

学校编码: 10384  
学 号: X2011222038

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

工 程 硕 士 学 位 论 文

声 波 测 井 技 术 研 究

Acoustic logging technology research

张 华 东

指导教师姓名: 孙海信副教授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 7 月

论文答辩时间: 2016 年 7 月

学位授予日期: 2016 年 7 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2016 年 7 月

声  
波  
测  
井  
技  
术  
研  
究

张  
华  
东

指  
导  
老  
师  
孙  
海  
信

厦  
门  
大  
学

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 张华东

2016年7月21日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年 月 日解密，解密后适用上述授权。
2. 不保密，适用上述授权。

声明人（签名）：张华东

2016年7月21日

## 声波测井技术研究

**【摘要】** 声波测井从上世纪 50 年代开始，经历了几十年的发展，已经成为测井研究的重要领域，是当今发展最快和应用最为广泛的现代测井方法。声波测井是油气矿藏勘探和开发的最为重要的手段之一。为了满足复杂油气矿藏的勘探开发，投入了大量资金开展声波测井方向的研究。

声波测井的物理基础是研究与岩石特性密切相关的声振动沿钻井方向的传播特性，特点是记录了地层的纵波、横波及流体波的时差、幅度、频率、相位等信息，而这些信息对于计算孔隙度、判断岩性、定性识别流体性质、评价岩石力学弹性参数等具有重要的作用，并且还可以为较深的砂泥岩储层估算岩石破裂压力值，为油藏工程提供参数，因此声波测井是油气勘探和开发的重要手段。在油气藏勘探和开发中主要解决储油层分布、油井固井质量的检测、出砂等问题。

本文首先介绍了声波测井的背景知识，接着对于常规测井技术进行了分析与仿真，然后介绍了声波测井的技术原理与主要的技术应用，最后对合成声波测井技术从原理上进行了阐述，并针对于其资源勘查的性能进行了仿真分析。

## Acoustic logging technology research

**[Abstract]** Since the beginning of the last century in 50s, sonic logging has experienced several decades of development, it has become an important field of well logging research, and it is the most widely used modern well logging method. Acoustic logging is one of the most important tools for the exploration and development of oil and gas deposits.

In order to satisfy the exploration and development of complex oil and gas deposits, a lot of funds have been put into the research of acoustic logging. The physical basis of acoustic logging is research and rock properties is closely related to the vibration and acoustic propagation characteristics along the directional drilling, which is characterized in that the formation of P-wave and S-wave and fluid wave moveout, amplitude, frequency and phase information is recorded, and the information for calculating porosity and lithology, qualitative identification of fluid properties and evaluation of rock elasticity parameters of judging has an important role, and can also deep sandstone and mudstone reservoir estimation of rock cracking pressure, reservoir engineering provide parameters, so the sonic logging is an important means of oil and gas exploration and development. In the exploration and development of oil and gas reservoirs, the main problems are the detection of the oil reservoir distribution, the quality of the oil well cementing, the sand production and so on.

In this paper, we first introduce the background knowledge of the acoustic logging, then for conventional logging technologies were analysis and simulation, then introduced the principle of acoustic logging technology and the main technology, finally expounds the synthetic acoustic logging technique in principle and needle for the performance of its resources exploration were simulation analysis.

**[Keywords]** acoustic logging; Conventional well logging technology ; Synthetic sonic logging technology

## 目录

<b>第 1 章 声波测井研究背景分析</b> .....	<b>1</b>
<b>第 2 章 常规声波测井技术研究分析</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 勘探测井技术研究</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 声波速度测井技术 .....	3
2.1.2 密度测井 .....	5
2.1.3 电阻率测井技术 .....	6
2.1.4 自然电位测井 .....	8
<b>2.2 套管井测井技术</b> .....	<b>10</b>
2.2.1 过程测井技术 .....	10
2.2.2 活化测井技术 .....	12
2.2.3 井间示踪监测技术 .....	13
2.2.4 注入剖面测井技术 .....	15
<b>2.3 测井数据处理技术</b> .....	<b>16</b>
2.3.1 测井数据预处理 .....	16
2.3.2 交会图技术 .....	19
2.3.3 油气层定性解释技术 .....	21
2.3.4 测井解释问题分析 .....	23
2.3.5 常规测井识别技术分析 .....	25
2.3.6 测井地质综合研究技术 .....	27
<b>2.4 常规测井技术性能仿真分析</b> .....	<b>28</b>
<b>第 3 章 声波测井技术原理与应用分析</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1 声波测井技术与裂缝预测研究</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2 声波测井技术与存储层研究</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3 声波测井技术与地层学研究</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4 声波测井技术与碳酸盐岩地貌研究</b> .....	<b>38</b>
<b>第 4 章 合成声波测井技术研究</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1 合成声波测井概述</b> .....	<b>40</b>
<b>4.2 合成声波测井原理</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3 影响合成声波测井的因素和解决方法</b> .....	<b>42</b>
4.3.1 子波提取 .....	42

