

doi: 10.7690/bgzdh.2018.01.013

基于网格划分的移动智能雷覆盖与修复算法

周昂扬, 张志安, 盛娟红

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对移动智能雷的覆盖与修复问题, 在目标区域信息已知且节点能够自由移动和精确定位的前提下, 提出一种基于网格划分的研究策略。根据移动智能雷的实际工作过程, 首先从降低能耗的角度给出具体的雷场网格覆盖形成算法。然后采用分布式信息融合的拓扑结构, 提出一种以邻居节点阈值作为判断标准的分布式雷场缺口信息融合算法。最后针对雷场中出现矩形缺口的情况, 设计依据雷场受损程度的网格化修复算法。研究结果表明: 该算法具有可行性与合理性, 能在 MFC 平台下完成仿真应用程序的编写。

关键词: 智能雷; 网格划分; 覆盖修复

中图分类号: TJ417 **文献标志码:** A

Coverage and Repair Algorithm of Mobile Intelligent Mines Based on Meshing

Zhou Angyang, Zhang Zhian, Sheng Juanhong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper is aimed at studying the issue about coverage and repair of mobile intelligent mines. Under the premise of detailed information about target area and free movement and accuracy location of intelligent mines, a research strategy based on meshing is promoted. According to the practical work process of mobile intelligent mine, taking into account the energy-saving factors, a specific coverage algorithm to form the grid in minefield was given firstly. Then, by adopting the distributed information fusion topology, an information fusion algorithm for minefield gap was provided, in which the threshold of neighbor node number is used as the criterion. Finally, in order to solve the problem of rectangular gap in minefield, designed a meshing repair algorithm according to the degree of minefield damage. The results show that the method is feasible and rational, and it can realize compiling simulation application program under MFC platform.

Keywords: intelligent mines; meshing; coverage and repair

0 引言

信息技术的飞速发展使得现代战场呈现出翻天覆地的变化。地雷作为一种传统的防御型武器, 在这场军事变革中获得了新生。以网络化、智能化为特点的现代雷场系统一经出现就成为各国研究的热点^[1]。在实际工作中, 智能雷节点一般通过随机部署的方式抛撒到复杂的战场环境中, 部署之后的智能雷会受到来自敌方爆破扫雷、电磁扫雷等破坏性的攻击, 同时恶劣的自然条件也会导致一些节点的失效^[2]。这些因素会使得一个完整的智能雷场网络出现缺口, 甚至被分割成若干互不相连的部分, 从而极大地降低对目标区域的封锁能力; 因此, 如何在雷场部署不合理或遭受破坏的情况下, 通过系统的主动覆盖修复来提升封锁能力, 是智能雷实际应用中需要克服的一个难题。

国内在这方面起步较晚, 目前对智能雷的研究工作主要集中在单个智能雷的性能提升上, 对网络化智能雷的研究还处在刚刚起步的阶段。笔者针对

封锁机场空地这一实际问题, 采用一种网格划分的策略来对智能雷的覆盖与修复问题进行研究, 从雷场初始覆盖的形成、受损后缺口信息的融合和雷场的自主修复 3 个方面出发, 提出具体的实现算法并在 MFC 平台下进行相应的仿真实验。

1 雷场的网格划分

1.1 智能雷节点基本假设

在对雷场封锁区域进行网格划分之前, 首先做出如下假设:

1) 每一个智能雷节点的覆盖范围均符合圆盘感知模型^[3]。也就是说, 智能雷节点的通信、探测和攻击范围均有明确的边界, 分别是以节点为圆心, 以 R_c 、 R_t 和 R_a 为半径的感知圆盘。

2) 所有智能雷节点具有完全相同的特性。即对于每个节点来说, 通信半径 R_c 、探测半径 R_t 和攻击半径 R_a 是相同的。

3) 节点的通信半径 R_c 、探测半径 R_t 和攻击半

收稿日期: 2017-10-03; 修回日期: 2017-11-09

作者简介: 周昂扬(1992—), 男, 江苏人, 硕士, 从事机械电子工程研究。

径 R_a 满足如下关系:

$$\begin{cases} R_c > 2R_a \\ R_t > R_a \end{cases}$$

在这种假设下, 以智能雷节点的攻击半径 R_a 得到的覆盖连通就意味着整个雷场网络的通信连通, 可以简化覆盖问题的研究, 文献[4]给出了具体的证明。这种假设与智能雷节点的实际情况相符, 不会造成额外的成本增加。

