

# 基于免疫蚁群优化的无线传感器网络节点调度研究

赵宇, 周文刚

(周口师范学院 计算机科学与技术学院, 河南 周口 466001)

**摘要:** 提出一种基于免疫优化蚁群算法(QIACO)的无线传感器网络节点调度策略方法; 针对传统的蚁群算法在寻优过程中存在的收敛速度慢、容易出现停滞现象等缺陷, 借鉴免疫系统的自我调节机制, 提出了一种新的疫苗选取策略及疫苗接种方法, 设计了基于免疫优化的蚁群算法, 达到提高算法的收敛速度和避免停滞现象的发生; 通过对 MESA 算法、蚁群算法、量子遗传算法和 QIACO 算法在负载均衡性分析、能耗均衡性分析和网络寿命分析进行仿真验证, 提出的算法在无线传感器网络节点调度策略中效果最好, 能有效地提高网络寿命。

**关键词:** 无线传感器网络; 节点调度; 能量有限; 蚁群算法; 人工免疫算法

## Research on Wireless Sensor Networks Node Scheduling Based on QIACO

Zhao Yu, Zhou Wengang

(College of Computer Science and Technology, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466001, China)

**Abstract:** Present an quick immune optimization ant colony algorithm (QIABC) for wireless sensor network node scheduling strategy. The traditional ant colony algorithm has defects such as slow convergence speed, easy to appear stagnation phenomenon in the optimization process. Based on the self-adjustment mechanism of the immune system, this paper proposes a new vaccine selection strategy and method of vaccination. The immune optimization ant colony algorithm can improve the defects of the ant colony algorithm. Compared the proposed QIABC algorithm with MESA algorithm, ant colony algorithm and the quantum genetic algorithm in load balance, energy balance analysis and network life through the simulator. According to the simulation results, the proposed algorithm obtains the best effect in wireless sensor network node scheduling strategy, which can improve the network life effectively.

**Keywords:** wireless sensor networks; node scheduling; limited energy; ant colony algorithm; artificial immune algorithm

### 0 引言

作为近年来的研究热点, 物联网的应用日趋广泛, 随着物联网的逐步发展, 如何保证物联网的可靠性成为制约物联网发展的一个障碍, 也成为众多专家学者的研究对象<sup>[1]</sup>。无线传感器网络是物联网的典型应用, 在无线传感器网络中, 无线节点的布置通常会高密度冗余, 一块区域往往有多个节点监测, 因此各节点收集到的数据高度相关且冗余, 处理时耗费大量计算资源, 此外, 大量的冗余信息还会导致信道阻塞、冲突, 浪费宽带资源。节点调度能有效地降低传感器网络的整体能量消耗, 同时也降低了传感器网络中节点的密度, 避免信道阻塞冲突, 提高了网络通信性能, 延长了网络寿命<sup>[2]</sup>。综上所述, 节点合理调度以延长网络寿命是传感器网络必须关注的一个研究问题。

目前已有不少节点调度算法提出, 如冯延蓬等<sup>[3]</sup>人提出目标跟踪准确度和节点能量消耗加权回报率的动态簇成员调度模型, 提高目标跟踪准确性, 降低节点能量消耗。Yan 等<sup>[4]</sup>提出节点调度算法主要针对同一目标区域内的不同位置, 节点结合自身覆盖范围内的每个点被自身周围节点所覆盖的状态来确定该点的工作时间周期, 提高网络寿命。Deng 等<sup>[5]</sup>提出了基于

簇的高密度传感器网络的调度算法 LDS 和分簇下基于能量平衡的节点调度算法。本文提出一种基于免疫优化蚁群算法(QIACO)的无线传感器网络节点调度策略方法, 对负载均衡性分析、能耗均衡性分析和网络寿命分析进行仿真验证, 可以看出此算法在无线传感器网络节点调度策略中效果最好, 能有效地提高网络寿命。

