中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 9 期: 1219 ~ 1227
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

进 展

中国人工源电磁探测新方法

底青云[1,2,3,4], 薛国强[2,3,4,5*], 殷长春[6], 李貅[7]

1. 中国科学院页岩气和地质工程重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 深部资源探测先导技术与装备研发中心, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
4. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
5. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
6. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
7. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054
* 通讯作者, E-mail: xueguoqiang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2019-08-04; 收修改稿日期: 2020-01-21; 接受日期: 2020-02-04; 网络版发表日期: 2020-06-12
北京市科技计划专项项目(编号: Z181100005718001)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0601204)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 41874088、41830101)资助

摘要 人工源电磁探测技术作为地球物理电磁探测的重要分支, 在过去十年中得到快速发展. 中国陆续攻克电磁探测方法的基础理论、正反演方法和核心装备技术难题, 在地面电磁法、航空电磁法及海洋电磁法等领域的研究中取得了突破性进展, 出现空-地-井立体探测和频-时域多尺度电磁探测新技术, 实现对地下10km深度范围内目标体的有效探测. 为了进一步满足国家在深部地质找矿、城市地下空间探测、地质灾害探测和监测等方面的迫切需求, 仍需继续推动地球物理勘探方法的技术创新, 发展高效、可靠、经济的新装备.

关键词 人工源, 地面电磁法, 航空电磁法, 海洋电磁法, 新进展

1 引言

中国正面临资源紧缺的严重压力, 随着矿产开发力度的加大, 浅部矿产资源已大幅减少. 已勘探的石化能源和固体矿产资源对工业化的保障程度日趋下滑. 中国未来20年城市人口数量大增, 对城市地下空间的开发规模加大. 伴随着经济的快速发展, 地质环境和地质灾害问题越来越突出. 地球物理勘探对保障矿产安全、促进国民经济的可持续发展具有重要的意义.

中国位于环太平洋成矿域、特提斯-喜马拉雅成矿域和古亚洲三大成矿域交汇区, 成矿地质条件好. 虽然目前探明的浅部后备储量有限, 对大宗矿产品的保障能力不足, 但是最新的成矿理论研究和深部定位预测结果均表明中国大陆2000m深部蕴藏着潜力巨大的矿产资源(滕吉文等, 2009). 为此, 中国明确提出实施“找矿突破战略行动”的资源保障战略(国办发(2011)57号). 近年来, 中国矿产资源勘探技术取得了长足发展, 一批新装备、新技术陆续投入使用, 逐步实现了对1000m以浅矿产资源的有效探测, 然而面向深部资源, 在现有装备的稳定性及方法技术高精度探测等方面仍

中文引用格式: 底青云, 薛国强, 殷长春, 李貅. 2020. 中国人工源电磁探测新方法. 中国科学: 地球科学, 50: 1219–1227, doi: 10.1360/SSTe-2019-0162
英文引用格式: Di Q, Xue G, Yin C, Li X. 2020. New methods of controlled-source electromagnetic detection in China. Science China Earth Sciences, 63: 1268–1277, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9583-9

© 2020 《中国科学》杂志社

存在诸多亟待解决的技术难题. 因此, 突破深度3000m的矿产资源勘探技术、提升6500~10000m的油气勘查技术, 成为中国深地探测技术发展的总体战略目标.

近年来, 中国城市化进程取得了举世瞩目的成就, 城市化水平由不足20%发展到已超过50%(李国平和谭玉刚, 2019). 然而, 随着城市地上发展空间逐渐趋于饱和, 如何合理有效利用和统筹开发地下空间, 如何对已建成地下设施进行风险监控, 成为中国面临的前所未有的重大发展问题之一. 对地下空间的有效利用依赖于对地下空间全要素高精度的探测, 以充分掌握地下构造和物性分布特征及运动状态. 目前, 中国城市地下空间探测学科理论缺乏、地下探测要素不全且精度不高, 不仅影响了对城市地下空间的认知水平, 也制约了城市立体规划与地下空间开发决策能力. 因此, 发展城市环境下的近地表、高精度、抗干扰、全要素探测方法与技术, 以及基于卫星遥感与地面观测相结合的空地一体探测理论与技术, 逐渐凝聚成为解决城市地下空间探测问题的主要发展方向.

地震、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害是自然动力作用与人类社会经济活动相互作用的结果. 由于地质灾变体与围岩具有物性差异, 发展对地质灾害体的高精度、抗干扰的地球物理探测方法, 通过地球物理数据处理和资料解释, 确定灾变体的空间赋存状态, 为掌握地质灾害发生和发展的条件与分布规律提供地球物理依据, 有助于较为可靠地实现对地质灾害的预警预报.

中国在“十一五”和“十二五”期间先后启动了一系列人工源深部资源探测技术及装备研发项目, 并在全国部署了“两网、两区、四带、多点”的探测实验. 已经实施完成了国家重大科研装备研制项目《深部资源探测核心装备研发》中“多通道大功率电法勘探仪”, 国家自然科学基金委《广域电磁法及其装备》等重大研究项目. 多通道瞬变电磁法(Di等, 2020; Li等, 2019)和广域电磁法(何继善, 2010; 何继善和薛国强, 2018)均形成了集装备自主研发、数据处理和野外实际探测于一体的综合系统. 国家863重大研究计划项目也连续资助了一系列涉及航空电磁、海洋电磁、地井电磁探测的重大技术和仪器装备研发项目.

