

时域航空电磁感应法介绍

早在50年代初期,在加拿大、瑞典等国就开始用航空电磁法来普查金属矿了。二十多年来,技术上经过多次改进,航空电法逐渐成熟,现已成为一种运用的有效找矿工具。航空电法有许多变种,除本文介绍的时域的航空电磁法外,其它航空电磁法都是频率域的。它们的一般工作方法是利用装在飞机上的发射线框,人工连续地发出一种或多种音频的电磁波作为场源(也有利用天然音频电磁场或甚低频电台发出的电磁波),用装在同一飞机上的或拖在机尾的吊舱中的接收线框来探测地下矿体所产生的二次场。因为发射的波形是连续的,所以需要有一次场存在的情况下测量比一次场弱几千倍到上万倍的二次场。为了在接收系统中消掉一次场的影响,发射和接收线框之间应保持某种方向上的关系,接收线框中所接收的一次场部份应在电子电路中给以补偿掉;或者消去与一次场相位相同的那部份,只测量与一次场相位相差 90° 的虚分量。如果接收线框和发射线框都安装在飞机上,则机身的振动对场的测量有很大的影响,线框微小的振动所产生的干扰讯号将调制所接收的讯号。即使所测量的是虚分量,但由于飞机金属骨架感应的涡流场与接收线框发生耦合,亦将引入较强的干扰。接收线框放在远离飞机的吊舱里,情况虽可以得到改善,但吊舱受气流变化,如照准方向有改变,也将有干扰讯号进入接收系统,使测量微弱的讯号发生困难。所有这些原因都使这类频率域的航空电磁法的灵敏度受到很大限制。

时间域航空电磁感应法与频率域的不同点在于:发射的一次场不是连续而是脉冲的,二次场的测量是在脉冲磁场停歇的时间内进行的。现在西方国家使用的一种形式,叫做INPUT(英普特),是感应、脉冲、瞬变三个英文字缩写。这一方法首先由加拿大

的A.R.巴林格提出,1959年制成第一台仪器安装在飞机上试用,以后相继不断改进,制成I、II、IV型仪器,最后在1965年制成V型仪器才初步定型。与前几种型号相比,V型仪器的发射功率较大,测量仪器的增益加大,对讯号的处理作了相当的改进。早期的仪器只有3—4个选通道,现在增多到6道。现在INPUT已与航磁、航空放射性等设备一道安装在同一架飞机上,为综合找矿使用。与其它航空电磁法勘探(包括所有频率域的和天然音频的电磁法)相比,INPUT具有较大的勘探深度,可以探寻块状硫化矿,也可探寻浸染硫化矿,而且还可以区分导电覆盖层的影响。

一、工作原理

方法的工作原理是在地下建立涡流脉冲磁场,分析涡流振幅衰减特性,取得有关地下结构的电性资料。在飞机上设置一个大发射迴线(固定在机头、机尾和两翼端的四个点上),其中通以规定的半正弦波电流,在空间建立强大的脉冲电磁场。发射电流是用可控硅整流元件装成的发射装置用机上的直流电源供给。在交变的半周期中,以相反方向使电容器充电,再通过迴线放电发出正弦波脉冲磁场。此磁场底部的宽度约1.5毫秒,脉冲之间的间歇时间为2.0毫秒(图1)。迴线本身就是脉冲形成网络的一部份,网络的其余部份安装在飞机里面的发射装置中。每一电流脉冲发出之后有一短暂的不发射时间,所以一次场是不连续的。在脉冲发射过程中,地下导体感应产生涡流,在脉冲磁场场崩后此涡流不立即消失,而是逐渐向导体内部迁移,大致按近乎指数的规律衰减,最后转化为热能而消失。利用安装在吊舱里面的接收线框和前置放大器来接收二次场信号。吊舱用500呎的电缆

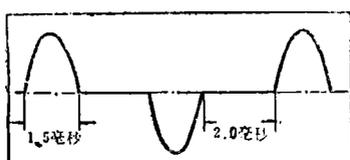


图1 一次电磁场(发射电流波形)

