



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

煤矿含水体瞬变电磁探测技术研究进展

薛国强^{1,2,3,4}, 李海^{1,2}, 陈卫营^{1,2}, 余传涛^{1,5}, 常江浩^{1,6}, 于景邨⁷

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 青海省第三地质勘查院, 青海 西宁 810029; 5. 太原理工大学矿业工程学院, 山西太原 030024; 6. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 7. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:老窑采空区、顶底板含水层、陷落柱、溶洞、裂隙等潜在含水体,是煤矿开采中的主要致灾因素,严重影响矿山安全生产。随着煤炭开采规模和深度的逐渐加大,地质条件和观测环境日趋复杂,此环境下含水体探测成为保障煤矿安全生产过程中遇到的巨大难题,亟需创新电磁精细探测理论与技术。瞬变电磁法能够获得地下介质的电阻率分布,由于煤矿含水体与围岩具有明显的电阻率差异,该方法成为探测含水体的主要方法之一。首先总结了煤矿含水体的赋存特征及其电磁法探测的物理基础。然后,综述了近年国内瞬变电磁探测理论、方法和技术等方面研究新进展,及其在煤矿含水体探测中的应用和前景。理论方面,重点介绍了近年被引入瞬变电磁场数值模拟的时变点电荷载流微元近场理论和矿井瞬变电磁法的物理基础——地下全空间电磁理论,这2项理论都得益于数值模拟手段的发展,近年取得了较大的发展。在方法方面,对修正式中心回线装置、电性源瞬变电磁法、半航空瞬变电磁法和矿井瞬变电磁法等新型瞬变电磁法装置进行介绍。随着相关数据处理和反演技术的发展,这些新装置开始在煤矿含水体中得到应用,并展现出与传统方法截然不同的技术特点。最后,指出瞬变电磁多分辨探测方法技术、大数据技术、煤矿多层采空区精细探测技术和瞬变电磁高分辨数据采集装备研发是近年煤矿复杂含水体探测的研究方向。

关键词:含水体;煤矿;探测;瞬变电磁法

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2021)01-0077-09

Progress of transient electromagnetic detection technology for water-bearing bodies in coal mines

XUE Guoqiang^{1,2,3,4}, LI Hai^{1,2}, CHEN Weiying^{1,2}, YU Chuantao^{1,5}, CHANG Jianghao^{1,6}, YU Jingcun⁷

(Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. The Third Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810029, China; 5. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 6. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 7. The School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Geological hazards, such as goaf areas of old coal mines, roof and floor aquifers, collapse columns, karst caves, and fissures that are often encountered during coal mining have become the main hazards that endanger coal production. However, with the gradual increase in the scale and depth of coal mining, the geological conditions and observation environment have become increasingly complex, which has brought serious problems to the detection depth, ac-

收稿日期:2020-11-12 修回日期:2021-01-11 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.YG20.1781

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42030106);中国科学院科研仪器设备研制项目资助项目(YJKYYQ20190004);自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室开放课题资助项目(KF2020-3)

作者简介:薛国强(1966—),男,山西运城人,研究员。Tel:010-82998193, E-mail:ppxueguoqiang@163.com

通讯作者:李海(1988—),男,湖南湘潭人,副研究员。Tel:010-82998003, E-mail:lihai@mail.iggcas.ac.cn

引用格式:薛国强,李海,陈卫营,等.煤矿含水体瞬变电磁探测技术研究进展[J].煤炭学报,2021,46(1):77-85.

XUE Guoqiang, LI Hai, CHEN Weiying, et al. Progress of transient electromagnetic detection technology for water-bearing bodies in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 77-85.



移动阅读

curacy, and efficiency of traditional electromagnetic methods. Effective detection of water-bearing geological bodies has become a huge problem encountered in the field of coal mining. Therefore, it is urgent to innovate electromagnetic fine detection theory and technology. Transient electromagnetic (TEM) method can recover the resistivity distribution of the earth. As the water-bearing bodies have big resistivity contrast with the surrounding rocks, TEM method is one of the major tools for detecting the water-bearing area. This paper analyzes the research progress of TEM detection theory, method, and technology for complex structures in coal mines in recent years in China. For the theory part, the time-varying point charge current-carrying micro-element near-field theory has been introduced into the simulation of TEM method, and the underground full-space electromagnetic theory has been improved with the development of numerical simulation tools. For the method part, the airborne, land-based, and underground methods for near-source electromagnetic detection have been developed, and a series of detection techniques suitable for airborne, land-based, and underground scenarios of investigating water-bearing structures in coal mines has been developed for general and detailed investigations. It is pointed out that transient electromagnetic multi-resolution method, big data technology, fine detection technology of multi-layer coal mine goaf and the research and development of transient electromagnetic high-resolution data acquisition equipment are the research directions for detecting complex water-bearing bodies in coal mines.

Key words: water-bearing bodies; coal mine; detection; transient electromagnetic method

我国以煤炭为主的能源消费结构在未来 30 a 内不会发生根本性改变。我国煤矿安全生产形势近年来持续稳定好转,但煤矿事故时有发生,据不完全统计,与地质因素有关的各类事故占 80%。深部煤炭开采地质条件复杂,隐蔽灾害源多样性、突发性和时变性是导致煤矿事故频发的主要因素,使煤矿灾害防控面临巨大挑战。煤炭资源与环境领域遇到前所未有的地质难题,其根本问题在于:煤矿开采的规模和埋深越来越大,地质环境日趋复杂,受限探测监测手段,导致对煤炭地质体和灾害体认知不足^[1]。因此,亟需创新地球物理精细探测理论与技术,提高煤矿地质灾害预测能力。

