

文章编号: 1001-1986(2005)03-0074-04

# 直流激电测深多参数综合分析划分含水异常岩体

柳建新, 刘海飞, 马捷

(中南大学信息物理工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要** 直流激电测深观测(计算)的参数多, 现已成为一种有效的找水方法。但由于不同的地区存在各种不同的干扰, 因此, 合理、准确地综合利用这些参数, 减少多解性, 避免解释错误显得尤为重要。本文在分析原始实测参数的基础上, 对部分参数进行了转化, 使其抗干扰能力更强, 资料解释更可靠, 并通过实例评价了部分参数的优越性和局限性。应用实例表明, 多参数综合解释方法具有推广意义。

**关键词** 直流激电测深; 多参数; 异常

**中图分类号** P631.324 **文献标识码** A

## Division of water-containing abnormality using multi-parameter method of direct current induced polarization sounding

LIU Jian-xin, LIU Hai-fei, MA Jie

(The Institute of Informative Physics of Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** Recently the direct current induced polarization sounding method is widely used to detect the ground water, due to its multi-parameters. Because of the different disturb degree in different work area, it is important to use multi-parameters reasonably and accurately, reducing more explanations and avoiding mistake explanation. Based on analyzing primitive practical data, the paper transformed partial parameters to ensure to use them accurately and to get the more reliable data. A case study shows advantages and limitations of partial parameters. The result indicates that the synthetic interpretation method of multi-parameters is worth to be widespread.

**Key words** direct current induced polarization sounding; multi-parameters; abnormality

## 1 引言

在物探找水方法中, 激发极化法是一种应用广泛且行之有效的方法。由于该法不受纯地形起伏及围岩电阻率不均匀性的影响, 且可充分利用其时间(或频率)特性, 因此在山区找水, 特别受到重视。但激电异常响应除与水有关外, 还受多种因素的影响, 解释并非单一。为了充分发挥激发极化法找水效果, 应综合利用多种激电参数之间的共性和个性的关系, 进行推断解释, 即所测电性参数均与含水因素有关, 但对含水因素的响应及压制干扰的能力又各不相同。实践表明, 直流激电测深多参数综合解释方法, 可从不同的角度分析和划分含水异常岩体, 尽量减少多解性, 使得解释更可靠。

## 2 激电找水所使用的参数

激电找水所使用的参数归纳起来可有以下几种<sup>[1]</sup>:

### 2.1 视电阻率( $\rho_s$ )

视电阻率是反映岩石电性的参数, 能够较好地反映地下构造形态特征, 在激电找水解释中占有重要地位。所以, 在测量激电参数的同时, 必须取得视电阻率数据。

### 2.2 极化率 $\eta_s$

含水岩石属于离子导电的体极化介质, 其极化强弱用极化率 $\eta_s$ 表示:

$$\eta(T, t) = \frac{1}{\Delta V(T)} \left( \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_2(t) dt \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\Delta V(T)$  为供电一段时间  $T$  后在断电前测得的总场电位差;  $\Delta V_2(t)$  为断电后  $t$  时刻测得的二次场电位差。

激电找水时常会用到该参数, 但该参数不仅对含水因素有较好的反映, 而且也对一些自然干扰有较强反映, 如含碳质灰岩、含金属颗粒的地质体等。所以, 在有此类干扰的测区内使用该参数时, 要结合

地质资料对异常进行全面分析,准确判断其是由何种异常源引起的。

2.3 半衰时(  $S_t$  )

所谓半衰时,即指放电二次场由断电后的最大值衰减到一半时所需要的时间,通常用  $S_t$  表示。实际工作中,为了取得较明显的  $S_t$  值,供电时间不宜过短,一般  $T \geq 30\text{ s}$ 。

2.4 衰减度(  $D$  )

该参数由山西平遥卜宜电探仪器厂提出,其算式为:

$$D = \frac{\overline{\Delta V_2}}{\Delta V_2(0.25\text{s})},$$
$$= \frac{1/5 \int_{0.25\text{s}}^{5.25\text{s}} \Delta V_2(T) dt}{\Delta V_2(0.25\text{s})} \times 100\%, \quad (2)$$

