

刘希高,凌春晖,刘志民,等. 矿用聚焦双频激电法电场扫描探测方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2388–2395. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0713

Liu Xigao, Ling Chunhui, Liu Zhimin, et al. Focusing dual-frequency induced polarization on electric field scanning method in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2388–2395. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0713

矿用聚焦双频激电法电场扫描探测方法

刘希高¹, 凌春晖¹, 刘志民², 张金涛¹, 吕一鸣¹, 周游¹, 吴淼¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 河北工程大学机电工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要:为实现煤矿巷道超前探测,提出了一种基于双频激电法和电场扫描探测理论的矿用聚焦双频激电法超前探测技术。基于共线点电流源的电力线方程理论,推导煤矿巷道探测电场边界电力线方程算法;提出电场扫描探测策略,分析了电场扫描探测的实际分辨率;基于电介质边界条件,根据巷道地质结构模型推导电力线偏移向量求解公式,分析了地质异常体对电力线的影响。理论计算表明:通过连续改变探测仪各通道电流强度,探测电场扫描分辨率理论上可任意设定,实际探测由实际地质工况条件选定;地质异常体的存在会影响电力线分布,板状体的厚度越大或者围岩与板状体之间的电阻率比值越大或者板状体倾角越大,则电力线偏移向量横坐标与纵坐标的绝对值越大;通过电场聚焦和偏转扫描探测,可确定异常体的直径和方位。

关键词:煤矿巷道;超前探测;聚焦双频激电法;电场扫描;探测分辨率

中图分类号: P631.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)09-2388-08

Focusing dual-frequency induced polarization on electric field scanning method in coal mine roadway

LIU Xi-gao¹, LING Chun-hui¹, LIU Zhi-min², ZHANG Jin-tao¹, LÜ Yi-ming¹, ZHOU You¹, WU Miao¹

(1. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: To achieve an advanced detection in coal mine roadway, a method called focusing dual-frequency induced polarization method based on dual-frequency induced polarization method and electric field scanning detection theory was proposed in this paper. Based on the theory of collinear point current source electric line equation, the detection electric field boundary electric line equations were established and the complete algorithm was derived. The electric field scanning detection strategy was proposed and the actual resolution of electric field scanning detection was analyzed with the boundary electric line equation. Based on dielectric boundary conditions theory, the offset vector of the electric line was derived according to the roadway geological structure model, and the influence of geological anomaly on the electric line was analyzed. Theoretical calculations show that the detection electric field scanning resolution can be set arbitrarily by continuously changing the current amplitude of different channel of the detector theoretically, but it is set according to actual detection conditions. The existence of geological anomalies will affect the distribution of electric line and the greater of $a \rho_1/\rho_2$ and $\beta(\beta \geq 90^\circ - \alpha)$, the larger the absolute value of the offset vector of electric line. The size and orientation of the geological anomalies could be calculated through electric field deflection and focusing scanning detection.

收稿日期: 2016-05-30 修回日期: 2016-07-20 责任编辑: 许书阁

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110023110008); 博士研究生拔尖创新人才培养基金资助项目(00800015Z6A1)

作者简介: 刘希高(1988—),男,山东潍坊人,博士研究生。Tel: 010-62339113 E-mail: lxgao88@126.com

Key words: coal mine roadway; advanced detection; focusing dual-frequency induced polarization method; electric field scanning; detection resolution

我国是世界上煤矿水害最为严重的国家之一,水害矿难对生命财产造成的损失在煤矿灾害事故中最为突出^[1],极大影响了煤矿掘进效率^[2]。目前煤矿巷道超前物探法主要分为地震类、电磁法类和电法类^[3-5]。现有物探方法不能理想地解决煤巷综掘超前探测所面临的问题^[5-6]。

为解决以上探测方法存在的缺陷,张伟杰^[6]提出了一种基于双频激电法^[7]和电场聚焦偏转效应的煤巷超前探测方法,该方法具有抗干扰能力强,方向性好,对水体敏感度高等优点。杜毅博等^[8]和刘志民等^[9]分别研制了基于该方法的超前探测仪发射系统和接收系统,通过实际探测证实可实现功能要求。张金涛等^[10]建立了煤巷超前探测灾害性含导水构造双频激电法的解析数学模型,提出了视幅频率数据快速确定灾害性含导水地质构造的厚度及其距掘进面距离的方法。刘志民等^[11]搭建了典型有害地质构造等效阻容模型,利用动态电场激励法原理样机模拟测试煤巷典型有害地质构造激电效应特性,得出视幅频率和视电阻率值随测点距掘进断面变化规律,进而判断掘进断面前方有害地质构造性态。张伟杰等^[12]提出了电场约束效率概念,研究了电极参数与电场约束效率之间的规律,找出了电极参数的最佳范围。然而,相关文献并没有从理论上深入研究电场扫描探测方法。笔者聚焦双频激电法探测原理的基础上,首先建立了探测电场边界电力线方程,并推导了完整的求解算法,提出了电场扫描探测策略,利用边界电力线方程分析了电场扫描探测的实际分辨率,最后根据电介质边界条件,分析了地质异常体对电力线的影响。

