

文章编号: 1001—1749(2006)04—0337—05

可控源音频大地电磁测深法应用实例

黄力军, 陆桂福, 刘瑞德

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000)

摘要: 目前对电法的探测深度要求越来越高, 常规电法有时难以满足实际工作需要。与常规电法相比, 可控源音频大地电磁测深法具有探测深度大、设备相对轻便和横向分辨率高等特点, 已广泛应用于地热资源、水文地质、有色金属矿产和工程地质勘查工作之中, 并取得了令人十分满意的实际应用效果。这里介绍的是一些具有代表性可控源音频大地电磁测深应用实例和应用成果, 这些实例基本涵盖了目前电法的主要应用范畴, 常规电法难以胜任的地质调查工作。实例中包括断陷盆地型地热资源和深部基岩裂隙水调查, 危机矿山深部找矿和复杂地形条件下铁路隧道工程勘查。

关键词: 电磁测深; 地热资源; 水文地质; 有色金属矿产; 工程地质; 调查

中图分类号: P 631.3+25 **文献标识码:** A

0 前言

可控源音频大地电磁测深是在音频大地电磁测深(AMT)基础上, 发展起来的一种人工源频率测深方法。上世纪五十年代, 在卡尼亚(L Cagniard)论文^[1]的基础上, 发展形成了基于观测天然场大地电场和磁场正交分量, 计算视电阻率的大地电磁测深方法。在音频($n \times 10^{-1}$ Hz ~ $n \times 10^3$ Hz)范围内, 大地电磁场相对较弱, 人文干扰较大。为了克服上述困难, 七十年代初, D W Strangway 教授和他的学生 M A Goldstein^[2,3]提出沿用 AMT 的测量方式, 观测人工供电产生的音频电磁场。由于所观测的电磁场频率、场强和方向均由人工控制, 其观测的方式与 AMT 相同, 所以称其为可控源音频大地电磁测深(简称 CSAMT 法)。CSAMT 法可以采用磁性源或电性源二种人工场源, 目前主要应用电性源可控源音频大地电磁测深法。

可控源音频大地电磁测深是以有限长接地导线为场源, 在距场源中心一定距离处同时观测电、磁场参数的一种电磁测深方法。目前应用大多采用赤道偶极装置进行标量测量, 同时观测与场源平行的电场水平分量 E_x 和与场源正交的磁场水平分量 H_y (测量装置布置见图 1)。利用电场振幅 E_x

和磁场振幅 H_y 计算卡尼亚阻抗电阻率 ρ_s , 电场相位 E_p 和磁场 H_p 计算卡尼亚阻抗相位 φ_s 。阻抗电阻率和阻抗相位联合反演计算反演电阻率参数, 利用反演电阻率进行地质推断解释。目前, 可控源音频大地电磁测深反演主要采用一维电阻率圆滑反演方法^[4]。

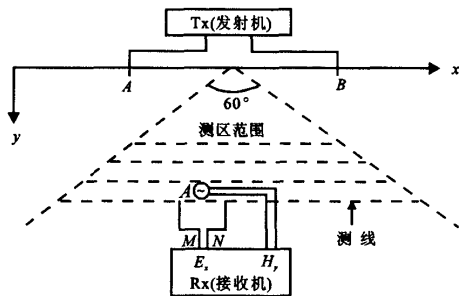


图1 标量CSAMT测量装置示意图

Fig.1 Scalar CSAMT survey array

十几年来, 我们一直从事可控源音频大地电磁测深应用研究和生产工作, 在各个应用领域中均做过很多工作。在本文中, 作者以典型实例介绍了可控源音频大地电磁测深方法的实际应用及应用效果。

