

Soil Trough Experimental Study Based on the Focused Dual Frequency Induced Polarization Method in Advanced Detection of Coal Roadway

You Zhou, Yiming Lv, Jintao Zhang, Zhimin Liu, Xigao Liu, Miao Wu

China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing
Email: zhouy0208@126.com

Received: Sep. 3rd, 2015; accepted: Sep. 16th, 2015; published: Sep. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Focused dual frequency IP instrument has been designed and fabricated based on the principle of focused dual frequency induced polarization method. Then we established soil trough experiment platform and structured the abnormal water bearing body by simulating conditions of the coal mine, the detailed design process of experiment platform is given. Based on special electrode layout mode that the electrode is perpendicular to the roadway section, on the condition of no deflection, we got the apparent amplitude frequency data with and without abnormal water bearing body by changing the bucking current ratio and the relative position between the two measuring electrodes. And we obtained the best bucking current ratio and measurement electrode position under these conditions according to data analysis.

Keywords

Advanced Detection of Coal Roadway, Focused Dual Frequency Induced Polarization Method, Soil Trough Experiment, Electrode Layout Mode, Apparent Amplitude Frequency

聚焦双频激电法煤巷超前探测土槽实验研究

周 游, 吕一鸣, 张金涛, 刘志民, 刘希高, 吴 淼

中国矿业大学(北京), 北京

Email: zhouy0208@126.com

收稿日期: 2015年9月3日; 录用日期: 2015年9月16日; 发布日期: 2015年9月23日

摘 要

基于聚焦双频激电法原理设计并制作了聚焦双频激电仪, 模拟井下环境建立了土槽实验台并构造了含水异常体, 给出了实验台的详细设计过程。基于垂直于煤巷断面的特殊布极方法, 在无偏转条件下, 通过变换屏流比和两测量电极的相对位置关系, 测得在有含水异常体下的视幅频率数据。根据数据分析得到了此条件下的最佳屏流比及最佳测量电极位置。

关键词

煤巷超前探测, 聚焦双频激电法, 土槽实验, 布极, 视幅频率

1. 引言

目前用于煤巷综掘超前探测的方法均存在一定的不足, 主要表现在: 探测准确率低、方向性差、实时性差、效率低、成本高、抗干扰能力差等突出问题[1]。因此, 文献[2]提出了“动态电场激励法煤巷超前探测技术”, 聚焦双频激电法源于动态电场激励法[1] [3] [4], 该方法充分利用双频激电法原理[5]的优点, 结合电场聚焦和偏转理论, 可实现地质异常体准确定位。本人所在课题组长期致力于聚焦双频激电法的研究, 目前已经研制出发射装置和接收装置的实验样机。

目前国内各种超前探测方法的模拟实验主要用于隧道的超前探测, 用于煤巷综掘超前探测的相关研究较少, 更鲜有基于聚焦双频激电法的相关模拟实验研究。有学者基于直流电法超前探测技术, 通过在沙坑中埋设已知的低阻体, 在模拟巷道中布置电极的方式, 采用网络并行电法勘测系统对前方已知的物体进行探测[6]。还有学者基于矿井直流电法掘进超前探测理论, 建立了独头巷道掘进前方存在球体溶洞时的超前探测数学模型, 探讨了溶洞至掘进面距离、溶洞半径、埋深等参数与视电阻率异常的联系, 给出了相应理论曲线或经验公式, 并采用沙槽模拟实验对理论进行验证[7]。还有学者基于聚焦电流法隧道超前探测理论, 采用两种电极布置方式进行沙槽模拟实验[8]。

本文基于聚焦双频激电法, 采用垂直于断面布置电极的方法, 在土槽中放置含水异常体模型, 模拟井下含水地质构造, 通过变换屏流比及测量电极位置, 开展土槽实验研究。通过对视幅频率数据的分析得到最佳屏流比及最佳测量电极位置。

2. 聚焦双频激电法原理

2.1. 双频激电法

双频激电法[5]主要利用两种不同频率并具有相关性的方波电流进行叠加, 同时供入大地, 形成双频组合电流作为激励源; 并接收含有地质异常信息的极化电势差, 通过仪器内部的斩波放大、相敏检波等手段, 得到其高频电位差与低频电位差, 从而求得异常构造所产生的激发极化效应(induced polarization 简称 IP 效应)。

