电磁探测技术在工程与环境中的应用现状

林 君
(长春科技大学,吉林 长春 130026)

摘要:电磁探测技术是工程和环境地球物理勘查中最有效的技术之一,近年来频率域和时间域电磁探测仪器不断发展,涌现出适用于地下管线探测、地下水污染监测、堤坝质量检测、土壤特性探测与评价的新型电磁探测仪器。频率域电磁探测仪器采用了传导电流和位移电流都不能忽略的频段以及位流发射技术;时间域电磁探测仪器向甚早期偏移,以弥补传统电磁法和探地雷达难以探测的盲区,提高探测的分辨率与探测效率。在美国爱得荷国家工程实验室(Idaho National Engineering Laboratory)进行的电磁探测综合演示实验(EMID)反映出当今电磁探测仪器的水平和发展趋势。

关键词:电磁探测仪器;工程与环境监测;频率域电磁探测;时间域电磁探测;研究现状
中图分类号:P631.3 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2000)03-0167-11

工程与环境地质问题大多涉及浅层(近地表层)探测与评价。近年来,随着电子技术与计算机技术的飞速发展,用于浅层地球物理勘查的新技术新仪器不断涌现。在地球物理勘查技术中,电磁法勘查是一种常用的地球物理方法,主要用于地下水调查、地下固体废物与污染物探测、考古、土壤评价及城市管线探测等。通常用于浅层探查的电磁探测方法有三大类:探地雷达方法(GPR)、时间域电磁法(TEM)和频率域电磁法(FEM)。这三大类方法中,每一类都有其优点和一定的局限性。探地雷达被广泛地应用于电阻率较高地区的探测,并且具有较高的分辨能力,可以探测几厘米到几十米深度,但是在电阻率小于 30 Ω·m 的环境中,这种仪器的探测深度被限定在 1 m 之内,如粘土覆盖地区。为了克服探地雷达的局限,人们对时间域和频率域电磁探测仪器的发射信号频率以及信号波形等进行了改进,从而弥补了探地雷达的不足。近年来时间域和频率域电磁探测技术与仪器有了长足的进步,在工程与环境中的应用领域不断扩大,本文综述这两类电磁探测技术与仪器的发展现状及趋势。

1 频率域电磁探测仪器的进展

频率域电磁探测仪器利用发射频率的变化或收发距的变化来实现对不同深度的目标体进行探测,也可以利用发射线圈与接收线圈的不同结构来提高仪器的探测能力和探测效果。早期的频率域电磁探测仪器主要发射低频信号,典型的频率范围为 0.05 Hz~60 kHz,这类宽频带仪器在固体矿产勘查领域发挥了作用,但用于浅层勘查,还需要提高频率。

低频电磁法中,对大多数地质环境而言,通常只考虑传导电流的影响而忽略位移电流的作用,因此,绝大多数电磁法处理与解释程序都不包括介电常数影响这一项。但是,当发射频率较高或在高阻地区,位移电流的影响就变得不可忽略了,这就要求电磁法正、反演程序中要同

收稿日期:1999-06-15
基金项目:国土资源部百名跨世纪人才基金资助

万方数据

时考虑传导电流和位移电流。

在高频钻孔电磁法和探地雷达中，70 年代就有人开始研究位移电流的影响，但在其它电磁法中研究位移电流影响的有关文献很少。Sinha 和 Lytle 等人在 70 年代就开始研究航空电磁法中位移电流的影响问题[1,2]，给出了获取电阻率和介电常数的图解方法，开发了利用倾角测量的周期变化特性来分辨地层的解决特定问题的手段。Bitterlich 和 Kellner 在 1970 年给出了从地下测量来确定电阻率与介电常数的方法[3]。Fraser 等人在 1990 年分析了航空测量中由于忽略位移电流所造成的畸变与解释误差，并得出只有在电磁法计算中直接包含位移电流才能减少误差的结论[4]。一般说来，只要位移电流的幅度超过传导电流的 5%，则位移电流的影响就不可忽略，而在大多数地质条件下，当频率达到 50 kHz～100 kHz 时，就会出现这种情况。美国地质调查局(USGS)的 Steward 等人基于 Ryu 等人在 1970 年提出的解电磁场边值问题的通用积分方程表达式的基础上[5]，研究开发出同时考虑传导电流和位移电流的高频电磁

