

DOI: 10.11779/CJGE201411017

# 坑道瞬变电磁全程数据分析及 1:1 含水模型试验研究

胡雄武<sup>1</sup>, 张平松<sup>1</sup>, 吴荣新<sup>1</sup>, 李培根<sup>2</sup>, 付茂如<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 福州华虹智能科技开发有限公司, 福建 福州 350004)

**摘要:** 考虑到接收系统过渡过程及电流关断时间, 通过对接收系统冲激响应函数、一次电动势及二次全程感应电动势理论公式的推导, 还原了接收瞬变电磁全程响应信号, 与理论全程数据的对比分析表明, 电流关断时间和接收系统过渡过程给早、中延时段瞬变场造成严重的畸变, 导致数据解析不能有效识别坑道前方近距离地电信息。为评价畸变数据对坑道超前探水的影响, 建立坑道前方 1:1 定量水仓模型, 通过在掘进工作面连续观测 100 m<sup>3</sup> 以内水量变化情况下的瞬变场响应数据, 分析并获得了含水模型的瞬变异常响应特征, 确定其响应时窗处于畸变数据段, 进一步指出现有坑道超前探水技术仍需不断改进, 以提高超前预测精度。

**关键词:** 瞬变电磁; 坑道超前探水; 全程响应; 畸变数据; 近距离地电信息; 1:1 含水模型

中图分类号: TU45; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-2103-07

**作者简介:** 胡雄武(1984-), 男, 博士, 主要从事岩土工程物探理论与应用研究。E-mail: huxiongwu1984@126.com。

## All-time data analysis of transient electromagnetic method for tunnels and investigation on 1:1 water model

HU Xiong-wu<sup>1</sup>, ZHANG Ping-song<sup>1</sup>, WU Rong-xin<sup>1</sup>, LI Pei-gen<sup>2</sup>, FU Mao-ru<sup>1</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Fuzhou Huahong Aptitude

Science Development Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

**Abstract:** Considering the transition of receiving system and the turn-off time of currents, the expressions for impulse response function, primary electromotive force and secondary all-time induced electromotive force are derived. On this basis, the all-time response signals received by receiving coil are restored. The comparative analysis of the receiving and theoretical all-time data shows that the turn-off time of currents and the transition of receiving system distort the early and middle window time data, resulting in undistinguishable electrical information obtained by data processing in short range ahead of tunnels. To assess the impact of aberration data on the advanced water detection in a tunnel, a 1:1 quantitative sump model ahead of the tunnel is established. Through the continuous observation and analysis of the transient field data in different water less than 100 m<sup>3</sup>, the transient exception response characteristics of water are obtained. It is shown that the response time of the water model is within the time range of the aberration data, and it is further indicated that the technology of advanced water detection must be improved to increase the advanced forecast accuracy.

**Key words:** transient electromagnet; advanced water detection in tunnel; all-time response; aberration data; short-range electrical information; 1:1 water model

## 0 引言

全空间瞬变电磁法已成为井巷、隧道等坑道掘进超前水害探测的主要技术之一<sup>[1-5]</sup>。现阶段该技术存在两个不可忽略的问题: ①瞬变电磁仪器工作时存在约几百微秒的电流关断时间, 导致测试数据受到一次电动势(emf)干扰, 且改变了瞬变场源的激励方式; ②多匝接收回线受其分布电容和电感影响, 实测数据存在明显的过度过程。因以上两个问题, 实测数据在早、中延时段存在明显的畸变, 现场应用一般舍弃该畸变段数据, 仅解析晚延时段数据, 造成测试结果不

能有效识别坑道超前近距离地电信息。为提高该方法的勘探精度, 近些年来, 许多学者对全程二次场信息提取及解释进行了大量的研究<sup>[6-13]</sup>, 一定程度上改善了早、中延时段数据的可靠性及解析精度。本文从接收系统过渡过程及考虑电流关断时间出发, 通过相关公式推导, 还原并分析理论全程瞬变电磁场的响应特征, 力求为坑道瞬变电磁测试数据提供系统的认识。

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(51134012); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20103415120003)

**收稿日期:** 2014-06-04

通过在实际坑道前方建立 1:1 定量水仓模型,连续观测模型的瞬变场响应数据,分析坑道前方水体的响应特点,获得水体响应数据与畸变数据的特征关系,进一步为现场探测提供指导。

## 1 坑道瞬变电磁全程响应分析

### 1.1 接收线圈的系统响应状态

瞬变电磁接收系统的响应特征方程可表示为<sup>[7]</sup>

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + 2\delta \frac{dV(t)}{dt} + \omega^2 V(t) = \frac{1}{LC} \varepsilon(t) \quad (1)$$

式中  $V(t)$  为输出电动势;  $\delta = (rC + L/R)/(2LC)$ ;  $r$  为接收线圈内阻;  $R$  为接收端外电路总电阻;  $L$  为接收线圈电感;  $C$  为接收线圈分布电容;  $\omega$  为谐振频率,  $\omega = \sqrt{(r/R + 1)/(LC)}$ 。

