

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.011

基于蒙特卡洛法的空投鱼雷搜捕概率分析

郭聚¹, 韩建立¹, 李新成², 吕照富²

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 65529 部队, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 针对空投鱼雷实际使用情况, 分析空投鱼雷散布规律和鱼雷主动声自导原理。构建空投鱼雷的投雷误差模型、潜艇定位误差模型、搜捕弹道模型和自导检测模型; 采用蒙特卡洛法对空投鱼雷投雷和搜捕过程进行仿真, 分析不同投雷高度、速度、投雷点方位、潜艇定位误差对鱼雷搜捕概率的影响。仿真结果表明, 该分析可为作战决策提供理论依据。

关键词: 空投鱼雷; 投雷散布; 声呐方程; 蒙特卡洛; 搜捕概率

中图分类号: TJ630 文献标志码: A

Search Probability Analysis of Air-dropped Torpedo Based on Monte Carlo Method

Guo Ju¹, Han Jianli¹, Li Xincheng², LYU Zhaofu²

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. No. 65529 Unit of PLA, Liaoyang 111000, China)

Abstract: Based on the actual application of air-dropped torpedo, the dispersion law of air-dropped torpedo and the active acoustic homing principle of torpedo are analyzed. The torpedo dropping error model, the submarine positioning error model, the hunting trajectory model and the homing detection model were established. The process of torpedo dropping and hunting was simulated by Monte Carlo method, and the effects of different torpedo dropping heights, velocities, mine dropping positions and submarine positioning errors on torpedo hunting probability were analyzed. The simulation results show that the analysis can provide a theoretical basis for operational decision-making.

Keywords: air-dropped torpedo; torpedo dispersion; sonar equation; Monte Carlo; hunting probability

0 引言

自 19 世纪初, 潜艇以其优异的隐蔽性和广阔的水下活动范围成为了海战中的“隐形杀手”, 各国开始重视反潜作战的研究和应用。反潜机搭载有搜潜设备和攻潜武器, 具有机动性强、易于占领发射阵位、搜捕效率高等特点。反潜机在反潜作战中的应用使得搜潜效率大幅提升^[1], 空投鱼雷作为航空反潜机携带的最有效的攻潜武器之一^[2], 在立体反潜作战中承担了重要角色。

在反潜作战中, 携带空投鱼雷的航空反潜机接收到潜艇位置信息后, 迅速飞往指定位置投雷, 鱼雷由空中入水后对潜艇进行搜捕、跟踪和攻击^[3-4]。为最大限度地发挥鱼雷作战效能, 正确使用航空反潜鱼雷是必须深入研究的问题。笔者通过建立航空反潜鱼雷搜捕模型、主动声自导目标检测模型、误差模型, 对空投鱼雷搜捕概率进行分析。

1 鱼雷模型

1.1 环型搜捕模型

假设鱼雷环形搜索角速度为 ω_T (定义向左运动

为正向), 鱼雷初始位置为坐标系原点, 环形搜捕圆心坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , 初始时刻鱼雷航向为 y_1 轴正向。所建环形搜捕模型如图 1 所示。

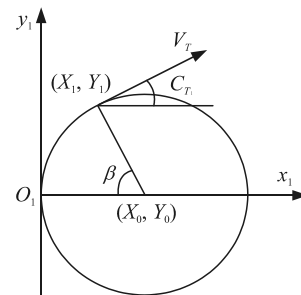


图 1 环形弹道模型

由图 1 可得环形弹道半径 $R_{at}=V_t/\omega_T$, 环形弹道圆心 $(-\text{sign}(\omega_T) \cdot R_{at}, 0, Z_c)$, 弹道倾角为 θ , 鱼雷在 t_1 时刻的回旋角度为 $\beta=\omega_T t_1$, 鱼雷在 t_1 时刻的坐标和航向为:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_0 + \text{sign}(\omega_t) \cdot R_{at} \cdot \sin \omega_t \cdot t_1 \\ Y_1 &= Y_0 + R_{at} \cdot \cos \omega_t \cdot t_1 \\ Z_1 &= Z_0 + \int_t^{t+1} V_t \cdot \cos \theta \cdot dt \\ \bar{C}_1 &= \pi/2 + \beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期: 2022-03-13; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61701519)

