

【引用格式】李卓禹,陈泱,石剑. 基于探测概率的磁诱饵对抗效能评估方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(5): 467-471.

基于探测概率的磁诱饵对抗效能评估方法

李卓禹^{1,2}, 陈泱^{1,2}, 石剑³

1. 中国人民解放军91776部队, 北京 100161;
2. 复杂舰船系统仿真重点实验室, 北京 100161;
3. 军事科学院战争研究院, 北京 100091)

摘要 潜艇对抗航空磁探可采取施射磁诱饵的方式, 针对磁诱饵对抗效能评估问题, 首先分析了基于离散Fréchet距离的磁场曲线相似性度量方法的应用特点, 结合反潜机与诱饵相遇时的运动轨迹特点, 提出了一种基于探测概率的诱饵磁场对抗效能评估方法, 给出了典型需求场景下的对抗概率描述, 并进行了仿真应用与分析。该方法能够对诱饵对抗航空磁探的能力进行评估, 可用于诱饵考核及辅助优化诱饵使用策略。

关键词 效能评估; 磁诱饵; 探测概率; 航空反潜

中图分类号 E925.2

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)05-0467-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.05.014

Evaluation Method of Magnetic Decoy Antagonism Effectiveness Based on Detection Probability

LI Zhuoyu^{1,2}, CHEN Yang^{1,2}, SHI Jian³

1. No. 91776 Unit of PLA, Beijing 100161, China;
2. Science & Technology on Complex Ship Systems Simulation Laboratory, Beijing 100161, China;
3. Institute of War, Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China)

Abstract Submarines can shoot magnetic decoys to resist airborne magnetic detection. Aiming at the evaluation of magnetic decoy's antagonism effectiveness, firstly, the application characteristics of the magnetic field curve similarity measurement method based on discrete Fréchet distance are analyzed. Combined with the motion trajectory characteristics of the anti-submarine aircraft when it encounters decoys, a decoy's magnetic field antagonism effectiveness evaluation method based on detection probability is proposed, the confrontation probability description under typical demand scenarios is given, and the simulation application and analysis are carried out. This method can evaluate the capability of the decoy against airborne magnetic detection, and can be used to evaluate decoys and assist in optimizing decoy use strategy.

Key words effectiveness evaluation; magnetic decoy; detection probability; aviation anti-submarine

0 引言

潜艇因其隐蔽性好、突袭威力大、威慑力强, 在现代海战中能够发挥重要作用。其中, 隐蔽性是

其相对于水面舰艇、航空平台的核心优势^[1-2]。当前, 各种探测装备及探测技术快速发展, 给潜艇隐蔽性带来极大挑战^[3-6], 其中, 航空磁探仪已成为潜艇的主要威胁之一。针对航空磁探的威胁, 潜艇

除可采取降低艇体磁异常特性、增强潜艇下潜能力等被动手段外, 还可通过施放磁诱饵主动诱导航空磁探^[7-9]。

磁诱饵对抗航空磁探可采取 2 种不同的方案:

1) 针对航空磁探的探测机理产生磁场以诱骗敌航空磁探; 2) 精确模拟所需保护潜艇的磁场分布, 而不考虑航空磁探的探测机理。对于采用第 2 种方案的磁诱饵, 其主要评价指标即其磁场与潜艇磁场之间的相似性^[10]。

文献[11]提出了一种磁场通过特性曲线相似性度量方法, 可用于评估磁场相似程度。磁探仪探测潜艇磁场时, 也是对其磁场通过特性曲线进行测量识别, 因此, 该方法可用于度量反潜机沿一具体路径经过诱饵或潜艇 2 种磁源上空时的相似性。而对于磁诱饵对抗航空磁探而言, 由于诱饵的磁场分布与方向有关, 那么诱饵与反潜机相遇的角度对其对抗效能有较大影响^[12]。此外, 两者之间的横距对对抗效能也有较大影响。在评价磁源的对抗效能时, 应充分考虑各种角度和横距, 对每一种情况的磁感应强度曲线进行相似性度量, 并对全局进行综合评价。

