

范涛,赵兆,吴海,等. 矿井瞬变电磁多匝回线电感影响消除及曲线偏移研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 932-940. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0619

Fan Tao, Zhao Zhao, Wu Hai, et al. Research on inductance effect removing and curve offset for mine TEM with multi small loops[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 932-940. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0619

## 矿井瞬变电磁多匝回线电感影响消除及曲线偏移研究

范涛,赵兆,吴海,鲁晶津,王继矿

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司,陕西西安 710077)

**摘要:**小线框瞬变电磁近年广泛用于煤矿井下含水探测,但多匝回线自感和互感作用使早期时间道信号严重失真,小边长线框的固有过渡过程使晚期时间道信号显著抬升,均会对资料的处理解释精度带来干扰,为解决这一问题,通过分析矿井与地面瞬变电磁曲线的差异,分两步给出了消除小线框影响的方法。结合理论推导得出的多匝回线电感公式与实测电流-时间导数的关系,计算出需要消除的电感电动势,可消除早期信号中的小线框电感影响;引入曲线偏移概念,利用衰减曲线斜率与时间项指数幂项的相关性,以正演曲线为拟合目标,可在一定程度上修正晚期信号受到的线框固有过渡过程影响。通过对大量不同类型的矿井含水探测实测资料处理,结合钻探等其他实际地质信息,证明该方法可有效获取有利于精确反演解释的数据,使矿井瞬变电磁数据处理不再需要引入经验参数。

**关键词:**矿井瞬变电磁;线圈电感;曲线偏移;正演拟合;煤矿水害

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2014)05-0932-09

### Research on inductance effect removing and curve offset for mine TEM with multi small loops

FAN Tao, ZHAO Zhao, WU Hai, LU Jing-jin, WANG Ji-kuang

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Small loops TEM method is widely used for water detection in underground coal mine in the past few years. However, the self and mutual inductance effect of multi-loops distorts the early time channel very badly, and the instinct transition area of small side-length loop upraises the signal of late time channel, both of which will disturb the accuracy of data processing and interpretation. In order to solve those problems, two steps were given to eliminate the effect of small loops by analyzing the difference between underground mine TEM curves and ground TEM curves. Combining the relationship between inductance formula of multi-loops by analytical derivation and derivative of current-time by actual measurement, the effect of small loop on early signals was removed by calculating the inductance electrodynamic potential that should be eliminated. Introducing the definition of curve offset, utilizing the relativity between the slope of attenuation curve and the exponent term of time, taking forward modeling curve as the fitting target, the influence of loop's instinct transition area on late signal was corrected in a certain extent. By processing of a large amount of practical data from different types of mine water detection and comparing with other actual geology information from drilling exploration, the method is proved to be effective for achieving good data for accurate inversion and interpretation. It permits no more introducing of experimental parameters into the processing of mine TEM data.

收稿日期:2013-05-09 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41104087);“十二五”国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-002);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B04)

作者简介:范涛(1983—),男,陕西安康人,助理研究员。Tel:029-81778063, E-mail: fantao4444@163.com

**Key words:** mine TEM; loop inductance; curve offset; forward modeling; coal mine water

煤矿水害事故是仅次于瓦斯爆炸的煤矿重大灾害,在煤矿重、特大事故中所占比例较大,已经成为制约煤矿安全生产的重大隐患,提高煤矿水害探测技术解释水平显得尤为迫切。

近年来,小线框瞬变电磁方法被广泛应用于井下寻找采空区、巷道掘进工作面的连续跟踪超前探测、探测煤层水、防治煤层水等方面,对保障煤矿安全、减少煤矿水害事故发挥了积极作用<sup>[1]</sup>。

由于井下特殊的工作环境,为达到一定的探测深度,发射和接收装置常使用多匝线圈<sup>[2]</sup>。而线圈匝数的增加,也使得线圈的自感及相互间的互感对早期数据的影响增大、关断时间增加,早期的数据发生畸变,不能加以利用。如何减小线圈电感的影响,从而提取早期数据,已逐渐引起许多物探工作者的兴趣。

关于线圈的电感系数计算,已经有人在这方面做出了大量工作,大多针对的是单匝线圈的自感系数计算,如 1986 年苏联卡兰塔罗夫等编写的《电感计算手册》中,以简化公式、图表以及数据表的形式给出了单匝矩形线圈自感的表达式<sup>[3]</sup>,薛国强等也分别以近似公式计算了单匝矩形线圈自感<sup>[4-6]</sup>,Christian Harlander 等均采用有限元方法研究了单匝矩形线圈自感的数值解<sup>[7-10]</sup>,李文尧推导了单匝矩形线圈自感的精确表达式<sup>[11]</sup>;除此以外,杨海燕等在多匝矩形回线的自感和互感系数方面做了大量研究工作,给出了实际工作中多匝线圈电感系数的近似公式<sup>[12]</sup>。

但对于如何从矿井瞬变电磁中心回线装置观测数据中消除多匝小线圈带来的影响,目前还鲜有人做深入研究,这使计算得到的电感系数没有为实际矿井水害安全预防工作发挥真正的作用。笔者从消除多匝回线电感影响出发,通过偏移消除小边长影响,最终实现矿井瞬变电磁曲线的正常化,为后续反演解释工作提供合适的二次场数据。

## 1 方法原理

### 1.1 矿井瞬变电磁中心回线装置曲线特征

地面大线框瞬变电磁中心回线装置是一种野外工作的常用装置,其观测得到的二次场衰减曲线特征较为简单,便于分析。如式(1),曲线晚期响应与  $t^{5/2}$  成正比,即

$$E = \frac{\mu_0^{5/2} M q}{5(4\pi)^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{3}{2}} t^{\frac{5}{2}}} \quad (1)$$

式中,  $E$  为感应电动势;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $M$  为发送线圈磁矩;  $q$  为接收线圈磁矩;  $\rho$  为地层电阻率;  $t$  为观