作者简介: 郭聚(1992—), 男, 山东人, 硕士, 从事海军导弹装备综合保障研究。E-mail: 728373219@qq.com。

1.2 空投鱼雷散布误差

空投鱼雷对潜攻击时，火控系统根据声呐探测到的目标信息解算投雷点，由于影响投雷的因素较多、整个空投过程复杂，故空投鱼雷落点存在误差^[5]。

空投鱼雷误差服从正态分布，落点误差可分解为与航向平行、垂直相互独立的 2 个方向。由投雷误差经验公式可得，鱼雷在雷体坐标系中 x 轴方向（平行于鱼雷航向）和 y 轴方向（垂直于鱼雷航向）的散布均偏差分别为^[6-7]：

$$\begin{cases} E_x = (8H + 0.08V) \times (7.8 + 5.5H) \\ E_y = (8H + 0.08V) \times (7.8 + 5.5H) \end{cases} \quad (2)$$

式中： H 为反潜机投雷时的飞行高度； V 为反潜机投雷时的飞行速度。

由正态分布定义可得概率偏差和均方差的关系如下：

$$\begin{cases} E_x = \sqrt{2} \rho \sigma_x \\ E_y = \sqrt{2} \rho \sigma_y \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\rho \approx 0.4769$ ，可得：

$$\begin{cases} \sigma_x = E_x / 0.6743 \\ \sigma_y = E_y / 0.6743 \end{cases} \quad (4)$$

投雷偏差适用于弹道坐标系中，在实际作战使用时，需要将误差由弹道坐标系变换到地面坐标系中。 ψ 为雷体坐标系 x 轴与地面坐标系 x 轴的夹角，可得下式：

$$\begin{cases} \sigma'_x = \sigma_x \times \cos \psi + \sigma_y \times \sin \psi \\ \sigma'_y = \sigma_x \times \sin \psi + \sigma_y \times \cos \psi \end{cases} \quad (5)$$

1.3 鱼雷声自导模型

噪声掩蔽下的主动声呐方程为^[8]：

$$DT - DI + NL = SL + TS - 2TL \quad (6)$$

式中：等式左边为在噪声条件下声自导系统根据给定参数所能检测出的最低强度的回声信号；等式右边为目标的回声信号强度。 TL 表达式：

$$TL = 20 \lg R + \beta R \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中： R 为雷目距离，km； β 为吸收系数，dB/km。常用的声吸收系数估算公式为：

$$\beta = 2\pi TSf / (f_p / f + f / f_p) \times 10^{-5} + Kf^2 \quad (8)$$

式中： f 为声波频率，kHz； T 为海水温度，K； S 为每千克海水中盐的总重量，g，称为海水盐度； f_p 为弛豫频率，kHz。

$$f_p = 263T \times 10^{-1} 722/T \times 10^{-3} \quad (9)$$

K 为与海水温度有关的系数：

$$K = 1.42 \times 10^{1.240/T} \times 10^{-8} \quad (10)$$

式(8)较为全面地反映了声吸收系数受海水温度、盐度的影响情况；为方便使用，依据参考文献[9]也可以根据海况对 β 进行取值，如表 1 所示。

表 1 海况条件对应声吸收系数值

海况条件	良好	中等	不良	恶劣
β /(dB/km)	2	4~6	7~8	>9

本文中为应对实际作战使用时遇到的不良条件， β 取值为 8 dB/km。

式(6)中 TS 表达式为^[10]：

$$TS = TS_{\max} \times (16.17 - 3.98 \times \cos 2\alpha - 3.083 \cos 6\alpha) / 23.233 \quad (11)$$

式中： TS_{\max} 为最大反射强度； α 为方位角，是潜艇航向与鱼雷航向夹角。对 TS_{\max} 为 40 dB， SL 为 170 dB，距离为 1 km 的潜艇在不同方位角情况下的目标反射强度仿真。如图 2 所示。

