

doi: 10.11720/wtyht.2018.1383

杨天春,梁竞,程辉,等.天然电场选频法的浅层地下水勘探效果与异常分析[J].物探与化探,2018,42(6):1194-1200.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1383

Yang T C, Liang J, Cheng H, et al. The effect and the anomaly analysis of shallow groundwater exploration based on the frequency selection method of natural electric field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1194-1200. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1383

天然电场选频法的浅层地下水勘探效果与异常分析

杨天春¹, 梁竞², 程辉³, 曹书锦¹, 董绍宇¹, 宫玉菲¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 广西贵港工程地质勘察院 广西二七三地质队, 广西 贵港 537101; 3. 湖南科技大学 先进矿山装备教育部工程研究中心, 湖南湘潭 411201)

摘要: 通过实践应用、理论推导和模拟计算,说明天然电场选频法在浅层地下水勘探中的有效性,并分析其异常形成过程中起主要作用的天然一次场场源分量。将选频法应用于广西农村找水打井项目中,依据其勘探成果共钻井 131 口,出水量大于 $1\text{ m}^3/\text{h}$ 的井共 114 口,约占钻井总量的 87%。实践表明选频法在浅层地下水勘探中是实用可行的。在实践应用和以往研究成果的基础上,设计均匀半空间内球形充水岩溶的简单模型,以便解析求解并计算分析地表剖面上二次电场的大小;计算结果表明,水平交变磁场产生的二次电场是一个相对高电位异常,而水平交变电场才产生相对低电位异常,由此推断天然电场选频法在地下水勘探中异常的形成主要是由于地下天然交变电场分量作用的结果。

关键词: 天然电场选频法;地电场;地下水;电磁场;游散电流

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2018)06-1194-07

0 引言

天然电场选频法简称选频法,一般认为它与大地电磁测深法相同,是以大地电磁场作为工作场源,以地下岩(矿)石之间导电性差异为基础,通过在地面上测量天然交变电磁场产生的几个不同频率的电场水平分量的变化规律,来研究地下地电断面的电性变化。该方法的实践应用是由音频大地电磁法(AMT)演化而来,所采用的工作频率大多为 $15\text{ Hz} \sim 1.5\text{ kHz}$,它是由我国学者提出来的,到目前为止未见到国外相关研究文献。国外曾采用的大地电流-大地电流剖面法(telluric-telluric profiling)与选频法有些相似之处^[1,2],它是从磁大地电流法中派生出来,且在应用中一般还选择一个固定的参考点,工作的频率也不一样,如 TELMAG 的工作频率为 3、5、8、

13、21、34、80、170、380、680、1 300、2 500 Hz。此外,大地电流-大地电流剖面法常与磁大地电流法结合起来使用,计算出磁大地电流的假视电阻率,由此可以得到更好的地质效果^[3]。20 世纪 40 年代国外曾有人提出过利用工业游散电流找矿的设想,但未实现^[4]。

20 世纪 80 年代,国内学者先后提出了游散电流法(或称为音频大地电位法)、声频大地电场法(简称声电法)、天然低频电场法(简称天电场法)、天然电场选频法;90 年代,又有少数学者在文献中提到地电选频法、音频大地电场法、天然交变电场法等。1990 年左右,鲍光淑等提出了干扰电场法,成功研制了 16 个测量通道的干扰电场仪,并与地矿部湘南地质队合作开展了利用干扰电场找矿的可行性和有效性研究,干扰电场仪先后在 13 个干扰场区、5 个矿区 21 条试验剖面上,系统扫描观测 33 000 条曲

收稿日期: 2017-09-01;修回日期: 2018-03-01

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目(16K031);湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(2016JJ5023)

作者简介: 杨天春(1968-),男,湖南津市人,教授,博士,主要从事地球物理方面的教学和研究工作。Email: ytc6803@163.com

线^[4]。近年来,又有学者提出地下磁流体探测法。根据上述学者所研制或使用仪器的原理、方法特点来看,这些方法本质上都是相同的,故在此统称为天然电场选频法。与其他物探方法相比,选频法在实践应用中具有快速简便、易于操作、成果直观等优点,因此,自 20 世纪 80 年代以来,选频法主要在地下水资源勘探、水灾害勘查方面取得了显著效果,并逐渐得到了广泛应用和发展^[5-9]。

