

瞬变电磁法在浅层古墓探测中的应用

刘才华^{1*} 刘宽宏¹ 冉军林¹ 刘建利² 沈铭成¹

杨超² 乔汉青³ 邢慧婷⁴ 于涵⁴

1. 中陕核工业集团二一四大队有限公司, 陕西 710100;

2. 陕西地矿物化探队有限公司, 陕西 710043;

3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 065000;

4. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 130026

摘要:物探方法中的瞬变电磁法(TEM)和高密度电阻率法(HDRM)作为野外考古工作常用的无损探测方法之一,技术比较成熟。本文以陕西省西安市某考古现场作为研究对象,利用瞬变电磁法和高密度电阻率法联合探测古墓葬遗址,通过分析地下电性特征,初步确定了墓室的位置、宽度、顶部埋深。经挖掘证实瞬变电磁法在该区域更准确有效,且更满足无损探测要求。

关键词:瞬变电磁法;高密度电阻率法;视电阻率;考古;无损探测

一、引言

瞬变电磁法(transient electromagnetic method,简称TEM)和高密度电阻率法(high-density resistivity method,简称HDRM)是考古领域常用的无损探测方法,以地下岩矿石之间的电性差异为基础,根据视电阻率变化推断地下几何结构,在文物遗址勘探和抢救挖掘方案制定中发挥着重要作用,已有诸多成功案例^[1-6]。由于墓葬存在土体的挖掘扰动与回填致使墓室或墓坑与周围存在较大的物理性质差异^[7],因此具备采用瞬变电磁法和高密度电阻率法进行古墓遗址探测的前提条件。通过两种方法在此两条测线开展联合探测,根据处理结果对墓室的顶部埋深、位置、大致空间走向和是否存在回填物进行评估,为抢救性挖掘施工提供基础依据。

二、方法原理

(一)瞬变电磁法

瞬变电磁法(TEM)也称时间域电磁法或过渡过程法,是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域人工源电磁探测方法,利用不接地回线(磁性源)或接地回线(电性源)向地下发送一次脉冲磁场(通常称为一次场),在发射间歇期,使用接收线圈或高灵敏度磁强度计来观测地下地质体中激励起的感应涡流产生随时间变化的感应电磁场(通常称为二次场)。由于二次场包含地下地质体丰富的地电信息,通过对这些响应信息进行提取和分析,获得地下介质的几何结构和物理性质参数从而达到探测地下地质体的目的^[8-24]。

该方法于20世纪40年代由苏联科学家A.H.TNXOHOB的理论为基础应用于油气田地质构造调查,随后至20世纪80年代仪器装备、数据处理和成果解释系统得到了完善的发展形成了技术体系,随后适用于钻井、海洋和航空领域的方法技术,《脉冲感应电磁法勘探》和《金属物探过渡过程法应用指南》等标志性专著相继问世并快速应用普及。西方国家于1951年由J.R.Wait率先提出瞬变电磁法找导电矿体的应用理念,随后至20世纪90年代美国、加拿大、澳大利亚等西方国家领先完成了地面和航空瞬变电磁探测装备系统研发和普及应用。我国自20世纪70年代开始理论研究,20世纪80年代末研发出WDC、SD等系列地面瞬变电磁探测装备系统,以原长春地质学院朴化荣、中南大学牛之琰、原西安地质学院方文藻、中国地质科学院物化探研究所蒋邦远、长安大学李貅等为代表的学者针对此技术结合研究成果已先后出版多部专著。

***通讯作者:**刘才华,1990年11月,男,汉族,陕西商洛人,现任中陕核工业集团二一四大队有限公司地球物理勘查与遥感工程师,研发工程师、项目经理,硕士。研究方向:工程物探、航空物探。

基金项目:陕西省科技厅重点研发项目“基于小型无人直升机平台的低空大比例尺航磁测量系统关键技术研究”(2018GY-05)、中陕核工业集团二一四大队有限公司“小型无人机探测浅地表未爆弹药(UXO)应用研究”(201912)和“小型无人机磁性源瞬变电磁探测系统设计及应用”项目(201913)联合资助。

对于中心回线装置其视电阻值计算可根据公式^[25]：

$$\rho(t) = \frac{\mu_0}{4\pi t} \times \left(\frac{2\mu_0 M q}{5t dM(t)/dt} \right)^{2/3} \quad (1)$$

$$M = IL^2 \quad (2)$$

其中， $\rho(t)$ 为延时 t 时刻视电阻率，单位为欧[姆]米； μ_0 为真空磁导率，值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ； M 为发射磁矩，单位为安[培]平方米； q 为接收线圈等效面积，单位为平方米； t 为衰减时间，单位为毫秒； $dM(t)/dt$ 为磁场感应强度 B 关于时间的导数； I 为发射电流，单位为安[培]； L 为发射回线边长，单位为米。

