第25卷 第4期 地质与勘探 Vol. 25, No. 4
1989 年 4月 GEOLOGY AND PROSPECTING April, 1989

论时域激电异常谱的分布规律问题

傅良魁 王 璟

（中国地质大学）

以实验结果为依据，分析了二次电位和二次电场的时间谱随测点位置和供电电流强度以及供电时间的改变而变化的若干规律。讨论了二次电位和二次电场出现异常谱的原因，并分析了极化球体上U_2、E_2的表达式，提出了存在的问题及其严密、精确解的表达式。

关键词：时域激发极化法；异常谱；分布规律

物探与化探

众所周知，在传统的激发极化法理论中，对于均匀体极化介质的情况，时间域激电场的放电曲线，乃是随时间呈单调衰减型的曲线。但在前些年，我们在一定条件下，对某些面极化体的一般模型进行时域激电场观测时，得到二次电场随放电时间（t）改变正、负号的时域谱[1,2,3,4]。这种时域异常谱明显不同于单调衰减型的简单时域异常谱，可称为变号时谱（对U_2而言），或变向时谱（对E_2或j_2而言）。以后，王庆乙也观测到了这种激电现象，并称其为“奇异谱”[5]。

此外，在频率域激电法测量中，也观测到了随频率的增加虚分量改变正、负号的频域激电谱[6,7,8]。近年来，国内、外许多物探工作者对这种变号谱进行了研究和探讨，试图从中发现其变化规律，弄清产生变号谱或变向谱的原因，以便充分利用，从而提高激电法的找矿效能。这种研究和探讨既有理论价值，也有实际意义。但是，迄今为止，不同研究者对某些问题尚有明显不同的看法。本文对以下几个问题进行讨论，并提出一些看法。

关于正常谱和异常谱的认识问题

不难理解，由于当前对不规则的时（频）谱仍处于研究、探索阶段，其名称和定义不统一是自然的。但是，为了更好地进行学术交流，对某些基本概念和基本含义的认识问题，很有必要取得一致意见，以便在物探界的学术活动中，大家有共同语言。例如，对于激电法中的正常时（频）谱和异常时（频）谱的认识问题，取得统一是十分有益的。

我们认为，宜将均匀各向同性的线性体极化介质中激电场的时（频）谱，定义为正常时（频）谱或简称正常谱。Cole—Cole模型反映的时（频）谱即属正常谱。时域正常谱为随放电时间的逐渐增长呈单调衰减型的曲线；频域正常谱在复平面图中频点的轨迹线为一圆弧。正常谱反映的极化介质参数值是唯一的，与测点位置等几何因素无关。故可称其为真谱或真参数。它们可以唯一地表征极化介质的激电属性。以均匀各向同性的体极化大地为例，当用A极供电时，观测点处的二次极化电位有以下的正常谱表

达式[9]：

时域正常谱：

$$U_2(t)=U_2(0)\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^{nc}}{\Gamma(1+nc)} \tag{1}$$

频域正常谱：

$$U_2(\omega)=U_2(0)\left[1-m\left(1-\frac{1}{1+(i\omega\tau)^c}\right)\right] \tag{2}$$

式中，τ、m和c为极化介质的时间常数、充电率（或极化率）和频率相关系数，它们均为体极化介质的激电真参数，其量值大小决定了介质的激电属性特征；Γ为伽马函数；$U_2(0)$为$t=0$（时域）或$\omega=0$（频域）最大的二次电位值；t为放电时间；ω为角频率（$2\pi f$）。以上两式为Cole—Cole模型的数学形式。它们所表达的内容，近年来已为物探工作者所了解。

此外，我们认为，应将任意非均匀（包含分区均匀）和非各向同性的极化介质中之时（频）谱定义为异常时（频）谱或称异常谱。其形态特征通常较复杂、不具有式(1)、(2)的正常谱形式。在实验室和野外非均匀介质条件下，虽然在某些测点上观测到时域激电谱具有单调衰减型的放电曲线；频域激电谱具有圆弧形状●，但其所反映的介质参数值，乃是由非均匀条件下各种极化作用的总和，故其为视频谱，由此得到的参数为视参数（τ_s、m_s、c_s）皆非某种单一介质的真谱或真参数，这时可仿照式（1）、(2)写出以下近似形式●：

$$U_2(t)=U_2(0,x)\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{\left(\frac{t}{\tau_s}\right)^{nc_s}}{\Gamma(1+nc_s)} \tag{3}$$

$$U_2(\omega)=U_2(0,\ x)\left[1-m_s\left(1-\frac{1}{1+(i\omega\tau_s)^{c_s}}\right)\right] \tag{4}$$