4.3.2	影响反褶积效果的因素.....	42
4.3.3	速度误差的影响.....	43
<b>4.4</b>	<b>资料准备 .....</b>	<b>44</b>
4.4.1	地震部分.....	44
4.4.2	声波测井部分.....	45
4.4.3	测井数据分析及处理.....	45
<b>4.5</b>	<b>实现方法 .....</b>	<b>47</b>
4.5.1	提取资料.....	47
4.5.2	合成地震记录.....	49
4.5.3	反褶积运算.....	50
4.5.4	推算声阻抗.....	52
4.5.5	计算速度曲线.....	53
<b>结论</b>	.....	<b>55</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>56</b>
<b>致谢</b>	.....	<b>59</b>

## Contents

<b>Chapter1</b>	<b>Background of acoustic logging .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapter2</b>	<b>Research of conventional acoustic logging .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>open-hole logging .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Acoustic velocity log .....	3
2.1.2	Density logging .....	5
2.1.3	Electrolog.....	6
2.1.4	Spontaneous potential log .....	8
<b>2.2</b>	<b>Casing well logging technology .....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Production log .....	10
2.2.2	Activation logging .....	12
2.2.3	Cross well radioactive tracer monitoring.....	13
2.2.4	Injection profiles log.....	15
<b>2.3</b>	<b>Log interpretation technology.....</b>	<b>16</b>
2.3.1	Technic of pretreatment for logging.....	16
2.3.2	Technic of cross plot and frequency cross plot .....	19
2.3.3	Qualitative interpretation for oil and gas.....	21
2.3.4	Problem in identification of oil and gas bearing bed.....	23
2.3.5	Conventional well logging technology.....	25
2.3.6	Comprehensive research of well logging geology .....	27
<b>2.4</b>	<b>Simulation of conventional well logging technology .....</b>	<b>28</b>
<b>Chapter3</b>	<b>Application of acoustic logging technology .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Acoustic logging technology and fracture prediction.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Research on acoustic logging technology and storage layer .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Acoustic logging technique and stratigraphic study .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>Acoustic logging technology and the carbonate geomorphology ....</b>	<b>38</b>
<b>Chapter4</b>	<b>Study on synthetic acoustic logging technology .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Overview of synthetic acoustic logging .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Principle of synthetic acoustic log .....</b>	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Factors affecting of acoustic logging .....</b>	<b>42</b>
4.3.1	Wavelet extraction .....	42
4.3.2	Factors affecting the effect of deconvolution.....	42



4.3.3 Influence of velocity error.....	43
<b>4.4 Data preparation.....</b>	<b>44</b>
4.4.1 Seismic section.....	44
4.4.2 Sonic log.....	45
4.4.3 Logging data analysis and processing .....	45
<b>4.5 Synthetic acoustic logging application .....</b>	<b>47</b>
4.5.1 Extract data .....	47
4.5.2 Synthetic seismic record .....	49
4.5.3 Deconvolution operation.....	50
4.5.2 Calculated acoustic impedance.....	52
4.5.3 Deconvolution operation.....	53
<b>The Ending .....</b>	<b>55</b>
<b>Reference .....</b>	<b>56</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>59</b>

## 第 1 章 声波测井研究背景分析

油气测井是十大石油学科之一,是石油工业高新技术含量最高的学科之一,近几十年来,从第一代的半自动测井仪到现在的第五代第六代的成像测井仪,发展非常迅速。由于我国声波测井技术发展较晚,虽然在一些方面取得了一些成绩,但是总体水平与国外的测井技术仍有一定的差距。

在常规测井资料分析、解释方面和电磁、声波测井基础理论研究方面,我国与国际先进水平的差距还不是很大,而且随着国内石油市场的进一步开放以及国际交流的增强,这种差距还会不断缩小,但是由于我国油气测井技术研究起步较晚、底子薄缺乏有自主知识产权的核心技术,使我国测井技术的发展还面临了一些困难。

