

基于磁偶极子构造法几何建模的铁管磁异常正演

朱慧慧, 刘得军, 冯 硕, 潘 琦, 闫景富

(中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

摘要: 地下铁磁性金属管线受地球原磁场磁化产生磁场会改变原地磁场分布, 而形成地磁异常; 通过管道几何建模和磁偶极子构造法对管道磁异常进行正演分析; 首先利用近似的立方体单元对管道进行几何建模并输出相应的立方体单元体积和中心坐标; 然后将立方体单元近似为磁偶极子, 使用磁偶极子构造法进行管道磁异常正演; 最后研究了距径比, 磁倾角, 磁偏角, 地球场强, 管道材料磁化率对管道磁异常正演的影响; 研究表明: 在 6 倍距径比外, 同一球面上测点磁异常值接近一致, 且管道磁异常正演结果不受磁倾角, 磁偏角和材料磁化率的影响; 随着地磁场强度增大, 管道磁异常呈线性增大; 研究成果将为自主研发高精度磁异常地下管线探测设备奠定理论基础。

关键词: 铁质管线, 几何建模, 磁偶极子构造法, 磁异常正演

Magnetic Dipole Reconstruction Geometry Modeling for Underground Ferromagnetic Pipe Magnetic Abnormal Detection

Zhu Huihui, Liu Dejun, Feng Shuo, Pan Qi, Yan Jingfu

(College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Underground ferromagnetic pipe can be magnetized by earth magnetic field, superposition of magnetized field and earth magnetic field produce magnetic abnormal. By pipe geometry modeling and Magnetic dipole reconstruction we can do Magnetic abnormal forward analysis. Initially, approximate cube elements are used to reconstruct pipe geometric model and output volume and center coordinates of elements. Then cube elements are seen as magnetic dipole and magnetic dipole reconstruction is used to forward pipe magnetic abnormal. At last research the influence of Distance-to-Diameter ratio, magnetic inclination, magnetic declination, geomagnetic field and pipeline's susceptibility on pipe magnetic abnormal forward calculation. The results show that: when Distance-to-Diameter ratio is bigger than 6, magnetic abnormal of measurement points on the same sphere are very close and pipe magnetic abnormal is not affected by magnetic inclination, magnetic declination, and pipeline's susceptibility; pipe magnetic abnormal increases linearly with the increase of geomagnetic field. This result can lay a theory foundation for high precision underground pipeline detection equipment.

Keywords: underground ferromagnetic pipeline; geometry modeling; magnetic dipole reconstruction; magnetic abnormal forward

0 引言

自然界的磁体都可以认为是大量形状和磁矩大小不同的基本磁体单元的组合^[1], 当磁体单元最大外形尺寸远小于磁体到磁场测点之间的距离时, 基本磁体单元可视作磁偶极子来计算磁场^[2-3]。磁偶极子构造法基于该原理, 将被地磁场磁化的铁质管道分割成有限数量的单元块, 由单元块在几何结构上重构管道^[4-7]。将每个单元块视作磁偶极子, 使用磁偶极子公式计算所有单元在测点的磁场, 依据磁场矢量叠加原理得到磁化铁质管道在测点的磁场^[4-6]。

对于形状和分布规则的球体、无限长水平圆柱体及板状体等磁源, 其磁异常计算存在解析解^[8-9], 而管道、铁皮桶、钢铁构件及未爆炸武器 (UXO) 铁壳等形状及分布不规则的铁磁质磁源, 磁异常解析求解较为困难^[9-10], 使用数值计算的方式进行磁异常仿真较为合适^[9]。Marchetti 等人 and Fur-

