

doi:10.3799/dqkx.2015.187

# 基于深埋管线探测的井中磁梯度方法

陈 军<sup>1,2</sup>, 陈泽元<sup>2</sup>, 杨 川<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 上海同纳建设工程质量检测有限公司, 上海 200331

**摘要:** 目前, 井中磁梯度方法是深埋金属管线常用的探测方法之一, 但是存在理论不够完善及缺乏定量分析方法等问题. 研究内容包括 3 个方面: (1) 从无限长水平圆柱体的磁场强度入手, 通过坐标系的转换, 推导出地面探测和井中探测的磁场水平分量、垂直分量的关系, 进一步推导出管线的井中磁梯度公式; (2) 根据磁梯度公式模拟出梯度值随有效磁化倾角及孔位的变化情况; (3) 通过对模型正演数据的统计分析确定了 3 种关系式: 极值比与有效磁化倾角之间的关系式、管线的水平位置和磁梯度极值间的孔深距离与有效磁化倾角的关系式、磁梯度极值的绝对值较大者和管线埋深之间的距离与极值距间的比值和有效磁化倾角的关系式. 这 3 种关系式组成了管线埋深及水平位置的估算公式. 最后, 通过实例来估算了管线的埋深和平面位置, 根据估算结果进行的正演结果表明了该方法的可行性.

**关键词:** 井中; 磁梯度; 深埋管线; 管线探测; 极值距; 物探.

**中图分类号:** P631.2

**文章编号:** 1000-2383(2015)12-2110-09

**收稿日期:** 2015-04-11

## Borehole Magnetic Gradient Method Based on Detection of Deep Underground Pipeline

Chen Jun<sup>1,2</sup>, Chen Zeyuan<sup>2</sup>, Yang Chuan<sup>2</sup>

1. Institute of Geophysics &amp; Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Shanghai Tongna Construction Quality Test Co., Ltd., Shanghai 200331, China

**Abstract:** At present, borehole magnetic gradient is one of the commonly used methods for the detection of deeply buried metal pipelines, which is controversial due to its unsystematic theoretic basis and absence of quantitative analysis. In view of these challenges, this paper aims to present our study involving the following three aspects. (1) The relationships of the vertical component, horizontal component between the magnetic fields of surface and boreholes were derived, and the borehole magnetic gradient formula of deep underground pipeline was deduced, starting from the strength of the magnetic field of infinite horizontal cylinder and the transformation of coordinate system. (2) The relationship of the magnetic gradient changes with the inclination of effective magnetization and the position of hole was simulated according to the formula of magnetic gradient. (3) Three kinds of relationship were determined based on the statistical analysis of the forward modeling data, namely, (a) the relationship between maximum ratio of magnetic gradient and the inclination of magnetic gradient, (b) the relationship of the horizontal position of deep underground pipelines, the extreme distance of magnetic gradient and the inclination of magnetic gradient, (c) the relationship of the ratio of distance between the depth of deep underground pipelines, the depth corresponding to the maximum absolute value of magnetic gradient, the extreme distance of magnetic gradient with the inclination of magnetic gradient. These relationships constitute the estimation formula to estimate the depth and horizontal position of deep underground pipelines. Finally, an example of estimating the depth and horizontal position of deep underground pipeline is given. The feasibility of the method is shown by the results of forward modeling based on the estimation results.

**Key words:** borehole; magnetic gradient; deep underground pipeline; detection of underground pipeline; extreme distance; geophysical prospecting.

**作者简介:** 陈军(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事工程物探、检测、监测的应用与研究. E-mail: chjrjh@126.com

**引用格式:** 陈军, 陈泽元, 杨川, 2015. 基于深埋管线探测的井中磁梯度方法. 地球科学——中国地质大学学报, 40(12): 2110-2118.

## 0 引言

在城市建设飞速发展的过程中,有大量的管线铺设在地下.为了确定这些管线的位置和埋深,常常需要采用地球物理的方法进行探测,其原理是利用被测管线与埋设处周边介质的某些物理性质(如磁性、电性、电磁性、介电特性等)存在一定的差异,采用相应的仪器探测出这些差异,经过相应的分析处理后确定出被测管线的位置和埋深.例如采用磁法探测地下管线是以被测管线与周边介质之间存在磁性差异为前提来达到探测目的的.

进入 21 世纪后,随着非开挖工艺铺设地下管线技术的发展,地下管线的埋深也越来越深.常规的管线探测方法已经无法满足深埋管线的探测需要,因此各种先进的探测方法被开发与应用.方根显和邓居智(2004)根据无限长的水平圆柱体磁场理论,采用高精度磁法对杭州某段埋深约为 8 m 的西气东输管线进行探测,通过磁场异常确定了平面位置,同时通过比值圆交会法计算出管线埋深,取得了较好的效果.陈军等(2005)采用地质雷达对江苏丹阳某工地深埋天然气管道进行了探测,得到反射异常深度达 26 m 的雷达反射剖面,效果较明显,同时说明管线埋深越大相应的水平定位误差也越大.王水强等(2005)研究水平金属管线在垂直方向上的磁梯度理论曲线变化的特征,采用磁梯度法准确探测出埋深为 10.5 m 的航油管道位置,并指出深度上的探测精度几乎接近直接法水平,可将误差控制在  $\pm 20$  cm 以内,证明该方法具有良好的应用效果.张汉春和莫国军(2006)研究了管线的一系列电磁场特征,提出了应用管线仪对特深地下管线探测时应采用远端接地直连、低频、合适的功率(保证电流足够大)以抑制或排除干扰异常的影响,并且明确了当探测深度大于 3 m 时应采用  $\Delta H_x$  的 75% 或  $H_x$  的 80% 定深;同时指出对 RD4000 型管线仪而言,理论公式中  $\alpha$  并不是常数,而是不同的埋深有不同的  $\alpha$  值.张汉春(2008)在广东番禺段 LNG 管线的竣工测量中成功采用两种管线仪探测出深达 7 m 的目标管线,并说明埋深宜采用直读法和 70% 法相结合.司永峰(2009)针对小口径非开挖深埋管线提出了基于姿态测量原理的探测方法,推导了磁力三分量及重力加速度三分量姿态定向公式以及曲线构建公式,并采用基于此原理研制的仪器在对穿越河流、道路、建筑物等深埋管线的探测中取得了良好的效果.丁华等(2010)将高密度电法、瞬态瑞雷波法和地震映像法