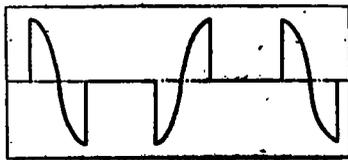


图2 在吊舱中测得的一次场

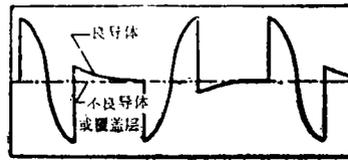


图3 在吊舱中测得的一次场和二次场

牵引在飞机的下后方。在吊舱中的接收线圈所测得的波形见图2和图3。在图3中还可以看到良导体和不良导体(如覆盖层)的二次瞬变场曲线,两者衰减的速率是不相同的,前者衰减较慢,而后者衰减较快。

测量仪器和显示记录装置安放在机舱里,测量仪器的电子线路中除放大器外,还有几道门电路和积分电路,按一定的时间间隔顺序对瞬变的衰减曲线采样(或选通),也就是在门电路开启的时间内,允许讯号选通到记录仪。

接收机所拾取的讯号不是整个衰减曲线,而是在一次激励磁场场崩后,在规定的几个不同时刻上,按时间顺序记录衰减曲线在该时刻的幅度,选通的每个脉冲幅度经放大平滑和积分之后,分别地记录在多道记录仪的纸带上。选通中心时间和选通门的宽度一般是预先规定了的,如果需要,可予以改变。老型号的仪器有四个采样道,中心采样(或选通)时间规定在一次场崩后450、850、1250和1650微秒等4个时间上,选通门的宽度相同,均为400微秒。新型的仪器(V型)有6个选通道,各道选通中心时间是:300、500、700、1100、1500和1900微秒(图4)在飞行过程中除分开记录6个时间的感应瞬变场(有时也叫做过渡场)的振幅之外,在同一记录纸带上还记录有航空磁测、航空放射性测量、飞行高度以及其它与成果推断解释有关的数据。

二、理论基础

电流是以脉冲形式送入发射迴线,每一脉冲呈半正弦波形,因而产生相应形状的磁场。离飞机相当远处此迴线的磁场可以认为是一个垂直偶极所产生的磁场。沿迴线半径方向的任一点处的磁场强度与该点到迴线中心的距离的三次方成反比。总磁场强度的方程式可用下式表示:

在 $(0 < t < T/2)$,

$$H = (M/r^3) \cdot (1 + 3\sin^2\theta)^{3/2} \cdot \sin(t/T)$$

t 在其它时间, $H=0$

在上式中, M 是磁矩(它是迴线的匝数、截面积以及

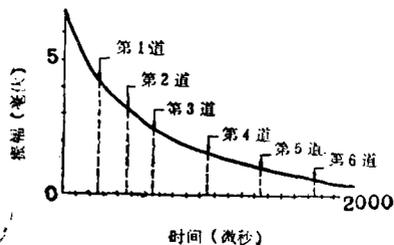


图4 采样道(I、II、V型仪器是四个采样道, V型仪器是六个采样道)

送入迴线中的电流强度的乘积); r 是观测点到迴线中心的距离; θ 是极角(由迴线轴开始量起); T 是单个正弦波的周期。个别脉冲之间的时间间隔可以等于 T 或稍大于 T , 脉冲的极性是交替反向的。为了便于分析,我们只研究单个脉冲和在脉冲停止后 $T/2 < t < T$ 时刻之间的瞬变(过渡)效应。

根据电磁场基本理论,随时间变化的磁场 H 总是伴随着一个与磁场时变率成正比的电场 E 。所以,如果 H 按 $\sin(t/T)$ 变化,则 E 将按 $(1/T) \cdot \cos(t/T)$ 变化。 E 和 H 的方向是彼此正交的。

在感应脉冲瞬变法 INPUT 中,当所发射的脉冲磁场场崩时, E 为有限值。在自由空间此电场几乎是随着脉冲磁场的场崩立刻衰减为零。但在导电的或导磁的介质中(例如在硫化矿中)由于感应效应,场的衰减时间将延迟。如果介质是导电的,将有与电场对应的涡流流动。在衰减过程中此涡流又产生一垂直磁场(二次场)具有同样的时间特征,此磁场可用下式来表征:

$$h = h_0 \cdot e^{-t/\tau_c}$$

h_0 是脉冲磁场开始场崩时的二次场; h 是场崩后 t 秒时的二次场; τ_c 是瞬变场的时间常数。

导电率不同的地质体,其时间常数不同,研究 h 的过渡过程,也就是研究地质体的时间常数。实际工作中,我们不是测量某个时刻 h 的振幅,而是测量在某个时刻接收线圈在此变化的磁场中所感应的电压,该电压正比于:

$$\frac{dh}{dt} = (h_0/\tau_c) \cdot e^{-t/\tau_c}$$

接收线圈绕在一个磁芯棒上,安装在吊舱内。吊舱的轴呈水平与飞行方向一致。接收的讯号经初步放大后,通过屏蔽电缆与飞机里面一组相关采样道接通,顺序通过各采样道到达记录仪被记录在纸带上。每一道代表瞬变采样的相关积分,积分的时间常数为3秒。

导电板状体在感应场中产生的涡流是沿导体表面周围流动的,因此可以把导电板状体看作是一个载有电流的迴线,其电感量为 L , 电阻为 R (有的情况下迴线还具有电容 C), 这样就引入了时间常数 τ_c 的概念。 τ_c 可以由 L/R 来定义。矿体的导电性的好坏可以根据过渡过程的时间常数的大小来确定。如果在两个相距一定间隔的时间 t_1 和 t_2 上,测得过渡场衰减曲线上的瞬变磁场 h_1 和 h_2 , 按上述方程式将有如下的关系:

$$h_1 = h_0 \cdot e^{-t_1/\tau_c} \text{ 和 } h_2 = h_0 \cdot e^{-t_2/\tau_c}$$

从上二式中消去 h_0 即得:

$$(h_1/h_2) = e^{(t_2-t_1)/T_c}$$

则 $T_c = (t_2 - t_1) \cdot \ln^{-1}(h_1/h_2)$

当 $t_2 - t_1$ 为100微秒, 在 $h_1/h_2 = 1.23$ 时,

$T_c = 500$ 微秒。在 $h_1/h_2 = 2.0$ 时, $T_c = 100$ 微秒。

自然界中导体的时间常数可列表如下, 以供参考:

| 导体分类 | 时间常数(微秒) |
|---------------------------|----------|
| 沼泽、湖泊等不良导体 | 20—100 |
| 导电性较弱的破碎带、粘土、砂土 | 100—200 |
| 良导性的块状硫化矿 | 200—1000 |
| 极化导体, 散染硫化矿(表现有电容和感应极化效应) | >1000 |

利用时间常数决定地下导体的电性, 就是INPUT对异常进行分类的物理基础。

三、方法的某些优点

由于接收的讯号是与发射的讯号隔开的, 消除了一次场的影响, 因而比用连续波的电磁感应法具有更高的灵敏度。此外, 受气流扰动的影响不大, 记录质量比较均匀。由于讯号噪声比的提高, 所以勘探深度增大。与现有的连续波电磁感应法相比, INPUT的勘探深度要大200呎左右。

在大多数情况下, 导电的沼泽地区所感应的涡流在脉冲磁场崩后650微秒时间内完全衰减到零, 大多数的导电覆盖层的过渡场在脉冲磁场停止后在850微秒内也完全消失, 所以这些干扰的影响不会在最后的两个选通道中出现。在地表导电率很高的地区, 覆盖层的影响可能持续较长的时间, 除表现为不难辨认的宽异常带外, 是不可能进入到最后两个选通道的。另外由于硫化矿为良导体, 在这种矿体中涡流衰减很慢, 结果在所有的几个通道中都会有明显可辨的异常。于是提供了一种极为简单的区分良导性的硫化矿和非良导性覆盖层的方法。

对于来自飞机骨架感应的瞬变涡流的反应, INPUT比其它航空电磁法可以获得更精确的补偿。这种补偿是在仪器的每个采样通道中, 馈入一个与飞机骨架所感生的涡流波形和振幅相同而极性相反的讯号来完成的。补偿讯号取自一次场在接收线框中所感生的电压。采样通道的补偿调整很简单, 可以在飞行过程中进行, 一待调整好了, 吊舱的摇摆以及它与飞机金属机身耦合的改变都能得到精确地改正。所以即使在气流不太好的情况下, 或是在地形恶劣的地区, INPUT也能够顺利地进行工作, 并且探测灵敏

