电磁法和电磁法仪器新进展

刘国栋

1. 电磁法和电磁法仪器新进展
2. 矿产资源调查的物探方法和仪器设备
3. 瞬变电磁仪——以 PROTEM 为例
4. 频率域电磁法仪的最新进展
5. 地下环境检测与监测的现代地球物理方法和仪器



北京欧华联科技有限责任公司

地址：北京海淀区建材城中路 3 号程远大厦 B 座 301 室
邮编：100096　电话：010-82920623/24　传真：010-8292792
网址：www.ouhualian.com　　Email：bost1@263.net

电磁法和电法仪器的新进展和应用

EM and DC Instruments and Their Application

刘国栋　Liu Guodong

（北京欧华联科技有限责任公司，010-82920623）

摘要：

电磁法和直流电法与地震方法一样，是地球物理方法中发展最快的方法。近 5-6 年电磁法和电法仪器设备和软件有了长足发展和巨大变化，新一代仪器设备的最大优点是，噪音低，分辨率高，频带宽，动态范围大，多功能，灵活轻便，低功耗，硬件和软件的完善结合。

电磁法和电法的应用领域日益扩展，目前几乎涵盖了探测地下目标的各个方面。电磁法和电法虽然种类繁多，但发展最快，应用最普遍的应属大地电磁法，瞬变电磁法和高密度电法。

关键词：大地电磁法，瞬变电磁法，高密度电法。

Abstract

EM and DC geophysical methods as seismic method have been quickly devolped in both sides of hardware and software during the past years. The biggest advantages of latest EM and DC instruments would be: Iow noise and high resolution, wide frequency band and high dynamic range, multi-faction and flexibility, high integration and low power consumption. The applicational fields of EM and DC methods are extended year by year and at the current they are almost covered the all of targets to be detected in the Earth.

Key words: MT method, TDEM method, DC-Resistivity method.

一、 引言

电磁法、电法应用于各种领域，包括石油勘探，地下水勘探，地热能勘探，工程勘探和选址，矿产资源勘探，活断层勘探，地震安全评价，地质填图，环境勘探，堤坝病害诊断，地

下埋藏物和管线探测，海水倒灌和地下污染范围界定，地下电阻率变化监视以及地壳上地幔构造研究等等。

电磁法和电法除地面观测外，还可在钻井中，井间，地下开采巷道和水域进行观测，以解决某些特殊的地质问题。例如井中瞬变电磁法，井中地质雷达和井中高密度电法，它们可以探测井间、井壁周围和井中与地表之间的地质；巷道内的瞬变电磁法可以对巷道四周和工作面前方进行超前探测，以预测可能存在的含水体（层），断层和陷落柱等，以保证煤矿和隧道的安全生产和顺利挖进。

目前电磁法、电法仪器种类繁多，但应用最普通，效果最佳的不外乎三类仪器，即大地电磁测深仪（MT 仪），瞬变电磁仪和高密度电磁法。当今一流的电磁法和电法仪器必然是高超的硬件和软件的完美结合，以达到：

- 高分辨率，高信噪比
- 宽频带，大动态范围
- 高集成，多功能，低功耗
- 操作简单，轻便灵活，现场施时显示结果。

本文拟以 GMS-06 地球物理电磁观测系统（MT 仪），PROTEM 瞬变电磁仪和 RESECS 高密度电法仪为例，对这三类仪器的最新进行和应用做一简介。

二、 GMS-06 地球物理电磁观测系统及其应用：

若干年来 MT 方法面临的主要问题是，如何提高野外数据采集质量，以获取高质量的视电阻率和相位曲线并提高生产效率，以及如何有效的消除静位移和获得最接近实际的反演模型。

提高野外数据采集质量和提高生产率与磁场传感器的信噪比，数据采集单元的分辨率以及 MT 法的观测排列形式和数据处理方法等紧密相关。

GMS-06 的磁场传感器是最新研制的感应式 FMS-06 磁场传感器，重约 8Kg，长 1.2m，直径 75mm，很轻便。由于采用了特殊结构的磁芯材料，计算机模拟设计的线圈结构和磁反馈前置放大，FMS-06 的频带范围扩展到 10,000Hz-10,000 秒，达 8 个数量级，其信噪比（即天然场低活动水平与传感器的噪声之比）高达 10-100 倍，在高频段的噪声低至 5×10^{-7}nT/ √Hz，并且没有温飘和时漂。见图 1。这是当今世界上性能最好的感应式磁场传感器。该传感器保证了在天然场活动最平静的日子也能记录到高质量的、全频段电磁信号[1]。

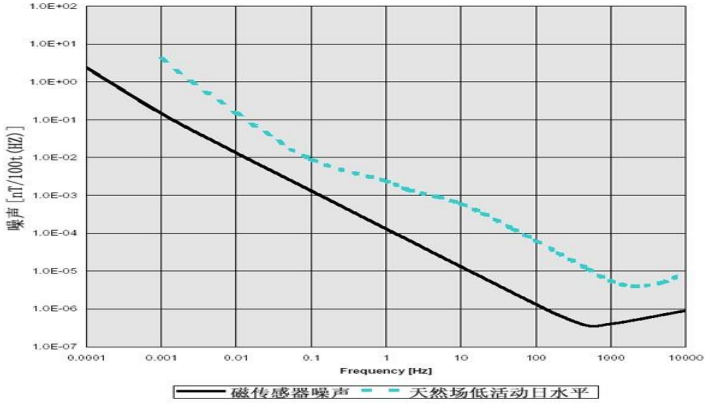


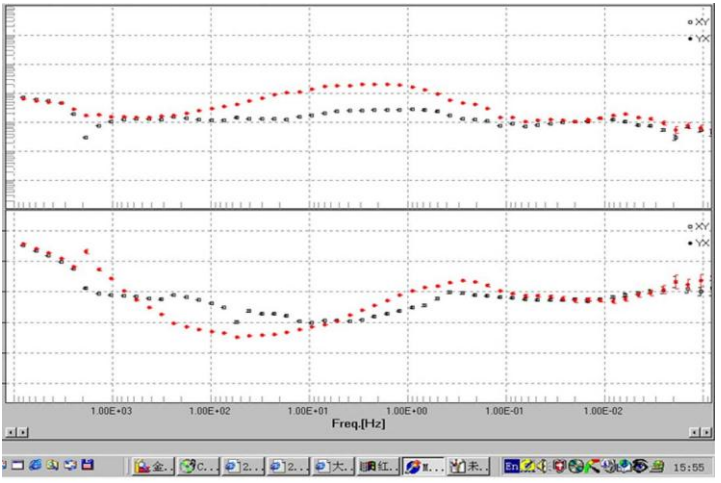
图 1

GMS-06 的数据采集单元 ADU-06，即主机，带宽 20 KHz—直流，其高频段和低频段各有一个 24 位 A/D 转换器，以保证全频段都具有最高的分辨率和最大的动态范围。除三个固定频段外，还设有一个自由频段，用户可根据需要选择自己最感兴趣的记录频段。ADU-06 内部设有 500MB 的闪烁存储器，可存贮大量的野外记录数据。ADU-06 重约 5Kg，5 道功耗 7-12W[2]。

如果把 FMS-07 感应式传感器（频响 20KHz-1,000 秒）与微型的磁通门磁力仪 FGS-01 结合起来，GMS-06 的频带范围可

以扩展到 20KHz-100,000 秒。

图 2 和图 3 是配有 FMS-06 磁传感器的 GMS-06 系统所记录的 MT 曲线，其高频端达 10,000Hz，低频端达 10,000 秒。



黑龙江某金矿GMS-06 单站（非远参考）MT 曲线（最高频率为 10, 000Hz）

图 2



GMS-06 系统观测的周期达 10,000 秒的视电阻率曲线

图 3

如果局部噪声很强，众所周知消除这种噪声的最好方法是采用远参观道观测。此外，GMS-06 的软件系统 MAPROS 具有很强的去噪功能，例如剔除干扰尖峰技术和 Robust 评估算法。Windows 系统下的 MAPROS 软件可实时处理观测数据并获得多种大地电磁参数，例如时间系列，原始谱，计算谱，叠加谱，视电阻曲线，相位曲线，倾子，相干度，走向，二维偏离度，各向异性系数等[3]。

提高生产效率的有效途径是采用网络式或阵列式 MT 观测排列形式。GMS-06 可以容纳 32 个移动单位与基站共同组成这种观测排列。此时，可以采用 GPS 钟同步或同轴电缆同步。在这种排列下，如果与远参考道结合并采用 EMAP 数据处理方法，既可以有效地压制局部噪声，又可以有效地消除静位移。

静位移是浅部非均匀体引起的，它使 TE 和 TM 曲线沿纵轴互相分离。如果已知浅层的真电阻率值就可对其进行校正。可用瞬变电磁法取求浅层的真电阻率值。如果 MT 仪的频带足够高，也可以根据不受静位移影响的高频渐近线读取浅层的真电阻率值，并以该值为准对其他有静位移的测点进行校正。由于 GMS-06 的高频响应达 10,000Hz，可以满足这种要求。

GMS-06 可应用于 MT，AMT，CSAMT，E-MAP，网络观测和远参考道。

三、 PROTEM 瞬变电磁仪系统及其应用

瞬变电磁法是时间域电磁法，以局部场做场源，分辨率高于以平面波场做场源的频率域电磁法，近些年来发展很快，在很多领域得到广泛应用。瞬变电磁法对浅层分辨率很高，但随深度加大而降低。

对瞬变电磁仪所关心的主要问题是，如何减少关断时间以获得更早期的瞬变场，如何提高晚期瞬变场的信噪比以增加勘探深度，如何从瞬变场信息中提取更多的地质信息，以及如何适应多种观测排列形式等。

加拿大 Geonics 公司生产的 PROTEM 瞬变电磁仪系统，由于在发射机的关断线路设计和加工工艺上采取了特殊的技术，

其关断时间只有 0.5μs，在使用 40×40m 的发射线框情况下，关断时间也只有 2.5μs，是当今世界关断时间最小的瞬变电磁仪，它可以获得浅至几米的地下信息[4]。

提高瞬变电磁法的勘探深度是人民所关心的问题之一。瞬变电磁法的最大勘探深度 H 可近似地由下式确定[5]：

$$H=0.55(M\rho/RmN)^{1/5}$$

其中 M 为发射磁矩，M=IS（I 为发射电流，S 为发射线圈面积），乘积 RmN 为最小可分辨信号电平。

从上式可见，提高勘探深度的途径，包括提高发射电流 I，加大发射线圈尺寸 S 和降低可分辨信号电平，即提高信噪比。提高发射电流 I 是最容易的方式，但它带来很大弊端，首先是一次场消失时间显著加大，大大增加了关断时间，掩殁了有效的瞬变电磁场信号；此外还很难保持发射场的稳定，导致观测结果不重复。一般来说，最大发射电流在 30-40 安培范围。加大发射线圈面积 S 是提高勘探深度的最好方法之一。其中加大发射线框边长最好，因为它不会导致关断时间的明显增加，如果靠增加发射线圈匝数来增加发射线圈有效面积将导致关断时间明显增加。降低可分辨信号电平有多种方法，首先是有效地抑制各种噪声，包括天然电磁噪声，人为电磁噪声，感应噪声等。抑制随机噪声的有效方法是多次叠加，抑制工频及其谐波噪声的有效办法是模拟滤波以及剔除坏值。选择接收机最佳的测量增益也是提高信噪比的一种方法。测点尽量靠近发射线框中心，发射线框与高压线斜交，也可改善信噪比。

为了适应不同勘探深度的需要，Geonics 公司研发了三种不同的发射系统，即 PROTEM47，其勘探深度可达 100-150m，PROTEM57-MK2，其勘探深度可达 500m，PROTEM67 的勘探深度可达 1,500m。当然这是指地层为中等电阻率的情况下，地层电阻率高勘探深度加大，地层电阻率低勘探深度减小。

接收机需要有很高的频带，很窄的早期门和极大的动态范围以及很高的分辨率，才能满足高质量观测的需要。PROTEM 瞬变电磁仪频宽高达 270KHz，早期门窄 6μs，30 个观测门，

动态范围达 132dB，分辨率 23 位[4]。

PROTEM 瞬变电磁仪可以同时观测瞬变电磁场的三分量信号，而不是仅仅观测垂直分量信号。当地下为非均匀水平层状构造时，瞬变场中便会产生 X、Y 水平分量，它们包含着地下构造的更多信息，例如构造走向、倾向、倾角等等。所以三分量观测有助于全面了解地下构造情况。如果进一步发展可以实现多维反演。

PROTEM 瞬变电磁仪适合于多种野外观测装置，例如同点装置，偶极装置，大定回线源装置和井中装置。不同装置适合于不同勘探目的和深度。均可在现场实时显示瞬变曲线。

煤矿或隧道工程的超前探测是地球物理勘探中最具挑战性的课题之一。由于 PROTEM47 的高度轻便和灵活性，它已在我国煤矿的超前探测中得到成功应用。河北省峰峰矿务局梧桐庄煤矿，利用 PROTEM47 和白登海博士与欧华联公司联合开发的世界上唯一的全空间反演软件，成功地探测到煤层陷落柱和含水体的存在（见图 4），并事先采取封堵措施，避免了水害的发生。科技日报于 2003 年 12 月 11 日在技术创新版对此做了较详细地报导。

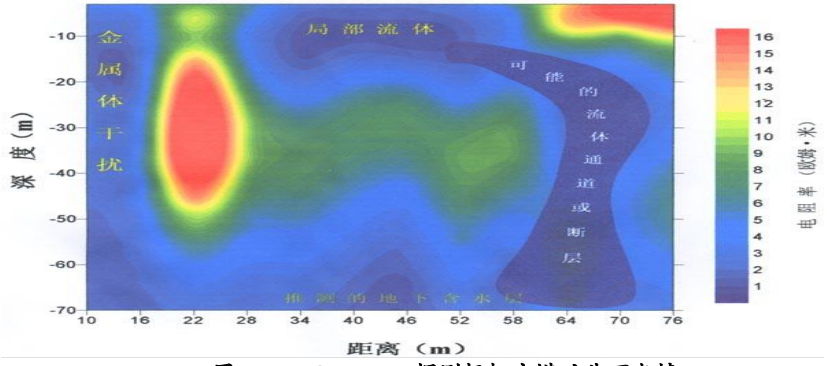


图 4　PROTEM47 探测梧桐庄煤矿井下水情
（据白登海资料）

PROTEM 可应用于地面观测，井中观测，巷道和掌子面观测。Geonics 公司是时间闻名的专门生产电磁法仪器的专业公司，它生产的 PROTEM 瞬变电磁仪很先进[6]。

图 5 是中国地震局地质研究所利用 PROTEM 系统对福州市八一水库活断层的探测剖面[7]。

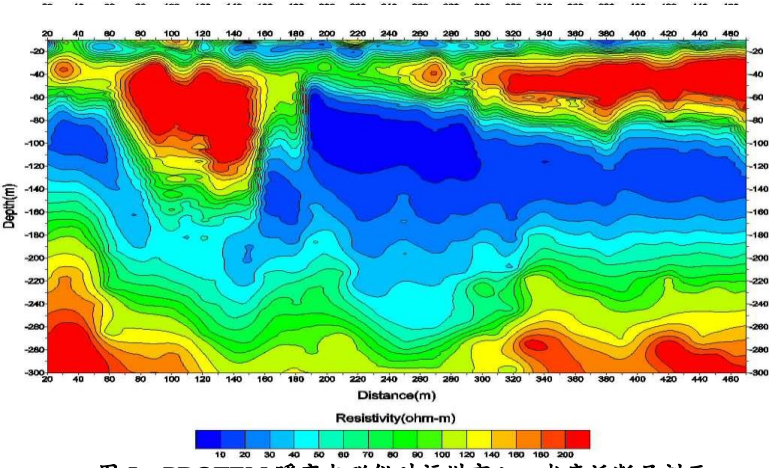


图 5　PROTEM 瞬变电磁仪对福州市八一水库活断层剖面 (据白登海资料)

四、RESECS 高密度电法仪系统及应用

当今高质量的多道直流电法仪必须是设计完善、质量高超、功能齐全的硬件和软件的完善结合。高密度电法的主要优点是对地下构造的高分辨率和设备的轻便性，其主要不足是探测深度 H 有限（H≈1/5—1/6 AB）式中 AB 是最大供电极距。AB 一般不超过 1,000m，所以最大勘探深度为 200m。如果 AB 超过 1,000m，不仅增加电极串长度，还要加大供电电压，使设备变得笨重和困难。

德国 DMT 公司研制和生产的 RESECS 高密度电法仪具有 6 个电位测量道和一个电流测量道。在单道或多道工作情况下均可控制 960 个电极。每个电极串由 16 个编码器和 16 个电极

