

瞬变场法野外工作方法 和数据解释手册

G·布塞利

[澳] K·G·麦克拉凯 编著

H·鲁特



地质出版社

瞬变场法野外工作方法 和数据解释手册

Sy37/12

G·布塞利

联邦科学工业研究院矿物物理及矿物学研究室

K·G·麦克拉凯

[澳] 联邦科学工业研究院空间科学及应用研究部 编著

H·鲁特

地球物理勘探顾问公司

蒋邦运 译

地质出版社

译 者 的 话

澳大利亚广大地区分布着厚的良导覆盖层。多年来，澳大利亚的地球物理学家试用过多种频率域电磁法，但都未取得好的地质效果，问题在于无法穿透这低阻屏蔽层。

苏联在 60 年代研制成МППО-1 型过渡过程法(苏联的命名)仪器，并取得好的地质效果后，澳大利亚的地球物理学家极为重视这方面的研究。联邦科学工业研究院的 G·Buselli 博士亲自去苏联考察、工作，而后研制成世界上第一台微机控制的 SIROTEM 系统(至今已为 SIROTEM-III 型，为世界上此类系统中第一流产品之一)，并在本国取得了穿透低阻覆盖层的先例。一时该方法和仪器在澳大利亚得到普遍应用和世界很多国家的引进。但一种方法技术要取得好效果，除了“利器”外，不懂得方法之机理，不善于理论结合实际，其应取得的效果必会降低。更何况物探方法是一种“间接”的方法，同一方法应用之妙各有不同，效果也大不一样。利用手册也许是提高物探人员这方面素质的较好途径之一。

瞬变场法的优点很多，一般都归结为其穿透深度大，可透过低阻覆盖层发现深部隐伏矿体。诚然这是一基本优点，但译者想在此指出：上述优点是建立在绝对测量和长延时多道观测的基础上的，它把剖面观测和测深观测合为一体一次完成。现在受到重视或说比较熟悉的仍是剖面测量，很少发挥它的测深作用。其实，就现有的数据处理技术，当一条剖面观测完毕，剖面曲线图、视电阻率拟断面图、测深推断图可以在其后一小时内完成，给出直接找矿和间接找矿的丰富信息。

我国物探界研究和试用金属矿电磁法已有 30 余年历史，看法不一，自瞬变电磁法开发应用以来才取得好的地质效果。时至

今日，情况已发生了变化，电磁法正处于日益上升之际。这一手册的译出，必然对推动本方法的广泛应用和物探人员这方面水平的提高有所帮助。

原文中提到的一些程序或未提到的程序，就译者所知，可以从地矿部物化探研究所、中国地质大学和中南工业大学得到。原文引用参考文献较多，作者注意了符号含意的统一，但仍有极个别符号含意不止一个。比如，“ W ”有时代表厚度，有时在另外一处代表异常宽度。为了读者便于对照参考文献，译者没有改动，这点务请读者注意。本手册名直译是《SIROTEM 野外工作方法和数据解释手册》，考虑到书内仪器内容较少，其它内容是通用的，故意译成现书名。

译者水平所限，虽三修稿件，难免有不当之处，谨请读者指正幸。

蒋邦远 于河北廊坊

1991.7.6

目 录

本书所用符号一览表	1
SIROTEM 系统的主要性能说明	3
第一章 野外工作方法技术	
§ 1 野外工作方法技术概要	8
1.1 普查观测	8
1.2 详查观测	9
§ 2 回线的组合类型	10
2.1 主要的回线组合类型	10
2.2 各种回线组合的剖面曲线特征	12
§ 3 回线组合类型的选择	15
3.1 一般准则	15
3.2 目的物的参数	15
3.3 电磁噪声	16
3.4 地质噪声环境	17
3.5 发射回线参数	20
3.6 建议	25
§ 4 回线大小的选择	26
4.1 重叠回线组合	27
4.2 内-回线组合	31
§ 5 最佳延时的选择	34
5.1 空气中的球体	34
5.2 地质噪声的影响	36
5.3 小结	37
§ 6 探测深度的极限	38
6.1 重叠回线组合	38
6.2 计算探测深度极限的举例	41

