

大地电磁测深资料的联合反演研究*

林长佑 武玉霞

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文从大地电磁场的色散关系出发,阐述了进行大地电磁资料一维联合反演的物理意义。论证了对于以色散关系相联系的一对大地电磁响应函数,特别是阻抗实部和虚部视电阻率进行联合反演的必要性和可能的应用前景。对比研究了大地电磁阻抗各单参量及其联合反演的效果。结果表明,在加快反演迭代速度,限定反演解的非唯一性、保证反演迭代的稳定进行等方面,联合反演比单参量反演具有明显的优越性;在大多数情况下,阻抗实部视电阻率和阻抗虚部视电阻率联合反演的效果要比通常所采用的常规视电阻率和阻抗相位的联合反演效果好。实际大地电磁资料的试验表明,各种不同平均阻抗的利用和综合反演解释将有助于获得更为可靠的结果。

一、大地电磁场的色散关系和资料的联合反演

大地电磁探测是建立在如下的物理基础上的。地球被看成是一个具有某些特定性质的物理系统。考虑到与地球系统特性相联系的阻抗函数的一系列性质和物理约束,可导出阻抗 $\bar{Z}(\omega)$ 的埃米尔特实部和虚部之间满足如下关系(取 $\Omega = \omega + i0$) [1]:

$$\tilde{Z}_1(\omega) = \vec{K}_1 + \vec{K}_2\omega + \frac{1+\omega^2}{\pi} \text{PV} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{Z}_2(\lambda)}{(\omega-\lambda)(1+\lambda^2)} d\lambda. \quad (1)$$

其中 \vec{K}_1 和 \vec{K}_2 为常数埃米特矩阵, PV 表示柯西主值运算。对阻抗矩阵的任一对角元素,其实部和虚部之间满足如下关系 [1]:

$$\text{Im}[Z(\omega)] = k_1 + k_2\omega + \frac{1+\omega^2}{\pi} \text{PV} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Re}[z(\lambda)]}{(\omega-\lambda)(1+\lambda^2)} d\lambda. \quad (2)$$

这里 k_1 和 k_2 为常量。

上述阻抗的色散关系的导出并未考虑地球介质电性的维结构特征,即阻抗(或其对角元素)的埃米尔特实部(或实部)与埃米尔特虚部(或虚部)之间所遵从的色散关系是不依赖于地球电性分布的。这种色散关系对于阻抗元素的视电阻率和相位也存在。对于一维情形阻抗张量蜕化为一个复数阻抗,其实部和虚部之间的色散关系取如下形式 [1]:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[z(\omega)] &= \operatorname{Re}[z(\omega_0)] + \frac{\omega - \omega_0}{\pi} \operatorname{PV} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Im}[z(\lambda)]}{(\omega - \lambda)(\lambda - \omega_0)} d\lambda, \\ \operatorname{Im}[z(\omega)] &= \operatorname{Im}[z(\omega_0)] - \frac{\omega - \omega_0}{\pi} \operatorname{PV} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Re}[z(\lambda)]}{(\omega - \lambda)(\lambda - \omega_0)} d\lambda. \end{aligned} \quad (3)$$

而视电阻率和阻抗相位遵从如下色散关系：

$$\begin{aligned} \ln[(\rho_s(\omega_0)/\rho_1)^{1/2}] &= \ln[(\rho_s(\infty)/\rho_1)^{1/2}] - \frac{2}{\pi} \operatorname{PV} \int_0^{\infty} \frac{\omega \phi(\omega)}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega, \\ \arg[z(\omega_0)] = \phi(\omega_0) &= \frac{\pi}{4} + \frac{2\omega_0}{\pi} \operatorname{PV} \int_0^{\infty} \frac{\ln[(\rho_s(\omega)/\rho_1)^{1/2}]}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega. \end{aligned} \quad (4)$$

上述一系列色散关系的存在，表明了在全实频域内（ T 或 $\omega \in (-\infty, \infty)$ ）阻抗实部和虚部或视电阻率和相位是彼此相关的。如果我们的测量是在全实频域内进行的，阻抗实部（或虚部），视电阻率（或阻抗相位）都单独地、全部地包含了阻抗所反映的地下电性结构的所有信息，则相对应的另一套资料就成为多余的了。同时我们也看到，任何一个频率的阻抗实部（或虚部）、视电阻率（或阻抗相位）都在一定加权的意义上包含了全实频域内的阻抗虚部（或实部）、阻抗相位（或视电阻率）所提供的信息。实际大地电磁测量是在一个很有限的频带内进行的，同一频带内测量的阻抗虚部资料对该频带内阻抗实部资料起了某种外推和补充的作用。反之亦然。无疑，使用两种资料的联合反演增加了观测资料的信息量。由于色散关系的积分核函数与频率有关，随着离开所需求响应函数的频率而迅速减小，在利用色散关系由阻抗实部（或虚部）导出阻抗虚部（或实部）时，起主要作用的仅是邻近给定频率的少数几个量级的资料。上述讨论同样适用于视电阻率和阻抗相位这一对以色散关系相联系的响应函数。用于反演的观测资料信息量的增加，不仅提高了反演迭代收敛的速度，而且更为有效地保证了反演迭代比较稳定地收敛至真实模型。在任何情况下，精确测量（或理论模型计算）的一对大地电磁响应函数必定满足色散关系。反之，能以用一个地电模型精确拟合的一套（含以色散关系相联系的一对大地电磁响应函数）大地电磁资料必定也是在一定程度上满足色散关系的约束的。尽管这些约束是不完全的，是仅在全实频域内精确成立的，但是需要满足约束关系的数量比较大。不难看出，对于 m 个频点的观测资料应满足的色散关系式为 $2m$ 个。当对遵从色散关系的一对大地电磁响应函数进行联合反演时，由于较强约束的存在，大大缩小了反演解的非唯一性。

实际的大地电磁观测资料有一定的分散程度，存在随机误差乃至偏离误差。因而对实际观测资料的反演，是寻求一个模型在观测误差范围内拟合观测资料。无疑，拟合了较多观测数据的模型将是比较可信的模型。这正是多参数联合反演的一个出发点。而当用作联合反演的一对大地电磁响应函数以色散关系相关联时，一个在观测误差范围内拟合了观测资料的模型得以获取，本身就意味着，在观测误差水平上，观测的一对大地电磁响应函数是满足色散关系的。如果联合反演找不到一个模型在观测误差范围内拟合观测资料，表明所估算的观测资料的误差是不合理和不适宜的。

