

# 浅水中磁性柱状体的磁场特征

袁志文<sup>1</sup>, 吴天彪<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 北京地质仪器厂, 北京 100016)

**摘要:**在某些浅水区域中,常有大量工程障碍,如磁性柱状体。依据磁性柱状体的特点,从顺轴磁化无限延深柱状磁性体这一简化数学模型的磁场分析入手,进而对更近实际的顺轴磁化有限延深柱状磁性体的磁场及其梯度场的分布规律进行讨论,并据此提出了采用水平磁梯度测量法对磁性柱状体磁特性实施探测的可取途径。

**关键词:**磁法勘探; 磁场特征; 磁性柱状体

**中图分类号:** P631.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2005)06-0530-03

在浅水区域中,常设置有大量含有磁性柱状体的筑城性工程障碍。该类障碍按一定规律布设,其排列特征与磁性特征十分典型。为能快速发现并准确识别此类障碍、实时探明障碍带所处位置,我们就极有必要认真研究并能充分利用这些障碍所特有的探测特征(特别是磁特征),从而为浅水障碍探测器材的研制奠定基础。为此,我们依据磁性柱状体的特点,从顺轴磁化无限延深柱状磁性体的磁场分析入手,进而对与磁性柱状体更相接近的顺轴磁化有限延深柱状磁性体的磁场及其梯度场的分布规律进行讨论,并就如何采用梯度测量法对此类障碍实施

探测进行探讨。

## 1 顺轴磁化无限延深柱体的磁场

为了研究方便,我们首先将磁性柱状体简化为顺轴磁化无限延深柱状磁性体进行讨论,即从点磁极的磁场分布规律入手,为进一步开展磁性柱状体磁场分布特性研究奠定基础。

设点磁极的磁量为  $-m$ 、坐标为  $M(0,0,\zeta)$ ,其在空间任一点  $P(x,y,z)$  的总磁异常及各分量磁异常分别为:

$$\left. \begin{aligned} T_a &= \frac{-m}{r^2} = \frac{-m}{x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2}, \\ Z_a &= T_a \sin \alpha = \frac{m(\zeta - z)}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}}, \\ H_{ax} &= T_a \cos \alpha \cos \beta = \frac{-mx}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}}, \\ H_{ay} &= T_a \cos \alpha \sin \beta = \frac{-my}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}}, \\ \Delta T &= Z_a \sin I + H_{ax} \cos I \cos A + H_{ay} \cos I \sin A = m \frac{(\zeta - z) \sin I - x \cos I \cos A - y \cos I \sin A}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $T_a$  是总磁异常矢量;  $Z_a$  是  $T_a$  的垂直分量;  $H_{ax}$  是  $T_a$  的水平分量沿  $x$  方向的异常;  $H_{ay}$  是  $T_a$  的水平分量沿  $y$  方向的异常;  $\Delta T$  是总磁异常;  $\alpha$  为  $T_a$  与  $H_a$  夹角,  $\beta$  为  $H_a$  与  $x$  轴的夹角,  $I$  为地磁倾角,  $A$  为  $x$  轴的方位角。

依据式(1),可分析点磁极的磁异常剖面特征。以  $x$  方向剖面为例,令  $y=0, z=0, \zeta=h, x$  剖面的磁场为:

$$Z_a = \frac{mh}{(x^2 + h^2)^{3/2}} \quad (2)$$

由于  $x$  轴方向是任意选择的,故式(2)是通过坐标原点的任意剖面上的磁场表达式。

令  $\frac{\partial Z_a}{\partial x} = 0$  可得极值点坐标  $x_{\max} = 0$ ,磁场的极大值  $Z_{\max} = m/h^2$ 。利用  $Z_a(x_{1/2}) = Z_{\max}/2$  的关系,可得半极值点的坐标:  $x_{1/2} = \pm 0.766h$ , 由  $\frac{\partial^2 Z_a}{\partial x^2} = 0$ , 得

拐点坐标:  $x_0 = \pm h/2$ 。从以上分析可知,点磁极在  $x$  剖面的磁场分布  $Z_a$  为对称于纵坐标轴的正磁异常。

因磁性柱状体的长度终究是有限长的,故磁性柱状体的磁场分布特性显然与点磁极的磁场分布特性差别较大。但通过以上对顺轴磁化无限延深柱状磁性体的磁场分布特性研究,为进一步对接近于磁性柱状体的顺轴磁化有限延深柱状磁性体的磁场分布特性开展研究提供了条件。

