



期刊官网扫码浏览



更多信息扫码浏览

大深度高精度广域电磁勘探理论与技术

何继善^{1,2,3}

- (1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 长沙 410083;
2. 有色资源与地质灾害探测湖南省重点实验室, 长沙 410083;
3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘 要:矿产资源是实现“两个一百年”奋斗目标的物质基础,随着浅部资源的日渐枯竭,“深地探测”战略提出向地球深部进军。电磁法是深地探测的支柱方法之一,但由于地球内部非均匀性强、耗散介质多,致使地下电磁波传播方程的求解成为世纪难题,因而传统电磁法在探测深度、探测精度和探测准确度方面存在不足,成为“深地探测”战略的关键瓶颈。笔者经过多年的科研攻关,发明了广域电磁法,建立了以曲面波为核心的电磁勘探理论,构建了全息电磁勘探技术体系,实现了频率域电磁法由平面波到曲面波的跨越;研发了具有完全自主知识产权的大深度高精度探测技术与装备,实现了强干扰条件下电磁信号的高信噪比-高精度-快速测量,打破了国外电磁法仪器装备的长期垄断。广域电磁法的探测深度、分辨率和信号强度分别是可控源音频大地电磁法(CSAMT 法)的 5 倍、8 倍和 125 倍,实现了电磁法由粗放到精细的跨越,有力地支撑了面向国家重大需求的“深地探测”战略。

关键词:广域电磁法;大深度;高精度;伪随机信号

文章编号: 1004-0609(2019)-09-1809-08

中图分类号: P631

文献标志码: A

多解性等原因,这些方法都没能成为电磁法的主流。

1 国内外研究现状

电磁感应法(电磁法)是地球物理电法勘探的重要分支,该方法主要利用地下介质的导电性、导磁性和介电性的差异,应用电磁感应原理观测和研究人工或天然形成的电磁场的分布规律(频率特性或时间特性),进而解决有关地质问题。

最早认识到大地电流的存在是格林尼治天文台的 MATEUCCI(1867)^[1];1917 年,美国工程师 CONKLIN 提出了电磁感应法并获得专利;1925 年 SUNDBERG 用该法取得了找矿效果^[2],但直到 1934 年才由 SCHLUMBERGER 实现了该法的商业应用^[3]。LUNDBERG(1932)的著作奠定了交流电法的基础^[4],实际上该方法的根源还可以上溯到 1908 年 VAN BEMMELENE 的工作^[5]。

在一百多年的发展历程中,电磁法派生出许多分支,如感应法、强度法、航空电磁法等等。这些方法都曾经取得一定的效果,因为勘探深度不大以及异常

1.1 大地电磁法

现代意义上的大地电磁法(Magnetotelluric, 简称 MT)是建立在前苏联的 ТИХОHOB (1950)^[6]和法国的 CAGNIARD(1953)^[7]分别、独立地提出来的原理基础之上。或许由于当年交流的不便(东西两方处于冷战时期),西方地球物理学界对 ТИХОHOB 的论文知之甚少,便把 MT 获得的视电阻率命名为“卡尼亚(Cagniard)电阻率”,沿用至今。

MT 的理论基础源于以 Maxwell 方程组为基础的电磁场理论。大地电磁法既可在时间域也可在频率域中进行,但以频率域应用最广。它以天然交变电磁场为场源,当交变电磁场以波的形式在地下介质中传播时,由于电磁感应作用,地面电磁场的观测值将包含地下介质电阻率分布的信息;由于电磁场的趋肤效应的影响,不同周期的电磁场信号具有不同的穿透深度;因此,研究大地对电磁场的频率响应,可以获得地下不同深度介质电阻率的分布规律。

其实,在 ТИХОHOB 和 CAGNIARD 的论文发表

之前,人们已经在测量和利用天然电磁场,主要是测量天然电场,用来划分明显的构造,但无法计算出视电阻率。直到 ТИХОХОВ 和 CAGNIARD 的论文发表之后,才形成了大地电磁法视电阻率的概念。所以他们是大地电磁法的奠基人,在他们的文章发表之后,很快发明了同时测量电场与磁场的大地电磁仪,理论研究获得快速发展,从正演到反演形成了大地磁场的理论体系。

MT 具有利用天然场源、探测深度大、采用平面波理论阻抗形式简洁和解释简单等一系列特点,在大深度探测(如地球深部构造)方面具有独特的优势,使得它在不长的时间便风靡全球。20 世纪 50~70 年代是 MT 发展的黄金时期,VOZOFF 于 1986 年将 MT 的代表性文章编辑成《Magnetotelluric Method》一书出版,是 MT 的里程碑之作^[8]。除了专门的 MT 仪之外,Zonge 公司和凤凰公司都将 MT 的功能加入了它们的仪器中。我国刘国栋先生等^[9]最早研制成功大地电磁仪,并进行推广应用。

