



石油科技知识系列读本
SHIYOU KEJI ZHISHI XILIE DUBEN

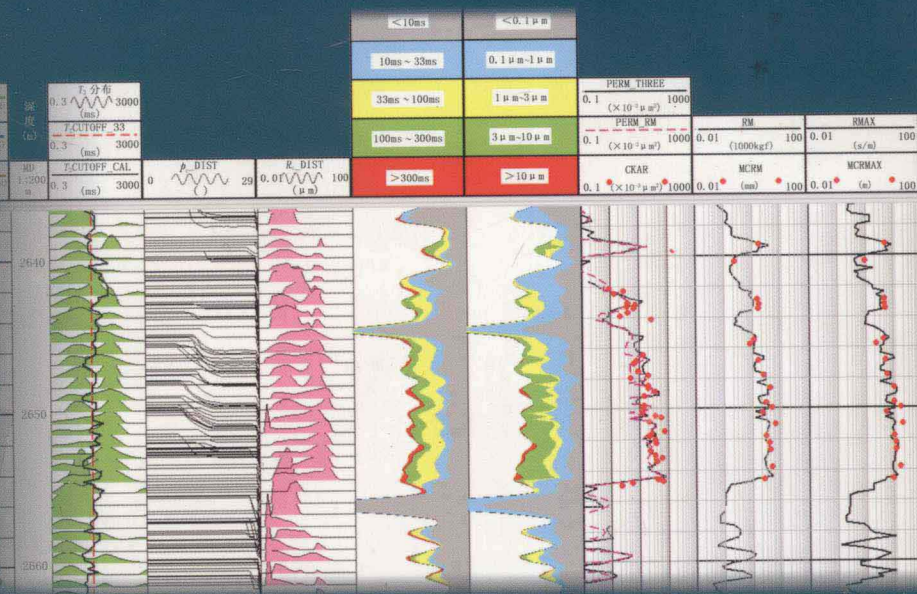
石油

测井

Well Logging in Nontechnical Language

作者: David E. Johnson & Kathryn E. Pile

翻译: 曹文杰 吴剑锋 高淑梅



石油工业出版社



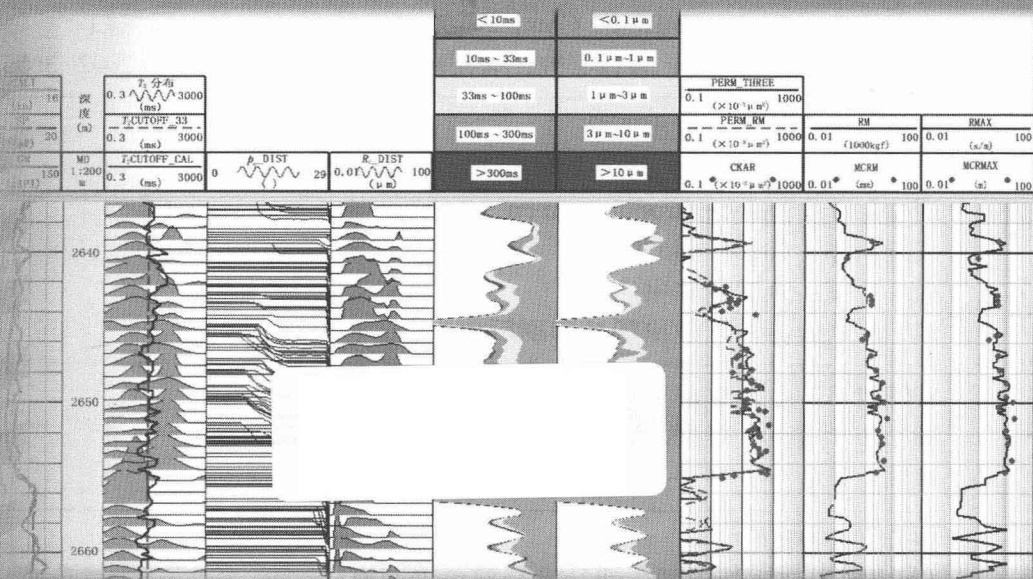
石油科技知识系列读本
SHIYOU KEJI ZHISHI XILIE DUBEN

