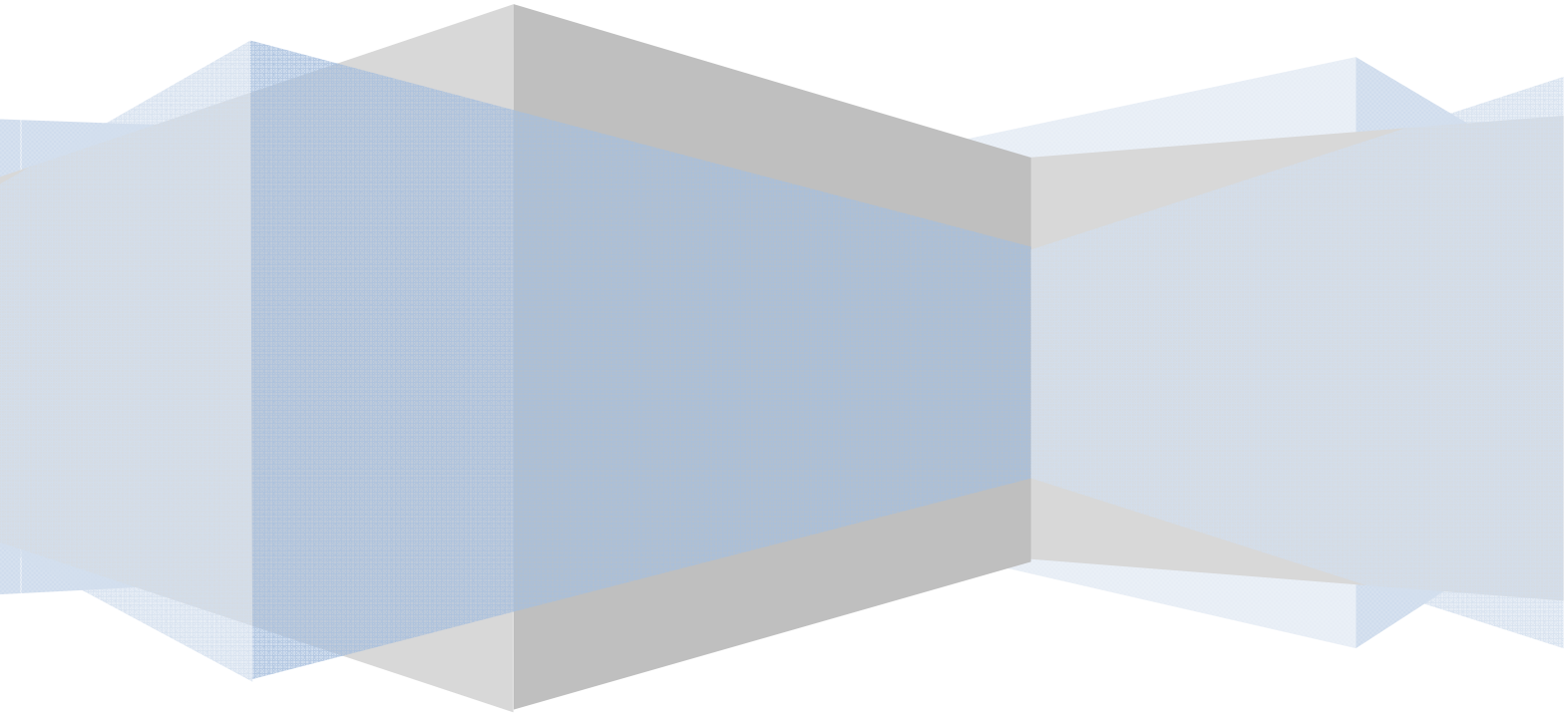
北京欧华联科技有限责任公司

应用中的瞬变电磁法

—PROTEM 瞬变电磁仪



主要内容

一、瞬变电磁法原理

二、如何实现瞬变电磁法原理

三、观测装置及初始场

四、初始场与导体耦合问题

五、不同地质结构的瞬变电磁响应

六、野外工作

七、资料解释及应用实例

八、井中瞬变电磁法

尊敬的用户：

您好！您是 PROTEM 瞬变电磁仪或瞬变电磁法用户，相信您在使用中已经取得了很多宝贵经验。过去 10 余年 PROTEM 瞬变电磁仪在我国已得到广泛应用，已成为矿产资源勘探，工程勘探和煤矿水患预测的重要手段，获得了大量的成功实例。

为了提高瞬变电磁法应用水平，促进瞬变电磁法的发展，我公司编辑了《应用中的瞬变电磁法》一文，供您参考。并希望得到您的指正。

北京欧华联科技有限责任公司

2014 年 11 月 13 日

一 、瞬变电磁法原理

1. 频率域原理（图 1a）

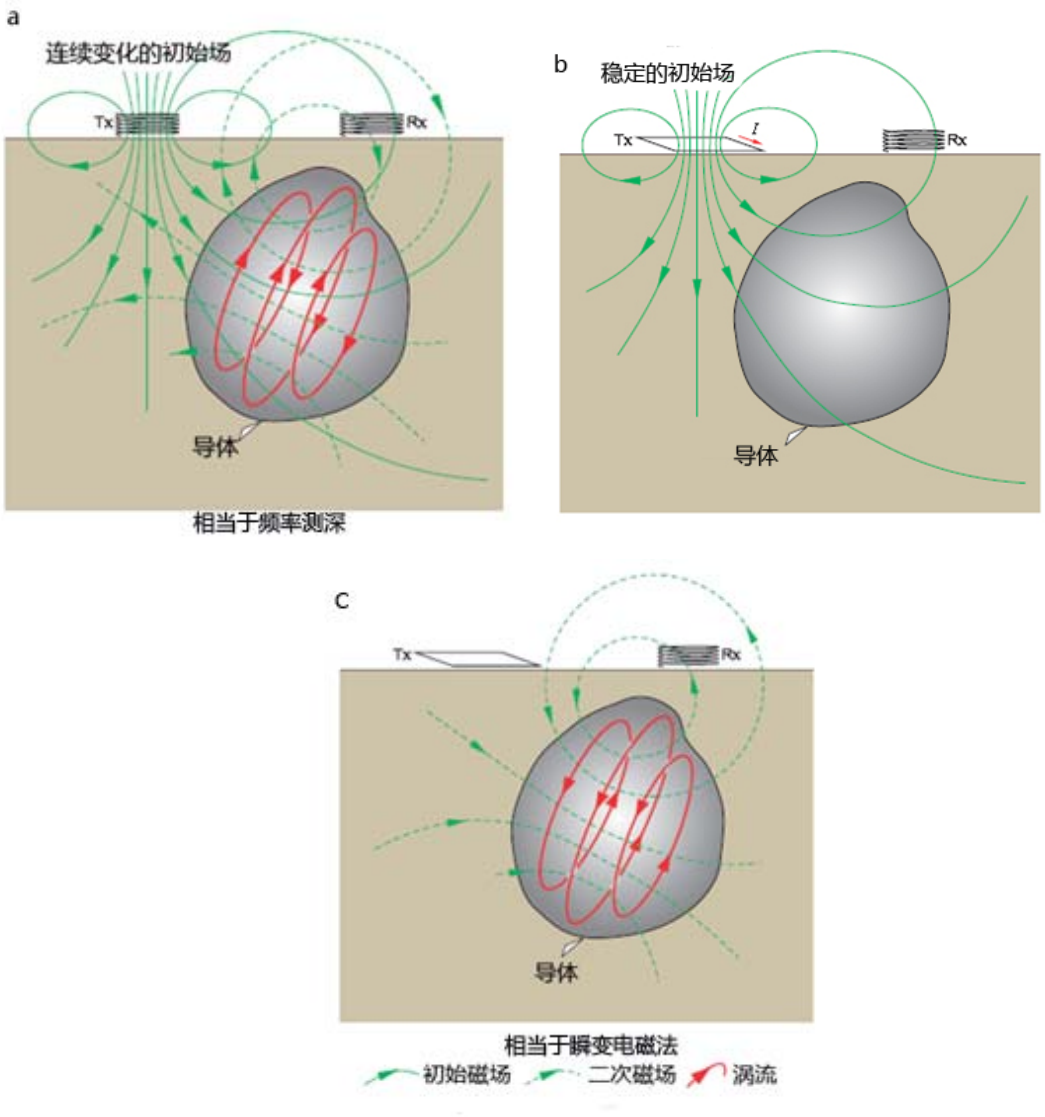


图 1　　a 表示频率域电磁法连续变化的初始场在导体中产生的二次场方向反抗初始场的变化。b 表示时间域电磁法在发射电流关断之前的稳定的初始场。C 表示时间域电磁法在发射电流关断之后在导体中感应的涡流及其产生的二次场。Tx 是发射线圈，Rx 是接收线圈

2. 时间域原理

图 1（b）表示稳定电流产生稳定磁场（关断前），在导体中不产生涡流。图 1（c）表示稳定磁场突然关断，便产生磁场反对关断，此磁场称为一次场。该一次场在导体中感应出变化的涡流，该变化涡流产生二次场，即瞬变场。

瞬变场（涡流）在导体中分布符合趋肤效应，即高频在表面，低频在内部，瞬变场随时间按指数衰减，即高频衰减快，低频衰减慢。

瞬变场幅度和衰减的快慢取决于导体的电导率值和大小，即导体的时间常数（以后讲）。所以观测瞬变场的幅度及其随时间衰减过程便可确定导体的电导率和大小。

二、如何实现上述原理

1. 产生初始场和二次场

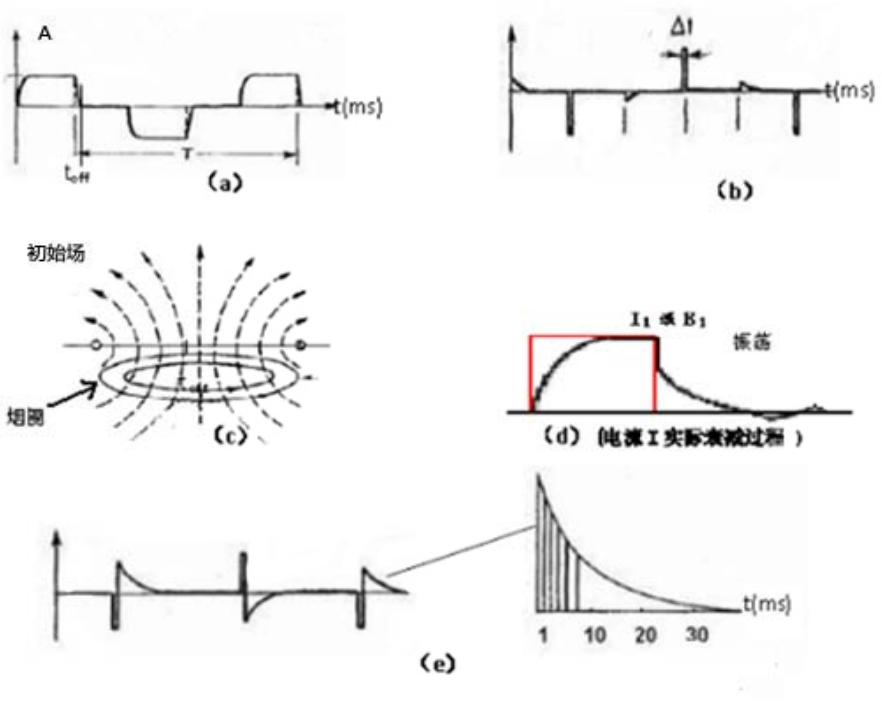


图 2　初始场和瞬变场形成过程及衰减

发射机向发射线框输入脉冲电流 A，A 不变时在发射线周围产生稳定的初始场（见图 1b），当发射电流 A 突然关断时，则发射线圈产生瞬时变化的初始磁场并向地下穿透。在穿透过程中若遇到导电介质便在其中产生涡流（感应电流），涡流又产生二次场（瞬变场）（图 1c）。在发射电流 A 突然关断的瞬间，由于发射线圈的感抗作用，A 不能立即关断，要经历一段时间，称其为关断时间 t_{off}。t_{off} 之后开始观测二次场（图 2a，图 2e）。在 t_{off} 之后发射线圈还有一个弱震荡过程，为避免振荡过程影响，在 PROTEM 的接收回路中设置有噪声抑制（图 4），此外接收线圈还要离开发射线圈一定距离。

2.仪器装置



图 3　　瞬变电磁仪装置图

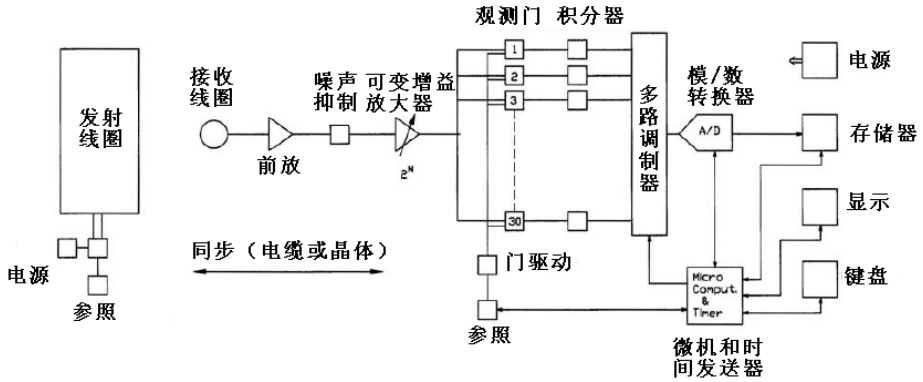


图 4　瞬变电磁仪接收机电路框图（以 PROTEM 为例）

3.感应探头和磁通门磁力仪探头：磁通门探头测量的是导电介质中涡流产生的磁场，感应线圈探头测量的是磁场变化率。对于探测块状的、高导硫化矿体而言，在初始磁场作用下其产生的二次磁场较强，衰减慢，磁通门探头优于感应线圈探头。其它情况下感应线圈探头优于磁通门探头。但磁通门探头有铁芯材料，它在一次场作用下会产生自感应场并叠加在二次场上，形成噪声。

