

阮百尧, 邓小康, 刘海飞等. 坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法研究. 地球物理学报, 2009, 52(1): 289~296

Ruan B Y, Deng X K, Liu H F, et al. Research on a new method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(1): 289~296

坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法研究

阮百尧¹, 邓小康¹, 刘海飞^{2,3}, 周 丽¹, 张 力²

1 桂林工学院资源与环境工程系, 桂林 541004

2 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083

3 桂林工学院广西地质工程中心重点实验室, 桂林 541004

摘 要 研究和提出了一种坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法. 该方法通过在掌子面上设立不同功能的环状电极组, 使一次场电流具有像探照灯一样的聚焦功能, 可有效探测坑道掘进前方不良地质体的存在, 达到超前预报的目的. 本文首先介绍了直流电阻率超前聚焦探测的基本原理, 并给出了两种聚焦观测方式. 为了验证所提方法的可行性, 通过轴对称电性介质二维异常电位有限元数值模拟方法, 对聚焦观测条件下几例坑道模型进行了模拟计算. 结果表明, 该方法对异常反映明显, 可进行即时解释, 建议在坑道超前预报中逐步推广使用.

关键词 坑道, 直流电阻率, 超前聚焦探测, 有限元

文章编号 0001-5733(2009)01-0289-08

中图分类号 P631

收稿日期 2008-03-16, 2008-11-04 收修定稿

Research on a new method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel

RUAN Bai-Yao¹, DENG Xiao-Kang¹, LIU Hai-Fei^{2,3}, ZHOU Li¹, ZHANG Li²

1 Department of Resources and Environment Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2 School of Info-Physics and Geometrics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

3 Key Laboratory of Geological Engineering Centre of Guangxi Province, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract We research and put forward a new method of advanced focus detection for DC resistivity in tunnel. This method can make the primary field current to focus like a searchlight through setting up different circular electrode groups on the working face, and can effectively detect the existence of bad geologic body ahead tunneling and aim at the goal of advanced prediction. This paper firstly introduces the primary principle of advanced detection with DC resistivity and gives two kinds of surveying method of focus. In order to verify the feasibility of this method, we simulated several tunnel models of axial-symmetric electrical media in the focus surveying condition using 2-D finite element method of anomaly potential, and the modeling results show that this method can obviously reflect the anomaly, and the data can be real-time interpreted. We propose to popularize and use this method to advanced prediction of tunnel gradually.

Keywords Tunnel, DC resistivity, Advanced focus detection, FEM

1 引言

在矿山井巷掘进、隧道掘进、露天采场开挖、城市及军事地下工程施工过程中,若工作面前方、巷道四周附近存在断层、溶洞、陷落柱、瓦斯时,如不提前探测,就可能导致“矿山淹井”、“瓦斯爆炸”、“塌方”等灾难性事故.因此,研究坑道超前探测方法和技术,进行准确的灾害预报,在矿山、隧道、地下工程建设等方面有着广阔的应用前景,不仅具有深远的理论价值,而且对于保护生命、财产安全具有十分重要的实际意义^[1,2].

近年来,国内外对坑道超前预报方法技术的研究取得很大进展,研究出基于地震反射波法、瑞雷波法、直流电阻率法、地质雷达法、声波法等坑道超前预报方法,并研制出了专用仪器,这些仪器和技术为预报地下地质灾害做出了重大贡献^[3~18].

直流电阻率法超前探测开始于 20 世纪 80 年代后期,工作中大多使用单极-偶极装置,即利用点电极 A 供电,电极 B 置于无穷远处,测量电极 MN 在掘进头后方反向一定范围观测点电源所产生的等电位球面异常,据此推断解释掘进头前方的地质异常体.但该方法存在着探测距离有限,容易受巷道条件(浮煤、轨道、电、磁)等影响的缺点,在超前预报中一直不是主流方法^[8~18].

针对直流电阻率法易受旁侧干扰,而且数据解释还是建立在理想的状态下,即周围无干扰体、电极

距大时假定电流场为全空间分布、极距小时假定电流场为半空间分布,完全忽略了坑道空腔的影响.如果忽略这些影响,超前预报就会出现失误,而这种失误常常是致命的.因此,提出了一种坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法,在电极布置中通过设立不同功能的环状电极组,使一次场电流具有象探照灯一样的聚焦功能,减小旁侧影响,并能进行即时解释.为了检验电阻率超前聚焦探测方法的可行性,并为了计算方便(不失一般性),假设坑道是水平且圆柱状的、掌子面呈圆形,供电和测量电极及异常体与坑道呈轴对称分布,如图 1.通过轴对称电性介质二维有限元数值模拟方法,对聚焦观测方式下的几例地电模型进行了模拟计算,并对比分析了不同地电条件下归一化电位曲线的异常特征,验证了坑道直流电阻率超前聚焦探测方法的可行性.