天然电场选频法属天然被动源的方法,其场源很复杂。有人认为其一次场场源与大地电磁法完全相同,来源于地球外部;有人则认为来源于地球内部地幔软流层及之下地磁场向上辐射的电磁波;还有人认为是游散的工业电流所致。因此,也就形成了对该方法的多种称呼。对于选频法的实测资料反演,一般认为 U 形、V 形、阶梯形电位剖面曲线分别对应宽破碎带、窄破碎带和岩层界限;对异常体深度反演都是根据经验定性推断,或者是选用其他物探方法辅助确定;近年来,逐渐开始在实践中应用选频测深法确定含水层的埋深^[9]。2013 年,杨天春等曾从正演理论和试验入手,对选频法剖面异常的成因开展过初步研究,依据大地电磁理论,推导并计算了二维情况下,垂直断层、良导体球体、水平圆柱体等简单地质地球物理模型的选频法异常,说明天然电场选频法异常的成因是由天然感应二次电场所致;2016 年又对三维电磁场共同作用下,地下导电导磁球体的地表电场分量进行过正演探讨,说明了天然电场选频法所测得的地表水平电场分量主要是由天然的水平交变电场、水平交变磁场共同作用的结果^[5,7,10]。选频法的场源是比较复杂的,但不管它来自地球外部、地球内部,还是游散的电流场,在直角坐标系中,若认为场源距离研究区域非常远,则可将一次场场源分解为简单的水平电场、水平磁场的共同作用。该方法在地下水勘探中剖面异常的形成,水平电场分量、磁场分量各自的作用效果如何呢?这是本文探讨的主要内容。

1 实践应用

在广西“十二五”农村饮水安全工程找水打井项目中,广西贵港二七三地质队 2013~2015 年承担了武宣县、平乐县、恭城县、藤县、容县、覃塘区、港北区等地的地下水勘探及钻井工作,采用天然电场选频法开展前期地球物理勘探工作,根据选频法成果共钻井 131 口,钻井的最大深度为 142.8 m。其中,无水孔(即出水量 $\leq 1 \text{ m}^3/\text{h}$)17 个、有水但水量小的

孔(即 $1 \text{ m}^3/\text{h} < \text{出水量} < 5 \text{ m}^3/\text{h}$)29 个、成井孔(即出水量 $\geq 5 \text{ m}^3/\text{h}$)85 个;若按成井孔计算则成井命中率约为 64.9%;若将小水量的孔计算在内,则成井命中率约为 87%。由此可见,天然电场选频法在浅层地下水勘探中是一种行之有效的方法。

图 1、图 2 分别为广西平乐县沙子镇格水塘村、武宣县武宣镇清水村的天然电场选频法剖面探测成果及其这两地剖面异常点处的选频测深曲线,图中各曲线旁边的数据代表不同的探测频率。实际工作中,剖面工作的电极距 MN 为 10 m,点距也为 10 m;选频法测深工作时,电极 M 、 N 对称于测深点,极距逐渐增大,步长为 10 m。

格水塘村位于恭城河岩溶平原地的西侧一带,基岩的主要岩性为灰岩。测区上部(Qh)土层一般为亚砂土、亚黏土,下部为砂砾石层,含孔隙水,层厚一般在 3.5~7 m 之间;第四系(Q)土层主要为坡残积层黏土、亚黏土亚黏土夹砾石不含水,层厚一般在 5~13 m 之间。泥盆系上统(D_3)主要分布于该村北西侧和北东侧一带,主要为厚层灰岩、灰黑色薄层状硅质岩,地层厚度一般为 119~410 m。

