

# 我国大地电磁测深新进展及瞻望

魏文博

(中国地质大学, 北京 100083)

[摘 要] 简要回顾了上世纪 60—80 年代,我国大地电磁测深工作的起步和发展,较全面地介绍了 90 年代以来的新进展,并瞻望了新世纪的发展方向。

[关键词] 大地电磁测深仪器;数据采集;数据处理和反演;应用;新进展

[中图分类号] P631

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-2903-(2002)02-0245-10

## 0 引 言

电法勘探是勘探地球物理学的重要分支。如果从 1815 年 P. Fox 在硫化矿体上观测到自然电场<sup>[1]</sup>算起,电法勘探已有近 200 年历史;但真正得到发展,则不到 100 年时间。20 世纪初,世界各国的工业迅速发展,矿产原料需求量急剧增加,迫切需要先进的勘查技术;因而,促使电法勘探从科学研究进入实用阶段,并得以迅速发展。显然,电法勘探的发展是和工业生产水平、社会经济状况,以及科学技术进步密切相关的。发展到今天,电法勘探在勘探地球物理学各分支中,方法技术最多、应用面最广,其应用领域遍及固体矿产、油气和水资源勘查,工程勘查,环境监测,及地学基础理论研究等各方面。在所有的电法勘探方法中,发展最快的是大地电磁测深。

大地电磁测深是 20 世纪 50 年代初由 A. N. Tikhonov<sup>[2]</sup>和 L. Cagniard<sup>[3]</sup>分别提出的天然电磁场方法。60 年代以前,由于技术难度大,该方法的研究进展缓慢;但它具有探测深度大、不受高阻层屏蔽的影响、对低阻层反应灵敏等吸引人的优点,因而对该方法的研究始终为人们所关注。70 年代以来,由于张量阻抗分析方法的提出,方法理论研究出现突破性进展,并随着电子、计算机、信号处理技术突飞猛进的发展,大地电磁测深无论在仪器研制,或是数据采集、处理技术与反演、解释方法等方面的研究,都融合了当代先进的科学理论和高新技术,这使大地电磁测深有了长足的进步,因此成为电法勘探众多方法技术中最成熟的方法。

近年来,大地电磁测深方法不断得到完善,应用效果明显改善,成绩斐然,引人瞩目。在这新世纪开端,我们回顾它在我国的发展历程,总结近些年取得的进展,瞻望新世纪未来的方向,这将有益于大地电磁测深在我国的进一步推广应用,取得更辉煌的成就。

## 1 回 顾

我国的大地电磁测深工作始于 20 世纪 60 年代初期。至今,经历了 60 年代的引进、探索时期,70—80 年代的研究、试验时期和 90 年代的迅速发展、推广应用时期。

20 世纪 60 年代初期,在顾功叙院士的大力倡导下,原中国科学院兰州地球物理研究所

[收稿日期] 2001-12-26; [修回日期] 2002-03-25.

[基金来源] 中国科学院资源与环境重大项目(K2951-A1-401)。

[作者简介] 魏文博,男,1945 年 9 月生,福建泉州人,1969 年毕业于原北京地质学院地球物理勘探系,现任中国地质大学(北京)教授、博士生导师,主要从事电法勘探、海洋电磁探测及大陆动力学研究。

开始研究大地电磁测深方法,取得了初步成果<sup>[4]</sup>。但这时期,大地电磁测深数据处理采用的是最简单的标量阻抗处理方法,导致相同频点上所计算的视电阻率和阻抗相位分散性大,严重地影响了方法的实际应用。

1966年邢台地震后,“地震灾害”的形势逼人,地震预报要求探测深达地幔的地质结构;从而推进了大地电磁测深方法的研究,使我国大地电磁测深事业进入研究、试验阶段。

1970年,国家地震局地质研究所试制了感应式、晶体管线路的模拟大地电磁测深仪,并用于华北地区的野外实际测量。继而又与国家地震局兰州地震研究所和地球物理勘探大队共同研制了LH1型模拟记录大地电磁测深仪。这成为20世纪70年代中期到80年代初,我国大地电磁测深工作的主要设备。

为了适应发展需要,70年代初,原北京地质学院物探系与国家地震局地质研究所、原石油部地球物理勘探局研究院合作,开展了大地电磁张量阻抗估算方法的研究<sup>[5]</sup>;与此同时,国家地震局兰州地震研究所也开展了此项研究。研究的结果,随即被用于处理实测数据,明显改善了大地电磁测深数据处理质量,使大地电磁测深在国内得以继续顺利发展。可以说,这项研究成果在我国大地电磁测深方法的发展历史上占有重要地位,属于阶段性进展的标志。

