

引用格式: 盛亮, 邱志明, 罗荣, 等. 基于航道发散的港口封控布雷方案生成方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(9): 54-59. SHENG L, QIU Z M, LUO R, et al. A method of generating mine-laying scheme for port blockade based on channel divergence[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9): 54-59.

基于航道发散的港口封控布雷方案生成方法

盛亮^{1,2}, 邱志明³, 罗荣³, 孟祥尧³

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033; 2. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001;
3. 中国人民解放军91054部队, 北京 102442)

摘要: 在布雷方案的制定工作中, 针对人工作业方式和布雷辅助决策系统自动化水平不高、方案制定效率低、精确度不高、可靠性不强等问题, 提出了一种新的布雷方案快速自动生成方法。该方法设计了一种港口口门和主航道发散模型, 考虑了多种海洋环境因素和敌对反水雷威胁的影响, 结合大地主题解算理论及水深插值与提取技术, 能够快速自动生成精确的港口封控布雷方案。仿真实验与结果表明, 该方法生成的布雷方案符合海域的实际情况, 准确性、可靠性和实用性较好。

关键词: 布雷方案; 航道发散模型; 大地主题解算; 港口封控

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.013

A Method of Generating Mine-Laying Scheme for Port Blockade Based on Channel Divergence

SHENG Liang^{1,2}, QIU Zhi-ming³, LUO Rong³, MENG Xiang-yao³

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. College of Aviation Foundation, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China; 3. No. 91054 Unit of PLA, Beijing 102442, China)

Abstract: In order to solve the problems of low automation level, and low efficiency, accuracy and reliability of the existing manual operation mode and mine-laying aided decision-making system in the formulation of mine-laying scheme, a new method for fast automatic generation of mine-laying scheme is proposed. This method designs a divergence model of port entrance and main channel, with consideration of the impact of various marine environmental factors and hostile anti-mine threats. Combined with the theory of solution of geodetic problem and water depth interpolation and extraction technology, an accurate mine-laying scheme for port blockade is produced quickly and automatically. The simulation experiment results show that the mine-laying scheme generated by this method conforms to the actual situation of sea area and has preferable accuracy, reliability and practicability.

Key words: mine-laying scheme; model of channel divergence; solution of geodetic problem; port blockade

0 引言

布雷方案的制定是布雷作业中一项基础性的前期工作, 事关整个布雷作业的成败和水雷作战效能的发挥, 因而, 科学、合理、高效、准确地制定布雷方案就显得尤为重要。当前, 制定布雷方案主要有传统人工作业和半自动式辅助布雷系统两种方式: 传统人工作业主要依

靠人力和经验进行图上标绘和测算, 效率低下、准确性不高、随意性大; 半自动式辅助布雷系统在效率和准确性上有所增强, 能较好地为布雷方案的制定提供科学合理的决策支持, 辅助指挥员根据水雷的战技术指标和海战场环境制定相应的布雷方案, 但水雷的雷位点仍旧需要在软件系统上进行测算、标定, 无法完全自动生成, 难以适应快速高效的布雷需求^[1-2]。文献[3]设计了一种舰用精确布雷系统, 用于在已知布雷点的情况下开展精准布雷作业, 但没有考虑如何生成精确的布雷方案。

目前, 国内外研究布雷方案生成的文献很少, 且大

收稿日期: 2019-05-22

修回日期: 2019-06-28

作者简介: 盛亮(1982—), 男, 湖北天门人, 博士生, 讲师, 研究方向为自主无人系统任务规划。

多数集中在对已有方案的优选上。文献[4]提出了一种压缩粒子群算法用于优化水雷布阵策略,仿真表明优化后的水雷布阵提升了整体的封锁效率;文献[5]提出了一种基于网格化势场的布雷弹封控区域通道分析方法,该方法不仅能判断通道的存在性,还能求出通道的具体位置,仿真结果表明,依据该方法确定的雷区通道能够有效提升封控效率;文献[6]提出了一种自航水雷障碍对舰船目标流毁伤的解析计算方法,通过该方法对雷障中的雷位进行优化配置后能够确保舰船目标流中制定序列舰船达到预期的毁伤概率。以上文献都是在已有的雷障方案基础上通过优化算法得出达到最大封锁或毁伤概率的水雷雷位设置,不足之处是没有研究已有的布雷方案是如何产生的。