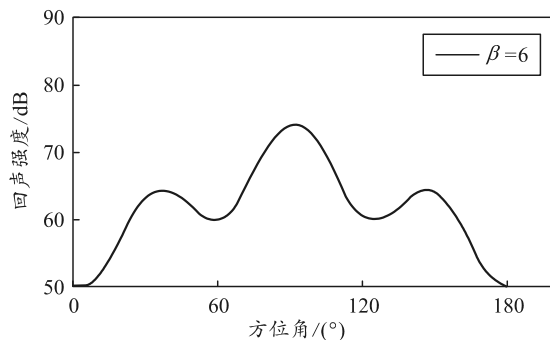


图 2 潜艇回声强度与方位角关系

2 目标模型

2.1 潜艇定位精度

受探测设备精度限制、气象水文条件影响，在实际作战中对目标的定位存在较大误差^[11]，一般认为声呐浮标的定位误差如图 3 所示。

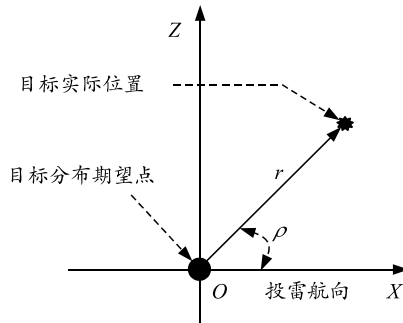


图 3 目标实际位置与探测位置关系

目标实际位置与探测位置的距离 r 服从正态分布 $N(0, \sigma_q)$ ；夹角 ρ 服从 $U(0, 2\pi)$ 的均匀分布， σ_q 为搜潜设备探测下的目标散布均方差^[12]。

2.2 潜艇机动模型

空投鱼雷入水后会被潜艇声呐探测设备探测到，潜艇发现鱼雷后的主要对抗措施有规避、软杀伤和硬杀伤。研究表明机动规避仍然是有效对抗手段之一^[13]。

在实际水中对抗时，潜艇声呐系统能侦测到来袭鱼雷的方位，但对鱼雷搜捕方式等参数未知，故对抗中潜艇机动角度具有随机性。如图 4 所示， T 为来袭鱼雷， M 为潜艇位置，当来袭鱼雷相对于潜艇的弦角 $Q_L < 90^\circ$ 时，潜艇机动完成时航向在 $[C_m + 90^\circ, C_m + 180^\circ]$ 内均匀分布；当来袭鱼雷的弦角 $Q_L > 90^\circ$ 时，潜艇机动完成时航向在 $[C_m, C_m + 90^\circ]$ 内均匀分布。

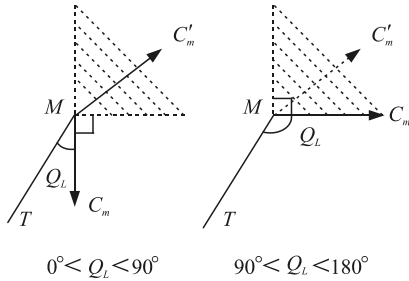


图 4 潜艇机动航向

潜艇旋回经验公式为^[14]：

$$\left. \begin{aligned} R_m &= 10.8V_m + 150 \\ \omega_m &= 0.334V_m + 0.8 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 V_m 为潜艇航速，kn。潜艇转向模型：

$$\left. \begin{aligned} X_{m+1} &= X_m + R_m \cdot \sin(H + \omega_m \cdot t) \\ Y_{m+1} &= Y_m + R_m \cdot \cos(H + \omega_m \cdot t) \\ H_{m+1} &= H + \omega_m \cdot t \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： H 为潜艇初始航向； X_m 、 Y_m 、 Z_m 为潜艇 t 时刻坐标； X_{m+1} 、 Y_{m+1} 、 Z_{m+1} 为潜艇 $t+1$ 时刻坐标。

2.3 雷、艇相对弦角、距离计算模型

$$\left. \begin{aligned} Q_L &= \arctan((y_m - y_t)/(x_m - x_t)) \\ r &= \sqrt{(y_m + y_t)^2 + (x_m + x_t)^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中： Q_L 、 r 为鱼雷相对于潜艇的弦角、距离； x_m 、 y_m 为鱼雷在地理坐标系中坐标； x_t 、 y_t 为潜艇在地理坐标系中坐标^[14]。

