DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.251149

基于剖面法解决平行管线探测难点研究与应用

张永命,陈锐杰
(广东天驰智慧管网有限公司,广东 广州 510520)

摘　要: 随着城市地下管网系统的日益复杂化,近间距平行管线的精确探测已成为地下管线探测领域的技术难点之一。针对平行管线探测中存在的电磁干扰、信号叠加、定位定深精度不足等问题,系统研究了剖面法技术在解决这些难题中的应用。通过理论分析、方法创新和实例验证,探讨了水平磁场与垂直磁场联合反演、剖面曲线拟合等关键技术的实施效果。

关键词: 平行管线探测;水平磁场与垂直磁场联合反演;剖面曲线拟合
中图分类号: TU990.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0044-04

Research and Application of Solving Parallel Pipeline Detection Difficulties Based on Profiling Method

ZHANG Yongming, CHEN Ruijie
(Guangdong Tianchi Smart Pipeline Network Co., Ltd., Guangzhou 510520, China)

Abstract: With the increasing complexity of urban underground pipeline networks, the precise detection of closely spaced parallel pipelines has become one of the technical difficulties in the field of underground pipeline detection. Aiming at the problems such as electromagnetic interference, signal superposition and insufficient positioning and depth determination accuracy existing in the detection of parallel pipelines, the technical application of the profile method in solving these difficult problems is systematically studied. Through the theoretical analysis, method innovation and case verification, the implementation effects of key technologies such as joint inversion of horizontal and vertical magnetic fields, and profile curve fitting are discussed.

Keywords: parallel pipeline detection; joint inversion of horizontal and vertical magnetic fields; profile curve fitting

0　引　言

城市地下管线作为维系城市运行的“生命线”,其空间分布的精确探测直接关系到城市安全与可持续发展。随着城市化进程加速,地下管网密度激增(如广州中心城区达 12.8 km/km^2),平行管线间距普遍压缩至 0.5 m 以内。此类密集布局导致电磁信号耦合干扰、定位精度难以满足施工要求的难点,导致施工破坏事故频发,年均经济损失超 500 万元/km。因此,突破平行管线探测技术瓶颈,对保障城市安全、降低运维成本具有紧迫的工程意义。

本文于 2011 年首次提出“竖直剖面法”技术,并通过多年工程应用与改良,形成一套针对超深管线精细探测的解决方案。本文针对平行管线探测中存在的电磁干扰、信号叠加、定位定深精度不足等问题,系统研究了剖面法技术在解决这些难题中的应用。通过理论分析、方法创新和实例验证,探讨了水平磁场与垂直磁场联合反演、剖面曲线拟合等关键技术的实施效果。研究表明,基于剖面法的探测方法能够有效减少相邻管线的电磁干扰,提高目标管线的识别精度,为复杂条件下平行管线的精确探测提供了有效的技术手段。

收稿日期: 2025-09-07
作者简介: 张永命(1973—),男,学士,高级工程师,从事地下管线探测、检测及修复工作。

1　平行管线探测的技术难点

地下管线探测中广泛使用的频率域电磁法(frequency-domain electromagnetic method, FDEM)基于电磁感应原理工作[1-7]。

对于单根管线,其磁场分布具有典型的特征:水平磁场分量 *Hx* 曲线呈对称分布,在管线正上方出现峰值;垂直磁场分量 *Hz* 曲线呈反对称分布,在管线正上方过零点。这种规律性的分布使得单根管线的探测相对简单,精度较高。

然而,当多根管线平行近距离布置时,它们产生

的电磁场会相互叠加和干扰，使磁场分布变得复杂，增加了探测的难度。在平行管线探测中，主要存在以下几种干扰情况：

（1）电磁场叠加效应：当多根管线平行近距离布置时，各自产生的电磁场会相互叠加，形成复杂的复合电磁场。这种叠加不是简单的线性相加，而是包括相位干涉和能量耦合在内的复杂过程，导致磁场分布曲线扭曲变形。

（2）电流耦合现象：平行管线之间通过电磁感应产生电流耦合，导致管线中的电流分布不均匀。特别是在相同频率激励下，管线之间会产生互感效应，使电流强度和相位发生变化，进一步加剧了电磁场的复杂程度。

（3）深度影响差异：不同埋深的平行管线对电磁场的响应特性不同。深埋管线的信号衰减较快，容易被浅埋管线的强信号所掩盖，形成信号遮蔽效应，使得深埋管线的探测变得困难[8-9]。

