◇ 综述 ◇

周期性管柱信道的声波通信技术研究综述*

赵傲耸^{1,3} 陈 浩^{1,2,3†} 张 波⁴ 张晋言⁴ 何 晓^{1,2}

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190))
 (2 北京市海洋深部钻探测量工程技术研究中心 北京 100190)
 (3 中国科学院大学 北京 100049)
 (4 中石化胜利石油工程有限公司测井公司 东营 257096)

摘要: 井下声波通信技术利用周期性管柱信道实时传输声波数据,相比于其他通信方式,具有适应性好、复杂 度低、传输效率高等优点,在随钻地质导向、油水井监测等方面有广阔的应用前景,是发展智能油田的关键技 术之一。该文主要综述 20 世纪 90 年代以来关于周期性管柱信道物理模型、信道容量、声信号调制与接收方法 等关键问题的研究历程和主要结论,并对通信系统的设计要点与国内外相关产品的现场应用进行梳理,为后 续的技术改进提供依据。

关键词:声波通信;数据传输;周期性管柱;智能油田
中图法分类号:TN929.4 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2020)05-0791-08
DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.05.019

Review on downhole acoustic communication technology based on periodic string channel

ZHAO Aosong^{1,3} CHEN Hao^{1,2,3} ZHANG Bo⁴ ZHANG Jinyan⁴ HE Xiao^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 Beijing Engineering and Technology Research Center for Deep Drilling Exploration and Measurement,

Beijing 100190, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Shengli Well Logging Company, SINOPEC, Dongying 257096, China)

Abstract: Downhole acoustic communication technology, which transmits acoustic data based on periodic string channel in real time, has the advantages of good adaptability, low complexity and high transmission efficiency compared with other communication methods. As one of the key technologies in intelligent oilfield, it has a broad application prospect in geosteering and oil-well monitoring. This paper mainly reviews the research on channel physical model, capacity, signal modulation and reception methods since 1990s, and summarizes the design points of the system and its field application, this will guide the later development.

Keywords: Acoustic communication; Data transmission; Periodic string channel; Intelligent oil field

2019-12-18 收稿; 2020-02-15 定稿

作者简介: 赵傲耸(1995-), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向: 井下声波通信。

^{*}国家自然科学基金项目(11774373, 11734017, 11574347, 91630309)

[†]通信作者 E-mail: chh@mail.ioa.ac.cn

0 引言

智能油田是21世纪的发展方向之一,其本质是 一套闭环信息采集、传输和处理系统,不仅能连接 作业现场与油田基地,更重要的是实时连接地面与 井下以实现永久监测^[1]。在智能导钻中,实时有效 地将随钻测量的信息传递到地面供工程师进行决 策是该项技术发展的瓶颈之一^[2]。总之,无论是在 油田的后期智能开发还是前期的智能导钻中,在井 下获取的数据都必须通过一定的方式传递到地面, 即布设这些系统时,有效的井中和地面通信方式是 其中的一个重要因素。

现有的井下通信方法可笼统的分为有线和无 线两大类。有线通信包括电缆、智能钻杆等,传输速 度快,但往往设备昂贵、部署难度大;无线通信包括 泥浆脉冲、电磁辐射、声波传输,该类方法通常不干扰钻进过程,都可以在随钻测井中使用^[3],除泥浆脉冲外,基于电磁和声波的井下通信方式也有应用于智能油田开发的实例。

从表1可以看出,声波传输以井下固有的金属 钻杆或油管(下文统称"管柱")作为通信信道,以低 频弹性波为载波,不依赖于钻井液和地层,系统复杂 度低,便于井场部署和改装;相比于其他通信方式, 其数据传输速率较高,能够满足地面监测与决策的 需求,有望对发展智能油田起到关键推动作用。20 世纪90年代以来,哈里伯顿等油服公司率先开展技 术攻关,目前已推出商用的随钻产品^[4],性能远超 泥浆脉冲传输。国内的研究相对滞后,随钻声通信 产品尚未推出,但有油水井智能检测的管柱通信报 道^[5]。

