

# 邻井距离随钻电磁探测系统的设计与实现

余勇, 梁华庆, 史超, 吴志永, 高德利

(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** 邻井距离随钻探测是精细控制复杂结构井井眼轨迹的关键技术之一; 基于旋转磁场测距原理, 研制了邻井距离随钻电磁探测系统; 该系统以安装在钻头后方的磁短节作为交变磁场发生器, 位于邻井中的三轴磁场传感器作为信号接收器; 针对磁场信号低频微弱特性, 研制了低噪声、窄通频带、高精度数据采集电路; 采用改进的 DFT 谱峰法, 自动跟踪锁定井下三轴磁场信号, 滤除其它频率的杂波和噪声, 精确提取出信号的幅值; 采用曼码通信将井下数据传至地面仪, 地面仪据此计算出邻井之间的距离和方位, 引导钻进作业; 室外测试和现场试验表明, 所研制的邻井距离探测系统, 最大有效测距距离可达 50 m, 可以满足 SAGD 双水平井和煤层气连通井的钻井工程实际需求。

**关键词:** 邻井距离探测; 随钻测量; 旋转磁场测距; 微弱信号采集与处理

## Design and Implementation of Electromagnetic Detection System for Distance of Adjacent Wells

Yu Yong, Liang Huaqing, Shi Chao, Wu Zhiyong, Gao Deli

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** Adjacent wells distance measurement while drilling is one of the key technologies to fine-grained control of complex structures wellbore trajectory. Based on the principle of rotating magnet ranging, an electromagnetic adjacent well detection system while drilling is developed. A magnetic short section is designed and installed behind the drill bit to generate the alternating magnetic field, a tri-axial magnetic field sensor is located in the adjacent well as a signal receiver, and a low-noise, narrow pass band, high-precision data acquisition circuit is developed to detect the weak low-frequency magnetic field signal. A filtering method based on the modified DFT peak spectrum value is proposed to track the alternating magnetic frequency accurately and extract the magnetic amplitude precisely. The Manchester code communication is used to transmit the downhole data to the surface instrument. The surface instrument calculates the distance and orientation between adjacent wells and guides drilling operations. The outdoor and field tests showed that the maximum measurement distance range of the developed system is up to 50 meters, which can meet the actual demand of drilling engineering.

**Keywords:** adjacent well distance measurement; MWD; rotating magnetic field ranging; weak signal acquisition and processing

## 0 引言

复杂结构井是以水平井为基本特征的系列井型, 包括双水平井、多分支井、连通井、U 型井及多功能组合井等, 是高效开发低渗透、非常规及海洋等复杂油气田的先进井型<sup>[1-3]</sup>。而高精度井间随钻测距是复杂结构井精确导向、准确中靶的关键技术之一。目前国外研制的井间随钻测距仪主要有旋转磁场井间测距系统 RMRS (rotating magnet ranging system) 和磁场定位导向工具 MGT (magnetic guidance tool), 但其核心技术被严格保密和垄断, 相关的文献资料很少, 而且油田测试服务费用非常昂贵, 严重制约了复杂结构井在我国油气田开发中的推广应用。各大石油公司都迫切希望开发出具有自主知识产权的高性价比的井间随钻测距导向系统。为此, 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室在国家“十一五”、“十二五”科技重大专项的资助下, 对邻井距离随钻电磁探测技术, 从测量原理、磁定位信号的产生、井下电磁探测仪, 到

磁测距导向算法等方面展开了系统的研究, 研制成功的邻井距离随钻电磁探测系统已应用于钻井现场, 取得了很好的应用实效, 打破了国外公司在该领域的技术垄断。

## 1 邻井距离随钻电磁探测原理

图 1 所示为邻井距离随钻电磁探测系统应用于连通井中的测量原理<sup>[3]</sup>。系统由磁短节(磁信标)、井下电磁测量探管和地面仪组成。磁短节固定在正钻井钻头后方, 随钻具一起旋转产生交变磁场; 井下电磁测量探管放在已钻井中, 用于测量磁短节产生的三轴交变磁场信号, 并将测量的数据上传至地面

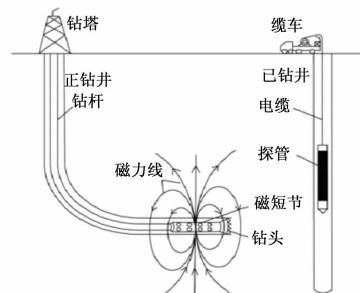


图 1 邻井距离随钻电磁探测系统在连通井中的测量原理

收稿日期: 2015-10-09; 修回日期: 2015-11-17。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05009-005)。

