

305017

矿场地球物理测井技术

# 电测井

胜利油田测井总站编写组编



624

石油化学工业出版社

矿场地球物理测井技术

# 电 测 井

胜利油田测井总站编写组编

石油化学工业出版社

## 内 容 提 要

《矿场地球物理测井技术》(电测井)一书, 主要介绍多线型电测仪的原理、结构, 仪器的校验调节, 野外操作, 故障排除及维修保养等。

主要读者对象为矿场地球物理测井工人, 也可供有关科研单位及院校师生参考。

### 矿场地球物理测井技术

#### 电 测 井

胜利油田测井总站编写组编

石油化学工业出版社 出版

(北京和平里七区十六号楼)

石油化学工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  印张  $7 \frac{1}{2}$  插页 1

字数 173 千字 印数 1—6,560

1976年6月第1版 1976年6月第1次印刷

书号15063·油41 定价 0.58 元

## 前 言

矿场地球物理测井是解决油、气田勘探和开发工作中一系列地质、工程问题的重要手段。在毛主席革命路线的指引下，我国测井工作有了飞跃地发展。一九五八年自行设计、制造了多线型全自动电测井仪，它是矿场地球物理测井中的基本记录仪器。在伟大领袖毛主席号召“工业学大庆”以来，矿场地球物理测井广大职工贯彻毛主席关于**独立自主、自力更生**的方针，又进一步试制成功多种新型测井仪。这些新型测井仪器与多线型全自动电测仪配合使用，为多快好省地勘探和开发石油及天然气矿产资源，创造了有利条件。

随着矿场地球物理测井任务的不断增长，需要培养更多能熟练地操作和掌握这些仪器的技术工人和技术人员。为此，本书侧重阐述多线型电测井仪器结构、原理、操作方法、故障排除以及维修保养等。

本书初稿经过大港油田有关电测工人和技术人员的审查，对书稿提出了宝贵意见；修改稿又经石油化学工业部石油勘探开发规划研究院勘探室审阅修改。

由于编写时间和水平所限，书中仍会有缺点和错误，敬希读者批评指正。

编写组

1974年9月

# 目 录

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>第一章 电阻率和自然电位</b>       |  |
| <b>测井方法的原理</b>            |  |
| 第一节 电阻率测井.....1           |  |
| 一、测量岩样电阻率.....1           |  |
| 二、测量地层电阻率.....2           |  |
| 第二节 自然电位测井.....5          |  |
| 一、自然电位的产生.....6           |  |
| 二、实际测量的自然电位.....8         |  |
| <b>第二章 多线电测仪</b>          |  |
| 第一节 工作原理.....9            |  |
| 第二节 测量线路.....14           |  |
| 一、电阻率曲线道(又叫KC线路).....15   |  |
| 二、测量的校验线路.....18          |  |
| 三、自然电位道测量线路.....25        |  |
| 四、刻度极化补偿器.....26          |  |
| 第三节 检流计的结构及调整.....26      |  |
| 一、结构.....26               |  |
| 二、磁场.....26               |  |
| 三、线路.....26               |  |
| 四、参数测定.....28             |  |
| 五、线路调节.....32             |  |
| 六、调节检流计的实际操作.....34       |  |
| 第四节 下井电流供电系统.....36       |  |
| 一、整流器及干电池组.....36         |  |
| 二、电流控制面板.....37           |  |
| 三、机械换向器.....38            |  |
| 第五节 光学系统.....40           |  |
| 第六节 照相示波仪深度传动系统.....44    |  |
| 第七节 照相示波仪的调整.....47       |  |
| 一、磁场系统的调整.....47          |  |
| 二、安装或更换检流计.....47         |  |
| 三、检流计光源的调整.....48         |  |
| 四、横线灯光的调整.....48          |  |
| 五、45°反射镜的调整.....48        |  |
| 六、直线灯光的调整.....49          |  |
| 七、照相纸移动指示器的调整.....49      |  |
| 八、内刻度尺的调整.....49          |  |
| 九、外刻度尺的调整.....49          |  |
| 十、圆柱体透镜的调整.....49         |  |
| 十一、卷纸机构的调整.....49         |  |
| 第八节 多线电测仪的辅助部分.....50     |  |
| 一、综合接线板.....50            |  |
| 二、杂项控制板.....51            |  |
| 三、总电源变压器.....52           |  |
| 四、井口装置.....53             |  |
| 第九节 多线电测仪的操作.....55       |  |
| 一、电源网路的操作.....55          |  |
| 二、供电电流的操作.....55          |  |
| 三、测量直流电流和校验线路电阻的操作.....55 |  |
| 四、测量交流电流的操作.....56        |  |
| 五、多条曲线并测的操作.....56        |  |
| 第十节 多线电测仪的维修.....59       |  |
| 一、一般维护保养.....59           |  |
| 二、一般故障的检修.....59          |  |
| 第十一节 多线电测仪技术特性.....61     |  |
| 一、照相示波仪特性.....61          |  |
| 二、测量控制板特性.....62          |  |
| <b>第三章 下井仪器</b>           |  |
| 第一节 井斜仪.....63            |  |
| 一、JX641型井斜仪原理与结构.....63   |  |
| 二、下井仪器.....63             |  |
| 三、换档装置.....65             |  |
| 四、测量线路.....68             |  |
| 五、JX641型井斜仪的操作.....69     |  |
| 六、JX641型井斜仪的校验.....69     |  |
| 七、JX641型井斜仪的技术指标.....70   |  |
| 第二节 井径仪.....70            |  |
| 一、电阻式井径仪的结构原理.....71      |  |
| 二、井径仪的校验.....72           |  |
| 三、井径仪的测量.....73           |  |
| 四、井径仪的开腿装置.....73         |  |
| 五、JJ701型井径仪的技术指标.....74   |  |
| 六、微井径仪.....74             |  |
| 第三节 井温仪.....75            |  |
| 一、电阻井温仪的原理.....75         |  |
| 二、井温仪的热惯性.....76          |  |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 三、JW701型井温仪的构造                      | 77 |
| 四、井温仪的校验                            | 78 |
| 五、井温测量                              | 78 |
| 六、JW701型井温仪的技术指标                    | 79 |
| <b>第四节 微电极</b>                      | 79 |
| 一、微电极测井原理                           | 79 |
| 二、微电极的校验                            | 80 |
| 三、井下测量                              | 80 |
| 四、微电极的技术特性                          | 82 |
| <b>第五节 流体电阻率测定仪</b>                 | 82 |
| 一、地面泥浆电阻率测定仪                        | 82 |
| 二、井内流体电阻率测定仪                        | 84 |
| <b>第六节 自动换电极装置</b>                  | 85 |
| 一、自动换电极装置的构造                        | 85 |
| 二、自动换电极的工作原理                        | 85 |
| 三、自动换电极的检修                          | 86 |
| <b>第七节 综合下井仪</b>                    | 86 |
| 一、综合下井仪的结构原理                        | 86 |
| 二、综合下井仪的检修                          | 87 |
| <b>第四章 测井电缆自动做深度记号与电<br/>缆故障的检修</b> |    |
| <b>第一节 电缆自动做深度记号</b>                | 89 |
| 一、自动做深度记号的原理                        | 89 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 二、自动做记号的井上装置                   | 89 |
| 三、深度计算                         | 91 |
| <b>第二节 电缆故障的检修</b>             | 92 |
| 一、检查电缆断芯                       | 92 |
| 二、检查电缆绝缘                       | 94 |
| 三、电缆断芯和绝缘破坏的修复                 | 95 |
| 四、WcL <sub>4</sub> 测井六芯电缆的技术特性 | 97 |