异常谱可有各种形状，其中包括变号谱和变向谱，或所谓“奇异谱”。它们只是异常中的某些特殊形式。为了反映和描述各种地电条件下的异常谱，针对不同条件，一些研究者将（3）、(4）式写成另一些形式，以便求取复杂情况下的介质视参数值。

以上关于正常谱和异常谱的定义，是按应用地球物理学中公认的基本概念给出的，有利于广大读者建立共同语言。这与以往文献有所不同[5]，仅供读者参考。

为阐述以上定义，现列举一个实验例子。本实验采用中间电位装置AMB（$N\to\infty$）或简称中位装置。取$AB=50$cm，模型为面极化水平石墨圆柱体（长度$L=24$cm，半径$r_0=3$cm，中心深度$h_0=5.2$cm），柱轴与AB方位一致，测点在AB或柱体的中点（$x=0$），用美制192型繁用电位计测量，经改装，在断电后$t=0.03$秒时取第一个值，结果如图1所示。在观测条件下，虽然各曲线的U_2值皆为负，且在放电过程中未改变符号，但它们的形状均与正常时谱相异，故U_2皆为异常谱。表明在一定条件下，U_2的时域谱既非单调衰减的曲线，也非正常谱。

在其他测点上，U_2衰减曲线只是在形态上与正常谱类似（随t单调衰减），但其参数值是不同的（既非围岩，也非极化体），均为视参数，因此皆属异常谱。如图2中的二次电位归一化放电曲线所示，各点U_2曲线的放电速度和时间常数有所不同，其与均匀围岩（实验中为自来水）之差值为参数的异常值。

图3为不同延时的U_2剖面曲线。由图可见，在极化体顶部$x=0$点附近，不同t值的U_2剖面曲线均通过横轴或零值，但它们的

● 这时圆弧的半径和中心位置与正常谱情况有所不同。

● 这时$U_s(0,x)$值与测点坐标和非均匀地电条件有关。

零值点位置不同（虽然差异不大，相距较小），而且其极值点（$E_2=0$点）位置也有所不同（亦是在相当小的测段内），即在不同放电时刻上，U_2极值点与E_2零值点的位置均是活动的，不是固定的。其活动范围和特征，均与U_2和E_2的异常谱性质有关，由许多因素决定。

