

空投水雷布雷间隔的战术应用问题

马善峰¹, 李居伟¹, 孙明太¹, 刘海光^{1,2}

(1. 海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对最小布雷间隔不适用于空投布雷作战的问题, 提出了战术最小布雷间隔的概念。结合空投水雷弹道特性, 分析了布雷散布误差影响因素, 探讨了多枚水雷连续投放时散布误差的相关性问题, 研究了战术最小布雷间隔的确定方法。最后仿真分析了考虑空投水雷散布误差时, 战术最小布雷间隔的选取, 以及对布雷作战效果的影响。

关键词: 空投水雷; 散布误差; 布雷间隔; 作战效果

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)12-0076-04

Tactical Application of Drop-Interval for Air-Launched Mines

MA Shan-feng¹, LI Ju-wei¹, SUN Ming-tai¹, LIU Hai-guang^{1,2}

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China;
2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266041, China)

Abstract: Since the minimum drop-interval is not applicable to air-launched mines, the concept of “tactical minimum drop-interval” is proposed. According to the trajectory characteristics of airdropped mine, the factors that have effect on dispersion error are analyzed, the dispersion error correlativity when multiple mines are dropped continually is discussed, and the mathematical models are established. Then, a method for determining the tactical minimum interval of airdropped mines is presented. Finally, simulation is made based on the mathematical models. The selection of the tactical minimum interval with consideration of dispersion error, and its effect on the operational effectiveness, are analyzed according to the simulation results.

Key words: air-launched mine; dispersion error; mine-dropping interval; operational effectiveness

0 引言

水雷战历来备受重视, 即使在当下美军最前沿的“空海一体战构想”中, 水雷战也被认为具有很高的价值^[1]。其中, 攻势布雷对布雷平台的隐蔽性、快速性要求高, 航空布雷平台无疑是比较理想的选择。然而, 空投水雷投放时的速度大、高度高, 并且水雷需要经过投放离机、空中开伞、带伞降落、入水脱伞、水中下沉等运动阶段才能进入工作状态。需经历空气和海水两种不同的环境介质, 会受到各种随机因素的影响, 从而导致水雷的实际布点与期望布点产生一定的偏差^[2], 即为布雷散布误差。文献[3]研究了布雷散布误差对舰船触雷毁伤概率的影响, 从仿真数据来看, 文中描述的情况主要适用于布雷散布误差较大的自航式水雷, 对于

空投水雷并不十分合适; 同时, 该文献的布雷散布误差计算方法, 不考虑多雷雷位散布的相关性问题, 这一点对于空投水雷也不适用。

在布雷作战中, 最小布雷间隔是一个重要的参数。而在空投布雷中, 水雷散布误差较大, 选取布雷间隔时应当充分考虑空投散布误差的影响, 特别是传统的最小布雷间隔已经难以适用。为此, 本文提出了战术最小布雷间隔的概念。

1 空投水雷散布分析

与带伞航空炸弹相比, 研究空投水雷的布放位置散布时, 除了水雷空中运动的随机性之外, 还需要考虑到水雷水下运动的随机性。因此, 研究空投水雷散布时, 可以将整体散布误差分为两个相互独立的部分进行分析: 一是空中弹道散布; 二是水下弹道散布。相比较而言, 水雷水下运动的随机误差较小, 空中带伞运动随机误差较大。

1.1 空中弹道散布

就单枚水雷而言,影响飞机空投水雷空中弹道散布的随机因素主要包括:

- 1) 水雷技术散布,主要包括水雷质量、气动力系数、降落伞面积等偏离水雷设计理论值的散布;
- 2) 投雷条件散布,主要包括飞机投水雷高度、速度、水雷初始姿态等偏离平飞投放水雷理论值的散布;
- 3) 空中气象散布,主要是指水雷完成空中弹道受到的随机风的影响。