(1)、地质结构特殊性,给勘探和资料处理带来了一定的困难。我国石油储量近 90%来自陆相沉积为主的砂岩油藏,天然气储量大部分来自非砂岩地藏,地质条件十分复杂。油田总体规模小,储层条件差,类型多,岩性复,岩性复杂,储层非均质性严重,物性变化大,这些不利因素给油气勘探带来了困难;并且油气的浅层勘探已经进入尾期,新的油气多分布在深层处。

(2)、在仪器方面。我国在仪器方面与国外的差距尤为突出虽然近几年我国在仪器方面增加了投入,并且国内也出现了一些有实力的仪器生产单位,一些仪器在国内也占有分量,但是其信息采集的规模,精度和可靠性与国外仪器相比仍存在较大的差距。

(3)、软件方面。在信息技术高度发展的情况下,声波测井资料的自动处理也在提高,但是这要求一个好的处理软件为平台。虽然国内几家公司在此方面做出了较好的发展,但是软件工程化、商业化有待大力改进。

(4)、人才是一个行业和领域最重要的组成部分,目前,地质、物探、测井等学科的知识结构较为单一,缺乏应用的复合型人才。

由于声波测井理论的成熟,伴随着科技的进步,声波测井技术现状被广泛的应用于水电、铁道、冶金、工业和民用建筑领域,成功解决了资源和工程勘探中的有关问题。特别是在 21 世纪,资源已经成为制约我国向

前快速发展的重要因素，而油气、天然气占居各种资源的首位，声波测井是油气勘探、开发的重要手段；并且随着国家一些大型基建项目的开工和国家对于灾害地质防护的需要，声波测井技术在今后的发展中，将发挥越来越重要的作用。

声波测井利用声波在岩石等介质中的传播时，幅度的衰减、速度和频率的变化等声学特性来研究钻井地质剖面、判断固井质量等问题的一种测井方法。目前声波测井常用到的方法包括声波速度测井法、密度测井法、电阻率测井法、自然电位测井法等。

从声学上来讲，声波测井是属于充液井孔中的波导问题。测井的井孔中的声波的声速、衰减是油气勘探和开发中极其重要的参数；岩石的横波的波速和密度资料可以用来计算岩石的弹性参数；计算岩石的非弹性参数；估算就地的最大最小主地层应力；估算孔隙压力，破裂压力和坍塌压力；计算孔隙度和储层产能的评估；估算地层孔隙内流量模量<sup>[1]</sup>；为合成地震记录问题等提供输入参数等等。

声波测井的特点是记录了地层的纵波、横波及流体波的时差、幅度、频率、相位等信息，而这些信息对于计算孔隙度、判断岩性、定性识别流体性质、评价岩石力学弹性参数等具有重要的作用，并且还可以为较深的砂泥岩储层估算岩石破裂压力值，为油藏工程提供参数，因此声波测井是油气勘探和开发的重要手段。在油气藏勘探和开发中主要解决储油层分布、油井固井质量的检测、出砂等问题。

## 第2章 常规声波测井技术研究分析

测井技术是一种井下油气勘探方法,是准确发现油气藏和精确描述油气藏的重要手段,是油气储量及产量评估不可缺少的科学依据。测井技术是石油科技的一个重要组成部分,是石油天然气工业中高新技术含量最多的学科之一。测井技术,按作业方式划分,一般分为电缆测井和随钻测井两大系列;按作业性质划分,一般分为勘探测井(裸眼)测井和生产(套管)测井两大系列。

### 2.1 勘探测井技术研究

裸眼井测井一般是指勘探阶段的测井过程,是钻井作业结束未下套管之前实施的测井过程。利用裸眼井测井技术不仅可以划分井孔地层剖面,确定岩层厚度和埋藏深度,进行区域对比,而且可以探测和研究地层的主要成分、裂缝、孔隙度、渗透率、油气饱和度及流体性质、倾向、倾角、断层、构造特征和沉积环境与砂体的分布等参数。对于评价地层的储集能力、分析研究油气层等具有重要的意义。

#### 2.1.1 声波速度测井技术

对于测井工作来说,井下岩石可认为是弹性介质,在外力作用下能产生切变弹性形变和压缩弹性形变,所以它既能传播纵波又能传播横波,不过岩石的纵波速度比横波速度大 1.73 倍。在气体和液体中,只能产生压缩弹性形变,不能产生切变形变,因此只能传播纵波,不能传播横波。

测井的声波频率为 15 千周/秒—30 千周/秒,介于声波和超声波之间,通常就简称为声波。声波通过岩石,其波的速度,幅度有时甚至频率都会发生变化。目前常用的是声波速度的幅度这二个特性。