对式(1)做 Laplace 变换,得接收系统传输函数:

$$g(s) = \frac{1}{LC(s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2)} \quad (2)$$

式中,  $s$  为复变量,  $s = i2\pi f$ ,  $f$  为响应频率,  $\zeta$  为阻尼系数,  $\zeta = \delta/\omega$ 。

由式(2)做逆 Laplace 变换,可得接收系统系统冲激响应函数为

$$g(t) = L^{-1}[g(s)] = \begin{cases} \frac{1}{LC\alpha} e^{-\delta t} \text{sh}(\alpha t) & (\zeta \geq 1) \\ \frac{1}{LC\alpha} e^{-\delta t} \sin(\alpha t) & (\zeta < 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha = \omega \sqrt{\zeta^2 - 1}$ 。

由线性时不变理论可知,理论信号  $\varepsilon(t)$  输入接收线圈后的输出电动势  $V(t)$  为  $\varepsilon(t)$  与  $g(t)$  的卷积,即<sup>[14]</sup>

$$V(t) = g(t) * \varepsilon(t) \quad (4)$$

因此,据式(4)便可求出  $\varepsilon(t)$  对应接收的  $V(t)$ 。由于  $\delta$  与  $\omega$  的比值不同,接收系统分为欠阻尼 ( $\zeta < 1$ ), 临界阻尼 ( $\zeta = 1$ ) 和过阻尼 ( $\zeta > 1$ ) 3 种状态,不同状态的接收系统对信号的响应不同,其中,当  $\zeta = 1$  时,接收信号质量较好,但为防止系统  $\zeta < 1$ ,实际一般调整至微过阻尼状态,可通过改变  $R$  来实现<sup>[7]</sup>。

### 1.2 一次电动势分析

令电流关断起始时间为 0,关断时间为  $t_{of}$ ,根据 Faraday 电磁感应定律,坑道瞬变电磁中心回线装置条件下,回线中心点的一次电动势可表示为<sup>[15]</sup>

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} -Sn\mu_0 \frac{\sqrt{2}}{\pi a} \frac{\partial I(t)}{\partial t} & (0 < t \leq t_{of}) \\ 0 & (t > t_{of}) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $t$  为瞬变延迟时间;  $S$  为接收线圈等效面积;  $n$  为发射回线匝数;  $a$  为发射回线边长的一半;  $I(t)$  为电流关断函数;  $\mu_0$  为真空磁导率。

由于接收线圈分布于发射线圈中心区域,式(5)

仅表示中心点,不能代替整个接收线圈内的一次电动势,因此,将式(5)改写成

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} -M \frac{\partial I(t)}{\partial t} & (0 < t \leq t_{of}) \\ 0 & (t > t_{of}) \end{cases} \quad (6)$$

以发射电流满足线性关断为例,有

$$I(t) = I(1 - t/t_{of}) \quad (t \leq t_{of}) \quad (7)$$

式中,  $I$  为发射电流幅值。

则线性电流关断条件下,式(6)可简化为

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} M \frac{I}{t_{of}} & (0 < t \leq t_{of}) \\ 0 & (t > t_{of}) \end{cases} \quad (8)$$

假设  $t_{of} = 0.2 \text{ ms}$ ,  $S = 10 \text{ m}^2$ ,  $n = 4$  匝,  $a = 1 \text{ m}$ ,  $I = 2.5 \text{ A}$ ,  $M = 0.0005 \text{ H}$ ,接收系统的阻尼系数  $\zeta = 1.05$ ,分布电容  $C = 0.000001 \text{ F}$ ,电感  $L = 0.001 \text{ H}$ ,内阻  $r = 1.5 \Omega$ ;外电路电阻  $R$  可根据  $\zeta$  的关系求出。将上述参数分别代入式(3)和(8),依据式(4)可求出一次电动势  $\varepsilon_1(t)$  及  $V_1(t)$ 。如图 1 所示,理论  $\varepsilon_1(t)$  在关断时间以前为一恒值,关断时间后为 0,而  $V_1(t)$  分成上升沿 ( $t \leq t_{of}$ ) 和下降沿 ( $t > t_{of}$ ) 两段,由此可见,  $\varepsilon_1(t)$  不仅对电流关断前测试数据有干扰,还对电流关断后测试数据有一定的影响。

