

DOI: 10.11779/CJGE201404009

# 坑道掘进瞬变电磁超前探水解释方法的改进研究

胡雄武, 张平松, 严家平, 郭立全

(安徽理工大学地球与环境学院 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 瞬变电磁方法已在坑道超前探水中发挥重要作用。因实际测试时存在电流关断时间, 激励场不再满足阶跃关断条件。以水平电偶极子瞬变场响应为基础, 给出坑道瞬变电磁多匝小回线中心阶跃瞬变场表达式。通过对 3 种非阶跃关断瞬变场的响应计算, 确定了关断时间的影响范围, 指出关断时间的影响对于坑道掘进前方浅部含水体的探测不可忽略。推导了全空间线性关断条件下全程视电阻率算法, 从而改进坑道超前探水解释方法。物理模型实验和实例应用结果表明, 该方法对于坑道掘进前方浅部含水体的空间划分更好, 增强了瞬变电磁法对岩层富水特性的判定能力。  
**关键词:** 坑道超前探水; 瞬变电磁法; 关断时间; 线性关断电流; 全程视电阻率算法; 改进

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2014)04 - 0654 - 08

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

## Improvement of means for interpretation of advanced water detection of tunnels by transient electromagnetic method

HU Xiong-wu, ZHANG Ping-song, YAN Jia-ping, GUO Li-quan

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The transient electromagnetic method has played an important role in detecting the water bearing ahead of tunnels. Because of the existence of turn-off time in practical application, the exciting field can not satisfy the step turn-off condition. An expression for the step at the central point of small multi-turn loop is given based on the transient field of level electric dipole. Through the analysis of the transient field induced by three non-step turn-off currents, the influence range of the turn-off time is determined. It indicates that the detecting influence of the turn-off time on superficial part containing water ahead of the tunnel cannot be neglected. To improve the means for interpretation of water detection, the algorithm for the whole period apparent resistivity is derived in full space. Physical model tests and practical applications show that this improvement algorithm is more satisfactory to divide the space of superficial part containing water and increases the judgement capability of its aquosity.

**Key words:** advanced water detection in tunnel; transient electromagnetic method; turn-off time; linear turn-off current; whole period algorithm of apparent resistivity; improvement

## 0 引 言

瞬变电磁法是坑道超前探水的主要方法之一<sup>[1-5]</sup>。目前, 该方法在坑道超前探水应用过程中, 采用的是理想瞬变场理论对测试数据进行分析与解释, 即从发射电流零关断(又称阶跃关断)条件下推导的瞬变场响应表达式, 然后计算其全程或晚期视电阻率, 从而对探测前方含水异常体进行空间划分与含水性判定。但实际中, 受测试仪器系统的限制, 发射电流难以实现阶跃关断, 而需要一定的时间(简称关断时间)。由于坑道超前探水时, 瞬变电磁场的激励采用多匝的小回线装置(如采用 40 匝边长为 2 m 的方形回线), 电流的关断时间一般有几十至几百微秒, 这将使坑道掘进前方地质体的二次场响应不再符合阶跃瞬变场响应特征, 导致阶跃视电阻率解析算法<sup>[6]</sup>存在不足。

有学者研究认为, 非阶跃关断与阶跃关断瞬变场的差异主要在于早延时段<sup>[7]</sup>, 对探测前方浅部地质体的分辨能力有影响。文献[8]将关断期间的电流离散成电流元的叠加, 采用阶跃瞬变场的积分求解视电阻率, 该算法计算量大, 计算时间长, 且需要对电流在关断期间的高密度采样。文献[9]给出了几种常用的校正方法(如坐标移动法、解析法、量板法、Eaton 校正方法), 但这些方法仅适用于关断以后的较晚延时段, 应用时, 还需要对一些参数进行估算, 如稍有不准, 易引起新的误差。

以全空间水平电偶极子瞬变场表达式为基础, 给出坑道多匝小回线装置下电流阶跃关断的中心回线瞬

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134012)

收稿日期: 2013 - 06 - 03

变场表达式, 根据几种非阶跃电流关断模式的瞬变场计算与对比, 确定关断时间的影响范围, 然后推导线性关断下的全空间瞬变场表达式, 获得其全程视电阻率, 力求改进超前探水解释方法。通过物理模型实验和实例应用进一步分析其可靠性和适用性。

### 1 常规电流关断模式

假设发射电流关断时, 其关断表达式为

$$i(t) = \begin{cases} I_0 & (t \leq 0) \\ I_0 f(t) & (0 < t < t_0) \\ 0 & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $I_0$  为发射电流幅值;  $f(t)$  为关断衰减函数;  $t_0$  为关断时间。一般存在以下几种关断模式<sup>[7, 9-10]</sup>:

半正弦关断

$$f(t) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi t}{2t_0}\right), \quad (2a)$$

$$f'(t) = -\frac{\pi}{2t_0} \sin\left(\frac{\pi t}{2t_0}\right); \quad (2b)$$

指数关断

$$f(t) = e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (3a)$$

$$f'(t) = -\frac{t_0}{(t-t_0)^2} e^{-\frac{t}{t_0}}; \quad (3b)$$

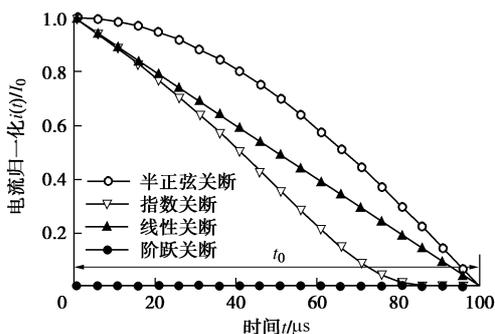
线性关断

$$f(t) = 1 - \frac{t}{t_0}, \quad (4a)$$

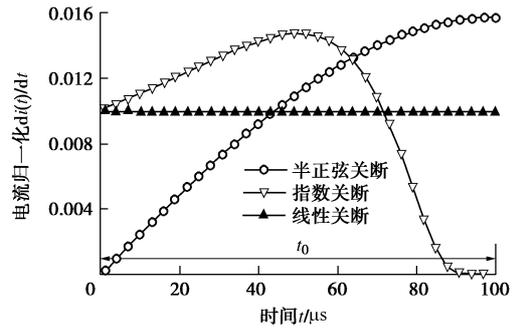
$$f'(t) = -\frac{1}{t_0} \quad (4b)$$

式 (2b)、(3b) 和 (4b) 中  $f'(t)$  为  $f(t)$  的时间导数。

假设关断时间  $t_0=100 \mu\text{s}$ , 可获得上述 3 种非阶跃关断电流曲线。从图 1 可见, 在关断开始阶段, 半正弦关断慢于线性关断, 指数关断则快于线性关断; 在关断后期, 半正弦关断和指数关断则表现相反。而瞬变场的大小及分布形态与关断的速度有关, 由此可见, 不同的关断模式产生的瞬变场必然不等。



(a) 关断电流  $i(t)$  的归一化曲线



(b) 关断电流  $di(t)/dt$  的归一化曲线

图 1 发射电流关断模式

Fig. 1 Modes of turn-off current

### 2 均匀全空间瞬变电磁场响应

#### 2.1 全空间中心回线阶跃瞬变场响应表达式

均匀无限介质中, 当电偶极子中的稳恒电流阶跃关断后产生的瞬变磁场为<sup>[11-12]</sup>

$$h_z^e(t) = \frac{Iyds}{4\pi r^3} \left[ \Phi(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} ue^{-u^2} \right] \quad (5)$$

式中  $I$  为发射电流;  $y$  为观测点至电偶极子的平面垂直距离;  $ds$  为电偶极子长度;  $r$  为观测点至电偶极子的距离;  $\Phi(u)$  为误差函数, 其取值表达式为  $\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-x^2} dx$ , 其中,  $u = \sqrt{\mu_0 r^2 / (4\rho t)}$ ;  $\rho$  为均匀空间介质电阻率;  $t$  为观测时间。

$n$  匝圆形回线的瞬变场可通过电偶极子沿回线路径积分求得, 其表达式经推导为

$$H_z^C(t) = \int_0^{2\pi} \frac{Ird\theta}{4\pi r^3} \left[ \Phi(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} ue^{-u^2} \right] = \frac{nI}{2r} \left[ \Phi(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} ue^{-u^2} \right] \quad (6)$$

式中,  $r$  变为圆形回线的半径。

坑道探测时一般采用方形回线, 假设其边长为  $2L$ , 按磁矩等效近似, 将  $r = 2L/\sqrt{\pi}$  代入式 (6), 则方形回线中心点的瞬变磁场表达式可写为

$$H_z^R(t) = \frac{\sqrt{\pi}nI}{4L} \left[ \Phi(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} ue^{-u^2} \right] \quad (7)$$

对式 (7) 求时间导数, 可得中心点感应电动势为

$$\varepsilon_z^R(t) = \frac{\pi nIS\rho}{2L^3} u^5 e^{-u^2} \quad (8)$$

式中,  $S$  为接收线圈等效面积。

#### 2.2 全空间中心回线非阶跃瞬变场响应表达式

依据杜哈马尔积分式, 可以得到任意输入作用下输出的过渡过程与脉冲过度函数之间的关系<sup>[8]</sup>, 即非阶跃瞬变场响应  $R'(t)$  可表示为<sup>[10, 13]</sup>

$$R'(t) = \int_{-\infty}^t -\frac{di(s)}{ds} R(t-s) ds \quad (t > 0) \quad (9)$$

式中  $i(t)$  为发射电流归一化函数;  $R(t-s)$  为阶跃场瞬变响应函数;  $-di(t)/dt$  为脉冲过度函数; 做变量替换  $r=t-s$ , 并联合式 (1), 则式 (9) 改写为

$$R'(t) = \int_{-\infty}^t -f'(t)R(r)dr \quad (t > 0) \quad (10)$$

假设零时刻选在关断的起点, 当  $f'(t)$  用式 (2b)、(3b) 和 (4b) 代入时, 可获得半正弦、指数及线性关断的全程瞬变场。因直接对式 (10) 进行积分较为复杂, 采用离散积分求解。为便于表述, 定义非阶跃全程的感应磁场和电动势函数分别为  $h_z(t)$  和  $V_z(t)$ 。

