可控源音频大地电磁法探测隐伏断层的正演模拟

马志飞
北京市地质研究所，北京（100120）
E-mail：pony1984621@yahoo.com.cn

摘　要：隐伏断层是许多工程项目中的重大隐患，如何准确确定隐伏断层的位置及产状，是地质勘探工程中的重大问题之一。作为电法工作的一个分支，可控源音频大地电磁法由于同时测量电场和磁场数据，提高了分辨率，且勘探深度范围大、工作效率高、受地形影响小，其应用越来越广。为了分析可控源音频大地电磁法探测隐伏断层的理论基础和可行性，结合隐伏断层的电性特征，建立不同埋深、不同断距的隐伏断层和地下存在高、低阻异常体三组地质模型，进行正演模拟。通过正演计算，研究不同埋深、不同产状的断层的电磁响应，分析其视电阻率和阻抗相位特征，并区分隐伏断层与地下高阻柱状体和低阻柱状体的电磁响应，为正确识别隐伏断层提供理论依据。正演结果显示：相位数据对断层反映很敏感，特别是断层左右两边岩性不同时，阻抗相位截然不同，界限明显；隐伏断层的覆盖层越厚，即断层埋藏越深，则视电阻率的反映越不明显，但阻抗相位依然能够清晰体现出来；与视电阻率资料相比，阻抗相位具有更高的敏感度，且阻抗相位资料更易于捕捉到地层深部的信息；断层的异常特点与高阻和低阻柱状体异常特征有显著区别。

关键词：CSAMT；隐伏断层；卡尼亚电阻率；阻抗相位；正演模拟
中图分类号：P631.3

1. 引言

隐伏断层是在地表无显示或出露不明显，而潜伏在地表以下的断层。这种断层可以是在其形成以后又为新沉机物所覆盖；或者是断层被后来的侵位岩体占据，也可以是形成于地下深处没有切穿地表的断层。

在地震安全评价、抗震防灾规划、工程地质勘察工作中，常常遇到的首先是确定隐伏断层的位置、走向以及破碎带的宽度、断层的倾角等问题。隐伏断层所在的位置往往是地震发生时破坏最严重的区域、隧道建设和水利建设等工程地质的危害区域。

虽然隐伏断层探测是一项难度很大的工作，但随着科技的发展，关于隐伏断层探测的各种手段和方法的探讨日益增多。现在有高精度重磁探测、放射性气体探测、地震勘探和电法勘探等多种方法可供选择，但在有些工作区，由于地形地质条件复杂、第四系覆盖层厚度大，加之人工改造及植被的覆盖，隐伏断层的存在与否及其性质的调查变得尤为困难。而过去相关的地球物理勘探技术由于受解译精度、断层埋藏深度的限制，一直未能很好地解决这一问题，而钻探方法的成本在实际工作中是不可承受的。在追朔和查寻隐伏断层的工作中，电法勘探作为地质填图及工程勘察的主要地球物理方法之一，早已被广泛采用，并日益显示出它的优越性。

2. CSAMT 探测隐伏断层的研究现状

作为电法勘探方法中的一种，可控源音频大地电磁测深法（Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics，简称 CSAMT）由于其独特的优点而受到人们的关注。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，兼有剖面和测深双重性质，因此具有诸多优点：第一，使用可控制的人工场源，信号强度比天然场大，因此可在较强干扰区的城市及城郊开展工作；第二，测量参数为电场与磁场之比，得出的是卡尼亚电阻率。由于是比值测量，因此可减少外来的随机干扰，并减少地形的影响；第三，基于电磁波的趋肤深度原理，利用改变频率进行不同深度的电测深，大大提高了工作效率，减轻

了劳动强度，一次发射，可同时完成多个点的电磁测深；第四，勘探深度范围大，通常可达2－3km；第五，横向分辨率高，可灵敏地发现断层；第六，由于接收机在接收电场的同时还要接收磁场，因此高阻屏蔽作用小，可穿透高阻层。

很多成功的工程实例证明，应用可控源音频大地电磁法勘察工程地质活动中的不良地质体是比较有效的一种方法。但用可控源音频大地电磁法研究隐伏断层是近几年来才逐渐开始的。日本学者 Koichi Suzuki 等（2000）[1]综合运用 CSAMT、直流电法和电阻率层析成像方法在日本的四条活断层带上探测第四系覆盖层之下的地质结构，结果显示，CSAMT 对几百米深度范围内的地质结构具有很强的探测能力，能够根据电阻率确定不同岩层的边界和断层的大致位置。李金都、王学潮（2004）[2]结合南水北调西线工程调水区桑日麻断裂的探测，用可控源音频大地电磁测深法探测断层深部的发育情况，为分析工程地质问题提供基础性资料。底青云等（2005）[3]利用以可控源音频大地电磁法为主，甚低频法、部分地段激发极化法和瞬变电磁为辅助手段对南水北调西线一期工程中 20km 深埋长隧洞段进行了探测研究，评价可能影响工程的断层、破碎带及异常区，对工程施工提供非常了有用的帮助信息。徐光辉等（2005）[4]将可控源音频大地电磁法用于北京水文地质勘查，通过查明断裂构造而成功寻找地热资源和地下水资源。谭儒蛟等（2007）[5]运用 V6 系统对龙蟠变形隐伏构造展开 CSAMT 探测工作，研究了高山峡谷区复杂地形条件下对隐伏构造的探测，通过处理可以改善复杂地形条件对反馈电磁信号的干扰，成功发现由第四系深厚崩坡积层所掩盖的中深部隐伏断裂地质构造。邓洪亮等（2007）[6]以南水北调工程为例，研究了在探测深埋长隧洞工程中使用可控源音频大地电磁法探测断层的应用技术。安志国等（2008）[7]在西南一改建铁路项目中，对隧道洞线中使用 CSAMT 探测断层和破碎带的技术进行研究，分析正常地层和存在断层、破碎带等不良地质体的典型视阻率－频率曲线，证实 CSAMT 法对于勘查断层和破碎带等不良地质体是比较有效的一种方法。许广春等（2008）[8]将 CSAMT 应用到朔准铁路鹰鹞山隧道和京沪铁路张夏隧道两个工程中，根据电阻率等值线梯度变化推断岩性分界线及断裂构造的位置，取得了较好的效果，并得出结论：可控源音频大地电磁法对低阻非常敏感，可有效地划分断层破碎带，可有效避免高阻屏蔽，解决常规电法以及地震折射法不能解决的地质问题。

3. CSAMT 的基本原理

可控源音频大地电磁法是基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组而发展起来的一种电磁勘探方法，麦克斯韦方程组实质上反映了电荷、电流、电场、磁场随时间和空间变化的定律，它综合了电磁现象的相互作用[9~11]。

根据大地电磁场的理论，在地面上观测的两个正交的水平电磁场 E_x 和 H_y 之比定义为平面电磁波的波阻抗 Z，其物理意义和单位与电阻率相同。因此有

$$Z=\frac{E_x}{H_y} \qquad (3\text{-}1)$$

利用电磁场在介质中的边界条件, 可以导出水平电偶极源在地面上的电场及磁场(在 x , y , z 轴上的分量) 的公式并代入上式，可得：

$$\frac{E_x}{H_y}=\frac{2\rho_1}{(1+i)\sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0\omega}}} \qquad (3\text{-}2)$$

经过简单运算就可以得到地下得视电阻率公式为：

$$\rho_1=\frac{1}{\mu_0\omega}\left|\frac{E_x}{H_y}\right|^2 \quad (3\text{-}3)$$

在推导过程中采用得是 CGS 单位制，在实际测量中，我们多用 MKS 制单位，此时 E 的单位是 mv/Km，H 的单位是 γ（1γ=10^{-2}/4πA/m）,电阻率用 Ω.m 作单位，则可以得到卡尼亚电阻率：

$$\rho_s=\frac{1}{5f}\left|\frac{E_x}{H_y}\right|^2 \quad (3\text{-}4)$$

由电磁场的场强公式可看出，电磁场实际上由虚部和实部两部分组成。视相位的定义式为：

$$\varphi_s=tg^{-1}\frac{\mathrm{Im}(E,H)}{\mathrm{Re}(E,H)} \quad (3\text{-}5)$$

式中，Re(E)和 Re (H)分别为电场和磁场的实部，Im(E)和 Im(H)分别为电场和磁场的虚部。它的物理意义是发射电流与观测点上的电场之间的相位差，或观测点上电场与磁场之间的相位差，因此又可以表示为：

$$\varphi_s=\varphi_E-\varphi_H \quad (3\text{-}6)$$

在准静态条件下，趋肤深度与波长分别为：

$$\delta=\sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} \quad (3\text{-}7)$$

$$\lambda=2\pi\delta \quad (3\text{-}8)$$

如果取大地中 μ 常见值 μ=4π×10^{-7} H/m，并由 $\omega=2\pi f$ 和 $\sigma=\frac{1}{\rho}$，可以把趋肤深度 δ 写成与电阻率 ρ 有关的形式：

$$\delta=503\sqrt{\frac{\rho}{f}}\ (\mathrm{m}) \quad (3\text{-}9)$$

虽然趋肤深度在某种意义上来说与电磁波在介质中穿透的深度有关，但它并不代表实际的有效探测深度。勘探深度 D 是个比较模糊的概念，较好的经验公式是：

$$D=\frac{\delta}{\sqrt{2}}=356\sqrt{\frac{\rho}{f}}\ (\mathrm{m}) \quad (3\text{-}10)$$

因此，当大地电阻率一定时，改变信号频率便可以得到由浅至深的电阻率变化关系，这就是频率电磁测深的基本原理。

4. 隐伏断层的电性特征

因隐伏断层潜伏地表以下，因此单凭通过野外的地质调查难以发现线索。但是，由于断层切断了岩层的水平连续性，上下盘的错动和断层滑动面的破碎导致岩层的电性特征发生明显变化，当这种电性异常突出到一定程度就能够通过地面的地球物理探测而反映出来。一般而言，相对于围岩介质的电阻率，断层可表现为低阻断层或高阻断层，决定于断层的性质、破碎带宽度、胶结程度、含水特征、岩脉侵入等特性及围岩电阻率特性。

