

随钻声波传输技术

尚海燕 周 静 著



非外借



科学出版社

随钻声波传输技术

尚海燕 周 静 著

西安石油大学优秀学术著作出版基金

陕西普通本科高等学校“专业综合改革试点”项目

联合资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要探索随钻声波传输技术。第一,介绍声波传输技术在钻井无线信息传输中的重要性和优势;第二,详细分析声波沿钻柱信道传输时周期性钻柱信道和非周期性钻柱信道的特性,以及影响声波信道的主要因素,并针对典型钻具组合的声波传输特性进行数值分析;第三,在声波钻柱信道梳状滤波特性的基础上进行信息传输的多种调制解调方法研究,在正交频分复用技术的基础上进行给定信道上信息传输的误码率和最佳的信息传输方式的分析与仿真;第四,对极低信噪比下采用杜芬振子检测方法进行探讨;第五,对声波激励源随钻阵列声波换能器进行设计与应用研究。

本书可作为高等院校钻井信息传输相关专业教师、学生的参考书,也可作为对随钻声波信息传输技术感兴趣的工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

随钻声波传输技术 / 尚海燕, 周静著. —北京: 科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056866-3

I. ①随… II. ①尚… ②周… III. ①随钻测量-声波传播-研究
IV. ①P634.7②O422

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 048894 号

责任编辑: 宋无汗 杨 丹 赵微微 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 250 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

油田开发需要大规模的钻完井，风险大、成本高，井深可达上千米。安全钻井和现代智能钻井都需要及时将井下采集的信息传输到地面，同时地面的指导控制钻井指令也需要及时下传。因此，随钻通信是钻井系统的重要组成部分。目前，随钻信息传输方式主要有泥浆脉冲遥传、电磁波传输、智能钻杆传输和声波遥传。泥浆脉冲遥传的传输速率理论上小于 50bit/s，实际上小于 10bit/s，远不能满足钻井过程中大量数据的传输需求，也不能在欠平衡钻井中有效工作。电磁波传输利用电磁波穿越地层传输信息，传输速率为 20~100bit/s，可以应用于欠平衡钻井。只有当地层电阻率大于 $10\Omega\cdot\text{m}$ 时电磁波传输才能进行有效的长距离信息传输，当地层电阻率较低或地层结构较复杂时，不能进行有效信息传输。智能钻杆传输是利用特制的钻杆建立智能钻杆网络系统，其传输速率可达 2Mbit/s，是目前数据传输率最高的方法，但由于需要特制的钻杆或改造的钻杆及特制的接头，钻井成本大幅提高。声波遥传利用声波沿钻柱传输信息，传输速率达 20~100bit/s，可通过中继装置增加信息传输的距离。目前存在的主要问题是信息传输不稳定，同一仪器不能在多个井中重复有效地工作，因此该研究工作一度停止。随着声波沿钻柱传输理论研究的发展，随钻声波传输技术的潜力和优势使其再次成为随钻信息传输领域的重要研究方向之一。

本书是作者所在课题组近几年在声波沿钻柱进行随钻信息传输的研究成果汇总。从 2011 年课题组开始声波沿钻柱进行随钻远距离传输研究至今，先后受到三个中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目的资助。在随钻声波传输领域，相关研究已经取得了两个国家发明专利的授权和两个国家发明专利的公示。本书将探讨随钻信息传输系统的信源、传输经过的信道和信息的接收端检测三个方面内容。声波信号沿钻柱传输的信道的分析、仿真是本书的研究重点。第 1 章为绪论。第 2、3 章利用无缝声波传输模型，对井下钻柱建立整个信道的分析仿真模型，并针对典型的钻具组合分析声波传输特性。第 4、5 章研究信号沿钻柱信道的传输方法，包括从常规信息调制解调到信息优化传输。第 6 章研究极低信噪比下信号检测问题，针对钻井环境噪声强而有用的声波信息弱的情况提出解决信息检测问题的方法。第 7 章分析声源的性能和如何获得适合钻井环境的最佳信源装置。

由于随钻声波传输系统目前仍没有成熟的商品，研究探索仍有待井下实践的

验证补充和深化。本书希望通过对现有技术进行整理总结，以供更多的同行借鉴和参考，为随钻声波传输系统的应用尽一份微薄之力。

本书共 7 章，其中第 6 章由周静撰写，其余各章由尚海燕撰写。在此感谢成书过程中给予分析与仿真指导的张峰、张伟涛和滕舵，进行仿真与文字整理的邱彬、高建邦、张会先、王丽娟和张晶等，还要感谢课题组所有成员所给予的鼓励和帮助！