3 仿真分析

3.1 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法是一种通过随机抽样的统计试验方法。其基本思想是通过分析研究建立事件的随机分布的模型，对该随机事件进行大量抽样试验，对抽

样结果进行统计计算，当试验次数足够多时，事件出现的频率便可以估计事件的概率。具体方法如图 5 所示。

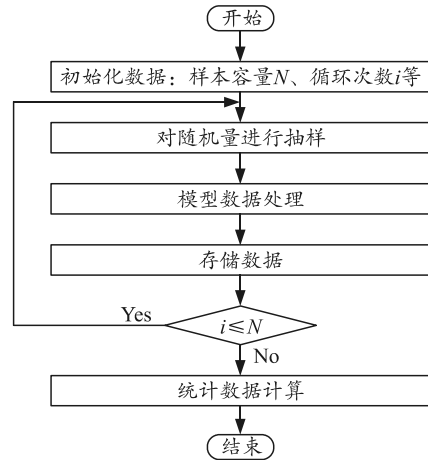


图 5 蒙特卡洛模拟方法

3.2 仿真条件

笔者对空投鱼雷的潜搜捕概率仿真条件如下：

- 1) 反潜模式为应召反潜，反潜机接到目标位置信息后飞抵预定点位进行投雷，鱼雷初始航向与反潜机投雷时航向相同，指向声呐探测得到的潜艇位置^[15]。
- 2) 鱼雷采用主动声自导，搜捕图形为环形搜捕；
- 3) 笔者只考虑搜捕概率，即只要鱼雷探测到潜艇即认为搜捕成功^[16]；
- 4) 潜艇在鱼雷入水时开始机动，转为背向鱼雷的航向后直航。

5) 仿真次数确定按原则依据下式：

$$N = 4P(1 - P)/\varepsilon^2 \quad (15)$$

选取概率 $P=0.8$ ，精度要求 $\varepsilon=0.02$ ，可得仿真次数为 2 000 次。

6) 仿真流程如图 6 所示。

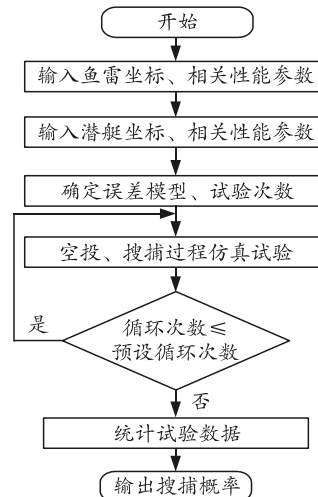


图 6 搜捕仿真流程

仿真中涉及到的装备性能参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

装备	参数	数值
鱼雷	鱼雷航速/kn	45
	鱼雷航程/m	5 000
	自导搜捕扇面/(°)	45
	自导发射声源级/dB	170
	鱼雷干扰噪声级/dB	60
	自导接收指向性指数/dB	30
	检测阈/dB	20
反潜机	投雷速度/(km/h)	100~400
	投雷航向/(°)	0~180
	投雷高度/m	100~700
潜艇	最大反射强度/dB	20
	航速/kn	20
声呐	目标位置均方差/m ²	100~700

3.3 仿真分析

3.3.1 目标定位精度对搜捕概率的影响

投雷点位于潜艇左侧 45°，反潜机航速 100 km/h，投雷高度 100 m，潜艇采取机动规避的条件下，不同定位均方差 σ_q 对鱼雷搜捕概率的影响，如图 7 所示。

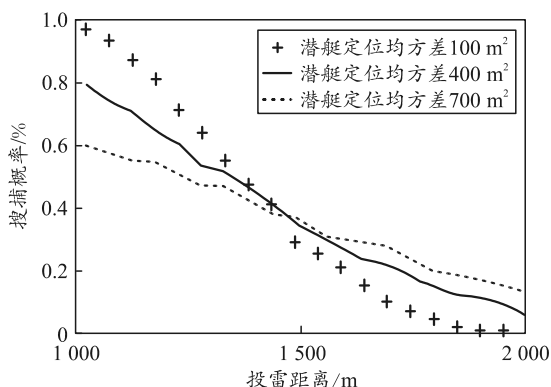


图 7 潜艇定位均方差对搜捕概率的影响

由上图可得目标定位精度对鱼雷的发现潜艇概率有一定影响，在定位精度较高时投雷点应尽可能接近潜艇位置，当定位精度较低时投雷点可距离潜艇位置稍远，以此使鱼雷获得较高搜捕概率。