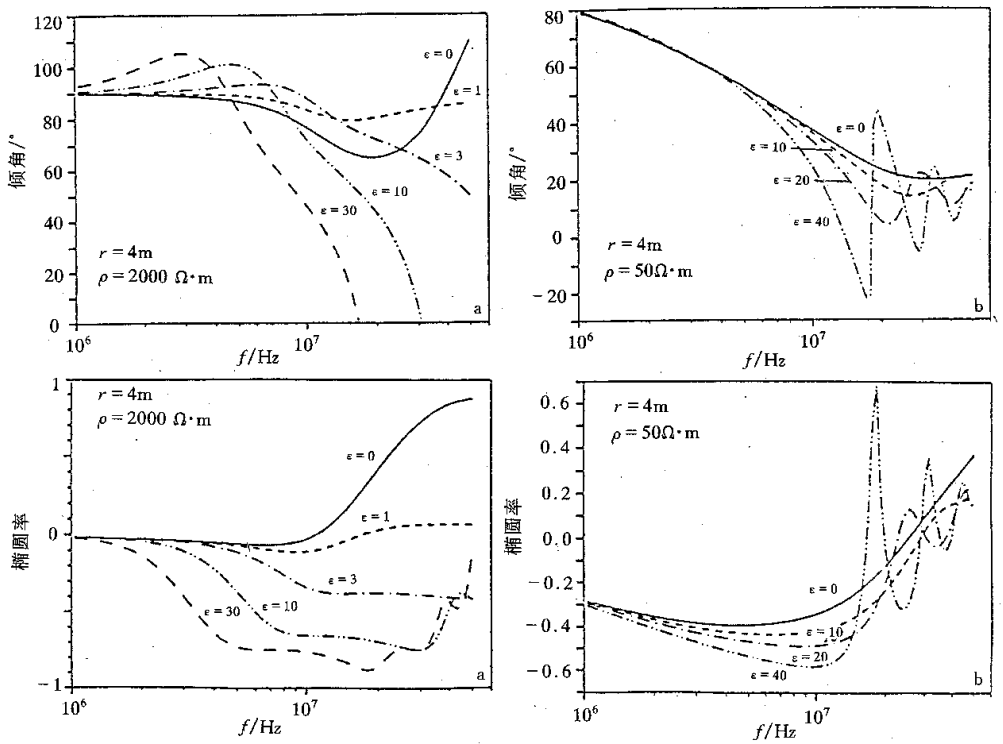

图 1 地下半空间正演模拟

a—具有高电阻率 ρ 和变化的介电常数 ε；b—具有低电阻率 ρ 和变化的介电常数 ε

法正演程序[6]。图 1 是利用该程序计算的半空间倾角和椭圆率响应曲线。图 1a 假定电阻率为高阻值($\rho = 2\ 000\ \Omega\cdot m$)，介电常数 ε 为 0～30，从图中可以看出当频率高于 6 MHz 时，只是 ε 从 0 变到 1，曲线的形态都有很大的变化。对于低阻的情况，位移电流在高频段同样有较大的影响，图 1b 给出了电阻率为 50 Ω·m 的倾角和椭圆率正演响应曲线，ε 为 0～40。注意到图 1b 中当 $\varepsilon \geqslant 20$ 时，倾角和椭圆率在频率高于 10 MHz 情况下出现振荡波峰。可利用该程序来研究电阻率变化对波形的影响。通过正演计算，当 $\varepsilon = 10$ 时，ρ 从 50 Ω·m 变化到 1 000 Ω·m。可以得到：电阻率对波形幅值有较大影响，但随频率变化并不十分明显，尤其是对椭圆率的测

