油矿地球物理测井

38056



湖北地质学院石油教研室

1972.8.

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

前言 …… 1.

第一部分：测井方法和资料解释 …… 2.

第一章：电阻法测井 …… 2.

§.1. 岩层的电阻率 …… 2.

§.2. 电阻法测井的理论概述 …… 4.

§.3. 视电阻率及其测量原理 …… 9

§.4. 电极系 …… 14

§.5. 视电阻率曲线 …… 17

§.6. 横向测井 …… 31

第二章：微电极系测井及侧向侧井 …… 31

§.1. 微电极系测井 …… 31

§.2. 侧向和微侧向测井 …… 35

第三章：自然电位法测井 …… 40

第四章：井径测量 …… 47

第五章：标准测井 …… 50

第六章：放射性测井 …… 54

第七章：感应测井 …… 62

第八章：声波测井 …… 74

P61/31

38056

408420

§.1. 声波速度测井 …… 74
§.2. 声波幅度测井简介 …… 82

第九章：套管射孔和井壁取心 …… 86
§.1.油井的套管射孔 …… 86
§.2.井壁取心 …… 90
第二部分：测井资料的综合解释和应用 …… 93
第十章：砂-泥质剖面测井资料的综合解释和应用 …… 93
§.1.测井方法的选择 …… 93
§.2.××地区各类岩性的基本电性特征 …… 95
§.3.××地区油水干层的基本电性特征 …… 96

第十一章：碳酸盐剖面测井资料的综合解释和应用 …… 100

第十二章：盐湖相的水化学沉积剖面测井资料的综合解释和应用 …… 104
§.1.测井方法的选择 …… 104
§.2.划分岩层 …… 104
§.3.判断油水层 …… 111

第十三章：测井资料的定量解释 …… 114
§.1.地层水电阻率的确定 …… 115
§.2.地层孔隙度的确定 …… 117
§.3.地层含油饱和度的确定 …… 119

前　言

油矿地球物理测井是用地球物理方法研究油井的地质剖面和技术情况的一门科学。它是以岩层的物理性质和化学成分的差异为基础的。如岩层导电、导声、导热性的差异，岩层渗透率，孔隙度、含油饱和度的差异，岩层的成分，放射性元素的含量的差异等等。我们通过各种测井方法测得了这些差异，再根据测得的这些差异去判断岩层的性质。

地球物理测井是一种间接识别岩层性质的手段。在油井中运用这种手段可以不取芯或少取芯，同时又能获得可靠的地质资料，而且还可以得到比岩芯分析更全面更正确的资料。这对于加速油田勘探速度、降低成本、提高勘探质量有着巨大意义。因此，学好地球物理测井是革命的需要，是为祖国多、快、好、省地寻找油气田的需要。

在修正主义路线统治下的旧大学，资产阶级专了无产阶级的政，学校不向工农兵开门，培养的是资产阶级的接班人。旧大学的测井课，也有不少封、资、修的毒素。唯心论和形而上学的东西多，辩证唯物论的东西少；外国的东西多，中国的东西少；生产上过了时的东西多，现在生产上的先进技术少；"名人""权威"的东西多，我国工人阶级在三大革命运动中的创造发明少。旧测井课要么脱离生产实际，学生做练习是"假题假做"，用的测井曲线是人造的"理想"曲线，学生毕业了，解决生产实际问题的能力差。旧测井课不能适应培养无产阶级革命事业接班人的需要，因此，必须彻底改革。

本讲义在批判旧教材的基础上，注意了用毛泽东思想分析、回答和解决测井各项业务问题；注意了理论和实践相结合；注意了通俗易懂和少而精的原则；注意了教材的先进性。本讲义是为石油地质专业学测井而编，因此，讲义重点放在了资料的解释和应用部分，对仪器的线路和原理只做了简单介绍。

在编写过程中，尽管我们在各方面作了不少努力，并得到油田

测井站工人师付和革命技术人员的大力支持与协助。但由于我们毛泽东思想学得不好，对教育革命理解不深，业务水平有限，再加上受到一些客观条件的限制，一定会存在很多缺点和错误，诚恳地希望工农兵学员和其他读者提出宝贵意见。

