

# 激电测深与 EH4 结合在查找水源和基岩埋深工程中的应用

## Application of IP Sounding Combined with EH4 in Finding Water Source and Bedrock Buried Depth Engineering

毛东辉

Donghui Mao

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 中国·新疆 昌吉 831100

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831100, China

**摘要:** 论文以激电测深和 EH4 大地电磁测深相结合的测试结果, 辅以钻孔揭露实例, 来验证在中深地层中查找水源与基岩埋深的效果。激电测深资料解释根据极化率、半衰时、衰减度和综合激电参数 ZP 的变化情况综合判定含水层; EH4 大地电磁测深数据采用专用的软件计算, 计算出每个测点不同深度的电阻率, 并转换反演制作成图。

**Abstract:** This paper uses the test results of the combination of IP sounding and EH4 magnetotelluric sounding, supplemented by borehole exposure examples, to verify the effect of finding water source and bedrock burial depth in the medium-deep strata. The interpretation of IP sounding data comprehensively determines the aquifer according to the changes of polarizability, half-decay time, attenuation degree and comprehensive IP parameter ZP; EH4 magnetotelluric sounding data is calculated with special software, and the resistivity at different depths of each measuring point is calculated, and converted into inversion and mapped.

**关键词:** 激电测深; EH4 大地电磁测深; 地下水; 基岩埋深

**Keywords:** exciting electric sounding; EH 4 earth electromagnetic sounding; ground water; bedrock buried depth

**DOI:** 10.12346/edwch.v1i2.7844

### 1 地质概况、物理特征及工作量

对独山子某公司地下水环境监控设施完善项目进行水文地质物探测试工作, 根据要求, 本次测试的目的是了解测区的地下水位、地层分层及基岩埋深。配备 DZD-6A 数字电阻率仪一台、EH-4 连续电导率剖面仪一台及配套设施。

独山子区地形呈斜条状, 南北长, 西北窄, 西北高, 东南低, 绝大部分地区为戈壁滩, 海拔在 500m 以下, 在地质构造上属于新第三纪以来形成的乌鲁木齐山前拗陷的西段上覆 300~500m 厚的第四纪冲积洪积松散砂砾石层。测区的覆盖层主要为第四系的砂砾石层, 基岩为第三系泥岩和下更新统西域砾岩。地下水埋深一般大于 50m, 工程地质条件良好。该区主要地表水系奎屯河全长 70km, 集水面积 1564km<sup>2</sup>, 年径流量 6.034 × 10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, 洪水期最大流量 173m<sup>3</sup>/s, 最小流量 4.2m<sup>3</sup>/s, 属山区降雨及隔雪水补给型逐流年内分布不均。奎屯河是独山子地区生产、生活用水的主要来源之一。

根据本次物探测试结果, 含土砂砾石电阻率 80~500Ω·m, 极化率在 0.1%~1%, 砂砾石电阻率 200~700Ω·m, 含水砂砾石层的极化率在 2%~8%, 泥砂岩电阻率 200~300Ω·m, 砂砾岩电阻率 400~600Ω·m。布置工作量见表 1。

表 1 物探外业工作量统计表

序号	剖面编号 (位置)	剖面长度 (m)	实测点数	
			EH-4 点	激电测试点
1	P1	2260	7	3
2	P2	3058	9	2
3	P3	7578	6	6
4	P4	7300	5	5
5	P5	751	3	1
6	ZK11		1	1
7	奎屯工业园 区二水厂		1	1
合计		20947m/5 条	32	19

【作者简介】毛东辉 (1989-), 男, 中国河南孟州人, 本科, 工程师, 从事工程地质勘察及物探检测技术研究。

## 2 工作布置、方法与技术

### 2.1 工作布置

本次物探测试工作具体位置由地质人员现场指定,共布置 P1~P5 5 条剖面 and ZK11、工业园区二水厂两处的激电测试和 EH-4 地层电阻率测试,具体工作布置见图 1。



