

利用倾斜磁场最大值点确定地下 管线深度的方法原理

傅 平

(中国地质大学·北京)

本文导出了地下管线电流产生的倾斜磁场异常表达公式, 计算出了观测点沿圆弧和水平地表主剖面移动时倾斜磁场的分布规律, 指出了利用倾斜磁场最大值点确定管线深度时在原理上存在的问题和不实用性, 阐明了错误的实质, 给出了两个实例, 证明了本文中所提出的理论。

关键词: 倾斜磁场; 地下管线; 深度确定

在用电磁法探测地下管线的工作中, 借助于几何方法可以确定地下管道的埋设深度。其原理是: 地下管线发出的二次场的磁力线, 近似为一组同心圆。当线圈预先放在与地面成 45° 角的位置时, 只有到达如图1所

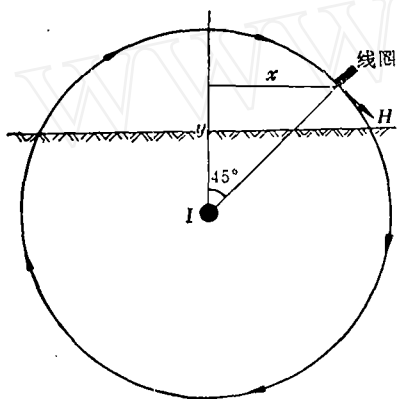


图 1 地下管线深度测量原理图

示的位置, 磁力线才能与线圈平面垂直, 从而在线圈内激发起最大的感应信号。从几何角度看, 此时线圈与管线的水平距离 x (可以测得) 和线圈与管线的垂直距离 y (包含深度参数) 相等, 依此确定管线深度。

然而, 实践证明, 这种定深方法在原理上是有问题的, 所确定的地下管线深度与实际相差较大。本文拟从理论上剖析上述定深

原理, 并给出验证实例。

地下管线电流的倾斜 磁场异常表达式

设水平地面以下有一条良导性水平无限长地下管线, 其中心深度为 h , 利用接触式或感应式激发场源使管线中产生幅值为 I 的电流, 则在空间中形成水平电轴型磁场异常 H 。如图2所示, 取管线中心 O 为坐标原点,

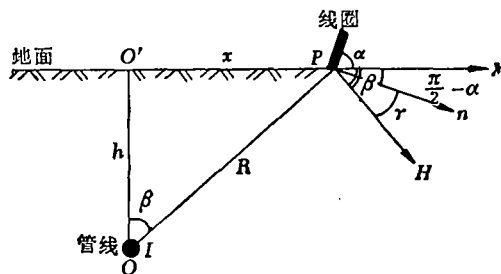


图 2 磁场矢量方向及坐标示意图

X 轴与地面平行, 并与地下管线走向垂直; Y 轴垂直地面并指向上, 在距地下管线为 R 的任意点 $P(x, y)$ 处, 线电流 I 产生的磁场 H 在国际单位制中有以下形式:

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (\text{A/m}) \quad (1)$$

其矢量方向与 R 垂直。空间的磁场矢量

轨迹线是以地下管线为中心的一簇同心圆。

当在空间任意点 $P(x, y)$ 用与地表面夹角为 α 的倾斜线圈观测倾斜磁场分量 H_n 时, 可写出:

$$H_n = H \cos \gamma = \frac{I}{2\pi R} \cos \left(\beta - \frac{\pi}{2} + \alpha \right) \\ = \frac{I}{2\pi R} (\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta) \quad (2)$$

