

# 直升机 TEM 系统关键技术指标与探测深度分析

王卫平

中国国土资源航空物探遥感中心,北京,100083

**摘要** 直升机 TEM 系统在国际上正处于开发实验阶段,还需 2~3 年时间才可投入商业应用。该系统即灵活、又有一定的勘探深度,在国外已经取得了一定的勘查效果,因此,它是今后航空电磁测量技术的发展趋势。直升机 TEM 系统的灵活性符合中国多山的勘查条件,而它的勘探深度有多大是急需弄清的另一关键的问题。本文利用水平层状大地模型计算出的瞬变响应,分析了装置类型、磁矩、噪声与探测深度的关系,并得出了直升机 TEM 系统,在中国几种典型水文地电模型条件下的最大勘探深度,这对于论证我国是否发展直升机 TEM 系统提供了理论依据。

**关键字** 直升机 TEM 系统 水平层状大地模型 关键技术指标 瞬变响应 探测深度

## An Analysis of Pivotal Technique Specification of the Helicopter TEM System and Its Detection Depth

WANG Weiping

China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing, 100083

**Abstract** The Helicopter TEM system remains in the stage of development and experimentation in the world, and is likely to be used in commercial exploration in about two or three years. With its flexibility and a certain detection depth, this system has got some good prospecting results. It has therefore become the development trend of the air-borne electromagnetic survey technique in future. Is this system suitable to the concrete situation of China? It is the air-borne electromagnetic technicians who can answer this question. The flexibility of the helicopter TEM system make it suitable to mountainous conditions of China, but its detection depth remains a key question which needs to be solved. Based on the horizontal sandwich earth model, the authors calculated transient electromagnetic response and analyzed the relation of the installation, moment and noise to the detection depth. As a result, the maximum detection depths of the helicopter TEM system are obtained under the condition of several typical geoelectric models of China, and the theoretical basis for the development of the helicopter TEM system in China is provided.

**Key words** Helicopter TEM System horizontal sandwich earth model pivotal technique specification transient electromagnetic response detection depth

直升机 TEM 系统是利用直升机作为运载工具的时间域电磁测量系统,由于时间域电磁系统是在一次场断开时,测量瞬变二次场的衰减过程,受一次场的影响较小,因此相对于频率域电磁系统具有较大的探测深度。该系统具有多种装置类型,发射与接收线圈均放在吊舱中,系统较为灵活,适合在地形复杂的地区进行矿产和勘查工作。为了了解直升机 TEM 系统的勘探深度,对在水平层状大地上方,常用的各种直升机 TEM 系统的瞬变电磁响应进行了正演模拟计算,结合其关键技术指标,得出了该系统在我国典型地电条件下的理论最大探测深度。

## 1 层状大地模型数学算法

根据目前直升机 TEM 系统的装置类型,将其归纳为以下数学装置模型(图 1)。

时间域航空电磁法的一维正演,要求计算水平层状大地上空,水平和/或垂直磁偶极源在其断开后,于空中水平和/或垂直线圈内生成的感应电动势随时间的衰变过程。设大地为  $n$  层水平层,各层电阻率和厚度分别为  $(\rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots, \rho_n, h_n \rightarrow \infty)$ 。发射线圈(磁偶极源)TX 位于地面上空,高度为  $h$ ;接收线圈 RX 的高度为  $z$ ,与 TX 的水平距离

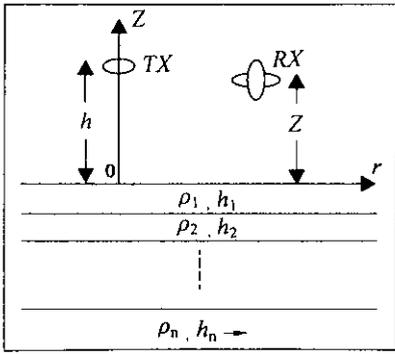


图1 水平层状大地上方磁偶极源场的计算模型

Fig.1 Calculation model of magnetic dipole field above horizontal layered earth

图中发射线圈为离地高度  $h$  的垂直或水平偶极子,接收线圈为离地高度  $z$  的水平和垂直线圈,收发线圈距离为  $r$

Transmit coil is vertical or horizontal dipole and it's altitude to the earth is  $h$ , receive coil is vertical or horizontal dipole and it's altitude to the earth is  $z$ , interval between transmit and receive coil is  $r$

