

瞬变电磁法在地下水勘查中的应用

张保祥¹, 刘春华¹, 汪家权²

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要:介绍瞬变电磁法的基本原理, 对常见的地下水勘查问题进行室内物理模拟实验和正演计算, 编制用于测量数据处理的计算机程序. 对野外应用实例分析表明, 瞬变电磁法用于地下水勘查效果良好.

关键词:瞬变电磁法; 地下水勘查; 应用实例

中图分类号: P641.7

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)04-0023-03

瞬变电磁法(TEM)是近年来国内外发展较快、地质效果较好的一种电探方法. 它除了具有穿透高阻能力强及人工源随机干扰影响小的优点外, 还具有施工方便、测地工作简单、工作效率高及地质效果好等一系列优点. 该方法主要应用于金属矿勘查、构造填图、油气田、煤田、地下水、地热以及冻土带和海洋地质等方面的研究, 在国内外已取得了令人瞩目的效果.

1 理论基础

1.1 基本原理

瞬变电磁法属时间域电磁感应方法, 其数学物理基础是导电介质在阶跃变化的激励磁场激发下引起涡流场的问题. 它的测量原理是利用不接地回线向地下发送一定波形的一次脉冲磁场, 在该一次磁场的激励下, 地下导体中将产生涡流, 随之产生一个衰变的感应电磁场(二次场)向上传播, 在地表用线圈接收到二次场随时间变化的特征, 将反映地下导电体的电性分布情况, 据此判断地下不均匀体的赋存位置、形态和电性特征.

1.2 瞬变电磁响应

敷设在均匀大地上的发送回线中的电流产生磁力线, 当该回线中电流突然切断的瞬间, 在地下导电半空间中产生感应涡流场, 开始瞬间的电流集中于地表, 随后向下及向外扩散.

$$\text{等效电流}^{[1]}: i = \frac{1}{4\pi c_2(\sqrt{t/\sigma\mu})^2} \quad (1)$$

$$\text{扩散半径}^{[1]}: a = \sqrt{8c_2\sqrt{\frac{t}{\sigma\mu_0}}} \quad (2)$$

$$\text{所在深度}^{[1]}: d = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{t}{\sigma\mu_0}} \quad (3)$$

向下扩散的速度^[1]:

$$v_z = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (4)$$

式中: t 为时间, s; σ 为电导率, S/m; μ_0 为空气的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; $c_2 = 8/(\pi - 2) = 0.546479$.

计算均匀半空间的瞬变电磁响应时, 可把等效电流环看成一系列的二次发送线圈, 由于它在某时刻的半径、深度及电流可根据上述各式计算出, 所以可以很容易地得出在某时刻沿地面测线的响应值以及在某个测点响应值随时间变化的规律.

2 模拟计算

2.1 物理模拟

物理模拟是根据相似性原理用物理方法观测出一定条件下瞬变场的分布特征. 在地下水勘查工作中, 最常见的问题是对层状和断层类含水层以及溶洞类含水层的探测. 在室内模拟实验中, 可将前两类含水层概化为板状导电体类型, 将溶洞类含水层概化为球体状或柱体状导电体类型来看待.

a. 水平圆柱体及球体上的异常特征. 导电水平圆柱体上不同测道的剖面曲线异常为对称于柱顶的单峰, 异常随测道衰减的速度取决于其时间常数. 在球体上方也出现类似于圆柱体的对称于球顶的单峰

基金项目: 山东省科委“综合物探基岩找水技术研究”课题(1992127)

作者简介: 张保祥(1966—), 男, 山东寿光人, 高级工程师, 硕士, 从事水资源开发与水文环境物探研究.

