

测井解释 原理与应用

斯仑贝谢测井公司

石油工业出版社

P631.8/003

069994



测井解释原理与应用

斯仑贝谢测井公司

李舟波 潘葆芝等 译 李舟波 校



200814681



52/52/01

石油工业出版社

内 容 提 要

该书全面系统地介绍了斯仑贝谢测井公司80年代所采用的各种测井方法、解释原理及其应用。许多测井新方法如井中地震勘探法,反映了近年来地面勘探与测井相结合的一种趋势;地层对比、相分析及油藏描述则是测井应用从“点”走向“面”的反映。该书实为测井、地质、开发工作者及大专院校有关师生的良师益友。

该书第一、二、八章由潘葆芝译,第三、四、七、十一由张存和译,第五、九章由李舟波译,第六章由李庆谋译,第十、十二章由范晓敏译,第十三章由沈金松译,全书由李舟波校订。

Schlumberger
Log Interpretation Principles/Applications
Schlumberger Educational Services 1331 Lamar Suite 1175 Houston, Texas 770
Copyright © 1987

测井解释原理与应用

斯仑贝谢测井公司
李舟波 潘葆芝等 译 李舟波 校

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京海淀昊海印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 15¹/₄ 印张381千字 印 1—2,000

1991年3月北京第1版 1991年3月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0449-6/TE·432

定价: 4.80 元

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 历史	(1)
§ 1.2 井场工作	(3)
§ 1.3 测井数据采集	(5)
§ 1.4 数据处理	(6)
§ 1.5 数据传输	(7)
第二章 测井定量解释基础	(11)
§ 2.1 孔隙度	(11)
§ 2.2 饱和度	(12)
§ 2.3 渗透率	(12)
§ 2.4 储集层的几何形状	(13)
§ 2.5 温度和压力	(13)
§ 2.6 测井解释	(14)
§ 2.7 侵入过程	(14)
§ 2.8 电阻率	(15)
§ 2.9 地层因素与孔隙度	(16)
§ 2.10 含水饱和度	(17)
第三章 自然电位和自然伽马测井	(22)
§ 3.1 自然电位测井	(22)
§ 3.2 自然伽马测井	(28)
§ 3.3 自然伽马能谱测井	(30)
第四章 确定地层水电阻率	(35)
§ 4.1 利用水样分析资料汇总表确定 R_w	(35)
§ 4.2 利用化学分析确定 R_w	(35)
§ 4.3 根据SP确定 R_w	(35)
§ 4.4 环境校正和注意事项	(36)
§ 4.5 不同于NaCl的盐类	(37)
§ 4.6 SP异常	(38)
§ 4.7 根据电阻率-孔隙度测井确定 R_w	(38)
§ 4.8 电阻率-孔隙度交会图	(39)
第五章 孔隙度测井	(41)
§ 5.1 声波测井	(41)
§ 5.2 密度测井	(50)
§ 5.3 中子测井	(58)
第六章 确定岩性和孔隙度	(68)
§ 6.1 中子-密度交会图	(69)

§ 6.2	声波-密度交会图	(69)
§ 6.3	声波-中子交会图	(70)
§ 6.4	密度-光电吸收截面指数交会图	(71)
§ 6.5	NGS交会图.....	(71)
§ 6.6	泥质含量对交会图的影响.....	(72)
§ 6.7	次生孔隙度对交会图的影响.....	(72)
§ 6.8	次生孔隙度指数测井.....	(73)
§ 6.9	油气对交会图的影响.....	(73)
§ 6.10	M-N交会图.....	(74)
§ 6.11	MID图.....	(76)
§ 6.12	ρ_{ma} 和 U_{ma} 的MID图.....	(78)
§ 6.13	复杂岩性的混合体.....	(79)
§ 6.14	LITHO-ANALYSIS程序	(81)
§ 6.15	存在蒸发岩的情况.....	(82)
§ 6.16	流体识别.....	(83)
第七章	电阻率测井	(85)
§ 7.1	普通电阻率测井.....	(85)
§ 7.2	聚焦电极测井.....	(90)
§ 7.3	感应测井.....	(96)
§ 7.4	微电阻率测井.....	(106)
第八章	确定饱和度	(113)
§ 8.1	引言.....	(113)
§ 8.2	纯地层.....	(113)
§ 8.3	对数重叠法.....	(117)
§ 8.4	电阻率比值法.....	(119)
§ 8.5	F-MOP可动油图	(126)
§ 8.6	空井眼中孔隙度和含气饱和度的确定.....	(126)
§ 8.7	含泥质地层.....	(127)
§ 8.8	SARABAND和CORIBAND模型	(131)
§ 8.9	双水模型.....	(136)
§ 8.10	GLOBAL方法	(144)
第九章	电磁波传播测井	(152)
§ 9.1	引言.....	(152)
§ 9.2	EPT测井.....	(153)
§ 9.3	DPT测井.....	(159)
第十章	渗透率 and 生产能力	(167)
§ 10.1	渗透率	(167)
§ 10.2	生产能力	(180)
第十一章	井中地震勘探	(185)
§ 11.1	引言	(185)
§ 11.2	井下地震仪器	(185)
§ 11.3	数字检验爆炸观测	(187)