应用到深埋管线的探测中,并取得了较好的效果.王勇和王永(2011)采用电磁感应法(管线仪)、地质雷达、高密度电法、高精度磁测等非开挖探测敷设的地下管线,取得了一定的效果.沈林勇(2011)研究基于曲线方位角信息和曲线曲率信息的曲线重建方法进行非开挖地下信息管线的三维曲线探测技术,得出了该方法能够实现探测目的并且不受电磁干扰和管线埋深干扰的结论.司永峰和王永(2013)再次改进基于重力场和磁场的地下管道三维姿态测量方法和仪器,并通过试验及实际应用验证了改进后的有效性.

在以上所有方法之中,井中磁梯度法由于其施工相对而言比较经济与高效、且梯度测量相比磁测而言对管线的分辨能力也有大幅度提高,是探测深埋金属管线较好的方法,但是在该方法的研究中存在理论不够完善及缺乏定量分析等问题.针对此问题,本文推导了管线的井中磁梯度公式,并且通过正演模拟,得到估算管线埋深及水平位置的经验公式,最后将估算公式应用于实测数据,取得了较好的应用效果.

## 1 井中磁梯度

### 1.1 管线的磁场

由位场理论可知,均匀磁化且密度均匀的物体,其磁位和引力位之间存在泊松公式关系,即均匀磁化物体的磁位可以表达为(管志宁,2005):

$$U = -\frac{1}{4\pi G\sigma} \mathbf{M} \cdot \nabla V, \quad (1)$$

式中: $G$  为万有引力常数; $\sigma$  为密度差; $\mathbf{M}$  为磁化强度矢量; $V$  为引力位.

在管线探测中,可将管线视为无限长的水平圆柱体.如图 1 所示,设管线的走向与地面直角坐标系的  $Y$  轴平行,管线中心位置为  $(x_0, z_0)$ ,即中心埋深

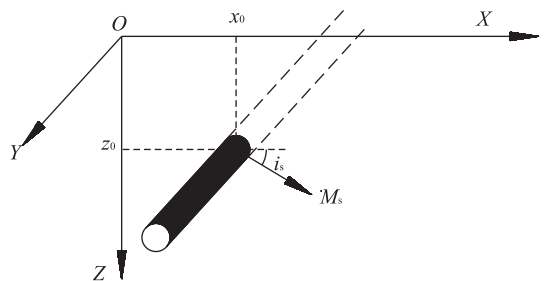


图 1 管线模型示意图

Fig.1 The model of underground pipeline

为  $z_0$ ,  $X$  轴与测线方向平行, 垂直向下为  $Z$  轴, 则由场论可知其在测点  $(x, z)$  处的引力位为:

$$V = -2G\sigma S \ln r, \quad (2)$$

式中:  $S$  为水平圆柱体的横截面积;  $r$  为测点与圆柱体中心位置之间的欧氏距离.

设水平圆柱体的有效磁化强度为  $M_s$  ( $M_x$ ,  $M_z$ ), 有效磁化倾角为  $i_s$  (在 2D 情况下, 定义其范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 由  $X$  轴正向顺时针旋转  $i_s$  逐渐增加), 则由公式(1)和(2)可求得管线的磁场垂直分量  $Z_a$  和水平分量  $H_a$  表达式分别为:

$$Z_a = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \cdot \frac{M_z [(z - z_0)^2 - (x - x_0)^2] + 2M_x (x - x_0) (z - z_0)}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^2}, \quad (3)$$

$$H_a = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \cdot \frac{M_x [(x - x_0)^2 - (z - z_0)^2] + 2M_z (x - x_0) (z - z_0)}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^2}, \quad (4)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率 ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ). 由于  $M_x = M_s \cos i_s$ ,  $M_z = M_s \sin i_s$  与单位长度的有效磁矩  $m_s = SM_s$ , 则公式(3)和(4)可以变换为:

$$Z_a = \frac{\mu_0 m_s}{2\pi} \cdot \frac{[(z - z_0)^2 - (x - x_0)^2] \sin i_s + 2(x - x_0) (z - z_0) \cos i_s}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^2}, \quad (5)$$

$$H_a = \frac{\mu_0 m_s}{2\pi} \cdot \frac{[(x - x_0)^2 - (z - z_0)^2] \cos i_s + 2(x - x_0) (z - z_0) \sin i_s}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^2}. \quad (6)$$

## 1.2 管线的井中磁梯度

为了便于分析, 将直角坐标系的原点选取为水平圆柱体的几何中心, 则公式(3)和(4)可以简化为

$$Z_a = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \frac{(z^2 - x^2) M_z + 2xz M_x}{(x^2 + z^2)^2}, \quad (7)$$

$$H_a = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \frac{(x^2 - z^2) M_x + 2xz M_z}{(x^2 + z^2)^2}. \quad (8)$$