组成，一条轻便的 7 芯电缆可以连接 60 个电极串，既 960 个电极。主机重仅 13Kg，轻便。RESECS 可以进行井间观测以及井中和地表联合观测。

RESECS 的硬件分辨率为 16 位，采样率 1KHz/每道。于是，在 1ms 发射脉冲情况下，电流道和电位道的样品数均为 1,000 个，对其平均叠加后相当于分辨率提高 10^3 倍，即 2^{10} 倍。这样，RESECS 的分辨率就达到了 26 位，相当于 20nv 左右。这样高的分辨率足以分辨出精细的地下结构。为了分辨出几十 nv 级的有效电位信号，RESECS 采取了一系列措施。其中包括，对所有的道进行极完善的电性绝缘处理、防水、防潮处理；消除地下激散电流的影响；选择合适的采样窗口，避免采集干扰信号；设置合适的滤波系数，去掉伴随采样窗口上升沿和下降沿的干扰等等[7]。

为了保证实现高质量观测，可以在观测菜单上设置较严格的观测误差值，拒绝接收不合格的观测数据。此外，可以增加观测的叠加次数和加大发射电流以提高信噪比。

对地下结构的分辨能力，还与装置排列形式有关，因为不同的装置排列形式对不同的目标体有不同的灵敏度。RESECS 有 10 种不同装置排列形式，可通过软件自动选择，用户也可自己定义装置排列形式。

RESECS 高密度仪具有非常完善的软件功能。对观测结果进行在线处理，实时显示时间域过程，实时计算直流电阻率值及其标准方差，实时计算感应极化强度值和 IP 值，实时显示伪断面的图形，实时显示失效道位置，并可立即补测或在排列滚动前统一补测，以保证总体的观测质量。

图 6 是 RESECS 高密度电法仪对福州市八一水库活断层的探测断面，可见十分精细[7]。

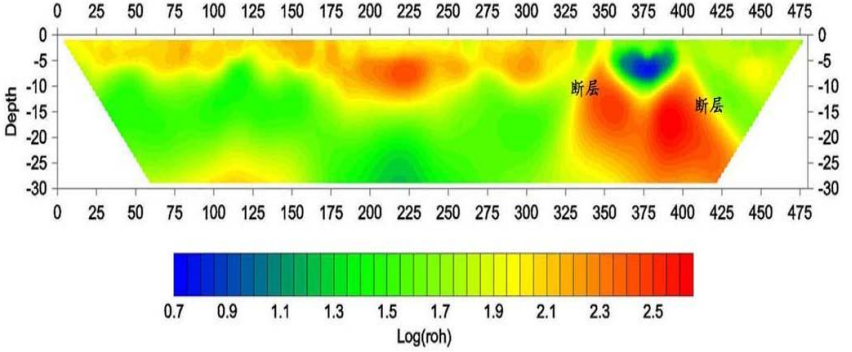


图 6　RESECS 对福州市八一水库活断层的探测结果

图 7 是 RESECS 高密度电法仪对涿州市垃圾掩埋场的污染物向地下扩散范围的探测结果。上图是现场实时显示的伪断面，下图是反演结果。垃圾场位于剖面右端的干涸河床上，可见污染物已向河床下方和右前方扩散。

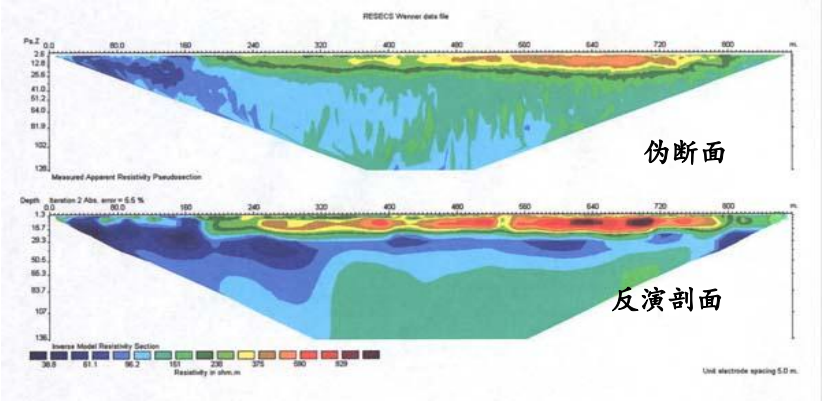


图 7　RESECS 探测涿州垃圾场污染范围（据黄丹青资料）

RESECS 可应用于地面观测和井中观测[9]。

图 8 是 RESECS 高密度电法仪对哈尔滨市内某建筑工地地下防空洞的探测结果。图中的兰色低阻体是充水的防空洞位置，已被证实。

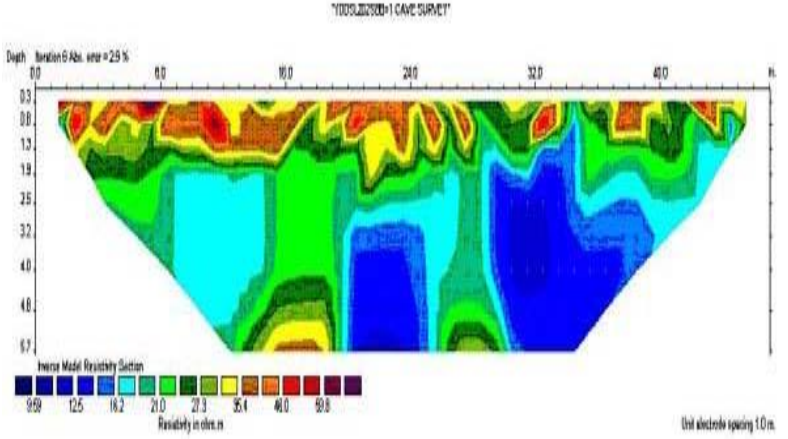


图 8　RESECS 高密度电法仪在哈尔滨市内某建筑工地探测防空洞。已被证实的充水防空洞。（据黄丹青资料）

参考文献

[1] *Matzander, U; Broad band induction coil magnetometer, Branschweiger, Germany, Metronix, 2003.*

[2] *Matzander, U; ADU-06 user manual, Branschweiger, Germany, Metronix, 2001*

[3] *Friedrichs, B; MT software-MAPROS, Branschweiger, Germany, Cooper Power Tools, 2001*

[4] *Geonics.L; Time domain EM system-PROTEM, Ontaric, Canada, Geonics Limited, 1999*

[5] 牛之琏，时间域电磁法原理，长沙，中南工业大学出版社，1992

[6] 蒋邦远主编，瞬变电磁法勘探，北京，地质出版社，1998

[7] 白登海，王立凤，孙洁，朱金芳，黄宗林，黄丹青，何兆海，祖金华，廉雨芳，*Quentin Yarie, Volker Schaepe.* 福州八一水库—上千断裂的高密度电法和瞬变电磁法试验探测。地震地质，24（4），2002

[8] *Schaepe, V; RESECS DC-Resistivity and Electrode Control system, Essen, Germany, DMT, 2002*

[9] *Kemna, E.A; Complex resistivity tomography, 4th progress Report, Essen, Germany, DMT, 1998*

矿产资源调查的物探方法和仪器设备

刘国栋
北京欧华联科技有限责任公司（BOST）
（北京，100096）

摘要：
本文论述了矿产资源调查中的物探方法，应用条件，仪器设备及应用实例。其中包括磁法，重力，瞬变电磁法，频率域电磁法，直流电法和地震法等。

关键词：矿产资源调查，磁法，瞬变电磁法，频率域电磁法，地震法

一、 引言

本文所指的矿产资源主要为有色金属矿和贵金属矿，如铜、铅 、锌、锡、钨、镍、铬、金、金刚石矿等。这类矿产资源具有不同的成因，控制条件和物理性质，形成了特征不同的地球物理场，因此对它们进行物探调查的方法也各异。例如有些矿产受构造和断裂控制或者呈层状产生，此时应主要采用地震方法和电磁法；有些矿产资源与岩浆岩或夕卡岩带有密切关系，此时应首先采用快速、廉价的磁法；有些矿产资源伴有高磁性，高密度或高波速，此时应采用对应的物探手段等。

由于不同物探方法的探测精度差异很大，以及物探数据的多解性，因此在矿产资源探测的不同阶段要采用不同的物探手段，并与地质资源密切结合，进行综合物探解释，以期获得更可观的结果。本文就矿产资源调查中的一些物探方法和仪器设备做一些探讨。

二、 矿产资源调查的物探方法和仪器设备

1. 磁法

磁法是最经典的物探方法。很多有色金属矿与岩浆岩充填

的断裂带，夕卡岩带以及与岩浆活动伴随的热液活动带有关。由于岩浆岩一般都含有磁性物质，因此通过地面磁测可以快速的圈定与岩浆活动有关的有色金属矿远景区。此外某些金属矿伴生有磁铁矿，某些金属矿产在基性和超基性岩之中，某些金属矿与弱磁性的蚀变带有关，此时可利用磁法直接寻找这类矿产资源。

矿产资源调查中一般都观测全磁场 F。有多种观测全磁场 F 的磁力仪，例如，质子磁力仪（核旋），Overhauser 磁力仪，光泵磁力仪（钾光泵，铯光泵，氦光泵）和相应的磁场梯度仪。

标准质子磁力仪的分辨率高达 0.01nT，精度 1nT；Overhauser 磁力仪和光泵磁力仪的分辨率≥0.01nT,精度高达 0.1nT。在矿产资源调查中一般都应用质子磁力仪。近三年来国内矿产资源调查部门共进口了 300 多台 GSM-19T 标准质子磁力仪，该仪器小型、轻便、全数字化、稳定，获得用户好评。磁场梯度仪主要用于确定磁异常边界和浅层探测，也可作为磁力仪使用。

2. 重力法

重力法主要用于寻找高密度的矿产资源以及与高密度基岩和超基性岩伴生的矿产资源。CG-5 型重力仪和 BURRIS 重力仪是当今观测精度最高的重力仪，其读数分辨率达 1 微伽，重复观测精度＜5 微伽和 10 微伽。如果在山区使用如此高精度的重力仪进行观测，地改精度很难达到要求。地改不足或过剩，将出现与地形高差成镜像的假异常。

3. 电磁法

电磁法是矿产资源调查和勘探中最常用的物探方法。电磁法可分三大类，即时间域电磁法，频率域电磁法和直流电法[1]。

时间域电磁法有两种，一种是通过观测由地面回线发射的一次场在地下介质中感应出的、随时间变化的二次场来探测地下电性结构，通常称为瞬变电磁法（TEM）；另一种是通过观测由地面偶极源发射的电流脉冲在地下介质中产生的、随时间变

化的二次场来探测地下电性结构，称为长偏移距瞬变电磁法（LOTEM）。

1）瞬变电磁法（TEM）

瞬变电磁法分辨率高，探测深度适中（与测区地下平均电阻率值有关）。它在圈定断裂，破碎带，蚀变带，岩浆岩接触带，地下电性分层等方面能提供较可靠的信息，对陡立的地质构造分辨程度高，可直接寻找高导矿体。

国内有多个单位研发或生产瞬变电磁仪，国外厂家生产的瞬变电磁仪有 PROTEM，PEM，terraTEM 以及 V8 和 GDP-32 系统中含有的瞬变电磁功能。

PROTEM 瞬变电磁仪由加拿大 Geonics 公司研发和生产。该公司自 1978 年开始生产 EM37 瞬变电磁仪，至今已更新换代四次。目前生产的瞬变电磁仪有 PROTEM47，PROTEM47HP，PROTEM57-MK2，PROTEM67 和加强型 PROTEM67，它们的主要区别是勘探深度不同，最大勘探深度可达 1500-2000m。此外，还有井中瞬变电磁仪。

在过去四年中，国内已有 31 家用户购买了 PROTEM 瞬变电磁仪。PROTEM 瞬变电磁仪的主要特点是：分辨率高，抗干扰能力强，工作效率高，三分量、30 个观测道同时观测，工作温度—40℃—+60℃，防水，防潮，接收—发射相互分离，适应各种野外观测装置，工作稳定，重复准确率 100%。

下面例举几个 PROTEM 瞬变电磁仪的应用实例：

（1） PROTEM57-MK2 探测云南锡矿带实例

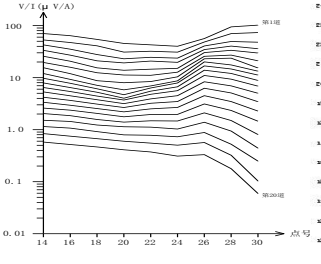


图 1：瞬变电磁场响应曲线

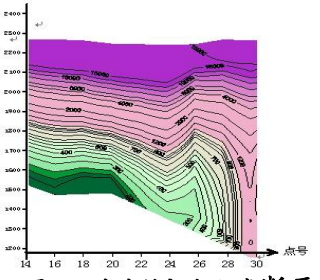


图 2：反演的视电阻率断面

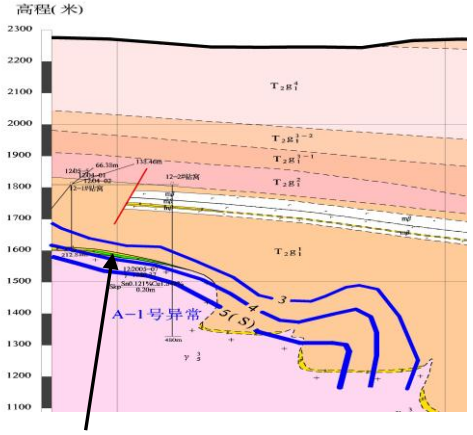


图 3：地质解释断面，图中的粗线为推断的锡矿带，已被钻探证实（根据云南省有色地质调查院资料，2006）

（2） 图 4 是 EM37（PROTEM67 前身）在澳大利亚探测金矿实例

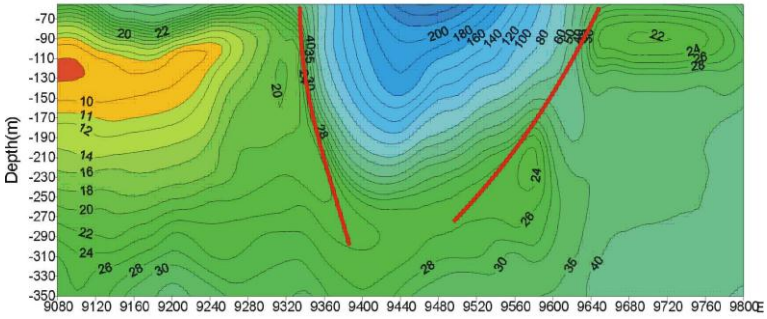


图 4：金矿赋存于受断裂控制的高阻流纹斑岩之中

（3） 图 5 是 PROTEM 对黑龙江乌拉嘎金矿深部找矿的勘探结果。图 5 右上角 I 号异常是低阻体，它与正在开采的金矿体一致，推测是由于岩石破碎程度较高，含金矿存于破碎带，蚀变，导致低阻。据此推测剖面左侧的 II 号低

阻体以及深部的III号低阻带，应是金矿区远景区[2]。

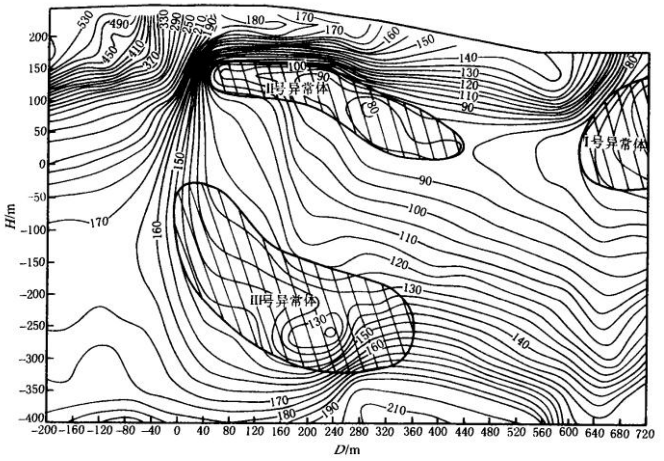


图 5：乌拉嘎金矿 127 线 TEM 测量结果解释剖面图

2）长偏移距瞬变电磁法（LOTEM）

长偏移距瞬变电磁法是通过接地偶子向地下注入 100-200A 的脉冲电流，偶极长度 2000m，接地电阻要低至几欧姆，发电机功率高达几百千瓦，可见发射装置十分庞大。该方法即可观测对高导层敏感的、随时间变化的二次磁场分量，也可观测对高阻层敏感的、随时间变化的二次电场分量[3]。长偏移距瞬变电磁法的勘探深度可达 3000-4000m，与测区地下平均电阻率值有关。很少见该方法在有色矿产资源调查中的应用。

3）频率域电磁法

频率域电磁法是通过在地面观测随时间变化的电磁场分量来探测地下的电性结构，其场源是太阳活动产生的电磁波或人工发射的电磁场。标准的频率域电磁法叫大地电磁法（MT），它有很多变种，以适应不同的观测环境，例如远参道法用以解决局部电磁噪声干扰，电磁阵列法（EMAP）用以解决静效应，电—电磁剖面法（CEMAP）用以提高生产效率，可控源法（CSAMT）用以提高信噪比。上述方法可以联合应用，以解决频率域电磁

