

高等学校教学用书

# 测井仪器原理

电法测井仪器

冯启宁 主编



石油大学出版社

京)

登记号	125494
分类号	P631.3
种次号	015

# 测井仪器原理

(电法测井仪器)

冯启宁 郑学新 编

52/26/18



石油0118294

石油大学出版社



鲁新登字10号

### 内 容 提 要

本书是《测井仪器原理》的第一部分，主要讲述测井中电法测井的下井仪器线路。全书分三章，第一章讲了双侧向和微球下井仪；第二章介绍感应测井仪；第三章阐述电磁波传播测井仪，结合仪器对电子线路进行了分析。

本书对国内外的上述类型下井仪都作了介绍，不仅是石油高校的测井专业教材，而且也可作为有关院校专业的参考书及现场测井人员的参考书或自学书籍。

### 测 井 仪 器 原 理

(电法测井仪器)

冯启宁 郑学新 编

\*

石油大学出版社出版

山东省东营市

山东省新华书店发行

山东电子工业印刷厂印刷

\*

开本787×1092 1/16 12.25印张 插页1 303千字

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN7-5636-0201-1/TE·45

(压膜)定价：7.60元

# 前 言

本书根据1986年石油部高校教材会议决定编写，是石油高校测井专业本科生“测井仪器”课的统一教材，由石油大学负责编写。分电法测井仪器和非电法测井仪器两册出版。

由于测井技术的飞跃发展，测井仪器不断更新，数控测井系统的应用和推广，目前石油高校所使用的1982年出版的“测井仪器”教材已显得相当陈旧，急需有更新的教材，以反映国内外测井仪器的现代水平。

作为一本工科专业的教材，应有其系统性、科学性、先进性和实用性。本书的编写力求把这几方面统一起来。测井仪器的种类和型号繁杂，仪器的电路原理和工艺设计涉及的面很广，为了使便于理解和掌握课程内容，有利于今后的工作，本书选择有代表性的典型仪器进行编写。讲授几种主要测井方法的下井仪器和地面数控测井系统，既有以模拟电路为主的仪器，也有以数字电路为主的仪器；既考虑到我国目前现场使用的仪器，也编写了先进的、目前国内尚未生产的仪器，使学生能面向世界，面向未来。全书共分三册，第一册是电法测井仪器，除生产中常用的侧向测井和感应测井仪器外，也编写了国外已普遍使用的高频电磁波测井仪器。第二册为非电法测井仪器，包括声波测井仪器和放射性测井仪器（中子测井仪、岩心密度测井仪和

自然伽马能谱测井仪)。第三册的内容是几种主要的数控测井系统和测井信号的传输。授课学时为100学时左右。

测井专业本科生“测井仪器原理”课程的教学要求主要是让学生掌握各种测井仪器的测量原理。因此,本书主要在于讲授各种测井仪器的电路原理,而不是仪器的设计和制造工艺。对先行课中尚未涉及到的一些基础技术课的内容,在这本教材里给予适当的补充。

本书是在编者近年来讲授“测井仪器”课程的基础上编写的。全书由冯启宁主编。第一章和第五章由郑学新执笔;第二章、第三章和第七章由冯启宁执笔;第四章由鞠晓东执笔;第六章由陆介明执笔。前三章为电法测井仪器部分,第四章至第七章为非电法测井仪器部分。

本书承西安石油学院石油勘探仪器与自动化系系主任胡启副教授主审,钟振伟、陈志常、高效曾等同志参加审稿,在此表示感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,错漏之处在所难免,敬请读者提出批评指正。

编者

1991年1月

# 目 录

第一章 电流聚焦测井仪	( 1 )
第一节 电流聚焦测井仪器测量原理及工作方式	( 1 )
一、地层电阻率的测量原理	( 1 )
二、侧向测井仪器测量原理	( 2 )
三、侧向测井仪器工作方式	( 8 )
小结	( 10 )
第二节 1229双侧向仪器	( 10 )
一、仪器工作原理	( 10 )
二、主要电路分析	( 16 )
三、仪器刻度和校验	( 22 )
小结	( 24 )
第三节 JSC801型双侧向测井仪	( 24 )
一、概述	( 24 )
二、主要电路说明	( 25 )
三、仪器刻度对零电路	( 30 )
第四节 DLT-E 双侧向测井仪	( 31 )
一、概述	( 31 )
二、仪器工作原理	( 33 )
三、双侧向仪器的电子短节 DLC-D	( 36 )
四、双侧向基本部分的主要电路分析	( 45 )
五、地面电流模块 LCM-A 简述	( 56 )
小结	( 58 )
第五节 微球形聚焦测井仪	( 58 )
一、MSFL 原理	( 59 )
二、仪器原理框图	( 60 )
三、主要电路说明	( 61 )
四、仪器刻度	( 67 )
小结	( 67 )
参考文献	( 68 )
第二章 感应测井仪器	( 69 )
第一节 感应测井仪器测量原理	( 69 )
一、感应测井测量原理	( 69 )
二、几何因子	( 70 )

