



# 海底管道磁异常正演与实测结果分析

王方旗<sup>1</sup> 宋玉鹏<sup>1</sup> 董立峰<sup>1</sup> 刘振纹<sup>2</sup> 林旭波<sup>1</sup> 陶常飞<sup>1</sup>

1 自然资源部第一海洋研究所,山东 青岛,266061

2 中国石油集团工程技术研究院,天津,300451

**摘要:**采用重磁位场的泊松公式法推导了海底管道磁异常的理论计算模型,以两段已知的输气管道为研究对象进行了正演模拟计算和海上实测验证。正演结果表明,在距海底管道约8.0 m的观测平面上能产生跨度约20.0 m、幅值分别高达329.8 nT和362.4 nT的正磁异常。实测的海底管道磁异常分布跨度与正演的结果基本一致,但其分布的细节特征存在不同,既存在正异常,也存在负异常。通过分析磁异常极值点的分布特征推测可能是管道连接处的热剩磁导致了实测磁异常的细节特征。

**关键词:**海底管道;海洋磁法;理论模型;磁异常正演;热剩磁

中图分类号:P229.5

文献标志码:A

海洋磁法探测是通过观测和分析由海底岩石或其他探测对象的磁性差异所引起的磁异常,来研究海底地质构造、寻找矿产资源或海底人造物体的一种海洋地球物理方法。随着海洋工程建设的不断深入和海上搜救活动的需求日益增多,海洋磁法在海底一些特殊人造目标物探测和搜寻方面的应用越来越广泛,如海底管道<sup>[1-2]</sup>、海底电(光)缆<sup>[3-6]</sup>、海底考古<sup>[7]</sup>、沉船<sup>[8-9]</sup>、遗弃的锚链及未爆的炸弹<sup>[1,10-12]</sup>等等。

海底管道是铺设于海底用于连续地输送大量油、气或水的密闭性铁质管道,是海上油田生产系统的重要组成部分,也是目前最快捷、最安全和经济可靠的海上油气运输方式。随着海洋油气资源的不断开发,大量的海底管道被铺设于海底面以下深度小于2 m的表层沉积物中,在后续的海洋工程建设和其他海洋活动实施前必须要准确探测其空间位置和走向,以避免对其造成损害。海底管道的材质一般为铁磁性的无缝钢管或直缝钢管,磁化率很高,其在厘米-克-秒电磁单位制下为10~50( $\kappa$ )<sup>[13]</sup>,换算成国际单位制,数量级在 $10^2\sim 10^3$ ( $\kappa$ )。因此,在地磁场背景下,海底管道会产生强感应磁场,为采用海洋磁法进行海底管道的探测和定位提供了有利条件。

本文从重磁位场的泊松公式出发推导了海底

管道在海平面附近的感应磁场(叠加到地磁场上产生的磁异常)的正演计算模型,选取渤海某油田的两段海底输气管道作为研究对象,进行了正演模拟计算,并采用海洋磁力仪进行了海上实测,通过分析和比较正演与实测结果的磁异常分布特征,对海底管道的磁法探测的机制和有效性作更深入的了解。

## 1 磁法探测工作坐标系

地球上任一点的地磁场总强度矢量通常可以用直角坐标系来描述。本文以海洋测绘中通常采用的空间直角坐标系为工作坐标系,与实际的海上作业情况和工程应用相符,便于数据的处理、解释和应用。如图1所示,坐标原点O依据工作时

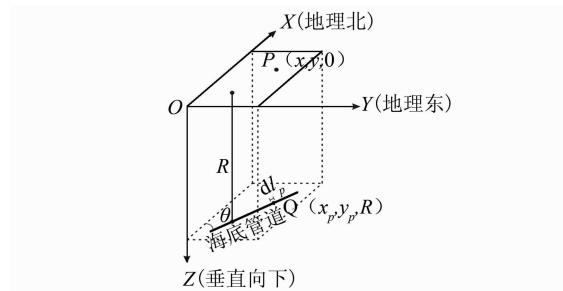


图1 磁法探测工作坐标系

Fig. 1 Working Coordinate System of Magnetic Survey

采用的坐标系统的投影方式选在观测面上,  $XOY$  平面为水平观测面,  $X$  轴指向地理北,  $Y$  轴指向地理东,  $Z$  轴垂直向下。这样, 推导时即可将观测点的地磁场强度矢量及海底管道的感应磁场强度矢量分解为 3 个方向的分量。