然而,MT 有两个与生俱来的缺点,一是信号微弱,二是信号随机,它们导致观测精度很低。为了提高精度,不得不在测量中对数据多次叠加,使得测量的速度非常慢,导致测点密度和频点数量受到极大限制,其结果就是垂直分辨率和水平分辨率都很低。尽管如此,由于没有其他电磁法的探测深度能达到 MT 的深度,人们不得不容忍它的缺点,继续使用。

1.2 可控源音频大地电磁法

多伦多大学的博士生 GOLDSTEIN,在导师 STRANGWAY 的指导下,于 1971 年写了一篇很好的博士论文,对 MT 进行改进^[10-11]。他以人工场源代替天然场源,在距离场源很远的地方(远区)电磁波可近似为平面波,他把均匀大地上电偶极子场源的电磁场表达式加以简化,取任意一组正交的电磁分量之比计算阻抗,从而也得到了卡尼亚视电阻率表达式。

GOLDSTEIN 的成果在勘查地球物理界引起了极大的反响,很快就成为一种新的电法勘探方法,风行全世界,被定名为 Controlled source audio-frequency magnetotellurics(可控源音频大地电磁法,简称 CSAMT)。

CSAMT 有三个特点:一是用人工场源,二是主要使用音频频率,三是沿用卡尼亚公式计算视电阻率。

与 MT 法相比,CSAMT 使用人工场源,克服了 MT 法场源随机的缺点,信号强度也比 MT 法大为提高。除了探测深度较小之外,它的工作效率、精度以及纵向和横向分辨率都有明显提高。自 CSAMT 被提

出 40 多年来,该方法在金属矿、地热以及水文、环境等领域得到了广泛的应用,成为受人欢迎的一种地球物理方法。

CSAMT 法也有它固有的缺点。首先是它所沿用的卡尼亚公式要求满足平面波近似,达不到平面波近似该公式便不成立。MT 法利用高空电离层中的电流以及赤道上空的雷电作为场源,在地面进行测量,场源与观测点的距离很容易满足平面波近似的条件。CSAMT 的人工场源布置在地面,在距离场源数千米到数十千米的地方进行测量。与 MT 法相比,CSAMT 的收发距就小得多,难以满足平面波近似。CSAMT 仍然按照卡尼亚公式计算视电阻率,相当于人为地丢弃了许多代表非远区特点的高次项,引入了不小的人为误差;丧失了原本具有的信号强度大,观测精度高的优势。其次是 CSAMT 发射的能量很难与天然场相比,探测深度比 MT 相差很远。第三是沿袭变频法的做法,依旧一个一个频率地逐次发送和接收,效率受到很大限制,而且,各频率之间的相对精度难以提高。

1.3 磁偶源频率测深法

比 CSAMT 提出略早,1969 年法国地质调查局的 DUROUX 发表了《Principe Te Mise En Ceuvre Du Sondage Electromagnetique Melos Techno》,提出了“磁偶源频率测深法”,又称为 MELOS 方法。MELOS 方法提出的初衷,是为了克服大地电磁法场源的随机性和信号微弱的缺点,MELOS 方法也是对 MT 法的一种改进。CSAMT 除了采用人工场源以外,其他的做法,如远区测量、测一组正交的电、磁分量以及用卡尼亚公式提取视电阻率等等一整套做法,基本上是沿用 MT 的,但是 MELOS 方法选择的技术路线与 CSAMT 的不同。

首先,MELOS 突破了远区测量的限制,把观测区域扩大到过渡区,拓展了人工源电磁法的测量范围,同时提高了信号强度。第二,MELOS 打破了必须从一对正交的电、磁分量仿照 MT 用卡尼亚公式提取视电阻率的做法,单测一个电分量或磁分量也能得到视电阻率。

MELOS 相对于 MT 少测一个分量,本来可以简化仪器装备、提高野外效率,但在非远区的电磁场表达式的级数展开中,存在一些含有超越函数甚至特殊函数的高次项。由于当时找不到一种简单的方式从测量结果中反算出地下的视电阻率,因此 DUROUX 只好采取校正的办法,通过校正系数把中远区的结果改正到远区去。这样,MELOS 最终也没能摆脱远区测量的窠臼。而为了取得校正系数,又必须至少同时测

