

doi: 10.11720/wtyht.2019.1159

杜庆丰,冯晓兰,黄跃.地—井瞬变电磁关键技术研究[J].物探与化探,2019,43(1):143-147.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1159

Du Q F, Feng X L, Huang Y. Research on key technical problems of surface-borehole TEM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 143-147. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1159

地—井瞬变电磁关键技术研究

杜庆丰,冯晓兰,黄跃

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北 廊坊 065000)

摘 要: 地—井瞬变电磁法在加拿大、澳大利亚等国的勘查实践中已取得了很好的效果,国内由于缺乏从仪器设备到资料处理解释的整套技术,使得该方法未能被广泛应用。为此,研制了地—井瞬变电磁仪器,同时系统地研究了地—井三分量坐标系的确定、探头角度系统偏差的测定、三分量的校正运算、勘查目标体方位及距离的分析与计算等,并在实际的地—井瞬变电磁观测中获得了良好的应用效果。

关键词: 地—井瞬变电磁法;探头角度偏差测定;三分量校正;目标体定位

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0143-05

0 引言

地—井瞬变电磁法是在钻孔上方或钻孔附近的地面上发射,用接收探头在钻孔中逐点测量发射电流关断后地下地质体中感应的瞬变电磁二次场,它不是测井方法,而是一种地—井物探方法。用该方法测量时,接收探头与勘查对象距离较近,受导电覆盖层和电磁干扰小,故较地面 TEM 更易发现深部的隐伏矿体;该方法可在钻孔周围一定范围内,最大限度地发现井旁及井底矿体,还可对钻孔已见的良导目标体进行定位并追踪其延伸方向。

在国外,地—井 TEM 方法的研究始于 20 世纪 70 年代,80 年代获得快速发展,90 年代初期三分量仪器便得以商品化,目前该方法在加拿大、澳大利亚等国已被广泛应用。近二十多年来,国内在地—井 TEM 方法上亦开展了较多的研究工作,研究内容主要集中在方法理论方面,国内地—井 TEM 工作所使用的仪器设备均需从国外进口,但进口设备的高价格以及下井设备的高风险,制约了该项技术的开展和应用。为此,依托国土资源部公益性行业科研专项经费项目,我们从仪器设备、测量方法技术、处理解释软件等方面进行了系统的研究,希望能推动该

方法技术在国内走向实用化。

1 IGGETEM4.0 三分量地—井 TEM 系统

研制的地—井 TEM 系统包括:适用于井深不超过 2 000 m 的三分量 TEM 井下探头,三分量 TEM 接收机,大功率 TEM 发射机,5 kW 整流器(图 1),1 000 m 和 2 000 m 塑胶电缆专用绞车(图 2)以及配套的数据处理软件。



图 1 三分量 TEM 整流器、发射机、接收机及探头
Fig.1 Rectifier, transmitter, receiver and probes of the thre-component TEM system

收稿日期: 2018-04-20;修回日期: 2018-07-11

基金项目: 国土资源公益性行业科研专项经费项目“深井地—井 TEM 系统实用化与推广应用”(201511031)

作者简介: 杜庆丰(1963-),男,教授级高级工程师,主要从事瞬变电磁法研究工作。Email: duqingfeng@igge.cn

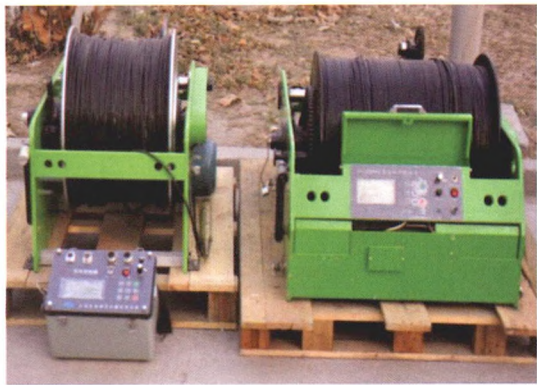


图 2 1000 m、2000 m 塑胶电缆专用绞车
Fig.2 Special winches for 1000 m and
2000 m plastic cables