三、线圈系特性	(71)
四、反褶积	(76)
五、传播效应校正	(80)
第二节 DIT-D 双感应测井仪	(82)
一、感应测井仪的测量原理图	(82)
二、主要电路分析	(88)
三、地面接口电路	(101)
第三节 其它感应测井仪器	(106)
一、1503双感应测井仪	(106)
二、半导体双感应测井仪	(118)
第四节 感应测井仪的刻度	(123)
一、刻度原理	(124)
二、最佳刻度环直径和最佳刻度点	(127)
三、DIT-D 双感应测井仪的刻度	(128)
小结	(133)
参考文献	(133)
第三章 电磁波传播测井仪	(134)
第一节 电磁波传播测井仪的测量原理	(134)
一、岩石的介电特性	(134)
二、介电测井原理	(136)
三、介电测井仪器测量原理	(137)
第二节 电磁波传播测井仪(EPT)的工作原理	(139)
一、测量原理及电路框图	(139)
二、仪器参数的选择	(142)
第三节 电磁波传播测井仪(EPT)天线部分电路分析	(143)
一、微波混合集成电路(MHIC)	(143)
二、降频变换电路	(147)
三、控制电路	(153)
第四节 电磁波传播测井仪(EPT)电子短节部分电路分析	(162)
一、测量电路	(164)
二、测量控制电路	(172)
三、专用接口电路	(176)
四、通用接口电路	(180)
第五节 电磁波传播测井仪(EPT)的校验和刻度	(185)
一、在空气中校验仪器	(185)
二、在实体模型中刻度仪器	(185)
小结	(186)
参考文献	(186)
附表 测井中常用的非许用单位与许用单位换算表	(187)

# 第一章 电流聚焦测井仪器

## 第一节 电流聚焦测井仪器测量原理及工作方式

### 一、地层电阻率的测量原理

自然界中不同岩石和矿物的导电能力是不相同的，尤其地层中所含流体性质不同时，导电性能差别很大。电阻率测井正是利用这一特点来区别钻井剖面上的岩层性质和油、气、水层的。

普通电阻率测井是将一个三电极系，如AMN电极系下放井中，然后上提电极系对井剖面进行测量。在测量过程中，由供电电极A不断向地层供电。假定不考虑井眼影响，地层又是一个各向均匀的同性介质，其电阻率为 $\rho$ 。根据点电极的电位公式，则测量电极M点的电位是：

$$U_M = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{AM}$$

测量电极N点的电位是：

$$U_N = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{AN}$$

因而有

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) = \frac{\overline{MN}}{4\pi \overline{AM} \cdot \overline{AN}} \rho I$$

令

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

代入上式可得

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

式中 $I$ 为从A电极流出的电流强度， $K$ 为电极系系数，单位m。

由于实际地层是非均匀的各向异性介质，加上井眼影响，由普通电阻率测井测得的电阻率只能近似反映地层的真电阻率，称为视电阻率( $\rho_o$ )，相应上面的电阻率公式可改写成

$$\rho_o = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

我国当前采用的简易横向测井，是一种组合的普通电阻率测井。它用4个电极距长度不同的电极系组成复合电极系对钻井剖面进行测量，可得到4条反映不同探测深度的视电阻率曲线。

在一般地层剖面中，采用普通电阻率测井是有效的，但在盐水泥浆和膏盐剖面中，由于



受泥浆分流的严重影响，使普通电阻率测井失去了效力，为解决这种地层剖面的测井提出了电流聚焦测井。

电流聚焦测井是采用电屏蔽方法，使主电流聚焦后水平流入地层，因而大大减小了井眼和围岩影响。现在，电流聚焦测井不仅是盐水泥浆和膏盐剖面井的必测项目，也是淡水泥浆井测井的主要方法之一。

电流聚焦测井的电流线沿电极轴线的侧向流入地层，故又叫侧向测井。侧向测井在电阻率测井方法中是一个大家族，按构成电极系的电极数目来分，有三侧向，七侧向、八侧向和九侧向(即双侧向)；按探测深度，上述每一种侧向测井又有深、浅之分；按主电流聚焦后的特点，还可分为普通聚焦和球形聚焦等。

现在，最理想的侧向测井组合是双侧向和微球形聚焦测井组合。双侧向的仪器性能、探测深度、分层能力、测量动态范围都优于三、七侧向。微球形聚焦的探测特性也比微侧向和邻近侧向好。由双侧向微球形聚焦组合获得的资料可以较准确地确定地层电阻率 $\rho_i$ 、冲洗带电阻率 $\rho_x$ 和侵入带直径 $D_i$ 。这些是计算地层含油饱和度、判断地层含油性不可缺少的参数。

## 二、侧向测井仪器测量原理

由上可见，侧向测井仪器多种多样，但基本测量原理是相同的。侧向测井与普通电阻率测井的主要区别就在于它的主电流(又叫测量电流)是被聚焦以后才流入地层的。为使主电流聚焦，侧向测井电极系的主电极 $A_0$ 都位于电极系中心，两端都有屏蔽电极 $A_1$ 、 $A_2$ ，它们以 $A_0$ 呈对称排列。测井时，从主电极流出的主电流 $I_0$ 和从屏蔽电极流出的屏蔽电流 $I_b$ 极性完全相同。三侧向就是由上述这样三个电极组成的，其电极为柱状，电极 $A_0$ 较短，以提高对薄地层的分辨能力；电极 $A_1$ 、 $A_2$ 较长，以增强屏蔽作用，减小井眼和围岩影响。 $A_1$ 和 $A_2$ 短路连接，具有相同的电位，电极间用绝缘材料隔开。测井时，仪器自动控制 $I_b$ 使 $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 三电极电位相等，沿纵向的电位梯度为零(即 $\frac{\partial U}{\partial z} = 0$ )。从而迫使主电流沿垂直于井轴的方向流入地层，避免了主电流沿井轴方向流动。在无限均匀介质中，主电流束如图1-1中的阴影部分所示。