煤矿含水体易引发地下矿井突水,与瓦斯、粉尘、火灾、动力地质灾害等并列为影响矿山安全的主要灾害源。按照含水体的水源划分,煤矿含水体可分为地表水体、冲积层水体、砂岩类含水体、灰岩类含水体等,这几类含水体所引发的煤矿突水事故占全国典型案例 90% 以上,其中尤其以灰岩岩溶所引发的矿井水害最多^[2]。查明煤矿含水体的空间赋存状况和发育趋势,预测和预防矿井突水灾害是煤矿安全生产亟待解决的问题。

电磁法是含水体探测的主要地球物理手段,是以介质的电磁性(包括电阻率、极化率和磁导率等)差异为物质基础,通过观测和研究人工或天然的交变电磁场随空间分布规律与时间的变化规律,达到对地下目标体探测的一类电法勘探方法^[3]。按电磁法观测的是随频率还是随时间的变化,可分为频率域电磁法(Frequency domain electromagnetic method, FEM)和

瞬变电磁法(Transient electromagnetic method, TEM)。其中,瞬变电磁法数据采集与含水体有关的二次场信号,不仅可在地面观测,也可以直接在井下进行观测,获得离目标区域更近且信噪比更高的数据。由于瞬变电磁法对低阻体敏感,而含水体与围岩相比常常呈明显的低阻特征。因此,瞬变电磁法是目前煤矿含水体探测的主要电磁方法。

在实际应用中,已有众多学者采用瞬变电磁法开展了煤矿含水体探测,其中包括了地面、井下和地空等探测方法^[4-5],煤矿含水体发育的时移监测^[6]和水文地质灾害勘测^[7]等研究。

由于深部煤炭开采地质条件复杂,隐蔽灾害源多样性、突发性和时变性,使煤矿灾害防控面临巨大挑战。煤炭资源与环境领域遇到前所未有的地质难题,其根本问题在于:地球物理探测和监测手段有限,导致对煤炭地质体和灾害体探测能力不足。因此,亟需创新地球物理精细探测理论与技术,提高煤矿地质灾害预测能力。笔者分析了近年国内煤矿复杂体瞬变电磁探测理论、方法、技术、装备、应用等方面研究新进展,并进一步指出发展煤矿环境下弱信号观测的高精度、高分辨率、抗强干扰、高效率大功率电磁装备是今后的发展方向。

1 煤矿含水地质体赋存特征

含水地质体主要包括煤层顶板水、底板水、煤层采空区水。与围岩相比,含水体的电阻率较低,是电磁法探测的前提。同时,当采空区或者其他潜在含水结构未富水时,区域与围岩相比,将呈现明显的高阻特征。因此,瞬变电磁法能同时对煤

矿含水体和采空区进行探测,是煤矿含水体探测的主要方法之一。

煤系地层中常见的含水体为松散覆盖层中的孔隙水和基底中奥陶统碳酸盐岩含水。煤系地层之上一般覆盖有 50 ~ 200 m 厚的第四系的松散层,其中一般含有 2 ~ 4 层的孔隙含水层组,其含水性强弱取决于成因类型和岩性组合。易引起煤矿矿井充水的是第四纪底部附近的松散层含水岩组。奥陶统碳酸盐岩是华北地区含煤岩系基底富水性最强的含水地层,石灰岩连续型(即厚层或中厚层石灰岩),常在该层底部形成层状溶洞,成为区域性岩溶富水带。

老窑积水是主要的含煤岩系内部水害水源。古代的小煤窑和近代煤矿的采空区及废弃巷道由于长期停止排水而保存的地下水。实质上它也是地下水的一种充水水源。中国不少老矿井,在其浅部分布有许多小煤窑,深度为 100 ~ 150 m,还有近代的一些采空区和废巷。这些早已废弃的老窑与废巷,储存大量地下水,这种地下水常以储存量为主。当生产矿井遇到它们时,往往容易遭遇突水,破坏性强,对煤矿生产危害较大。

煤矿中水的传导是造成煤田水患的重要诱因。煤矿导水体包括断裂带、导水陷落柱、采空塌陷区等。张性断层的破裂面多数是张开具有空隙,破碎带中多为角砾层,疏松多孔有利于地下水的流动和储存,这类断层具有导水性,是矿井涌水的良好通道。导水陷落柱的基底溶洞发育,空间很大,柱体内填充物未被压实,沟通煤层底板和顶板数个含水层,高压地下水充满柱体,溶岩作用强烈,采掘工作面一旦揭露柱体,地下水大量涌入井巷,水量大且稳定,易造成淹井事故。采空区导水裂隙带与采空区密切联系,若上部发展到强含水层和地表水体底部,矿坑涌水量会急剧增加。

2 瞬变电磁探测新的理论

瞬变电磁探测的理论突破是提升方法精度的前提,能为煤矿复杂含水体探测奠定理论基础。本节将介绍基于时变点电荷载流微元的瞬变电磁场理论和矿井瞬变电磁法全空间场理论的研究进展,前者对电磁场的求解精度有重要影响,但目前仍停留理论研究阶段,尚未取得实际应用。后者是矿井瞬变电磁的理论基础,目前已有多个应用实例。

2.1 基于时变点电荷载流微元的瞬变电磁场理论研究进展

经典勘探电磁场理论中,发射源的微元为偶极子

形式(图 1),而有限尺寸的源以偶极子的积分形式表达。图 1 中-30, -20, -10 为电磁场响应与源的幅值之比,这种基于偶极子叠加的计算方式,一定程度上可以改善采用直接单个偶极子假设带来的误差,但其仍未能恢复偶极子微元本身略去的高阶项,不能从根本上消除源尺寸在近源区域造成的计算误差,无法适应近源精细勘探需求。此外,传统计算方式中需进行的时频转换和数字滤波还会给计算结果带来一定误差。

