·非地震·　　文章编号:1000-7210(2011)02-326-05

瞬变电磁法大定源回线斜阶跃波响应计算

刘　正*①②　杨　生②

(①昆明理工大学,云南昆明 650093;②中国有色金属矿产地质调查中心,北京 100012)

刘正,杨生.瞬变电磁法大定源回线斜阶跃波响应计算.石油地球物理勘探,2011,46(2):326～330

摘要　为了更准确地计算全区视电阻率,本文推导出瞬变电磁法中发射电流为斜阶跃波条件下,大定源回线装置的感应电动势解析表达式。该方法可在计算大定源回线全区视电阻率时,消除关断时间的影响,减小理论响应值与实测响应值之间的误差,同时避开了数值积分的近似运算,提高了计算精度和计算效率。理论和实际应用实例表明,此法所具有的优点是瞬变电磁其他计算方法不能相比的。

关键词　瞬变电磁法　大定源回线　感应电动势　斜阶跃波

中图分类号:P631　　文献标识码:A

1　引言

大定源回线装置是瞬变电磁法(TEM)中的主要装置之一[1,2]。因其工作效率高,发射磁矩大,抗干扰能力强,特别是在面积勘探和地形复杂地区工作时,大定源回线瞬变电磁法自然成为首选的勘探方法[3～5]。但目前对大定源回线装置的数据处理还存在诸多问题:①通常对大回线装置采集的资料采用中心回线的公式进行近似处理解释,在高阻区且是晚期道这种近似是可接受的,但在低阻区或早期道,因感应电动势与收发位置相关,近似的解释会得出错误的结果;②Raiche 曾于 1987 年采用拉普拉斯变换的方法推出了阶跃波条件下的矩形大定源回线感应电动势响应公式[6],随后又有一些关于该公式的使用效果的文献发表。然而真正的阶跃波的发射条件是无法满足的,如今尚没有一台瞬变电磁仪器的发射系统能实现发射阶跃波信号,实际发射的都是斜阶跃波信号,故存在关断效应,特别是对大定源回线装置,由于发射框边长大,相应的关断时间一般会很长,用阶跃波的公式处理实测数据误差较大,尤其是早期道数据几乎无法利用,所以消除关断效应显得非常必要。因此人们关心研究 TEM 方法关断效应的问题[7～11]。参考文献[9]给出了几种装置的斜阶跃波的响应解析式,但没有给出大定源回线装置的解析式。

为了更准确地计算全区视电阻率,本文推导了发射电流为斜阶跃波条件下的大定源回线的感应电动势解析式,可在计算大定源回线全区视电阻率时,消除关断效应的影响,同时避开数值积分近似计算,有效提高计算精度和效率。

2　阶跃波响应计算公式

设均匀半空间的电导率为 σ,大定源回线发射框为 T_x,其边长为 L_x 和 L_y,水平接收线圈为 R_x(图 1)。

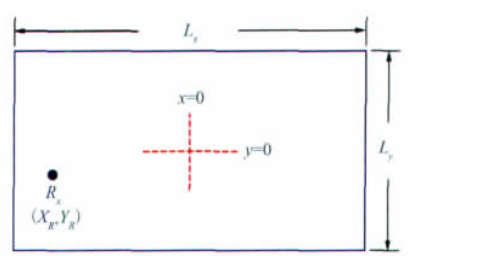

图 1　大定源回线装置 T_X-R_X 平面示意图

在阶跃波条件下,Raiche 将发射线圈看作水平电偶极子的积分,推导出的接收线圈 R_x 上的感应电动势(垂直分量)为

$$\varepsilon(t)=\frac{IA_R}{2\pi\sigma}[F(y_1,x_1)-F(y_1,x_2)+F(x_2,y_2)-F(x_2,y_1)+F(y_2,x_2)-F(y_2,x_1)+F(x_1,y_1)-F(x_2,y_2)] \quad (1)$$

*北京市朝阳区安外北苑 5 号院 4 区科研楼 206,100012。Email:ralf_001@126.com

本文于 2010 年 2 月 5 日收到,最终修改稿于 2011 年 2 月 16 日收到。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中:I 为发射框电流;A_R 为接收框 R_x 的有效接收面积,且

$$x_1 = X_R + L_x/2 \qquad x_2 = X_R - L_x/2$$
$$y_1 = Y_R + L_y/2 \qquad y_2 = Y_R - L_y/2$$

