

doi: 10.11720/wtyht.2021.1513

张莹莹.电性源瞬变电磁法综述[J].物探与化探,2021,45(4):809–823.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1513>

Zhang Y Y. Review on the study of grounded-source transient electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(4): 809–823. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1513>

电性源瞬变电磁法综述

张 莹 莹

(新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 电性源瞬变电磁法(TEM)具有探测深度大、受地形限制小、工作效率高等优点,近些年发展较快,涌现出一系列面向地面、半航空、地—井的电性源瞬变电磁新方法。本文通过回顾近些年国内外出现的新方法,即长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)、短偏移距瞬变电磁法(SOTEM)、多通道瞬变电磁法(MTEM)、电性源半航空瞬变电磁法和电性源地—井瞬变电磁法的研究历史,总结各类方法在正演模拟、系统设计、反演成像和施工方法等方面的研究现状。研究表明:LOTEM 研究基础丰厚,发展全面,是一种比较成熟的电性源 TEM 方法;而其他电性源 TEM 方法虽然取得了一些研究进展,但整体仍处在初步研究阶段,相关技术仍有待进一步提升;LOTEM 中有价值的研究内容,如提高数据信噪比、高维反演和联合解释等,可为这些电磁勘探新技术提供借鉴,以期高效率、高分辨率深部探测提供更多解决方案。

关键词: 电性源;瞬变电磁法;深部探测;偏移距;多通道;半航空;地—井

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)04-0809-15

0 引言

瞬变电磁法(transient electromagnetics, TEM)是一种时间域电磁探测方法,相比其他电磁方法,具有施工简单、与地震方法在数据处理上有相似之处和对下伏构造信号耦合强的优点。自 18 世纪 30 年代由苏联科学家提出瞬变电磁法概念后,该法在地壳结构调查、地热调查、金属矿产勘查、石油、煤炭等非金属勘查、地质灾害调查、地下水调查、采空区探测、隧道超前地质预报等领域得到广泛应用^[1-2]。

根据装置形式不同,TEM 方法可分为磁性源 TEM 和电性源 TEM。磁性源装置属于感应源,它与目标层有最佳耦合,受旁侧及层位倾斜的影响小,但场的能量在地层中衰减较快,因此探测深度有限且当边长较大或地形条件复杂时发射源布设工作量大,导致工作效率低;此外,磁性源仅有水平电场分量,易于在低阻层中激发感应电流,因此适用于解决良导目标体的探测问题,但由于场本身的结构特性,

磁性源装置的分层效果不够理想^[1,3-4]。电性源装置不仅可以使大功率电源提高勘探深度,且根据互换原理,电性源装置观测信号的衰减速度比回线源慢,信号电平相对较大,对保证晚期信号的观测质量有好处,适用于深部构造探测;另一方面,在地形条件复杂地区发射源布设可选范围大、更灵活、更方便,可以在场源两侧进行多点的面积性测量,因此野外勘探效率更高。此外,电性源同时具有水平和垂直电场分量,水平电场分量有利于低阻体探测,垂直电场分量在地层电性界面感应的电荷有利于高阻体探测,因此电性源对良导和高阻目标体都有较好的分辨能力。在三维坐标系下,电磁场的 6 个分量均与地层电性相关,电性源装置可以提供更丰富的地层电性信息^[1,4]。

近年来,国内外学者越来越多地关注到电性源 TEM 方法在探测深度、工作效率、分辨能力等方面的优势,涌现出一批面向地面、航空、井中的电性源 TEM 新技术、新方法。根据野外施工方式不同,目前电性源 TEM 方法的研究主要集中在长偏移距瞬

收稿日期: 2020-11-08; 修回日期: 2021-03-09

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2017D01C064)

作者简介: 张莹莹(1989-),女,博士,2016年毕业于长安大学,主要从事瞬变电磁场的理论与应用方面的研究工作。Email: zhangyy19890423@

变电磁法(地面)、短偏移距瞬变电磁法(地面)、多通道瞬变电磁法(地面)、电性源半航空瞬变电磁法(航空)及电性源地—井瞬变电磁法(井中),并已成功用于地壳结构调查、火山结构调查、地热勘探、油气勘探、金属矿勘探、采空区探测、隧道勘察等领域。本文对上述常见的电性源 TEM 方法的发展历程、最新进展以及各自的特点进行总结和分析,旨在促进电性源 TEM 方法的发展,为高分辨率、多参数、大面积、高效率深部探测提供更多解决方案。

1 长偏移距瞬变电磁法

为了区别浅部勘探系统(如 SIROTEM 和 EM37),Vozoff 和 Strack 于 20 世纪 70 年代在澳大利亚提出长偏移距瞬变电磁法(long-offset TEM, LOTEM)^[1]。该法采用固定的接地导线源作为发射源,导线源长约数百米至数千米,偏移距约 2~20 km 不等,同时测量电场和衰减电压响应,为了避免横向各向异性的影响,理论上要求接收装置应尽量靠近发射源,但实际应用中受导线噪声等影响,为了获得不受导线噪声或系统模拟滤波器影响的未失真信号,存在一个最小偏移距,一般来说,偏移距应大致与探测深度相当或大于探测深度,实际工作中采用的偏移距常常约为探测深度的 3~6 倍^[1]。因偏移距较大,导致采集信号强度衰减剧烈,信噪比降低,在一定程度上限制了 LOTEM 的探测深度和探测精度。与其他电磁类方法相比,LOTEM 方法可以克服典型的电磁噪声问题,分辨率更高,数据采集效率也更高,目前该法已在地壳结构调查、油气勘探、地热调查、地震预测、火山结构调查、煤矿勘查、海水入侵调查、油气运移监测等领域得到广泛应用^[5-17]。

作为最早发展起来的电性源瞬变电磁方法,长期以来国内外学者在 LOTEM 的数据解释、分辨率分析、观测参数设计、数据信噪比分析等方面做了大量的研究工作。视电阻率解释方面,早期的如 Yang 于 1986 年改进了早晚期视电阻率计算方式,仔细研究了 LOTEM 视电阻率计算无解析解和非唯一解的两个问题,对全期视电阻率的概念进行扩展并针对一些特殊情况导出了 LOTEM 单值视电阻率计算公式,但仅当第一层地层厚度比偏移距大 0.7 倍时该法才适用^[18]。Bibby 等采用长偏移距多源(张量)双极—偶极测量方法对新西兰陶波火山 5~8 km 深处的电阻率构造进行勘探,借助斯伦贝谢装置绘制的极浅(<1 km)电阻率成像结果做约束,圈定了 3 个电阻率异常区^[19]。Caldwell 等借鉴直流电阻率法

多源(张量)双极—偶极测量中张量分析的概念,在 LOTEM 数据解释中提出一种瞬时视电阻率张量,与常规的早晚期视电阻率不同的是,该张量可以得到 3 个独立、坐标不变、时变的视电阻率,该法可以把张量 LOTEM 测量中得到的复杂数据以更紧凑明了的方式展现出来,获得地下三维电阻率分布^[20]。后续的如翁爱华等采用连分式渐进展开研究了 LOTEM 甚晚期响应高精度计算和全区视电阻求解问题^[21]。陈清礼等通过分析感应电动势曲线随均匀半空间电阻率变化特性,采用二分搜索算法研究了 LOTEM 感应电动势响应的全区视电阻率算法^[22]。

根据周期性差异,LOTEM 的噪声可分为周期噪声和非周期噪声,周期噪声可能来源于铁路、工频干扰等,非周期噪声有更多自然源,如水泵、电动栅栏、火车、工厂、经过接收装置的车辆等^[23]。根据 Strack 的研究,对于周期噪声,采用叠前数字递归真振幅陷波滤波器,在叠加前对每一个独立的瞬变响应进行处理,几乎不会出现振幅失真,可以干净地移除周期噪声,大幅提高信噪比,也可采用常规的同步采样压制噪声,给出更详细的地下电性信息。非周期噪声的振幅可能远高于或低于信号水平,一旦这种噪声被记录到但是没被识别,可能会严重干扰叠加结果^[23]。对于非周期噪声,可以使用对称或区定义的移除选择算法进行叠加,有选择地保留信号振幅,利用统计方法移除噪声;小波阈值去噪也是一种常用方法,但不同的阈值方案去噪效果各有差异,可以先根据信号统计分布特征选择合适的阈值方案以提高去噪效果^[23-24]。分辨率分析方面,Cardador 等在墨西哥东北部坦皮科城盆地的一次 LOTEM 调查中证实,在油气勘查方面,该法可以确定岩石孔隙和断裂中的流体类型,相比较其他传统的频率域电法和电磁法,LOTEM 的分辨率更高且探测深度更大^[25]。王阳等基于 LOTEM 一维正演,分析了层参数和偏移距变化对视电阻率曲线的影响,发现对低阻层的分辨能力主要由纵向电导决定,对高阻层的分辨能力主要取决于高阻层厚度,偏移距变化对分辨能力的影响很小^[26]。

观测参数设计方面,地形影响的分析是一个研究热点。为了对横向电阻率差异的影响做定量和半定量解释,Hordt 等使用三维有限差分程序模拟地形的垂直分量衰减电压响应,讨论了地形对 LOTEM 数据畸变的影响,并指出虽然在解释的第一阶段可以忽略地形,但在二维或三维反演时需考虑地形因素影响^[27]。唐新功等讨论了地堑地形对 LOTEM 的

