

高等学校教学用书

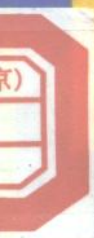
测井仪器原理

非电法测井仪器

冯启宁 主编



石油大学出版社



登录号	135073
分类号	P631.81
种次号	050

测井仪器原理

(非电法测井仪器)

冯启宁·鞠晓东 编
陆介明 郑学新

5245/27



石油大学0132558

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》的第二部分,包括第四章至第七章,共四章。主要讲述声波测井下井仪和放射性测井下井仪。第四章叙述声波测井,包括双发双收声波测井和数控声波测井;第五章叙述补偿中子测井;第六章叙述岩性密度测井;第七章叙述自然伽马能谱测井。简要介绍了其测井原理,结合测量参数对电子线路进行了详尽分析。并介绍了国内外各种同类下井仪。

本书是石油高校测井专业教材,也可作为有关院校专业的参考书及现场人员的参考书或自学书籍。

测 井 仪 器 原 理

(非电法测井仪器)

冯启宁 鞠晓东 编
陆介明 郑学新

*

石油大学出版社出版

山东省东营市

新华书店发行

石油大学出版社照排室排版

石油大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 11.125 印张 2 插页 278 千字

1992 年 10 月第 1 版 1992 年 10 月第 1 次印刷

印数 1 - 3000 册

ISBN 7-5636-0232-1 / TE · 49

定价: 6.80 元(模)

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

第四章 声波测井仪.....	(1)
第一节 声波测井原理.....	(1)
一、岩石中声波的传播参数	(1)
二、声系设计和测量原理	(2)
第二节 双发双收声波测井仪.....	(5)
一、双发双收声系原理	(5)
二、下井仪工作原理	(7)
三、地面仪工作原理.....	(10)
小结	(36)
第三节 数控声波测井技术	(36)
一、井下设备概述.....	(37)
二、声系设计原理.....	(37)
三、电子线路短节 SLC	(43)
四、地面设备工作原理.....	(63)
小结	(72)
第五章 补偿中子测井仪	(74)
第一节 测量方法原理	(74)
第二节 2435 补偿中子测井仪	(74)
一、仪器测量原理.....	(74)
二、电路说明.....	(75)
第三节 CNT-G 补偿中子测井仪.....	(78)
一、概述.....	(78)
二、仪器工作原理.....	(79)
三、电路分析.....	(80)
小结	(99)
参考文献	(99)
第六章 岩性密度测井仪.....	(100)
第一节 仪器原理.....	(100)
一、物理原理	(100)
二、仪器测量原理	(105)
第二节 LDT-D 井下仪器线路分析	(113)
一、岩性密度测井仪 LDT-D 总框图	(113)
二、通用接口 U_1 、 U_2 和 U_3	(114)

三、用户字(UDW)指令译码	(119)
四、核信号的放大和处理	(126)
五、井径测量	(137)
六、脉冲计数与脉冲计数率的传输	(138)
第三节 LDT 刻度	(140)
一、本底测量	(140)
二、铝块测量	(141)
三、铝块加铁衬套筒测量	(141)
四、总体测量	(141)
小结	(142)
第七章 自然伽马能谱测井仪	(143)
第一节 自然伽马能谱测井测量原理	(143)
一、岩石的自然放射性	(143)
二、自然伽马能谱测井仪测量原理	(144)
第二节 NGT-C 自然伽马能谱测井仪测量原理	(148)
一、稳谱原理	(148)
二、NGT-C 自然伽马能谱测井仪测量原理和框图	(149)
三、刻度能量和电压的转换关系	(151)
第三节 NGT-C 自然伽马能谱测井仪电路分析	(152)
一、环信号放大、比较逻辑电路	(152)
二、谱信号比较逻辑电路	(155)
三、高压环路控制和谱误差控制	(157)
四、能窗计数率的发送	(161)
五、接口电路	(166)
小结	(170)
参考文献	(170)
附表 测井中常用的许用单位与非许用单位换算表	(171)

第四章 声波测井仪

第一节 声波测井原理

一、岩石中声波的传播参数

声波测井是根据声学物理理论发展起来的一种测井方法。声波测井中一般采用频率数千赫至数万赫的机械波(某些特殊声波测井方法使用数十万赫至数兆赫的频率)。这个波谱的大部分在人耳能听到的范围内,因此称为“声”波测井。

对于由不同岩石组成的地层,当所施加的机械力在一定范围内时,可以近似的看成由质点组成的弹性体。因此,人们有可能应用弹性力学理论去考察声波在地层中的传播规律,进而用声波测井曲线来分析地下岩层的某些重要地质特征。

表 4-1 测井中常见介质的纵波声速

性质	材料	时差 ΔT ($\mu\text{s}/\text{m}$)	速度 v_p (m/s)
无孔隙固体	白云岩	142.7	7010
	石灰岩	156.2	6400
	方解石	163.1	6130
	硬石膏	164	6100
	钢(厚度有限)	164	6100
	花岗岩	166.3	6010
	石膏	172.6	5790
	石英	173.6	5760
	套管	187	5350
	岩盐	218.5	4580
	水泥(固结)	273.3	3660
饱和原生水的 孔隙岩石	白云岩(孔隙度 5~20%)	164~219.5	6100~4560
	石灰岩(孔隙度 5~20%)	177.2~252.3	5640~3960
	页岩	192.9~469.2	5180~2130
	砂岩(孔隙度 5~20%)	205.1~285.1	4880~3510
	砂层(未固结,孔隙度 20~35%)	285.1~364.5	3510~2740
液 体	水(含 NaCl 200g/L)	596.5	1680
	水(含 NaCl 100g/L)	630.9	1590
	淡水	682.4	1470
	泥浆	620.1	1610
	石油	781.2	1280
气 体	氢	772	1300
	甲烷	2187	460