深部探测装备的关键技术问题是传感器材料和加工工艺等核心技术的突破, 形成深部探测地球物理装备体系. 中国地球物理传感器等关键装备长期依赖进口. 近年来, 国内成功研发了航空瞬变电磁勘探仪、多通道大功率电法勘探仪等深部资源探测装备, 突破了感应式磁矢量传感器等制约中国深部探测装备发展的核心部件(底青云等, 2019). 攻克电磁探测的基础理论、核心技术和仪器装备是解决深部资源探测的有效途径之一.

总之, 中国人工源电磁探测技术近年来得到快速发展. 本文主要根据探测空间的不同, 对广域电磁法、天波探测方法、时频电磁法、短偏移瞬变电磁法等地面电磁探测新方法, 以及航空电磁法(地空电磁法)、海洋电磁法、井下电磁法等领域的研究进展进行分析, 从而为中国深部地质找矿、工程地质等领域开展10km以浅人工源电磁探测提供技术支撑.

2 地面电磁探测新方法

可控源音频大地电磁(CSAMT)是一种人工源频率域测深方法. 根据不同频率电磁波在不同导电介质中具有不同趋肤深度的特性, 在地表接收从高频到低频的电磁响应以获得由浅到深的大地电性结构, 可用于资源和工程等领域探测(Goldstein和Strangway, 1975; 底青云和王若, 2008). CSAMT由天然场源的大地电磁法(MT)发展而来, 数据处理手段较为成熟, 且人工源的引入提高了信号强度. 为了获得简化的视电阻率表达式, CSAMT需要在远区观测, 这带来了信号强度弱、精度低的问题. 因此, 何继善(2010)提出了广域电磁法. 另一方面, 为了兼顾大深度和高精度探测, 底青云研究团队将半空间平面波传播理论发展为全空间天波曲面波理论, 提出天波探测方法(底青云等, 2013).

2.1 广域电磁法

广域电磁法由何继善(2007, 2010)提出, 该方法采用人工场源, 根据水平电流场源和垂直磁场源在均匀半空间地面的电磁场解析表达式, 定义了视电阻率, 建立了一种可以在包括过渡带在内的广大区域进行测量的频率域电磁测深方法. 该方法包括水平电流源和垂直磁场源两种形式, 其中电流源广域电磁法(包括E-E_x和E-E_z测深方式)发射偶极矩大、探测深度高, 是实际中更普遍应用的一种方法. 基于均匀半空间电磁场的解析表达式推导广域视电阻率, 是广域电磁法的核

心技术之一, 其定义为

$$\rho_a = K_{E\text{-}E_x}\frac{\Delta V_{MN}}{I}\frac{1}{f_{E\text{-}E_x}(ikr)}, \tag{1}$$

$$f_{E\text{-}E_x}(ikr) = 1-3\sin^2\varphi+\mathrm{e}^{-ikr}(1+ikr), \tag{2}$$

$$K_{E\text{-}E_x} = \frac{2\pi r^3}{\mathrm{d}L\cdot MN}, \tag{3}$$

式中, I为发射电流, $\mathrm{d}L$为源长度, ρ_a为电阻率, MN为接收电极长度.

目前, 这种方法的发射源相对比较笨重, 在地形复杂情况下进行金属矿探测时存在一定的局限性. 进一步优化发射装备的功率-体积密度比是未来的研究方向.

2.2　天波探测方法

天波探测方法是在天然场大地电磁法(MT)和可控源音频大地电磁法(CSAMT)基础上发展起来的一种新型人工源电磁探测技术. 它通过一个大功率固定发射台发射0.1~300Hz超低频/极低频电磁信号来探测地下地质结构(卓贤军和赵国泽, 2004; 底青云等, 2013). 天波是指在电离层-大气层-岩石层全空间中传播的电磁波, 其传播路径如图1a所示. 首先利用百公里长的接地导线向地下注入数百安培的交变电流, 所产生的电磁波传播到电离层, 并反射到地下, 最后在地面观测携带地下目标体的电磁信号, 获取地下电性结构分布特征. 天波数据采集方法与天然场大地电磁法类似, 观测三分量磁场信号和水平电场信号, 如图1b所示. 国内学者对天波的应用已做了大量的理论和试验工作. 例如, 大功率发射台辐射的电磁场计算(李帝铨等, 2010), 不同距离电磁信号发射接收试验, 油田深部结构探测试验等. 目前, 这种方法的理论基础为平面直角坐标下的电磁响应模拟计算, 为了推广使用该方法, 还需进一步研究球面坐标系下正演模拟, 同时完善三维反演计算研究.

2.3　时频电磁法

时频电磁法(TFEM)是可控源音频大地电磁测深法和长偏移距瞬变电磁法相结合的一种电磁方法. 东方地球物理公司在大功率建场测试法的基础上, 提出这种采用类似大偏移距地震勘探的工作方式. 给大地供强电流激发油气勘探目标体, 测量油气藏孔隙介质放电形成的次生电磁场和电磁场频谱. TFEM的野外施工方式类似于CSAMT法, 但同时采集时间域和频率域电磁信号. 从时间域数据获得电阻率信息, 从频率域数据提取极化率信息, 并应用这两种参数对地下油储结构进行评价.

时频电磁法的装置布设如图2所示, 发射端采用大功率发电机和长导线源, 激发源波形为1:1占空比的正负方波, 从高频到低频连续激发, 并采用叠加的方法提高信号的信噪比. 接收端一次性采集到的时间域和频率域信号, 为提取目标层电阻率和激电信息提供了可能. 经过十余年的发展, 该方法形成了视电阻率定义、约束反演等数据处理和成像技术, 并在野外实际探测中获得成功应用(He等, 2010; 张春贺等, 2013).