ness 分别使用表面积分方程法求解了地下铁皮桶所致探测面磁异常^[10-11]。Aydin 使用棱柱单元计算了磁基底的磁异常^[12]。Churchill 等人使用 COMSOL 有限单元分析软件计算了不同形态下 UXO 的磁异常, 并将求解结果与解析法椭球体模型计算结果进行了对比^[13]。Sanchez 等人及其所在研究团队使用立方磁体单元构造了 UXO 及 Non-UXO 构件磁异常数值分析模型^[9]。由于地下管道结构的特殊性, 棱柱单元不能有效的重建管道几何结构^[9,12]; 而有限元软件在伪二度体磁异常探测建模时, 计算内存需求大且求解易发散^[13]。为此, 本文利用近似立方体单元构造管道几何模型, 使用磁偶极子构造法建立管道磁异常数值分析模型, 分析了不同因素对管道正演磁异常的影响, 为管道探测磁异常数据处理及反演提供理论基础。

1 原理方法

1.1 磁偶极子构造法原理

当磁体单元的外形尺寸远小于磁体中心到磁场测量点的距离时, 磁体在测点处的磁场可使用磁偶极子公式 (1) 近似计算^[2,14]。定义测点到磁体中心的距离与磁体最大外形尺寸之间的比为距径比, Zhang 等^[14]人在一定距径比范围内进行了磁体磁偶极子磁场计算测点磁场误差的实验分析, 从实验上证明了磁偶极子磁场计算公式的适用性。Yang 等^[3]人在论文中给

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2016-11-21。

基金项目: 国家自然科学基金(41374151)。

作者简介: 朱慧慧(1989-), 女, 湖北钟祥人, 硕士研究生, 主要从事地下铁质管线磁异常正演方法方向的研究。

刘得军(1965-), 男, 河北迁安人, 教授、博士生导师, 主要从事磁异常探测与仪器响应数值模拟方向的研究。

出了磁偶极子公式计算磁体磁场的误差计算公式，但未说明其具体来源。Guo 等^[2]人基于圆环电流磁体单元定量分析了磁偶极子计算磁体的误差，并与前人研究成果进行了对比分析说明了其研究结果的准确性。在此，我们将管道划分所得单元视作磁偶极子，其测点处的磁场计算公式为：

$$B_p = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(m \cdot r) \cdot r}{r^5} - \frac{m}{r^3} \right] \quad (1)$$

式 (1) 中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ 为真空中的磁导率。设第 j 个测点 P_j 的三维坐标为 (P_{jx}, P_{jy}, P_{jz}) ，管道单元 E_i 的中心坐标为 (E_{ix}, E_{iy}, E_{iz}) ， r 为单元 E_i 到测点 P_j 的位移， r 为 r 的模量 (单元 E_i 到测点 P_j 的距离)。 m 为单元 E_i 的磁矩矢量，其大小由单元体积、单元有效磁化率 χ_a 及外磁场 B_e 的大小决定；在不考虑剩磁影响时，磁矩方向与外磁场方向相同。则磁偶极子 E_i 在测点 P_j 的磁场可表示为函数 $B_{ij} = f(E_i, P_j)$ ，设磁体由 I 个相邻磁偶极子组成，则这 I 个磁偶极子在 P_j 点的磁场可表示为^[4-6]：

$$B_j = \sum_{i=1}^I B_{ij} \quad (2)$$

位于地磁场中的铁质管线分割单元在地磁场的磁化下产生了磁化磁矩，每一个磁化单元能够视作一个磁偶极子^[2,14]。所有磁化单元的在测点处的磁场叠加，即为地下磁化管道在测点处产生的磁化磁场。管道磁异常探测过程中， P_j 点的探测磁场 B_{dj} 为磁化磁场与地球背景场之和，即：

$$B_{dj} = B_j + B_e \quad (3)$$

其中： B_j 为管线被地磁场磁化后产生的磁化磁场， B_e 为地球背景场。

1.2 管道几何建模及磁异常正演计算

如图 1 所示，管道外径为 R ，管道厚度为 δ ，在地磁观测坐标系中管道轴线距离地面为 0.4 m 。为了使得磁化管道单元在距离单元中心各个方向球面上测点磁场尽量一致，将管道单元分割为尽量接近于立方体的单元。沿管道轴向将管道等分为 δ 长的管道环，将每一小段管道圆环等分为 N 等份， N 为的舍入整数，则长度为 L_p 的管线划分所得单元数为 n ，这个单元在几何上还原构造了原管道结构。

