

# MWSN's Nodes Deployment Research in Partial Area of Coal Mine

Xiaoping Hu, Kaisheng Wu

Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan  
Email: hxp210@163.com, wukaishengcn@163.com

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 3<sup>rd</sup>, 2019; published: May 10<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In order to improve the coal mine's localized network ability to resist damage and self-repairing capability, this paper studies a kind of the coal mine mobile wireless sensor networks (MWSN) localized node deployment method. By improving the deployment density of localized nodes and nodes classification, the anti-failure capability of localized networks is improved. The initial deployment method under localized network coverage and post-disaster coverage and network connectivity is analyzed, and the results show that this method has better ability to resist damage. At the same time, this paper also designs a damage detection and repair algorithm for localized networks. Using mobile robot nodes in the network interval to achieve network detection and self-repairing through the simulation experiment of a continuous simulation space, it is verified that the algorithm has a good network connectivity repair ability.

## Keywords

Mobile Wireless Sensor Network (MWSN), Localized Network, Node Deployment, Self-Repairing

---

# 煤矿井下移动无线传感器网络的局部节点部署研究

胡小平, 吴开盛

湖南科技大学, 先进矿山装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭  
Email: hxp210@163.com, wukaishengcn@163.com

收稿日期: 2019年4月28日; 录用日期: 2019年5月3日; 发布日期: 2019年5月10日

## 摘要

为提高煤矿井下局部网络抗破坏能力和自修复能力, 本文研究了一种煤矿井下移动无线传感器网络(MWSN)的局部节点部署方法, 通过采用提高区域节点部署密度和节点分级的方法提高局部网络的抗破坏能力, 并对该部署方法下局部网络的初始覆盖率和灾后覆盖率和网络连通性进行了分析, 结果表明该方法具有较好的抗破坏能力。同时本文还设计了一种针对局部网络的受损检测和修复算法, 充分利用网络区间内的移动机器人节点实现网络检测和自修复, 通过对一段连续模拟空间的仿真实验, 验证了该算法具有较好的网络连通修复能力。

## 关键词

移动无线传感器网络, 局部网络, 节点部署, 自修复

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前应用于煤矿井下的无线传感器网络大部分的仍是缺少移动节点的普通无线传感器网络(WSN), 这种网络存在对环境变化的适应性差, 网络扩展性差以及不具备网络自修复能力的问题。此外, 受煤矿井下长距离的巷道环境限制, 井下构建的网络中往往存在许多长距离的线状网络, 这些部分自然成为了整个网络中极为脆弱的环节, 极易在灾害情况下造成网络中断。移动无线传感器网络(MWSN)由于配备了一定量的移动机器人节点, 所以具备一定的自修复能力并且网络的布置和扩展也相对灵活, 在煤矿井下监测网络的构建中有较好的应用前景。

目前, 针对带状区域无线传感网络节点部署已有许多学者进行了研究, 文献[1]提出了一种等腰三角形覆盖, 文献[2] [3]提出了一等分覆盖的方法, 文献[4]基于区域的二重完全覆盖提出了一种等腰梯形覆盖的方法, 并且详细证明了节点感知半径  $r$  和带状区域宽度  $w$  的比值满足一定条件时, 可以获得最大的节点利用效率。同时, 在关于网络节点故障监测方面, 文献[5] [6] [7]等提出了很多种关于网络覆盖空洞的检测方法。文献[8]针对可充电无线传感网络提出了一种基于扇区的替换方法, 用来检测故障节点以及使用 Air-Robot 投放新节点的方式进行网络修复。文献[9]针对无线传感器网络部署区域由于通信障碍和其他一些因素产生的某些节点无法与网络通信的情况, 给出了一种使用节点代理解决监测区域内节点通信不可达的方案, 并基于一般意义的网络系统模型提出了一种探测覆盖区域内节点连通性的算法。

在本文中研究对象是煤矿井下移动无线传感器网络, 它不仅担负日常的井下环境监测任务, 而且必须在矿井发生事故时, 仍能够及时有效地传回井下环境数据, 为煤矿搜救工作提供依据。由于本文对无线传感器网络的要求主要是抗破坏能力, 与文献[2]完全覆盖和最大节点利用率的目标有所不同, 所以在节点部署方面兼顾了多重覆盖度、节点利用率以及网络连通性等多个方面, 同时还引入了一定量的移动机器人节点和随机布置的随机节点, 作为特殊情况下的网络修复节点和应急替换节点。此外, 为实现灾后的网络修复, 提出了基于网络连通性的网络节点故障检测方法, 然后按照受损节点优先级使用移动机器人进行修复。由于煤矿井下环境复杂多样, 网络部署方法并不完全相同, 本文主要结合井下环境特点