由图 1a 可知,格水塘村测线上明显的相对低电位异常位于 11、20 号点附近,由于相邻的平行测线上的 11 号点附近没有异常,最终确定该测线 20 号点为成井位置。图 1b 为 20 号点处的选频法测深成果曲线,图中 25 Hz、67 Hz 两个频率档在 $MN=50 \text{ m}$ 、60 m 附近同时出现较明显的 V 形低谷,由此预测地下水的埋深约为 50 m。钻探揭露:钻井深 102.2 m,0~10 m 为残积黏土,黄褐色,夹少量细砂、卵石,钻进返水为黄色;10~102.2 m 为灰岩,灰色,细晶结构,中—厚层状,节理裂隙、溶蚀发育,岩心多呈短柱状、长柱状;钻进返水较黄;15.2~16.4 m 段为充填溶洞;54~62 m 段很破碎,裂隙发育,钻进时孔内有明显漏水现象,含水性较好,为本孔的主要含水段;该井出水量 $>5 \text{ m}^3/\text{h}$,采用 5 t 泵抽水时,井内水位最大降幅只有 5 cm。可见,钻孔实测的含水层埋深的中间值约为 58 m, MN 异常极距(50 m)与钻井出水埋深(58 m)之比约为 0.86。

清水村位于黔江东岸岩溶准平原中南部一带,下伏基岩主要为灰岩,工作区未见基岩出露地表,测区一带下伏基岩岩溶较发育。该区第四系(Q)上部为褐黄色黏土层,下部为含碎石亚黏土,整个覆盖层厚度为 10~30 m。石炭系中统大埔组(C_2d)主要分布于第四系覆盖层下部,岩性主要为中—厚层状白云岩夹灰岩、白云质灰岩,地层厚度为 345~660 m。

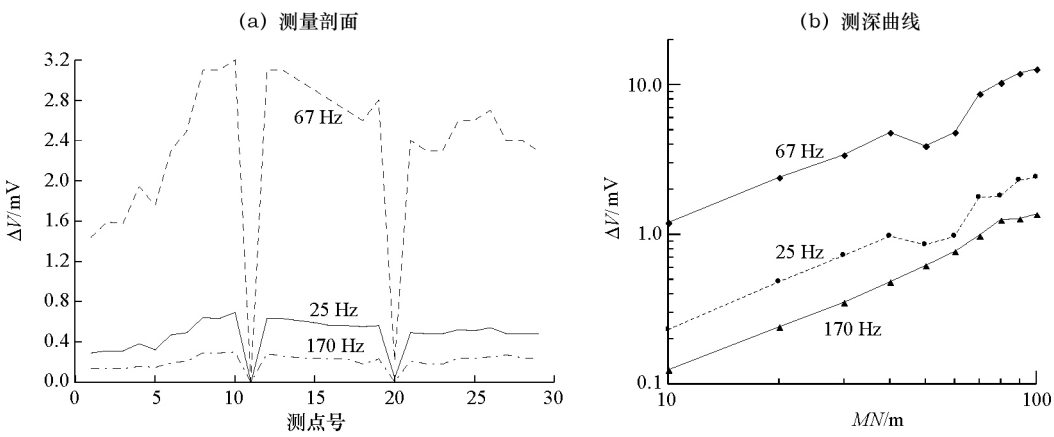


图 1 格水塘村天然电场选频法剖面探测成果 (a) 及测深成果 (b)

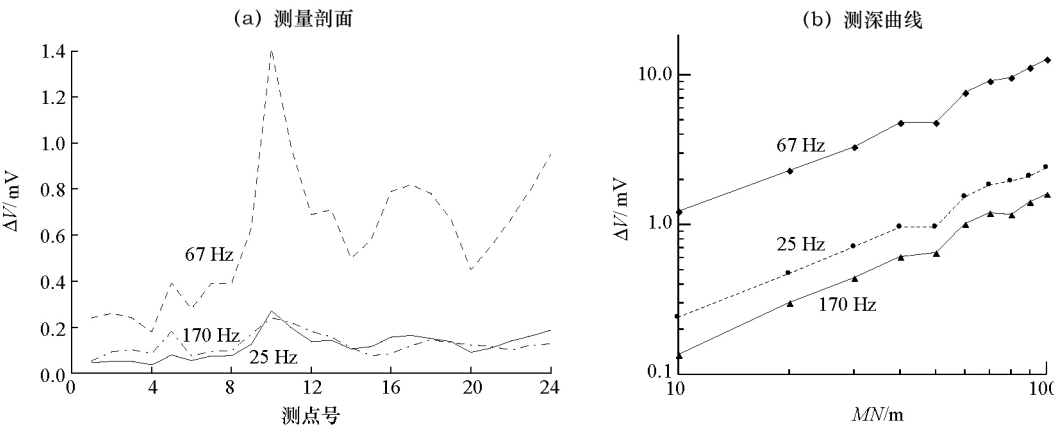


图 2 清水村天然电场选频法剖面探测成果 (a) 及测深成果 (b)

