

三电位测深法及其在岩溶地区的应用

李淑莹

(地质矿产部岩溶地质研究所)

一、三电位测深的基本原理

三电位测深是由三种简单的测深装置组合而得的直流电阻率测深法。它不仅能探测水平层状电性层的垂向分布、埋深与厚度,而且更适于探测非水平层状的近似球体的等轴状或其它不规则形状的电性体。

所谓三电位法,实质是在每个测点上同时观测对称、偶极、交叉三种装置的电阻率。它的布极方式通常采用温纳排列,即相邻电极间距相等(如图1所示)。野外实测时,只需一次布极,通过一个转换开关来改变供电电极和测量极的相对位置,便可得到三种装置的电极排列方式。

三电位测深则是在测深点上按对数坐标等间距不断地扩大电极间距,同样采用温纳排列,从而得到三种装置的测深曲线。将这三条测深曲线绘制在同一坐标系内,便可得出三电位测深曲线。如图2所示,当地下存在一个球形异常体时,曲线将发生畸变,由于三种装

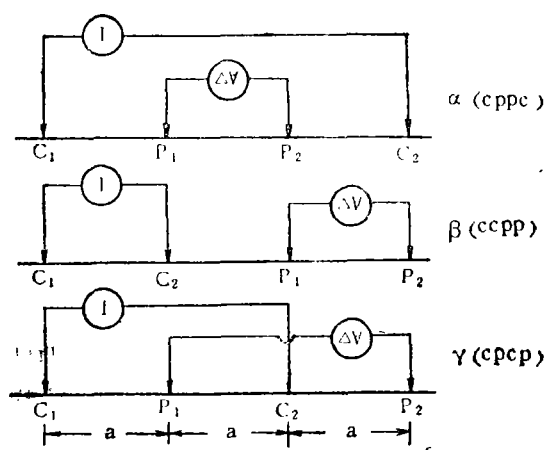


图1 三电位法电极排列示意图

Fig. 1 Sketch of electrode array of tri-potential method.

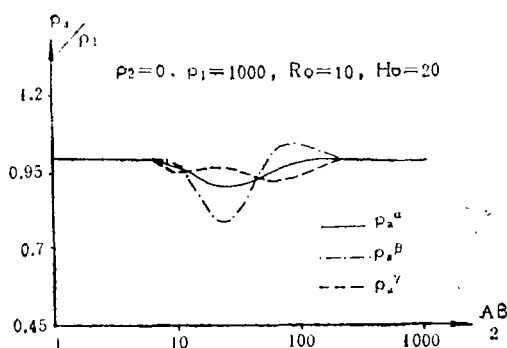


图2 低阻球体三电位测深曲线图

Fig. 2 Theoretical curves of tri-potential sounding for low resistivity globe case.

置的测深曲线变化趋势不一致,形态也不相同,因而必然会出现交叉,且交点位置与异常体埋藏深度和规模大小都有关。因此,利用三电位测深曲线的交点对应的 $\frac{AB}{2}$ 值便可求出异常体的顶底板埋深。

二、三电位测深的理论曲线特征

因为求解不规则形状非均匀地质体对于位场分布所引起的畸变值是一个极复杂的问题,为简便起见,同时考虑到许多溶洞可近似看成球体,所以本文仅对球状不均匀体作出理论计算。

(一) 理论计算:

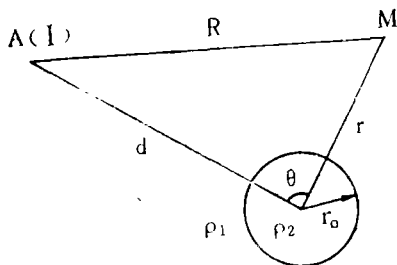


图3 当有球体存在时点源电场的计算简图
Fig. 3 Calculation of electric field of point source in the condition of existing globe.