当线圈向右倾斜 45° 时, 则以 $\alpha = 45^\circ$ 代入上式, 得向右倾斜的磁场分量为:

$$H_r = \frac{I}{2\sqrt{2}\pi R} (\sin \beta + \cos \beta) \quad (3)$$

考虑到有坐标关系:

$$\sin \beta = \frac{x}{R} \quad (4)$$

$$\cos \beta = \frac{y}{R} \quad (5)$$

则式 (3) 还可写成直角坐标形式:

$$H_r = \frac{I}{2\sqrt{2}\pi R} \cdot \frac{x+y}{x^2+y^2} \quad (6)$$

当线圈向左倾斜 45° 时, 则以 $\alpha = 135^\circ$ 代入式 (2), 得向左倾斜的磁场分量有形式:

$$H_l = \frac{I}{2\sqrt{2}\pi R} (\sin \beta - \cos \beta) \quad (7)$$

或写成:

$$H_l = \frac{I}{2\sqrt{2}\pi R} \cdot \frac{x-y}{x^2+y^2} \quad (8)$$

如果观测点位于地表, 则取以上各式中的 $y = h$ 。若取式 (2) 中的 $\alpha = 0$ 和 $\frac{\pi}{2}$, 则得 $P(x, y)$ 点处的垂直磁场分量 (H_y) 和水平磁场分量 (H_x) 为:

$$H_y = \frac{Ix}{2\pi(x^2+y^2)} \quad (9)$$

$$H_x = \frac{Iy}{2\pi(x^2+y^2)} \quad (10)$$

存在的问题

1. 沿圆弧观测倾斜磁场最大值点确定管线深度

首先剖析测点沿圆弧移动的情况。分析式 (3) 可见, 如果观测点 P 位于以 O 点为中心、以某个定值 R 为半径的圆弧上, 则倾斜磁场 H_r 为 β 角的函数, 即 H_r 随 R 与 Y 轴夹角之大小而变化, 并由 $\partial H_r / \partial \beta = 0$ 得:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = 1$$

即当 $\beta = 45^\circ$ 时, 倾斜磁场 H_r 出现极大(或最大)值:

$$H_{r\max} = \frac{I}{2\pi R} \quad (11)$$

其他点的 H_r 值则相对较小。取

$\frac{I}{2\sqrt{2}\pi R} = 1$, H_r 与 β 的关系列于下表。

β	-93°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0	15°	30°	45°	60°	75°	90°
H_r	-1	-0.7071	-0.3660	0	0.3660	0.7071	1	1.225	1.366	1.414	1.366	1.225	1

因此, 在观测点沿圆弧线上移动的条件下, 前述观点是正确的。

但事实上, 人们不能使观测点沿圆弧移动。因此, 前述确定地下管线深度的方法是不能实现的, 其原理是不能成立的。因为在地下管线深度或其空间位置未确定之前, 图 1 或图 2 中 O 点的空间坐标是未知的, 故无

已知的特定圆弧中心, 因而不具备沿圆弧移动观测点的前提条件。

尽管从几何原理上可以设想, 在已知地下管线中心位置 (O 点) 的前提下, 当 P 点沿一定 R 值的圆弧上移动时, 可以观测到倾斜磁场 H_r 的数值。但使测点离开地表并保持接收线圈沿空间的某个圆弧移动, 这在

实际施工中是极其困难、甚至是不可能的。因此,这种确定深度的原理或方法是不实际的,只能是一种想象。

而且,在 $\beta > 45^\circ$ 的条件下,测点沿这么大幅度的圆弧移动时,才能观测到 H_r 的极大点(或最大值),这就要求圆弧半径 $R > \sqrt{2}h$,如果由于 h 值未知而选用圆弧幅度较小(不满足以上等式),则即使将线圈沿小圆弧移动,也观测不到 H_r 的最大值点出现。

2. 沿水平地表主剖面观测倾斜磁场最大值点确定管线深度

其次,剖析测点沿水平地表主剖面(或 X 轴方向)移动的情况。在这种情况下,取式(6)中的 $y=h$,得向右倾斜磁场分量:

$$H_r = \frac{I}{2\sqrt{2}\pi} \cdot \frac{h+x}{h^2+x^2} \quad (12)$$

此式表明, H_r 随测点位置 x 变化的关系较复杂。为了研究倾斜磁场沿测线的分布规律,取 $I=2\pi$ (A), $h=1$ (m),算得图3中所示的 H_r 理论剖面曲线。由图可见, H_r 曲