6.3	内-回线组合	42
§ 7	忽略覆盖层和围岩影响的条件	44
7.1	忽略地质噪声的判据	44
7.2	重叠回线组合	44
7.3	内-回线组合	46
§ 8	测网的选择	47
8.1	接收系统的分辨率	47
8.2	测网的大小	49
§ 9	超顺磁效应和负响应	51
9.1	近地表超顺磁物质的效应	51
9.2	负瞬变电磁响应	54
第二章 数据解释		
§ 10	数据解释方案概述	59
10.1	普查观测	59
10.2	详查观测	61
§ 11	适用的瞬变电磁数据解释辅助资料一览表	63
§ 12	数据解释辅助资料的详情	63
12.1	相似模拟	63
12.2	经验关系式和诺模图	75
12.3	解析式	82
12.4	计算机程序	90
12.5	计算器程序	92
§ 13	SIROTEM 系统数据解释方法	93
13.1	普查观测	93
13.2	详查观测	100
§ 14	SIROTEM 系统数据解释方法的应用实例	113
14.1	引言	113
14.2	矿例研究	114
§ 15	地-井*瞬变电磁法	135
15.1	引言	135

* 原文为“井中”，因与工作情况不尽贴切，故改为地-井——译者

15.2 板和球的程序.....	136
15.3 空气介质地-井瞬变电磁法相似模拟曲线	137
参考文献(A, B. 有用的手册、论文和教科书)	160
附录 A. 联邦科学工业研究院瞬变电磁法模拟曲线.....	163
附录 B. 苏联和澳大利亚矿产资源局-Macquarie 大学 的瞬变电磁模型曲线	168
附录 C. 两层大地视电阻率典型曲线	193
附录 D. 单层薄板典型曲线	198
附录 E. 两层薄板上重叠回线的典型曲线.....	203

本书所用符号一览表

长度（单位用米，用毫米处特别声明）

- L' 回线中心间距离
- L 回线边长的一半
- b 回线边长 ($b=2L$)
- R 回线半径
- D 回线直径
- d 板的顶深；球或圆柱中心埋深
- d' 球或圆柱体的顶深
- Z 球体或圆柱体的中心深度
- h 回线距地平面的高度
- W 地质体的宽度
- l 地质体的半走向长
- m 地质体半延深
- s 复合体之间的距离
- a 球体或圆柱体的半径
- x 回线在垂直地质体走向方向上的位移
- y 回线在平行地质体走向方向上的位移

无量纲的长度

$$\bar{R} = R/d$$

$$\bar{L} = L/d$$

$$\bar{a} = a/d$$

$$\bar{x} = x/d$$

面积（单位为平方米，用平方毫米处特别声明）

A 回线面积

角度（度）

- θ 地质体倾角
- α 地质体走向角

导电性

- σ 电导率单位西门子/米, (符号 $S \cdot m^{-1}$)
- σ_0 覆盖层电导率 ($S \cdot m^{-1}$)
- σ_1 围岩电导率 ($S \cdot m^{-1}$)
- σ_B 矿体电导率 ($S \cdot m^{-1}$)
- σ_s 球体电导率 ($S \cdot m^{-1}$)
- S 电导率与厚度乘积 (西门子, S)
- S_s 球体的电导率与厚度乘积 (S)
- ρ 电阻率单位为欧姆·米, 符号 $\Omega \cdot m$

时间

- t 延迟时间 (秒, 用毫秒处特别声明)
- τ 时间常数 (秒, 用毫秒处特别声明)
- β 归一的无量纲时间, $t \cdot 10^{-3} / (\mu_0 SL)$ 或 $t \cdot 10^{-3} / (\mu_0 \sigma WL)$,
其中 t 用毫秒
- T 归一的无量纲时间, $t / (\mu_0 \sigma R^2)$
- α 对于球体 $\alpha = 1 / (\mu_0 \sigma a^2)$; 对于板状体 $\alpha = 1 / (4 \mu_0 SL)$

电磁参数

- μ_0 自由空间的导磁率, $4 \pi \times 10^{-7} H/m$
- V 电压 (伏特, 用微伏或毫微伏处特别声明)
- I 电流 (安培)

SIROTEM 系统的主要性能说明

这里列出与数据解释有关的 SIROTEM 的主要性能，仪器的详细性能说明和操作介绍（如天电抑制方法，结果的标准误差计算，以及磁带数据格式的说明）在新型 SIROTEM 的操作手册中介绍。

