

文章编号: 1001-0920(2012)12-1844-05

基于感染球策略的传感器网络移动代理路由算法

刘 逵, 刘三阳, 冯海林

(西安电子科技大学 理学院, 西安 710071)

摘要: 基于感染球策略提出一种移动代理能量有效路由算法(EEMAA), 该算法利用感染球来缩小移动代理寻找及修复最优路径的范围, 进而降低网络的寻路能耗; 同时, 还提出一种最优路径局部修复策略, 该策略能在保留原有最优路径大部分信息的基础上, 对最优路径作出局部修复. 仿真实验表明, 该算法在寻找最优路径时能避开剩余能量少的节点, 使网络中各节点的能量呈整体性衰落, 且在失效节点附近能快速修复最优路径.

关键词: 移动代理; 蚁群优化; 感染球; 最优路径修复

中图分类号: TN939

文献标志码: A

Energy efficient mobile agent routing algorithm base on the infection sphere in wireless sensor networks

LIU Kui, LIU San-yang, FENG Hai-lin

(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China. Correspondent: LIU Kui, E-mail: LiuKui_1980@163.com)

Abstract: An energy efficient mobile agent routing algorithm(EEMAA) based on the infection sphere is presented. This algorithm uses the infection sphere to reduce the number of nodes by researching and restoring the energy efficient route from the processing node to the target nodes, which can reduce energy consumer of the networks. A new restore rule for the failure optimal route is presented. The optimal route can restore quickly in the local of fail nodes and most of the information of the original optimal route can be reserved by using this rule. Simulation results show that the proposed approach can keep away from the nodes with less residual energy and can make the energy of each node on the optimal route overall decline. At the same time, this algorithm can restore the optimal route quickly in the local of fail nodes.

Key words: mobile agent; ant colony optimization; infection sphere; optimal route restoring

1 引言

传感器节点在对监测对象的监控^[1]过程中通常会产生大量的实时数据流, 这些数据流在网络中传输时会极大地占用有限的通信带宽, 因此, 如何适时的融合传感数据以减少网络的通信量是传感器网络的研究热点. 目前, 无线传感器网络数据融合算法主要是基于以处理节点(PN)为中心的 Client/ Server (C/S)模型提出的. 对于传感器网络而言, C/S模型存在诸多问题: 首先是能耗大, PN节点在处理数据前无法判定待传数据的有效性, 从而导致了大量冗余数据传输, 造成带宽资源的浪费; 其次是网络负载不均衡, 当多个节点同时向PN节点进行数据传输或服务请求时, 易造成网络资源的恶性竞争及网络负载不均衡等问题. 移动代理^[2-4](MA)计算模式可克服C/S模

式的诸多不足, 已在信息获取等领域得到成功应用. MA与以数据为中心的分发模式相结合, 具有如下优点: 1) 可有效降低传输带宽需求, 缩短通信时延; 2) 可针对环境变化作出适当反应, 根据网络负载动态决定迁移策略和数据处理方法, 从而使网络达到负载均衡的状态; 3) 完成对有效节点的发现及路由的建立, 从而有利于网间数据融合. 在无线传感器网络中, PN节点作为网络查询的控制者和感知数据的接收者, 往往是MA的创建者和回收者, 各传感器节点对目标的感知数据不再直接汇聚到PN节点进行处理, 而是通过MA来完成对数据的采集和处理, 最后再反馈给PN节点.

文献[5]基于贪婪搜索策略给出了全局最近邻优先(GCF)及本地最近邻优先(LCF)的MA启发式算

收稿日期: 2011-05-05; 修回日期: 2011-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874085, 60974082).

作者简介: 刘逵(1980—), 男, 博士生, 从事无线传感器网络算法及其优化的研究; 刘三阳(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事现代最优化理论与方法、无线传感器网络算法及其优化等研究.

法. 该算法在选择路由时仅考虑节点之间的距离, 忽略了其他因素的影响, 因而在小规模网络中能够得到较好结果; 但在大规模网络中, 该算法的性能急剧下降. 文献 [6-8] 在遗传算法的基础上, 分别提出了移动代理路由算法, 这些算法均需要知道网络的全局信息, 因此在大规模网络中, 该类算法的实用性较差; 同时该类算法的自适应能力弱, 无法实时完成网络突变时的信息收集. 另外, 这些算法试图找到一条能耗最少的路径, 而没有考虑各节点的剩余能量情况, 这样可能会导致某些节点被过多使用而引发其过早死亡. 文献 [9] 提出的基于蚁群优化^[10]策略的路由算法 (ARA) 可以找到一条最短路径, 但最短路径并非能耗最小的路径, 同时该算法也没有考虑节点的剩余能量情况. 文献 [11] 从路由总能耗及各节点剩余能量的角度出发, 提出了一种基于蚁群优化策略的移动代理能量有效路由算法 (ADEEMA), 该算法没有有效利用网络的拓扑结构及通信能耗模式来缩小参与寻找最优路径的节点范围, 从而加大了网络的寻路能耗.