§ 11.4	Geogram合成地震记录的处理程序.....	(189)
§ 11.5	垂直地震剖面	(191)
第十二章	地质应用	(196)
§ 12.1	引言	(196)
§ 12.2	对比	(196)
§ 12.3	从地层倾角测井获得的地层信息	(203)
§ 12.4	测井相识别	(212)
§ 12.5	储集层描述	(216)
第十三章	岩石的机械特性	(224)
§ 13.1	天然裂缝	(224)
§ 13.2	弹性常数	(230)

第一章 绪 论

电测井是在半个多世纪以前引入石油工业的。从那时起，又有许多新的和改进的测井仪器研制出来并投入正常的使用。

随着测井技术的发展，资料解释的技巧也取得很大进展。目前，详细分析精心选择的电缆测井系列的测量结果，可以提供一种用来导出或推测含油气和含水饱和度、孔隙度、渗透率指数和储集层岩石岩性的精确数值的方法。

已有数百篇描述各种测井方法及其应用和解释的论文。这样多的文献，无论从内容还是由于常常得不到，都使一般的测井用户陷于困境。

为此，本书将对这些测井方法和解释技术提供一个总的概貌。对于斯仑贝谢公司提供的各种裸眼井项目做了比较详细的讨论，包括解释原理和基本应用。讨论尽可能保持简洁、清楚，并使数学推导减到最低限度。

希望本书能作为一本有用的手册，服务于对测井感兴趣的任何人。某些可能对更详细的材料感兴趣的人，可查阅每章后列出的参考文献和其它测井文献。

§ 1.1 历 史

第一条测井曲线是在1927年于法国东北部阿尔萨斯省的Pechelbronn小油田内的一口井中记录的。在井眼穿透的岩层上得到的这条电阻率曲线是用“点测”方法记录的。井下测量装置（叫作电极系）按固定的间距在井内停下来进行测量，然后计算出电阻率并用手工点在图上。逐点都完成这一过程，直到整个曲线被记录出。第一条测井曲线的一部分示于图1-1。

1929年，电阻率测井作为商业性服务引入委内瑞拉、美国和苏联，很快又进入荷属东印度。电阻率测量结果在对比和识别可能含油气地层方面的用途，很快被石油工业所承认。

1931年，自然电位（SP）测量结果与电阻率曲线一起包括在电测井曲线图上。同一年，斯仑贝谢兄弟Marcel和Conrad完善了连续记录的方法，并研制成第一台笔记录仪。

照像胶片记录仪于1936年引入。到那时，电测井曲线图上已包括SP曲线和短电位、长电位以及长梯度电极系电阻率曲线。从1936年一直到50年代后期，这种组合在测井工作中一直占主要地位。大约从1946年起，这些测井曲线可以同时记录下来。

随着各向异性地层倾角仪的研制，于30年代初期开始了地层倾角的研究。带有照像井斜仪的三臂倾角仪于1943年引入，它可同时确定地层倾斜的方位和角度。每个臂有一个SP电极。1946年，SP电极被短电阻率电极系所替代，从而使倾角测量可以在几乎没有SP对比细节的井中进行。

第一个连续记录的电阻率地层倾角下井仪，采用三个微电阻率电极系和一个磁通门罗盘，产生于50年代中期。从那以后，又有许多改进，使地层倾角测量进一步优化。今天，四

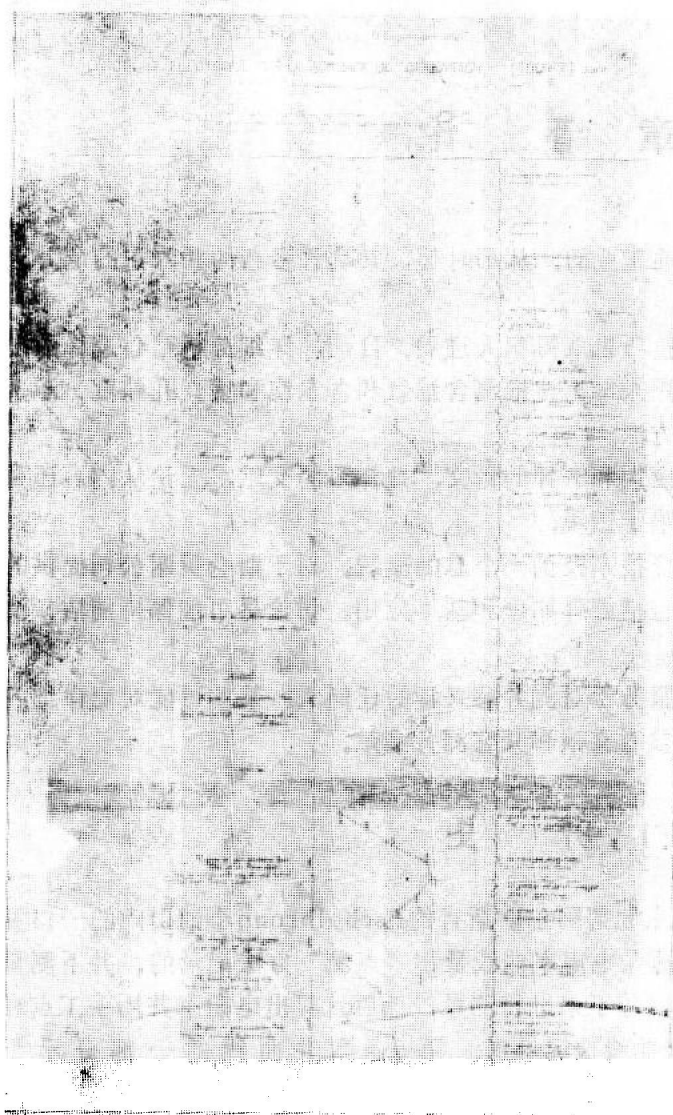


图1-1 第一条测井曲线(由Henri Doll根据点在坐标纸上的点子绘出)

