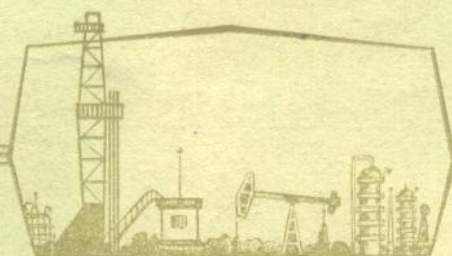


高等学校教学用书

测井仪器

上册

周坤瑞 杨荣礼编



石油工业出版社

测 井 仪 器

上 册

周坤瑞 杨荣礼 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书为石油院校地球物理测井专业测井仪器课教学用书。书中将国内外现用的测井记录仪器分为模拟记录（照相记录及静电显影记录）及数字磁带记录两大类。分别叙述其基本工作原理，并结合具体仪器分析其线路、结构及特点。

本书还可供石油地质、煤田测井、水文等专业师生参考。并可供野外测井技术人员自学或参考。

测 井 仪 器

上 册

周坤瑞 杨荣礼编

*

石油工业部教材编译室（北京902信箱）

石油工业出版社出版发行

（北京和平里七区十六号楼）

化学工业出版社印刷厂印刷

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $9^{1/4}$ 插页2 字数228千字印数1—2,500

1981年1月北京第1版 1981年1月北京第1次印刷

书号15037·2219 定价1.05元

前 言

本书是为石油院校测井专业编写的教材，本书结合现场广泛使用的测井记录仪器，介绍了多线照相记录仪，在此基础上，介绍了静电显影明记录的原理以及双深度照相记录仪的特点。考虑到今后发展的需要，还介绍了野外数字测井磁带记录仪。授课45学时左右为宜。

为了便于理论联系实际，学以致用，本书力求结合具体的记录仪器，阐明基本概念和基本原理，着重于培养分析电路的能力，同时也注意到培养调校仪器的技能。不过，由于引进的测井仪器刚开始使用，技术资料不足，加上编者经验缺乏，因此这部分教材，仍需大家共同探讨。

本书编写过程中，得到胜利油田、西安石油勘探仪器总厂、渭南煤田地质仪器设备厂等单位的大力支持和热情帮助，在此再次表示感谢。

由于编者经验不足，水平不高，因此书中的缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

本书由华东石油学院测井教研室组织审查，最后由王曰才同志负责审阅。

目 录

第一章 概述	1
第一节 测井技术的作用和特点.....	1
第二节 测井的原理及基本概念.....	2
第三节 数字测井系统.....	4
第二章 多线照相记录仪	8
第一节 检流计系统.....	8
第二节 光学系统.....	24
第三节 深度系统.....	26
第四节 控制电路.....	31
第五节 多线照相记录仪的调整.....	35
第三章 静电显影明记录原理	40
第一节 静电显影的原理.....	40
第二节 静电记录纸.....	43
第三节 显影剂.....	46
第四章 双深度照相记录仪	48
第一节 结构特点.....	48
第二节 光学系统的特点.....	49
第三节 控制电路的特点.....	50
第四节 检流计控制电路的特点.....	54
第五章 数字测井磁带记录仪原理概述	58
第一节 数字测井仪简介.....	58
第二节 采样基本原理.....	59
第三节 磁带记录原理.....	60
第四节 磁带记录格式.....	63
第六章 数字磁带机	66
第一节 概述.....	66
第二节 逻辑控制电路.....	67
第三节 写数据电路.....	82
第四节 读数据电路.....	87
第五节 伺服电路基本原理.....	96
第七章 磁带机控制器	99
第一节 时钟.....	99
第二节 存贮器.....	102

第三节	输入输出系统	113
第四节	磁带记录	120
第五节	误码检测	130
第六节	深度系统	131
参考资料		138
附图		

第一章 概 述

第一节 测井技术的作用和特点

一、测井在石油勘探和开发中的作用

测井是矿场地球物理的简称，它在石油勘探和开发中，是不可缺少的一门科学技术。为了找油找气，一般要根据地质科学的研究，首先在有利于石油生成和储集的地区，进行地质调查和地球物理勘探，找出可能储藏石油和天然气的各种地质构造。至于这些地质构造中是不是有油有气呢？最终要靠钻井来证实。在钻井过程中，可以从钻速变化、泥浆性能变化、油气显示以及岩屑、岩芯分析，气测井等等资料，进一步认识地层，粗略地判断含油气情况。

气测井又叫泥浆测井，主要是分析研究泥浆中气体含量和成分的变化。当钻头钻开含油、气储集层时，循环的泥浆可以把一些油、气带到地面，通过气测井仪器的分析就可以测定出来。在探井中，一般都进行气测井，它是直接找油找气的重要方法之一。根据气测井的异常显示，还可以准确地预报高压油气层，以便钻井队采取措施，防止发生井喷事故。此外，测井还可以为钻井工程提供井斜、井径等资料。

在钻井见到油气显示之后，还有许多技术问题需要解决。例如，油层有多厚？油田面积有多大？油气储量是多少？要回答这些问题，又需要做大量的工作。只有把地下的情况弄得清清楚楚，才可能科学地开发油田。测井可以提供许多极为重要的资料，例如利用测井曲线划分岩性，确定层厚，进行综合解释求出目的层的孔隙率、含油饱和度、泥质含量等参数。对多口井的测井资料进行对比，可以绘制地质构造图。随着地层倾角测井的发展，从一口井中就可以确定地层层面的倾角和倾向，通过电子计算机的数据处理，可以绘制构造图，并为在这些构造上打边界井，选择有利的井位。对于一些岩性可疑的层位，可用测井电缆，把井壁取芯器放到井筒内，对准可疑地层进行井壁取芯，把岩芯取到地面上，再作细致的观察和分析。对于储集层中液体的性质，也可用电缆式地层流体测试器进行测试。由此可见，测井是深入地认识地层和地质构造的重要手段之一。

