# 脉冲式航空电磁系统研制简报

桂林冶金地质研究所航电组

## 前　言

脉冲式航空电磁系统，是六十年代加拿大发展起来的新型航电系统，对探测良导性矿床，特别是硫化矿床，有良好效果，具有勘探深度大、覆盖层影响小等优点。为“**独立自主、自力更生**”地发展我国航电事业，根据冶金部指示，我们从1971年开始研制脉冲式航空电磁系统。

结合我国具体情况，我们首先研制了直-五飞机的短吊仓方案，与国外采用的长吊仓方案相比，在消除飞机金属干扰体的影响方面，短吊仓方案的难度较大。此外，为了满足山区开展航电工作的需要，我们还试验了不放吊仓（即同框）方案，并取得初步效果。

1974年8月，我们与冶金部物探公司协作，研制出GDM—Ⅰ型脉冲式航空电磁系统。同年10月至75年3月，在中国民航二十大队的大力协助下，进行了30小时的正常场试飞，取得了初步结果，并发现了一些问题。其后，又在此基础上，对系统作了较大改进，实现了接收机集成电路化。新的GDM—Ⅱ型航电仪，于75年11月至76年10月进行了第二次试飞（约50小时），76年7月在河北某磁铁矿区两个已知剖面上取得了较好的异常反应，证明设计是合理的。同框方案也在矿上取得了异常，表明该方案的设计是可能实现的。

为了使脉冲式航电系统早日应用于生产，从76年12月起，桂林冶金地质研究所、北京地质仪器厂、冶金部物探公司、广东地质局航测大队、湖北地质局航测队、辽宁地质局物测队、河南地质局航测队组织了大协作，以GDM—Ⅱ型航电仪为基础，在北京地质仪器厂试制了两套DKM—Ⅰ型脉冲式航电仪。77年10月至11月，由冶金部物探公司使用该仪器，在安徽某地进行了1千平方公里的生产试飞（用直-五飞机30米吊仓）。同年12月，北京地质仪器厂、湖北地质局航测队使用另一套DKM—Ⅰ型仪器，在运-五飞机上进行了长吊仓方案（100米）的飞行试验。

在整个试验及生产飞行中，得到了中国民航二十大队的大力支持，使任务得以顺利完成，取得了予期的效果。

然而，由于机型及所用装置的限制，应用于大面积生产，尚有一些问题需要加以解决。我们相信，在华主席为首的党中央“抓纲治国”的战略决策指引下，通过各兄弟单位的共同努力，脉冲式航空电法一定会提高到一个新的水平，迅速投入综合航空物探的行列。

## 一　系统简介

### 1.工作原理

由环绕飞机外面的发射天线$T_Z$发出高功率的电磁脉冲，在导体上感应出涡流脉冲，用拖曳在机后吊仓中的接收线圈Rx测量其幅度和瞬变特性，由此获得地下导电性的信息，以解决找矿及相应的地质问题。



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电流馈入发射天线（图1），产生一个相应的磁场H，在离飞机适当的距离上可近似看成为轴向垂直的偶极子磁场。

空间总磁场方程式为：

当 $0 < t < \frac{T}{2}$ 时，

$$H = M/r^3 \sqrt{1 + 3\cos^2\theta} \cdot \sin\frac{t}{T}$$

对t的其他值，H＝0

式中M是磁距（等于发射天线圈数n，截面积S，电流幅值I的乘积），θ是发射天线平面法线和径向r的夹角，t是时间，T是全正弦波的周期。

在脉冲终点上，电场E的值是有限的，在自由空间中电场几乎立刻降到0。而在有限导电率和导磁率的介质中，其作用将被感应效应所滞后。如果介质是导电的，当然就有与电场相一致的瞬变磁场，通常可表为