通常使用“百分频率效应”(Percent frequency effect, 缩写为 PFE)、或视幅频率表征频域激发极化程度, 其定义为:

$$PFE = F_s = \frac{\Delta V(f_L) - \Delta V(f_H)}{\Delta V(f_L)} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中, $\Delta V(f_H)$ 和 $\Delta V(f_L)$ 分别表示高、低频电位差。双频激电法充分发挥频率域激电法的优点, 将高低两种频率进行叠加调制, 形成双频激发电流(如图 1(a)), 对探测区域进行激电激励, 探测双频激电场电位差信息(如图 1(b)), 一次性同时得到高频电位差和低频电位差, 即可直接计算视幅频率值。

该方法观测精度高, 稳定性好, 观测装置轻便灵活, 并具有较强的抗电磁干扰能力, 而且发射装置的电流变化也对测量结果影响较少。但是由于煤巷掘进工作特点, 无法直接应用于煤巷掘进超前探测。该探测方法是聚焦双频激电法的基础。

2.2. 聚焦双频激电法

聚焦双频激电法源于双频激电法, 依据空间电场效应, 根据同性电场之间互相排斥的性质, 在掘进工作面四周布置约束电极以形成约束电场, 从而与主发射电极的探测电场进行相互作用, 利用电场的约束作用, 有效控制电场的传播方向, 使探测电场的发射方向与发射范围控制一定范围内; 并通过改变各约束电极电流强度, 使探测电场发生偏转, 从而实现掘进面前方进行半空间探测, 对含水地质异常构造进行准确定位, 达到定方向、定距离探测的目的。如图 2 所示。

3. 实验样机功能

3.1. 发射样机

聚焦双频激电仪发射装置的实验样机已经初步研制并调试完成, 且达到了预期的设计目标:

(1) 输入 127 V 交流电, 输出五路相互隔离且幅值单路可调的调制方波电流, 波形如图 3 所示;

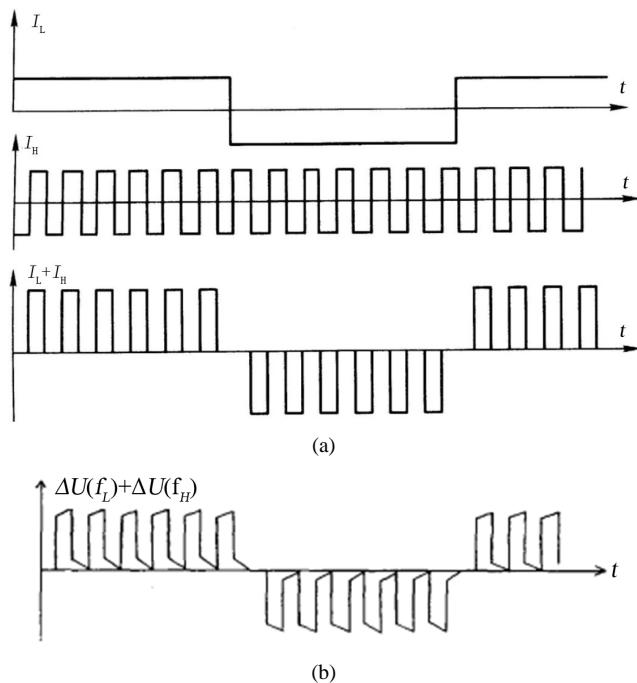


Figure 1. Dual frequency waveform: (a) Synthesis of dual frequency modulated wave current; (b) Received waveform

图 1. 双频激电波形: (a) 双频调制波电流的合成; (b) 接收波形示意图

- (2) 发射装置的显示屏可显示各路输出的电流幅值 I_i 、电压值 V_i 和接地电阻值 R_i ;
- (3) 与接收装置进行通讯, 将各路输出的电流幅值传送给接收装置;
- (4) 接受接收装置的控制信号且用该信号控制输出电流波形的频率和相位。

3.2. 接收样机

聚焦双频激电仪接收装置的实验样机已经初步研制并调试完成, 且达到了预期的设计目标:

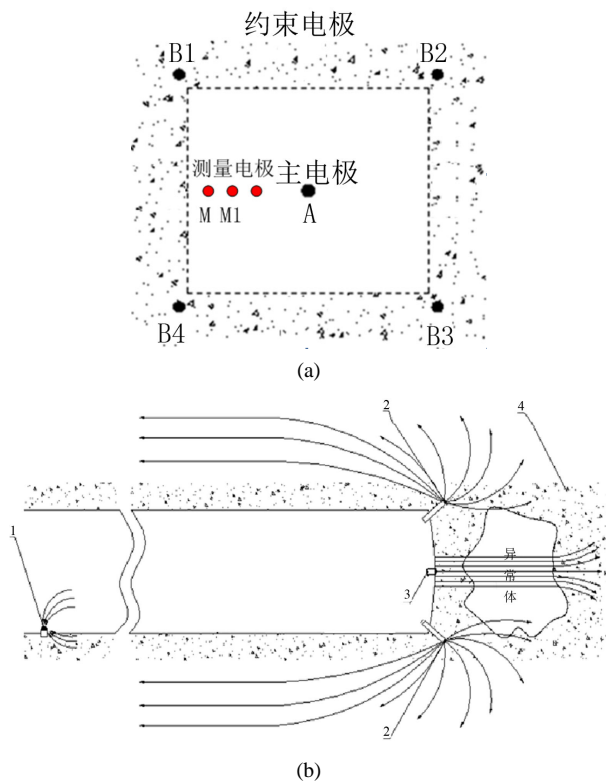


Figure 2. The focused dual frequency induced polarization method in advanced detection of coal roadway: (a) Driving surface electrode arrangement; (b) The arrangement of the electrodes in the vertical section of the tunnel and the schematic diagram of the constrained electric field; 1. Ground electrode; 2. Constrained electrode system B_i ; 3. main electrode A and measuring electrode M; 4. Surrounding rock mass media

图 2. 聚焦双频激电法超前探测方法: (a) 掘进面电极布置示意图; (b) 巷道纵切面电极布置及约束电场示意图, 1. 接地电极; 2. 约束电极系 B_i ; 3. 主电极 A 及测量电极 M; 4. 围岩介质

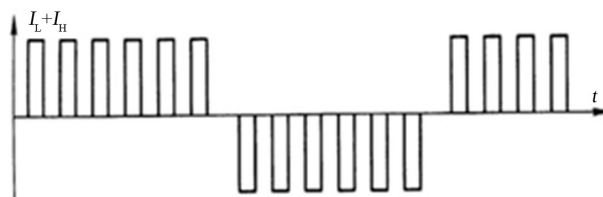


Figure 3. Schematic diagram of output current
图 3. 输出电流波形示意图

- (1) 接收的高低频电压信号频率为以下四组中的任意一组：1 Hz 与 1/13 Hz、2 Hz 与 2/13 Hz、4 Hz 与 4/13 Hz、8 Hz 与 8/13 Hz；
- (2) 提取及显示与巷道前方地质结构相关的参数：高低频电位差幅值与相位、视幅频率；
- (3) 可将数据进行存储并通过外设接口导出到移动存储设备中；
- (4) 发出控制信号控制发送机各路电流输出的波形频率和相位。

4. 实验设计

4.1. 土槽实验模型设计

参照煤矿安全规程和井下探放水技术规范 MT/T632-1996，取探水起点至积水区距离为 40 米，设巷道掘进断面尺寸宽 5 m × 高 4 m，按 1:10 比例进行设计。在平坦大地开挖一个土槽，使巷道腔体模型尺寸为 4.3 m，深为 0.8 m。含水异常体腔的尺寸为宽 1.5 m × 厚 0.5 m × 高 1.1 m，如图 4 所示。

4.2. 布极方案设计

本实验在有无异常体下，变换屏流比约束条件和测量电极位置开展实验。其中，无约束时主电极电流取 30 mA；屏流比为 1:1 时主电极和约束电极电流均为 30 mA；屏流比为 1:2 时，约束电极电流为 15 mA，主电极电流为 30 mA；屏流比为 2:1 时，约束电极电流为 30 mA，主电极电流为 15 mA。另外实验过程中频率对选择 1 Hz 和 1/13 Hz。具体方案设计如图 5 所示。

