

铁路工程勘察中大定源瞬变电磁方法的应用

郭志强¹

翁爱华²

(1.铁道第三勘察设计院集团有限公司,天津 300251; 2.吉林大学应用地球物理系,吉林长春 130026)

摘要 本文讨论了大定源瞬变电磁资料处理的基本方法。利用公式对实际数据进行了处理,并和基于中心回线原理处理的大定源瞬变电磁数据的计算结果进行比较,发现基于中心回线原理处理的结果在回线边缘视电阻率偏大,导致回线区域视电阻率边缘高,中间低,呈U形断面。模拟结果表明,铁路工程勘察采用瞬变电磁法时,要获得准确的地电信息,必须采用合适的处理方法。

关键词 大定源瞬变电磁; 视电阻率; 铁路工程勘察

前言

目前,瞬变电磁法在铁路工程勘察中的应用越来越多,特别是针对采空区的探查,瞬变电磁已成为一个非常重要的方法。在实际应用中,一般采用中心回线或者重叠回线进行观测,但这种方式工作效率较低,为提高工作效率,需要采用大定源瞬变电磁方法,只需要敷设一次发射回线,在回线内外都可以测量,工作效率大幅度提高。在实际工作中,大定源观测装置常用矩形大回线作为发射源,在回线外或者回线内测量垂直磁场产生的感应电动势,进而由观测的数据分析地下电阻率的变化规律。但大定源瞬变电磁法的资料解释目前多采用多道电位(感应电动势)剖面进行定性解释,因而影响瞬变电磁技术的实际应用及效果。目前多采用半定量解释方法,其原理基于中心回线工作原理。这样就要求大定源瞬变电磁的测量必须在回线中部1/3的区域进行。但实际工作中,为了进一步提高工作效率,测量可能会靠近回线进行,所得到的数据此时如果仍用中心回线原理进行解释,发现中心回线处理的结果在回线边缘,电阻率偏大,导致靠近回线区域视电阻率边缘高,中间低,呈U形断面。为解决靠近回线边缘区域视电阻率失真的问题,本文利用基于矩形大定源理论的视电阻率计算方法,对理论和实际资料进行了计算。并基于计算结果指出铁路工程勘察中必须采用合适的回线尺寸,以便获得目的层响应。

1 大定源瞬变电磁视电阻率定义

地表敷设的矩形大定源回线,在水平地表面产生的垂直磁场感应电动势表达式为

$$\varepsilon(t) = \frac{IA_R}{2\pi\sigma} [F(y_1, x_1) - F(y_1, x_2) + F(x_2, y_2) - F(x_2, y_1) + F(y_2, x_2) - F(y_2, x_1) + F(x_1, y_1) - F(x_1, y_2)], \quad (1)$$

式中 σ 为均匀半空间介质的电导率, I 是供电电流, A_R 是接收线圈的磁矩,并且

$$x_1 = x_R + L_x/2, y_1 = y_R + L_y/2, x_2 = x_R - L_x/2, y_2 = y_R - L_y/2, \quad (2)$$

其中 (x_R, y_R) 为相对回线中心的接收点坐标, L_x, L_y 为发射回线的边长。而 $F(x,y)$ 的计算公式为

$$F(x, y) = \left(\frac{2 + x^2/\rho^2}{x^3} \right) \frac{y}{\rho} \operatorname{erf}(u_\rho) - \frac{2u_y}{\sqrt{\pi}x^3} \left(\frac{x}{\rho} \right)^2 e^{-u_y^2} - 2 \frac{1 + u_x^2}{x^3} e^{-u_x^2} \operatorname{erf}(u_y), \quad (3)$$

这里, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, $u_x = \sqrt{\mu_0 \sigma x^2 / 4t}$, $u_y = \sqrt{\mu_0 \sigma y^2 / 4t}$, $u_\rho = \sqrt{\mu_0 \sigma \rho^2 / 4t}$ 。 erf 为概率积分。