根据断层的发育情况及其与两侧岩层的电性差异,断层的电性特征主要有以下几种表现[12]：当断层破碎带宽、断层电阻率与两侧岩层电阻率差异明显时，断层表现为高阻或低阻

板状体；当断层带不发育或断层电阻率与两侧岩层电阻率差异不明显时,如果断层两侧岩性不同，断层将表现为岩性分界面；如果断层两侧岩性相同且与断层的电阻率差异不大时，电法探测将很难反映。

对断层的大地电磁响应的研究发现[13]，TM 极化情况下,无论高阻基底还是低阻基底,当频率的穿透深度未达到基底时, 断层附近的视电阻率受到断层的影响， 在低阻一侧视电阻率低于真电阻率,在高阻一侧高于真电阻率。断层似乎是一种“放大器”,它放大了断层两侧的电阻率差别。并且随着频率的降低，这种放大作用越明显。在这种情况下，断层具有分离相位的作用,且分离方向相同。对所有频率来说，高阻一侧相位低于 45°，低阻一侧相位高于 45°。根据这种“放大器”特征，可确定断层的存在。根据实测的若干不同频率的视电阻率值, 沿测线画出几条曲线, 若在某处视电阻率出现台阶形状, 说明此处有断层存在。

5. 正演模拟及分析

为了能够在理论上发现隐伏断层的电性变化特征，设计了几组对比模型，分别从不同埋藏深度、不同断距、均匀大地状态下埋藏高阻和低阻异常体等不同角度探讨隐伏断层的电磁响应特征和 CSAMT 法对隐伏断层的探测能力。

采用美国 SCS2D 二维平滑模拟软件进行正演计算，模拟参数均为：发射电偶极 AB＝1km，发射电流 I＝8A，供电频率 $f=2^{n/2}$ Hz (n=0－26)，测量电极距 MN＝20m，收发距 r＝5km，测点 30 个。

5.1 不同埋深的隐伏断层正演模拟

设计第一组对比试验，包括三个地质模型：模型一（图 5－1）、模型二（图 5－4）和模型三（图 5－7）。地层都是分为两层，ρ_1＝100Ω.m，ρ_2＝500Ω.m，在 10 号点处有一垂直断层，断距 50m。三个模型中的断层埋深不同，分别为 50 m、100 m、200 m。地质模型和正演计算的视电阻率－频率断面图、阻抗相位－频率断面图分别见图 5－1 至图 5－9，均以点号为横坐标，以 $\log_2 f$ 为纵坐标绘图。

地质模型一中，从埋深 50m 处的断点开始垂直向下延伸到埋深 100m，由于切断层状地层，左右两侧的岩层性质不同。经正演计算，得到的视电阻率－频率断面图中（图 5－2），横向上看，断层引起的视电阻率畸变很明显，且位置清晰，10 号点左右两侧电阻率差异显著；纵向上看，从 $\log_2 f$＝13 开始一直延伸至 $\log_2 f$＝0，即从高频 f＝8192Hz 开始到低频 f＝1Hz，视电阻率都发生了扭曲，且越往深部变形越严重。阻抗相位－频率断面图中（图 5－3），在 $\log_2 f$＝9～12，即 f＝512～4096Hz 之间，阻抗相位出现明显的低值异常，由趋肤深度公式 2.41 估算其深度为 55.625m 以下，是断层位置的反映，下部基本不受影响，阻抗相位等值线仍然是呈水平状。

地质模型二和模型三中，随着断层埋藏深度的不断增加，视电阻率的畸变在浅层的表现越来越弱（图 5－5 和图 5－8）；而阻抗相位－频率断面图中，阻抗相位的变化依然比较明显，只是随着断层埋深的增加，异常区域也逐渐趋于低频段（图 5－6 和图 5－9），模型二的阻抗相位低值异常出现在 $\log_2 f$＝7～10，即 f＝128～1024Hz 之间，模型三的阻抗相位低值异常出现在 $\log_2 f$＝5～8，即 f＝32～256Hz 之间。对比结果说明，阻抗相位对断层的反映比较敏感，且能准确反映其埋深，而视电阻率是断层造成的综合反映，对位置的反映不确定。

模型一：断层埋深 50 米

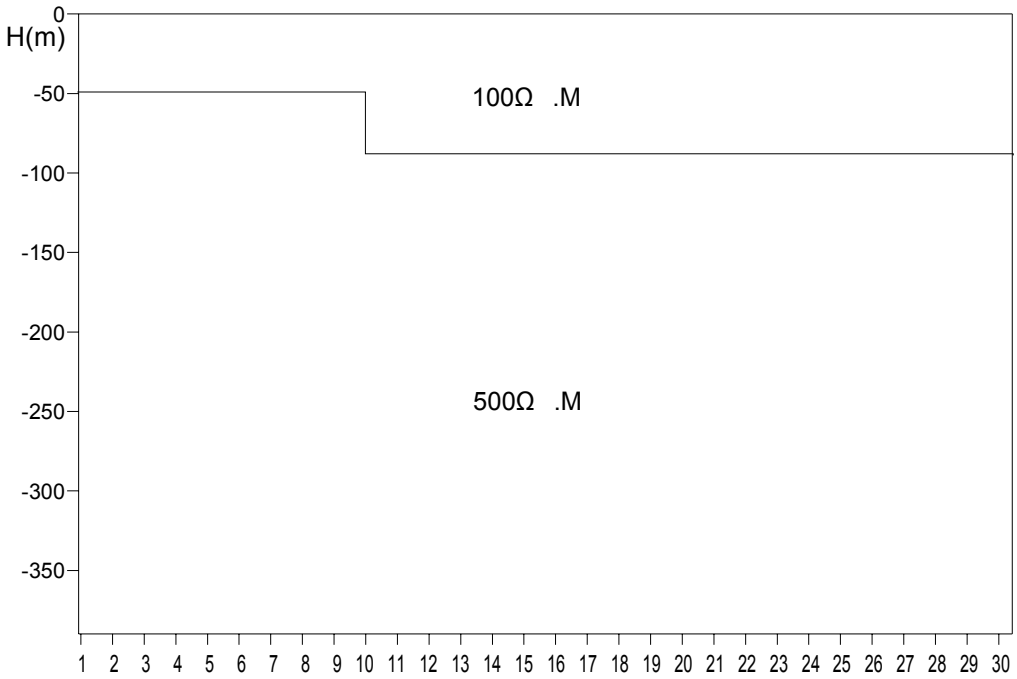


图 5－1 地质模型一

Fig 5-1 Geological model 1

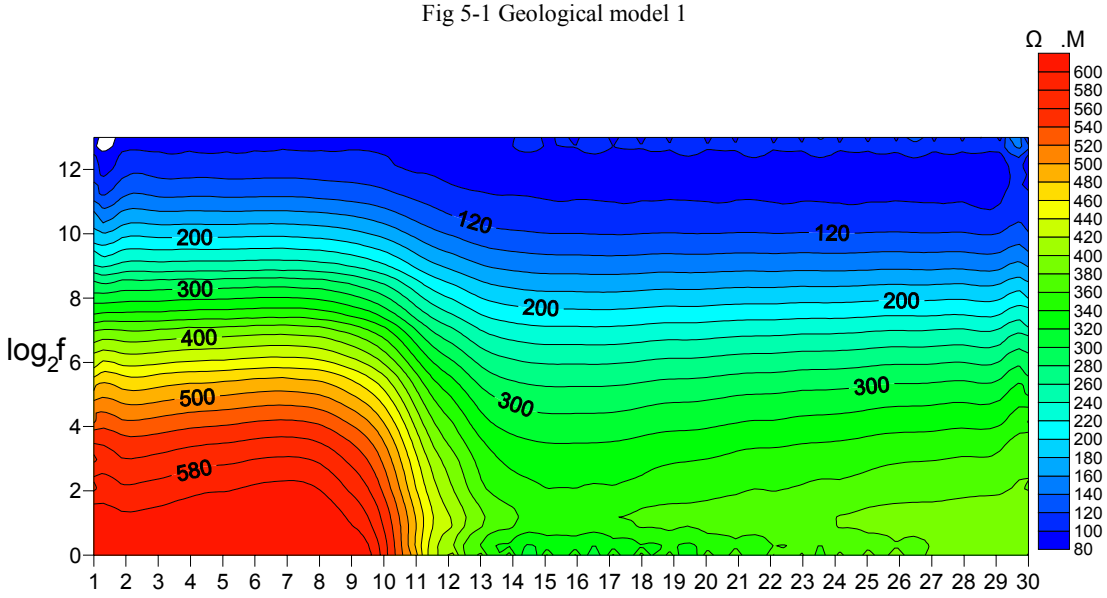


图 5－2 模型一正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-2 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 1

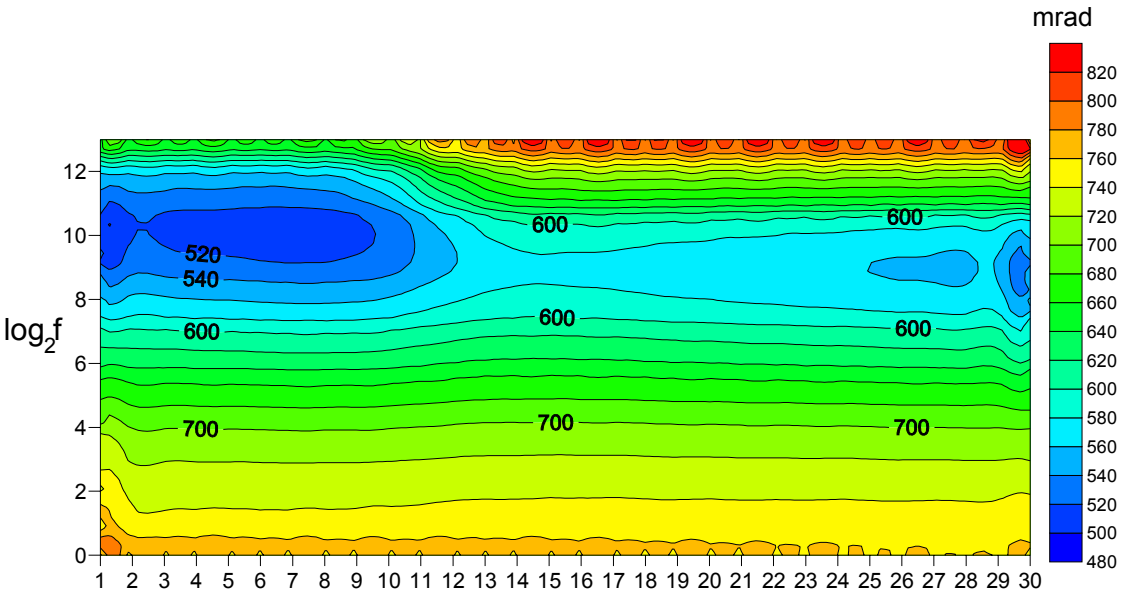


图 5－3 模型一正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-3 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 1