针对上述移动代理路由算法存在的问题, 本文提出了一种基于感染球^[12]策略的移动代理能量有效路由算法 (EEMAA). 该算法首先构造了相应节点之间的最大感染球, 并利用最大感染球来缩小参与寻找最优路径的节点范围, 进而降低了网络的通信能耗及延迟, 且在网络存在失效节点的情况下能快速修复最优路径.

2 基于感染球策略的 EEMAA 算法

2.1 通信模型及 MA 的属性

本文采用文献 [11] 的通信能量消耗模型来分析无线传感器节点之间的通信能耗, 同时假设网络中所有节点都是同构且能量有限的, 并且每个节点都有唯一的标识 (id). 算法中的 MA 有以下属性: 1) 处理并存储 PN 节点、目标节点和途经各节点的信息; 2) 存储与移动代理所处位置相对应的最大感染球信息; 3) 具有蚂蚁寻路特性的算法代码; 4) 完成数据融合的算法代码. MA 在网络中搜寻 PN 节点到各目标节点的最优路径, 到达目标节点后进行数据融合, 当遍历了所有的目标节点后再返回到 PN 节点.

2.2 最大感染球理论基础

假设传感器网络图为 $G(v, E)$, 图中所有边的权为该边两端点间距离的平方. 设父节点为 v 、子节点为 u , 两节点间传输单位比特的信息所消耗能量为 En^* . 从父节点 v 出发途经节点 w 到子节点 u 的路由记为 vwu , 如果在路由 vwu 上传输单位比特信息所消耗的能量小于 En^* , 则有 $d_{vw}^2 + d_{wu}^2 < (d_{vu})^2$, 由余弦定理可得 $\angle vwu$ 为钝角, 所以节点 w 在以 vu 为

直径的球内, 称此球为节点 v 与节点 u 的最小感染球. 如果在路由 vwu 上传输单位比特信息所消耗的能量等于 En^* , 则有 $d_{vw}^2 + d_{wu}^2 = (d_{vu})^2$, 由勾股定理可得 $\angle vwu$ 为直角, 所以节点 w 在最小感染球的球面上. 因为在路由 vwu 上传输单位比特信息所消耗的能量小于等于 En^* , 所以称节点 w 为感染捷径节点. 在最小感染球的大圆中, 直径 vu 将其平分两个半圆, 从节点 v 出发沿着任一半圆上的感染捷径节点到节点 u 的路由有如下性质.

定理 1 从节点 v 出发, 沿着任意半圆周上的感染捷径节点到节点 u 的路由设为 $vw_1w_2 \cdots w_ku$, 则在此路由上传输单位信息所消耗的总能量小于 En^* .

证明 因为节点 w_1, w_2, \cdots, w_k 均在半圆的圆周上, 所以 $\triangle vw_1w_2, \triangle vw_2w_3, \cdots, \triangle vw_{k-1}w_k$ 均为钝角三角形. 因 $\triangle vw_1w_2$ 为钝角三角形, 由余弦定理可得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 < d_{v,w_2}^2, \quad (1)$$

故 $\triangle vw_2w_3$ 也为钝角三角形. 同理可得 $d_{v,w_2}^2 + d_{w_2,w_3}^2 < d_{v,w_3}^2$, 将其代入式 (1) 得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 + d_{w_2,w_3}^2 < d_{v,w_3}^2, \quad (2)$$

递推得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 + \cdots + d_{w_{k-1},w_k}^2 < d_{v,w_k}^2. \quad (3)$$

因为 $\angle vw_ku$ 为半圆对应的圆周角, 所以 $\triangle vw_ku$ 为直角三角形. 由勾股定理可得 $d_{v,w_k}^2 + d_{w_k,u}^2 = d_{vu}^2$, 将其代入式 (3) 得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 + \cdots + d_{w_k,u}^2 < d_{v,w_3}^2, \quad (4)$$

所以在该路由上传输单位比特信息所消耗的总能量不大于 En^* . \square

以最小感染球 O_1 上的感染捷径节点对 C_1D_1 为直径做最小感染球 O_2 , 设球 O_2 上距球 O_1 的球心 o_1 最远的点为 E_1 , H_1 为 o_1E_1 间的距离, 当弦 $C_1D_1 = \sqrt{2}r_1$ 时, H_1 达到最大值 $\sqrt{2}r_1$, 此时球 O_2 将球 O_1 的球径外扩的最长, 外扩的距离为 $d_1 = (\sqrt{2} - 1)r_1$, 如图 1 所示.