从公式(1),由观测的感应电动势获得均匀大地的电阻率,必须采用数值方法进行。这里采用二分法获得大定源法的全区视电阻率估计。

2 大定源瞬变电磁计算结果

2.1 理论计算结果

采用半空间模型检验大定源瞬变电磁计算结果。首先对电阻率为 $100\Omega\cdot\text{m}$ 的均匀半空间进行数值模拟,假定在电阻率为 $100\Omega\cdot\text{m}$ 的均匀半空间上,敷设 $600\text{m}\times 200\text{m}$ 的矩形发射回线,以线圈左下角点为原点,分别计算布设在左下角与回线中心附近两点的全区视电阻率值。从图1可见,无论是靠近发射回线边界还是回线中部的测点,计算的全区视电阻率都反映了介质的真电阻率。同时,由于直接求方程的根,对早期时间和晚期时间,都能给出电阻率的真实估计。

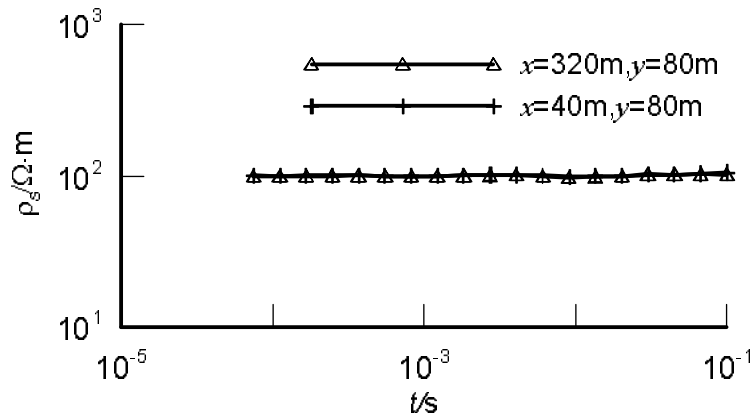
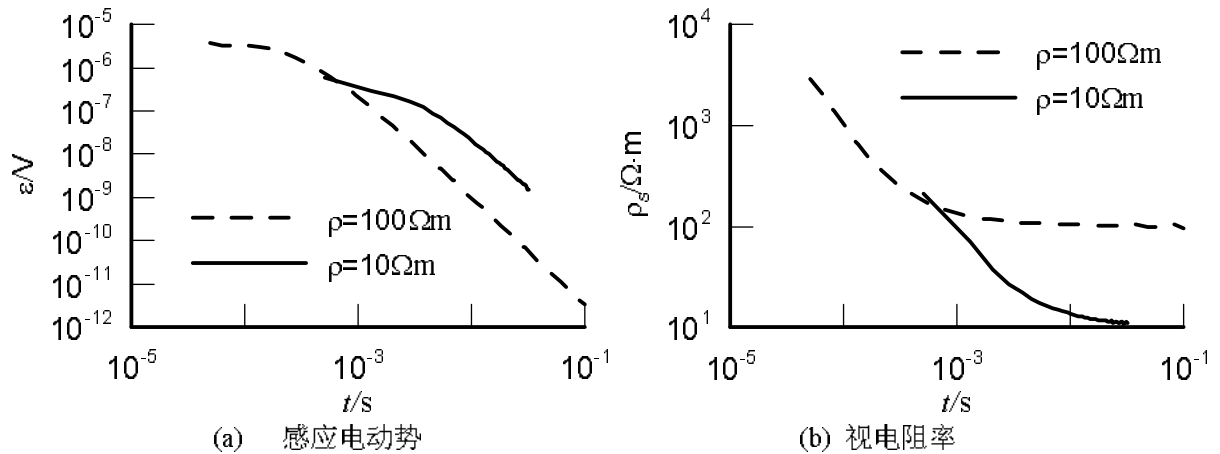