$$h = h_0 \exp(-t/Tc)$$

式中Tc是瞬变场时间常数。

理论上，衰减的瞬变过程可由足够灵敏的磁强计作记录。但通常接收机是用感应线圈测量与磁场微商成比例的电动势。

$$\partial h/\partial t = -(h_0/Tc)\, e^{-t/Tc}$$

接收线圈接收的讯号（图2）通过电缆将讯号馈送接收机。对瞬变场的5个不同时间进行取样（图3），各道平均幅值由记录仪记录下来，通过标定即可得到瞬变场的特性资料。

瞬变场的时间常数可由下式求出

$$Tc = \frac{t_2 - t_1}{\mathrm{Ln}\, A_1/A_2}$$

其中$t_1$、$t_2$分别为前道和后一道平均开门时间，$A_1$、$A_2$分别为相应的二次场幅值。

由于不同导电性的物质其瞬变效应是不

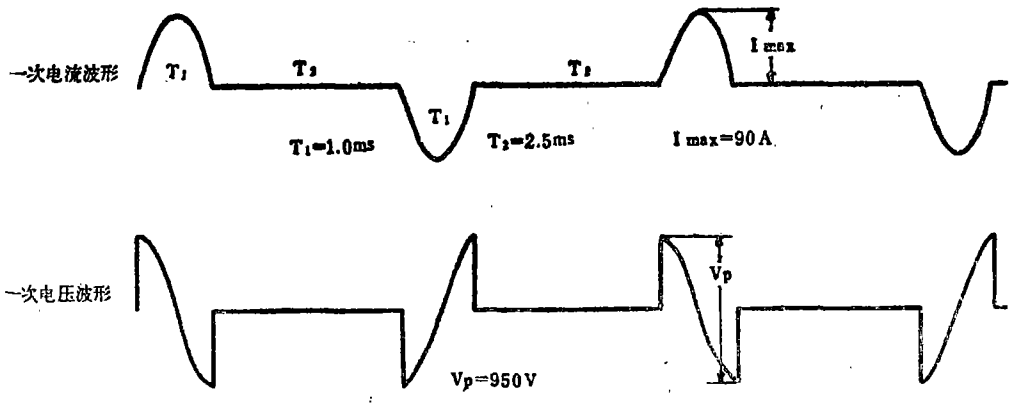
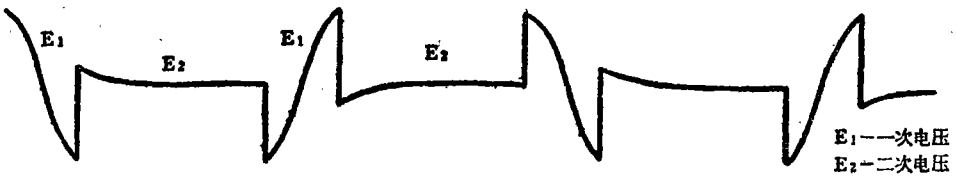



图1 发射天线上的电流及电压波形




地下导体存在时的一次、二次电压

图2 吊舱（探头检测）信号波形图



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

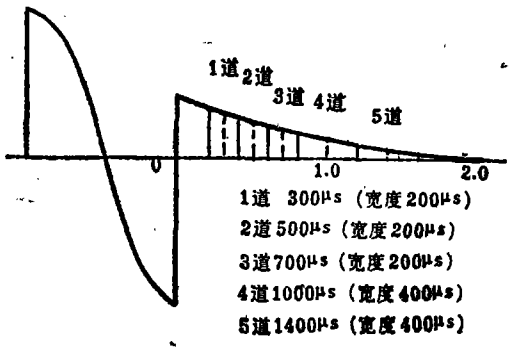



图3 二次信号取样时序

同的，利用5道记录特性就提供了区分不同导电地质体的可能，特别是对于良导性块状硫化矿，此法可以获得良好效果。

**2.装置简述**

限于我国民航的条件，我们采用国产直-五飞机、短吊仓（30和45米）的脉冲瞬变系统（飞行高度100～150米）（图4），也研究了不放吊仓（即同框）方案（飞行高度50米）（图5）。图6为GDM系统仓内装置图。本文着重讨论这种航电系统的短吊仓方案。

目前西方资本主义国家都采用长吊仓，其径向距离约为400～500英尺。而我们采用短吊仓，带来了较多的困难。如不加补偿时，系统要求磁场稳定性达到1/2000。当飞机和吊仓径向距离为150米时，吊仓和飞机的相对位移不超过2.5厘米；当采用30米时，

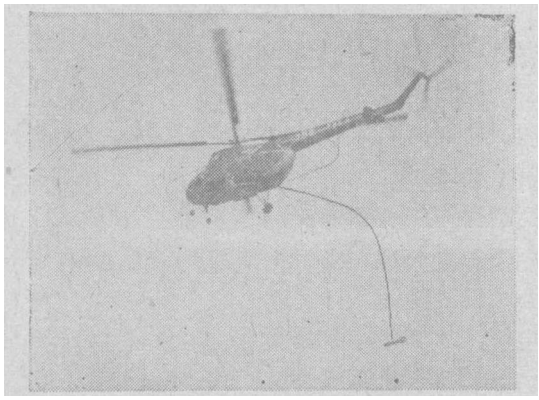


图4 短吊仓脉冲式航空电磁系统

相对位移不能超过0.5厘米。加入补偿后，短吊仓方案中吊仓距飞机较近，发射天线当作磁偶极子条件不能满足，补偿跟随性变劣，这些都是短吊仓方案的困难。

**3.发射机原理及设计**

发射机原理见图7。一次脉冲由脉冲形成网络产生，这个网络包括电感L（发射天线），电容器C和电阻$R_0$（包括发射天线电阻、可控硅导通电阻和接头接触电阻的总和），电沅$V_b$接于电桥两端。