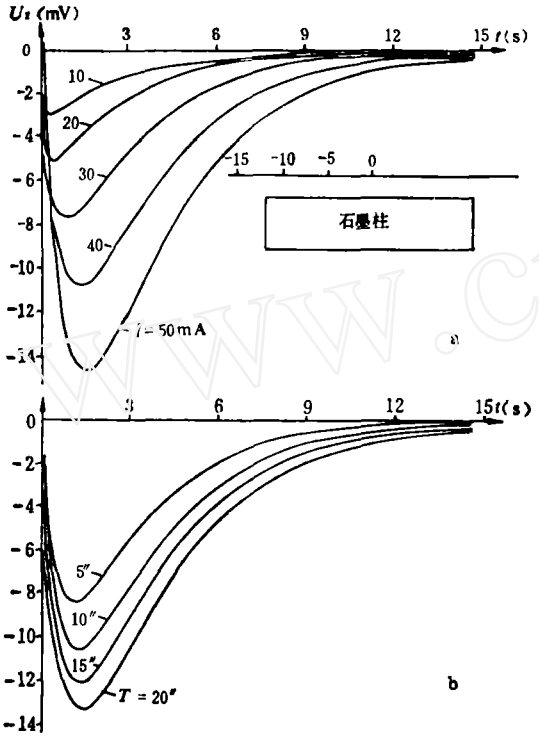

图 1　在石墨柱体上用中间电位装置测量U_2的实验结果

a—供电时间T = 10秒，改变电流I的观测情况，
b—I = 40mA，T不同的情况

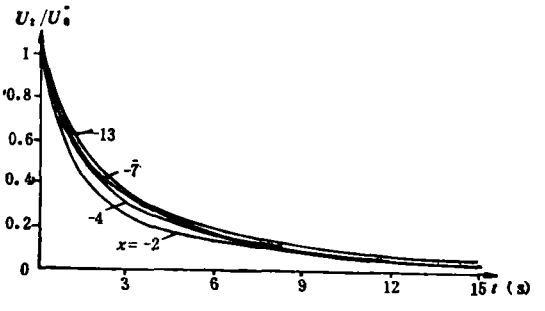

图 2　在不同测点上U_2随t的归一化衰减曲线（条件同图1）

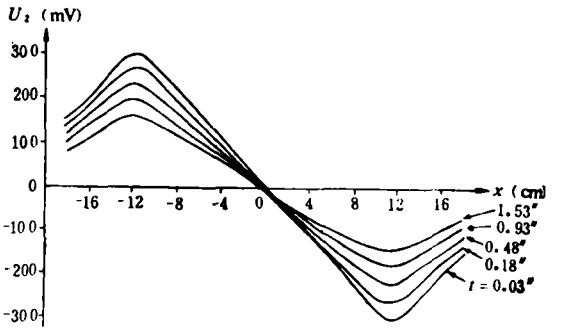

图 3　不同放电时间的U_2剖面曲线（条件同图1）

关于球体上U_2和E_2表达式问题

当可极化球体位于无限介质内的水平均匀电流场中时，其二次场（U_2，E_2，j_2）的严格解具有较简单的形式（参见一般电法教科书）；但在半空间情况下，由于地面影响，严格解的形式便较复杂（我们在〔7〕中已导出）。而在研究二次场的时（频）谱性质时，必须运用严格解，只有这样，才能正确反映出异常谱的性质和规律。否则，若将全空间的解，简单化地用镜像加倍法（对全空间的解乘以2），便当成半空间条件下的解，则是严重失实的；不能够正确表达出地表面上各点二次场的时（频）谱之真实或严格的客观规律。充其量，只能粗略近似地描述二次场的剖面分布特征。这对物探工作者而言，应建立起明确认识。事实上，广大物探人员也是理解这一点的。但是，迄今为止，尚有某些人欠明确，故有讨论之必要。现对此问题简要阐述如下。

众所周知，公式（1）为时域正常谱的表达形式，适用于描述均匀各向同性体极化介质在全空间、半空间或标本情况下的时域谱。而对水平地表下均匀电流场中的埋藏或隐伏极化球体情况（或其他形体），在主剖

面上，简单化地乘以几何、坐标函数 $G(x)$ $\left[=U_2(0,x)\cdot\frac{x}{(H^2+x^2)^{3/2}}\right]$，便作为表达极化球体时域二次场的解，就有严重问题，甚至不能成立。例如，有的文献中给出：在极化球体上方，二次电位与时间和测点位置的关系为：

$$U_2(t,\ x)=U_2(0,x)\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n \frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^{n(1-\alpha)}}{\Gamma[1+n(1-\alpha)]}\cdot\frac{x}{(H^2+x^2)^{3/2}} \tag{3}^*$$

式中，$1-\alpha=c$，H为球心深度，x为测点位置。并且，由上式给出二次电场强度与时间和测点位置的关系为：

$$\boldsymbol{E}_2(t,x)=-\frac{\partial U_2(t,x)}{\partial x}=$$

$$=\boldsymbol{E}_2(0,x)\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^{n(1-\alpha)}}{\Gamma[1+n(1-\alpha)]}\cdot \cdot\frac{H^2-2x^2}{(H^2+x^2)^{3/2}} \tag{4}^*$$

以上两式由于简单化地将时间函数与坐标函数写为互成系数的孤立或分离开的相乘形式，致使不能严格、正确地反映或描述时域二次场的真实特性和客观规律。读者容易看出，以上两式给出的$U_2(t,\ x)$与$\boldsymbol{E}_2(t,\ x)$之时间特性是相同的，即只有在$U_2(t,\ x)$出现异常时谱的测点，$\boldsymbol{E}_2(t,x)$才有异常时谱。而以往文献认为$U_2(t,\ x)$在各测点上均无异常时谱，因此由以上两式得到的结论必然是：$\boldsymbol{E}_2(t,\ x)$在各测点上也不会出现异常时谱。但这与许多条件下的实验结果相违。