5. 数据处理及分析

5.1. 测量电极 M 在靠近主电极一侧

在不同聚焦条件下，将测量电极 M 固定在靠近电极一侧，改变 MN 距离实验，如图 6 所示。此时的聚焦方案依次为无聚焦、屏流比分别为 1:1、2:1、2:1 等四个方案；布极时，测量电极 M 固定，依次在 MN1、MN2 和 MN3 之间测量，MN 之间的距离依次为 5 cm、10 cm、15 cm。

四种聚焦方案下，PFE% 值曲线如图 7 所示，PFE% 相对增长率曲线如图 8 所示，高低频电位曲线如图 9 所示。

从图 7 不同聚焦条件下有无异常体 PFE% 对比曲线和图 8 不同聚焦条件下有异常体 PFE% 相对增长率曲线图中，可以看出四种聚焦条件下得到的数据都能反映异常。有约束比无约束的 PFE% 差别大很多，即有约束比无约束对异常体反应更加灵敏。另外，屏流比为 1:2 和 2:1 时有、无异常体的 PFE% 值随 MN 距离变动变化比较剧烈，屏流比为 1:1 时有、无异常体的 PFE% 值变化适中。

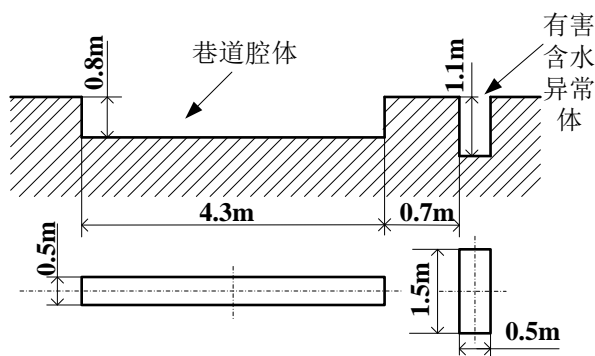


Figure 4. Experimental model of soil tank
图 4. 土槽实验模型

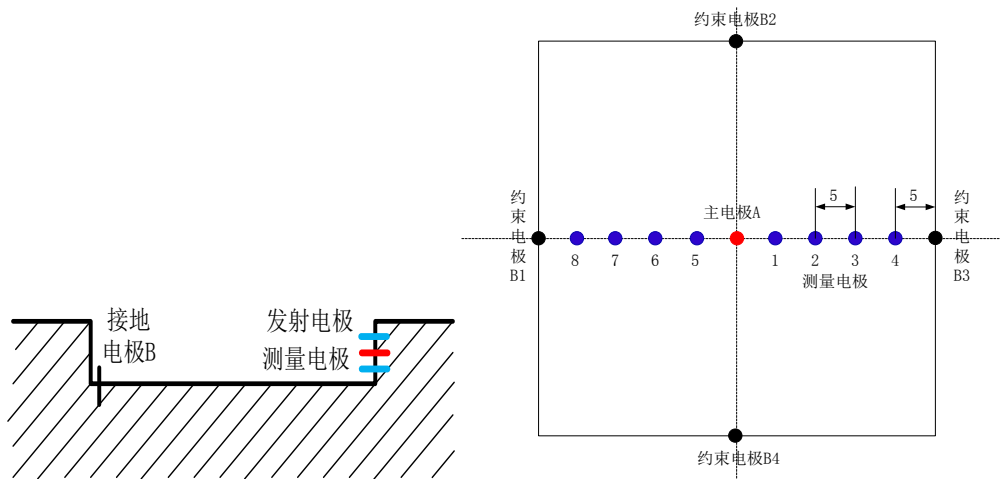


Figure 5. Layout design of electrode
图 5. 布极方案设计

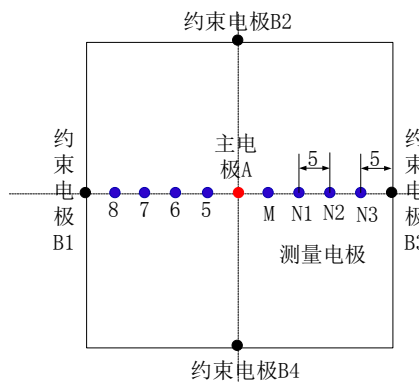


Figure 6. Measuring electrode M is at the side of the main electrode
图 6. 测量电极 M 在靠近主电极一侧布极

