

· 矿井物探 ·

# 巷道层测深理论曲线数值模拟及 资料解释方法

岳建华 李志聘 刘世蕾 (中国矿业大学 徐州 221008)

**摘要** 建立了层测深理论曲线正演模拟的数学模型,结合三层和四层地电模型层测深视电阻及视电阻率理论曲线的正演计算,研究了层测深曲线特征和解释方法,同时介绍了煤矿井下层测深法的应用实例。

**关键词** 层测深法 正演模拟 反演解释 应用

**中国图书资料分类法分类号** P631.322

**作者简介** 岳建华 男 30岁 副教授 电法勘探

## 1 引言

本文是在《巷道层测深工作原理及技术》<sup>[1]</sup>一文的基础上,全面介绍了层测深理论曲线正演模拟技术和理论曲线基本特征,论述了层测深实测资料的解释方法,通过部分应用实例,进一步论述层测深解决工作面内煤层构造扰动的实际地质效果。

## 2 层测深理论曲线正演模拟的数学模型

对于水平多层介质地电模型(图1),根据全空间电位分布理论,选取柱坐标系,并以供电点源A

为坐标原点,可写出层测深装置(图2)供电偶极A(I)和B(-I)在煤层与顶底板分界面处(即测量电极M、N处)产生的电位表达式:

$$U_{ii}^A(M) = \frac{I\rho}{4\pi} \int_0^\infty [1 + A_{ii}(\lambda) + B_{ii}(\lambda)] J_0(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$U_{ii}^A(N) = \frac{I\rho}{4\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda_i} + A_{ii}(\lambda) e^{-\lambda_i} + B_{ii}(\lambda) e^{\lambda_i}] J_0(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$U_{ii}^B(M) = \frac{I\rho}{4\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda_i} + A'_{ii}(\lambda) e^{\lambda_i} + B'_{ii}(\lambda) e^{-\lambda_i}] J_0(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

## 参考文献

- 1 朱光明等. 小波变换及其在一维滤波中的应用. 石油物探, 1993;32(1):1~10
- 2 刘仲一等. 信号特征分析的一种新方法. 石油大学学报, 1994;18(2):14~18
- 3 夏洪瑞等. 小波变换及其在去噪中的应用. 石油地球物理

勘探, 1994;29(3):274~285

- 4 杨忠民, 黄大云. 小波变换在提高资料的信噪比和分辨率中的应用. 石油地球物理勘探, 1994;29(5):623~629
- 5 李世雄, 刘家琦. 小波变换和反演数学基础, 北京:地质出版社, 1994

(收稿日期 1996-04-26)

## USING B-SPLINE WAVELET TRANSFORM TO IMPROVE RESOLUTION OF SEISMIC DATA

Cui Ruofei Cao Dexin (China University of Mining and Technology)

Gong Yesong (Hebei Coal Geophysical Survey Team)

**Abstract** In this paper the concept of wavelet transform is introduced and both the scale function and the wavelet function are obtained with the second-order B-spline function as the wavelet basis. It is tested on actual data that wavelet transform can obtain the seismic profiles of different band and improve the resolution of data after considering the characters of seismic signal in both time domain and frequency domain.

**Keywords** seismic survey; wavelet transform; B-spline wavelet; resolution

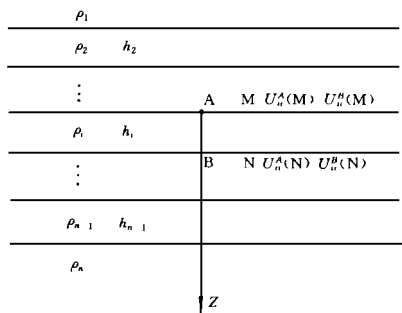


图 1 水平多层介质地电模型

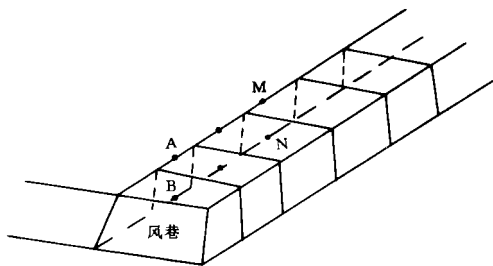


图 2 层测深装置示意图

$$U_{ii}^B(N) = \frac{I\rho}{4\pi\omega} \int_0^{\infty} [1 + A'_{ii}(\lambda) + B'_{ii}(\lambda)] J_0(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中待定系数  $A'_{ii}$ 、 $B'_{ii}$ 、 $A'_{ii}$ 、 $B'_{ii}$  可由边界条件导出:

$$A'_{ii}(\lambda) = \frac{\alpha(1+\beta)}{1-\alpha\beta}, \quad B'_{ii}(\lambda) = \frac{(1+\alpha\beta)}{1-\alpha\beta}; \quad (5)$$

$$A'_{ii}(\lambda) = \frac{\alpha'(1+\beta')}{1-\alpha'\beta'}, \quad B'_{ii}(\lambda) = \frac{\beta'(1+\alpha')}{1+\alpha'\beta'}; \quad (6)$$

$$\alpha' = \frac{D_{i-1}-\rho}{D_{i-1}+\rho}, \quad \beta' = \frac{T_{i-1}-\rho}{T_{i-1}+\rho} e^{-2\lambda_i}; \quad (7)$$

$$\alpha' = \frac{D_{i-1}-\rho}{D_{i-1}+\rho} e^{-2\lambda_i}, \quad \beta' = \frac{T_{i-1}-\rho}{T_{i-1}+\rho}. \quad (8)$$

而  $D$  和  $T$  可由下面的递推公式求得:

$$\begin{cases} D_1 = \rho \\ D_k = \rho \frac{(D_{k-1} + \rho) + (D_{k-1} - \rho) e^{-2\lambda_k}}{(D_{k-1} + \rho) - (D_{k-1} - \rho) e^{-2\lambda_k}}, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_n = \rho \\ T_j = \rho \frac{(T_{j-1} + \rho) + (T_{j-1} - \rho) e^{-2\lambda_j}}{(T_{j-1} + \rho) - (T_{j-1} - \rho) e^{-2\lambda_j}}. \end{cases} \quad (10)$$

分析以上各式可以看出, 待定系数与偶极距  $r$  无关, 只与各电性层层参数和积分变量  $\lambda$  有关, 因而式(1)~(4)可统一写成以下形式:

$$U = r \int_0^{\infty} T_{ii}^{(css)}(\lambda) J_0(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

式中用  $T_{ii}^{(css)}$  代替(1)~(4)式中与待定系数  $A'_{ii}$ 、 $B'_{ii}$  或  $A'_{ii}$ 、 $B'_{ii}$  有关的项, 即核函数项。将(11)式与地表

半空间二极装置的视电阻率公式

$$\rho_s(r) = r \int_0^{\infty} T_1(\lambda) J_0(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

比较, 两式形式完全相同, 因而可借用地表半空间二极装置的视电阻率滤波器计算层测深装置的电位值。其离散公式为:

$$U(k\omega) = \sum_{i=n_1}^{n_2} T_{ii}^{(css)}[(k-1)\omega] \cdot C(i\omega), \quad (13)$$

式中  $k$ ——计算点对应极距的序号;

$\omega$ ——采样间隔, 层测深装置的偶极距  $r = k\omega$

$C(i\omega)$ ——地表半空间二极装置的视电阻率滤波系数。

当  $T_{ii}^{(css)}$  选取不同的具体表达式时, 可方便地计算出  $U_{ii}^A(M)$ 、 $U_{ii}^B(M)$ 、 $U_{ii}^A(N)$ 、 $U_{ii}^B(N)$  的值, 然后利用层测深视电阻和视电阻率的定义式<sup>[1]</sup>求得层测深理论  $R_s$  和  $\mathcal{R}$  值。

$$R_s = \omega U_{MN}/I,$$

$$\mathcal{R} = K R_s,$$

$$K = \frac{2\pi \sqrt{r^2 + b^2}}{r^2 + b^2 - r},$$

式中  $b$ ——煤层厚度。

采用数字滤波算法, 根据(13)式可编制适用于任意多层介质的层测深理论曲线及正演计算程序。

### 3 层测深理论曲线分析

#### 3.1 层测深视电阻率理论曲线类型

对于通常的三层介质(水平巷道在  $\rho$  介质中)地电模型, 层测深视电阻率  $\mathcal{R}$  曲线可分为三种类型: 当  $\rho < \rho > \rho$  时, 层测深曲线为上升型, 类似于地表直流电测深的 G 型曲线(图 3), 我们称之为  $G_s$  型曲线; 当  $\rho < \rho < \rho$  或  $\rho > \rho > \rho$  时, 层测深曲线称之为  $K_s$  型曲线, 类似于地表直流电测深的 K 型曲线; 当  $\rho > \rho < \rho$  时, 层测深曲线为下降型, 形如地表直流电测深的 D 型曲线, 我们称之为  $D_s$  型曲线。