4.多台接收和单台接收：可采用单个或多个接收探头观测二次场，但考虑到每个测点的观测时间不会超过 1 分钟，所以采用多个接收探头意义不大，此外多个探头的信号传输线之间会产生相互感应增加了观测噪声。

三、观测装置及初始场

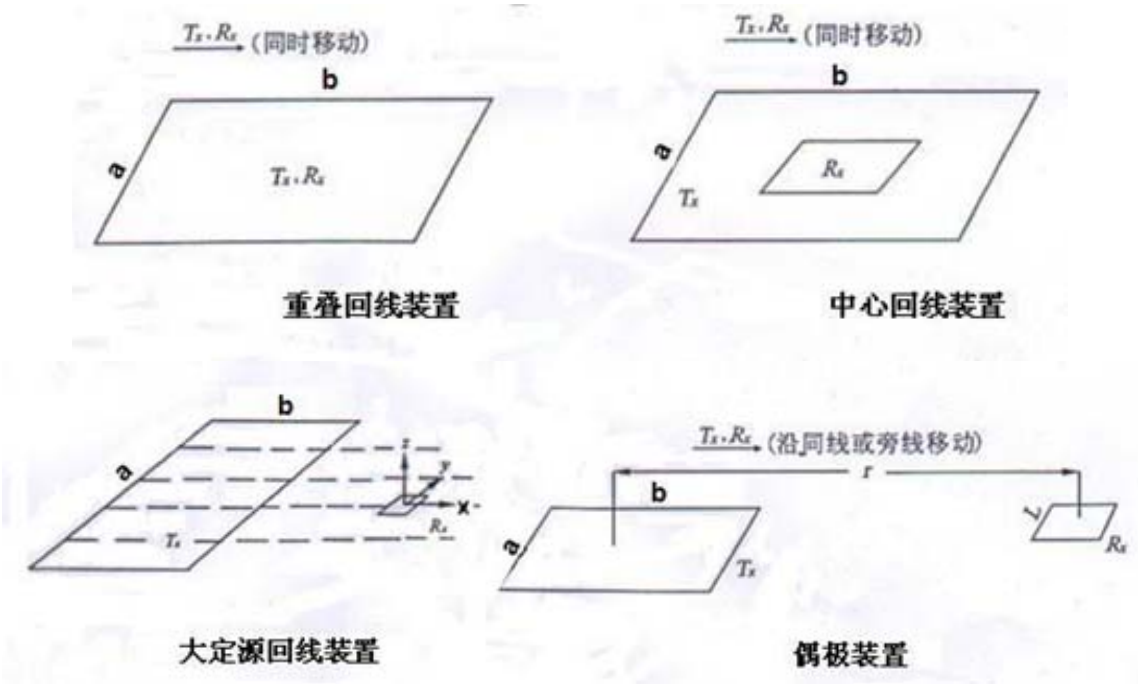


图 5　瞬变电磁法野外观测装置

1. 发射线圈磁矩　M=INS

2. 初始磁场方向及强度

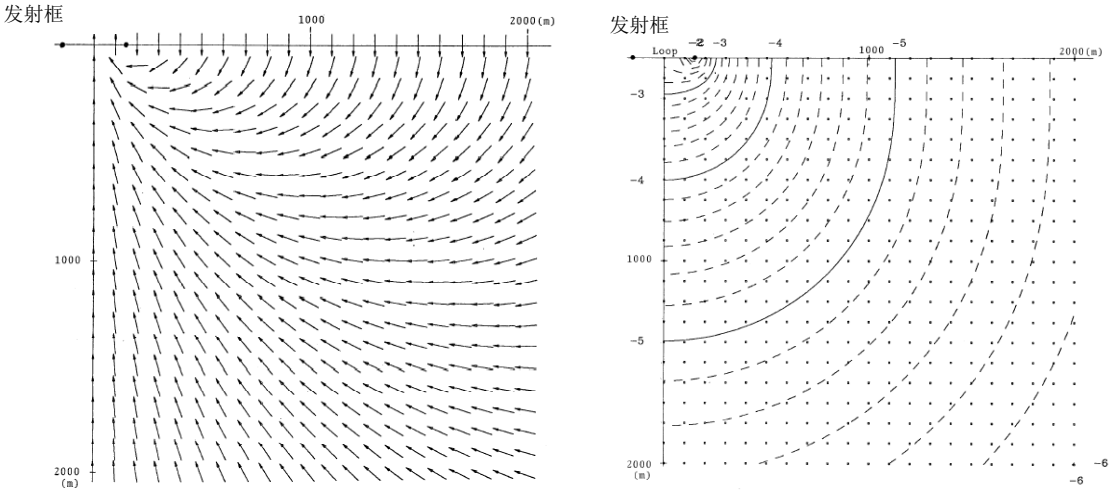


图 6　初始场方向及强度

1）在框内初始磁场向上，在框外向下，并且随距离和穿透深度而改变，在更大深度上（即更长时间）方向从向下变为向上，在框内不变。

2）初始场强度随距离按指数衰减：小线圈随距离按立方衰减；大线圈随距离按平方衰减。所以重叠装置和中心装置只能测框内，大定源装置可测框外，但框外场强是框内的≤1/2。

3.初始场扩散

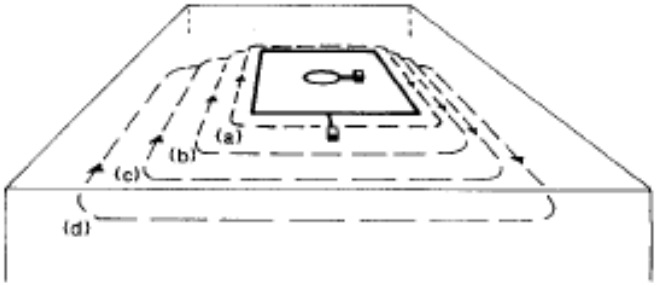


图 7　关断时间之后初始场向地下扩散

早期初始场扩散到（a），覆盖的范围小，分辨率高，到晚期扩散（d），覆盖范围大，分辨率降低。

4.盲区及勘探深度

在工程勘探中需要了解最浅部的电性结构，因此观测时间引起的探测盲区要尽量小。盲区大小可按下式评估：

$$h \approx 28\sqrt{\rho t} \qquad (1)$$

h 是在均匀介质中勘探深度的一种近似表达式，ρ 是测点下方的电阻率值（Ω.m）,t 是开始观测有效瞬变场的时间（ms），即关断时间 t_{off}。

PROTEM 瞬变电磁仪 TEM47，在 40X40m 发射线圈，2A 发射电流时关断时间 t_{off} 最小可短至 0.5μs=0.0005ms，如果测点下方的电阻率 ρ=30Ω.m，则 h=28 √30X0.0005=3.4m，即盲区 3.4m。

如果按上式估算勘探深度，则 t=瞬变场的衰减时间。若 t=15-20ms，地下电阻率 ρ=100Ω.m，则勘探深度 h=1080-1250m。可见，地下电阻率 ρ 越高，勘探深度越大，但 ρ 越高，瞬变场衰减时间越快，所以勘探深度 h 与 ρ 不是简单的开平方关系。

在均匀介质中勘探深度的另一种近似表达式：

$$H = 0.55\left[\frac{M\rho}{RmN}\right]^{1/5} \qquad (2)$$

式中 M 是发射线圈磁距，ρ 是测点下方至勘探深度 H 的平均电阻率值（Ω.m）， RmN 是瞬变电磁仪可分辨的最小信号电平。

对于 PROTEM 系统而言，归一化后的系统噪声为 0.1nV/m^2,即有效面积为 1m^2 时接收线圈的噪声为 0.1nV，如果接收线圈有效面积 1000m^2，则系统噪声为 100nV，即 10^{-7}V。此时，根据公式（5），勘探深度 H 如下表。

最大发射电流	发射线圈尺寸	测点下方至勘探深度 H 的电阻率值		
		20 Ω m	100 Ω m	1000 Ω m
20A	单匝 100m×100m S=10000m^2	H=280m	H=390m	H=620m
20A	单匝 500m×500m S=250000m^2	H=530m	H=730m	H=1170m
20A	单匝 1000m×1000m S=1000000m^2	H=700m	H=960m	H=1540m

由于勘探深度 H 与$[M\rho]^{1/5}$成正比，与$[RmN]^{1/5}$成反比，也即当 M 或ρ增加 2 倍时，勘探深度 H 仅增加 15%；当 M 或ρ增加 4 倍时，H 增加 32%。可见勘探深度 H 与 M 的依赖关系是较弱的，但为了增加勘探深度也只能加大发射线圈的有效面积 S 或发射电流 I，即加大发射线圈磁矩。然而，当发射电流 I 过大时，关断时间 t_{off} 显著加大，于是一次场强显著降低，可见加大发射电流 I 并非最佳选择。

$$V(t) = \frac{d\phi}{dt_{off}}$$

由于地层电阻率变化很大，在新生代沉积盆地区地层电阻率可低至 20Ω.m，在基岩出露的山区电阻率可高达 1000Ω.m 以上，这对勘探深度影响可达 1 倍以上。

以上是在均匀半空间介质中的勘探深度。如果探测局部导体，由于其规模有限探测深度将显著降低。

提高瞬变电磁法勘探效果的最佳途径，是在勘探深度范围内初始场能与目标体有最好耦合，即初始场能垂直穿过目标体走向，这样目标体在初始场作用下能产生最大的涡流和最强的二次场（瞬变场）。

四、初始场与导体耦合问题

这是瞬变电磁法能否成功探测出目标体的关键问题。

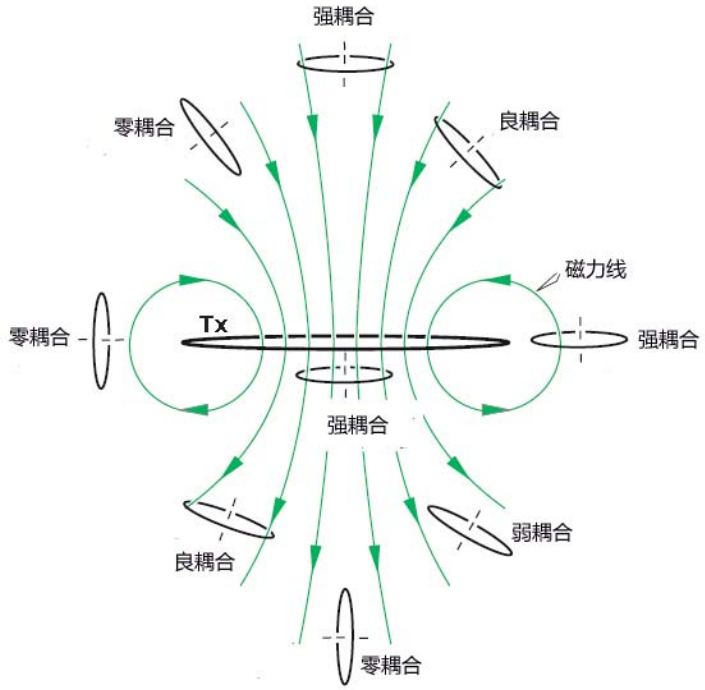


图 8　Tx 发射的磁场对不同位置导体的耦合情况

如果初始场方向与板状导体平面或走向垂直则耦合最好，该导体产生的二次场最强；如果初始场方向与板状导体平面或走向平行，该导体产生的二次场为零，无法发现它。为了便于理解，我们用初始场在导体内产生的涡流系统来讨论耦合问题：