如果可控硅2和4同时被触发，电流就

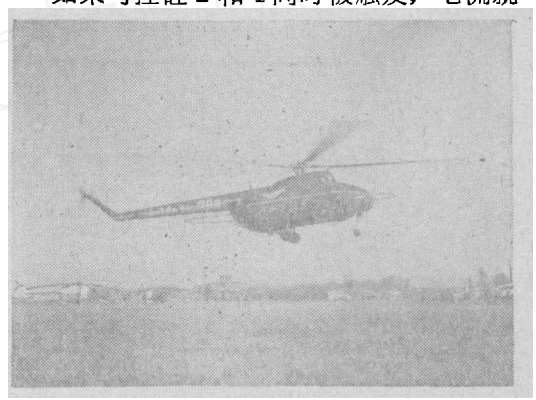


图5 同框法脉冲航空电磁系统

在电路中流通，按箭头方向通过回路。直到由于电容器达到电沅电压而使回路中电流变

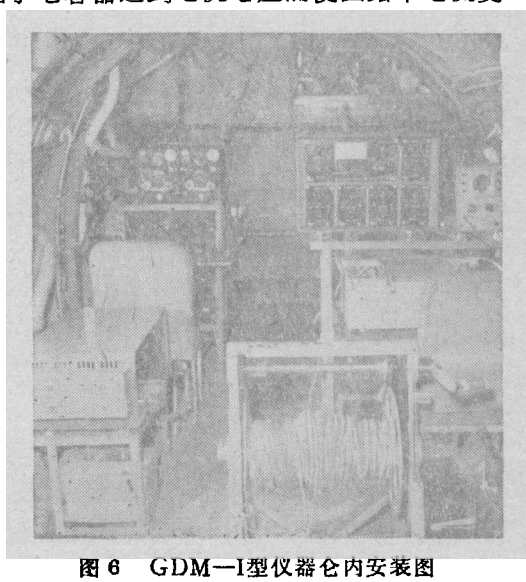


图6 GDM—I型仪器仓内安装图



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

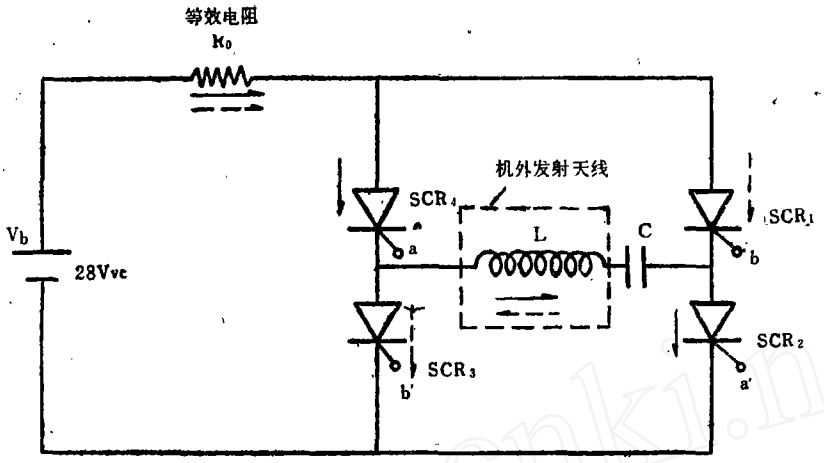



**图7 发射机原理图**

为0为止。电流脉冲具有半正弦的形状，其宽度

$$\tau = \pi \sqrt{LC}$$

第二个触发脉冲到来时，可控硅1和3同时被触发，上述过程将重复，但有下述特点：1）通过发射天线L的电流和第一个脉冲反向；2）在可控硅2和4被触发瞬间，电容可看作一个附加电沅与电池$V_b$串联。在第二个脉冲到来时，电流达到的数值比第一个脉冲到来时的峰值更高。在第二个脉冲的末尾，这个条件重新出现，电容电压又充到一个新的更高的值。因此，在发射天线上流过逐渐增加峰值的交变电流脉冲，而电容电压也逐渐增加，在实际工作中这个效应将达到平衡状态。

可控硅的控制极由二个功率晶体管驱动，其触发脉冲来自接收机的逻辑控制系统的a、b脉冲，以使发射机与接收机同步工作。

发射机主要参数：

发射天线线圈：由3×8平方毫米扁铜线7匝，面积47平方米，电阻0.2欧姆，重量125公斤（77年改装时用3×6平方毫米扁铜线，重量减轻到47公斤）。

电容：50微法，耐压1000伏

电沅：飞机27伏电沅

峰值电流：90安培

峰值发射安匝数：3万安·匝·平方米

发射机重量：30公斤

**4.吊挂系统结构和性能**

探头和前放固结一体置于吊仓中，接收线圈收到讯号经前放放大后，通过电缆馈入接收机。吊仓用万向环提吊，尾环起定向作用，仓体成流线型，以减少飞行阻力。吊仓重量为16公斤。用直径8毫米、拉力200公斤的屏蔽电缆提吊，飞行时吊仓径向与水平面约成45°角。