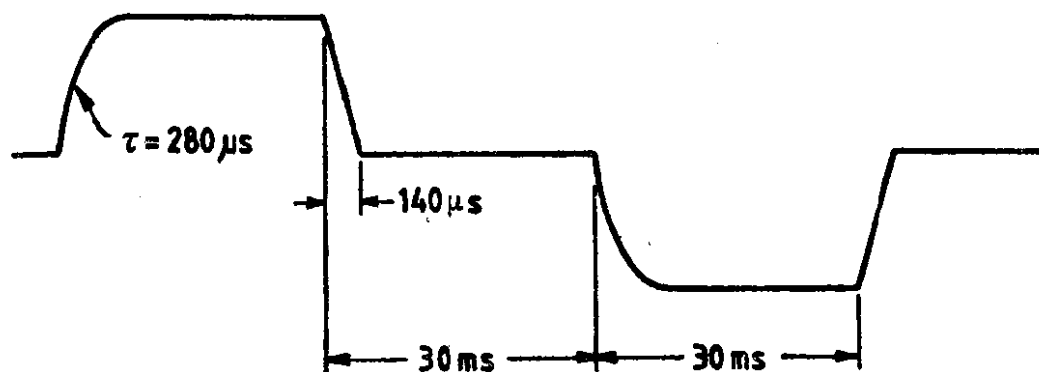
1. 延迟时间

SIROTEM 的延迟时间是从发射电流关断时计量的，每一道的起止时间列在表 1 中。为解释数据，通常采用给定道的起、止时间的算术平均值（标记为“中间时间”）。

2. 取样道数

SIROTEM I 型，选样道至少 17 道，可连续选择最终取样道，最多 32 道；而 SIROTEM II 型只能从标记着 $(2n+2)$ 道的开关上选择偶数道。 $n=0$ 是专门设计的一档，这档选择 16 个取样道和 64 次叠加（与叠加开关次数的位置无关），是用来做快速校正的。SIROTEM II 型在取样道置于 $n=1$ 、2 或 3 时不工作（就软件中第 3 版本而言），因此一般工作时最少为 10 个取样道数（即 $n=4$ ）。

3. 发射电流波形



电流为方形双极性波形，非通电时间可以从 30 ms 变到 180

表 1

取样道序	取样开始时间 (ms)	取样中间时间 (ms)	取样终止时间 (ms)
1	0.315	0.487	0.659
2	0.707	0.879	1.051
3	1.099	1.271	1.443
4	1.491	1.663	1.835
5	1.883	2.055	2.227
6	2.275	2.643	3.011
7	3.059	3.427	3.795
8	3.843	4.211	4.579
9	4.627	4.995	5.363
10	5.411	5.779	6.147
11	6.195	6.955	7.715
12	7.763	8.523	9.283
13	9.331	10.091	10.851
14	10.899	11.659	12.419
15	12.467	13.227	13.987
16	14.035	15.579	17.123
17	17.171	18.715	20.259
18	20.307	21.851	23.395
19	23.443	24.987	26.531
20	26.579	28.123	29.667
21	29.715	32.827	35.939
22	35.987	39.099	42.211
23	42.259	45.371	48.483
24	48.531	51.643	54.755
25	54.803	57.915	61.027
26	61.075	67.323	73.571
27	73.619	79.867	86.115
28	86.163	92.411	98.659
29	98.707	104.955	111.203
30	111.251	117.499	123.747
31	123.795	136.315	148.835
32	148.883	161.403	173.923

ms (参见下面)。电流接通时呈指数上升, 时间常数为 τ , 关断时呈相当于线性的阶跃下降。 τ 值和阶跃宽度都取决于发射回线的电感和电阻。就 3.2Ω 的 100 m 边长的回线来说, 这两个值是

阶跃宽度: $140 \mu\text{s}$

τ : $280 \mu\text{s}$

非通电时间与通电时间相等, 为了抑制 50 Hz 干扰选该时间长短为 10 ms 的倍数。在电力线频率为 60 Hz 的国家 (如美国), 为了最有效地抑制这个频率的干扰, SIROTEM 内部做了调整, 时间长短为 8.333 ms 的倍数。为了抑制 50 Hz 干扰, 由选取的道数决定电流关断时间, 除了最后一道的结束时间要加上 $361 \mu\text{s}$ 外 (在数据采集完以后, 微处理器计算运行所需时间), 还要凑整为下一个 10 ms 的倍数。举例, 如取 21 个取样道, 第 21 道终止于 35.939 ms , 那么发射机在 40 ms 接通; 如取 20 个取样道, 第 20 取样道的终止时间为 29.667 ms , 但接通发射机的信号还要迟 $361 \mu\text{s}$ (即在 30.028 ms), 所以选定发射机在 40 ms 接通。为了抑制 50 Hz 和 60 Hz 的干扰, SIROTEM I 型和 II 型仪器的不通电时间如表 2 中所列。