石油

测井

Well Logging in Nontechnical Language

作者: David E. Johnson & Kathryn E. Pile
翻译: 曹文杰 吴剑锋 高淑梅



石油工业出版社

内 容 提 要

本书用浅显易懂的语言，辅以实例，讲述了测井的发展、测井方法、测井解释，及在工业和生活中的应用，并辅有应用实例。

本书可供从事石油测井专业的科研和工程技术人员、地质人员、野外工作人员、勘探管理人员、大学本科生、研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油测井 / (美) David E. Johnson 等著; 曹文杰, 吴剑锋
高淑梅译. —北京: 石油工业出版社, 2009.12

(石油科技知识系列读本)

书名原文: Well Logging

ISBN 978-7-5021-7387-6

I . 石…

II . ① D…② 曹…③ 吴…④ 高…

III . 油气测井

IV . TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 165991 号

本书经 PennWell Publishing Company 授权翻译出版, 中文版权归
石油工业出版社所有, 侵权必究。著作权合同登记号: 图字 01-2002-3655

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

发 行 部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

787×960 毫米 开本: 1/16 印张: 14.25

字数: 230 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

致 读 者

如果你对测井感兴趣，或者如果你从事测井工作但对它了解不多，那么本书很适合你。对那些间接利用测井曲线者如银行家、租地人、地质学家和工程技术人员、职员、助理和秘书等而言，用非专业术语编写的《测井技术》是一本实用的基础教科书。当他们在日常工作中遇到测井曲线时，此书有助于他们理解这些波浪式的曲线。

在开始学习之前，先讨论一下你的需求。你对测井的哪些方面感兴趣？你为什么想了解测井？你想知道多少内容？你用这些信息打算做什么？最重要的是，你希望从本书中学到什么？希望通过阅读它成为测井解释的专家呢？还是仅仅希望规避风险？

很显然，只有你自己才能够回答上述那些问题。如果你仅仅是临时或偶尔对测井感兴趣，那么你就选对了书。也许你已坐在会议桌旁，与那个一手做记录，另一只手在抽雪茄烟的人在一起，听他发誓说他的测井曲线能证明这是终生难遇的机会。另一方面，你可能日复一日地保存和处理测井曲线，却对曲线所显示的信息有着模糊不清的想法。你可能不想成为一名石油地质家、工程师或测井分析家。然而，你想储备测井方面的知识作为坚实的背景，以便你能做出更令人满意的商业决定，那么本书将会对你有很大帮助。

你能从本书学到什么？读完本书你将熟悉目前常用的测井种类——钻井液录井、裸眼井和套管井电缆测井、计算机生成的测井曲线和随钻测井曲线。你将熟悉根据裸眼井测井中最常测的项目来识别储层和非储层。另外，遇到更复杂的问题时，你知道如何去寻求帮助。尽管你不是专家，你也能提出合适的问题。信息充足时你知道如何决策，更重要的是，信息不足时你也知道如何处理。

本书不是关于这个题目的最新论述，它只是对一个相当复杂的技术性专题做一个初步的入门解释。如果你想根据一组测井曲线所包含的信息来做出重要决定，你能从本书中获得帮助。当你手头有钱希望获得一组测井曲线的正确解释时，可以从测井分析咨询专家或是从几个大测井公司内从事测井分析和销售的专家那里寻求建议。

关于测井曲线应用的第二个词是谨慎。我们几乎不能直接测量到我们正在寻找的油气，而是根据其他参数的复杂的测量值进行推断和做出最好的猜测。根据这些推断，我们用公式计算出解释结果。但是要好好想一想，如果测井总是预测

很成功，如果人们能很完美地解释它，如果测井仪器从不出错，那么测井公司就不需要所有与解释相关的免责条款了。

什么是免责条款？实质上，它说明在一个不完美的世界里生活着充满了善意但有时可笑的人们；机器和电子仪器有时会出错；解释偶尔会失误。公司会告诉你并强调任何钻井作业都有高风险。测井公司和测井分析家（权威）完全不用为这些失误而导致的任何损失而感到羞愧。我们同意这些观点。

像这样的一本书，这样一本试图用非专业术语介绍技术性较强的题目的书，绝不可能像该专业领域的技术处理一样准确和精确。本书是相当精确和过于简化之间的折中。我们希望达到解释准确但很简化这样一个中间层面。我们经常删掉或大大简略仪器设计原理和计算程序，而仅仅提供目前所常用的解释方法中的几种。就像前面陈述的，我们不能让测井分析家脱离读者，相反，我们想让读者了解这个过程。