四层以上介质模型的层测深视电阻率曲线和视电阻曲线类型比较复杂, 除与各电性层的电阻率有关外, 还与层厚有关。图 4 为四层介质层测深  $\mathcal{R}$  理论曲线, 可见随参数  $\rho$  的变化, 曲线尾支变化较大, 当  $\rho \rightarrow \infty$  时, 尾支急剧下降, 层测深视电阻率  $\mathcal{R}$  曲线类似于 K 型。

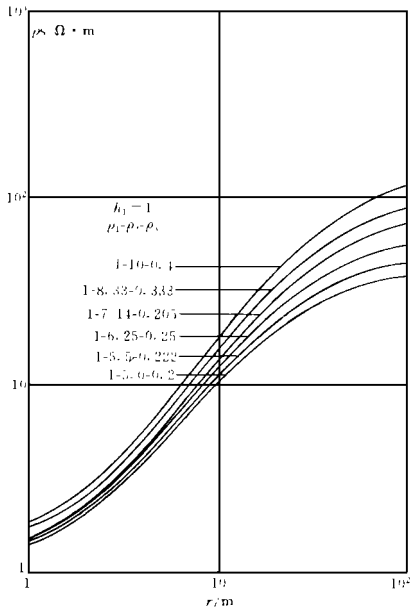


图 3 三层介质层测深视电阻率理论曲线

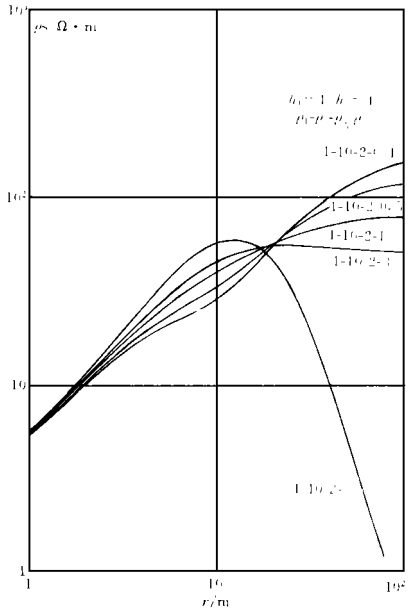


图 4 四层介质层测深视电阻率理论曲线

3.2 层测深视电阻率曲线特征分析

层测深曲线的变化特征主要取决于煤层及其顶底板岩层电阻率的相对大小关系。 $\rho_s$  变化规律可利用层测深视电阻率微分表达式进行分析:

$$\rho_s = \frac{j_{MN}^{\perp}}{j_0^{\perp}} \rho_{MN} \quad (14)$$

式中  $j_{MN}$  —— 测量偶极子间的电流密度;

$j_0^{\perp}$  —— 均匀介质电流密度理论值的垂直分量;

$\rho_{MN}$  —— M、N 间介质真电阻率。

当偶极距  $r$  较小时,顶底板岩层的低阻分流作用较大,  $j_{MN} < j_0^{\perp}$ ,  $\rho_s < \rho_{MN}$  ( $\rho_{MN} = \rho$ ); 当偶极距  $r$  逐渐增大时,顶底板岩层低阻分流作用的影响相对减小,高阻煤层排斥、低阻围岩吸引造成煤层内偶极场电流线偏折影响增大,  $j_{MN}$  增大,曲线呈上升变化趋势; 当偶极距  $r$  足够大时,电流线近于垂直煤层流过,顶底板岩层的低阻分流作用趋于稳定,这时  $j_{MN}$  与  $j_0^{\perp}$  达到一定值,层测深视电阻率曲线尾支出现水平渐近线,理论上可以证明下式成立:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \rho_s = \frac{2\rho}{\rho + \rho_0} \quad (15)$$

因此,对于高阻煤层(例如  $\rho$  为高阻煤层),当煤层内存在构造扰动时,必然会引起视电阻率曲线和视电阻曲线的较大变化,也就是说层测深法对构造影响的分辨能力较强。

对于四层及以上的多层层测深曲线,可利用等效电阻电路的思想进行分析。图 5 是选取  $\rho = 1$ ,  $\rho_0 = 10$ ,  $\rho_1 = 2$ ,  $h_2 = 1$ ,  $h_3 = 4$ , 变化  $\rho$  值计算的一组四层介质理论层测深曲线。此时煤层底板两层介质的作用可用一电阻率值等于等效视电阻率值的一层介质代替,称之为等效层。等效层的电阻率值随偶极距的变化而变化。对于  $\rho > \rho_0$  的情形,等效层的电阻