图 1 项目区 P1~P5 剖面平面布置示意图

### 2.2 工作方法

#### 2.2.1 激电测试

①采集参数设置及装置系数。

激电测试工作采用四极测深装置。对称四极装置计算公式为:

$$K = 0.1\pi \frac{AM \times AN}{MN} \quad (1)$$

其中, AM、AN、MN 为极距长度, m。

对称四极测深排列见图 2。

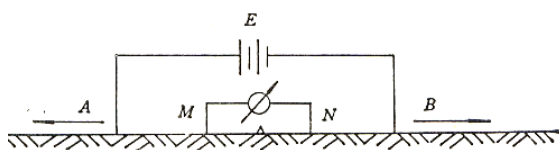


图 2 对称四极测深排列示意图

②激电测试电极距及装置系数见表 2。

③采集参数: 激电测试处理电极 M、N 两极采用不极化电极。激电测试供电周期 T=30s。采集视电阻率  $\rho_s$ 、极化率 M、半衰时 Th、综合激电参数 Zp、衰减度 D。

#### 2.2.2 EH4 大地电磁测深

高频大地电磁测深法属于可控源与天然源相结合的一种大地电磁测深方法。深部地质体通过天然场源成像,接收频率范围为 10Hz~100kHz; 浅部地质体则通过低功率发射器发射 1~100kHz 人工电磁信号, 补偿天然信号的不足。

表 2 激电测试深电极距表

AB/2	MN/2	K	AB/2	MN/2	K
3	1	13	99	33	415
6	2	25	150	50	628
9	3	38	210	70	880
15	5	63	300	100	1257
21	7	88	360	120	1508
30	10	126	390	130	1634
45	15	188	450	150	1885
66	22	276	600	200	2513

将大地看作水平介质,大地电磁场是垂直投射到地下的平面电磁波,则在地面上可观测到相互正交的电磁场分量为  $E_x, H_y; H_x, E_y$ 。通过测量相互正交的电场和磁场分量,可确定介质的电阻率值。其计算公式为:

$$\rho = 1/5f|E_x/H_y|^2 \quad (2)$$

其中, f 为频率, Hz;  $\rho$  为电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。

由于地下介质是不均匀的,因而计算的  $\rho$  值称为视电阻率值。探测深度理论上为一个趋肤深度,计算公式为:

$$\delta \approx 503 (\rho/f)^{1/2} \quad (3)$$

其中,  $\delta$  为趋肤深度。

式 (3) 表明,电磁波的透入深度随电阻率的增加和频率的降低而增大。

野外数据采集时,以测线方向为 X 轴,垂直测线方向为 Y 轴。勘探工作过程中, X、Y 方向的电极距为 20m、工作频率 10 Hz~100kHz、叠加次数 8~16 次以上,记录 X、Y、Z 三个文件。观测数据当日传输到电脑,同时成图,并及时备份。

高频大地电磁法野外工作布置见图 3。

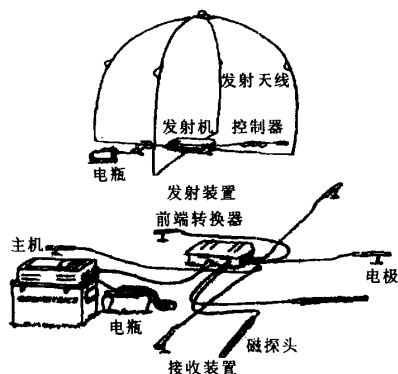


图 3 高频大地电磁法野外工作布置示意图

## 3 资料解释

### 3.1 激电测试资料解释

电测深资料解释工作,首先依据测深点电阻率值绘制等  $\rho-s$  断面图,结合地质资料对岩层进行大致分层处理,再在双对数坐标纸上绘制  $\rho_s-AB/2$  关系曲线,根据曲线类