探头灵敏度0.5微伏/毫伽，谐振点5千周。

前放主要指标：

放大倍数：Vpp＝10伏时50倍（30米）、80倍（45米）

短路噪声：＜3微伏

频带：0～10千周（3分贝频带）

共模抑制比：＞80分贝

电沅：±9伏，1毫安

**5.接收机原理及设计指标**

接收机方框图见图8。从前放输入Vpp＝10伏的讯号进入截止频率为10周/秒的高



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

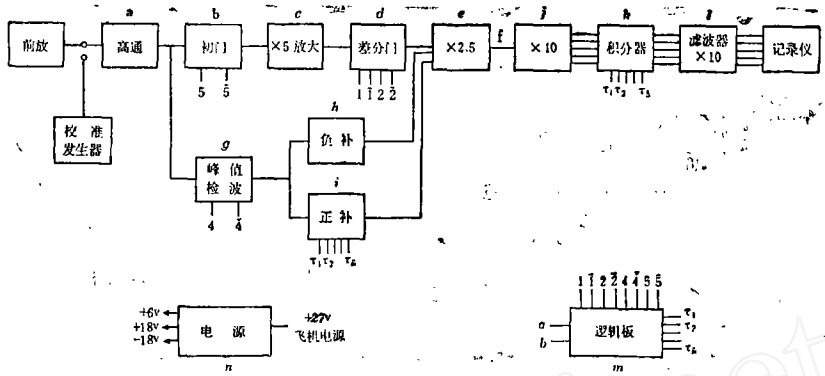



图8 接收机原理图

通滤波器a，以滤去探头在地磁场中摆动所产生的低频讯号。经过初始门b的作用，使一次场短路，二次场部分通过，而门的通断是由逻辑板产生的脉冲同步控制的。经过5倍放大器c后进入差分门d，变成同一极性的讯号，再经2.5倍加法器e进入10倍放大器j。高通滤波器a出来的一次场讯号，经峰值检波器g的作用，产生正负补偿讯号。飞机在高空中平飞时，将正负补偿讯号和测量讯号加在一起，可以得到绝对值关0的瞬变效应（即在调节补偿开关之后），合成讯号f经10倍放大器j放大后，送到5个并联积分器k的输入端，每个积分器都有一个场效应管作为门控部分，其控制脉冲由逻辑板m中环形计数器产生的$\tau_1$、$\tau_2$……$\tau_5$所控制，讯号积分器经过10倍放大器和滤波器e送到记录仪。

逻辑部分m概述：逻辑部分由晶体振荡器产生1兆周/秒的标准脉冲，通过分频产生一定时序的脉冲，其中a、b用以控制发射机。控制主回路各道门通断的脉冲亦由分频器中选取，环形计数器$\tau_1$、$\tau_2$……$\tau_5$用以控制五道取样。总之，由于所有的脉冲都是由一个脉冲沅同步控制，保证各部分顺序工作。

电沅部分n是用27伏飞机电沅，用逆变器变压并用桥式整流后进行稳压，采用集成电路进行深度反馈的稳压器可达到0.1%的稳定度。

GDM—Ⅱ型接收机达到的指标：

增益：1250倍

短路噪声：Vpp<20微伏

取样道：延时200微秒，五道连续，中点为300，500，700，1000，1400微秒。

时间常数：0.6秒

电沅：27伏，200毫安

重量：5公斤

系统总重量：270公斤。

**6.提高接收系统灵敏度的两个问题**

任何远距离传感设备的灵敏度，都与系统的信噪比有关，因此尽一切努力增大信号振幅（异常），减少噪声（记录上的背景电平）。

目前接收系统中采用了相关分析采样技术、滤波器、积分器以及对飞机金属骨架的峰值补偿技术。这些措施都大大提高了系统的信噪比，在此，着重讨论以下两个问题：

（1）补偿原理 所谓补偿，就是对机体涡流的二次感应电压Vn（各道干扰基底，n＝1～5）予以处理，以突出微弱的地下导体异常的信号。由于飞行过程中，探头相对于机体的位置是不断变化的，Vn亦将随之变化，因此，无法使用固定电平的补偿。

但是，如果取一次电压$V_0$的某一部分作为补偿信号，则在发射场与机体涡流场的分布形态（等效作用中心，轴向及线度）一



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

致的情况下，则在正常场飞行中，无论探头如何摆动，经补偿后的信号，从原理上说应恒等于零。这就实现了补偿的“自动跟随”。

补偿的数学陈述是：

$$KnV_0 - Vn = 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

（Kn为补偿系数，$0 < Kn < 1$。Kn值是在飞机高空平飞过程选取，一经确定后不再变动）。当地下存在导体时，则有

$$\begin{aligned} f(t) &= Kn(V_0 + \Delta E_0) - (Vn + \Delta E_2 n) \\ &= (KnV_0 - Vn) + (Kn\Delta E_0 - \Delta E_2 n) \\ &= Kn\Delta E_0 - \Delta E_2 n \cdots\cdots\cdots\cdots (2) \end{aligned}$$

式中$\Delta E_0$、$\Delta E_2 n$分别为导体引起的一次（感应段）及二次（衰减段）异常。

显然，为了观测到纯的二次异常，应使$Kn \to 0$，$\Delta E_0 \to 0$。补偿中$V_0$一般取一次电压前沿峰值，道理亦在于此。

为了满足自动跟随的条件，发射线圈的架设，吊放长度及接收分量选择，均应给予相当重视，否则，会引起补偿的装置性误差。对此，我们将另文论述。

（2）*积分器和积分时间常数* 接收机采用不完全积分器，原理见图9。RC为积分电阻和电容，a是各道控制脉冲的输入端，K是场效应管组成的门控电路，BG是运算放大器。