针对布雷方案制定方法自动化水平不高、效率低、精确性及可靠性不强的问题,本文基于港口口门及主航道发散模型、大地主题解算理论以及水深插值与提取技术,提出了一种快速全自动港口封控布雷方案生成方法,该方法理论清晰易懂、操作简便易行。基于海域数据的仿真实验表明,该方法可完全自动生成满足封控要求的水雷雷障所有雷位点的经纬度及水深数据,可靠性好、精确度高,能高效地制定实用性强的布雷方案。

1 港口封控数学模型

1.1 港口主航道发散模型

在对港口开展封控布雷作业时,通常是对港口口门附近或口门外主航道实施封锁布雷。港口口门指外堤堤头之间或堤头与天然屏障之间的船舶出入口^[7]。口门外主航道是以口门中心为起点,其航向朝外海方向与口门成一定角度,航道宽度通常为一个定值,设为 H_0 。图1为港口口门及主航道示意图。其中, E, F 点分别表示港口口门的两端,通常是外堤堤头或天然屏障突出点, O 点表示口门中心点。

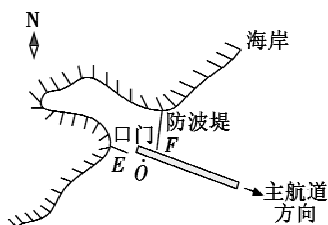


图1 港口口门及主航道示意图

Fig.1 Diagram of port gate and main channel

随着主航道向外海延伸,船舶沿着航道航行过程中,其航迹会有不同程度的发散,超过航道所限定的宽度。为确保所布雷障能够更好地发挥封锁作战效能,在制定布雷计划时需要考虑主航道上的船舶航迹发散的影响。航迹沿航道垂直方向发散的程度称为航道裕度,用 Y 表示。设航道裕度随航道长度的增加而线性

增加,即

$$Y = k \cdot x \quad (1)$$

式中: k 为航道发散系数; x 为航道当前位置距口门中心的距离。

主航道发散模型如图2所示。

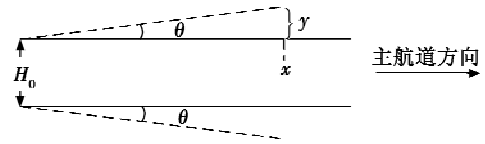


图2 主航道发散模型

Fig.2 Divergence model of the main channel

由图2易知, $k = \tan \theta$, θ 为裕度与该侧航道边缘起点的连线与主航道方向的夹角,称之为发散角。则航道裕度又可表示为

$$Y = x \cdot \tan \theta \quad (2)$$

故布雷时需要封锁的正面宽度 D 为

$$D = 2Y + H_0 = 2x \cdot \tan \theta + H_0 \quad (3)$$

1.2 水雷线快速自动生成

实施布雷作业时,雷障样式可以选取零散水雷、水雷线以及水雷群^[8]3种。当作战意图为威慑、吓阻敌方海上活动时,一般布设零散水雷;当作战意图为封锁控制敌方海上活动时,通常布设水雷线或水雷群。本文研究以港口封控为目的,雷障样式选择水雷线。

港口封控布雷作业的雷型可以选择沉底雷、锚雷等多种样式,出于经济性的考虑,对于港口和进出主航道布雷大多选择沉底雷进行港口封控。本文布设水雷线也以沉底雷为例。

1.2.1 定位水雷线中心点

影响沉底雷的布设作业以及作战效能发挥的主要因素有水深、潮汐、海水透明度、敌方反水雷威胁^[9-10]、海流以及海底地质^[11]。本文在自动生成水雷线的过程中暂不考虑洋流和海底地质这些相对次要的因素,仅考虑水深、潮汐、海水透明度以及敌方反水雷威胁的影响。