量两个正交的磁分量, 如此以来, 只测一个分量的优势也丧失掉了。

MELOS 方法从克服 MT 法信号微弱以及采用卡尼亚公式要求测量一对正交电、磁分量的缺点出发, 最后又回到了远区测量多个分量的起点, 没能比 CSAMT 获得更大的推广, 不能不说是一件憾事。

1.4 频率测深法

除了 CSAMT 和 MELOS 方法之外, 还有一种称为“频率测深法”的人工场源频率域电磁测深方法。它利用接地的水平电流源或者不接地回线形成的垂直磁偶源作为场源, 测量电场或者磁场分量。测量方式可以有多种不同的组合, 而在实际工作中主要是采用接地的水平电流源(AB)和测量 M、N 两点之间电位差的 AB-MN 方式。

频率测深法要求在远区接收, 将偶极子场简化后, 便可以得到视电阻率的表达式。频率测深法在野外施工时场源(AB)和接收(MN)二者同时移动, 在每个测点上测得不同频率的视电阻率进行测深。由于频率测深法工作效率低, 也未能得到推广。

1.5 传统频率域电磁法的问题

不难看出, 电磁法发明 100 多年来, 由于地球是复杂的非均匀、强耗散介质, 电磁波的传播方程求解极其困难, 对电磁法数据只能做定性分析, 或者采用近似公式做定量分析。因此, 现有的人工源电法勘探方法, 不论是 CSAMT 法、MELOS 法, 还是频率测深法, 都存在某些不足。追根究底, 这些方法的共同问题在于将复杂的电磁场曲面波方程简化为平面波方程, 而平面波近似只在浅部适用, 随着深度增加, 公式误差增大, 分辨率和准确度急剧降低。

1.6 电磁法的出路

经过多年的研究, 笔者认识到, 传统电磁法的瓶颈体现在三个方面: 1) 方法理论方面, 采用平面波近似公式, 导致深部信息不准确; 2) 探测技术方面, 数据量少, 大量谐波信息被丢弃, 导致分辨率差、效率低、能耗高; 3) 仪器装备方面, 有效信号弱, 干扰信号强, 测量误差大, 信噪比低, 通用性差, 成本高。

笔者认为电磁勘探技术的唯一出路是抛弃平面波思维, 建立全新的曲面波电磁勘探理论, 推动电磁勘探技术与装备的变革, 实现地球物理学家的百年梦想。

笔者在国际上首次严格从电磁波方程出发, 率先将几何(观测系统)和物理(电磁感应)参数全部考虑在内, 定义了在任何位置都是正确的广域视电阻率参数,

结束了人工源频率域电磁法 40 多年沿袭大地电磁法视电阻率计算公式的历史, 发明了可在不限于“远区”的“广大区域”测量的广域电磁法, 颠覆了频率域电磁法只能在“远区”测量的思想。

广域电磁法继承了 CSAMT 场源可控的优点, 克服了 MT 场源随机性和信号微弱的缺点, 但摒弃了 CSAMT 变频发送的缺点, 而采用一次发送包含多个频率成分且振幅接近的伪随机信号^[12-14], 可以在“非远区”进行测量, 大大拓展了人工源电磁法的观测范围, 提高了观测速度、精度和野外勘探效率。

“大深度高精度广域电磁勘探技术与装备”2018 年获中国国家技术发明一等奖。

2 广域电磁法

2.1 基本理论

假设地球是均匀大地, 采用水平接地电偶极源作为场源时, 沿着场源方向的电场 E_x 和垂直场源方向的磁场 H_y 的严格表达式如下:

$$E_x = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} [3\cos^2\phi - 2 + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (1)$$

$$H_y = \frac{IdL}{2\pi r^2} \left[(1 - 4\sin^2\phi)I_1K_1 + \frac{ikr}{2}\sin^2\phi(I_1K_0 - I_0K_1) \right] \quad (2)$$

式中: I 为电流; dL 为发射源长度; i 为纯虚数; r 为收发距; ϕ 为 r 与发射源的夹角; ρ 为大地电阻率; $k = \sqrt{-i\omega\mu/\rho}$; μ 为导磁率; I_0 、 I_1 和 K_0 、 K_1 分别为以 $ikr/2$ 为变量的 0 阶、1 阶和第一类、第二类修正贝塞尔函数。

电磁法的探测能力由测量装置的“几何参数”和电磁效应在地下传播的“物理参数”共同决定。“几何参数”由发射-接收的相对位置、发射源长度和接收电极距离组成, 反映了测量装置的几何特性, 称为“装置系数”。“物理参数”是由频率、磁导率、大地电阻率和收发距构成的复函数, 反映了电磁效应在地下的传播特性, 称为“电磁效应系数”。