测井不仅在石油勘探中具有重要的作用，而且在油田开发过程中，也能发挥积极的作用。在工程上，利用测井资料可以估算出固井所需要的水泥量。固井质量的优劣，也可用测井方法进行检查和评定。根据开发方案，有计划地打开油、气、水层，也要用到测井、射孔技术。一般都用测井资料作为校准射孔深度的依据，再用电缆把聚能射孔弹对准目的层，进行井下射孔，以形成穿过套管、水泥环进入地层的若干射孔通道。有了这些通道，才便于注水注气或采油采气。为了提高油井的生产能力，有时需要对一些储集层进行酸化压裂处理，这也要用测井资料和技术，以提高准确性和了解处理的效果。油田投产后，掌握井下流体的动态十分重要，这对稳定高产，提高采收率，关系十分密切。生产测井可以提供井下流体动态的许多参数，这不仅是判断油井故障的重要依据，而且也是调整油田开发方案的重要数据。此外，用测井技术还可以找出井下出水层位、井壁窜槽部位，甚至可以检测出套管腐蚀的程度。

测井质量好,资料齐全准确,解释精度高,就能在油田勘探和开发中发挥积极的作用。如果测井原始资料就不可靠,那么不论是人工解释还是计算机处理,都难以得出可靠的结果。采用不可靠的甚至是错误的测井资料来指导勘探和开发,往往会造成严重的后果。为了充分发挥测井的积极作用,一定要努力提高测井的质量和水平。

二、石油测井的特点

石油测井研究的对象,主要是钻井井眼所穿过的地层,研究的主要手段是用测井仪器测量反映地层物理性质的各种参数,并根据测井资料与储集层岩性、储油物性以及含油性的规律,解决油田勘探和开发中的许多问题。

不同的油田,地质特点不同。井眼所穿过的地层也有各种各样的岩性,要划分这些岩性层面,测井仪器必须有一定的分层能力。在钻井过程中,由于循环泥浆的冲洗和静压力作用,常常在渗透性地层中发生泥浆滤液侵入的现象,因此渗透层的物理性质会发生变化。要探测渗透层径向物理特性的变化,就要求测井仪器有不同的探测范围。为了减小泥浆对测井读数的影响,一般采用使测井探测器贴井壁的措施,而在盐水泥浆井中,则采用聚焦性能好的测井仪器,以减小盐水泥浆的影响。

在地层比较单纯的条件下,用几种测井方法进行解释,就能得到满意的结果,而在地质条件复杂的条件下,就需要多选择一些测井方法,多取一些测井资料,进行综合解释和计算,才可能得到较好的成果。一种测井方法通常只反映地层某一方面的物理特性,要从不同的方面来认识岩性复杂的地质剖面,多选用几种测井方法是必要的。为了使不同探测深度的测井仪器在相同的井下状态中探测,有必要进行组合,以便一次下井测量多个参数。这不仅有利于保证质量,而且有利于提高测井时效,因此许多测井仪器都向系列配套方面发展,组合程度很高,而且大量采用集成电路。

随着石油工业的发展,钻井技术的提高,深井和超深井不断增多,这就要求测井仪器设备能适应测深井。深井的井下特点是高温、高压,因此,耐高温、耐高压就成为对深井仪器 and 深井电缆的特殊要求。常见的石油钻井的井径是20厘米至30厘米,所以石油测井的下井仪器都是长筒形,外径不能做得太大。

采用钻井取芯的方法,优点是可以直观地认识地质剖面,缺点是成本高,进尺慢。测井的特点是用电缆把仪器下到井筒里,可以很快地测出反映地层物理性质的各种测井曲线,经过综合解释,同样可以认识地质剖面,判断油、气、水层。不仅解决问题的速度快,而且费用低,这是石油测井得到广泛应用的重要原因。

近年来,应用电子计算机处理测井资料见到了地质效果,显示了数字处理的优越性,因此,数字测井仪器和数字处理方法的研究,有了很大的发展。

第二节 测井的原理及基本概念

一、测井的一般原理

测井主要是测量井内的地球物理参数及其相应的深度。测井的一般原理如图1-1所示。在测井过程中,通常用测井电缆把下井仪器放到井筒内,测井绞车提升或下放电缆,使下井仪器沿着井筒移动,同时由电缆带动深度传送器工作。因此,当下井仪器通过电缆向地面传输电信号时,深度传送器也就传送出相应的深度,两者同时送进测井记录仪,就可以进行测井资料的自动记录。

测井专用面板的作用有二:第一,控制井下仪器进入正常工作状态;第二,对井下仪器

送来的电信号进行处理，以满足刻度或测井的需要。下井仪器也叫做井下仪器，它的作用主要是参数转换，也就是把各种被测的地球物理参数转换成相应的电信号。测井电缆除了连接下井仪器、驱动深度传送器外，主要是给下井仪器提供传输电信号和电能的通道。测井记录仪的作用，就是按照规定的比例，自动地记录被测地球物理参数的电信号及其深度。

二、测井的基本概念

测井曲线是测井记录的一种形式。它用连续变化的曲线幅度模拟地球物理参数的大小，在测井曲线图上标有相应的深度，看起来很方便。这种随着井深变化的连续曲线，也叫做模拟曲线。