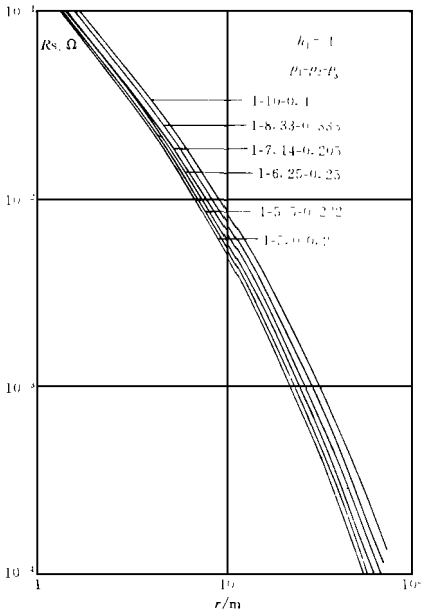


图 5 三层介质层测深视电阻理论曲线

率值随偶极距的增大而逐渐减小, 最终趋于  $\rho$  值。基于以上假设, 当偶极距  $r$  较小时,  $\rho$  介质的影响可忽略不计, 此时层测深曲线的特征由  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  和  $\rho$  介质决定, 当  $\rho$  介质的厚度较大时曲线中间出现水平段; 随着  $r$  的进一步增大,  $\rho$  介质的影响逐渐增大, 层测深理论曲线的特征由  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  以及  $\rho$  和  $\rho$  介质的等效层视电阻率值  $\rho^{(3,4)}$  决定; 当偶极距足够大时,  $\rho^{(3,4)} = \rho$ , 此时曲线特征由  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  及  $\rho$  决定, 曲线尾支出现水平渐近线, 其值由下式决定:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} R_s = \frac{\rho \rho_1^2}{\rho + \rho_1} \quad (16)$$

3.3 层测深视电阻曲线

图 5 和图 6 为三层和四层视电阻曲线, 在双对数坐标系中总体上呈单调下降趋势, 下降速度取决于顶底板岩层电阻率和煤层电阻率的相对大小。由视电阻曲线特征可以看出, 单纯利用视电阻曲线分层, 其分辨能力较差, 但对构造影响和断层、裂隙等反映灵敏。

4 层测深解释方法

层测深资料的基本解释方法是曲线对比法, 即利用同巷道电测深曲线确定煤层及围岩电性参数, 然后正演模拟未受破坏煤层的理论层测深曲线, 或

利用同巷道不同测点的层测深实测曲线, 采用相关分析方法确定未受破坏煤层的理论层测深曲线; 将实测曲线和理论曲线对比, 根据二者的吻合程度及实测曲线上的异常畸变点, 确定煤层内是否存在断层或裂隙发育带等构造扰动。依据畸变点的性质, 即高、低阻异常反映, 可确定断层或裂隙发育带的含水性; 根据畸变点位置, 可确定断层或裂隙发育带的位置。

图 7 为巷道层测深实测视电阻(图 7a)和视电阻率(图 7b)曲线, 实测曲线和理论曲线对比具有明显的异常畸变点, 该畸变为两个相距较近的高阻小断层(不含水)所致。

5 应用实例

配合查明工作面内煤层小构造, 在杨庄矿 II 617 工作面开展了层测深井下工作方法、技术和地质效果的试验工作。在风巷 50#、74#、95#、107# 点布置了最大极距  $r = 150 \sim 205$  m 的层测深工作。由于工作面的宽度仅有 105 m, 而巷道空间和巷道周围岩层破坏作用对小极距点的层测深结果有影响, 所以除 107# 点极距范围取 10~225 m 外, 其余各层测深点极距范围为 20~150 m。层测深极距点序列选取 5 的整数倍。