2　传统方法的局限性

传统的地下管线探测方法如特征点法和极大值法在平行管线探测中存在明显的局限性。特征点法依据磁场分布的特征点（如峰值点、零点）来确定管线位置和埋深，但在平行管线情况下，这些特征点会因为干扰而发生位移或消失，导致较大误差。极大值法通过寻找磁场水平分量的最大值来确定管线平面位置，但在平行管线条件下，由于磁场叠加，最大值点往往会偏离管线实际位置。

此外，传统方法大多依赖单一磁场分量（通常是水平分量）进行分析，缺乏对磁场信息的全面利用。这种单一依赖限制了方法在复杂条件下的分辨能力和抗干扰能力，难以满足高精度探测的需求。

3　剖面法技术原理与方法

3.1　剖面法的理论基础

剖面法是一种基于电磁场剖面扫描和曲线反演分析的探测方法。其核心思想是通过系统采集沿垂直管线走向的剖面磁场数据，获取丰富的电磁场信息，然后通过正演模拟和反演计算，求解管线的空间位置参数。

剖面法基于麦克斯韦方程组和电磁场理论，将地下管线简化为无限长直线电流模型。对于一组平行管线，地表某点的磁场强度可以表示为各管线在该点产生的磁场强度的矢量叠加：

$$\vec{H}(x)=\sum_{i=1}^{n}\frac{I_i}{2\pi r_i^2}\left(-\sin\theta_i\hat{x}+\cos\theta_i\hat{y}\right)$$

式中：I_i为第i根管线中的电流强度；$\hat{x}$和$\hat{y}$为观测点到管线的距离；θ_i为管线与观测面的夹角。

通过测量地表沿剖面的磁场分布，可以利用优化算法反演求解各管线的位置和电流强度，从而实现平行管线的区分和定位。

3.2　水平剖面法介绍

水平剖面法是将接收机垂直于管道走向放置，在地面上每隔一定距离接收机采集地下管道发出的电磁信号，利用软件对信号进行反演分析（见图1）。

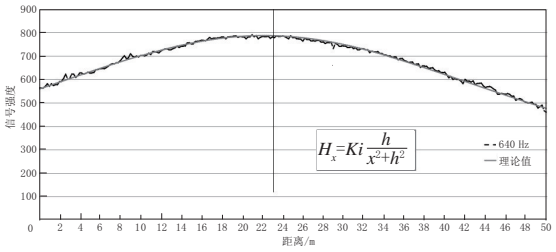

图1　水平剖面法分析原理示意图

3.3　竖直剖面法介绍

如图2所示，竖直剖面法须提前对目标管道进行预定位，在管道旁侧沿垂向钻孔，将分离式电磁感应探头放进钻孔内采集目标管道发射的电磁信号，对信号数据进行反演分析，求出目标管道的精确位置和埋深。

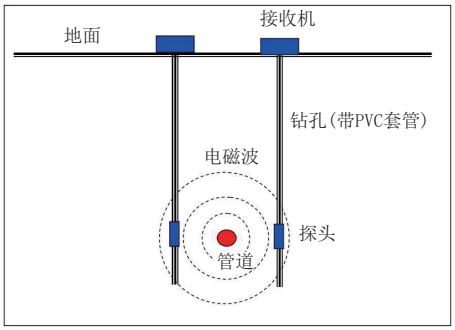

图2　竖直剖面法原理示意图

3.4　剖面曲线拟合法

剖面曲线拟合法是通过对比实测曲线与理论曲线的相似性来确定管线参数的方法。通过不断调整管线参数（位置、埋深、电流强度），使理论计算曲线与实测曲线最佳拟合，从而确定管线的准确位置。这种方法避免了特征点法对磁场分布特征的依赖，更适合于复杂磁场条件下的管线探测。

4　应用分析

4.1　场地概况与探测难点

本文项目位于广东省中山市某镇两条道路交叉

口（见图 3），该区域拟开展污水主干道顶管工程。根据前期了解，该区域地下存在 1 条高压天然气管道，管道为定向钻施工，埋深未知，管材为钢，管径为 ϕ508 mm，设计压力为 4.0 MPa。同时，天然气管道周边埋有路灯、通讯等浅部管线。使用电磁感应法探测时，平行管线之间电磁场相互干扰，难以分辨有效信号。

