

直升机频率域航空电磁系统 在均匀半空间上方的电磁响应特征与探测深度

王卫平 王守坦

(国土资源部航空物探遥感中心,北京,100083)

摘要 直升机频率域电磁系统的最大勘探深度究竟是多少,一直是有争议的问题。在实际工作中,通常认为其最大勘探深度为150 m,但这些都是根据实际的勘查经验得出的,没有统一的标准。针对这一问题,根据均匀半空间模型,推导了不同装置的频率域电磁响应的理论公式,分析了不同装置的频率域电磁响应特征,探讨了电磁响应特征与穿透深度的关系,并给出了不同装置的频率域电磁系统的理论探测深度。

关键词 直升机频率域电磁系统 均匀半空间 电磁响应特征 探测深度

Electromagnetic Response Character of Helicopter Frequency Domain EM System above Uniform Half Space and Its Prospecting Depth

WANG Weiping WANG Shoutan

(China Aerogeophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing, 100083)

Abstract The maximum prospecting depth of the helicopter frequency domain EM system has been a problem of long controversy. It is usually considered that the maximum prospecting depth is 150 m in practical survey, but this value has been merely derived from the practical prospecting experience and cannot be regarded as a unanimously-adopted standard. Based on the uniformity half space model for this problem, the authors have worked out the theoretical formula for frequency domain electromagnetic responses of different devices, analyzed the electromagnetic response character, discussed the relationship between the electromagnetic response character and the prospecting depth, and put forward the theoretical prospecting depth of the frequency domain EM system for different devices.

Key words helicopter frequency domain EM system uniformity half space electromagnetic response character prospecting depth

直升机频率域电磁系统的发射与接收线圈均放在吊舱中,系统较为灵活,适合进行矿产和水文地质、工程地质和环境地质勘查工作。系统装置类型有水平共面、垂直共面和垂直同轴3种装置,收发距为5~8 m。技术指标为噪声水平 2×10^{-6} ,零点漂移 10×10^{-6} ,磁矩700 NIA。为了了解各种频率域航空电磁系统的勘探深度,对在均匀大地上方,常用的各种直升机频率域电磁系统的响应进行了正演模拟计算,结合系统性能,给出了各种装置的直升机频率域电磁系统的理论探测深度,并把其作为对比直升机频率域电磁系统理论勘探深度的一种依据。

1 理论计算公式

假设均匀半空间介质的电导率为 σ ,在地表上方高度 h m处有一个水平或垂直偶极子 M ,接收线圈距离发射偶极子为 L m,与发射线圈构成水平共面、垂直共面和垂直同轴3种装置。从麦克斯韦方程出发,引入矢量位 A^* (电场强度 $E = \text{rot } A^*$),在柱坐标系中推导出矢量位 A^* 的波动方程(Nabighian, 1988);利用分离变量法求出波动方程的通解,并通过代入偶极源处和无穷远处的极限条件,及地面边界处矢量位 A^* 及其法线方向导数 $\partial A^* / \partial n$ 的连续条件,求得通解中的待定系数;通

过磁场强度 H_2 与矢量位 A^* 的关系,解出空间相应方向的磁场强度 H_2 ,并利用磁偶极子场的公式,求得空间相应方向的一次磁场强度 H_1 ,从而分别计算上述条件下的二次磁场的相对响应值,并用二次磁场与一次磁场的比值表示(用 10^{-6} 表示)。现将推导出的理论公式表示如下:

水平共面装置公式

$$\frac{H_2}{H_1} = L^3 \int_0^\infty m^2 \left(\frac{m - m_1}{m + m_1} \right) e^{-2mh} J_0(mL) dm \quad (1)$$

垂直共面装置公式

$$\frac{H_2}{H_1} = L^2 \int_0^\infty m \left(\frac{m - m_1}{m + m_1} \right) e^{-2mh} J_1(mL) dm \quad (2)$$

垂直同轴装置公式如下:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{L^3}{2} \int_0^\infty m^2 \left(\frac{m - m_1}{m + m_1} \right) e^{-2mh} J_0(mL) dm - \frac{L^2}{2} \int_0^\infty m \left(\frac{m - m_1}{m + m_1} \right) e^{-2mh} J_1(mL) dm \quad (3)$$