模型二：断层埋深 100 米

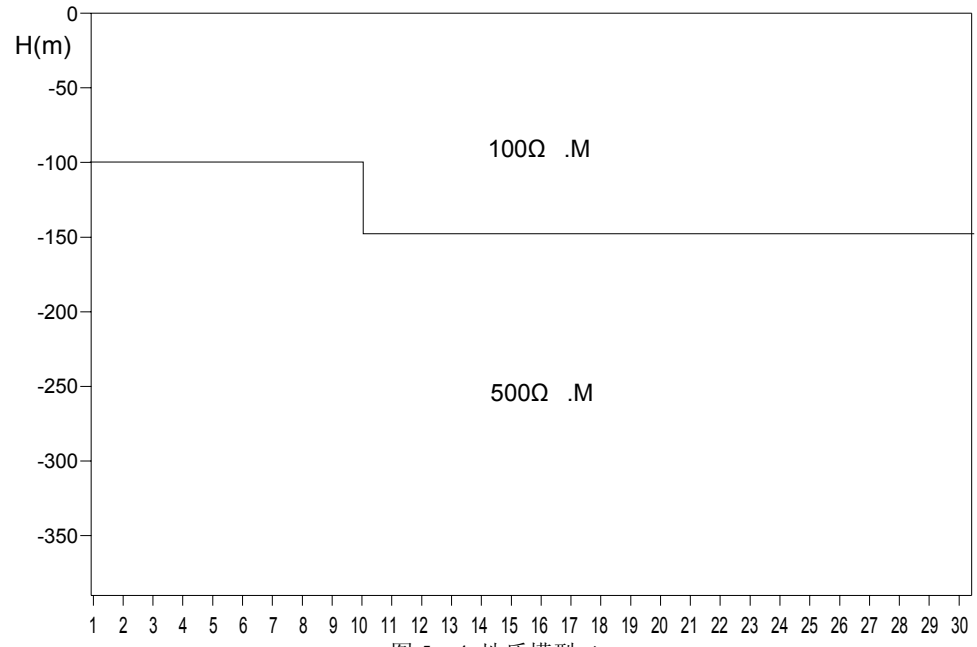


图 5－4 地质模型二

Fig 5-4 Geological model 2

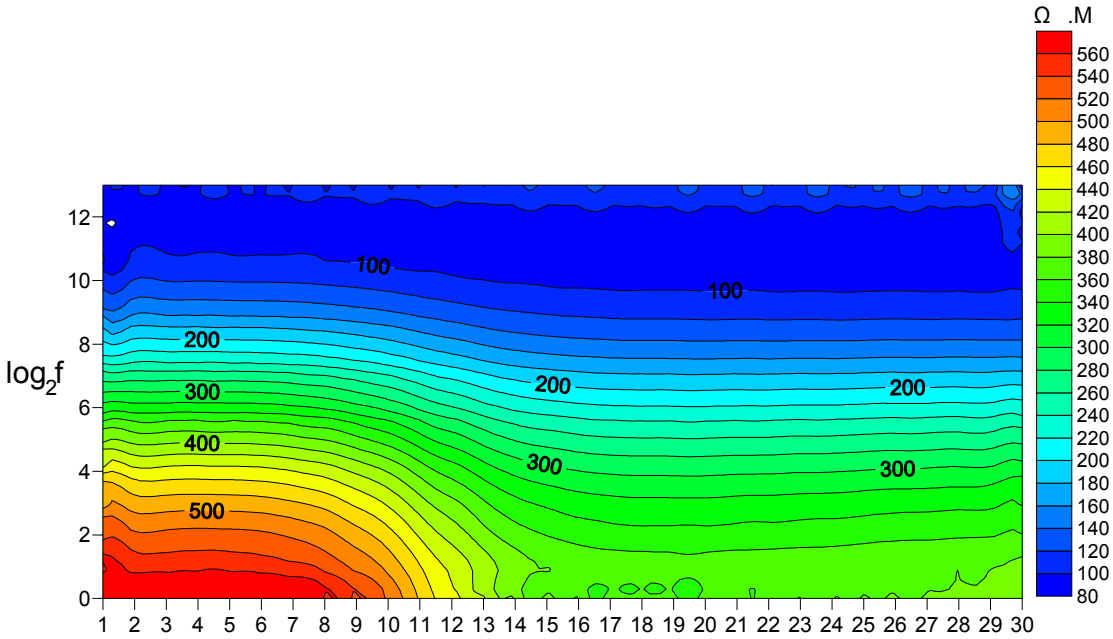


图 5－5 模型二正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-5 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 2

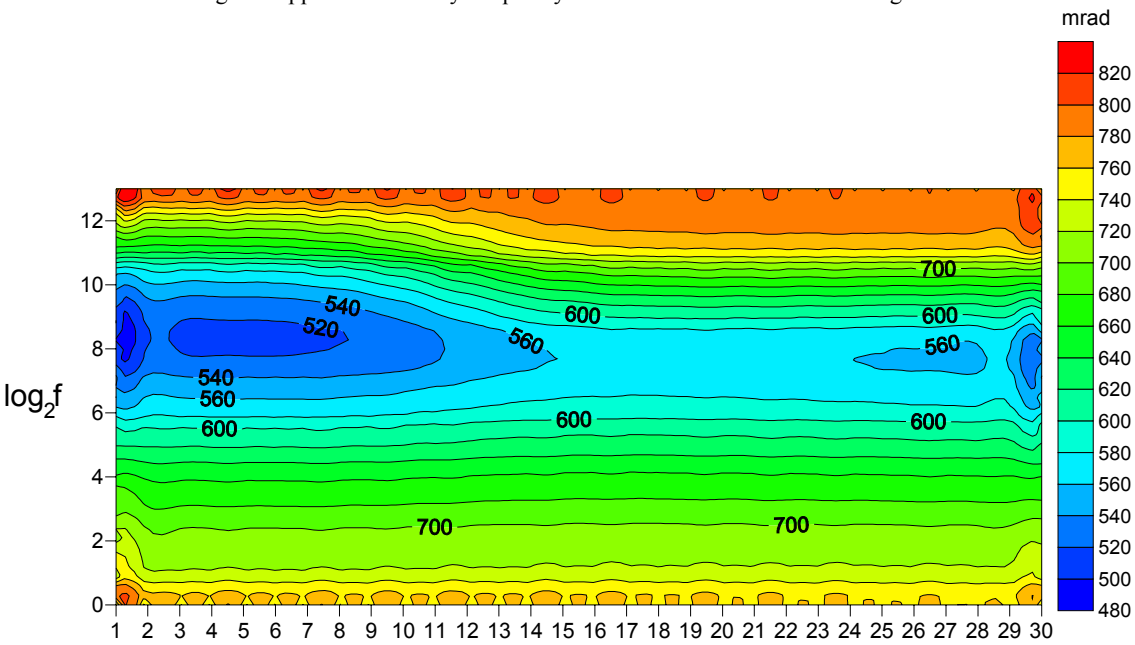


图 5－6 模型二正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-6 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 2

