

地下金属管线管径的探测

徐振业 时万钟 杨德林 何金田
张兵临 王明星 王士智 谢建忠

(河南省基础及应用科学研究所 郑州大学物理系 郑州 450052)

徐保民

(郑州国营4057厂 郑州 450006)

摘要 用现有的一台电磁感应式地下金属管线探测仪在现场进行人工数据采样,然后拟合出一个地下金属单管线二次场分布的经验公式,再用该分布函数曲线半宽度参数,伴以地下金属管线埋深的探测,便可探测出管径值。探测误差约为实际管径的 $\pm 10\%$ 。

关键词 探测,拟合,正态分布,半宽度

1 引言

地下金属管线探测仪,数十年前就已问世。但是迄今为止现有的这类探测仪仅能探测出地下金属管线的走向和埋深,不能探测管径。本文给出了一个探测管径的方法,从而给测绘管线图和市政管理增加了有用信息。同时本文还介绍了该探测方法的物理思路、数学模型、所用装置和实验步骤以及对所得结果的讨论。

2 实验描述

本实验所用探测仪由发射机、接收机和数据采样板三部分组成(如图1)。发射机和接收机均采用矩形定向天线。

当探测仪工作时,发射机产生一次场,地下金属管线在此场的感应下产生二次场。按照常规操作方法,通过检测二次场先把未知地下管线的走向定下来。然后,让接收机按图1所示,在地下金属管线上方逐点移动(天线平面垂直于地面,移动步距为1cm),便可测出一组数据 $\{v_i, x_i\}$ 。此处 x_i 为水平坐标值, x 轴垂直于地下管线走向; v_i 为接收机检测到的与 x_i 对应的电压信号值,它表征地下金属管线二次场的宏观平均值。

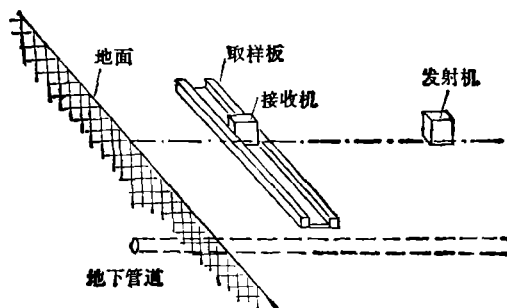


图1 整机工作示意图

1992-10-08 收到,1993-03-18 定稿

徐振业 男,1936年生,副教授,主要从事检测技术专业的研究和教学工作。

时万钟 男,1943年生,副教授,主要从事传感器应用及智能化仪表方面的研究工作。

本实验是原理性实验,故暂采用人工移动采样法,采样步距为1cm。另外,数据处理采用计算机离线分析法。实用装置则应采取自动采样和计算机在线分析。

3 曲线拟合

根据电磁学的基本原理,上述实验中接收机在 x_i 处检测到的电压信号 v_i 应是如下函数:

$$v_i = f(T, L, R, \phi, D, S, x_i, \dots), \quad (1)$$

其中 T 为与发射机有关的参数; L 为接收机和发射机之间的距离; R 为与接收机有关的参数; ϕ 为被探测管线的直径; D 为被探测管线的埋深; S 为同土壤有关的参数; x_i 为水平座标值。

由于实测现场条件的复杂性和多变性,上述函数的解析式是难以求出的。为此,本实验根据实测得到的数据组 $\{v_i, x_i\}$,采用非线性最小二乘法拟合出 v_i 的经验表达式:

$$v_{fi} = f(x_i, \mathbf{B}), \quad (2)$$

此处 \mathbf{B} 为拟合函数中诸参数构成的多维向量。为求出 \mathbf{B} 的各维分量,按照加权的最小二乘法的要求,应使下式取极小值,即

$$R(\mathbf{B}) = \sum_{i=1}^n w_i [v_i - f(x_i, \mathbf{B})]^2 = \min, \quad (3)$$