CSAMT 法假设在离发射源很远的“远区”, 忽略“装置系数”, 将式(1)和(2)中含有深部信息的高次项省略掉, 只考虑浅部的“电磁效应系数”, 用卡尼亚公式计算视电阻率参数。卡尼亚公式的“远区”需要收发距 $r \geq 15D$ (D 为探测深度), 如 $D=1$ km, 则 $r \geq 15$ km; 由于场源功率的限制, 一般 $r \leq 20$ km, 则 $D \leq 1.3$ km。

电场或磁场表达式中均含有电阻率信息,如果源的强度和发射-接收的相对位置已知,完全考虑“装置系数”和“电磁效应系数”,测量任意分量都可以求得视电阻率,这就是广域电磁法的思想。

广域电磁法从严格的电磁波方程出发,不做简化,首次将电流-频率-位置-大地电阻率-磁导率等全部信息考虑在内,采用迭代方法计算得到视电阻率参数,实现了全息电磁勘探;颠覆了CSAMT法忽略“装置系数”、只考虑浅部“电磁效应系数”的粗放做法,结束了人工源频率域电磁法沿袭大地电磁法视电阻率定义和计算公式40多年的历史,实现了电磁法由粗放到精细的跨越。

由于采用严格的表达式,考虑了“装置系数”和全部的“电磁效应系数”,可以在不局限于“远区”

的广大区域测量,收发距 $r \geq 3D$ 即可,如 $D=1\text{ km}$ 时, $r \geq 3\text{ km}$ 即可,颠覆了人工源频率域电磁法只能在“远区”测量的思想。

图1(a)所示为均匀大地电阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,收发距为 20 km 时的测深曲线。由于CSAMT忽略几何参数,只考虑浅部物理参数,因此视电阻率在 $D > 1.3\text{ km}(r/15)$ 以下深度时偏离了真实的 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,且深部的分辨率降低了。

广域电磁法考虑了全部的几何和物理参数,视电阻率是准确的,首次达到了人工源频率域电磁法探测深度的理论极限($r/3$)。同样的发送功率和收发距,广域电磁法的探测深度是CSAMT的5倍;大量野外实例证明,就目前的装备条件,广域电磁法的实际探测深度已经超过 8 km (见图2)。由式(1)可知,场强与 r^3