### 3 关断时间的影响特征分析

实际中关断时间  $t_0$  是通过仪器记录获得。为确定其对瞬变场的影响范围, 考虑式 (10) 的计算中, 响应场的内核中还涉及发射回线的等效边长  $b = \sqrt{nL}$ 、地质体的电阻率  $\rho$ 。因此采用不同参数进行数值计算与误差分析。令非阶跃场  $\psi(t)$  与阶跃场  $\xi(t)$  的误差为

$$\text{Error} = \left| \frac{\psi(t) - \xi(t)}{\xi(t)} \right| \times 100\% \quad (11)$$

计算感应磁场误差时,  $\psi(t)$  和  $\xi(t)$  分别用  $h_z(t)$  和  $H_z^R(t)$  代入, 计算电动势误差则用  $V_z(t)$  和  $\varepsilon_z^R(t)$  代入。

假设  $I = 2A$ ,  $L = 2m$ ,  $S = 80m^2$ , 取不同的  $t_0$ ,  $b$  及  $\rho$ , 计算各关断模式的全程瞬变场, 图 2 中左图为瞬变磁场, 右图为感应电动势, 可见, 非阶跃与阶跃关断的差异主要在早延时段, 关断时间以前, 差异明显; 关断时间后, 线性、半正弦和指数关断之间的瞬变场差异较小, 衰减特征相似。为确定关断时间的影响范围, 从各图中提取  $\text{Error} = 5\%$  时对应的时间  $t$ , 并与  $t_0$  做比值处理, 其结果作为关断时间的影响范围。