模型三：断层埋深 200 米

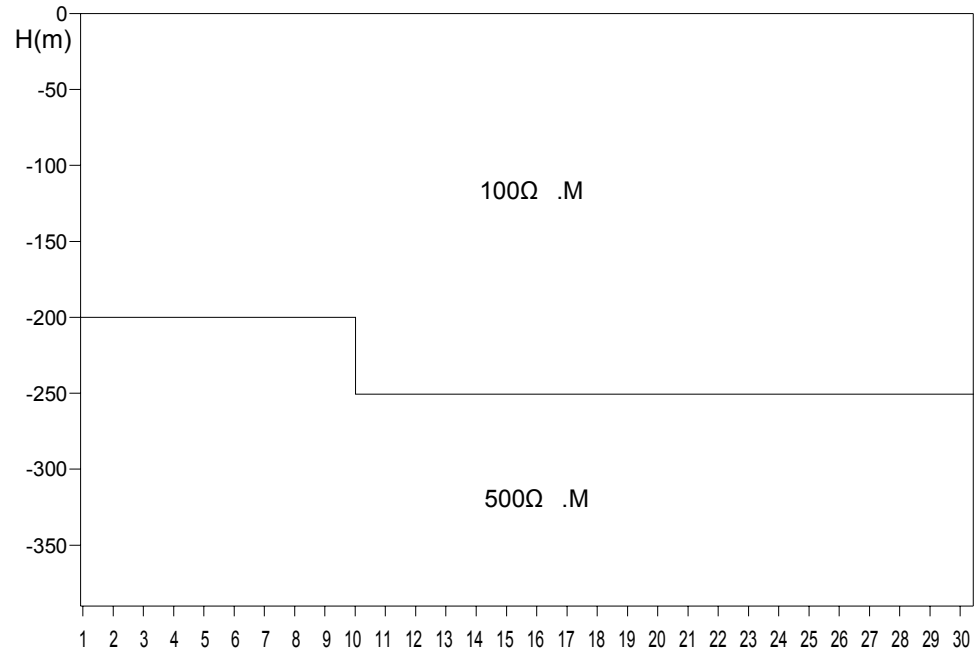


图 5－7 地质模型三

Fig 5-7 Geological model 3

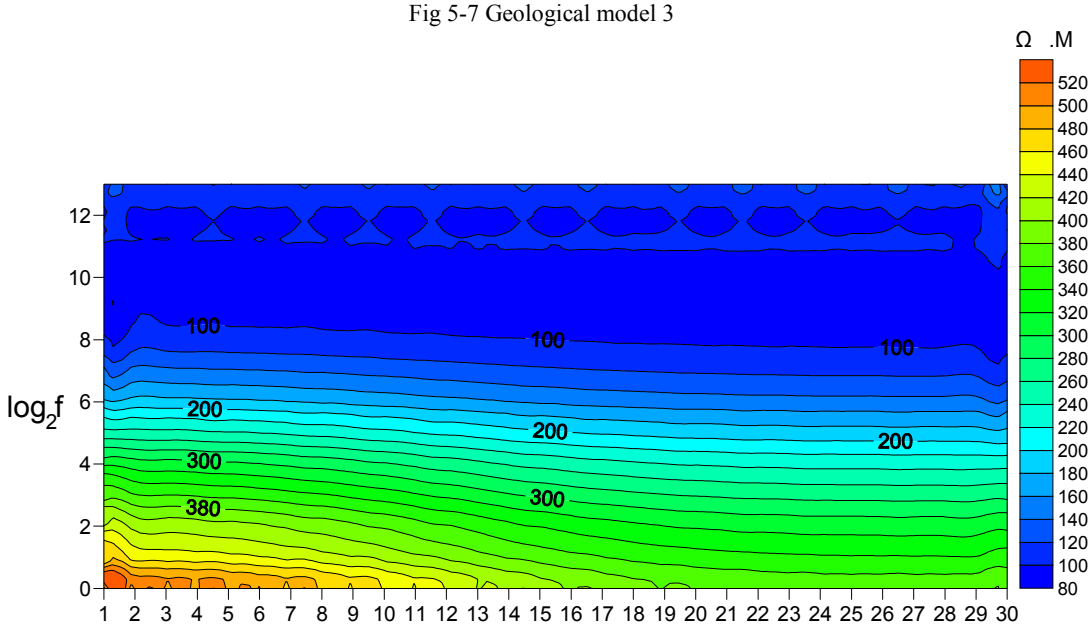


图 5－8 模型三正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-8 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 3

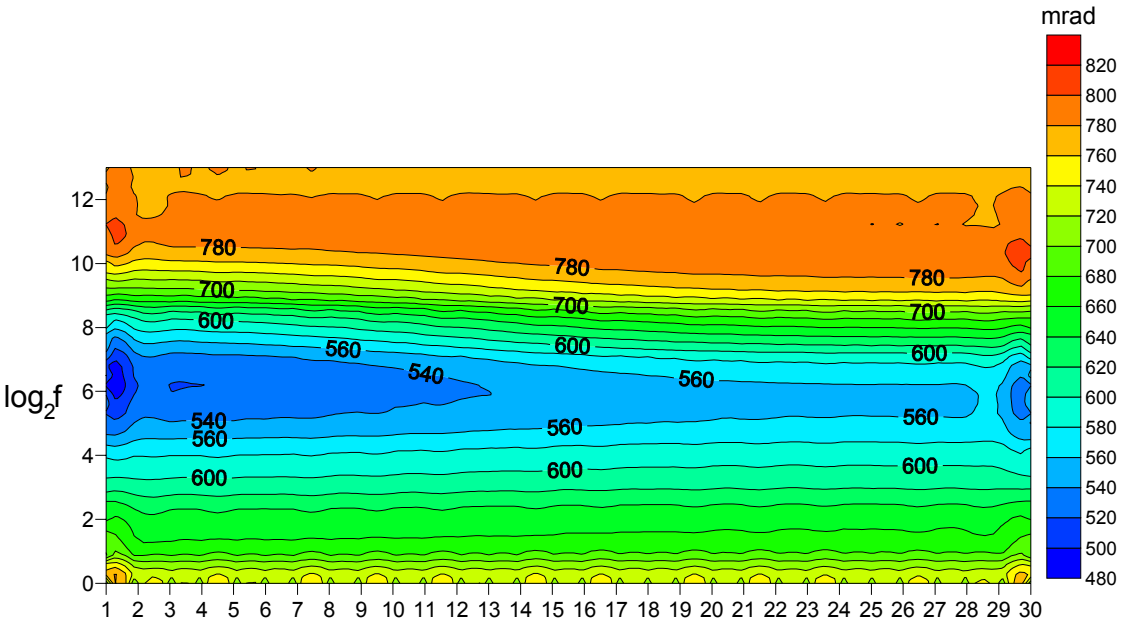


图 5－9　模型三正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-9 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 3

5.2 不同断距的隐伏断层正演模拟

设计第二组对比试验，包括三个地质模型：模型二（图 5－4）、模型四（图 5－10）和模型五（图 5－13）。地层都是分为两层，ρ_1＝100Ω.m，h_1=50m，ρ_2＝500Ω.m，h_2=350m，在 10 号点处有一垂直断层，断层埋深 100m。三个模型中的断层断距不同，分别为 50 m、100 m、10 m。地质模型和正演计算的视电阻率－频率断面图、阻抗相位－频率断面图分别见图 5－4 至图 5－6、图 5－10 至图 5－15，均以点号为横坐标，以 $\log_2 f$ 为纵坐标绘图。

与地质模型二相比，模型四中的断层断距增大一倍，在视电阻率－频率断面图（图 5－11）上所表现出来的区别就是以 10 号点附近为界限，左右两侧的视电阻率差异更大，特别是 10 号点之后，由于断层陷落，同深度的视电阻率取值在断距较大时比断距较小时要小很多，这是由于高阻地层所处的深度更大造成的；模型五中的断层断距仅 10m，所表现的情况恰恰相反（图 5－14）。

阻抗相位－频率断面图上，模型四的异常范围出现在 $\log_2 f$＝7～12 即 f＝128～4096Hz（图 5－12），与模型二相比，异常区间大了很多，但频率低于 128Hz 的区域等值线仍然保持水平，说明该区域基本不受影响；模型五的异常范围出现在 $\log_2 f$＝8～10 即 f＝256～1024Hz（图 5－15），异常区间减小，频率低于 256Hz 的区域等值线仍然保持水平。

对比结果说明，随着断层断距的增大，断层两侧的视电阻率差异愈加显著，等值线密集程度增大，而且对深部的影响也越来越大，但对浅层的影响较小；阻抗相位异常区的范围与断层所处位置基本一致，且随着断层断距的增大而增大，断层以上的地层和以下的地层受到的影响都较小。

模型四：断层断距 100 m

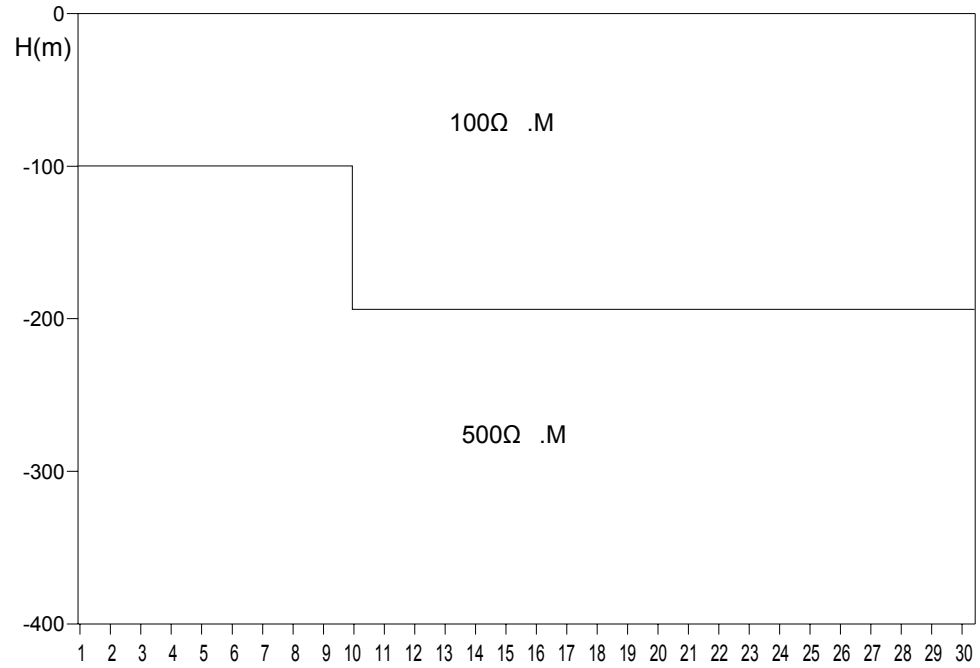


图 5－10 地质模型四

Fig 5-10 Geological model 4

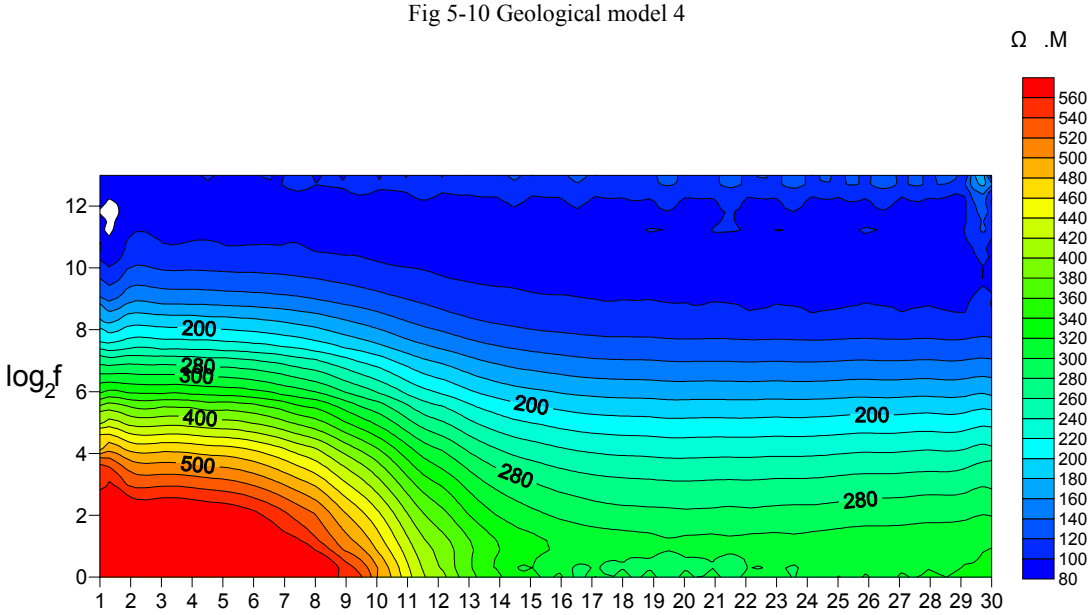


图 5－11 模型四正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-11 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 4