2 坑道直流电阻率超前聚焦探测原理

在坑道中采用直流电阻率法进行超前探测要解决的首要问题就是电流传播的方向问题.由于电流场的分布是向四周发散的,而超前探测的主要目标是预报掌子面前方较狭窄的一段范围内的地质情况,要求电流向掌子面前方集中传播.聚焦电流法是减小旁侧影响的有效办法,它通过屏蔽电极使电流向探测区聚集,减少旁侧影响,增加勘探深度,如图 1,它已在电阻率测井中取得了很好的应用效果.本文针对坑道超前预报提出了两种电极布置方式,如

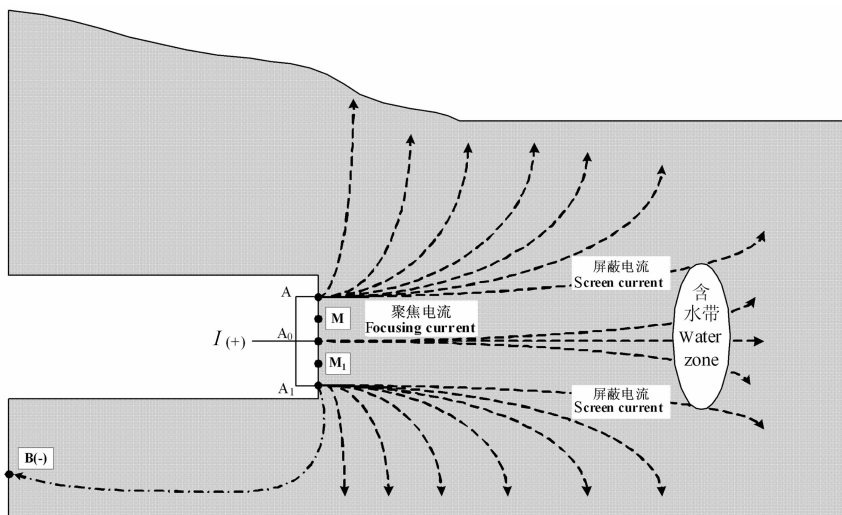


图 1 轴对称坑道模型聚焦探测方法示意图

A 和 A₁ 为屏蔽电极, A₀ 为聚焦电极, B 为无穷远极, M 和 M₁ 为测量电极.

Fig. 1 Focus detection method for the model of axial-symmetric tunnel

A and A₁ are the shielding electrodes, A₀ is the focusing electrode, B is the remote electrode, M and M₁ are the surveying electrodes.

图 2,探测时通过供电电极或电极环 A 供电,使电流聚焦,观测掌子面上测量电极或电极环 M 的电位随掘进深度的变化情况.显然当掌子面前方没有异常体时,M 处的电位不变,而当掌子面前方有低阻(高阻)异常体时,由于低阻(高阻)异常体对电流的吸引(排斥),M 处的电位变小(大),且随着掌子面距离低阻(高阻)异常体越近,电位越小(大),从而可达到超前预报的目的.

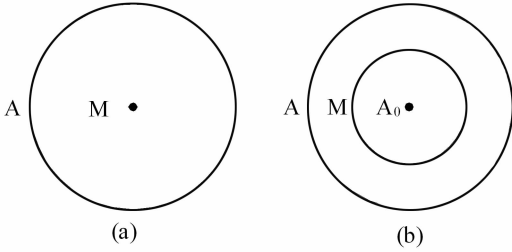


图 2 聚焦观测方式

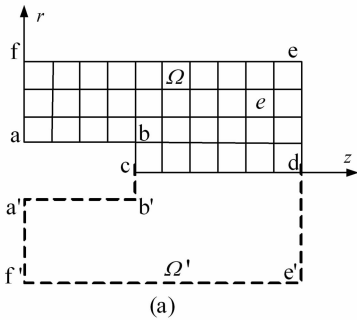
(a) A-M 装置;(b) A-M-A₀ 装置.

Fig. 2 Methods of focusing observation

(a) A-M array;(b) A-M-A₀ array.

3 坑道轴对称电性介质二维有限元数值模拟

在数值模拟过程中,为消除场源奇异性的影响,采用了异常电位有限单元法,以提高近场源处电位的计算精度.



3.1 异常电位的边值与变分问题

假定坑道是水平且圆柱状的、掌子面呈圆形,并且地下介质、供电和测量电极是关于坑道轴对称的,则在柱坐标系下二维地电断面异常电位满足的边值问题为^[19,20]

$$\nabla \cdot (r\sigma \nabla u) + \nabla \cdot (r\sigma' \nabla u_0) = 0, \in \Omega$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \in \Gamma_s$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = -\frac{ucos\theta}{R^2}, \in \Gamma_\infty$$

其中 σ 是地下介质的电导率; σ' 为异常电导率; u 为异常电位; u_0 为正常电位; r 为坐标; n 是边界的外法线方向; R 为源点到边界点的矢径; θ 是边界外法线方向 n 和 R 的夹角; Γ_s 为介质与空气的接触面 af、ab 和 bc 及坑道轴 cd; Γ_∞ 为无穷远边界 de 和 ef, Ω 为 abcdef 所包围的区域,如图 3a.图中 abcb'a' 为坑道空腔,地下介质关于坑道轴 cd 对称,即区域 Ω 与 Ω' 是以 cd 轴对称的.与上述边值问题等价的变分问题为

$$F(u) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} r\sigma (\nabla u)^2 + r\sigma' \nabla u_0 \nabla u \right] d\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma_\infty} \left[\frac{1}{2} r\sigma \frac{cos\theta}{R} u^2 + r\sigma' \frac{cos\theta}{R} u_0 u \right] d\Gamma,$$

