

# 基于磁梯度法的深埋管线探测技术研究

詹斌 朱能发 孙士辉

(天津市勘察院, 天津 300191)

**【摘要】** 针对一般管线探测仪等不能解决的深埋管线探测问题, 建立了水平圆柱体磁异常及磁梯度异常正演模型, 通过对水平金属管道的磁异常垂向剖面图和磁梯度异常垂向剖面图对比, 给出确定管线埋深的判别标志—“s”的拐点, 且在实际应用中取得了理想效果。

**【关键词】** 磁梯度; 深埋管线; 探测

**【中图分类号】** P 631. 325

**【文献标识码】** A

doi:10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2013. 01. 012

## Deeply Buried Pipeline Detection Technology Based on Magnetic Gradient Method

Zhan Bin Zhu Nengfa Sun Shihui

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300191, China)

**【Abstract】** General pipeline detectors can not solve deeply buried pipeline detection problem. A horizontal cylinder of magnetic anomalies and the magnetic gradient anomalies forward model are established. Through horizontal metal pipes magnetic anomaly vertical cross-sectional view of the magnetic and gradient anomalies vertical cross-sectional view of contrast. The "s" inflection point is obtained to determine pipeline depth discriminant flag, and in the practical application of the desired effect.

**【Key words】** magnetic gradient; deeply buried pipeline; detection

### 0 引言

作为地下空间的主载体城市地下管线, 是城市的重要基础设施, 是城市的赖以维持的生命线, 为保证地下管线信息的可靠性、准确性, 国内外技术人员通过城市地下管线探测来定位地下管线。尽管在管线探测方面人们已经有一套成熟的技术方法, 但对于深埋金属管线的探测效果仍不尽人意。随着非开挖施工的管线越来越多, 其敷设的管线距离长、埋深大( $h > 5$  m), 已超出了一般地下管线探测仪器标称的探测深度, 也就给管线探测工作者提出了一个较为棘手的难题—深埋地下管线探测<sup>[1]</sup>。近年来, 国内的管线探测工作者先后采用管线仪、导向仪、地面磁法、地质雷达等工作方法, 对深埋管线进行了探测和研究工作。由于工作区一般处于繁华市区, 场地环境及电磁干扰较大, 上述地面探测方法适用性相对较差<sup>[2]</sup>, 为此笔者深入研究了井中磁梯度法并将其在深埋金属管线探测中做了探讨。

### 1 磁性体的磁场

由磁法勘探的基本理论可知, 地球周围存在着

地磁场, 在地磁场的作用下, 所有磁性体均被磁化产生自己的磁场, 它们叠加在正常地磁场上, 使地磁场正常分布规律发生变化, 这种变化的磁场称为磁异常。本文所要研究深埋金属管线属于强铁磁性物质, 受大地磁场的磁化作用, 在其周围区域分布有较强的磁异常, 因此, 可以通过观测其磁异常的变化, 尤其是垂直分量  $Z_a$  的梯度值的分布来判定异常体的平面位置及埋深<sup>[3]</sup>。

### 2 水平圆柱体磁场的正演模拟

将区域内的水平金属管道等效为一个无限长水平圆柱体(见图 1), 设  $xoy$  面为观测面,  $y$  沿走向方向,  $x$  轴垂直于目标体走向,  $z$  轴垂直向下, 坐标原点选在磁性体中心或其顶面中心在地面的投影点, 规定  $Z_a$  向下为正。无限长水平圆柱体的磁场( $Z_a$  为垂直分量、 $H_a$  为水平分量、 $\Delta T$  为磁场强度)公式<sup>[4]</sup>:

$$Z_a = \frac{2M_s}{(x^2 + R^2)^2} [(R^2 - x^2) \sin i - 2xR \cos i] \quad (1)$$

$$H_a = \frac{-2M_s}{(x^2 + R^2)^2} [(R^2 - x^2) \cos i + 2xR \sin i] \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{2M_s}{(x^2 + R^2)^2} [(R^2 - x^2)(\sin I \sin i - \cos I \cos i \cos A - \cos i \sin I + \cos I \sin i \cos A)] \quad (3)$$

$$\tan i = \frac{\tan I}{\cos A} \quad (4)$$

式中： $R$ 为无限长水平圆柱体的埋深； $i$ 为有效磁倾角； $I$ 为磁倾角（本文取  $45^\circ$ ）； $A$ 为磁方位角； $M_s = J_s \cdot S$ 为截面磁矩； $J_s$ 为有效磁化强度。

