关于电磁法勘探的分辨力*

汪光照

（冶金部地质研究所）

提 要

为了正确地评价与应用电磁法勘探，本文兼顾方法原理和技术因素，通过对场的基本表达式的分析及若干环境因素的讨论，认为：方法的原理性分辨力，可用电性分辨因子（$\partial U/\partial\beta^2$）及形态分辨因子（$U_{柱}/U_{球}$）描述之；现实分辨力是方法原理与观测技术的统一，从技术因素来说，仪器的精度制约着方法的分辨力；不同观测分量具有不同的分辨力；电磁法的高分辨力寓于丰富的信息之中。

近年来，国外一些学者已开始论述感应电法的分辨力[1]。鉴于我国各类电磁法都已经（或正在）试用而尚未推广的状况，系统地分析一下电磁法的分辨力，无疑将有益于电磁法的应用与发展。

可从两个既相区别又有联系的方面概括电法勘探的分辨力：

（1）获得的异常资料中所包含的与异常源（体）电性及几何参数有关的信息量。

（2）在特定的环境条件下，反映目的探测物（矿体）的有用信息与干扰（地质噪声）的比值。

应当指出，电法勘探的分辨力是受多种因素所限定的，如观测仪器精度及观测分量，激励场特性，各类噪声，导体电性及赋存空间状态等等。为论述简明，我们略去一些可人为选择或改变的因素（如场源及装置形式），而以原理性（场的特性）及技术性（观测仪器指标及特性）因素为主。

一、简单形体理论计算结果的分析

电法勘探中异常效应的理论表达式，均可概括为：

$$H_A = H_0 U(\sigma,\mu,b,f(或t))b^n\varphi(x,y,z) \quad \cdots\cdots (1)$$

式中，H_A为异常分量，H_0为激励场强；$\varphi(x,y,z)$为座标函数，仅取决于异常体与测量装置的几何关系。$U(\sigma,\mu,b,f)$可称为特性因子，σ,μ,b分别为异常体的导电率、导磁率及特性尺寸（如球之半径）。U、b^n即异常场源的等效磁（或电）矩。$n=1\sim3$，视异常体形状而定，对于球体取$n=3$，水平圆柱$n=2$。显见，方法的分辨力本质上决定于特性因子。

本文一九八二年一月收到。

*文中的部分计算是由杨健、汪根林同志完成的。

根据有关文献[2,3,4]，稍加修改，即可列出均匀电流场（dc法），均匀谐变场及均匀瞬变场（EM及PEM法）中球、水平圆柱体异常效应的特性因子U：

dc法（直流电法）：

$$球：U_{dcs}=\frac{\sigma_2-\sigma_1}{\sigma_2+2\sigma_1}=\frac{K-1}{K+2} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$柱：U_{dcc}=\frac{\sigma_2-\sigma_1}{\sigma_2+\sigma_1}=\frac{K-1}{K+1} \quad \cdots\cdots (3)$$

$K=\sigma_2/\sigma_1$，σ_2，σ_1分别为导体及围岩的导电率。

频域电磁法（EM法）：

$$球：U_{EMS}=1+\frac{3}{\beta^2S^2}-\frac{3\mathrm{cth}\beta S}{\beta S} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$柱：U_{EMC}=\frac{I_2(\beta S)}{I_0(\beta S)} \quad \cdots\cdots (5)$$

其中，I_2，I_0，为第一类复宗量贝塞尔函数。

$\beta^2=\sigma$，μ_0a^2，σ，μa分别为导体导电率，导磁率（此处$\mu=\mu_0=4\pi\times10^{-7}$，仅考虑非磁性导电球或柱体）及半径。$S=\sqrt{i\omega}$，$i=\sqrt{-1}$；$\omega=2\pi f$，f为激励场频率。

当βS较小时，利用双曲函数的幂级数展开及贝塞尔函数的近似表达式，可得：

$$U_{EMS}=\left[\frac{2\beta^4}{315}\omega^2+\frac{2\beta^8}{31185}\omega^4\right]-i\left[\frac{\beta^2}{15}\omega-\frac{\beta^6}{1575}\omega^3\right]$$

$$(\beta^2S^2<\pi^2) \quad \cdots\cdots (4')$$

$$及U_{EMS}=\frac{-\beta^4\omega^2}{32+2\beta^4\omega^2}+i\frac{2\beta^2\omega}{16+\beta^4\omega^2} \quad [\beta S\ll1] \cdots\cdots (5')$$

特别地，当$\beta S\to0$时*，则有

$$U_{EMS}\to i/15\beta^2\omega=\mathrm{Im} \quad \cdots\cdots (4'')$$

$$U_{EMC}\to i/8\beta^2\omega=\mathrm{Im} \quad \cdots\cdots (5'')$$

式中，不包含i项称为实部（Re），含i项称为虚部（Im），均为实际观测分量。

当$\beta S\to\infty$时，4，5式均趋于1。即

$U_{EMS}\to1=\mathrm{Re}$

$U_{EMS}\to1=\mathrm{Re}$

瞬变电磁法（PEM）：

瞬变法的物性因子，随激励脉冲波形而异[5]，当激励脉冲为阶跃函数类型时，有：

$$U_{PEMS}=6\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{-\frac{(n\pi)^2}{\beta^2}t}}{(n\pi)^2} \quad \cdots\cdots (6)$$

