

doi:10.3799/dqkx.2017.051

提高深埋成品油管道探测精度的方法

鲁永康^{1,2}, 马文帅³, 杨越², 潘团结³, 张虎⁴, 鲁星¹, 刘蕊旭⁵

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学自动化学院, 湖北武汉 430074

3. 中铁十九局集团公司轨道交通工程有限公司, 北京 101300

4. 南宁轨道交通集团有限公司, 广西南宁 530021

5. 湖北省无线电厂, 湖北武汉 430074

摘要: 为满足工程建设的需要, 如何提高深埋地下管线的探测精度是探测工作中的难点. 在地铁盾构土建施工的工地, 采用FDEM(frequency domain electromagnetic method)法对埋深约16 m的成品油管道进行探测, 第一步是经过地面测线X方向的探测工作, 确定了目标管道的走向Y并缩小了范围, 因为受干扰物体的影响, 所以两种工作频率探测结果之间的定深误差很大, 尚未满足工程实际的需要; 第二步是在经过距目标管道5.0 m处的两个孔内的Z方向进行探测, 获得了离开目标管道较近“测线”上的 H_z 实测曲线; 第三步是用 H_z 理论曲线与 H_z 实测曲线进行拟合反演, 最终获得了定位、定深误差分别为20 cm、10 cm以内的探测精度, 为地铁施工建设提供了精准的基础性技术资料. 孔内Z方向的探测工作表明, “测线”离目标管道更近, 又可以避开地面X方向测线上的干扰物的影响, 可以提高探测精度. 孔内探测是对地面X方向探测成果的检验, 值得推广到对地面探测成果质量的验收中; 采用拟合软件进行推断解释, 是对探测数据的信息处理技术, 将在FDEM法探测地下管线中得到广泛的应用.

关键词: 地铁盾构施工; 频率域电磁法; 地球物理; 拟合反演软件; 探测质量检验.

中图分类号: P631.2

文章编号: 1000-2383(2017)04-0641-05

收稿日期: 2016-12-13

A Method for Improving Detecting Accuracy of Locating Deeply Buried Refined Oil Pipelines

Lu Yongkang^{1,2}, Ma Wenshuai³, Yang Yue², Pan Tuanjie³, Zhang Hu⁴, Lu Xing¹, Liu Ruixu⁵

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. China Railway 19th Bureau Group Co., LTD., Beijing 101300, China

4. Nanning Rail Transit Co. LTD., Nanning 530021, China

5. Hubei Radio Factory, Wuhan 430074, China

Abstract: The highly accurate detecting technology of deeply refined oil pipelines has been used FDEM (frequency domain electromagnetic method) method in the subway shield construction site. We summary that how to improve detecting accuracy of refined oil pipelines for about 16 m buried depth. First step, we determine the direction Y of the target pipeline and narrow the searching area through detecting working of X direction on ground. With background interfere the error of pipeline's location is not acceptable and depth error is large when using two different working frequencies on ground detection. Second step, we need detect the direction Z of two boreholes with the distance at 5.0 m from target pipeline. And we can acquire H_z measured curve of the target pipeline nearby. Last step, measured and theoretical H_z curves is inverted and acquired high accurate results with location and depth is 20 cm and 10 cm. It can provide accurate and basic technical data for subway construction. The way of detecting Z direction of borehole can avoid the inference of X direction on ground and also provide a way to test the result of

作者简介: 鲁永康(1946—), 男, 教授级高工, 主要从事地下管线探测的理论与方法技术的研究、教学与探测实践等工作. ORCID:0000-0001-5243-2751. E-mail: 18986184740@126.com

引用格式: 鲁永康, 马文帅, 杨越, 等, 2017. 提高深埋成品油管道探测精度的方法. 地球科学, 42(4): 641—644, 651.

ground detecting. The method is worth popularizing to the acceptance of the quality of ground detection. The signal processing technology of detection dates will be widely used in detecting underground pipeline base on FDEM method with its powerful advance and superiority.

Key words: railway shield construction; FDEM; geophysics; fitting inversion; detection quality.