* 常温及标准大气压下

地下岩石在岩性、沉积年代、组织结构(孔、洞、裂缝)等方面的不同导致了以其为介质传播的声波在速度、幅度衰减以及频率等参数的变化。表 4-1 列举了石油测井中常见介质和岩性的纵波声速。一般地说,随着岩石的密度变大、胶结致密和孔隙度变低、地层埋藏的变深和地质年

代变老时,纵波声速增加,反之则降低。

图 4-1 示出了一个可能由声波测井仪器接收到的典型声波信号的波形。

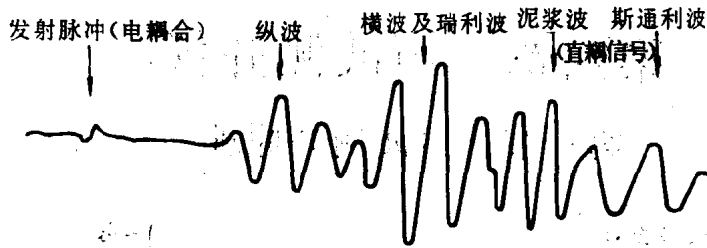


图 4-1 典型的声波波列

由于纵波(压缩波或 P 波)相对速度最快,因此在声波测井中往往也最容易接收和处理。普通声波测井仪一般专用来接收和测量纵波声速 v_p 。 v_p 可表示为

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}} \quad (4-1)$$

式中 E ——杨氏模量(定义为弹性体单位截面上所受的力同长度的相对形变之比);

ρ ——介质密度, g/cm^3 ;

σ ——泊松比(定义为柱状弹性体轴向受力时直径相对形变和长度相对形变之比);

如果能够测得横波(剪切波或 S 波)速度 v_s , 那么对于同一介质, v_p 和 v_s 有如下关系

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}} \quad (4-2)$$

因而可以进一步求出泊松比 σ 。 σ 是一个重要的岩石弹性参数。目前,先进的声波测井仪往往通过特殊设计的声系和一套复杂的数据处理,同时得到 v_p 和 v_s 曲线,从而估算出地层 σ 值。

纵波首波的声波幅度测量早先被用来评价水泥胶结质量。现在,测量纵波和横波在地层中传播时的衰减特性也日益受到重视,并成功地运用到对裂缝带、含气层等的地质解释中。随着电子科学技术的发展,使得对整个声波信号波列进行高速度高精度采集、传输和处理(由于计算复杂,往往是非实时性处理)成为可能,使人们致力于开展声波全波列的理论研究和解释分析技术,为油田开发提供大量的科学数据。

关于对声波测井物理机理的详细讨论,请参考有关声波测井方法原理书籍。

二、声系设计和测量原理

为进行声波测井,往往要形成一个人工声场并设法接收通过地层传播的声波信号。这种由发射探头(即发射器)T 和接收探头 R 组成的探测器体称为声系。图 4-2 示出了由最简单的声系组成的声波测井下井仪结构。发射、接收探头一般由磁致伸缩或压电陶瓷材料制成,起到电-声或声-电转换作用。声系和电子线路部件等组成下井仪主体。铣削了许多横槽的钢制隔声筒作为声系外壳,使通过外壳(钢是一种衰减减小的高速传声介质)的声波的传播路径延长并在不断折射和反射中能量损失殆尽,以免干扰对通过地层传播的声波的测量。

装在钢筒内的电子线路部件称为电子线路短节,主要功能是按地面仪器的指令对发射探头进行激励和按一定要求放大接收信号并沿测井电缆将信号传输至地面。目前,最先进的数控测井系统可在井下对声波信号(甚至是超声波信号)进行采集和数字化并传输至地面由计算机