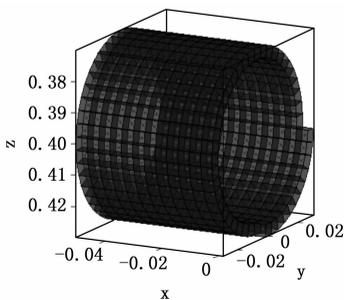


图 1 磁偶极子构造法管道几何建模模型

位于地磁场中的铁质管线分割单元在地磁场的磁化下产生了磁化磁矩，每一个磁化单元能够视作一个磁偶极子。所有磁化单元的在测点处的磁场叠加，即为地下磁化管道在测点处产生的磁化磁场。在管线外径与厚度确定时，管道单元大小即被确定，图 1 中单元块表示由管道分割所得单元。管道空间位置确定时，每个管道单元的几何中心即被确定，图 1 中点即为单

元的几何中心。此时，在地磁坐标系中，影响点磁化磁场的因素只有管道材料磁化率与背景磁场。结合式 (2) 与式 (3)，最终可表示为：

$$B_{dj} = \sum_{i=1}^I B_{ij}(E_i, P_j, x_m, B_e) + B_e \quad (4)$$

式 (4) 就是磁偶极子构造法计算地磁坐标系中，受地磁场磁化的铁质管道 (磁化率为 χ_a) 在点的探测磁异常。

要想确定地面上一点的地磁场的强度与方向，至少要测出任意 3 个彼此独立的地磁要素，称为地磁三要素^[15]。在本文研究过程中，以地球场强、磁倾角及磁偏角描述磁场测点背景场。由公式 (4) 可知，距径比，地球场强，磁倾角，磁偏角，材料磁化率对测点磁异常均有影响。本文重点研究这些因素对测点磁异常的影响。为了研究分析地下铁管正演磁异常，建立如图 2 所示的分析模型。假设地球场强，磁倾角，磁偏角，材料磁化率为固定值，研究距径比对球面上磁异常的影响。此外，进一步研究不同距径比条件下，在一定范围内改变地球场强，磁倾角，磁偏角，材料磁化率，通过分析模型正演计算测点磁异常，并分析这些因素对测点磁异常的影响。

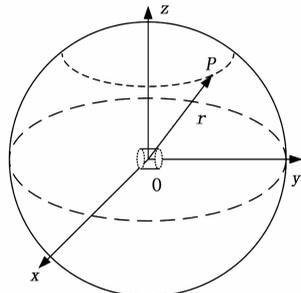


图 2 管道磁异常正演计算模型

2 数值分析

2.1 距径比对球面上磁异常的影响

设直线管道单元外径 60 cm ，厚度 6 mm ，材料磁化率为 200SI ，背景磁场大小为 $54\ 583.6 \text{ nT}$ ，磁倾角为 59.061° ，磁偏角为 -6.629° ^[16-17]。在距径比 $\lambda (\lambda = \frac{r}{\varphi})$ ，其中 r 是管道中心到测点的距离， φ 是直线管道单元外径) 确定的球面上，在坐标系测点仰角 $0 \leq \theta \leq \pi$ 和测点方位角 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 变化范围内，每隔 0.1 弧度计算一个 P 点磁感应强度，即在球面上可采集 182 个磁感应强度矢量。如图 3 所示为距径比 2 倍，4 倍，6 倍，8 倍，10 倍球面上测点的磁异常分布值。由图 3 可知，磁