万方数据

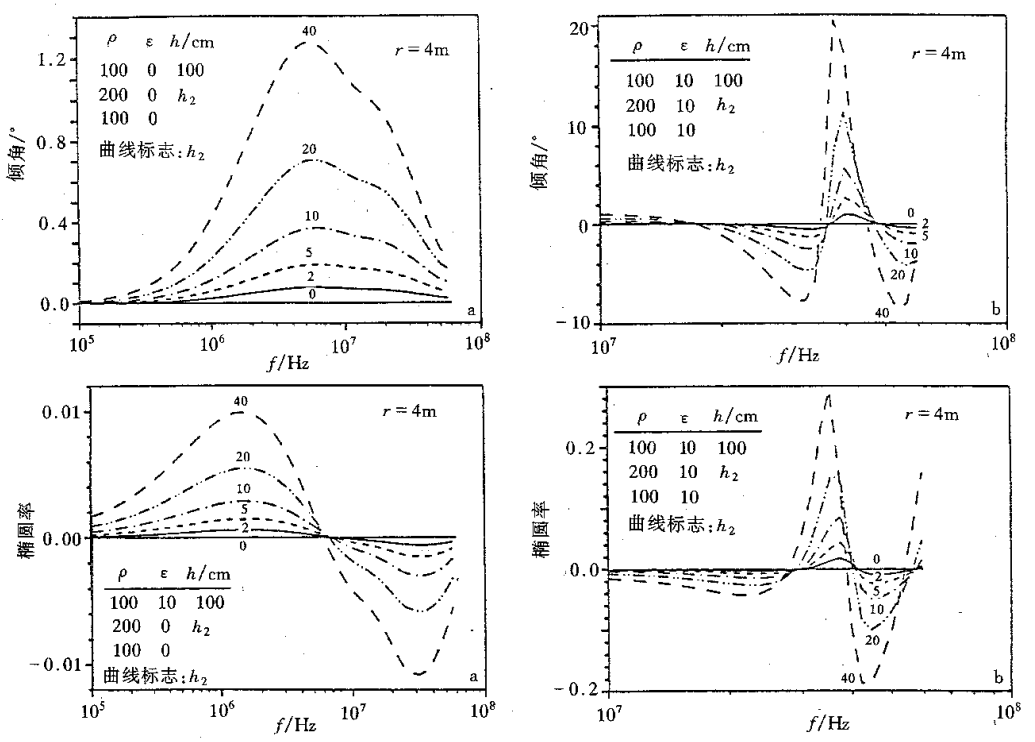

图 2　在地下半空间加入变化厚度的高阻层所产生的异常的正演模拟

a—忽略位移电流影响 ;b—包含位移电流影响

量曲线影响,只有在频率大于 30 MHz 以上时,曲线变化较大且出现振荡波峰。

当考虑介电常数影响之后,高频电磁探测具有一定的薄层检测能力,这仍可以通过正演模拟来证明。图 2 给出了薄层模型的正演计算对比结果,图 2b 是同一模型考虑位移电流的结果,显然当频率较高时图 2b 可以明显地分辨出薄层的存在,而这一点对工程与环境物探很重要,许多问题涉及高阻薄层探测问题(如介电性目标体的探测)。根据正演模拟结果,美国地质调查局研制了一种新型的高频电磁探测仪器,该仪器的发射频率为 300 kHz～30 MHz,线圈距可从 0.5 m 变化到 5 m,频率变化间隔可以小到 100 kHz,包括电池在内,样机的质量约 40 磅,用电池供电可以工作 12 h。该仪器发射 1 个磁场分量,接收 2 个磁场分量。为了消除发射机与接收机金属导线连线的影响,采用光纤电缆来传送相位同步与控制信号,从而有效地隔离了电磁噪声。该仪器可以在 10 s 内记录 1 个测量点的 2 个接收分量。

美国亚利桑那大学研制开发了另一种高频电磁探测系统[7],其频率范围为 31 kHz～32 MHz,这个频率范围所能探测的深度正是工程与环境勘查中最需要的深度。该仪器除了采用光纤电缆连接发射线圈与接收线圈之外,还采用了多分量发射与多分量接收技术,用邻近频率法以及附加校准线圈法对发射的一次场和干扰场进行消除,从而提高系统的灵敏度及信噪比。为了提高仪器探测结果的解释精度,该探测系统包含有神经网络解释与数据可视化软件。数据可视化软件提供神经网络接口、绘制探测曲线、一维正演模拟、数据成像以及解释功能等 ;神经网络解释通过训练数据逐步提高解释效果,而野外实时解释所需的数据是在数据采集之后由无线通信方式传送的。该系统经过实验测试取得了较明显的效果,但样机系统过于笨重,不适于商业化生产,在抗干扰能力等方面还需要进一步加强。

万方数据

另一种宽频带电磁探测仪器是美国 Geophex 公司最新研制的 GEM-2 多频电磁探测器[8,9]。这种仪器质量约 9 磅,频带为 90 Hz～22 kHz。GEM-2 的发射与接收线圈相距为 5.5 英尺,并且用另 1 个线圈来消除接收线圈的一次场。3 个线圈固定在 1 个特制的板条上,操作者手持该板条即可以进行剖面快速测量。仪器轻便,每小时可采集 10 000 个数据。GEM-2 与前 2 种仪器相比的最大特点是采用数字'位流'发射技术,把要发射的 1 组所希望的频率信号变成调制的发射波形。位流用来控制 1 组数字开关,通过开关控制发射线圈来产生包括由操作者指定的所有频率的复杂波形,这种用位流来构造随机波形的技术称为脉宽调制技术。图 3 给出了含有 150,270,570,1 080,2 070,4 060,7 740 及 15 000 Hz 等 8 个频率的位流技术发射波形示意,图 3a 给出 1 个含有 8 个频率的位序列 1～1 215 点所产生的电流波形,图 3b 是图 3a 中位序列 30～90 点的波形放大图,图 3c 给出了图 3a 发射波形的幅度谱。GEM-2 还采用了窄带匹配滤波技术来提高信噪比,用数字信号处理器 DSP 技术来提高系统的实时性。

