

## 光纤陀螺油井测斜系统硬件研究及设计

简红清, 马迎建, 高爽, 罗光明, 李敏

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了实现石油测井中井眼轨迹测量, 提出了一种基于光纤陀螺油井测斜系统的设计和实现方法, 将捷联惯性导航技术应用到油田测井领域。整个系统是以高速数字信号处理器 TMS320VC33 为核心实现数字滤波和导航解算, 以 FPGA 设计为辅完成 DSP 外围接口功能, 实现对水平井的井斜角、方位角和工具面角的测量。该文重点介绍了惯性测量单元、数据采集与接口电路、通讯电路和导航计算机等方面进行硬件和软件设计, 并对已完成的试验样机进行全面测试, 达到预期的基本要求。

**关键词:** 光纤陀螺; 油井测斜; 捷联惯导; DSP

**中图分类号:** U666.1

**文献标识码:** A

## System hardware research and design for FOG utilized in measurement-while-drilling surveying technique

JIAN Hong-qing, MA Ying-jian, GAO Shuang, LUO Guang-ming, LI Min

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A new inclinometer logging technology was presented to realize eyes orbit measurement in petroleum drilling. The strapdown inertial navigation technology was briefly introduced, and the structure design of FOG utilized in Measurement-While-Drilling surveying system was studied. High speed digital signal processor TMS320VC33 was core in the whole system to accomplish digital filter and calculation, and field programmable gate array (FPGA) was assistant to accomplish function of interface circuit. System hardware and software of FOG utilized in Measurement-While-Drilling surveying technique was designed from inertial measurement unit, data sampling, interface circuit to navigation computer etc, the inclination, the azimuth and the tool face angles of horizontal drilling wall was determined. The experimental system was achieved, and the system static work has reached the anticipated designing requirement under the normal temperature, at present.

**Key words:** FOG; Measurement-While-Drilling Surveying Technique; strapdown navigation; DSP

### 0 引言

随着石油测井技术的发展, 井眼轨迹测量成为测井领域的热点。传统的测井技术主要采用磁通门传感器作为测量元件进行角度测量, 容易受到外界磁场的干扰, 尤其是油井中含有铁磁物质时会导致仪器

收稿日期: 2006-01-26

作者简介: 简红清 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光纤陀螺油井测斜系统研究。

电子邮箱: SY0317218\_bh@aspe.buaa.edu.cn

精度下降甚至完全无法工作, 因此在测量精度和质量上存在种种缺陷; 而以捷联惯性导航技术为理论基础的光纤陀螺油井测斜系统具有高精度、性能稳定等优点。捷联惯性导航技术采用惯性测量单元(陀螺仪和加速度计)直接固连在载体上, 用计算机来完成导航平台的功能, 以数学平台代替物理平台, 使整个系统的体积、重量和成本大大降低。光纤陀螺是轻型的固态结构, 它具有可靠性高、尺寸小、重量轻、低成本、寿命长、功耗低、能够耐冲击和振动、不受地磁的干扰、瞬时启动以及有很宽的动态范围等优点; 石英挠性加速度计具有体积小、重量轻、响应快和精度较高等优点。井眼内径严格限制了测斜仪的尺寸, 因而基于捷联惯性导航技术的小型化光纤陀螺油井测斜系统是国内外研究的重点。该技术有利于提高油井产量、延长油井使用寿命、降低油田成本及有效减少能源浪费等优点, 并可以对老井井斜的数据校测, 具有极好的应用前景。

## 1 系统结构设计

根据光纤陀螺油井测斜系统的要求, 系统结构主要由油井测斜仪、单片机上位机控制和地面测试设备等三个部分组成, 如图 1 所示。油井测斜仪是系统的主要组成部分, 主要包括惯性测量单元(IMU)、FPGA 数据采集和接口电路、系统导航计算机、通讯电路和电源监控电路等, 完成油井的方位和姿态测量; 地面测试设备与油井测斜仪通讯, 发送控制命令及获取油井的井斜角、方位角和工具面角; 单片机上位机将井口的所在位置的初始数据信息传送给导航计算机, 用于系统导航解算时的初始对准。本文重点讨论光纤陀螺油井测斜系统中油井测斜仪的惯性测量单元、数据信号采集和接口电路、通讯电路设计及其导航计算机的工作原理。