由于大地电磁观测是在实频域内进行的，而色散关系中与频率有关的积分核函数随着作为积分变量的频率远离所需估算频率而衰减较快，设参考频率 ω_0 与观测频率 ω 相比充分大。按下式引入阻抗实部和虚部视电阻率，

$$\begin{aligned}\rho_s^{\Re}(\omega) &= 0.4T(\operatorname{Re}[z(\omega)])^2, \\ \rho_s^{\Im}(\omega) &= 0.4T(\operatorname{Im}[z(\omega)])^2.\end{aligned}\quad (5)$$

若(3)式的积分仅在 $0-\omega_0$ 之间进行,则化为:

$$\begin{aligned}\sqrt{\rho_s^{\Re}(\omega)} &= \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega}}\sqrt{\rho_s^{\Re}(\omega_0)} + \frac{|\omega - \omega_0|}{\pi\sqrt{\omega}} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^{\omega-\varepsilon} \frac{\sqrt{\lambda}\sqrt{\rho_s^{\Re}(\lambda)}}{|\omega - \lambda||\lambda - \omega_0|} d\lambda - \\ &- \frac{|\omega - \omega_0|}{\pi\sqrt{\omega}} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\omega+\varepsilon}^{\omega_0-\varepsilon} \frac{\sqrt{\lambda}\sqrt{\rho_s^{\Re}(\lambda)}}{|\omega - \lambda||\lambda - \omega_0|} d\lambda,\end{aligned}\quad (6a)$$

$$\begin{aligned}\sqrt{\rho_s^{\Im}(\omega)} &= \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega}}\sqrt{\rho_s^{\Im}(\omega_0)} - \frac{|\omega - \omega_0|}{\pi\sqrt{\omega}} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^{\omega-\varepsilon} \frac{\sqrt{\lambda}\sqrt{\rho_s^{\Im}(\lambda)}}{|\omega - \lambda||\lambda - \omega_0|} d\lambda + \\ &+ \frac{|\omega - \omega_0|}{\pi\sqrt{\omega}} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\omega+\varepsilon}^{\omega_0-\varepsilon} \frac{\sqrt{\lambda}\sqrt{\rho_s^{\Im}(\lambda)}}{|\omega - \lambda||\lambda - \omega_0|} d\lambda.\end{aligned}\quad (6b)$$

由(6)式我们不难看出,由于对某给定频率 ω , $\rho_s^{\Re}(\omega)$ 和 $\rho_s^{\Im}(\omega)$ 都取正值,右边第一项为常数项,其值主要取决于带正号的项。则 $\rho_s^{\Re}(\omega)$ 的值主要取决于频率低于 ω 的 $\rho_s^{\Re}(\lambda)$,而 $\rho_s^{\Im}(\omega)$ 的值则主要取决于频率高于 ω 的 $\rho_s^{\Re}(\lambda)$ 。即 $\rho_s^{\Im}(\omega)$ 较多地反映了地球较浅部的信息,而 $\rho_s^{\Re}(\omega)$ 则较多地反映了地球较深部的信息。

对视电阻率和阻抗相位,设加以考虑的频带为 $\omega_1-\omega_2$,可由(4)式的第二式出发获得如下关系式:

$$\begin{aligned}\arg[z(\omega_0)] &= \frac{\pi}{4} - \frac{2\omega_0}{\pi} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\omega_1}^{\omega_0-\varepsilon} \frac{\ln[(\rho_s(\omega)/\rho_1)^{1/2}]}{|\omega^2 - \omega_0^2|} d\omega + \\ &+ \frac{2\omega_0}{\pi} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\omega_0+\varepsilon}^{\omega_2} \frac{\ln[(\rho_s(\omega)/\rho_1)^{1/2}]}{|\omega^2 - \omega_0^2|} d\omega.\end{aligned}\quad (7)$$

为便于讨论问题,我们考虑一个两层介质模型,设 $\rho_1 < \rho_2$,并且设所考虑的频带已超出高频振荡区,则有, $\ln[(\rho_s(\omega)/\rho_1)^{1/2}] > 0$, (7)式右部两项的符号保持不变。高阻的第二层起作用时将引起相位由 $\frac{\pi}{4}$ 下降。则起主要作用的是(7)式右边的第二项,即频率 ω_0 的阻抗相位主要决定于频率低于 ω_0 的视电阻率,这样,与视电阻率相比较阻抗相位着重反映了比较深部的电性结构信息。对于 $\rho_1 > \rho_2$ 的情形(7)式右部的后两项恰巧反号。此时第二层起作用将使相位由 $\frac{\pi}{4}$ 上升。同样是(7)式右边的第二项对相位起主导作用。表明,与视电阻率相比,阻抗相位将更多地反映出地球较深部的信息。与上述讨论形成对照的是,与阻抗相位相比,视电阻率则更多地反映出地球浅部的信息。

作为例子我们对于两个模型给出了这四种响应曲线的形态变化特征。可以看出,它们与上述由色散关系出发所作的讨论结果是相一致的。同时,我们还注意到,阻抗虚部视电阻率 ρ_s^{\Im} ,与常规视电阻率 ρ_s 相比,含有更多的地球较浅部的信息;而阻抗实部视电阻率 ρ_s^{\Re} ,与阻抗相位 ϕ 相比,则含有更多的地球较深部的信息。因而,阻抗实部视电阻率和虚部视电阻率曲线的联合反演,在某些情形下,可能会更优于视电阻率和阻抗相位曲线的联合反演。

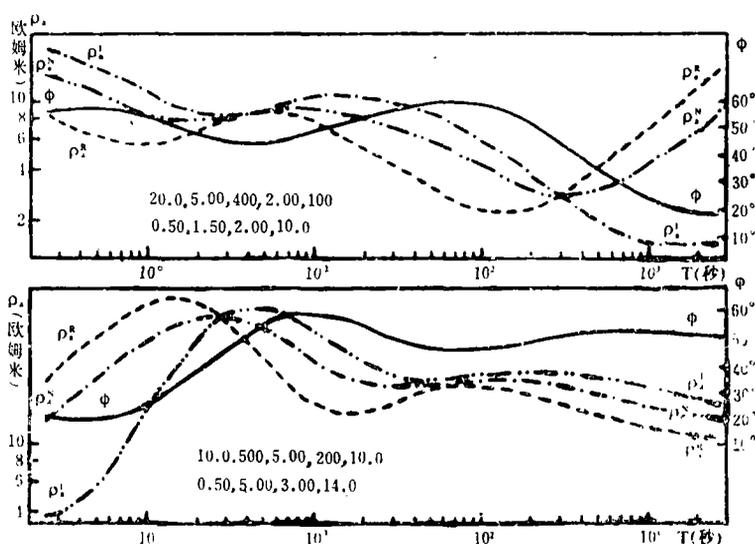


图 1

二、大地电磁阻抗实部视电阻率和虚部视电阻率的联合反演

在早期的大地电磁测深中，多采用常规视电阻率曲线的一维反演求取地下电性结构。近年来，国内外则比较普遍采用视电阻率和阻抗相位曲线的一维联合反演来获取地下电性结构模型。在以往的工作中，我们对比研究了阻抗实部视电阻率、阻抗虚部视电阻率和常规视电阻率的特性，阐述了阻抗实部视电阻率在地震前兆监测中的应用前景〔2〕。