最后，让我们遵照毛主席"我们能够学会我们原来不懂的东西"的伟大教导，下定决心，排除万难，学好测井课，掌握这一向地球开战的武器，为在我国找到更多的油气田而努力奋斗。

第一部份　测井方法和资料解释

第一章　电阻法测井

§1. 岩层的电阻率

我们知道，任意一种物质都具有电阻（用R表示），而且它的电阻大小，与横截面积（用S表示）成反比，与其长度（用l表示）成正比。写成等式则为：

$$R = \rho \frac{l}{S} 。$$

比例系数（ρ）称为这种物质的电阻率。

则　$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} 。$$

电阻的单位是欧姆，长度的单位是米，横截面积的单位是平方米。显然，电阻率的单位就是欧姆·米。

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} = 欧姆 \cdot \frac{米^2}{米} = 欧姆·米。$$

对于岩层来说，它的电阻率的物理意义就是横截面积为1平方米，长为1米的某种岩层所具有的电阻。

毛主席教导我们说："任何运动形式，其内部都包含着本身特殊的矛盾。这种特殊的矛盾，就构成一事物区别于它事物的特殊的本质。这就是世界上诸种事物所以有千差万别的内在的原因，或者叫作根据。"

我们接触过各种岩层，每一种岩层都有它特殊的本质，这种特

殊的本质也表现在传导电流的能力上，也就是说，不同的岩层具有不同的电阻率。

各种不同的岩层电阻率的变化很大，由几分之几的欧姆·米到几百万欧姆·米。下表列举了几种主要岩层的电阻率。

岩层名称	电阻率（欧姆·米）	岩层名称	电阻率（欧姆·米）
泥岩	8 ——— 20	砂层	0.3 — 1000
粉砂岩	10 ——— 300	疏松砂岩	0.5 ——→ 40
白云岩	10 ——— 5000	致密砂岩	20 —— 1000
致密灰岩	50 ——— 5000	含油气砂岩	20 —— 2000

从表中可以看出，从岩性上讲灰岩电阻率最高，泥岩电阻率最低，砂岩比泥岩电阻率高，比灰岩电阻率低。从胶结程度上讲，致密的岩层比疏松的岩层电阻率要高。

岩层具有不同的电阻率，反过来，我们掌握了岩层电阻率的规律，测得了电阻率的大小就可以判断岩层，这就是我们电阻法测井的依据。

岩层的电阻率是由各方面的因素决定的。岩层在自然状态下，除去组成岩层的矿物外，还含有充满于岩层孔隙空间的盐水溶液（地层水）。因此，岩层电阻率不仅和组成岩石矿物的电阻率及其在岩石中的百分含量有关，而且主要和单位体积岩层中所含地层水的多少，以及地层水所含盐类的成分和浓度有关。除此以外，还决定于岩层颗粒的形状，大小及岩石的组织结构和温度。

岩层的导电性，按其性质来讲，可分为电子导电和离子导电。金属矿物颗粒具有电子导电性（电流是一些自由的负电粒子流——电子流）。而造岩矿物和水溶液则具有离子导电性（液体中的盐分

子分解成离子参与导电）。

在大多数岩层中，特别是沉积岩类的岩层中，是以离子导电为主。大多数矿物均具有非常高的电阻率。因而，岩层导电的主要原因是由于岩层孔隙中含有地层水的缘故。

地层水溶解的盐类主要是 NaCl（食盐），通常用矿化度的高低来表示含盐量的多少。矿化度越高，分离成的离子数目越多，导电能力越强，电阻率越小。因此，当岩层的孔隙中装的是地层水时，岩层的电阻率取决于地层水矿化度的高低。一个砂岩层，如果含有高矿化度的水，它的电阻率只有几十分之一欧姆·米，如果含的是淡水，那么它的电阻率可达几十甚至几百欧姆·米。

如果矿化度相同，那就决定含地层水的多少，含地层水越多，分离的离子也就越多，导电能力就越强，电阻率越小。而含地层水的多少，又取决于岩层的绝对孔隙率，绝对孔隙率越大，岩层的电阻率越小。

