

高等学校教材

测井仪器原理

冯启宁 鞠晓东 编著
柯式镇 李会银



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

测井仪器原理

冯启宁 鞠晓东 编著
柯式镇 李会银

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了双侧向、微球形聚焦、感应、阵列感应、井壁电成像、常规声波、多极子阵列声波、超声波扫描成像、自然伽马、补偿中子、岩性密度等各种测井仪器的原理,以及测井地面系统、测井数据传输等方面的内容。

本书适合高等学校勘察技术与工程专业教学使用,也可供油田测井工作人员、测井仪器研制及维修人员借鉴与参考。

图书在版编目(CIP)数据

测井仪器原理/冯启宁等编著.
北京:石油工业出版社,2010.8

(高等学校教材)

ISBN 978-7-5021-7841-3

I. 测…

II. 冯…

III. 测井仪—高等学校—教材

IV. TH763.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 103461 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523612 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 中国石油报社印刷厂

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 24.5 插页: 2

字数: 624 千字

定价: 38.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

本书是为高等学校“勘察技术与工程”专业本科生“测井仪器”课程编写的教材。20世纪90年代,石油大学出版社按“电法测井仪器”和“非电法测井仪器”两个分册出版了冯启宁教授主编的《测井仪器原理》,作为石油高校测井专业本科生的统编教材沿用至今已十几年,显然已不适用。进入21世纪以来,测井技术飞速发展,成像测井技术已得到广泛应用,原教材却缺少这部分内容。此外,按新的教学计划,本课的授课时数为50学时,仅为原课时数的一半,因此也必须对教材内容进行精选。为此,在原书基础上重新编写出版了本教材。

自20世纪90年代以来,随着低电阻率油气藏、低孔隙度低渗透率油气藏、复杂岩性油气藏等成为勘探、开发的重点,常规测井技术难以发挥作用,成像测井技术逐渐成为测井的主流技术,电成像和声成像测井发展更快,相应的成像测井仪器已成为测井的主要装备并广泛使用。钻井技术的发展对测井仪器的集成化、小型化和耐温耐压等方面提出了更高的要求。计算机技术、通信技术、新材料和电子器件等相关学科的发展为测井仪器的更新换代起到了推波助澜的作用。测井仪器的核心技术是对不同类型的物理参数(电、声、核、核磁)和工程参数的采集、传输和信号的前期处理。一个完整的测井仪器系统,包括地面仪器、传输电缆和各种类型的下井仪器。下井仪器是测井仪器系统的关键部分,它是将不同类型测井方法(电、声、核、核磁)的测量原理和相应的测控技术完好结合而构成的。一种新测井技术的出现,总要从它的下井仪器中体现出来。此外,新型测井仪器的研发总是在原有仪器的基础上继承、延伸和开拓的;成像测井仪器也是在常规测井仪器基础上发展起来的。

作为高等学校本科生专业教材,应体现其系统性、科学性、先进性和实用性,本书的编写也力求把这几方面统一起来。本书以讲授几种主要测井方法的下井仪器为主,考虑到测井仪器系统性,对公用的地面记录、控制系统和井下与地面间的电缆信号传输等内容专辟章节讲述。在编写选材上,对微电阻率扫描测井、阵列感应测井、多极子阵列声波测井、井壁声波成像测井等几种常用的成像测井仪器重点讲述;考虑到常规测井仪器不仅是目前生产上的在用仪器,而且只有掌握了常规测井仪器原理才能更深入了解成像测井仪器的特点,因此本书沿用了原书双侧向测井、双感应测井、声波测井、补偿中子测井、岩性密度测井和自然伽马能谱测井等常规测井仪器的基本内容。在编写上,选择典型仪器为例,以讲述测量原理为重点,达到举一反三的目的,每章后面附有小结和思考题,给学生以启迪。在讲授内容上,为与前期课程衔接,主要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。