由于作者水平有限，加之现场实验经验不足，材料不够充分，本书只是初步探索，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 钻井信息传输概述	2
1.3 随钻声波传输国内外发展现状	6
参考文献	8
第 2 章 随钻声波传输信道特性及其模型的建立	10
2.1 引言	10
2.2 信道基本理论	10
2.2.1 信道特征	10
2.2.2 信道的数学描述	11
2.2.3 信道的分析方法和参数	12
2.3 声波传输的基础知识	13
2.3.1 声波传输的基本概念	13
2.3.2 声波传输的基本特点	13
2.3.3 相速、群速和色散曲线	16
2.3.4 声波沿钻柱传输的研究方向	17
2.4 声波信号沿钻柱传输突变截面信道模型的建立	17
2.4.1 声波在钻柱中传输的基本规律	18
2.4.2 突变截面周期性钻杆信道的等效透声膜分析	18
2.4.3 突变截面周期性钻杆信道的 FIR 滤波器模拟	24
2.4.4 突变截面非周期性信道模型的等效透声膜方法	31
2.5 声波沿钻柱传输渐变截面信道模型的建立	35
2.5.1 渐变截面杆的波动方程	35
2.5.2 线性直圆锥杆波动解	36
2.5.3 带有圆锥过渡管的周期钻杆等效透声膜方法	36
2.5.4 渐变截面过渡管组合管串的声波传递	39
2.5.5 渐变圆锥截面过渡杆的数值仿真分析	46
参考文献	52

第3章 钻柱信道声波传输特性研究	54
3.1 引言	54
3.2 钻杆外形尺寸对声波传输信道特性的影响	54
3.2.1 钻柱长度对信道的影响	54
3.2.2 钻杆横截面积对信道的影响	55
3.3 钻杆误差对信道的影响	57
3.4 不同钻具组合对声波信道的影响	58
3.4.1 不同钻杆长度组合的信道特性	58
3.4.2 不同钻杆截面积组合的信道特性	60
3.5 典型钻井钻具组合声信号信道特性	62
3.5.1 塔式钻具组合	63
3.5.2 钟摆钻具组合	68
3.5.3 满眼钻具组合	69
参考文献	71
第4章 信号沿信道传输调制解调方法的研究	73
4.1 引言	73
4.2 信号数字调制的基本原理	73
4.2.1 ASK 调制的基本原理	74
4.2.2 FSK 调制的基本原理	75
4.2.3 PSK 调制的基本原理	76
4.2.4 三种调制方式的比较	78
4.3 声波信号在信道中调制解调传输仿真	79
4.3.1 声波信号经 2ASK 调制解调传输仿真	79
4.3.2 声波信号经 2FSK 调制解调传输仿真	80
4.3.3 声波信号经 2PSK 调制解调传输仿真	81
4.4 声波传输的调制解调仿真软件设计及说明	82
4.4.1 软件概述	83
4.4.2 模拟通道使用说明	92
4.5 调制信号通过钻柱信道的仿真分析	95
4.5.1 FSK 信号通过突变信道和渐变信道分析	95
4.5.2 BPSK 信号通过突变信道与渐变信道分析	101
4.5.3 FSK 和 BPSK 调制解调方式的对比	103
参考文献	104

第 5 章 基于 OFDM 的起伏窄信道声波信息传输	105
5.1 引言	105
5.2 钻杆信道特性分析	105
5.2.1 时间选择性衰落	105
5.2.2 频率选择性衰落	106
5.2.3 钻杆信道的频谱资源和衰落特性	106
5.3 数据传输方案	109
5.3.1 OFDM 的基本原理	109
5.3.2 钻杆信道下 OFDM 的参数选择	111
5.3.3 OFDM 声波遥测系统结构	113
5.3.4 OFDM 接收机灵敏度	114
5.4 自适应载波分配与功率分配技术	114
5.4.1 自适应技术的理论基础	115
5.4.2 基于模糊逻辑的比特分配和功率分配	116
5.4.3 基于扩频码的比特分配和功率分配	119
5.5 传输方案的仿真及结果分析	121
5.5.1 传输方案的可行性测试	121
5.5.2 钻杆信道衰减测试	124
5.5.3 子信道误码率状况	126
5.5.4 传输方案的总体信号失真	130
参考文献	135
第 6 章 用杜芬振子检测随钻声波信号的研究	137
6.1 引言	137
6.2 混沌理论与混沌特征分析	138
6.2.1 通向混沌的途径和特征	138
6.2.2 混沌系统的判别方法	140
6.2.3 杜芬方程的混沌特性研究	141
6.2.4 噪声对杜芬系统的影响	145
6.3 混沌系统检测 2FSK 信号方法的研究	147
6.3.1 混沌系统检测微弱信号原理与仿真	147
6.3.2 混沌系统检测 2FSK 信号的原理	149
6.3.3 混沌系统检测 2FSK 信号检测仿真方法与实现	150
6.3.4 解决相位不同步问题的方法	151

