

水下物体磁探测线间距的影响因素

柯泽贤¹, 赵俊生¹, 任来平², 刘雁春¹

(1. 海军大连舰艇学院 海测工程系, 辽宁 大连 116018; 2. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061)

摘要:建立合理水下小目标磁探测线间距需以定量分析各种因素对其影响为基础。将水下小目标的磁场模型视为磁偶极子, 建立水下小目标的磁场空间衰减规律。根据水下目标磁探测的原理及其工作背景, 对目标磁距大小、仪器信噪比、地磁变化、日变影响、测船的定位误差等因素进行综合分析, 得出磁力仪在探测某一已知物时的测线间距计算公式。

关键词:磁法探测; 测线间距; 磁偶极子; 水下物体

中图分类号: P631.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2010)01-0071-03

随着我国海洋事业的发展, 航道的使用更加频繁, 为保证海上船舶航行安全和港口经济建设的平稳、快速发展, 探索和完善水下小目标的快速搜寻研究很有意义。对于那些较小的目标(如水雷、铁锚、浮鼓坠等), 在目标未被全部淹没时可用声呐或磁声呐进行探测^[1], 但当它们淤埋于较厚的海底淤泥中时, 侧扫声呐等探测设备无能为力, 此时运用磁探测是最好的选择。海上的铁质沉物在地磁场中被磁化, 产生磁异常。磁探测就是通过测量磁场异常来确定这些铁磁性水下小目标的性质和位置。

测线间距确定是海洋磁探测技术的重要内容, 测线布得过密, 会造成工作量过大、人力物力的浪费; 测线布得过疏, 两条测线的控制范围没有重叠, 有可能漏测目标。笔者所讨论的是寻找目标概略位置时的测线间距设计。文献[2]在考虑了部分因素后设计出计算测线间距的公式, 但对地磁影响、测船误差、探头定位误差等没有考虑。笔者认为无论在理论意义上, 还是在对实际探测工作的指导意义上, 综合考虑这些因素的影响是有必要的。笔者从水下小目标的磁偶极子模型出发, 根据水下目标磁探测的原理, 模型上更加严密地探讨了影响磁探测间距的各种因素, 综合考虑这些因素后得到了磁探测线间距计算公式。

1 小目标本身磁场特征的影响

水下磁探测主要是搜寻沉没水底的一些小尺度磁性物体, 对于这些小尺度目标, 当其距离探头大于体长3倍以上^[3], 则可以忽略其体积、形状并假设其

为一磁偶极子。分析其磁场特征就是分析磁探测间距大小影响因素的基础。

磁偶极子的磁矩 m 在空间任意一点产生的磁场 B 如图1所示, 文献[4]已经导出了 B 的两个直角坐标分量, 它们分别为

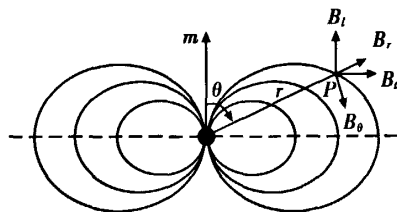


图1 磁偶极子在空间产生的磁场分布示意

$$\begin{cases} B_r = \frac{\mu}{4\pi} \frac{m}{r^3} \cdot 3\sin\theta\cos\theta, \\ B_\theta = \frac{\mu}{4\pi} \frac{m}{r^3} \cdot (3\cos^2\theta - 1). \end{cases} \quad (1)$$

式中各量的具体含义如图1所示; μ 为磁场空间的磁导率, 真空磁导率为 $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}^2$; θ 为磁矩 m 与矢径 r 的夹角。由式(1)可得 B 的模量

$$|B| = \frac{\mu}{4\pi} \frac{m}{r^3} \cdot \sqrt{\cos^2\theta + 1}. \quad (2)$$

以上是偶极子在空间任意一点产生的磁场大小和方向的数学模型, 由此可以看出铁磁物产生于空间某一点的磁力(T)大小与磁矩(M)、距离(r)、方位(θ)有关。在目标距离较近, 沿磁矩矢量方向探测, 易于发现目标。

当 $\theta = 0$ 时, $|B| = \frac{\mu m}{4\pi r^3}$ 达到最小, 令 $\frac{\mu m}{4\pi} = M$, 则式(2)可简化为

$$T \geq M/r^3. \quad (3)$$

对于复杂的磁场情况, 可根据矢量合成原理, 将其视为若干个偶极子磁矩的合成。如浅水中的磁性柱状物体, 其磁场分布特征就与偶极子明显不同^[5], 其随深度、角度的不同, 磁场强度变化较大。

