

# 电法勘探方法在水文和工程地质中的应用

方前发<sup>1</sup>, 张宏兵<sup>2</sup>

(1.江苏路成工程有限公司, 江苏 南京 210016;

2.河海大学土木工程学院地质工程系, 江苏 南京 210098)

【摘要】文章简要叙述了我国目前发展较快的几种主要电法勘探方法的发展概况及其在工程和水文地质中的应用。

【关键词】电法勘探; 高密度电法; 激发极化法; CSAMT; 瞬变电磁法; 地质雷达

【中图分类号】P631.3+22

【文献标识码】A

【文章编号】1008-1151(2006)04-0029-03

## 一、引言

电法勘探方法可以追溯到19世纪初P.Fox在硫化金属矿上发现自然电场现象, 至今已有100多年的历史。我国电法勘探始于20世纪30年代, 由当时北平研究院物理研究所的顾功叙先生所开创。经过70余年的发展, 我国的电法勘探无论在基础理论、方法技术和应用效果等方面都取得了巨大的进展, 使电法成为应用地球物理学中方法种类最多、应用面最广、适应性最强的一门分支学科。同时, 经过广大地球物理工作者不懈努力, 在深部构造、矿产资源、水文及工程地质、考古、环保、地质灾害、反恐等领域, 电法已经和正在发挥着重要作用。限于篇幅, 本文仅对其中几种主要方法, 如高密度电法、激发极化法、CSAMT、瞬变电磁法和地质雷达等作简要介绍, 并就这些方法在水文和工程地质中的应用进行阐述, 供广大水文和工程地质、工程物探人员参考。

## 二、高密度电法

高密度电法实际上是集中了电剖面法和电测深法, 其原理与普通电阻率法相同, 所不同的是在观测中设置了高密度的观测点, 是一种阵列勘探方法。关于阵列电法勘探的思想源于20世纪70年代末期, 英国人设计的电测深偏置系统就是高密度电法的最初模式, 20世纪80年代中期日本借助电极转换板实现了野外高密度电法的数据采集。我国是从20世纪末期开始研究高密度电法及其应用技术, 从理论方法和实际应用的角度进行了探讨并完善, 现有中国地质大学、原长春地质学院、重庆的有关仪器厂家研制成了几种类型的仪器。

高密度电法野外测量时将全部电极(几十至上百根)置于剖面上, 利用程控电极转换开关和微机工程电测仪便可实现剖面中不同电极距、不同电极排列方式的数据快速自动采集。与常规电阻率法相比, 高密度电法具有以下优点: 1. 电极布置一次性完成, 不仅减少了因电极设置引起的故障和干扰, 并且提高了效率; 2. 能够选用多种电极排列方式进行测量, 可以获得丰富的有关地电断面的信息; 3. 野外数据采集实现了自动化或半自动化, 提高了数据采集速度, 避免了手工误操作。此外, 随着地球物理反演方法的发展, 高密度电法资料的电阻率成像技术也从一维和二维发展到三维, 极大地提高了地电资料的解释精度。

高密度电法应用领域比较广, 尤其在水文和工程地质勘

查方面, 主要有: 底青云(2002)、吴长盛(2001)、郭铁柱(2001)、董浩斌(2001)等使用高密度电法在水库大坝的坝体稳定性评价、坝基渗漏勘察、堤坝裂缝检测上见到了好的应用效果; 严文根(2002)将高密度电法用在电厂大坝的基岩面起伏及其强度特性评价上; 王文州(2001)、王玉清(2001)、侯烈忠(1997)等将高密度电法用在高速公路高架桥、高层建筑选址、机场跑道的地基勘探中; 郭秀军(2001)采用高密度电法探测防空洞、涵洞、溶洞、地下局部不明障碍物等物理性质有别于周围介质的地下有形体; 杨湘生(2001)在湘西北岩溶石山区找水中应用高密度电法确定最佳井位方面取得了好的效果; 解爱华(2003)采用高密度电法与瞬变电磁面波法完成了国际机场扩建工程中的岩土工程勘察问题, 查明古河道、墓穴和洞穴的分布及埋深, 利用土层的剪切波速划分场地类别。此外, 何门贵(2002)、刘晓东(2001)、王士鹏(2000)在寻找地下水、管线探测、查明采空区、调查岩溶及地质灾害等工程物探中使用了高密度电法。

