

电法勘探方法发展概况

李 金 铭

(中国地质大学, 北京 100083)

摘 要 本文简要叙述了80年代以来,我国常用和发展较快的几种主要电法的发展概况。这些方法有激发极化法、频谱激电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法和探地雷达。

关键词 电法勘探方法, 激发极化法, 频谱激电法, 瞬变电磁法, 可控源音频大地电磁法, 探地雷达。

众所周知,电法是应用地球物理学中方法种类最多,应用面最广、适应性最强的一门分支学科。实践证明,它在深部构造、固体矿产、能源和水文、工程、环境等各地质领域的勘测调查中,已经和正在发挥着重要作用。80年代以来,随着经济建设的迅猛发展和科学技术的不断进步,和其它地球物理方法一样,电法在方法理论和方法技术等方面都得到了很大提高,取得了许多理论和应用重要成果。由于电法勘探方法的种类很多,发展也是多方面的,限于篇幅,这里仅对其中常用的和发展较快的几种主要方法,如激发极化法、频谱激电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法和探地雷达等作扼要介绍。其它电法80年代以来的发展概况,可参考最近由地质出版社出版的《电法勘探新进展》^[1]一书。

1 激发极化法^{[2] - [25]}

激发极化(激电)法是50年代末和60年代初,在我国开始试验研究和推广的。实践证明,它是应用最广和效果最好的一类电法勘探方法,早期是以直流(时间域)激电法为主,通过长期应用和研究取得了许多重要成果,如短导线测量和近场源激电法等。为了提高激电的抗干扰能力和减轻装备,70年代初又开始研究推广了交流(频率域)激电法,主要是变频法。中南工业大学提出的双频激电法是对变频法的发展。为解决异常区分和电磁耦合问题,80年代初又开始对频谱激电法进行研究,之后通过大量工作,取得了不少有价值成果。与此同时,时间域频谱激电法也得到了进一步发展。关于频谱激电法的发展概况,下面将专题介绍。这里仅对常规激电法自80年代以来在实际应用、资料解释等方面的进展情况作扼要叙述。

激电法在找水方面的应用,与国外相比我国做的工作最多且颇有成效。继70年代初由原陕西省地质局第一物探队提出衰减时法找水之后,山西平遥卜宜水利电探仪器厂又提出了激发比和衰减度等综合参数找水方法并研制了相应仪器,通过推广取得了明显经济和社会效益。为了发展以衰减时为主的找水方法,1985年以来,北京地质仪器厂相继研制生产了微机激电仪、微机电测仪和地面井中测量合为一体的多功能电法仪。在此期间,中国地质大学对激电法找水的应用基础和解释理论进行了系统研究,提出了激电找水的新参数—偏离度,并在应用中取得了明显找水效果。由山西平遥卜宜水利电探仪器厂、河南农科院农经区划研究所、黑龙江省水利厅和中国地质大学(北京)等十单位协作完成的“激发极化法找水的研究和推广”

项目,据不完全统计,共创直接和间接经济效益 3.6 亿元。该项成果获得了 1992 年国家科技进步二等奖。目前激电法找水仍在继续发挥作用。近年由我国派往非洲等国的找水队伍,用激电法找水取得了令人满意的效果。

用激电法找油,前苏联和美国等国始于 70 年代,我国自 1976 年开始,石油部物探局与武汉地质学院等单位协作,首先在冀中和内蒙等油区开展了试验研究工作。80 年代以来,中科院地球物理研究所与地矿部物化探研究所等单位协作,又先后在我国西南、华北和西北等油区做了大量深入的试验研究工作。他们根据对不同时代、不同圈闭类型和不同埋深油气藏上的地面和井中激电资料以及物性测定、矿物和同位素分析,证实了激电异常与油田上覆地层的次生黄铁矿有关,而次生黄铁矿又与油气渗漏和逸散密切相关,由此说明了激电异常与深部油储的内在联系。在此基础上建立的地、物、化综合参考模型及异常模式对后来激电法找油的生产性工作起到了重要指导作用。如新疆准噶尔盆地和大港油田等地区,以此模型、模式为指导均取得了明显找油效果。

激电异常的定量解释,由于长期以来都停留在特征点法的解释水平,因此在某种程度上直接影响了激电法的进一步发展。为了提高激电法对二维、三维极化体激电异常的定量解释水平,并实现解释过程计算机化,中国地质大学(北京)在 B. A. 柯马罗夫近年(1989)提出的“用点测深资料作地电断面图的定量解释方法(相对强度法、积分参数法、微分参数法)基础上,研制了计算机解释成图软件,并通过系统的理论计算、数值模拟和物理模型实验,总结了在不同地电条件下,上述方法对确定极化体中心埋深、产状、上界面位置及轮廓的定量解释效果。由于这一方法的解释结果形象、直观且比较实用,因此易于推广。

常规激电法的发展方向,除继续提高定量解释水平和实现计算机解释自动化以外,为了寻找我国西部地形比较复杂和难进入地区的金属矿产资源,激电法还需考虑如何进一步解决方法的轻便化问题。