图 1 均匀半空间大定源视电阻率

2.2 大定源资料用中心回线方法处理结果分析

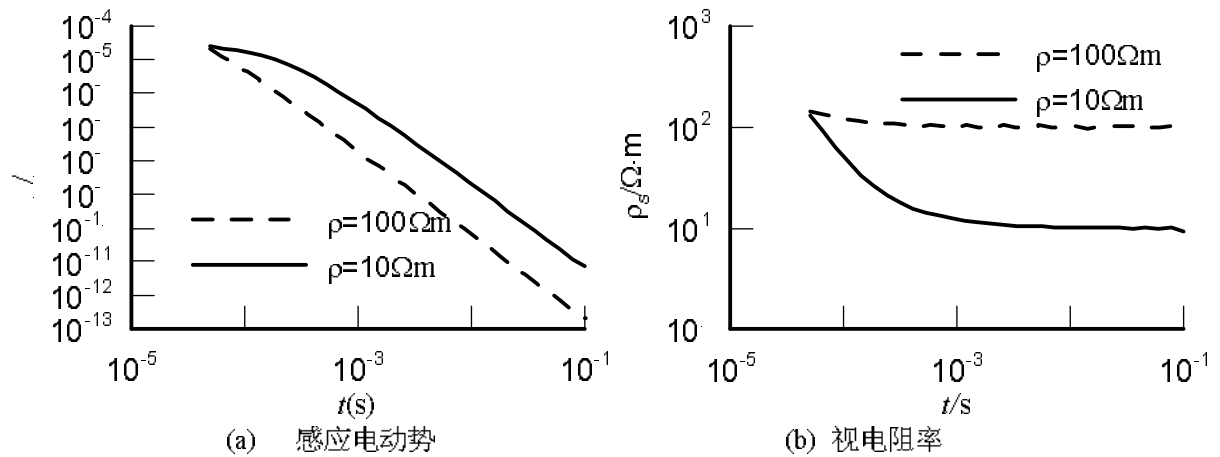
在回线中心处，大定源理论与中心回线理论是一致的，因此，可以用中心回线方法讨论线圈大小对探测深度影响。从理论分析，用于铁路工程勘察时由于探测深度相对较浅，采样时间较早，中心回线方法在线圈很大后，早期信号已与地层电阻率无关系，获得的视电阻率已经不能反映出实际的地层电阻率，且计算的电阻率往往比实际的要高。只有到了晚期，计算的电阻率才能反映实际电阻率。这种规律明显反映在图 2 的结果中，图 2 中大地电阻率假定为 10 或 100 $\Omega \cdot m$ 时，发射回线 800m \times 800m，图 2a 和图 2b 分别为在回线中心点处计算的感应电动势和视电阻率曲线。将发射线圈缩小为 200m \times 200m 后，在回线中心点处计算的感应电动势和视电阻率曲线见图 3。此时，计算的视电阻率无论浅部还是深部，都能反映实际的电阻率变化。因此，对于铁路工程勘察，采用中心回线，线圈要求不能太大，这样才能获得浅部信息。显然，该结论同样适用于大定源工作装置。



(a) 感应电动势

(b) 视电阻率

图 2 800m \times 800m 大回线中心感应电动势和视电阻率曲线



(a) 感应电动势

(b) 视电阻率

图 3 200m \times 200m 大回线中心感应电动势和视电阻率曲线

2.3 线圈的边缘效应

对于实际的大定源资料，必须要求测量在回线中部 1/3 区域中进行，此区域中场基本和回线中心处的场值基本一样，因此能采用中心回线技术处理这些资料。但当测量范围超过此规定，尤其靠近回线，场将发生较大变化。此时，采用中心回线处理技术将产生较大的误差。图 4a 为大地电阻率为 $100\Omega\cdot\text{m}$ 时大定源模拟点位分布。图 4b 为该 4 点大定源产生的感应电动势。从图可见，在此情形下，各点的感应电动势在早期差别较大。如果基于中心回线处理技术，浅部将出现电阻率假异常。

