

# 瞬变电磁法在城市地下管线调查中的应用研究

孟磊

中国电建集团西北勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2021年11月2日; 录用日期: 2021年12月2日; 发布日期: 2021年12月10日

## 摘要

地下管线是保证城市日常运行和可持续发展的支撑体系, 为城市提供必不可少的生活保障。然而, 在城市道路修建过程中由于缺乏基础资料, 导致管线破坏事故频繁发生。因此, 为了能快速而准确有效探测地下空间中潜在的管线以及走向, 本文将拖曳式高分辨瞬变电磁系统应用到城市地下管线探测中。以深圳市光明区地下污水金属管线勘查实例, 介绍了瞬变电磁法的工作原理、数据采集设备和反演处理方法。将瞬变电磁法反演结果和地震散射结果进行对比分析, 结合实际现场情况验证了瞬变电磁法的探测结果。通过上述案例可以得出: 拖曳式高分辨瞬变电磁系统在城市地下管线调查中具有效率高, 分辨率强以及抗干扰能力强等优点, 能够适应复杂的城市工作环境。本文研究作为城市地下管线和病害体的调查提供更高效的方法和技术。

## 关键词

瞬变电磁法, 地下空间, 管线调查, 分辨率强

# Research on Application of Transient Electromagnetic Method in the Survey of Urban Underground Pipeline

Lei Meng

Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2021; published: Dec. 10<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Underground pipelines are a supporting system to ensure the daily operation and sustainable development of the city, and provide an indispensable life guarantee for the city. However, due to the

lack of basic data during the construction of urban roads, pipeline damage accidents frequently occur. Therefore, in order to detect potential pipelines and directions in underground space quickly, accurately and effectively, the towed and high-resolution transient electromagnetic system were applied to the detection of urban underground pipelines in this paper. Taking an example of underground sewage metal pipeline survey in Guangming District, Shenzhen, the working principle of transient electromagnetic method, data acquisition equipment and inversion processing method are introduced. The inversion result of the transient electromagnetic method and the seismic scattering result are compared and analyzed, and the detection result of the transient electromagnetic method is verified in combination with the actual field conditions. Through the above case, it can be concluded that the towed and high-resolution transient electromagnetic system has the advantages of high efficiency, high resolution and strong anti-interference ability in the urban underground pipeline survey, and can adapt to the complex urban working environment. The research work in this paper provides more efficient methods and techniques.

## Keywords

Transient Electromagnetic Method, Underground Space, Pipeline Survey, High Resolution

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

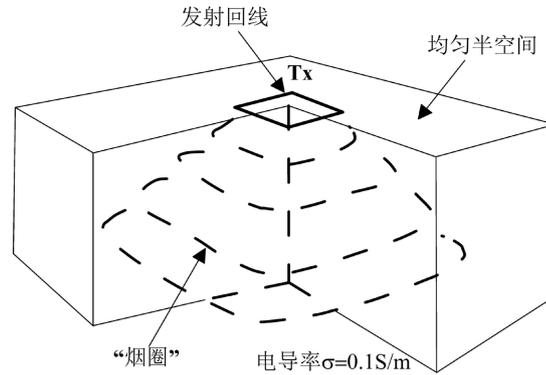
## 1. 引言

地下管线是保证城市生存和可持续发展的支撑体系，为城市提供必不可少的物质运营条件，是城市的“生命线”。地下管线由给水、雨水、污水、电力、电信、煤气、热力、电视、路灯、工业、公交等组成，其线位的选址在数据上的一点偏差都可能带来增加工程量或不可估量的安全事故。

地球物理方法种类很多，可以解决从地表到地壳上千公里的地质问题，为国家的能源矿产调查起到了决定性的作用，具有不受场地条件限制、环保等优点，因此被用于城市地下管线调查中[1]-[7]。瞬变电磁法是通过不接地回线或接地线源向地下发送一次场，在电流关断间歇期间内接收感应二次场的变化[8][9]。该方法的优点是纯二次场观测，其分辨率高、探测深度深，对低阻异常体敏感。传统瞬变电磁法主要应用于空旷山区，勘探仪器主要采用国外设备，电流关断时间很长，造成浅表的异常信息丢失，形成了瞬变电磁的探测盲区。近年来，以吉林大学林君院士、重庆大学付志红教授、中南大学席振铎教授和中国地质大学(武汉)梁庆九等人在国产化浅层瞬变电磁仪器研制上取得了非常突出的成就。其中，重庆大学付志红教授及其团队等人在瞬变电磁发射机高速关断技术、线圈消互感技术、高速采样率以及数据处理反演等方面取得了重大进步，为实现城市浅地表地下空间精细探测提供了强有力的保障[10][11]。