1 探测原理

1.1 基本原理

聚焦双频激电法超前探测系统包括激励信号发射系统(以下简称发射系统)和激电信号接收系统(以下简称接收系统),如图 1 所示。发射电极的主电极 A_0 及约束电极 A_n 布置在巷道断面,接地电极 B 布置在巷道后方无穷远处,测量电极为 MN,布置在巷道后方,电场分布如图 2 所示。

发射系统可产生 5 路相互隔离、单路幅值可调的双频调制方波电流,电流波形如图 3(a) 所示,电流频率为 1 Hz 与 1/13 Hz、2 Hz 与 2/13 Hz、4 Hz 与 4/13 Hz、8 Hz 与 8/13 Hz 中的任意一组,其中 1 路与主电极连接,另外 4 路与约束电极连接,通过改变主电流

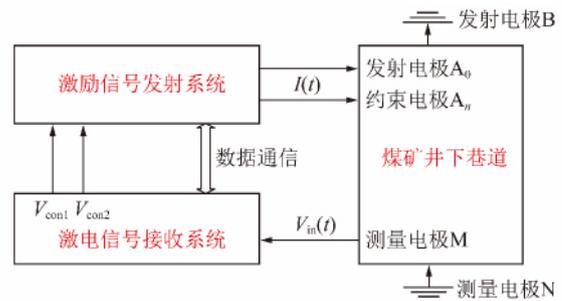


图 1 聚焦双频激电法超前探测系统

Fig. 1 Focusing dual-frequency induced polarization advanced detection system

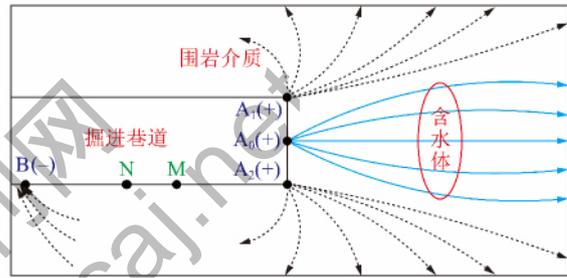


图 2 聚焦双频激电法电场分布

Fig. 2 Electric field distribution of focusing dual-frequency induced polarization method

与发射电流大小及比值,可在煤矿井下巷道前方产生聚焦激励电场。

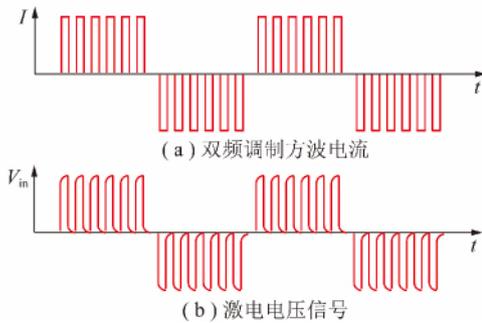


图 3 发射电流波形及激电电压信号

Fig. 3 Waveform of emission current and IP signal

接收系统可产生双频 PWM 驱动控制信号 V_{con1} , V_{con2} , 控制发射系统产生双频调制方波电流,通过发射电极供入煤巷掘进面前方的煤岩;同时接收系统测量煤岩介质激发极化产生的电压信号,如图 3(b) 所示,通过信号处理获得激电电压幅值 ΔV_L 和 ΔV_H 及相位差 φ_L 和 φ_H ,计算激电效应参量视电阻率 ρ_s 、视幅频率 F_s 、视相频率 φ_s ,如式(1)~(3)所示。

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

$$F_s = \frac{\Delta V_L - \Delta V_H}{\Delta V_L} \times 100\% = \frac{\rho_s(f_L) - \rho_s(f_H)}{\rho_s(f_L)} \times 100\% \quad (2)$$

$$\varphi_s = \frac{\varphi_L - \varphi_H}{\varphi_L} \times 100\% \quad (3)$$

1.2 方法特点

聚焦双频激电法基于双频激电法和电场聚焦偏转效应。双频激电法优势在于可消除巷道空腔对探测结果的影响以及消除对激电参数相同的干扰因素^[10]。电场聚焦偏转效应的特点在于相应视幅频率数据的变化规律可以分别反演异常体厚度和掘进断面的距离两个关键参数,通过电场扫描探测可确定异常体的直径和方位。

(1) 消除巷道影响。

聚焦双频激电法的特点之一是可以消除巷道影响。岳建华等^[13-14]通过物理模型实验和数值模拟研究了巷道空间对井下电流场的影响,提出了巷道影响系数 α 的计算公式,并指出巷道空间影响下的视电阻率与全空间视电阻率满足如下关系。

$$\rho_s^a = \frac{2}{\alpha} \rho_s^m \quad (4)$$

式中 ρ_s^a 、 ρ_s^m 分别为全空间与实测视电阻率。

本文提出的聚焦双频激电法电极布置方式满足文献[14]的电极布置规律,故满足式(4)。将式(4)代入式(2),可得表达式(5)。因此,矿用聚焦双频激电法可消除巷道空腔对探测结果以及对激电参数相同的干扰因素的影响。

$$F_s = \frac{\rho_s^a(f_L) - \rho_s^a(f_H)}{\rho_s^a(f_L)} \times 100\% = \frac{\rho_s^m(f_L) - \rho_s^m(f_H)}{\rho_s^m(f_L)} \times 100\% \quad (5)$$

