

# 对抗航空磁探的磁诱饵模拟指标分析及度量方法

石剑<sup>1</sup>, 刘忠乐<sup>1</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 王亮<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 湖北武汉 430033;

2. 中国人民解放军 91194 部队, 辽宁大连 116011)

**摘要** 针对航空磁探的威胁, 潜艇可通过施放能够模拟其空中磁场特性的装置(磁诱饵)进行对抗, 在对磁诱饵进行研究时, 需要对其模拟需求进行分析。针对此问题, 在对目前常用磁探仪工作原理及优缺点进行分析的基础上建立了基于标量磁探仪的航空磁探潜模型, 以所建立的航空磁探潜模型为基础, 分析了对抗航空磁探时磁源所需满足的模拟需求, 并给出对抗效能评估度量方法及指标: 磁场功率比、磁场方向可调性指标及有效面积指标, 为潜艇空中磁场模拟方法研究的开展提供了基础。

**关键词** 航空磁探; 磁诱饵; 需求分析; 效能评估

**中图分类号** TJ67 **文献标识码** A

## Simulation Index Analysis and Measurement Method of Magnetic Decoy for Countering Aeronautic Magnetic Detection

SHI Jian<sup>1</sup>, LIU Zhongle<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>2</sup>

(1. School of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. No. 91194 Unit of PLA, Dalian 116011, China)

**Abstract** To counter the threat of aeronautic magnetic detection, submarines can launch devices (magnetic decoy) that can simulate the aerial magnetic field characteristics, and hence the simulation requirements need to be analyzed in the process of studying magnetic decoy. Aiming at this question, on the basis of analyzing the working principle, advantages and disadvantages of commonly used magnetic detectors, this paper establishes an aeronautic magnetic antisubmarine detection models based on scalar magnetic detectors. Based on the established model, simulation requirements of magnetic source for counterinry magnetic detection are analyzed, and the method and indexes of evaluating the countermeasure effectiveness which contain magnetic field power ratio, adjustable index of magnetic field direction and effective area index are given, which provides a foundation for the research on the method of simulating submarine's aerial magnetic field.

**Key words** aeronautic magnetic detection; magnetic decoy; requirement analysis; effectiveness evaluation

## 0 引言

未来的海上战争中, 潜艇将是海上力量极其重要的组成部分<sup>[1]</sup>, 随着潜艇综合减震降噪技术、水声对抗技术以及 AIP 动力技术的发展和广泛使

用<sup>[2-3]</sup>, 潜艇在现代海战中的使用范畴和强度必定会增大, 其将承担起包括封锁、布雷、破交作战、情报收集与侦察、监视等更多的作战任务, 发挥更重要的作用。航空磁探是主要的反潜手段之一, 由于其在作战效率、隐蔽安全、攻潜效果等方面的优

势<sup>[4]</sup>,近年来愈加受到一些海军大国及部分发展中国家的重视,其对潜艇造成的威胁也日益增大。

针对航空反潜的威胁,潜艇的对抗方式主要可以分为被动对抗和主动对抗两种。其中主动对抗方式有着通用性好、研发成本低、实用性强的优势,其主要指潜艇通过施放能够模拟其磁场特性的磁模拟装置(磁诱饵)来诱导欺骗敌方的航空磁探,使之不能对我潜艇进行准确的跟踪定位,从而保护我方潜艇的安全<sup>[6]</sup>。在国内相关研究中,文献[5]从航空磁探的角度对运动磁性目标的定位问题进行了研究,给出了较通用的磁定位方法,而针对探潜问题,该模型能够进行一定的简化;文献[6]对磁诱饵的磁场建模及试验验证等内容进行了研究,为磁诱饵的设计奠定了较好的基础,然而其缺少从航空磁探潜方式出发对磁诱饵的模拟需求进行分析的关键内容,难以保证磁诱饵能够较好地对抗航空磁探。

