leq \max\{x_A, x_C\}, \quad (1)$$

$$\min\{x_A, x_C\} \leq \max\{x_S, x_O\}, \quad (2)$$

$$\min\{y_S, y_O\} \leq \max\{y_A, y_C\}, \quad (3)$$

$$\min\{y_A, y_C\} \leq \max\{y_S, y_O\}. \quad (4)$$

当式(1)–(4)都成立时, 通过快速排斥实验. 为方便, 本文用 $E_{bb}(SO, AC) = 0, 1$ 分别表示线段 SO, AC 不能、能通过快速排斥实验.

2) 跨立实验.

令 $t_1 = x_S - x_O, w_1 = y_S - y_O, t_2 = x_S - x_A, w_2 = y_S - y_A, t_3 = x_S - x_C, w_3 = y_S - y_C$, 若

$$(t_1 w_2 - t_2 w_1)(t_1 w_3 - t_3 w_1) \leq 0 \quad (5)$$

成立, 点 A, C 在线段 SO 两端. “点 S, O 在线段 AC 两端”的判断方法类似于式(5). 若点 A, C 在线段 SO 两端, 且点 S, O 在线段 AC 两端, 则线段 SO, AC 通过跨立实验. 为方便, 本文用 $E_f(SO, AC) = 0, 1$ 分别表示线段 SO, AC 不能、能通过跨立实验.

只有 $E_{bb}(SO, AC) = 1$, 且 $E_f(SO, AC) = 1$ 时, 线段 SO 与线段 AC 才会交叉.

对于线段 SO 与线段 BD 是否相交的判断, 与上述判断类似. 如果阅读器 S 能识别标签 O , 那么就要求 $E_m(SO, ABCD) = 0$, 即要求下面两式同时成立:

$$E_{bb}(SO, AC) = 0, \text{ 或 } E_f(SO, AC) = 0, \quad (6)$$

$$E_{bb}(SO, BD) = 0, \text{ 或 } E_f(SO, BD) = 0. \quad (7)$$

本文通过快速排斥试验和跨立试验, 判断某一阅读器能否识别某一标签, 为存在矩形障碍物的RFID网络优化模型增加合理的约束条件限制.

2.2 RFID网络优化模型(RFID network optimization model)

在一个物流RFID网络所处区域, 有 N_t 个电子标签, 可提供阅读器的最大数量为 N_{\max} , 阅读器的读取范围为一半径为 R 的圆^[1,4,6,11]. 第 i 个阅读器的坐标为 (x_S^i, y_S^i) , 第 j 个电子标签的坐标为 (x_O^j, y_O^j) . 在该区域存在 N_{ob} 个障碍物, 第 k 个障碍物用 OB_k 表示, $k = 1, 2, \dots, N_{ob}$. 若现使用 N_R 个阅读器, 令集合 $SN_R = \{1, 2, \dots, N_R\}$, 集合 $SN_t = \{1, 2, \dots, N_t\}$, 集合 $SN_{ob} = \{1, 2, \dots, N_{ob}\}$.

综合考虑覆盖率、负载平衡程度、成本, 建立考虑障碍物的物流RFID网络优化模型:

$$\max F = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3, \quad (8)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为权重系数, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为正实数, 且

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1,$$

f_1, f_2, f_3 分别为物流RFID网络的覆盖率^[6]、负载平

衡程度^[2,6]、成本^[2]:

$$f_1 = \sum_{j \in SN_t} c_O^j, \quad (9)$$

$$f_2 = \prod_{j \in SN_t} \frac{1}{\text{over}_j + 1}, \quad (10)$$

$$f_3 = \frac{N_{\max} - N_R}{N_{\max}}, \quad (11)$$

其中 c_O^j 为第 j 个电子标签的覆盖率:

$$c_O^j = \begin{cases} 1, & \sum_{i \in SN_R} \text{reader}_{ij} \neq 0, \\ 0, & \sum_{i \in SN_R} \text{reader}_{ij} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

over_j 为第 j 个电子标签被阅读的重叠程度:

$$\text{over}_j = \begin{cases} 0, & \sum_{i \in SN_R} \text{reader}_{ij} \leq 1, \\ -1 + \sum_{i \in SN_R} \text{reader}_{ij}, & \text{其他}. \end{cases} \quad (13)$$