但就在这时期,世界上科学技术的发展促进了电子和计算机控制技术的进步,国外的大地电磁仪器早已跨越模拟记录阶段,进入数据记录的时代。因此,1976年,国家地震局地质研究所与原石油部地球物理勘探局仪器厂和研究院、原北京地质学院物探系等单位共同合作,开始研制SD-1型数字式大地电磁测深仪,并开发相应的软件系统<sup>[6]</sup>。两年后,投入野外试验,取得我国第一批数字化大地电磁测深资料。之后,又逐步得到完善和提高。在改进后的SD-2型仪器上,一些主要技术性能已达到当时国际同类仪器的水平。

这一时期,国内除了大力开展仪器和数据采集方法技术的研究与试验之外,在数据处理方面则从标量阻抗处理发展到张量阻抗处理,使大地电磁探测技术具有真正的实用价值。但是,由于大地电磁场信号极为微弱,且电磁噪声背景又随着国家经济建设发展而日益严重,导致大地电磁观测质量明显下降。为了保证数据采集质量,需要有高灵敏度、高稳定性、抗干扰能力强、性能优良的仪器,也需要有好的、有效的抑制电磁噪声影响的数据处理方法。20世纪70年代末、80年代初,国内、外的学者就此发表了一系列成果,如傅氏变换法、时间域滤波法、互功率谱法和近参考道法等等<sup>[7]</sup>。这些方法对于压制电磁干扰的影响有一定作用,但效果并不都能尽如人意。原因在于,它们只适用于克制非相关噪声的影响,而对于相关噪声的影响作用不大。

但在同一测点,电磁噪声往往同时迭加到各道的电磁信号上,属于相关噪声。针对这一问题,T.D. Gamble等人在1979年提出远参考道大地电磁测深法<sup>[8]</sup>。它不仅能用于压制同一测点上的非相关噪声,还对于压制同一测点上的相关噪声有较好的效果。但遗憾的是,当时国内还不具备推广、应用该方法的硬件条件。

大地电磁测深资料的反演、解释是该方法实际应用的重要环节,因此一直为人们所重视。在我国大地电磁测深工作的早期,反演方法主要类似于直流电测深资料的“量板法”。这完全是手工操作方法,并且不可能考虑非一维条件引起场源极化的影响,反演的准确性在相当程度上取决于解释人员的经验,定量解释的误差很难估计。

20 世纪 70 年代中期以来,随着电子计算技术在国内日益广泛应用,早期的“量板法”已逐渐被淘汰,代之以计算机拟合反演。但这时期的反演方法仍然属于“一维反演”的范畴,除了地球物理反演的多解性以外,它们的最大问题还是反演结果受人为因素的影响太大,难于提高定量解释的精度。这时期常用的反演方法包括:Bostick 反演、高斯—牛顿法、梯度法、广义逆反演、马夸特法、连续介质反演、大地电磁拟地震解释法等等<sup>[9]</sup>。

从 60 年代到 80 年代,这 30 年是大地电磁测深在国内生根、发芽并逐步走向茁壮成长的关键时期。30 年来的进展表明,国内在大地电磁测深方法理论研究,仪器研制,数据采集技术实施,数据处理、反演软件开发,方法应用试验等方面做了大量工作,取得了卓著的成绩。大地电磁测深在国内已基本形成一套较完整的技术体系,这使它在深部地质研究和石油地质调查方面的作用逐渐为人们所认可。

在进入 20 世纪最后的 10 年,我们欣喜地看到我国的大地电磁测深事业已得到迅速发展,并在不断向前迈进。

## 2 进 展

20 世纪 90 年代是我国大地电磁测深工作迅速发展、推广应用的时期。

这时期突出的进展主要表现在国内大地电磁仪器设备有了极大的改善,数据采集、处理和反演正逐渐缩小与世界先进国家的差距,应用领域不断扩大,工作量急剧增长,应用效果明显提高,国际合作、交流继续发展加深了我国大地电磁工作者与国际地球内部电磁感应领域学术界的相互了解。

