

基本馆藏

263935

横向电测深解释图板的用法

苏联 A·E·古林柯維奇編

赵学孟译 蒋学明校訂



石油工业出版社

5611
6163

內 容 提 要

这一套图板收集了电阻测井、特别是横向测井结果进行解释所需的地球物理资料。图集中共收图板97幅，有的是用计算方法绘制的，有的是用网格模拟法绘制的（对有限厚的地层）。

说明书部分介绍了图板的内容，求得地球物理资料的方法，着重解释时怎样利用图板，也举了一些应用图板的实例。

这一套图板可供矿场地球物理工程技术人员、科学研究人员、有关院校师生阅读、参考。



ПАЛЛАДИИ ВОКОВОГО, КАРТОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ И МЕТОДИКА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
根据苏联国立石油科学技术书籍出版社（ГОСПОТЕХИЗДАТ）
1958年莫斯科版翻译

横向电测深解释图板的用法

赵学孟译 蔣学明校订

石油工业出版社出版（地址：北京内城根石油工业出版社）

北京市书刊出版业营业登记证出字第028号

石油工业出版社印刷厂印刷 新华书店发行

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本·印张17 $\frac{1}{2}$ ·84千字·印1—2,000册

1959年12月北京第1版第1次印刷

目 录

第一节	电阻测井,电探曲线图板	1
第二节	无限厚地层	6
第三节	有限厚地层,取得理论曲线的方法	11
第四节	有限厚地层, KC 曲线和横向测井曲线	15
第五节	横向测井曲线图板	23
第六节	横测深曲线的初步整理	31
第七节	相当于无限厚地层的电探曲线的解释	37
第八节	极大值电探曲线的解释	43
参考文献		54

第一节 电阻测井, 电探曲线图板

岩石电阻率同岩性、储油层性质、含油、气情况, 以及地层水矿化度等有着密切的关系。

电阻法测井, 或简称电阻测井, 是借助一个用四个电极 A 、 B 、 M 、 N 组成的装置来进行的。按极性(通常 A 为正、 B 为负)将两个电流、电极接电源, 通入电流 I , 并且在两个测量电极 MN 之间测量电位差 ΔU 。

比值 $\frac{\Delta U}{I}$ 的大小取决于通过电流的岩石的电阻率。测井电极系是下放到井中的四极装置的一部分, 一般包括三个电极: A 、 M 、 N , 或 M 、 A 、 B 。我们把 A 或 B 看作是一个点电极和分布于井轴中心的电极。第四个电极 M 或 N 位于地面。这样我们就得到两种不同的电极系 ~~双电极系~~。有一个供电电极的单电极系, 一种是具有两个供电电极的双电极系^①。根据互易定律, 供电电极和测量电极采用单极双电极系, 在任何一种情况下对同一介质都不会改变 $\frac{\Delta U}{I}$ 的比值。因此, 我们只讨论其中的一种电极系——单电极系就可以了。

在电性上为无限的均匀介质^②中, 点电极 A 所产生的电场电位 U 可用公式求得:

$$U = \frac{I \rho}{4\pi} \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

① 单电极系又称为直接供电电极系, 双电极系又称为互供电电极系^[6]。

② 这里和以后所谈的一切介质的含义都将是各向同性的, 就是说, 它的电性在所有的方向都是一致的。

式中 I ——电流强度； ρ ——介質电阻率； r ——从电极 A 到电位 U 的记录点之间的距离。

根据式(1)其电位差为：

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{AN - AM}{AMAN} = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{MN}{AMAN},$$

式中 U_M 和 U_N ——供电极 A 通电后在测量电极 M 和 N 两点所产生的电位。

这里不考虑地面电极 B 对 M 和 N 所产生的电位，因为这些电位极小。

这样，如果在整个空间内的介質是均質的话，则：

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (2)$$

式中 $K = 4\pi \frac{AMAN}{MN}$ (或 $4\pi \frac{MAMB}{AB}$)

即电极系系数。括弧内等式属双电极系的系数。在通常情况下，如果介質为不均質时，则 $K \frac{\Delta U}{I}$ 的值取决于决定 ρ 值在空间中分布的地电参数。比如，在空间不同范围内其介質电阻率为 $\rho_1, \rho_2, \dots$ 则 $K \frac{\Delta U}{I}$ 值取决于 $\rho_1, \rho_2, \dots$ 并取决于这些介質間各分界面的几何形状。因此，用公式(2)所求得的值称为视电阻率，或简称视电阻(RC)，并以 ρ_x 表示。