法中的各种问题。

频率域电磁法的主要优点是:勘探深度可从地表至几公里，乃至百公里，取决于仪器所能记录的频率范围；对高导层（体）十分敏感，有利于寻找高导矿体；横向分辨率高，有利于圈定构造和岩体边界；仪器设备轻便；二维反演成熟，也可进行三维反演[4]。在矿产资源调查中的应用范围与瞬变电磁法类似。

目前世界上生产的大地电磁仪有 GMS-06,V5-2000,ACF-4M,V8 和 GDP-32 中含有的大地电磁功能。最近德国 Metronix 公司在 30 年研发和生产大地电磁仪的基础上,研制成功一种全新概念的 GMS-07 综合电磁法仪。该仪器的特点是：频带范围 250—直流，为全频段电磁测量仪；有 10 个数据采集道，因此一台仪器可同时完成四个测点的观测任务，工作效率提高 4 倍，也可作 EMAP 处理;具有 CSAMT 功能,可以人工源和天然源联合观测;一台小型主机进行数据采集控制和实时处理；可远程操控，随时下载或传递数据。

下面给出两个大地电磁法探测金属矿的实例：

① GMS-06 大地电磁仪勘查铜镍矿实例

新疆图拉而根铜镍矿是全岩矿化超镁铁质岩浆硫化物型铜镍矿，为查明含岩矿体向深部的延伸情况在矿区进行了两次大地电磁剖面勘探。图 6 和图 7 是 2004 年勘探的两条 MT 剖面的解释结果。图 6 中部连续的低阻异常和图 7 中部两个规模较小的低阻异常,是铜镍矿在深部的展布情况,并得到钻探证实[5] 。

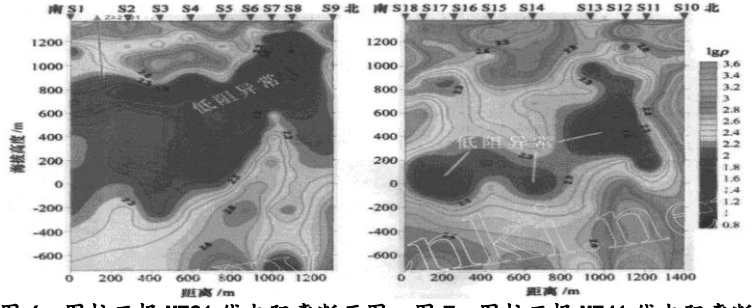


图 6：图拉而根 MT21 线电阻率断面图　图 7：图拉而根 MT41 线电阻率断面图

② 大地电磁法预测铜矿成矿带实例

为了预测土屋铜矿在深部的成矿地带，在该矿进行了详细的 MT 勘探。从已知区勘探结果可见（图 8），铜矿分布在高阻体和低阻围岩的接触带中。为了预测深部成矿带，对全区所有 MT 测点的观测结果作出不同深度的平切图，并对 310 米深处远景成矿做出预测(图 9)[6]

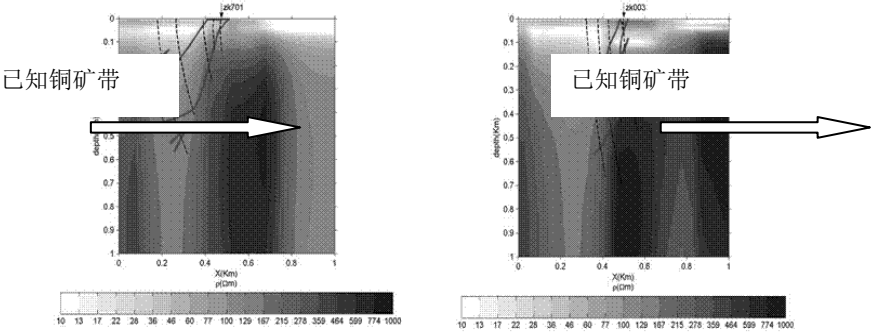


图 8：已知土屋铜矿体的 MT 电阻率断面铜矿赋存在高低阻接触带中

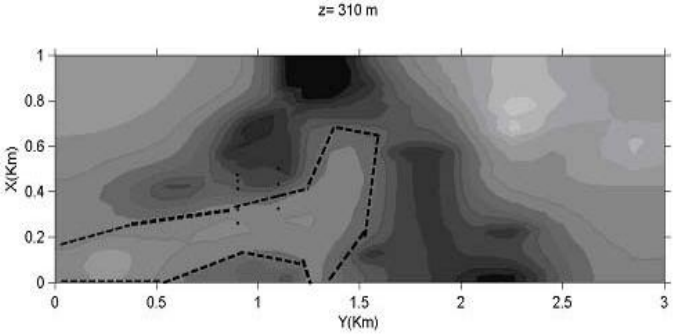


图 9：对土屋铜矿在 310 米深处的有利成矿带预测图，有利成矿带由虚线圈出。

4）高密度电法

高密度电法由于采用多电极、小极距，多次叠加纵向密集分层，自选多种装置结构和有效的二（三）维反演等一系列技术，使其分辨率在电法勘探中最高，但勘探深度为最大供电

距的 1/5，即不超过 200m。高密度电法既可以获得细微的地下电性结构，也可以观测 IP 值，所以在浅层金属矿勘探中能发挥很大作用。
目前比较著名的高密度电法仪有 RESECSⅡ 和 AGI。

5）激发极化法

激发极化法是探测有色矿产资源的经典方法，它对于寻找浸染状矿和斑岩型矿有较好效果，因为这类矿物颗粒分散在岩体之中，互不相连，形不成低阻异常，但却可以产生较大的激电异常。然而较广分布的黄铁矿，石黑化和碳化岩体（层），往往产生更强烈的激电异常，很难与矿体异常区分，此外人文电磁噪声也会造成强烈干扰。

激发极化法的探测深度取决于测区平均电阻率值和人文噪声水平，在 AB 极距 1000m、接地电阻低至几欧姆情况下，其探测深度可达 200-300m。为了提高信噪比往往采用大功率发射。Vip 和 IPR-12 是专用激电仪,V8 和 GDP-32 系统含有激电功能，最大发射功率为 30KW。

4. 地震法

在油气勘探，煤田勘探和工程勘探中地震法是最有效的物探方法,但在本文所论的矿产资源调查中地震法应用的比较少。主要原因是很多矿产资源多与岩浆活动有关,控矿构造倾角大，地震法很难取得有效数据。然而，有些矿产资源，例如与深海岩浆热液活动有关的铅锌矿，沉积型矿等往往为层状结构，此时利用地震法勘探可获得很好效果。此外，有些矿产资源伴生在高速体或低速体中，此时采用井中地震层析成像技术，往往能到达直接找矿的目的，下面给出两个实例：

1）爱尔兰的 Navan 铅锌矿赋存于深 650m 的灰岩之中，为探测深至 1000m 的控矿构造和矿产发育情况,采用 Summit 地震仪进行了详细的反射法地震勘探。地震反射剖面如图 10 所示，结合钻井资料解释后的地质断面如图 11 所示。可见矿体在深部呈层

状展布并被次级断裂切割。

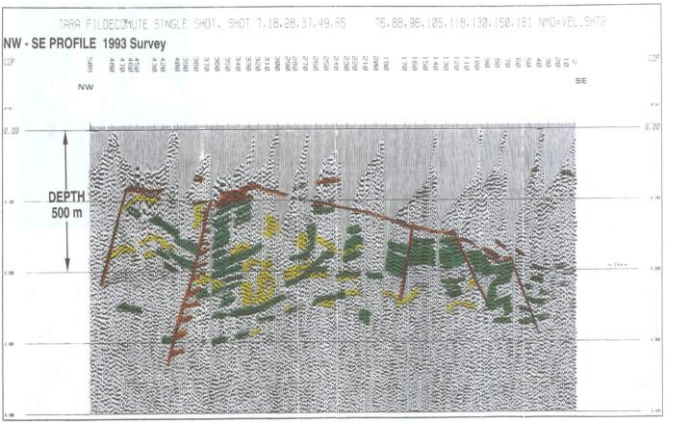


图 10：爱尔兰 Navan 铅锌矿地震反射剖面（V. Schaepe，2007）

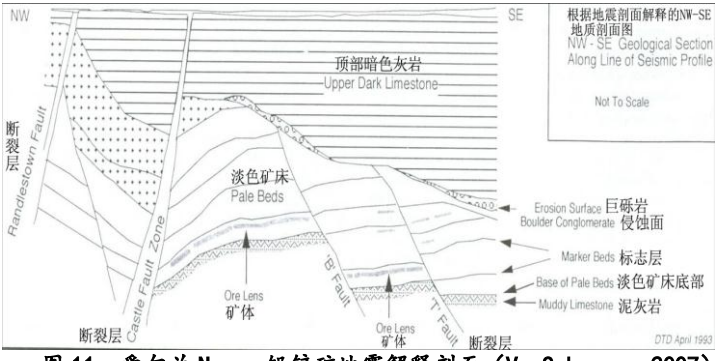


图 11：爱尔兰 Navan 铅锌矿地震解释剖面（V. Schaepe，2007）

2)西班牙 Reocin 锌矿是欧洲的第二大金属矿基地，年产量 200 万吨。该矿赋存于厚层白云岩之中，主矿体被断层切割。为了获取现有采矿巷道下 22m 深以上的矿产信息，利用 Summit 地震仪井中地震层析成像技术取得了成功结果，见图 12。

从图可见锌矿体存在的白云岩波速值高达 5900m/s，因此根据波速层析成像获得的速度图像就可以圈定未知矿体的位置。

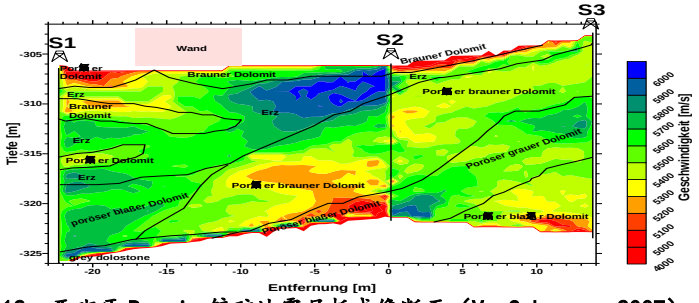


图 12：西班牙 Reocin 锌矿地震层析成像断面（V. Schaepe，2007）

Summit 地震仪是德国 DMT 公司的著名产品，在中国已有 40 家用户。2006 年研制成功的 Summit II plus 地震仪是最新一代产品，其采样率高达 20μs，即 50000Hz，分辨率高达 24 位，系统动态范围 160dB，瞬时动态范围 120dB，双道采样站具有强的数据处理功能，重 1.2Kg，道间距可变，笔记本电脑做主机，道数可无限扩展。非常轻便，稳定，特别适合山区和地形复杂地区开采二维和三维地震勘探工作。在过去一年中国内已有 10 家用户购买了 Summit 地震仪的新产品，即 Summit II plus。

参考文献：

[1] 刘国栋，电磁法及电法仪器的新进展和应用，石油地球物理勘探，2004，39（增刊）：46-51

[2] 张宝林，蔡新平，梁光河等。综合地球物理方法对金矿深部找矿靶区的验证。地球物理学报，2002，45（增刊），346-355

[3] 刘国栋，张木生，邓前辉等。唐山大震区的深部瞬变电磁法勘探，电磁方法研究与勘探。北京： 地震出版社，1993

[4] 胡祖志，胡祥云，大地电磁三维反演方法综述，地球物理学进展，2005，01

[5] 梁光河，徐学旺，肖骑彬等。大地电磁测深法在铜镍矿勘查中的应用，矿床地质，2007，26（1）：120-127

[6] 谭捍东，李聪嫔，王彩琪。地质与勘探，大地电磁三维反演在土层铜矿探测中的应用研究—三维反演解释，地质与勘探，2003，21

瞬变电磁仪——以 PROTEM 为例

Transient EM Instrument——As Example by PROTEM

刘国栋

北京欧华联科技责任有限公司 BOST in China

摘要:

本文以 PROTEM 瞬变电磁仪为例，讨论了如何提高瞬变电磁仪发射系统的发射偶极矩，以及关断时间，电流脉冲宽度等对二次场（瞬变场）的影响；同时也讨论了对接收系统的技术要求，其中包括分辨率，动态范围，三分量接收和叠加等问题。此外，还讨论了瞬变电磁法在矿产资源，地下水，煤田和油气田以工程和环境勘探等方面的应用问题。

Abstract:

In this paper, it has been described that how to improve the transmit dipole moment of transmitting system and also introduces the effect on secondary field（transient field）brought by the turn-off time and width of current impulse by taking PROTEM for example. It described the technical requirement of receiving system in which included resolution， dynamic range， three-component and data stacking. Beside the cases study including the applications for mineral, underground water, seam layer as well as oil and gas explorations.

一、 引言

最近几年来瞬变电磁法在国内发展很快，在矿产资源勘探、煤田储水构造和地下水探测以及工程勘探等方面获得广泛应用。

目前国产瞬变电磁仪有重庆奔腾的 WTEM，重庆地仪厂的 ATEM－Ⅲ，中国地大（武汉）的 CUGTEM－4，长沙白云的 MSD-1，西安强源 EMRS-ZB 等。国外生产的瞬变电磁有加拿大 Geonics 公司的 PROTEM 系统，Crone 公司的 PEM，凤凰公司的 V8，美国 Zonge 公司的 GDP-32。

Geonics 公司是专门研发和生产时间域电磁仪器的专业公司，除 PROTEM 瞬变电磁仪外，还有时间域金属探测仪，大地电导率仪，井中瞬变电磁仪等。

Geonics 公司自 1978 年开始生产 EM37 瞬变电磁仪，至今已更新换代四次，目前生产的瞬变电磁仪系列有：

- PROTEM47，最小探测深度 150m；
- PROTEM47HP，专门用于煤矿和隧道内部的超前探测和侧邦探测；
- PROTEM57-MK2，最小探测深度范围为 500m；
- PROTEM67，最小探测深度范围为 1000m；
- 加强型 PROTEM67，最小探测深度 1500m；
- BH43-3 井中瞬变电磁仪，可在 2000m 钻井内进行探测，探测半径为 120m。

瞬变电磁法的勘探深度与覆盖层电阻率值直接相关，现以 PROTEM47 为例列表如下：

表 1：PROTEM47 的最大勘探深度

发射回线 单边长度（m）	覆盖层电阻率（ohm-m） 25	 100	 400
5	40	50	70
10	50	70	95
20	70	90	125
40	90	120	160
80	120	160	220
160	155	210	280

可见，当覆盖层电阻率低至 25 Ohm-m 时 PROTEM47 的勘探深度为 155m，当覆盖层电阻率为 400 Ohm-m 时其勘探深度为 280m。

PROTEM 瞬变电磁仪是世界上最著名的瞬变电磁系统，很多国家都在应用。在过去四年中，我国就有 31 家用户购买了不同类型的 PROTEM 瞬变电磁系统，在实际应用中获得了良好效果。

二、 应用范围

PROTEM 瞬变电磁仪主要应用于：

1. **有色金属和贵金属矿产资源勘探：**圈定控矿构造和成矿母岩，如圈定断裂带，破碎带，蚀变带，夕卡岩带，岩浆岩接触带和含矿母岩等；可直接寻找高导矿体；对高倾角和陡立的地质体分辨率高。
2. **地下水勘探：**确定断层含水性，确定含水层和储水构造，确定热水体分布和海水侵入范围。
3. **煤田勘探：**在地震法无法取得有效信息的地区，可以直接探测煤层分布和煤田区的地质构造。
4. **油、气勘探：**确定含油、气区的电性分层，构造分区和断层展布等。
5. **工程和环境勘探：**确定基岩埋深及风化程度，确定软层或砾石层埋深和厚度，确定断层展布，圈定地下水污染范围，填埋垃圾堆渗漏情况等。

三、 PROTEM 瞬变电磁仪

瞬变电磁仪的简单工作过程是，发射机向铺设在地面的发射回线发射不同频率的电流脉冲，该脉冲的下降沿产生变化的一次场并向周围空间扩散。该一次场进入地下导电介质时便产生随时间变化的二次场，该二次场（即瞬变场）的大小和分布受地下介质的电导率值和结构控制。因此通过二次场的观测和反演解释便可以获得地下介质的电导率值，电性分层，厚度变化，电性体埋深和产状以及地下电性结构等有关信息。

1. 瞬变电磁仪的发射系统

发射系统包括发射机，发射回线和电源（发电机或电瓶）。发射机向发射回线注入不同频率的电流脉冲Ⅰ（脉冲宽度或周期视勘探深度而定），图 1a。当电流脉冲Ⅰ关断时，发射回线中产生一次场并向四周扩散，同时在地下导电介质中产生随时间变化的二次场，图 2。当电流脉冲关断时，接收机立即打开、接收二次场信号，图 1b。