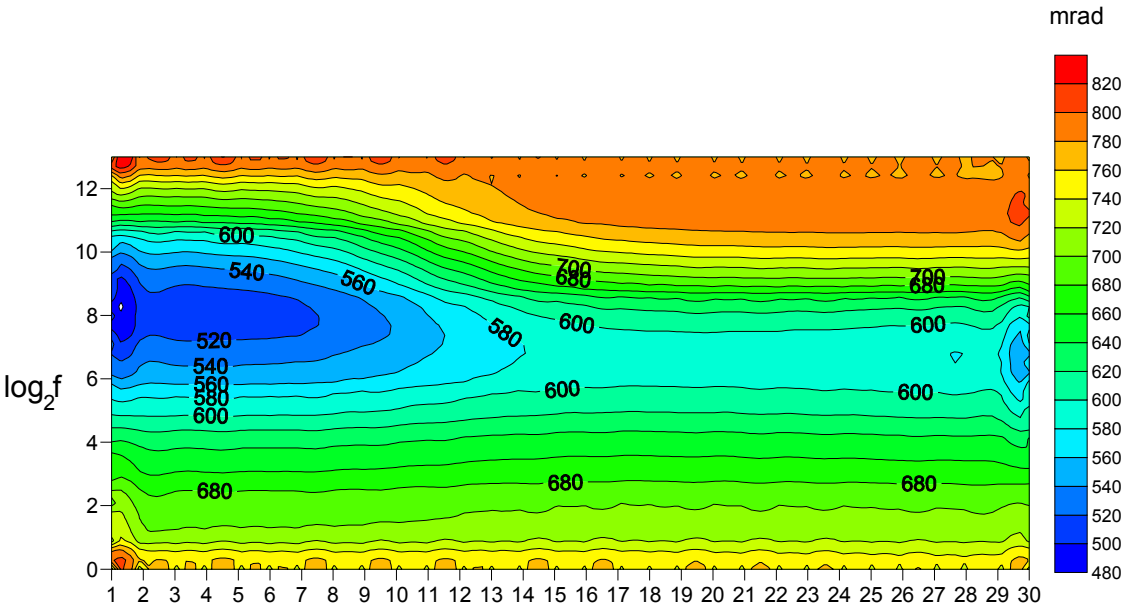


图 5－12　模型四正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-12 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 4

模型五：断层断距 10 m

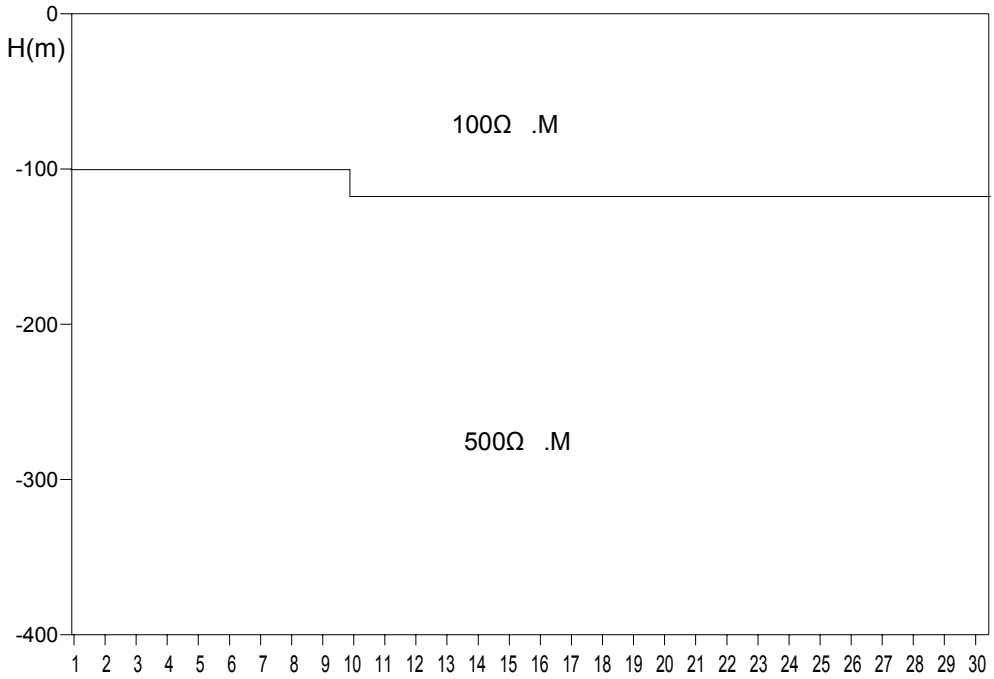


图 5－13　地质模型五

Fig 5-13 Geological model 5

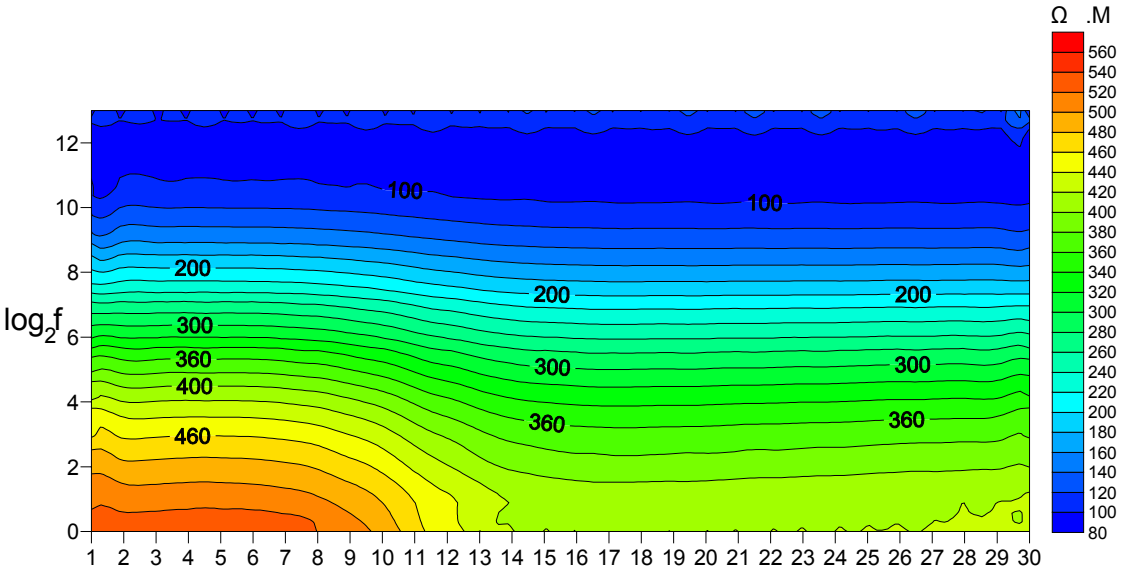


图 5－14 模型五正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-14 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 5

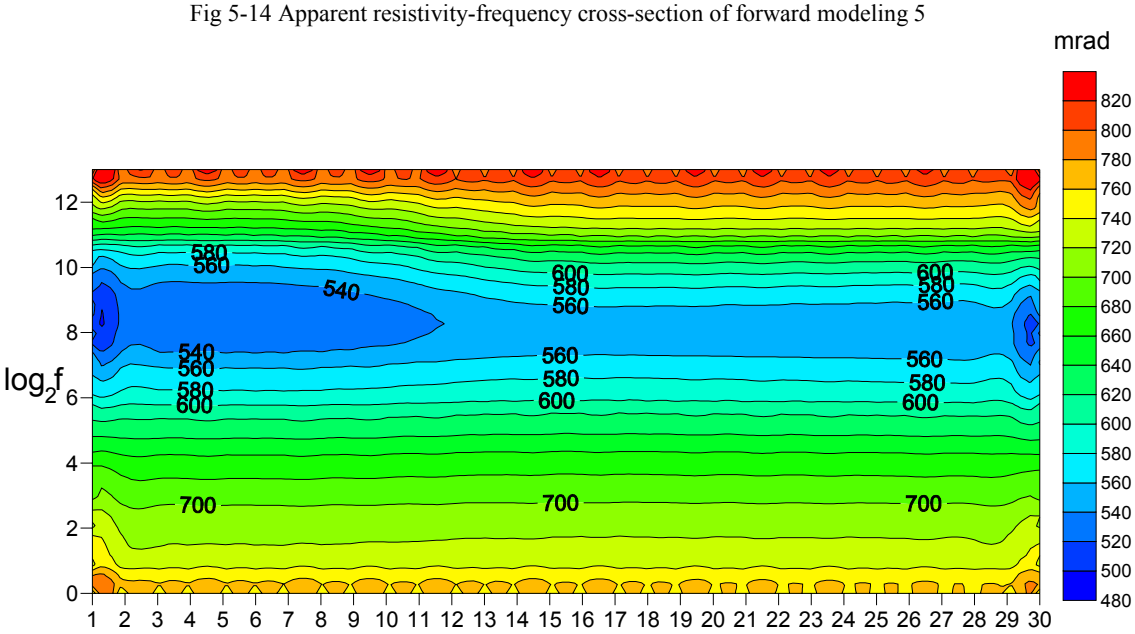


图 5－15 模型五正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-15 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 5