$F(x,y)$的解析式为

$$F(x,y) = \frac{2+x^2/r^2}{x^3}\frac{y}{r}\mathrm{erf}(u_r) - \frac{2u_y}{\sqrt{\pi}x^3}\left(\frac{x}{r}\right)^2 \times \exp(-u_r^2) - 2\frac{1+u_x^2}{x^3}\exp(-u_x^2)\mathrm{erf}(u_y) \tag{2}$$

其中:$r=\sqrt{x^2+y^2}$;$u_x=\sqrt{\frac{\mu\sigma}{4t}}x$;$u_y=\sqrt{\frac{\mu\sigma}{4t}}y$;$u_r=\sqrt{\frac{\mu\sigma}{4t}}r$;$\mathrm{erf}(z)$ 为误差函数。当误差函数的自变量较小时,由式(2) 计算 $F(x,y)$ 误差很大,于是通过下式将其展开,有

$$F(x,y) = \frac{4u_y\exp(-u_r^2)}{\sqrt{\pi}x^3}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{2^n}{(2n+3)!!}\times \left[2(u_r^2+u_x^2)u_r^{2n} - 2u_y^{2n+2} - (2n+3)u_x^2u_y^{2n}\right] \tag{3}$$

式中 $x=0$ 为 $F(x,y)$间断点。由于 $F(x,y)$是延一条发射边积分后的不定积分式的因式,而 $x=0$ 表明接收点恰好在此发射边的正上方,此时不可能有垂直分量,于是有

$$F(x,y) = 0 \qquad x = 0 \tag{4}$$

但是,由于接收点最多同时在两条发射框边上,所以总的感应电动势在此处不为零($t>0$),并在 $x=0$ 处连续。

3　斜阶跃波响应计算

设阶跃波激发的二次场瞬变值为 $\dot{B}(t)$,供电脉冲电流为 $I(t)$,关断期间的斜坡电流 $I'(t)$激发的二次场的瞬变值为 $\dot{B}'(t)$,$\dot{B}(t)\propto \mathrm{d}I'(t)/\mathrm{d}t$,$\dot{B}'(t)$为输出的过渡过程;采样的零时刻选在关断电流的终点。设 $I(t)=1$,关断时间为 t_{of},如图 2 所示,则有

$$\dot{B}'(t) = \frac{1}{t_{\mathrm{of}}}\int_t^{t+t_{\mathrm{of}}}\dot{B}(r)\mathrm{d}r \tag{5}$$

由式(5)可知线性关断效应可通过对理想阶跃关断响应值 $\dot{B}(t)$ 在 t_{of} 时间内取平均得到,设 $B(t)=\int\dot{B}(t)\mathrm{d}t$,由牛顿—莱布尼兹法则有

$$\dot{B}'(t) = \frac{B(t)\,|_t^{t+t_{\mathrm{of}}}}{t_{\mathrm{of}}} \tag{6}$$

由式(6)可知,若要计算 $\varepsilon(t)$的关断效应 $\varepsilon'(t)$,则需要将 $\varepsilon(t)$对时间 t 进行积分,如果直接使用数值累计方式进行积分运算,虽然实现较容易,但是误差较大,计算速度较慢,所以要考虑求取 $\varepsilon'(t)=\int\varepsilon(t)\mathrm{d}t$ 的解析式。由式(6)可知,$\int\varepsilon(t)\mathrm{d}t$ 可通过计算 $\int F(t)\mathrm{d}t$的积分式得到,其关键点就是如何推导 $\int F(t)\mathrm{d}t$的解析表达式。