1 地热资源调查

作为绿色能源,地热资源的开发利用日益受到人们的广泛重视。一般情况下,地热资源埋藏较深,开采风险很大。为了提高效率,降低成本,减少投资风险,在开发地热资源前,大多进行地质调查,地球物理勘查就是地热资源调查的重要手段之一。地下热水能够使热储层位电阻率降低,低阻异常是识别地热资源的重要标志,所以在以往地热资源调查中,直流电阻率法一直占主导地位。但直流电阻率法的工作效率低,勘探深度相对较浅,在使用中受较大限制。目前地热资源开发的深度越来越大,大多开采深度已超过 2 000 m。随着深度加大,地表观测到的由地下热水引起的电阻率差异越来越小,以至难以观测到由地热变化引起的电阻率异常,所以,深部地热资源调查的主要任务是勘查热储地层及地质构造分布情况。近几年,我们采用可控源音频大地电磁测深法,分别在北京、辽宁、河北、江西、江苏和浙江等地的深部地热资源调查中,均取得了较好的地质效果。

断陷盆地型热水埋深相对较大,以中低温为主,分布范围较广,是目前利用最广的地热资源,在北京已经得到广泛地开发和利用。北京市及周边地区蓟县系雾迷山组白云岩厚度较大,埋深一般 0 m ~ 1 000 m,岩溶裂隙较为发育,热导率值较高,是北京市主要热储地层。该区地热勘查主要任务是了解蓟县系白云岩埋藏深度、上覆地层和构造分布情况。

以北京市远郊某区为勘查实例,该测区大部为第四系所覆盖,第四系(Q)由粘土、粉砂和砂砾石组成;第四系下部为白垩系(K)砂岩和侏罗系(J)砂岩,侏罗系内穿插有火山岩;侏罗系下部为蓟县系(Jx),岩性主要为白云岩。

在测区内地层间电性差异较为明显,第四系电阻率较低,约 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 左右;白垩系电阻率 $20 \Omega \cdot \text{m} \sim 50 \Omega \cdot \text{m}$;侏罗系砂岩电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m} \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$;蓟县系白云岩电阻率大于 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 。各时代地层岩性之间电阻率存在明显差异,为开展电法勘探工作提供了充分的地球物理前提。

图 2 是该测区某地可控源音频大地电磁测深反演电阻率和地质解释综合断面图。由图 2 可见,断面内除 $x = 1\ 500 \text{ m}$ 附近出现断裂破碎带外,从剖面起点到端点断面电阻率逐渐升高,符合实际地层呈单斜变化趋势。断面内 0 m ~ -500 m 为第四系,河滩局部出现高阻外,电阻率均很低;除第四系和白垩系间电阻率差异较小,层间电阻率呈渐变关

系,除两者间界面不太明显外,白垩系~侏罗系~蓟县系界面非常清楚。实际验证(地热井)结果,1 296 m 见蓟县系白云岩,利用 CSAMT 反演电阻率推断蓟县系白云岩顶界面深度与实际地热井验证深度结果仅差几十米(见图 2)。该地热井已开发出温度 71°C ,出水量 $2\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的地下热水。由于地热开发井终孔于断裂破碎带内,是北京市目前温度和出水量最高的地热开发井。

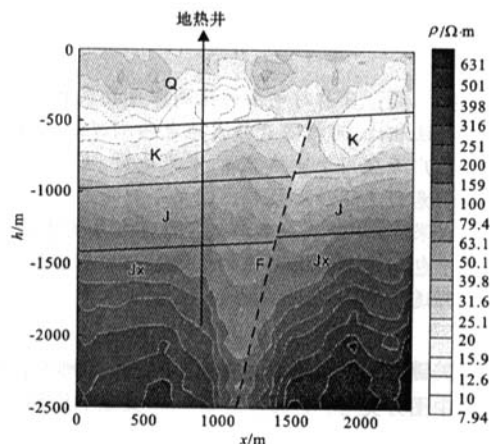


图 2 北京市某地 CSAMT 地热勘查综合断面图

Fig. 2 The comprehensive cross section of CSAMT exploration, Beijing

2 水文地质调查

直流电阻率测深法是浅部基岩裂隙水调查的主要手段。但其勘探深度相对较小,施工过程相对较为繁琐。当地表障碍物较多时,施工非常困难,尤其随着深度加大,直流电阻率测深法更加难以满足实际工作需要。