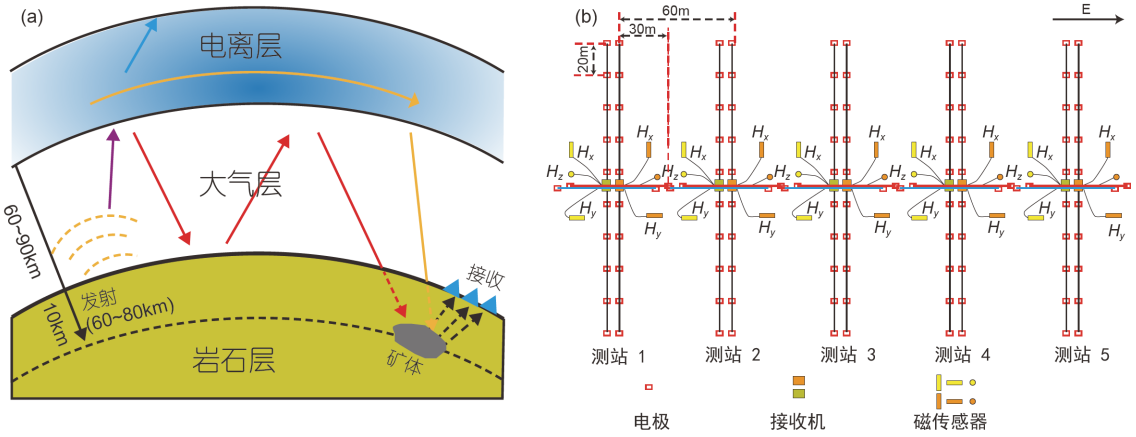


图 1　天波采集站批量测试测站布设示意图

(a) 天波传播路线示意图; (b) 测站工作布设示意图. 据李萌和底青云(2018)

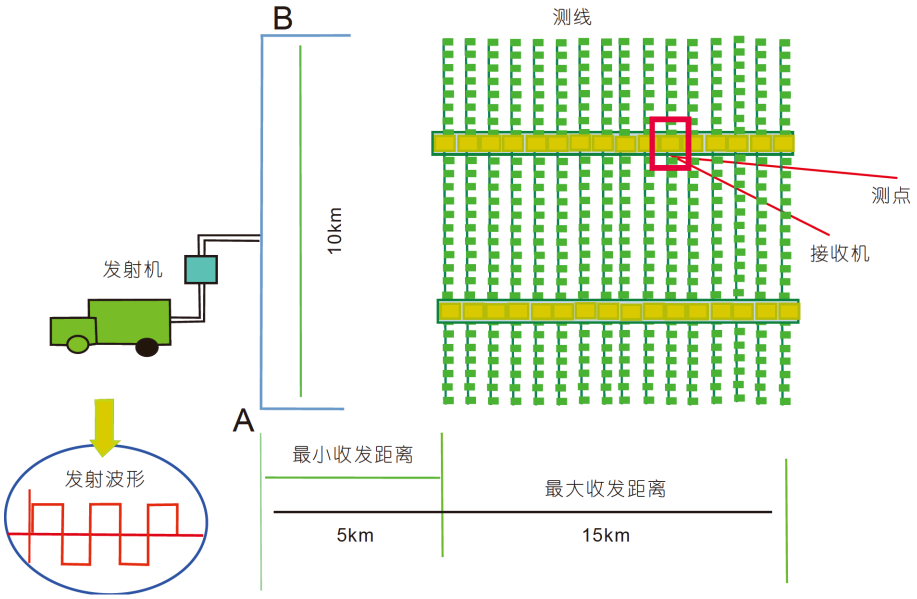


图 2　时频电磁法野外施工布置图

据张春贺等(2013)

目前该方法主要应用于页岩气和常规油气勘探中，在金属矿资源领域的应用鲜有报道. 由于金属矿具有倾角陡、目标层薄等特点，还需要进一步研究资料精细处理和相关的解释技术.

2.4　短偏移瞬变电磁法

短偏移瞬变电磁法(SOTEM)是在长偏移瞬变电磁法(LOTEM)的基础上提出的(薛国强等，2013；Xue, 2018). 通过接地线源激发电磁场信号，在赤道向的近源区观测响应, 偏移距通常为0.5~1.5倍探测深度, 能够以较小的偏移距离实现大深度探测(图3). 利用当前主流的电磁法仪器如V8、GDP-32等都可以实施SOTEM测量，陈卫营等(2016)详细讨论了SOTEM的响应特征、可行性和优越性，及其工作方法和数据解释方法等，并给出了若干探测实例. 随后，SOTEM方法在煤田采空区、矿产资源探测及工程勘查等方面获得了推广应用，实现对地下1500m目标体探测(Chen等，2015; Zhou等，2015; Li等，2018). 这种方法目前主要通过进口仪器来实现数据采集，自主研发短偏移瞬变电磁法专用装备成为当务之急.

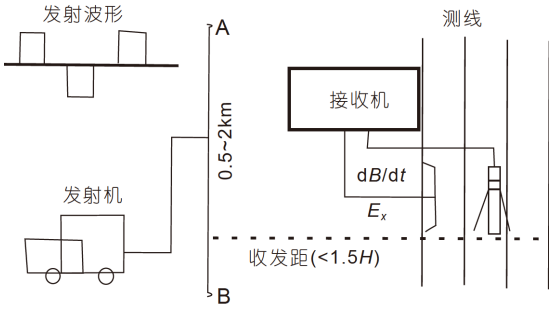


图 3　短偏移瞬变电磁法野外布置示意图

据薛国强等(2013)

另外，席振铢等(2016)研发出浅层瞬变电磁法装备. 该方法采用上下平行共轴的两个相同线圈通以反向电流作为发射源，且在该双线圈源合成的一次场零磁通平面上，测量对地中心耦合的纯二次场. 理论计算和物理实验论证了该方法能够有效消除接收线圈本身的感应电动势, 从而获得地下纯二次场的响应. 该方法采用的双线圈源比传统单线圈源对地中心耦合场能量更集中，因而有利于减少旁侧影响、提高探测的横向分辨率. 实际试验表明该方法是浅层探测的一种有效方法(席振铢等, 2016).