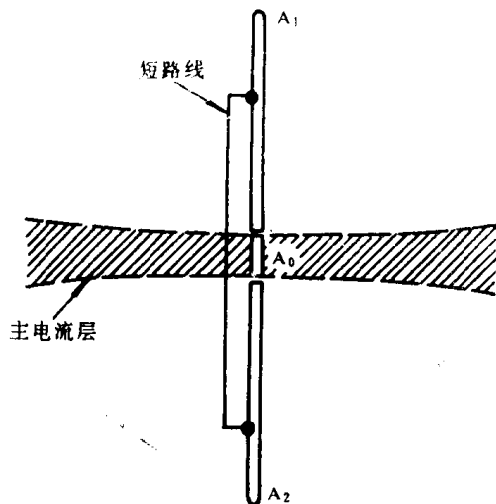


图1-1 三侧向电极系和主电流层

为避免电极极化，侧向测井采用低频正弦交流电供电，国产三、七侧向的电流频率用515Hz。测井时，由仪器测出主电流 $I_0$ 的数值或主电极 $A_0$ (可用 $A_1$ 或 $A_2$ 代替)至无穷远处电极N间的电位差，就可计算出地层视电阻率 $\rho_s$ 。

和普通电阻率测井一样，侧向测井的视电阻率公式是：

$$\rho_s = K \frac{U}{I_0} \quad (1-1)$$

式中  $U$ ——主电极表面的电位，单位V；

$I_0$ ——主电流强度，单位A；

$K$ ——侧向电极系数，单位m。

电极系数 $K$ 可用实验或理论公式计算求得，对不同侧向测井仪器 $K$ 的理论表达式不同。三侧向

$$K = \frac{2\pi L_0}{1g \frac{2L}{\phi}}$$

式中  $L_0 = L_m + \frac{2}{3}b$

$L_m$ ——主电极实际长度；

$b$ —— $A_0$ 与 $A_1$ 或 $A_2$ 之间绝缘环厚度；

$L$ ——三侧向电极系长度；

$L_0$ ——主电极视长度；

$\phi$ ——电极系直径。

在三侧向屏蔽电极以外，两端再加上第二屏蔽电极 $A'_1$ 、 $A'_2$ 。若将它们分别与对应的第一屏蔽电极 $A_1$ 和 $A_2$ 短路连接，就等于加长了屏蔽电极，相应屏蔽作用增强，可以进行深三侧向测井。反之若用 $A'_1$ 、 $A'_2$ 作 $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 的回流电极，就可降低屏蔽作用，进行浅三侧向测井(见图1-2和图1-3)。

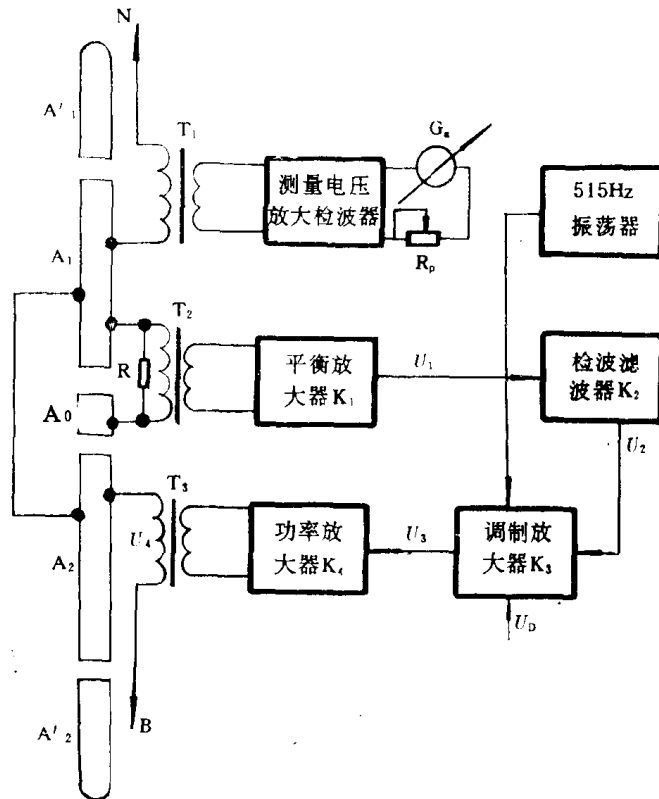


图 1-2 恒流式三侧向仪的原理框图

B——主电流和屏蔽电流的回流电极；  
 T<sub>1</sub>——测量信号输入变压器；  
 T<sub>2</sub>——屏流输出变压器；  
 R<sub>P</sub>——记录仪测程电阻；  
 U<sub>D</sub>——比较电压