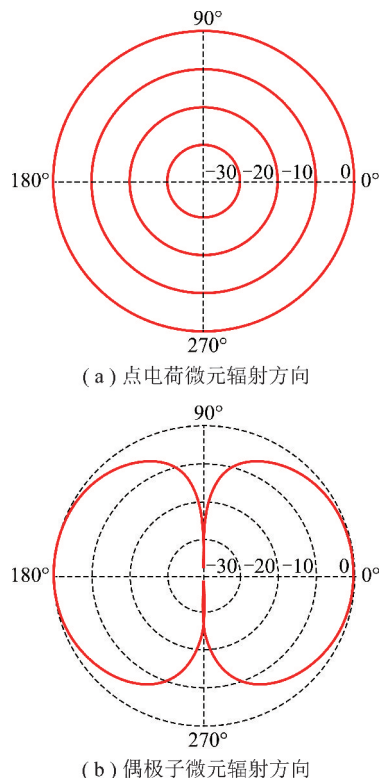


图 1 点电荷微元和偶极子微元的电磁场辐射方向示意

Fig. 1 Illustration of the electromagnetic field excited by a point charge and a dipole

为进一步推动瞬变电磁勘探方法的发展,奠定精确勘探研究基础,笔者^[8]和周楠楠等^[9]提出基于时变点电荷载流微元的瞬变电磁场计算理论。从载流微元出发,以时变点电荷假设代替偶极子假设,并且不再经过傅里叶或拉普拉斯变换,直接在时间域中求解层状介质表面上大定源回线、长接地导线源的解析表达式。通过分析不同场区中时变 TEM 场的性质,分析典型地层的时变电磁响应特征,推导出确实适合全场、全期的视电阻率公式。并结合理论模型和实际例子对研究成果进行一定的检验。对资料处理和解释方法的进一步研究,为瞬变电磁法的进一步深入研究和推广应用打下了理论基础。

在基于时变点电荷假设的电磁场计算理论中,通过引入时域格林函数,直接在时间域内求取瞬变电磁

场的解析解。采用积分运算,把电磁场阻尼波动方程的求解问题化为求其格林函数积分形式解的问题;建立辅助路径解决奇点问题,利用复分析中的约当引理、留数定理和广义函数等理论和方法,推导计算出时间域格林函数的时空四重广义积分,得到达朗贝尔方程的直接时域格林函数精确解析式。该方法以时变点电荷微元代替传统的偶极子源,使源真正的微元化,考虑了源的精准位置矢量、消除了源尺寸带来的影响,且不再经过频域变换,直接在时域位函数的基础上计算时域瞬变场,恢复了时域电磁场的因果律,避免了频域变换带来的截断误差。基于时变点电荷理论,显著提升了电磁场的计算精度,尤其在近源区域,精度可提升 3 倍以上^[9]。

尽管基于时变点电荷流微元的瞬变电磁理论目前尚未得到实际应用,但是其对煤矿含水水体探测仍具有指导意义。后续章节将介绍基于全空间场理论的矿井瞬变电磁法,由于该方法施工空间受限,需在近源区域开展探测。通过对近源区域模拟精度的提升,可为矿井瞬变电磁法提供新模拟思路。

2.2 矿井瞬变电磁法全空间场理论进展

全空间下电磁场的传播特征是矿井瞬变电磁法的理论基础。为此,于景邨^[10]出版了《矿井瞬变电磁法勘探》,系统奠定了矿井瞬变电磁法全空间场理论基础。该书从电磁场基本方程出发,通过对矿井下全空间瞬变电磁场分布特征的数值模拟,推导并定义了矿井瞬变电磁法的视电阻率计算方法。根据井下巷道内瞬变电磁法勘探工作装置形式,分析矿井瞬变电磁法勘探中各种人文噪声,并介绍了矿井瞬变电磁法的处理技术、全空间瞬变电磁法勘探数据时深换算理论及方法。

近年来,随着数值模拟手段的发展和应用,矿井瞬变电磁法的全空间理论得到了长足发展。相比于地面瞬变电磁法,矿井瞬变电磁法的电磁场在全空传播,响应会受到全空间下各个方向的异常体的影响。在此情形下,对异常响应的数值模拟至关重要。JIANG 等^[11]通过推导波数域方程,发展了全空间的 2.5 维有限差分数值模拟方法。岳建华等^[12]采用三维数值模拟方法对矿山巷道下方的瞬变电磁响应开展了模拟,LI 等^[13]和 CHANG 等^[14]则针对巷道或者隧道掘进面前方的目标体响应开展了三维数值模拟,分析了掘进面前方低阻异常体所引起的响应。在数值模拟方法的发展和模拟结果分析下,矿井瞬变电磁的探测能力得到进一步验证,推动了方法在实际探测中的应用。

3 瞬变电磁探测方法进展

3.1 修正式中心回线瞬变电磁法

中心回线装置是瞬变电磁法勘探中最常用的装置之一。在实际应用中,回线装置发射线框边长一般为 100 ~ 800 m。当发射回线边长较大时,若仅在发射线框中心点进行观测,会大大降低 TEM 法的工作效率(图 2(a))。大定源回线装置虽然可以在回线内外进行观测(图 2(c)),但由于响应在线框外有变号现象,视电阻率成像和反演均不稳定。

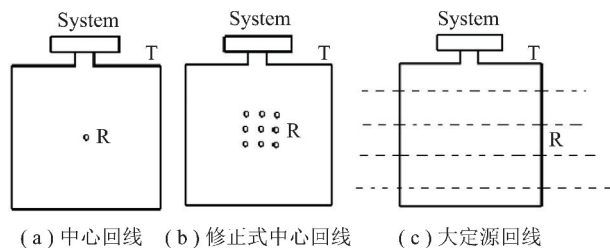


图 2 3 种不同回线瞬变电磁法装置形式^[15]