将井下 MWSN 划分成多个局部加强的子网络。以其中一个子网络中的节点部署策略为研究对象, 研究提高网络的抗破坏能力和受损后的网络自修复能力的具体方法。

## 2. 无线传感器网络的构成

### 2.1. 煤矿车场区环境特点

煤矿井下移动无线传感器网络中的节点布置必须适应煤矿井下环境特点。网络中固定节点位置除了需满足遮挡少覆盖范围广之外, 还必须考虑节点不和井下作业发生干扰, 所以网络中的固定节点一般布置在巷道顶部和底部的侧壁区域。网络中的移动机器人节点通常为地面移动机器人, 其只能布置在空间有限的地面区域, 如果将机器人部署在地面侧壁区域时, 机器人的灾后生存率和利用网络定位机器人位置的性能都会降低, 所以通常希望将机器人布置在相对较好的中间区域。考虑到不能和正常的井下作业发生干扰, 机器人节点的部署就必须选择在相对开阔的位置。

煤矿车场区是井下运输的枢纽, 由多种功用的巷道组合而成。其主要运输巷道与一般巷道并无太大区别, 但是车场区存在许多巷道的交叉口, 是一个较大的开阔区域, 且通常各交叉口相隔不会太远, 所以非常适合布置局部加强网络。为了便于研究, 本文将巷道交叉口的开阔区域用  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 5\text{ m}$  的立方体区域代替, 由于巷道结构, 设备布置等因素影响, 区域内的抗破坏能力并不相同, 在本研究中根据区域抗破坏能力将区域划分为巷道顶部区域、巷道侧壁区域和巷道中心区域三部分, 分别用 T、S、C 表示, 示意图如图 1 所示。不同区域内的节点覆盖情况以及移动机器人节点配置情况均有不同, 重点通过研究节点初始布置优化方法, 提高网络整体的生存率和修复率。

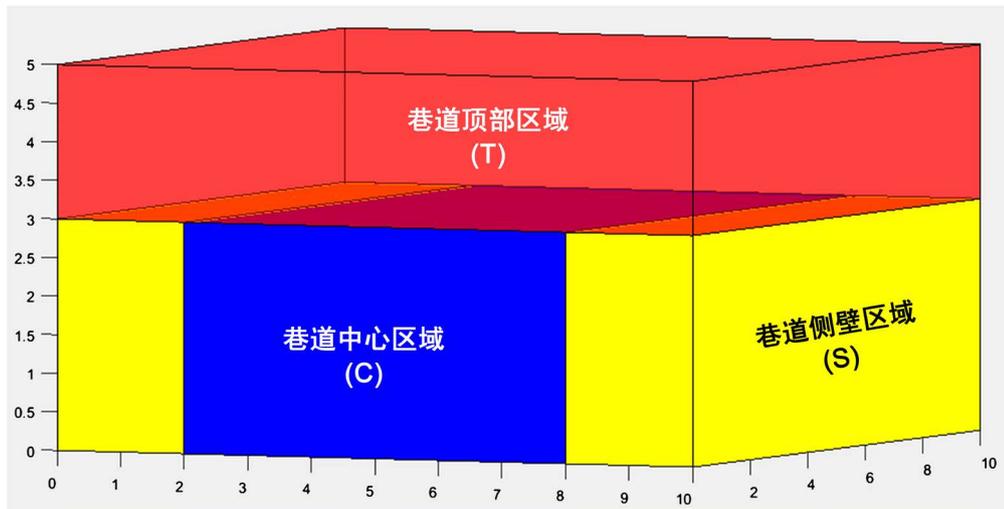


Figure 1. Schematic diagram of division of intersection area in car yard  
图 1. 车场区交叉口区域划分示意图