(2) 电场扫描探测。

文献[15]在双频激电超前探测模型基础上,依据电场叠加原理建立了三极和五极聚焦条件下测点电位的频率域解析数学模型,研究了两种条件下用二极装置跑极超前探测灾害性含、导水体、陷落柱和断层时,利用相应的视幅频率数据的变化规律可以分别反演异常体厚度和掘进断面的距离两个关键参数。然而,该研究仅分析了电场聚焦时探测规律,而通过电场聚焦无法实现巷道前方地质异常体扫描探测与方位判断。

本文提出的方法通过电场聚焦扫描和偏转扫描探测,基于发射系统可产生5路相互隔离、单路幅值可调的双频调制方波电流,通过电场扫描探测可确定异常体的直径和方位,具体探测方法将在后文中进一

步论述。

2 电场方程

矿用聚焦双频激电法的工作频率在 $10^{-2} \sim 10^1$ Hz,故发射电流可形成稳定电流场^[7]。根据电场理论,稳定电流场满足以下基本方程式。

$$\begin{cases} j = \sigma E = \frac{E}{\rho} \\ \text{div } j = 0 \\ E = -\text{grad } U = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} e_x + \frac{\partial U}{\partial y} e_y + \frac{\partial U}{\partial z} e_z\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 σ 为介质电导率; ρ 为介质电阻率; j 为电流密度; E 为电场强度; U 为电位函数。

在电法勘探中,稳定电流场中的电位函数 U 所满足的微分方程为

$$\Delta U = \nabla^2 U = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (7)$$

电极在巷道断面布置如图4所示。主电极 A_0 位于掘进断面的中心位置,4个约束电极 $A_1 \sim A_4$ 排列在主电极四周。设通过电极 A_0, A_1, A_2 且与掘进断面的垂直平面为 α ,通过电极 A_0, A_3, A_4 且与掘进断面的垂直平面为 β , α 与 β 相互垂直。电极 $A_0 \sim A_4$ 电流分别为 $I_0 \sim I_4$ 。对于平面 α 上一点 P ,当 $I_3 = I_4$ 时,电极 A_3 和 A_4 在点 P 的电场强度在垂直于平面 α 方向的分量为0,电极 A_0, A_1 和 A_2 在点 P 的电场强度沿平面 α ,故点 P 场强方向与平面 α 平行,故通过分析电极 A_0, A_1 和 A_2 的电场分布情况可反映整个电极系在空间的电场聚焦偏转情况。

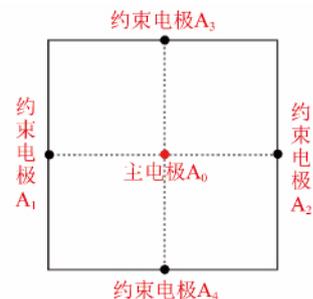


图4 巷道断面电极布置

Fig. 4 Arrangement of electrodes on the roadway section

建立如图5所示直角坐标系, x 轴方向为巷道掘进方向, y 轴方向为掘进断面方向,电极坐标为 $A(0, 0)$, $A_1(0, d)$, $A_2(0, -d)$ 。距离掘进断面 x 的探测断面上 P 点坐标为 (x, y) ,定义 $PA_0 = r_0$, $PA_1 = r_1$, $PA_2 = r_2$ 。

根据点电流源的全空间电场,各电极在点 P 的电势分别为 φ_{PA_0} , φ_{PA_1} 和 φ_{PA_2} ,表达式如式(8)所示。

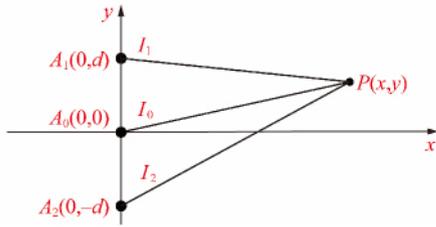


图 5 巷道掘进方向坐标系

Fig. 5 Coordinate system of roadway driving direction

$$\begin{cases} \varphi_{PA0} = \frac{\rho I_0}{4\pi r_0} & \varphi_{PA1} = \frac{\rho I_1}{4\pi r_1} & \varphi_{PA2} = \frac{\rho I_2}{4\pi r_2} \\ \varphi_P = \varphi_{PA0} + \varphi_{PA1} + \varphi_{PA2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $r_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$; $r_1 = \sqrt{x^2 + (y - d)^2}$; $r_2 = \sqrt{x^2 + (y + d)^2}$; $I_0 = I_1/k_1 = I_2/k_2$ 。