### 第五章 测井的干扰

|                      |     |
|----------------------|-----|
| <b>第一节 漏电的干扰</b>     | 98  |
| <b>第二节 感应干扰</b>      | 101 |
| <b>第三节 绞车的磁化干扰</b>   | 102 |
| <b>第四节 工业迷散电流的干扰</b> | 102 |
| <b>第五节 N电极接地的干扰</b>  | 103 |

### 第六章 野外测井工作方法与原图整理

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>第一节 野外测井工作方法</b>     | 104 |
| 一、新探区测井工作的进行            | 104 |
| 二、测井前的准备工作              | 104 |
| 三、测井过程中的故障和解除方法         | 105 |
| <b>第二节 测井原图的整理与验收标准</b> | 108 |
| 一、测井原图的整理               | 108 |
| 二、测井原图的验收标准             | 111 |

# 第一章 电阻率和自然电位测井方法的原理

## 第一节 电阻率测井

普通电阻率测井，是把电极系放入井内，测量井下一定范围内地层的电阻率，用自动记录测井仪连续记录地层电阻率随井深的变化，所记录的曲线称为电阻率曲线，用以研究钻井所穿过的地质剖面 and 划分油、气、水层。

### 一、测量岩样电阻率

假定岩样是由均匀物质构成的圆柱体，长度为  $l$ ，截面积为  $A$ ，则电阻  $R$  可由下式求出：

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{1-1}$$

式中  $\rho$ ——岩样电阻率。

按照欧姆定律，给岩样通过电流  $I$ ，用仪器测量出岩样  $l$  段电位降  $\Delta U$ ，即

$$\Delta U = I \cdot R \tag{1-2}$$

上式又可写为

$$\Delta U = I \cdot \rho \frac{l}{A} \tag{1-3}$$

则

$$\rho = \frac{A}{l} \cdot \frac{\Delta U}{I} \tag{1-4}$$

岩样的长度  $l$  和截面积  $A$ ，可用量具测量，则  $\rho$  可按 (1-4) 式算出。

如图 1-1，取一块岩样，将它切成圆柱状，其截面积为  $A$ ，在岩样两端放置两个铜制金属板电极  $A$  和  $B$ ；在岩样中间安置两个金属电极  $M$  和  $N$ ，它与测量电位差的仪器  $G$  相联。打开开关  $K$ ，调节电位器  $R_2$ ，使通过岩样的电流强度为  $I$ ，测出  $M$ 、 $N$  两端的电位差为  $\Delta U_{MN}$ ，按公式 (1-4) 得

$$\rho = \frac{A}{l} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \tag{1-5}$$

式中  $K = \frac{A}{l}$ ——电极常数。

测量时可用以下单位表示，即  $\Delta U$  用毫伏 (mV)， $I$  用毫安 (mA)， $A$  用平方米 ( $m^2$ )， $l$  用米，则岩样电阻率的单位是欧姆-米 ( $\Omega \cdot m$ )， $K$  的单位是米 (m)。