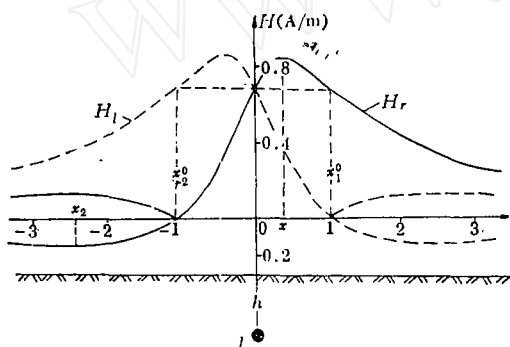


图3 在水平地表主剖面上倾斜磁场理论曲线

线在管线右侧有一主极大值点(或峰点);在管线左侧 H_r 剖面线通过零值点(或哑点)后,在外侧还有一次极大值点(观测 H_r 振幅时也为正值)。

为了确定 H_r 剖面曲线的两个极值点位置,取 $\partial H_r / \partial x = 0$,得:

$$x^2 + 2hx - h^2 = 0$$

解此方程得两极值点坐标为:

$$x_{\max} = (\sqrt{2} - 1)h = 0.414h \quad (13)$$

$$x_{\min} = -(\sqrt{2} + 1)h = -2.414h \quad (14)$$

将上式代入式(12)得 H_r 的两个极值为:

$$H_{r,\max} = \frac{(\sqrt{2} + 1)I}{4\sqrt{2}\pi h} \quad (15)$$

$$H_{r,\min} = \frac{-I}{4\sqrt{2}\pi(\sqrt{2} + 1)h} \quad (16)$$

式(12)的 $H_r = 0$ 时,得倾斜磁场的哑点或零值点坐标为:

$$x^0 = -h \quad (17)$$

分析式(13)显见,沿水平测线移动观测点时,倾斜磁场的极大(或最大)值点距管线顶部的水平长度并非管线深度(h),其值尚不及 h 的一半。因此,利用倾斜磁场最大值点确定管线深度的原理和方法,沿水平测线观测也是不适应的,将产生绝对误差:

$$\Delta h = h - x_{\max} = (2 - \sqrt{2})h = 0.586h \quad (18)$$

此值与管线的实际埋深(h)成正比,产生的相对深度误差为:

$$\frac{\Delta h}{h} = (2 - \sqrt{2}) = 58.6\% \quad (19)$$

这样大的误差是不容许的,达不到工程质量要求。这是不适当的或错误的定深方法所造成的。

由式(12)可导出,当 $x=h$ 和 $x=0$ 时,乃有:

$$H_{r,h} = H_{r,0} = \frac{I}{2\sqrt{2}\pi h} \quad (20)$$

此值较式(15)所示的倾斜磁场最大值 $H_{r,\max}$ 小17%以上。

$$\frac{H_{r,\max} - H_{r,h}}{H_{r,\max}} = \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2} + 1} = 17.2\% \quad (21)$$

即在地下管线右侧 $x=h$ 测点处,倾斜磁场

并非最大值点, 故不能依此确定地下管线深度 (h)。

当线圈向左倾斜 45° 角时, 水平地表主剖面上的倾斜磁场有形式:

$$H_l = \frac{I}{2\sqrt{2}\pi} \cdot \frac{x-h}{x^2+h^2} \quad (22)$$

其理论曲线如图3所示, 乃有与 H_r 曲线绕 Y 轴呈对称状分布的形态 (H_r 与 H_l 组成倾斜磁场联合剖面曲线)。 H_l 曲线在管线左侧有主极大值点, 右侧有极小值点 (振幅也为正值), 并在 $x=h$ 处出现零值点或哑点。

