

自主式光纤陀螺油井测斜仪

张春熹, 高爽

(北京航空航天大学 光电技术研究所, 北京, 100083)

摘要: 简要介绍了光纤陀螺原理, 分析了光纤陀螺应用于油井测斜的优点。研制了基于惯性测量技术的光纤陀螺测斜仪, 它是一种不依赖任何外部设备, 完全自主且实时快速的井眼轨迹测量仪器。样机实验结果表明: 该仪器能够实现全方位测量, 满足石油测井要求。

关键词: 光纤陀螺; 加速度计; 惯性测量; 测斜仪

中图分类号: TH89 文献标识码: B 文章编号: 1002-1841(2006)11-0009-03

Autonomous Fiber Optic Gyroscopes Incliner for Well Logging

ZHANG Chun-xi, GAO Shuang

(Institute of Opto-Electronics Technology, BeiHang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Introduces operating principles of Fiber Optic Gyroscopes (FOGs) and analyzes the advantages of FOG for well logging. Fiber Optic Gyroscopes Incliner (FOGI) is an Inertial Measure System based on the Inertial Navigation technology. It is a real-time measuring instrument with little settling time depending on no external aiding navigation. Primary experiment results showed the instrument can measure full angle and meet the requirement of logging.

Key words: fiber optic gyroscopes (FOGs); accelerometers; inertial measurement; inclinometer

0 引言

随着世界石油资源的日益紧张, 石油油井井眼轨迹的精确测量越来越显示出其重要性, 这就需要有高精度的油井测斜仪器。一些发达国家已经投入相当多的人力、物力用于这方面技术的研究, 其研究重点就在于如何将惯性测量技术应用于井眼轨迹测量, 从而获得精度高, 操作简单的测量仪器。目前国内各油田广泛使用的测斜仪器均采用磁通门技术或机械陀螺技术。由于这两种技术原理上的缺陷, 导致现有仪器有精度不足、使用范围受限和寿命短等弊病。光纤陀螺轻型的固态结构使其具有可靠性高、寿命长、能够耐冲击和振动、瞬时启动、功耗低以及有很宽的动态范围等优点^[1], 从原理上分析, 光纤陀螺用于油井测斜几乎可以克服现有测斜仪器的所有缺点, 是十分适用于油井测斜仪的角度传感器。

因此光纤陀螺油井测斜仪具有体积小、寿命长、零点漂移小、精度高、价格低等优点。由于国外的高精度陀螺测斜技术又对我国施行技术封锁, 只提供测量服务, 不提供产品及相关技术, 所以光纤陀螺油井测斜仪的开发成功, 可以较大幅度地提高井眼轨迹的测量精度, 为油田开发提供强有力的技术支持, 减少和避免油田开发过程中的经济损失, 具有良好的经济效益和社会效益。

1 光纤陀螺原理

光纤陀螺基于萨格奈克(Sagnac)效应^[1], 在惯性空间通常萨格奈克效应可以描述如下: 在同一闭合回路中, 沿顺时针方向和逆时针方向传播的两束光, 围绕垂直于回路的轴的转动将引起两束光之间相位差的变化, 该相位差 $\Delta\varphi$ 的大小与光回路旋转速率 Ω 成比例关系。Sagnac 效应数学表达式如下:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

式中: L 为光纤长度; D 为光纤环直径; c 为光在真空中的传播速度; λ 为入射光的波长。

由此可见, 光纤陀螺尺寸越大其性能越好。干涉式光纤陀螺(I-FOG)通过采用多匝光纤线圈来增强相对线性空间的旋转引起的萨格奈克效应。从光纤陀螺的诞生起至今, 国际上绝大多数公司和科研院所研制的光纤陀螺都是这种类型的陀螺, 现已有各种精度的干涉式光纤陀螺面世。I-FOG 的基本光学器件有光源、耦合器、光纤环、探测器和 Y 波导等, I-FOG 闭环方案原理如图 1 所示。