影响并指出发射源铺设在平坦处可最大限度减少地形影响^[28]; Tang 等采用基于张量格林函数的体积积分方程法研究了山谷和山峰地形对 LOTEM 响应的影响,发现无论是山谷还是山峰地形均对 LOTEM 响应有严重影响,且发射源的位置要比接收点的位置重要的多,建议对于山谷和山峰地形,发射源应尽量放置在地形平坦区域^[29]。还有一些其他的集中在极化特性方面的研究,如 Hoheisel 等讨论了激电效应对 LOTEM 数据的影响,发现高极化近地表层对发射源附近的电场分量晚期响应影响较大,但在正常情况下极化层对磁场分量的影响可忽略^[30]。

长期以来,学者对 LOTEM 反演做了大量研究。为了对横向电导率差异的影响做半定量和定量解释, Hodrt 等对德国西北部 Musterland 盆地的 LOTEM 数据做了深入分析,采用 3 种不同的三维正演程序对 LOTEM 数据进行三维效应解释:薄板积分方程正演可用于对异常的位置和走向做出初步判断,体积积分方程程序可对良导异常做出可能的地质解释,一种新的有限差分算法可对模拟实际地质情况的复杂良导构造进行数值模拟,最终得到的模型与实测数据吻合很好;此外还讨论了二阶马奎特算法和奥卡姆反演用于 LOTEM 数据一维反演的效果,二者的反演结果与已知岩性和测井曲线吻合很好,同时还发现 LOTEM 电场分量对高阻层有重要的识别作用^[31-32]。为了对 LOTEM 数据进行快速准确的处理和定量解释,严良俊等采用数值迭代方法研究了垂直磁场定义的全区视电阻率,经时频转换后引入 MT 反演方法对时频转换视电阻率曲线进行反演,该法能够较好地解决多解性问题,具备现场解释能力^[33]。2000 年以后,随着复杂精细算法的发展,对 1D 和 3D 问题进行反演以获取更真实的地电信息成为可能,如 Commer 等对印度尼西亚爪哇岛中部默拉皮火山地区于 1998、2000 和 2001 年采集的三组 LOTEM 数据进行深入分析,考虑到地形和 3D 地下构造的影响,分别采用稳定的最小二乘和阻尼最小二乘联合反演方法优化有限参数的 3D 模型,提出结合三维优化算法和三维约束反演查明火山结构的电阻率特征,对该地区地质情况取得了新的认识^[34-35]。由于传统的瞬变电磁 1D 反演方法无法识别出近地表异常, Hordt 等基于反复试验正演方法,采用 2D 有限差分正演对德国奥登地区的一次 LOTEM 调查采集的数据进行解释^[36]。Khan 等分析了时间域、频率域、拟地震域的 LOTEM 数据,发现 LOTEM 更易识别高阻围岩中的低阻异常,并指出拟地震成像技术可实现高分辨率 LOTEM 成

像^[37]。Liu 等通过时域有限体积算法发现电各向异性对 LOTEM 反演结果有很大影响,基于各向异性模型的反复试验 LOTEM 正演可以得到较为理想的解释结果^[38]。这些研究丰富了 LOTEM 解释体系,对 LOTEM 方法起了重要的推动作用。

联合解释技术一直以来也是一大热点问题,这些联合解释技术可能是联合电磁类技术,也可能是非电磁类技术。Beer 等结合直流电阻率法和 LOTEM 用于南非卡普瓦拉克克拉通北缘深部构造研究,结果与地震反射数据吻合较好,探测深度可至 30 km^[39]。Strack 等利用数据收集和采集中 LOTEM 与地震方法的相似性,如数据处理与地震全波形处理类似,二者均可设计成多通道采集系统等,研究了油气勘探中的 LOTEM 与地震勘探联合解释技术^[40]。考虑到每种地球物理物理勘探方法各自的局限性,为了提高解释结果的准确性, Lin 等采用地震、测井和 LOTEM 联合方法研究新南威尔士某煤矿煤层特征,利用地震勘探和测井曲线绘制煤层电性信息,同时基于 1D 和 2.5D 自动反演对 LOTEM 数据进行解释,根据电性特征获得压力、含水饱和度等参数^[41]。Kalscheuer 等联合 LOTEM 和 VI-BROTEM 数据研究印度尼西亚爪哇岛默拉皮火山南翼的一个断层构造,采用基于奥卡姆方法的一维多分量联合反演获得一维反演结果并为后续的二维正演提供基本模型,解释结果表明该断层构造与火山口边缘的一次古雪崩有关^[42]。Harnoon 等使用 LOTEM 和中心回线 TEM 联合反演方法对阿塞拜疆某泥火山进行调查,发现当深度 > 5 km 时,考虑到深度和油气目标电阻率,反演结果的分辨率已较差^[43]。针对 MT 勘探深度大和 LOTEM 浅部地层分辨率高的特点,涂君研究了 MT 和 LOTEM 联合反演方法,按照固定参数、信噪比、拟合差和灵敏度特征分配目标函数权重分配方式,通过模型设计验证了算法的正确性和有效性,该法可以保证反演结果较大勘探深度的同时提高浅部分辨率^[44]。

2 短偏移距瞬变电磁法

短偏移距瞬变电磁法 (short-offset TEM, SOTEM) 最早出现在英国爱丁堡大学学者 Ziolkowski 于 2012 年申请的发明专利中,自 2013 年起由中国科学院地质与地球物理研究所研究员薛国强在装备与软件开发上进一步完善并推广^[45-46]。该法延续了电性源瞬变电磁法对地形条件要求低和勘探深度大的优点,采用固定的接地导线源作为发射源,在

发射源两侧一定位置范围内进行面积性旁线测量,考虑到远场区信号相对较弱,一般建议工作区域位于近场区和中场区,测量电场和磁场信号^[47-48]。相比 LOTEM 方法,观测区域包含近场区域和中场区域,离源更近,采集信号更强,具有更高的探测精度和工作效率,目前该法已在深部水文地质调查、金属矿勘查、盐矿溶腔探测、煤田采空区探测等领域得到成功应用^[49-56]。2015 年薛国强等针对 SOTEM 深部探测的野外工作规程提炼出 5 个关键问题: SOTEM 各分量响应特征与地层相互作用研究、记录点、场源复印和阴影效应等问题研究、噪声去除方法研究及施工方法研究和拟合反演算法改进,并有针对性地提出相应的研究方法,从 SOTEM 场效应、观测参数设计、资料处理以及数据精细反演等方面构建了完整的 SOTEM 深部探测方法^[57-59]。

SOTEM 方法的研究目前仍处于初步阶段,研究内容大都集中在视电阻率定义、分辨率分析、数据信噪比分析、观测参数设计、场效应、一维反演等方面。视电阻率解释上,崔江伟对比分析了 TEM 全区视电阻率求解中常见的分段级数逼近法、二分法、平移算法求取 SOTEM 方法中磁场响应 $B_z(t)$ 和衰减电压响应 $dB_z(t)/dt$ 全程视电阻率的差异,发现分段级数逼近法计算的全程视电阻率曲线在光滑程度上不如其他两种基于计算机迭代计算的方法,但全程视电阻率可以消除浅部假高值现象,更真实地反映地层电性变化特征^[60]。分辨率分析方面,侯东洋等分析了 SOTEM 和可控源音频大地电磁法(CSAMT)在克服低阻覆盖层屏蔽和对地下低阻层探测方面的差异,研究结果表明 SOTEM 对低阻覆盖层的敏感度及对低阻层的探测能力均优于 CSAMT^[61]。噪声研究方面,SOTEM 噪声的主要来源是人文噪声,特别是人文活动剧烈的城镇区域,这一类噪声属于高度不稳定信号且变化急剧,根据有用信号和噪声信号的频率差异,陈大磊等采用小波变换和五点圆滑技术对强干扰数据进行处理,能够恢复较为真实的有用信号^[48,62]。

场效应和观测参数设计方面,陈卫营等研究了 SOTEM 地下感应电流扩散、多分量电磁响应平面分布、多偏移距衰减等特性,根据响应特性得到 SOTEM 的最佳观测区域,其中垂直磁场分量对低阻目标体敏感的区域集中在赤道向区域;水平电场分量对低阻目标体敏感的区域集中在赤道向区域,对高阻目标体敏感的区域集中在轴向区域^[63]。Zhou 等计算分析了 TE 模式响应(载流导线)、TE-TM 模式响应(接地端)和 TEM 模式响应(载流导线+接地

端)的分布特征、探测深度以及对异常的敏感度,发现 TE-TM 场探测深度最小,TE-TM 模式响应电场的探测能力更好,TEM 响应磁场的探测能力最强,但是对层厚和电阻率均不太敏感^[64]。常江浩等基于 FDTD 正演模拟研究了三维异常体对 SOTEM 场扩散的影响,结果表明 5 个电磁场分量对三维异常体的灵敏区域不同,对于不同的分量可选择不同的区域进行观测以提高 SOTEM 的探测能力,实现复杂目标体精细探测^[65]。薛俊杰等通过数值模拟发现近区的极限探测深度一般都大于远区,当偏移距等于 0.7~1 倍目标体埋深时 SOTEM 可获得最大探测深度,而基于镜像源理论的视探测深度可用于给定时刻的实际探测深度估算^[66]。Zhou 等研究了发射源排列对接地导线源 TEM 水平电场的影响,利用有限差分方法分析了阴影及场源复印效应对接地导线源 TEM 探测精度的影响并提出了相应的校正办法,根据发射源产生的自感电压研究了接地导线源 TEM 的最小探测深度,并从衰减曲线、平面分布和异常灵敏度三方面分析了接地导线源 TEM 的轴向电场^[67-70]。Hou 等通过对比研究发现 E_x 比 H_z 分量能够更有效地区别高阻围岩和低阻覆盖层,对于实际应用中 E_x 分量存在的静态效应,可以采用 E_x 和 H_z 分量联合反演以获得更全面的解释结果^[71]。还有一些其他的集中在极化特性方面的研究,如陈稳等基于 Cole-Cole 模型的 SOTEM 一维正演计算,分析了装置参数(收发距,极化体埋深)和极化参数(极化体电阻率、极化率,频率相关系数,时间常数)对 $E_x(t)$ 、 $B_z(t)$ 和 $dB_z(t)/dt$ 响应的影响,发现 $E_x(t)$ 受激电效应的影响最大^[72]。近两年,出现了一些关于联合解释方面的文献,如 Khan 结合 SOTEM、伽马和电阻率测井方法用于区别煤层和渗透率更高的砂岩层,圈定富水区及描绘煤层缝合线^[73]。

一维反演方面,目前发表的论文大都是中国地质与地球物理研究所薛国强老师团队所做的工作,2016 年陈卫营等提出基于全期视电阻率校正的 SOTEM 一维等效源反演算法,作为一种半定量解释方法,该法可以对 SOTEM 实测数据进行一维快速反演成像;同年,利用 SOTEM 全期视电阻率与大地电磁视电阻率之间的相似性,给出了一种从时间域到频率域转换的拟 MT 反演方法用于 SOTEM 数据反演,但该法仍属于较为粗糙的反演方法^[74,75]。为了提高对复杂模型的反演精度,2017 年他研究了 SOTEM 数据一维 OCCAM 反演方法,分析了信号噪声水平、偏移距、浅部厚低阻层对反演结果的影响,

发现当噪声水平小于 5% 时, 仍可获得较准确的反演结果; 偏移距对反演结果影响很小; 浅部厚低阻层的反演结果通常较差, 仅能获得地层的平均电阻率; 当用于 SOTEM 三维数据时, 三维异常体与背景电阻率的差异会导致一维反演结果出现较大误差, 特别是异常体边缘地带影响最大^[76]。

3 多通道瞬变电磁法

多通道瞬变电磁法 (multi-channel TEM, MTEM) 由英国爱丁堡大学学者 Wright 等于 2001 年提出, 并于 2005 年获得美国专利, 该法借鉴了地震勘探的相关技术, 可实现高精度、大深度探测, 设计的初衷是为了探测油气, 随后由薛国强等于 2013 年引入深部矿产资源勘查。该法采用固定的接地导线源作为发射源发送伪随机编码, 在发射源轴向延长线上两侧范围内进行类似于地震勘探的阵列式多道测量, 同时测量发射端的电流变化和接收端电压变化, 借助多道阵列式观测、时间域多次叠加和空间域多次覆盖等技术, 进行高精度、密集、快速采样, 因此具有较高的观测精度和工作效率, 采集数据包含一次场和二次场信息, 探测深度较常规时间域电磁法更大, 目前已在油气探测、监测油气运移、矿产资源勘查等领域得到成功应用^[77-86]。

目前, 对于 MTEM 的研究仍处于初步阶段, 研究的内容集中在系统设计、视电阻率计算、数据反演、信噪比和分辨率分析等方面。视电阻率解释方面, 智庆全从反函数定义出发给出一种全域视电阻率定义方法, 并引进拟地震偏移成像技术提高 MTEM 方法的分辨率^[87]; 张文伟等通过研究大地脉冲响应及其频谱特征, 提出频率域比值法, 基于该法可不用估计整个大地脉冲响应实现 MTEM 视电阻率计算, 这种新的视电阻率计算方法可以很好地反映地下电性结构^[88]。数据反演方面, 齐彦福等研究了 MTEM 方法理论 m 序列和实际发射波形的全时正演模拟, 利用相关辨识技术削弱噪声, 直接对积分获得的阶跃响应进行共中心点道集数据联合反演, 可大大提高工作效率^[89]; 李海等采用反卷积和反向积分算法提取 MTEM 数据响应, 并基于 OCCAM 算法的联合反演算法实现了共中心点道集数据联合反演, 数值模拟结果表明该反演算法有较好的稳定性^[90]。

数据信噪比和分辨率分析方面, MTEM 观测中常见的随机噪声可分为平稳和非平稳随机噪声。根据 Wright 和薛国强等的分析, 平稳随机噪声主要指

远源天电、主频和负载稳定时的工频和仪器热噪声, 由于这一类噪声与 m 序列提供的信号不具有相关性, 可借助 m 序列伪随机编码达到压制噪声的目的, 如齐彦福等基于 m 序列和实际发射波形全时正演模拟研究的相关辨识技术、袁哲等基于 m 序列编码参数对抗噪声性能影响给出的 m 序列编码参数优选方案; 也可采用常规的线性数字递归滤波、改进的基于陷波带宽和初始条件优选的数字递归陷波去除周期性工频噪声^[86, 89, 91-94]。非平稳随机噪声主要指近源天电、主频和负载不稳定时的工频、短时和高频人文噪声, 这一类噪声可借鉴传统非平稳信号处理手段, 依据噪声和观测信号带宽范围去除噪声, 对于带内噪声, 可采用噪声观测、建模等方法; 对于观测信号带宽外噪声, 可采用频率分离方法, 如滤波、小波变换、独立分量分析等^[95]。分辨率分析方面, 钟华森等在预条件正则化共轭梯度方法的基础上提出采用相关叠加算法对全时段和各个时段 MTEM 虚拟波场提取结果进行相关性叠加, 得到抗干扰能力强、光滑、波峰明显的虚拟波场结果^[96]; 涂小磊等针对 MTEM 的特点对三维时域差分格式进行改进, 数值模拟结果表明 MTEM 对油气薄层有较好的勘探能力^[97]; 王若等采用 2D 有限元正演实现 MTEM 正演模拟, 数值模拟结果表明相对于频率域有源电磁方法, MTEM 对有一定埋深的顺层矿床有更高的分辨能力^[98]; 为了避免 MTEM 中从全波形响应提取纯二次场造成的有用信息丢失, Di 等提出用跨维框架方法从 PRBS 激励中直接对全波形 TEM 响应做变换, 从而提高 MTEM 方法的分辨率^[99]。

与 LOTEM 和 SOTEM 不同的是, MTEM 采用伪随机编码波形进行激励, 以提高对地探测的分辨率, 伴随着 MTEM 大量现场试验, 系统设计方面近些年也取得了不少研究进展。早期的如 Hobbs 等发现通过使用伪随机二进制序列 (PRBSs) 作为输入波形, 可以提高采集信号信噪比^[100]; 2015 年以来伴随着我国自主研发的多通道瞬变电磁装置陆续完善, 出现了一批系统设计方面的文献, 张盛泉等借助电子设计自动化软件平台研发了适用于监测大功率 MTEM 发射机的电压及电流记录装置^[101-102]; 董庆运等设计了一种分布式中心的数据采集网络结构, 可提高电源站系统的灵活性和健壮性^[103]; 张乐等在以太网物理层基础上, 设计了一款数据传输可靠、数据率更高、功耗更低的交叉站^[104]; 底青云等介绍了由我国自主研发的多通道大功率电法勘探仪的系统组成、方法原理和集成方案以及深部矿勘探测试结果^[105]; 林凡强设计研发了一种可通过程序灵活

配置不同电磁响应、采样通道多、动态范围宽、存储容量大、同步精度高的接收系统,对于开展深部矿体精细探测具有重要实践意义^[106];何瑞昊设计开发了一种稳定性和交互性良好的上位机软件^[107];王旭红等提出一种适用于 MTEM 发射机的新型有源软开关变换器,可实现发射机功率拓展与效率提高^[108]。

4 电性源半航空瞬变电磁法

电性源半航空 TEM (grounded-source semi-airborne TEM) 最早由日本学者 Mogi 等于 1998 年提出,起源于 Nabighian 提出的基于水平电偶极源,地面发射、空中接收的半航空电磁法,该法采用电性源地面发射,飞行器空中接收的工作方式,发射源可以是单一的,也可以是多个的,具备地面 TEM 法勘探深度大的特点,且电性源易于布设,因此复杂地形适应性强;接收器可以是有人机或无人机,如直升机、无人飞艇和旋翼机等,具备航空 TEM 工作效率高的特点,且载重远小于航空 TEM 法,因此安全性更高,目前已在地热调查、火山结构调查、地下巷道调查、地下水盐渍化及地下水监测、隧道勘察、采空区探测、古河道结构探测等得到成功应用^[109-127]。电性源半航空 TEM 法的快速发展集中在近 10 年,无论是在系统设计还是数据物理解释方面都取得了较多的进展。目前,市场上已投入使用,有代表性的系统如 Mogi 等设计的 Grounded Electrical Source Airborne Transient EM (GREATEM) 系统、吉林大学嵇艳鞠团队研制的无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统、中国科学院电子学研究所刘富波等研制的无人直升机搭载的半航空 TEM 勘探系统 (S-ATEM) 和成都理工大学王绪本团队研制的线圈传感器、同步采集装置以及实时数据处理软件三部分构成的接收系统 (SATR) 等,搭载的飞行平台各异,可以采集多分量磁场响应,也可以采集多分量磁场的时间导数响应,在某些地区实际应用中探测深度可达 800 m^[110, 115-117, 121-124]。

由于搭载了航空平台,半航空 TEM 响应受不同的噪声类型影响较大,如天电噪声、飞行运动噪声等^[121]。天电噪声属于短时电磁信号,在天电活动较弱的地方可按周期噪声采用传统滤波方法,如中值滤波、M 值估计法、小波变换、组合滤波等进行去除,在天电活动较强的地方可通过剪裁剪法进行处理^[115, 121]。由于测量线圈在地磁场中运动,地磁场的均匀性会导致线圈产生磁通量变化,产生的感

应电动势即为飞行运动噪声。飞行运动噪声处理的常见方法有陷波法、多项式拟合法、独立分量分析法、小波神经网络方法、经验模态分解方法、集合经验模态分解方法等^[110, 116-117, 121, 128]。

关于数据物理解释的研究主要有视电阻率定义、快速成像、反演等,视电阻率定义方面,阳贵红分析了接收高度对电磁响应的影响并设计了求解全区视电阻率的算法^[129];张莹莹等对半航空 TEM 法多分量磁场响应及磁场的时间导数响应进行分析,基于反函数原理实现了多分量的全域视电阻率计算,该方法可实现全时域、全空域视电阻率定义^[130-131];吕仁斌利用查询表方式求解视电阻率,并结合视深度公式实现了电导率深度成像^[132];吴启龙基于反函数思想研究了半航空 TEM 法衰减电压响应的全期视电阻率成像,并将该算法应用于复杂地形地区隧道勘察^[120];易国财等分析了三层地电模型中间低阻薄层埋深、层厚、电阻率差异等参数对全区视电阻率曲线的影响,探讨了半航空瞬变电磁法对低阻薄层的探测能力^[133]。快速成像方面的工作主要集中在在长安大学李貅老师团队所做的工作,李貅、张莹莹等针对半航空 TEM 法三维解释问题,结合全域视电阻率、Kirchhoff 曲面偏移成像及逆合成孔径成像开展研究,构建了半航空 TEM 法逆合成孔径成像方法^[134-135];同年,基于电偶极子浮动薄板原理,结合相关叠加技术研究了多辐射场源半航空 TEM 快速成像算法,该法可提高传统视纵向电导方法的分辨能力^[136];成都理工大学王仕兴等基于分段二分搜索算法建立电导率—电磁响应数据“库”,实现计算速度快、成像结果可靠的半航空瞬变电磁电导率深度快速成像^[137]。

反演方面的研究工作目前已发表的论文有些针对单辐射场源,有些针对多辐射场源。嵇艳鞠、徐江等利用等效变换获得电性源半航空 TEM 响应与电阻率一一映射的样本集,基于三层 BP 神经网络和 Levenberg-Marquardt 算法进行样本训练,实现了电性源半航空 TEM 神经网络反演,该法的反演精度要优于传统数值计算方法^[138-139];赵涵等以 Occam 反演理论为基础研究了多辐射场源地空 TEM 一维反演算法^[140];张澎等引入并行技术实现了最平缓模型约束条件下的半航空时间域电磁数据自适应正则化反演^[141];Abdallah 等将频率域电磁反演方法用于 GREATEM 的时间域数据处理,该法适用于对电阻率横向变化大的数据进行反演^[142];杨聪等结合自适应正则化反演方法和阻尼最小二乘反演方法提出自适应正则化—阻尼最小二乘反演算法,数值模拟

结果表明该法可在一定程度上提高半航空瞬变电磁法对高阻的分辨率,提高反演精度^[143]。

还有一些其他的关于半航空 TEM 响应特征的研究,早期的有 Verma 等讨论了偏移距、飞行高度等参数对瞬变响应的影响,数值分析结果表明电性源半航空 TEM 法受偏移距影响较大,飞行高度对瞬变响应的影响主要集中在早期且影响很小^[144];宿传玺基于三维时域有限差分算法,结合典型岩溶地质灾害源特征,建立干溶洞、充填型溶洞、半充填溶洞的地质三维概化模型,分别分析了接地长导线源和地面回线源的半航空 TEM 响应特征^[145];曹凤凤基于有限元三维正演算法,总结了典型起伏地形(斜坡、山谷、山脊、峰谷结合地形)模型在不同装置参数(飞行方式、接受高度、偏移距等)下 TEM 响应特征^[146];由于测点位于空中,半航空 TEM 法的观测数据更易受噪声影响,为了获得数据采集质量更稳定的区域,Ma 等基于典型模型中的误差分析方法讨论了半航空 TEM 野外工作的灵敏区域^[147];Li 等采用时间域矢量有限元方法研究了阵列源对半航空 TEM 响应的影响^[148];张莹莹基于一维正演理论,讨论了多辐射场源布设方式对 TEM 多分量响应的影响,并结合偏移距变化时瞬变响应衰减幅度,给出了半航空 TEM 的工作区域范围^[149];李貅等基于三维矢量有限元法证实多辐射场源能够减少单一源体积效应影响,在地下多方位激发地质体,获得多方位耦合信息^[150]。

5 电性源地—井瞬变电磁法

为了区分常用的回线源地—井瞬变电磁法(surface to borehole TEM),武军杰等于 2017 年提出电性源地—井瞬变电磁法(grounded-source surface to borehole TEM),该法采用在地面布置电性源,井中采集信号的工作方式,具备电性源装置发射功率大、辐射面积广、探测深度大、对地形条件要求低的优点;井中接收多分量瞬变响应,受地表干扰和电性干扰影响小,可以获得比地面方法更强的异常,提高找矿效果^[151-152]。该法的研究也尚处于初步阶段,目前已发表的研究内容包含系统设计、视电阻率定义、响应特征分析、联合解释等,主要集中在响应特征分析方面。

系统设计上,李术才等采用均匀半空间和层状模型对电性源地—井 TEM 法的采集范围和传播规律进行研究,发现垂直排列方向异常幅值大,可视为最佳测线方向,数值模拟结果显示长度为 1 km 的电

性源有效勘探深度可达 1.5 km,这些结论为电性源地—井 TEM 方法的实际应用提供了理论和数值试验支撑^[151];视电阻率定义方面,武军杰等基于反函数定理研究了电性源地—井 TEM 方法三分量感应磁场的全域视电阻率定义问题,数值模拟计算结果表明该法能够有效反映地下信息^[153];联合解释方面,为充分利用地面发射源,武军杰提出同时采集井中和空中数据,进行地—井与地—空 TEM 联合解释,提高电性源 TEM 法的纵向和横向分辨能力^[152]。

响应特征分析方面,武军杰、李貅等首先基于一维正演模拟分析了电性源地—井 TEM 三分量瞬变响应特征,结果表明,瞬变响应总场仅在中晚期时间道对电性界面有明显反应,瞬变响应异常场形态简单,对电性界面反映明显,且水平分量对异常的反映优于垂直分量^[154];随后,基于 FDTD 正演模拟研究了电性源地—井 TEM 瞬变场的空间分布特征,总结了背景场和异常场信号随时间变化规律^[155];Chen 等利用有限差分法研究了二维模型的电性源地—井 TEM 响应,数值模拟结果表明电性源异常幅值比回线源更强^[156];陈卫营等基于一维正演理论,分析了电性源地—井 TEM 方法六个电磁场分量的扩散、分布特性和探测能力,发现不同分量对地层的探测能力各异,垂直电场和水平磁场瞬变响应对目标层的反映最明显^[157]。

6 结论与讨论

1) 电性源 TEM 方法近些年取得了一定的研究进展,研究基础丰厚的 LOTEM 在装置系统、数据处理、反演、成像和联合解释等方面均有较大发展,应用领域更加丰富,由最初的地壳结构调查和油气勘探扩展到煤矿勘探、海水入侵、油气运移检测等领域,已经是一类比较成熟的电性源 TEM 方法。

2) 起步较晚,研究基础相对薄弱的 SOTEM、MTEM、电性源半航空 TEM 和电性源地—井 TEM 目前仍处于推广阶段,伴随大量现场试验,仪器的稳定性、通用性均有提高,在深部探测方面的优势日益突出;虽然在装置系统、数据处理、解释等方面取得了一定的研究进展,但相关技术仍有待进一步提升。

3) 上述各类电性源 TEM 法的研究中有不同程度关于数据信噪比的讨论,实际上,随着我国城镇化建设的发展,各种电磁噪声及人文干扰已成为制约高信噪比电性源 TEM 信号的重要因素,特别是对反映深部信息的晚期信号影响严重,研究各类噪声及干扰的压制和去除技术也是一项重要内容。

4) 学者们很早就注意到电性源 TEM 方法受地形影响大,这种影响不止体现在上文中讨论较多的系统设计上,对一维反演这种基于层状模型的反演方法同样影响很大,为了解决地形起伏剧烈及电性结构复杂情况下的反演问题,研究带地形的高维反演方法是实现电性源 TEM 方法深部精细探测是一项重要课题。

5) 考虑到每种地球物理物理勘探方法的局限性,为了提高解释结果的准确性,联合解释及联合反演也是一大研究热点,既可以联合电磁类方法,也可以联合非电磁类方法,该项技术可以在保证电性源 TEM 方法大深度探测的前提下,提高对地探测分辨率。

6) 上文中讨论的大部分研究都是基于单个辐射源,实际上单个发射源可以扩展至多个,对地下进行宽方位辐射,通过调整发射源的位置和电流方向,有针对性地加强某些分量采集信号强度,该法有助于实现低成本、高精度、大深度电性源 TEM 勘探作业。

7) 电性源 TEM 方法具有探测深度大、受地形限制小、工作效率高等诸多优点,近些年出现的面向地面、航空和井中的各类不同方法已基本满足大部分应用场景下的探测需求,作为地球电磁法勘探领域的新技术、新方法,各类电性源 TEM 方法均是值得推广的方法。

参考文献 (References):

- [1] Strack K M. Exploration with deep transient electromagnetics[M]. Elsevier Science Publishers B V Amsterdam, The Netherlands, 1992.
- [2] 薛国强,李貅,底青云.瞬变电磁法理论与应用研究进展[J].地球物理学进展,2007,22(4):1195-1200.
Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application[J].Progress in Geophysics, 2007,22(4):1195-1200.
- [3] 朴化荣.电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990.
Piao H R. Principles of electromagnetic sounding[M].Beijing:Geological Publishing House,1990.
- [4] 刘天佑.地球物理勘探概论[M].北京:地质出版社,2007.
Liu T Y. Introduction to geophysical exploration[M].Beijing:Geological Publishing House,2007.
- [5] Keller G V, Pritchard J I, Jacobson J J, et al. Megasource time-domain electromagnetic sounding methods[J]. Geophysics, 1984, 49:993-1009.
- [6] Vozoff K, Moss D, LeBrocq K L, et al. LOTEM electric field measurements for mapping resistive horizons in petroleum exploration[J].Exploration Geophysics, 1985,16(3):309-312.
- [7] Strack K, Luschen E, Kotz A W. Long-offset transient electromagnetic (LOTEM) depth soundings applied to crustal studies in the Black Forest and Swabian Alb, Federal Republic of Germany[J]. Geophysics, 1990,55(7):834-842.
- [8] Strack M. LOTEM case histories in frontier areas of hydrocarbon exploration in Asia[C]// San Francisco: 60th Annual International Meeting, Expanded Abstracts with Biographies, Technical Program, 1999.
- [9] Strack K, Hanstein T, Stoyer C H, et al. Time domain controlled source electromagnetics for hydrocarbon applications [M]. The Earth's Magnetic Interior. Netherlands: Springer, 2011.
- [10] Skokan C K, Andersen H T. Deep long-offset transient electromagnetic surveys for crustal studies in the USA[J].Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1991,66:39-50.
- [11] Muller M, Hordt A, Neubauer F M. Electromagnetic technique's success at Vesuvius points to use in forecasting eruptions[J].Eos, Transactions, American Geophysical Union, 1999,80(35):393-401.
- [12] Muller M, Hordt A, Neubauer F M. Internal structure of Mount Merapi, Indonesia, derived from long-offset transient electromagnetic data[J].Journal of Geophysical Research, 2002,107(B9):2187.
- [13] 严良俊,胡文宝,陈清礼,等.长偏移距瞬变电磁测深法在碳酸盐岩覆盖区落实局部构造的应用效果[J].地震地质, 2001,23(2):271-276.
Yan L J, Hu W B, Chen Q L, et al. Trial with LOTEM to investigate detailed geological structure in the area covered with carbonate[J].Seismology and Geology, 2001,23(2):271-276.
- [14] Stephan A, Schniggenfittig H, Strack K. Long-offset transient EM sounding north of the Rhine-Ruhr coal district Germany[J].Geophysical Prospecting, 2006,39(4):505-525.
- [15] Kafri U, Goldman M, Lyakhovsky V, et al. The configuration of the fresh-saline groundwater interface within the regional Judea Group carbon aquifer in northern Israel between the Mediterranean and the Dead Sea base levels as delineated by deep geoelectromagnetic soundings[J].Journal of Hydrology, 2007,344:123-134.
- [16] Ceia M, Carrasquilla A, Sato H K, et al. Long offset transient electromagnetic (LOTEM) for monitoring fluid injection in petroleum reservoirs—Preliminary results of Fazenda Alvorada Field (Brazil) [C]// Rio de Janeiro, Brazil: 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2007.
- [17] 谢兴兵,周磊,严良俊,等.时移长偏移距瞬变电磁法剩余油监测方法及应用[J].石油地球物理勘探, 2016,51(3):605-612.
Xie X B, Zhou L, Yan L J, et al. Remaining oil detection with time-lapse long offset&window transient electromagnetic sounding[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016,51(3):605-612.
- [18] Yang S. A single apparent resistivity expression for long-offset transient electromagnetics[J]. Geophysics, 1986,51(6):1291-1297.
- [19] Bibby H M, Risk G F, Caldwell T G. Long offset tensor apparent resistivity surveys of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand[J].Journal of Applied Geophysics, 2002,49:17-32.
- [20] Caldwell T, Bibby H M. The instantaneous apparent resistivity tensor: A visualization scheme for LOTEM electric field measurements [J].Geophysical Journal International, 1998,135(3):817-834.

- [21] 翁爱华,王雪秋.长偏移距瞬变电磁测深甚晚期响应及视电阻率的数值计算[J].地震地质, 2003,25(4):664-670.
Weng A H, Wang X Q. Numerical simulations of very-late time response and apparent resistivity in long-offset time sounding[J]. Seismology and Geology, 2003,25(4):664-670.
- [22] 陈清礼,严良俊,付志红.均匀半空间长偏移距瞬变电磁法全区视电阻率的数值计算方法[J].工程地球物理学报, 2009,6(4):390-394.
Chen Q L, Yan L J, Fu Z H. Algorithm for the all-time apparent resistivity of LOTEM method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009,6(4):390-394.
- [23] Strack K M, Hanstein T H, Eilenz H N. LOTEM data processing for areas with high cultural noise levels[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1989,53:261-269.
- [24] 邵敏,邱宁,何展翔.长偏移距瞬变电磁信号小波阈值去噪效果分析[J].工程地球物理学报,2008,5(1):70-74.
Shao M, Qiu N, He Z X. Effect of wavelet threshold de-noising on long-offset transient electromagnetic signal[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008,5(1):70-74.
- [25] Cardador M H, Cuevas A, Watanabe H, et al. Experimental evaluation of hydrocarbon detection with the Long-Offset Time-Domain Electromagnetic Method in the Cretaceous carbonates of the Tampico-Misantla basin, Mexico [J]. Journal of Applied Geophysics, 2003,52(2):103-122.
- [26] 王阳,李伟林,李论,等. LOTEM 视电阻率曲线对一维层状介质的分辨能力[J].物探化探计算技术, 2018,40(2):197-204.
Wang Y, Li W L, Li L, et al. Distinguishing ability for 1D model of LOTEM apparent resistivity curves[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018,40(2):197-204.
- [27] Hordt A, Muller M. Understanding LOTEM data from mountainous terrain[J]. Geophysics, 2000,65(4):1113-1123.
- [28] 唐新功,胡文宝,严良俊.地堑地形对长偏移距瞬变电磁测深的影响研究[J].工程地球物理学报, 2004,1(4):313-317.
Tang X G, Hu W B, Yan L J. Graben topographic effects to the long offset transient electromagnetic responses[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004,1(4):313-317.
- [29] Tang X G, Hu W B, Yan L J. Topographic effects on long offset transient electromagnetic response[J]. Applied Geophysics, 2011,8(4):277-284.
- [30] Hoheisel A, Hordt A, Hanstein T. The influence of induced polarization on long-offset transient electromagnetic data[J]. Geophysical Prospecting, 2010,52(5):417-426.
- [31] Hordt A, Druskin V, Knizhnerman L, et al. Interpretation of 3-D effects in long-offset transient electromagnetic (LOTEM) soundings in Munsterland area/Germany [J]. Geophysics, 1992,57:1127-1137.
- [32] Hordt A, Jodicke H, Strack K M, et al. Inversion of long-offset TEM soundings near the borehole Munsterland 1, Germany, and comparison with MT measurements[J]. Geophysical Journal International, 1992,108(3):930-940.
- [33] 严良俊,胡文宝,陈清礼,等.长偏移距瞬变电磁测深的全区视电阻率求取及快速反演方法[J].石油地球物理勘探,1999,34(5):532-538.
Yan L J, Hu W B, Chen Q L, et al. The estimation and fast inversion of all-time apparent resistivities in long-offset transient electromagnetic sounding[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999,34(5):532-538.
- [34] Commer M, Helwig S, Hordt A, et al. Interpretation of long-offset transient electromagnetic data from Mount Merapi, Indonesia, using a three-dimensional optimization approach[J]. Journal of Geophysical Research, 2004,110(B3):B03207.
- [35] Commer M, Helwig S L, Hordt A, et al. New results on the resistivity structure of Merapi Volcano (Indonesia), derived from three-dimensional restricted inversion of long-offset transient electromagnetic data[J]. Geophysical Journal International, 2006,167(3):1172-1187.
- [36] Hordt A, Dautel S, Tezkan B, et al. Interpretation of long-offset transient electromagnetic data from the Odenwald area, Germany, using two-dimensional modeling[J]. Geophysical Journal International, 2000,140(3):577-586.
- [37] Khan M Y, Xue G Q, Chen W Y, et al. Analysis of Long-offset Transient Electromagnetic (LOTEM) Data in Time, Frequency, and Pseudo-seismic Domain[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2018,23(1):15-32.
- [38] Liu Y J, Yogeshwar P, Hu X Y, et al. Effects of electrical anisotropy on long-offset transient electromagnetic data[J]. Geophysical Journal International, 2020,222(2):1074-1089.
- [39] Beer J H, Roux C L, Hanstein T H, et al. Direct current resistivity and LOTEM model for the deep structure of the northern edge for the Kaapvaal craton, South Africa[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1991,66:51-61.
- [40] Strack K M, Vozoff K. Integrating long-offset transient electromagnetics (LOTEM) with seismic in an exploration environment[J]. Geophysical Prospecting, 1996,44(6):997-1017.
- [41] Lin Z, Vozoff K, Smith G H, et al. Joint application of seismic and electromagnetic methods to coal characterisation at West Cliff Colliery, New South Wales [J]. Exploration Geophysics, 1996,27(4):205-215.
- [42] Kalscheuer T, Commer M, Helwig S L, et al. Electromagnetic evidence for an ancient avalanche caldera rim on the south flank of Mount Merapi, Indonesia[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2007,162:81-97.
- [43] Harnoon A, Adrian J, Bergers R, et al. Joint inversion of long-offset and central-loop transient electromagnetic data: Application to a mud volcano exploration in Perekishkul, Azerbaijan[J]. European Association of Geoscientists & Engineers, Geophysical Prospecting, 2014:1-17.
- [44] 涂君.大电磁测深法与长偏移距瞬变电磁法联合反演方法研究[D].成都:成都理工大学,2019.
Tu J. Research on the joint inversion of magnetotelluric sounding and long offset transient electromagnetic methods[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [45] Ziolkowski A M. Short-offset transient electromagnetic geophysical surveying[P]. United State Patent Application Publication, 2010.

- [46] 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 G Q, Chen W Y, Zhou N N, et al. Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 255-261.
- [47] 薛国强,闫述,陈卫营.电性源瞬变电磁短偏移探测方法[J].中国有色金属学报,2013,23(9):2365-2370.
Xue G Q, Yan S, Chen W Y. Exploration technique due to grounded wire source with short-offset[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2365-2370.
- [48] 薛国强,闫述,陈卫营.接地源短偏移瞬变电磁法研究展望[J].地球物理学进展,2014,29(1):177-181.
Xue G Q, Yan S, Chen W Y. Research prospect to grounded-wire TEM with short-offset[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 177-181.
- [49] 李功强,程久龙,高峰,等.煤矿深部采区岩层富水性短偏移距瞬变电磁法探测[J].中国矿业,2013,22(10):131-134.
Li G Q, Cheng J L, Gao F, et al. Research on detecting strata water-bearing property in deep coal mining area using short-offset transient electromagnetic method[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(10): 131-134.
- [50] Xue G Q, Gelius L J, Sakyi P A, et al. Discovery of a hidden BIF deposit in Anhui province, China by integrated geological and geophysical investigations[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 63: 470-477.
- [51] Chen W Y, Xue G Q, Younis K M, 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: 1643-1651.
- [52] Zhou N N, Xue G Q, Chen W Y, et al. Large-depth Hydro-geological detection in the North China-type coal field through Short-offset Grounded-wire TEM[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2393-2404.
- [53] Zhou N N, Xue G Q, Hou D Y, et al. Short-offset grounded-wire TEM method for efficient detection of mined-out areas in vegetation-covered mountainous coalfields[J]. Exploration Geophysics, 2017, 48(4): 374-382.
- [54] 卢云飞,薛国强,邱卫忠,等. SOTEM 研究及其在煤田采空区中的应用[J].物探与化探,2017,41(2):354-359.
Lu Y F, Xue G Q, Qiu W Z, et al. The research on SOTEM and its application in mined-out area of coal mine[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 354-359.
- [55] 陈大磊,陈卫营,郭朋,等.SOTEM 法在城镇强干扰环境下的应用——以坊子煤矿采空区为例[J].物探与化探,2020,44(5):1226-1232.
Chen D L, Chen W Y, Guo P, et al. The application of SOTEM method to populated areas: A case study of Fangzi coal mine goaf[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1226-1232.
- [56] Xue G Q, Zhang L B, Hou D Y, et al. Integrated geological and geophysical investigations for the discovery of deeply buried gold-polymetallic deposits in China[J]. Geological Journal, 2019, 55(1): 1771-1780.
- [57] 薛国强,闫述,陈卫营,等. SOTEM 深部探测关键问题分析[J].地球物理学进展,2015,30(1):121-125.
Xue G Q, Yan S, Chen W Y, et al. The key problems of SOTEM used in deep detection[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 121-125.
- [58] Di Q Y, Xue G Q, Yin C C, et al. New methods of controlled-source electromagnetic detection in China[J]. Science China (Earth Sciences), 2020, 63: 1268-1277.
- [59] 薛国强,陈卫营,武欣,等.电性源短偏移距瞬变电磁研究进展[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):215-226.
Xue G Q, Chen W Y, Wu X, et al. Review on research of short-offset transient electromagnetic method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 215-226.
- [60] 崔江伟.电性源短偏移距瞬变电磁法全程视电阻率计算研究[D].南昌:东华理工大学,2015.
Cui J W. Calculation of all-time apparent resistivity for the SOTEM[D]. Nanchang: East China Institute of Technology, 2015.
- [61] 侯东洋,薛国强,陈卫营. SOTEM 与 CSAMT 对低阻层的分辨能力比较[J].物探与化探,2016,40(1):185-189.
Hou D Y, Xue G Q, Chen W Y. Distinguishing capability of SOTEM and CSAMT for low resistivity layer[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 185-189.
- [62] 陈大磊,陈卫营,郭朋,等.SOTEM 法在城镇强干扰环境下的应用——以坊子煤矿采空区为例[J].物探与化探,2020,44(5):1226-1232.
Chen D L, Chen W Y, Guo P, et al. The application of SOTEM method to populated areas: A case study of Fangzi coal mine goaf[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1226-1232.
- [63] 陈卫营,薛国强,崔江伟,等. SOTEM 响应特性分析及最佳观测区域研究[J].地球物理学报,2016,59(2):739-748.
Chen W Y, Xue G Q, Cui J W, et al. Study on the response and optimal observation area for SOTEM[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 739-748.
- [64] Zhou N N, Xue G Q, Li H. A comparison of different-mode fields generated from grounded-wire source based on the 1D model[J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(2): 591-606.
- [65] 常江浩,薛国强.电性源短偏移距瞬变电磁场扩散规律三维数值模拟[J].地球科学与环境学报,2020,42(6):711-721.
Chang J H, Xue G Q. Three-dimensional numerical simulation of diffusion law of short-offset grounded-wire transient electromagnetic field[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(6): 711-721.
- [66] 薛俊杰,陈卫营,王贺元.电性源短偏移瞬变电磁探测深度分析及应用[J].物探与化探,2017,41(2):381-384.
Xue J J, Chen W Y, Wang H Y. Analysis and application of the detection depth of electrical source Short-offset TEM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 381-384.
- [67] Zhou N N, Xue G Q, Hou D Y, et al. An investigation of the effect of source geometry on grounded-wire TEM surveying with horizontal electric field[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2018, 23(1): 143-151.
- [68] Zhou N N, Hou D Y, Xue G Q. Effects of shadow and source o-

- verprint on grounded-wire transient electromagnetic response[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15: 1169 – 1173.
- [69] Zhou N N, Xue G Q. Minimum depth of investigation for grounded-wire TEM due to self-transients[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 152: 203 – 207.
- [70] Zhou N N, Xue G Q, Li H, et al. Investigation of axial electric field measurement with grounded-wire TEM surveys[J]. Pure and Applied Geophysics, 2018, 175: 365 – 373.
- [71] Hou D Y, Xue G Q, Zhou N N, 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: 857 – 871.
- [72] 陈稳, 薛国强, 陈卫营, 等. SOTEM 多分量激电响应特性分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 1859 – 1865.
- Chen W, Xue G Q, Chen W Y, et al. Multi-component response of SOTEM with IP effect[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5): 1859 – 1865.
- [73] Khan M Y, Xue G Q, Chen W Y. Investigation of groundwater inrush zone using petrophysical logs and short-offset transient electromagnetic (SOTEM) data[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2020, 25(3): 433 – 437.
- [74] 陈卫营, 薛国强. SOTEM 一维等效源反演方法[J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 411 – 416.
- Chen W Y, Xue G Q. 1-D image source inversion of SOTEM data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2): 411 – 416.
- [75] Chen W Y, Xue G Q, Muhammad Y. Quasi MT inversion of short-offset transient electromagnetic data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(7): 2413 – 2422.
- [76] 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 W Y, Li H, Xue G Q, et al. 1D OCCAM inversion of SOTEM data and its application to 3D models[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(9): 3667 – 3676.
- [77] Wright D, Ziolkowski A, Hobbs B. Hydrocarbon detection and monitoring with a multicomponent transient electromagnetic (MTEM) survey[J]. The Leading Edge, 2002, 21(9): 852 – 864.
- [78] Wright D, Ziolkowski A, Hobbs B. Detection of subsurface resistivity contrasts with application to location of fluids [P]: USA 20050237063, 2005.
- [79] Ziolkowski A, Hobbs B, Wright D. Multi-transient electromagnetic demonstration survey in France[J]. Geophysics, 2007, 72(4): 197 – 209.
- [80] Ziolkowski A, Parr R, Wright D, et al. Multi-transient EM repeatability experiment over North Sea Harding field [C]//Houston, Texas: 71st SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysics, 2009.
- [81] 薛国强, 闫述, 底青云, 等. 多道瞬变电磁法 (MTEM) 技术分析[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(1): 94 – 100.
- Xue G Q, Yan S, Di Q Y, et al. Technical analysis of multi-transient electromagnetic method[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(1): 94 – 100.
- [82] 薛国强, 武欣, 李海, 等. 多道瞬变电磁法 (MTEM) 国外研究进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2187 – 2191.
- Xue G Q, Wu X, Li H, et al. Progress of multi-transient electromagnetic method in abroad[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2187 – 2191.
- [83] 王显祥, 底青云, 邓居智. 多通道瞬变电磁法油气藏动态检测[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(5): 1021 – 1030.
- Wang X X, Di Q Y, Deng J Z. Reservoir dynamic detection based on multi-channel transient electromagnetic [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(5): 1021 – 1030.
- [84] 张文伟, 底青云, 雷达, 等. 物探新方法——多通道瞬变电磁法在金属矿勘探中的应用[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(1): 1 – 8.
- Zhang W W, Di Q Y, Lei D, et al. Multi-channel transient electromagnetic method: a new geophysical method and its application in exploring metallic ore deposits[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(1): 1 – 8.
- [85] 欧阳涛, 底青云, 薛国强, 等. 利用多通道瞬变电磁法识别深部矿体——以内蒙兴安盟铅锌银矿为例[J]. 地球物理学报, 2019, 62(5): 1981 – 1990.
- Ou Y T, Di Q Y, Xue G Q, et al. Identifying deep ore bodies using the Multi-Channel Transient Electromagnetic Method (MTEM): an example of a lead-zinc-silver mine in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(5): 1981 – 1990.
- [86] 薛国强, 底青云, 王若, 等. 多通道瞬变电磁法资料处理方法技术综述[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 211 – 215.
- Xue G Q, Di Q Y, Wang R, et al. Overview on data processing methods of multi-channel transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 211 – 215.
- [87] 智庆全. MTEM 波场变换与偏移成像方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- Zhi Q Q. Study on wave field transformation and migration imaging of MTEM data[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [88] 张文伟, 真齐辉, 底青云. 多通道瞬变电磁法频率域比值算法及视电阻率计算研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4171 – 4181.
- Zhang W W, Zhen Q H, Di Q Y. Study on MTEM frequency-domain ratio method and apparent resistivity calculation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4171 – 4181.
- [89] 齐彦福, 殷长春, 王若, 等. 多通道瞬变电磁 m 序列全时正演模拟与反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2566 – 2577.
- Qi Y F, Yin C C, Wang R, et al. Multi-transient EM full-time forward modeling and inversion of m-sequences[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2566 – 2577.
- [90] 李海, 薛国强, 钟华森, 等. 多道瞬变电磁法共中心点道集数据联合反演[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4439 – 4447.
- Li H, Xue G Q, Zhong H S, et al. Joint inversion of CMP gathers of multi-channel transient electromagnetic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4439 – 4447.
- [91] Wright D, Ziolkowski A, Hall G. Improving signal-to-noise ratio using pseudo random binary sequences in multi-transient electromagnetic (MTEM) data [C]// Vienna: Proceedings of the 68th

- EAGA Conference and Exhibition, SPE, 2006.
- [92] 袁哲, 张一鸣, 郑起佳. 多道瞬变电磁法中 m 序列抗噪性定量评估及编码参数优选[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 52(1): 195–205.
- Yuan Z, Zhang Y M, Zheng Q J. Anti-noise quantitative analysis of the m-sequence in the multi-transient electromagnetic method and its coding parameter optimization[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 52(1): 195–205.
- [93] 袁哲, 张一鸣, 王旭红, 等. 多通道瞬变电磁法激励源降噪性能对比研究[J]. 地球物理学进展, 2020, 36(1): 425–433.
- Yuan Z, Zhang Y M, Wang X H, et al. Comparative study on noise reduction performance of MTEM sources[J]. Progress in Geophysics, 2020, 36(1): 425–433.
- [94] 张文伟, 底青云, 耿启立, 等. 基于数字递归陷波的多通道瞬变电磁法周期噪声去除研究[J]. 物探与化探, 2020, 44(2): 278–289.
- Zhang W W, Di Q Y, Geng Q L, et al. The removal of MTEM periodic noise based on digital recursive notching[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 278–289.
- [95] Wu X, Xue G Q, Wang S, et al. The Suppression of Powerline Noise for the time-domain electromagnetic method with coded source based on independent component analysis[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2019, 24(4): 513–523.
- [96] 钟华森, 薛国强, 李貅, 等. 多道瞬变电磁法(MTEM)虚拟波场提取技术[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4424–44431.
- Zhong H S, Xue G Q, Li X, et al. Pseudo wavefield extraction in the multi-channel transient electromagnetic (MTEM) method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4424–44431.
- [97] 涂小磊, 底青云, 王亚璐. 多通道瞬变电磁有限差分正演模拟[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(5): 2225–2232.
- Tu X L, Di Q Y, Wang Y L. Finite-difference approach for 3D multi-channel transient electromagnetic modeling[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(5): 2225–2232.
- [98] 王若, 王妙月, 底青云, 等. 多通道瞬变电磁法 2D 有限元模拟[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 5048–5095.
- Wang R, Wang M Y, Di Q Y, et al. 2D FEM modeling on the multi-channel transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 5048–5095.
- [99] Di Q Y, Li H, Xue G Q, et al. Pseudo-2D Trans-dimensional Bayesian inversion of the full waveform TEM response from PRBS source[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 99: 1–9.
- [100] Hobbs B, Ziolkowski A, Wright D. Multi-Transient Electromagnetics(MTEM)-controlled source equipment for subsurface resistivity investigation[C]//18th IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, El Vendrell Spain, 2006: 17–23.
- [101] 张盛泉. 大功率电法发送机中全波形记录技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- Zhang S Q. Development of full-waveform recording technology in high-power electrical transmitter[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [102] 薛国强, 底青云, 王若, 等. 多通道瞬变电磁法资料处理方法技术综述[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 211–215.
- Xue G Q, Di Q Y, Wang R, et al. Overview on data processing methods of multi-channel transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 211–215.
- [103] 董庆运. MTEM 勘探系统中电源站的设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- Dong Q Y. Implementation of battery management unit in MTEM system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [104] 张乐. MTEM 勘探系统中交叉站的设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- Zhang L. The implementation of line manage unit in MTEM system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [105] 底青云, 雷达, 王中兴, 等. 多通道大功率电法勘探仪集成试验[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4399–4407.
- Di Q Y, Lei D, Wang Z X, et al. An integrated test of the multi-channel transient electromagnetic system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4399–4407.
- [106] 林凡强. 多通道瞬变电磁接收机研发及采集研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- Lin F Q. The development of a multi-channel transient electromagnetic receiver and its acquisition tests[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [107] 何瑞昊. MTEM 全波形记录仪上位机软件的实现[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- He R H. The development of MTEM voltage and current logger software[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [108] 王旭红, 张一鸣, 刘蔚. 多道瞬变电磁法发射机供电关键技术研究[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(3): 355–365.
- Wang X H, Zhang Y M, Liu W. Key technology study of power supply for multi-transient electromagnetic method transmitter[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(3): 355–365.
- [109] Nabighian N M. Electromagnetic methods in applied geophysics-theory (volume 1)[M]. Tulsa OK: Society of Exploration, 1988.
- [110] Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, et al. Development of grounded electrical source airborne EM (GREATEM)[J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 61–64.
- [111] Mogi T, Kusunoki K, Kaieda H, et al. Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey of mount Bandai, north-eastern Japan[J]. Exploration Geophysics, 2009, 40: 1–7.
- [112] Allah S A, Ito H, Mogi T, et al. Three-dimensional resistivity characterization of a coastal area: application of grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey data from Kujukuri beach, Japan[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 99(3): 1–11.
- [113] Ito H, Mogi T, Jomori A, et al. Further investigation of underground resistivity structures in coastal areas using grounded-source airborne electromagnetics[J]. Earth Planets & Space, 2011, 63(8): e9–e12.
- [114] Ito H, Kaieda H, Mogi T, et al. Grounded electrical-source air-

- borne transient electromagnetics (GREATEM) survey of Aso Volcano, Japan[J]. *Exploration Geophysics*, 2013,44:A-D.
- [115] 嵇艳鞠,王远,徐江,等.无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用[J]. *地球物理学报*, 2013,56(11):3640-3650.
- Ji Y J, Wang Y, Xu J, et al. Development and application of the grounded long wire source airborne electromagnetic exploration system based on unmanned airship[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013,56(11):3640-3650.
- [116] Wang Y, Ji Y J, Li S Y, et al. A wavelet-based baseline drift correction method for grounded electrical source airborne transient electromagnetic signals[J]. *Exploration Geophysics*, 2013,44:229-237.
- [117] 李肃义,林君,阳贵红,等.电性源时域地空电磁数据小波去噪方法研究[J]. *地球物理学报*, 2013,56(9):3145-3152.
- Li S Y, Lin J, Yang G H, et al. Ground-airborne electromagnetic signals de-noising using a combined wavelet transform algorithm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013,56(9):3145-3152.
- [118] 方涛,张建军,付成群,等.无人机地空瞬变电磁系统在冷山地下巷道探测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2015,30(5):2366-2372.
- Fang T, Zhang J J, Fu C Q, et al. Using ground-airborne transient electromagnetic system on unmanned aerial vehicle detecting Yeshan underground tunnels[J]. *Progress in Geophysics*, 2015,30(5):2366-2372.
- [119] 刘金鹏.电性源地空瞬变电磁法在采空区探测中的应用[D].西安:长安大学,2018.
- Liu J P. The application of ground-airborne transient electromagnetic method with electric source in the gobs detection[D]. Xi'an: Chang'an University,2018.
- [120] 吴启龙.半航空瞬变电磁视电阻率成像及在复杂地形区域隧道勘察中的应用[D].济南:山东大学,2019.
- Wu Q L. Semi-Airborne transient electromagnetic apparent resistivity imaging and its application in tunnel survey in complex terrain areas[D]. Jinan: Shandong University,2019.
- [121] 刘富波,李巨涛,刘丽华,等.无人机平台半航空瞬变电磁勘探系统及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2017,32(5):2222-2229.
- Liu F B, Li J T, Liu L H, et al. Development and application of a new semi-airborne transient electromagnetic system with UAV platform[J]. *Progress in Geophysics*,2017,32(5):2222-2229.
- [122] 吴寿勇.半航空电磁勘查系统数据采集关键技术研究[D].成都:成都理工大学,2014.
- Wu S Y. Research of data acquisition key technologies of half aviation electromagnetic exploration system[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2014.
- [123] 李琳琳.半航空瞬变电磁发射机关键技术研究[D].成都:成都理工大学,2015.
- Li L L. Study on the key technology of the GREATEM transmitter[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2015.
- [124] 王金梅.无人机半航空瞬变电磁信号接收技术研究[D].成都:成都理工大学,2018.
- Wang J M. The research on receiving technology of semi-airborne transient electromagnetic receiver[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2018.
- [125] 张莹莹,李貅.地空瞬变电磁法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2017,32(4):1735-1741.
- Zhang Y Y, Li X. Research progress on ground-airborne transient electromagnetic method[J]. *Progress in Geophysics*, 2017,32(4):1735-1741.
- [126] 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*, 2020,42(6):776-783.
- Wang Z R, Cheng J L, Song L B, et al. Application of Grounded-airborne time domain electromagnetic system in goaf exploration of coal mine in Shenmu area of Shaanxi, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2020,42(6):776-783.
- [127] 谢小国,魏良帅,王绪本,等.半航空瞬变电磁法在古河道结构探测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210209.1546.021.html>.
- Xie X G, Wei L S, Wang X B, et al. Application of semi-airborne TEM to structure exploration in the old channels[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210209.1546.021.html>.
- [128] 毛鑫鑫,毛立峰,杨聪,等.半航空瞬变电磁数据小波降噪方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20201223.1126.006.html>.
- Mao X X, Mao L F, Yang C, et al. Research on wavelet denoising method for semi-airborne transient electromagnetic data[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20201223.1126.006.html>.
- [129] 阳贵红.时域电性源地-空电磁探测数据预处理研究[D].长春:吉林大学,2012.
- Yang G H. Data preprocessing research on electrical-source of time domain ground-airborne electromagnetic[D]. Changchun: Jilin University,2012.
- [130] 张莹莹.水平电偶源地空系统瞬变电磁法多分量解释技术及全域视电阻率定义研究[D].西安:长安大学,2013.
- Zhang Y Y. Study on multi-component interpretation and full field apparent resistivity definition of semi-airborne transient electromagnetic method with electrical dipole on the surface[D]. Xi'an: Chang'an University,2013.
- [131] 张莹莹,李貅,姚伟华,等.多辐射场源地空瞬变电磁法多分量全域视电阻率定义[J]. *地球物理学报*, 2015,58(8):2745-2758.
- Zhang Y Y, Li X, Yao W H, et al. Multi-component full field apparent resistivity definition of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method with galvanic sources[J]. *Chinese Journal of Geophysics*,2015,58(8):2745-2758.
- [132] 吕仁斌.半航空瞬变电磁数据处理及快速成像方法研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- Lyu R B. Research on rapid simulation and data processing of semi-aerial transient electromagnetic[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2017.
- [133] 易国财,王仕兴,王绪本,等.基于全区视电阻率的半航空瞬变电磁法对低阻薄层的探测能力探讨[J]. *地球物理学进展*,