针对此问题,本文首先对目前常用磁探仪工作原理及优缺点进行分析,并建立了基于单个标量磁探仪及2个标量磁探仪的航空磁探潜模型。以所建立的航空磁探潜模型为基础,分析了对抗航空磁探时磁源所需满足的模拟需求,并给出对抗效能评估度量方法及相应度量指标:磁场功率比、磁场方向可调性指标及有效面积指标,为潜艇空中磁场模拟方法的进一步研究打下了基础。

## 1 基于标量磁探仪的航空探潜模型

磁探仪全称为磁力探测仪,用于测量磁场的强度和方向。现代潜艇的主要结构是铁磁性物质,在地磁场作用下会产生感应磁场,这部分感应磁场与海洋背景磁场相叠加,会使海洋背景磁场发生明显的畸变,即产生磁异常信号。磁探仪对该磁异常信号进行分析判断,可实现发现潜艇的目的,因此磁力探测仪又叫做磁异常探测仪<sup>[7]</sup>。一般来说,将只测量所处位置磁场模量而不论磁场方向的磁探仪称为标量磁探仪(Scalar magnetometers)或总量磁探仪(Total field magnetometers)。目前的标量磁探仪主要可分为核子旋进式磁探仪及光泵磁探仪,其中核子旋进式磁探仪主要是利用原子核的自

旋磁矩随外磁场产生的旋进运动的频率(拉莫尔频率)与外磁场强度的关系设计的,通过测量其旋进频率即可得到外磁场强度,包括质子旋进式磁探仪、Overhauser效应质子磁探仪及氦3核子旋进磁探仪;光泵磁探仪是利用一些原子(氦4、铯、钾、铷)中未配对电子的自旋磁矩随外磁场产生的旋进运动的频率与外磁场强度的关系设计的,因此有时也称之为电子旋进式磁探仪。它们都是根据量子理论设计的,都属于量子磁探仪<sup>[8]</sup>。与标量磁探仪相比,矢量磁探仪(Vector magnetometers)不仅测量所处位置的磁场模量,也测量磁场方向,其需要3个正交传感器测量3个维度中的磁场分量,其探测精度相对于标量磁探仪小得多。目前的矢量磁探仪主要有磁通门磁探仪、超导磁探仪及原子磁探仪。

总体而言,目前标量磁探仪相对矢量磁探仪的探测精度较高、探测距离远,利用标量磁探仪进行航空探潜的方式简单而有效,是各国海军中广泛使用的航空磁探潜方式。利用标量磁探仪对水下磁性目标进行探测,可根据标量磁探仪的数量分为单个标量磁探仪探测方法和多个标量磁探仪探测方法。

### 1.1 基于单个标量磁探仪的探测模型

在探潜的过程中,为了减小飞行对磁异常探测的影响,飞机通常做平稳的飞行。因此可以假设在探潜的较短时间内,反潜机以相对潜艇速度 $V$ 做水平匀速飞行,其机载标量磁探仪所探得的磁场为目标磁场及背景磁场的总量,其中背景磁场主要为地磁场,记为矢量 $\mathbf{B}_e$ ,其与磁北方向的夹角(磁倾角)为 $\phi$ ,磁北方向与速度 $V$ 的夹角为 $\theta$ 。

以潜艇目标所处位置为原点 $O$ ,反潜机飞行方向为 $X$ 轴,竖直向下为 $Y$ 轴,建立坐标系 $OXYZ$ ,如图1所示。

设潜艇磁矩为 $\mathbf{M} = (M_x, M_y, M_z)^T$ , $T_0$ 时刻磁探仪在该坐标系下的矢径为 $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ ,机载磁探仪的采样周期为 $t_m$ , $T_0 + nt_m$ 时刻潜艇在磁探仪处产生的磁感应强度为<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{B}_{g,n} = \frac{\mu_0}{4\pi r_n^3} \left[ \frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}_n)\mathbf{r}_n}{r_n^2} - \mathbf{M} \right] \quad (1)$$

