

矿场地球物理

第 1 集

燃料化学工业部石油勘探开发规划研究院编

一九七三年四月

B721/2001

毛主席语录

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

目 录

用人工电位测井判断水淹层位.....大庆油田(1)

中子寿命测井.....江汉石油管理局(20)

井下超声电视.....大庆油田(36)

井下电视.....六四一厂(40)

盐水泥浆测井方法的选择及应用.....江汉石油管理局(45)

用声波—感应测井计算含油饱和度.....胜利油田(56)

根据声、感测井确定地层水电阻率.....胜利油田(59)

质量流量计测试数据分析.....大庆油田(63)

用人工电位测井判断水淹层位

大庆油田

摘要 本文叙述用人工电位测井判断水淹层的实验研究和解释方法，这对确定水淹层含水率、水淹厚度及水淹层残余油饱和度取得了一定的地质效果。

一、前言

注水开发油田，在油田进入含水采油阶段，全面部署调整井，认识水淹层位、水淹层出水程度、水淹厚度及残余油饱和度等参数，成为了解地下情况的重要资料。这些参数的解决与否，直接关系到油田调整方案的正确实现，关系到能否确保油田高产稳产的大问题。注淡水开发的油田，以往没有一个可靠的判断水淹层的方法。

解决水淹层的问题，首先要了解水淹层最显著的特点。通过对大庆油田水淹层的岩性、物性、电性、含油性和水性的调查与综合分析，发现水淹层最显著的特点是随着水

中146地区水淹层含水率与矿化度关系

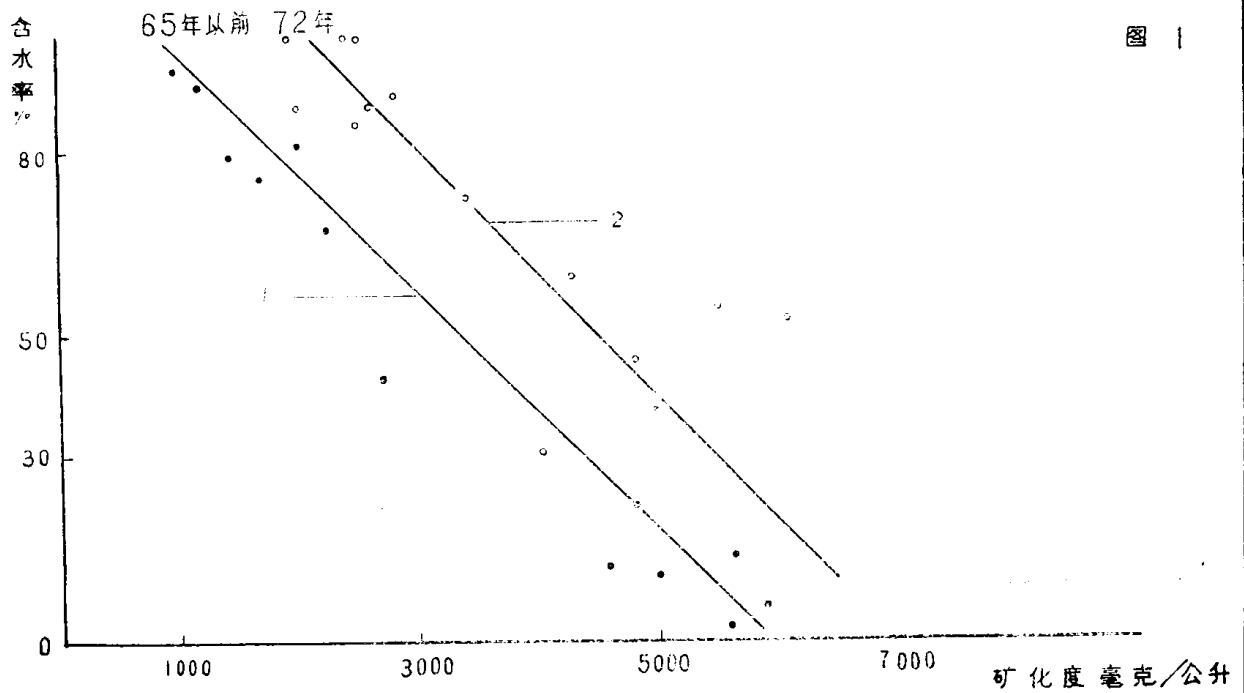


图 1

淹程度的增加，其地层水（油层原始地层水与注入水的混合）的矿化度迅速下降（图1）。针对这一特点，我们首先开展了室内实验的研究，38块岩样实验的结果表明：人工电位相对值与地层水电阻率（主要决定矿化度和离子成分）有良好的线性关系，人工电位相对值随地层水电阻率的增加而增加，其截距的大小受渗透率控制（图2）。由于目前油田水淹层均为高渗透层，所以渗透率对人工电位相对值与地层水电阻率的关系影响不大；又由于本油田原始地层水和注入的淡水均属碳酸氢钠水型，所以离子成分对地层水电阻率影响是稳定的。由上所述，针对本油田的具体情况，利用人工电位相对值来估计地层水的矿化度，从而判断水淹程度是可行的。

岩心人工电位相对值与地层水矿化度关系

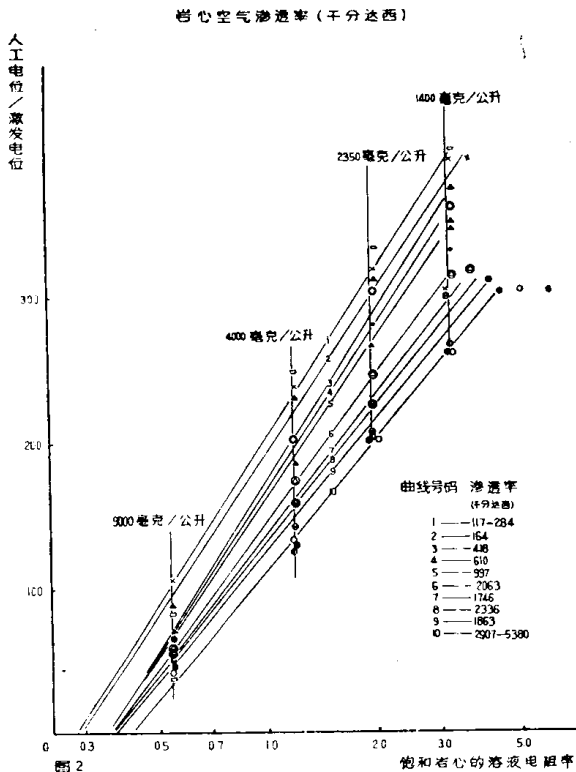


图 2

但值得注意的是：本油田今后大量污水回注对本方法是不利的，同时，岩层中泥质成分及岩石渗透率、侵入带等因素对人工电位的影响，目前在解释中尚未有效地清除。其测量方法尚需进一步研究和改进。

