

文章编号: 1001-1986(2001) 02-0052-03

天然交变电场动态特征研究

王齐仁 (湘潭工学院土木系, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 运用电磁波传播理论, 结合实测资料, 分析天然交变电场动态信息的存在, 阐明其形成机理和基本特征, 为辨别和判断天然交变电场异常信息、提高解译成果的可靠性提供理论依据, 对研究地下含水构造、岩溶、堤坝渗漏等地质问题有一定的指导意义。

关键词: 交变电磁场; 动态信息; 电磁流体; 堤坝渗漏

中图分类号: P631.3 25 **文献标识码:** A

1 引言

天然交变电场研究的是大地电磁场中的电场分布规律, 通常只利用它的静态特征来划分地电断面, 从寻找固体矿床推广到地下水资源勘查, 取得了较好的地质效果, 但在实际工作中也出现了不少问题, 尤其在找水方面, 成井率不高 (一般只有 40% ~ 60%)。笔者经过近十几年的实测、试验, 发现并认识到天然交变电场动态信息的存在及其特征, 对其成因和规律作了初步的理论分析, 希望能为广大物探工作者理解和研究地球物理场信息提供一条新思路。

2 动态信息形成机理

2.1 电磁波传播规律

地球表面, 大地电磁场可视为垂直入射的平面电磁波, 电场强度 E 磁场强度 H 磁感应强度 B 电位移 D 电流密度 J 自由电荷体密度 q 的关系服从

麦克斯韦方程组:

$$\vec{\text{rot}} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad \vec{\text{rot}} E = - \frac{\partial B}{\partial t};$$

$$\vec{\text{div}} D = q; \quad \vec{\text{div}} B = 0$$

不同形式的交变电磁波可以分解为谐变电磁波, 在导电介质中遵循:

$$E = E_0 e^{-bz} e^{i(kx - \omega t)}$$

$$H = H_0 e^{-bz} e^{i(kx - \omega t)}$$

$$b = k \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{2} [1 + (\frac{\mu}{\epsilon})^2 - 1]$$

式中 z —— 传播距离;

b —— 介质对电磁波的吸收系数;

μ —— 介质的导磁系数;

ϵ —— 介电常数;

d —— 电阻率;

f —— 电磁波的频率

习惯上取 $\lambda = 1/b$ 称为电磁波的趋肤深度 (或穿

收稿日期: 2000-10-17

作者简介: 王齐仁 (1963-), 男, 湖南浏阳人, 讲师, 从事地球物理勘探教学、科研及混凝土结构检测与质量评价工作。

- [18] DeGroot-Hedin C, Constable S C. Occam's inversion to generate smooth, low-dimensional models from magnetotelluric data [J]. *Geophysics*, 1990, 55(12): 1613~1624.
- [19] 董清华, 曹俊兴. 井间电阻率层析成像的几个问题研究 [J]. *地球物理学进展*, 1998, 13(4): 85~89.
- [20] Hestense M, Stiefel E. Methods of conjugate gradients for solving linear systems [J]. *J. Res. Nat. Bur. Standards*, 1952, 49: 409~436.

- [21] 吴小平, 徐果明. 电阻率三维反演中偏导数的求取与分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(4): 363~372.
- [22] Ellis R G, Oldenberg D W. The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem; a conjugate gradient approach [J]. *Geophys. J. Int.*, 1994, 119: 187~194.
- [23] Park S K, Van G P. Inversion of pole-pole data for 3D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, 1991, 56(7): 951~960.

Rapid 3-D Resistivity inversion for complicate model

WU Xiao-ping¹, WANG Tong-tong²

(1. University of Science and Technology of China, Department of Earth

and Space Science, Hefei 230036, China; 2. Anhui Institute of Environmental Protection, Hefei 230061, China)

Abstract While conjugate gradient (CG) relaxation technique is used to solve the inverse equations and Rodi method is introduced to compute the Jacobi matrix G , only one forward calculation is required in each inversion iteration, thus the 3-D resistivity inversion is computed much quickly. Additionally, by avoiding huge storage for G and $G^T G$ and imposing a smoothness constraint on model, we make a solid base of 3-D resistivity inversion for the complicate structure.