2 三分量坐标系的确定

地—井 TEM 坐标系目前尚不统一,本文定义的坐标系如图 3 所示。如此定义坐标系的理由有三: x 为北、 y 为东,这样可使其与大地坐标的北(x)、东(y)一致,亦即与地形图的坐标一致; z 为下,与瞬变电磁教科书的多数示意图中的磁场方向一致; x 、 y 、 z 三个分量的正方向适用于右手定则(右手笛卡尔坐标系)。

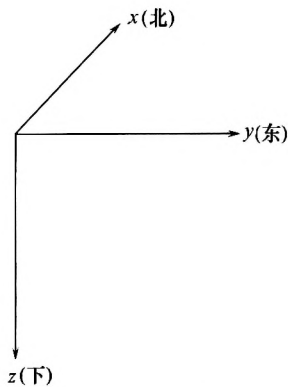


图 3 地—井 TEM 坐标系
Fig.3 Coordinate system of surface-borehole TEM

3 探头角度系统偏差的测定

TEM 探头在井中是可以自由转动的,即探头中的 x 、 y 线圈的方向是不可控的,探头在井中各测点的转角、倾角及方位角等参数由安装在同一探头中的定向器给出。在安装探头中的 TEM 线圈和定向器时,难以使得 TEM 线圈的北(x)、东(y)与定向器相应的北、东轴完全一致,为此,每个探头成为产品之前均须通过实际测量,测定出 TEM 线圈的 x 、 y 线圈的法线方向与定向器北、东轴的角度偏差。

为测得这些角度数据,制作了专门装置。装置上包含一个与该装置固定在一起的可发射磁场的线圈,当该线圈的角度被确定时,通过旋转探头使 TEM 线圈接收的值达到最大或最小的方式确定出 TEM 线圈的角度,而此时同时读取测向器的重、磁参数并计算出相应角度,TEM 线圈的角度与测向器相应角度之差便是我们需要的角度偏差值。

TEM 线圈的北、东、下各轴与测向器相应轴的夹角在下文中计作: φ_x 、 φ_y 、 φ_z 。角度偏差测定的具体装置情况及具体测量过程可参见参考文献[3]。

4 三分量的校正运算

4.1 井中定向器角度的计算

各厂家的定向器其坐标系定义不尽相同,由定向器测量结果计算的滚角、倾角、方位角的表达式便不同。文中用图 3 中的地—井 TEM 坐标系来定义定向器的 x 、 y 、 z 坐标,在此坐标系下,整理的各角度的计算公式如下。

1) 由重力参数计算重力滚角 θ :

$$\cos\theta = \frac{g_y}{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}},$$
$$\sin\theta = \frac{g_x}{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}},$$
$$\tan\theta = \frac{g_x}{g_y}。$$

2) 由磁性参数计算磁滚角 θ_m :

$$\cos\theta_m = \frac{-H_y}{(H_x^2 + H_y^2)^{1/2}},$$
$$\sin\theta_m = \frac{-H_x}{(H_x^2 + H_y^2)^{1/2}},$$
$$\tan\theta_m = \frac{H_x}{H_y}。$$

3) 由重力参数计算倾角 ε :

$$g = (g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)^{1/2},$$
$$\cos\varepsilon = \frac{g_z}{g},$$
$$\sin\varepsilon = \frac{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}}{g},$$
$$\tan\varepsilon = \frac{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}}{g_z}。$$

