

超深管线的探测与方位标定技术及其应用

林守江 梁杏照

天津市嘉信技术工程公司 天津 300384

摘要: 地面电磁法定位金属管线是一项成熟技术。随着定向穿越施工方法的普及, 穿越区超深管线越来越多, 深度大且密集。应用地面电磁法探测时需要足够强的信号电流, 还因为土壤环境的影响有较大的测量偏差。探井电磁法能够有效降低对待测管线上信号强度要求, 提高测量精度。但在旁侧钻探对目标管线的安全带来较大风险, 同时探井测量还有施工效率低、探测成本高的问题。在穿越管段的高精度测量施工中, 能通过少量探井的 UPM 测量结果提高 UPL 探测结果的精度, 高效低成本地完成超深管线的定位及测深工作。

关键词: 超深管线; 探井电磁法; 地面电磁法; 埋深测量

The Technologies and Application of detection for buried pipelines in Crossing area

Lin shoujiang, Liang xingzhao

Tianjin Genius Technology and Engineering corporations. Tianjin,300384, China

Abstract: The electromagnetic detection to locate buried pipelines is a mature technology. With construction approach of directional drilling, there are more and more ultra-deep pipelines in a crossing area. When above ground electromagnetic method is used for detection, a stronger signal is required, and there are bigger result deviations due to different soil Characteristics. The exploration well electromagnetic detection can effectively reduce the signal requirements and improve accuracy. However, drilling on a side of pipeline brings risks to pipeline. At the same time, exploratory well drilling also has low construction efficiency and high project cost. In high-precision location in across pipe sections, the accuracy of UPL detection results can be improved by UPM measurement results of a less number of exploratory wells, and detection and depth measure of ultra-deep pipelines can be carried out efficiently and effectively.

Key words: Ultra-deep pipe, Exploration well EM detection, Surface EM detection, Depth measurement

1 引言

对普通埋设的金属管线实施地面电磁法定位是常规做法, 技术和设备也非常成熟。常规的电磁定位和定深测量方法, 在 6 米的埋深范围内精度一般能够满足工程的需要, 且具有测量方法简单, 设备价格便宜, 施工成本低等优点。

随着定向钻的普及应用, 穿越法铺设的管道越来越多, 穿越区内并行管道的数量在不断增加, 管道之间的距离也在不断减小。应用常规的地面电磁法, 由于探测信号的衰减以及接收机信号拾取能力的局限, 对管道埋深的测量很难达到工程上的精度需求。探井磁梯度法是测量超深管道的有效方法之一, 但当穿越区多条管线并行时, 由于无法分辨不同的铁磁体而难于实施有效的探测。此外, 由于穿越电缆的主体是非铁磁性金属, 磁梯度法无法实施有效的探测。

结合电磁感应原理和穿越超深管线探测需求实际, 为勘察及测绘单位提供精度够用、方便快捷、成本可控的检测技术手段, 天津嘉信公司基于多年埋地管道探测仪器开发以及探测施工的经验, 开发出了基于地面电磁法的超深管道定位系统 UPL (Ultra-deep pipeline locator), 以及基于探井电磁法的超深管道测量系统 UPM (Ultra-deep pipeline Measure system)。UPL 采用卫星

同步信号发射机的技术途径，通过多台卫星同步大功率发射机施加超强信号，配合高精度空芯线圈结构，大大提高了地面电磁法的测量精度和探测范围；UPM 测量系统则应用探井电磁法，通过将测量探头放入探井中，在足够近的距离内探测目标管道上的电磁信号，从而大大提高了传感器的测量信噪比，实现高精度的管道位置测量。工程上的应用表明，UPL 与 UPM 配合应用于穿越区超深管线的探测，具有较高实用价值和良好应用前景。

2 地面电磁探测的 UPL 方法

普通管线仪的有效埋深测量范围不超过 6 米，测量精度会随管线埋深的增加而显著降低，难于满足工程测量对超深管线测深的范围和精度要求。造成埋深测量能力局限的原因有两个：其一是，普通管线仪的发射机的输出功率最大只有 10 瓦，而穿越段跨度一般都在一两公里，能够施加信号点与最大埋深的探测段相距很远，因信号在传输过程中呈指数规律衰减，致使超深管段上的信号强度不足以满足高精度测量需求；其二是，普通管线仪采用的磁芯线圈，对探测信号的分辨率较低，仅靠接收机后端的信号调理和数字滤波功能，无法补偿传感器自身的局限。此外，管线仪两个竖直布置的水平线圈之间的距离也不能满足大埋深测量的精度要求。

