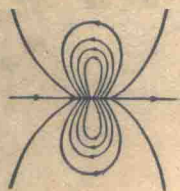


偶極電測深理論

Л. М. 阿尔平 著



地質出版社

基本圖例

118561

偶極電測深理論

蘇聯·阿列克謝耶夫



科學出版社

偶極電測深理論

И. М. 阿尔平 著

林 振 民 譯

地質出版社

1957·北京

Л. М. АЛЬПИН
ТЕОРИЯ ДИПОЛЬНЫХ
ЗОНДИРОВАНИЙ
ГОСТОПТЕХИЗДАТ
МОСКВА 1950

本書敘述了作者所推荐的电法勘探的一种形式——偶极电测深——的数学物理基礎。此外，还研究了野外工作方法及其結果的整理等一系列問題。本書可作为电法勘探的工程技術人員的指南。

偶極电測深理論

著者	Л. М. 阿 尔 平
譯者	林 振 民
出版者	地 質 出 版 社
	北京宣武門外永光寺西街3号
	北京市書刊出版業營業許可證出字第050号
發行者	新 華 書 店
印刷者	地 質 印 刷 厂
	北京廣安門內教子胡同甲32号

編輯：陈培光 技術編輯：張華元 校对：張曉光
印数(京)3,700册 1957年4月北京第1版
开本 $31'' \times 43''^{1/2}$ 1957年4月第1次印刷
字数90,000字 印張4
定价(10)0.55元

偶極電測深理論

И. М. 阿尔平 著

林 振 民 譯

地質出版社

1957·北京

Л. М. АЛЬПИН
ТЕОРИЯ ДИПОЛЬНЫХ
ЗОНДИРОВАНИЙ
ГОСТОПТЕХИЗДАТ
МОСКВА 1950

本書敘述了作者所推荐的电法勘探的一种形式——偶极电测深——的数学物理基础。此外，还研究了野外工作方法及其结果的整理等一系列问题。本书可作为电法勘探的工程技术人员指南。

偶极电测深理论

著者	Л. М. 阿尔平
译者	林振民
出版者	地质出版社
	北京宣武门外永光寺西街3号
	北京市书刊出版业营业许可出字第050号
发行者	新华书店
印刷者	地质印刷厂
	北京广安门内教子胡同甲32号

編輯：陈培光 技術編輯：張華元 校對：張曉光
印数(京)3,700册 1957年4月北京第1版
开本 $31'' \times 43^{11}/_{25}$ 1957年4月第1次印刷
字数90,000字 印張4
定价(10)0.55元

目 錄

緒 言.....	4
1. 地表上的電場分量.....	16
2. 偶極子的一次場	18
3. 偶極電阻.....	22
4. 各偶極電阻分量之間的 關係.....	27
5. 偶極電測深与普通電測深的結果之間的關係	29
6. 偶極電測深曲線的近似 公式.....	36
7. 在平行層系上的 電 測 深.....	38
8. 偶極電測深曲線的水平漸 近綫	48
9. 進行偶極電測深時的絕緣 基 底.....	51
10. 关于普通電測深和偶極電測深的記錄点和探 測 深 度.....	56
11. 平行偶極 裝 置.....	61
12. 关于根据偶極電測深的結果繪制普 通電測深曲綫問 題.....	72
13. 理論計算的条件的破坏.....	73
14. 实际的（非極限的）偶極裝置的系数.....	76
15. 关于偶極電測深結果的描 述.....	80
16. 关于偶極電測深的实际 实 現.....	84
17. 关于偶極電測 深 的 量 板.....	91
18. 关于偶極電測深的优 缺 点.....	96
結 束 語.....	99

緒 言

野外电阻率法勘探所采用的装置是(圖1)由两个供电电极 A 和 B (电流 I 经过它们送入地下) 及两个测量电极 M 和 N 组成; 电极 M 和 N 在段线 AB 的中间部分, 做为测量 M 和 N 点间的电位差之用。有时也可在 AB 間隔的外面測量 AB 直綫上的电位降, 而有时在平行于 AB 的直綫上測量。其中, “攜出 MN ”(圖2)裝置, 曾在1936年被果辛(К.П. Козин)和查加尔米斯特尔(А.М. Загамистр)用于追索石英脉。