## 三、激发极化法

在电法勘探中, 当电极排列向大地供入或切断电流的瞬间, 在测量电极之间总能观测到随时间缓慢变化的附加电场, 称为激发极化效应。激发极化法(或激电法)就是以岩、矿石激发极化效应的差异为基础来解决地质问题的一类勘探方法。激电法是20世纪50年代末在我国开始研究和推广的, 早期是以直流(时间域)激电法为主, 20世纪70年代初开始研究交流(频率域)激电法——主要是变频法, 20世纪80年代初又开始对频谱激电法进行研究, 也就是研究复视电阻率随频率的变化——即复视电阻率的频谱。由于该方法测量的是二次场, 具有不受地形起伏和围岩电性不均匀的影响、可测量的参数多等优点。

在实际地质应用方面, 初期的激电法主要用于勘查硫化金属矿床, 后来发展到诸多领域, 如氧化矿床、非金属矿床、工程地质问题等。近年来, 激电法找水效果十分显著, 被誉为“找水新法”。早在上世纪60年代, 国外学者Victor Vacquier(1957)等提出了用激电二次场衰减速度找水的思想。在该思想的启迪下, 我国也开展了有关研究, 并将激电场的衰减速度具体化为半衰时、衰减度、激化比等特征参数, 这些参数不仅能较准确地找到各种类型的地下水资源, 而且可以在同一水

【收稿日期】2006-01-20

【作者简介】方前发(1966-), 男, 安徽安庆人, 江苏路成工程有限公司工程师, 研究方向: 工程物探、公路工程。

文地质单元内预测涌水量大小,把激电参数与地层的含水性联系起来。目前,我国已有北京地质仪器厂、重庆地质仪器厂和山西平尧地质仪器厂生产出适合寻找地下水的仪器。

在找水方面的具体应用有:杨进(1997)用回归系数的显著性检验及回归预测方法预报了地下涌水量;姜义生(2000)使用双频激电法不仅解决了居民饮用的地下水源,而且解决了干扰地下施工的漏水带;龙凡(2002)使用激电法中视激化率和半衰时参数在砂页岩地区、灰岩地区、花岗岩地区和玄武岩地区找到了地下水资源,并且用回归直线法预测了单井涌水量;王丰军(2001)使用激电法在贫水山区进行找水;王俊业(2000)用激电参数和电阻率参数对地层的富水性进行评价,取得了好的结果;李金铭(1993)、金学名(1993)使用激电法的偏离度参数寻找地下水资源;李茂塔(2001)、李金铭(1990、1994)对激电法找水的基础理论进行了研究;周立功(2001)使用激电法在重力土坝稳定性检测中查明最大下沉段坝下介质赋水情况。

值得一提的是,利用激电法找水或确定地层的含水性,最好与高密度电阻率法相结合,这样可以降低地球物理解释的多解性,提高找水的成功率。高密度电阻率法在确定高阻或低阻地质体具有优越性,但低阻地质体并不代表富含地下水,可能是由于泥岩引起地层的电阻率下降。这时,可以通过使用激电法来区分含水地层和泥岩,因为激电二次场与岩石的孔隙有关,在纯粹泥岩中极化率比较小,在含水砂砾岩中极化率比较大,此外二次场的衰减速度也与孔隙的大小、形状和宽窄有关,这就是激电法找水的机理所在。