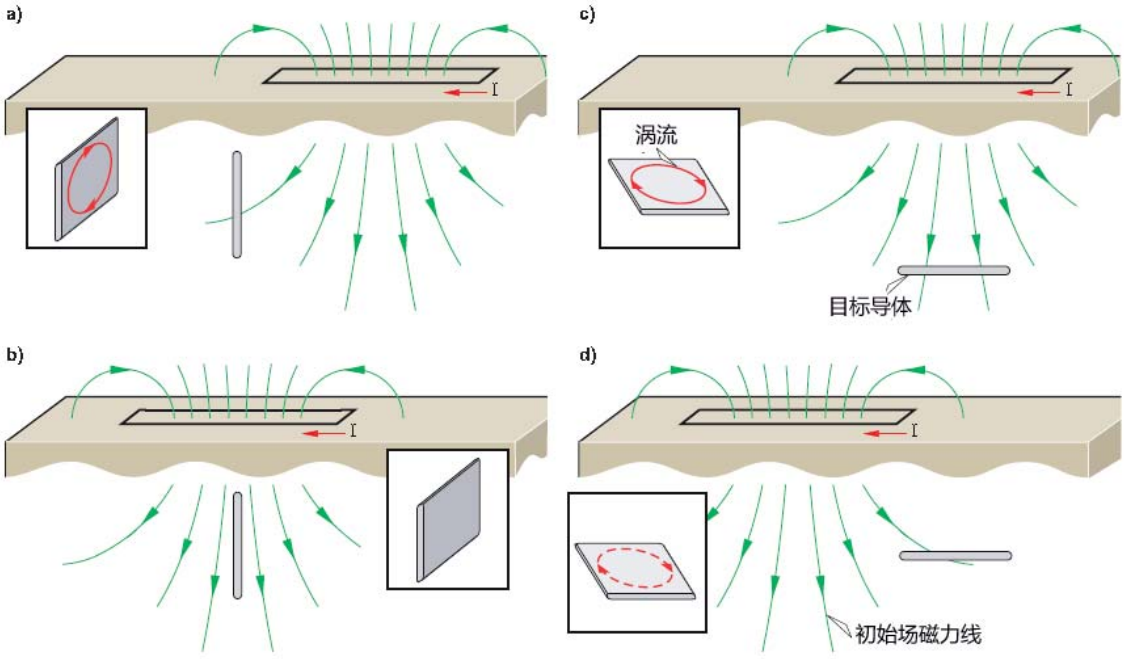


图 9　对地下垂直的和水平的导体薄板处在不同位置时，与初始场耦合情况的变化：a 良好耦合，b 零耦合，c 强耦合，d 弱耦合

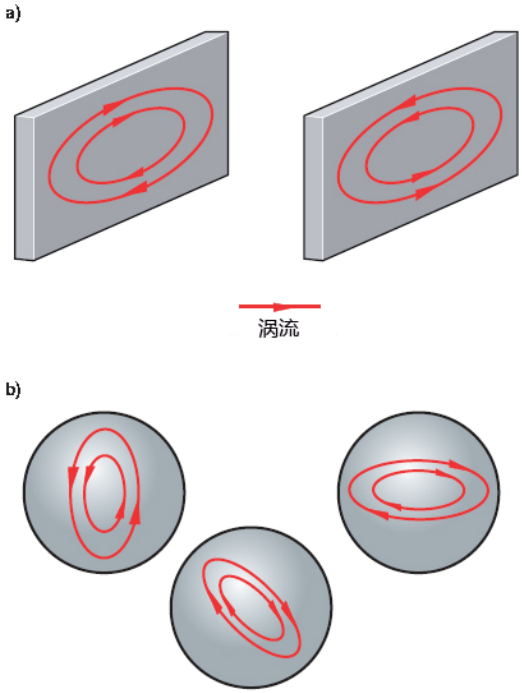


图 10　在导体中的涡流取向：在板状导体中涡流系统处在导体平面内（a），在球状导体内涡流与初始场方向垂直（b）

涡流是由变化的初始场在导体内部产生的。初始场变化越快，涡流越强，即关断时间越短，涡流越强。

涡流以封闭形式存在于导体内。发射电流一旦关断，就产生初始磁场。初始磁场在导体内感应出涡流系统，涡流随时间而衰减。高频涡流，在导体表面流动，最早衰减、衰减快，所以早期瞬变场最强，下降最快。随着时间涡流向导体内部流动，导体导电率和体积越大，涡流向导体内部移动速度越慢、即衰减过程越慢。

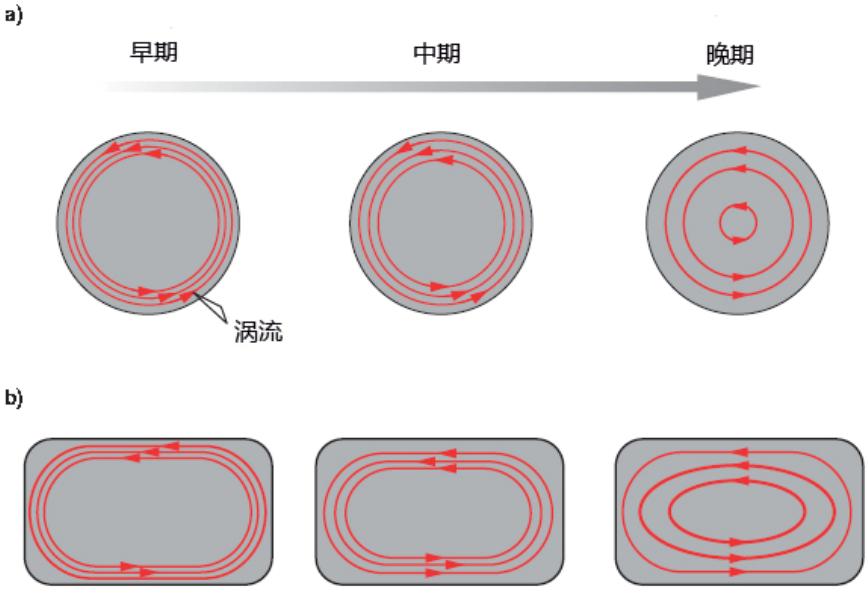


图 11　　涡流随时间的变化：a 球状导体，b 薄板状导体

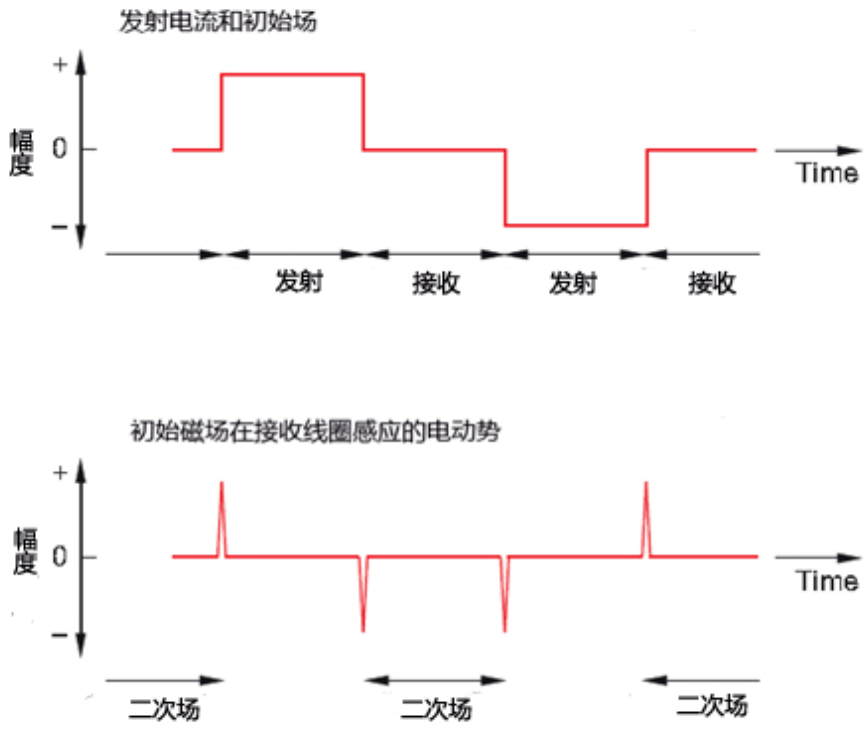


图 12　在不存在导体介质的情况下，发射电流波形在接收线圈中产生的感应电动势

要使初始场与探测目标体有最佳耦合，需要考虑初始场方向和探测目标体的倾向。如图 6，图 13.

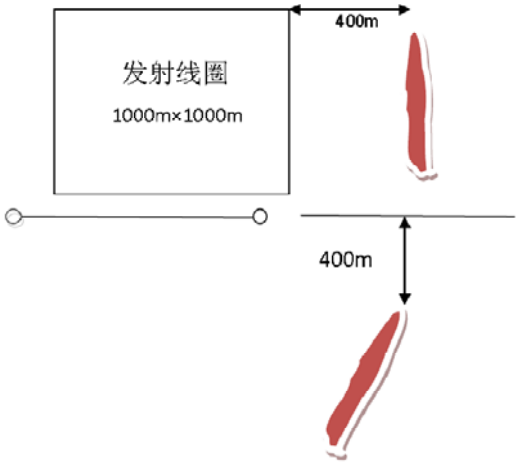


图 13　发射线圈与矿体位置断面图

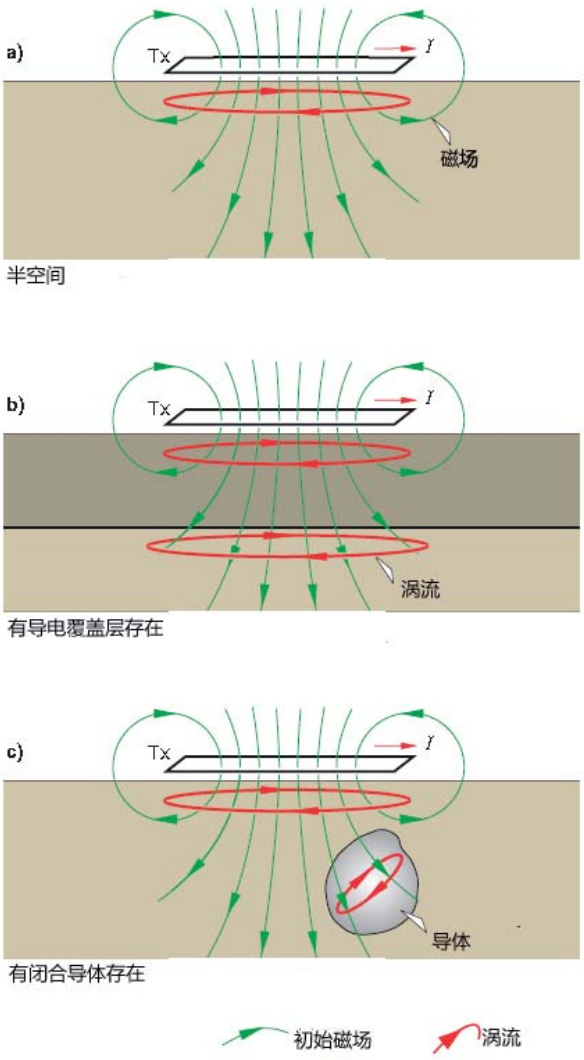
五、不同地质结构的瞬变电磁响应

上面讨论的是在均匀的不导电的（高阻的）地下介质中存在局部的导电体（目标体）情况下的耦合问题，但实际情况是非常复杂的。例如可能有薄的浅部高导层（例如风化层，沉积层薄层）存在，地下介质可能是电性均匀的，目标体位于均匀介质之中，地下介质也可能电性分层的，目标体位于其中等等。上述各种介质均会产生瞬变电磁响应，而我们观测的瞬变电磁场是它们的综合反映，下面分别讨论。

1. 地下均匀导电介质响应

这是最简单情况，电性差仅存在地下—空气界面处。这个模型对于了解初始场的扩散，烟圈概念，扩散深度和衰减率以及分析二次场扩散概念等都是非常有用的。在地面回线发射情况下，涡流

就是发射回线的图像，图 14a。



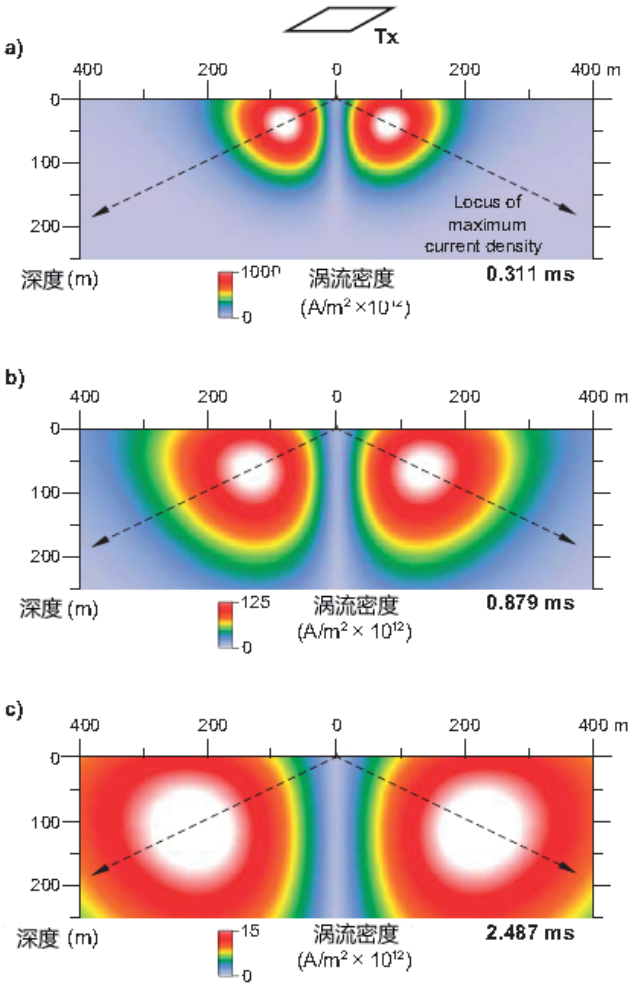


图 14　初始场感应的涡流系统：a 在导电半空间内，b 有高导覆盖层的导电半空间内，c 有闭合导体的导电半空间内

图 15　在导电半空间内涡流随时间的扩散情况 a 早期；b 中期；c 晚期

图 15 表示的是水平发射线圈发射的初始场在地下感应的涡流随时间逐渐扩散的图像。

可见随着时间的增加，涡流向外和向下移动，电流密度快速衰减，能量快速损耗。

从图 15 可见，在发射线圈下方涡流体的形状就像圆饼一样，称之为“烟圈”，它在地下连续扩散，强度和扩散速度随时间下降。“烟圈”按近 30°角向下膨胀。涡流的幅度强烈地依赖于地下电导率和扩散时间。

由于存在地表空气界面，否则电流就会向任何方向扩散。

1）在均匀介质中的扩散深度 d：

$$d = \sqrt{\frac{2t}{ua}} = 1261.6\sqrt{t\rho} \qquad (3)$$

t 是衰减时间.

