

中国地球电磁法新进展和发展趋势

赵国泽, 陈小斌, 汤 吉

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘 要 本文用有限的篇幅, 重点介绍近几年地球电磁法在深部结构探测、能源和资源勘探、环境和工程探查、地震等灾害监测以及新技术和软件等方面的最新发展状况, 介绍几个有发展和应用潜力的新电磁技术。

关键词 地球电磁法, 地壳电性结构, 能源资源勘探, 地震监测, 新技术

中图分类号 P318, P319

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)04-1171-10

Advanced geo-electromagnetic methods in China

ZHAO Guo-ze, CHEN Xiao-bin, TNA G Ji

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract The recent development of geo-electromagnetic method and its application in study of deep structure, exploration of resources, in environmental and engineering detection and monitoring of earthquake are introduced in the paper. The trends of some new techniques on the data processing and analysis are presented. A few new potential research fields using EM method are summarized.

Key words geo-electromagnetic, crustal electricity structure, resource exploration, monitoring of earthquake, developing technique

0 引 言

世界上地球电磁法发展已经有一个多世纪的历史^[1~7]。我国解放前在个别金属矿地区进行过电法勘探, 在油气领域的勘探几乎为零, 上世纪 50 年代, 在矿山和盆地区等开始进行电法和磁法勘探^[6~7]。60~70 年代始, 我国的地球电磁法开始有较大的发展, 特别是大地电磁法的研究和应用, 由于其特有的优势和特点, 不仅使大地电磁法本身的理论和仪器、数据处理和解释等获得快速发展, 而且由于它与传统电法、磁法和无线电等其它技术的交叉和融合, 衍生了许多新的分支技术。

近 20 多年来, 为适应国民经济建设和科学发展的需要, 各种电磁技术的研究和应用都得到前所未有的高速发展, 新的技术不断涌现。据不完全统计, 现在我国正在研究和应用的地球电磁技术有近 20

种, 如大地电磁(包括 MT、CEMAP 等)、人工源声频大地电磁(CSAMT)、瞬变电磁(TEM)、电阻率成像(DC)、激发极化(IP/SIP)、探地雷达(GPR)、核磁(NMR)、地磁测深(GDS)、磁剖面(MV)、自然电位(SP)、井间、井地电磁(LOGGING)、网式电磁(Network-MT)、人工和天然混合场源电磁(EH4 设备)、卫星电磁(Sat-EM)、高频大地电磁(RMT)、甚低频(VLF)以及具有发展潜力的人工源大功率超低频/极低频电磁(CSELF/SLF)等。世界上已有的或者新发展起来的技术, 我国几乎都在进行研究并投入应用。我国所进行的电磁法勘探工作量是世界上最大的, 仅以油气电磁勘探为例, 每年的工作量比世界上其他所有国家工作量之和还要大得多^[7]。

电磁技术的研究和应用已渗透到各个领域, 包括能源和资源勘探、工程和环境勘察、地震和火山灾害监测、地壳上地幔结构探测、海洋和空间电磁测量

收稿日期 2007-05-28; **修回日期** 2007-06-20.

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40534023)资助.

作者简介 赵国泽, 男, 1946 年生, 河北石家庄人, 北京大学地球物理系毕业, 中国地震局地质研究所研究员, 博士生导师, 曾任地球物理研究室主任, 现任地球电磁探测研究中心主任, 1988~1989 东京大学博士后研究, 1991 被评为“做出突出贡献的中国博士学位获得者”, 2001 东京大学客座教授, 2004~2006 中国地震局地质研究所学位评定委员会主任, 现任中国地球物理学会地球电磁学专业委员会主任, 主要从事大地电磁等地球电磁法及其应用研究, (E-mail: zhaogz@ies.ac.cn)

等各个方面,测量的地下深度自地表到 1000 多公里.为适应国家经济建设需求的增长和科学技术的发展,电磁法应用领域在不断扩展,新的分支技术相继出现,硬软件技术也在不断进步.现在每年都有大量研究应用成果在国内外不同层次的刊物发表,或有书籍出版.也还有很多成果虽已应用于实践中,但没有公开发表论文或出版.

显而易见,用一篇文章不可能全面介绍或阐述这些成果,本文仅介绍一些最新的研究应用动态和几种新发展的电磁技术,但仍不免以偏概全,期望起到抛砖引玉的作用.

1 地球电磁法广泛应用于各个领域

1.1 地下深部结构探测研究

上世纪 50 年代大地电磁法的出现标志着电磁法进入一个新的发展历史阶段,并以其探测深度大、对地下流体和温度状况等反映灵敏、实施成本低等优点,首先在地壳上地幔结构探测中得到应用.我国首先把它应用于南北地震带北段和华北平原盆地的探测研究^[8~10].之后,通过国家“六五”到“十一五”的各五年计划、地学断面计划、973、863 以及国家自然科学基金等项目,在我国华北、华中、华南、东北、西南、西北等广大地区开展了地壳上地幔结构的大量大地电磁探测^[8~58],这些研究结果为大陆各个构造区的深部结构和动力学研究提供了有价值的信息.特别是近年来,在青藏高原及其周围地区、华北克拉通地区、大别-苏鲁超高压变质带地区以及一些强地震区和火山地区等的探测研究又取得了新的成果^[30~41],下面仅对一些研究结果作梗概介绍.

1.1.1 相对稳定区地壳结构

在相对稳定地块区或盆地区即地壳没有发生严重变形的地区,如中下扬子地块、鄂尔多斯地块、华北平原盆地、塔里木地块、青藏高原次级地块如拉萨地块和秦岭-祁连地块等,虽然它们生成的时代互不相同,但它们的电性结构却具有相似性.一般在表层沉积层以下,地壳由三层组成.上地壳电阻率相对较高,称为高阻层,电阻率数值为几百到几千 $\Omega \cdot \text{m}$ 甚至更大.高阻层的底界深度对于不同地块区有一定差别,其总纵向电导值约为几十 $\text{S}^{[33,59]}$ (S 为纵向电导的单位:西门子,下同).

在高阻层之下出现低阻层,电阻率一般为几十 $\Omega \cdot \text{m}$,总纵向电导值一般为几十到几百 S ,低阻层的厚度及其以下地区的不同而有所差异.有的地区的低阻层反映了地壳内的韧性剪切或者是壳内滑脱性

质.低阻层之下电阻率又增大,约为几百 $\Omega \cdot \text{m}$,总纵向电导值一般大于上地壳高阻层.