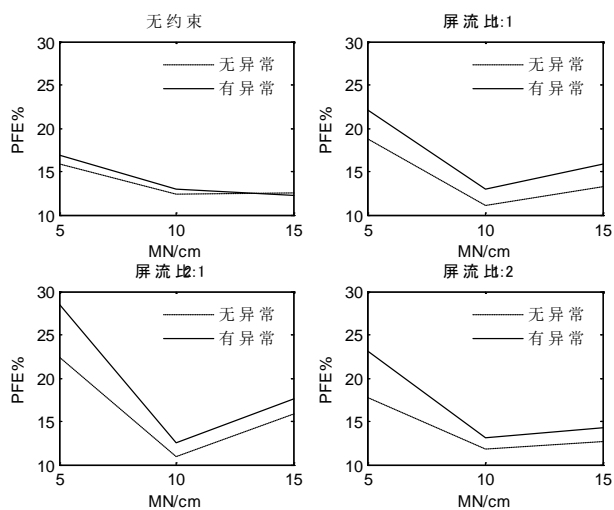


Figure 7. Comparison of PFE% with or without abnormal body under different focusing conditions
图 7. 不同聚焦条件下有无异常体 PFE%对比

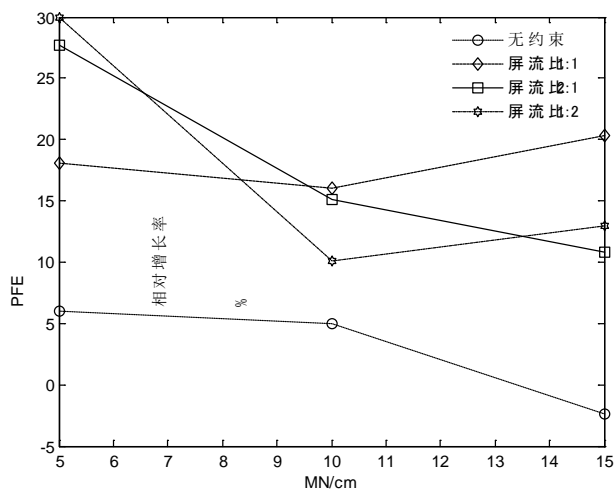


Figure 8. The relative growth rate of PFE% with abnormal body in different focusing conditions

图 8. 不同聚焦条件下有异常体 PFE% 相对增长率曲线

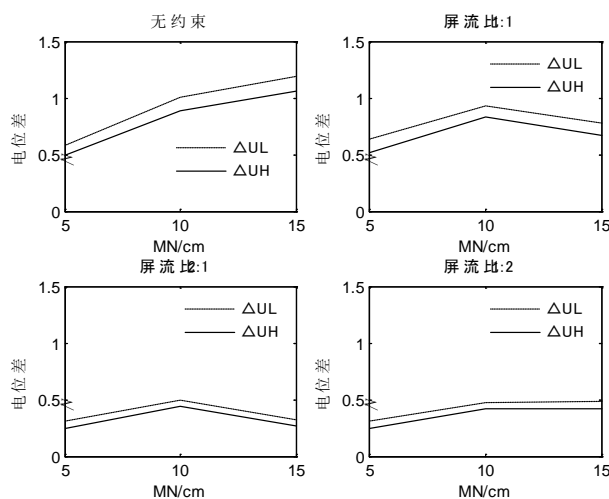


Figure 9. High and low frequency potential curves under different focusing conditions

图 9. 不同聚焦条件下高低频电位曲线

分析其原因,从图 9 可看出,无约束时电位值较大,约束为 1:1 时电位值适中,屏流比为 1:2 和 2:1 时电位值较小。根据 PFE 计算公式可知,当介质极化率一定(一定时),电位基数越大对异常反应的淹没就越大。同理,电位基数越小则误差的影响就会被放大。所以无约束时由于电位基数较大,导致 $PFE\%$ 值较小探测灵敏度较差;屏流比为 1:2 和 2:1 时电位基数较小,虽然 $PFE\%$ 值较大,但是由于误差的影响被放大故 $PFE\%$ 的稳定性很差,实际探测时容易引起误判;约束为 1:1 时电位基数适中, $PFE\%$ 较大探测灵敏度较高。

