

地球物理勘探专辑

第 3 辑

电 法 勘 探

(激发极化法)

地质出版社

地球物理勘探专辑

第 3 辑

电 法 勘 探

(激发极化法)

地质出版社

1960·北京

本专輯中收集了近年来国外（主要是苏联）期刊上有关激发极化法的十几篇文章。内容包括激发极化法的原理、工作方法以及在阿尔泰等地的具体实例。本专輯对于从事该法的物探人員来说是很好的参考资料。

本書由張寶珍、吳崇祥、顧燕庭、趙文津、錢蘭海、孫克昌等同志譯出，傅良魁同志校閱。

地球物理勘探专輯
第 3 輯
电法勘探（激发极化法）

譯 者 張 寶 珍 顧 燕 庭 等

出版者 地 質 出 版 社

北京西四大街地質部內

北京地質出版社登記證出字第050号

发 行 者 新 華 書 店 科 技 发 行 所

經 售 者 各 地 新 華 書 店

印 刷 者 地 質 出 版 社 印 刷 厂

北京安寧門外六號院40号

印数(京)1—2000册

开本787×1092¹/₃₂

字数260,000

定价(10)1.50元

1960年7月北京第1版

1960年7月第1次印刷

印张11²/₅

目 录

激发极化法——一种地球物理勘探方法

.....D. F. 勃拉叶尔 (5)

激发极化法的理论研究.....R. H. 弗立歇等 (29)

岩石中激发电位问题的讨论.....Л. O. 波利亚柯夫 (49)

在激励电流作用下极化金属矿体的相似性原则

.....Ю. П. 布拉謝維奇 (59)

离子导电岩石激发极化的性质.....И. И. 洛克伊田斯基 (67)

岩石的激发极化特性.....B. H. 达赫諾夫 (77)

激发电化学活动性.....B. H. 达赫諾夫 (87)

激发极化电位的电场.....B. H. 达赫諾夫 (93)

细粒砂质粘土岩石的激发极化电位问题.....М. Г. 拉岱紹娃等 (99)

电子导体和离子导体人工极化的实验研究.....Ю. C. 雷斯 (110)

沉积岩激发极化作用的实验室研究.....И. И. 洛克伊田斯基 (120)

在无矿地段上岩石激发极化的特性.....Ю. C. 雷斯 (134)

岩石和矿石的激发极化及其在电法勘探中的应用

.....B. A. 柯馬罗夫等 (144)

激发极化电场的性质及其用于金属矿普查方面的可能性

.....B. A. 柯馬罗夫 (163)

球状金属矿体激发极化场的计算.....Ю. П. 布拉謝維奇 (180)

长椭球和扁椭球体激发极化场的计算.....Л. А. 盖尔布赫 (192)

找寻硫化矿时激发极化法的应用.....Г. И. 薩柯夫采夫 (206)

在电解极化电法勘探中新的测量方法.....松原厚、中林一孝 (221)

在阿尔泰多金属矿床上应用激发极化法的几个结果

.....B. A. 柯馬罗夫等 (250)

激发极化法在瑞典金属矿床上的应用.....W. 布赫霍因 (258)

激发极化法的模型实验

.....M. Г. 拉恰紹娃, B. M. 道布累宁 (264)

矿场地球物理学中的激发极化法.....B. H. 达赫諾夫 (280)

激发极化法——一种地球物理勘探方法

D. F. 勃拉叶尔

摘 要

经过实验室的实验,已经证实了在电解质中金属体激发极化电位的一些基本关系。供电时,矿体两端的电位降在达饱和电位1.2伏以前,激发电位为矿体两端电位降的线性函数。离子扩散与化学作用是决定激发电位增长或衰减速度的重要因素。极化作用只发生在导电性矿物的边界部分。实验室的实验结果给出了均匀、各向同性矿化地层的激发极化电位的解释。该电位随着离开点电极按 $\frac{1}{r}$ 的比例下降。本文对激发极化率下了定义,并且描述了野外数据的分析方法。在两个矿化带(磁硫铁矿和磁铁矿)上的野外测量结果证实了所发表的理论。

引 言

当电解池中有电流通过时,电池中阴阳两极便引起极化,这是人们早就知道的。这个效应提供了一个发现地下致密状或散漫状金属矿体的途径,而且构成了激发电位法(IP)的地球物理勘探基础。简言之,这个方法是先在一个金属体上产生极化作用,然后测定这个极化作用,进行的程序,如图1所示。一个金属体M放在充满一种电解质的围岩中。这个金属体的存在将歪曲电流线的分布,使其按照金属体与周围岩石间电阻率的比例关系而分布。电流流进金属体的一面相当于一个等效电解池的阴极,而电流流出的一面则相当于阳极。金属体本身则相当于通常的外线路。当直流电由A极流向B极时,金属体便极化,电流流入的一面为正,流出的一面则为负。若停止电流从A向B流动,则金属体上的偶电层就产生电流,并流经周围介质而自行消失。记录器R将指示出C和D两点间由极化电流所造成的电位降。为了避免测量由激励电流所产生的电位降,必须使开关S在供电电路

未断开之前保持断路。

一些基于激发极化原理的勘探方法，曾經被許多人研究过，而且产生过各种各样的主张。在1912年什留姆别尔热（1912, 1920, 1930）曾經取得过关于利用激发极化作用作为勘探方法的专利权，但是后来他承認了他在野外的实验是不成功的。

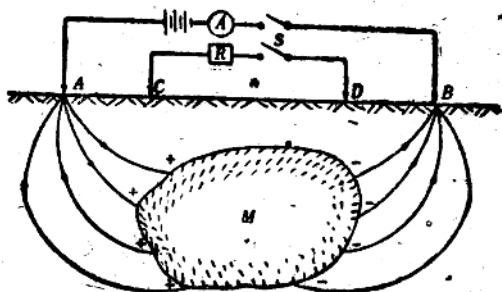


图1. 电流由A向B流经金属体M，使其极化。记录器R测量激励电流停止后激发极化的衰减

什留姆别尔热把这个失败归咎于自然极化、“残余”极化、离子迁移以及介质的电阻率等因素。穆勒（1932, 1934a, 1934b, 1940）和威司（1933）曾經研究过一个方法，利用这个方法他們自称曾經仅以1至2瓦特的功率就得到地下3000英尺到6000英尺深的反映。可是貝留其（1935, 1941）却不能重复得出他們的这些结果。他发现，他們的方法只适用于非常浅的深度。

普达本柯（1940）和派得逊（1940）曾提出过一个直接探明油田的方法，他們所使用的装置与本文所要談的相似。这个方法的基础在于电解质和油的极化效应的差异。

除上述专门测量激发极化作用的方法以外，还有許多种测量地电性质的有关线路。一般來說，这些方法包括对容抗的测量，因为容抗对极化效应的反应是灵敏的。有关这些方法討論請讀者參看勃勞（1933）、什留姆别尔热（1932）、哈雷（1938）、麦祖勃拉（1939）、

埃弗琴 (1945, 1948), 和力威斯 (1945, 1948) 等的文献。

本文所讨论的研究工作。目的在于确定影响极化的各种因素的作用。如果弄清了这些作用, 则对野外测量结果的解释就容易得多了。

工作的第一部分包括实验室的实验, 实验是以理论研究来个别地控制和探讨每个起作用的因素, 这些理论将有可能使这些结果应用到勘探中去。第二部分, 是将这些实验结果应用在两个已知矿床上野外测量结果的推断解释上。

实验室内的研究

实验室的实验是这样设计的, 使每个可能影响激发极化作用的因素 (如电阻率, 电流密度等等) 的效应都可以分别地进行观测。野外测量的推断解释在很大程度上依靠实验室的结果, 下面将有详细的讨论。

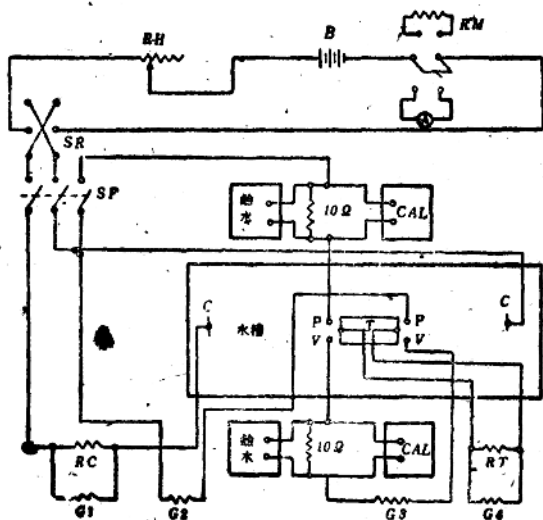


图 2. 实验室内水槽模型、电极等装置图

实验步骤

第一个模拟地质的模型是一个充满纯石英砂的木槽。很快就证实了，用水槽做实验也可以得到同样的结果，因此大多数实验就在水槽中进行。在水中放进一定份量的食盐 (NaCl)，使电阻率达到所需要的值。 NaCl 浓度的变化范围是重量百分比的0到3.6。

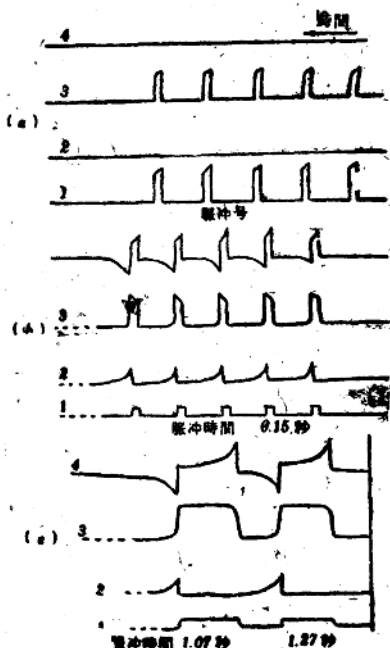


图3. 标准示波记录。(a)无标本时所得到的记录。(b)和(c)是有标本时所得到的记录。曲线1为激励电流脉冲，曲线2为激发极化电位，曲线3为通过标本空间的电位，曲线4为流过标本的电流

记录系统的电路示于图2。电极 CC' 供给激励电流，用示波仪的检流计 G 测量该电流。脉冲开关 SP 使得这个电流一通一断。当电流停止时， Ag/AgCl 电极 (PP') 就立即接通到检流计 G_2 ， G_2 是用来记录极化电位的衰减的。开关机械装置要避免激励电流电路和极化电位电路同时通路。极化电位电路在电流电路断开10毫秒 (0.01秒——译者注) 后接通。

第二对电极 VV' 连续测量极化体以外空间的电位。电极 PP' 和 VV' 与激励电流是隔开的。两个电位电路要准备作校对工作。

曾经研究过很多种可极化的物体标本。其中最常用的是长20厘米，两端面积约为100平方厘米薄铁片作盖帽的塑料管。图中以 T

表示此物。用金属导线焊接铁板向里的一面，经过管子从圆柱体的中

心把導線向外引出。把兩端的金屬板緊壓在管子裡，而整個圓柱體充滿了混合物，這混合物把管內水驅出管外，同時也增加了重量。從標本中引出的兩根金屬導線接到檢流計 G 。兩端金屬板在電性上聯接起來了，而這個標本實際上就成了固體金屬。通過標本的電流可以用 RT 上的電位降來測出，這樣一來，這個標本就適于研究激發極化作用。

由上述實驗所得出的一些典型示波記錄示于圖3。曲線1是用 G_1 測得的激發電流的記錄；曲線2是用 G_2 測得的衰減的激發極化電位；曲線3是用 G_3 測得的標本外部電位曲線；曲線4是由 G_4 測得的通過標本的電流。

激發極化作用的存在

用圖2所示的儀器線路，先作電極間沒有標本時的測量。然後把標本放進電極 PP' 和 VV' 之間再測量一次。所得曲線示于圖3，其中（a）是沒有標本時得到的，而（b），（c）是有標本情況下得出的。

（a）中曲線1同時給出了激發電流的大小和形狀，而曲線3是通過標本空間的電位降。測量沒有標本的曲線2時記錄器的靈敏度已調節到使25 μ 伏特的電位偏轉1毫米。但是沒有顯示任何偏轉。當介質是用充滿鹽水的砂子時，得到結果是相同的。這證明了在純石英砂或水（鹽水或清水）上是觀察不到極化電位的。但是，當電極間放進一塊金屬體後，情況就完全改變了。記錄（b）和（c）所示是當電極間放進鐵板標本時獲得的結果。這兩個記錄中最重要的特征是曲線2所示的電位衰減。曲線上的這種特征是在脈沖電流完全停止以後得到的。這些說明，由於在標本邊界上產生了極化作用，使得電位上升了。此外，通過標本的電流（曲線4）也同樣表明有極化電位存在。在激發脈沖開始時，標本表面起電極的作用，並且電流通過此標本。當標本表面上的極化作用產生時，通過標本的電流便下降。脈沖持續時間愈長，標本電流降得愈多，直到一個穩定的殘余電流形成起來為止，此時產生電動勢的物質的形成速度和消失的速度達到平衡。當激發電流停止後，這個由極化產物而形成的電池就通過周圍介質而放電。由此而流進介質的電流是與流過標本的電流方向相反的。

激發極化作用和激勵電位

激发极化作用与激励电流间的关系是用一个指定的模型，改变通过它的激励电流和观测相应的极化电位而得到的。图4为空间中无标本和有标本时的IP电位与激励电流间的关系曲线。无标本时，通过

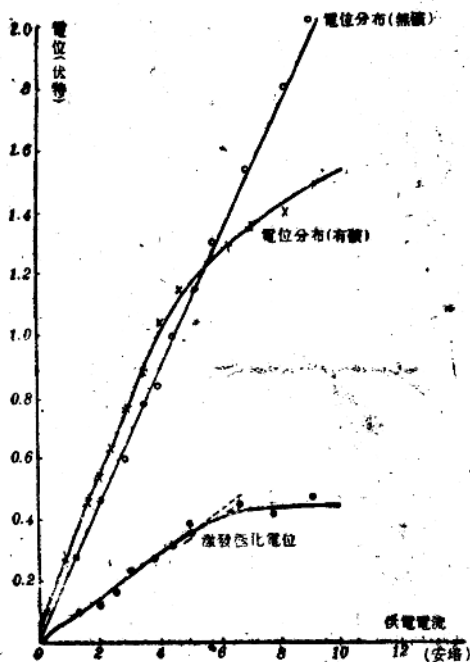


图4. 无标本时通过标本空间的电位，有标本时通过标本空间的电位以及激发极化等曲线与激励电流之关系

标本位置的空间的电位遵守欧姆定律。但是，在有标本时，当空间电位在近1.2伏交叉点以下时，其值大于按欧姆定律所确定的值。超过交叉点后，电位就降落到欧姆值（按欧姆定律所确定的值——译者注）以下。在1.2伏以下激发极化电位是激励电流的线性函数，而且这线性

关系与介質电阻率无关。此外，由各种不同电阻率的电解質和不同金属标本中所得的 IP 曲线都通过原点。这说明，要产生极化效应并不需要起始电位。另外，在接近1.2伏时，所有曲线都呈现饱和效应。氢氧电流的理论值是1.23伏。这一事实在这里很有意义。

由图3还可以看到另外一个饱和效应。它与供电电流脉冲长度有关。假如脉冲长度增加，则 IP 电位也增加，直到饱和值为止。达到饱和值的速度与电解質的电阻率有关。

激发极化作用和围岩电阻率

周围介質的电阻率对物体激发极化作用的影响有以下几方面：

1. 如前所述极化电位是电位降落的线性函数，所以与介質电阻率成比例。因此在勘探时，周围岩石电阻率将起显著的作用。在任何地区判定激发极化作用时必须测量电阻率。

2. 在实验室测量中发现了，极化电位与流进标本的起始电流成比例。很明显，流进标本的起始电流决定于标本和周围介質間电阻率的比值。当标本的电阻率小于围岩的 $\frac{1}{10}$ 时可以得到饱和的极化作用。当

矿物的电阻率比围岩的电阻率大时，则矿物只稍微极化。另一方面，如果围岩电阻率超过矿物电阻率10倍以上，则难以取得效果。

激发极化作用和衰减时间

因为极化作用经过围岩而消失，因此，其衰减速度将多少与介質的电阻率有关。曾经对各种不同电阻率的电解質测定了一定数量的极化电位衰减和上升曲线。所得到的全部曲线都非常相似。但是，没有一条衰减曲线是表示纯电阻放电的指数曲线形状的。因此，这里必定有若干种除了电阻率以外的其他因素作用着极化作用的放电速度。关于电极上极化产物的放电在文献中给了三个微分方程。这些微分方程示于表1的第一栏中。第二栏是这些方程的解答。

方程(a)和(b)适合于一个普通的电解电池，而且是描述当外线路没有电流流过时电极物質的放电情况的。由标本里面所组成的电极在激发极化作用的实验过程中始终是联结着的。这样一种装置破坏了方程(a)和(b)所需要的零电流的条件。于是，实际放电曲线和

表 1

衰 減 速 度	电位与時間的关系	备 注
(a) $dE/dt = -A t^{kE}$	$E = B - (1/k) \ln(t+c)$	波頓和雷代尔(1928)
(b) $dC/dt = -kE^2$	$E = \frac{A}{t+c}$	通常假定
(c) $dE/dt = -\beta E$	$E = E_0 e^{-\beta t}$	普通指数

表 1 前两个电位与時間函数間的一致性說明了在确定衰减特性时, 介質电阻率的作用比起极化产物的开路放电更为次要。实验室得到的所有衰减曲线在所取得的数据范围内符合方程(b)。因此可以得出結論, 激发极化电位随着時間衰减主要受离子扩散和极化表面的化学作用的支配, 而几乎与周围介質电阻率无关。由此可以推論: 不同地区土壤电阻率的改变将很少影响所获得的衰减曲线的形状。因此, 在两个不同地区所得到的两个放电曲线可以在相应的時間間隔內作比較。

IP 电位的衰减時間常数大約为 0.3 秒。这个時間大于土壤的 RC 的時常數 (批埃尔松 1934) 近 1000 倍, 因此极化作用的衰减将不受該常数的影响。实际上, 脉冲开关的延迟時間对普通 RC 瞬时效应所需要的消失時間而言已是足够长了。

化学边界上的現象

穆勒, 威司, 普达本柯和其他人曾論述了关于在一个化学边界上能产生极化电位的信念, 所謂化学边界即两种不同化学成分的电介質接触的边界。他們指出可指望化学边界和岩石边界之間是非常相似的。

当边界的一面沒有导电性矿物时, 上述实验室实验不可能得出一个使其边界上产生激发极化作用的結構。但是这种效应曾以与周围介質不同的电介質所作成的电池进行了研究。这两种电介質是用一层植物紙膜分开的, 这个膜封閉着电池的周围。虽然曾用过各种各样的电介質, 但是对电池內任何溶液, 把它浸在低电阻率的介質中, 都观察不到激发极化电位。当把 CuSO_4 或 NaCl 作为上述溶液且放在自来水中时, 可在其进口处观察到很小的电位。無論該电位的起源是什么,

比起铁的激发极化电位比较来总是一个二级效应。以上现象是与穆勒和威司在这样一种边界上所观察到的效应是不一样的，当然离地表3000呎以下的边界就更不可能有反应。

关于离子浓度

什留姆别尔热曾经假设一种由离子迁移使电流电极附近不均匀而引起的极化效应。为了检验这个假设，把测量装置设计得能够尽量提高不均匀效应，但是没有发现任何由不均匀所引起的电位。这归结为任何由这种效应所引起的激发电位差或者是小得不易于测量（小于40微伏）或者是对所使用的测量仪器来讲消失得太快了。从盐水的张弛时间的观点来看还能解释得通，由司缺拉顿（1941）计算得出该张弛时间为 2×10^{-10} 秒。显然，竭培杰所获得的效应不是因为激发的离子浓度的变化。该效应大概由其他原因引起，可能是由于含有均匀分散的导电矿物颗粒所致。

影响极化电位的其他因素

对勘探来讲，影响极化的一个重要因素是矿体的成分。标本两端除了用普通铁板外，还曾用黄铜、铝、铜等金属板进行了研究。也同样用过磁铁矿块、磁硫铁矿块、碳棒等作为标本。在每一种上述金属上，同样在碳棒上都得到了激发极化电位。在所有情况中测得的电位与在铁板上所测得的是可以相比拟的。

另外一个能够影响极化电位的因素是小分散颗粒的串联效应。曾经证明过激发极化电位与通过颗粒的电位降成正比。所以，产生饱和作用所需要的电流密度与矿物颗粒的长度成反比。两个串联的短颗粒所测得的极化电位（在饱和时）将要比通过同一长度的单个颗粒上所测得的大。这个现象曾经由如下的实验得到了证实，即先分别测量两个不同长度铁棒上的激发极化电位（在饱和时），然后再测量两个串联组合铁棒的激发极化电位（两棒间隔 $\frac{1}{8}$ 英寸）。通过组合棒的电位超过

长度等于两个组合棒之合的一个棒上的电位，并且这个电位继续增加，直到短棒上产生饱和作用为止。这个串联效应将有利于增强分散矿物（具有散漫状结构的含意——译者）的极化电位，特别是，当这些

顆粒排列得很好而且相互間分离得不很远。顆粒間距离的增加将会减少通过組合体所測得的极化电位。因此，激发极化电位对岩石中极化矿物的百分比含量是有显著反应的。

上面設想的分散导电矿物顆粒的极化作用已为室内实验所証实。純石英砂和鉄砾混在一起，直至金屬的重量占样品的重量的10%。将该样品埋在干淨的石英砂質之中，用溫納氏电极系（即等距四极裝置）进行測量。图5为通过該浸染带的一条剖面上所观测到的极化作用。图5中所示的结果是由围绕浸染矿带的中心旋轉电极排列方向而得到的，极化电位在浸染带几何长度最长的方向上为极大值。

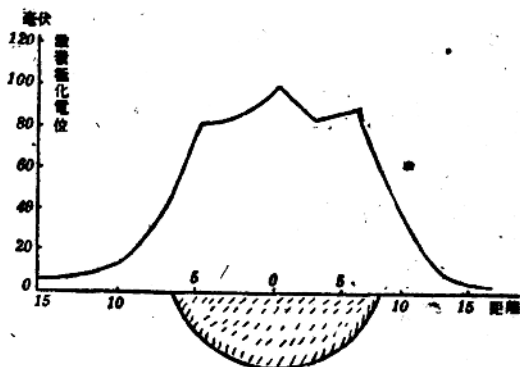


图5 放于純石英砂介質中的金屬浸染带上的激发极化电位。插图所示为电极系围绕一固定中心旋轉的結果

結 論

下面是实验里所得到一些結果：

- (a) 放在电介質中的金屬体的表面能够产生极化电位。
- (b) 通过物体的电位在未达到1.2伏以前，激发电位与电位梯度成线性关系。超过1.2伏后，飽和效应开始出現。
- (c) 离子扩散和极化作用产物的化学作用在确定极化电位增长

速度和衰减速度时起着重要的作用。

(d) 对一級近似而言，只有金属体或者类金属体才能够极化。

(e) 分散在不极化的围岩中的金属颗粒可以极化。

由以上的观测，可以推出如下的結論：

(a) 电解质接触边界上的极化产物只是当边界两边的导电形式有变化时才产生：即导电形式由离子导电轉化为电子导电或者相反。

(b) 界面上激发电荷密度与通过界面法綫分量的电流密度成正比；它的符号恰与产生它的电流相排斥。

(c) 若极化作用全部被激发，則这种极化作用便是由导电性的浸染状或块状矿体所产生的。

(d) 浸染状矿物产生饱和作用所需要的电流比块状矿体为大。此外，对于相同强度的激励电流，当矿物在低电阻率岩石中时，其矿化带上的激发极化电位，比矿物在高电阻率岩石中时为小。其原因有二：(1) 通过矿体的电位梯度較小，(2) 围岩和矿物間电阻率的比值减小。

(e) 对于一級近似而言，衰减曲綫的形状与矿物周圍介質的电阻率无关。因此，对处于不同环境下的矿物，所得曲綫的时间常数几乎相同。

由此可得出推論，什留姆別尔热所描述的“残余”极化电位，是由較均匀分布的导电矿物产生的。普达本柯所測得的电位大概也是这同样根源引起的。穆勒和威司的主张中没有一个是在上述結論中占得住脚的。他們大概只是測量了他們自己的供电电极的极化作用，而这却比他們所探求的效应要大过好几倍。

实验室实验結果中所得到的結論确立了一些关于野外必須遵守的工作程序和野外数据計算方法的規定。視电阻率的測量可在极化作用的数据中一起得到。在比較各地区測量結果以前必須先从野外測量結果中去掉电阻率的因素。因为激发电位与激励电流間具有綫性关系，因此必須規定野外測量用相同的电流值。对于某一电流值，如果要达到饱和时间，为了組成 IP 电位的衰减曲綫，需要激励电流脉冲的持續時間不小于0.3秒。但是脉冲時間也不需要超过0.5秒。根据电的瞬

时效应，在迅速衰减的欧姆电位中干扰出现之前，发现开关的延迟时间需要短到10毫秒。

理 論 討 論

均匀矿化地层

根据实验室的实验使得要得到均匀矿化地层的极化电位的公式变得简单了。假设金属矿物的分布是均匀的，介质电阻率均匀并为常数。在原点上点电极所发出的激励电流的作用下，单位体积的介质将按下面关系极化。

$$P = -c\rho i = -ki$$

这里 i = 电流密度， ρ 为电阻率。于是地面上任意一点的电位 ϕ_s ，是由电偶单元所引起的电位的体积分。

即

$$\phi_s(x, y, z) = \int_V \frac{P \cos \theta dV}{R^2}$$

这里 R 是观点点到体积单元的距离， θ 则为电偶轴（或称极化轴——译者注）与半径 R 间的夹角。这些关系与在古典极化作用的论述中所获得的结果是一致的，因此我们就把最后的结果写在下面。利用我们的记号，变为

$$\phi_s(x, y) = \frac{kI}{r} \quad (1)$$

这里 I 是激励电流， r 是离开电源的距离。均匀矿化地层上激发极化电位的极大值按照 $\frac{1}{r}$ 比例随着远离供电点电极而下降。这结果曾在实验室中充满均匀矿化砂的铁质半球体中心的供电点电极所证实。

在雷棚浓村和派苏尔法尼亚的大理岩上所进行的极化电位的测量，更进一步证实了均匀矿化地层的 $\frac{1}{r}$ 关系。这个测量结果将在以后讨论。

测量结果的解释推断

均匀矿化地层的 $\frac{1}{r}$ 关系对野外测量结果的解释推断提供了一个