在地面探测时测线方向为水平方向, 而在井中探测时测线方向是垂直方向, 因此地面探测的坐标系与井中探测的坐标系存在  $90^\circ$  的旋转关系, 即将地面探测的坐标系沿  $Y$  轴顺时针旋转  $90^\circ$  便是井中探测的坐标系. 旋转之后与之前的磁化强度矢量和磁场分量存在如下关系:

$$M_{xH} = M_s \sin i_s = M_z, \quad (9)$$

$$M_{zH} = -M_s \cos i_s = -M_x, \quad (10)$$

$$x_H = z, \quad (11)$$

$$z_H = -x. \quad (12)$$

将公式(9)~(12)代入公式(7)和(8), 即可得到井中探测坐标系下的磁场垂直分量  $Z_H$  与水平分量  $H_H$ :

$$Z_H = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \frac{(z_H^2 - x_H^2) M_{zH} + 2x_H z_H M_{xH}}{(x_H^2 + z_H^2)^2} = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \frac{(x^2 - z^2) M_x + 2xz M_z}{(x^2 + z^2)^2}, \quad (13)$$

$$H_H = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \frac{(x_H^2 - z_H^2) M_{xH} + 2x_H z_H M_{zH}}{(x_H^2 + z_H^2)^2} = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \frac{(z^2 - x^2) M_z + 2xz M_x}{(x^2 + z^2)^2}, \quad (14)$$

公式(13)和(14)即为管线的地面磁测和井中磁测的计算表达式. 潘贤炽和刘行义(1982)亦通过复平面推导了地面磁测和井中磁测的关系式.

将公式(13)和(14)坐标原点移到公式(5)和(6)的坐标原点, 即:

$$Z_H = \frac{\mu_0 m_s}{2\pi} \cdot \frac{[(x - x_0)^2 - (z - z_0)^2] \cos i_s + 2(x - x_0) (z - z_0) \sin i_s}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^2}, \quad (15)$$

$$H_H = \frac{\mu_0 m_s}{2\pi} \cdot \frac{[(z - z_0)^2 - (x - x_0)^2] \sin i_s + 2(x - x_0) (z - z_0) \cos i_s}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^2}, \quad (16)$$

公式(15)和(16)即为管线的井中磁测的磁场垂直分量和水平分量的计算表达式.

采用井中磁梯度探测深埋管线考虑的是磁场垂直分量, 相应的磁梯度为垂直分量沿垂直方向的导数, 即:

$$Z_T = \frac{\partial Z_H}{\partial z} = \frac{\mu_0 m_s}{\pi} \cdot \frac{(x - x_0) [(x - x_0)^2 - 3(z - z_0)^2] \sin i_s}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^3} + \frac{\mu_0 m_s}{\pi} \frac{(z - z_0) [(z - z_0)^2 - 3(x - x_0)^2] \cos i_s}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^3}. \quad (17)$$

## 2 模拟分析

根据公式(17), 可以模拟得到在同一钻孔中井中磁梯度随磁化倾角变化的曲线, 相关参数(模拟的

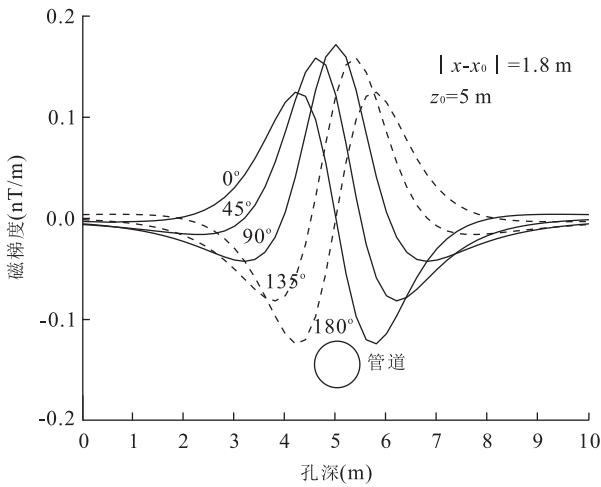


图 2 管线井中磁梯度随磁化倾角变化的曲线  
Fig.2 Borehole magnetic gradient curve of pipeline changing with magnetic inclination

近极大值和极小值的绝对值较大的一方对应的深度; (3)磁梯度的极值大小与  $i_s$  有关, 即  $i_s$  越大、极值越大; (4)磁梯度极大值和极小值之间的距离(令其为  $E_D$ )与钻孔和管线的水平距离  $|L|$  有一定的关联,  $|L|$  越大, 则  $E_D$  越大。

### 3 管线参数估算方法

#### 3.1 磁化倾角的估算

由于磁梯度的极值大小与  $i_s$  有关, 此处考虑通过  $|Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$  与  $i_s$  之间的关系来估算  $i_s$ , 利用公式 (17) 进行模拟, 表 1 中列出不同  $i_s$  时的  $|Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$  值, 图 4 为由表 1 数据绘制的关系图。