N——无穷远测量电极；  
 T<sub>2</sub>——平衡信号输入变压器；  
 R——主电流取样电阻；  
 G<sub>s</sub>——检流计；

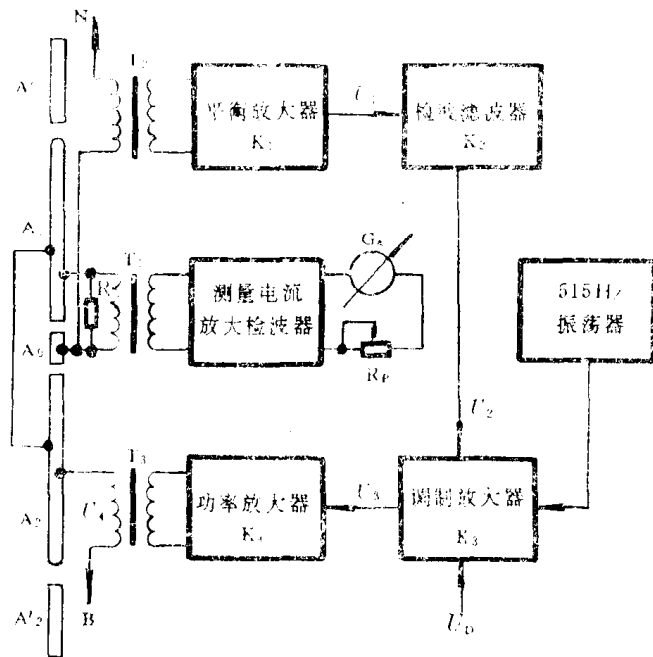


图 1-3 恒压式三侧向仪的原理框图

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| B——主电流及屏蔽电流的回流电极；           | N——无穷远测量电极；                 |
| T <sub>1</sub> ——测量信号输入变压器； | T <sub>2</sub> ——平衡信号输入变压器； |
| T <sub>3</sub> ——屏流输出变压器；   | R——主电流取样电阻；                 |
| R <sub>F</sub> ——记录仪测程电阻；   | G <sub>4</sub> ——检流计；       |
| U <sub>D</sub> ——比较电压       |                             |

侧向测井仪器是根据它们的测量原理设计的，现以三侧向为例。

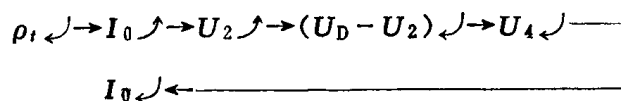
由电阻率公式  $\rho_s = K \frac{U}{I_0}$  可知，我们欲得到电阻率，可以保持  $I_0$  恒定，测量电压  $U$  的数值，或保持电压  $U$  不变，测量主电流  $I_0$ ；也可以对电压  $U$  和电流  $I_0$  不加任何限制，任其随负载自由浮动，同时测量电压和电流，通过计算  $\frac{U}{I}$  的比值来获得电阻率；或者在保持  $IU$  乘积恒定的条件下，同时测量电压和电流来确定电阻率。以上这些工作方式分别叫做恒流式、恒压式、自由式和恒功率式。

三侧向有恒流式和恒压式两种，如图 1-2 和图 1-3 所示。无论恒流式和恒压式，设计仪器首先要考虑的问题是如何使  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  三电极电位相等，为此需要供给  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  同极性的电流。电路框图中用 515 Hz 振荡器输出电流经过调制放大和功率放大后加到屏蔽电极  $A_1$  或  $A_2$ ，然后再通过连接在电极  $A_1$  和  $A_0$  间的一个小电阻  $R(0.01\Omega)$  加到电极  $A_0$ ，这样就达到了使  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  电流极性相同的目的。

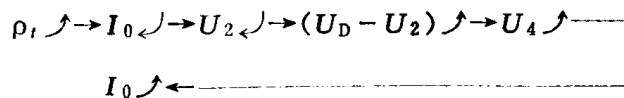
测井过程中，随着电极接地电阻的变化，必然引起主电流  $I_0$  的变化，在恒流式仪器中必须保持  $I_0$  不变，使接地电阻的变化完全反映在主电极表面电位的变化上。为此，电路中设置了平衡放大器对主电流的变化进行检测（若是恒压式仪器则对电压的变化进行检测）。通过负反馈形式对主电流（或电压）进行控制，使主电流（或电压）按原来相反的方向变化，达到恒定

电流(或电压)的目的。

保持恒流的平衡调节过程是:



反之



测量信号取自 $A_1$ 至 $N$ 电极间的电位差,因 $N$ 电极在无穷远处,即 $U_N = 0$ ,所以 $U = U_{A_1}$ 。该信号经变压器 $T_1$ 送至测量放大器放大,再经滤波和相敏检波输出至记录仪。

七侧向电极系如图1-4所示,它由7个环状电极组成。其中 $A_0$ 和 $A_1$ 、 $A_2$ 分别是主电极和屏蔽电极,作用同前。介于 $A_0$ 和 $A_1$ 或 $A_2$ 之间的 $M_1$ 、 $N_1$ 和 $M_2$ 、 $N_2$ 是两对监督电极,又叫测量电极。它们均以 $A_0$ 为中心,对称地排列在 $A_0$ 两侧,每对同名电极间用导线短路,所以 $A_1$ 和 $A_2$ ,  $M_1$ 和 $M_2$ 、 $N_1$ 和 $N_2$ 具有相同的电位。

测井时,供给主电极 $A_0$ 和屏蔽电极 $A_1$ 、 $A_2$ 同极性的电流 $I_0$ 和 $I_b$ 。仪器自动调节屏流 $I_b$ ,使得两对监督电极 $M_1N_1$ 和 $M_2N_2$ 上保持相同的电位,即 $U_{M_1} = U_{N_1}$ 或 $U_{M_2} = U_{N_2}$ 。由于等位面之间不可能有电流流动,所以无论主电极或屏蔽电极流出的电流都在 $M_1N_1$ 及 $M_2$ 、 $N_2$ 处拐弯,即使主电流沿水平方向流入地层,主电流分布如图1-4所示。电阻率公式

