

瞬变电磁场的波场变换研究

陈本池 周凤桐 李金铭

摘要 通过对不同条件下层状介质模型瞬变电磁场数据的波场变换、分析,提高了对瞬变电磁场波场变换物理意义的认识,并总结出若干有价值的规律。指出这种通过数学方法变换出的波场,不仅在形式上满足波动方程,而且在导电介质中也存在“传播”现象,在“传播”过程中,当遇到电性分界面时,也存在“反射”和“透射”。这些结论为在瞬变电磁法中,正确合理地引入地震处理解释方法提供了重要的理论依据。

关键词 层状介质;瞬变电磁场;波场变换;拟地震解释

THE WAVEFIELD TRANSFORMATION STUDY OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC FIELD

Chen Benchi

(*University of Petroleum, Beijing* 100083)

Zhou Fengtong

(*Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, MLR, Langfang* 065000)

Li Jinming

(*China University of Geoscience, Beijing* 100083)

Abstract Through wavefield transformation and transient electromagnetic field data of stratiform medium model under different conditions, the authors have raised the understanding of the physical significance of wavefield transformation of transient electromagnetic field and summed up some valuable regularities. It is pointed out that the wave field obtained from the mathematic transformation not only satisfies wave equation in form but also exhibits “propagation” phenomenon in conductive media. In the process of “propagation”, the “reflection” and “transmission” phenomena also exist at the electric interface. These conclusions provide important theoretical grounds for reasonable utilization of the seismic processing and interpretation method.

Key words stratified media; transient electromagnetic field; wave field transformation; seismic interpretation

由于当今电子及计算机技术的飞速发展，高精度、智能化、灵活可靠数字式野外电磁勘探仪器的不断涌现，已从根本上改变了传统的电磁勘探测量方式，现今的电磁测量也能象地震勘探那样，实现时间域、空间域的密集、快速、高精度采样。地震勘探作为一种比较先进成熟的勘探方法，在数据处理解释方面，有许多值得借鉴和利用的地方，因此，目前各种电磁法拟地震的处理解释正成为电磁勘探领域研究的热点。其中，颇具潜力和前景的当属电磁场的波场变换拟地震解释，该方法通过数学积分变换，将满足扩散方程的低频电磁场转换为满足波动方程的波场，然后借助于地震中发展起来的一些较为成熟的处理成像方法技术，来求解物性或几何参数。在本文中，将以电磁法中最为复杂的瞬变电磁场为对象，利用研究出的算法〔1〕，对均匀半空间、层状介质模型的瞬变电磁响应进行波场变换研究，以探讨波场变换的物理意义，并由此得出一些较为规律性的认识，为在瞬变电磁法中正确合理地引入地震处理解释方法提供理论依据。

1 波场变换原理〔1,2〕

对于瞬变电磁场各分量，如果不考虑其本身的方向性，它们满足如下形式的标量扩散方程

$$\nabla^2 P(r, t) - \mu_0 \sigma(r) \frac{\partial}{\partial t} P(r, t) = S(r, t) \quad (1)$$

式中, $P(r, t)$ 代表瞬变电磁场的场分量（电场或磁场分量）， $S(r, t)$ 为源函数， $\sigma(r)$ 为介质的电导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

引入函数 $U(r, q)$ ， $F(r, q)$ ，使之满足如下波动方程

$$\nabla^2 U(r, q) - \mu_0 \sigma(r) \frac{\partial^2}{\partial q^2} U(r, q) = F(r, q) \quad (2)$$

方程（1）与（2）间唯一对应的数学变换式为〔2〕

$$P(r, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t^3}} \int_0^{+\infty} q e^{-\frac{q^2}{4t}} U(r, q) dq \quad (3)$$