型选择二层量板 D 型和 G 型理论曲线及对称电测深 Q 型、A 型、H 型、K 型辅助曲线，利用量板对曲线进行定量解释。

激电测试资料解释工作根据极化率、半衰时、衰减度和综合激电参数 ZP 的变化情况综合判定含水层，一般含水地层的的相关数值为无水地层背景值的 2~6 倍左右<sup>[1]</sup>。本次测试极化率、半衰时和综合激电参数 ZP 值的变化趋势比较明显，能较好的判断含水层（如典型激电测试数据激电点见表 3）。

表 3 激电点电 10 ( ZK3 ) 激电参数记录表

电 10 ( ZK3 )	电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	极化率 M1 ( % )	极化率 M2( % )	半衰时 ( s )	综合激电参数 ( s )	衰减度 ( % )
3	254	0.96	0.76	1.04	0.75	0.37
6	329	1.17	1.07	1.54	1.35	0.45
9	166	0.67	0.54	2.02	1.02	0.49
15	160	0.75	0.64	1.88	1.06	0.51
21	195	0.8	0.81	2.38	1.57	0.53
30	189	1.01	0.88	2.38	1.8	0.52
45	206	1.14	1.08	2.14	1.83	0.52
66	228	1.14	0.98	1.36	1.16	0.42
99	258	1.57	1.33	0.92	1.09	0.43
150	239	1.29	1.21	1.58	1.53	0.44
210	301	1.64	1.36	1.4	1.72	0.43
300	418	1.25	1.13	1.78	1.66	0.64
360	450	2.85	2.75	2.36	5.05	1.28
450	532	1.76	1.6	1.82	2.4	0.4

电 10 ( ZK3 ) 典型激电参数见图 4。

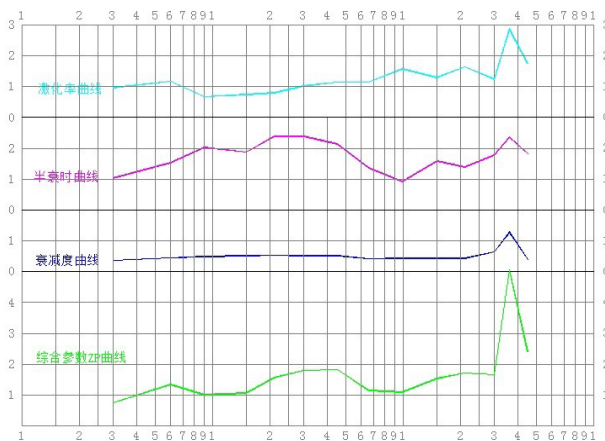


图 4 电 10 ( ZK3 ) 典型激电参数图

### 3.2 EH4 大地电磁测深资料解释

大地电磁法数据采用专用的软件计算，计算出每个测点不同深度的电阻率，并转换成文论文件，再用相关的作图软件成图。

资料处理有实时处理和后续处理两种。本次数据处理采用的是后续处理，后续处理是野外工作结束后在室内完成的一项工作，一般包括两个内容：一是在主机上对野外数据进

行相关系数、滤波系数的调整或对时序资料 ( Y 或 V 文件 ) 进行逐个挑选或剔除等重新处理。尽量降低影响因素，突出有用异常，达到实用目的<sup>[2]</sup>。二是在上述工作的基础上，将最终处理后的结果文件 ( Z 或 W ) 拷贝到 PC 机上，进一步做定量解释及二维反演处理，进行彩色成图等。

本次测试基岩埋深的解译结合激电测试和 EH-4 大地电测深的资料综合推断：通过电 10 ( ZK3 ) 典型激电参数数据显示相关参数突变情况和 EH-4 测试成果根据软件生成的视电阻率断面图进行定性解释，综合推测地下水位在 250~350m 左右；激电测试 600m 以内的极距所测的地层视电阻率值及曲线类型皆为第四系砂砾石层的表现，未见明显的曲线类型变化，推测 600m 以内未见基岩，EH-4 测试成果根据软件生成的视电阻率断面图进行定性解释，综合 EH-4 各测试剖面视电阻率剖面图推测底部基岩视电阻率在 800~1100  $\Omega \cdot m$ 。