#### 四、可控源音频大地电磁法(CSAMT)

可控源音频大地电磁法是在大地电磁法(MT)和音频大地电磁法(AMT)基础上发展起来的一种可控源频率测深方法。CSAMT是1975年由Myron Goldstein提出,它基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组建立了视电阻率和电场与磁场比值之间的关系,并且根据电磁波的趋肤效应理论得出电磁波的传播深度(或探测深度)与频率之间的关系,这样可以通过改变发射频率来改变探测深度,达到频率测深的目的。目前,已商业化的CSAMT仪器是由加拿大凤凰公司与美国宗基公司研制的。

CSAMT采用可控制人工场源,测量由电偶极源传送到地下的电磁场分量,两个电极电源的距离为1~2km,测量是在距离场源5~10km以外的范围进行,此时场源可以近似为一个平面波。由于该方法的探测深度较大(通常可达2km),并且兼有剖面 and 测深双重性质,因此具有诸多优点:第一,使用可控制的人工场源,测量参数为电场与磁场之比——卡尼亚电阻率,增强了抗干扰能力,并减少地形的影响。第二,利用改变频率而非改变几何尺寸进行不同深度的电测深,提高了工作效率,一次发射可同时完成7个点的电磁测深。第三,探测深度范围大,一般可达1~2km。第四,横向分辨率高,可以灵敏地发现断层。第五,高阻屏蔽作用小,可以穿透高阻层。与MT和AMT法相同,CSAMT法也受静态效应和近场效应的影响,可以通过多种静态校正方法来消除“静态效应”的影响。

CSAMT法一出现就展示了比较好的应用前景,尤其是作为普通电阻率法和激发极化法的补充,可以解决深层的地质问题,如在寻找隐伏金属矿、油气构造勘察、推覆体或火山岩

下找煤、地热勘查和水文工程地质勘查等方面,均取得了良好的地质效果。在地下水资源方面,CSAMT法适合寻找深部的基岩裂隙水;石昆法(1999)使用CSAMT法在灰岩中寻找断层,并打出了地下水;郭建华(1995)用CSAMT法在干旱地区寻找地下水资源及探测隐伏构造;蒋达龙(1994)用CSAMT法发现地下热水资源;底青云(2001)结合CSAMT法和高密度电法探测深层和浅层的地下水资源;底青云(2002)使用CSAMT法查找矿山顶板涌水隐患;严盛新(2003)用CSAMT法在沙漠腹地寻找地下水资源;吴璐苹(1996)用CSAMT法在山区、半山区等地质条件复杂地区进行找水。此外,CSAMT法在工程勘探中的坝体渗漏调查、国家南水北调工程西线的地质勘查、小浪底水利工程等项目,都可以发挥良好的作用,如刘录刚(2004)用CSAMT法在雁门关隧道中进行超前地质预报。

#### 五、瞬变电磁法(TEM)

瞬变电磁法是利用不接地或接地线源向地下发送一次场,在一次场的间歇期间,测量由地质体产生的感应电磁场随时间的变化。根据二次场的衰减曲线特征,就可以判断地下不同深度地质体的电性特征及规模大小等。由于该方法是观测纯二次场,消除了由一次场所产生的装置耦合噪音,具有体积效应小、横向分辨率高、探测深度深、对低阻反映灵敏、与探测地质体有最佳偶合、受旁侧地质体影响小等优点。

瞬变电磁法最初是由前苏联学者在20世纪30年代提出用于解决地质构造问题,20世纪50年代用于找矿,20世纪60年代以后从方法原理到一、二维反演都得到了广泛应用和发展。在我国,该方法研究始于20世纪70年代,20世纪90年代后逐步向工程检测、环境、灾害等应用领域发展。从20世纪80年代开始,原长春地质学院、原地矿部物化探研究所、中南大学等研究机构分别在方法理论、仪器及野外试验、一维及二维正反演方法等方面做了大量工作,并且自行研制了几种功率小、探测深度浅的瞬变电磁法仪器,在生产实际中见到了好的应用效果。然而,大功率、探测深的瞬变电磁法仪器国内尚在研制中,目前主要依赖进口。