对于封锁海上船舶的沉底雷而言,最小布雷深度由海水透明度决定,而最大布雷深度受水雷引信作用半径和破坏半径决定。若某港口口门附近海域海水透明度为 a_0 ,某水雷最大布雷深度为 b_0 ,则在不考虑其他因素的情况下,封控该港口时,该型雷可布水深范围 h 为

$$a_0 < h \leq b_0 \quad (4)$$

考虑潮汐的影响时,若该港口高潮潮高为 c_0 ,低潮潮高为 c_1 ,则有可靠布雷水深范围 h 为

$$a < h \leq b \quad (5)$$

式中: $a = a_0 - c_1$,为可靠布雷最小水深,实际布雷时水深需要大于 a ; $b = b_0 - c_0$,为可靠布雷最大水深,实际布雷时水深不能超过 b 。考虑敌方反水雷兵力威胁,设置一

个布雷安全保障距离 $d_{安}$, 表征水下隐蔽布雷距口门的相对安全距离, 当布雷区域离口门中心点的距离大于 $d_{安}$ 时, 可认为被对方发现的风险较小, 布雷成功率较高。沿主航道方向, 以离口门 EF 的中点 O 距离为 $d_{安}$ 的点为起点, 以步长 Δl 依次搜索主航道中心线每一点的水深值 h , 若连续 3 个点的水深值均满足式(5), 则以中间的点为所期望布设的水雷线中心点, 如图 3 所示。

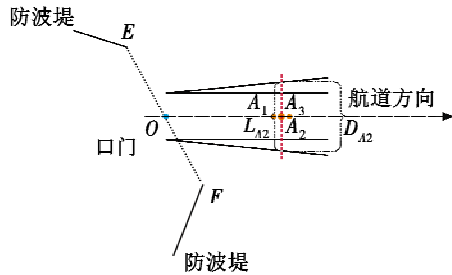


图 3 水雷线中心点的定位

Fig. 3 Locating of mine-line center point

连续的 3 点 A_1, A_2, A_3 对应的水深值 h_{A1}, h_{A2}, h_{A3} 均满足式(5), 则 A_2 作为所期望布设的水雷线中心点。由式(3)可知, A_2 点处设置水雷雷障时需要封锁的正面宽度为

$$D_{A2} = 2 |\vec{OA}_2| \cdot \tan \theta + H_0 \quad (6)$$

为达到以最小的布雷量获得最佳的封锁效果, 水雷线与航道垂直相交于中心点 A_2 , 且其遮拦宽度 L_{A2} 满足 $L_{A2} \geq D_{A2}$ 。

1.2.2 定位水雷线上的雷位点

设水雷线上布设有 m 颗水雷, 布雷间隔为 λ , 该雷水面破坏半径为 $P_{雷}$, 则水雷线的遮拦宽度 L 为

$$L = \lambda(m-1) + 2P_{雷} \quad (7)$$

式中, 水面破坏半径与雷位处水深和水雷破坏半径 P_0

相关, 即 $P_{雷} = \sqrt{P_0^2 - h^2}$, 将式(7)代入式(6)可得 $m \geq (2 |\vec{OA}_2| \cdot \tan \theta + H_0 - 2P_{雷}) / \lambda + 1 \quad \lambda \geq \lambda_{min} \quad (8)$

式中: 雷型一定时, $P_{雷}$ 随 h 的变化而改变, 且 $0 \leq P_{雷} \leq P_0$; λ_{min} 为最小布雷间隔。因而, 为方便计算, 同等条件下在保证封锁要求时, 令 $P_{雷} = 0$, 则有

$$m \geq (2 |\vec{OA}_2| \cdot \tan \theta + H_0) / \lambda + 1 \quad \lambda \geq \lambda_{min} \quad (9)$$