图 2a 中确定的清水村相对低电位异常点定为测线 20 号点,因为该处的相对异常幅度大一些,同时也是结合了现场地形地质情况来确定的。图 2b 为该点处的选频法测深成果曲线,图中 3 个频率测深曲线在 $MN=40\text{ m}\sim 50\text{ m}$ 段近似水平, $MN=50\text{ m}$ 时的探测结果未遵循递增的规律,出现转折的相对低异常,为相对的 V 形低谷,推测地下水的埋藏深度约为 45 m。该异常点位的钻探情况:钻井深度 84.4 m,0~13.5 m 为残积黏土,黄色,钻进返水为黄色;13.5~84.4 m 为灰岩,深灰色,岩芯较完整—较破碎,局部节理裂隙发育。其中,54.5~55 m 为充水溶洞;55~64.7 m 段岩芯破碎,节理裂隙发育,多见溶蚀孔,钻进时有漏水现象;这两段透水性和富水性好,为本孔主要含水层,该井出水量 $>5\text{ m}^3/\text{h}$ 。所以,钻探揭露的浅部充水溶洞的埋深约为 55 m, MN 异常极距(45 m)与钻井揭露的埋深(55 m)之比约为 0.82。

由以上的实践应用效果来看,天然电场选频法的剖面异常一般具有低电位的对称曲线特征,一般

呈现“V”或“U”形,异常具有对称性,这一点从以往的应用实例中也可看到;就浅层地下水的勘探而言,根据实践总结,测深曲线异常处极距的大小 MN 与含水层实际埋深存在 1:1 的大致关系^[9];就图 1、图 2 选定的工作频率来说,67 Hz 的信号总是强一些,这可能与工业游散电流的存在有关。由此还可知,选频法的测深效果似乎与 AMT 法的理论不一致,频率测深法中勘探深度与频率是直接相关的,而此处的应用效果是与极距相关;因此,分析其场源问题是有必要的。

2 场源分析及均匀半空间交变电磁场中的球体

天然电场选频法是一种被动源的电法勘探方法,其异常电场产生的原因很复杂,场源问题一直还有争论。笔者认为该方法的场源包括两部分:一是地球外部因素引起的交变电磁场,它与常用的大地电磁场测深法的场源是相同的;二是地表人文因素

引起的交变电磁场,包括工业用电等引起的游散电流场和人文电磁干扰信号等^[11-12]。从前面实测的成果曲线图 1、图 2 中也可看到,67 Hz 的信号在这三个频率中总是最强的,这可能是由于 67 Hz 的信号最接近我国的工业用电频率 50 Hz,地下游散电流的频率就是 50 Hz 所致。从以往大多成功的实例来看,选频法在地下水勘探中的深度一般较小,一般< 150 m;就可控源音频大地电磁法而言,收发距大于 3 倍趋肤深度时可近似认为进入远区^[13];可见,天然电场选频法在常见的勘探深度范围内一般都避开了人文干扰,即地表人文干扰引起的交变电磁场一般可认为是远场源。所以,天然电场选频法中的场源并非完全天然的,“天然场”在此是一个广义的概念,就像甚低频法一样,只是有些电磁场信号并非为了勘探的目的而人为供入地下的。

尽管地下大地电磁场信号的成份是非常复杂的,但综合上述分析,并根据 CSAMT 远场区的特点,在图 3 所示的直角坐标系中,一定深度处的“天然”交流一次场场源信号有:水平方向的交变电场分量,游散电流场等的合矢量 E_x 、 E_y ,水平的交变磁场 H_x 、 H_y 和(游散电流场中的)垂直的交变电场 E_z 。