测时间<sup>[13-14]</sup>。

假设地下介质电性均匀,则在双对数坐标上衰减曲线呈  $68.2^\circ$  直线下下降(图 1)(该角度根据标准单位情况下数据正切值确定)。实际工作中,尽管地下介质电性并不均匀,但衰减曲线整体下降角度仍呈  $68.2^\circ$ ,仅在局部有微小变化,如图 2(a)所示,图中曲线工作参数为:发射边长 120 m,接收面积 100 m<sup>2</sup>,发射频率 8.33 Hz,发射电流约为 10 A。

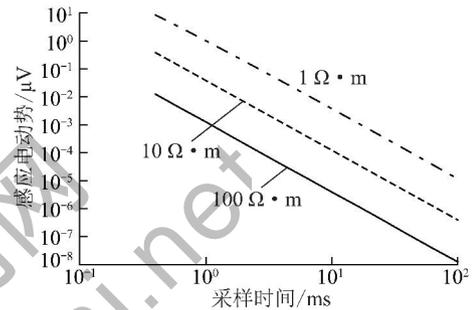
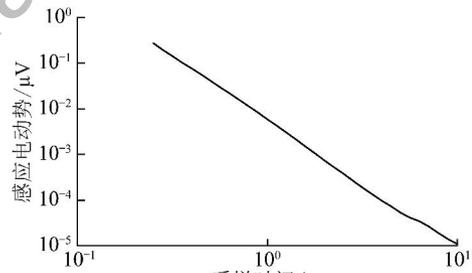
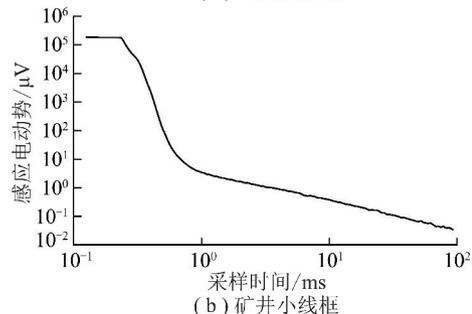


图 1 均匀半空间 TEM 正演衰减曲线

Fig. 1 Uniform half-space TEM forward attenuation curves



(a) 地面大线框



(b) 矿井小线框

图 2 实测地面大线框和矿井小线框 TEM 衰减曲线

Fig. 2 Measured TEM attenuation curves with ground large loop and mine small loop

矿井小线框瞬变电磁中心回线装置观测得到的二次场衰减曲线与地面地面大线框瞬变电磁中心回线装置的差异较大,由于线圈边长小,匝数多,在回线的中心,关断时间内的回线中心电感电动势必然相比相同面积的单匝回线要强,这使早期信号幅值明显增强;另外,多匝小回线中心的电感电动势和多匝小回

线的电感电容均较大,所以其暂态过渡过程影响时间长,或全程都受过渡过程影响,这两者相结合,共同造成晚期信号的抬升。以边长 2 m 的 10 匝线框为例,经大量实测数据统计曲线斜率约为 -1,即矿井瞬变电磁中心回线装置衰减曲线晚期段约呈 45° 直线下降(图 2(b))。

由矿井与地面瞬变电磁中心回线装置曲线特征可知,想要对矿井瞬变电磁数据进行如地面数据相同的圆滑滤波、去干扰、全期视电阻率计算、反演等处理步骤并取得合理的结果,必须消除多匝小回线装置对观测信号的影响。

### 1.2 早期数据多匝回线电感影响消除办法

对关断时间内的电感影响和线圈固有过渡过程带来的影响同时进行校正存在较大难度,故可将这两个过程分别处理,在早期段不处理线圈过渡过程带来的影响,仅消除关断时间内由电感造成的影响,下一步再统一消除暂态影响。

设单匝圆形回线半径为  $r$ ,导线半径为  $a$ ,回线中通以电流  $I$ ,由圆回线的轴对称性选用圆柱坐标系,坐标原点位于线圈中心  $O$ , $z$  轴与线圈轴线重合(图 3(a))。

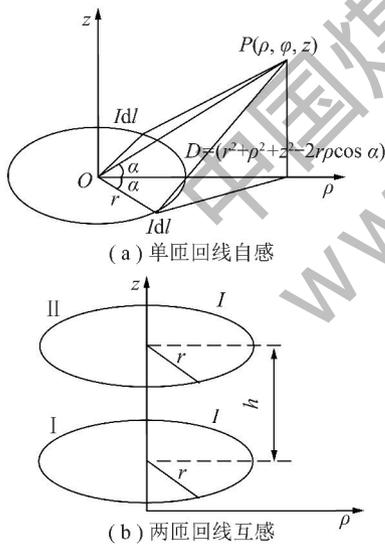


图 3 单匝回线和两匝回线自感计算模型

Fig. 3 Self-inductance calculation model with single-turn loop and two-turn loop

整个圆回线在点  $P$  处产生的磁位为

$$A_p = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{r \cos \alpha d\alpha}{\sqrt{r^2 + \rho^2 + z^2 - 2r\rho \cos \alpha}} e_\varphi$$

式中,  $e_\varphi$  表示在柱坐标系下  $\varphi$  方向的单位向量。

从而穿过由闭合内边线所围面积中的磁通为

$$\Phi = \int_0^{2\pi} A_p(r-a) d\varphi =$$

$$\frac{2\mu_0 I}{k} \sqrt{r(r-a)} \left[ \left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right]$$

式中,  $k = \frac{\sqrt{4r(r-a)}}{\sqrt{(2r-a)^2}} \approx \sqrt{1 - \frac{a^2}{4r^2}}$ ;  $K(k)$  为第 1 类完全椭圆积分;  $E(k)$  为第 2 类完全椭圆积分。

则圆回线的外自感为

$$L_w = \frac{2\mu_0}{k} \sqrt{r(r-a)} \left[ \left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right]$$