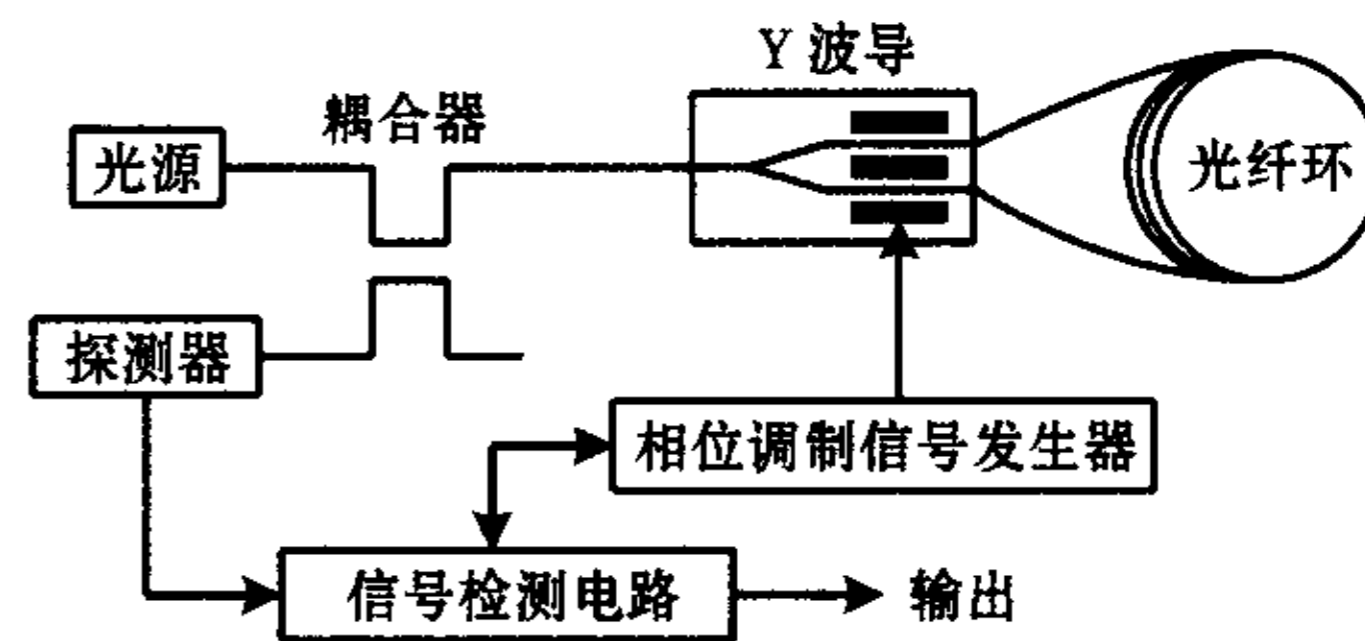


图 1 I-FOG 闭环方案原理图

受到井下空间、温度等诸多因素的限制, 测井用光纤陀螺应具有尺寸小、功耗低, 耐高温的特性。为了适应油井测斜仪的特殊结构要求, 系统中的光纤陀螺采用一体化设计, 将光路和电路集中安装在直径 Φ 为 54mm 的金属圆柱骨架上, 在有限空间下设计光纤陀螺组件光路及电路结构, 使光纤陀螺满足系统精度所需, 系统所用光纤陀螺设计指标如表 1 所示。

表 1 光纤陀螺指标

零漂 /(°)·h ⁻¹	随机游走 /(°)·h ^{-1/2}	标度因数 非线性度 /×10 ⁻⁶	最大输入 角速度 /(°)·s ⁻¹	温度范围 /°C	外形尺寸 直径/mm
0.3	0.03	200	30	-20 ~ +85	≤48

2 光纤陀螺测斜仪测量原理及组成

光纤陀螺测斜仪是基于惯性导航技术的惯性测量系统,是一种不依赖任何外部设备,完全自主的实时而快速的测量仪器。其基本原理是根据牛顿提出的相对惯性空间的力学定律^[2],利用光纤陀螺、加速度计敏感仪器沿油井井眼运动过程中的角速度、加速度,通过实时测量解算计算机进行航位推算计算,得到油井井眼各位置的倾斜角、方位角和相应的深度增量等参数,用以描述油井井眼轨迹。