## 4 测试成果

### 4.1 P1 剖面测试成果

P1 剖面：第一电性层厚度 45~70m，电阻率 30~200  $\Omega \cdot m$ ，推测为砂砾石含黏性土层；第二电性层厚度 50~57m，埋深 45~70m，电阻率 200~250  $\Omega \cdot m$ ，推测为相对砂砾石含黏性土层；第三电性层厚度 55~565m，埋深 104~128m，电阻率 350~450  $\Omega \cdot m$ ，推测为砂砾石层；第四电性层埋深 670~696m，电阻率 200~300  $\Omega \cdot m$ ，推测为泥砂岩。激电点电 1 ( ZK13 )、电 2 ( ZK14 )、电 3 ( ZK15 ) 测试数据综合解译推测地下水位埋深 275~320m，推测含水砂砾石层厚度 360~395m ( 见图 5 )<sup>[3]</sup>。

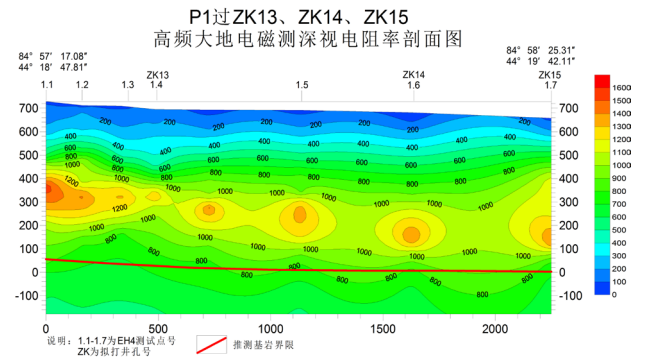


图 5 P1 剖面 EH-4 测试成果图

### 4.2 P2 剖面测试成果

P2 剖面：第一电性层厚度 55~100m，电阻率 60~500  $\Omega \cdot m$ ，推测为砂砾石含黏性土层；第二电性层厚度 60~100m，埋深 55~100m，电阻率 200~300  $\Omega \cdot m$ ，推测为相对细颗粒砂砾石含黏性土层；第三电性层厚度 490~565m，埋深 114~200m，电阻率 300~450  $\Omega \cdot m$ ，推测为砂砾石层；第四电性层埋深 670~694m，电阻率 200~300  $\Omega \cdot m$ ，推测为泥砂岩。综合解译推测地下水位埋

深 279~333m, 含水砂砾石层厚度 357~400m (详见图 6)。

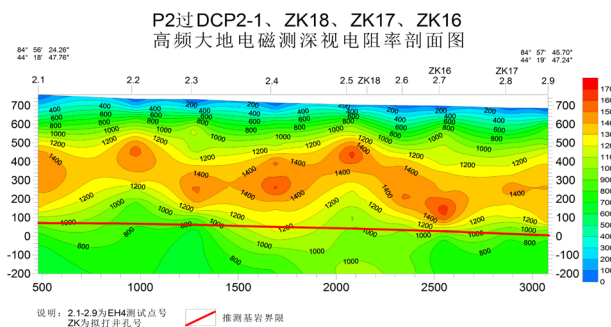


图 6 P2 剖面 EH-4 测试成果图

### 4.3 P3 剖面测试成果

P3 剖面: 第一电性层厚度 70~100m, 电阻率 80~750Ω·m, 推测为砂砾石含黏性土层; 第二电性层厚度 550~615m, 埋深 70~100m, 电阻率 200~700Ω·m, 推测为砂砾石层; 在剖面桩号 1+280~5+930 段在砂砾石层中夹一长 4650m, 最大厚度 104m, 埋深 281m~357m 的相对低阻透镜体, 电阻率 70~100Ω·m, 推测为砂砾石层; 第四电性层埋深 653m~691m, 电阻率 450~600Ω·m, 推测为砂砾岩。激电点电 8 (ZK6)、电 9 (ZK8)、电 14 (ZK12)、电 15 (DCP3-1) 测试数据综合解译推测地下水位埋深 247~337m, 推测含水砂砾石层厚度 316~420m (见图 7)。

