

## 基于多移动节点和遗传算法的传感器网络覆盖修复策略

叶苗<sup>1,2,3</sup>, 王宇平<sup>1</sup>, 魏静萱<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071; 2. 桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541004;  
3. 桂林电子科技大学 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西, 桂林 541004)

**摘要:** 设计了一种基于多移动节点和路径规划的传感器网络覆盖的修复策略。该机制通过对节点消耗能量的分析, 采用遗传算法计算出移动节点的合理移动路径, 可以最大可能地对普通节点进行及时修复, 最大程度地避免由于传感器节点死亡带来的覆盖空洞。用随机过程在数学上证明了算法的收敛性。通过仿真实验的测试证实, 所设计传感器节点修复机制和对移动节点的路径规划的求解算法能有效地预防节点死亡带来的覆盖空洞问题。

**关键词:** 无线传感器网络; 覆盖空洞; 修复; 生存时间; 多移动节点

中图分类号: TP393; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)12-0045-08

## Coverage repair strategies for wireless sensor networks based on multi-mobile nodes and genetic algorithm

YE Miao<sup>1,2,3</sup>, WANG Yu-ping<sup>1</sup>, WEI Jing-xuan<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China;  
2. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;  
3. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** A repairing strategy for the coverage of the sensor network based on multi-mobile nodes and path planning is designed. Such mechanism can ultimately repair common nodes in a timely fashion via energy consumption analysis of the nodes by using genetic algorithm to calculate the reasonable moving path of the mobile nodes, which can avoid coverage holes caused by the death of sensor nodes at its best. The global convergence the designed algorithm is proved by stochastic process. Simulation experiments have proven the effectiveness of the designed mechanism and the relevant solution algorithm.

**Key words:** wireless sensor network; coverage hole; repair; lifetime; multi-mobile node

### 1 引言

无线传感器网络由分布在诸如医院、森林、高速公路等实际物理环境中能自动感知环境获取感知数据的大量感知节点组成, 这些节点之间通过无线方式相互通信, 体积小, 由电池供电, 能量有限。由于不同节点的功能不同, 或者感知任务不同, 部

分节点会因为故障或者能量耗尽而过早死亡, 由此产生感知区域的覆盖空洞<sup>[1]</sup>, 从而影响系统对监控区域的监控质量, 影响整个网络的连通性能。

目前已经设计出一些方法来延长网络生存时间。比如适当提高覆盖区域中静态布置节点的冗余度<sup>[2]</sup>, 采用合理的调度策略切换节点休眠、唤醒和激活等工作状态, 可以很好地延长无线传感器网络

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272119, 61203372, 61472297); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(K5051303009); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118370); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金资助项目(YQ14204); 广西教育厅基金资助项目(YB2014148)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation (61272119, 61203372, 61472297); Fundamental Research Funds for the Central Universities (K5051303009); Guangxi Natural Science Foundation of China (2014GXNSFAA118370); Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments (YQ14204); The General Programs of the Scientific Research Project of Guangxi Educational Committee (YB2014148)

的工作时间，缺点是冗余度的增加会相应地带来成本的增加；文献[3]设计了在无线传感器网络工作一段时间后进行第二轮节点抛撒来延长网络生存时间的方法，缺点是再次抛洒的节点会增加网络的布置成本；针对位置可以改变的动态传感器网络，文献[4~6]提出基于虚拟力、Voronoi 图的填补覆盖空洞的方法，由于移动节点可以带来的灵活性，是目前比较新的方法。

实际网络中，考虑到成本和环境因素，大部分的节点一旦布置好以后位置不方便再改变。随着移动机器人技术的发展和成熟，可以让少部分节点具备移动能力<sup>[7]</sup>。如果这些移动节点能对固定位置的静态节点在死亡之前进行能量补充或者进行节点替换<sup>[8]</sup>，就能有效地预防覆盖空洞的产生，有效地延长传感器网络的生存时间。为此，设计了一种基于多移动节点和最短路径规划的传感器网络覆盖修复策略。这个修复机制通过对静态工作节点的能量分析，结合遗传优化算法，求解出合理的规划路径，可以最大可能地对普通节点进行及时修复，最大程度地避免由于传感器节点死亡带来的覆盖空洞。通过仿真实验的测试证实所设计传感器节点修复机制和对移动节点的路径规划的求解算法能有有效的预防节点死亡带来的覆盖空洞问题。

## 2 问题描述

### 2.1 网络模型

假设在二维平面区域事先布置好  $n$  个静态工作节点的无线传感器网络可以用一个完全图  $G = (V, E)$  表示，顶点集合  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  代表  $n$  个静态传感器节点，边集合  $E = \{e_{ij}\}$  表示两节点之间平面距离，除此以外还有一个位置固定的 sink 节点和  $k$  个可移动节点  $V = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ ，sink 节点和可移动节点的供电能量和计算能力非常富裕。静态节点可以通过某些定位机制获取自己的位置信息<sup>[9-11]</sup>，静态节点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  每隔一定周期时间间隔  $\Delta t$  向 sink 节点汇报当前的剩余能量值  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ，sink 节点根据能量值变化程度可以估算出每个节点能量消耗的频率  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ ，其中， $f_i = \Delta e_i / \Delta t$ ，从而可以估算出静态节点的剩余生存时间  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ，显然  $t_i = e_i / f_i$ 。计算能力富裕的 sink 节点可以根据这些信息和  $n$  个静态节点的位置信息计算出每个移动节点访问静态节点的次序，这  $k$  个可移动节点  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  在 sink 节点安排的调度指

令下从某个已知的固定位置  $B$ （称为基站位置）出发依次到达静态节点，并通过对静态节点进行能量补充或者节点替换<sup>[8]</sup>的方式进行修复，最后返回基站位置  $B$ ，假设所有移动节点的移动速度为某个常数值  $w$ 。