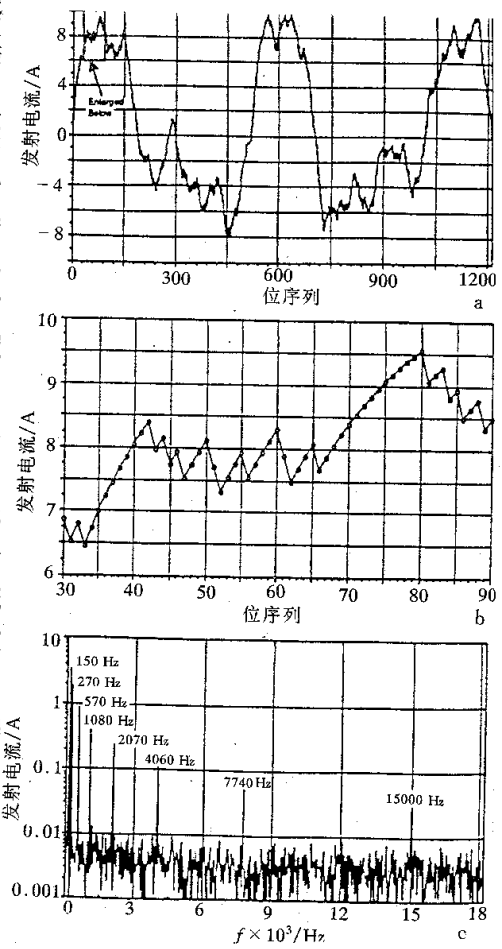

图 3 电流波形及其频谱

a—发射电流波形;b—波形放大图;c—幅度谱

2 时间域电磁探测仪器的进展

时间域电磁探测仪器的最小探测深度不仅与接收机的采样速率、噪声性能等因素有关,还与发射机的关断时间、关断波形以及关断之后的第 1 次采样时刻等因素有关。早期的时间域电磁探测仪,发射机关断时间为几十微妙,在这种情况下,最小探测深度为几十米。专门用于浅层探测的仪器已经达到关断时间为 3 μs,第 1 个采样时间为 6 μs,这样,其最小探测深度在低电阻率地区可以达到 5～10 m。在低电阻率地区如表层有粘土地区,探地雷达的探测范围仅为顶层 1 m 左右,这样在常规的时间域电磁探测仪器与探地雷达的探测范围之间就存在 1 个盲区,这个探测盲区正是工程与环境探测所关心的区域。由于高频电磁法扫频测量需要一定的时间,导致频率域电磁探测效率较低,而且频率域电磁法是在强大的一次场背景之上来测量二次场的,难以提高测量精度,因此,80 年代以来,人们对时间域电磁探测技术与仪器更加关心。90 年代初,美国地质调查局、加里福尼亚大学伯克利分校、劳伦斯伯克利实验室、犹他大学(Utah)、亚利桑那大学等多家研究单位合作,在美国能源部(DOE)的资助下,开始研制一种甚早期时间域电磁系统 VETEM(Very Early Time Electromagnetic System),主要用于解决探地雷达及常规 TEM 系统难以解决的浅层地质问题[10～13]。

设计的 VETEM 系统,首先要解决的是利用多维数值模拟和物理模拟的结果来优化仪器

万方数据

设计和勘查设计以及测试和精细解释软件问题 ;然后要解决关断时间小于微秒级的发射机以及具有纳秒级采样的接收系统,即设计在良导电介质区进行快速、高分辨率导电和介电目标探测的仪器系统 ;第三要设计用于实时探测的解释与处理软件。经过几年的努力,设计出 VETEM 样机系统。该系统具有如下性能指标 :发射线圈直径为 30～100 cm,对称放置的 5 个接收线圈组成阵列,发射峰值电流为 1～10 A,发射线圈关断时间小于 10 ns,在关断之后接收窗口时间为 10～1 000 ns,采样间隔为 2 ns,发射电流实时监测与记录。图 4 是该系统在野外测试时发射电流实时监测与接收信号的波形,图 5 是用' 三维阴影灰度图法 '来表示沿测量剖面记录的所有波形。与图 4 相比,图 5 不仅可以表示图 4 所示的波形,而且还可表示出沿测量剖面变化的情况。VETEM 系统在 1995 年进行了第 1 次野外测试,测试结果表明 VETEM 系统对表层埋藏目标体具有较好的探测能力。

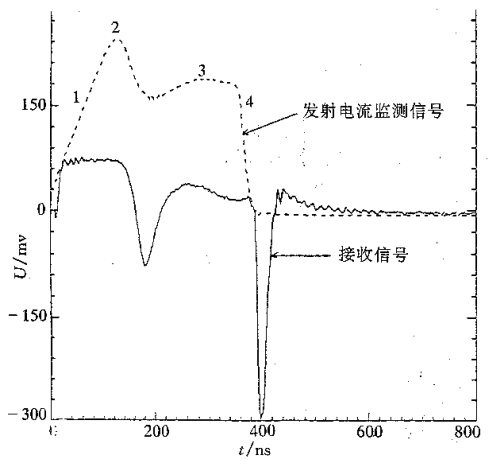

图 4　VETEM 系统野外测试的发射与接收波形

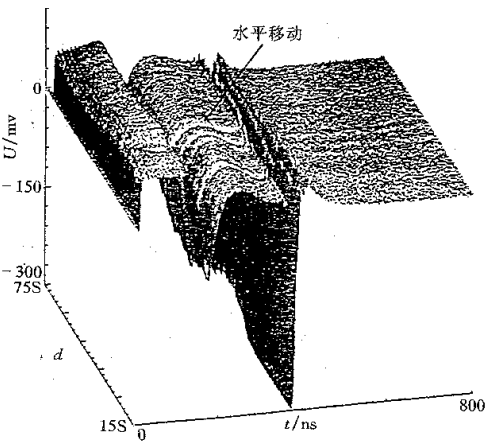

图 5　用三维阴影灰度图法表示的剖面测量

另一种甚早期瞬变电磁测量系统 NanoTEM 是由美国 Zonge 公司研制的,该系统已经成为商业化产品,主要用于探测几米到 100 m 左右深度的电性目标体[14]。该系统由 1 个电池供电的发射机(NT-20)和 1 个快速采样的接收机(GDP-16 或 GDP-32)组成,通常采用 20 m×20 m 发射回线和 5 m×5 m 的接收线圈构成测量装置。发射线圈的边长可以变化 (5～100 m),接收线圈的边长也可以变化(1～10 m)。发射机的关断时间为 1.2 μs(10 m×10 m 回线),当回线边长增大时,关断时间变长。由于 GDP-32 的最快采样间隔为 1.2μs,实际上 NanoTEM 系统并没有突破微秒级采样,因此仍难以用来研究高分辨率浅层的电性探测问题。NanoTEM 系统自问世以来,已有许多成功的应用实例发表。