大地电磁阻抗实部和虚部视电阻率的联合反演，在形式和原则上与常规视电阻率的反演没有什么大的差别。

在反演迭代中我们采用了如下的双目标函数，只要其中之一下降，则认为迭代成功。

$$F_1(\ln \lambda) = \|\Delta \ln \rho - A \Delta \ln \lambda\|^2 + \mu^2 \|\Delta \ln \lambda\|^2;$$

$$F_2(\ln \lambda) = \|\Delta \ln \rho\|.$$

(8)

目标函数 \$F_2\$ 为对观测资料的拟合度，它同时被用作反演迭代终止的判据。根据我们对一些理论模型 480 次反演迭代的统计，其中仅有 61 次迭代不满足 \$F_1\$ 下降条件，而 \$F_2\$ 下降，参数修改更接近理论值参数的点次为 331，变差的点次为 61。这一情形多出现在反演迭代的后期。

关于大地电磁常规视电阻率和阻抗相位联合反演目标函数最小值的存在，已有某些作者作过论述〔8〕。我们所进行的比较大量的理论模型的数字试验表明，对于阻抗实部视电阻率和虚部视电阻率曲线的联合反演，如果目标函数选择适宜，初始参数离真值不是特别远，理论模型所产生的“观测值”的频带适宜，精度足够，则反演迭代一般可以任何需要的精度逼近理论模型参数。表 1 给出了用作反演试验两个模型的理论参数、初始参数及模型类型。

为了对各种大地电磁响应函数的反演及联合反演效果进行试验研究，我们研制了大地电磁阻抗实部视电阻率曲线反演程序、阻抗虚部视电阻率曲线反演程序、常规视电阻率曲线反演程序、阻抗相位曲线反演程序、阻抗实部视电阻率和阻抗虚部视电阻率曲线联合反演程序，及常规视电阻率和阻抗相位联合反演程序。对于表 1 所列的两个理论模型及初始参数进行了试验对比研究。表 2 给出了上述前两种单参量反演和两种联合反演迭代 10 次所获得的电

表 1

模型分类		电 性 分 层 参 数								曲线类型	
		ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	h_1	h_2	h_3		h_4
模 型 I	理 论	20.0	5.00	400	2.00	100	0.50	1.50	2.00	10.0	HKH
	初始A	30.0	3.00	100	5.00	50.0	1.00	1.00	4.00	8.00	HKH
	初始B	20.0	5.00	20.0	5.00	20.0	1.00	3.00	3.00	6.00	HKH
	初始C	5.00	10.0	1000	20.0	500	1.00	3.00	1.00	15.0	AKH
	初始D	100	10.0	20.0	5.00	10.0	2.00	3.00	3.00	6.00	HQH
模 型 II	理 论	10.0	500	5.00	200	10.0	0.50	5.00	3.00	14.0	KHK
	初始A	40.0	100	20.0	50.0	20.0	1.00	3.00	5.00	20.0	KHK
	初始B	5.00	50.0	70.0	400	5.00	0.20	2.00	6.00	10.0	AAK
	初始C	50.0	40.0	2.00	400	5.00	1.00	10.0	2.00	8.00	QHK
	初始D	15.0	200	80.0	60.0	20.0	1.00	3.00	10.0	8.00	KQQ

表 2 a 同一理论模型(模型 I)不同反演方式迭代(10次)结果

初始模型	反演方式	电 性 分 层 参 数								$PN \times 10^{-3}$	$PNO \times 10^{-3}$	$PN/PNO \times 10^{-3}$	
		ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	h_1	h_2	h_3				h_4
理论模型		10.0	500	5.00	200	10.0	0.50	5.00	3.00	14.0			
A	RI	9.97	459	4.95	163	10.0	0.50	5.02	2.94	14.1	1.360	1390	0.98
	RR	9.26	377	4.86	137	9.99	0.45	5.08	2.84	14.3	1.430	528.6	2.71
	II	9.82	368	4.82	121	9.95	0.48	5.07	2.80	14.5	1.990	1894	1.05
	AP	9.92	410	4.85	126	9.98	0.49	5.05	2.82	14.4	1.240	447.5	2.77
B	RI	9.63	290	4.84	377	10.0	0.46	5.11	2.94	13.7	3.410	871.1	3.91
	RR	4.36	249	5.15	400	10.0	0.19	5.25	3.15	13.6	1.670	1034	1.63
	II	9.58	279	4.80	392	10.1	0.45	5.13	2.91	13.7	3.950	670.1	5.89
	AP	9.35	237	4.87	388	10.0	0.43	5.16	2.97	13.7	3.970	434.8	9.13
C	RI	9.94	377	4.92	172	9.99	0.49	5.04	2.92	14.1	4.930	362.9	13.6
	RR	8.52	359	5.01	327	10.0	0.41	5.09	3.05	13.7	0.622	1854	0.34
	II	9.99	482	5.01	238	10.0	0.50	5.00	3.02	13.9	0.435	2596	0.17
	AP	9.93	404	4.99	357	10.0	0.49	5.02	3.05	13.7	2.110	434.5	4.86
D	RI	9.96	452	4.94	165	9.99	0.49	5.02	2.93	14.2	0.880	960.9	0.92
	RR	9.35	386	4.86	142	9.99	0.46	5.07	2.85	14.3	1.170	1124	1.04
	II	9.83	372	4.84	130	9.96	0.48	5.07	2.81	14.4	1.400	764.5	1.83
	AP	9.92	420	4.86	130	9.98	0.49	5.04	2.84	14.4	0.910	527.9	1.72