即以断电后 0.25 s 到 5.25 s 的时间段内  $\Delta V_2$  的平均值与 0.25 s 的  $\Delta V_2$  值之比作为衡量二次场放电快慢的参数, $D$  值越小说明放电越快, $D$  值越大说明放电越慢。衰减度参数测深曲线的异常峰值常与某些地质界面相对应,具有较高的相关性,实际工作中应予以重视。

2.5 极化比(  $J$  )

其表达式为:

$$J = \eta_s D = \frac{\overline{\Delta V_2}}{\Delta V} \times 100\%。$$
$$(3)$$

通常在含水层上  $\eta_s$  和  $D$  值均较高,所以取两者的乘积作为综合参数可使异常放大,反映更明显。并且该参数对含碳质岩层的影响也有较好的压制。

2.6 综合参数  $Z_s$

其表达式为:

$$Z_s = \eta_s S_t / 2。$$
$$(4)$$

实践表明,视半衰时(  $S_t$  )曲线对含水层顶部有较明显的反映,但对底界反映不清;极化率  $\eta_s$  曲线对整个含水层都有所反映,但异常宽度大,幅度小,边界模糊<sup>[2]</sup>,如图 1。为了提高这些参数的分辨力,可将这两个参数进行综合整理。 $Z_s$  值越高,含水性越好,由于含碳质地层的影响,极化率值较高,但半衰时衰减较快,这使得综合参数  $Z_s$  值较小,从而可以排除碳质层的干扰,使得解释更可靠。

2.7 相对半衰时(  $S_r$  )

为了减少视半衰时随  $AB/2$  的增加也相应增大的影响,河南省地矿局物探队在用半衰时法找水时提出相对半衰时(  $S_r$  )参数,其表示式为:

$$S_r = S_t / \rho_s,$$
$$(5)$$

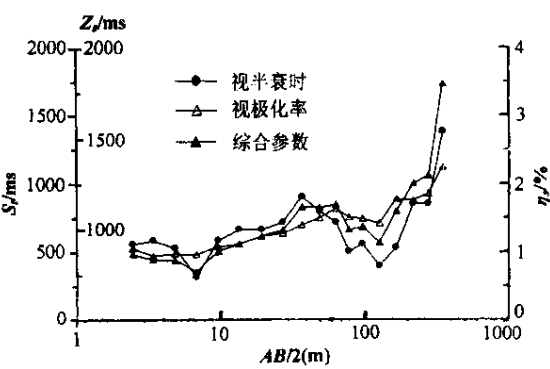


图 1 2140 号点综合参数  $Z_s$  等参数曲线  
Fig.1 Compound parametric curve (  $Z_s$  ) of No.2140 point

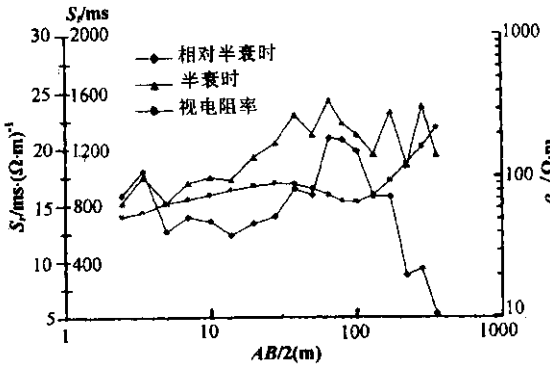


图 2 2160 号点相对半衰时  $S_r$  等参数曲线  
Fig.2 Relative half period curve (  $S_r$  ) of No.2160 point

即用半衰时除以视电阻率,换算出相对半衰时  $S_r$ 。在含水地段半衰时相对较大,而视电阻率相对较小,因此,在含水地段相对半衰时  $S_r$  也较大(如图 2)。利用该参数能够比较准确地划分富水构造,应在找水时引起重视。但是必须指出,利用该参数时应该考虑不含水的低阻层和含水高阻层的情况,避免错误解释。

2.8 偏离度(  $r$  )

偏离度是中国地质大学通过大量样品观测提出的一个激电找水新参数,即指极化率的实测结果与直线方程的偏离程度,其算式为:

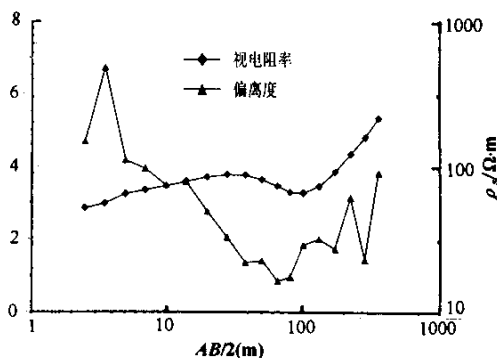
$$r = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i + K \lg t_i - B)^2}{n}}。$$
$$(6)$$

$$\text{其中 } \eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i,$$
$$(7)$$

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot \lg t_i - \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg t_i}{[\sum_{i=1}^n \lg t_i]^2 - n \sum_{i=1}^n (\lg t_i)^2},$$
$$(8)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i \cdot \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg t_i - \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot \sum_{i=1}^n (\lg t_i)^2}{[\sum_{i=1}^n \lg t_i]^2 - n \sum_{i=1}^n (\lg t_i)^2},$$
$$(9)$$

式中  $n$  为采样点数,  $t_i$  为采样时刻,  $\eta_i$  为  $t_i$  时刻测得的极化率。

图 3 2160 号点偏离度  $r$  等参数曲线Fig.3 Departure degree curve ( $r$ ) of No.2160 point

该参数与含水量呈负相关关系,即含水量增加时,偏离度减小,故在含水层上  $r$  表现为低值(如图 3)。由于它利用了放电曲线的全部数据,所以其抗干扰能力较强。

## 2.9 反射系数 $K_s$

为提高视电阻率曲线在垂直方向上的分辨力,挖掘出隐藏在视电阻率曲线上的微弱信息,应对视电阻率参数进行再解释。对此,前人提出了反射系数法。在直流电法中,假设在地面向地下供电,当电流遇到电阻分界面时,界面将向上反射一部分电流。这部分电流的大小取决于界面两侧电阻率的大小,即反射系数  $K_s$  的大小,所以  $K_s$  值直接反映了界面反射电流的能力。 $K_s$  值的大小近似等于视电阻率  $\rho_s$  曲线的导数,相当于把  $\rho_s$  曲线进行一次高通滤波<sup>[3]</sup>,从而放大突出了局部微弱异常,压制了低频背景。

对电测深曲线求反射系数  $K_s$ ,可采用第 1 种边界条件下的三次样条函数求导方法,它是非等间距条件下求导的一种有效方法。在 6.25 模数双对数坐标中,可令:

$$y_i = 6.25 \times \lg \rho_{si} \quad (10)$$

$$x_i = 6.25 \times \lg (AB_i/2) \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

式中  $\rho_{si}$ —第  $i$  个视电阻率值;

$AB_i/2$ —第  $i$  个电极距值。

电测深导数计算步骤如下:

第 1 步 计算首尾结点的导数:

首先利用列维尔(Neville)线性插值沿首尾结点内插 4 个结点,插值结点及列维尔(Neville)插值公式为<sup>[4]</sup>:

$$X_j = X_0 + j \cdot h \text{ 及 } X_{n-j} = X_N - j \cdot h \quad j = 1 \dots 4 \quad (12)$$

$$I_{0,1 \dots, k+1}(x) = I_{0 \dots, k}(x) +$$

$$\frac{I_{1 \dots, k+1}(x) - I_{0 \dots, k}(x)}{x_{k+1} - x_0} (x - x_0) \quad (13)$$