扩散深度是指初始场的最终穿透深度，它远远大于勘探深度。

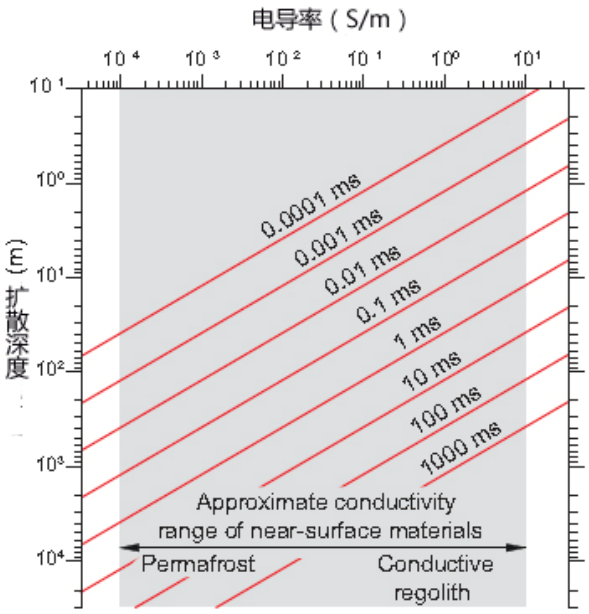


图 16　在不同电导率介质中，初始场在不同时间内的扩散深度

可见在高阻介质中扩散深度大，因为涡流在其中扩散的快。随着介质电阻率的降低，涡流的扩散速度下降。

2）均匀半空间的晚期响应

正如上述，在早期涡流体系扩散的很快，在晚期当扩散很大深度时，涡流体系扩散受到限制，其位置改变的很慢，也就是说扩散速度降低了。在晚期，在很大范围内涡流是平铺的，二次场是垂直的，幅度几乎是不变的，所以均匀半空间的水平场衰减快于垂直场衰减，这是判断均匀半空间和层状导体的重要指标。晚期二次场幅度按功率定律衰减，也即二次场幅度随时间 t 按指数 5/2 衰减：即，

$$\text{二次场}e(t) = \frac{K_e M \sigma^{3/2}}{t^{5/2}} \qquad (4)$$

2.地表高导薄层影响

地表高导薄层与水平发射线圈之间有最好的耦合，由于它与发射线圈非常接近，所以会产生强烈的瞬变响应。

此情况下，在地表高导薄层内部以及该层与下伏层的接触面上均感应有涡流系统（14b），涡流扩散被阻止在高导薄层内部。如果高导薄层是均匀的，侧向无限延伸的，那么涡流就快速地向侧向扩散，其衰减速度大于在半空间的衰减速度，衰减过程受高导薄层导电率和厚度之乘积（电导）所控制。随着层厚的增加，涡流系统垂直向下扩散和向外扩散，响应过程逐渐接近均匀半空间。当地下是多层介质时，瞬变感应同时出现在每个导电层之中，他们的衰减响应相互影响。各层的电导、埋深和层间距离决定着各层的响应幅度和对各层的分辨率能力。由于薄的高阻层电导值很小，TEM 是发现不了的。

图 17 表示浅部高导层瞬变场幅度和下部均匀半空间导电层的瞬变场幅度随时间的变化情况。可见，在早期浅部高导层响应占主导地位，而深度导电层（背景场）响应尚未出现。随着时间延长，来自浅部的响应逐渐变弱，来自深部的背景场响应逐渐占主导地位，但幅值弱，衰减慢。

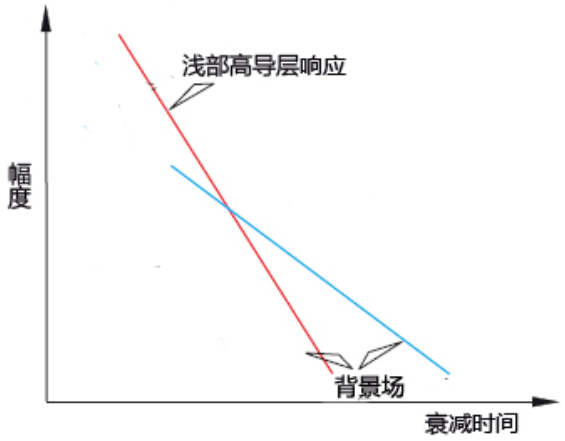


图 17　浅部高导层和导电围岩（半空间）按功率定律衰减

3.高导异常体响应：

当导电的均匀半空间含有不同导电率的异常体时，在初始场关断后，就会产生两个涡流体系。一个涡流体系是背景场（均匀半空间产生的），另一个是异常体产生的，两者相互叠加。

当高导异常体处于高阻半空间中，由于高阻半空间不产生涡流体系，所以异常体的涡流体系没有背景场影响，异常体内部涡流依赖于它的 τ 值、即异常体的电导率和规模。对于电性均匀的异常体来说，其晚期响应 A 随时间按指数衰减（图 18）：

$$A(t) = A_0 e^{-t/\tau} \qquad (5)$$

A_0 是初始幅度，其大小与导体形状，尺寸，埋深以及时间常数 τ 有关。时间常数 τ 是指信号幅度衰减到信号起始幅度 1/e 时（36.8%）所需的时间（ms）。时间常数 τ 之大小与导体的电导率和有效截面积 S 有关：

$$\tau = \frac{\mu\sigma s}{\pi^2} \qquad (6)$$

对于矿化带而言，其时间常数 τ 大致在 200 μ s 至几百 ms 变化，对于层状高导电率地层而言其 τ 值可达几秒。图 18 表示不同 τ 值的衰减曲线。

以上是瞬变曲线沿时间变化（衰减）的一般规律，它可以帮助我们识别地下的地质结构和高导异常体。

瞬变曲线沿空间变化、即瞬变场断面图。可帮助我们识别导体位置、边界、深度和形状的信息。

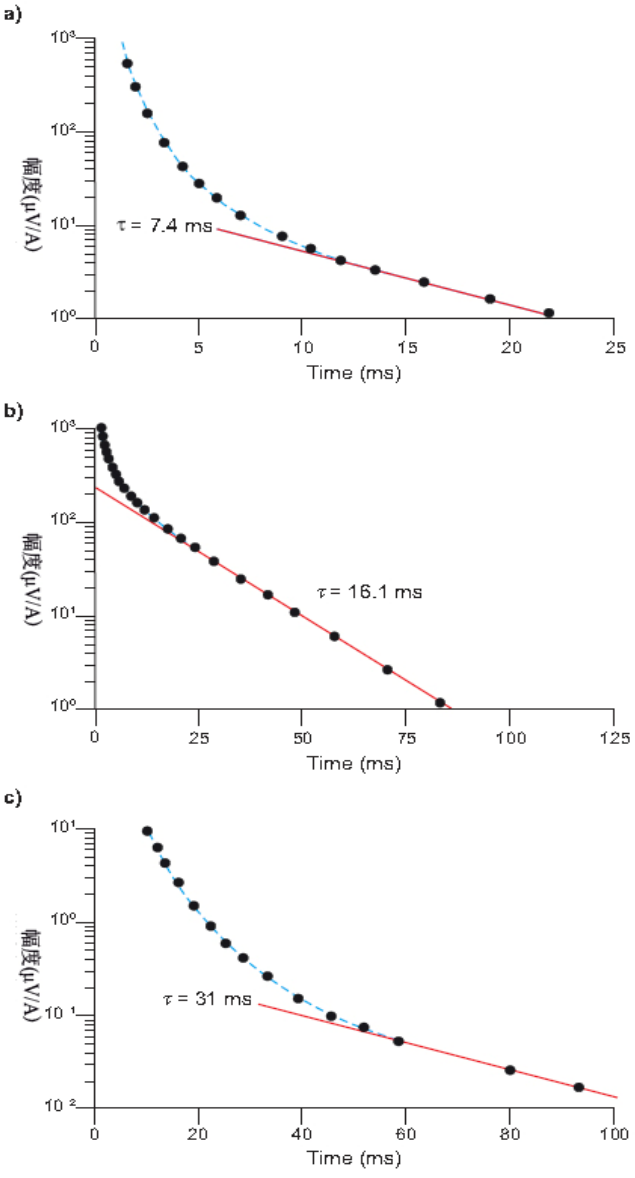


图 18　不同时间常数 τ 的导体晚期衰减曲线，可见 τ 值越大衰减时间越长

4. 估算导体电导率：

导体电导率可根据公式（7）计算，τ是时间常数，S是导体截面积。

$$\sigma = \frac{\tau}{1.27\times10^{-7}S} \qquad (7)$$

τ的估算方法见图19.

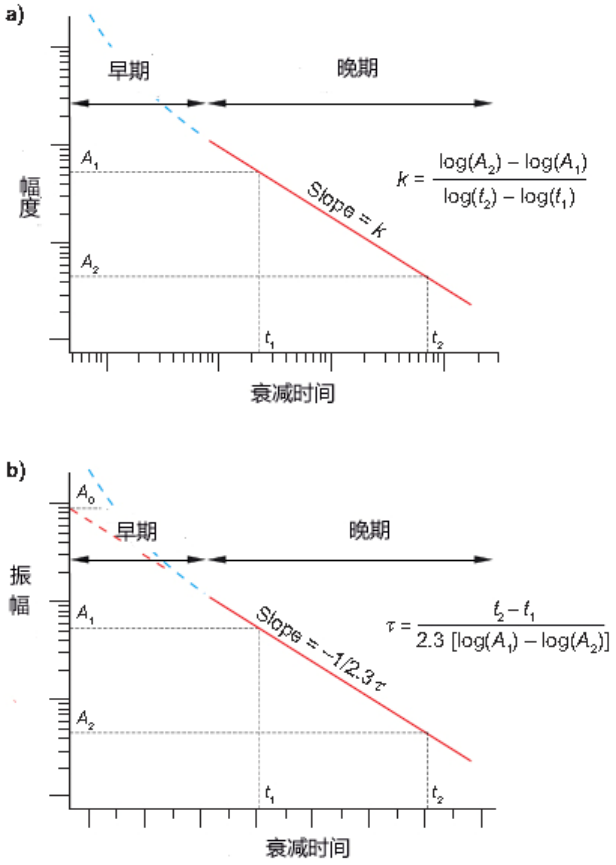


图19　高导异常体的瞬变场值随时间衰减：（a）按功率定律计算衰减常数K，（b）在晚期曲线上计算时间常数τ，A_1和A_2是在时间t_1和t_2时的瞬变场幅值

时间常数τ值的大小是评估导体质量的依据。对于大面积的良导体而言，其中的涡流衰减很慢，因此晚期的瞬变场仍有较高幅值，对于小面积的、低电导率体而言，瞬变场衰减很快（图20）。

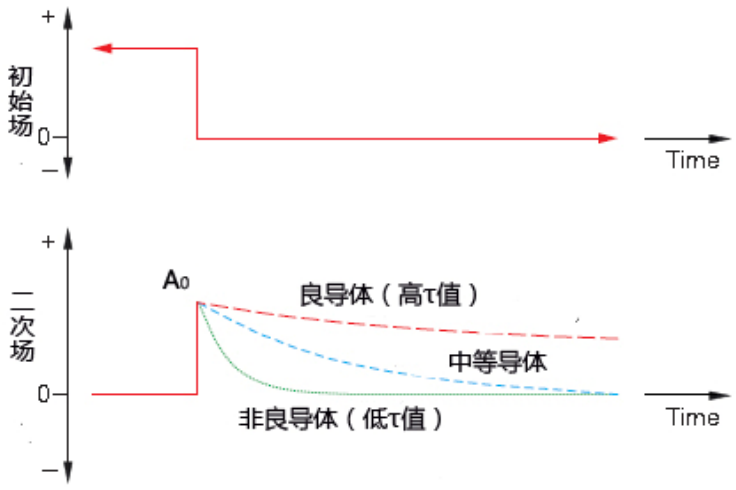


图20　良导体，中等导体和非良导体瞬变场衰减曲线对比

从公式（5）和图 20 可见，对于所有不同导电率导体而言，在起始时间 t=0 时的起始幅度 A（t）=A。它们的 τ 值不同，但它们的二次场起始幅度 A_0 是相同的，但随时间 t 延长，二次场幅度及其衰减发生了很大变化。

如果有浅部高导薄层存在或电导性围岩存在，那么它们控制了早期和中期的衰减过程，此时良导异常体的早、中期衰减过程就被掩盖掉了，只有到了晚期高导异常体所引起的二次场衰减过程才占统治地位。

5. 涡流沟道

如果高导异常体是埋藏在电导性的围岩之中，则高导异常体和围岩之间在电性上是相连的，此时电导性围岩和高导异常体在初始磁场激发下都会产生各自的涡流体系并相互影响。此时，高导异常体受三种机制、以复杂的方式被激发：（1）发射线圈产生的、崩塌式变化的初始磁场，（2）电性围岩中缓慢流动的半空间涡流产生的变化磁场。（3）半空间涡流通过高导异常体产生的变化磁场，这叫涡流集结或涡流沟道效应。

如果围岩是电阻性的，那么它的背景电流体系（涡流）在很短时间就会消失，如果围岩是电导性的，那么它的涡流体系就要保持较长时间。当高导体离开发射线圈较远时，高导体的涡流体系就会变弱，但电导性围岩的涡流体系仍然很强并且控制了高导体的涡流体系。

涡流沟道效应增强了在地表观测的瞬变场幅度，使高导异常体的瞬变场变宽了。涡流沟道效应也可以有效地增加低电导率导体的瞬变响应，这就很难区分高电导率异常体和低电导率异常体了。在高导围岩中几乎不可能识别高导异常体。同样浅部高导薄层的扩展涡流体系也是涡流沟道效应的源头之一。