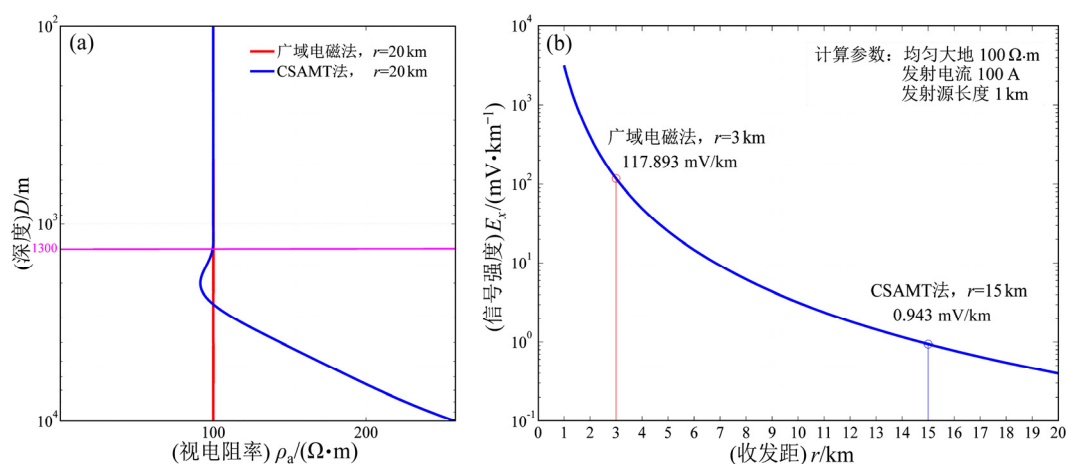


图1 均匀大地上广域电磁法和CSAMT法对比: (a) 测深曲线; (b) 信号强度

Fig. 1 Comparison of WFEM and CSAMT: (a) Sounding curve; (b) Signal intensity

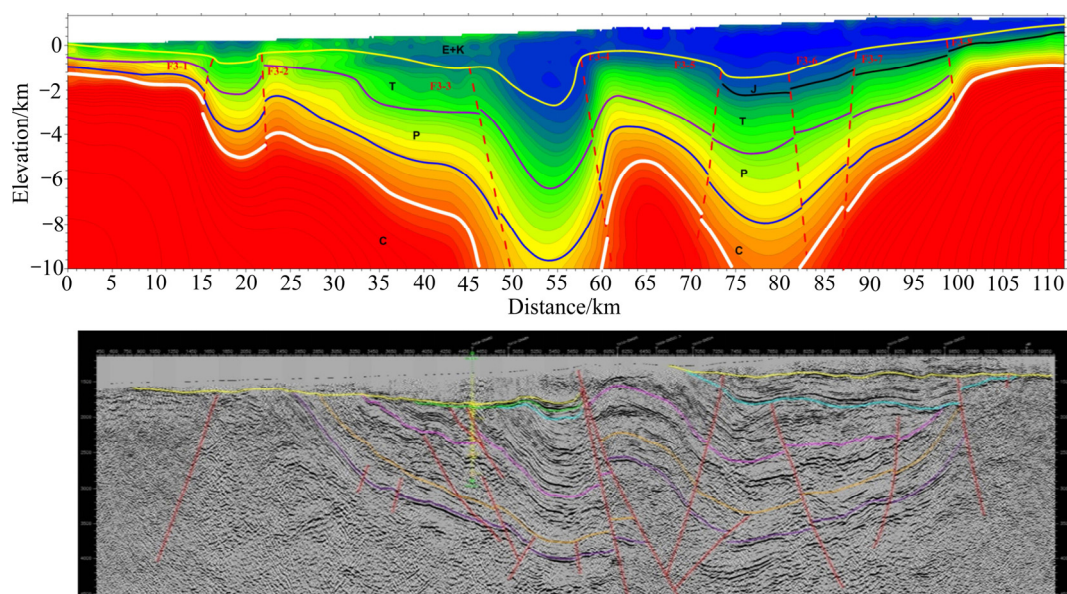


图2 广域电磁法和地震勘探效果对比(相同测线, 背靠背处理)

Fig. 2 Exploration results comparison of WFEM and seismic within same survey line

成反比,广域电磁法和CSAMT法的探测深度分别是 $r/3$ 和 $r/15$,同样的发送功率和探测深度,广域电磁法的信号强度是CSAMT法的125倍(见图1(b)),抗干扰能力大大提高。

2.2 探测技术

频谱密度和信噪比是制约频率域电磁法分辨率的核心关键,但传统人工源频率域电磁法存在两个瓶颈:一是采用“变频法”,需要逐一改变激励场源的电流频率实现测深,并通过长时间叠加提高单一频率的信噪比,工作效率低,难以实现高频谱密度测量;二是采用统计法或滤波法“去噪”,无法评估噪声对同频信号的污染程度,“去噪”效果难以保证。

人工源频率域电磁法数据具有鲜明特点:1)噪声存在于整个频谱;2)发射频率的个数有限,在频谱中的占比小于1%;3)除发射频率及其谐波处的噪声参数未知外,其余频谱中的噪声参数是已知的,即超过99%的噪声参数已知。

我们创造性地采用“反演”方法将噪声未知数(小于1%)解出,只保留信号,攻克了同频干扰去噪难题,实现了信号-噪声高度分离,除了获得发射频率信号外,还额外获得了大量(7倍以上于发射频率个数)的谐波信号,极大地提高了频率数据密度,颠覆了传统的统计法或滤波法“去噪”思路。

我们将数据分为周期和非周期部分,采用分步分域信号提取。

1) 周期部分(频率域信号提取):将主频及其谐波频谱置零,由相邻频点插值得到新的频谱;基于离散小波变换将预处理后的频谱分成低频和高频部分;基于希尔伯特变换识别高频部分的上包络线,并与低频部分重构得到频谱的整体上包络线,即为噪声的频谱;最后根据包络线与对应主频及其谐波振幅的比值计算噪声的影响幅度,筛选出高信噪比的主频和谐波信号。

2) 非周期部分(时间域信号提取):基于连续小波变换,获得非周期信号的能量分布信息,选择高斯噪声位置为重构点,基于傅里叶反变换和勒让德多项式联合逼近方法构造超定方程组,独树一帜的采用反演方法求解噪声在主频及其谐波的贡献,主频及其谐波的频谱减去噪声频谱,最终获得有效信号频谱。

由图3可见,采用我们发明的技术,在不增加野外工作量的情况下,获得频谱数据206个,是常规去噪方法获得数据量(24个)的8.6倍,曲线光滑,信噪比高;实现了宽频带频谱信号中所有有效信号(主频及其谐波)的快速-高精度提取,极大地提高了电磁法的