2 频谱激电法^{[26] - [61]}

频谱激电法(SIP)是 70 年代国际上发展起来的一种新的激电分支方法,它利用常规电阻率法的电极装置,在超低频段上($n \cdot 10^{-2} - n \cdot 10^2 \text{ Hz}$)作多频视复电阻率 $\rho_s(i\omega)$ 测量,根据 $\rho_s(i\omega)$ 的频谱特性及其空间分布规律,推断地下地质情况,达到地质找矿目的。因为此法是观测视复电阻率,故又称为复电阻率法(CR)。1978 年 W. H. Pelton 等发表的“利用多频激电测量作矿物区分和去除电磁耦合”的著名论文,奠定了 SIP 法的基础。1981 年 K. L. Zonge 等提出了他们在油气田上开展复电阻率法和利用剩余电磁效应(REM)找油气获得很高成功率的报告,将 SIP(或 CR)法的应用,扩展到新的领域。

由于频谱激电法获得的谱参数可为解决激电法的两大难题(识别和分离激电与电磁效应及评价激电异常)提供宝贵的信息,因而这一方法引起了国内外同行的广泛重视。

我国从 80 年代初期开始进行谱激电法的理论研究。1983 年地矿部引进了加拿大凤凰公司的 IPS-3 型频谱激电仪器系统,开展了 SIP 法试验和生产工作。随后,中国科学院地球物理研究所、新疆地矿局、新疆有色金属地质勘探公司、中南工业大学、地矿部物化探研究所和非金属地质公司等单位,相继引入凤凰公司新一代仪器(V-4 和 V-5)系统、美国 Zonge 公司的 GDP-12 和 GDP-16 及加拿大先达利公司的 IPR-11 仪器系统。此外,中南工业大学、中科院地球物理研究所与无锡电子技术应用研究所、长春地质学院和地矿部地质矿产经济技术研究院等单位,还研制了国产的谱激电仪器系统。目前,我国已基本具备了开发、乃至推广使用

SIP 法的技术条件。

在引进和研制仪器系统的同时,中国地质大学、中科院地球物理研究所、中南工业大学、北京有色金属矿产地质研究所及地矿部中国地质勘查技术院等单位,对 SIP 法的理论和应用开展了系统和深入的研究,取得了一系列重要的研究成果。其中,在物理-化学基础、模拟相似准则、复杂条件下三维体的激电、电磁模拟和由视谱直接反演真谱参数等方面的研究成果,均具有较高理论水平和实用价值。

在理论研究的基础上,我国物探工作者开展了较大工作量的 SIP 法野外试验和生产工作, SIP 法在实际应用方面取得了瞩目的成果。首先是建立了一整套合理和实用的野外工作方法技术,制定了规范性的工作条例;在国外软件的基础上,纳入了我国的理论研究成果,研制了包括 SIP 法正演计算、数据处理、反演解释和成果绘图的应用软件系统;总结了在各种炭质岩层、有色和黑色金属矿产及油气田上, SIP 法的异常特点和规律。其次,在正确理论和方法的指导下,找到两处有工业价值的铜多金属矿、开拓了 SIP 法在油气勘查的应用领域,取得了比较突出的地质效果。与此同时,用时间域谱激电法在一大型铅、锌、银、金矿床上,也取得了明显找矿效果。

十几年来,我国开展的频谱激电法工作,虽然取得了很大成绩,但对上述两大难题,即激电效应与电磁效应的分离和激电异常的评价并未完全解决,今后仍需继续进行研究。另外,为了加大方法的探测深度(目前只能达到 200—500m),还应研制大功率的仪器设备。

3 瞬变电磁法^{[62] - [80]}

瞬变电磁法(TEM)是近年来发展很快的电法勘探分支方法。它是利用一定波形的脉冲激发,在一次场断电后,通过观测二次场随时间的衰减特性达到地质目标的一种时间域电磁法。它除了具有电磁法穿透高阻层能力强及人工源方法随机干扰影响小等优点外, TEM 法还明显地具有断电后观测纯二次场,可以进行近区观测,减少旁侧影响,增强电性分辨能力;可用加大发射功率的方法增强二次场,提高信噪比,从而增加勘探深度;通过多次脉冲激发后场的重复测量叠加和空间域拟地震的多次覆盖技术应用,提高信噪比和观测精度;可通过选择不同的时间窗口进行观测,有效地压制地质噪声,获得不同勘探深度等一系列优点。