石油、天然气和其它气体都具有非常高的电阻率，因此，含油气层的电阻率就比含水层的电阻率高。显然，油气的含量越高，岩层的电阻率越大。

岩层电阻率与温度也有关系，经过反复实验，温度每增加 1° C，电阻率就约减少 2 — 3%。随着深度增加，地层温度升高，因此，它的电阻率就要降低。这虽不起主要作用，但在解释时也应该考虑到。

§ 2. 电阻法测井理论概述

一、电场强度与电位之间的关系。

电场的两种特性 —— 电场力（电场强度）和电场力所作的功（电位）是有着密切的联系的。

取电场中两个相邻的等位面 V_1 和 V_2（图 1 — 1）。（见次页）设 q。从点 1 移到点 2，经过的位移是 Δl，则电场力所作的

功为：

$$A = q_0 E \Delta l \qquad (1-1)$$

这个功也可以用两点的电位差来表示为：

$$A = q_0 (V_1 - V_2)$$
$$= -q_0 (V_2 - V_1)$$
$$= -q_0 \cdot \Delta V \qquad (1-2)$$

比较（1—1）和（1—2）式，得

$$E \cdot \Delta l = -\Delta V$$

所以 $$E = -\frac{\Delta V}{\Delta l} \qquad (1-3)$$

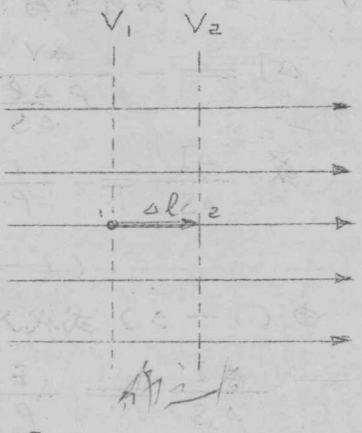


图 1 —— 1

上式说明，电场强度在数值上等于垂直等位面且沿电位减小方向上的单位长度内的电位负增量。

二、电场强度与电流密度之间的关系。

大家知道，流过一段均匀导体的电流强度与导体两端的电位差 $V_1 - V_2$ 成正比，而与其电阻 R 成反比，即：

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \qquad (1-4)$$

我们又知道，固定截面积的均匀物体所做成的导体，它的电阻 R 与其截面积 S 成反比，而与长度成正比，即：

$$R = \rho \frac{l}{S} \qquad (1-5)$$

将（1—5）代入（1—4）得：

$$I = \frac{V_1 - V_2}{\rho \frac{l}{S}} \qquad (1-6)$$

若我们在电阻率为 ρ 的介质中，分出长度为 Δl，截面积为 ΔS 的一小体积，并使 Δl 与电流方向一致，ΔS 与电流方向垂直。这

时，通过此小体积截面的电流强度为 ΔI，而小体积两端的电位降为 $V_1 - V_2 = -\Delta V$（图1—2）。

（1—6）式可写为：

$$\Delta I = -\frac{\Delta V}{\rho \frac{\Delta l}{\Delta S}}$$

或 $$\frac{\Delta I}{\Delta S} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta l} \qquad (1-7)。$$

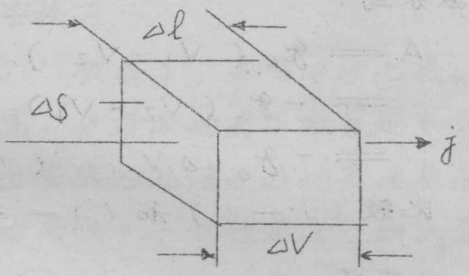


图 1—2

由（1—3）式代入（1—7）得：

$$\frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{E}{\rho}。$$

我们知道单位截面积通过的电流强度叫做电流密度，它以 j 来表示，则

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{E}{\rho} \qquad (1-7)$$

（1—7）式表明，电流密度的大小与电场强度的大小成正比，而其方向与电场强度方向相同。

三、均匀介质的直流电场中任意一点的电位。

设电极A和B通过导线与电源（直流电源）的正负极相连，并将它们置于电阻率为 ρ 的均匀介质中。假设电极B距电极A很远（无限远），则可以认为电极B对电极A附近的电场并无影响，这就好像我们只有一个电极A一样。又假设电极A很小，可以看着点电源，且这个电极向外发出的电流强度为 I（图1—3）。虽然，这时电流线是以A极为中心向四外发射的直线，而等位面是以A为中心的球面。

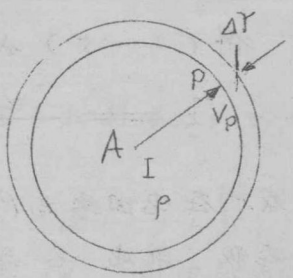


图 1—3

现在来计算距电极A为 r 的某一

点P的电位 V_P。为此，我们在半径 r 上沿径向取一个增量 Δr（参看图1—3）。电流在半径为 r 的等位面和半径为 $r+\Delta r$ 的等位面间造成的电位差为：

$$V_{r+\Delta r} - V_r = -\Delta V = IR = I\rho \frac{\Delta r}{4\pi r^2}$$

或

$$-dV = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{dr}{r^2}$$

$$V_P = -\frac{I\rho}{4\pi} \int \frac{dr}{r^2} = -\frac{I\rho}{4\pi}\left(-\frac{1}{r}\right)$$

$$V_P = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad 。 \qquad (1-8)$$

由此可见，均匀介质的直流电场中的任意一点的电位，与介质电阻率 ρ 及电流强度 I 成正比，而与该点到电源的距离 r 成反比。

倘若电极B并非位于无限远，则P点的电位应为A、B两电源电场电位的代数和，即

$$V_P = V_{AP} + V_{BP} = \frac{I\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{r_{AP}} - \frac{1}{r_{BP}}\right) \qquad (1-9)$$

四、均匀介质电阻率的测定。

电阻率是说明物体导电能力的物理量，所以物体电阻率的大小只能在物体导电中才能表现出来。因此，要测定岩层的电阻率必须把电流送到井下。在实际测井工作中，是把电流通过电缆及A、B电极（称供电电极）送到井下，并借助另外两个电极M、N（称测量电极）来测量A、B电极的电场在M、N两点的电位差（图1—4）。（见次页）因为我们假设介质是均匀介质（即：岩层厚度无限厚，且不考虑井的影响），又由于这个电位差正比于A、B电路中的电流强度 I 和电阻率 ρ，因此，我们可以根据测量M、N之间的电位差及 I 的结果来确定岩层的电阻率。

如图1—4所示（图见次页），测量电极M、N和供电电极A

A　P　B　　V_{PA} =

（它们总称电极系）在井下排列（均匀介质电阻率的测定如下图）在一条直线上，供电电极B放在地面上（无限远），并假设A、B电路中的电流强度为I。由于电极的尺寸很小，可视为点电极，则由公式（1—9）可知，距离电源点A为$\overline{AM}$的M极处的电位为：

$$V_M = \frac{I\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}}\right)$$

同理 $$V_N = \frac{I\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}}\right)$$

但因电极B位于无限远，因此BM和BN都是无穷大，则电极M、N之间的电位差等于：

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N$$

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

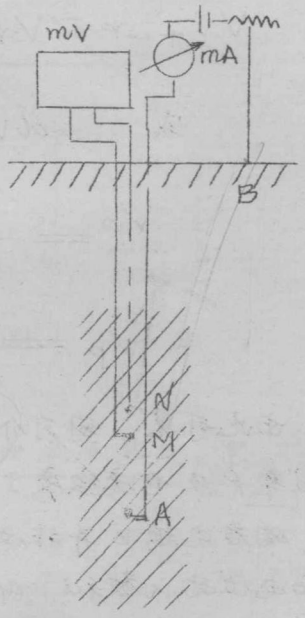


图1—4 均匀介质电阻率的测定

由此，岩层的电阻率ρ为：

$$\rho = 4\pi \frac{\overline{AM}\cdot\overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} \qquad (1—10)$$