## 2. 瞬变电磁法原理和数据处理方法

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, 简称 TEM)是利用不接地回线或接地电极向地下发送脉冲式一次电磁场，用线圈或接地电极观测由该脉冲电磁场感应的地下涡流产生的二次电磁场的空间和时间分布，来解决有关地质问题的时间域电磁法。目前，该方法已成为浅地表工程地球物理调查的重要方法之一，被广泛的应用于工程、水文地质调查，环境调查等诸多领域[12]-[19]。图1表示发射电流关断后，不同时刻地下等效电流环的分布示意图。从图中可以看到，等效电流环像从发射回线中“吹”出来的一系列“烟圈”。因此，将地下涡旋电流向下、向外扩散的过程形象地称为“烟圈效应”[20]。



**Figure 1.** The “smoke ring effect” of transient electromagnetic fields  
**图 1.** 瞬变电磁场 “烟圈效应”

传统的瞬态电磁数据处理方法是采用烟圈快速成像技术。该方法是一种半定性和定量的粗糙处理方法，具有精度低，对异常目标深度不敏感的缺点。烟圈快速成像理论的计算公式如下。某时刻烟圈的垂直深度  $d_r$  和垂直传播速度  $v$  为[20]:

$$d_r = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t\rho}{\mu_0}} \quad (1)$$

$$v = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 t}} \quad (2)$$

其中  $\rho$  为均匀半空间的电阻率，单位为  $\Omega \cdot m$ ； $t$  为采样延时，单位为 ms； $\mu_0$  为真空中的磁导率。

通过计算化简，可以得到视电阻率  $\rho_r$  和视深度  $H_r$  计算公式，如下：

$$\rho_r = 4 \left[ \frac{\sqrt{t_j \rho_j} - \sqrt{t_i \rho_i}}{t_j - t_i} \right]^2 t_{ij} \quad (3)$$

$$H_r = 0.441 \frac{(d_{r1} + d_{r2})}{2} \quad (4)$$

其中， $t_i, t_j$  为相邻时间道的采样时间，并且  $t_j > t_i$ ， $\rho_i$  和  $\rho_j$  为相邻时间道的全区视电阻率， $t_{ij}$  是  $t_i$  和  $t_j$  的算术平方根。

本文采用非线性粒子群优化算法进行反演计算。粒子群优化算法核心思想是：将鸟或鱼简化为粒子，粒子的位置代表最优化问题中的可能解，食物的位置代表最优解，所有粒子在一定的规则下，向着最优解位置运动[21] [22] [23]。

在寻优开始时，粒子群算法首先在搜索区域范围内随机初始化  $m$  个粒子，作为迭代初始值。然后粒子根据公式(5)实时更新自己的速度及位置：

$$v_{i,j}^{k+1} = v_{i,j}^k + c_1 r_1 (pbest_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 r_2 (gbest_{i,j}^k - x_{i,j}^k) \quad (5)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1} \quad (6)$$

式(6)中， $j$  为搜索空间的维度， $c_1$  和  $c_2$  为学习因子， $r_1$  和  $r_2$  为(0, 1)之间均匀分布的两个随机数。Xu (2020) 在文章中详细的探讨了粒子群优化算法的参数选择和反演拟合精度，得出该算法是一种高效、准确的全局优化算法[24]。

通过汉克尔变换和余弦变化求解瞬变电磁时间域响应[25] [26]，构造如下目标函数为：

$$\Phi(v,t) = \|d(v,t) - X(v,t)\|_2 \quad (7)$$

其中  $d(v,t)$  表示野外实测数据,  $X(v,t)$  表示正演数据, 模型输入为电阻率和层厚参数。

本文采用拖曳式高分辨瞬变电磁系统(图 2)进行野外采集工作。该系统由瞬变电磁主机、收发一体线圈、数据处理与成像软件组成, 采用了自主知识产权的“恒压钳位”高速线性关断和无损消互感技术[10][11], 结合高密度高动态信号采集, 具有极强的浅层和高分辨探测能力, 拖曳式观测模式极大提高了工作效率, 整套系统轻便小巧、实用高效, 便于野外作业。