式中： $\mathbf{B}_{g,n} = (B_{gx,n}, B_{gy,n}, B_{gz,n})^T$ ,  $\mathbf{r}_n = (x_n, y_n, z_n)^T = \mathbf{r}_0 + n \cdot (V \cdot t_m, 0, 0)^T$  为磁探仪在  $T_0 + nt_m$  时刻相对潜艇的矢径。式(1)的分量形式可表示为

$$\begin{cases} B_{gx,n} = a_{x,n}M_x + a_{y,n}M_y + a_{z,n}M_z \\ B_{gy,n} = b_{x,n}M_x + b_{y,n}M_y + b_{z,n}M_z \\ B_{gz,n} = c_{x,n}M_x + c_{y,n}M_y + c_{z,n}M_z \end{cases} \quad (2)$$

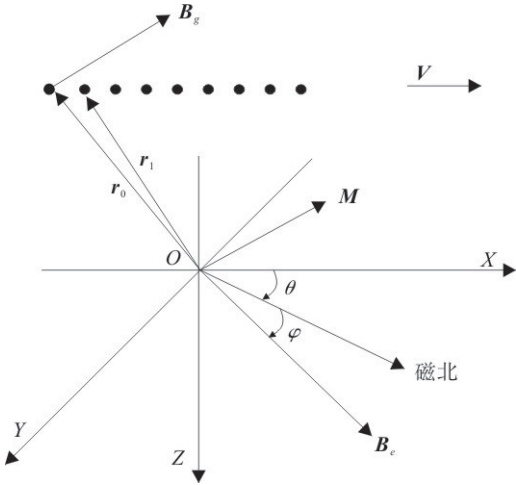


图 1 单个标量磁探仪探潜模型中各变量间的关系  
Fig. 1 Relationship of variables in antisubmarine detection model of single scalar magnetic detector  
记系数矩阵

$$\mathbf{A}_n = \begin{pmatrix} a_{x,n} & a_{y,n} & a_{z,n} \\ b_{x,n} & b_{y,n} & b_{z,n} \\ c_{x,n} & c_{y,n} & c_{z,n} \end{pmatrix}$$

则有

$$\mathbf{B}_{g,n} = \mathbf{A}_n \cdot \mathbf{M} \quad (3)$$

式中  $\mathbf{A}_n$  中各元素与  $x_n, y_n, z_n$  相关<sup>[9]</sup>, 此处不赘述。

$T_0 + nt_m$  时刻, 磁探仪处的总磁感应强度为

$$\mathbf{B}_{m,n} = \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_{g,n} \quad (4)$$

三矢量的位置关系如图 2 所示。

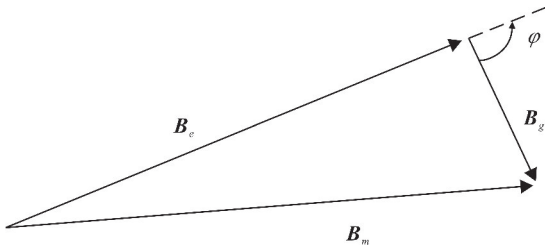


图 2 各磁场矢量间的关系

Fig. 2 Relationship of magnetic field vectors

由于磁探仪距离潜艇较远,  $|\mathbf{B}_e| \gg |\mathbf{B}_g|$ , 因此  $T_0 + nt_m$  时刻其输出可表示为

$$B_{m,n} \approx B_e + B_{g,n} \cos \varphi_n \quad (5)$$

式中  $B_{g,n} \cos \varphi_n$  为  $\mathbf{B}_g$  在  $\mathbf{B}_e$  方向上的投影。根据投影关系, 可得如下关系式

$$B_{g,n} \cos \varphi_n = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \end{pmatrix}^T \cdot \mathbf{B}_{g,n} \quad (6)$$

再由式(3), 有

$$B_{g,n} \cos \varphi_n = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \end{pmatrix}^T \cdot \mathbf{A}_n \cdot \mathbf{M} \quad (7)$$

记

$$\mathbf{C}_n = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \end{pmatrix}^T \cdot \mathbf{A}_n \quad (8)$$