$$\delta F(u) = 0.$$

3.2 单元剖分

用矩形单元对区域 Ω 进行剖分,如图 3 所示,

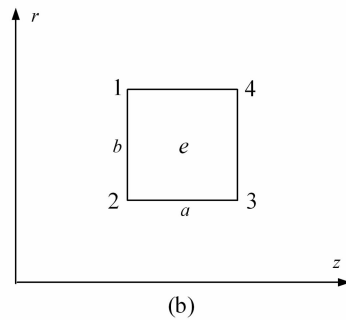


图 3 区域剖分(a)及单元编号(b)示意图

Fig. 1 (a) Division of region Ω and (b) element number

将(2)式中对区域 Ω 和边界 Γ_∞ 的积分分解为对各单元 e 和 Γ_e 的积分之和:

$$F(u) = \sum_{\Omega} \int_{\Omega} \frac{1}{2} r\sigma (\nabla u)^2 d\Omega + \sum_{\Omega} \int_{\Omega} [r\sigma' \nabla u_0 \nabla u] d\Omega$$

$$+ \sum_{\Gamma_\infty} \int_{\Gamma_e} \left[\frac{1}{2} r\sigma \frac{cos\theta}{R^2} u^2 \right] d\Gamma + \sum_{\Gamma_\infty} \int_{\Gamma_e} \left[r\sigma' \frac{cos\theta}{R^2} u_0 u \right] d\Gamma.$$

(3)

3.3 线性插值

在单元中对 u, u_0 采用双线性插值,即

$$u = \sum_{i=1}^4 N_i u_i, u_0 = \sum_{i=1}^4 N_i u_{0i}, \quad (4)$$

式中 u_i 和 u_{0i} ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为各单元节点的异常电位和正常电位; N_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为形函数,且有

$$N_1 = \frac{(1-\xi)(1+\eta)}{4}, \quad N_2 = \frac{(1-\xi)(1-\eta)}{4},$$

$$N_3 = \frac{(1+\xi)(1-\eta)}{4}, \quad N_4 = \frac{(1+\xi)(1+\eta)}{4}, \quad (5)$$

其中 ξ, η 与 r, z 的关系为 $z = z_0 + a\xi/2, r = r_0 + b\eta/2$, z_0 和 r_0 为子单元的中点; a 和 b 为子单元的边长.

3.4 单元分析

对(3)式中第一项进行积分,有

$$\int_e \frac{1}{2} r\sigma (\nabla u)^2 d\Omega = \int_e \frac{1}{2} r\sigma \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] dr dz = \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_{1e} \mathbf{u}_e, \quad (6)$$

其中 $\mathbf{k}_{1e} = (k_{1ij}), k_{1ij} = k_{1ji}, \mathbf{u}_e = (u_i)^T, i, j = 1, 2, \dots, 4$.

$$\begin{aligned} k_{1ij} &= \int_e r\sigma \left[\left(\frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) \right] dr dz \\ &= \sigma \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(r_0 + \frac{b}{2} \eta \right) \left[\left(\frac{\partial N_i}{\partial \eta} \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) \cdot \left(\frac{\partial N_i}{\partial \eta} \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial N_i}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial z} \right) \cdot \left(\frac{\partial N_j}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial z} \right) \right] \frac{ab}{4} d\eta d\xi. \quad (7) \end{aligned}$$

将(5)式代入(7)式,得

$$\mathbf{k}_{1ij} = \boldsymbol{\alpha}_{ij} \cdot \boldsymbol{\beta}, \quad (8)$$

其中

$$\boldsymbol{\beta} = (\beta_l), l = 1, 2, 3$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{21} \\ \alpha_{31} \\ \alpha_{41} \\ \alpha_{22} \\ \alpha_{32} \\ \alpha_{42} \\ \alpha_{33} \\ \alpha_{43} \\ \alpha_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 1 \\ -4 & 2 & 0 \\ -2 & -2 & 0 \\ 2 & -4 & -1 \\ 4 & 4 & -1 \\ 2 & -4 & 1 \\ -2 & -2 & 0 \\ 4 & 4 & -1 \\ -4 & 2 & 0 \\ 4 & 4 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma a}{12b} r_0 \\ \frac{\sigma b}{12a} r_0 \\ \frac{\sigma b}{12a} b \end{bmatrix}.$$

同理,对(3)式中第二项的积分为

$$\int_e [r\sigma' \nabla u_0 \nabla u] d\Omega = \int_e r\sigma' \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial u_0}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u_0}{\partial z} \right) \right] dr dz = \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}'_{1e} \mathbf{u}_{0e}, \quad (9)$$

其中 \mathbf{k}'_{1e} 与(6)式中 \mathbf{k}_{1e} 的形式基本相同,只需把(6)式中的 σ 改为 σ' 即可.