瞬变电磁法除了广泛应用于金属矿产、石油、煤田、地热以及冻土带和海洋地质等地质勘查工作之外,在水文和工程地质勘查中也取得了非常好的应用效果,如杨文钦(2002)、张保祥(2002)、郁万彩(2001)、蒋文(2004)等使用瞬变电磁法查明断层及顶板砂岩的导水性及富水性、勘查地下水资源及界定地下水位、评价断层空间位置及含水性并寻找地下水构造;刘继东(1999)、李貅(2000)、袁江华(2002)、阎述(1999)等使用瞬变电磁法探测煤柱及圈定老窑采空区、勘察煤田矿井涌水通道、探测小浪底水库库区煤矿采空区和探测地下洞体的存在;刘羽(1995)用瞬变电磁法评价塌陷成因及危害性、评价防冲帷幕稳定性、探测高层建筑地基和评价大桥桥址稳定性;郭玉松(1998)使用瞬变电磁法探测堤防工程隐患、勘查水库坝址;薛国强(2003)使用瞬变电磁法探测公路隧道工程中的不良地质构造;李文尧(2000)用瞬变电磁法在抗洪抢险中寻找漏水断裂或溶洞;敬荣中(2003)使用瞬变电磁法结合四极测深探测地下管网分布。

#### 六、地质雷达(GPR)

地质雷达与探空雷达技术相似,是利用宽带高频时域电磁脉冲波的反射探测目标体,只是频率相对较低,用于解决地

质问题,又称“探地雷达”。将雷达技术用于探地,早在1910年就已经提出,在随后的60年中该方法多限于对波吸收很弱的盐、冰等介质中。直到20世纪70年代以后,地质雷达才得到迅速推广应用。我国地质雷达仪器的研制始于20世纪70年代初期,由多家高校和研究机构进行仪器研制和野外试验工作。但是由于种种原因,研究成果至今未能用于实际。目前,国内使用的地质雷达仪器都是引进的,能够提供商用地质雷达技术的有美国、加拿大、瑞典、俄罗斯等国家。

地质雷达是由地面的发射天线将电磁波送入地下,经地下目标体反射被地面接收天线所接收,通过分析接收到电磁波的时频、振幅特性,可以评价地质体的展布形态和性质。由于雷达穿透深度与发射的电磁波频率有关,使其穿透深度有限,但分辨率很高,可达0.05米以下。早期,地质雷达只能探测几米内的目标体,应用范围比较狭窄。此外,地质雷达与地震反射法原理相似,一些地震资料处理解释方法可以借用。目前,地质雷达探测深度最大可达100米,使之成为水文和工程地质勘察中最有效的地球物理方法。

地质雷达因具有分辨率高,成果解释可靠的特点,在浅层地质勘探中,有着非常广泛的应用。如探测覆盖层厚度、基岩面起伏,查找潜伏断层、破碎带、古溶洞、管道沟、涵洞以及地下掩埋体,进行环境地质、考古调查等。在水文和工程地质中,地质雷达应用也是非常广泛,主要有:杨天春(2001)、钱荣毅(2003)、邓居智(1999)使用地质雷达进行公路、高速公路、机场道路等质量的无损检测;赵永贵(2003)、薛建(2000)、史付生(2003)使用地质雷达进行隧道地质超前预报、检测隧道衬砌质量;王俊茹(2003)、李永革(2001)、姬继法(2002)使用地质雷达探测建筑物地下边坡孤石、机场地下古墓等不良地质体分布,消除其对邻近或上部构筑物构成的潜在威胁;姜卫方(2000)、李大心(2000)、朱红军(2002)使用地质雷达调查滑坡体及滑坡面、评估崩塌、滑坡及地面沉降等地质灾害;高建东(1999)、曾校丰(2000)、王百荣(2001)、张志清(2000)使用地质雷达探测水库地下防渗墙、探测水库坝体结构层及结构层材料老化变质、检测灌浆质量及混凝土厚度、调查覆盖层厚度及衬砌混凝土质量;杨向东(2001)使用地质雷达探测地下管道;李张明(2000)使用地质雷达在三峡工程施工中探明花岗岩不均匀风化分布范围、圈定较大断层及风化夹层的延伸范围和产状、检测高速公路质量;王孝起(2001)使用地质雷达调查南水北调中线天津干渠基岩岩性及基岩面高程;张兴磊(2001)使用地质雷达查明了煤柱破坏情况和采空区分布范