6.4 随钻声波传输信号的混沌检测方法研究	157
6.4.1 杜芬系统检测微弱随钻声波信号的方法	157
6.4.2 仿真结果及分析	158
参考文献	163
第7章 随钻阵列声波换能器	165
7.1 引言	165
7.2 随钻阵列声波换能器的装配结构	165
7.3 随钻阵列声波换能器的等效网络模型	166
7.3.1 压电晶堆的 Mason 等效网络	167
7.3.2 前辐射头的 Mason 等效网络	168
7.3.3 后质量块的 Mason 等效网络	169
7.3.4 换能器整体等效网络模型	169
7.4 随钻阵列声波换能器的有限元模型及其仿真	171
7.4.1 随钻阵列声波换能器的有限元模型	171
7.4.2 随钻阵列声波换能器的有限元仿真	172
7.5 随钻阵列声波换能器大功率发射时的电匹配网络	174
7.5.1 负载阻抗复角与功放管耗散功率及电源供电效率的关系	174
7.5.2 窄带阵电匹配网络的并联调谐匹配	175
7.5.3 窄带阵电匹配网络的串联调谐匹配	175
7.6 随钻阵列声波换能器测试	176
7.6.1 随钻阵列声波换能器的阻抗特性测试	176
7.6.2 随钻阵列声波换能器的环境温度测试	178
7.6.3 随钻阵列声波换能器的功率测试	178
7.7 随钻阵列声波换能器的匹配与功率测试	181
7.7.1 随钻阵列声波换能器匹配原理	181
7.7.2 匹配器件及材质的选择	182
7.7.3 并联换能器功率测试	183
7.8 随钻阵列声波换能器整机系统测试	187
7.8.1 随钻阵列声波换能器整机系统构成	187
7.8.2 高低频谐振点匹配测试与分析	188
参考文献	190

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

油田开发需要大规模的钻完井，其风险大而且成本高，井深常达上千米。钻井过程中需要及时将井下实时采集的信息传输到地面的接收设备，供钻井工程师指导控制钻井过程。对于智能钻井工具而言，地面发出的指令需要下传到井下智能钻井装备以指导控制钻井的进行。因此，随钻信息传输系统是钻井过程中非常重要的系统装备之一，也是长久以来钻井界的特别关注点。我国存在着大量的深井以及低渗油气资源，其开采需要控压或欠平衡等一些特殊的钻井工艺，这对钻井技术的要求越来越高。运用这些特殊的工艺作业时，必须实时地获取井下压力、井下温度和井眼轨迹等井下数据。为了降低钻井风险并确保安全钻井，也需要及时获取井下数据。另外，随钻测井以及录井记录中的地层电阻率、自然伽马参数、声波时差等大量的地层参数，是通过安装在钻头附近的传感器采集到的，这些数据的上传同样需要地面与井下的双向信息传输系统。随钻信息传输系统将井下实测数据送往地面，用于分析、评估地层，预测油气储层和采收率等，并将地面工程师经实时分析制订的钻井操控指令及时下传到井下，从而实现高效安全的钻井作业。

井下的信息与地面相互传输的技术称为随钻信息传输技术。在国外，从 19 世纪初开始研究随钻测井，并先后研制了一些随钻测井仪器，但是都不能进行实时数据传输。直到 19 世纪 60 年代，利用泥浆脉冲传输系统方式成功地完成了随钻测井，并形成了有效的商品，称为随钻测量（measurement while drilling, MWD）。但是，其理论传输速率在 50bit/s 以下，实际使用中传输速率为 1~10bit/s^[1]。随着井下数据传输规模和传输速率需求的增大，各石油公司的研究学者开展了电磁传输、声波传输和光纤传输等其他形式的 MWD 研究以满足随钻信息传输的需要。将 MWD 与地质传感器结合，形成了地质随钻测井（logging while drilling, LWD）。MWD 与 LWD 实质都是随钻测量系统，在传输功能上完全一致，只是采集系统的传感器不同而已，因此随钻信息传输方法可以应用在 MWD 和 LWD 之中，并没有什么分别。