由于测井仪器种类繁多，课时有限，不可能面面俱到，请读者见谅。本书第一章“电流聚焦测井仪器”和第九章“补偿中子测井仪”沿用原书内容，由郑学新撰写；第二章“感应测井仪器”和第八章“自然伽马能谱测井仪”由冯启宁编撰；第三章“阵列感应测井仪”和第四章“井壁电成像测井仪”由柯式镇撰写；第五章“常规声波测井仪”由鞠晓东编撰；第六章“多极子阵列声波测井仪”和第七章“超声波扫描成像测井仪”由卢俊强撰写；第十章“岩性密度测井仪”沿用原书内容，由陆介明撰写；第十一章“测井地面系统”的第一节由鞠晓东根据原教材缩编和撰写，第二节由鞠晓东撰写；第十二章“测井数据传输”的第一、第二节由李会银撰写，第三节由鞠晓东撰写；由冯启宁教授统编全书。

由于编者水平有限，错漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者
2010 年 1 月

目 录

第一章 电流聚焦测井仪器	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
第二节 1229 双侧向仪器	9
一、仪器工作原理.....	9
二、主要电路分析	14
三、仪器刻度和校验	20
第三节 DLT-E 双侧向测井仪	22
一、概述	22
二、仪器工作原理	24
三、双侧向仪器的电子线路短节 DLC-D	26
四、双侧向基本部分的主要电路分析	36
五、地面电流模块 LCM-A 简述.....	46
第四节 微球形聚焦测井仪	47
一、MSFL 原理	47
二、仪器原理框图	48
三、主要电路说明	49
四、仪器刻度	55
本章小结	55
思考题	55
第二章 感应测井仪器	57
第一节 感应测井仪器测量原理	57
一、感应测井测量原理	57
二、几何因子	58
三、线圈系特性	59
四、反褶积	63
五、传播效应校正	68
第二节 DIT-D 双感应测井仪	70
一、感应测井仪的测量原理图	70
二、主要电路分析	76
第三节 1503 双感应测井仪器	88
一、1503 双感应测井仪电路原理框图	88
二、1503 双感应测井仪电路	89

三、地面测量线路	94
第四节 感应测井仪的刻度	99
一、刻度原理	99
二、最佳刻度环直径和最佳刻度点	103
三、DIT - D 双感应测井仪的刻度	103
本章小结	108
思考题	109
第三章 阵列感应测井仪	110
第一节 阵列感应测井仪器测量原理	110
一、阵列感应测井测量原理	110
二、线圈系特性	110
三、软件聚焦合成原理	111
第二节 阵列感应测井仪器	113
一、HDIL 仪器电路工作原理	113
二、主要电路分析	115
本章小结	129
思考题	129
第四章 井壁电成像测井仪器	130
第一节 井壁电成像测井仪器测量原理	130
一、井壁电成像测井测量原理	130
二、数据预处理与井壁图像的形成	131
三、仪器测量响应的 LLS/SFL 标定	133
第二节 FMI 成像测井仪	133
一、FMI 成像测井仪工作原理	133
二、主要电路分析	135
本章小结	147
思考题	147
第五章 常规声波测井仪	148
第一节 声波测井原理	148
一、岩石中声波的传播参数	148
二、声系设计和测量原理	149
第二节 双发双收声波测井仪	152
一、双发双收声系原理	152
二、下井仪工作原理	154
三、地面仪工作原理	157
本章小结	180
思考题	180
第六章 多极子阵列声波测井仪	181
第一节 多极子阵列声波测井仪测量原理	181
一、软地层中单极测量的局限性	181