上述各公式中

$$m_1 = \sqrt{m^2 - k^2}$$

$$k^2 = i2\pi f\sigma\mu$$

式中 k 是大地介质波数; f 是工作频率; σ 是大地介质电导率; μ 是大地介质导磁率, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; i 是表示虚部的符号; J_0, J_1 分别为零阶和一阶贝塞尔函数; L 是发射线圈与接收线圈之间的距离。

从公式(1)至(3)可以看出,在均匀大地上方,各种装置的电磁响应均包括对贝塞尔函数的无穷积分,电磁响应与飞行高度之间为指数关系,电磁响应也与大地介质波数有关,并为收发距 L 的函数。水平共面装置的电磁响应为零阶贝塞尔函数的无穷积分,垂直共面装置的电磁响应为一阶贝塞尔函数的无穷积分,而垂直同轴装置的电磁响应正好是上述2种装置响应之差的一半。

2 计算方法

由理论计算公式(1)至(3)可以看出,垂直同轴装置的电磁响应正好是水平共面装置与垂直共面装置响应之差的一半,为了计算方便,先分别计算水平共面装置与垂直共面装置的电磁响应,然后计算垂直同轴装置的电磁响应。对于上述各公式中的零阶和一阶贝塞尔函数的无穷积分,为简化计算方法,保证计算精度,采用快速汉克尔变换滤波数值积分的近似计算方法。

从朴化荣等(1987,1989)和殷长春(1990)的研究得知,可以把零阶和一阶贝塞尔函数的无穷积分写成:

$$\int_0^\infty F_0(m) J_0(mL) dm = \frac{1}{L} \sum_{n=-a}^b F_0(n\Delta) H_{0n} \quad (4)$$

这里

$$F_0(n\Delta) = F_0(m) \Big|_{m=\frac{en\Delta}{L}}, \Delta = \frac{\ln 10}{10}$$

H_{0n} 是第 n 项零阶贝塞尔函数的滤波系数,和

$$\int_0^\infty F_1(m) J_1(mL) dm = \frac{1}{L} \sum_{n=-c}^d F_1(n\Delta H_{1n}) \quad (5)$$

这里

$$F_1(n\Delta) = F_1(m) \Big|_{m=\frac{en\Delta}{L}}, \Delta = \frac{\ln 10}{10}$$

H_{1n} 是第 n 项一阶贝塞尔函数的滤波系数。

对于水平共面装置

$$F_0(m) = m^2 \left(\frac{m - m_1}{m + m_1} \right) e^{-2mh} \Big|_{m=\frac{en\Delta}{L}} \quad (6)$$

故

$$\left(\frac{H_2}{H_1} \right)_{hp} = L^3 \times 10^6 \times \sum_{n=a}^b F_0(m) H_{0n} \quad (7)$$

对于垂直共面装置

$$F_1(m) = m \left(\frac{m - m_1}{m + m_1} \right) e^{-2mh} \Big|_{m=\frac{en\Delta}{L}} \quad (8)$$

故

$$\left(\frac{H_2}{H_1} \right)_{vp} = L^2 \times 10^6 \times \sum_{n=c}^d F_1(m) H_{0n} \quad (9)$$

对于垂直同轴装置

$$\left(\frac{H_2}{H_1} \right)_{va} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{H_2}{H_1} \right)_{hp} - \left(\frac{H_2}{H_1} \right)_{vp} \right] \quad (10)$$