由图 4 可以看出,  $|Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$  与  $i_s$  之间存在分段关系. 对模拟数据进行分段拟合, 并令  $N = |Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$ , 可得到  $N$  与  $i_s$  之间的关系式如下:

$$N = \begin{cases} 5.312 \times 10^{-5} i_s^2 - 0.013 i_s + 0.994, & i_s \in [0^\circ, 90^\circ] \\ 5.312 \times 10^{-5} i_s^2 - 0.006 i_s + 0.375, & i_s \in (90^\circ, 180^\circ] \\ 5.312 \times 10^{-5} i_s^2 - 0.032 13 i_s + 5.056, & i_s \in (180^\circ, 270^\circ] \\ 5.312 \times 10^{-5} i_s^2 - 0.025 24 i_s + 3.197, & i_s \in (270^\circ, 360^\circ] \end{cases} \quad (18)$$

此式即为  $i_s$  的估算公式。

#### 3.2 水平位置的估算

由图 2 可知,  $E_D$  与  $|L|$  之间存在一定的关联. 根据公式 (17), 讨论如下:

(1) 当  $i_s = 0^\circ$  时, 可以求得在  $z - z_0 = \pm \sqrt{3 - 2\sqrt{2}} |L|$  时  $Z_T$  为极大值和极小值, 则  $E_D = 2\sqrt{-2\sqrt{2}} |L| \approx 0.83 |L|$ ;

(2) 当  $i_s = 90^\circ$  时, 可以求得在  $z - z_0 = \pm |L|$  或  $z - z_0 = 0$  时  $Z_T$  为极大值和极小值, 则  $E_D = |L|$ ;

(3) 当  $i_s = 180^\circ$  时, 情况和  $i_s = 0^\circ$  时的一样; 当  $i_s = 270^\circ$  时, 情况和  $i_s = 90^\circ$  时的一样。

为了更确切了解  $E_D$  与  $|L|$  之间的关系, 根据公式 (17) 进行了数值模拟, 计算结果见表 2 和图 5。

对图 5 所示的模拟结果进行曲线拟合, 令  $K = E_D/|L|$ , 可以得到  $K$  与  $\sin i_s$  之间的关系如下:

$$K = 0.198 \sin^2 i_s + 0.781. \quad (19)$$

根据公式 (18) 和公式 (19) 以及结合钻孔位置就可以估算出管线的平面位置。

#### 3.3 管线的埋深估算

由图 1 已经看出: 管线的埋深 ( $z_0$ ) 靠近磁梯度

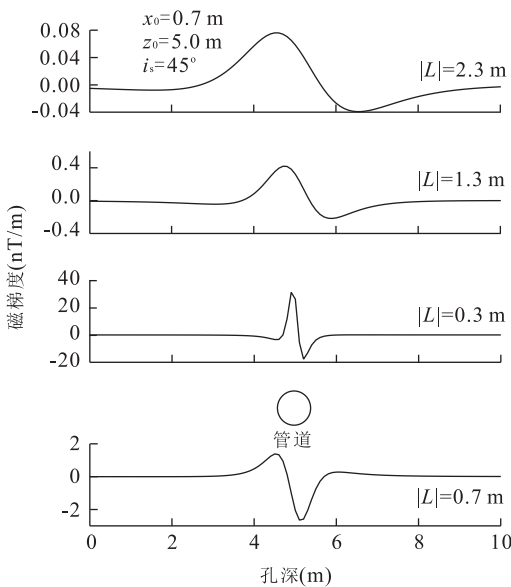


图 3 管线井中磁梯度随水平距离变化的曲线  
Fig.3 Borehole magnetic gradient curve of pipeline changing with horizontal distance

点距为 0.1 m) 和结果见图 2, 也可以模拟得到井中磁梯度随孔位变化的曲线, 相关参数和结果见图 3. 在模拟中, 假定钻孔是垂直的, 即在同一钻孔中,  $x$  是不变的. 令  $L = x - x_0$ , 则  $|L|$  为钻孔到管线的水平距离。

综合分析图 2 与图 3, 可以看出: (1)管线的埋深位于磁梯度的极大值 ( $Z_{T, \max}$ ) 和极小值 ( $Z_{T, \min}$ ) 对应的深度之间; (2) 当  $i_s = 0^\circ$  或  $180^\circ$  时, 管线埋深在极大值和极小值对应深度位置的正中间; 当  $i_s = 90^\circ$  时, 管线埋深对应着极大值的深度; 管线埋深靠

表 1  $|Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$  与  $i_s$  之间的关系

Table 1 Relationship between  $|Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$  and  $i_s$

$i_s$	$ L =0.7\text{ m}$	$ L =0.8\text{ m}$	$ L =1.3\text{ m}$	$ L =1.8\text{ m}$	$ L =2.3\text{ m}$
0°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15°	0.800	0.810	0.805	0.805	0.804
30°	0.647	0.646	0.647	0.645	0.641
45°	0.522	0.516	0.518	0.518	0.520
60°	0.406	0.410	0.411	0.411	0.410
75°	0.330	0.329	0.321	0.322	0.323
90°	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
105°	0.330	0.329	0.321	0.322	0.323
120°	0.406	0.410	0.411	0.411	0.410
135°	0.522	0.516	0.518	0.518	0.520
150°	0.647	0.646	0.647	0.645	0.641
165°	0.800	0.810	0.805	0.805	0.804
180°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
195°	0.800	0.810	0.805	0.805	0.804
210°	0.647	0.646	0.647	0.645	0.641
225°	0.522	0.516	0.518	0.518	0.520
240°	0.406	0.410	0.411	0.411	0.410
255°	0.330	0.329	0.321	0.322	0.323
270°	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
285°	0.330	0.329	0.321	0.322	0.323
300°	0.406	0.410	0.411	0.411	0.410
315°	0.522	0.516	0.518	0.518	0.520
330°	0.647	0.646	0.647	0.645	0.641
345°	0.800	0.810	0.805	0.805	0.804
360°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

