

大地电磁法中的 RHOPPLUS 理论及其应用研究

谭捍东¹, 齐伟威², 郎静¹

(1. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室 北京 100083 ; 2. 江西省地质矿产局 902 探矿工程大队 江西 新余 338000)

摘 要 : 简述了大地电磁法中的 Rhoplus 理论。结合实测资料 , 详细介绍了 Rhoplus 理论在检查视电阻率和相位资料间的一致性、估算任意频点的视电阻率和相位值及其上下限、合理拼接不同仪器系统采集的资料、发现或校正由仪器或处理软件的问题引起的曲线畸变、了解受干扰噪声影响造成曲线畸变的程度等方面的应用。

关键词 : 大地电磁法 , Rhoplus 理论 , 视电阻率 , 相位

中图分类号 : P632.3 文献标识码 : A 文章编号 : 1000 - 8918(2004) 06 - 0532 - 04

大地电磁法是一种天然源的电磁勘探方法。由于各种干扰噪声的存在 , 加上个别频段场源信号又很弱 , 在野外数据采集工作中虽然记录了长时间的时间序列资料 , 在室内对时间序列资料的处理又采用了 Robust 估计处理方法 , 但在得到的视电阻率和相位曲线中仍可能有个别频点值的分布不正常 , 或者几个连续的频点不正常。还有一些情况 , 如仪器性能不稳定 , 时间序列处理软件不正确 , 等等 , 也可能导致大地电磁测深曲线发生畸变。对于这种畸变的资料进行反演获得的电阻率模型会出现虚假的构造信息。研究用于检测大地电磁测深曲线的畸变程度并对发生畸变的曲线进行合理校正的方法就显得非常重要。Rhoplus 理论在这方面为我们提供了重要的理论基础。

1 Rhoplus 理论

在大地电磁法中 , 利用地表的电场和磁场分量 , 定义参数 $\alpha(\omega)$

$$\alpha(\omega) = E(\omega) / i\omega B(\omega)$$

其中 ω 为圆频率 , $E(\omega)$ 、 $B(\omega)$ 分别为电场和磁场分量的频谱。视电阻率 $\rho_s(\omega)$ 和相位 $\phi(\omega)$ 与参数 $\alpha(\omega)$ 之间存在下面的关系

$$\rho_s(\omega) = \mu_0 \omega |\alpha(\omega)|^2 ,$$

$$\phi(\omega) = |\alpha(\omega)| \exp[i\phi(\omega) - \pi/2]。$$

$\alpha(\omega)$ 和 $\rho_s(\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 之间的关系可进一步整理为

$$\ln \alpha(\omega) = \frac{1}{2} \ln \frac{\rho_s(\omega)}{\mu_0 \omega} + [\phi(\omega) - \frac{\pi}{2}]。$$

对于一维地电断面 , Weidelt 和 Parker 等的研究结果^[1,2]表明 $\alpha(\omega)$ 可以表达成下面的积分形式

$$\alpha(\omega) = a_0 + \int_0^\infty \frac{\alpha(\lambda)}{(\lambda + i\omega)} d\lambda ,$$

其中 a_0 、 $\alpha(\lambda)$ 为实数 , 且 $\lambda \geq 0$ 、 $\alpha(\lambda) \geq 0$ 。将积分表达式离散化 , 上式变为

$$\alpha(\omega) = a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n / (\lambda_n + i\omega)]。$$

对于二维地电断面 , Weidelt 的研究结果表明 , 由 TM 模式对应的电场、磁场分量所定义的参数 $\alpha(\omega)$ 也严格具有与一维地电断面对应的上述表达形式。

Parker 和 Booker 经过进一步的分析和研究 , 得到了下面的积分表达式^[4]

$$\frac{1}{2} \ln \frac{\rho_s(\omega)}{\mu_0 \omega} + [\phi(\omega) - \frac{\pi}{2}] = \ln a_0 + \int_0^\infty \frac{\mu(\lambda)}{\lambda + i\omega} d\lambda ,$$

$$\mu(\lambda) = \begin{cases} 1 & \lambda_n \leq \lambda \leq v_n \quad n = 1, 2, \dots, N \\ 0 & \lambda \notin (\lambda_n, v_n) \quad n = 1, 2, \dots, N \end{cases} ,$$