2015 年 4 月,在广西南宁市地铁 1 号线采用“盾构法”进行土建施工的工地,笔者采用频率域电磁(FDEM)法对埋深约 16 m 的成品油输送管道进行了探测工作。

首先是采用布置矩形水平小回线,使目标管道上载有感应电流,解决了探测工作中的首要问题——建场问题(鲁永康等,2006, 2014)。

在探测工作中,第一步是在地面上布置了 X 方向的测线,选用两种工作频率探测交变磁场的水平分量 H_x 曲线,采用“特征点”法(80%法)进行推断解释(杨旭等,1997),确定了目标管道的走向、缩小了它的范围,但是因为受干扰物的影响,所以两种频率的定深相差极大,远不能满足工程实际的需要。基于当前相应规范中地面探测定位、定深的误差均为埋深 h 的 $\pm 10\%$ (北京市测绘设计研究院,2003),如果能有方法缩小“测线”与目标管道的空间距离,就可以提高探测精度(减少绝对误差);第二步是采用自行研制的“高灵敏度交变磁场矢量传感器”(即孔内探头),在离目标管道 5.0 m 的钻孔内 Z 方向观测交变磁场的垂直分量 H_z ,得到实测曲线;第三步是对孔内探测数据,用 H_z 理论曲线与 H_z 实测曲线进行拟合反演方法进行推断解释,得到了定深精度为 ± 10 cm,定位精度为 ± 20 cm 的探测成果,为地铁盾构施工能否安全下穿成品油管道,提供了精准的基础性技术资料。

1 探测现场概况

隶属于中石化的“BK 线”成品油输送管道(简称“成品油管道”),是我国南方的一条重要的成品油管道。为了下穿地势低洼的 XG 铁路,2011 年施工人员采用非开挖顶管技术进行管道施工,钢管的外径为 457 mm,壁厚为 6.5 mm,工作压力为 10 MPa(约为 100 个大气压),局部埋深约为 16 m。南宁市轨道交通 1 号线采用盾构法施工,因为隧道与成品油管道的交汇之处,距 350 t 的液化储气罐群仅一墙之隔、离 100 000 t 级成品油库不足 800 m、离南宁东站约 900 m,所以隧道能否安全地下穿成品油管道,成为各方高度关注的问题。

2 地面探测方法技术与成果

因为大多数重要的地下管线是用导电性能优良的金属材料制成的,与周围介质相比,导电性差异非常悬殊,可以达到 105~1 010 倍,所以这类管线具有能集中电流的特点,为采用频率域电磁(FDEM)法探测提供了良好的物质条件。通常人们将这类载有电流的管线简化为“线电流”模型,那么该管线周围空间就存在着磁场,当选用相应的仪器去探测这种磁场,然后就可以根据磁场的空间分布规律进行推断解释,确定目标管线的走向、平面位置及埋深,达到探测的目的。

2.1 采用感应激发方式激发目标管道

因为有关规程禁止向这类管道上直接“充电”(北京市测绘设计研究院,2003),所以在离探测区域约 650 m 处有一段浅埋的目标管道沿马路布设,布置了两圈 7 m×80 m 的长方形水平回线,使目标管道上载有感应电流(杨旭等,1997;鲁永康等,2014),发送频率选择为 1 kHz 与 3 kHz,发送电流分别为 650 mA 与 100 mA。一是小回线的磁偶极矩 M 分别为 730 Am² 与 112 Am²(比普通的发射线圈要大很多倍),所以目标管道上能产生较强的感应电流,二是小回线远离探测区域,即使是一次磁场的垂直分量,也可以衰减到忽略不计的程度。在地面与孔内探测工作中,笔者均采用这种方法激发目标管道。

2.2 地面探测方法技术与成果

(1)因为目标管道埋深较大,所以笔者选择了探测深度大、信号较强、异常较为简单的观测磁场水平分量 H_x (杨旭等,1997);采用谐振接收技术的电磁接收机(鲁永康等,2014),具有频带窄,压制工作频率以外的电磁干扰能力强,内部噪音低、灵敏度高等特点。如果选择其他的观测方法、别的探测仪器,那么就不一定能够取得良好的探测效果。

(2)为了得到完整的 H_x 异常曲线(异常值由最大值的 100%降低到 30%以下),通常要求测线长度为埋深的 4 倍以上(杨旭等,1997)。然而受现场地形条件的限制,一是不得不将原来计划的两条测线改成一条测线,二是不得不使这条测线在上跨铁路的桥面上斜着通过,而且测线仍然未能达到要求的长

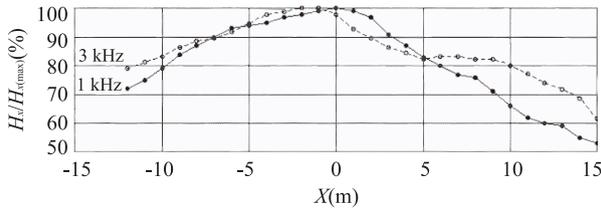


图 1 两种频率地面实测归一化 H_x 曲线
Fig. 1 Normalized curve H_x for two frequency

表 1 两种频率用“80%法”定位、定深结果

Table 1 The result of depth and location with “80% method”

	1 kHz(m)	3 kHz(m)	两频率之间的解释误差(m)
定位	-1.90	-0.74	1.16
定深	15.40	22.60	7.20

注:减去探测线圈的高度 40 cm.