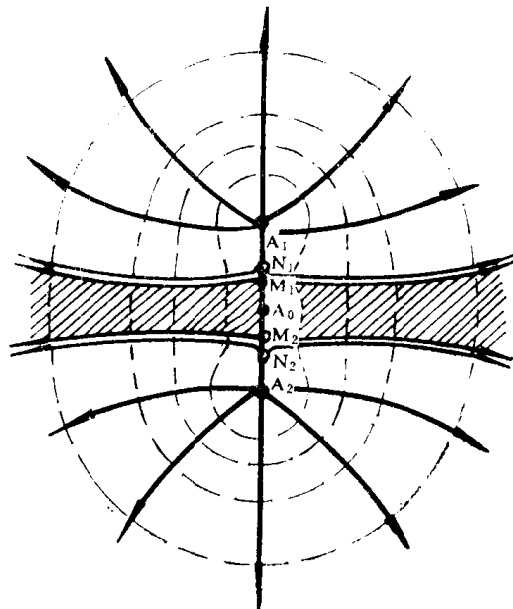


图1-4 七侧向电极系及电流分布

$$\rho_a = K \frac{U_M}{I_0}$$

式中 $U_M$ 为测量电极 $M_1$ 或 $M_2$ 至无穷远点的电位差( $U_M = U_{A_0}$ )。

七侧向电极可近似看作点电极,按点电极的电位公式可以导出七侧向电极系数

$$K = \frac{4\pi \cdot A_0 \overline{M_1} \cdot A_0 \overline{N_1} (\overline{A_0 M_1} + \overline{A_0 N_1})}{(A_0 A_1)^2 + A_0 \overline{M_1} \cdot A_0 \overline{N_1}}$$

测井时,理论上要求 $U_{M_1 N_1} = 0$ (或 $U_{M_2 N_2} = 0$ ),实际上 $U_{M_1 N_1}$ 不可能真正为零,只能近似为零,这个近似为零的信号称为剩余信号,记为 $\Delta U_{MN}$ (数值为微伏级)。测井时只要求不平衡信号 $U_{MN} < \Delta U_{MN}$ 就达到聚焦要求了。

在七侧向电极系中,一般用四个参数来表示电极系结构和特性,这四个参数是:

电极系长度 $L_0$  它是指电极 $A_1$ 和 $A_2$ 之间的距离,即 $L_0 = \overline{A_1 A_2}$ 。它主要影响侧向测井的探测深度。在一定范围内, $L_0$ 加长,相应探测深度增加,反之探测深度减小。若 $L_0$ 太长,除了使用不便以外,围岩和邻层影响也相应增大。

电极距 $L$  代表 $O_1 O_2$ 之间的距离,即 $L = \overline{O_1 O_2}$ ( $O_1$ 、 $O_2$ 分别是 $M_1 N_1$ 及 $M_2 N_2$ 的中点)。

$L$  的大小主要决定七侧向的纵向分层能力,  $L$  较小纵向分层能力强, 能划分出较薄的地层。

分布比  $s$  表示电极长度  $L_0$  与电极距  $L$  之比值, 即  $s = \frac{L_0}{L}$ 。它主要影响主电流层的形状,

$s$  过大不仅要求屏流过大, 而且对测量的影响因素复杂;  $s$  过小, 主电流聚焦差。一般取  $s$  为 3 左右较为适宜。这时主电流层基本上沿水平方向流入地层。在均匀介质中, 分布比对主电流层的影响如图 1-5 所示。

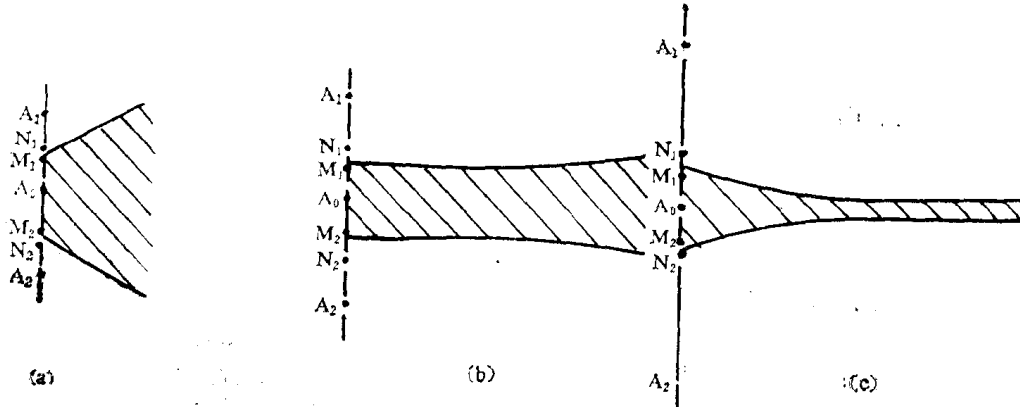


图 1-5 在均匀介质中主电流层的形状

(a) 分布比  $s < 2.1$  时的主电流层形状; (b) 分布比  $s = 2.5$  时主电流层形状; (c) 分布比  $s = 4$  时的主电流层形状

聚焦系数  $q$  指  $(L_0 - L)/L$  的比值, 即  $q = (L_0 - L)/L = s - 1$ 。它主要决定电极系的电流分布。

七侧向电路原理如图 1-6 所示, 仪器工作方式为恒流式, 测量监督电极中点至远处  $N$  电极间的电位差。

双侧向是在三、七侧向的基础上发展起来的, 它吸取了三、七侧向的优点。双侧向电极系由 9 个电极组成, 主电极  $A_0$ 、第一屏蔽电极  $A_1$ 、 $A_2$ 、第二屏蔽电极  $A'_1$ 、 $A'_2$  和三侧向一样用柱状电极, 其中  $A_0$  较短, 屏蔽电极较长。监督电极  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M'_1$ 、 $M'_2$  和七侧向一样用环状电极, 它们介于  $A_0$  和  $M_1$  (或  $M_2$ ) 之间。各同名电极间同样要短路连接, 并以  $A_0$  为中心呈对称排列 (见图 1-7)。