针对此问题, 首先分析文献[11]中磁场曲线相似性度量方法的应用特点, 结合反潜机与诱饵相遇时的运动轨迹特点, 提出一种基于探测概率的诱饵磁场对抗效能评估方法。通过该方法, 能够紧贴需求, 从实际应用的角度对诱饵模拟潜艇磁场以对抗航空磁探的能力进行评估, 可用于诱饵考核及辅助优化诱饵使用策略。

1 磁场通过特性曲线相似性度量方法

航空磁探对潜艇进行探测时, 获取的是一条磁感应强度随时间(距离)变化的曲线, 即磁场通过特性曲线, 如图 1 所示。当需考量磁诱饵与被模拟潜艇间相似性时, 可通过度量两者磁场通过特性曲线间的相似性实现^[13-14]。

文献[11]中提出了衡量磁场通过特性曲线相似性的方法, 将其应用于磁诱饵与潜艇磁场对比时, 可描述如下。

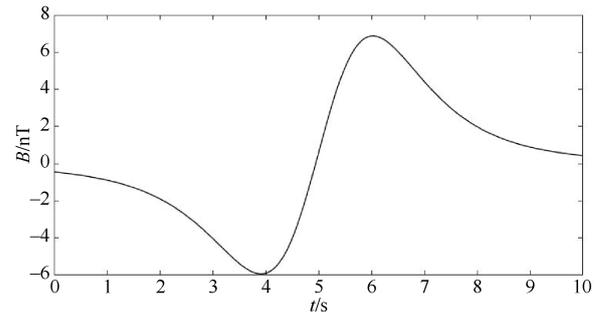


图 1 磁场通过特性曲线

Fig. 1 Passing characteristic curve of magnetic field

1) 将航空磁探对诱饵和潜艇的磁场通过特性曲线分别记为 $F_1: \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, $F_2: \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 其中 m 、 n 分别为 2 条曲线的离散点数量, u_i 、 v_i 坐标分别记为 (t_{u_i}, B_{u_i}) 、 (t_{v_i}, B_{v_i}) , 横、纵坐标分别表示时间、磁感应强度。

2) 计算特征值 $\delta_{dF}(F_1, F_2)$ 、 $d_t(F_1, F_2)$, 如式(1) - (2), $\delta_{dF}(F, G)$ 主要考量曲线在纵坐标方向的相似性, $d_t(F, G)$ 则主要考量曲线在横坐标方向的相似性。

$$\begin{cases} \delta_{dF}(F_1, F_2) = \min \{ \|L\| \mid L \text{ 为 } F_1, F_2 \text{ 间链接序列} \} \\ F_1: \{u_1, \dots, u_m\} \quad F_2: \{v_1, \dots, v_n\} \\ \|L\| = \max_{i=1,2,\dots,k} d(u_{a_i}, v_{b_i}) \\ d(u_{a_i}, v_{b_i}) = |B_{u_{a_i}} - B_{v_{b_i}}| \end{cases} \quad (1)$$

$$d_t(F_1, F_2) = \inf_{p \in R} \left[\max_{i=1,\dots,k} (p \cdot t_{u_{a_i}} - t_{v_{b_i}}) - \min_{i=1,\dots,k} (p \cdot t_{u_{a_i}} - t_{v_{b_i}}) \right] \quad (2)$$

式中: K 为 F_1 、 F_2 间链接序列的数量; u_{a_i} 、 v_{b_i} 分别为第 i 个链接序列的两端点, 参数 p 通过对式(3)所示优化问题进行求解确定。

$$\begin{cases} \min d_t(F_1, F_2) = \max_{i=1,\dots,k} (p \cdot t_{u_{a_i}} - t_{v_{b_i}}) - \min_{i=1,\dots,k} (p \cdot t_{u_{a_i}} - t_{v_{b_i}}) \\ \text{s.t. } \delta_{dF}(F_1, F_2) = \min \{ \|L\| \mid L \text{ 为 } F_1, F_2 \text{ 间链接序列} \} \\ \|L\| = \max_{i=1,2,\dots,k} d(u_{a_i}, v_{b_i}) \\ d(u_{a_i}, v_{b_i}) = |B_{u_{a_i}} - B_{v_{b_i}}| \\ u_{a_i} = (t_{u_{a_i}}, B_{u_{a_i}}), v_{b_i} = (t_{v_{b_i}}, B_{v_{b_i}}) \\ p \in R \end{cases} \quad (3)$$