具体些讲，读者分析 (3)*、(4)* 两式时，不难看出至少存在以下几个问题：

1．二次场（U_2和$\boldsymbol{E}_2$）衰减曲线的形状特征与测点位置(或x)无关，皆与 Cole-Cole模型的正常时谱相同，只是二次场的量值大小与x有关。这与理论和本文给出的实验结果不符（见图1～3）。按 (3)*式在$x=0$点必有$U_2=0$，但在某些条件下的事实并非如此。按 (4)*式在$x=\pm\frac{H}{\sqrt{2}}$处必有$\boldsymbol{E}_2=0$，而且在任何时间t均如此，但这与严格理论相悖[7]；而且与实验结果不符[1,2]（虽然这里的实验是在柱状和板状极化体上进行的，但这不影响对问题的定性分析）。

2．若将 (3)*式写成以下形式：

$$U_2(t,\ x)=F(t)\cdot G(x) \tag{5}$$

式中

$$F(t)=\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^{n(1-\alpha)}}{\Gamma[1+n(1-\alpha)]} \tag{6}$$

$$G(x)=U_2(0,\ x)\cdot\frac{x}{(H^2+x^2)^{3/2}} \tag{7}$$

则两点间的二次电位差便有以下形式：

$$\Delta U_2(t)=U_2(t,x_2)-U_2(t,\ x_1)=F(t)[G(x_2)-G(x_1)] \tag{8}$$

由此看来，$\Delta U_2(t)$的时间特性规律应与$U_2(t,\ x)$相同。但文献[5]和我们的实验结果均表明，$U_2(t,\ x)$与$\Delta U_2(t,x)$的时域谱为完全不同的衰减曲线（$\Delta x=x_2-x_1$相当小）。因此，与事实不符，未能正确反映激电场的时间变化特征。

3．由于（3)*式存在上述问题，故由此式通过对x求导得到的$\boldsymbol{E}_2(t,\ x)$必然也不能真实地反映时域激电谱。而且，顺便指出，若按常规的表达方法，当用$U_2(0)$表示与观测点坐标位置(x)无关的二次电位时，则$U_2(0,\ x)$应为与测点位置(x)有关的函数。因此，当对（3)*式就x求导数时，应顾及此点，于是便不会得出（4)*式[该式视$U_2(0,\ x)$与x无关导出的]。

关于 ΔU_2 与 E_2 时域谱的关系问题

电法勘探中的电位差（ΔU_2）测量，乃是物探工作者在室内和野外的一种常规观测内容。而且，众所周知，当测量电极距（MN）较勘查对象的尺度及埋深（H）相当小时，无论在理论上或实际上，这时 ΔU_2 反映的是其差分或微分（$MN \to 0$）性质。尤其在找寻地下隐伏矿体时，在 MN 很小的条件下，在任一规定时刻，均有以下关系成立：