在测井中，泥浆电阻率  $\rho_c$ ，也是用这

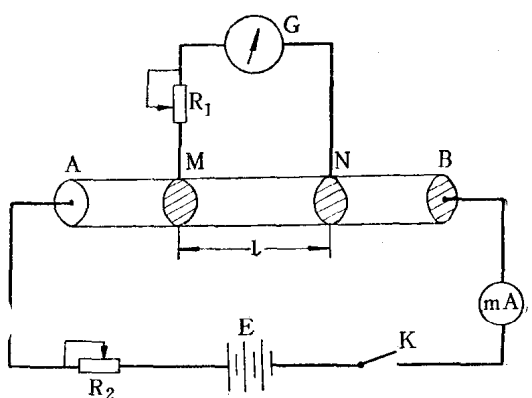


图 1-1 岩样电阻率测量原理线路

$G$ —检流计； $R_1$ —测量线路调节电阻； $M$ 、 $N$ —测量电极； $E$ —供电电源； $mA$ —毫安表； $K$ —电源开关； $R_2$ —调节电阻； $A$ 、 $B$ —供电电极； $l$ — $M$ 、 $N$ 电极间的距离

一原理测出的。不过泥浆罐的常数K是用实验方法确定的。

## 二、测量地层电阻率

假设井内介质是均匀、无限厚的地层，且无泥浆影响，根据图1-2中的测量线路，就可测出地层电阻率。

由点状供电电极A流出的电流I，向四面八方均匀辐射，若以A为球心，在球面上的电位相等，称为等位面（图1-3）。

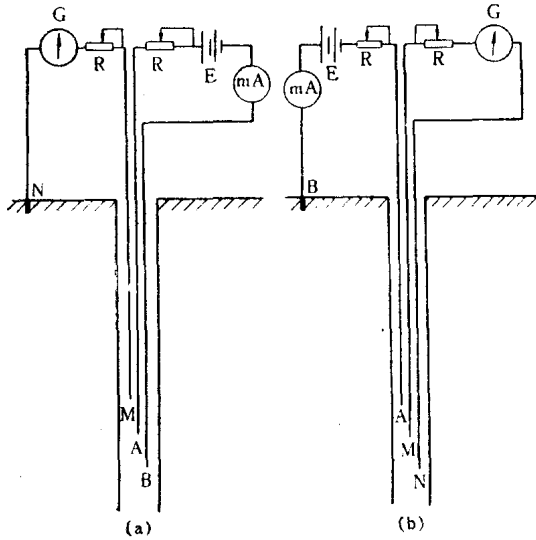


图 1-2 测定岩层电阻率的原理线路

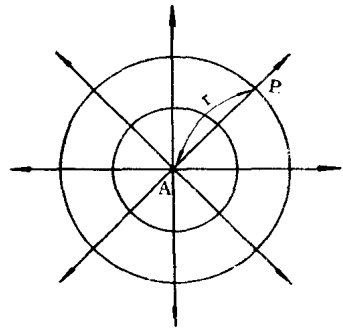


图 1-3 均匀介质中点电极的电场分布

(a) 一双供电电极系；(b) 一单供电电极系；A、B—供电电极；M、N—测量电极；G—测量仪器；mA—测量电流仪表；E—供电电源；R—调节电阻

在空间任取一点P，到A点的距离为 $r$ ，求P点所在等位面的电位 $V_p$ 。在P点以外，我们再可以分出无限多个等位面，每个等位面的半径是 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ …… $r_n$ ，每个等位面的电位是 $V_{r_1}$ 、 $V_{r_2}$ 、 $V_{r_3}$ …… $V_{r_n}$ ，每个等位面的表面积为 $4\pi r^2$ 、 $4\pi r_1^2$ 、 $4\pi r_2^2$ 、 $4\pi r_3^2$ …… $4\pi r_n^2$ 。在点电源电场分布范围内， $n$ 可为任意多个数，使相邻两个等位面非常接近，即 $4\pi r^2 \gg 4\pi r_1^2$ 、 $4\pi r_1^2 \gg 4\pi r_2^2$ ，依此类推。应用欧姆定律得到

$$\Delta V = I \cdot R$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

式中  $l$ ——相邻两个球面之间的距离（如 $l = r_1 - r$ ）；

$A$ ——流过电流 $I$ 的相邻两个球面的平均表面积（因为 $4\pi r^2 \gg 4\pi r_1^2$ ）。

$$R = \frac{\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1-6)$$

$V_p$ 、 $V_{r_1}$ 两个等位面之间的电位差，有

$$\Delta V = V_p - V_{r_1} = I_p = \frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1-7)$$

如此可以写到最后两个球面之间电位差。把这些公式的两端分别加起来



$$(V_p - V_{r_1}) + (V_{r_1} - V_{r_2}) + \dots + (V_{r_{n-1}} - V_{r_n}) = V_p - V_{r_n}$$

$$\frac{I\rho}{4\pi} \left[ \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) + \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \dots + \left( \frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n} \right) \right] = \frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right)$$

即 
$$V_p - V_{r_n} = \frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right) \quad (1-8)$$

$n$  可为无穷大, 即半径  $r$  也为无穷大, 这时  $\frac{1}{r_n}$  趋近于 0。则上式可写为

$$V_p - V_{r_n} = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1-9)$$

当  $r_n$  为无穷大时, 即离 A 点电源无限远, 那里的电位应为 0, 即  $V_{r_n} = 0$ , 则 P 点的电位

$$V_p = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1-10)$$

把公式 (1-10) 应用到实际测量电极系 AMN 中去, 则可写成

$$V_M = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{AM} \quad (1-11)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{AN} \quad (1-12)$$

式中 AM 和 AN 分别表示测量电极 M、N 到点电源 A 的距离。

$$\text{电位差 } \Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right)$$

$$= \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{\overline{AN} - \overline{AM}}{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}$$

$$= \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{\overline{MN}}{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}$$

可求出地层电阻率  $\rho$

$$\rho = 4\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1-13)$$

式中 K 称为电极系数, 它等于:

$$K = 4\pi \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \quad (1-14)$$

将 (1-13) 式和 (1-5) 式加以比较, 可以看出它们不同之处在于电极系数 K 的区别。

实验证明, 用同一个电极系, 采用单电极供电和双电极供电, 其测量结果完全一样, 称为互换电极系。因此在测井过程中, 采用任何一种电极系排列都可以。

根据电位互换原理也可得到证明。

A、B 发出大小相等、方向相反的电流, 设 A 电极产生电位为正, B 电极产生电位为负。

采用双电极供电时, 电极 A 在 M 点产生的电位  $V_M^A$

$$V_M^A = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{AM} \quad (1-15)$$

而电极B在M点产生的电位 $V_M^B$

$$V_M^B = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{BM} \quad (1-16)$$

按照电位叠加原理, 电极A和B在M点共同产生的电位

$$\begin{aligned} V_M &= V_M^A + (-V_M^B) = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{AM} - \frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{BM} \\ &= \frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \end{aligned} \quad (1-17)$$

另一个测量电极N放在无限远的地方, 电位 $V_N = 0$ 。

$$\begin{aligned} \Delta V_{MN} &= V_M - V_N = V_M = \frac{I\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \\ &= \frac{I\rho}{4\pi} \frac{BM - AM}{AM \cdot BM} = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{AB}{AM \cdot BM} \end{aligned} \quad (1-18)$$

式中

$$K = \frac{AM \cdot BM}{AB} \quad \text{——电极系数。}$$

前面已证明, 单电极供电的电位差为

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{MN}{AM \cdot AN} \quad (1-19)$$

如图1-2所示, 对电极尺寸相同的两个互换电极系来说, 上面两个公式表示的电位差数值是相等的, 因此

$$V_{MN}^{\#} = V_{MN}^{\#} \quad (1-20)$$

按照成对电极和不成对电极的相对位置, 还可把电极系进行分类, 如图1-4。

如图1-4中的(a), 成对电极比较接近。成对电极间的距离小于不成对电极之间的距离叫梯度电极系。

如图1-4中的(b), 成对电极分开比较远。成对电极间的距离大于不成对电极到最近一个成对电极间的距离叫电位电极系。

梯度电极系的记录点, 是成对电极 $\overline{MN}$  (或 $\overline{AB}$ ) 的中点O。

电位电极系的记录点, 是不成对电极M (或A) 到成对电极最近一个电极距A (或M) 的距离, 用符号 $\overline{AM}$ 表示。

根据梯度电极系测得的视电阻率曲线形状, 电极系又可分为底部梯度电极系 (或叫正装电极系) 和顶部梯度电极系 (或叫倒装梯度电极系), 如图1-5。

用底部梯度电极系测出的电阻率曲线, 对划分高电阻地层的底界面清楚; 而用顶部梯度电极系测出的电阻曲线, 对划分高电阻地层的顶界清楚, 见图1-6。

上述假定, 整个空间介质都是均匀的, 但实际测井遇到的地层都是由许多有限厚地层组成的, 而且电极系所在的井内泥浆电阻率与岩层电阻率不一样, 这时, 电场的电位也将与均匀介质中不一样。因此, 利用公式(1-5)不能由测量的结果直接得出岩层真电阻率, 曲线反映出的则是视电阻率 $\rho_k$ 数值的大小。

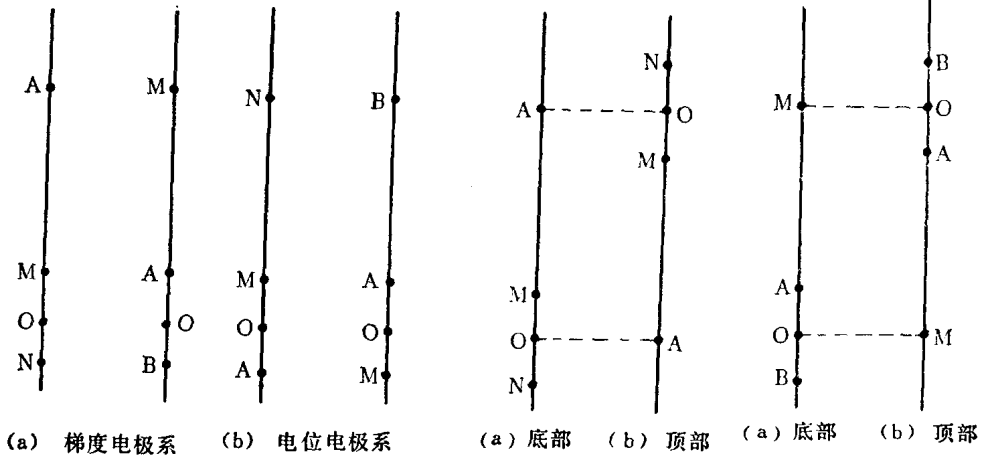


图 1-4 电极系分类

图 1-5 电极系的另一种分类

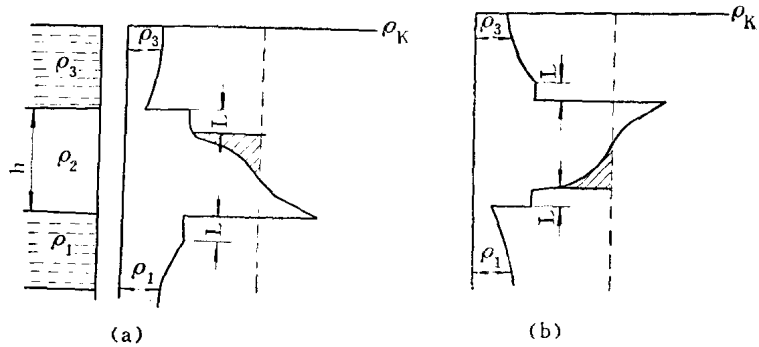


图 1-6 理想梯度电极系电阻率曲线形状

$\rho_2$ —高电阻地层电阻率； $\rho_1$ 、 $\rho_3$ —低电阻围岩电阻率； $h$ —高电阻地层厚度； $\rho_K$ —视电阻率； $L$ —电极距  
(a) —底部梯度电极系；(b) —顶部梯度电极系

$$\rho_K = K \frac{\Delta V}{I} \tag{1-21}$$

因此，采用一定尺寸和类型的电极系，所测得的某一种不均匀介质的视电阻率，是一种假想均匀各向同性介质的电阻率。其视电阻率的大小与电极系附近地层的电阻率及其厚度、倾斜、井径、泥浆电阻率以及浸入带电阻率等有关。

介质愈不均匀，测得的视电阻率与岩层真电阻率的差别愈大；只有在均匀介质中，视电阻率才与真电阻率相同。

## 第二节 自然电位测井

在测井生产过程中，可以发现这样的现象：当供电电极不通电流时，仍可测量到电位差。这个电位差称为自然电位。常用的自然电位测井法，是由两个铅制电极组成，一个电极放在地面，叫地面电极N；一个电极随电缆下入井内，叫井下电极M。它通过电缆和导线与地面测井仪连接起来，就可以测出这两个电极M、N间的电位差，见图1-7。

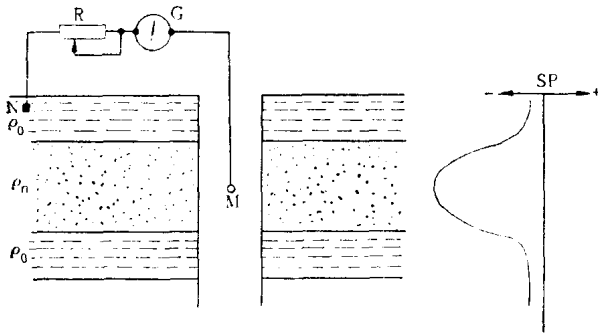


图 1-7 测量自然电位原理线路

G—检流计；R—测量线路调节电阻；N—地面测量电极；M—井下测量电极； $\rho_0$ —渗透性砂岩电阻率； $\rho_n$ —围岩（泥岩）电阻率；SP—自然电位曲线

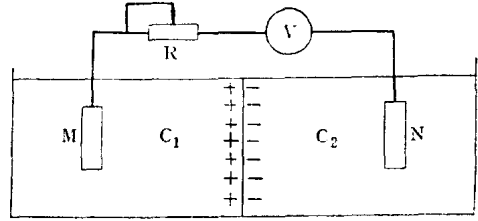


图 1-8 两种不同溶液接触面上的扩散电位

测井时，M电极随着电缆在井下移动，通过全自动测井仪可以连续将这个电位差记录成曲线，这条曲线就叫做自然电位曲线。目前我们又简称为SP曲线。

### 一、自然电位的产生

根据电化学现象，用一个玻璃缸，中间用一个渗透性的隔膜分隔开，分别装上两种浓度不相同的NaCl溶液  $C_1$  和  $C_2$  ( $C_1 > C_2$ ) 中，可用电位差计 (V) 测得电位差。这说明两种不同浓度的NaCl溶液接触时，产生了电动势，如图1-8。

#### 1. 扩散电位

两种不同浓度的溶液直接接触时，在渗透压的作用下，高浓度的离子向低浓度溶液中扩散。由于正负离子的迁移率不同（即  $\text{Cl}^-$  离子的迁移速度大于  $\text{Na}^+$  离子的迁移速度），浓度小的溶液  $C_2$  就会出现较多的负离子，浓度大的溶液  $C_1$  就会出现较多正离子，因而产生了电动势，形成电场。在这个电场作用下， $\text{Cl}^-$  离子受到正电荷的吸引和负电荷的排斥，其迁移速度减慢； $\text{Na}^+$  离子则受到正电荷的排斥和负电荷的吸引，其迁移速度加快，电荷富集的速度减慢。当电动势增加到  $\text{Cl}^-$  离子和  $\text{Na}^+$  离子迁移速度相同时，使扩散达到平衡，电动势保持一定数值，这种电动势叫扩散电位，用  $E_a$  表示，则

$$E_a = \frac{RT}{nF} \cdot \frac{U - V}{U + V} \ln \frac{C_1}{C_2}$$

$$= 2.3 \frac{RT}{nF} \cdot \frac{U - V}{U + V} \lg \frac{C_1}{C_2} \quad (1-22)$$

式中 R——气体常数 (8.373焦耳/度)；

n——离子价数；

F——法拉第常数；

U——正离子的迁移率；

V——负离子的迁移率；

$C_1$ ——高浓度溶液的浓度；

$C_2$ ——低浓度溶液的浓度。

井内自然电位的产生，与上述情况一样，是两种不同浓度的溶液相接触的产物。钻井过程中泥浆向地层渗透，经过砂岩过滤的滤液和地层水相接触。假如泥浆滤液的浓度是

$C_a$ ，电阻率是 $\rho_a$ ，地层水的浓度是 $C_B$ ，电阻率是 $\rho_B$ 。一般地 $C_B > C_a$ ， $\rho_B < \rho_a$ 。根据理论分析和实验结果，纯砂岩产生的扩散电动势为

$$E_{\phi} = K_1 \lg \frac{C_B}{C_a} \quad (1-23)$$

式中  $K_1$ ——纯水层的扩散电位系数（其数值与溶液的成分和温度有关）。

因NaCl溶液的电阻率与其浓度成反比，上式可变为

$$E_{\phi} = K_1 \lg \frac{\rho_a}{\rho_B} \quad (1-24)$$

与纯砂岩相邻的泥岩井壁上产生的扩散电动势，是泥岩地层水与井壁泥浆滤液的产物。由于泥岩的孔隙度小，地层水都被束缚在泥岩颗粒的表面，而泥质颗粒对 $Cl^-$ 离子有吸附作用，因而 $Cl^-$ 不能自由移动，只有 $Na^+$ 离子可以在地层中移动。因此，在泥岩井壁上产生 $Na^+$ 离子扩散，这时形成的电动势称为扩散吸附电动势。泥岩一方为负，井内泥浆一方为正。根据实验结果和理论分析，泥岩井壁上产生的扩散吸附电位为

$$E_{\pi} = K_2 \lg \frac{C_B}{C_a} \quad (1-25)$$

由于 $E_{\phi}$ 和 $E_{\pi}$ 的电动势不同，在砂岩和泥岩的接触面上也有自然电流产生，见图1-9。

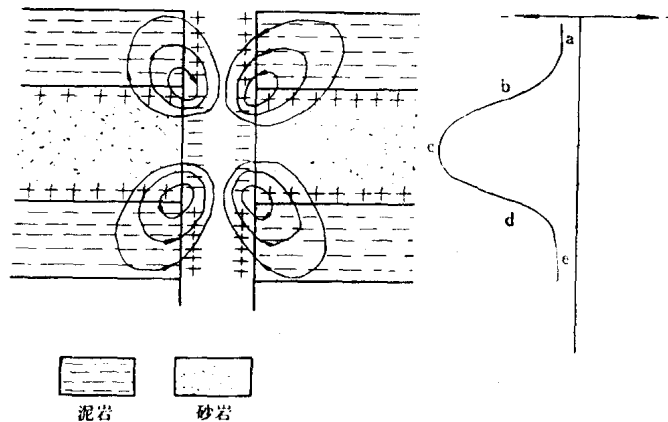


图 1-9 自然电位曲线的形状和井内自然电流的分析（泥浆矿化度<地层水矿化度）

大段泥岩的自然电位曲线基本上是一条直线。过了a点，电流强度逐渐增加，自然电位曲线缓慢偏向负的方向。到达泥岩与砂岩接触面b点，自然电位达到半幅度值。在砂岩中部自然电位达到最大值。过了c点，自然电位曲线逐渐降低。到达e点之后，自然电位又恢复到泥岩自然电位数值。

## 2. 过滤电位

除上述原因外，当溶液在一定压差的作用下，通过毛细管时，在管的两端也会产生电位差。在岩石中，颗粒与颗粒之间有很多孔隙，这些孔隙彼此连通形成孔道，也可视为毛细管，当泥浆柱压力高于地层压力时，泥浆向地层渗透。当通过泥饼过滤后，也会产生自然电位，这种电位叫过滤电位（ $E_f$ ），可用下式表示：

$$E_s = K_s \frac{\rho}{\mu} \Delta P \quad (1-26)$$

式中  $\Delta P$ ——压力差；  
 $\rho$ ——过滤溶液的电阻率；  
 $\mu$ ——过滤溶液的粘度；  
 $K_s$ ——过滤电位系数（与过滤溶液的成份和浓度有关）。

对渗透性岩石来说，一般可以认为  $K_s = 0.77$  毫伏，所以上式可写成

$$E_s = 0.77 \frac{\rho}{\mu} \Delta P \quad (1-27)$$

从上式可以看出，当地层压力与泥浆柱压力相差悬殊时，或泥浆（或地层水）电阻率很高时，过滤电位才比较明显。

由于负离子的吸附性较高，因此  $E_s$  是负的，即输入端的电位低于输出端的电位。

### 3. 氧化还原电位

氧化还原电位，主要产生于电子导电性的含有硫化矿物和煤层的剖面上，而在油田的地层剖面上很少见到。

元素氧化时，失去电子而带正电；还原时得到电子而带负电，这二者之差就叫氧化还原电位。如无烟煤层氧化时失去电子而带正电荷，而上下围岩氧化程度较低，因此，对应煤层显示为正异常。

## 二、实际测量的自然电位

实际测量的自然电位是一条连续曲线，如图1-10。自然电位曲线应用较广，用它可以划分砂泥岩剖面的渗透性地层，求地层水电阻及孔隙度等。

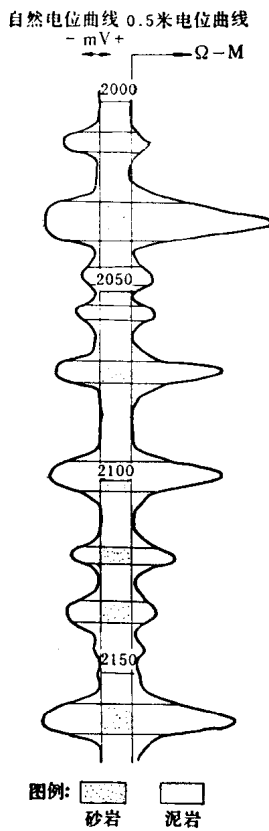


图 1-10 实际测量的自然电位曲线

## 第二章 多线电测仪

多线电测仪是我国1958年试制的，型号定为JD-581型。

为了适应野外工作，多线电测仪分别装在三台改装后的解放牌汽车上。一部汽车装仪器，叫仪器车；另一部装载下井电缆绞车等装置，叫做测井绞车，见图2-1。

多线电测仪仪器由下列几个面板组成，如图2-2。

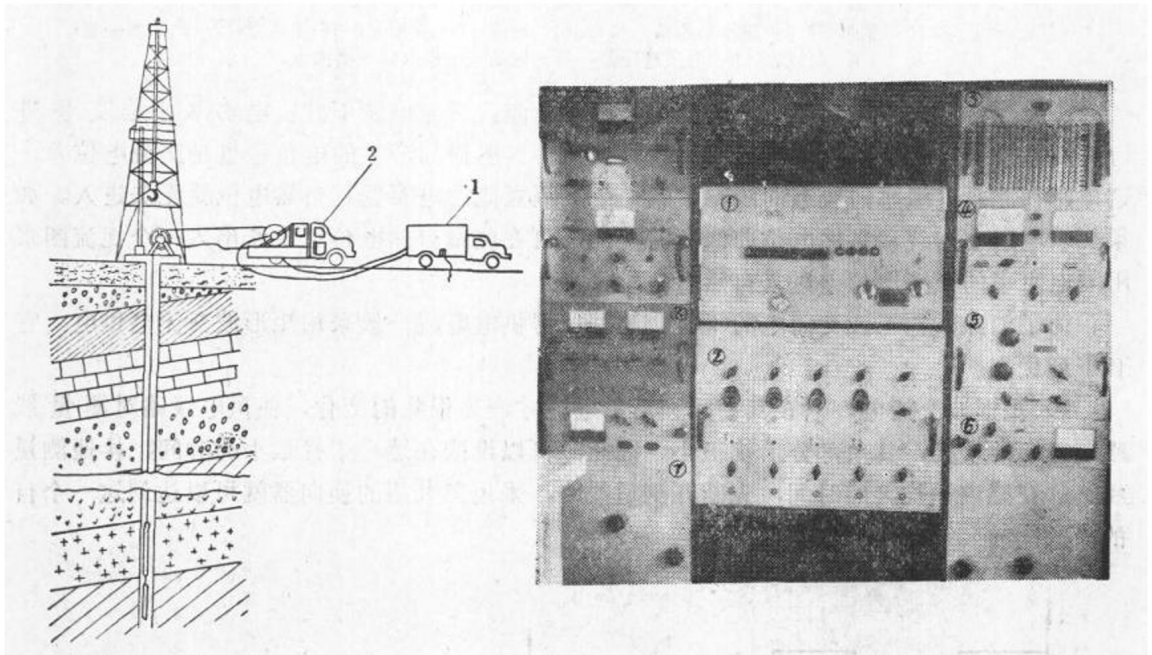


图 2-1 多线电测仪测井车

1—仪器车；2—测井绞车

图 2-2 多线电测仪总面板

1—自动照相记录仪面板；2—测量控制面板；3—综合接线面板；4—电流控制面板；5—换向器面板；6—整流、充电面板；7—总电源控制面板；8—放射性面板；9—杂项控制面板

多线电测仪绞车有两种型号：

1. DC-3500型电测绞车，其滚筒能缠绕电缆3500米。
2. DC-2200型电测绞车，其滚筒能缠绕电缆2200米。

多线电测仪一次下井可以测量四条电阻率曲线和一条自然电位曲线。配合各种下井仪器，还可以进行各种参数的测量。

### 第一节 工作原理

如果电极系尺寸固定，K值为常数，通过稳定的电流强度I下井，即可测出地层电阻

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

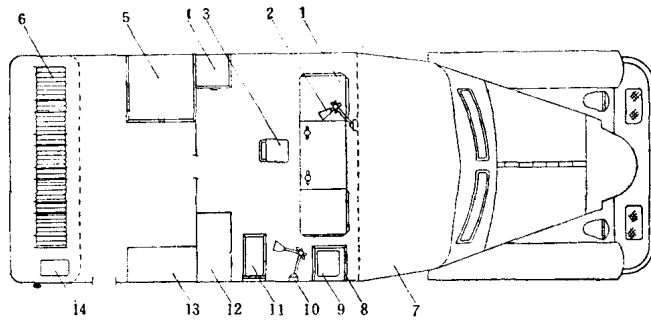


图 2-3 仪器车内部辅助部分布置

1—仪器面板；2、10—照明灯；3—操作员座椅；4、12、13—座椅；5—洗相室；6—绕线盘；7—汽车驾驶室；8—电池箱；9—电子稳压器；11—活动写字板；14—接线板

实际测井过程中，采用交流电流作为供电电流。交流电流下井，电解作用是交替进行，因此没有极化现象。而且，交流电场在M、N电极间产生的电位差也是交流电位差。这样，在测量电阻率曲线道的线路串联一个阻隔直流的电容器，自然电位就无法进入。如果要求电阻率曲线和自然电位曲线同时并测，可在测量自然电位道线路串入一个扼流圈来阻隔电阻率的交流电位差进入自然电位道。

为了消除50周工业交流电的干扰，测井仪器供电电流一般采用矩形波交流电供电，它有下列优点：

1. 矩形波交流电，只在其前沿和后沿电流才产生很陡的变化，使供电线路对测量线路有很大的干扰，其余部分干扰很小。因此，可以设法在感应干扰最小的时间，接通测量线路；在感应干扰大的时间，先断开测量线路，采用测井用的换向器就可以达到这一个目的，如图2-4。

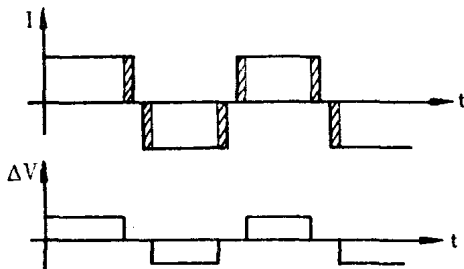


图 2-4 换向器供电道与测量道通断关系

I—供电道电流强度； $\Delta V$ —测量道M、N间的电位差；t—换向器旋转时间

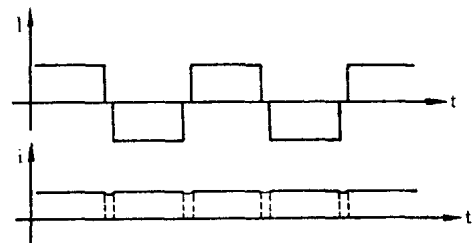


图 2-5 供电道电流 I 与测量道电流 i 的关系

2. 从图2-4可以看出，采用矩形波作为供电电流，M、N电极之间的电位差 $\Delta V_{MN}$ ，不需要专门在测量线路加入一个整流装置，只要把测量线路的两片整流环使其接通，方向和供电道两片整流环路恰好相反，就可以达到把交流 $\Delta V_{MN}$ 变成直流电位差的目的，如图2-5。

从图 2-5 可看出， $i$  是断续直流，检查计记录也是断续的。实际线路中，因检流计自



然频率没有这样大，光点有抖动现象。为了消除这种影响，往往在测量线路中并联一个电容 $C_1$ 进行充、放电，平滑断开部位。电容 $C_1$ 还同时有滤掉进入测量线路交流作用。电容 $C_1$ 的大小要合适，太小达不到目的，太大造成测量道阻尼过高。电阻率与自然电位并测的电测井仪器原理线路见图2-6。

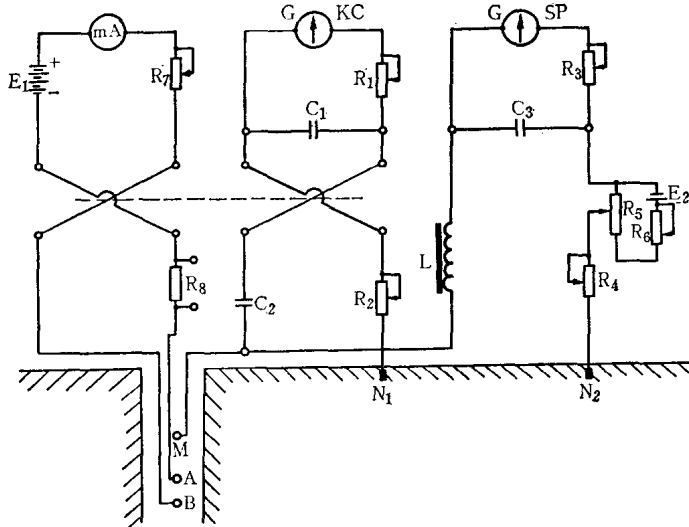


图 2-6 电测井仪器原理线路

G—检流计； mA—供电线路电流表；  $R_1$ —电阻率道测量线路调节电阻；  $R_2$ —换向器以下线路调节电阻；  $R_3$ —自然电位道测量线路调节电阻；  $R_4$ —自然电位道线路调节电阻；  $R_5$ —刻度补偿器标准电阻；  $R_6$ —刻度补偿器电流调节电阻；  $R_7$ —供电线路调节电阻；  $R_8$ —电阻率道校验下井电流 $I$ 和校验线路电阻用的标准电阻；  $C_1$ —电阻率道滤波电容器；  $C_2$ —电阻率道隔直流电容器；  $C_3$ —自然电位道滤波电容器；  $L$ —扼流圈；  $E_1$ —供电线路电源；  $E_2$ —刻度补偿器电源；  $M$ —井下测量电极；  $N_1$ —电阻率道地面测量电极；  $N_2$ —自然电位道地面测量电极；  $A$ 、 $B$ —供电电极

多线电测仪采用六芯铠装钢丝电缆，用双电极供电，一次可同时记录四条不同电极距的电阻率曲线和一条自然电位曲线。其原理电路如图2-7所示。

从线路中可见，测量自然电位的 $M$ 电极，是和电阻率道第四道共用一个 $M$ 电极。在实际测井过程中，通过多线电测仪的综合接线板，自然电位的 $M$ 电极，可以任意选择四个电阻率道的 $M$ 电极（ $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ ）中一个 $M$ 电极进行并测，但是必须标明用的哪一个 $M$ 电极进行并测的，以便校正自然电位曲线深度。当用自然电位道测量别的曲线时，如果不用刻度补偿器就可以把 $d$ 、 $e$ 两点短路。

电阻率供电线路的标准电阻 $R_{23}$ ，是通过各道测量线路的转换开关“ $I$ 、 $\Delta V$ 、 $R$ ”接入电阻率道的测量线路。

多线电测仪一次同时测量四个不同电极距的电阻率曲线，四个不同电极距，就有四个不同的电极常数 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 。按照测量电阻率公式

$$I = K \frac{m}{n} \quad (2-1)$$

如果四条电阻率曲线横向比例一样（即 $n_1 = n_2 = n_3 = n_4$ ）；电压常数也选择一样（即 $m_1 = m_2 = m_3 = m_4$ ），则应通四个电流下井