假定在均匀、各向同性、电阻率为 ρ_1 的无限介质中,有一半径为 r_0 、电阻率为 ρ_2 的球体(如图3所示),在距球心为 d 的位置上有一点电流源A,其电流强度为 I ,观测点M与A的距离为 R ,与球心的距离为 r ,则通过解拉普拉斯方程,可求得球外电位的解答。而在地面进行电法勘探时,必须给出半空间条件下的电位表达式。为此,采用将异常加倍的近似算法。其电位表达式^[1]为:

$$U = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{R} + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\rho_2 - \rho_1)n}{\rho_1 \cdot n + \rho_2(n+1)} \cdot \frac{r_0^{2n+1}}{d^{n+1}r^{n+1}} P_n(\cos\theta) \right] \quad (1)$$

式中 $P_n(\cos\theta)$ 为勒让德多项式。

对于MN不等于零的不同装置来说,只要写出M点和N点之间电位差的表达式,就可导出相应的电阻率计算公式。

由于计算目的主要是了解球体异常形态变化特征,并非用作理论量板,为简化运算过程,故只取 $n=1$ 项进行计算。若令 ρ_a^α 、 ρ_a^β 、 ρ_a^γ 分别代表对称、偶极、交叉三种装置的电阻率,则球体主剖面上三种装置电阻率近似计算公式分别为:

$$\rho_a^\alpha = \rho_1 \left[1 + 2 \ar_0^3 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2} \left(\frac{\cos\theta_1}{d_A^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_2}{d_A^2 r_N^2} + \frac{\cos\theta_3}{d_B^2 r_N^2} - \frac{\cos\theta_4}{d_B^2 r_M^2} \right) \right]^* \quad (2)$$

$$\rho_a^\beta = \rho_1 \left[1 + 6 \ar_0^3 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2} \left(\frac{\cos\theta_3}{d_B^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_4}{d_B^2 r_N^2} - \frac{\cos\theta_1}{d_A^2 r_M^2} + \frac{\cos\theta_2}{d_A^2 r_N^2} \right) \right]^* \quad (3)$$

$$\rho_a^Y = \rho_1 \left[1 + 3 \arctan^3 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2} \left(\frac{\cos\theta_1}{d_A^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_2}{d_A^2 r_N^2} - \frac{\cos\theta_3}{d_B^2 r_M^2} - \frac{\cos\theta_4}{d_B^2 r_N^2} \right) \right]^* \quad (4)$$

以上述公式为基础,我们编制了三电位测深的 BASIC 程序。这些计算和曲线的绘制均可通过 PC—1500 袖珍电子计算机来完成。

(二) 曲线特征:

在运算中,我们采用了改变球体半径 r_0 或球体中心埋深 H_0 或 ρ_2/ρ_1 比值等参数之一,而固定其他参数的办法来进行计算,以了解不同地电条件下的异常形态。经初步归纳总结,确认三电位测深理论曲线具有如下特征:

1. 同一低阻球体在不同埋藏深度下的异常特征:对于低阻体的三电位测深曲线形态,若与普通对称四极测深曲线相比, ρ_a^α 曲线近似呈“H”型; ρ_a^β 曲线形态近似呈“HK”型; ρ_a^Y 曲线形态近似呈“HKH”型。显然由于三条曲线变化趋势不一致,这必然导致交点的出现。不管埋藏深度如何改变,只要是在极距大到勘探深度能达到的范围内,均出现两个交点,这两个交点便可大致控制异常范围。随着埋深的改变,交点位置也随着改变,埋深愈大,交点所对应的 $\frac{AB}{2}$ 值也愈大。

2. 同一高阻球体在不同埋藏深度下的异常特征:其异常形态与低阻体正好相反,随着埋深的加大,异常交点位置所对应的 $\frac{AB}{2}$ 值亦相应增大。

3. 球体中心埋深相同,而球体半径不同时的异常特征:只要球体中心埋深相同,不论球体半径如何改变,三电位测深曲线的基本形态不变,且两个交点位置亦不变。只是随着半径由小到大的变化,异常幅度也会由小逐渐变大。

4. 球体半径和中心埋深均相同,而球体与围岩电阻率比值不同时的异常特征:对于除 $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ 比值不同,其他条件均相同的情况,计算结果表明其三电位异常特征基本一致。凡是 $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ 者均为高阻异常, $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$ 者均为低阻异常。无论是高阻还是低阻体,其交点位置均相同。

三、确定球体埋藏深度及规模的方法

通过对不同球体半径、不同埋藏深度以及不同电阻率比值的高(低)阻球体之三电位测深曲线的分析,发现:(1)三电位测深曲线的两个交点与球体中心埋深有固定关系;(2)球体顶部埋深与异常幅值大小有关。若以球体中心埋深 H_0 为纵坐标,三电位测深曲线的交