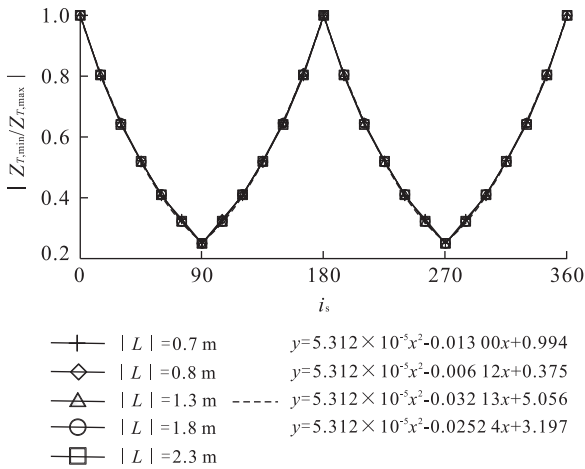


图 4  $|Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$  随  $i_s$  的变化

Fig.4  $|Z_{T, \min}/Z_{T, \max}|$  changing with  $i_s$

$2|z_m - z_0|/E_D$ , 则可以得到如下关系式:

$$D = \begin{cases} -0.011i_s + 0.977, & i_s \in [0^\circ, 90^\circ] \\ 0.011i_s - 0.998, & i_s \in (90^\circ, 180^\circ] \\ -0.011i_s + 2.951, & i_s \in (180^\circ, 270^\circ] \\ 0.011i_s - 2.972, & i_s \in (270^\circ, 360^\circ] \end{cases} \quad (20)$$

通过公式(18)和(20)即可以估算出管线的埋深.

### 3.4 估算的误差分析

为了了解估算公式的误差情况, 设置模型埋深为 5 m, 距第一孔 0.7 m. 采用公式(18)~(20)来估算, 估算结果见表 4.

由表 4 可以算出: (1) 估算的埋深中误差在 0.016~0.022 m 之间, 误差最大值为 0.070 m; (2) 估算的管线距孔位距离中误差在 0.029~0.072 m 之间, 误差最大值为 0.261 m; (3) 估算的埋深中误差平均值为 0.019 m, 是《城市地下管线探测技术规程》(CJJ61-2003)规定的管线埋深探测精度(埋深限差为  $0.15Z_0$ , 即是 0.75 m)的 2.5%; 水平位置中误差平均值为 0.041 m, 是《城市地下管线探测技术规程》(CJJ61-2003)规定的管线水平位置探测精度(水平位置限差为  $0.1Z_0$ , 即是 0.5 m)的 8.2%. 从这组

极值绝对值相对较大的位置, 处于此位置的上、下  $E_D/2$  范围之内. 设  $z_m$  为磁梯度极值的绝对值较大值所对应的深度, 通过公式(17)模拟得到  $2|z_m - z_0|/E_D$  与  $i_s$  之间的统计关系, 计算结果见表 3 和图 6.

由图 6 可以看出,  $2|z_m - z_0|/E_D$  与  $i_s$  之间存在分段关系. 对模拟数据进行分段拟合, 并令  $D =$

表 2  $E_D$  随  $i_s$  及  $|L|$  的变化  
Table 2  $E_D$  changing with  $i_s$  and  $|L|$

$i_s$	$ L =0.7$ m		$ L =0.8$ m		$ L =1.3$ m		$ L =1.8$ m		$ L =2.3$ m	
	$E_D$ (m)	$E_D/ L $	$E_D$ (m)	$E_D/ L $	$E_D$ (m)	$E_D/ L $	$E_D$ (m)	$E_D/ L $	$E_D$ (m)	$E_D/ L $
0°	0.6	0.86	0.6	0.75	1.0	0.77	1.4	0.78	2.0	0.87
15°	0.5	0.71	0.7	0.88	1.0	0.77	1.5	0.83	1.9	0.83
30°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.1	0.85	1.5	0.83	2.1	0.91
45°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.0	0.87
60°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.1	0.91
75°	0.6	0.86	0.8	1.00	1.2	0.92	1.7	0.94	2.2	0.96
90°	0.7	1.00	0.8	1.00	1.3	1.00	1.8	1.00	2.3	1.00
105°	0.6	0.86	0.8	1.00	1.2	0.92	1.7	0.94	2.2	0.96
120°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.1	0.91
135°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.0	0.87
150°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.1	0.85	1.5	0.83	2.1	0.91
165°	0.5	0.71	0.7	0.88	1.0	0.77	1.5	0.83	1.9	0.83
180°	0.6	0.86	0.6	0.75	1.0	0.77	1.4	0.78	2.0	0.87
195°	0.5	0.71	0.7	0.88	1.0	0.77	1.5	0.83	1.9	0.83
210°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.1	0.85	1.5	0.83	2.1	0.91
225°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.0	0.87
240°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.1	0.91
255°	0.6	0.86	0.8	1.00	1.2	0.92	1.7	0.94	2.2	0.96
270°	0.7	1.00	0.8	1.00	1.3	1.00	1.8	1.00	2.3	1.00
285°	0.6	0.86	0.8	1.00	1.2	0.92	1.7	0.94	2.2	0.96
300°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.1	0.91
315°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.2	0.92	1.6	0.89	2.0	0.87
330°	0.6	0.86	0.7	0.88	1.1	0.85	1.5	0.83	2.1	0.91
345°	0.5	0.71	0.7	0.88	1.0	0.77	1.5	0.83	1.9	0.83
360°	0.6	0.86	0.6	0.75	1.0	0.77	1.4	0.78	2.0	0.87