Figure 2. High-resolution towed transient electromagnetic detection system  
图 2. 拖拽式高分辨瞬变电磁系统

### 3. 瞬变电磁法应用案例分析

#### 3.1. 工程概况

深圳市光明区部分区段进行地下污水管线的探测, 本次精细勘察主要查明指定区域内的地下污水管线的位置和走向。现场地层物性, 具备物探的探测条件。

#### 3.2. 测线布置

本次瞬变电磁探测共布置 2 条测线(图 3), 测量点距 0.5 米, 发射电流 60 A, 发射频率 16 Hz, 最大观测接收时间为 1.0232 ms, 数据叠加 200 次, 使用 CL500 线圈进行探测。据已知资料查询, 该污水管的材质为金属材料, 直径约 1.5~2.0 m, 管道内有少量流水。



Figure 3. Layout of the field survey line of the transient electromagnetic method  
图 3. 瞬变电磁法野外测线布置图

### 3.3. 瞬变电磁法探测结果分析

使用粒子群优化算法对 L1 和 L2 瞬变电磁数据进行一维反演处理, 得到图 5 瞬变电磁反演视电阻率断面图。图 4 表示瞬变电磁多测道图, 其中图 4(a)表示测线 L1 多测道图, 图 4(b)表示测线 L2 多测道图。

从图 4 中可以看出, 测线 L1 在相对里程 10~13 m 之间, 瞬变电磁响应信号增强(图 4(a)), 测线 L2 在相对里程 11~14 m 之间, 瞬变电磁响应信号增强(图 4(b)), 这表明异常体呈低阻响应。

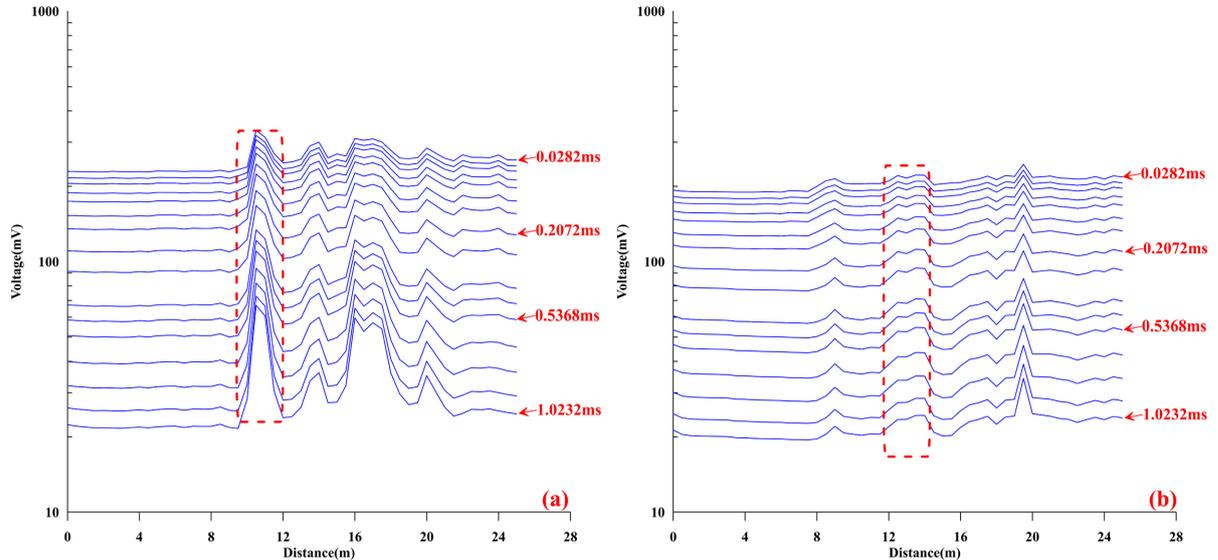


Figure 4. The multi-channel map of transient electromagnetic method. (a) L1; (b) L2