第二屏蔽电极有着双重的作用, 对深侧向电流, 它和第一屏蔽电极间相当于短路, 从而增强了屏蔽作用, 使主电流进入地层深处才发散。对浅侧向电流, 它和第一屏蔽电极间相当于绝缘, 并用作第一屏蔽电极和主电极的回流电极, 从而减小了屏蔽作用, 使主电流进入地层侵入带后就发散开了。深浅双侧向主电流流入地层的路径如图 1-8 所示。

测井时从主电极  $A_0$  流出的主电流  $I_0$  和从屏蔽电极流出的屏流  $I_s$  极性应该完全相同, 这是使主电流聚焦的基础。为此, 双侧向中采用了由跟踪屏流来产生主电流或由跟踪主电流来产生屏流的手段。

在双侧向中, 通过测量监督电极至无穷远处电极  $N$  的电位差和主电流  $I_0$ , 依据视电阻率公式计算出地层视电阻率。

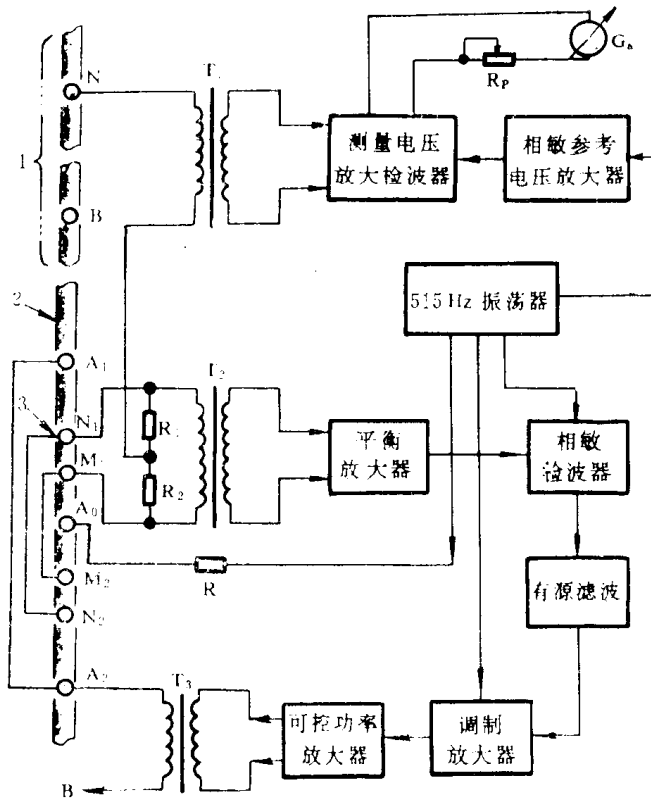


图 1-6 七侧向的测量原理图

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1——加长电极；                    | 2——七侧向电极系；                                   |
| 3——电极短路连接线；                 | B——主电流和屏流的回流电极；                              |
| N——无穷远测量电极；                 | T <sub>1</sub> ——测量信号输入变压器；                  |
| T <sub>2</sub> ——平衡信号输入变压器； | T <sub>3</sub> ——屏流输出变压器；                    |
| R——恒流电阻；                    | R <sub>1</sub> 、R <sub>2</sub> ——均压电阻(各为1kΩ) |