### 1 节点调度算法

无线传感器网络调度算法可以分为节点随机调度和节点协作调度两大类。具体表述如图 1 所示。

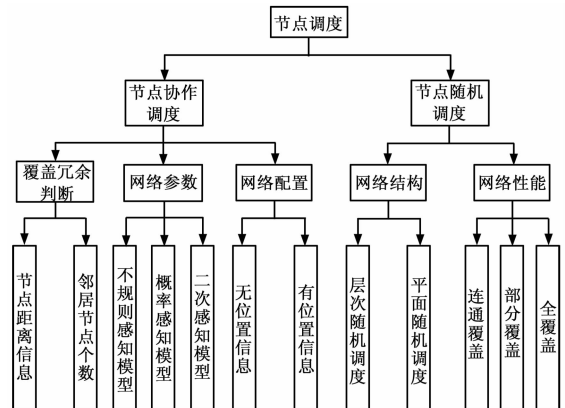


图 1 WSN 节点调度算法分类

如图 1 所示, 节点调度分为随机调度和协作调度两大类,

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-03-21。

基金项目: 河南省科技厅基础前沿项目(132300410276)。

作者简介: 赵宇(1973-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事无线传感器网络方向的研究。

节点随机调度是指随机地将网络监测区域内的节点分为某几个组, 随机调度算法只执行一次, 执行结束后按照一定的顺序对分组进行调度, 使得各分组内的节点有序地轮流工作。与之相对应的是节点协作调度, 协作调度算法在调度过程中会执行多次, 协作调度要求监测区域内的各节点与邻居节点之间要保持联系, 也就是要满足一定的连通性, 然后通过竞争方式从监测区域内的节点中选取若干节点, 让这些节点处于工作状态, 最终完成网络监测任务。

## 2 ACO 在节点调度算法中的应用

假设在初始时刻各路径上的信息素浓度值为  $E_0$ , 在蚁群运动过程中, 根据各节点与邻居节点的启发式信息和信息浓度, 概率公式如下所示。根据公式, 选择概率最大的邻居节点作为下一个转发节点, 随后在路径的起始节点上对该路径进行信息素的前向更新。

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{\gamma_j^\alpha(t) \cdot \tau_{ij}^\beta(t)}{\sum_{k \in N_{\text{step}}^i} \gamma_k^\alpha(t) \cdot \tau_{ik}^\beta(t)} & k \notin N_{\text{step}} \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

其中:  $N_{\text{step}}$  是前向蚂蚁的禁忌表, 表中记录的已经走过的节点, 这是为了防止监测数据包进入死循环,  $\gamma, \beta$  表示启发信息和信息素的所占权重,  $\gamma + \beta = 1$ 。

尽管蚁群算法具有众多优点, 如鲁棒性强、易于与其他方法结合、并行且分布式的计算机制等, 但该算法易出现停滞、搜索时间过长的缺点不容忽视。

## 3 免疫算法优化蚁群算法

由于蚁群算法具有收敛速度慢且易算法停滞, 因此本文提出一种基于免疫优化的蚁群算法 (QIACO) 对传统蚁群算法进行改进。免疫优化蚁群算法通过引入免疫算法中的细胞克隆、交叉、免疫选择和变异操作, 从而保持种群的多样性, 这样就能避免出现停滞, 同时利用疫苗接种的原理, 对变异后的抗体进行接种使得较优基因传给下一代, 这样就能提高传统蚁群算法的收敛速度。

免疫算法中有选择、交叉、变异和疫苗几种操作, 将他们引入到蚁群算法的迭代中就形成基于免疫的蚁群优化算法。算法具体步骤如下。

(1) 初始化: 初始化各个参数, 清空记忆池, 初始时刻各路径的信息量相等, 设  $a_i(t)$  表示在时刻  $t$  节点标号为  $i$  上的蚂蚁数目,  $\omega_{ij}(t)$  表示时刻  $t$  路径  $(i, j)$  上的信息量,  $m$  为问题的规模,  $n$  为蚁群中蚂蚁的总量, 他们之间的关系为  $n = \sum_{i=1}^m a_i(t)$ ,  $\omega_{ij}(t)$  初始值为常量;

(2) 初始时刻, 蚂蚁在各节点均匀分布;