二、人工电位原理及判断水淹层的理论基础

介质通电后发生极化，产生的电位称作人工电位。它是一个比较复杂的电化参数，人工电位方法是以研究电流通过岩层时在岩层中产生的物理化学过程为基础的。在岩层中发生的这些过程现在还未进行足够的研究，根据现有概念它包括有体极化，电渗透等。下面我们主要介绍体极化假说。

体极化 离子导电性的孔隙岩层在通电前岩石颗粒表面上偶电层密度是均匀分布的（图3—(1)），这偶电层的内层是砂子颗粒表面上的泥质杂质带负电的电薄膜，其电荷是不能移动的，这电薄膜吸附电解液中的正离子，形成带正电的电薄膜，为偶电层的

- I —— 激发电流 (毫安) ;
- L、S —— 岩样的长度和横截面积 (公分、公分²) ;
- P_H —— 电阻增大率 (主要取决于岩石含油饱和度) ;
- P_n —— 相对电阻率 (主要取决于岩石孔隙度) ;
- ρ_B —— 地层水电阻率 (欧姆 - 米) 。

由于本油田油层孔隙度较稳定, 在测量条件固定情况下, 则对于式(2)可写成

$$\Delta U_{B\Pi} = K \cdot A_B \cdot P_H \rho_B \dots \dots \dots (3)$$

式中K为测量条件 (主要是指岩样或地层激发时间、激发电流大小、岩样大小或电极尺寸、断电后至测量的时间等) 及岩芯孔隙度所决定, 可以看成常数。因此人工电位从理论上来说主要取决于岩石的三个参数: 电化学活性系数、含油饱和度和岩石孔隙中水的电阻率。

含油饱和度 由公式(2)可知, 在固定电流I时, 人工电位随着含油饱和度增加而增大。由图4-1可见, 对于渗透率为1215毫达西的岩样, 饱和相同矿化度的水, 在相同电流条件下测量其含油饱和度在80.9%和0%时的人工电位, 前者比后者高三倍左右 (图4-1曲线I、II), 显然这对判断水淹层是不利的。为了消除含油饱和度对人工电位的影响, 经多次实验分析, 在岩样两端, 应该通相同的激发电压, 而不是相同的电流, 这样偶电层才能在相同的外电场条件下发生变形。从图4-2看出, 岩样两端通相同的电压时, 曲线I、II重合了, 基本上消除了含油饱和度对人工电位的影响。根据这一实验把式(2)中I和 P_H 用激发电压来代替, 则式(3)可写成

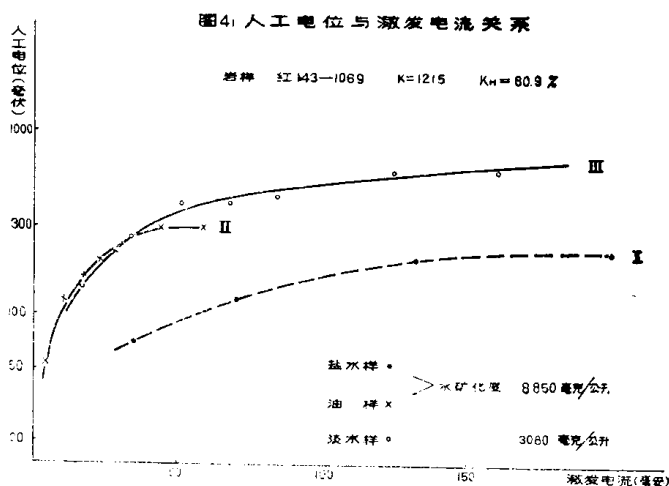


图 4-1

$$B = \frac{\Delta U_{B\Pi}}{\Delta U_{Kc}} = K' / f (A_B \cdot \rho_B) \dots \dots \dots (4)$$