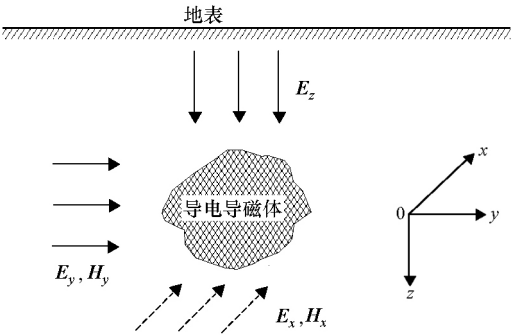


图 3 地下天然交变电磁场分量示意图

在远离人文干扰场的地方可认为没有 H_z 分量的存在,这一点杨天春等也从理论上给予了论证^[7]。对于一个如图 4 所示良导的低阻球体而言,若存在垂直交变一次磁场 H_z 的作用,在考虑三维交变磁场作用时,对地下导电导磁球体正演计算得到的地表水平方向异常电场分量 $|E_x|$ 曲线存在不对称现象,这与野外实测结果发生矛盾;另外,由于天然电场选频法只观测地表电场的水平分量,因此 E_z 即使存在,它对选频法异常的形成也没有作用,可不考虑该分量的作用。

由上分析可知,对如图 4 所示的均匀半空间介质中的导电导磁球体而言,选用天然电场选频法进行勘探时,在认为远场区作用于该球体的“天然”一

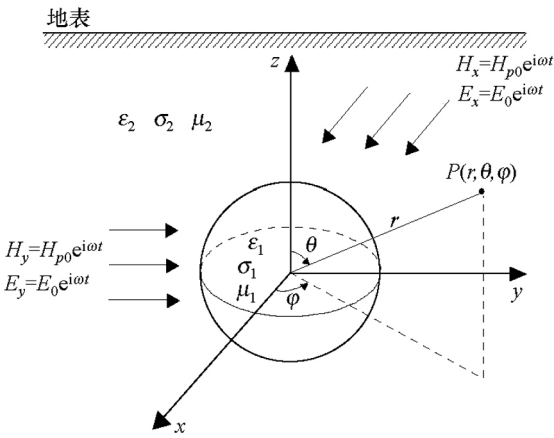


图 4 半空间天然交变电磁场中的球体

次电磁场分量只有 E_x 、 E_y 、 H_x 和 H_y 。杨天春等曾用自制磁探头连接自制的 MFE-1 天然电场选频仪对天然磁场的地表水平分量进行过测试,结果表明天然磁场水平分量的相对大小差别不大^[12]。为使问题简化,假设图 4 中的一次场 E_x 与 E_y 、 H_x 与 H_y 分别相等,且 $E_x = E_y = E_0 \cdot e^{i\omega \cdot t}$ 、 $H_x = H_y = H_{p0} \cdot e^{i\omega \cdot t}$,球体半径为 a ,其介电常数、电导率和磁导率分别为 ϵ_1 、 σ_1 、 μ_1 ,围岩相应的参数分别为 ϵ_2 、 σ_2 、 μ_2 。如图 4 所示的球坐标系中,观测点的坐标为 $P(r, \theta, \varphi)$ 。

在电导率 $\sigma \neq 0$ 的介质中,自由体电荷密度 q 不能堆积在某一处,则大地电磁场的传播服从麦克斯韦方程组。采用分离变量法,可得一次磁场分量 H_x 作用下产生的球外二次电场^[7,14-15]:

$$E_{2y} = - [C_1 J_{3/2}(k_2 r) + D_1 J_{-3/2}(k_2 r)] \cdot \frac{1}{\sqrt{k_2 r}} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \tag{1}$$

$$E_{2z} = [C_1 J_{3/2}(k_2 r) + D_1 J_{-3/2}(k_2 r)] \cdot \frac{1}{\sqrt{k_2 r}} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \tag{2}$$

同理,一次磁场分量 H_y 作用产生的球外二次电场为

$$E_{2x} = - [C_1 J_{3/2}(k_2 r) + D_1 J_{-3/2}(k_2 r)] \cdot \frac{1}{\sqrt{k_2 r}} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \tag{3}$$

$$E_{2z} = [C_1 J_{3/2}(k_2 r) + D_1 J_{-3/2}(k_2 r)] \cdot \frac{1}{\sqrt{k_2 r}} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}。 \tag{4}$$