2 测线间距的影响因素及计算公式

2.1 计算公式

实际磁力探测作业的原理可由图 2 表示。 H 为探头的入水深度; I 为探头到海底的高度, S 为目标可能的埋设深度; D 探头能探测到水下磁性目标的距离。由图 2 可知, D 的估计取决于目标磁距的大小和仪器的实际灵敏度。

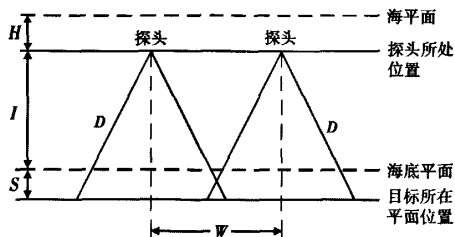


图2 测线间距与水下磁性目标关系示意

测线间距选择的总准则是目标引起的磁异常信号能在复杂的噪声背景中得到凸现、识别。对信号识别、提取之前, 必须对磁探的原理和噪声源进行分析。设磁力仪探头的动态噪声水平为 T_N , 则只有由目标引起的磁异常 T_S 比噪声水平大若干倍(即信噪比)时, 才认为信号是可靠的。假设磁力仪探头的信噪比为 n , 即有

$$T_S \geq n \times T_N, \quad (4)$$

故由公式(2)可知由磁偶极子引起的磁感应强度随距离成三次方递减。联合式(3)、式(4)有

$$D = \sqrt[3]{M/(n \times T_N)}, \quad (5)$$

式中, M 是探测目标的磁矩, 可在相关磁力资料中查取。以上三个基本参数在测量的开始阶段都是已知的, 因此根据式(4)就可以得到最大探测距离 D 。

例如: 实测某种水下铁磁体在 r 为 10 m 产生的磁场强度是 $T_1 = 12$ nT, 磁力仪的动态噪声为 0.1 ~ 0.4 nT, 有效检测信噪比 ≥ 3 , 则可靠信号值为 0.3 ~ 1.2 nT, 考虑海洋动态探测的复杂性, 保守估计, 取 $T_2 = 1.2$ nT。根据公式(4)有

$$D = R \times \sqrt[3]{T_1/T_2} = 21 \text{ m},$$

即在 21 m 范围内, 由目标引起的磁异常可以被探头捕捉到, 并凸现出来。求出 D 后, 便可求出测线间距

$$W = 2 \sqrt{D^2 - (I + S)^2}. \quad (6)$$

2.2 考虑磁背景场的干扰后的测线间距

在实际工作过程中, 探测的间距除了和目标磁距大小、仪器的动态噪声有关外, 还和区域背景磁干扰场密切相关。在磁场平静区, 现用的 GB 系列仪器的定位效率较高, 但在磁背景复杂区域, 磁梯度变化较大。地磁变化梯度 T_d 、日变影响梯度 T_r 、船磁效应梯度 T_e 和动态噪声叠加在一起, 情况比较复杂。只有当目标异常信号明显于这些因素带来的共同影响时, 干扰目标引起的磁异常才能被探头接受、分离、识别, 即 $T_S \geq f(T_d, T_r, T_e)$ 。磁测线距的计算公式为

$$D = \sqrt[3]{\frac{M}{n \times [T_N + f(T_d, T_r, T_e)]}}. \quad (7)$$

在实际的港湾内的磁探测工作中, 为减小诸多干扰, 减小对曲线的识别难度, 磁探测选择在日变稳定的时间段, 比如日落前进行, 日变影响规范且程度不大; 选择用小木船代替铁船, 故船磁效应影响可忽略不计, 故式(7)可简化为

$$D = \sqrt[3]{\frac{M}{n \times [T_N + f(T_d, T_r)]}}. \quad (8)$$

对于地磁异常梯度函数 $f(T_d)$, 可以从以往的地磁资料中得到。

2.3 考虑各种误差的测线间距计算

为了保证探测质量, 提高探测可靠性, 探测间距需有适当宽度的重叠。考虑到测量定位误差 m_1 、测船偏航误差 m_2 及航行波浪引起的拖鱼归算误差 m_3 等的影响, 两探测线之间至少重叠的宽度

$$L = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2}, \quad (9)$$

所以磁力探测线的间距

$$w = W - L =$$

$$2 \sqrt{D^2 - (I + S)^2} - \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2}, \quad (10)$$