作者简介: 余勇(1990-), 男, 湖北宜城人, 硕士研究生, 主要从事信号检测与石油仪器方面的研究。

仪, 地面仪据此计算出探管与磁短节之间的距离和方位, 引导钻进方向, 实现两井连通。

## 2 邻井距离随钻电磁探测系统结构设计

### 2.1 磁短节的结构设计

磁短节由安装在无磁钻铤中的横向排列的多个永磁体组成, 位于钻头后方, 与钻具一同旋转产生交变磁场, 是邻井距离随钻电磁探测系统的信号源<sup>[4]</sup>。

### 2.2 电磁测量探管的结构设计

电磁测量探管的结构<sup>[4]</sup>如图 2 所示, 其作用是采集磁短节产生的磁信号, 并将采集到的数据通过电缆传输到地面仪进行处理, 计算出邻井距离。

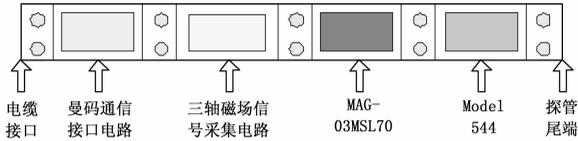


图 2 电磁测量探管的结构示意图

所设计的磁短节永磁体的表面磁场强度约为 5 000 高斯, 在 50 米之外磁场强度已衰减到  $10^{-8}$  高斯数量级, 传统的磁通门传感器无法探测到如此微弱的信号。为此选用高性能的井下三轴磁场传感器 MAG-03MSL70, 将交变磁场信号转换成交变电压信号。要计算两口井的相对距离和方位, 还需要测得探管所处位置的井斜角、方位角和温度。在探管中, 选用进口的 Model544 传感器, 其中的三轴加速度传感器来测量井斜角, 三轴磁通门传感器来测量方位角, 温度传感器来测量温度。

## 3 三轴磁场信号采集电路设计

### 3.1 采集电路总体方案

理论研究和实际测量表明, 探管中三轴磁场传感器输出的信号具有以下特点: 一是信号幅度随传播距离的 3 次方急速衰减; 二是信号频率会随着钻头转速的改变而变化, 频率范围在 1~4 Hz。

根据信号上述特点, 设计了信号采集电路总体方案。采集系统主要由模拟信号放大滤波电路、A/D 转换电路和微处理器电路构成, 如图 3 所示。

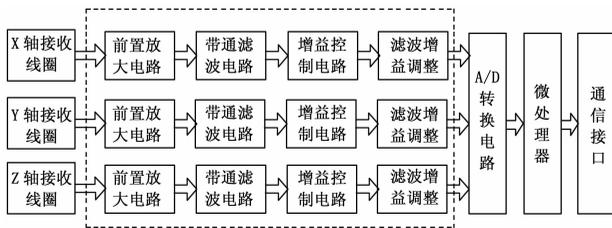


图 3 信号采集电路框图

前置放大滤波电路将模拟输入信号放大至合适的范围, 并滤除 1~4 Hz 之外的各种噪声。ADC 模数转换电路完成对三路模拟信号的同步高精度采样, 转换后的数字信号通过通信接口传到井下通信板, 通信板汇集三轴传感器数据以及其他信息后, 通过电缆采用曼码方式传至地面。

### 3.2 模拟信号放大滤波电路设计

在微弱信号的检测电路中, 第一级电路的噪声系数必须足够小, 应选用超低噪声、低漂移的放大器作为前置放大

级<sup>[5-6]</sup>。三轴交变磁场传感器输出的信号极其微弱, 且传感器的内阻也较大, 不利于提取有用信号, 因此前置放大电路选用噪声低、共模抑制比高的仪表放大器, 能有效地放大有用信号。

与前置放大电路相连的是八阶 Butterworth 带通滤波器。该滤波器在中心频率 2 Hz 处有一个平坦的增益响应, 同时从通带到阻带有一个陡峭的过渡区<sup>[7]</sup>。滤波器幅频响应如图 4 所示, 通带为 1~4 Hz, 在 10 Hz 处阻带衰减 >40 dB, 可以有效地滤除噪声, 提高信噪比。

