

# 时间域航空电磁法一维正演研究

罗延钟<sup>1</sup> 张胜业<sup>1</sup> 王卫平<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国地质大学, 武汉 430074

<sup>2</sup> 中国国土资源部航空物探遥感中心, 北京 100083

**摘 要** 基于电磁勘探理论, 导出了层状大地条件下时间域航空电磁法(偶极-偶极装置)的正演计算公式和算法, 编制了相应的计算机程序, 对若干典型地电断面作了正演计算. 计算结果说明时间域航空电磁法的探测能力和探测条件, 进而为时间域直升机航空电磁系统的设计方案提供了依据.

**关键词** 时间域 航空电磁法 一维正演

**文章编号** 0001-5733(2003)05-0719-06 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2002-03-18, 2002-09-28 收修定稿

## A RESEARCH ON ONE-DIMENSION FORWARD FOR AERIAL ELECTROMAGNETIC METHOD IN TIME DOMAIN

LUO YANZHONG<sup>1</sup> ZHANG SHENGYE<sup>1</sup> WANG WEIPING<sup>2</sup>

<sup>1</sup> China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

<sup>2</sup> China Aerogeophysical Survey & Remote Sensing for Land and Resources, Beijing 100083, China

**Abstract** Based on the electromagnetic theory, the forward formulae and algorithm are obtained for aerial electromagnetic methods (ATEM) with dipole-dipole array in time domain under the condition of stratified earth. The computer program for computing the ATEM response is worked out and the forward computing is completed for some typical geoelectrical sections. The results provide a basis for analyzing the detecting capacity and applied conditions of the ATEM and for designing the ATEM system on the helicopter.

**Key words** Time domain, Aerial electromagnetic methods, One-dimension forward.

## 1 引 言

为适应开发大西北, 快速进行矿产和地下水资源勘查的需要, 中国地调局立项开展“直升机航空 TEM 方法预研究”。研究该系统的一维正演问题是这一研究项目的重要组成部分. 其目的是估计给定层状大地条件下, 时间域航空电磁法的探测能力和探测条件; 进而为直升机时间域航空电磁系统的设计方案提供依据. Morrison H F 等<sup>[1]</sup> 早年曾研究过地面瞬变电磁法的一维正演问题, 近年则着重研究局

部不均匀体的航空瞬变电磁异常<sup>[2]</sup>. Barongo J O<sup>[3]</sup> 在研究航空瞬变电磁法的一维正演问题时, 利用频率域的计算结果转换到时间域. 本文基于电磁勘探理论, 推导层状大地条件下时间域航空电磁法(偶极-偶极装置)的正演计算公式和算法, 进而编制相应的计算机程序, 对若干典型地电断面作正演计算, 并对正演计算结果进行分析.

## 2 一维正演算法

时间域航空电磁法的一维正演, 要求计算水平

**基金项目** 国家地质调查局研究项目(200120120080).

**作者简介** 罗延钟, 男, 1935 年生, 教授. 1957 年毕业于北京地质学院物探系, 主要从事电法勘探的教学和科学研究工作.

E-mail: yluo@cug.edu.cn

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.如图1所示,设大地为  $n$  层水平层,各层电阻率和厚度分别为  $\rho_1, d_1; \rho_2, d_2; \dots; \rho_n, d_n$ . 发射线圈 TX 位于地面上空,高度为  $h$ ;接收线圈 RX 的高度为  $z$ ,与 TX 的水平距离为  $r$ .不失一般性,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.

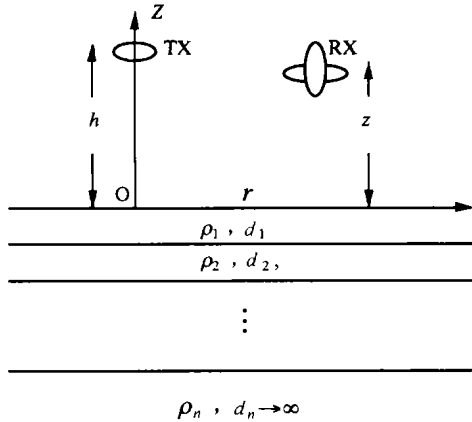


图1 水平层状大地上方的磁偶极源场的计算

Fig. 1 Computation of the field produced by a magnetic dipole upon the stratified earth

为计算时间域电磁场,先在拉普拉斯变换域中作计算,然后借助 Gaver-Stehfest 概率变换算法(简称 G-S 变换法)<sup>[4]</sup>做逆拉普拉斯变换,计算电磁场的瞬变过程.