在国外,前苏联 50 年代已基本建立了瞬变电磁法解释理论和野外施工的方法技术,理论研究方面也一直走在世界前列,50—60 年代由 Л. Л. ваньян, А. А. куфманн 等人成功地完成了瞬变电磁法的一维正、反演。70—80 年代前苏联地球物理工作者又在二、三维正演方面做了大量工作。80 年代初,前苏联学者 жданов 提出了电磁波拟地震波的偏移方法。80 年代末,前苏联一些学者又从激发极化的现象理论出发,研究了时间域瞬变电磁法的激电效应特征及影响,成功地解释了瞬变电磁法晚期段由电磁响应的变号现象。目前由俄罗斯生产的大功率瞬变电磁法(建场测深法)仪器已在我国石油系统打开局面。1992 年,中俄建场测深法在我国某些探区的联合试验,取得了良好的地质效果。欧美各国虽然于 50 年代就提出了该方法,并做了一定试验工作,但大规模发展 TEM 法始于 70 年代, J. R. wait, G. V. Keller, A. A. kaufmann 等人对该方法的一维正、反演及方法技术进行了大量研究,80 年代以来,随着计算机技术的发展,欧美各国在瞬变电磁法的二、三维正演模拟技术方面日臻完善。另外,几乎与 жданов 同时, S. Lee 根据电磁波与地震波的相似性,利用有限差分法实现了电磁波场的二维偏移和电磁数据的成象。欧美学者对时间域瞬变电磁法的激电效应研究始于 80 年代初,其中 P. Weidelt, G. W. Hohmann, T. J. Lee, M. F. Flis, A. P. Reiche, B. R. Spies 等人的工作奠定了

该领域的研究基础。西方早期生产的瞬变电磁法仪器主要是单一方法用的仪器,如加拿大生产的 EM-37 系统、UTEM 系统、PEM 系统及澳大利亚的 SIROTEM 系统等。近年来,电磁法仪器趋向于集成化,各种多功能电测系统,如加拿大凤凰公司生产的 V-5 和美国 Zonge 公司生产的 GDP-16 已广泛地占领了国际和我国市场。

国内瞬变电磁法研究自 80 年代初开始,由长春地院、地矿部物化探研究所、中南工业大学等单位分别在方法理论、仪器及野外试验方面做了一定的工作,目前已比较完整地建立了一维正、反演及方法技术理论,并自行研制了几种功率较小、勘探深度较浅的单一方法仪器,如物化探研究所研制的“WDC-1 和 WDC-2 瞬变电磁系统”及中南工业大学研制的“SD-1 和 SD-2 瞬变电磁仪”等。大功率、多功能瞬变电磁法仪器尚有待研制,目前主要依赖进口。

瞬变电磁法今后的发展方向可概括为如下几个方面:(1)理论方面,与实际地质构造接近的复杂二、三维问题正、反演;电磁拟地震的偏移及成像技术;瞬变电磁法的激电效应特征、分离技术和解释方法等。(2)方法技术方面,类似于 CSAMT 的双极源瞬变电磁法;拟地震的工作方法技术,如时间域多次叠加和空间域多次覆盖技术等。(3)仪器方面,主要是发展大功率、多功能、智能化电测系统,高温超导磁探头的研制及磁场观测和解释方法研究。(4)应用方面,除了通常应用于金属矿产及石油资源的勘查外,还应在地下水、地热、环境及工程勘查、井中瞬变电磁法及深部构造等方面拓宽其应用及研究领域。

4 可控源音频大地电磁法^{[81] - [99]}

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是 70—80 年代国际上新发展起来的一种电法勘探方法。由于该方法的探测深度较大(通常可达 2km)且兼有剖面和测深双重性质,因此颇受青睐。

1986 年我国石油物探局引进国外仪器,并首先在国内进行了一次方法的试验研究。随后,煤炭工业部、地矿部、有色金属工业总公司和中国科学院等部门,相继开展了 CSAMT 法的试验和生产工作。从首批引进加拿大的 V-4 和美国的 GDP-12 到近年引进的新一代 V-5 和 GDP-16 以及 GDP-32,目前国内已拥有十多套仪器在开展 CSAMT 法工作。实践证明,用 CSAMT 法在寻找隐伏金属矿、油气构造勘查、推覆体或火山岩下找煤、地热勘查和水文工程地质勘查等方面,均取得了良好地质效果。

应当看到,采用人工场源作 AMT 测量,虽然有信号较强,易于观测和生产效率高等优点,但随之而来的一系列与人工场源有关的问题需要解决。首先,采用大功率人工源使 CSAMT 法的装备十分笨重,生产成本也较高。其次,由于发送功率有限,为保持足够的观测信号,收发距 r 相对趋肤深度 $\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu}$ 不是很大时,电磁场进入近区($r/\delta \ll 1$)或“过渡区”(r/δ 接近于 1)。然而,卡尼亚电阻率计算公式是对远区(或称波区, $(r/\delta \gg 1)$ 导出的。在过渡区或近区,卡尼亚视电阻率 ρ_s 将发生畸变,即使在均匀大地条件下,算出的 ρ_s 也明显偏离大地的真电阻率,这称为非波区场效应或近场效应。加拿大凤凰公司提出了一种近场校正方法——过渡三角形法,能将均匀大地条件下近区和过渡区的 ρ_s 校正到接近大地真电阻率,但仍有 10—20% 的相对差。我国学者利用迭代法和数值逼近法建立了新的近场校正法,校正效果较好,在均匀大地条件下,校正计算的等效电阻率或全频域视电阻率非常接近大地真电阻率。