---

*$\beta S=0$，意味着f（或ω）=0，相对于直流场激励情况，U_{EMS}及U_{EMC}均等于0。

$$U_{PEMS} = 4\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{-\frac{\lambda n^2}{\beta^2}t}}{\lambda_n^2} \quad \cdots\cdots (7)$$

t为测量取样时间（以一次场场崩点为零）；λn为Io(βS) = 0 的n重根。

观测感应电势（ε = dH/dt）时，物性因子可相应地写成：

$$(U_{PEMS})' = 6/\beta^2\sum_{n=1}^{\infty}e^{-\frac{(n\pi)^2}{\beta^2}t} \quad \cdots\cdots (6')$$

$$(U_{PEMC})' = \frac{4}{\beta^2}\sum_{n=1}^{\infty}e^{-\frac{\lambda n^2}{\beta^2}t} \quad \cdots\cdots (7')$$

由于$\frac{\pi^2}{6} = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}$，$\frac{1}{4} = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{\lambda n^2}$ 故6、7式可简化为

$$U_{PEMS} = \sum_{n=1}^{\infty}e^{-\frac{(n\pi)^2}{\beta^2}t} \quad \cdots\cdots (6'')$$

$$U_{PEMC} = \sum_{n=1}^{\infty}e^{-\frac{\lambda n^2}{\beta^2}t} \quad \cdots\cdots (7'')$$

显然，$t/\beta^2 \to 0$ 时，U_{PEMS}及U_{PEMC}均趋于1，而$t/\beta^2 \to \infty$时，U_{PEMS}及U_{PEMS}均趋于零。