### 2.2 传感器网络覆盖修复策略模型

为方便问题描述，先假设只有一个移动节点  $m_1$ （即考虑  $k=1$ ）的情况。显然，合理的修复策略应该满足在任一静态节点  $v_i$  能量耗尽死亡前，移动节点  $m_1$  到达该静态节点  $v_i$  并进行修复，以防止覆盖空洞的产生。移动节点  $m_1$  到达静态节点  $v_i$  的时间  $T_i$  可以表示为  $T_i = S(B, v_i) / w$ ，其中， $S(B, v_i) = |Bv_{j,1} \dots v_{j,k} \dots v_{j,m} v_i|$  代表折线  $Bv_{j,1} \dots v_{j,k} \dots v_{j,m} v_i$  的长度（如图 1 所示），假设每一轮对单个静态节点的修复时间  $r_i$  为常数，则如果满足  $T_i = S(B, v_i) / w + r_i < t_i$ ，则表示在静态节点  $v_i$  剩余时间用完（即剩余能量耗尽）之前，移动节点  $m_1$  能及时到达该静态节点并成功进行了修复，即移动节点花费在路径上的移动时间加上移动节点对该静态节点的修复时间小于该节点的剩余生存时间。

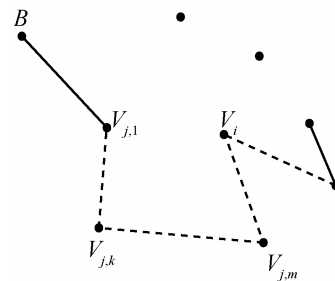


图 1 移动节点  $m_1$  从基站  $B$  出发经过静态节点  $v_{j,1}, \dots, v_{j,k}, \dots, v_{j,m}$  到达静态节点  $v_i$

希望找到的最佳移动路径是指移动节点  $m_1$  以某一速度  $w$  从基站位置  $B$  出发逐个经过每个静态节点并回到基站位置  $B$ ，在这条回路上及时修复静态节点的数量最多。显然，在保证成功修复节点数量最多的前提下，移动节点经过的回路长度所花时间越短越好，以尽快进行移动节点下一轮的修复。为简单考虑，假设花费在对静态节点修复的时间相同，并且保持不变，这个时间值是常数。这时就只需要考虑回路的路径长度最短。假设回路路径用  $P = Bv_{j,1} v_{j,2} \dots v_{j,i} \dots v_{j,n-1} v_{j,n} B$  表示，其中， $B$  表示基站节点， $v_{j,1}, v_{j,2}, \dots, v_{j,n} \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，其实这条路径  $P$  对应了 1 到  $n$  之间的一个排列。那么移动节点成功修复静态节点的数量就可以表示为

$$\begin{aligned}
f(P) &= \sum_{i \in V} \text{sign}(t_i - (T_i + r_i)) \\
&= \sum_{i \in V} \text{sign}\left(\frac{e_i}{f_i} - \frac{S(B, v_i)}{w} - \frac{r_i f_i}{f_i}\right) \\
&= \sum_{i \in V} \text{sign}\left(\frac{e_i - r_i f_i}{f_i} - \frac{S(B, v_i)}{w}\right) \\
&= \sum_{i \in V} \text{sign}\left(\frac{e'_i}{f_i} - \frac{S(B, v_i)}{w}\right), e'_i = e_i - r_i f_i \quad (1)
\end{aligned}$$

其中,  $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x \leq 0 \end{cases}$  表示符号函数,  $e_i$  表示节点

$v_i$  当前剩余能量值,  $f_i$  代表节点  $v_i$  的能量消耗频率,  $w$  是移动节点的移动速度,  $S(B, v_i) = |\overline{Bv_{j,1} \dots v_{j,k} \dots v_{j,m} v_i}|$  表示折线  $\overline{Bv_{j,1} \dots v_{j,k} \dots v_{j,m} v_i}$  的长度。  $e'_i = e_i - r_i f_i$  相当于对剩余能量  $e_i$  做了一个的平移变换得到  $e'_i$  (称  $e'_i$  为能量因子)。式(1)取最大值时的回路就表示移动节点  $m_i$  成功修复静态节点的数量最多的回路, 满足这一要求的回路当然不只一条, 合理的选择是在这些满足要求的回路中找到最短的一条, 表示移动节点进行这一轮修复操作的时间最短, 这可以表示为

$$\min l(P) = \sum_{i=0}^n d(v_{j,i}, v_{j,i+1}) \quad (2)$$

其中,  $d(v_{j,i}, v_{j,i+1})$  表示节点  $v_{j,i}$  和  $v_{j,i+1}$  之间的欧几里德距离。

如果不考虑式(1) (比如移动速度  $w$  足够大时), 只考虑式(2), 这个问题就演变为标准旅行商问题<sup>[12,13]</sup>, 标准旅行商问题属于组合优化问题中 NP 难的最具有挑战的问题之一。旅行商问题在很多领域中引起了广泛的关注和应用。Rafael Falcon<sup>[8]</sup>将 TSP 问题的一种变种问题 (1-TSP-SELPD) 引入到无线传感器网络的覆盖修复机制的设计中。本文设计的无线传感器网络覆盖修复机制, 在单个移动节点情况下实质上就是带约束条件的 TSP 问题。

再来描述更加一般的情况, 多个移动节点  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  对静态节点进行修复, 每个移动节点从基站位置  $B$  出发, 每个移动节点负责修复一部分静态传感器节点, 并返回基站位置  $B$ ,  $k$  个移动节点就对应了  $k$  条回路, 除了基站位置点, 这些回路没有公共节点。假设移动节点  $m_i$  负责修复的静态节点的集合用  $N(m_i)$  表示, 移动节点  $m_i$  的移动路径用  $P_i$  表示。类似单个节点的情况, 路径  $P_i$  对应集合  $N(m_i)$  中的节点元素组成的一个排列, 移动节点  $m_i$  在路径

$P_i$  上成功修复静态节点的个数可以表示为

$$f(P_i) = \sum_{i \in N(m_i)} \text{sign}(t_i - T_i) = \sum_{i \in N(m_i)} \text{sign}\left(\frac{e'_i}{f_i} - \frac{S(B, v_i)}{w}\right) \quad (3)$$