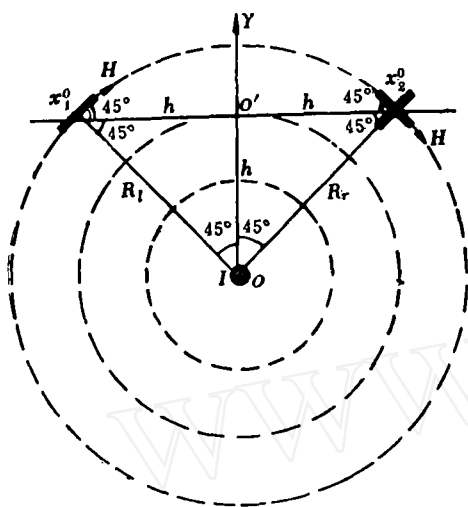


图 4 观测 H_r 和 H_l 曲线两个哑点位置图

应当指出, 由于单独一条倾斜磁场 (H_r 或 H_l) 剖面曲线在管线顶部均无特征值点存在, 故都不能仅仅靠观测一条倾斜磁场剖面曲线 (H_r 或 H_l) 确定地下管线的水平位置。若同时观测 H_r 和 H_l , 则可在 $x_2^0 = \pm h$ 两点处得到两个零值点或哑点 (图4), 依其中点坐标便可确定地下管线的水平位置 (O' 点)。而且, 同时还可由两哑点间长度 $\Delta x (= x_1^0 - x_2^0 = 2h)$ 之半, 确定管线深度 $h (= \frac{\Delta x}{2})$ 。

然而, 也应指出, 由于倾斜磁场剖面曲线在哑点处的变化梯度 (或斜率) 并非最大

值, 故利用倾斜磁场联合剖面曲线的两个哑点位置确定管线深度的精确度不是最高的。

图5中给出了向右倾斜磁场 H_r 的斜率(m_r)剖面曲线 (取 $h=1$ 和 2 两种深度算得两条曲线)。

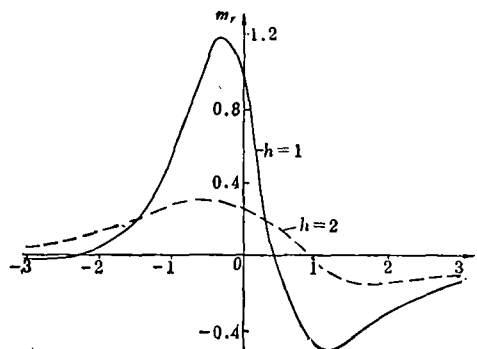


图 5 倾斜磁场 H_r 的斜率剖面曲线

由图可见, 倾斜磁场变化梯度的最大值点大致在管线左侧的 $x = -0.3h$ 处, 而在 $x = -h$ 的哑点上倾斜磁场剖面曲线的变化梯度仅约为最大值的一半。

此外, 当管线一侧地形不平或有障碍物时, 则只能观测到一个哑点 (在地形较平或无障碍物的一侧)。在这种条件下, 即使该哑点位置测的比较准, 但单靠一种倾斜磁场的观测不能确定管线的水平位置, 因而也就不能用来确定管线埋深。

在上述情况下, 为了确定管线深度及其水平位置, 却可以采用单独测量水平磁场分量 (H_x) 或垂直磁场分量 (H_y) 的简单方法。如对式 (9)、(10) 取 $y=h$, 算得图6的理论剖面曲线。当观测 H_x 时, 依其极大值点或峰点坐标便可确定地下管线的水平位置; 再在管线一侧 (地形较平或无障碍物) 测得 H_x 的半极值点位置, 即可直接得到管线深度; 当观测 H_y 时, 则依其零值点或哑点坐标确定地下管线的水平位置后, 再在管线一侧观测到峰点位置, 也可直接算得管线深度。而且, 利用 H_y 曲线哑点坐标确定地下管线水平位置, 由于管线上方 H_y 曲线哑