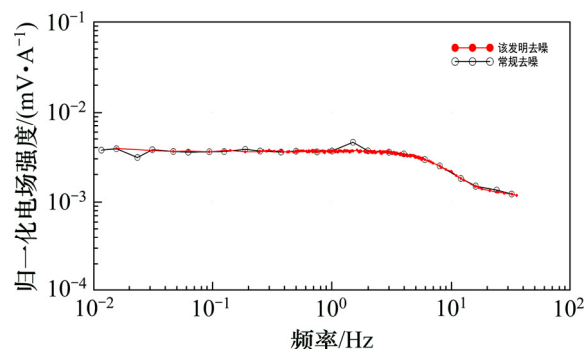


图3 版石盆地179点去噪效果对比

Fig. 3 Comparison of denoising effect at 179 station in Banshi basin

纵向分辨率和能源利用率。

2.3 仪器装备

宽频带、高频率密度、强信号、高测量精度是大深度高精度探测的关键。

CSAMT法采用粗放的仪器设计思想:1)采用“变频法”,需要逐个频率发射-接收,效率低、抗干扰能力差、测量精度低;2)多个电场共用一个磁场,导致虚假异常;3) $\delta_{\rho a} = 2\sqrt{\delta_{E_x}^2 + \delta_{H_y}^2}$,如 E_x 和 H_y 测量误差为1%时,视电阻率误差为2.8%,增大180%;测量时 E_x 和 H_y 必须严格垂直,实际常有偏差,又引入附加误差。

广域电磁法采用精细的仪器设计思想:1)采用宽频带频谱信号发射-接收,效率高、抗干扰能力强、测量精度高;2)每个测点均精确测量 E_x ,获得视电阻率,不产生虚假异常;3) $\delta_{\rho a} = \delta_{E_x}$,不引入附加误差。

我们采用大规模现场可编程门阵列技术实现宽频带频谱信号发射,基于“死区”控制技术保证大功率IGBT可靠开关,采用无源无损缓冲及高效热管散热技术,实现宽频带(0.01~8192 Hz)、高频率密度(80个频率)、大电流(200 A)电磁信号发射(见图4(a))。接收机采用精密低噪声模拟信号调理技术及高分辨、高速 $\Sigma-\Delta$ 模数转换器技术,实现高精度全波形电磁信号采集;在高精度浮点数字信号处理器上实现数字相干技术,快速提取电磁信号振幅和相位参数,压制同频干扰,极大的提高了信噪比。关键指标全面优于CSAMT商业仪器。

成功实现了200 kW宽频带大电流信号发射,上百台采集站阵列分布,实现大规模三维电磁勘探(见图4(b)),是目前能进行大数据三维电磁勘探的唯一仪器装备,打破了国外电磁法仪器的长期垄断。

发送机技术指标:① 最大发送功率 200 kW;

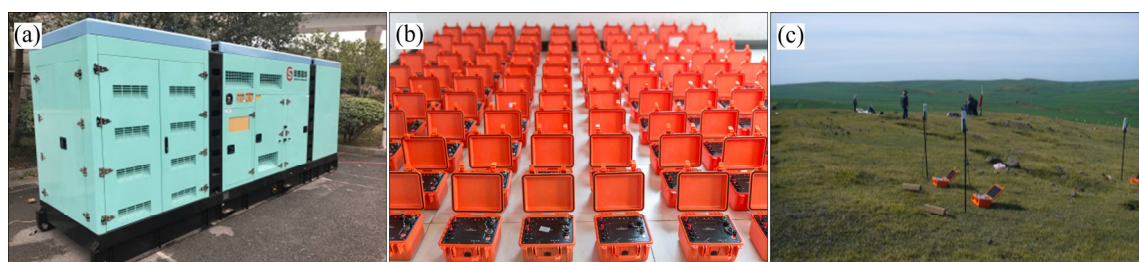


图4 广域电磁探测装备: (a) 200 kW 发射系统; (b) 接收机; (c) 大庆油田 3D 勘探

Fig. 4 WFEM equipment: (a) 200 kW launch system; (b) Receivers; (c) 3D exploration of Daqing oilfield

② 最大发射电压 1000 V; ③ 最大发送电流 200 A(峰值); ④ 电流测量精度 $\pm 0.5\%FS + 5\text{dgt}$; ⑤ 频带 0.01~8192 Hz。

接收机技术指标: ① 频带 0.01~8192 Hz; ② 测量精度 $\pm 1\%$; ③ 模数转换器分辨率: 24 bit; ④ 输入阻抗 $\geq 3\text{ M}\Omega$; ⑤ 50 Hz 工频压制 80 dB。