瞬变电磁仪的接收系统包括接收线圈（传感器）和接收机。

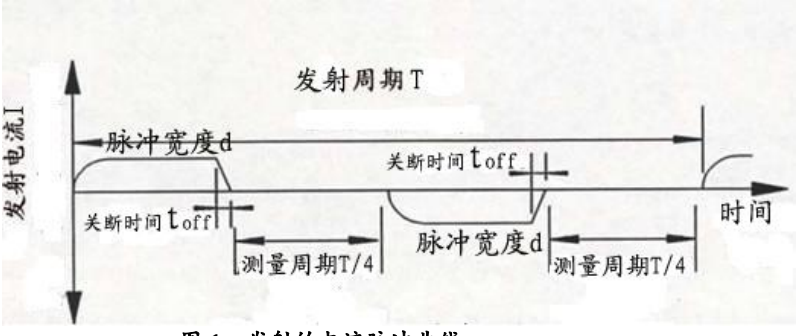


图 1a 发射的电流脉冲曲线

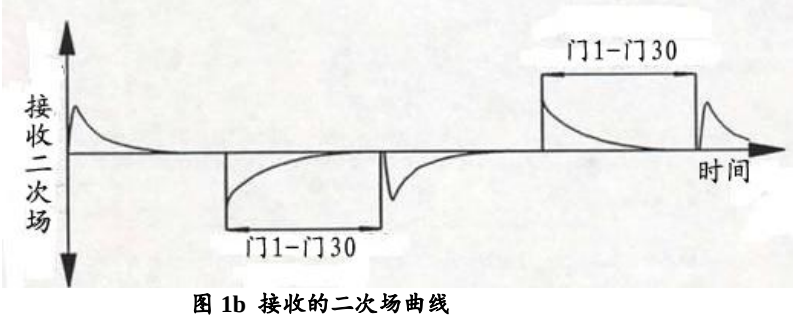


图 1b 接收的二次场曲线

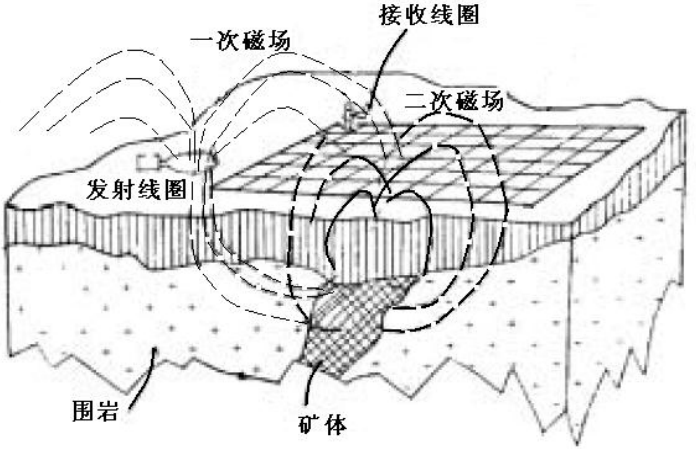


图 2 一次场和二次场空间分布示意图

为了加大勘探深度，提高信噪比，发射系统要能产生最大的发射偶极距 M，最大的感应电动势 $V(t)$，最快的工作效率和最小的畸变干扰。同时发射设备还要轻便以适应地形复杂地区的工作。PROTEM 的发射系统达到了这些要求：

1) 对勘探深度的要求

瞬变电磁仪探测深度 H 的近似表达式为[1]：

$$H = 0.5\left(\frac{M\rho}{R_m N}\right)^{\frac{1}{5}} \qquad [1]$$

式中：$M = I \times S$，I 为发射电流大小，S 为发射线圈有效面积（m^2）；在 S 一定的情况下，发射电流的大小取决于发射脉冲的最高电压值。ρ 为覆盖层平均电阻率值（Ohm-m）；$R_m N$ 为最小可分辨信号电平，它取决于信噪比。

PROTEM 瞬变电磁仪由于特殊的发射技术，PROTEM57 的最高发射电压为 60V，PROTEM67 为 150V，加强型 PROTEM67 为 240V。这是当今瞬变电磁仪中发射电压最高，发射波形最规则、最稳定的系统。它们的发射参数见表 2。

PROTEM 发射机外形见图 3。



PROTEN47 发射机



PROTEM57 发射机



PROTEM67 发射机

图 3 PROTEM 发射机

表 2 PROTEM 瞬变电磁仪发射机参数

发射线圈面积 S（m^2）	发射线圈电阻[按每千米 2 欧姆计算]	发射电流值 I （A）			发射偶极距 M（I*S）			相应勘探深度（m）		
		PROTEM57	PROTEM67	加强型 PROTEM67	PROTEM57	PROTEM67	加强型 PROTEM67	PROTEM57	PROTEM67	加强型 PROTEM67
100m*100m	0.8	28	28	28	280000	280000	280000	150	150	150
300m*300m	2.4	25	28	28	**2250000**	2520000	2520000	500	500	500
500m*500m	4	15	28	28	3750000	7000000	7000000	700	700	700
1000m*1000m	8	7.5	18.75	28	7500000	18750000	28000000	1000	1000	1000
2000m*2000m	16	3.75	9.4	15	15000000	37600000	60000000			1700

2) 对关断时间的要求

在发射线圈中产生的一次场由发射线圈中产生的感应电动势 $V(t)$确定：

$$V(t) = -N\frac{d\Phi(t)}{dt} = -NS\frac{dI(t)}{dt} \qquad [1]$$

S 为单匝线圈面积，N 为线圈匝数，$dI(t)/dt$ 为发射电流随时间变化。在 S 和 N 已确定的情况下，V(t)取决于发射电流随时间的变化率，即 $dI(t)/dt$，假设在发射回路中，电流脉冲的切断时间为 t_{off}， 那么

$$V(t) = -NS\frac{dI(t)}{dt_{off}} \qquad [2]$$

可见 t_{off} 越小，发射线圈中产生的感应电动势 $V(t)$越大。关断时间不仅影响发射线圈中感应电动势 $V(t)$的大小，还影响观测盲区的大小，因为关断时间越长早期信息丢失的就越多，勘探盲区就越大。此外，关断时间还影响瞬变场观测值与理论响应值的偏离程度：

设发射电流的关断时间为 t_{off}，观测的瞬变电磁场为

$$\varepsilon_2'(t) = \frac{1}{t_{off}}\int_0^{off} V(t)dt \qquad [3]$$

$\int_0^{off} V(t)dt = \varepsilon_2(t)$ 为理论响应值。理论响应值与观测值的偏差用 D_f 表示，称其为畸变因子：

$$D_f = \frac{\varepsilon_2'(t)}{\varepsilon_2(t)} \qquad [4]$$

可见 D_f 越接近于 1，关断时间 t_{off} 的影响就越小。对于三维

导体而言

$$D_f = \frac{\varepsilon_2'(t)}{\varepsilon_2(t)} = \frac{\tau}{t_{off}}(1 - e^{-t_{off}\tau}) \qquad [5]$$

对于半空间或水平薄层而言：

$$D_f = \frac{1}{(m-1)}\left[1 - \left(1 + \frac{t_{off}}{\tau}\right)^{1-m}\right] \qquad [6]$$

式中 τ 为导体的时间常数，对三维体而言 $\tau = \sigma\mu_0 a^2 / \pi^2$

（σ：导体的电导率值，a：导体的半径，μ_0：导体的磁导率值），t_{off} 为关断时间。

从式（5）和（6）可见，畸变因子 D_f 的大小与 t_{off}/τ 或 t_{off}/t 有关，（t 为观测瞬变场的时间），并列图如下（图 4）[2]

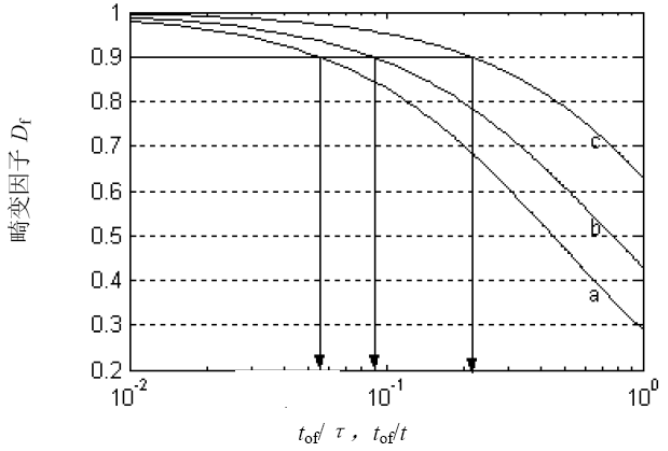


图 4 关断时间与畸变因子的关系；a—水平薄板情况下的 Df～t_{of} /t 曲线；b—半空间情况下的 Df～t_{of}/t 曲线；c—三维导电体情况下的 Df～t_{of} /τ 曲线。

从图可见，对于三维体而言，D_f 与 t_{off}/τ 有关。一般而言有工业意义的金属矿其 τ=5-50ms，此时如果瞬变电磁仪的关断时间 t_{off} = 500μs，则 t_{off}/τ=0.1-0.01。从上图中的曲线 c 可见，瞬变因子 D_f =0.95-0.99，可以忽略不计。

对于水平薄板和半空而言（图 4 中曲线 a 和 b），畸变段主要出现在早、中期曲线段，随观测时间 t 的增大，D_f 值趋于 1。例如，若 t_{off} = 750μs，发射频率为 0.625Hz，即观测时间 t 为 1/0.625×4=0.4s=4×10^{5}μs，则 t_{off}/t=0.00187。从图中 a 和 b 曲线可见，此时的畸变因子接近 1，即无畸变。所以发射系统的关断时间不能大于 750μs。

关断时间 t_{off} 还与发射电流大小和发射线圈尺寸（即电感量）有关。PROTEM47 的关断时间为 2.5μs（在发射电流 3A，发射回线 40m×40m 情况下），PROTEM57-MK2 关断时间 20-115μs（在发射电流 25A，发射回线 500m×500m 情况下，PROTEM67 关断时间 20-400μs（在发射电流 22A，发射回线 800m×800m 情况下）。此时发射回线的电阻值小于 2 欧姆/公里。

可见 PROTEM 的关断时间对瞬变场值不会产生任何畸变影响。

3) 对发射电流脉冲宽度，即重复率的要求：

如图 1a 所示，在每个发射周期 T 内发射一对双极性电流脉冲。脉冲宽度的大小直接影响工作效率和信噪比。因为每发射一个电流脉冲后，紧跟着便接收二次场，如图 1b。为了压制外界干扰，在每个测点上要发射 N 个电流脉冲和接收 N 个二次场信号，再对其进行叠加，以提高二次场观测值的信噪比。从这个角度出发，我们希望发射的电流脉冲宽度越小越好，即重复率为（1 秒钟内发射的双极性脉冲个数）越大越好。PROTEM 的重复率为 237.5Hz-0.25Hz 可选，即 4.2ms-4000ms 可选，因

此它在 30 秒观测时间内可以发射 14，280-15 个正、负电流脉冲和接收同样多的二次场信号。然而有的瞬变电磁仪最高发射频率为 25Hz，即 40ms，因此它在 30 秒观测时间内仅能发射和接收 1500 个电流脉冲和二次场信号，其叠加后的信噪比要比 PROTEM 低 10 倍；如果要达到与 PROTEM 同样的信噪比，其观测时间就要长 10 倍，即 300 秒。

然而，从另一角度出发，如果发射的电流脉冲宽度小，则观测的二次场中将会混进脉冲前沿的影响，使观测的二次场发生畸变。因此必须设计合理的脉冲宽度：

设畸变因子为 D_f，则

$$D_f = \frac{\varepsilon_2'(t)}{\varepsilon_2(t)} \qquad [7]$$

式中 $\varepsilon'_2(t)$ 为实现观测的二次场值，$\varepsilon_2(t)$ 为单脉冲阶跃下的二次场理论响应值。现对不同的导电介质条件分析如下：

(1) 三维导电体：

此时二次场的理论响应值为：

$$\varepsilon_2(t) = \frac{A}{\tau e^{-\frac{t}{\tau}}} \qquad [8]$$

A 为常量，t 为观测时间，$\tau=\sigma\mu_0 a^2/\pi^2$ 为时间常数。经计算：

$$D_f = \frac{\varepsilon_2'(t)}{\varepsilon_2(t)} = 1 - e^{-\frac{d}{\tau}} \qquad [9]$$

$d=T/4$，为电流脉冲宽度。

D_f 越接近 1，畸变影响越小，当 $D_f \geq 0.9$ 时可视为无影响。从式[9]可见，D_f 值只与 τ/d 有关，而与观测时间无关，

τ/d 越大，D_f 越小，畸变响应越明显。为了降低畸变影响，必须加大脉冲宽度 d，即降低发射频率或重复率。

有工业价值的局部导体（如硫化物矿体）的时间常数 τ 在 2ms-20ms 之间，此时从公式[9]可见,要使 $D_f \geq 0.9$，则必须 $\tau/d \leq 0.43$，d=4.65ms-46.5ms 之间。PROTEM 发射的电流脉冲宽度为 4.2m-4，000ms，可见满足 $D_f \geq 0.9$，即无畸变影响的要求。

(2) 水平导电薄板：

$$D_f = \frac{\varepsilon_2'(t)}{\varepsilon_2(t)} = 1-(1+\frac{d}{t})^{-4} \qquad [10]$$

可见此时 D_f 只与 t/d 有关而与电性参数无关。若取 D_f =0.9 时，则相应的 t/d=1.28。由于发射电流脉冲的占空比为 1，因此 t/d=1.28 实际上不成立，所以水平导电薄板不受脉冲宽度影响。

(3) 导电半空间：

$$D_f = \frac{\varepsilon_2'(t)}{\varepsilon_2(t)} = 1-(1+\frac{d}{t})^{-\frac{5}{2}} \qquad [11]$$

此时要满足 D_f=0.9，则对应的 $t/d \leq 0.66$，显然 PROTEM 满足这一条件。

图 5 是脉冲宽度与畸变因子 D_f 的关系曲线，可见 τ/d 和 t/d 越小 D_f 越接近或大于 0.9[2]。

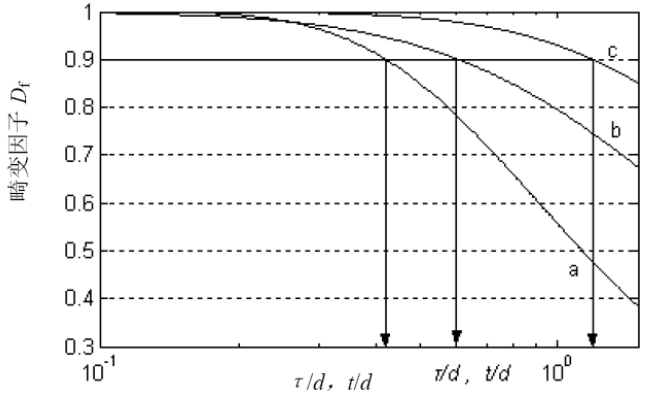


图 5 脉冲宽度与畸变引子 D_f 的关系曲线；a-三维导电体情况下的 D_f～τ/d 曲线； b-导电半空间情况下的 D_f～t/d 曲线；c－水平薄板情况下的 D_f～t/d 曲线

2. PROTEM 瞬变电磁仪的接收系统

接收系统包括接受线圈和接收机，它用来接收和记录发射电流脉冲信号在地下介质中产生的二次场并实时显示二次场曲线，以监测记录质量。由于二次场幅度可从早期的 $n*10^5\mu V$ 变到晚期的 $0.n\mu V$[1]，变化幅度达 6 个数量级以上，而最小信号幅度仅 $0.n\mu V$。要不失真接收这种二次场信号，对记录系统的要求是十分严格的。首先它必须具有高达 24 位的信号分辨率（包括一个符号位）和高达２９位的系统动态范围以及很强的噪声抑制功能。

PROTEM 瞬变电磁仪的接收系统完全满足了上述要求[3]：

1) 接收线圈：有三分量同时接收感应线圈，三分量同时接收磁通门传感器，三分量同时接收井中线圈，三分量顺序接收感应线圈和煤矿井下接收线圈。

2) 三分量数字接收机（图 6）

(1) PROTEM 接收机的信号分辨率为２４位，系统动态范围达２９位。为了保证信号分辨率的最小位是噪声位，接收系统具有很强的抗干扰能力，在发射频率的选择上远离了工频的谐波分量，并有很强工频抑制能力。PROTEM 接收机的动态范围高达 174dB（29 位），其中瞬时动态范围 138dB，前放最大增益 36dB。

(2) PROTEM 接收机具有“聪明”叠加功能，它可根据测区的干扰水平，选择最佳的叠加次数，以提高信噪比。为了提高对地下目标体的分辨能力，其最高发射和接收频率达 237.5Hz；为了加大勘探深度，其最低发射和接收频率低至 0.25Hz。两者覆盖范围达 1000 倍。