其中 w_i 为权因子。

根据对管径为5~100cm,埋深为30~450cm的不同现场条件的数十次实测得到的数据组 $\{v_i, x_i\}$ 描绘出的实验曲线形状(图2),判定 $f(x_i, \mathbf{B})$ 近似为正态分布函数,即

$$v_{fi} = f(x_i, \mathbf{B}) = b_1 \exp[-4 \ln 2 \cdot (x_i - b_3)^2 / b_2^2], \quad (4)$$

此处 b_1, b_2 和 b_3 为 \mathbf{B} 的三个分量, b_1 为峰值; b_2 为半宽度(满高度一半处的全宽度); b_3 为峰位。

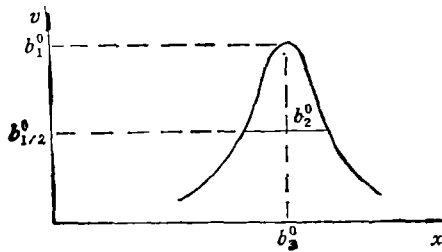


图2 实验曲线

注:纵坐标中 $b_1^0/2$ 应为 $(1/2)b_1^0$

因为 $f(x_i, \mathbf{B})$ 是 \mathbf{B} 的非线性函数,不能直接通过对(3)式求极值的方法求出 b_1, b_2 和 b_3 。解析非线性最小二乘问题有许多方法,本文采用高斯-牛顿法^[1]求解 b_1, b_2 和 b_3 。其步骤简述如下:

先选取 \mathbf{B} 的一组初值

$$\mathbf{B}^0 = (b_1^0, b_2^0, b_3^0),$$

将 \mathbf{B} 写成

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}^0 + \delta \mathbf{B} = (b_1^0 + \delta b_1, b_2^0 + \delta b_2, b_3^0 + \delta b_3). \quad (5)$$

将 $f(x_i, \mathbf{B})$ 在 \mathbf{B}^0 处按泰勒级数展开,略去二次以上项后得

$$f(x_i, \mathbf{B}) = f(x_i, \mathbf{B}^0) + \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial f(x_i, \mathbf{B}^0)}{\partial b_j} \right) \delta b_j. \quad (6)$$

将(6)式代入(3),并按照极值条件

$$\frac{\partial R(\mathbf{B})}{\partial (\delta b_j)} = 0, \quad j = 1, 2, 3,$$

得到如下方程组:

$$\begin{aligned}
& \delta b_1 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right)^2 \right] + \delta b_2 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial b_2} \right) \right] + \delta b_3 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial b_3} \right) \right] \\
& - \sum w_i (v_i - f) \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right), \\
& \delta b_1 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_2} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right) \right] + \delta b_2 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_2} \right)^2 \right] + \delta b_3 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_2} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial b_3} \right) \right] \\
& - \sum w_i (v_i - f) \left(\frac{\partial f}{\partial b_2} \right), \\
& \delta b_1 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial b_3} \right) \right] + \delta b_2 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial b_2} \right) \right] + \delta b_3 \left[\sum w_i \left(\frac{\partial f}{\partial b_3} \right)^2 \right] \\
& - \sum w_i (v_i - f) \left(\frac{\partial f}{\partial b_3} \right), \tag{7}
\end{aligned}$$

此处 $\sum_{i=1}^n$ 用 Σ 表示; $f(x_i, \mathbf{B}^0)$ 用 f 表示。由此方程组解出 δb_1 , δb_2 和 δb_3 后, 代入(5)式便可求出 \mathbf{B} 的三个分量 b_1, b_2 和 b_3 。但这里须说明一点, 通常 \mathbf{B} 不是一次求解就能得到的, 往往需要通过多次迭代过程求得。此处取近似条件:

$$\frac{|f(x_i, \mathbf{B}) - v_i|}{f(x_i, \mathbf{B})} \leq 10\%, \tag{8}$$

迭代次数上限取 11。若不满足此条件, 就认为是多管线分布, 不属于本文所讨论的对象。

关于 \mathbf{B} 的初值 b_1^0, b_2^0 和 b_3^0 选取可参看图 2。

在拟合过程中, 发现在实验曲线左右两端误差较大, 但这对我们探测管径无关紧要。此处只须在 $v_i \geq 0.4b_1^0$ 范围内拟合就可以了。为此, 可认为 v_i 近似为等精度测量, 故取权因子 $w_i = 1$ 。