3.3.2 反潜机投雷航速及高度对搜捕概率影响

投雷点位于潜艇左侧 45°、潜艇定位均方差 σ_q 为 100 m²。反潜机航速 100 km/h，分别以 100、200、300 m 的高度进行投雷时，鱼雷的搜捕概率如图 8 所示。反潜机投雷高度 100 m，分别以航速 100、200、400 km/h 投雷时鱼雷搜捕概率如图 9 所示。

由图 9 可知：反潜机投雷时的航速与投雷高度对鱼雷的搜捕概率都会造成一定影响，在相同定位精度情况下，较高的航速和投雷高度带来的投雷散布误差相对较大。在投雷点与潜艇位置距离较近时，

应降低投雷高度和速度以使投雷散布降低而获得更高的搜捕概率；在投雷点与潜艇位置距离较远时，应选择较高的投雷速度和投雷高度，通过较大的投雷散布获得较高的搜捕概率，并且投雷高度对搜捕概率的影响要大于投雷速度。

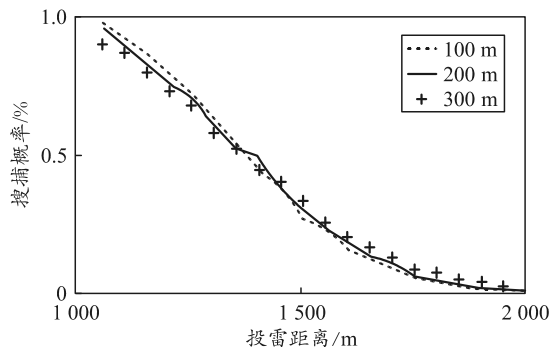


图 8 投雷高度对鱼雷搜捕概率

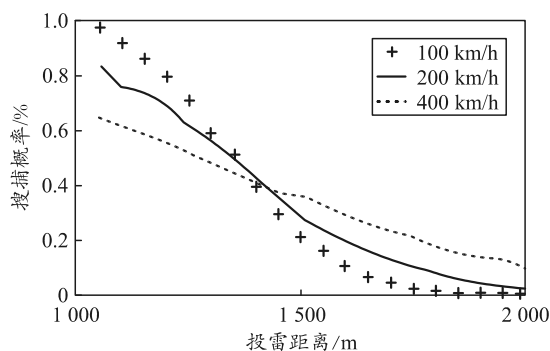


图 9 投雷航速对鱼雷搜捕概率

3.3.3 投雷方位对鱼雷搜捕概率影响

反潜机以航速 100 km/h、高度 100 m、潜艇定位均方差 σ_q 为 100 m² 的条件下，分别位于潜艇左侧 45°、135°、90° 的方位上投雷，鱼雷搜捕概率如图 10 所示。

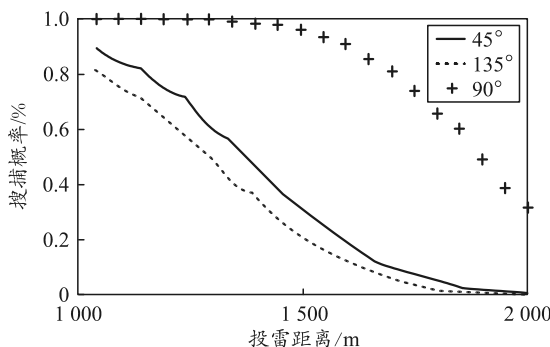


图 10 投雷方位对鱼雷搜捕概率影响

由上图可知：投雷点方位对鱼雷搜捕概率影响较大，当投雷点距离潜艇大于 1 200 m 时，在潜艇左侧 45°、135° 方位投雷，其搜捕概率将快速下降，为获得较高的搜捕概率应在潜艇正侧方投雷，即投雷点方位为 90°。

