

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.017

基于矢量磁力仪阵列的水下磁性目标警戒系统

汪兴海¹, 于力², 周镇宇², 王玉明²

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 中电科海洋信息技术研究院有限公司, 北京 100041)

摘要: 为提高水下磁性目标的预警成功率, 设计一种基于阵列矢量磁力仪的磁性目标探测方法。按照理论推导与仿真相结合的方式, 对阵列坐标系下磁性目标磁异常信号特征进行分析, 推导目标距离计算方法, 以某典型磁性目标为探测对象, 对目标运动磁异常特征进行仿真, 得出阵列间距与探测距离的关系。仿真结果表明: 该设计具有一定的实用性, 可为后续特定海区的水下磁性目标预警提供参考。

关键词: 水下探测; 磁力仪阵列; 梯度张量; 磁场

中图分类号: TJ67 文献标志码 A

Underwater Magnetic Target Alert System Based on Vector Magnetometer Array

Wang Xinghai¹, Yu Li², Zhou Zhenyu², Wang Yuming²

(1. School of Aviation Basic, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. CETC Ocean Information Research Institute Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: In order to improve the early warning success rate of underwater magnetic targets, a magnetic target detection method based on array vector magnetometer is designed. According to the combination of theoretical derivation and simulation, the magnetic anomaly signal characteristics of the magnetic target in the array coordinate system are analyzed, and the target distance calculation method is deduced. Taking typical magnetic target as the detection object, the magnetic anomaly characteristics of the target movement are simulated and obtained the relationship between array spacing and detection distance. The simulation results show that the design has a certain practicability and can provide a reference for the early warning of underwater magnetic targets in specific sea areas.

Keywords: underwater detection; magnetometer array; gradient tensor; magnetic field

0 引言

近些年, 随着我国海洋活动的不断发展, 海上平台设施安全(如钻井平台、海上发射平台等)显得越来越重要。海上平台设施面临的外部威胁主要来自于空中、水面、水下, 其中水面和空中威胁预警和反制手段比较成熟, 但水下面临的威胁则相对复杂。传统的水下探测手段以声呐为主, 随着近些年消声技术的进步, 水下潜航设备发出的声音越来越小, 特别是南海某些关键海域存在有规律的洋流, 水下目标可以借助洋流进行无动力航行, 使得声呐的预警成功率明显降低。由于水下潜航器机械结构一般具有铁磁性材料, 铁磁性材料在航行过程中切割地磁线会被磁化; 因此, 当被保护区域出现水下潜航器入侵时, 会改变背景磁场的正常分布, 即引起磁场异常。使用高精度的磁探仪可以自动测量背景磁场及其微小变化, 当水下目标经过高精度磁探仪作用区域时, 背景磁场的变化(磁异常)将被检测, 从而实现预警。

文献[1]以潜艇缩比模型为实测对象, 研究了潜艇磁场的空间分布, 并设计了潜艇磁场模拟方法; 文献[2]研究了美军用于水下作战的水下自航靶发展情况, 提到美军的 Mk30Mod2 自航靶可在深度 450 m 上模拟 0.5 伽玛的磁异常信号, 逼真地模拟潜艇磁场分布, 用于美海军进行水下目标探测训练; 文献[3]介绍了磁探仪在反潜无人机上的应用, 提到磁探仪的反潜距离一般为 400~600 m; 文献[4]介绍了国际比较有代表性的磁探仪系统, 提到了美军 S-2T 型探潜巡逻机装备的 AN/ASQ-10 磁探仪作用距离为 300 m 左右, 该文献在展望探潜趋势时强调, 应研究磁探仪阵列, 通过磁探仪的协同工作可协同感知海域态势, 增大磁探仪作用距离, 形成更大范围的战场态势信息; 但并未给出具体的布阵方法、信息处理方法等信息。