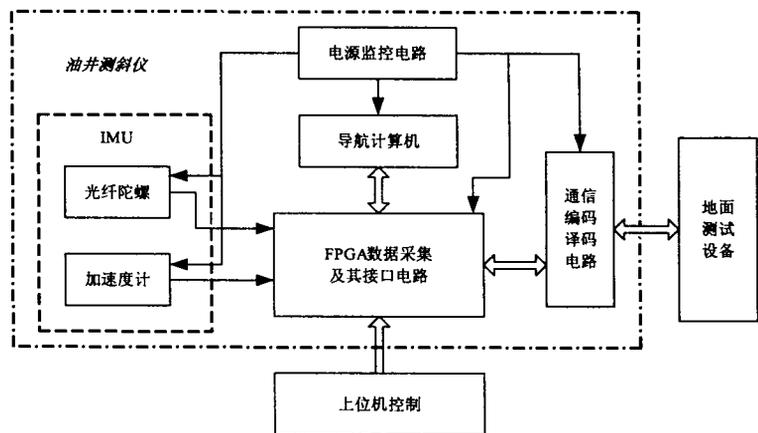


图 1 油井测斜系统结构框图

单片机上位机将井口的所在位置的初始数据信息传送给导航计算机, 用于系统导航解算时的初始对准。本文重点讨论光纤陀螺油井测斜系统中油井测斜仪的惯性测量单元、数据信号采集和接口电路、通讯电路设计及其导航计算机的工作原理。

### 1.1 惯性测量单元设计

惯性测量单元由 3 只中低精度光纤陀螺仪和 3 只石英挠性加速度计组成, 并且位置相互正交。中低精度光纤陀螺仪采用本研究所自行研制的小型化光纤陀螺, 信号输出采用脉冲方式, 静态工作精度在  $0.3 (^{\circ})/h$  左右。由于石英挠性加速度计输出信号是模拟电流量, 根据系统要求, 必须设计高精度的加速度计信号采集电路, 使其信号以脉冲方式输出, 加速度计检测电路如图 2 所示。模拟电流信号通过 V/F 变换成频率信号, 并利用光电耦合器进行隔离, 防止数模信号干扰。频率的高低代表了加速度计感应重力加速度的大小, 最终决定了测斜仪的姿态信息。V/F 变换采用 ADI 公司的 AD7742, 最高工作频率高达 6.144 MHz, 变换线性度好, 在 2.75 MHz 满刻度频率时, 最大非线性误差为 0.012%。通过实际电路测试, 静态工作精度可到达万分之  $1g \sim 2g$  (重力加速度值), 动态测量范围  $\pm 3g$ , 足够满足系统导航解算要求。

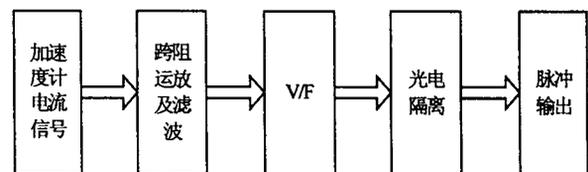


图 2 加速度计检测电路

### 1.2 数据采集和接口电路设计

数据采集和接口电路采用 FPGA 实现 DSP 外围电路及其接口的设计。采用 ALTERA 公司低成本、

低功耗、高容量的 ACEX1K 系列, 为了系统扩展和升级, 采用 10 万门的 EP1K100QI208-2。该系列芯片内核采用 2.5 V 供电, 工作频率最高可达 250 MHz, I/O 端口供电电压为 3.3 V。

主要功能是将惯性测量单元的脉冲信号转换为数字信号; 与 DSP 数据交换, 将导航计算机解算出的油井的井斜角、方位角和工具面角等一系列参数的数字信号进行通信编码; 并完成串行 E2PROM、DSP 和单片机的通信, 获取数字温度传感器的数据用于系统温度补偿等。FPGA 接口电路由地址译码及时序控制模块、脉冲计数模块、时钟分频模块、通信编码译码模块、与单片机通信 UART 模块、串行 E2PROM 的 SCI 三总线接口转换模块和单总线结构的数字温度传感器接口模块组成, 如图 3 所示。