## 2.1 磁场分量的基本计算公式

对于垂直磁偶极子(水平线圈)发射的情况,由文献[5]的公式(4.4.45 ~ 4.4.47),用拉氏变换变量  $s$  替换  $i$ ,并在右端除以  $s$ ,可得拉氏变换  $s$  域中接收线圈处的径向磁场分量  $H_r$ 和垂直磁场分量  $H_z$ 的表达式为

$$\tilde{H}_r(s) = \frac{m}{4s} \int_0^\infty \left[ e^{u_0(z-h)} - r_{TE} e^{-u_0(z+h)} \right] \times \int_0^\infty J_1(ur) du, \quad (1)$$

$$\tilde{H}_z(s) = \frac{m}{4s} \int_0^\infty \left[ e^{u_0(z-h)} + r_{TE} e^{-u_0(z+h)} \right] \times \int_0^\infty J_0(ur) du. \quad (2)$$

当用水平磁偶极子(垂直线圈)发射时,由文献[5]中(4.4.119 ~ 4.4.121)式,可写出发射偶极轴线方向上接收线圈处,拉氏变换  $s$  域中的径向磁场分量  $H_r$ 和垂直磁场分量  $H_z$ 的表达式

$$\tilde{H}_r(s) = \frac{-m}{4s} \int_0^\infty \left[ e^{u_0(z-h)} - r_{TE} e^{-u_0(z+h)} \right] \times$$

$$\int_0^\infty \left[ {}^2J_0(ur) - \frac{1}{r} J_1(ur) \right] du, \quad (3)$$

$$\tilde{H}_z(s) = \frac{m}{4s} \int_0^\infty \left[ e^{u_0(z-h)} + r_{TE} e^{-u_0(z+h)} \right] \times \int_0^\infty J_1(ur) du, \quad (4)$$

式中,  $m = I \cdot S_{TX}$  为发射磁偶极矩(单位为  $\text{Am}^2$ ),  $S_{TX}$  为发射线圈有效面积,  $I$  为发射线圈中的供电电流强度(单位为 A),  $J_0$ 和  $J_1$ 分别是零阶和一阶贝塞尔函数,为积分变量,自然对数的底  $e = 2.71828$ . 反射系数

$$r_{TE} = \frac{u_0 - u_{a_1}}{u_0 + u_{a_1}}, \quad (5)$$

式中,  $u_{a_1}$  通过下列递推公式算出:

$$u_{a_i} = u_i \frac{u_{a_{(i+1)}} + u_i \tanh(u_i d_i)}{u_i + u_{a_{(i+1)}} \tanh(u_i d_i)}, \quad (6)$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1; \quad (7)$$

$$u_{a_n} = u_n; \quad (7)$$

$$u_i = \sqrt{k^2 - k_i^2}, k_i^2 = -s\mu_i / i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

其中,忽略了位移电流,故有  $k_0 = 0$  和  $u_0 = \dots$ .

文献[4]认为,采用指数函数  $e^{-2u_i d_i}$  代替(6)式中的双曲线函数  $\tanh(u_i d_i)$ ,能获得更好的数值计算稳定性.为此,可用下列递推公式代替(6)式

$$r_{TE} = \frac{R_0 + F_1}{1 + R_0 F_1}, \quad (9)$$

式中,  $F_1$  由下列递推公式算出

$$F_i = e^{-2u_i d_i} \frac{R_i + F_{i+1}}{1 + R_i F_{i+1}}, i = n-2, n-3, \dots, 1, \quad (10)$$

$$F_{n-1} = e^{-2u_{n-1} d_{n-1}} R_{n-1}; \quad (11)$$

$$\text{和 } R_i = \frac{u_i - u_{i+1}}{u_i + u_{i+1}}, i = 0, 1, \dots, n-1. \quad (12)$$

## 2.2 适于数值滤波计算的感应电动势表达式

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

$$V = -S_{RX} \frac{dB}{dt} = -S_{RX} \mu_0 \frac{dH}{dt}, \quad (13)$$

式中,  $B$  为磁感应强度分量;  $S_{RX}$  为接收线圈的有效面积(单位为  $\text{m}^2$ );  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  (单位为 H/m) 是空气的磁导率.