二、多极子横波测量特点·····	183
三、正交偶极各向异性测量原理·····	184
第二节 多极子阵列声波测井仪 MPAL ·····	185
一、MPAL 仪器结构 ·····	185
二、仪器连接总线分析·····	187
三、系统控制电路·····	189
四、数据采集电路·····	190
五、模拟信号接收处理·····	191
六、发射电子线路·····	195
七、数据采集组合模式·····	196
第三节 交叉多极子阵列声波测井仪 XMAC II ·····	197
一、XMAC II 性能指标 ·····	197
二、仪器总体结构·····	198
三、控制采集电路·····	199
四、串行命令设置原理·····	204
五、发射电路·····	205
本章小结·····	207
思考题·····	208
第七章 超声波扫描成像测井仪·····	210
第一节 超声波扫描测量原理·····	210
第二节 数字井周成像测井仪 DCBIL ·····	211
一、仪器指标及整体组成结构·····	211
二、CPU 控制电路 ·····	213
三、脉冲幅度分析 (PHA) ·····	215
四、波形采集·····	219
五、磁力计电路·····	220
六、发射电路·····	222
第三节 EILog 超声成像测井仪·····	223
一、仪器总体构成·····	224
二、发射电路·····	225
三、放大检测电路·····	225
四、同步电路·····	226
五、系统控制电路·····	227
本章小结·····	228
思考题·····	228
第八章 自然伽马能谱测井仪·····	230
第一节 自然伽马能谱测井测量原理·····	230
一、岩石的自然放射性·····	230
二、自然伽马能谱测井仪测量原理·····	231
第二节 NGT-C 自然伽马能谱测井仪测量原理 ·····	235

一、稳谱原理·····	235
二、NGT-C 自然伽马能谱测井仪测量原理和框图 ·····	236
三、刻度能量和电压的转换关系·····	238
第三节 NGT-C 自然伽马能谱测井仪电路分析 ·····	239
一、环信号放大、比较逻辑电路·····	239
二、谱信号比较逻辑电路·····	242
三、高压环路控制和谱误差控制·····	243
四、能窗计数率的发送·····	249
五、接口电路·····	250
本章小结·····	258
思考题·····	258
第九章 补偿中子测井仪·····	259
第一节 测量方法原理·····	259
第二节 2435 补偿中子测井仪 ·····	260
一、仪器测量原理·····	260
二、电路说明·····	260
第三节 CNT - G 补偿中子测井仪 ·····	264
一、概述·····	264
二、仪器工作原理·····	265
三、电路分析·····	266
本章小结·····	285
思考题·····	286
第十章 岩性密度测井仪·····	287
第一节 仪器原理·····	287
一、物理原理·····	287
二、仪器测量原理·····	292
第二节 LDT - D 井下仪器线路分析·····	301
一、岩性密度测井仪 LDT - D 总框图 ·····	301
二、CCS 总线和通用接口 U_1 、 U_2 和 U_3 ·····	303
三、用户字 (UDW) 指令译码 ·····	306
四、核信号的放大和处理·····	313
五、井径测量·····	324
六、脉冲计数与脉冲计数率的传输·····	324
第三节 LDT 刻度 ·····	328
一、本底测量·····	328
二、铝块测量·····	329
三、铝块加铁衬套筒测量·····	329
四、总体测量·····	329
本章小结·····	330
思考题·····	330

第十一章 测井地面系统..... 331

第一节 数控测井地面系统..... 331

一、概述..... 331

二、CLS 系统组成 331

三、裸眼井测井信号恢复面板..... 335

四、CLS 系统其他重要设备 343

五、CLS 的软件系统 346

第二节 成像测井地面系统..... 349

一、概述..... 349

二、EILog 成像测井地面系统..... 350

三、测井软件系统..... 352

本章小结..... 356

思考题..... 356

第十二章 测井数据传输..... 357

第一节 数据传输原理..... 357

一、测井电缆的传输特性..... 357

二、信道码型设计..... 359

三、数字基带信号的功率谱密度..... 363

第二节 曼彻斯特编码测井数据传输..... 365

一、曼彻斯特编码及专用编码解码器..... 365

二、3514XA 数据传输短节 369

第三节 高速测井数据传输..... 372

一、高速数据传输基础..... 372

二、EILog 系统高速数据传输..... 375

本章小结..... 379

思考题..... 379

参考文献..... 381

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，尤其是当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 ρ 。根据点电极的电位公式，测量电极 M 点的电位是：