在电导性围岩之中的高阻体将会使半空间涡流体系在高阻体周围发生偏移，导致高阻体周围涡流增强，高阻体内部涡流缺失。所以在高阻体上方，在地面观测到的是瞬变场低值。

综上所述，识别不同地质结构瞬变响应（二次场）的关键指标是：

1) 非封闭的均匀半空间或均匀导电层的瞬变响应是：
   - 在晚期阶段瞬变曲线按功率定律衰减；
   - 水平瞬变场（x-y）的衰减速度快于垂直瞬变场（Z）的衰减速度。
2) 在高阻围岩中的封闭导体的瞬变响应是：
   - 在晚期阶段瞬变曲线按指数衰减，衰减快慢取决于导体 τ 值，而 τ 值依赖于导体的电导率值、形状和大小。
3) 浅部高导薄层的瞬变响应是：
   - 在早期浅部高导层瞬变响应强，衰减快；
   - 在浅部高导瞬变响应消失后，在晚期可以观测到围岩产生的缓慢的、半空间的瞬变响应。
   - 在晚期阶段半空间的瞬变响应消失后，可观测到封闭导体产生的缓慢的、弱的、按指数衰减的瞬变响应。
4) 在电导性围岩中的高导异常体的瞬变响应往往被围岩的，衰减慢的，高强度的瞬变响应所淹没。
5) 在电导性围岩中的高阻体周围瞬变响应增强，在高阻体上方瞬变响应变弱或消失。

六、野外工作

拟探测的目标导体具有不同的电性，不同的形状 ，不同的倾向和走向以及不同的埋深，它可能孤立存在，也可能在附近有其它导体，它的围岩可能具有不同的电性，勘探区可能存在表层高导薄层，也可能不存在，总之情况千差万别，所以要采用不同的方式以便有效地探测到目标导体。采用单一的电磁法达到最佳的探测目的往往是不可能的。

在不同的情况下，可采用阶跃发射或脉冲发射，对于不同的目标体要在不同的时间间隔上测量二次场衰减。此外，需要考虑的仪器参数还有基本频率、系统结构，以及对采集的数据如何归一化。这些参数共同影响探测和分辨目标体的能力。它们也强烈影响探测深度。

1. 发射波形和基本频率

初始场波形控制着瞬变响应。要获得理想的阶跃波初始场或方波脉冲初始场，则发射线圈中的电流要瞬间关断，但这是不可能的，因为发射线圈的电感防止了电流的瞬变关断。发射电流上升可以是线性的，但开断时间通常是比较快速的线性斜坡。一般而言，大功率发射系统关断时间长。关断时间长显著影响对浅部的分辨能力，下降发射脉冲宽度则显著影响对慢衰减导体的分辨率。

最关键的参数是初始场重复率，也叫基本频率。降低基本频率可使低频初始场能量增强，但也增加了关断时间，这有利于观测晚期瞬变场，有利于分辨良性导体，即电导率高，体积大的导体。提高基本频率可以增加高频能量，降低关断时间，可清楚地观测早期二次场，有利于分辨非良性导体和近地表的地质结构。基本频率设置的原则是对目标体能提供最佳的分辨能力。在已知地区实验不同的重复性有利于最佳重复率的确定。否则，可通过数字模拟来确定。

2. 发射装置结构

发射装置结构指的是发射线圈和接收机之间的排列方式，方位以及发射线圈的尺寸。
调查的详细程度决定着所应用的发射-接收装置结构，它也决定着侧向分辨率。

大回线水平发射线圈与围岩，水平地层和缓倾角导体耦合的最好。发射线圈一般是由单根导线组成的线圈或长方形线圈。

对于大部分瞬变法而言都要测量垂直分量（Z）和沿测线方向的水平分量（X），某些时候也测量垂直测线的分量（Y）。当发射线圈与接收线圈处于同一平面时，我们叫共同结构，当两者的轴线处于同一条直线上时，我们叫共轴结构。

1）移动回线模式（中心回线装置和偶极装置）

对于普查勘探和未知目标导体倾斜方向情况下，常用移动回线观测模式。最常用的移动回线模式为中心回线装置，也叫框内装置。这种装置的接收机位于发射框中心。对于探测水平导电层和均匀半空间而言，在该装置中心点上二次场水平分量 X 和 Y 为零图 21a。

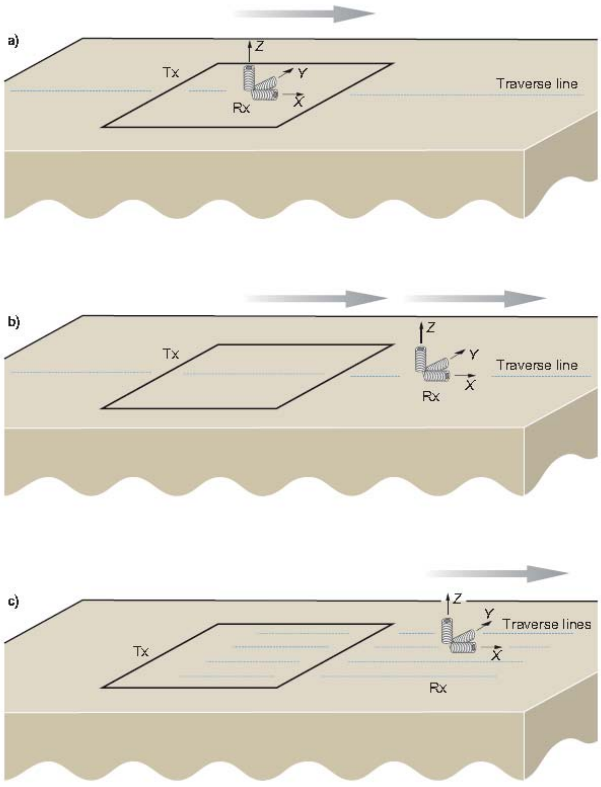


图 21　发射—接收装置结构，（a）框内装置（中心或重叠装置），（b）移动模式分离结构（偶极装置），（c）固定发射结构（大定源装置）

非对称分离装置，也叫偶极装置，对于探测陡倾角的薄状导体最有效。发射线圈中心和接收机之间的距离一般为方形发射线圈单边长度的两倍。观测的数据相当于发射线圈和接收线圈的中心位置。

移动回线模式的发射线圈单边长度一般为 50m-500m，移动间隔，即测点距离应为单边长度的 50%。由于每次移动后发射线圈与目标导体的相对位置都是不同的，因此其间的耦合程度也是变化的，也即在每个位置上产生的涡流电流体系都是不同的。所以回线模式可以认为是观测沿测线方向导体产生的涡流（二次场）或耦合程度的变化情况；固定回线模式（大定源装置）是发射线圈与目标导体耦合固定情况下观测导体内圈定的涡流体系沿测线的变化情况，移动回线模式对探测目标体的知倾向和走向最有效。

2）固定回线模式（大定源发射线圈）

用于已知目标体的倾向、走向和深度勘探情况。因为已知目标导体和倾向，故可正确的布设发射线圈位置。发射线圈长边要与目标导体走向平行。可在框内和框外观测。向框外的观测距离受初始场强度随发射边的距离之衰减而定。

大定源装置的发射线圈必须与陡倾角的目标导体走向垂直，以便获得好的耦合。

3）发射线圈尺寸

大的发射线圈尺寸和低的重复频率晚期信噪比就高，勘探深度就大。当发射线圈尺寸和勘探深度处于同一量级时信噪比和垂直分辨率最高。但大发射线圈与地表高导薄层和电性围岩耦合的愈好，他们产生的响应会淹没掉目标导体的异常影响。所以必须在它们之间做折中选择。同样，在移动回线模式中，大尺寸发射线圈有大的勘探深度，但降低了空间分辨率，所以也必须做折中选择。

一般说来，线圈尺寸（线圈周长）和勘探深度之比在高阻区大约 1:3；在有浅部高导薄层和电性围岩存在的情况下发射线圈尺寸要大，一般大约是 1:6。

4）瞬变电磁法野外工作设计

能否探测到隐伏的、不连续的目标导体，取决于地质环境，应用的仪器，发射装置以及野外工

作的严格性。在野外工作设计中，需要考虑的参数包括：目标体的规模大小，电导率有多大，它的形状和倾向、埋藏深度、目标导体是孤立的，还是与其它导电体相连的。水平板状导体相比于陡倾角的板状导体更容易探测，因为前者与初始场的耦合最强。当然围岩的导电性能更强烈的影响瞬变法的探测能力。

5）数据处理——幅度归一化

二次场强度依赖于初始场强度，所以测量的二次场幅度要相对一次场强度归一化。每一道振幅都要用同时发射电流去除，称归一化。对于线圈接收器而言，其感应电动势也依赖于线圈灵敏度，所以也必须对接收线圈的电压做归一化。全部归一化后的单位是 $V/(ANm^2)$。

V（伏）是接收线圈测定的感应电动势（伏）

A（安培）是发射电流值（即对初始场归一化）

N 接收线圈匝数，m^2 单匝接收线圈面积（平方米），除以 Nm^2 即对接收线圈的归一化

初始场强度随着离开发射线圈的距离而逐渐降低，因此在远处的异常被畸变了，用初始场强度去归一化二次场幅度可以降低这种影响。

6）观测道幅度（即沿测线的瞬变场断面图）

对于框内装置（中心装置）而言，观测道的幅度代表发射线圈中心处的瞬变场幅度；对于大定源装置而言，它是接收点处的幅度；对偶极装置而言，它是发射线圈和接收线圈之间的中点幅度。

瞬变场断面图的优点是，它真实的显现了观测结果，可以快速的了解地下的异常响应。其缺点是，它难于做地质解释，因为异常幅度与异常体本身没有可比性。

瞬变场幅度图的第二种表示方法，是在一些特殊测点确定功率常数 K 和时间常数 τ （图 19）

七、资料解释及应用实例

1. 资料解释过程

最通常的解释方法是首先识别导电体的类别，包括：文化导体，地形影响、地表导体，地层或区域性导体以及基岩导体等等，在矿产勘探中它们都属于环境噪声。例如地表导体（导电覆盖层），覆盖范围大，能产生广阔的，强的瞬变响应。地层或区域导体，具有大的走向延伸很广的电导率范围，能产生宽阔的异常幅度。他们包括断层，剪切带岩石 （例如页岩，石墨等等），岩石接触面等等。

如果瞬变响应延迟的时间非常短，它可能是浅部响应。在偶极装置情况下，导体的响应是不对称的，而且还依赖于接收机位于发射线圈的哪一边和相对于导体位置。

巨大的瞬变响应常与石墨，富硫化物的页岩，片麻岩以及含水构造（断层，含水层）和风化层有关。

对于相互接近的多个导体的瞬变响应是非常复杂的，因为它们相互感应，此时把个别异体分辨出来是困难的。

在没有浅部风化层的高阻地区，可以直接对目标导体的参数进行评估，但在有浅部高导层情况下就不一样了。

在定性解释中首先应分析每个测点的瞬变曲线随时间是如何变化的（随时间变化），以获得测点下方的地质电性结构和垂直变化以及是否存在异常体等定性信息。然后分析瞬变曲线沿测线方向的空间变化，包括瞬变场的幅度、形态、异常宽度，梯度和过零点，以获得沿测线方向的电性分层，地质结构以及异常体的形态，边界和深浅等定性信息。三个分量 X，Y，Z 的响应是明显不同的，但它们都与电性异常体结构有关。

瞬变场资料解释受不同的装置结构和不同的 EM 系统（发射阶跃波或脉冲波）所牵制，它们决定了地下的电磁响应。例如，在低电导率侵染矿体上方可以观测到很强的脉冲响应，但对于高电导率的块状矿体则没有很强的脉冲响应，然而块状矿体却能产生很强的阶跃响应。

2 不同观测装置下、不同产状导体的瞬变响应

图 22 到图 25 描述了常用的三种观测装置，在有浅部低阻薄层和没有浅部低阻薄层情况下，不同倾向的薄层导体的 Z 分量和 X 分量的瞬变响应断面图，现分析如下：

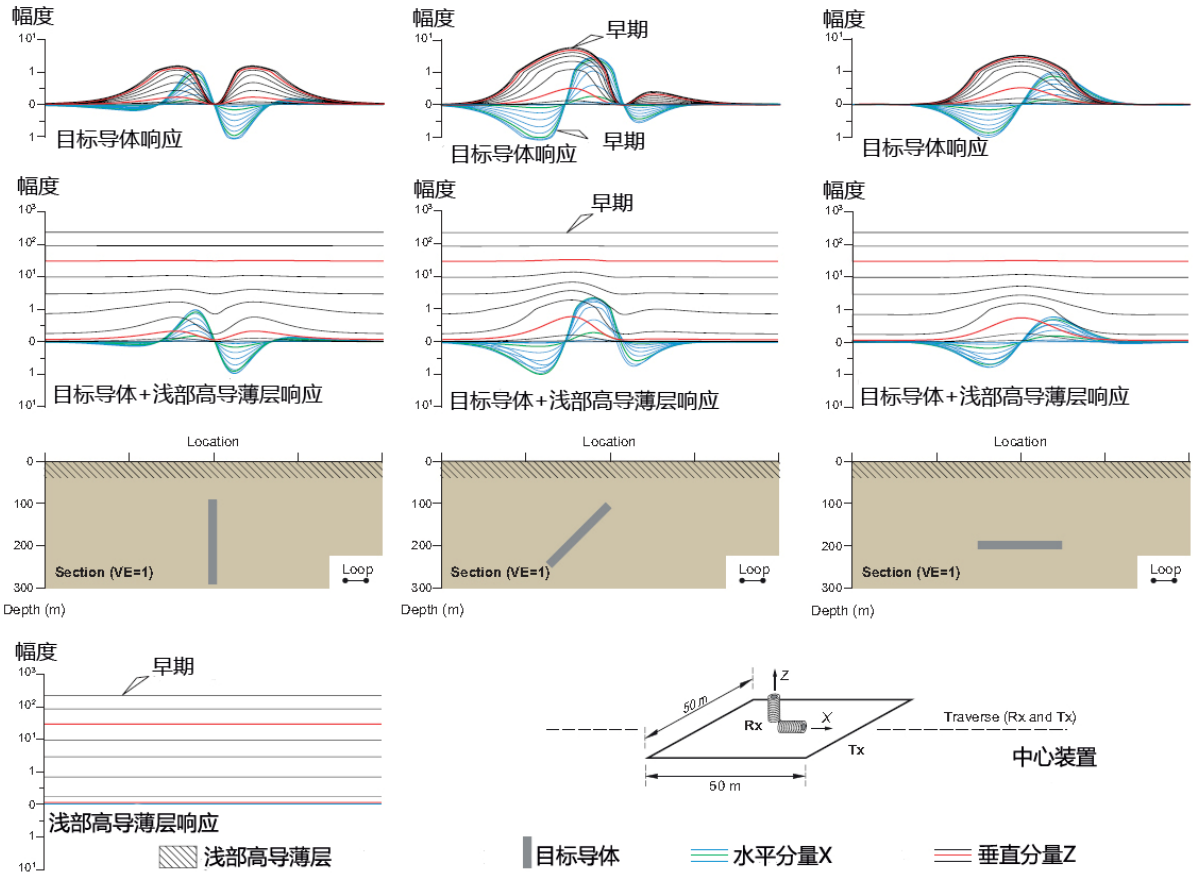


图 22　在中心装置下计算的瞬变响应，包括三种取向的薄板状导体，有无浅部高导薄层

1）中心观测装置

由上图可见，Z 分量和 X 分量在陡倾角薄板导体顶端为零，这是因为垂直薄板导体位于发射线圈正中心，结果是零耦合，在薄板导体没有涡流产生。Z 分量在垂直倾角导体两侧是对称分量，但 X 分量是反向对称，之所以反向是因为初始场方向在导体两侧正好相反。