式(12)–(13)中的 reader_{ij} 表示第 i 个阅读器能否识别第 j 个电子标签. 若第 i 个阅读器、第 j 个电子标签的距离 $\sqrt{(x_S^i - x_O^j)^2 + (y_S^i - y_O^j)^2} \leq R$ 且 $\forall k \in SN_{\text{ob}}, E_m(S_j O_i, O B_k) = 0$, 则 $\text{reader}_{ij} = 1$, 否则 $\text{reader}_{ij} = 0$. 本文针对障碍物为矩形的情况, 令第 k 矩形障碍物的顶点分别为 A_k, B_k, C_k, D_k , 则

$$O B_k = A_k B_k C_k D_k.$$

该模型是在经典RFID网络优化模型^[2,6]上, 增加了对障碍物的考虑, 即第 i 个阅读器与第 j 个电子标签之间的线段必须没有任何障碍物, 第 i 个阅读器才有可能识别第 j 个电子标签. 另外, 该模型中, f_1, f_2 与文献[6]模型一致, 本文考虑到使用阅读器数量是影响RFID网络成本的重要因素, 增加了成本 f_3 . f_3 与文献[2]模型中的网络成本一致.

3 优化方法设计(Design of optimization method)

3.1 快速排斥实验、跨立实验比较(Compare of quick rejection test and straddle test)

通过对比可发现, 线段 SO 与 AC 的快速排斥实验, 与线段 SO 与 BD 的快速排斥实验是等价的. 即线段 SO 与矩形 $ABCD$ 是否相交的快速排斥实验只需进行一次.

这样, 判断线段 SO 是否与矩形 $ABCD$ 相交, 需要进行一次快速排斥实验、两次跨立实验. 由于本文假定阅读器、标签都不在障碍物区域, 很多能通过快速排斥实验但不相交(不能通过跨立实验)的情况已被排除. 因此, “通过快速排斥实验”与“线段 SO 与矩形 $ABCD$ 相交”等价的比重比较高.

以一个具体的例子对此进行验证. 设图1中

$$L = 18 \text{ m}, W = 12 \text{ m}, L_1 = 10 \text{ m}, W_1 = 4 \text{ m},$$

障碍物位于物流RFID区域内中心位置. 阅读器读取半

径 $R = 5 \text{ m}$. 在此物流RFID区域内, 为提高计算精度, 按一种低偏差序列—Korobov点阵(Korobov Lattice)^[12]进行采样. Korobov点阵规则如下:

$$P_n = \{[\frac{i}{n}(1, a \bmod n, \dots, a^{s-1} \bmod n)] \bmod 1\}, \quad (14)$$

其中 $i = 0, \dots, n-1$. 这里, 令 $n = 2^{23}$, $s = 4$, $a = 2897$. 获得 $n \times 4$ 维矩阵, 第1列、第3列的各元素乘以 L 后分别作为阅读器、标签的横坐标, 第2列、第4列的各元素乘以 W 后分别作为阅读器、标签的横坐标.

经过 n 对阅读器、标签的感知计算, 当阅读器和标签都不在障碍物区域内时, 有97.102%的情况, “通过快速排斥实验”与“线段与矩形障碍物相交”等价. 可见绝大多数情况下, 直接由“快速排斥实验”来判断“线段相交”, 结果是正确的.