本书主要针对石油行业。油气测井占据了测井行业的大部分，除此之外，测井大家族中还有其他分支。一个正在成长的分支是矿物勘探中应用测井技术评价矿藏。测井在土木工程中同样发挥作用，例如，研究著名的 SanAndreas 断层，评价环境影响，监测废物处理场所，科技调查（许多测井技术被联邦政府用于监控和评估正在实验的地下核武器的炮眼）。这些行业所用的测井类型和石油测井大致相同。尽管你的特别用途可能未被涉及，但是本书介绍的是你可能会用到的测井技术。

本书中的例子主要来自美国，不是因为只有他们独有，而是基于取材方便。一个例子也就是为了证明一个观点而已。没有必要为了应用这里介绍的方法，到世界某一个特定地方去寻找涵盖每一个地理省份的例子。本书所用的测量单位采用测井实例所用的单位为英制。许多测井公司用公制单位，但这可能对读者意义不大，因为测量单位经常会被标注在图头或刻度上。

不管你对测井是否有兴趣，也不需考虑你在哪里使用，也不管你选择哪种测量系统，本书会使你开始对石油测井有所了解。

David E.Johnson

Kathryne E.Pile

目 录

1 测井简介	1
1.1 我们为什么要测井?	2
1.2 谁在用测井曲线? 为什么要用?	3
2 认识测井曲线	5
2.1 图头	5
2.2 主测井	7
2.2.1 纵向刻度	8
2.2.2 水平刻度	9
2.2.3 练习 1	11
2.2.4 练习 2	13
2.2.5 练习 3	13
2.2.6 练习 4	15
2.3 附图	16
2.4 重复曲线	16
2.5 刻度	18
2.6 综合考查	19
2.6.1 练习答案	19
2.6.2 考查题答案	20
3 地层参数	21
3.1 沉积类型	21
3.2 孔隙度	22
3.2.1 粒间孔隙度 (原生孔隙度)	23
3.2.2 其他类型的孔隙度	25
3.3 地层分析	25
3.4 泥质地层	27
3.5 储量估算	29
3.6 侵入	29
3.7 电阻率	33
3.7.1 直接与间接测量对比	33

3.7.2	含水饱和度	33
4	钻井液录井	38
4.1	钻进速度和迟到时间	38
4.1.1	钻进速度的测量	39
4.1.2	根据钻井液录井曲线解释 ROP	39
4.1.3	迟到时间	40
4.2	气体检测	41
4.2.1	气测	42
4.2.2	返回钻井液分析	43
4.2.3	测量和记录值	43
4.2.4	解释	46
4.3	样品采集	46
4.4	油气显示评价	48
4.4.1	识别	48
4.4.2	孔隙度	49
4.4.3	渗透率	49
4.4.4	油气比分析	50
4.4.5	应用	51
5	电阻率测量	52
5.1	感应测井仪器	54
5.2	聚焦电测井	58
5.3	电法测井	60
5.4	自然电位	62
5.5	微电阻率测井仪器	65
5.5.1	微电极测井	65
5.5.2	微侧向测井	66
5.5.3	微球形聚焦测井	66
6	孔隙度测量	68
6.1	岩心	68
6.2	亚原子间的相互作用	69
6.3	自然伽马测井	72
6.4	密度测井	74
6.5	补偿中子测井	78
6.6	声波测井	81

6.7	多孔隙度测井	84
6.8	快速粗略的交会孔隙度	88
7	综合解释	93
7.1	分析测井曲线前前提问题	93
7.2	分析曲线	93
7.3	快速直观解释	95
7.4	实例分析	96
8	具体解释	103
8.1	实例 1: Sargeant 1-5 井	104
8.2	来自海湾地区的实例	114
9	计算机生成的解释	119
9.1	井场计算机测井曲线	119
9.2	计算中心处理解释	125
9.3	介电常数测井	128
9.4	核磁共振测井	132
10	含水饱和度以外的方法	136
10.1	现场地震技术	136
10.2	确定倾角	140
10.3	地层测试	148
10.3.1	钻杆测试	148
10.3.2	电缆式地层测试器	149
10.4	地层取心	151
10.5	随钻测井	153
10.6	用空气钻井的测井方法	154
10.6.1	超热中子测井	154
10.6.2	井温测井	154
10.6.3	噪声测井	154
10.7	钻杆传送测井	155
11	完井测井	156
11.1	套管胶结	156
11.1.1	两级固井作业	157
11.1.2	测量水泥体积	158
11.2	测井曲线相关对比	158
11.3	水泥胶结测井	160