则式(7)可写为

$$B_{g,n} \cos \varphi_n = \mathbf{C}_n \cdot \mathbf{M} \quad (9)$$

结合式(5), 得

$$\begin{aligned} B_{m,n} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{m,i} &= B_{g,n} \cdot \cos \varphi_n - \\ \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} [B_{g,i} \cdot \cos \varphi_i] &= \mathbf{C}_n \cdot \mathbf{M} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} [\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{M}] = \\ &= \left[ \mathbf{C}_n - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} \mathbf{C}_i \right] \cdot \mathbf{M} \end{aligned} \quad (10)$$

将  $n=0, 1, 2, \dots, s-1$  代入式(2)、(3)、(10), 可得到由  $s$  个方程组成的方程组。显然, 方程组中左侧为磁探仪探测得的已知量, 右侧中的未知参数为  $\mathbf{r}_0$  和  $\mathbf{M}$ 。可将方程组记为如下形式

$$\mathbf{B} = \mathbf{C}'(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{M} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \left[ B_{m,0} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{m,i}, B_{m,1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{m,i}, \dots, B_{m,s-1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{m,i} \right]^T \\ \mathbf{C}'(\mathbf{r}_0) &= \left[ \mathbf{C}_0 - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} \mathbf{C}_i, \mathbf{C}_1 - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} \mathbf{C}_i, \dots, \mathbf{C}_{s-1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} \mathbf{C}_i \right]^T \end{aligned}$$

上式为非线性方程组, 单个标量磁探仪的探测模型可化为求解如下所示的优化问题

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{r}_0, \mathbf{M}) = \|\mathbf{B} - \mathbf{C}'(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{M}\|_2 \\ \text{s.t. } z_0 > 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中的待定参数为矢量  $\mathbf{r}_0$  和  $\mathbf{M}$ 。注意

到,在使用优化算法求解的过程中,代入  $r_0$  后,式

(11)将变为线性方程组,该线性方程组的解为

$$M = [C'(r_0)]^+ \cdot B \quad (13)$$

即对于任意  $r_0$  和  $M$  可用式(13)表示,则式

(12)可化为

$$\begin{cases} \min f(r_0) = \|B - C'(r_0) \cdot [C'(r_0)]^+ \cdot B\|_2 \\ \text{s.t. } z_0 > 0 \end{cases} \quad (14)$$

由此,该优化问题的待定参数仅为矢量  $r_0$ 。

## 1.2 基于两个标量磁探仪的探测模型

在实际的航空磁探过程中,为了提高磁异常探测的速度及准确性,常在一个飞行器上布设2个标量磁探仪联合使用的方式进行探测。可设两磁探仪沿飞行器轴线对称布设,距离为  $d$ ,两磁探仪相关变量分别标记为  $a, b$ ,则各变量关系如图3。

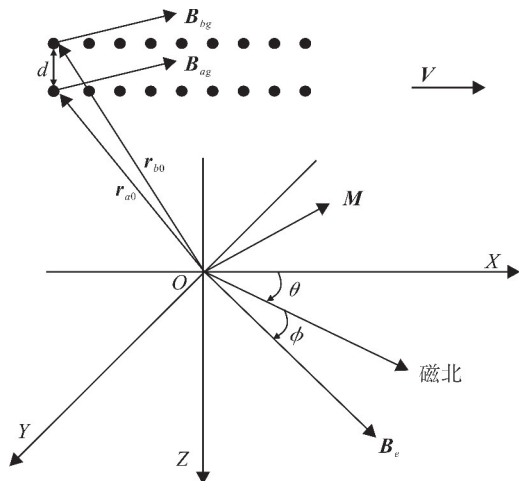


图3 两个标量磁探仪探潜模型中各变量间的关系

Fig. 3 Relationship of variables in antisubmarine detection models of double scalar magnetic detectors