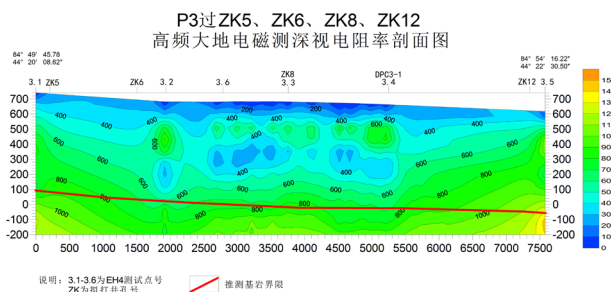


图 7 P3 剖面 EH-4 测试成果图

### 4.4 P4 剖面测试成果

P4 剖面: 第一电性层厚度 57~300m, 电阻率 150~500Ω·m, 推测为砂砾石含黏性土层; 第二电性层厚度 380~543m, 埋深 57~300m, 电阻率 200~700Ω·m, 推测为砂砾石层; 在剖面桩号 0+740~4+595 段在砂砾石层中夹一长 3855m, 最大厚度 243m, 埋深 57~210m 的相对低阻地层, 电阻率 40~80Ω·m, 推测为砂砾石层; 第四电性层埋深 642~680m, 电阻率 400~500Ω·m, 推测为砂砾岩。激电点电 18 (ZK9)、电 19 (ZK7)、电 20 (ZK4)、电 12 (ZK10) 测试数据综合解译推测地下水位埋深 215~351m, 推测含水砂砾石层厚度 316~420m (见图 8)。

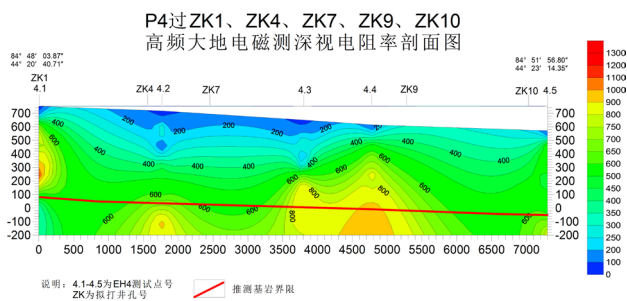


图 8 P4 剖面 EH-4 测试成果图

### 4.5 P5 剖面测试成果

P5 剖面: 第一电性层厚度 140~155m, 电阻率 150~350Ω·m, 推测为砂砾石含黏性土层; 第二电性层厚度 489~525m, 埋深 140~155m, 电阻率 200~350Ω·m, 推测为砂砾石层; 第四电性层埋深 642~663m, 电阻率 400~600Ω·m, 推测为砂砾岩。综合解译推测地下水位埋深 300~315m, 含水砂砾石层厚度 325~363m (见图 9)。

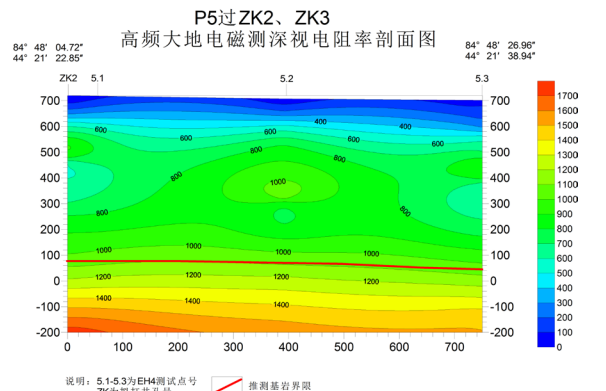


图 9 P5 剖面 EH-4 测试成果图

## 5 测试成果及钻孔实际对比

通过表 4 数据对比和实际钻孔揭露情况可知, EH4 大地电磁测深宏观上能反映电阻率变化趋势, 尤其是一定规模以上的电性层在其变层导致电阻率变化上有着指导意义在定量解释上有着劣势; 激电测深在找水和电性层分层上能定量的、较为准确的反映出来, 对 EH4 大地电磁测深的的数据给予细化, 两者结合相互验证, 能提高资料解译的准确率<sup>[4]</sup>。