下面是北京郊区水文地质调查实例。目前,北京应用的地下水主要分两个方面:一个是灰岩或白云岩岩溶裂隙水;另一个是断裂构造水。由于奥陶系灰岩岩溶破碎相对发育,与其它相应岩层相比埋深较浅,因而是目前北京市地下水开发的主要来源。

勘探区为第四系覆盖,附近地表出露有石炭~二迭系(C-P)、奥陶系(O)和寒武系(ε)。其中,石炭~二迭系主要为砂岩、页岩和泥岩,电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 左右;奥陶系主要为灰岩,电阻率大于 $500 \Omega \cdot \text{m}$;寒武系主要为砂岩、页岩和灰岩,电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m} \sim 300 \Omega \cdot \text{m}$ 。剖面附近出露有花岗岩体。

可控源音频大地电磁测深的勘查目的是,利用剖面测量方法确定实测剖面内地层、花岗岩体和地质构造的分布情况,勘探深度 2 000 m。

图 3 是区内实测剖面 CSAMT 勘查综合断面图。由图 3 可见,除表层外,反演电阻率曲线可大致分为四个值区,其中从剖面起点到 $x = 1\ 300\text{ m}$ 处为高值区,平均电阻率大于 $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$,推断为花岗岩体产生;从 $x = 1\ 300\text{ m}$ 处到剖面末端的区域内,由上至下又分为三个值区,反演电阻率曲线为 K 型,根据反演电阻率曲线及对应岩石电性,推断由上至下分别为石炭~二迭系、奥陶系和寒武系(地质推断结果见图 3)。

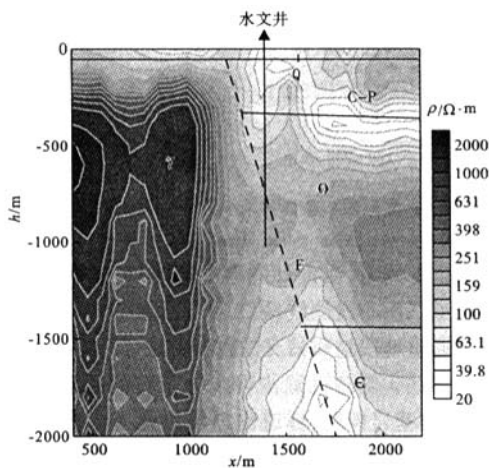


图 3 北京市某乡 CSAMT 水文地质勘查综合断面图

Fig. 3 The comprehensive cross section of CSAMT hydrogeological exploration, Beijing

图 3 内水文井为地下水开发钻孔,钻孔揭露上部见有砂页岩,下部为花岗岩和蚀变灰岩,地层深度与解释结果基本一致,终孔于断裂破碎带中(井深 1 000 m),出水量 $1\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 以上。

3 危机矿山深部找矿

电法在金属矿产物探勘查工作中一直占有重要地位,随着找矿工作的进一步深入,浅表矿日益减少,寻找深部隐伏矿是今后找矿的主要目标。另一方面,找矿工作重点已经逐渐转向我国西部地区,西部地区地表和地形条件更加复杂,一些常规电磁法已无法满足深部及复杂地形条件工作需要。可控源音频大地电磁测深方法采用定源观测,具有轻便、快速和勘探深度大等优点,其在复杂地形条件和深部找矿工作中,确定成矿有利地段和隐伏矿定位预测等方面起到了其它方法无法替代的重要作用。这里的定位预测实际上是指在详查找矿阶段,采用以电测深为主的方法手段对矿(化)体进

行二维或三维空间定位。根据其产状、规模和延伸(深)情况,结合已知地质和其它资料进行合理地质解释的一种找矿方法技术。

在实际工作中,我们一般采用中梯装置的时间域激发极化方法,寻找勘查区内成矿有利地段,使用可控源音频大地电磁测深法,在成矿有利地段对矿(化)体进行定位预测,并结合地质、地球化学和其它资料进行综合研究的找矿方法。事实表明,上述方法在实际找矿工作中可取得明显的地质效果。下面是甘肃白银有色金属公司小铁山矿深部找矿实例。