图 3　场地概况

4.2　水平剖面法探测

为排除平行管线干扰，采用水平剖面法开展精探，垂直于目标天然气管道布设一条水平剖面测线，观测剖面曲线如 4 图所示，排除铁护栏干扰，共有 3 个信号峰值，推测有 3 条地下管线。

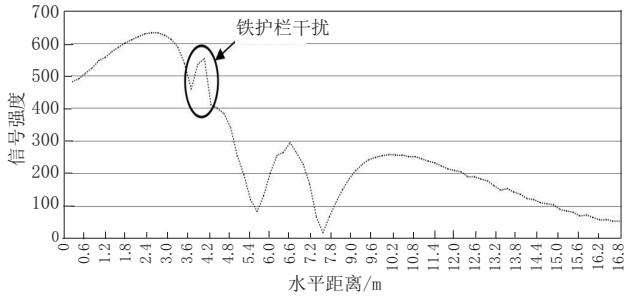

图 4　水平剖面法实测曲线

利用剖面数据反演软件，采用人机交互反演方式，绘制 3 条剖面曲线，再将 3 条曲线磁场值叠加，得到正演曲线（见图 5 中的橙色曲线），与实测曲线基本重叠。根据实地调查了解，推测中间磁场信号 L2 为路灯管线形成，右侧磁场信号 L3 为通讯管线形成。因此推测 L1 信号为目标天然气管道，其水平剖面反演平面位置为 X=2.6 m，埋深为 4.00 m（埋深不准确）。

4.3　竖直剖面法探测

为复核目标管道的精确埋深，在距离目标管道约 5 m 的位置钻孔，利用竖直剖面法开展精探。观测剖面曲线如图 6 所示，因路灯管线和通讯管块离钻孔较远，且埋深较浅，其对目标管道的电磁场信号干扰较小，因此在竖直方向上，目标天然气管道的信号较为明显。

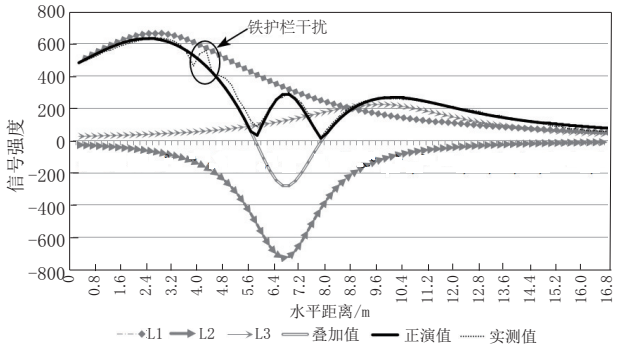

图 5　水平剖面法反演曲线

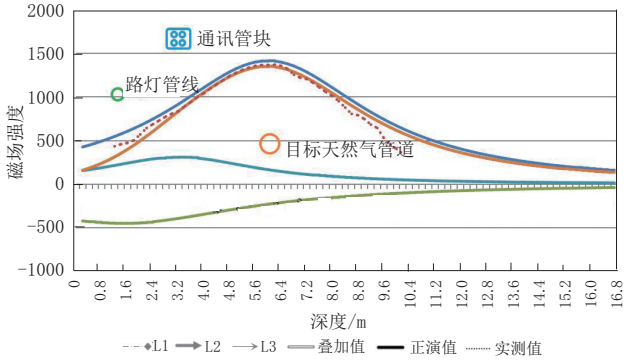

图 6　竖直剖面法反演曲线

利用剖面曲线拟合法反演，得出目标天然气管道的埋深为 5.99 m。

4.4　结果与验证

为验证探测结果的准确性，对精探确定的管道位置进行钎探验证，最终成功验证到了目标天然气管道，管道平面位置与水平剖面法反演结果基本一致，仅相差 0.05 m；埋深与竖直剖面法反演结果基本一致，地面以下 6.02 m，仅相差 0.03 m。结果表明，基于剖面法的探测结果与实际情况吻合良好，能够满足精细化设计施工要求。

5　讨论与展望

5.1　技术优势与局限性

基于剖面法的平行管线探测技术相比传统方法具有明显优势[13]：（1）抗干扰能力强，能够有效区分目标管线和干扰管线；（2）探测精度高，平均误差小于 0.1 m；（3）适用性广，可用于各种复杂条件下的管线探测；（4）自动化程度高，减少人为因素影响。