3　电磁法探测技术和仪器综合性能测试与比较

近年来,电磁探测仪器的性能不断提高,新型仪器不断出现,人们不禁要问 :这些新型探测仪器及解释处理软件对于解决复杂的工程与环境问题效果如何?这只有通过已知情况的野外测试评估才能给以解答。通过对现有仪器的野外评估还可以发现目前仪器中存在的问题,利于今后改进与完善 :此外,对已知埋藏物体情况的场地进行综合测试所获取的大量数据,还可以为研究有效的解释处理方法提供基本数据。出于上述目的,美国在爱得荷国家重点工程实验室的 Cold Test Pit (CTP)测试场地进行了电磁探测技术与仪器的综合演示(EMID)测试,主要用于比较不同类型电磁探测仪器对浅层(<10 m)的勘查能力。参加单位有来自世界各国

万方数据

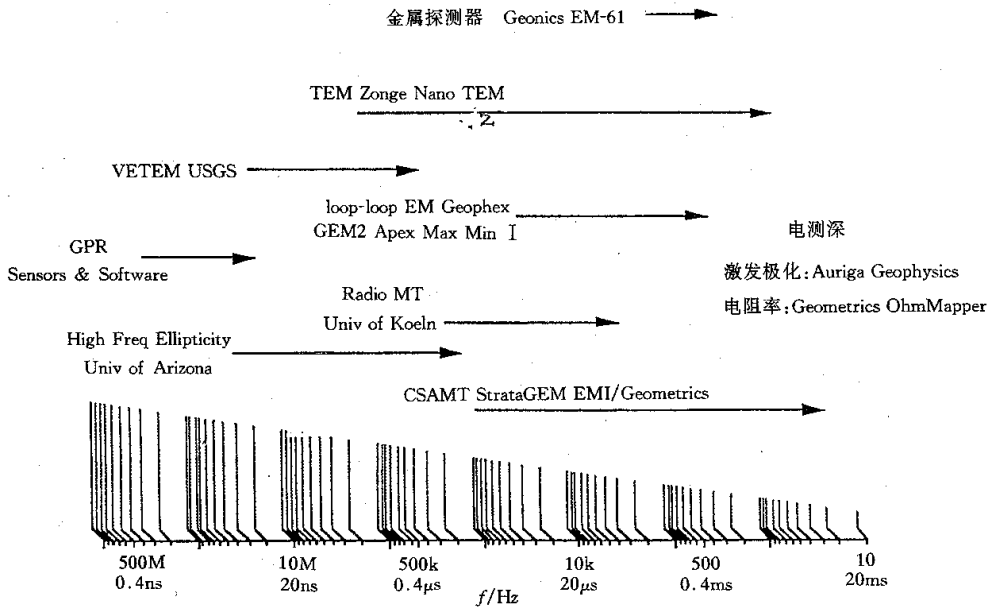

图 6 在 INEL 测试实验区进行的地球物理测量综合电磁法测试所覆盖的频率范围

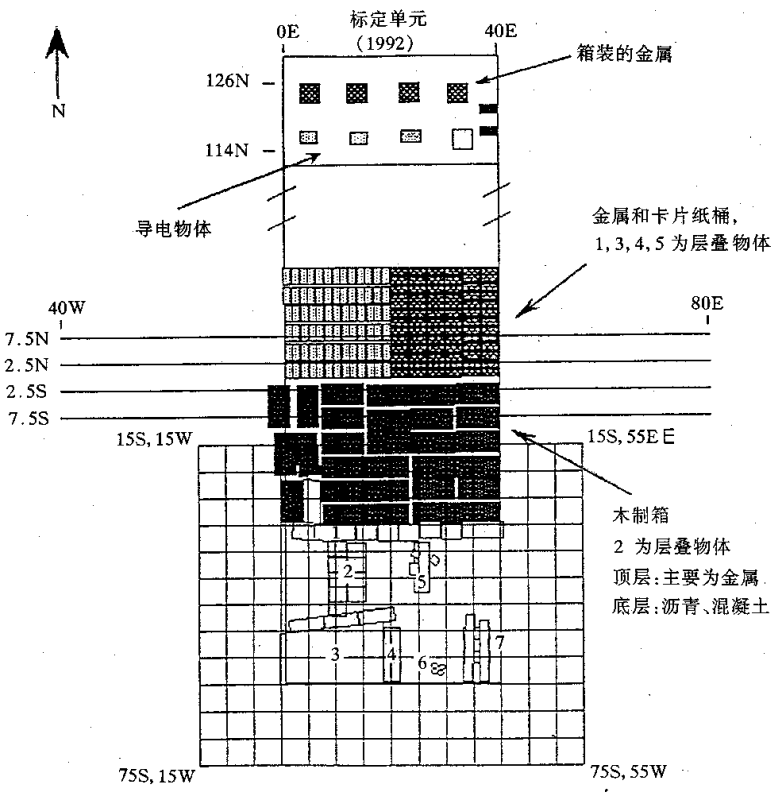

图 7 EMID 实验测试区示意

万方数据

表 1　EMID 测量环境说明

系统	频率范围	排列	测量参量	沿测线数据密度	一条基线测量效率	野外情况
Sensors & Software Pulse Echo GPR	25,100,450 MHz 32～2048ns	共偏值=1m 共中点	电压	C0=0.2m CM=0.4m	5 min	热,有风
USGS VETEM	25～70MHz 0～1900ns 采样间隔 2ns	HCP 和 NULL 1m 和 2m 天线距离	磁场,也可测电压	10cm	15 min	冷,有风
Geonics SuperEM－61	0.134～0.75ms (10 个采样点)	VMD :70cm 垂直天线偏置	电压瞬变延迟	10cm	5 min	冷,有风
Zonge NanoTEM	1.2μs～2.5ms	10m VMD t_x, 6×6 网格, 1m 3 分量 r_x/t_x	电压瞬变延迟	1m	1 h	热,有风
Univ. of Arizona HF ellip－Ticity	30kHz～32MHz	VMD t_x 3 分量接收 2～8m 收发距	3 分量电压换算成椭圆率	1/4～1/2 线圈距离	1 h	冷,有风 动态组构
Geophex GEM-2	0.5～56kHz	VMD/HMD 共面 1.67m 距离	自由空间响应的实的和正交的 PPm	2.5 英尺	5 min	冷,有风
Apex Parametri－cs MaxMin	0.44～56kHz	VMD 共面 15,30,60 收发距	自由空间响应实的和正交的百分比	5 '@15& 30 'Sep 10 '@60 '	1 h	热,有风