这样我们就以下式来代替式(2)

$$\rho_x = K \frac{\Delta U}{I}. \quad (2')$$

在电极系上，其中間的一个极通常靠近两个边缘电极中的一个电极。如果一个测量电极間一个电流电极相互靠近，就是电位电极系。如果两个测量电极（或电流电极）靠得很近，就是梯度电极系。

在两个靠得很近的电极间,其正中心的一点叫做电极系的记录点。所求得的视电阻值就是用该点来计算深度位置的。

EC 曲线是电阻测井法的初步成果,它表示 ρ_s 同深度 η 的关系曲线。

在电位电极系时,

$$\overline{AM} \ll \overline{MN}; \quad \frac{\overline{AM} \overline{AN}}{\overline{MN}} = \overline{AM} \left(\frac{\overline{AM}}{\overline{MN}} + 1 \right) \approx \overline{AM},$$

$$U_M \gg U_N, \quad \Delta U = U_M \left(1 - \frac{U_N}{U_M} \right) \approx U_M;$$

因而对电位电极系来说,则

$$\rho_s \sim 4\pi \overline{AM} \frac{U_M}{I}. \quad (3)$$

在梯度电极系时,

$$\overline{MN} \ll \overline{AM}, \quad \overline{MN} \approx \overline{AO},$$

$$\frac{U_M - U_N}{\overline{MN}} \approx \frac{U_M}{\overline{AO}}$$

式中 O —— MN 距离正中的点, $\frac{U_M - U_N}{\overline{MN}}$ 为 O 点的电场强度沿井轴方向 Z 的分量。

因而对梯度电极系来说,则

$$\rho_s \approx 4\pi \overline{AO}^2 \frac{E_z}{I}. \quad (4)$$

在电位电极系中 M 点是记录点,在梯度电极系中 O 点是记录点。

从 A 点到记录点间的距离叫做电极系的电极距 L :

电位电极系的电极距 $L = \overline{AM}$;

梯度电极系的电极距 $L = \overline{AO}$ 。

当电位电极系 MN 的距离为无限大,梯度电极系 MN

的距离为无限小时(即所谓极大电极系或理想电极系), 电位电极系具有下列的形式

$$\varphi_k = 4\pi L \frac{U}{I} = \varphi_u, \quad (5)$$

对梯度电极系来说, 则具有

$$\varphi_k = 4\pi L^2 \frac{E_s}{I} = \varphi_E. \quad (6)$$

极大电极系的特征是只有一个电极距 L 的参数。现采用的电极系, 除特殊情况以外, 所得的结果实际上同极大电极系所得的结果没有区别。因此, 在测井理论方面基本上只能向极大电极系方面去发展。

φ_k 值的大小通常同那些充满在空间的各不同部分的介质的电阻率(地电参数)和分界线有关。

表示这一关系的曲线图能用来作为测井结果的解释, 就是说可用测井结果来确定地电参数。

视电阻(R_s)率理论曲线(计算曲线、实验室曲线、试验曲线)和测井(R_s)理论曲线是上述图表资料的最主要的图件。 R_s 曲线主要用来解释横向测井(BR_s)的结果。

所谓横向测井就是用不同电极距^①的电极系(同一类型的)在井中进行多次的测量。

任何一条视电阻同电极距 L 的关系曲线都是 R_s 测井曲线(广义地叫做横向测井曲线)。

当其他参数值不变时按某一可变参数而组成的曲线族叫做 R_s 曲线图板(或 BR_s 图板)。当计算和绘制这些图板时, 可采用相对电阻率值来代替绝对电阻率值(视电阻率、真电阻