由于  $r \gg a$ , 因此可取  $k \approx 1$ , 此时圆回线的外自感可近似为

$$L_w = \mu_0 r \left( \ln \frac{8r}{a} - 2 \right)$$

而圆回线的内自感为

$$L_n = \frac{\mu_0 r}{4}$$

故单匝圆形回线的自感为

$$L = L_w + L_n = \mu_0 r \left( \ln \frac{8r}{a} - 1.75 \right) \quad (2)$$

2 个半径均为  $r$  的圆形平行回线, 间距为  $h$  (图 3(b)), 可得线圈 II 中任意点处的磁位为

$$A_{IIp} = \frac{\mu_0 I}{\pi k'} \left[ \left(1 - \frac{1}{2}k'^2\right) K(k') - E(k') \right] e_\varphi$$

因此两匝回线的互感系数为

$$M = \frac{2\mu_0 r}{k'} \left[ \left(1 - \frac{1}{2}k'^2\right) K(k') - E(k') \right]$$

式中,  $k' = \frac{\sqrt{4r^2}}{\sqrt{4r^2 + h^2}}$ , 当  $h \rightarrow 0$  时,  $k' \approx 1$ , 此时两匝回线的互感系数可近似为

$$M = \mu_0 r \left( \ln \frac{8r}{a} - 2 \right) \quad (3)$$

多匝圆回线由多个单匝圆回线串联而成, 由于各匝回线的形状、大小均相同, 因而每匝回线的自感系数及任意两匝回线间的互感系数都应相等, 则多匝圆回线的电感系数为

$$\tilde{L} = nL + n(n-1)M =$$

$$n\mu_0 r \left[ n \ln \frac{8r}{a} - (2n - 1.25) \right] \quad (4)$$

式中,  $n$  为回线匝数。

实际工作中大多采用方形回线, 边长为  $b$  的方形回线, 与其等磁矩的圆回线的半径  $r = b/\sqrt{\pi}$ , 将其代入式(2)~(4)中, 可得单匝方形回线的自感、两匝方形回线互感和  $n$  匝方形回线的电感系数分别为

$$L' = \frac{\mu_0 b}{\sqrt{\pi}} \left( \ln \frac{8b}{a\sqrt{\pi}} - 1.75 \right) \quad (5)$$

$$M' = \frac{\mu_0 b}{\sqrt{\pi}} \left( \ln \frac{8b}{a\sqrt{\pi}} - 2 \right) \quad (6)$$

$$\tilde{L}' = \frac{n\mu_0 b}{\sqrt{\pi}} \left[ n \ln \frac{8b}{a\sqrt{\pi}} - (2n - 1.25) \right] \quad (7)$$

由多匝方形回线自感和互感影响产生的感应电动势为

$$\tilde{E}' = d\Phi/dt = SdB/dt$$

式中,  $S$  为导线截面积;  $B$  为磁场强度。

对于固定的线圈, 磁场强度  $B$  正比于电流  $I$ , 设比例系数为  $c$ , 则  $dB = cdI$ , 可得

$$\tilde{E}' = ScdI/dt$$

而多匝方形回线的电感系数又可写为

$$\tilde{L}' = Sc$$

故由多匝方形回线电感产生的感应电动势最终可写为

$$\tilde{E}' = \tilde{L}' dI/dt \quad (8)$$

图 4 即为一个实测数据根据式(8)计算得到的结果, 工作方式使用磁探头的中心回线方式, 工作装置为  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 10$  匝发射线圈, 导线截面  $6\text{ mm}^2$ , 发射电流  $2\text{ A}$ , 可以看到在  $0.6\text{ ms}$  之前的曲线有明显变化,  $0.6\text{ ms}$  之后的数据随发射电流归零, 该时间点与实测矿井小线框 TEM 衰减曲线上的早晚期转折点相对应, 认为该点之后的实测数据受到的电感影响可以忽略, 不需要做校正。

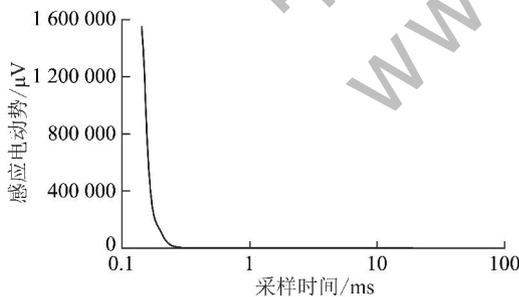


图 4 电感产生的感应电动势影响

Fig. 4 Effect of the induction electromotive force from inductance

因此, 进一步从该时间点之前的实测矿井瞬变电磁二次场  $E$  中减去该影响可得消除多匝方形回线电感影响的新感应电动势为

$$E_T = E - \tilde{E}' \quad (9)$$

此时衰减曲线早期与晚期的斜率方能达到基本一致, 许多地面瞬变电磁常用的 3 点圆滑、中值滤波等曲线预处理手段才能正常应用, 取得较好的剔除干扰效果。

### 1.3 消除小线框影响的曲线偏移方法

瞬变电磁探测中, 同一测点小发射回线采集的二次场数据比大发射回线衰减慢, 这是因为随着发射回线边长的减小, 装置的固有过渡过程对实测曲线的影响将越来越大, 造成曲线晚期段抬升, 图 5 一定程度上说明了这一现象。

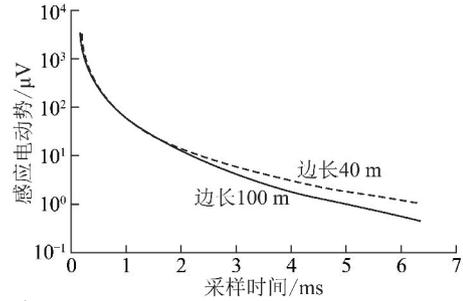


图 5 不同边长线圈衰减曲线对比

Fig. 5 Attenuation curves comparison with different side length of loop

矿井小线框瞬变电磁观测曲线受到这种影响更加明显, 如图 6 所示, 即使消除了早期数据中的电感影响, 曲线幅值仍有整体抬升, 整体斜率与瞬变电磁理论曲线斜率相差甚远, 这就是线圈暂态过程带来的影响, 会使全期视电阻率计算、反演等方法的处理结果明显不对, 不利于资料精细解释。