实际作业时, 在保证封锁要求的前提下, 所布水雷数量自然是越少越好, 故 m 取

$$m = \left\lceil \frac{2 |\vec{OA}_2| \cdot \tan \theta + H_0}{\lambda} \right\rceil + 1 \quad \lambda \geq \lambda_{min} \quad (10)$$

若水雷数量和布雷兵力均充足且作战决心为最大化封锁效率, 则布雷间隔取最小, 可得此时的布雷量为

$$m = \left\lceil \frac{2 |\vec{OA}_2| \cdot \tan \theta + H_0}{\lambda_{min}} \right\rceil + 1 \quad (11)$$

1) 当 m 为奇数时, 水雷线中心点 A_2 即为中间雷位

点 B_0 。其他雷位点 B_1, B_2, \dots, B_{m-1} 以 B_0 为中心, 以 λ_{min} 为间隔依次对称散开, 雷位点连成的水雷线垂直主航道方向, 如图 4a 所示。

通过大地主题解算 Bowring 公式^[12-13], 可由口门点的经纬度、主航道航向、 OA_2 距离得到 A_2 亦即 B_0 的经纬度, 再由 B_0 经纬度得到余下所有雷位的经纬度; 然后根据雷位经纬度从水深数据中提取对应点的水深值, 若所有雷位点的水深值均满足式(5), 则当前水雷线即为满足条件的布雷方案; 若有雷位点不满足式(5), 则沿着主航道方向以步长 Δl 搜索下一个水雷线的中心点。

2) 当 m 为偶数时, 水雷线中心点 A_2 为最内侧相邻两雷位的中心。 B_0, B_1 与 A_2 间隔 $\lambda_{min}/2$, 其他雷位以 λ_{min} 为间隔依次对称散开, 如图 4b 所示。

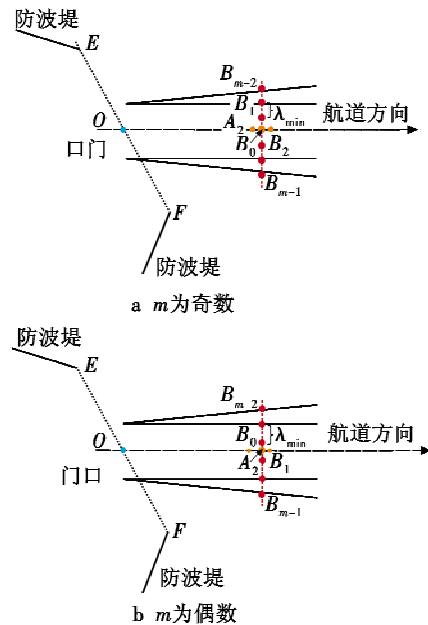


图 4 不同情况下水雷线的雷位

Fig. 4 The mine locations in mine-line under different conditions

与 m 为奇数时一样, 首先求出所有雷位的经纬度, 之后提取相应雷位的水深值并判断所有雷位点的水深值是否满足式(5): 若满足, 则当前水雷线即为满足条件的布雷方案; 若不满足, 则沿着主航道方向继续搜索下一个水雷线的中心点。直至得到最小布雷间隔下符合要求的水雷雷障方案。

若水雷数量不足或布雷兵力有限时, 设可布雷量为 n , 为已知值, 由式(9)可知

$$\lambda \geq (2 |\vec{OA}_2| \cdot \tan \theta + H_0) / (n-1) \quad (12)$$

实际计算时布雷间隔 λ 为

$$\lambda = (2 |\vec{OA}_2| \cdot \tan \theta + H_0) / (n-1) \quad (13)$$

同样以 A_2 点满足式(5)为例, 当 n 为奇数时, A_2 点即为雷位中心点 C_0 , 其余雷位点 C_1, C_2, \dots, C_{n-1} 以

间隔 λ 依次对称散开,通过上述求取水深值的办法来判断所有雷位点的水深值是否满足式(5):若满足,则当前水雷线即为满足条件的布雷方案;若不满足,则沿着主航道方向继续搜索下一个水雷线中心点。当 n 为偶数时,最内侧相邻两雷位 C_0, C_1 与 A_2 间隔 $\lambda/2$,其余雷位点以间隔 λ 依次对称散开,同理,判断所有雷位点的水深值是否满足式(5):若满足,则当前水雷线即为满足条件的布雷方案;若不满足,则沿着主航道方向继续搜索下一个水雷线中心点。直至得到给定水雷数量条件下符合要求的布雷方案。