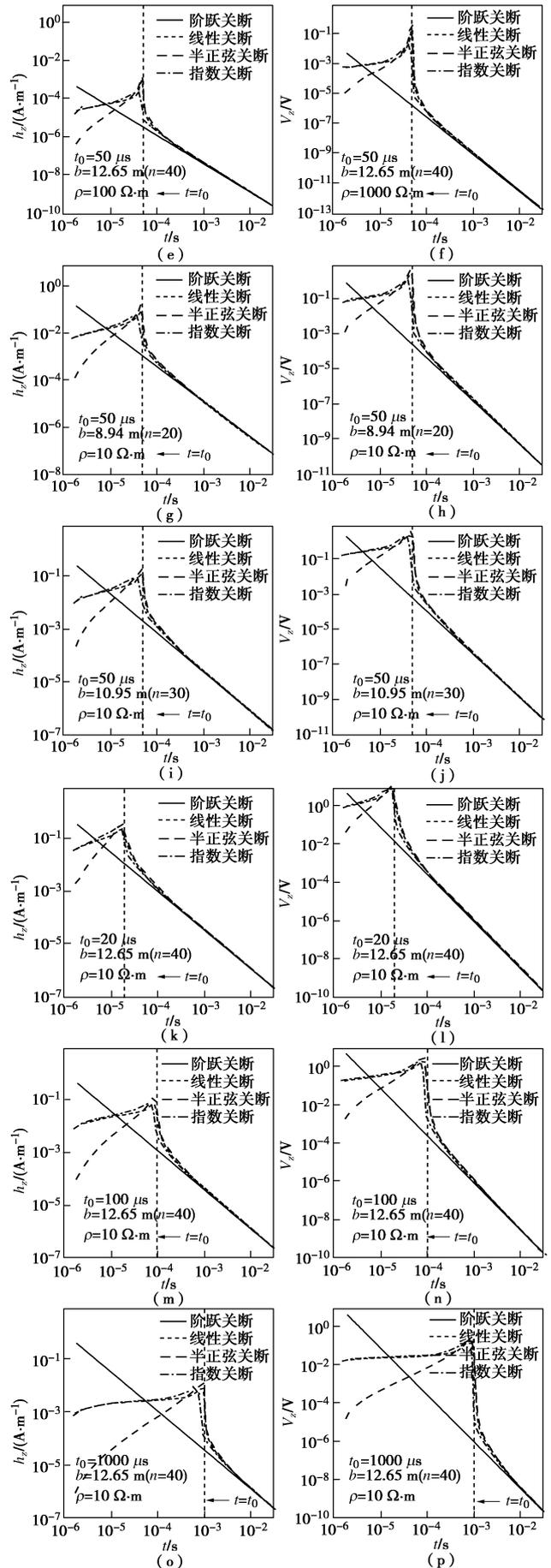


图 2 瞬变场的数值计算结果

Fig. 2 Numerical results of transient field

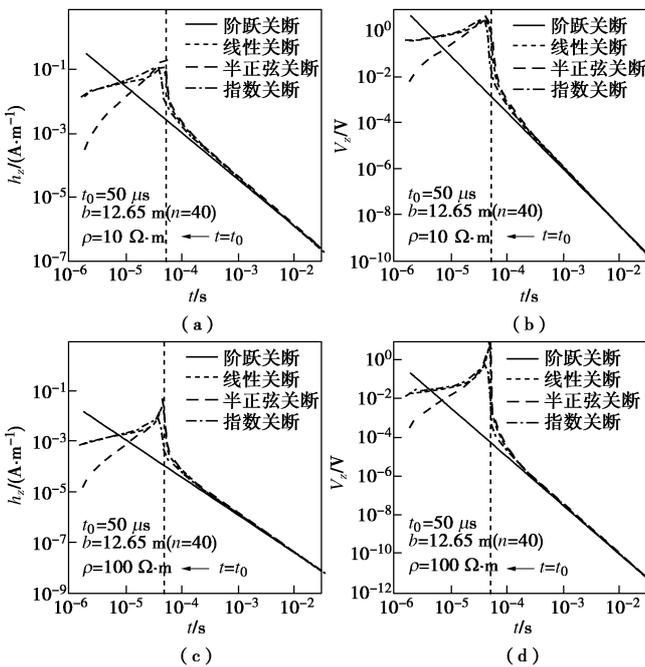


表1给出了感应磁场受关断时间的影响范围。可见:

(1) 线性关断模式: 地质体电阻率  $\rho$  及发射回线的等效边长  $b$  基本不改变关断时间的影响范围; 关断时间  $t_0$  的增加, 会使其影响范围有略微的下降。目前,  $t_0$  一般小于  $1000 \mu\text{s}$ , 因此, 可认为线性关断模式下, 关断时间的影响范围基本为一定值, 取平均值处理, 约为其自身的 16.5 倍。

(2) 半正弦关断模式: 其情况与线性关断类似, 关断时间的影响范围约为其自身的 20.6 倍。

(3) 指数关断模式: 做同上处理, 关断时间的影响范围约为其自身的 13.7 倍。

表1 感应磁场的关断时间影响范围

Table 1 Influence range of turn-off time of magnetic field

变化参数	关断时间的影响范围 $t/t_0$		
	线性关断	半正弦关断	指数关断
电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	10	16.6061	20.7009
	100	16.6056	20.6850
	1000	16.6103	20.6986
等效边长 $b/\text{m}$	8.94	16.6003	20.6743
	10.95	16.6095	20.6717
	12.65	16.6061	20.7009
关断时间 $t_0/\mu\text{s}$	20	17.5568	21.3911
	50	16.6061	20.7009
	100	16.2092	20.4205
	1000	15.6809	19.5458

表2给出了感应电动势受关断时间的影响范围。从图2可见, 感应电动势与感应磁场受关断时间的影响情况类似, 但其影响范围不同。线性关断模式、半正弦关断和指数模式下的影响范围分别约为 27.3 倍、34 倍和 22.6 倍。

表2 电动势的关断时间影响范围

Table 2 Influence range of turn-off time of electromotive force

变化参数	关断时间的影响范围 $t/t_0$		
	线性关断	半正弦关断	指数关断
电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	10	27.3172	34.2170
	100	27.3245	34.2396
	1000	27.3177	34.2489
等效边长 $b/\text{m}$	8.94	27.3155	34.1823
	10.95	27.3127	34.1852
	12.65	27.3172	34.2170
关断时间 $t_0/\mu\text{s}$	20	29.0429	35.4939
	50	27.3172	34.2170
	100	26.8080	33.3865
	1000	25.8346	32.2964

综合上述分析, 确定半正弦关断对瞬变场的影响范围最大, 其次为线性关断, 最后为指数关断。另外关断时间对磁场的影响范围比对感应电动势的影响范围小约 10 倍。

总之, 关断时间对瞬变场早延时范围的影响较大, 采用阶跃关断的全程视电阻率计算方法势必会产生较大的误差, 影响超前探测中、浅部含水异常体的分辨能力, 必须对其予以消除。

## 4 考虑关断时间的视电阻率计算

瞬变电磁探测仪器实际电流关断与理想的半正弦、线性和指数关断是有差异的, 一般处于这三者之间, 由此可认为线性关断是最为接近实际电流关断特征的模式。因此, 重点研究线性关断下的全空间全程视电阻率算法, 加以改善坑道掘进前方浅部含水异常体的分辨能力。

### 4.1 线性关断下的视电阻率公式推导

当电流线性关断时,  $-di(t)/dt = 1/t_0$  为常数, 代入式(10), 并据瞬变场在关断前后的幅值变化情况, 将全程瞬变场分成两段, 分别为<sup>[14]</sup>

$$\text{感应段: } R'(t) = \frac{1}{t_0} \int_0^t R(r) dr \quad (0 < t \leq t_0), \quad (12a)$$

$$\text{衰减段: } R'(t) = \frac{1}{t_0} \int_{t-t_0}^t R(r) dr \quad (t > t_0)。 \quad (12b)$$

其一, 把式(7)分别代入式(12a)、(12b), 经推导得感应段 ( $0 < t \leq t_0$ ) 磁场表达式:

$$h_1(t) = \frac{\sqrt{\pi n I t}}{4 L t_0} \left[ 2u^2 + (1 - 2u^2) \Phi(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u e^{-u^2} \right], \quad (13a)$$