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

测量电极 N 点的电位是：

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

因而有：

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

令 $K = \frac{4\pi \times \overline{AM} \times \overline{AN}}{\overline{MN}}$ ，代入上式可得：

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

式中 I ——从 A 电极流出的电流强度；

K ——电极系系数，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（ ρ_a ）。相应上面的电阻率公式可改写成：

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

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，但在盐水钻井液和膏盐剖面井中，由于受钻井液分流的严重影响，使普通电阻率测井失去了效力。为解决这种问题，提出了电流聚焦测井。

电流聚焦测井采用电屏蔽方法，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钻井液和膏盐剖面井的必测项目，也是淡水钻井液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、九侧向（即双侧向）；按探测深度来分，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微球形聚焦等。

现在，最常用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侧向和七侧向。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 ρ_t 、冲洗带电阻率 ρ_{xo} 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

1. 三侧向测井原理

由上述内容可见，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。三侧向就是由这样 3 个电极组成的，其电极均为柱状，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 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。

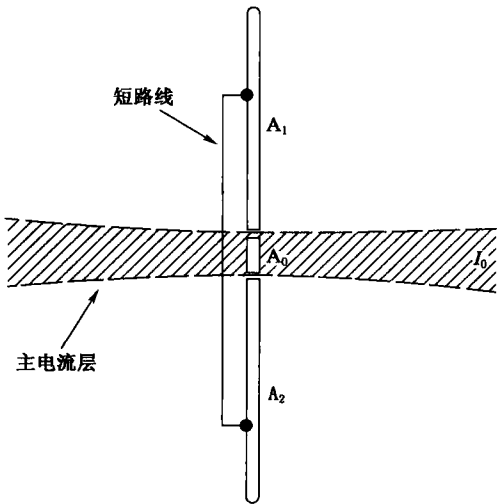


图 1-1 三侧向电极系和主电流层

为避免电极极化，侧向测井采用低频正弦交流电供电，国产三侧向、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 ρ_a 。

和普通电阻率测井一样，侧向测井的视电阻率公式是：

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

式中 U ——主电极表面的电位，V；

I_0 ——主电流强度，A；

K ——侧向电极系系数，m。

电极系系数 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。对三侧向测井仪器：

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

$$L_0 = L_m + \frac{2}{3}b$$

式中 L_m ——主电极实际长；

b —— A_0 与 A_1 或 A_2 之间绝缘环的厚度；

L ——三侧向电极系长度；

L_0 ——电极视长度；

ϕ ——电极系直径。

在三侧向屏蔽电极以外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，屏蔽作用相应增强，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（图 1-2、图 1-3）。

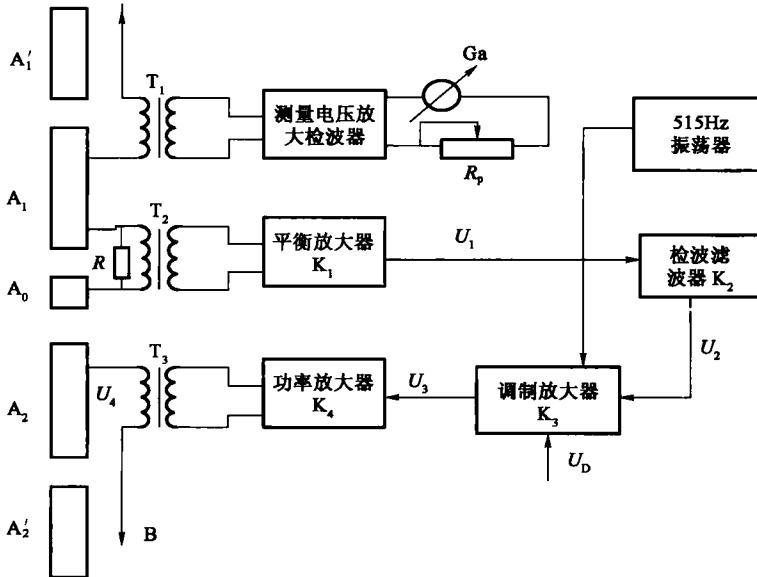


图 1-2 恒流式三侧向测井仪的原理框图

B—主电流和屏蔽电流的回流电极； T_1 —测量信号输入变压器； T_2 —平衡信号输入变压器； T_3 —屏流输出变压器； R —主电流取样电阻； R_p —记录仪测量电阻；