由(13)和(1) ~ (4)式知,为计算感应电动势  $V$  需计算包含零阶和一阶贝塞尔函数的无限积分(汉克尔变换).为便于采用安德生<sup>[6,7]</sup>的数值滤波算法计算汉

克尔变换. 引入归一化的无量纲参数

$$\begin{aligned} X &= r, \quad Z_R = z/r, \quad H_R = h/r, \\ Q &= \mu_0 s / (r^2), \quad H_{Ri} = d_i/r, \quad K_i = 1/i, \\ S_i &= u_i/r = (1 + K_i Q)^{1/2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (14)$$

于是,由(13)、(14)和(1)~(4)式可写出感应电动势在拉氏变换  $s$  域中的表达式

$$\begin{aligned} V_r^z(s) &= -S_{RX} \mu_0 \frac{dH_r}{dt} = -\frac{\mu_0 IS_{TX} S_{RX}}{4r^3} \times \\ & \int_0^\infty [e^{(Z_R X - H_R X)} - r_{TE} e^{-(Z_R X + H_R X)}] X^2 J_1(X) dX, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} V_z^z(s) &= -S_{RX} \mu_0 \frac{dH_z}{dt} = -\frac{\mu_0 IS_{TX} S_{RX}}{4r^3} \times \\ & \int_0^\infty [e^{(Z_R X - H_R X)} + r_{TE} e^{-(Z_R X + H_R X)}] X^2 J_0(X) dX, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_r^r(s) &= -S_{RX} \mu_0 \frac{dH_r}{dt} = \frac{\mu_0 IS_{TX} S_{RX}}{4r^3} \times \\ & \int_0^\infty [e^{(Z_R X - H_R X)} - r_{TE} e^{-(Z_R X + H_R X)}] \times \\ & [X^2 J_0(X) - X J_1(X)] dX, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} V_z^r(s) &= -S_{RX} \mu_0 \frac{dH_z}{dt} = -\frac{\mu_0 IS_{TX} S_{RX}}{4r^3} \times \\ & \int_0^\infty [e^{(Z_R X - H_R X)} + r_{TE} e^{-(Z_R X + H_R X)}] X^2 J_1(X) dX, \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $V$  与  $H$  的上标和下标分别表示发射线圈轴和接收线圈轴的指向;反射系数  $r_{TE}$  表示为(14)式引入的无量纲参数的函数,则式(9)中的  $R_0$  和  $F_1$  按下列公式计算

$$\begin{aligned} F_i &= e^{-2S_i H_{Ri} X} \frac{R_i + F_{i+1}}{1 + R_i F_{i+1}}, \quad i = n-2, n-3, \dots, 1, \\ F_{n-1} &= e^{-2S_{n-1} H_{n-1} X} R_{n-1}, \end{aligned}$$

$$\text{和 } R_i = \frac{S_i - S_{i+1}}{S_i + S_{i+1}} \quad i = 0, 1, \dots, n-1.$$

对(15)~(18)式作逆拉氏变换,可算出感应电动势的上阶跃响应,即充电过程;取其负值,得到感应电动势的下阶跃响应,即放电过程. (15)~(18)式中积分号内的第一项,是与拉氏变换变量  $s$  无关的常量,而常数的逆拉氏变换在零时刻以外皆为零,故在实际计算时可删去该项;积分号内的第二项只有反射系数  $r_{TE}$  与  $s$  有关,所以,实际上只需对  $r_{TE}$  做逆拉氏变换.

### 2.3 逆拉氏变换算法

目前已有多种多样的逆拉氏变换算法<sup>[8]</sup>,采用

G-S 变换<sup>[4]</sup>. 或许 G-S 变换并不是最精确或最好的算法,但它是纯实数运算,而且只需对较少的  $s$  值作计算,因而是一种计算速度较快的算法.