为  $r$ 。设圆柱坐标系原点  $O$  于 TX 正下方地面上,  $Z$  坐标轴垂直地面向上。

垂直发射磁偶极子,在拉氏变换( $s$ )域中接收线圈处的径向(水平)磁场分量  $H_r^z$  和垂直磁场分量  $H_z^z$  的表达式(Knight 等,1982)

$$H_r^z(s) = \frac{m}{4\pi s} \int_0^\infty [e^{u\alpha(z-h)} r_{TE} e^{-u\alpha(z+h)}] \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

$$H_z^z(s) = \frac{m}{4\pi s} \int_0^\infty [e^{u\alpha(z-h)} + r_{TE} e^{-u\alpha(z+h)}] \frac{\lambda^3}{u} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2)$$

水平发射磁偶极子,在拉氏变换( $s$ )域中的径向(水平)磁场分量  $H_r^h$  和垂直磁场分量  $H_z^h$  的表达式(Knight 等,1982)

$$H_r^h(s) = \frac{-m}{4\pi s} \int_0^\infty [e^{u\alpha(z-h)} - r_{TE} e^{-u\alpha(z+h)}] [\lambda^2 J_0(\lambda r) - \frac{\lambda}{r} J_1(\lambda r)] d\lambda \quad (3)$$

$$H_z^h(s) = \frac{m}{4\pi s} \int_0^\infty [e^{u\alpha(z-h)} + r_{TE} e^{-u\alpha(z+h)}] \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda \quad (4)$$

式中,  $m$  为  $I(S_{TX})$  为发射磁偶极矩 ( $\text{Am}^2$ ),  $S_{TX}$  为发射线圈有效面积 ( $\text{m}^2$ ),  $I$  为发射线圈中的供电电流强度 (A),  $J^0$  和  $J^1$  为零阶和一阶贝塞尔函数,  $r_{TE}$  为反射系数,由递推公式得出(Nabighian 等,1988)

野外实测的感应电动势  $V$  与磁场分量  $H$  对时间  $t$  的一阶导数成正比

$$V = -S_{RX} \frac{dB}{dt} = -S_{RX} \mu_0 \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

式中,  $S_{RX}$  为接收线圈的有效面积 ( $\text{m}^2$ );  $\mu_0 = 4\pi \times$

$10^{-7}$  ( $\text{H/m}$ ) 是空气的磁导率。

把(5)和(1)至(4)式结合,计算感应电动势  $V$ 。首先采用一种纯实数运算、计算速度较快的算法1即 Gaver-Stehfest 概率变换算法(简称 G-S 变换)(Knight 等,1982)对  $r_{TE}$  做逆拉氏变换,对给定的时间  $t$ ,感应电动势的瞬变响应值  $V(t)$  可按(6)式,由拉氏变换域中变量  $s_m = \frac{\ln 2}{t} m$  ( $m = 1, 2, \dots, 16$ ) 的感应电动势值  $V(s_m)$  算出:

$$V(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{m=1}^n k_m \cdot V\left[\frac{\ln 2}{t} \cdot m\right] \quad (6)$$