白银有色金属公司是五十年代初兴建的我国最大的铜有色金属生产基地,近十年来,后备矿源出现危机。1992 年我所参加白银矿区地质和物化探综合找矿研究工作,经过充分研究前人在中、大比例尺地质和物化探资料基础上,在小铁山矿区选择成矿有利地段进行 $100\text{ m} \times 20\text{ m}$ 网度的可控源音频大地电磁面积性测量及重点剖面的岩石地球化学、重力测量工作。

小铁山矿床是一个隐伏的海相火山岩 Pb、Zn、Cu 多金属矿床。地表仅有一铁帽露头,矿体全部埋藏于深部。区内出露的地层为白银群变质火山岩,可分为上、中、下三层,即上部石英角斑岩夹角斑凝灰岩;中部为硅质千枚岩夹石英角斑凝灰岩层;下部为石英角斑凝灰岩层。小铁山含矿带富存于一背斜轴部的石英角斑凝灰质碎裂岩中,矿化带上盘为硅质千枚岩,下盘为石英钠长斑岩体,已知矿的性质和分布与断裂构造关系密切。

资料处理后分别在相距 100 m 的 12 线和 13 线可控源音频大地电磁测深反演电阻率断面内,出现相互对应的二处低阻异常(ρ_1 和 ρ_2 异常),其中 ρ_1 (ρ_1-1 和 ρ_1-2 异常)异常对应已知矿体, ρ_2 异常位于深部探矿工程的空白地段的 175 号点附近, 12 线的 ρ_2 异常位于海拔 1 100 m ~ 1 800 m 处,为单一低阻异常; 13 线的 ρ_2 异常由二部分组成(ρ_2-1 和 ρ_2-2 异常),其中 ρ_2-1 异常位于海拔 1 400 m ~ 1 700 m 处, ρ_2-2 异常位于 ρ_2-1 异常下方海拔 850 m ~ 1 400 m 处(见下页图 4)。

根据地质资料和综合物化探异常,白银有色金属公司地质队 1994 年采用钻探验证(钻孔编号 bzk1) 12 线的 ρ_2 异常。钻孔揭露 484.35 m ~ 终孔(724.02 m)之间均处于蚀变矿化岩石和近矿围岩内,其中铜矿化有向下增高趋势(Cu 平均含量 0.04%,最高含量达 0.095%),高于矿体近矿围岩含量(0.036%)和本区背景值(0.002 2%)。由于工程故障,钻孔未到设计深度(800 m)。