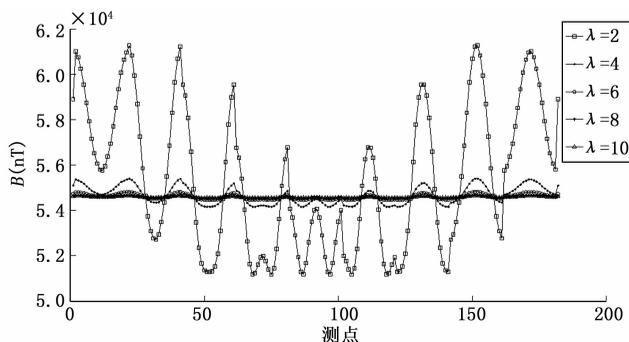


图 3 距径比 λ 对测点磁异常 B 的影响

化的直线管道单元在球面上测点位置不同, 引起的磁异常不同。在不同的距径比球面上, 磁偶极子构造法管道几何建模计算得到的磁异常分布趋势相似; 随着距径比的增大, 同一球面上测点的磁异常变化逐渐变小。计算表明, 在同一测点方向上, 以距径比为 10 时球面磁异常为真值, 当距径比大于 6 时, 球面上磁异常与真值之间相对误差均小于 0.35%, 此时不同距径比磁异常可视为相同。

2.2 地磁场强度, 磁倾角, 磁偏角, 材料磁化率对测点磁异常的影响

设直线管道单元外径 60 cm, 厚度 6 mm, 材料磁化率为 200 SI, 磁倾角为 59.061°, 磁偏角为 -6.629°, 背景磁场从 22 000 nT 到 68 000 nT 以 1 000 nT 为间隔变化, 计算距径比分别为 2, 4, 6, 8, 10 时, 取球面上第 22、28、72、161 点四组有代表性的磁异常数据如图 4 所示。由图 4 可知: 同一测点上, 随着地磁场强度增大, 磁异常呈线性增大; 随着距径比的增大, 同一测点在相同地磁场强度时磁异常之间的差异逐渐减小; 当 $\lambda \geq 6$ 时, 同一测点磁异常随地磁场强度增大同比例线性增大。

设直线管道单元外径 60 cm, 厚度 6 mm, 材料磁化率为 200 SI, 背景磁场大小为 54583.6 nT, 磁偏角为 -6.629°, 磁倾角从 -90° 到 90° 变化, 计算距径比分别为 2, 4, 6, 8, 10 时, 取球面上第 22、28、72、161 点四组有代表性的磁异常数据如图 5 所示。由图 5 可知: 在固定距径比球面上, 同一测点磁异常随磁倾角的变化成正弦波动; 在同一测点上, 不同距径比条件下, 磁异常随磁倾角变化趋势相同; 随着距径比的增大, 同一测点磁异常受磁倾角的影响逐渐减小; 当 $\lambda \geq 6$ 时, 同一测点磁异常不受磁倾角的影响。

设直线管道单元外径 60 cm, 厚度 6 mm, 材料磁化率为 200 SI, 背景磁场大小为 54583.6 nT, 磁倾角为 59.061°, 磁偏角从 -30° 到 30° 变化, 计算距径比分别为 2, 4, 6, 8, 10 时, 取球面上第 22、28、72、161 点四组有代表性的磁异常数据如图 6 所示。由图 6 可知: 同一测点上, 不同距径比条件下, 磁异常随磁偏角的变化趋势相同; 随着距径比的增大, 同一测点磁异常受磁偏角的影响逐渐减小; 当 $\lambda \geq 6$ 时, 同一测点磁异常不受磁偏角的影响。

设直线管道单元外径 60 cm, 厚度 6 mm, 背景磁场大小为 54583.6 nT, 磁倾角为 59.061°, 磁偏角为 -6.629°, 材料磁化率从 100 SI 到 1000 SI 以 50 SI 为间隔变化, 计算距径比

