

基于排队论的水下预置反舰导弹部署优化

孙凡, 邹强, 彭英武

(海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 随着武器装备的逐渐智能化和信息化, 武器系统的水下预置已经成为了未来水下无人作战体系中的重要研究内容之一。以封锁作战为背景, 用水下预置反舰导弹构建多层防御阵线封锁战略航道, 对敌实施打击。利用排队论相关理论研究了水下预置反舰导弹对来袭舰船编队总的命中概率, 并建立了其线形部署优化模型。通过仿真算例验证了模型的有效性, 分析了影响优化结果的其他因素, 结果表明: 该模型能够准确找出在总命中概率最大时最佳的部署层数和各层部署数量, 可为水下预置反舰导弹的部署决策提供一定科学参考。

关键词 水下预置; 反舰导弹; 部署优化; 排队论

中图分类号 TJ6:E925.2

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2020)05-0393-04

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.05.005

Deployment Optimization of Underwater Preset Anti-Ship Missiles Based on Queuing Theory

SUN Fan, ZOU Qiang, PENG Yingwu

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract With the gradual intelligence and informatization of weapons and equipment, the underwater preset technology of weapon systems has become one of the important research contents in the future underwater unmanned combat system. Taking the blockade operation as background, this article builds a multi-layer defensive front with underwater preset anti-ship missiles to block off the strategic channel to strike the enemy. In this paper, using the related theories of queuing theory, the total hit probability of underwater preset anti-ship missiles against the incoming ship formation is studied and its linear deployment optimization model is established. The effectiveness of the model is verified by simulation examples, and other factors affecting the optimization results are analyzed. The results show that the model can accurately find the optimal number of deployment layers and the number of deployments in each layer when the total hit probability is the highest. It can provide a certain scientific reference for the deployment decision of the next underwater preset anti-ship missiles.

Key words underwater preset; anti-ship missile; deployment optimization; queuing theory

0 引言

现代海战中, 各军事强国都在加紧对海洋控制权的掌握, 其中海上封锁已经成为夺取制海权的常用手段。相较于水雷封锁时毁伤半径小、封锁

区域有限、布雷数量要求多等劣势, 水下预置反舰导弹在封锁海域方面具有打击距离远、封锁面积大、命中概率高等天然优势, 将其部署在战略航道或敏感海域以进一步提升区域拒止能力, 将是未来海战中兵器使用的新方向。

收稿日期: 2020-07-23

作者简介: 孙凡(1991-), 男, 硕士生, 助理工程师, 主要从事武器系统运用与保障研究。

基金项目: 国防科技创新项目资助(19H86305ZD01300102)。

但同时,水下预置反舰导弹本身投放困难且难以回收,不可能随意大批量进行布放,因而有必要研究在部署少量导弹的情况下如何精准投放、部署优化以增大作战效能。

近年来,国内许多学者在水中兵器的部署策略和优化求解等方面开展了研究,衡辉^[1]等从兵力运用、布设方式以及性能差异水雷组合等方面探索了联合封锁作战中水雷的运用模式。冷相文等^[2]、卢楠等^[3]基于雷位散布特性分别研究了雷位横向间距与舰船毁伤概率、水雷毁伤概率与雷位误差之间的关系。马硕等^[4]建立了布雷数量计算的线性整数规划模型,通过该模型可以计算出封锁作战中达到既定作战效率的最少布雷数量。朱红波等^[5]以水雷障碍对目标舰船评估毁伤概率为评估指标,研究了一种期望雷位优化配置方法。可以看出,针对水中兵器的研究主要集中于水雷等传统武器的组网布阵、封锁效能等问题上,较少涉及其他新型武器装备。

本文基于排队论的理论,考虑在多发反舰导弹协同工作的情况下,以目标舰船进入防线的毁伤概率为优化目标,建立了水下预置反舰导弹水下线形部署优化模型,并通过仿真算例验证了优化模型的有效性和合理性。