Fig. 2 Three types of loop source electromagnetic method^[15]

为了提高回线源瞬变电磁法的工作效率和解释精度,根据中心回线和大定源回线 2 种装置各自的应用范围与特点,笔者^[15]提出了对回线源瞬变电磁法探测技术进行改进的方法,即:在观测方法上,采用大回线发射,提高探测深度,并在发射回线中心区域一定范围内进行观测(图 2(b)),最大限度地保留该装置近场观测的特性。

装置形式的转变会导致资料解释技术的不同。由于观测点位置已经偏离了中心点位置,继续套用传统的中心回线装置的计算公式和处理方法,虽然计算相对快捷,但是测量精度相对较低,对于深部小构造以及弱异常,会产生较大的影响。因此,在资料处理时,不能采用回线中心点公式计算视电阻率,而是要通过偶极子迭加方法,建立全场区公式,计算视电阻率。笔者^[15]改进了中心回线装置的资料解释方法,统一了大定源回线和中心回线理论公式,消除和避免了边缘效应,将导水小断层、奥陶灰岩陷落柱的探测精度从原有的基础上提高了 15% ~ 25%;划定了中心回线观测点精确探测的区域,以数据采集的可靠性保证精细探测的实现。这样,在实际生产中,回线内瞬变电磁测量装置逐步代替了中心回线,即只在回线中间 1/3 ~ 2/3 内进行观测。形成了改进后的中心回线方式。

修正式中心回线装置及资料解释技术的应用效果在西藏某钼矿的探测中得到验证^[16]。随后,在某含水采空区的探测中,利用修正式中心回线装置开展了采空区的时移监测,获得了采空区随时间的发育情

况^[6]。在此基础上,LI等^[17]发展了任意形状回线的瞬变电磁反演方法,并成功应用于山西某煤矿的采空区探测中。

3.2 电性源短偏移距瞬变电磁法

传统瞬变电磁法的发射源主要是回线源,如中心回线装置、重叠回线装置、大定源装置等。回线源在地下仅能产生水平方向的感应电流,使得回线源TEM仅对低阻目标体敏感。此外,回线源激发的信号在地层中衰减较快,导致探测深度较浅,因而回线源TEM多用于500 m以浅目标体的探测。为实现更大深度的有效探测,需要采用电性源装置。电性源瞬变电磁的传统工作方式是长偏移距瞬变电磁法(Long offset TEM, LOTEM),利用数公里长的接地导线向地下发射不间断的双极性方波电流,在大于3倍探测深度的偏移距范围内观测电磁场响应^[18]。由于接地线源在地下可产生水平和垂直两个方向的感应电流,对地下低阻和高阻目标体都具有较强的分辨能力,在大深度的地壳研究、油气藏勘查、地热调查等领域发挥着重要作用。但是,偏移距越大施工强度就越大,对发射机功率和性能的要求也越高,加上采用不间断连续波形电流,增加了数据处理难度。

近年来,为了实现地下1.5 km深度目标体的精细探测,笔者^[19]发展了电性源短偏移距瞬变电磁法(Short offset TEM, SOTEM)。该方法利用含关断时间的双极性矩形波作为发射源信号,在距离发射源较近(小于2倍探测深度)的梯形区域采集纯二次场信号(图3),因此信号强度较大。采用当前主流的电磁系统,如V8、GDP-32等,即可实施SOTEM测量,因此该方法在实际应用中易于推广。近几年,SOTEM得到了快速的发展,目前在正演模拟、视电阻率计算、反演解释、施工技术等方面形成了较为成熟的方法体系^[20-21]。

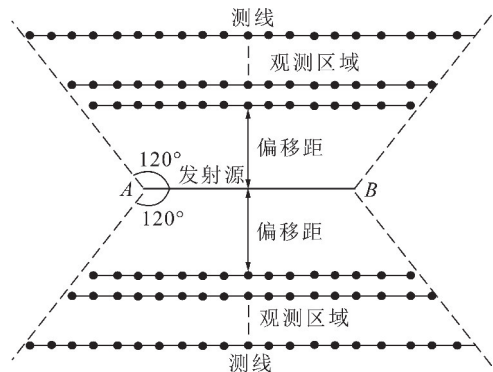


图3 SOTEM观测区域示意

Fig. 3 Illustration of the observation area of SOTEM method

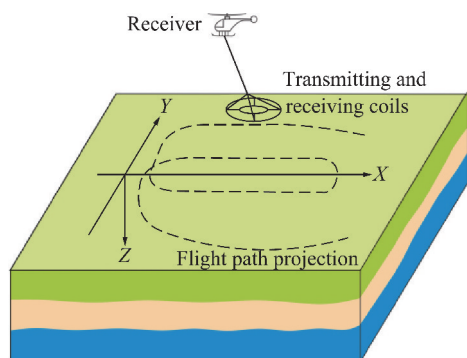
SOTEM方法在煤矿含水体探测已获得广泛应用。CHEN等^[4]采用SOTEM成功刻画了1 500 m深度的煤层底板,同时圈定了采空区的位置。ZHOU等^[5]开展了山地覆盖区的SOTEM煤矿采空区探测,获得了良好的探测效果。LI等^[22]和HOU等^[23]对低阻覆盖层下的采空区进行了探测。这些复杂情形下的采空区探测为煤矿水患探测起到了示范性效果,能够为SOTEM在煤矿复杂含水体的探测和应用奠定基础。