向上的另一臂构成一个井径仪。

微电极系记录也用于划分渗透层,而其它微电阻率仪器有助于确定从近井眼侵入带到未侵入原状地层的电阻率剖面。针对盐水泥浆,1953年研制出微侧向测井仪。紧接着是邻近侧向测井仪和微球形聚焦测井仪相继问世。

1951年,第一个聚焦式深探测的电阻率仪器——侧向测井仪问世。它用聚焦系统强迫探测电流(从中心电极发出)在距离电极一定的范围内基本上呈一个水平圆盘内。聚焦电阻率测井很适于在低电阻率泥浆井中探测薄层。在盐水泥浆和地层为高电阻情况下,侧向测井很快就取代了传统的电阻率测井。

从那时以后,又有几种侧向测井仪研制成功并投入商业使用。今天,由深侧向和浅侧向两种测量组成的双侧向测井仪DLL成为标准的仪器。它通常和微球形聚焦测井仪一起工作。

臂倾角仪同时记录10条微电阻率曲线,而且用三轴加速器和磁力仪提供高精度的仪器倾斜和方位的信息。现在,地层倾角信息的数据处理只能用电子计算机完成。

自然伽马(GR)和中子测井仪的出现,标志着放射性开始在测井中应用,以及电子技术首次在井下应用。与SP和电阻率测井仪不同,它们不仅可以在充满空气、天然气或油基泥浆的井中进行测井,还能够通过钢质套管对地层进行测量。Pontecorvo于1941年对中子测井做了介绍。

与GR测井相结合,中子测井提高了岩性解释和井与井间的地层对比。大约在1949年之后,注意力集中到中子测井作为一种孔隙度指示上。但是,早期的中子测井仪受井眼环境的影响非常大。一直到1962年引入SNP井壁中子孔隙度测井仪和1970年引入CNL补偿中子测井仪之后,中子测井曲线才被承认是一种孔隙度测量结果。双孔隙度中子测井仪把这两种中子测量组合在一种仪器上。

早期曾企图用微电阻率测量确定孔隙度。在50年代初引入的微电极系测井采用嵌在绝缘板表面上呈直线排列的三个小电极,绝缘板被压向井壁。装有电极的绝缘板的臂和相反方

在淡水泥浆中, 原始的电测井已被感应测井所代替。作为战时矿产探测仪的副产品, 针对油基泥浆于1949年研制出感应测井仪。然而, 很快就认识到它在淡水泥浆中也比电测井优越。

在1956年以前, 五线圈系感应仪与SP和16in[●]电位电极系组合成感应-电测井仪。在1959年, 五线圈仪器被探测更深的具有六个线圈的感应测井仪所代替。

1963年引入的双感应测井仪DIL, 现在已是一种标准仪器。DIL包括深感应、中感应和浅电阻率测量。现代的浅电阻率测量装置是一种聚焦式电阻率装置——1963年的仪器上为八侧向, 而目前的仪器上是球形聚焦。一种新的双感应测井仪相量感应测井仪改善了薄层响应, 提供了更大的探测深度和更大的电阻率动态范围。

自30年代起, 测井电缆就已用于把地震检波器放到井中测量来自地面声源的长距离声波传播时间。

在50年代后期, 声波测井被承认是一种可靠的孔隙度测井; 它的测量结果主要反应孔隙度, 而基本上和饱和度无关。

声波测井与聚焦电阻率测井(侧向和感应)相配合, 才使现代测井地层评价成为可能。声波测井给出孔隙度; 聚焦电阻率测井给出未侵入原状地层的真电阻率。

进一步改进的声波测井仪包括井眼补偿声波测井仪BHC, 长源距声波测井仪LSS和阵列式声波测井仪。后者可以记录声波的全波列。根据波列分析不仅可以提取纵波的传播时间, 而且可以提取横波和斯通利波的传播时间。

另一种基本反映地层孔隙度的测量方法地层体积密度测井是在60年代初期投入工业使用的。不久, 在1964年出现了补偿地层密度测井FDC。它对泥饼的影响进行了补偿。1981年出现的岩性-密度测井改善了体积密度测量, 并提供对岩性敏感的光电吸收截面测量结果。

利用电缆式下井仪获取岩石样品和地层流体样品也有很有趣的历史。用一个空的圆柱状“子弹”射进地层从井壁取心的方法在1937年就已存在了。显然, 这种技术从它问世以来的半个多世纪中经历了不断地改进。对于很坚硬的岩石, 现代的井下机械取心仪器实际是钻取岩样。