这里 $(H_2/H_1)_{hp}, (H_2/H_1)_{vp}$ 和 $(H_2/H_1)_{va}$ 分别是水平共面、垂直共面和垂直同轴装置的均匀大地响应; a, b 和 c, d 分别是零阶和一阶贝塞尔函数的滤波系数的取项范围。从计算精度考虑,选取 $a = 53, b = 31, c = 25$ 和 $d = 38$ 。收发距 L 选取 3 m、6 m、8 m、9 m;飞行高度(偶极子离地表面高度)选取 25 m、30 m、36 m、43 m、52 m、62 m、75 m、90 m、107 m、129 m、155 m、200 m、300 m;大地电导率与工作频率的乘积 σf 选取 3 SHZ, 7 SHZ, 10 SHZ, 30 SHZ, 70 SHZ, 100 SHZ, 300 SHZ, 700 SHZ, 1 000 SHZ, 3 000 SHZ, 7 000 SHZ, 10 000 SHZ, 30 000 SHZ, 70 000 SHZ, 100 000 SHZ, 300 000 SHZ, 700 000 SHZ, 1 000 000 SHZ, 3 000 000 SHZ, 零阶和一

阶贝塞尔函数的滤波系数 H_{0n} 和 H_{1n} 引自朴化荣 (1987, 1989) 和殷长春 (1990), 全部采用复数计算, 分别求取大地响应的实虚分量 (相对于一次场的二次场值, 单位为 10^{-6})。

3 计算结果及分析

3.1 电磁响应特征

将计算结果绘制成不同装置的大地响应的实虚分量, 与大地电导率和工作频率乘积的关系曲线特征图, 以及不同装置的大地响应的实虚分量与飞行高度的关系曲线特征图 (图 1, 图 2)。综合分析各种装置的电磁响应列线图, 可以得出以下结论:

(1) 在各种情况下, 大地响应的实分量形态相

似, 均随着大地电导率与工作频率乘积值 (以下简称“乘积”) 的增加而增加, 为一单调上升曲线。在乘积数值较小时, 在双对数坐标中的曲线近似成较陡的直线, 当乘积较大时, 曲线渐趋于饱和。

(2) 在各种情况下, 大地响应的虚分量形态相似, 在大地电导率与工作频率的乘积数值较小时, 在双对数坐标中曲线近似成 45° 的直线, 随着乘积的增加逐渐趋于饱和, 达到一个最大值。乘积再增加时, 虚分量值近似成 17.5° 的直线逐渐减小。

(3) 大地响应的实分量和虚分量值, 在双对数坐标中均随飞行高度增加很快地衰减, 大地电导率与工作频率的乘积数值越大或飞行高度越大, 响应值越近似为陡直线。

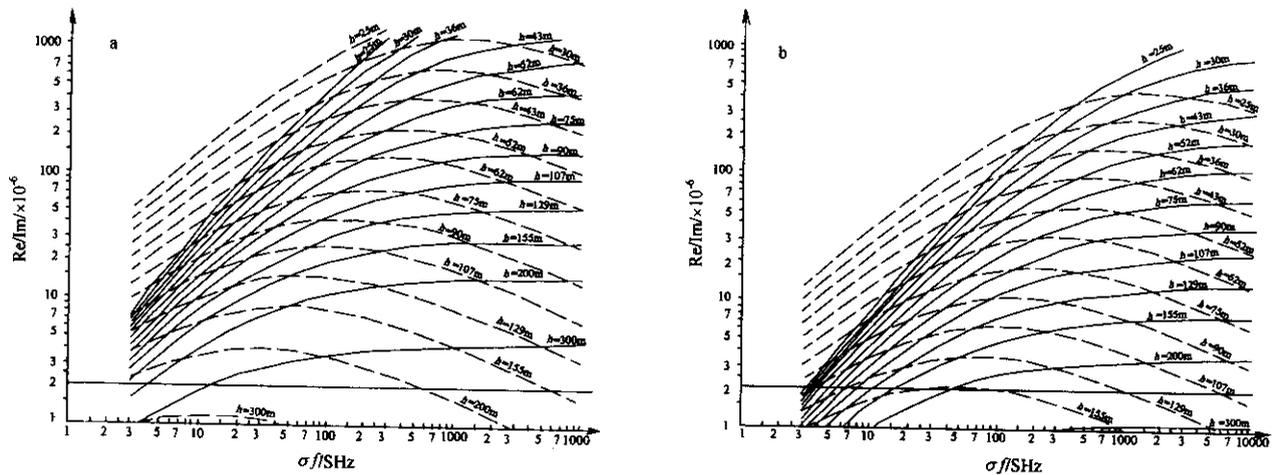


图 1 均匀半空间上方大地电磁响应的实虚分量与 $f\sigma$ 关系图

Fig. 1 The map of relationship between inphase or quadrature and $f\sigma$ of earth electromagnetic response above uniformity half space