(3) 利用信息素搜索公式, 每个蚂蚁选择自己的下一节点, 如果信息素残留过多会导致启发信息被淹没, 因此在每只蚂蚁完成一步或者遍历后, 对残留信息要进行处理。

(4) 进行相关判断, 若蚁群完成了一次循环则进行步骤 (5), 否则进行步骤 (3);

(5) 将蚁群算法形成的解作为初始抗体群, 并计算抗体与抗原之间的亲和力;

(6) 按亲和力对抗体进行排序, 选择前  $M$  个亲和力高抗体为记忆细胞放入记忆池;

(7) 在初始抗体群中进行基于免疫学的操作, 对抗体进行克隆、交叉、变异、疫苗接种, 对新的抗体进行亲和力计算, 根据亲和力对抗体群进行更新。

(8) 判断是否达到最大免疫算法迭代次数, 达到进行步骤 (9), 反之进行步骤 (7);

(9) 将经过免疫算法迭代后的最优解与记忆池中的最优解进行比较, 如果迭代后的新的最优解的亲和力比记忆池中的高, 那么久计算新的最优解与记忆池中其他优异解的相似度, 如果相似度大于一个给定阈值, 则舍弃该解, 因为它与记忆池中的解相似, 如果小于阈值, 就将该解加入到记忆池中, 同时更新记忆池, 将其中最差的那个舍弃。

(10) 信息素更新: 由于有新的抗体进入或离开记忆池, 因此利用下式对各路径上信息素进行更新。

(11) 判断是否满足终止条件, 满足就输出全局最优解, 否则进行步骤 (2)。

基于免疫的蚁群算法通过免疫选择出亲和力高浓度低的抗体进行克隆, 从而使得抗体浓度一定时, 浓度打的抗体传到下一代的概率降低, 然后再对克隆抗体进行交叉变异, 最后进行疫苗接种。根据上述免疫蚁群算法描述, 其基本流程和步骤如图 2 所示。