1.2 网格划分方法

在满足上述假设的情况下, 可以以智能雷节点的攻击半径 R_a 为依据进行封锁区域的网格划分。常见的网格划分方法有正三角形、正方形和正六边形网格划分 3 种^[5], 分别以节点感知圆盘的内接正三角形、正方形和正六边形作为基本网格单元, 如图 1 所示。

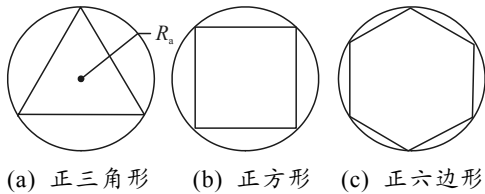


图 1 3 种网格划分方法的基本单元

笔者以覆盖一块长为 L , 宽为 W 的矩形区域 S 为例, 比较这 3 种网格划分方法。图 2—图 4 分别为正三角形、正方形和正六边形网格划分示意图, 智能雷节点位于每个网格的中心。如果设节点的攻击半径为 R_a , 通过几何关系就可以求得基本网格单元的边长。进一步可以得到每层网格的覆盖宽度和沿长度方向上每层内节点的间距, 最终得到不同方法对矩形区域 S 网格划分所需的节点数。表 1 对 3 种网格划分的基本参数进行了汇总与比较。

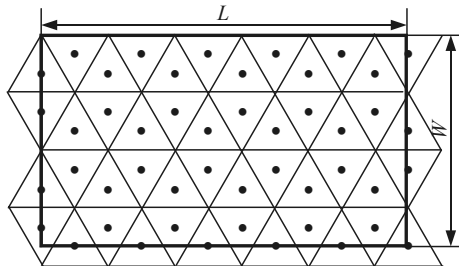


图 2 正三角形网格划分

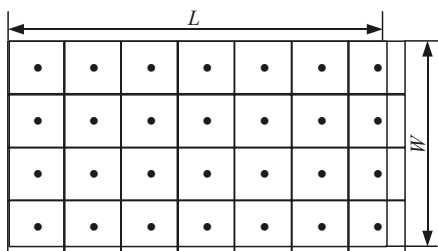


图 3 正方形网格划分

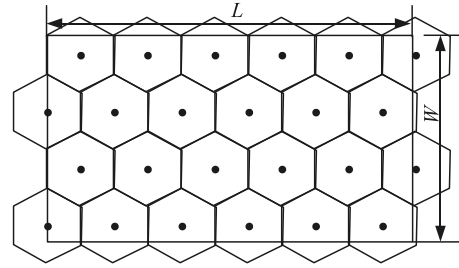


图 4 正六边形网格划分

表 1 3 种网格划分的基本参数

类别	正三角形	正方形	正六边形
网格边长	$\sqrt{3}R_a$	$\sqrt{2}R_a$	R_a
层宽	$1.5R_a$	$\sqrt{2}R_a$	$1.5R_a$
层内间距	$(\sqrt{3}/2)R_a$	$\sqrt{2}R_a$	$\sqrt{3}R_a$