再对(3)式中的第三项进行边界积分,可写成对单元 $\overline{34}$ 边和单元 $\overline{14}$ 边的积分.当 $\overline{34}$ 边和 $\overline{14}$ 边落在无穷远边界时,由于无穷远边界离电源较远,可将 $C = \cos\theta/R^2$ 看作常数提到积分号之外,则有

$$\int_{\overline{34}} \frac{1}{2} r\sigma \frac{\cos\theta}{R^2} u^2 d\Gamma = \frac{C}{2} \int_{\overline{34}} r\sigma u^2 d\Gamma = \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_{2e} \mathbf{u}_e, \quad (10)$$

$$\int_{\overline{14}} \frac{1}{2} r\sigma \frac{\cos\theta}{R^2} u^2 d\Gamma = \frac{C}{2} \int_{\overline{14}} r\sigma u^2 d\Gamma = \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_{3e} \mathbf{u}_e, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{k}_{2e} = (k_{2ij}), \mathbf{k}_{3e} = (k_{3ij}), k_{2ij} = k_{2ji}, k_{3ij} = k_{3ji}, i, j = 1, 2, \dots, 4$.

$$\begin{aligned} k_{2ij} &= C\sigma \int_{-1}^1 \left(r_0 + \frac{b}{2} \eta \right) \cdot N_i N_j \cdot \frac{b}{2} \Big|_{\xi=1} d\eta \\ &= \frac{C \cdot \sigma \cdot b}{12} \gamma_{ij}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{3ij} &= C\sigma \int_{-1}^1 \left(r_0 + \frac{b}{2} \eta \right) \cdot N_i N_j \cdot \frac{a}{2} \Big|_{\eta=1} d\xi \\ &= \frac{C \cdot a \cdot r_0 \cdot \sigma}{12} \chi_{ij}, \end{aligned}$$

式中

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & & & \text{对} \\ 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 3r_3 + r_4 & \\ 0 & 0 & r_3 + r_4 & r_3 + 3r_4 \end{bmatrix}, \quad \chi_{ij} = \begin{bmatrix} 4 & & & \text{对} \\ 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & \\ 2 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

同理,对(3)式中第四项的积分为

$$\int_{\overline{34}} r\sigma' \frac{\cos\theta}{R^2} u_0 u d\Gamma = C \int_{\overline{34}} r\sigma' u_0 u d\Gamma = \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}'_{2e} \mathbf{u}_{0e}, \quad (12)$$

$$\int_{\overline{14}} r\sigma' \frac{\cos\theta}{R^2} u_0 u d\Gamma = C \int_{\overline{14}} r\sigma' u_0 u d\Gamma = \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}'_{3e} \mathbf{u}_{0e}, \quad (13)$$

其中(12)和(13)式中的 $\mathbf{k}'_{2e}, \mathbf{k}'_{3e}$ 与(10)和(11)式中的 $\mathbf{k}_{2e}, \mathbf{k}_{3e}$ 的形式基本相同,只需把 σ 改为 σ' 即可.

3.5 总体合成

将(6)、(9)、(10)、(11)、(12)和(13)式的积分结果相加,并扩展成由总体节点编号组成矩阵或列阵:

$$\begin{aligned} F_e(u) &= \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T (\mathbf{k}_{1e} + \mathbf{k}_{2e} + \mathbf{k}_{3e}) \mathbf{u}_e + \mathbf{u}_e^T (\mathbf{k}'_{1e} + \mathbf{k}'_{2e} \\ &\quad + \mathbf{k}'_{3e}) \mathbf{u}_{0e} = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{k} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{k}' \mathbf{u}_0, \quad (14) \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{k}_e = \mathbf{k}_{1e} + \mathbf{k}_{2e} + \mathbf{k}_{3e}, \mathbf{k}'_e = \mathbf{k}'_{1e} + \mathbf{k}'_{2e} + \mathbf{k}'_{3e}$, 为总体节点编号的扩展矩阵; \mathbf{u} 和 \mathbf{u}_0 分别为异常电位和正常电位在总体节点编号下的列向量.将所有单元的 $F_e(u)$ 相加,得:

$$\begin{aligned} F(u) &= \sum_e F_e(u) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \sum_e \mathbf{k} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \sum_e \mathbf{k}' \mathbf{u}_0 \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{k} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{k}' \mathbf{u}_0. \quad (15) \end{aligned}$$

令(15)式的变分为零,得线性方程组

$$\mathbf{k} \mathbf{u} = -\mathbf{k}' \mathbf{u}_0. \quad (16)$$

通过解上述线性方程组,得各节点的异常电位 \mathbf{u} , 并与正常电位 \mathbf{u}_0 相加得到总电位 $\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{u}_0$.

4 正常电位的计算

在轴对称介质异常电位有限元数值模拟过程

中,要涉及到正常电位的计算.由于布设在掌子面上的供电电极或电极环布置的特殊性,通常供电电极环的半径较小,并且供电电极到测量电极的距离也较小,在这种情况下,坑道掘进后方的介质对掌子面上观测点的电位影响较小,而坑道空腔的影响又不能忽略,因此,为提高掌子面上观测点处电位的计算精度,基于均匀半空间条件下计算正常电位.根据供电电极在掌子面上布置方式的不同,下面分情况计算正常电位:

$$u_0 = \frac{I\rho_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(r_a \cos\varphi - r_p \cos\varphi')^2 + (r_a \sin\varphi - r_p \sin\varphi')^2 + (z_a - z_p)^2}} d\varphi.$$

不失一般性,特别地取研究断面 $\varphi' = 0^\circ$ 时,上式变为

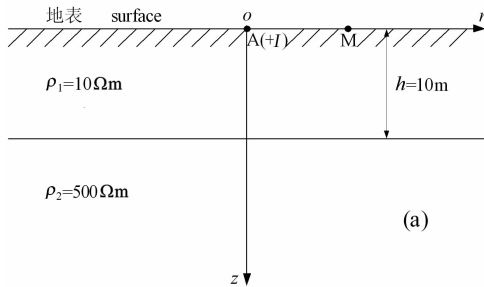
$$u_0 = \frac{I\rho_0}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{\sqrt{r_a^2 + r_p^2 + (z_a - z_p)^2 - 2r_a r_p \cos\varphi}} d\varphi. \quad (18)$$

(18)式可用勒让德-高斯求积公式求得.