2 布雷方案自动生成算法

算法基于地理坐标系下经纬度解算和水深数据提取技术,通过建立港口口门、主航道的数学模型,考虑海洋环境和敌对威胁因素,自动生成符合条件的布雷方案。

2.1 算法步骤

1) 根据口门两侧堤头的经纬度计算出口门中心点的经纬度值,即主航道起始中心点。设置航道搜索步长 Δl ,其取值范围是 $0 < \Delta l < \lambda_{\min}/2$ 。根据船舶在主航道航行时航迹的统计数据,概略设置发散角 θ ,查询主航道的方向 α ,设置安全保障距离 $d_{安}$ 。

2) 根据港口海域海水透明度、水雷最大布雷深度以及港口海域高潮潮高和低潮潮高的值,得出式(5); i 赋值 2,为外循环搜索迭代次数。

3) 沿主航道方向从距口门中心点外 $d_{安}$ 点处(设为点 G),以 Δl 为步长,取距离 G 点 1 倍步长和 2 倍步长的 2 个点,通过 Bowring 公式得到这 2 个点的经纬度值。

4) 沿主航道方向,以 Δl 为步长,取距离 G 点 $i+1$ 倍步长的点,通过 Bowring 公式得到该点的经纬度值;将距离 G 点 $i-1$ 倍步长处、 i 倍步长处以及 $i+1$ 倍步长处点分别简称为 $i-1$ 点、 i 点和 $i+1$ 点。

5) 根据 $i-1$ 点、 i 点和 $i+1$ 点的经纬度值,查询对应的水深值,判断 3 个点的值是否满足式(5):若是,则 i 点为水雷线中心点 A_2 ,转 6);若否,则 $i=i+1$,转 4)。

6) 计算第 i 点离 O 点的距离。若水雷和布雷兵力充足,则根据式(11)计算需要布设的水雷数 m ,再依据 m 的奇偶性、水雷线方向、 A_2 点经纬度、布雷间隔计算各个雷位点的经纬度值;若水雷或布雷兵力不足,给定布雷量 n ,根据式(13)求得布雷间隔 λ ,再依据 n 的奇偶性、水雷线方向、 A_2 点经纬度、布雷间隔计算各个雷位点的经纬度值,最后求得水雷线上全部布雷点的经纬度。