4 结论

笔者建立了空投鱼雷的落点散布误差模型、鱼雷水下环形搜捕运动模型、声自导检测模型和潜艇规避模型。通过蒙特卡洛法仿真得到如下结论:

1) 反潜机投雷的高度和速度对投雷散布的误差均为正相关,且高度对投雷散布的影响大于速度,纵向误差稍大于横向误差。在鱼雷落点距离潜艇距离较近时,以较低速度和高度投雷使投雷散布降低,可增大鱼雷搜捕概率;在鱼雷落点距离潜艇较远时,以较高速度和高度投雷使投雷散布增大,利用较大的投雷散布一定程度弥补了距离增大导致搜捕概率降低的问题。为确保鱼雷有较高搜捕概率,投雷距离不宜大于 1 500 m。

2) 在较低的潜艇定位误差情况下,潜艇与鱼雷距离较近时搜捕概率维持在较高水平,当距离增大到某一值后,搜捕概率迅速降低,随后搜捕概率维持较低水平。在较高的潜艇定位误差情况下,鱼雷的搜捕概率随着潜艇与鱼雷距离增大而缓慢下降。较高的潜艇定位精度能使搜捕概率在更大的距离上维持一个较高水平。

3) 距离相同时,鱼雷落点在潜艇正侧方时鱼雷搜捕概率最大,落点在侧前方的搜捕概率大于落点在侧后方的搜捕概率。笔者对空投鱼雷投放、搜捕进行建模仿真,分析了影响鱼雷搜捕概率的因素,所得结论可为空投鱼雷的作战使用提供理论依据,最大限度地发挥鱼雷作战效能。

参考文献:

- [1] WANG Z J. Maximizing the probability an aerial anti-submarine torpedo detects its target[J]. Journal of Marine Science and Application, 2009, 8(2): 175-181.
- [2] 李居伟, 谢力波, 刘钧贤. 反潜巡逻机使用航空自导深弹攻潜效能及方法研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(1): 34-37.
- [3] 郑强, 杨日杰, 陈佳琪, 等. 直升机空投鱼雷的散布误差研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 65-70.
- [4] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京: 军事科学出版社, 2003: 88-90.
- [5] 温志文, 杨智栋, 王力竞. 空投鱼雷系统建模与空中弹道仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(5): 63-66, 72.
- [6] 杨日杰, 郑强, 陈佳琪, 等. 空投鱼雷入水点影响因素研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(6): 71-73.
- [7] 欧阳寰, 王超勇, 黎子芬. 航空反潜鱼雷发现概率分析与仿真计算[J]. 中国设备工程, 2017(7): 148-150.
- [8] 许兆鹏, 李博, 李斌, 等. 主动声自导鱼雷极限射程主要影响因素仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(5): 143-146.
- [9] 孟庆玉, 张静远, 王鹏, 等. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 52-57.
- [10] 管贺, 孙学海, 薛昌友. 自导作用距离对主动声自导鱼雷捕获概率的影响[C]//中国造船工程学会电子技术学术委员会 2011 年海战场电子信息技术学术年会论文集. 北京: 中国造船工程学会, 2011: 117-118, 157.
- [11] 郑强, 杨日杰, 陈佳琪, 等. 空投鱼雷发现概率的解析模型研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(3): 16-19.
- [12] 李居伟, 赵志允, 孙明太. 反潜巡逻机空投鱼雷最佳投雷参数研究[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(6): 473-478.
- [13] 邓新文, 朱文振, 谢勇. 潜艇转向旋回防御主动声自导鱼雷的战术意义与作战运用[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(1): 65-70.
- [14] 李明辉. 基于蒙特卡洛法的水下对抗效能推演评估研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2014.
- [15] 徐以成, 孙明太, 李居伟. 反潜巡逻机空投鱼雷攻潜作战效能分析[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(4): 301-305.
- [16] 罗光成, 张丹, 杨日杰. 潜艇规避运动模型建模与仿真[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(9): 97-99.