笔者基于三轴矢量磁力仪研究探测阵列布置、阵列控制和数据处理等方法, 对在关键航道或特定海区进行全天时的水下预警具有重要的探索价值。

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-05-12

作者简介: 汪兴海(1987—), 男, 山东人, 硕士, 副教授, 从事电子系统设计、信号检测与信息处理研究。E-mail: marshallplan@126.com。

1 磁性目标特征分析

水下目标艇体一般由高强度铁磁性物质构成。这些铁磁性物质在海洋地磁场中航行时极易被磁化，形成感应磁场。此外，艇体在建造过程和航行时由于振动、海浪的冲击作用以及长期的定向停泊，还会产生固定磁场^[5]。

正常航行条件下，一定时间内目标艇体固有磁场可视为不变。根据艇体的结构特征，通常将固有磁场分为横向分量、纵向分量、垂直分量。在磁性目标定位研究中，由于艇体长度一般小于 100 m，而磁力仪作用距离普遍大于 300 m，当磁力仪距离目标的距离大于 2.5 倍目标尺寸时，可以把磁性物体视作磁偶极子处理。在目标坐标系下，如图 1 所示， A 为磁力仪位置，固有磁场在远场空间 A 点处产生的磁感应强度 3 分量(单位 nT) B_x 、 B_y 、 B_z 表示为^[6]：

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{100}{r^5} \begin{bmatrix} 3x^2 - r^2 & 3xy & 3xz \\ 3xy & 3y^2 - r^2 & 3yz \\ 3xz & 3yz & 3z^2 - r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 3(x_F - x)^2 - |\bar{r}_{MF}|^2 & 3(x_F - x)(y_F - y) & 3(x_F - x)(z_F - z) \\ 3(x_F - x)(y_F - y) & 3(y_F - y)^2 - |\bar{r}_{MF}|^2 & 3(y_F - y)(z_F - z) \\ 3(x_F - x)(z_F - z) & 3(y_F - y)(z_F - z) & 3(z_F - z)^2 - |\bar{r}_{MF}|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 m_x 、 m_y 、 m_z 为目标磁矩在阵列坐标系方向的分量。通过对上式求偏导，可得目标在 F 点引起的磁场各分量梯度为：

$$g_{xx} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)^3 - 9(x_F - x) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)^2(y_F - y) - 3(y_F - y) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)^2(z_F - z) - 3(z_F - z) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$g_{xy} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)^2(y_F - y) - 3(y_F - y) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)^2 - 3(x_F - x) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)(z_F - z) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$g_{xz} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)^2(z_F - z) - 3(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(z_F - z)^2 - 3(x_F - x) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$g_{yy} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)^2 - 3(x_F - x) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(y_F - y)^3 - 9(y_F - y) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(y_F - y)^2(z_F - z) - 3(z_F - z) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 M_x 、 M_y 、 M_z 为艇体等效磁矩， r 为 A 点至目标的直线距离。对于运动目标，测试阵列固定不动，目标运动会引起阵列测试节点磁异常。阵列坐标系如图 2 所示， F 为固定测试节点。

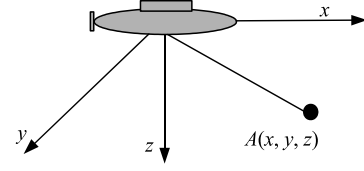


图 1 目标坐标系

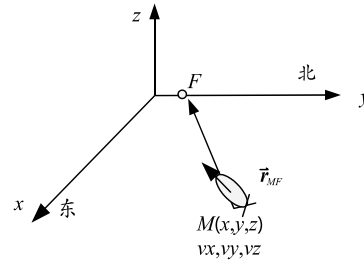


图 2 阵列坐标系

固定阵列某测试节点 $F(x_F, y_F, z_F)$ 相对目标的距离矢量可表示为 $\bar{r}_{MF} = (x_F - x, y_F - y, z_F - z)$ ，则目标在 F 点引起的磁异常可表示为(单位 nT)：