7) 判断水雷线上各雷位点水深值是否满足式(5):若都满足,则转 8);若有任意一个以上的点不满足,则 $i=i+1$,转 4)。

8) 算法结束,返回水雷线上各雷位点经纬度和对

应的水深值。

2.2 算法流程

算法流程由外和内两个循环组成:外循环负责找到符合要求的水雷线中心点;内循环以中心点为基准,计算所有雷位的具体位置和对应水深值。外、内循环流程如图 5 所示。

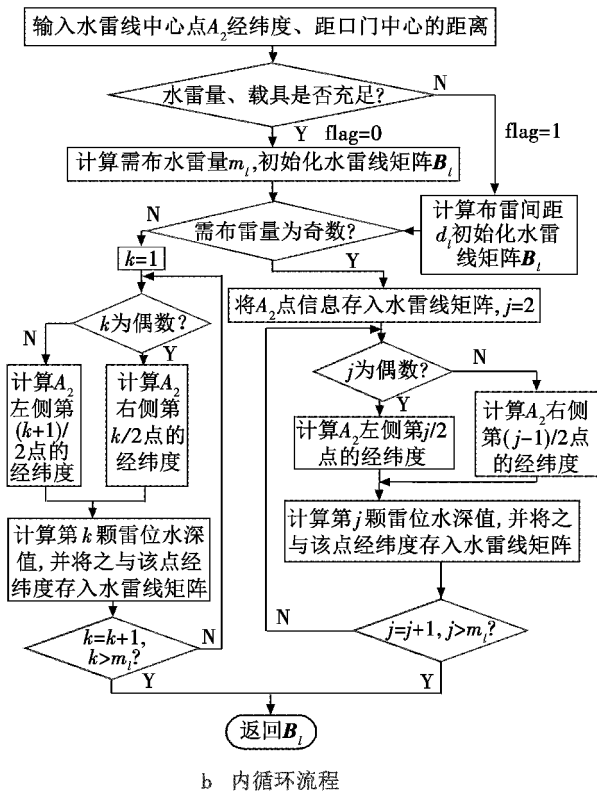
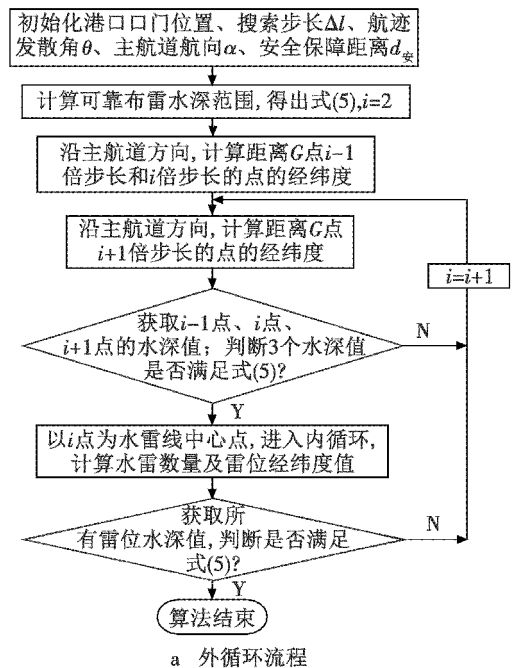


图 5 外、内循环流程

Fig. 5 Process of the external and internal loops

3 基于海域数据的仿真实验与结果分析

通过仿真实验验证本文港口封控布雷方案快速自动生成方法的合理性、有效性及准确性。

3.1 港口海域选取与仿真空间建立

某港口海域、口门及主航道如图6所示。

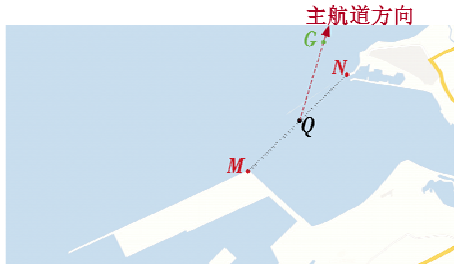


图6 某海域港口口门及主航道

Fig. 6 Port gate and main channel in a sea area

通向外海的南侧天然堤堤头为点M,北侧防波堤堤头为点N,口门中心点为Q,主航道航向30°。通过水深数据查询可知,从口门处沿主航道100 km处S点水深值已超120 m,已处于不可布设区,故而,选取包含点M和S之间区域的海域建立仿真空间即可。本文作业海域选取经度在东经 $U^\circ \sim (U+1)^\circ$ 、纬度在北纬 $V^\circ \sim (V+1)^\circ$ 之间的某海域,坐标原点的经纬度设为 $(U^\circ E, V^\circ N)$ 。下图中X代表经度,Y代表纬度,单位均为 $(^\circ)$,间隔 $1/64 (^\circ)$;犬顶方向为水深减少方向,水深范围为 $-150 \sim 100$ m,间隔1 m,向上水深绝对值减少。建立的仿真空间为 $64 \times 64 \times 250$ 的栅格空间,图中,G点为安全保障点。

