

基于超声测距的随钻井径测量系统设计

倪卫宁¹, 李三国¹, 李继博¹, 张卫¹, 李胜²

1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101
2. 中海油田服务股份有限公司油技事业部, 天津 300451

摘要 传统电缆测井的机械多臂井径仪在高速旋转的随钻条件下难以完成测量, 而基于超声测距的随钻井径测量系统, 具有利用超声测距的非接触、速度快、信息处理简单、抗干扰能力强等优点, 通过采用 3 个换能器等角距圆周分布, 在存在“偏心”时可有效测量井径以及井筒轴心到仪器轴心的距离矢量。本文借鉴国内外现有超声波随钻井径测量系统及技术经验, 设计了以单片机为核心的模块化超声随钻井径测量系统。从超声换能器特性、硬件电路以及程序控制 3 个方面入手进行协同设计, 精度高、具偏心修正功能。根据理论计算和超声换能器产品参数特点, 采用 1MHz 的超声换能器进行测距。采用增益可编程的反射波信号检测电路, 通过多次增益校正, 使得首个反射波信号前沿被比较器捕捉到, 把超声波传输时间检测精度提高到一个换能器振荡周期以内, 有效提高了测距精度, 实现高速高精度测量与井径计算, 其测量精度达到毫米量级。

关键词 随钻测井; 井径仪; 超声测距; 增益控制

中图分类号 TH816

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.03.006

Design of the Logging While Drilling Caliper Tool Based on Ultrasonic Distance Measurement

NI Weining¹, LI Sanguo¹, LI Jibo¹, ZHANG Wei¹, LI Sheng²

1. Research Institute of Petroleum Engineering Technology, SINOPEC, Beijing 100101, China
2. Division of Oil Technology, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China

Abstract Caliper measurement by using the traditional wireline multi-finger caliper tools is very difficult under the condition of while drilling. The Logging While Drilling (LWD) caliper tool based on ultrasonic distance measurement possesses the advantages of non-contact, high speed, easy process, and strong anti-jamming. By using three ultrasonic transducers which are equidistantly mounted on the surface, the caliper and the eccentricity are effectively measured. The modular design is utilized for the entire system with the MCU as the core, by drawing lessons from the domestic and international research results of the LWD caliper tool based on ultrasonic distance measurement. In order to design a high precise and eccentricity correcting caliper measurement system, the characteristics of ultrasonic transducer, hardware circuit, and program control are together considered and the collaborative design is used. According to the result of calculation and the parameter characteristics of the real ultrasonic transducers, 1MHz ultrasonic transducers are chosen. Since the variable gain detection circuit and the several gain calibrations are utilized, the first echo signal frontier is captured by the comparator, and the time precision of ultrasonic flight is improved to one period of the ultrasonic transducer oscillation. Finally the measurement precision is effectively improved and the measurement deviation is reached at 1mm.

Keywords Logging While Drilling(LWD); caliper measurement; ultrasonic distance measurement; gain control

0 引言

随钻测井(Logging While Drilling, LWD)是指在钻井过程中, 使用仪表化的钻铤测量用于评价所钻地层物理参数的一种测井方法, 包括测量电阻率、岩性、孔隙度、饱和度、井径

等。其测量结果克服了常规电缆测井受钻井液污染的影响, 有利于获取地层的真实参数, 更为客观地反映地层的实际特性, 对地层做出快速准确的评价。

传统电缆测井的机械多臂井径仪在高速旋转的随钻条

收稿日期: 2012-11-23; 修回日期: 2012-12-14

作者简介: 倪卫宁, 副研究员, 研究方向为随钻测井仪器设计与开发, 电子信箱: niwn.sripe@sinopec.com

件下难以完成测量,而超声测距非接触、速度快、信息处理简单的特点^[1-6],成为了随钻井径测量的首选^[7]。国际上也一直进行超声测距的研究^[8,9],主要的随钻测井设备商相继推出了超声随钻测量仪。例如,哈利伯顿公司的 H02987-A4 超声随钻井径测量仪。但这些仪器价格昂贵,维修不便^[10]。国内也有几家单位推出了超声随钻井径测量系统,但基本上都是采用单个或 2 个超声波换能器的结构方式,其测量方法受到仪器偏心制约,测量精度较低^[11]。本文设计了一种采用 3 个换能器等角距圆周分布,实现高精度、偏心修正的基于超声测距的随钻井径测量系统,其测量精度达到毫米量级。