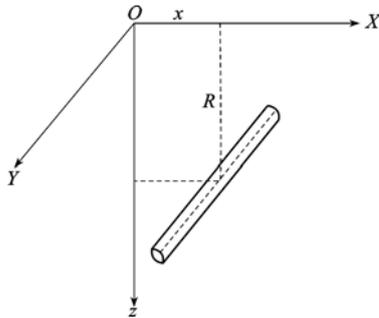


图1 水平金属管道正演模型

那么，由  $Z_a$ 、 $H_a$  公式利用计算机模拟出  $R=3\text{ m}$ 、 $R=10\text{ m}$  且水平圆柱体南北走向 ( $A=90^\circ$ ) 时，在地面观测取得的曲线（见图2、图3）。

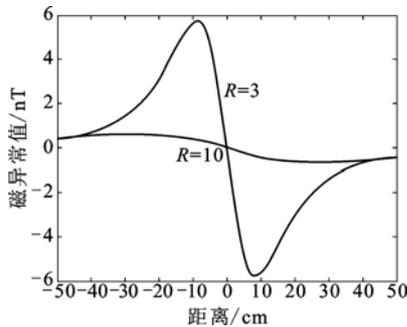


图2 埋深为3 m、10 m的水平金属管道  $H_a$  理论曲线

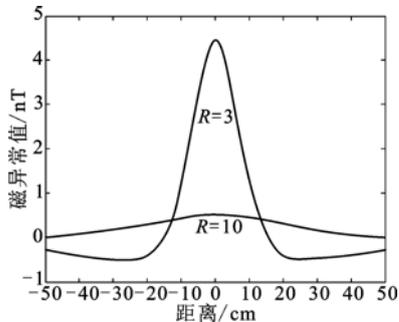


图3 埋深为3 m、10 m的水平金属管道  $Z_a$  理论曲线

经过对比分析可知，当水平圆柱体埋深  $< 3\text{ m}$  时曲线幅值变化大，易于识别， $Z_a$  曲线的峰值点或

$H_a$  曲线的零值点即为水平圆柱体的中心位置，同时亦可利用曲线来估计埋深；当水平圆柱体埋深较大时曲线幅值变得平缓，不易于识别，此时普通管线探测仪很难取得理想效果<sup>[5]</sup>。

于是人们想到将磁力仪置入钻孔内，由上而下观测水平金属管道在垂直方向上的  $Z_a$  曲线变化，将会得到较理想的效果。分别对不同走向的水平金属管道的全空间  $Z_a$  值做了模拟（见图4、图5）。

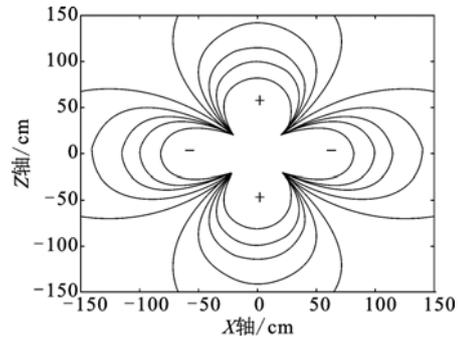


图4 水平金属管道  $Z_a$  空间等值线图 ( $A=90^\circ$ )

由此可见，当水平金属管道南北走向时 ( $A=90^\circ$ )，相当于垂直磁化的水平金属管道异常分布，即：管线东西两侧磁异常场呈轴对称分布，上下异常以过管线轴线的水平面呈现以中部正异常、两侧为负异常的镜像对称分布；当水平金属管道东西走向 ( $A=0^\circ$ ) 时，在南北剖面上的磁异常则表现为：其南北两侧磁异常场呈非对称分布，其空间等值断面图沿轴线发生逆时针偏转，上侧正异常区向南偏移；当水平金属管道任意走向时  $Z_a$  磁场空间分布介于上述两者之间<sup>[6]</sup>。

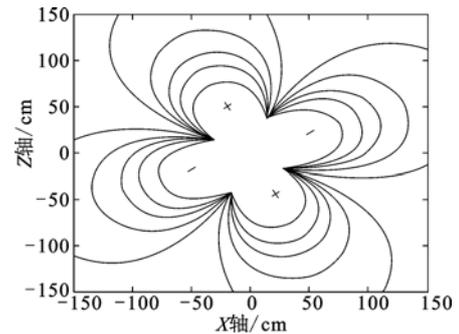


图5 水平圆柱体磁场  $Z_a$  空间等值线图 ( $A=0^\circ$ )

### 3 水平圆柱体磁梯度场的模拟

公式(1)对  $R$  求偏导即得到  $Z_a$  垂直方向上的梯度公式：

$$\frac{\partial Z_a}{\partial R} = \frac{2M_s}{(x^2 + R^2)^2} (2R \sin i - 2x \cos i) - 8M_s (R^2 - x^2) \sin i - \frac{2R x \cos i}{R(x^2 + R^2)^3} \quad (5)$$

