

感 应 法

賀 永 康 編

中国工业出版社

感應法

（附感應法）

中國工業出版社

感 应 法

賀 永 康 編

中 国 工 业 出 版 社

这本小册子着重介绍了感应法的原理和野外工作方法；叙述了工作中常遇的几种干扰；列举了国内外应用感应法的实例；最后简单讨论了感应法中存在的一些问题。内容比较浅显，可供地质人员和野外物探队从事该方法的初级物探人员参考。

感 应 法

賀 永 康 編

地质部地质书刊编辑部編輯（北京西四羊市大街地质部院内）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可出字第110号）

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $4^{13/16}$ ·插页1·字数97,000

1962年11月北京第一版·1962年11月北京第一次印刷

印数0001—2,040·定价(10-5)0.63元

*

统一书号：15165·1466(地质-151)

目 录

緒言.....	5
一、感应法中电磁场的特征	9
(一) 一次場.....	9
(二) 二次場.....	20
二、感应法的理論和实验基础.....	24
(一) 基本假设.....	24
(二) 良导性板状地质体上方的磁場.....	26
(三) 反演問題的解.....	32
(四) 模型实验.....	48
三、感应法的野外工作	55
(一) 工作前的准备.....	55
(二) 測量手續.....	57
(三) 仪器.....	60
(四) 野外工作.....	74
四、工作中的干扰来源	88
(一) 地形影响.....	88
(二) 人为导体的干扰.....	94
(三) 非矿的地质干扰.....	98
五、感应法的应用	103
(一) 应用范围和应用条件.....	103
(二) 应用实例.....	104
六、在感应法中值得研究的几个問題	129
(一) 关于工作距离的选择問題.....	129
(二) 关于場的相位結構.....	134

(三) 純異常法.....	139
(四) 方法的勘探深度.....	147
結語	152
参考文献	154

緒 言

在地球物理勘探的电法勘探中，感应法是高频（工作频率大于1000赫以上的）方法中的一种。它具有实际应用价值，在某些国家里已经得到比较广泛的应用。它的工作原理非常简单，可以参看图1。

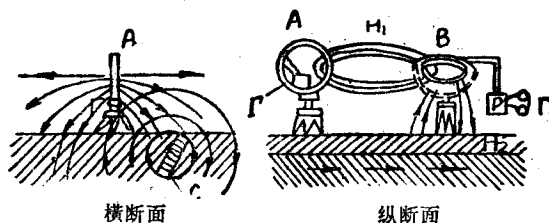


图 1

从图上可以看见，特制的电子管振荡器 (Γ) 产生按正弦规律变化的高频 (20—100 仟赫) 电流。电流在框状天线 (A) 中流动。整套装置都放在地表面，发射的框状天线垂直地表安放。这样在框状天线的四周空间 (包括地下) 便建成高频的电磁场。因为大地具有导电性，并与空气呈水平分界面，所以地下所生的感应电流对空气中电磁场的分布有一定的影响。框状天线的辐射具有方向性，磁场强度的分布图好象一个“8”字形 (见图2)。在通过线框中心的水平面内各个点上的磁场只有水平分量 (H_1)，这种场我们称作一次场。如果地下某一深度赋存有导电性较好的地质体 C (图1)，在一次场的激励下，就在这个地质体中激生感应电动势，并形

成感应电流，这种电流所生的磁场我们称作二次场（或是异常场）。可以在地表离开发射的框状天线某一距离的点上，用带有测定磁场方向或是磁场强度用的装置来研究磁场的分布状况。这时观测到的数据是上述两种磁场迭加在一起的总效应。测量用的装置为一个框状的接收天线（ B ）和无线电接收机（ P ）（附有仪表或耳机 T ）。接收机的结构要按所测量的是总磁场的方向还是总磁场的强度的分量而有所不同。

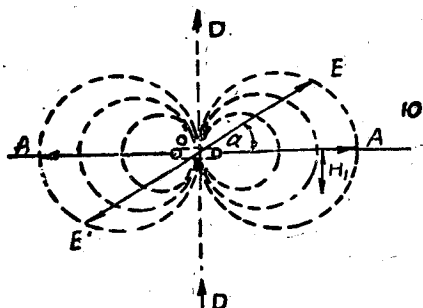


图 2 框形天线的磁场分布图

一次场的方向是水平的，二次场的方向在地表各点均不一样，所以总磁场的方向在一般的情况下也不是水平的。根据观测结果，知道了总磁场分量强度的分布特征或是总磁场向量的方向变化情况，就能够判断地下有没有导电性良好的金属矿体。

感应法具有它本身的特点，和直流电法勘探（甚至与低频交流电法勘探）有着本质上的不同。目前在实际应用中，还不如直流的与低频交流的电法勘探那样广泛。但是越来越

多的經驗指出，直流電法並不一定能夠完全解決實際工作中的問題，而交流方法（其中包括感應法）却在某些方面比直流電法具有一定的優越性，在高頻方法中又以感應法比干涉法、射線法、回波法等方法應用得普遍，而且歷史經驗也最多。

在蘇聯的許多地區都曾使用過感應法，並已取得豐富的經驗。由於各地區的情況不同，所獲得的地質效果也不一樣。一般來講，在科拉半島、北極地區、西伯利亞、中哈薩克等地區，因為那里的基岩和沖積層以及凍土帶的電阻率都很高，而硫化礦卻具有較大的導電率，所以效果很好；感應法的勘探深度在這裡比在蘇聯其他地區都大，在個別地方曾達到 80—100 米。在這些地區的地形一般也都很平坦，所以地形影響很小。另外在外貝加爾、中烏拉爾、高加索等地區，在與上述地球物理特征類似的某些地方，也都得到較好的效果。但在那些浮土厚度達幾十米、沖積層和圍岩電阻率比較低的地方，或是在有強烈地形影響的山區，效果則不太好。

在我國，用感應法完成的工作很少，經驗還不多。但我國地區遼闊，根據蘇聯的經驗，有利於用感應法工作的地方還是很多的。例如在我國北方，入冬後土壤凍結，使直流電法施工困難的地區；在新疆、甘肅等地砂質沙漠地帶，以及浮土很薄、岩石出露面積較多的山地，在這些地區均可以考慮選擇感應法來做普查找礦工作。南方某些地區在某些季節里也可以使用感應法。近年來，有的物探隊應用感應法已經發現了許多用其他方法沒有發現的礦體。

近十多年来，在感应法的理论研究方面已有很大进展，一些新的仪器已试制成功，对方法的实质已基本上掌握。许多国家已经将感应法用于生产，并且在一定的地质情况下效果都很好。可以确信，随着今后实际经验的积累，感应法将日臻完善，并将在地质普查勘探工作中发挥更大的作用。

一、感应法中电磁场的特征

(一) 一次场

在感应法工作中，发射机（振荡器）产生的高频交变电流流通在框状天线中。这时电磁能量向四周空间辐射，形成激励地下矿体的场源。从马克士威电磁场方程出发，可以计算在框状天线四周空间内任何一点的磁场强度。在给定的坐标系里，假定线框是由四个顺序连接的电偶极子所组成（图3），根据马克士威方程系推导出的公式，可以算出空间任一点(P)上的总磁场在各个坐标轴(x, y, z)方向的分量值。在实际测量时发射机和接收机的位置保持一定。这时接收点

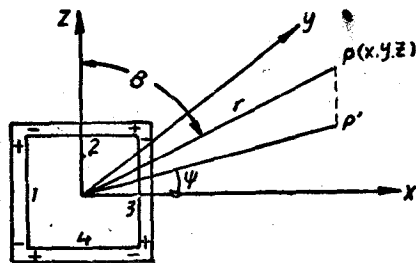


图3 框状天线（四个电极子所组成）磁场的决定

位于发射线框的平面内（在 x 轴上， $\psi=0$ ），接收线框的轴对准发射线框的中心（ $\theta=90^\circ$ ），二者之间的距离一般不超过100米。工作中所用的波长为3000—15000米（频率相当于100—20千赫）。工作距离(r)和波长(λ)相比非常小，即在所谓

邻近帶內观测。在这种特殊的情况下，將我們的工作条件代入到从馬克士威方程导出来的磁場向量公式中。由于磁場的其他两个分量均为0，只剩下 x 方向的磁場分量，經過簡化，最后可得到在接收点 P 上磁場强度(H_1)的表达式如下：

$$H_1 = \frac{QS\omega}{r^3} (\cos \omega t) \quad (1)$$

式中 Q ——与发射机功率有关的一个常数（发射机的功率愈大，磁場也愈强）；

S ——綫框面积（綫框面积愈大，磁場也越强）；

ω ——場的圆頻率（ $\omega = 2\pi f$ ， f 是場的頻率）；

r ——接收点到发射綫框的中心距离；

t ——時間。

上述公式的推导过程很麻煩，我們就不介紹了。实际上当接收距离(r)比綫框的綫性尺寸(a)大很多时，載电流綫框的磁場与放在綫框中心、其軸垂直于綫框平面的磁偶极子的磁場是等效的[●]。我們以后者来代替前者，可以求出在接收点的磁場强度，这比上述的方法要簡便得多。

設这个等效的磁偶极子水平地安放在发射綫框的中心，磁軸垂直于綫框平面，它的磁矩为 M 。在任一点的磁場强度便不难利用初等物理学中求磁偶极子的磁場公式計算出来。图4中磁偶极子在 P 点所生的磁場可以有两个分量 H_r 与 H_θ 。設偶极的长度(l)远較其中心到 P 点的距离(r)为小，可以导出

$$H_r = \frac{2M \cos \theta}{r^3}, \quad H_\theta = \frac{M \sin \theta}{r^3}$$

● 可参看“电学原理”裴济·亚当姆斯著，楊肇濂譯，227—229頁或“电磁波与輻射系統”約敦著82—84頁。

式中 θ 为 r 与偶极轴的交角, 当 $\theta=90^\circ$ 时, $H_r=0$

$$H_\theta = \frac{M}{r^3} \quad (2)$$

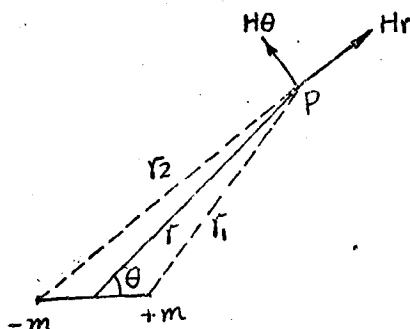


图 4 磁偶极子磁场的决定

但载有电流的小线圈的磁矩(M)是和线圈绕组的匝数(n)、线圈的面积(S), 以及线圈中所流动的电流(I)等成正比, 因此可以写成:

$$M = KnSI$$

式中 K 为比例常数。

于是 (2) 式变为:

$$H_1 = \frac{KnSI}{r^3}, \quad (3)$$

这是在恒定电流稳态的情况下导出来的, 实际上线圈中的电流为交变电流, 因而磁场也是交变的, 因此不妨将 (3) 式

写成

$$H_1 = \frac{Q'S}{r^3} \cos \omega t \quad (4)$$

(4) 式在形式上和 (1) 式一样 (在电流为交变电流时 Q' 里面已包括了 ω)。

由此得出结论：一次场是与接收距离 (r) 的立方成反比，与线框面积 (S) 以及发射机的功率大小成正比。线框面积不能太大 (太大了携带不方便)，发射机的功率也不宜太大 (太大了电能消耗多，携带也不便)，所以增大一次场不能单纯地依靠增大 S 、 I 等来实现，最好是尽可能提高接收机的灵敏度。

应该指出，发射线框的电磁能量辐射的强度是有方向性的：通过线框中心、垂直于线框平面方向的磁场强度最弱，位于线框平面方向的磁场强度最强。在通过线框中心的水平面内，在与中心对称的各个点上以各个方向所画的向径的长度代表该方向的磁场强度。联结这些向径的末端，就得到“8”字形的曲线。由图 2 可以看到，在发射线框面上 (AA 方向) 的发射能量最大，而在垂直于发射线框面 (DD' 方向) 的发射能量最小。在其他方向上能量发射的大小是与该点的向径方向和线框面交角 (α) 的余弦成正比的，例如在 E 点的场强：

$$\overline{EO} = \overline{AO} \cos \alpha$$

$\overline{EO}$ 与 $\overline{AO}$ 分别表示在 EO 和 AO 方向的场强，当 $\alpha = 0^\circ$ 时 $\overline{EO} = \overline{AO}$ ，当 $\alpha = 90^\circ$ 时 $\overline{EO} = 0$ 。

所以在工作中接收线框总是放在 AA 线上，也就是在发

射綫框平面內，而且照准发射綫框的中心。在野外所有观测过程中，永远保持在这种情况下进行观测。

当电磁波通过的不是真空而是任何其他介質时，电磁場作用在带电的質点上，例如組成物質的电子上。这些带电質点受迫振盪，电磁能量的一部分便被轉換成为热能，引起电磁波的衰减，也就是介質对电磁能量的吸收。电磁波在介質中传播时，由于介質导电性質的不同，而有着不同的影响，所以上面表达一次場强度的公式只适用于在真空（或空气）里发射的情况，否則电磁波的特性就会发生变化，不仅場的强度有大的改变，而且产生場的相位移。在我們目前工作中，把相位移的影响当成干扰因素看待，不象在某些低頻电法中把場的相位移看成是一种和电磁場强度一样的参数。測定場的相位差早已形成一种新的找矿方法的物理依据，应用場的相位結構虽是感应法的远景，但現在还没有用于实践。

我們知道，电磁波在半导体介質中传播时，电磁場的分量的振幅值是按指数規律衰减的。

$$E = E_0 e^{-br} \quad H = H_0 e^{-br} \quad (5)$$

式中 E_0 、 H_0 是电磁波在真空中传播时电场和磁场强度的振幅值； E 和 H 是它們进入介質中 r 深度以后相应的振幅值， e 为自然对数的底； b 是介質的吸收系数。 b 决定于介質的导电率 σ 、介电常数 ϵ 和电磁振盪的頻率 f ，可以用下面的公式表达：

$$b = \frac{2\pi f}{C} \sqrt{\epsilon\mu} \sqrt{-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{-2\sigma}{\epsilon f}\right)^2}} \quad (6)$$

式中 μ 为介質的导磁率，在感应法工作中取它等于单位值； C 为真空中的光速，这里 σ 是以 CGSE 单位来表示的。（6）式的

推演也相当麻烦，在理论电工学或无线电波传播的教本中都讲到，我们这里不准备推演。现在只对控制吸收系数 b 的几个因素加以定性的讨论。

不难看出，导电率等于零时，吸收系数也等于零；导电率增大，吸收系数增大；频率增高，吸收系数也增大。

试就在两种特殊的情况下来看：

1. 当 $\frac{2\sigma}{\epsilon f} \ll 1$ ，也就是说位移电流占优势时，吸收系数可以相当精确地用下式确定：

$$b = \frac{2\pi\sigma}{C\sqrt{\epsilon}} \text{ 厘米}^{-1}$$

2. 当 $\frac{2\sigma}{\epsilon f} \gg 1$ ，也就是说传导电流居优势时，吸收系数 b 将等于：

$$b = \frac{2\pi}{C} \sqrt{f\sigma} \text{ 厘米}^{-1}$$

从上面的公式可知，吸收系数与频率和导电率的乘积的平方根成正比。因此在同样的频率下，介质的导电率愈小，吸收系数也愈小，而波穿透介质的深度愈大。

根据公式(6)，设岩石的介电常数(ϵ)等于10， $\mu=1$ 。如果岩石的导电率($\sigma = \frac{1}{\rho}$)为某一定值，在不同的频率下，吸收系数将有不同的值。可以作出一条频率与吸收系数的关系曲线。岩石导电率为各种不同值时，可以得到一系列的这种关系曲线，见图5。工作中习惯上常用岩石的电阻率（以欧

姆米作单位) 来代替岩石的导电率, σ 与 ρ 之间的关系为:
 $\sigma \cdot \rho = 9 \times 10^9$, 图 5 中是用 ρ 来代替 σ 画成的。

从图 5 可看出, b 随 f 的增加而增大, 频率增高到某一定值时, b 停止增大, 而趋近一渐近线。比较不同的曲线, 发现岩石的电阻率越大, 趋近渐近线也越快 (图中 $\rho = 900$ 欧姆米的曲线比 $\rho = 90$ 欧姆米的曲线趋近渐近线要快)。

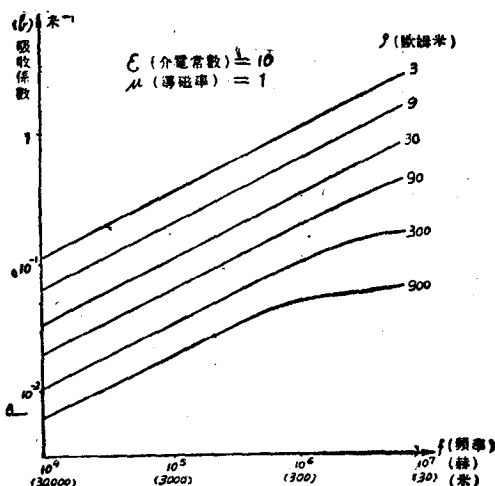


图 5 不同电阻率的岩石的吸收系数与场的频率的关系曲线图

在以上的讨论中, 介电常数 ϵ 、导磁率 μ 、导电率 σ 在感应法工作频率范围内都是常数, 不随频率的改变而改变。但在更高的频率范围时, 它们就不再是常数。实验证明, 这种情况发生在频率高于 10^7 赫以上的时候。我们实际工作所用的频率不超过 10^5 赫, 所以 ϵ 、 μ 、 σ 基本上都作为常数。