1 测量几何原理

图 1 是基于超声测距的随钻井径测量系统轮廓图。如图所示,基于超声测距的随钻井径测量系统被实现为一个短节,测距超声波换能器被嵌在系统外壁。由于 3 个换能器均匀分布在圆周上,视图中只能看到 1 个换能器的正面,另 1 个的侧面,无法看到第 3 个。图中的耐磨带可减轻系统表面与井壁摩擦,同时还起到规避超声波测距盲区的作用。电路部分被安装在仪器内部。

图 2 为图 1 的 1-1 处的剖面再结合井眼的示意图,图 2 中 3 个超声换能器均匀分布,即夹角为 120 情况存在“偏心”的横截面图,图 3 为等效几何关系图。通过 3 个在圆周均匀分布的超声换能器,可以在存在“偏心”时有效测量出井径以及井筒轴心到仪器轴心的距离矢量。

实际测量过程中,测量仪器下到井下以后难以避免出现“偏心”现象,即仪器的轴心与井筒的轴心存在一个偏移。在电缆测井时采用扶正器纠正偏心,而在钻井时,由于系统高速旋转,使用扶正器较困难。

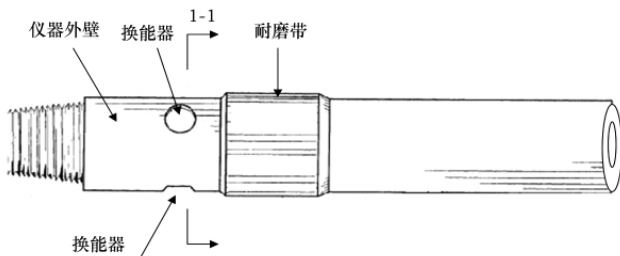


图 1 基于超声测距的随钻井径测量系统轮廓图
Fig. 1 Outline map of logging while drilling caliper tool based on ultrasonic distance measurement

S_1, S_2, S_3 分别是 3 个换能器测距模块的测量值, r 为仪器的半径, R 为井筒的半径, d 为井筒轴心到仪器轴心的距离矢量, θ 为 R_1 方向与 d 方向的夹角。根据上述结构可以计算出: $R_1=S_1+r, R_2=S_2+r, R_3=S_3+r$ 。其中, R_1, R_2, R_3 分别是仪器轴心到井壁的距离。

根据图 3 所示的几何关系,对以 d 为公共边的 3 个三角形,可以列出如下三角函数方程:

$$(R_1^2+d^2-R^2)/2R_1d=\cos\theta \quad (1)$$

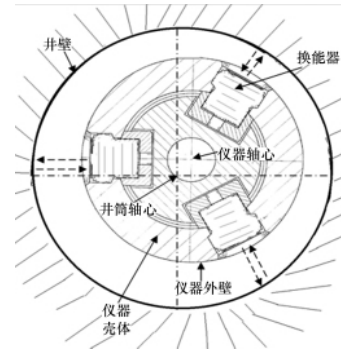


图 2 1-1 剖面再结合井眼的示意图
Fig. 2 Section combined scheme for a borehole

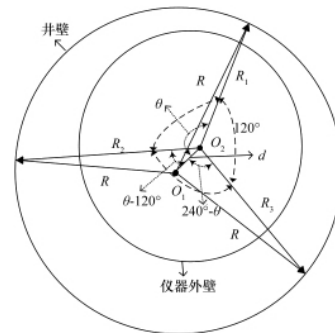


图 3 等效几何关系图
Fig. 3 Diagrams of equivalent geometric relation

$$(R_1^2+d^2-R^2)/2R_1d=\cos(\theta-120)=\cos(120-\theta) \quad (2)$$

$$(R_3^2+d^2-R^2)/2R_3d=\cos(240-\theta)=\cos(120+\theta) \quad (3)$$

上述 3 个方程中, R_1, R_2, R_3 为已知的测量值,因此可以求出 R, θ, d 3 个变量。结果如下:

$$d^2=[(R_1^2-T)/R_1]^2/4+[(R_2^2-T)/R_2-(R_3^2-T)/R_3]^2/12 \quad (4)$$

$$R^2=T+d^2=(R_1+R_2+R_3)R_1R_2R_3/(R_2R_3+R_1R_3+R_1R_2)+ [(R_1^2-T)/R_1]^2/4+[(R_2^2-T)/R_2-(R_3^2-T)/R_3]^2/12 \quad (5)$$

$$\theta=\cos^{-1}[(R_1^2+d^2-R^2)/2R_1d] \quad (6)$$

$$T=(R_1^2R_2R_3+R_1R_2^2R_3+R_1R_2R_3^2)/(R_2R_3+R_1R_3+R_1R_2) = (R_1+R_2+R_3)R_1R_2R_3/(R_2R_3+R_1R_3+R_1R_2) \quad (7)$$