1957年地层测试器问世。它用来获取地层流体样品, 并在取样过程中测量孔隙压力。随后出现了间隔地层测试器FIT和重复式地层测试器RFT。老式仪器每次下井仅可做一次压力测量和取一个样品; RFT仪器可以做无数次压力测量和每次下井可取两个样品。

为了处理那些地层水为淡水、矿化度是变化的或不知其矿化度的地层, 发展了介电测井。电磁波传播测井EPT于1978年引入; 深电磁波传播测井DPT于1985年开始采用。

上面的历史概述并没有把现代测井仪器所进行的全部测量包括进来。其它的测井方法还有核磁共振、核辐射谱(自然的和激发的)和大量套管井参数的测量等。

§1.2 井场工作

电缆式电测井是用测井车来完成的(见图1-2), 有时称它为“活动实验室”(图1-3)。测井车是载运井下测量装置、向井中下放电缆和仪器所需的绞车、给井下仪器供电并接收和

● 1 in = 2.54 cm, --- 编注

处理测井信号的地面装置，以及获得“测井曲线”永久性记录所需的设备。

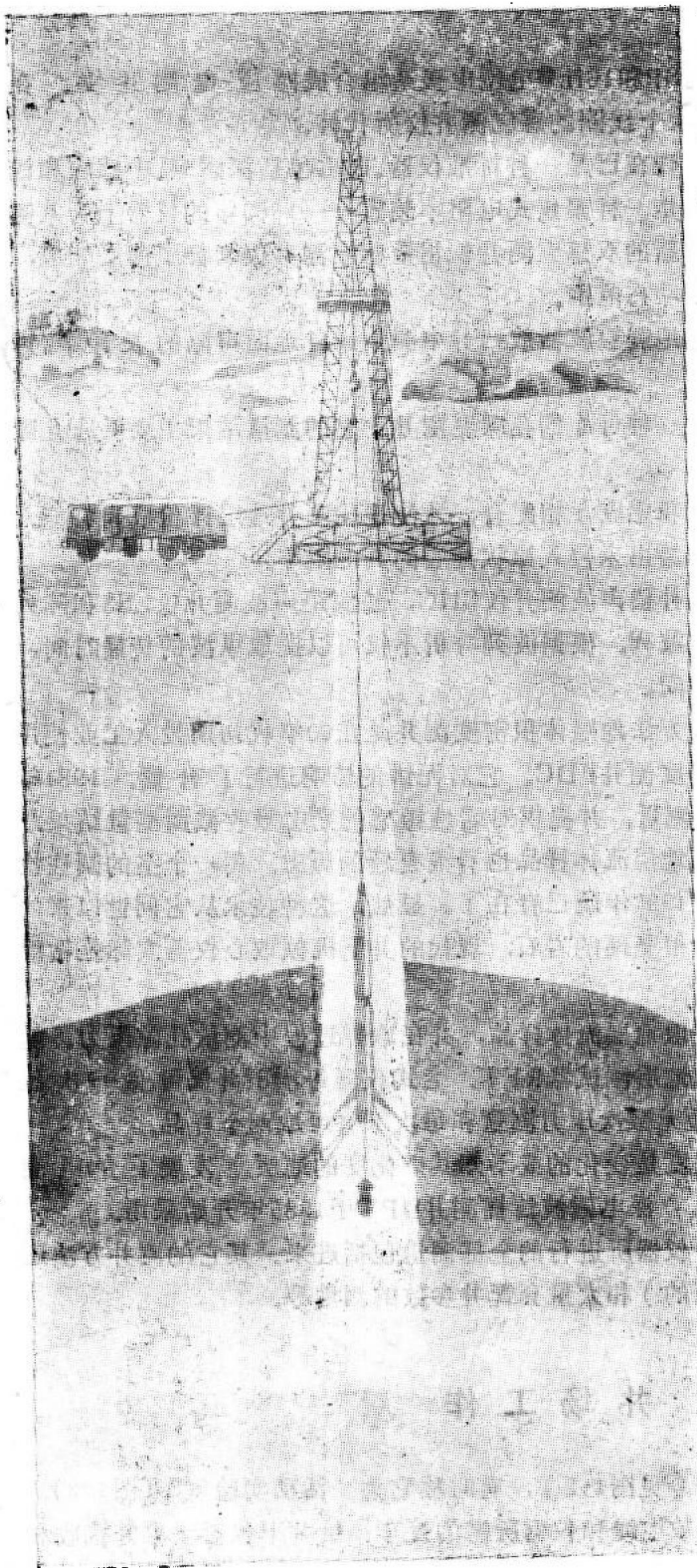


图1-2 电缆式测井工作示意图

井下测量装置通常由两部分组成。一部分是用来进行测量的传感器，叫做探测器。当然，传感器的类型取决于测量的性质。电阻率传感器是电极或线圈；声波传感器是换能器；放射性传感器是对放射性敏感的检测器；等等。探测器的外壳可用钢或纤维玻璃制成。

下井仪的另一部分包括给传感器供电、处理测量信号和把信号通过电缆传输到测井车上的电子线路部分。这部分可能是单独的，但作为整个仪器的一部分旋拧在探测器上，也可能和探测器组合在一起成为一个单一的仪器。当然，这取决于传感器和电子线路需要多大的空间，以及传感器的要求。电子线路部分的外壳通常用钢制成。