目前,大地电磁测深在国内石油、天然气普查勘探,在深部地质结构探测,在地热和地下水资源调查,在地震预测、预报和地质灾害防治等应用领域的地位得到进一步的肯定;而在海洋资源探测领域的应用,在固体矿产资源勘察的应用,在石油、天然气详细勘探中的作用,已表露出可喜的前景。

### 2.1 大地电磁仪器

进入 90 年代,在国际上,大地电磁仪器主要朝着多道、多功能,小型、轻便和智能化发展。这时期的仪器必须满足大地电磁场多分量和远参考点数据采集的需要;为了保证数据采集质量,又要求具有实时处理功能,即把大地电磁数据处理软件固化在仪器的微处理器上,在资料采集的全过程能随时监控数据采集质量;此外,为了提高野外工作效率,提高仪器的利用率,仪器除了实现小型化、轻便化和多功能以外,还实现智能型仪器的功能,仪器的操作基本上由计算机自动控制。这类仪器以加拿大 Phoenix 公司的 V-5 多功能大地电磁仪为代表。

尽管国内已有多个单位研制成数字式大地电磁仪,并用于实际生产。但由于电子技术进展缓慢,元器件性能、质量差,加工工艺水平落后,导致目前国产仪器设备过分庞大、笨重,功耗太高,不能完全适应野外工作和大地电磁测深实际生产发展的需要。而仪器设备的改进,需要有一定的环境条件和一定的时间,不可能在短期内实现。因此,确定采用引进国外先进仪器的办法来适应国内大地电磁测深实际生产迅速发展的需要。这阶段,从国外进口的大地电磁测深仪器,主要有加拿大 Phoenix 公司的 MT-5 大地电磁系统、V-5 多功能大地电磁系统,美国 EMI 公司的 MT-1 大地电磁系统,德国 Metronix 公司的 MMS-04 大地电磁系统。这类

仪器,至今仍是国内开展大地电磁测深工作的重要设备,据不完全统计,它在国内的总数可能超过 60 套。

近年来,国外大地电磁仪器的发展十分神速。为了适应大地电磁高密度、面积性、大数据量采集的需要,现代大地电磁仪器除了保持原有的小型、轻便、多道的优点,还发展了卫星同步测量技术和网络型或分布式组合系统。由美国 EMI 公司和加拿大 Phoenix 公司在 1996 年分别推出的 MT-24NS 网络型大地电磁系统和 V-5-2000 大地电磁系统则属于这种类型的仪器。现在,这类最先进的仪器在国内已有相当多的数量,它们在大地上电磁测深实际生产和地学科学研究中已发挥了很好的效应,使我国大地电磁测深在硬件设备方面的条件有了极大的改善。

需要指出,国内一些大学和研究所的研究人员为了赶上国际先进水平,促进我国大地电磁测深事业的发展,对大地电磁仪器的研制始终本着永不放弃的精神,进行坚持不懈的努力,在实现仪器小型化、轻便化、智能化、多道测量、卫星同步测量和分布式组合系统等方面取得了可喜的进步。

1995 年,中国地质科学院物化探研究所在国土资源部的资助下研制成功 CLEMP 分布式被动源电磁系统。该系统采集信号的频率范围为 16 KHz—0 Hz;模数转换采用 24 位 A/D 转换,实现高精度测量;系统由一部主机与多部子机组成,每部子机为两道测站;系统采用非封闭挂接式连接,挂接子机的数目不限,并通过 GPS 实现同步测量;此外,仪器还具有实时处理功能,主机在控制管理子机的同时对观测数据进行现场分析和处理<sup>[10]</sup>。

仪器研制成功后,已先后在戈壁沙漠、高山峡谷、黄土高原及中高山林区等不同地貌特征的地区进行过野外试验,无论是金属矿勘查,还是地下水资源调查都取得良好效果。

进行海底大地电磁测深,技术难度很大,在我国是个空白。长期以来,世界上一直没有商品性的仪器,只有某些外国公司开展这方面商业性的技术服务工作,且费用昂贵。1998 年开始,在国家“863 计划”资助下由中国地质大学(北京)应用地球物理系负责,研制了海底大地电磁系统,填补了我国这方面技术的空白,避免依赖外国的局面;为在我国发展海上电磁探测技术创造了条件。