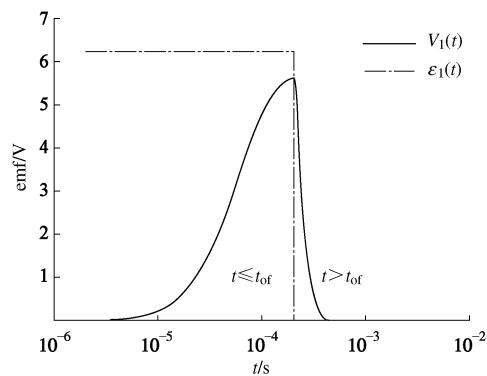


图 1 接收线圈中一次感应电动势输入输出关系

Fig. 1 Input-output relation of primary EMF in receiving coil

### 1.3 二次感应电动势分析

均匀全空间介质中,坑道方形发射回线中心点的阶跃二次磁场表达式为<sup>[12]</sup>

$$H(t) = \frac{\sqrt{\pi n I}}{4a} \left[ \varphi(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u e^{-u^2} \right] \quad (9)$$

式中,  $\varphi(u)$  为误差函数,  $\varphi(u) = 2 \int_0^u e^{-x^2} dx / \sqrt{\pi}$ ,

$u = \sqrt{\mu_0 a^2 / (\pi t \rho)}$ ,  $\rho$  为大地电阻率。

依据 Duhamel 积分式,可以得到任意输入作用下输出的过渡过程与脉冲过渡函数之间的关系,即非阶跃二次磁场表达式为<sup>[16]</sup>

$$H'(t) = \int_{-\infty}^t -\frac{dI(s)}{dt} H(t-s) ds \quad (t > 0), \quad (10)$$

依据式 (10), 可求出全空间二次感应电动势为

$$\varepsilon_2(t) = -S\mu_0 \frac{\partial H'(t)}{\partial t}. \quad (11)$$

联合式 (7)、(9)、(10) 和 (11), 可推导电流线性关断时, 全空间瞬变电磁感应电动势的表达式:

感应段 ( $0 < t \leq t_{of}$ ):

$$\varepsilon_2^i(t) = -\frac{\sqrt{\pi}\mu_0 nIS}{4at_{of}} \left[ \varphi(u) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} u e^{-u^2} \right]; \quad (12a)$$

衰减段 ( $t > t_{of}$ ):

$$\varepsilon_2^a(t) = \frac{\mu_0 nIS}{4at_{of}} \left[ \frac{2ue^{-u^2} - \sqrt{\pi}\varphi(u) + \sqrt{\pi}\varphi\left(\frac{u\sqrt{t}}{\sqrt{t-t_{of}}}\right) - \frac{2u\sqrt{t}e^{-u^2t/(t-t_{of})}}{\sqrt{t-t_{of}}}}{\sqrt{t-t_{of}}} \right]. \quad (12b)$$

由式 (12a)、(12b) 可获得电流线性关断条件下全程二次感应电动势  $\varepsilon_2(t)$ 。图 2 给出了  $\rho$  分别为  $10 \Omega \cdot m$  和  $1 \Omega \cdot m$  的感应电动势曲线, 从中可见, 感应电动势在感应段  $\varepsilon_2^i(t)$  和衰减段  $\varepsilon_2^a(t)$  极性相反, 感应段的响应值比衰减段大, 且电阻率越低, 其响应幅值越大。

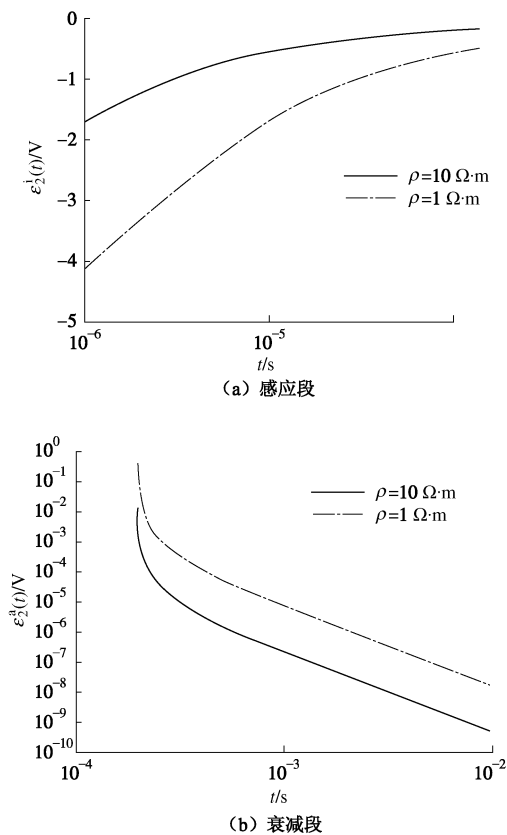


图 2 理论二次感应电动势响应

Fig. 2 Response of secondary EMF in theory

图 3 给出了  $\rho$  为  $10 \Omega \cdot m$  情况下  $\varepsilon_2(t)$  经接收系统的输出曲线  $V_2(t)$ 。可见,  $\varepsilon_2^i(t)$  不仅存在与感应段, 而