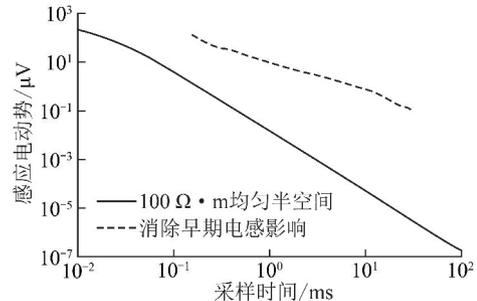


图 6 消除电感影响后矿井 TEM 衰减曲线与正演曲线对比

Fig. 6 Comparison of the mine TEM attenuation curve with inductance effect removing and forward curve

地面大线框瞬变电磁处理工作中, 针对这一问题常规的校正方法是用层状介质一维正演拟合的方法进行消除该种影响。如果在物性参数未知的地区, 在正常场区域, 用平均电阻率模型进行正演计算, 拟合实测值。

矿井线框瞬变电磁工作同样可以引入这一思想。如 1.1 节所说, 瞬变电磁正演理论曲线在双对数坐标上均呈  $68.2^\circ$  直线下降, 其斜率为  $-2.5$ , 与式(1)中  $t^{5/2}$  成反比。

因此, 欲校正矿井瞬变电磁曲线, 只需在不改变曲线上不同测道数据相对比例关系的前提下, 将曲线

角度向理论曲线角度偏转拟合即可。

以边长 2 m 的 10 匝线框为例,经大量实测数据统计,消除早期数据中的电感影响后,根据标准单位情况下数据正切值可确定曲线斜率约为-1,衰减曲线约呈 45° 直线下降。由于曲线斜率实际上是与  $t$  的指数幂项相关,这意味着 2 m 线框的矿井瞬变电磁二次场曲线实际是与  $t^{-1}$  成正比,即对按 1.2 节方法处理后的数据,进一步除以偏移因子  $t^{3/2}$  即可将曲线与理论曲线拟合。实际工作中,不同的工作装置观测得到的曲线斜率仍会有细微差别,偏移因子需要做一定的微调,可按如下步骤进行拟合:

(1) 给定一个较小的步长  $\nabla t$ ,按照下式计算偏移后的感应电动势,有

$$E_U = E_T/t^{(U_n-\nabla t)} \quad (10)$$

式中,  $U$  的下标  $n$  表示迭代次数,令  $U_1 = 5/2$ 。

(2) 计算理论电动势  $E_L$  与  $E_U$  的拟合差。

(3) 判断该差是否小于事先给定的一个很小的数  $\varepsilon_0$ ,如小于,可认为拟合成功,否则,令  $U_n = U_{n-1} - \nabla t$ ,重复步骤(1)~(3),直到拟合差满足要求为止。

此时,曲线形态恢复为不受矿井多匝小线圈装置影响的常规形态,地面瞬变电磁已开始成熟应用的一些精细处理解释方法均可正常应用,如全期视电阻率二分搜索算法,拟大地电磁(MT)深度反演算法<sup>[15]</sup>等。

## 2 校正效果演示

因为目前的正演程序均没有引入线圈自感和互感的影响,也不考虑装置自耦合效应与固有过渡过程,所以无法给出理论模型正演数据来验证本文提出的校正方法,下面将以物理模拟为例来说明校正方法的效果。

物理模型如图 7 所示,铜棒长度  $L$  为 0.1 m,直径  $R$  为 0.03 m,距离水面的距离  $D$  为 0.13 m,具体工作参数为:观测装置类型,中心回线装置;采样率为 250 kHz;激发频率为 25 Hz;叠加次数为 500 次;发射回线参数为 0.4 m×0.4 m×10 匝;接收面积为 0.9 m<sup>2</sup>;发射电流为 2.2 A;观测道数为 100 道。

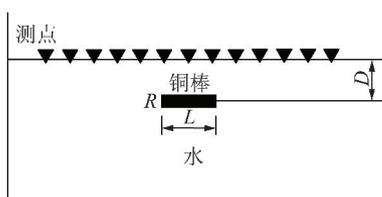


图 7 横型示意

Fig. 7 Schematic diagram of the model

本次工作,因探测目标及环境电阻率均较小,拟

合目标选择电阻率值为  $5 \Omega \cdot m$  的均匀半空间正演曲线。如图 8 所示,消除电感影响后曲线,其下降斜率与正演曲线显然有较大差异,如直接利用其进行全期视电阻率计算或反演等处理必然会得到错误的结果;偏移校正的曲线基本与正演曲线重合,下降斜率基本一致,这为后续精细处理解释打下了良好基础。

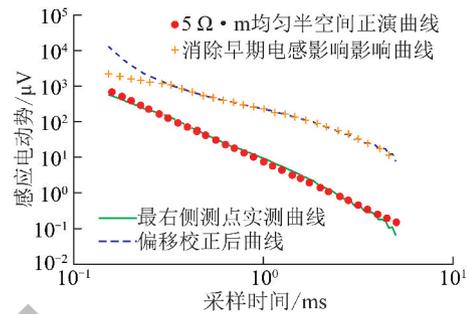


图 8 校正效果

Fig. 8 Correction effect

图 9 为原始曲线计算的视深度-晚期视电阻率结果与用本文方法处理后曲线计算的视深度-全期视电阻率结果对比。从图中可以看出:图 9(b) 的低阻异常中心圈与埋深  $D$ 、铜棒长度  $L$  和直径  $R$  均对应较好,形状也较规整;图 9(a) 的低阻异常中心圈也能反映出铜棒的影响,但均存在较图 9(b) 更大的误差;其次,图 9(a) 低阻异常两侧的高阻环境上下没有连通,这可能会带来错误的理解。综合来看,校正后的解释结果与模型吻合度更高。