## 2 磁异常正演

### 2.1 海底管道的磁化强度及各分量

海底管道处在地球磁场作用下, 受现代磁场磁化而具有的磁化强度为感应磁化强度  $\mathbf{M}_i$ , 其方向与地磁场方向一致, 可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\mathbf{M}_i = \kappa \frac{\mathbf{T}_0}{\mu_0} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{T}_0$  是地磁场总强度(T);  $\kappa$  是磁化率, 对海底管道而言, 一般约为  $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$  SI ( $\kappa$ );  $\mu_0$  是真空磁导率, 其值为  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m。

此外, 海底管道在加工制作、安装和焊接过程中, 经过热作用和机械作用等所保留下来的磁化强度为剩余磁化强度  $\mathbf{M}_r$ , 它与现代磁场无关。因此, 海底管道的总磁化强度  $\mathbf{M}$  是由两部分组成的, 即:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r \quad (2)$$

但是由于海底管道加工及安装的历史过程无法获知, 其剩余磁化强度无法估算, 因此在进行其磁异常的数学推导中暂不考虑  $\mathbf{M}_r$ 。

如图 2 所示, 若不考虑剩余磁化强度, 海底管道的磁化强度方向与地磁场方向( $D$ )一致, 磁化强度倾角与地磁倾角( $I$ )一致, 则 3 方向分量分别为:

$$\Delta T = \sqrt{(H_{ax} + T_0 \cos I \cos D)^2 + (H_{ay} + T_0 \cos I \sin D)^2 + (Z_a + T_0 \sin I)^2} - T_0 \quad (5)$$

$$\Delta T = H_{ax} \cos I \cos D + H_{ay} \cos I \sin D + Z_a \sin I \quad (6)$$

式(5)和(6)都是由  $\mathbf{T}_a$  的 3 个分量计算磁异常  $\Delta T$  的表达式, 不同的是式(5)为直接从磁异常的定义出发进行计算, 而式(6)则是当磁异常  $\mathbf{T}_a$  强度不大时采取了简化和近似, 相比较而言, 计算简单一些。

### 2.3 重磁位场的泊松公式

如图 1 所示, 假设观测平面上任一观测点的坐标为  $P(x, y, 0)$ , 海底管道上无限小微元  $dl_p$  的坐标为  $Q(x_p, y_p, R)$ , 海底管道到观测平面  $XOY$  的距离为  $R$ , 海底管道的方位角为  $\theta(0^\circ \sim 180^\circ)$ , 管道外径为  $d_1$ , 管道内径为  $d_2$ , 则小微元的体积为:

$$dv = S \cdot dl_p = \frac{\pi}{4 \sin \theta} (d_1^2 - d_2^2) \cdot dy_p \quad (7)$$

小微元  $dl_p$  的磁矩为:

$$\begin{cases} M_x = M \cos I \cos D \\ M_y = M \cos I \sin D \\ M_z = M \sin I \end{cases} \quad (3)$$

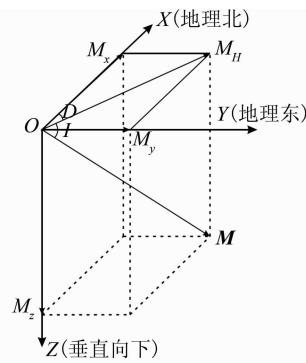


图 2 磁化强度矢量空间分布图

Fig. 2 Spatial Distribution of Magnetized Intensity Vectors

### 2.2 磁异常值 $\Delta T$ 表达式

在海洋磁法探测中, 磁力仪测量的是总磁场强度  $\mathbf{T}$ 。磁异常总强度矢量  $\mathbf{T}_a$  是总磁场强度  $\mathbf{T}$  与正常地磁场  $\mathbf{T}_0$  的矢量差, 而  $\Delta T$  则是总磁场强度  $\mathbf{T}$  与正常场  $\mathbf{T}_0$  的模量差, 是一个标量值<sup>[14]</sup>, 即:

$$\Delta T = |\mathbf{T}| - |\mathbf{T}_0| = |\mathbf{T}_a + \mathbf{T}_0| - |\mathbf{T}_0| \quad (4)$$

为了分析和计算的方便, 通常把磁异常总强度矢量  $\mathbf{T}_a$  分解为工作坐标系  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标轴上的 3 个分量, 即  $H_{ax}$ 、 $H_{ay}$ 、 $Z_a$ , 同样的, 正常地磁场  $\mathbf{T}_0$  也分解为 3 个分量, 则根据式(4)可以得出磁异常值的表达式如式(5); 此外, 当磁异常  $\mathbf{T}_a$  强度不大时, 可近似把  $\Delta T$  看作是  $\mathbf{T}_a$  在  $\mathbf{T}_0$  方向的投影<sup>[14]</sup>, 从而根据三者的关系可以推导出磁异常值的另一个表达式如式(6)。

$$dm = M \cdot dv = \frac{\pi \kappa T_0}{4 \mu_0 \sin \theta} (d_1^2 - d_2^2) \cdot dy_p \quad (8)$$