电场强度与电势满足拉普拉斯方程, 此外电场强度满足矢量叠加原理, 故点 P 处电场满足式(9)。

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -\text{grad } U = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{e}_y\right) \\ \mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9), 可求得 E_{px} 和 E_{py} 的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{px}(x, y) = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left(\frac{x}{r_0^3} + \frac{k_1 x}{r_1^3} + \frac{k_2 x}{r_2^3} \right) \mathbf{e}_x \\ \mathbf{E}_{py}(x, y) = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left[\frac{y}{r_0^3} + \frac{k_1(y-d)}{r_1^3} + \frac{k_2(y+d)}{r_2^3} \right] \mathbf{e}_y \end{cases} \quad (10)$$

3 巷道边界电力线方程

3.1 电力线方程

文献[16-18]分别通过直接积分和高斯定理推导了共线点电荷系电场的电力线方程, 根据点电荷与点电流源的相似性, 笔者利用文献[16]的高斯定理方法推导了共线点电流源的电力线方程。根据图5建立的坐标系, 此时点 P 的电力线方程为

$$\frac{I_0 y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{I_1(y-d)}{\sqrt{x^2 + (y-d)^2}} + \frac{I_2(y+d)}{\sqrt{x^2 + (y+d)^2}} = C^1 \quad (11)$$

考虑到各个电极电流满足关系 $I_0 = I_1/k_1 = I_2/k_2$, 式(11)可化简为

$$\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{k_1(y-d)}{\sqrt{x^2 + (y-d)^2}} + \frac{k_2(y+d)}{\sqrt{x^2 + (y+d)^2}} = C \quad (12)$$

对于共线点电流源的电力线分布问题, 主要求解步骤^[18]如下:

(1) 找出中性点坐标。

中性点是指电场强度为 $E = 0$ 的点, 通过中性点

的电力线, 将静电场空间划分为几个区域, 该电力线即为各区域的分界线。

(2) 求解积分常数。

根据中性点坐标, 求通过中性点电力线积分常数 C 的数值。

(3) 求解电力线方程。

根据电力线方程的积分形式, 求通过中性点的电力线。

3.2 中性点坐标求解

对于图5的电极分布, 中性点位于 y 轴, 故满足 $E_{px}(x) = 0$, $E_{py}|_{x=0} = 0$ 。

$$E_{py}(0, y) = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left[\frac{y}{r_0^3} + \frac{k_1(y-d)}{r_1^3} + \frac{k_2(y+d)}{r_2^3} \right] = 0 \quad (13)$$

当 $k_1 = k_2$ 时, y 轴上的中性点仅有 1 个, 位于坐标原点; 当 $k_1 \neq k_2$ 时, y 轴上的中性点存在 2 个, 分别位于 y 轴正负半轴, 坐标范围分别是 $0 < y < d$ 和 $-d < y < 0$ 。

当中性点位于 y 轴正半轴, $E_{py}|_{x=0} = 0$ 化简为

$$\frac{1}{y^2} + \frac{-k_1}{(y-d)^2} + \frac{k_2}{(y+d)^2} = 0 \quad (14)$$

当中性点位于 y 轴负半轴, $E_{py}|_{x=0} = 0$ 化简为

$$\frac{-1}{y^2} + \frac{-k_1}{(y-d)^2} + \frac{k_2}{(y+d)^2} = 0 \quad (15)$$

在给定 k_1 , k_2 和 d 的值后, 方程(14)与(15)为一元四次方程, 此时求解上述方程可得中性点坐标数值解。

3.3 积分常数求解

根据前述, 中性点位于电场边界电力线上, 将其坐标 $P(0, y)$ 代入电力线方程, 可得

$$\frac{y}{|y|} + \frac{k_1(y-d)}{|y-d|} + \frac{k_2(y+d)}{|y+d|} = C \quad (16)$$

当中性点位于 y 轴正半轴, 令积分常数为 C_1 , 化简可得式(17)。根据 k_1 和 k_2 的不同数值, 可得对应积分常数 C_1 。

$$1 - k_1 + k_2 = C_1 \quad (17)$$

当中性点位于 y 轴负半轴, 令积分常数为 C_2 , 化简可得式(18)。根据 k_1 和 k_2 的不同数值, 可得对应积分常数 C_2 。

$$-1 - k_1 + k_2 = C_2 \quad (18)$$

3.4 电力线方程求解

当积分常数为 C_1 时, 当给定点 $P(x, y_1)$ 的横坐标时, 可根据电力线方程(12)得到点 P 纵坐标 y_1 ($0 < y_1 < d$) 的数值解; 当积分常数为 C_2 时, 当给定点 $P(x, y_2)$ 的横坐标时, 可根据电力线方程(12)得到点 P

纵坐标 y_2 ($-d < y_2 < 0$) 的数值解。根据求得 y_1 与 y_2 的数值解 绘制对应的电力线。

4 电场扫描探测方法

探测电场分辨率是指物探仪器实现准确探测煤矿掘进断面前方地质异常构造的最小断面面积。下面讨论探测电场分辨率问题。

4.1 电场扫描探测范围

根据《煤矿防治水规定》要求, 分隔水煤(岩)柱厚度应大于 20 m^[19]。因此, 在确定电场扫描探测范围时, 规定探测电场与顶板及底板的安全距离为 20 m, 故安全距离边界的坐标分别为 $\pm(20 + d)$ m。电场扫描探测范围划分为 4 个区域: 探测区域 A, B, C, D, 各区域的电流比值以及边界电力线坐标见表 1。