长期以来,CSAMT 法的一维反演方法是先将野外实测卡尼亚视电阻率频率测深数据作近场校正;然后用大地电磁法(MT)的反演方法,对近场校正后的数据作解释。这种作法最多只能是一种粗略近似的半定量解释方法,严格的 CSAMT 定量解释应该直接采用基于实际使用的三维场源建立的反演方法,我国学者建立的双极源 CSAMT 法的一维正、反演算法,应用

效果甚佳。

在二维和三维地电条件下,双极源 CSAMT 的观测结果,既与观测点也与场源下方的地电分布有关(场源复印效应或场源附加效应),还能反映出场源和测点之间的电性不均体的影响(阴影效应)。这些由人工场源引起的复杂现象,其影响规律和校正方法尚待研究,研究的困难在于,二维或三维地电条件下,双极源电磁场的计算十分复杂。均匀围岩或二层非各向同性大地基岩中存在局部三维不均匀体时,双极源电磁场的正演数值计算(积分方程)算法虽已解决,但所要求的存贮量($>8\text{Mb}$)和计算量都很大。二维地电条件下,电偶极源电磁场的数值计算(有限元)算法,国内外都已进行了多年研究,直到最近才获得突破,如能研制出实用程序,将对 CSAMT 法各种场源影响规律和校正方法的研究及过渡区观测结果的解释,起重要的推动作用。

与 MT 和 AMT 法相同,CSAMT 法也受地表局部不均匀造成的“静态效应”影响,我国学者针对 CSAMT 法的特点,研究和建立了多种静态校正方法,效果也很好。

为了推动 CSAMT 法的进一步发展,如上所述,应深入研究二维和三维条件下,由人工场源引起的各种复杂现象对双极源 CSAMT 观测结果的影响规律和校正方法,提高观测结果的解释水平。另外,应参照国外仪器标准,尽快完成国产多功能电法仪器的研制工作。

5 探地雷达^{[100] - [104]}

探地雷达与探空雷达技术相似,也是利用宽带高频时域电磁脉冲波的反射探测目标体,只是它的频率较低,并且是从地面向地下发射电磁波解决地质问题,故又称“地质雷达”。将雷达原理用于探地,早在 1910 年就已经提出。在以后的六十年中脉冲技术作为一种探测方法,多限于波吸收很弱的冰、盐等介质中。70 年代以后,探地雷达的实际应用范围迅速扩大。

随着微电子工艺的迅速发展,现在的探地雷达设备正在由庞大、笨重结构改进为现场适用的轻便仪器。目前,已推出的商用探地雷达有美国微波联合体(Microwave Associates)的 MKI 及 II、加拿大探头及软件公司(SSl)的 PulseEKKO 系列、美国地球物理探测设备公司(GSSI)的 SIR 系列、瑞典地质公司(SGAB)的 RAMAC 钻孔雷达系统、俄国 XADARInc 的 XADAR 系统等。研制中雷达有挪威地质技术研究所 NGI 雷达、瑞典 MRS 系统、英国 ERA 工程技术部的雷达仪、美国 INFRASENSE Inc. 的 PAVLAYER 和 DECAR 等。这些雷达仪使用的中心工作频率在 1—3000MHz 范围,时窗达 20000ns。据报道,已推出的商用雷达,根据不同的地下地质条件,地面系列的探深约在 30—50m,分辨率可达数厘米,深度符合率小于 $\pm 5\text{cm}$ 。探地雷达由于采用了宽频短脉冲和高采样率,使其探测的分辨率高于所有其它地球物理手段。

我国探地雷达仪器的研制始于七十年代初期,地矿部物探所、煤炭部煤科院以及一些高校和其它研究部门均做过探地雷达设备的研制和野外试验工作。当时使用的是同点天线,以高频示波显示回波直接读取反射初至或照相记录波形。但是由于种种原因,这一研究未能正式用于实际。现在,国家地震局、水电勘测设计部门、煤炭部门、铁道部门、黄河水利委员会有关部门以及工程勘测单位和一些高校相继引进了国外仪器,探地雷达的应用和理论研究工作也正日益扩展。

中国地质大学(武汉)于 1990 年利用教委系统世界银行贷款从加拿大引进探地雷达设备后,开展了一系列理论和雷达数据正反演研究以及工程现场的试验和勘测工作。截止 1994 年年中,已经完成了十六个省、自治区直辖市的九种岩土类型六十余个工程工区的众多工程地质勘测任务。

理论研究方面,目前仍相对集中于信号处理。但当前的信号处理还仅仅停留在地震资料处理技术的借鉴和移植上,电磁波实际传播特性要求雷达资料处理在相当程度上有别于弹性波的方法。这方面的研究,包括雷达探测的正反演课题正在进行之中。探地雷达,由于使用了很高的工作频率,电磁波能量在地下的衰减较剧,因而在高导厚覆盖条件下,探测范围受到限制。与其他物探方法一样,探地雷达图像的正确判读和解释,始终是探地雷达工作者的一项重要和艰巨的任务,今后应作为重点进行研究。