4) 由重力、磁性参数计算的方位角 ϕ :

$$H_{x'} = \frac{H_x \cdot g_y + H_y \cdot g_x}{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}},$$

$$H_y = \frac{H_x \cdot g_x + H_y \cdot g_y + H_z \cdot g_z}{g},$$

$$H_{z'} = \frac{H_z \cdot (g_x^2 + g_y^2) - H_x \cdot g_x \cdot g_z - H_y \cdot g_y \cdot g_z}{g \cdot (g_x^2 + g_y^2)^{1/2}},$$

$$\cos \phi = \frac{H_{z'}}{(H_{z'}^2 + H_{x'}^2)^{1/2}},$$

$$\sin \phi = \frac{-H_{x'}}{(H_{z'}^2 + H_{x'}^2)^{1/2}},$$

$$\tan \phi = \frac{-H_{x'}}{H_{z'}}.$$

上述各式中, H_x 、 H_y 、 H_z 、 g_x 、 g_y 、 g_z 分别为测向器测得的磁性及重力参数; g 、 $H_{x'}$ 、 $H_{y'}$ 、 $H_{z'}$ 、 $V_{x'}$ 、 $V_{y'}$ 、 $V_{z'}$ 、 V_{zy}' 等为中间变量。定向器各角度的定义见图 4。

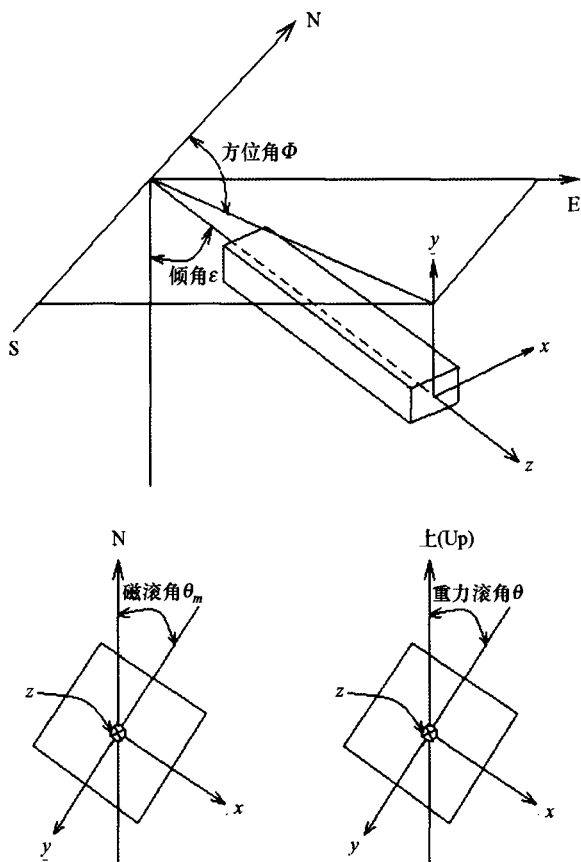


图 4 定向器各角度示意

Fig.4 Schematic diagrams of the orientation angles

4.2 TEM 三分量的校正计算

TEM 探头测得的分别是 x 、 y 、 z 各线圈法线方向上的感应电动势的值, 为将全井的观测结果校正至图 3 的地—井 TEM 坐标系, 推导出校正计算公式。

1) 倾角 $\varepsilon < 3.0$ 度时的校正计算:

$$V_{xy0} = (V_{x0}^2 + V_{y0}^2)^{1/2},$$

$$V_z = V_{x0} \cdot \cos(\varepsilon - \varphi_z) + V_{xy0} \cdot \sin(\varepsilon - \varphi_z),$$

$$V_x = V_{x0} \cdot \cos(\theta_m - \varphi_x) - V_{y0} \cdot \sin(\theta_m - \varphi_y),$$

$$V_y = V_{x0} \cdot \sin(\theta_m - \varphi_x) + V_{y0} \cdot \cos(\theta_m - \varphi_y).$$

2) 倾角 $\varepsilon \geq 3.0$ 度时的校正计算:

$$V_{x'} = V_{x0} \cdot \sin(\theta - \varphi_x) + V_{y0} \cdot \cos(\theta - \varphi_y),$$

$$V_{y'} = V_{x0} \cdot \cos(\theta - \varphi_x) - V_{y0} \cdot \sin(\theta - \varphi_y),$$

$$V_{zy}' = V_{x0} \cdot \sin(\varepsilon - \varphi_z) - V_{y'} \cdot \cos(\varepsilon - \varphi_z),$$

$$V_x = V_{x'} \cdot \cos \phi + V_{zy}' \cdot \sin \phi,$$

$$V_y = V_{x'} \cdot \sin \phi - V_{zy}' \cdot \cos \phi,$$

$$V_z = V_{x0} \cdot \cos(\varepsilon - \varphi_z) + V_{y'} \cdot \sin(\varepsilon - \varphi_z).$$