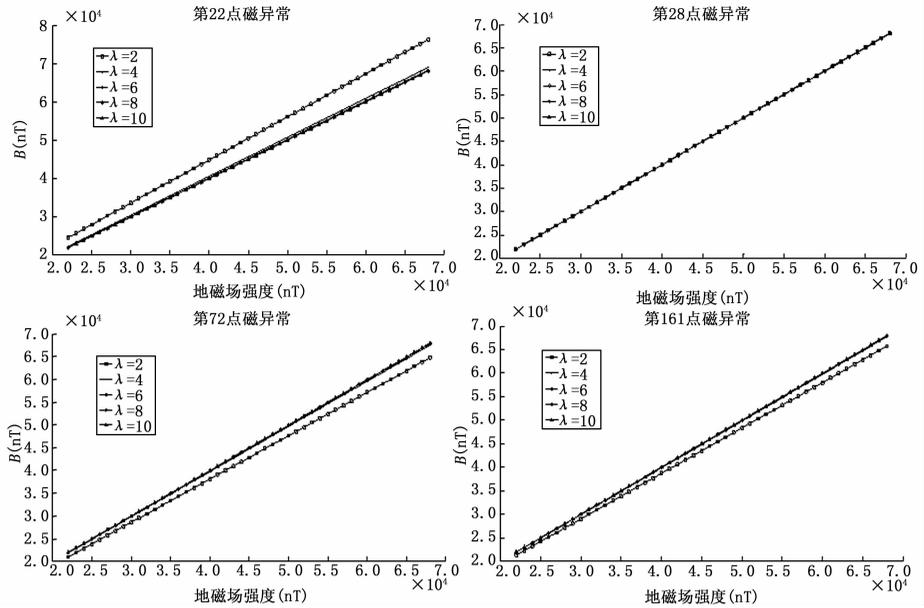


图4 地磁场强度对测点磁异常的影响

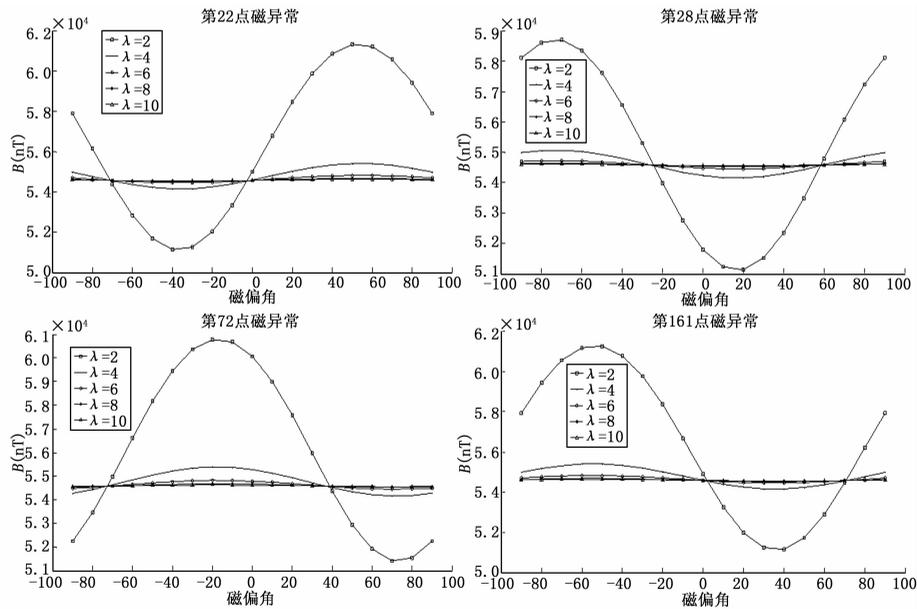


图5 磁倾角对测点磁异常的影响

分别为 2, 4, 6, 8, 10 时, 取球面上第 22、28、72、161 点四组有代表性的磁异常数据如图 7 所示。由图 7 可知: 同一测点上, 不同距径比条件下测点磁异常随材料磁化率的变化趋势相同; 随着距径比的增大, 同一测点磁异常受材料磁化率影响逐渐变小; 当 $\lambda \geq 6$ 时, 同一测点磁异常不受材料磁化率的影响。