式中,  $k_m$  是 G-S 变换系数。

用 Anderson (1979) 和昌彦君等 (1995) 的数值滤波算法计算其中的零阶和一阶贝塞尔函数的无限积分(汉克尔变换)。从而算得接收线圈内感应电动势的瞬变响应  $V(t)$ 。最后按下式计算占空比为 1 的正负方波的瞬变响应  $V^{ZF}(t)$ :

$$V^{ZF}(t) = \sum_{i=1}^8 (-1)^{n[\ln(0.5(i+3)+0.55)]} V[t + (i-1)t_d]$$

式中,  $t_d$  为正负方波的脉宽;  $n$  为取整函数。

对发射磁矩为  $1(\text{Am}^2)$  和接收线圈等效面积为  $1(\text{m}^2)$ , 计算归一化感应电动势的瞬变响应,即接收线圈有效灵敏度  $\text{dB}/\text{dt}$  ( $\text{nT/s}$ ), 计算时供电波形是占空比为 1 的正负方波; 供电方波脉宽取为  $3 \sim 10$  ms; 方波的断电延迟时间为零; 采样时间按等比序列分布于  $0.013$  ms 至脉宽 ( $3$  ms 或  $10$  ms) 之间, 共 14 个观测装置包括以下 4 种类型。第一种装置 (NARRAY=1): 水平线圈发射, 水平线圈接收; 第二种装置 (NARRAY=2): 垂直线圈发射, 垂直线圈接收; 第三种装置 (NARRAY=3): 水平线圈发射, 垂直线圈接收; 第四种装置 (NARRAY=4): 垂直线圈发射, 水平线圈接收; 发射线圈高度和接收线圈高度取为  $30 \sim 50$  m; 发射线圈与接收线圈的水平距离取为  $0.1 \sim 50$  m ( $0.1$  m 收发距用于近似表示收发同心装置)。据有关资料, 西部和东部的典型水文地电模型的参数选择见表 1。

表 1 典型水文地电模型一览表

Table 1 The table of geoelectric model of typical hydrology

层	西部典型地区		东部非盐渍化	
	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	厚度/m	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	厚度/m
第一层	3, 5, 7, 10	30, 100, 150, 250, 300	50	100, 200, 300, 400, 500, 600
第二层	20	300	20	300
第三层	3	-	50	-

注: 第一层覆盖层的选取仅是为了分析系统的探测深度。

## 2 电磁响应特征与装置类型

以西部找水地电模型为例, 对不同装置类型的

直升机 TEM 系统的电磁响应特征、系统吊舱高度、收发距,以及大地导电性对瞬变响应的影响进行了计算,并对计算结果进行了分析。

### 2.1 感应电动势随时间的衰变态势

虽然不同装置测得的感应电动势(或磁感应强度对时间的变化率  $dB/dt$ )在数值上各不相同,但它们随时间变化的基本性态是一致的,即都随时间增大而衰减(图 2)。垂直线圈发射和垂直线圈接收装置衰减最慢,而水平线圈发射、垂直线圈接收和垂直线圈发射、水平线圈接收装置衰减最快。特别要指出的是,第三和第四种装置的感应电动势瞬变响应曲线完全相同,即第三和第四种装置是完全等效的(统称为正交装置)。

### 2.2 吊舱高度对瞬变响应的影响

由瞬变响应的计算公式可知,在计算瞬变响应时,只需计算公式中积分号内的第二项,而该项只与发射线圈高度及接收线圈高度之和  $h+z$  或  $H+Z$  有关。这就是说,在一维条件下,航空瞬变电磁法的响应只决定于发射线圈高度与接收线圈高度之和,而与两个高度的分别取值无关。

### 2.3 收发距对瞬变响应的影响

分别对  $r$  为 50 m, 30 m, 15 m, 8 m, 5 m, 1 m 和

0.1 m 等 7 种收发距的电磁响应进行计算,并作出相应的理论曲线(图 3)。通过分析可知,当收发距很大时,瞬变曲线变得比较复杂,随着收发距的减小,感应电动势和异常都变大,而当收发距  $r$  大于等于 15 m 时,已接近于  $r$  趋近于 0 时的渐近值。通过分析其他装置的计算数据可知,第一种装置瞬变响应随收发距  $r$  的变化性态,与第二种装置的相似;且在  $r$  趋近于 0 时的渐近情况下,第一种装置比第二种装置的响应值和绝对异常值都大一倍,而两种装置的相对异常值相同。第三种装置为正交装置的瞬变响应随收发距  $r$  的变化性态,与第一和第二种装置(统称平行装置)的完全不同;特别是在收发距  $r$  大于等于 15 m 时,正交装置的感应电动势和绝对异常值与  $r$  成正比减小(因而相对异常值保持不变),且当  $r$  趋近于 0 时正交装置的响应值和异常值都趋于零。可见,平行装置适于采用小收发距,甚至采用同心装置。而正交装置适于采用较大的收发距,不宜采用同心装置。