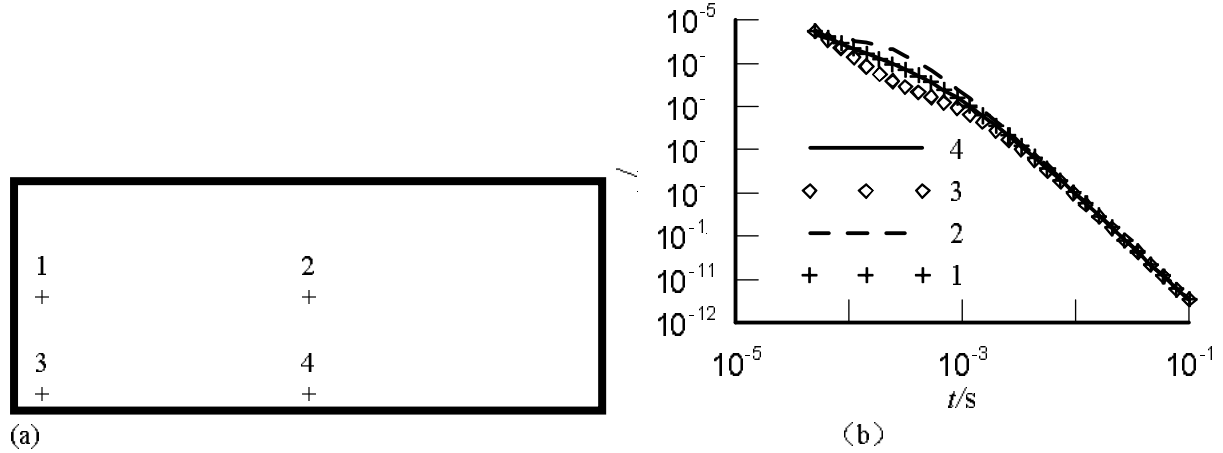


图 4 大定源点位分布及感应电动势

对图 4b 的感应电动势，分别采用中心回线和大定源方法计算视电阻率，结果如图 5。从图可见，对于基于大定源理论方法，即使观测点靠近边缘，其计算的视电阻率也能反映出实际的电阻率变化（图中，4 个点的视电阻率重合，只绘制一条）。而对于基于中心回线理论的处理结果，在晚期，视电阻率基本重合并趋于大地真电阻率。同时，即使测点在回线中心，计算的视电阻率在早期也不能反映介质的真电阻率。因此，对于大定源数据，采用中心回线处理必须慎重。

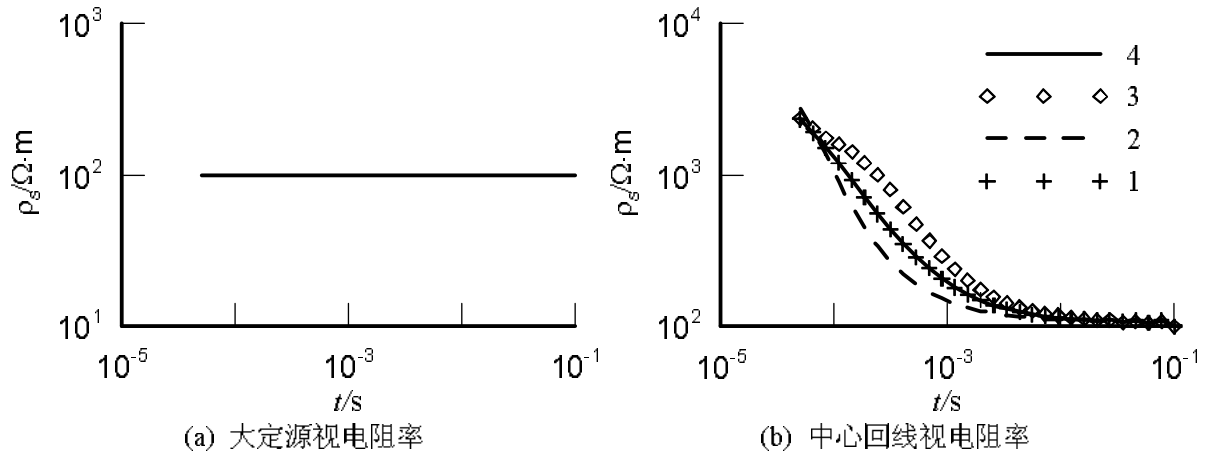


图 5 大定源和中心回线计算的视电阻率

3 工程实例

图 6 为某次铁路工程勘察大定源瞬变电磁法野外观测排列布置图。线圈边长 $800\text{m}\times 800\text{m}$ ，接收磁矩 10000m^2 。点距 50m 。工作频率 32Hz 。采样时间从 $50\mu\text{s}$ 到 50ms 。图 7 为右上角测点的感应电动势曲线及计算的视电阻率。同图 5 中结果类似，采用中心回线原理处理的视电阻率在早期偏高，与采用大定源处理的结果相差较大。