3) 计算特征值 $\Phi(F_1, F_2)$, 如式 (4), 特征值 Φ 即可描述 2 条磁场通过特性曲线间的相似性, Φ 值越小, 两条曲线的相似度越高。

$$\Phi(F_1, F_2) = \frac{2\mu\delta_{dF}(F_1, F_2)}{(B_{u_{\max}} - B_{u_{\min}}) + (B_{v_{\max}} - B_{v_{\min}})} + \frac{2(1-\mu)d_t(F_1, F_2)}{p \cdot (t_{u_m} - t_{u_i}) + (t_{v_m} - t_{v_i})} \quad (4)$$

式中, $\mu \in [0, 1]$ 及 $(1-\mu)$ 为 2 部分的权值, 可根据横纵坐标权重实际进行确定。

2 基于探测概率的对抗效能评估方法

上节中给出了磁场通过特性曲线的相似性度量方法, 该方法能够度量反潜机沿一具体路径经过磁源上空时的对抗情况。而对于磁诱饵对抗航空磁探而言, 由于诱饵磁源的磁场分布与方向有关, 不同方向的磁场通过特性曲线变化特征及峰值均有较大差别, 则磁源和反潜机相遇的角度对其对抗效能有较大影响。此外, 两者之间的横距对对抗效能也有较大影响。在评价磁源的对抗效能时, 应充分考虑各种角度和横距。对每一种情况的磁感应强度曲线进行相似性度量, 并对全局进行综合评价。

由于反潜机通过磁源有效作用区域的时间通常很短, 且反潜机速度远大于磁源速度, 因此在该时间内可做如下假设:

- 1) 反潜机经过磁源上空时速度矢量保持不变且水平;
- 2) 磁源相对大地坐标系静止。

对于每一条经过路径, 均对应一个唯一的反潜机航线与磁源中心在该高度上投影点的最近会遇点 (Closest Point of Approach, CPA), 即每一个 CPA 点对应一条反潜机路径 (如图 2 所示); 而每一条反潜机路径, 当磁源分别为诱饵和潜艇时, 对应着 2 条磁场通过特性曲线及一个特征值 Φ 。

根据评价需求, 可给出如下的具体实施方法。当需要对磁源在指定高度处指定区域 S 内的对抗效能进行评估时, 首先将该区域离散化为均匀的点集。以磁源正上方 h 高度平面处, 半径 R 的范围内为例, 可按极坐标对其进行离散化, 记角度差为

$\alpha = \pi/n_1$, 距离差为 $\eta = 2R/n_2$, 得到 $n_1 \times n_2$ 个点, 如图 3 所示。这一步的实质就是对总体进行抽样。

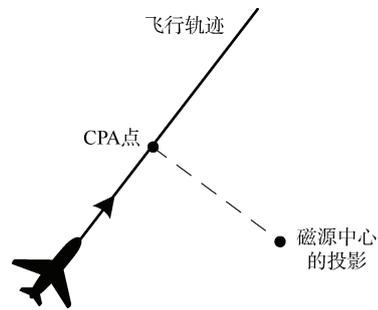


图 2 反潜机飞行路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anti-submarine aircraft flight path

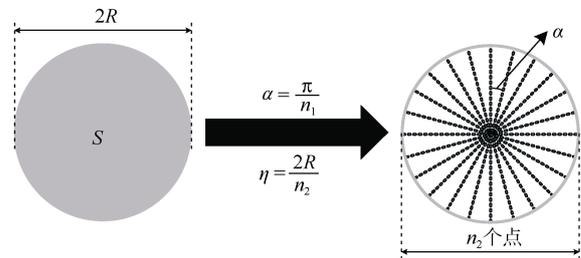


图 3 指定区域的离散化示意图

Fig. 3 Discretization diagram of the specified area

对于抽样得到的任意一点 $Q_{i,j} (1 \leq i \leq n_1, 1 \leq j \leq n_2)$, 可利用特征值 $\Phi(F_1, F_2)$ 度量以该点为 CPA 时的磁源与所需模拟潜艇在飞行轨迹处的分布特性曲线的相似性, 得到相似性特征值 $\Phi_{i,j}$ 。设置阈值 ε , 当 $\Phi_{i,j} < \varepsilon$ 时, 记 $t_{i,j} = 1$; 当 $\Phi_{i,j} \geq \varepsilon$ 时, 记 $t_{i,j} = 0$, 则可记磁源在高度 h 处、区域 S 内的对抗概率为

$$P_{h,S} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} t_{i,j}}{n_1 \cdot n_2} \quad (5)$$