异常,在半径相同的情况下,球体的异常随时间常数衰减的速度要比水平圆柱体快得多,异常的范围也比较小.在直立柱体上,也具有与此类似的规律.

b. 薄板状导体上的异常特征.薄板状导体上的异常形态及幅度与导体的倾角 α 有关,当 $\alpha = 90^\circ$ 时,异常形态为对称于导体顶部的双峰,在顶部出现接近于背景值的极小值,不同测道的曲线除了异常幅度及范围有所差别外,都具有相同的形态特征.当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时,随着 α 的减少,回线与导体间耦合增强,异常响应幅度也随之增加,但双峰不对称,在导体倾向一侧的峰值大于另一侧,两侧峰值之比主要受 α 的影响.

c. 导电覆盖层对异常的影响.有限导体在晚期按指数规律衰减,在时间常数较大时,其衰减速度可能比导电覆盖层上响应的衰减速度要慢,因此,在早期由于发、收回线与覆盖层之间的耦合比与导体的耦合要强,所观测到的信号主要反映的是覆盖层的响应,在晚期主要反映的是导体.

2.2 正演计算

针对工作中经常遇到的有关地下水方面的问题,总结和概括出了几种典型的地下水勘查类型,并分别对其进行了正演模拟计算.

a. 松散层中的地下水问题.在第四系松散地层中,古河道和砂砾石透镜体是较好的含水层,它们呈高阻反映,由正演计算可知,瞬变电磁法对高阻层的探测能力较低,因此,在实际工作中遇到此类地下水问题时一般不用瞬变电磁法进行勘查.

b. 基岩地区层状含水层中的地下水问题.某些赋水性较好的岩层,其含水层厚度往往很大,在这种情况下,利用瞬变电磁法可以解决下面几个问题:确定含水层埋深;确定含水层的厚度;根据测量电阻率

估算含水层水质变化情况.

c. 海(咸)水入侵区的地下水问题:在潜水含水层地区,利用瞬变电磁法可以确定出咸水层的埋深和厚度.在承压含水层受海(咸)水入侵影响的地区,由于咸水含水层的测深曲线类型和淡水含水层存在明显差别,因此,利用瞬变电磁法可很容易地将其区分开来.

3 资料解释

瞬变电磁法的资料解释工作,主要是根据瞬变电磁响应的时间特性和剖面曲线特征以及测区的地质、地球物理特征,通过分析研究划分出背景场及异常场,并从各类异常中确定与导体有关的异常. TEM 法的数据处理主要分为两部分:瞬变电磁剖面法数据处理与瞬变电磁测深法数据处理,以框图来表示上述两种数据处理流程,如图 1 所示.

影响瞬变电磁法资料解释精度的因素很多,电磁噪声干扰是其中很重要的一个方面.在野外地下水勘查过程中,利用 SD-1 型瞬变电磁仪器对山东省各地的电磁噪声电平进行了测量,频率 25 Hz,叠加次数 256 次,具体数据见表 1;在资料解释时的滤波处理阶段,应将其消除.

表 1 山东省各地电磁噪声电平的平均值

地点 (县、乡)	时间	噪声 $/(10^{-9} \text{V} \cdot \text{m}^{-2})$	地点 (县、乡)	时间	噪声 $/(10^{-9} \text{V} \cdot \text{m}^{-2})$
酒水泉林	1993-07	0.426	广饶颜徐	1995-06	0.662
临朐五井	1994-06	0.635	肥城仪阳	1995-07	0.444
泰安城关	1994-11	1.019	崂山仰口	1995-07	4.011
东阿牛店	1995-03	0.142	平邑东阳	1995-09	1.138
长清平安	1995-04	2.048	费县岩坡	1995-10	1.156
淄川寨里	1995-05	0.405	寿光王高	1995-11	1.072