6 后记

最后,谈谈关于岩性测深(Petro Sonde - PS)法的发展概况^{[105 - [112]}。大家记得,1985年—1986年美国GI公司来我国表演时,PS法在大深度上显示出的高分辨率和识别油、煤、水的能力,引起了我国物探界的高度重视。但由于该公司对PS法原理解释明显缺乏说服力,以致在国内物探界产生了不少争议,国外地球物理学家也大都持怀疑态度。然而PS法的神奇效果已被试验所证实,因此近十年来,国内许多学者都在按照自己的认识和理解对PS法的理论机制和仪器进行了大量研究,发表了多篇论文并研制出了数种仪器。不过从结果来看,至今还没有哪种对理论机制的解释能被普遍接受,还没有哪种仪器能给出重复性很好、再现性很强的资料。并且在观测结果的解释方面还带有不少主观因素和个人经验的性质。因此,为了揭开这个“谜”,应当象文献[112]中作者所建议的那样:“加强对该法理论基础的研究和讨论;有关部门或学术团体,组织对现有仪器的技术性能和应用效果进行更权威的、科学的测试和评定;在对有关技术依法保护个人或单位知识产权的条件下进行公开的切磋交流,争取早日对这一方法技术作出人们能够普遍接受的评价和发展决策”。

参 考 文 献

- [1] 李金铭、罗延钟主编,电法勘探新进展,地质出版社,1996。
- [2] 傅良魁主编,激发极化法,地质出版社,1982。
- [3] 傅良魁、李金铭、史元盛,近场源激发极化法,地质出版社,1986。
- [4] 何继善、鲍光淑,频率域激发极化法中的双频幅频观测,物探与化探, No. 3, 1983。
- [5] 陕西省地质局第一物探队,激发极化法衰减时法找水实验研究阶段报告,激发极化法文集,地质出版社,1975。
- [6] 钟新准, JJ-2 型积分式激发电位仪,物探与化探, No. 1, 1980。
- [7] 夏治平, DWJ-1 微机激电仪,物探与化探, No. 1, 1985。
- [8] 夏治平、连克, DWD-1 型微机电测仪,物探与化探, No. 4, 1987。
- [9] 钟新准、陈居和,找水新法—激发极化法,水利电力出版社,1987。
- [10] 李金铭、程学栋、高杰,激电找水应用基础研究,物探与化探, No. 4, 1990。
- [11] 傅良魁、孟海东、宋宇辰,激发极化法找水的一些新进展,物探与化探, No. 6, 1993。
- [12] 李金铭,激电找水的新参数—偏离度,勘察科学技术, No. 6, 1993。
- [13] 金学名,偏离度参数在激电找水中的应用效果,物探与化探,第4期,1993。
- [14] 李金铭等,激发极化法找水基础理论研究,地质出版社,1994。
- [15] 刘任,应用激发极化法直接寻找油气研究,石油地球物理勘探,第4期,1980。
- [16] 吴广耀,直接找油电法勘探的研究,地质科技情报,第1期,1983。
- [17] 张赛珍、聂馨五等,激发极化法探测油气田—异常成因与油气藏关系的探讨,地球物理学报,第6期,1986。
- [18] 聂馨五、张赛珍等,激发极化法探测油气田—效果及异常模式探讨,地球物理学报,第3期,1987。
- [19] 张赛珍、石昆法、周季平,激发极化法勘查油气藏的应用基础和应用实例,物探与化探,第5期,1989。
- [20] 周安昌、杨冠鼎等,激发极化法找油在大港油田的应用,物探与化探,第5期,1990。