通过 3 种网格划分方法的比较可以看出: 在对同一块矩形区域进行覆盖时, 正三角形网格需要最多的节点, 正方形次之, 正六边形只需最少的节点。在某些情况下正三角形网格划分的节点数可以达到正六边形的 2 倍; 因此, 选取正六边形网格可以有效节省智能雷节点数量, 降低雷场成本。然而从另一个方面考虑, 当网格中某一节点失效时去看形成覆盖空洞的大小, 如图 5 所示。当正三角形网格中的某一节点失效时, 并没有覆盖空洞产生; 当正方形网格中的某一节点失效时, 覆盖空洞的面积为 $(4-\pi)R_a^2$; 对正六边形网格而言, 覆盖空洞的面积高达 $(3\sqrt{3}-\pi)R_a^2$ 。因此, 从雷场节点失效时仍能保证一定的覆盖能力来考虑, 正三角形网格划分是最佳的方法。对于移动智能雷系统而言, 成本与覆盖能力都是不可忽略的因素。综合这两方面的考虑, 笔者最终采取正方形网格划分的方法, 以求得雷场成本与覆盖能力的折中。另外, 正方形网格与矩阵之间有着良好的映射关系, 可以为雷场覆盖参数的计算带来很大的便利^[6]。

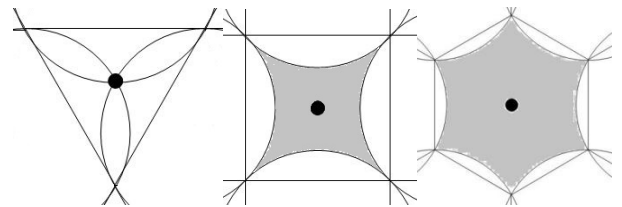


图 5 某一节点失效时形成的网格覆盖空洞

2 雷场初始覆盖的形成

2.1 随机撒布方式下的网格覆盖形成算法

针对封锁机场空地这一实际问题, 笔者给出在智能雷节点随机撒布情况下雷场正方形网格覆盖的初始形成算法。为尽量减小智能雷节点的移动距离,

降低系统能量损耗，笔者借鉴了基于行为的智能雷编队控制研究^[7]和基于矩阵的区域覆盖方法^[8]，给出具体的正方形网格覆盖初始形成算法：

1) 首先根据机场空地的大小和智能雷节点攻击半径 R_a ，将封锁区域划分成 M 行 N 列的正方形网格，确定目标点的坐标，并以这些坐标作为元素，构成 M 行 N 列的雷场目标矩阵 $T_{M \times N}$ 。

2) 智能雷节点被随机抛撒到机场空地中后，通过无线传感器网络技术和定位算法，完成雷场网络的组建和节点位置坐标的获取。

3) 所有智能雷节点按 X 坐标的数值从小到大排序，构成以 $M \times N$ 个坐标为元素的列向量，然后以 M 为单位，将其划分成 M 行 N 列的矩阵 $S_{M \times N}$ 。

4) 在矩阵 $S_{M \times N}$ 的每一列内，按节点的 Y 坐标大小对 M 个节点从小到大进行重新排序，获得新的矩阵 P_{XY} ，称为 X 主导的雷场初始矩阵。

5) 将雷场目标矩阵 $T_{M \times N}$ 与 X 主导的雷场初始矩阵 P_{XY} 中相同位置的元素一一对应，得到随机撒布的每一个移动智能雷节点的目标位置。通过 $T_{M \times N}$ 与 P_{XY} 相减，然后对每个矩阵元素的欧式距离求和，得到 X 主导方法下的节点总移动距离 D_X 。

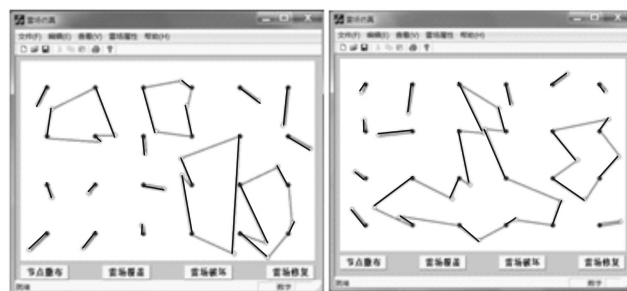
6) 类比 3)–5) 中的方法，先按 Y 坐标排序，再在每一行内按 X 坐标排序，可得到 Y 主导的雷场初始矩阵 P_{YX} 和 Y 主导方法下的节点总移动距离 D_Y 。