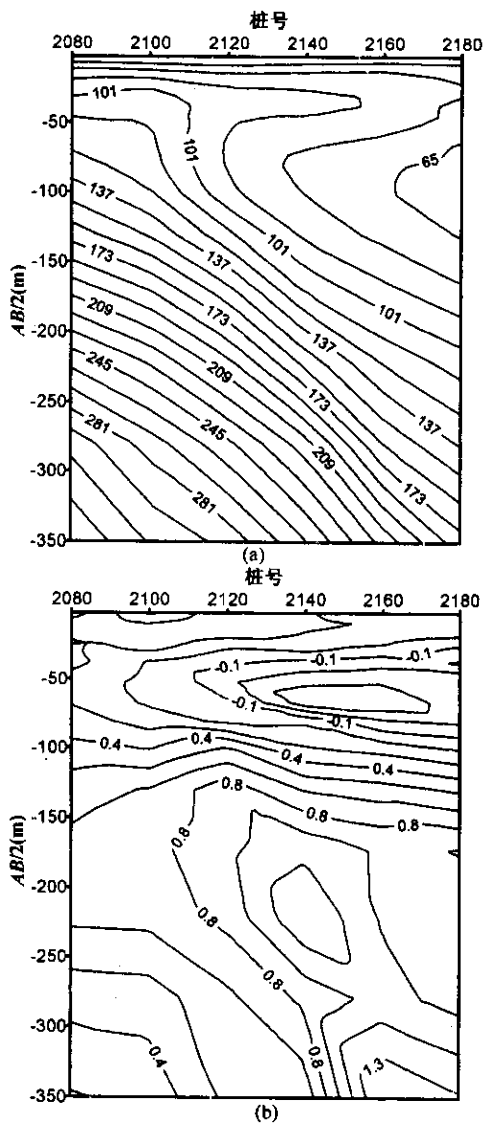


图 4 A 断面视电阻率等值线图

Fig.4 Contour diagram of A section

a—视电阻率  $\rho_s$  等值线图 b—反射系数  $K_s$  等值线图

步长  $h$  的取值为 0.1 即可。插出 4 个结点后,再利用 5 点求导公式求出边界导数 5 点边界求导公式为:

$$K_1 = \frac{1}{12h} [-25f(x_0) + 48f(x_1) - 36f(x_2) + 16f(x_3) - 3f(x_4)], \quad (14)$$

$$K_N = \frac{1}{12h} [3f(x_{n-4}) - 16f(x_{n-3}) + 36f(x_{n-2}) - 48f(x_{n-1}) + 25f(x_n)], \quad (15)$$

式中  $K_i$  代表一阶导数  $f'(x)$  的近似值。

第 2 步 利用三次样条函数求导方法,求出其余  $N-2$  个结点的一阶导数。

第 3 步 负值校正:当  $K_i$  为正值时,  $K_{si} = K_i$ , 当  $K_i$  为负值时,需要校正<sup>[5,6]</sup>,其校正公式为:

$$K_{si} = \frac{K_i(1 - K_i)}{1.05(1 + K_i) + K_i^2} \quad (16)$$

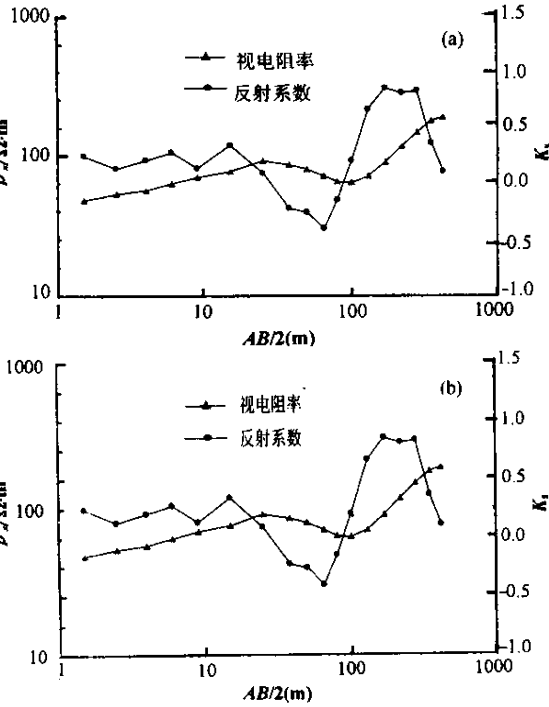


图 5 2160 号点对称四极电测深曲线  
Fig.5 Symmetric four - pole sounding curve of No.2160 point  
a——微分装置 ; b——等比装置