如果一个阶跃函数加到积分器的输入端，电容电压上升到输入电压的0.93倍所需脉冲个数为：

$$n = \frac{2RC}{\tau}$$

$\tau$—采样的宽度。

我们来讨论改善信噪比的原理：在进入积分器之前的信噪比

$$(S/N)_{in} = \frac{S_{in}}{N_{in}}$$

积分n次后，有用讯号S应为

$$Sout = nS_{in}$$

对于噪声

$$Nout = \sqrt{n} \cdot N_{in}$$

$$(S/N)_{out} = \frac{Sout}{Nout} = \sqrt{n}\ (S/N)_{in}$$

信噪比改善度

$$SNIR = \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} = \sqrt{n}$$

对于我们所选用的不完全积分器来说

$$SNIR = \sqrt{n} = \sqrt{2RC/\tau}$$

譬如时间常数采用0.9秒，对于前三道$\tau = 200$微秒，$C = 1.5$微法，$R = 24$千欧。

$$SNIR = \sqrt{\frac{2 \times 24 \times 10^3 \times 1.5 \times 10^{-6}}{200 \times 10^{-6}}} = 19$$

这表明信噪比通过不完全积分器大大提高了。

然而时间常数选得太大，异常幅值大大下降，因此，为了讨论时间常数选择，我们引入特征长度的概念。将时间常数$\tau$与航速S的乘积定义作特征长度，记作

$$L = \tau \cdot S$$

如航速$S = 160$公里/小时 $\approx 50$米/秒，为了不漏掉50米宽度的异常，时间常数

$$\tau = L/S = \frac{50米}{50米/秒} = 1秒。$$

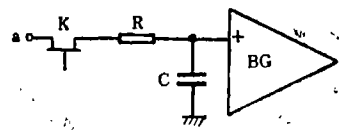



图9 积分器原理图

## 二 实验和生产试飞的效果

### 1.试验飞行情况

为了研究系统的技术性能，我们先后做了三种不同性质的试验飞行。

（1）*正常场试飞* 即在600米高空平飞，观测30米、45米短吊仓方案及同框方案



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的正常场噪声电平，研究降低噪声电平途径，确定系统最高精度及实用性。

噪声电平有“相对”与“绝对”两种表示方法。前者用一次场电压“归一”，以

$$\frac{\text{等效输入噪声峰峰值（微伏）}}{\text{接收点之一次电压峰峰值（微伏）}}\times 10^{6}(\text{ppm})$$

表示之。

$$\left(\text{其中，等效输入噪声}=\frac{\text{记录纸上的噪声电压}}{\text{接收系统总增益}}\right)$$

加拿大INPUT Ⅶ型系统的最好指标为50ppm。后者则以噪声的等效磁场强度（奥斯特或伽马、毫伽）来描述，用等效输入噪声（微伏），探头灵敏度（微伏/毫伽）来求取。

GDM—Ⅱ型30米、45米吊仓方案及DKM—Ⅰ型30米吊仓方案相应的噪声电平（以第一道最大峰峰值计），相对值分别为60ppm、60ppm和50ppm。绝对值约为$12\times10^{-7}$奥斯特，$3.6\times10^{-7}$奥斯特及$10\times10^{-7}$奥斯特。

GDM—Ⅱ型同框方案的噪声，由于一次场电压很强，若按相对值计，可小到1～1.5ppm，其绝对值为$10^{-6}$奥斯特。

分析噪声的来流，可归纳为两类。一是探头震动噪声及外来噪声（如天电、机上电气设备之干扰等）。二是补偿跟随误差。第一类噪声在目前精度上（$>10^{-7}$奥斯特）尚不严重，今后随着精度的提高，势必会产生较大影响，应当高度重视。第二类噪声在短吊仓方案中是十分突出的。由于探头位置变化，所带来补偿跟随误差，亦可分为仪器运算误差（即欲补偿之绝对量及补偿电路自身的底数影响）及装置性（即吊仓摆动所引起的）误差两项。DKM—Ⅰ型由于探头特性改善，补偿电路底数影响较小，业已使30米吊仓方案之相对噪声电平减少到50ppm。但是，在我国具体条件下，要减少装置性误差，而又要保持低飞行高度，仍需做大量的工作。

（2）已知剖面上的试飞　图10、11、12是1976年GDM—Ⅱ型系统在两个已知矿区剖面及金属堆积物上的实际飞行结果。矿体由夕卡岩型磁铁矿富矿组成，基本上出露地表，但表层氧化成粉末状，原生矿导电率约几到十几欧姆米。所谓金属堆积为直径约40厘米的矿山送风管道。

由图可见，三种装置的异常都高于背景起伏三倍以上，异常位置相当吻合且与矿体部位（测量中插旗设标）对应。经重复观测，形态及幅值均相差不大，表明异常是可靠的。

值得注意的是，三种装置的绝对精度虽然不同，但异常效应却大体类似（从某种角度说来，不放吊仓的异常更为明显），这说明飞行高度在航电方法中是个极为重要的因素。在设计、评价某一航电系统时，最低安全高度应与发射功率、接受灵敏度一起综合考虑。

**2.某矿区生产试飞的结果**

77年10月，冶金部物探公司使用DKM—Ⅰ型仪器，探头外吊30米，在安徽某地进行了五万分之一（局部地区加密至二万五千分之一）生产试飞，面积一千平方公里。本区已知铜矿有含铜夕卡岩及含铜磁铁矿两种