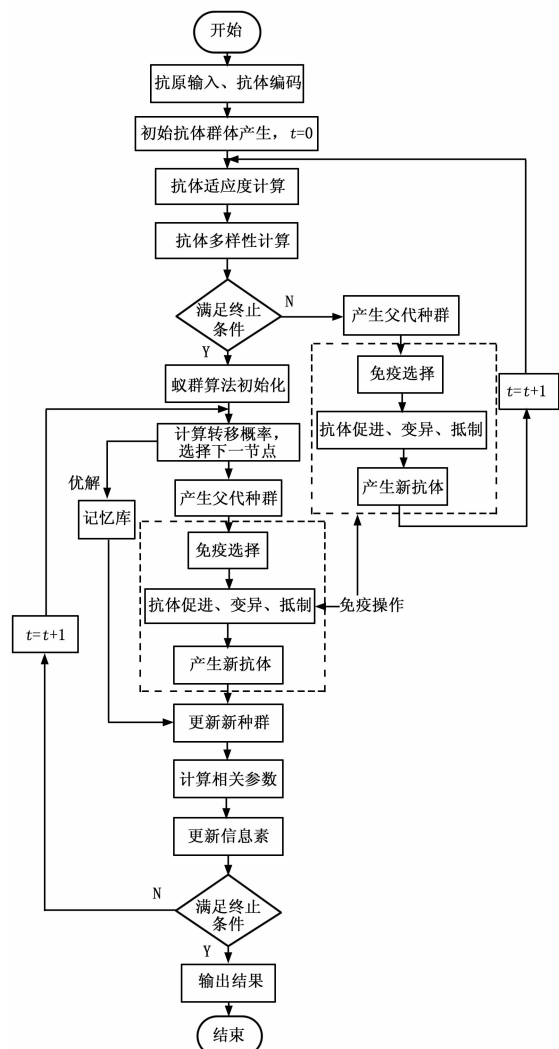


图 2 免疫蚁群算法结构流程图

### 4 仿真实验与结果分析

假设仿真环境在 100 m×100 m 的观测区域中随机抛洒 50 个传感器节点，同时所有节点都具有相同的传输范围。在整个网络中，汇聚节点有持续的能量供给，而其它的普通节点一次性能量供给，能量耗完就“死亡”了，它们初始能量设定为 50 J，全部节点通信半径范围都设置为 30 m，假定节点之间传输数据能量的消耗是 45 nJ/bit，而接收数据的能量消耗是 30 nJ/bit，数据的分组大小是 64 byte，信息素衰落参数取值 0.3，每个节点随机发送 10~50 个数据包，整个网络运行时间设定为 500 s，仿真环境采用的是 Matlab，版本是 R2008a，实验仿真中计算机配置为内存 2G 的奔腾处理器中。仿真过程中参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数配置表

参量	取值	意义说明
$\gamma$	0.5	启发式信息权重
$\beta$	0.5	信息素权重
$k_1$	10	前向更新信息素放大倍数
$k_2$	10	反向更新信息素放大倍数
$a$	0.6	跳数信息权重
$b$	0.3	邻居跳数均值权重
$c$	0.1	节点间距离比重的权重

文献中提出的 MESA (most energy saving approach) 算法、蚁群算法 (ACO)、量子遗传算法 (QGA) 和本文提出 QIACO 算法在负载均衡性分析、能耗均衡性分析和网络寿命分析进行比较。

(1) 负载均衡性分析：根据文献 [6] 中提到的关于节点定义的源生负载和转发负载，假定每个节点随机产生 5~100 个监听数据包，运用统计原理分析网络中的汇聚节点 Sink 节点集的数据转发负载情况，计算 MESA 算法、蚁群算法 (ACO)、量子遗传算法 (QGA) 和本文提出的算法这些转发负载的均值来表示汇聚节点转发负载的均衡能力。显示结果如图 3 所示。从图中我们可以看出，随着节点侦听到的数据包逐渐增加时，它的汇聚节点的转发负载的均值也呈现出线性增长，节点集的标准差一直处在 1.1%~1.9% 均值之间。从数据可以说明本文提出的基于免疫蚁群优化算法的无线传感器网络调度负载均衡性较好，而且节点离汇聚节点越近，均衡性越好。

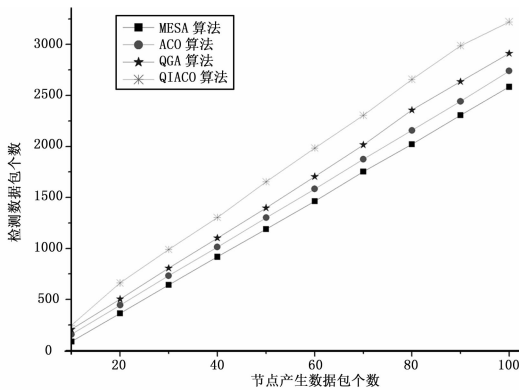


图 3 几种算法的数据转发负载均值对比

(2) 能耗均衡性分析：在无线传感器网络中，能量均衡有效是一个非常重要的因素。假定每个节点随机产生 5~100 个监听数据包，统计分析节点的能量消耗情况，节点能耗的均衡性如图 4 所示。从图中可以看出，随着节点产生监听数据包的增加，节点的能量消耗呈现线性增长趋势。但在这 4 种算法中，MESA 算法能量消耗最大、ACO 算法次之、QGA 算法第三、能量消耗最小的是本文提出的 QIACO 算法。本文提出 QIACO 算法能量消耗随着发送数据包的增加能量消耗呈线性关系，消耗较小、分布均匀。在同样发送 80 个数据包情况下，本文提出的算法比 MESA 算法节省能量 66%，比 ACO 算法节省 53%，比 QGA 算法节省了 42%。