$k$  个移动节点  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  在  $k$  条移动路径上成功修复静态节点的总数就可以表示为

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^k f(P_i) &= \sum_{i=1}^k \sum_{i \in N(m_i)} \text{sign}(t_i - T_i) \\
&= \sum_{i=1}^k \sum_{i \in N(m_i)} \text{sign}\left(\frac{e'_i}{f_i} - \frac{S(B, v_i)}{w}\right) \quad (4)
\end{aligned}$$

合理的修复策略是这个值越大越好, 这表示成功修复静态节点数越多越好, 其中变量符号表示意义同式(1)。

类似只有一个移动节点的情况, 移动节点的移动速度保持不变, 移动节点所花的时间越短, 对应移动路径长度越小, 对  $k$  条回路中只需考虑这  $k$  条回路长度的最大值越小越好。移动节点  $m_i$  的移动路径  $P_i$  的长度用  $l(P_i) = \sum_{i \in N(m_i)} d(v_{i,j+1}, v_{i,j+1})$  表示, 第二个优化目标可以表示为

$$\min(\max_{i=1, \dots, k} l(P_i)) = \min(\max(\sum_{i \in N(m_i)} d(v_{i,j+1}, v_{i,j+1}), \dots, \sum_{i \in N(m_k)} d(v_{i,j+1}, v_{i,j+1}))) \quad (5)$$

对  $k$  个可移动节点修复  $n$  个静态传感器节点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  的问题, 要找出满足式(4)、式(5)要求的最优规划路径并不容易, 首先要将  $n$  个静态传感器节点指派给  $k$  个可移动节点, 再对各自分派的静态节点集进行  $k$  次最小旅行商问题的求解, 这是个 NP 难的组合优化问题。

**定理 1** 本文设计的基于多移动节点的传感器网络覆盖修复策略的优化模型式(4)、式(5)是一个 NP 难的优化问题。

**证明** 要求出满足式(4)、式(5)要求的最优规划路径, 需要先将  $n$  个静态传感器节点指派给  $k$  个可移动节点, 再对各自分派的静态节点集进行  $k$  次最小旅行商问题的求解。 $n$  个静态传感器节点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  分配给  $k$  个可移动节点  $V = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ , 在所有分配方案中求解出使式(4)取最大值的解, 这是一个典型调度分配问题, 已经证明了这是一个 NP 难问题<sup>[14]</sup>, 不可能在多项式时间内完成。其次, 对移动节点  $m_i$ , 在顶点集  $N(m_i)$  求出最短哈密顿回路, 这是在顶点集

$N(m_i)$ 中求解旅行商问题, 也已经被证明是 NP 难的<sup>[12]</sup>。由以上 2 个方面分析可知本文设计的基于多移动节点的传感器网络覆盖修复策略的优化模型式(4)、式(5)是一个 NP 难的优化问题。证明完毕。

### 3 基于遗传算法的求解方法

上节证明了设计的基于多移动节点的传感器网络覆盖修复策略的优化模型式(4)、式(5)是一个 NP 难的优化问题, 对此, 经典的确定性数学优化方法显得无能为力。随机性智能优化方法对目标函数性质的要求低, 只需要用到函数值的计算, 实现方便, 适用于一般性工程优化问题的求解, 也适用于 NP 难问题的求解。本文采用智能优化算法中比较成熟的遗传算法<sup>[15]</sup>对传感器网络覆盖修复策略的优化模型式(4)、式(5)进行求解, 设计出遗传算法中具体的交叉算子、变异算子和选择算子, 为了加快找到最优解的速度, 结合问题的特点设计了局部搜索算子。这里以 2 个移动节点的情况为例介绍算法的设计思路和实现, 在稍后的算法设计中可以看到该方法可以推广到  $k$  个移动节点的情况。

#### 3.1 编码方案和种群初始化

记基站位置为  $B$ , 2 个移动节点修复  $n$  个静态传感器节点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 染色体个体  $P$  采用双基因的整数编码, 每一列表示一个基因, 第一个值表示静态节点编号, 第二个值表示移动节点编号, 个体编码总共 2 行, 上面一行是整数 1 到  $n$  的一个排列数, 下面的  $n$  位基因取值为 1 或者 2, 表示对应上一行相应编号的静态节点被第 1 个移动节点或第 2 个移动节点修复。移动节点修复静态节点的顺序就是第一行编码中出现的节点顺序。比如图 2 表示 14 个静态节点, 第 1 个移动节点修复静态节点的移动路径为  $P_1=B-v_1-v_8-v_7-v_{13}-v_{11}-v_9-v_{10}-B$ , 第 2 个移动节点修复静态节点的移动路径为  $P_2=B-v_{14}-v_3-v_4-v_{12}-v_6-v_5-v_2-B$ 。对每个个体都采用随机初始化的方式。采用这样双基因位编码方式的好处在于方便后面适应度值的计算和各种进化算子的设计与实现。随机初始化产生  $pop$  个个体作为初始群体。

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 8 & 7 & 14 & 3 & 13 & 4 & 12 & 6 & 5 & 11 & 9 & 10 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

图 2 双移动节点情形的路径解编码实例

#### 3.2 适应度值

对 2 个移动节点的情况, 将式(4)中的  $k$  值取 2 作为第一个适应度函数, 记为

$$g_1(P) = \sum_{i=1}^2 f(P_i) = \sum_{i=1}^2 \sum_{i \in N(m_i)} \text{sign}(t_i - T_i) = \sum_{i=1}^2 \sum_{i \in N(m_i)} \text{sign} \left( \frac{e'_i}{f_i} - \frac{S(B, v_i)}{w} \right) \quad (6)$$

表示 2 个移动节点成功修复静态节点的数量, 其中变量符号的含义同式(4)。

同样取式(5)中的  $k$  值为 2 作为另一个适应度函数, 记为

$$g_2(P) = \max_{i=1, \dots, 2} l(P_i) = \max \left( \sum_{i \in N(m_1)} d(v_{j,i}, v_{j,i+1}), \sum_{i \in N(m_2)} d(v_{j,i}, v_{j,i+1}) \right) \quad (7)$$