据此, 能够较客观地描述磁源的对抗效能并进行量化。

3 其它典型情形下的对抗概率描述

式 (5) 描述了磁源在高度 h 处、区域 S 内的对抗概率。实际上, 该方法可根据需要对各种不同考核区域下的对抗概率进行度量, 下面对部分典型情况下的对抗概率进行描述。

3.1 三维空间中的对抗概率描述

当反潜机的具体来袭高度不明,仅知其高度范围 $H \in [h_1, h_2]$ 时,则需度量磁源在高度 $H \in [h_1, h_2]$ 、区域 S 内的对抗概率。此时,按图 3 所示对区域 S 进行二维离散化的基础上,在高度方向上离散化,得到 n_3 个点。同样,对于抽样得到的任意一点 $Q_{i,j,k} (1 \leq i \leq n_1, 1 \leq j \leq n_2, 1 \leq k \leq n_3)$,可得到相似性特征值 $\phi_{i,j,k}$ 。类比式 (5),则可记磁源在高度 $H \in [h_1, h_2]$ 处、区域 S 内的对抗概率为

$$P_{H,S} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} t_{i,j,k}}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3} \quad (6)$$

3.2 某一角度方向的对抗概率描述

当反潜机的飞行高度 h 、来袭角度 φ 已知时,则不需度量诱饵磁源在整个区域内的对抗概率,仅需考虑其在高度 h 处、角度 φ 方向、距离 R 内的对抗概率,该对抗概率可记为

$$P_{h,\varphi} = \frac{\sum_{j=1}^{n_2} t_{i\varphi,j}}{n_2} \quad (7)$$

在此基础上,通过对比诱饵磁源在高度 h 处不同角度的对抗概率,可选择用对抗概率最高的角度迎敌,以更好地诱骗敌反潜机。

3.3 某一距离的对抗概率描述

在某些场景中(如诱饵磁源考核),还需度量诱饵磁源在高度 h 处、距离 R 处的对抗概率,该对抗概率可记为

$$P_{h,R} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} t_{i,jR}}{n_1} \quad (8)$$

式(5)–(8)列举了部分典型情形下的对抗概率描述,在其它情形中,均可根据实际需求度量诱饵在选定高度、角度、横距范围内的对抗概率。因此该方法具有较高的灵活性,适用范围广。

4 仿真分析

因实际舰船空中磁场数据难以获取,本文以一型 1/25 缩比船模实测磁场数据及诱饵磁源模型仿真所得磁场数据为基础,对上述评估方法在典型情形下的应用进行仿真分析。其中,诱饵磁源模拟方

式为对目标船模磁场总量进行精确模拟。

假设已知反潜机来袭海拔高度为 200 m,而方向未知。则可考察诱饵磁源处于不同深度时,其在海拔 200 m 处、一定投影范围内的对抗概率。考虑诱饵对抗实际,此处以斜距 $L \leq 400$ m 确定该投影范围,如图 4 所示,根据诱饵深度 d 确定投影范围半径 R 取值。

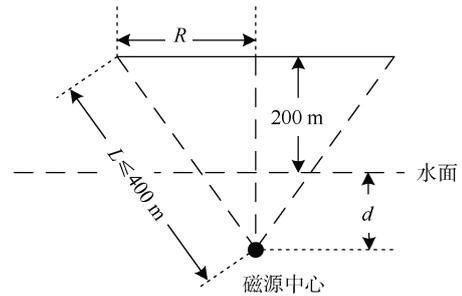


图 4 投影范围示意图

Fig. 4 Schematic diagram of projection range

取步长为 10 m,考察磁源深度在 10~100 m 范围内时,其对抗概率的变化情况,如表 1 所示。其中,计算时取 $\mu = 0.5$, 阈值 $\varepsilon = 0.2$ 。