根据文献[4],用 G-S 变换作逆拉氏变换的算法是:对给定的时间  $t$ ,感应电动势的瞬变响应值  $v(t)$  可按(19)式,由拉氏变换域中变量  $s_m = m \ln 2/t$  ( $m = 1, 2, \dots, n$ ) 的感应电动势值  $V(s_m)$  算出

$$v(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{m=1}^n K_m V\left(\frac{\ln 2}{t} m\right), \quad (19)$$

式中,  $n$  是决定于计算机位数的正偶整数,取  $n = 16$ ;  $K_m$  是 G-S 变换系数,可按下式算出

$$\begin{aligned} K_m &= (-1)^{m+\frac{n}{2}} \times \\ & \frac{\min\left(m, \frac{n}{2}\right)}{i=i_1} \frac{i^{\frac{n}{2}} (2i)!}{\left[\frac{n}{2} - i\right]!(i-1)!(m-i)!(2i-m)!}, \end{aligned} \quad (20)$$

式中,求和下限  $i_1$  是  $(m+1)/2$  的整数部分.

### 2.4 汉克尔变换的算法

通过 G-S 变换计算出  $r_{TE}$  的瞬变响应,按(15)~(18)式,用安德生<sup>[6]</sup>的数值滤波算法计算汉克尔变换,从而算得接收线圈内感应电动势的瞬变响应.用数值滤波计算汉克尔变换的具体算法,可参阅文献[7].

### 2.5 计算正负方波的瞬变响应

上述算法计算出的瞬变响应是阶跃响应  $v(t)$ ,可按下式进一步计算占空比为 1 的正负方波的瞬变响应  $v^{ZF}(t)$

$$v^{ZF}(t) = \sum_{i=1}^{4N} (-1)^{\text{Int}[0.5(i+3)+0.5]} \times v[t + (i-1)t_d], \quad (21)$$

式中,  $t_d$  为正负方波的脉宽;  $\text{Int}$  为取整函数;  $N$  为某一足够大的正整数,试算结果表明取 2 足矣.

## 3 典型模型的计算结果

### 3.1 一维正演计算程序

按前述算法用 Fortran 语言编制了计算机程序.编程时考虑到 G-S 变换要求双精度计算,而汉克尔变换的数值滤波计算只需采用单精度,故先算 G-S 变换,后做数值滤波计算.所编制的程序计算接收线圈有效灵敏度  $dB/dt$  的时间响应,即发射磁矩为  $1\text{Am}^2$ ,接收线圈等效面积为  $1\text{m}^2$  时的感应电动势.该程序还计算同样条件下均匀大地上的正常响应,

给定层状大地相对于均匀大地的异常响应及异常响应和正常响应之比的相对异常。

### 3.2 计算参数的选取

按现有国际先进航空瞬变电磁系统的实用数据,选取装置类型、发射和接收线圈高度与间距及时间制式等参数:

(1) 测量装置包括以下 4 种类型:

装置类型编号用  $N_A$  表示,当  $N_A = 1$ ,水平线圈发射,水平线圈接收,

$N_A = 2$ ,垂直线圈发射,垂直线圈接收,

$N_A = 3$ ,水平线圈发射,垂直线圈接收,

$N_A = 4$ ,垂直线圈发射,水平线圈接收;

(2) 供电波形是占空比为 1 的正负方波;供电方波脉宽  $t_d$  为 3 ~ 10 ms;

(3) 方波的断电延迟时间  $t_r$  为零;

(4) 采样时间按等比序列分布于 0.013 ms ~  $t_d$  之间,采样总数  $M = 14$  个;

(5) 发射线圈高度  $h$  和接收线圈高度  $z$  取为 30 ~ 50 m;

(6) 发射线圈与接收线圈的水平距离  $r$  取为 0.1 ~ 50 m.

