

IP 法几种常用电极排列的比较

激电工作使用的电极排列有多种,应根据工作目的、地质条件和需要信息量选其一种进行工作,否则不但得不到预期效果,而且浪费资金。遗憾的是有这种倾向,某种电极排列得到偏爱,不分场合照例使用,对其它电极排列的特点则考虑不多。论述各种电极排列优缺点的文章不多,虽通过模型实验结果有所了解,但还不够深透。本文介绍一些理论计算结果,使对激电常用的几种电极排列的优缺点能进一步加深理解,以便在野外工作中能有所适从。常用的有偶极—偶极(D—D)排列、单极—偶极(P—D)排列和梯度(G)排列,这些电极排列的布极方式示于图1。

耗服从能量极小原理,尽可能地最小。将大地划分成有限元网格,每一网格中的功率损耗以单元结点上的电位和单元电阻率表示。总功率(全部电位的一个函数)极小化后确立一组方程,解之可得实际电位值。将理论模型上代表电极的点电源电位组合起来,即可计算出某种电极排列的响应。改变模型极化部分的电阻率值,就能模拟激电效应。根据用两种频率测量结果,高值代表“低频”,低值代表高频。视电阻率 ρ_A 是均匀大地产生所测电位差应有的电阻率(文中所绘是“低频”的视电阻率)。百分频率效应(PFE)的定义是:
$$PFE = 100 \frac{\rho_A(1) - \rho_A(2)}{\rho_A(2)}$$

$\rho_A(1)$ 和 $\rho_A(2)$ 分别是模型极化部分高、低真电阻率的视电阻率。金属因数与 $PFE/\rho_A(1)$ 成比例,本文没有利用这一参数。时间域所测量的参数是充电率,它与PFE成比例。

以直立、水平和倾斜的板,在有和没有覆盖层的情况下,以及在有两个倾斜板的情况下的理论计算结果,就异常反应强度、倾斜影响、覆盖层的穿透、分辨能力等方面,对上述三种电极排列的优缺点进行比较。

一 异常反应的强度

对直立板而言,无论是 ρ_A 还是PFE异常,D—D排列的异常强度稍大于P—D排列的异常强度,而以G排列的异常强度最小(图2的a、b、c、d和图3的a、b)。对水平板而言,这三种电极排列的异常强度近乎一样(图4的a、b、c、d和图5的a、b)。倾斜的板是介乎前二者之间的一种情况,异常强度仍是:D—D排列的稍大于P—D排列的,但都比G排列的大,G排列的最小,(图6的a、b,图7的a、b、c、d和图8的a、b)。在这几种情况下,PFE异常均比相应的 ρ_A 异常明显。除水平板外,G排列的异常最小。

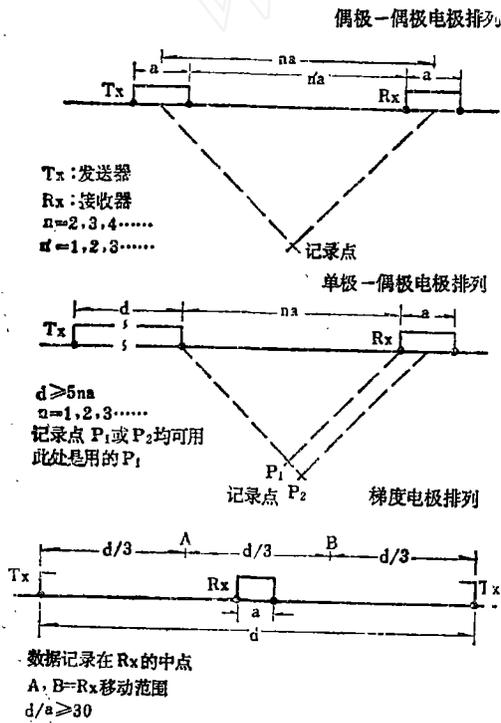


图1. 激电测量常用的三种电极排列

激电异常是用有限元法计算的,依据的事实是,当直流电流在地下流过时,功率损

对于倾斜板, 异常峰值的幅度随电阻率差异的变化关系示于图9 (图中横轴表示电阻率差异 (ρ_0/ρ_1) , ρ_1 为板的电阻率, ρ_0 为周围介质的电阻率)。电阻率差异 (ρ_0/ρ_1) 增大, 最大电阻率异常值 R 变化曲线变平缓, 表示饱和效应 (即电阻率异常渐近地趋近于一个无限导电不均匀体的 (有限) 异常)。

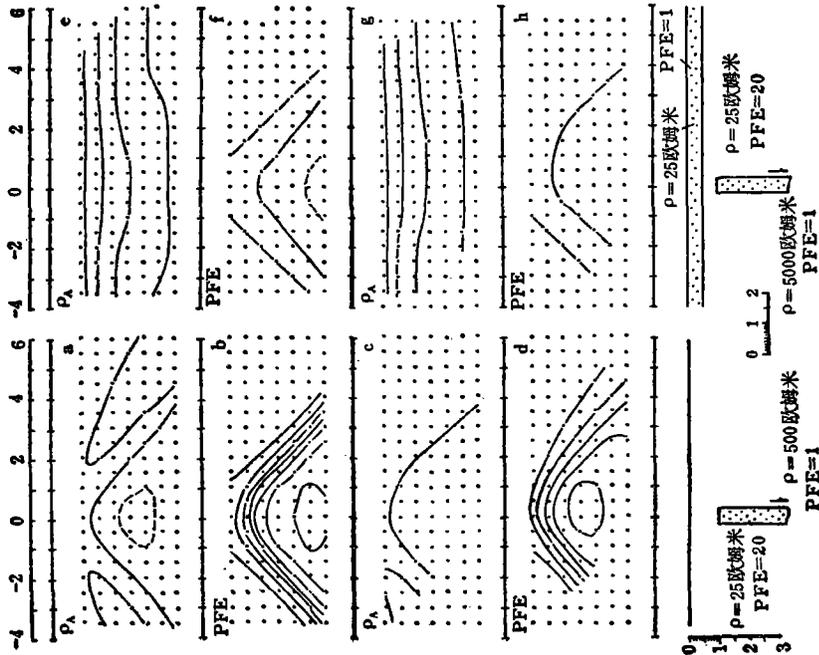


图2 直立板 (向下延深5.3单位, 电阻率25欧姆米, PFE=20) 的异常

图中a, b, e, f为D-D排列; c, d, g, h为P-D排列 (P在D的左侧); a, b, c, d为没有覆盖层; e, f, g, h为有覆盖层。等位线单位: ρ_A —欧姆米 (间距, 10, 14, 19, 27, 37, 52, 72); PFE—1% (间距, 1)。

各图等值线由内向外 (或由下向上) 分别为:

- a—27, 37, 52; b—7, 6, 5, 4, 3, 2, 1;
- c—37, 52; d—6, 5, 4, 3, 2, 1;
- e—14, 10, 7.5, 5; f—2.5, 2, 1;
- g—19, 14, 9, 7; h—2, 1

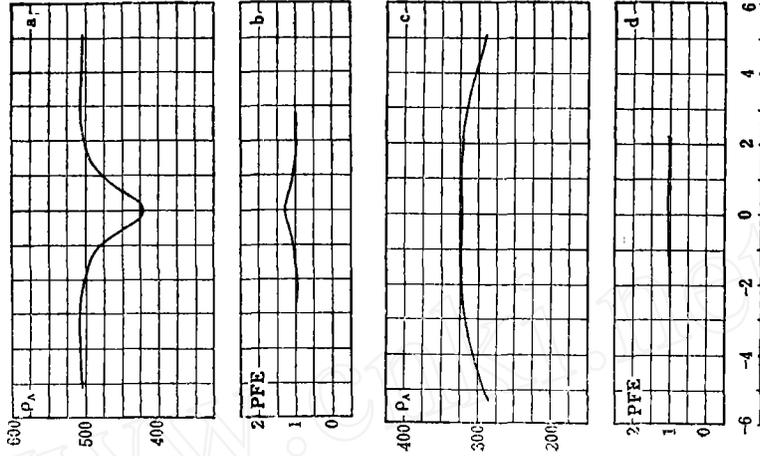


图3 直立板 (参数同图2) G排列的异常
供电电极位于-15和+15号点; 测量电极距: 半个单位; 图中a, b为没有覆盖层, c, d为有覆盖层

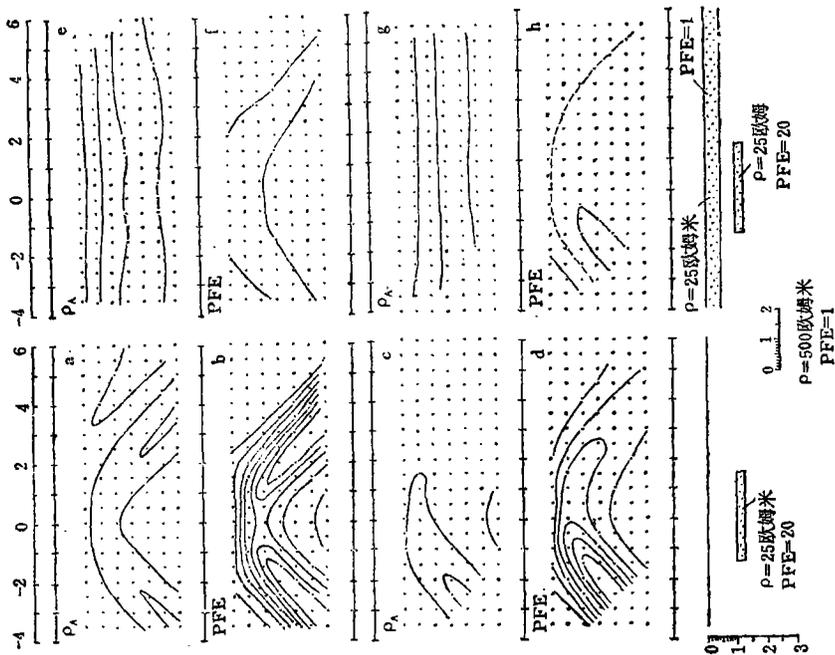


图4 水平板的异常

图中a、b、e、f为D-D排列；c、d、g、h为P-D排列（P在D的左侧）；a、b、c、d为没有覆盖层；e、f、g、h为有覆盖层。

各图等值线由内向外（或由下向上）分别为：

- a—(右) 37, 27, 37, 52, b—(右或左) 8, 4, 5, 6, 7,
- 6, 5, 4, 8, 2, 1, c—52, 37, 27, d—(左) 8, 4, 5,
- 6, 7, 6, 5, 4, 8, 2, 1, e—14, 10, 7, 5, f—2, 1,
- g—19, 14, 10, h—2, 1.5, 1.

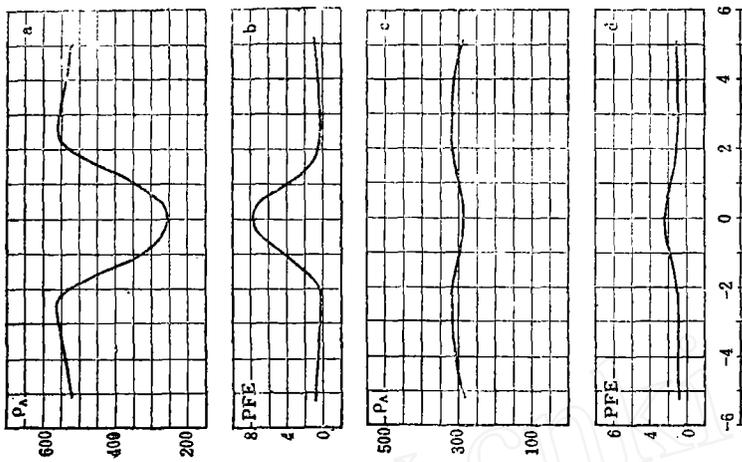


图5 水平板的G排列异常

供电电极位于-15和+15点号；测量点距：半个单位；图中a、b为没有覆盖层；c、d为有覆盖层

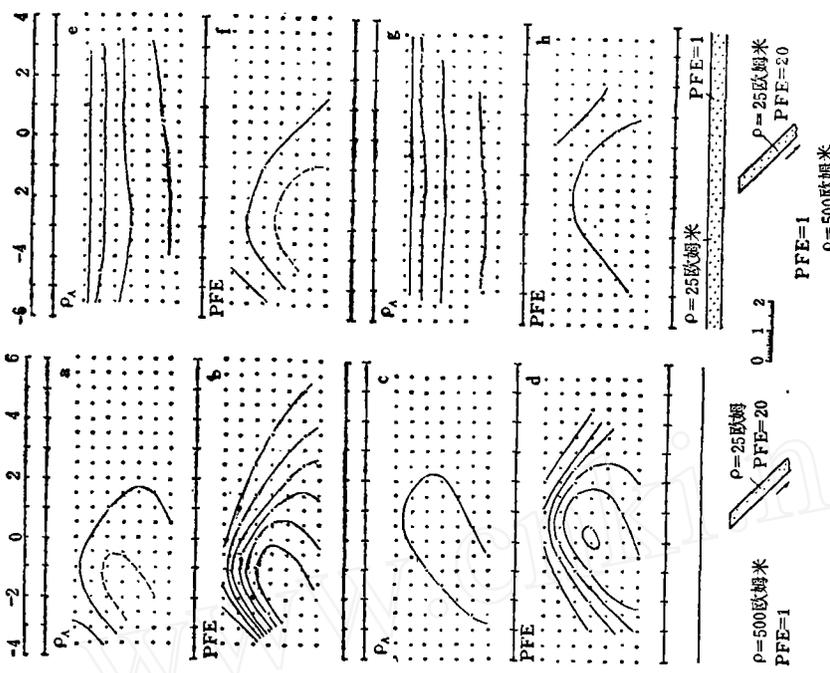


图6 倾斜板(倾角45°, 向下延深5个单位, 顶板埋深1个单位, 顶板中心位于0号"点"左侧1.25单位的下方)的D-D排列异常

图中a、b为没有覆盖层, c、d为有覆盖层。
各图等值线分别为:
a-(左)28, 37, 52;
b-(左)8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0;
c-14, 10, 7.5, 5;
d-2.5, 2, 1

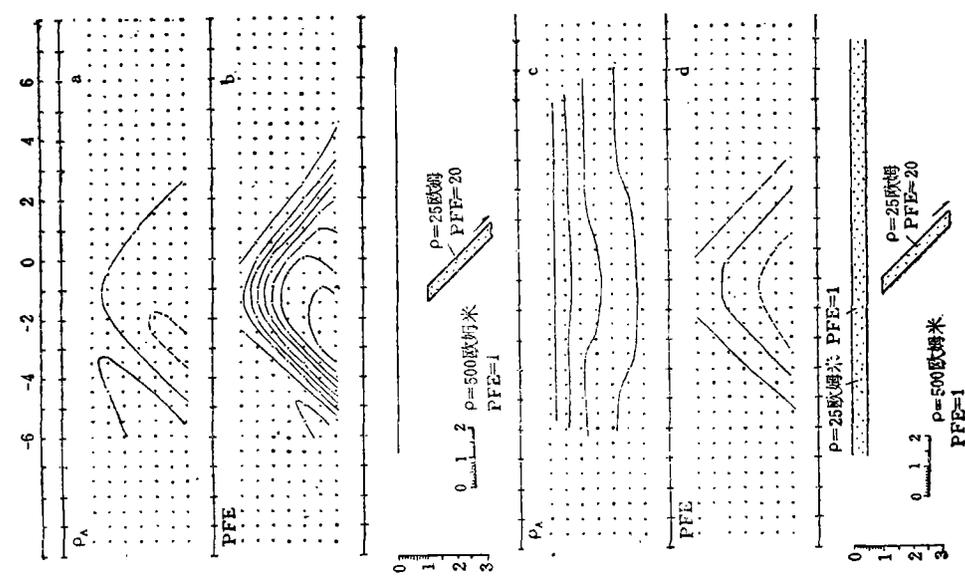


图7 倾斜板(参数同图6)的P-D排列异常

图中a、b、c、e、f为P位于D的左侧, c、d、g、h为P位于D的右侧;
a、b、c、e、f为没有覆盖层, e、f、g、h为有覆盖层。各图等值线分别为:
a-30, 37, 52, b-(左)7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, c-37,
d-6, 5, 4, 3, 2, 1, e-19, 14, 10, 7, f-2.5, 2,
g-19, 14, 10, 7, h-2, 1

与D—D和P—D排列的异常相比，G排列的异常趋近饱和较快。因此G排列（固有PFE为定值）的最大视频率效应出现峰值时的 ρ_0/ρ_1 值比D—D和P—D排列的最大频率效应出现时的 ρ_0/ρ_1 值要低。

二 倾斜的影响

对于D—D排列，直立板（图2中的a、b）和倾斜板（图6中的a、b）的异常图差别不大。不过后者稍呈不对称状，其异常最强部分的倾斜方向和板倾斜的方向相反。倾角越小对称性越明显，到0°时，假剖面图上从板的两端异常好像有臂向外伸出（图4的a、b）。只有埋藏浅、倾斜小于45°的构造异常才表现明显的不对称，才可能判定其倾斜方向。

P—D排列的倾斜板的异常（图7的a、b、c、d）在形态和随倾角变化方面分别和D—D排列的异常相似。由于P—D是一种不对称的排列，所以45°倾斜板的异常反应与单极P和偶极D的相对位置有关。当P在D的左侧或右侧（见图7）时，尽管异常总的形态一样，但异常的强度不同，P在板的下盘时异常强度较大。

G排列的异常在形态和强度方面受倾斜的影响都大（图8a、b）。梯度排列时一次场均匀， ρ_A 异常与均匀场中导电薄板的异常相似。随着倾角的减小或埋深的减小，异常峰谷的幅度单调地增大。在倾斜导电板的上方，在板的下盘出现高峰，在上盘出现低谷。PFE异常与 ρ_A 异常刚好成镜像关系。所以根据梯度排列的异常一般能对倾角的大小，特别是倾斜方向作出判断。

三 覆盖层的穿透

由于电流在导电较好的覆盖层中被短路，所以屏蔽了地下物体所产生的异常。比较图2～图8在有和没有覆盖层的情况下的异常，就可看出这种影响是很大的。有覆盖层的情况下， ρ_A 异常很小。根据视电阻率随极距 n 改变而改变，由D—D和P—D排列的假剖面图都可指出覆盖层的存在。在梯度排列的剖面上，根据电阻率向剖面两端衰减来确定覆盖层的存在，是困难的。关于覆盖层

的资料对推断解释很为重要。

图10和图11绘出D—D和P—D排列对不同电阻率和厚度的覆盖层的反应。图中横轴代表收发装置的有效间距与覆盖层厚度（ d ）的比值。此有效间距为偶极长度 a 与间隔指数 n 的经验函数 s 的乘积。此经验函数将 n 、 a 和 d 组成一个参数，这样可以作一条曲线代表在 a/d 值一个范围内的异常反应，其精度约3%。

如果存在简单的层状构造，用几种不同间距的D—D或P—D排列测得的结果，能得出解释。实际上解释结果是很含糊的。部分原因是由于所能利用的电极距太少，不能构造一条测深曲线。

覆盖层的影响使各种电极排列的PFE异常都大大地减弱，但极化体的异常特点都有不同程度的保留（图2、4中的b和f，d和h，图6中的b和d，图7中的b和f，d和h，

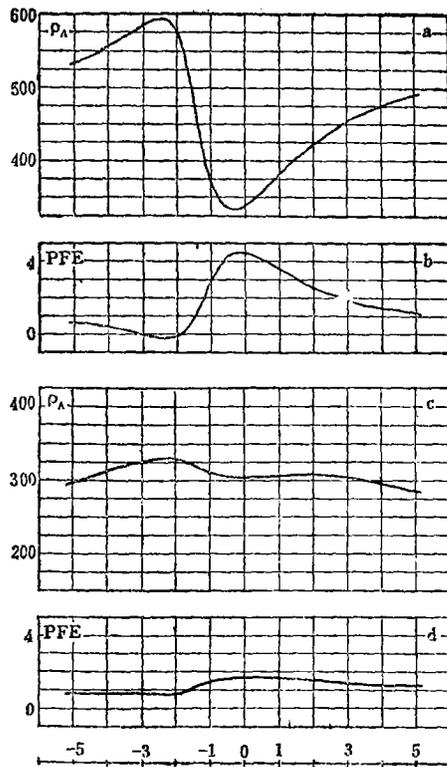


图8 倾斜板（参数产状同图6）的G排列异常
图中a、b为没有覆盖层，c、d为有覆盖层，供电电极在-15号和+15号点

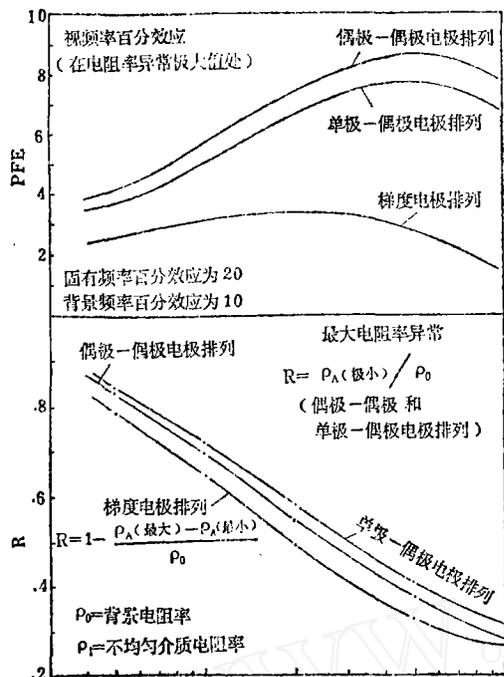


图9 倾斜板的IP反应与电阻率差异的关系

图3、5、7中的b和d)。异常似乎来源于深处，清晰度较差。覆盖层的存在使异常最大幅度变小。水平板的异常幅度减小比陡倾斜板的异常幅度减小还要多。对于三种电极排列，由于覆盖层的影响PFE异常的相对减小，差不多相同。与其它两种排列相比，D—D排列的异常减小要多一点。

导电覆盖层的屏蔽效应对三种电极排列看来是相同的。

四 覆盖层的异常

如果覆盖层的厚度或电阻率在水平方向有变化，将产生异常，干扰矿所生的异常。对覆盖层下面地形起（山）伏（谷）进行了计算。无论是“山”还是“谷”，D—D和P—D排列的异常仍是相似，只是前者的异常稍大一些。山相当于浮土变薄，阻挡电流在覆盖中流动。在D—D假剖面图上，异常的特点是两边为高阻，中间为低阻。在P—D假剖面图上，异常不对称。“谷”的异常不明显而且小。P—D假剖面图上的反应特别不清

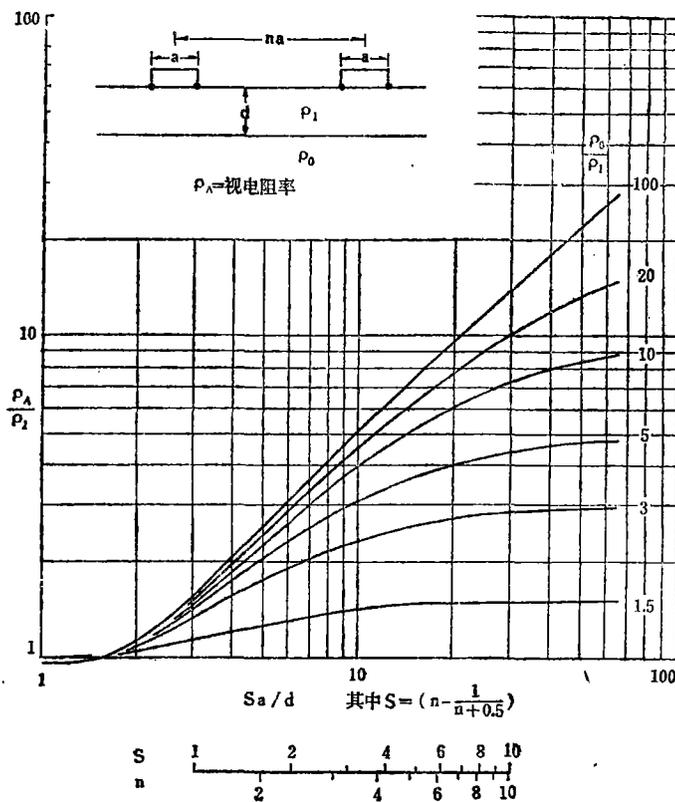


图10 在两层构造上用D—D排列测得的视电阻率

利用“有效间距指数” S （根据经验方法由 n 导来的一个函数），可用单条曲线代表一个 a/d 范围内的反应，在 $n \geq 2$ 时，估计精度在8%以内

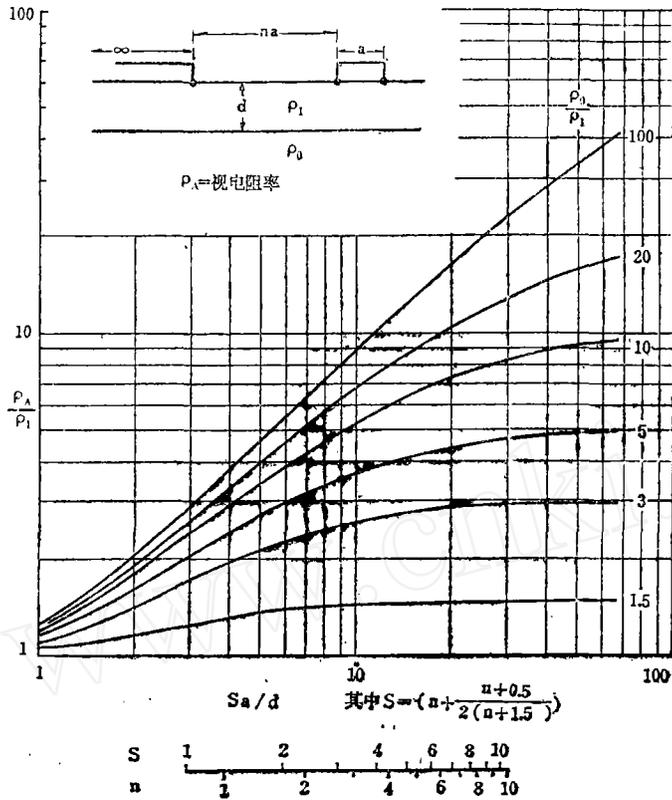


图11 在两层构造上用P—D排列测得的视电阻率
在 $n \geq 1$ 时, 估计精度在3%以内

晰, 不能确定异常构造的性质和位置。

梯度异常大而明显, 视电阻率梯度陡的地方就是山或谷所在的水平位置。但是它的反应太强, 对其它异常会发生严重的干扰。

处理覆盖层异常有两种办法。一种是选择对覆盖层变化反应最小的电极排列。在此情况下, 不会把覆盖层的构造圈出来, 所以也很难判别与别的异常产生干扰, 但是这种干扰也不会太大。P—D排列得的反应似乎是最小。

第二个办法是选择一种电极排列, 对覆盖层构造能引起显著的异常, 此异常是可以推断解释的, 是在不考虑对其它异常干扰的情况下获得的。梯度排列虽然精确地确定构造的水平位置, 但给出有关深度方面的资料不多。全面地讲, D—D排列对构造有好的反应, 它对覆盖层反应的强度介于其它两种排列之间。

五 分辨力和推断解释

在这里用两个倾斜的板来比较各种排列的分辨能力。对D—D和P—D排列来讲, ρ_A 异常较宽, 分别不出下面有两个物体。PFE异常比 ρ_A 异常的分辨力稍强, 但也不是很明显(图12)。G排列的 ρ_A 和PFE异常的分辨能力比前两种排列大得多(图13)。所以只就水平方向的分辨能力来讲, 不考虑深度方面的区分能力, 以G排列为最好。

实际上地质情况往往都很复杂, 地下构造各个部位在形状、深度、电阻率、极化率各个方面都有所不同, 经常需要根据IP异常来作出判断。作者对厚度不均的覆盖层下面同时有高、低阻(埋深不同)板状体的情况, 进行了理论计算(所绘制的假剖面图限于篇幅未予复制——译者)。简单概括起来, D—D和P—D异常所提供的资料可以粗略地

勾绘简单的构造，可以求得构造的水平位置和大致的埋深。对复杂的构造，总的分辨力以D—D排列较大，认为适于推断解释。G排列得不出深度方面的资料，但水平方向的分辨力强，可以提供准确的水平位置和倾斜方向。

六 感应耦合

供电和测量导线间的感应耦合可以产生乱真的频率效应。在大地均匀的情况下，可以计算出各种电极排列的耦合效应。在简单情况下，由于感应耦合对D—D排列所产生的频率效应，一般比同样偶极长度和同样极距的P—D排列的要小，通常G排列受感应耦合的影响比其它两种排列要大。

最后可把这三种电极排列在各方面的优缺点归纳如右下表（优劣次序以A、B、C、D表示，A最优，D最劣）：

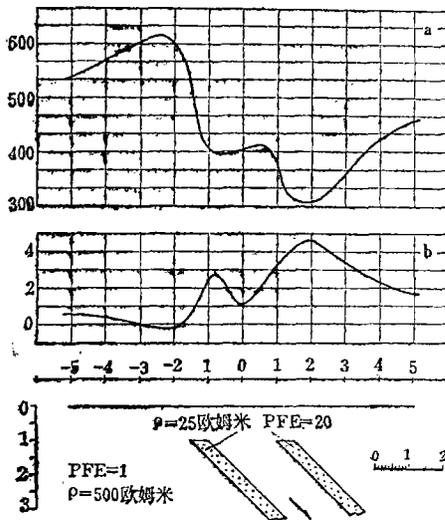


图13 在两个倾斜板上方G排列的 ρ_A 和 PEF 异常曲线
供电电极在 -15 号和 +15 号点，测量点距：半个单位

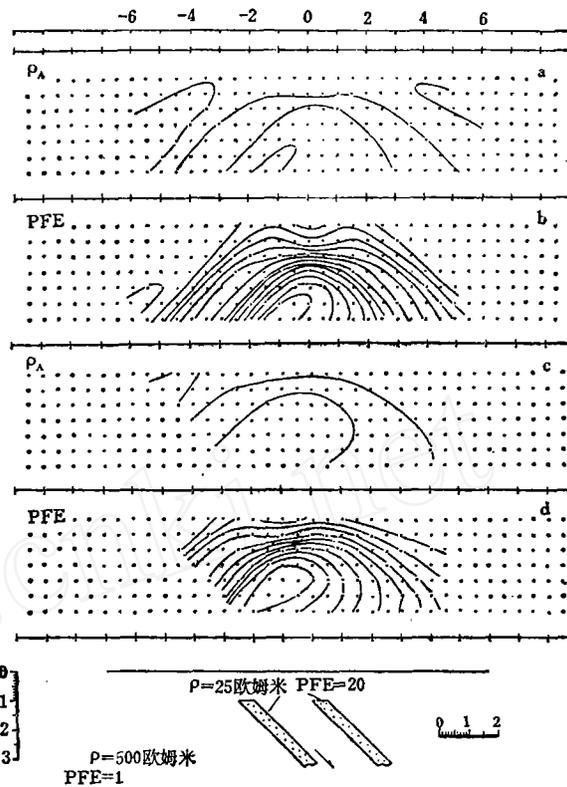


图12 在两个倾斜板上方的 ρ_A 和 PFE 异常
图中 a、b 为 D—D 排列，c、d 为 P—D 排列（P 在 D 的左侧），各图等值线分别为：
a—19, 27, 37, 52; b—(左)13, 12, 11, ……0;
c—27, 37, 52; d—11, 10, 9 …… 1

特 征	D—D 排列	P—D 排列	G 排列
反应强度	A	B	C
对倾斜构造的反应	C	C	A
对覆盖层的穿透	A	A	A
对覆盖层不规则的反应	A	B	B
对覆盖层不规则的干扰	B	A	C
水平方向不均匀的分辨能力	B	C	A
深度	A	B	D
感应耦合(层状构造)	A	B	C
感应耦合(有限的均匀体)	A	B	D

(摘译自《Geophysics》,
1973, Vol.38, No.4,
P.787~761

作者: J.H. 科冈
吴奇石译 李恭校)