$$g_{yx} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)^2(y_F - y) - 3(y_F - y) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)^2 - 3(x_F - x) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)(z_F - z) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$g_{yz} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(y_F - y)^2(z_F - z) - 3(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(y_F - y)(z_F - z)^2 - 3(y_F - y) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$g_{zy} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(y_F - y)^2(z_F - z) - 3(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(y_F - y)(z_F - z)^2 - 3(y_F - y) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$g_{zx} = \frac{100}{|\bar{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)^2(z_F - z) - 3(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(y_F - y)(z_F - z) \\ 15|\bar{r}_{MF}|^2(x_F - x)(z_F - z)^2 - 3(x_F - x) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$g_{zz} = \frac{100}{|\vec{r}_{MF}|^5} \begin{bmatrix} 15|\vec{r}_{MF}|^2(x_F-x)(z_F-z)^2-3(x_F-x) \\ 15|\vec{r}_{MF}|^2(y_F-y)(z_F-z)^2-3(y_F-y) \\ 15|\vec{r}_{MF}|^2(z_F-z)^3-9(z_F-z) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过分析可得：

$$g_{yx}=g_{xy}; g_{zx}=g_{xz}; g_{xx}+g_{yy}+g_{zz}=0。$$

2 梯度张量在目标定位中的应用

由磁场矢量各分量的梯度组成梯度张量矩阵 G ：

$$G = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

若能测得 F 点的矢量磁场以及梯度张量 G_F ，则可计算得出 F 处的梯度张量模和磁场总梯度 Q_F ^[6]。

而 F 处的磁场总量可以计算得出：

$$|\vec{B}_F| = \sqrt{B_{Fx}^2 + B_{Fy}^2 + B_{Fz}^2} = (100|\vec{m}|)/|\vec{r}_{MF}|^3 \sqrt{3(\vec{r}_{MF} \cdot \vec{m})^2/|\vec{r}_{MF}|^2|\vec{m}|^2 + 1} \quad (13)$$

其中 $(\vec{r}_{MF} \cdot \vec{m})/(|\vec{r}_{MF}||\vec{m}|) = \cos\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle$ 。

F 处梯度张量的模可计算得出：

$$|G_F| = \sqrt{\sum g_{ij}^2} = 100/|\vec{r}_{MF}|^5 \sqrt{18|\vec{r}_{MF}|^2|\vec{m}|^2 + \vec{r}(6\vec{r}_{MF} \cdot \vec{m})^2} = 300|\vec{m}|/|\vec{r}_{MF}|^4 \sqrt{4\cos^2\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle + 2} \quad (14)$$

F 处的磁场总梯度可以计算^[7]得出：

$$Q_F = \sqrt{\vec{B}_F G_F (\vec{B}_F G_F)^T} / |\vec{B}_F| = 300m/|\vec{r}_{MF}|^5 \sqrt{(8\cos^4\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle + 7\cos^2\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle + 1)/(3\cos^2\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle + 1)} \quad (15)$$

由式(2)、式(3)联合可得：

$$\cos^2\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle = \left[\left(\pm\sqrt{17(|G_F|/Q_F)^4 - 28(|G_F|/Q_F)^2 + 4} + 7(|G_F|/Q_F)^2 - 10 \right) / \left(12 - 8(|G_F|/Q_F)^2 \right) \right] / 2 \quad (16)$$

$\cos^2\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle$ 有 2 个理论值，计算时应取介于 0 和 1 之间的根。式(13)、式(14)联合可得

$$|\vec{r}_{MF}| = 3 \frac{|B|}{|G|} \sqrt{(4\cos^2\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle + 2)/(3\cos^2\langle\vec{r}_{MF}, \vec{m}\rangle + 1)} \quad (17)$$