RI—阻抗实部和虚部视电阻率曲线联合反演; RR—阻抗实部视电阻率曲线反演; II—阻抗虚部视电阻率曲线反演; AP—常规视电阻率和阻抗相位曲线联合反演。

表 2 b 同一理论模型 (模型 I) 不同反演方式迭代 (10 次) 结果

初始模型	反演方式	电 性 分 层 参 数								PN × 10 ⁻⁸	PNO × 10 ⁻⁸	PN/PNO × 10 ⁻⁸	
		ρ ₁	ρ ₂	ρ ₃	ρ ₄	ρ ₅	h ₁	h ₂	h ₃				h ₄
理论模型		20.0	5.00	400	2.00	100	0.50	1.50	2.00	10.0			
A	RI	20.0	5.00	195	2.00	100	0.50	1.49	2.02	9.99	0.200	131.7	1.52
	RR	18.5	4.97	133	2.00	99.9	0.50	1.46	2.04	9.98	0.121	118.4	1.02
	II	19.9	4.98	120	1.99	99.2	0.50	1.47	2.05	9.97	0.091	143.8	0.63
	AP	19.9	4.99	96.7	2.00	99.9	0.50	1.46	2.06	9.96	0.130	66.9	1.94
B	RI	19.9	4.98	56.7	1.99	99.9	0.50	1.43	2.11	9.94	1.620	1086	1.49
	RR	15.2	4.85	44.3	1.99	99.7	0.51	1.32	2.18	9.92	1.230	840.7	1.46
	II	19.1	4.85	33.2	1.96	95.5	0.53	1.31	2.25	9.83	1.130	1286	0.87
	AP	19.8	4.96	42.1	1.99	99.8	0.51	1.39	2.17	9.90	1.110	468.8	2.37
C	RI	20.4	4.89	1039	2.02	100	0.53	1.46	1.97	10.1	13.14	3948	3.32
	RR	6.84	1.67	992	3.80	96.4	4.98	5.98	0.70	5.43	73.05	5036	14.5
	II	20.5	5.08	1017	1.99	88.7	0.48	1.55	1.97	9.94	10.84	2412	4.49
	AP	20.0	5.00	1000	2.00	100	0.50	1.51	1.99	10.0	0.032	2667	0.01
D	RI	19.9	4.98	55.8	1.99	99.9	0.50	1.43	2.11	9.94	1.868	2416	0.77
	RR	111	5.25	65.8	1.99	99.5	0.77	1.65	2.03	9.92	3.190	1680	2.02
	II	19.0	4.84	29.1	1.96	94.4	0.53	1.29	2.28	9.81	2.552	3029	0.84
	AP	14.8	4.96	41.4	1.99	99.8	0.51	1.39	2.17	9.90	1.261	1990	0.63

性分层参数。总的说来，在大多数情况下，阻抗实部和虚部视电阻率的联合反演获得了最为接近理论模型的模型参数；常规视电阻率和阻抗相位联合反演所得结果次之；而阻抗实部视电阻率曲线和阻抗虚部视电阻率曲线的单参量反演则劣于联合反演效果，且各有所长，一般说，阻抗虚部视电阻率反演获得了较好的模型上部诸层的参数，阻抗实部视电阻率反演则获得了较好的模型下部诸层的参数。

阻抗实部、虚部视电阻率及其联合反演的效果对比，由上述两个理论模型前15次迭代优劣的统计可以看得很清楚（表 3）。就每次迭代后模型参数比较接近理论模型参数而言，联合反演明显地优于两种单参量反演。其中，仅对模型 I 的初始参数 C 的反演迭代，阻抗虚部视电阻率的单参量反演的效果与联合反演的效果可以相比拟。

实测的大地电磁资料是带有误差和有一定的分散程度的，反演解的非唯一性比较大。我们看到（表 4），对于表 2 所列的 4 种反演方式，所获得的反演解的差别是比较大的。反演解的非唯一性是十分严重的。但是可以看到，两种联合反演迭代结果则比较接近。可见对于实际的有误差的大地电磁资料，联合反演对于缩小反演解的非唯一性范围效果是明显的。为了对比研究 4 种反演方式所获得反演解的非唯一性和稳定性，表 4 中列出了大体在观测精度范围内拟合了观测资料的最后几次迭代的电性层参数。两种联合反演的解明显稳定于单参量反演解。在大多数情况下，阻抗实部和虚部视电阻率曲线的联合反演又较常规视电阻率和阻抗相位联合反演所获得的解稳定。

表 3 阻抗实部、虚部视电阻率及其联合反演效果对比（前15次迭代统计）

模 型	初始模型	反演方式	参数修改 最好点次	参数修改 次好点次	模 型	初始模型	反演方式	参数修改 最好点次	参数修改 次好点次
	I	A	RR	47		48	A	A	RR
II			22	47	II	33			43
RI			107	19	RI	93			55
B		RR	26	83	B	B	RR	23	25
		II	12	26			II	42	53
		RI	114	11			RI	76	24
C		RR	10	30	C	C	RR	44	27
		II	81	26			II	39	35
		RI	84	27			RI	60	33
D		RR	44	52	D	D	RR	16	43
		II	16	35			II	23	44
		RI	96	37			RI	104	20

反演方式说明同前。

对于实测的大地电磁资料，由常规视电阻率曲线和阻抗相位曲线的单参量反演迭代，获得了差别很大的模型参数反演解（都在观测精度内拟合了观测数据！）（表5）。充分暴露出了它们反演解的非唯一性。而联合反演则给出了比较稳定的反演解。

表 5 四条实测MTS曲线常规视电阻率、阻抗相位及其联合反演结果对比

反演 方式	No. 2 ρ_{yx}												
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	PN	PNO
AP	24.4	6.37	42.8	3.49	60.0	19.1	0.54	1.28	2.68	14.5	50.3	0.0257	0.183
AR	13.4	2.49	36.0	2.19	83.0	12.7	0.71	0.53	2.06	12.4	23.3	0.0175	0.239
PH	19.9	1.80	48.5	3.39	108	15.6	1.01	0.27	2.74	16.0	42.7	0.0162	0.399
反演 方式	No. 1 ρ_{yx}												
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	PN	PNO
AP	19.2	6.46	54.2	3.02	61.2	23.6	0.37	1.56	2.11	10.7	4.00	0.0344	0.139
AR	11.5	1.34	168	3.06	17.9	34.5	1.09	0.20	2.55	11.2	4.30	0.0355	0.174
PH	22.8	1.73	211	4.56	56.9	29.8	1.24	0.25	2.99	14.0	0.93	0.0178	0.092
反演 方式	No. 2 ρ_{xy}												
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	PN	PNO
AP	20.5	4.62	518	0.62	102	0.40	0.46	1.15	6.96	5.38	1.94	0.0563	1.050
AR	12.3	1.23	616	0.54	97.0	0.06	3.89	0.23	7.64	16.4	1.23	0.0662	1.460
PH	31.8	4.78	96.4	0.58	92.9	0.69	1.11	0.65	9.78	2.76	2.05	0.0351	0.241
反演 方式	No. 1 ρ_{xy}												
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	PN	PNO
AP	72.6	6.64	155	0.50	117	0.01	0.32	1.75	6.32	14.0	0.07	0.0680	0.890
AR	12.9	1.70	480	1.00	131	1.06	1.16	0.26	6.12	15.2	36.6	0.0694	1.230
PH	188	8.61	246	2.63	23.6	0.01	2.73	0.48	21.6	27.6	1.21	0.0307	0.251

