维普资讯 http://www.cqvip.com

第十五卷第三期 物 探 与 化 探 Vol. 15, No. 3
1991年6月 GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION Jun., 1991

可控源音频大地电磁法的静态效应校正

罗延钟
（中国地质大学·武汉）
何展翔
（石油物探局地调五处）
马瑞伍 郭建华
（新疆地矿局物探大队）

摘 要

本文讨论了可控源音频大地电磁法静态效应的现象和实质，评述了现有的静态校正方法，介绍了由作者设计的一种空间滤波校正法的原理和具体作法，并以实例说明了其有效性和局限性。

可控源音频大地电磁法（CSAMT）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人工源频率测深方法。它的探测深度适中（几十米到一、二千米）、横向和纵向分辨力好，生产效率高，兼有测深和剖面研究双重特点，是进行地质立体填图、研究地质构造和直接找矿的有效手段。我国煤炭、石油、有色金属和地矿系统，先后引进国外先进仪器，开展此法的试验研究和生产，已取得一批良好的地质成果。但由于该法资料处理和推断解释的复杂性，也使一些地区推断解释失误，验证钻孔落空。为使CSAMT法在地质找矿（包括找煤、油气和固体矿产）中发挥其应有的作用，需要研究和完善该法的资料处理和推断解释方法。本文将讨论其中一个重要问题，即CSAMT的静态效应及其校正方法。

静 态 效 应

CSAMT和MT法一样，观测结果常受静态效应的畸变。所谓静态效应是指当近地表存在局部导电性不均匀体时，电流流过不均匀体表面而在其上形成“积累电荷”，由此产生一个与外电流场成正比（比例系数不随频率变化）的附加电场。它使实测的各个频率的视电阻率，相对于不存在局部不均匀体时变化一个常系数。从而使绘于双对数坐标系中的频率测深曲线，沿视电阻率轴（即纵轴）发生上下平移—当局部不均匀体为低阻体时，测深曲线向下平移；而若为高阻体，则向上平移。故通常称静态效应为静态位移或静位移。图1中部示出了测深曲线静位移的典型例子。

在ρ_s拟断面图上，地表局部不均匀体引起的静态效应表现为直立的密集ρ_s等值线（图1（a）底部），或垂直的纺锤形局部封闭等值线（图1（b）底部），或更复杂的形态。其总的图象特征是横向范围不大的陡立密集等值线。

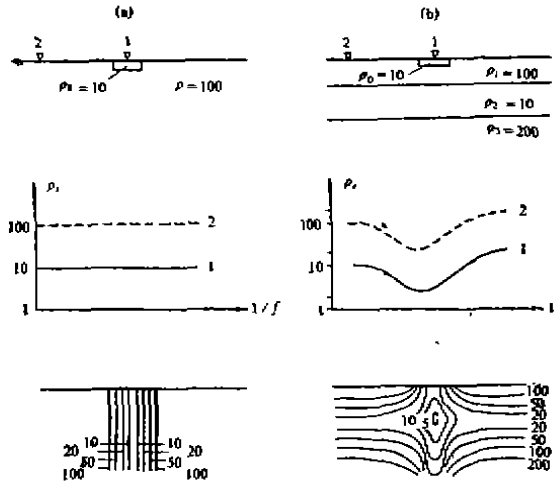


图 1　均匀大地(*a*)和H型地电断面(*b*)地表存在局部低阻体时CSAMT的静态效应示意
（已作近场校正）
上部—地电断面；中部—ρ_s测深曲线；底部—ρ_s拟断面图；1（实线）—有静态效应；2（虚线）—没有静态效应

静态效应会使测深曲线的（一维）定量解释结果，无论电阻率或层厚度都产生误差；而在对ρ_s拟断面图作定性解释时，会使粗心的解释者误将静态效应推断为陡立的深大断裂或垂向大延深的异常体。因此，对静态效应作校正，消除或减小其影响，是CSAMT资料处理的一项不可缺少的重要任务。