度.在探测过程中,笔者还密切注意测线方向准、测线平直、测点准、探测线圈方向准等多种技术要点.

(3)对地面实测 H_x 曲线的分析:1 kHz 与 3 kHz 的实测 H_x 曲线如图 1 所示.

由图 1 可见,与 H_x 理论曲线相比,两条曲线均有极大值;其次 1 kHz 的 H_x 曲线的左右对称性不好,3 kHz 的 H_x 曲线的称性更差.利用“特征点法”(即利用曲线上极大值 80% 的两个点之间的宽度)进行推断解释,定位、定深的结果如表 1 所示.

在地面探测过程中得到了目标管道走向与桩位方向一致的结果,表明对管线走向的探测精度较高;且在后续的孔内探测结果,也证明了地面探测时确定的走向较为精确.

根据实地情况进行分析,实测 H_x 曲线左右对称性差的原因,最大可能是测线恰好在上跨于铁路的桥面上通过,桥梁构件中的钢筋具有良好的导磁性,严重地歪曲了磁场的分布,导致了磁场空间分布的畸变;地面探测主要成果是缩小了目标管道的范围,为钻孔位置和深度的设计奠定基础,否则钻孔过程中就有可能损坏目标管道的危险.

3 孔内 Z 方向探测方法技术

相关规程中,对定位、定深的误差均为埋深的 $\pm 10\%$ (北京市测绘设计研究院,2003),如果可以设法减少目标管线与“测线”之间的距离,那么就可以提高探测精度,减少绝对误差.

(1)因为在地面探测结果中,两种频率观测的定位误差约为埋深的 7.2%,定深误差约为埋深的 45%,显然远远不能满足工程建设的需要,所以必须

进行孔内 Z 方向的探测工作.因为设计的两个钻孔与目标管道相距均为 5.0 m,小于埋深的 1/3,而且可以避免干扰物的干扰,可以期望得到较高的定位、定深精度($\leq |\pm 50 \text{ cm}|$).

自行研制的孔内探头(郭玉等,2005a,2005b),也采用“谐振接收”技术,具有压制工作频率以外的电磁干扰能力强、内部噪音低、灵敏度高等特点.孔内探头只有 1 kHz 的一个固定频率,探头经过电缆与接收机相连,向探头内的低噪声前置放大器 LNA 提供直流工作电源,同时向接收机传输磁场的垂直分量 H_z 信号.

(2)对两个孔内 Z 方向的探测、用数值拟合反演软件进行推断解释(曹立斌等,2003;鲁永康等,2014)的成果:首先笔者设计了两个钻孔 ZK1Y 与 ZK2Z,设计深度为 22 m,孔径为 90 cm.用 RTK 型 GPS 测量,两个孔位的水平距离为 3.44 m,高差为 0.05 m.孔位与 1 kHz 地面探测定位的距离均为 5.0 m.因为土质的原因,导致了孔壁的垮塌,实际探测深度只能分别达到 18.0 m 与 17.0 m.对两个孔内的 H_z 实测曲线如图 2、图 3 所示,除 1,2 个测点外, H_z 实测曲线夹在两条 H_z 理论曲线中间,表明深度误差小于 $\pm 10 \text{ cm}$;如果改变平面位置,实测曲线与黑色点线的吻合程度就会变差,表明平面位置误差小于 $\pm 20 \text{ cm}$.两个孔内的实测与理论 H_z 曲线拟合反演成果表 2 所示.

将地面与孔内探测成果进行对比,1 kHz 地面探测的定位误差为 $0.50 \pm 0.20 \text{ m}$,定深误差为 $0.30 \sim 0.80 \text{ m}$,表明采用较低的工作频率时,地面