式(1)~(4)中, $J_{3/2}(kr)$ 及 $J_{-3/2}(kr)$ 为复宗量贝塞尔函数, k_2 为围岩的波数, $k_2^2 = \omega^2 \epsilon_2 \mu_2 - i\omega \mu_2 \sigma_2$ 。系数 C_1 、 D_1 分别为

$$C_1 = - \frac{i\omega 3 \sqrt{\pi} \mu_1 \mu_2 H_p k_1^2 a^3}{2\sqrt{2} \{ (\mu_2 - \mu_1) p_1 \cos p_1 - [\mu_2 (1 - p_1^2) - \mu_1] \sin p_1 \} },$$
$$D_1 = - \frac{a^3}{2\sqrt{2}} \frac{(2\mu_1 + \mu_2) p_1 \cos p_1 - [\mu_2 (1 - p_1^2) + 2\mu_1] \sin p_1}{(\mu_2 - \mu_1) p_1 \cos p_1 - [\mu_2 (1 - p_1^2) - \mu_1] \sin p_1} i\omega \sqrt{\pi} \mu_2 k_2^2 H_p.$$

上两式中： $p_1=k_1a$ ， k_1 为球体介质的波数，当忽略位移电流时， $k_1^2=-i\omega\mu_1\sigma_1$ 。

对于图 4 中水平方向两个交流电场 $E_0 \cdot e^{i\omega t}$ 的作用，可参考均匀静电场中的导电球的解近似获得^[14,16]。若只考虑异常场，则球外地表异常场的电位分布为

$$U_p = 2 \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \frac{j_0}{\sigma_2} r \sin \theta e^{i\omega t}。 \tag{5}$$

电法勘探一般测量的是电位的梯度，即异常场的电场强度。则由式(5)可得直角坐标系中，沿 y 轴方向($x=0$)地表主剖面上的感应二次电场 E_{2y} 、 E_{2x} 分别为

$$E_{2y} = 2 \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} a^3 \frac{j_0}{\sigma_2} \frac{2y^2 - h_0^2}{(y^2 + h_0^2)^{5/2}} e^{i\omega t}, \tag{6}$$

$$E_{2x} = 2 \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} a^3 \frac{j_0}{\sigma_2} \frac{1}{(y^2 + h_0^2)^{3/2}} e^{i\omega t}, \tag{7}$$

式中： h_0 为球体球心的埋深， $j_0=E_0/\rho_2$ 。

3 模拟计算分析

假定图 4 模型中的球体为充水溶洞，电阻率 $\rho_1=60\ \Omega \cdot \text{m}$ ，球心的埋深 $h_0=30\ \text{m}$ ，其半径 $a=1.5\ \text{m}$ ；围岩为 $\rho_2=3\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$ 的灰岩，围岩及充水岩溶均无磁性；同时，假定 x 、 y 两个方向均存在 $B_0=1\times e^{i\omega t}\text{T}$ 的交变磁场，假定地下半空间中沿 x 方向、 y 方向还存在大小相等的交变电场，令 $E_0=50\times 10^{-3}\times e^{i\omega t}\ \text{V/m}$ 。当交变磁场的频率 f 为 $67\ \text{Hz}$ 时，利用式(1)、式(6)可计算出地表主剖面沿 y 方向的二次异常电场 $|E_{2y}|$ ，图 5a 即为计算结果；同理，地表主剖面沿 y 方向的二次异常电场 $|E_{2x}|$ 的变化也可由式(4)、式(7)获得。由于电法勘探中，主要对异常场感兴趣，下面的计算中仅关心二次异常电场的大小。