5 算 例

5.1 模型一

模型一为两层水平层状介质大地,其层参数为:



当供电电极 A 为点源并且位于坑道轴线时,正常电位的计算公式为

$$u_0 = \frac{I\rho_0}{2\pi r_{ap}}, \quad (17)$$

其中 I 为单位电流强度; ρ_0 为电源处的电阻率; r_{ap} 为供电电极 A 到网格节点 P 的距离.

当供电电极 A 为以坑道轴线为中心的环形电极时,在柱坐标系 (r, φ, z) 下,电流环上任意点 A 的坐标为 $(r_a \cos\varphi, r_a \sin\varphi, z_a)$,空间上任意点 P 的坐标为 $(r_p \cos\varphi', r_p \sin\varphi', z_p)$,则正常电位的计算公式为

第 1 层厚度为 10 m,电阻率为 10 Ωm ,第 2 层电阻率为 500 Ωm ,供电电极 A 位于地面的 O 点上,测量电极 M 在地面上沿 r 向测量,如图 4a.分别采用本文的异常电位有限元数值模拟方法和文献[21]的解析法进行模拟计算,计算的视电阻率曲线如图 4b 所示(实线表示解析解,三角形表示数值解),从图中可以看出,异常电位有限单元法的数值解与文献[21]的解析解拟合得非常好,说明本文数值模拟方法在计算精度上是可靠的,可用于坑道轴对称介质模型的计算分析.

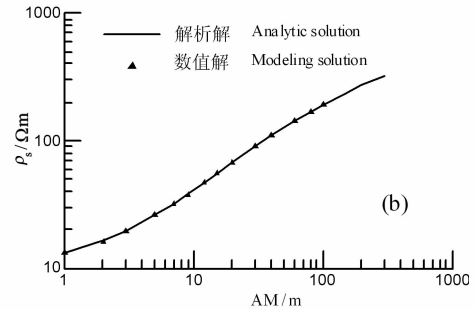


图 4 有限元法的模拟精度分析

(a) 层状介质模型;(b)有限元法与解析法的计算结果对比.

Fig. 4 Modeling precision analysis of FEM

(a) Model of layer media;(b) The comparison of computational results of FEM and analytic method.

5.2 模型二

假定在坑道掘进前方 29~31 m 范围内有一低阻异常体,电阻率为 10 Ωm ,以坑道轴线为中心,其半径为 3 m,厚度为 2 m;围岩电阻率为 500 Ωm ;坑道半径为 4 m.采用上述两种装置进行观测,其中 A-M 装置:极距 $AM = 3$ m, A-M-A₀ 装置:极距 $AA_0 = 3$ m, $A_0M = 1$ m,模拟的归一化电位 V/V_0 随掘进尺度 d 的变化关系如图 5.从图中可以看出,随着坑道掌子面逐渐靠近异常体,归一化电位逐渐减小,并在

异常体中心部位形成明显的低阻异常.对于两种装置而言, A-M-A₀ 装置观测到的异常幅度更大些.

5.3 模型三

类似于模型二,在坑道掘进前方 29~31 m 范围内设置一高阻异常体,电阻率为 1000 Ωm ,以坑道轴线为中心,其内半径为 1 m,外半径为 4 m,厚度为 2 m;围岩电阻率为 500 Ωm ;坑道半径为 4 m.依然采用上述两种装置进行观测,其中 A-M 装置:极距 $AM = 3$ m, A-M-A₀ 装置:极距 $AA_0 = 3$ m, $A_0M = 1$ m,

模拟的归一化电位 V/V_0 随掘进尺度 d 的变化关系如图 6. 从图中可以看出, 随着坑道掌子面逐渐靠近异常体, 归一化电位逐渐增大, 并在异常体中心部位形成明显的高阻异常. 同样, 两种装置中的 A-M-A₀ 装置观测到的异常幅度相对大些, 说明 A-M-A₀ 装置对异常的反映能力要强于 A-M 装置.