且因接收系统的过渡过程影响, 信号延伸至衰减段;  $\varepsilon_2^a(t)$  同样因受接收系统过渡过程影响, 前期部分信号与理论信号存在明显差异, 本次算例中, 约至延时 1 ms 以后, 理论与实测信号一致。

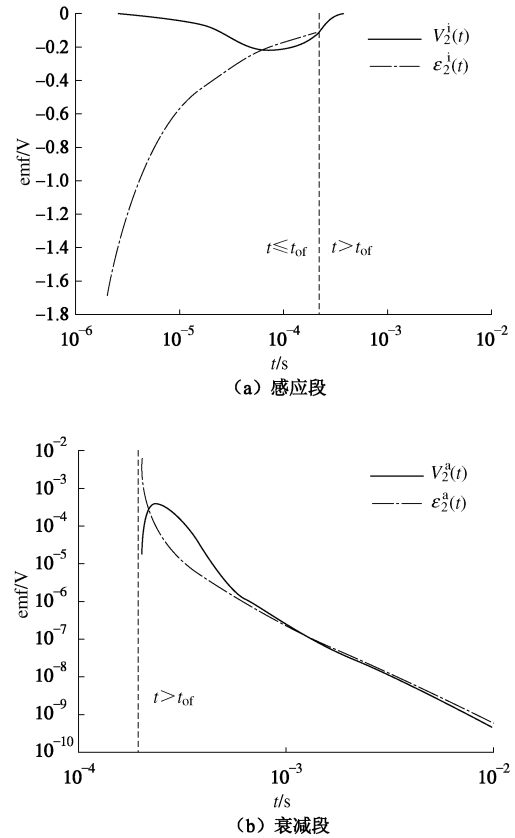


图 3 接收线圈中二次电动势输入输出关系

Fig. 3 Input-output relation of secondary EMF in receiving coil

#### 1.4 全程瞬变电磁场分析

坑道瞬变电磁超前探测时, 接收线圈理论输入全程瞬变响应信号可近似为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t). \quad (13)$$

因此, 将式 (13) 代入式 (4) 中, 便可获得实际全程瞬变电磁响应  $V(t)$ 。

图 4 给出了电阻率  $\rho$  为  $10 \Omega \cdot m$  情况下理论全程瞬变响应  $\varepsilon(t)$  与实际全程瞬变响应  $V(t)$  的曲线对比。从中可见, 由于电流关断时间和接收系统过渡过程的综合影响, 在 1 ms 以前,  $V(t)$  与  $\varepsilon(t)$  曲线差异大, 实际探测一般针对关断时间  $t_{of}$  以后的瞬变场数据进行处理, 从而忽视了早、中延时段瞬变场数据所携带的地电信息, 给坑道超前探水带来不利影响。

## 2 坑道超前 1:1 含水模型试验研究

### 2.1 水仓模型构建

试验坑道顶标高 175 m, 截面宽 2 m, 高 2 m, 两帮为泥岩, 较平整, 顶、底板分别为砂岩和粉砂岩, 属于二叠系下统童子岩组地层, 海陆交互相含煤沉积。

如图 5 所示, 在试验掘进坑道前方 25 m 处布置水仓模型, 分内外两仓, 内仓为长方体, 截面为正方形, 边长为 5 m, 储水 60 m<sup>3</sup>; 外仓截面为长方形, 宽 1.2 m, 长 15 m, 储水 40 m<sup>3</sup>, 内外两仓共储水 100 m<sup>3</sup>; 水仓整体沿坑道走向布置, 走向长度为 20 m, 分布在坑道前方 25~45 m 之间。