### 2.2. 移动无线传感器网络中的节点简介

作为无线传感器网络的节点必须具有三个部分, 分别为感知部分——传感器、处理与存储部分——微处理器、无线通信部分——通信模块。无线传感网络的传感器通常有许多种类型, 这些传感器可实现诸如温度、湿度、运动、压力、声音、气体成分等等的监测, 微处理器则主要用于对一些数据的简单处理和存储, 通信模块则负责节点间的通信, 该模块也是网络节点能量消耗最大的部分。一个完整的移动无线传感器网络除了各种监测节点外, 通常还包含被感知对象与网络用户等要素。

无线传感器网络根据空间布置方式的不同可分为平面结构和分级结构两种[10]。在平面结构的无线传感器网络中,各个节点具有同等的地位,也正是由于这一特点,源节点和目标节点间一般存在多条路径,网络的负荷可以由这些路径共同分担,通常情况下不存在瓶颈,网络健壮性较好。但是,由于平面结构网络是自组织网络,且节点众多,密度较大,所以在节点的组织、定位以及节点与基站之间的路由建立、控制与维持的报文开销都较大,除了影响传输速率外,网络的能源消耗控制以及网络的可靠性都难以保证。所以平面型结构通常用于节点数目相对较少,网络规模不大的情况,具有易于部署,实现网络功能的优点。分级结构通常是将网络划分为多个簇(Cluster),每个簇由一个簇头(Cluster Head)和若干簇成员(Cluster Member)组成,这些簇头形成高一级的网络,并负责簇间的数据传输,而簇成员只负责数据的采集。这样可以大大减小网络中路由控制信息的数量,网络具有较好的扩充能力。簇头可以预先确定,也可以通过选举算法自动产生。由于簇头可以随时选举产生,因此网络也具有较好的抗破坏性。分级网络结构存在一个明显的问题是簇头能量消耗过大,由于簇头的数据流量高出普通节点几倍或几十倍,在发送和接收报文的过程中将消耗更多的能量。在无法保证簇头能量能及时补充的情况下,通常采用簇头轮换算法使网络中节点能量消耗基本相同,以延长网络寿命。

本文在局部网络的构建过程中采用的是分级结构网络,节点包括锚节点,随机节点和移动节点三类。其中锚节点作为一级节点,具有最佳的抗破坏能力,充当网络中的簇头节点。随机节点为二级节点,主要为随机布置的监测节点。移动节点为三级节点,在网络正常运行时停留在相对安全的巷道中心区域,当网络异常变化时,通过节点的自主移动修补网络。网络拓扑结构如图2所示。

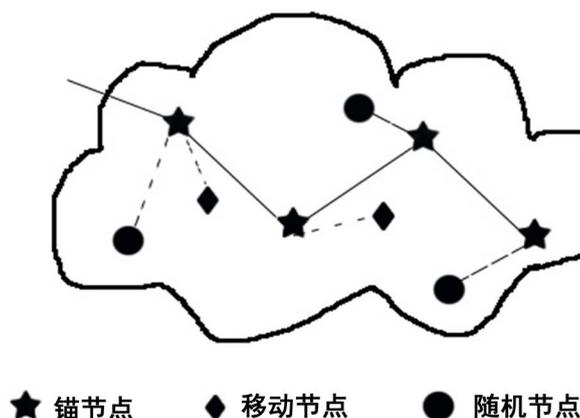


Figure 2. Topological structure of localized nodes  
图2. 区域节点拓扑结构

### 3. 节点部署研究

#### 3.1. 节点初始部署方法

在选定的立方体区域内,根据三级节点的网络拓扑结构,按先部署锚节点构建网络骨架,再部署随机节点增强网络,最后部署移动机器人节点的方法进行。锚节点的部署情况如图3中红色五角星所示,这些节点的位置都是既定已知的,由这些锚节点可基本实现区域全覆盖。再布置一定量的冗余随机节点如图3中绿色圆点所示,其位置是未知的。可移动的节点如图3中紫色五角星所示,通常布置在空间的中心域,但是其具体位置也是未知的。启动网络后,先通过锚节点对随机节点和移动节点进行定位,定位完成后向控制中心发送所有二、三级节点的位置信息。由于区域内通过锚节点已经基本实现区域覆盖,为节省能量,二、三级节点在确定位置后进入休眠状态。