3.2 跨立实验的执行概率设计(Design of straddle test's execution probability)

与文献[3–6]相同, 本文也基于粒子群算法设计求解算法. 不同的是, 本文粒子群算法主要针对存在障碍物的物流RFID网络, 算法每代每个粒子都要进行大量的“快速排斥实验”、“跨立实验”. 而由第3.1节可知, 若“跨立实验”完全取消, 仅进行“快速排斥实验”, 计算结果仍有较高的可靠性; 且计算时间可以减少很多. 因此, 本文基于Sigmoid函数, 设计了一种“跨立实验”执行概率, 在算法迭代前期, “跨立实验”执行概率小, 以加快探索速度; 算法迭代后期, “跨立实验”执行概率高, 以提高开发精度. 具体方法如下:

第1代计算结束之后, 按适应度从优向劣对各粒子排序, 各粒子的序号为 $k = 1, 2, \dots, M$ (令粒子数为 M). 从第2代开始, 各粒子“跨立实验”的执行概率为

$$\varphi(k, t) = \begin{cases} \varphi_1(k, t), & 1 \leq t < t_1, \\ \varphi_2(k, t), & t_1 \leq t \leq t_2, \\ 1, & t_2 < t \leq T, \end{cases} \quad (15)$$

其中:

$$\varphi_1(k, t) = B_1 \left[\frac{M+1}{2} - k \right] + D_1, \quad (16)$$

$$\varphi_2(k, t) = \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t - t_s)]} + F_2 + B_2(t) \left(\frac{M+1}{2} - k \right), \quad (17)$$

$$0 \leq \varphi_1(k, t), \varphi_2(k, t) \leq 1. \quad (18)$$

当 $t_2 < t \leq T$ 时, $\varphi(k, t) = 1$ 是为保证算法计算结果正确. 在式(16)中, $B_1 > 0, 0 < D_1 < 1$. 由于 k 的系数小于0, 因此每一代, 较优的粒子“跨立实验”执行概率较高, 即开发精度较高, 这样利于提高算法开发精度.

式(17)中: $D_2 > 0, A > 0, F_2 > 0,$

$$t_s = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (19)$$

$$B_2(t) = b_2 - c_2 t > 0, \quad (20)$$

其中: $b_2 > 0, c_2 > 0.$

为使“跨立实验”的执行概率平滑变化, 令

$$\varphi_1(k, t_1) = \varphi_2(k, t_1), \quad (21)$$

$$\varphi_2(k, t_2) = 1. \quad (22)$$

即

$$B_1 \left[\frac{M+1}{2} - k \right] + D_1 = \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t - t_s)]} + F_2 + B_2(t) \left[\frac{M+1}{2} - k \right]. \quad (23)$$

可令

$$B_1 = B_2(t_1), \quad (24)$$

$$D_1 = \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t_1 - t_s)]} + F_2. \quad (25)$$

同理, 由式(22), 可令

$$B_2(t_2) = 0, \quad (26)$$

$$\frac{D_2}{1 + \exp[-A(t_2 - t_s)]} + F_2 = 1. \quad (27)$$

3.3 参数约束(Parameter constraint)

由式(17)(20), 可求出

$$\frac{\partial \varphi_2(k, t)}{\partial t} = \frac{D_2 A \exp[-A(t - t_s)]}{\{1 + \exp[-A(t - t_s)]\}^2} - c_2 \left(\frac{M+1}{2} - k \right). \quad (28)$$

根据式(18)(22), 要求 $\varphi_2(k, t)$ 是 t 的递增函数, 即要求 $k = 1$ 时, 式(28)成立, 即

$$\frac{D_2 A \exp[-A(t - t_s)]}{\{1 + \exp[-A(t - t_s)]\}^2} - c_2 \frac{M-1}{2} > 0. \quad (29)$$

考虑到 $t < t_s$ 时, $\frac{\partial \varphi_2(k, t)}{\partial t}$ 随 t 逐渐增加; $t > t_s$ 时, $\frac{\partial \varphi_2(k, t)}{\partial t}$ 随 t 逐渐减小. 因此要求 $t = t_1, t_2$ 时, 式(29)成立. 根据式(19), 有

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_2(k, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_1} &= \frac{D_2 A \exp[-A(t_1 - \frac{t_1 + t_2}{2})]}{\{1 + \exp[-A(t_1 - \frac{t_1 + t_2}{2})]\}^2} - c_2 \frac{M-1}{2} = \\ &= \frac{D_2 A \exp(A \frac{t_1 - t_2}{2})}{[\exp(A \frac{t_1 - t_2}{2}) + 1]^2} - c_2 \frac{M-1}{2}. \end{aligned} \quad (30)$$