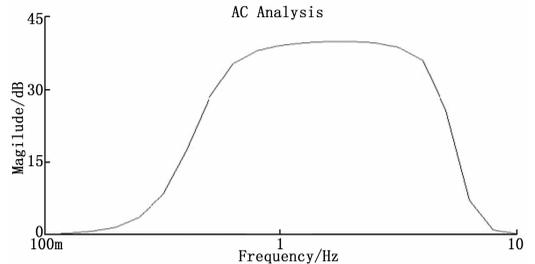


图 4 八阶带通滤波器幅频响应曲线

由于接收信号的动态范围大, 为了提高仪器的测量精度及输入动态范围, 在电路中加入了程控放大电路模块。程控放大电路是将信号放大到 A/D 量化的最佳区间, 以提高仪器的动态范围和灵敏度。

程控放大器可以通过微处理器直接控制, 改变其放大倍数, 可控放大倍数为 1、10、100 和 1 000。根据实际输入的模拟信号大小, 电路总的可控放大倍数为 30~30 000 倍。

### 3.3 ADC 与微控制器接口设计

A/D 转换电路主要是由 A/D 芯片 AD7734 组成。AD7734 是美国 AD 公司推出的多通道 24 位模数转换芯片, 适合低频率高精度 A/D 转换器。片内差分输入通道, 能把传感器的小信号变成串行数据输出。由于这种模数转换芯片是采用  $\Sigma-\Delta$  技术, 所以受环境噪声的影响比较小, 是工业和过程控制中的理想选择。

这种转换器能以 20 kHz 或更高的速度对模拟输入信号进行连续采样, 采样速率为 MCLKIN/512 (由主时钟 MCLKIN 决定, 一般为 10 MHz)。采样信号经  $\Sigma-\Delta$  ADC 转换成数字信号, 该信号经数字滤波后, 以确定的速率更新 24 位数据输出至寄存器。在本设计中 AD7734 的输入范围 -5~5 V, 有效数据 16 位, 其每一位转换为实际信号约为 152  $\mu$ V。

## 4 曼码通信电路设计

采用曼彻斯特编码, 通过测井电缆实现井下与地面之间的数据和命令的准确、稳定、可靠的传输。通信系统工作时, 发送的数据要按照一定的格式编码后发出。传输的有效数据是 16 位, 且必须给数据添加相应的同步信息, 以保证系统的正确接收。同时, 为了保证通信的可靠性, 还为数据添加了一位冗余, 即, 一位奇偶校验位。发送的数据帧格式如图 6。



图 6 曼彻斯特编码帧格式

数据同步头由 3 个半位时钟的低电平和 3 个半位时钟的高电平构成; 数据为 16 位数据, 采用大端模式 (即高位在前,

低位在后), 数 ‘1’ 由半位时钟的高电平和半位时钟的低电平表示, 数 ‘0’ 由半位时钟的低电平和半位时钟的高电平表示; 校验位为偶校验 (即当每帧数据 ‘1’ 的个数为偶数时该位为 ‘1’, 编码为从高电平到低电平跳变; 当每帧数据 ‘0’ 的个数为奇数时该位为 ‘0’, 编码为从低电平到高电平跳变)。

曼彻斯特编码功能通过定时器控制, 在单片机的两个 I/O 口上产生相应的高低电平来实现。运放的两个输入端分别为 PH、PL。当 PH=1、PL=0 时, 编码电路发送出高电平; 当 PH=0、PL=1 时, 编码电路发送出低电平。通过单片机控制两输入端的电平高低实现编码, 然后, 经过功率放大器放大后调制到电缆上。这样就实现了编码。

曼彻斯特码的解码采用软件和硬件结合方式, 具体说来将接收到的电缆上的信号经微分电路、放大电路、比较电路后, 得到规则的方波信号, 然后由单片机进行解码。

### 5 数字信号滤波算法的研究

虽然采用自制的硬件采集滤波电路可以有效地滤除 1~4 Hz 以外的噪声和干扰, 极大地提高了信噪比。但在 1~4 Hz 以内还含有其它频率的杂波和噪声, 为能精确地提取出三轴信号的幅值, 还需在软件算法上进一步滤除电路通带内 (1~4 Hz) 的杂波和噪声, 得到纯净的三轴磁场信号。

离散傅里叶变换 (DFT) 是频谱分析常用的方法, 检测过程中截取正弦信号的若干个周期, 信号 DFT 幅度谱的最大值  $X_{max}$  和正弦信号幅值  $A$  满足关系式  $X_{max} = A \times N / 2$  ( $N$  为信号长度), 幅度谱的最大值对应的频率即为正弦信号的频率。只要在 1~4 Hz 范围内找到幅度谱最大值, 即可检测出井下交变磁场正弦信号的幅值和频率<sup>[8]</sup>。但传统 DFT 是对数字信号的连续频谱在整个数字频率范围内进行等间隔均匀采样。对于 RMRS 这样的窄带信号而言, 假设经过通带为 1~4 Hz 的带通滤波电路后, 选取采样频率为 50 Hz, 那么有用信号频段只占到整个数字频率的不足 1/10, 这意味着 DFT 将有 9/10 以上的采集点分布在无用频率段, 不仅造成极大的浪费, 而且在数据量较短的条件下, 频率采样间隔较大, 很难实现高的频率分辨率, 进而无法精确锁定有用信号频率, 导致信号幅度检测的误差较大。