图 4. 瞬变电磁法多测道图。(a) L1; (b) L2

图 5 表示瞬变电磁法视电阻率断面图, 其中图 5(a)表示测线 L1 的反演结果, 图 5(b)表示测线 L2 的反演结果。结合野外现场分析, 从图 5 中可以分析可得, 测线方向由南向北, 长 25 m, 深度 15 m。反演电阻率结果中表层厚 5 m 以内为低阻, 电阻率值在 40~80  $\Omega\cdot\text{m}$  之间, 对应位置为回填土层, 其下埋深 5~15 m 范围, 电阻率值在 100~300  $\Omega\cdot\text{m}$  之间, 推断为粉质粘土层, 地层趋于稳定。

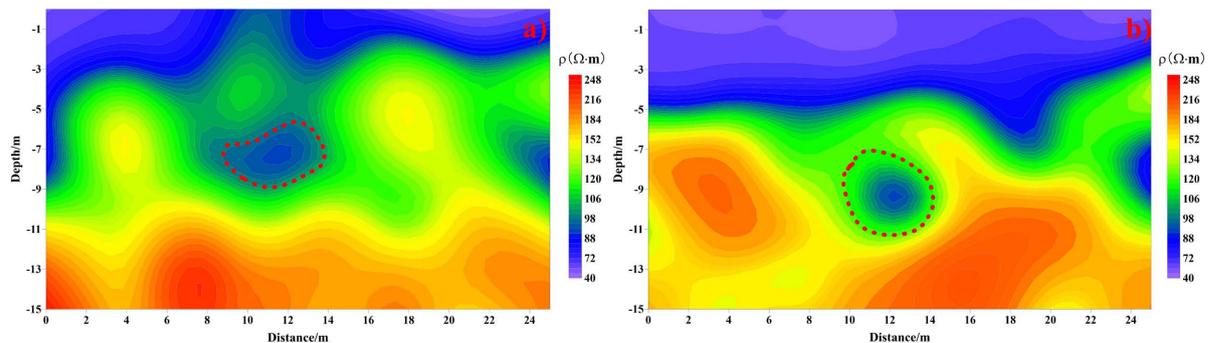


Figure 5. The resistivity profile map of the transient electromagnetic method. (a) L1; (b) L2

图 5. 瞬变电磁法视电阻率断面图。(a) L1; (b) L2

测线 L1 相对里程 10~13.5 m 处的 7~9.5 m 深度内有一处低电阻率异常区, 测线 L2 相对里程 11~13.5 m 处的 8~10 m 深度内有一处低电阻率异常区。据已知资料, 该污水管为金属材料且管内有少量流水。对于瞬变电磁法来说, 电磁波对金属和水等低阻敏感。电磁波传播到金属管道时, 金属管壁会对电磁波产

生屏蔽作用，信号增强。结合已知资料，推测该低速异常区域为污水主管所在位置。

图 6 是在测线 L1 处平行进行的地震散射探测，从地震散射波速分布图中可以看出，测线相对里程 9~11.5 m 处的 9~10.5 m 深度内有一处低速异常区。这是因为地震波波长比较长，很容易穿透金属管壁，到达管壁内部。由于管道内含有少量水，其余充满空气。当地震波从周围介质传播到空气时，速度迅速降低，呈相对低速异常区域。该异常区与瞬变电磁测线 1 的异常区域比较吻合，验证了瞬变电磁探测结果的准确性。