对观测点  $P$  来说, 微元  $dl_p$  可看作一个球体磁源,  $P$  到其的距离为:

$$r = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2} \quad (9)$$

则微元在  $P$  点的引力位为<sup>[14]</sup>:

$$V = \frac{G \sigma \cdot dv}{\sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2}} \quad (10)$$

式中,  $G$  为引力常数;  $\sigma$  为球体密度。

根据重磁位场的泊松公式,  $P$  点的磁位可表示为<sup>[14]</sup>:

$$U = -\frac{1}{4\pi G \sigma} M \cdot \text{grad}_P V \quad (11)$$

根据磁场强度与磁位的关系, 可得微元在各坐标轴的磁场强度分量为:

$$\left\{ \begin{array}{l} dH_{ax} = -\mu_0 \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\mu_0}{4\pi G} (M_x V_{xx} + M_y V_{xy} + M_z V_{xz}) \\ dH_{ay} = -\mu_0 \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\mu_0}{4\pi G} (M_x V_{xy} + M_y V_{yy} + M_z V_{yz}) \\ dZ_a = -\mu_0 \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\mu_0}{4\pi G} (M_x V_{xz} + M_y V_{yz} + M_z V_{zz}) \end{array} \right. \quad (12)$$

将式(3)、式(7)和式(10)代入式(12),整理后可得式(13)。

将每个观测点  $P(x, y, 0)$  看作已知点,将已知的海底管道的参数代入式(13),并对海底管道

$$\left\{ \begin{array}{l} dH_{ax} = \frac{\kappa T_0 (d_1^2 - d_2^2)}{16 \sin \theta [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2]^{\frac{5}{2}}} \{ [2(x - x_p)^2 - (y - y_p)^2 - R^2] \cos I \cos D + \\ 3(x - x_p)(y - y_p) \cos I \sin D - 3R(x - x_p) \sin I \} \cdot dy_p \\ dH_{ay} = \frac{\kappa T_0 (d_1^2 - d_2^2)}{16 \sin \theta [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2]^{\frac{5}{2}}} \{ [2(y - y_p)^2 - (x - x_p)^2 - R^2] \cos I \cos D + \\ 3(x - x_p)(y - y_p) \cos I \sin D - 3R(y - y_p) \sin I \} \cdot dy_p \\ dZ_a = \frac{\kappa T_0 (d_1^2 - d_2^2)}{16 \sin \theta [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2]^{\frac{5}{2}}} \{ [2R^2 - (x - x_p)^2 - (y - y_p)^2] \sin I - \\ 3R(x - x_p) \cos I \cos D - 3R(y - y_p) \cos I \sin D \} \cdot dy_p \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\Delta T(x, y, 0) = \sqrt{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} dH_{ax} + T_0 \cos I \cos D\right)^2 + \left(\int_{-\infty}^{+\infty} dH_{ay} + T_0 \cos I \sin D\right)^2 + \left(\int_{-\infty}^{+\infty} dZ_a + T_0 \sin I\right)^2} - T_0 \quad (14)$$

$$\text{或 } \Delta T(x, y, 0) = \cos I \cos D \int_{-\infty}^{+\infty} dH_{ax} + \cos I \sin D \int_{-\infty}^{+\infty} dH_{ay} + \sin I \int_{-\infty}^{+\infty} dZ_a \quad (15)$$

### 3 海底管道磁异常

#### 3.1 海底管道的分布

试验选取的海底管道为渤海某油田的输气管道,用于将海上平台开采的天然气输送至陆地上的集气站,其地理位置见图 3。本文选取了该管道的两段作为研究对象:管道 P1 和 P2,管道外径  $d_1$  为 325 mm,内径  $d_2$  为 219 mm,材质为美国石油学会标准 X56 级钢材。本次试验区为 100 m  $\times$  100 m 的正方形区域,在试验区内的两段管道的长度分别约为 100 m,走向近似为水平直线。

根据已知的海底管道位置信息,可求得其近似关系式。管道 P1 所处水深约为 8.0 m,走向北偏东,方位角  $\theta$  约为 1.19°,表达式为:

$$x_p = 48.30y_p - 71891.22 \quad (16)$$

管道 P2 所处水深约为 8.6 m,走向北偏西,方位角  $\theta$  约为 175.8°,表达式为:

$$x_p = -13.59y_p + 32637.99 \quad (17)$$

由于本文的研究对象分布范围较小,其地磁背景参数可看作常量,根据其地理位置可通过查

的全长进行积分后代入式(5)或者式(6),即可计算出海底管道在观测平面上的观测点  $P$  产生的磁异常,见式(14)或式(15)。在式(13)与式(14)中,积分限  $(-\infty, +\infty)$  表示理论上海底管道全长都对  $P$  点的磁异常有贡献,但在计算时可根据实际情况选取合适的积分界限以简化计算过程。经过计算验证,式(14)与式(15)的计算结果是一致的,两者计算的海底管道在同一点产生的磁异常的差值小于 1 nT。

$$\left\{ \begin{array}{l} dH_{ax} = \frac{\kappa T_0 (d_1^2 - d_2^2)}{16 \sin \theta [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2]^{\frac{5}{2}}} \{ [2(x - x_p)^2 - (y - y_p)^2 - R^2] \cos I \cos D + \\ 3(x - x_p)(y - y_p) \cos I \sin D - 3R(x - x_p) \sin I \} \cdot dy_p \\ dH_{ay} = \frac{\kappa T_0 (d_1^2 - d_2^2)}{16 \sin \theta [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2]^{\frac{5}{2}}} \{ [2(y - y_p)^2 - (x - x_p)^2 - R^2] \cos I \cos D + \\ 3(x - x_p)(y - y_p) \cos I \sin D - 3R(y - y_p) \sin I \} \cdot dy_p \\ dZ_a = \frac{\kappa T_0 (d_1^2 - d_2^2)}{16 \sin \theta [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + R^2]^{\frac{5}{2}}} \{ [2R^2 - (x - x_p)^2 - (y - y_p)^2] \sin I - \\ 3R(x - x_p) \cos I \cos D - 3R(y - y_p) \cos I \sin D \} \cdot dy_p \end{array} \right. \quad (13)$$

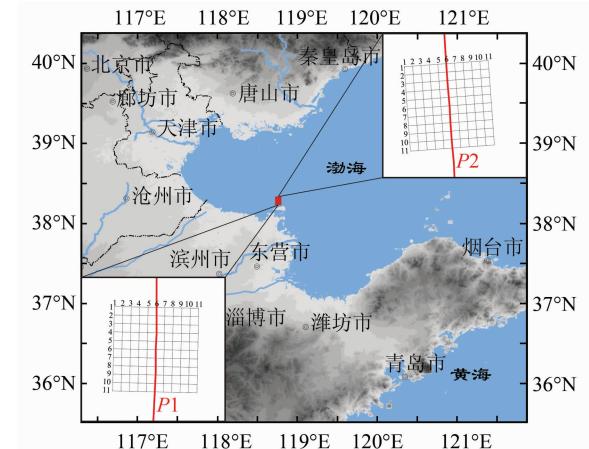


图 3 海底管道地理位置

Fig. 3 Location of Submarine Pipelines

询国际地磁参考场(international geomagnetic reference field,IGRF)<sup>[15]</sup>得到,研究区地磁背景场强度  $T_0$  约为 52 500 nT,地磁偏角  $D$  约为  $-6.3^\circ$ ,地磁倾角  $I$  约为  $55.0^\circ$ 。

#### 3.2 正演结果分析

根据收集的两条海底输气管道的坐标信息和其他相关参数,不考虑剩磁的影响,在以管道为中

心线的  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的正方形区域内进行正演计算(与实测范围一致),图 4 和图 5 分别为根据海底管道 P1 和 P2 的正演结果绘制的磁异常等值线图和典型剖面图,该结果与任来平等<sup>[2]</sup>从磁偶极子模型出发导出的数学模型计算结果的形态和趋势是一致的。