1 问题描述

水下预置反舰导弹是预先放置于大陆架、岛链等敏感海域进行长期潜伏,战时通过特殊手段激活后,从海底升空执行打击任务。既然需要在水下进行长期的潜伏待机,那么在平时投放时势必要考虑投放的形式、位置、数量等问题,即武器的部署问题。参考其他武器的阵地部署形式,我们可以认为水下预置反舰导弹至少应有以下几种部署方式:环形部署、扇形部署、线形部署、集团部署^[6]。

本文如图1所示,主要研究在战略航道处以线形方式部署多枚水下预置反舰导弹构成多层防线,对企图通过该航道的敌水面舰船编队实施打击,阻止其进入特定海域。在此背景下,分析找出最佳的部署层数和各层数量的部署方案。

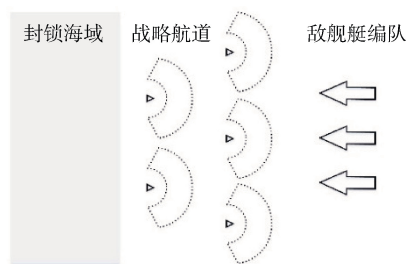


图1 反舰导弹水下部署示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater deployment for anti-ship missile

2 数学模型

2.1 基本假设

在突破进入封锁航道过程中,不考虑其他武器的对抗。假设敌方舰船编队共有舰船数目 m 艘,突破时的平均强度为 λ ,进入防线及突防成功的目标均视为泊松流。突破时,进入当前防线打击范围的舰船编队中的1个目标只被1枚反舰导弹进行攻击且只攻击1次。打击过程服从先到先服务(FCFS)的原则,打击中目标若未被摧毁或未被攻击,则视作目标舰船突破当前防线。

我方共在水下线形预置 n 枚反舰导弹构筑 k 层防线,反舰导弹对来袭舰船编队的打击过程可以视为随机服务过程,发射准备时间为 t_s (主要指远程激活、信息装载、出水打击等主要作战过程时间和),服从负指数分布。

其中第 i 层防线上预先布设了 x_i 枚反舰导弹武器系统,该防御系统可被视为 $m/m/x_i$ 损失制随机服务系统^[7]。

2.2 目标突防概率模型

第1层防线的水下反舰导弹打击敌方水面舰船编队的过程,可以看作是有限等待时间的随机服务系统。根据排队论损失制 $m/m/c$ 的统计平衡下的稳态方程:

$$p_c = \frac{(\lambda t)^c}{c!} \left(\sum_{j=0}^c \frac{(\lambda t)^j}{j!} \right)^{-1} \quad (1)$$

可得敌方目标突防第1层防线的概率 p_1 为

$$p_1 = \frac{(\lambda_1 t_s)^{x_1}}{x_1!} \frac{1}{\sum_{j=0}^{x_1} \frac{(\lambda_1 t_s)^j}{j!}} \quad (2)$$

假设每枚反舰导弹突破敌方反导武器拦截后的命中概率为 p_h , 进入第 1 层防线的敌舰船编队的数目为 m_1 , 则可知在第 1 层防线被反舰导弹命中的目标数目为

$$Q_1 = (1 - p_1)p_h m_1 \quad (3)$$

进入第 i 层防线的目标数目:

$$m_i = m_{i-1}p_{i-1} + m_{i-1}(1 - p_{i-1})(1 - p_h) \quad (4)$$

化简后得:

$$m_i = m_{i-1}(1 - p_h + p_h p_{i-1}) \quad (5)$$

同理, 可求得进入第 i 层防线的敌舰船编队突破时的平均强度为

$$\lambda_i = \lambda_{i-1}(1 - p_h + p_h p_{i-1}) \quad (6)$$

因为该防御系统可被视为 $m/m/x_i$ 损失制随机服务系统, 可得敌方目标突破第 i 层防线的概率 p_i 为

$$p_i = \frac{(\lambda_i t_s)^{x_i}}{x_i!} \frac{1}{\sum_{j=0}^{x_i} \frac{(\lambda_i t_s)^j}{j!}} \quad (7)$$