对倾斜导体而言，最强的响应出现在倾斜方向。

对于水平薄板导体而言，响应也是对称的，但 Z 分量峰值出现在导体中心，因为是水平产状导体所以在导体中心耦合最强。在水平延伸浅部高导薄层存在时，由于该薄层在每个侧点上均产生很强的早期 Z 分量响应，所以把目标体 Z 分量的早期响应掩盖掉了。

注意：在中心装置情况下，对于水平层状导体和均匀半空间而言，X 和 Y 分量响应是零，所以目标导体的 X 分量响应不受浅部低阻薄层的干扰。有、无浅部高导层存在时，X 分量响应的幅度和形态不受影响（浅兰色曲线），而 Z 分量响应被显著压底。

2）偶极装置

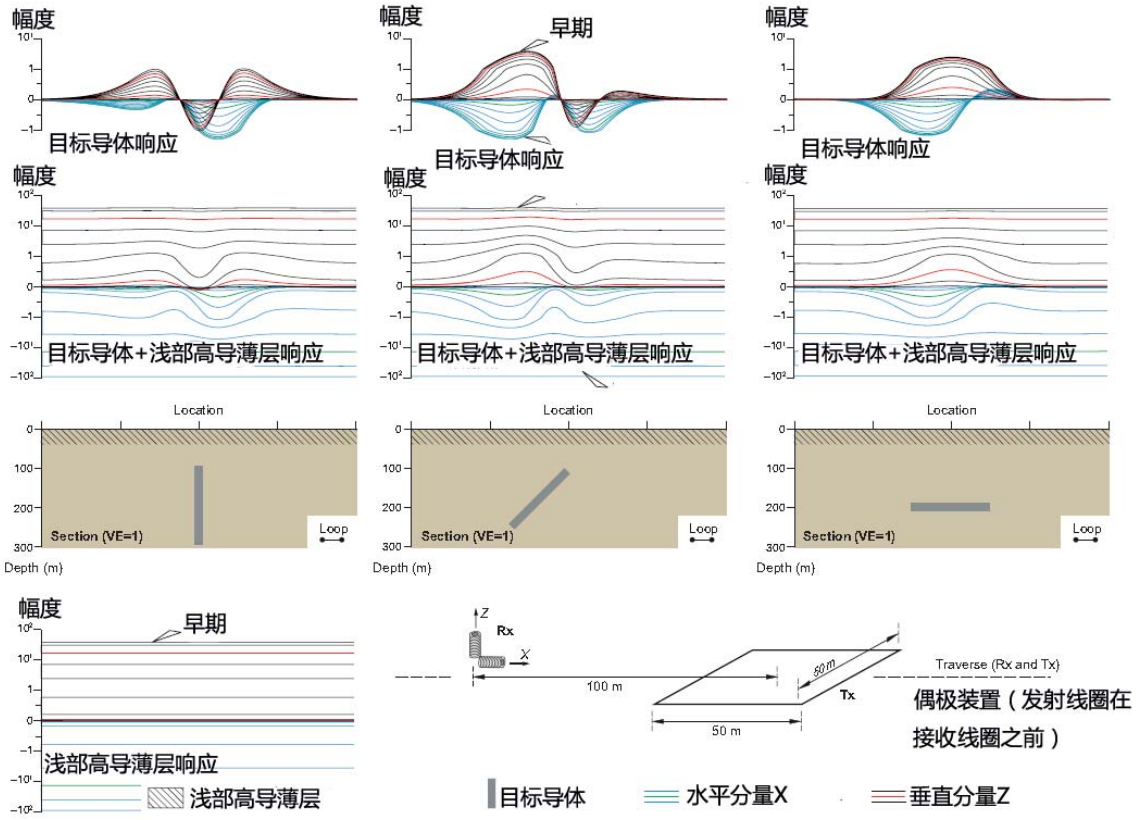


图 23　发射线圈在前，接收机在后的偶极装置下薄板状导体的瞬变响应

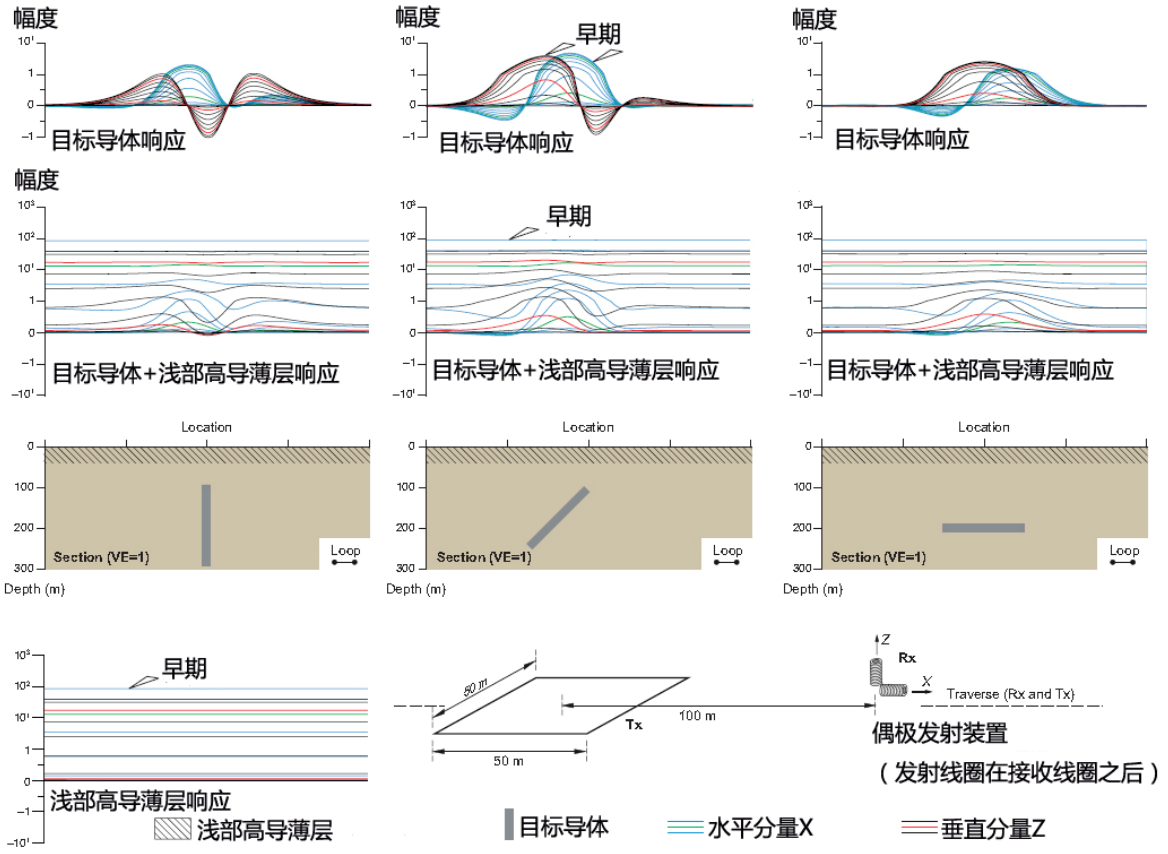


图 24　接收机在前，发射机在后的偶极装置下薄板状导体的瞬变响应

可见偶子装置产生的 Z 和 X 响应是不对称的，对于倾斜导体响应最强，并且出现倾斜导体的下降边。

3）大定源装置

上述的中心装置沿测线移动，相当于改变一次场与探测目标体之间的耦合关系；偶极装置沿测线移动，也相当于改变一次场与探测目标体的耦合关系，所不同的是观测位置有移动。

大定源装置是一次场与探测目标体的耦合关系是不变的，测点沿测线移动相当于观测在固定耦合情况下二次场沿测线是如何变化的，图 25。大定源装置的探测深度大，但分辨率低于中心装置和偶极装置，因此在使用大定源装置时应测量瞬变场的三个分量，以帮助获得导体的更多信息。要特别注意发射线圈位置要与探测目标体有好的耦合。

现以发射线圈位于水平板导体之上为例：

在发射线圈内 Z 分量很强，因为耦合最好。在发射线圈外 Z 分量变负担幅度仅为发射线圈内的 1/2，这是发射线圈内、外初始场强度差一倍所致。

在发射线圈中点 X 分量为零，两侧正、负相反。这是因为在线圈中点初始场是垂直的，在薄板中产生的涡流体系在板内是水平分布的，所以该涡流产生二次场只有垂直分量（图 9c）。但向两侧移动时，一次场有一定角度与薄板相交，所以薄板内有 X 分量响应。

在有浅部导电薄层存在时，由于它与发射线圈有良好耦合，所以强度很大，并叠加在地下薄板状导体的响应之上。

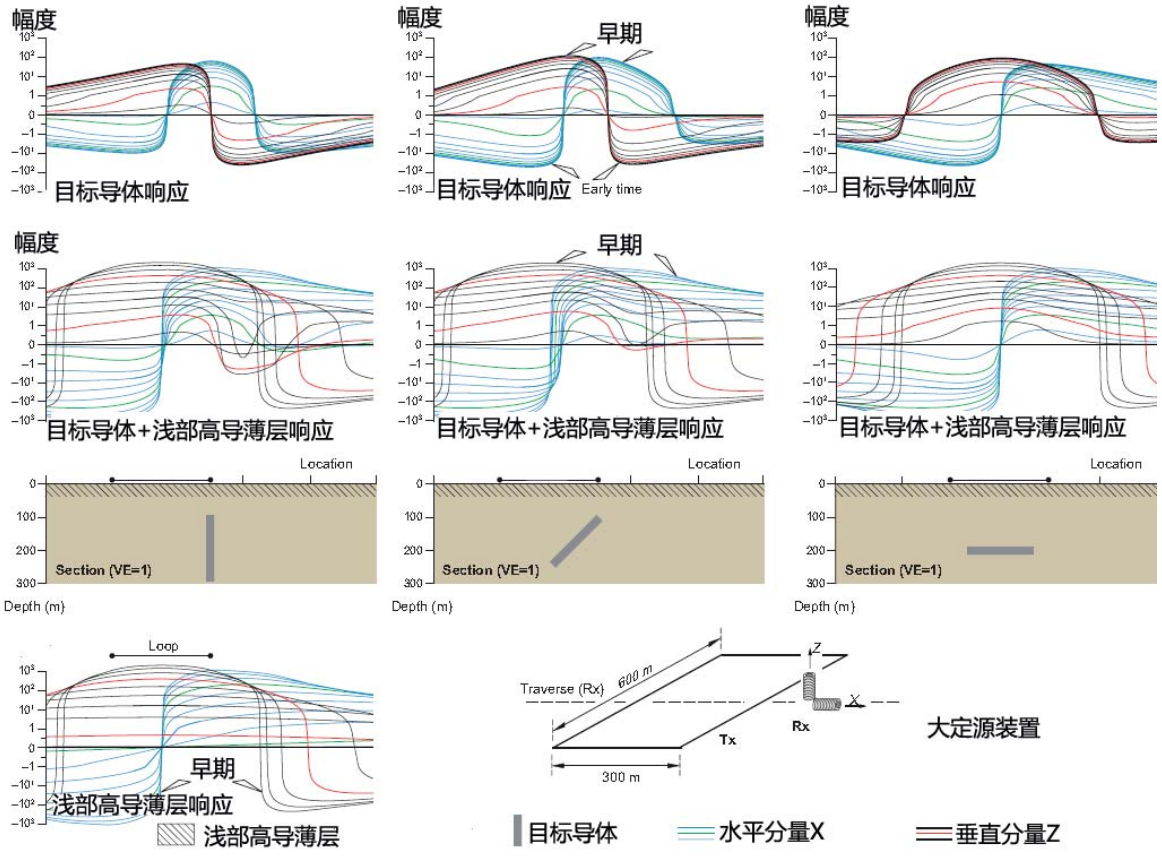


图 25　在大定源装置下计算的薄板状导体的瞬变响应

4）综上可见：

（1）不同探测目的和不同的探测深度要考虑采用不同的装置结构和不同的发射基本频率。

（2）不同的装置结构对相同的导体所产生的 Z 和 X 响应是不同的，移动发射装置目标导体的异常形状比较复杂。

（3）联合 Z 和 X 分量有助判断导体的倾向，顶点或中心的位置。

（4）没有地表导电薄层存在时，即在裸露山区探测时，地下目标体不受干扰，探测效果最好，否则会受强烈影响。

（5）在普查和剖面调查中，在未知目标体倾向和走向情况下采用移动发射装置较好，但该装置发射磁矩较小，探测深度小，然而由于发射磁矩小于地表高导薄层和导电性围岩耦合较弱，所以目标导体的瞬变响应受畸变较少，对目标导体分辨率高。移动发射装置要求平铺发射线圈，并不断移动，所以在地形切割地区和森林地区工作困难。