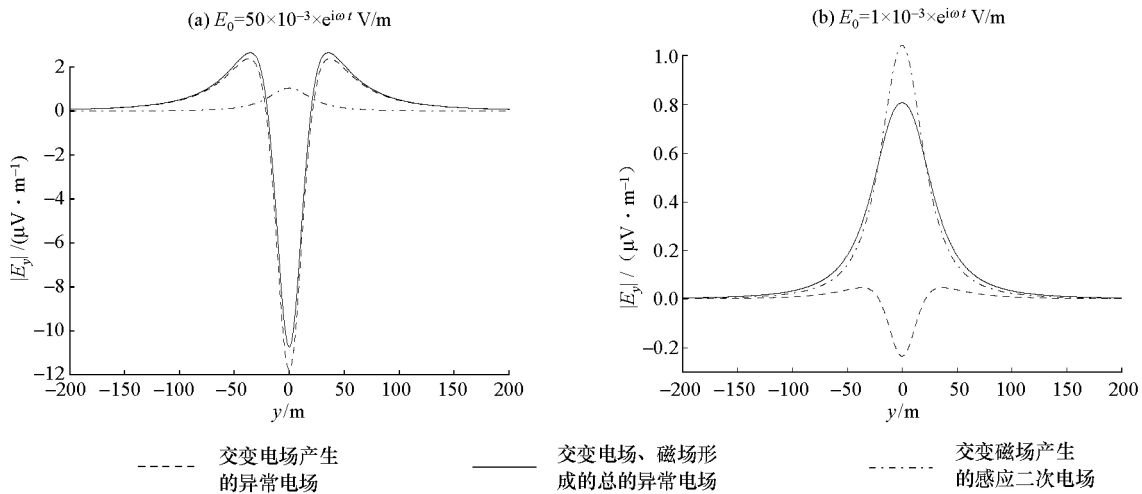


图 5 地表主剖面沿 y 轴方向异常电场强度 E_y 曲线

图 5a 中的计算结果相当于采用平行移动法获得，即测量电极 M 、 N 沿测线以固定的间距移动， MN 的中点为记录点；前面图 1 中的实测结果就是采用平行移动法获得，这是野外最常用的观测方法。图 5a 中的 3 条曲线都关于球体的中心投影位置对称，交变磁场产生的二次电场在球体上方为一较明显的高电位异常，而交变电场产生的二次异常电场为十分明显的相对低电位异常；由此形成的合矢量为非

常明显的相对低电位异常。该异常曲线的形态与前面图 1 中的实测曲线以及以往已知充水岩溶体上的探测结果相似^[6]，由此也推断天然电场选频在浅层地下水勘探中的异常形成原因是“天然的”水平交变电场和交变磁场共同作用的结果。

假设前面模型中的参数 $E_0=1\times 10^{-3}\times e^{i\omega t}\ \text{V/m}$ ，其余参数均不变，同理可计算出交变磁场、交变电场以及它们共同作用产生的二次感应电场或二次相对

异常电场的大小(图 5b)。由计算结果可知,交变磁场、交变电场产生的感应二次电场和二次异常电场曲线的特征与图 5a 相似,但它们叠加矢量的曲线特征则表现为相对高电位异常,并不能反映地下相对低阻异常体的特征。究其原因,主要是由于此时交变磁场产生的相对高电位感应二次电场的大小明显大于交变电场产生的相对低电位异常绝对值的大小,由此矢量叠加形成了相对高电位异常。

在选频法的实际应用中,都是根据相对的低电位异常判断地下水的水平投影位置,并且根据前面的应用实例可知,成功率还非常的高;由此可以断定,由于“天然的”水平交变磁场在地表主剖面上始终是形成高电位的相对异常,天然电场选频法在地下水勘探中的相对低电位异常主要是由“天然的”水平交变电场引起的。所以,有人将天然电场选频法称为游散电流法或干扰电场法也是有一定道理的^[4,16]。

4 结语

本文首先通过分析天然电场选频法在广西“十二五”农村饮水安全工程找水打井项目中的应用情况,对比 131 口钻井与选频法探测成果,说明该方法在浅层(约 150 m 之内)地下水勘探中的有效性,其成井命中率在该项目应用中达到了 64.9% 以上。并且该方法仪器设备轻便、工作效率高、异常直观,对山区、建筑设施较密集的城镇适应性较其他物探方法强,是一种值得进一步推广的浅层地下水地球物理勘探方法。

作者利用均匀半空间中低阻导电球体的简化地质地球物理模型,在水平交变电磁场的共同作用下,根据经典的电磁理论推导出了地表主剖面上感应二次电场和二次异常电场的计算式,并根据模拟计算可知:交变磁场在地表主剖面上产生的感应电场是一个相对高电位异常,而交变电场形成的异常电场

始终是相对低电位异常;由此可以判断,天然电场选频法在地下水勘探中的低电位异常主要是由“天然的”水平交变电场分量所致。

参考文献:

[1] Pham V N, Boyer D, Xue C Y, et al. Application of telluric-telluric profiling combined with magnetotelluric and self-potential methods to geothermal exploration in the Fujian Province, China [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1995, 65(3-4):227-236.