7) 比较 D_X 与 D_Y 的大小，如果 $D_X < D_Y$ ，则按照 X 主导的方法进行节点移动；反之，按照 Y 主导的方法进行节点移动。最终实现移动智能雷节点对机场空地的正方形网格覆盖。

2.2 网格覆盖形成算法仿真

为了证实上述算法的可行性，笔者采用 C++ 语言，在 MFC 平台下根据算法流程完成了雷场仿真应用程序的编写，对算法进行了仿真验证。在机场空地长为 840 m，宽为 560 m，智能雷节点攻击半径为 100 m 的条件下，对随机撒布时节点形成的正方形网格覆盖进行仿真。仿真结果如图 7 所示。图中空心圆点为随机撒布的智能雷节点，实心圆点为正方形网格覆盖的理论节点位置，黑色线段表示 X 主导的雷场移动方法，灰色线段表示 Y 主导的雷场移动方法。根据仿真计算，图 7(a) 中 $D_X=1\ 956.13$ m， $D_Y=1\ 809.19$ m，采用 Y 主导的方法按灰色线段轨迹移动；图 7(b) 中 $D_X=1\ 892.56$ m， $D_Y=2\ 003.74$ m，最终采用 X 主导的方法按黑色线段轨迹移动实现区域的正方形网格覆盖。通过多次仿真验证了算法的

可行性与合理性。



(a) Y 主导的移动方案 (b) X 主导的移动方案

图 7 仿真结果

3 雷场缺口信息的融合

3.1 信息融合技术及其拓扑结构

信息融合技术是一种利用计算机技术，对来自不同信息源的多个传感器观测到的信息，在一定准则下进行自动分析、综合，以获得单个或单类信息源无法获得的有价值的综合信息，并最终完成其任务目标的信息处理技术^[9]。根据在信息融合过程中采用拓扑结构的不同，可以将信息融合技术分成集中式、分布式、混合式和反馈式 4 种。

在集中式结构中，传感器节点直接将采集到的原始数据上传，所有的信息处理都将在融合中心完成。在分布式结构里，传感器节点不仅作为数据采集器，而且具备一定的信息处理能力，可以先对原始数据进行筛选、滤波、分类和压缩等预处理，然后再将预处理后的数据交给融合中心。混合式结构结合了上面 2 种结构的优点，灵活性更强，但复杂度也更高；而在反馈式结构中，融合中心会将处理后的数据结果反馈给传感器节点，形成信息的闭环流动，从而对传感器节点进行实时调节，保证系统处于最佳状态。

移动智能雷系统具有节点数量多、工作环境信息复杂、低功耗要求高的特点。在这种情况下，如果采用集中式结构将所有节点采集到的原始信息集中处理是不切合实际的。考虑到每一个移动智能雷节点都具有一定的数据处理能力且缺口信息的融合相对简单，笔者选择智能雷节点先进行局部信息处理，确定位于缺口边界的节点，再将这些节点的局部缺口信息传送到某一节点上集中处理的信息融合方式，最终获取完整的缺口信息。这也正是典型的分布式信息融合。

3.2 基于分布式结构的缺口信息融合算法

首先将雷场中节点的失效分为 2 种。一种情况

是由于环境或能耗因素导致的节点失效，称为自然失效，如图 8 中的空心圆点所示。它一般随机地出现在雷场网络中，数量较少，不会影响整个雷场的封锁能力。另一种情况是在敌方扫雷破坏下，雷场中出现的大面积节点失效，称为扫雷失效，如图 8 中的空白区域。这种失效一般有着比较规则的边界，失效节点数量多，严重影响雷场的封锁能力。对雷场的覆盖修复也主要是针对扫雷失效导致的雷场缺口进行研究。