所研制的“海底大地电磁系统”包括一套“五分量海底大地电磁系统”,它用于同时测量海底大地电磁场三个磁场分量和二个电场分量,和四套“两分量海底大地电磁系统”,这只用于测量海底大地电磁场二个电场分量。这些仪器都能在 500 米水深的水底工作,采集信号的频率范围(100~0.0001) Hz,电场观测灵敏度为 0.02  $\mu\text{V}/\text{m}$ ,磁场观测灵敏度为 0.3  $\text{V}/\text{nT}$ 。

2000 年 7—8 月间,进行了海上大地电磁数据采集试验。所研制的 5 套仪器投放后,“回收”率达到 100%,并且都测量到海底的大地电磁场数据,首次用自行研制的仪器在我国东海水深 130 米的陆架区获得海底大地电磁测深曲线<sup>[11]</sup>。

## 2.2 大地电磁测深的数据采集、处理和反演

大地电磁测深的目的在于探测地下不同深度上介质的导电性结构,它的全过程包括数据采集、处理和反演。数据采集是基础,是关键;大地电磁测深的应用成功与否,在很大程度上取决于数据采集质量。数据处理和反演是紧密相关的二个重要环节,通过它们才能达到大地电磁测深的目的,获取尽可能准确的有用信息。

### 2.2.1 大地电磁数据采集与处理

如何有效地压制各种干扰,提高信噪比,保证大地电磁数据质量,这始终是大地电磁数据采集与数据处理的核心问题.在早期研究的基础上,最近十年来,国内的大地电磁工作者就此又做了大量工作,取得了明显进展.

如前所述,目前国内的大地电磁测深仪器都属于多道测量系统,这些仪器都具有卫星同步测量的功能.因此,在数据采集方面已有条件实现“远参考道测量”,以提高原始数据采集质量.现在,在一些强干扰地区、地质构造复杂区和大地电磁信号微弱的地区,大地电磁野外数据采集正在逐步推广“远参考道测量”方法.

在数据采集方面,另一个新的趋势是强调记录“时间序列”的作用.这主要是因为应用“Robust 估计”处理大地电磁资料要求有足够长的“时间序列”数据.

Robust 数据处理方法根据观测误差的剩余功率谱的大小对数据进行加权,注重未被干扰的数据,降低突变点数据的权,使它对大地电磁阻抗估算值的影响最小,从而明显改善受电磁噪声污染的单站大地电磁测深资料<sup>[12]</sup>.

把“Robust 估计”用于处理大地电磁数据是国外学者在 20 世纪 80 年代末提出的,我国在 90 年代初开始试验.试验的结果表明,该方法的效果与信号的噪声含量有关,对处理噪声含量低于 50 % 的信号是有效的;此外,还取决于时间序列数据的长度.可以说,Robust 方法能有效地压制张量阻抗关系式中输出端的噪声,但对输入端的噪声作用不大<sup>[13]</sup>.因此,在实际应用中,往往把“远参考道测量”技术与“Robust 处理”方法相结合.实践证明,这是获得高质量大地电磁观测数据的最佳途径.近年来,这方法正迅速在实际生产中推广应用.

在 80 年代,人们发现根据大地电磁测深资料整理的视电阻率拟断面图上,等值线呈直立的密集分带现象,这显然是一种畸变现象.研究结果表明,它是由浅层电性不均匀和地形起伏引起的“静位移”效应,将给资料反演带来极大的误差,甚至造成错误,严重地影响大地电磁测深方法的应用效果.因此,关于“静位移”校正方法的研究成了近年来国内外关注的焦点.

国内在 90 年代中期前,采用的“静位移”校正方法主要有曲线平移法,近地表电阻率观测等方法<sup>[14]</sup>,这些方法都仅仅考虑电流引起的电场畸变,并没考虑磁场分量的畸变,因而在有些条件下效果不甚明显.90 年代中期以来,通过国际合作,在国内引进并推广大地电磁张量阻抗分解技术,用于实施“静位移”校正,取得了较好的应用效果.此外,这方法还可用来确定区域构造的走向.

现在在国内应用的,能比较好地克服“静位移”影响的方法,还有直接考虑近地表电性不均匀体的反演解释法和电磁阵列剖面法,即 EMAP 法<sup>[15]</sup>.

EMAP 方法采用阵列式排列,用首尾相连的电偶极子沿测线测量电场,这大大增加了空间采样密度,扩大了信息量;同时,又在时间域采用相邻多道迭加的办法抑制表层电性不均匀的静位移干扰和随机干扰,从而明显地突出有用信号.近年来,它在我国石油和天然气普查、勘探中,特别是地震勘探不利的西南和西北许多地区得到比较广泛的应用<sup>[16]</sup>.