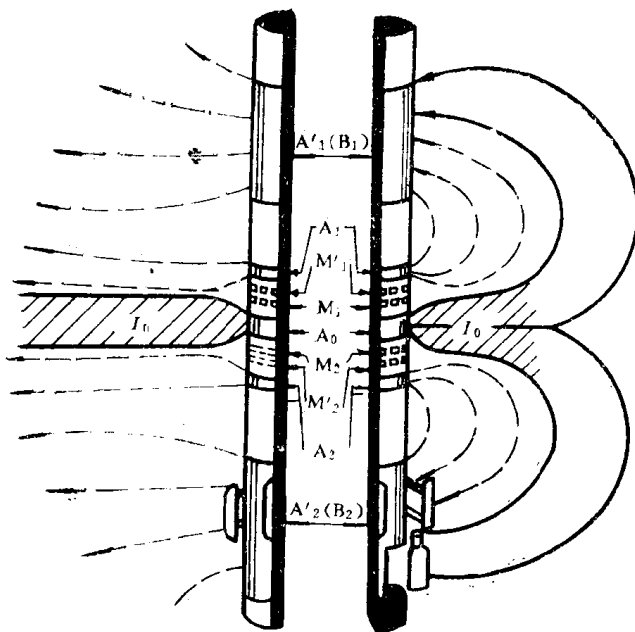


图 1-7 在均匀介质中主电流层的形状

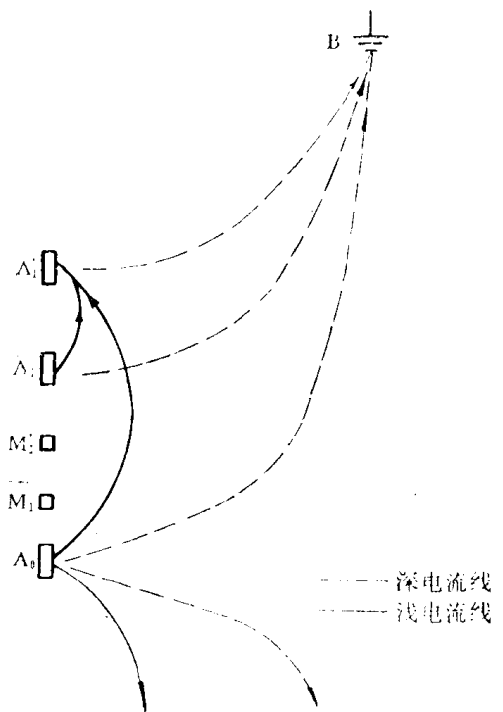


图 1-8 深、浅侧向电流路径图

在侧向测井视电阻率公式  $\rho_a = K \frac{U}{I_0}$  中,  $U$  和  $I_0$  分别代表主电极的表面电位和主电流。

因此  $\frac{U}{I_0}$  代表主电极  $A_0$  的接地电阻。

设  $A_0$  接地电阻为  $R_0$  则

$$\rho_a = KR_0 \quad (1-2)$$

式中,  $A_0$  的接地电阻  $R_0$  显然等于主电流流过路径中各部分电阻之和, 即

$$R_0 = R + R_m + R_{mc} + R_i + R_f + R_u$$

式中  $R$ ——电极  $A_0$  和泥浆的接触电阻;

$R_m$ ——主电流  $I_0$  流过泥浆的体电阻;

$R_{mc}$ —— $I_0$  流过的泥饼电阻;

$R_i$ —— $I_0$  流过侵入带地层的电阻;

$R_f$ —— $I_0$  流过原状地层电阻;

$R_u$ —— $I_0$  返回到电极  $B$  的回路电阻。

在主电流聚焦良好的条件下,  $R_0$  和主电流流过路径各部分介质电阻的关系可用图 1-9 表示。

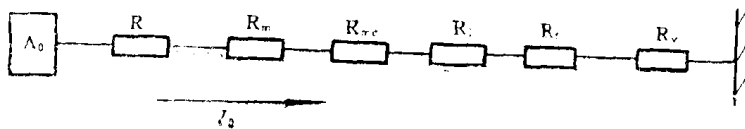


图 1-9 主电极接地电阻等效电路图

由于泥浆电阻率低,  $I_0$  流过泥浆、泥饼的路径又很短, 所以  $R$ 、 $R_m$  和  $R_{mc}$  可以忽略。又因  $I_0$  返回路径的截面很大, 所以  $R_u$  也可忽略, 从而有

$$R_0 \approx R_f + R_i$$

由此可见, 侧向测井的测量结果主要反映  $R_f$  和  $R_i$  的数值, 即原状地层电阻率  $\rho_f$  和侵入带电阻率  $\rho_i$  的大小。

显然, 对深侧向  $R_i$ , 若对接地电阻  $R_0$  的贡献比  $R_f$  的贡献越大, 则测井效果越好。所以侧向测井用于盐水泥浆和高阻地层剖面比用于淡水泥浆和中低阻地层剖面效果要好。

对浅侧向, 由于  $I_0$  刚要进入原状地层就迅速发散了, 所以  $R_f$  对  $R_0$  的贡献可以忽略不计, 即浅侧向测量结果主要反映侵入带电阻率  $\rho_i$  的大小。

### 三、侧向测井仪器工作方式

仪器工作方式是指仪器在测井时对主电极的供电方式。【如前所述, 它有恒流式、恒压式、自由式和恒功率式四种。这四种方式各有什么特点呢, 下面我们就简要说明一下这个问题。

#### 1. 恒流式

保持主电流  $I_0$  恒定, 只测量主电极(通常用监督电极  $M_1$  或  $M_2$  代替)至远处电极  $N$  之间的电位差  $U$ 。显然在一定范围内, 测量地层的电阻率越高。提供的测量电压越大, 测量误差越小。所以恒流式仪器适于对高阻地层的测量。

因为  $I_0$  恒定, 在地层电阻率变化范围很大时, 要求仪器电压检测系统的动态范围要很

大，这在电路设计上是很困难的。比如地层电阻率从  $1\Omega\cdot\text{m}$  变到  $10000\Omega\cdot\text{m}$ ，即变化了10, 倍，要求电压检测系统能跟踪测量是很难办到的。设计时，若照顾了中间顾不了两头，往往对于小信号显得放大不足，而对大信号又会出现饱和失真。所以恒流式仪器对于高阻和低阻层的测量误差都比较大，甚至使测量结果不能使用。总之，恒流式仪器测量动态范围小，这是恒流式仪器的主要缺点。优点是电路简单，三、七侧向和微侧向均采用这种工作方式。

## 2. 恒压式

采用恒压式，主电极表面电位恒定，只测量主电流。显然测量地层的电阻率越低，提供测量的电流信号越大，相应测量误差小，所以恒压式仪器适于对低阻地层的测量。

恒压式仪器和恒流式一样，仪器电路简单，但测量动态范围小。

## 3. 自由式

因自由式电流和电压都是浮动的，测井时，同时测量电流、电压两个量，因此可以得到较宽的测量动态范围。

比如地层电阻率仍从  $1\Omega\cdot\text{m}$  变到  $10000\Omega\cdot\text{m}$ ，自由式仪器只要测量电压和电流各变化100倍即能满足测量要求。