- 式中 ΔU_{Kc} —— 激发电位 (伏) ;
- B —— 人工电位相对值;
- K' —— 常数 (取决于除了激发电流以外的其它测量条件) 。

图42 人工电位与激发电位关系

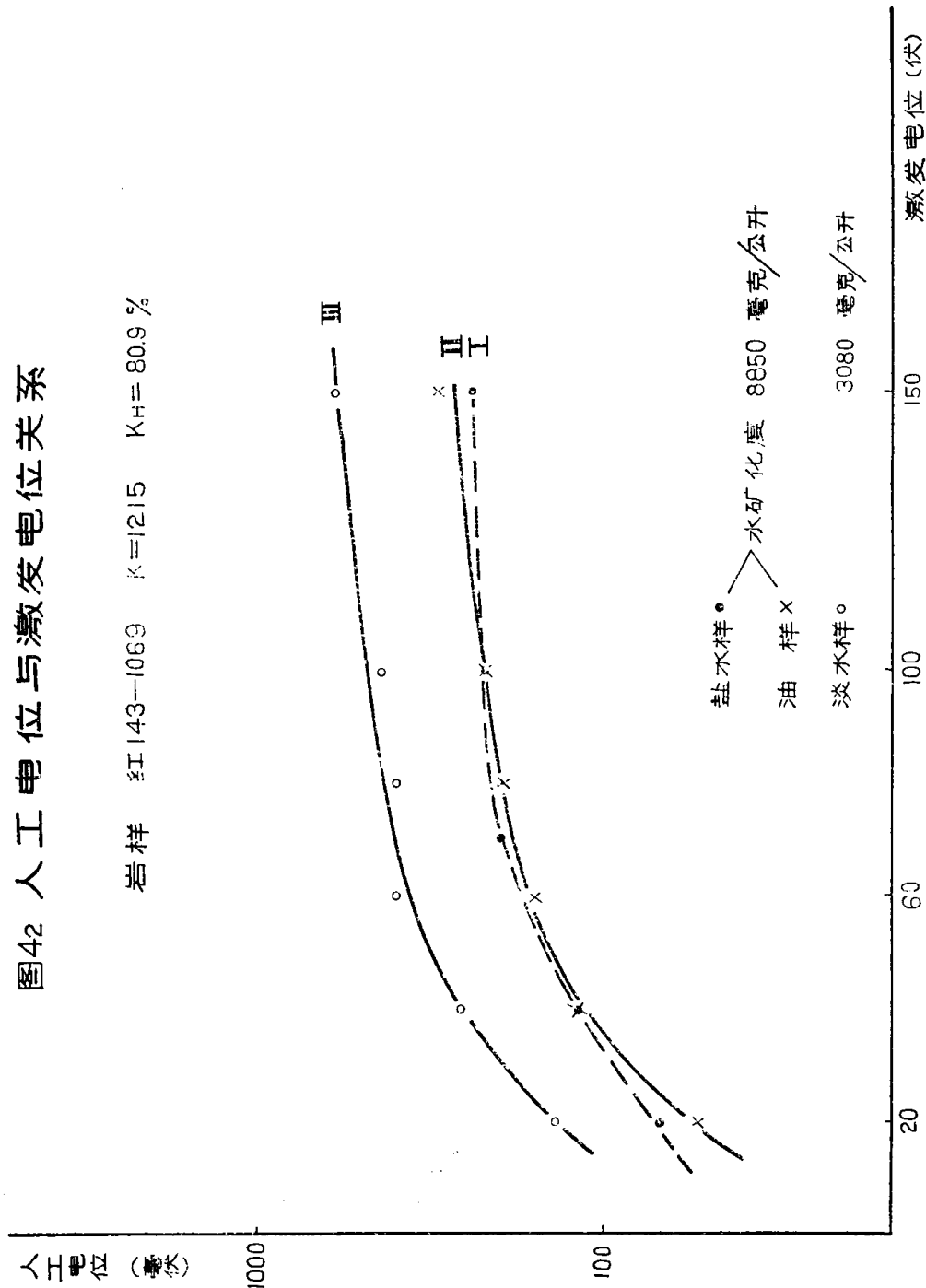


图4-2

从式4看出人工电位相对值主要取决于岩石的电化学活性系数和孔隙中水的电阻率。根据本油田38块岩样室内实验结果证实了这一点(图2)。由图2统计得出

$$B = K \log \rho_B + b \dots\dots\dots (5)$$

式中K与b主要取决于岩石的渗透率和泥质成份及测量条件。在我们的实验条件下,对泥质成份一般为高岭土时,对不同渗透率岩样可得到以下经验公式

特高渗透层 $B = 300 \log \rho_B + 112 \dots\dots\dots (5_1)$

中渗透层 $B = 288 \log \rho_B + 133 \dots\dots\dots (5_2)$

低渗透层 $B = 382 \log \rho_B + 205 \dots\dots\dots (5_3)$

由式 5₁₋₃ 可见, 对于泥质成份为高岭土的砂岩样品的人工电位相对值, 随着地层水电阻率的增加 (即水淹层含水率增大) 而增大, 随着地层渗透率的增加 (即岩石比面的降低) 而降低。

另外据国外实验研究结果 (图 5), 当溶液电阻率 $\rho_B = 0.6 - 10$ 欧姆米范围内, 人工电位相对值与溶液电阻率的关系可近似写成

$$B = A_B \cdot \rho_B^m \dots\dots\dots (6)$$

式中 m —取决于岩石性质的指数。

对所研究岩样的 m 值变化在 $0.68 - 0.86$ 范围内, 取平均值为 0.75 , 可写成:

$$B = A_B \cdot \rho_B^{0.75}$$

又据国外实验资料, 认为人工极化电位与岩石中溶液电阻率成正比 (表 1)。

岩石相对极化系数 B 与饱和和岩石的溶液电阻率关系

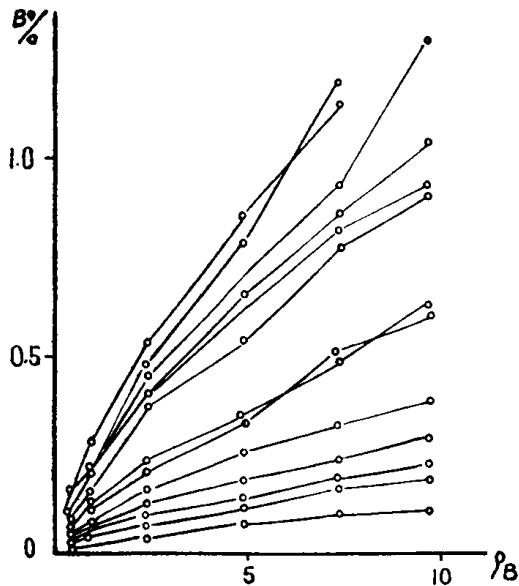


图 5

该资料中还说明人工极化电位与溶液的性质有关, 主要取决于正离子类型, 在相同溶液电阻率情况下, 分别饱和 CaCl_2 、 NaCl 、 HCl , 得出泥质颗粒吸附 Ca^{++} 离子的人工电位最大, 吸附 H^+ 离子的人工电位最小。总的来说, 泥质吸附 Ca^{++} 离子时产生的人工电位比吸附 K^+ 离子 (Na^+ 离子) 时产生的人工电位高 4 倍, 而后者又比吸附 H^+ 离子时产生的人工电位高 3 倍左右。但从本油田水分析资料来看, 无论是油田地层水, 还是注入水, 均属碳酸氢钠水型, 正离子绝大部分为 K^+ 和 Na^+ , 而 Ca^{++} 、 Mg^{++} 离子仅占 1%, 因此溶液的性质对本油田的人工电位与地层水矿化度关系影响不大。

从上所述, 当测量条件固定, 胶结物为高岭土时, 人工电位相对值主要与地层水电阻率有关, 其次与地层渗透率有关。对目前水淹层主要为高渗透层, 可以认为利用人工

电位判断水淹层的地质基础和理论基础是可靠的。

表 1

岩样材料	饱和岩样的方法	岩样粒度 (毫米)	溶液种类	溶液电阻率 (欧姆米)	人工电位相对值
含 2% 蒙脱砂岩样品	用蒸馏水冲洗后饱和浓度为 0.2H 的溶液	0.54—0.83	CaSO_4	270	25.9
				71	11.5
				18	3.43
				6	1.09

但必须指出，由于人工极化是由砂岩颗粒表面上的泥质吸附正离子的电薄膜形变所产生的，而泥质吸附溶液中正离子的能力（即吸附容量）取决于它和溶液中正离子的共性。其共性愈强，则吸附该正离子的相对能力就愈大，如高岭土与 H^+ 离子的共性大于 Na^+ 和 Ca^{++} 离子的共性，所以高岭土吸附 H^+ 离子能力强，因而吸附 Na^+ 和 Ca^{++} 离子能力相对要弱。而微晶高岭土（胶岭土或称蒙脱土）吸附 Na^+ 和 Ca^{++} 离子能力比高岭土要大得多。所以如果砂岩胶结物为微晶高岭土时，其人工电位要比胶结物为高岭土时大得多。本油田有个别油层的胶结物为微晶高岭土，这对人工电位判断水淹层是有影响的。

三、人工电位测量方法

现将人工电位室内实验和现场测量条件的要点介绍如下：

1. 岩样必须洗掉残余盐，用蒸馏水多次反复长时间冲洗，检查冲洗液的电导率合格后烘干，然后用真空法或加热法饱和所研究的溶液。
2. 保持测量槽两端液面平衡，并用充气环橡皮套夹住岩样，以防两端液体串槽。
3. 尽量采用较粗的虹吸管（即盐桥）和电极电位较小（仅几毫伏）而稳定的甘汞电极。
4. 测量前起始电位（岩石自然极化电位，电极电位，线路干扰电位的总称）要小而稳定，如果起始电位较大，则必须将它补偿掉，但补偿后的剩余电位必须稳定。
5. 岩样通电时间不要太短，因为孔隙中离子极化需要一定的时间才能达到饱和，据实验统计，通电时间在 1—2 分钟内的测量结果重复性较好。但一次通电时间不宜过长，因长时期通较大的直流电，盐桥易击穿，电极易极化。
6. 必须同步操作，因为人工电位是断电后按指数规律随时间延长而逐渐消失的直流讯号（图 6）。若断电时间为 T_0 ，从 T_0 到数字电压表记录仪显示出一个人工电位值，需要时间 Δt ，同步操作就是要在测量任何一块岩样时 Δt 相等，而且 Δt 越小，人工电位就越大。

人工电位现场测量要点如下：

1. 电极系选择

测量人工电位需通较大的直流电，而测量电极 M 靠近 A 电极，因而 M 电极就处于比地面电极 N 较大的电流密度区（N 电极实际上不被极化），这样 M 电极必然因电流流过而产生极化电位。如果这个极化电位较大而不稳定，必然歪曲地层的人工电位实际值。为了减小极化电位，可使 M 电极处于较小的电流密度区，这样就要使 M 电极远离供电电极 A 或减小激发电流。但这时人工电位幅度将大大降低。为了测得较高的人工电位，又使 M 电极产生的极化电位尽量小而稳定，经室内和现场多次试验得出以下三点做法：

- (1) 供电电极要对称。下井的五个电极排列为 B—A—M—A—B $\begin{matrix} AM = 7.5 \text{公分} \\ BM = 5.0 \text{米} \end{matrix}$

对称性供电的优点是，电流从 A 电极进入地层，和同一侧的 B 电极形成回路，测量电极 M 也就可以避免电流大量通过而产生极化电位。

- (2) 为了增加 M 电极和 A 电极之间的接触电阻，在 M 电极外表装上钻有直径 10 毫

米小孔的绝缘套筒（玻璃钢制）。

(3) 电极材料采用金属铅做测量电极M，而用不易电解又有良导电性能的非金属石墨做供电电极A和B。

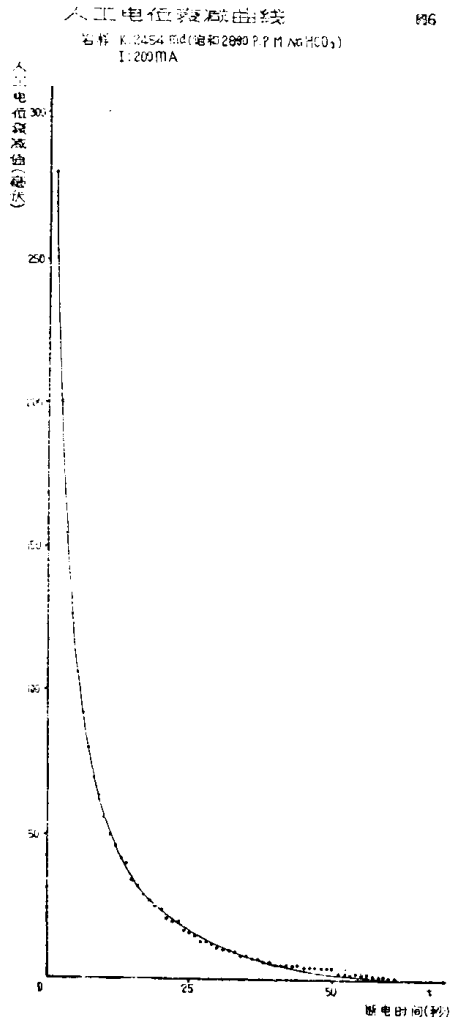


图 6

电极系及扶正器结构图

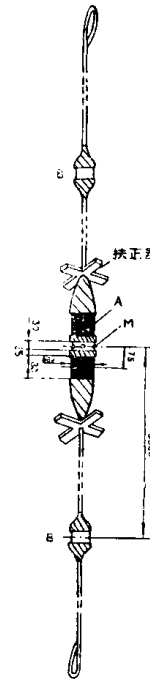


图 7

测井实践表明，采用这种结构的电极系（图 7），是保证人工电位测井质量重要的一环，如在某井 750 米泥岩段处进行电极极化试验表明（图 8）：在电极未供电时，测量电极 MN 之间电位差为 36 毫伏，通电后测人工电位为 37 毫伏，说明电极极化电位很小，同时亦说明电阻道讯号（即激发电位的 1500 毫伏）未进入人工电位道。

图 8

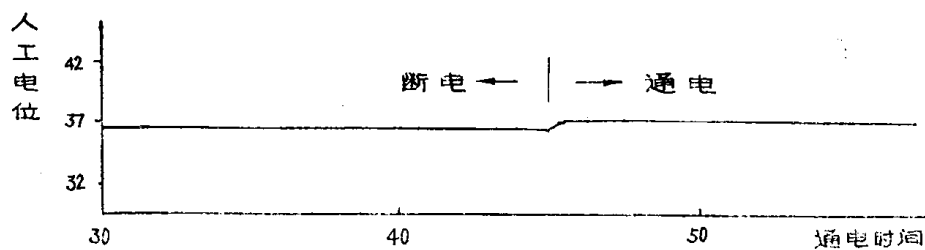


图 8

采用上述电极系进行测量时，有时测量重复性较差（相对误差 $>10\%$ ），分析原因之一是电极系偏心所致（该电极系直径最大为9公分，而A—M—A总长度只20公分左右，与井径差不多大），因此在电极A—M—A上下两端加上扶正器，测量重复性一般均符合要求（相对误差 $\leq 10\%$ ）。

2. 测速的选择

通过三口井的多种测速对比试验和三口井的高阻层点测试，对人工电位幅度与测速之间的关系认识如下：人工电位幅度是随外电场激发时间增长呈指数规律的增加，一般需要1—2分钟才能达到极大值（图9），其曲线形态基本上同断电后人工电位降落的形态。这表明人工电位测井要得到大的幅度，就必须保证电极系通过地层有足够长的激发时间。若要测到地层人工电位极大值的70—80%，则对地层需要通电8—16秒。对于

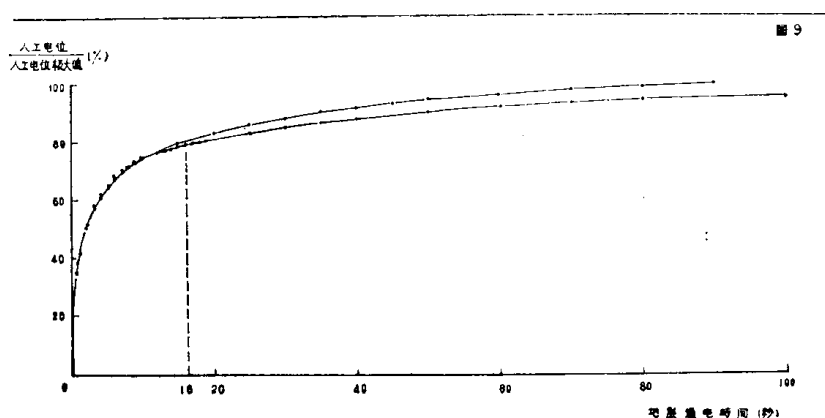


图9

层厚大于1.2米的地层，采用测速600米/小时，则测出的人工电位幅度可达极大值的70—80%。采用这种测速经试油验证解释效果比较好，又考虑钻井时效的要求及便于操作，测速范围规定为550—750米/小时，这时人工电位曲线由于测速的变化所引起的误差一般不超过10%（图10）。但超出此测速范围就影响解释精度，这时应进行测速校正或重测，测速校正曲线见图11。

3. 电极和仪器器的绝缘

在进行人工电位测井时，换向器通电的半周记录激发电位，断电的半周记录人工电位。而油层或水淹层的激发电位一般为4—8伏，加之采用平均电流为+300毫安（实际最大脉冲电流超过600毫安），这就要求记录仪、电缆、电极（特别是激发电位道和人工电位道的检流计之间的绝缘以及这两道换向器上的绝缘）各部份绝缘性能比横向电测井还要高。实践表明，当绝缘性能差时，人工电位幅度和形态都要畸变。

4. 激发电流及记录道电容的选择

为了消除或减小自然电位及其它干扰电位对人工电位的影响，激发电流尽可能采用大一些，这样测出的人工电位就较大，但是大电流经过机械换向器产生火花严重，对整流子绝缘破坏较厉害，因此对使用机械换向器测人工电位，最大允许电流为300毫安

图 10

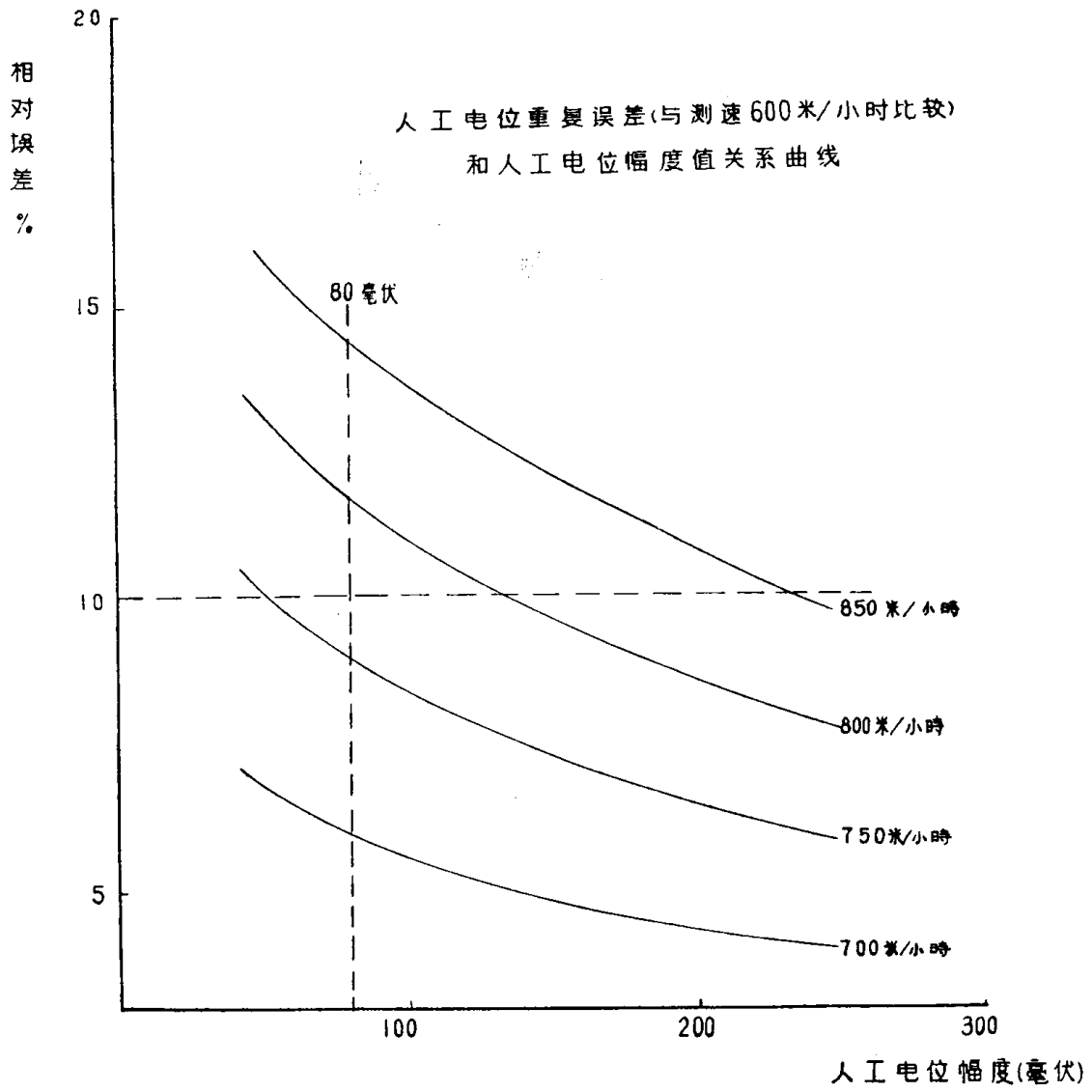


图 10

测速校正曲线

图 11

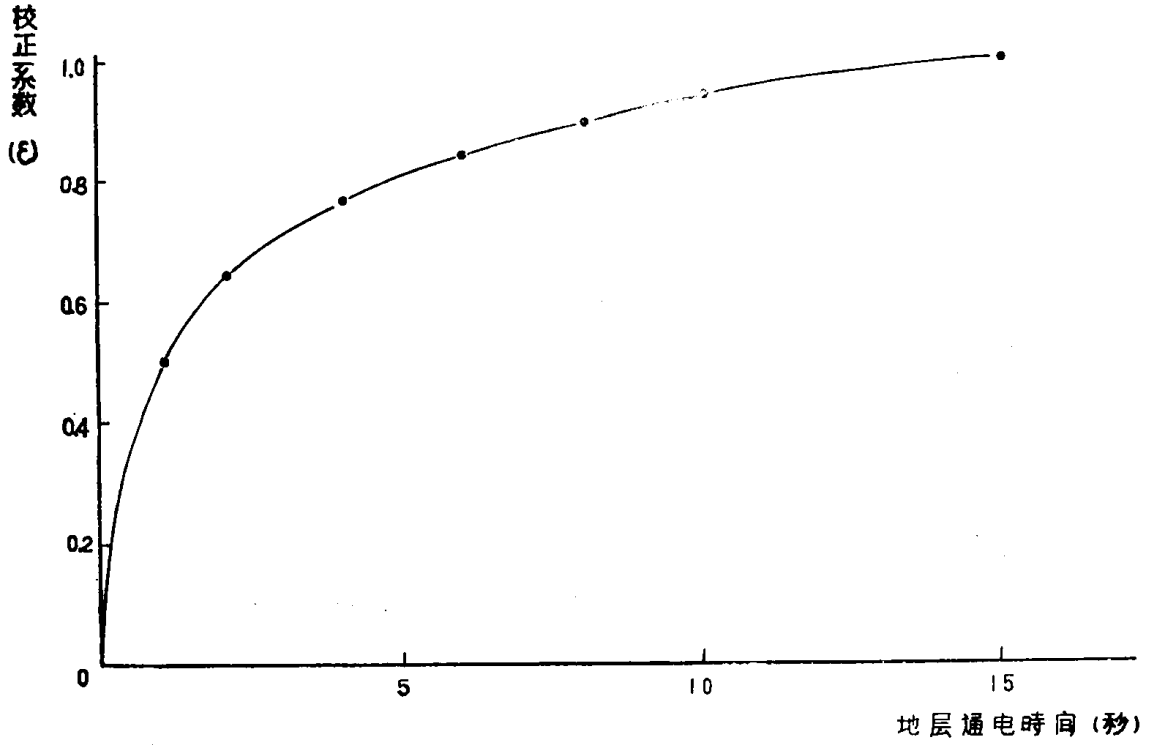


图 11

光电换向器原理线路图

图 12

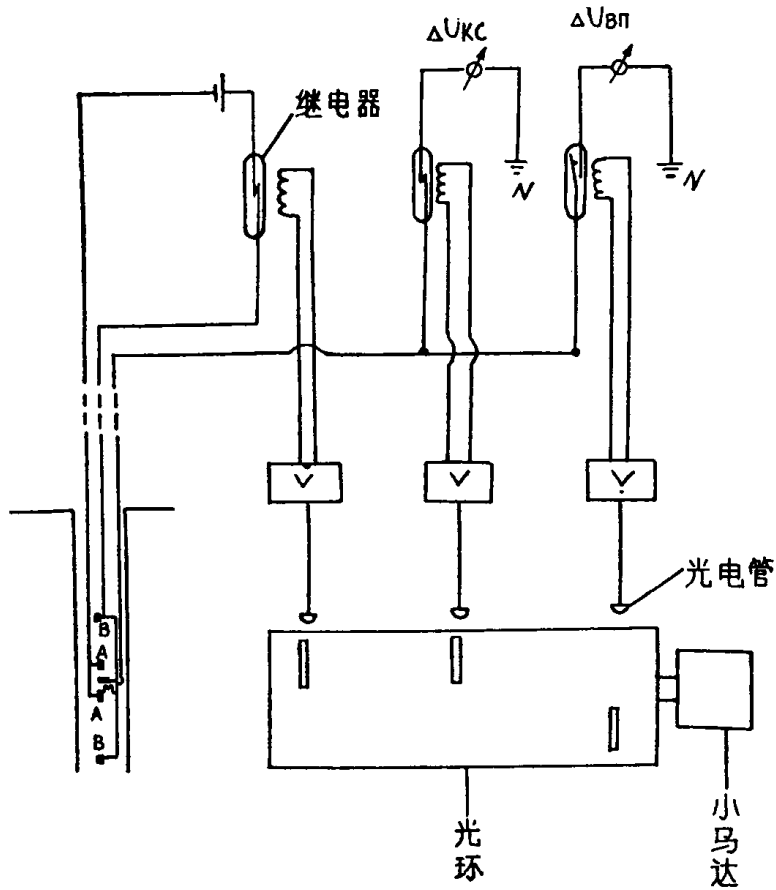


图 12



图 13

(脉冲电流为 600 毫安)。为了采用较大的电流及今后完井电测的方便，我们设计加工了光电换向器（即光电控制开关器），其工作原理见图12。用光电换向器与机械换向器经过七口井测井对比证明，可取得效果一致的人工电位资料（图13），而且光电换向器原理简单，绝缘性良好，使用、维修、加工简单方便等优点。

测量人工电位时，记录仪器各道“隔直电容”开关均处直流通位置，“滤波电容”公用开关处断的位置，人工电位记录道需要在换向器与测程电阻之间并联 100 微法的电容。

采取上述技术措施，一般均可以取得质量较好的人工电位测井资料，成功率目前达到90%。

四、综合判断水淹层的含水率、水淹厚度及水淹层残余油饱和度的解释方法。

人工电位虽然与地层水矿化度存在着密切关系，但关系不是单一的，它同样受岩层渗透率、泥质成份和含量及其分布状态、泥浆侵入等因素的影响。为了进一步密切测井参数与地层水矿化度的关系，根据地层水电阻率的对数与人工电位相对值成正比（式 5）而与自然电位成反比的关系，我们采用人工电位相对值与自然电位的比值来确定水淹层含水率，其关系式为

$$\frac{\Delta U_{\text{ВП}}}{\Delta U_{\text{КС}} \Delta U_{\text{ПС}}} = f(p) \dots\dots\dots (7)$$

- $\Delta U_{\text{ПС}}$ ——自然电位（经厚度校正，毫伏）；
- P ——水淹层含水率（%）。

人工电位($\Delta U_{\text{ВП}}$)。用 +300 毫安人工电位（正值）曲线来确定，其幅度值虽然包含自然电位（负值），但因水淹层的自然电位幅度低，这样附加进来的自然电位成份比油层时要小，比采用 -300 毫安的人工电位（负值）曲线更有利于水淹层的判断。