Key words resistivity; complicate structure; 3-D inversion; conjugate gradient

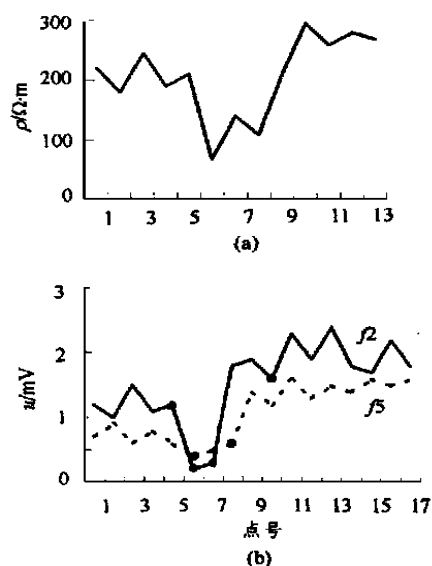


图 1 视电阻率和天然电场电位差曲线

a——视电阻率曲线; b——天然电场电位差曲线

透深度), 在无磁介质中,

$$W \approx \frac{1}{b} \approx 503.3 \frac{d}{f}$$

显然, 电场强度 E 磁场强度 H 随吸收系数 b 呈负指数规律衰减, 其穿透深度随介质电阻率增大而增大, 随频率增高而减小; 其能量随传播距离增大而减小^[1, 2]。

不同性质 (导电性、介电性等) 的介质, 对电磁波具有不同的吸收、衰减作用。即当电磁波频率一定时, 介质电阻率、介电常数、导磁系数不同, 电磁场在地表的响应就不相同, 电磁法勘探就是以此为客观前提。若介质本身均匀, 这种电磁响应在观测数值上是相对稳定的。如岩溶发育地带通常富含地下水, 具有良好的导电性, 与围岩存在明显的电性、电化性质差异, 因此, 视电阻率和天然电场电位差曲线形态基本一致, 为明显的低幅度异常特征^[3]。(图 1)

2.2 传导电流与位移电流的影响

均匀各向同性介质在交变电磁场作用下, 存在着传导电流 $j_{传}$ 和位移电流 $j_{位}$ 两种不同性质的电流:

$$j_{传} = \frac{1}{d} E_0 e^{ikr},$$

$$j_{位} = \epsilon \chi_f E_0 e^{i(kr - \frac{\pi}{2})}.$$

传导电流是由电荷直接移动形成的, 它取决于介质的电阻率, 且与电磁波频率无关; 位移电流则是电场的介质所激发的一种介电极化现象所形成的, 它不需要什么载流子, 取决于介质的介电常数, 且与电磁波频率有关^[1, 2]。

绝大多数造岩矿物的电阻率均大于水的电阻率, 几乎所有的造岩矿物的介电常数 (4~13) 都远小于水的介电常数 (80)。而岩石的电阻率、介电常数与其含水量存在着十分密切的关系, 岩体因孔隙、裂隙含水, 其电阻率减小, 介电常数明显增大。如石灰岩本身电阻率有几 $k\Omega \cdot m$, 含水时可下降到几百甚至几十 $\Omega \cdot m$; 一般干土介电常数约为 2, 而潮湿土壤可达 32; 同样, 溶液浓度越高, 电阻率越小, 介电常数越大, 可极化的极性分子就越多, 传导电流、位移电流均增大。

孔隙中溶液的运移方式, 速率绝不是均匀稳定的, 而是脉冲式、非稳定的。溶液中导电粒子的含量时多时少, 速率时快时慢, 即自由电荷密度 $q(t)$ 随时间变化, 使得整个介质的传导电流, 尤其是高频状态下的位移电流极不稳定, 随时间呈不规则变化。流动的溶液作为电磁能量的载体被称为电磁流体, 又在电磁场力的作用下产生相对运动, 切割电、磁力线, 形成复杂的、随时间变化的瞬变感应电磁场, 这就是交变电磁场的动态信息。

2.3 波阻抗的影响

由麦克斯韦方程可知:

在不导电介质中, 波阻抗为:

$$\left| \frac{E_x}{H_y} \right| = \overline{X},$$

导电介质中, 当 $\frac{1}{k\chi_d} \gg 1$ 时, 波阻抗为:

$$\left| \frac{E_x}{H_y} \right| = \overline{k} \overline{d}$$

可见, 介质的介电常数、电阻率对波阻抗有直接影响, 若地下介质性质均匀、稳定, 则其波阻抗为常数; 若地下多孔介质中流体是不均匀流动的、非稳定的, 即其介电常数、电阻率是变化的, 则其波阻抗也是变化的。因此, 在电磁场中激发的响应就成了一种动态的电磁响应——动态信息 (通常是用观测波阻抗的方法来计算介质的电阻率, 其结果自然反映电磁场的动态效应)。

3 动态信息特征

动态电磁响应理论上是交变电磁场中电磁流体的感应电磁场随空间和时间变化的结果, 即电磁场强度在某一地点时强时弱; 实际观测中, 表现为同一测点仪器指针有力摆动, 读数极不稳定甚至无法读数, 这种动态特征对高频电磁波尤为明显。变化的频度、幅度客观上取决于介质的电性、电化性质及其孔隙中溶液运动方式和变化规律, 同时也与观测方