当$\pi^2 t/\beta^2 \gg 1$时，U_{PEMS}及U_{PEMC}可一级近似为：

$$U_{PEMS} = e^{-9.9t/\beta^2}$$

$$及U_{PEMC} = e^{-5.8t/\beta^2}$$

用2，3，4，5，6式计算的图见图1～4。

分析上述算式及列图可见，

1.dc法的特性因子，仅与相对导电率K有关，K值同，U 值相等，本质上无法提供真实导电率的信息。

2.EM法U与综合参数$\beta^2 = \sigma\mu a^2$呈复函数关系，在相对低频（βS较小）段，ImU及

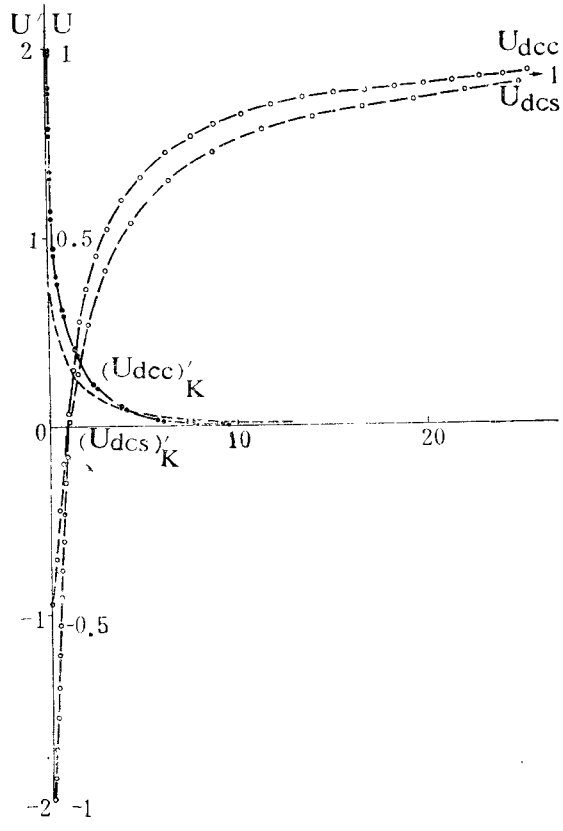


图1 均匀电流场中球和水平圆柱的特性因子U及其一阶导数

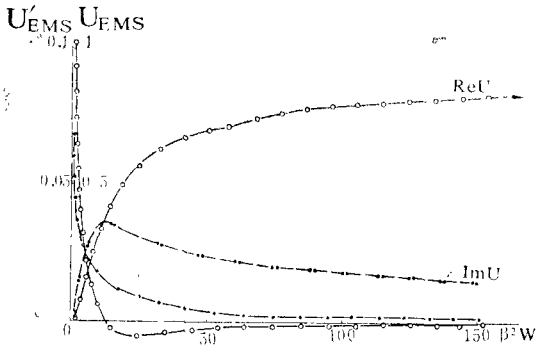


图 2 谐变场中球体反应的U_{EMC}及U'_{EMC}

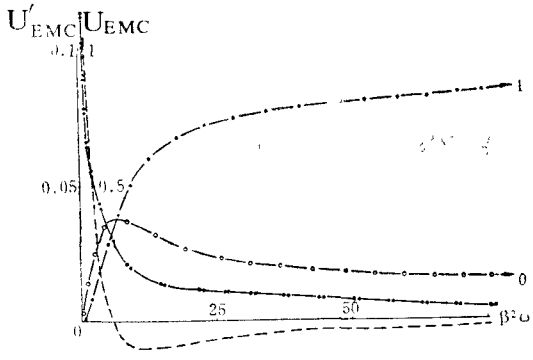


图 3 谐变场中柱体反应的U_{EMC}及U'_{EMC}

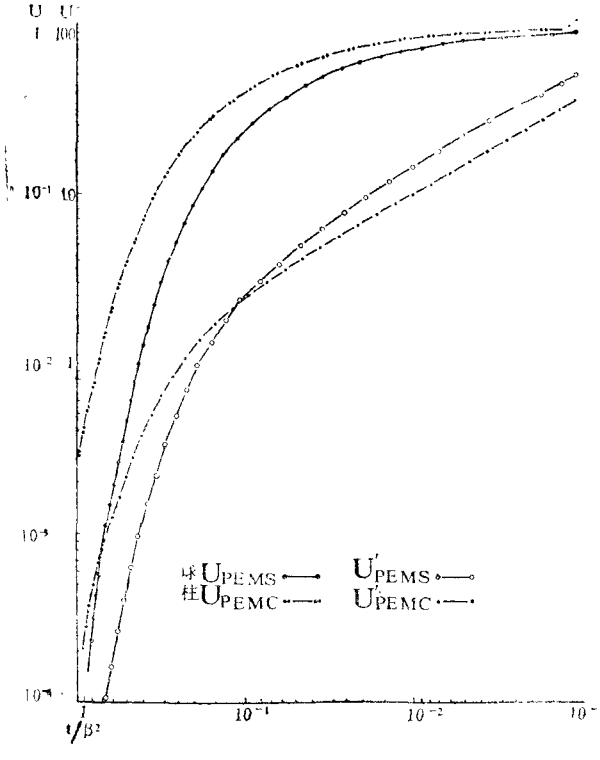


图 4 瞬变场中球和柱体反应的特性因子及其一阶导数（U）′t/β^2

ReU均具有较高分辨力，而当$\beta S \to \infty$（相对高频）时，仅管U值趋于1，但$\partial U/\partial \beta^2 = 0$，方法分辨力全部丧失，这是由涡流全部趋于导体表面的物理实质所决定的。

3.瞬变法（PEM）中，U与综合参数β^2大致成负指数关系，$t/\beta^2 \to 0$（相对早期），U值趋于1，本质上与EM法的相对高频或dc法相同。而在t/β^2较大时（相对晚期），方法具有较高分辨力。

4.为了定量地评价方法分辨力，可以引用两个函数做为标准：导电率（或综合参数）分辨因子$\partial U/\partial\beta^2$（$\beta^2\cdot\omega$或$t/\beta^2$），及形态分辨因子$U_{柱}/U_{球}$（$\beta^2\omega$；或K，或$t/\beta^2$）(图5)。概括说来，电法勘探的原理性分辨力高低可按PEM法相对晚期效应——EM法相对低频效应——dc法，PEM法相对早期，EM法相对高频段顺序排列。

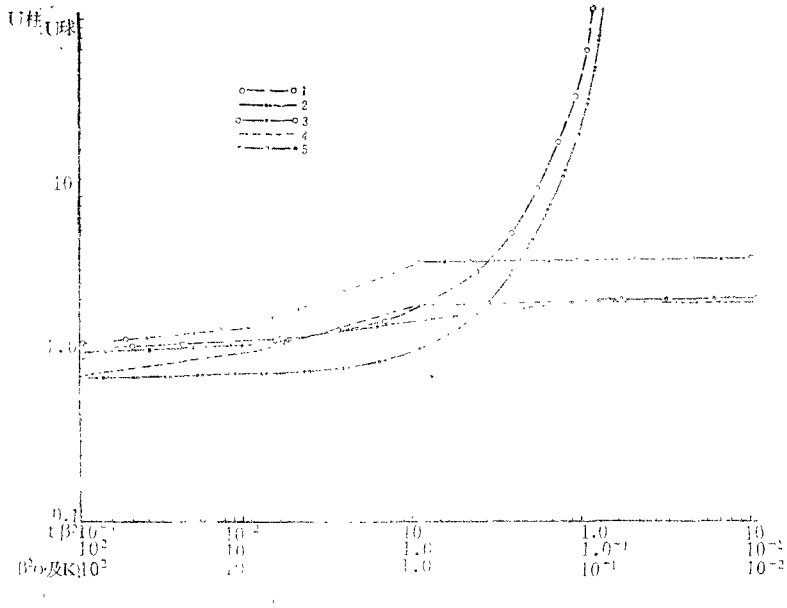


图5　dc、EM、PEM反应中的形态分辨因子$U_{柱}/U_{球}$

1.PEM法（测瞬变场），2.PEM法（测瞬变电压），3.EM法（测Re），4.EM法（测Im），5.dc法。

二、影响电磁法分辨力的技术性因素

方法的原理性分辨力不等于现实分辨力，后者是原理与技术的现实统一。

1.观测仪器的功率灵敏度　图6所示地质剖面，球形矿体中心埋深50M，半径10M，导电率100℧m^{-1}，围岩导电率为0.001℧m^{-1}，（电磁法中可忽略其影响）。对dc法说来，目前技术条件下不可能获得异常反应[4]*。使用EM法及PEM（均匀场）时，要获得可靠异常并要求相应分辨力，仪器的功率、灵敏度可按下式一级近似地求取：

$$Ha = HoU\cdot\frac{a^3}{z^3} \quad \cdots\cdots (8)$$

式中，Ha为异常场强（mγ，γ或安·米$^{-1}$），Ho为球心处一次场强(mγ，γ或安·米$^{-1}$)，

* 中梯 dc法，目前对球体的最大反应深度 h≐2.15a。（h为中心埋深，a为半径）。

在回线场中 $Ho=\dfrac{2Ib^2}{(z^2+\frac{b^2}{4})\sqrt{z^2+\frac{b^2}{2}}}$ 安米$^{-1}$ $=\dfrac{2Ib^2}{(z^2+\frac{b^2}{4})\sqrt{z^2+\frac{b^2}{2}}}\times 4\pi\times 10^5$ (mγ)

〔b为回线边长，h为地下深度，I为回线中电流）。

若以Ha≥10Sa（Sa为仪器最高观测精度）为可靠异常量级，则8式可写成：

$$\frac{Sa}{Ho}\leqslant 0.1\cdot U\cdot(\frac{a}{z})^3=8\times 10^{-4}\cdot U$$

据此，在EM法中，

若取 U＝0.9（相应工作频率为 5.6 × 10^3，…）要求Sa/Ho<720ppm

U＝0.1（相应工作频率为 625，125C/S）要求Sa/Ho<80ppm

U＝0.05（相应工作频率为375，93C/S）要求Sa/Ho<40ppm

U＝0.005（相应工作频率为343C/S，10C/S）要求Sa/Ho< 4 ppm

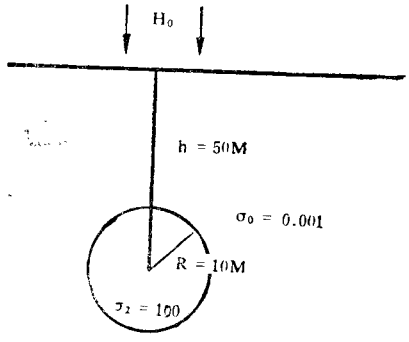


图6 仪器功率灵敏度计算模型

括号中第一个频率值为观测实分量所用，第二个指观测虚分量所用。1ppm＝10^{-6}。

对瞬变法，则有：

取U＝0.80（相应测量取样时间为110μs）要求Sa/Ho<640ppm

U＝0.08（相应测量取样时间为2.5ms）要求Sa/Ho<64ppm

U＝0.008（相应测量取样时间为5.7ms）要求Sa/Ho<6.4ppm

U＝0.0008（相应测量取样时间为8.6ms）要求Sa/Ho<0.64ppm

由图2及图4可知，使用不同的工作频率及取样时间，EM法及PEM法对所设导体的分辨力可以相差几个量级，而高分辨力的获得，是以仪器的高精度大功率为前提的。

2.仪器的观测方案与结构原理 a.谐变场法中虚、实分量的分辨能力

4′式表明，低频小参数段，谐变场中球体反应的实虚分量分别为：

$$ReU_{EMS}=\frac{2\beta^4}{315}\omega^2+\frac{2\beta^8}{31185}\omega^4$$

$$ImU_{EMS}=\frac{1}{15}\beta^2\omega+\frac{1}{1575}\beta^6\omega^3$$

对比此二式显见：

Ⅰ）$\beta^2\omega<10$时，$|Im|>|Re|$。

Ⅱ）Re的分辨力≫Im。因为，若以第一项而论（起主要作用的项），前者与β^4（即σ^2）成正比，后者则与β^2（σ'）成正比。

当存在低阻复盖及局部不均匀体*时，相对于虚分量说来，实分量的高分辨力（或高信杂比）将更突出。

* 对于不均匀体的影响，文献〔1〕作了详尽论述，其主要结论可参见附录。

表1，是按图7所计算的结果。

EM法与PEM法对均匀复盖层的反应 表1

谐变场法(EM)	工作频率(C/S)	50	100	500	1000	2000	4000	10000	20000	备注 ①计算时忽略盖层反应与水平圆柱反应的相互影响。 ②使用100M半径之圆形回线为场源，圆心位于柱的直上方。 ③S/M即柱体反应值与盖层反应值之比。
	实分量Re(S/N)	25/104	250/7500	52/190	8/14	3/5	1.1/1.5	<1/<1	<0.5/<0.5	
	虚分量Im(S/N)	2/15	20/85	2.6/1.6	1/0.4	0.4/0.1	0.1/<0.1	<0.1/<0.1	<0.1/<0.1	
瞬变法(PEM)	测量取样时间(ms)	30	20	10	5	1	0.5	0.3	0.1	
	S/N	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	$>10^3/>10^4$	$5\times10^2/2\times10^3$	4.0/7.3	

由表可见：

Im分量受复盖影响比Re大得多，对局部不均匀体的反应比Re敏感得多。这也解释了在低阻复盖区Im往往出现大片异常，而R_e和瞬变电压却无明显反应的大量事实[1]，附图8即为一实例。

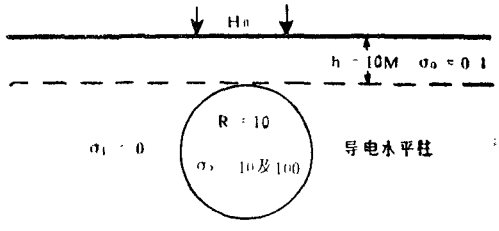


图7 复盖层影响计算模型

b.瞬变法中观测瞬变磁场与感应电势的对比

瞬变法中，可以有两种观测方案：测瞬变磁场H(t)及感应电势$\frac{dH}{dt}$(t)，文献[5]对前者做了肯定。为此，我们以阶跃函数脉冲激励的球体反应为例，做了部分计算，结果如图9，10。

由图可见：

①对极良导体（$\beta^2=500$ms），观测H（t）（其物性因子为U_{PEMS}）时，不仅幅值较大，而且随时间衰减缓慢，表明较$\frac{dH}{dt}$（t）有相对优越性。对中等导体（$\beta^2=50$ms），两者实际上等效。而对非良导体（$\beta^2=5$ms），则以观测$\frac{dH}{dt}$为好。

⑪就单一时间道（t一定）对β^2的反应而论，H（t）随β^2单调增大并逐渐饱和（其性态如谐变法中的实分量），而$\frac{dH}{dt}$则呈“带通”特性（如谐变法中的虚分量），反应极大值随t值增加向高β^2段推移。这说明从地质填图目的出发，应该观测H′（t）。

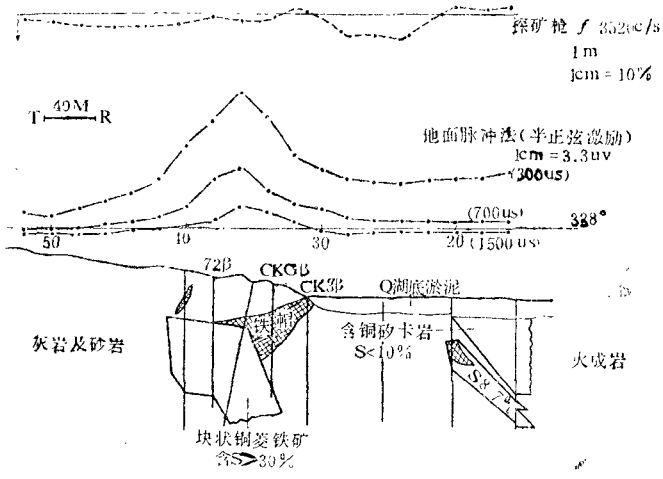


图 8 探矿枪及地面瞬变法对比实例

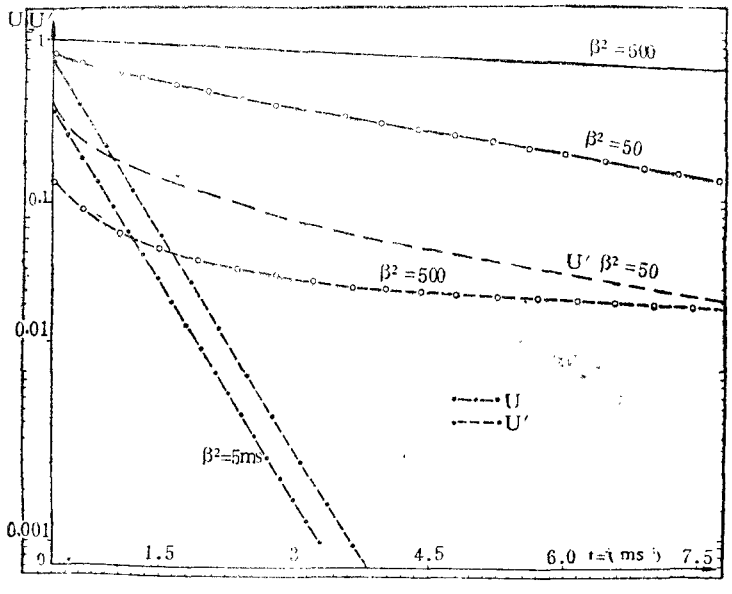


图 9 U_{PEMC}及U'_{PEMS}函数和取样时间的关系（阶跃函数激励）

c.瞬变法中不同激励波形的比较

瞬变法中选择激励波形，实质上就是确定等效工作频段，已有大量文献论及[5]。这里，仅对两种目前在国内试用的波形稍加评论。图11是以球、柱为例，阶跃函数与INPUT半正弦脉冲激励时U值的比值曲线。由图可知：

（i）对极良导体（$\beta^2>100$ms），U_T（阶跃函数激励）$\gg U_H$（半正弦激励）。

（ii）对不良导体（$\beta^2<5$ms），$U_T\ll U_H$。

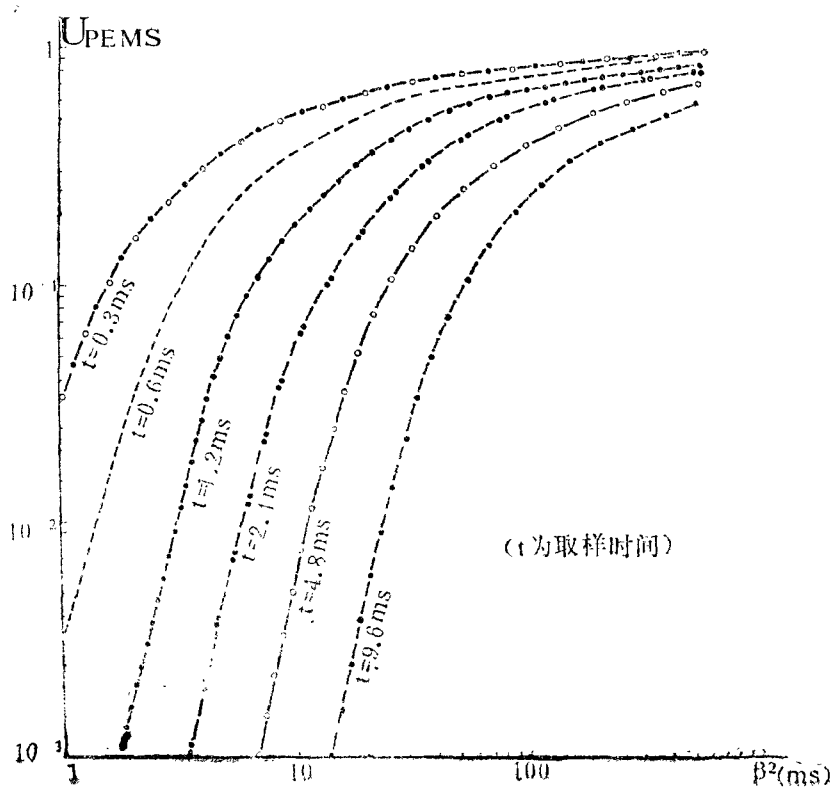


图10a U_{PEMS}与β^2的关系

（iii）在中等导电区段（$\beta^2=5\sim100$ms），两者U值的比介于0.2～5之间，可认为近似等效。

d.瞬变场法与谐变场的比较

从原理上说，PEM法与EM法是等效的。如果将电磁勘探看成一种信号传递过程（图12），导体反应以传递函数表示，当输入为频率函数$H_1(\omega)$和时间函数$H_1(t)$时，分别有：

输出函数（异常）$H_2(\omega)=H_1(\omega)\cdot U(\omega)$

$$H_2(t)=H_1(t)\cdot U(t)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

数学上$H_2(\omega)$与$H_2(t)$是可以用拉氏变换及逆变换相互转换的。

$$H(\omega)=L[H(t)],\quad H(t)=L^{-1}[H(\omega)]\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

但是从技术上说，相对于谐变波，瞬变法有如下特点[5]：

（i）由于激励脉冲可看成基波及若干谐波所合成，因PEM法相当于宽频谱的谐变电磁法，对于随机分布的地下导体说来，无疑增加了信息量。

（ii）按富氏逆变换可以证明，PEM法中瞬变段（一次场场崩后的时间段）的异常效应实质上等效于多频虚分量差值，导体综合参数愈大，取样时间愈大，低频虚分量的百分比愈

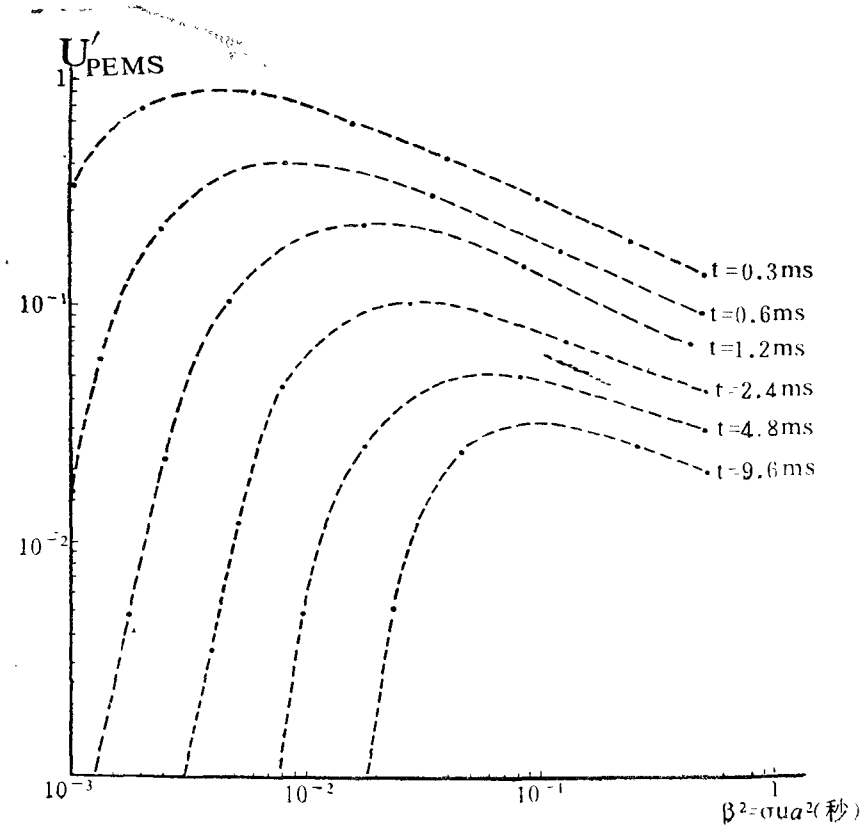


图10b U′PEMS与β²的关系

大。这也解释了瞬变法晚期分辨力高的原因。

为了进一步说明虚分量差值及瞬变法的高分辨力，表1及附录表中，同样列出了有关数据，由表可见：

a.低阻复盖对瞬变法的影响确实比谐变法小得多。

b.低阻局部不均匀体对瞬变法的影响，比谐变场中实、虚分量都小，而与虚分量差值相当。

当然，瞬变法的“宽频谱，高分辨力”两大特点也带来了技术上的麻烦：

（i）宽带噪声与高精度要求的矛盾。

如上所述，瞬变法中晚期阶段U值很小，为测准微弱的瞬变信号，要求接收精度较高。但进一步提高精度，势必进入天然电磁场的影响范围（目前，航空 INPUT 系统的磁场测量精度是n～10mγ，已受天然场的干扰）。