1.1.2 造山带或严重变形区

造山带或严重变形区是由于地壳受到侧向挤压、褶皱等作用发生抬升或变形,原有的地壳分层结构发生严重变形甚至遭到破坏,断裂或断裂带发育,地壳物质发生运移和重组,电性结构复杂.其中沿着断裂带及其附近的流体较丰富,往往显示为低电阻率区(体),而地壳的其它部分表现为高电阻率区(体),高电阻率体和低电阻率体交错发育或块体明显倾斜.

发现这些现象的地区包括,华北的太行山隆起带^[42],南北地震带北部的六盘山地区^[43],青藏高原东边缘的龙门山和鲜水河断裂交汇区,青藏南边缘的喜马拉雅山地区,天山北边界地区,大别-苏鲁造山带地区等^[26,32,44].

1.1.3 近代火山区或新生代裂谷区

近代火山区或新生代裂谷区一般岩浆活动强烈,地面显示高地热异常.在中国大陆新生代裂谷区的大地电磁测量工作不多,当雄裂谷是少数的测区之一.在长白山火山、五大连池火山、黑龙江镜泊湖火山和腾冲火山等进行了电磁探测^[45~48].前三个火山区等都属于幔源的玄武岩型火山,但是它们地壳内部的电性结构有差别.长白山火山区在 10 多 km 深度以下存在低阻体,横向宽约数千米,向深处延伸达十多千米以上.五大连池火山的地壳显示为高电阻率特征,高阻体沿近南北方向延伸,东西向宽为数公里,高阻体的底界深度约 10km.前者推测为地壳内的岩浆囊,后者推测为火山活动后岩浆通道内固结过程中的岩浆.在云南腾冲火山区的地壳深部,也发现低电阻率体,推测是深部岩浆囊^[45].

1.1.4 强震区的地壳电性结构

在我国的许多强震区开展了大地电磁测深探测研究,如在三河地震(1679)、沙城地震(1720)、玛纳斯地震(1906)、海原地震(1920)、邢台地震(1966)、阳高地震(1989)、张北地震(1998)以及鲜水河与安宁河强地震断裂带区等进行了观测^[49~55].探测发现这些地区的地壳表现出一些共同的电性结构特征:

在震源区及其周围电性结构复杂,高电阻率体和低电阻率体沿横向并列发育,二者之间存在倾角较大的电性差异界面,不再有大范围成层发育的水平电性层;在震源区附近或侧翼往往存在低电阻率的块体;震源区附近发育有较大规模的断裂(带)或隐伏断裂(带),且与高、低阻体的边界相对应.

1.1.5 地壳内低阻层的成因研究

二维反演等先进技术的应用,使不同地区的探测结果可对比性增强了,对低阻层成因的解释也易于得到一些共识^[33,59]。目前提出的成因主要有:含盐流体、颗粒界面的碳膜、导电矿物和部分熔融。

在一些局部地区导电矿物可能引起电阻率的降低,岩石矿物颗粒界面的碳膜也可能引起低阻带,但难以解释连续存在上百千米以上范围的壳内低阻层。部分熔融可解释火山区或者大地热流较高地区的壳内低阻层,例如长白山火山、腾冲火山和青藏高原康马向北倾的低阻体,后者的大地热流值高达 242 mW/m^2 ^[26]。

相对稳定区壳内的低阻层,可能是含盐流体的存在所致。干燥条件下,地壳岩石的电阻率一般为 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}$ 以上,但是当岩石内含有相互连通的流体时,可以引起电阻率降低几个数量级。试验和探测研究发现,中下地壳是可以存在流体的^[59]。另外,地壳变质岩的碳-氧-氢(C-O-H)系统的研究表明,地壳内流体可分为三层,即富含甲烷的上层,以水为主的中层和以 CO_2 为主的下层。所以地壳中部具有引起电阻率降低的条件。而在造山带或严重变形区,层状结构遭到破坏,流体扩散或逃逸,赋存在孔隙度较大的断裂带附近,电阻率较低。其它地方流体明显减少,形成贫水区,电阻率相对较高^[33]。

1.1.6 上地幔过渡带的电性结构

上世纪 90 年代发展起来的网式大地电磁网法(Network-MT)可以探测深至千公里的上地幔结构,不仅能够确定岩石圈底界深度,而且能够探测上地幔 410 ~ 660 km 深度范围过渡带的电性。在我国东北地区的探测结果表明,在 100 ~ 200 km 发现相对低阻层,相当于岩石圈底界。在 400 km 发现相对高阻层,深度增大到 600 km 深度左右时电阻率又随深度增大而有所减小,该相对高阻层可能与上地幔过渡带对应^[56]。研究发现在地块边界带地区,上地幔过渡带的电阻率又分为上、下两部分,上部的电阻率大于下部的电阻率。

1.2 能源、矿产资源和工程勘探

在油气和矿产资源勘探、水文和工程探查等方面,电磁法探测发挥了重要的作用。无论是在矿产的前期普查阶段,还是在精查阶段,无论是在勘探条件较好的盆地区,还是在构造复杂的山区、火山岩地区、沙漠地区以及南海相碳酸盐岩地区,电磁法探测结果都起到了重要作用。电磁法探测的深度范围

跨度很大,可自地表附近的地下管线探查、溶洞勘查,到深达十多公里的基底探测。可以不夸张地说,几乎各个需要地球物理探测的领域,电磁法都能够发挥作用。但需要指出,过去许多勘探成果虽然被生产部门应用但没有发表或公开,一定程度上影响了新技术的应用和推广。

1.2.1 油气勘探

油气勘探也是我国最早利用和研究电磁法的领域之一,投入的工作量最大。至今在各含油气盆地以及远景勘探区都开展了电磁探测,为我国石油的开发发挥了举世瞩目的作用,王家映(2006)^[71]对此已经给出了系统准确的论述,本文不予重复。但需要指出,油气勘探行业也正在大力发展一些新的电磁技术,并成为我国新技术研究应用的主要支撑行业之一^[60~63]。

1.2.2 矿床勘探

对金属矿产的勘探,电磁法仍然是主要的方法。除了利用传统的电法之外,近年来利用激电法(SIP/CR)、人工源和天然源的混合场源法(EH4)、人工源声频大地电磁法(CSAMT)、瞬变电磁(TEM)、大地电磁法(MT)等^[64~68],在寻找深部隐伏矿床、构造复杂区的矿床等方面,都取得了有用的成果。

令人可喜的是,最近在中国地质调查局的支持下,汇集了国内 20 多个单位的专业队伍,用最新的电磁技术,在华东某矿区开展了大规模的电磁方法比对试验探测,参加试验的方法包括大地电磁(MT)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、复电阻率(CR)法、时间域激发极化法、双频激电法、三极激电测深和瞬变电磁法(TEM)等,投入的设备有十几种。虽然施工条件非常艰难、干扰背景很强,但初步结果却明显好于预期效果。可以相信,这次试验将为危机矿山的复苏、解决“攻深找盲”中的技术问题,为新技术的进步和推广必将产生重要的影响。