考虑到我国航空瞬变电磁系统近期将主要用于西北干旱地区找水,地下电性层数、各层的电阻率和

厚度等模型参数,主要参照我国西北地区的若干典型地电断面选取。选取三层地电断面,各层参数取值为:

$$\rho_1 = 3, 10, 20 \text{ m}; \quad d_1 = 30, 100, 300 \text{ m};$$

$$\rho_2 = 3, 20, 50 \text{ m}; \quad d_2 = 30, 100, 300 \text{ m};$$

$$\rho_3 = 3, 20, 50 \text{ m}.$$

### 3.3 航空瞬变电磁响应的规律性

#### 3.3.1 航空瞬变电磁响应的衰变态势

图 2a 示出了一个三层地电断面上,4 种观测装置在双对数坐标系中的理论瞬变响应曲线。地电断面参数:  $\rho_1 = 3, \rho_2 = 20, \rho_3 = 3 \text{ m}; d_1 = 100, d_2 = 300 \text{ m}$ 。装置参数:  $h = 30 \text{ m}, z = 30 \text{ m}, t_d = 10 \text{ ms}, t_r = 0$ 。可以看出,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  $B$ )在数值上各不相同,但它们随时间变化(瞬变响应)的基本性态是一致的,即都随时间增大而衰减。在当前(小收发距)条件下,感应电动势的强度按第一种装置( $N_A = 1$ )、第二种装置( $N_A = 2$ )、第三和第四种装置( $N_A = 3$  和 4)依次减弱;前两种装置的瞬变响应衰减速度几乎相同,后两种装置的衰减速度较快。特别要指出的是,图 2a 所示第三和第四种装置的感应电动势瞬变响应完全相同。实际上,它们的计算公式(18)和(15)完全相同,因而计算结果自然一样。即两种正交装置是完全等效的。

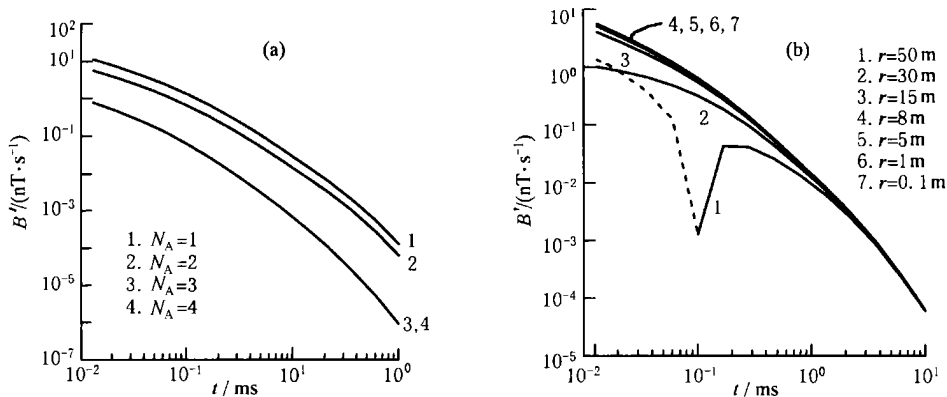


图 2 三层地电断面上的归一化感应电动势理论瞬变响应曲线  
(a) 收发距  $r = 2.5 \text{ m}$ ,不同装置类型的情况;(b) 装置类型  $N_A = 2$ ,不同收发距  $r$  的情况。

Fig. 2 The transient response curves of normalized EMF for different array  
(a) and for different TX-RX distance (b) upon a three layers earth

#### 3.3.2 吊仓高度对瞬变响应的影响

图 2 是对发射线圈高度  $h = 30 \text{ m}$  和接收线圈高度  $z = 30 \text{ m}$  算得的。曾经分别对  $h = 40 \text{ m}, z = 20 \text{ m}$  和  $h = 20 \text{ m}, z = 40 \text{ m}$  的情况作过计算,计算结果与图 2 完全相同。这也可由瞬变响应的计算公式

(1) ~ (4) 或 (15) ~ (18) 得到说明。前已指出,在计算瞬变响应时,只需计算上述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  $H_R + Z_R$  有关。这就是说,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.基于这一结论,由互换原理便容易理解前一节所述“第三和第四种装置的感应电动势瞬变响应完全相同”的物理意义了.自然,所有这一切都是针对水平层状大地而言的.在非一维大地条件下,上述结论不成立,第三和第四种装置既不能互换,也不相互等效.