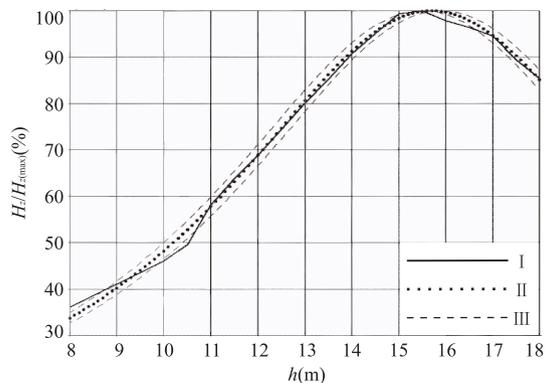


图 2 ZK1Y 孔实测归一化 H_z 曲线与理论 H_z 曲线拟合反演

Fig. 2 Measured normalized curve H_z and theoretical curve H_z for ZK1Y borehole

I. 实测 H_z 曲线; II. 高拟合度 H_z 理论曲线; III. 深度改变了 $\pm 20 \text{ cm}$ 的 H_z 理论曲线

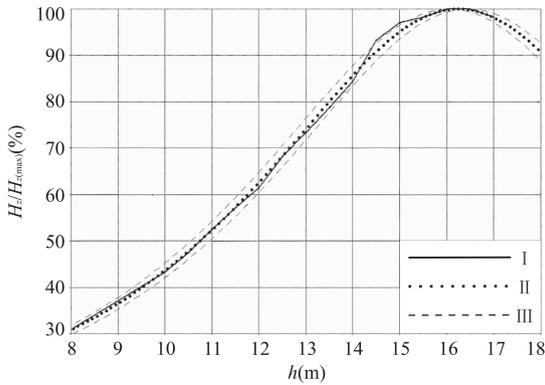


图 3 ZK2Z 孔实测归一化 H_z 曲线与理论 H_z 曲线拟合反演

Fig. 3 Measured normalized curve H_z and theoretical curve H_z for ZK2Z borehole

I. 实测 H_z 曲线; II. 高拟合度 H_z 理论曲线; III. 深度改变了 ± 20 cm 的 H_z 理论曲线

表 2 两个孔内实测与理论 H_z 拟合反演结果

Table 2 The fitting result of Measured and theoretical H_z for two boreholes

	ZK1Y 孔 (m)	误差 (cm)	ZK2Z 孔 (m)	误差 (cm)
管心埋深	15.70	$\leq \pm 10 $	16.25	$\leq \pm 10 $
管心与钻孔间距	5.50	± 20	5.50	± 20

探测的精度也较高;同时也表明了工作频率较高时,前述干扰物的影响较大。

孔内探测成果能获得如此高的精度,一是因为距离目标管道近,远离了干扰物,所以提高了广义的信号噪声比 S/N ;二是得益于采用计算机数值拟合反演方法进行推断解释,即使在“测线长度”不足的情况下,仍然可以用理论曲线与实测曲线进行拟合,充分体现了该方法的先进性与优越性。

经过地面到孔内的由表及里、逐步深入地开展探测工作,达到了对成品油管道精确定深、定位的目标,为地铁盾构施工能否安全地下穿成品油管道,提供了准确、可靠的基础性技术资料。

根据孔内探测成果计算,成品油管与隧顶的间距为 4.07 ± 0.10 m,研究人员认为可以安全地下穿成品油管道,施工单位已于 2015 年 7 月 18 日完成施工。

4 结论

(1)经过本次由表及里、逐步深入地开展探测工作,为工程的建设施工提供了精准的基础性技术资料,为安全地利用地下空间资源提供了技术支持。

(2)在孔内 Z 方向对目标管道进行探测,既可以更加接近目标管线进行探测,又可以避开干扰物的干扰,提高了广义的信号噪声比 S/N ,使定深误差小于埋深的 $1/160$,探测精度得到很大的提高。现有规范规定,对地面探测成果质量的验收工作,是采用“开挖验证”方法,而孔内探测方法与外科中的“微创手术”相似,具有精度高、效率高、成本低、对环境的影响小等许多优点,值得推广应用到对地面探测成果的质量检验工作中。

(3)采用计算机数值拟合反演方法进行推断解释,将理论曲线与孔内实测曲线进行拟合反演,对于埋深约为 16 m 的管道,最终得到 ± 10 cm 的深度误差和 ± 20 cm 的平面位置误差。无论对地面探测还是对孔内探测,利用整条测线上每一个测点的数值,采用数值拟合反演方法进行推断解释,充分体现了信息处理的先进性与优越性,将在 FDEM 法探测地下管线中得到广泛的应用。

长期对 FDEM 法探测地下管线的理论与方法技术的研究、教学与培训工作,为本次探测实践奠定了基础、指明了方向,多次成功的高难度的探测实践工作(鲁永康等,2000,2014),为研究人员积累了丰富的经验,赢得了社会的信誉。笔者热切地期待着,探测方法与探测仪器的完美结合的、探测仪器硬件与软件完美结合的、新一代精准的、具有自主知识产权的探测仪器的问世;期待着地下管线探测行业,能广泛使用反演软件进行推断解释工作,紧跟信息时代高速发展的步伐;其次能采用孔内探测方法对地面探测成果的质量进行检验,在为节约集约利用地下空间资源服务中,做出更大的贡献。

References

- Beijing Institute of Surveying and Mapping, 2003. Technical Specification for Detecting and Surveying Underground Pipelines and Cables in City(CJJ61—2003). China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese).
- Cao, L. B., Lu, K., Zhou, J. L., 2003. Parameter Inversion of Underground Pipeline Using Improved Genetic Algorithm. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 25(4): 358—362 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y., Lu, Y. K., Chen, B., 2005a. Research and Design of a High Performance Sensor with Alternating Low-Frequency Magnetic Field. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 18(3): 493—495 (in Chinese with English abstract).