我国地域辽阔,地形复杂多变,工农业生产、人文因素引起的强干扰区较普遍,这些都构成大地电磁测深工作极不利的条件.最近几年,国内从事大地电磁测深的许多专家针对西南地区复杂地形和强电磁场源干扰等典型问题,正抓紧研究克服的办法,并已取得可喜的进展.如江汉石油学院提出的同步阵列大地电磁法在山区的应用取得良好结果;采用可控源音

频大地电磁法中过渡三角形法校正近场源干扰,也取得比较满意的结果.此外,小波分析在大地电磁时间序列去噪、提取谱成份等方面的应用研究也取得一定进步.

### 2.2.2 地电磁数据反演

直至 20 世纪 90 年代中期,国内对大地电磁测深实测资料的反演,多数仍采用一维反演方法.但国内关于二维反演的研究却在 80 年代中期便开始了,只是进展缓慢,始终达不到实用化的要求.主要原因在于,二维反演不是对单个测点的资料进行反演,而是沿一条测线的许多测点同时反演.同时参与反演的参数多、数据量太大,未知数也多,反演迭代过程中雅可比系数矩阵阶数大,导致计算量大幅度增加,在一般的 PC 机上难于实现.解决问题的途径是寻找减小二维正演和偏导数矩阵计算量的快速方法.

所以,早期提出的一些二维快速反演方法的差别在于二维正演或雅可比系数矩阵的计算不同.或是用事先估计的模型进行响应计算代替二维正演;或是用两个极化模式视电阻率的一维正演代替二维正演;或是通过分频率反演,逐步固定模型参数,以减小雅可比系数矩阵的计算量;所有这些方法都只是近似的二维反演方法,并只有少量参数参与反演.因而,反演结果仍然误差较大,不能完全满足实际应用的需要.

90 年代初 J. T. Smith、J. R. Booker 提出大地电磁二维快速松弛反演<sup>[17]</sup>.该反演方法设定的初始模型为均匀半空间,反演时用有限差分法计算出模型对应的响应数据、各测点下的积分核函数及数据残差,然后使目标函数取极小,得到模型改正量及新模型,接着进行插值形成新的二维断面,以此为新的初始模型;重复上述过程,逐次迭代,直至满足一定的拟合精度,从而得到最终的二维反演模型.该方法可以对 TE 和 TM 两个极化模式的参数独立反演,也可进行联合反演,即全信息反演;此外,还可进行静位移自动校正.

大约在 90 年代中期,国内开始逐步推广大地电磁二维快速松弛反演方法.应用的结果说明,它具有快速、结果较合理、不受人为因素影响等特点;因此,普遍为人们所欢迎.

当前,面临着社会经济迅猛的发展,在现代科学技术浪潮的推动下,大地电磁测深资料的三维正、反演问题,已成为国际地球内部电磁感应领域的前沿研究课题.

总体上讲,国外在三维正演方面的研究已趋于成熟,交错采样有限差分法成为主导的计算方法;但三维反演至今未取得实用化的研究成果.在国内,关于三维正演的研究工作还较少,只有中国地质大学(北京)、中国科技大学、国家地震局地质研究所和江汉石油学院等单位做过一些工作.长期以来,由于三维正演研究滞后,必然也限制了三维反演研究的进展.

2000 年,中国地质大学(北京)应用地球物理系在深入分析大地电磁二维快速松弛反演理论的基础上,对三维正、反演理论和方法进行研究,取得了突破性进展.

在三维正演方面,提出了更为合理地设定边界条件的办法;同时采用目前最先进的解大型系数矩阵方程组的双共轭梯度稳定解法,实现了快速稳定的三维交错采样有限差分数值模拟的最佳算法.

在三维反演方面,建立了系统的大地电磁三维快速反演理论,巧妙地获得了三维快速反演的灵敏度函数表达式,首次成功地解决了三维快速反演的核心问题,形成了在微机上实现的快速算法.

目前,所研究的大地电磁三维快速反演方法已可用于对实测资料的反演,这表明我国在这方面的成就已走在世界的最前列.