综上所述：在磁力仪所在的坐标系空间中，若空间磁异常信号由单一目标产生，能测得某点的磁异常信号矢量和梯度张量，则无需知道目标磁矩信息，即可求得目标距离该点的距离。

3 磁力仪阵列布设与仿真

3.1 布设方法

梯度张量可以通过多个磁力仪组成测试阵列进

行计算获取。由于梯度张量中 9 个元素只有 5 个是独立的，对于三轴矢量磁力仪阵列，可以通过位于同一平面的 4 个磁力仪进行两两正交获取。阵列布设如图 3 所示，其中梯度计算以内部 4 点测量为主，当目标较远时内部 4 点梯度无法分辨时，则以外部 4 点进行辅助测量。

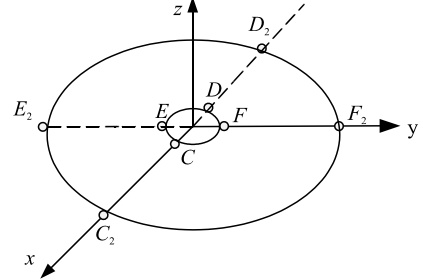


图 3 阵列布设

此外，外围 4 个矢量磁力仪，还可两两构成一组目标预警阵列，用于观测目标的通过特性，对目标进行预警，并为后续的目标测距提供辅助信息。内部 4 个矢量磁力仪两两构成一组矢量梯度计算模块，推导得出原点的梯度张量信息；同时根据 4 组矢量信息近似求取原点处的矢量信息；有了原点矢量信息和梯度张量信息，则可以实现对目标的测距^[8]。结合外围预警阵列提供的矢量数据，可对目标进行初步定位。详细处理流程如下^[9]：

- 1) 梯度张量 5 个独立元素分别为： g_{zx} 、 g_{xx} 、 g_{yx} 、 g_{yy} 、 g_{zy} ，通过 C 点、 D 点矢量信息获取 g_{zx} 、 g_{xx} 、 g_{yx} ，通过 E 点、 F 点矢量信息获取 g_{yy} 、 g_{zy} ；
- 2) 根据 g_{zx} 、 g_{xx} 、 g_{yx} 、 g_{yy} 、 g_{zy} 求梯度张量 G ；
- 3) 通过 C 点、 D 点、 E 点、 F 点 4 组矢量信息求得原点磁场矢量信息 B 和总量信息 $|B|$ ；
- 4) 根据原点磁场矢量信息 B 和梯度张量 G 求得原点处磁场总梯度 Q ；
- 5) 根据梯度张量 G ，求取梯度张量模 $|G|$ 。

3.2 仿真计算

根据 3.1 节建立的模型，进行未知目标的探测仿真，仿真思路为：1) 给定目标磁矩信息、初始空间位置、航行速度、航行方位，计算在阵列坐标系下，目标运动给各测试节点引起的磁异常矢量信息；2) 以阵列磁异常矢量信息为输入，推测目标活动区域，计算未知目标距离。其中：目标磁矩 $(80\ 000, -20\ 000, 40\ 000) \text{ A}\cdot\text{m}^2$ ，初始位置 $(800, 800, 30) \text{ m}$ ，航速 $(-6, -6, 0) \text{ m/s}$ 。如图 4 所示，此过程中目标由防区外围(如东北侧)经过。此过程将在 C_2 、 F_2 处产生的磁异常波动最为明显。仿真效果如图 5 所示。