1.2.3 水文和工程环境勘探

电磁法在煤田勘查、采空区探查、地下水和地热资源勘查等方面,也都开展了大量的工作^[69~71]。在南水北调、三峡水库、铁路、公路等地基和隧道工程等方面也都为生产部门提供了非常有价值的探测成果^[72~74]。在城市管线探查、输电工程^[75]和考古^[76]等方面取得许多有用的研究和勘查结果。此外,利用电磁法在植被覆盖区^[77]和盐湖区^[78]等也开展了先导性的应用研究。

1.3 地震等灾害监测和预测

电磁场和地壳电阻率被认为是地震前兆反应

最灵敏的物理量之一,通过观测电磁场可直接监测地震前兆异常,用观测的电磁场计算得到的电阻率,也可监测地震前兆异常。

1966年邢台地震以来,一些传统的电法和磁法被应用于地震监测当中,取得许多有价值的成果。随着研究和观测的发展,发现在ELF/SLF/ULF等频段($0.01 \sim n \times 10^3$ Hz)的电磁场记录到更多的与地震有关的异常现象,而且该频段电磁场可反映深达震源附近电阻率的变化。因此,利用这些频段电磁场进行地震监测研究,引起国内外地震预测专家的重视。

对于地震电磁异常信号传播到地表和空间的数值和物理模拟研究,近年取得有成效的进展^[79]。针对提取电磁异常弱信号的问题,利用现代技术研发了新的观测接收装置,记录到一些异常现象,并对波动特征进行了研究^[80]。

上世纪90年代人工源大功率超低频/极低频电磁技术在地震预测和资源探测等领域的发展和推广应用^[81~82],为我们提供了一种至今最为理想的监测地震活动性的电磁观测技术,并在我国的十五、十一五计划中开始建设和实施。

我国虽然没有正在活动的火山,但是近代火山活动还是强烈的。近十年来,电磁法在火山地区不仅为研究深部构造提供了重要依据,而且也正在被列入常规的火山活动性监测中。

2 新技术、新方法的研究

2.1 数据处理、反演和模拟的新技术

电磁法数据处理与解释技术已经近于系统化并比较成熟。近年来,应用领域的扩展和勘探实践的高要求,使这一领域仍取得显著的进步。

在大地电磁法观测的时间序列处理方面,引入小波理论和多尺度信号处理以及高阶统计量方法^[83~85],以减少大地电磁观测响应函数中的噪声。远参考道电磁阵列观测与Robust时间序列处理技术的结合得到进一步研究和推广^[86,87]。

在响应函数分析中,开展了资料的局部畸变及其克服方法的研究。当前有效的方法如巴赫分解、GB分解、感应矢量分析等,并仍进行了深入研究和推广应用^[88~93]。对于资料静位移校正的有效性也进行了对比研究^[94~96]。此外还进行了大地电磁数据极化模式的选择与确定的研究^[97,98]。

瞬变电磁法中,研究了信号源关断时间的改进和校正方法^[99],全期视电阻率的定义和反演方

法^[100~103],以及最小分辨率和最大探测深度等有关问题^[104]。

大地电磁正反演研究的热点开始向三维问题转移。交错网格法等已成为大地电磁三维正演计算的主要方法^[105~108]。三维正演技术正在逐步被应用于实测资料解释中,也用于对二维反演解释结果的检验和修正^[109,110]。三维反演在实用化方面的研究取得显著进展^[111]。针对大地电磁反演计算量太大等问题,并行计算技术也正在研究^[112,113]。研究中还涌现了大量正反演新技术^[114~126]。

带地形的、多参数的大地电磁正反演研究一直受到关注。对于二维问题,尽管理论研究早已展开并已获得较好的结果^[127~135],但由于实际条件的复杂性,各种消除地形影响的处理方法在实测资料中的有效性还有待进一步验证。对三维地形影响的研究也在进行中^[127,134],并有很大的研究空间。

对于可控源电磁法的正反演技术也有了长足的进展。频率域电磁法中,二维模型二维源(线源)问题得到了较好的研究^[136~139]。二、三维模型三维源问题的研究也受到了重视^[140,141]。一些研究提出了局部网格加密、吸收边界条件以及全区视电阻率方法来提高计算的精度和稳定性^[142]。虽然时间域电磁法正反演技术不如频率域电磁法成熟,但也有许多研究报道^[144~148],其中包括二维模型三维源问题的反演研究^[147]。

近年来电阻率成像的三维研究在进一步发展^[149,150],激电法/谱激电法的方法研究进展很快,在正反演研究方面也取得了明显进步^[151~154]。电磁测井^[155~156]、井地电磁探测^[157~158]和探地雷达^[159~160]新技术的研究也正在受到更大重视。地壳上地幔深部的电性各项异性已经在国外一些地区被发现,国内也开始了数值模拟方法的研究^[161]。为适应实际应用中大量观测数据的处理解释,相应的功能齐全、操作简便的可视化软件系统已经有多单位研究^[162~165]。

2005年举行的“全国电法和电磁法勘探软件推介会”进一步促进了软件等新技术的发展,对科技工作者特别是年轻人的研究积极性给与较大鼓励。

2.2 研发实用化的设备

上世纪60~70年代,我国曾研发了具有自主知识产权的大地电磁设备^[166],为推动我国电磁仪器的发展起到了推动作用。但近十多年来,我国使用的电磁仪器以进口为主,这引起许多学者的关注,并在有关部门的支持下,下功夫研制我国自产的设备。尽

管过程比较艰难,但仍取得一些可喜的进展^[167-168,173]。为更适于我国的实际和方法发展的需要,对引进设备的软件系统的改进也是研究的重要内容^[169]。

2.3 海洋电磁法

世界上开展海洋电磁探测至少已经有 20 多年的历史^[170]。海洋探测不论是对于海洋资源探测还是对于国土勘查等都是非常必要的,特别是在当今能源勘探开发激烈竞争的国际环境下,开展海洋电磁探测成为国家发展的当务之急。在这一形势下,各国都在大力研究和发展海洋电磁探测的新技术。

何展翔等^[63]对国际海洋人工源电磁技术(简称为 CSEM)进行了分析。据统计,CSEM 的投入在 2004 年仅有 \$3000 万美金,到了 2005 年上升了 3 倍,预计在未来 3~4 年间,将达到 \$6~9 亿美金,大约是海上地震勘探的 25%。近年发展起来的人工源海洋 CSEM 技术具有许多独特的优点,它能够有助于确定地震方法勘探划定的构造储层中的液体是油还是水,并经钻孔的验证率极高,为油气的评价预测迈出了关键一步。国外一些大石油公司,已经把海洋 CSEM 作为勘探流程中的不可缺少的重要组成部分^[63]。此外,对含油流体以及水中微生物的生物电磁信号的研究,正在形成一个新的研究领域^[171]。