定义沿仪器 3 个加速度敏感轴 X、Y、Z 建立载体坐标系 $Ox_b Y_b Z_b$,定义当地地理坐标系 $Ox_t Y_t Z_t$ (东、北、天)为参考坐标系,要确定仪器的姿态只需确定载体坐标系(b)和地理坐标系(t)之间的关系。b系相对于t系的角位置可以用一组由欧拉角确定的姿态转移矩阵 C_t^b 来表示。按照方位角、倾斜角 θ 、横滚角 φ 的定义,可以按下列顺序分 3 次转动得到^[2]:

$$Ox_t Y_t Z_t \xrightarrow{-\Psi} Ox_{b1} Y_{b1} Z_{b1} \xrightarrow{\theta} Ox_{b1} Y_{b1} Z_{b1}$$

$$Ox_{b1} Y_{b1} Z_{b1} \xrightarrow{\varphi} Ox_b Y_b Z_b$$

其变换关系为

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = C_t^b \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_t^b = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos \varphi + \sin \Psi \sin \theta \sin \varphi & & & \\ \sin \Psi \cos \varphi & & & \\ \cos \Psi \sin \theta - \sin \Psi \sin \theta \cos \varphi & & & \\ -\sin \Psi \cos \varphi + \cos \Psi \sin \theta \sin \varphi & & -\cos \theta \sin \varphi & \\ \cos \Psi \cos \theta & & \sin \theta & \\ -\sin \Psi \sin \varphi - \cos \Psi \sin \theta \cos \varphi & & \cos \theta \cos \varphi & \end{bmatrix} \quad (3)$$

记

$$C_t^b = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

得出

$$\theta = \sin^{-1}(T_{23}) \quad (5)$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1}(-T_{13}/T_{33}) \quad (6)$$

$$\Psi = \text{tg}^{-1}(T_{21}/T_{22}) \quad (7)$$

通过用四元素法不断更新姿态矩阵,即可得各位置的倾斜角、方位角等参数。

仪器由惯性测量单元(Inertial Measurement Unit - IMU)、实时解算计算机、数据处理及传输单元、井下供电、数据传输电缆和地面设备等几部分组成。其中,IMU 是仪器核心,由正交安置的 3 只光纤陀螺和石英挠性加速度计组成,所用光纤陀螺及石英挠性加速度计的指标如表 1、表 2 示。

表 2 加速度计指标

零位偏值	标度因数非线性度/ $\times 10^{-6}$	输入范围/g	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$
$\leq 5 \times 10^{-4} g$	200	± 5	-20 ~ +85

当加速度和陀螺的测量误差为常值时,应用终值定理,其

稳态误差为

$$\theta = \frac{\nabla \gamma}{g} = \frac{5 \times 10^{-4} g}{g} = 5 \times 10^{-4} \text{rad} = 0.029^{\circ} < 0.2^{\circ}$$

$$\Psi = \frac{\epsilon_y}{\Omega \cos L} = \frac{0.3^{\circ}/h}{15^{\circ}/h \cdot \cos 39^{\circ} 58'} = 1.49^{\circ} < 2^{\circ}$$