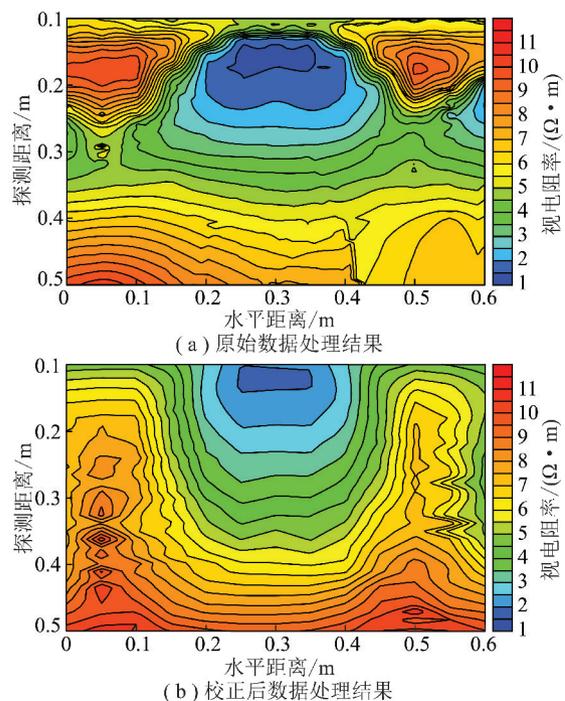


图 9 物理模拟 TEM 测线处理结果对比

Fig. 9 Comparison chart of TEM line's results

### 3 实际应用

#### 3.1 超前水害探测

在煤矿巷道掘进过程中,工作面前方水害是影响安全生产的主要问题。

山西 A 煤矿在巷道掘进过程中,发生了工作面左侧少量出水的情况,为搞清楚该工作面前方的含水情况,开展了矿井瞬变电磁超前探测工作,并结合处理解释结果进行了打钻验证。

根据了解到的水文地质情况,结合矿井瞬变电磁特点,选择以下工作参数进行超前探测:观测装置类型为中心回线装置;采样率为 500 kHz;激发频率为 25 Hz;叠加次数为 500;发射回线参数为  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 10$  匝;接收面积为  $450\text{ m}^2$ ;发射电流为 2 A;观测道数为 40 道。

图 10(a)为本次工作最右侧 1 号测点曲线按照本文方法处理的结果,从图 10(a)可以看到偏移后曲线早期与正演曲线基本拟合,晚期明显衰减较快,可以推测该测点前方较远处可能出现高阻反应。

图 11 为本次超前探测工作原始曲线计算得到的视深度-晚期视电阻率结果与用本文方法处理后曲线计算得到的视深度-全期视电阻率结果对比。图中黑色箭头为根据物探结果施工的 4 个钻孔,其中 1 号钻孔长 71 m,出水量为  $24\text{ m}^3/\text{d}$ ;2 号钻孔长 53 m,出水量为  $12\text{ m}^3/\text{d}$ ;3 号钻孔长 40 m,出水量为  $528\text{ m}^3/\text{d}$ ;4 号钻孔长 30 m,出水量为  $384\text{ m}^3/\text{d}$ 。

首先,由于引入全空间经验系数(该系数实际工作中不可能给的绝对准确),图 11(a)计算出的视电阻率值整体高于图 11(b),超前探测距离也大于图 11(b),而图 11(b)由于曲线与地面常规大线框瞬变电磁曲线一致,所以计算出的全期视电阻率与视深度不需要靠系数调节,为精确值。

其次,图 11 反映出了相似的异常特征,工作面前方左侧电阻率较低(与实际工作面左侧出水情况相符),右侧电阻率较高(与图 10 推测相符),主要低阻异常集中在工作面正前方。但图 11(a)浅部存在一个半环状高阻条带,而探测区域主体应还是同一层煤,很难解释这一高阻反映,图 11(b)则整体视电阻率变化均匀,与理论符合较好。

进一步与钻探结果相印证可知,图 11(b)工作面正前方的低阻异常随距离减弱,完全吻合较远的 1,2 号钻出水量少、较近的 3,4 号钻出水量多的情况,图 11(a)工作面前方较远处仍有很强的低阻异常,与 1,2 号钻结果吻合情况较差。

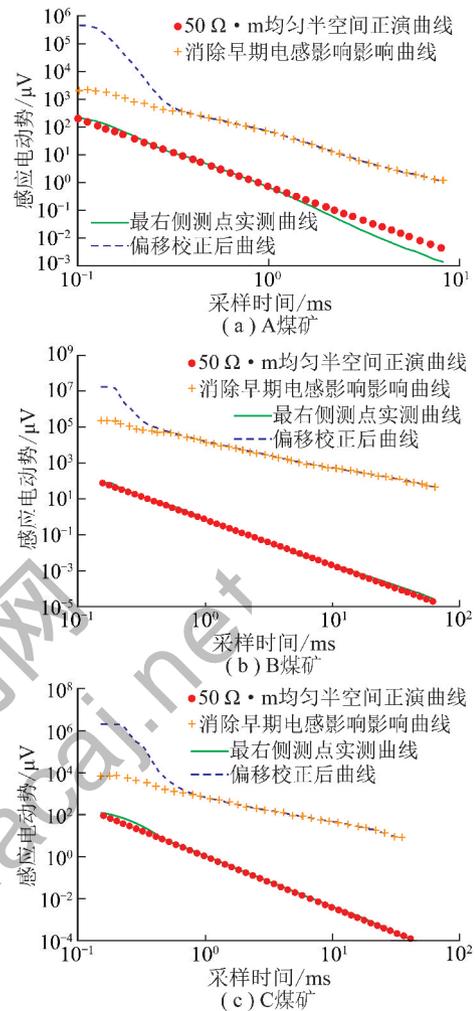


图 10 单点曲线处理结果

Fig. 10 Processing results with single point curves

#### 3.2 底板水害探测

在煤矿开采过程中,底板水害,尤其是底板灰岩突水,同样是影响安全生产的重要问题。

河南 B 煤矿与全国闻名的大水矿区中的特大水矿井为邻,煤系上覆冲积砂砾层孔隙水,下伏厚约 800 m 喀斯特灰岩,矿区构造以断裂为主,地下水丰富,水文地质条件十分复杂,为搞清楚工作巷道底板的含水情况,开展了矿井瞬变电磁探测工作。