3 结论

利用近似立方体单元重构地下铁质管线的几何结构, 在此基础上使用磁偶极子构造法建立管道磁异常正演模型。研究了测点空间位置对磁异常的影响, 同时讨论了磁倾角, 磁偏角, 地球场强, 材料磁化率对磁异常的影响。由研究分析可知, 磁倾角, 磁偏角, 地球场强, 材料磁化率一定时, 在不同的距径

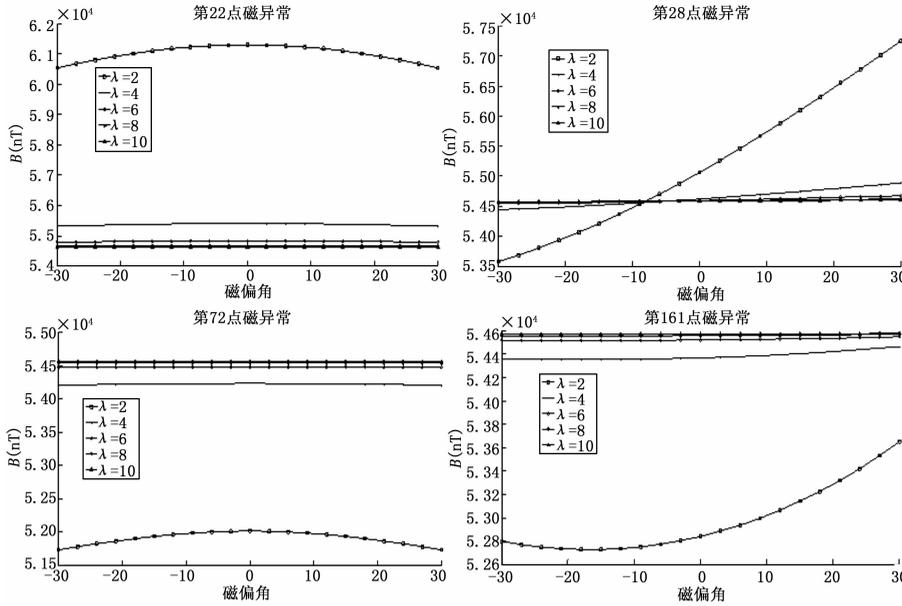


图 6 磁偏角对测点磁异常的影响

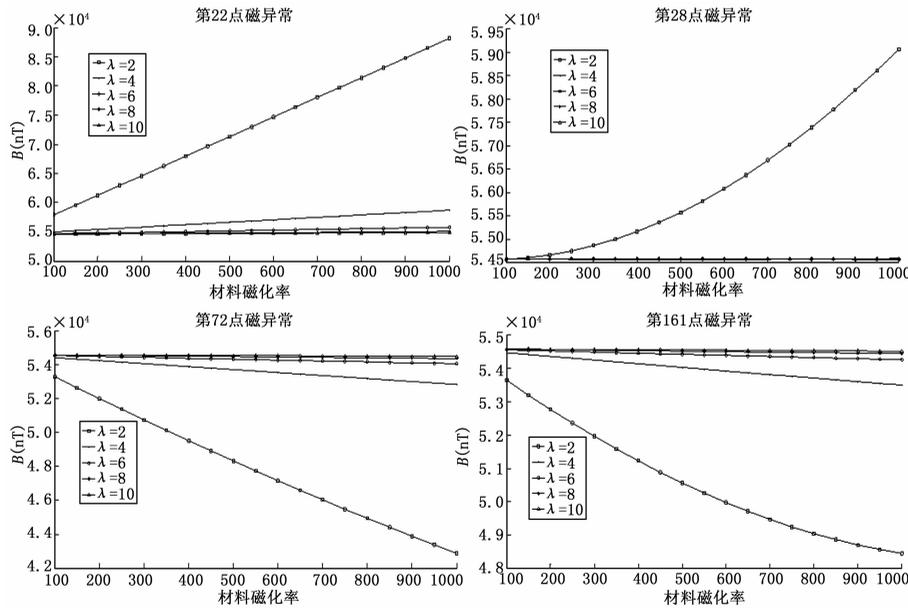


图 7 材料磁化率对测点磁异常的影响

比球面上, 管道磁异常分布趋势相似; 随着距径比的增大, 同一球面上测点的磁异常变化逐渐变小; 当距径比大于 6 时, 不同测点处磁异常近似相同。随着地球场强的增大, 测点磁异常线性增大。当距径比大于 6 时, 测点磁异常不受倾角, 磁偏角, 材料磁化率的影响。文章提供了一种有效的地下铁管磁异常正演方法, 为自主研发高精度磁异常地下管线探测设备奠定理论基础, 同时为实际仪器的标定、仪器响应模拟及探测特性评价等提供理论依据。

参考文献:

[1] 张恒磊, 胡祥云, 刘天佑. 基于二阶导数的磁源边界与顶部深度快速反演 [J]. 地球物理学报, 2012, 55 (11): 3839-3847.
 [2] 底青云, 方广有, 张一鸣. 地面电磁探测系统 (SEP) 研究 [J].

地球物理学报, 2013, 56 (11): 3629-3639.
 [3] 张恒磊, Marangoni Y R, 左仁广, 等. 改进的各向异性标准化方差探测斜磁化磁异常源边界 [J]. 地球物理学报, 2014, 57 (8): 2724-2731.
 [4] Yang W A, Hu C, Li M, et al. A new tracking system for three magnetic objectives [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (12): 4023-4029.
 [5] 张朝阳, 肖昌汉, 高俊吉, 等. 磁性物体磁偶极子模型适用性的试验研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18 (5): 862-868.
 [6] Hu C, Meng M Q and Mandal M. Efficient magnetic localization and orientation technique for capsule endoscopy [J]. International Journal of Information Acquisition, 2005, 2 (01): 23-36.
 [7] 郭文波, 李琳, 薛国强等. 瞬变电磁快速成像解释系统研究 [J]. 地球物理学报, 2005, 48 (6): 1400-1405.