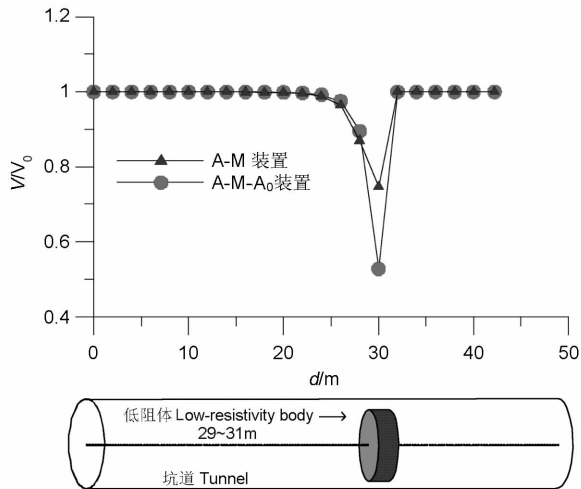


图 5 低阻模型的计算结果

Fig. 5 Computational results of low resistivity model

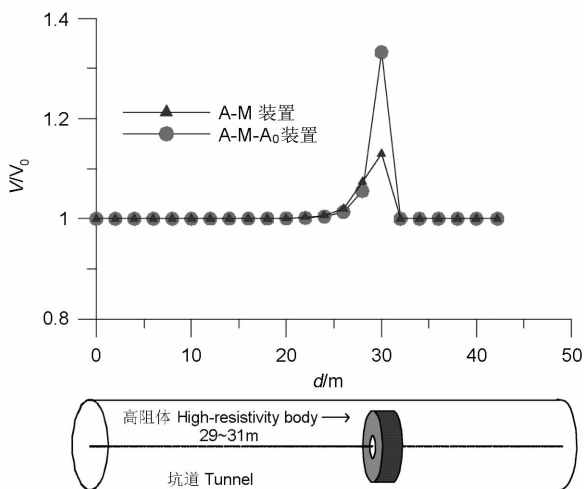


图 6 高阻模型的计算结果

Fig. 6 Computational results of high resistivity model

5.4 模型四

为了更深入地研究 A-M-A₀ 观测装置的探测能力, 对图 7a 所示地电模型进行了数值模拟, 并对比分析了不同厚度的低阻破碎带、不同测量极距以及不同供电极距条件下的异常特征曲线.

在保持供电和测量极距不变的情况下, 改变破碎带的厚度进行数值模拟, 其中供电极距 A₀A 和测

量极距 A₀M 分别为 4 m 和 2 m. 图 7b 为破碎带厚度分别为 2 m、3 m、4 m 以及坑道前方没有破碎带时的模拟结果. 从图中可以看出, 当坑道前方不存在破碎带时, 在电阻率为 500 Ωm 的围岩介质中, 归一化电位曲线在 1 附近平稳前进, 当接近电阻率为 1000 Ωm 的围岩介质时, 归一化电位逐渐上升, 并在 2 附近保持平稳, 准确地反映了坑道前方的异常特征. 当坑道掘进前方存在破碎带时, 随着掌子面逐渐靠近破碎带, 在距离破碎带前方约 15 m 时, 归一化电位曲线开始逐渐下降, 并在破碎带中心位置形成明显的低阻异常, 而且随着破碎带厚度的逐渐增大, 低阻异常特征越明显.

保持模型参数及供电极距不变, 改变测量极距进行数值模拟, 其中破碎带厚度为 4 m, 供电极距 A₀A 为 5 m, 测量极距 A₀M 从 1 m 增加到 4 m, 每次增加 1 m, 模拟结果见图 7c. 与图 7b 的曲线形态相似, 在距离破碎带前方约 15 m 时, 归一化电位曲线开始逐渐下降, 并在破碎带中心部位形成明显的低阻异常. 在测量电极 M 向供电电极 A 移动过程中, 随着极距 A₀M 的增大, 归一化电位曲线下降的幅度越来越大, 说明其探测深度逐渐增加, 对破碎带的超前探测能力逐渐增强. 当 A₀M 增大到 3 m 时, 曲线下降得最快, 继续增大 A₀M, 归一化电位曲线下降的幅度开始减小, 探测深度逐渐变浅. 如图 8 示意图, 说明当测量电极距 A₀M 与供电电极距 A₀A 满足 A₀M/A₀A=0.6 关系时, 探测深度最大, 可将其作为直流电阻率聚焦探测的最佳极距比.

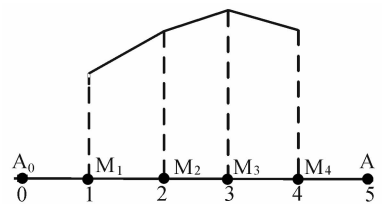


图 8 探测能力与 A₀M 的关系

Fig. 8 The relationship between detecting ability and A₀M

在不改变模型参数及测量极距的前提下, 改变供电极距进行数值模拟, 其中破碎带厚度为 4 m, 测量极距 A₀M 为 1 m, 供电极距 A₀A 从 2 m 增加到 5 m, 每次增加 1 m, 模拟结果见图 7d. 从图中可以看出, 随着供电电极距 A₀A 的逐渐增大, 归一化电位曲线下降的幅度越来越大, 当 A₀A=5 m 时, 曲线下降的幅度最大, 说明供电电极距越大, 探测深度越大, 超前探测的能力越强.