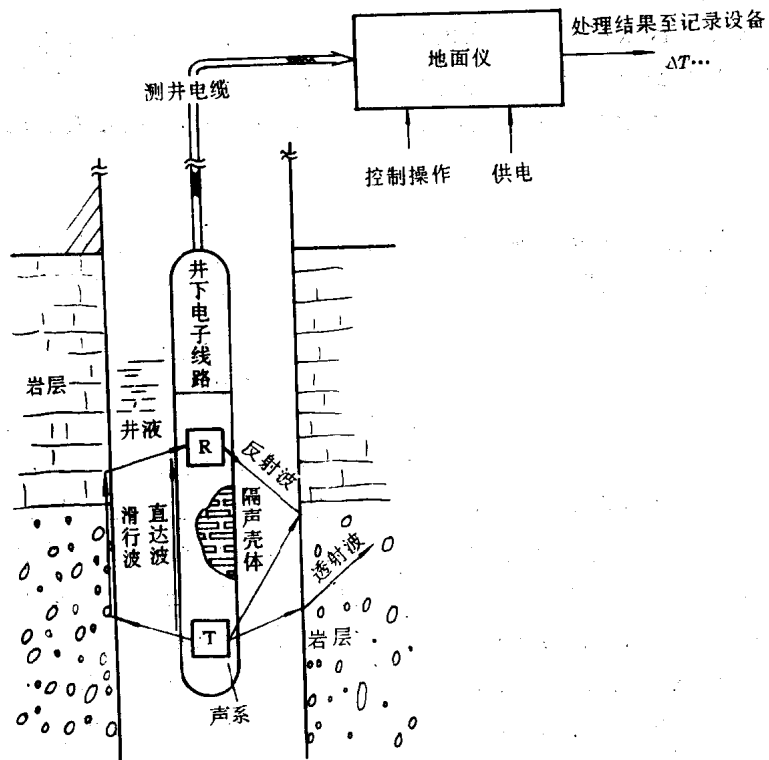


图 4-2 声波测井示意图

分析处理。地面仪器通常比较复杂，主要作用是控制下井仪器，接收信号并完成对信号的处理，最后在记录装置上得到同其它类型测井相似的以深度为纵坐标的声波测井曲线。

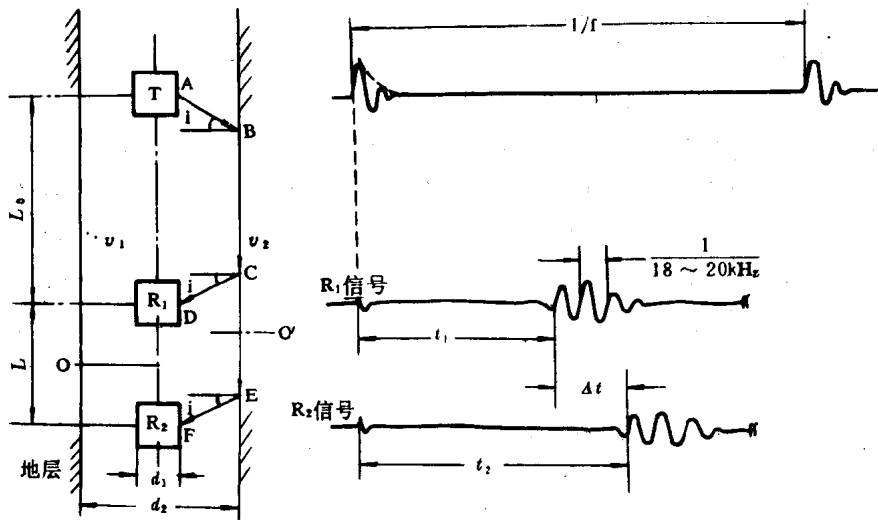


图 4-3 典型的单发双收声系及信号波形示意图

图 4-3 示出了一个典型的用于测量声速的单发双收声系，并以此讨论声系结构设计中所

要考虑的主要因素。

发射探头 T 被激发后,按一定的指向特性形成逐渐扩散的声波场。根据声波测井理论,以临界角 i 入射至地层产生的所谓滑行波将最早到达接收探头(直达波除外)。由于一般情况下地层声速 v_2 总是大于井液声速 v_1 , 这一临界角是存在的,并满足关系式

$$i = \arcsin \frac{v_1}{v_2} \quad (4-3)$$

发射探头 T 与其最近的接收探头 R_1 之间距离 L_0 称为源距。为了保证最先到达 R_1 的是滑行波,对 L_0 的选取应满足下式

$$L_0 > (d_2 - d_1) \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \quad (4-4)$$

式中 $\beta = \sin i_{\max} = v_{1\max}/v_{2\min}$ 。例如,设井径 d_2 为 250mm,探头直径 d_1 为 50mm,最高井液声速 $v_{1\max}$ 为 1620m/s,最低地层声速 $v_{2\min}$ 为 1830m/s,则 L_0 应大于 0.811m。国产声速测井仪(专用来测量声速的声波测井仪)的源距常选在 1m 左右。一般地说,随着源距的增大,各种波因速度不同而逐渐分开,有利于某些信息(如 v_s) 的提取,但由此带来的不利因素是由于加长了声传播路径,声波的过度衰减使得所接收信号的信噪比变差,处理变得困难甚至出现错误测量(如周波跳跃)。国外研制的长源距声系由于采用了先进的技术设计及制造工艺,基本上克服了上述不利因素,因而可能得到一些在常规源距时难以得到或无法处理的测量结果。

当接收探头不止一个时,相应接收探头之间的距离 L 称为间距。声波测井仪对地层的纵向分辨能力主要由间距决定。由于声速测井仪所测量的是声波在一段地层中(图 4-3 中的 CE 段)传播的平均效果,因此,对于厚度大于 L 的地层能够得到正确的测量值,而对于厚度小于 L 的地层(也称为薄层)虽有响应,但测量值的动态幅度将下降,造成测量误差。间距减小有利于对薄地层的测量,即分层能力好,但过小时因两道信号时间间隔小造成处理上相对误差增大,并且 L 值本身的固有机件位置误差也会导致系统精度下降。国产仪器的间距一般在 0.4~0.5m 之间,国外仪器有的达到 0.6m(2ft)左右。