随着定向井、水平井和丛式井技术的发展，随钻测井技术的应用也越来越广泛，数据传输规模越来越大，要求实时传输钻井数据以便实时掌握地层资料，有

助于现场的分析处理,从而及时精细地控制钻井轨道,及时有效地对地层进行评价,以完善钻井进程。现代钻井向旋转导向钻井、地质钻井、智能钻井方向发展,安全钻井、提高钻井效率、提高目的层预采率、提高采收率等都不能缺少随钻测量系统。因此,研究随钻测量系统中的随钻信息传输有十分重要的意义与价值。

1.2 钻井信息传输概述

石油工程钻井时,从设计到钻探,直至完井都需要进行测井,从而获得各种石油地质以及工程技术资料作为开发油气田和完井的原始资料。裸眼井测井称作裸眼测井,油气井下完套管二次测井称作生产测井。通过测井可以评价油、气层,因为测井可以为石油地质和工程技术人员直接提供各项地质数据,是油气田的勘探与开发必需的环节。目前,随着石油工业的发展,对测井的要求也越来越高,国内外研究并实施了多种测井技术。随着耐高温抗冲击传感器的不断发展,井下能测量的数据量越来越大,且智能导向钻井对井下信息的实时需要,促使随钻测量及其相关技术得到了迅速的发展,井下测量的领域也不断扩大。随钻测量信息传输总体趋势从有线随钻测量向无线随钻测量逐渐过渡,而且随钻测量的参数不断增多,无线随钻测量技术已经成为当前石油工程技术发展的一个主要方向。在随钻测井的过程中,信号传输技术成为技术的关键。目前,国内采用的钻采测试设备大部分是从国外进口的,其价格都很昂贵。因此,研究随钻传输技术对提高石油钻采效率、保证石油安全生产、解决井下通信等一系列问题具有重大意义。井下信息传输按传输线方式只有两种:有线传输方式和无线传输方式。有线传输方式主要有电缆传输、特殊钻杆传输和光纤传输,通常传输速度极快且传输信息的容量很大,但往往成本较高。

电缆传输是通过钻杆内下入铠装电芯电缆,多芯电缆将井下传感器的数据传输到地面,处理后记载到存储设备中。井下电源受到电缆中缆心数、电缆直径、绝缘性能、环境条件以及井深等条件的限制,测井时由地面提供仪器电源。有缆传输系统通过电缆的连接进行信息传输,并且直接向井下提供能量,可以进行地面与井下双向通信,而且实时性好,传输速率很高,井底无须附加动力源。目前,电缆随钻信号传输在实验井中获得了初步成功,最高传输速率可达 2Mbit/s。缺点是会严重影响正常的钻井过程,往往需要停钻进行,并且裸眼测井时需要起出钻具,当井深超过 1000m 时,巨大的起下钻是非常耗时的。有缆制作工艺相对复杂,费用也很高。

特殊钻杆传输是将连续导体作为钻杆的一部分,在钻杆接头内安装一种特殊的电磁装置,钻杆主体内埋电缆,当钻杆与钻杆紧密连接时,电磁装置起到连接作用,钻杆间连接成了一个有线的主体。把相应的电磁装置和电缆也安装在钻铤

内,让整个钻柱具有导电性能,这种传输方式称为智能钻杆传输。美国 Grant Predico 公司研制出的感应接头遥测钻杆系统,智能钻杆采用铜导线实现电能的传送,能初步解决频繁拆卸钻杆上导线接头的问题,其传输速率可达到 1Mbit/s。IntelliServ 公司研制的 IntelliPipe 遥传系统,其钻杆接头之间传输数据采用非接触感应方式,数据传输速率可达到 2Mbit/s。俄罗斯采用在每个单根钻杆中吊电缆,而且在钻杆接头处加电插头的方式进行信号传输。法国 IFP 公司采用了唇密封的电钻杆,并且成功用于浅井。目前,我国在这方面的技术尚未研究成功。特种钻杆传输方式的优点是数据传输快,可实现双向通信;缺点是需要加工特殊钻杆,其成本高,可靠性稍差,实现电力下传需要攻关。

光纤传输利用光纤测井的基础理论,包括光纤光栅传感网络技术,光纤光栅温度技术,应力、信号调制解调、检测等技术,下井光缆、传感器系统等连接保护技术。这些技术在国外几家公司已经取得了初步成功^[2,3]。2005 年美国桑迪亚国家实验室研制出了用于随钻测量的光纤遥测系统,在研究所测试时,光纤达到 915m 的深度,数据的传输速率约为 1Mbit/s,其使用的光纤电缆很细小,成本低,能短时间使用,最后在钻井泥浆中磨损完,并被冲走。光纤测井技术目前已有很大的进步,但是还没有有关光纤传输随钻测井的应用,因此光纤测井技术还处于研究实验阶段。随着技术的进步,光纤遥测技术将会在随钻中得到广阔的发展空间。

无线传输方式包括泥浆脉冲遥传、电磁波传输和声波遥传^[4-6]。无线随钻传输方式,无论采用哪种传输媒介,都需要投入一套相关的传输设备,测量与传输随钻进行,至少不再为测井过程增加庞大的起下钻工程,很大程度上节省了钻时和降低了钻井成本。

目前,普遍采用的随钻测井仪器是钻井液压力脉冲传输数据方式,俗称随钻测量。它是将井下采集的数据信息通过井下脉冲发生器转变成钻井液压力脉冲信号,随着钻井液循环传送到地面,在地面接收并分析处理,传输方式是上行的,将井下信息传输到地面。该技术已经很成熟,优点是经济、方便;缺点是数据传输速率低,难以实现将大量的采集参数实时传输到地面,并且实现地面与井下双向通信的难度大,其核心部件脉冲阀易损件,且价格昂贵。20 世纪 50 年代末,APR 公司研发了正脉冲的泥浆遥传系统,后来其与 Lane walls 公司共同改进了该系统,并进行了脉冲遥传测试。60 年代后期,Teleco 公司开发了泥浆脉冲遥传系统,并在实际应用中证明,可以满足当时随钻测井的需要。泥浆脉冲遥传系统的应用,极大地推动了随钻技术的发展。目前,以正脉冲方式传输的随钻泥浆脉冲遥测系统在国内均已实际应用,如 Halliburton 公司的 HDS1 (high-speed directional survey) 系统,中国石油天然气集团公司“地质导向钻井技术与应

用”课题组开发的 CGMWD 系统等,但是正脉冲传输的随钻测量系统的传输速率比较低,只有 $0.5\sim 5\text{bit/s}$ 。而采用连续波方式传输信息的随钻测量系统,结构复杂、难度大,只有 Anadrill 公司的商品 (Power-PulserTM) 能够以 24Hz 的频率作为载波信号,传输速率高达 12bit/s ,但其理论和技术都还不够成熟。Halliburton 公司也在致力于开发以连续波方式进行信息传输的随钻测量系统,目标是传输速率能达到 $20\sim 30\text{bit/s}$ 。泥浆脉冲 MWD,无法满足不断增长的大容量、高速率的数据传输要求,其信息传输通道的传输速率和信息容量远远落后于井下传感器的数据采集率,导致随钻测量信息严重滞后,传输与测量严重不匹配。传输已成了一个亟待解决的问题,MWD 也不能在欠平衡钻井中有效工作。

电磁随钻测量 (electromagnetic measurement while drilling, EM-MWD) 是 20 世纪末进入工业化应用的一项新型传输技术。电磁波传输技术是利用电磁波实现地面与井下之间的信息传输。随钻电磁波测井仪放在非磁性钻铤内,非磁性钻铤和上部钻杆之间用绝缘短节相连接,这样便于载有被测信息的低频电磁波向井周围地层传播。地面上探测器探测经地层传播到地面的井下信息;反之下传时,信息发射装备在地面,探测接收在井下。电磁随钻测量技术可追溯到 20 世纪 30 年代,于 70 年代初研制出了实用型的 EM-MWD 系统,在 80 年代中期实现商业化生产和应用。90 年代以来,各大石油公司陆续推出了一系列的 EM-MWD 商业化产品,使得该技术在欧洲、南美洲、加拿大等地区和国家推广应用^[4]。早期研究的电磁波传输由于信号衰减大,只能实现短距离传输,并且因成本高而未被市场商用化。近年来,通过不断改进,电磁波传输技术逐渐进入市场,其优点是不需要机械接收装置就可以实现双向传输,而且传输速率比泥浆脉冲传输速率高,可以用于空气、泡沫或泥浆的欠平衡钻井。但是,电磁波传输能量衰减大,很难在深井中得到应用,且由于低电磁波频率比较低,与大地频率很接近,容易受到井场环境因素的影响,从而增加信号探测的难度。俄罗斯在此领域技术较成熟。欧美其他国家近几年也先后研发出几种新的 EM 系统,如康谱乐公司的 EM-MWD 系统、Schlumberger 公司的 E 脉冲电磁传输系统,其传输速率最高可达 12bit/s ,还有 Halliburton 的下属公司 Sperry-Sun 公司的电磁 MWD 系统和 Weatherford 公司开发的 TrendSET MWD 系统等。20 世纪末,中国石油勘探开发研究院对井下电磁信号短传技术进行了深入研究,并且成功研制了 NBLOG-1 型测量短节,可用于测量近钻头的井斜角、地层电阻率和自然伽马。哈尔滨工业大学赵永平对电磁波信号传输进行了深入的研究,建立了油井大地的电磁信道模型,并且确立了一个可以测试实际信号传输能力的实验系统方案。但是,总体来讲,国内在这方面的研究仍很缺乏,还处在信号编码、信号传输特性分析和开发单个系统样机的初级阶段。

声波传输方式是利用声波经过钻柱传输信号。声波无线传输发射系统和数据

采集系统随钻杆或抽油泵下入井底,将采集到的各种地层参数和井下参数转换为数字信息,然后编码并通过井下声波发生器发射声波振动信号,沿钻杆柱传输到地面,被安装在井口的声波接收器接收,经过信号处理,解码后得到该井的地层评价或实时动态资料。2007年美国桑迪亚国家实验室开发了声波遥传技术,通过钻柱传递信息,可以取代泥浆脉冲遥传。声波遥传技术的优点是数据传输速率能达到 $20\sim 100\text{bits/s}$,远高于泥浆脉冲传输速率。通过增强发射声信号强度,以及使用特殊结构的钻头增加中继装置和优化地面设备等方法增加声传输的距离,而且不会堵塞钻井液通道,与电磁波传输技术一样可用于空气、泡沫或泥浆的欠平衡钻井。但其缺点是声波信道与钻柱结构相关性大,对所用的电子器件要求高,需要经受井下高温环境,同时由于钻井设备产生的噪声会干扰声波传输,加大了对信号探测的难度。Halliburton公司研制的随钻测井LWD声波遥测系统,是在LWD上方安装了一个井下发射器,载波频率为 $400\sim 2000\text{Hz}$,沿钻柱向前传输的信号强度只能通过无源衰减而减少,而且在与泥浆脉冲遥测技术允许的比特误差率相同的情况下,该系统数据传输速率能达到上百比特每秒,比泥浆脉冲遥测技术数据传输速率提高了十几倍。

利用声波沿钻柱传输信息的优点是其相对实现成本低、数据传输速率较高、受钻井液的干扰小,但信息传输因信道结构变化以及环境的不同,易导致传输不稳定。随着声波沿钻柱传输理论研究的进一步深入,钻柱传输系统的井场实验,特别是随钻声波传输系统的发展有着很大的潜力和优势。近年来,利用声波沿钻柱传输通信再次成为国内外随钻信息传输领域的重要研究方向之一。现代钻井向导向钻井、地质钻井、智能钻井发展。提高钻井效率、提高采收率等技术都依赖于随钻信息传输系统,因此研究随钻声波传输系统有非常重要的意义与价值。

综上所述,有线传输方式和无线传输方式各有优缺点,归纳后见表1-1。

表 1-1 不同传输方式比较

传输方式	传输介质	传输深度/m	传输速率/(bit/s)	可靠性	开发成本
有线传输	电缆	>6000	1~2M	好	较高
	特殊钻杆	>6000	1~2M	一般	很高
	光纤	>1000	1M	好	很高
无线传输	钻井液脉冲	>6000	1~12	好	中等
	电磁波	600~6000	20~100	一般	较高
	声波	1000~4000	20~100	一般	较低

从表1-1可以看出,除光纤传输方式传输深度略差外,其他有线传输方式和无线传输方式都可以进行深井传输。有线传输方式明显比无线传输方式传输速率快。但是在实际钻井中应用中,由于有线传输方式制作工艺比较复杂,需要特殊

加工的钻杆,提高了成本,而且电缆和光纤的连续性差,因此在整个钻进的过程中有可能被岩屑和泥浆损坏,从而无法有效传输信息,影响正常通信。因为有线传输方式不需要依靠钻井液作为传输介质,所以其可靠性优于无线传输方式。然而,无线传输方式的开发成本明显低于有线传输方式。