衰减段 ( $t > t_0$ ) 磁场表达式:

$$h_2(t) = \frac{\sqrt{\pi n I t}}{4 L t_0} (1 - 2u^2) \Phi(u) - \frac{n I t}{2 L t_0} u e^{-u^2} + \frac{\sqrt{\pi n I t}}{4 L} \left( 1 + \frac{2t}{t_0} u^2 - \frac{t}{t_0} \right) \Phi(u / \sqrt{1 - t_0/t}) + \frac{n I}{2 L \sqrt{1 - t_0/t}} \left( \frac{t}{t_0} - 1 \right) u e^{-u^2 / (1 - t_0/t)}。 \quad (13b)$$

其二, 把式(8)分别代入式(12a)、(12b), 经推导得感应段 ( $0 < t \leq t_0$ ) 感应电动势表达式:

$$V_1(t) = \frac{\sqrt{\pi \mu n I S}}{4 L t_0} \left[ 2u e^{-u^2} / \sqrt{\pi} - \Phi(u) + 1 \right], \quad (14a)$$

衰减段 ( $t > t_0$ ) 感应电动势表达式:

$$V_2(t) = \frac{\mu n I S}{2 L t_0} \left[ u e^{-u^2} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Phi(u) \right] + \frac{\mu n I S}{2 L t_0} \left[ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Phi \left( \frac{u}{\sqrt{1 - t_0/t}} \right) - \frac{u e^{-u^2 / (1 - t_0/t)}}{\sqrt{1 - t_0/t}} \right]。 \quad (14b)$$

联合感应段和衰减段的感应磁场和电动势, 就可获得全程的感应磁场  $h_z(t)$  和电动势  $V_z(t)$ 。

当圆形半径等效为方形回线边长时, 式(13)和(14)中有  $u = \sqrt{\mu_0 L^2 / (\pi \rho t)}$ , 因此, 由  $u$  的表达式可

以推出全程视电阻率  $\rho$  的公式为

$$\rho = \mu_0 L^2 / (\pi t u^2) \quad (15)$$

据此, 采用二分搜索算法<sup>[15]</sup>获得  $u$ , 然后代入式 (15) 便可求出全程视电阻率  $\rho$  值。

### 4.2 全程视电阻率求解算法分析与求解精度验证

图 3 给出了感应段的瞬变场与  $u$  的对应关系。可见, 磁场  $h_1(t)$  和电动势  $V_1(t)$  在该段与  $u$  均保持单调的关系, 因此, 在该段, 利用磁场或电动势均可求得唯一的视电阻率值。

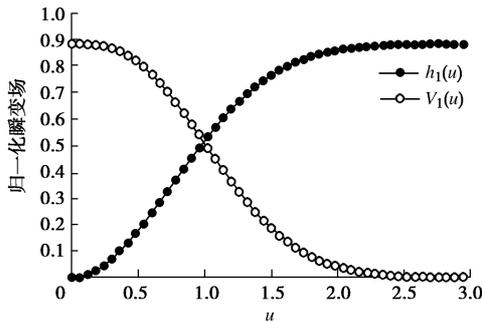


图 3 感应段归一化瞬变场曲线

Fig. 3 Normalized curve of transient field at induction stage

图 4 为衰减段瞬变场与  $u$  的关系曲线图。可见, 磁场  $h_2(t)$  与  $u$  仍具单调特性, 是  $\rho$  的单值函数, 利用磁场可求得视电阻率唯一解。而在该段, 电动势  $V_2(t)$  是  $u$  的分段单调函数,  $V_2(t)$  与  $\rho$  存在 3 种关系: 当  $V_2(t)$  处于曲线转折点时,  $u$  有唯一值,  $\rho$  有唯一解; 当  $V_2(t)$  大于曲线转折点处的核函数值时,  $u$  不存在,  $\rho$  无解; 当  $V_2(t)$  小于转折点处的幅值时, 对应两个  $u$  值,  $\rho$  有两个解, 分别对应瞬变场的早期和晚期<sup>[6]</sup>。

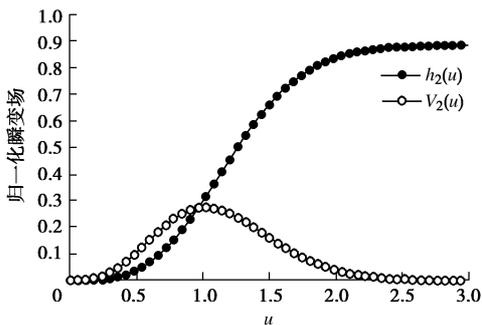


图 4 衰减段归一化瞬变场曲线

Fig. 4 Normalized curve of transient field at attenuation stage

由上述分析可知, 在瞬变场的全程范围内, 利用感应磁场求解视电阻率具有唯一值; 而利用感应电动势求解, 在衰减段存在多种情况, 不利于真实解的获得。因此, 本文选用感应磁场求解视电阻率。

为验证所求视电阻率的解析精度, 采用实际坑道超前探测参数, 取  $n = 40$ ,  $I = 10 \text{ A}$ ,  $L = 2 \text{ m}$ , 均匀全空间电阻率  $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ , 以电流关断起点为采样零时刻, 选择关断时间为  $t_0 = 100 \mu\text{s}$  代入式 (13a)、