*1 (2)式中的 $d_B, r_M, r_N, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 等变量与(3), (4)式中的相应变量均不相同。

点所对应的 $\frac{AB}{2}$ 值为横坐标作图, 则可看出, 随着 H_0 的增大, $\frac{AB}{2}$ 值也增大。且近似呈线性变化, 只是第一个交点与第二个交点与 H_0 的关系曲线之斜率不同而已。如图 4 所示, 图

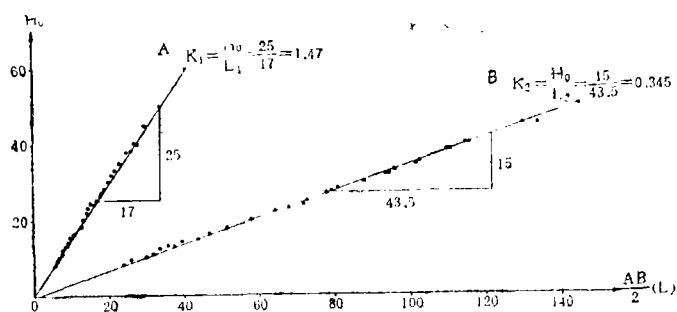


图 4 三电位测深交点位置 (L_1 和 L_2) 与球体中心埋深 H_0 的相关关系图

Fig.4 Correlation between intersecting points (L_1 and L_2) of tripotential sounding and central burial depth H_0 of globe.

中 A 为第一个交点所对应的 $\frac{AB}{2}$ (用 L_1 表示) 与 H_0 的相关曲线。其斜率为 1.47, 即

$K_1 = \frac{H_0}{L_1} = 1.47$; 图中 B 为第二个交点所对应的 $\frac{AB}{2}$ (用 L_2 表示) 与 H_0 的相关曲线, 斜率

为 0.345, 即 $K_2 = \frac{H_0}{L_2} = 0.345$ 。我们将 K_1 和 K_2 称为改正系数。这样利用 L_1 乘以 K_1 , L_2

乘以 K_2 所得 h_0 应相等。若 $K_1 L_1$ 与 $K_2 L_2$ 不完全相等, 可取其平均值作为中心埋深。用不同半径、不同埋深以及不同电阻率比值的理论曲线进行验算, 结果见表 1。

根据大约 60 组三电位测深理论曲线的交点, 进行计算求取中心埋深值, 与已知中心埋深 H_0 相对比, 误差在 5% 以内的占 94% 以上, 最大误差不超过 10%, 若取两个交点分别计算所得的 h_0 值的平均值与已知 H_0 相比, 其误差则全部小于 5%。因此, 可以认为, 利用 $K_1 L_1$ 或 $K_2 L_2$ 求取中心埋深的方法, 其精度是足够的。

不过, 从表 1 还可看出, 只要球体中心埋深不变, 不论球体大小如何改变, 亦即球体顶

表1 计算中心埋深 h_0 与实际中心埋深 H_0 对比表Tab. 1 Comparison of calculated central burial depth h_0 and practical value H_0

