

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.01.010

航空磁探仪探潜目标磁梯度定位方法

王光源¹, 马海洋², 章尧卿¹

(1. 海军航空工程学院 指挥系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要: 以反潜巡逻机使用光泵式磁探仪为例, 提出一种利用航空磁探仪对潜艇进行磁梯度定位的方法。在较详细地分析潜艇的磁场特性, 建立磁场模型的基础上, 对反潜巡逻机装备磁探仪如何利用磁梯度矢量来探测潜艇和对潜艇进行定位进行分析, 建立了相应的模型, 并根据航空磁探仪探潜的特点, 将航空反潜中潜艇的远场磁信号等效为磁偶极子磁场。结果表明, 通过对潜艇位置做的3次跟踪探测, 能较准确地定位潜艇的位置。

关键词: 潜艇磁场; 航空磁探仪; 目标定位; 磁梯度

中图分类号: O223; N945.12 **文献标志码:** A

Magnetic Gradient Target Positioning Method of Airborne MAD Submarine Detection

Wang Guangyuan¹, Ma Haiyang², Zhang Yaoqing¹

(1. Dept. of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Taking the patrol aircraft using the airborne MAD for example, the paper put forward a method of magnetic gradient to get the position of the submarine. On the base of analyzing the magnetic field characteristic of the submarine in detail and setting up the magnetic field model, how the patrol aircraft to make use of airborne MAD to survey submarine was analyzed and set up the model, and according to the characteristic of airborne MAD, the paper took far field magnetic signal be equivalent of magnetic dipole magnetic field. Result shows that through following and surveying 3 times that the position of submarine can be got accurately.

Keywords: submarine magnetic field; airborne MAD; target positioning; magnetic gradient

0 引言

随着潜艇消声技术的发展以及受浅海复杂水声环境的影响, 对潜艇的水声探测已变得异常困难。随着非声探潜技术的不断发展, 使得对潜艇进行航空磁性探测和搜索将成为航空反潜的另一种主要方式。航空磁性探测是用装载于飞机上的磁探仪接收潜艇的磁场信号, 对潜艇进行准确定位, 并依此解算出目标潜艇的运动要素, 及其与飞机的相对位置等参数。故以反潜巡逻机使用光泵式磁探仪为例, 提出一种对潜艇进行磁梯度定位的方法。

1 潜艇磁场模型分析

1.1 几种典型的潜艇磁场模型简析

常用的潜艇磁场模型有均匀磁化旋转椭球体模型、均匀磁化旋转椭球体阵列模型、磁偶极子模型、磁偶极子阵列模型、旋转椭球体与磁偶极子混合阵列模型等。

从消磁以及防御水雷的要求出发时, 潜艇的空间磁场一般等效为一系列位于潜艇空间所占区域内的磁偶极子磁场的线性叠加。但是航空磁探仪探测中潜艇的磁场模型可以进一步简化, 因为航空磁探

仪技术性能的一般要求是对中型潜艇作用距离不小于 400 m, 而中型潜艇的长度一般不超过 100 m。在这样的比例下, 完全可以将潜艇等效为一个磁偶极子, 在满足了磁探仪对潜探测精度的基础上, 简化了潜艇的磁场模型和对模型的解算。

1.2 潜艇磁场的磁偶极子模型

受地磁场磁化的潜艇的总磁性 T_{Σ} 可分解为固定磁性 T_p 和感应磁性 T_i , $T_{\Sigma} = T_p + T_i$ 。固定磁性是潜艇的剩磁, 可认为固定不变。感应磁性是舰船在航行过程中受地磁场感应磁化而形成的, 随地磁场 B_T 的变化而变化。

潜艇磁偶极子模型的磁矩 \vec{M} 由下列部分组成: 沿潜艇的横向分量为 M_x , 沿潜艇的纵向分量为 M_y , 沿潜艇的垂向分量为 M_z , 如图 1。而 M_x 和 M_y 又可认为各由其永久磁场分量 M_{px} 、 M_{py} 及感应磁场分量 M_{ix} 、 M_{iy} 组成, 设潜艇的航向为 C_T , 如图 2, 则有:

$$\begin{cases} M_x = M_{px} + M_{ix} \cdot \sin C_T \\ M_y = M_{py} + M_{iy} \cdot \cos C_T \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2010-07-17; 修回日期: 2010-09-28