Univ. of Koln RMT	24,60,120Hz 200kHz	1m E—W 电偶极子 N—S 磁场	视电阻率和 Eew 及 Hns 的相位	相对于基线 2.5 在 LOP 上 5 '	1.5 h	雨、雪,有大风
EMI& Geometrics Stratagem CSAMT	10Hz～72kHz	正交 15′偶极子和磁线圈	E_x 和 E_y H_x 和 H_y	15 英尺	1 h	雨、雪,有大风
Geometrics OhmMapper	16kHz(电容)	5m,10m 偶极—偶极剖面	电压	5 英尺	1 h	热,有风
Auriga IP	1Hz,0.01～10Hz (L7.5N)	2m,5m 偶极—偶极测深	电压/电流及毫弧度	偶极距—1/6 偶极距	3 h	trip1 :暴雨, trip2 :热,有风

著名的研制电磁探测仪器的公司以及科研单位,参加测试的仪器共有 11 种,包括加拿大 Sensors and Software 公司的 Pulse Echo 探地雷达、美国地质调查局的 VETEM 系统、加拿大 Geonics 公司的时间域电磁法金属探测器 EM-61、美国 Zonge 公司的 NanoTEM、美国亚利桑那大学的高频椭圆率测量系统、美国 Geophex 公司的 GEM-2、Apex Parametrics 公司的 MaxMin-I 低频电磁探测系统、德国大学的 RMT 系统、EMI 公司和 Geometrics 公司的 Stratagem CSAMT 系统、Geometrics 公司的 OhmMapper 以及 Auriga Geophysics 的 Auriga IP 系统。图 6 是上述 11 种仪器在 EMID 实验区测试所能覆盖的频率范围。图 7 是爱得荷国家重点工程实验室 EMID 测试区示意。该测试区建于 1988 年,其中埋藏了多种已知的在工程和环境领域需要探测的目标体。

参加 EMID 的电磁探测仪器包括探地雷达(GPR)、频率域高频电磁法和低频电磁法仪器(FEM)、时间域瞬变电磁法仪器(TEM)、可控源大地电磁探测仪(CSAMT)和激发极化(IP)仪

万方数据

器等。表 1 和表 2 分别给出了上述 11 种仪器的测量情况描述以及测量系统评估。表 1 中包括频率范围、装置排列、测量参量、剖面测量点距(数据密度)、测量 1 条剖面所需的时间以及测量时的野外环境等。表 2 中的系统评价包括勘查深度、噪声水平、使用方便程度、解释程度、开发程度以及探测效果评价等。

EMID 测试的数据已经进入 Internet 网,可以通过 Internet 网下载不同探测系统的数据进行处理与解释。在 1997 年的工程与环境地球物理应用研讨会(SAGEEP)上,Louise Pellerin 等人发表了 EMID 系统评价的文章[15],对探地雷达、时间域和频率域电磁系统等进行了性能比较,为从事电磁探测仪器研制以及电磁法勘探技术方法研究的人员提供了有价值的参考。