深度比例 测井曲线图上，一个深度单位与它所代表的实际井段距离之比，就是深度比例。例如深度比例为1:200的测井曲线，即表示在测井曲线图上的1米，所代表的实际井段是200米。1:200的测井曲线常用于定量解释。1:500的深度比例，常用于测全井段的标准测井。1:20的深度比例，又叫放大比例，通常只用于需要详细分层的井段。

横向比例 在测井曲线图上，单位幅度长所代表的地球物理参数值，就是测井曲线的横向比例。横向比例常用符号 n 表示。例如在视电阻率测井曲线上，横向比例 $n = 5$ 欧姆·米/厘米，即表示在测井曲线图上横向的每厘米长，所代表的视电阻率数值都是5欧姆·米。这种单位长度表示相同参数值的横向比例，又叫线性比例。有些测井曲线采用对数比例更方便些，这时需要用对数尺来度量测井曲线的幅度。因为对数尺不是均匀刻度的，所以对数比例也叫做非线性比例。

在同一个油田上，为了便于地质对比，一般都规定统一的深度比例和横向比例。当发现某井的岩性变化特别大时，可先用统一标准测曲线，然后变换横向比例补测有关井段，以便解释时采用。

测井刻度 调整测井系统，使它符合刻度要求，以保证测井的横向比例准确。

设计测井仪器时，一般都要求仪器的读数与所测参数有线性关系，有的要求有对数关系。因此对于线性和稳定性都符合要求的测井仪器进行刻度时，只要刻度两个点就可以了，即刻度一个低值和一个高值，而所测地球物理参数值应大体上不超过刻度范围。有时除了刻度低值和高值外，还记录几个辅助的中间值，以供参考，例如声波测井的刻度。

实体刻度的优点是直观可靠，例如井径仪的刻度，可用已知直径的钢圈（也叫井径规）套在井径仪的测量腿上，再调整测井仪器，使它满足横向比例的要求。但有些实体刻度设备不便于在井场使用，需要用便于携带的刻度器来代替。例如放射性测井仪器的刻度，常用三级刻度标准：一级为国家的标准刻度井，二级为各电测站的刻度井，三级为野外用的刻度模块或标准放射源。为了保证测井仪器刻度准确，一般要求每月作一次二级刻度，在井场每次测井都必须进行三级刻度。

自然电位测井，采用标准电位差刻度；声速测井，常用标准时差信号刻度；普通视电阻率测井，用校验下井电流和调节测量线路的方法进行刻度。这些都属于非实体刻度，是一种间接刻度的方法。当然，这时测井刻度点的选择也要适当，其间隔应能包括所测参数的整个

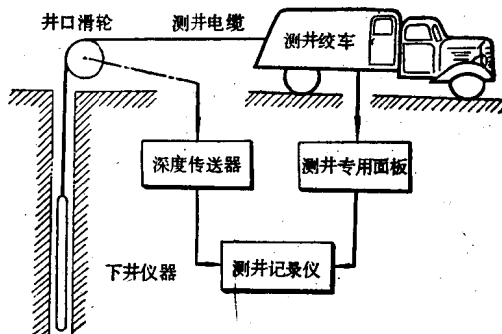


图 1-1 测井的方框原理图

变化范围。

测速控制 控制绞车起下电缆的速度,以保证下井仪器移动的速度既均匀,又不超过规定的最高测速。测井刻度和测速控制都很重要。刻度准确,只表明仪器的静态点测性能符合要求。有了测速控制,才能保证仪器的动态测井性能符合要求。为了保证测井质量,各种测井项目都规定了各自的最高测速,超过最高测速就会影响测井质量。如果钻井泥浆的性能不好,井径不规则,井身结构不佳,则应降低测速,以保证测井质量。为了便于检查实际的测速,在测井曲线的原始记录上,一般都有时间标记。

测井数字记录 测井的野外数字磁带记录,其记录的一般过程是:先按照测井深度,对反映测井参数的模拟电压进行采样,然后通过模数转换器(简称A/D转换器)变成二进制的数字量,再按照一定的顺序存入缓冲存储器,最后经过磁带格式器进入数字磁带机,把这些数字量及有关深度等编码记录到数字磁带上。

野外数字磁带记录和有关数据的记录卡片及原始测井曲线等,在磁带修改人员初步整理之后,经过计算机的预处理,转换成适合计算机作数字处理的磁带记录。如果证明数字记录符合质量要求,就可利用解释程序,控制计算机进行数字处理,最后得到多种地质参数的解释成果图以及数据表格。

第三节 数字测井系统

目前有两种类型的数字测井系统。一种是数字磁带测井系统,另一种是车载计算机数字测井系统。数字磁带测井系统用得比较普遍,它是在原有测井系统的基础上,增加了数据采集设备而形成的。车载计算机数字测井系统是七十年代研制的成果,有一定的发展前景。

一、数字磁带测井系统

数字磁带测井系统的一般原理如图1-2所示。综合下井仪和综合测井面板,主要作用是反映地层物理性质的参数,按照规定的比例转换成模拟电压,以便照相记录仪和数字磁带机进行记录。测井曲线的深度比例,可通过深度系统来满足要求。