因此,从以上实验可得出:在 M 固定,依次在 MN_1 、 MN_2 和 MN_3 之间测量这种布极方式下,采用屏流比 1:1 进行探测,这种探测方式测得的灵敏度和可靠性都较高。

5.2. 测量电极 M 在远离主电极一侧

在不同聚焦条件下,将测量电极 M 固定在远离电极一侧,改变 MN 距离实验,如图 10 所示。此时

的聚焦方案依次为无聚焦、屏流比分别为 1:1、2:1、2:1 等四个方案；布极时，测量电极 M 固定，依次在 MN1、MN2 和 MN3 之间测量，MN 之间的距离依次为 5 cm、10 cm、15 cm。

四种聚焦方案下，PFE% 值曲线如图 11 所示，PFE% 相对增长率曲线如图 12 所示，高低频电位曲线如图 13 所示。

从图 11 和图 12 中可以看出这种布极方案下测得的有、无异常体的 PFE% 值出现了交叉，还会有很大的负值出现，并且有异常体时 PFE% 值随 MN 距离的变化而变化的非常激烈。

分析其原因，这是由于在这种布极方式下测的电位差较小，误差影响被放大引起的。

因此，从以上实验可得出：这种布极方法的误差太大，实际应用时非常容易引起误判，所以不建议采用这种布极方案。

5.3. 测量电极 MN 跑极

在不同聚焦条件下，将测量电极 MN 进行跑极实验，如图 14 所示。此时的聚焦方案依次为无聚焦、屏流比分别为 1:1、2:1、2:1 等四个方案；布极时，依次在 M1N1、M2N2 和 M3N3 之间测量，MN 之间的距离为 5 cm。

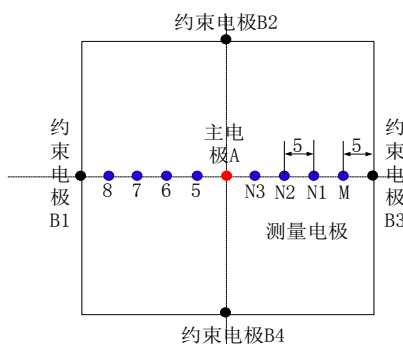


Figure 10. Measuring electrode M is far from the side of the main electrode

图 10. 测量电极 M 在远离主电极一侧布极

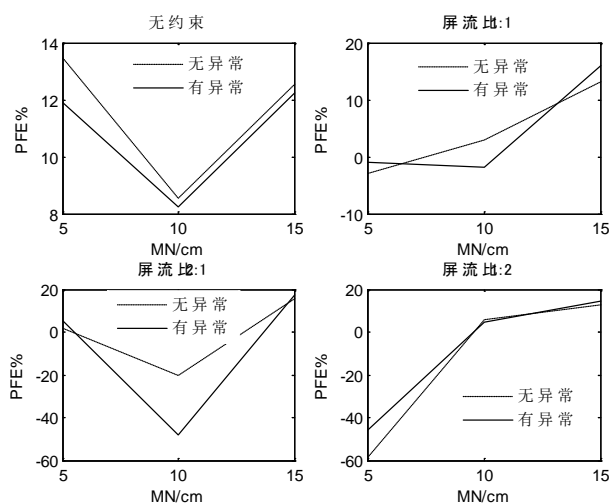


Figure 11. Comparison of PFE% with or without abnormal body under different focusing conditions

图 11. 不同聚焦条件下有无异常体 PFE% 对比

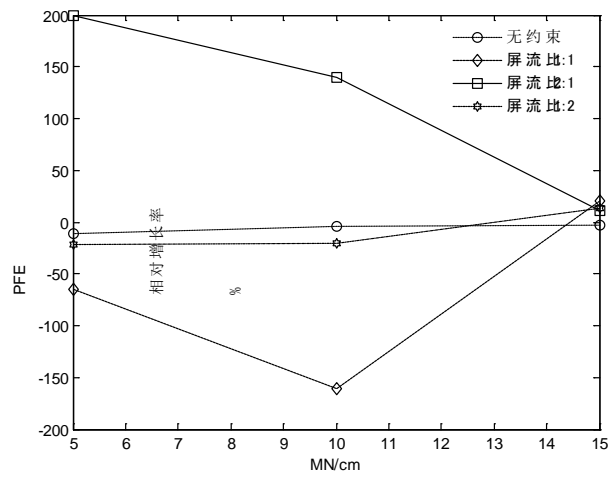


Figure 12. The relative growth rate of PFE% with abnormal body in different focusing conditions