### 3.3.3 收发距对瞬变响应的影响

为考察收发距  $r$  对瞬变响应的影响,分别对  $r = 50, 30, 15, 8, 5, 1, 0.1$  m 7 种收发距作过计算.图 2b 给出了第二种装置在不同收发距  $r$  时的归一化感应电动势理论瞬变响应曲线.由图可见,当收发距很大时(例如,图中曲线 1,  $r = 50$ m),瞬变响应的早期出现负值(虚线),瞬变曲线变得比较复杂,先负后正,最初由小变大,取得极大值后又由大变小,直到衰减至零.随着收发距减小,感应电动势和相

对于均匀大地时的异常值都变大;而当收发距  $r = 15$ m 时,已接近于  $r = 0$  时的渐近值.计算数据表明,第一种装置的瞬变响应随收发距  $r$  的变化趋势,和第二种装置的相似;且在  $r = 0$  时的渐近情况下,第一种装置比第二种装置的瞬变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——正交装置的瞬变响应随收发距  $r$  的变化形态,与第一和第二种装置的完全不同;特别是在收发距  $r = 15$ 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,相对异常值保持不变,且当  $r = 0$  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,甚至采用同点装置.而正交装置适于采用较大的收发距,不宜采用同点装置,除非打算采用“纯异常法”探测二维或三维不均匀体的纯异常.

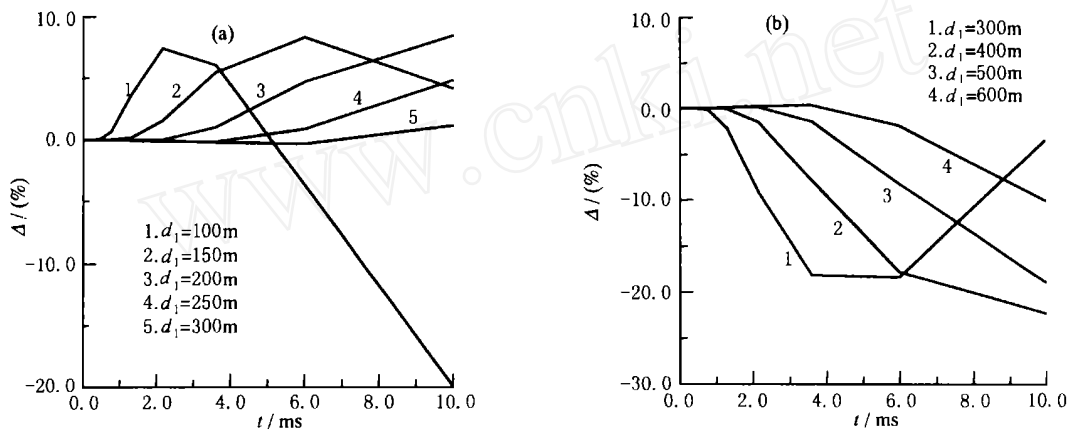


图 3 H 型和 K 型地电断面上,第一种装置的航空瞬变电磁响应相对异常  
(a) K 型地电断面  $d_1 = 3, 2 = 20, 3 = 3$  m,  $d_2 = 300$  m; (b) H 型地电断面  $d_1 = 20, 2 = 3, 3 = 20$  m,  $d_2 = 300$  m.

Fig. 3 Relative anomalies of the transient response for the first array upon the H model (a) and K model (b) three layers earths

### 3.3.4 大地导电性对瞬变响应的影响

系统地对不同地电断面进行了计算,以研究航空瞬变电磁法对不同导电性和不同埋藏深度水平层的探测能力.图 3a 给出了图 2 所示观测条件下,地下高阻层在不同埋藏深度时,第一种装置的相对异常响应.其参数同图 2.可以看出,当高阻层上顶埋深  $d_1$  为 100 m,即为其厚度  $d_2$  的 1/3 时,相对异常响应达 8.5% ~ -17.2%;而当  $d_1$  增大到 300 m,即与其厚度  $d_2$  相同时,相对异常值很小,直到最后一个采样时间( $t = 10$  ms),才达到 1% 左右.为了对比,在图 3b 中给出了同样条件下,地下存在不同埋藏深度的低阻层时的计算结果.相比之下,低阻层引起的相对异常响应要强得多,在低阻层的厚度  $d_2$  与上