4. 发射回线电阻

为了保证读数能精确地归一, 回线中的电流应当保持在 $1-10 \text{ A}$ 的范围内。在周围温度高于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$, 负载最大时, 发射回线两端的电压约为 16 V ; 负载最小时, 电压约为 22 V 。这就意味着要采用的发射回线电阻范围如下

回线电阻最小 (电流 10 A 左右时): 1.6Ω

回线电阻最大 (电流 1 A 左右时): 22Ω

注意, 为了使电流不高于 7 A , 安装了一些部件, 这样回线最低电阻就是 2.3Ω 。

5. 叠加次数

在 SIROTEM I 型仪器里, 对在给定一次不通电时间内测量的瞬变电压算一次叠加; 而对于 SIROTEM II 型仪器, 在一次完

表 2

不通电时间 (ms)			不通电时间 (ms)		
道数	抑制选择		道数	抑制选择	
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz
17	30.000	25.000	10	10.000	8.333
18	30.000	25.000	12	10.000	16.666
19	30.000	33.333	14	20.000	16.666
20	40.000	33.333	16	20.000	25.000
21	40.000	41.666	18	30.000	25.000
22	50.000	50.000	20	40.000	33.333
23	50.000	50.000	22	50.000	50.000
24	60.000	58.333	24	60.000	58.333
25	70.000	66.666	26	80.000	75.000
26	80.000	75.000	28	100.000	100.000
27	90.000	91.666	30	130.000	125.000
28	100.000	100.000	32	180.000	175.000
29	120.00	116.666			
30	130.000	125.000			
31	150.000	150.000			
32	180.000	175.000			

整的，即包括正、反向通电时间在内的完整的双极性周期内，两次断电时测量的瞬变电压的平均值算一次叠加。按照这个算法，比如说，SIROTEM I 型仪叠加 2^{11} 次相当 SIROTEM II 型叠加 2^{10} 次（面板上标为 1024 叠加）。SIROTEM I 型仪器的叠加设备，能在 2^0 到 2^{12} 叠加次数中任选，而 SIROTEM II 型仪器可以选择的叠加次数是 512、1024、2048 或 4096，而 64 次叠加是专为取样道数档 $n=0$ 这一测试道设置的。

为了提高 SIROTEM 的模数转换器 (ADC) 的分辨率而装了插入器。此插入器是这样工作的, 它要求至少 2^9 次叠加 (对 SIROTEM II 型为 256 次叠加) 以大大增加模数转换器的分辨率。而最佳的工作情况要求 2^{11} 或 2^{12} 次叠加, 所以采用 SIROTEM I 型仪器时, 建议不要用低于 2^9 次的叠加。为了极大地降低噪声, 通常合适的方法是用 2^{10} 次叠加做两次观测。对于 SIROTEM II 型仪器, 最少的可用叠加次数为 512 次。

6. 视电阻率计算

SIROTEM 系统是按以下近似式计算视电阻率值

$$\rho_a = 6.32 \times 10^{-12} b^{8/3} (V/I)^{-2/3} t^{-5/3}$$

式中 ρ_a 为视电阻率, 单位 $\Omega \cdot m$, 而打印输出值单位为 $m \Omega \cdot m$ 。对于 SIROTEM I 型仪器, b 假定为 100 m, 采用其它 b 值时, 输出的每一个电阻率值都要乘 $(b/100)^{8/3}$ 系数来校正。对于 SIROTEM II 型仪器, 可以从面板上选用 $b=25$ 、50、100 或 200m。SIROTEM 系统计算 ρ_a 的值时利用了对数, 所得值是近似的, 其值可比上列公式算出的大 10%。

第一章 野外工作方法技术

§ 1 野外工作方法技术概要

1.1 普查观测

1. 采用重叠回线或内-回线组合 (参见 § 2) 时, 如果有超顺磁效应 (参见 § 9), 应当将接收回线从发射回线处移开 (对于重叠回线至少移开 3 m, 对于内-回线至少离开 15m*)。

2. 研究测区的已知地质情况, 而后确定此地质环境的最恰当的模式 (比如, 是一个地层覆盖在下延无限半空间介质上)。若测区很大, 则必须利用不同的模型来估计地层的变化。

3. 分析以往电法填图资料, 获得 S 、 σ_h 等电参数, 用在假设的地质环境模型上。

4. 在没有地电断面资料的情况下, 在适当的地点做瞬变电磁测深是可取的方法。测深用内-回线接收方式 (参见 § 2), 而发射回线边长, 比如说可用 100m。计算假设的半空间的视电阻率 (参见 12.3.1 部分), 再借助于典型曲线 (参见 12.2.5 部分) 或是反演程序 (参见 12.4.2 部分), 对资料做反演。