其中,为了表示和计算方便,设 T 是临时变量。

2 系统结构及模块化设计

系统采用以单片机为核心的模块化设计,借鉴国内外现有超声波随钻井径测量系统及技术经验,从超声换能器特性、硬件电路以及程序控制 3 个方面入手进行协同设计,研究高精度、具偏心修正的超声随钻井径测量系统。系统原理框图如图 4 所示,整个系统分成 8 个模块,分别是“数据处理传输存储模块”1 个,“超声测距模块”3 个,“超声换能器”3 个,“泥浆脉冲无线数据上传模块”1 个。模块之间的连接都采用简单的接插件,非常便于检修替换。

数据处理传输存储模块和超声测距模块部分都以 STM32F103 为核心,增强了各模块的智能控制与数据处理能力,单片机的使用也使得外围数字逻辑元件大为减少,电路

可靠性提高,从而使整个系统的可靠性大大提高。其中数据处理传输存储模块主要完成井径测量定时规划、数据运算存储、数据接收和转发。

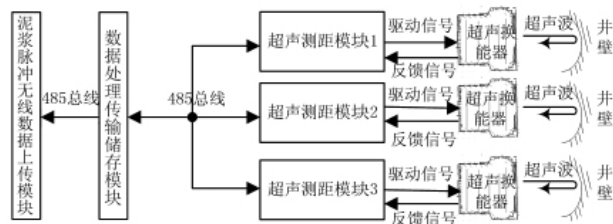


图4 原理框图

Fig. 4 Block diagram

3 超声测距模块设计

超声测距系统基于时差法进行测距。时差法是指超声换能器发射超声信号,通过超声接收器接收超声回波信号,检测出发射超声信号到接收回波信号的时间差 t , 并利用时间差 t 乘以超声的传播速度 v 再除以 2, 得到超声换能器与反射面之间的距离 d , 即 $d=vt/2$ 。

由于吸收衰减和扩散,超声能量随目标距离的变化而变化,用固定阈值的比较器检测回波,可能导致越过门槛的时刻不能确定在第几个回波周期,从而影响计时的准确性。本系统考虑在钻井液中测量距离并最终计算出井径大小,因此根据使用环境和条件,距离的测量精度要达到 $\pm 1\text{mm}$ 。为了达到这个精度要求,首先要从超声探头频率的选择进行计算。设超声波在钻井液中的传播速度 v 为 1450m/s , 根据超声波的谐振频率 f , 计算得到理论计时偏差 Δt 为 $1/f$, 因此等效的距离误差计算为:

$$\Delta S = v \times \Delta t / 2 = 1450 \times 1 / (2f) = 725 / f (\text{m}) = 725000 / f (\text{mm}) \quad (8)$$

由上式可以推出,当 $f > 725000\text{Hz}$ 即 0.725MHz 时, $\Delta S < 1\text{mm}$, 因此考虑到实际应用中超声换能器只有在部分频率点的成熟产品,选用 1MHz 的超声波换能器。

为了提高超声测距精度,需要准确检测到回波脉冲序列的到达时间。双比较器整形结合软件可以准确确定回波前沿到达时间,提高超声波测距精度^[1],但是使用环境的差异导致反射超声波能量存在较大差异,比较器阈值的确定将较为困难。另外通过数字细分和高分辨率 A/D 超声波传输时间精密测量方法可以有效提高测量精度^[4],由于该方法采用了 12 位 32MHz 的 A/D 采样,不但需要单片机,还需要高性能的现场可编程门阵列 (FPGA) 才能完成测量,因此其功耗、印刷电路板 (PCB) 尺寸等指标就不适合空间狭小且依靠电池供电的随钻仪器。

本系统设计了一种增益可变的回波信号检测电路,增益可以通过单片机输出直接控制。超声波测距模块发射和接收电路分别如图 5 和图 6 所示。发射电路较为简单,主要是驱动放大和匹配。接收电路较复杂,主要包括放大、滤波、可调增益放大和比较。其中可编程增益放大器选用 PGA112, 可变增益为 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128。该芯片与单片机的接口简