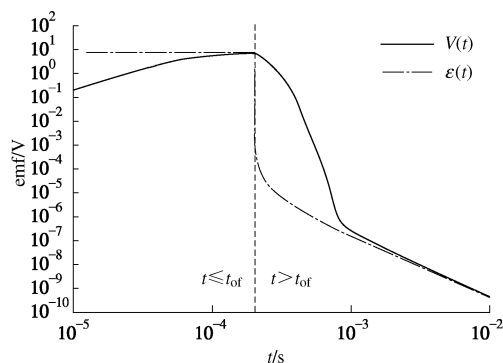


图 4 接收线圈中全程电动势输入输出关系

Fig. 4 Input-output relation of overall EMF in receiving coil

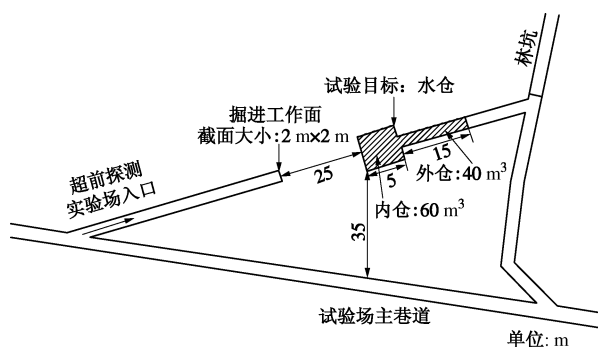


图 5 坑道前方水仓模型布置图

Fig. 5 Layout of mockup ahead of tunnel

## 2.2 数据采集

### (1) 仪器设备及采集参数

采用本安型 YCS256 瞬变电磁仪, 配套中心回线装置, 其中发射回线 10 匝, 边长 2 m, 接收回线 20 匝, 边长 1.2 m, 发射电流为 2.5 A, 供电脉冲为双极性矩形波, 测试频率为 6.25 Hz, 仪器采集电压上限为 2.5 V; 另据试验检测, 当前装置系统条件下, 仪器工作时发射电流的关断时间为 0.222 ms, 接收系统处于微过阻尼状态。由于本次试验模型距离掘进工作面较近, 为使水仓响应信号落入有效观测时间窗口, 试验前对水仓进行了大量测试, 通过测试数据对比分析, 确定对现有仪器原有观测时间窗口进行合理调整, 设置为 80 个时间窗口, 控制时窗范围为 0.065~15.92 ms, 相邻窗口基本呈对数等间隔分布。

### (2) 观测方式

将中心回线紧贴在坑道掘进工作面上并固定, 使

回线法线与水仓共线, 达到最强的激励状态。然后给水仓注水, 使其满仓 100 m<sup>3</sup>, 数据采集时, 设计水仓内水量在 1 h 放完, 放水期间, 通过阀门控制放水速度, 期间按 12 min 时间间隔采集一组数据, 每组数据采集 5 次, 取平均值作为该时刻观测的瞬变场数据, 当组数据采集时, 关闭阀门, 待该组数据采集完毕, 阀门打开, 继续放水。整个放水期间共采集 6 组数据, 对应水仓水量分别为 100, 80, 60, 40, 20, 0 m<sup>3</sup>, 通过数据对比, 分析不同水量条件下瞬变电磁场响应的变化情况。

## 2.3 数据分析与讨论

从实测数据分析, 由于晚延时段感应电动势受电磁噪声影响大, 信噪比差, 故仅选择前面 40 个观测窗口感应电动势作为水仓内水体响应的分析数据。

图 6 为水仓内不同水量情况下的实测感应电动势剖面, 图中横坐标  $q$  代表水仓内的水量。由于在观测过程中, 装置回线及观测参数等均不变, 唯一改变的是水仓内的水量, 因此, 可以认为感应电动势发生变化是由水量改变而引起。从图 6 中横向变化可见, 随着水量的增加, 前期测道感应电动势逐渐下降, 尾部测道感应电动势有逐渐上升趋势, 表明瞬变场响应因水仓内水量变化而发生改变, 进一步说明水受回线源激励影响, 产生了瞬变场信号。

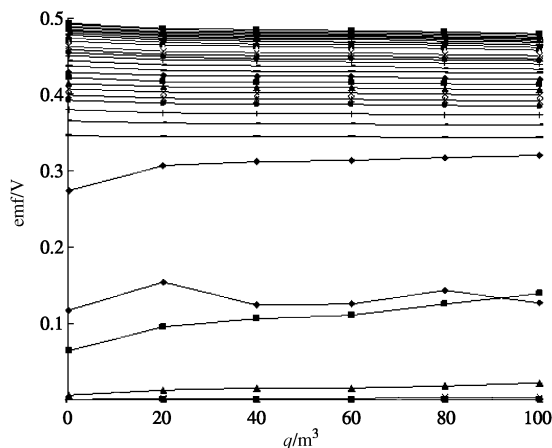


图 6 不同水量下的感应电动势剖面

Fig. 6 Section of induced EMF in different water

由于观测时间内包含电流关断时间前后两个部分的数据, 即感应段和衰减段数据, 根据前文对理论全程数据的分析, 感应段与衰减段数据的衰减特征不同, 因此, 本文分别对感应段和衰减段数据进行讨论。

图 7 (a)、(b) 分别给出了水仓内不同水量情况下的实测感应电动曲线。从图 7 (a) 可见, 水仓内无水时, 实测感应电动势幅值最高, 如在  $t = 0.067$  ms 时刻, 该幅值大小约为 0.4936 V; 随着水量的逐渐增加, 感应电动势幅值逐渐降低, 当水仓水量为 100 m<sup>3</sup>

时, 实测感应电动势幅值最低, 同样以  $t = 0.067 \text{ ms}$  时刻为例, 感应电动势幅值约为  $0.4798 \text{ V}$ 。与感应段数据分布特征相反, 水仓内无水时, 衰减段 (图 7(b)) 实测感应电动势幅值最低, 如在  $t = 0.248 \text{ ms}$  时刻, 其幅值约为  $0.0956 \text{ V}$ ; 随着水量的增加, 感应电动势幅值逐渐升高, 当水仓水量为  $100 \text{ m}^3$  时, 实测感应电动势幅值最高, 在  $t = 0.248 \text{ ms}$  时刻响应幅值约为  $0.1393 \text{ V}$ 。