大定源回线装置参数分布图

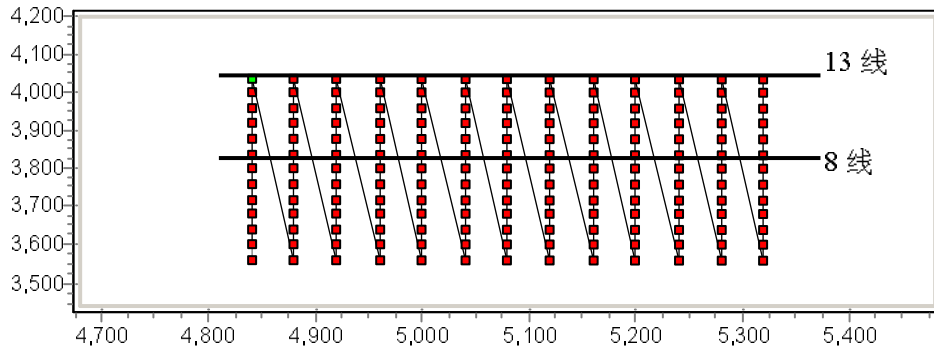


图 6 大定源排列布置图

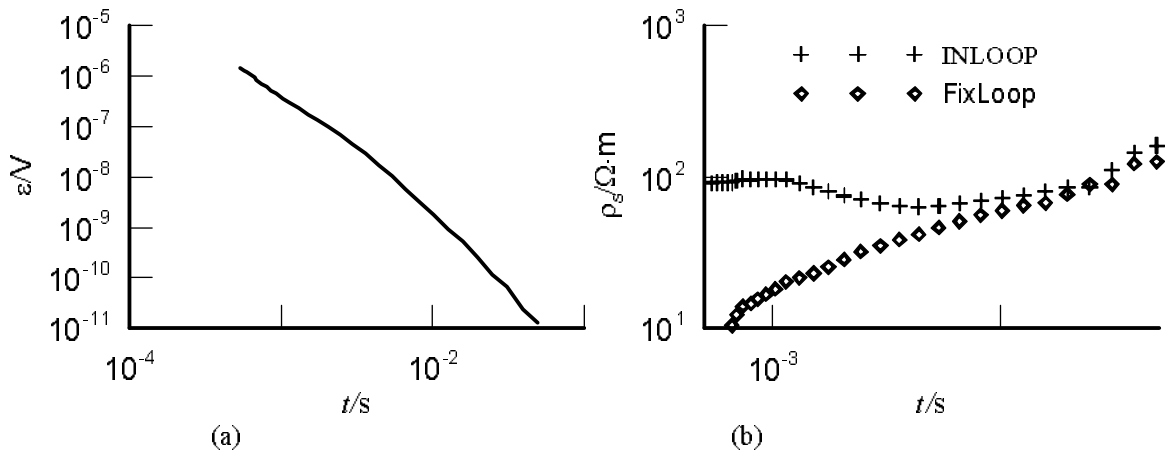


图 7 右上角测点感应电动势(a)和中心回线计算的视电阻率以及大定源视电阻率(b)

图 8 为该次测量的 8 线和 13 线测点组成的视电阻率-深度剖面。图 9 与图 10 为第 5 和第 11 时窗道测区观测感应电动势和计算的视电阻率平面等值线分布规律。从图中可见，由于受回线影响，即使测量被限制在测区中部 2/3 的范围内，观测的感应电动势仍然具有同心圆的特点。显然，根据该感应电动势，采用中心回线方法处理的结果也必将具有该特点，形成假的异常反映。