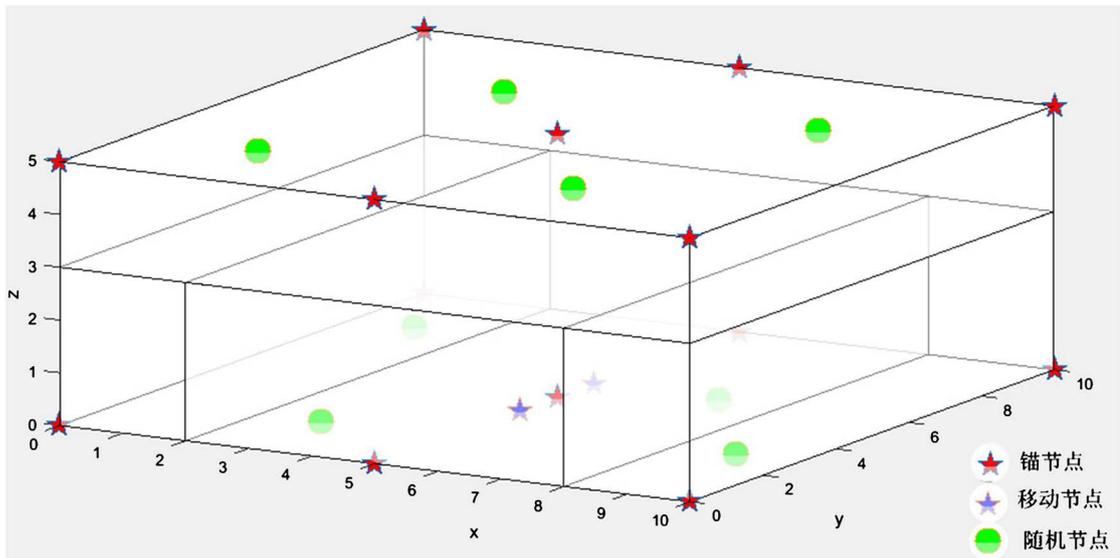


Figure 3. Initial deployment of localized nodes  
图 3. 区域节点初始部署

### 3.2. 节点假设与初始覆盖率

实际环境中的节点覆盖范围常常因自身状态和所处环境的不同而有一定的出入, 在本文中为便于研究, 假设所有节点均符合布尔感知模型[11], 即所有传感器节点的感知范围均是一个以节点为圆心, 感知半径为  $R$  的球形区域, 发生在节点感知半径内的事件被节点感知的概率为 1, 否则设为 0; 考虑到网络可能需要应对极端环境, 所以安全的感知半径均乘一个极端条件系数  $n$  ( $n < 1$ ), 在本实验中, 结合节点情况取安全感知半径  $R_n$  取为 5 m, 远小于理论感知半径, 且本文假定节点的通信半径与感知半径相同. 假设节点  $O$  坐标为  $(x_o, y_o)$ , 对于平面上任意一点  $S(x_s, y_s)$ , 节点检测到  $S$  发生某一事件的概率为:

$$P(o,s) = \begin{cases} 1 & d(o,s) \leq R_n \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

其中,  $d(o,s) = \sqrt{(x_o - x_s)^2 + (y_o - y_s)^2}$  为节点  $O$  与点  $S$  间的欧氏距离。

为简化覆盖率研究, 将巷道前后截面、上顶面, 下底面和左右壁面分别定义为 1~6 号截面, 研究各面内的区域覆盖情况, 用各个面内的覆盖率代替整个空间的覆盖水平. 由于初始状态随机节点和移动机器人节点都是随机部署的, 需要定位后才能发挥作用, 且网络正常的情况下这些节点都处于休眠状态, 所以初始覆盖率仅考虑锚节点的情况. 由于锚节点布置的对称关系, 我们仅研究 1 号、3 号和 5 号面的覆盖情况, 分别如图 4(a)~(c)所示, 颜色越深表示能覆盖到该区域的节点越多. 各面的初始覆盖率情况如表 1 所示:

由以上结果可知, 在 1 号面和 3 号面上初始覆盖率达到 100%, 且 2 重覆盖率均在 80% 以上, 覆盖效果好, 其中 5 号面存在无法覆盖的区域, 其整体覆盖率为 95.66%, 但其 2 重覆盖率也达到了 60% 以上, 综合来看整体的覆盖冗余度较大, 主要是为保证后续极端条件下遭到破坏后的网络仍具备一定的覆盖以完成最后的网络自修复。