### 2.4 供电脉冲宽度对地电模型瞬变响应的影响

通过对 3.0 ms 和 10.0 ms 两种供电脉冲宽度的计算结果对比可知,在寻找良导覆盖层(如上层电阻率  $3 \Omega \cdot m$ )下较大埋藏深度的高阻层或寻找较大埋藏深度的良导异常体(如  $3 \Omega \cdot m$  的良导体)时,

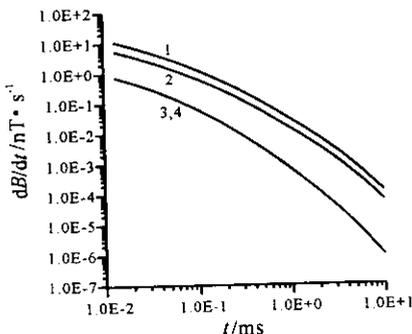


图 2 三层地电断面上,四种装置的归一化感应电动势理论瞬变响应曲线

Fig.2 Transient electromagnetic response curve about unitary induced electromotive force theory of four kind of installation above geoelectric section of three strata  
电断面参数:  $\rho_1-3 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2-20 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3-3 \Omega \cdot m$ ;  $h_1-100 m$ ,  $h_2-300 m$ ;  
装置参数:  $H_{TX}-30 m$ ,  $Z_{RX}-30 m$ ,  $TRDIST-2.5 m$ ,  
 $TD-10 ms$ ,  $TRMP-0$ ;  
曲线: 1- NARRAY = 1; 2- NARRAY = 2; 3- NARRAY = 3;  
4- NARRAY = 4

Geoelectric section parameter:  $\rho_1-3 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2-20 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3-3 \Omega \cdot m$ ;  
 $h_1 = 100 m$ ,  $h_2 = 300 m$   
Installation parameter:  $H_{TX}-30 m$ ,  $Z_{RX}-30 m$ ,  $TRDIST-2.5 m$ ,  
 $TD-10 ms$ ,  $TRMP-0$

Curve: 1- NARRAY = 1; 2- NARRAY = 2; 3- NARRAY = 3;  
万方数据 4- NARRAY = 4

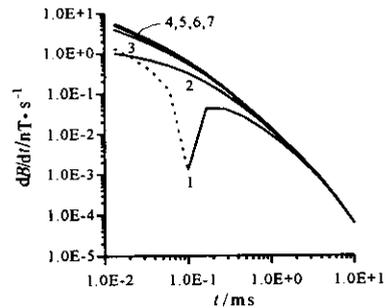


图 3 三层地电断面上,不同收发距  $r$  的归一化感应电动势理论瞬变响应曲线

Fig.3 Transient electromagnetic response curve about unitary induced electromotive force theory of different interval between transmit and receive coils above geoelectric section of three strata

曲线: 1- $r=50 m$ , 2- $r=30 m$ , 3- $r=15 m$ , 4- $r=8 m$ , 5- $r=5 m$ ,  
6- $r=2.5 m$ , 7- $r=0.1 m$

曲线 1 左支(虚线)为负值, NARRAY = 2 (采用第二种装置), 其余装置参数和地电断面参数同图 2

Curve: 1- $r=50 m$ , 2- $r=30 m$ , 3- $r=15 m$ , 4- $r=8 m$ ,  
5- $r=5 m$ , 6- $r=2.5 m$ , 7- $r=0.1 m$