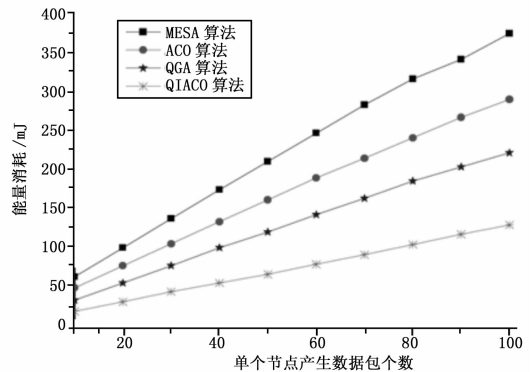


图 4 几种算法的节点的能耗均值对比

(3) 网络寿命分析：在无线传感器网络的网络寿命分析实验中，为了正确有效地衡量网络的寿命、我们不定时的随机发送监听数据包个数，同时以固定的时间间隔进行采集和发送，每次间隔时间为 10 s，逐次增加到 8 次 80 s，记录网络中第一个节点死亡时间，得出的仿真结果如图 5 所示。从图中可以看出，随着时间间隔的增大，网络中第一个节点死亡的时间也在延长。与 MESA 算法、ACO 算法、QGA 算法 4 种算法对比，本文提出的算法第一个节点的死亡时间比 ACO 算法延长了 28%，比 QGA 算法延长了 24%。可以看出本文提出的算法能够有效地延长网络寿命。

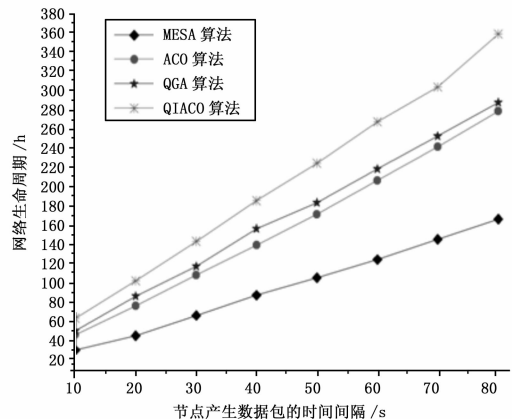


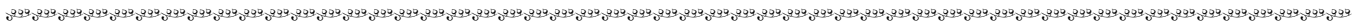
图 5 几种算法不同时间间隔下的网络寿命对比

同样地采用上面的 8 种时间间隔，我们分析负载节点在单位时间里转发监听数据包的个数，以此来衡量无线传感器网络 (下转第 2339 页)

参考文献:

[1] 许 建, 杨 庚, 陈正宇, 等. 基于二次独立集的数据融合调度算法 [J]. 通信学报, 2014, 12 (1): 1306-1313.  
 [2] 杨 庚, 李 森, 陈正宇, 等. 传感器网络中面向隐私保护的高精确度数据融合算法 [J]. 计算机学报, 2013, 36 (1): 189-199.  
 [3] 乐 俊, 张维明, 肖卫东, 等. 无线传感器网络中一种基于非均匀划分的分簇数据融合算法 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48 (2): 247-254.  
 [4] 林 蔚, 尹 娟. 无线传感器网络含有缺失数据的数据融合研究 [J]. 计算机应用研究, 2012, 28 (4): 631-636.  
 [5] Luo C, Wu F, Sun J, et al. Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking [C], ACM, 2009: 145-156.  
 [6] Luo J, Xiang L, Rosenberg C. Does compressed sensing improve the throughput of wireless sensor networks? [A]. Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on [C], IEEE, 2010: 1-6.  
 [7] Xiang L, Luo J, Vasilakos A. Compressed data aggregation for energy efficient wireless sensor networks [A]. Sensor, Mesh and Ad

Hoc Communications and Networks (SECON), 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on [C], IEEE, 2011: 46-54.  
 [8] Gilbert A C, Strauss M J, Tropp J A, et al. One sketch for all: fast algorithms for compressed sensing [A]. Proceedings of the thirty-ninth annual ACM symposium on Theory of computing [C], ACM, 2007: 237-246.  
 [9] Park J, Jung B C, Kim J M, et al. Sparse Signal Recovery with Parallel Orthogonal Matching Pursuit and Its Performances [J]. Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 2013, 17 (8): 1784-1789.  
 [10] Zhang W, Huang B, Zhou T. An improvement on StOMP for sparse solution of linear underdetermined problems [A]. Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese [C], IEEE, 2013: 1951-1956.  
 [11] Jeong Y S, Han Y H, Park J J, et al. MSNS: mobile sensor network simulator for area coverage and obstacle avoidance based on GML [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, (1): 1-15.