度和勘探深度不会受到影响, 这是其它航空电磁法(它们只能在气流很平稳的情况下飞行)所不及的。

V型仪器比老型的仪器又作了许多改进, 发射功率增大4倍, 使总的勘探深度可以达到350—700呎(取决于导体的大小), 在接收仪器中采用了最新的微电路设计, 在输出级中采用了新的有源滤波器, 进一步改善了记录的质量。由于对讯号的处理采用相关选通和数字滤波系统, 气流和人为的电磁干扰得到了最大的抑制。因而讯号噪声比得到了很大的提高。

四、试验效果

(一) 块状硫化矿

航空电磁感应法主要用来寻找赋存于高阻围岩中的块状陡倾斜的板状硫化矿床。自采用航空电磁感应法以来, 加拿大地盾中的许多著名的硫化矿大都是采用这种方法找到的。例如在安大略提明兹附近的得克斯湾矿床就是其中之一。此矿床埋藏较浅(只有35呎), 宽600呎, 其核心部份呈强烈的石墨化, 矿体导电性很好。过去在这个矿床上曾利用I型的INPUT仪器测量, 取得了明显的异常(图5), 不仅异常的强度大, 而且衰减时间颇长。在这里INPUT异常还具有另外的特点, 矿异常的左边在第一采样道的曲线上还有一个反映覆盖层的异常, 可是此异常在其它延迟的采样道上消失。

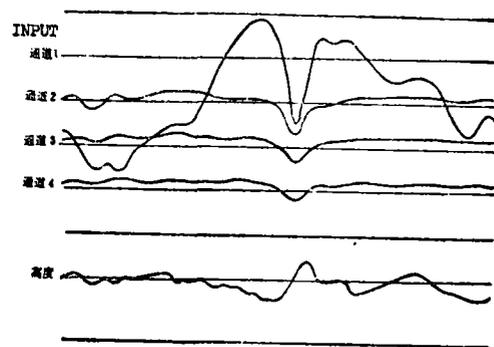


图5

图6表示在一个埋深150呎的镍矿上所取得的结果。在所有选通道上都有明显的过渡效应, 同样在矿异常的左边也有一个只出现在第一选通道曲线上的反映覆盖层的异常。这两个例子都说明覆盖层所引起的弱导电性的异常衰减很快。因此INPUT有分辨导电覆盖层和深部矿体的能力。在有良导性覆盖层存在的情况下, 其它航空电磁法的找矿能力很低, 不能保证最有效地圈出下伏的深部矿体。

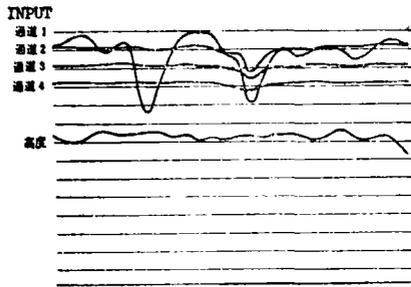


图 6

(二) 浸染硫化矿

寻找某些浸染类型的硫化矿，INPUT 的灵敏度不够，过去曾引起许多争论，但是在近来的许多工作中直接找寻这种类型的矿床也取得了一定的结果。

图 7 是找低品位硫化矿的一个成功例子。里卡菲尔东和艾体克是两个浸染铜矿床。硫化物的总含量都不超过 5%，一般小于 3%。铜的平均品位是 0.5%（艾体克含有百分之几的黄铁矿，含黄铜矿约 1—2%，含磁铁矿但不含磁黄铁矿。里卡菲尔东硫化物的含量与艾体克大致相同，但还含有磁黄铁矿）。从图上可看出艾体克的异常强度不太大，到第四选通道异常就完全消失，是典型的导电不好的硫化矿的反应。就在这个矿带上（但不正好在这一剖面上），激发极化法给出了高于背景极化率 5 倍的异常，电阻率的反应是 300—500 欧姆米（背景电阻率为 3000—15000 欧姆米）。里卡菲尔东矿体为何在所有六个选通道上都有反应，其原因还未查明，可能与二者的产状不同有关。