以上分析了各种数据传输方式的性能,阐述了各自的优劣以及应用局限性,本书的工作重点则是对于声波传输方式的研究。

1.3 随钻声波传输国内外发展现状

美国桑迪亚国家实验室从1948年开始进行声波如何沿钻杆传输信息的研究工作,但是最终由于声波信号衰减严重而被迫停止。1972年,BARNES等^[7]研究并分析了理想钻柱的宏观结构,提出了通阻带交替梳状滤波器的信道特征。之后Drumheller^[8]开始研究声波传输系统,分别设计了两个实验来研究声波传输的机理。实验一是在实验室利用模型来检测声波,验证了在钻杆中传输的声波主要是纵波;实验二是在钻井现场充满泥浆的长达1500ft*的钻柱上进行声波测试,实验证明声波每千英尺衰减20dB,也证明了周期性钻柱信道特性为通阻带交替梳状滤波器结构。同时,Drumheller分析了声波纵波沿理想钻杆传输的频谱特性,得到了钻柱外形尺寸对声波传输信道特性的影响^[8,9]。他从理论上研究声波沿钻杆传输时的信道特性,采用有限差分方法对信道幅频进行了分析,并且为了验证理论分析,在实验室搭建了一个缩小的等效标准钻杆模型,其缩小模型是由20根钻杆级联而成的周期性结构钻具模型,通过在这个模型上进行测试分析,得出了其理论分析的正确性。Niels等^[10]在Drumheller工作的基础上,导出了周期性结构钻柱中透射波与反射波幅度,采用传输矩阵法表示,分析研究了能量耗损效应和钻杆尺寸参数变化对声波幅度的影响,并应用马尔可夫链描述了声波能量通过周期性钻杆传输时的脉冲响应。2005年,Gao等^[11]研究了声波钻柱信道的传输容量理论,分析了声波钻杆传输系统的信道容量、噪声和衰减,结果显示典型的钻柱信道在噪声环境下的信道容量最大可以达到几百比特每秒,并且根据实际测量的声波沿钻柱传输特性,从理论上计算了不同衰减、不同编码方法以及不同调制方式下的信号传输速率值。Gao等还将信道容量理论应用在声波遥传系统的实现上,为了实现系统在钻井条件下以最大的信道利用率传输,进行了多方面优化系统方法的研究,同时也证明差错控制编码可以提高传输速率^[11]。通过在钻井环境下随钻声波传输系统的信道容量的计算,证明该系统和现在广泛应用的泥浆脉冲传输系统

* 1英尺(ft)=3.048×10⁻¹米(m)。

具有相当的比特误码率,其数据传输速率高于泥浆脉冲传输系统。实际中测得的钻杆声波特性曲线为通阻带相间的特性,通带结构表现为多尖峰起伏。2007年Neff等^[12]测试了2500m井眼中的声波传输系统,并测试了现场在旋转和不旋转钻具组合时的声波遥测工具系统的工作性能,实现了不同载波频率和不同波特率(5 bit/s、10bit/s、20bit/s)下的声波遥传系统的性能评估。同时,也记录和分析了声波信号数据解码以及数据可靠性等内容。实验表明,井下声波遥传系统具有商业应用价值,系统传输数据速率快,可以大量节约时间,提高钻井效率。相比泥浆脉冲传输系统和电磁波传输系统,声波传输系统的数据传输速率最高。Neff等^[12]公布现场测试的在2500m的井眼中随钻声波遥测系统,传输速率达到20bit/s以上。

我国对井下声波沿钻杆传输数据的研究处于起步阶段,对声波传输的研究工作主要集中在对声波沿钻杆传输系统信道的研究,主要是理论分析和计算机数值仿真。文献[13]运用有限元法对处于充液井孔中周期性钻柱系统中纵波的传播特性进行了数值仿真。文献[14]将正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)信号调制技术应用到随钻数据声波传输系统模型中,并用MATLAB进行了仿真分析,观察不同调制信号在钻柱信道中传输的波形图,分析其传播特性,并且验证了几种不同调制方式在声波数据传输系统中的可行性。研究表明,周期性钻柱结构系统的信道具有通阻交替的梳状滤波特性,随钻数据声波传输采用1/3编码效率的卷积编码和正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)调制技术可以提高数据通信的可靠性,降低数据传输系统的误码率。文献[15]研究了近钻头声波信号传输系统,分析了管箍界面与泥浆介质阻尼对信号传输特性的影响,通过色散曲线分析了钻杆中纵波传输的频谱特性,验证了钻柱结构的变化与接收信号幅值之间存在的某种关系,并且钻杆在长度或截面积上的变化都会对其传输特性有一定影响。文献[16]根据声波在钻杆中的传输特性和边界条件,导出了声波传输函数的传递矩阵方法,该方法较有限元法模拟精度高,计算方便,只是需要后续测试数据的应用支持。文献[17]和文献[18]在实验室模拟了周期性钻柱,通过利用低频纵波数据传输研究了换能器激励与接收位置对信道特征的影响,并在理论上研究了沿钻杆内外轴向流动的钻井液阻尼和黏弹性地层边界对行波传播特性的影响。