（3）式即为瞬变电磁场分量的波场变换公式，式中的 $U(r, q)$ 为 $P(r, t)$ 所对应的“波场”。从（3）式的波场变换公式中不难发现，式中的变换仅依赖于时间变量 t ， q ，而独立于空间变量 r ；与时间 t 对应的类时间变量 q 是以 s 为单位的量，利用（3）式，可以将瞬变电磁场随时间 t 的衰减曲线转换为波场随类时间 q 的波传播曲线，其传播速

度为 $(1/\mu_0)$), 这样, 就有可能像地震那样, 发展起来一套电磁成像技术, 来求解物性和几何参数。

2 模型讨论

2.1 均匀半空间模型

研究中, 我们以常用的垂直磁偶极子源作为激发源。图1给出了垂直磁偶源脉冲激发下, 地面不同偏移距处 (发射源固定不动, 半空间电导率 $1/\sqrt{\mu_0\sigma}$) 的水平电场分量及其对应的各转换波场曲线 (图中各曲线均已用其最大值归一)。

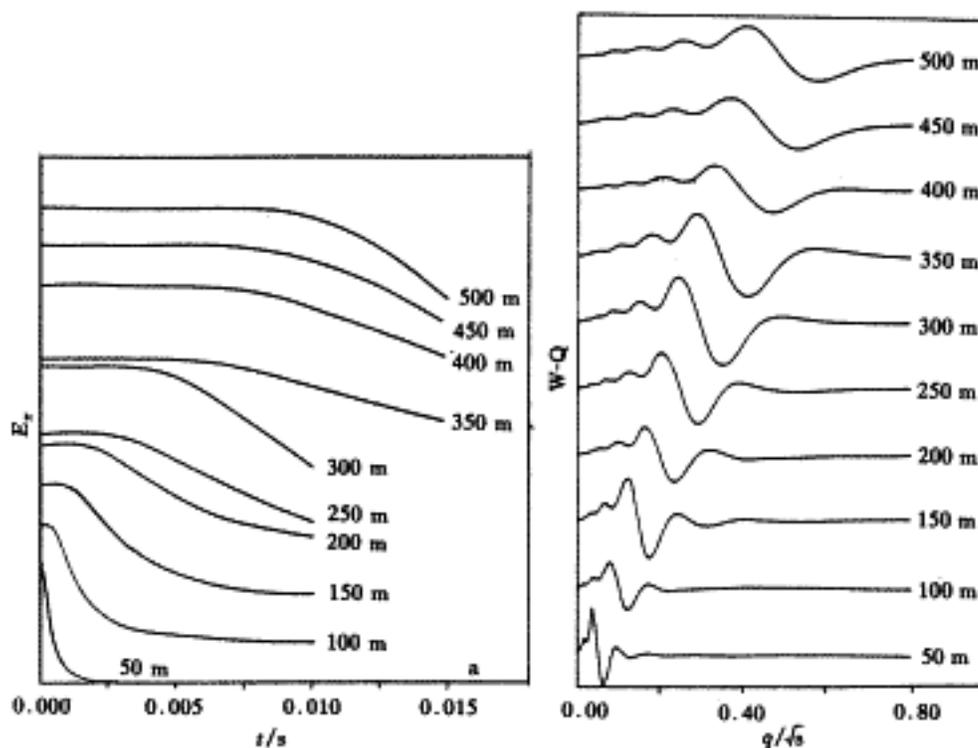


图1 水平电场分量及其转换波场曲线

a—不同偏移距时的水平电场；b—不同偏移处水平电场的变换波场

由图可见, 波场曲线形态与反射地震中地震子波的传播特征很相似, 但“子波”随偏移距的变化、衰减要比地震波快得多。离发射源越近, 子波延续时间越短, 振幅越大, 对距离的分辨率较高; 随着传播距离或传播时间的增大, 由于大地的滤波作用, 子波的延续时间加长, 且变得宽缓, 对距离的分辨率降低, 或者说, 高频成份相对低频成份有较大损失。通过对各“子波”主极值的到达“时间”与其对应距离的比值计算表明, 变换波在均匀半空间介质中以常速传播, 其传播速度不随偏移距变化, 仅与半空间的电导率有关。