近十年来我国的海洋电磁探测也得到了发展^[172],在 863 项目的支持下,研制了我国首台海底大地电磁测深仪^[173],并利用该设备在南海琼东南海域首次进行了大跨度海陆联测,使海底大地电磁技术进入实用化阶段^[174]。此外,近年在雷州半岛近岸地区,用不同设备和观测方法进行了成功的海洋陆地联合测量试验,证明电磁法在海底火山岩覆盖区、珊瑚礁和碳酸盐岩地区能够取得可靠的结果^[175-176]。

2.4 网式大地电磁法

越来越多的研究表明,在研究大陆动力学乃至全球动力学当中,对岩石圈、软流圈和地幔过渡带结构以及它们之间的相互作用和耦合关系的认识是非常必要的^[56,177]。以前的电磁方法,由于受设备频带的限制,对岩石圈以下部分的探测分辨率受到了影响。上世纪 90 年代发展起来的网式大地电磁法(Network-MT),用长数十公里的电话线作为测量电场分量的接地电极线,用地磁台磁场测量仪,可以测量频率低至数十、上百万秒周期的电、磁场数据,研究岩石圈、软流圈和地幔过渡带的厚度和内部结构^[56]。在我国东北太平洋板块弧后地区的首次探测

表明,它能够提供岩石圈到地幔过渡带等更深层的丰富信息。直接利用地磁、地电台站观测的数据研究深部结构,正在成为有前途的研究分支技术^[178]。

2.5 人工源超低频/极低频电磁法

不论是资源探测还是地壳深部结构探测或地震预测研究,克服干扰一直是电磁法面临的课题,因此先后提出各种人工源电磁法如 CSAMT、TEM 和 MHD 等。但这些方法或者源场覆盖范围小,或者探测深度较小,或者施工成本大。

上世纪 90 年代人工源大功率超低频/极低频电磁技术(CSELF/SLF)的推广受到人们的高度重视。其发射源是在高大地电阻率地区架设长数十、上百公里的信号发射天线,天线两端接地体为低电阻率区。用大功率信号源,向天线和接地体输送交变大电流,由天线、接地体和地下等效电流线构成巨大的电流环。电流环中的交变电流在空间感应生成很强的交变电磁场,向空间传播,并通过波导层传播到数千上万公里范围。在地面测量各电、磁场分量,既可研究空间环境电磁场的信息,也可象大地电磁法一样研究地下的电性结构^[81-82]。

通过国际合作测量试验等证明,在数千公里外可以记录到信噪比约一个量级以上的数据。在地震台站进行的仅有的两次测量,恰巧都分别记录到距各自接收地震台站约 100km 附近发生的地震之前 2 天左右出现的电磁场异常。在某油田的探测证明,探测深度可达近十公里,并提供了更多的新信息。俄罗斯科学家现正利用科拉半岛发射台的信号,在距发射台数百公里外的地区探测地下深至十多公里的结构(与彼得堡大学 Michail 教授的交流,2007)。

在全国或更大范围,共用一个稳定的人工源信号,无论是监测电磁场异常,还是探测地下的结构,其优势是显而易见的。该项技术的发展建设已列入我国十一五重大科学技术基础设施建设项目中,可以相信,它的发展标志着地球电磁法正在迈向一个新的高度。

2.6 卫星电磁技术

随着地球科学的发展和研究的深入,以及现代技术的进步,对地球及其环境的研究已经不限于仅在地面的观测,利用卫星技术成为不可避免的发展趋势,其中卫星电磁观测技术具有举足轻重的作用^[179]。

早在 1997 年,俄罗斯科学家就提出把卫星电磁观测和利用科拉半岛的大功率发射台信号的观测作为对灾难性地震短期预报的主要方法。2003 年 6 月

以来美国、法国、乌克兰、意大利和俄罗斯等国家先后发射了观测电磁场和粒子变化的 4 颗地震预测研究卫星,这也是至今仅有的主要用于地震预测研究的卫星^[180]。

我国已经重视利用卫星观测技术进行地震预测研究,在中国地震局等几个部门的合作研究的基础上,发射地震电磁卫星已经列入国家的卫星发展计划中。

3 瞄准前沿领域、把握前进方向

地球电磁法的研究和应用渗透到经济建设和人类生活的各个领域,已经或正在从事的工作和取得的成果举不胜数。本文虽不能反映我国地球电磁法研究和应用的全貌,但可以发现,我国对地球电磁法的研究已经在世界上占有重要的位置,影响在日益扩大。2008 年 9 月将在我国举行的国际地球电磁法学术讨论会,给我们提供了与国际上地球电磁研究领域最高层次的专家学者交流的机会,是我国地球电磁学界的重大事件。

为促进地球电磁法研究和应用更好更快的发展和不断创新,除有关人员的不懈努力外,现提出以下几点想法,让我们共勉。

(1) 加强基础研究

一个新学科或新技术的提出和创立,需要坚实的科学基础,一个新技术的发展同样需要坚实的研究基础。地球电磁学科及其技术的发展证实了这样一个过程。在当前面临地球电磁技术发展机遇的同时,也存在许多挑战。地球电磁学科的同行特别是年轻一代的科技工作者肩负着重要的使命,为保持学科的健康发展,头等重要的是加强学科的基础研究。

(2) 鼓励发展新技术

地球电磁法各个分支技术的出现,都是适应实践的需要和伴随新技术的发展而产生的。其中,除了科技工作者的深入研究外,与来自各有关方面的支持和扶持是分不开的。现在以及未来的发展中,必然仍会有新的思路、新的技术或方法提出来,因此需要有关部门和一代一代科学家的关怀,从学科发展、国家经济和社会发展的需要出发,鼓励创新。

(3) 发扬协作和合作精神

地球电磁学科和技术发展到今天的好局面,凝聚了国内外研究机构和应用部门广大科技人员共同的心血。要使电磁学科和技术继续向前发展,使我国在这一领域立于不败之地,需要大家团结协作,共同努力,摒弃部门或局部利益,瞄准前沿课题,不断前

进。

致谢 本文引用了相关的大量文献,也得到了许多同行的启发,深表谢意!