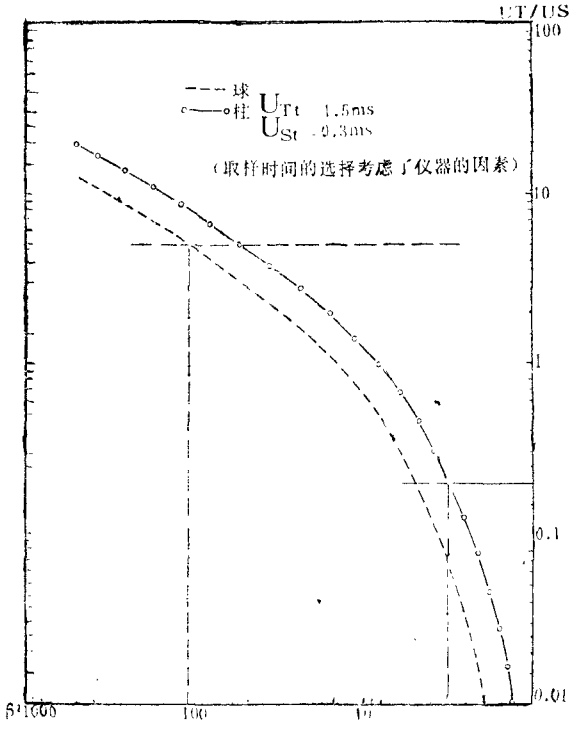


图11 单阶跃激励U_T与半正弦激励Us的比较

（ii）对导磁体反应远不如谐变法中实分量，这在客观上部分抵消了宽频谱探测的优点。

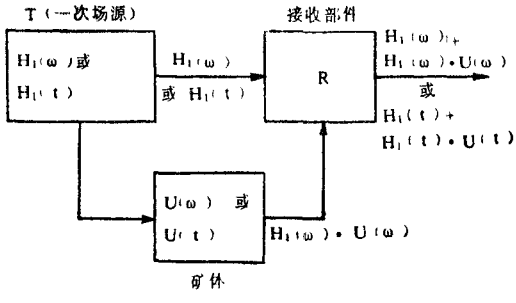


图12 EM法中信号传递示意图

三、提高电磁法分辨力的途径

高分辨力寓于丰富的信息之中，而且是原理和技术的综合表现，为了提高电磁法的分辨力，应该——

1.发展宽频谱、多参数的电磁探测系统和探测方法 近年来，瞬变法、变频法（IP），甚低频法（VLF）及天然电磁场法〔AFMAG〕的出现与发展，复电阻率概念的引出及十四频EM仪、UTEM仪器的研制，反映了人们对“宽频谱、多参数”探测和统一电磁诸方法的意愿，从找矿勘探实际及信息提取理论说来，这是合乎逻辑的。

就电磁法本身说来，有三种途径可供选择：

（1）研制可变脉宽，可调重复频率的瞬变法仪器。

（2）采用脉冲激励，选频接收（基波及高次谐波）的谐变场方案。

（3）设法利用“宽频谱，大深度，多信息”的天然电磁场信号。

2.谐变场法中应改善对实分量信号的提取技术，发挥实分量的高分辨力 所谓“低频虚分量”的方案，是由于在强大一次场背景上观测微弱的实分量异常的技术困难所造成的。从现代技术状况看，观测实分量的精度可望大大提高，如改模拟百分度测量为数字测量，改感应电压（探头）测量为磁力仪测量（光泵及超导磁力仪）。

瞬变场法中感应段（一次场存在区段）亦包含丰富的信息（特别是对导磁体）——因等效于多频实分量，亦应加以利用。

3.加强方法研究，从理论上搞清一些基本问题 例如：

（1）电磁法中，导体几何特性尺寸亦包含于综合参数$\beta^2=\sigma\mu b^2$之中，不提高确定b的精度，电磁法对于σ的高分辨力将无从谈起。

（2）利用谐变场异常实、虚分量幂级数表达式的高次项，原理上可提高其分辨力，虚分量差值法就是一例。

设频率$\omega_1\omega_2$之Im分别为$Im\omega_1$和$Im\omega_2$，求其差值并消除线性相关部分可得：

$$\Delta I'_m=\frac{Im\omega_1-I\omega_2}{\omega_1-\omega_2}=-\frac{\beta^2}{15}+\frac{\beta^6}{1575}K \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

$K=\omega_1^2-\omega_1\omega_2+\omega_2^2$为已知常数。

（3）引进数据处理技术，消除观测误差与地质噪声，以配合仪器精度的提高。

四、结　论

综合所述，可得如下认识：

1.电磁法的分辨力应包含原理与现实两重含义。原理上，以物性分辨因子$\frac{\partial U}{\partial\beta^2}$及形态分辨因子$\frac{U_{柱}}{U_{球}}$（$\beta^2$，ω）为判断依据，并考虑典型地质环境（低阻复盖，局部不均匀体存在）中的信杂比，可以认为瞬变法相对晚期，谐变法相对低频段具有较高分辨力，而瞬变法相对早期及谐变法相对高频，分辨力实质上同dc法。

2.不同观测分量，分辨力迥然不同。谐变法中，实分量分辨力高于虚分量，虚分量差值法及瞬变反应，可大大改善对导电性的分辨力。

3.高分辨力寓于丰富信息之中，发展宽频谱多参数的探测方法和系统，是一种必然趋势。

4.现实分辨力是理论与技术的综合表现，为提高电磁法分辨力，必须坚持仪器与方法结合。

参考文献与资料

〔1〕A.A. Kayfman. 1978, Resolving Capabilities of the inducting methods electroprospecting. 《Geophysics》 Vol 43 No 7. 12.