① 在进行横向测井的同时, 通常还要进行 R_{∞} 测量, 以及流体和井径测量。

率),可采用相对电极长度代替绝对电极长度。这样,可以减少图板资料,并且能够简化使用方法。

所有真电阻率一般都同泥浆电阻率有关,所有的綫量則同井径,或所研究的地层厚度有关。

本套图板主要由两种类型的 K3 图板組成,即 BK3 图板和 MK3 图板。

1. BK3 图板 这些图板只适用于横向測井。就是說,用横向測井方法来測定沿井的半径方向介質均質性被破坏后对測量結果产生的影响。这时介質在井軸方向被認為是均質的。換句話說,这是一些不考虑围岩影响的巨厚地层的曲綫图。

由于无限厚地层电阻測井理論得到解决,才得到了这些图板。B. A. 弗克院士就是这一理論的奠基者。

2. MK3 图板 当介質的电阻率不仅在井径方向有改变而且在井軸方向也有改变从而对横向測井結果产生影响时;将会使任务更为复杂。例如,当被研究地层的上部岩石和下部岩石对 KC 值产生影响时(井对 KC 值的影响除外),我們就可以看出上述情况。在这种情况下,KC 值随着电极系在被研究地层界面位置的改变而变化,为了能取得一定的横向測井曲綫,必須預先估計到根据那些 KC 曲綫的点子来繪制这一曲綫(电探曲綫)。作电探曲綫时采用 KC 曲綫的极大值。MK3 曲綫是根据被研究地层 KC 曲綫极大值所繪制的 BK3 曲綫作出的。其所以把这些曲綫編入 MK3 图板內,是由于 MK3 图板能大大地推进,横向測井解釋工作和提高解釋質量。

本套图板內的第一类图板适用于当浸入帶为均質时的情况(或是沒有浸入帶),第二类图板只在浸入帶不存在的情况下使用。

第二节 无限厚地层

当无限厚地层为均质时(图 1a),其视电阻率只取决于地层电阻率 ρ_n 、泥浆电阻率 ρ_c 、井径 d 和电极距 L 。 ρ_n/ρ_c 比值在我們討論的情况下仅同 ρ_n/ρ_c 和 L/d 两个数值有关。

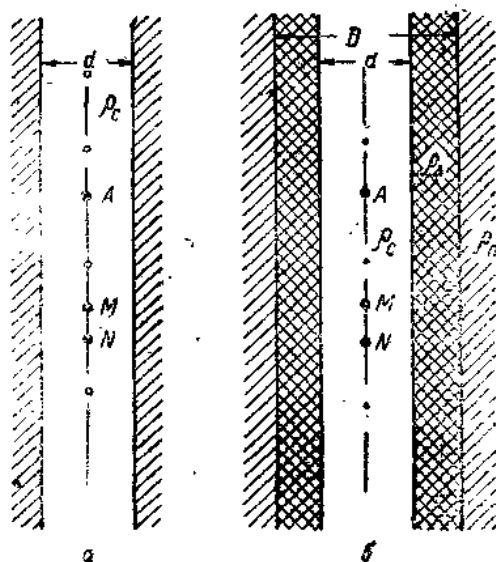


图 1

B. A. 福克院士于 1933 年就已解决了位于井轴部分的点电源所产生的电位的分布问题。对非理想电极来说,可按下面已得的解法计算:

$$\varrho_{\kappa}/\varrho_c = 1 + \frac{4}{\pi} \frac{\overline{AMAN}}{MNd} \int_0^{\infty} A(\lambda) \left(\cos 2\lambda \frac{\overline{AM}}{d} - \cos 2\lambda \frac{\overline{AN}}{d} \right) d\lambda, \quad (7)$$

$$\text{式中} \quad A(\lambda) = \frac{\alpha \lambda K_0(\lambda) K_1(\lambda)}{1 + \alpha \lambda K_0(\lambda) I_1(\lambda)}; \quad (8)$$

$K_0(\lambda), K_1(\lambda), I_1(\lambda)$ ——虚幅角的贝塞尔函数。

由于对公式(7)中的积分进行特殊换算的结果,并采用假定数值的积分方法,Б. А. 福克得出示于图2上的非理想梯度电极系曲线。这是一些在下列情况下所得的 $\varrho_{\kappa}/\varrho_c$ 同 ϱ_a/ϱ_c 比值的关系曲线:

$$AM = 24; 32; 42^{2/3} a \text{ 和 } AN = 32; 42^{2/3}; 56^{2/3} a,$$

式中 $a = \frac{d}{2}$ ——井的半径。

对极大(或理想)电位电极系来说,

$$\varrho_{\kappa}/\varrho_c = 1 + \frac{4L}{\pi d} \int_0^{\infty} A(\lambda) \cos 2\lambda \frac{L}{d} d\lambda. \quad (9)$$

对极大(或理想)梯度电极系来说,

$$\varrho_{\kappa}/\varrho_c = 1 + \frac{8L^2}{\pi d^2} \int_0^{\infty} \lambda A(\lambda) \sin 2\lambda \frac{L}{d} d\lambda. \quad (10)$$

两层曲线图板 № 1—3 代表的两种不同介质情况的曲线同这些公式相符。这些公式是 Л. М. 阿利平^[12]根据自己所制定的对这些曲线以及对普遍存在的三层介质曲线的计算方法所得,这一点将在下面谈到。