(13b), 计算线性关断下瞬变场全程响应数据, 然后利用该数据反求  $u$ , 进一步获得视电阻率  $\rho_s$ 。

图 5 为  $\rho_s$  验证结果图。可见, 理论瞬变场的视电阻率计算值与真值非常接近, 在早延时段, 误差小于 0.005%; 在晚延时段, 计算值有轻微振荡, 但其最大误差不超过 0.08%, 表明视电阻率计算精度高。

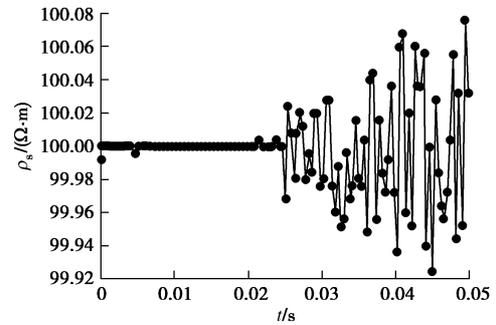


图 5 视电阻率求解算法验证结果

Fig. 5 Results of validation of apparent resistivity

### 4.3 物理模型实验

为体现线性全程视电阻率算法的优越性, 在室内布置了相关物理模型实验。

#### (1) 实验平台

实验选择在充满水的有机玻璃水槽中进行, 实验时在模拟坑道前方放置一块铝板, 代替实际坑道掘进遭遇的含导水断层, 其表面积约为  $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ , 厚度为  $4 \text{ mm}$ , 图 6 为实验模型布置示意图。

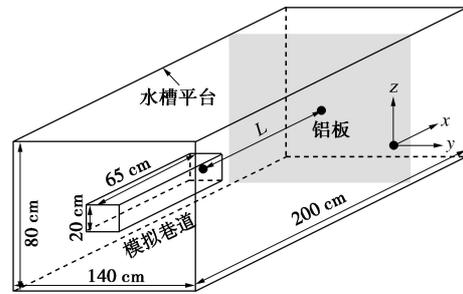


图 6 物理模型实验布置示意图

Fig. 6 Arrangement of physical model tests

#### (2) 仪器设备

实验采用 YCS256 型矿用本安型瞬变电磁仪, 并采用中心回线装置, 设计发射回线边长  $10 \text{ cm}$ , 匝数为 20, 用  $0.15 \text{ mm}^2$  规格的漆包线制成; 接收回线边长  $5 \text{ cm}$ , 匝数为 40, 采用  $0.01 \text{ mm}^2$  规格的漆包线制成 (如图 7), 通过对实验系统进行数据采集比较, 确定  $6.25 \text{ Hz}$  作为数据采集频率, 观测总时间窗口数设为 256, 装置固定条件下, 发射电流  $4.5 \text{ A}$ , 仪器记录该装置的关断时间为  $53 \mu\text{s}$ 。

#### (3) 数据采集

数据采集时, 使装置回线紧贴工作面上, 线圈与

掘进工作面中心共线, 将铝板分别放置于模拟坑道前方 20 cm 和 30 cm 处, 分别采集铝板的感应电动势数据。从 256 个观测时间窗口中选择 40 个, 起始窗口为 0.216 ms, 最后窗口为 14.6 ms, 中间各窗口基本呈对数等间隔分布, 提取后的感应电动势衰减曲线如图 8。

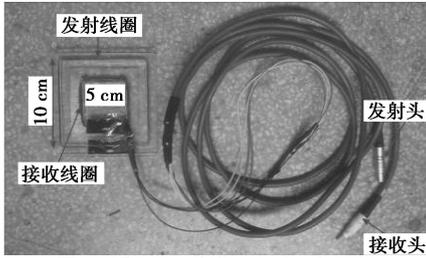


图 7 瞬变电磁发射与接收回线

Fig. 7 Transmit and receive coil of transient electromagnet

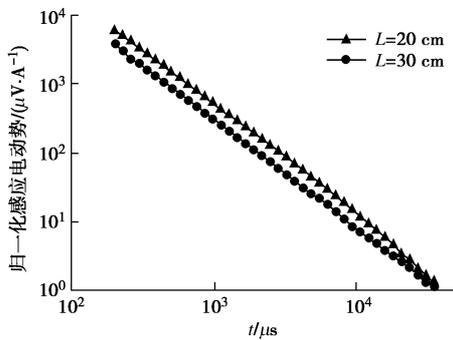


图 8 实测感应电动势曲线

Fig. 8 Measured curves of induced electromotive force

(4) 数据处理与分析

将测试数据进行全程线性关断和阶跃关断视电阻率解析与对比, 因仪器记录电流关断时间小于起始记录窗口时间, 故观测数据一直处于瞬变场的衰减段, 其视电阻率计算选择衰减段公式求解。

图 9 即为全程视电阻率对比图。可见, 在忽略曲线尾部因瞬变场波动影响的曲线形态变化外, 线性全程视电阻率曲线表现出明显的 H 型地电模型特征, 而阶跃视电阻率曲线则表现出 G 型地电特征。显然, 前者与实验地电模型较为符合, 对低阻异常有突出作用。另外, 相比  $L = 30 \text{ cm}$ ,  $L = 20 \text{ cm}$  时线性全程视电阻率算法对异常体的突出能力相对明显, 表明关断时间主要影响中浅层低阻异常的分辨能力。