图2为计算出的水平电场分量、垂直磁场分量、磁感应强度随时间的变化率 (感应电动势) 的波场变换结果 (收发距 $r=200$ m, 半空间电导率 $=0.02$ s/m, 图中各曲线均已用其最大值归一)。可见, 虽然利用各分量转换出的波场, 其振幅或极性不一致,

但子波到达时间却相同，均能很好地反映出半空间中感应扩散场的运动特征。

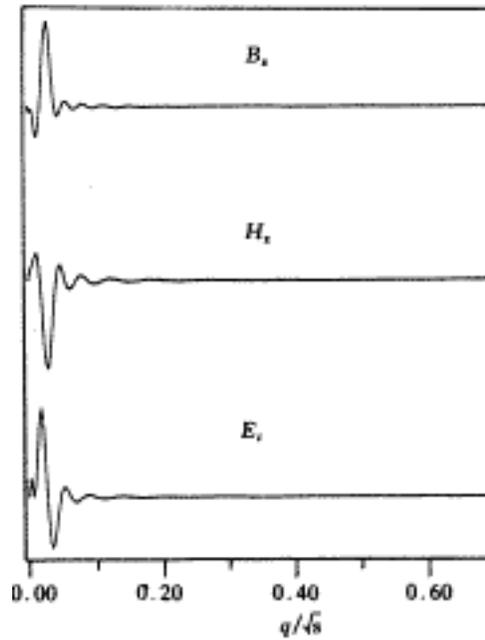


图2 不同分量的波场变换结果

固定偏移距 ($r=100\text{ m}$) 改变了导电半空间的电性，计算出了各对应的感应垂直磁场的变换波场，示于图3a中（图中各曲线均已用其最大值归一），其变化特征与改变偏移距时波形相类似，随着电导率的增大，介质对高频电磁波的吸收作用增强，对应地，其波场中高频成份衰减很快，曲线变得越来越光滑、平缓。图3b中还给出了变换子波主极值的到达时间（在这里相当于慢度）随电导率的变化曲线，它们之间为一典型的抛物线型关系，与前面推导出的关系是一致的。