目前，大多数测井仪都是很容易组合的。换句话说，多种仪器的探测器和电子线路部分可以联接成一个下井仪，从而在一次下井和从井中提上来的过程中做多种测量和记录多条测井曲线。

下井仪（或仪器组合）联接在用于向井中下放仪器和从井中提起仪器的电缆上。现在在裸眼井测井中使用的大多数电缆有七个绝缘的铜缆芯。在新研制的电缆中，六个铜缆芯的中心有一根光纤缆芯。电缆用钢铠甲裹起来，以便使它具有承受仪器重量的强度，以及当仪器在井中遇卡时提供一些提拉仪器的强度。电缆和仪器放入井中和从井中提出是由安装在车上的绞车进行的。

井深是用刻度过的测量滑轮系统来测量的。为了保证电缆拉紧和深度更准确，一般是在从井中上提的过程

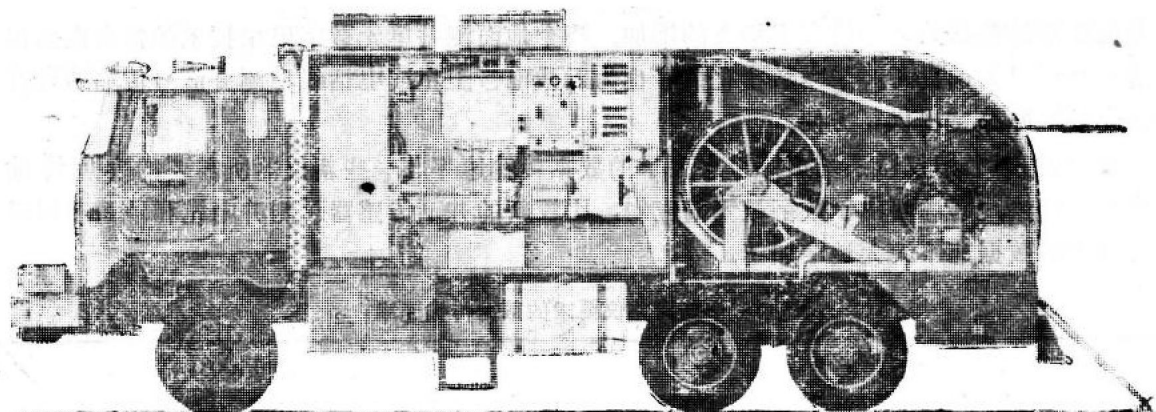


图1-3 典型的CSU井场活动实验室

主绞车装有长达30000ft的七芯测井电缆；后部是可选择的小绞车，装有24000ft的细单芯电缆，用于加压情况下的生产测井服务。数据采集装置和计算机装在测井小室内，在远距离海上测井时，测井室和绞车总成安装在撬上

中记录测井曲线。

通过电缆传输的信号可能是模拟的或数字形式的。现代趋势倾向于数字形式。当然，电缆也用于从地面向井下仪器供电。

地面装置（图1-4）向井下仪器提供电源。更重要的是，地面装置从井下仪器接收信号、处理和分析这些信号，以及作出相应的响应。有用的信号以数字形式输出到磁带上，并以模拟形式输出到阴极射线管和照像胶片上。

照像胶片在测井车上进行处理，并由胶片印出纸记录。井下测量信号的这种连续记录叫做测井曲线。

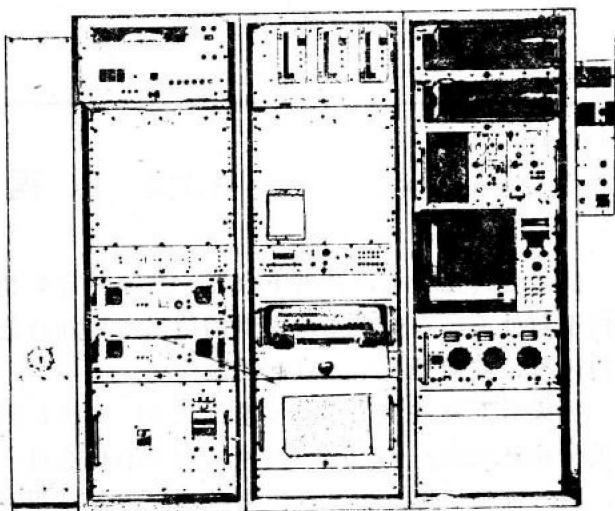


图1-4 CSU是一个以计算机为主体的综合数据采集和处理系统

主要的部件是，右边：记录数据的屏幕显示和照像单元；中间：三个插座式磁带驱动器，下面是键盘和打印单元；左边：两个DEC1134计算机，每个内存为256k，顶部是一个容量为42MB的双硬盘驱动器和一个备用的48MB盒式磁带机

§ 1.3 测井数据采集

随着数字电子技术和数据处理方法的飞快发展，电缆式测井技术也一直在发生着变化。一些新的概念已经改变了我们关于已有测井技术的想法，并更新了我们关于未来发展方向的设计。传感器、井下电子线路、电缆、电缆遥测技术和地面信号处理都受到影响。