2.3 线形部署优化模型

由式 (5) 和式 (7) 可知, 构建的多层防线的累计命中目标数目为

$$Q = \sum_{i=1}^k (1 - p_i)p_h m_i \quad (8)$$

战时, 当战略航道被封锁, 敌方舰船编队势必尽可能强行突破以投送兵力。为拒止敌方目标于特定区域之外, 就要使得构建的多层防线对目标的总命中概率达到最大, 对敌水面舰船编队构成强有力的打击和威胁。因此, 反舰导弹水下线形部署优化模型为

$$\max p_i = \frac{Q}{m} \quad (x_1, x_2, \dots, x_k \text{ 为自然数}) \quad (9)$$

3 算例分析

现假设在水下使用 $n=6$ 枚某型反舰导弹分别线形布设 2、3 层防线, 该武器系统的发射准备时间 $t_s=1.5$ h (综合考虑武器远程激活、信息装载、出水打击等时间和), 命中概率 $p_h=0.7$, 敌方舰船编队突破时的平均强度 $\lambda=2$ 艘/h, 可得其全部部署方案和总命中率结果分别如表 1 和表 2 所示。

模型计算显示, 以 $(x_1, x_2)=(4, 2)$ 阵型布设 2 层防线时, 总命中概率达到最大 0.781; 以 $(x_1, x_2, x_3)=(3, 2, 1)$ 阵型布设 3 层防线时, 总命中概率达到最大 0.818 7。

表 1 $k=2$ 时的部署方案及对应总命中概率
Table 1 Deployment scheme and corresponding total hit probability at $k=2$

(x_1, x_2)	p_i	(x_1, x_2)	p_i
(6, 0/0, 6)	0.663 5	(3, 3)	0.778 9
(5, 1)	0.746 8	(2, 4)	0.753 5
(4, 2)	0.781	(1, 5)	0.713 3

表 2 $k=3$ 时的部署方案及对应总命中概率
Table 2 Deployment scheme and corresponding total hit probability at $k=3$

(x_1, x_2, x_3)	p_i	(x_1, x_2, x_3)	p_i	(x_1, x_2, x_3)	p_i
(1, 1, 4)	0.759 6	(2, 2, 2)	0.817 7	(4, 1, 1)	0.801 7
(1, 2, 3)	0.792 9	(2, 3, 1)	0.809 9	(4, 2, 0)	0.781
(1, 3, 2)	0.805 3	(2, 4, 0)	0.753 5	(5, 1, 0)	0.746 8
(1, 4, 1)	0.784 1	(3, 1, 2)	0.812 4	(6, 0, 0)	0.663 5
(1, 5, 0)	0.713 3	(3, 2, 1)	0.818 7		
(2, 1, 3)	0.794 8	(3, 3, 0)	0.778 9		

由结果可以看出, 在当前作战背景下, 水下预置反舰导弹部署优化模型, 可以较好地计算出导弹最大总命中概率时应该采用的最佳部署层数及各层数量。

在实际作战使用中, 不可能随意无限量进行投放, 考虑到部署中导弹的效费比, 同理只分别计算当部署 6~10 枚导弹时, 2、3 层防线的最佳部署方案和最大总命中概率 $\max p_i$, 结果如表 3 所示。

表 3 最优部署方案及总命中概率
Table 3 Optimal deployment scheme and total hit probability

n	(x_1, x_2)	$\max p_i$	(x_1, x_2, x_3)	$\max p_i$
6	(4, 2)	0.781	(3, 2, 1)	0.818 7
7	(4, 3)	0.832 8	(3, 2, 2)	0.878 9
8	(5, 3)	0.865 8	(4, 2, 2)	0.916 6
9	(5, 4)	0.881	(4, 3, 2)	0.940 8
10	(6, 4)	0.895 3	(5, 3, 2)	0.954 6