类似地, 可以求出

$$\frac{\partial \varphi_2(k, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_2} = \frac{D_2 A \exp(A \frac{t_1 - t_2}{2})}{[1 + \exp(A \frac{t_1 - t_2}{2})]^2} - c_2 \frac{M-1}{2}. \quad (31)$$

可见, 式(30)与式(31)相等, 也即, 仅需

$$\frac{D_2 A \exp(A \frac{t_1 - t_2}{2})}{[1 + \exp(A \frac{t_1 - t_2}{2})]^2} - c_2 \frac{M-1}{2} > 0. \quad (32)$$

对于该方法中的参数, 可先设置 $T, M, t_1, t_2, A, B_1, D_1$, 然后根据式(19)求出 t_s , 根据式(24)(26)求出 b_2, c_2 , 根据式(25)(27)求出 D_2, F_2 . 再代入式(32), 看是否满足, 若不满足, 再对参数进行调整使其满足.

举一个例子, 当 $M=20, T=100, t_1=31, t_2=80, B_1=0.0065, A=0.2, D_1=0.1$ 时, 计算出 $c_2=1.3265 \times 10^{-4}, b_2=0.0065, D_2=0.9135, F_2=0.0932$, 式(32)成立(不等号左边为 8.0225×10^{-5}). 可以求得 $\varphi(k, t)$ 随 t 变化的情况如图2所示.

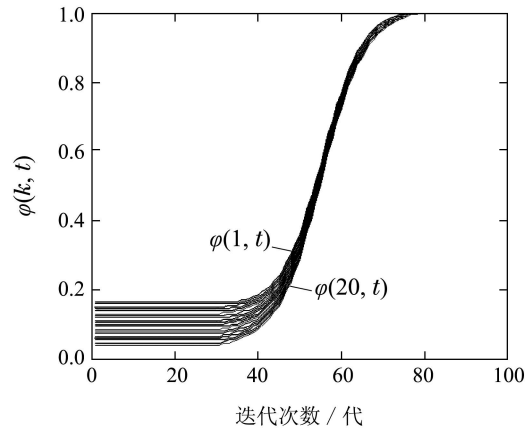


图2 “跨立实验”执行概率变化情况

Fig. 2 Change of straddle test's execution probability

3.4 “跨立实验”执行比例的期望分析(Expectation analysis of straddle test's execution rate)

需要知道迭代计算中“跨立实验”执行比例的期望值, 以了解算法的计算复杂度. 为便于分析, 假设各代各粒子的判断次数相同.

当 $1 \leq t < t_1$ 时, 第 t 代各粒子, “跨立实验”执行比例的期望为

$$\begin{aligned} E_1(t) &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \varphi_1(k, t) = \\ &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [B_1 \left(\frac{M+1}{2} - k \right) + D_1] = D_1. \end{aligned} \quad (33)$$

则当 $1 \leq t < t_1$ 时, “跨立实验”执行比例的期望均值

$$\bar{E}_1(t) = D_1. \quad (34)$$

当 $t_2 < t \leq T$ 时, “跨立实验” 执行比例的期望均值显然为 1. 当 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时, 第 t 代每个粒子, “跨立实验” 执行比例的期望为

$$E_2(t) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \varphi_2(k, t) = \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t - t_s)]} + F_2 + \frac{1}{M} B_2(t) \sum_{k=1}^M \left(\frac{M+1}{2} - k \right) = \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t - t_s)]} + F_2. \quad (35)$$

则当 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时, “跨立实验” 执行比例的期望均值为

$$\bar{E}_2(t) = \frac{1}{t_2 - t_1 + 1} \sum_{t=t_1}^{t_2} \left\{ \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t - t_s)]} + F_2 \right\} = F_2 + \frac{D_2}{t_2 - t_1 + 1} \left\{ \frac{1}{1 + \exp[-A(t_1 - t_s)]} + \frac{1}{1 + \exp[-A(t_1 + 1 - t_s)]} + \dots + \frac{1}{1 + \exp[-A(t_2 - t_s)]} \right\}. \quad (36)$$