该方法近年来在考古、滑坡治理、管道工程探测、堤坝渗漏检测、水资源勘查、有色金属矿产勘查、铁路隧道勘查、地基勘查、煤田采空区勘查、土壤污染调查等方面应用广泛且成效显著^[26]。

(二) 高密度电阻率法

电阻率法(DRM)是以岩、矿石导电性的差异为基础，通过观测和研究人工施加稳定电流场的作用下地下介质中传导电流分布规律进行找矿和解决地质问题的一种勘探方法^[27-33]。高密度电阻率法(HDRM)在20世纪80年代初由日本引进至原长春地质学院(今吉林大学)等科研院所开展仪器装备和数据处理软件研发攻关获得了成功，很快在全国大面积推广应用，取得了非常多的优质成果。其与常规电阻率法原理相同，差别在于高密度电阻率法将多个电极一次性布设在观测剖面的数据采集点上，将多通道电极转换器、数字电路微处理器、多芯电缆高效集成为分布式多通道数字智能测量系统，其快速自动跑极和数据采集提高了传统人工跑极和冗杂的仪器操作的野外工作效率，此外与传统的电阻率法相比，数据采集信息更丰富，经济成本和时间成本更低，便于数据处理和成果解释，已发展成为一种“多、快、好、省”的勘探方法，在含水破碎带调查、地基勘查、地裂缝探测、煤田采空区探测、水库堤坝渗漏检测、岩溶塌陷探测、有色金属矿山勘查、地质滑坡治理与风险评估、尾矿渣堤坝重金属污染调查、垃圾填埋场污水渗漏和土壤污染调查等方面发挥着重要作用。其视电阻率计算原理如下：

视电阻率的求取通过给AB极供电 I ，利用MN测量电位差而获得，在实际工作中，通过下述公式(2)求得测点 x 处的电阻率值。

$$\rho = \frac{\nabla V}{I} \cdot K \quad (2)$$

其中 K 为装置系数，满足关系式：

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (3)$$

尽管该方法计算获得的电阻率不是岩石的真实电阻率，但观测的却是地下电性介质中存在不均匀体和地形起伏效应的一种综合地电特征反应。因此根据其观测的视电阻率变化规律来达到有色金属勘探、考古、环境灾害评估和解决其他工程地质问题的目的。

三、野外工作方法

本文在考古人员圈定的可疑区域布设G01和G02共2条测线，线距1 m。瞬变电磁法采用自主设计的5匝1 m x 1 m发射线圈的小型中心回线瞬变电磁探测装置，测量点距1 m，发射电流0.5 A，接收线圈等效面积3000 m²，增益1，叠加次数64，仪器采用骄鹏科技(北京)有限公司生产的无人机载和地面两用型EMT1200中功率发射机和EM3W多功能采集站；高密度电阻率法电极间距0.5 m，输出电压300 v，平均接地电阻800 Ω，仪器采用重庆顶峰地质勘探仪器有限公司生产的EDJD-1A型多功能直流电法仪。

四、墓葬区概况及地球物理特性

(一) 墓葬区概况

该墓葬区位于西安市某基础建设用地内考古施工现场，地表为黄土黏土层，附近露头位置多见墓葬夯土遗迹，附近考古资料显示该区域近地表埋深1 m内存在大量无棺椁直接掩埋在泥土内的仰韶文化时期古墓葬群，其下部可能存在于其他历史时期的墓室。经考古人员通过浇纯净水观察地表渗透差异和干燥快慢差异圈定可疑区之后，本研究团队应邀在可疑区开展地球物理勘探方法来探测可疑区地下几何结构，对其是否存在墓室、墓室位置、顶部埋深进行评估。