式中 g 为重力加速度约为 9.8073m/s^2 。

由计算结果可以看出所用光纤陀螺及石英挠性加速度计的指标满足石油测井精度要求。

3 光纤陀螺测斜仪系统实现

光纤陀螺的结构尺寸确定了光纤陀螺捷联惯性组合的尺寸,根据仪器的特殊结构,设计了 IMU 的新型结构;实时解算计算机和 IMU 放在金属保温瓶内,如图 2 所示。

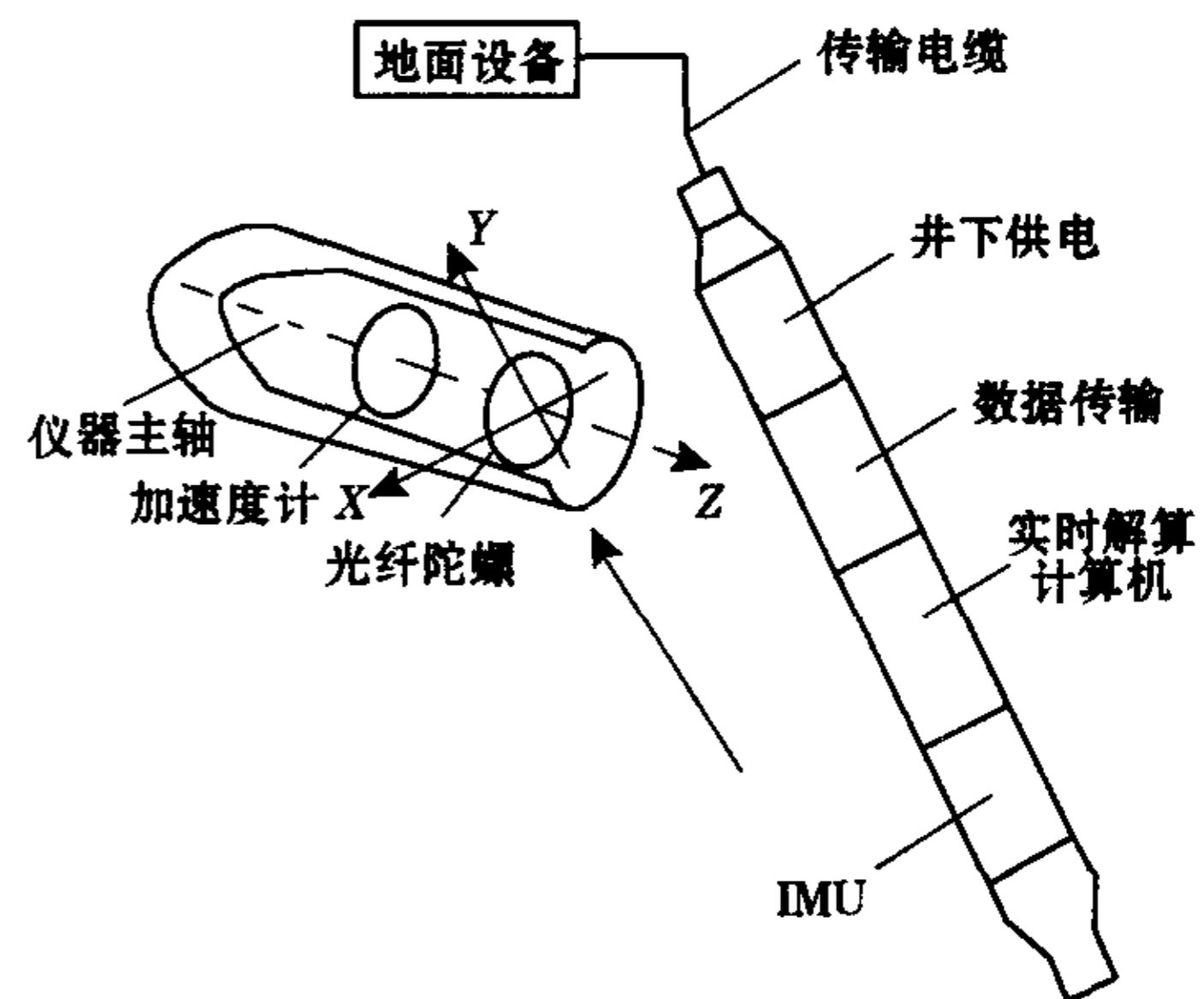


图 2 仪器结构图

实时解算计算机采用浮点 DSP TMS320VC33 + FPGA 方案,完成 IMU 测试数据读取、数据预处理和实时计算,包括惯性传感器误差补偿、初始对准、在线校正、滤波等。

系统运行的软件采用 C 语言和汇编语言混合编程,它可以实现仿真运行和实际系统运行两大基本功能,主程序思想流程:系统上电后 reset, dsp 初始化后,等待定时器中断 CPU,进入中断服务程序,写 XF0, XF1,从 FPGA 中读数据,调用实时解算算法子程序,输出解算数据,等待下次定时器中断。主程序的流程图如图 3 所示。

4 仪器长期测量精度的保证

4.1 温度、振动和冲击问题

与光纤陀螺工作的其他环境比较,油井井下环境主要在温度、振动和冲击方面有的大差异。最主要的问题是高温问题,由于地层中的温度梯度约为 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,则 3 000 ~ 5 000m 的油井井下温度约为 $90 \sim 150^{\circ}\text{C}$,对于超深井温度则会更高,为保证系统的正常工作,在选用耐高温光学器件的同时,采用系统外加装高效保温瓶和温度检测单元,从而确保系统工作的环境温度不超过 80°C 。此外为避免系统内部产生高温损坏,系统尽量采用低功耗元器件,同时压缩测量时间。