R_0	H_0	按 K_1L_1, K_2L_2 计算之球心埋深 h_0 ($K_1=1.47, K_2=0.345$)					
(已知球体半径)	(已知球心埋深)	L_1	h_0	误差(%)	L_2	h_0	误差(%)
(低阻) 5	10	6.8	9.996	0.04	30.0	10.35	3.5
5	15	10.0	14.70	2.0	44.0	15.18	1.2
5	20	13.2	19.4	3.0	58.0	20.01	0.05
10	15	10.0	14.7	2.0	44.0	15.18	1.20
10	20	13.5	19.8	1.0	58.0	20.01	0.05
10	25	17.0	24.99	0.04	72.0	24.84	0.64
10	30	20.0	29.4	2.0	88.0	30.4	1.33
10	35	22.5	33.08	5.49	103.0	35.54	1.54
(高阻) 10	15	10.0	14.7	2.0	44.2	15.2	1.3
10	20	13.5	19.8	1.0	59.0	20.4	2.0
(低阻) 15	20	13.3	19.6	2.0	58.0	20.01	0.05
15	25	17.0	25.0	0.	73.0	25.2	0.8
15	30	20.0	29.4	2.0	88.0	30.36	1.2
15	35	22.4	32.93	5.91	103.0	35.54	1.54
15	40	28.0	41.2	3.0	115.0	39.7	0.75
15	45	30.0	44.1	2.0	134.0	46.2	2.67
(高阻) 15	20	13.1	19.3	3.5	58.0	20.01	0.05
15	25	17.0	24.99	0.04	73.0	25.19	0.76
15	30	21.0	30.87	2.9	88.0	30.36	1.2
(低阻) 20	25	17.0	24.99	0.04	72.0	24.84	0.64
20	30	20.0	29.4	2.0	88.0	30.36	1.2
20	35	22.2	32.6	6.86	102.0	35.19	0.54
20	40	27.0	39.69	0.78	116.0	40.02	0.05
20	45	30.0	44.1	2.0	130.0	44.85	0.33
20	50	34.0	49.98	0.04	145.0	50.03	0.06
(高阻) 20	25	17.0	24.99	0.04	73.0	25.19	0.76
20	30	20.0	29.4	2.0	87.0	30.02	0.07
20	35	23.0	33.81	3.4	102.0	35.19	0.54
20	40	27.0	39.69	0.78	116.0	40.02	0.05
20	50	34.0	49.98	0.04	145.	50.03	0.06

部或底部埋深如何改变,都不会使交点位置发生变化。故认为用此法还不可能准确地推断球体顶、底部埋深。从大量计算结果(见表2)还发现存在如下规律:

1. 当球体顶部埋深 h_1 为球体半径 R_0 的两倍左右时,三电位测深曲线第一交点对应的 L_1 与球体顶部埋深 h_1 近似相等(即 $h_1 \approx L_1$);

2. 当球体底部埋深为球体半径的三至四倍时,其第二交点对应的 L_2 的一半与球体底部埋深 h_2 近似相等(即 $h_2 \approx \frac{1}{2}L_2$);

3. 球体顶部埋深与球体半径之比值愈小,用 $h_1 = L_1$ 和 $h_2 = \frac{1}{2}L_2$ 近似解求得顶部或

表2 球体顶底埋深与半径之比值及其与交点之比值对比表

Tab. 2 The ratio of the radius to the top and bottom of globe and compared with intersecting point.

R_0	h_1/R_0	h_1/L_1	h_2/R_0	h_2/L_2	备 注
10	0.10	0.14	2.10	0.66	R_0 —球体半径
20	0.25	0.29	2.25	0.62	
10	0.30	0.34	2.30	0.61	h_1 —球体顶部埋深
15	0.33	0.38	2.33	0.60	
15	0.47	0.50	2.47	0.57	h_2 —球体底部埋深
20	0.50	0.50	2.50	0.57	
10	0.50	0.50	2.50	0.57	L_1 —第一交点对应的
10	0.60	0.56	2.60	0.55	$\frac{AB}{2}$ 值
20	0.65	0.61	2.65	0.55	
20	0.75	0.68	2.75	0.54	
20	1.00	0.74	3.00	0.52	L_2 —第二交点对应
10	1.00	0.74	3.00	0.52	
5	1.20	0.85	3.20	0.50	的 $\frac{AB}{2}$ 值
10	1.30	0.88	3.30	0.49	
20	1.50	0.88	3.50	0.48	
10	2.00	1.00	4.00	0.45	
15	2.00	1.00	4.00	0.45	
10	2.50	1.11	4.50	0.44	
5	3.00	1.13	5.00	0.43	

底部埋深误差愈大。但在相同的埋深和相同的半径条件下,用 $h_2/L_2 = 0.5$ 改正系数求取的 h_2 值与实际值的误差比用 $h_1/h_2 = 1$ 改正系数求取的 h_1 值的误差要小。

四、野外实例

为了证实三电位测深定量解释方法的实际效果,我们在一些岩溶比较发育的地区,选择了十余个已知钻孔,做了孔旁三电位测深。另外还对三个未知孔做了三电位测深定量解释。按三电位测深交点法所作定量解释与钻孔资料对比,相对误差在10%以内的占54.5%,相对误差在40—60%以内的占27.2%,最大误差达75.4%。其中误差大的几个点都是溶洞规模小,埋深也比较浅的。下面略举几例说明之。