根据了解到的水文地质情况,结合矿井瞬变电磁特点,选择以下工作参数进行底板探测(施工区域内铺设沿测线延伸的铁轨):观测装置类型为中心回线装置;采样率为 250 K;激发频率为 2.5 Hz;叠加次数为 500 次;发射回线参数为  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 10$  匝;接收面积为  $450\text{ m}^2$ ;发射电流为 2 A;观测道数为 100 道。

图 10(b)为本次工作最左侧 1 号测点曲线进行本文方法处理的结果,从图 10(b)可以看到偏移后曲线与正演曲线拟合很好,仅局部有微小差异,反映了介质的不均一性。

图 12 为本次底板探测工作原始曲线计算得到的视深度-晚期视电阻率结果与用本文方法处理后曲

线计算得到的拟大地电磁 (MT) 深度反演结果<sup>[15]</sup>对比。图中黑色虚线为根据地面三维地震结果圈出的

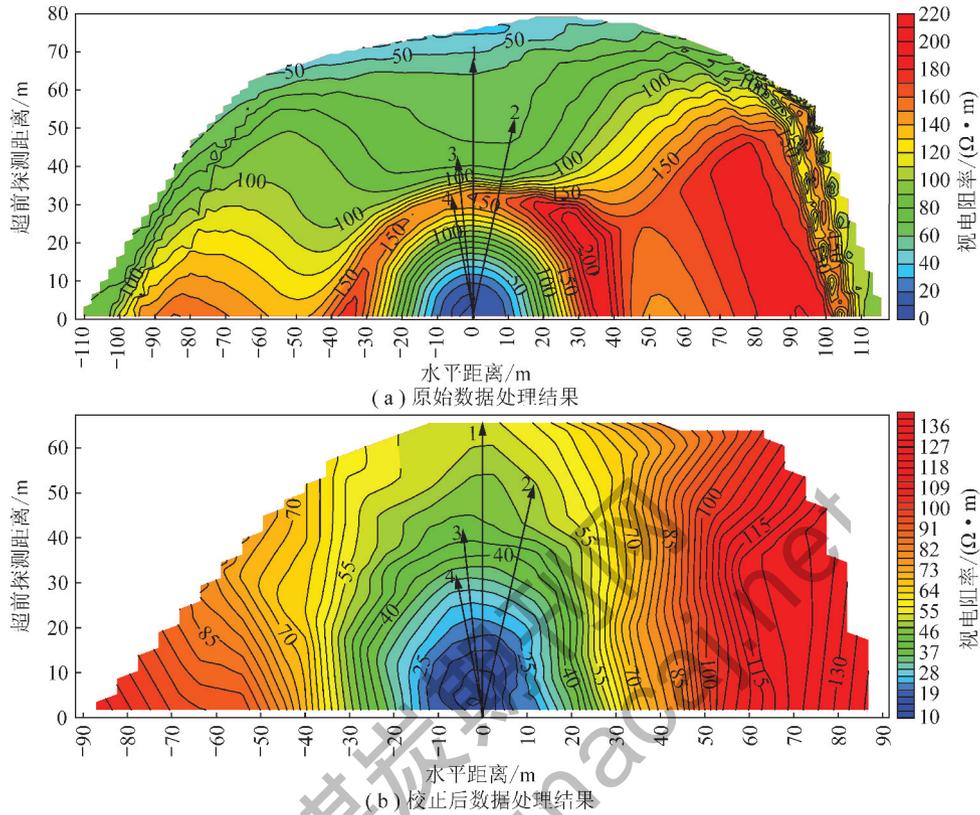


图 11 山西 A 煤矿矿井 TEM 测线处理结果对比

Fig. 11 Comparison of TEM line's results in A Mine

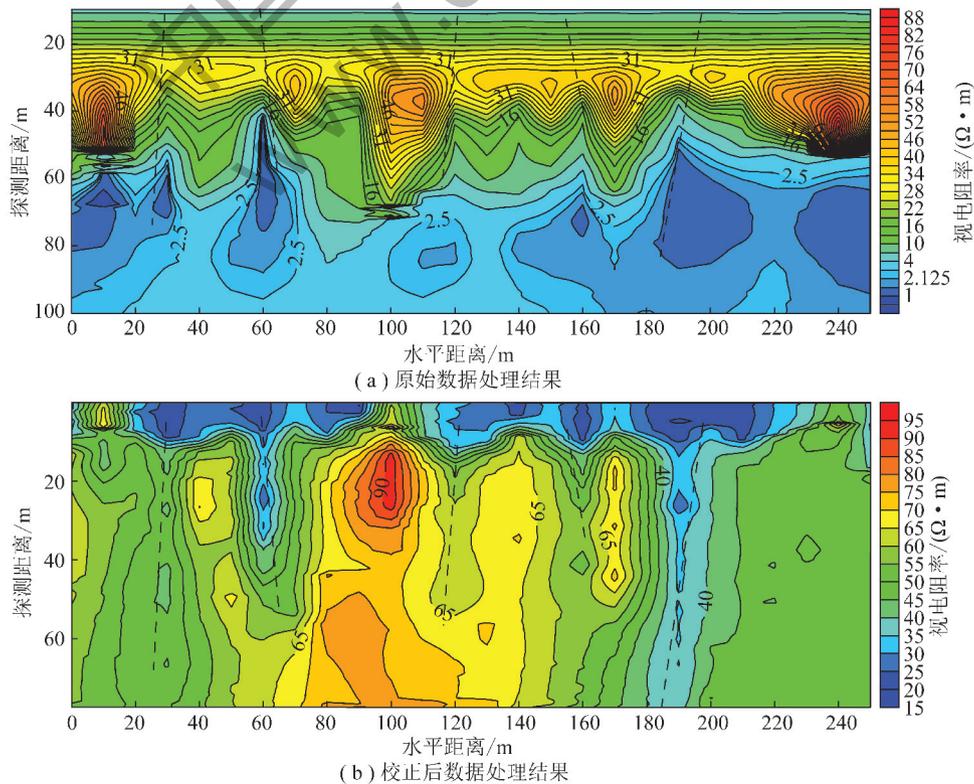


图 12 河南 B 煤矿矿井 TEM 测线处理结果对比

Fig. 12 Comparison chart of TEM line's results in B Mine

小断层。

首先,由于引入全空间经验系数的误差,图12(a)计算出的视电阻率值整体低于图12(b),探测距离也大于图12(b),而图12(b)由于曲线与地面常规大线框瞬变电磁曲线一致,所以反演出的电阻率与深度为精确值。

其次,两幅图上反映出了相似的异常特征,在断层所在位置均有电阻率等值线的扭曲异常出现,但图12(a)浅部存在的高阻条带,与已知地层信息不符,并且深部为连成一整片的低阻,分辨率很低;图12(b)在断层位置均有对应的条带状低阻异常反应,浅部有一层低阻反应,与测线整体受铁轨影响也能对应。

进一步与施工时看到的已知情况相印证可知,30 m位置有一放水孔,水压为3.7 MPa,图12(b)的第1条低阻条带能与之吻合。