图 12. 不同聚焦条件下有异常体 PFE% 相对增长率曲线

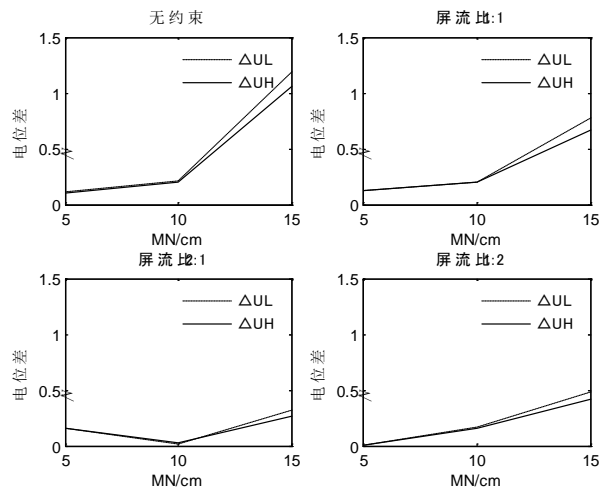


Figure 13. High and low frequency potential curves under different focusing conditions

图 13. 不同聚焦条件下高低频电位曲线

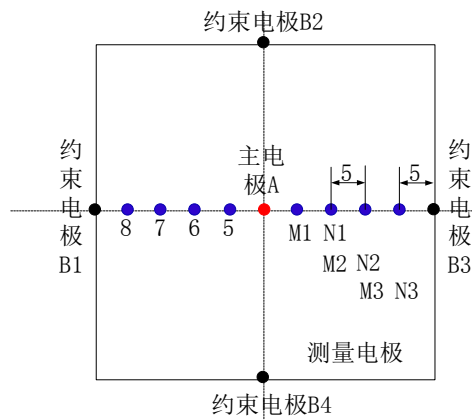


Figure 14. Measuring electrode MN as running pole

图 14. 测量电极 MN 跑极

四种聚焦方案下, PFE%值曲线如图 15 所示, PFE%相对增长率曲线如图 16 所示, 高低频电位曲线如图 17 所示。

从图 15 和图 16 可以看出这种布极方案下测得的有、无异常体的 PFE%值出现了交叉, 还会有很大的负值出现, 并且有异常体时 PFE%值随 MN 距离的变化而变化的非常激烈。

分析其原因, 这是由于在这种布极方式下测的电位差较小, 误差影响被放大引起的。

因此, 从以上实验可得出, 这种布极方法误差的影响太大, 实际应用时非常容易引起误判, 所以不建议采用这种布极方案。

6. 结论

综合分析在有、无异常体的实验条件下, 3 种布极方式, 4 种聚焦方案的实验数据, 得到对异常体灵敏度较高, 且误差干扰较低的最佳探测方案如下:

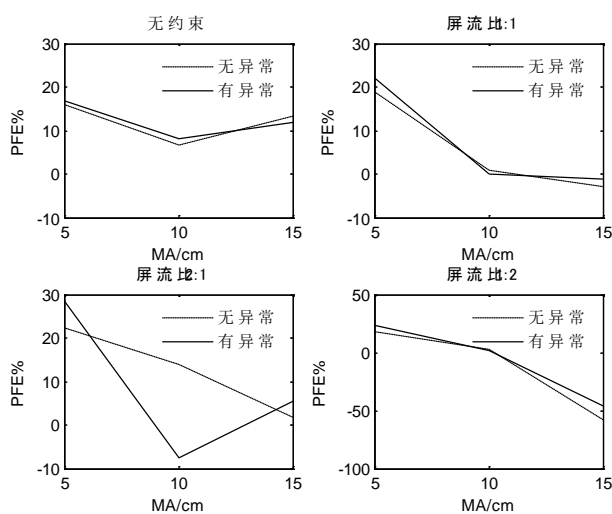


Figure 15. Comparison of PFE% with or without abnormal body under different focusing conditions