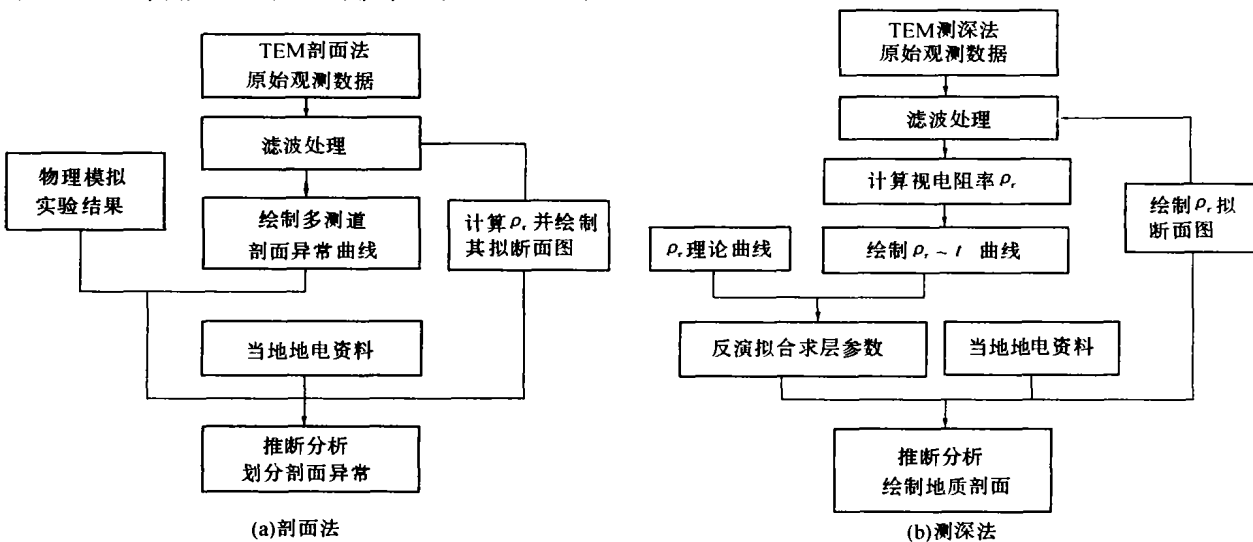


图 1 瞬变电磁法数据处理流程框图

4 应用实例分析

4.1 临朐县某村水井勘探

山东省临朐县某村地处石灰岩山区,由于长期缺水,严重制约了当地的经济的发展.该村以前曾经打深井两眼,均为干孔.该处第四系覆盖层厚约5m,下伏地层为中寒武统的灰岩、页岩互层,区域地下水位10m左右.应用瞬变电磁法进行剖面法测量,测量采用50m×50m重叠回线装置进行,点距25m,频率为25Hz,叠加次数取256次.图2为该剖面多测道 $V(t)/I$ 异常剖面曲线图,由该图可以看出,4号测点存在明显导电体异常,同时对该点进行了反演拟合计算.通过分析认为该处适合打深井,决定打井一眼,解决了该村的生产生活用水问题.

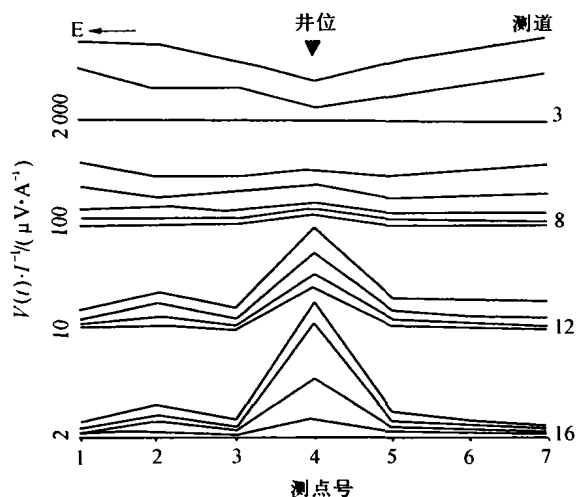


图2 I剖面多测道 $V(t)/I$ 异常剖面曲线

实际打井结果:160m以上为张夏组灰岩、页岩互层,128~155m裂隙发育,为主要含水层;160m以下是徐庄组页岩、灰岩及砂岩,岩石完整,裂隙不发育,钻至240m终孔.该井为一自流井,自流量为20~30m³/h,经抽水试验,当降深10m时,水量大于80m³/h,与实测分析结果吻合较好.

4.2 广饶县咸水入侵监测

山东省广饶县位于泰沂山北麓山前冲积平原,自20世纪70年代以来,连年干旱、地表水补给量减少,同时,由于过量开采地下水,造成了地下水位大幅度下降,引发咸水入侵,且速度呈明显加快的趋势.