$\omega = iv_n$ 是 $\alpha(\omega)$ 的解。

积分式的右边可以看成是由一系列 δ 函数组成的数学模型对应的响应。这就表明 , 对于一维地电断面和二维地电断面的 TM 模式 , 其大地电磁响应视电阻率 ρ_s 和相位 ϕ 总存在 1 个由一系列 δ 函数组成的数学模型与之相对应。

把上述的理论称为 Rhoplus 理论。对实测资料利用 Rhoplus 理论寻找由一系列 δ 函数组成的数学模型的过程称为 Rhoplus 分析。

2 Rhoplus 理论的主要应用

对于 1 条大地电磁测深曲线的 ρ_s 和 ϕ 数据 ,通过对积分式离散化 ,用加权的最小二乘法求解 ,若可以找到 1 个由一系列 δ 函数组成的数学模型 ,其响应可以拟合给定的数据 ρ_s 和 ϕ ,则说明所给定的数据 ρ_s 和 ϕ 间是一致的 ;否则就不一致。这是应用 Rhoplus 理论分析大地电磁资料的重要根据。Rhoplus 理论的应用 ,主要有 5 个方面。

2.1 检查视电阻率和相位资料的一致性

在理论上 ,对于任意的一维地电断面和二维地电断面 TM 模式 ,其对应的视电阻率和相位资料都

严格具有一致性。对于实测资料 ,当受干扰噪声或其他因素影响严重时 ,这种一致性很难保证 ,因而有必要对实测资料应用 Rhoplus 理论进行这种一致性检查。

下面是利用 Rhoplus 理论检查视电阻率和相位资料一致性的例子。图 1 中 a、b 表明相位资料有脱节 ,而 c、f 表明视电阻率资料正常 ,这可能是把 1 到 20 频点 2 种模式的相位资料搞反了。为了验证这种假设是否正确 ,我们对视电阻率和交换后的相位资料(图 1d、e)进行了 Rhoplus 分析 ,可以看出 ,拟合结果很好 ,表明假设是正确的 ,采取的校正方案也是合理的。

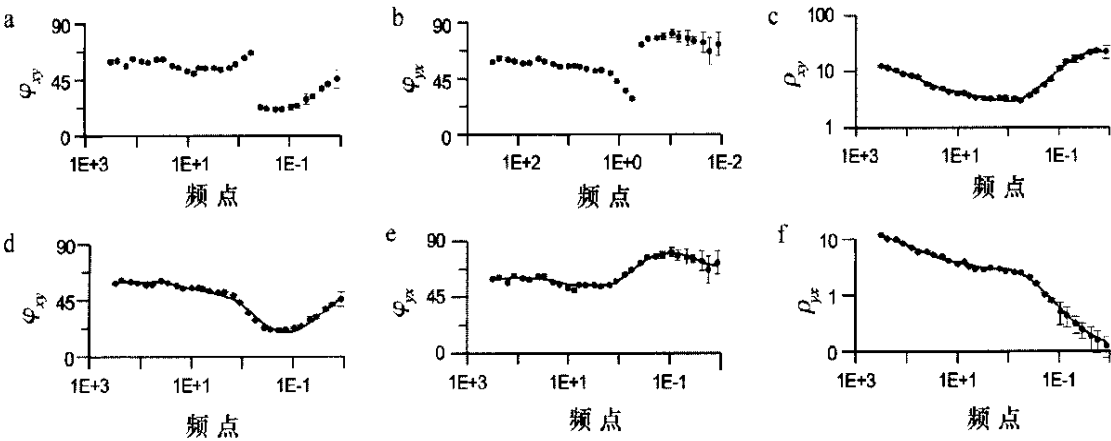


图 1 利用 Rhoplus 理论检查视电阻率和相位资料一致性的例子

值得指出的是 ,虽然从理论上只对一维地电断面和二维地电断面的 TM 模式资料满足 Rhoplus 理论的结论进行了严格的证明 ,但实际应用表明 ,对于二维地电断面 TE 模式资料和三维地电断面的资料在绝大多数情况下也满足 Rhoplus 理论。前面例子中 2 种模式资料均拟合得很好就表明了这一点。