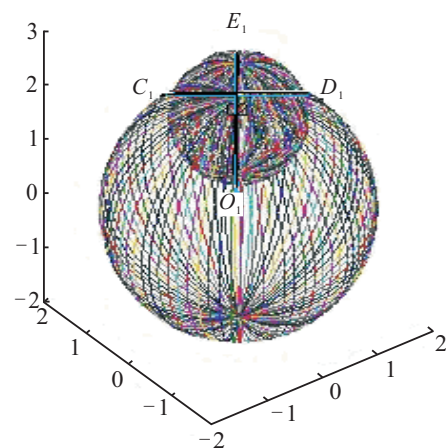


图 1 最小感染球半径最大外扩图

同理, 以感染球 O_2 上感染捷径节点对 C_2D_2 为直径做最小感染球 O_3 , 当弦 $C_2D_2 = \sqrt{2}r_2$ 时, H_2 达到最大值 $\sqrt{2}r_2$, 此时 O_3 将 O_2 的球径外扩的长度为 $d_2 = (\sqrt{2} - 1)r_2$. 其中 $r_2 = \sqrt{2}/2 \times r_1$, 依次下去, 当弦 C_1D_1 , 弦 C_2D_2, \dots , 弦 C_nD_n 相互平行时, 则外扩的总长度达到最大值 $H = d_1 + d_2 + \dots + d_n + \dots = \sqrt{2}r_1$, 从而得如下定理.

定理 2 如果在由节点 v 途经一些中间节点到节点 u 的路由上传输单位比特信息, 所消耗的能量不大于 En^* , 则途经的这些节点一定是在以节点 v 和 u 之间连线的中点 o_1 为球心, 以节点 v 和 u 之间距离的 $(\sqrt{2} + 1)$ 倍为直径的最大感染球内.

记最大感染球内节点组成的集合为 V^* , 最大感染球内的边组成的集合为 E^* , 则图 $G^* = (V^*, E^*)$ 是图 $G = (V, E)$ 的子图. 定理 2 保证了节点 v 和节点 u 在图 G^* 中的最优路集与其在图 G 中的最优路集相同, 所以可以在子图 G^* 上寻找节点 v 到节点 u 之间的最优路. 由于降低了蚁群的搜索范围, 进而降低了网络的能耗和通信延迟; 同时对应不同的路径衰退模式 (即以边长的 $q(2 < q \leq 4)$ 次幂为权) 找到的最优路径图 $G^* = (V^*, E^*)$, 是在以 $q = 2$ 时找到的最优路径图 G 的子图. 从而可知在图 G^* 中, 节点 v 到节点 u 的最优路径 $vw_1w_2 \dots w_ku$ 一定属于两个节点在图 G 中的最大感染球内.

定理 3 对应不同路径衰退模式下得到的最优路径图 G^* 是对应于 $q = 2$ 时路径衰退模式下得到的最优路径图 G 的子图.

证明 要证最优路径图 G^* 是最优路径图 G 的子图, 即证图 G^* 中所有的边均在图 G 中. 假设图 G^* 中的边 (v, u) 不在图 G 中, 记在图 G 上节点 v 到节点 u 的最短路由为 $(v = v_{m0}, v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{m(n-1)}, v_{mn} = u)$, 从而有如下性质:

$$\begin{aligned} |v - u|^q &= (|v - u|^2)^{q/2} \geq \\ &\sum_{r=1}^n |v_{mr} - v_{m(r-1)}|^2)^{q/2} \geq \\ &\sum_{r=1}^n |v_{mr} - v_{m(r-1)}|^q, \end{aligned} \quad (5)$$