图中 f 表示工作频率, σ 为大地电阻率, h 为飞行高度; Re 为实分量 (实线); Im 为虚分量 (虚线); Re/Im 表示实分量或虚分量, 水平实线为系统的噪声水平, 其值为 2×10^{-6} ; 图 a 为水平共面, 收发距 $L = 8\text{ m}$, 当 $h = 300\text{ m}$ 时虚分是已降至噪声水平以下; 图 b 为垂直同轴, 收发距 $L = 8\text{ m}$, 当 $h = 155\text{ m}$ 时虚分量已经降至噪声水平附近

In this map, f denote frequency, σ is earth resistivity, h is fly height; Re is inphase (real line); Im is quadrature (dashed line); Re/Im denote inphase or quadrature, horizontal real line denote noise level, its value is 2×10^{-6} ; a-installation type: horizontal coplanar, interval between transmit and receive coils $L = 8\text{ m}$ while $h = 300\text{ m}$, quadrature decreased and below noise level; b-installation type: vertical coaxial, interval between transmit and receive coils $L = 8\text{ m}$ while $h = 155\text{ m}$, quadrature decreased to close noise level around

(4) 在相同装置中, 不同收发距的大地响应的实分量和虚分量值, 均随收发距的增大而显著增大。当收发距从 6 m 增大到 8 m , 实分量和虚分量的响应值增大了近 2.4 倍。

(5) 在相同情况下, 水平共面装置大地响应的实分量和虚分量值, 将比垂直同轴装置响应的实分量

和虚分量值几乎大 4 倍。

3.2 电磁响应特征与探测深度

最大勘探深度的分析方法为当各种装置的大地响应实分量或虚分量, 随着高度变化的曲线 (尤其是虚分量最大值的曲线), 落在该种装置 (包括收发距) 的系统噪音 (噪音水平为 2×10^{-6}) 水平以下时, 系

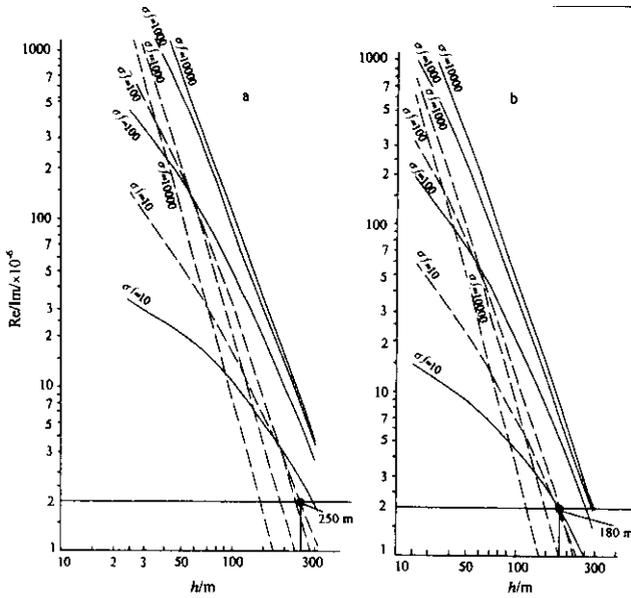


图2 均匀半空间上方在地电磁响应的实虚分量与飞行高度的关系图

Fig. 2 The map of relationship between inphase or quadrature and fly height of earth electromagnetic response above uniformity halt space