（6）大定源装置布设发射线框比较费时间，但对地形要求不严格，在发射线框内外都可布点观测，同时勘探深度也大，所以是面积勘探的主要装置结构。由于发射线圈与目标导体的耦合关系不变，所以异常形态简单。但由于发射线框面积大，所以对地表高导薄层和导电性围岩有很强或较强的耦合。它们产生的二次场会掩盖目标导体的瞬变响应，或使其受到畸变，对目标的分辨率低于移动发射线圈模式，此时可以进行三分量观测可帮助判断目标导体。

3. 影响资料解释的几个问题

瞬变电磁法与其他地球物理方法一样，反演结果具有多解性。

1）电性环境

地表高导薄层的响应及其对目标体响应的响应，在上节中已经阐述了。地表高导薄层的响应使下伏导体产生的弱的早期响应变得模糊、不易识别，而下伏导体产生的二次场又在高导薄层中感应出新的涡流体系，减弱了或增强了它原有的涡流体系

地表高导薄层的电导率和厚度的变化很容易误解为是下伏高导体所致。初始场关断时间较长，会使场的高频分量降低，从而降低了地表高导薄层和电性围岩的响应。当接收线圈离开地表高导薄层时（如井中瞬变电磁法），它的影响就消失了。

2）相邻导体相互响应

相邻导体产生的叠加响应改变了目标导体的响应，叠加结果可能被当做一个目标导体的响应。相邻导体的接近程度对于分解弱导体影响巨大。例如大时间常数导体的响应可以淹没掉小时间常数导体的响应。

3）文化噪声和地形影响

电子设备和功率线都会产生噪声，误认为是瞬变响应。

如果发射线圈位于山底，则山体便成为电性介质，并产生早期的瞬变响应。这种地形响应可从对比瞬变断面图和地形起伏的相关性识别出来。目前还没有特别的方法消除地形响应，当然模型计算是一种手段。

4）感应极化

一般认为地下介质的电导率是和频率无关的，也即介质电导率不随频率和瞬变场衰减时间而改变。然而如果有可极化的导体或可极化的地下介质，并在早期被涡流充电，那么在晚期，被极化的导体或介质便会通过大地而发电，并产生二次场，此二次场具有反极性，即所谓的感应极化。

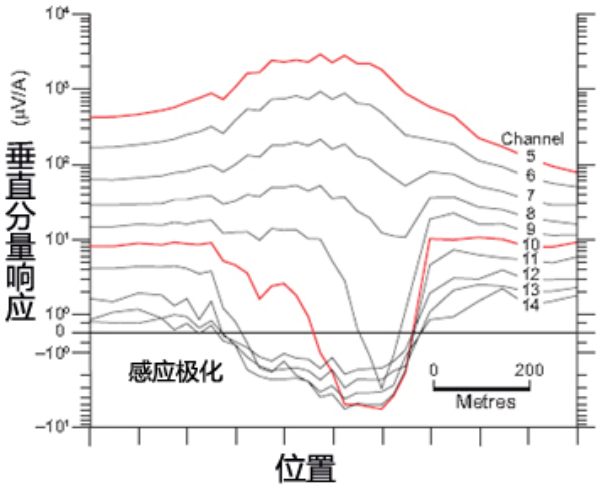


图 26

4.探测块状硫化物矿床实例

下面给出的四个实例分别是在澳大利亚和加拿大利用瞬变电磁法探测金属矿的瞬变电磁响应断面图和钻孔验证的地质解释断面。

图 27 表示瞬变电磁法在探测四个块状硫化物矿床的应用实例。图 27a 是对澳大利亚 Queensland IDCG 矿床的瞬变电磁法探测剖面。IDCG 是金—铜矿，赋存在角砾火山岩之中，上覆 45m 厚的导电沉积层。应用方形重叠装置，边长 100m，记录 dB /dt。图中表明，强幅度的局部响应（A）是矿化角砾岩产生的，异常特点类似于浅部的倾斜板状体（图 23）。

浅部导电沉积层的响应 D 在早期是高强度的、平坦的。次高强度的，宽缓的瞬变响应（B）是导电的剪切带引起的，该响应可延伸至第 11 道，形成主异常体（C）。在主异常体左侧出现的、微幅度峰值异常是基底风化带的反映。

图 27b 是西澳大利亚 Trilogy 矿的瞬变响应和地质断面图。Trilogy 矿是多金属矿床，由产于硅质和千枚岩/板岩之中的亚块状和细脉状矿脉所组成。应用的是重叠装置 80mx80m 方形线圈，dB/dt 观测。一直延续到晚期的，宽缓的瞬变响应（A）是由亚块状和细脉状硫化矿体产生的。响应（A）的幅值在断面右方升高后再缓慢消失，表示该矿体向右倾。左边弱的晚期响应（B）和（C）可能是该矿体的浅部所产生的（因为矿体的 τ 值大，所以在晚期仍有响应）。响应宽度随延迟时间而增加，最终消失的异常（D）应该是浅部基底低阻风化带产生的。低阻风化层，也可能包括千枚岩（半空间）控制了响应（E）。在断面中部早期出现的下降响应（F）可能与风化层中的高阻硅质千枚岩有关。

图 27C 是澳大利亚 Queensland 地区 Eloise SEDEX 金—铜矿的瞬变场断面图和地质解释结果。该矿是块状和网脉状金—铜矿，形态为陡倾角板状体，矿体位于古生代褶皱带之内，区内有 50-70m 厚的低阻沉积盖层，观测 dB/dt。可见晚期响应（A）是陡倾角高导矿体产生的。在早期阶段的低阻盖层响应（B）向断面右方下降，与低阻盖层向右减薄有关；响应（B）是深部导体的响应（A）向右偏移的结果（因为是大定源装置，所以陡倾角高导体响应振幅的最低值应出现在高导体顶部）。

图 27d 是加拿大魁北克地区 Tripod 块状镍硫化矿床的瞬变场断面图和解释结果。在该矿区即观测了磁场 B，也观测了 dB/dt。矿体位于高导的超铁镁质岩之中，这种高导目标体导致其中的感应涡流衰减缓慢，因此发射的基本频率要低（5Hz 和 1.67Hz）。利用中心回线装置，上图磁场 B 的响应（A）延续到最晚期，而 dB/dt 的响应（A）在晚期显著的减弱了。响应的非对称性表明目标体是倾斜的。这里没有浅部低阻薄层，围岩产生的响应导致目标体响应出现畸变。

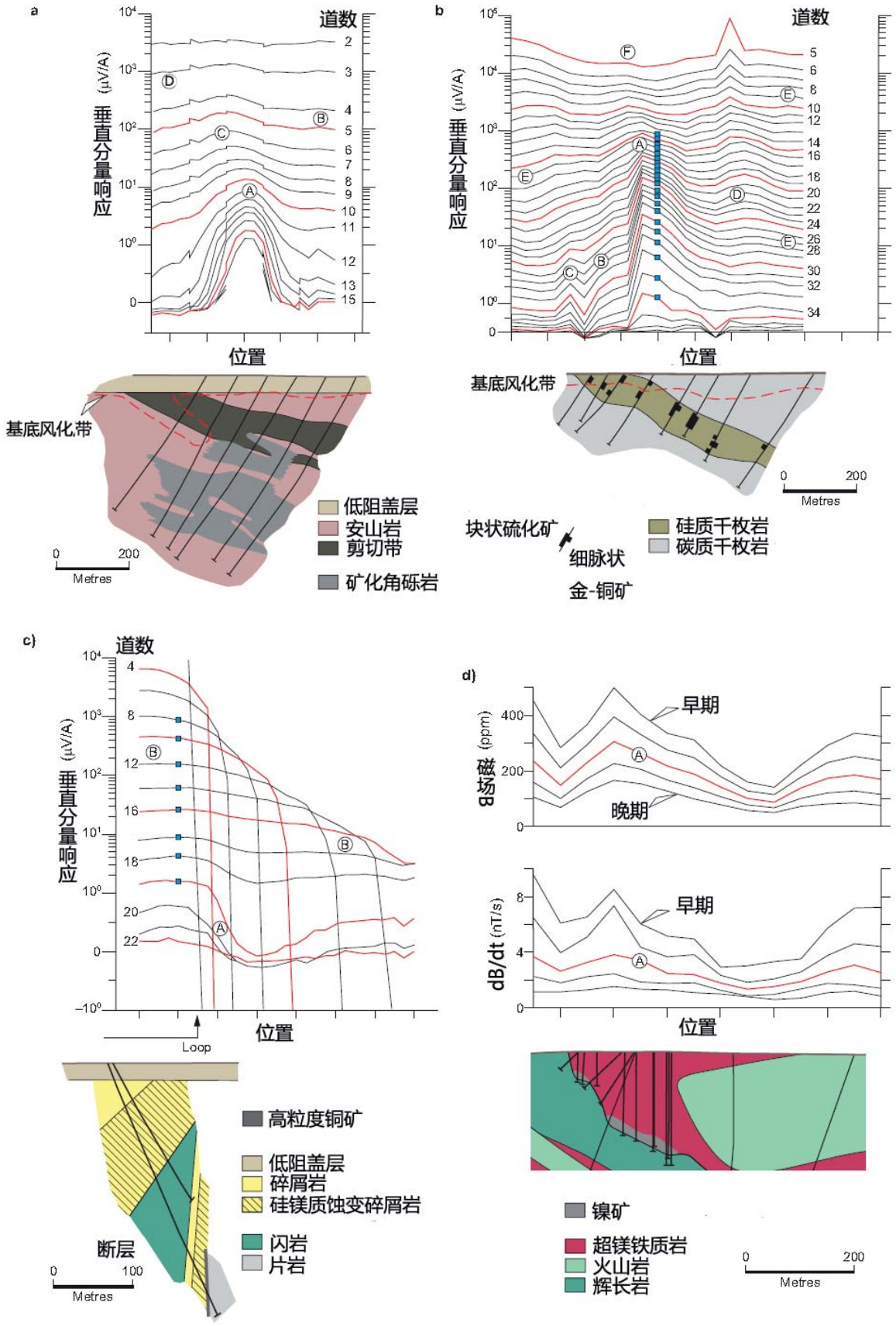


图 27　四个金属矿床的探测实例：（a）IOCG 矿床，（b）Trilogy VMS 矿床，（c）Eloise SEDEX 矿床，（d）Tripod 镍硫矿床

从图 27 可见，利用磁场接收器记录的矿体所产生瞬变磁场响应（B）持续的时间长，在晚期仍

比较明显，用感应线圈记录的磁场变化率 dB/dt 能较明显地反映矿体形态的局部变化。这是因为该矿床的常数 τ 大，所以其产生瞬变磁场 B 衰减的慢，频率低；而 dB/dt 记录的是磁场变化率，而矿体形态的局部变化可导致 dB/dt 的较明显改变。

八、井中瞬变电磁法

井中瞬变电磁法（DHEW）的目的是探测钻井周围的导电目标体。DHEM 的接收探头处于地面以下，所以它部分的屏蔽了地面的电磁噪声，故而信噪比比地表瞬变电磁法高，此外没有地表低阻层对目标体的影响，接收探头距离深部目标体近、分辨率高，所以 DHEM 比地面瞬变电磁法有更强的探测能力。

DHEM 能够确定导体的位置和方位，导体的组合情况以及导体向钻孔外围的延伸情况。在矿产资源勘探中 DHEM 是一个非常重要的手段。

1.DHEM 的数据采集

大部分 DHEM 系统的发射线圈是平铺在地面上（图 28），但为了与目标导体有最好的耦合，在某些情况下发射线圈布置在斜坡上，如果某地区在开矿，发射线圈也可布置在矿区之上。由于接收探头可以在井中向下移动，也可以向上移动，所以与目标体之间总可以获得最佳耦合。牢固的接收探头可以在井下 2000-3000m 进行测量。可在裸井或塑料套管井中进行测量，但不能在钢套管钻井中测量，因为钢套管会引起很强的干扰。

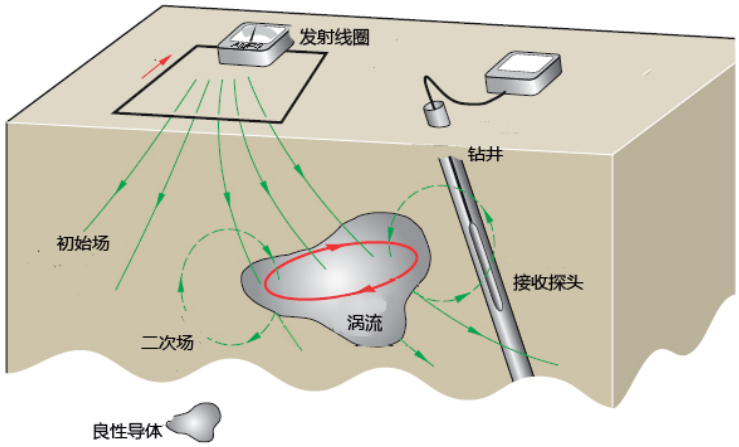


图 28　应用地面大发射线圈的井中瞬变电磁法原理图。表示发射电流关断后在良导性矿体内感应的涡流及二次磁场

井中瞬变电磁法的探测半径取决于可接收到的最小信号电平，初始场与目标导体的耦合程度，以及探头灵敏度和背景噪声。在好的条件下，对良导体的探测半径可达 1000m。要想井中瞬变法取得最佳效果，应从几个钻孔中或单井多个发射线圈情况下采集二次场的三分量数据。