5.3 地下高低阻异常体的正演模拟

设计第三组对比试验，包括三个地质模型：模型六（图 5－16）、模型七（图 5－19）和模型八（图 5－22）。地层为均匀岩层，ρ＝100Ω.m，h=400m，地层中含有高阻、低阻地质异常体。地质模型和正演计算的视电阻率－频率断面图、阻抗相位－频率断面图分别见图 5－16 至图 5－24，均以点号为横坐标，以 $\log_2 f$ 为纵坐标绘图。

模型六是在均匀大地中含有高阻柱状体，柱状体体积很小，但经正演计算的视电阻率－频率断面图（图 5－17）中，异常区域明显增大，横向上，从 3 到 16 号点，电阻率基本上都呈现出直上直下的密集陡立状；纵向上，从 $\log_2 f=13$ 开始一直延伸至 $\log_2 f=0$，即从高频 f＝8192 Hz 开始到低频 f＝1Hz，视电阻率都发生了扭曲，且越往深部变形越严重。均匀大地中含有低阻柱状体的模型七（图 5－20）和同时含有高阻、低阻异常体的模型八（图 5－23）都表现一样的特征。

从阻抗相位－频率断面图上观察，无论是高阻还是低阻，异常体所处位置的阻抗相位都

是闭合环状，且高阻体所处位置阻抗相位出现低值异常（图 5－18），而低阻体所处位置出现高值异常（图 5－21），在横向上和纵向上，阻抗相位等值线都不再水平，可见阻抗相位对高阻和低阻异常体的敏感性都特别强，图 5－24 的对比更为鲜明，异常更加突出。

模型六：ρ_1＝500Ω.m 的高阻柱状体位于 10 号点处，埋深 100m

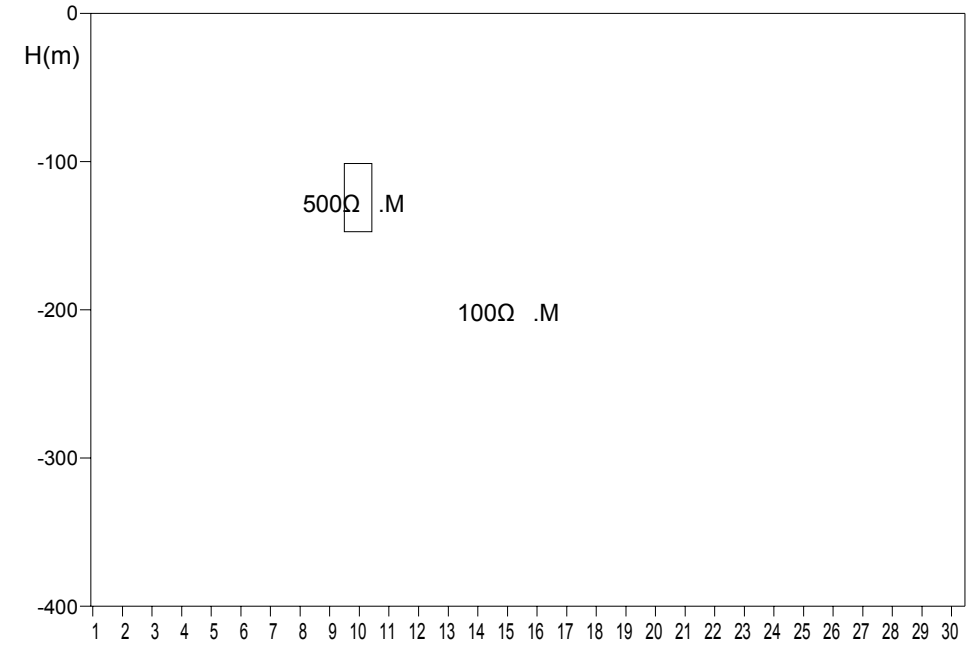


图 5－16 地质模型六

Fig 5-16 Geological model 6

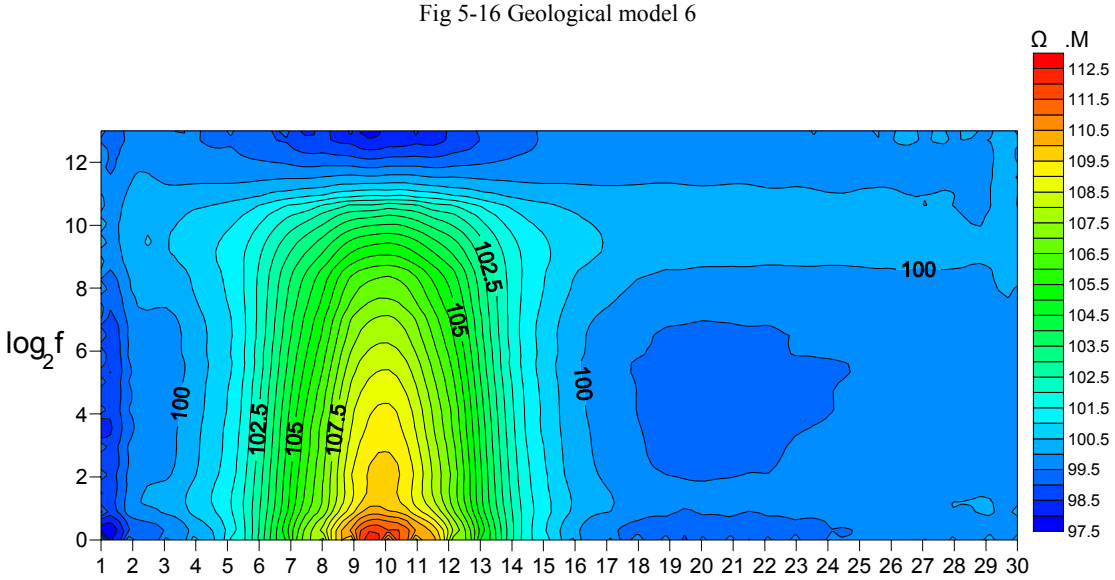


图 5－17 模型六正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-17 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 6

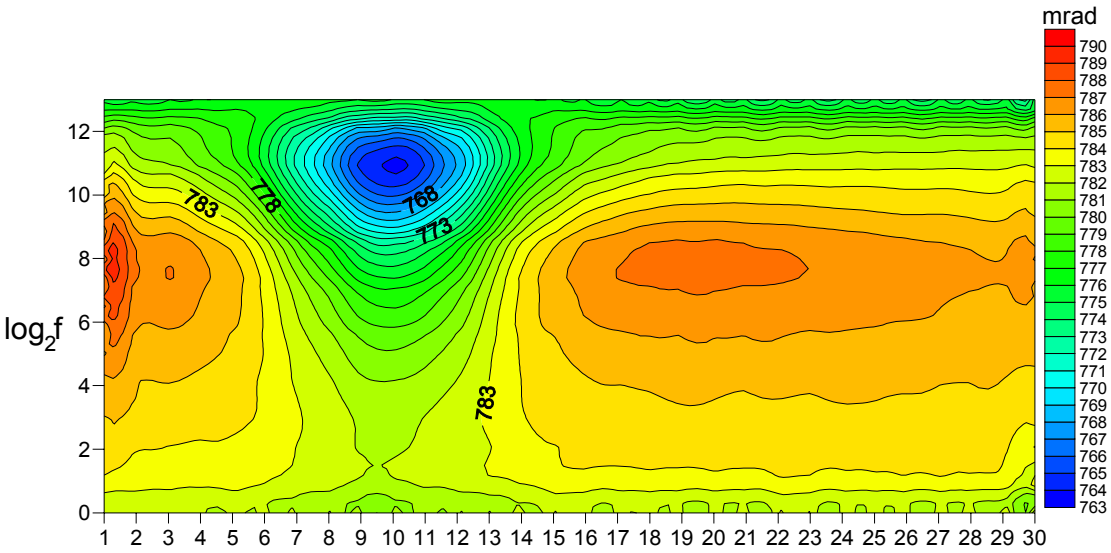


图 5－18　模型六正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-18 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 6