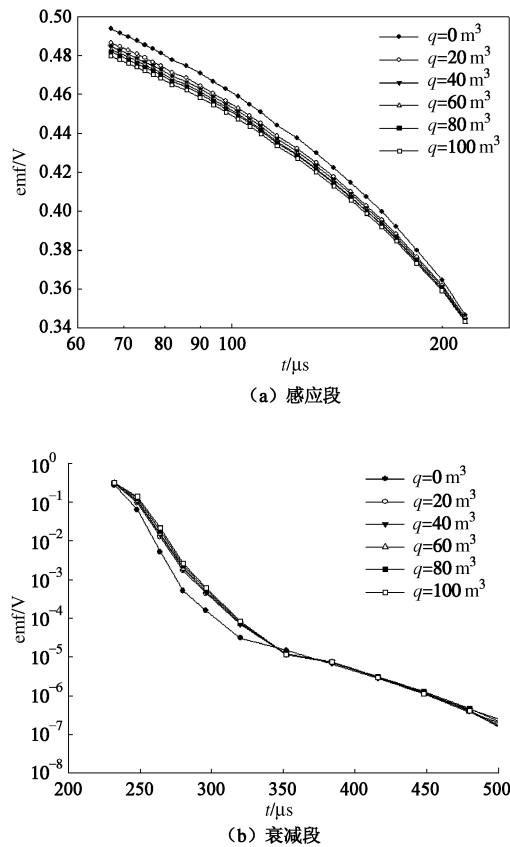


图 7 不同水量下的感应电动势衰减曲线

Fig. 7 Attenuation curves of EMF in different water volumes

为进一步分析水的响应随水量的变化情况, 将水量为  $100, 80, 60, 40, 20 \text{ m}^3$  时观测的感应电动势与水量为  $0 \text{ m}^3$  实测数据相减, 所得差值近似认为巷道前方水仓内水体的瞬变电磁场响应。图 8 为不同水量情况下水体的瞬变电磁异常响应曲线。①从中可见, 实际观测因时间窗口从  $0.065 \text{ ms}$  开始, 对该时刻以前瞬变场响应未能记录, 与图 3 中的  $V_2(t)$  曲线对比, 实测曲线在  $0.065 \sim 0.5 \text{ ms}$  时间段的分布特征与  $V_2(t)$  具有较高的相似性, 因此, 理论与试验结果均表明, 坑道前方含水水体在感应段产生负极性的感应电动势, 在衰减段产生正极性的感应电动势。②从图 8 (a)、(b) 中可见, 水仓内水体异常感应电动势在  $0.28 \text{ ms}$  以后差值约为  $0$ , 表明本试验中坑道前方水仓内水体的最大瞬变响应延时为  $0.28 \text{ ms}$ , 而该时刻以前测试数据受

一次电动势和接收系统过渡过程影响, 水仓水体异常电动势远小于实测感应电动势, 现有处理方法难以解析出异常电性参数, 实际探测中若遭遇类似情况, 一般不能有效的超前预测预报坑道前方含水水体。③从不同水量的异常瞬变电磁响应曲线对比可见, 随水仓内水量的变化, 异常响应幅值发生变化, 但其响应时间窗口未有明显变化, 因此, 从本试验可见, 当水仓位置不变时, 水量变化通常会明显改变响应场幅值, 而对响应场的时间窗口范围改变较小。