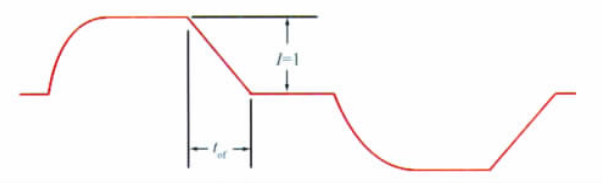

图 2　斜阶跃波

当式(2)中 x 和 y 固定之后,F 为时间 t 的函数,设

$$f(t) = \int F(t)\mathrm{d}t \tag{7}$$

令

$$F_1(t) = \frac{2+x^2/r^2}{x^3}\frac{y}{r}\mathrm{erf}(u_r) \tag{8}$$

$$F_2(t) = \frac{2u_y}{\sqrt{\pi}x^3}\left(\frac{x}{r}\right)^2\exp(-u_r^2) \tag{9}$$

$$F_3(t) = 2\frac{1+u_x^2}{x^3}\exp(-u_x^2)\mathrm{erf}(u_y) \tag{10}$$

则式(7)可写成

$$f(t) = \int F_1(t)\mathrm{d}t - \int F_2(t)\mathrm{d}t - \int F_3(t)\mathrm{d}t \tag{11}$$

下面分别计算式(11)中各项的不定积分:

(1)由式(2)可知,式(11)的第一项可以写成

$$\int F_1(t)\mathrm{d}t = \int\frac{2+x^2/r^2}{x^3}\frac{y}{r}\mathrm{erf}(z)\mathrm{d}t \tag{12}$$

其中 $z=\sqrt{\frac{\mu\sigma}{4t}}r$,将 $\mathrm{d}t=\frac{-\mu\sigma r^2}{2}z^{-3}\mathrm{d}z$ 代入式(12),得

$$\int F_1(t)\mathrm{d}t = A\left[z^{-2}\mathrm{erf}(z) + \frac{2}{\sqrt{\pi}}z^{-1}\exp(-z^2) + 2\mathrm{erf}(z)\right] \tag{13}$$

其中 $A=\frac{\mu\sigma ry(2+x^2/r^2)}{2x^3}$。

(2)同理,式(11)的第二项可以写成

$$\int F_2(t)\mathrm{d}t = \int\frac{2z_y}{\sqrt{\pi}x^3}\left(\frac{x}{r}\right)^2\exp(-z^2)\mathrm{d}t \tag{14}$$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中 $z_y=\sqrt{\frac{\mu\sigma}{4t}}y=\frac{y}{r}z$。将此结果代入式(14),得

$$\int F_2(t)\mathrm{d}t = B[z^{-1}\exp(-z^2)+\pi^{\frac{1}{2}}\mathrm{erf}(z)] \quad (15)$$

其中 $B=\frac{\mu\sigma y}{\sqrt{\pi}xr}$。

(3)同理式(11)的最后一项可以写成

$$F_3(t)\mathrm{d}t = \int 2\frac{1+z_x}{x^3}\exp(-z_x^2)\mathrm{erf}(z_y)\mathrm{d}t \quad (16)$$

其中:$z_y=\sqrt{\frac{\mu\sigma}{4t}}y=\frac{y}{r}z$; $z_x=\sqrt{\frac{\mu\sigma}{4t}}x=\frac{x}{r}z$。将此结果代入式(16),得

$$\int F_3(t)\mathrm{d}t = -C\left[-\frac{1}{2}z^{-2}\exp(-z_x^2)\mathrm{erf}(z_y)-\frac{y}{\sqrt{\pi}r}z^{-1}\exp(-z^2)-\frac{y}{r}\mathrm{erf}(z)\right] \quad (17)$$

其中 $C=\frac{\mu\sigma r^2}{x^3}$。

将式(13)、式(15)、式(17)联立求解,得

$$f(t) = Az^{-2}\mathrm{erf}(z)+A\frac{2}{\sqrt{\pi}}z^{-1}\exp(-z^2)+2A\mathrm{erf}(z)-Bz^{-1}\exp(-z^2)-B\sqrt{\pi}\mathrm{erf}(z)-\frac{1}{2}Cz^{-2}\exp(-z_x^2)\mathrm{erf}(z_y)-C\frac{y}{\sqrt{\pi}r}z^{-1}\exp(-z^2)-C\frac{y}{r}\mathrm{erf}(z)$$