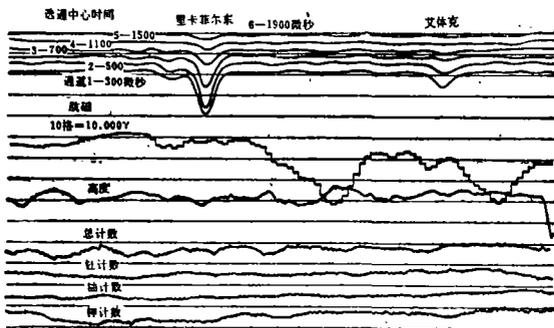


图 7

(三) 斑岩铜矿

斑岩铜矿是一种浸染矿，在地面用电磁感应法效果不好。用 INPUT 测试的结果见图 8。从图上可看出有两个相距很近但清晰可辨的异常。左边的一个异常是由于地上采矿设备所引起的，但是第二个异常是

矿山采矿场，异常反应良好，在所有六个采样道上都有反应，表现出非指数规律的衰减。

在另外一个斑铜矿上所做的结果见图 9。矿体大约含有 0.8% 的铜 1500 万吨，在目前条件下此矿床还没有经济意义，矿带最大厚度为 200 呎，上面是厚度为 200 呎的淋滤帽，由于风化作用铜被带走，作为二次富集在深部沉积，总硫化物含量大于 5%，主要是黄铜矿和辉铜矿。从图上可看出 1 至 4 道都有反应，但讯号的幅度不大这是由于矿体埋藏深，硫化物含量低的缘故。

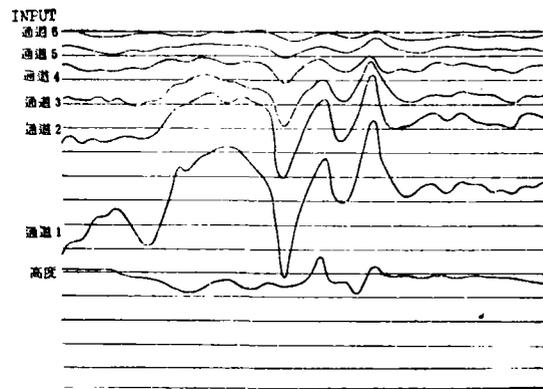


图 8

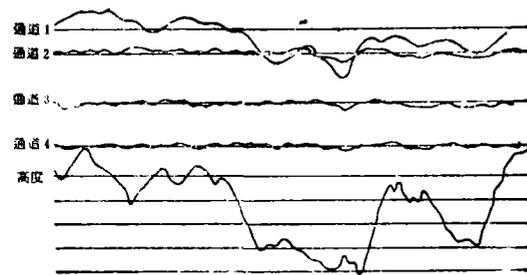


图 9

(四) 铁矿

用航空电磁感应法找铁矿一直未得到好的效果。在许多探寻有色金属矿的工作中，如果岩石中含磁铁矿较多，对找矿不但无益而且有害，特别是对那些测相位或测虚分量的方法是这样。在瑞典北部和芬兰曾经用 INPUT 做了许多工作，取得了有意义的效果，现在分别介绍如下：

(1) 图 10 顶上一组曲线是用正规的飞行高度 (380 呎) 在瑞典的突欧耳甲非的块状磁铁矿矿床上所得的结果。在所有六道上都有明显的异常；图 10 下面两组曲线分别表示在同一矿带上提高飞行高度到 600 呎和 1000 呎所获得的结果，说明即使飞行高度提

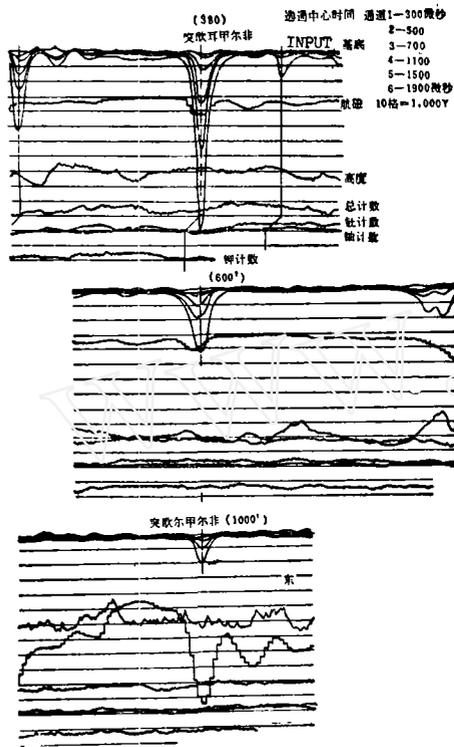


图10

高离地面1000呎，矿体异常仍然很清晰而不会漏掉。证明这种方法对这种条件下的导电矿体的勘探深度是相当大的。另外在瑞典著名的基鲁纳铁矿(Fe40%)上用上述三种高度飞行观测，也取得同样的效果。