模型七：ρ_2＝20Ω.m 的低阻柱状体位于 10 号点处，埋深 100m

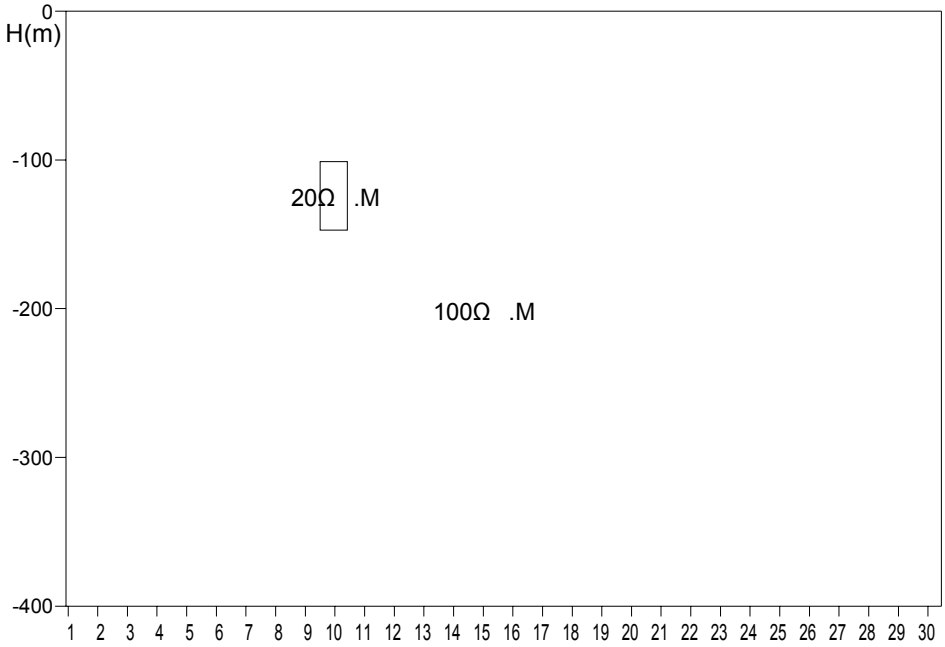


图 5－19 地质模型七

Fig 5-19 Geological model 7

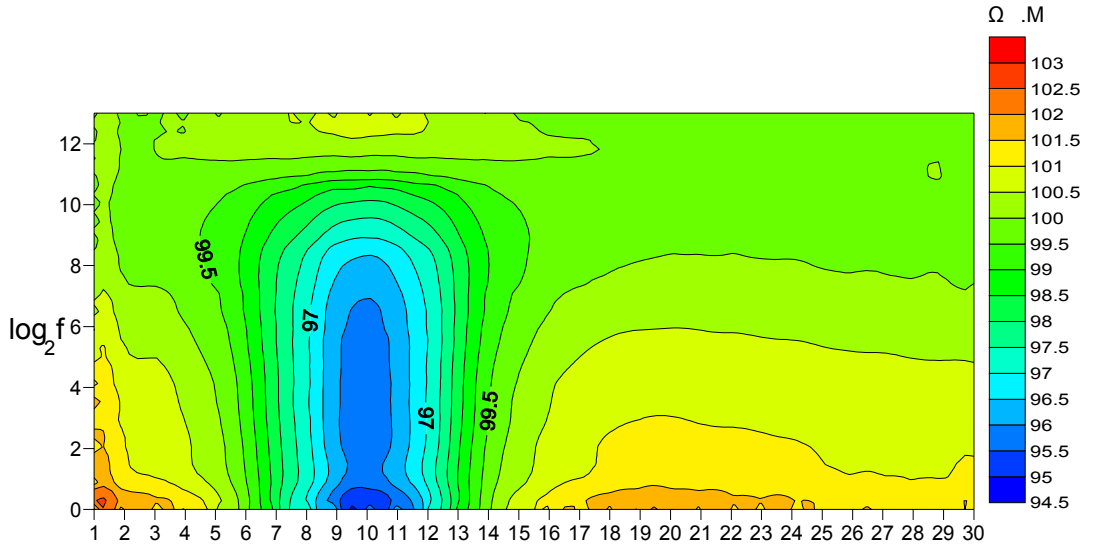


图 5－20 模型七正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-20 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 7

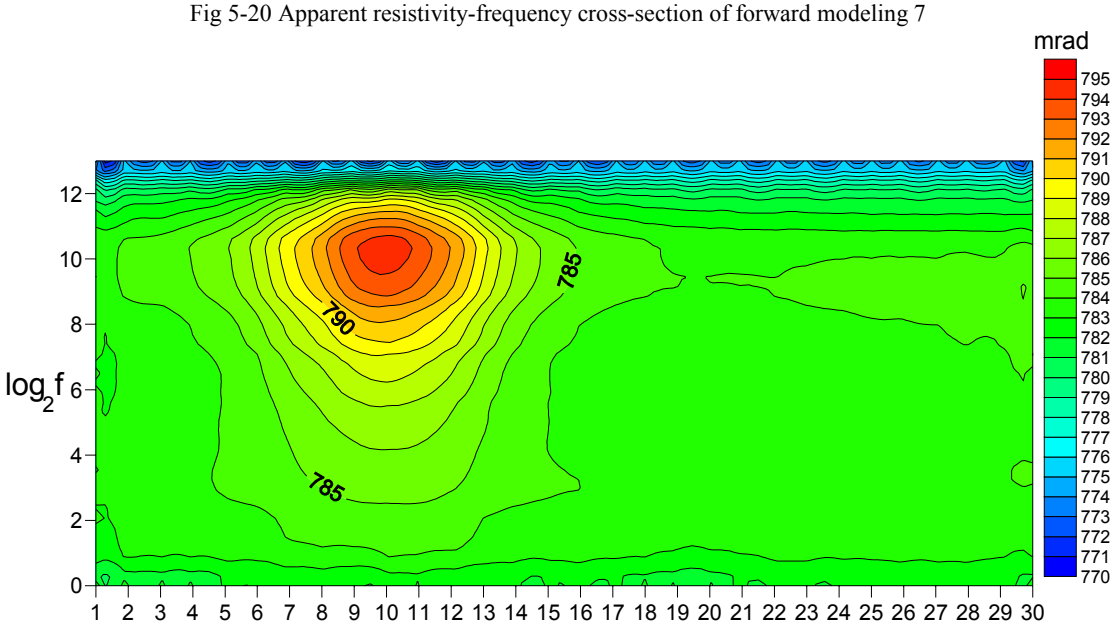


图 5－21 模型七正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-21 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 7

模型八：ρ_1＝500Ω.m 的高阻柱状体位于 10 号点处，ρ_2＝20Ω.m 的低阻柱状体位于 20 号点处，埋深均为 100m

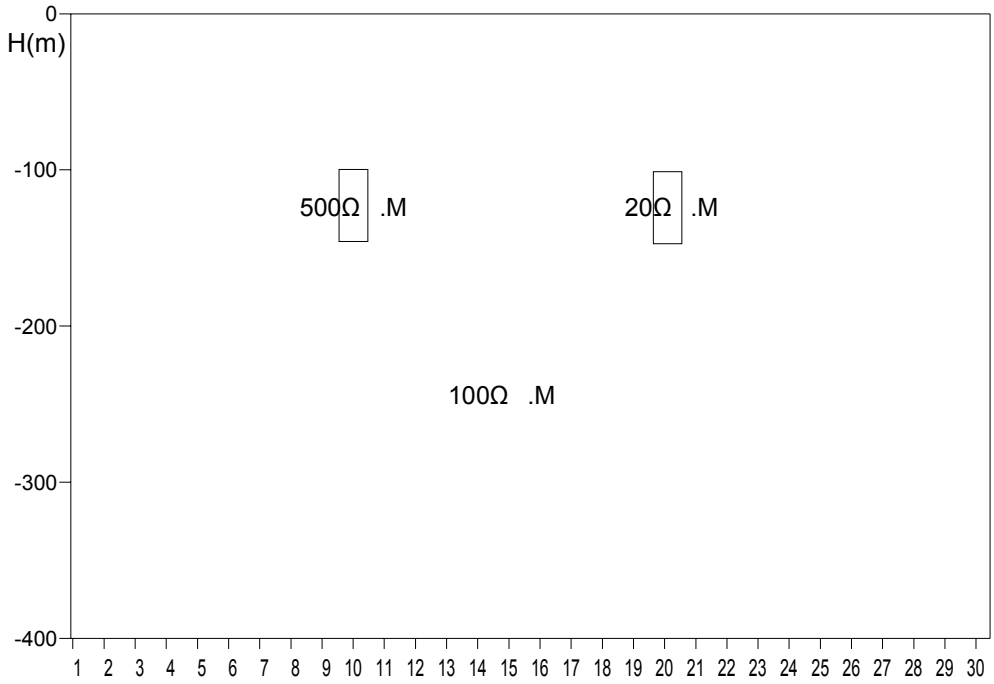


图 5－22 地质模型八

Fig 5-22 Geological model 8

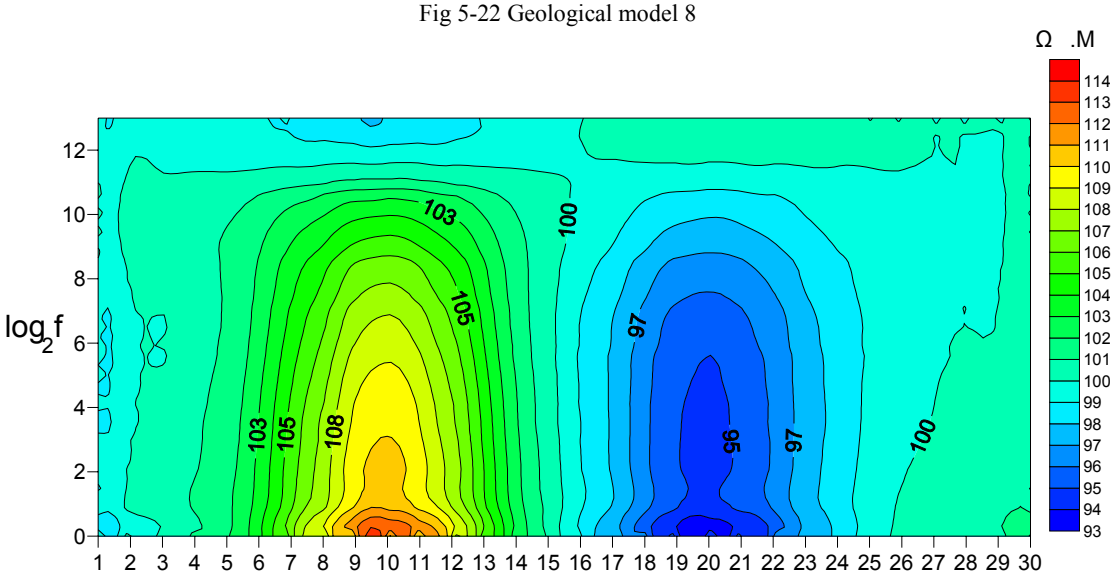


图 5－23 模型八正演模拟视电阻率－频率断面图

Fig 5-23 Apparent resistivity-frequency cross-section of forward modeling 8

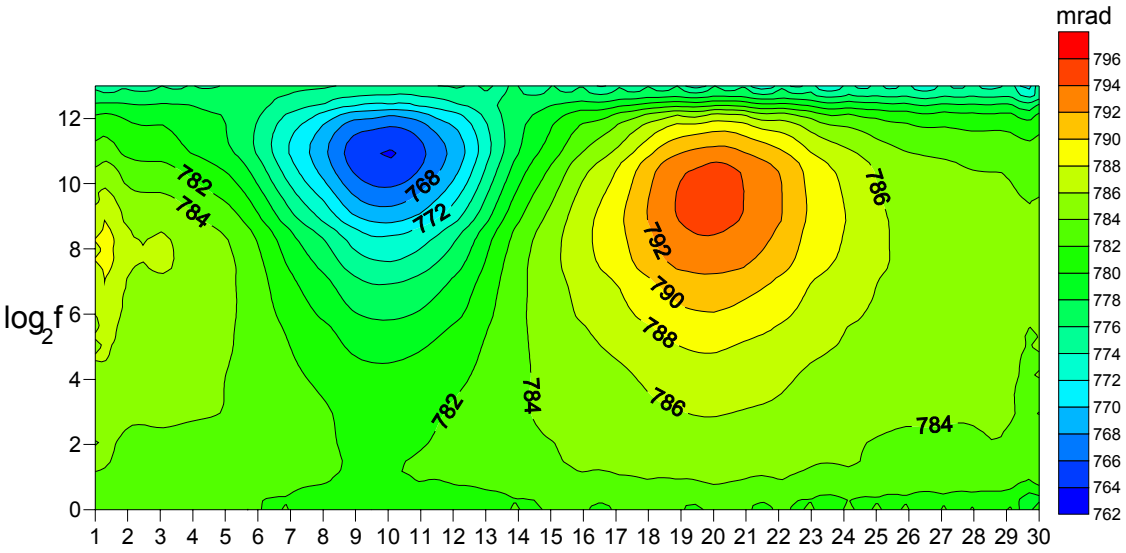


图 5－24 模型八正演模拟阻抗相位－频率断面图

Fig 5-24 Impedance phase-frequency cross-section of forward modeling 8

6. 结论与建议

通过三组地质模型的对比模拟研究，可以总结出以下几方面结果：

（1）相位数据对断层反映很敏感，特别是断层左右两边岩性不同时，阻抗相位截然不同，界限明显，断层对相位的分离作用具体表现为，高阻一侧比低阻一侧的相位值低。当断层继续向下延伸，两侧岩层性质一样时，阻抗相位仍然保持一致，没有变化。因此，使用阻抗相位资料帮助解释反演资料具有一定作用。