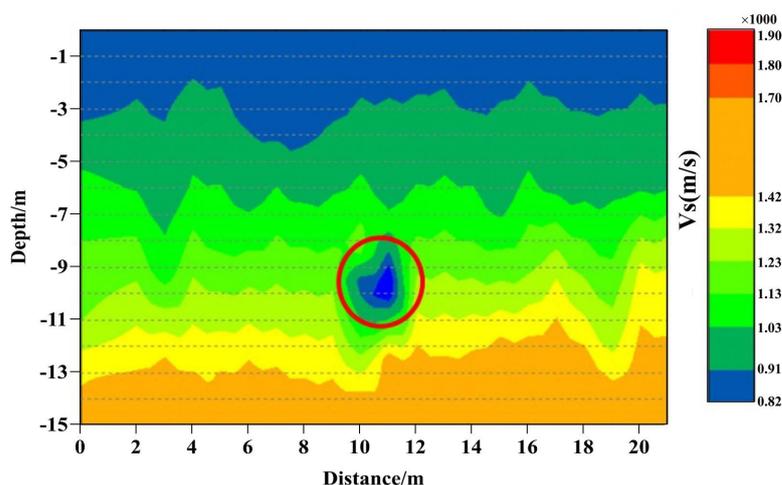


Figure 6. Distribution map of seismic scattering wave velocity

图 6. 地震散射波速分布图

#### 4. 结论

本文将拖曳式高分辨瞬变电磁系统应用到城市管线探测调查中，对瞬变电磁法采集的数据进行一维反演处理。将得到的反演结果和地震散射结果进行比较分析，验证了瞬变电磁法探测结果。通过本次工程试验结果表明，拖曳式高分辨瞬变电磁系统在地下管线异常调查中具有效率高，分辨率强，抗干扰能力强等优点，能够准确而直观地反映出地下金属管线的分布范围和空间展布情况。通过此次探测结果，可以为下一步管网综合治理提供准确的物探资料。本文的研究工作为城市地下空间管线和病害体等调查提供了更高效的方法和技术。

#### 基金项目

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司院内项目：高水位管道智能检测技术与装备系统研发(编号：dky2020xz79)。

#### 参考文献

- [1] 张开元, 韩自豪, 周韬. 瞬变电磁法在探测煤矿采空区中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(4): 341-344.
- [2] 刘长会, 刘树才, 闫赛, 刘焱, 苏林. 综合物探技术在浅埋煤层采空区勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(1): 51-54.
- [3] 何开录. 瞬变电磁法在采空区勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(3): 351-354.
- [4] 杨光, 陈玉玖, 姜志海. 小回线源瞬变电磁法在煤矿积水采空区探测效果分析[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(4): 399-402.
- [5] 付小明, 谭显江, 雷英成. 综合物探方法在水域穿越工程中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(2):

175-179.

- [6] 王善勋, 杨文锋, 张卫敏, 王备战. 瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(4): 400-405.
- [7] 赖刘保, 陈昌彦, 张辉, 等. 浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2743-2746.
- [8] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [9] 牛之璉. 时间域电磁法勘探[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
- [10] 付志红. 电磁探测特种电源技术的研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [11] 王浩文. 瞬变电磁小回线探测技术研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [12] 朱亚军, 王艳新. 高密度电法和瞬变电磁法在地下岩溶探测中的综合应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(6): 738-742.
- [13] 李黎, 史存焕. 瞬变电磁法在隧道超前预报中提高信噪比的方法[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 737-743.
- [14] 王宗旭. 综合物探在采空区铁路选线中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(6): 744-749.
- [15] 胡俊杰, 彭青阳, 徐洪苗. 综合物探方法在垃圾填埋场选址勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(5): 596-603.
- [16] 宋伟, 邓刘洋. 复杂地形条件下瞬变电磁法中心回线装置发射线框大小选取研究[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(6): 768-774.
- [17] 宋伟, 邓刘洋, 周桃生. 综合物探方法在隧道突涌水致灾构造探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(5): 589-595.
- [18] 赵东东, 陈基炜, 宗全兵, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在地铁盾构孤石探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(4): 495-502.
- [19] 郭润平, 张康, 田江环, 程斌, 张宏涛. 瞬变电磁法大电流多匝重叠小回线装置在岩土工程勘察的应用效果[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(4): 503-512.
- [20] Nabighian, M.N. (1979) Quasi-Static Transient Response of a Conducting Half Space—An Approximate Representation. *Geophysics*, **44**, 1700-1705. <https://doi.org/10.1190/1.1440931>
- [21] Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995) A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on MICRO Machine and Human Science*, Indianapolis, 4-6 October 1995, 39-43.
- [22] 师学明, 肖敏, 范建柯, 等. 大地电磁阻尼粒子群优化反演法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1114-1120.
- [23] 易远元, 王家映. 粒子群反演方法[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(4): 385-389.
- [24] Xu, Z.Y., Fu, Z.H. and Zhang, J. (2020) Research and Application of the Transient Electromagnetic Method Inversion Technique Based on Particle Swarm Optimization Algorithm. *IEEE Access*, **8**, 198307-198316.
- [25] 李建慧, 朱自强, 曾思红, 等. 瞬变电磁法正演计算进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1393-1400.
- [26] 陈小红. 瞬变电磁中心回线装置一维正反演算法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2012.