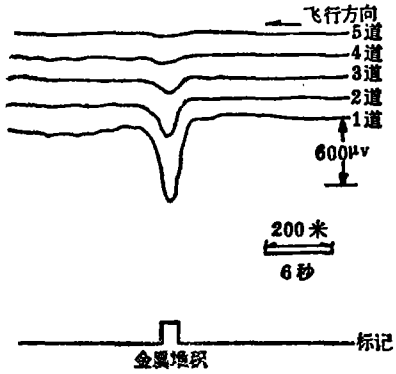



图10　不放吊舱方案在金属堆积物上方的反应（飞行高度50米）



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

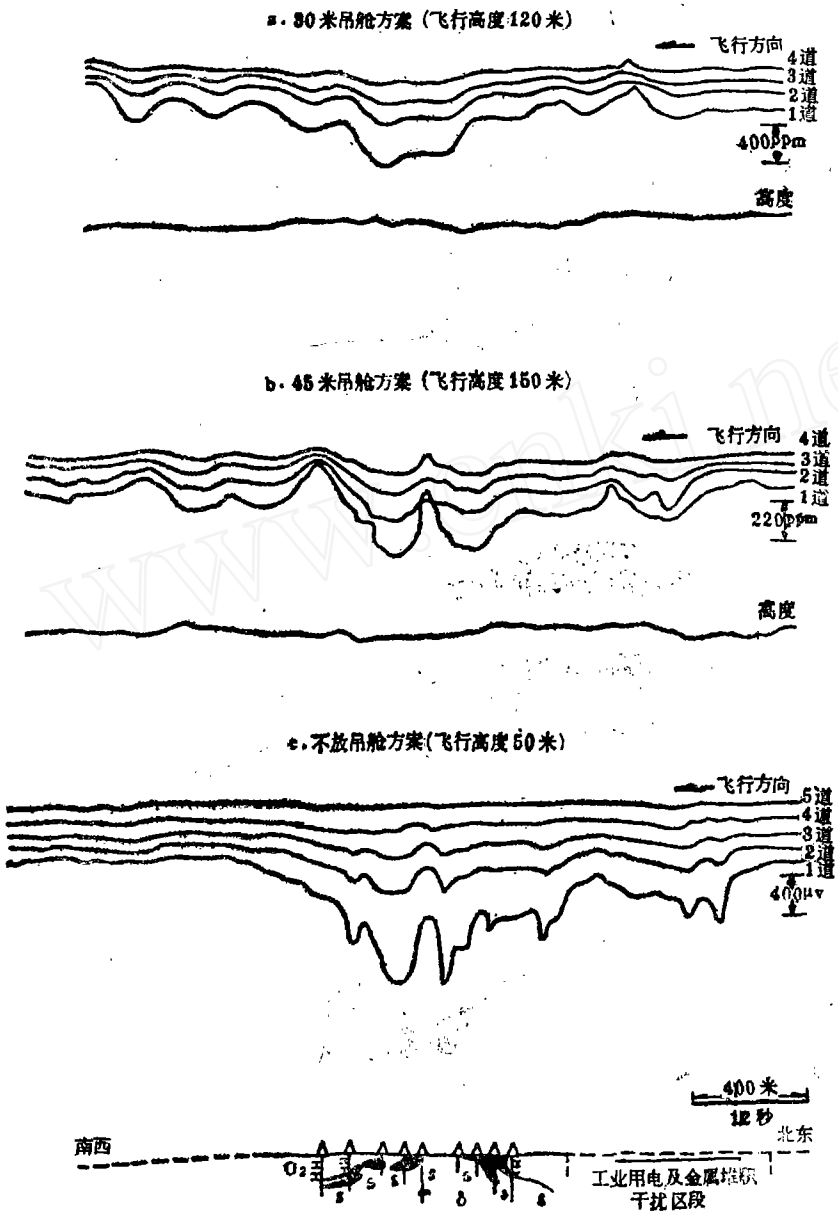



图11　河北某铁矿上试飞资料（一）

类型，而以前者为主。从地面电法效果看，含铜夕卡岩一般反应不好。已知矿体，正在勘探的规模较小，稍大的则已采空或仅留下一部分表层磁铁矿，且大多有工业干扰。因之，已知矿体的异常幅度较小，形态较乱，但多次重现。图13为中、　　硫铁矿上的异常反应。主要矿石成分为磁黄铁矿、磁铁矿、闪锌矿、毒砂等，铜的品位为0.05～0.29%。北部为内变质闪长岩，南部与石灰岩接触，形成夕卡岩带。在内变质闪长岩中亦有磁铁矿、褐铁矿零星露头。箭头指示了根据地面出露矿石插旗设标的位置，证实了