深度编码器的作用是按照相等的深度间隔发出深度脉冲信号。该深度脉冲信号通过控制器又产生一系列的控制信号,使多路采样开关对综合测井面板输出的模拟电压 $A_1, \dots, A_n$ 依次采样,而模数转换器则不断地把它们转换成相应的数字量。测井时,电缆不停地移动,深度编码器不断地发出深度脉冲信号。每来一个深度脉冲信号,多路采样开关和A/D转换器完成一次采样和模数转换的任务。虽然是多路采样,但是所得到的数字信息量并不大。

数字磁带机通常在均速运带的条件下,进行数字记录(也叫写入)或数据回放(也叫读出),因此相比之下,数字磁带机的记录速度很高,在很短的时间内,就可以记录大量的测井数字信息。为了充分发挥数字磁带机的作用,在数字磁带测井系统中,常采用缓冲存储器。在缓冲存储器中一般又分成二页,页间交替工作。采样和模数转换所得到的数字信息,按照记录格式的要求,经过编排,及时存入缓冲存储器中,当第一页存满时,控制器发出控制信号,磁带机工作,把第一页存储的测井数据及深度码等等写入磁带。在此期间内,采样继续进行,所得测井数据则依次存到缓冲存储器的第二页上。当第二页存满时,又发出存满信号,控制器则发出控制信号,使磁带机再次工作,把第二页的数据写入磁带;而第一页则继续存数。存储器的两页交替工作,一直继续到记录结束。磁带机在测井过程中,每记录一个数据块要启停一次,因此磁带所记录的许多数据块之间都留有一定的间隙。虽然测井速度

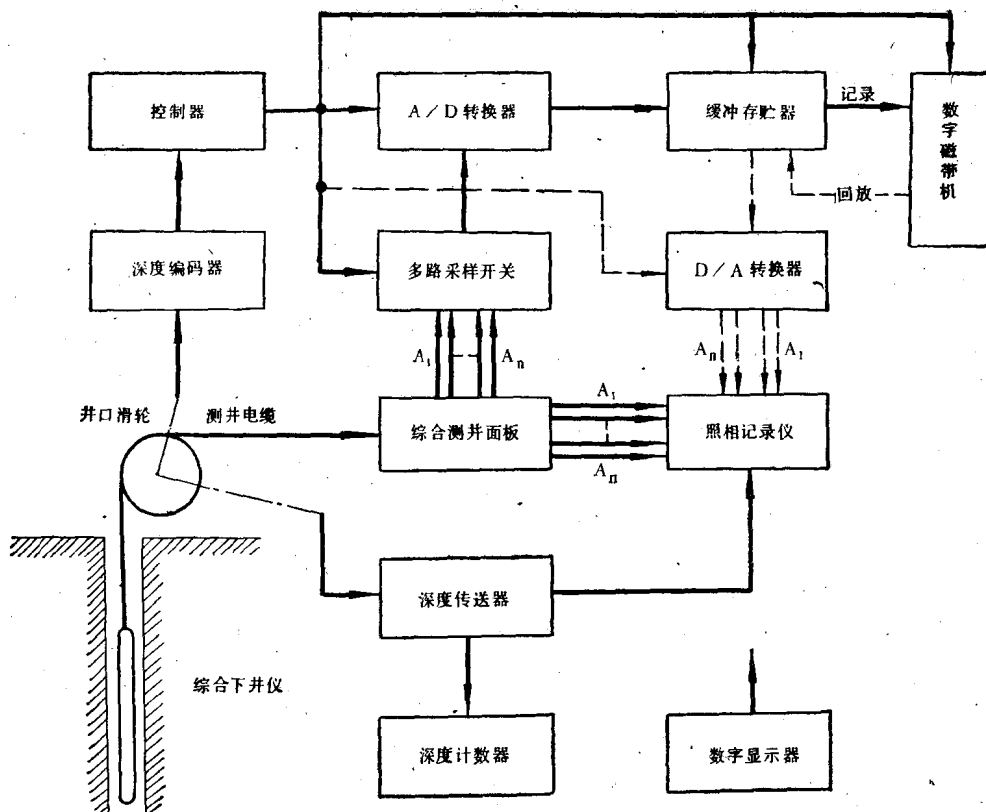


图 1-2 数字磁带测井系统的框图

不同时，单位时间内采样的次数不同，但是，经过缓冲存贮器的缓冲作用，进入磁带机的数据却与测井速度无关。从磁带上检查，记录的数据是均匀分布的。

在回放过程中，磁带机读出磁带上记录的信息，先存进缓冲存贮器，在控制器的控制下，反多路转换开关依次把缓冲存贮器输出的数码接到 D/A 转换器上，转换成相应的模拟电压，以便照相记录仪记录成回放曲线。回放时，要使深度传送器和深度编码器在回放电路的驱动下同时工作，并保证照相记录的比例尺符合要求。

深度计数器的作用是显示测井深度。数字显示器可以用来测量或监视仪器中的数字信息。

数字磁带测井系统，虽然可以在测出测井曲线的同时，就得到野外数字磁带记录，但是，因为它以模拟量的刻度和记录为标准，所以测量精度受到了前者精度的限制。为了保证质量，数字磁带测井系统一般都带有分段的刻度装置，可以对照相记录仪、数字磁带机、综合测井面板以及下井仪器分别地进行逐段刻度。为了简化井场的刻度调节，便于同时记录不同测井内容的刻度值，在综合测井面板里，常设有各种测井方法的等效刻度信号调节器。下井仪器下井后，随着井内温度的升高，下井仪器的灵敏度可能发生变化。为了发现这种变化，以便及时调整地面仪器给予适当的补偿，在有些下井仪器中，设有井下参考刻度信号的装置。刻度极为重要，没有刻度记录的测井曲线和野外磁带，都属于废品。为了保证一定的精度，采取较严格的刻度措施是必要的。但是，当测井内容较多时，刻度操作显得很繁琐，