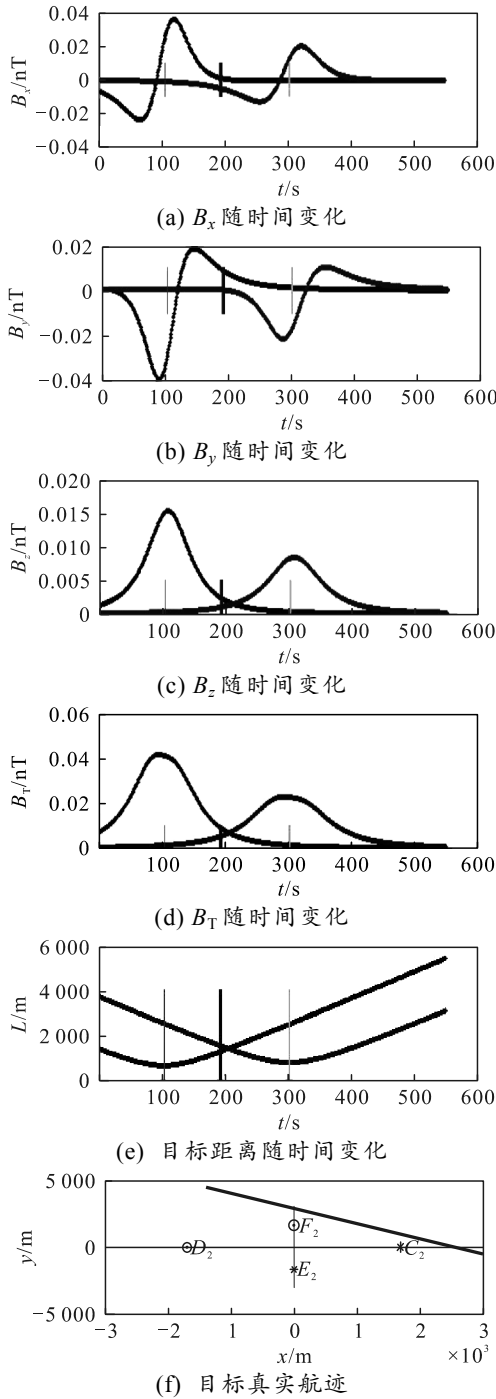


图 4 目标防区外经过磁异常特性仿真

仿真表明：当目标从 C_2/F_2 防区外经过时， B_x 、 B_y 、 B_z 均表现延时特性，可以通过综合分析矢量磁异常信息，判断目标的大致航向，实现对防区 1/4 方向的目标预警，也可为目标定位阵列提供辅助信息，实现综合判断，提高探测结果可信度。

目标通过过程中，在内部 4 测试点 C 、 D 、 E 、 F 处产生的磁异常信号如图 5 所示，将这些磁异常信号按照图 4 进行处理，得到的目标距离反演与目标实际距离的关系如图 5(d) 所示。

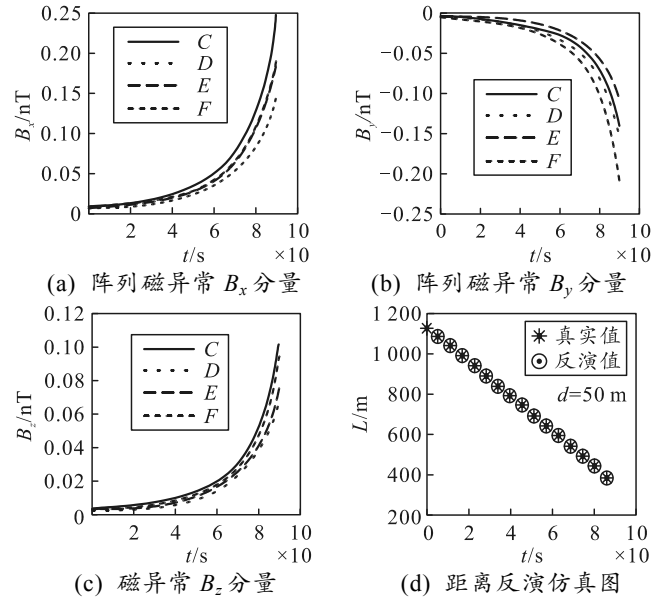


图 5 矢量磁阵列运动目标定位仿真

仿真结果表明：基于平面 4 点阵的磁矢量处理算法从理论上可以实现对未知目标的距离跟踪，且点阵间距越小，对磁力仪分辨率的要求越高。

3.3 阵列参数分析

3.3.1 梯度阵间距分析

由于内部阵列主要应用于磁梯度测量，因此，内部间距理论上越小越好，但是由于矢量磁力仪分辨率的限制，间距过小则无法进行梯度的有效分辨。设目标磁矩 $(80\ 000, -20\ 000, 40\ 000) \text{ A}\cdot\text{m}^2$ 为例，初始位置 $(800, 800, 30) \text{ m}$ ，航速 $(-6, -6, 0) \text{ m/s}$ 进入防区。