AR—视电阻率反演；PH—阻抗相位反演；AP—视电阻率和相位的联合反演

表4 两条实测大地电磁测深曲线不同反演方式迭代结果对比

No. 1 ρ_{yx}

反演方式	N	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	PNO	PN	PN/PNO
RI	8	18.7	5.62	152	3.00	45.9	20.7	0.47	1.40	2.08	10.1	0.88	0.209	0.056	0.268
RR	8	11.6	2.84	88.1	3.10	32.1	30.2	0.77	0.53	2.45	11.9	1.74	0.189	0.050	0.265
II	8	12.8	2.45	77.4	2.26	66.3	1.67	1.01	0.41	2.55	13.2	22.6	0.228	0.056	0.248
AP	7	19.2	6.46	54.2	3.02	61.2	23.6	0.37	1.56	2.11	10.7	40.0	0.139	0.034	0.245

PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代的结果

RI	5	15.9	4.83	40.3	3.04	74.9	20.1	0.59	0.98	2.42	10.8	7.90			
	6	17.5	5.59	49.4	3.02	68.9	20.6	0.49	1.26	2.26	10.6	5.07			
	7	18.7	5.77	90.1	3.01	65.8	20.8	0.46	1.44	2.06	10.4	2.33			
	8	18.7	5.69	152	3.00	45.9	20.7	0.47	1.40	2.08	10.1	0.88			
AP	7	19.2	6.46	54.2	3.02	61.2	23.6	0.37	1.56	2.11	10.7	4.00			
	6	15.9	5.46	40.2	3.07	73.7	23.1	0.53	1.12	2.36	11.3	8.28			
	5	14.3	4.42	40.6	3.10	78.7	21.5	0.67	0.83	2.43	11.3	11.2			
	4	13.1	3.93	43.3	2.26	85.9	18.3	0.79	0.76	3.06	7.93	17.4			
RR	5	10.2	3.52	46.1	3.02	70.6	26.2	0.68	0.64	2.53	11.3	8.28			
	6	12.4	3.28	51.0	3.07	62.0	29.1	0.70	0.62	2.52	11.8	5.23			
	7	12.4	3.10	61.4	3.09	49.7	30.1	0.73	0.58	2.49	11.9	3.20			
	8	11.6	2.84	88.1	3.10	32.1	30.2	0.77	0.53	2.45	11.9	1.74			
II	8	12.8	2.45	77.4	2.26	66.3	1.67	1.01	0.41	2.55	13.2	22.6			
	7	13.0	3.11	57.0	2.62	78.0	6.67	0.96	0.51	2.51	11.6	16.3			
	6	13.1	3.70	49.6	2.73	79.4	10.7	0.90	0.62	2.47	10.7	11.1			
	5	13.1	3.95	44.9	2.75	79.4	11.9	0.89	0.67	2.48	9.92	9.70			
4	12.9	3.95	44.5	2.23	81.8	15.4	0.95	0.71	2.97	7.44	11.7				

No. 2 ρ_{yx}

反演方式	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	N	PNO	PN	PN/PNO
RI	22.8	5.63	40.7	3.50	48.6	15.6	0.62	1.06	2.75	14.6	56.7	7	0.257	0.046	0.179
RR	16.7	3.81	29.5	3.38	65.5	37.4	0.70	0.66	3.13	13.4	11.6	6	0.208	0.038	0.183
II	17.6	3.07	84.8	5.40	87.0	145	0.98	0.43	2.63	13.2	39.2	8	0.298	0.039	0.131
AP	24.4	6.37	42.8	3.49	60.0	19.1	0.54	1.28	2.68	14.5	50.3	8	0.183	0.026	0.142

PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代的结果

RI	4	19.9	4.56	31.8	3.17	81.4	22.0	0.75	0.79	3.21	11.4	21.6			
	5	21.4	4.88	30.2	3.44	82.4	23.2	0.69	0.81	3.05	13.4	25.5			RR—阻抗实部视电阻率反演
	6	22.2	5.31	33.2	3.46	83.5	20.5	0.65	0.93	2.93	14.3	33.1			II—阻抗虚部视电阻率反演
	7	22.8	5.63	40.7	3.50	48.6	15.6	0.62	1.06	2.75	14.6	56.7			
AP	8	24.4	6.37	42.8	3.49	60.0	19.1	0.54	1.28	2.68	14.5	50.3			RI—阻抗实部视电阻率和
	7	22.9	6.07	33.0	3.45	80.4	23.0	0.58	1.11	2.90	14.1	35.9			虚部视电阻率联合反
	6	21.7	5.38	28.7	3.42	83.9	25.5	0.64	0.90	3.11	13.6	25.5			演
	5	19.8	4.81	30.7	3.45	81.9	24.1	0.71	0.79	3.05	13.0	21.4			
	4	17.6	4.24	38.8	2.85	87.8	20.1	0.84	0.75	3.82	8.34	24.3			AP—视电阻率和阻抗相位
RR	4	9.86	4.31	41.0	2.59	83.4	23.1	0.92	0.69	3.45	9.20	22.3			联合反演
	5	11.6	4.14	36.0	3.36	74.5	30.7	0.73	0.67	3.00	12.8	15.8			
	6	16.7	3.81	29.5	3.38	65.5	37.4	0.70	0.66	3.13	13.4	11.8			
II	8	17.6	3.07	84.8	5.41	87.0	145	0.98	0.43	2.63	13.2	39.2			
	7	17.7	3.59	64.1	4.84	78.8	83.6	0.94	0.52	2.67	13.6	42.8			
	6	18.0	4.13	46.2	4.20	82.7	47.9	0.89	0.59	2.83	13.7	32.0			
	5	17.7	4.40	38.9	3.51	80.2	28.2	0.89	0.64	3.05	12.4	24.6			