(2) 在另一磁铁矿矿床上的测量结果见图11。矿体长1200米，厚100米，底部的深度达550米，储量三亿吨。富矿部份含铁62%，贫矿含铁35%。贫富矿各占一半，部份矿石中带有还原的磁性铁闪锌矿。从图上还可以看出磁铁矿和块状硫化矿的反应是不一样的，硫化矿的衰减时间比磁铁矿的长，磁铁矿的异常

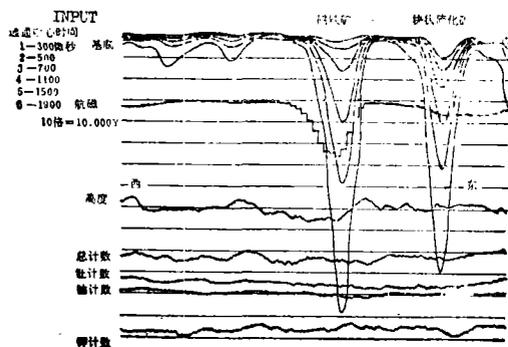


图11

在第五第六道上已不明显了，但硫化矿的异常在第五第六道上仍然很强。根据这一结果，可以用INPUT来区分磁铁矿和硫化矿，至少在这个地区是有这种可能。

(3) INPUT在瑞典探寻铁矿的工作中，还发现这样一个有意义的结果，即用这种方法可以从许多贫矿中把够品位的磁铁矿地段圈定出来，图12是在瑞典基鲁纳地区一个已知没有经济价值的铁的总含量只有15%的磁铁矿上用INPUT测得的结果，从图12a上可以看出，完全没有异常表示。图12b是在该矿床的另一个断面上，矿体铁品位是25%，从图上可以看出在第一选通道上有较小的异常反应。可以推想到含铁品位达到30%的时候将开始有完整、明显可辨别的异常出现，在前面的例子中磁铁矿含铁品位为35%时就获得了很强的异常。所以INPUT所能探寻的磁铁矿其最低品位界限是30%，恰好与冶炼所要求的矿石最低品位相同，不谋而合。这一经验值得注意，可以用INPUT对那些没有验证的磁异常进行分类，在飞行过程中配合磁法可以评价磁异常。