1) $d=5 \text{ m}$ 。

阵列间距 $d=5 \text{ m}$ 时，理论上在内部 4 节点产生的矢量差如图 6 所示。

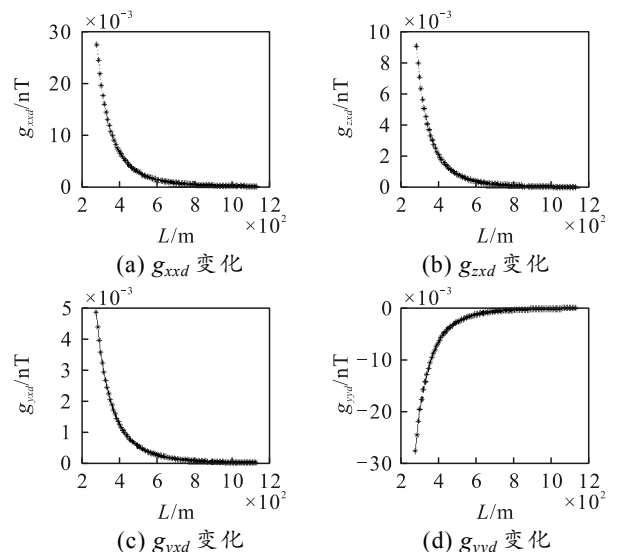


图 6 阵列间距 $d=5 \text{ m}$ 时内部 4 节点产生的矢量差

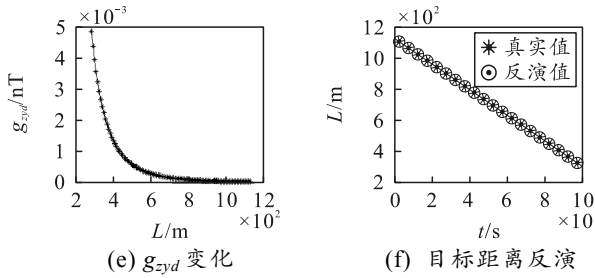


图 6 内部 4 点阵矢量差 ($d=5\text{ m}$)

仿真结果表明：阵列间距为 5 m 时，对于磁矩 $(80\ 000,-20\ 000,40\ 000)\text{ A}\cdot\text{m}^2$ 量级的目标，对于 1 pT 分辨率的磁力仪，目标跟踪距离小于 250 m。