3.3 半航空瞬变电磁法

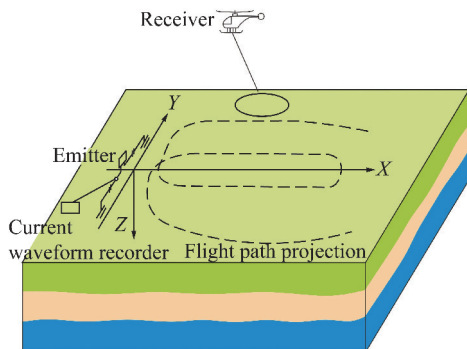
航空瞬变电磁法(Airborne TEM, ATEM)是基于机载平台的瞬变电磁勘探方法。其基本原理与地面TEM一致,通常将特定频率的半正弦脉冲电流传输到飞机头部,机翼和机尾周围的水平环路线圈中,然后在脉冲间隔内通过接收在飞机吊舱中牵引的线圈在不同时间接收电磁场(图4(a))。然后,可以通过分析随时间变化的场的强度和衰减特性来确定地下地质体的空间分布和电特性。该方法是一种高灵敏度,探测深度大的纯二次场测量方法。ATEM还具有区分覆盖范围影响的能力,可以有效克服地面条件的局限性,并有效、精确地获取机载平台的地电信息,因此被广泛用于矿产、地下水和其他资源勘探中^[24-25]。但是,ATEM由于需要采用载荷较高的旋翼直升机或者固定翼飞机开展工作,成本较高。同时,由于发射源置于航空平台上,向地下注入能量有限,因此航空瞬变电磁法的探测深度有限。为此,近年来半航空瞬变电磁法(Semi Airborne TEM, SATEM)得到越来越多的关注。

半航空瞬变电磁法采用地面发射和控制机载接收的装置形式(图4(b))。它既利用了地面大功率发射的优点,又获得了空中数据采集的高效特点,可望兼具大深度和高效率的特点,被认为是地面TEM和ATEM的结合。与地面TEM相比,SATEM更加有效地消除了地形条件的限制,从而大大降低了人员成本。与机载TEM相比,它具有更高的信噪比,并且将系统中较为笨重的发射系统置于地面后,可采用无人机作为接受系统的搭载平台,其工作模式更安全。

近年来,半航空瞬变电磁法的反演成像和应用得到快速发展。李貅等^[26]发展了逆合成孔径成像方法,张莹莹等^[27]发展了多辐射场源形式下的地空瞬变电磁成像,LIANG等^[28]发展了基于变形玻恩迭代法的地空瞬变电磁一维反演方法。JI等^[29]针对地空瞬变电磁的实测数据,发展了基于自适应卡尔曼滤波器的去噪方法。在煤矿含水体探测方面,WU等^[30]和张庆辉等^[31]给出了半航空瞬变电磁法在采空区探



(a) 航空瞬变电磁法装置示意



(b) 非航空瞬变电磁法装置示意

图4 航空瞬变电磁法和半航空瞬变电磁法装置示意对比

Fig. 4 Comparison of the schematic diagrams of airborne

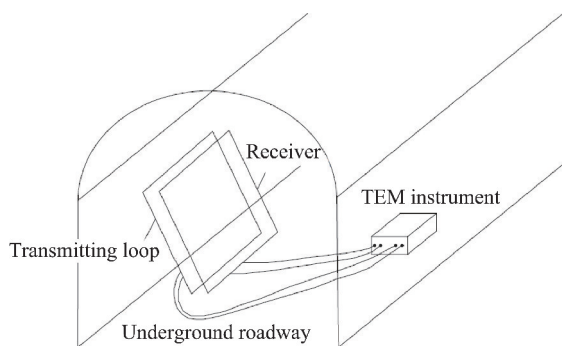
TEM and SATEM method

测中的应用实例,王振荣等^[32]将该方法成功应用于陕西神木地区煤矿采空区勘查,所圈定的疑似积水采空区,为该煤矿工作面合理布置和采空区治理等提供了可靠的地质信息。

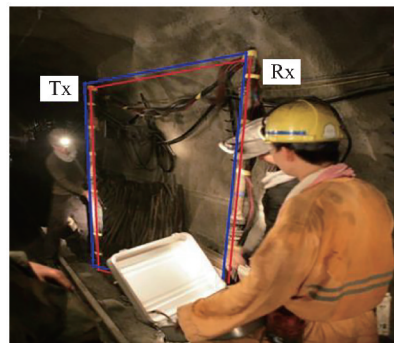
3.4 矿井瞬变电磁法

矿井瞬变电磁是一种全空间探测方法。它通过位于地下的煤矿井下巷道铺设瞬变电磁探测的发射和接收装置(图5)。由于矿井瞬变电磁法需要将探测系统置于煤矿巷道或者工程隧道等空间受限环境下,多匝形式的小回线装置是矿井瞬变电磁探测的主要装置^[33]。多匝小回线装置会增强线圈互感作用,影响瞬变电磁衰减曲线的早期。通过优化装置参数,能在一定程度优化或者消除早期信号的畸变。同时,研究信号的关断效应对响应的影响^[34],以及全空间模型下巷道空间对响应的影响^[11,35-37],对小回线装置的成功应用奠定了理论基础。

随着矿井瞬变电磁法全空间理论的发展,矿井瞬变电磁法近年来得到较多应用,从而推动了矿井瞬变电磁法数据处理和反演方法的发展。杨海燕等^[38]发展了矿井瞬变电磁法的全空间视电阻率成像。程久龙等^[39]提出了波场变换数据处理及成像方法,实现瞬变电磁剖面到拟地震剖面的转换,达到对电性界面的准确划分并得到成功应用。程久龙等^[40]改进了粒