所有外围设备都经过 FPGA 与导航计算机进行数据通讯, 这不仅由于 FPGA 采用的是硬件语言编程, 使外围设备有统一的时序控制和地址译码, 工作稳定, 而且还可以减少导航计算机的工作量, 加快系统解算的速度。

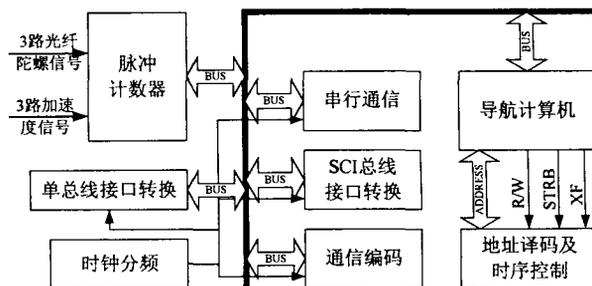


图3 FPGA数据采集及接口电路

### 1.3 导航计算机

本系统导航计算机选用的处理器芯片是 TMS320VC33, 它是 TI 公司推出的一款 32 位浮点式高性能数字信号处理器, 以高速、低功耗、低成本、体积小、内部资源丰富和易于开发为显著特点。具有高速的浮点运算能力, 其单周期指令执行速度为 150MFLOPS 和 75MIPS, 足够满足系统的运算速度; 内含 5 倍频的锁相环(PLL)时钟发生器, 能产生到达 75MHz 的内部时钟, 实现实时数据处理; 带有 34k×32 位的片内双静态 RAM, 分为 2 个 16k×32 位块和 2 个 1k×32 位块, 足够满足系统捷联导航解算时的数据存储; 系统功耗低, 在 150MFLOPS 下运行时, 功耗低于 200 mW; 带有 32 位的高性能 CPU, 可进行 16/ 32 位整数和 32/ 40 位的浮点操作; 具有四个内部译码页选, 可大大简化与 I/O 及存储器的接口; 带有启动程序装载功能, 将外部低速存储器或串输入口的程序数据加载到 DSP 内部的高速 SRAM 中运行。

导航计算机主要功能包括: 1) 实现用户程序自引导功能; 2) 对 FPGA 接口电路进行时序控制、地址译码和数据交换; 3) 和单片机上位机通信, 获得初始化数据, 进行初始对准; 4) 完成惯性测量单元的数据滤波等一系列预处理, 利用捷联惯性导航解算算法, 求解所需的井斜角、方位角和工具面角等参数。导航计算机功能模块框图如图 4 所示。

导航计算机每次上电都要进行复位, 本系统采用 MAXIM 公司的 MAX705 集成微处理器监控复位电路来完成, 其可以实现四个功能: 在电路上电、掉电及异常时产生一个 200 ms 的复位信号; 有独立的看门狗, 当 1.6 s 以上没有触发看门狗输入时, 看门狗输出变低; 有一个 1.25 V 的电压门槛监测器, 用于掉电报警或高于 +5 V 的电压监测; 并含有一个手动复位输入, 实现手动复位功能。当导航计算机复位时, DSP 首先通过访问中断, 将外部用户程序储存器的数据载入 DSP 内部 RAM 空间, 并开始运行程序。

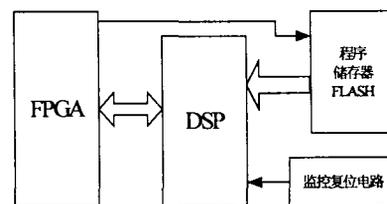


图4 导航计算机功能模块框图

### 1.4 通讯电路设计

传号交替反转码转化机理如图 5 所示。

根据地面测试设备的要求, 利用声波逻辑方式进行数据通讯。地面测试设备向油井



图5 传号交替反转码转化机理

测斜仪发送控制信号, 利用 PCM 脉码调制, 再送给 FPGA 解码; 导航计算机的解算数据通过 FPGA 编码之后, 再将信号转换为传号交替反码, 以声波逻辑的方式发送到地面测试设备。

## 2 软件设计

为了进行系统调试, 实现油井测斜功能, 系统软件设计包括: TMS320VC33 的程序加载、数据采集与数字滤波、初始对准和导航解算程序等。用户程序通过仿真器下载到 DSP 中, 并在仿真环境下编译、链接, 得到可执行的输出文件。为了使系统最终脱离仿真器独立运行, 必须将输出文件存储到 flash 芯片中, DSP 在复位之后, 自动运行固化在指定地址空间内的程序, 执行程序引导装载功能, 因而, Boot loader 软件的设计是非常重要的。

系统复位时, DSP 工作在微计算机引导模式, 首先运行固化在 0h~0FFFh 空间内的一段引导转载程序 (Bootloader) 让 DSP 从外部慢速存储器或者串口中将程序数据加载到 DSP 内部的 RAM 中运行。转载的数据格式可以是 8/16/32 位。如果从外部存储器进行引导, 则加载程序必须放在特定的三个存储映射区域中, 即 Boot1、Boot2、Boot3, 存储器加载流程图如图 6 所示。加载完成后, 导航计算机开始从第一个程序块执行程序。

当导航计算机初始之后, 首先通过访问 FPGA 采集的 3 路陀螺和 3 路加表信号, 并进行数字滤波。初始对准程序实现航向和姿态量的精确对准, 导航解算程序实时采集惯性测量单元数据、解算和输出导航信息。

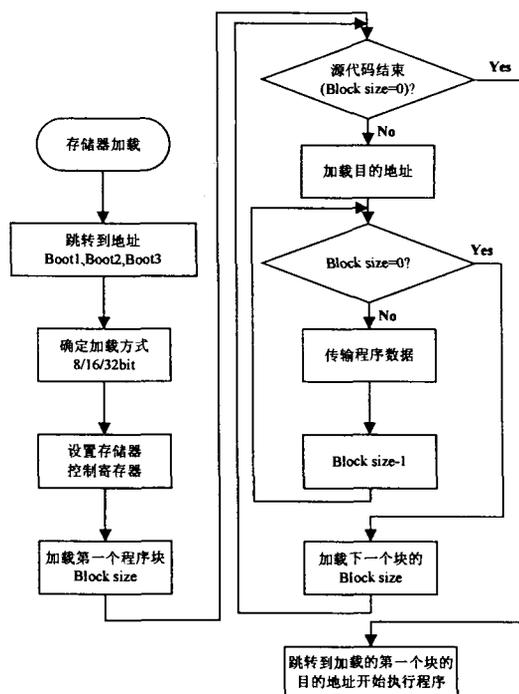


图6 存储器加载流程图

## 3 结论

基于捷联惯性导航技术的光纤陀螺油井测斜系统硬件平台承载了从陀螺、加表信号采集到导航计算机的解算及解算参数的数据传输整个过程。以此方案设计的实验样机已经完成, 并在常温静态下进行了测试, 达到系统设计指标要求。由于系统在地面 3 km 以下工作, 环境温度高达 120℃, 因而在设计过程中系统的尺寸和功耗是两个最关键的因素, 采用光纤陀螺技术已经基本上解决系统尺寸问题, 温度问题还需要进一步的研究, 通过采用低功耗元器件尽可能减少系统功耗并采用一些其它措施, 使基于光纤陀螺的油井测斜系统真正应用到实际油田测井领域。

### 参考文献:

- [1] Aboelmeaged Noureldin. New measurement-while-drilling surveying technique utilizing sets of fiber optic rotation sensors[D]. University of Calgary, Calgary Alberta, March, 2002.
- [2] Noy K A, Leonard J G. A new rate gyroscopic wellbore survey system achieves the accuracy and operational flexibility needed for today's complex drilling challenges[A]. Proceedings of SPE/IADC Drilling Conference[C]. Amsterdam, Netherlands, Mar.4-6, 1997: 773-783.
- [3] 李迪. 基于 DSP 的光纤陀螺捷联惯导数字信号处理系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2003.
- [4] 胡少青. 应用高分辨率 A/D 和 DSP 实现的加速度计并行数据采集系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2002, 16(1).
- [5] 谢子殿, 朱秀. 基于磁通门与重力加速度传感器的钻井测斜仪[J]. 传感器技术, 2004, 23 (7): 30-33.
- [6] 贾苹, 李志宏. 捷联系统中加速度计的信号采集[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 27 (2): 260-263.