表 3  $2|z_m - z_0|/E_D$  与  $i_s$  之间的关系

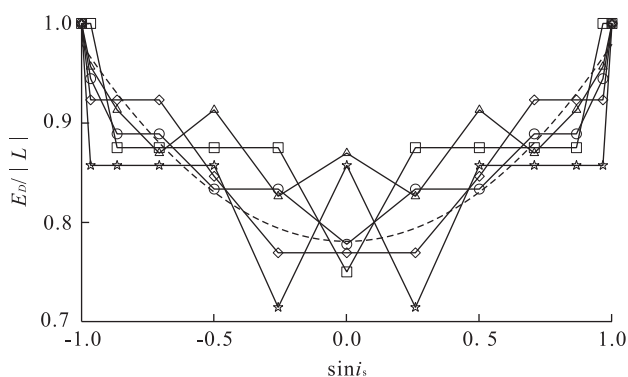
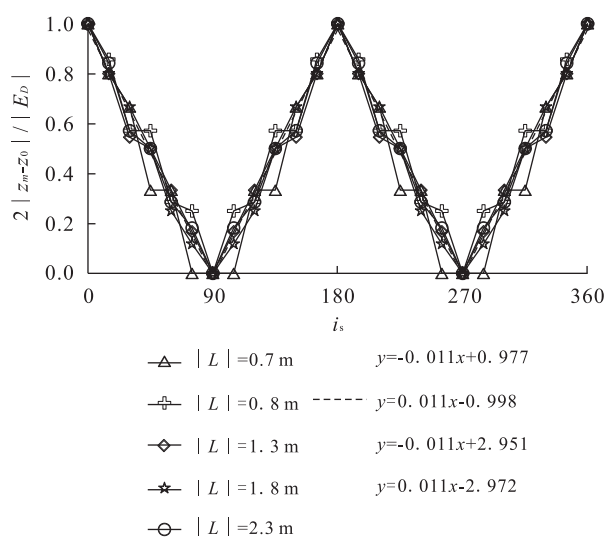
Table 3 Relationship between  $2|z_m - z_0|/E_D$  and  $i_s$

$i_s$	$ L =0.7$ m	$ L =0.8$ m	$ L =1.3$ m	$ L =1.8$ m	$ L =2.3$ m
0°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15°	0.800	0.857	0.800	0.800	0.842
30°	0.667	0.571	0.545	0.667	0.571
45°	0.333	0.571	0.500	0.500	0.500
60°	0.333	0.286	0.333	0.250	0.286
75°	0.000	0.250	0.167	0.118	0.182
90°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
105°	0.000	0.250	0.167	0.118	0.182
120°	0.333	0.286	0.333	0.250	0.286
135°	0.333	0.571	0.500	0.500	0.500
150°	0.667	0.571	0.545	0.667	0.571
165°	0.800	0.857	0.800	0.800	0.842
180°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
195°	0.800	0.857	0.800	0.800	0.842
210°	0.667	0.571	0.545	0.667	0.571
225°	0.333	0.571	0.500	0.500	0.500
240°	0.333	0.286	0.333	0.250	0.286
255°	0.000	0.250	0.167	0.118	0.182
270°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
285°	0.000	0.250	0.167	0.118	0.182
300°	0.333	0.286	0.333	0.250	0.286
315°	0.333	0.571	0.500	0.500	0.500
330°	0.667	0.571	0.545	0.667	0.571
345°	0.800	0.857	0.800	0.800	0.842
360°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 4 估算结果及误差平均值

Table 4 Estimation results and its average error

$i_s$	L =0.7 m		L =0.8 m		L =1.3 m		L =1.8 m		L =2.3 m	
	$Z_0$ (m)	L	$Z_0$ (m)	L	$Z_0$ (m)	L	$Z_0$ (m)	L	$Z_0$ (m)	L
0°	4.996	0.768	4.996	0.768	4.990	1.280	5.014	1.793	4.980	2.561
15°	4.969	0.748	4.984	0.881	5.003	1.258	5.005	1.887	4.964	2.390
30°	5.007	0.721	5.022	0.840	5.053	1.322	4.979	1.801	5.008	2.284
45°	5.053	0.684	4.970	0.797	4.991	1.365	4.987	1.820	4.983	2.273
60°	5.005	0.646	5.014	0.755	4.996	1.294	5.061	1.726	5.039	2.263
75°	4.946	0.624	4.970	0.832	4.996	1.244	5.038	1.763	4.980	2.282
90°	4.990	0.715	4.989	0.817	4.982	1.328	4.976	1.839	4.969	2.350
105°	5.047	0.621	5.039	0.828	5.018	1.239	4.982	1.755	5.045	2.272
120°	4.990	0.641	4.993	0.749	5.016	1.286	4.954	1.715	4.981	2.248
135°	5.042	0.678	5.036	0.791	5.020	1.354	5.027	1.806	5.036	2.255
150°	4.988	0.716	4.983	0.833	4.956	1.313	5.032	1.790	5.006	2.387
165°	4.997	0.626	5.021	0.878	5.004	1.252	5.006	1.875	5.049	2.379
180°	4.993	0.768	4.993	0.768	4.988	1.280	4.983	1.793	4.976	2.561
195°	5.001	0.628	4.982	0.881	5.000	1.258	5.000	1.886	4.960	2.389
210°	5.009	0.721	5.020	0.840	5.050	1.323	4.976	1.802	5.003	2.283
225°	4.955	0.684	4.968	0.797	4.987	1.365	4.983	1.820	4.977	2.274
240°	5.006	0.646	5.012	0.755	4.993	1.295	5.057	1.727	5.035	2.265
255°	4.948	0.624	4.969	0.832	4.993	1.245	5.034	1.764	4.975	2.283
270°	4.990	0.715	4.988	0.817	4.981	1.328	4.973	1.839	4.966	2.349
285°	5.057	0.614	5.026	0.832	4.998	1.244	4.954	1.763	5.009	2.282
300°	4.998	0.645	4.983	0.755	4.998	1.294	4.930	1.726	4.949	2.264
315°	5.050	0.683	5.026	0.796	5.003	1.364	5.005	1.819	5.007	2.274
330°	4.996	0.721	4.974	0.839	4.941	1.322	5.013	1.801	4.982	2.282
345°	5.003	0.628	5.013	0.881	4.992	1.257	4.988	1.886	5.025	2.389
360°	5.002	0.768	5.002	0.768	5.004	1.280	5.005	1.793	5.008	2.561
中误差	0.021	0.038	0.015	0.031	0.016	0.029	0.022	0.035	0.02	0.072