Left part of curve (dashed line) is negative. NARRAY = 2 (the second installation), other installation parameter and geoelectric section parameter is same as fig.2

3.0 ms的供电脉冲宽度均难于发现。可见对于一般的地电条件,10.0 ms的供电脉冲宽度是必要的。

### 3 系统磁矩、噪声与探测深度

为了了解直升机 TEM 系统的探测深度,对于水平同心装置,磁矩为  $40 \times 10^4 \text{ Am}^2$ (其他参数:脉冲宽度 10 ms,线圈离地高度 30 m)的直升机 TEM 系统,在我国典型的水文层状大地模型的条件,进行了电磁响应特征、系统磁矩、噪声与探测深度的分析。根据目前国外直升机 TEM 系统的技术现状及发展趋势,系统的噪声水平选取 10 pt、25 pt、50 pt、100 pt 四个级别。地电模型选择了西部找水地电模型和东部非盐渍化找水地电模型。

#### 3.1 系统探测深度的评价方法

利用层状大地模型与均匀半空间模型的时间域电磁响应之差,分析电磁响应特征随时间的衰减关系。通过分析可以看出(图 4-a),不同埋深的地质体的瞬变电磁响应,在某一时间段均存在一个峰值区,认为该峰值区即为时间域电磁响应的最佳接收时间道。当某一电磁响应峰值区低于系统的噪声水平时,说明该系统已无法分辨有用的地质信息,将此电磁响应峰值区对应的模型体埋深,确定为该种系统的最大勘探深度。同理,通过瞬变电磁响应峰值随不同地质体埋深的衰减曲线特征(图 4-b),可以更清楚地分析最大穿透深度,即当衰减曲线与系统噪声水平相交时,其交点所对应的地质体埋深,即为该系

统的最大勘探深度。

#### 3.2 西部水文地电模型

对于西部找水地电模型,在瞬变响应与时间的关系曲线图中(图 4-a),随着目标物埋藏深度的增大,瞬变响应峰值的强度逐渐降低,这从瞬变响应峰值随目标物埋藏深度的关系图中(图 4-b),可以更清楚地看到这一特征。根据瞬变响应峰值与噪声水平的关系,确定了不同导电覆盖层、不同噪声水平与系统(磁矩取  $40 \times 10^4 \text{ Am}^2$ )探测深度的关系,并根据瞬变响应与磁矩的线性关系,从瞬变响应峰值随目标物埋藏深度的关系图中估算出系统磁矩与探测深度的关系,估算结果见表 2。当系统噪声水平从 10 pt 增加到 100 pt 时,探测深度从 204 m 降低到 132 m,由此可见系统噪声水平对探测深度影响较大,说明对于同类电磁系统,降低噪声水平是增大系统探测深度的主要因素。目前,国外直升机航空 TEM 系统的系统噪声水平可以达到 25 pt,若按此噪声水平计算,对于西部找水地电模型,覆盖层电阻率从  $3 \Omega \cdot \text{m}$  变化到  $10 \Omega \cdot \text{m}$  时,探测深度从 170 m 增加到 191 m。从仪器原理的角度分析,磁矩较大的系统,相对噪声水平反而减少,所以,磁矩与探测深度也有一定的关系。当系统磁矩从  $10 \times 10^4 \text{ Am}^2$  增加到  $10 \times 10^4 \text{ Am}^2$ ,探测深度从 133 m 增加到 203 m。即磁矩的增大对探测深度的影响是有限的,对于  $3 \Omega \cdot \text{m}$  的导电覆盖层,系统磁矩增大 2 倍时,探测深度仅增大 14 m 左右,当系统磁矩为  $10 \times 10^4 \text{ Am}^2$ ,探测深度