2.4 科学意义

广域电磁法结束了人工源频率域电磁法近半个世纪沿袭大地电磁法视电阻率计算公式的历史, 发明了可在不限于“远区”的“广大区域”测量的广域电磁法, 颠覆了频率域电磁法只能在“远区”测量的思想, 为电磁勘探开辟了崭新的研究领域, 有力地推动了电磁地球物理学的进步。

广域电磁法攻克了人工源频率域电磁法大深度—高精度勘探的关键核心难题, 研发了具有完全自主知识产权的大深度高精度探测技术与装备, 将人工源频率域电磁法的探测深度由 1.5 km 提升至 8 km, 频率数据密度提高 7 倍以上, 实现了电磁法由粗放到精细的跨越, 满足了“深地探测”战略“形成 3000 米以浅矿产资源勘探技术, 储备 5000 米以深资源勘查前沿技术”的要求, 成为“深地探测”战略的关键支撑技术。

2.5 经济和社会效益

矿产资源是人类文明进步、国民经济发展和科学技术革命的基础。在世界经济中, 95%以上的能源、80%以上的工业原料和 70%以上的农业生产资料来源于矿产资源。长期来看, 矿产资源作为我国国民经济的重要基础地位不会改变, 矿产资源的供应安全, 仍是我国国家安全的重要方面^[15]。

我国是一个资源大国, 目前已发现的矿产有 170 余种, 资源开采量居世界第二。新中国成立 70 年以来,

我国矿产资源生产和勘探工作一直支撑着社会主义经济建设和工业化发展, 大幅地提升了我国的综合国力。然而, 我国在工业化进程中, 社会经济可持续发展正面临资源紧缺的严重压力, 随着矿产开发力度的加大, 资源储备急剧下降, 已勘探的能源和固体矿产资源对工业化的保障程度日趋下滑, 资源的供需矛盾日益突出。

我国浅部矿产资源, 如露头矿、浅部矿, 已大幅减少。从国土资源部对全国 1010 座大中型矿山资源潜力的调查结果可知, 60%以上的矿山可开采的潜力严重不足。铁、铜、铝、钾盐等重要矿产高度依赖进口, 对外依存度高达 50%~80%, 远高于国家经济的安全警戒线(对外依存度 40%)。矿产资源短缺日益严重, 后备探明储量严重不足的现状令人堪忧, 已成为制约我国经济发展的重大瓶颈。

广域电磁法被誉为“绿色、高效、低成本”的勘探技术, 可以在以下几方面发挥积极而重大的作用:

1) 建立了适合我国国情和复杂地质—地表条件的页岩气预测评价体系, 施工效率比传统方法提高 3 倍以上, 节约下降超过 70%; 2) 为生产矿山深边部或接替资源提供了有力的勘探手段; 3) 为火山岩油气提供了有力的勘探手段; 4) 为黄土塬地区油气提供了有力的勘探手段; 5) 为煤矿水害提供了有力的勘探手段; 6) 为剩余油分布提供了有力的监测手段; 7) 为页岩气压裂提供了适用的监测手段; 8) 为地质灾害的防治提供了有效的技术手段。

广域电磁法在中石油、中石化、中国地调局、神华、华电等 50 多家单位成功应用, 在页岩气、常规油气、生物气、地热、固体矿产及煤矿水害等勘探工作中全面推广应用。其中页岩气勘查面积超过 3 万平方千米, 提交资源量或地质储量 4641.22 亿立方米; 获得常规油气地质储量 1.86 亿吨; 获得生物气储量 80

亿立方米；释放了煤炭储量 2000 多万吨。广域电磁法为我国矿产资源保障、经济发展和社会安全提供了有力支撑，有力地推动了我国矿产勘探行业的进步。

3 应用前景与展望

广域电磁法建立了以曲面波为核心的电磁勘探理论，构建了全息电磁勘探技术体系，实现了频率域电磁法由平面波到曲面波的理论跨越；突破了宽频带—高频率密度电磁信号高效发射、频谱周期信号快速提取等多项重大关键技术，攻克了人工源频率域电磁法的核心理论和技术难题，研发了具有完全自主知识产权的大深度高精度探测技术与装备。广域电磁法在常规油气、页岩气、生物气、固体矿产、地热及煤矿水害探测等领域中得到成功应用，取得了理论—方法—技术—装备—应用的全创新链成果，实现了电磁法由粗放到精细的跨越，有力地支撑了“深地探测”战略，为我国矿产资源保障、经济发展和社会安全提供了有效支撑，具有广阔的应用前景和市场前景。