3　海洋、航空和井下电磁探测方法

3.1　海洋可控源电磁法

中国是一个海洋大国，海洋国土面积占陆地国土

面积近1/3. 石油、天然气以及稀有金属等各种资源在海底具有丰富的储量, 发展海洋可控源电磁探测技术具有重要的意义.

海洋可控源电磁法(MCSEM)采用拖曳电缆近海底发射, 在海水中采用阵列式接收方式, 通过发射电极向海水中发送0.1~10Hz的大功率电磁脉冲, 由接收机接收海底介质返回的电磁响应信号, 获得海底介质电性成像信息, 实现对海底目标体的探测(图4). 天然气水合物以及油气资源储层的电导率比海水或海底沉积物的电导率小几十倍甚至上百倍, 利用这种电导率物性差异来实现海底的地质构造以及油气资源电磁探测.

在中国海洋国土上进行地球物理观测与研究, 也有助于提升对地球系统内部运动变化规律的认识. 虽然中国在海洋电磁法方面起步较晚, 但是近年来取得较大进展. 海洋电磁探测三维数值模拟是方法研究的基础. 付长民等(2009)、陈桂波等(2009)、殷长春等(2014)、韩波等(2015)、杨军等(2015)、Guo等(2016)、蔡红柱等(2015)、李勇等(2017)、刘玲等(2018)实现了海洋可控源电磁响应高效三维正演, 研究成果有助于指导海底矿产和油气目标体探测.

近年来中国海洋可控源电磁探测装备研制水平得到明显提高. 中南大学(周胜等, 2017)研发了由甲板控制系统、万米光电复合缆、仪器舱拖体和天线拖体组成的深海6000m拖曳式瞬变电磁系统, 并由大洋号第30航次第二航段在西南印度洋脊热液区, 应用该系统发现了明显的电磁异常, 印证了系统的有效性. 刘长胜等(2011)对探测系统参数与海洋油气目标的耦合关系展开研究, 王猛等(2013, 2017)、陈凯等(2015)研制出海洋可控源电磁系统, 陶海军等(2017)和张天信等(2017)对大功率海洋电磁发射机进行研究. 目前, 成套的海洋电磁探测装备在多个海域执行探测任务. 罗鸣和李予国(2015)、李亚彬(2016)采用高斯-牛顿算法, 实现了考虑姿态参数的反演. 赵宁等(2016, 2017)开展了三维MCSEM数据约束反演研究.

3.2　航空/地空电磁法

航空电磁法(Airborne Electromagnetic Method, AEM)是一种基于飞机平台的电磁探测方法. 通过搭载于飞行平台的线圈向地下发射一次场, 用传感器观测二次场, 达到探测地下地质结构的目的(图5a). 该方法由于无需地面人员接近, 适合在高山、沙漠、森林

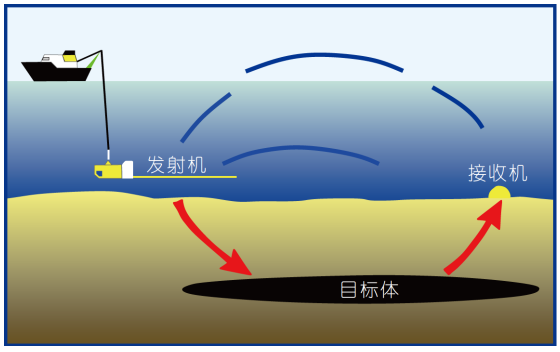


图 4　海洋电磁法工作示意图
据罗鸣和李予国(2015)

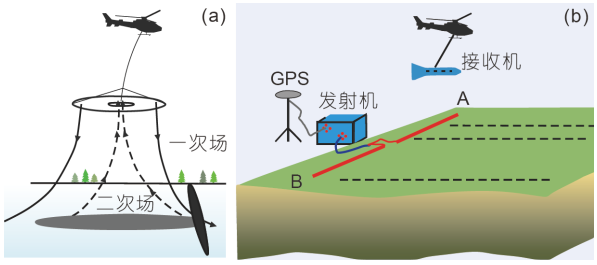


图 5　航空和地空电磁法工作示意图
(a) 航空电磁法工作示意图; (b) 地空电磁法工作示意图. 据王琦等(2013)和Ji等(2016)

覆盖等地区工作. 国外航空电磁发展始于20世纪中期, 目前已形成时间域和频率域、主动源和被动源、固定翼和直升机平台的系列航空电磁勘查系统. 国内航空电磁技术近年来得到较大提升.

半航空电磁法(Semi Airborne EM, SAEM)是一种兼顾工作效率与探测深度的航空电磁探测方法, 在地面布设发射系统, 通过搭载于飞行平台的接收装备观测二次场信号(Crosby和Steele, 1971; Elliott, 1996; Mogi等, 1998; 嵇艳鞠等, 2013)(图5b). 相较于传统AEM, 由于SAEM发射系统置于地面, 系统功率及重量不再受限于飞行平台的供电与搭载能力的限制, 可实现更大功率的输出, 从而获得较全航空电磁法更大的探测深度, 并且降低了飞行风险. 此外, 由于近年来传感器与采集系统的轻小型化, 及民用低成本无人机性能的显著提升, 使得采用低成本无人机搭载SAEM电磁探测成为可能.