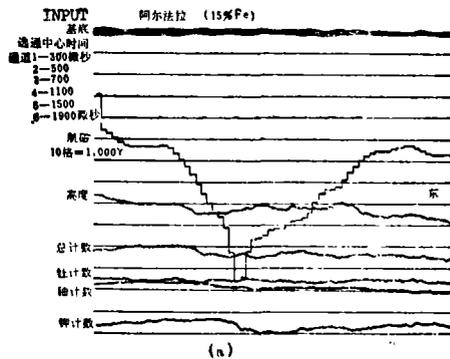


图12

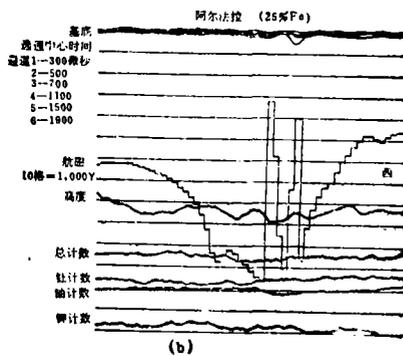


图12

(4) 在芬兰波的尼亚海湾离海岸16公里处的海上有一个很著名的磁异常, 这个磁异常是好几年前就发现了的, 很可能是铁矿的反应。经过计算, 该铁矿应该位于海平面以下300呎深处, 海水的深度是75呎。上面的海水层似乎比海底下面矿体的导电性还好。能否透过上面导电性良好的海水层发现海底下面的导电矿体, 这是物探的一个难题。曾用INPUT做了一次尝试。假定整个海水本身代表一种均匀的导电介质, 为了将它的影响抵消掉, 于是使仪器先在深海里飞行, 避免海底物质对它产生影响。在飞行过程中, 人为地调节仪器所有六个选通道, 使它们对飞行高度的变化表现近乎均匀的特性, 也就是说对每个选通道从第1道到第6道的增益依次提高, 最后的一道的灵敏度比它未调之前的正常情况下的灵敏度提高了20倍。经过这样调节以后, 在深海上空飞行, 测得的曲线如图13所示, 所有6道曲线变化幅度完全一致。仔细地测量出随高度改变时的幅度变化, 可以精确地得出每一道的平均衰减因数。仪器经过这样调节以后, 保持各道灵敏度不动, 再使仪器在上述的磁异常上空飞行, 所测得的记录见图14。

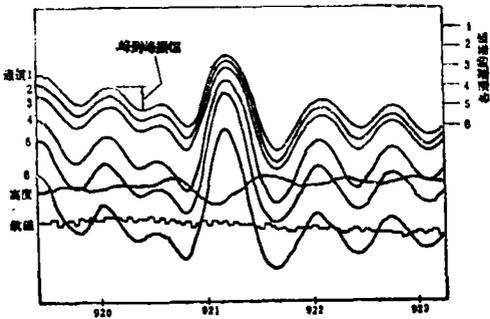


图13

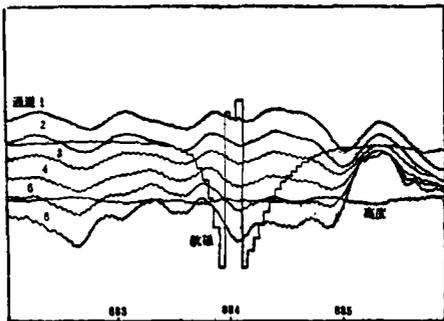


图14

从图上立即可看出, 均一性不再存在, 已穿过海底到达基岩某一深度。为了要把与矿体有关的异常提取出来, 将各道的振幅数字化, 对各道曲线的振幅给

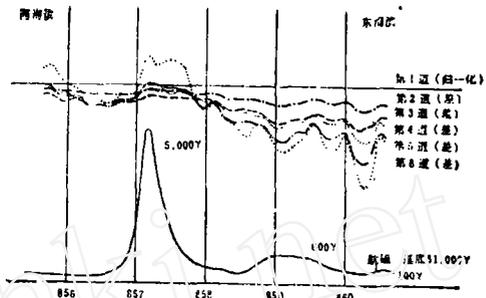


图15

以随飞行高度衰减因数的改正, 并将所得结果对第一道归一化。如是在完全没有导电率差异的情况下, 所有各选通道的曲线将合成一条横线。仪器经过上述调整, 数据按上述方法处理, 在海岸磁异常上方所得的记录如图15所示。显然所有各通道记录的曲线并不合成一条横线, 而是有异常出现, 并且在磁异常最大峰值处, INPUT有明显异常, 现在异常的正方向朝上, 所有时间延迟均被消除。另外还表示出在磁性矿体沿倾斜向下的那一边还有另一INPUT异常, 磁电两种方法的这种对应关系, 已经通过垂直磁性矿体走向来回两次飞行以及沿磁性矿体走向方向飞行的测量结果得到证实。当磁异常消失的时候与磁异常对应的INPUT异常也消失。因此我们认为在磁异常所在的地方, 下面有够品位的磁铁矿, 而且在它的上盘可能还有一个赤铁矿矿体。在东边电阻率增大, 反映海底在这一方向变浅。

恰好在第二年的冬天, 波的尼亚海湾和大部份波罗的海多年来发生第一次冰冻。大自然提供了难得的机会, 把钻机搬到冰上, 在INPUT所证实的磁异常上面打钻验证, 结果第一个钻孔在所计算的深处就见到了50多米厚的品位高于35%的磁铁矿, 而且所含杂质很低。