为此对 DFT 法进行改进, 将 DFT 的频率采样点聚集在有用的 0~5 Hz 窄带内, 这样, 与传统的 DFT 谱峰法相比, 信号频率的检测精度可提高 10 倍, 信号峰值检测的最大相对误差也相应的降至原有的 1/10 以下。

### 6 系统测试结果与分析

在完成了系统联调后, 对其进行野外测试。图 7、8 分别为磁短节距离电磁测量探管 20 米, 50 米时 A/D 采集的原始时域信号、信号 DFT 的幅度谱以及经过改进的 DFT 滤波算法处理后信号的时域波形。随着距离的增加, 信号幅值急速减小, 而噪声逐步加大。

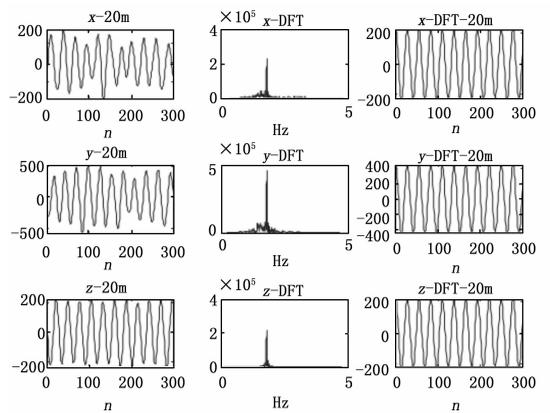


图 7 距离 20 米测试结果

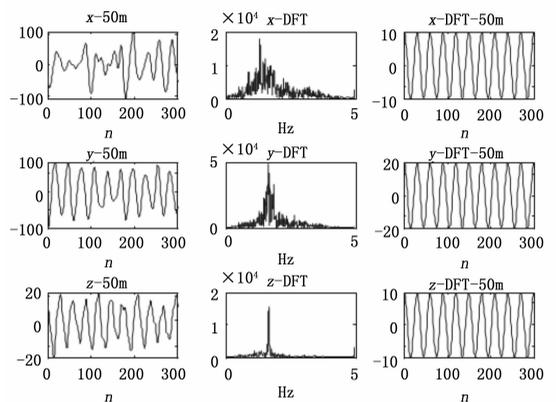


图 8 距离 50 米测试结果

图 7、图 8 左右两边曲线纵坐标及图 9 纵坐标为 AD 转换后的值, 乘 10 除以 65536 可得到电压 V。

检测出的三轴信号峰峰值随距离变化的曲线, 信号峰峰值基本上是和距离的立方成反比, 与理论分析吻合较好。实际应用中, 根据检测出的三轴信号大小, 依据相关算法<sup>[10]</sup>, 即可求出磁短节相对于探管的距离和方位。

### 7 结束语

本文基于旋转磁场测距原理, 研制了邻井距离随钻电磁探测系统。在深入分析待测信号特点的基础上, 设计了信号采集电路, 实现了三轴磁场信号的高精度采样。采用改进的 DFT 谱峰法, 自动跟踪锁定井下三轴磁场信号, 滤除其它频率的杂波和噪声, 有效地解决强干扰大噪声背景下微弱的磁场信号的

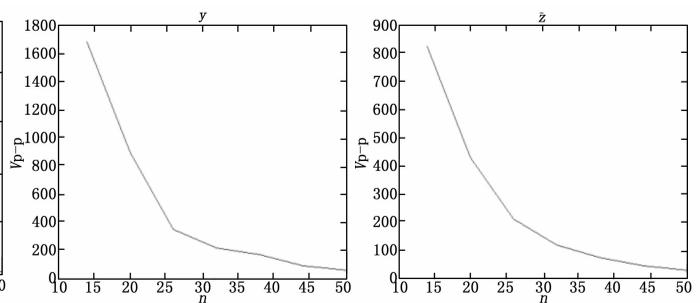


图 9 提取的三轴信号峰峰值随距离变化曲线

图 9 为经数字信号处理后