表1 各种井下通信方式的对比

 Table 1 Comparison of various downhole communication methods

	电缆	智能钻杆	泥浆脉冲	电磁辐射	声波传输
传输速率	快	较快	正脉冲 < 5 bit/s 连续脉冲 <30 bit/s	< 20 bit/s	> 100 bit/s
应用限制	操作复杂,会影响 正常钻进过程	需对钻杆进行改装, 实施难度大	依赖于钻井液,无法在 欠平衡井以及开发中使用	对地层电阻率要求较高	无
成本	高	高	中等	较高	低
商业化	成熟	小范围	成熟	小范围	半商业化

考虑到声波在管柱中远距离传输的多径衰落 和非平稳噪声干扰等问题,研究的重点在于两方面: 一是要搞清楚管柱信道的特性,建立物理模型,从而 优化声通信信道的参数;二是要研究适合该信道的 数据传输方案,提高通信的可靠性。通过以上研究, 最终实现高速高可靠性的周期性管柱声通信。为了 更好地推动本项技术的发展,本文对井下声波通信 的关键问题和研究历程进行梳理和回顾。

1 信道物理模型的研究

低频范围内空心圆管中轴向传播的声波有3 种模式:纵波、扭转波和弯曲波;纵波的传播波 速快、耗散少,且接收简单,因此一般使用纵波作 为通信载波^[6]。关于波在周期结构中传播的问题, Brillouin^[7]于20世纪三四十年代做了大量的理论 研究。文献[6,8-14]在Brillouin的基础上对管柱信 道的声传输特性进行了较为系统的研究,包含对频 散、阻抗、衰减等物理特性的解释。

1.1 管柱信道的物理特性

首先对管柱模型进行合理简化:假设声波呈 轴对称分布,考虑到声传输的载波频率一般低于 2 kHz,基本符合低频假设,因此可以将管柱看作周 期级联的均匀弹性棒。图1展示了简化的管柱模型 中声波多路径传播的情况。



图1 简化的管柱模型与声波多径传播

Fig. 1 Simplified drill string model with acoustic multipath propagation

周期结构中的波传播一般会被归结为特征值问题:将一维波动方程写成Hill方程形式,代入

Floquet 定理和声学边界条件即可得到特征方程,进 而得出频散方程^[8]:

$$\cos[k(d_1 + d_2)] = \cos\left(\frac{\omega d_1}{c_1}\right) \cos\left(\frac{\omega d_2}{c_2}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{z_1}{z_2} + \frac{z_2}{z_1}\right) \sin\left(\frac{\omega d_1}{c_1}\right) \sin\left(\frac{\omega d_2}{c_2}\right), \quad (1)$$

其中,k为复波数,ω为角频率,d_{1,2}、c_{1,2}、z_{1,2}分别为 管段和接箍的长度、声速和特性阻抗,公式(1)揭示 了管柱信道的频散特性。如图2所示,群速度在频 域上呈带隙结构,通阻带的位置与周期单元的材料、 尺寸有关,其物理机理类似于声子晶体中的布拉格 散射;通频带内存在频散现象,且随着频率增大而愈 发显著,这将使脉冲波传播的时域波形产生畸变。





Fig. 2 The dispersion curve of periodic string structure

进一步研究阻抗特性,将特征向量的系数代入 公式 $z(x,\omega) = F_s/v_s$,显然波阻抗是个复数,且在空 间上呈周期对称分布;通过对相位的分析发现每根 管段上的两个物理位置的阻抗总为实数,上述结论 可以指导管柱与通信设备(中继器、接收机等)的阻 抗匹配,减少注入损失^[9]。