## 6. 结语

①受篇幅限制, 测试数据未能全部展示。物探测试结果推测测区地下水位埋深 215~350m, 含水砂砾石层厚度 315~455m, 基岩埋深 620~697m。

②钻探均揭露地下水位, 未能揭露基岩埋深。以上测试结果与钻孔实际揭露的水位基本吻合, 如 ZK11 位置在 P4 剖面附近, ZK11 钻孔揭露处地下水位埋深 219m, 与 P4 剖面推测地下水位埋深 215~351m 相吻合。

表 4 测试成果统计表

点号	钻孔及位置	水位 (m)	基岩埋深 (m)	地面高程 (m)	备注	
1.1 (EH-4)			685	740	P1 剖面	
1.2 (EH-4)			693	735.7		
1.3 (EH-4)			696	731.4		
1.4 (EH-4) / 电 1 1	ZK13	315	697	727.3		
1.5 (EH-4)			688	710.7		
1.6 (EH-4) / 电 2	ZK14	293	676	696.3		
1.7 (EH-4) / 电 3	ZK15	275	670	678.4		
电 6	DCP2-1 以西 510m	333	690	771	P2 剖面	
2.1 (EH-4)	DCP2-1		694	759		
2.2 (EH-4)			680	745.7		
2.3 (EH-4)	DCP2-2		677	737.6		
2.4 (EH-4)			676	726		
2.5 (EH-4) / 电 4	ZK18	300	676	714.6		
2.6 (EH-4)			674	709.7		
2.7 (EH-4)	ZK17		673	703.8		
2.8 (EH-4)	ZK16		674	694.3		
2.9 (EH-4)			678	688.9	P3 剖面	
3.1 (EH-4) / 电 7	ZK5	337	653	743		
3.2 (EH-4) / 电 8	ZK6	284	653	683.2		
3.6 (EH-4) / 电 17	ZK6、ZK8 之间	286	620	680		
3.3 (EH-4) / 电 9	ZK8	293	691	681.5		
3.4 (EH-4) / 电 15	DCP3-1	281	684	664		
3.5 (EH-4) / 电 14	ZK12	247	666	616		
4.1 (EH-4) / 电 11	ZK1	351	680	755.4		
4.2 (EH-4) / 电 20	ZK4	325	687	722.7		
4.3 (EH-4) / 电 19	ZK7	273	650	660	P5 剖面	
4.4 (EH-4) / 电 18	ZK9	250	642	632		
4.5 (EH-4) / 电 12	ZK10	215	643	582.9		
5.1 (EH-4)	ZK2		642	721.9		
5.2 (EH-4)	ZK2、ZK3 中间		651	712.7		
5.3 (EH-4) / 电 10	ZK3	300	663	703.7		
6 (EH-4) / 电 13	ZK11	219	644	588.9		
电 16	奎屯工业园区二水厂	195	650	560.8		工业园区 二水厂
7 (EH-4)	奎屯工业园区二水厂		650	560.8		

③通过激电测深法和 EH4 大地电磁测深法结合解译,能较为准确的解译地下水埋深等测试结果,并经验证数据的准确性,可以得两种方法的结合在查找深度水源和基岩界面等工程中有着很好的测试效果。

#### 参考文献

[1] 李艳梅.直流激电测深法在石灰岩区找水中的应用[J].东北水利

水电,2012(2):2.

[2] DL/T 5010—2005 水电水利工程物探规程[S].

[3] 李霞,陈文芳,万利勤,等.EH4和对称四极激发极化联合技术的严重缺水基岩山区找水研究[J].水文地质工程地质,2018,1(4):23-29.

[4] 安鑫.EH4在引调水工程勘察中的应用[J].广东水利水电,2021(3):75-78.