(五) 航空电阻率填图

电磁感应脉冲瞬变法不仅可以分辨覆盖层的影响寻找基岩里面的孤立的导电矿体, 还可以对土壤和地表表层进行地质填图。只要具有一定的电性差异和有充分的对比资料, 用这种方法完全有把握完成电阻率填图的任务。

曾在加拿大曼尼托巴的温克惹用INPUT所做的试验结果与过去在地面用直流电阻法测得结果进行了对比。温克惹的水源是取自75呎厚的粘土和冰碛物下面的砾石层。砾石层的电阻率为40—650欧姆米, 比其它岩石的电阻率(5—30欧姆米)高。用钻探圈定的主要含水层和地面用对称四极装置所做的电阻法剖面

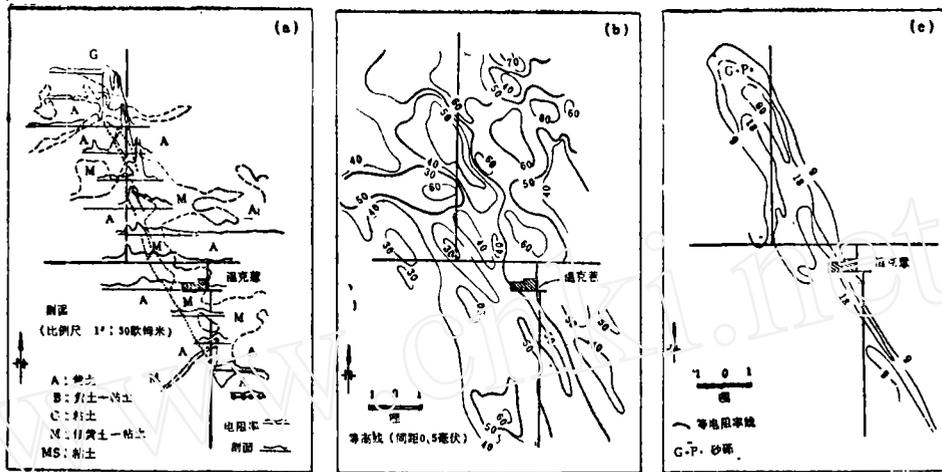


图16a

图16b

图16c

结果示于图16a，为了便于对比，将电阻法剖面结果构成等电阻率曲线示于图16c，以1英里测线距用INPUT测得的结果示于图16b，图中的等值线代表经过高度改正后的第二选通道所测得的瞬变曲线的变化。虽然等值线图并没有给出视电阻率的值，但可以看出图16b和16c这两张图是非常吻合的。还应该注意，航测总的飞行时间是三个小时，而地面电阻法测量所花费的时间是三个月。所以航空电测比地面电测费用省，取得成果的时间快。根据所测的衰减曲线上各点的幅度，可以看出衰减曲线总的形态不是真正的，也不是近似的指数曲线形式（未给出），而是一条直线，并且在低频端出现一个隆起，可以说明这一曲线好像两层的电测深曲线。如果有合适的对比资料，对层状覆盖层的分析解释是很有希望的。

还有一些用航空INPUT找水的例子，这里不再列举了。

在结束本文时，顺便介绍一下苏联在这方面的情况。苏联从1965年开始也进行了某些试验。1971年发表了初次试飞的资料。从发表的文献来看，加拿大和苏联两国在发展时域航空电法的方向上有所不同。加

拿大偏重于“短脉冲(1.5毫秒),短时延(≤ 2 毫秒)”*, 苏联则偏重于较长的脉冲(25—30毫秒)和较长的时延(3—23毫秒)。另外，加拿大是先搞成航空的时间域电法，后来再完成地面INPUT，作为检查航电异常之用。而苏联恰好相反，地面过渡场法的工作做的较多（限于篇幅，苏联的资料就不在这里一一列举了），而航空过渡场法尚未完全过关。

不论是从加拿大还是从苏联已发表的资料来看，勘探深度大、覆盖层影响小、有可能寻找浸染矿和地质填图，有可能区分贫矿与富矿，……都是时间域航空电法的优点，而这些恰恰是其它频率域的航空电法难以实现的。

在我们国家的某些单位也正在独立地进行这方面的研究工作，预计在一个不太长的时间即可投入生产。

(编者：汪光照，贺永康)

(参考文献从略)

* 为简便通俗起见，借用激发极化法中的两个词彙。