将上式整理可得

$$f(t) = \frac{\mu\sigma r z^{-2}}{2x^3}\left[\frac{1}{2}\left(2+\frac{x^2}{r^2}\right)\mathrm{erf}(z)-r\exp(-z_x^2)\mathrm{erf}(z_y)\right]-\frac{\mu\sigma y}{2\sqrt{\pi}xr}\left[z^{-1}\exp(-z^2)+\sqrt{\pi}\mathrm{erf}(z)\right] \quad (18)$$

式(18)中 z 值较小时可用展开式计算,斜阶跃波垂直响应感应电动势为

$$\varepsilon(t) = \frac{\varepsilon'(t)\,|_t^{t+t_{\mathrm{of}}}}{t_{\mathrm{of}}} \quad (19)$$

其中

$$\varepsilon'(t) = \frac{IA_R}{2\pi\sigma}[f(y_1,x_1,t)-f(y_1,x_2,t)+f(x_2,y_2,t)-f(x_2,y_1,t)+f(y_2,x_2,t)-f(y_2,x_1,t)+f(x_1,y_1,t)-f(x_2,y_2,t)] \quad (20)$$

式(19)的零时刻选在关断结束时刻,当零时刻选在关断的开始时刻时,公式变为

$$\varepsilon(t) = \frac{\varepsilon'(t)\,|_{t-t_{\mathrm{of}}}^{t}}{t_{\mathrm{of}}} \quad (21)$$

4 算例

4.1 算例1

算例1为给定均匀半空间的感应电动势计算。计算参数为:发射线框长 $L_x=600\mathrm{m}$,宽 $L_y=200\mathrm{m}$,发射电流 $I=10\mathrm{A}$,有效接收面积 $A_R=200\mathrm{m}^2$,关断时间 $t_{\mathrm{of}}=300\mu\mathrm{s}$,电导率 $\sigma=0.01\mathrm{S/m}$,采用 EM67 的高频时间衰减,感应电动势的时间衰减效果见图3和图4,其中图3的接收点为中心点,图4的接收点为 $X_R=\pm500\mathrm{m}$, $Y_R=0$。

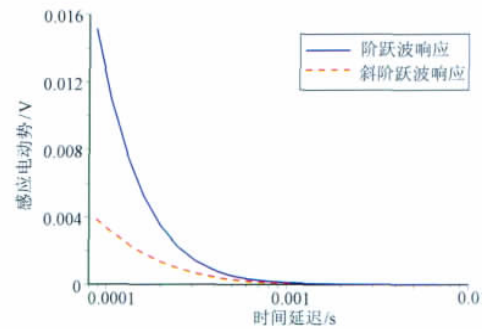

图3 中心点处的感应电动势衰减曲线

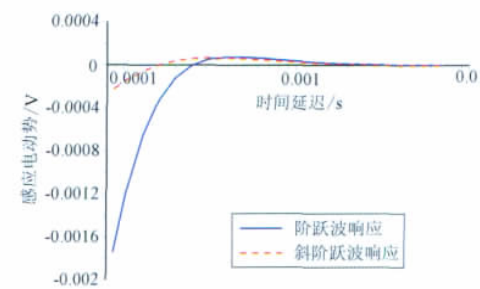

图4 $X_R=\pm500\mathrm{m}$, $Y_R=0$ 处的感应电动势衰减曲线

由图3和图4可看出,在早期道斜阶跃波响应与阶跃波响应的相对变化量非常大,随着时间的增大,变化量逐渐减小,中心点处的响应值变化见表1,其中响应值的百分比变化量的计算是用差值与阶跃波响应值相比较得出的。响应值的相对变化量曲线见图5。

由图5及表1可看出,在中心点处时间延迟为88.13μs时的变化量达到74.4%,变化幅度显著;在6978μs处其变化量亦有5.1%之多。由图3与图4的比较来看,在远离中心点的位置上相对变化量比中心点的更大一些。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　中心点处响应值对比表