表示 2 个移动节点的移动路径长度的最大值, 其中变量符号的含义同式(5)。

优化目标为

$$\max g_1(P) = \sum_{i=1}^2 \sum_{i \in N(m_i)} \text{sign} \left( \frac{e'_i}{f_i} - \frac{S(B, v_i)}{w} \right)$$

$$\min g_2(P) = \max \left( \sum_{i \in N(m_1)} d(v_{j,i}, v_{j,i+1}), \sum_{i \in N(m_2)} d(v_{j,i}, v_{j,i+1}) \right)$$

$$\text{记 } g(P) = (g_1(P), g_2(P)) \quad (8)$$

假设对任意 2 个个体  $Q, R$ , 取使  $g_1$  值大的个体为最优个体, 即如果  $g_1(Q) > g_1(R)$ , 则不论  $g_2(Q)$  与  $g_2(R)$  的取值如何, 个体  $Q$  都要比个体  $R$  优越; 当  $g_1$  取值相同时, 取  $g_2$  值小的个体为最优个体, 即如果  $g_1(Q) = g_1(R)$  并且  $g_2(Q) > g_2(R)$ , 则  $R$  个体都要比个体  $Q$  优越。这表示移动节点能成功修复静态节点数量在尽可能多的前提下, 让每轮修复所花的时间最小。

#### 3.3 交叉算子

父代个体采用双点交叉方式产生子代个体。从当前种群中随机的是选择 2 个父代个体  $P_1, P_2$ , 随机产生 1 到  $n$  之间的 2 个整数  $X, Y$  作为交叉点, 如图 3 所示, 交换 2 个交叉点之间的基因片段, 包括静态节点基因片段和移动节点基因片段, 为了消除重复静态节点编码产生非法个体, 对每个父代个体从第二个交叉点  $Y$  开始列出基因, 并消除掉重复的基因位, 再从第二个交叉点  $Y$  开始填充这些基因, 这样可以解决子代个体中静态节点编码有重复基因位的问题; 对移动

节点基因位，只交换了 2 个交叉点之间的移动节点基因片段，其余基因位的取值仍然保持不变，如图 3 所示的 2 个个体  $P_1$ 、 $P_2$  交换基因片段  $\begin{vmatrix} 3 & 4 & 5 \\ 2 & 1 & 1 \end{vmatrix}$  和  $\begin{vmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$ ，交叉后的子代个体  $C_1$  的 3、4、6、7 对应的移动节点基因位和父代个体  $P_1$  的 3、4、6、7 对应的移动节点基因位一样，子代个体  $C_2$  的 1、2、7、6 对应的移动节点基因位和父代个体  $P_1$  的 1、2、7、6 对应的移动节点基因位一样。

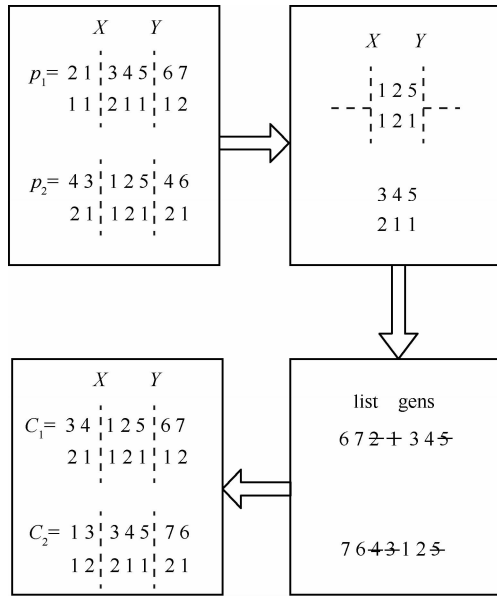


图 3 交叉例子示意

对双基因位的父代个体采用双点交叉，不仅可以消除子代个体中非法个体的产生，还有利于子代个体继承父代个体的优良基因片段，有利于问题的求解。

### 3.4 变异算子

由于个体采用双基因位整数编码，本文设计的变异算子如下。对个体  $C$ ，随机产生 1 到  $n$  之间的 2 个整数  $j$  和  $k$ ，交换这 2 个位置上的静态节点基因位和移动节点基因位，或者只交换这 2 个位置上的移动节点基因位。

### 3.5 局部搜索算子

对个体  $P = \begin{vmatrix} v_{j,1} & v_{j,2} & \dots & v_{j,n-1} & v_{j,n} \\ m_{j,1} & m_{j,2} & \dots & m_{j,n-1} & m_{j,n} \end{vmatrix}$ ，先确

定各个移动节点的移动路径，比如这里讨论的是 2 个移动节点的情况，第 1 个移动节点的移动移动路径表示为  $v_{j_1,1} \ v_{j_1,2} \ \dots \ v_{j_1,r-1} \ v_{j_1,r}$ ，第 2 个移动节点的

移动移动路径表示为  $v_{j_2,1} \ v_{j_2,2} \ \dots \ v_{j_2,s-1} \ v_{j_2,s}$ ，则

个体  $P = \begin{vmatrix} v_{j,1} & v_{j,2} & \dots & v_{j,n-1} & v_{j,n} \\ m_{j,1} & m_{j,2} & \dots & m_{j,n-1} & m_{j,n} \end{vmatrix}$  的等价个体可

以表示为

$$P' = \begin{vmatrix} v_{j_1,1} & v_{j_1,2} & \dots & v_{j_1,r-1} & v_{j_1,r} & v_{j_2,1} & v_{j_2,2} & \dots & v_{j_2,s-1} & v_{j_2,s} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 2 & 2 & \dots & 2 & 2 \end{vmatrix}$$

其中， $r + s = n$ 。依据能量因子越小，需要先修复的可能性越大，因此对各个移动节点所属的静态节点按照能量因子值进行升序排序，排序后的静态节点的编号序列作为局部搜索的结果，比如对个体  $P$  的等价个体

$$P' = \begin{vmatrix} v_{j_1,1} & v_{j_1,2} & \dots & v_{j_1,r-1} & v_{j_1,r} & v_{j_2,1} & v_{j_2,2} & \dots & v_{j_2,s-1} & v_{j_2,s} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 2 & 2 & \dots & 2 & 2 \end{vmatrix}$$