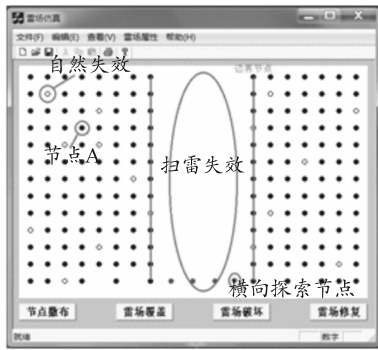


图 8 雷场缺口示意图

在正方形网格覆盖雷场中，每个节点的位置坐标精确可知；因此，只要能够确定缺口边界的所有节点，然后再将这些节点的位置信息进行融合，就可以获得完整的雷场缺口信息。为了找出缺口边界节点，笔者采用一种以邻居节点阈值作为标准的判断方法。通过对正方形网格的研究可以发现，在一个完整正方形网格中，每个节点(非边缘节点)都拥有 8 个邻居节点，而当雷场缺口形成后，位于缺口边界的节点至少会丢失 3 个邻居。尽管在自然失效的情况下有时也会导致某一节点丢失 3 个以上邻居(图 8 中的节点 A)，但这种情况发生的概率很小。而且利用边界的连续性和规则性可以很容易地将这类节点剔除。

在算法实现过程中，首先选取一个剩余能量最多的节点作为融合中心。每一节点会建立并维护一张邻居表，根据邻居节点阈值作为标准，周期性更新并判断自身是否为缺口边界。在确认为缺口边界后，节点会向融合中心发送包含自身 ID 和位置坐标信息的数据。当收集到足够的缺口边界节点后，融合中心会进行位置信息的融合处理，去除误判的节点，通过几何计算得到雷场缺口的形状、大小和方位等信息。对于雷场被分割成 2 个无法通信的部分时，可以通过移动节点进行横向的探索修复。如图 8 底部节点，建立 2 部分之间的连接，从而最终获取完整的雷场缺口信息。算法流程如图 9。

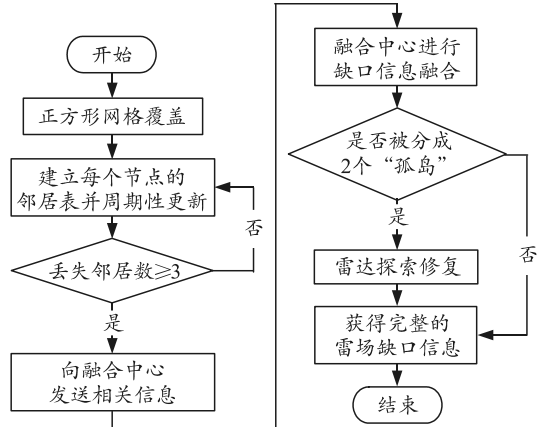


图 9 雷场缺口信息融合算法流程

4 雷场的修复

4.1 依据雷场受损程度的网格化修复算法

回顾之前对 3 种网格划分方法的比较，在对同一块矩形区域进行覆盖时，正六边形需要的节点数是最少的。当时考虑雷场成本与覆盖能力的平衡，笔者选取了正方形网格覆盖的方法，其实就是通过增加一定的成本来提高雷场中冗余节点的数量，为雷场遭到破坏后的修复提供保障，因此就有了一种正方形转正六边形的网格化修复方法。为了实现修复，首先需要对封锁区域重新进行正六边形网格划分，确定新的网格目标节点。然后根据雷场剩余节点的位置坐标确定每个节点的目标位置。在 2.1 节中给出的正方形网格形成算法对于正六边形网格的形成同样适用，最终可以实现对封锁区域的正六边形网格修复。通过这种网格转化的方法，重新形成的正六边形网格仍然可以保证对整个封锁区域的无缝覆盖，达到最佳的修复效果。不过这种方法只适用于雷场缺口较小，受损程度较低的情况。假设通过缺口信息融合得到雷场失效节点数为 N_v ，当 N_v 满足式(1)时才可以通过网格转换法实现雷场的无缝修复。经过理论计算，通常 N_v/N_s 不会超过 0.23，也就是说当雷场中失效节点数少于总节点数的 1/4 时，可以考虑采用这种修复方法。

$$N_v \leq N_s - N_h = \left\lfloor \frac{L}{\sqrt{2}R_s} \right\rfloor \times \left\lfloor \frac{W}{\sqrt{2}R_s} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{L}{\sqrt{3}R_s} \right\rfloor \times \left\lfloor \frac{W}{1.5R_s} \right\rfloor \quad (1)$$