表 1 电场扫描探测范围

Table 1 Electric field scanning detection range

探测区域	边界	$k_1 = k_2$	y/m
A	上	0.95	22
	下	5	5.5
B	上	5	5.5
	下	掘进方向中心线	0
C	上	掘进方向中心线	0
	下	5	-5.5
D	上	5	-5.5
	下	0.95	-22

为直观了解探测区域范围, 电场扫描范围如图 6 所示。

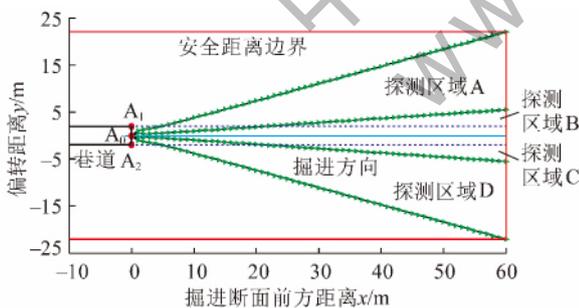


图 6 电场扫描探测范围分布

Fig. 6 Electric field scanning detection range

4.2 电场分区扫描

电场聚焦扫描时, 电流比 $k_1 = k_2 = k$ k 从 0.95 ~ 5 变化时, 电场扫描区域为 A 和 D; 电场向上偏转扫描时, 电流比 $k_1 = 1.95 \sim 2.5$ $k_2 = 3 \sim 4.3$ 时, 电场扫描区域为 B; 偏转电场向下扫描时, 电流比 $k_1 = 3 \sim 4.3$ $k_2 = 1.95 \sim 2.5$ 时, 电场扫描区域为 C。电场扫描分辨率可通过设置发送机各路电流调节。电场分区扫描时, 电流比值以及边界电力线坐标见表 2, 考

虑到电场向上偏转与向下偏转扫描的对称性, 此处仅给出电场向上偏转扫描结果。表 2 中电场聚焦扫描分辨率为 2 m, 电场偏转扫描分辨率为 1 m。

表 2 电流比值与边界电力线坐标

Table 2 Current ratio and coordinates of boundary electrical line

电场聚焦扫描			电场向上偏转扫描		
k_1	k_2	y/m	k_1	k_2	y_2/m
1.08	1.08	± 20	2.5	4.3	5.5
1.25	1.25	± 18	2.45	4.15	5
1.45	1.45	± 16	2.35	3.88	4
1.7	1.7	± 14	2.25	3.64	3
2.05	2.05	± 12	2.15	3.42	2
2.5	2.5	± 10	2.05	3.2	1
3.25	3.25	± 8	1.95	3.0	0

4.3 电场扫描探测策略

电场扫描探测的目的是实现地质异常体直径和方位的准确探测。当异常体位于扫描半径 R_1 和扫描半径 R_2 之间时, 此时异常体直径为 $R_1 - R_2$, 如图 7 所示。下面按照异常体位于探测区域 A 或 D 以及异常体位于探测区域 B 或 C 两种情况进行讨论。

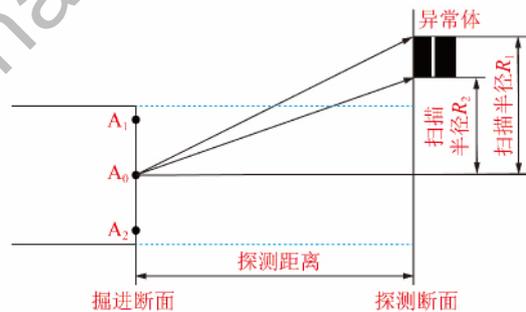


图 7 地质异常体方位

Fig. 7 Direction and position of anomalies

4.3.1 异常体位于探测区域 A 或 D

当异常体位于探测区域 A 或 D 时, 通过聚焦电场扫描可确定异常体直径及方位, 通过偏转电场扫描可确定异常体位于探测区域 A 或 D。

通过电场聚焦扫描, 随着电流比的变化, 观测探测仪数据变化, 从探测仪接收机数据变化开始到数据停止变化截止, 记录主电流与各路约束电流数值, 通过反演确定两次扫描半径, 计算差值进而确定异常体。

当电场向上偏转扫描时, 如果探测仪接收机数据为聚焦电场扫描时的异常数据, 则异常体位于探测区域 A, 当电场向下偏转扫描时, 如果探测仪接收机数据为聚焦电场扫描时的异常数据, 则异常体位于探测区域 D。