以最佳部署方案 $(x_1, x_2)=(4, 2)$ 为基础, 分析单

枚反舰导弹的命中率 p_h 和发射准备时间 t_s 分别对总命中率 p_t 的影响, 结果如图 2-3 所示, 可知:

1) 部署时选用单枚命中率高的导弹可提高防线整体命中概率。本例中, p_h 从 0.7 提升至 0.76, p_t 可增加约 6.43%。而对于现有导弹武器系统而言, 采用超声速飞行和提高反舰导弹末端的突防速度, 是提高反舰导弹突防能力的重要手段^[8]。因此, 在水下预置部署时, 可以针对性选择搭载此类高性能导弹来增强区域拒止能力。

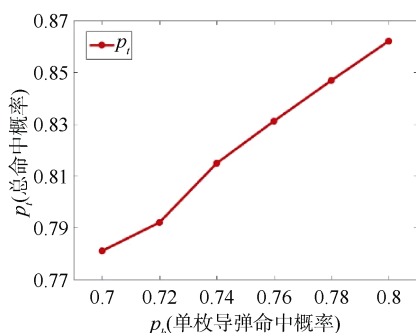


图 2 $k=2$ 时 p_h 对 p_t 的影响

Fig. 2 Effect of p_h on p_t at $k=2$

2) 缩短导弹的发射准备时间对提高整体防线的命中概率有积极作用。反舰导弹水下预置的特点就是武器系统长期潜伏, 战时远程激活^[9]。本例中, t_s 从 1.5 缩短至 1.1 时, p_t 可提高约 7.89%, t_s 从 0.9 缩短至 0.5 时, p_t 可提高约 3.67%。可见, 缩短 t_s 对 p_t 有明显的提高作用。但随着 t_s 的不断减小, 这种影响逐渐趋于饱和, 此时 t_s 已不是主要的影响因素。

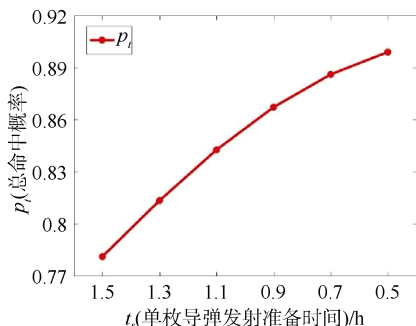


图 3 $k=2$ 时 t_s 对 p_t 的影响

Fig. 3 Effect of t_s on p_t at $k=2$

4 结束语

水下预置是未来武器使用的典型样式。本文以水下预置反舰导弹封锁战略航道为背景, 基于排队论理论建立了以总命中概率为目标的水下线形部署优化模型, 通过仿真算例验证了模型的有效性, 并分析了单枚导弹命中率与发射时长对优化结果的影响, 对武器的作战使用具有一定的参考价值。

但同时, 本文只是把线形部署的水下预置反舰导弹视作简单的随机服务系统进行武器部署优化初探, 并未过多考虑协同作战中武器本身的其他战技指标对优化结果的影响。下一步工作中, 将加强分析武器性能、敌我对抗过程等因素, 并开展针对其他部署样式的研究。

参考文献

- [1] 衡辉, 王新华, 杨迎化. 联合封锁作战中水雷综合运用模式研究[J]. 水雷战与舰船防护, 2017, 25(4): 25-27.
- [2] 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.
- [3] 卢楠, 张旭. 自航水雷雷位误差对障碍毁伤概率影响分析[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5): 110-112.
- [4] 马硕, 马亚平. 混合定次雷区的布雷数量计算方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2017, 31(4): 15-18.
- [5] 朱红波, 张旭, 冷相文. 基于遗传算法的自航水雷障碍雷位配置[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(2): 162-164.
- [6] 许金余. 防空阵地网的理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [7] 唐应辉. 排队论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] 沈培志, 王培源. 反舰导弹突防的技术手段与战术措施[J]. 飞航导弹, 2018(1): 25-29.
- [9] 杨智栋, 李荣融, 蔡卫军, 等. 国外水下预置武器发展及关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(6): 521-526.

(责任编辑: 曹晓霖)