单,由片选、时钟和数据构成。系统通过多次增益校正,使得第 1 个回波信号被阈值比较器捕捉到。图 7 是实验中示波器观察到的回波信号。从图中可以明显看出,接收到的反射信号周期性振荡,其频率为换能器的谐振频率,其振荡幅值开始逐渐增大,当达到发射波周期个数以后(本系统发射周期设置为 5 个),幅值则开始逐渐减少。由于系统使用环境差异较大,特别是温度、压力(影响钻井液浓度),反射面的硬度和超声波的发射以及接收角度等因素对反射波的幅度影响很大,因此可编程增益级数越大,每级增益之间的倍数越小,将越能适应各种使用环境,使得接收电路检测到第一个回波信号,提高测量分辨率。

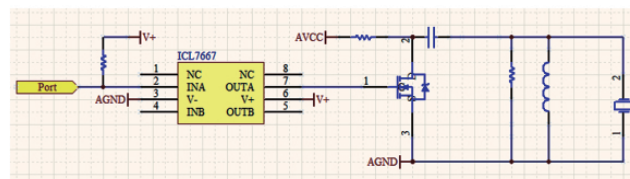


图5 发射电路图

Fig. 5 Diagram of transmitter circuit

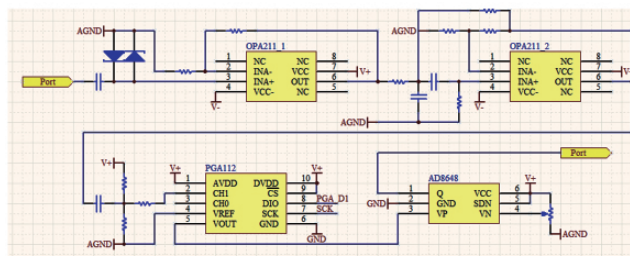


图6 接收电路图

Fig. 6 Diagram of receiver circuit

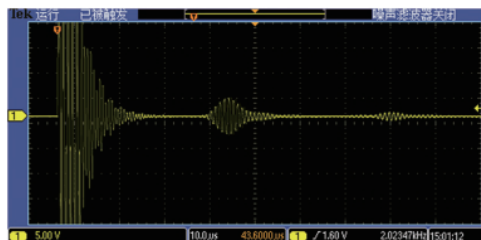


图7 测量波形图

Fig. 7 Waveform chart of measurement

4 程序设计

系统程序与硬件模块相对应,分成数据处理存储程序和超声测距程序。其中数据处理存储程序较为简单,主要完成命令和数据的上传与下达,以及测距周期设置和数据存储。超声测距程序的流程如图 8 所示。考虑到测距盲区,流程图中需要加入延时 $30\mu\text{s}$ 再检测回波,否则系统将把发射波的余波误认为回波信号。由于反射面距离太远或反射角度太大等原因,无法检测到回波,则计数器溢出,程序跳出等待检测回波,重新开始测距。

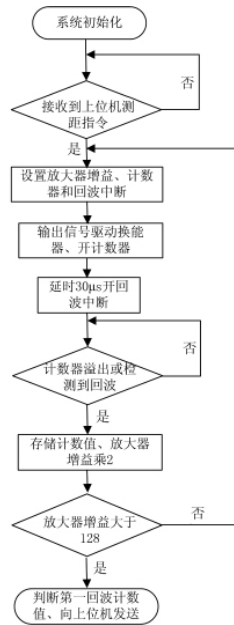


图8 测距程序流程图

Fig. 8 Flow chart of distance measurement program

5 实验结果分析

为了验证超声井径测量的效果,将超声井径测量系统安装在长 500mm,直径 120mm 的钻铤上。整个钻铤放入内径为 200mm 的套管内,套管的部分段落人为地扩充其内径 10~30mm。套管内充满了类似于钻井液的盐水,这样就形成了一个模拟井眼环境。在这个模拟井眼环境的试验中,由超声井径测量系统、盐水、套管构成的超声波回波体系建立了超声波信号传输环境,超声井径测量系统各模块工作良好。经过套管反射回的超声波信号经过放大、滤波、比较和时钟计数后获得的距离信号清晰准确。

在超声井径测量系统中,主要技术参数超声换能器频率为 1MHz,发射功率为 100mW。表 1 是对 3 种内径(直径)分别为 200、210、220mm 的测量数据,每种内径在不同的偏心情况下测量 3 次。根据实验测量和误差分析:测量精度为 ±1mm,测量盲区为 25mm。因此可以证明该测量系统实现了回波的有效检测,测量误差与理论计算相符合。