参考文献 (References):

- [1] 石应骏,刘国栋,吴广耀,王家映,等. 大地电磁测深法[M]. 北京:地震出版社,1984.
- [2] 刘国栋,等译. 大地电磁测深法[M]. 北京:地震出版社,1987.
- [3] 陈乐寿,王光镔,编著. 大地电磁测深法[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [4] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [5] 刘国栋,陈乐寿,主编. 大地电磁测深研究[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [6] 赵国泽,王继军,陈小斌. 中国地壳上地幔结构电磁探测研究. 陈运泰等主编:《中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展》[M]. 地震出版社,2004,107~121.
- [7] 王家映. 我国石油电法勘探评述[J]. 勘探地球物理进展,2006,29(2):77~81.
- [8] 顾群,孙洁,史书林,等. 华北、西北一些地区地壳和上地幔内高导层[J]. 地震地质,1980,2(2):21~29.
- [9] 国家地震局兰州地震研究所大地电磁测深组. 我国南北地震带北段地壳和上地幔的电性特征[M]. 大地电磁测深,北京:地震出版社,1981,68~73.
- [10] 国家地震局地质研究所大地电磁测深组. 北京平原地区大地电磁测深结果[M]. 大地电磁测深,北京:地震出版社,1981,74~79.
- [11] 刘国栋,史书林,王宝均. 华北地区壳内高导层及其地壳构造活动性的关系[J]. 中国科学(B 辑),1984,B9:839~848.
- [12] 赵国泽,赵永贵. 华北平原盆地演化中深部热、重力作用初探[J]. 地质学报,1986,60(1):102~113.
- [13] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京:地震出版社,1989.
- [14] 孙洁,徐常芳,江钊,等. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地震构造活动的关系[J]. 地震地质,1989,11(1):35~45.
- [15] 邓前辉,刘国栋,刘金汉,等. 湖北襄樊—福建罗源的大地电磁测量与地壳上地幔电性特征研究[J]. 地震地质,1990,12(2):149~158.
- [16] 江钊,孙洁,徐常芳,等. 江苏响水—内蒙满都拉地壳上地幔电性结构初探—地学断面研究报道之三[J]. 地震地质,1990,12(3):193~206.
- [17] 史书林,徐常芳. 辽宁义县—内蒙古东乌珠穆沁旗剖面深部电性研究[J]. 地震地质,1991,13(2):115~125.
- [18] 孔祥儒,刘士杰,张建军等. 福建东部地区大地电磁测深研究[J]. 地球物理学报,1991,34(6):724~735.
- [19] 蒋洪堪,战双庆,王鸿勋. 四川大足—福建泉州深部地电特征[J]. 地球物理学报,1992,35(2):214~22.
- [20] 刘国栋,邓前辉,主编. 电磁方法研究与勘探[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [21] 白登海,张丽,孔祥儒. 内蒙古东部古生代块体碰撞区的大地电磁测深研究[J]. 地球物理学报,1993,36(6):326~336.

- [22] 刘国栋,顾群,史书林,等. 京津唐渤和周围地区地壳上地幔电性结构及其与地震活动性的意义[J]. 地球物理学报, 1993, 36(2): 149 ~ 157.
- [23] 秦国卿,陈九辉,刘大建,等. 昆仑山脉和喀喇昆仑山脉地区的地壳上地幔电性结构特征[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 193 ~ 199.
- [24] 李立. 中国大陆地壳上地幔电性特征[J]. 地球物理学报, 1996, 39(增刊): 130 ~ 140.
- [25] 袁学城. 中国地球物理图集. 国际岩石圈委员会 201 号出版物[M]. 北京:地质出版社, 1996.
- [26] Chen L, Booker J R, Jones A G, *et al.* Electrically conductive crust in southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying[J]. Science, 1996, 274: 1694 ~ 1696.
- [27] 徐常芳. 中国大陆地壳上地幔电性结构及地震分布规律[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 254 ~ 261.
- [28] 杨宝骏,穆石敏,金旭,刘财. 中国满洲里 - 绥芬河地学断面地球物理综合研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 772 ~ 782.
- [29] 王家映. 我国大地电磁探测研究新进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 206 ~ 217.
- [30] 孔祥儒,王谦身. 青藏高原西部综合地球物理剖面 and 岩石圈结构与动力学[J]. 科学通报, 1999, 44(12): 1257 ~ 1265.
- [31] 鲁兵,徐可强,刘池阳. 藏北羌塘地区的地壳电性结构及其意义[J]. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 153 ~ 159.
- [32] 孙洁,晋光文,白登海,等. 青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(增刊): 173 ~ 180.
- [33] 赵国泽,汤吉,詹艳,等. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究[J]. 中国科学(D), 2004, 34(10): 908 ~ 918.
- [34] 汤吉,詹艳,赵国泽等. 青藏高原东北缘玛沁 - 兰州 - 靖边剖面地壳上地幔电性结构研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1205 ~ 1216.
- [35] 金胜,叶高峰,魏文博,等. 青藏高原东南部地壳导电性结构与断裂构造特征 - 下察隅 - 昌都剖面大地电磁探测结果[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 408 ~ 415.
- [36] 谭捍东,姜枚,吴良士,等. 青藏高原电性结构及其对岩石圈研究的意义[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 906 ~ 911.
- [37] 马晓冰,孔祥儒,刘宏兵,等. 青藏高原东北部地区地壳电性结构特征[J]. 地球物理学报, 2006, 48(3): 689 ~ 696.
- [38] 魏文博,金胜,叶高峰,等. 西藏高原中、北部断裂构造特征: INDEPTH() - MT 观测提供的依据[J]. 地球科学, 2006, 31(2): 257 ~ 265.
- [39] 魏文博,金胜,叶高峰,等. 藏北高原地壳及上地幔导电性结构 - 超宽频带大地电磁测深研究结果[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1215 ~ 1225.
- [40] 魏文博,金胜,叶高峰,等. 华北地区大地电磁测深及岩石圈厚度讨论[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 762 ~ 772.
- [41] Zhao G Z, Chen X B, Tang J, *et al.* Crustal and upper mantle structure in eastern boundary of Tibet plateau by MT data. 18th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, 2006, Spain
- [42] 赵国泽,刘铁胜,江钊,等. 山西阳高 - 河北容城剖面大地电磁资料的二维反演解释[J]. 地球物理学报, 1997, 40(1): 38 ~ 46.
- [43] 詹艳,赵国泽,陈小斌,等. 宁夏海原大震区西安州 - 韦州剖面大地电磁探测与研究[J]. 地球物理学报, 2004a, 47(2): 274 ~ 281.
- [44] 詹艳,赵国泽,汤吉,等. 新疆玛纳斯大震区地壳深部的电性结构[J]. 地震地质, 1999, 21(2): 159 ~ 167.
- [45] 白登海,廖志杰,赵国泽,等. 从 MT 探测结果推论腾冲热海热田的岩浆热源[J]. 科学通报, 1994, 39(4): 344 ~ 347.
- [46] 詹艳,赵国泽,等. 黑龙江五大连池火山群大地电磁探测和研究初步结果[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 00 ~ 408.
- [47] 朱仁学,付维洲,孟令顺,等. 黑龙江镜泊湖火山地区电性结构初步研究[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 186 ~ 190.
- [48] 汤吉,邓前辉,等. 长白山天池火山区电性结构和岩浆系统[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 191 ~ 200.
- [49] 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. 刘国栋主编《电磁方法研究与勘探》[M]. 北京:地震出版社, 1993, 1 ~ 21.
- [50] 邓前辉,张木生,詹艳,等. 邢台 7.2 级地震震源区的电磁阵列剖面发测量与电性特征研究[J]. 地球物理学报, 1998, 41(2): 218 ~ 225.
- [51] Zhao G Z, Jiang Z, Liu G D, *et al.* Two-dimensional inversion and interpretation of MT data in a seismic active area of Northern part of North China. Proc. 30th Int'l [J]. Geol. Congr, 1997, 20: 69 ~ 82.
- [52] 赵国泽,刘国栋,詹艳,江钊,等. 张北 - 尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地震地质, 1998, 20(2): 155 ~ 163.
- [53] 钱家栋,曹爱民. 1976 年唐山 7.8 级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究[J]. 地震, 1998, 18(增刊): 1 ~ 9.
- [54] 赵国泽,詹艳,江钊,等. 华北北部地壳上地幔电性结构及其与地震关系研究的新进展. 马宗晋等主编《构造地质学 - 岩石圈动力学研究进展》[M]. 北京:地震出版社, 1999, 331 ~ 338.
- [55] 邓前辉,王继军,汤吉,等. 三河 - 平谷 8 级大震区地壳上地幔电性结构特征研究[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 178 ~ 185.
- [56] 赵国泽,汤吉,等. 用大地电磁网在长春等地探测上地幔电导率结构[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 143 ~ 153.
- [57] 魏荣强,臧绍先. 大陆岩石圈流变结构研究进展及存在问题[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 359 ~ 364.
- [58] 姚保华,章振铨,王家林,火恩杰,张先康,刘保金,吴健生,王夫运,于鹏,毛雅萍. 上海地区地壳精细结构的综合地球物理探测研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 482 ~ 491.
- [59] Jones A G. Electrical conductivity of the continental lower crust. in: Fountain D M, *et al.* Eds, Continental Lower Crust, Elsevier, 1992, 81 ~ 143.
- [60] 苏朱刘,吴信全,胡文宝,等. 复视电阻率(CR)法在油气预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(4): 467 ~ 471.
- [61] 孙卫斌,李德春. 海洋油气电磁勘探技术与装备简介[J]. 物探装备, 2006, 16(1): 16 ~ 19.
- [62] 孙卫斌,刘云祥,李德春,等. 应用大地电磁资料以别塔中地区火山岩[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(6): 702 ~ 705.
- [63] 何展翔,孙卫斌,孔繁恕,等. 海洋电磁法[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(4): 451 ~ 457.