2012年中国科学院电子学研究所由俄罗斯引进Impulse-A5直升机航空瞬变电磁系统. 2013年以来, 中

国科学院电子学研究所联合其他单位，研制出直升机电磁探测系统CAS-HTEM. 目前，CAS-HTEM系统已为多家单位提供飞行勘探服务, 获得良好的探测效果.

中国最早的SAEM系统由吉林大学研发，最早在江苏省如东县开展海水侵入探测，并在内蒙古锡林郭勒盟巴彦宝利格盆地开展地下水资源探测工作(Ji等, 2016). 2013年起，中国科学院在国家项目支持下开展SATEM系统研发，并于2017年在位于山东省昌邑-安丘成矿带的莲花山铁矿开展了探测(Liu等, 2017). 当然，目前中国的航空电磁装备还处于研发阶段和试生产阶段，加快这种装备技术的推广使用是下一步的发展方向.

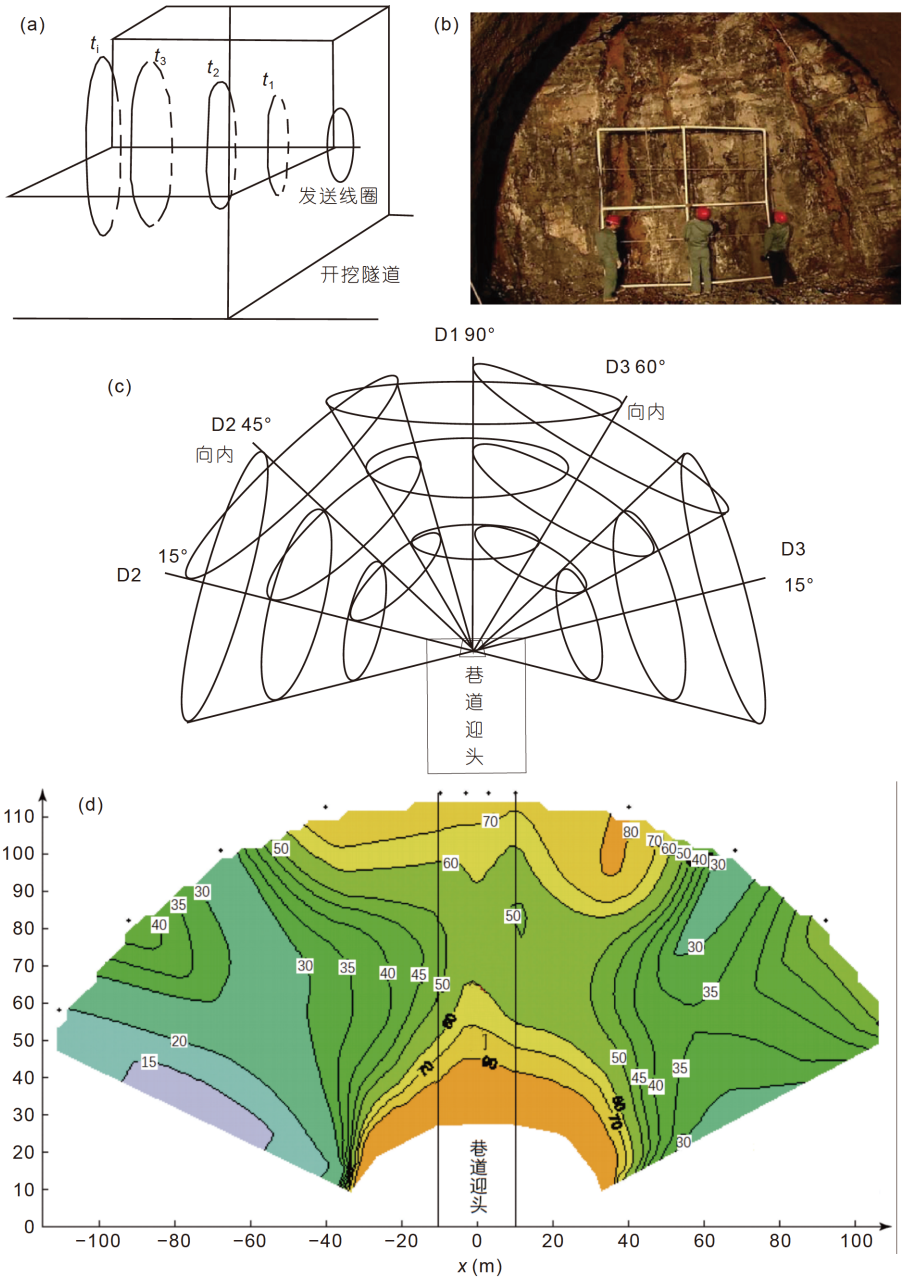


图 6　隧道/井下小线圈瞬变电磁工作示意图

(a) 隧道探测原理图; (b) 隧道探测工作示意图(薛国强和李貅, 2008); (c) 煤矿井下探测原理图; (d) 煤矿井下探测成果示意(程久龙等, 2016)

3.3　隧道/井下小线圈瞬变电磁法

瞬变电磁场在隧道中工作时，可以采纳的主要装置方式有两种: 一种是在隧道掌子面/井下巷道独头上进行观测，以勘察前方地质结构情况(如图6a和6b所示)；另一种是沿着隧道掘进/巷道方向在已开挖的空间进行观测，以调查隧道/巷道顶底面围岩情况. 所获得的数据能够对观测面前方进行电阻率成像(如图6c和6d所示). 由于井下空间受限，发射线框通常采用小线圈, 从而形成了小线圈井下瞬变电磁探测技术. 该技术在地下隧道掌子面空间或者采煤空间利用直径或者边长为1~2m的小型线圈，在掘进面上开展探测，可圈定前方低阻富水体. 这种方法的难点在于全空间理论模拟问题，目前的全空间理论研究还不完善，还需要提高全空间视电阻定义和计算的精度.