静态效应的校正方法

在MT法中已提出多种静态效应校正（简称静校正）方法。比较重要的方法可归纳为三大类，即利用磁场分量测量结果，利用相位测量结果和利用空间域或波数域中的数字滤波作静校正。下面讨论这些方法在CSAMT法中应用的可行性。

前已述及，静态效应乃局部不均匀体表面积累电荷形成附加电场，对实测电场产生畸变而引起的，它对磁场分量无影响。因此，直接利用实测磁场分量计算视电阻率，便可避免静态效应。基于此原理，可建立不同形式的利用磁场分量实测结果作静校正的方法。不过，在CSAMT法中，为提高生产效率通常在观测剖面上每隔6～7个测点实测一个磁场分量。这样，CSAMT法本身不能提供逐点作静校正所需的磁场分量实测值。当然，可以加密CSAMT法观测磁场分量的点距，也可以辅以独立的其它测量磁场的方法（如TEM法）。但这都要以增加野外工作量为代价，在经济上是不可取的。

静态效应只是使双对数坐标系中的视电阻率（振幅）ρ_s频率测深曲线上下平移，它不改变曲线的变化斜率。另一方面，根据希尔伯特变换，对于满足线性、时不变条件的大地系统，相位频谱$\varphi(f)$近似与振幅频谱的对数导数$\frac{d\log\rho_s(f)}{d\log f}$（或对数斜率）成正比。因此，可以认为静态效应对相位测量结果无影响*。基于此原理可以建立不同形式的利用相位实测结果作静校正的方法。不过，实测相位相对振幅（ρ_s）测量结果来说，缺少有关电阻率绝对

维普资讯 http://www.cqvip.com

值的信息。因而单纯对相位资料（它不受静态效应畸变）作解释或单纯利用相位资料作静校正，有可能遗漏或模糊地下实际存在的横向电性变化。在研究地下平缓变化的地质构造时，尤其容易出现这种危险。

为进行静校正，MT法中发展了电磁阵列剖面法（EMAP）[1]。这是一种利用空间域（或转换到波数域）低通滤波，压制静态效应的有效方法。不过，它要求以密集的测点（点距几十到几百米）进行MT观测，在经济上很不划算（通常MT法的点距为几到几十公里），因而目前还没有在MT法中推广使用。CSAMT法有较高的生产效率，其观测点距通常为几十到几百米。因此，EMAP的基本思想—利用数字滤波压制静态效应，很适用于CSAMT法的静校正。下面介绍我们基于这一思想设计的一套用于CSAMT法静校正的空间滤波方法。

利用空间滤波法作静校正的基本出发点，是认为地下电性异常体或地质构造引起的视电阻率沿测线的变化是平缓渐变的；而地表局部电性不均匀体或局部地形不平则会引起视电阻率沿测线急剧变化。这样，若设计某种低通滤波器沿测线作空间滤波，则可压制“高频”的静态效应。其具体作法如下：

首先根据工作地区的地电条件，选择一个在工区内厚度、深度和电阻率都比较稳定的电性层，并大致估计其在频率测深曲线上对应的频段（假设为 $f_m \sim f_n$，共 $n-m+1$ 个频点）。然后计算各测深点在该频段范围内实测视电阻率的几何平均值

$$\rho_{ai}=\left\{\prod_{j=m}^{n}\rho_{si}(f_j)\right\}^{\frac{1}{n-m+1}} \qquad (1)$$