表 1 对抗概率计算结果

Table 1 Calculating results of confrontation probability

深度 d/m	对抗概率 P
10	0.767
20	0.822
30	0.883
40	0.856
50	0.793
60	0.745
70	0.702
80	0.626
90	0.573
100	0.528

可以看出,诱饵磁源深度变化时,其对抗概率有一定的差异。在上述条件下,磁源深度位于 30 m 附近时对抗效果较好。因此,当反潜机来袭海拔高度已知时,可将对抗概率作为确定诱饵深度的参考依据之一。在其它情形中,也可通过计算对抗概率来辅助确定诱饵的相对角度、横距等,以达到更优的对抗效果。

5 结束语

隐蔽性是潜艇其相对于水面舰艇、航空平台等平台的核心优势。当前,航空磁探仪给潜艇隐蔽性带来极大挑战。针对航空磁探的威胁,潜艇可通过施放能精确模拟母艇磁场分布的磁诱饵进行对抗。诱饵主要评价指标即其磁场与母艇磁场之间的相似性。针对诱饵磁源对抗效能的综合评价问题,本文首先分析了基于离散 Fréchet 距离的磁场相似性度量方法的应用特点,结合反潜机与诱饵相遇时的运动轨迹特点,提出了一种基于探测概率的诱饵磁场对抗效能评估方法,针对典型需求场景,给出了多种情形下的对抗概率描述。并选取典型情形,对该评估方法进行了仿真应用与分析,验证了该评估方法的有效性。该方法可以定量地评估诱饵模拟潜艇磁场以对抗航空磁探的能力,且具备较高的灵活性,可用于诱饵考核,以及不同情形下为优化诱饵使用策略提供有效辅助。

本文首先分析了基于离散 Fréchet 距离的磁场相似性度量方法的应用特点,结合反潜机与诱饵相遇时的运动轨迹特点,提出了一种基于探测概率的诱饵磁场对抗效能评估方法,针对典型需求场景,给出了多种情形下的对抗概率描述。并选取典型情形,对该评估方法进行了仿真应用与分析,验证了该评估方法的有效性。该方法可以定量地评估诱饵模拟潜艇磁场以对抗航空磁探的能力,且具备较高的灵活性,可用于诱饵考核,以及不同情形下为优化诱饵使用策略提供有效辅助。

参考文献

[1] 刘晓伟,马宇,李筠,等. 美国海军核潜艇装备技术

- 发展与启示[J]. 飞航导弹, 2021, 52(11): 71-79.
- [2] 李想,钱家昌,陈虹,等. 美国俄罗斯核潜艇划代分析研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(3): 169-173.
- [3] 杨俊,于斐,徐源,等. 国外反潜探测装备与技术发展评述[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(S1): 132-137.
- [4] 李方正,张玮,周晗,等. 国外潜艇事故原因分析及启示[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(2): 170-173.
- [5] 刘惟恒,罗阳,于均杰,等. 新概念多无人机协同探潜技术发展趋势分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 9-13.
- [6] 王伟,于福建,张峻铭. 基于云计算的探潜信息综合处理系统建设研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(1): 80-85.
- [7] 张朝阳,刘济民,杨林. 磁探潜关键技术现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 18-27.
- [8] 王树乐,胡迺成,崔庆扬. 国内航空磁探反潜技术研究现状[J]. 中国新通信, 2018, 20(11): 177-178.
- [9] 陶荣华,王丹,迟铨. 国外航空磁探潜装备应用分析及发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(4): 369-373.
- [10] 陈宇沁,周宏威,袁建生. 基于磁异常检测的潜艇探测探头类型分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(11): 20-24.
- [11] 石剑,刘忠乐,周敏佳,等. 一种基于离散 Fréchet 距离的磁场相似性度量方法[J]. 电子学报, 2018, 46(4): 856-861.
- [12] 吴芳,吴铭,杨日杰,等. 反潜巡逻机运动态势对潜艇磁异常信号的影响分析[J]. 测试技术学报, 2017, 31(4): 283-289.
- [13] 王海云,孙玉兰,董大群. 舰船物理场通过特性曲线相似度分析[J]. 探测与控制学报, 1999(3): 30-36.
- [14] 田东,庄劲武,刘胜道,等. 一种舰船磁场信息保护方法[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(2): 92-95.

(责任编辑:肖楚楚)