表 2 EMID 系统评价

系统	勘查深度	噪声水平	使用方便性	解释水平	开发水平	注释
Sensors & Software Pulse Echo GPR	< 1m	动态范围:168dB 重复性好	受训练的 2 人 各种地表	屏幕可监视部分	商品化仪器 商品化测量	在 INEL 测试场地,GPR 出现问题
USGS VETEM	0~2m	动态范围:80dB tx 变化 5%	2~3 人,1 人受严格训练,卡车/绞手车	没有开发	研究样机	正在开发的系统
Geonics SuperEM-61	5cm~5m	动态范围:190dB	1 人受训练 0.5m 明显	剖面或等值线	商品化仪器 商品化测量	良好的金属探测器
Zonge NanoTEM	< 20m	动态范围:190dB 早期重复性<2%	受训练的 2~3 人 各种地表	剖面/时间等值线/时间 ID 反演	商品化仪器 商品化测量	相当密的数据集 三分量
Univ. of Arizona HF ellip-ticity	< 30m	动态范围:120dB 椭圆率 60dB 重复性 < 1%	受训练的 2~3 人,2ATVs	神经网络反演	工程样机	选择区有效
Geophex GEM-2	< 5m	Instr=1×10^{-6} 噪声,重复性 $(50\sim200)\times10^{-6}$	受训练的 1 人 各种地表	等值线数据	商品化仪器 商品化测量	快速异常映像
Apex Parametri-cs MaxMin	1/4~1/2 线圈距	重复性 0.05~0.4%	受训练的 2 人 各种地表	剖面观测 3D 反演	商品化仪器 商品化测量	获取相位数据有问题
Univ. of Koln RMT	表层深度估计	重复性 rho < 2% pha<0.5°	2 人操作 1 人受训练 各种地表	MT 伪断面,2D 反演	正在进行商品化	有限的发射有效
EMI & Geom-etrics Stratagem CSAMT	表层深度估计	动态范围:18 位 A/D 数据变化 rho +/-10% pha +/-2.5°	2 人操作,1 人受训练 各种地表	MT 伪断面,2D 反演	商品化仪器 商品化测量	受野外时间限制,工作停止
Geometrics OhmMapper	1/4~3 偶极距	重复性 < 3%	2 人操做 各种地表	伪断面反演	样机系统	2.5 m 偶极出现耦合问题
Auriga IP	1/4~3 偶极距	Instr<0.1mv 重复性:rho<5% pha<2mR	2~4 人,1 人受训练,各种地表	伪断面反演	商品化仪器 商品化测量	劳动强度大

万方数据

4　我国电磁法仪器研制需要解决的问题

国际上电磁法仪器在工程与环境上的应用领域不断扩大,主要得益于电磁法仪器性能的不断提高以及解释处理软件的不断完善。先进的电子技术与计算机技术促进了电磁法仪器的发展,使许多复杂问题得以解决。但是,探地雷达在高导电性地区的探测深度、频率域测量的探测速度与效率、时间域测量的解释精度与效果等问题是今后电磁法仪器需要进一步努力解决的,而利用电子技术和计算机技术来缩小发射机与接收机的体积、提高探测精度和仪器的可靠性、压制干扰噪声等,仍是今后一段时间内要重点研究和解决的问题。

我国的电磁探测仪器,尤其是时间域中的甚早期测量(VETEM)以及频率域中的高频测量(同时包括传导电流和位移电流)研究较薄弱。为了加强我国电磁技术及仪器在工程与环境中的应用研究,建议重点解决如下问题:

1. 频率域高频电磁探测仪器研究,需要解决的关键技术包括:如何利用双频差分测量技术来提高仪器的抗干扰能力;高频测量(300 kHz～50 MHz)的采集与存储技术;利用多分量线圈进行发射、接收与背景场消除技术;随机信号多频同时发射技术;电磁测量中的噪声抑制技术以及利用人工神经网络等新技术进行反演解释技术。

2. 甚早期时间域电磁探测仪器研究,重点解决的关键技术包括:发射机的快速关断与接收机的高速采样技术,要突破微秒级的限制;高分辨率的瞬变电磁解释技术;噪声抑制技术以及高信噪比的接收采样与实时处理技术。

3. 适宜对多种电磁探测方法进行评估对比的实验测试场地。

电磁法在工程与环境中的应用具有广泛的前景,也是目前地球物理领域研究的热点之一,仪器设备的进步必将促进该方法的进展,需要引起人们的关注。

参考文献:

[1] Sinha A K. Influence of allitute and displacement currents on plane—wave EM fields[J]. Geophysics, 1977,42:77～91

[2] Lytle J R, Lager D L,Laine E F. Subsurface probing by high-frequency measurements of the wave tilt of electromagnetic surface waves[J]. IEEE Trans. Geosci. Electr., GE-14,1976,244～249

[3] Bitterlich W,Lellner A W. Determination of electric rock parameters from the field structure of a magnetic dipole[J]. Geophysical Prospecting,18:516～549

[4] Fraser D C, Stodt J A,Ward S H. The effect of displacement currents on the response of a high-frequency helicoper electromagnetic system[A]. In:Ward S H, Ed. Geotechnical and environmental geophysics(Vol.2), SEG Publications,1990

[5] Ryu J, Morrison H F,Ward S H. Electromagnetic fields about a loop source of current[J]. Geophysics,1970,35:862～896