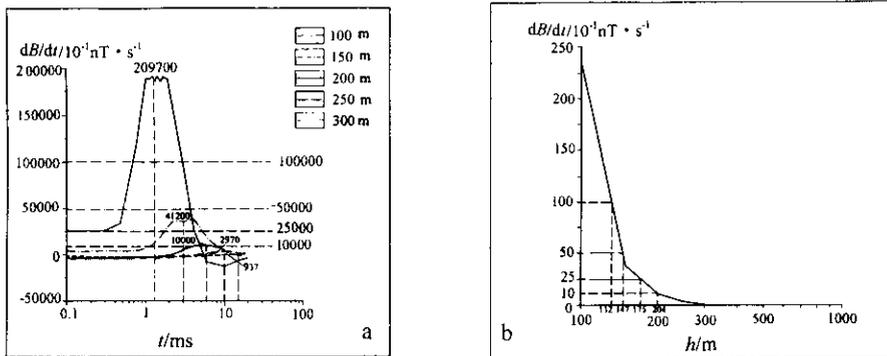


图 4 西部找水地电模型电磁响应特征与探测深度分析图

Fig. 4 Analysis figure between transient electromagnetic response character and prospecting depth for geoelectric model of western hydrology

地电模型:第一层电阻率  $\rho_1 = 3 \Omega \cdot \text{m}$ ,第二层电阻率  $\rho_2 = 20 \Omega \cdot \text{m}$ ,第三层电阻率  $\rho_3 = 3 \Omega \cdot \text{m}$ ,第一层厚度见图例中的标值,第二层厚度  $h_2 = 300 \text{ m}$ 。a-瞬变电磁响应(层状大地模型与均匀半空间模型的时间域电磁响应之差)随时间的变化曲线,水平虚线为噪声水平,竖虚线为电磁响应的极值点(数值为峰值)位置;b-瞬变电磁响应随第一层厚度的变化曲线,水平虚线为噪声水平,竖虚线为某种噪声水平对应的探测深度

Geoelectric model: the first layer resistivity:  $\rho_1 = 3 \Omega \cdot \text{m}$ , the second layer resistivity:  $\rho_2 = 20 \Omega \cdot \text{m}$ , the third layer resistivity:  $\rho_3 = 3 \Omega \cdot \text{m}$ , please see sign value in legend for the first layer thickness, the second layer thickness  $h_2 = 300 \text{ m}$ ; a is transient electromagnetic response curve (the difference of transient electromagnetic response between layed earth model and uniformity half space model) changing with time. Horizontal dashed denote noise level, erect dashed denote extremum point (data value denote peak valve); b is variety curve of transient electromagnetic response changing with the first layer thickness. Horizontal dashed denote noise level, erect dashed denote prospecting depth in some noise level

表 2 系统噪声、磁矩与探测深度的关系一览表  
 Table 2 The table about relations between system noise, moment and prospect depth

噪声水平 /pt	探测深度 /m	系统磁矩 /Am <sup>2</sup>	探测深度 /m
10	204	100000	133
25	175	200000	147
50	147	400000	175
100	132	1000000	203
计算条件:第一层电阻率 3 Ω·m;系统磁矩 400000 Am <sup>2</sup>		计算条件:第一层电阻率 3 Ω·m;系统噪声 25 pt	

才能达到 200 m 左右。目前,直升机 TEM 系统的最大磁矩可达  $40 \times 10^4 \text{ Am}^2$ , 即当覆盖层电阻率为  $3 \Omega \cdot \text{m}$ , 系统的最大探测深度为 175 m, 而当覆盖层电阻率增大到  $10 \Omega \cdot \text{m}$  时, 系统的最大探测深度为 191 m。综合以上分析结果, 认为直升机 TEM 系统对于西部找水地电模型的理论最大探测深度为 192 m 左右。

### 3.3 东部水文地电模型

对于东部非盐渍化找水地电模型, 由图 5 可以看出, 当覆盖层厚度为 297 m 时, 瞬变响应已经降到 25 pt 以下, 将 297 m 作为直升机 TEM 系统在非盐渍化区典型水文地电模型的理论最大勘探深度。