Ga—检流计； U_D —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 $\rho_a = K \frac{U}{I_0}$ 可知，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 UI 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。

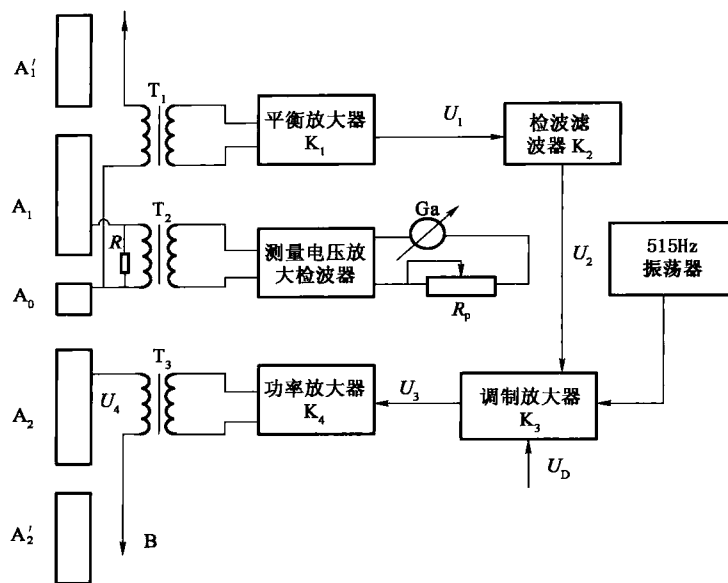


图 1-3 恒压式三侧向测井仪的原理框图

B—主电流和屏蔽电流的回流电极；T₁—测量信号输入变压器；T₂—平衡信号输入变压器；

T₃—屏流输出变压器；R—主电流取样电阻；R_p—记录仪测量电阻；

Ga—检流计；U_D—比较电压

三侧向有恒流式和恒压式两种，如图 1-2 和图 1-3 所示。无论恒流式还是恒压式，设计仪器首先要考虑的问题是如何使 A₀、A₁、A₂ 三电极电位相等，为此需要供给 A₀、A₁、A₂ 同极性的电流。电路框图中用 515Hz 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 A₁ 或 A₂，然后再通过连接在电极 A₁ 和 A₀ 间的一个小电阻 R (0.01Ω) 加到电极 A₀，这样就达到了使 A₀、A₁、A₂ 电流极性相同的目的。

在测井过程中，随着电极接地电阻的变化，必然引起主电流 I₀ 的变化，在恒流式仪器中必须保持 I₀ 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：

$$\rho_t \downarrow \rightarrow I_0 \uparrow \rightarrow U_2 \uparrow \rightarrow (U_D - U_2) \downarrow \rightarrow U_4 \downarrow \rightarrow I_0 \downarrow$$

反之：

$$\rho_t \uparrow \rightarrow I_0 \downarrow \rightarrow U_2 \downarrow \rightarrow (U_D - U_2) \uparrow \rightarrow U_4 \uparrow \rightarrow I_0 \uparrow$$

测量信号取自 A₁ 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_{A₁}。该信号经变压器 T₁ 送至测量放大器放大，再经滤波和相敏检波输出至记录仪。

2. 七侧向测井原理

七侧向电极系如图 1-4 所示，它由 7 个环状电极组成。其中 A₀ 和 A₁、A₂ 分别是主电极和屏蔽电极，作用同前。介于 A₀ 和 A₁ 或 A₂ 之间的 M₁、N₁ 和 M₂、N₂ 是两对监督电极，又叫测量电极。它们均以 A₀ 为中心，对称地排列在 A₀ 两侧，每对同名电极间用导线短路，所以 A₁ 和 A₂、M₁ 和 M₂、N₁ 和 N₂ 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, 所以无论主电极还是屏蔽电极流出的电流都在 M_1 、 N_1 及 M_2 、 N_2 处拐弯, 使主电流沿水平方向流入地层。主电流分布如图 1-4 所示。电阻率公式为:

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

式中 U_M ——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, 按点电极电位公式可以导出七侧向电极系数:

$$K = \frac{4\pi \times \overline{A_0M_1} \times \overline{A_0N_1} \times (\overline{A_0M_1} + \overline{A_0N_1})}{(\overline{A_0A_1})^2 + \overline{A_0M_1} \times \overline{A_0N_1}}$$

测井时, 理论上要求 $U_{M_1N_1} = 0$, 实际上 $U_{M_1N_1}$ 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 ΔU_{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 4 个参数来表示电极系结构和特性, 这 4 个参数是:

(1) 电极系长度 L_0 , 是指电极 A_1 和 A_2 之间的距离, 即 $L_0 = \overline{A_1A_2}$ 。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。

(2) 电极距 L , 代表 O_1O_2 之间的距离, 即 $L = \overline{O_1O_2}$ (O_1 、 O_2 分别是 M_1N_1 及 M_2N_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。

(3) 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。

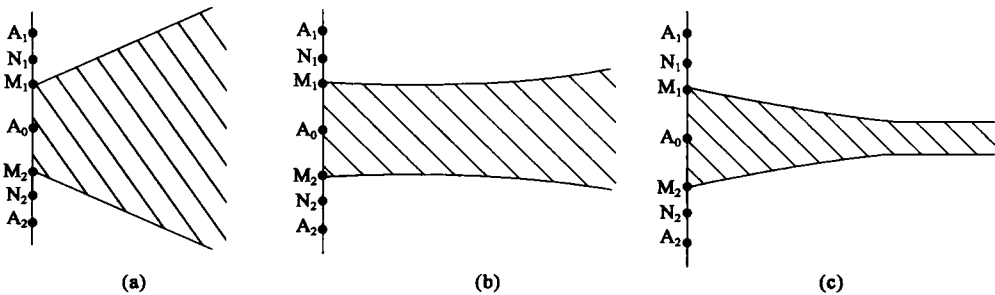


图 1-5 在均匀介质中主电流层的形状

(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 $S = 4$ 时主电流层形状

(4) 聚焦系数 q , 指 $(L_0 - L)/L$ 的值, 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, 仪器工作方式恒流式, 测量监督电极中点至远处 N 电极间的电位差。