或 $$\rho = K\frac{\Delta V}{I} \qquad (1—11)$$

式中K是电极系系数，它是一个仅与电极之间的距离有关的常数。

$$K = 4\pi \frac{\overline{AM}\cdot\overline{AN}}{\overline{MN}} \qquad (1—12)$$

由公式（1—10）得知，只要测得ΔV_{MN}和I值，并根据电极之间的距离算出K值，然后将它们代入这个公式中，就可以得到

需要全本请访问 www.ertongbook.com

岩层的电阻率 ρ。

在图1—4中，如果测量电极M、N作为供电电极A、B，而把供电电极A、B作为测量电极M、N，测得结果完全相同，只是在此情况下，电极系系数应改写为：

$$K = 4\pi \frac{\overline{MA}\cdot\overline{MB}}{\overline{AB}} \quad 。$$

这个原理叫互换原理，我们利用公式（1—9）很容易证明，论证过程就不再叙述了。

在实际测井中，电位差 ΔV 的单位是毫伏，电流强度 I 的单位是毫安，电极之间距离都用米，求得的电阻率单位则是欧姆米。

§3、 视电阻率及其测量原理

一、视电阻率

上节我们所讨论的结论，只是在均匀无限介质中才是正确的，而这种情况在我们的实际测井工作中永远是遇不到的。我们所遇到的情况是：地层厚度有限；各个地层电阻率不同；井内充满泥浆其电阻率又不同于地层；在井的周围又有泥浆侵入带，而侵入带的电阻率又不同于泥浆和地层。在这样复杂的情况下，显然不能用公式（1—9）式来确定岩层的电阻率。但是无论如何我们总可以使用一定的电极系，测出 ΔV 和 I 值来，然后将 ΔV、I 和 K 值（常数）代入公式（1—9）后也可以确定一个“电阻率”值（显然不是岩层的真电阻率）。为与岩石的真电阻率区别起见，我们称之为视电阻率，用 ρ_K 表示之。

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

式中 K 仍为电极系系数，显然，视电阻率的单位仍为欧姆米。

ρ_K 是一个非常复杂的函数，它不但与电极系周围介质的电阻

率（岩层电阻率、围岩电阻率，泥浆电阻率，侵入带电阻率等）及这些介质的分布（岩层厚度，岩层倾角，井径）有关，而且还与电极系的排列有关。现在只能这样讲：岩层厚度越大，井径越小，泥浆与岩层的电阻率差别越小，视电阻率值越接近岩层的真电阻率。反之差别就越大。

将电极系置于井中不同位置时，由于周围岩层电阻率的改变，将测得不同的视电阻率值。这样，电极系沿井身由下到上进行测量时，将得到一条连续变化的视电阻率曲线来（简称 KC 或 ρ_K 曲线）。

如果预先掌握了由岩层变化所引起视电阻率曲线变化的规律，反过来，就可以利用这些规律来解释实际得到的 ρ_K 曲线，达到划分钻井地质剖面，确定岩层及含油气层位置和厚度的目的。

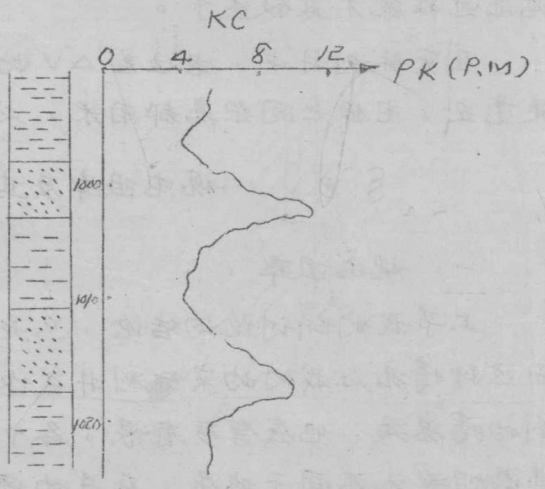


图 1—5　视电阻率曲线

二、视电阻率测井的测量线路。

图 1——6（见次页）为油田上常用的 51 型测井仪的测量线路。

为了测量视电阻率，必须对 A、B 电极供以一定的电流。由于在测视电阻率（简称 KC）时，一般还要同时测量井内地层与泥浆发生电化学过程而产生的自然电位（简称 ΠC，将在第三章详细介绍）。因此为了使视电阻率的电位差不会与自然电位相混淆，需将供电电源的电流由原来的直流通过换向器 Π 变成矩形交流电流。这样，在 M、N 电极上，既有 A、B 电极交流电流引起的与 ρ_K 成正比的矩形波状交流电位差 ΔV_{KC}，又有由地层的自然电位引起的，