激发电位($\Delta U_{\text{КС}}$)。为了消除含油饱和度对人工电位的影响，所以引入了人工电位的相对值。由于人工电位电极系的AM距离仅7.5公分，探测深度较浅，实测的激发电位受泥浆侵入、泥浆电阻率影响较大，为了消除含油饱和度的影响，用短梯度视电阻率比值 ($\rho_K^{0.15} / \rho_K^{0.25}$) 来确定激发电位。由图 14 看出，对于纯油层来说，激发电位与短梯度视电阻率比值关系较密切（泥浆电阻率一般在3~4欧姆米之间时），如果泥浆电阻率较大时激发电位就较大，同时水淹层的激发电位亦较大（图14中空圈点子为含水大于60%的水淹层），由于激发电位增高，因而人工电位相对值降低。用实测激发电位不利于判断

水淹层，而用短梯度比值由图14实线查出的激发电位可以较正确的反映地层含油饱和度。同时自然电位随泥浆电阻率增大而增大，而短梯度视电阻率比值随泥浆电阻率增大而降低，从而可以不对泥浆电阻率校正而大致抵消泥浆电阻率对所求的激发电位与自然电位乘积的影响。

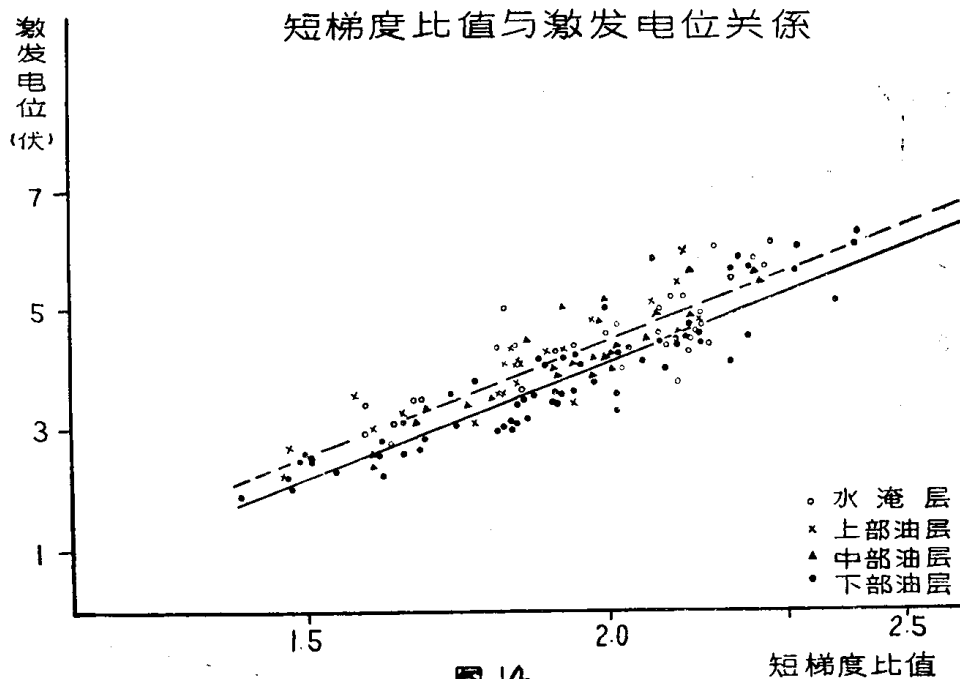


图 14

图 14

根据上述参数的选择，对一批单层试油井(17口井28层)，计算出 $\frac{\text{人工电位相对值}}{\text{自然电位}}$ ，

与对应的单层试油求得的含水率作出的关系是良好的(图15)，从表2看出，含水量误差大于20%的仅3层。

新井的水淹层解释利用诺模图板(图16)计算水淹层含水率。

水淹层厚度可根据解释层内人工电位高峰异常作指示，对应深度在微电极曲线上卡厚度。

水淹层残余油饱和度计算步骤：

1. 根据四口油基泥浆取芯井作出的短梯度视电阻率比值与含油饱和度图板(图17)，该图板的绝对误差，对层厚 ≥ 1.2 米的层为 2.8%，层厚 < 1.2 米的层为 5.2%，首先求出每个水淹层的视含油饱和度 K_H 视，再根据 K_H 视由 $P_H = f(K_H)$ 图板求出视电阻增大率 P_H 视(所以称视电阻增大率，是因为先假定水淹层的视地层水电阻率与油层的原始地层水电阻率一致，萨尔图油层为 0.67 欧姆米，葡萄 花油层为 0.64 欧姆米)。

2. 利用 $\frac{\text{人工电位相对值}}{\text{自然电位}}$ 与单层试油的地层水电阻率资料作出关系曲线(图18)，

人工电位相对值
自然电位幅度

与含水率关系

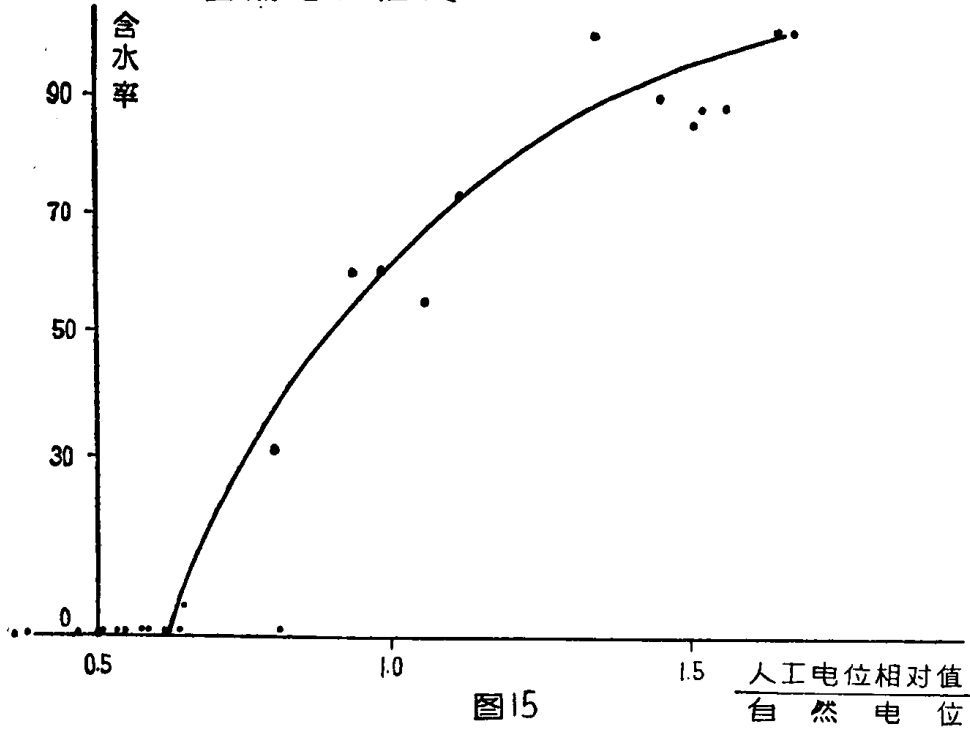


图 15

图 15

水淹层出水量计算诺模图

图 16

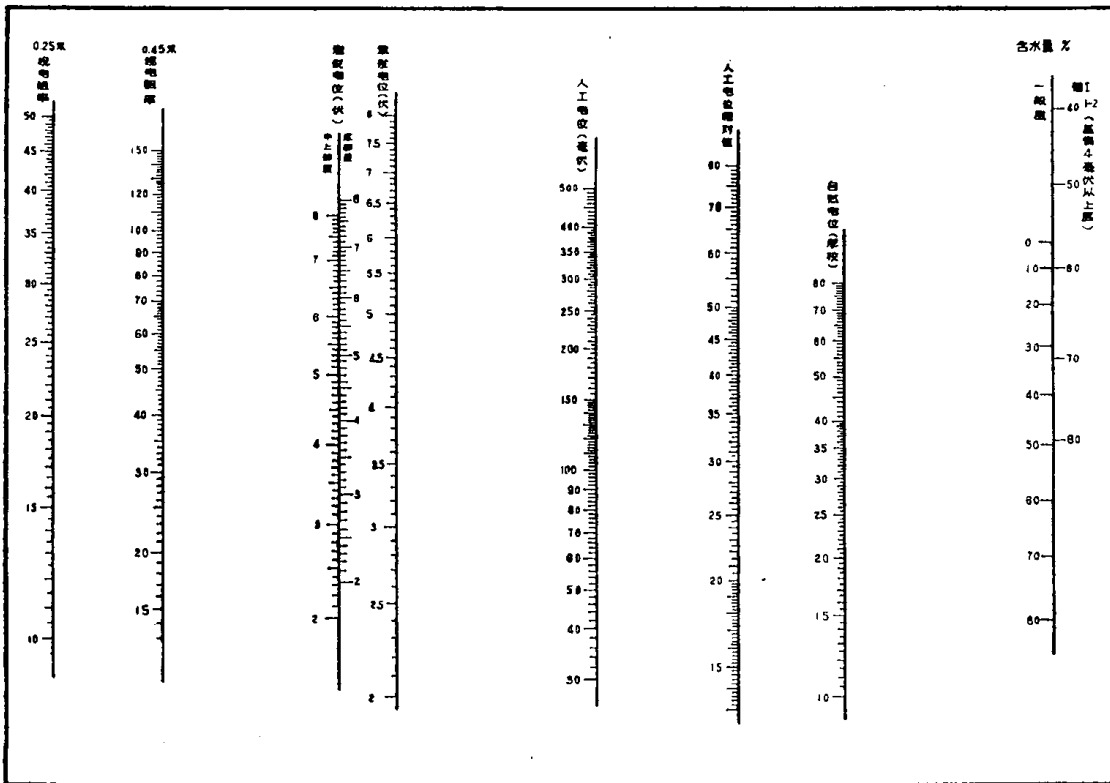


图 16