作者简介: 王光源 (1964-), 男, 山东人, 副教授, 硕士生导师, 从事武器系统效能评估与优化使用, 作战模拟与仿真等研究。

由于在磁异探潜作业时纬度变化不大, 可以不考虑地磁场数值变化对 M_z 感应分量的影响, 所以 M_z 可不再分解为永久分量与感应分量的组合。因此, 潜艇的横向感应磁矩 M_{ix} , 横向永久磁矩 M_{px} 、纵向感应磁矩 M_{iy} 、纵向永久磁矩 M_{py} , 以及垂向磁矩 M_z 就构成其在磁异探测中的数学模型。

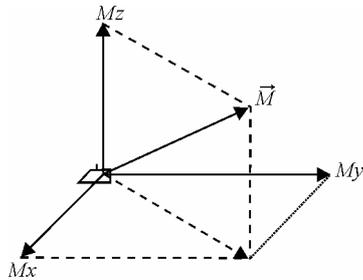


图 1 潜艇磁矩及其分量

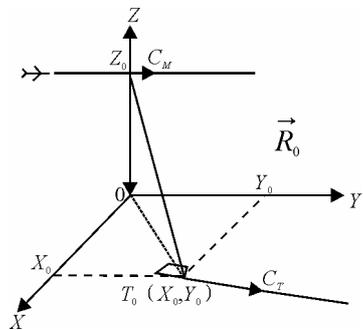


图 2 巡逻机—潜艇位置关系图

1.3 磁偶极子的空间磁场

如图 2, 设 Y 轴方向为飞机飞行方向, X 轴方向为地磁场方向。

t_0 时刻飞机过 z_0 点, z_0 在水平面上的投影为坐标系原点, 潜艇位于水平面内 (X_0, Y_0) 点, 构成坐标系。

其中, \vec{R}_0 是由潜艇指向巡逻机的位置矢量:

$$\vec{R}_0 = x_0 i + y_0 j + z_0 k \quad (2)$$

目标斜距为:

$$R_0 = |\vec{R}_0| = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \quad (3)$$

则潜艇在 $T_0(X_0, Y_0)$ 处的磁矩 \vec{M} 产生于位置矢量 \vec{R}_0 处 z_0 点的磁场为:

$$\vec{H}_{R_0} = -\frac{1}{R_0^3} \left[\vec{M} - \frac{3 \times (\vec{M} \cdot \vec{R}_0)}{R_0^2} \cdot \vec{R}_0 \right] \quad (4)$$

1.4 磁梯度矢量

已知潜艇在空间中某点产生的磁场为 \vec{H}_R , 则磁场的方向导数 $|\partial \vec{H}_R / \partial \vec{R}|$ 的大小表明 \vec{H}_R 沿 \vec{R} 方向

变化的快慢程度。又由梯度的概念可知, 沿梯度方向的 $|\partial \vec{H}_R / \partial \vec{R}|$ 值最大, 此时磁探仪与潜艇之间的距离最短, 并且在同一垂直平面内。由此可简化坐标系, 如图 3。

磁探仪与潜艇之间的最短距离为:

$$R = \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \quad (5)$$

磁梯度矢量为:

$$\vec{G} = \frac{\partial \vec{H}_R}{\partial x} i + \frac{\partial \vec{H}_R}{\partial y} j + \frac{\partial \vec{H}_R}{\partial z} k \quad (6)$$

由于目标位于 X 轴上, $Y=0$, Y 轴方向的磁梯度可以忽略不及, 因此在图 3 所示的坐标系中, 磁梯度矢量可简化为:

$$\vec{G} = \frac{\partial \vec{H}_R}{\partial x} i + \frac{\partial \vec{H}_R}{\partial z} k \quad (7)$$