法、观测时间等因素有关。

4 观测方法

天然交变电场可通过天然电场选频法来观测，它是由两个电极接收来自地下介质的感应电动势——天然电场电位差。仪器选用不同的通频带区分来自不同深度的电场信息，观测天然电场电位差在空间、时间上的变化规律。其工作频率一般为几十 Hz 到几百 Hz，由小到大分为 f_0, f_1, \dots, f_{n-1} 等 n 个频率档位，观测各测点不同频道的天然电场电位差值，并记录指针摆动的频度及最大幅度。对每一测点相当于测深法，对一条测线则相当于剖面法，可以获得地电断面沿测线方向和铅垂方向的电性变化规律，进而推断地下地质情况。

5 试验成果与分析

5.1 动态信息的时间特性

某抽水钻孔附近 100 m 左右房地开裂，按抽水量分级控制，进行连续 8 h 抽水试验，观测不同时间天然电场电位差与其动态信息，以及裂缝应变值，据此分析应变与抽水的关系。（表 1）

抽水前后与抽水过程中天然电场电位差曲线异常和动态特征发生了明显的变化：抽水前径流带附近曲线呈低幅度异常，动态点个数少，且摆动频度和幅度均小；随抽水时间增长动态信息增强，动态点个数增加，摆动频度和幅度也相应增大；随停泵时间增

表 1 两条测线各频道动态信息统计情况

时间	剖面	各频道摆动次数						摆动幅度	平均摆动频率 $f/s^{\circ} (5次)^{-1}$	应变
		f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5			
抽水前	1			1	1			小	68	稳定
	2	2	1	2				小	62	
抽水 4 h	1	3	2	3	5	1	2	较大	38	基本稳定
	2	6	8	7	5	3	4	较大	32	
抽水 8 h	1	5	5	4	4	2	3	大	24	迅速增大
	2	8	10	12	6	6	7	大	25	
停泵 26 h	1	4	3	3	2		1	较大	33	逐渐减小
	2	5	7	9	2	1	3	较大	34	
停泵 48 h	1	2		1	1		1	较小	62	趋于稳定
	2	2	1	3			1	较小	50	

表 2 动态信息统计结果

剖面距离 钻孔 /m	各频道摆动次数						摆动幅度	平均摆动频率 $f/s^{\circ} (5次)^{-1}$	观测时间 /h
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5			
50	3	5	2	6	2	4	大	18	抽水 2
100	3	5	2	5	2	3	大	16	抽水 3
300	2	3	1	5	1	2	较大	26	抽水 4
600	1	2	1	2		1	小	34	抽水 5
1 000		1		1			最小	88	抽水 7

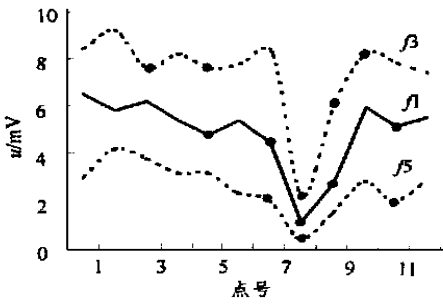


图 2 离井 100 m 处测线的观测结果
 f_5 ——浅部； f_3 ——中部； f_1 ——深部

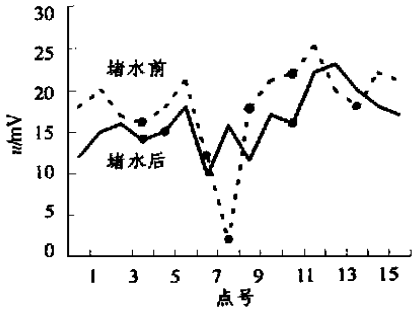


图 3 某矿区地表漏水点附近天然电场电位差曲线
长这种特性逐渐减弱。天然电场电位差随时间的变化规律与应变观测结果相吻合，只是应变相对滞后一段时间^[3]。

试验证明，地下水沿断层破碎带形成相对集中的径流通道，在岩溶裂隙中作非稳定运动，扰动电磁场；抽水加快了水流速度，激发出变化更强烈的动态信息。进一步说明了地下流场动态信息的存在与其时变规律。

5.2 动态信息的空间特性

某大学水井布置在当地一条 NE 75°主要导水断裂带上，上部为红层覆盖，主要含水层为含砾灰岩，分别在地表以下 40 m、75 m、135 m 三个深度见溶洞，岩溶裂隙发育，富含地下水。在连续 12 h 进行的抽水试验过程中，于断裂带上 50 m、100 m、300 m、600 m、1 000 m 等处垂直走向布置五条测线，观测天然交变电场电位差。（表 2）