图 15. 不同聚焦条件下有无异常体 PFE%对比

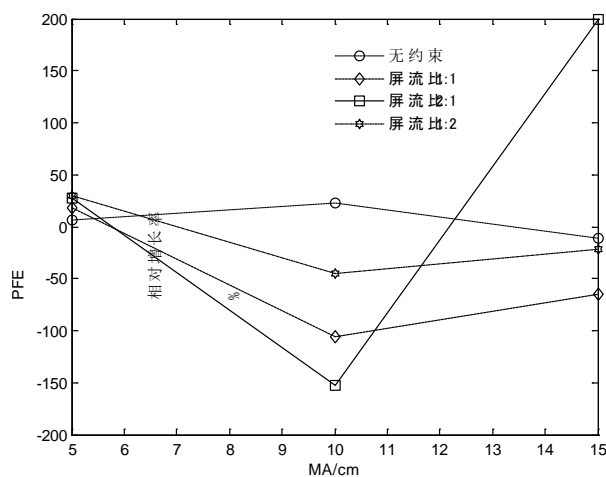


Figure 16. The relative growth rate of PFE% with abnormal body in different focusing conditions

图 16. 不同聚焦条件下有异常体 PFE%相对增长率曲线

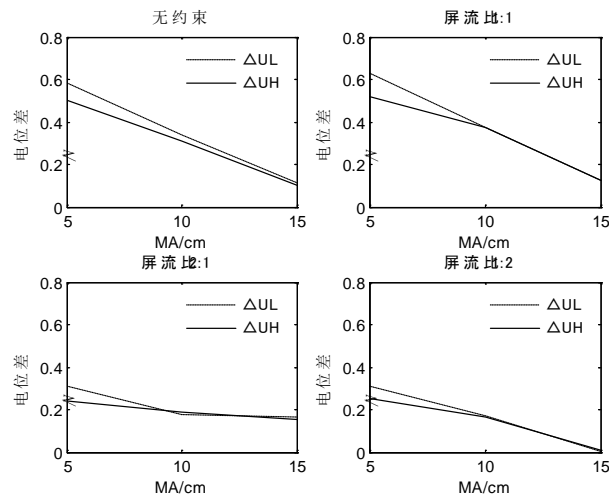


Figure 17. High and low frequency potential curves under different focusing conditions

图 17. 不同聚焦条件下高低频电位曲线

- (1) 最佳布极方案为：测量电极 M 固定在靠近主电极的一侧，通过改变 N 的位置来改变 MN 距离；
- (2) 最佳屏流比 1:1：四个约束电极的电流值与主电极取相同的电流值，这时的聚焦效果更好；
- (3) 本文给出了在室内土槽实验模型条件下的测试实验结果，可作为实际煤巷情况下测试实验的理论基础。鉴于仪器目前的条件，后续实测条件下的实验还有待研究。

基金项目

国家“十二五”863 计划重大项目(2012AA06A405)。

参考文献 (References)

- [1] 张伟杰, 郝明锐, 杜毅博, 吴淼, 等 (2010) 基于双频激电法的煤矿巷道超前探测新技术初探. *煤炭科学技术*, **3**, 73-75.
- [2] Zhang, W.J., Hao, M.R., Zhang, W.Z. and Wu, M. (2011) Study on realtime ahead detection technology for mining roadway based on double frequency induced method. *The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Hohhot, 15-17 July 2011, 722-725.
- [3] 张伟杰 (2011) 动态定向电场激励法煤巷掘进超前探测技术研究. 中国矿业大学(北京).
- [4] 张维振, 杜毅博, 张伟杰 (2012) 基于双频激电法的煤巷综掘超前探测系统研究. *中国煤炭*, **12**, 30-33.
- [5] 何继善 (2005) 双频激电法. 高等教育出版社, 北京.
- [6] 王夏杰, 李杰, 刘晓明, 等 (2014) 直流电法超前探测沙槽模拟实验. *矿产与地质*, **2**, 249-252.
- [7] 韩光, 庄德玉, 田劫, 等 (2009) 矿井直流电法超前预报球体构造的初步理论及实验研究. *煤炭工程*, **3**, 69-72.
- [8] 周丽, 阮百尧, 宁绍球, 等 (2009) 聚焦电流法隧道超前探测模型实验. *桂林工学院学报*, **1**, 40-42.