图中各变量有如下关系式

$$B_{ag,n} = \frac{\mu_0}{4\pi r_{an}^3} \left[ \frac{3(M \cdot r_{an})r_{an}}{r_{an}^2} - M \right] \quad (15)$$

$$B_{bg,n} = \frac{\mu_0}{4\pi r_{bn}^3} \left[ \frac{3(M \cdot r_{bn})r_{bn}}{r_{bn}^2} - M \right] \quad (16)$$

$$r_{b0} = r_{a0} - (0, d, 0) \quad (17)$$

类比上节,可将式(15)-(16)记为

$$B_{ag,n} = A_{g,n} \cdot M \quad (18)$$

$$B_{bg,n} = A_{b,n} \cdot M \quad (19)$$

记

$$C_{a,n} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\theta \\ \cos\phi \sin\theta \\ \sin\phi \end{pmatrix}^T \cdot A_{a,n} \quad (20)$$

$$C_{b,n} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\theta \\ \cos\phi \sin\theta \\ \sin\phi \end{pmatrix}^T \cdot A_{b,n} \quad (21)$$

则有

$$B_{ag,n} \cos\phi_{a,n} = C_{a,n} \cdot M \quad (22)$$

$$B_{bg,n} \cos\phi_{b,n} = C_{b,n} \cdot M \quad (23)$$

可得

$$B_{am,n} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{am,i} = \left[ C_{a,n} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{a,i} \right] \cdot M \quad (24)$$

$$B_{bm,n} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{bm,i} = \left[ C_{b,n} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{b,i} \right] \cdot M \quad (25)$$

将  $n = 0, 1, 2, \dots, s-1$  分别代入式(24)和(25),可得到由  $2s$  个方程组成的方程组。方程组中左侧为磁探仪探测得的已知量,右侧中的未知参数为  $r_{a0}, r_{b0}$  和  $M$ 。可将方程组记为如下形式

$$\begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_a(r_{a0}) \\ C'_b(r_{b0}) \end{bmatrix} \cdot M \quad (26)$$

式中:

$$B_a = \left[ B_{am,0} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{am,i}, B_{am,1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{am,i}, \dots, B_{am,s-1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{am,i} \right]^T$$

$$B_b = \left[ B_{bm,0} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{bm,i}, B_{bm,1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{bm,i}, \dots, B_{bm,s-1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} B_{bm,i} \right]^T$$

$$C'_a(r_{a0}) = \left[ C_{a,0} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{a,i}, C_{a,1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{a,i}, \dots, C_{a,s-1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{a,i} \right]^T$$

$$C'_b(r_{b0}) = \left[ C_{b,0} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{b,i}, C_{b,1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{b,i}, \dots, C_{b,s-1} - \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} C_{b,i} \right]^T$$

由式(17),  $r_{b0} = r_{a0} - (0, d, 0)$ ,式(26)可记为

$$B_{ab} = C'_{ab}(r_{a0}) \cdot M \quad (27)$$

式中未知参数为  $r_{a0}$  和  $M$ ,则2个标量磁探仪的探测模型可化为求解如下所示的优化问题

$$\begin{cases} \min f(r_{a0}) = \|B_{ab} - C'_{ab}(r_{a0}) \cdot [C'_{ab}(r_{a0})]^+ \cdot B_{ab}\|_2 \\ \text{s.t. } z_{a0} > 0 \end{cases} \quad (28)$$

## 2 对抗航空磁探的指标需求分析

由上节可知,标量磁探仪的输出为

$$B_{m,n} \approx B_e + B_{g,n} \cos\phi_n \quad (29)$$

该部分由地磁场标量( $B_e$ )及目标磁场在地磁

场方向上的投影值 ( $B_{g,n} \cos \varphi_n$ ) 组成, 而标量磁探仪在对目标进行探测时, 主要依靠的就是  $B_{g,n} \cos \varphi_n$  部分。显然, 对于潜艇磁诱饵而言, 为增强对抗航空磁探的有效性, 需在合理范围内增大其  $B_{g,n} \cos \varphi_n$  值。下面对其进行具体分析。