图中 f 表示工作频率; σ 为大地电阻率; h 为飞行高度; Re 为实分量(实线); Im 为虚分量(虚线); Re/Im 表示实分量或虚分量, 水平实线为系统的噪声水平, 其值为 2×10^{-6} ; 图 a 为水平共面, 收发距 $L = 8$ m, 当 $h = 250$ m 时虚分量已全部降至噪声水平以下, 将 250 m 深度确定为此种装置的理论最大勘探深度; 图 b 为垂直同轴, 收发距 $L = 6$ m, 当 $h = 180$ m 时虚分量已全部降至噪声水平以下, 将 180 m 深度确定为此种装置的理论最大勘探深度

in this map, f denote frequency; σ is earth resistivity; h is fly height; Re is inphase (real line); Im is quadrature (dashed line); Re/Im denote in-phase or quadrature, horizontal real line denote noise level, its value is 2×10^{-6} ; a-installation type: horizontal coplanar, interval between transmit and receive coils $L = 8$ m, while $h = 250$ m, quadrature decreased and below noise level completely. The biggest depth of theory is defined as 250 m for this kind of installation; b-installation type: vertical coaxial, interval between transmit and receive coils $L = 6$ m, while $h = 180$ m, quadrature decreased and below noise level completely. The biggest depth of theory is defined as 180 m for this kind of installation

统已经无法分辨出有用的地质信息, 此飞行高度即为该种装置(包括收发距)系统的最大勘探深度。

对于水平共面装置, 收发距为 8 m 时, 由图 1-a 可以看出, 当深度为 300 m 时虚分量已降至噪声水平以下。由图 2-a 可以更清楚地看出, 当深度为 250 m 时虚分量已经全部降至噪声水平以下。将 250 m 深度确定为此种装置的理论最大勘探深度, 当收发距为 6 m 时, 深度为 180 m, 虚分量已全部降至噪声水平以下, 将 180 m 深度确定为此种装置的理论最大勘探深度。同理, 对于垂直同轴装置, 收发

距为 8 m 时, 系统的最大勘探深度为 200 m。收发距为 6 m 时, 系统的最大勘探深度为 120 m。

从上述结果可以看出, 随着收发距的增加, 最大勘探深度将增大, 而且水平共面装置比垂直同轴装置的勘探深度大。这是因为当收发距增大时, 发射线圈在接收线圈处产生的一次场减弱, 对二次场的影响降低所致, 提高了系统的分辨能力。而在均匀半空间的情况下, 水平共面装置产生的一次场方向, 对大地激发的条件比垂直同轴装置更为有利, 这从另一个侧面说明, 装置类型不同, 对不同产状的地质体的最佳激发方向也不同, 通常水平共面装置适合于探测水平层状介质, 而垂直同轴装置适合于探测陡倾斜的地质体。

4 结论

通过以上分析认为, 不同装置的直升机频率域电磁系统, 探测深度不同。当系统收发距增大时, 勘探深度增大, 而且, 收发线圈方向不同, 对不同产状地质体的最佳激发方向也不同, 通常水平共面装置适合于探测水平层状介质, 而垂直同轴装置适合于探测陡倾斜的地质体。目前, 直升机频率域电磁系统的最大收发距为 8 m, 在均匀半空间的情况下, 最大勘探深度为 250 m, 但随着覆盖层导电性的增加, 勘探深度将会明显降低。以上分析结果对于中国利用直升机频率域电磁系统有效地进行不同目的的勘查测量具有一定的指导意义。

参考文献

- 朴化荣, 殷长春. 1987. 频率测深正演问题滤波算法及人机反演. 物化探计算技术, 2(2): 137~148.
 朴化荣, 殷长春. 1989. 频率测深水平磁场的正演计算及应用. 物化探计算技术, 11(3): 204~213.
 殷长春. 1990. 提高频率测深的正演计算速度的方法. 物化探计算技术, 12(2): 99~105.

References

- Yin Changchun. 1990. A method increasing the speed of direct calculation of F. E. M. sounding. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 12(2): 99~105 (in Chinese).
 Yin Changchun, Piao Huarong. 1987. Calculation of E. M. sounding by filtering method and an interactive inversion system. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 9(2): 137~148 (in Chinese).
 Yin Changchun, Piao Huarong. 1989. Calculation and application of horizontal magnetic field of E. M. sounding. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 11(3): 204~213 (in Chinese).
 Nabighian M N. 1988. Electromagnetic methods in applied geophysics, Tulsa. Theory, Society of Exploration Geophysicists, 1: 211~250.