11.3.1	解决问题的实例	163
11.3.2	影响 CBL 解释的情况	165
11.3.3	脉冲回声测井仪	167
11.3.4	超声水泥评价测井仪	168
11.4	补注水泥	169
11.5	产层射孔	172
12	单井和油藏检测	175
12.1	生产测井	175
12.2	生产井常出现的问题	175
12.2.1	层间窜流	176
12.2.2	过早见水	176
12.2.3	机械故障	177
12.2.4	产量过低	177
12.3	分析生产状况的复杂性	178
12.4	生产测井仪器	180
12.4.1	自然伽马 / 磁定位仪 (GR/CCL)	181
12.4.2	井温仪	182
12.4.3	流量计	182
12.4.4	流体压力计	184
12.4.5	差示压力计	185
12.4.6	持率仪	186
12.4.7	脉冲中子仪	186
12.4.8	放射性示踪测井	186
12.5	生产测井实例	189
12.6	套管检测仪	191
12.6.1	套管井电位剖面测井仪	192
12.6.2	声成像测井仪	192
12.6.3	漏磁检测仪	192
12.6.4	多臂井径仪	194
12.6.5	修井作业	194
12.7	过套管地层评价仪	194
12.7.1	核物理学和过套管测井仪	195
12.7.2	伽马能谱	196
12.7.3	补偿中子测井	196

12.7.4	声波仪	197
12.7.5	密度仪	197
12.7.6	脉冲中子频谱仪	197
12.7.7	脉冲中子衰减仪	197
12.8	油藏监测	198
12.9	总结	200
后记	208

1 测井简介

就以测井是什么和它是如何得名开始吧！有一个故事大致是这样的。石油工业在 18 世纪左右开始起步时，许多海员因此失业（奇怪吧？由于新生的石油行业和煤油的发展，淘汰了使用鲸鱼油而导致海员被解雇）。因为海员习惯于借助缆绳登高工作，他们自然能登上油田铁架塔。

随着海员涌入油田，他们带来了许多航海的表达方式，这是为什么钻井井架及其设备被称做“船具”（rig），管架称作“桅杆”（mast），值班室被叫做“狗屋”（doghouse），并且记录被保存在“资料柜”（knowledge box）里，术语测井（log）是航行日志的另一种表示方法。

几乎每个人都听说过船长写的航海日志，它是按照年月顺序记录船只在海上所发生的事情，记录钻井中发生的事情就是钻井日志，因为油公司对钻井钻开地层时所发生的事情很感兴趣，钻井日志通常是按深度而不是按时间记录的。



图 1-1 电测车携带车载计算机和能
测量井深达 25000ft 的测井电缆

在石油工业初期，钻井日志实际上是所能获得的有关地下地层的唯一信息。钻井日志记录了从井下返回的岩石类型，每小时钻进多少英尺，油或气的流量，设备故障，卡钻事故和任何影响到评价井的其他资料。今天，log 的意思已经延伸到按纵向深度（时间）记录的任何用曲线或文字记录的资料。

人们所提及的测井通常是指使用电缆测井车和仪器记录的裸眼井信息（图 1-1）。logs 也可指钻井日志、钻井液录井，计算机生成的测井曲线以及随钻测井曲线。

1.1 我们为什么要测井？

我们为什么要进行测井？它能告诉我们什么重要的东西？

斯伦贝谢公司在 19 世纪 60 年代有一句广告语是：“……测井是石油工业的眼睛。”这句广告语恰当地描述了测井的重要性。地质家和工程师设法想象一口井的下面正在发生什么时，的确是在盲目地工作。一层层的沉积物经过年代变迁逐渐堆积，不断形成又变化，以至于我们无法准确地猜测到我们脚下到底是什么。

在测井之前，钻井工人仅仅有钻井日志和邻井的信息，这些信息在过去和现在都是非常重要和有用的，但是它仍留下许多问题要靠“猜和赌”来解决。电缆测井技术为石油地质学家和工程师们点亮了一盏明灯。特别是它能提供如下信息：