视电阻同地层真电阻率的关系常常由于泥浆水向地层的浸入而复杂。在井壁附近形成“浸入带”或“中间带”——即井壁附近岩石孔隙中的液体全部地或部分地被泥浆滤液所代替

的部分。浸入带的电阻 ϱ_d 可能同地层不变部分的电阻率以及同泥浆电阻率有着很大的区别。

在进行理论计算时(这一点下面将要谈到)认为泥浆浸入带是均质的并且有一分界面筒面将它同没有泥浆浸入带的地层分开,这一分界面筒的轴心同井轴一致(见图16)。这一圆筒面的直径 D 称为浸入带的直径。

关于估计浸入带不均质性的影响问题在 JI. M. 阿利平^[57]、B. H. 达赫诺夫和 E. A. 涅曼的著作中都讨论过^[58, 59]。

增阻泥浆浸入不同于减阻泥浆浸入。如果泥浆滤液的电阻率大于地层水的电阻率, $\varrho_d > \varrho_n$ 。这种情况的浸入称为增阻泥浆浸入。如果泥浆电阻率小于充满地层孔隙间的液体电阻率, 则泥浆滤液浸入地层时将形成比地层电阻率低的低电阻带。这种情况下的泥浆浸入称为减阻泥浆浸入。

当存在有泥浆浸入带时视电阻同样用公式(9)和(10)来表示,但是在这种比较普遍的情况下可用下式代替公式(8):

$$A(\lambda) = \frac{P + \alpha_1 \lambda K_1(\lambda) [K_0(\lambda) + P I_0(\lambda)]}{1 + \alpha_1 \lambda J_1(\lambda) [K_0(\lambda) + P I_0(\lambda)]}, \quad (11)$$

式中
$$P = \frac{\alpha_2 \kappa \lambda K_0(\kappa \lambda) K_1(\kappa \lambda)}{1 + \alpha_2 \kappa \lambda K_0(\kappa \lambda) I_1(\kappa \lambda)};$$

$$\alpha_1 = \frac{\varrho_d - \varrho_n}{\varrho_n}; \quad \alpha_2 = \frac{\varrho_n - \varrho_d}{\varrho_d}; \quad \kappa = \frac{D}{d}.$$

在存在有泥浆浸入带的情况下, 同泥浆电阻率有关的视电阻取决于 ϱ_n/ϱ_c 、 D/d 、 ϱ_d/ϱ_n 和 L/d 四个比值。

JI. M. 阿利平^[57]所作的 № 9—41 号曲线图板曲线同公式(9)和(10)及变换式(11)相符。

用来作 K3 曲线的参数 $\mu = \frac{\varrho_n}{\varrho_c}$ 将称为这一曲线的模数。

一切表示 ϱ_n/ϱ_c 同 L/d 关系的 BK 3 曲线, 以及它们的派

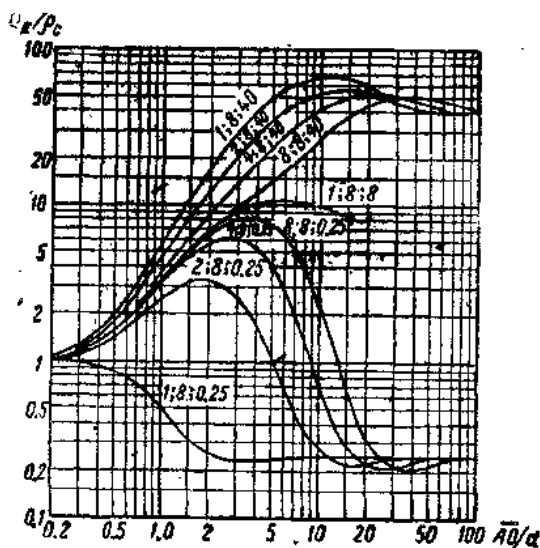


图3 $q_n=40$, $q_n=0.25$ 的两层和
三层 BE3 曲线的对比
曲线符号: D/d , q_n/q_c 和 q_n/q_c

生曲线都是绘制于模数 (相当于 $\log_{10}$ 的线段) 等于 6.25 厘米的对数纸上。

每一条 BE3 曲线都有两条近直线的渐近线。左边所有的曲线都趋于 $q_n/q_c = 1$ 直线, (左边的渐近线), 右边的每条曲线亦向纵坐标等于地层的相对电阻率 q_n/q_c 的直线 (右边的渐近线) 延伸。