[2] Mlynarski M, Zlotnicki J. Fluid circulation in the active emerged Asal rift (east Africa, Djibouti) inferred from self-potential and Telluric-Telluric Prospecting [J]. Tectonophysics,2001,339(3):455-472.

[3] 李立.磁大地电流法和大地电流—大地电流剖面法[J].物探与化探,1983,7(4):194-198.

[4] 鲍光淑,李大庆,张友山,等.干扰电场仪的研究[J].中国有色金属学报,1994,4(4):9-13.

[5] 杨天春,张辉.利用天然电场选频法研究断层接触带[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2013,28(4):32-37.

[6] 杨天春,申建平,黎光明,等.天然电场选频法在充水岩溶勘查中的试验与分析[J].煤田地质与勘探,2014,42(2):71-75.

[7] 杨天春,张启,王齐仁,等.天然电磁场激励下球体的天然电场选频法异常成因分析[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2016,31(2):58-65.

[8] 程辉,白宜诚.天然音频电场选频仪设计与应用[J].地球物理学进展,2014,29(6):2874-2879.

[9] 梁竞,韦启峰,洪卷,等.自然电场法在岩溶地区找水打井中的应用[J].工程勘察,2016,44(2):68-78.

[10] 杨天春,张辉.岩溶体的天然电场选频法异常成因研究[J].水文地质工程地质,2013,40(5):22-28.

[11] 林君琴,雷长声,董启山.天然低频电场法[J].长春地质学院学报,1983,13(2):114-126.

[12] 杨天春,夏代林,王齐仁,等.天然电场选频法理论研究与应[M].长沙:中南大学出版社,2017.

[13] 汤井田,周聪,肖晓.复杂介质条件下 CSAMT 最小收发距的选择[J].中国有色金属学报,2013,23(6):1681-1693.

[14] Ward S H.地球物理用电磁理论[M].北京:地质出版社,1978.

[15] 何继善.海洋电磁法原理[M].北京:高等教育出版社,2012.

[16] 杨杰.游散电流法在岩溶地区的试验成果及理论研究[J].物探与化探,1982,6(1):41-54.

The effect and the anomaly analysis of shallow groundwater exploration based on the frequency selection method of natural electric field

YANG Tian-Chun¹, LIANG Jing², CHENG Hui³, CAO Shu-Jin¹, DONG Shao-Yu¹, GONG Yu-Fei¹

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. No. 273 Geological Party, Guangxi Guigang Engineering Geological Investigation Institute, Guigang 537101, China; 3. Engineering Research Center for Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Through practical application, theoretical deduction and simulation calculation, the validity of the frequency selection method of natural electric field in shallow groundwater exploration was illustrated, and the natural field source component which plays a major role in the formation of anomaly was analyzed. The method had been applied to 12th Five-Year Plan of the rural drinking water safety project by No. 273 Geological Party of Guangxi in 2013~2015. According to its exploration results, a total of 131 wells were drilled. 114 wells' water output was more than 1m³/h, accounting for about 87.0% of the total amount of drill holes. The practical application shows that the frequency selection method is practical and feasible in shallow groundwater exploration. On the basis of practical application and previous research results, a spherical water filled karst model in uniform half space was designed, and the magnitude of the secondary electric field on the main section of the surface was calculated by using analytic method. The calculated results show that the horizontal alternating magnetic field produces a relatively high potential anomaly, whereas the horizontal alternating electric field produces a relatively low potential anomaly. It can be concluded that the formation of anomaly of frequency selection method in groundwater exploration is mainly due to the effect of alternating electric field components.

Key words: frequency selection method of natural electric field; geoelectric field; groundwater; electromagnetic field; stray current

(本文编辑:沈效群)