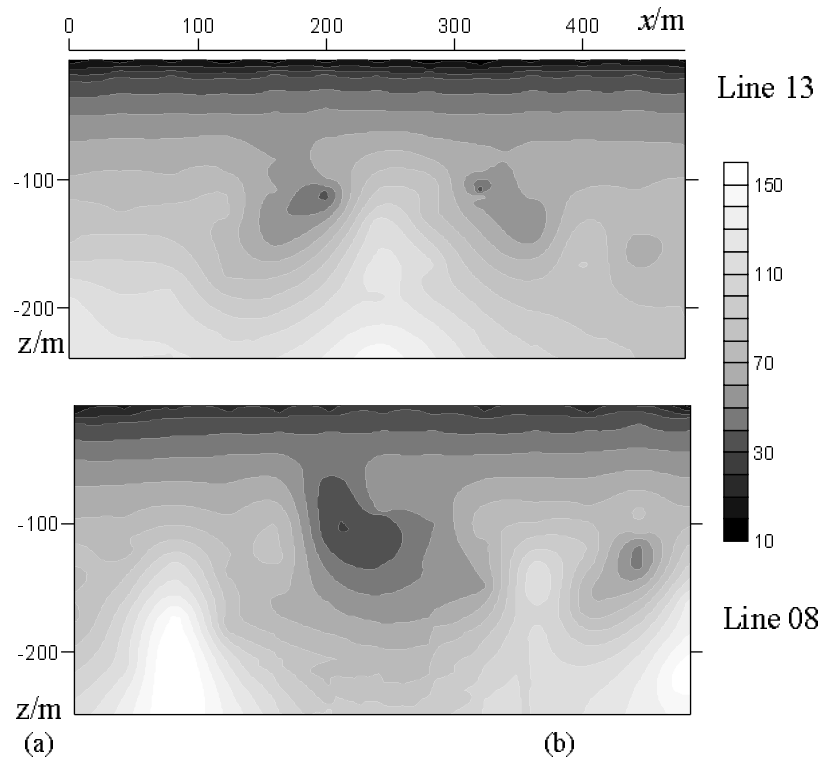


图 8 测量的 8 线和 13 线视电阻率-深度剖面

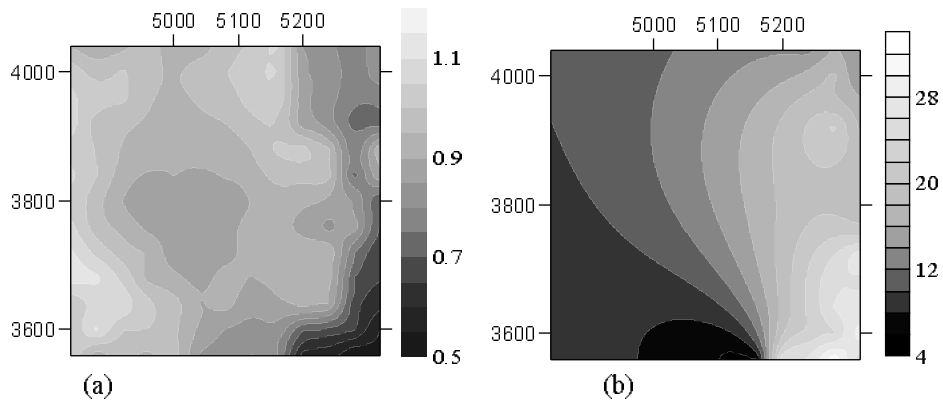


图 9 第 5 道($t=66.04\mu\text{s}$)测量感应电动势(a)及计算的视电阻率(b)平面等值线

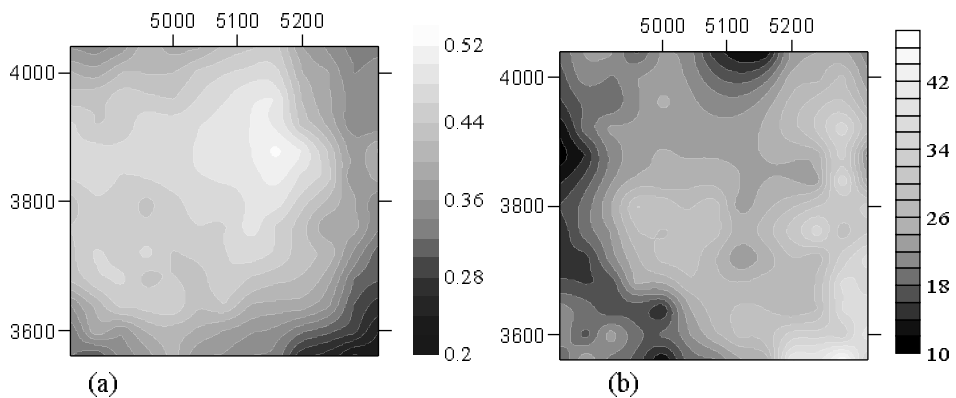


图 10 第 11 道($t=1.0256\text{ms}$)测量感应电动势(a)及计算的视电阻率(b)平面等值线

图 11 为该测区采用大定源方法处理后的视电阻率三维分布，基本没有发射回线影响的痕迹。不同深度视电阻率平面等值线图反映了电阻率的空间变化规律，与已知地质情况比较吻合，证明采用大定源方法处理能够较真实地反映地下介质电阻率分布情况。