根据空投航弹、水雷等非制导武器的散布规律^[4],结合空投水雷作战使用中投雷高度较低的情况,可将空投散布分为投雷航向上的散布和垂直于投雷航向的散布两个相互独立的方面考虑,一般认为它们分别服从正态分布。根据正态分布概率偏差和均方差的关系有

$$\begin{cases} \sigma_x = E_x / \sqrt{2\rho} \\ \sigma_z = E_z / \sqrt{2\rho} \end{cases} \quad (1)$$

式中:下标 X 和 Z 分别表示投雷航向和垂直于投雷航向; σ_x 和 σ_z 分别为空中弹道落点在投雷航向和垂直于投雷航向上的散布均方差,单位为 m ; E_x 和 E_z 分别为空中弹道落点在投雷航向和垂直于投雷航向上的散布概率误差,单位为 m ; $\rho = 0.4769$, 为常数。

当飞机连续布放多枚水雷时,一般采用恒定的飞行状态,即一定飞行速度的水平飞行姿态,设定相同的投雷间隔,进行多枚水雷的连投操作。当布雷间隔较小时,相邻两枚水雷投放时的飞机飞行状态变化不大,空中环境变化也较小,此时两枚水雷的散布误差,具有一定的相关性。而文献[3]研究的一个基本出发点是:所有水雷的散布误差都相互独立。

同时,连续投放多枚水雷时,散布误差的相关性还应当有这样的规律:从第一枚水雷开始,随着投雷间隔增加,散布误差的相关性就会逐渐降低。

综上所述,在不失一般性的条件下,可以将多雷连投时的落点散布相关性用如下方法进行描述。

设等间隔连续投放水雷 m 枚,第 i 枚水雷的落点为在投雷航向上的坐标 X_i ,则可认为 X_i 是一个服从正态分布的随机变量,均方差为 σ_i 。并且各雷落点散布均方差的关系有

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \dots = \sigma_i \quad (2)$$

设 $\sigma = \sigma_i$, X_i 与 X_k 的协方差为 c_{ik} , X_i 与 X_k 的相关系数为 ρ_{ik} ,则有

$$c_{ik} = \rho_{ik} \sigma_i \sigma_k = \rho_{ik} \sigma^2 \quad (3)$$

由于 $c_{ik} = c_{ki}$ ($i \neq k, i, k = 1, 2, \dots, m$), 则

$$\rho_{ik} = \rho_{ki} \quad i \neq k, i, k = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

设 m 维随机变量 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m)$ 的协方差矩阵为

$$C, \text{ 且 } C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mm} \end{pmatrix} \circ$$

根据式(2)~式(4)可知 C 是一个对称矩阵,可化简为

$$C = \sigma^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1m} \\ \rho_{12} & 1 & \dots & \rho_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1m} & \rho_{2m} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

根据上文分析,式(5)中的相关系数 ρ_{ik} 可由第 i 枚水雷和第 k 枚水雷的间隔来表达。设相邻两雷的投雷间隔为 d , 则第 i 枚水雷和第 k 枚水雷的间隔 D_{ik} 可表示为

$$D_{ik} = (k - i) \cdot d \quad (6)$$

设具有相关性的最大投雷距离为 D_{\max} , 则该距离亦可表达为最小不相关的投雷距离。根据服从正态分布随机变量的性质,此处的不相关即为相互独立。因此, D_{\max} 的实际意义是:两枚水雷的布放距离若大于 D_{\max} , 则两者的散布相互独立。同时,结合随机变量相关系数的定义有:当 $0 \leq D_{ik} \leq D_{\max}$ 时

$$\rho_{ik} = \begin{cases} 0 & D_{ik} = D_{\max} \\ a & 0 < D_{ik} < D_{\max} \\ 1 & D_{ik} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, a 满足 $1 > a > 0$ 的条件。该式给出了投雷散布相关性与水雷的间隔之间的定性关系,亦即 a 与 D_{ik} 的定性关系。