因为 
$$\frac{U_{\max}}{U_{\min}} = 100, \quad \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 100$$

故 
$$\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \cdot \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 10^2 \cdot 10^2 = 10^4$$

国产801双侧向和引进1229双侧向均采用这种工作方式。需指出这种工作方式的仪器在测量地层电阻率很高和很低时，仪器分别相当于恒流式和恒压式，其测量误差较大。

## 4. 恒功率式

由式(1-1)视电阻率公式可知，要确定电阻率，我们并不一定要测得电压和电流的实际数值，只要知道它们的比值即可。但要测量准确，务必使测量电压和电流都处于测量仪器的可测范围之内，若超过仪器测量范围，测量结果就失真了。由于自由式测量的  $U$  和  $I$  不受任何限制，很难使测量仪器的测量系统跟踪  $U$  和  $I$  的全部变化。因此，限制了仪器测量动态范围的进一步扩展，一般自由式仪器测量动态范围只能达到  $10^4$  倍。

恒功率式在测量过程中保持  $IU$  乘积不变，只要选定最高和最低电阻率的两个极点保持功率不变，就使测量电压和电流始终处在仪器可测量的范围之内。也就不会出现测量电压和电流被限幅的情况。因此，可以获得比自由式仪器更宽的测量动态范围。

比如，保持测量功率( $W$ )等于  $0.6\mu\text{W}$ ，设电极系数  $K=1$ ，测量电压介于  $0.3\sim 200\text{mV}$  之间，测量电流介于  $3\mu\text{A}\sim 2000\mu\text{A}$  之间。那么仪器可测量的电阻率范围是：

$$\frac{U_{\max}}{I_{\min}} = \frac{200\text{mV}}{3\mu\text{A}} = 66.6\text{k}\Omega\cdot\text{m} \sim \frac{U_{\min}}{I_{\max}} = \frac{0.3\text{mV}}{200\text{mA}} = 0.15\Omega\cdot\text{m}$$

即 
$$\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} = \frac{66.6\text{k}\Omega\cdot\text{m}}{0.15\Omega\cdot\text{m}} \approx 0.44 \times 10^6$$

当然，实际仪器测量动态范围会比这低一些，因为深侧向电极系数小于1。

和自由式仪器比较，恒功率式仪器电路复杂，如果不采用计算机控制，进行恒功率测量是不可能的。



## 小 结

电流聚焦测井是电阻率测井方法中的一种，因此，其视电阻率公式和普通电阻率测井相同。

电流聚焦测井的主要特点，是主电流在聚焦后平行流入地层。如何使主电流聚焦呢？保证屏流和主电流极性完全相同是至关重要的。为此，一般采用以下手段。一是象三、七侧向那样，用同一电流原供给屏流和主电流。因为屏流大于主电流，在测井过程中屏流又是浮动的。所以加到屏蔽电极的屏流，要由平衡放大电路输出的信号加以调制，然后通过功率放大后才加到电极上；二是用跟踪主电流来产生屏流，或用跟踪屏流来产生主电流，这种方式用在下述双侧向仪器中。

在侧向测井仪器中，适当增加屏蔽电极的长度，可以加大屏蔽能力，增加仪器探测深度。相反，在屏蔽电极两端设置回流电极，又可使主电极和屏流流入地层的深度变浅，从而降低探测深度。深、浅侧向测井正是利用这一点，再配以相应的电子电路来实现的。

本节讲述了七侧向的基本参数，这些参数也适用于双侧向。还讲述了侧向测井仪器的工作方式，目的在于为学习下述双侧向仪器线路打下一定基础。

## 第二节 1229双侧向仪器

引进1229双侧向仪，一次下井可同时测得深、浅两条 $\rho_s$ 曲线。为了实现深、浅同时并测，仪器采用频分供电。深、浅侧向供电频率分别为32Hz和128Hz。

仪器系统激励采用屏流主动式，即先有屏流后有主电流。该仪器可与1308自然伽马测井仪、声波测井仪、3104微侧向组合测井，还可带测一条自然电位曲线。

由于该仪器组合需要传输的测量信息多，用一般信息传输方式缆芯已不够用，为此采用了脉码传输。

### 一、仪器工作原理

1229双侧向仪器原理如图1-10所示。下井仪器电路由直流稳压电源、控制信号发生器(F)、深侧向屏流源(B)、浅侧向屏流源(C)、平衡放大混合电路(A)、深浅侧向电流检测电路(E)和深浅侧向电压检测电路(D)七个部分组成。

直流稳压电源为整个下井仪器提供+15V和-15V直流工作电源。

控制信号发生器由振荡器和分频器组成。它产生32Hz和128Hz的方波信号，为整个下井仪器中的斩波器、相敏检波器提供相位参考信号。该信号频率亦决定了深、浅侧向的供电频率。同时还为微侧向测井仪提供另一种频率的方波信号。

如前所述，该仪器是屏流主动式仪器。测井时首先由深、浅屏流源电路提供并通过屏蔽电极向地层发射出32Hz和128Hz的屏蔽电流。流入地层的屏流在监督电极 $M_1$ 和 $M_1'$ ， $M_2$ 和 $M_2'$ 之间产生电位差。显然该电位差包含了深、浅侧向的电流频率。它由平衡放大混合电路放大，用以控制主电流发生器产生包含上述两种频率的主电流。因此主电流始终跟踪屏流的极性和相位变化。正因如此，主电流的产生使监督电极间的电位差趋于零，相应聚焦了主电流。