若令 $\Delta t = 0, 1, \dots$, 则有

$$\frac{1}{1 + \exp[-A(t_1 + \Delta t - t_s)]} + \frac{1}{1 + \exp[-A(t_2 - \Delta t - t_s)]} = \frac{1}{1 + \exp[-A(\Delta t + \frac{t_1 - t_2}{2})]} + \frac{1}{1 + \exp[-A(-\Delta t - \frac{t_1 - t_2}{2})]} = 1. \quad (37)$$

因此

$$\bar{E}_2(t) = F_2 + \frac{D_2}{t_2 - t_1 + 1} \frac{t_2 - t_1 + 1}{2} = F_2 + \frac{D_2}{2}. \quad (38)$$

而由式(25)(27)可得

$$D_1 + 1 = \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t_1 - t_s)]} + \frac{D_2}{1 + \exp[-A(t_2 - t_s)]} + 2F_2 = D_2 + 2F_2. \quad (39)$$

再由式(34)(38)–(39)可得

$$\bar{E}_2(t) = \frac{1}{2} [\bar{E}_1(t) + 1]. \quad (40)$$

则 $1 \leq t \leq T$ 时, 每一代每个粒子, “跨立实验” 执行

比例的期望均值为

$$\bar{E}(t) = \frac{1}{T} [D_1(t_1 - 1) + \frac{D_1 + 1}{2}(t_2 - t_1 + 1) + T - t_2] = \frac{1}{T} [(D_1 - 1) \frac{t_1 + t_2}{2} + T + \frac{1 - D_1}{2}] = \frac{1}{T} (D_1 - 1)t_s + 1 + \frac{1}{2T} (1 - D_1). \quad (41)$$

由于 $0 < D_1 < 1$, 因此 $\bar{E}(t)$ 是 t_s/T 的线性单调递减函数. 另外, 当 T 较大时, 可近似忽略 $(1 - D_1)/(2T)$. 因此, $\bar{E}(t)$ 完全由参数 D_1 及 t_s/T 决定, 与其他参数无关. 通过调节 t_s/T , 可使 $\bar{E}(t)$ 大致在 $[D_1, 1]$ 范围内变化.

4 算例分析(Analysis of examples)

在 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的物流RFID区域内, 随机分布 100 个RFID电子标签, 可提供阅读器的最大数量 $N_{\max} = 20$. 设阅读器感知半径 $R = 5\text{ m}$ ^[1,4].

令物流RFID区域的 4 个顶点坐标为 $(0, 0)$, $(30, 0)$, $(30, 30)$, $(0, 30)$. 存在两个矩形障碍物, 障碍物 4 个顶点的坐标见表 1.

表 1 障碍物顶点坐标

Table 1 Obstacles' vertex coordinates				
障碍物编号	4个顶点坐标 / m			
1	(6,10)	(16,10)	(16,14)	(6,14)
2	(20,10)	(24,10)	(24,20)	(20,20)

采用粒子群算法求解, 每个粒子编码为 $3 \times N_{\max}$, 每个阅读器有 3 个编码: 横坐标、纵坐标、是否利用 $(0, 1)$ 之间的实数, 大于 0.5 则利用, 否则不利用. 粒子数 $M = 20$, 迭代次数 $T = 100$, $\omega = 0.729$, $c_1 = c_2 = 1.49445$. 计算机配置为 “Pentium Dual 2.00 GHz, 2 GHz 内存”, 编程工具为 MATLAB 7.1. 为验证本文方法的有效性, 同时采用 “跨立实验” 100% 执行的 PSO (用 PSO_all 表示) 进行计算. 用 PSO_SC 表示采用本文方法的 PSO 算法.