式(10)就是磁力物探测线间距计算公式。在一般工作情况下, m_1 、 m_2 、 m_3 都不大, 测线间距的大小主要取决于磁性目标的磁矩和探测仪器性能。在测船操作可行、拖鱼安全得到保证的条件下, 通过增加传感器拖鱼的入水深度即减小拖鱼到水底的距离来加大测线间距效果比较明显。另外, 要增大测线间距, 还需要尽可能减小测量定位误差、测船偏航误差和拖鱼位置归算等误差。

3 算例

设在港湾内寻找某一磁铁物质,运用小木船拖曳磁探头的作业方式。式(10)中各参数在实际工作中可根据实际情况来选择。设探头离海底为2 m,某一目标埋设为1 m;日变影响梯度稳定,探测的时间短,故日变影响大小可忽略;磁探仪器选GB-5,仪器灵敏度为0.005 nT,动态噪声为0.05~0.2,信噪比为3;地磁正常梯度变化取均值为8 nT/km左右,表格中地磁变化为两相邻测点间的地磁场变化值;磁化强度取73.6 A/m,则目标磁矩的大小可根据其体积求出;海上测量定位采用NGD-60型差分GPS设备,其近海内定位精度可达 ± 1 m;为保持探头入水深度,测船航速控制在6节左右,采样率2 Hz,则每隔1.5 m采集一个测量值。拖鱼的定位受到海浪和拖船的姿态影响,这里取定位误差0.3 m。计算在目标磁矩、地磁变化、测船定位误差、探头位置归算误差不同情况下的测线间距。

表1 不同条件下的测线间距计算

目标磁矩 $A \cdot m^2$	磁场变化 nT	测船定位误差 m	拖鱼归算误差 m	测线间距 m
28.89	0.012	0.8	0.3	3.5
73.60	0	0.7	0.3	7.3
73.60	0.012	0.7	0.3	7.2
110.04	0.012	0.7	0.3	9.2

由上面表格可知,在探头离海底距离一定的情况下,磁矩大小对间距的影响最大;由表格中序第一行和第二行数据可以看出,地磁变化对间距的影响很小,正常情况下,可以忽略不计;测船的定位误差对间距的影响也比较大。

4 结论

在实际的磁探测过程中,由于受到恶劣作业环境的影响,要实现磁性目标准确定位,难度较大。在某片海域要实现对某一水下小目标的准确定位,测线间距是磁探测中的重要技术,间距布设合理,可以大大提高效率,减少工作量。运用笔者提出的测线间距布设方法,对磁目标进行初步定位,根据捕捉到的磁异常,将目标锁定在某两条测线的范围内,然后对异常区进行加密探测,得到目标周围详细的磁异常等值线,对目标进行准确定位。

据对影响磁探测的各因素分析,有以下结论值得参考。

(1)影响测线间距的因素有目标磁矩的大小、磁力仪的灵敏度和信噪比、船磁效应、日变影响、地磁变化、测船的定位精度。

(2)磁场强度随距离成立方快速衰减,故影响测线间距最大的因素是水下小目标磁矩的大小和探头的入水深度,磁矩越大,大间距也能探测到,当磁矩较小时,只能通过增加探头的入水深度来缩小与目标的间距。

(3)探头的灵敏度越高,信噪比越小,越有利于增大间距,提高效率。

(4)除此两大主要影响因素外,其他因素也不容忽视。选择在日变稳定、幅度小时间段,可减少日变影响;运用小木船替代铁磁船可以减小船磁效应对磁探测的复杂影响。

(5)由于磁探测时,海底磁性物质产生的背景场对目标识别干扰非常大,探测前广泛掌握磁测海区的地磁场、水深资料,了解海底地形和地质、海底基岩情况,掌握海区内沉船、管线、电缆的分布情况。这样,在进行数据处理分析时,可以较好地排除磁背景场干扰。

不足之处,水下目标的磁场空间分布情况会受探测方向和物体形状一定的影响,但由于缺乏相应实验,无法更进一步的细致量化;无法准确知道拖鱼的定位误差,这些将对定位精度和测线间距计算产生影响。这些作者将在以后的论文中加以完善。

参考文献:

- [1] 袁志文,管志宁.应用磁声呐技术探测水下小目标[J].物探与化探,2005,29(5):418-420.
- [2] 吴文福,顾建松,罗建国,等.GB-5海洋氢光泵磁探仪及其应用[J].声学及电子工程,1999(3):19-22.
- [3] 胡德昭,朱慧娟.地球物理学原理及其应用[M].南京:南京大学出版社,1995.
- [4] 任来平,赵俊生,侯世喜.磁偶极子磁场空间分布模式[J].海洋测绘,2002,22(2):18-21.
- [5] 袁志文,吴天彪.浅水中磁性柱体的磁场特征[J].物探与化探,2005,29(6):530-532.
- [6] 梁开龙,刘雁春,管铮,等.海洋重力测量与磁力测量[M].北京:测绘出版社,1996.
- [7] 任来平.水下离散障碍物的磁探测信号研究[J].海洋测绘,2008,28(2):5-8.
- [8] 任来平,张襄安,刘国斌.海洋磁力测量系统误差来源分析[J].海洋测绘,2004,24(5):5-8.
- [9] 边刚.海洋磁力测量数据处理方法研究[D].大连:海军大连舰艇学院,2008.
- [10] 王闰成,王守国.水下铁磁体磁场特征[J].海洋测绘,2006,26(5):35-37.
- [11] 边刚,刘雁春,暴景阳,等.海洋磁力测量测线间距确定研究[J].海洋测绘,2003,24(2):28-31.
- [12] 江山,王志圭.大学物理学:第二册[M].合肥:中国科技大学出版社,1991.

- [12] 奚先, 姚姚. 非平稳随机介质模型[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(1): 71 - 75.
- [13] 奚先, 姚姚. 随机介质模型理论的概述[G]//中国地质学会青年工作委员会, 中国地质大学. 地学探索. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000. 125 - 128.
- [14] 吴何珍, 符力耘, 兰晓雯. 基于随机介质模型的储层非均质性分析[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 793 - 799.
- [15] Korn M. Seismic wave in random media[J]. Journal of Applied Geophysics, 1993, 29: 247 - 269.
- [16] 李灿辛, 刘学伟, 李敏峰, 等. 非均匀地质体散射波特征初探[J]. 石油物探, 2006, 45(2): 134 - 140.
- [17] 张光萤, 曾新吾. 二维随机裂纹介质模型[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(2): 1 - 4.

THE APPLICATION OF Von Karman TYPE AUTOCORRELATION FUNCTION TO MODELING RANDOM MEDIA

LI Can-ping¹, WANG Nan-ping², LI Zhi-hong¹

(1. College of Information, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper constructed random media models using the Von Karman type autocorrelation function, discussed the model characteristics by two model parameters of autocorrelation length and spectrum exponent and analyzed the distribution and variation of velocities in the models under the conditions of different variances. The results show that the variations of random media models of heterogeneity scales in lateral and longitudinal directions are all produced by changing autocorrelation length and lateral and longitudinal spectrum exponent. The disturbance range of the random perturbation is different if the disturbance variance is different, and such a difference results in fluctuation of velocities in models around the background velocity. The modeling figures demonstrate that random medium models can vividly describe real media.

Key words: random medium; Von Karman-type autocorrelation function; autocorrelation length; lateral and longitudinal spectrum exponent

作者简介: 李灿辛(1977 -), 女, 博士, 讲师, 主要从事散射波地震勘探理论研究及信号处理方面研究, 公开发表学术论文数篇。

上接 73 页

THE INFLUENCE OF THE SPACE OF SEARCHING LINES ON THE MARINE MAGNETIC SEARCH FOR UNDERWATER OBJECTS

KE Ze-xian¹, ZHAO Jun-sheng¹, REN Lai-ping², LIU Yan-chun¹

(1. Department of Hydrographic Engineering, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China; 2. Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China)

Abstract: The analysis of the influencing factors constitutes the basis of designing the precise line interval in magnetic searching. Taking the underwater small object as a magnetic dipole, the authors found the law of the magnetic force attenuation of the magnetic object. A formula for defining searching line space was put forward based on an organic analysis of the influence caused by such factors as the magnetic force, signal-to-noise of the instrument, geomagnetic change, geomagnetic diurnal variation, and dynamic working condition.

Key words: marine magnetic searching; searching line space; magnetic dipole; underwater object

作者简介: 柯泽贤(1985 -), 男, 湖北黄石人, 硕士研究生, 主要从事磁力探测方面的研究。