式中，i 为测深点号；$\rho_{si}(f_j)$ 为第 i 个测深点在第 j 个频率（f_j）的视电阻率实测值。

之后，将相邻的若干个（假设为 $D=2L+1$ 个）测深点的平均视电阻率 ρ_a，与一滤波函数 F 作数字滤波运算，计算平均视电阻率的滤波值

$$\rho_{Li}=\sum_{k=-L}^{L}[\rho_{a(i+k)}\cdot F_k] \qquad (2)$$

式中，F_k 为一低通滤波器的滤波系数；$D=2L+1$ 为滤波窗口宽度；计算结果 ρ_{Li} 记录在滤波窗口中心点 i 上。

最后，以各测深点（设为第 i 点）的平均视电阻率 ρ_{ai} 去除其滤波值 ρ_{Li}，便得静校正系数

$$K_i=\frac{\rho_{Li}}{\rho_{ai}} \qquad (3)$$

以此系数乘相应测深点各频点的视电阻率实测值 $\rho_{si}(f_j)$，便得经过静校正的视电阻率

$$\rho'_{si}(f_j)=K_i\cdot\rho_{si}(f_j) \qquad (4)$$

上述静校正方法的关键是恰当的选取滤波窗口宽度 D 和数字滤波系数值 F_k。经过反复的试算，我们认为一般情况下选取 $D=5$ 和 $F_k=0.12,\ 0.22,\ 0.32,\ 0.22,\ 0.12$，便能获得好的校正效果；而在地表不均匀性较强时，采用 $D=7$ 和 $F_k=0.08,\ 0.12, 0.175, 0.25, 0.175,\ 0.12,\ 0.08$，效果较好。

---

* CSAMT 的实测相位值是阻抗 $Z=\frac{E}{H}$ 的相位，而不是复视电阻率 $\tilde{\rho}_s=\frac{1}{sf}\left(\frac{E}{H}\right)^2$ 的相位。不过，后者为前者的二倍，所以静态效应对后者无影响也就对前者无影响。

维普资讯 http://www.cqvip.com

应 用 实 例

为说明前述静校正方法的应用效果，我们来看几个应用实例。其一是在山西某盆地的工作成果。CSAMT法在该盆地的任务是探测奥陶系高阻灰岩顶面的起伏，研究其与上覆地层构造的继承关系，以查明该区的局部构造和断裂分布。野外观测采用$AB=2$km的双极源，供电电流强度为$n\sim20$A，测量电极距$MN=200$m。收发距$r=6\sim10$km，大于探测目标—奥陶系灰岩顶面深度（1～2km）的三倍。测深点距一般为500m，测深频段为$2^{-1}\sim2^{12}$Hz。