此外,声系中探头与井液之间良好的声耦合能提高声能传输效率,在高温、高压,高电压条件时的密封和绝缘等也是设计上不容忽视的内容。

观察图 4-3 右侧的波形示意图,可帮助简单理解声速测量过程。T 受高电压(或大电流)脉冲激励后发射声波,经 t_1 时间后, R_1 接收到这一信号并转换成电信号, t_2 时间后, R_2 也接收到信号。虽然由于 d_2, v_1, v_2 等因素的影响导致 t_1, t_2 不仅仅与 v_2 相关,但因双接收器的补偿作用,使得在井眼规则(d_2 为一常量)的均匀地层中 $\overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}$ 或 \overline{EF} 可看成公共传播路径,所以时间差 $\Delta t (\Delta t = t_2 - t_1)$ 中将不包含井径 d_2 和液体声速 v_1 的影响。这样,就可以利用下式

$$v_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (4-5)$$

求出纵波速度。测井中习惯以速度的倒数 ΔT 表示声速,故

$$\Delta T = \frac{1}{v_p} = \frac{\Delta t}{L} (\mu\text{s/m}) \quad (4-6)$$

ΔT 也称为声波时差,在这里为纵波时差。为与横波时差相区分,可分别表示为 ΔT_p 和 ΔT_s 。本章中不讨论 ΔT_s ,故以后的 ΔT 均代表 ΔT_p 。声波测井地面仪中的电子线路对两道声信号的纵波首波(滑行波首波,也称初至波)进行识别并处理得 Δt 。通常把 R_1 与 R_2 的机械中点 O 称为记

录点(即时差测量值所代表的那段地层的几何中点),但实际上的记录点应为 \overline{CE} 中点 O' 。显然, O 与 O' 距离随井径 d_2 和临界角 i 的不同而变化。故测得的时差曲线在解释处理时可能需进行深度校正。值得注意的是测井仪本身得到的时间差 Δt 是以时间为量纲,而通常指的声波时差 ΔT 是速度的倒数(也可称为慢度),两者物理意义不同,应加以区别。

声波测井仪在工作中是以下井仪器的匀速上提运动和对发射器不断激励而进行的。发射器每秒钟的发射次数 f 称为发射频率(或同步频率),图4-3中两次发射的时间间隔即为 $1/f$ 。当 f 高时,在同样测速 v 时所测得的纵向分辨率好(测量精细),这是由于声波测井实际上是工作在点测状态(这是与一般电、核测井的显著区别)。例如,在 v 为1800m/h和 f 为20Hz时,相当于纵向每2.5cm距离就有一个测量点。另一方面,为了接收本次发射产生的纵波首波,希望上次发射时引起的余波基本平息,这对于某些硬地层往往需要数十毫秒的时间,这样也就限制了 f 的上限。通常, f 在几到几十赫之间。老式声速测井仪(本教材未加以讨论)中由于采用的是积分式 $\Delta t - U_{\Delta T}$ ($U_{\Delta T}$ 定义为代表 ΔT 的模拟电压)转换,使得 f 必须为恒定值,一般是20Hz,并且 f 的稳定性直接影响测量精度。较为新型的仪器中往往采用数字式 $\Delta t - N_{\Delta T}$ ($N_{\Delta T}$ 定义为代表 ΔT 的数字量)转换,数字显示和DAC式模拟输出,故 f 可以根据需要调整,一般在7~20Hz之间。这类仪器也称为数字式声波测井仪。应注意同步频率 f 与声波信号频率之间的区别,后者通常在数十至数万赫的范围。

第二节 双发双收声波测井仪

随着声测井方法理论和电子技术的发展,在七十年代中期,我国开始研制双发双收声速测井仪。典型机种为西安石油勘探仪器总厂的BSS-75型,该仪器无论在测量精度、整机功能,还是在工艺水平诸方面较早期的单发双收声速测井仪(如CSC-71型)都有长足的进步。八十年代初期,更新型的声波测井仪,SSF-79型双发双收声波测井仪投入批量生产。这种声波测井仪功能较强,除了可测量纵波声速外,还能进行声幅(用于检查固井质量)和噪声测量(过去称为自然声波测井,可用于探测被封堵层之间的串槽等)。在对信号的处理中采用了跟踪延迟、时差比较等很有特色的方法,因而具有良好的抗干扰能力和较高的测量精度。SSF-79仪采用比较先进的(就当时水平而言)国产中小规模集成电路,工艺水平较高。下井仪可用于七千米以上的超深井中测量,耐高温200℃,耐压达1200atm,这也是目前国内同类仪器的最高性能指标。总之,SSF-79仪代表了我国声波测井仪的技术水平,本节主要讨论这种仪器(以下简称79仪)的工作原理,并对有关电路作出分析。

一、双发双收声系原理

1. 声系结构

上节讨论的单发双收声系,在理想井眼条件下,可得到准确的测量结果。当井眼不规则如井壁坍塌时,且不规则部分位于运行中的 R_1 、 R_2 两探头之间,根据图4-3可知,路径 \overline{CD} 与 \overline{EF} 将不相等,因而造成测量误差。对于图示的发射器上置式声系,如假设 R_2 处于扩径的环境中,则 \overline{EF} 大于 \overline{CD} 。这样,到达 R_2 的信号要在井液中耗费更长的时间,导致 Δt_2 增加,显然,这一增加不是由于地层声速变化引起的。如果 R_1 处于扩径环境中,结果与上相反。根据以上简单分析可知,采用单发双收式声系的声测井仪主要缺点是受井眼条件影响大。