基本的测井测量结果可能包含着大量的信息。过去，由于缺少高速率数据传感器和井下电子器件，这些数据的某些部分不能传输到电缆上和记录仪中而没有被记录下来。同样，这些限制也一直妨碍或推迟了一些新的测井方法和仪器的采用。伴随着数字遥测技术的发展，测井电缆传输数据的速率已有了极大的增加。整个地面测井单元数字记录技术的提高也使记录能力有了很大的提高。采用数字化信号也为无线电、卫星或电话线把测井信号传输到计算中心或基地办公室提供了方便。

表1-1将一个旧仪器系统声感组合要求的数据传输速率与一些新仪器所需要的数据传输速率作了比较。它说明由于数字技术的应用，比较新的井下传感器、测井电缆和地面装置现在可处理的数据速率大大地增加了。

表1-1 一些测井仪要求的数据传输速率

ISF感应-声波		200bits/ft
高分辨率地层倾角		
	10个倾角道	25000bits/ft
阵列声波		
	全波波形	60000bits/ft
非弹性散射能谱		
	能谱	20000bits/s
井下地震仪		
	5秒波列	80000bits/s

§ 1.4 数 据 处 理

信号处理至少可以在井下仪器、地面测井车和计算中心三个地方执行。在何处进行处理取决于何处能最有效产生所期望的结果，何处首先需要所提取的信息，何处可以作出基本的专门评价，或何处技术因素起控制作用。

如果井下测井仪是合乎要求的地方，则设计测井仪器使数据在井下处理，并将处理后的数据传输到地面。当想像不到原始数据有什么进一步用途或原始数据的数量大到不可能传输时，属于这种情形。但是在大多数情况下，希望将测得的原始数据送到地面记录和处理。这样，原始数据可用于任何进一步处理或显示，而且可以长期保存供以后使用。

称为CSU的井场数字计算机系统是当前世界各地使用的斯仑贝谢测井仪器车上的标准装置（图1-4）。该系统具有处理大量数据的能力。它克服了组合测井系统（由许多测量传感器堆积或组合而成的测井仪器串）过去的许多限制。它还缩短了井场操作过程。仪器刻度也快得多和精确得多，而且能更有效地控制仪器的操作。

CSU系统为井场数据处理提供了巨大潜力。就象处理核辐射能谱确定元素组分和进一步确定化学组分一样，处理声波波形确定纵波和横波速度的工作已经在进行。利用CSU系统进行更复杂的反褶积和信号滤波也是可行的。

几乎所有的普通测井解释模型和方程在CSU系统中都可以处理。尽管井场测井解释程序没有计算中心那样完善，但是远远超过了手工所能做到的。井场程序包括确定简单和复杂岩性地层的孔隙度和饱和度、识别岩性、计算地层倾角、计算渗透率和确定更多岩石物理参

数。另外，可按用户最满意的格式重新安排数据（记录的、处理的或计算的）。

毫无疑问，对井场地层评价的要求将增加，并且程序也将变得更复杂。

计算中心提供功能更强大的计算机、更有经验的测井分析家、更充裕的时间和可以综合更多的数据。斯仑贝谢的计算中心分布在全世界各主要石油中心。它们提供的信号处理和地层分析程序比井场CSU系统复杂得多。程序涉及的范围从单井评价程序到一系列专用应用程序，直到评价整个油田的储集层描述。在参数选择和实际运算中可以更广泛地应用统计技术。

测井数据处理似乎越来越向集中所有测井测量结果进行综合处理的方向发展。正在设计的程序将考虑到，对于给定范围的岩石测井参数能以可预见的方式进行交叉对比，并且在整个处理过程都注意这种关系。新的程序可以使用来源更多的数据，如岩心、压力和生产测试结果，以及储集层模拟数据等。

§ 1.5 数据传输

CSU系统能用适当的通讯联系传输测井曲线。接收站可以是另一个CSU系统、传输终端或计算中心。为了减少传输时间或使数据适合于接收器的要求，在传输之前可以编辑或变换数据格式。机内的传输质量检验可以保证信息传输的可靠性。

使用LOGNET通讯网络，图形数据或测井磁带可通过卫星从井场传输到多个地方（图1-5）。在美国大陆和加拿大的陆上与海上已有这种服务，实际上，任何电话机都是可能的接收站。

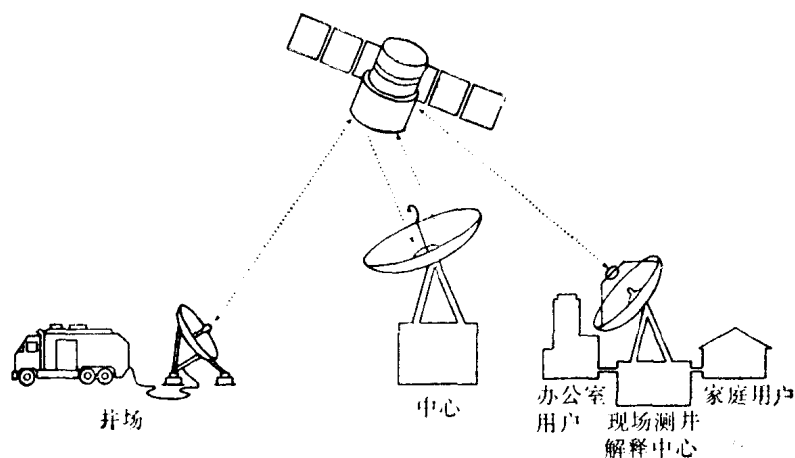


图1-5 LOGNET通讯系统示意图

一个小型可搬运的井场通讯天线可以用卫星把测井数据传输到斯仑贝谢计算中心，然后再通过电话送到顾客办公室或顾客的家里。由于系统是双向的，经过补偿的或计算后的测井数据可以传送回井场。这个系统也提供一般的双向声音通讯。有几种接收站可供选择：