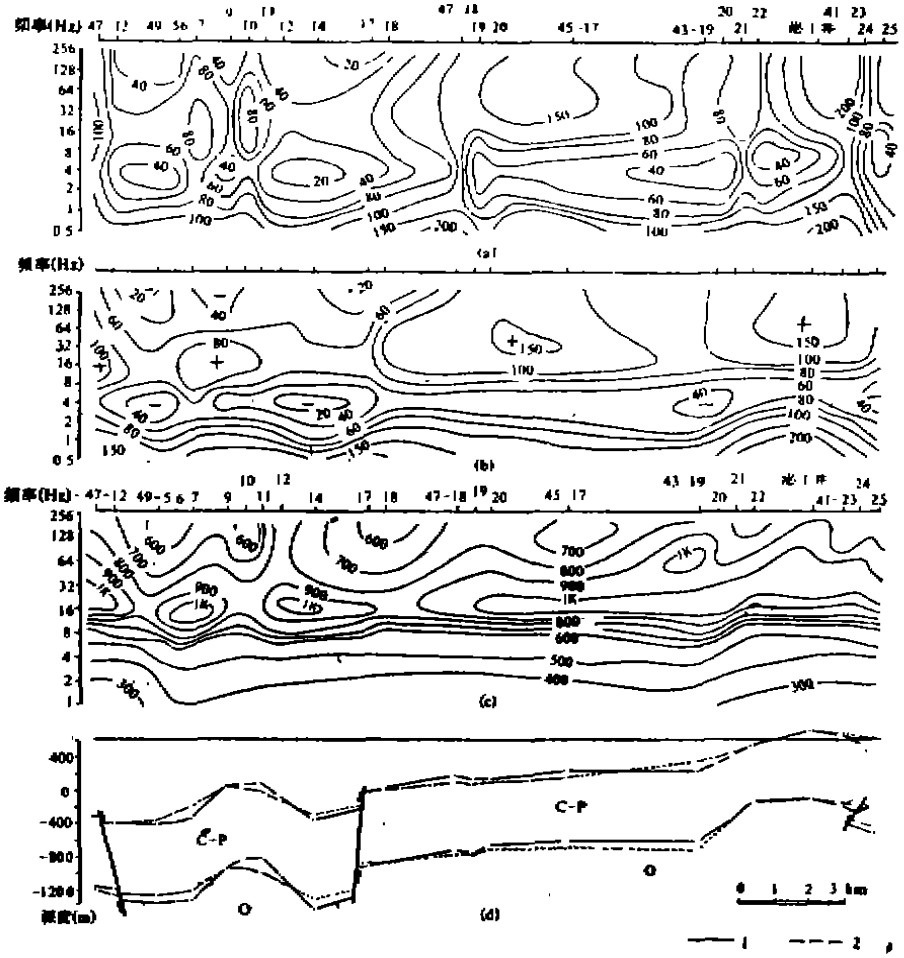


图 2　山西某盆地CSAMT和地震勘探综合剖面

（a）作了近场校正但未作静校正的ρ_s拟断面（单位Ω·m）；
（b）作静校正后的ρ_s'拟断面（单位Ω·m）；
（c）CSAMT视相位ρ_s拟断面（单位mrad）；
（d）地震（实线）和CSAMT（虚线）确定的地层断面。
1—地震解释深度线；2—电法解释深度线

图2示出了一条剖面的工作成果。其中(a)图为经过近场校正的视电阻率ρ_s拟断面图。可以看出，由于静态效应，图上出现了四个陡立等值线异常带（43—9、47—18、43—22和

维普资讯 http://www.cqvip.com

41—24点)。它们造成存在陡立断层或岩脉的假象，也使整个断面上的局部构造形态难以辨认。为此，采用空间滤波法作了静校正。对该区实测资料的分析发现，较高频段(2^6～2^9Hz)视电阻率变化平缓，标志表层覆盖层下有一厚度、深度和导电性都较稳定的电性层（这与已知的地质和物探资料相吻合)。故作静校正时，选取各测深点$f=2^6$，2^7，2^8和2^9Hz四个频点的实测视电阻率值计算平均视电阻率ρ_a。滤波窗口宽度选为$D=5$。图2(b)是经过空间滤波处理后的ρ_s拟断面图，其上已不再存在前述造成假象的陡立等值线异常带，下部反映奥陶系基岩起伏的高阻等值线变得十分圆滑和轮廓清晰。对静校正后的数据作了一维定量解释，结果示于图2(d)。由图可见，CSAMT推断的石炭—二叠系（C—P）和奥陶系（O）地层界线以及划分出的断层位置，与同一剖面地震勘探的结果吻合得非常好。

对比图2(a)、(b)、(c)、(d)可以看出，静校正后的ρ_s拟断面图（特别是下部的高阻等值线)，很好地反映了地下构造形态。视相位φ_s拟断面图也大体上能反映地下构造形态，而且没有（a）图那样复杂的陡立等值线异常带。这印证了前面关于相位资料不受静态效应畸变的论断。另一方面，图2（c)的下部φ_s等值线十分平缓，对地下构造反映得比较不清楚。这也印证了前面的另一论断，即单纯利用相位资料作解释或作静校正，有可能遗漏或模糊地下实际存在的横向电性变化。