### 3.3 工作面内部水害探测

在煤矿工作面采煤活动中,工作面内部的水害更是影响安全生产的一个重大问题。

内蒙古C煤矿在216上01工作面形成后,因工

作面内部有落差大于13 m的较大断层经过,为探明内部水害构造,进行了音频电透视工作,并根据划出的低阻异常布置了钻孔,但许多辅运巷道的钻孔并未见出水,针对这一结果,由工作面两侧的辅运巷道和回风巷道分别对工作面内部开展了矿井瞬变电磁探测工作。

根据了解到的水文地质情况,结合矿井瞬变电磁特点,选择以下工作参数进行超前探测:观测装置类型为中心回线装置;采样率为250 K;激发频率为6.25 Hz;叠加次数为500次;发射回线参数为2 m×2 m×10匝;接收面积为450 m<sup>2</sup>;发射电流为2 A;观测道数为100道。

图10(c)为本次工作下部辅运巷左侧4号测点曲线进行本文方法处理的结果,从图10(c)可以看到偏移后曲线与正演曲线基本拟合,仅在早期和晚期有两处出现曲线抬升,可以推测该测点前方可能出现两处低阻反应。

图13为本次超前探测工作原始曲线计算得到的视深度-晚期视电阻率结果与用本文方法处理后曲线计算得到的视深度-全期视电阻率结果对比。

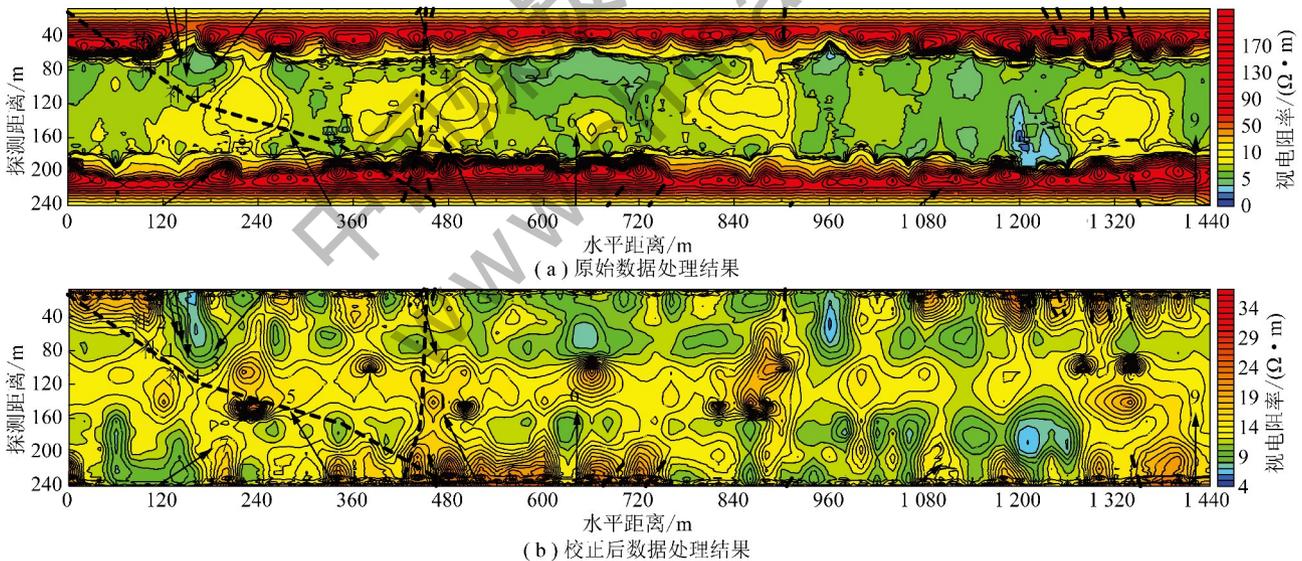


图13 内蒙古C煤矿矿井TEM测线处理结果对比

Fig. 13 Comparison chart of TEM line's results in C Mine

图13中虚线为断层,黑色箭头为钻孔:1号钻孔孔深130.5 m,垂直深度65.25 m,无水;2号钻孔孔深88 m,垂直深度44 m,无水;3号钻孔孔深90 m,垂直深度45 m,涌水量14.4 m<sup>3</sup>/d,水压0.12 MPa;4号钻孔孔深130 m,垂直深度65 m,涌水量108 m<sup>3</sup>/d;5号钻孔孔深130 m,垂直深度65 m,无水;6号钻孔孔深130 m,垂直深度65 m,涌水量36 m<sup>3</sup>/d;7号钻孔孔深90 m,垂直深度45 m,无水;9号钻孔孔深130 m,垂直深度44.5 m,无水;补1号钻孔从50 m