进行局部搜索后的编码表示为

$$P_{local} = \begin{vmatrix} v'_{j_1,1} & v'_{j_1,2} & \dots & v'_{j_1,r-1} & v'_{j_1,r} & v'_{j_2,1} & v'_{j_2,2} & \dots & v'_{j_2,s-1} & v'_{j_2,s} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 2 & 2 & \dots & 2 & 2 \end{vmatrix}$$

其中，静态节点序列对应的节点能量因子满足  $e'_{j_1,1} \leq e'_{j_1,2} \leq \dots \leq e'_{j_1,r-1} \leq e'_{j_1,r}$  和  $e'_{j_2,1} \leq e'_{j_2,2} \leq \dots \leq e'_{j_2,s-1} \leq e'_{j_2,s}$ 。

### 3.6 求解算法

由以上对各种进化算子的设计，这里给出本文设计的具体求解算法——多移动节点修复策略下的遗传算法(coverage repair strategies based on multi-mobile nodes and its genetic algorithm)简称 CRSMN-GA 算法。

**步骤 1 (初始化)**。对种群大小  $pop$ ，变异概率  $p_m$ ，最大进化代数  $MaxGen$  等进化参数取合适的参数值，采用本文设计的编码方式和初始化方式对个体和种群进行初始化，记初始化种群为  $P(0)$ ，按照式(8)计算种群中各个个体的适应度值，记进化代数  $t = 0$ 。

**步骤 2 (交叉算子操作)**。从当前种群中随机选取 2 个父代个体，使用前面设计的交叉算子 2 个子代个体，重复一定次数，总共产生  $pop$  个子代个体，并计算每个个体的适应度值，记这些子代个体的集合为  $O_1$ 。

**步骤 3 (局部搜索算子)**。对交叉后集合  $O_1$  中的每个个体，使用前面设计的局部搜索算子进行局部优化，所有这些改进的子代个体的集合记为  $O_2$ ，并计算其适应度值。

**步骤 4** (变异算子操作)。随机的中集合  $O_2$  中选择一个个体随机使用前面设计的 2 种变异方式的一种, 以概率  $p_m$  进行变异操作, 变异后的子代个体的集合记为  $O_3$ , 并计算其适应度值。

**步骤 5** (选择)。从种群集合  $P(t) \cup O_1 \cup O_2$  中选择最好的  $pop$  个个体组成作为下一代进化的父代群体, 令  $t=t+1$ 。

**步骤 6** (终止条件)。如果进化代数达到事先设置的最大进化世代数  $MaxGen$  值, 则输出当前群体的最好个体作为最优值, 否则转入步骤 2 继续运行。

#### 4 CRSMN-GA 算法收敛性分析

CRSMN-GA 算法是一种随机性搜索算法, 为保证设计算法确实能找到基于多移动节点的传感器网络覆盖修复策略的优化模型式(4)、式(5)的最优解, 本文从数学上给出算法的全局收敛性的证明。

**定理 2** CRSMN-GA 算法以概率 1 收敛于全局最优解, 而且与初始群体分布无关。

**证明** 为了数学上表述方便, 记交叉操作为  $C$ , 局部搜索操作为  $L$ , 变异操作为  $M$ , 记  $Prob\{MLC(a)=b\}$  表示对进化群体中的个体  $a$  经过交叉、局部搜索和变异后进化成子代个体  $b$  的概率, 如果满足  $Prob\{MLC(a)=b\} > 0$ , 则称个体  $b$  由个体  $a$  可达。

先证明命题满足如下 2 个结论。

1) 假设用  $e$  表示由个体  $a$  经过交叉和局部搜索操作后的任一中间个体, 则有

$$Prob\{MLC(a)=b\} = p_m Prob\{M(e)=b\}$$

由于 CRSMN-GA 算法中步骤 4 表示随机均匀选择设计的 2 种变异方式中的一种, 因此有

$$Prob\{M(e)=b\} = 0.5 \frac{1}{n-1} \frac{1}{n-2} \dots \frac{1}{2} > 0$$

因此对任意的 2 个个体  $a$  和  $b$ , 满足个体  $a$  经过交叉、局部搜索和变异后进化成子代个体  $b$  的概率  $Prob\{MLC(a)=b\} > 0$ , 即对任意的 2 个个体  $a$  和  $b$  个体, 满足  $b$  由个体  $a$  可达。

2) 由 CRSMN-GA 算法中的步骤 5 说明, 每次进化的当前群体中的最好个体好于前一次进化的父代群体中的最好个体, 满足进化群体中的最好个体单调性的要求。

根据 T Back 原理<sup>[16]</sup>可知, CRSMN-GA 算法满足结论 1) 和结论 2), 因此以概率 1 收敛全局最优解, 而且与初始群体分布无关。证明完毕。

#### 5 实验及结论

前面从数学理论上给出了算法的可行性分析, 本节从实验上验证以上设计的 CRSMN-GA 算法能解决本文设计的基于多移动节点的传感器网络覆盖修复策略的优化模型式(4)、式(5), 对此使用 C 语言编写了程序进行了测试, 硬件平台为 Intel(R) Pentium(R) 双核 2.0, 2 GB 内存, 软件运行操作系统为 Windows XP(SP3)。由于所设计的模型非常接近标准 TSP 问题, 因此使用 TSP 公开数据集 TSPLIB<sup>注1[17]</sup>中的 14 个城市 TSP 问题 burma14 进行改进作为算法的测试用例。假设这 14 个城市节点的坐标对应了 14 个静态传感器节点的位置坐标, 可移动节点的基站位置坐标直接取为  $B <19.00, 95.00>$ ; 每个静态传感器节点的能量因子值取区间  $[20, 40]$  之间的一个随机数, 具体取值如表 1 所示, 可以发现节点 2、4、13、14 的能量因子比较小。假设所有节点的能量消耗频率值一样  $f_i = 1$ 。