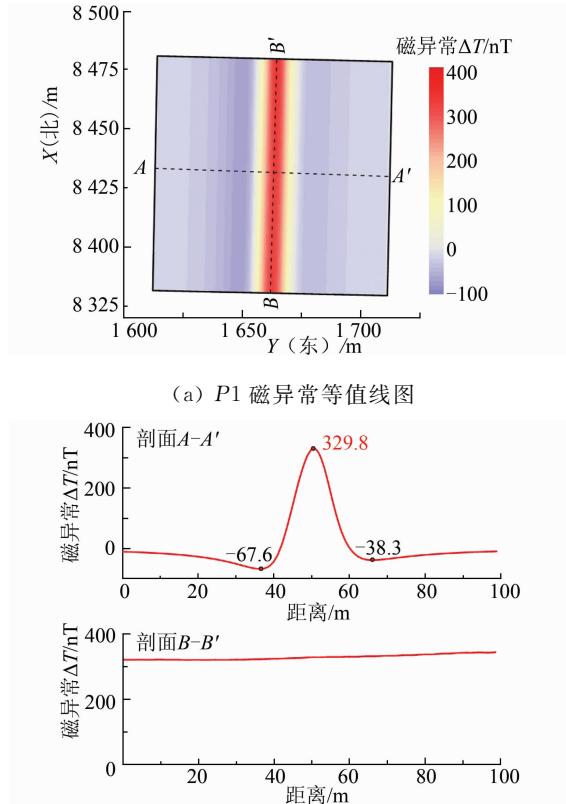


图 4 海底管道 P1 正演磁异常等值线图和典型剖面图

Fig. 4 Forward Magnetic Anomaly Contour Map and Profiles of P1

从图 4、图 5 可以看出,在观测平面内海底管道上方约  $20.0\text{ m}$  范围内磁场出现较大的正异常,在其正上方出现极大值,管道 P1 为  $329.8\text{ nT}$ ,管道 P2 为  $362.4\text{ nT}$ ;在管道东西两侧约  $12.0\text{ m}$  附近各出现一个极小值,管道 P1 分别为  $-67.6\text{ nT}$  和  $-38.3\text{ nT}$ ,管道 P2 为  $-49.0\text{ nT}$  和  $-41.5\text{ nT}$ ,且西侧的极小值比东侧的略小。从剖面图(见图 4(b)和图 5(b))可以看出,若磁法测线为垂直(或斜交)管道走向,随着海上施测的进行,当海洋磁力仪到达管道附近时,平滑的磁场强度剖面上会出现一个明显的正异常“脉冲”(如剖面 A-A' 和 C-C',本文观测平面距离海底管道的垂直距离约为  $8.0\text{ m}$ ,在剖面上磁异常横向跨度约为  $20.0\text{ m}$ ),极大值点即为管道的正上方,探测是有效的;但若测线为平行管道走向,剖面会一直平滑(如剖面 B-B' 和 D-D'),不会产生明显的磁异常,因此就

无法确定管道的位置,这种探测是无效的。

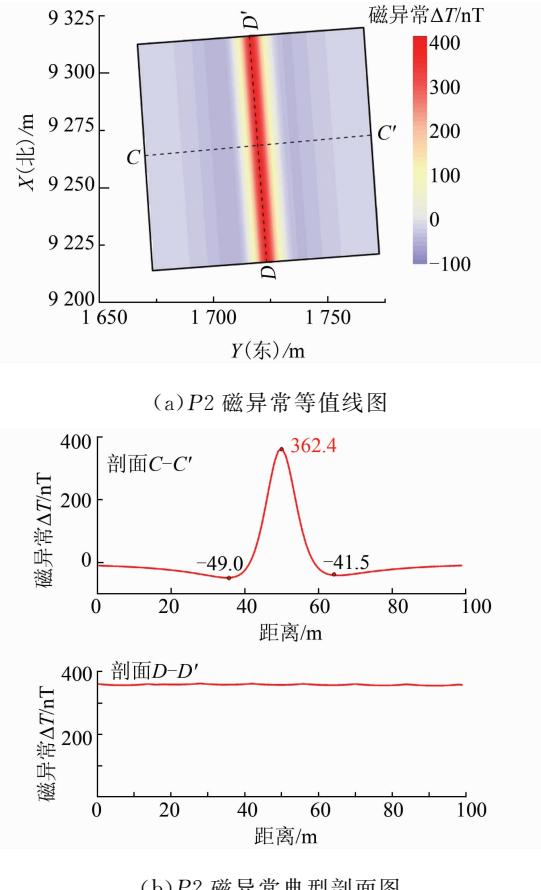


图 5 海底管道 P2 正演磁异常等值线图和典型剖面图

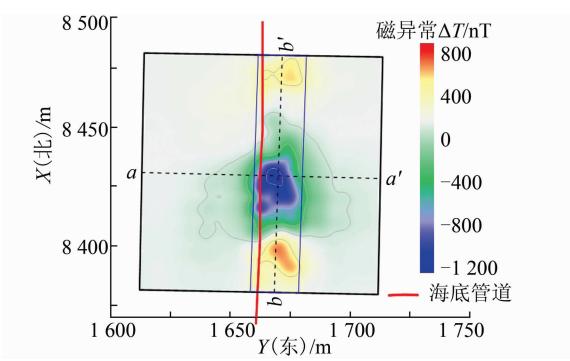
Fig. 5 Forward Magnetic Anomaly Contour Map and Profiles of P2