采用如图4-4所示对称排列的双发双收(或双发四接收)声系,在理想情况下可以较好地补偿因井眼变化带来的影响。因此,使用这种声系排列结构的声波测井仪也称为井眼补偿式声波测井仪。两个发射器 T_{\pm} 、 T_{\mp} 是分时交替工作的。在 T_{\pm} 发射时,上接收器 R_1 最早接收到信号,然后是 R_2 。用这两个信号(也称为 R_1 和 R_2 信号,分别由上、下接收探头产生)可得到一个时间差称为上发射时差,记为 Δt_{\pm} 。 T_{\mp} 发射时,由同样两个接收器可接收到 r_1 和 r_2 信号,可得到 Δt_{\mp} 。在这里,上发射时接收的信号用 R 、下发射用 r 表示,下标1代表早到的信号,下标2代表晚到的信号,因而可对四种信号加以区分。仪器的输出结果是这两个时差的平均值,仿式(4-6)有

$$\Delta T = \frac{\Delta t_{\pm} + \Delta t_{\mp}}{2 \times L} \quad (\mu s/m) \quad (4-7)$$

79仪采用的源距为0.8m,间距0.4m。由于源距短,声信号衰减少,可获得较高的信噪比。但这种仪器只能用于测量纵波,横波信息叠加在纵波的强续至波上,无法直接检出。

2. 井眼补偿作用

双发双收声系的井眼补偿作用可借助于图4-5加以说明。双发双收测量可以分解成两个独立的单发双收测量。在图示的一段井径变化的均匀地层中,井眼影响对两种不同组合呈相反的趋势,这种互补现象使人们认识到:只要将不断交替所测得的对应同一段地层(即 \overline{CE} 与 $\overline{C'E'}$)的上发射时差 Δt_{\pm} 和下发射时差 Δt_{\mp} 取数学平均值,就能够在很大程度上补偿井径变化对测量结果的影响。

双发双收声系除具有井眼补偿作用外,由于其对称的排列结构,对下井仪的弯曲和倾斜、两道接收信号放大和传输过程中的不对称畸变也有一定的补偿作用。但由于声波测井采用的声波波长在井液中为厘米数量级,当因仪器弯曲、倾斜造成接收器轴线偏离井轴时会形成明显的干涉作用,使接收信号幅度减小,信噪比变差。因此,双发双收声系仍需工作在良好居中的条件下。

3. 深度补偿问题

如上所述,要得到有意义的 ΔT , 参加运算的 Δt_{\pm} 和 Δt_{\mp} 两值应该由同一层段(79仪要求0.4m厚)取得,但实际上有两个主要因素影响这一条件的满足。

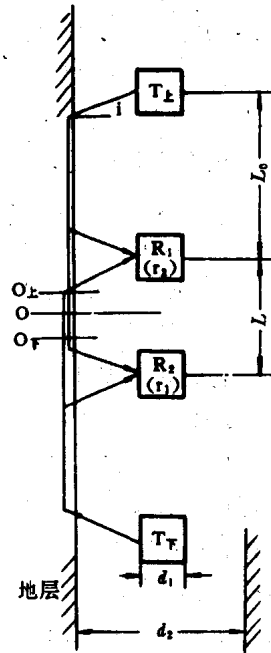


图4-4 双发双收声系示意图

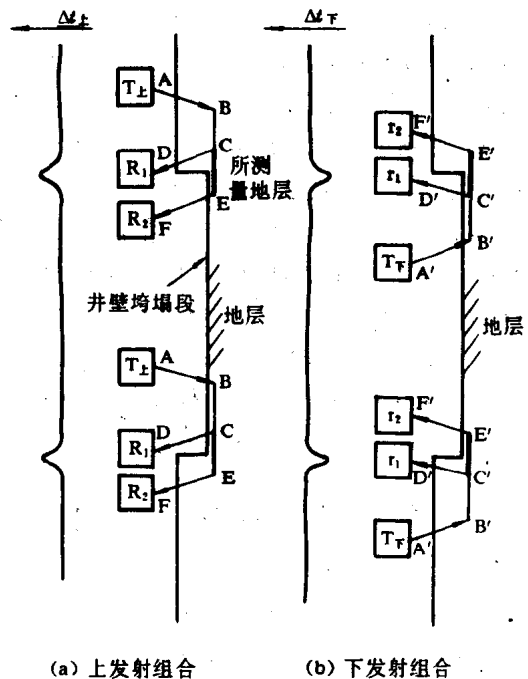


图4-5 双发双收声系的井眼补偿作用

(1) 临界角 i 的影响

设声系处于静止状态,根据图4-4可知, $\Delta t_{\text{上}}$ 的记录点 $O_{\text{上}}$ 和 $\Delta t_{\text{下}}$ 的记录点 $O_{\text{下}}$ 因临界角的存在而不与理论记录点 O 重合。这种不重合度为

$$\overline{O_{\text{上}}O_{\text{下}}} = (d_2 - d_1)\text{tg}i \quad (4-8)$$

如设 $d_2 - d_1$ 为17cm, i 在 $11.2^\circ \sim 62.3^\circ$ 之间变化, 则 $\overline{O_{\text{上}}O_{\text{下}}}$ 为1.7~16.3cm。这使得测量结果 $\Delta t_{\text{上}}$ 、 $\Delta t_{\text{下}}$ 不为同一层位。形象地说, 这时得到的 ΔT 是“模糊”的, 尤其是当 i 和 d_2 均较大时(对应低速并有井壁垮塌现象的地层), 对井径等变化的影响将不易得到好的补偿效果, 对薄层也失去了良好的分辨能力。