2) $d=10\text{ m}$ 。

阵列间距 $d=10\text{ m}$ 时，理论上在内部 4 节点产生的矢量差如图 7 所示。

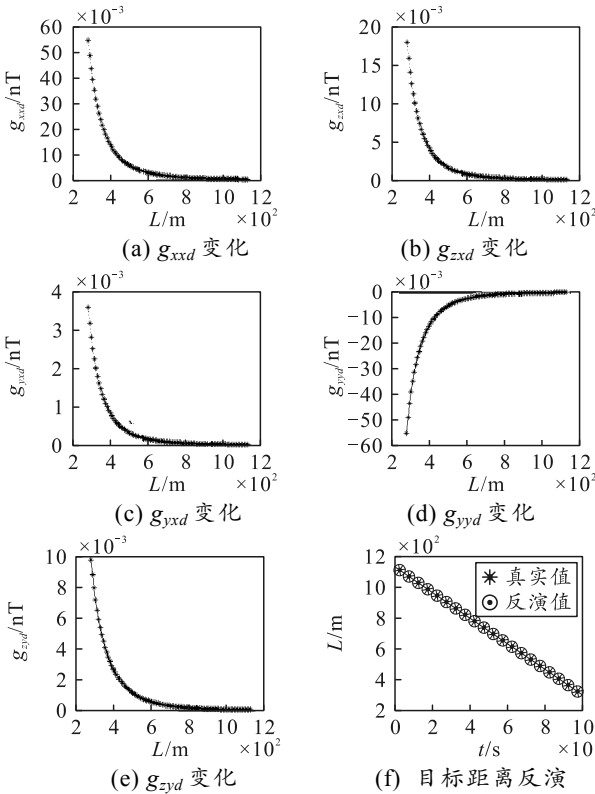


图 7 内部 4 点阵矢量差 ($d=10\text{ m}$)

仿真结果表明：阵列间距为 10 m 时，对于磁矩 $(80\ 000,-20\ 000,40\ 000)\text{ A}\cdot\text{m}^2$ 量级的目标，对于 1 pT 分辨率的磁力仪，目标跟踪距离小于 500 m。

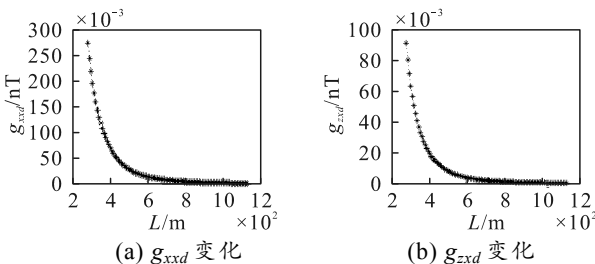


图 8 内部 4 点阵矢量差 ($d=50\text{ m}$)

仿真结果表明：阵列间距为 50 m 时，对于磁矩 $(80\ 000,-20\ 000,40\ 000)\text{ A}\cdot\text{m}^2$ 量级的目标和 1 pT 分辨率的磁力仪，目标跟踪距离小于 800 m。

综上所述，内部 4 点阵距离与目标跟踪距离成反比，点阵距离越大，测量误差受环境噪声影响越大，对平台补偿要求越高；点阵距离越小，对磁力仪分辨率要求越高。考虑到海底阵列局部背景噪声未知，间距过大会导致阵列背景参考值不唯一，为了尽量减小背景对梯度测量的影响，梯度阵间距应尽量小；但是由于矢量磁力仪分辨率的限制，梯度阵间距过近必然牺牲对目标的测距能力。

3.3.2 预警阵间距分析

对于磁矩为 $(80\ 000,-20\ 000,40\ 000)\text{ A}\cdot\text{m}^2$ 的典型目标，分辨率为 1 pT 的矢量磁力仪的最大预警范围可以达到 2 000 m，要全面获取目标矢量磁信息的最短作用距离约 1 100 m。要实现目标进入防区的准确预警，需要获取 2 组磁力仪的全矢量信息，即目标进入防区时距离两点的最大距离均不应大于 1 100 m；因此，预警阵参数 L 应满足 $2\times(L/2)^2\leq 1\ 100^2$ ，即 $L\leq 1\ 555$ 。

4 结束语

随着海洋探测活动的不断发展，水下潜航目标的种类越来越多，笔者以磁矩为 10^4 数量级的某典型水下目标为探测对象，以 1 pT 分辨率的三轴矢量磁传感器为技术前提，探讨了基于三轴矢量磁力仪阵列的特定防区的水下预警方案，并采用数学建模与仿真的方式进行了方案模拟和参数分析。基于平面阵的梯度张量测量，假定一定空间内背景磁场相

等且稳定。由于水下背景磁场存在扰动, 该方法需要进行精确的背景磁场扰动滤除, 后续将根据实验数据重点研究阵列化背景磁场扰动滤除, 并探索更加科学的区域预警阵列及数据处理方法。

参考文献:

- [1] 刘忠乐, 石剑, 文无敌. 模拟潜艇磁场的组合式磁源[J]. 航空学报, 2017, 38(12): 238-248.
- [2] 周卿, 李奔, 孔德景. 美国海军水下自航靶发展研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(13): 186-189.
- [3] 邓兴民, 杨超, 魏延萍. 无人机反潜作战研究[J]. 科学技术创新, 2020(24): 1-3.
- [4] 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.