2.2 估算任意频点的 ρ_s 和 ϕ 及其上下限

对于实测资料(由相位和至少 1 个频点的视电阻率值组成) ,应用 Rhoplus 理论可估算任意频点的 ρ_s 和 ϕ 值 ,在给置信度时 ,还可确定任意频点 ρ_s 和 ϕ 值相应的上下限。这一点在决定是否取舍某受干扰频点的值 ,或给定其合理的值时是重要的依据 ,因而是很有用处的。

下面是利用 Rhoplus 理论确定视电阻率和相位资料上下限的例子。图 2 中的虚线是置信度为 95% 时确定出的任意频点 ρ_s 和 ϕ 值的上下限。注意图 2b 中第 8 号频点相位值位于此频点相位的上下限之外 ,因而此频点的相位资料在反演解释中是应该舍弃的 ,如果利用 Rhoplus 分析得到的此频点的拟合相位值代替此频点的实测相位值也是合理的。

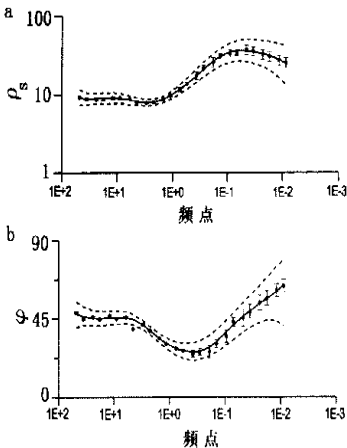


图 2 利用 Rhoplus 理论确定 ρ_s 和 ϕ 上下限的例子

2.3 对不同仪器系统的观测结果进行处理

为了取得超宽频带的大地电磁资料 ,往往采用不同观测频段的仪器系统进行联合观测。在“国际喜马拉雅青藏高原深剖面探测的大地电磁研究 (IN-DEPTH-MT)”项目中 ,为了获得深达壳幔的地电信息 ,采用了 V5 和 LIMS 仪器系统配套工作。在对 2 种仪器系统采集的时间序列资料经预处理后分别得到的视电阻率和相位资料进行拼接时 ,发现在有些

测点视电阻率资料间有小的位移,而相位资料连接得很好(图3)。由于在有些测点,两套仪器分别工作时所使用的电极距长度是不同的,因而产生了不同的静位移,造成了视电阻率间小的位移。应用 Rhoplus 理论,以 LIMS 资料为准对 V5 仪器的视电阻率资料进行了严格的处理,因而很好地解决了资料拼接中出现的位移问题。