REFERENCES

- [1] WARD S H. Electrical, electromagnetic, and magnetotelluric methods[J]. *Geophysics*, 1980, 45(11): 1659–1666.
- [2] SUNDBERG K, LUNDBERG H, EKLUND J. Electrical prospecting in Sweden[M]. Årsbok 17, Sveriges Geologiska Undersökning, Stockholm, 1923.
- [3] SCHLUMBERGER M. The application of telluric currents to surface prospecting[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1939, 20(3): 271–277.
- [4] LUNDBERG H, ZUSCHLAG T. A new development in electrical prospecting[C]//*Geophysical Prospecting*. New York: Amer Inst Min Met Eng, 1932: 47–62.
- [5] VAN BEMMELEN W. Registration of earth-currents at Batavia for the investigation of the connection between earth-current and force of earth-magnetism[C]//*NEDERLANDSE K, VAN WETENSCHAPPEN A. Proceedings Series B: Physical Sciences*, 1907, 10: 512–533.
- [6] TIKHONOV A N. On determining electric characteristics of the deep layers of the Earth's crust[J]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1950, 73(2): 295–297.
- [7] CAGNIARD L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting[J]. *Geophysics*, 1953, 18(3): 605–635.
- [8] VOZOFF K. Magnetotelluric methods[M]. Soc of Exploration Geophysicists, 1986.
- [9] 刘国栋, 陈乐寿. 大地电磁测深研究[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
LIU Guo-dong, CHEN Le-shou. Study on magnetotelluric methods[M]. Beijing: Seismological Press, 1984.
- [10] GOLDSTEIN M A, STRANGWAY D W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source[J]. *Geophysics*, 1975, 40(4): 669–683.
- [11] GOLDSTEIN M A. Magnetotelluric experiments employing an artificial dipolar source[D]. Toronto: University of Toronto, 1971.
- [12] 何继善. 2" 系列伪随机信号及应用[J]. *中国地球物理学会年刊*, 1998: 199.
HE Ji-shan. 2" Pseudo-random signal and its application[J]. *Annual Journal of the Chinese Geophysical Society*, 1998: 199.
- [13] 何继善. 频率域电法的新进展[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1250–1254.
HE Ji-shan. The new development of frequency domain electro-prospecting[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(4): 1250–1254.
- [14] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
HE Ji-shan. Wide field electromagnetic sounding methods and pseudo-random signal coding electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [15] 王家枢, 张新安, 张小枫. 矿产资源与国家安全[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
WANG Jia-shu, ZHANG Xin-an, ZHANG Xiao-lang. Mineral resources and national security[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.

Theory and technology of wide field electromagnetic method

HE Ji-shan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education; Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Non-ferrous and Geological Hazard Detection, Changsha 410083, China;

3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Mineral resources are the material basis for building a moderately prosperous society in all respects by the time the Communist Party of China celebrates its centenary in 2021, and to turn China into a modern socialist country that is prosperous, strong, democratic, culturally advanced, and harmonious by the time the People's Republic of China celebrates its centenary in 2049. With the depletion of shallow resources, the strategy of 'deep exploration' is proposed for mineral resources. Electromagnetic method is one of the pillar methods for deep exploration. However, due to the strong inhomogeneity and dissipation of the earth, the solution of the propagation of underground electromagnetic wave has become a century-old problem. Therefore, the traditional electromagnetic method has some shortcomings in probe depth, accuracy and accuracy, which has become the key bottleneck of the 'deep exploration' strategy. The author invented a new geophysical exploration method-wide field electromagnetic method (WFEM), established the electromagnetic exploration theory with curved surface wave as the core, and constructed the technical system of holographic electromagnetic exploration. The span of frequency-domain electromagnetic method from plane wave to curved wave was realized. The author also developed a large-depth and high-precision exploration technology and equipment with completely independent intellectual property rights, which realizes high signal-to-noise ratio, high precision and fast measurement of electromagnetic signals under strong interference conditions. The probe depth, resolution and signal intensity of WFEM are 5, 8 and 125 times higher than those of CSAMT, respectively, realizing the leap from rough to fine of electromagnetic method.

Key words: wide field electromagnetic method; large depth; high precision; pseudo-random signal

Foundation item: Project(2018YFC0807802) supported by the National Basic Research Development Program of China;

Project(41874081) supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China

Received date: 2019-07-10; **Accepted date:** 2019-08-22

Corresponding author: HE Ji-shan; Tel: +86-731-88877075; E-mail: hejishan@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)