在进行非线性最小二乘法拟合之前, 为使拟合奏效, 需先对原始数据组 $\{v_i, x_i\}$ 进行 5 点二次三项式平滑处理^[2], 求出与 x_i 对应的平滑值

$$\bar{v}_i = (1/35)(-3v_{i-2} + 12v_{i-1} + 17v_i + 12v_{i+1} - 3v_{i+2}). \tag{9}$$

(1)~(8)式中的 v_i 值实际上是平滑以后的 \bar{v}_i 。

4 管径的探测

经过上述拟合处理, 我们得到(4)式

$$v_i = b_1 \exp[-4 \ln 2 \cdot (x_i - b_3)^2 / b_2^2].$$

根据物理推理^[3]和实测经验证实, 地下管线的管径 ϕ 和埋深 D 越大, b_2 也越大, 即二次场分布曲线的半宽度越大。我们通过对 D 等于 30~100cm, ϕ 等于 5~12cm 不同现场条件的数十次实测(用三种不同尺寸天线)和开挖验证, 并经过最小二乘法处理, 得到如下经验公式

$$\begin{aligned}
D\phi/b_2^2 &= C, \\
\phi &= Cb_2^2/D, \tag{10}
\end{aligned}$$

C 为一常数, 约为 0.10。

埋深 D 可通过常规方法测定, 为此, 只要利用上述曲线拟合法求出 b_2 , 管径 ϕ 便可探

知。

因为目前我们的实验是原理性实验,数据处理采用计算机离线分析法,故 ϕ 是通过计算逐步求出的。但如若做成自动采样和在线分析的智能化探测仪,无需人工干预,探测仪便可自动探测并显示出相应的 ϕ 值。

5 实验检验

为检验上述理论和方法的可用性,对不同探测目标进行了实测和开挖验证。所得结果是满意的,探测精度完全能满足工程要求。现将其中两个探测实例列于表 1。

表 1

序 号	半 宽 度 $b_2(\text{cm})$	探 测 埋 深 $D(\text{cm})$	探 测 管 径 $\phi(\text{cm})$	实 际 管 径 $\phi_0(\text{cm})$	探 测 管 径 误 差 $\Delta\phi(\text{cm})$
I	98.9	71.0	13.8	12.0	+1.8
II	51.9	43.0	6.3	6.0	+0.3

6 讨论

(1)由(10)式求 ϕ ,或用智能化探测仪探测 ϕ ,主要误差来源于 D 值不易测准,故欲提高探测 ϕ 的精度,需设法提高探测 D 的精度。

(2)本文所述方法和所得结果,仅适用于单根管线,若探测对象系多管线分布,上述方法无效。

(3)(10)式中的 C 值是“仪器常数”,非普适常数,它与天线参数和接收机输入-输出特性等因素有关。故一台具体探测系统做好后,需经过对已知探测目标的实测进行标定。

参 考 文 献

- [1] Slavic I A. Nucl. Instrum. Methods, 1976, 134(2):285—289.
- [2] Yule H P. Nucl. Instrum. Methods, 1967, 54(1):61—69.
- [3] Jackson J D. Classical Electrodynamics. USA: John Wiley & Sons press company, 1975, 300—450.

DETECTION OF UNDERGROUND METAL PIPE'S DIAMETER

Xu Zhenye Shi Wanzhong Yang Delin He Jintian Zhang Binlin
Wang Mingxiang Wang Shizhi Xie Jianzhong

*(Henan Fundamental & Applied Science Research Institute, Department of
Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)*

Xu Baomin

(Zhengzhou State 4057 Factory, Zhengzhou 450006)

Abstract Data are sampled manually using a electromagnetic induction type underground metal pipe detector. After that, an empirical formula for a metal pipe's second field distribution function is obtained by fitting the data. On the other hand, the depth of underground metal pipe can be detected by use of the detector. Then, the pipe's diameter can be calculated by use of the half width of the distribution function's curve and the depth. The error of the result is $\pm 10\%$ of the pipe's diameter.

Key words Detection, Fitting, Normal distribution, Half width