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

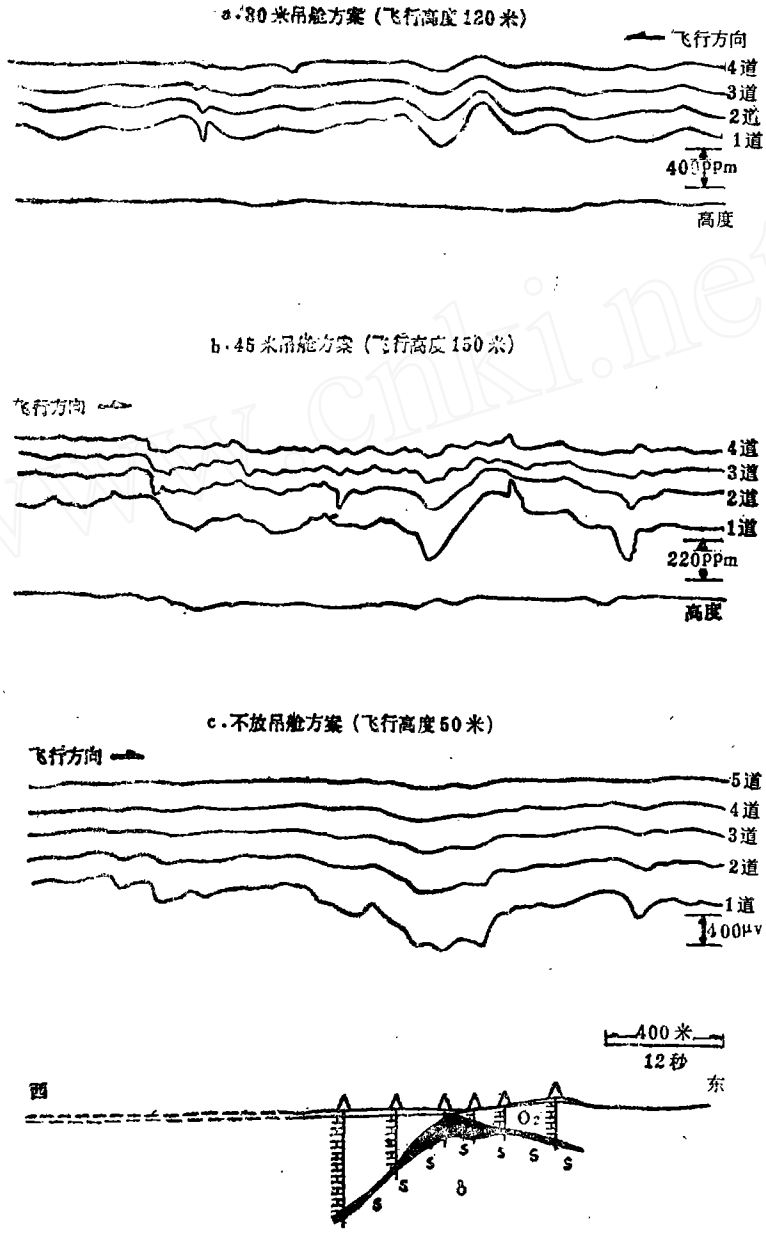



图12 河北某铁矿上试飞资料（二）

系统对良导性矿有反应。

此外，在测区内发现一批异常，为了验证未知异常的可靠性，已对十几个未知异常进行了地面检查，所用仪器为DO—1型低频偶极电磁仪，结果表明地面异常与空中异常基本对应。在此仅列出其中二例。图14为



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

D77—11异常及地面检查结果，此异常出现在砾岩区，在异常中心测到幅度高达30%的虚分量异常，对相邻测线亦作地面电测，异常延伸300米以上。图15为D77—16异常，剖面为第四纪覆盖，见到小片煤层出露，异常下方为地面电磁法测出的12%的虚分量异常。（地面异常与空中异常位置的偏移是因目测领航误差）。在离异常中心400米处，还测到高达25%的虚分量异常，此异常出现在水塘附近。为什么这个异常空中并无反应，原因在于地面