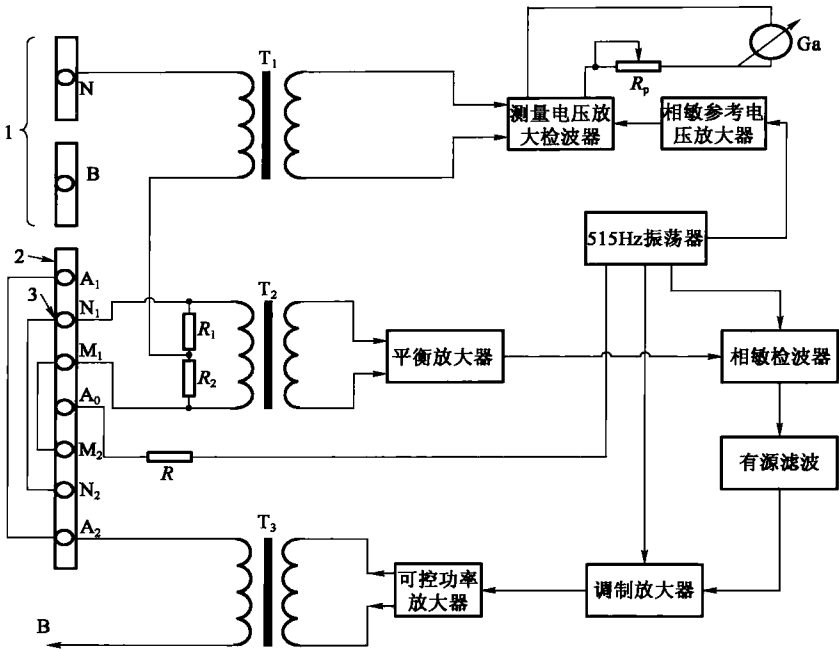


图 1-6 七侧向仪的测量原理图

1—加长电极；2—七侧向电极系；3—电极短路连接线；B—主电流和屏蔽电流的回流电极；
N—无穷远测量电极；T₁—测量信号输入变压器；T₂—平衡信号输入变压器；T₃—屏流输出变压器；R—主电流取样电阻；R₁，R₂—均压电阻，各为 1kΩ

3. 双侧向测井原理

双侧向是在三侧向、七侧向的基础上发展起来的, 它吸取了三侧向、七侧向的优点。双侧向电极系由 9 个电极组成, 主电极 (A₀)、第一屏蔽电极 (A₁、A₂)、第二屏蔽电极 (A₁'、A₂') 和三侧向一样用柱状电极, 其中 A₀ 较短, 屏蔽电极较长, 监督电极 (M₁、M₂ 和 M₁'、M₂') 和七侧向一样用环状电极, 它们介于 A₀ 和 M₁ (或 M₂) 之间。各同名电极间同样要短路连接, 并以 A₀ 为中心呈对称排列 (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 A₀ 流出的主电流 I₀ 和从屏蔽电极流出的屏流 I_b 极性应该完全相同, 这是使主电流聚焦的基础。为此, 双侧向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 I₀, 依据视电阻率公式计算出地层视电阻率。

在侧向测井视电阻率公式 $\rho_a = K \frac{U}{I_0}$ 中, U 和 I₀ 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。

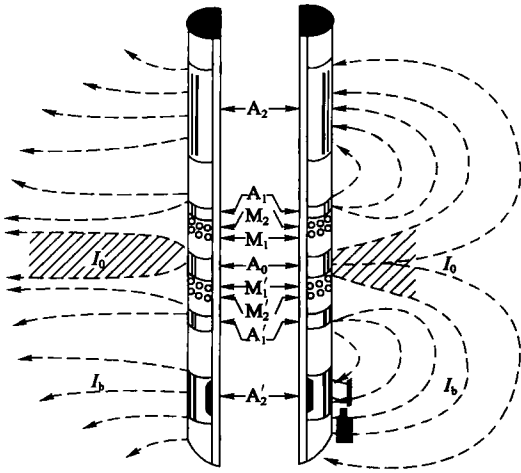


图 1-7 在均匀介质中主电流层的形状

设 A_0 的接地电阻为 R_0 , 则:

$$\rho_a = KR_0$$

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:

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

式中 R ——电极 A_0 和钻井液的接触电阻;

R_m ——主电流 I_0 流过钻井液的体电阻;

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_t —— I_0 流过原状地层的电阻;

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。

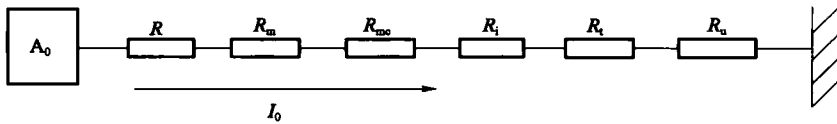


图 1-9 主电极接地电阻等效电路图

由于钻井液电阻率低, I_0 流过钻井液、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:

$$R_0 \approx R_i + R_t$$

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

显然, 对深侧向 R_t , 若对接地电阻 R_0 的贡献比 R_i 的贡献越大, 则测井效果越好, 所以