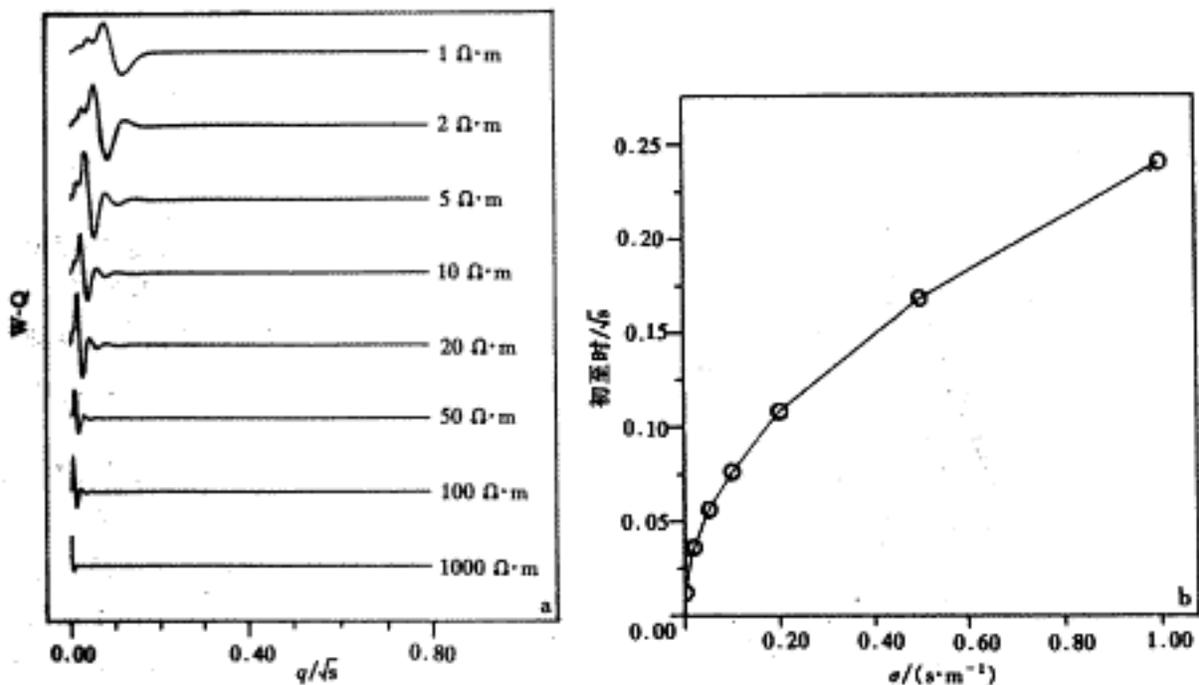


图3 电性不同时垂直磁场的波场变换结果
a—变换波场；b—子波主极值到达时间随电导率的变化

众所周知，电磁波在介质中的传播速度是随频率而变化的（频散效应）。对瞬变电磁法而言，不同延时的电磁场在介质中传播的速度不同，而从上面的计算来看，利用瞬变电磁场的整段时间衰减曲线，经波场变换计算出的“波”的传播速度仅与介质的电导率有关，而与频率（延时）无关。通俗地讲，波场变换实际上相当于把电磁响应中与传播有关的特征提取出来，而把电磁波传播过程中与频散、衰减有关的项进行压制或去除。对瞬变电磁法稍有接触的人都知道，瞬变电磁场理论及其场特征均很复杂，即使是最简单的均匀半空间模型，也有远区、过渡区、近区之分。不同的场源其场的分布、变化特征也不同。但通过波场变换可以看到，变换出来的波场曲线能更加直观形象地反映瞬变电磁场的传播特征，以及与介质电性的关系。

2.2 二层介质模型

首先讨论最简单的绝缘基底情况。为了讨论问题方便、直观，同时消除由于收发距不同产生的直达波变换的影响，在正演计算中，采用类似于地震勘探中的自激自收的记录方式，固定偏移距使 $r=0$ ，并在变换之前，在总场中减去了以第一层电阻率为均匀半空间的场。

令第一层电阻率 $\rho_1 = 1 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ，改变第一层厚度 h_1 ，计算出的水平二次电场的波场变换结果见图4a（图中各曲线均已用其最大值归一）。可见，随着界面埋深的增大，传播距离增大，子波到达时间延迟，高频成份损失也相应变大，曲线越来越宽缓。在图4b中，还给出了变换波场主极值到达时间随 h_1 的变化曲线，为一直线，图中直线的斜率正好是以电阻率 $\rho_1 = 1 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 为均匀半空间时慢度的2倍。