胡雄武等(2013)和孙怀凤等(2016)对井下瞄杆等金属体干扰进行定量分析, 并提出初步校正方法. 张乐文等(2018)对比分析了滤波和传统截断方式的成像结果，提出井下瞬变电磁去噪方法. 通过全区视电阻率(杨海燕等, 2010; 戚志鹏等, 2015)、平移算法(杨海燕等, 2014)将响应转换成视电阻率信息. 苏茂鑫等(2010)利用视纵向电导法对响应进行处理和解释. 薛国强和李貅(2008)、范涛等(2017)将拟地震虚拟波场成像技术应用到井下瞬变电磁响应成像中，取得了良好的应用效果. 对于该方法的研究目前主要是模拟计算，后续需要开展大量的实际探测应用研究.

3.4　地井电磁探测方法

地井电磁探测方法将发射源布设于地面，在地下(井中)观测电磁响应信号(如图7所示)(Chen等，2017; 陈卫营等，2019). 这种装置形式有效地避免了地表电磁干扰及低阻覆盖层影响. 此外, 在钻孔的周边布设多个发射源, 利用不同方位的钻孔进行测量, 可以判断异常体的空间位置和延伸，实现对地下目标体的精确追踪和定位.

4　结束语

中国发展了天波探测(WEM)、广域电磁法(WFEM)、多通道瞬变电磁法(MTEM)和电性源短偏移瞬变电磁法(SOTEM)等地面探测新技术. 航空电磁、地空电磁以及海洋电磁法探测技术也得到快速发展，攻克了大功率发射机、高灵敏磁传感器和低噪声采集站等电磁探测方法的核心技术和装备.

面对未来“一带一路”重大基础设施建设、雄安新区建设、城市地下空间勘探开发等需求，仍需不断完善人工源电磁探测全空间理论、多分量探测技术与高性能装备, 在打破国外对磁传感器垄断的同时, 建设具有自主知识产权的人工源电磁探测技术体系，实现人工源电磁探测的技术突破, 更好服务国家经济发展.

电磁探测的反演是典型不适定的，造成反演结果的多解性，尽管通过正则化方法能够一定程度上压制

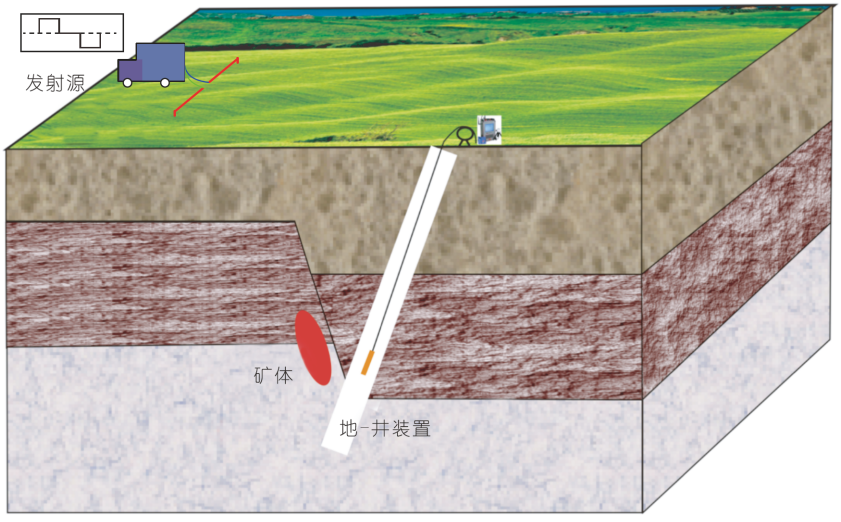


图 7　地井电磁探测方法工作示意图

改自Chen等(2017)

反演的多解性, 然而不适定性是反演自身固有的特征, 没有所求解的附加信息, 这一本质困难是不易克服的, 残缺的信息很难通过任何数学技巧来修补. 解决该问题的有效方法是发展约束反演和联合反演. 约束反演是通过将已有的先验信息如地质结构、钻孔测井信息、物性测量信息等加入到反演中, 对反演参数的结构和物性进行约束, 使反演结果能够符合地质条件. 同时由于地质资料的加入, 减少了地下模型未知参数的个数, 降低了维度, 有利于提高反演精度. 当先验信息不充分时, 将电磁法结合其他地球物理方法进行联合反演也可以提高反演精度. 联合反演的本质是通过增加对地下目标的有效信息量来增加约束, 减少可行解的空间, 来达到更准确反映地质目标体的目的. 因此, 发展约束反演和联合反演, 能够提高电磁法探测的精度和分辨率, 进一步扩大电磁探测应用的深度和广度.

电磁探测中所采集的数据信息具有大数据的特质, 利用大数据和深度学习理论对电磁法正反演和数据资料处理进行数据分析和挖掘, 将带来巨大价值. 大数据中的高带宽技术, 可为大数据量的三维电磁场计算带来更快的运算速度; 大数据中的分析理论, 可全方位分析和匹配各类反演方法的计算优劣性, 为特定区域特定问题找到最优的反演计算方式; 深度学习特别适合于不确定性和非结构化的信息处理, 将其应用于电磁数据预处理和反演中, 将会有很好的应用效果. 利用学习记忆功能, 使电磁法数据处理和反演工作具有延续性和继承性. 汲取大数据和深度学习的新思路、新方法, 使电磁探测方法得到更好的发展.