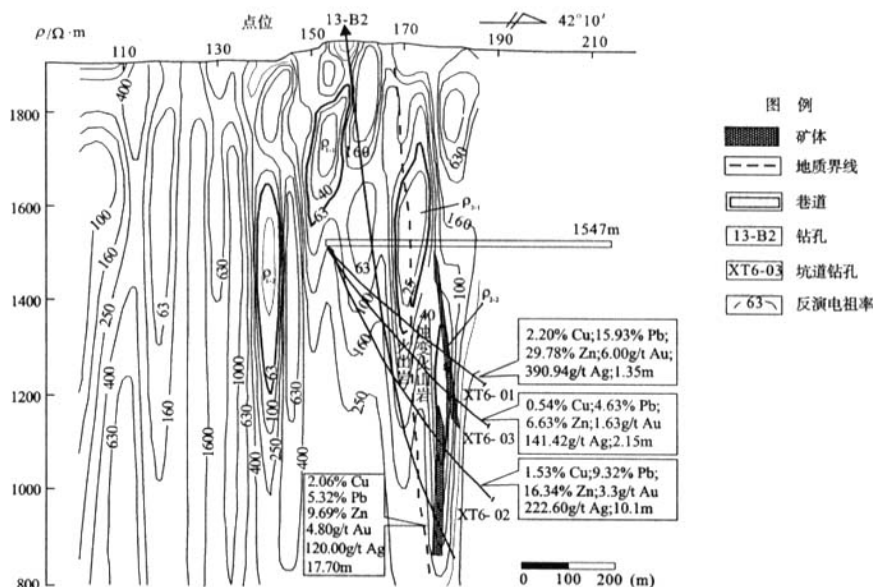


图4 小铁山矿区13线CSAMT反演电阻率异常和钻孔验证结果

Fig.4 CSAMT exploration comprehensive cross section, Xiaotieshan Mine

在距12线100 m处的13线布置 ρ_2-2 异常验证孔(钻孔编号13—B2), 见厚17.7 m, 综合品位(Cu、Pb和Zn)达17%的工业矿体; 由于矿体埋深较大, 后来加拿大明科公司在1547 m的巷道内连续施工三个定向孔, 每个钻孔均见工业矿体^[5], 矿体的总金属量为450 000 t。这是目前我国矿山深部物化探找矿成功的实例。在小铁山深部找矿工作中CSAMT方法起到了关键的, 其它方法难以做到的定位预测作用。

4 工程地质勘查

地震勘探一直是工程地质勘查的主要手段, 在地震勘探难以施工地区, 多采用直流电阻率测深或瞬变电磁测深方法等常规电法。在通常情况下, 常规电法勘探深度较小, 同时受到地表条件影响, 在复杂地形条件下, 直流电阻率测深和瞬变电磁测深方法等常规电法很难完成相应的勘查工作。

以CSAMT法铁路隧道勘查工作为实例。寺铺尖隧道位于太行山深处, 是朔黄铁路上最长的一个隧道。隧道全长6 400 m, 隧道通过的地段地表条件非常复杂, 相对高差超过1 000 m, 大多地段行人难以通行。勘查目的是探测隧道通过的地段地层、可能富水地段和地质构造分布等情况, 探测深度为1 000 m。在实际工作中, 我们采用隧道上部

隧道上部测量, 当设计隧道上部难以通过时, 采用在隧道二侧布设测线, 用二侧剖面测量结果来推断隧道通过地段地质情况的勘查方法。

寺铺尖隧道区除沟谷中分布有第四系洪积层外, 大部基岩裸露; 隧道出口段出露有太古界五台山群混合花岗岩; 隧道进口段主要出露有古生界中、上寒武系($\epsilon_2 + \epsilon_3$)灰岩, 其中, 中寒武系下部为页岩; 山顶处出露奥陶系下统(O_1)灰岩。出口处半坡见有下寒武系(ϵ_1)黄紫色页岩直接角度不正合于太古界地层之上。统计结果表明: 奥陶系下统电阻率800 $\Omega \cdot m \sim 1\ 200 \Omega \cdot m$; 寒武系中、上统电阻率500 $\Omega \cdot m \sim 800 \Omega \cdot m$; 寒武系下、中统电阻率500 $\Omega \cdot m \sim 800 \Omega \cdot m$; 太古界五台山群电阻率大于1 500 $\Omega \cdot m$ 。

图5(a)(见下页)是其中一条旁测剖面的CSAMT反演电阻率断面图。我们根据CSAMT反演电阻率横向变化(电阻率横向间断)推断出剖面通过地段断层展布情况, 这里推断出五条断层(分别将其编号为 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_{3+1} 和 F_5 断层); 结合岩石物性及电阻率随着深度变化推断出地层分布情况。图5(b)是根据二条旁测剖面测量结果推断的设计隧道地质推断解释断面图(局部)。施工单位利用我们预测结果施工, 实际结果证明我们推断的地层地质构造均较准确^[6]。这是目前CSAMT法在复杂地形条件下工程地质勘查工作中比较成功的应用实例。