### 2.3 大地电磁应用研究新拓展

最近十年是大地电磁测深事业在国内茁壮成长的时期,除了方法理论更趋向成熟,仪器设备更先进,数据处理和反演技术更加完善以外,应用研究也以迅猛的势态向前发展。

粗略估计,到目前为止,全国累计完成的大地电磁测深点估计已超过 20000 个。其中,绝大多数用于油气资源探测,一部分用于深部地质调查,少量用于寻找地热和水资源。由此可见,这时期我国的大地电磁测深仍主要在油气资源勘查和地球深部地质研究这两个领域拓展。值得关注的一个新动向是,向海洋的发展。在这新世纪来临之际,我国已基本完成海底大地电磁探测技术的研究,并成功地进行了海上试验。

#### 2.3.1 油气资源勘查中应用的进展

前阶段,大地电磁测深在油气资源勘查中,主要用于研究高阻基底面的起伏、划分沉积地层、圈定局部构造、进行区域构造格局研究等问题。但当前我国油气工业面临着资源消耗增加、资源量短缺、环境保护、可持续发展等问题的挑战。勘探重点转移到:地面施工条件恶劣的地区(沙漠、高原、黄土塬、喀什特山地、水网、沼泽地区、滩涂、海洋等);地质条件复杂的地区(盆地边缘、山前逆冲推覆带、古潜山、碳酸盐地区、卵砾层覆盖区、火山岩覆盖区等);以及寻找地下深层储油构造。

因此,迫切需要发展新的地球物理探测技术,提高勘探能力。

如前所述,近十来年,大地电磁测深在仪器、数据采集、处理和反演等方面都有了明显进步;这大大提高了该方法的勘探能力,使大地电磁测深在复杂地区油气资源勘查中发挥越来越重要的作用,已获得不少成功的例子。

在我国东部,古潜山奥陶系灰岩是油气勘探的主要目的层。但其埋藏深度大,结构、构造复杂,因此地震勘探的难度大;此外,东部地区经济发达,工、农业生产用电干扰和人文干扰严重,给地球物理数据采集和资料处理带来许多困难;所有这些因素构成了东部油气藏勘探的老大难问题。近两年来,江汉石油学院石油地球物理勘探重点实验室和石油物探局第五地调处分别在河北黄骅坳陷大港油田开发区、乌马营地区和苏北葛渔城地区开展同步阵列电磁测深寻找东部古潜山深层油气田的试验研究,均取得可喜的效果<sup>[18]</sup>。

我国西南和西北,地形与地表地质条件极其复杂,属典型的地震勘探困难区。为了弥补地震勘探的不足,在云贵川地区 and 新疆地区,石油勘探部门投入了大量电磁测深工作,取得较好的应用效果;其中,以塔里木盆地的电磁测深结果最引人注目,为塔北油气勘探区取得重大突破提供了重要信息。

#### 2.3.2 壳、幔电性结构研究中的应用

大陆动力学研究是当前地球科学研究的前沿,而地壳和上地幔结构研究则是大陆动力学的核心问题之一。大地电磁测深是从导电性的角度研究地壳和上地幔结构不可缺少的方法。长期以来,我国对此投入了大量工作,在 GGT 地学大断面研究、华北地区地震预测、预报研究、青藏高原形成演化机理研究等方面都取得许多重要成果。但由于地球是一个极其复杂的系统,地球深部研究是一项探索性很强的工作,探测技术受历史条件的限制。因此,仍有许多值得做进一步探讨的问题。譬如近年来,关于青藏高原壳幔电性结构的研究取得了许多新认识。这得益于现代超宽频带大地电磁探测技术的发展。

从 1995 年至今,中国地质大学(北京)和美国华盛顿大学(西雅图)、加拿大地质调查局

合作,在青藏高原用 MT-24NS 宽频带大地电磁系统与 LIMS 智能化长周期大地电磁系统相结合,成功地实现超宽频带大地电磁数据采集;采集信号的频率范围为 320 赫兹—20000 秒,因而保证能获得地下上百公里深处,较可靠的信息;从而对青藏高原地壳电性结构提出一些新认识,发现高原的地壳可能普遍存在“流体”或局部“熔融体”<sup>[19]</sup>,这有可能进一步推进有关青藏高原隆升机制的研究。

### 2.3 海洋探测领域的应用

我国的海洋地球物理探测,以地震勘探为主,包括重力和磁法测量;但缺少电磁探测技术,长期以来没有获取海洋地壳介质导电性的手段。海底大地电磁探测,是把仪器布置在海底,通过观测海底大地电磁场数据,研究海底以下不同深度的岩层导电性,达到探测地下地质构造特征的目的。为了维护海洋国土权益,也为了加速查明我国海域油气、矿产资源的步伐,早在 1997 年,海底大地电磁探测技术的研究已列入国家“863 计划”,成为海洋领域 820 主题(海洋探查与资源开发技术)的研究课题之一。