作业海域仿真空间如图7所示。

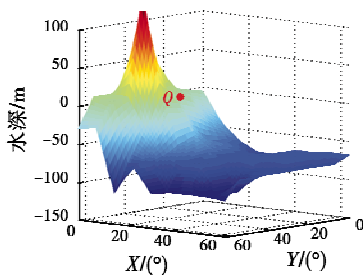


图7 作业海域仿真空间

Fig. 7 Spatial simulation of operational sea area

3.2 基于海域数据的布雷方案生成仿真与分析

仿真条件假定如下:主航道宽度为1000 m,航道发散角 $\theta = 5^\circ$,最小布雷间隔设为300 m,主航道方向 $\alpha = 30^\circ$,安全保障距离 $d_{\text{安}} = 15$ km。该海域海水透明度设为30 m,高潮潮高3.5 m,低潮潮高1.5 m,某雷最大布雷水深假定为120 m。当水雷和载具数量充足时,采用最小间隔进行布雷,水深通过线性插值进行海

洋三维环境仿真,水雷雷障布设仿真如图8所示。

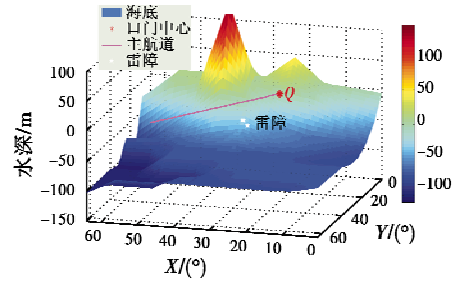


图8 可布水雷量充足时的三维雷障方案

Fig. 8 The scheme of 3D mine-obstacles with sufficient deployable mines

对应图8中的三维雷障方案,水雷雷障俯视图如图9所示。

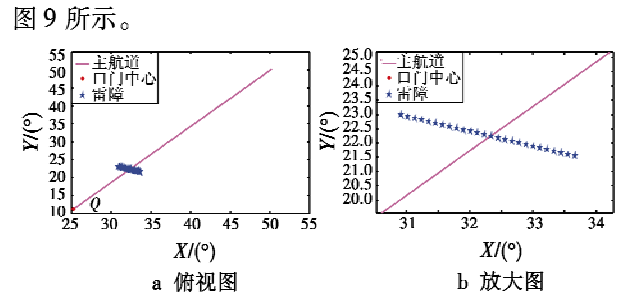


图9 可布水雷量充足时的雷障俯视图

Fig. 9 Top view of the mine-obstacles with sufficient deployable mines

由图8~图9可知,充分布雷时,雷位点以最小间隔在水雷线上依次展开,达到最大封锁效果,需布设水雷26个,且能够得出布设每个水雷的精确经纬度值和相对应的水深值。水雷线上26个雷位点的水深值如表1所示。

表1 26个水雷雷位的水深值

Table 1 Depth values at 26 mine-locations

水雷序号	雷位水深/m	水雷序号	雷位水深/m	水雷序号	雷位水深/m
1	-30.75	10	-31.281	19	-38.5469
2	-30.75	11	-36.375	20	-31.2813
3	-30.75	12	-31.281	21	-38.5469
4	-30.75	13	-36.375	22	-31.2813
5	-30.75	14	-31.281	23	-38.5469
6	-31.281	15	-38.547	24	-31.8125
7	-30.75	16	-31.281	25	-38.5469
8	-31.281	17	-38.547	26	-31.8125
9	-36.375	18	-31.281		