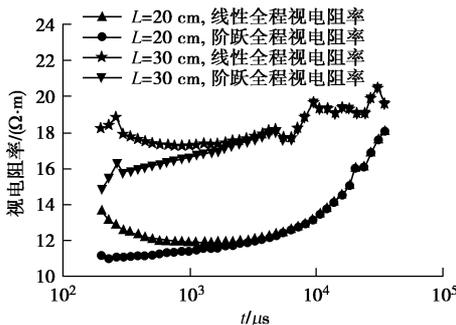


图 9 全程视电阻率曲线对比

Fig. 9 Comparison of the all-time apparent resistivity curves

4.4 实例应用

(1) 地质条件

淮南某矿 210108 工作面底抽坑道掘进前方存在 Fs6 断层, 三维地震资料显示该断层落差约 10 m, 距掘进工作面约 30 m, 为查明断层带的含导水性, 采用瞬变电磁超前探测。

(2) 仪器装置与数据采集

现场测试仪器及采集频率与上节实验一致, 不同的是改变采集装置中发射边长为 2 m, 10 匝, 接收线圈边长为 1.2 m, 20 匝, 另外考虑到实际地质体的瞬变场响应衰减快, 数据解析从 256 窗口中选择 80 个, 起止时间为 0.216~37.1 ms。图 10 为现场仪器实测电流关断曲线, 从中确定关断时间为 0.226 ms, 近似呈线性关断, 符合研究视电阻率算法的应用。

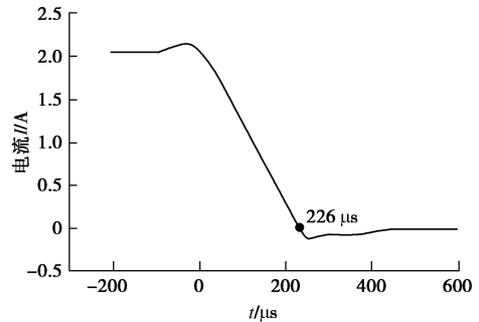


图 10 实测电流关断曲线

Fig. 10 Measured current curve of turn-off time

根据现场坑道掘进工作面宽 5 m, 高 4.5 m, 且坑道两帮金属体分布多, 为避免受到严重的金属干扰, 现场测试仅针对坑道正前方进行了测试, 共布置 10 个测点, 点距 0.3 m, 如图 11 所示。

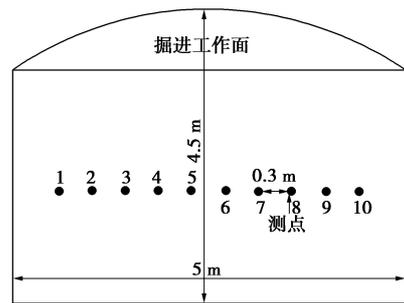


图 11 现场观测布置图

Fig. 11 Layout of site observation

(3) 数据解析与实际验证

数据处理时, 首先将实测感应电压转换成磁场<sup>[6]</sup>, 因本次观测在关断时间内分布有记录窗口, 考虑到一次场的干扰, 推导方形回线中心一次场可表示成

$$H_z^p(t) = \sqrt{2ni(t)}/\pi L \quad (16)$$

因此, 根据电流关断曲线, 可计算出一一次场, 将转换后的实测瞬变磁场减去该一次场, 然后将剩余磁场数

据代入式 (13a)、(13b) 和式 (15) 求得全程视电阻率值。

图 12 为现场实测的感应电动势剖面, 图 13 (a)、13 (b) 分别为其对应的全空间线性和阶跃关断的全程视电阻率拟断面图, 其中时深转换采用文献[17]的研究方法。对比可见, 图 13 (a) 在超前距离  $d$  为 30~45 m 段的低阻表现更为明显。后期坑道揭露该段确实为 Fs6 断层影响带, 坑道掘进时, 其顶板有较强的淋水现象。