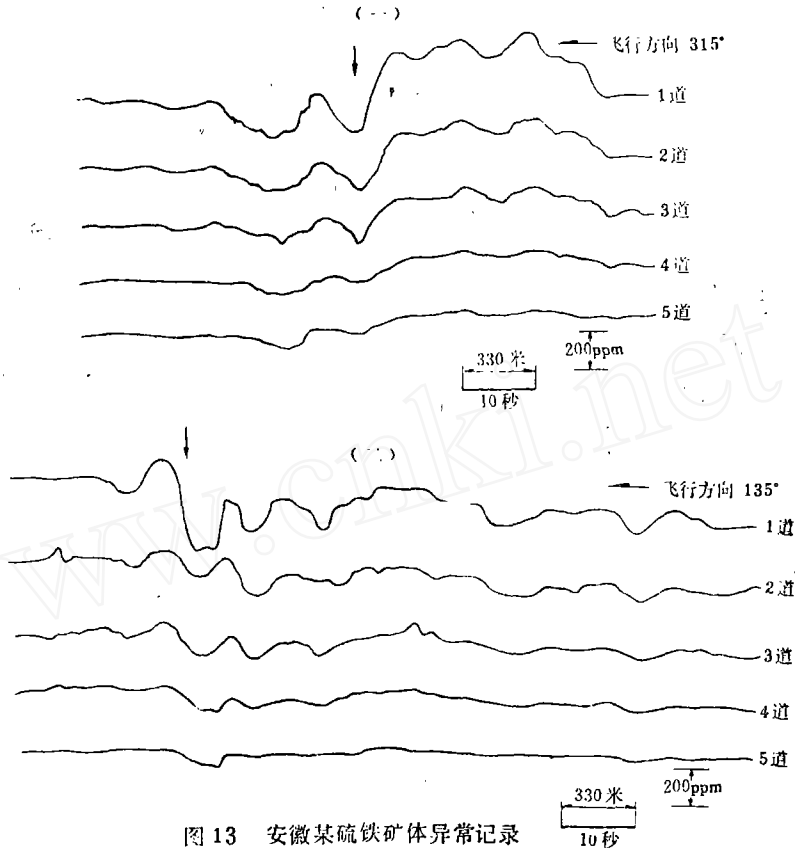
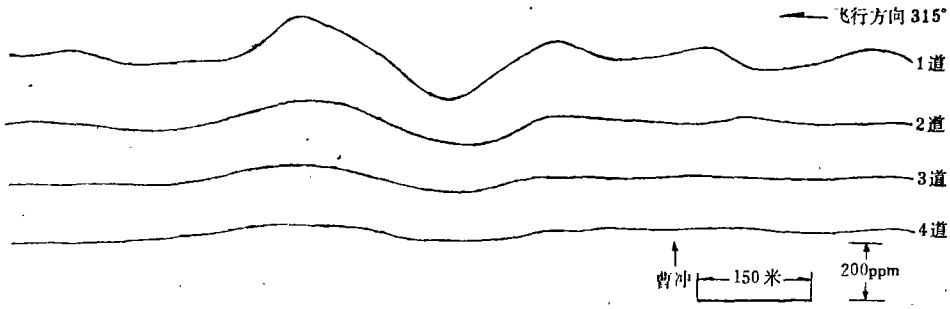



图 13　安徽某硫铁矿体异常记录



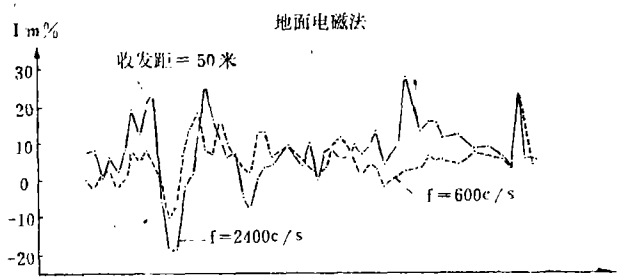




图 14　D77－11异常的地面电磁测量结果



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

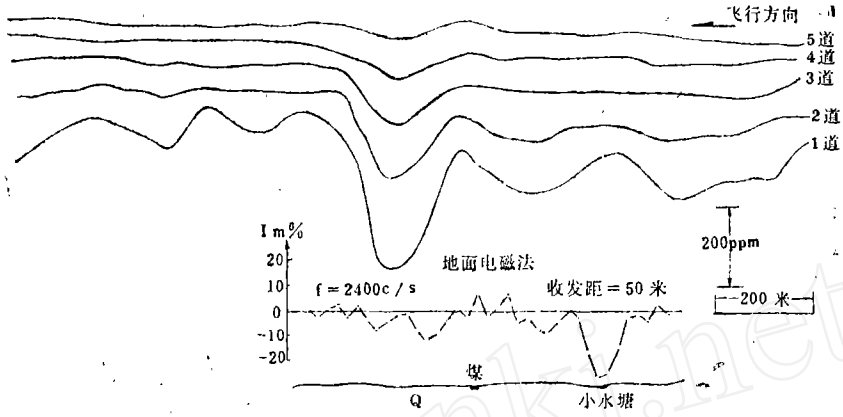



图 15　安徽某地 D77－16 异常地面电磁测量结果

电法对表层局部导体反映灵敏，在航空电测中，由于这些局部导体干扰场随距离衰减很快，以至无法在航电测量中反映出来。特别是地面电磁法记录中的跳跳蹦蹦的小干扰，在航电测量中往往测不出来。这些异常尚待钻孔验证。

## 三　结　　语

通过几年来有关单位的共同努力，脉冲式航空电磁系统从仪器装备而言已基本完善。

从直-五飞机短吊舱方案(30米、45米)和湖北地质局航测队使用 DKM—Ⅰ型仪器在运-五飞机上进行长吊舱方案(100米)的试验结果表明，系统主要技术指标——正常场相对噪声电平和绝对精度已达到较好的指标，仪器其他指标也达到实用的水平。

由桂林冶金地质研究所提供的直-五飞机的短吊舱方案有一定发现良导异常的能力，可在地形较好地区使用。

然而，受国内可选机型及民航规定所限，飞行高度与国外相比偏高，以致影响了勘探效果。因而设计能适应于低飞的装置方案，是我国进一步开展脉冲式航空电磁法所面临的重要课题。

**通　　知**

本刊1978年第1期第3页插图有错误，除委托各地邮局收回更换新图外，原图一律作废。特此通知。

《地质与勘探》编辑部



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net