4.3.2 异常体位于探测区域 B 或 C

当异常体位于探测区域 B 或 C 时,通过聚焦电场扫描可确定异常体位于探测区域 B 或 C,通过偏转电场扫描可确定异常体直径及方位。

通过电场聚焦扫描,随着电流比变化,观测探测仪数据变化,如果探测仪接收机数据保持不变,表示异常体位于探测区域 B 或 C。

当电场向上偏转扫描时,如果探测仪接收机数据发生变化,表示异常体位于探测区域 B,同样记录数据变化情况,通过反演确定两次扫描半径,通过求取差值进而确定异常体直径和方位。同理,当电场向下偏转扫描时,如果探测仪接收机数据发生变化,表示异常体位于探测区域 C,同样的方法可确定异常体直径和方位。

5 异常体对电力线影响分析

地质异常体的存在对电力线分布将产生影响,下面将基于电介质边界条件,根据巷道地质结构模型推导电力线偏移向量求解公式,分析地质异常体对电力线的影响。

5.1 电介质边界条件

考虑到围岩与异常体分界面两侧均为电介质,设煤岩一侧电流密度法向及切向分量分别为 j_{1n} 和 j_{1t} ,异常体一侧电流密度法向及切向分量分别为 j_{2n} 和 j_{2t} ,两侧电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 。故界面满足如下边界条件^[20]:

$$\begin{cases} j_{1n} = j_{2n} \\ \rho_1 j_{1t} = \rho_2 j_{2t} \end{cases} \quad (19)$$

当围岩与异常体两侧电力线入射角与折射角分别为 θ_1 及 θ_2 时,如图 8 所示。此时,根据式(19)可知 θ_1 及 θ_2 满足

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (20)$$

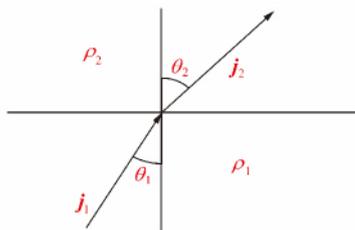


图 8 分界面电流密度折向

Fig. 8 Refraction of current density on the interface

5.2 模型及公式推导

根据文献[21]的建模方法,所建模型如图 9 所示。假设异常体前方岩石为各向同性介质,其电阻率

为 ρ_1 ;地质异常体为无限大板状体,其电阻率为 ρ_2 ,其厚度为 a ,与掘进面中心距离为 d 与掘进面法线方向夹角为 β ;异常体后方岩石为亦各向同性介质,其电阻率为 ρ_3 。设某条边界电力线在 ρ_1/ρ_2 界面的入射角与折射角分别为 θ_1 及 θ_2 ,在 ρ_2/ρ_3 界面的入射角与折射角分别为 θ_2 及 θ_3 ,电力线与掘进方向中心线夹角 α ,板状体与掘进方向中心线夹角 β 。后续参数分析过程中取 $\rho_1 = \rho_3$ 。

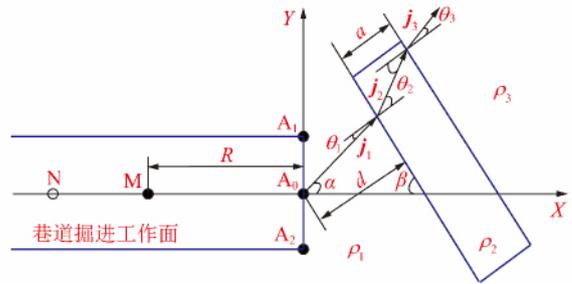


图 9 巷道地质构造模型

Fig. 9 Model of roadway geological structure

根据几何关系以及式(20),可得 α β θ_1 θ_2 及 θ_3 满足

$$\begin{cases} \theta_1 = \alpha + \beta - 90^\circ \\ \rho_1 \tan \theta_1 = \rho_2 \tan \theta_2 \\ \rho_2 \tan \theta_2 = \rho_3 \tan \theta_3 \end{cases} \quad (21)$$

考虑到 $\rho_1 = \rho_3$,故 $\theta_1 = \theta_3$,即当异常体为无限大板状体时,电力线方向在经过异常体前后没有变化。设点 P 和 Q 分别表示无异常体和存在异常体时电力线与板状体远离掘进面一侧的交点,则偏移向量 PQ (Δx Δy) 表示电力线经过异常体的位置变化情况。

$$\begin{cases} \Delta x = -a(\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \cos \beta \\ \Delta y = a(\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \sin \beta \end{cases} \quad (22)$$

联立表达式(21)及(22),可得电力线偏移向量横坐标 Δx 及纵坐标 Δy 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta x = a\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1\right) \cot(\alpha + \beta) \cos \beta \\ \Delta y = -a\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1\right) \cot(\alpha + \beta) \sin \beta \end{cases} \quad (23)$$

5.3 参数影响分析

根据表达式(23)可知,电力线位置变化情况与板状体厚度 a 、围岩与异常体电阻率比值 ρ_1/ρ_2 、电力线与掘进方向中心线夹角 α 和板状体与掘进方向中心线夹角 β 有关。除相应的分析参数外,其他参数选择如下: $a = 2 \text{ m}$ $\rho_1/\rho_2 = 2$ $\alpha = 30^\circ$ $\beta = 30^\circ$ 。

当其他参数不变,(1)当板状体厚度 a 范围为 0 ~ 10 m 时,偏移向量坐标与 a 关系如图 10(a) 所示;