CRSMN-GA 算法参数的取值为变异概率  $p_m = 0.15$  (依据文献[18], 一般取 0~0.2 之间的一个小数), 最大进化世代数  $GenMax = 800$ , 种群大小  $pop = 50$ 。移动节点的移动速度分别取不同值  $w = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 。运行算法 CRSMN-GA 得到的结果如表 2、表 3 所示, 表 2 统计出单个移动节点所能修复的最多节点个数和移动节点移动路径的最短长度。表 3 统计出 2 个移动节点情况下所能修复的最多节点个数和 2 个移动节点移动路径的最小最大长度值。

从表 2 可以看出不管单个移动节点的速度取何值, 首先修复的都是 14 号静态节点, 这是由于 14 号节点能量因子值小 (即剩余生存时间短), 并且距离基站位置  $B <19.00, 95.00>$  最近, 所以优先考虑修复。当移动节点的速度  $w = 1, 0.9$  时, 修复静态节点的数目都是 14, 表示成功修复所有静态节点, 这时求得的最短路径长度和标准 TSP 问题一样<sup>[17]</sup>, 长度是 32.271 264。当  $w = 0.8$  时, 为了能修复所有的 14 个静态节点, 8 号节点必须优先于 1 号节点先修复, 否则如果再按照  $w = 1, 0.9$  时的移动路径移动, 8 号节点将不能及时修复。类似这样需要先修复能量因子较少的静态节点的情况还很多。另外, 随着  $w$  值的减小, 能成功修复的静态节点的数量也越来越少。但对双移动节点的修复策略, 从

注 1 <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/iwr/comopt/soft/TSPLIB95/TSPLIB.html>

表 3 可以看出  $w=1.0$  减小到 0.4 的时候, 所有的静态节点能够被及时修复, 相比单节点的情形得到了完全的改观, 并且, 2 个移动节点的移动路径中的最大长度相比单移动节点的情形也减少了很多。这些结论从图 4、图 5 中可以得到更加直观的体现。图 4 中三角形表示未能及时修复的节点。这里可以更加直观地看到修复能量因子较少的静态节点需要优先修复。比如 13、14 号节点能量因子值小(即剩余生存时间短)并且距离基站位置  $B < 19.00, 95.00 >$  最近, 所以得到了成功修复, 节点 2、4 能量因子虽然比较小, 但由于距离基站位置  $B < 19.00, 95.00 >$  稍远, 所以在  $w=0.6、0.5、0.4$  时不能保证被成功修复。这样可以换来尽可能多的静态节点被成功修复。另外, 从图 4 中可以发现,  $w=0.4$  时会有 5 个节点未能及时修复。在图 5 表示的双移动节点的情况没有一个三角形节点, 2 个移动节点在各自回路上及时修复静态节点, 所有节点都能被及时修复。对比图 4、图 5 可以发现, 移动节点移动速度越快, 移动节点的数量越多, 被成功修复的静态节点的数量就越多, 所耗费的时间也越短, 由于静态节点死亡带来的覆盖空洞的可能性也就越小。

表 1 基于公开 benchmark 开数据集中 burma14 问题的静态节点位置及能量值

节点编号	静态节点	坐标	节点能量因子
1	$v_1$	$\langle 16.47, 96.10 \rangle$	39
2	$v_2$	$\langle 16.47, 94.44 \rangle$	27
3	$v_3$	$\langle 20.09, 92.54 \rangle$	36
4	$v_4$	$\langle 22.39, 93.37 \rangle$	23
5	$v_5$	$\langle 25.23, 97.24 \rangle$	39
6	$v_6$	$\langle 22.00, 96.05 \rangle$	37
7	$v_7$	$\langle 20.47, 97.02 \rangle$	35
8	$v_8$	$\langle 17.20, 96.29 \rangle$	37
9	$v_9$	$\langle 16.30, 97.38 \rangle$	39
10	$v_{10}$	$\langle 14.05, 98.12 \rangle$	35
11	$v_{11}$	$\langle 16.53, 97.38 \rangle$	36
12	$v_{12}$	$\langle 21.52, 95.59 \rangle$	33
13	$v_{13}$	$\langle 19.41, 97.13 \rangle$	23
14	$v_{14}$	$\langle 20.09, 94.55 \rangle$	24

表 2 单个移动节点在不同移动速度时的修复策略

$w/(m \cdot s^{-1})$	最优移动路径	最短路径长度	修复节点数
0.4	14-12-7-13-8-11-9-10-1-2-3-4-5-6	34.796 186	9
0.5	14-12-6-7-13-8-2-1-11-9-10-5-4-3	37.533 243	11
0.6	14-3-4-12-6-7-13-8-11-9-10-1-2-5	38.432 498	12
0.7	14-3-4-12-6-7-13-8-2-1-10-9-11-5	38.646 385	13
0.8	14-3-4-5-6-12-7-13-2-8-11-9-10-1	33.144 351	14
0.9	14-3-4-5-6-12-7-13-2-1-10-9-11-8	32.271 264	14
1.0	14-3-4-5-6-12-7-13-2-1-10-9-11-8	32.271 264	14

表 3 双移动节点在不同移动速度时的修复策略

$w/(m \cdot s^{-1})$	移动路径 1	移动路径 2	最大路径长度	修复节点数
0.4	7-13-8-2-1-11-9-10	14-3-4-12-6-5	19.308 218	14
0.5	7-13-11-9-10-2-1-8	14-3-4-5-6-12	18.086 591	14
0.6	7-13-8-11-9-10-1-2	14-12-6-5-4-3	17.209 720	14
0.7	7-13-8-11-9-10-1-2	14-3-4-5-6-12	17.209 720	14
0.8	7-13-8-11-9-10-1-2	14-3-4-5-6-12	17.209 720	14
0.9	7-13-8-11-9-10-1-2	14-12-6-5-4-3	17.209 720	14
1.0	7-13-8-11-9-10-1-2	14-12-6-5-4-3	17.209 720	14