地层顶部深度、地层厚度、孔隙度、温度、钻遇的地层类型（泥岩、砂岩、石灰岩、白云岩）、油或气显示、估算的渗透率、储层压力、地层产状（地层倾角和倾向）、矿物识别、胶结指数、水泥与套管的胶结情况、生产井中不同层位的流体类型和流量。

由于新测井方法和老测井方法的新用途不断被开发出来，信息还在不断增加。

但是测井的真正原因是由于它能判定一口井是好还是坏。一口好井具有商业价值，它能生产足够的油或气来回报钻井时的投资，并获得利润。一口坏井就没有商业价值，测井有助于进行这种判定。

当测井开始之前，成千上万的钱已经用于租地、地震研究和钻井。但是，更多的钱还要花费在完井上——下套管、固井、射孔、测试、下生产油管和封隔器，安装井口设备和地面生产设施。如果公司在花数千美元进行完井之前，能确定这口井不具有生产价值，那么它能使损失降

到最低。就像（扑克牌）赌博，失败后投入巨资是毫无意义的。

测井帮助我们确定正在钻入的地层是否存在具有商业价值的油、气储层。这样，可以使对坏井的投资成本降到最低。对于好井来说，测井也可以告诉我们油气层所处的深度、储量和是否有多个层具有开采价值。

1.2 谁在用测井曲线？为什么要用？

实际上，石油工业中的大部分人或多或少都会用到测井曲线（图 1-2）。当然在钻井和完井过程中需要决策的人也要用到。

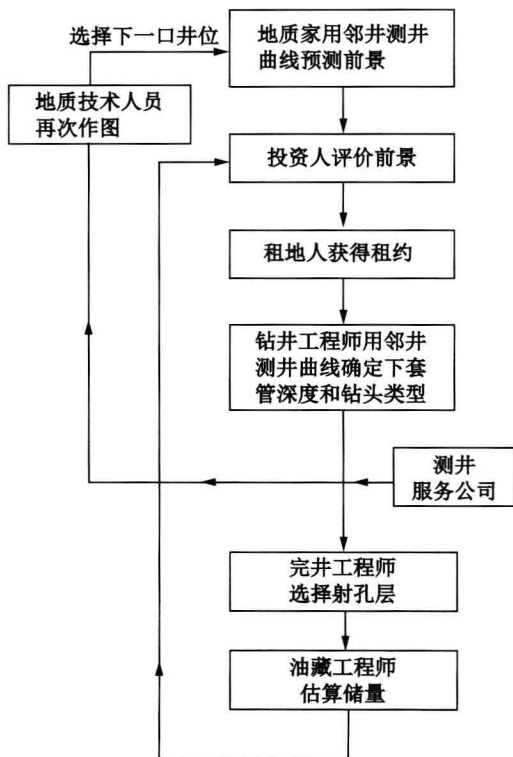


图 1-2 实际上石油工业界人人利用测井曲线

测井几乎可用于勘探和生产的全过程，我们看一下独立公司（一个与石油有关的，但不与具有生产、炼制和营销能力的主要的、有影响的超级公司相接触的公司）所做的钻井方案。一个独立公司的规模可以拥有几百万资产和几百名雇员，也可以是由几个有不同专业经验的人组成的小团体，或者说只有一个人，一个独立公司也可以是为了一纸钻井合

同而组合在一起的几个人。这个团队拥有地质学家、租地人、投资人和工程师。

首先，由地质学家评价一个区域，这个评价基于地震资料、现有测井资料、邻井数据、想象和直觉。拥有了这些信息，地质学家做出这个地区的构造图并且建议如何实现这个构想。

租地人主要负责获得地质学家必需的租约，租地人不需要像测井分析家一样懂得如何准确认识测井资料。但是他（她）必须具有一定的测井应用知识，能和土地所有者、银行家、地质学家讨论前景问题。

金融家（中间商，投资人）把合同卖给银行家和投资人时可能会用到地质学家收集的资料（包括测井资料）。买合同的组织有利益需求，例如他们投资是希望获得利润。为了保护投资，银行家和投资人经常利用独立公司或咨询公司的测井分析家评价测井资料。井开钻并测完井后，团队内部对是否投入更多的钱用于完井、封堵和报废井会有不同的观点。在你的或是你公司的钱有风险时，最好对测井解释有充分的了解，可以决定如何行动。

钻井工程师根据邻井的测井信息钻井。从这些信息中，工程师决定要用的钻井液类型和密度，钻遇地层的类型，钻头的类型，下套管深度及钻井周期。

完井工程师主要依赖测井信息决定哪个层具有生产价值和套管射孔的确切深度。基于日报、钻井液录井、各种裸眼井和套管井测井的信息，完井工程师将要进行射孔、测试、作业并最终将这口井投入生产。

油藏工程师用裸眼井测井资料计算原始储量（可采油气量）。储量计算要根据生产数据、压力恢复测试，以及这口井后期可能测的其他测井资料而作周期性更新。

在这一系列使用测井资料的人中有绘制构造图的地质技术人员；那些想知道这口井为什么没有邻井好的矿权所有者；为下一口井提供更好的钻井液的钻井液销售人员；间接利用测井资料作出评估并计算公司净资产的会计师，很多人都依靠测井解释结论。这就是为什么要尽可能多地了解测井的好处。

学习测井的第一步是要知道测井曲线的组成和如何认识它们，让我们从第2章开始学习吧。

2 认识测井曲线

在下面的章节中，我们将要介绍石油工业界用到的几种测井项目，有测量地层电阻率的，有确定孔隙度的，还有确定矿物类型的。但是在学习如何根据不同的测井曲线了解地层和油气存在情况之前，我们需要知道怎样找到和如何看懂原始测井资料的五个主要部分：图头、主测井、附图、重复曲线和刻度。

2.1 图 头

当你拿到一口井的测井曲线，通常首先看到的是在测井曲线最上部的一段短的文本框，这段文本框就叫作图头，顾名思义，它放在测井曲线的顶部（或最上部）。图头部分包含有用和通常很关键的信息。图2-1是一张测井曲线的图头部分，其信息说明如下：

①测井公司。

②操作公司（操作员）。

③具体的井信息。井名或井号、矿区或油田名称、法定的位置（指该井所在的地理位置，通常是指镇区范围内的一部分）、海拔高度（通常是指钻台面或方钻杆补心的海拔高度）、测井日期、测时井深、其他辅助信息（钻井液性能、钻头尺寸、套管尺寸、井深）。

④测井种类或类型。

⑤该井其他测井或测量项目。

⑥设备信息。仪器序列号、仪器（零长）间隔、测井车号码、测井车生产厂家。

⑦个人信息。曲线记录员、测井监督。

⑧备注部分。记录在测井过程中的任何非正常情况或偶然现象。

⑨测井曲线刻度和曲线标识。

解释任何一口井时首先要仔细检查图头。这是为什么呢？显而易见，因为你首先需要知道正分析的测井曲线的井名肯定是你分析的井。然后检查包含在图头信息内的技术信息，确定测井项目和关于这