利用瞬变电磁法对广饶县的咸水入侵问题进行现场探测,采用100m×100m重叠回线装置,点距50m,频率25Hz,叠加次数256次,I剖面共测量23个点.图3为测点12的正演拟合求参数结果,其余各点也进行了同样解释,圈定出了咸水区及入侵区的范围.咸水区的电阻率值很小,入侵区也小于

20Ω·m,同时取水样化验分析,结果表明Cl⁻浓度大于500mg/L.因此,在此类地区可以把20Ω·m作为监测该地区海水入侵的一个指标.与电阻率法相比,瞬变电磁法具有速度快、精度高的优点.

4.3 东阿隐伏岩溶水水源地勘探

山东省聊城市为地区行署驻地,原以城郊第四系孔隙水为主的供水水源地已不能满足城市生产生活的需要,需开发位于东阿县境内的隐伏岩溶水水源地以解决城市供水问题.东阿县隐伏岩溶水水源地位于该县牛角店镇下马头至周家门前地区,南临黄河,第四系覆盖层厚度大于50m,下伏中奥陶统灰岩、下奥陶统白云质灰岩及上、中、下寒武统灰岩及页岩.测量采用100m×100m重叠回线装置进行,频率25Hz,叠加次数256次,点距100m.共测量两条剖面,I剖面沿黄河北岸由西南至东北方向进行,全长约11km,在I剖面异常较明显段70~100号点之间以北约700m处进行了II剖面的测量,该剖面全长3km.

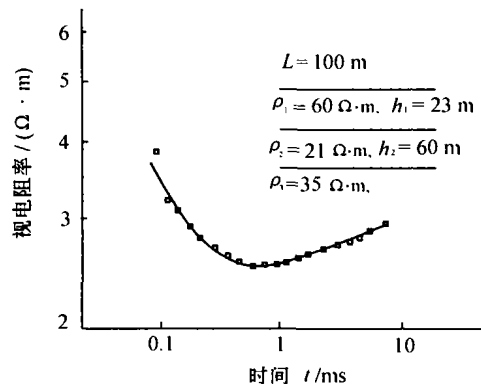


图3 测点12的视电阻率曲线及其正演拟合求参数结果

在瞬变电磁法圈定的构造带及其影响范围内,共布井10眼,除2眼布置在构造影响带边缘出水量小于100m³/h外,其余井出水量均大于200m³/h.由此可见,在东阿隐伏岩溶水水源地的水文地质勘探过程中,利用瞬变电磁法准确地圈定出了赋水构造带的位置及水源地的富水区域,为建井开采提供了科学依据.

5 结语

针对实际工作中经常遇到的有关地下水方面的问题,总结和概括出几种常见的典型地下水勘查类型,并分别对其进行了正演模拟计算,为野外实际地下水勘查工作提供了有益的参考.提出瞬变电磁法用于地下水勘查的数据处理和资料解释分析方法,并研制出了一套计算机程序,具有较高的实用价值.

通过室内模拟实验、正演计算及几年来在地下水勘查方面的实践可以看出,(下转第29页)