表 1 实验数据及其测量误差(单位:mm)

Table 1 Experimental data and their measurement errors (unit: mm)

实际井径	测距 R_1	测距 R_2	测距 R_3	计算井径	误差
200.0	92.8	104.2	113.8	200.8	0.8
200.0	101.7	96.2	109.5	200.5	0.5
200.0	93.1	91.1	113.2	199.1	-0.9
210.0	101.5	120.2	90.8	209.7	-0.3
210.0	104.5	115.2	95.9	211.0	1.0
210.0	99.8	98.5	114.8	209.2	-0.8
220.0	122.8	108.6	98.5	220.8	0.8
220.0	109.0	101.6	117.8	219.3	-0.7
220.0	98.7	116.3	112.8	219.1	-0.9

6 结论

(1) 提出了通过 3 个 120° 夹角安装换能器测距的方式,结合 3 个测试距离值与它们之间的几何关系,计算出偏心 and 井径,并设计了相应的测量电路和测量软件。通过对仪器的模拟环境试验,证明系统能够很好地完成测量。

(2) 通过增益可编程的回波信号检测方法,把超声波传输时间检测精度提高到一个换能器振荡周期以内,等效的井径测量精度可以达到 1mm。

(3) 在测量超声波传输时间过程中,换能器的谐振频率、比较器的阈值和可编程增益放大器的增益级数及每级之间倍数是测量分辨率的 3 个重要因素。

参考文献 (References)

- [1] 赵海鸣, 卜英勇, 王纪婵. 一种高精度超声波测距系统的研制[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(6): 62-65.
Zhao Haiming, Bu Yingyong, Wang Jichan. Mining Research and Development, 2006, 26(6): 62-65.
- [2] 蒲杰, 李平, 吴文焘. 一种简单高精度超声波液位计系统的设计与实现[J]. 应用声学, 2010, 29(6): 437-442.
Pu Jie, Li Ping, Wu Wentao. Applied Acoustics, 2010, 29(6): 437-442.
- [3] 李云龙, 卜雄洙, 赵文, 等. 新型嵌入式超声波测距系统[J]. 仪表技术与传感器, 2012(1): 97-99.
Li Yunlong, Bu Xiongzu, Zhao Wen, et al. Instrument Technique and Sensor, 2012(1): 97-99.
- [4] 张兴红, 张慧, 王全, 等. 基于 ARM 的超声波流量计 A/D 转换电路设计[J]. 自动化与仪表, 2011(10): 18-21.
Zhang Xinghong, Zhang Hui, Wang Xianquan, et al. Automation & Instrumentation, 2011(10): 18-21.
- [5] 姚滨滨, 张宏建, 唐晓宇, 等. 基于时差法和 TDC-GP2 的超声波流量测量方法[J]. 自动化与仪表, 2011(8): 17-20.
Yao Binbin, Zhang Hongjian, Tang Xiaoyu, et al. Automation & Instrumentation, 2011(8): 17-20.
- [6] 张兴红, 向风云, 张天恒, 等. 超声波传输时间精密测量方法及应用研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 651-654.
Zhang Xinghong, Xiang Fengyun, Zhang Tianheng, et al. China Mechanical Engineering, 2012, 23(6): 651-654.
- [7] 阮玉柱, 陈凡, 胥召, 等. 超声波测径在钻井过程中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2010(23): 130-132.
Ruan Yuzhu, Chen Fan, Xu Zhao. Inner Mongolia Petroleum Chemical Industry, 2010(23): 130-132.
- [8] Kazys R, Mazeika L, Sliteris R, et al. Online profiling of nonplanar objects by high-resolution air-coupled ultrasonic distance measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1825-1830.
- [9] Jiang S B, Yang C M, Huang R S, et al. An innovative ultrasonic time-of-flight measurement method using peak time sequences of different frequencies[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(3): 735-744.
- [10] 潘光玮, 冯泽东, 何源, 等. 基于直接数字合成技术的随钻电阻率测井仪器器的设计与实现[J]. 物探与化探, 2012, 36(2): 253-255.
Pan Guangwei, Feng Zedong, He Yuan, et al. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(2): 253-255.
- [11] 任志明. 非接触井径超声波测量方法研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
Ren Zhongming. Method of a non-contact ultrasonic method for caliper logging[D]. Daqing: Daqing Petroleum College, 2008.

(责任编辑 齐志红)