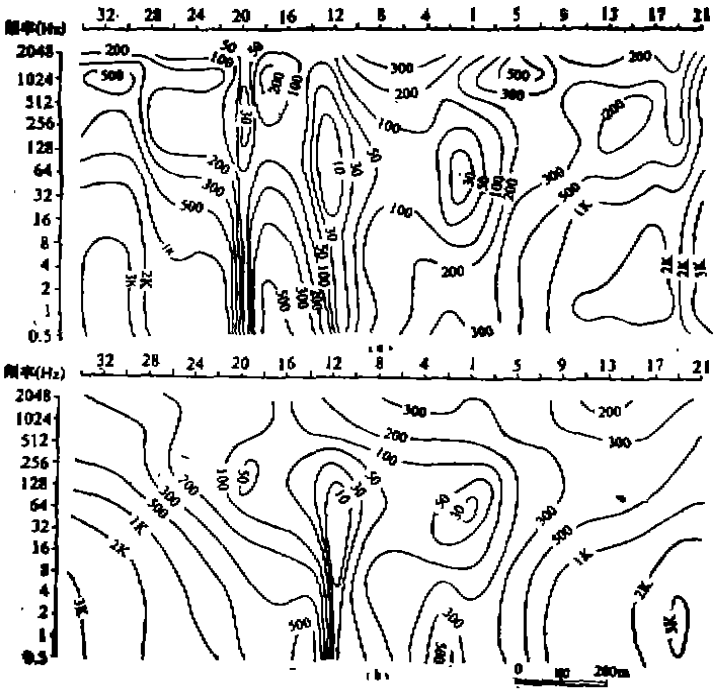


图3 新疆某铜矿2875线CSAMT法视电阻率拟断面

（a）作了近场校正，但未作静校正的ρ_s拟断面；

（b）作了近场校正和静校正后的ρ_s拟断面

第二个例子是新疆某铜矿的工作结果。该铜矿是与潜火山作用有特殊密切关系的潜火山热液黄铁矿型铜矿床。矿石富含黄铁矿，为良导电体，是CSAMT法有利的找矿目标。图3

维普资讯 http://www.cqvip.com

是根据该矿2875线CSAMT法观测结果，整理出的视电阻率拟断面图（收发距$r=6.1$km，测量电极距$MN=$测点距$\Delta X=50$m）。其中，（a）图经过近场校正，但未作静校正。在零乱和总趋势呈陡立的ρ_s等值线背景上，可划分出四个局部低阻异常和若干个高阻圈闭，很难作推断解释。为校正明显存在的静态效应，对（a）图所示资料用空间滤波法作了静校正。考虑到该区最高频（$f=2^{12}$Hz）的观测质量较差，选用$f=2^{11}$，2^{10}和2^{9}Hz三个频点的实测ρ_s值计算各测深点的平均视电阻率ρ_a，并以$D=5$的窗口作空间滤波。（b）图是经过静校正后的ρ_s拟断面图，图中没有了贯穿整个频段的陡立等值线，并且清晰地呈现出两个局部低阻异常（20号点下的50Ω·m低阻闭合圈是静校正不完全留下的静态效应"痕迹"，不将其作为有意义的异常）。其中，1号测点下的低阻闭合圈，与钻探控制的已知富矿相对应；12号点下是新发现的异常。结合其它地质-物化探资料，我们推断此低阻异常是地下存在良导电含铜黄铁矿体的反映。用Bostick法对12号点经过近场和静位移校正后的视电阻率测深曲线作半定量解释，得良导电体上顶埋深约为200m。据此，向主管部门提交了异常验证申请报告。钻探结果在穿过一些较贫的矿（化）层后，于180～206m打到了20多米厚的黄铁黄铜矿体。这个例子再次证明了空间滤波法作静校正的有效性，同时，也进一步展现了CSAMT法寻找深部隐伏矿的光明前景。

尽管前面两个例子都说明空间滤波法的校正效果很好，我们还是要指出这一方法的局限性—它对单个测点地表不均匀性的校正效果好，但对相邻几个测点上连续出现的不均匀性无能为力，甚至造成假象。图4示出了山西某盆地一条剖面上的CSAMT拟断面图。从未经静校正的ρ_s拟断面图（图4.a）看，似乎8号点存在地表高阻体引起的静位移。作五点空间滤波处理后，所得ρ_s拟断面图（图4.b）消除了8号点的"静位移"，而在该点下部的ρ_s等值线呈现出高阻下凹，反映奥陶系高阻灰岩在8号点为一坳陷。但是，从视相位拟断面（图