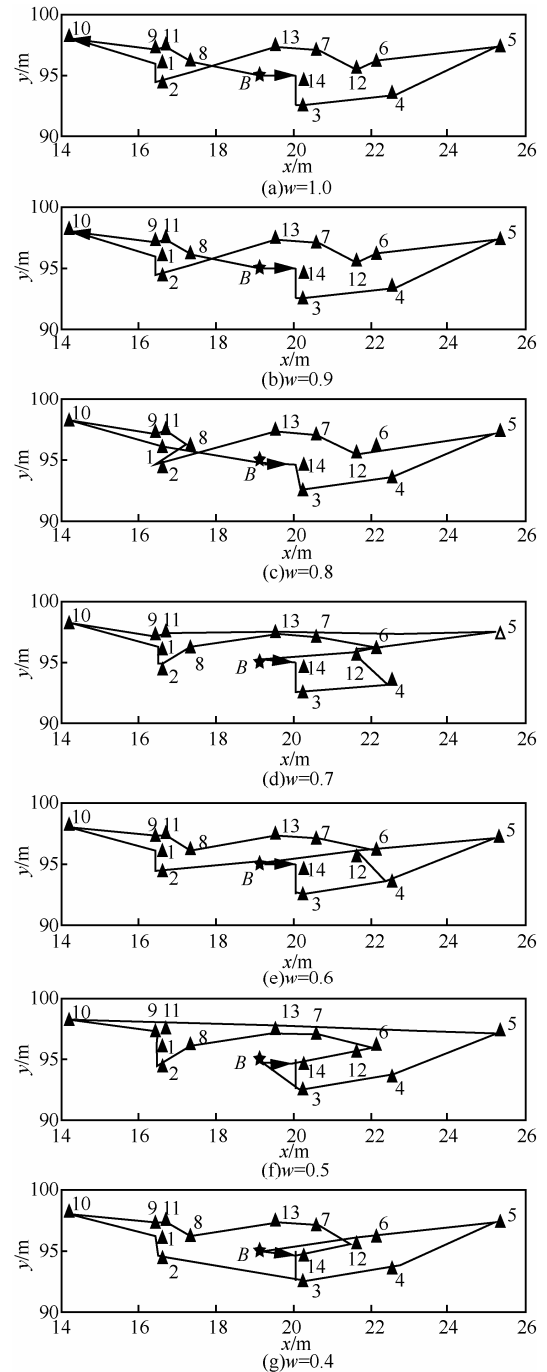


图 4 单个移动节点在不同移动速度时的最佳规划路径

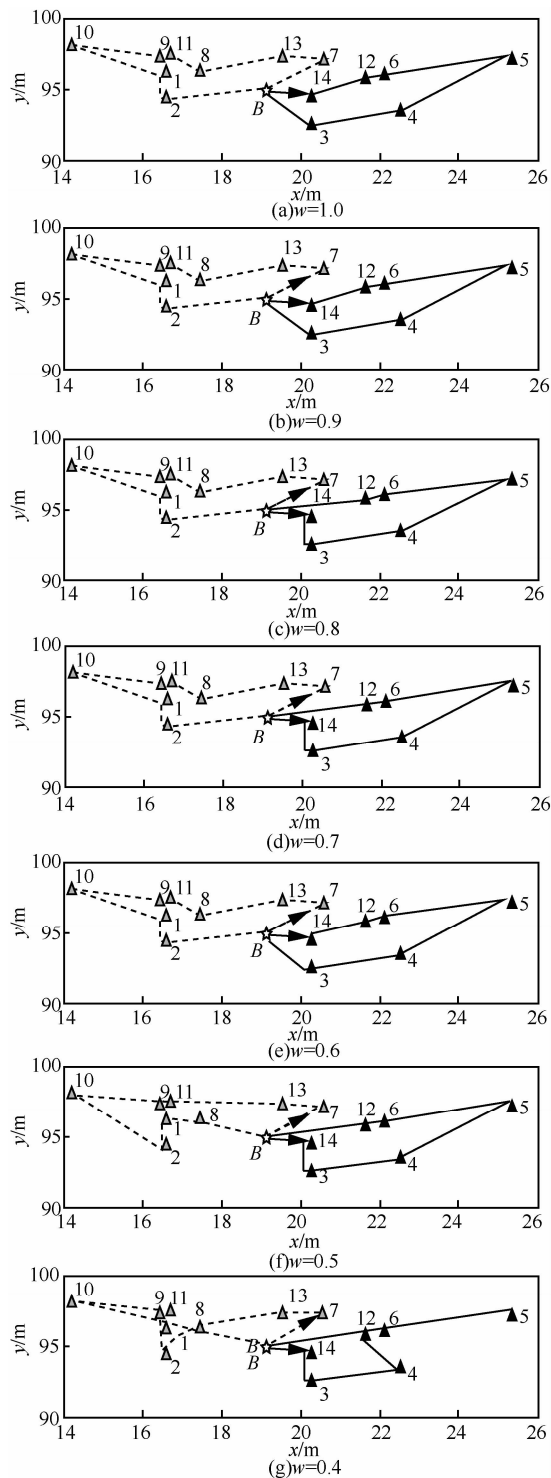


图 5 双移动节点在不同移动速度时的最佳规划路径

### 6 结束语

从能量消耗的分析出发，提出了一种基于多移动节点和路径规划的传感器网络覆盖的修复策略。并采用遗传算法进行求解，计算出合理的多移动节点的规划路径，可以最大化进行能量补充或者替换的传感器

节点数量，最大程度地避免由于传感器节点死亡带来的覆盖盲区。通过仿真实验测试证实所设计传感器节点修复机制和求解算法能有效地解决节点死亡带来的覆盖空洞问题。作为此模型的另一个发展方向是，适当地控制移动节点的数量，可以方便地设计更加灵活的在一定时间间隔内及时修复静态传感器节点的覆盖修复机制，避免覆盖空洞的产生。

### 参考文献:

[1] WANG X, WANG S. An improved particle filter for target tracking in sensor system[J]. Sensors, 2007, 7(1): 144-156.