(2) 仪器上提运动的影响

上面已提到, $T_{\text{上}}$ 、 $T_{\text{下}}$ 是交替工作。设 $T_{\text{上}}$ 先发射, 那么到 $T_{\text{下}}$ 再发射时, 仪器已上提了

$$\Delta h = \frac{v}{f} \quad (\text{m}) \quad (4-9)$$

式中 v ——测速, m/s;

f ——同步频率, Hz。

所以, $\Delta t_{\text{上}}$ 、 $\Delta t_{\text{下}}$ 两时间差所分别代表的地层的实际纵向不重合度为

$$l = \overline{O_{\text{上}}O_{\text{下}}} - \Delta h = (d_2 - d_1)\text{tg}i - v/f$$

可知, 仪器上提运动对临界角 i 的影响本身是一种补偿。在实际应用中正是通过合理选择 v 和 f 来减少 l 的影响。但由于 i 随所测量的地层变化, 是一个未知因素, 因此, 不采用特殊处理(如计算机处理)是不可能使 l 近似为零的。对79仪来说, 好的深度补偿往往更依赖于操作者的经验和已知地质条件。

早年研制的 BSS-75型声速测井仪曾采用过一种所谓“最佳补偿”处理, 其基本思想是通过有选择的进一步利用仪器上提运动的补偿作用, 即将本次得到的 $\Delta t_{\text{上}}$ 暂存, 同后续循环的某一 $\Delta t_{\text{下}}$ 相加处理。这时可分别得到1、3、5或7倍 v/f 的补偿, 并试图做到

$$l = (d_2 - d_1)\text{tg}i - n \cdot \frac{v}{f} \rightarrow 0$$

但同样由于 i 的未知, 这种“最佳补偿”是难以真正实现的。因此, 79仪中不再采用将 $\Delta t_{\text{上}}$ 暂存的“最佳补偿”处理。

二、下井仪工作原理

79仪的下井仪主要由声系和电子线路两大部分组成。要求仪器工作在高温高压环境下, 因此线路设计得尽可能简单实用, 以增加可靠性, 对信号的复杂处理则主要由地面仪完成。

下井仪电子线路的主要功能是: 根据地面仪发来的同步发射脉冲去分别控制两个发射器工作; 二组放大电路对接收器的接收信号进行放大并驱动电缆, 将信号传输至地面仪处理。图4-6示出下井仪电路原理框图。设计上作为超深井(井深可大于7km)应用的79仪采用8.5km电缆, 如何解决信号在超长电缆传输中因大的线间互感引起的互扰(尤其是第一道的后续波对第二道首波的干扰)和最有效的使用缆芯是传输设计中的重要问题。为此, 两道信号均采用对地可悬浮的双端平衡传输方式, 并对称地使用缆芯。例如: 上发射期间, 传输第二道信号的缆芯②、⑤均处于传输第一道信号缆芯①、③的垂直平分线上(见图4-6中电缆截面示意), 因此, 只要电缆本身几何对称性好, 两道信号的互扰可降至最小。输出变压器 T_1 、 T_2 次级均有中心抽

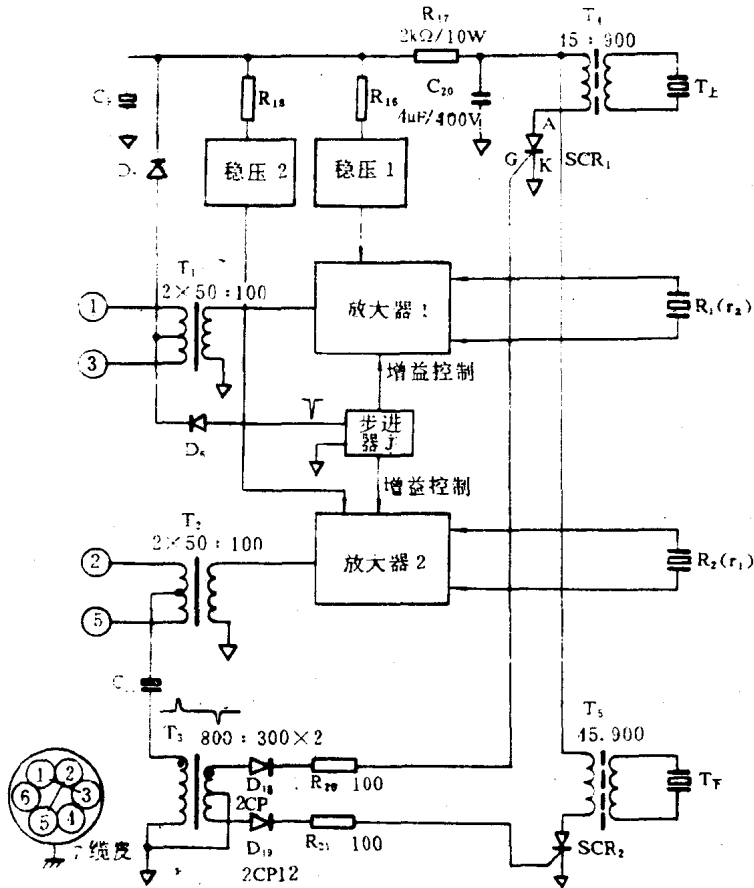


图4-6 SSF-79仪井下部分示意图

头,从中取出下井高压供电和控制发射的下井同步脉冲,并且不影响信号向地面传输。以 T_1 为例,地面仪向井下供电由缆芯①、③平均负担(地面仪输入变压器也采用中间抽头引入供电电压,见后述)。该电流的磁化作用在 T_1 次级绕组的两半侧互相抵消,因此对 T_1 本身对交流信号的耦合作用没有影响(所需要的只是在设计 T_1 次级导线截面时要考虑供电电流引起的铜损和加强绝缘性能);同时缆芯①、③对第一道信号双端传输,中心抽头可看成悬浮的交流地,其绕组与缆皮⑦绝缘,故对直流高压供电也同样没有影响。使用这种巧妙的设计方法,在仅用四根缆芯和缆皮的情况下,能高质量地传输包括供电在内的四路信号并使之互扰很小。这种方法在缆芯数有限的测井信号传输中是经常采用的。