(一) 广西临桂县浪桥堡测区 $\frac{90}{9}$ 号点

该区位于桂林市南部,地貌属峰林平原型。区内地势比较平坦,全部为黄红色砂质粘土覆盖,覆盖厚度为4—13米。测区周围有岩溶孤峰,为泥盆系上统融县组灰岩,褶皱发育,断裂错动明显,区内有塌坑多处,多为附近大量抽水所引起^[4]。该点经钻探验证在15.22—17.22米有一含水溶洞。在该点所做三电位测深曲线如图5所示。从曲线之交点看共有四个。但从交点

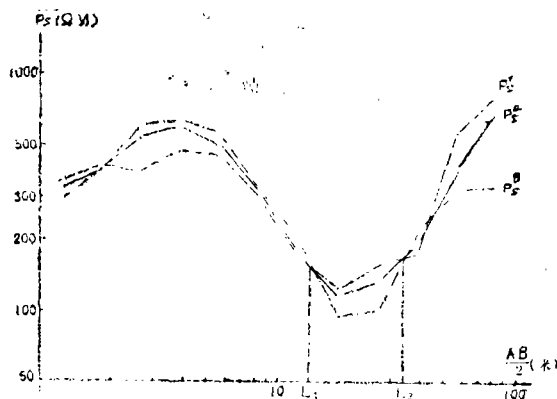


图5 临桂县浪桥堡地区90/9号点三电位测深曲线推断解释图

Fig. 5 Interpretation of tripotential sounding curves at Point 90/9 of Longjaobao.

$$h_1 = L_1 = 13.6 \text{ 米}, \quad h_2 = \frac{1}{2} L_2 = \frac{1}{2} \times 34 = 17 \text{ 米}.$$

$$H_0 = \frac{(13.6 \times 1.47 + 34 \times 0.345)}{2} = 15.9 \text{ 米}$$

所对应的 $\frac{AB}{2}$ 值及交点所控制的异常形态来看, 不难判断最先出现的交点只是表土不均匀的

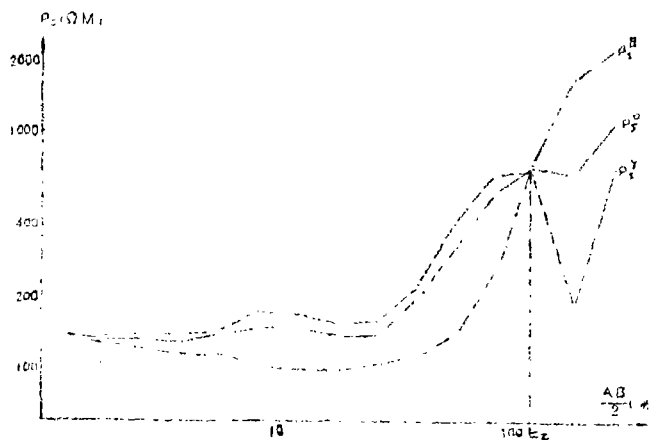
反映, 接下来在低阻异常范围内出现的两个交点($L_1 = 13.6$ 米, $L_2 = 34$ 米)才是含水溶洞顶底板埋深的反映。对于这样一组测深曲线, 若仅取 ρ_s^a 一条曲线, 凭经验系数法判断含水溶洞的埋深, 大约为15米左右, 估计溶洞规模不大, 即埋深与半径的比值大于2, 故可用 $k_1 = 1$ 和 $k_2 = 0.5$ 的改正系数来计算。解释结果为 $h_1 = 13.6$ 米 $h_2 = 17.0$ 米。与钻孔资料对比, 其误差分别为11.3%和1.3%。

(二) 柳州市劳教所 $\frac{50}{1}$ 号点*。

该区位于柳州市东郊, 亦属峰林平原地形, 但测区内地势不很平坦, 测深点位于低洼地形内, 周围山峰由石炭系上统角砾岩、灰岩和白云岩构成。断裂构造发育, 有利于溶洞的形成, 为主要富水地段。据该孔钻探资料已知在27.47至32.85米段岩芯有溶蚀现象; 60.22至61.97米段裂隙发育; 在67.35至68.22、73.40至75.50、82.55至83.65等深度范围内岩芯极其破碎。从该点孔旁三电位测深曲线看(图6), 只在较深部位(较大 $\frac{AB}{2}$)出现一个交点,

可推断此交点为底部埋深的反映。应用 $h_2 = \frac{1}{2} L_2$ 公式来求取底部埋深 $h_2 = \frac{1}{2} \times 118 = 59$

* 1 钻孔资料由广西水文队提供。



$$h_2 = \frac{1}{2} L_2 = \frac{1}{2} \times 118 = 59 \text{ 米}$$

图6 柳州市劳教所50/1点孔旁三电位测深曲线推断解释图

Fig. 6 Interpretation of tripotential sounding curves at point 50/1 of Liuchou.