这与假设相矛盾, 所以边 (v, u) 不能加入, 即最优路径图 G^* 是最优路径图 G 的子图. \square

考虑到网络中各节点能量的负载均衡性, 防止过度使用某些节点而导致这些节点过早坏死, 本文提出一种最优路径评定标准, 即

$$d = \sqrt{\lambda_1 \sigma^2 + \left(\frac{\lambda_2 \times E_1}{\lambda_3 \times (E_2 + E_3)} \right)^2}. \quad (6)$$

d 越小, 则对应的路径越优. 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为非负

偏向参数; σ 为这条路径上各节点剩余能量的方差; E_1 是这条路径上传输一条信息时总的能量消耗; E_2 是这条路径上所有节点的平均剩余能量; E_3 是这条路径上所有节点中剩余能量最小的那个节点的剩余能量. 根据实际需求, 可以通过对非负偏向参数的调控来突出对路由能量总消耗、路径上所有节点的平均剩余能量、所有节点中剩余能量最小值及各节点的剩余能量均衡性的偏向程度.

2.3 EEMAA 算法

对网络进行初始化, 每个节点均要建立各自的邻居列表. 邻居列表中存储以下信息: 1) 邻居节点的 id 号; 2) 邻居节点的位置信息^[13]; 3) 该节点与邻居节点之间信息素的浓度. 基于最大感染球策略构造的 EEMAA 算法如下:

Step 1: 当 PN 节点获得目标节点集 $u = \{u_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 的请求时, PN 节点利用各目标节点的位置信息, 求出距 PN 节点最近的目标节点 u_i ; 然后计算 PN 节点与目标节点 u_i 的最大感染球, 并将最大感染球信息记录在 MA 中.

Step 2: 位于节点 v_i 的 MA 首先对节点 v_i 的邻居列表进行更新, 更新规则为: 1) 利用 MA 中最大感染球信息和 v_i 邻居列表中各节点的位置信息判断邻居列表中各节点是否在最大感染球内, 将不在最大感染球内的节点从邻居列表中移除; 2) 将 v_i 的邻居列表中 MA 访问过的节点移除; 3) 将 v_i 的邻居列表中比 v_i 距目标节点 u_i 更远的节点移除; 4) 如果目标节点 u_i 在 v_i 的邻居列表中, 则将目标节点 u_i 以外的所有节点移除.

Step 3: MA 根据伪随机比例规则^[11]在节点 v_i 邻居列表中选择节点 v_j 作为下一跳访问节点, 到达节点 v_j 后首先更新 MA 携带的信息, 然后按公式 $h_{ij} \leftarrow (1 - \xi)h_{ij} + \xi h_0$ 更新局部信息素, 其中参数 ξ 满足 $0 < \xi < 1$, 参数 h_0 是信息素的初始值. 如果节点 v_j 是 PN 节点, 则转 Step 6; 如果节点 v_j 是目标节点 u_i , 则在该节点进行数据融合, 并从 MA 的目标节点表 u 中移除 u_i , 转 Step 4; 否则, 转 Step 2.

Step 4: 如果 MA 的目标节点表示 u 非空, 则利用目标节点的位置信息求距目标节点 u_i 最近的目标节点 u_j , 利用目标节点 u_i 与目标节点 u_j 的位置信息求两者的最大感染球, 同时更新 MA 中最大感染球信息, 转 Step 2; 否则, 转 Step 5.

Step 5: 将 PN 节点的位置信息放在目标节点表 u 中, 以当前 MA 所在的目标节点 u_i 为起始节点, 以 PN 为目标节点, 求两节点的最大感染球, 同时更新 MA 中最大感染球的信息, 转 Step 2.

Step 6: 按式 (6) 求最优路径度, 然后再次派出新的 MA 重复上述步骤 m 次, 记录其中路径度最小的路径, 并按规则 $h_{ij} \leftarrow (1-\rho)h_{ij} + \rho\Delta h_{ij}^{bs}, \forall (i, j) \in T^{bs}$ 进行全局信息素更新. 其中: ρ 是信息素的蒸发率, $\Delta h_{ij}^{bs} = 1/C^{bs}$ 是信息素的增量, C^{bs} 是最优路径的长度, T^{bs} 是最优路上的各边组成的集合. 重复 n 次 Step 1 ~ Step 6, 然后在 PN 所记录的 n 条路径中选择路径度最小的路径作为遍历所有目标节点, 再返回 PN 的最优路径.