电路工作过程如下。由地面仪供给的180~230V 正高压通过 D_7 引导、 C_9 滤波后分别送至稳压电路1、稳压电路2和 R_{17} 。稳压电路给放大器提供约+30V 的单极性电源电压。 R_{17} 是一只大功率线绕电阻,用于给储能电容 C_{20} 充电时限流。当忽略缆芯本身电阻时,对 C_{20} 的充电时间常数为8ms 左右, f 最高不超过20Hz,因此在可控硅 SCR 每次未导通之前, C_{20} 两端已充至地面仪供给的高压值。

T_2 次级中心抽头引出地面仪产生的发射方波信号,由 C_{11} 隔去直流成分,取出正负交替的突变成分后,再经 T_3 转换成一对互补的双端控制信号接至两 SCR 的触发电极。当地面仪发来

的是信号正跳沿时,通过 T_1 耦合使 D_{12} 导通,并由 R_{20} 限流后至 SCR_1 的控制极 G 。 SCR_1 导通后使 C_{20} 存储的电能瞬间通过 T_1 泄放。由于 SCR 导通内阻和 T_1 初级阻抗均很小,故短时间内形成强烈的电流脉冲。通过 T_1 近20倍的升压作用使上发射器 T_+ 两端加有数千伏的脉冲高压,从而激励出足够强的声波脉冲射向地层。触发 T_+ 的同时, D_{11} 保护 SCR_2 的控制极不被反向击穿。当地面发来的同步信号负跳时, SCR_2 导通, T_+ 被激励。

不同岩性、物性的地层对声波的衰减有很大差别,为使向地面仪传输的信号有合适的幅度(在声幅测量时还要求波形失真尽可能小),设计了由步进继电器 J (可看成是一种电磁控制的波段开关)控制的井下可变增益放大器。为了不多占用缆芯,步进器线圈供电(也称为换档,实际上是使触点组按某一固定方向切换一次)与下井仪供电占用同一回路,并由负极性高压脉冲驱动。不换档时, D_6 阻止下井正高压加至步进继电器线圈。换档操作时,一个由地面仪控制的负高压脉冲(电容放电)通过 D_6 使继电器变换档位,两放大器增益也随之被同步地改变。 D_7 阻止换档负高压影响稳压电路等。换档脉冲撤除后,继电器线圈失电但仍保持在该档位,正高压又复送下来通过 D_7 对下井仪供电。

图4-7是下井仪电子线路短节中 $R_1(r_2)$ 探头道放大器和稳压电路部分的电原理图。 A_1 为国产 $4E304HT$ 型高温(上限达 $200^\circ C$) 运放,起电压放大作用,放大倍数设计成从 $2\sim 150$ 倍,分六档变化,由步进继电器控制切换,使反馈电阻 $R_1\sim R_6$ ($10k\Omega\sim 750k\Omega$) 分别依次接入。 $R_1(r_2)$ 探头以双端方式接至 A_1 。放大器的接法比较特殊,分析时可假想信号源 R_1 中间有一地电位,这样探头本身阻抗就充当了整个反馈环路的一部分。稳压二极管 $D_9\sim D_{12}$ 接成背对背形式,用以