点处的斜率最大, 故依此进行定位的精度较高; 另外, 由于 H_x 曲线半极值点处的变化梯度也接近最大值, 故依此确定管线深度也较准确。

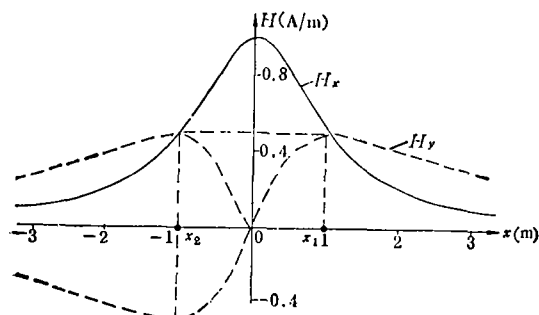


图 6 水平磁场和垂直磁场分量理论剖面曲线

实 例

为了验证本文提出的上述理论, 在北京某单位院内近于水平的场地上, 利用DG-1型地下管线探测仪进行了现场观测。采用频率为100kHz交变电偶极($AB=6\text{m}$, $I=0.5\text{A}$)作为激发感应源, 勘察对象分别为不同深度的动力电缆和通讯电缆, 观测结果列于图7。

由图7(a)可见, 在动力电缆情况下, 倾斜磁场 H_r 剖面曲线的最大值点约位于 $x_m=35\text{cm}$ 处, 而该电缆的实际深度 $h=80\text{cm}$, 前者尚不及后者的一半, 相差50%以上, 证实利用倾斜磁场最大值点确定管线深度存在问题($x_m=0.44h$)。

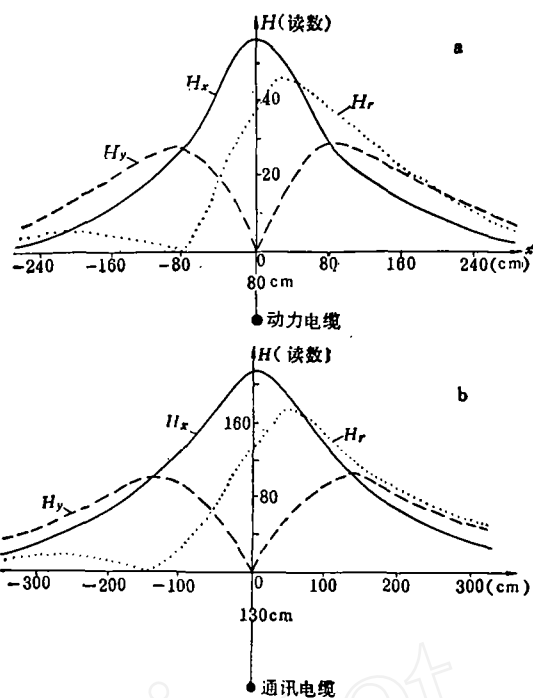


图 7 地下动力电缆和通讯电缆磁场分量 H_r 、 H_x 、 H_y 的观测结果

在图7(b)所示的通讯电缆上, 倾斜磁场 H_r 剖面曲线的最大值点约位于 $x_m=55\text{cm}$ 处, 该电缆的实际深度为130cm($x_m=0.42h$)。两者相差一倍以上(x_m 与实际埋深的相对误差约为57.7%)。同样证明了前述理论的正确性。

图7还表明, 根据 H_x 和 H_y 剖面曲线的实测特征点位置(峰点、哑点及半极值点)可以较简单地确定地下电缆的水平位置和深度, 其值均与实际情况较接近。

On Estimation of Depth to a Buried Pipeline Detected by EM Method

Fu Ping

Formulas were derived for calculating anomaly field due to eddy current induced in a buried pipeline under the excitation of a primary EM field. Through calculations the distribution patterns of anomaly field of different points along a circular arc or over a principal profile on earth surface are known. It is thus noted that the conventional method for depth determination by measuring the distance between maximum points on the anomaly curve is wrong in principle and yields a great error in the results. In this paper the reason for making such a wrong estimate is expounded and two practical examples are also cited for illustration.