0120080156

McLeod, D. P., Stedman, G. E., Webb, T. H., et al., 1998. Comparison of Standard and Ring Laser Rotational Seismograms. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88 (1): 495—1503

Spudich, P., Fletcher, J. B., 2008. Observation and Prediction of Dynamic Ground Strains, Tilts, and Torsions Caused by the M 6.0 2004 Parkfield, California, Earthquake and Aftershocks Derived from UPSAR Array Observations. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(4): 2348—2352. doi: 10.1785/0120100138

Suryanto, W., Igel, H., Wassermann, J., et al., 2006. First Comparison of Array-Derived Rotational Ground Motions with Direct Ring Laser Measurements. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96(6): 2059—2071. doi: 10.1785/0120060004

Takeo, M., 1998. Ground Rotational Motions Recorded in Near-Source Region. *Geophys. Res. Lett.*, 25(6): 789—792. doi: 10.1029/98GL00511

Takeo, M., 2009. Rotational Motions Observed During an Earthquake Swarm in April 1998 Off-Shore Ito, Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B): 1457—1467. doi: 10.1785/0120080173

Wassermann, J., Lehndorfer, S., Igel, H., et al., 2009. Performance Test of a Commercial Rotational Motions Sensor. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B): 1449—1456. doi: 10.1785/0120080157

Wu, C. F., Lee, W. H. K., Huang, H. C., 2009. Array Deployment to Observe Rotational and Translational Ground Motions along the Meishan Fault, Taiwan: A Progress Report. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2B): 1468—1474. doi: 10.1785/0120080185

(上接 644 页)

Guo, Y., Lu, Y. K., Chen, B., 2005b. Applied Circuit of Lower-Noise Pre-amplifier Composed by Unattached Components. *Chinese Journal of Electron Devices*, 28(4): 795—797 (in Chinese with English abstract).

Lu, Y. K., Qu, Z., Qiang, J. K., et al., 2000. An Accurate Location Method for Deep Buried and Adjacent Cables in “Waterline Area”. In: *Chinese Geophysics*, ed. The Chinese Geophysics, 2000. China University of Geosciences Press, Wuhan, 142 (in Chinese).

Lu, Y. L., Yang, Y. S., Lu, X., et al., 2014. An Analysis of Underground Pipeline Detecting Technology Using FDEM Method. *Office Automation*, 2014(S1): 150—153 (in Chinese with English abstract).

Xu, H. H., Wang, S. T., 1987. *Virtual Component Electromagnetic Method*. Geological Publishing House, Beijing, 108—118 (in Chinese).

Yang, X., Tian, Y. Z., Zhang, Z. L., 1997. *Underground Pipeline Detection and Pipeline Information System*. Surveying and Mapping Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

北京市测绘设计研究院, 2003. 城市地下管线探测技术规程 (CJJ61—2003). 北京: 中国建筑工业出版社.

曹立斌, 鲁永康, 周建兰, 2003. 用改进的遗传算法对密集平行管线直接反演的研究. *物探化探计算技术*, 25(4): 358—362.

郭玉, 鲁永康, 陈波, 2005a. 高性能低频交变磁场传感器的研究与制作. *传感器技术学报*, 18(3): 493—495.

郭玉, 鲁永康, 陈波, 2005b. 分立元件设计的低噪声前置放大器实用电路. *电子器件*, 28(4): 795—797.

鲁永康, 曲赞, 强健科, 等, 2000. “水线区”深埋相邻电缆的精确定位方法技术. 见: 中国地球物理学会编, 中国地球物理学会年刊. 武汉: 中国地质大学出版社, 142.

鲁永康, 杨宇山, 鲁星, 等, 2014. 用 FDEM 法探测深埋油气管道方法技术的分析与思考. *办公自动化*, 2014(S1): 150—153.

许洪海, 王守坦, 1987. *虚分量电磁法*. 北京: 地质出版社, 108—118.

杨旭, 田应中, 张正禄, 1997. *地下管网探测与信息管理*. 北京: 测绘出版社.