- 1) 标准的数字化FAX机可直接在办公室接收测井图形数据。
- 2) 在办公室或家中插入标准电话出口上的轻便Pilot 50远距离复印器，可以使用户得到昼夜服务。
- 3) Pilot 100测井工作站可安装在用户的办公室以便接收磁带和测井曲线图，并可用

来复制多份测井曲线图。由于该站是自动的,它可以无人管理地接收数据。

4) ELITE 1000工作站可安装在顾客的办公室,用来接收来自LOGNET通讯网络的数据。利用这个新工作站不仅可以使用斯仑贝谢各个方面先进的公开成果,而且可以运用它的整个环境校正库。

5) Pilot 2000计算中心配备有斯仑贝谢测井分析家和测井数据处理员,安装在用户办公室进行现场测井数据的计算机解释。这种中心可以调用所有标准的斯仑贝谢测井解释程序。

为了对空中传输的数据提供保密,所有数据都译成密码。

在世界各地还有其他一些使用电话、无线电和卫星通讯的地方性传输系统。在一些场合,从井场进行传输是可能的;在另外一些情况下,传输数据必须由一个比较固定的通讯站发出。经过预先计划,几乎能够从世界的任何一个地方把测井数据传送到另外一个地方。

参 考 文 献

1. Schlumberger, C., Schlumberger, M., and Leonardon, E.G.: "Electrical Coring; A Method of Determining Bottom-Hole Data by Electrical Measurements, " AIME T.P.462; *Geophys. Prosp. Trans.*, AIME (1932) 110.
2. Schlumberger, C., Schlumberger, M., and Doll, H.G.: "The Electromagnetic Teleclinometer and Dipmeter, " *Proc.*, First World Petroleum Congress, London (July 1933).
3. Doll, H.G.: "The SP Dipmeter, " *Pet. Tech.* (Jan. 1943) 6.
4. Stratton, E.F. and Hamilton, R.G.: "Application of Dipmeter Surveys, " paper presented at 1947 AIME Annual Meeting, Tulsa, Oct.8-10.
5. DeChambrier, P.: "The Microlog Continuous Dipmeter, " *Geophys.* (April 1953) 18, No.4.
6. Allaud, L.A. and Ringot, J.: "The High-Resolution Dipmeter Tool, " *The Log Analyst* (May-June 1969) 10, No.3.
7. Pontecorvo, B.: "Neutron Well Logging—A New Geological Method Based on Nuclear Physics, " *Oil and Gas J.* (Sept. 1941) 40, No.18.
8. Tittle, C.W., Faul, H., and Goodman, C.: "Neutron Logging of Drill Holes: The Neutron-Neutron Method, " *Geophys.* (April 1951) 16, No.4.
9. Russell, J.H. and Bishop, B.O.: "Quantitative Evaluation of Rock Porosity by Neutron-Neutron Method, " *Pet. Eng. J.* (April 1954).
10. Bush, R.E. and Mardock, E.S.: "The Quantitative Interpretation of Radioactivity Logs, " *J. Pet. Tech.* (1951) 3, No. 7; *Pet. Trans.*, AIME, 192.
11. Russell, W.L.: "Interpretation of Neutron Well Logs, " *Bull.*,

- AAPG (1952) 36, No. 2.
12. Wyllie, M.R.J.: "Procedures for the Direct Employment of Neutron Log Data in Electric-Log Interpretation," *Geophys.* (April 1952) 17, No. 4.
 13. Allen, L. S., Tittle, C. W., Mills, W.R., and Caldwell, R. L.: "Dual-Spaced Neutron Logging for Porosity," *Geophys.* (Jan. 1967) 32, No. 1.
 14. Alger, R.P., Locke, S., Nagel, W.A., and Sherman, H.: "The Dual-Spacing Neutron Log—CNL," *J. Pet. Tech.* (Sept. 1972) 24, No. 9.
 15. Doll, H.G.: "Introduction to Induction Logging and Application to Logging of Wells Drilled With Oil-Base Muds," *J. Pet. Tech.* (June 1949); *Pet. Trans.*, AIME, 186.
 16. Dumanoir, J.L., Tixier, M.P., and Martin, M.: "Interpretation of the Induction-Electrical Log in Fresh Mud," *J. Pet. Tech.* (July 1957) 9, No. 7; *Trans.*, AIME, 210.
 17. Tixier, M.P., Alger, R.P., Biggs, W.P., and Carpenter, B. N.: "Dual Induction-Laterolog: A New Tool for Resistivity Analysis," paper SPE 713 presented at the 1963 SPE Annual Meeting, New Orleans, Oct. 1963.
 18. Doll, H.G.: "The Microlog—A New Electrical Logging Method for Detailed Determination of Permeable Beds," *J. Pet. Tech.* (June 1950) 2, No. 6; *Pet. Trans.*, AIME, 189.
 19. Doll, H.G.: "The Laterolog: A New Resistivity Logging Method with Electrodes Using an Automatic Focusing System," *J. Pet. Tech.* (Nov. 1951) 3, No. 11; *Pet. Trans.*, AIME, 192.
 20. Schuster, N.A., Badon, J.D., and Robbins, E. R.: "Application of the ISF/Sonic Combination Tool to Gulf Coast Formations," *Trans.*, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. (Oct. 1971).
 21. Doll, H.G.: "The Microlaterolog," *J. Pet. Tech.* (Jan. 1953) 5, No. 1; *Pet. Trans.*, AIME, 198.
 22. Doll, H.G., Dumanoir, J.L., and Martin, M.: "Suggestions for Better Electric Log Combinations and Improved Interpretations," *Geophys.* (April 1960) 25, No. 4.
 23. Stripling, A.A.: "Velocity Log Characteristics," *J. Pet. Tech.* (Sept. 1958) 10, No. 9; *Pet. Trans.*, AIME, 213.
 24. Aron, J., Murray, J., and Seeman, B.: "Formation Compressional and Shear Interval-Transit-Time Logging by Means of Long Spacings and Digital Techniques," paper SPE 7446 presented at the 1978