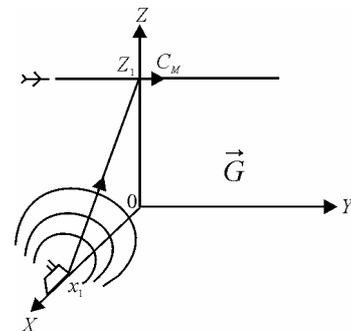


图 3 磁梯度矢量

2 磁探仪测量的特点

磁饱和式磁探仪只能测量出潜艇所在区域的磁异常强度, 而光泵式磁探仪不仅能够测量磁异常强度, 而且能够测量潜艇空间磁场的磁场矢量, 进而得到梯度矢量。

由于潜艇产生的磁异常是处在整个地磁场背景下的, 磁异常 \vec{H}_R 是磁探仪探头感应到的总磁场 \vec{H}_T , 减去其中的固定地磁场部分 \vec{H}_E :

$$\vec{H}_R = \vec{H}_T - \vec{H}_E \quad (8)$$

潜艇的空间磁场与地磁场的关系如图 4。

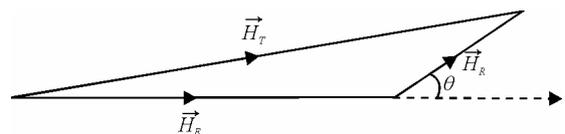


图 4 各磁场间的关系

图中的各矢量的值之间的关系为:

$$H_T = \sqrt{[H_E^2 + H_R^2 - 2 \cdot H_E \cdot H_R \cdot \cos(\pi - \theta)]} \quad (9)$$

由于 $H_R \ll H_E$, 上式可近似为:

$$H_T = H_E \cdot [1 + \frac{1}{2}(H_R^2 + 2 \cdot H_E \cdot H_R \cdot \cos\theta) / H_E^2] \quad (10)$$

代入式 (8) 得:

$$H = H_T - H_E = \frac{H_R^2 + 2 \cdot H_E \cdot H_R \cdot \cos\theta}{2 \cdot H_E} \approx H_R \cdot \cos\theta \quad (11)$$

由式 (11) 可知,磁探仪探测到的磁场 \vec{H} 是潜艇磁场 \vec{H}_R 在地磁场方向上的投影。故光泵式磁探仪探测到的磁梯度也是地磁场方向上的水平磁梯度:

$$G_x = \frac{\partial \vec{H}_R}{\partial x} i \quad (12)$$

3 磁探仪的磁梯度矢量定位

3.1 磁梯度矢量特性分析

通过以上分析可知,对潜艇磁场的测量最终将转化为对水平磁梯度 G_x 的测量。 G_x 是一个有方向,有大小的矢量,其方向指向潜艇目标磁场的水平投影位置,而大小则反应了潜艇的磁场强度和离飞机的水平距离 L_{xy} 。

如图 5, G_{x1} 显示潜艇在航线右侧, G_{x2} 显示潜艇在航线左侧。

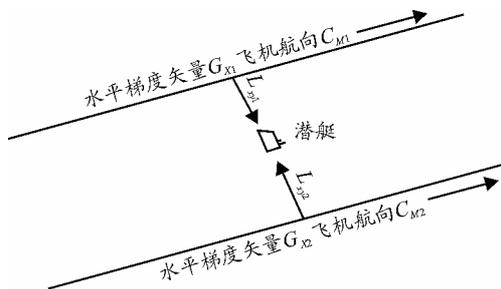


图 5 磁梯度矢量剖面图

理论上,在已知了潜艇方位和潜艇距飞机的水平距离之后,即可确定出潜艇相对于飞机在水平面上投影的位置。结合飞机导航系统提供的位置信息,就可以将潜艇的绝对位置确定下来。但由于潜艇产生的磁异常强度 H_R (一般为几十 nT) 远小于地磁场强度 H_E (一般为数千 nT),受地磁场影响,所测得的磁梯度的大小 $|G_x|$ 误差较大,因此,水平距离 L_{xy} 的误差也较大,不能用于精确定位。

3.2 定位原理

由于单次测量所得方位距离不能准确地确定潜艇位置,因此笔者提出多次测量的方法:

巡逻机在海上搜索,当通过潜艇附近时,测量磁场会出现一个异常量 ΔT (纵坐标) 对应航线(横

坐标) 的曲线图会出现异常,当航线方向为东西向时,这个异常的曲线图形是对称的,如图 6。由此可判定目标潜艇的位置就在 ΔT 异常峰值对应的位置附近;若航线的方向为南北方向,在北纬斜磁化地区,潜艇附近的 ΔT 异常曲线是不对称的。此时,不能再按 ΔT 异常峰值来定潜艇的位置,而是在异常正负峰值之间,其具体位置须根据当地的磁倾角计算而得。

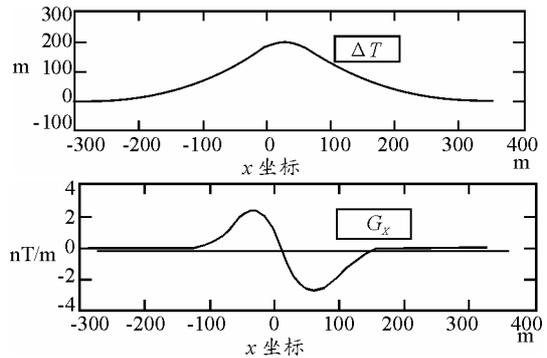


图 6 ΔT 、 G_x 矢量剖面

潜艇作第二次搜索时,在航线上可以测到较清楚的目标(潜艇)信号。如果在巡逻搜索中有 2 次发现潜艇,如图 5,则可以利用 G_{x1} 和 G_{x2} 矢量中矢量长度最大值处的经纬度或 G_{x1} 和 G_{x2} 各自的汇聚中心附近的经纬度坐标值来粗略估计潜艇的经纬度坐标。例如:

设 G_{x1} 处的经纬坐标为 $N1, S1$; G_{x2} 处的经纬坐标为 $N2, S2$ 。

则潜艇经纬度的粗略估算值 (N, S) 为:

$$\text{纬度值: } N = (N1 + N2) / 2$$

$$\text{经度值: } S = (S1 + S2) / 2$$

有了 2 次发现取得的潜艇位置的粗略估计值,第 3 次追踪的航线,就有可能经过潜艇上空附近。此时,就会出现图 6 所示的 G_x 和 ΔT 剖面曲线。

G_x 分量在潜艇前后分别出现正负极值,并在潜艇上方 ($X=0$) 附近改变方向,出现零值,即 $G_x = 0$ 。 ΔT 剖面曲线在潜艇上方 ($X=0$) 附近出现峰值。

在通过潜艇上空时,由于 G_y 很小, $G_y \approx 0$,水平梯度矢量 \vec{GH} 就与 G_x 分量接近,即 $\vec{GH} \approx G_x$,此时 G_x 矢量的方向基本沿着航线的方向;在过潜艇上方时, G_x 趋于最小值或接近零值。此时,据以上诸异常的特征位置,可以较准确地测定潜艇的水平投影位置,即它在 $x=0 (N0, S0)$ 的位置。

(下转第 38 页)

立武器系统作战效能与评估因素之间的数学模型:

$$u = \sum_{j=1}^m a_j K(x_j, x) + b$$

解得的 Lagrange 乘子

$$a = (-1.887, 0.0003, 0.771, -6.739, 7.854)$$

对任意的评估因素 x_i 有:

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} = 0.0489, \frac{\partial u}{\partial x_2} = 0.7918, \frac{\partial u}{\partial x_3} = 0.2056,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_4} = -0.0549, \frac{\partial u}{\partial x_5} = 1.0414, \frac{\partial u}{\partial x_6} = 0.8061$$

取方案 3 作为代表来分析评估参数的灵敏度。分别取每个参数值的 10%，则各评估参数的灵敏度为:

$$\Delta u(x_1) = 0.0021, \Delta u(x_2) = 0.0386, \Delta u(x_3) = 0.0109,$$

$$\Delta u(x_4) = -0.0023, \Delta u(x_5) = 0.0702, \Delta u(x_6) = 0.0421$$

由分析可见，可靠性指标灵敏度最大，灵敏性指标灵敏度次之，而最大速度、飞行范围、最大负载、购买费用指标的灵敏度较小。

4 结束语

实例计算结果表明，该方法无须考虑决策属性

(上接第 27 页)

[2] 尹碧波, 赵文绪. 企业知识理论: 框架与演进[J]. 内蒙古农业大学学报, 2005(1): 51-53.