很费时间，这是其弊病。

二、车载计算机数字测井系统

野外磁带记录送到计算中心，经过数字处理才能得到测井解释成果图。当测井现场远离计算中心时，就难以及时见到测井解释成果。发展数字通讯系统，虽然能较快地见到解释成果，但是，据统计，费用昂贵，很不经济。国外有些测井仪器带有某些计算功能，可以对测井曲线进行简单地计算，并得出某些解释成果曲线。但是，由于考虑的因素比较单一，因此当测井剖面的岩性复杂影响因素较多时，其解释效果很差，几乎没有任何实际意义。

随着大规模集成电路的广泛使用，电子计算机的小型化和微型化的产品越来越多，价格不断下降，这就为发展车载计算机数字测井系统提供了有利的条件。从测井技术本身的发展来看，针对不同岩性的地质剖面，已经形成了不同的测井系列，在井场操作时，刻度和测井都有一定的顺序，因此完全有可能用计算机进行程序控制。从测井资料数字处理方面来看，不论是方法还是处理程序，也都积累了不少经验，这为用车载计算机数字测井系统进行现场解释奠定了基础。

国外有几家测井公司，经过几年的试验研究，先后试制了各自的车载计算机数字测井系统，试用于生产都见到了一定的效果，受到测井操作人员的欢迎，引起了各石油公司的重视。这种数字测井系统是以数字计算机为中心，各种输入和输出设备都要与数字计算机相协调，并在计算机控制下工作，其原理如图1-3所示。

根据测井内容，接好下井仪器后，测井操作员选出所需的操作及解释程序磁带，装在磁带机上，操作键盘式控制台上的有关键盘，可将有关程序输入计算机的内存贮器中。操作员按动控制台上的有关码键，可将测井图头所需记载的内容输入计算机。操作员按下刻度键时，电子计算机就控制整个测井系统进入刻度状态。测井图头和刻度线，可由数控照相记录仪输出，同时将其数据记录到磁带机的磁带上。当下井仪器到达测量井段时，操作员按下测井键，电子计算机就在操作程序控制下，使整个系统进入测井状态。下井仪器通过测井电缆传送上来的电信号，经过接口变换成数字信息进入计算机，测井的深度，则由深度编码器经过深度系统5，再进入计算机。计算机的输出端，可以由磁带机进行原始数据或处理数据的记录；同时由数控记录仪进行模拟记录。在视频监视器的荧光屏上，可逐段监视测井曲线的质量。

当测井仪器的动作不符合操作程序时，计算机将发出故障信号，操作员可及时处理。测完预定的井段，操作员按下终止键，计算机按照操作程序完成必要的控制后，使测井系统进入终止状态。由于操作的自动化程度很高，因此操作员不必忙于扳动开关，而可以集中精力注意观察测井曲线的质量。

如果需要对多种测井曲线进行综合分析，则可将有关数字磁带记录分别输入计算机，并在综合解释程序控制下，由计算机进行数字处理，所得结果可以从数控记录仪输出，同时还可以记录在磁带上。这种现场解释的优点是：便于及时判断油、气、水层，对完井井段和完井方法提出较好的方案。当然，如果对某些井段的原始资料有怀疑，或者认为解释成果有问题，那还可以及时补测重算，加以验证。

由于计算机处理测井资料时，可以考虑多种影响因素，反复计算，因此解释效果较好。据国外资料介绍，斯伦贝谢CSU车载计算机数字测井系统比较先进，在井场解释可确定的参数有：