- [64] 蔡运胜,张宝华. 几种电法仪器在地质勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2006, 42(5): 71~78.
- [65] 肖骑彬,蔡新平,徐兴旺,等. 浅层地震与 MT 联合技术在隐伏金属矿床定位预测中的应用[J]. 矿床地质, 2005, 24(6): 676~683.
- [66] 黄俊革,阮百尧,王家林. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 619~624.
- [67] 吴子泉,尹成. 电阻率横向剖面法及其在隐伏断层探测中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 625~631.
- [68] 滕吉文,杨立强,姚敬全,刘宏臣,等. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 317~334.
- [69] Zhao Guoze, Zhan Yan, Chen Xiaobin, et al. Detection on the ground water using EM methods. Progrss in Environmental and Engineering Geophysics, Science Press USA Inc., 2004, 354~358.
- [70] 阎述,石显新,陈明生. 华北型煤田水文地质电法勘探的深度问题[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 5~8.
- [71] 安润莲,姚精选,杨引串. 瞬变电磁勘探技术在探测采空区中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 116~122.
- [72] 底青云,王光杰,安志国,等. 南水北调西线千米深长隧洞围岩构造地球物理勘探[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1836~1842.
- [73] 曹哲明,刘铁,朱正国. 高频大地电磁测深在隧道工程勘察中的应用研究[M]. 北京:中国地球物理, 2006, 645.
- [74] 薛国强,李勇,杨静东. 瞬变电磁法在公路地质勘察中的应用[J]. 石油仪器, 2006, 20(2): 41~43.
- [75] 欧阳传金,董利清. 电磁法在三峡输电工程接地极址地下电性分布测量中的应用[J]. 采矿技术, 2006, 6(4): 65~66.
- [76] 苏永军,王绪本,罗建群. 高密度电阻率法在三星堆壕沟考古勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 268~272.
- [77] 杨同敏,谢拥军,王鹏,杨锐. 植被电磁散射的半空间模型研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 605~610.
- [78] 马黎春,李保国,蒋平安,钟骏平,邱宏烈,武红旗. 罗布泊干盐湖电磁感应电导率与“耳纹”成因关系探讨[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 651~654.
- [79] 黄清华. 地震电磁信号传播的控制模拟实验[J]. 科学通报, 2005, 50(16): 1774~1778.
- [80] 赵玉林,赵璧如,钱卫,等. 印尼 Mw9.0 地震的短临地电波(声波/潮汐力谐振共振波, HRT 波)波动前兆——HRT 波法进行短临地震准确预测可能性的探讨[J]. 国际地震动态, 2006, 8: 6~21.
- [81] 赵国泽,汤吉,邓前辉,等. 人工源超低频电磁波技术及其用于首都圈地震预测的测量研究[J]. 地学前缘, 2003, 10(Sup): 249~257.
- [82] 赵国泽,陆建勋. 利用人工源超低频电磁波监测地震的试验和分析[J]. 中国工程科学, 2003, 5(10): 27~33.
- [83] 何兰芳,王绪本,王成祥. 用小波分析提高 MT 资料信噪[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(3): 299~302.
- [84] 徐义贤,王家映. 基于连续小波变换的大地电磁信号谱估计方法[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 677~683.
- [85] 王书明,王家映. 关于大地电磁信号非最小相位性的讨论[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 216~221.
- [86] 严良俊,胡文宝,陈清礼,等. 远参考 MT 方法及其在南方强干扰地区的应用[J]. 江汉石油学院学报, 1998, 20(4): 34~38.
- [87] 邓前辉,孙洁,王继军,等. 电磁阵列剖面-大地电磁联合测量及其资料处理[J]. 地震地质, 1998, 20(3): 250~253.
- [88] 赵国泽,汤吉,刘铁胜,等. 山西阳高~河北容城剖面大地电磁资料的初步解释—阻抗张量分解技术及其应用[J]. 地震地质, 1996, 18(1): 66~74.
- [89] 王立凤,晋光文,孙洁,等. 地球电磁响应函数的旋转不变量特征[J]. 物探化探计算技术, 2000, 22(4): 306~311.
- [90] 王立凤,晋光文,孙洁,等. 一种简单的大地电磁阻抗张量畸变分解方法[J]. 西北地震学报, 2001, 21(2): 172~179.
- [91] 胡玉平,鲍光淑,贾继标. 基于畸变 3 个因子的 MT 畸变曲线改正方法与应用[J]. 地质与勘探, 2005, 41(6): 75~79.
- [92] 汤吉,晋光文,赵国泽,等. 感应矢量及其在长白山天池火山区的应用[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 294~303.
- [93] 陈小斌,赵国泽,詹艳,等. 磁倾子矢量的图示分析及其研究[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 626~636.
- [94] 陈清礼,张翔,胡文宝,等. 南方碳酸盐岩区大地电磁测深曲线静态偏移校正[J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(3): 30~32.
- [95] 杨长福,林长佑. 用 TEM 反演法进行 MT 静位移的识别和校正[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(6): 609~614.
- [96] 杨生,鲍光淑,李爱勇. MT 法中静态效应及阻抗张量静态校正法[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(1): 8~13.
- [97] 张翔. 大地电磁测深资料的 TE, TM 极化视电阻率曲线识别研究[J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(4): 72~75.
- [98] 陈小斌,赵国泽,马霄. 关于 MT 二维反演中数据旋转方向的选择问题初探[J]. 石油地球物理勘探, (审稿中).
- [99] 白登海, Meju M A. 瞬变电磁法中两种关断电流对响应函数的影响及其应对策略[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 245~251.
- [100] 苏朱刘,胡文宝. 中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演方法[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 215~221.
- [101] 白登海, Meju M A, 卢健,等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697~704.
- [102] 严良俊,徐世浙,胡文宝,等. 中心回线瞬变电磁测深全区视纵向电导解释方法[J]. 浙江大学学报(理学版), 2003, 30(2): 236~240.
- [103] 翁爱华,陆冬华,刘国兴. 利用连分式定义瞬变电磁法全区视电阻率研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 56~58.
- [104] 薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 575~578.
- [105] 黄临平,戴世坤. 复杂条件下 3D 电磁场有限元计算方法[J]. 地球科学, 2002, 27(6): 775~779.
- [106] 沈金松. 用交错网格有限差分法计算三维频率域电磁响应