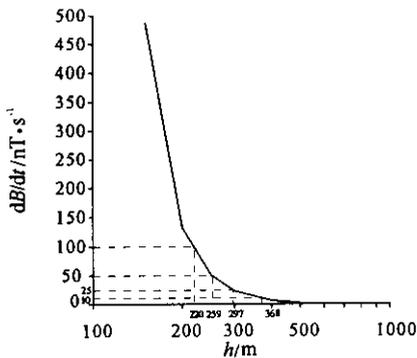


图 5 东部非盐渍化找水地电模型电磁响应特征与探测深度分析图

Fig. 5 Analysis figure between transient electromagnetic response character and prospecting depth for geoelectric model of eastern unpickled hydrology  
 地电模型: 第一层电阻率  $\rho_1 = 50 \Omega \cdot \text{m}$ , 第二层电阻率  $\rho_2 = 20 \Omega \cdot \text{m}$ , 第三层电阻率  $\rho_3 = 50 \Omega \cdot \text{m}$ , 第二层厚度  $h_2 = 300 \text{ m}$ , 本图为瞬变电磁响应随第一层厚度的变化曲线, 水平虚线为噪声水平, 竖虚线为某种噪声水平对应的探测深度  
 Geoelectric model: the first layer resistivity:  $\rho_1 = 50 \Omega \cdot \text{m}$ , the second layer resistivity:  $\rho_2 = 20 \Omega \cdot \text{m}$ , the third layer resistivity:  $\rho_3 = 50 \Omega \cdot \text{m}$ , the second layer thickness  $h_2 = 300 \text{ m}$ , this figure is variety curve of transient electromagnetic response changing with the first layer thickness, horizontal dashed denote noise level, erect dashed denote prospecting depth in some noise level

## 4 结论

(1) 航空瞬变电磁法的第一种装置与第二种装置(统称平行装置)适于采用小收发距, 甚至采用同心装置。第三种装置与第四种装置(统称为正交装置)在一维条件下是等效的, 并且适于采用较大的收发距。在一维条件下, 航空瞬变电磁法的响应只决定于发射线圈高度与接收线圈高度之和, 而与两个高度的分别取值无关。值得说明的是, 对探测 300~600 m 深度的异常体来说,  $3 \text{ ms}$  的供电和测量脉宽(Td)显得太窄, Td 为 10 ms 的脉宽是必要的。

(2) 利用层状大地模型与均匀半空间模型的时间域电磁响应之差, 分析电磁响应特征随时间的衰减关系, 并总结出了电磁响应特征、系统收发距、噪声、磁矩与探测深度的关系。认为系统噪声对穿透深度影响最大, 而系统磁矩由于受重量和能量的限制, 对穿透深度的影响是有限的, 在西部咸水良导覆盖层的条件下, 覆盖层电阻率的变化对系统探测深度影响不大。即降低系统噪声水平是增加穿透深度的关键因素。

(3) 对于西部各沙漠盆地, 直升机 TEM 系统基本可以解决 200 m 以内咸水层中寻找淡水的需要, 在东部非盐渍化地区可以解决 300 m 以内淡水资源的分布状况。由此可见, 直升机 TEM 系统在我国的水资源及矿产勘查中具有很大的需求, 因此在条件成熟时, 在我国发展直升机 TEM 系统意义重大。

### 参考文献

昌彦君, 张桂青. 1995. 电磁场从频率域转换到时间域的几种算法比较: 物探化探计算技术, 17: 25~29.

### References

Anderson W L. 1979. Computer program numerical integration of related Hankel transform of order 0 and 1 by adaptive digital filtering. Geophysics, 44(7): 1287~1305.  
 Cang YanJun, Zhang Guiqing. 1995. Several arithmetic compare of electromagnetic field from frequency domain transform to time domain. Calculation Technology of Geophysical and Geochemistry Exploration, 17: 25~29 (in Chinese with English abstract).  
 Knight J H, Raich A P. 1982. Transient electro-magnetic calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method. Geophysics, 47(1): 47~50.  
 Nabighian M N (Editor in chief). 1988. Electromagnetic methods in applied geophysics. Theory, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 108~112.