(3) 为了不遗漏二次场的变化细节，PROTEM 接收机具有 30 个观测道。为了获取地下三维体的全部信息 PROTEM 接收机可以同时观测二次场的三个分量 dB_Z/dt，dB_X/dt，dB_Y/dt。

(4) PROTEM 接收机实时显示二次场观测结果，即瞬变场曲线，以监控观测质量；自动显示关断时间，以提高数据反演的准确性。

(5) PROTEN 接收机是通用型接收机，它可以与 TEM47，TEM47HP，TEM57-MK2，TEM67 和加强型 TEM67 发射机相匹配。

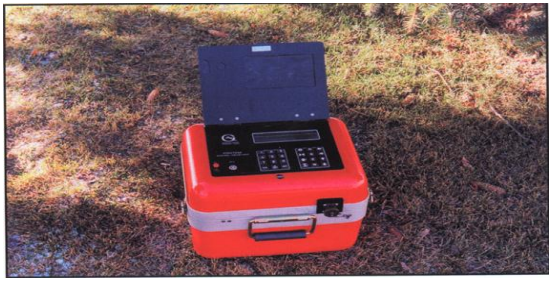


图 6 PROTEM 三分量数字接收机

四、 PROTEM 瞬变电磁仪的工作条件

1. 轻便：PROTEN 接收机重 15Kg，TEM47 发射机 5.3Kg，TEM57-MK2 15Kg，TEM67 发射机 27Kg。TEM57-MK2 既可以发电机供电，也可以 12V 电瓶供电，便于在地形复杂的山区工作
2. 适合不同的野外观测装置：瞬变电磁法的野外观测装置有重叠装置，中心装置，偶极装置和大定回线装置等。前三者装置常用于浅层勘探和中层勘探，大定回线装置主要用于中深层和深层勘探。由于 PROTEM 瞬变电磁仪的发射机和接收机是相互分离的，所以除了重叠装置外，它适合其它任何野外装置。如果接收机和发射机是一体化的，除了重叠装置外，采用其它的野外装置都会带进不应有的干扰。
3. 工作温度宽，防潮、防水：PROTEM 瞬变电磁仪的工作温度范围为-40^0- $+60^0$，防水、防潮，它可以在任何季节、任何天气条件下正常工作。
4. 稳定、重复率高：目前在国内工作的近 40 套 PROTEM 瞬变电磁仪很少出现故障，即使有些故障也能及时排除。PROTEM 瞬变电磁仪的观测重复性达 100%。

五、 应用实例

下面给出 PROTEM 瞬变电磁仪的几个应用实例。

实例 1：地质结构和活断层探测

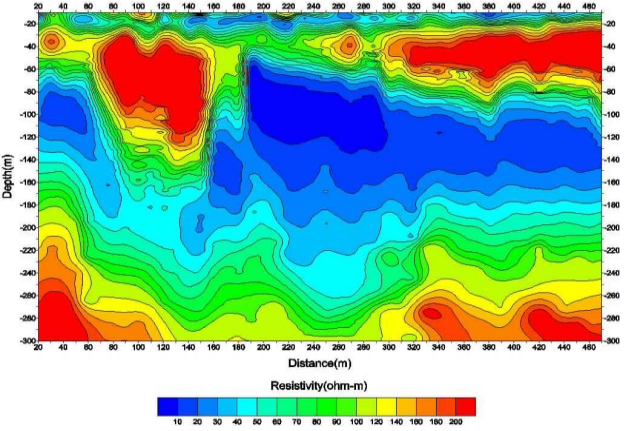


图 7 福州市郊八一水库地下电性结构

（根据中国科学院地质和地球物理研究所 白登海资料）

实例 2：金矿探测

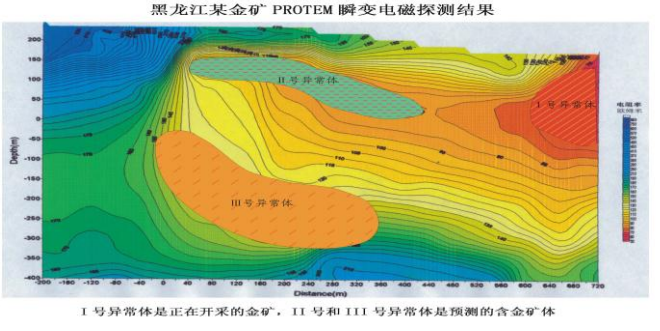


图 8 黑龙江某金矿 PROTEM 瞬变电磁探测结果（Ⅰ，Ⅱ和Ⅲ号异常体是预测的含金矿体）

实例 3：有色金属矿探测实例

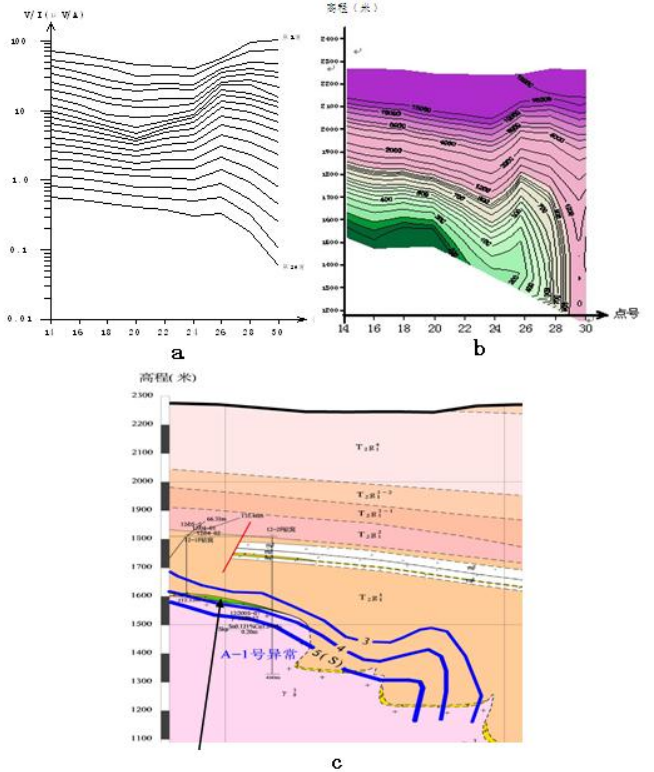


图 9 图 a 瞬变电磁响应曲线，图 b 反演的电阻率剖面，图 c 是根据图 a，b 推断的地质断面

（粗兰线表示锡矿带，它已被钻探证实，根据云南省有色地质调查院资料）

实例 4：煤层地质构造探测

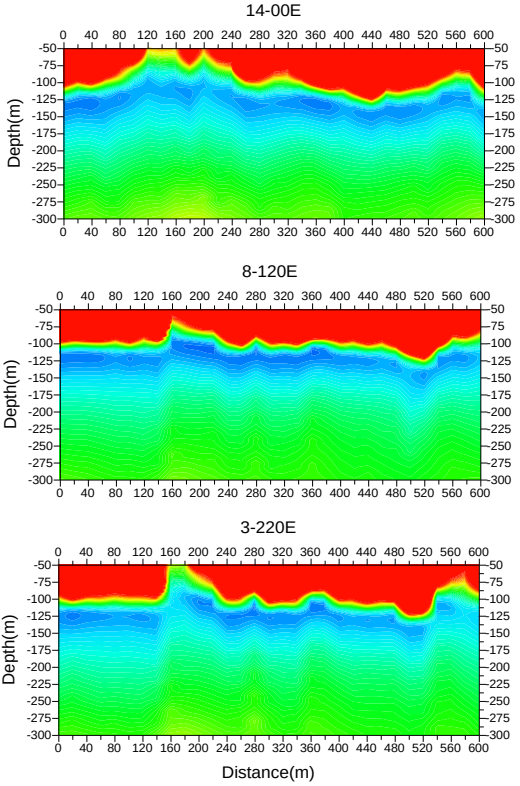
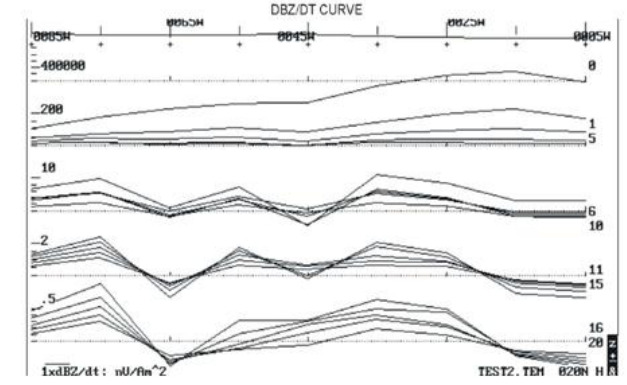


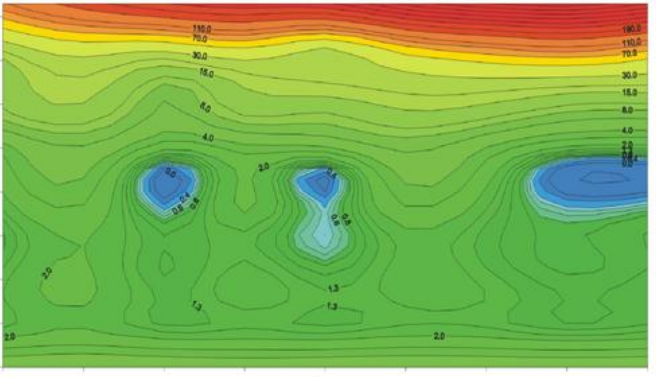
图 10 山西晋城某煤矿煤层地质构造的探测剖面

（根据白登海等资料）

实例 5：地下空洞的探测



a



b

图 11 澳大利亚西部库尔嘎底地区地下空洞

PROTEM 测量结果；

图 a 瞬变场响应曲线；图 b 反演的电阻率剖面

（图中蓝色为地下采空区，根据赵国泽等资料）

参考文献

[1] 牛之琏：时间域电磁法原理，中南工业大学出版社，1992.

[2] 嵇艳鞠：浅层高分辨率全程瞬变电磁系统中全程二次场提取技术研究，博士论文，吉林大学 2004.

[3] 北京欧华联科技公司：PROTEM 瞬变电磁仪，www.ouhualian.com, 2007.

频率域电磁法仪的最新进展

The New Development of Frequency Domain Electromagnetometer

刘国栋 Liu Guodong

摘要

从上世纪 50 年代末第一台 MT 仪在前苏联问世至今已 50 多年。在此阶段，世界很多国家包括美国、加拿大、德国、法国、瑞典、中国等都研发了 MT 仪或频率域电磁系统。最近德国 Metronix 公司新研制成功的 GMS-07 是频率域电磁仪的最新代表。本文简要的介绍了 GMS-07 的电路原理，传感器的特点和开放性的软件概念。

Abstract

It has been more than 50 years that the first MT came into the world in USSR in late 1950s. During this period, many countries including the Germany， USA, Canada, France, Sweden and China have developed MT or Frequency Domain Electromagnetic System. The GMS-07 which has been successfully developed by Germany recently is the representation of Frequency Domain Electromagnetometer up to the minute. This paper introduced the circuitous philosophy of GMS-07 in brief as well as features of the sensor and the open software concept.

一、 沿革

电磁法分为频率域电磁法和时间域电磁法。以天然场做场源的频率域电磁法包括标准的大地电磁法（MT），远参道法（RFMT），电磁阵列法（EMAP），带远参道的电磁阵列法，

以人工场做场源的声频大地电磁法（CSAMT）和频率域测深法（FDS）。

众所周知，频率域电磁法的基本原理是以平面波入射的不同频率的天然电磁场向地下传播过程中，在地球介质中感生出二次电磁场，通过在地面观测入射的和感生的不同频率的电磁场信号 Hx、Hy、Hz、Ex，Ey，求解地下电阻率分布及有关电性结构参数。由于电磁波的穿透深度 $P=0.5\sqrt{\rho/f}$，所以勘探深度随电磁波频率的降低而加深。由于地下介质通常都是非均匀的二维体或三维体，电阻率为张量。为了求取不同深度的张量阻抗，需要观测不同频率的、具有不同极化类型的电磁场分量。由于可控源声频大地电磁法和频域测深法，利用的人工发射源无法发射不同极化类型的电磁波，所以只能适应对一维均匀结构的探测,但是人工场源可以获得高信噪比的观测数据。

天然电磁场活动的频率范围为 10KHz—4*10^{-4} 秒，在磁平静日时的活动谱为 $10^{-5}nT\sqrt{Hz}$ $-10nT\sqrt{Hz}$，磁暴期间活动谱可增加十至数十倍。人工场源发射的电磁波频率可扩展至 250KHz。因此一套全频段的频率域电磁法仪，其覆盖的频率范围应为 250KHz-4*10^{-4} 秒，动态范围应大于 130dB，磁场传感器的最低噪声不大于 $10^{-6}nT/\sqrt{Hz}$。

上世纪 50 年代提出频率域大地电磁法，50 年代末前苏联出现首个 MT 仪，它用悬丝式磁场传感器，通过光电倍增管转换成电信号，再通过检流计打印在感光照片上。它频带上限为 0.1Hz，记录仪的动态范围约 20dB。上世纪 60 年代美国采用感应式磁场传感器和模拟磁带记录仪，其频带上限达 100Hz，最高灵敏度 0.01nT，动态范围 40dB 以上。70 年代出现瞬时浮点

放大技术和以磁带为记录介质的数字记录仪，动态范围达60—80dB。至此，MT 仪仍需大型仪器车装载，随后出现固体存储器，使 MT 仪的体积大大缩小。80 年代初，德国 Metronix 公司和加拿大凤凰公司推出车载大地电磁现场实时处理系统，频带范围扩展至 384Hz-4096 秒,法国推出以超导磁力仪做磁场传感器的 MT 系统。由于计算机水平的快速提高和新的 Δ-ΣA/D 转换器技术的出现，80 年代末车载 MT 实时处理系统被便携式 MT 实时处理系统所替代。此时的代表产品有加拿大凤凰公司的 V5，德国 Metronix 公司的 MMS-05 以及美国公司的 MT1。MMS-05 的频带范围扩展至 8192Hz-4096 秒，动态范围达 120dB。上世纪 90 年代由于压制局部噪声的远参数道方法和滤除静位移的 EMAP 方法的提出，以及 GPS 同步技术的采用，频率域的大地电磁仪由单道系统发展为多台或网络系统，如 GMS-06 和 V5 2000。这使得 MT 的数据质量和应用效果得到显著提高。

进入 21 世纪以来，频率域电磁仪向两个方向发展。一个方向是把原有的频率域电磁法仪，时间域电磁法仪和直流电法仪组合成多功能电磁法仪，例如凤凰公司的 V8 和 Zonge 公司的 GDP-32；另一个方面是沿着专业道路向更高层次发展，例如 Metronix 公司最新推出的 GMS-07 频率域综合电磁法仪。本文仅就 GMS-07 做一介绍，关于 PROTEM 瞬变电磁仪可参阅另文。

二、 GSM-07 频率域综合电磁法仪

1. 功能

GSM-07 综合电磁法仪也叫 GSM-07 综合电磁观测系统，它是德国 Metronix 公司在研发和生产电磁法仪近 30 年的经验基础上，最近开发出来的最新一代电磁法仪。

GSM-07 可实现如下功能：

- 标准的 MT 和 AMT 观测
- 远参考道观测
- 电磁阵列法 EMAP 观测
- 可控源 CSAMT 和多道可控源 CSEMM 观测
- 天然源和可控源联合观测，类似 EH4 功能

2. 独特优点：

GSM-07 与目前世界上的频率域电磁仪相比，有如下独特优点：

1) 主机 ADU-07 的频带宽达 250KHz—DC，覆盖了从地表至上地幔勘探中的全频段电磁波范围。图 1 是主机 ADU-07 外观图。



图 1：主机 ADU-07 外观图

2) 数据采集通道多达 10 个，它们可分别切换为：

① 10 个高频道：带宽 250KHz—1Hz，可扩展至 0.01Hz，对

应的勘探深度 0m—3000m；

② 10 个低频道：带宽 500Hz—DC，对应的勘探深度 300m—上地幔内部；

③ 10 个高频和低频混合配置：带宽 250KHz—DC。

- 在全部配置高频道时，其中 2 个高频道为磁道，8 个高频道为电道，于是 1 台 GSM-07 可以同时进行 4 个测点的高频 MT 测量任务或 9 个测点的 CSAMT 任务（一个通道为磁道，另外 9 个通道为与磁道垂直的电道）。工作效率比标准大地电磁仪提高 4 倍，比标准 CSAMT 仪提高 9 倍。
- 在全部配置低频道时，应用效果同上，但勘探深度在 300m 以下。
- 在高、低频混合配置时，其中 3 个高频道配置感应式磁场传感器，3 个低频道配置磁通门磁场传感器（频响 20 秒—10 万秒），另外四道分别配置两个高频电道和两个低频电道。这种配置的勘探深度为 0m—上地幔内部。