4

1

Dual Induction/SFL W/GR

CSU

2	Company: ABC Petroleum Corp. Well: Mabel #1 Field: Wildcat County: Shawnee State: Kansas Nation: USA Location: N/2 SW SEC 5 TWP. 12N RGE: 12 W Permanent Datum: GL Elevations — Elev. of Perm. Datum: 1501.0 ft KB: 1513.0 F Log Measured From: kB DF: 1511.0 F 12.0 F Above Perm. Datum: GL: 1501.0 F Orig. Measured From: kB Date: 24 SEP 86 Run No: 1	5 Other Services — Diu/Sfl W/Gr Ldt/Cnl W/Gr MI W/Gr Dwql Lognet Lss Program Tape No: 28.2																
3	Depth-Driller: 5033.0 ft Depth-Logger: 5033.0 ft BTM Log Interval: 5027.0 ft Top Log Interval: 536.0 ft Casing-Driller: 533.0 ft Casing-Logger: 536.0 ft Casing: 8 7/8" Weight: 24.0000 lb/ft Bit Size: 7 7/8" Depth:																	
3	Type Fluid in Hole: Chemical Density: 9.20 Lb/G Viscosity: 57.0 S pH: 9.0 Fluid Loss: 8.0 C3 Source of Sample: Flowline RM: 2.290 OHMM at 80.0 °F RMF: 1.900 OHMM at 76.0 °F RMC: 1.680 OHMM at 80.0 °F Source RMF/RMC: Meas/Calc RM at BHT: 1.337 OHMM at 142 °F RMF at BHT: 1.058 OHMM at 142 °F RMC at BHT: .981 OHMM at 142 °F Time Circ. Stopped: 6:00 9/24 Time Logger on BTM.: 10:22 9/24 Mx. Rec. Temp: 142.0 °F Logging Unit No: 8302 Logging Unit Loc: Liberal Recorded By: Jack Dunne Witnessed By: Jim Smith																	
6	Remarks: Chlorides 1100 PPM 1.5 inch Standoffs Used on Dual Induction SP Shift 8284																	
6	Equipment Numbers — DIC-DA 1194 DIS-EC 1109 SGC-JC 2649 NLM-BC 546 IEM-BD 1308																	
9	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">GR (gAPI)</td> <td style="width: 25%;">300.00</td> <td style="width: 25%;">SFLA (Q * m)</td> <td style="width: 25%;">50.000</td> </tr> <tr> <td>GR (gAPI)</td> <td>150.00</td> <td>RILD (R_{ILD}) (Q * m)</td> <td>50.000</td> </tr> <tr> <td>SP (mV)</td> <td>150.00</td> <td>CILD (m)</td> <td>1000.0</td> </tr> <tr> <td>SP (mV)</td> <td>40.000</td> <td></td> <td>0.0</td> </tr> </table>		GR (gAPI)	300.00	SFLA (Q * m)	50.000	GR (gAPI)	150.00	RILD (R _{ILD}) (Q * m)	50.000	SP (mV)	150.00	CILD (m)	1000.0	SP (mV)	40.000		0.0
GR (gAPI)	300.00	SFLA (Q * m)	50.000															
GR (gAPI)	150.00	RILD (R _{ILD}) (Q * m)	50.000															
SP (mV)	150.00	CILD (m)	1000.0															
SP (mV)	40.000		0.0															

图 2-1 图头提供的信息有井的类型及一些参数
图头被分成了两半，将上半部展开予以说明

口井的其他信息。例如钻井液资料（钻井液电阻率、失水量、密度和黏度）、钻头尺寸、套管下深和完钻井深，通过备注部分了解在测井过程中是否有任何非正常现象发生。最后，看一下是哪个测井公司测井，并不是所有测井公司的测井质量都相同，并且你的某些决定往往要受到你对测井曲线的信任度的影响。所有这些信息对测井解释都是重要的，并且它们能有助于你决定如何处理这口井。

2.2 主 测 井

图头以下就是测井曲线的主测井，它看起来像一张非常长的图，在图上我们可看到测井仪器传输到地面上的信息。在这部分我们将学习纵向刻度和水平刻度。

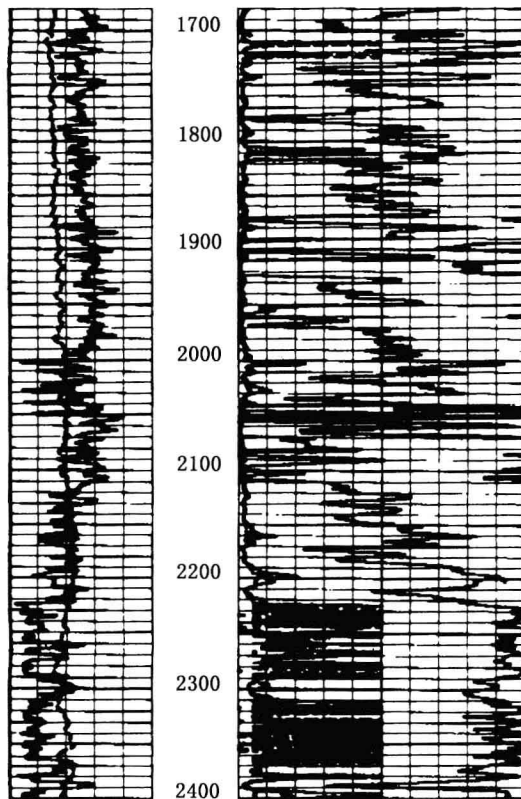


图 2-2 纵向比例尺为 1in/100ft (1 : 100)，
可用于与邻井地层的深度对比