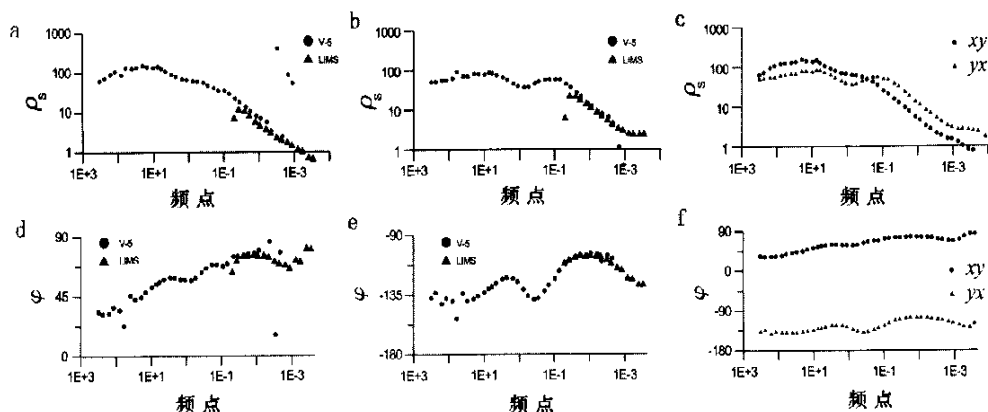


图3 利用 Rhoplus 理论拼接资料的例子

2.4 发现或校正由仪器或预处理软件引起的问题

在有些情况下,由仪器或处理软件引起的问题表现在视电阻率或相位曲线上是很难识别的。但经过 Rhoplus 分析,有时是可以发现问题的,甚至有时还可以对问题进行校正。

下面是1个利用 Rhoplus 理论发现和校正仪器问题的例子。图4a、b为对实测视电阻率和相位资料进行 Rhoplus 分析后的拟合结果,可见相位曲线拟合很好,而视电阻率曲线的后7个频点却很难拟

图3是1个应用 Rhoplus 理论对 V5 和 LIMS 资料进行拼接并对小的位移进行合理校正的例子。其中图3a、b、d、e是对2套仪器系统的资料直接拼接得到的结果,可见视电阻率资料间有小的位移,相位资料接的很好。图3c、f是应用 Rhoplus 理论进行拼接并对小的位移进行合理校正后的结果。

合。为了找到问题的原因,对测区内所有测点测深曲线的 Rhoplus 分析拟合结果全面分析,发现凡使用了某一探头的测深曲线 Rhoplus 分析结果都具有前面的现象,因而推断这一现象与此探头有关。通过对探头的标定资料进行分析,发现标定资料存在问题,对标定资料校正后,相应校正后的视电阻率和相位曲线也趋于正常。图4c、d为对校正后的视电阻率和相位曲线进行 Rhoplus 分析后的拟合结果。

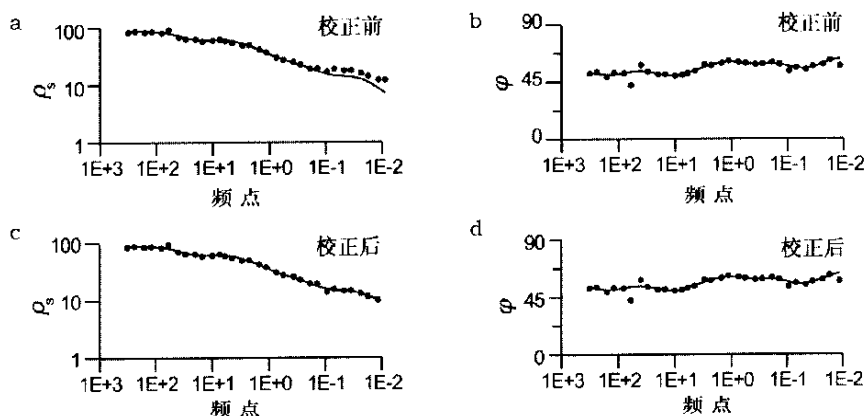


图4 利用 Rhoplus 理论发现和校正仪器问题的例子

2.5 了解受干扰噪声影响曲线畸变的程度

由于个别频段大地电磁信号很弱,当干扰噪声的影响严重时,即使记录长时间的时间序列资料,又采用 Robust 估计方法估算大地电磁响应,但在有些
万方数据

情况下,视电阻率或相位资料仍有个别频点的值分布不正常,或者连续频点的值分布不正常。对于这种情况,有时也很难识别,但利用 Rhoplus 分析有时是可以发现这种不正常分布的。