### 3.3. 网络其他性能分析与优化

在 3.2 节中已经讨论了网络覆盖率和多重覆盖这两个重要的基本网络性能, 在本节中将从网络覆盖

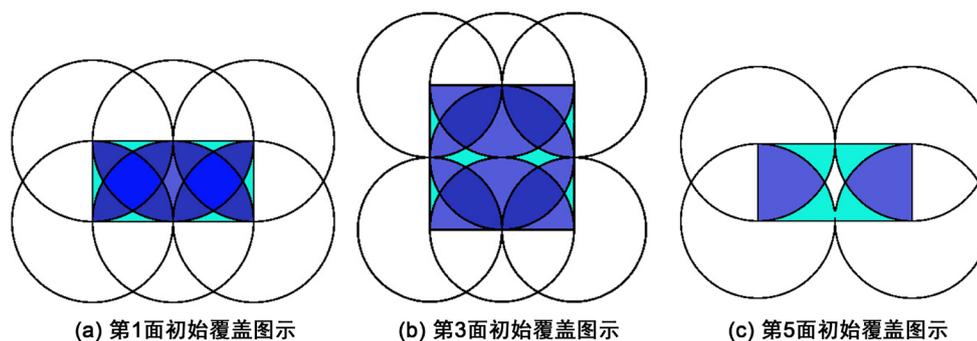


Figure 4. Diagram of initial coverage on the 1, 3, 5 plane  
图 4. 第 1, 3, 5 面初始覆盖图示

Table 1. Initial fraction of coverage of each surface  
表 1. 各面初始覆盖率

面编号	1 重覆盖率	2 重覆盖率	3 重覆盖率	4 重覆盖率	整体覆盖率
1 号面	13.02%	4.34%	51.13%	31.51%	100%
3 号面	8.68%	47.03%	44.30%	0%	100%
5 号面	34.24%	61.42%	0%	0%	95.66%

密度、网络覆盖效率和网络连通性三个方面进行分析。由于在本文中，随机节点和移动节点都是作为紧急情况下的应急节点，所以在衡量网络静态性能的过程中先不加以考虑。

定义 1 覆盖密度：覆盖密度定义为所有节点覆盖的面积之和与实际需要监测区域面积的比值[4]，用  $\rho$  表示，用来衡量节点覆盖的利用效率。表达式如下：

$$\rho = \frac{N\pi r^2}{A}$$

式中  $N$  表示与监测区相关的节点个数， $A$  表示需要监测区域的面积。我们一般只考虑区域完全覆盖的情况，所以  $\rho$  总是一个大于等于 1 的数，显然  $\rho$  越小节点覆盖的利用率越高，当  $\rho$  等于 1 时，节点覆盖面积恰好完全覆盖需要监测的区域，利用率最高。

在本文提出的节点初始布置方案中，由 3.2 节提到的平面分析方法，依次计算得到 1 号、3 号面的覆盖密度，其中由于 5 号 6 号面监测区域没有完全覆盖，所以该参数没有参考意义。

定义 2 覆盖效率：覆盖效率定义为所有节点在监测区域内覆盖面积的并集与所有节点在监测区域内覆盖面积之和的比值[4]，用  $\eta$  表示，用来衡量区域覆盖效率。表达式如下：

$$\eta = \frac{\bigcup_{i=1}^N S_i}{\sum_{i=1}^N S_i}$$

式中  $S_i$  表示第  $i$  个节点在监测区所覆盖的面积。显然  $\eta$  是一个小于等于 1 的数，当所有节点在监测区覆盖的面积无重合部分时， $\eta$  等于 1，此时节点在监测区域的覆盖得到了最大程度的利用。但是由 3.2 节可知，适当的多重覆盖可以提高网络的抗破坏能力，同时在信息传递链路的选择上也有较大的选择空间，所以我们必须针对实际需要，在这两个性能设计之间权衡。

在现有的高抗破坏网络节点布置方案下，我们可以分别计算得到 1 面、3 面、5 面的覆盖效率，从计算的结果来看，覆盖效率的降低也是在可以接受的范围内。

定义 3 节点连通: 两个节点间的欧氏距离小于等于节点通信半径, 那么这两个节点相互连通。在本文的环境模型中, 网络连通性主要考察巷道截面间的信息连通以及截面内节点间的信息连通, 一个是为了实现信息沿巷道的内外交流, 另一个是为了实现截面内的信息交流。首先考察 1 面内节点的连通情况, 根据定义 3, 每个节点都至少与两个节点相互连通, 且靠近巷道中心线的两个节点可同时与三个节点相互连通, 网络的连通度较高。然后我们考察 1 面和 2 面间的连通情况, 显然 1、2 面要实现连通只能通过 3、4 号面的中心节点中继, 不过依然满足存在两条独立的连通通道, 巷道截面间的连通度仍较高。不过这些靠近巷道中心线的节点在网络连通中担负的任务较大, 一方面会造成节点能耗加大, 另一方面也会导致网络的连通情况受这些节点的影响较大。