参考文献

蔡红柱, 熊彬, Zhdanov M. 2015. 电导率各向异性的海洋电磁三维有限单元法正演. 地球物理学报, 58: 2839–2850

陈凯, 魏文博, 邓明, 伍忠良, 余刚. 2015. 用于海底MT及海洋CSEM的海底电磁采集站. 应用地球物理, 12: 317–326

陈桂波, 汪宏年, 姚敬金, 韩子夜. 2009. 各向异性海底地层海洋可控源电磁响应三维积分方程法数值模拟. 物理学报, 58: 3848–3857

陈卫营, 韩思旭, 薛国强. 2019. 电性源地-井瞬变电磁法全分量响应特性与探测能力分析. 地球物理学报, 62: 1969–1980

陈卫营, 薛国强, 崔江伟, 钟华森. 2016. SOTEM响应特性分析与最佳观测区域研究. 地球物理学报, 59: 739–748

程久龙, 陈丁, 薛国强, 邱浩, 周项通. 2016. 矿井瞬变电磁法超前探测合成孔径成像研究. 地球物理学报, 59: 731–738

底青云, 王若. 2008. 可控源音频大地电磁数据正反演及方法应用. 北京: 科学出版社

底青云, 王妙月, 付长民, 李帝铨, 许诚, 卓贤军. 2013. “地-电离层”模式电磁波传播特征研究. 北京: 科学出版社

底青云, 朱日祥, 薛国强, 殷长春, 李貅. 2019. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展. 地球物理学报, 62: 2128–2138

范涛, 鲁晶津, 王冰纯, 刘磊, 赵兆. 2017. 瞬变电磁虚拟波场反演法在井下超前探测中的应用. 煤炭科学学报, 45: 8–16

付长民, 底青云, 王妙月. 2009. 海洋可控源电磁法三维数值模拟. 石油地球物理勘探, 44: 358–363

韩波, 胡祥云, Schultz A, 左博新, 李建慧, 蔡建超. 2015. 复杂场源形态的海洋可控源电磁三维正演. 地球物理学报, 58: 1059–1071

何继善. 2007. 频率域电法的新进展. 地球物理学进展, 22: 1250–1254

何继善. 2010. 广域电磁测深法研究. 中南大学学报(自然科学版), 41: 262–269

何继善, 薛国强. 2018. 短偏移距电磁探测技术概述. 地球物理学报, 61: 1–8

胡雄武, 张平松, 严家平, 郭立全. 2013. 坑道掘进瞬变电磁超前探水解释方法的改进研究. 岩土工程学报, 36: 654–661

嵇艳鞠, 王远, 徐江, 周逢道, 李肃义, 赵义平, 林君. 2013.无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用. 地球物理学报, 56: 3640–3650

李萌, 底青云. 2018. 地面电磁探测接收系统批量对比试验. 石油地球物理勘探, 53: 186–196

李勇, 吴小平, 林品荣, 韩思旭, 李荡, 刘卫强. 2017. 电导率任意各向异性海洋可控源电磁三维矢量有限元数值模拟. 地球物理学报, 60: 1955–1978

李帝铨, 底青云, 王妙月. 2010. 电离层-空气层-地球介质耦合下大尺度大功率可控源电磁波响应特征研究. 地球物理学报, 53: 411–420

李国平, 谭玉刚. 2019. 中国城市化特征、区域差异及其影响因素分析. 社会科学辑刊, 21: 106–110

李亚彬. 2016. 基于Qt的海洋可控源数据处理软件开发. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学