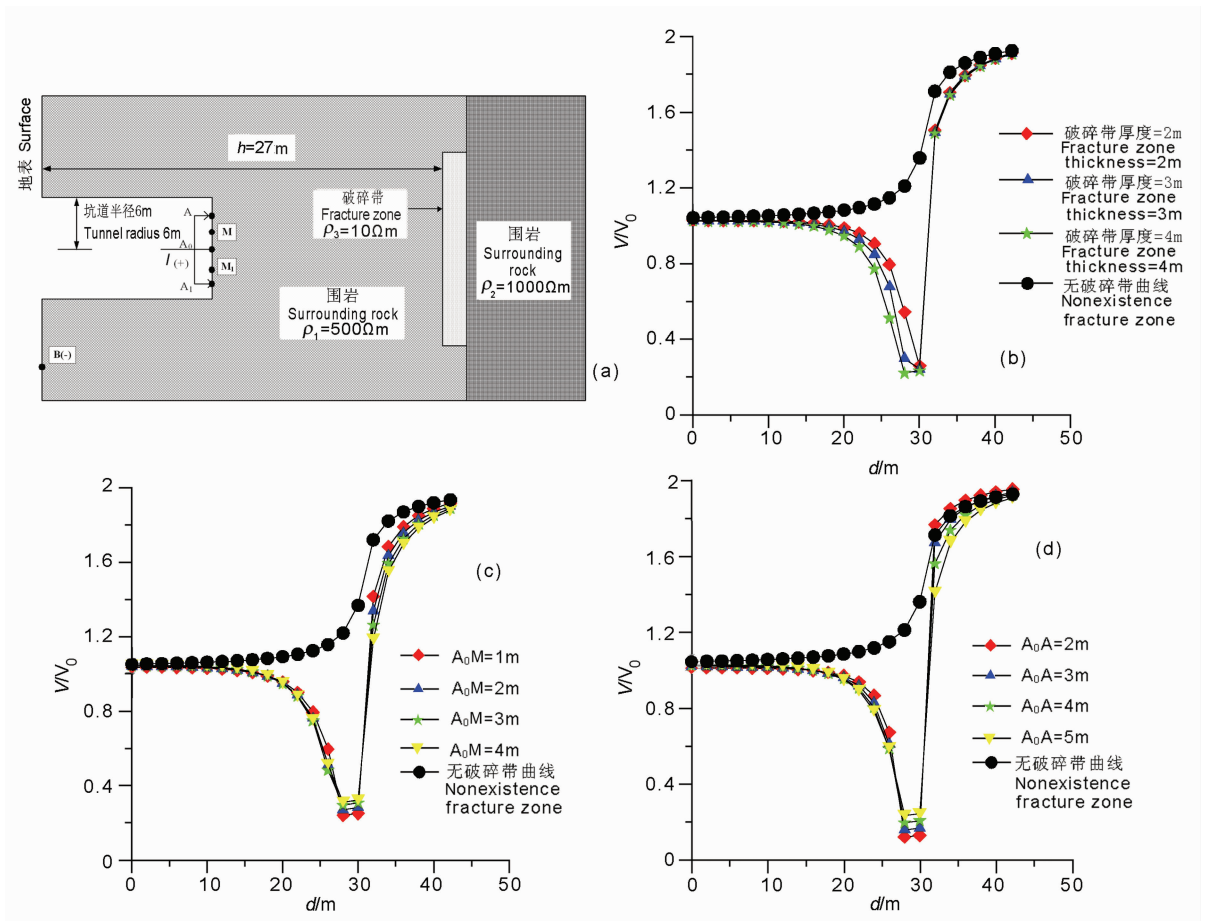


图7 低阻破碎带模型的计算结果

(a) 破碎带模型; (b) 不同厚度破碎带的计算结果; (c) 不同测量电极距的计算结果; (d) 不同供电电极距的计算结果。

Fig. 7 Computational results of low resistivity fracture zone model

(a) Model of fracture zone; (b) Computational results of different thickness fracture zone model; (c) Computational results of different surveying electrode spacing; (d) Computational results of different transmitting electrode spacing.

6 结论

(1) 本文研究和提出了一种坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法, 并给出了两种聚焦观测方式。从坑道模型的试算结果来看, 该方法能较好地反映坑道掘进前方异常体的存在, 可在坑道超前预报中逐步推广使用。

(2) 在计算正常电位的过程中, 根据供电电极在掌子面上布设方式的不同, 对点源和环形供电电极分情况计算正常电位, 能有效提高掌子面上观测点处电位的计算精度。

(3) 对两种观测装置的模拟结果进行对比分析发现: A-M-A₀装置对异常的超前探测能力要强于A-M装置; 当破碎带厚度、供电电极距和测量电极距发生改变时, 都会使归一化电位曲线的形态发生改变, 为了最大限度地探测坑道前方的目标体, 在布

设电极装置 A-M-A₀时, 应在条件允许的情况下尽量增大供电电极距 A₀A, 并使测量电极距 A₀M 与供电电极距 A₀A 的比 A₀M/A₀A 等于 0.6, 可达到最佳探测效果。

参考文献 (References)

- [1] 张 梁, 张业成, 罗元华等. 地质灾害灾情评估理论与实践. 北京: 地质出版社, 1998
Zhang L, Zhang Y C, Luo Y H, et al. The Theory and Practice of Geologic Hazard Evaluation (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1998
- [2] 王齐仁. 灾害地质体超前探测技术研究现状与思考. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 65~69
Wang Q R. Research actuality and considerations on the advanced detecting technology for hazard geological body. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 2005, 33(5): 65~69
- [3] 李永鸿, 徐光黎, 杨银湖等. 地震反射波法技术及其在隧道超前地质预报中的应用研究. 岩土工程学报, 2005, 27(10):