## 4. 模拟受灾结果及分析

### 4.1. 模拟受灾假设与灾后网络覆盖分析

根据本文 2.1 的区域划分情况, 不同的区域设定了不同的灾后节点损坏率。在本研究中, 巷道顶部节点遭受破坏的概率最大, 其次是巷道侧壁区域, 节点生存率最高的是巷道中心区域。为方便研究, 本文中按 3.1 所示的区域节点初始布置方法布置节点, 通过确定损坏节点数目的方法来确定区域的节点损坏率, 具体数值如表 2 所示:

**Table 2.** Setting of damages in each area  
**表 2.** 各区域损坏情况设定

区域范围	锚节点	损坏数	损坏率	随机节点	损坏数	损坏率
顶部区域	7	5	71.4%	4	3	75.0%
侧壁区域	4	2	50.0%	2	1	50.0%
中心区域	3	1	33.3%	2	1	50.0%

从表 2 中数据可以看出, 网络破坏情况较严重。在灾后发生后, 所有休眠的节点进入工作状态, 为网络自修复做准备。由于只假定了区域节点损坏数目, 具体是哪些节点受损具有随机性, 而节点的位置对受损后的区域覆盖率和后续的网络修复具有很大的影响。所以本文采用随机抽取 10 组不同的损坏情况进行灾后网络覆盖分析和后续修复条件判定, 具体结果如表 3 所示:

**Table 3.** Simulated post-disaster coverage and network connectivity  
**表 3.** 模拟受灾后的覆盖率和网络连通性

次数	1 面	2 面	3 面	4 面	5 面	6 面	连通性
1	97.8%	97.8%	74.9%	95.2%	78.5%	78.5%	中断
2	100%	0%	89.4%	99.6%	39.3%	39.3%	中断
3	39.3%	97.8%	95.3%	99.7%	78.5%	39.3%	连通
4	97.8%	89.3%	89.8%	99.8%	39.3%	39.3%	中断
5	100%	78.5%	59.9%	98.9%	78.5%	78.5%	中断
6	47.8%	97.8%	87.1%	94.6%	39.3%	87.1%	中断
7	97.8%	47.8%	74.9%	100%	87.1%	39.3%	连通
8	89.3%	87.1%	89.4%	98.9%	39.3%	39.3%	连通
9	78.5%	100%	89.8%	95.4%	39.3%	39.3%	中断
10	100%	78.5%	59.9%	100%	47.8%	47.8%	连通

由表 3 可以发现, 灾后网络覆盖率与被破坏节点分布有较大关系, 十组随机情况中网络发生中断的占 6 组, 虽然从灾后覆盖率来看, 十组中仅第二组出现了 2 号面覆盖率为零的情况, 其他情况下各面覆盖率最低都在 30% 以上, 但是网络中断率却达到了 60%, 所以灾后网络修复中网络连通恢复仍需重点研究。

## 4.2. 模拟受灾网络修复分析

### 4.2.1. 网络受损检测及修复算法的实现

由于网络修复的目的是使巷道内端传感器节点能够和外端节点实现连通, 所以本文采用内部节点的连通性判定方法。在前面构建的区域网络模型中, 即对 1 号截面内的节点进行连通性判定, 然后由内向外检测网络连通性, 直到到达 2 号截面。算法执行过程如下:

第一步: 1 号截面内节点发布所有与其相连的节点广播信息, 然后利用内层移动机器人巡视和接收 1 号截面节点信息, 如果机器人接收不到任何 1 号截面节点信息, 则判定 1 号截面节点损坏, 若机器人接收到 1 号截面节点信息但是均不包含外层节点的连通信息, 则认为区间中点的节点损坏。

第二步: 2 号截面内节点发布所有与其相连的节点广播信息, 然后利用外层移动机器人巡视和接收 2 号截面节点信息, 如果机器人接收不到任何 2 号截面节点信息, 则判定 2 号截面节点损坏, 若机器人接收到 2 号截面节点信息但是均不包含内层节点的连通信息, 则认为区间中点的节点损坏。