类似于表3的方法,我们将常规视电阻率—阻抗相位联合反演与阻抗实部视电阻率—阻抗虚部视电阻率联合反演的效果进行了对比(表6)。其试验模型参数列于表1中。可以看出,在所列8组试验中,除一组而外(模型I的初始模型C),阻抗实部视电阻率—阻抗虚部视电阻率联合反演的效果是优于常规视电阻率—阻抗相位联合反演的。而且大部分占有比较明显的优势。因而,大地电磁测深中阻抗实部—虚部视电阻率联合反演方法是应当加以倡导的。

表6 大地电磁资料两种联合反演效果对比(前15次迭代统计)

模 型 I								模 型 I							
初始A		初始B		初始C		初始D		初始A		初始B		初始C		初始D	
RI	AP	RI	AP	RI	AP	RI	AP	RI	AP	RI	AP	RI	AP	RI	AP
78	25	94	20	21	58	85	27	98	33	91	25	57	53	98	13

RI—阻抗实部和虚部视电阻率曲线联合反演参数修改较好点次

AP—视电阻率和阻抗相位曲线联合反演参数修改较好点次

三、大地电磁平均阻抗的反演研究

通常的大地电磁一维反演是建立在均匀分层介质模型的基础上的。但是,实际上并不存在理想的一维,乃至二维的地电结构。大量的大地电磁二维和三维数字模拟及曲线畸变的研究表明,不同类型的非一维地电模型对于大地电磁响应函数的影响是十分复杂的,很难找到一种固定的模式去加以处理。然而,对于某些非一维模型,特别是某些三维地电结构,相对应的阻抗张量元素可能受到某种反号的影响,且阻抗张量存在某些旋转不变量,它们对阻抗张量元素起着某种平均的作用,有人亦称之为平均阻抗。在地下电性结构特征予知甚少,或许使用平均阻抗进行反演解释,可望获得不至出现大错的结果。通常定义如下三种大地电磁阻抗旋转不变量,或平均阻抗[4、5]:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{2} (Z_{xy} - Z_{yx}); \\ Z_2 &= (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})^{1/2}; \\ Z_3 &= (-Z_{xy}Z_{yx})^{1/2}. \end{aligned} \quad (9)$$

为了试验这三种平均阻抗的使用效果,我们利用了相距不远的两个大地电磁测深点的资料。两测点分别位于两个钻井旁,並已有某些频率电磁测深资料。图2和图3给出了这两个测点两测量方向的常规视电阻率、阻抗相位、阻抗实部视电阻率和阻抗虚部视电阻率曲线,同时还给出了上述三种定义的平均阻抗相应的曲线。分析该两测点图中诸曲线形态,可以看出如下特点:1.当两测量方向的某一对曲线($\rho_{xy} - \rho_{yx}$, $\phi_{xy} - \phi_{yx}$, $\rho_{xx}^R - \rho_{yy}^R$, $\rho_{xy}^I - \rho_{yx}^I$)彼此重合或不能加以分辨时,三种平均阻抗的相应参量曲线(ρ_{s1} , ρ_{s2} , ρ_{s3} ; ϕ_{s1} , ϕ_{s2} , ϕ_{s3} ; ρ_{s1}^R , ρ_{s2}^R , ρ_{s3}^R ; ρ_{s1}^I , ρ_{s2}^I , ρ_{s3}^I)亦与它们相重合而不能加以分辨;2.当两测量方向的某一对曲线彼此分离时,三种平均阻抗的相应曲线位于其间的某一位置;3.对于我们这里所研究的两个测点(也可能是特例),除低频端个别频点而外(一般这些频点的资料质量较差),三种平均阻抗所获得的同一响应参量在误差范围内基本上是彼此重合的,即三种平均方式是基本等效的;4.该两测点测量方向相应的一对曲线在短周期相差不大,说明它们並未受到表面非均匀性特别明显的畸变影响。相应一对曲线后部的分离可归结为受到测点原地

深部非均匀性，或较大横向尺度非均匀性的影响。还应该指出的是，由于该两测点处的频率电磁测深低频区仍基本满足远场条件，故其视电阻率曲线尾部与我们所获得的大地电磁测深视电阻率曲线的首部相互衔接，且基本重合。