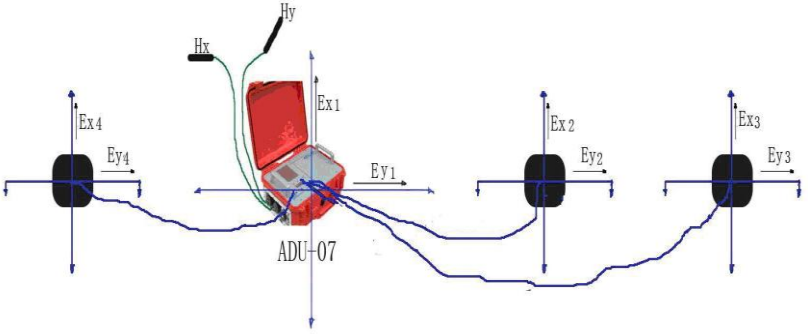


图 2：一台 ADU-07 同时完成四个测点观测

3) 每个通道有两个不同类型的 24 位 A/D 转换器，保证在全频段内都有最高的信号分辨率，以有效的分辨天然电磁场的最小变化。
4) 动态范围 > 130dB，涵盖了全部天然电磁场的变动范围，包括强磁暴。
5) 包括传感器在内的自动检测，自动校正极化电位，自动显示故障。
6) 用户可编程 FIR 滤波器（高通、低通、滤波、带通），以滤除人文噪声干扰。
7) 可组成多达 32 个 ADU-07 的网络观测系统，由高精度 GPS 或网络同步。
8) 可通过局域网，Internet 网，优盘等安装软件系统和测量参数，控制仪器操作和下载数据。遥控，无人执守。
9) 主机 ADU—07 内置 4G 闪存（可扩展），实时数据处理、显示和存储，无需笔记本电脑。
10) 主机重 8Kg，功耗 3—5W（低频），15W（高频），工作温度-40℃—+70℃，防潮，防水，防震。

3. 线路原理

1）ADU-07 方框图

下图是 ADU-07 方框图。数据采集通道 1—10 可任意与磁场传感器和电场传感器连接。来自磁场传感器和电场传感器的模拟信号，首先进入高频通路 HF 或低频通路 LF（统称 ADC 板）进行放大、滤波、标定、极化电位补偿等一系列过程，形成时间序列并存储。时间序列经 24 位 A/D 转换后变为数字信号，并对其进行一系列计算和处理后，获得各种功率谱以及反映地下电性结构的各种电性参数和视电阻率及阻抗相位曲线。

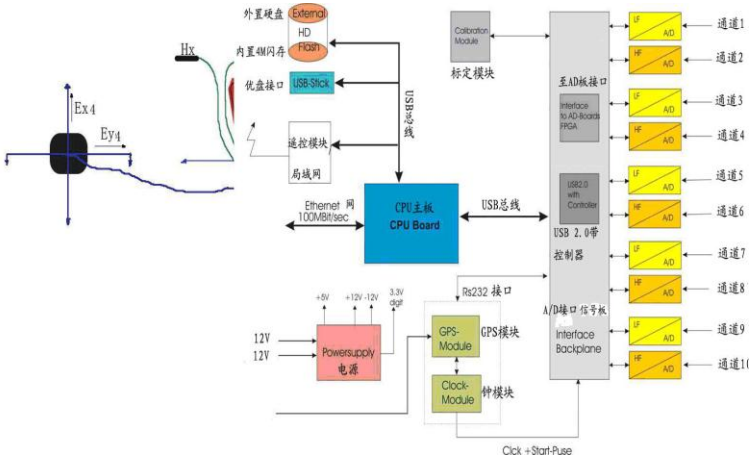


图 3：ADU-07 方框图

主机 ADU-07 由主板 CPU 控制，它根据预先设置的工作参数，通过 USB 总线设置 AD 板的频带、增益、系统标定、极化补偿、A/D 运行、数据计算、处理、存储、显示、下载等等。可通过遥控，局域网，优盘等给 CPU 安装软件系统，设置测点的工作参数。

2）ADC 板线路原理图



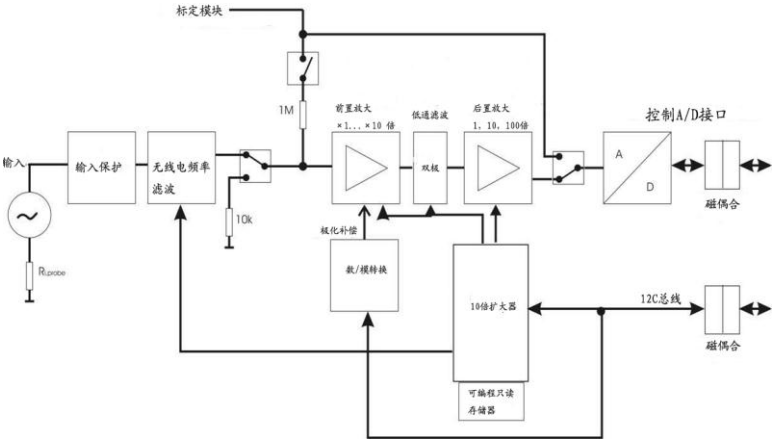


图 4 是低频 ADC 线路原理图

来自于不极化电极和磁场传感器的电磁场信号进入 ADC 板的输入端，经由无线电频率滤波后进行第一次放大（1—10 倍），然后由可编程 FIR 滤波器滤除人文电磁噪声后再进行第二次放大（1，10，100），最后馈电给 24 位 A/D 转换器。标定和极化补偿功能也包括在 ADC 板之中。所有上述过程和工作参数选择均由 CPU 通过总线控制。ADC 板的模拟线路和数字线路均有电流去耦，以防止相互干扰。

低频 ADC 板的频带为 250Hz—DC，采样率 1Hz 和 4000Hz，噪声 $14nv/\sqrt{Hz}$ ，功耗 0.25W。高频 ADC 板的频带 250KHz—1Hz，如果关掉 1Hz 高通滤波器，其低频可扩展至 0.01Hz，采样率 10KHz 和 600KHz，噪声 $10nV/\sqrt{Hz}$ 。由于 ADC 板中的放大器采用了独特的斩波稳幅放大器，其噪声比无斩波放大器低 5—100 倍（图 5）。

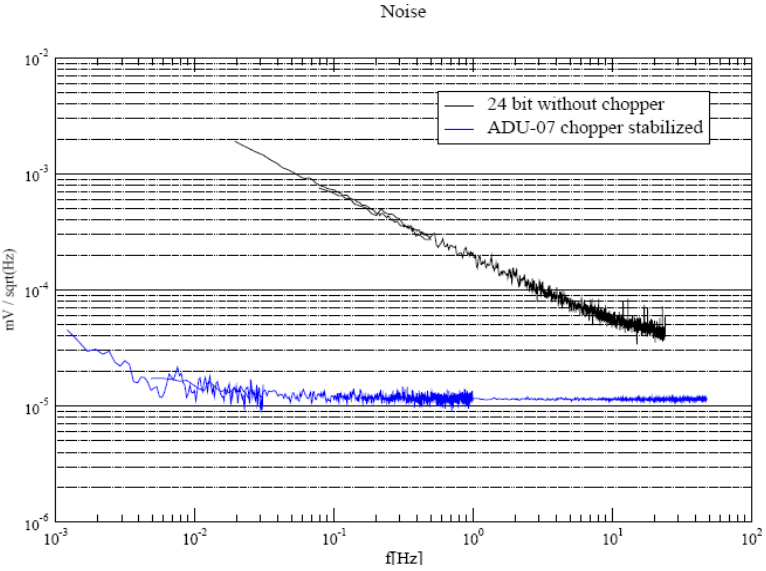


图 5：斩波稳度放大器与无斩波器放大器的噪声比较

4. 开放性软件系统：

只有优越的硬件功能是不够的，必须要有相适应的、先进的软件系统。考虑到现今电磁测量的复杂性，Metronix 公司决定将 ADU07 中的软件模块（CPU 板）分成若干个开放性模块，以便用户控制作业流程，如图 3。

1) 硬件隔离层 HAL：这是 Metronix 特有的 ADU 硬件 C/C++ 应用程序接口。该接口把硬件部分与管理性软件分离开，这样就便于厂商根据新的发展或用户根据自身需求，随时修改和增补新的软件功能，而又不至于影响硬件的正常运行，反之亦然。

2) 主控程序 MCP：MCP 是软件主体，它经由 C/C++应用程序接口与 HAL 通讯，以设置硬件状态、控制硬件运行。

3) 软件隔离层 SAL：数据库内所有登录动作均为 XML 格式（可扩展标记语言）;用户发送XML格式数据到数据库(即设置测量参数的过程)，之后由主控程序来解析这些信息。可以通过 TCP 端口 3306 访问数据库，也可以使用其他工具访问，如 Metronix 为用户专门提供的可与主控程序直接联系的 phpMyAdmin 功能；Metronix 还为用户提供了易于扩展的与数据库接口的 PHP 网。最终用户可以用 ssh, sftp 和 SAMBA 共享驱动使 ADU07 作为文件服务器。

XML Concept 可扩展标记语言概念

XML (eXtensible Markup Language)——可扩展标记语言，可读、可操作、可检测格式是否正确，无需重写软件即可对程序进行扩展。可以用 Metronix 的 PHP 接口轻松创建文件，且没有强制性要求。XML 文件格式包括主机、传感器和标定文件的所有信息，例如，如果在文件参数设置中忘记传感器编号或编号设置错误，可通过 XML 文件对进行校正。

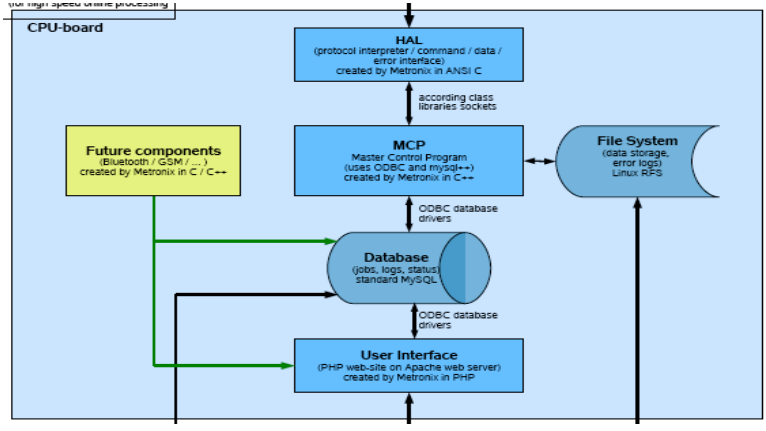


图 6：开放性软件系统

5. 磁场传感器

1）陆上传感器

众所周知，频率域电磁测深仪的核心部分是磁场传感器，因为天然电磁场的频率范围宽达 8 个数量极，最小活动幅度仅有千分之几 nT。要想用一个传感器接收如此频宽和如此低的天然电磁场信号是十分困难的，因此多数频率域电磁仪都采用两种频带响应的感应式磁场传感器来接收天然磁场信号。

Metronix 公司在磁场传感器的研发方面一直处于领先地位。在过去 30 年来，它研发 7 种不同型号的感应磁场传感器，包括 MMS-02，MMS-03 ，MMS-04，MMS-05，FMS-06，FMS-07 和 SHFT-02：

- FMS-06 频带 10KHz-10000 秒达 8 个数量极，基本覆盖了用于地球物理勘探和研究的电磁波频率范围；
- FMS-07 频带 50KHz-1000 秒，它完全满足各种应用地球物理的要求；
- SHFT-02 是微型超高频三轴感应式磁场传感器，其频率范围 1-250KHz，结合高频发射机可进行 CSEMM/Enviromt 勘探，也可进行静位移校正；
- 如果对地壳至到上地幔内部的电性结构进行探测研究，可以采用 FGS-01 三分量磁通门磁力仪。见图 7

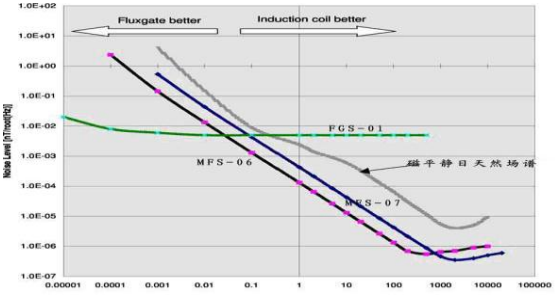


图 7：Metronix 公司的不同类型磁场传感器频带范围，噪声频及其与磁平静时天然电磁场谱的对比。

从图可见，Metronix 的磁场传感器 MFS-06 的频带与天然电磁场活动频带基本一致，其噪声谱比磁平静日时的天然场谱低 10-100 倍；MFS-07 的噪声谱比磁平静日时的天然场谱低 6-100 倍，但其高频响应扩展至 50KHz，可以获得近地表的电性结构。

Metronix 的感应式磁场传感器内置可控的斩波负反馈放大器，显著地扩展了频带，降低了输出噪声，消除了温漂和时漂。由于采用高度绝缘的细条状高导磁材料做磁芯，使涡流降至极低，灵敏度显著提高。由于计算机计算最合理的线圈匝号，使整个传感器各项技术指标达到了最佳。

2）水下传感器

Metronix 与挪威 EMGS 合作，研制成了一种水下感应式磁场传感器 MFS-08U（图 8）。它可在水深 3000m 工作，其内置的前放增益动态高达 200dB。用于水下 EM/MT 观测任务。



图 8：MFS-08 水下磁场传感器

地下环境检测与监测的现代地球物理方法和仪器设备

刘国栋
北京欧华联科技有限责任公司

一、前言：

地下环境检测与监测涉及很多内容。本文主要介绍，垃圾填埋场渗漏，地下储油库渗漏和污水管渗漏所导致的对地下水和地下环境污染，检测和监测的地球物理方法及其仪器设备。

地球物理方法和仪器设备种类繁多，他们各自的探测目标和应用领域很不相同，这主要取决于探测目标所形成的地球物理场性质。上述污染体的渗漏直接导致地下电性参数（电阻率及相关参数）的改变，因此只有电法和电磁法才能够检测或监视地下电性的变化，从而确定渗漏区（点）、污染范围及其扩散情况。

目前最流行的电法是高密度电法，最流行的电磁法是时间电磁法（瞬变电磁法）频率域电磁法（大地电磁法和可控源法）。虽然 地质雷达也是一种流行的电磁方法,但它只能给出地下电性界面（体）形态，而不能给出有关电性值（电阻率或电导率）的信息，同时它的探测深度很浅，所以不太适合地下环境探测，故在此不予介绍。本文就这上述方法及其在环境检测和监测中的应用及仪器设备等做一简要介绍。如果您需要了解更多信息，请登录我们的网页：www.ouhualian.com，或直接联系。

二、 用于环境监测的高密度电法工作原理和RESECSII高密度电法仪

1. 高密度电法的简单原理

高密度电法是通过观测与研究人工建立的地下电流场的分布规律以确定地下电性异常体的分布范围、埋深及其电导率值。由于高密度电法是通过向地下注入快速脉冲电流，并对地下电流场分布进行叠加观测，所以其观测精度和分辨率极高。

地表至100-200m深度范围内，除了正常的岩层和土壤外，还夹杂有各类人为堆积物和污染体，如人工填土，建筑废弃物，空洞，垃圾堆以及各种渗漏物所导致的地下污染等。不同的岩层、土壤和各种人为堆积物、垃圾堆以及污染体等，都有不同的电性（电阻率或电导率）。高密度电法通过供电电极**A B**，向地下发射脉冲电流**I**，此电流场通过地下不同电性物质时形成不同的电位差△**V**，并由**M N**测量电极测量这些电位差值的分布（此电位差分布与地下物质的电导率呈函数关系),从而划分出地下的各种物质分布，包括埋深、形状、体积以及电导率值等。如图1所示：