第三步: 内外层机器人共享第一步和第二步收集到的信息, 对网络连通情况进行判定并制定修复方案。

第四步: 若存在 1 号截面内节点  $P_{1j}$ , 2 号截面内节点  $P_{2k}$ , 且二者对应有共同的中间层节点  $P_{15}$ , 则认为该区间的网络处于连通状态, 释放该区间机器人到下一网络区间;

第五步: 若存在 1 号截面内节点  $P_{1j}$ , 2 号截面内节点  $P_{2k}$ , 但无共同对应的中间层节点, 此时判定  $j$  与  $k$  是否相等, 若相等则指定一个机器人充当中间节点实现  $P_{1j}$  和  $P_{2k}$  的连接, 释放区间内其他机器人到下一网络区间;

第六步: 若 1 号(或 2 号)截面内节点均损坏, 仅有 2 号(或 1 号)截面节点及与其对应连通的中间层节点, 则指定一个机器人充当 1 号(或 2 号)截面内的节点实现区间的网络连通, 释放区间内其他机器人到下一网络区间;

第七步: 若 1 号(或 2 号)截面内节点均损坏, 仅有 2 号(或 1 号)截面节点且无与其对应连通的中间层节点, 则指定一个机器人充当 1 号(或 2 号)截面内的节点, 指定另一个机器人充当中间层节点实现区间的网络连通, 释放区间内其他机器人到下一网络区间;

第八步: 若 1 号和 2 号截面内节点均损坏, 则指定一个机器人充当 1 号截面内节点, 指定另一个机器人充当 2 号截面内节点, 并搜寻可以使两截面内机器人相连通的中间层节点, 若存在则以此节点实现区间网络连通, 若不存在则考虑采用前面区间释放的机器人充当中间节点, 若无前面空间释放的机器人则判定网络连通修复失败。

### 4.2.2. 网络连通修复的仿真与分析

在本研究中, 灾后修复的重点不在于恢复网络的覆盖率, 而在于恢复网络的连通性, 以保证基本的信息流通。在 MATLAB 环境下搭建了一个由 10 个图 3 所示的空间区域组成的长巷道模拟环境, 截面内节点分别用  $P_{ij}$  表示,  $i=1,2,\dots,11$ ;  $j=1,2,\dots,6$ , 每段空间区域中间的节点用  $P_{ik}$  表示, 其中  $k=0,1,2,\dots$ 。仿真中各段的损坏率以及损坏节点的具体位置均为随选定, 实验一共进行了 10 组, 每次均按照 4.2.1 中的网络受损检测及修复算法进行网络连通的修复, 具体结果如图 5 所示:

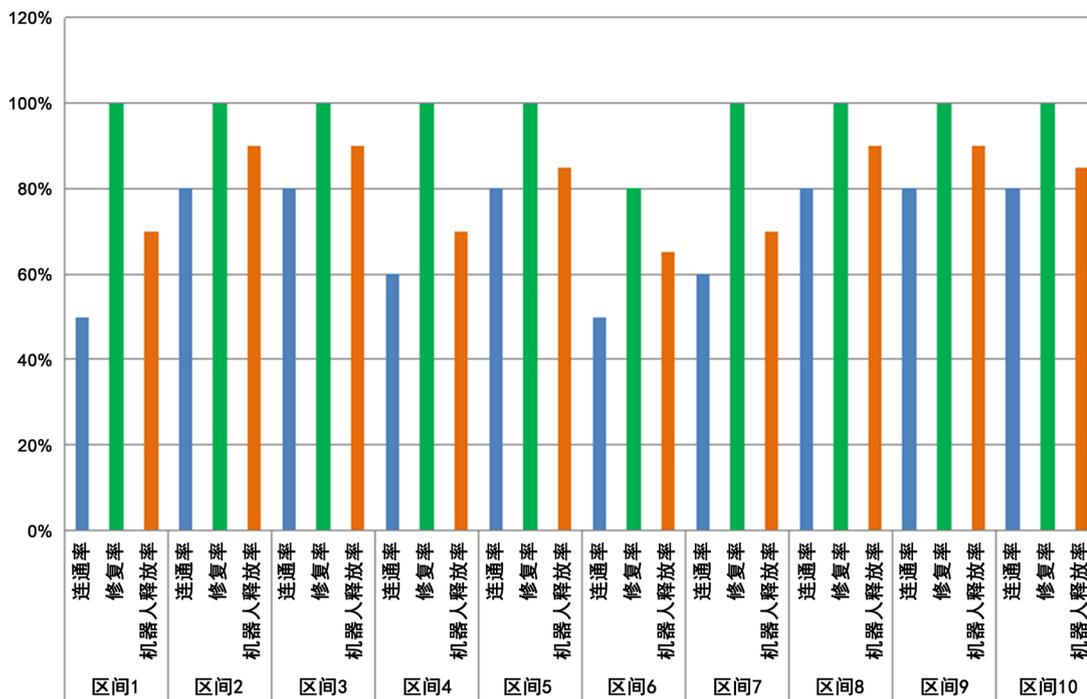


Figure 5. Repairing simulation results  
图 5. 修复仿真结果

从图中结果可以看出, 由于前面节点布置的优化, 在 10 组模拟实验中各区间的模拟灾后连通率都在 50% 以上, 十次实验中经修复后的总体的连通率为 90%, 其中的一次修复失败发生在区间 6, 由于网络的串联性质导致整体的网络连通修复失败。在另外几次仿真中各区间的修复率均达到了 100%, 验证了修复算法的可行性。

## 5. 结论及展望

通过对煤矿井下一段区间内的节点部署设计, 提高了无线传感器网络的局部抗破坏能力, 从区间的初始节点覆盖率和模拟灾后节点覆盖率分析了节点部署方案的优势; 另外通过利用区间段内的移动机器人, 设计了单个区间段的网络受损检测和修复方案, 通过多区间段组成的连续模拟空间对该修复算法进行了仿真, 仿真结果显示该方法具有较好的网络修复率, 能够大大提高灾后无线传感器网络的自修复能力。但是该方法也存在一些问题, 比如节点布置密度较大, 移动机器人节点也布置得较多, 所以不适宜于大范围应用, 只使用与局部区段的网络加强。后续还应当对实际的井下受灾数据进行深入分析, 合理选择不同位置的锚节点密度及移动机器人部署数量, 争取在投入成本和网络修复率方面取得平衡。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(61572185)。

## 参考文献

- [1] 方旺盛, 陈耀宇. 矿井巷道 WSNs 等腰三角形节点覆盖模型[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(3): 30-33+36.
- [2] Tseng, Y.C. and Wang, Y.C. (2007) Efficient Placement and Dispatch of Sensors in Wireless Sensor Network. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7, 262-274. <https://doi.org/10.1109/TMC.2007.70708>
- [3] Xu, H., Liu, W. and Wang, B. (2014) Subarea Localization Performance of the Divide-and-Cover Node Deployment in

a Long-Bounded Belt Scenario. *IEEE Transactions on Computers*, **63**, 2842-2850.

<https://doi.org/10.1109/TC.2013.144>

- [4] 王婷婷. 无线传感器网络覆盖优化方法研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [5] So, E.A. (2013) Coverage Hole Healing Strategy with Awareness of Data Delivery Time in Wireless Sensor Networks. *Education & Training in Mental Retardation & Developmental Disabilities*, 2013, 399-409.
- [6] Chintakunta, H. and Krim, H. (2014) Distributed Localization of Coverage Holes Using Topological Persistence. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **62**, 2531-2541. <https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2314063>
- [7] Feng, Y., Vergne, A., Martins, P. and Decreusefond, L. (2015) Homology-Based Distributed Coverage Hole Detection in Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **23**, 1705-1718. <https://doi.org/10.1109/TNET.2014.2338355>
- [8] Alkhalidi, S.M., Wang, D. and Al-Marhabi, Z.A. (2017) Adopting Sector-Based Replacement (SBR) and Utilizing Air-R to Achieve R-WSN Sustainability. *Information*, **8**, 70. <https://doi.org/10.3390/info8020070>
- [9] 黄晓, 程宏兵, 杨庚. 无线传感器网络覆盖连通性研究[J]. 通信学报, 2009, 30(2): 129-135.
- [10] 陈利虎. 无线传感器网络实验平台的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [11] 李海坡, 杜庆伟. 一种能量有效的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(2): 233-236.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [csa@hanspub.org](mailto:csa@hanspub.org)