在物流RFID网络系统中, 覆盖率最为重要, 其次负载平衡程度, 再次网络成本. 考虑到覆盖率本身数值较大(覆盖率较大, 可能是 80 多或 90 多, 而负载平衡程度、网络成本都小于等于 1), 式(13)中, 取 $\lambda_1 = 0.09$, $\lambda_2 = 0.9$, $\lambda_3 = 0.01$. PSO_SC 参数设置同第 3.3 节, 式(32)成立. 根据式(41), $\bar{E}(t) = 0.505$. PSO_SC 算法连续执行 50 次, 平均计算时间为 1.371 s, “跨立实验” 的平均计算时间为 0.729 s. 则 PSO_SC 计算时间应较 PSO 少

$$0.729 \times \frac{1 - \bar{E}(t)}{\bar{E}(t)} \approx 0.7146\text{ s},$$

PSO_all 计算时间应约为 $1.371 + 0.7146 = 2.0856\text{ s}$.

为进一步比较,减少PSO_all的粒子数或迭代次数,获得与PSO_SC计算时间相当的PSO算法. PSO_all的粒子数或迭代次数应为原来的 $1.371/2.0856 = 0.6574$,即减少粒子数至 $0.6574 \times M \approx 13$,或减少迭代次数至 $0.6574 \times T \approx 66$.

这4种方法分别连续计算50次,获得的最优结果及平均结果如表2所示. PSO_SC(获得其最优结果的那次计算)的各目标函数进化曲线如图3所示,其中细实

线、点划线、虚线、粗线分别对应适应度、覆盖率、负载平衡程度、网络成本. 为便于比较它们的变化趋势,让它们分别乘以0.1, 0.01, 1, 1, 使得它们都在 $[0, 1]$ 范围内.

图4为PSO_SC(获得其最优结果的那次计算)的误差率(判断线段交叉错误的比例)随迭代次数变化的情况. PSO_SC算法第1, 30, 43, 55, 67, 81代获得的平均适应度、平均误差率如表3所示.

表2 几种方法的优化结果比较

Table 2 Optimization results comparison of several methods

计算结果	性能指标	PSO_SC	PSO_all		
			$M = 20, T = 100$	$M = 20, T = 66$	$M = 13, T = 100$
最优结果	覆盖率	93	99	91	92
	负载平衡程度	1	0.5	0.25	0.00391
	网络成本	0.4	0.4	0.35	0.25
	适应度	9.274	9.364	8.4185	8.286
平均结果	覆盖率	91	92.2	85	88
	负载平衡程度	0.273	0.208	0.22	0.201
	网络成本	0.32	0.3	0.28	0.3
	适应度	8.439	8.488	7.851	8.104
	计算时间/s	1.371	2.089	1.389	1.367

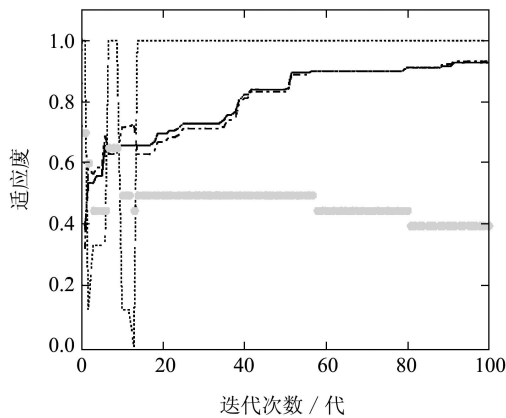


图3 各目标函数的进化曲线

Fig. 3 Evolution curve of objective functions

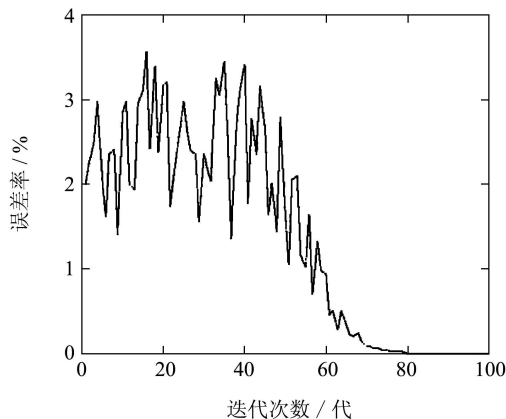


图4 误差率变化情况

Fig. 4 Change of error rate

表3 PSO_SC适应度、误差率情况

Table 3 Fitness, error rate of PSO_SC

代数	1	30	43	55	67	81
适应度	3.447	6.637	7.641	8.111	8.190	8.275
误差率	1.61%	1.57%	1.61%	0.71%	0.13%	0%