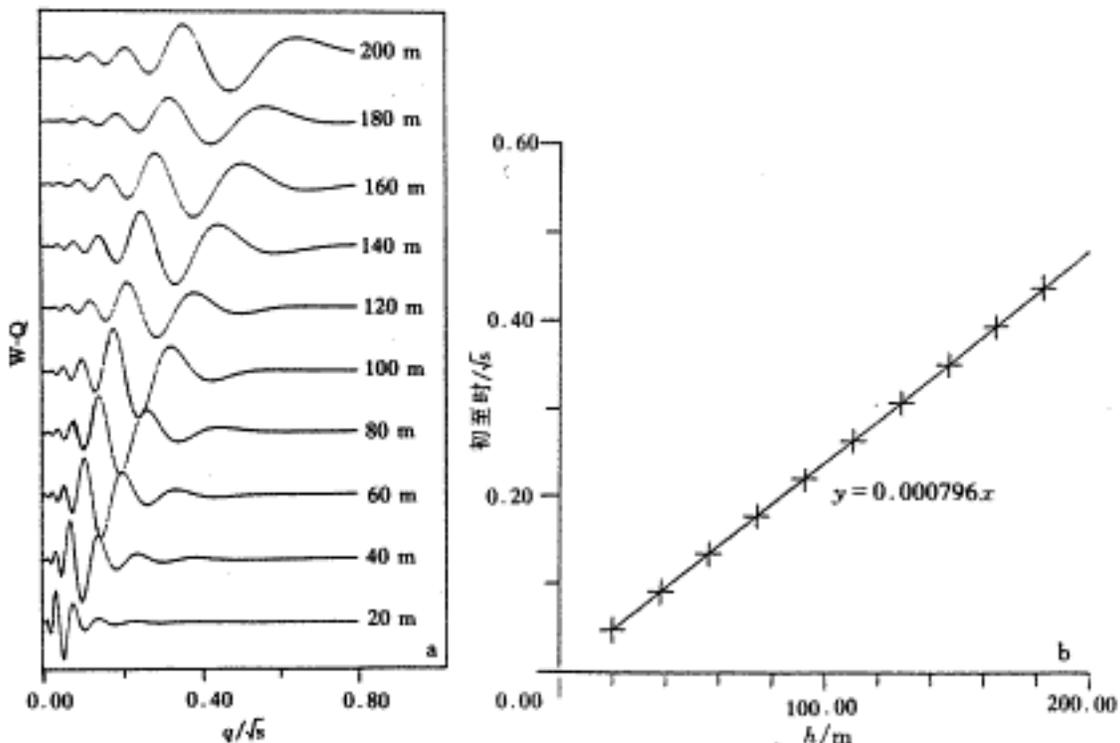


图4 二层绝缘基底($r=0$)时的波场变换结果
a—变换波场；b—波场主极值到达时间随 h_1 的变化曲线

现固定2层绝缘基底模型的几何参数($r=0$, $h_1=100$ m), 改变上层介质的电性参数, 同样进行波场变换计算, 将各波场主极值的到达时间, 按电导率的变化示于图5, 图中实线对应二层介质, 虚线对应半空间, 该关系曲线为典型的抛物线型函数, 图中虚线对应于子波在电阻率等于 ρ_1 的均匀半空间中慢度的2倍。从图中看到, 实、虚线吻合极好(满足类似于地震中“爆炸反射面”的概念), 证明在绝缘基底情况下, 变换出来的子波的传播速度仅与上层介质的电导率有关, 并且等于以该介质为均匀半空间时波的传播速度。图中子波到达时间为半空间时的2倍, 是由于波在地面与界面间往返传播引起。在2层绝缘基底情况下, “入射”能量能全部返回, 在界面没有透射损失。

对于下伏层为有限电阻率的二层大地模型, 我们对正演出的磁感应强度随时间的变化率进行了波场变换计算(同样除去了均匀半空间的响应), 模型电阻率分别为 $\rho_1 = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2 = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 使用重叠回线装置($r=0$), 改变第一层的厚度, 得到了界面“反射”子波到达时间随厚度 h_1 的变化曲线(图6)。与绝缘基底时一样, 为一过原点的直线(实线), 虚线为其拟合线, 两者不完全一致是由于瞬变场正演计算(谱方法)时误差引起。不过, 此时直线的斜率并不等于波在相应半空间中传播慢度的2倍, 说明在电阻率有限基底的2层介质中, 到达地表的“反射”子波在上层介质中是以恒速传播, 但该传播速度不仅与上覆地层电阻率有关, 而且还与下伏地层电阻率有关。