米。与实际裂隙发育段深度对比,仅相差3米。其相对误差为4.8%。而单独用对称装置 ρ_{α} 测深曲线来进行解释,电算和量板法均难以拟合,只有用经验系数法,推断结果为90米左右,看来误差是比较大的。

(三) 来宾县凤凰华侨农场三队 $\frac{84}{30}$ 号点*

该区属峰林谷地型,地势比较平坦开阔,测区范围内未见岩石露头,为黄色砂质粘土所覆盖,据钻孔揭露本区岩层以上石炭统灰岩为主,其次为下二叠统栖霞组含泥质燧石灰岩、硅质岩、硅质页岩夹含锰灰岩。谷地中溶蚀洼地和塌陷分布很广,利于地表水及大气降水的渗透补给。该孔于38米左右见裂隙水。从该孔孔旁三电位测深曲线看(图7)出现三个交叉点,依据异常特征,判定低阻异常范围应为第二和第三两个交点所控制。故令第二个交点对应的 $\frac{AB}{2}$ 值为 L_1 ,第三个交点对应的 $\frac{AB}{2}$ 值为 L_2 ,则 $h_1 = L_1 = 21$ 米, $h_2 = \frac{1}{2} L_2$

$= \frac{1}{2} \times 72 = 36$ 米。以底部埋深与见水裂隙深度相比,仅相差2米,相对误差为5.3%。但利用电算对普通对称四极测深曲线所作解释,低阻层底部埋深为13米,相对误差达65%以上。

(四) 唐家湾测区 $\frac{72}{12}$ 号点

该区位于桂林市南西方向约九公里处,属峰丛谷地地形。测区两面为陡峭山峰,中间为

*: 钻孔资料由广西物探队提供。

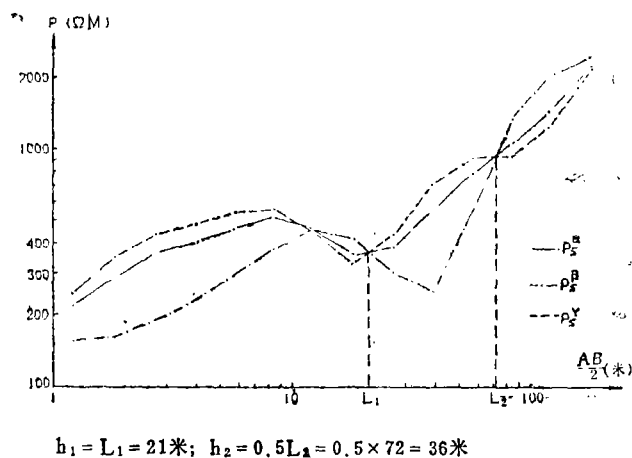


图7 来宾县凤凰华侨农场三队84/30号点三电位测深曲线推断解释图

Fig. 7 Interpretation of tripotential sounding curves at point 84/30 of Fenghuang.

地势略有起伏的近东西向狭长地带,与断裂构造走向一致。东面比较开阔,往西逐渐变窄。出露岩层为泥盆系东岗岭组灰岩。区内还存在许多塌坑、落水洞等,并可见暗河出口。该点为未知点,是依据综合电法异常布置的验证孔。依据三电位测深曲线,按交点法解释结果,溶洞埋深应为7—8米(如图8所示)。钻探结果在深5米处见一小溶洞,其直径不到1