由图3可见, 3个子目标中, 覆盖率的变化趋势与适应度较为接近, 另外两个子目标与适应度差异较大. 虽然 $\lambda_1 < \lambda_2$, 但由表2可知, 覆盖率本身数值较负载平衡程度、网络成本大很多, 因此它在总目标中分量最重.

由第3.3节的参数设置可知, 第1, 30代属于 $1 \leq t < t_1$, 较少考虑“跨立实验”, 第43, 55, 67代属于 $t_1 \leq t \leq t_2$, 逐渐增加对“跨立实验”的考虑, 第81代属于 $t_2 < t \leq T$, 完全考虑“跨立实验”. 由图4可见在前80代, 误差率一直很小. 由表3可见, 随着代数的增加, 平均适应度逐渐增加; 第1, 30, 43代平均误差率相对较高, 在第55, 67代, 平均误差率已经开始下降, 第81代平均误差率已降为0.

图5为PSO_SC获得最优结果的示意图, 其中“*”为阅读器, 小“◆”为标签, 虚线圆为阅读器的识别范围, 两个矩形为障碍物. 由图5可见, PSO_SC最优结果的覆盖率较高, 各阅读器之间没有冲突. 由表2可见, 几种PSO_all算法的平均计算时间与前

述的分析(第4节的第4-5段)吻合. 相对于第一种 PSO_all, PSO_SC 最优结果、平均结果的覆盖率低些, 负载平衡程度及网络成本较优, 适应度略低, 但计算时间少很多; PSO_SC 的平均计算时间与后两种 PSO_all 相当, 但最优结果和平均结果明显更优.

为全面验证本文模型及方法的正确性与实用性, 在该物流RFID网络中, 分别设置3个、4个、5个、6个不同的障碍物, 采用 PSO_SC 及3种 PSO_all, 获得的平均适应度、平均计算时间如表4所示. 由表4可知, 在不同的案例中, 本文 PSO_SC 的平均适应度与第一种 PSO_all 相当, 并且明显优于两种 PSO_all; PSO_SC 的平均计算时间与后两种 PSO_all 相当, 明显优于第一种 PSO_all.

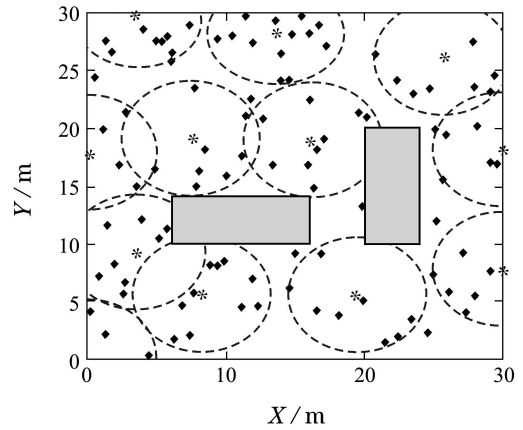


图 5 PSO_SC 获得最优的RFID网络示意图

Fig. 5 Diagram of best RFID network obtained by PSO_SC

表 4 不同实例的优化结果比较

Table 4 Optimization results comparison of different examples

算法性能指标	障碍物数量	PSO_SC	PSO_all		
			$M = 20, T = 100$	$M = 20, T = 66$	$M = 13, T = 100$
适应度	3	8.326	8.352	7.841	7.968
	4	8.175	8.203	7.797	7.813
	5	8.028	8.045	7.781	7.729
	6	7.842	7.893	7.524	7.661
计算时间/s	3	1.727	2.646	1.759	1.747
	4	2.306	3.519	2.315	2.309
	5	2.9144	4.423	2.923	2.921
	6	3.493	5.357	3.519	3.483

根据表4的计算结果及分析可见, 对于存在矩形障碍物的物流RFID网络, 本文方法是一种较优的优化方法.