(2) 当围岩与异常体电阻率比值 ρ_1/ρ_2 范围为 1 ~ 10 时, 偏移向量坐标与 ρ_1/ρ_2 关系如图 10(b) 所示; (3) 当电力线与掘进方向中心线夹角 α 范围为 $0^\circ \sim 80^\circ$ 时, 偏

移向量坐标与 α 关系如图 10(c) 所示; (4) 当板状体与掘进方向中心线夹角 β 范围为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 时, 偏移向量坐标与 β 关系如图 10(d) 所示。

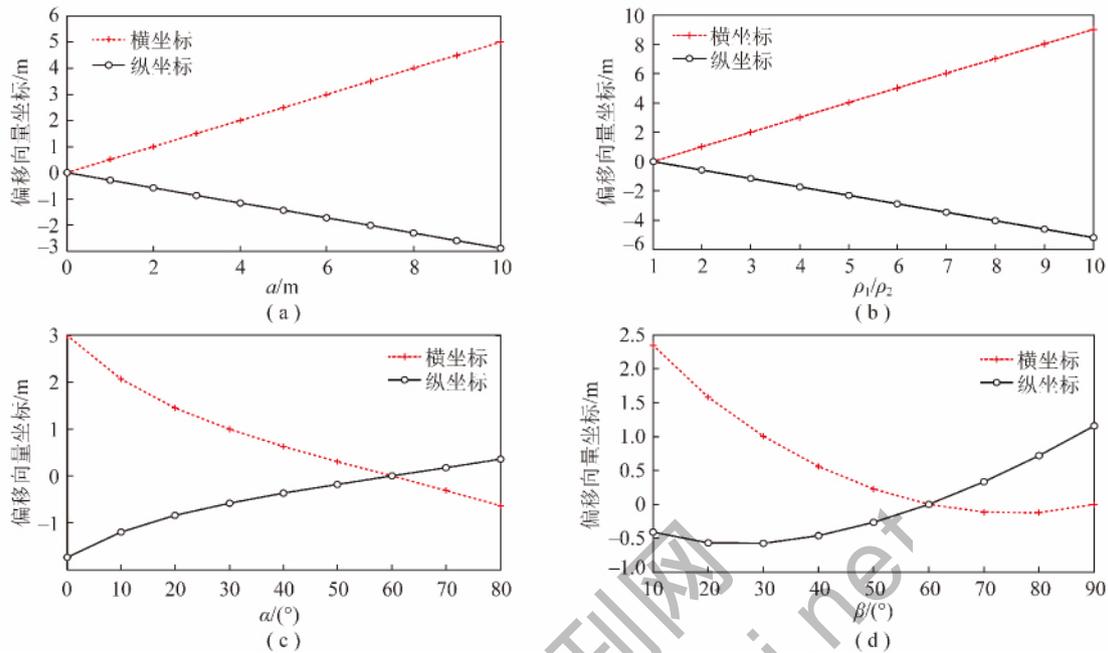


图 10 厚度 a , 比值 ρ_1/ρ_2 , 夹角 α 和 β 对偏移向量影响

Fig. 10 Relationship between thickness a , ratio ρ_1/ρ_2 , angle α and β and offset vector

5.4 结果讨论

文献[21]通过对坑道电阻率超前探测研究, 得到如下结论: 板状体的厚度 a 越大, 或者围岩与板状体之间的电阻率比值 ρ_1/ρ_2 越大, 或者板状体倾角 β 越大, 视电阻率异常极值位置 AM 与点电源到异常体中心距离的差异越大, 即视电阻率异常极值点位置向巷道后方移动。

本节通过对各因素对电力线偏移向量影响分析, 得到如下结论: 当 $a=0$, $\rho_1/\rho_2=1$, $\alpha+\beta=90^\circ$ 满足条件之一时, 电力线偏移向量为 0; 当地质异常体与电力线不满足上述条件时, 地质异常体会影响电力线分布, 即异常体前方电力线不变, 异常体后方电力线发生偏移, 具体规律为: 板状体的厚度 a 越大, 或者围岩与板状体之间的电阻率比值 ρ_1/ρ_2 越大, 或者板状体倾角 β ($\beta \geq 90^\circ - \alpha$) 越大, 则电力线偏移向量横坐标与纵坐标的绝对值越大。考虑到电场强度与电位分布满足式(9), 则电力线偏移对应巷道后方电位分布发生变化, 故可认为地质异常体参数变化对于激电参数异常极值点位置与电力线偏移向量具有相同影响趋势。

当巷道断面前方地质结构如本章所用模型时, 根据文献[15]所述方法, 利用相应的视幅频率数据的变化规律可以分别反演异常体厚度和掘进断面的距离两个关键参数。考虑到异常体前方电力线方向可