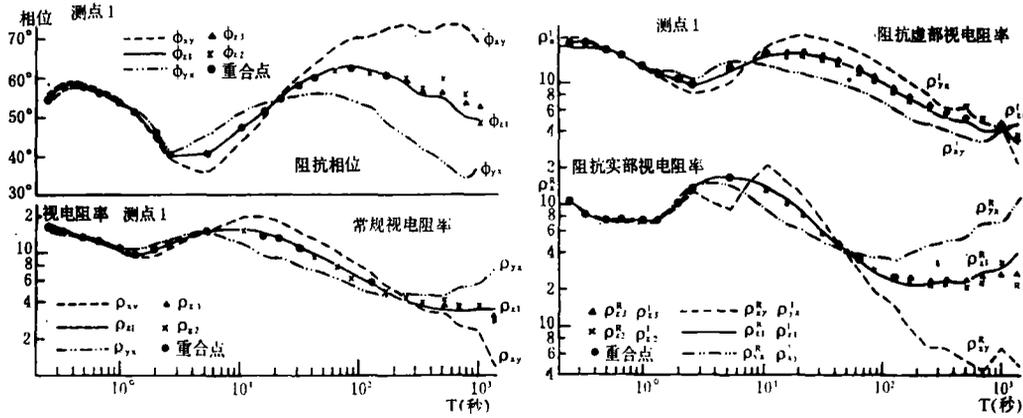


图 2

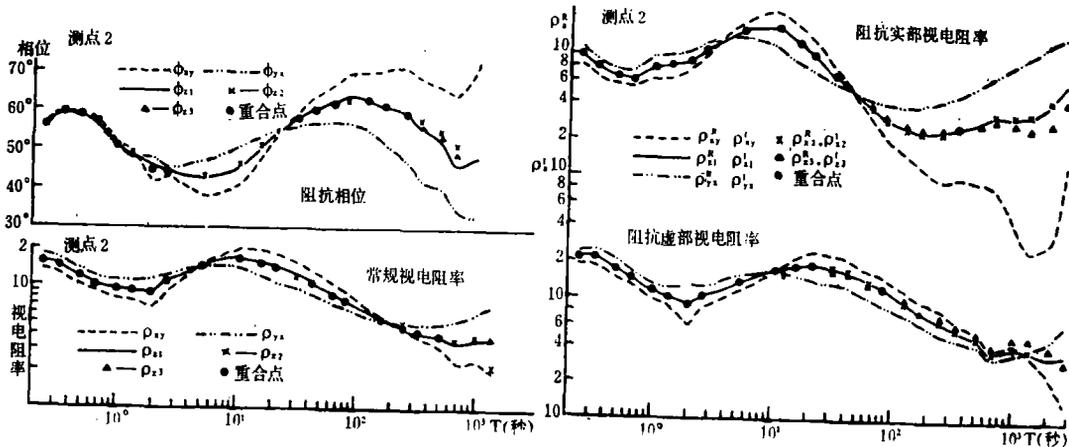


图 3

表 7 a、b 分别给出了这两个测点的三种平均阻抗利用两种联合反演方法所获得的电性分层参数。为了对比所获得反演解的稳定性，我们仿照表 4 的方法，同时给出了大体在观测误差范围内拟合了观测资料的最后几次的迭代结果。测点 1 和测点 2 的钻井资料表明，该处表层第四纪和第三纪的总厚度分别为 442 米和 523 米。与表 7 所列结果加以对比，三种平均阻抗的阻抗实部视电阻率和虚部视电阻率的联合反演 (RI) 获得了最为接近的结果，因而第一层电阻率和厚度取其反演结果的域值。三种平均阻抗两种反演方法所得第二层电阻率值差别不大，但层厚较为分散，考虑到三种平均阻抗由 RI 反演所获得的结果较为集中，同时考虑到第二层参数值可能受到第一层所确定参数的影响，故取 RI 反演的结果作为第二层参数的域值。第五层厚度，测点 1 Z_5 和 Z_5 两种联合反演方法所得结果相近，测点 2 仅 Z_5 两种联合反演方法所得结果相近，我们取了它们的域值范围。其它电性分层参数则取其所有三种平均阻抗、两种联合反演方法所得结果的域值。将上述综合解释结果列于表 8 中。我们看到，

除个别方法本身分辨较差的高阻层的电阻率而外，所给电性参数的域值范围并不是很大的，是完全可以为人们所接受的。第一层电性参数与钻井资料相符，由两钻井资料所估算的测点1和2的Q+N的等效电阻率的域值分别为10.2—39.2和9.51—36.3欧姆米（测点1 Q和N的厚度分别为110和332米，测点2分别为96米和427米；Q和N电阻率域值分别为60—500欧姆米和8—30欧姆米），十分清楚，我们反演的第一层电阻率的域值是落在这一域值的中部的某一区域内的。而深部后三层的电性参数相近可以找到共同的参数域值范围。可能与该两测点相距甚近有关。

表 7 a 测点 1 的三种平均阻抗的两种联合反演结果

No. 1 z1 PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代结果												
RI	5	20.7	5.45	32.8	1.75	86.0	4.93	0.66	0.91	4.53	11.6	7.87
	6	23.1	6.95	40.0	1.74	85.3	5.17	0.51	1.34	4.20	11.4	5.44
	7	27.2	7.25	63.6	1.75	77.4	5.47	0.43	1.75	3.79	11.1	3.49
	8	28.2	7.31	104	1.75	74.6	5.55	0.44	1.74	3.77	10.7	2.32
	9	28.5	7.34	203	1.75	73.9	5.60	0.44	1.81	3.67	10.5	1.64
	10	27.8	7.27	122	1.74	18.5	5.69	0.45	1.72	3.80	9.70	0.41
AP	6	20.8	6.45	35.4	1.76	87.0	3.16	0.60	1.15	4.31	12.0	7.38
	5	20.1	5.09	33.7	1.81	88.6	4.67	0.70	0.83	4.46	12.2	11.1
	4	18.6	4.52	39.5	1.86	87.8	2.48	0.80	0.72	4.42	12.7	8.49
	3	17.2	4.02	46.7	1.26	93.8	10.7	0.82	0.71	5.44	7.86	21.7
No. 1 z2 PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代结果												
RI	5	20.7	5.44	34.0	1.87	84.5	2.05	0.66	0.91	4.24	12.9	5.12
	6	23.1	7.00	42.8	1.86	84.3	1.97	0.51	1.37	3.90	13.2	4.05
	7	26.9	7.45	72.4	1.87	80.7	2.02	0.44	1.75	3.49	13.4	3.65
	8	27.8	7.28	149	1.88	117	2.07	0.45	1.77	3.42	13.2	3.28
	9	26.9	7.16	117	1.86	42.1	2.11	0.47	1.64	3.59	12.7	3.17
	AP	6	20.6	6.42	36.2	1.86	84.9	1.67	0.61	1.14	4.05	11.1
5		20.2	5.06	34.1	1.92	86.4	2.25	0.71	0.82	4.23	12.6	3.33
4		18.8	4.56	39.0	2.05	86.2	1.76	0.79	0.71	4.11	14.2	3.12
No. 1 z3 PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代结果												
RI	5	20.5	5.40	33.4	1.89	84.7	2.55	0.66	0.90	4.36	12.5	5.18
	6	22.9	6.89	41.2	1.88	84.2	2.63	0.52	1.33	4.03	12.2	3.71
	7	26.6	7.46	68.3	1.90	85.6	2.75	0.43	1.75	3.60	12.0	2.92
	8	27.4	7.24	124	1.90	93.5	2.78	0.45	1.74	3.56	11.8	2.70
	9	27.2	7.21	224	1.90	109	2.79	0.46	1.74	3.56	11.7	2.59
	10	27.1	7.19	270	1.90	204	2.78	0.46	1.72	3.59	11.8	2.64
AP	6	20.4	6.38	36.3	1.88	86.6	1.71	0.62	1.14	4.15	11.7	3.68
	5	20.1	5.04	33.8	1.93	86.3	2.77	0.70	0.82	4.32	12.4	4.21
	4	18.6	4.55	38.6	2.05	86.2	1.94	0.79	0.72	4.22	13.9	3.85
反演方式	N	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5