中国地质大学和原中南工业大学、广州海洋地质调查局、同济大学的研究人员合作,经过艰苦努力,完成了海底大地电磁系统的研制,并在 2000 年 7 月间成功地完成了海上试验。首次在我国东海用自主研制的仪器采集到海底大地电磁场信号,实现了海底大地电磁探测技术的研究目标,填补了国内这方面技术的空白。这为我国今后开展海洋电磁探测打下了良好基础<sup>[20]</sup>。

## 4 前 瞻

不言而喻,我国大地电磁测深的发展也是始终与社会需求相适应的。最近十年,国内空前大规模经济建设的前景已预示着 21 世纪我国将面临着能源、矿产和水资源供需不足,生态环境恶化等尖锐矛盾。因此,资源勘查与环境监测的需求将急剧增长,这既向大地电磁测深提出新的挑战,又提供了广阔的拓展空间和发展机遇。此外,在 21 世纪数学、物理等基础性科学和电子、计算机、信息等高新技术取得的突出成就,有可能为大地电磁测深飞跃式发展提供必要的理论与技术支撑。显然,21 世纪我国的大地电磁测深工作必将面临生动的新局面。

如果说,在 20 世纪我国的大地电磁测深是从地震预报深部探测开始的,后来因为寻找油气田的需要发展到大尺度、区域性普查勘探的;那么,新世纪它将适应小尺度、精细详查的高要求。这是我国大地电磁测深方法技术取的全方位(包括仪器设备、数据处理、反演解释和应用领域的拓展)创新性进展,臻于完善、完美的时代。

### 4.1 仪 器

在现有基础上,将加强国产大地电磁仪器的研制、开发能力。从高起点出发,吸取当代电子、微电子学和材料学的最新成果,运用新一代计算机与弱信号处理技术,发展高精度、大动态范围、超宽频带、高智能化的数据采集器,高灵敏度、超宽频磁传感器。

为了实现小尺度、精细探测,必需推广大地电磁三维勘探。因此,需要研究具有实时传输、实时处理功能的大节点数 MT 数据采集单元集群。

### 4.2 数据处理

进入 21 世纪,大地电磁探测应向高精度地球物理探测技术的水平发展。因此,一方面应



实现三维数据采集,另一方面则应着重研究大地电磁三维数据处理和三维正、反演方法。为此必需继续深入研究各种形式的大地电磁畸变效应特征,应用最新的数学理论和数字信号处理技术解决二维与三维畸变效应的分离问题;研究非规则测网干扰信号的压制与校正技术;研究估算张量阻抗的新方法。

#### 4.3 资料反演、解释

地球本身是个复杂系统,由于影响因素多,它的导电性更加复杂。但长期以来,人们在大地电磁测深的理论研究中普遍使用的是高度简化的层状结构、介质导电性分区均匀的物理模型,这与实际相差太远。实际地壳的结构,具有物质组成多样性、空间形体复杂性、导电性非均匀与各向异性;具有多尺度、分形分维的特征。而这些,在目前高度简化的近似模型中根本不可能加以考虑。此外,对于地球电磁响应的非线性特征,对于电磁干扰的数学模型,研究甚少。这显然影响大地电磁正演理论的准确性,因而影响到反演结果的精度,不可能满足小尺度资源详查的需要。

所以,在 21 世纪应首先加强复杂物理模型算法理论的研究,改进大地电磁正演研究方法;在此基础上实现大地电磁测深数据高精度的二维和三维反演。同时,加紧引进非线性反演理论(遗传算法、仿真模拟淬火等方法),向非线性反演发展。为了尽可能减小反演的多解性,另一个发展方向是研究带约束条件的多参量反演和联合反演。强调联合反演,必需加强岩石物性实验研究,建立物质状态、热参数、波速、密度与电性参数的定量关系。