(a) 矿井瞬变电磁法装置示意



Tx—发射线框, Rx—接收线框

(b) 矿井瞬变电磁法数据采集现场

图5 矿井瞬变电磁法装置示意图和数据采集现场^[35]Fig. 5 Schematic diagram of a mine transient electromagnetic detection device and a scenario of collecting the data sets^[35]

子群优化算法,提高了矿井瞬变电磁法的实测数据处理精度,并进一步发展到2.5维反演^[41]和基于神经网络的富水性预测方法^[42]。

4 研究展望

尽管近年来瞬变电磁理论和方法均得到长足发展,但其仍然难以满足煤矿地区复杂含水体的精细探测需求。本节从技术发展和探测需求2方面,给出了瞬变电磁法在复杂含水体探测方面的研究方向的展望。技术方面主要关注多分辨探测技术和大数据技术。探测需求方面,多层采空区的精细探测仍然是实际生产中的难点,而相关仪器设备的发展也是未来需要解决的问题。

4.1 瞬变电磁多分辨探测方法技术

多分辨探测理论方法研究包括全空间电磁波传播理论研究;矢量、张量、梯度等多尺度探测方法研究;瞬变电磁多分辨探测方法技术研究主要包括立体化探测技术和研究多分辨探测技术。

电磁勘探的观测方式和观测参数的多样化、观测环境的复杂化、观测数据大动态弱信号强干扰等新特点,亟需发展空天-地面-井中-海洋立体探测技术,并取得实质性地推广应用,最终实现对地球深部的高

分辨探测。

兼顾深部大探深和浅部高分辨的理论-方法-技术-应用全链条式探测新方向研究是世界难题。发展地质结构约束的大尺度模型、多源多分量信息联合反演技术,完成模型由简单到复杂、数据由单一到综合的联合反演解释,提高电磁法探测的精度和分辨率。瞄准国际前沿,缩小与国外技术差距。

4.2 电磁大数据技术

大数据和深度学习技术的应用是目前地球物理领域的研究热点,在地球物理信号的去噪和反演方面,已得到成功应用。当前,大数据技术主要用于瞬变电磁去噪。由于瞬变电磁数据有数据量大、有用信号弱、噪声来源多样且特征复杂等特点,去噪除处理难度大。此外,由于去噪处理与后续的数据反演往往相互独立,当去噪过程效果不佳、去噪后数据中仍有剩余干扰时,反演结果可靠性也将受到严重影响。因此,实现对观测数据的有效噪声去除,是影响大地电阻率分布信息的关键前提问题,大数据深度学习的方法可望发挥作用。

大数据中分析理论可全方位分析和匹配各类反演方法的技术优势,为特定地质问题寻找最优的解决方案;利用深度学习方法,实现电磁数据去噪、反演成像和地质解释;利用大数据技术和人工智能算法实现对电磁探测目标的动态监测。随着深度学习技术的发展,已有研究人员尝试建立更加复杂的神经网络,以期通过机器经验来部分替代人的经验,从而解决传统地球物理数据处理与分析领域效率低且依赖人工质量控制的问题。

4.3 多层采空区多方法精细探测

多层积水采空区的上部积水低阻层对下部积水层形成屏蔽,在煤矿普遍进入深部开采的情况下,为防止上部采空区积水造成的突水事故,针对多层积水采空区的微弱异常、掩盖异常的地形影响、静态偏移和随着社会发展日益严重的电磁干扰,根据煤田的地质环境特征,很有必要综合运用 TEM、可控源音频大地电磁法和直流电阻率等方法,采用地球物理电磁场数值计算新技术、信息与信息处理新成果,解决采空区积水的高精度探测问题。

另外,探测积水采空区需要多种电磁勘探方法的协同配合,比如针对不同地表和地质环境,利用高密度电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法、激发极化法等方法进行综合勘探,能够为解决地形起伏、低阻地层屏蔽、矿区干扰等复杂环境条件探测提供解决思路。

4.4 瞬变电磁高分辨数据采集装备研发

突破宽频带、低噪声传感及高分辨信号检测技术,实现高精度电磁探测装备自主研发。通常认为随观测时间延长 TEM 场的变化趋向平缓,采样率可以降低。现有的主流 TEM 探测仪器,如加拿大 Phoenix 公司的 V8、Geonics 公司的 PROTEM、美国 Zonge 公司的 GDP32、Laurel 公司的 terraTEM、国内的长沙白云地质仪器开发有限公司的 MSD-1 等,为使采集的数据占有相同的内存空间,降低对传输速度的要求,对不同时间档均采取了变频采样的方式,使各时间档的采样个数大致相同。实际上,信噪比随观测时间延长呈降低趋势。观测时间较长的时间档,需要更多的采样数参加叠加平均,才能获得较高信噪比的数据。随着对电磁勘探精度要求的不断提高,特别在多层积水采空区的探测中,为了提高纵向分辨率,仪器制造厂家应用户的要求,普遍将原有的 20 个时间道增加到 40 个时间道。有些仪器如加拿大 Phoenix Geophysics Limited 公司的 V8 仪器,最多可提供 200 个时间道,且还有继续增加的趋势。

此外,由于煤矿区域往往具有多个人工干扰源,难以采集到高信噪比的数据。在此环境下,增大发射功率,发展电性源、大功率发射技术是保障干扰地区获得高信噪比晚期信号的前提。同时,通过高采样率装备的研发,增加瞬变电磁系统的采样率,从而实现短期、高叠加的数据采集,能够在一定程度上压制随机噪声,为后续高分辨信息的提取打下基础。

5 结 语

尽管近年来地球物理方法和技术不断更新和提高,煤矿含水体精细探测仍然是亟待解决的难题。在瞬变电磁法中,计算能力和数值模拟技术的发展,推动了基于时变点电荷载流微元理论和矿井瞬变电磁全空间理论的发展,指明了方法在精细探测的突破方向。

瞬变电磁新技术的发展和应用也在一定程度上提高了对煤矿含水体的探测能力。修正式中心回线装置和电性源瞬变电磁法在保证探测深度和探测精度的同时,提高了野外数据采集的效率。半航空瞬变电磁法是一种更为高效的新技术,装备和数据反演手段发展成熟后,可进一步提高数据采集速度,为煤矿区的面积性探测提供新的工具。矿井瞬变电磁法则着力于在煤矿巷道周边的精细探测,高精度的数据反演技术将进一步提高该方法的应用效果。瞬变电磁法作为一种对地下电阻率分布进行成像的地球物理工具,在深度、精度和效率方面仍然具有很大发展空间。

间,是未来煤矿含水区的探测的关键工具之一。

参考文献 (References):

- [1] CHEN Bo. Stress-induced trend: The clustering feature of coal mine disasters and earthquakes in China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2020, 7(4): 676–692.
- [2] 刘树才. 煤矿底板突水机理及破坏裂隙带演化动态探测技术 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
LIU Shucai. Mechanism of water inrush from coal seam floor and continuous survey of fractured zones in coal seam floor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [3] GUO Zhenwei, XUE Guoqiang, LIU Jianxin, et al. Electromagnetic methods for mineral exploration in China: A review [J]. Ore Geology Reviews, 2020, 118: 103357.
- [4] CHEN Weiying, XUE Guoqiang, MUHAMMAD Youniskhan, et al. Application of short-offset TEM (SOTEM) technique in mapping water-enriched zones of coal stratum, an example from East China [J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172(6): 1643–1651.
- [5] ZHOU Nannan, XUE Guoqiang, HOU Dongyang, et al. Short-offset grounded-wire TEM method for efficient detection of mined-out areas in vegetation-covered mountainous coalfields [J]. Exploration Geophysics, 2016, 48(4): 374–382.
- [6] XUE Guoqiang, CHENG Jiulong, ZHOU Nannan, et al. Detection and monitoring of water-filled voids using transient electromagnetic method: A case study in Shanxi, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(5): 2263–2270.
- [7] 成学光, 高鹏飞. 瞬变电磁法在煤矿水文地质勘察中的应用 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(7): 124–126.
CHENG Xueguang, GAO Pengfei. Application of TEM in hydrological geology exploration [J]. Coal Technology, 2011, 30(7): 124–126.
- [8] 薛国强, 闫述, 周楠楠. 偶极子假设引起的大回线源瞬变电磁响应偏差分析 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2389–2396.
XUE Guoqiang, YAN Shu, ZHOU Nannan. Theoretical study on the errors caused by dipole hypothesis of large-loop TEM response [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2389–2396.
- [9] 周楠楠, 薛国强, 王贺元. 点电荷微元与偶极子源的时域电磁场响应对比 [J]. 应用地球物理, 2013, 10(3): 349–356, 359.
ZHOU Nannan, XUE Guoqiang, WANG Heyuan. Comparison of the time-domain electromagnetic field from an infinitesimal point charge and dipole source [J]. Applied Geophysics, 2013, 10(3): 349–356, 359.
- [10] 于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [11] JIANG Zhihai, LIU Shucai, MALEKIAN Reza. Analysis of a whole-space transient electromagnetic field in 2.5-dimensional FDTD geoelectric modeling [J]. IEEE Access, 2017, 5: 18707–18714.
- [12] 岳建华, 杨海燕, 胡搏. 矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1904–1909.
YUE Jianhua, YANG Haiyan, HU Bo. 3D finite difference time domain numerical simulation for TEM in-mine [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1904–1909.
- [13] LI Shucai, SUN Huaifeng, LU XuShan, et al. Three-dimensional modeling of transient electromagnetic responses of water-bearing structures in front of a tunnel face [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2014, 19(1): 13–32.
- [14] CHANG Jianghao, YU Jingcun, LI Juanjuan, et al. Diffusion law of whole-space transient electromagnetic field generated by the underground magnetic source and its application [J]. IEEE Access, 2019, 7: 63415–63425.
- [15] XUE Guoqiang, BAI Chaoying, YAN Shu, et al. Deep sounding TEM investigation method based on a modified fixed central-loop system [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 76: 23–32.
- [16] XUE Guoqiang, QIN Kezhang, LI Xiu, et al. Discovery of a large-scale porphyry molybdenum deposit in Tibet through a modified TEM exploration method [J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2012, 17(1): 19–25.
- [17] LI Hai, XUE Guoqiang, ZHAO Pan, et al. Inversion of arbitrary segmented loop source TEM data over a layered earth [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 128: 87–95.
- [18] STRACK Kurtmartin. Exploration with deep transient electromagnetics [J]. Elsevier Amsterdam, 1992: 373.
- [19] 薛国强, 陈卫营, 周楠楠, 等. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 255–261.
XUE Guoqiang, CHEN Weiying, ZHOU Nannan, et al. Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 255–261.
- [20] 陈卫营, 李海, 薛国强, 等. SOTEM 数据一维 OCCAM 反演及其应用于三维模型的效果 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(9): 3667–3676.
CHEN Weiying, LI Hai, XUE Guoqiang, et al. 1D OCCAM inversion of SOTEM data and its application to 3D models [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(9): 3667–3776.
- [21] ZHOU Nannan, HOU Dongyang, XUE Guoqiang. Effects of shadow and source overprint on grounded-wire transient electromagnetic response [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(8): 1169–1173.
- [22] LI Hai, XUE Guoqiang, ZHOU Nannan, et al. Appraisal of an array TEM method in detecting a mined-out area beneath a conductive layer [J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172(10): 2917–2929.
- [23] HOU Dongyang, XUE Guoqiang, ZHOU Nannan, et al. Exploration of deep magnetite deposit under thick and conductive overburden with ex component of sotem: A case study in China [J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(2): 857–871.
- [24] LEGAULT J M, PRIKHODKO Alexander, DODDS D J, et al. Results of recent VTEM helicopter system development testing over the Spiritwood valley aquifer [A]. Conference Proceedings, 25th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering & Environmental Problems [C]. Manitoba: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012.
- [25] SMITH Richard, HODGES Greg, LEMIEUX Jean. Case histories illustrating the characteristics of the HeliGEOTEM system [J]. Exploration Geophysics, 2009, 40(3): 246–256.
- [26] 李貅, 张莹莹, 卢绪山, 等. 电性源瞬变电磁地空逆合成孔径成像 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(1): 277–288.

- LI Xiu, ZHANG Yingying, LU Xushan, et al. Inverse synthetic aperture imaging of ground-airborne transient electromagnetic method with a galvanic source [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1): 277-288.
- [27] 张莹莹, 李貅, 李佳, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁法快速成像方法研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 869-876.
- ZHANG Yingying, LI Xiu, LI Jia, et al. Fast imaging technique of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 869-876.
- [28] LIANG Bingyang, QIU Chen, HAN Feng, et al. A new inversion method based on distorted born iterative method for grounded electrical source airborne transient electromagnetics [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(2): 877-887.
- [29] JI Yanju, WU Qiong, WANG Yuan, et al. Noise reduction of grounded electrical source airborne transient electromagnetic data using an exponential fitting-adaptive Kalman filter [J]. Exploration Geophysics, 2018, 49(3): 243-252.
- [30] WU Q, LI D S, JIANG C D, et al. Ground-source airborne time-domain electromagnetic (GATEM) modelling and interpretation method for a rough medium based on fractional diffusion [J]. Geophysical Journal International, 2019, 217(3): 1915-1928.
- [31] 张庆辉, 田忠斌, 林君, 等. 时域电性源地空电磁系统在煤炭采空积水区勘查中的应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2509-2515.
- ZHANG Qinghui, TIAN Zhongbin, LIN Jun, et al. Application of time domain electrical source ground airborne electromagnetic system in goaf water exploration [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2509-2515.
- [32] 王振荣, 程久龙, 宋立兵, 等. 地空时间域电磁系统在陕西神木地区煤矿采空区勘查中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 6: 776-783.
- WANG Zhenrong, CHENG Jiulong, SONG Libing, et al. Application of ground-airborne time domain electromagnetic system in goaf exploration of coal mine in Shenmu Area of Shaanxi, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 6: 776-783.
- [33] 程久龙, 陈丁, 薛国强, 等. 矿井瞬变电磁法超前探测合成孔径成像研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(2): 731-738.
- CHENG Jiulong, CHEN Ding, XUE Guoqiang, et al. Synthetic aperture imaging in advanced detection of roadway using the mine transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 731-738.
- [34] 杨海燕, 岳建华, 李锋平. 斜阶跃电流激励下多匝小回线瞬变电磁场延时特征[J]. 地球物理学报, 2019, 62(9): 3615-3628.
- YANG Haiyan, YUE Jianhua, LI Fengping. The decay characteristics of transient electromagnetic fields stimulated by ramp step current in multi-turn small coil [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(9): 3615-3628.
- [35] CHANG Jianghao, SU Benyu, MALEKIAN Reza, et al. Detection of water-filled mining goaf using mining transient electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(5): 2977-2984.
- [36] 刘志新. 矿井瞬变电磁场分布规律与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- LIU Zhixin. Study on the distribution and application of mine transient electromagnetic field [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [37] 于景邨, 常江浩, 苏本玉, 等. 老空水全空间瞬变电磁法探测三维数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 95-99, 103.
- YU Jingcun, CHANG Jianghao, SU Benyu, et al. Study on whole space transient electromagnetic method prospect three dimensional numerical modeling of gob water [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 95-99, 103.
- [38] 杨海燕, 邓居智, 张华, 等. 矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 651-656.
- YANG Haiyan, DENG Juzhi, ZHANG Hua, et al. Research on full-space apparent resistivity interpretation technique in mine transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 651-656.
- [39] 程久龙, 邱浩, 叶云涛, 等. 矿井瞬变电磁法波场变换与数据处理方法研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1646-1650.
- CHENG Jiulong, QIU Hao, YE Yuntao, et al. Research on wave-field transformation and data processing of the mine transient electromagnetic method [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1646-1650.
- [40] 程久龙, 李明星, 肖艳丽, 等. 全空间条件下矿井瞬变电磁法粒子群优化反演研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3478-3484.
- CHENG Jiulong, LI Mingxing, XIAO Yanli, et al. Study on particle swarm optimization inversion of mine transient electromagnetic method in whole-space [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3478-3484.
- [41] CHENG Jiulong, XUE Junjie, ZHOU Jin, et al. 2.5-D inversion of advanced detection transient electromagnetic method in full space [J]. IEEE Access, 2019, 8: 4972-4979.
- [42] 程久龙, 赵家宏, 董毅, 等. 基于 LBA-BP 的矿井瞬变电磁法岩层富水性的定量预测研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 330-337.
- CHENG Jiulong, ZHAO Jiahong, DONG Yi, et al. Quantitative prediction of water abundance in rock mass by transient electromagnetic method with LBA-BP neural network [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 330-337.