上述各式中: V_{x0} 、 V_{y0} 、 V_{z0} 为实测的感应电动势数据; φ_x 、 φ_y 、 φ_z 分别为 TEM 线圈的北、东、下轴至测向器相应轴的夹角(逆时针为正,顺时针为负); $V_{x'}$ 、 $V_{y'}$ 、 V_{zy}' 、 V_{xy0} 为中间变量; V_x 、 V_y 、 V_z 为经三分量校正计算后的感应电动势结果数据。三分量校正计算的具体计算过程参见文献[4]。

5 数据处理

地—井瞬变电磁数据处理内容包括: 数据编辑、滤波, 三分量校正运算, 异常识别及分析处理。

6 应用效果

运用自行研制的 IGGITEM4.0 地—井瞬变电磁仪器系统, 在新疆哈密白石泉 506 钻孔中开展了测量工作, 下述三组图分别为 x 、 y 、 z 三个分量的感应电动势剖面。

图 5、图 6、图 7 的三组图所示的感应电动势数据质量良好, 除进行了必要的三分量校正运算外未作圆滑、滤波等处理, 即这三组图是由原始数据直接绘制而成的。图中主要异常段位于 320~390 m, 通过对图件的定性分析及使用我们研制的处理软件计算, 对该井的异常分析结果如下。

z 方向: 在 360 m 深度处, 早期为弱的正异常, 钻孔在该处穿过低阻体(边缘); 晚期为负异常, 表明钻孔旁侧有低阻体, 由异常衬度可见, 该低阻体规模较大。

x 、 y 方向: 由早期 x 、 y 感应电动势剖面曲线可见, 钻孔穿过低阻体, 该低阻体向南倾斜, 其主体位于钻孔西侧偏北; 由晚期 x 、 y 感应电动势剖面曲线可见, 钻孔旁侧有较大规模的低阻体, 该低阻体向北倾斜, 其主体位于钻孔东侧偏南。

在 x 、 y 、 z 的中期道, 由于钻孔所穿过低阻体异常(正异常)与钻孔东侧较远处的低阻体的异常(负异常)反向, 两种异常在中期道相互抵消, 故中期道

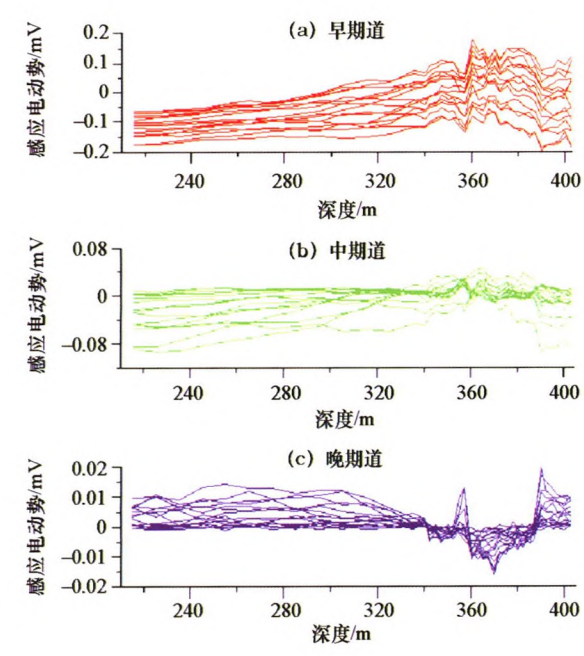


图 5 白石泉 506 钻孔 x 分量早、中、晚期
感应电动势剖面

Fig.5 X-component profiles of induced electromotive force in early, middle and late stages of Baishiquan 506 borehole