然而,与文献[5]中的情况类似,由于具有随机性的影响因素十分复杂,两者的定量关系难以用数学方法描述。因此,要确定 a 的具体数学表达也十分困难。此处暂且假定两者具有广义的线性关系——直线关系,即有

$$\rho_{ik} = 1 - D_{ik} / D_{\max} \quad (8)$$

结合式(6)有

$$\rho_{ik} = 1 - \frac{(k - i) \cdot d}{D_{\max}} \quad (9)$$

在上述数学模型的基础上,采用模拟法计算水雷布放位置时,可以将水雷空中弹道落点在投雷航向和垂直于投雷航向上分别考虑。

1.2 水下弹道散布

影响飞机空投水雷水下弹道散布的随机因素主要包括:水雷自身参数偏离设计理论值的误差;水雷入水时的姿态、速度、脱伞时间等偏离理论值的误差;水下随机浪涌等对水雷水下弹道的影响等。对于沉底雷而言,由于布设水深较浅、自身重量较大、水下运动时间

较短,因此上述随机因素对布放位置误差的影响,相比空中弹道误差而言要小很多。为方便处理,本文将水雷水下弹道在投雷航向和垂直于投雷航向上的散布误差分别考虑,均假定其为服从正态分布的随机变量,均方差分别为 $\sigma_{s,x}$ 和 $\sigma_{s,z}$ 。

在下文的模拟法仿真计算中,上述两种散布误差分别考虑,进行累加计算,进而得到整体弹道散布误差。首先模拟产生带有散布误差的空中弹道落点,然后将此点作为散布中心,结合水下弹道散布均方差,模拟产生水雷最终布放位置。

2 最小布雷间隔与战术最小布雷间隔

2.1 最小布雷间隔

最小布雷间隔 d_{\min}^1 是指:水雷引爆时,相邻水雷不会受到任何影响的最小距离。若相邻水雷的布设距离小于该间隔,则当其中一枚水雷被引爆时,很可能影响另一枚水雷的正常工作,甚至引起殉爆。为充分发挥水雷作战隐蔽性和持久性,应当尽量避免这种邻雷间隔过小的情况。

然而,在水雷技术参数中给出的最小布雷间隔,往往是根据一定条件下的水雷技术试验计算出的,并且是一个主要用于描述水雷抗邻雷爆炸能力的技术指标^[6],同时,该最小布雷间隔在数值上往往与空投水雷散布误差处于同一数量级。因此,在实际作战中,如果仅仅依靠这个最小布雷间隔进行布雷操作,不考虑投雷散布误差的影响,就有可能出现邻雷间隔小于最小布雷间隔的情况。

例如,如果按照 d_{\min}^1 进行布雷操作,由于散布误差的影响,极有可能出现相邻两雷之间的距离小于 d_{\min}^1 。如果将布雷间隔加大,则出现这种情况的可能性就会降低。

2.2 战术最小布雷间隔

鉴于上述情况,在实际布雷操作中,应当结合布雷散布误差,计算出一个适用于实际作战的最小布雷间隔,本文称之为战术最小布雷间隔,表示为 d_{\min} ,其定义为:按此间隔布放水雷时,出现邻雷间隔小于最小布雷间隔的概率小于 P_{sb} 。其中, P_{sb} 为固定概率值,且 P_{sb} 应当趋近于1。如当 $P_{sb}=0.99$ 时,可认为按战术最小布雷间隔布放水雷不会出现间隔过小的情况。同时,根据战术最小布雷间隔的物理意义有

$$d_{\min} > d_{\min}^1 \quad (10)$$

战术最小布雷间隔的计算方法:本文采用基于作战过程模拟的蒙特卡罗法^[4]计算战术最小布雷间隔。首先根据布放散布误差等(即式(2)~式(9)),按照一定的间隔 d ,模拟产生多枚水雷的布放位置;然后,判