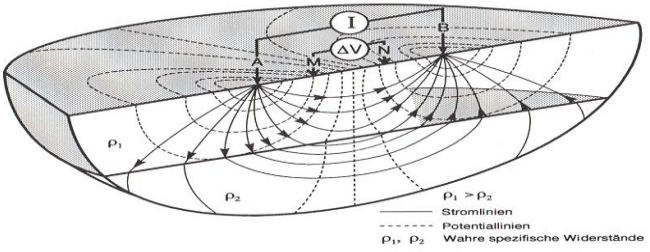


图1

图1是最简单的工作方式。但在实际测量中要不断的改变供电电极**A B**的长度，测量电极**M N**的长度和位置，并进行叠加

观测，以便测量不同深度的电位差值和提高分辨率和观测精度（图2）。目前世界上广泛应用高密度电法对地下电性体分布进行精密测量。

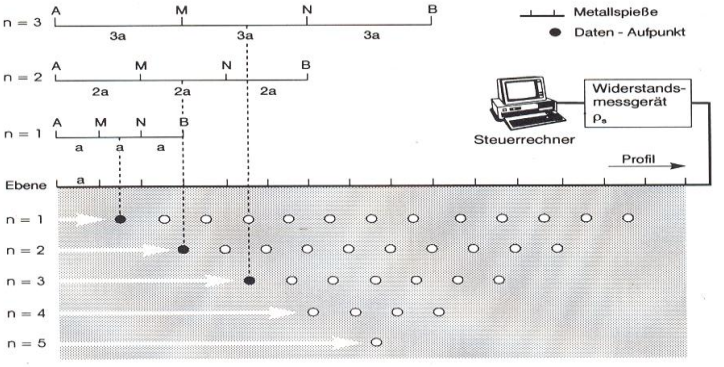


图2

在地表同时布设数十至数百个电极（取决于最大勘探深度）。在测量过程中供电电极**A B**和测量电极**M N**的长度和位置以及注射脉冲电流的强度和频率，由主机自动控制，自动改变。

2. RESECSII高密度电法仪及其主要优点

RESECSII高密度电法是德国DMT公司RESECS电法仪系列中的最新版本（图3）。其主要优点有：

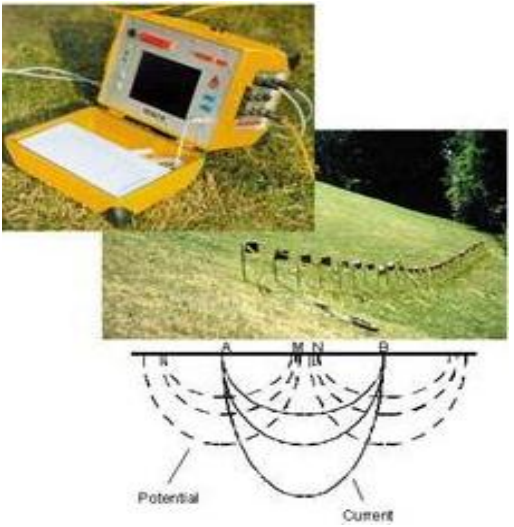


图3

- 960个电极连接在一条7芯电缆上。
- 8个电位道，一个电流道，可做三维和井中—地面—水域联合观测。
- 高功率注射和高分辨率，最大发射电流2.5A,分辨率优于30nV级。
- 具有完善的滤波功能，各道之间高度绝缘、防水、防潮、轻便、稳定。
- 自动选择多达18种不同的测量装置（包括+、-）；以适应不同的探测目标，也可以自定义测量装置。
- PC机自动控制数据采集，实时计算和显示测量的电位差值和注入的电流值、自然电位值、视电阻率、复数电阻率、极化率、谱阻抗、相位差以及观测结果的标准偏差值。
- 实时显示注射电流和测量电位差的示波图形、伪断面和伪

面积断面图，以利于现场监视观测质量和结果。

- 实时显示失效道位置，可随时或在排列滚动前对失效道进行补测，以全面保证观测质量。
- 设有特殊的监测模式，对地下电阻率变化进行实时或定时监测，用以监视地下污染源和堤坝渗漏的扩展情况。

3. RESECSII高密度电法仪在环境监测中的优越性

- 能确切地给出地下污染体的埋深、形状和大小。
- 能精确的找出地表污染源,例如垃圾填埋场和其他污染源的泄漏点和泄露通道。
- 能实时或定时监测地下污染体的扩散情况。
- 能精确的给出地下污染体的真电导率值和复数电阻率值，以及帮助确定污染体的性质。
- 能精确给出电性异常体的极化率值（IP)。
- RESECSII高密度电法仪的技术指标是独一无二的。

4. RESECSII高密度电法仪的测量内容

- A B极发射极电流强度和波形以及M N极测量的电位差值和波形
- 观测剖面下方一系列网格点上的观测视电阻率和反演后的真电阻率值
- 观测的视电阻率值之标准偏差值
- 视电阻率剖面分布图（伪断面图）和反演后的真电阻率分布图，复数电阻率值（包括真电阻率值和相位值)。
- IP值、充电率。
- 地下电阻率值随时间的变化。

5. RESECS高密度电法仪在环境监测中的应用实例

1）确定垃圾堆污染范围

2002年11月国家煤田地质总局物探研究院，在验收RESECS高密度电法仪时，沿涿州市郊拒马河岸边做了一条验收剖面，观测结果见图4。

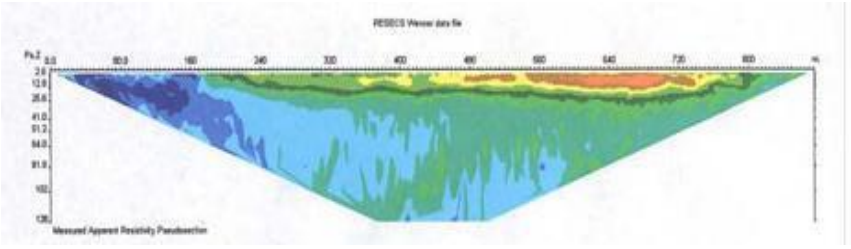


图4a

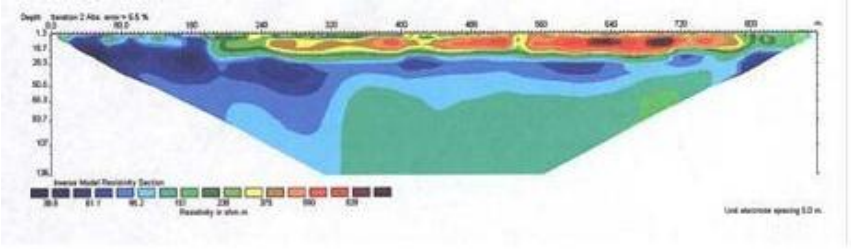


图4b

拒马河在该处很宽。在长时间内岸边堆积了大量生活垃圾、成了垃圾场。由于生活垃圾中含有大量可溶性盐类和各种金属元素，因此形成了低阻—高导体。这些可溶性盐类和金属元素溶于雨水之中，并与雨水一起向地下渗漏、扩散，对地下环境和地下水造成严重污染。

图4a是沿上述观测剖面的视电阻率断面图（伪断面），是现场实时演示的结果；图4b是反演的真电阻率剖面图。从图可

见，剖面左端为低阻—高导体（深蓝色），它位于生活垃圾堆近旁；随着生活堆中的可溶盐和金属元素向地下渗透，该低阻—高导体向拒马河下游方向（剖面右侧）扩散。

2）确定垃圾堆范围及渗漏情况

图5是2003年在福州市郊八一水库附近，用SUMMIT高密度电法圈定的生活垃圾堆范围和渗漏情况。

图5a是现场实时显示的视电阻率断面图，图5b是反演后的真电阻率断面图。可见，图中右侧的低阻—高导体（蓝色）是生活垃圾推的分布形状、体积和深度。由于该生活垃圾堆正好位于致密的高阻基底（红色）之上，所以未发现向下渗漏情况。

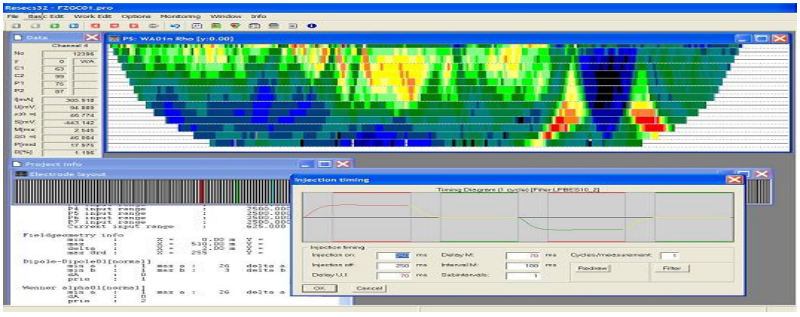


图5a

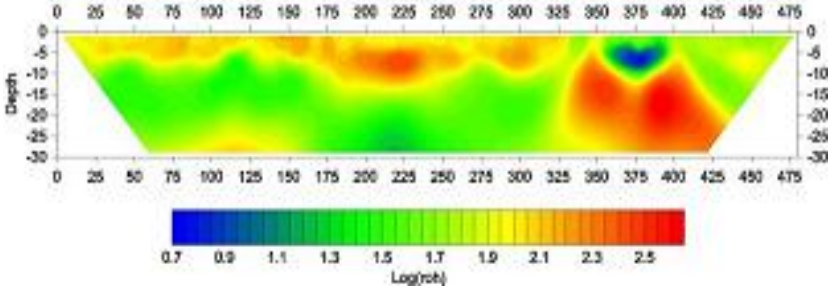


图5b

3）确定油库渗油对地下造成的污染情况

法国的Strasvourg-Entzheim地区的浅部地层分布式0-1.5米为松散层，1.5—8.5米为沙砾岩层，8.5—10米未砂质粘土层（隔水层），10米以下为含水的粘土质砂岩。1957年在Strasvourg-Entzheim机场附近建了一个军用地下储油库。由于长时期运行，该储油库底部出现泄漏。泄漏的煤油穿过沙砾层一直渗透到隔水的沙质粘土层之上。

由于沙砾岩层是高阻层，煤油也是高阻的，因此很难用通常的方法发现被煤油污染的地区，为了解决这一难题，，1999年10月DMT公司利用Summit高密度电法仪,采用井中和地面三维联合观测，计算每个测点下的电阻率和相位值，即复数电阻率值的方法，获得了极好的观测结果。野外观测布置如图6所示：

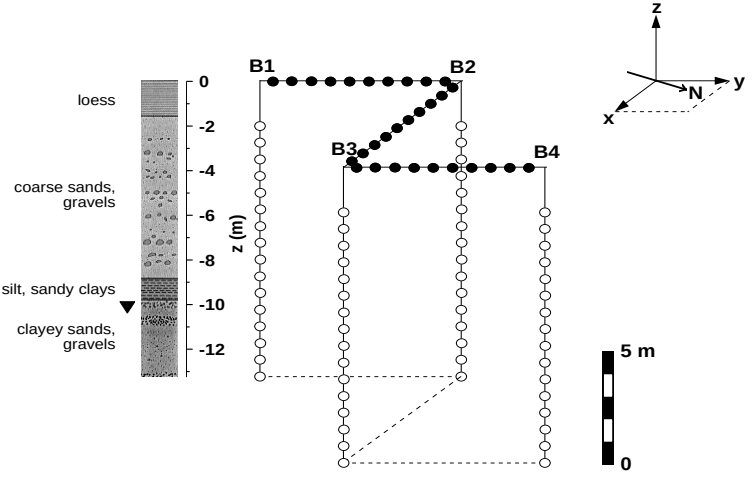


图6

图6：井中（B1、B2、B3、B4）和地面三维联合观测布置。黑园点为地面电极，白圆圈为井中电极。左边的地质柱状图。

图7是观测区内未被污染的钻孔（B2）和已被污染的钻孔（B7）之间的观测结果对比

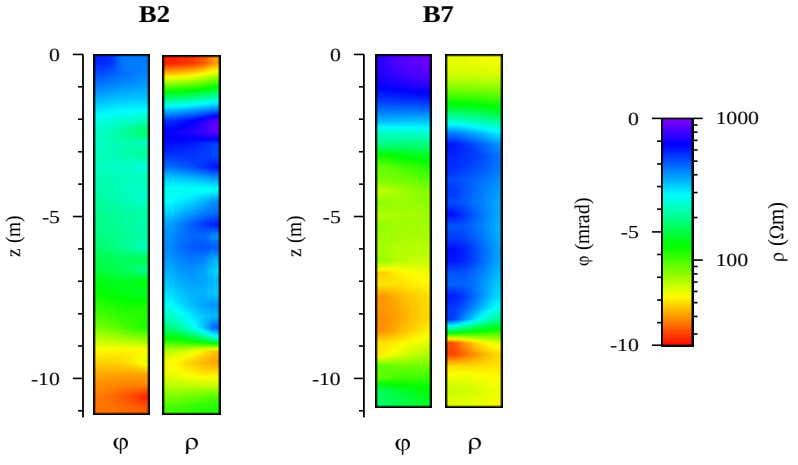


图7

可见，两者之间的电阻率值（ρ）没有显著差别，但两者之间的相位值（ϕ）却明显不同。例如，在未被污染的钻孔（B2）中相位值随着深度的变化比较缓慢，从地表的0弧度、向深处（10米左右）逐渐增加到-10弧度左右；但在被污染的钻孔（B7）中，在9米深的砂质粘土层之上相位值直接增加到-9度弧度。可见，虽然电阻率无法区分污染区和未被污染区，但相位值便可以将两者清楚的区分开来。

图8是钻孔B4、B5、B6和B7的观测结果。从电阻率图中（上图）看不出有什么区别，但从相位图中（下图）可以判断，钻孔（B4—B5）之间要比钻孔B5—B6之间和钻孔B6—B7之间的污染程度轻微。

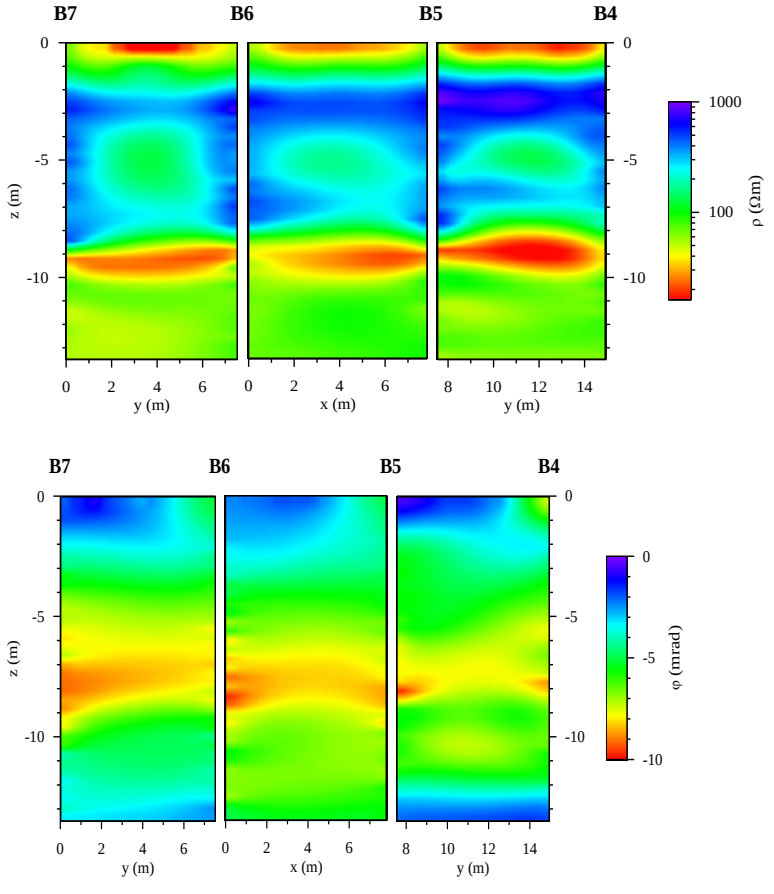


图8

4）RESECS高密度电法仪对城市地下空洞的确定

城市地下空洞往往也是污染源之一，是城市安全的重大隐患。图9是用RESECS高密度电法仪对德国乌普塔市地下空洞的探测结果。左图是RESECS高密度电法仪沿城市街道的布设情况，

右图是探测结果，其中的高阻体（银元宝状）是地下空洞所在。

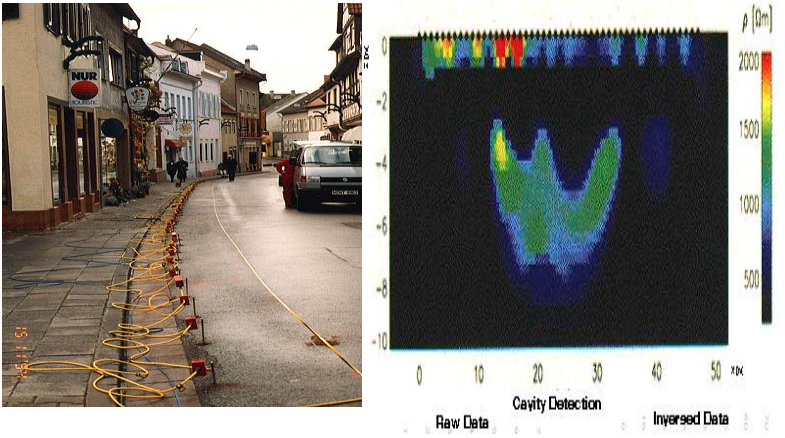


图9

RESECS 高密度电法仪，尤其是它的最新版本 RESECSII 是目前世界上功能最多，技术指标最先进，抗干扰能力最强，工作最稳定，软件系统最完善的高密度电法仪。目前国内已有多家购买了 RESECS 或 RESECSII 高密度电法仪。