然而，该方法也存在一定的局限性：（1）野外工作量大，需要采集大量剖面数据；（2）计算复杂，需要专业的软件和操作人员；（3）只能针对金属管线，对非金属管线效果无效[14]。

5.2　未来研究方向

基于当前研究成果和存在不足，未来研究可从

以下几个方向展开：

（1）外业数据采集智能化[15-16]：研发一种外业数据采集智能化集成设备，能对管线信号实时采集记录，及时生成剖面曲线，减少人工操作导致的偶然误差。

（2）深度学习算法集成：利用深度学习算法自动识别和解释磁场异常模式，减少人工干预，提高解释效率和准确性。神经网络算法特别适合于处理复杂的非线性电磁场数据，能够建立磁场特征与管线参数之间的映射关系。

（3）多源数据融合技术：将电磁法数据与地质雷达、地震波法等其他物探方法的数据进行融合，综合利用不同方法的优势，提高探测结果的可靠性和分辨率。

6　结　语

本文针对地下管线探测中的难点问题——平行管线探测，系统研究了剖面法的应用技术和方法。通过理论创新、技术改进和工程验证，得出以下结论。

（1）平行管线探测的主要难点在于电磁场叠加、电流耦合和深度影响差异等因素导致的磁场分布畸变，传统方法在这些干扰条件下难以取得准确结果。

（2）剖面法通过系统采集垂直剖面方向的磁场数据，并利用水平与垂直磁场联合反演算法，能够有效减少相邻管线的电磁干扰，提高目标管线的识别精度。

（3）工程应用结果表明，基于剖面法的平行管线探测技术能实现对地下管线平面位置、埋深的精探，探测精度远超行业规范要求，具有较高的可靠性和实用性。

（4）剖面法在平行管线探测中表现出良好的应用效果，但对于非金属管线的探测仍需结合其他方法，形成多方法融合的综合探测方案。

综上所述，基于剖面法的平行管线探测技术为解决地下管线探测中的难题提供了有效的技术手段，具有广泛的推广应用价值。随着技术的不断发展和完善，这一方法将在城市地下空间开发和安全管理中发挥越来越重要的作用。

参考文献：

[1] 城市地下管线探测技术手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2001.
[2] CJJ 61—2003，城市地下管线探测技术规程[S].
[3] 刘忠新，范士杰. 地下管线探测技术的论述及应用[J]. 城市勘测，2004(4)：23-25.
[4] 郭根会. 磁法在地下管线探测中的应用[J]. 城市勘测，2011(增刊1)：109-110.
[5] 徐涛，许顺芳. 多偏移距地震映像法应用技术研究[J]. 工程地球物理学报，2009，6(3)：273-276.
[6] Mercer, John E. Locating systems for horizontal directional drilling-Part 1[J]. No-Dig Engineering,1998,4(5):2-4.
[7] Mercer, John E. Locating systems for horizontal directional drilling-Part 2[J]. No-Dig Engineering, 1999, 5(1)：6-11.
[8] 张汉春. 非开挖特深管线的探测技术分析及展望[J]. 地球物理学进展，2010，25(3)：1092-1097.
[9] 张汉春，莫国军. 特深地下管线的电磁场特征分析及探测研究[J]. 地球物理学进展，2006，21(4)：1314-1322.
[10] 张永命，肖顺. 剖面观测法在超深管线探测中的应用[J]. 城市勘测，2011(增刊1)：125-127.
[11] 姜文青，王大成. 珠海大道HDD天然气管道的探测[J]. 城市勘测，2010(增刊2)：221-223.
[12] 王春起. 大埋深管道位置探测技术探讨[J]. 地下管线管理，2009，(5)：37-40.
[13] 张永命，肖顺，陈锐杰. 利用“竖直剖面法”实现超深地下管线的精确定位[J]. 城市勘测，2014(3)：173-176.
[14] 梁国. 基于竖直剖面法实现近间距平行及大纵深管线的精确定位[J]. 广东水利水电，2023(10)：106-111.
[15] 唐灵，韦乙杰. 复杂管线剖面观测反演研究及应用[J]. 工程地球物理学报，2022(1)：21-26.
[16] 胡周文，杨水华，曾令响，等. 基于联合反演的近间距深埋管线探测技术研究[J]. 工程地球物理学报，2023(2)：197-204.