声信号在传播时的衰减主要包括扩散损耗、吸 收损耗和边界损耗,它们都与传播距离和信号的 频率有关。多位研究者对管柱信道的衰减机制进 行了探讨^[6,10-14]。Drumheller^[6,10]提出管柱声传 输的两种主要衰减机制:第一种是基于经验参数 的 Maxwell 阻尼模型,本质是模拟纵波与弯曲波的 耦合作用导致的径向耗散; 第二种是管段尺寸的 随机分布改变了散射模式,间接导致了纵波的衰 减。一般来说,对不同长度管段进行重新排列是降 低衰减最直接的手段[12]。现场试验结果与上述理 论符合良好,主要通频带的声波衰减水平大致为 13~30 dB/km(即每千英尺衰减4~9 dB,本文均换 算为公制单位)^[6]。Lee^[13]和Rama^[14]讨论了井孔 中多种阻尼机制对管中声波的影响,并通过试验将 声波衰减范围缩小为13~23 dB/km。之后的研究 者在计算信道容量时,多使用23 dB/km的典型值。

1.2 信道模型的仿真方法

基于弹性波动理论,管柱信道的仿真方法主要 分为数值法和解析法,前者包括时域有限差分、有 限元等方法,后者主要利用传递矩阵进行求解。

1989年, Drumheller^[8]首先给出了一维周期波 导的时域有限差分公式:

$$u_n^{j+1} + u_n^{j-1}$$

$$= \frac{2z_{n+1/2}}{z_{n+1/2} + z_{n-1/2}} u_{n+1}^j$$

$$+ \frac{2z_{n-1/2}}{z_{n+1/2} + z_{n-1/2}} u_{n-1}^j. \qquad (2)$$

1990年, Clayer等^[15]研究了地面与井下边界 对管柱信道的影响。1993年, Drumheller^[6]将Clayer 等的研究成果引入公式(2)的运算,并对声传输的 阻尼衰减机制进行了完善,较为准确地预测了井下 2000 m管柱的传输特性。2000年, Carcione等^[11] 提出了另一种高阶时域算法,能够计算一维波导 的多种传播损耗,还能模拟非均匀截面引起的脉冲 畸变和延迟。图3^[16]展示了信道的频带特性,描述 如下:

(1) 类似梳状滤波器,即由于声波的多径效应导致的频率选择性衰落;

(2)频带资源有限,通频带内并不平坦,且随着 传输距离(图中距离单位为英尺)增加,衰减也随之 增加; (3) 通带内的"尖峰"是由声波干涉形成的驻波 所引起的,数量与管段周期数成正比。



图 3 管柱信道传递函数的幅频响应 Fig. 3 The magnitude of the channel transfer function over the acoustic frequency band

为了保证计算速度,时域的数值方法通常是对 低阶的单模式波进行仿真,为了进一步模拟非周期 结构中多种模式波"耦合"振动的声传输行为,一些 研究者提出用传递矩阵的方法^[17-21]。文献[17-20] 将单个管段用2×2传递矩阵进行描述,与有限差分 方法的仿真结果大致相同。Han等^[21]在3种模式 波的非耦合传递矩阵基础上,利用厚圆柱壳模型建 立了考虑耦合效应的振动传递矩阵,与实验结果符 合良好,和ANSYS仿真相比能较大程度简化振动 分析和建模过程,计算效率更高。

更合理的设置阻尼机制和边界条件能得到更 准确的信道传递函数*H*(*f*)。在波动方程中加入阻 尼项,目前多依赖于经验的参数模型,需要与现 场数据进行匹配;李成等^[22-23]的研究表明,地 面、井底、地层等边界对信道的传输性能也有较大 影响。

2 声波数据传输方案

井下管柱信道具有慢时变、多径衰落等特性, 用于随钻数据传输时,还会受到钻头和地面设备的 强噪声干扰。对信道通信能力的研究包括信道容 量、噪声模型等,目的是提出合适的信号传输和接收 方法以最大限度地利用频带资源、提高接收信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR)和对抗码间干扰 (Inter symbol Interference, ISI)。

2.1 信道容量与噪声模型

Gao 等^[24]系统研究了随钻工况下的信道容量。 已知信道传递函数*H*(*f*),根据香农定理得到信道的 上行容量计算公式:

$$C_{\rm up} = \int \log_2 \left[1 + \frac{P_S(f)}{P_{N_d}(f) + |H(f)|^{-2} P_{N_s}(f)} \right] df \text{ bit/s},$$
(3)