- [21] 行英弟, 大功率激电在油气勘探中的应用效果, 物探与化探, 第 3 期, 1995。
- [22] 王晓红, 激电法在西北某油田上的应用效果, 物探与化探, 第 1 期, 1996。
- [23] 柯马罗夫 B. A. 等, 阎立光译, 李金铭校, 应用点测深(T3)作地电断面图的方法指南, 地质出版社, 1992。
- [24] 李胜辉、李金铭、魏文博, 固定点源测深法定量解释影响因素的理论与实验研究, 中国地球物理学会第十一届年会(荆沙市, 1995 年 10 月)报告, 1995。
- [25] 陈本池、李金铭、魏文博, 复杂条件下固定点源测深法定量解释效果的数值模拟研究, 中国地球物理学会第十一届年会(荆沙市 1995 年 10 月)报告, 1995。
- [26] Pelton W. H., et al, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multirequency IP, Geophysics, 43, 586 - 609, 1978.
- [27] Zonge K. L., Hughes L. J and Carlson N. R., Hydrocarbon exploration using induced polarization, apparent resistivity and eletromagnetic scattering, Presented at the fifty - first annual international meeting and exposition SEG, 1981.
- [28] Wong J., An electrochemical model of the IP phenomenon in disseminated sulfied ores, Geophysics, 44, 1245 - 1265, 1979.
- [29] Guptasarma D., Effect of surface polarization on resistivity modeling, Geophysics, 48, 98 - 106, 1983.
- [30] Guptasarma D., True and apparent spectra of buried prlarizable targets, Geophysics, 49, 171 - 176, 1983.
- [31] Soininen H., The behavior of the apparent resistivity phase spectrum in the case of a polarizable prism in an unpola - rizable half - space, Geophysics, 49, 1534 - 1540, 1984.
- [32] Soininen H., The behavior of the apparent resistivity phase spectrum in the case of two polarizable media, Geophysics, 50, 810 - 819, 1985.
- [33] Liu - Song and Vozoffk., The complex resistivity spectra of models consisting of two polarizable media o different intrinsic properties, Geophysical Prospecting, 33, 1029 - 1062, 1985.
- [34] 傅良魁, 复电阻率法异常的频谱及空间分布规律, 地质与勘探, 3, 1981。
- [35] 张赛珍等, 我国几个金属矿区岩、矿石的低频相位频率特性及影响因素, 地球物理学报, 27, 1984。
- [36] 罗延钟、张桂青, 频率域激电法原理, 地质出版社, PP. 301, 1988。
- [37] 罗延钟、吴之训, 谐激电法中频率相关系数的应用, 地球物理学报, 35, 1992。
- [38] 罗延钟、许妙立、吴之训, 面极化球体上视复电阻率的频谱特征和模拟相似性准则, 桂林冶金地质学院学报, 6, 1986。
- [39] Xiong Zonghou, Luo Yanzhongm, Wang Shoutan and Wu Guangyao, Induced polarization and electromagnetic modeling of a three - dimensional body buried in a two - layer anisotropic earth, Geophysics, 51, 2235 - 2246, 1986.
- [40] Meng Yongliand and Luo Yanzhong, Calculation of harmonic eletromagnetic field and scale modeling laws for surface polarizable bodies, Chinese Journal of Geophysics, 32, 145 - 158, 1989.
- [41] 傅良魁、张虎豹, 频谱激电法若干理论研究, 物探与化探, 9, 1985。
- [42] 傅良魁、李金铭、陈兆洪, 埋藏极化体激电时间谱视参数的实验研究结果, 地质与勘探, 12, 1985。
- [43] 李金铭、陈兆洪, 埋藏极化体上时间域激电谱的理论研究, 桂林冶金地质学院学报, 7, 1987。
- [44] 罗延钟、方胜, 极化椭球体上频谱激电法的异常性态, 桂林冶金学院学报, 5, 1985。
- [45] 罗延钟、熊宗厚、崔先文, 同时存在激电和电磁效应的频谱激电异常性质, 物探与化探, 11, 1987。
- [46] 罗延钟、姚建阳、何展翔、陈绪诚, 球形极化体上点源装置频谱激电异常的高级近似算法, 物化探计算技术, 9, 1987。
- [47] Luo Yanzhong and Wu Zhixun, SIP anomalies obtained with D - D arrayover a polaizable sphere in a homogeneous hall - space, An Overview of Exploration Geophysics in Chian - 1988, SEG Publication, Geophysical References Series No. 3, 1989.
- [48] 罗延钟、吴之训, 研究剩余电磁效应的理想参数, 物探与化探, 16, 1992。
- [49] 罗延钟、方胜, 视复电阻率频谱的一种近似反演方法, 地球科学, 11, 1986。
- [50] 刘崧, 计算视复电阻率的新的近似公式, 地球物理学报, 31, 1988。
- [51] 张桂青、崔先文、罗延钟, 一种反演频谱激电法视谱直接求真参数的方法, 地质与勘探, 23, No. 4, 1985。
- [52] 刘崧, 激电法在寻找深埋金属矿中的应用前景及方法理论中值得研究的一些问题, 地质科技情报, 5, No. 1, 1985。
- [53] 张桂青、崔先文、罗延钟, 确定隐伏极化固有频谱参数的方法, 国际勘探地球物理学术讨论会(西安, 1986 年 10 月)报告, 1986。
- [54] 张桂青、崔先文、罗延钟, 由谐激电法视谱直接反演真谱参数, 国际勘探地球物理讨论会(北京, 1989 年 9 月)报告,