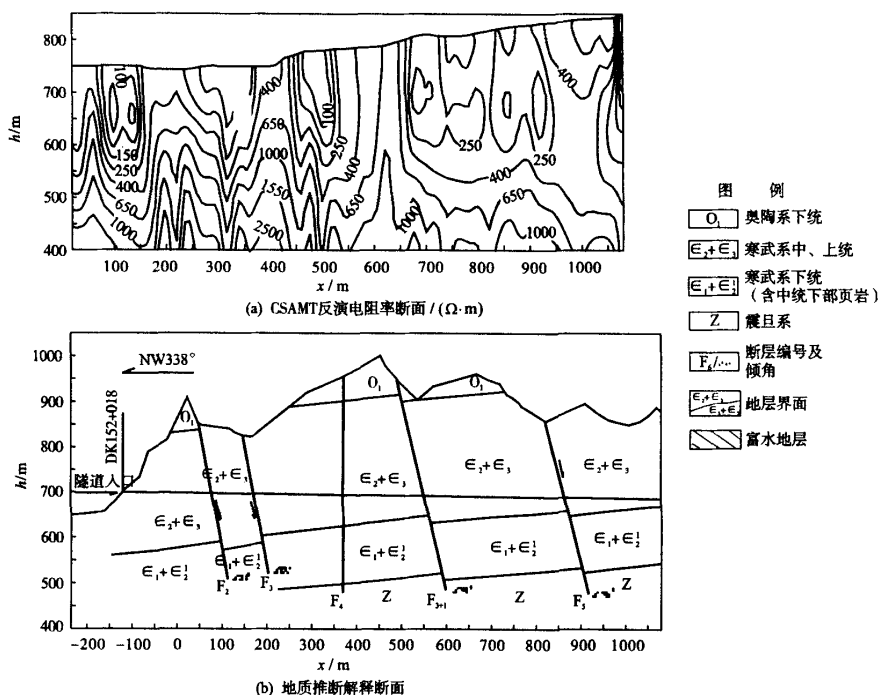


图5 朔黄铁路寺铺尖隧道 CSAMT 勘查综合断面图

Fig.5 CSAMT exploration comprehensive crsoss section, Sipujian Tunnel

5 结语

作为一种人工源电磁法,在可控源音频大地电磁测深方法测量中不可避免地会存在场源效应。所以在实际工作中,应根据工作任务,结合实际地质和地层电性分布情况,合理地选择场源方向、收发距和采样频率范围。在保证最佳信噪比情况下,要尽量使所采集的数据处在远区。在数据处理中,要注意识别场源效应和静态效应等影响引起的数据畸变,慎重处理这些效应的影响。

无论资源开发还是工程施工进行前期调查均可以提高效率、降低成本、减少风险。实际应用结果表明,可控源音频大地电磁测深法能够适应复杂地形条件,满足探测深度较大的地质勘查工作要求。需要说明的是,随着勘探深度加大,其勘查手段必须提高观测和解释精度,以加大勘探深度,提高方法的实际应用效果。另一方面,引起地下电阻率变化的因素很多,利用可控源音频大地电磁测深法勘查,需要结合已知地质、地球物理特征和其它有关资料进行综合研究,合理地进行地质解释。

上述实例表明,在一些地热资源、水文地质、有色金属矿产资源和工程地质等地质勘查工作中,可控源音频大地电磁测深法能够起到其它方法无法

起到的作用。

参考文献:

- [1] CAGNIARD L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting[J]. Geophysics, 1953, 18: 605.
- [2] STRANGWAY D W, SWIFT C M, HOLMER R C. The application of audio-frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration[J]. Geophysics, 1973, 38: 1159.
- [3] GOLDSTEIN M A, STRANGWAY D W. Audio-frequency magnetotellurics with a granged electric dipole source[J]. Geophysics, 1975, 40: 1159.
- [4] CONSTABLE S C, PARKER R L, CONSTABLE C G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data[J]. Geophysics, 1987, 52(3): 289.
- [5] 胡达骥, 徐叶兵, 陈群, 译. 明科矿业及金属公司在白银厂地区找矿新进展[J]. 地质与勘探, 1999, 35(2): 1.
- [6] 杜彦军, 王皓, 李玮. 可控源音频大地电磁测深法在寺铺尖隧道勘察中的应用[J]. 铁路地质与地基, 1998, 37(1): 19.

作者简介: 黄力军(1954-), 男, 1982年毕业于长春地质学院物探系, 1992年获中国地质大学(北京)硕士学位, 教授级高级工程师, 主要从事电磁法勘查研究和生产工作。