其中, $P_S(f)$ 为声信号的功率谱密度, 噪声源被确 定为两部分, 井下钻头噪声 $P_{N_a}(f)$ 和地面设备噪声 $P_{N_s}(f)$ 。进一步分析噪声的总功率谱密度, $P_N(f) =$ $P_{N_d}(f) + |H(f)|^{-2}P_{N_s}(f) \approx |H(f)|^{-2}P_{N_s}(f)$,因此 在数据上行传输时, 地面噪声是影响传输速率的主 要因素; 同样地, 数据下行传输时应着重抑制井下钻 头噪声。

使用现场测试的噪声数据(考虑到井场的大多 数噪声数据服从高斯分布,为了简化计算,假设噪声 为高斯分布),设置信道衰减水平为23 dB/km,用注 水法(Water-filling method)计算公式(3),得到可 用频带范围400~1800 Hz。图4^[24]展示了信道容量 与发射功率的关系,当传输距离为1828 m (约6000 英尺)时,信道仍有每秒数百比特的传输潜力。



图 4 不同传输距离时信道容量与发射机功率的关系 Fig. 4 The relationship between channel capacity and transmitter output amplitude at different transmission distances

然而对于管柱信道来说,连续的反射会导致其 脉冲响应持续上百毫秒(图5),从数字通信的角度 来看,这意味着接收信号可能存在显著的ISI,是限 制信道容量的又一主要因素。



图5 五十节管柱信道的冲激响应

2.2 声信号调制技术

为了充分利用管柱信道有限的带宽资源,对抗 ISI和频率选择性衰落,在常规调制方法(二进制相 移键控(BPSK)、正交振幅调制(QAM)等)的基础 上引入多子带并行传输的通信策略。Gao等^[24]首 先提出将离散多音频(Discrete multi-tone, DMT) 技术用于钻杆通信,并从理论上计算了BER=10⁻³ 时的传输速率,证明声波具有远超泥浆脉冲 的传输潜力。2007年,Memarzadeh^[16]将正交频 分复用(Orthogonal frequency division multiplexing,OFDM)和联合信源信道编码(Joint sourcechannel coding, JSCC)应用到井下通信系统, 图 6^[16]展示了OFDM的发射/接收原理图和测试 信号传输频谱。



图 6 声波 OFDM 工作原理示例 Fig. 6 Sample acoustic OFDM system

OFDM 是一种把信道频谱划分为多个正交子 带,再将数据分布到各个子带上并行传输的多载 波通信方案。子带带宽 Δf 与符号周期T成反比 ($T = 1/\Delta f$),好的设计能保证符号周期T比信道脉 冲响应长得多,配合循环前缀,使ISI的影响最小化; 在频域上允许各子带的自适应调制以灵活应对各 种不平坦与多变的信道条件;借助快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT)技术高效地完成庞 杂的并行处理。不同于常见的移动无线通信,管柱 信道的时变非常缓慢,且增加管段也不会对通带产 生明显的影响,初步试验甚至可以忽略其时变特性 以降低系统的复杂度(如减少均衡器的使用)。近几 年,多位研究者将改进的OFDM技术应用到井下通 信系统,理论传输性能均有一定程度的提升^[25-27]。

2.3 信号接收与噪声抑制

假设地面和井下分别有 $|A_s(f)|^2$ 和 $|A_d(f)|^2$ 的噪声衰减因子,代入公式(3)得到:

$$C_{\rm up} = \int \log_2 \left[1 + \frac{P_S(f)}{P_{N_d}(f) + |A_s(f)|^2 |A_d(f)|^{-2} |H(f)|^{-2} P_{N_s}(f)} \right] \mathrm{d}f \text{ bit/s.}$$
(4)