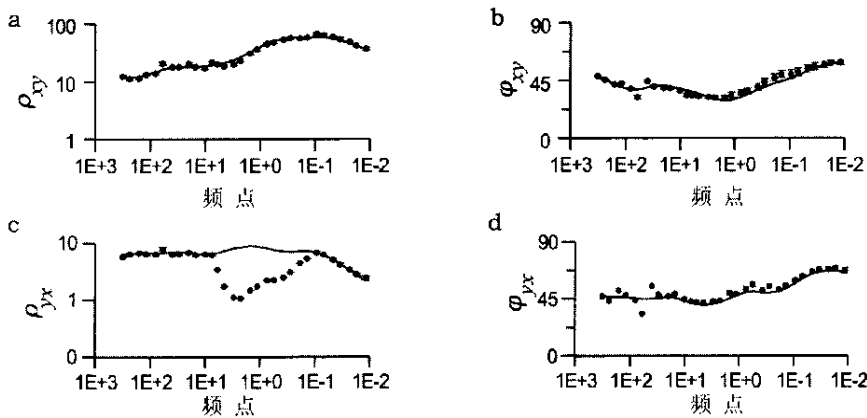


图 5 利用 Rhoplus 理论发现畸变严重资料段的例子

下面是 1 个利用 Rhoplus 理论发现畸变严重资料段的例子。图 5 是对某测点 2 种模式的资料进行 Rhoplus 分析拟合的结果。从图 5a、b 可以看出 ,对 ρ_{xy} 、 φ_{xy} 的拟合结果比较好 ,而从图 5c 中可以看出 ,中频段 12 个频点的视电阻率 ρ_{yx} 不能拟合 ,表明此频段的 ρ_{yx} 值分布是不正常的 ,这样 ,此频段的视电阻率资料在反演解释中是应该舍弃的 ,否则 ,在反演结果中就会产生假的构造信息。

3 结论

通过上面结合实测资料例举的 Rhoplus 理论在检查资料的一致性、估算任意频点的值及其上下限、合理拼接资料、发现或校正由仪器或处理软件引起的问题、了解受干扰噪声影响曲线畸变的程度等方面的主要应用 ,可见 Rhoplus 理论是大地电磁法中

的一个重要基础理论 ,应用 Rhoplus 理论分析和处理实测大地电磁资料 ,是精细处理大地电磁资料的一种重要工具 ,也是对实测资料反演解释前的一个重要处理流程。

参考文献 :

[1] Weidelt P. The inverse problem of geomagnetic induction[J]. Z. Geophys ,1972 ,38 :257 - 289.
[2] Parker R L. The inverse problem of electromagnetic induction : existence and construction of solutions based upon incomplete data [J]. Jour Geophys Res ,1982 ,85 :4421 - 4428.
[3] Weidelt P ,Kaikkonen P. Local 1D interpretation of magnetotelluric B-polarization impedance[J]. Geophys J Int ,1994 ,117 :733 - 748.
[4] Robert L Parker ,John R Booker. Optimal one-dimensional inversion and bounding of magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors ,1996 ,98 :269 - 282.

THE RHOPPLUS THEORY IN MAGNETOTELLURIC METHOD AND ITS APPLICATION

TAN Han-dong¹ ,QI Wei-wei² ,LANG Jing¹

(1. College of Geophysics and Information Technique China University of Geosciences Geo-detection Laboratory Ministry of Education ,Beijing 100083 , China ;2. No. 902 Party of Exploration Engineering , Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources ,Xinyu 338000 , China)

Abstract : This paper describes in brief the Rhoplus theory in magnetotelluric method. With practical examples ,the paper deals in detail with the application of the Rhoplus theory in such aspects as the examination of the consistency between the apparent resistivity and the phase data ,the estimation of apparent resistivity and phase value as well as their upper and lower limits at any frequency point ,the reasonable piecing of the data collected by different instrument systems ,the discovery or correction of curve distortion caused by instrument or software processing ,and the understanding of the degree of curve distortion caused by interfering noise.

Key words : magnetotelluric method ; Rhoplus theory ; apparent resistivity ; phase

作者简介 :谭捍东(1966 -) ,男 ,2000 年获中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院博士学位 ,现为中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院教授 ,主要从事地球物理的研究与教学工作。