1）井中瞬变电磁法的发射线圈 Tx 布置方法有：（1）单井五个不同方位的发射线圈（图 29a），这样钻孔周围的所有导体都能被激发，二次场的形状，幅度和行迹都可探测到。（2）应用一个发射线圈在多个钻孔中记录瞬变场（图 29c）。此时不同钻孔之间的二次场与井中接收探头耦合情况是不同的，因此限制了对导体位置和方位的准确定位，但提供了临界信息。在单孔多个发射线圈调查中，主要应用沿钻孔方向记录的轴向分量。（3）当用三分量测量时可以只用一个发射线圈（图 29b），发射线圈的位置要考虑初始场与目标体之间要有很好的耦合。

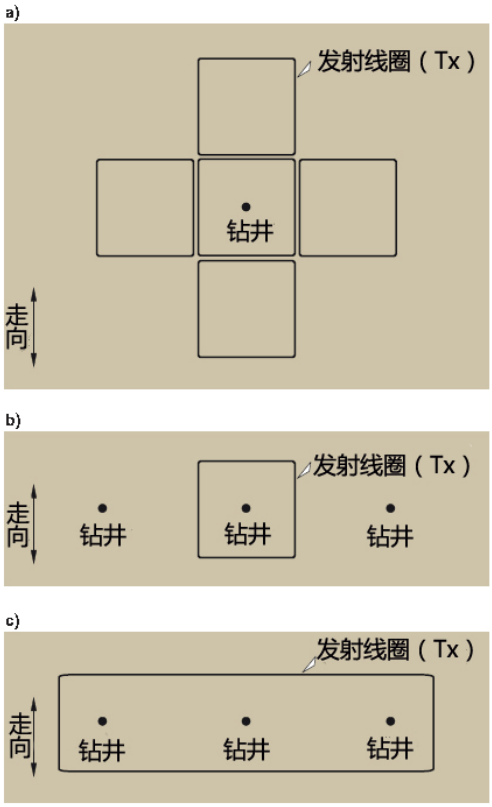


图 29　发射线圈布置

2）轴向分量测量

在历史上井中瞬变应用的探头都是沿钻井轴向布置的接收线圈，即轴向分量测量。它测量的是沿钻井方向观测点处的场强 A（图 30）。

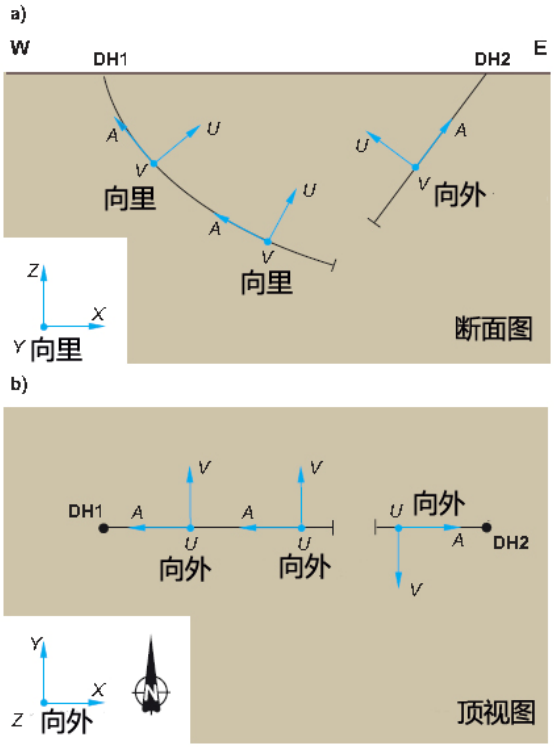


图 30　表示井中瞬变场矢量的坐标参照系：A 是轴向分量，U 和 V 是与钻孔垂直的径向分量。图 a 是表示钻井坐标参照系的断面图，当钻孔 DH1 是弯曲的时候，响应矢量绝对方向是如何变化的，在钻孔 DH2 是如何变化的。图 b 是参照系的顶视图，x，y，z 是参照系的绝对（地理）坐标

为了数据分析必须知道井中每个观测点处的探头方位，否则测量结果不能提供异常导体的方位和位置。但如果布置不同方向的发射线圈，以改变初始场与导体的耦合关系，也可以确定异常导体的方位和位置。

3）三分量测量

除观测轴向分量外，还观测两个互相垂直的，横切钻孔的两个径向分量。三分量测量提供了在观测点处初始场和二次场的方位，这就有可能在单一发射线圈情况下、唯一的确定导体的方位，当然初始场需与目标体有良好的耦合。尽管如此，应用多个不同方位的发射线圈仍然是好办法。

为了在一致的参考系内对数据进行分析，必须要测量在井孔内探头方向的变化，并对其进行校正。探头内装配的磁场传感器和加速度计提供了这些变化的信息。场的轴向分量 A 总是沿着钻井轴向的，正方向向上（图 30），径向分量 U 位于钻孔平面内，并与钻井轴向垂直，正方向向上。在水平钻孔中 U 是垂直的，在垂直钻孔中 U 是水平的。另一个径向分量 V 与 U 垂直，是正极性（图 30）。瞬变场以 A,U,V，空间坐标分别显示和解释。某些人把 A,U,V 轴分别作为 Z,X,Y 轴。

根据钻孔的方位角和倾角，把 A,U 和 V 参照系方位改变到绝对方向上。按钻孔的方位角和倾角对瞬变场进行旋转，以便在绝对参考系内对其进行分析。

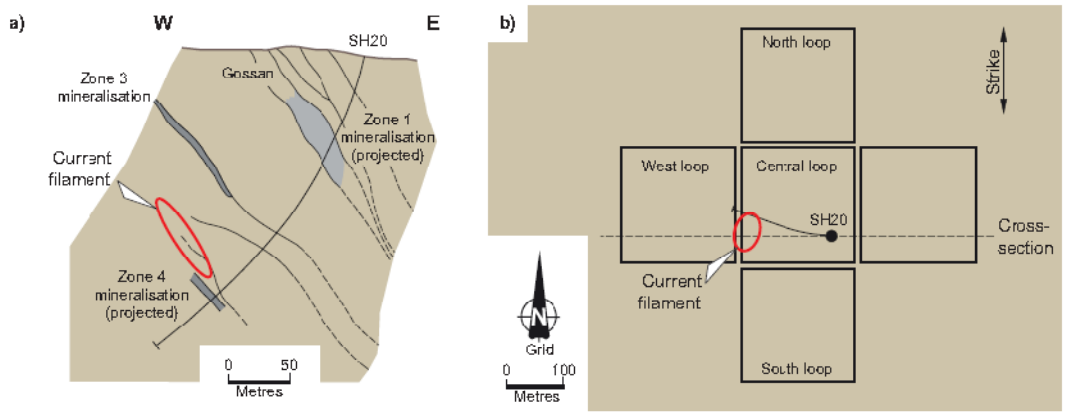
4）井中瞬变法实践

长方形发射线圈的长边平行探测目标体走向。线圈边长一般是探测深度的 1/2。

做井中瞬变电磁时，钻孔位置，方位角和深度都是已知的，大多数情况下目标体的位置和状态也是已知的，因此正演计算对于确定发射线圈最佳尺寸，布设位置和发射线圈数量是非常有用的。此时，可以计算初始场以示明它与已知目标体的耦合情况，以及瞬变场每个分量的形态和极性。如果目标体走向是未知的，通常发射线圈布置在钻孔上方，以对钻孔四周进行等量激发。此外，也可在有初步探测结果之后，再布置其他发射线圈。

2.应用实例

下面介绍五个发射线圈沿钻孔方向记录 dB/dt 的应用实例和仅用一个发射线圈记录三个分量的应用实例。



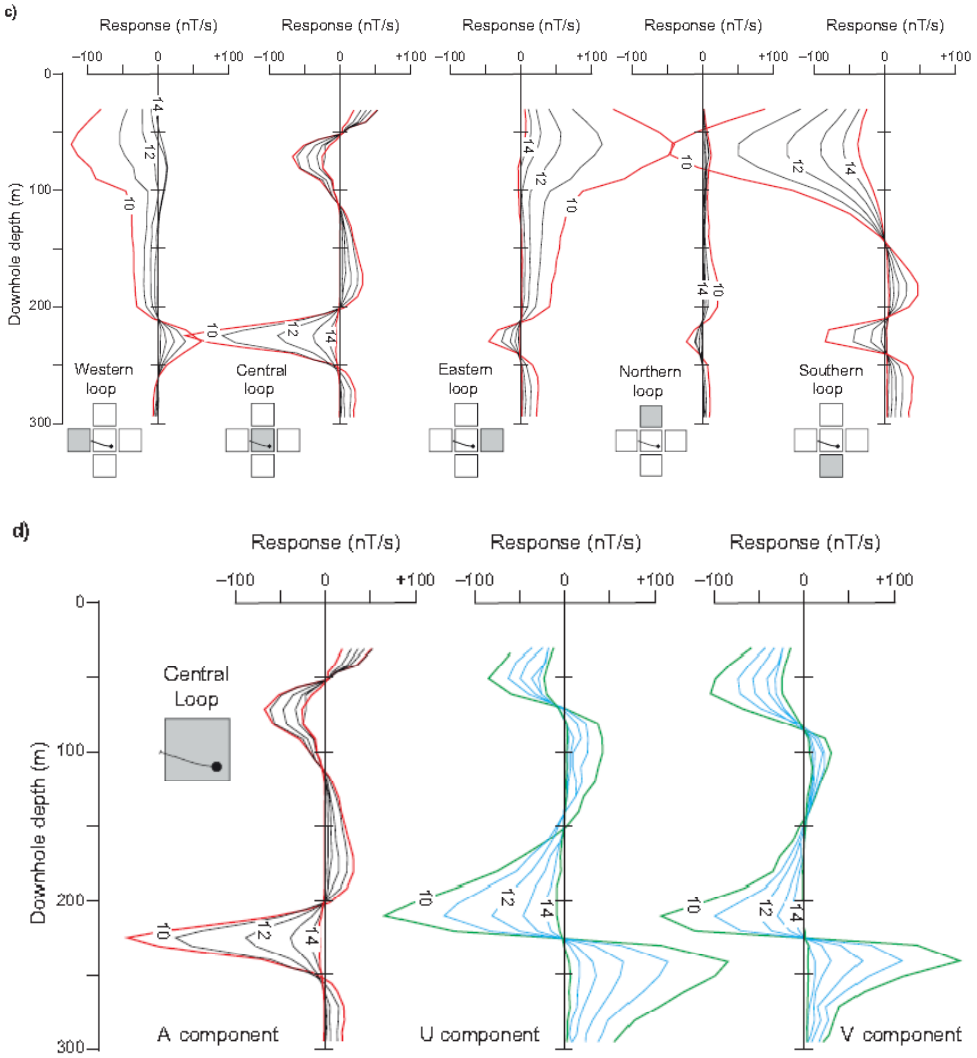


图 31

矿区在澳大利亚北昆士兰，它是多金属矿，铜含量占主导。母岩是变沉积岩和变火山岩。矿体为透镜状；在图 31a 中以 Zone1 到 Zone4 表示块状、侵染状和细脉状矿体；图 31b 表示钻孔和五个发射线圈在钻孔 SH_{20} 中仅记录晚期的 dB/dt 轴向分量（10-15 门）。10-15 道的 dB/dt 有两个异常，它们是两个矿体的响应。从图 31c 中可见，北发射线圈的响应很弱，表明北发射线圈与矿体耦合最弱。在大约 75m 深处的 dB/dt 异常和已知的矿体 Zone1 一致，该异常可能是连续的细脉状或块状的高导矿体所产生的。南、中和西发射线圈激发的二次场极性是相同的，而东发射线圈是极性相反的，说明矿体是位于东发射线圈以西。上述解释与已知地质资料一致。

在 225m 深处的响应与已知的矿体不一致，它可能是矿体 4 在钻孔 SH20 以南 100m 以远被截断了。最大响应来自中心发射线圈和南发射线圈，说明矿体位于钻孔以南。来自东发射线圈的响应弱于来自西和中心发射线圈的响应，说明矿体距离西和中发射线圈不是很远。西发射线圈的反极性说明矿体位于西和中发射线圈之间。

为了更准确的确定矿体的位置和方位，又观测了瞬变场的两个径向分量以补助轴向分量数据。此时，仅用中心发射回线（位于钻孔 SH20 之上）。三分量响应（图 31d）表明，矿体位于钻孔以南。A 分量的峰值以及 U 和 V 分量的一致性给出了矿体平面的井中位置，三分量的对称性表明，矿体是与钻孔方位垂直的。结合三个分量的极性（如图 30 所定义的），可唯一地确定相对于钻孔的涡流系统。用东倾、北东走向矿体的电流束模型所计算的三分量响应表明，它与观测结果是一致的。基于上述解释，钻井穿过了矿体 4。多个发射线圈和单发射线圈三分量观测结果都表明，矿体没有向钻孔 SH20 以北延伸。