对于沉积岩来说,声波的传播速度主要与下列因素有关:

(1)、岩性。在沉积岩中声波的传播速度与岩石密度有密切的关系,一般速度随密度的增加而呈线性增大。

(2)、岩石的结构。胶结疏松孔隙度大的岩石,相应地密度较小,一般说来,沉积岩的密度随其孔隙度的增大而线性地减小,因此各种沉积岩

的孔隙度与速度之间大致成线性关系，即随着孔隙度的增加，传播速度呈线性地减小。

(3)、与地质年代有关。许多实际观测的资料指出，同样深度成分相似的岩石，当地质年代不同时，声波的传播速度也不同，老地层比新地层具有较高的速度。

(4)、与埋藏深度有关。许多测量结果表明，在岩性和地质年代相同的条件下，声波速度随岩石埋藏深度的增加而增大，这是由于埋藏深的岩石所受的负荷大的缘故。

不同性质的岩石，由于其密度和结构不同，因而声波的传播速度也不相同，因此可以根据声波的传播速度来研究岩石的岩性，岩石的孔隙度等。通常，声波在介质中传播时，由于质点振动要克服相互间的磨擦力，即由于介质的粘滞和阻尼使声波能量转化成热能而衰减，这种现象就是所谓介质吸收声波能量。声波能量被地层吸收情况与声波频率和地层本身的密度有关，对同一地层来说，声波频率越高，被吸收越厉害（因此声波测井用的频率在超声波中是很低的）；对于一定频率来说，地层越疏松（密度越小）声波被吸收越厉害，衰减越大，幅度越低。

综上所述，在井下，声波幅度（或声波能量）的变化有两种形式：一是声波在地层中传播时，因地层吸收声波能量而使幅度衰减；另一种是声波在不同性质的界面上，由于声阻抗不同声波的能量分布也不同，使声波幅度发生变化。这两种变化形式往往同时存在，究竟那种为主，要根据具体情况加以分析。例如，在裂缝及疏松岩石井段，声波幅度的衰减，主要是由于地层吸收声波能量所致；在下套管井中各种波的幅度变化主要与套管和地层之间的界面所引起的声波能量分布有关。因此，如果在裸眼井测量井下声波幅度就有可能划分出裂缝带和疏松岩石的井段（这些往往是油气储集的有力地方）；在下套管井中测量各种波的声波幅度可以用来检查固井质量。

水、气的声速不同，由于水的声速大于气的声速，因此在高孔隙度（大于 30%）和泥浆侵入不深的条件下，声波测井能够比较好地确定疏松砂岩的气层。由于不同地层具有不同的声波传播速度，所以声波时差曲线

可应用于划分地层。致密石灰岩、白云岩声速最高，时差最小，孔隙发育的石灰岩和白云岩，声速相对降低，时差增加。砂岩声速一般较低，时差较大，泥岩声速更低，在时差曲线上，时差很大，对钙质富集层，其普通特点是声波时差小。微电极数值高，一般孔隙性灰岩有明显正幅度差。岩石密度是控制地层声波速度的重要因素，而岩石密度又和地质孔隙度有密切的关系，因此声波速度可以较好地反映地层孔隙度。经过大量的实际工作得出下列结论，在固结而压实的纯地层中若有小的粒间孔隙均匀分布，则孔隙度和声波时差存在线性关系（称平均时间公式）<sup>[2]</sup>。

### 2.1.2 密度测井

密度测井，将带有伽马源的放射性测井仪下到井中，伽马源放出的 $\gamma$ 射线与井周围的地层发生相互作用。对于中等能量的 $\gamma$ 射线，当其与中等原子序数的元素组成的地层相作用时，主要发生康普顿-吴有训效应，康普顿吸收系数 $\mu$ （此处用 $\mu$ ，不用 $\sigma$ ）可用下式表示：

$$\mu = \frac{Z}{A} \rho N_0 \sigma_e \quad (2-1)$$

式中： $Z$ ——原子序数；

$A$ ——原子量；

$\rho$ ——介质的密度；

$N_0$ ——阿佛加德罗常数（ $N_0=6.02 \times 10^{23}$  克分子<sup>-1</sup>）

$\sigma_e$ ——能量为 $E$ 的 $\gamma$ 射线在介质中的微观散射截面。

对于一般沉积岩来说，其中大多数元素的 $Z/A$ 近于 $1/2$ （图2-1）， $N_0$ 为一常数，对于一定能量的 $\gamma$ 射线来说， $\sigma_e$ 也是常数，因此康普顿吸收系数与介质的密度有正比关系。