- 1989。
- [55] 张桂青、崔先文、罗延钟,由视谱直接反演真谱参数的实用方法,地球科学,第6期,1990。
- [56] 王自力、张赛珍,一种真复电阻率谱参数的求解方法,地球物理学报(6),1990。
- [57] 张赛珍、周季平、李英贤、吴璐苹,岩(矿)石频谱激电特征与结构构造和矿物成分,中国科学技术出版社,1994。
- [58] 刘崧、官善友、高鹏飞,一种频谱激电资料反演新方案,中国地球物理学会第六届年会(武汉,1990年10月)报告,1990。
- [59] 罗延钟主编,IPS—3 频谱激电系统,国外地质勘探技术专辑 10,1987。
- [60] Wa Zhixun and Luo Yanzhong., Application of the SIP method over some mining districts, An. Overview of Exploration Geophysics in China - 1988, SEG Publication, Geophysical References Series No. 3, 1989.
- [61] 周安昌、李金铭、杨冠鼎、陈兆洪,时谱激电理论与应用研究,中国地球物理学会第八届年会(昆明,1992年11月)报告,1992。
- [62] ванвян, Л. Л., 电磁测深法原理,煤炭工业出版社,1979。
- [63] Nabighian, M. N. Editor., Time - Domain Electromagnetic Methods of Exploration, Special Issue, Geophysics, 49, No. 7, 1984.
- [64] 考夫曼, A. A., 凯勒, G. V., 频率域和时间域电磁测深,地质出版社,1987。
- [65] 朴化荣,电磁测深法原理,地质出版社,1991。
- [66] 朴化荣、黄皓平,电磁法勘探的新进展,物探化探译丛,第4、5期,1992。
- [67] 牛之珽,时间域电磁法原理,中南工业大学出版社,1992。
- [68] 何展翔、罗延钟,西方地面瞬变电磁法理论的发展现状,国外地质勘探技术,第1期,1989。
- [69] 殷长春,任意角度频率测深正演计算及应用,物化探计算技术,第2期,1991。
- [70] 朴化荣、殷长春,利用 G—S 逆拉氏变换法计算瞬变测深正演问题,物化探计算技术,第4期,1987。
- [71] 长谷川健,水平电气双极子による成状大地のステップ応答と見挂导电率について,物理探矿,第3期,1985。
- [72] 殷长春、朴化荣,电磁测深法视电阻率定义问题的研究,物探与化探,第4期,1991。
- [73] 霍全明等,瞬变电磁法在煤矿水害防治预测中的应用,西北工业大学出版社,1994。
- [74] 方文藻等,瞬变电磁测深法原理,西北工业大学出版社,1993。
- [75] 方文藻等,频率域电磁法中视电阻率全区定义,西安地质学院学报, No. 4, 1992。
- [76] Spies, B. R., Eggeres, D. E., The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods, Geophysics, Vol. 51, No. 1, 1986.
- [77] Goldman, M. M., Transient eletromagnetic inversion based an approximate solution to the forward problem, Geophysics, Vol. 53, No. 1, 1988.
- [78] Flis, M. F., et al, Induced - Polarization effects in time - domin eletromagnetic measurements, Geophysics, Vol. 54, No. 4, 1989.
- [79] 孙鸿雁,TEM 测量中极化效应研究进展,物探化探译丛, No. 3, 1993。
- [80] 中国石油天然气总公司物探局五处,建场测 深法(3c)简介,会议材料,1992。
- [81] Yamashita M. and Haqlof P. G., CSAMT case histories with a multi - xhannel CSAMT system and discussion of near - field data correction, Phoenix Geophysics Ltd, 1985.
- [82] 何继善等编译,可控源音频大地电磁法,中南工业大学出版社,1990。
- [83] 汤井田,何继善,水平电偶源频率测深中全区视电阻率定义的新方法,地球物理学报, 37, 1994。
- [84] 罗延钟、周玉冰、万乐,一种新的 CSAMT 资料近场校正方法,勘查地球物理勘查地球化学文集,第20卷,地质出版社,1996。
- [85] 万乐、罗延钟、马瑞花、莫真文,CSAMT 法一维正演的快速近似算法,中国地球物理学会第九届年会(长沙,1993年10月)报告,1993。
- [86] 罗延钟、万乐、杨麟峰,双极源 CSAMT 法一维正演的等效偶极源近似算法,勘查地球物理勘查地球化学文集,第20卷,地质出版社,1996。
- [87] 万乐、罗延钟,双极源 CSAMT 法的一维反演算法,勘查地球物理勘查地球化学文集,第20卷,地质出版社,1996。
- [88] Macinners S. C., Lateral effects in controlled source audio - frequency magnetotellurics, Ph. D. dissertation, University of Arizona Tucson, Arizona, 1987.