〔2〕Ю.В.雅库博夫斯基。1963, "感应电法勘探"未译

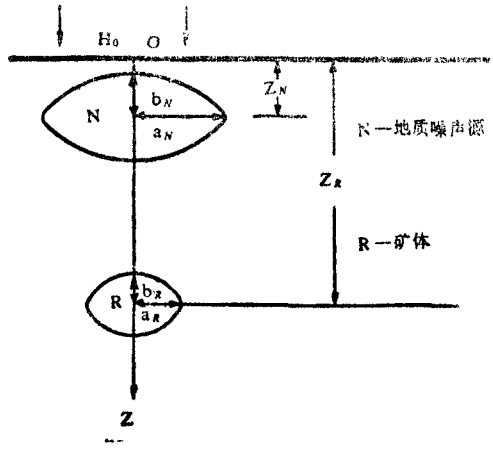
〔3〕许洪海等，1964，多频虚分量法《北京地院科研论文集》（2）

〔4〕中南矿冶学院，1978，《电法勘探》

〔5〕冶金部地质研究所，物探室航电组，1977，航空电磁法译文集

附 录

按照附图所示模型，文献〔1〕对局部不均匀体的影响作了一系列计算，结果见附表〔1，2〕



附图1 局部不均匀体影响计算模型

据文献〔1〕

应用谐变场法条件下可忽略N影响所要求的γ_R/γ_N最小值（脚标R—矿体，N—噪声源）（a/b）$_N$=16；（z/b）=1.1 附表1

(a/b)R	1			2				4				8				16				32				64			
(z/b)R	Ha	Hr	Δ|H|	Ha	Hr	Δ|H|	ΔHa	Ha	Hr	Δ|H|	ΔHa	Ha	Hr	Δ|H|	ΔHa	Ha	Hr	Δ|H|	ΔHa	Ha	Hr	Δ|H|	ΔHa	Ha	Hr	Δ|H|	ΔHa
4	$5\cdot10^4$	$1.5\cdot10^3$	10^3	$4\cdot10^3$	250	160	95	370	50	30	25	60	12	9	7	16	4	3	3	6	2	1	1	2	1	1	0.5
6	$2\cdot10^5$	$3\cdot10^3$		10^4	450	280		930	80	50	30	110	17	12	9	22	5	4	3	7	2	2	1	3	1	1	0.5
8				$3\cdot10^4$	670	430		$2\cdot10^3$	110	70	40	140	25	15	10	30	6	4	3	8	2	2	1	3	1	1	0.5
10				$5\cdot10^4$	930			$3.5\cdot10^4$	150	100	50	300	30	20	13	40	7	5	4	9	2	2	1	3	1	1	0.5
15								10^4	270			800	50	30	18	80	10	7	5	14	3	2	2	4	1	1	0.5
20								$3\cdot10^4$				$2\cdot10^3$	70	50	25	150	14	9	6	20	3	2	2	5	1	1	0.5
30												$5\cdot10^3$	130	80		400	25	15	8	40	5	3	2	7	1	1	1
40												10^4				900	35	20		75	7	4	3	10	2	1	1
60																$3\cdot10^3$	60	40		200	11	7		20	2	2	1

附注：①计算中忽略N与R感生磁场的相互作用。②所谓忽略N影响，即$U_R/U_N>10$。③Ha Hr Δ|H| ΔHa分别为虚分量，实分量，异常振幅及虚分量差值。

（引自文献1）

应用瞬变法时，可忽略N影响$U_R/U_N>10$所需的γ_R/γ_N的最小比值（脚标R—矿体，N—噪声源） 附表2

(a/b)R	1			2			4			8			16		
(z/b)R (r/b)R	3	5	7	3	5	7	11	15	20	18	25	35	28	40	55
4	370	140	90	320	110	60	20	13	9	7	4	3	3	2	2
6	410	160	98	360	125	67	23	14	10	7	5	3	3	2	2
8	440	170	103	400	140	73	25	15	11	8	5	4	3	2	2
10	470	180	108	420	148	77	27	16	11	9	5	4	3	2	2
15	510	200	115	460	165	85	30	18	12	10	6	4	4	2	2
20	540	210	125	490	175	91	32	19	13	10	6	4	4	2	2
30	590	220	130	540	190	99	35	21	14	12	7	5	4	2	2
40	620	230	135	570	200	105	38	22	14	13	7	5	5	3	2
60	660	250	145	610	215	115	41	24	15	14	8	5	5	3	2

备注：（a/b）N=10；（z/b）N=1.1；$\gamma_R=\sqrt{2\pi^P Rt10^T}$。

（引自文献1）