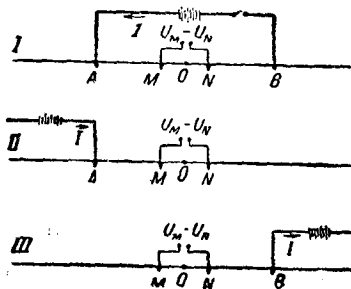


圖 1. 直綫对称四極裝置及三極裝置。



圖 2. “攜出 MN ”裝置

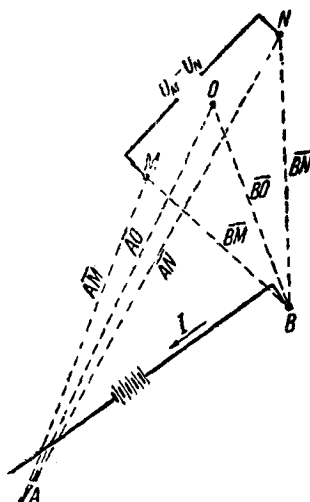


圖 3. 四極裝置的普遍形式

圖 3. 表示四極裝置的普遍形式, 而圖4表示对称四極裝置的普遍形式。

用普通四極法工作时所观察的場是电极 A 和 B 所产生的場的总和, 而所测量的电位差 $U_M - U_N$ 是 A 和 B 极的电場在 M 和 N 点之间的电压的代数和。換句話, 普通四極裝置 $AMNB$ 可認為是三極裝置的加倍, 如圖 1 所示。第四电极的存在使所观察的电位差增大, 并使装

置系数相应地缩小，但在原理上其差别不大。为要实现双向电测深（ A 和 A' 电极在 MN 电极延长线上并分布于其两边）曾经不止一次企图摆脱第四电极的影响。第二供电电极可布置在垂直于 MN 并通过其中点 O 的直线上（圖5），这样可避免把它放到十分远的地方。但在介質沿水平方向是均匀的，即岩石導电率沿水平向是不变的条件下（沿平行于地表的方向，而地表假定为一平面），电测深的結果与方向无关，而多向电测深也就失去意义。假使这条件不存在，則第四电极即使是布置在上述垂直线上，也須放在足够远的距离上，不然就不能保証消除其影响。

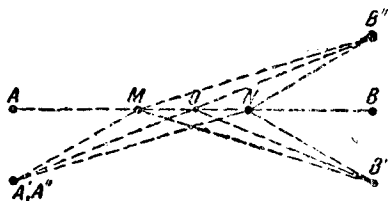


圖 4. 对称四極裝置：直綫的
（ $AMNB$ ）及非直綫的
（ $A'MNB'$ 及 $A''MNB''$ ）

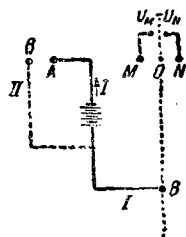


圖 5. 双向調查的裝置：
I—電極 B 位于“无限远”；
II—電極 B 位于電極 A 附近
（偶極裝置）

$\overline{MN} \rightarrow 0$ 时的 AMN 裝置的电测深，可当作借助于测量偶極子 $\overline{MN}$ 在离 A 極不同的距离（ $r = \overline{AO} = \frac{\overline{AM} + \overline{AN}}{2}$ ）上观察点電極 A 的电場。根据测量電極与供电電極互換原理，可以認為進行 $\overline{MN} \rightarrow 0$ 的 AMN 裝置的电测深时，我們是在不同距离的 A 点上观察供电偶極子 $\overline{MN}$ 所產生的电位差。假使 $AMNB$ 四極裝置中的兩個電極 N 与 B 离電極 A 和 M 足夠远（与 $\overline{AM}$ 綫段相比較），則得到双極裝置 AM 。这类裝置的电测深可归結为在不同的距离上观察点電極的电場。

AM 和 AMN 裝置，与 $AMNB$ 一样，可用以進行剖面測量，为此，不改变裝置的大小而沿地表移动它。这时，远离的電極或則保持不动，或則与其他電極一起移动。在進行 AMN 或 AM 裝置的剖面測量时，也必須注意到远离的電極可能產生的影响。

讓我們想像用觀察偶極子所產生的電場的強度的方法來進行电阻率法的調查。為這目的，可將四極裝置改變為兩個偶極子：一為供电的 BA ，另一為測量的 MN 。實際上這意味着 B 和 A 電極靠近到這樣程度使得 $\overline{BA}$ 距離以及 $\overline{MN}$ 距離與 $\overline{BA}$ 和 $\overline{MN}$ 綫段的中點 Q 及 O 的距離相較，顯得十分小。

很顯然，在一般情況下，偶極子可以任意地分布(圖 6)。沿地面移動偶極裝置而不改變其相互位置，則得到偶極剖面，而固定 $\overline{QO}$ 的中心或其他點並改變 $\overline{QO}$ 的距離，則得到偶極電測深。

在 1938 年作者曾向國家聯合地球物理托拉斯科學調查處(НИОГС ГТ)提出採用偶極裝置的意義。

在 1939 年有一小型試驗性電法隊在作者領導下在韃靼蘇維埃社會主義共和國古比雪夫城附近進行偶極電測深試驗^①。

在 1941 年初發表了作者的論文“偶極電測深”(“礦產勘探”雜誌第一期)。在該論文上指出了沿着通過偶極子中心的直綫研究電場強度具有很重要意義，並導出某些偶極電測深原理，包括下列情況：測量偶極子與供电偶極子相平行而前者的中心點位於後者的軸上(即軸向

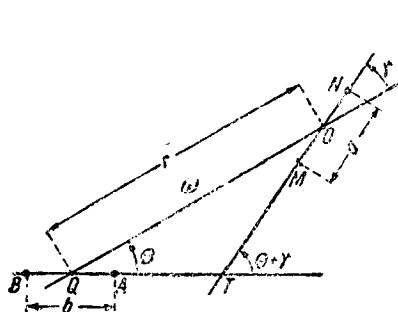


圖 6. 偶極電測深的普遍形式

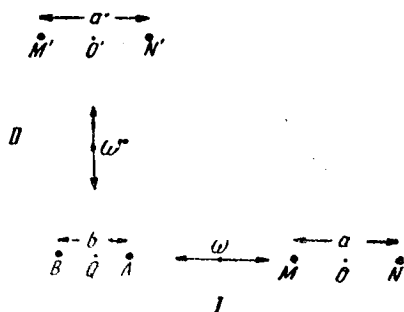


圖 7. 最簡單的具有平行偶極子的偶極裝置：軸向的(I)及赤道的(II)

①隊內的人員包括了伏爾斯基電法勘探隊的成員(隊長為契柯夫 Г. Д. Цекон)。野外工作以及資料的整理工作，有霍爾閔(В. И. Холмин 分隊長)，МГРИ 的學生布洛赫(И. М. Блок)和波式克(Л. Н. Посик 操作員)及費多洛夫(А. А. Федоров)工程師等人參加。

电测深)，或前者的中心点位于后者的赤道面上（即赤道电测深）。圖7表示这些最簡單的裝置。在这論文中叙述了上述試驗的結果，并指出軸向及赤道电测深的优缺点。

將任何偶極电测深与普通电测深相比較，其优点是可縮短長綫的（一般为供电的）長度。这优点的意义还不限于節省电綫，虽則这点已有不小意义。

当电綫的長度大为增加时候，其电阻就超过 A 和 B 接地电阻。为此，就要求增大供电綫路中的电压，这样必然引起漏电和其他困难。

偶極裝置还有一些优点如：增強偶極电测深的“分辨率”，并便于進行“單向”增距的“双向”調查^①。还可指出供电綫路与測量綫路远离时的某些好处：顯著地減少漏电的影响，并減少裝置的总長度。

圖8对照了不同裝置的电测深的理論曲綫（量板的），計算这曲綫时的条件是：第二層介質电阻率 ρ_2 为第一層电阻率 ρ_1 的9倍的水平層系。这些曲綫繪在双对坐标紙上，縱坐标表示視电阻率与第一層电阻率的比值，而橫坐标表示电极距 r （場源与观察点之間的距离）与第一層厚度 h_1 的比值。

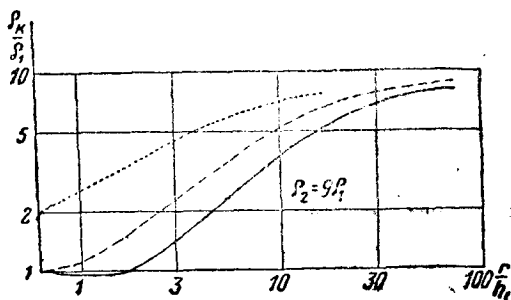


圖8. 不同裝置的电测深的兩層理論曲綫的对照：双極裝置 AM — 上枝曲綫；極限三極裝置 AO — 中間曲綫；軸向偶極裝置 — 下枝曲綫（对数坐标），橫坐标表示以第一層厚度为單位的 AM ， AO 及 QO 的距离（相应于双極，三極和偶極的裝置）

偶極曲綫差異性大，而 AM 裝置的曲綫差異性最小。

1940年布洛赫（在1939年他做为實習生参加上述試驗）在上布林

①圖5中虛綫表示出，为要取得便于進行双向調查的裝置，將电极 B 放在电极 A 附近比放在“无限远”要方便得多。

区的一个礦上采用偶極剖面，得到很成功的結果^①。

但偶極裝置有兩個缺点，成为阻碍偶極电測深發展的客觀原因：

(1) 偶極子間的距离增大时，觀察的电位差的下降，要比 $AMNB$ 裝置的供电电極距增大时快得多，为此就要增加供电电流的強度，而在用于电池时，常常是达不到这样強度；(2) 由于必須把供电綫路接到电位計的同步开关上^②，因此由于采用偶極裝置而使 AB 或 MN 綫的長度的減少，并不能導致电綫总長度的減少。

由于电測站的出現 [НИИПГ ГСГТ 的 А. 阿列克西叶夫 (А. М. Алексеев) 与 Б. 亞雷雪夫 (Б. П. Ярышев) 及其他等人設計的]，偶極裝置的意义大为增加。在电測站上，由于有高灵敏度的檢流計、照相記錄、用發电机供电、并且用特殊方法通电和断电等，使得电場迅速降低而引起困难大为减少，还可避免用同时开关做零点讀数；由于这些原因，使得在發揮偶極电測深的优点时所遇到的技術障碍大部分消失。

另一方面，用普通四極裝置工作时，电測站的优点并沒全部發揮。偶極裝置的綫路电阻小，可避免过高的电压，因而采用它更为合理。

1945年亞雷雪夫曾以第一套电測站 (НИИПГ) 在格魯斯区 (Грозный) 進行深偶極測深工作。

在1947年，这現象曾引起大家注意，就是当偶極子互相垂直时，場的形成过程的时间大为縮短。

在同一年，А. 克拉耶夫 (А. А. Краев) 与 А. 西門諾夫 (А. С. Семенов) 的論文 (“礦產勘探” 1947年第3期) 引起电法勘探人員的注意，該論文敘述了在列宁格勒区采用偶極裝置進行非常深的电測深。

对于最簡單的偶極电測深——軸向及赤道——的理論，作者曾在上述文章里 (“礦產勘探” 1941年第1期) 做了介紹。А. 薩布罗夫斯基 (А. И. Заборовский) 教授所著“电法勘探”書中也有所敘述^③。

①布赫：双向剖面。“礦產勘探”、1948年第3期。

②但是，用其他方法来使这两綫路同时閉合的可能性并不是不存在。

③Заборовский А. И. Электроразведка, Гостоптехиздат 1943, 薩布罗夫斯基：电法勘探。國家燃料出版社，1943年。

本書將敘述更普遍的裝置形式的偶極電測深的理論。

雖則這題目較為簡單，作者還是盡量詳細地用文字和數學公式敘述，希望使廣泛的電法勘探專家能很快地熟悉偶極電測深。

有必要首先提起某些電法勘探的基本原理。

進行電阻率法工作時，電極 M 和 N 之間的電位差為：

$$U_M - U_N = \int_M^N (\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}) = \int_M^N E \, dl \cos(\mathbf{E}, d\mathbf{l}), \quad (0.1)$$

此間 $\mathbf{E}$ —— M 和 N 點聯綫之間的電場強度。

測量結果的所謂“介質視電阻率”可用下公式表示： (0.2)

$$\varrho_K = K \frac{U_M - U_N}{I}$$

此間 K ——裝置系數。

當 $\overline{MN}$ 距離為無限小時，則成為具有測量偶極子 MN 的極限裝置（或理論的裝置），其電位差

$$U_M - U_N = \overline{MN} E_{MN} \quad (0.1')$$

而

$$\varrho_K = K' \frac{E_{MN}}{I} \quad (0.2')$$

此間 E_{MN} ——在“觀測點”上即在偶極子 MN 上沿 $\overrightarrow{MN}$ 方向的電場分量，而 K' ——極限的裝置系數。當 $\overline{MN}$ 非常小時

$$K' \cong \overline{MN} K.$$

K 與 K' 系數是這樣確定：從均勻介質中的 $U_M - U_N$ 及 E_{MN} 的表達式出發，使得根據 (0.2) 及 (0.2') 公式計算出來的 ϱ_K 值等於此介質的電阻率。這樣，假使以 U^0 和 $\mathbf{E}^0$ 表示具有 ϱ_0 電阻率的均勻介質中的電位和電場強度（在給定的供電電極，即其給定的位置和給定電流強度的情況下），則得

$$\varrho = K \frac{U_M^0 - U_N^0}{I}, \quad (0.3)$$

或

$$\varrho^0 = \gamma' \frac{\kappa \kappa_0 E}{I} \quad (0.3')$$

因此

$$\frac{\varrho_K}{\varrho^0} = \frac{U_M - U_N}{U_M^0 - U_N^0}, \quad (0.4)$$

或

$$\frac{\varrho_K}{\varrho^0} = \frac{E_{MN}}{E_{MN}^0} \quad (0.4')$$

在具有 ϱ_0 电阻率的均匀介质中,一个位于地表的电极(其供电电流为 I),在相距为 F 处所产生的电位和电场强度,可用下列公式表示:

$$U^0 = \frac{e}{F} = \frac{\varrho^0 I}{2\pi} \frac{1}{F};$$

$$E^0 = \frac{e}{F^2} F,$$

此間 $e = \frac{\varrho^0 I}{2\pi}$ —— 电极的电荷。

从上述公式很容易得出电位差 $U_M^0 - U_N^0$ 及电场强度的分量 E_{MN}^0 的表达式:

$$U_M^0 - U_N^0 = \frac{\varrho^0 I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right); \quad (0.5)$$

$$E_{MN}^0 = \frac{\varrho^0 I}{2\pi} \left(\frac{\cos(\overrightarrow{AO}, \overrightarrow{MN})}{AO^2} - \frac{\cos(\overrightarrow{BO}, \overrightarrow{MN})}{BO^2} \right) \quad (0.5')$$

这样,就得出四极装置的系数

$$K = \frac{2\pi}{C}; \quad (0.6)$$

$$K' = \frac{2\pi}{C'}, \quad (0.6')$$

此間

$$C = \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}; \quad (0.7)$$

$$C' = \frac{\cos(\overrightarrow{AO}, \overrightarrow{MN})}{AO^2} - \frac{\cos(\overrightarrow{BO}, \overrightarrow{MN})}{BO^2} \quad (0.7')$$

假使照这样來布置 AB 和 MN 电极, 使得 $\overline{AM} = \overline{BN}$, $\overline{AN} = \overline{BM}$ 及 $\overline{AO} = \overline{BO}^*$, 則

$$C = 2\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right), \quad (0.7'')$$

$$C' = \frac{2 \cos(\overrightarrow{AO}, \overrightarrow{MN})}{AO^2} \quad (0.7''')$$

其中, 普通采用的直綫对称四極裝置就屬於这情况, 但对于直綫裝置 $\cos(\overrightarrow{AO}, \overrightarrow{MN}) = 1$ 。

假使电极 B 离其余电极非常远, 則得(假定 $\overline{BM} \rightarrow \infty$ 和 $\overline{BN} \rightarrow \infty$)

$$C = \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}; \quad (0.8)$$

$$C' = \frac{\cos(\overrightarrow{AO}, \overrightarrow{MN})}{AO^2}, \quad (0.8')$$

即, 从三極裝置 AMN 变为对称四極裝置 $AMNB$ 时, 系数 C 和 C' 增加一倍。当介質为“水平向均匀”的条件下, 則 $U_M - U_N$ 和 E_{MN} 的值也加倍。正如上面所談, 在这条件下, 第四个电极的存在并非本質問題, 这种裝置可用三極裝置 AMN 代替。

实际上所采用的測量綫 MN 具有一定長度。这样(下面將要說明)

$$K' > \overline{MN} K,$$

* 这情况發生于当电极 AB 及 MN 位于平行四边形的对角綫的端点上或位于等腰梯形的兩底的端点上时, 如圖 4 所示。

而

$$\overline{MNE}_{MN} < U_M - U_N.$$

但假使比值 $\frac{\overline{MN}}{AO}$ 和 $\frac{MN}{OB}$ 是不很大的分数，則通常可認為

$$K' E_{MN} \cong K (U_M - U_N). \quad (0.9)$$

其中，对于直綫三極裝置的場合，根据 (0.6) 和 (0.8) 可得

$$C = \frac{\overline{MN}}{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}; \quad (0.10)$$

$$K = 2\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} = 2\pi n (n-1) \overline{MN} \quad (0.11)$$

此間

$$n = \frac{\overline{AN}}{\overline{MN}} \quad (0.12)$$

是个大于二的数。

当 n 为无限大时則得極限裝置 AO ，此裝置是相应于 AMN 裝置的極限情况，它是由电源 A 和位于观测点 O 的測量偶極子組成。对于此裝置，依据 (0.8') 及 (0.6') 可得

$$C' = \frac{1}{AO^2}; \quad (0.10')$$

$$K' = 2\pi \overline{AO^2}. \quad (0.11')$$

假使 n 足夠大，則 $\overline{AN} \cong \overline{AM} \cong \overline{AO}$ ，对于直綫裝置 AMN ，則依据 (0.11) 可得

$$K \cong 2\pi \frac{\overline{AO^2}}{\overline{MN}}, \quad (0.13)$$

而且近似等式

$$K' \cong \overline{MN} K \quad (0.14)$$

能够成立。假使 n 值不十分大，则得

$$K = \frac{2\pi}{MN} \left(\overline{AO^2} - \frac{1}{4} \overline{MN^2} \right); \quad (0.13')$$

$$\overline{MN} K = (1 - \alpha) K', \quad (0.14')$$

此间

$$\alpha = \frac{\overline{MN^2}}{4 \overline{AO^2}} = \frac{1}{(2n-1)^2}, \quad (0.15)$$

以代替 (0.13) 和 (0.14)。

当 $n=2$, 即当 $\overline{AM} = \overline{MN}$ 时:

$$\alpha = \frac{1}{9} \cong 11\%.$$

但随着 n 和 $\frac{K}{K'}$ 的减少, MN 间电场的平均值也就增长, 即数值

$$E_{cp} = \frac{1}{MN} \int_M^N (Edl) \quad (0.16)$$

随着增长 (与中点 O 的 E_{MN} 值相比较), 因而 $\frac{U_M - U_N}{MN}$ 的比值也随着增长。因此近似等式 (0.9) 在一般情况下仍然正确。其中, 对于建立电测深理论时所假设的条件, 即对于由均匀岩层所组成的平行层系的场合, 这论断是正确的。

在这样条件下, 根据 (0.2) 和 (0.2') 公式所确定的 q_K 数值, 相互间差别小到这样程度, 以致有可能将根据 (0.2) 公式整理出的实际测量的结果, 与根据 (0.2') 公式所做的理论计算的 (对于不同的断面) 结果相比较而进行推断。换句话说, 在这种条件下, 采用 (0.2) 与 (0.13) 公式所绘出的野外电测深曲线, 可用根据 (0.2') 和 (0.13') 计算所得的量板进行推断^① (但带有某些限制)。

①关于 $\overline{MN}$ 长度对于电测深曲线形状的影响的问题, 可参看作者的一篇论文, 在“实用地球物理”第一期和第二期, 国家燃料出版社, 1945年和1946年。