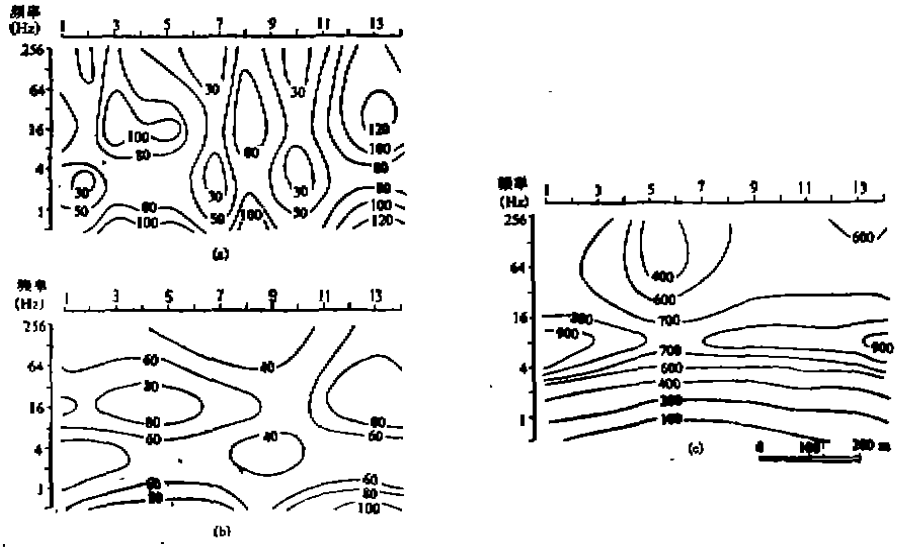


图 4　山西某盆地61线CSAMT拟断面

（a）近场校正后未作静校正的ρ_s拟断面图；
（b）作了近场和静位移校正的ρ_s拟断面图；
（c）视相位φ_s拟断面图。

维普资讯 http://www.cqvip.com

4、C）看，8号点下没有任何下凹的反映。这就引起了对ρ_s拟断面图推断的怀疑。经过全面分析后发现，实际上不是8号点有高阻静位移，而是其两侧6、7和9、10号点存在地表低阻引起的静态效应，致使空间滤波法失败。这个例子虽然特殊，类似情况在实际中比较少见，但它毕竟说明了空间滤波法的局限性。所以，当对这种方法作静校正后的资料作推断解释时，应参考未作静校正前的ρ_s资料和相位观测资料，并尽可能与其它地质-物化探资料配合起来进行。

结 论

CSAMT法和MT法一样，通常都存在地表局部电性不均匀或局部地形不平引起的静态效应。它使ρ_s测深曲线沿纵轴发生平移，定量解释产生明显误差；并使ρ_s拟断面图上异常变得零乱，出现陡立等值线，造成地下存在陡立深大断裂或岩脉的假象。为了在不增加附加野外工作量的情况下，对CSAMT资料作静校正，可以利用相位观测资料或采用空间滤波法。直接利用相位观测资料或借助它作静校正，都可避免或压制静态效应的影响，但有可能遗漏或模糊地下实际存在的横向电性变化。五点空间滤波法通常能有效地校正静态效应对视电阻率的畸变，获得清晰反映地下电性分布的ρ_s异常；但对连续出现的地表不均匀造成的静位移，校正效果不佳。所以，应将空间滤波法校正前、后的ρ_s资料与相位资料结合起来作推断解释。

目前采用的五点或七点空间滤波，是针对二维地电条件，沿横向观测剖面设计的一维滤波。当存在三维地表不均匀体时，不难由此演化出沿地面的二维滤波，压制其形成的静态效应。

参 考 文 献

[1] Bostick F. X., Electromagnetic Array Profiling (EMAP), (56th) SEG Annual Meeting Expanded Technical Program Abstracts with Biographies, 1986, p. 60—61.

THE CORRECTION OF STATIC EFFECTS IN SONIC FREQUENCY TELLURIC ELECTROMAGNETIC METHOD OF CONTROLLABLE SOURCE

Luo Yanzhong

(China University of Geosciences, Wuhan)

He Zhanxiang

(No. 5 Geological Investigation Division, Bureau of Geophysical Exploration for Petroleum)

Ma Ruiwu, Guo Jianhua

(Geophysical Prospecting Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang)

Abstract

This paper discusses the phenomena and nature of static effects in sonic frequency telluric electromagnetic method of controllable source, reviews the available methods for correction of static effects, describes the principle and operation of a spatial filtering correction method designed by the authors, and with examples illustrates its effectiveness and limitation.