刘玲, 殷长春, 刘云鹤, 邱长凯, 黄鑫, 张博. 2018. 基于谱元法的频率域三维海洋可控源电磁正演模拟. 地球物理学报, 61: 756–766

刘长胜, 周逢道, 林君. 2011. 系统参数对海洋油气可控源电磁勘探的影响. 石油勘探与开发, 38: 744–949

罗鸣, 李予国. 2015. 一维电阻率各向异性对海洋可控源电磁响应的影响研究. 地球物理学报, 58: 2851–2861

牛之琏. 2007. 时间域电磁法原理. 长沙: 中南大学出版社

戚志鹏, 智庆全, 李貅, 孙怀凤. 2015. 隧道瞬变电磁任意点垂直分量全域视电阻率解释方法. 岩石力学与工程学报, 34: 1426–1434

殷长春, 贲放, 刘云鹤, 黄威, 蔡晶. 2014. 三维任意各向异性介质中海洋可控源电磁法正演研究. 地球物理学报, 57: 4110–4122

滕吉文, 杨立强, 刘宏臣, 闫雅芬, 杨辉. 2009. 岩石圈内部第二深度空间金属矿产资源形成与集聚的深层动力学响应. 地球物理学

报, 52: 1734–1756
陶海军, 张一鸣, 任喜国. 2017. 大功率海洋电磁发射机DC-DC可控源电路特性分析. 电工技术学报, 32: 233–244
苏茂鑫, 李术才, 薛诩国, 李貅, 邱道宏. 2010. 隧道地质预报中的瞬变电磁视纵向电导解释方法研究. 岩土工程学报, 32: 1722–1726
孙怀凤, 李貅, 卢绪山, 李术才, 任宝宏. 2016. 隧道强干扰环境瞬变电磁响应规律与校正方法: 以TBM为例. 地球物理学报, 12: 328–340
王猛, 张汉泉, 伍忠良, 盛堰, 罗贤虎, 景建恩, 陈凯. 2013. 勘查天然气水合物资源的海洋可控源电磁发射系统. 地球物理学报, 56: 3708–3717
王琦, 林君, 于生宝. 2013. 固定翼航空电磁系统的线圈姿态及吊舱摆动影响研究与校正. 地球物理学报, 56: 3714–3750
王猛, 邓明, 伍忠良, 罗贤虎, 景建恩, 陈凯. 2017. 新型坐底式海洋可控源电磁发射系统及其海试应用. 地球物理学报, 60: 4253–4261
杨军, 刘颖, 吴小平. 2015. 海洋可控源电磁三维非结构矢量有限元数值模拟. 地球物理学报, 58: 2827–2838
杨海燕, 邓居智, 张华. 2010. 矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究. 地球物理学报, 53: 651–656
杨海燕, 邓居智, 汤洪志, 林云. 2014. 全空间瞬变电磁法资料解释方法中的平移算法. 吉林大学学报(地球科学版), 44: 1012–1017
席振铢, 龙霞, 周胜. 2016. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法. 地球物理学报, 59: 3428–3435
薛国强, 李貅. 2008. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术. 地球物理学报, 51: 894–900
赵宁, 王绪本, 秦策, 阮帅. 2016. 三维频率域可控源电磁反演研究. 地球物理学报, 59: 330–341
赵宁, 王绪本, 秦策, 余年, 周军, 徐玉聪. 2017. 基于VTI各向异性介质的频率域海洋可控源电磁三维约束反演. 地球物理学报, 60: 1946–1954
张春贺, 刘雪军, 何兰芳, 何委徽, 周印明, 朱永山, 崔志伟, 邝锡汉. 2013. 基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探研究. 地球物理学报, 56: 3173–3183
张乐文, 宿传玺, 孙怀凤, 李召峰, 辛冬冬, 程铭, 吴启龙, 李凯. 2018. 隧道瞬变电磁超前探测去噪方法试验研究与应用. 岩石力学与工程学报, 37: 3353–3361
张天信, 王中兴, 吴树军, 底青云, 任文静, 叶鹏飞. 2017. 海洋电磁低时钟飘移及自动增益采集技术研究. 地球物理学报, 60: 4165–4173
周胜, 宋刚, 黄龙. 2017. 深海6000m拖曳式瞬变电磁系统及其应用. 地球物理学报, 60: 4294–4301
卓贤军, 赵国泽. 2004. 一种新的资源探测人工源电磁技术. 石油地球物理勘探, 39: 114–117
薛国强, 陈卫营, 周楠楠. 2013. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术. 地球物理学报, 56: 255–261
Chen W Y, Xue G Q, Muhammad Y K, Gelius L J, Zhou N, Li H, Zhong H. 2015. Application of short-offset TEM (SOTEM) technique in mapping water-enriched zones of coal stratum, an example from East China. Pure Appl Geophys, 172: 1643–1651
Chen W Y, Khan M Y, Xue G Q. 2017. Response of surface-to-borehole SOTEM method on 2D earth. J Geophys Eng, 14: 987–997
Crosby R O, Steele J P. 1971. Report on Airborne Geophysical Surveys Anyox Area. British Columbia on Behalf of Hogan Mines Limited
Di Q Y, Xue G Q, Lei D, Wang Z X, Li H, Olalekan F. 2020. Demonstration of the newly developed MTEM systems for gold detection in China. Geol J, 55: 1763–1770
Elliott P J. 1996. New airborne electromagnetic method provides fast deep-target data turnaround. Leading Edge, 15: 309–310
Goldstein M A, Strangway D W. 1975. Audio-frequency magnetotelluric with a grounded-electric dipole source. Geophysics, 40: 669–683
Guo Z, Dong H, Liu J. 2016. Comparison of marine controlled-source electromagnetic data acquisition systems by a reservoir sensitivity index: analyzing the effect of water depths. Acta Oceanol Sin, 35: 113–119
He Z X, Hu W B, Dong W B. 2010. Petroleum electromagnetic prospecting advances and case studies in China. Surv Geophys, 31: 207–224
Ji Y J, Wang Y, Xu J, Zhou F D, Li S Y, Zhao Y P, Lin J. 2016. Frequency-domain sparse Bayesian learning inversion of AVA data for elastic parameters reflectivities. J Appl Geophys, 133: 1–8
Li H, Xue G Q, Di Q. 2018. Numerical analysis of land-based inline-source configuration for the controlled-source electromagnetic method. J Environ Eng Geophys, 23: 47–59
Li H, Di Q Y, Xue G Q. 2019. A comparative study of inline and broadside time-domain controlled-source electromagnetic methods for mapping resistive targets on land. Geophysics, 84: B235–B246
Liu F B, Li J T, Liu H L, Ling H, Fang G Y. 2017. Application of the EEMD method for distinction and suppression of motion-induced noise in grounded electrical source airborne TEM system. J Appl Geophys, 139: 109–116
Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, Morikawa T, Jomori N. 1998. Development of grounded electrical source airborne transient EM (GREATEM). Explor Geophys, 29: 61–64
Xue G Q. 2018. The development of near-source electromagnetic methods in China. J Environ Eng Geophys, 23: 115–124
Zhou N N, Xue G Q, Chen W, Cheng J. 2015. Large-depth hydrogeological detection in the North China-type coalfield through short-offset grounded-wire TEM. Environ Earth Sci, 74: 2393–2404

(责任编委: 杨顶辉)