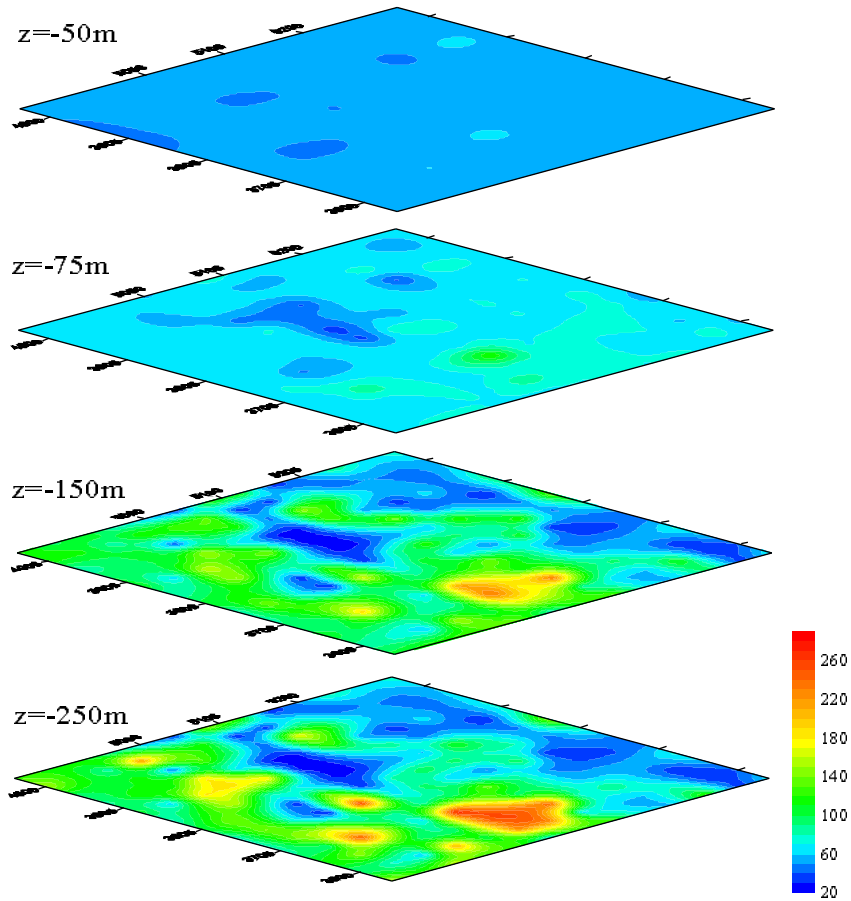


图 11 不同深度视电阻率切片

图 12 为某次铁路工程采空区勘察大定源瞬变电磁探测的成果，此次野外施工使用的仪器是美国 zonge 公司生产的多功能电法仪 GDP-32II 型仪器。发射线圈 100×100 米，接收采用接收面积 200m^2 的磁探头。通过采用大定源瞬变电磁计算方法进行处理，在 220 点~340 点、390 点~440 点、600 点~660 点之间深度 70~120 间有明显的高阻异常，推断为采空异常区，经钻探验证与实际情况比较一致。