其中： L 为封锁区域的长； W 为宽； N_s 和 N_h 分别为覆盖封锁区域所需的正方形和正六边形节点数； $\lceil x \rceil$ 为不小于 x 的最小整数。

当雷场受损程度较高时，即使通过网格转化的方法也无法实现整个雷场对封锁区域的理想覆盖。这时，笔者不再要求雷场的无缝覆盖，而以减少系

统能耗为原则，采用折线封锁的方法，对正方形网格覆盖中出现的矩形缺口进行雷场修复，如图 10。

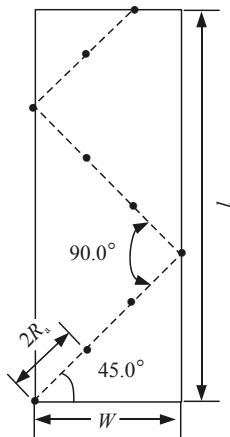


图 10 折线封锁策略

为了保证对缺口的封锁和节点间的正常通信，修复节点沿折线方向相距 2 倍的 R_a 均匀分布。与雷场初始的正方形网格覆盖相比可以发现，这里的修复目标节点其实都属于原来正方形网格的节点，因而无需对修复目标节点的坐标位置重新计算。为了在保证雷场网络连通的前提下尽量节省能耗，在同一行中具有较多邻居的节点里选取距离修复节点最近那个进行移动修复。整个修复算法流程如图 11。

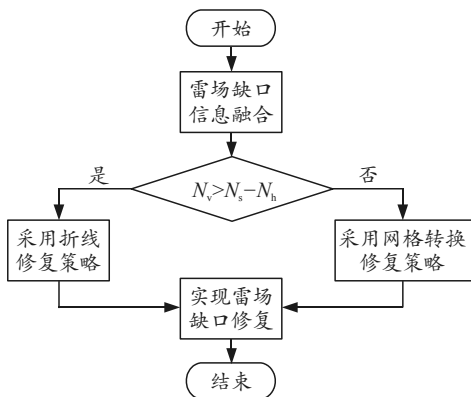


图 11 修复算法总流程

4.2 雷场修复仿真

针对提出的基于雷场受损程度的网格化修复算法，笔者在 MFC 平台下根据算法流程进行了雷场修复的仿真验证。这次扩大封锁区域的面积，在机场空地长 2 800 m，宽 1 800 m，智能雷节点攻击半径为 100 m 的条件下，首先利用随机撒布方式下的网格覆盖形成算法完成初始的正方形网格覆盖，如图 12 所示。

根据仿真计算结果可得， $N_s=260$ ， $N_h=204$ 。然后分别产生 2 种大小不同的矩形缺口，如图 13 所示，

图 13(a)中扫雷失效数为 39，自然失效数为 10；图 13(b)中扫雷失效数为 65，自然失效数也为 10。

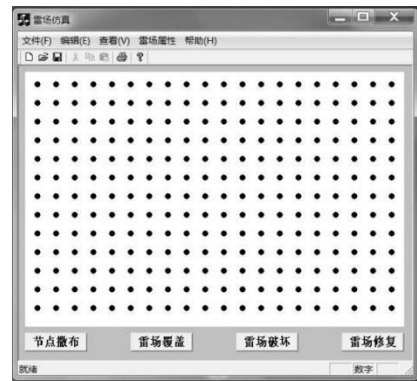
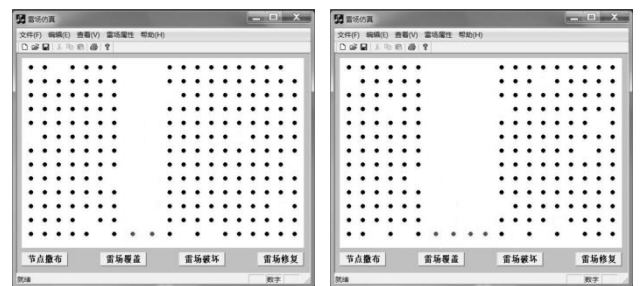