下面利用上述 3 步对实测视电阻率断面计算反射系数。对比分析用视电阻率  $\rho_s$  和反射系数  $K_s$  绘制的断面等值线图(图 4),可以看出  $K_s$  等值线图(图 4b)能更好地反映含水异常体的形态和埋深。仔细观察反射系数  $K_s$  等值线图,将会发现反射系数有大于 1 的现象。垂直电测深曲线即使在  $\rho_2/\rho_1 \rightarrow \infty$  的情况下,曲线仅为与水平轴成  $45^\circ$  夹角的渐进线。在某些特殊情况下,尽管排除各种错误因素,曲线的某一段仍会出现斜率大于 1 的超斜现象<sup>[7,8]</sup>。在 2160 号点的微分装置(1/5)的电测深曲线(图 5b)中,超斜现象较严重,推测这是因为地下地质体的界面倾角和等比装置的体积效应都较大等原因造成的。视电阻率曲线即使存在超斜现象,但反射系数对含水地质体的反映还是比较明显的(如图 4b),在这种情况下该参数仍然有一定的应用价值。

当外界干扰较大造成视电阻率值不稳定时,由于反射系数对视电阻率微小变化的高敏感性,容易造成错误解释,在这种情况下建议慎重使用。

3 应用实例

试验工区位于湖南长沙某县湘江沿岸,地形平坦,外界干扰很小。区内地层大致可分为:上覆第四系粘土;中间为泥质砂砾石层及含水钙质粉砾岩;下部为灰砾岩基底,并且比较完整。电测深目的是确定富水段的规模及其埋深。对上述 9 种参数的断面

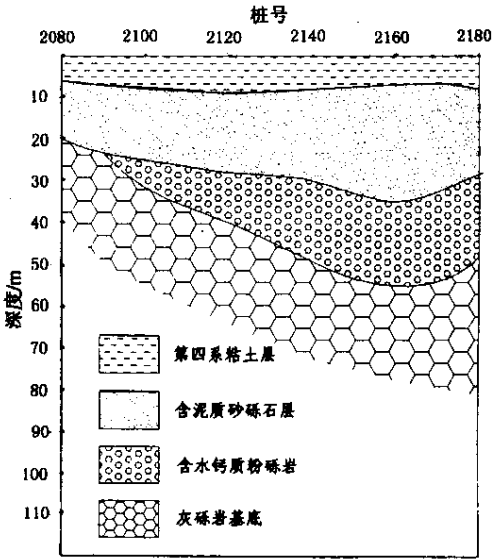


图 6 A 断面地质解释断面图  
Fig.6 Geologic interpretation section of A section  
等值线图进行综合分析(限于篇幅未全部给出),主要含水段位于 2160 号点下方,埋深大约在 35~55 m 之间,该 9 种参数在此处均有较好的反映,根据这 9 种参数推断的地质解释断面如图 6 所示。

据后期的钻探证实,在解释的含水段位找到了地下水,验证了多参数综合解释方法的准确性。实践证明直流激电多参数综合解释法,可排除单一参数因不确定因素所造成的假异常,减少多解性,使得地质解释更加可靠。

4 结论

直流激电测深多参数综合解释方法从不同角度分析和划分含水异常岩体,在很大程度上克服了用单一参数经常出现的多解性,保证了地质推断解释的可靠性。另外,直流激电所测的物理参数,是地下地质情况综合信息的反映,在找水过程中还必须在充分掌握地质资料的基础上,客观地分析所获得的电性资料,才能取得好的地质效果。

参考文献

[1] 李金铭,程学栋,高杰. 激电找水应用基础[J]. 物探与化探, 1990, 14(4): 266-274.  
[2] 陕西省地质局第一物探队. 激发极化法文集[C]. 北京: 地质出版社, 1975.  
[3] 陈树金. 电测深导数在水文物探工作中的应用[J]. 物探与化探, 1990, 14(2): 149-151.  
[4] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.  
[5] 张宏. K 剖面法应用初探[J]. 长沙交通学院学报, 1996, 12(2): 33-37.  
[6] 敬容中,林剑,肖志强. K 剖面法在岩溶勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2002, 38(2): 78-81.  
[7] 方文藻,孙渊. 工程及水文物探教程[M]. 西安: 西安地质学院出版社, 1997.  
[8] 中南冶金学院物探教研室编. 金属矿电法勘探[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.