5 小结(Conclusion)

本文首先建立了存在矩形障碍物的物流RFID网络优化模型. 考虑到优化计算中, 跨立实验的计算时间较长, 影响了算法的搜索速度. 本文在分析了快速排斥实验对交叉的决定程度之后, 基于 Sigmoid 函数, 设计了一种跨立实验执行概率. 并对参数范围进行了分析, 对跨立实验执行概率的数学期望进行了研究. 标签规模为100的多个案例仿真结果表明, 本文提出方法是可行的.

另外, 其他一些形状的障碍物也可以划分为或近似划分为几个矩形的组合; 传感器部署优化也存在类似的覆盖问题. 因此, 本文方法具有较广的应用范围.

参考文献(References):

[1] 王永华. 超高频RFID多读写器部署与协调技术研究 [D]. 广州: 中山大学, 2009.

(WANG Yonghua. *Research on UHF RFID multi-readers deployment and coordination technology* [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2009.)

[2] GIAMPAOLO E D, FORNI F, MARROCCO G. RFID-network planning by particle swarm optimization [C] // *Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation*. New York: IEEE, 2010: 1 - 5.

[3] 刘微, 陈贺新, 陈瀚宁, 等. 改进的PSO算法在RFID网络调度中的应用 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2011, 29(2): 121 - 127. (LIU Wei, CHEN Hexin, CHEN Hanning, et al. Improved particle swarm optimizer for RFID network planning [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2011, 29(2): 121 - 127.)

[4] 刘快, 沈艳霞, 纪志成. 基于改进粒子群算法的RFID网络系统的优化 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 900 - 904. (LIU Kuai, SHEN Yanxia, JI Zhichen. RFID network optimization based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(1): 900 - 904.)

[5] GONG Y J, SHEN M, ZHANG J, et al. Optimizing RFID network planning by using a particle swarm optimization algorithm with redundant reader elimination [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(4): 900 - 912.

[6] 刘快, 纪志成. 基于混合粒子群的RFID网络的优化部署 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1326 - 1328. (LIU Kuai, JI Zhicheng. RFID network deployment based on hybrid particle swarm optimization [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(4): 1326 - 1328.)

- [7] CHIH Y C, CHAO T C, YU C C, et al. An obstacle-free and power-efficient deployment algorithm for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(6): 2925 – 2941.
- [8] HEXSEL B, CHAKRABORTY N, SYCARA K. Coverage control for mobile anisotropic sensor networks [C] // *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2011: 2878 – 2885.
- [9] CARMELO C, VALERIA L, ENRICO N, et al. Nodes self-deployment for coverage maximization in mobile robot networks using an evolving neural network [J]. *Computer Communications*, 2012, 35(9): 1047 – 1055.
- [10] 刘丽娟. 空间分析中缓冲区生成算法研究及应用 [D]. 郑州: 河南大学, 2009.
(LIU lijuan. *Research and application for algorithm for buffer creation in spatial analysis* [D]. Zhengzhou: Henan university, 2009.)
- [11] RAHMAN F. *Towards secure and scalable tag search approaches for current and next generation RFID systems* [D]. Milwaukee, Wisconsin: Marquette University, 2010: 76 – 79.
- [12] GILL H S, LEMIEUX C L. Searching for extensible Korobov rules [J]. *Journal of Complexity*, 2007, 23(4/6): 603 – 613.

作者简介:

李建军 (1981–), 男, 讲师, 博士, 目前研究方向为物联网智能优化, E-mail: lij@shmtu.edu.cn;

黄有方 (1959–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为物流管理与工程, E-mail: yhuang@shmtu.edu.cn;

吴华锋 (1976–), 男, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为物联网关键技术, E-mail: hfwu@shmtu.edu.cn;

杨勇生 (1965–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为物流管理与工程, E-mail: ysyang@shmtu.edu.cn;

肖英杰 (1959–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为交通运输工程, E-mail: xiaoyj@shmtu.edu.cn.