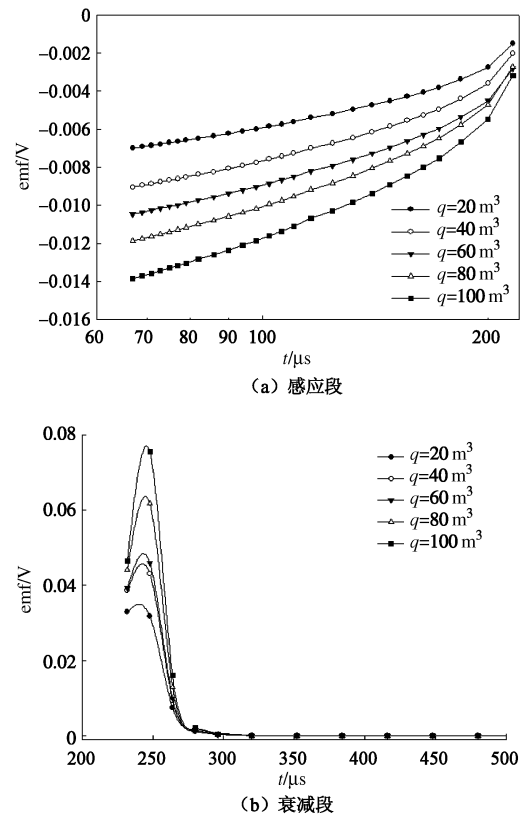


图 8 不同水量情况下水体的异常响应曲线

Fig. 8 Abnormal response curves of water in different water volumes

图 9 给出了不同时间窗口的水体异常感应电动势与水量变化的关系曲线。在感应段, 由于水的异常电动势为负值, 为方便获得该段异常电动势与水量的关系, 将异常电动势取绝对值, 获得图 9 (a)。从该图中明显可见, 在整个感应段, 坑道前方水仓内水量与其异常电动势在图中所示的单对数坐标系下近似呈线性变化关系, 斜率约为  $-0.0037242$ , 由此说明, 在感应段, 随水量递增, 水的异常电动势幅值在对数域近似呈负向线性增长; 图 9 (b) 反映了衰减段水量与异常电动势的变化关系, 与感应段相似, 两者在单对数坐标系下也近似呈线性变化, 斜率约为  $0.0031785$ , 表明了衰减段, 随水量递增, 其异常电动势幅值在对数域近似呈线性增加。总而言之, 水量

递增, 其异常电动势响应越大, 且其响应值在对数域内近似呈线性上升, 但感应段和衰减段异常幅值的上升速度不同。

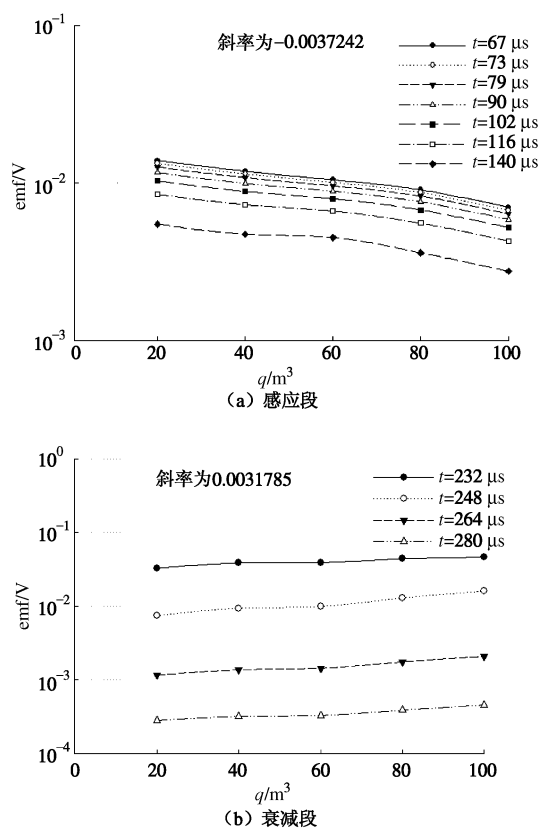


图9 不同时间窗口的水体瞬变场响应与水量的变化关系

Fig. 9 Relationship between water volumes and its transient electromagnetic response in different time windows

### 3 结论与讨论

给出了一次电动势表达式, 并推导发射电流线性关断条件下全程二次感应电动势算法, 利用理论全程数据与接收系统的冲激响应函数的卷积, 获得了坑道瞬变电磁全程数据的响应特征, 确定电流关断时间及接收系统过渡过程给瞬变场早、中延时数据造成严重畸变。建立了坑道超前 1:1 定量含水模型, 通过在坑道掘进工作面连续观测模型内不同水量对应的瞬变场响应数据, 分析确定了水体受多匝小回线源激励, 产生了瞬变场信号; 利用不同水量时水体的异常响应曲线对比, 确定: ①坑道前方含水水体在感应段产生负电动势, 在衰减段产生正电动势, 该结果与理论数据一致; ②随水量线性递增, 水体异常电动势绝对值在对数域呈线性上升, 但在感应段上升快, 衰减段上升相对慢; ③本试验中  $100 \text{ m}^3$  水的最大瞬变响应延时为  $0.28 \text{ ms}$ , 在采样时窗中基本属于畸变段, 说明实际坑道超前探水需进一步研究利用畸变段数据, 以提高对坑道超前近距离水体的识别能力。

通过本文研究可以看出, 坑道超前近距离水体的瞬变场响应时窗短, 衰减速度快, 且在感应段表现出负电动势, 这是以往未能直观认识到的, 针对本文给出的坑道前方  $100 \text{ m}^3$  水的情况, 在实际中往往难以被有效识别, 因此, 笔者认为坑道超前探水技术 (包含仪器设备、全程数据提取与解析方法等) 仍需不断改进, 其中重点需要减小发射电流关断时间, 缩短接收系统暂态过程, 增加瞬变场的有效观测时窗范围。同时, 希望技术人员在数据解析时不要盲目舍弃畸变段数据, 应对其多加利用, 如在连续坑道超前探水过程中, 可根据掘进验证对比, 结合含水体的异常瞬变响应特征, 对畸变段数据采用曲线比较的方法进行近距离水体的预测预报, 进一步保障坑道安全掘进。