- [J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 281~289.
- [107] 谭捍东, 余钦范, John Booker, 等. 大地电磁法三维交错采样有限差分数值模拟[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 705~711.
- [108] 鲁来玉, 张碧星, 鲍光淑. 电阻率随位置线性变化时的三维大地电磁模拟[J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 568~575.
- [109] 宣飞. 五大连池火山岩浆囊分布的三维数值模拟[D]. 中国地震局地质研究所硕士论文, 2000.
- [110] 汤吉. 长白山天池火山区地壳深部电性结构和大地电磁三维数值模拟研究[D]. 中国地震局地质研究所博士论文, 2001.
- [111] 谭捍东, 余钦范, Booker J, 等. 大地电磁三维快速松弛反演[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 850~855.
- [112] Tan H D, Tong T, Lin C H. The parallel 3D magnetotelluric forward modeling algorithm [J]. Applied Geophysics, 2006, 3(4): 197~202.
- [113] 刘羽, 王家映, 孟永良. 基于 PC 机群的大地电磁 OCCAM 反并行计算研究[J]. 石油物探, 2006, 45(3): 311~315.
- [114] 徐义贤. 大地电磁多尺度反演法[J]. 地球物理学报, 1998, 41(5): 704~711.
- [115] 师学明, 王家映, 等. 一维层状介质大地电磁模拟退火反演法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(8): 542~546.
- [116] 过仲阳, 王家林, 吴健生. 应用遗传算法联合反演地震~大地电磁测深数据[J]. 石油物探, 1999, 38(1): 102~108.
- [117] 陈小斌. 有限元直接迭代算法[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(2): 165~171.
- [118] 蔚宝强, 胡文宝. MT 资料的遗传法反演[J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(3): 25~29.
- [119] 师学明, 王家映, 等. 多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 122~130.
- [120] 陈小斌, 张翔, 胡文宝. 有限元直接迭代算法在 MT 二维正演计算中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4): 487~496.
- [121] 苏朱刘, 罗延钟, 胡文宝. 大地电磁测深“正演修正法”一维反演[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(2): 138~144.
- [122] 苏朱刘, 胡文宝. 大地电磁测深“降维逼近法”二维反演[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(5): 516~523.
- [123] 严良俊, 胡文宝. 大地电磁测深资料的二次函数逼近非线性反演[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 935~940.
- [124] 王绪本, 毛立峰, 高永才. 电磁导数场概率成像方法研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 679~684.
- [125] 陈小斌, 赵国泽, 汤吉, 詹艳, 王继军. 大地电磁自适应正则化反演算法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 937~946.
- [126] 师学明, 王家映, 易远元, 等. 一种新的地球物理反演方法——模拟原跃迁反演法[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 305~312.
- [127] 徐世浙, 阮百尧, 周辉, 等. 大地电磁场三维地形影响的数值模拟. 中国科学(D 辑), 1997, 27(1): 15~20.
- [128] 晋光文, 赵国泽, 徐常芳, 等. 二维倾斜地形对大地电磁资料的影响与地形校正[J]. 地震地质, 1998, 20(4): 454~458.
- [129] 张翔, 胡文宝, 严良俊, 等. 大地电磁测深中地形影响和校正[J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(1): 37~41.
- [130] 张翔, 胡文宝. 带地形的大地电磁测深联合二维反演[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(2): 190~196.
- [131] 王绪本, 李永年, 高永才. 大地电磁测深二维地形影响及其校正方法研究[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(4): 327~332.
- [132] 陈小斌. MT 二维正演计算中地形影响的研究[J]. 石油物探, 2000, 39(3): 112~120.
- [133] 张翔, 陈清礼, 胡文宝. 山区 MT 资料精细处理与效果分析[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(5): 603~607.
- [134] 阮百尧, 徐世浙, 徐志锋. 三维地形大地电磁场的边界元模拟方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(1): 130~134.
- [135] 戴世坤, 罗延钟. 二维地电模型多参数反演及其在 MT 测深中的应用[J]. 地球物理学报, 1993, 36(6): 60~64.
- [136] 阎述, 陈明生. 线源频率域电磁测深二维正演(一)[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(5): 60~62.
- [137] 阎述, 陈明生. 线源频率域电磁测深二维正演(二)[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(6): 56~59.
- [138] 陈小斌, 胡文宝. 有限元直接迭代算法及其在线源频率域电磁响应中应用[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 119~130.
- [139] 王若, 王妙月, 底青云. 频率域线源大地电磁法有限元正演模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1858~1866.
- [140] 底青云, Martyn Unsworth, 王妙月. 复杂介质有限元法 2.5 维可控源音频大地电磁法数值模拟[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 723~730.
- [141] 王若, 王妙月, 卢元林. 三维三分量 CSAMT 法有限元正演模拟研究初探[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 579~585.
- [142] 雷达, 孟小红, 王书民. 复杂地形条件下的可控源音频大地电磁测深数据二维反演技术及应用效果[J]. 物探与化探, 2004, 28(4): 323~326.
- [143] 阮百尧, 王有学. 三维地形频率域人工源电磁场的边界元模拟方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1197~1204.
- [144] 严良俊, 徐世浙, 陈小斌, 等. 线源二维瞬变电磁场的正演计算新方法[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 58~61.
- [145] 严良俊, 徐世浙, 胡文宝, 等. 中心回线瞬变电磁测深法快速电阻率成像方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 58~61.
- [146] 李实, 闫述, 李创社, 等. 人工神经网络专家系统在瞬变电磁法反演中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(6): 48~51.
- [147] 熊彬, 罗延钟, 强健科. 瞬变电磁 2.5 维反演中灵敏度矩阵计算方法() [J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 616~620.
- [148] 嵇艳鞠, 林君, 王忠. 瞬变电磁接收装置对浅层探测的畸变分析与数值剔除[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 262~267.
- [149] 吴小平, 徐果明. 利用共轭梯度方法的电阻率三维反演研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 420~427.
- [150] 阮百尧, 熊彬. 电导率连续变化的三维电阻率测深有限元模拟[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 131~138.
- [151] 阮百尧, 罗润林. 种新的复电阻率频谱参数的递推反演方法