图 12 初始正方形网格覆盖

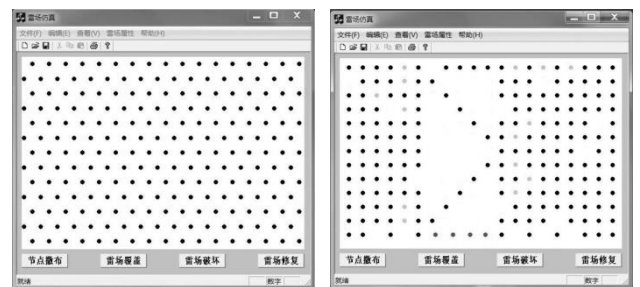


(a) 缺口较小

(b) 缺口较大

图 13 2 种破坏后的雷场

依据分布式结构的缺口信息融合算法，可以获得完整的雷场缺口信息。图 13(a)总失效节点 $N_{v1}=49$ ，缺口纵向深度 $l_1=1\ 800\text{ m}$ ，缺口横向宽度 $w_1=565.7\text{ m}$ ；图 13(b)总失效节点 $N_{v2}=75$ ，缺口纵向深度 $l_2=1\ 800\text{ m}$ ，缺口横向宽度 $w_2=848.5\text{ m}$ 。根据失效节点数 N_v 与 N_s-N_h 的关系，图 13(a)中 $N_{v1}=49 < N_s-N_h=56$ ，可以采用正方形转正六边形的网格转化修复方法；图 13(b)中 $N_{v2}=75 > N_s-N_h=56$ ，故采用折线修复方法。



(a) 网格转换修复

(b) 折线修复

图 14 修复后的雷场

图 14 为修复后的雷场示意图。在图 14(a)中，通过重新对封锁区域进行正六边形网格划分，实现了雷场的无缝理想修复；在图 14(b)中，灰色的圆点表示根据节能原则确定用来修复的节点，雷场仅移

动了 14 个节点,就在保证雷场网络连通的前提下实现对缺口的有效封锁,达到了节点移动数量少、路程短,节约系统能量的目的。

5 结论

笔者针对移动智能雷的覆盖修复问题进行了详细研究。首先介绍了常用的网格划分方法,通过对比分析选择了正方形网格覆盖的雷场布置策略,并从减小能耗的角度给出了雷场正方形网格覆盖初始形成算法。当雷场受到破坏时,提出了一种以邻居节点阈值作为判断标准的分布式雷场缺口信息融合算法,为雷场的修复提供保障。接着,针对正方形网格覆盖中出现矩形缺口的情况,设计了依据雷场受损程度的网格化修复算法。当受损程度较低时,采用网格转化的方法实现对雷场的无缝理想修复;当雷场严重受损时,以智能雷节点最少移动为原则对雷场缺口进行折线修复。最后在 MFC 平台下完成了雷场仿真应用程序的编写,通过软件仿真模拟了智能雷的整个工作流程,证实了算法的可行性与合理性。

参考文献:

- [1] 郭颖, 翟岩龙. 基于 WSN 的智能雷场通道检测算法研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(S1): 281-285.
- [2] 董文, 方向, 范磊, 等. 基于斯坦纳树的雷场网络大面积损坏修复策略[J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 197-202.
- [3] MEGERIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2005, 4(1): 84-92.
- [4] TIAN D, GEORGANAS N D. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(6): 744-761.
- [5] 赵国炳. 无线传感器网络覆盖问题研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [6] 翟萌, 贾方秀, 于纪言. 基于低成本传感器的航弹组合导航算法[J]. 兵工自动化, 2016, 35(4): 16-20.
- [7] 李存利, 焦国太, 李晓晨. 基于行为的智能封锁雷编队控制研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(3): 131-134.
- [8] 王建平, 焦国太, 秦栋泽, 等. 基于矩阵仿真法的区域封锁子弹药自修复系统设计[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(3): 71-74.
- [9] 杨露菁, 余华. 多元信息融合理论与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 2-9.