由海域信息和水雷信息可知,可靠、有效的布雷水深范围为28.5~116.5 m。由表1易知,当以最小间隔进行充分布雷时,算法生成的布雷方案是完全符合实际要求的。

当水雷和载具数量不足时,设可布水雷数量为10,得到的仿真结果如图10、图11所示。

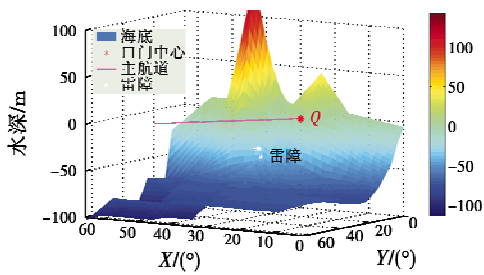


图10 可布雷量不足时的三维雷障方案

Fig. 10 The scheme of 3D mine-obstacles with insufficient deployable mines

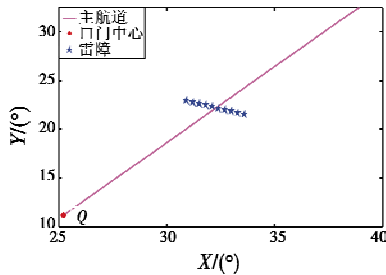


图11 可布雷量不足时的雷障俯视图

Fig. 11 Top view of the mine-obstacles with insufficient deployable mines

10个水雷雷位点水深数据值如表2所示。

表2 10个水雷雷位点水深数据

Table 2 Depth values at 10 mine-locations

水雷序号	雷位水深/m	水雷序号	雷位水深/m
1	-30.75	6	-31.2813
2	-30.75	7	-38.5469
3	-30.75	8	-31.2813
4	-31.281	9	-38.5469
5	-36.375	10	-31.8125

由表2可知,10个水雷雷位的水深值也满足布雷水深范围,当水雷和载具数量不足时,算法生成的布雷方案也是完全符合实际要求的。两种情形均是在基于海域数据条件下开展的仿真实验,结果表明,本文所提方法是可行的,具备较强的实用性。

4 结论

布雷方案的合理性和精确性极大地影响了水雷作战效能的充分发挥。鉴于此,本文提出了一种基于大地主题解算和水深插值与提取技术的布雷方案快速自动生成方法。新方法相比于传统的布雷方案制定方法优势明显,主要体现在:

1) 在输入布雷海域相关信息后,能够快速自动地

生成合理的布雷方案,大大提升了制定方案的效率;

2) 生成的布雷方案包括所有雷位精确的经纬度信息和对应的水深数据,较大地提升了布雷方案的精确性和实用性,也更方便指挥员评估其合理性。

该方法也存在不足:由于水深数据是由精度不高的某海域水深数据集经插值所得,且由Bowring公式进行大地主题解算与水深提取时会存在误差,导致规划的雷位点水深值与实际值会有差距。下一步工作会进一步优化完善该方法。

参考文献

- [1] 周杰,高洪林,王新华. 布雷辅助决策系统的设计与实现[J]. 舰船电子工程,2010,30(4):36-39.
- [2] 夏立新. 水雷和布雷[J]. 水雷战和舰船防护,1997,3(4):26-31.
- [3] 童增埔. 舰用计算机控制精确布雷系统[J]. 舰船科学与技术,1991(2):33-50.
- [4] 蔡尚. 水下爆炸作用下舰船毁伤效能评估及水雷布阵策略优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [5] 冯勇,冯钟林,许梅生. 基于网格化势场的布雷弹封控效能分析[J]. 弹箭与制导学报,2016,36(4):153-156.
- [6] 冷相文,朱红波,张旭. 自航水雷障碍对舰船目标流毁伤效能评估方法[J]. 南京理工大学学报,2014,38(3):371-374.
- [7] 葛一. 中外港口口门有效宽度研究[D]. 大连:大连海事大学,2014.
- [8] 韩鹏,李玉才. 水中兵器概论(水雷分册)[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007.
- [9] 孟晶,李庆民,刘天华. 改进的二次正交设计在反水雷效能模型中的应用[J]. 海军工程大学学报,2011,23(4):84-89.
- [10] 王睿,李庆民,李华. 马尔科夫链扫雷效果评估模型可信度验证[J]. 海军工程大学学报,2007,19(6):108-112.
- [11] 衡辉,王新华,杨迎化,等. 海洋环境对UUV布雷作战影响分析[J]. 水雷战与舰船防护,2017,25(1):38-40,86.
- [12] 胡炎,张丕旭,石章松. 基于Bowring公式的超视距目标定位算法实现[J]. 舰船电子工程,2008,28(11):169-171.
- [13] 谢晓方,张欣景. 航路规划中大地主题解算的简化方法[J]. 火力与指挥控制,2004,29(3):77-80.