- 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.p.20210208.1323.080.html>.
- Yi G C, Wang S X, Wang X B, et al. Study on the detection capability of low resistivity thin layer by semi-airborne transient electromagnetic method based on all-time apparent resistivity [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.p.20210208.1323.080.html>.
- [134] 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 X, Zhang Y Y, Lu X S, 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.
- [135] 张莹莹. 地空瞬变电磁法逆合成孔径成像方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- Zhang Y Y. Study on inverse synthetic aperture imaging of ground-airborne transient electromagnetic method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [136] 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 Y Y, Li X, Li J, et al. Fast imaging technique of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(2): 869–876.
- [137] 王仕兴, 易国财, 王绪本, 等. 基于分段二分搜索算法的半航空瞬变电磁电导率深度快速成像方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20201223.1447.022.html>.
- Wang S X, Yi G C, Wang X B, et al. Research on the semi-airborne transient electromagnetic conductivity depth rapid imaging method based on segmented binary search algorithm [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20201223.1447.022.html>.
- [138] 嵇艳鞠, 徐江, 吴琼, 等. 基于神经网络电性源半航空视电阻率反演研究[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(5): 973–980.
- Ji Y J, Xu J, Wu Q, et al. Apparent resistivity inversion of electrical source semi-airborne electromagnetic data based on neutral network [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(5): 973–980.
- [139] 徐江. 基于人工神经网络电性源半航空视电阻率反演方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Xu J. Apparent resistivity inversion research of electrical-source of semi-airborne transient electromagnetic based on neutral network method [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [140] 赵涵, 景旭, 李貅, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁一维反演方法研究[J]. *物探与化探*, 2019, 43(1): 132–142.
- Zhao H, Jing X, Li X, et al. A study of 1D inversion of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(1): 132–142.
- [141] 张澎, 余小东, 许洋, 等. 半航空时间域电磁数据一维自适应正则化反演物[J]. *物探化探计算技术*, 2017, 39(1): 1–8.
- Zhang P, Yu X D, Xu Y, et al. An adaptive regularized inversion of 1D semi-airborne time-domain electromagnetic data [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 39(1): 1–8.
- [142] Abdallah S, Mogi T, Kim H J. Three-dimensional inversion of GRETEM data: application to GRETEM survey data from Kujukuri Beach, Japan [J]. *Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 99: 1–7.
- [143] 杨聪, 毛立峰, 毛鑫鑫, 等. 半航空瞬变电磁自适应正则化-阻尼最小二乘算法研究[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(1): 137–146.
- Yang C, Mao L F, Mao X X, et al. Study on the semi-aerospace transient electromagnetic adaptive regularization-damped least squares algorithm [J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(1): 137–146.
- [144] Verma S K, Mogi T, Allah S A. Response characteristics of GRETEM system considering a half-space model [C]// Giza, Egypt: 20th IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, 2010.
- [145] 宿传玺. 浅层岩溶半航空瞬变电磁响应规律与试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- Su C X. Responses and experimental studies of semi-airborne transient electromagnetic for shallow karst [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [146] 曹凤凤. 地空瞬变电磁起伏地形效应的特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- Cao F F. Study on characteristics of rugged terrain effect of ground-airborne transient electromagnetic [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [147] Ma Z J, Di Q Y, Li D, et al. The optimal survey area of the semi-airborne TEM method [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 172: 103884.
- [148] Li H, Qi Z P, Li X, et al. Numerical modeling analysis of multi-source semi-airborne TEM systems using a TFEM [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2020, 17(3): 399–410.
- [149] 张莹莹. 多辐射场源半航空瞬变电磁法多分量响应特征分析[J]. *物探与化探*, 2021, 45(1): 102–113.
- Zhang Y Y. An analysis of full-component response of multi-source semi-airborne TEM method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(1): 102–113.
- [150] 李貅, 胡伟明, 薛国强. 多辐射源地空瞬变电磁响应三维数值模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(2): 716–723.
- Li X, Hu W M, Xue G Q. 3D modeling of multi-radiation source semi-airborne transient electromagnetic response [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(2): 716–723.
- [151] 李术才, 李凯, 翟明华, 等. 矿井地面-井下电性源瞬变电磁探测响应规律分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(8): 2024–2032.
- Li S C, Li K, Zhai M H, et al. Analysis of grounded transient electromagnetic with surface-tunnel configuration in mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8): 2024–2032.
- [152] 武军杰. 地井与地空瞬变电磁联合解释方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- Wu J J. Study on joint interpretation of borehole and ground-airborne TEM data [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [153] 武军杰, 李貅, 智庆全, 等. 电性源地一井瞬变电磁全域视电阻率定义[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(4): 1595–1605.

Wu J J, Li X, Zhi Q Q, et al.Full field apparent resistivity definition of borehole TEM with electric source[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(4):1595-1605.

[154] 武军杰,李貅,智庆全,等.电性源地—井瞬变电磁异常场响应特征初步分析[J].物探与化探,2017,41(1):129-135.

Wu J J, Li X, Zhi Q Q, et al. A preliminary analysis of anomalous TEM response characteristics in borehole with electric transmitter[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017,41(1):129-135.

[155] 武军杰,李貅,智庆全,等.电性源地—井瞬变电磁三分量响应特征分析[J].地球物理学进展, 2017,32(3):1273-1278.

Wu J J, Li X, Zhi Q Q, et al.Analysis of three component TEM response characteristics of electric source dill hole TEM[J]. Progress in Geophysics, 2017,32(3):1273-1278.

[156] Chen W Y, Khan M Y,Xue G Q. Response of surface-to-borehole SOTEM method on 2D earth[J].Journal of Geophysics and Engineering, 2017,14(4):987-997.

[157] 陈卫营,韩思旭,薛国强.电性源地—井瞬变电磁法全分量响应特性与探测能力分析[J].地球物理学报, 2019,62(5):1969-1980.

Chen W Y,Han S X,Xue G Q. Analysis on the full-component response and detectability of electric source surface-to-borehole TEM method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019,62(5):1969-1980.

Review on the study of grounded-source transient electromagnetic method

ZHANG Ying-Ying

(College of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Grounded-source transient electromagnetic method (TEM) has many advantages such as deep exploration, flexible arrangement in rough terrain and high working efficiency. Recently it has got much attention and a series of new methods are available, ranging from surface to airborne and borehole method. In this paper, the authors review the research history of long-offset TEM (LOTEM), short-offset TEM (SOTEM), multi-channel TEM(MTEM), grounded-source semi-airborne TEM and grounded-source surface to borehole TEM, and summarize their research status in forward modeling, system design, inversion, imaging and field working. The results show that, as a well-developed grounded-source TEM, LOTEM has accumulated many research achievements. Although some progress has been made, the researches on other grounded-source TEMs are still in a primary stage and still need further improvement. Valuable research results in LOTEM, for example, noise suppression technology, high dimensional inversion and point interpretation, can be introduced to these newly developed electromagnetic methods, which can help provide solutions for high working efficiency and high resolution deep exploration.

Key words: grounded-source; transient electromagnetic method; deep exploration; offset; multi-channel; semi-airborne; surface to borehole

(本文编辑:沈效群)