- [5] 袁益钟. 船体磁性的工程估算[J]. 上海交通大学学报, 1980(1): 53-74.
- [6] 王磊, 卞光浪, 翟国君. 磁异常相关的四种物理信号性质分析[J]. 海洋技术, 2011, 30(4): 105-108.
- [7] 万成彪. 基于磁偶极子模型的磁性目标定位方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 13-15.
- [8] 黄玉. 地磁场测量及水下磁定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 22-25.
- [9] 陈路昭, 冯永强, 郭瑞杰. 地磁背景下基于传感器阵列的磁偶极子目标跟踪方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 573-581.

(上接第 77 页)

4 结论

1) 采用基于威布尔分布、役龄回退因子和故障率递增因子的混合故障率函数, 体现了役龄和维修次数对部件劣化情况造成的影响, 能较为客观地描述部件故障率变化趋势。

2) 通过设置可靠度阈值确定维修计划的预防性维修周期以及引入效费比的概念确定部件的更换周期, 能保证部件在高可靠度运行的基础上最大程度地利用维修资源, 既降低了非预期故障发生的概率, 又能避免维修资源的浪费。

3) 各项成本参数确定后, 可通过修改可靠度阈值来调整维修计划。仿真实验结果证明: 可靠度阈值越高, 预防性维修周期越短, 维修次数越多, 非预期故障次数期望值越小, 维修成本率越高。

4) 采用该方法能制定合理的维修策略, 避免部件出现过维修和欠维修的情况, 有效降低故障率, 提高维修工作效率, 在保证部件可靠性的前提下, 减少维修资源的浪费。

参考文献:

- [1] 赵星贺, 周斌, 封会娟, 等. 车辆装备总成预防性维修间隔期研究[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(4): 77-82.
- [2] 刘葛辉, 陈绍宽, 金华, 等. 基于延迟时间模型的不完全检修计划优化模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(7): 1298-1307.
- [3] 贺德强, 罗安, 肖红升, 等. 基于可靠性的列车关键部件机会预防性维修优化模型研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(5): 37-43.

- [4] 张乐乐. 基于群体智能算法与模糊 MADM 的选择性维修策略优化及评估方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 5-7.
- [5] 金玉兰, 刘莹, 严嘉欣. 考虑维修时间和惩罚的租赁设备维修策略研究[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2): 30-35.
- [6] 甘捷, 王磊, 张晓红, 等. 单机调度与非完美视情维修的联合决策与优化[J/OL]. 工业工程与管理: 1-13[2020-08-26]. <https://kns-cnki-net-s.nudtproxy.yitlink.com/443/kcms/detail/31.1738.T.20200313.1604.004.html>.
- [7] 刘学娟. 基于随机系数回归模型的退化过程及维修策略研究[J/OL]. 控制与决策: 1-7[2020-08-26]. <https://doi-org-s.nudtproxy.yitlink.com/10.13195/j.kzyjc.2019.1087>.
- [8] NAKAGAWA T. Sequential imperfect preventive maintenance policies[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1988, 37(3): 295-298.
- [9] ZHOU X, XI L, LEE J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(4): 530-534.
- [10] MALIK M A K. Reliable preventive maintenance policy[J]. AIIE Transactions, 1979, 11(3): 221-228.
- [11] 梁开武. 可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 30-32.
- [12] 侯文瑞, 蒋祖华, 金玉兰. 基于可靠度的多部件系统机会维修模型[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1805-1808.
- [13] 何庆, 洪燕云. 机械维修性的数量特征[J]. 现代制造工程, 2003, 5(10): 13-15.
- [14] 刘志龙, 王红, 杜维鑫, 等. 基于效费比的地铁车辆设备预防性维修决策优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(1): 146-151.