3 算法扩展性及抗毁性分析

本文提出的算法是一种分布式算法, 移动代理 MA 根据每个节点存储的信息来选择下一跳节点, 同时由于采用了最大感染球策略, 进而减小了参与寻找及修复最优路径的节点数目. 定理 2 保证了本文算法的能耗扩展因子为 1. 当最优路径上某个节点失效后, 则做相对于失效节点的父节点和失效节点的子节点的最小感染球, 然后在这个最小感染球上运用本算法作局部修复, 从而可在保留原有最优路径大部分信息的基础上, 在失效节点附近寻找新的感染捷径节点来修复最优路径.

图 2 所示为网络中最优路径中的某一段, 在这段路径上, 节点 c 因故失效, 则做相对于失效节点的父节点 b 和失效节点的子节点 e 的最小感染球; 然后在此最小感染球中运用本文提出的 EEMAA 算法找出代替失效节点 c 的感染捷径节点, 对这一段最优路径进行局部修复. 因为节点 d 在这个最小感染球中, 且节点 b 和节点 e 均是节点 d 的邻居节点, 所以可用路由 bde 来代替故障路由 bce , 从而实现在保留原有路径大部分信息的前提下, 在局部对最优路径进行修复.

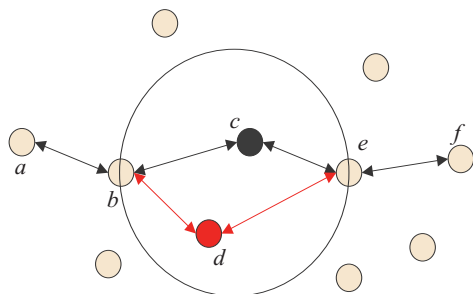


图 2 节点 c 失效时的局部路由修复

4 仿真实验

将本文提出的 EEMAA 算法与 LCF 算法、ARA 算法及 ADEEMA 算法进行仿真比较. 假定 MA 代码长度为 50 Byte, 其携带的数据量为 1 600 bit. 将 500 个传感器节点随机地部署在 200×200 m 的正方形区域中, 假设每个节点的初始能量均为 1 J, PN 节点位于正方形区域的左下角 (0, 0) 位置, 从上述节点中随机选取一个目标节点, 并使目标节点不断远离 PN 节点.

图 3 给出了不同距离下网络总能耗之间的关系. 由图 3 可知, 当 PN 节点到目标节点的距离相同时, 本算法的网络总能耗最低. 尤其在 PN 节点距目标节点较近时, 本文算法比 ADEEMA 算法、LCF 算法及 ARA 算法的网络总能耗要小很多, 这主要是因为当 PN 节点和目标节点相距越近时, 利用最大感染球策略去掉的参与寻找最优路径的节点数目越多.

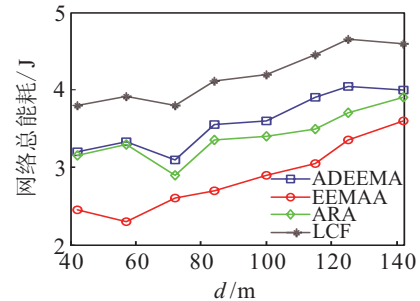


图 3 不同距离下网络总能耗之间的关系

图 4 给出了节点最小剩余能量之间的关系. 由图 4 可得, 当 PN 节点到目标节点的距离相同时, 本文算法找到的最优路径上剩余能量最少的节点具有较高的剩余能量, 这是因为本文算法能在寻找最优路时避开剩余能量少的节点, 同时兼顾路由总能耗小和路由上各节点剩余能量均衡的内在要求.

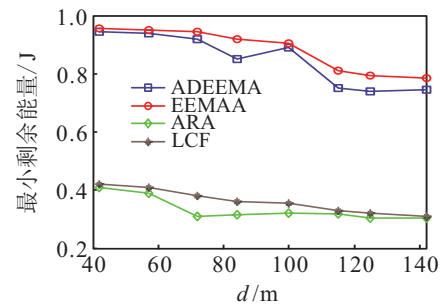


图 4 节点最小剩余能量之间的关系

从上述节点中随机选取 6 个目标节点, 并固定它们的位置, 然后不断加大上述区域内节点数目. 求 4 种算法各自搜索到的遍历目标节点的最优路径, 并比较最优路径上的能量总消耗. 6 个目标节点的位置分别是 (40, 30), (42, 31), (39, 29), (113, 92), (117, 88), (115, 90). 图 5 是随着节点数目的增加, 各算法对应的网络总能耗情况. 本文提出的算法利用感染球策略降低了蚂蚁搜索的范围, 从而能够快速有效地找到从 PN 节点出发遍历目标节点的最优路径. ADEEMA 算法则是在全网络中寻找从 PN 节点出发遍历目标节点的最优路径, 扩大了寻路范围, 所以该算法寻路代价相对较高. 而 LCF 的寻路机制是在全网络上基于贪婪策略选择路由, 因此其寻找到的路径相对能耗最高. ARA 算法则是基于最短路径角度提出的, 所以该算法的网络总能耗较低.