(二) 探测结果分析

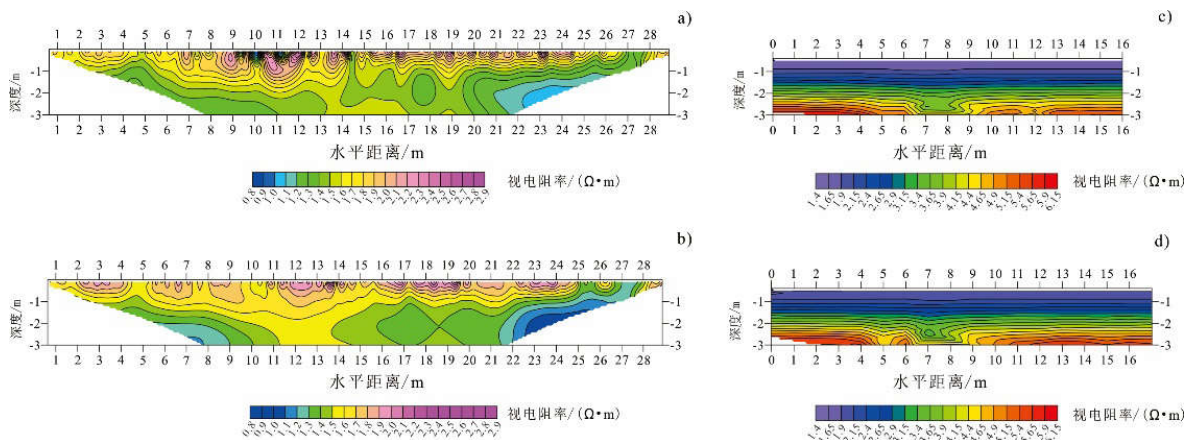


图1 高密度电阻率法和瞬变电磁法反演结果

- (a.G02测线高密度电阻率法; b.G01测线高密度电阻率法;
- c.G02测线瞬变电磁法; d.G01测线瞬变电磁法)

Fig2. The inversion results of HDRM and TEM

- (a. HDRM result of G02 profile; b. HDRM result of G01 profile;
- c. TEM result of G02 profile; d. TEM result of G01 profile)

实测数据反演结果如图1所示，得到G01、G02测线下方电阻率和视电阻率断面图，根据断面图进行推断解译。两种方法实际采集数据起点存在差异，瞬变电磁法的起点0m对应高密度电阻率法的4 m处。通过对比图中a)和c)、b)和d)发现两条测线上高密度电阻率法横向距离10.5 m-14 m处与瞬变电磁法横向距离6.5 m-10 m处在深度约2 m以下均存在显著的电性异常。高密度电阻率法（图a)、图b)在该区域显示的是高阻异常，而瞬变电磁法反演结果（图c)和图d)显示的是低阻异常，这与两种方法原理差异有关，从横向上能够明显看到地层的电性特征在横向上不连续，异常区域和周围存在明显的电阻率差异。此外，瞬变电磁法反演结果（图c)和图d)显示该异常区域为低阻的显著特征可排除测线下方墓室内存在空洞的可能性，表明该墓室内可能与周围的土层存在电性差异较大的回填物，埋深2 m至地表部分横向连续性好可能存在密实齐整的封土层。

综上，推测G01测线与G02测线下方可能存在一个走向与两条测线近似垂直的墓室，其顶部埋深约2 m，宽3 m-4 m，内有回填物，顶部至地表存在密实的封土层。



图2 测线位置与挖掘验证

如图2所示，经挖掘测量证实墓室顶部埋深为2 m，墓室宽度为3.5 m，内有较地表更细腻的黏土回填物，顶部封土比较密实均匀，走向近似垂直于G01和G02两条测线走向。

高密度电法的探测结果仅能够体现出墓室顶部埋深，电性异常宽度受数据质量影响一致性较差而无法准确估算墓室宽度和墓室大致走向，墓室上部封土状态和有无回填物无法评估。

瞬变电磁法在此可疑区域探测效果优势更明显，能够很好地反映出封土层状态、墓室顶部埋深与宽度、回填物的存在以及墓室的大致走向均与实际情况吻合。

五、结论

本文通过使用瞬变电磁法和高密度电阻率法对该墓葬区进行探测,初步确定了墓室顶部埋深、位置、宽度和空间走向,为进一步考古探测和发掘提供了重要依据。通过本次考古探测,可得出以下结论:

(一)通过两种方法探测结果分析,两种方法都能够发现墓室引起的电性异常,能够准确估计出墓室顶部埋深。但瞬变电磁法在此区域优势明显,成效显著,还能够进一步评估墓室宽度、顶部封土状态和有无回填物等更详实的信息;

(二)相比高密度电阻率法电极需要与地表土壤耦合,存在破坏表层遗迹的风险,磁性源瞬变电磁法不会对墓葬造成任何破坏,是最适合此区域探测古墓葬遗迹的有效方法之一;