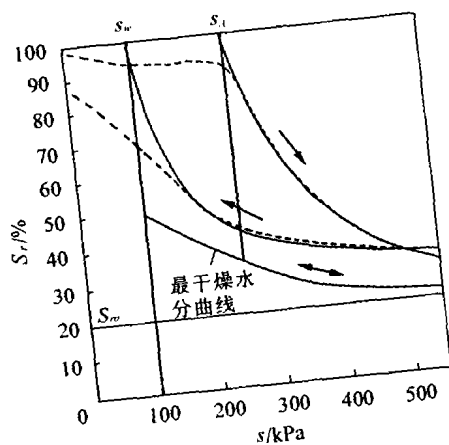


图4 最干燥水分曲线

法的概念非常清晰:非饱和土浸水饱和,吸力使有效应力减小,土体发生膨胀,为保持土体体积不变所要施加给土体的应力(即膨胀力 P_e)与由吸力产生的有效应力成比例,比例系数可根据试样在饱和及非饱和状态下的抗剪强度反求出。膨胀力的测定方法简便易行,能为现场工程师所接受。虽然这种方法的适用范围是有一定局限性的,首先是土类,只限于膨胀土;其次是饱和度,如前所述,当饱和度很高(即处于封闭非饱和形态)时,吸力的增加等于平均有效应力,所以吸附强度与膨胀力成直线关系;当饱和度和度较高(即处于过渡非饱和形态)时吸力的增加一部分引起有效应力的增加,吸附强度与膨胀力的关系可用某种函数拟合(指数或双曲线等);当饱和度很低(即处于悬垂水非饱和形态)时,从理论上讲这种方法是不适用的。但我们从中可得到启迪:避开吸力,结合具体研究土体的性质找出合适的方法确定由吸力产生的有效应力,是使非饱和土的研究能为实际工程服务的一条有效发展途径。

4 总结与讨论

在非饱和土中,非结合水有两种不同的保存形式,所以吸力有两种不同的作用效果,应分为两种成分:有效应力与内部应力。对 Bishop 公式的质疑,多是因 Bishop 未将两者分开而致。如浸水湿陷是因

为非饱和土吸水后大量的毛细水转为重力水,内部应力消失、土的刚性变小而引起的;对于强度问题和变形问题, χ 值不同是因为内部应力是局部力,不传递,它只影响塑性变形,不影响抗剪强度(这一结论已被日本学者向后雄二^[1]用非饱和粉土和粘土与砂组成的混合土通过三轴压缩试验和吸力压缩试验所证明)。但从理论上讲,渐近性破坏不可能在较短的时间内发生,内部应力不影响工程实际中非饱和土开始破坏时的强度,但影响试验得出的非饱和土的强度峰值。以往根据失稳边坡反算出的非饱和土抗剪强度总是介于试验得出的强度峰值与残余强度之间就是一个很好的实例。两者似乎矛盾,笔者认为试验得出的非饱和土抗剪强度究竟是否受内部应力的影响,还需视试验条件而定。当剪切速率很慢时,内部应力可能不影响抗剪强度,当剪切速率较大而饱和度和又较低时,内部应力肯定会影响抗剪强度。剪切速率对非饱和土抗剪强度的影响比对饱和土的影响大。另外向后雄二的三轴压缩试验结果还表明,不同饱和度的试样,应力应变关系呈硬化型时,软化后的强度有向同一值收敛的倾向,应力应变关系呈软化型时,应变达 15% 后强度也有向同一值收敛的倾向。对非饱和试样的三轴压缩试验来说,若采用排气不排水或不排气不排水的试验方法,剪前和剪后的含水量是不变的,但饱和度可能会发生很大的变化,因此用含水量来反映吸力强度有时是不妥的。

参考文献:

- [1] 向后雄二. 不飽和土の三軸応力条件での力学的挙動に対する弾塑性論的解釋[J]. 農業土木学会論文集, 1996(12): 47~57.
- [2] 轻部大藏. 不飽和土の間隙水と土塊力学的挙動の関係について[J]. 土木学会論文集, 1996(3): 83~92.
- [3] 卢肇钧. 非饱和土抗剪强度的探索研究[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(2): 10~25.
- [4] 向后雄二. 不飽和シルトおよび砂粘土混合土の三軸応力条件での体積変化およびせん断挙動[J]. 農業土木学会論文集, 1998(2): 35~47.

(收稿日期: 2001-05-24 编辑: 熊水斌)

(上接第 25 页)瞬变电磁法对导电层的分辨能力优于对高阻层的分辨能力。基岩地区含水层及污染后的地下水均呈低阻反映,因此,与其他电探方法相比,利用瞬变电磁法进行地下水勘查具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992. 19.

- [2] 张保祥. 瞬变电磁法在地下水勘查中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2000.
- [3] 张保祥, 李福林. 海水入侵动态指标研究[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(1): 33~35.
- [4] David V, Mark T. Transient electromagnetic sounding groundwater[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 995~1005.

(收稿日期: 2001-04-06 编辑: 张志)