下面同样对不同走向的水平金属管道空间梯度值的理论曲线做了模拟(见图 6、图 7)。

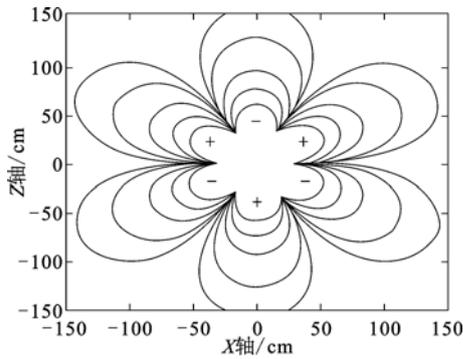


图 6 水平金属管线  $Z_a$  梯度空间等值线图 ( $A=90^\circ$ )

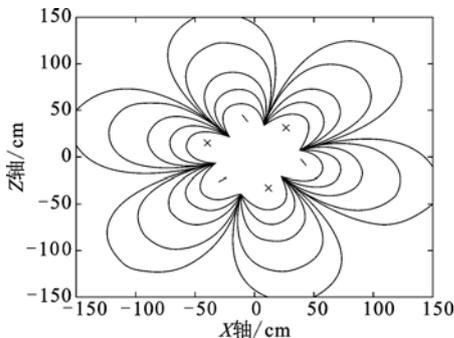


图 7 水平圆柱体磁场  $Z_a$  梯度空间等值线图 ( $A=0^\circ$ )

当水平圆柱体南北走向时( $A=90^\circ$ ),对于磁梯度异常同样有管线东西两侧磁梯度异常场呈轴对称分布,异常以垂直管线轴线的断面呈现正异常、负异常相间分布,同样当水平金属管道东西走向时( $A=0^\circ$ ),其南北两侧磁异常场呈非对称分布,其空间等值断面图沿轴线发生逆时针偏转;当水平金属管道任意走向时,磁梯度异常场空间分布亦介于两者之间。为了便于观察  $Z_a$  求导前后对比,分别模拟了  $A=90^\circ$  即水平金属管道南北走向时  $X=50\text{ cm}$ (图 4、图 6)处垂直剖面的曲线(见图 8、图 9)。

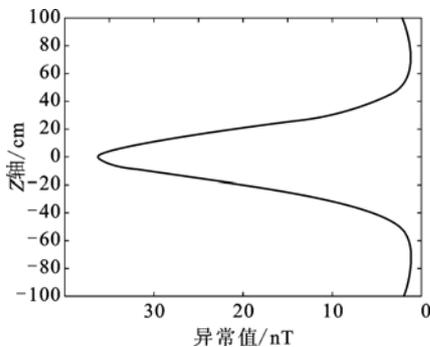


图 8 水平金属管道磁异常剖面图 ( $X=50\text{ cm } A=90^\circ$ )

由两图对比可知,在同一垂向剖面上对  $Z_a$  求导后(梯度值)曲线形态变成“s”,而水平金属管道的

中心及磁异常剖面极值正好对应于“s”的拐点,因此利用磁梯度法探测金属管线时只需找到“s”拐点即可准确确定其埋深。

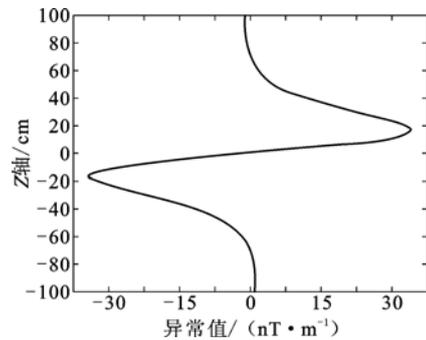


图 9 水平金属管道磁梯度异常剖面图 ( $X=50\text{ cm } A=90^\circ$ )

#### 4 应用实例

天津某电力公司欲在某工区建设高压线塔基,但经调查该施工场地附近有两条(一条 DN300 燃气管线和一条 DN200 输油管线)钢质管线,埋深范围 5~12 m。由于现场施工需要打桩,而这些管线具体位置不详,为了保证施工安全我们布设两条探测断面(见图 10)采用井中磁梯度探测方法对管线具体定位。