断布放水雷是否有小于最小布雷间隔 d_{\min}^1 的情况,若有,则不合格布雷(即间隔 d 过小)的次数 N_{sb} 增加一次。通过 N 次模拟出现邻雷间隔过小的概率为

$$P_{sb} = N_{sb}/N \quad (11)$$

式中, $N > 2000$ 。

3 布雷效果评价指标分析

3.1 指标选取

布放水雷线(群)是航空兵攻势布雷作战的主要形式,一般采用舰艇至少触一雷的概率作为衡量作战效果的指标。舰艇至少触一雷的概率为

$$P = P_{tg} \cdot P_{cl} \quad (12)$$

式中: P_{tg} 表示舰艇通过水雷障碍的概率,主要考察布雷区域的选择是否合理有效; P_{cl} 表示舰艇在雷障中经过水雷作用地带的概率(即触雷概率),主要考察水雷布放参数选取是否合理有效。

本文主要研究具体布雷参数的问题,因此将舰艇在雷障中的触雷概率 P_{cl} 作为布雷效果评价的指标。同时,在研究战术最小布雷间隔时,则采用出现邻雷间隔过小的概率,亦即将水雷爆炸不影响邻雷工作的概率作为评价指标,此概率即为 $1 - P_{sb}$ 。

3.2 计算方法

采用基于作战过程模拟的蒙特卡罗法^[4]计算舰艇触雷概率 P_{cl} 。具体方法是:首先根据布放间隔、散布误差等参数,在一定的区域内模拟产生水雷布放位置;然后,根据水面舰船通过该区域的统计规律,模拟单艘舰艇出现在水雷区域的位置;进而,根据水雷有效作用宽度等技术参数,判定该舰艇是否进入水雷作用范围内,若是则认为触雷,触雷次数 N_{cl} 增加一次,否则为未触雷。通过 N 次模拟,则有

$$P_{cl} = N_{cl}/N \quad (13)$$

式中, $N > 2000$ 。

4 算例分析

4.1 战术最小布雷间隔

仿真条件:等间隔布雷数量4枚或8枚;最小布雷间隔 $d_{\min}^1 = 80$ m;空中弹道在投雷航向的散布均方差 $\sigma_x = 30$ m,在垂直于投雷航向的散布均方差 $\sigma_z = 20$ m;水下弹道在投雷航向和垂直于投雷航向的散布均方差为 $\sigma_{s,x} = \sigma_{s,z} = 3$ m;模拟次数4000次。

仿真结果:图1为不同投雷数量下,投雷间隔与不影响邻雷工作的概率关系;图2为不同投雷散布时,投雷间隔与不出现邻雷间隔过小的概率的关系;图3为假设连续投放的各枚水雷散布误差相互独立时,投雷间隔与不出现邻雷间隔过小的概率的关系。

图 2 中的投雷数量为 4 枚。投雷散布 1 为 $\sigma_x = 30$ m, $\sigma_z = 20$ m。投雷散布 2 为 $\sigma_x = 50$ m, $\sigma_z = 30$ m。其余的仿真参数不变。

图 3 中的投雷数量为 4 枚。其余的仿真参数与图 1 相同。

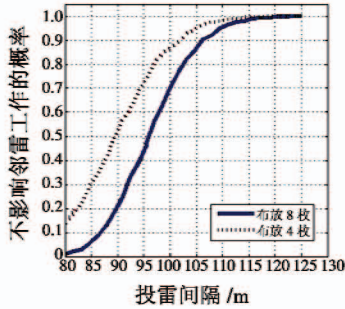


图 1 投雷数量与战术投雷间隔的规律
Fig. 1 Relationship between quantity and drop-interval of air-launched mine

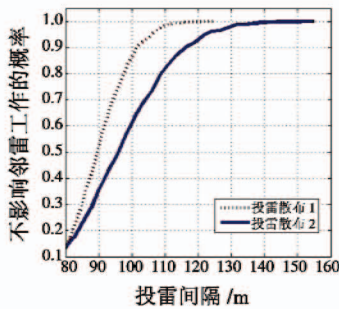


图 2 投雷散布与战术投雷间隔的规律
Fig. 2 Relationship between dispersion error and drop-interval of air-launched mine