如前文所述,信道容量是SNR的直接函数,在声信 号发射功率难以进一步提高的情况下,通过直接或 间接的方式抑制噪声是提高接收SNR的唯一途径。

2006年, Sinanovic^[28]提出双传感器接收方案, 其基本思想是通过阵列信号处理实现定向滤波,从 而抑制管段中与声信号传输方向相反的地面噪声; 除此之外,还提出在接收机和地面设备(发射机和 钻头)之间加装物理结构的声衰减器,两种方法均 能为信道容量带来数量级的提升。后续的研究多围 绕以上两方面展开,包括隔声体(Acoustic isolator tool, AIT)设计、多阵列接收模型的训练、弱信号检 测与提取等^[29-30]。

Fig. 5 Impulse response of 50-section channels

3 通信系统设计与商业化进展

设计井下声波通信系统应考虑到以下几点:(1) 井下高温、高压与强震环境对器件的影响;(2)通信 设备兼顾小型化与长续航;(3)在满足传输需求的 前提下,系统复杂度尽可能低;(4)最大限度提高接 收信噪比;(5)高效可靠的调制和解调方案。

1996年,日本国家石油公司开发了用于随钻数 据传输的原型机:采用磁致伸缩换能器发射声波,载 频1kHz以下,通频带内传输,实现了最大传输距离 1914 m (速率10 bit/s);限制传输速率的主要原因 是对噪声抑制和信道衰减的机制认识不足^[31]。

2000年,哈里伯顿公司开发出第一个商用的井下声波通信系统,用户能够实时获取井下数据,配合地面直读(Surface read out, SRO)模式,实现对多种试井环境的井下监测,极大地节省试井作业时间和测试成本,方便专家决策^[32]。初代系统的特点为: (1)双向声波通信能力,发送数据集包括压力、温度、时间、决策指令等;(2)发射机装于测试阀上方,含3 个石英传感器,有发射与存储两种模式,必要时可电缆介入;(3)发射机与接收机之间装有中继器,最大服务井深3657 m(约12000英尺);(4)可用于深海井和欠平衡井的监测^[33-34]。

2007年,加拿大XACT公司联合Extreme Engineering公司和美国桑迪亚国家实验室进行了随 钻声通信系统的现场测试并率先实现商业化服 务^[4]。初代系统利用单个通频带BPSK调制进行 数据传输,标称速率20 bit/s,尚未安装中继器,服 务井深为垂直井2500 m,水平井800 m。至2011 年,XACT公司已在北美服务了400余口井,新一 代系统能够对任何管柱结构进行建模从而预先确 定最佳通频带的位置;使用两个中继器实现最大 服务井深4000 m,初步具备节点监测功能,传输速 率 30 bit/s 以上 (最快达 80 bit/s)^[35]。2013年,该公 司实现井下声波遥测网络(Acoustic telemetry network) 的构建,即在钻井过程中实时获取信道的多 节点环空压力和温度等数据信息^[36]。系统的4个 主要组成部分如图 7^[4] 所示,其特点为:(1) 声信号 以40 Hz 宽的调制扫频信号形式输出,用以激发管 内纵波,提高传输可靠性;(2)AIT装在声波发射 器 (Acoustic telemetry tool, ATT) 与钻具 (Bottom hole assembly, BHA)之间,抑制钻头噪声和反向 传播的声信号;(3)阵列接收器(Extreme acoustic receiver, EAR)安装在钻机的顶部驱动套筒或方钻杆(Kelly)上,由两个加速度计和信号处理模块组成,同时负责与解码与可视化设备(Decoding and display unit, DDU)的双向无线通信;(4)ATT可作为中继器,用于转接与放大信号,兼具节点监测功能;(5)声波相位调谐器(Acoustic phase tuner, APT)可加装在所有ATT的顶部和底部进行阻抗过渡。



系统设计存在许多难点,比如用于随钻通信的 发射换能器要输出1kHz以下的低频声波,尺寸不 能太小,还要更高效率地激发管中纵波,对其结构设 计提出挑战;考虑到阻抗匹配,发射短节一般与钻杆 直径相同,留给电源和信号处理模块的空间极其有 限;接收端的信号处理也至关重要,信道估计、均衡 检测等环节直接关系到数据恢复的准确性;多个中 继器之间可能发生信号"串扰"等^[37]。国内尚无成 熟的商业化产品。

4 总结与展望

井下通信系统能够帮助地面工程师监测和控制井中状态,从而更好地规避作业风险、降低时间 与资金成本。虽然目前仍受限于传输速率,无法传输声波全波列等大数据集,但可以在信道特性允许 的前提下,将测井设备与传感器收集的特征参数发 送到地面,以完成预先设计好的特定任务。比如前 文提到,井下监测系统被设计为每隔一段时间向地 面中继器发送一组数据集:实时的环空(管内)压力、 温度和系统相关状态信息;以上数据可实现对地层 破裂、管段泄露、岩屑堆积等风险的监控。再比如, 随钻地质导向常用"井斜+自然伽马+电阻率"的 数据组合,其中近钻头处的自然伽马和电阻率数据 用于检测地质情况变化,井斜数据用于计算井眼轨 迹。总之,发送数据集的参数选择主要取决于地面 人员对于资料解释和功能实现的需要。

井下声波通信技术经过多年的研究和应用,已 经有了长足的发展,在多种应用场景下表现出优良 的传输性能和可靠性;如在油气生产过程中,也可以 通过周期性的套管或油管部署声通信系统,将实时 获得井下信息传递到地面从而指导和优化开采方 案。总之,声波传输方式因其成本低、传输速率高、 可行性高等特点,有可能成为井下通信的优选方案。

参考文献

- 石崇东,李琪,张绍槐.智能油田和智能钻采技术的应用与发展 [J].石油钻采工艺,2005,27(3):1-4,82.
 Shi Chongdong, Li Qi, Zhang Shaohuai. Application and development of the intelligent oil field and intelligent drilling and production technologies[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2005, 27(3):1-4,82.
 张辛耘,王敬农,郭彦军.随钻测井技术进展和发展趋势 [J].
- [2] 张丰松, 土吸秋, 郭彦丰, 随田两开汉本近展和发展趋势[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 10–15, 100. Zhang Xinyun, Wang Jingnong, Guo Yanjun. Advances and trends in logging while drilling technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(1): 10–15, 100.
- [3] 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(3): 249-253.
 Liu Xinping, Fang Jun, Jin Youhai. Application status and prospect of LWD data transmission technology[J].
 Well Logging Technology, 2008, 32(3): 249-253.
- [4] Neff J M, Camwell P L. Field-test results of an acoustic MWD system[C]. 2007 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 2007.
- [5] Yu J Q, Zhen L C, Sun F C, et al. The downhole transmission characteristics of vibration waves—An experimental study in the Daqing oil field[C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Perth, 2016.
- [6] Drumheller D S. Attenuation of sound waves in drill strings[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(4): 2387–2396.
- [7] Brillouin L. Wave propagation in periodic structures[M]. New York: Dover Publications Inc, 1946.

- [8] Drumheller D S. Acoustical properties of drill strings[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1989, 85(3): 1048–1064.
- [9] Drumheller D S. Wave impedances of drill strings and other periodic media[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(6): 2527–2539.
- [10] Drumheller D S. Coupled extensional and bending motion in elastic waveguides[J]. Wave Motion, 1993, 17(4): 319–327.
- [11] Carcione J M, Poletto F. Simulation of stress waves in attenuating drill strings, including piezoelectric sources and sensors[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(1): 53–64.
- [12] Kumar L S, Han W K, Guan Y L, et al. Downhole pipe selection and arrangement for acoustic drillstring telemetry[C]. 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2012.
- [13] Lee H Y. Drillstring axial vibration and wave propagation in boreholes [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [14] Rama R V N. The radiation and vibration of drilling tubulars in fluid-filled boreholes[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [15] Clayer F, Aquitaine E, Vandiver J K, et al. The effect of surface and downhole boundary conditions on the vibration of drillstrings[C]. SPE Technical Conference and Exhibition, New Orlreans, 1990.
- [16] Memarzadeh M. Optimal borehole communication using multicarrier modulation[D]. Houston: Rice University, 2007.
- [17] Lous N J C, Rienstra S W, Adan I J B F. Sound transmission through a periodic cascade with application to drill pipes[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(5): 2302–2311.
- [18] Wang C Y, Qiao W X, Zhang W Q. Using transfer matrix method to study the acoustic property of drill strings[C]. 2006 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 2006.
- [19] Gutierrez-Estevez M A, Krueger U, Krueger K A, et al. Acoustic channel model for adaptive downhole communication over deep drill strings[C]. 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2013.
- [20] 车小花,乔文孝,李俊,等.随钻测井钻柱声波的频谱特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(6):66-70.
 Che Xiaohua, Qiao Wenjun, Li Jun, et al. Acoustic spectral characteristics of drill string of logging while drilling[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(6): 66-70.
- [21] Han J H, Kim Y J, Karkoub M. Modeling of wave propagation in drill strings using vibration transfer matrix methods[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(3): 1920–1931.
- [22] 李成, 丁天怀. 信道阻尼边界对井下钻杆声传输的影响 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(6): 17–20, 175.