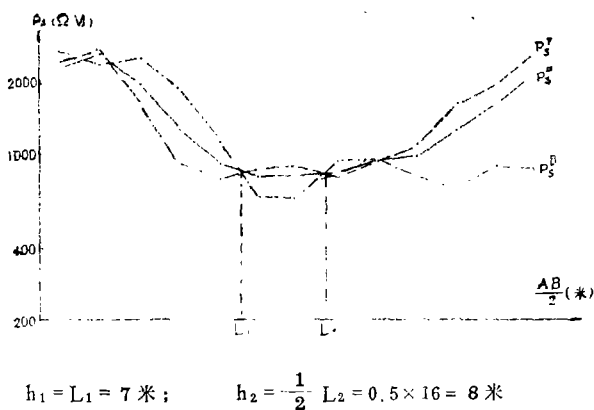


图8 临桂县唐家湾测区76/12号点三电位测深曲线推断解释图

Fig. 8 Interpretation of tripotential sounding curves at point 76/12 of Tangjawan.

米。虽然钻探结果与推断值仅差2米多,但由于埋深太浅,所以相对误差较大,达40%以上。对此点还做了常规对称四极电测深,用电算解释,其结果为13.2米,相对误差超过100%。

五、结 束 语

综上所述,从定量解释的角度来看,说明三电位测深在岩溶地区的应用效果,优于常规对称四极测深。但由于本文所介绍的理论曲线是基于均匀介质中存在高(低)阻球体的假设。客观实际是不可能与理论假设条件完全一致的。能够引起物探异常的地质体或岩溶形态也不可能为规则形状。只能说它们的形态近似呈球状、圆柱状、等轴状、板状或其他形状。围岩也不可能完全均匀。并且除裸露的岩石外,基岩上部都存在本身电性就不均的覆盖层。故野外实测曲线与理论曲线在形态上大多不一致。有时候只出现一个交点,而有时又出现三,四个。那么,如何判断探测目的物所引起的交点呢?这是问题的关键。只有正确的判断才能得到正确的解释。经验表明,表土层不均匀所引起的异常之交点与岩溶地质体引起的异常之交点是具有明显差异的。前者通常只出现在浅部且变化幅度不大,而后者则显示出由上下两个交点控制的、三条曲线互相分开的、幅度变化较大的异常。实践还证明,地下只要有不均匀地质体存在,就会有三电位测深交点异常存在。因此,我们认为该法的应用具有普遍意义,与常规电测深相比,它更适于非水平层的各种不规则形状的目的物。此外,定量解释方法比较简单,且精度较常用的一些方法要高。不足之处是在每个测深点上必须作三次观测,计算、绘图工作量也相应增加,故野外工作速度较常规电法要慢。

由于该项工作还刚刚开始,只选择了球体这种最简单的模型进行正演计算。因此,对其规律的总结认识是极不完善的,尚有待在实践中继续摸索、总结提高。为此,建议今后通过模拟实验或其他有效途径,建立具有覆盖层的、不同形态的及组合模型的三电位测深正演概念。以便获得系统的资料。从中找出规律,用以指导实践。

因条件所限,笔者在成文前未能取得更多的第一手资料,错误和不妥之处,敬请读者指正。本文所引用的野外实例,其物探野外工作由韦吉益、秦金富、沈斌、陈贻祥、黄静、朱其光、黎康兵、李蓓等同志协助完成。电算程序主要由黄静同志协助完成,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 武汉地质学院,电法勘探教程, P1—3, 1980.
- [2] E.W.Carpenter and G.M.Habberjam 1956, A Tripotential Method of Resistivity Prospecting Geophysics, Vol. XXI, NO. 2 P.455-469
- [3] K.G.Kirk and H.Raucn 1977, The Application of the Tripotential Method of Resistivity Prospecting for Groundwater Exploration and Land Use Planning in Karst Terrains, Karst Hydrogeology, Vol. P. 285—299.
- [4] 李淑莹,低频电磁法在岩溶地区的应用,《中国岩溶》, 1983, 第2期。

TRIPOTENTIAL SOUNDING AND ITS APPLICATION IN KARST AREA

Li Shuying

(Institute of Karst Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources)

Abstract

This paper briefly introduces the principle of the tripotential sounding, and describes the theoretic characteristic curves of tripotential sounding on a sphere under the conditions of different diameter of different sphere, different central burial depth and different ratio of resistivity. It has been found that the value $AB/2$ corresponding to the intersecting point of the tripotential sounding curves is in linear relationship with the central burial depth H_0 of the sphere. Some case histories were cited to exemplify of the possibility of quantitative interpretation by using the intersecting point method with tripotential sounding curves.