UPL 系统采用卫星同步发射机从穿越段两端施加大功率检测信号、重新设计的接收机超精密空气线圈（如图 1 所示），以及加大两个水平线圈的间距，有效地应对了普通管线仪在探测超深管线上能力局限，提高了探测能力和结果精度。

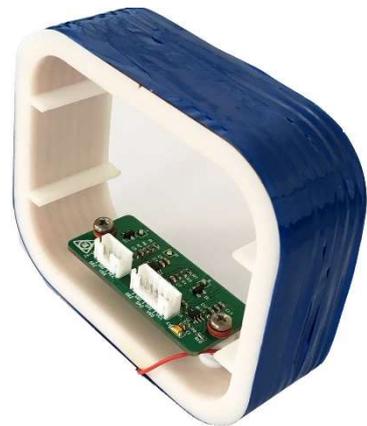


图 1 UPL 主测量用空芯线圈

卫星同步发射机的工作频率为 640Hz，通过接收 GNSS 的秒脉冲信号实现输出探测信号在时序上严格同步，使两台发射机给管道施加的检测电流能够实现完全同步叠加，达到管道上检测电流在传输过程中相互补强，从而增加探测信号的强度，增大对管道的有效探测深度和距离。同步模式可以选择在检测段的同一位置为其施加检测信号，也可以选择检测段的两端为其施加检测信号。当穿越管段过大，或埋深过大还可多台发射机同时为检测段加载信号。大跨度、超埋深管线上的信号强度分布和叠加原理如下图 2 所示。

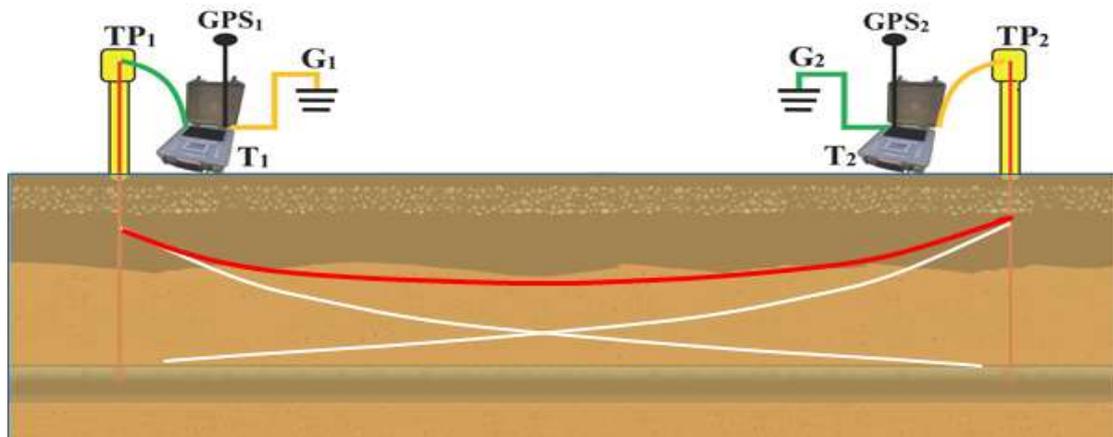


图 2 双侧同步信号叠加原理图

打破探测局限的另外一个途径是提升信号捕捉能力。磁芯线圈作为传统管线定位仪的信号拾取装置，具有结构紧凑、输出信号强，信号调理电路简单等特点。但这类线圈的灵敏度低，对弱信号的反应不灵敏，后续信号调理和数字滤波也难于补偿。UPL 接收机的埋深测量采用高

精度空芯线圈，能够有效提高对目标管线上信号的探测能力和分辨率，通过信号调理和数字滤波等技术，大大提升大埋深管道上弱小信号的检测识别和抗干扰能力。

嘉信公司 UPL 接收机的上下两组测深线圈的间距增加到 100 厘米，应用高精度的空芯线圈，配合信号调理和数字滤波算法，有效地提升了测量超深管道的测量范围和测量精度。在检测信号强度足够的前提下，UPL 的探测深度达到 40 米，1~10 米的测深精度优于±2%，10~20 米的测量精度达到±5%，20~40 米的测量精度优于±10%。

3 超深管线的 UPM 测量方法

探井磁梯度法属于被动测量技术，无法测量出目标管线到探井中探头之间的距离，也无法对多管线有选择地实施测量。因而，当地下区域管线密集或有其他铁磁物体时，测量结果会存在较大偏差，甚至无法实施有效的区分而得到正确的测量结果，该技术的应用受到很大的限制。天津嘉信公司基于电磁法开发的超深管线测量系统 UPM 打破了磁梯度法的局限。其探测原理与普通的管线定位仪完全相同，也是需要给目标管线施加一个交流信号。与管线仪的不同之处在于将测量传感器集成在一个长 40 厘米，直径 4 厘米的探头内，将信号处理、参数设置、操作控制、数据存储等功能放在测量主机中，两者之间由电缆连接。通过探井与电磁法相结合，由探头中上下布置的两个测量线圈，测量出管线与探井中探头之间的精确距离，应用专利技术实现了超深管道空间位置的探测。具体功能包括识别目标管道、测量埋深、水平距离测量以及标定方位等。