[3] 朱彬. 邹议企业知识理论[J]. 福建师范大学学报, 2007(4): 84-85.

[4] 刘亚东. 车辆装备保障分队训练能力研究[D]. 军事交通学院硕士论文, 2009: 26-35.

[5] 张文松. 战略和能力的耦合[J]. 中国软科学, 2005(7): 122-127.

[6] 张春润, 伊洪冰. 车辆装备保障训练转型与任务分析研究报告[R]. 军事交通学院, 2008: 4-7.

(上接第 34 页)

其中: $N0=0$ 点的纬度值, $S0=0$ 点的经度值。

另外, 由于 Gx 矢量有指向作用, 且其矢量交点离航线的远近与目标潜艇离航线的远近有正相关关系, 故常可联合用第一次遭遇的航线上的 ΔT_j 异常的峰值位置和 Gx 矢量异常交点位置, 一次性地较准确地判断潜艇的经纬度位置。

4 结束语

结果表明, 通过对潜艇位置做的 3 次跟踪探测, 能较准确地定位潜艇的位置。下一步, 将对该模型进行仿真计算, 以便验证其实用性。

间的复杂关系, 在灵活性和所提供的信息量上优于传统解析法, 在计算速度上优于 Monte Carlo 法。

参考文献:

[1] Smola A J, Scholkopf B. A tutorial on support vector regression[J]. Statistics and Computing, 2004, 14(3): 199-222.

[2] 王强, 沈永平, 陈英武. 多属性决策的支持向量机方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(6): 54-58.

[3] 张丽叶, 郑绍钰. 基于 LS-SVM 的装备研制费用建模与分析[J]. 兵工自动化, 2009, 28(2): 16-18.

[4] 杨俊燕, 张优云. 支持向量机在机械设备震动信号趋势预测中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2005: 39(9): 950-953.

[5] 张弓长, 郭焯, 曹潇, 等. 基于最小二乘支持向量机的多属性决策[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(9): 2746-2748.

[6] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 31-50.

[7] 张小云, 刘允才. 高斯支撑向量机的性能分析[J]. 计算机工程, 2003, 29(8): 23-25.

[8] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[9] 徐海涛, 许路铁, 俞卫博, 等. 红外探测器灵敏度的测量方法[J]. 四川兵工学报, 2009(11): 123-124.

[7] 胡利民. 装备训练学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004, 10: 153-154.

[8] 张春润, 刘增勇. 信息化条件下“院校-部队-训练机构”三位一体车辆装备保障人才培养体系研究报告[R]. 军事交通学院, 2008: 23-25.

[9] 张春润, 张怀军. 信息化条件下“院校-部队-训练机构”三位一体训练内容体系研究报告[R]. 军事交通学院, 2008: 35-37.

[10] 杨超, 胡利民, 宋辉. 改进解释结构模型在装备保障训练内容组织与设计中的应用[J]. 四川兵工学报, 2009(2): 69-71.

参考文献:

[1] 叶平贤, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 4.

[2] 翁行太, 曹梅芬, 等. 磁异探潜中潜艇的数学模型[J]. 上海交通大学学报, 1995, 5(3): 27-32.

[3] Harriman, Walter L, Palosky, Paul H. Comparison of Aircraft Maneuver Compensators for Antisubmarine Warfare Magnetometers[R]. 1981,(2),AD-A325 806/8/XAB

[4] 唐劲飞, 龚沈光, 王金根. 磁偶极子模型下目标定位和参数估计的两种新方法[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 154-157.

[5] 古小明, 周克胜, 朱居莹. 战场复杂电磁环境[J]. 四川兵工学报, 2009(7): 78-80.