时间延迟/s	阶跃波响应/V	斜阶跃波响应/V	ε 差值/V	响应值变化/(%)
0.00008813	0.015143	0.003878531	0.011263981	74.38647372
0.0001069	0.010977	0.003125107	0.007851405	71.52914462
0.0001313	0.007681	0.002439734	0.005241253	68.23671519
0.0001619	0.00525	0.001858895	0.003391511	64.59521085
0.0002006	0.003494	0.001378029	0.002116347	60.56437299
0.0002506	0.002247	0.000987128	0.001260019	56.07194477
0.0003144	0.001407	0.000686088	0.000720874	51.23621122
0.0003956	0.000861	0.000463528	0.000397429	46.16129967
0.0004994	0.000515	0.000304215	0.000211134	40.96908169
0.0006313	0.000304	0.000194779	0.000108794	35.83783339
0.0007994	0.000176	0.000121749	5.44375×10^{-5}	30.89767832
0.001014	0.000101	7.44×10^{-5}	2.65103×10^{-5}	26.26869034
0.001287	5.73×10^{-5}	4.47×10^{-5}	1.26384×10^{-5}	22.05997883
0.001636	3.22×10^{-5}	2.63×10^{-5}	5.89625×10^{-6}	18.30739652
0.002081	1.80×10^{-5}	1.53×10^{-5}	2.70586×10^{-6}	15.04284948
0.002648	1.00×10^{-5}	8.77×10^{-6}	1.22540×10^{-6}	12.25697063
0.003373	5.52×10^{-6}	4.98×10^{-6}	5.47509×10^{-7}	9.909737035
0.004297	3.04×10^{-6}	2.80×10^{-6}	2.42519×10^{-7}	7.965350607
0.005475	1.67×10^{-6}	1.57×10^{-6}	1.06646×10^{-7}	6.371401378
0.006978	9.18×10^{-7}	8.71×10^{-7}	4.65965×10^{-8}	5.075453591

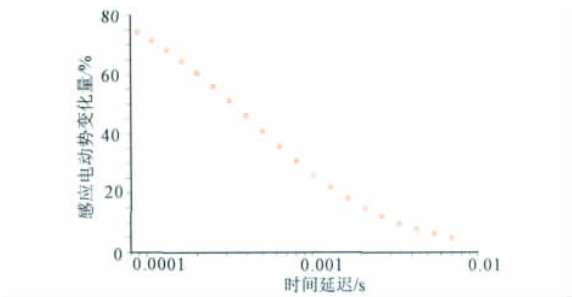

图 5　中心点处响应值相对变化量曲线图

4.2　算例 2

算例 2 为给定电阻率的均匀半空间视电阻率的理论计算。计算参数为:发射线框长 $L_x=400$m,宽 $L_y=400$m,发射电流 $I=1$A,有效接收面积 $A_R=1\text{m}^2$,关断时间 $t_{of}=300\mu$s,电阻率分别为 100 Ω·m 和 1000Ω·m。采用 EM67 的中频 20 道时间衰减,在不加关断时间的情况下,中心点处的电阻率求解结果如图 6 所示,框外距中心点 400m 处的电阻率的求解结果如图 7 所示。

算例 2 使用 EM67 中频 20 道时间延迟,其第 14 时间道与算例 1 的第 20 时间道延时相当。在 6543μs 处,算例 2 的相对误差在 3.8%～4.0%之间,此时假设电阻率为 1000Ω·m,则视深度已超过 2200m。从图 6 和图 7 可看到,大定源回线的关断效应很大;对比图7和图6可发现在发射参数相同的情况下,接收点在框外时的关断效应比在框内大。