图 3 UPM 设备图

测量探头是 UPM 的核心部件，它相当于普通管线仪的接收线圈组，通过与地面上的测量主机配合，完成高精度测量功能。测量探头由两个电磁感应线圈、一个三分量磁芯线圈、电子罗盘及信号调理电路板构成。上下线圈的间距为 300mm。信号调理电路将两个线圈的感应电动势滤波放大并上传给测量主机。整个探头置于高强度的碳纤维管内。

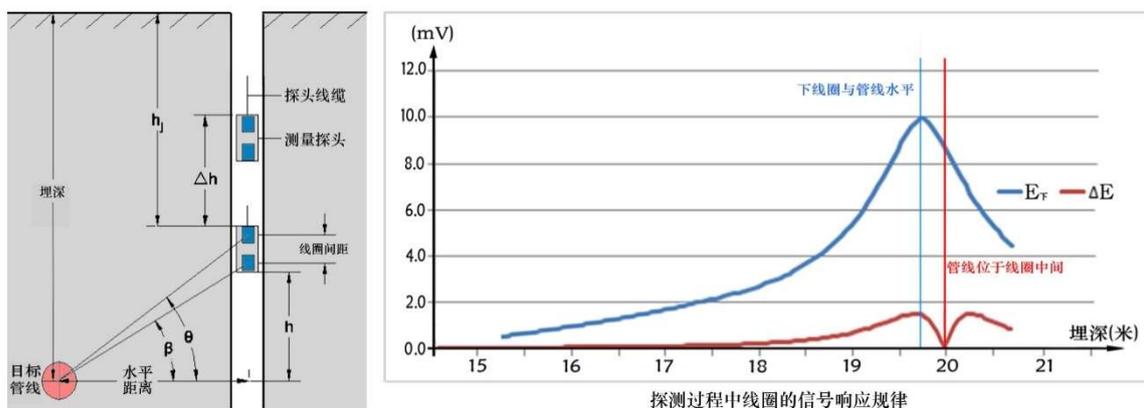


图 4 UPM 探测原理图

UPM 测量的步骤是：先对目标管道粗略定位，在管道的旁侧打一个探井，其深度略大于管道的预计埋深。给管道施加特定频率的信号电流，且保证信号强度满足测量的需求，使探头能够测量出足够大的感应信号。将探头放入探井中并向下输送，过程中主机实时显示探头的测量

曲线。当探头经过目标管道时，测量主机有相应的峰值响应和谷值响应（如图 4 所示）。探头接近目标管道时，主机计算出目标管道与探井间的水平距离。

此外，当探井位置离管线很近，且采用的钻探工艺不能保证探井的垂直度时，需要标定管线与探井中探头之间的相对位置。UPM 的探头中增加了一个三分量正交线圈组的传感器，连同内置电路板，以及平面电子罗盘，实现了相对于探头的目标管线方位的电磁法标定。该方位信息对于复杂环境中标识出目标管线，进一步探测管线的水平位置，避免后继工程误伤管线，减少钻探数量都具有重要意义。

UPM 的方位标定方法的原理是：探头在探井内垂直方向接近目标管道，由三分量正交线圈组中的正交线圈接收目标管线上的电磁信号，其中两组水平线圈的各自感应电动势，经内置电路板上的信号处理电路中的前置放大和信号调理后数字化，应用专利方法计算出管道上交变电磁场的合成矢量与线圈 Y 方向的夹角。平面电子罗盘测得的航向角，反映的是线圈组中水平 Y 方向线圈与磁北方向的夹角。此外，根据三分量正交线圈组中竖直布置的 Z 方向线圈测得电磁探测信号的竖直分量大小及方向，计算出目标管线上探测信号产生电磁场的水平矢量与磁北向的夹角。也就是，探头投影在管线通过水平面上的位置，与管线上最小距离点连成的垂线，与地磁北向的夹角，它指示出管道的方位信息。