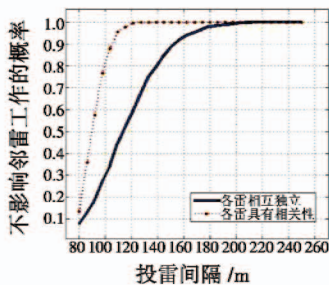


图 3 各雷散布相关性与投雷间隔的规律
Fig. 3 Relationship between dispersion error relativity and drop-interval of air-launched mine

结果分析如下。

1) 根据上文分析的战术最小布雷间隔的意义,图 1 中投雷间隔 d 在 120 m 时,投雷数量不论是 4 枚还是 8 枚,不出现邻雷间隔过小的概率均约为 0.992。因此,在最小布雷间隔为 80 m 时,战术最小布雷间隔选取为 120 m 比较合适。同时,图 1 还说明:战术最小布雷间隔的选取与投雷数量无关。

2) 式(9)成立的主要原因是投雷散布误差的存

在,战术最小布雷间隔的大小也取决于散布误差的大小。图 2 说明:散布误差越大,战术最小布雷间隔也应当越大。例如,投雷散布 2 时,战术最小布雷间隔选取为 140 m 比较合适。

3) 图 3 中,连续投放的各枚水雷散布具有相关性时,战术最小布雷间隔约为 120 m;假设各枚水雷散布相互独立则战术最小布雷间隔约为 220 m。说明:连续投放的各枚水雷散布误差是否具有相关性,对投雷间隔的选取影响很大。因此,该相关性是作战使用必须考虑的问题。

4.2 舰船触雷概率

仿真条件:布雷区域宽度 600 m;布放方式为水域宽度内等间隔均匀布放(见图 4),水雷线垂直于舰船通过方向;水面舰船通过布雷区域的位置服从均匀分布;水雷危险带宽度 70 m;空投水雷的空中弹道在投雷航向上的散布均方差 $\sigma_x = 30$ m,在垂直于投雷航向的散布均方差 $\sigma_z = 20$ m;水下弹道在投雷航向和垂直于投雷航向的散布均方差为 $\sigma_{,x} = \sigma_{,z} = 3$ m;模拟 4000 次。

设最小布雷间隔 $d_{min}^1 = 80$ m,取战术最小布雷间隔 $d_{min} = 120$ m(根据上文计算结果)。

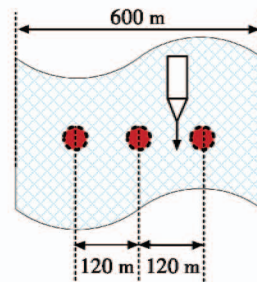


图 4 水雷均匀布放示意图

Fig. 4 Sketch of uniform mine dropping

结果分析如下。

1) 假设布放 1 条水雷线:采用战术最小布雷间隔布雷时,在该区域内最多能够布设 4 枚水雷,舰船触雷概率约为 88%;若采用最小布雷间隔布雷,则最多布放 6 枚水雷,舰船触雷概率约为 96%。

由此可见,由于布雷间隔的增大,考虑到布雷散布时(满足战术最小布雷间隔要求),作战效果明显降低。为了弥补这种情况的不足,在作战中应当增加水雷线,如采用战术最小布雷间隔布设 2 条水雷线,直线通过的舰船触雷概率将会增加到约 99%。

2) 采用文献[3]中的方法,假设连续布放各枚水雷的散布误差相互独立。在同样的仿真条件下,采用战术最小布雷间隔布设一条 4 枚水雷线,舰船触雷概率约为 95%。因此,在连续布放的各枚水雷的散布误差相互独立的假设条件下,布雷作战效果评估时的计算

(下转第 92 页)