（2）隐伏断层的覆盖层越厚，即断层埋藏越深，则视电阻率的反映越不明显，但阻抗相位依然能够清晰体现出来。埋藏浅的断层对整个断面的视电阻率都有很大影响，特别是对深部数据的影响逐渐增大；埋藏深的断层对浅部的视电阻率数据影响很小，从断面图上很难看出异常。这是由于视电阻率不是某一种岩层的真电阻率，在地下存在多种岩层的情况下，它是在探测深度范围内各层岩石电阻率的一种综合效应，除了受到各种岩石电阻率的综合影响外，还与岩石、矿石的分布状态(包括一些构造因素)、电极排列等具体情况有关。由于体积效应，断层所在位置不仅该处的视电阻率畸变，而且对附近几个测点的电阻率值影响严重，因此仅仅用视电阻率资料进行物探解释会引起较大的误差。

（3）与视电阻率资料相比，阻抗相位具有更高的敏感度，局部结构电性参数的变化对阻抗相位资料的影响要大于对视电阻率资料的影响。由公式 3-4 可知，视电阻率资料主要反映大地电磁场频谱的振幅特征，是一种能量关系，对水平层状介质，观测的视电阻率值只是突出了某个特定深度上局部电性分布的空间加权平均作用；而公式 3-6 表明阻抗相位资料表示的是大地电磁场频谱的相位特征，是一种超前或迟后的关系，则因邻近层位的影响，阻抗相位会偏离均匀半空间中的 45°（45°为均匀大地条件下的电场和磁场之间的相位差），即 784.5mrad，断层的存在使得两侧岩性不同，如同岩层界面，阻抗相位也会偏离 45°。文献[14]经模拟计算发现阻抗相位曲线的斜率一般要比视电阻率曲线的斜率大，并且，对于阻抗相位资料，其斜率的变化幅度更大。斜率的变化幅度也在一定程度上反映了对地下电性结构的敏感程度。

（4）断层的异常特点与高阻和低阻柱状体异常特征有显著区别，高阻和低阻体往往在视电阻率图和阻抗相位图上显示的是闭合状区域异常，而断层的特征是两侧的视电阻率和阻抗相位显示出明显界限。与高阻和低阻异常体相比，断层的异常要小得多。

（5）从几组模型的正演结果来看，视电阻率－频率断面图反映的异常体的深度与实际情况出入很大。由于体积效应的影响，所观测到的视电阻率仅仅是测点附近局部区域内真实电性结构的空间加权平均，从某个观测值很难判定它是代表哪个深度的信息。一种比较可信的解释是，视电阻率曲线和阻抗相位曲线的变化非同步进行，阻抗相位资料的主要变化特征比视电阻率资料的主要变化特征超前，阻抗相位资料更易于捕捉到地层深部的信息，这与文献[15]中计算的结果一致。这在一定程度上说明了单纯依靠视电阻率资料或阻抗相位资料进行反演和解释，误差较大。CSAMT 的二维圆滑反演就是通过视电阻率和阻抗相位联合反演计算，获得二维反演电阻率，此时得到的反演结果基本上表达了地质体的真实电阻率，所以阻抗相位在断层处的显著变化能够经反演计算在二维反演电阻率中表达。

综上所述，利用 CSAMT 探测隐伏断层，对物探成果进行解释时，识别断层应遵循的规律是：在反演视电阻率断面图上，隐伏断层的异常表现一般为横向电阻率等值线发生错断、并伴有同向扭曲现象，有比较明显的密集梯度带，高阻与低阻之间呈现出明显的边界；通常情况下，根据断层两侧视电阻率值的不对称性可以直接定出上升盘和下降盘，一般是视电阻率值高的一侧为上升盘，视电阻率值低的一侧为下降盘，从断层两盘的位置差异可以估计垂直断距的大小的断层倾向；阻抗相位的数据对物探结果的解释能够起到重要的辅助作用，对于同一工作区内的若干条测线，视电阻率和阻抗相位异常点都应落在一条直线上，这是识别和准确判定隐伏断层的重要标志之一。此外，在探测隐伏断层时还应收集探测区的地质资料，以对本区断层可能的表现形式及电性结构有一个大致的了解，选择合适的探测方法及电极距、装置参数，以使探测能最大程度的体现可能隐伏断层的异常。根据电性异常表现，区分隐伏断层和岩溶空洞等其他不良地质体，有些有干扰的断面，在一种探测方式中断层显示不清，但在另一探测方式中干扰能被压制使断层能有明显表现，还有些情况则是干扰造成的断层假象，这些都需要用多种方式综合判定，辅助以其他物探手段，提高物探解释结果的准确性。

参考文献

[1]Koichi Suzuki , Shinji Toda，Kenichiro Kusunoki,et al. Case studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick quaternary[J].Engineering Geology,2000,56:29－45.
［2］李金都,王学潮.南水北调西线工程区活动断层 CSAMT 技术探测研究[J].岩石力学与工程学报，2004，23(17)：2932－2936.
［3］底青云，伍法权，王光杰等.地球物理综合勘探技术在南水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用[J].岩石力学与工程学报，2005，24(20)：3631－3638.
［4］徐光辉,黄力军,刘瑞德.应用可控源音频大地电磁测深于北京水文地质勘查[J].物探与化探，2005，29(6)：523－525.
［5］谭儒蛟,胡瑞林,徐文杰等.金沙江龙蟠变形体隐伏构造 CSAMT 探测与解译[J].地球物理学进展，2007，22（1）：283－288.
［6］邓洪亮,谢向文,陈玲.CSAMT 法探测深长埋隧洞中隐伏断层的技术应用[J].南水北调与水利科技，2007，5(2)：12－15.
［7］安志国，底青云，王光杰.深埋长隧道洞线岩性 CSAMT 法分析研究[J].岩石力学与工程学报，2008，27：3286－3291.
［8］许广春，习铁宏，段洪芳.可控源音频大地电磁法(CSAMT)在隧道勘察中的应用[J].工程勘察，2008，6：68－71.
［9］石昆法.可控源音频大地电磁法理论与应用[M].北京：科学出版社，1999，10.
［10］汤井田，何继善.可控源音频大地电磁法及其应用[M].长沙：中南大学出版社，2005，12.
［11］底青云，王若等.可控源音频大地电磁数据正反演及方法应用[M].北京：科学出版社，2008，4.
［12］王爱国，马巍，张向红等. 隐伏断层电性特征及浅层电法探测[J].西北地震学报，2006，28(3)：242－247.

［13］朱仁学.断层的大地电磁响应的研究[J].长春科技大学学报，1999，29(3)：290－294.
［14］晋光文.大地电磁资料的灵敏度研究[J].地球物理学报，1991，34(4):465－473.
［15］晋光文.大地电磁阻抗相位资料的特点和应用[J].地震地质，1988，10（4）：159－168.

Forward Modeling of Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics Method to Detect Buried Faults

Ma Zhifei
Beijing Institute of Geology,Beijing (100120)

Abstract

Buried fault is the major potential risk of a lot of projects. It is a problem should be solved to detect the location and attitude of buried fault accurately in the field of geological exploration projects. As a branch of electrical prospecting techniques, controlled source audio-frequency magnetotellurics method has improved resolution because it can measure the electric field and magnetic field at the same time, it is used more and more widely depending on the advantages of great exploration depth, high efficiency, little topographic effect.In order to analyze the theoretical basis and the feasibility of appling electrical prospecting techniques in buried fault detecting, according to the electrical characteristics of coalfield, three groups of geological models were made, including buried faults of different depths, different fault throw and high or low resistive anomalous body. By means of forward modeling, the electromagnetic response of buried fault of different depths and different fault throw was studied, the characteristics of apparent resistivity and impedance phase were analyzed, different electromagnetic response of fault and high or low resistive anomalous body was distinguished.It could provide a theoretical basis to identify the buried fault correctly. The results showed that: phase data was great sensitive to the fault, impedance phase isogram was different and the boundary was very clear, particularly when the lithological on both sides of the fault changed; The thicker the cover above buried fault is, the less obvious apparent resistivity reflected, but impedance phase still be able to reflect clearly; compared with the apparent resistivity data, impedance phase had a higher sensitivity and it was easier to capture the information from deep stratigraphic; There is a significant distinction between the electrical resistivity anomaly of fault and high or low resistive anomalous body.

Keywords: CSAMT, buried fault, cagniard resistivity, impedance phase, forward modeling

作者简介：马志飞（1984-），男，汉族，河南省郸城县人，地球探测与信息技术专业硕士，现在北京市地质研究所从事地质与地球物理勘探的研究， E-mail：pony1984621@yahoo.com.cn.