从表 2 可以看出，离钻孔越远，动态信息越弱，仪器指针摆次数减少，幅度、频率降低。说明距离抽水井越近，地下水水力坡度越大，径流速度快，对电磁场的扰动也大，动态特征突出。此外，不同深度（低频反应深部，高频反应浅部）裂隙发育程度、地下水流速、流量各异，使各频道的天然电场电位差曲线及动态特征也各不相同，（图 2）图中曲线的相对电性变化均有较明显的异常反应，只是中部反应更加强烈（异常幅度大、摆动次数多）。可见，在空间上天然交变电场的动态信息也有较明显的反应。

文章编号: 1001-1986(2001) 02-0055-02

瞬变电磁场信号在地下的扩散及地面上的时域响应特性

闫述¹,陈明生²,傅君眉¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院,陕西 西安 710049;
2. 煤炭科学研究总院西安分院,陕西 西安 710054)

摘要:瞬变电磁测深是近年来发展较快的电磁勘探方法,是实现精确勘探的一个突破点。本文应用时域有限差分算法分析了瞬变场在二维地电模型情况下低阻体对“烟圈”的吸收现象、瞬变场的滞后现象,对进一步的时频分析和高维反演提供了正演基础。
关键词:瞬变电磁场;时域有限差分;扩散;滞后
中图分类号: P631.3 25 **文献标识码:** A

1 引言

瞬变电磁法是通过接地电极或不接地回线通以脉冲电流而在地下建立起一次脉冲磁场,在一次磁场间歇期间,在时域接受感应的二次电磁场。由于早期信号反映浅部地电断面,晚期信号反映较深部地电断面,这就可以达到测深的目的。

对于瞬变电磁法的测深原理, Nabighian (1979)^[1]以“烟圈”效应形象地加以阐明:地表接收的二次电磁场是地下感应涡流产生的,其涡流以等效电流环向下并向外扩散,形如“烟圈”。随着时间的推移,“烟圈”的传播与分布将受到地下介质的影响,这就是瞬变电磁法探测地下地质情况的简单原理。以往对于瞬变电磁场信号的分析,大多先从频

收稿日期: 2000-10-19
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49974026)
作者简介: 闫述 (1954-),女,天津人,高级工程师,博士研究生,从事电磁场与微波技术研究。

6 应用实例分析

实际工作中,先用天然电场选频法在工作区内进行大面积普查,根据交变电场的静态信息特征划分地电断面,初步勾绘出低阻异常带的分布及主要走向,再垂直主要走向布置 3~5 条测线进行实测,针对曲线异常带,加密点距,详细观测和记录各点的动态信息,据此判断地下主要径流带的存在与发育规模。
某矿区地表河水大量漏入矿井,由于灰岩地区岩溶发育,地表及基岩起伏较大,浅部电性极不均匀,常规物探方法受到限制,联合剖面法效果很差。采用的天然电场选频法简单、轻便,结论可靠。(图 3) 根据动、静态信息特征找到漏水通道,确定钻孔位置,进行注浆堵水。图 3 显示,堵水前曲线异常突出,动态信息明显,堵水后曲线异常幅度大大减小,动态信息大大减弱,说明堵水效果十分明显。

杂,瞬变的感应电动势,由于在时间上和空间上的非稳定运动,使得地表电磁响应除了具有相对可靠的低幅度异常外,还具有较明显的动态特征。采用天然电场选频法测量其动态信息及变化规律,可以从空间、时间四维的角度来研究地下液态电磁导体的存在及发育规模,较准确地探测和判断地下导水构造、岩溶的分布规律。目前,许多水库、江河堤坝管涌、渗漏现象严重,漏水通道内非稳定的水流在大地电磁场中产生不稳定的、时变的感应电场场(洪水季节更为明显),若能进一步研究,掌握其动态规律,将为查漏堵漏、病害治理和抗洪抢险提供科学依据。

参考文献

[1] 马根和. 场论 [M]. 北京: 原子能出版社, 1995. 251~ 264.
[2] 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 123~ 159.
[3] 王齐仁,徐卓荣. 抽水与地面变形关系的研究 [J]. 焦作工学院学报, 2000, 19(2): 109~ 112.

7 结束语

天然交变电场中良导流体 (电磁流体) 产生复

Study on the dynamic characteristics of natural alternating electromagnetic field

W ANG Qi-ren (Xiangtan Polytechnic University, Dept. of Civil Engineering, Xiangtan 411201, China)

Abstract By applying the propagation theory of electromagnetic field, in conjunction with the measured data, the existence of dynamic characteristics of natural alternating electromagnetic field is analyzed, and its formation mechanism and basic characteristics are clarified. Then, the theory basis is supplied for distinguishing and determining the anomaly information of natural alternating electromagnetic field, and for improving the reliability of interpretative result. This study has guiding significance in solving geology problem such as underground water-bearing formation, Karst, dam seepage, and etc.

Key words alternating electromagnetic field; dynamic information; electromagnetic fluid; dam seepage