### 3.3 实测磁异常特征及与正演结果的对比分析

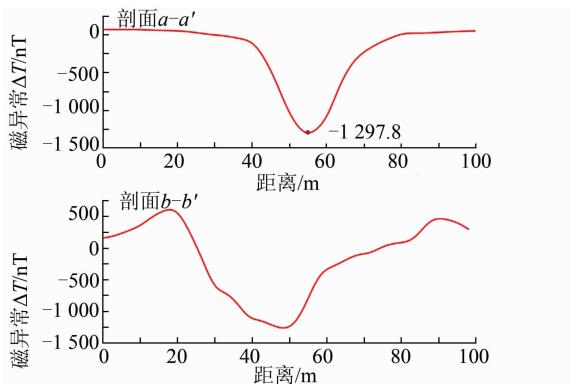
海上实测试验采用的主要仪器是美国的 G-882SX 铋光泵海洋磁力仪,配备实时差分导航定位系统(differential global positioning system, DGPS),并搭载 SES-2000 参量阵浅地层剖面仪同步测量。分别以两段海底管道 P1 和 P2 为中心进行网格状测线布设,测线分别垂直和平行目标管道的已知走向,测线间距为  $10\text{ m}$ ,每段管道试验区内布设 22 条测线(见图 3)。图 6 和图 7 分别为两个试验区的磁异常等值线图和典型剖面图。

#### 3.3.1 实测磁异常特征

从磁异常等值线图(见图 6(a)和图 7(a))看,在海底管道附近约  $20.0\text{ m}$  范围内(蓝色矩形区域)存在明显的磁异常带,或为正异常,或为负异常。但是对比发现,磁异常带的中心线并不能与已知的海底管道的位置相重合,表现为:管道 P1 的测量结果东偏约  $7.5\text{ m}$ ,管道 P2 的测量结果东偏约  $8.0\text{ m}$ 。经过与参量阵浅地层剖面仪(DGPS 接收机安装于换能器的正上方,对管道的定位较准确)确定的管道位置相比较,证明本次海上实测



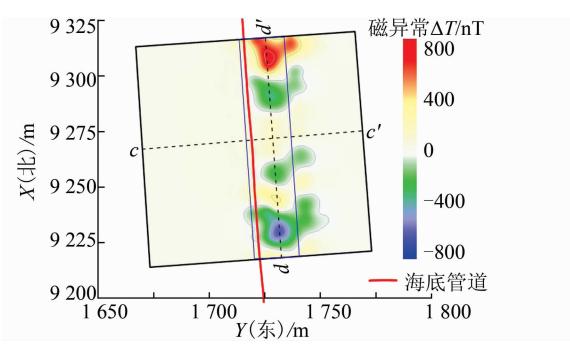
(a) P1 实测磁异常等值线图



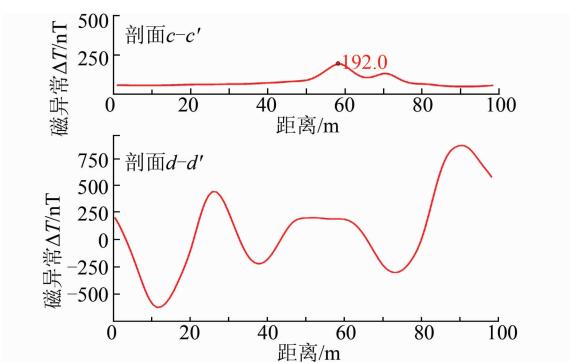
(b) P1 实测磁异常典型剖面图

图 6 海底管道 P1 实测磁异常等值线图和典型剖面图

Fig. 6 Measured Magnetic Anomaly Contour and Profiles of P1



(a) P2 实测磁异常等值线图



(b) P2 实测磁异常典型剖面图

图 7 海底管道 P2 实测磁异常等值线图与典型剖面图

Fig. 7 Measured Magnetic Anomaly Contour and Profiles of P2

的结果是正确的,而收集的用于正演计算的管道位置是不准确的。从剖面图(见图 6(b)和图 7(b))看,垂直于管道走向的剖面(中心剖面  $a-a'$  和  $c-c'$ )均是在平滑的磁场强度剖面上出现一个明显的磁异常“脉冲”,管道 P1 出现极小值点  $-1297.8$  nT,管道 P2 出现极大值点  $192.0$  nT,能很容易地确定海底管道的位置。而平行管道走向的剖面(剖面  $b-b'$  和  $d-d'$ )上尽管出现若干极值点,但无规律,若不参考磁异常等值线图,则无法确定哪个极值点是管道产生的。

### 3.3.2 与正演结果的对比分析

从实测磁异常与正演结果的对比来看,在海底管道正上方都存在一个明显的磁异常条带,横向跨度约为  $20.0$  m,在垂直管道走向的剖面上都有明显的“脉冲状”磁异常。不同的是正演的磁异常条带分布规律、均匀,且中心线处都为正异常,而实测的磁异常条带内出现若干极值点,中心线处有正异常,也有负异常,实测结果与正演结果存在较大出入,经分析后推测可能是由于海底管道的剩余磁化强度导致的。