探井电磁测量超深地下管线的方法，克服了探井磁梯度法测量地下管线深度的局限；相比地面电磁法可大幅度降低对探测信号强度的需求，减小了施工难度和工作量，提高了埋设深度的测量精度，减少钻探井的盲目性。当探井靠近目标管线且钻探不能保证垂直度时，目标管线方位标定方法配合水平距离的测量，获取管线与探头之间的方位信息来区分目标管线与其他地下构筑物，评估探井垂直度上的偏差，理清复杂探测现场内多管线之间的位置关系。当需要钻探附加探井来核实探测结果时，方位信息对于避免发生损伤目标管线也具有重要的参考意义。

4 工程上的配合应用

UPL 应用卫星同步信号发射机、大间距的空芯线圈等技术大幅提升了超深管线的探测能力，特别是测深精度有了大幅度的提高。但是，电磁法测深的结果受土壤环境因素的影响较大，高精度测量时需要对结果实施校证过程。具体的校正方法是，在已知埋深的位置应用 UPL 进行测深，求得测量结果与真实埋深之间比例系数，该系数反映的是土壤环境对电磁信号衰减特性，对于一个探测区域可以认为该校正参数是相同的，可用来对整个测量剖面进行校正从而消除 UPL 的测量误差。

UPM 测量结果可用于 UPL 测量结果的校验。工程中 UPL 和 UPM 配合使用还可以有效地减少探井的钻探数量，降低了在管道旁侧实施钻探对目标管线安全带来的风险，达到控制施工成本的目的。

天津某公司计划使用定向钻施工建设一条天然气管道，管道南北走向管径为 1016mm，穿越东西向的国道。资料显示在道路南侧约 14.3 米和 18 米分别是管径为 1016mm 的输气管道和管径为 324mm 的输油管道。交叉处输油管道设计埋深为 18 米，输气管道埋深 15.4 米。新建管道该位置上的设计埋深为 20 米。2021 年 5 月，应业主要求，应用 UPL 和 UPM 对该穿越区域内的油气管道进行了管线定位和埋深剖面测量，取得了良好的效果，得到了用户的肯定。

校验过程是，在距离测量起点 215 米的输油管道 UPL 测点上进行 UPM 探井测量。该点处 UPM 的埋深测量值为 18.45 米，UPL 埋深值为 17.57 米，校正系数为 1.05。应用该系数对工程

重点段内整个输油管线剖面进行了校正，结果见表 1。

现场 UPL 测量结果及 UPM 校正值（单位：米）

表 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距离起点	123	175	195	215	235	255	275	295	305	325
UPL 测量值	12.49	14.58	16.86	17.57	18.13	18.02	17.53	17.97	17.23	17.88
UPM 校正后	13.11	15.30	17.70	18.45	19.04	18.92	18.43	18.87	18.08	18.78



图 5 检测施工现场

5 结论

UPL 和 UPM 检测设备是应对穿越区超深管线的定位测量而开发的，它们具有各自优点和局限。UPL 通过卫星同步发射机、高分辨率的空芯线圈以及大线圈间距等手段大大地提高了地面电磁法探测超深管线的能力，改善了埋深测量的精度。但由于电磁法测量深度会受土壤条件的影响，单靠 UPL 测量埋深的探测精度有时不能够满足工程测量的高精度需求。应用 UPM 在探测剖面的关键点实施探井电磁法验证 UPL 测量结果，并应用同一测量点的数据计算出埋深数值的校正系数，经校正的埋深测量结果大大地提高了可靠性和测量精度。

通过 UPL 和 UPM 的配合使用，能够发挥出两种技术手段各自的优越性，用少量探井的 UPM 测量校正多点的 UPL 结果，从而高效地完成超深管线的定位及埋深测量，降低了穿越区管道测量的施工成本。此外，应用 UPM 分别对穿越区不同管道实施测量，能够有效区分和识别并行管道，标定出不同管道的精确空间位置，保障基于精确测量结果的后继工程的施工安全。

参考文献

1. Radiodetection Ltd: Application of pipeline locator, 2004
2. 林守江. 管线探测仪应用中的几个问题[J]. 《管道技术与设备》. 2009 年 6 期
3. 马红莲等. 基于电磁法的河流穿越管道埋深探测技术应用研究[J]. 《中国特种设备安全》. 2018 年 5 期
4. 刘宏亮. PCM+电流测绘系统在深埋穿越管道探测中的应用与实现[J]. 《工程技术研究》. 2017 年 04 期

林守江 男，1962 年 10 月出生，黑龙江省甘南县人，工学硕士，高级工程师。南开大学客座教授，中国腐蚀与防护学会防腐蚀施工与技术专委会副主任委员，全国防腐蚀标准化技术委员会 TC381 委员。多年从事埋地管道检测技术、腐蚀评价方法的研究。现任天津市嘉信技术工程公司董事长。

联系方式：林守江 13902088718，天津市西青区海泰南道 18 号左岸科技产业基地 8 号楼，300384