三、PROTEM47 瞬变电磁仪和 EM 型大地电导率仪在环境监测中的应用

1、瞬变电磁法简单原理

在地面上发射一系列不同频率的电磁脉冲,这些电磁脉冲在地下产生感应电流并随着时间向地下深处和四周扩散,俗称“烟圈”（图 10）。

当扩散的“烟圈”碰到电性界面或电性异常体时，“烟圈”

就会改变，因此在地面观测“烟圈”随时间的变化过程，就能确定出地下电性界面和电性异常体的埋深、形状、大小及其电性参数值。

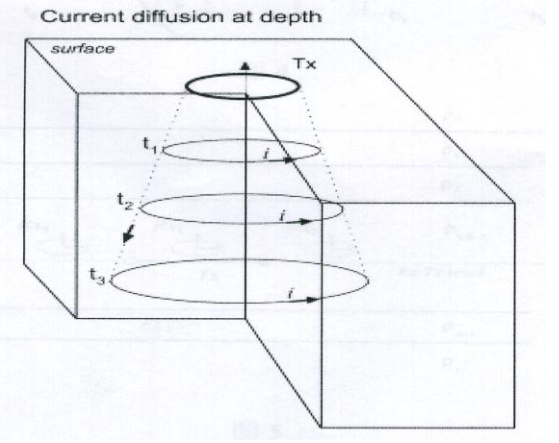


图 10

2、PROTEM47 瞬变电磁仪的优点

PROTEM47 是加拿大 Geonics 公司生产的瞬变电磁仪系列中，分辨率最高、关断时间最短、工作效率最快、最轻便的一种。



图 11

加拿大 Geonics 公司从 1976 年开始生产瞬变电磁仪,已有 30 年历史，它的瞬变电磁仪是世界上公认的最好产品，仅最近三年来中国就从 Geonics 公司进口了约 40 套（包括 PROTEM47,PROTEM57 和 PROTEM67）瞬变电磁仪。PROTEM47 的主要优点有：

- 关断时间短，只有 2.5us，因此可获得几米—150 米的地下电性信息。
- 分辨率高，对瞬变场信息分辨率达 24 位，系统分辨率达 29 位
- 接收机和发射机分离，因此适合多种野外观测装置，并避免了相互干扰。
- 具有“聪明”叠加技术，保证了高的信噪比。
- 抗干扰能力强，可在市区展开正常观测工作
- 轻便、高度稳定。

3、EM 型大地电导率仪也是 Geonics 研发的、专门用于深几十米之内的地下环境和水资源勘探，它对高阻体也有很好的分辨能力。

其中 EM31—MK2 型大地电导率仪极其轻便,一个人便可携带并进行观测（图 12)。其主要优点是观测速度快，测量精度高，可以测出微小的电阻率变化，可进行连续测量，但勘探深度只有 6 米。

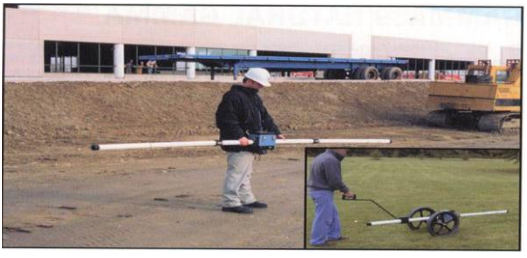


图 12

EM34—3 型大地电导率仪可以利用三种不同的发射—接收线圈距离（10m、20m、30m），以实现不同的勘探深度，最大勘探深度可达 60m。



图 13

在人文噪声很强的大城市地区，可采用大功率发射的 EM34—3XL 大地电导率仪，其信噪比可提高 10 倍。

4、 PROTEM47 瞬变电磁仪和 EM 大地电导率仪对环境监测的探测实例

1）对地下管线极其渗透物—氯化物对地下水污染区的探测

加拿大北阿尔伯达重质油生产基地的地下埋有很多地下管线，其渗透物对地下造成了严重污染。该基地关闭后进行重建，在重建之前,必须把地下管线和受污染的土壤全部拆除和移走。为此，用 Geonics 研制的 EM 大地电导率仪对管线的埋藏地点、深度以及受污染土壤的范围和厚度进行探测。图 13a 是观测到的地下电导率成像，图 13b 是相位成像。经确认图中的线性异常是 5cm 直径、埋深 3 米的地下管线位置。此外，从图中还可见，线性异常外围存在高导区，其电导率比背景值高出 30ms/m

以上。经检测，高导区下的地下水中氯化物含量增高。这些氯化物是从地下管线渗漏出来的。

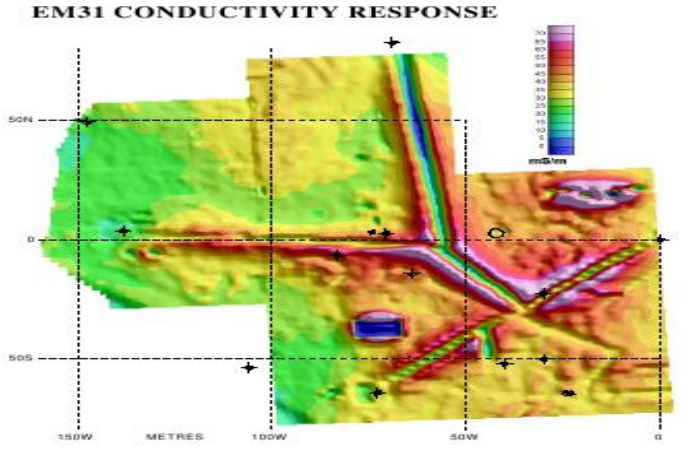


图 14a

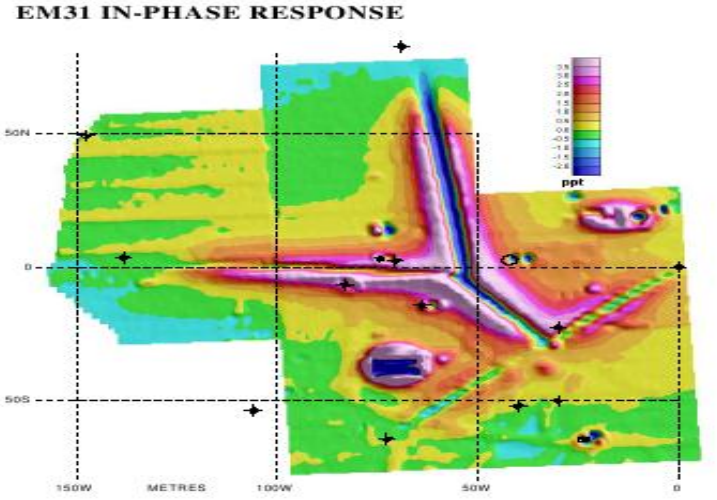


图 14b

2）对油渗漏路径的探测

加拿大某城市大型储油库出现了渗漏，渗漏的油质向地下扩散。为了治理被油污染的地下环境，必须把油的扩散路径检测出来。利用 Geonics 公司的大地电导率仪和瞬变电磁仪进行了详细探测，获得了理想结果，图 15 是其中的一条探测剖面。

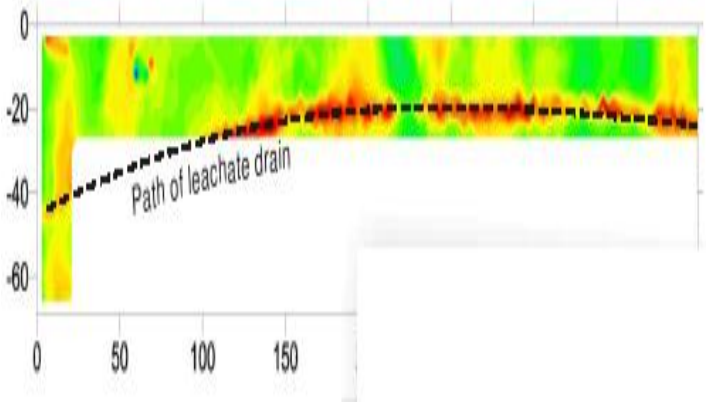


图 15

该区浅层是低阻的松散层和低阻沉积物，渗漏物是高阻的油质，所以探测目标是在低阻层中圈定出高阻分布体。从图明显可看到沿 20 多米深、向剖面左端缓倾的高阻薄层便是渗漏油质的通路。

3）对垃圾填埋场及其污染范围的确定

同样采用 EM 型大地电导率仪和 PROTEM 瞬变电磁仪对垃圾填埋场体积、形状及其污染范围进行详细勘探。图 16 是其中的一条勘探剖面。

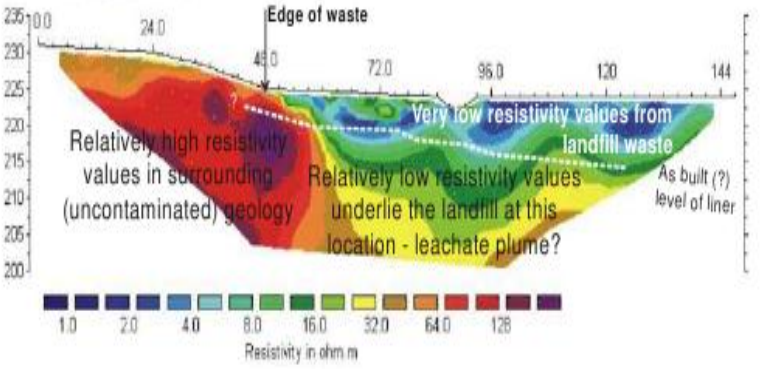


图 16

图 16 中的低阻体（蓝色区）是垃圾填埋场，下伏的中等电阻率区（绿色至深绿色）是严重污染区—轻度污染区范围，剖面左边的高阻区（红色）和深部的高阻区（黄色）是未被污染和基本未被污染的区域。

三、GSM-07 综合电磁观测系统

德国 Metronix 公司是世界上最早研发和生产频率域的电磁观测系统的公司之一。其生产的 MMS-02 在 1980 年就进入中国市场，其后的 MMS-03、MMS-04、MMS-05，特别是近代的 GSM-06 在中国拥有很多用户。

最近刚研制成功的 GSM-07 综合电磁观测系统，是世界上频率域电磁仪中最先进的一种，其技术指标，应用领域和软件系统都是一流的。

1、 频率域电磁仪的简单工作原理

太阳黑子活动以及大气层雷电活动产生的电磁波（称其为天然电磁场），向地球内部穿透并在其中产生感应电磁场，其穿

透深度取决于电磁场频率和被穿透层的电阻率值。感应场的幅度和相位与观测点下方的地下电性结构密切相关。

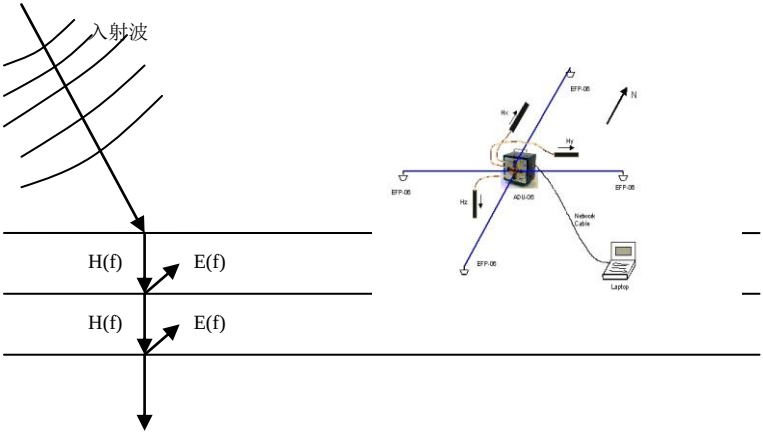


图 17

因此，在地面观测天然电磁场及其感应场的磁场分量 Hx，Hy，Hz 和电场分量 Ex，Ey 随频率的变化（图 17），便可解出测点下方不同深度的地下电性结构，包括电性层埋深、厚度、走向、倾向、构造维数和各向异性等。该法通常称为 MT 法和 AMT 法。

天然电磁场信号幅度较弱并且最高频率不超过 10^4Hz，所以在人文电磁干扰严重的大城市和工业区最好采用人工发射的电磁场作为场源，该法称为 CSAMT 法。

2、GSM-07 综合电磁观测系统主要优点



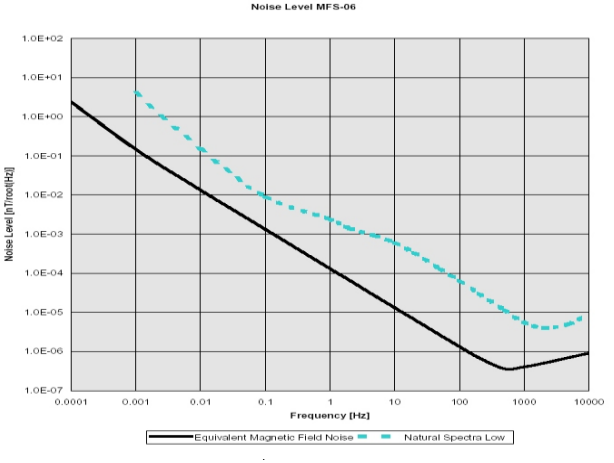
图 18

GSM-07 是最近研制成功的综合电磁观测系统，其关键部分包括 ADU-07 主机和 MFS-07 磁场传感器，它与其他频率域电磁仪相比具有如此下优点：

- 频率范围从直流——250KHz，意味着其勘探深度从近地表至百公里以下，对浅层的分辨率达到 m 级。
- 有 10 个记录道，每个通道有两个 24 位 A/D 转换器，分别负责对 1Hz——250Hz 的高频信号和低于 500Hz 的低频信号进行 A/D 转换。因此 GSM-07 对全频段都保持最高的分辨率。
- 由于有 10 个记录通道，因此可以同时连接不同类型的磁场传感器，从而扩展了应用领域。
- 即可以独立应用，也可以把多达数十台的 ADU-07 通过局域网（LAN、WLAN）或通过精密的 GPS 同步，组成统一多台的观测系统。
- 无人执守，自动标定，自动消除极化电位。
- 存储原始数据时间序列和各项现场实时处理结果。
- 通过 RJ45 网线接口传输数据。

- 与 Enviro 高频发射装置配合实现高频（1KHz——100KHz）CSAMT 观测；与其它发射装置配合实现较低频率的 CSAMT 观测。进一步可实现时间域电磁观测。
- 具有极宽的工作温度范围，从-40℃—+70℃;功耗仅 3-5 瓦（低频）100KHz 以上高频功耗 15 瓦；防水，防潮。
- 极其完美的现场处理软件 MAPRO，它实时给出视电阻率曲线、相位曲线、构造走向、相干度、二维偏离度、各向异性参数等地下电性结构信息。特别是 MAPRO 软件含有四种不同的去电磁干扰功能，以保证获得高质量的数据处理结果。

Metronix 公司的磁场传感器是世界上独一无二的，其中的 MFS-06 磁场传感器温度漂移接近 0；频率响应 10kHz—10,000 秒；噪声极低，仅有 10^{-2}nT/Hz$^{1/2}$@0.01Hz,10^{-4}nT/Hz$^{1/2}$@1Hz 和 5*10^{-7}nT/Hz$^{1/2}$@1000Hz。这意味着既或在磁平静日期间其噪声水平也比有效信号水平低 10-100 倍。



SHFT－02 超高频三轴磁场传感器，除了上述特点外，其频率响应高达 1kHz-250kHz，三个分量组装在一起，是专门为环境勘探、工程勘探而设计的（图 20）。



图 20

3、GMS-07 综合电磁观测系统技术指标：

频道范围：	直流—250KHz 。
道数：	每个 ADU-07 含有 1 道至 10 道。
带宽：	两个频带（直流—250Hz，1KHz—250KHz），用数字滤波器可建立亚频带。
A/D 转换器：	每道两个 24 位 A/D 转换器，低频采样率 250 个/秒；高频采样率 250,000 个/秒。
动态范围：	> 130 dB。
系统控制器：	32 位嵌入式控制器,LINUX。
存贮介质：	4G 字节闪烁盘，可扩充，USB 接口。
测试装置：	对所有的重要功能，包括传感器和仪器功能都可自动检测和显示并建立文档。
标定：	自动标定。
输入阻抗：	电道>10 兆欧；磁道>20 千欧。
网络连接：	标准 100 兆双绞电缆。USB 1.1，2.0，（无线/蓝牙技术）。
同步：	GPS 钟±30ns。可以确定的存贮卫星参考站的位置。
接口种类：	网络，磁传感器，电极线，电源输入，GPS 天线，USB 1.1，2.0，无线/蓝牙。
外壳：	坚固的防水聚碳酸酯外壳。
重量：	接近 8。5Kg。
外部尺寸：	400*330*170mm3。
功耗：	平均. 3-5 W（低频）；15 W 高频 @ 96kHz to 250 kHz
工作温度：	-40C° — +70C° （内置闪烁盘）。 +5 ℃ — + 50℃ （内置硬盘）