经过校正的有效孔隙度；

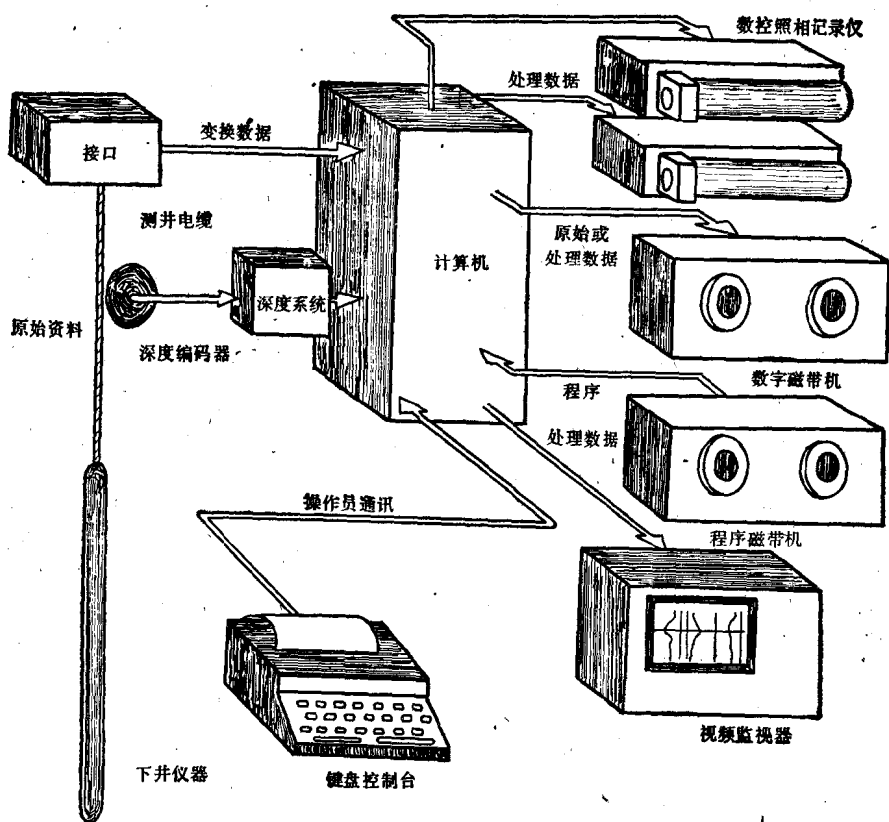


图 1-3 车载计算机数字测井系统示意图

含水饱和度;
视颗粒密度;
纯水层地层电阻率 R_0 与地层真电阻率 R_t 之比;
井筒体积分析;
泥岩指数。

第二章 多线照相记录仪

在数字磁带测井系统中,一般采用照相记录仪记录测井曲线。在处理野外磁带时,为了检查记录质量和核对数据,通常要求把野外磁带、操作员填写的卡片、测井原始曲线以及一段回放曲线等四种资料一起送到计算中心。当

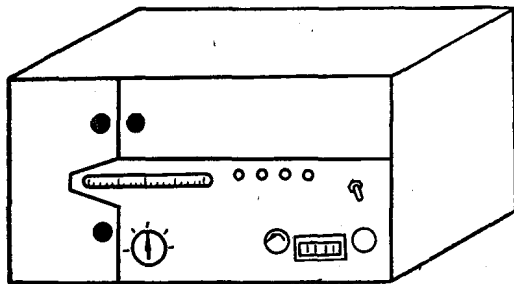


图 2-1 多线照相记录仪的外形图

发现野外磁带记录不够好时,则以测井原始曲线为准,用曲线数字转换仪把某段测井曲线输入计算机,再对野外磁带进行修改。由此可见,测井原始曲线仍然是很重要的资料。

照相记录仪,又叫做照相示波器,其主要作用是自动地记录测井曲线的幅度和深度,同时记录测井的速度。多线照相记录仪的外形如图2-1所示,它由检流计磁场系统,光学系统,深度系统等部分组成。为了调节和控制照相记

录仪的工作状态,设有照相记录仪的控制电路。

第一节 检流计系统

一、检流计的工作原理和灵敏度

测井检流计与一般磁电式电表的工作原理类似。它由永久磁铁、线圈、扭丝以及反射镜等组成,其工作原理如图2-2所示。当线圈2中通过电流 i_g 时,线圈产生的磁场与永久磁铁的磁场相互作用,使线圈受力而形成旋转力矩。线圈和扭丝是连接成一体的,线圈旋转一个角度,扭丝就被扭了一个角度。扭丝是有弹性的,在弹性限度范围内,扭转的角度越大,产生的反作用力矩就越大。如果检流计线圈转动了 α_c 角以后,不再转动,则表明电流 i_g 通过线圈所产生的旋转力矩 M_i ,与扭丝产生的扭力矩 M_e ,两者大小相等,方向相反,达到了平衡。用数学形式表示,即:

$$M_i + M_e = 0 \quad (2-1)$$

从载流导体在磁场中受力的规律来看:

$$F = nBi_g l$$

式中 n ——检流计线圈的圈数;

B ——磁感应强度即磁通密度。

从图2-2可以看出,线圈绕轴偏转的旋转力矩是:

$$M_i = Fr \cos \alpha_c$$

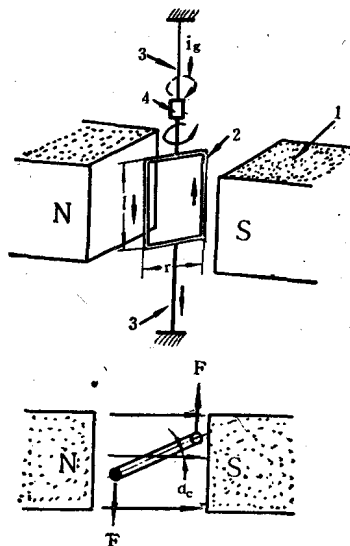


图 2-2 检流计工作原理

1—永久磁铁; 2—检流计线圈; 3—扭丝; 4—检流计小反射镜; l —检流计线圈的长度; r —检流计线圈的宽度

在一般情况下, 检流计线圈的偏转角度很小, 所以 $\cos\alpha_c$ 趋近于1。略加整理:

$$\begin{aligned} M_i &= nBlr i_g \\ &= n\phi i_g \\ &= \psi i_g \end{aligned}$$

在式中, lr 乘积是线圈的面积; lr 乘上磁通密度 B 相当于磁通量 ϕ 。线圈有 n 匝, 因此 $n\phi$ 可用磁链 ψ 来表示。电流 i_g 流过检流计线圈产生的旋转力矩可简化为:

$$M_i = \psi i_g \quad (2-2)$$

另一方面, 实验证明, 在检流计线圈偏转角度不太大的情况下, 扭丝产生的扭力矩与偏转角的大小成正比, 与扭丝本身的材料, 长短、宽窄、厚薄等几何尺寸, 加工工艺等因素有关。其数学表达式为:

$$M_s = -W\alpha_c \quad (2-3)$$

其中 W 是比例系数, 它表示扭丝扭转单位角度时, 所产生的反抗力矩的大小。它反映扭丝本身的特性。习惯上称 W 为“反抗力矩系数”, 但也有人称它为“比反抗力矩”。

将公式(2-2)和(2-3)代入公式(2-1)可得到:

$$i_g = \frac{W}{\psi} \cdot \alpha_c \quad (2-4)$$

这表明, 流过检流计线圈的电流 i_g , 与检流计线圈偏转的角度 α_c 有正比关系。在测井检流计中, 反射镜片是贴在扭丝上的, 扭丝扭转了一个角度, 反射镜片也随着转一个角度。但是, 从照相记录仪的外刻度尺上来看, 见到的是光点偏转了一个距离。那么光点偏转距离与检流计小反射镜片的偏转角之间有什么关系呢?