$$\boldsymbol{E}_2 \doteq \frac{\Delta U_2}{MN} \qquad (9)$$

并且，可视 $\boldsymbol{E}_2$ 为 MN 间的平均电场强度（这乃是一般的物探常识）。而且，当围岩无极化作用时，地面上任意点处均有关系：

$$\boldsymbol{E}_2 = \rho_1 \boldsymbol{j}_2 \qquad (10)$$

式中，ρ_1 为围岩或测点处介质的电阻率。

由于二次电场强度 $\boldsymbol{E}_2$ 为矢量，故二次电流密度 $\boldsymbol{j}_2$ 也为矢量，而且此时各点 $\boldsymbol{E}_2$ 与 $\boldsymbol{j}_2$ 的矢量方向一致。公式（9）表明，在放电过程中的某一时刻（t），二次电位差 ΔU_2（$=U_{2M}-U_{2N}$）改变正、负号时（即为 U_{2M} 与 U_{2N} 值的大小关系发生变化的时刻），必然也是 $\boldsymbol{E}_2$ 或 $\boldsymbol{j}_2$ 改变符号的时刻，其物理实质乃是 $\boldsymbol{E}_2$ 或 $\boldsymbol{j}_2$ 改变其矢量方向的时刻。这均为电学原理的基本概念。而且 $\boldsymbol{E}_2$ 或 $\boldsymbol{j}_2$ 的矢量方向是由高电位的点指向低电位的点。如在某一时刻 t_1 时 $U_{2M} > U_{2N}$（或 $\Delta U_2 > 0$），则此时 $\boldsymbol{E}_2$ 或 $\boldsymbol{j}_2$ 的矢量方向便由 M 点指向 N 点（反之，若此时 $U_{2M} < U_{2N}$ 或 $\Delta U_2 < 0$，则此时 $\boldsymbol{E}_2$ 或 $\boldsymbol{j}_2$ 的矢量方向便由 N 点指向 M 点）；当在另一时刻，t_2 若变成 $U_{2M} < U_{2N}$ 时（或 $\Delta U_2 < 0$），则 $\boldsymbol{E}_2$ 或 $\boldsymbol{j}_2$ 的矢量方向也相应地同时变成由 N 点指向 M 点（反之，若在 t_2 时有关系 $U_{2M} > U_{2N}$ 或 $\Delta U_2 > 0$，则 $\boldsymbol{E}_2$ 和 $\boldsymbol{j}_2$ 的矢量方向便由 M 指向 N）。按照这些电学常识，不言而喻，在 ΔU_2 改变符号的时刻，必同时为 $\boldsymbol{E}_2$ 和 $\boldsymbol{j}_2$ 改变矢量方向的时刻。故对于出现这种激电现象的测点或测区称为变向点或变向区（范围不大），并且早已在实验中观测到[1,2]。因此，这是以放电过程中的客观现象为基础命名或定义的，是一般物探工作者所能理解和接受的事实。而且，应当注意，在激发极化效应衰减过程中，在某个观测点上或在某个小区段内，在某一时刻出现变号（U_2）或变向（$\boldsymbol{E}_2$ 或 $\boldsymbol{j}_2$）的物理或电化学原因，乃是由不同极化单元放电过程的时间常数不同所致。若视“变向区”为出现“奇异时（频）谱”的原因，乃是颠倒性（现象与原因）的误解。

下面给出几个用小极距 MN（0.5cm）在模型上测得的 ΔU_2（或 $\boldsymbol{E}_2$ 和 $\boldsymbol{j}_2$）时域谱结果。图4为测点（MN 中点）在 $x=-0.25$ cm 处测得的。由图可见，用相同供电电流强度和不同供电时间（T）的 ΔU_2 曲线的衰减速度便有所不同。表明了异常时谱给出不同视参数值（τ，等）的特征。

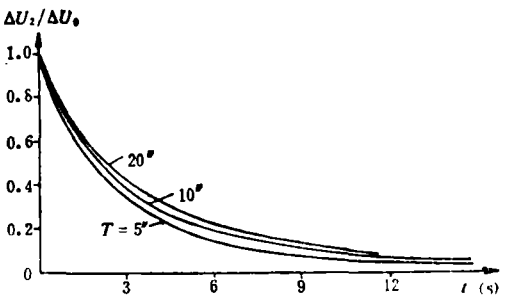

图 4　$\Delta U_2(t)$ 归一化时域谱实验结果
（I = 40mA）

图5是取测点在 $x=-11.75$cm 处观测的结果（$T=10$秒，其他条件同图4）。该测点位于极化体端点附近。由图可见，$I \geqslant 30$mA 的各 ΔU_2 放电曲线，均在放电过程中改变符号，即皆为变号型异常谱。在 ΔU_2 改变正、负号的时刻，便为该测点 $\boldsymbol{E}_2$ 和 $\boldsymbol{j}_2$ 改变矢量方向的时刻。如对 $I=50$mA 情况而言，当 $t<0.45$ 秒时，$\Delta U_2<0$（$U_{2M}<U_{2N}$），$\boldsymbol{E}_2$ 和 $\boldsymbol{j}_2$ 的矢量方向由 N 指向 M；当 $t=0.45$ 秒时，$\Delta U_2=0$（$U_{2M}=U_{2N}$），此刻 $\boldsymbol{E}_2=\boldsymbol{j}_2=0$；而

当$t>0.45$秒时，$\Delta U_2>0(U_{2M}>U_{2N})$，这时$E_2$和$j_2$的矢量方向便由$M$点指向$N$点。因此，该实验表明，在$I\geqslant 30$mA的条件下，$x=-11.75$cm的测点为变向点，在放电过程中，$E_2$和$j_2$将在某一时刻表现为改变其矢量方向。然而，本实验也表明，在$I\leqslant 20$mA的条件下，该测点的ΔU_2时域谱，也呈量值逐渐随t单调衰减的放电曲线，表明了变向点的出现是有条件的。

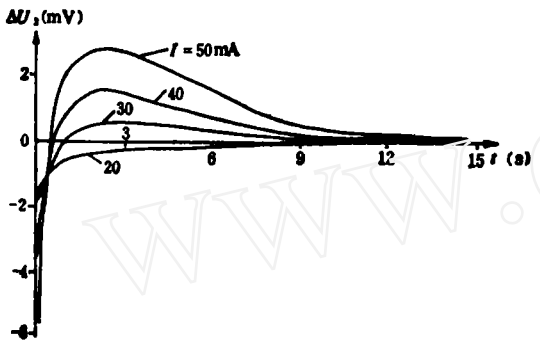

图 5 不同供电电流时ΔU_2在极化体端点附近的时域谱实验观测结果
($x=-11.75$cm)

图6为极化体端点附近几个测点上ΔU_2的放电曲线($I=40$mA)。该实验结果表明，在$x=-11.75$cm左侧相当靠近的两个测点上($x=-12.25$cm和$x=-12.75$cm)，ΔU_2为负值单调衰减型的时域异常谱；而在右侧靠近的测点上($x=-11.25$cm)，ΔU_2变为正值单调衰减型异常谱；仅在$x=-11.75$cm处出现ΔU_2先负后正的变号型时域异常谱。表明在放电过程中出现ΔU_2变号型异常谱或E_2和j_2改变矢量方向的变向区范围，是相当窄小的。实验中需仔细观测方能发现。

最后指出，在解释激电二次场出现变号型或变向型时域异常谱的发生原因时，应注意到，二次极化场的各物理量(U_2，ΔU_2，E_2、j_2)在放电过程中的变化特性，皆为极化体激电效应的一种表象。而且应明确，二次场各物理量间均有十分密切的物理本质性的联系关系。因此，在探索异常谱性态发生原因时，只要彻底弄清其中之一，便可理解其余。以往文献认为：由于U_2波形参数不同，形成了E_2奇异的频(时)谱。看来这是用现象说明现象，非属物理实质性解释。对不会出现奇异频(时)谱的原因，也有待深入研究。

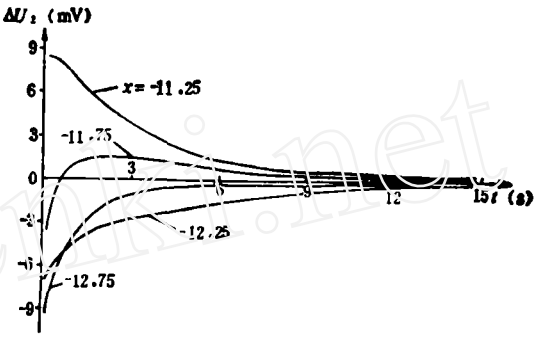

图 6 极化体端点附近不同测点上ΔU_2的衰减曲线实验结果 ($I=40$mA，$T=10$秒，其他条件同图1)

结　论

1．二次电位通常是有异常谱的，当用中位装置测量时，在极化体上方的许多条件下，不但U_2会出现变号谱，而且η_s会出现无穷大值。

2．(3)*、(4)*表达的U_2和E_2式，不能正确表达或描述埋藏极化球体在放电过程中激电场的时域谱。

3．在许多条件下，测量二次电位差ΔU_2时，在放电过程中ΔU_2改变符号的时刻，即为E_2和j_2改变矢量方向的时刻，其变向点和变向区是客观存在的事实，是极化体激电效应的自然表象。

4．对二次场各物理量的异常谱做解释时，应以极化体激电效应的实质为基础，而以U_2的时变特性去解释E_2或ΔU_2异常谱特征时，只是从现象到现象的说明，并非物理(或电化学)原因的解释。

5．激电场的时间、空间分布规律尚有待进一步研究和探索，以便在实践中充分利用。在此过程中，适当开展些学术讨论是有益的，以促进统一认识，共同提高。望广大物探工作者为推动物探事业的发展共勉。

参 考 文 献

[1] 傅良魁，地质与勘探，1980，第8期.

[2] 傅良魁，地球科学，1981，第1期.

[3] 傅良魁主编，《激发极化法》，地质出版社，1982年.

[4] 傅良魁等，地质与勘探，1985，第12期.

[5] 王庆乙等，地质与勘探，1986，第2期.

[6] K. L. Zong, et al., Geophysics, 1975, V. 40, №5.

[7] 傅良魁等，物探与化探，1985，第6期.

[8] 傅良魁，地质与勘探，1981，第2期.

[9] W. H. Perton, et al., Geophysics, 1978, V. 43, №3.

On the Distribution Regularity of Time Domain IP Anomaly Spectrum

Fu Liangkui　Wang Jing

On the basis of experimental results, some variation regularities of the time spectrum of secondary potential and secondary electric field varying with the location of station, exciting current intensity and current-on-time are analysed. The origin of IP anomaly spectrum is discussed. In addition, after analysis of the expressions of U_2 and E_2 for a polarizable spherical body, the authors put forward a strict and exact solution.

冶金地质学会分析测试学术委员会召开第一届年会

冶金地质学会分析测试学术委员会第一届年会于1988年10月22日至25日在四川省峨眉县召开。

参加会议的有来自冶金、有色、武警黄金及高等院校等系统的代表共49人。会议共收到论文41篇，其中有23篇在大会上交流。这些论文反映了近年来有关单位在科研工作中所取得的成绩，是广大科技人员辛勤劳动的结晶。概括起来这次会议有如下几个特点：

1．论文涉及面广，涉及到元素化学分析、原子发射光谱、原子荧光光谱、电化学分析、物相分析、新试剂的合成与应用研究、金矿样品加工工艺等多种专业。值得一提的是，在本次会议上有数篇有关实验室管理方面的论文，从不同角度介绍了如何提高实验室管理水平，实行灵活经营，以适应冶金地质进一步深化改革需要，受到了人们的普遍重视。

2．体现了科研与生产密切相结合，为冶金地质找矿服务的方针。绝大多数论文，都是已经在生产工作中推广应用，并已取得良好效果的科研成果。如微量金的分析，化探样品的快速分析，金矿试样加工工艺等问题，都是目前冶金、有色、黄金部队、地质化验部门普遍关心的问题。又如锰矿地质找矿和高磷锰矿的利用问题，是冶金地质面临的一项艰巨任务。这次会议交流的有关锰矿石物相分析的论文，密切地配合目前锰矿地质找矿工作，为一些高磷锰矿的开发利用提供了科学依据。

3．一些论文具有较高的使用价值和较高的科研水平，例如“某地闪锌矿单矿物中银的赋存状态分析方法研究”，查明了在特定粒度下呈裸露状态及包裹状态自然银和硫化银的赋存状态和含量，在分析流程上很有特色，解决了地质、选冶研究中急需解决的问题。又如“水平撒样化学光谱法测定微量金”，成功地把水平撒样法应用于微量金的测定，从而简化了金的分离富集流程，工作效率显著提高，引起了与会代表的广泛关注。上述情况反映出冶金地质化验工作近年来在为地质找矿服务的同时，自身的技术水平也有了长足的进步。

4．科技产品的推广应用相当活跃。近年来，许多科研单位注意利用自己的研究成果进一步开发新产品，在本次会议上介绍和推出的科技产品有：中南冶金地质研究所的金矿制样连动机和棒磨机；WFC型物相分析磁选仪；西南冶金地质研究所的KTB—1型可控硅调压电热板；中国地质大学的微珠法野外测金箱；科学院成都地理研究所的PC—1500分析数据采集处理系统等。这些产品都具有简单、实用、效率高的特点，引起了代表们的很大兴趣，当场达成了数项科研成果交易协议。

（陈华供稿）