近于直流的自然电位差 $\Delta V_{\pi C}$。为了分别记录这两种电位差，就需要将两者区分开来，并分别进入各自的测量线路。在图1—6中，最左边的部分是供电线路，中间部分是KC线路，右边是πC线路。在中间的KC线路部分装有电容C，我们知道，电容只能通过交流电，不能通过直流电，因此，中间KC线路部分只能通过矩形波状交流电位差 ΔV_{KC}，换向器再将矩形交流电位差 ΔV_{KC} 变成直流 ΔV_{KC}，被KC桥流计所记录。右边的πC线路部分装有电感线圈L，我们知道电感线圈只能通过直流电，而不能通过交流电，直流的 $\Delta V_{\pi C}$ 就在右边线路部分被πC桥流计所记录。

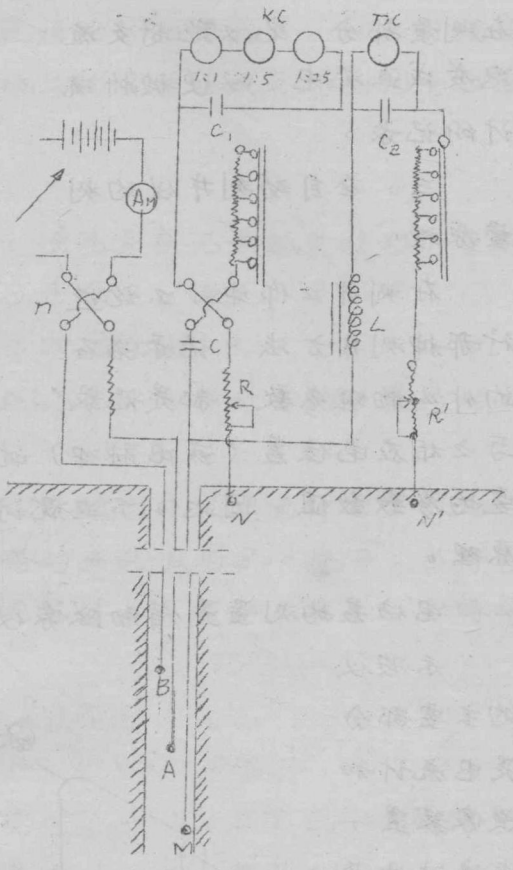


图1—6　51型测井仪测量线路

虽然采取了上述分流装置，总还有一部分交流的 ΔV_{KC} 进入πC线路，以及一部分直流的 $\Delta V_{\pi C}$ 进入KC线路再经过换向器后变成了交流的 $\Delta V_{\pi C}$。为了使这些交流的电位差不影响测量结果，在两通测量线路的桥流计两端分别并联3电容 C_1 和 C_2，使进入线路中的交流干扰短路。

换向器是一对同时变换的双极开关（如图1—7见次页中所示）。当换向器工作时，即为两个双极开关都是对角线接触实相通的状态，

（图中虚线部分）高速交替的过程。在供电线路部分，它能将直流电源的直流电变成交流电；在测量部分，它又能将交流电变成直流电，以便被检流计所记录。

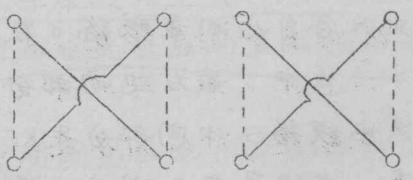


图 1—7 换向器工作原理示意图

三、全自动测井仪的测量原理：

在测井工作中，不论进行哪种测井方法，记录岩石的什么物理参数，都是记录与之相应电位差（或电脉冲）的大小，然后经过换算即可得到所需要的参数数值。因此，下边就讨论全自动测井仪测量电位差的基本原理。