表 7 b 测点 2 的三种平均阻抗的两种联合反演结果

No. 2 z1 PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代结果												
RI	5	22.0	4.62	32.0	1.79	86.7	6.86	0.64	0.71	5.31	10.9	6.70
	6	22.7	4.98	32.6	1.78	84.0	7.08	0.61	0.79	5.27	10.3	3.92
	7	23.8	5.52	34.5	1.77	79.9	7.15	0.56	0.93	5.17	9.89	2.18
	8	24.4	5.62	35.4	1.77	82.2	7.16	0.55	0.97	5.14	9.63	1.81
	9	24.4	5.61	35.3	1.77	86.1	7.16	0.55	0.96	5.14	9.52	0.94
	10	24.7	5.69	36.0	1.77	202	7.15	0.54	0.99	5.12	9.68	1.82
AP	5	21.9	4.72	30.2	1.89	89.4	8.41	0.63	0.71	5.26	12.2	8.16
	4	20.2	4.46	34.6	1.77	90.7	4.37	0.70	0.69	5.21	10.9	10.8
	8	17.4	3.98	45.8	1.23	94.0	7.56	0.69	0.70	6.15	7.59	19.3
No. 2 z2 PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代结果												
RI	4	20.8	4.39	33.1	1.78	88.2	4.77	0.67	0.69	5.33	10.4	11.4
	5	21.9	4.60	31.3	1.75	87.7	4.03	0.64	0.71	5.32	10.8	10.2
	6	22.6	4.91	31.7	1.74	86.9	3.92	0.61	0.77	5.29	10.8	10.0
	7	23.6	5.45	33.6	1.75	85.9	3.89	0.57	0.91	5.17	10.9	10.2
	8	24.1	5.52	34.5	1.75	85.0	3.89	0.56	0.94	5.14	10.9	10.3
	9	24.2	5.57	34.8	1.75	69.7	3.89	0.55	0.95	5.13	10.9	10.3
AP	5	21.8	4.72	28.3	1.59	89.5	0.54	0.63	0.72	5.22	19.5	0.61
	4	20.4	4.48	33.8	1.67	88.3	0.63	0.69	0.69	5.04	10.0	0.56
No. 2 z3 PN<0.06大体在观测精度内的最后几次迭代结果												
RI	5	21.8	4.60	33.5	1.85	86.7	3.35	0.64	0.72	5.20	10.7	4.32
	6	22.7	5.07	34.4	1.83	86.6	3.39	0.60	0.83	5.15	9.81	3.09
	7	24.2	5.72	37.7	1.83	92.8	3.42	0.54	1.00	5.00	9.67	2.76
	8	24.9	5.78	39.6	1.84	101	3.42	0.53	1.04	4.96	9.74	2.74
	9	25.2	5.87	41.3	1.85	67.0	3.42	0.52	1.08	4.92	9.82	2.81
	10	25.0	5.79	40.3	1.84	16.8	3.43	0.53	1.05	4.95	9.67	2.87
AP	7	27.4	6.62	36.3	1.89	86.9	4.01	0.43	1.21	4.91	9.81	2.06
	6	21.7	5.30	33.5	1.89	89.0	3.25	0.60	0.85	5.09	10.3	3.90
	5	21.7	4.71	30.7	1.93	89.8	3.55	0.63	0.72	5.23	11.5	4.95
反演方式 N		ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5

表 8 中我们同时给出了该两测点对畸变较小的 ρ_{yz} 曲线，用两种联合反演方法所获得的结果。总的讲来，阻抗实部视电阻率和阻抗虚部视电阻率的联合反演获得了比较接近上述综合解释结果，其中第三层、第五层厚度和第六层电阻率显示出与综合解释结果有较大差别。

本文所使用的大地电磁观测资料由本课题组获得，在野外资料收集过程中曾得到张云琳等同志协助。资料处理解释使用了我们为 MMSO 2 E 大地电磁测深仪研制的软件系统〔6〕。

(本文1990年12月25日收到)

表 8 两个测点三种平均阻抗综合反演解释结果

测点	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5		
№.1	26.9— 27.8	7.16— 7.27	35.0— 270	1.74— 1.90	40.0— 200	1.70— 5.70	0.45—0.47	1.64—1.72	3.60—4.30	9.70—12.7	2.60—3.70		
№.2	24.2— 25.0	5.57— 5.79	28.0— 40.0	1.59— 1.89	70.0— 200	3.40— 8.40	0.53—0.55	0.95—1.05	4.90—5.20	9.70—10.9	2.10—2.80		
共同 电性 层	Q+N			1.74— 1.89	70.0— 200	3.40— 5.70	Q+N			9.70—10.9	2.60—2.80		
ρ_{yz}	反演 方式	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	表左所列为两 测点选择畸变 较小曲线反演 结果
№.1	RI AP	22.6 17.7	7.00 6.28	131 39.7	3.05 3.00	65.1 79.5	17.7 14.5	0.49 0.67	1.53 1.09	1.80 2.14	10.7 10.8	5.14 8.77	
№.2	RI AP	23.8 20.2	5.85 5.49	56.9 33.8	3.55 3.37	57.2 85.7	18.3 24.0	0.67 0.75	0.97 0.79	2.62 3.00	14.8 13.3	46.4 21.9	

参 考 文 献

- (1) Yee, E. and Paulson, K.V., Concerning dispersion relations for the magnetotelluric impedance tensor, *Geophysical Journal*, Vol.95, No. 3, 549—559, 1988.
- (2) 林长佑、刘晓玲、武玉震, 试论大地电磁测深法在地震前兆探索中的进一步应用, *地震学报*, Vol.12, No. 2, 166—175, 1990.
- (3) Fischer, Gaston and Le Quang, B.V., Topography and minimization of the standard deviation in one-dimensional magnetotelluric modeling, *Geophys.J.R. Astr. Soc.*, Vol.67, No. 2, 279—292, 1981.
- (4) Ingham, Malcolm R., The use of invariant impedances in magnetotelluric interpretation, *Geophysical Journal*, Vol.92, No. 1, 165—169, 1988.
- (5) Park, S.K. and Livelybrook, D.W., Quantitative interpretation of rotationally invariant parameters in magnetotellurics, *Geophys.*, Vol.54, No.11, 1483—1490, 1989.
- (6) 林长佑、武玉震, MMSO 2 E 大地电磁测深仪资料处理解释软件系统, *中国地球物理学会年刊*, 155, 地震出版社, 1990.

ON THE JOINT INVERSION OF MAGNETOTELLURIC DATA

Lin Changyou, Wu Yuxia

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China*)

Abstract

On the basis of dispersion relations for the magnetotelluric (MT) field, the physical meanings of 1-D joint inversion of MT data are expounded. The necessity and applied prospects of the joint inversion using a pair of MT response functions, especially the apparent resistivities of the impedance's real and imaginary parts, which are relative with the dispersion relations, are inferred. The effects of the single parameter's and joint inversions for MT impedance are tested. It is shown that in the aspects of increasing the velocity of the inverse iteration, limiting the non-uniqueness of the inverse solution and assuring the stable convergence of the inverse iteration, the joint inversions are more advantageous than the single-parameter's inversions, in the most cases the joint inversion using the apparent resistivities of impedance's real and imaginary parts is more advantageous than the joint inversion using the normal apparent resistivity and impedance's phase, which is usually used now. The test for practical MT data shows that the use of the various average impedances and the synthetic interpretation of them will help to obtain more reliable results.