顶深度  $d_1$  同为 300 m 时,大约在采样时间为 3.6 ~ 6.0 ms 时有将近 -20% 的相对异常;甚至在低阻层的上顶深度  $d_1$  达到 600 m,即两倍于其厚度  $d_2$  时,相对异常仍在 10% 以上.上述计算结果再次验证了人们熟知的观点,即瞬变电磁法适于探测低阻异常体,而对探测高阻体不利.现有的航空瞬变电磁技术,很难在我国西北地区厚达 300 m 的低阻覆盖层下,勘查到厚度与覆盖层相当的高阻含水层.但是,如果覆盖层比含水层的厚度小的多,或者含水层是高阻层覆盖下的低阻层,勘查效果会好的多.此外,上述计算结果还表明,对探测 300 ~ 600 m 深度的异常体来说,3 ms 的供电和测量脉宽  $t_d$  显得太窄,  $t_d = 10$  ms 的脉宽是必要的.

## 4 结论与建议

4.1 航空瞬变电磁法的第一和第二两种平行装置,适于采用小收发距,甚至采用同点装置.第三和第四两种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;如果采用很小的收发距或同点装置,只能观测到二维或三维不均匀体的纯异常.

4.2 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.

4.3 航空瞬变电磁响应的早期比较复杂,可能出现负值,瞬变曲线随时间增长由负变正、由小变大,并在取得正极大值后进入晚期的“正常”衰减过程.

4.4 现有的航空瞬变电磁技术,很难在我国西北地区厚达 300m 的低阻覆盖层下,勘查到厚度与覆盖层相当的高阻含水层.

4.5 对探测 300~600m 深度的异常体来说,3 ms 的供电和测量脉宽  $t_d$  显得太窄, $t_d = 10$  ms 的脉宽是必要的.

本研究只解决了层状大地条件下,时间域航空电磁法的一维正演问题.它有助于估计给定层状大地条件下,时间域航空电磁法的探测能力和探测条件;进而为直升机时间域航空电磁系统的设计方案提供依据.这对于在我国开展时间域航空电磁法的调研和预研工作是必要的和充分的;不过,对于实际开展时间域航空电磁法来说,简单的一维正演研究就远远不够了.为此,建议在引进和实际开展时间域航空电磁法工作时,进行如下理论和软件研究,以提高我国时间域航空电磁法资料的解释水平和应用效果:研究时间域航空电磁法的全时域视电阻率的算法及程序,建立相应的定性解释方法;研究时间

域航空电磁法的一维反演算法及程序,建立拟二维定量解释方法;研究时间域航空电磁法的 2.5 维正演和反演算法及程序,建立实用的二维定量解释方法.

本研究得到中国国土资源部航空物探遥感中心王守坦同志的热心帮助,特致谢忱!

## 参考文献

- [1] Morrison H F, Phillips R J, O'Brien D P. Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half space. *Geophysical Prospecting*, 1969, **17**: 82~101
- [2] Morrison H F, Becker A, Hoversten G H. Physics of airborne EM systems. *Exploration Geophysics*, 1998, **29**: 97~102
- [3] Barongo J O. Selection of an appropriate model for the interpretation of time-domain airborne electromagnetic data for geological mapping. *Exploration Geophysics*, 1998, **29**: 107~110
- [4] Knight J H, Raich A P. Transient electromagnetic calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method. *Geophysics*, 1982, **47** (1): 47~50
- [5] Nabighian M N. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Volume 1, Theory. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1988
- [6] Anderson W L. Computer program numerical integration of related Hankel transform of order 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics*, 1979, **44** (7): 1287~1305
- [7] 罗延钟,张桂青. 电子计算机在电法勘探中的应用. 武汉:武汉地质学院出版社,1987. 154~158  
LUO Yanzhong, ZHANG Guiqing. Application of Electronic Computer in Electrical Prospecting. Wuhan: Wuhan College of Geology Press, 1987. 154~158
- [8] 昌彦君,张桂青. 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,1995, **17** (3): 25~29  
CHANG Yanjun, ZHANG Guiqing. Comparison among three transformation algorithms of electromagnetic field from frequency domain to time domain. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1995, **17** (3): 25~29