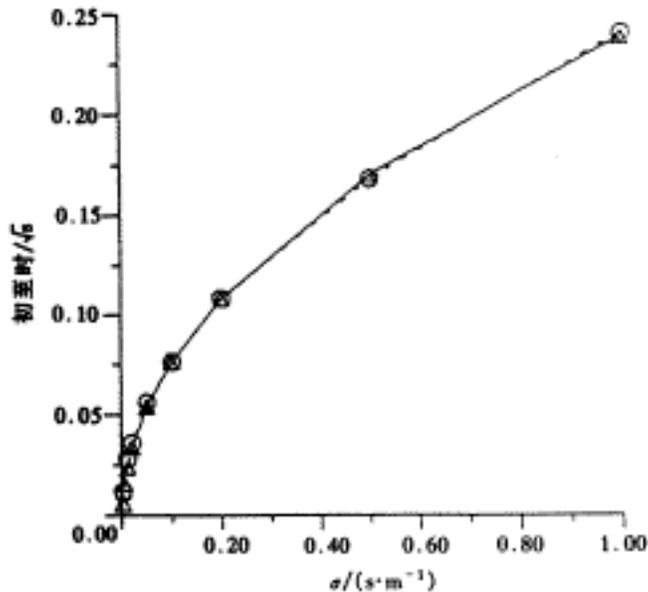


图5 波场主极值到达时间随 ρ_1 的变化曲线

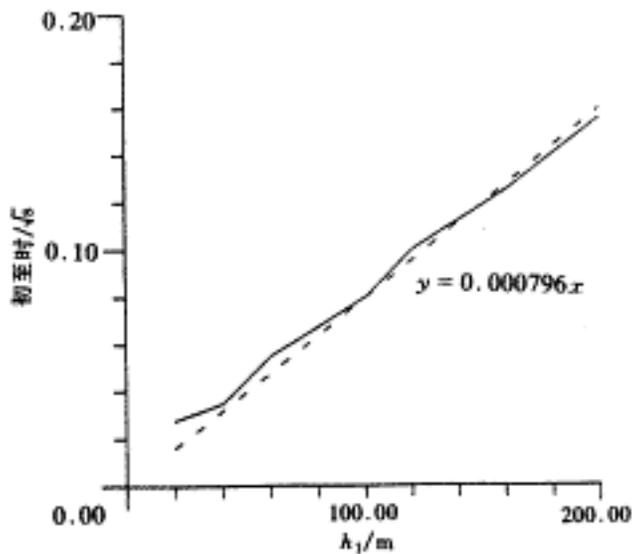


图6 子波到达时间随厚度 h_1 的变化曲线

2.3 三层介质模型

在地震勘探中，对层状介质而言，由于地下各层的层间反射、多次反射等因素的影响，各界面反射的有效信息的识别和拾取一直是一个比较棘手的问题。因此，在数据采集和处理中便发展起来了一系列旨在提取各反射界面信息，提高纵向分辨率的技术，如叠加、反褶积技术等。对于电磁波场，由于它在传播过程中的衰减和传播速度均较快，“反射”界面波场信息的识别和拾取将会更加困难。这里，仅给出一个典型的3层H型地电断面瞬变电磁响应的波场变换结果，以对层状介质中电磁变换波场有一些感性认识。

图7给出了在一个3层H型地电断面($\rho_1 = \rho_3 = 100 \cdot \text{m}$, $\rho_2 = 10 \cdot \text{m}$, $h_1 = 100 \text{ m}$)上，利用重叠回线装置，改变第二层厚度，计算磁感应强度随时间的变化率，变换出的相应的波场曲线（图中各曲线均已用其最大值归一）。由图可见，第一个界面（第二层顶面）的反映均能清楚地显现出来；当第二层厚度较小时，底界面很难直观地从图中分辨；随着第二层厚度加大或者说底界面埋深加大，底层界面信息逐渐分离、显现，但由于埋深增加，高频成份损失也多，分辨能力减弱。由于反映底层界面信息的子波与上层界面产生的子波重叠，并且其强度较上层界面要弱，因此，总的来看，底层界面信息反映不如上层界面好。