- [89] Zonge K. L., and Hughes L. J., Controlled Source Audio - Frequency Magnetotellurics, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics Vol. 2, SEG, 1988.
- [90] Xiang Zonghou, Luo Yanzhong, Wang Shoutan and Wu Guangyao., Induced polarization and eletromagnetic modeling of a three - dimensional body buried in a two - layer anisotropic earth, Geophysics, 51, 2235 - 2246, 1986.
- [91] Boschetto N. B. et al., Controlled - source audiofrequency magnetotelluric responce of three - dimensional bodies, Geo - physics, 56, 225 - 264.
- [92] Unsworth M. J., Travis B. J. and Chave A. D., Electromagnetic induction by a finite electric dipole source over a 2 - D earth, Geophysics, 58, 198 - 214, 1993.
- [93] 孟永良, 罗延钟, 二维地电构造上电偶极源电磁场的有限单元算法, 勘查地球物理勘查地球化学文集, 第 20 卷, 地质出版社, 1996。
- [94] 罗延钟、何展翔、马瑞伍、郭建华, 可控源音频大地电磁法静态效应校正, 物探与化探, 15, 196 - 202, 1991。
- [95] 何展翔, 相权静校, 中国地球物理学会电磁测深学术讨论会(北京, 1991 年 12 月)报告, 1991。
- [96] 汤井田、何继善, 静效应校正的波数域滤波方法, 物探与化探, 17, 209 - 216, 1993。
- [97] 罗延钟、何展翔、万乐, CSAMT 法的静态效应校正方法, 勘查地球物理勘查地球化学文集, 第 20 卷, 地质出版社, 1996qd。
- [98] 何展翔、罗延钟, CSAMT 法在山西沁水盆地的应用效果, 勘查地球物理勘查地球化学文集, 第 20 卷, 地质出版社, 1996。
- [99] 马瑞伍、罗延钟, 可控源音频大地电磁法和瞬变电磁法在新疆阿舍勒铜矿区的应用, 勘查地球物理勘查地球化学文集, 第 20 卷, 地质出版社, 1996。
- [100] D. J. Daniels et al., Introduction to subsurface radar, IEE Proceeding, 135(4):278 - 320, 1988.
- [101] 王惠濂等, 脉冲时间域探地雷达讲座(连载), 国外地质勘探技术, (10):26 - 31;(11):32 - 36;1990, (1):34 - 40, 1993。
- [102] Davis J. L., Annan A. P., High Resolution Sounding Using Ground Probing Radar, Geoscience Canada, 13(3):205 - 208, 1986.
- [103] Pauli Hanninen et al., Special Paper 16, Fourth International Conference on GPR, June 8 - 13, Rovaniemi, Finland, 1992.
- [104] 王惠濂等, 探地雷达专辑, 地球科学—中国地质大学学报, Vol. 18, No. 3, 1993。
- [105] 吴海成, 勘探技术的新突破—Petro - Sonde 岩层探测仪的成功应用, 国外地质勘探技术, No. 3, 1985。
- [106] 傅良魁, 岩性电测探法及其在我国的试用效果, 物探与化探, No. 10, 1986。
- [107] 陈维权等, 一种新的地球物理勘探方法—岩性探测法, 勘探地球物理北京(89)国际讨论会论文摘要(C89), 1989。
- [108] 刘洪, 只测天然水平电场提取地下各深度信息的一种可能方案, 地球物理学报, No. 1, 1991。
- [109] 刘若谷, PS 法原理研究的一些理论线索, 国外地质勘探技术, No. 4, 1992。
- [110] 吴以仁译, 岩石探测仪用于勘探的工作实例, 物探化探译丛, No. 4, 1990。
- [111] 岳棋柱译, 有益于改善地层解释的新方法, 物探化探译丛, No. 2, 1991。
- [112] 年宗元, 我国勘查地球物理的若干进展—1993, 物探与化探, Vol. 18, No. 6, 1994。

(下接第 249 页)

THE ADVANCES IN GEOCHEMICAL EXPLORATION OF SOLID ORE RESOURCES AND THE ACHIEVEMENTS GAINED

Mu Xuzan, Xi Xiaohuan

(Bureau of Geological Survey, Ministry of Geology and Mineral Resources, Beijing 100812)

Abstract In celebration of the 30th International Geological Congress to be held in Beijing, this paper aims at making known to our foreign colleagues the advances and achievements of geochemical exploration for solid ore resources in China: regional geochemical prospecting and medium - scale geochemical prospecting have covered 5170000 km² and some 900000 km² respectively, about 43000 geochemical anomalies of various sorts have been discovered and, on such a basis, 569 large -, medium -, and small - sized ore deposits with economic value have been found through anomaly appraisal and engineering inspection. The ore - prospecting effects are quite remarkable and, especially in geochemical prospecting of gold and silver deposits, achievements with breakthrough significance have been obtained. Geochemical methods and techniques have been continuously improved and spread. China's geochemical prospecting has approached or reached international advanced level in several aspects such as field work methods for special landscape areas, analytical methods and techniques for minor and trace elements, inspection methods for geochemical anomalies as well as processing and mapping of geochemical data.

Key words Geochemical exploration, rich achievements, level of method and technique.

第一作者简介 牟绪赞,男,1941年生,1962年北京地质学校化探专业毕业,1986年北京地质学院地质系(函大)毕业,现在地矿部地质调查局任副总工程师,高级工程师。多年从事地球化学勘查找矿实践,1979年后在地矿部从事化探生产技术管理工作。先后曾承担编写化探成果报告,多次参加编写化探规范及在“物探与化探”等刊物发表文章。

=====

(上接第 258 页)

A GENERALIZED DESCRIPTION OF THE DEVELOPMENT OF ELECTRIC EXPLORATION METHODS

Li Jinming

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract The present paper makes a brief description of the progress of several main electric methods which have been developed quite rapidly since 1980s. They include induced polarization method, frequency spectrum IP method, transient electromagnetic method, controlled - source audio - frequency magnetotelluric method and GPR.

Key words electric exploration method, induced polarization method, frequency spectrum IP method, transient electromagnetic method, controlled - source audio - frequency magnetotelluric method, GPR.

作者简介 李金铭,男,1933年9月生,籍贯河北。1957年北京地质学院物探系研究生毕业。长期从事应用地球物理尤侧重于电法的教学与科研工作,已发表论文数十篇,出版电法通用教材及科研专著多部。现为中國地质大学(北京)教授、博士生导师,1984年—1994年曾任本校应用地球物理系副系主任、系主任等职。现任地质类高等院校第二届勘查地球物理专业课程指导委员会副主任、电法勘探课程指导组组长。