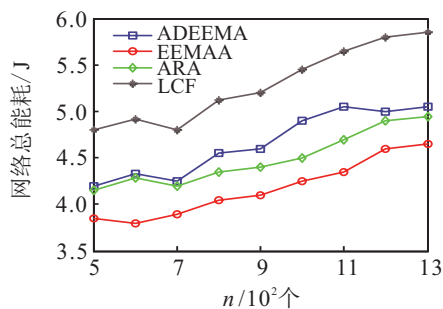


图5 不同密度下网络总能耗之间的关系

LCF算法及ARA算法找到的路径上节点的最小剩余能量最小,这些剩余能量小的节点将会很快死亡,使得整个网络出现路由空洞.本文由于给出了一种新的兼顾路由总能耗小、节点最小剩余能量大和路由上各节点能量均衡的评定标准,从而保证了最优路上的节点能量呈整体性衰落,避免节点过早死亡.

5 结论

EEMAA算法利用最大感染球策略减少了参与寻找及修复最优路径的节点数目,从而达到降低系统能耗及通信延迟的目标.该算法被赋予移动代理蚂蚁的特性,在最大感染球上通过蚁群优化机制来寻找PN节点与目标节点之间的最优路径.为了达到在最优路径上出现失效节点后,网络能快速修复最优路径的目标,本文还制定了最小感染球局部修复策略,从而可以在保留原有最优路径大部分信息的基础上,对最优路径作出快速修复.

参考文献(References)

- [1] 蒋杰,方力,张鹤颖.无线传感器网络最小连通覆盖集问题求解算法[J].软件学报,2006,17(2):175-184.
(Jiang J, Fang L, Zhang H Y. An algorithm for minimal connected cover set problem[J]. J of Software, 2006, 17(2): 175-184.)
- [2] Akkaya K, Younis M. A survey of routing protocols in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325-349.
- [3] 李志宇,史浩山.一种基于网格和移动代理的无线传感器网络数据融合算法[J].传感技术学报,2008,21(7):1232-1236.
(Li Z Y, Shi H S. A data aggregation algorithm based on

grid and mobile agent in WSN[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2008, 21(7): 1232-1236.)

- [4] Zhou S W, Lin Y P. A study of trajectory-based mobile agent dynamic routes algorithm for data fusion in wireless sensor networks[J]. Chinese J of Computers, 2007, 30(6): 894-904.
- [5] Qi H, Iyengar S S, Chakrabarty K. Multiresolution data integration using mobile agents in distributed sensor networks[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2001,31(3): 383-391.
- [6] Li Z Y, Shi H S. A data aggregation algorithm based on grid and mobile agent in WSN[J]. Chinese J of Sensor and Actuators, 2008, 21(7): 624-628.
- [7] Wang S, Yan Y J. The mobile agent-based data fusion in sensor network[J]. Chinese J of Sensor and Actuators, 2006, 19(3): 367-374.
- [8] Wu Q, Rao N S V, Barhen J, et al. On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(6): 740-753.
- [9] 梁华为,陈万明,李帅.一种无线传感器网络蚁群优化路由算法[J].传感技术学报,2007,20(11):2450-2455.
(Liang H W, Chen W M, Li S. ACO-based routing algorithm for wireless sensor networks[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2007, 20(11): 2450-2455.)
- [10] Marco Dorigo, Thomas Stutzle. Ant colony optimization[M]. Cambridge: MIT Press, 2006.
- [11] 郑巍,刘三阳,寇晓丽.动态传感器网络移动代理路由算法[J].控制与决策,2010,25(7):1035-1039.
(Zheng W, Liu S Y, Kou X L. Dynamic mobile agent routing algorithm in sensor network[J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 1035-1039.)
- [12] 揭盛华.新发感染病及其临床对策[M].北京:人民卫生出版社,2008.
(Jie S H. A new infection disease and its clinical countermeasure[M]. Beijing: People's Medical Publishing House Press, 2008.)
- [13] Hekmat R, Van Mieghem P. Connectivity in wireless ad-hoc networks with a log-normal radio model[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(1): 351-360.