综合国内外随钻声波传输系统的研究进展,通过仿真分析和模拟实验都证实了声波传输具有很大的潜力,这也是国内外投入大量人力物力研究的主要原因。起初,为了简化问题,假设传输系统为理想周期均匀结构,对声波传输系统研究也主要集中在对周期性理想钻杆信道的研究,并令接头间的螺纹连接足够紧密不产生声波反射,声波反射只产生在钻柱结构的横截面积有变化的位置。而在实际

钻井过程中, 钻具组合会根据井壁地层和井况的需要连接不同功能的钻具, 且钻杆数量、钻杆密度、钻铤和不同的地层特性环境等都会对声波传播特性产生影响, 同时复杂多变的钻井环境对声波传输有着很大影响, 制约着其发展, 包括在钻井过程中起重要作用的钻井液的密度和黏度等^[19]。

利用声波传输信息, 需要研究三个部分: 声源发射系统、声波信道和接收系统。声源发射系统决定了声波信号的发射能量以及传播信号的形式等。发射信号的能量越大越好, 并且需声源信号的发射能量集中在信道内有效传播才最有利于接收端接收信号。信道决定了声波信号的调制形式、调制频率、最小的发射功率和最远的传输距离等。接收机对随钻声波来说, 低信噪比下的信号检测研究是必不可少的研究内容, 因此本书就声波传输问题进行了研究。第2章将对井下的声波传输信道进行探讨, 运用声波无缝传输模型对信道连接截面的突变信道和渐变信道进行信道分析, 建立周期性和非周期性钻柱信道模型。第3章将分析不同钻具构成声波信道的特性以及不同规格的钻具组合的声波信道特性, 研究钻具参数变化及不同钻具排列组合变化对声波信道的影响, 最后给出典型钻井钻具组合声信号的信道特性。第4章在已建立的声波钻柱模型基础上, 研究信号沿信道传输的数字调制解调方法。特别是研究在声波传输的窄信道更有效的信息传输方式, 从而引出第5章基于OFDM的声波信息传输方法的研究。第6章讨论接收问题, 特别是低信噪比下的信号检测问题, 用杜芬振子检测方法检测信噪比为-30dB及以下的信号。第7章讨论随钻声波传输中信源的产生问题, 研究随钻阵列换能器技术, 通过产生更大能量的声源以将信息发送得更远。

总之, 本书致力于随钻声波传输技术的研究与实现, 为声波传输仪器的研制与实验提供理论依据和借鉴, 以加速随钻声波传输系统的商用化进程。

参 考 文 献

- [1] 邹德江, 范宜仁, 邓少贵. 随钻测井技术最新进展[J]. 石油仪器, 2005, 19(5): 1-4.
- [2] 张辛耘, 王敬农, 郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 10-15.
- [3] 牛林林. 随钻测井的数据传输[J]. 国外测井技术, 2009, 174(12): 7-9.
- [4] 张涛, 鄢泰宁, 卢春华. 无线随钻测量系统的工作原理与应用现状[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(2): 126-128.
- [5] 张会先. 钻井信息传输通道特性仿真[D]. 西安: 西安石油大学硕士学位论文, 2012.
- [6] 刘新平, 房军, 金有海. 随钻测井数据传输技术应用现状及展望[J]. 测井技术, 2008, 32(6): 249-253.
- [7] BARNES T G, KIRKWOOD B R. Passbands for Acoustic Transmission in an Idealized Drill String[J]. Acoustical Society of America Journal, 1972, 51(5): 1606-1608.
- [8] DRUMHELLER D S. Acoustical properties of drill strings[J]. Journal of the acoustical society of America, 1989, 85(3): 1048-1064.
- [9] DRUMHELLER D S. Attenuation of sound waves in drill strings[J]. Journal of the acoustical society of America, 1993, 94(4): 2387-2396.