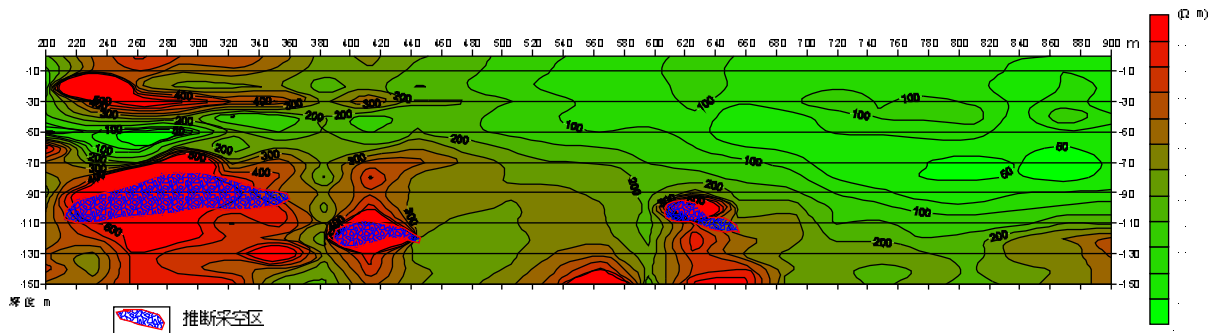


图 12 大定源瞬变电磁计算成果

4 结论与建议

- (1) 铁路工程勘探采用大定源瞬变电磁工作方法需采用大定源处理理论及方法；采用中心回线原理计算的视电阻率在回线边缘和早期都不合适；
- (2) 为获得浅部信息，必须采用相对小的发射源，才能获得较好的探察效果。

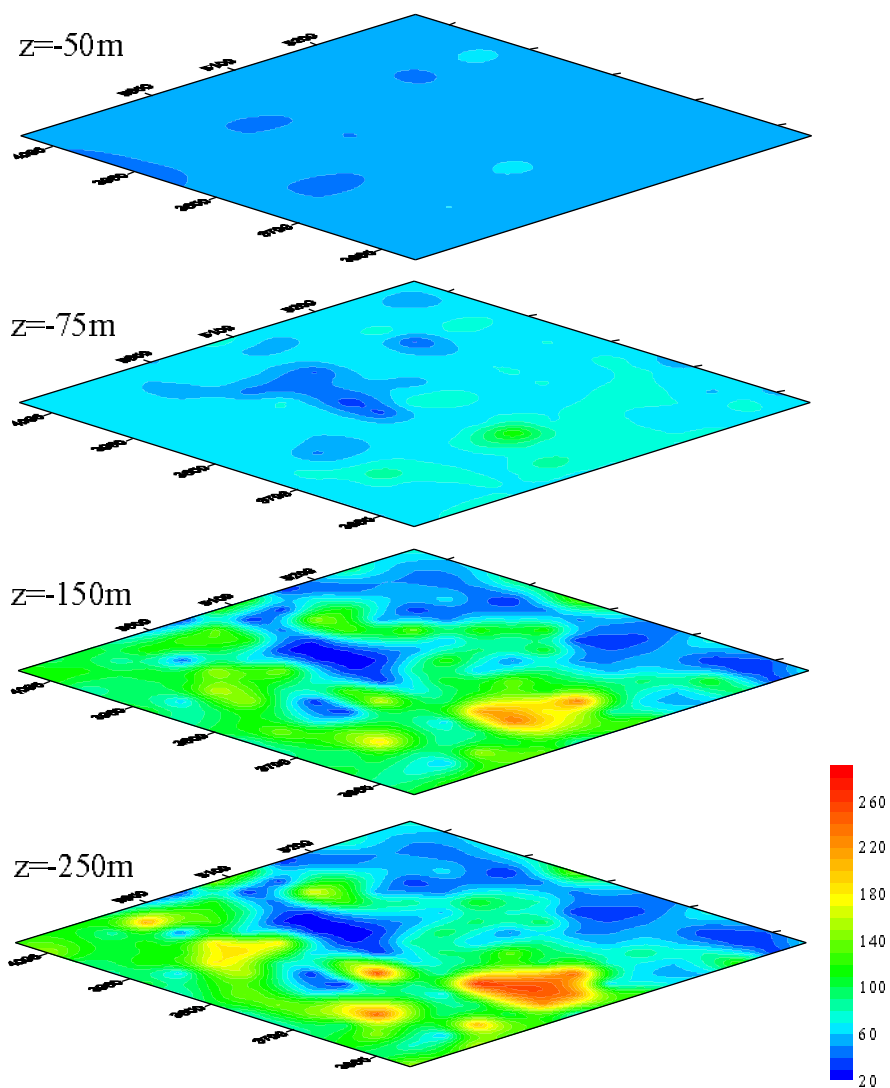


图 11 不同深度视电阻率切片