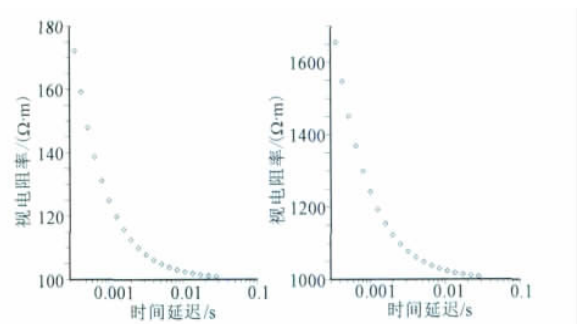

图 6　不考虑关断时间,在给定电阻率均匀半空间条件下计算的全区视电阻率

接收点在中心点。(左) $\rho=100\Omega\cdot$m;(右) $\rho=1000\Omega\cdot$m

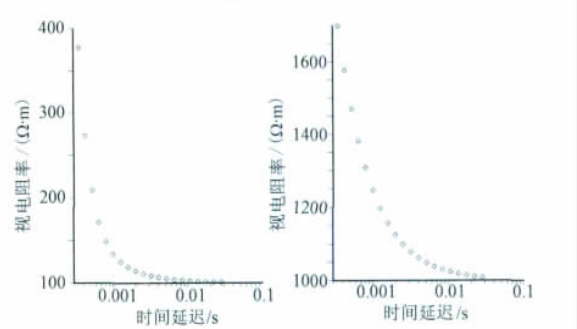

图 7　不考虑关断时间,在给定电阻率均匀半空间条件下计算的全区视电阻率

4.3　算例 3

算例 3 为实测数据的计算。工区位置为辽宁省

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

青城子，计算参数为：发射线框长 $L_x=300$m，宽 $L_y=600$m，发射电流 $I=20$A，有效接收面积 $A_R=200$m^2，关断时间 $t_{of}=336\mu$s。采用EM67的中频20道时间衰减，在框内中心点处，视电阻率求解结果如图8所示，其百分比校正量如图9所示，算例3的视电阻率百分比校正量与算例2基本相当，在6543μs处相对校正量为4.3%。

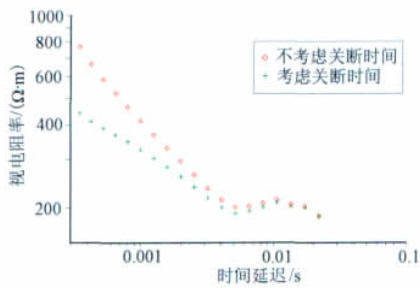

图8 算例3全区视电阻率

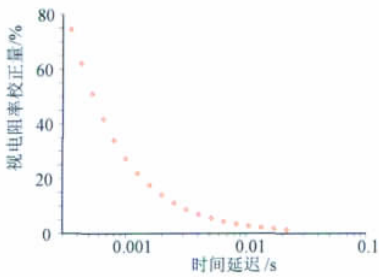

图9 算例3百分比校正量曲线图

5 结束语

为了消除关断效应，本文推导了大定源瞬变电磁法斜阶跃波响应的计算解析式，使用该式计算全区视电阻率有以下优点：

(1)计算精度高。相对于其他斜阶跃波关断效应方法来说，用积分解析式计算避免了数值积分的累计误差，计算精度最高；

(2)计算速度快。虽然斜阶跃波响应解析式比较复杂，在理论上的计算耗时要比阶跃波计算增加一倍多。但是因为使用解析式方式计算，计算速度远比使用数值累计积分的计算方式快，而且计算速度不受计算精度的影响。

(3)在早期道，斜阶跃波响应值与理想阶跃波的差值相当大，即使到晚期，亦相当可观。如不考虑关断时间，理论响应值与实测响应值之间会出现很大的误差，而且在计算全区视电阻率时会出现多解现象，如果计算误差过大，将会影响到多解性的判别，最终影响到全区视电阻率曲线形态。因此关断效应的解析式推导对于全区视电阻率的计算具有重要意义。

参考文献

[1] 牛之琏. 时间域电磁法原理. 湖南长沙：中南大学出版社，2007

[2] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探. 北京：地质出版社，1998

[3] 张成范，翁爱华，孙世栋等. 计算矩形大定源回线瞬变电磁测深全区视电阻率. 吉林大学学报(地球科学版)，2009，39(4)：755～758
Zhang Cheng-fan，Weng Ai-hua，Sun Shi-dong et al. Computation of whole-time apparent reisistivity of large rectangular loop. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition)，2009，39(4)：755～758

[4] 李建慧，刘树才，李富等. 大定源瞬变电磁法矩形发射回线激发的电磁场. 物探化探计算技术，2008，30(2)：154～157
Li Jian-hui，Liu Shu-cai，Li Fu et al. Electromagnetic field transmitted by rectangular loop in large fixd tem. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*，2008，30(2)：154～157

[5] 石显新，闫述，傅君眉等. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进. 地球物理学报，2009，52(7)：1931～1936
Shi Xian-xin，Yan Shu，Fu Jun-mei et al. Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method. *Chinese J Geophys*，2009，52(7)：1931～1936