- [J]. 物探化探计算技术, 2003, 25(4): 298 ~ 301.
- [152] 吴小平. 利用共轭梯度方法的激发极化三维快速反演[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 62 ~ 64.
- [153] 苏朱刘, 胡文宝, 严良俊. 电阻率和极化率测深法的正演修正法反演[J]. 石油物探, 2005, 44(2): 195 ~ 198.
- [154] 张辉, 李桐林, 董瑞霞. 体积分方法模拟电偶源三维电磁响应[J]. 地球物理学进展, 2006 21(2): 386 ~ 390.
- [155] 魏宝君. 一种新型随钻电阻率测井仪器的响应和刻度[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 632 ~ 641.
- [156] 邢光龙, 杨善德, 李曙光. 电磁波测井资料反演中 Jacobi 矩阵的快速算法及其特性分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 642 ~ 650.
- [157] 安然, 李桐林, 徐凯军. 井地三维电阻率反演研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 247 ~ 249. (247)
- [158] 王志刚, 何展翔, 魏文博. Born 近似快速三维反演井地电法数据[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 508 ~ 513.
- [159] 李嘉, 郭成超, 王复明, 张景伟. 探地雷达应用概述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 629 ~ 637.
- [160] 刘四新, 曾昭发. 频散介质中地质雷达波传播的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 320 ~ 326.
- [161] 杨长福, 林长佑, 孙崇赤, 等. 二维对称各向异性介质大地电磁反演[J]. 地震学报, 2005, 27(3): 339 ~ 345.
- [162] 张翔, 肖晓琳, 胡文宝, 等. 基于 VC 平台的大地电磁测深交互式解释系统[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(6): 612 ~ 614 转 639.
- [163] 陈小斌, 赵国泽, 詹艳. MT 资料处理与解释的 Windows 可视化集成系统[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(suppl): 11 ~ 16.
- [164] 肖骑彬. 基于数据库平台的 MT 数据处理可视化方案[J]. 物探与化探, 2005, 29(3): 269 ~ 272.
- [165] 张连伟, 郝明, 童孝忠. Matlab 工具箱在大地电磁测深二维正演中的应用[J]. 铁道勘察, 2007, (1): 59 ~ 61.
- [166] 张木生等. SD-1 型数字大地电磁记录系统[J]. 地球物理学报, 1984, 27(6): 600 ~ 604.
- [167] 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(2): 138 ~ 142.
- [168] 赵璧如, 赵健, 张洪魁, 等. PS100 型 IP 到端可控源高精度大地电测仪系统 ~ CDMA 技术首次在地电阻率测量中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 675 ~ 682.
- [169] 柳建新, 王贵财, 刘春明. 多功能 ASTATIC 软件的改进与开发[J]. 物探化探计算技术, 2006 28(4): 346 ~ 351.
- [170] 赵国泽, 行武毅, 浜野洋三, 等. 东太平洋 Juan de Fuca 板块的磁变研究[J]. 地球物理学报, 1990, 33(5): 521 ~ 539.
- [171] Werkema D D, Atekwana E A, Rossbach S, *et al.* Laboratory and field results linking high conductivities to the microbial degradation of petroleum hydrocarbons: Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP '04), 2004 [J]. March 26 ~ 28 Colorado Springs, CO, 363 ~ 373.
- [172] 何继善, 鲍力知. 海底无限长水平线电流源电磁场[J]. 中南工业大学学报, 2001 32(6): 551 ~ 554.
- [173] 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(2): 131 ~ 137.
- [174] 邓明, 刘方兰, 张启升, 等. 海陆联合大跨度多点海底大地电磁同步数据采集[J]. 科技导报, 2006, 24(10): 28 ~ 32.
- [175] 于鹏, 王家林, 吴健生, 等. 陆联测的大地电磁数据处理与综合解释[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 1264 ~ 1269.
- [176] 张全胜, 王家映, 叶景艳, 等. 雷琼地区滩海 MT 勘探可行性试验研究[J]. 地质与勘探, 2006, 42(1): 64 ~ 67.
- [177] 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 大陆岩石圈导电性的研究方法[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 15 ~ 23.
- [178] Tang J, Zhao G Z, Uyeshima Makoto, *et al.* Study on the mantle electrical conductivity structure in eastern China. 2006, 18th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth [J]. Spain.
- [179] 徐文耀, 国连杰. 空间电磁环境研究在军事上的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 335 ~ 344.
- [180] 赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛. 电磁卫星和地震预测[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 667 ~ 673.