 [8] Shaw R K, Agarwal B N P, Nandi B K. Use of Walsh transforms in estimation of depths of idealized sources from total-field magnetic anomalies [J]. Computers & geosciences, 2007, 33 (7): 966-975.
 [9] Sanchez V, Li Y G, Nabighian M N et al. Numerical Modeling of Higher Order Magnetic Moments in UXO Discrimination [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 (9): 2568-2583.
 [10] Marchetti M, Sapia V and Settini A. Magnetic anomalies of steel drums: a review of the literature and research results of the INGV [J]. Annals of Geophysics, 2013, 56 (1): R0108.
 [11] Furness P. Modelling magnetic fields due to steel drum accumulations [J]. Geophysical Prospecting, 2007, 55: 1-12.
 [12] Aydin I, Oksum E. MATLAB code for estimating magnetic basement depth using prisms [J]. Computers & Geosciences, 2012, 46: 183-188.
 [13] Churchill K M, Link C, Youmans C C. A comparison of the finite-element method and analytical method for modeling unexploded ordnance using magnetometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50 (7): 2720-2732.
 [14] Jessell M. Three-dimensional geological modelling of potential-field data [J]. Computers & Geosciences, 2001, 27 (4): 455-465.
 [15] 徐文耀. 地球电磁形像物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
 [16] 洪立波. 城市地下管线面临的挑战与机遇 [J]. 城市运行管理, 2009 (2): 32-34.
 [17] 雷林源. 城市地下管线探测与测漏 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.