伽马射线穿透物质时由于射线与物质间的相互作用。它的强度将随着物质的厚度的增加而逐渐减弱，实验结果证明，射线强度与物质的厚度之间存在着指数关系。

元 素	A	Z	2Z/A
H	1.008	1	0.9841
C	12.011	6	0.9991
O	16	8	1
Na	22.99	11	0.9569
Si	28.09	14	0.9968
Cl	35.46	17	0.9588
Ca	40.08	20	0.998

图 2-1

散射伽马射线强度和岩石密度有关，而不同的岩石有不同的密度，因此可以根据密度测井曲线划分地层。一些常用的测井方法不能划分岩盐和无水石膏，无水石膏和致密石灰岩，致密石灰岩和白云岩，石膏和孔隙性灰岩等地层，根据它们密度的差别，用密度测井可以把它们区分开来。

Pe 曲线与岩性关系密切，对于单矿物骨架来说，根据 Pe 就可划分岩性，而对于双矿物骨架组分及三矿物骨架组分来说，要根据相应的响应课程及理论图版来确定岩性及孔隙度，现分别叙述如下：

单矿物分析，如果岩石中只有一种骨架矿物，则可根据 Pe 值来划分岩石，因为岩石的孔隙度及所含流体的成分对 Pe 的影响不大，可以忽略。石英、方解石及白云岩中充满水和充满天然气时的 Pe 值的数据也证实了上述论点。

双矿物分析，如果岩石骨架由二种矿物组成，此时要与密度值  $\rho_b$  及中子孔隙度  $\phi_N$  进行组合，利用理论图版来确定岩性及孔隙度<sup>[3]</sup>。

三矿物分析，如果岩石骨架是由三种矿物组成，此时应该使用三矿物分析图版，该图版相当于视骨架密度和视骨架有效光电吸收指数。

### 2.1.3 电阻率测井技术

#### (1)、普通电阻率测井原理

电阻率测井就是沿井身测量井周围地层电阻率的变化。为此，需要向井中供应电流，在地层中形成电场，研究地层中电场的变化，求得地层电阻率。把供电电极 A 和测量电极 M, N 组成的电极系放到井下，供电电极的回路电极 B（或 N）放在井口。当电极系由井底向上提升时，由 A 由极供应电流 I，M, N 电极测量电位差  $K \Delta U_{MN}$ ，它的变化反映了周围地层电

阻率的变化。通过变换,即可测出地层的视电阻率。这样就能给出一条随深度变化的视电阻率曲线,可用下开表示:

$$R_a = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (2-2)$$

在实际测井时,由于地层厚度有限,上、下有围岩,对于渗透性地层又会形成侵入带,各部分介质的电阻率不同,实际上是非均匀介质。因此,用上式得出的电阻率不等于地层的真电阻率,称为视电阻率  $R_a$ ,但在一定程度上  $R_a$  反映了地层电阻率的变化。通常,地层真电阻率越大,视电阻率越高。所以,在井内测量的视电阻率反映了井部面上地层电阻率的相对变化,可以用来研究井部面的地质情况和划分有用矿产带<sup>[4]</sup>。

## (2)、电极系

通常把井下接在同一线路中的电极叫作成对电极,把地面电极与井下电极接在同一线路中的电极叫作不成对电极。根据成对电极与不成对电极间的距离,把电极系分为两类<sup>[5]</sup>。当成对电极 MN 的距离很大时, N 点电极对测量结果已无影响,这样的电极系称为理想电位电极系,其视电阻率可用下式表示:

$$R_a = 4\pi AM \frac{U_M}{I} \quad (2-3)$$

上式表明,所测视电阻率与 M 电极的电位成正比,这也是电位电极系命名的依据。

## (3)、微电极测井

采用两个电极距很短的电极系,一个是微电极系 (A0.05M2), 电极距为 0.05m; 另一个是微电梯度电极系 (A0.025M1 0.025M2), 电极距为 0.035m。实验证明,微梯度的探测范围约为 4~5cm,微电位的探测范围约为 7~9cm。由于电极系很小,钮扣电极装在一块极板上,用推靠器把电极压向井壁,使电极与井壁直接接触。

## (4)、应用

为了在一个油田或一个地区研究地质剖面、构造形态及岩相的变化,选用一个或两个电极系对全井段进行测量,这种测井叫作标准电测井。我国用 0.5 米的电位电极系和 2.5 米的梯度电极系测量。同时还测量自然电



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.