本文正演计算未考虑剩余磁化强度的影响,而海底管道的主要材质为钢铁,属于铁磁性体,在加工制作、安装及焊接过程中会产生强度大、稳定性高的热剩余磁性<sup>[13]</sup>。由于铺设在海底的长达几公里甚至上百公里的管道是由一节一节的单根钢管通过法兰或焊接等方式连接起来的,而且每根钢管具有独特的机械加工和热作用的历史,因此其剩余磁化强度的方向具有很强的随机性和偶然性,其大小甚至可能超过感应磁化强度的 10 倍<sup>[13-14]</sup>。剩余磁化强度叠加到规律性的地磁场和感应磁场上就会产生具有一定随机性和偶然性的磁异常特征。此外,管道上的法兰和阀门等其他附件也会表现出各自不同的磁性,影响实测总磁场异常的结果。

如图 8 和图 9 所示,在磁异常等值线图上,通过测量沿海底管道的走向方向上出现的各磁异常极值点之间的距离发现,各极值点间的距离近似表现为  $12$  m 的倍数。考虑到一般海底管道的单节管长度即为  $12$  m,而在管道安装、铺设时接头处一般会采用焊接方式,会产生较强的热剩磁,因此推测可能是管道连接处的热剩磁叠加到感应磁场上而导致了磁异常的不规律分布。

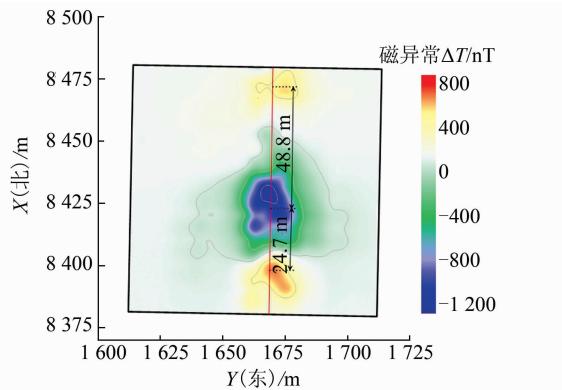


图 8 P1 实测磁异常极值点分布特征分析

Fig. 8 Analysis of the Distribution Characteristic of the Measured Magnetic Anomaly of P1

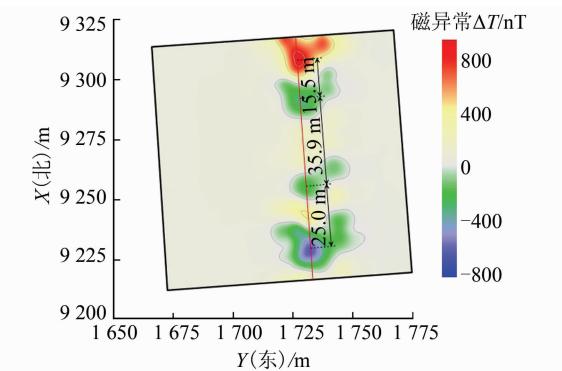


图 9 P2 实测磁异常极值点分布特征分析

Fig. 9 Analysis of the Distribution Characteristic of the Measured Magnetic Anomaly of P2

## 4 结语

本文通过正演模拟计算和海上实测探讨了采用海洋磁法探测和定位海底管道的机制和有效性。在磁异常等值线图上海底管道表现为沿管道走向分布规律的“条带状”异常区域,区域的中心线即可确定为海底管道的位置;在垂直管道走向的剖面图上则表现为平滑的磁场强度剖面出现明显的“脉冲”状异常,极值点即可确定为海底管道的位置。在采用海洋磁法探测海底管道时,若条件允许,应尽量采用网格状方法布设测线,以获取丰富、详尽的区域磁场分布特征;但若考虑工程成本和探测效率,则可只在垂直管道的走向布设测线。

正演结果与实测结果的对比分析表明,海底管道具有较大的剩余磁化强度,连接处的焊接工序及管道上的阀门、法兰等附件都会对其磁场分布产生影响,这就解释了在实际工程测量中同一条海底管道的不同位置经常会出现不同的磁异常特征的原因。