[2] WANG X, MA J J, WANG S. Prediction based dynamic power optimization in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2007, 7(3): 251-266.

[3] WANG L, GUO Y, ZHAN Y. Security topology control method for wireless sensor networks with node-failure tolerance based on self-regeneration[J]. Eurasip Journal of Wireless Communications and Networking, 2010:1-11.

[4] LI X, DAVID H. Distributed coordinate-free hole recovery[A]. Proc of GLOBECOM[C]. Beijing, China, 2006. 189-194.

[5] KUN Y H, JANG P S. Hole detection and boundary recognition in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Mannheim, 2009. 72-82.

[6] LI X, DAVID H. Distributed coordinate-free hole recovery[A]. Proc of GLOBECOM[C]. Beijing, China, 2006. 189-194.

[7] WANG G, CAO G, BERMAN P, et al. Bidding protocols for deploying mobile sensors[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(5): 563-576.

[8] RAFAEL F, XU L, AMIYA N, et al. The one-commodity traveling salesman problem with selective pickup and delivery: An ant colony approach[A]. 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)[C]. 2010.1-8.

[9] 叶苗, 王宇平. 基于方差概率模型和进化计算的WSN定位算法[J]. 软件学报, 2013, 24(4): 859-872.

YE M, WANG Y P. A new malicious nodes attack-resistant security location method in wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 24(4): 859-872.

[10] JIANG J F, HAN G J, ZHU C, et al. Secure localization in wireless sensor networks: a survey[J]. Journal of Communications, 2011, 6(6): 460-470.

[11] 叶苗, 王宇平. 一种新的容忍恶意节点攻击的无线传感器网络安全定位方法[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 532-545.

YE M, WANG Y P. Location estimation in wireless sensor networks based on probabilistic model with variant and evolutionary algorithm[J]. Journal of Software, 2013, 36(3): 532-545.

[12] WANG Y P, QIN J. A memetic-clustering-based evolution strategy for traveling salesman problems[J]. Rough Sets and Knowledge Technology Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4481: 260-266.

- USA, 2010.1-4.
- [7] WU H, ZHU C, LA R J, *et al.* Fast adaptive S-ALOHA scheme for event-driven machine-to-machine communications[A]. 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)[C]. Quebec City, Canada, 2012.1-5.
- [8] 李晓辉, 李丹. LTE 中的流量自适应 M2M 接入控制算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 46-50.  
LI X H, LI D. Adaptive admission control mechanism for M2M communication in LTE[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013,41(1):46-50.
- [9] NIKAEIN N, KREA S. Latency for real-time machine-to-machine communication in LTE-based system architecture[A]. Wireless Conference 2011-Sustainable Wireless Technologies (European Wireless)[C]. 2011.1-6.
- [10] THOMSEN H, PRATAS N K, STEFANOVIC C, *et al.* Analysis of the LTE access reservation protocol for real-time traffic[EB/OL]. arXiv preprint arXiv:1301.2427, 2013.
- [11] RUBIN I. Group random-access disciplines for multi-access broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1978, 24(5): 578-592.
- [12] WEI C H, CHENG R G, AL-TAEE F M. Dynamic radio resource allocation for group paging supporting smart meter communications[A]. 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications[C]. 2012.659-663.
- [13] WEI C H, CHENG R G, TSAO S L. Modeling and estimation of one-shot random access for finite-user multichannel slotted ALOHA systems[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1196-1199.
- [14] WEI C H, CHENG R G, TSAO S L. Performance analysis of group paging for machine-type communications in LTE networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7):3371-3382.
- [15] WU H, ZHU C, LA R J, *et al.* FASA: Accelerated S-ALOHA using access history for event-driven M2M communications[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2013,21(6): 1904-1917.
- [16] 3GPP Standard TR 37.868-2011. RAN Improvements for Machine-type Communications[S]. 2011.
- [17] ZTE. R2-104662: MTC Simulation Results with Specific Solutions. 3GPP TSG RAN WG2 Meeting #71[S]. 2010.
- [18] 张兆丰. 移动随机接入研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.  
ZHANG Z F. Research on Mobile Random Access[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003.

#### 作者简介:



杨柳 (1978-), 女, 四川达州人, 博士, 西南交通大学高级实验师, 主要研究方向为多址接入技术、数字媒体技术。



范平志 (1955-), 男, 四川广汉人, 博士, 西南交通大学教授, 主要研究方向为码分多址通信、多媒体宽带无线通信、信息与编码理论、信号设计与处理、专用移动通信、网络与信息安全。



郝莉 (1971-), 女, 北京人, 博士, 西南交通大学教授, 主要研究方向为多址接入技术、MIMO 检测与域编码、无线资源管理。

(上接第 53 页)

- [13] WANG Y P, HAN L, LI Y, *et al.* A new encoding based genetic algorithm for the traveling salesman problem[J]. Engineering Optimization 2006, 38(1):1-13.
- [14] REN Q, WANG Y P. A new hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem[J]. Computer and Operations Research, 2011, 39(10): 2291-2299.
- [15] ÖKULKARNI R V, RSTER F A, VENAYAGAMOORTHY G K. Computational intelligence in wireless sensor networks: a survey[J]. Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(1):68-96.
- [16] BÄCK T. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [17] REINELT G. TSPLIB—A traveling salesman library[J]. ORSA J. Comput, 1991, 3(3):376-384.
- [18] 李敏强, 寇纪淞, 林丹等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
LI M Q, KOU J S, LIN D, *et al.* The Basic Theory and Application of Genetic Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2003.

#### 作者简介:



叶苗 (1977-), 男, 广西桂林人, 西安电子科技大学博士生、副教授, 主要研究方向为网络计算、进化算法、人工智能。

王宇平 (1961-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为人工智能、网络和工程设计中的优化方法、最优化理论、数据挖掘。

魏静萱 (1981-), 女, 陕西西安人, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为进化算法、最优化理论与方法、人工智能等。