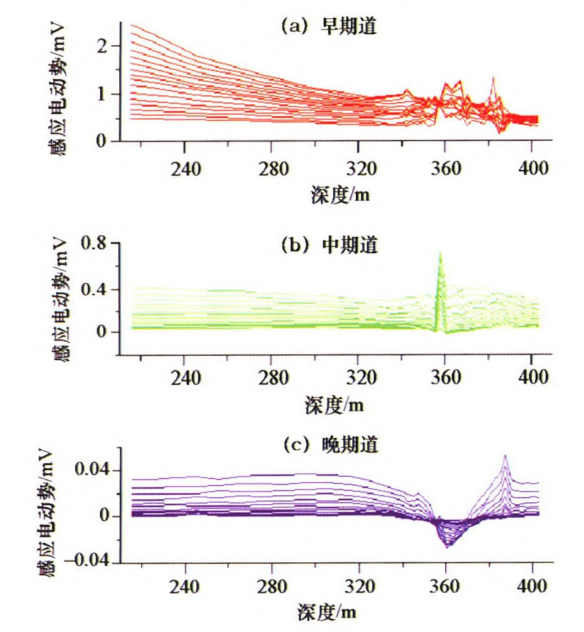


图 7 白石泉 506 钻孔 z 分量早、中、晚期
感应电动势剖面

Fig.7 Z-component profiles of induced electromotive force in early, middle and late stages of Baishiquan 506 borehole

感应电动势相对早、晚期而言异常不够明显。

7 结论与建议

经实际勘查工作检验,这套地—井瞬变电磁法

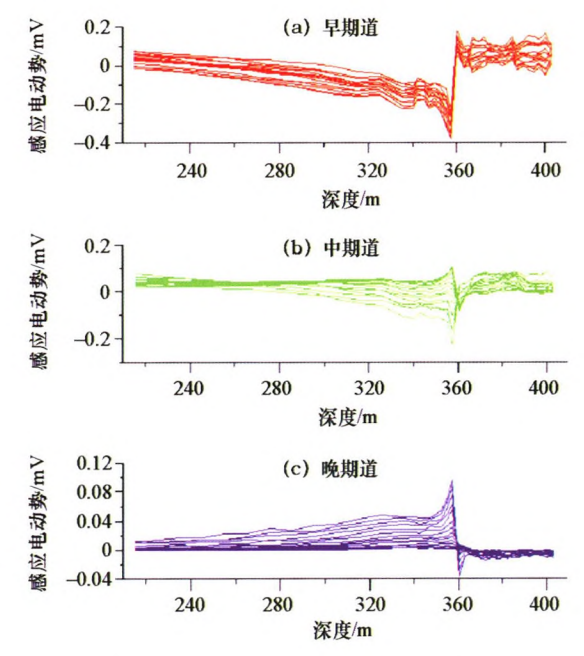


图 6 白石泉 506 钻孔 y 分量早、中、晚期
感应电动势剖面

Fig.6 Y-component profiles of induced electromotive force in early, middle and late stages of Baishiquan 506 borehole

系统性能稳定,测量结果是正确的;经多次测试,开发的三分量校正计算软件,计算结果正确,研制的数据处理程序可基本满足勘查工作的需要。

这套自主研发的地—井瞬变电磁法系统已基本接近实用,并初步形成一套较完整的应用技术,建议对该系统做进一步的完善并加大推广使用的力度,以使我国可更快、更好、更广泛地开展地—井瞬变电磁法的勘查工作。

致谢:在地—井瞬变电磁法系统的实用化应用中,得到了新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队、青海省第三地质矿产勘查院、内蒙古国土资源勘查开发院的大力支持,在此表示感谢。

参考文献 (Reference) :

[1] 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.
Jiang B Y. Applid near zone magnetic source transient electromagnetic exploration[M].Beijing: Geological Publishing House,1998.

[2] 杜庆丰.瞬变电磁(TEM)数据组合滤波[J].地质与勘探,2002,38(s):129-131.
Du Q F. TEM data composite filter[J].Geology and Prospecting, 2002,38(s):129-131.