## 参考文献

- [1] Liang Ruicai, Liu Baohua, Zhang Zhengmin, et al. Magnetic Application in Site and Pipeline Engineering Geological Survey[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(12): 55-57(梁瑞才, 刘保华, 张政民, 等. 磁力测量在海洋井场、管线工程地质调查中的应用[J]. 海洋科学, 2003, 27(12): 55-57)
- [2] Ren Laiping, Huang Motao, Zhai Guojun, et al. A Model for Calculating Magnetic Field of Underwater Pipeline[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(1): 1-6(任来平, 黄漠涛, 翟国君, 等. 海底管线磁场计算模型[J]. 海洋测绘, 2007, 27(1): 1-6)
- [3] Zhong Xiansheng, Pei Yanliang. Discussion of the Survey Method of the Seabed Cables Using the Magnetometer[J]. *Marine Sciences*, 2001, 25(9): 10-11(钟献盛, 裴彦良. 应用磁力仪探测海底电缆方法的探讨[J]. 海洋科学, 2001, 25(9): 10-11)
- [4] Yu Bo, Liu Yanchun, Bian Gang, et al. Magnetism Detecting Method for Seabed Cable in Marine Engineering Surveying[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5): 454-457(于波, 刘雁春, 边刚, 等. 海洋工程测量中海底电缆的磁探测法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(5): 454-457)
- [5] Pei Yanliang, Liang Ruicai, Zheng Yanpeng, et al. The Method and Practices of the Submarine Pipelines Detection Using Magnetometers[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(5): 2226-2232(裴彦良, 梁瑞才, 郑彦鹏, 等. 海底缆线的磁力探测方法与实践[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 2226-2232)
- [6] Szyrowski T, Sharma S K, Sutton R, et al. Developments in Subsea Power and Telecommunication Cables Detection: Part 2—Electromagnetic Detection[J]. *International Journal of the Society for Underwater*, 2013, 31(3): 133-143
- [7] Ma Yong, Li Jiaobiao, Wu Ziyin, et al. The Application of an Integrated Geophysical Prospecting System to Underwater Archaeology—An Example from Chuan Island, Guangdong Province[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2016, 34(2): 43-52(马永, 李家彪, 吴自银, 等. 综合物探技术在海洋考古中的应用——以川岛水下考古为例[J]. 海洋学研究, 2016, 34(2): 43-52)
- [8] Liu Chen. The Comparative Analysis of Multi-beam Sounding System, Side-scan Sonar and Magnetometer in the Wreck Detection[D]. Beijing: China Uni-

- versity of Geosciences, 2015(刘陈. 多波束系统、侧扫声纳与磁力仪在海底沉船探测中的比较分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2015)
- [9] Lü Banglai. Study on the Key Technologies for Detecting Underwater Objects Using the Magnetic Survey and Their Applications[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015(吕邦来. 磁法探测水下目标的关键技术与应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015)
- [10] Billings S D. Discrimination and Classification of Buried Unexploded Ordnance Using Magnetometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2004, 42(6): 1 241-1 251
- [11] Grossinger R, Keplinger F, Mehmood N, et al. Magnetic and Microstructural Investigations of Pipeline Steels[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(11): 3 277-3 280
- [12] Sanchez V, Li Yaoguo, Nabighian M N, et al. Numerical Modeling of Higher Order Magnetic Moments in UXO Discrimination[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2 568-2 583
- [13] Breiner S. Applications Manual for Portable Magnetometer[M]. San Jose: Geometrics, 1999
- [14] Liu Tianyou. Magnetic Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013 (刘天佑. 磁法勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 2013)
- [15] Thébault E, Finlay C C, Beggan C D, et al. International Geomagnetic Reference Field: The 12th Generation[J]. *Earth Planets & Space*, 2015, 67:79

## Analysis of Forward and Measured Magnetic Anomalies of Submarine Pipeline

WANG Fangqi<sup>1</sup> SONG Yupeng<sup>1</sup> DONG Lifeng<sup>1</sup> LIU Zhenwen<sup>2</sup> LIN Xubo<sup>1</sup> TAO Changfei<sup>1</sup>

1 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

2 Research Institute of Engineering Technology, CNPC, Tianjin 300451, China

**Abstract:** The theoretical calculation model of magnetic anomaly of submarine pipeline is derived by Poisson formula method of gravity and magnetic field. For two known submarine gas pipelines, the forward simulation calculation and sea test verification are carried out. The forward results show that positive magnetic anomalies with a span of about 20.0 m and up to 329.8 nT and 362.4 nT respectively are produced on an observation plane of about 8.0 m from the submarine pipeline. The measured distribution spans of magnetic anomalies of submarine pipeline are consistent with the results of forward modeling, but the details of their distributions are different. Both positive and negative magnetic anomalies exist. By analyzing the distribution characteristics of the extreme points of magnetic anomalies, it is speculated that the thermal residual magnetism at the junctions of the pipeline may lead to the detailed characteristics of the measured magnetic anomalies.

**Key words:** submarine pipeline; marine magnetic method; theoretical model; magnetic anomaly forward; thermal residual magnetism

**First author:** WANG Fangqi, master, engineer, specializes in marine geophysical survey technology. E-mail: sdhdwfq0317@fio.org.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41606056; the National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC0306003; Marine Industry Research Special Funds for Public Welfare Projects, No. 201305034.