[6] Raiche A P. Trainsient electromagnetic field computations for polygonal loops on layered earth. *Geophysics*，1987，52(6)：785～793

[7] 杨生. TEM中心回线法考虑关断时间的全区视电阻率计算方法. 物探与化探，2008，32(6)：647～651
Yang Sheng. All-time resistivity calculation in consideration of time-off using the central TEM loops method. *Geophysical & Geochemical Exploration*，2008，32(6)：647～651

[8] 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. 物探化探计算技术，2006，28(2)：129～133
Yang Yun-jian，Wang Xu-ben，He Zhan-xiang. The effect discussion of ramp time and some general corrective methods of Transient electromagnetic method. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*，2006，28(2)：129～133

[9] 孙天财. 发射电流波形对瞬变电磁测量结果影响及校正的研究. 重庆大学硕士学位论文，2008

[10] Asten M W，Prince D G. Transient EM sounding by the in/out-loop method. *Exploration Geophysics*，1985，16(3)：165～168

[11] Fitterman D V，Anderson W L. Effect of transmitter turn off time ontransient sounding. *Geoexploration*，1987，24(2)：131～146

(本文编辑：冯杏芝)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

163000,China

Neopaleozoic tectonic evolution and hydrocarbon analysis in Bamai-Tazhong area, Tarim Basin. Guo Qian[1,2], and Pu Ren-hai[1,2]. *OGP*, 2011, 46(2): 317～325

From a paleostructure map of Bamai-Tazhong area in Tarim Basin based on drilling information and seismic data, and through the restoration of Neopaleozoic deposit thickness in Bamai-Tazhong, this paper elaborates that hydrocarbon, after entering reservoir, migrated from the ancient structure nose shaped salient to pitch up direction, and that the hydrocarbon migration, accumulation and dissipation were revealed after leaving source rocks or source rock area. The observations are obtained as follows: 1. The ancient uplift and depression pattern of Bamai-Tazhong in Neopaleozoic period was very different from nowadays, these two uplifts were preliminarily formed during Neopaleozoic, and had the NW extension direction during Carboniferous. The high point of Tazhong uplift was further west than the present time. Hetian River area between these two uplifts is now a low uplift, but it used to be an ancient depression and saddle. The SW Maikit slope was a WE depression which extended deeper from west to east. 2. The top surface tectonic evolution of Donghe sandstone show that oil and gas generated in Manjiaer depression migrated to north before latest cretaceous, failed to accumulate in Tazhong uplift. Hydrocarbon migrated to south after neogene and was captured into reservoirs at the No.1 and No.10 high traps in Tazhong uplift, while low structure traps in the south slope of Tazhong uplift could not get hydrocarbon. This probably is the reason for a few dry holes. 3. The north Maikit slope and Hetian River low uplift were migration and accumulation areas of multi-struture period. The high structure and the north side of Tazhong uplift were provision and accumulation areas to Manjiaer depression during himalayan period. The eastern area of Tazhong uplift was the final migration oriented area and also the updip pinch-out zone of Donghe sandstone, which consists of multiple sets of reservoirs, a favorable exploration area in Bamai-Tazhong.

Key words: Tazhong uplift, Bachu uplift, Maikit slope, Neopaleozoic, tectonic evolution, erosion thickness restoration, hydrocarbon migration

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shanxi, 710069, China

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shanxi, 710069, China

Computations of ramp turn-off response of a large fixed rectangle transmitting loop. Liu Zheng[1,2] and Yang Sheng[2]. *OGP*, 2011, 46(2): 326～330

In order to accurately calculate all-time apparent resistivity, the analytic formula of the transient electromagnetic response for ramp turn-off of a large fixed rectangle transmitting loop is derived in the article. During calculations of apparent resistivity, effects of ramp turn-off can be revised and approximations of numerical integration can be avoided. So the calculation precision will be improved greatly and computer time will be less. Calculations using the analytic formula show its special advantage by theoretical practical examples.

Key words: transient electromagnetic method, large fixed rectangle transmitting loop, induced electromotive force, ramp turn-off

1. Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650093, China

2. China Nonferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing, 100012, China

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net