- 1180~1184
- Li Y H, Xu G L, Yang Y H, et al. Application of seismic reflected wave method to geological prediction for tunneling. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (in Chinese), 2005, **27**(10):1180~1184
- [4] 曾昭璜. 隧道地震反射法超前预报. 地球物理学报, 1994, **37**(2):218~230
- Zeng Z H. Prediction ahead of the tunnel face by the seismic reflection methods. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1994, **37**(2):218~230
- [5] 何振起, 李海, 梁彦忠. 利用地震反射法进行隧道施工地质超前预报. 铁道工程学报, 2000, **68**(4):81~85
- He Z Q, Li H, Liang Y Z. Geological super-leading forecast during tunnel construction by utilizing seismic response analysis method. *Journal of Railway Engineering Society* (in Chinese), 2000, **68**(4):81~85
- [6] 张勇, 张子新, 华安增. TSP超前地质预报在公路隧道中的应用. 西部探矿工程, 2001, **72**(5):101~103
- Zhang Y, Zhang Z X, Hua A Z. Application of TSP in the expressway tunnel geological prediction. *West-China Exploration Engineering* (in Chinese), 2001, **72**(5):101~103
- [7] 谭金龙, 陈耀蝉, 刘基. 瞬态面波勘探技术在隧道超前预报中的应用. 土工基础, 2005, **19**(4):86~90
- Tan J L, Chen Y C, Liu J. Application of transient surface wave exploration technology for forecast in tunnel engineering. *Soil Eng. and Foundation* (in Chinese), 2005, **19**(4):86~90
- [8] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究. 地球物理学报, 2006, **49**(5):1529~1538
- Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(5):1529~1538
- [9] 黄俊革, 阮百尧, 王家林. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演. 地球物理学报, 2007, **50**(2):619~624
- Huang J G, Ruan B Y, Wang J L. The fast inversion for advanced detection using DC resistivity in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2):619~624
- [10] 冯于静, 王邦成, 李玉宝等. 点电源法在煤矿巷道超前探测中的应用及效果. 河北煤炭, 1998, **4**:9~11
- Feng Y J, Wang B C, Li Y B, et al. Application and effect of point electric power method in advanced detection in coal tunnels. *Hebei Coal* (in Chinese), 1998, **4**:9~11
- [11] 刘青雯. 井下电法超前探测方法及其应用. 煤田地质与勘探, 2001, **29**(5):60~62
- Liu Q W. Underground electrical lead survey method and its application. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2001, **29**(5):60~62
- [12] 李玉宝. 矿井电法超前探测技术. 煤炭科学技术, 2002, **30**(2):1~3
- Li Y B. Mine electric method pilot detection technology. *Coal Science and Technique* (in Chinese), 2002, **30**(2):1~3
- [13] 程久龙, 王玉和, 于师建等. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用. 煤田地质与勘探, 2000, **28**(4):60~62
- Cheng J L, Wang Y H, Yu S J, et al. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2000, **28**(4):60~62
- [14] 黄秀成, 秦之富, 朱如荣等. 公路隧道地质雷达地质预报方法探讨. 公路交通技术, 2004, **5**:107~111
- Huang X C, Qin Z F, Zhu R R, et al. Discussion on geological radar forecast methods of road tunnels. *Technology of Highway and Transport* (in Chinese), 2004, **5**:107~111
- [15] 李文俊, 汪高举, 贺英魁等. 探地雷达在巷道掘进超前探测中的应用. 矿业安全与环保, 2005, **32**(4):44~46
- Li W J, Wang G J, He Y K, et al. The application of ground penetrating radar in the ahead detection of tunnel. *Security and Environmental Protection of Mineral Industry* (in Chinese), 2005, **32**(4):44~46
- [16] 何兵寿, 魏修成. 矿井地质雷达超前探测正演模拟. 煤田地质与勘探, 2000, **28**(5):52~55
- He B S, Wei X C. The forward modeling of drift GPR pulled ahead exploration. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2000, **28**(5):52~55
- [17] 代高飞, 夏才初, 毛海和. 地质雷达在隧道超前预报中的应用. 西部探矿工程, 2004, **100**(9):116~118
- Dai G F, Xia C C, Mao H H. Application of ground probing radar in geological forecast for tunnel construction. *West-China Exploration Engineering* (in Chinese), 2004, **100**(9):116~118
- [18] 李丽华. 地下声波法CT探测技术在工程地质勘查中的应用. 工程勘察, 2002, **6**:60~62
- Li L H. Application of the subsurface sonic CT technique in engineering geological exploration. *Geotechnical Investigation & Surveying* (in Chinese), 2002, **6**:60~62
- [19] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法. 北京: 科学出版社, 1994
- Xu S Z. The Finite Element Method in Geophysics (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994
- [20] 欧东新, 阮百尧. 电性轴对称分布电阻率测井的有限元法模拟. 桂林工学院学报, 2002, **22**(2):123~128
- Ou D X, Ruan B R. FEM simulating logging with axial-symmetric resistivity distribution. *Journal of Guilin University of Technology* (in Chinese), 2002, **22**(2):123~128
- [21] 武汉地质学院金属物探教研室编. 电法勘探教程. 北京: 地质出版社, 1991
- Research Room of Metal Geophysical Exploration, Wuhan Institute of Geology. Electrical Prospecting Tutorial (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991