[6] Steward D C, Anderson W L, Grocer T P, et al. Shallow subsurface mapping by electromagnetic sounding in the 300kHz～30MHz range:model studies and prototype system assessment[J]. Geophysics,1994,59:1201～1210

[7] Sternberg B K,Poulton M M. The LASI high-frequency electromagnetic subsurface imaging system. In:the proceedings the Industry Partnerships to Deploy Environmental Technology Meeting[C], Department of Energy (DOE), Morgantown Energy Technology Center (MTEC), USA,1996

[8] Won I J. A wide—band electromagnetic exploration method—some theoretical and experimental results[J]. Geophysics, 1980,45:928～940

[9] Won I J. GEM-2—a new multifrequency electromagnetic sensor[M]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1996,1(2):129～137

[10] Pellerin L,Labson V F,Pfeifer M C. VETEM—a very early time electromagnetic system[C]. In:the proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems:SAGEEP'94,1994,USA,795～802

万方数据

[11] Pellerin L, Labson V F, Pfeifer M C. VETEM—a very early time electromagnetic system—the first year[C]. In the proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems: SAGEEP '95, USA. 1995, 727～731

[12] Pellerin L, Pfeifer M C. VETEM—a very early time electromagnetic system—year 2[C]. In the proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems: SAGEEP '96, USA, 1996, 91～100

[13] Wright D L, Grover T P, Labson V F. et al. The very early time electromagnetic (VETEM) system: first field test results [C]. In the proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems: SAGEEP '96, USA, 1996, 81～90

[14] Zonge K L, Carlson N R. NanoTEM: a very early time TEM system[M], International workshop on high resolution geophysics, Tucson, USA, 1997

[15] Pellerin L, Alumbaugh D L, Pfeifer M C. The electromagnetic integrated demonstration at the Idaho National Engineering Laboratory Cold Test Pit[C]. In the proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems: SAGEEP '97, 1997, USA, 725～734

[16] Wang T, Tripp A C. Simulation of EM wave propagation in the three-dimentional structures by a finite-difference method [C]. In: the proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems: SAGEEP '94, USA, 1994, 737～755

[17] Xiong Z, Tripp A C. Electromagnetic modeling of large structures using integral equations[M]. In: the proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems: SAGEEP '94, USA, 1994, 1045～1052.

[18] 林君. 甚早期时间域电磁系统—VETEM[J]. 国外地质勘探技术, 1997(12): 1～4

[19] Lin J, Ma L, Yu S B. Implementation of remote synchronization in electromagnetic surveys by GPS timing signal[C]. Third International Conference on Electric Measurement and Instrumentation, Beijing, China, 1997

[20] Lin J. Development of high-resolution geophysical instruments for engineering and environmental investigations[C]. International Workshop on High-Resolution Geophysics, 1997, Tucson, USA

[21] Lin J, Li T L, Yu S B. Non-Uniform Sampling and Robust Stacking of Transient Electromagnetic Signal[C]. International Conference on Signal Processing, ICSP '98, Beijing, 1998

[22] McCracken K G, Oristaglio M L, Hohmann G W. A comparison of electromagnetic exploration systems[J]. Geophysics, 1986, 51: 810～818

[23] Stollar R, Roux P. Earth resistivity surveys—a method for defining groundwater contamination[J]. Ground Water, 1975, 13: 145～150

[24] Ward S H, ed. Geotechnical and environmental geophysics[M]. SEG Publications, 1990

TREND OF ELECTROMAGNETIC INSTRUMENTATION FOR ENGINEERING AND ENVIRONMENT

Lin Jun

(*Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130026)

Abstract: Being one of the effective geophysical investigation techniques in engineering and environment, electromagnetic (EM) survey has been well developed in these years. New EM instruments have been continually introduced into underground tube detection, underground water pollution monitoring and subsurface building detection and evaluation. With the purpose of filling in the blank area where the traditional EM methods and the ground penetrating radar (GPR) can not be applied effectively, frequency domain electromagnetic (FEM) instruments make use of frequency bands, in which the diffusion and displacement currents cannot be ignored, and the bit-stream transmit technique. Time domain electromagnetic (TEM) instruments are shifted to the very early time of the off-time electro-

万方数据

magnetic responses. The detection resolution and efficiency can be improved by the new EM instruments. The electromagnetic integrated demonstration (EMID) at the Idaho National Engineering Laboratory Cold Test Pit in USA shows the present status and development trend of the modern EM instrumentation.

Key words :electromagnetic instruments ;engineering and environmental geophysics ;FEM and TEM ;development review

作者简介 :林君(1954 –),男,吉林通化人。1982 年 1 月毕业于长春地质学院应用地球物理系。曾赴英国和美国学习深造。现任长春科技大学信息科学与技术学院院长、教授、博士生导师、中国仪器仪表学会地质仪器分会常务理事、国际电气与电子工程师学会(IEEE)会员。主要从事地球探测技术及仪器、信号检测与处理、计算机应用技术等领域的研究与教学工作。公开出版专著译著 8 部,在国内外发表论文 100 多篇。