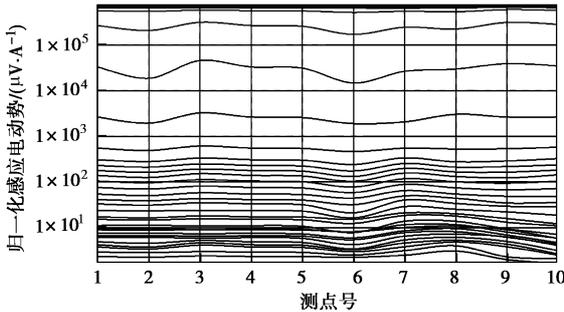


图 12 实测感应电动势剖面

Fig. 12 Section of measured induced electromotive force

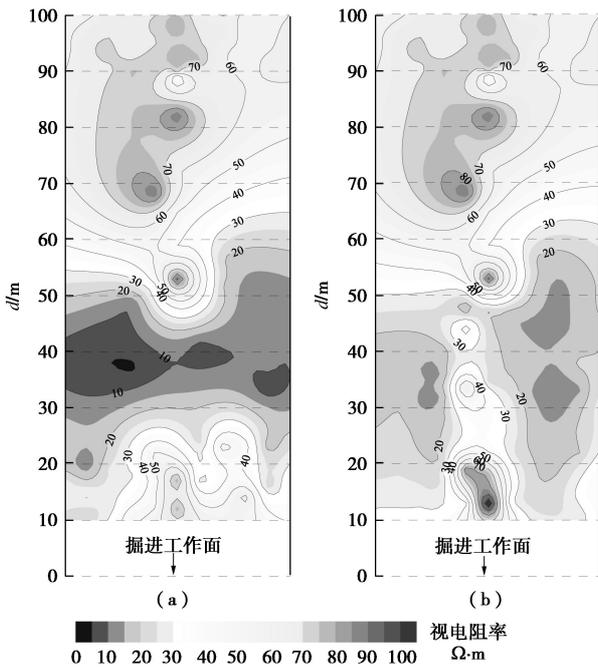


图 13 线性关断和阶跃关断的全程视电阻率拟断面图

Fig. 13 Pseudo section of whole field apparent resistivity calculated by linear and step turn-off currents

由此可见, 通过考虑关断时间的全空间全程视电阻率算法要优于常规阶跃关断的视电阻率结果, 增强了异常区的空间划分及含水性的判定能力。

### 5 结语与讨论

#### 5.1 结 语

以全空间水平电偶极子的瞬变场为基础, 给出坑

道瞬变电磁回线中心阶跃关断瞬变场响应表达式。通过对常归几种电流关断模式下的瞬变场响应特征分析, 确定了关断时间的影响范围, 其结果认为: 关断时间的存在, 对于采用阶跃关断理论的全程视电阻率算法而言, 会严重降低坑道掘进前方中、浅部含水体的分辨能力。笔者推导了线性关断下的全空间全程视电阻率计算公式, 分析了该算法的优越性, 以此来改进坑道超前探水解释方法。物理模型实验和实例应用结果均表明该算法对于坑道掘进前方浅层含水体的空间划分及含水性判定能力有较好的改善。

#### 5.2 讨 论

需要指出的是, 本文研究的视电阻率解释方法是基于发射电流线性关断条件下推导的, 当仪器实际的发射电流越接近线性关断, 其相应的视电阻率解析精度将越高, 因此, 如果能控制仪器发射电流呈线性关断, 将更有利于该方法更好的发挥作用。此外, 从图 2 中几种不同关断模式下的瞬变场响应曲线对比可见, 关断时间以后的瞬变场曲线衰减形态受关断时间的影响不大, 如果所采用仪器的发射电流偏离线性关断, 其结果对于衰减段的视电阻率求解影响相对较小, 但此时对于感应段的视电阻率解析结果将不正确, 依据目前瞬变电磁的实际应用状况, 瞬变场观测一般在关断时间以后, 因此, 研究结果可进一步为多种不同电流关断模式的仪器探测应用提供较高的视电阻率解析精度。

#### 参考文献:

[1] 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))

[2] 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))

[3] 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))
- [4] 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))
- [5] 李云波, 李好. 矿井瞬变电磁法富水体超前探测原理及应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2013, **40**(2): 69 - 72. (LI Yun-bo, LI Hao. Principle of advanced detection of water-enriched body with mine transient electromagnetic method and its application[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, **40**(2): 69 - 72. (in Chinese))
- [6] 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 J Geophys, 2010, **53**(3): 651 - 656. (in Chinese))
- [7] 杨海燕, 岳建华. 瞬变电磁法中关断电流的响应计算与校正方法研究[J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(6): 1947 - 1952. (YANG Hai-yan, YUE Jian-hua. Research on response calculation and correction technique of turn-off current in the transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2008, **23**(6): 1947 - 1952. (in Chinese))
- [8] 白登海, MEJU M A. 瞬变电磁法中两种关断电流对响应函数的响极其应对策略[J]. 地震地质, 2001, **23**(2): 235 - 251. (BAI Deng-hai, MEJU M A. The effect of two types of turn-off current on TEM response and the correction techniques[J]. Seismology and Geology, 2001, **23**(2): 235 - 251. (in Chinese))
- [9] 杨云见, 王绪本, 何展翔. 瞬变电磁法中的斜阶跃波效应及常规的几种校正方法分析[J]. 物探化探计算技术, 2006, **28**(2): 129 - 132. (YANG Yun-jian, WANG Xu-ben, He Zhan-xiang. The effect discussion of ramp time and some general corrective methods of transient electromagnetic method[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, **28**(2): 129 - 132. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] NABIGHIAN M. 勘查地球物理电磁法[M]. 赵经祥, 译. 北京: 地质出版社, 1992. (NABIGHIAN M. Electromagnetic methods in applied geophysics[M]. ZHAO Jing-xiang, trans. Beijing: Geological Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [12] FITTERMAN D V, ANDERSON W L. Effect of transmitter turn-off time on transient soundings[J]. Geoplot, 1987, **24**(2): 131 - 146.
- [13] 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))
- [14] 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))
- [15] 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))
- [16] 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))
- [17] 于景邨, 刘志新, 刘树才. 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 Jing-cun, LIU Zhi-xing, LIU Shu-cai. 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. (in Chinese))