### 1) 磁感应强度值 $B_{g,n}$ 。

磁诱饵在飞行器高度产生的磁感应强度值  $B_{g,n}$ , 将直接影响标量磁探仪探测到该磁诱饵的难易程度。由于地磁场  $B_e$  较大,  $B_{g,n}$  越小则对标量磁探仪的灵敏性要求越高。

对该指标的需求可分为两部分, 首先是磁诱饵在飞行器高度产生的最大磁感应强度值  $B_{g,\max}$ , 这决定了标量磁探仪所能探测到的整体信号幅值; 同时, 由  $B_{g,n}$  的下标  $n$  可知, 标量磁探仪对目标的探测是随相对位置变化的, 由于磁诱饵和飞行器对相互间运动是不可预知的, 还要求磁诱饵产生的磁感应强度值在较大范围内达到一定的幅值。

### 2) 与地磁场夹角余弦值 $\cos \varphi_n$ 。

与  $B_{g,n}$  类似, 磁诱饵在飞行器位置的磁感应强度矢量  $B_{g,n}$  与地磁场矢量  $B_e$  的夹角余弦值  $\cos \varphi_n$  同样影响着标量磁探仪对其的探测。当  $\varphi_n$  接近  $90^\circ$  或  $270^\circ$  时,  $B_{g,n}$  在  $B_e$  方向上的投影近似等于 0; 当  $\varphi_n$  接近  $0$  或  $180^\circ$  时,  $B_{g,n}$  在  $B_e$  方向上的投影则近似等于  $B_{g,n}$  的模  $B_{g,n}$ 。

需要注意的是, 机载标量磁探仪对目标的探测是一个持续采样的过程, 在这个过程中, 角度  $\varphi_n$  是变化的, 在评价磁诱饵的对抗能力时, 应考量  $\varphi_n$  在整个探测过程中的大小变化。

## 3 对抗效能评估度量方法

通过以上分析, 可将影响磁诱饵对机载标量磁探仪对抗效能的主要因素总结为 3 方面: 磁诱饵在指定高度产生的最大磁感应强度值  $B_{g,\max}$ ;  $\cos \varphi_n$  在整个飞行器轨迹上的大小分布情况; 磁诱饵在指定高度产生的磁感应强度  $B_g$  大于有效临界值的范围。下面分别针对这 3 个方面进行度量指标的确定。

### 1) 最大磁感应强度值 $B_{g,\max}$ 。

对于磁诱饵而言, 可以预见的是, 当磁场产生

装置一定时, 都可以通过增大其功率来使其最大磁感应强度值增大。因此, 在度量磁诱饵的最大磁感应强度值时, 应同时考虑其功率。显然, 当不考虑其它因素时, 在最大磁感应强度值一定的情况下, 其功率越小越有利于应用。

假设磁诱饵在其上方高度  $h$  处产生的最大磁感应强度值为  $B_{g,\max}$ , 此时磁诱饵的功率为  $P$ , 定义磁场功率比  $\Gamma_h$  如下

$$\Gamma_h = \frac{B_{g,\max}}{P} \quad (30)$$

由表达式可知, 当  $\Gamma_h$  值越大, 可认为磁诱饵的对抗效能越好。

### 2) 夹角余弦值 $\cos \varphi_n$ 分布。

磁诱饵在对抗航空磁探时, 应调整其航行方向, 使其在指定高度上的磁感应强度矢量  $B_g$  能够与地磁场矢量  $B_e$  尽量垂直, 这在具体的战术使用层面有非常大的意义, 但不同类型的磁诱饵都能够无差别地实现这一点, 因此这无法直接应用于磁诱饵对抗效能的度量。然而, 若磁诱饵能够在不改变航行方向及深度的情况下调整  $B_g$  方向且磁场功率比  $\Gamma_h$  变化不大, 将有利于其更好地对抗机载标量磁探仪。由此, 定义磁诱饵在其上方  $h$  高度处的磁场方向可调性指标  $K_{\varphi_h}$ 、 $K_{\theta_h}$  如下