(上接第 2330 页)

的拥塞率, 仿真结果如图 6 所示。从图中看出, 无线传感器网络节点在单位时间内的转发数据包个数随着时间间隔增大而下降, 发送的数据包个数越少, 说明它的通信效果越好, 拥塞也越低。本文提出的算法与 MESA 算法、ACO 算法、QGA 算法四种算法对比, 它的网络拥塞率最低, 与 MESA 算法相比, 网络的拥塞率下降了 33%。

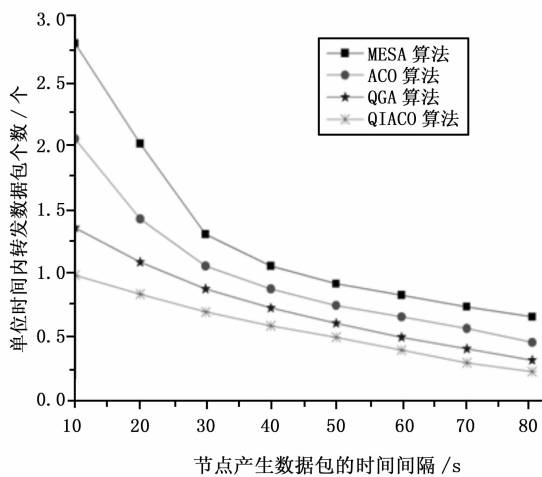


图 6 几种算法单位时间内转发数据包个数

通过在负载均衡性分析、能耗均衡性分析和网络寿命分析 3 个方面进行比较, 我们可以看出这四种算法在节点调度优化中本文提出的 QIACO 算法最好、量子遗传算法 (QGA) 次之, 蚁群算法 (ACO) 和 MESA 算法效果差些, 通过这三方面比较, 本文提出的 QIACO 算法在无线传感器网络节点调度策略中最佳。

5 结束语

提出基于免疫优化蚁群算法的无线传感器网络节点调度策略方法, 利用免疫中的疫苗选取方法、接种策略和抗体自我调节机制, 选出亲和度高的以及浓度较低的抗体进行克隆复制增殖, 这样减少了算法陷入局部搜索的可能性。之后对克隆出来的抗体进行交叉变异操作, 这样便能够提高蚂蚁种群的多样性、避免蚁群算法中易出现的停滞现象, 之后通过记忆池中记忆细胞对抗体疫苗进行选取, 这样就得到较优解基因, 缩短了蚁群算法的收敛时间。通过对四种算法在负载均衡性分析、能耗均衡性分析和网络寿命分析进行仿真验证, 本文提出的算法在无线传感器网络节点调度策略中效果最好, 减少网络能量消耗, 有效地提高网络寿命。

参考文献:

[1] Han K, Liu Y, Luo J. Duty-Cycle-Aware Minimum-Energy Multicasting in Wireless Sensor Networks [J]. Networking, IEEE/ACM Transactions, 2013, 21 (3): 910-923.  
 [2] Nasser N, Karim L, Taleb T. Dynamic Multilevel Priority Packet Scheduling Scheme for Wireless Sensor Network [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions, 2013, 12 (4): 1448-1459.  
 [3] 许婧祺, 王 敏. 一种基于网格的无线传感器网络动态分簇路由协议 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (6): 1729-1732.  
 [4] Yan T, He T, Stankovic J A. Differentiated surveillance for sensor networks [A]. Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems [C], Los Angeles, California, USA, ACM, 2003: 51-62.  
 [5] Deng J, Han Y, Heinzelman W, et al. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10 (6): 825-835.  
 [6] 朱红松, 孙利民, 徐勇军. 基于精细梯度的无线传感器网络汇聚机制及分析 [J]. 软件学报, 2007, 18 (5): 1138-1151.