控, 通过在巷道后方跑极确定异常极值位置, 然后利用本文所述电场扫描探测方法, 可确定异常体直径和方位。

6 结 论

(1) 当采用发射电极位于掘进断面, 接收电极在断面后方跑极的方式时, 矿用聚焦双频激电法可消除巷道空腔对探测结果的影响。

(2) 根据电场扫描探测理论, 探测电场扫描分辨率由电流比决定, 通过电场聚焦扫描和电场偏转扫描探测可确定异常体的直径和方位。

(3) 地质异常体的存在对电力线分布将产生影响, 板状体的厚度 a 越大, 或者围岩与板状体之间的电阻率比值 ρ_1/ρ_2 越大, 或者板状体倾角 β ($\beta \geq 90^\circ - \alpha$) 越大, 则电力线偏移向量横坐标与纵坐标的绝对值越大。

参考文献:

- [1] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
Wu Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [2] Wang Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science &

- Technology 2014 1(3): 153-260.
- [3] 刘盛东, 刘静, 岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J]. 煤炭学报 2014 39(1): 19-25.
Liu Shengdong, Liu Jing, Yue Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(1): 19-25.
- [4] 张平松, 李永盛, 胡雄武. 巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J]. 地下空间与工程学报 2013 9(1): 135-140.
Zhang Pingsong, Li Yongsheng, Hu Xiongwu. Application and discussion of the advanced detection technology with DC resistivity method in tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2013 9(1): 135-140.
- [5] 程久龙, 李飞, 彭苏萍, 等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报 2014 39(8): 1742-1750.
Cheng Jiulong, Li Fei, Peng Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods [J]. Journal of China Coal Society, 2014 39(8): 1742-1750.
- [6] 张伟杰. 动态定向电场激励法煤巷掘进超前探测技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京) 2012.
Zhang Weijie. Research of advanced detection technology based on dynamic and directional electric field excitation method of coal roadway driving [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing) 2012.
- [7] 何继善. 双频激电法[M]. 北京: 高等教育出版社 2005.
- [8] 杜毅博, 刘希高, 吴森, 等. 动态定向电场激励法煤巷综掘超前探测发射系统[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014 33(7): 877-882.
Du Yibo, Liu Xigao, Wu Miao, et al. Mine transmitting system for dynamic and directional electric field excitation method of coal roadway driving [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science) 2014 33(7): 877-882.
- [9] 刘志民, 刘希高, 吴森, 等. 煤巷超前探测双频交流激电接收机系统设计[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015 34(8): 968-973.
Liu Zhimin, Liu Xigao, Wu Miao, et al. Design of dual-frequency alternating current IP receiver system for advanced detection in coal roadway. [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science) 2015 34(8): 968-973.
- [10] 张金涛, 周游, 刘志民, 等. 超前探测巷道灾害性含导水构造的双频激电法[J]. 煤炭学报 2015 40(8): 1894-1899.
Zhang Jintao, Zhou You, Liu Zhimin, et al. Dual-frequency induced polarization method for advanced detection on disastrous water-conducting or water-bearing structure in roadway [J]. Journal of China Coal Society 2015 40(8): 1894-1899.
- [11] 刘志民, 刘希高, 张金涛, 等. 交流聚焦激电法煤巷超前探测阻容试验模拟[J]. 煤炭学报 2015 40(9): 2144-2151.
Liu Zhimin, Liu Xigao, Zhang Jintao, et al. Experimental simulation of resistance-capacitance model for advanced detection in coal roadway based on alternating current focusing induced polarization method [J]. Journal of China Coal Society 2015 40(9): 2144-2151.
- [12] 张伟杰, 张玉洁, 张有东, 等. 激励法超前探测技术电场约束效率研究[J]. 煤炭科学技术 2015 43(6): 102-106.
Zhang Weijie, Zhang Yujie, Zhang Youdong, et al. Study on electrical field restriction efficiency of excitation method advance detection technology [J]. Coal Science and Technology, 2015 43(6): 102-106.
- [13] 岳建华, 李志聃. 巷道空间对矿井电测曲线影响的模型实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 1993 21(2): 56-59.
- [14] 岳建华, 李志聃. 矿井直流电法勘探中的巷道影响[J]. 煤炭学报, 1999 24(1): 9-12.
Yue Jianhua, Li Zhidan. Effect of coal mine roadway in direct current prospecting method [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 9-12.
- [15] 张金涛. 煤巷综掘双频激电法超前探测正反演及信号发送机研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京) 2016.
Zhang Jintao. Research on the forward-inversion model and signal transmitter of advance detection in coal roadway tunneling with dual frequency induced polarization method [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing) 2016.
- [16] 胡仁刚. N个沿直线分布点电荷系统的电力线方程[J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 1995(2): 227-231.
- [17] 李云生. 共线点电荷系的电力线方程[J]. 上海海运学院学报, 1990(2): 89-94.
- [18] 胡蜀秋. 关于共线点电荷系电场的电力线方程[J]. 教学与研究, 1980(S1): 53-62.
- [19] 国家安全生产监督管理总局、国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社 2009.
- [20] 岳建华, 刘树才. 矿井直流电法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2000.
- [21] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报 2006 49(5): 1529-1538.
Huang Junge, Wang Jialin, Ruan Baiyao. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel [J]. Chinese Journal Geophysics 2006 49(5): 1529-1538.