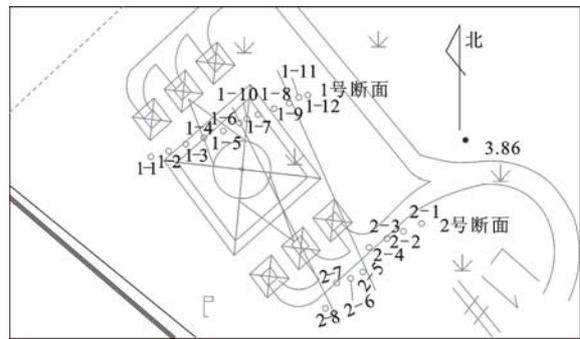


图 10 工区概况和钻孔布置图

本次磁梯度探测采用 CCT-3 型磁梯度仪,通过测量钻孔内由下而上各点垂直磁梯度值的变化,达到识别金属管线位置的目的。

探测区域内按一定的间隔各布置了 12 个和 8 个钻孔,成孔后将 PVC 管下至孔中,随即将磁梯度仪的探头放到 PVC 管内,从孔底开始以 0.1 m 的间隔依次往上测量各点的磁梯度值,为保证测量精度每个钻孔都重复测量。根据磁梯度值分别绘制了 1、2 断面磁梯度实测曲线(见图 11、图 12)。

由图 11 中的磁梯度曲线可以看出, 1-8、1-11、1-12 孔-4.6 m 的深度上存在明显的磁梯度异常(即“s”曲线),且 1-11 孔异常值最大, 1-8 孔异常值大于 1-12 孔,因此可以判断油气管的平面位置应在

1-8孔和1-11孔之间,而处在1-8孔和1-11孔之间的1-9孔由于遇到不明物而停止钻进其曲线恰好存在异常,故判断管道的平面位置在1-9孔处;此外1-6、1-10孔在-4.1m处存在异常,而1-6孔恰好遇到不明障碍物,从而判断管道的平面位置在1-6孔处,1-7孔的异常形态纵向范围较大应为两管道的综合反映。同样由图12中的磁梯度曲线可得到,在-4.6m处平面位置2-4、2-5孔之间存在金属管道;2-7、2-8孔标高-4.1m亦有磁梯度异常,由钻孔布置图可知2-7、2-8孔距离较远且2-8孔异常值远大于2-7孔,故判断管道紧邻2-8孔右侧。

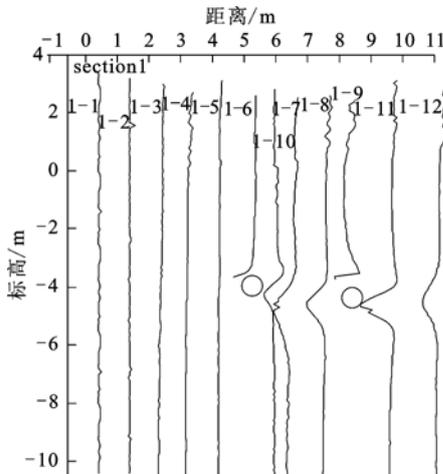


图 11 1号断面磁梯度实测曲线

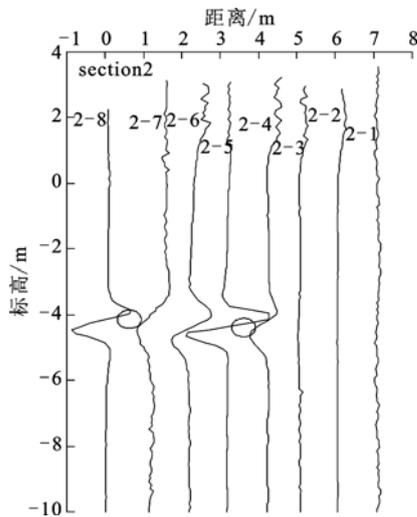


图 12 2号断面磁梯度实测曲线

### 5 结论

本文非常直观地展示了所研究的磁梯度法的空间断面及剖面图,给出了管线埋深的判别标志。通过实例证明了磁梯度法确定的地下金属管线的埋深比常规物探手段都要精确,甚至能根据异常幅值区分同一场地内不同管径的金属管道,这是其他探测手段无法比拟的;同时笔者认为由于金属管道走向不同受磁化所产生的场会导致梯度异常的“s”型形态不规则,譬如“s”型正负幅值不一样。除此之外测量步长的大小也会影响所得到的“s”型形态。建议在观察曲线时不应拘泥于曲线形态,要具体问题具体分析,结合实测数据综合考虑得出正确结论。相信随着研究的不断深入,磁梯度法在深埋管线的探测中会发挥越来越大的作用。

### 参 考 文 献

- [1] 何宜章. 2004年我国非开挖行业发展概况[J]. 非开挖技术, 2005(2-3).
- [2] 张汉春, 黄昀鹏. 长距离深埋管线的探测效果[J]. 物探与化探, 2006(4): 366-369.
- [3] 谭承泽, 郭绍雍. 磁法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [4] 成都地院, 武汉地院, 等. 应用地球物理学—磁法教程[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [5] 雷 宛. 肖宏跃等工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [6] 王水强, 黄永进. 等磁梯度法探测非开挖金属管线的研究[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(5): 353-357.

收稿日期: 2012-09-21