$$K_{\varphi_h} = \frac{\Delta \varphi_{\max}}{\Delta \Gamma_h} \quad (31)$$

$$K_{\theta_h} = \frac{\Delta \theta_{\max}}{\Delta \Gamma_h} \quad (32)$$

式中:  $\Delta \varphi_{\max}$  为  $B_g$  偏角可调整的最大值;  $\Delta \theta_{\max}$  为  $B_g$  倾角可调整的最大值;  $\Delta \Gamma_h$  为在该范围内  $\Gamma_h$  的变化差值。由表达式可知,  $K_{\varphi_h}$ 、 $K_{\theta_h}$  值越大, 磁诱饵的对抗效能越好。

### 3) $B_g$ 大于有效临界值的范围。

通常而言, 当磁诱饵在其上方  $h$  高度处的磁感应强度峰值  $B_{g,\max}$  越大, 则在该平面内的整体磁感应强度也越大。需要注意的是, 不同的磁诱饵在同一水平面内随距离的衰减速度是不尽相同的。由于对飞行器运动轨迹的不可预知性, 磁诱饵很难通过调整其所在位置使飞行器飞过磁感应强度值最大的区域, 因此, 若磁诱饵能够在更宽阔的区域内

保持较高的磁感应强度值,其对抗效能将得到显著提升。基于此,定义磁诱饵在其上方  $h$  高度处的有效面积指标  $M_h$  为

$$M_h = S | B_{g,s} \geq c \cdot B_{gmax} \quad (33)$$

式中: $c \in (0,1)$  为有效范围临界系数; $S$  为磁感应强度值  $B_{g,s}$  不小于临界值的范围; $M_h$  则为该范围的面积大小。需要注意的是,系数  $c$  在  $c \in (0,1)$  范围内不应选取过大或过小值,而在对不同的磁诱饵进行横向对比时, $c$  在适中范围内取不同值对结果不会有明显影响,为方便计算,可取  $c=0.5$ 。

由  $M_h$  的表达式可知, $M_h$  值越大,磁诱饵的对抗效能越好。

#### 4 结束语

本文分析了目前常用的标量及矢量磁探仪的工作原理及各自的优缺点,分别建立了基于单个标量磁探仪和2个标量磁探仪的航空磁探潜模型,以所建立的航空磁探潜模型为基础,分析了对抗航空磁探时磁源所需满足的模拟需求,并给出对抗效能评估度量方法及指标:磁场功率比、磁场方向可调性指标及有效面积指标,为潜艇空中磁场模拟方法研究的开展提供了理论基础,指明了研究方向。

#### 参考文献

- [1] SCOTT R. Ghost in the machine: DARPA sets course towards future unmanned ASW trail ship[J]. Jane's Navy International, 2010 (4):10-11.
- [2] XU R W, HE L, ZHANG L K, et al. Identification of submarine mechanical noise sources on sparse data[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44 (7):151-160.
- [3] HANS P, PETER H, RANDOLPH T, et al. Air-independent propulsion system for submarines[C]// ThyssenKrupp Techforum. Germany: ThyssenKrupp, 2006.
- [4] 孙明太.航空反潜装备[M].北京:国防工业出版社, 2012:161-243.
- [5] 王金根,龚沈光.基于运动标量磁强计的磁性目标定位问题研究[J].电子学报,2002,30(7):1057-1060.
- [6] 刘忠乐,石剑,文无敌.磁诱饵空中磁场模型及其试验验证[J].探测与控制学报,2015,37(1):31-35.
- [7] 韩瑞新,李春洪,陆勤夫,等.航空反潜中的磁探仪系统仿真研究[J].系统仿真学报,2009,21(9):2753-2757.
- [8] 张昌达,董浩斌.量子磁力仪评说[J].工程地球物理学报,2004,1(6):499-507.
- [9] 林春生,龚沈光.舰船物理场[M].2版.北京:兵器工业出版社,2007:54-55.