为了便于分析, 可参看图2-3所画的镜式检流计的反射光路图。从检流计光源灯5发出平行光束, 光束照射到检流计小反射镜片上, 该镜片反射出来光束分成两路: 一路反射到观察窗的外刻度尺上; 另一路经柱状透镜聚焦后, 照射到相纸上。假设小反射镜片在1的位置时, 反射光束对应的是1。当小反射镜片偏转了 α_c 角后, 变到2的位置时, 则反射光束也就移到2。反射光束1和2的夹角是 $2\alpha_c$, 检流计光点在刻度尺上偏转的距离是 L 。

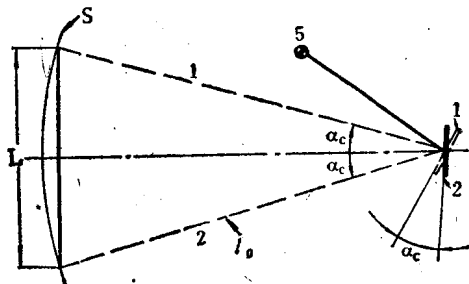


图 2-3 检流计的反射光路

当偏转角度 α_c 不太大, 而光臂 l 较长时, 弧长 S 和弦长 L 非长接近。从几何关系来看, 有: $S = l_0 \cdot \alpha_c$ 。

因为 $1^\circ = \frac{\pi}{180^\circ}$ (弧度), 所以:

$$L \approx l_0 \cdot 2\alpha_c \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = \frac{\pi\alpha_c}{90^\circ} \cdot l_0 \quad (2-5)$$

这表明, 检流计光点偏转的距离与小反射镜片偏转的角度成正比。当检流计线圈偏转的角度一定时, 则光臂 l 越长, 检流计光点在刻度尺上偏转的距离就越长。

检流计的电流灵敏度与那些因素有关呢? 将公式(2-4)代入(2-5)可得到:

$$L = \frac{\pi l_0 \psi i_g}{90^\circ W}$$

$$S_i \equiv \frac{L}{i_g} = \frac{\pi l_0 \psi}{90^\circ W} \quad (2-6)$$

检流计光点偏转的距离 L ，被通过检流计线圈的电流 i_g 除，就表示单位电流强度作用下，检流计光点偏转的距离。这正是检流计电流灵敏度 S_i 的定义。因此，由公式(2-6)可以看出，检流计的光臂 l_0 越长，磁链 ψ 越大，反抗力矩系数 W 越小，则检流计的电流灵敏度 S_i 越高。当检流计及其磁场系统制成后，只要 l_0 、 ψ 、 W 固定不变，检流计的电流灵敏度也就可以保持稳定不变。

通过以上讨论，我们找到了一些规律，明确了提高检流计电流灵敏度的途径。例如，为了增大磁链，检流计线圈的圈数要多，线圈的框面要大，永久磁铁的磁性要强，矫顽力要大，作用到线圈上的磁通密度要大等等。要想反抗力矩系数 W 较小，扭丝就要选择适当的材料和几何形状，同时还要考虑加工工艺等等。

二、多线电测检流计的结构

从外表上看，多线照相记录仪的检流计磁场总成是由10支 JDJ4 型笔式检流计，两块永久磁铁，上、下软轭铁以及底座等组成。永久磁铁的材料是铝镍钴 V 号磁钢。永久磁铁与上、下软轭铁的间隙越小越好，设计要求间隙不大于 1 丝（即 0.01 毫米）。磁钢经过热处理和充磁老化，在磁场的检流计插孔中，磁通密度约为 11000~12000 高斯。因此，在一定的空气空隙中，能够保持恒定的磁场强度。检流计磁场总成的结构如图 2-4 所示。