#### 4.4 应用研究

基于 21 世纪社会发展对能源、固体矿产、水资源的需求,大地电磁测深迫切需要进一步拓宽应用领域,提高应用效果。考虑到我国的实际情况,发展海洋电磁探测,服务于海洋能源、矿产勘查和政治、军事需要应是新世纪大地电磁测深应用不可忽视的新领域。在资源勘查方面,将抓紧实现大地电磁测深在固体矿产勘探的应用和提高复杂地区、复杂条件下油气藏勘探的应用效果;探索利用大地电磁测深直接寻找油、气藏的技术。

人类只有一个地球,但当前,地球却面临着人口膨胀,资源短缺,气候变迁,地质灾害迭起,生态环境恶化等严重问题,而这一切问题的解决都有赖于地球科学的进步。为了确保人类社会可持续发展,21 世纪势必是地球科学大发展的时代,有关地球动力学的研究将有望取得突破性进展。因而,在新世纪大地电磁测深将更多的用于地壳深部探测,为地球动力学研究提供重要依据。

### 参 考 文 献

- [1] 张赛珍、王庆乙、罗延钟,中国电法勘探发展概况[J]. 地球物理学报,1994,37(增刊 D):301~309.
- [2] A. H. T , , , 1950, w LxxIII, 2.
- [3] Louis Cagniard. Basic Theory of the Magneto-telluric Method of Geophysical prospecting[J]. Geophysics, 1953, 18(3):605~635.
- [4] 刘国栋. 我国大地电磁测深的发展[J]. 地球物理学报,1994,37(增刊 D):408~423.
- [5] 国家地震局地质研究所大地电磁测深组、武汉地质学院物探系石油电法组、石油部地球物理勘探局研究院电法组. 估算张量阻抗的大地电磁测深资料处理方法[A]. 见:大地电磁测深[C]. 北京:地震出版社,1981,3~16.
- [6] 国家地震局地质研究所大地电磁测深组. SD-1 型数字大地电磁测深仪[A]. 见:大地电磁测深[C]. 北京:地震出版社,1981,115~133.

- [7] 陈乐寿,王光镔.大地电磁测深法[M].北京:地质出版社,1990,185~227.
- [8] T D Gamble, W M Gubau, J Clarke. Magnetotellurics with a remote magnetic reference[J]. Geophysics, 1979, 44(1): 53~68.
- [9] 晋光文.大地电磁测深反演问题综述[A].见:电磁测深[C].北京:地质出版社,1987,84~91.
- [10] 林品荣,赵子言.分布式被动源电磁法系统及其应用[J].地震地质,2001,23:138~142.
- [11] 魏文博,邓明,谭捍东,等.我国海底大地电磁探测技术研究的进展[J].地震地质,2001,23:131~137.
- [12] G D Egbert, J R Booker. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 1986, 87:175~194.
- [13] 江钊,刘国栋,孙洁,等. Robust 估计及其在大地电磁资料处理中的初步应用[A].见:电磁方法研究与勘探[C].北京:地震出版社,1993,60~69.
- [14] 方文藻,李予国,李貅.用瞬变电磁测深校正 MT 静态效应[A].见:电磁方法研究与勘探[C].北京:地震出版社,1993,111~116.
- [15] 罗志琼.用电磁阵列剖面法压制 MT 静态效应影响的研究[J].地球科学,1990,15(增刊):13~22.
- [16] 何展翔,江纹波,罗卫峰,等.西部山区 CEMP 采集方法技术试验研究[M].地震地质,2001,23:201~206.
- [17] J T Smith, J R Booker. Rapid inversion of two and three dimensional magnetotelluric data [J]. J. Geophys. Res. 1991, 96:3.
- [18] 孙卫斌,张长江,员智能.连续电磁剖面法在古潜山构造勘探中的应用[J].地震地质,2001,23:207~211.
- [19] Wenbo Wei, Martyn Unsworth, Alan Jones, et al. Detection of Widespread Fluids in the Tibetan Crust by Magnetotelluric Studies[J]. Science, 2001, 292(5517):716~718.
- [20] 魏文博,邓明,谭捍东,等.利用海底大地电磁探测研究南海地壳电性结构的必要性—南海环境与资源基础研究前瞻[M].北京:海洋出版社,2001,123~132.

## New Advance and Prospect of Magnetotelluric Sounding (MT) in China

WEI Wen-bo

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

[Abstract] A brief review of China's MT is given here for 60s, 70s and 80s of last century. Since 90s China's MT had a great progress and a detailed review is introduced. The prospect of MT in 21st century is also discussed.

[Key words] Magnetotelluric sounding (MT); Data acquisition; Data processing; Application; New advance