电位差的测量是借助照像仪（测井示波仪）进行的（图 1—8）。

示波仪的主要部分是电流计和照像装置，电流计的两端 M、N 通过电缆与井下测量电极 M、N 相连，当 M、N 两端有电位差输入时，线路里就有电流通过，此

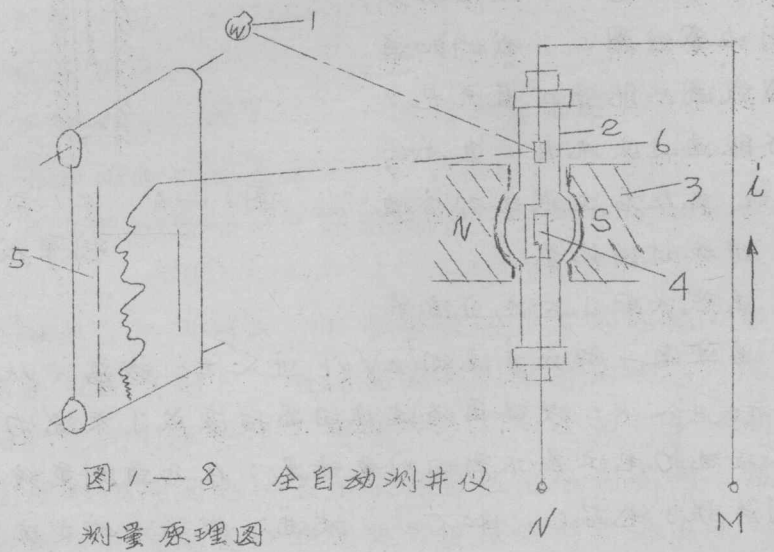


图 1—8 全自动测井仪测量原理图

1、光源；2、电流计；3、磁铁；4、电流计线圈；5、照像感光记录纸；6、反光镜。

个电流流经线圈4时，线圈中将产生磁场，这个磁场与固定磁场3互相作用使电流计线圈发生偏转，小镜6随之也发生偏转，反射的光点在照像记录纸上也相对原始位置移动一个距离 l。M、N线路中的电阻值是一定的，光点在记录纸上的位移 l 就与待测的电位差 ΔV 成正比，其关系如下：

$$\Delta V = K_i \cdot l \cdot R$$

式中 K_i 为电流的电流常数（使光点在记录纸上移动1厘米电流计内应通过的电流强度值；单位为微安/厘米）。

R为电流计测量线路的总电阻（欧姆）。

l 为接入电位差 ΔV 后，光点在记录纸上相对原始位置移动的距离（厘米）。

《例》．已知JD—571型全自动测井仪电流计的常数为0.625微安/厘米，电流计测量线路的总电阻为800欧姆，当待测电位差 ΔV 输入M、N端点后，使电流计光点移动5厘米。求待测电位差为多少毫伏？

解：

$$\Delta V = K_i \cdot l \cdot R$$
$$= 0.625 \times 5 \times 800 \times 10^{-3}$$
$$= 2.5 \text{ 毫伏。} \quad (1 \text{ 毫安} = 10^3 \text{ 微安})$$

根据上述例子，不难看出，当电流计的电流常数和测量线路的总电阻给定时，2.5毫伏电位差，能使光点位移5厘米。显然，要使光点位移1厘米，需要0.5毫伏电位差。使光点在记录纸上移动1厘米时所需要的电位差（毫伏），叫做测量线路的电压常数，用 m 来表示。可见

$$\Delta V = m \cdot l \text{ （毫伏）}$$

由于所测的电位差的大小不一，为了保证都能测量出来，应当使电压常数能够改变，以扩大测量范围。改变测量线路的电阻，就可以得到各种电压常数，因为在电流一定时，电位差与电阻成正比。下表给出了当电流常数为0.625微安/厘米时的电压常数。

JD－571型测井仪电压常数表

测量线路电阻（欧姆）	电压常数（毫伏/重米）
800	0.5
2000	1.25
4000	2.5
8000	5
20000	12.5
40000	25
80000	50

§4. 电极系

视电阻率的大小，不仅与电极系周围的介质有关，而且与电极系电极的排列有关。根据公式

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

可以看出，电极系电极的排列不同，K值就不同，因而 $\rho_{视电}$ K值也不同，因此我们有必要进一步的研究视电阻率的电极系。

电极系中连结在同一电路的个电极叫做成对电极；而电极系中与地面电极连结在同一电路中的电极叫不成对电极。

一、梯度电极系

成对电极间的距离小于任意成对电极到不成对电极之间的距离的电极系，称为梯度电极系（图1——9见次页）。

在梯度电极系中，成对电极在上部者，叫顶部梯度电极系；成

需要全本请访问 www.ertongbook.com