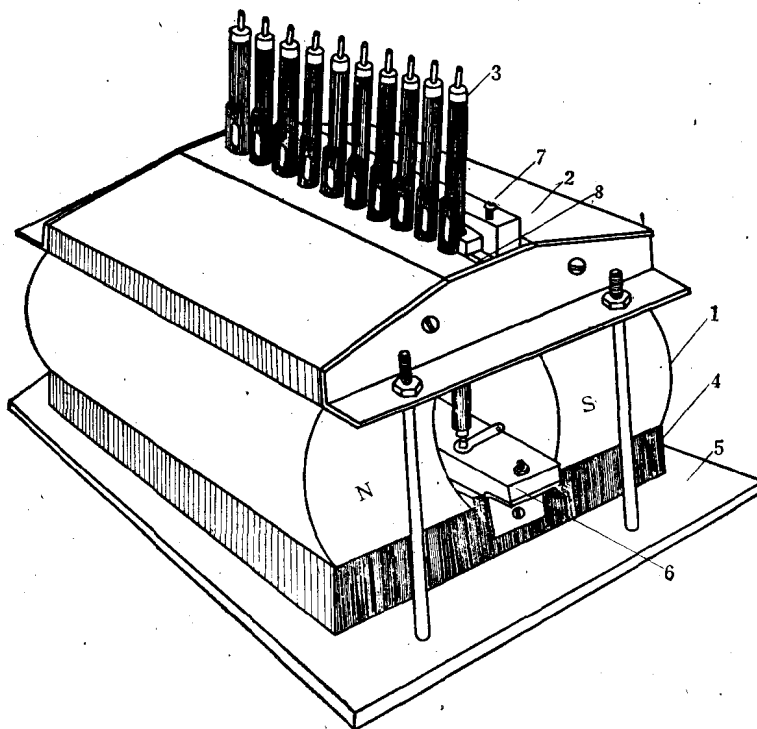


图 2-4 检流计磁场总成的结构

1—鼓形永久磁钢；2—上软轭铁；3—笔式检流计；4—下软轭铁；5—检流计磁场总成的底座；6—检流计接线座（即检流计底板）；7—检流计固紧螺钉；8—黄铜垫片

检流计磁场总成经过严格检验，合格品才准出厂，使用过程中严禁任意拆卸。因为大拆大卸，永久磁钢的磁性急剧下降，再装起来，就达不到原来的水平了。永久磁钢的磁性太弱，就会出现所有检流计的电流灵敏度都普遍降低。在现场使用中，为了减小永久磁钢的自然退磁作用，在更换检流计时，最好能用铁片将已拔出检流计的插孔短路。同时，一次不要拔出几个检流计，更不要同时把所有的检流计全部拔出来。

JDJ4 型笔式检流计具有：体积小，灵敏度高，密封，机械稳定性较好等特点。此外，由于笔式检流计为圆筒形，装在磁场的检流计插孔中以后，仍然可以用检流计调节帽使其左右转动，调整检流计光点的位置。采用这种整体调节机械零的方法，比采用直接拧扭丝改变机械零的方法好。因为它既不会因调节过度，拧断扭丝；又不会因调节不当，影响检流计的参数。

JDJ4 型笔式检流计的结构如图2-5所示。

在图2-5的检流计结构中，我们看到在检流计外壳上镶有两块半圆筒形的软铁7，而在检流计黄铜支架上，却焊了一个圆柱形的软铁芯14。为什么要采用这种结构呢？

为了得到均匀的径向磁场和提高磁通密度，因此采用了这种结构。当检流计插入检流计插孔中时，进入检流计线圈部位的磁力线，大体上与圆柱形软铁芯的表面相垂直，而磁通密度的大小和分布也近似均匀，因此可得到近似均匀的径向磁场，如图2-6所示。

检流计线圈比软铁芯大一些，它可以在软铁镶块和软铁芯的空隙中转动。由于这个空隙中的磁力线是径向分布的，因此作用在线圈两边的电磁力总是和线圈平面垂直的。电磁力和线圈平面相垂直，这意味着力臂固定不变。力臂固定不变，则旋转力矩的大小仅仅取决于电磁力的大小。而电磁力的大小，在磁场稳定和线圈系统结构一定的条件下，又仅仅取决于流过检流计线圈的电流强度的大小。由此可见，采用这种结构的主要优点是：不论线圈平面在哪个位置上，旋转力矩与流过检流计线圈的电流始终保持正比关系。

为什么用软铁材料呢？这是因为软铁的导磁性能好，而矫顽磁力很小，用它做成软铁

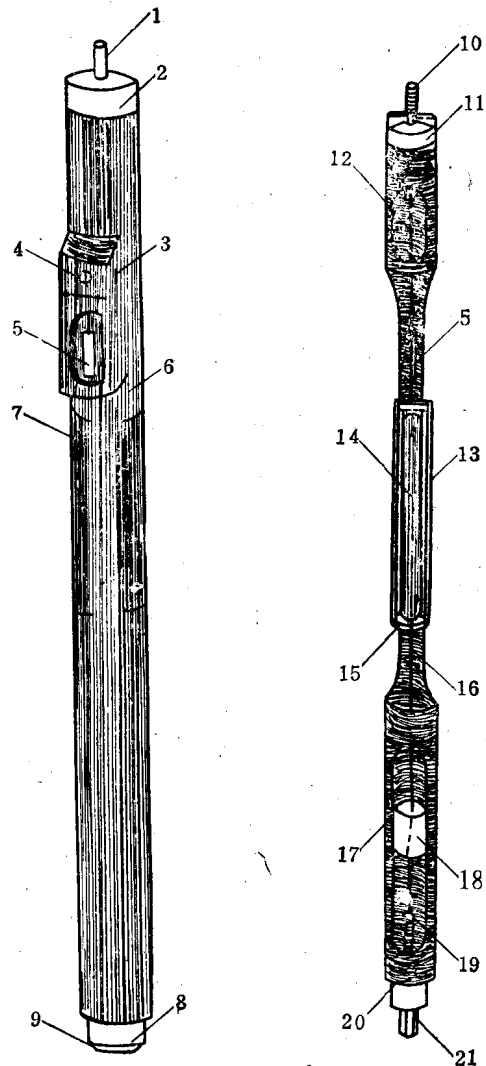


图 2-5 JDJ4型笔式检流计的结构

1—检流计接线头；2—有机玻璃绝缘垫片；3—机械调零块；4—锁紧顶丝；5—检流计小反射镜片；6—检流计外壳；7—软铁镶块；8—有机玻璃绝缘套；9—检流计下引线插座；10—上引线螺柱；11—有机玻璃绝缘垫片；12—检流计上扭丝；13—检流计线圈；14—软铁芯；15—象牙线圈架；16—检流计下扭丝；17—检流计黄铜支架；18—带斜孔的有机玻璃滑块；19—减震弹簧；20—绝缘套；21—下引线插头