对图7给出的模型，固定 $h_2 = 100 \text{ m}$ ，改变第二层电性，变换结果见图8，图中虚线为 $\rho_2 = 50 \cdot \text{m}$ 时的变换结果，实线为 $\rho_2 = 10 \cdot \text{m}$ 时的变换结果。显然，反映上层界面子波主峰基本重合，反映下层界面子波当第二层电阻率较小时，传播速度变慢，子波到达时间后移，反映上下界面的两子波重叠度降低，子波呈逐渐分离趋势，在图中看得很清楚（实线）。

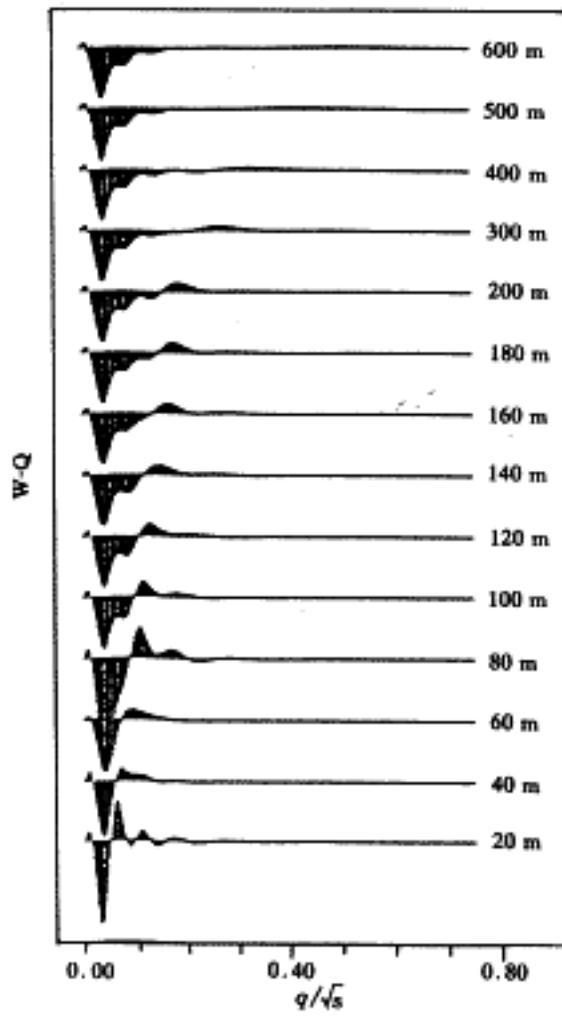


图7 三层H型地电断面的波场变换结果

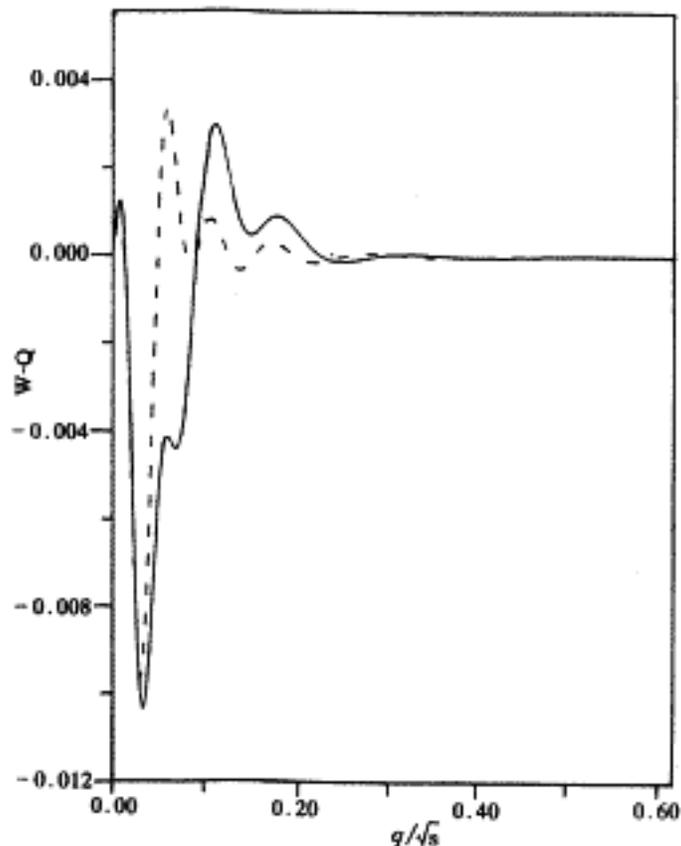


图8 改变中间层电性对变换波场的影响

上面我们仅讨论了3层H型地电断面。理论计算表明〔1〕，存在多层地电断面时，情况会变得很复杂。

3 几点认识

通过对不同条件下层状介质模型瞬变电磁场数据的波场变换计算、分析，可以总结出以下几点认识。

1. 通过积分变换的方法，将瞬变电磁场随时间的衰减曲线变换为类似于地震波的波场传播曲线，实质上相当于把电磁响应中与传播有关的特征提取出来，将电磁场在有损介质中的传播变换为无损介质中的传播，造成一种和地震波场雷同的形式化的波场。虽然变换出的波场与地震波场一样，在形式上满足波动方程，但是由于2种波场的物理背景不同，它们之间存在一些重要区别，前者是与感应的瞬变电磁场衰减曲线相对应的“反射”子波，是计算出来的，而后者却是在弹性介质中传播的实实在在的地震子波。

2. 理论计算结果表明：这种变换出的波场在导电介质中确实存在“传播”现象，在“传播”过程中遇到电性分界面时，也存在“反射”与“透射”，并且在一定条件下，还满足类似于地震波场中的“爆炸反射面”的概念，这为将地震处理解释方法引入到电磁波场中来提供了重要的理论依据。

3. 瞬变电磁场的波场变换并不拘泥于场源的激发方式，并且可以利用场的各个分量进行计算。计算时，利用了整条衰减曲线，勿需考虑什么近区、远区特征等因素。