5. 在认为信噪比最大处确定出延迟时间 (参见 § 5)。

6. 从设想的地电剖面的 S 、 σ_h 等电参数计算出极限深度 d_L 。为了做这些计算, 还要假设欲探寻目的物的电导率 (比如 $\sigma_s = 10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$) (参见 § 6)。

7. 选择发射回线的边长相当于极限深度 d_L 的大小 (通常为 100m, 如认为合适也可以选 50m、150m、200m)。如果欲探

* 对于内-回线, 接收线圈在发射回线中心, 没有再移动的可能。但原文如此, 在此可理解为发射回线边长应大于 30 m

寻目的物的尺寸较小（在断面图上尺寸最大的 D ），则回线尺寸应当减小，直到 $L/D \approx 2$ 为止。

8. 为了探测埋深等于极限探测深度处的（球状）目的物，如所选的回线大小正确的话（根据目的物与围岩或覆盖层间的电导率差），则对地质噪声的信噪比 η_G 应大于3，这是校核回线选择是否正确的一种方法。如果在上面2、3和4所确定的地电断面中的电导率比的条件下， η_G 不大于3，则回线应适当减小（参见§7）。

9. 布置测网时，要使相邻测点上铺设的回线不重叠。一般来说，回线间距为回线尺寸的二倍是不可取的（参见§8）。

10. 尽可能用大发射电流，以增大对瞬时噪声的信噪比 η_T （参见4.1.1和4.2.1部分）。

11. 在第一个测点上做重复测量（用SIROTEM I型仪器采用 2^{11} 次叠加，用SIROTEM II型仪器采用1024次叠加，且有20多个取样道，这样至少有5个取样道的数值 $\leq 1\mu\text{V}/\text{A}$ ），由重复测量估算：

(a) 第21取样道和附近的一些道的噪声均方误差（对II型仪器用统计输出数据估计）。

(b) 电导率。其中假设大地为半空间（参见12.3.1部分）。

12. 选择叠加次数，使测量时间约为铺设下一个回线时间的 $1/2$ 到 $3/4$ 。如果数据中噪声严重，就用所选叠加次数的一半于每点做两次观测。对SIROTEM的模数转换器的插入器工作状态来说，叠加 2^{11} （II型仪器为1024）是最佳的，不过对大多数情况，用 2^{10} 叠加（II型仪器为512）次数做两次观测已经足够。

13. 在整个观测中最好保持相同叠加次数和取样道数。为了在无矿地区减少观测时间，可以在观测期间改变取样道数。在这两种情况里，都必须保证至少最后五道的输出小于 $1\mu\text{V}/\text{A}$ 。

14. 在观测中要绘几个有意义取样道的曲线。比如一条能给出覆盖层特点的早期道，和两条晚（是模型的原因）延时道。

1.2 详查观测

1. 优先采用移动接收线圈（参见 § 2）。有时采用分离回线方式，回线中心间距大约等于目的物埋深时，圈定陡倾斜岩脉更好一些（参见 § 2）。

2. 象普查观测一样，要研究测区已知的地质和地球物理数据，以计算最佳延时、极限探测深度以及发射回线的大小（参见 1.1 部分）。

3. 采用与普查相同的步骤来确定最晚延时和采用的叠加次数（参见 1.1 部分）。

4. 测网要比普查测量的密一些。重叠回线组合铺设以重叠 10% 为宜；用移动接收线圈组合，点距要求 5 m 到 10m（参见 8.2.2 部分）。

§ 2 回线的组合类型

2.1 主要的回线组合类型

瞬变电磁法所采用的主要回线组合如下（参见图 2.1）。

1. 发射接收同一回线组合

这种方式是用一个回线既当发射回线又当接收回线，回线的边长可以是 5 m 变到 200m 左右。先供电到回线中，当电流断开时，回线两端转接到接收机，开始测量不供电期间的瞬变响应。

2. 发射-接收重叠回线组合

此回线组合的几何形状与同一回线组合一样，只是发射回线和接收回线是两个独立的回线，两者空间上重叠在一起。家用绞合胶质电线，用于这种回线组合最合适，因为发射和接收所用的两条电线可以在一起一次铺设好。有时，为了降低超顺磁效应（参见 9.1 部分），发射回线和接收回线要分开 3 m 左右，这称为偏离回线组合。

3. 内-回线组合

内-回线组合是重叠回线的一个变种，它由偶极接收线圈（如用多匝空心的、铁淦氧磁体的或导磁金属心的探头）放在大发射