油井中一般的振动不超过 2g,冲击一般为 10g,都远低于航空工业领域的高振动、大冲击环境,故在使用中不会存在很大的问题。

4.2 仪器小型化技术

由于油井井径及外接保温瓶尺寸所限,仪器的外型尺寸受到严格的限制。光纤陀螺捷联惯性组合的尺寸主要由光纤陀

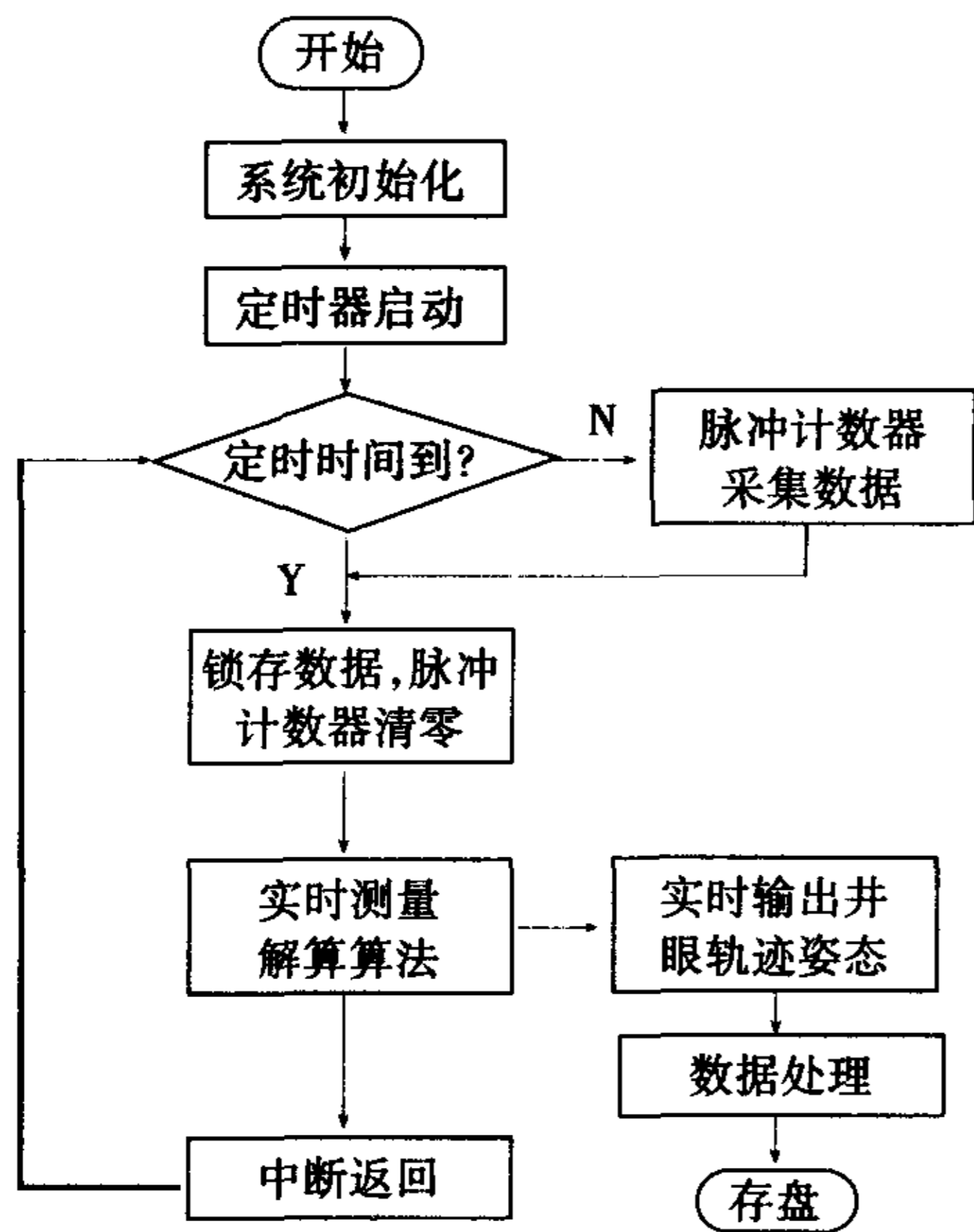


图 3 主程序流程图

螺的结构尺寸确定,而光纤陀螺的结构尺寸往往决定了光纤陀螺的精度。由光纤陀螺原理分析可知,I-FOG的精度和光纤环的长度成正比,为了保证光纤陀螺的精度,在有限的空间内可以通过改变光纤环的形状(例如绕椭圆环)等途径来增加光纤长度,保证仪器所需光纤陀螺的精度,实现仪器小型化。

4.3 减小仪器测量误差的措施

一般测斜仪的工作时间约为 2 h 左右,由惯性测量的原理可知,其测量误差与时间有关,为了限制这一误差的增长,确保系统的测量精度必须进行控制测量。系统采用的误差控制手段是零速修正(ZUPT)技术^[3],从仿真结果可以看出ZUPT技术

能有效地限制系统测量误差的增长。此外,闭合数据的测后最佳平滑也是一种有效途径,当测量在具有已知位置、已知方位、已知垂线偏差或已知重力异常的点上闭合时,由系统软件执行最佳平滑,去改进由系统得出的位置和重力的实时估值。当测量在上述点上闭合时,可测得测量过程中积累的误差,从而可利用这些数据来修正中间各测点上的测量值。

总之,通过上述措施将有利于系统长期工作的精度。

5 结论

光纤陀螺测斜仪突出的优点是其工作特性不受井下磁场或附近磁场的干扰,在任何情况的井中都可以使用。此外,该仪器不需任何外部辅助设备,可自主寻北、操作简单、测量速度快、测量精度高、可靠性好。根据理论分析和初步实验实验结果可知,采用上述方案的光纤陀螺油井测斜仪能实现全方位、无角度限制的连续测量,基本满足石油领域油井常规测斜要求。光纤陀螺测斜仪也将成为石油油井测斜中最经济、最可靠、也是最重要的测试手段。

参考文献:

[1] HERVE C L. The Fiber-Optic Gyroscope. 张桂才译. 北京:国防工业出版社,2002.
 [2] 以光衡. 惯性导航原理. 北京:航空工业出版社,1969.
 [3] NOURELDIN A D, IRYINE-HALLIDAY D, MINTCHEV M P. Measurement-while-drilling surveying of highly-inclined and horizontal well sections utilizing single-axis gyro sensing system. Submitted to the IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001(7).

作者简介:张春熹(1965—),教授,博士生导师,主要研究方向为光纤陀螺及其导航系统、光电检测与信号处理、光波导与集成光学技术等。

(上接第 8 页)

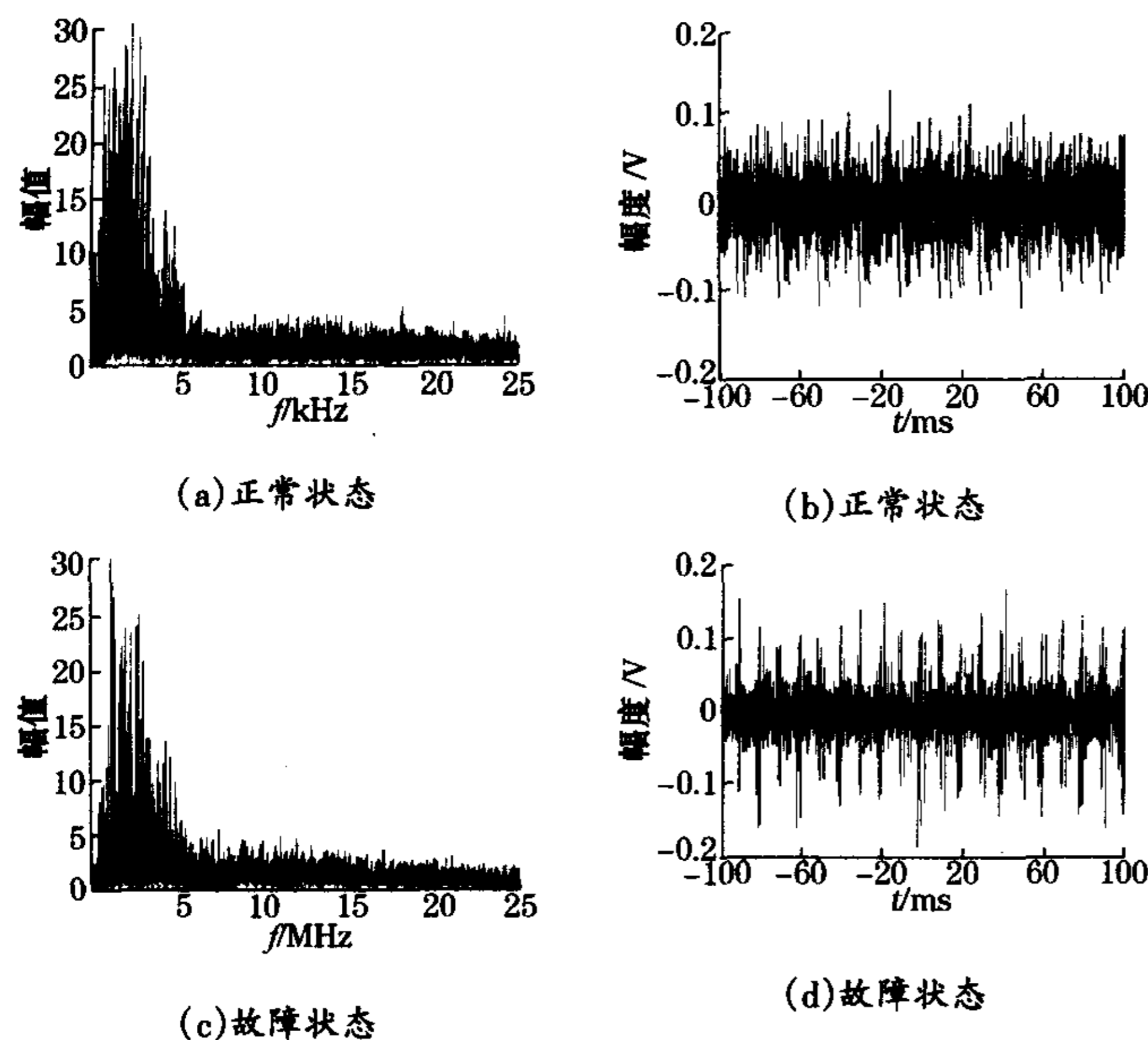


图 7 4M20 压缩机六段排气阀声发射信号

4M20 氮氢气压缩机气阀完好状态监测。结果表明:基于声发射技术研制的 PVDF 声发射传感器具有信号输出电压幅值高,频率响应范围宽、灵敏度高、使用方便等特点,能够用于工业生产设备的状态监测。

参考文献:

[1] 袁振明,马羽宽,何泽云. 声发射技术及其应用. 北京:机械出版社,1985:17-85.
 [2] 范雷雷,施惠丰. 声发射技术在设备状态检修中的应用. 电力设备,2004,5(11):41-43.
 [3] 王俊涛,宋永伦. 声发射缺陷检测技术的应用与发展. 机床与液压,2004(4):4-125.
 [4] 耿荣生,沈功田,刘时风. 声发射信号处理和分析技术. 无损检测,2002,24(1):23-28.
 [5] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册. 北京:机械工业出版社,2002:244-274.
 [6] XIANG D, HSU N H, BLESSING G V. The design, construction and application of a large aperture lens-less line-focus PVDF transducer. Ultrasonics, 1996, 34:641-647.
 [7] Analog Devices, Inc. Ultralow Noise, High Speed, BiFET Op Amp AD745. <http://www.analog.com>, 2002.
 [8] 村松博芝,新获正隆,仲村隆. 压电传感器,压电传感器的制造方法和脉搏检测器. 日本专利,02150498.9, 2003-05.
 [9] 张卫民,王信义,王克勇. 声发射技术在压缩机故障检测中的应用. 仪表技术与传感器,1999(6):31-33.
 [10] Measurement Specialties, Inc. Piezo Film Sensors Technical Manual. <http://www.msiusa.com>, 2004.

作者简介:王庆锋(1972—),工程师,硕士研究生,主要研究方向为计算机测控技术。