(三)挖掘证实,瞬变电磁法探测成果与实际情况吻合。

参考文献:

- [1]戴田宇,谢尚平.高密度电阻率法在墓葬考古的应用[J].地球物理学进展,2015,30(06):2885-2891.
- [2]武军杰,吕国印,赵敬洗.瞬变电磁技术探测古墓陪葬金属器皿的应用效果[J].物探化探计算技术,2007(S1):47-50.
- [3]于维刚,廖烟开,何发亮.高密度电阻率法在沉银考古中的应用[J].工程地球物理学报,2009,6(S1):91-94.
- [4]宋洪柱,李守春,张素梅.高密度电阻率法在古墓探测中的应用[J].工程地球物理学报,2007,04(02):123-126.
- [5]杨利容.高密度电阻率法在考古探测中的应用研究[D].成都:成都理工大学,2005.
- [6]闫永利,底青云,高立兵,陈刚.高密度电阻率法在考古勘探中的应用[J].物探与化探,1998(06):452-457.
- [7]何培,吴德宽,周鹏,刘云彪.高密度电阻率法在古墓探测上的应用[J].资源环境与工程,2015,29(06):1029-1032.
- [8]Brian R.Spies.Depth of investigation in electromagnetic sounding methods[J].Geophysics,1989,54(7):872-888.
- [9]牛之琏.时间域电磁法原理[M].长沙:中南大学出版社,2007.
- [10]Spies B R.Depth of investigation in electromagnetic sounding methods[J].Geophysics,1989,54(7):872-888.
- [11]李金铭.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [12]李建慧,曹晓峰,凌成鹏,姜志海,刘亚军,韩波,胡祥云.瞬变电磁法勘探的地电模型及其成功案例分析[J].地球物理学进展,2016,31(01):232-250.
- [13]马江峰.瞬变电磁法小回线装置浅层探测技术研究[D].重庆大学,2012.
- [14]蒋博.瞬变电磁法在地下空穴探测中的试验研究及应用[D].郑州大学,2013.
- [15]刘俊.矿井瞬变电磁法视电阻率定义与关断效应理论研究[D].东华理工大学,2013.
- [16]杨镜明,魏周政,高晓伟.高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用[J].地球物理学进展,2014,29(01):362-369.
- [17]李新均,王阳,唐沐恩.瞬变电磁法及其在工程地球物理勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2014,11(03):355-360.
- [18]Nabighian M N,et al.Electromagnetic methods in applied geophysics-Theory Volume I[J].Society of Exploration Geophysicists,1988,313-503.
- [19]McNeill J D.Application of transient electromagnetic techniques[J].Geonics Limited Technical Note TN-7,1980.
- [20]Buselli G.The effect of near-surface superparamagnetic material on electromagnetic measurements[J].Geophysics,1982,47(9):1315-1324.
- [21]Levy G M.Correction of measured transient electromagnetic responses for finite transmitter turn-off duration[J].Geonics Limited note TN-16,1984:1-6.
- [22]Morrison H F,et al.Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half-space[J].Geophysical prospecting,1969,17:82-101.
- [23]Knutur Arnason.Central loop transient electromagnetic sounding over a horizontally layered earth[J].Orkustofnun,1980.
- [24]Meju Maxwell A.A simple method of transient electromagnetic data analysis[J].Geophysics,1998,63:405-410.
- [25]DZ/T 0187-2016,地面磁性源瞬变电磁法技术规程[S].
- [26]刘国兴.电法勘探原理与方法[M].北京:地质出版社,2005.

- [27]蒋小明.高密度电阻率法用于垃圾填埋体液气分布探测的试验研究[D].浙江大学,2016.
- [28]王冬青.高密度电阻率成像法在断裂带探测中的应用研究[D].南京大学,2013.
- [29]王宇玺.高密度电阻率法的主要装置特点与应用[D].成都理工大学,2010.
- [30]王斌战,郭光宇,邱波,唐宝山,马小丰.高密度电阻率法在城市中进行精细化探测的效果分析[J].资源环境与工程,2019,33(S1):137-140.
- [31]Zhou,You Q.A sensitivity analysis of DC resistivity prospecting on finite,homogeneous blocks and columns[J].Geophysics,2007,72(6):F237-F247.
- [32]Shima,Hiromasa.2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data[J].Geophysics,1992,57(10):1270-1281.
- [33]Sasaki Y.3-D resistivity inversion using the finite-element method[J].SEG Technical Program Expanded Abstracts,1999,11(1).