变换后的波场曲线对瞬变电磁场的传播特征，以及与介质电性的关系表现得更为形象、直观。

4. 虽然变换出的波场能直接反映界面两侧的电阻率差异，然而，由于实际岩层的电阻率差异很大，对应的各“反射系数”差异也很大，“反射子波”的强弱相差悬殊，与地震子波相比，这种子波衰减和传播均很快，子波延续宽度较大，相互间重叠度增加，分辨能力相对要差。尤其对于多层介质情况，很难直观地识别出各个“反射”界面的有效波。实际上，变换波场的这些特征在一定程度上，还是由低频电磁场的物理特性所决定。有关如何识别提取多层界面有效“反射”信息的方法技术，还有待进行深入研究。

本文在撰写过程中，得到了牟永光教授的指导和支持，在此深表感谢！

作者简介：地质行业科学技术发展基金资助项目（第959617号）

第一作者简介 陈本池，男，1966年10月生于湖南澧县。1986年7月毕业于中国地质大学（武汉）物探系，获学士学位，并分别于1995年和1998年在中国地质大学（北京）获应用地球物理学硕士和博士学位，现在石油大学（北京）博士后流动站从事震电勘探的理论与方法、电磁成像方法研究，已发表论文10余篇。

Claerbout J F, Fundamentals of geophysical data processing McGraw-Hill Book Co. Inc. 1976

作者单位：陈本池 石油大学，北京 100083
周凤桐 国土资源部地球物理地球化学勘查研究所，廊坊 065000
李金铭 中国地质大学，北京 100083

参 考 文 献

[1] 陈本池. 瞬变电磁场的波场变换与偏移成像理论研究. 中国地质大学（北京）博士论文，1998

[2] Lee K H, Liu G, Morrison H F. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive media. Geophysics, 1989, 54(9): 1180 ~ 1192

1998年11月24日收稿