### 2 顺轴磁化有限延深柱体的磁场

磁性柱状体实际为有限长的磁性体,故将其看作是顺轴磁化有限延深柱状磁性体更为接近实际,即我们可将其看作是 2 个极性相反、埋深不同的点磁极,其磁场为 2 个点磁极磁场之和,即

$$z_a = Z_{a+} + Z_{a-}$$

$$\left. \begin{aligned} Z_a &= m \left\{ \frac{\zeta - z}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} - \frac{(\zeta + 2l\sin\alpha) - z}{\{(x - 2l\cos\alpha)^2 + y^2 + [z - (\zeta + 2l\sin\alpha)]^2\}^{3/2}} \right\}, \\ H_{ax} &= -m \left\{ \frac{x}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} - \frac{x - 2l\cos\alpha}{\{(x - 2l\cos\alpha)^2 + y^2 + [z - (\zeta + 2l\sin\alpha)]^2\}^{3/2}} \right\}, \\ H_{ay} &= -m \left\{ \frac{y}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} - \frac{y}{\{(x - 2l\cos\alpha)^2 + y^2 + [z - (\zeta + 2l\sin\alpha)]^2\}^{3/2}} \right\}, \\ \Delta T &= m \left\{ \frac{(\zeta - z)\sin l - x\cos l\cos A - y\cos l\sin A}{[x^2 + y^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} - \right. \\ &\quad \left. \frac{[(\zeta + 2l\sin\alpha) - z]\sin l - (x - 2l\cos\alpha)\cos l\cos A - y\cos l\sin A}{\{(x - 2l\cos\alpha)^2 + y^2 + [z - (\zeta + 2l\sin\alpha)]^2\}^{3/2}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由上列公式可看出,因双点极的磁场是由不同水平位置和埋深、符号相反的 2 个点极磁场之组合,因此为不对称的磁异常,其剖面图见图 2。当  $2l$  改变时,磁异常将发生明显的变化。 $2l \rightarrow \infty$  时,它的磁场和单极磁场一样; $2l \rightarrow 0$  时,其磁场将与球体磁场一致。当  $m$  一定时,  $Z_a$  仅是  $\alpha$ 、 $l$  及测点坐标的函数,而  $\Delta T$  除与上述参量有关外,还与测线方向、磁化倾角等有关。

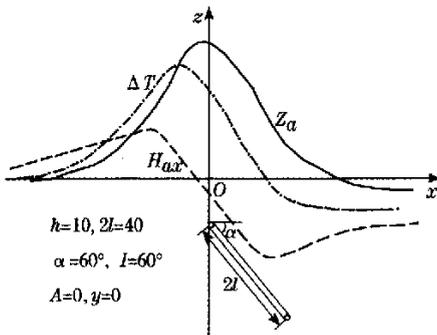


图 2 双点极异常剖面示意

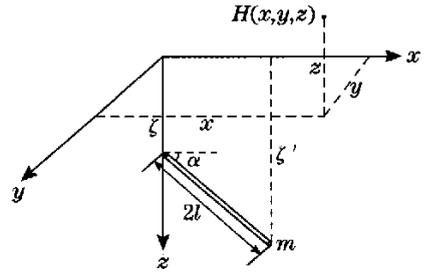


图 1 顺轴磁化有限延深柱体

设 2 个点磁极磁量分别为  $+m$  和  $-m$ , 它们相距为  $2l$ , 2 点连线与水平线夹角为  $\alpha$ 。上磁极埋深为  $\zeta$ , 在地面的投影点为坐标原点。  $z$  轴垂直向下,  $x$  轴与柱体倾向一致, 如图 1 所示。根据式 (1), 以不同点极的参量代入后, 可得双点极在  $P(x, y, z)$  点的磁场表达式为:

### 3 磁场分布特性及磁法探测方案

由图 2 可知,磁性柱状体的磁异常无论是总场 ( $\Delta T$ )、水平分量 ( $H_{ax}$ ) 或垂直分量 ( $Z_a$ ), 其峰值均出现在磁性柱状体前上方。在实际探测过程中, 我们也需要探测系统在作业载体位于磁性柱状体前方时就能将其探测到, 否则在探测过程中作业载体就可能撞上磁性柱状体而损坏。从磁性柱状体的磁场分布特性看, 即希望在  $Z_a$ 、 $\Delta T$  或  $H_{ax}$  尚未到达峰值时, 就能将其探测到。故探测系统必须具备一定的灵敏度, 以保证在较远的距离上就能探测到目标。由图 2 中还可以看出,  $Z_a$  及  $\Delta T$  的异常曲线陡, 信号强度大, 但其峰值出现在磁性柱状体顶端较近的前上方;  $H_{ax}$  异常幅度及斜率均相对较小, 但其峰值出现在离磁性柱状体顶端相对较远的前上方, 故仅从信号强度这一角度来看, 显然以选用测量  $Z_a$  或  $\Delta T$  的方法来探测磁性柱状体较为理想。但图 2 显示出, 在  $H_{ax}$  出现峰值前,  $Z_a$ 、 $\Delta T$ 、 $H_{ax}$  的幅度与斜率基本相近, 若希望在磁性柱状体前上方较远处 (即