[3] 黄跃,沈钟,冯晓兰,等. TEM 井中磁探头的校准装置及校准方法:发明专利证书号第 2231480 号[P].2016-09-07.
Huang Y, Shen Z, Feng X L, et al. Calibration device and calibration method of surface-borehole TEM magnetic probe: Invention Patent Certificate No.2231480[P].2016-09-07.

[4] 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所.地—井瞬变电磁(TEM)三分量校正软件 1.0;软著登字第 0663591 号[CP]. 2013-12-26.
Institute of Geophysical and Geochemical Exploration. Surface-borehole TEM three-component correction software 1.0: Computer software copyright registration No.0663591 [CP]. 2013-12-26.

[5] 张杰,邓晓红,谭捍东,等. 地—井瞬变电磁资料矢量交会解释方法[J].物探与化探,2015,39(3):572-579.
Zhang J,Deng X H,Tan H D,et al.A study of vector intersection for borehole transient electromagnetic method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(3):572-579.

[6] 武军杰,李貅,智庆全,等. 电性源地—井瞬变电磁法三分量响应特征分析[J].地球物理学进展,2017,32(3).
Wu J J,Li X,Zhi Q Q,et al.Analysis of three component TEM response characteristic of electric source dill hole TEM[J].Progress in Geophysics (in Chinese),2017,32(3).

[7] 孟庆鑫,潘和平,牛峥. 大地介质影响下地—井瞬变电磁的正演模拟分析[J].中国矿业大学学报,2014,43(6).
Meng Q X,Pan H P,Niu Z. Forward simulation of surface-borehole TEM in geological medium effect[J].Journal of China University of Mining & Technology, 2014,43(6).

[8] 李建慧,刘树才,焦险峰,等. 地—井瞬变电磁法三维正演研究[J].石油地球物理勘探,2015,50(3):556-564.
Li J H,Liu S C,Jiao X F, et al. Three-dimensional forward modeling for surface-borehole transient electromagnetic method[J].Oil Geophysical Prospecting,2015,50(3):556-564.

[9] Xue G Q, Qin K Z, Li X, et al. Discovery of a largescale porphyry molybdenum deposit in tibet through a modified TEM Exploration Method[J]. JEEG, 2012,17(1): 19-25.

[10] Guo J L, Zeng Y Q, Li X. Numerical simulation analysis of surface-to-borehole TEM based on the finite difference method[C]// International Workshop and Gravity,Electrical & Magnetic Methods and their Applications, 2015;115-118.

[11] Swidinsky A, Nabighian M. On smoke rings produced by a loop buried in a conductive half-space[J]. Geophysics, 2015, 80(4): E225-E236.

[12] Annetts D. Inversion of surface and downhole electromagnetic data for a 3D earth[C]// 22nd ASEG Geophysical Conference, Extended Abstracts, 2012; 1-3.

[13] Buselli G, Lee S K. Modelling of drill-hole TEM response from multiple targets covered by a conductive overburden [J]. Exploration Geophysics, 1996, 27(3): 141-153.

[14] Gao J, Zhao A B, Peng F, et al. Inversion of array induction logs and its application[J]. Petroleum Science, 2007, 4(3): 31-45.

[15] Hughes N A, Ravenhurst W R. Three componet DHEM surveying at balcooma[J]. Exploration Geophysics, 1996, 27: 77-89.

Research on key technical problems of surface-borehole TEM

DU Qing-Feng, FENG Xiao-Lan, HUANG Yue

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS,Langfang 065000,China)

Abstract: Surface-borehole TEM method has achieved good results in exploration in Canada and Australia. Due to the lack of complete technology from equipment to data processing and interpretation, the method has not been widely used in China. The authors developed the surface-borehole TEM instrument and, at the same time, systematically studied the determination of the three component coordinates of the surface-borehole TEM, the measurement of the deviation of the probe angle, the correction of the three components, and the analysis and calculation of the orientation and distance of the target body, which achieved good application results in actual measurement.

Key words: surface-borehole TEM; measuring the deviation of the angle of the probe; three component correction; target body location

(本文编辑:沈效群)