Li Cheng, Ding Tianhuai. Effect of damping boundary conditions on acoustic transmission of drill strings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(6): 17–20, 175.

- [23] 李成, 丁天怀. 不连续边界因素对周期管结构声传输特性的影响 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 172–175, 216.
 Li Cheng, Ding Tianhuai. Influence of discontinuous boundaries on acoustic transmission in periodic cascade with application to drill pipes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 172–175, 216.
- [24] Gao L, Gardner W R, Robbins C, et al. Limits on data communication along the drillstring using acoustic waves[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2008, 11(1): 141–146.
- [25] Gutierrez-Estevez M A, Krueger U, Krueger K A, et al. Acoustic broadband communications over deep drill strings using adaptive OFDM[C]. 2013 IEEE Wireless Communication and Networking Conference, 2013.
- [26] Li C, Chang J F, Fan S C, et al. Analyzing the validity of a DFT-based improved acoustic OFDM transmission along rotating simulated drillstring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 81: 447–460.
- [27] Ma D, Shi Y B, Zhang W, et al. Design of acoustic transmission along drill strings for logging while drilling data based on adaptive NC-OFDM[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2018, 83: 329–338.
- [28] Sinanovic S. Limits of acoustic waveguide communication[D]. Houston: Rice University, 2006.
- [29] Liu X C, Feng X L. Research on weak signal detection for downhole acoustic telemetry system[C]. IEEE 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, 2010: 4432–4435.
- [30] Li C, Chang J F, Liu Z, et al. Characteristics analysis of joint acoustic echo and noise suppression in periodic drill-

string waveguide[J]. Shock and Vibration, 2014, 2014(1): 1–10.

- [31] Tochikawa T, Sakai T, Taniguchi R, et al. Acoustic telemetry: the new MWD system[C]. 1996 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, 1996.
- [32] Harper G, Almanza E, Foss A, et al. Implementation of advanced acoustic telemetry system adds value and efficiency to well testing operations[C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, 2003.
- [33] Azari M, Salguero A, Almanza E, et al. Data acquisition with advanced acoustic telemetry improves operational efficiency in deep-water and land-well testing case histories[C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Adelaide, 2006.
- [34] Gao L, Finley D, Gardner W, et al. Acoustic telemetry can deliver more real-time downhole data in underbalanced drilling operations[C]. IADC/SPE Drilling Conference, Miami, 2006.
- [35] Reeves M E, Camwell P L, Mcrory J. High speed acoustic telemetry network enables real-time along string measurements, greatly reducing drilling risk[C]. SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition, Aberdeen, 2011.
- [36] Reeves M, Smith D, Groves D, et al. Unique acoustic telemetry network with distributed pressure measurement nodes enables accurate real-time analysis of sweep effectiveness[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 2013.
- [37] 李志刚, 管志川, 王以法. 随钻声波遥测及其关键问题分析 [J].
 石油矿场机械, 2008, 37(9): 6–9.
 Li Zhigang, Guan Zhichuan, Wang Yifa. Acoustic teleme-

try while drilling and analysis in its key problems[J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(9): 6–9.