SPE Annual Meeting.

25. Faul, H. and Tittle, C.W.: "Logging of Drill Holes by the Neutron-Gamma Method, and Gamma Ray Scattering, " *Geophys.*(1951) 16.
26. Wahl, J. S., Tittman, J., Johnstone, C. W., and Alger, R. P.: "The Dual Spacing Formation Density Log, " *J. Pet. Tech.* (Dec. 1964) 16, No. 12.
27. Gardner, J.S. and Dumanoir, J.L.: "Litho-Density Log Interpretation, " *Trans.*, 1980 SPWLA Annual Logging Symposium.
28. Lock, G.A. and Hoyer, W. A. : " Natural Gamma Ray Spectral Logging, " *The Log Analyst* (Sept.-Oct. 1971) 12, No.5.
29. Serra, O., Baldwin, J., and Quirein, J.: "Theory, Interpretation, and Practical Applications of Natural Gamma Ray Spectroscopy, " *Trans.*, 1980 SPWLA Annual Logging Symposium.

第二章 测井定量解释基础

当今,几乎所有产出的油和气都来自储集层岩石(通常为砂岩、石灰岩或白云岩)孔隙空间中所聚集的油和气。储集层单位体积所含油或气的数量是其孔隙度和含烃饱和度的乘积。

为了确定总储量及油气聚集是否具有工业价值,除孔隙度和含烃饱和度以外,还需要知道含烃的地层体积。为了计算这个体积,必须知道储集层的厚度和面积。

要评价储集层的生产能力,必须知道流体在孔隙系统中流动的难易程度。地层岩石的这种性质就是它的渗透率,它取决于孔隙相互连通的方式。

因此,评价一个储集层所需要的主要岩石物理参数是它的孔隙度、含烃饱和度、厚度、面积和渗透率。另外,储集层几何形状、地层温度和压力,以及岩性在储集层的评价、完井和开发中都起着重要的作用。

§ 2.1 孔隙度

孔隙度是单位体积地层中的孔隙体积;它是孔隙或空间在样品总体积中所占据的比例。孔隙度的符号为 ϕ 。一个致密均匀的物质,例如一块玻璃,其孔隙度为零,另一方面,海绵具有很高的孔隙度。

地下地层的孔隙度可以在很大范围内变化。致密的碳酸盐岩(石灰岩和白云岩)和蒸发岩(盐、硬石膏、石膏、钾盐等)的孔隙度实际上可能为零;固结良好的砂岩可能有10~15%的孔隙度;未固结的砂岩可能有30%或更大的孔隙度。泥岩或粘土可能有超过40%的含水孔隙度,但其单个孔隙通常很小,以致岩石对流体的流动是非渗透性的。

孔隙的分类是按照孔隙周围物质的自然排列,以及孔隙的分布和形状来进行的。对于纯砂岩,岩石骨架由形状近似于球形的砂粒以某种方式堆集在一起组成,孔隙存在于颗粒之间。这样的孔隙叫做粒间的、糖粒结构的或骨架孔隙。一般来说,从地层沉积时起它们就存在于地层中。因此,它们也叫原生孔隙。

由于实际的沉积过程不同,石灰岩和白云岩也可能存在粒间孔隙。它们也可能具有孔洞和小洞穴形式的次生孔隙。次生孔隙是由地层水的作用或沉积后施加在岩石骨架上的构造作用所引起。例如,当弱酸性的渗滤水在石灰岩地层相互连通的通道中流动时,将造成并扩大孔隙空间,其中包含的小甲壳类虫的壳可能被溶解并形成孔洞。相反,矿物质丰富的渗滤水也可以形成封闭地层中一部分孔隙和通道的沉积物,从而减小它的孔隙度和(或)改变孔隙的几何形态。富含镁盐的水可以渗进方解石中,并伴随着钙被镁逐渐取代。由于取代是原子对原子,克分子对克分子,而一克分子白云石的体积比方解石小12%,结果使骨架体积减小,相应地增加了孔隙体积。

地层中出现的应力也可能引起骨架的网状裂隙、裂缝或断裂,使孔隙体积增加。然而,