图 5  $E_D/|L|$  与  $\sin i_s$  之间的关系Fig.5 Relationship between  $E_D/|L|$  and  $\sin i_s$ 图 6  $2|z_m - z_0|/E_D$  随  $i_s$  的变化Fig.6  $2|z_m - z_0|/E_D$  changing with  $i_s$ 

数据来看,公式(18)~(20)的估算完全满足管线探测精度要求,并且均优于管线探测精度要求。

## 4 应用实例

某工程项目将进行桩基施工,为了确定横跨道

路的直径为 500 mm 铁质燃气管线的位置和埋深,采取井中磁梯度的方法探测该燃气管线.钻孔间距约为 1.3 m,3 个钻孔的位置见图 7(编号为 K1、K2 与 K3).

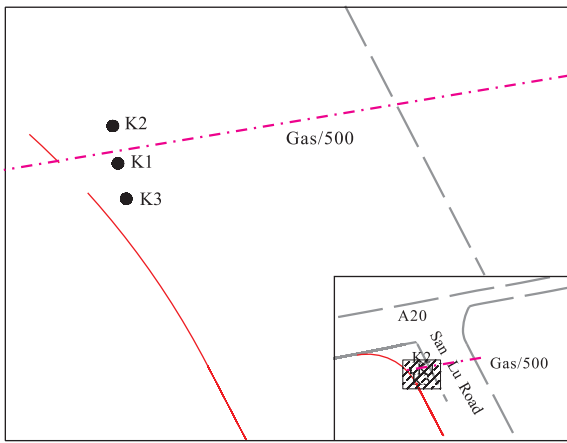


图 7 钻孔位置(编号为 K1、K2 与 K3)

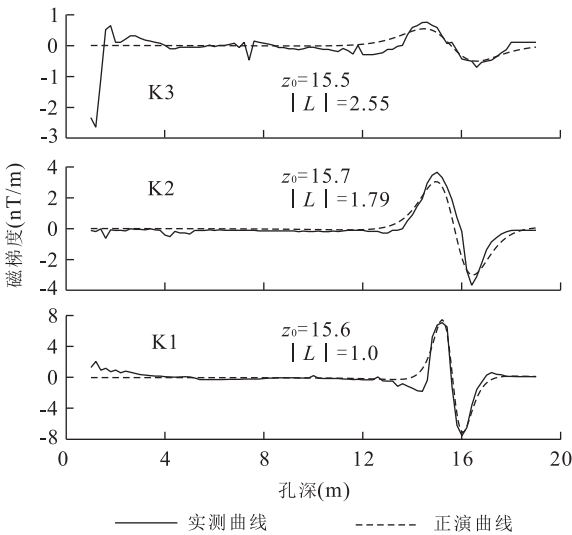
Fig.7 The borehole locations (numbers for K1, K2 and K3)  
点划线表示推断的管线水平位置

图 8 燃气管线的实测和正演结果

Fig.8 The measured and modeling results of the gas pipeline

现场探测时,磁梯度测量步长为 0.2 m,采用磁梯度探头先自上而下,后自下而上的方式测量,当上下两次测量结果相差较大时则重新测量该孔数据,最终数据为上、下两次测量的平均值,成图时为了坐标轴数据清晰,将数据归在  $\pm 10$  nT/m 范围内,结果见图 8。从图 8 可以看出,除浅部存在干扰外其余数据基本正常。

对实测结果按照公式(18)~(20)进行分析,确定由 K1、K2 与 K3 处实测数据的估计埋深分别为 15.6 m、15.7 m 与 15.5 m,确定  $|L|$  分别为 1.00 m、1.79 m 与 2.55 m。将所得参数数据代入公式(17)之中进行正演,得到的模拟结果与实测情况的标准差分别为 0.70、0.38、0.18,这说明模拟结果与实测情

况基本一致。确定的  $|L|$  值与已知的孔间距之间存在一定的差距,因此根据孔间距及实测与分析所得的孔间距之间的差值,并考虑管线尺寸因素的影响将实测值按照孔间距分配调整,确定由 K1、K2 与 K3 所得的  $|L|$  分别为 0.4 m、0.9 m 与 1.7 m。最终确定该燃气管线的中心埋深为 15.6 m,位于 K1 和 K2 之间,与 K1 的距离为 0.4 m(推断的管线水平位置如图 6 之中的点划线)。这个结果的埋深中误差为 0.06 m,是管线埋深探测精度要求的 0.26%;不考虑管线尺寸因素影响的水平位置中误差为 0.559 m,是管线水平位置探测精度要求的 35.8%。如果将管线看成无数条线的集合,则这个集合的范围为管线管径范围,因此简单考虑管线尺寸因素对  $E_D$  的影响为管线管径大小范围,则水平位置中误差为 0.136 m,为管线水平位置探测精度要求的 8.7%,这个比例与模型模拟所得的比例相近。