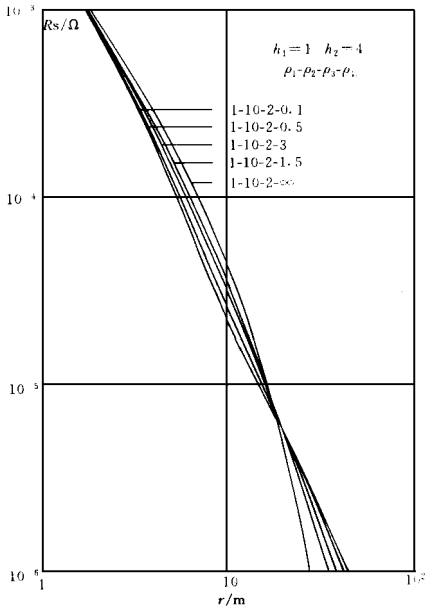


图 6 四层介质层测深视电阻理论曲线

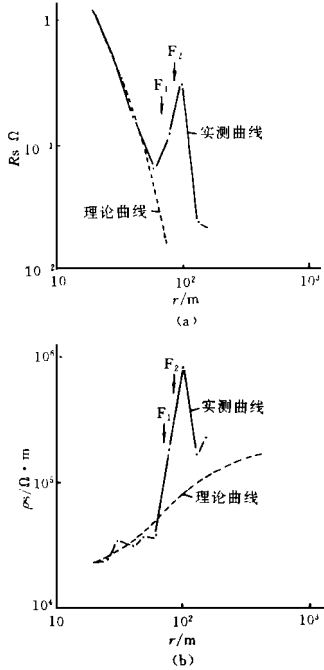


图 7 层测深视电阻(a)和视电阻率(b)曲线对比图

由图 8、图 9 的视电阻率和视电阻实测曲线和理论曲线对比可以看出:

a. 巷道揭露断层  $F_4$  (断距 1.5 m 左右) 在 107<sup>#</sup> 和 74<sup>#</sup> 点的层测深曲线上均有明显的反映,  $F_1$  和  $F_2$  断层组在 50<sup>#</sup> 点的层测深  $R_s$  曲线上反映强烈, 其表现特征为层测深曲线上与断层对应位置处严重畸变, 出现高阻异常点。

b. 除巷道揭露断层外, 根据 95<sup>#</sup> 点 (小号一侧) 和 107<sup>#</sup> 点层测深曲线的畸变点位置, 推断煤层内在风巷 90<sup>#</sup> 点附近电性不均匀, 后经回采验证, 为煤层及其围岩隆起裂隙反映。

c. 根据层测深曲线上的异常特征及异常正负, 推断煤层内  $F_1$  和  $F_2$  断层组为不含水的断裂带,  $F_4$  为含水断层。

## 6 结束语

层测深法的应用实践表明, 该方法适于探测高

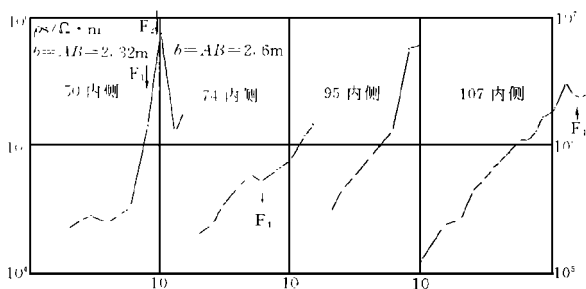


图 8 || 617 风巷层测深视电阻率曲线图

内侧——MN 在小号点一侧; 外侧——MN 在大号点一侧

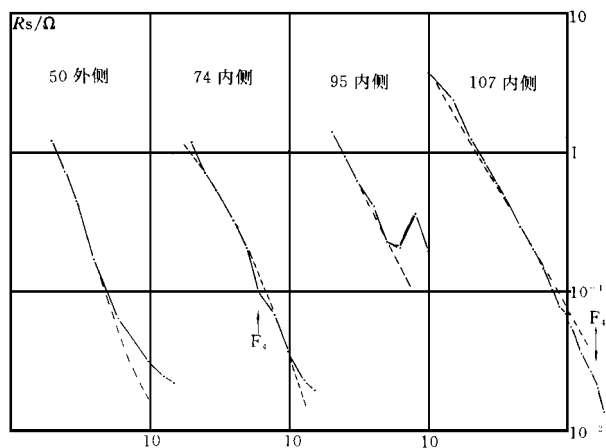


图 9 || 617 风巷层测深视电阻曲线图

内侧——MN 在小号点一侧; 外侧——MN 在大号点一侧

阻煤层小断层或裂隙发育带, 与其它矿井电法相比具有顺层穿透深度大、异常反映明显等特点。层透视法具有类似特征, 同样值得研究。但是由于层测深法和层透视法的应用时间较短, 许多问题尚待深入研究。

## 参考文献

- 1 岳建华, 李志聃. 煤矿井下直流层测深方法与原理. 煤炭学报, 1994; 19(4): 422~429

(收稿日期 1996-04-29)

# NUMERICAL SIMULATION AND DATA INTERPRETATION METHOD OF THEORETICAL CURVES IN COAL SEAM SOUNDING

Yue Jianhua Li Zhidan Liu Shilei

(China University of Mining and Technology)

**Abstract** The methematical model of forward simulation of coal seam sounding theoretical curves is set up in this paper. In connection with the forward calculation of apparent resistance theoretical curves of 3-layers and 4-layers geoelectric models, the characteristics and interpretation method of coal seam sounding curves are also disoussed. Some examples of coal seam sounding applied in coal mine are shown.

**Keywords** coal seam sounding method; forward simulation; inversion interpretation; application