

变正则化参数的地面核磁共振数据反演

翁爱华^{1,2}, 肖占山¹, 徐世浙¹

1 浙江大学 理学院, 杭州, 310027; 2 吉林大学 应用地球物理系, 长春, 130026

将观测到的核磁信号转化为地下含水层含水量分布是地面核磁共振数据的反演。在自由空间中, 地面核磁共振数据的反演可转化为线性方程组求解问题。为获得最终解, 在反演过程中, 要求利用最优的正则化参数进行反演。由于最优正则化参数计算困难, 通常采用经验方法或者较费时的优化计算求取。为克服该困难, 在地面核磁共振反演中, 我们引入了变正则化参数的反演技术。

1. 地面核磁共振反演公式

假设发射线圈为圆环线, 在地面核磁共振勘探中, 当激发脉冲电流停止后, 回线中将产生随时间 t 变化的自由感应信号。当地下含水层呈层状分布时, 信号的初始强度 (振幅) $E_0(Q)$ 可化为对深度变量 z 的积分形式, 即

$$E_0(Q) = \int_0^{\infty} K(Q, z) n(z) dz \quad (1)$$

式中 $n(z)$ 是地层含水量, $K(Q, z)$ 称为积分核。对激发电流脉冲强度 Q 和深度 z 离散化后有

$$E_{0i} = K_{ij} n_j, \quad (2)$$

其中 n_j 为第 j 含水层的含水量, 并且 $0 \leq n_j \leq 1$ 。进一步可将上式写成如下的矩阵形式

$$Kn = E. \quad (3)$$

上式等价于下面的优化问题

$$\begin{aligned} \min : & \|y - Ax\|^2 + \alpha^2 \|Wx\|^2, \\ \text{s.t.} & \quad x_i \geq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 α^2 称为正则化因子, W 是体积为 $K \times N$ 的模型约束条件矩阵, 取决于模型限制方式。

2. 变正则化参数反演的原理

在常规的正则化反演中, 正则化因子 α^2 是固定的, 这显然没有考虑不同数据对模型参数的分辨能力。变正则化地面核磁共振数据反演方法的基本原理是, 假设正则化因子是各个含水层位置的空间变量, 并且由模型参数分辨率矩阵及其展布函数决定。对于高分辨率的参数, 要求正则化因子值小, 而分辨率较低的参数, 其相应的正则化因子被赋以较大的值。这样, 在反演过程中, 将根据参数灵敏度对优化问题中的含水量模型与数据误差进行平衡, 达到同时提高了反演的分辨率和反演过程的稳定性。具体的实现过程大致如下: 首先由 (4) 式用小s的正则化参数定义模型参数分辨率矩阵 R , 并求出每个模型参数的空间展布函数 SP_i ; 接着由展布函数计算变正则化参数, 其公式为

$$\lambda_i = \lambda_{\min} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{SP_{\max} - SP_{\min}} (SP_i - SP_{\min}). \quad (5)$$

式中 λ_{\min} 、 λ_{\max} 、 SP_{\min} 、 SP_{\max} 分别为正则化参数和展布函数的上下限。最后, 利用获得的变正则化参数重新求解 (4) 式, 获得最终的含水层模型。

本文的研究由国家自然科学基金 (No. 40304009) 资助。

参考文献

- 1 翁爱华等. 层状导电介质中地面核磁共振响应特征理论研究, 地球物理学报, 44, 1, 2004
- 2 Legchenk A V et al. Inversion of surface NMR data, Geophysics, 63, 1, 1998