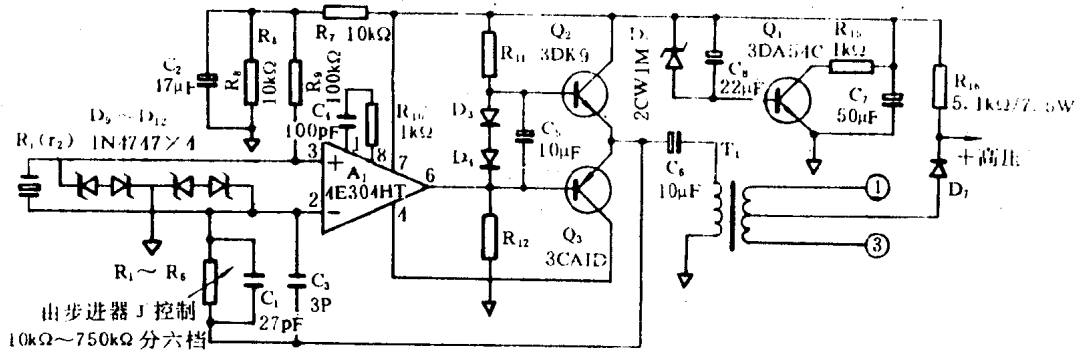


图4-7 下井仪信号放大及稳压电路电原理图

限制大信号峰值以免使 A_1 输入级过载导致内部差分放大管被击穿。为了增加驱动能力(注意:虽然接成强负反馈的运放理论上输出电阻极小,但并不具备带大的电容性负载的能力),由中功率管 Q_2 、 Q_3 组成互补推挽功率放大器进行放大,其输出内阻小于 50Ω 。 D_3 、 D_4 、 R_{11} 和 R_{12} 为 Q_2 、 Q_3 建立合适的静态工作点,避免小信号时的交越失真。 C_5 提供 A_1 输出至 Q_2 的交流通路。为使下井仪电路简单,采用了单电源供电。由 R_7 、 R_8 、 C_2 分压并滤波后得到约 $+15V$ 的电压,通过 R_9 接至 A_1 正输入端,为 A_1 提供一偏置电位,使 A_1 正常工作和放大信号良好。为避免功放级因采用单电源(静态输出约 $1/2$ 电源电压)使 T_1 磁化,由 C_6 隔去直流成分。 $4E304$ 主要性能指标相当于国外 $\mu A709$ 型(国产类似型号有 $F003$ 和 $F005$ 等),其特点是交流特性较好,但需进行外部频率补偿,这种作用由 R_{10} 、 C_4 、 C_3 和 C_1 等完成,使 A_1 在整个增益变化范围内工作稳定,无自激振荡发生。 Q_1 、 D_5 、 R_{15} 等组成并联式稳压电路,吸收功率放大器(工作在 AB 类状态)在静态时

多余的供电电流。稳压值为 D_5 的齐纳击穿电压与 Q_1 发射结正向电压之和,由 R_{15} 值可推算出,最大吸收电流值为 30mA 左右。这种类型的稳压器由于效率低(特别是空载时)、稳压性能不好,应用远不如串联型和开关型稳压器广泛。但 79 仪要求井下负载对供电电流的使用尽量平稳,以减少缆芯间的互扰,这种简易式并联稳压器的特性正满足这一要求。对井下的高压供电和低压供电采用同一回路,大功率线绕电阻 R_{16} 将高压降至低压。

三、地面仪工作原理

声波测井地面仪的主要功能是:按一定的时序产生一系列控制信号,控制下井仪发射探头的交替发射;接收井下传输来的信号,经处理后得到声波时差。仪器的工作状态和有关信号由专用示波器监视。79 仪采用的是经过改装的国产 SR8 型双踪通用示波器。经校准后的模拟输出信号接照相记录仪进行曲线记录。

79 仪地面部分的整体由数字、模拟集成电路、晶体管等上千个元器件组成,内部信号种类较多,处理过程较为繁琐,是一种比较复杂的电子仪器。

在详细讨论各主要功能电路之前,首先应对仪器的整体结构有所了解。图 4-8 示出了 79 仪声速测量部分的原理框图。主要由主振荡器、指令发生器、鉴别器、信号分离和 Δt 波形成电路、时差计数、数字显示及模拟输出、刻度电路以及跟踪延迟、时差比较等几大部分组成。图 4-9 是有关部分的工作波形。主振荡器决定了同步发射频率,这一信号经主控双稳后变成一个工作循环(即一次完整的 ΔT 信号的获得过程)的上、下两次发射期间的控制信号,称为上控方波和下控方波。这两个互补信号除控制井下探头交替发射外,还控制信号分离电路对经过鉴别器(比较器)的首波信号进行鉴别(例如:在上发射期间 R_1 探头信号的首波产生 Δt_{\uparrow} 的上升沿, R_2 探头信号的首波产生 Δt_{\downarrow} 的下降沿)。 Δt 形成电路受信号分离控制门的触发,在上、下发射期间分别形成 Δt_{\uparrow} 和 Δt_{\downarrow} 矩形波。计数电路在 Δt 宽度内对 5MHz 高频振荡器的输出方波(时标信号)进行计数即得到数字化的声波时差 ΔT 。 ΔT 计数值经输出寄存器后变成稳定的输出代码,接至数字显示和经 D/A 转换(DAC)后产生模拟输出信号。跟踪延迟、时差比较等电路用于提高测量的可靠性和抗干扰能力。刻度信号(也称校准信号)发生器、刻度延迟等电路与鉴别器、延迟 I 和 II、信号分离控制门等电路配合产生 $0 \sim 600 \mu s/m$ 的时差校准信号,以此为标准进行模拟记录仪的横向比例设定。图 4-9 也示出了 Δt_{\uparrow} 、 Δt_{\downarrow} 形成的基本过程。

1. 同步控制电路

声波测井仪内部的工作要求按一定的时序进行。为此,设置了主同步信号、上控方波、下控方波、地面同步信号和下井同步信号等“指挥”信号,保证机器有序地运行。这一系列信号由同步控制电路产生。

图 4-10 是同步控制电路的简化原理图。有关波形示于图 4-11。

由单结晶体管 $3Q_1$ 和 $3C_1$ 、 $3R_1$ 和 $3W_1$ 等组成一个张弛振荡器,振荡周期 T 可用下式表示

$$T = \tau \ln \frac{1}{1 - \eta}$$

式中 τ 为单结晶体管发射结积分电路的时间常数,在数值上为 $3C_1$ 与 $3R_1$ 、 $3W_1$ 之和的积。 η 为分压比,是单结晶体管的一个内部参数。通过调节 $3W_1$ 可以使同步频率在 $5 \sim 20 \text{Hz}$ 内变化。为使张弛振荡器输出的脉冲与后面 TTL 逻辑电路接口,使用 $3Q_2$ 等进行反相放大和电平匹配。79 仪使用超长深井电缆时,考虑到下井同步有数十微秒的额外传输时间,为便于对信号的观测和