$H_{ax}$ 出现峰值前)就能发现目标,则对  $Z_a$ 、 $\Delta T$  或  $H_{ax}$  进行探测所获取信号的幅度及其变化率差别不大。故若采用梯度测量的方式,并要求在  $H_{ax}$  出现峰值前就能发现目标,则通过检测  $H_{ax}$  的方法来探测磁性柱状体与通过检测  $Z_a$ 、 $\Delta T$  的方法来探测磁性柱状体效果相近。再者,从磁性柱状体磁异常的强度量级看,采用磁通门式梯度测量(其精度已能满足探测这一特殊目标的需求)方案最为适宜。但测量总场或垂直分量的梯度异常与测量同作业载体前进方向一致的水平分量梯度异常,虽原理相近,但实现的工艺及其系统复杂程度大不相同。例如,若需测量垂直分量的梯度异常,则在测量传感器内就需有一套复杂的调节机构,以保证 2 个磁通门探头垂直设置且相互平行。除机构复杂外,传感器“平行度、一致性、转向差”等指标的调节工艺也将十分烦琐。且因 2 个跑道型的磁通门探头需垂直设置,而使梯度传感器的体积(探杆直径)大大增加。相反,若采取测量水平梯度的方法,则调节机构有可借鉴的范例,调节工艺相对简单,传感器体积也相对较小。

综上所述可知:水平分量  $H_{ax}$  异常峰值出现在总场( $\Delta T$ )及垂直分量( $Z_a$ )的异常峰值前,对其测量有利于目标的提前发现;虽然  $\Delta T$ 、 $Z_a$  的信号幅度大,但在  $H_{ax}$  出现峰值前, $\Delta T$ 、 $Z_a$ 、 $H_{ax}$  的幅度与变化率相近,对 3 种形式的磁异常采用梯度测量的探测方法效果相同;磁通门式水平梯度测量,系统简单实用,传感器体积小,调节机构及调试工艺易于实现。

为此,在开展浅海障碍探测系统的研制过程中,宜采取磁通门磁梯度测量的技术方案,通过检测磁性柱状体的水平磁梯度( $H_{ax}$ )异常,来实现对量含有磁性柱状体的筑域性工程障碍的有效探测。

#### 4 结束语

在对磁性柱状体磁场特性进行定性分析的同时,我们对磁性柱状体的磁场分布规律也进行了实际测量。测试的结果同以上分析结果基本吻合。依据以上提出的磁通门水平磁梯度测量技术方案,我们开展了浅水障碍探测系统原理样机的研制工作。经试验验证,该方案技术可行。在此基础上,我们还将进一步开展对磁性柱状体磁场分布特性的定量仿真计算,以能为浅水障碍探测系统的研制提供更充分、具体的设计依据。

#### 参考文献:

- [1] 郭俊义. 地球物理学基础[M]. 北京:测绘出版社,2001.
- [2] 赵鹏大. 地质勘探中的统计分析[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1990.
- [3] 秦葆珊,吴天彪. 磁通门式磁力梯度仪与磁场梯度测量[M]. 北京:地质出版社,1985.
- [4] 陈卫民. 海底勘查技术的最新发展[J]. 海岸工程,1995,14.
- [5] Gebhardt R K, Smits K. Military requirements for geomagnetic data[R]. Naval Ocean Res & Dev Activity Rep,1988.
- [6] Bhattacharyya B K. Continuous spectrum of the total-magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic body[J]. Geophysics, 1966,31:97 - 121.

### MAGNETIC FIELD CHARACTERISTICS OF MAGNETIC POLE IN SHALLOW WATER

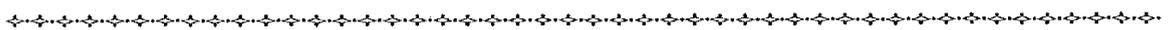
YUAN Zhi-wen<sup>1</sup>, WU Tian-biao<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Factory of Geological Instruments, Beijing 100016, China)

**Abstract:** There exist large quantities of engineering obstacles such as magnetic pole in some shallow water areas. In the light of the characteristics of magnetic pole, this paper, starting with an analysis of the magnetic field of the simplified mathematical model for the direct axis magnetized infinite extension columnar body, deals with the distribution regularity of the magnetic field and gradient field of the direct axis magnetized finite extension columnar magnetic body which is closer to the actual situation. On such a basis, it is suggested that the method of horizontal magnetic gradient measurement could be adopted to detect magnetic characteristics of magnetic pole.

**Key words:** magnetic exploration; magnetic field characteristics; magnetic pole

**作者简介:**袁志文(1963-),男,博士研究生,高级工程师,1983年本科毕业于东南大学自动控制系后长期从事军事探测装备的研制工作,获军队科技进步一等奖一项、二等奖两项、三等奖四项,国家科技进步三等奖一项,公开发表学术论文近20篇。



上接 529 页

**Key words:** parametric sonar; detecting by acoustic signal; profiling system; SES-96 system

**作者简介:**褚宏宪(1973-),男,助理研究员。2004年获中国海洋大学环境工程专业工程硕士学位,主要从事岩土工程研究与工程物探研究,公开发表学术论文数篇。E-MAIL:chx-8@163.com;qdchongxian@cgs.gov.cn

万方数据