开始出水,出水量渐大,成孔后涌水量864 m<sup>3</sup>/d;补2号钻孔从33 m出水,至52 m水量最大至518.4 m<sup>3</sup>/d;补4号钻孔51 m处水量增大至273.6 m<sup>3</sup>/d,66 m处增至864 m<sup>3</sup>/d,成孔后涌水量1296 m<sup>3</sup>/d。

首先,由于引入全空间经验系数的误差,图13(a)计算出的视电阻率值整体高于图13(b),而图13(b)由于曲线与地面常规大线框瞬变电磁曲线一致,所以计算出的全期视电阻率与视深度为精确值。

其次,图13反映出了相似的电阻率分布特征,但

图 13(a) 两侧靠近巷道处均存在高阻条带, 几乎无法分析浅部的异常, 带来了两侧各 40 m 以上的解释盲区, 图 13(b) 则浅部与深部视电阻率分布合理清晰, 有利于精细解释。

图 13(b) 中对应断层位置均有视电阻率曲线扭曲, 吻合较好; 进一步与钻探结果相印证可知, 大量没有打出水的钻孔均对应在上部高阻区域, 符合实际情况, 3, 4, 6 号钻孔出水量较少, 均对应幅值较弱、范围较小的低阻异常或异常边界, 补 1, 2, 4 号钻孔水量较大, 都对应上部回风巷 100 ~ 180 m 位置的强低阻异常。总体来看, 处理结果与实际吻合较好; 图 13(a) 部分区域与钻探结果对应不好, 如 9 号钻孔。

## 4 结 论

(1) 找到了两处关键影响因素: 多匝回线电感影响和小线框固有过渡过程影响, 针对这两大特点分别进行消除和偏移工作, 可将矿井瞬变电磁实测数据转换为常规地面大线框瞬变电磁数据形态, 避免由于曲线畸变引起的处理解释困难。

(2) 用该方法对物理模拟数据进行计算, 取得了明显有利于反演的结果。

(3) 针对煤矿常见的超前、底板及工作面内部水害类型, 选取了典型实际资料进行了对比处理, 取得了较常规方法精确且符合地质验证情况的解释。利用本文方法处理实测数据, 不需要引入经验系数, 既无明显盲区, 也没有改变视电阻率的横向分布特征, 在煤矿水害勘探中具有实用性。

(4) 本文仅计算了发射回线电感产生的感应电动势, 未考虑接收装置带来的电感影响, 曲线偏移算法在应用中可能出现同一测线不同测点计算出不同的偏移角度, 产生一些不利于精细解释的结果, 因此还需要进一步研究和完善。

## 参考文献:

- [1] 于景邨, 刘志新, 刘树才, 等. 深部采场突水构造矿井瞬变电磁法探查理论及应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 818-821.  
Yu Jingcun, Liu Zhixin, Liu Shucai, et al. Theoretical analysis of mine transient electromagnetic method and its application in detecting water burst structures in deep coal stope[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 818-821.
- [2] 姜志海, 岳建华, 刘树才. 多匝重叠小回线装置的矿井瞬变电磁观测系统[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1152-1156.  
Jiang Zhihai, Yue Jianhua, Liu Shucai. Mine transient electromagnetic observation system of small multi-turn coincident configuration[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1152-1156.
- [3] 卡兰塔罗夫, 采伊特林. 电感计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [4] 薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 575-578.  
Xue Guoqiang. On surveying depth by transient electromagnetic sounding method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5): 575-578.
- [5] 王建华. 电气工程师手册(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] 王兆安, 张明勋. 电力电子设备和应用手册(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] Christian Harlander, Rainer Sabelka, Siegfried Selberherr. Efficient inductance calculation in interconnect structures by applying the Monte Carlo method[J]. Microelectronics Journal, 2003, 34: 815-821.
- [8] Jan K Rainey, Jeffrey S DeVries, Brian D Sykes. Estimation and measurement of flat or solenoidal coil inductance for radiofrequency NMR coil design[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2007, 187(1): 27-37.
- [9] Sijoy C D, Chaturvedi S. Calculation of accurate resistance and inductance for complex magnetic coils using the finite-difference time-domain technique for electromagnetics[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2008, 36(1): 70-79.
- [10] Christisan Peters, Yiannos, Manol. Inductance calculation of planar multi-layer and multi-wire coils; An analytical approach[J]. Sensors and Actuators, 2008, A145-146: 394-404.
- [11] 李文尧, 武中华. 瞬变电磁法矩形线圈自感的精确表达式[J]. 地质与勘探, 2010, 46(1): 160-164.  
Li Wenyao, Wu Zhonghua. Accurate formula of self-inductance coefficient of rectangular coil in transient electromagnetic methods[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(1): 160-164.
- [12] 杨海燕, 岳建华, 胡文武, 等. 多匝回线的自感对瞬变电磁早期信号的影响特征[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(2): 96-98.  
Yang Haiyan, Yue Jianhua, Hu Wenwu, et al. The characteristics of the early signal in tem affected by self-induction of multiturn coil[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(2): 96-98.
- [13] 范涛, 王秀臣, 李貅, 等. 瞬变电磁方法在探测煤矿浅层高阻采空区中的应用[J]. 西北地质, 2010, 43(2): 156-162.  
Fan Tao, Wang Xiuchen, Li Xiu, et al. Application of TEM detected goaf in coal mine with high-resistivity and shallow-layer[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(2): 156-162.
- [14] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [15] 范涛, 王鹏, 李文刚, 等. 瞬变电磁拟 MT 深度反演方法精细解释煤矿水害研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 129-135.  
Fan Tao, Wang Peng, Li Wengang, et al. Research of simulated MT method with TEM depth inversion fine interpret the coal mine water disaster[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 129-135.