围,指导注浆施工;张欣海(1999)使用地质雷达查明了海上围堤的断面特征以及着底情况;陈爱云(2003)使用地质雷达在石质文物保护工程中查明岩体中含水裂隙和溶洞的分布规律及对文物的影响。

## 七、结论

通过对几种主要电法勘探方法的发展、原理及实际应用进行综述,可以看出,电法勘探方法在水文和工程地质勘探领域有着广泛的应用,归结起来有以下几方面:

1.高密度电法由于其高效率、深探测和精确的地电剖面成像,成为水文和工程地质勘察中最有效的方法。考虑到该方法的分辨率不高,在具体的应用中可以结合其他电法勘探、电测井等方法,达到精细地质解释的目的。

2.地质雷达主要用于各类工程地质勘探,是工程地质勘探首选的电法勘探方法。同时,该方法可以借用地震勘探中已有的资料处理和解释技术,使其迅速发展,可以在更多的领域发挥作用。

3.在水文地质勘探中,激发极化法和可控源音频大地电磁法是首选的电法勘探方法,如果将激发极化法和高密度电法结合起来寻找地下水资源,效果将会更好。

4.瞬变电磁法在水文地质和工程地质勘探中都有着广泛的应用,尤其是大功率瞬变电磁仪不仅可以在深部地质勘探中发挥作用,还具有较高的分辨能力。如果将该方法与高密度电法结合使用,有望解决深部精细地质勘察问题。

## 【参考文献】

- [1]李金铭.电法勘探方法发展概况[J].物探与化探,1996,20(4).
- [2]张赛珍,王庆乙,罗廷钟.中国电法勘探发展概况[J].地球物理学报,1994,37(增刊1).
- [3]董浩斌,王传雷.高密度电法的发展与应用[J].地学前缘(中国地质大学),2003,10(1).
- [4]李金铭.激发极化法找水基础理论研究[M].北京:地质出版社,1994.
- [5]底青云,石昆法,王妙月,等.CSAMT法和高密度电法探测地下水资源[J].地球物理学进展,2001,16(3).
- [6]刘羽.瞬变电磁法在不同类型工程中的应用[J].桂林工学院学报,1995,15(4).
- [7]曾校丰,许维进,钱荣毅,等.水库坝体结构层的地质雷达高分辨率探测[J].地球物理学进展,2000,15(4).

## 《沿海企业与科技》杂志征稿启事

《沿海企业与科技》杂志是由广西社会科学院主管、广西社会科学院企业文化研究中心主办的省级综合性学术刊物,主要刊发科技、经济、企业经营管理方面的论文,系中国期刊网、龙源国际期刊网、中国学术期刊(光盘版)、万方数据系统等全文收录期刊。由钱伟长任名誉顾问,于光远、李京文、袁隆平等包括六七位院士在内的专家领导担任顾问。杂志创办于1996年,大16开本,月刊,国内外公开发行,国际标准刊号:ISSN1007-7723,国内统一刊号:CN45-1227/N,邮发代号:48-86,定价10元。欢迎广大新老作者踊跃投稿、征订!

地址:南宁市新竹路5号广西社会科学院613室 邮编:530022

网址:<http://www.qklw.com> 电话:0771-5871468 信箱:yhqy168@126.com