BE3 曲线在接近自己右边的渐近线前将交叉于穿过极大值或极小值。

当地层电阻率为无限大时, 井中的电流密度将在离供电电极某一距离处开始变为常数。从而电场强度 E 亦为常数,

并且视电阻率 ρ_E 根据公式 (6) 将正比于电极距的平方 I^2 。对数格纸上的幂关系以一条同横坐标轴成一斜角的直线表示, 它的切线等于幂指数。因此梯度电极系无限大模数的 BK3 曲线的直线段同横坐标线斜交成 $63^\circ 26'$, 它的切线等于 2。

图 3 所示为两层和三层 BK3 曲线的对比图。曲线的对比表明, 在减阻泥浆浸入的影响下(当 $\rho_n > \rho_e$ 时)左部的 BK3 曲线变缓, 甚至极大值也有某些降低并向右移。增阻泥浆浸入能引起 BK3 曲线的升高。

因此在存在泥浆浸入的情况下我们有两种类型的三层曲线: 一为平缓类型的曲线, 一为稍微升高类型的曲线。

当增阻泥浆浸入不深时, 如 J. M. 阿利平所指: 当 ρ_n/ρ_e 值相同时以及泥浆浸入带的参数值 ρ_a/ρ_e 和 D/d 各不相同, BK3 曲线实际上是一致的, 但须有一个条件, 就是 ρ_a/ρ_e 和 D/d 值应当是参数

$$U = \int_{d/2}^{D/2} \frac{\rho_a - \rho_n}{\rho_e r} dr$$

都具有同一个数值。

能满足这一要求的情况(线段)叫作 U -等值性。对一般所讨论的均质带来说, ρ_a 值同 r 无关。那时

$$U = \frac{\rho_a - \rho_n}{\rho_e} \ln \frac{D}{d}.$$

U -等值性原理可以减少在横向测井结果的整理时所必须的 BK3 曲线的数量。

在应用 U -等值性原理时所引用的极大值 D/d (上限 D/d) 如果越小, 则 ρ_a/ρ_e 比值也越小。

根据 C. T. 科馬洛夫^[7]的公式, 当 $e_a/e_c=5, 10, 20, 40, 100, 200$ 时, D/d 的上限相应地等于 2, 2, 3, 4, 6, 8。

在减阻泥浆浸入时, 就会发生象 C. T. 科馬洛夫所提出的情况。即三层介质同二层介质等值, 但要满足下面两个条件。

1) 在右部渐近线上 BK3 曲线的极大值升高, 以及沿井轴方向, 三层介质和两层介质的导电率一样。

2) 符合于下面恒等式

$$\frac{d_0^2}{e_0} + \frac{D^2 - d_0^2}{e_n} = \frac{d^2}{e_c} + \frac{D^2 - d^2}{e_a}$$

式中 D 和 e_a ——三层介质泥浆浸入带的直径和真电阻率;
 d_0 和 e_0 ——在二层介质同该三层介质等值的情况下液柱的直径和电阻率。

在上述的等值性情况下, BK3 曲线的右部实际上是相符的。

减阻泥浆浸入时的等值性能大大减轻平缓的 BK3 曲线的解释工作, 并使得以假定的三层剖面来代替二层剖面成为可能。

第三节 有限厚地层, 取得 理论曲线的方法

如果地层具有一定限度的厚度, 则须在上述同视电阻有关的地电参数里加入地层的厚度 h 和围岩电阻率 $e_{\text{岩}}$ 。除此以外, EC 值随着地层界面处电极系的位置 (它以记录点的深度 η 来决定) 的变化而变化。

求出 q_e 同 L 的关系式和 q_e 同地电参数的关系式, 并要考虑到地层的有限厚度的问题, 一般说是不能达到的。如果说假定 $d=0$, $D=0$, 就是说, 不考虑井和泥浆浸入带^①的影响, 要求得这样的关系式并不是很难的。

这一极为普通情况的 KC 曲线和极大值的电探曲线在很多作者的著作里^[7, 8]都有论述。

多耳 (N. G. Doll) 得出一些近似的公式, 同时对电阻无限大和厚度有限的地层作出一些 KC 曲线, 在绘制这些曲线时还考虑到当围岩电阻同泥浆电阻没有区别时井的影响问题。

M. Л. 欧节尔斯卡雅^[9]也对这一情况用一个带水的桶的模型得出电阻为无限大地层组的某些曲线, 作为地层模型的一些镶有小孔的玻璃板。

为了解决实际问题, C. Т. 科马洛夫曾利用一个带水的用桶做的模型, 在桶内安放有用陶制的电阻为有限的地层模型。除此以外, 科马洛夫还把多耳的近似公式稍微扩大了一些, 并且得出当上下地层的介电电阻率同泥浆电阻率有区别时的曲线。

C. Т. 科马洛夫用内插法和外推法扩大 BK3 图板, 以上述模型工作和某些其他(试验)工作结果而补充了 N. G. 多耳曲线, 以及上面引证的等值原理使得 C. Т. 科马洛夫有可能制定出一种在实际工作中应用很广的横向测井结果的整理方法和解释方法。

因为在计算有限电阻层的有限厚度的影响时所得的资料

① 相应的公式在 B. H. 达赫诺夫的书中已有列举。

不够可靠和不够完全,所以需要找出为了解决这一任务的一些比较完善的方法。

1943—1946 年間,Л. М. 阿利平曾經用順序近似法來計算 KC 曲綫,而根据 KC 曲綫來計算有限厚和有限电阻层的 MIF 曲綫和图板并考慮到井的影响^[8],但是用这一方法来計算視电阻的工作,当电极距小于地层厚度时会碰到极大的困难。

对取得有限厚地层的 KC 理論曲綫和橫向測井曲綫來說,目前最有效的方法是电网模型法。如果电流是呈圓筒状对称地分布,这种网状模型方法則更为容易办到。在井下条件下,只要能使得电极系位于井軸、井壁四周形成一个圓筒,地层間的分界面同井軸垂直,就可以达到上述要求。

在这种情况下,整个空間被同井軸相垂直的平面系統和与井同軸的几个圓筒面的系統分割成一些基本环(图4)。每一个环都为沿井徑方向的电阻 ω_R 和平行于井軸电阻 ω_Z 所替換。

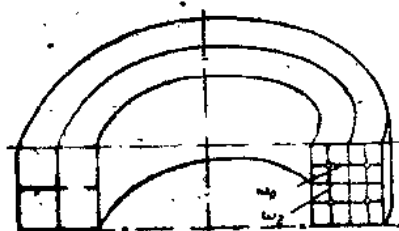


图4 用綫繞电阻組成的网状扇形体来代表井和容积(人工电网模型井)

这些电阻值相当于井徑方向和井軸方向內单位环的电阻:

$$\omega_R = \frac{\rho_0}{4\pi L} \ln \frac{r_H}{r_h};$$

$$\omega_Z = \frac{\rho_0 L}{\pi(r_H^2 - r_h^2)}.$$

式中, ρ_0 ——电网模型裝置空間部分內的介質电阻率; L ——环的高度; r_H 和 r_h ——单位柱状环的外部 and 内部的半径。

电阻 ω_R 和 ω_Z 的两个中间点相互联接着, 它们的两端同相当于空间的另一扇形体相邻二电阻相接, 这样就形成了一个代替空间的电网。

1951 年 Л. М. 別拉什, В. Н. 达赫諾夫和 Е. А. 涅曼^[6]等为了取得电阻测井的理论曲线, 特别是为了研究泥浆浸入带的非均匀性^[5,8]曾经采用过电积分器 ДИ-11 型。但是所采用的这一种电网, 不能保证得到可靠的结果, 特别是在地层为有限厚时得到的结果更加不可靠。

1950—1951 年全苏地球物理研究所解释实验室在 Л. М. 阿利平的领导下曾做过一个专门的电网模型装置, 当井对井轴来说, 是一对称的圆筒时, 则这一装置才能同电测时井的情况相当。

这一装置能够在沿井轴部分形成一个大小为 $500d$ (d 为井眼直径)、直径为 $243d$ 的空间。电网模型被分成几个地段。单个的模型装置部分相当于这些地段, 这些相应的部分组成电网以后, 就可以造成一个派生剖面的模型。

相当于高度为 $10d$ 的泥浆柱的井下部分包括 600 多个电阻。模型装置总共包括 15,000 多个电阻。

В. С. 捷姆金諾娜雅、Ф. И. 叶祖波夫^[10]和本卷的作者, 在 Л. М. 阿利平的领导下曾用这一装置取得了大批的有限厚地层和同这些地层配合使用的理论视电阻曲线和电探曲线^①。

① А. С. 列維亞、Н. В. 薩夫金和 А. Н. 葛季等几位主任技術員都參加了這一工作。