## 5 总结

本文依据推导出的管线井中磁力梯度公式,通过正演模拟与统计分析得到由磁力梯度数据推断管线埋深及水平位置的估算公式,包括 3 个方面:极值比与有效磁化倾角之间的关系、管线的水平位置和磁梯度极值间的孔深距离与有效磁化倾角的关系、磁梯度极值的绝对值较大者和管线埋深之间的距离和极值距间的比值与有效磁化倾角的关系。实例正演的结果充分说明了拟合得到的 3 种关系是有效的,所得管线埋深的误差很小,为 0.06 m;而水平位置的估计误差较大,达到 0.559 m,简单考虑管线尺寸因素影响后的误差则为 0.136 m。因此,依据本文给出的 3 种关系可以确定管线的埋深和水平位置。但是确定管线水平位置的误差较大,简单地考虑了管线的尺寸因素之后误差减小很多,这说明通过本文方法确定管线的水平位置还与管线的尺寸有关,究竟是何种关系尚需进一步地研究。

## References

- Chen, J., Zhao, Y. H., Wan, M. H., 2005. The Application of Ground-Penetrating-Radar in Prospecting Underground Pipeline. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2 (4): 260-263 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2005.04.003
- Ding, H., Zhu, G. L., Wang, D. P., 2010. Research on Detecting Method of Deep Buried Pipeline. *Chinese Journal of*



- Engineering Geophysics*, 7(3): 390—393 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2010.03.025
- Fang, G.X., Deng, J.Z., 2004. Detection of Deep Pipeline. In: The 20<sup>th</sup> Annual of the Chinese Geophysical Society, Xi'an, 181 (in Chinese).
- Guan, Z.N., 2005. Magnetic Field and Magnetic Exploration. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Pan, X.C., Liu, X.Y., 1982. The Relationship between Surface and Borehole Magnetic. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 6(5): 265—269 (in Chinese).
- Shen, L.Y., 2011. Research on 3D Detection Techniques Underground Information Pipeline (Dissertation). Shanghai University, Shanghai (in Chinese with English abstract).
- Si, Y.F., 2009. Study on Technology of Detecting Deep Underground Pipelines with Small Diameter Based on the Attitude Measurement. *Shanghai Geology*, (4): 21—24, 28 (in Chinese with English abstract).
- Si, Y.F., Wang, Y., 2013. 3D Detection of Underground Pipelines Using Magnetic and Gravity Field Measurements. *Shanghai Land & Resources*, 34(1): 76—80 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.2095-1329.2013.01.019
- Wang, S.Q., Huang, Y.J., Li, F.S., et al., 2005. Research of Magnetic Gradient in Detecting Trenchless Metal Pipe. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2(5): 353—357 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2005.05.007
- Wang, Y., Wang, Y., 2011. Application of Integrated Geophysical Method in Detection of Underground Pipeline Laid by Trenchless Technology. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (4): 58—61 (in Chinese).
- Zhang, H.C., 2008. The Verification of Pipeline Detection Using Horizontal Directional Drilling (HDD) Technology in Panyu, Guangzhou. *Journal of Geotechnical Investigation and Surveying*, (8): 65—68 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.C., Mo, G.J., 2006. Study on Electromagnetic Field Feature and Probing Effect about very Deep Buried Pipeline. *Progress in Geophysics*, 21(4): 1314—1322 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2006.04.042

### 附中文参考文献

- 陈军, 赵永辉, 万明浩, 2005. 地质雷达在地下管线探测中的应用. *工程地球物理学报*, 2(4): 260—263.
- 丁华, 朱谷兰, 汪大鹏, 2010. 深埋管线探测方法技术分析探讨. *工程地球物理学报*, 7(3): 390—393.
- 方根显, 邓居智, 2004. 特深管线的探测. 见: 中国地球物理学会第二十届年会论文集, 西安, 181.
- 管志宁, 2005. 地磁场与磁力勘探. 北京: 地质出版社.
- 潘贤炽, 刘行义, 1982. 井中磁测与地面磁测的关系. *物探与化探*, 6(5): 265—269.
- 沈林勇, 2011. 非开挖地下信息管线的三维曲线探测新技术研究(博士学位论文). 上海: 上海大学.
- 司永峰, 2009. 基于姿态测量的深埋小口径地下管道探测技术研究. *上海地质*, (4): 21—24, 28.
- 司永峰, 王永, 2013. 基于重力场和磁场测量的地下管道三维探测研究. *上海国土资源*, 34(1): 76—80.
- 王水强, 黄永进, 李凤生, 等, 2005. 磁梯度法探测非开挖金属管线的研究. *工程地球物理学报*, 2(5): 353—357.
- 王勇, 王永, 2011. 综合物探方法在非开挖工艺敷设地下管线探测中的应用. *测绘通报*, (4): 58—61.
- 张汉春, 2008. 广州番禺某段定向钻 LNG 管线探测的验证. *工程勘察*, (8): 65—68.
- 张汉春, 莫国军, 2006. 特深地下管线的电磁场特征分析及探测研究. *地球物理学进展*, 21(4): 1314—1322.