### 参考文献:

- [1] 苏茂鑫, 李术才, 薛翊国, 等. 隧道地质预报中的瞬变电磁视纵向电导解释方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1722 - 1726. (SU Mao-xin, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, et al. TEM apparent longitudinal conductance interpretation in tunnel geological forecast[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1722 - 1726. (in Chinese))
- [2] 孙怀凤, 李术才, 李 貅, 等. 隧道瞬变电磁多点阵列式探测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(11): 2225 - 2233. (SUN Huai-feng, LI Shu-cai, LI Xiu, et al. Research on transient electromagnetic multipoint array detection method in tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(11): 2225 - 2233. (in Chinese))
- [3] 张平松, 李永盛, 胡雄武. 坑道掘进瞬变电磁超前探水技术应用分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2749 - 2753. (ZHANG Ping-song, LI Yong-sheng, HU Xiong-wu. Applied analysis of advanced detection for containing water body ahead of tunnel by transient electromagnetic method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2749 - 2753. (in Chinese))
- [4] 张 军, 赵 莹, 李 萍. 矿井瞬变电磁法在超前探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, **9**(1): 49 - 53. (ZHANG Jun, ZHAO Ying, LI Ping. Application research of mine transient electromagnetic method in advanced detection[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, **9**(1): 49 - 53. (in Chinese))
- [5] 张平松, 程 桦, 吴荣新, 等. 巷道掘进瞬变电磁法跟踪超前预报分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(4): 919 - 923. (ZHANG Ping-song, CHEN Hua, WU Rong-xin, et al. Advanced forecast analysis on tunnel driving by TEM

- detection[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(4): 919 - 923.
- [6] 嵇艳鞠, 林 君, 于生宝, 等. ATTEM 系统中电流关断期间瞬变电磁场响应求解的研究[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(6): 1884 - 1890. (JI Yan-ju, LIN Jun, YU Sheng-bao, et al. A study on solution of transient electromagnetic response during transmitting current turn-off in the ATTEM system[J]. Chinese J Geophys, 2006, **49**(6): 1884 - 1890. (in Chinese))
- [7] 王华军. 阻尼系数对瞬变电磁观测信号的影响特征[J]. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 428 - 434. (WANG Hua-jun. Characteristics of damping coefficient effect on transient electromagnetic signal[J]. Chinese Journal of Geophys, 2010, **53**(2): 428 - 434. (in Chinese))
- [8] 张 爽, 刘紫秀, 陈曙东. 瞬变电磁传感器阻尼特性的标定研究[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(2): 662 - 670. (ZHANG Shuang, LIU Zi-xiu, CHEN Shu-dong. Calibration study on the damping characteristics of TEM sensor[J]. Chinese J. Geophys, 2014, **57**(2): 662 - 670. (in Chinese))
- [9] 孙天财. 发射电流波形对瞬变电磁测量结果影响及校正研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008. (SUN Tian-cai. Research of correction and effect of transmitting waveform on the transient electromagnetic response[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese))
- [10] 陈清礼. 瞬变电磁法全区视电阻率的二分搜索算法[J]. 石油天然气学报, 2009, **31**(2): 45 - 49. (Chen Qin-li. Searching algorithm for full time apparent resistivity from TEM electromotive force data[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, **31**(2): 45 - 49. (in Chinese))
- [11] 杨海燕, 邓居智, 张 华, 等. 矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究[J]. 地球物理学报, 2010, **53**(3): 651 - 656. (YANG Hai-yan, DENG Ju-zhi, ZHANG Hua, et al. Research on full-space apparent resistivity interpretation technique in mine transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophys, 2010, **53**(3): 651 - 656. (in Chinese))
- [12] 胡雄武, 张平松, 严家平, 等. 坑道掘进瞬变电磁超前探水解释方法的改进研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 654 - 661. (HU Xiong-wu, ZHANG Ping-song, YAN Jia-ping, et al. Improvement of means for interpretation of advanced water detection of tunnels by transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 654 - 661. (in Chinese))
- [13] 胡雄武, 张平松, 严家平, 等. 矿井瞬变电磁超前探测视电阻率扩散叠加解释方法[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(5): 925 - 931. (HU Xiong-wu, ZHANG Ping-song, YAN Jia-ping, et al. Spread stack interpretation means of apparent resistivity in roadway advanced detection with transient electromagnetic method[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(5): 925 - 931. (in Chinese))
- [14] 陈生潭. 信号与系统[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001. (CHEN Sheng-tan. Signals and systems[M]. 2nd ed. Xi'an: XiDian University Press, 2001. (in Chinese))
- [15] 牛之琰. 时间域瞬变电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007. (NIU Zhi-lian. Theory of time domain electromagnetic method[M]. Changsha: Central South University Press, 2007. (in Chinese))
- [16] 蒋邦远. 近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1998. (JANG Bang-yuan. Applied near zone magnetic source transient electromagnetic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese))