

# 基于压电陀螺的测斜仪硬件研究与设计

程正富,杨守良

(重庆文理学院 物理与信息工程系,重庆 402160)

**摘要:**提出了基于压电陀螺的矿井测斜系统,以解决磁强计或传统测斜惯性仪表在小井径或套管井测量领域的受限性。介绍了陀螺测斜仪的系统集成方案,并采用 TMS320F281X DSP 实现了数据采集、数字滤波和实时解算。所设计的试验样机倾斜方向角测量范围  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,误差在  $\pm 0.2^\circ$  以内,倾斜角测量范围  $0^\circ \sim 15^\circ$ ,误差在  $\pm 0.04^\circ$  以内,达到探矿用井的测量要求,并具有体积小,成本低,性能稳定的特点,具有完全实用的工程应用价值。

**关键词:**钻井测斜仪;压电陀螺;惯性测量单元;DSP

中图分类号:P634.7

文献标识码:A

## Hardware Research and Design of Inclinometer Based on Piezoelectric Gyro

CHENG Zheng-fu, YANG Shou-liang

(Dept. of Physics and Information Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

**Abstract:** A new well measuring inclination system based on Piezoelectric Gyro was presented to eliminate the limit of magnetometer or conventional measuring inclination inertial instruments applied in slim hole and cased hole in well logging. The system integration scheme of Gyro-inclinometer was introduced and data acquisition, digital filter and real-time solution were realized by using TMS320F281X DSP. The azimuth angle measurement range of designed test prototype was  $0^\circ \sim 360^\circ$ , error  $\leq \pm 0.2^\circ$ . The measuring range of the tilt angle was  $0^\circ \sim 15^\circ$ , error  $\leq \pm 0.04^\circ$ , which could meet the qualification of the prospecting. The test prototype also had the advantage of small volume, low cost, stable performance and with whole complete engineering value for application.

**Key words:** drilling inclinometer; piezoelectric gyro; inertial measurement unit; DSP

矿井测斜是矿井钻孔测量的新技术,是综合超前探测、构造定位的重要手段。由于其在采前勘探中的独特作用,国内外近期进行了多项相应技术研究。本文以压电振动陀螺和三轴 MEMS 加速度计为核心,采用航空航天高科技传感和数字技术,实现了高精度测量<sup>[1]</sup>。

目前采用的探矿测斜技术主要以磁传感器或动调惯性传感器为主,它们都有各自的缺点,限制了在矿井测斜中的应用,主要有

(1) 采用磁传感器进行井下方位测量。磁传感器易受到包括钻井矿床的存在等各种外部因素的影响,它们随机分布难以预测,且有地磁影响。此外,其动态行为也将受到来自钻井过程中的磁干扰而不得不使用非磁的钻井环来保护磁传感器<sup>[2]</sup>。

(2) 采用动调陀螺和光纤陀螺的惯性方位测量。动调陀螺具有精度较高,体积较小的优点。在对完井的二次开发和测试中已有应用<sup>[3]</sup>,但其抗冲击振动性能差,基本不能用于矿井测斜。研究人员一直在寻求更适合陀螺测井方案;Noureldin 等人发

现光纤陀螺能够完成在这些外部因素下的钻井应用<sup>[3]</sup>,并且提出了一个完整的基于光纤陀螺导航的测量应用方案。随后,Ledroz 等人又对基于这一方案的陀螺性能进行了讨论,并在实验室进行了钻井模拟测试<sup>[4]</sup>。但光纤陀螺的重要本体缺陷是造价贵,抗高温能力较差,且体积随精度增加而增大,很难满足在小井径中的应用<sup>[4]</sup>。其性能又易受噪声、不稳定性、信号漂移及振动和热变化等环境因素的影响。因此虽然方案可行,但距离实用,特别是小井径或套管井条件下的矿井测斜,仍存在较大距离。

基于惯性陀螺的方位测井过程是一种在恶劣外部下的工程应用,陀螺较地面和常温用陀螺,需具有抗高冲击振动,较小体积和抗高温及剧烈温度变化影响的能力。应用在钻井测量中的陀螺不仅结构精密,工艺要求高,测试复杂,且需对陀螺输出信号建立矩阵方程进行专业性很强的复杂解算,同时要对其温度漂移、冲击振动产生的漂移进行补偿,对其原理误差进行多级修正等。因此,选用适合的陀螺和合理的硬件结构是完成高质量测井工作的保障<sup>[2]</sup>。

基于上述原因,我们提出了一个基于固态振动陀螺的完整矿井测斜方案。该方案采用三轴 MEMS 加速度计和双轴压电陀螺组成惯性测量单元(IMU)。根据该型陀螺成本低、体积小(传感单元直径仅 $\varnothing 15\text{ mm}$ )、抗冲击振动、结构简单和传感与信号处理单元便于分拆等特点,进行了一体化集成设计,使其完全适合各类井径测量环境。结合该型陀螺输出信号的特点,提出了相应的测量方法,针对系统应用,设计了数据的采集和处理硬件电路,并实现了系统数据的实时处理。

### 1 系统结构设计

#### 1.1 惯性测量传感器

我们选用的战术级压电振动陀螺,其传感单元与驱动和读出单元可以简单分拆安装在测井舱的狭窄空间内,相关的性能参数:随机游走(ARW) $0.07\text{ }(^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$ ,偏置漂移 $18\text{ }(^{\circ})/\text{h}$ ,刻度因子 $600\text{ mV}/(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ ,输出噪声 $21\text{ mV}(1\sigma)$ ,测量带宽 $0\sim 6\text{ Hz}$ 。传感单元尺寸为 $40\text{ mm}\times 7\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,驱动与读出电路 $20\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ 。惯性测量舱形状为圆柱形,能容纳仪表的有效内直径仅为 $35\text{ mm}$ ,文献[3-4]所述光纤陀螺直径超过 $\varnothing 95\text{ mm}$ ,无法满足要求,我们采用的陀螺通过分拆组装,如果采用与 $z$ 轴垂直放置,传感单元长度仍大于有效内直径,因此我们提出了传感单元沿 $z$ 轴成 $45^{\circ}$ 角倾斜放置的方式,从而在不明显减小测量精度条件满足了小井径矿井测斜要求,如图1所示。



图1 测量与信号处理舱结构

加速度计参数:SCA1000-D01 倾角传感器体积 $9\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ ,质量小于 $1.2\text{ g}$ ,分辨率 $0.0008^{\circ}$ 能同时进行双轴测量。根据所提方案,IMU的位置在距钻头 $7\sim 8\text{ m}$ 的位置的惯性测量舱,包含一个容纳IMU的空间和一个为减少剧烈冲击振动而设计的吸收舱,其他有些为工程应用所设计的机构,如确定正确锁定装置,材料的类型以及为吸收冲击能的相关结构。

#### 1.2 惯性导航系统(INS)

INS 决定运动物体在本地(参考)坐标系中的位置、速度和方位。物体的加速度由三轴加速度来决定。为了达到导航的目的,必须在已定义的参考坐标系中确定位置。为此,又必须获得参考坐标系下加速度计的连续方位信息<sup>[3]</sup>。我们采用固态振动压

电陀螺完成了物体的角速度测量,从而通过积分运算得到了方向角。陀螺和加速度计分别组合在相互垂直的方向组成了IMU并构成了INS的硬件部分,导航算法相应成为了INS的软件部分。采集与运算部分的电路包括:24位并行接口模数转换器AD7656(最高采样频率 $250\text{ kHz}$ ),32位高精度数字信号处理器TMS320F2812,及其相关的电源管理和数据通讯模块。

TMS320F2812 芯片是新一代数字信号处理器,既具有数字信号处理,又具有强大的事件管理能力和嵌入式控制功能,片内含有丰富外设,特别适于有大批量数据处理的测控场合,其主要构成和性能包括具有32位中央处理器,片内 $128\text{ kbit}$  Flash 存储器和 $18\text{ kbit}$  SRAM,高精度的双路12位AD转换模块,两个事件管理器(EVA、EVB),SPI、SCI 串行外围设备模块,3个外部中断和外部中断扩展(PIE)模块,56个独立的可编程多用途输入输出引脚(GPIO)等<sup>[6]</sup>。

本系统的数据采集任务要求该采集板能对多路传感器信号进行采样,并进行数字滤波、降噪,将传感器所得位置信息通过串行接口输出,如图2所示。

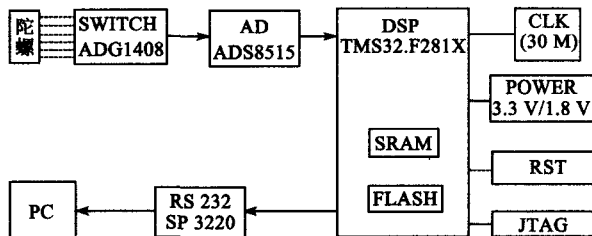


图2 数据流向图

整个数据采集和信号处理电路由TMS320F281X DSP、ADS8515 模数转换器、模拟开关ADG1408、SP3220EEA 串行电平转换芯片等组成。在这次设计中电路原理图用ORCAD Capture 10.5 绘制,印制电路板图是利用PADS2007 设计,DSP 的软件在CCS 2.2 集成开发环境下利用C语言及汇编语言进行混合编程。

#### 数据采集与信号处理过程:

① 首先实现陀螺数据的采集。陀螺输出的是角速度模拟信号形式的数据,并伴有随机误差,需要对陀螺的随机误差进行处理,因此需将该数据滤波后经过AD转换成为数字信号,然后再输出给单片机,得到陀螺的输出信号 $V(T)$ ,A/D转换功能由ADS8515来完成。

② 然后是信号处理。陀螺输出的信号存在零位偏移,对于陀螺的零位偏移,可通过数据处理进行分析;系统中使用了温度传感器ADT7301来实现

温度信号的采集,得到温度  $T$  后得到陀螺在该温度环境下的零位漂移的数据  $f(T)$ ,再将陀螺的输出信号  $V(T)$  减去偏移量  $f(T)$ ,最后除以陀螺的刻度因子  $K$ ,就能得到陀螺的角速度  $\omega = [V(T) - f(T)]/K$ ,电路板上带有晶振,可提供时间,因此最后将角速度对时间积分,就能得到陀螺的姿态角,进一步可通过软件算法计算出偏北角。所有的计算都在 TMS320F2812 中完成。

③ 最后将数据发送到计算机,单片机与计算机的通信,需将陀螺的姿态角数据转换为十六进制字符的形式经 RS232 串口发送到上位机。数值从十进制转换为十六进制的过程以及数值与字符间转换的过程都是在 TMS320F2812 上完成的,最后由单片机输出字符串。通过电平转换器 SP3220,再送入 RS232 串口,进入到计算机。

1.3 通信接口

传统的软件开发是采用上述试验装置完成实际的导航运动。首先,整个软件包(包括 FLP、对齐和导航)用 Matlab V. 6.5 (The Mathworks, Natick, MA) 软件开发。然后运用开发的软件对试验装置进行初始化测试,只有可视模块转换为 Visual C++ (Microsoft, Seattle, WA),其他的如 FLP、对齐和导航模块都转换为 ANSI C 以便下载在钻井微处理器上。

我们开发的实时图形用户界面(见图 3)便于观察导航参数。对齐时间被参数化,考虑实际使用时间大于 30 min,以满足随钻测量过程的需要。初始角度正确计算后,在实验室条件下的导航过程就能连续进行。我们开发的软件也能实时存储原始数据和导航参数,如方位和位置等。存储的数据可被处理和分析以确定所提及方法的准确性。

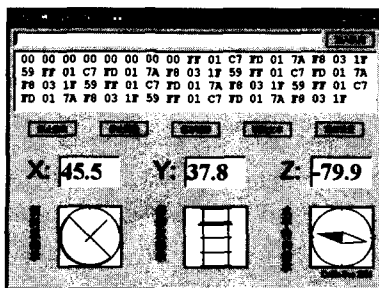


图 3 姿态测量通信接口界面

2 试验验证

2.1 实验室测试结果

测试装置固定在双轴数显转台上(测角误差为  $\pm 4''$ ),陀螺组合底座的基准面与安装在转台上的一个真北基准平面镜的法线垂直。采用全圆测量法对误差进行标定。进行了 10 次测试,每次测试时间不

超过 125 s,测试结果如表 1 所示。由表可计算出的方向角总精度为  $\pm 0.2^\circ$ 。

表 1 实验室精度测试试验

真值/ $^\circ$	0	50	90	95	150
测试值/ $^\circ$	359.82	49.79	89.69	94.72	149.87
误差	-0.18	-0.21	-0.31	-0.28	+0.13
真值/ $^\circ$	180	250	270	310	360
测试值/ $^\circ$	180.33	250.28	270.16	310.30	359.73
误差	+0.33	+0.28	+0.16	+0.30	-0.27

2.2 现场测试结果

以上试验数据均在常温下测定,实际测试过程中由于地温梯度为每 100 m 变化  $3^\circ\text{C}$ ,对井下测试仪器的温度特性提出了很高的要求,故我们又进行了现场对比试验,包括试验样机和国外 SRG 进口测斜仪,测试结果如表 2 所示。对比数据说明试制测斜仪的测量数据与 SRG 设备的基本吻合,精度达到  $\pm 0.5^\circ$ 。

表 2 现场精度对比测试试验

序号	深度 /m	井斜角/ $^\circ$		方向角/ $^\circ$	
		试制测斜仪	SRG 测斜仪	试制测斜仪	SRG 测斜仪
1	50	0.42	0.38	224.63	226.12
2	100	0.39	0.36	224.92	226.21
3	150	0.40	0.28	224.87	225.93
4	200	0.45	0.36	224.24	226.18
5	250	0.39	0.42	224.70	226.32
6	300	0.36	0.45	224.54	226.41
7	350	0.41	0.28	224.54	226.23
8	400	0.65	0.56	224.89	225.98
9	450	0.71	0.58	224.63	225.82
10	500	0.72	0.66	225.02	225.91
11	550	0.69	0.78	225.07	226.21
12	600	0.67	0.86	224.78	226.08
13	650	0.71	0.98	224.93	226.12
14	700	0.83	0.96	225.02	225.81
15	750	0.88	1.28	224.78	226.23
16	800	0.82	1.36	224.62	226.38
17	850	0.97	1.28	224.63	226.22
18	900	1.05	1.06	224.72	225.91
19	950	1.01	1.28	224.91	225.89
20	1 000	1.38	1.36	224.72	225.38
21	1 050	1.46	1.68	224.69	226.02
22	1 100	1.49	1.58	225.02	226.17
23	1 150	1.44	1.88	225.03	226.39
24	1 200	1.52	1.96	224.92	226.38
25	1 250	1.73	2.16	224.68	225.92
26	1 300	1.79	2.16	224.79	226.21
27	1 350	1.77	2.06	225.93	225.93
28	1 400	1.88	2.36	224.78	226.08
29	1 450	1.93	2.46	224.89	226.12

序号	深度 /m	井斜角/(°)		方向角/(°)	
		试制 测斜仪	SRG 测斜仪	试制 测斜仪	SRG 测斜仪
30	1 500	1.75	2.56	224.78	226.11
31	1 550	1.94	2.78	224.83	226.03
32	1 600	2.13	2.81	224.79	226.18
33	1 650	2.35	3.06	224.63	226.32
34	1 700	2.64	3.12	224.78	226.21
35	1 750	2.83	3.16	224.13	225.83
36	1 800	2.95	3.06	224.82	225.98
37	1 850	3.14	3.46	224.62	226.02
38	1 900	3.23	3.82	224.72	226.81
39	1 950	3.15	4.01	224.63	226.80
40	2 000	3.41	3.89	225.02	226.08
41	2 050	3.53	3.98	224.90	226.19

### 3 结束语

采用基于固态振动压电陀螺的探测传感器进行钻井导航不需要无磁环,且体积完全满足实际测井需要,特别是小井径和套管井,这对测量将非常有利。

通过采用 DSP 信号处理芯片加快了信号处理的速度,同时又降低了系统的功耗,减小了系统的体积,增强了系统的抗干扰的能力。高速的中央处理模块需要无延迟的外围电路配合才能发挥它的速度优势。本硬件系统的高集成度不仅满足了 DSP 对延迟的要求并且进一步简化了系统的电路,缩小了电路的体积。同时由于它的反复可编程特性,提高了系统的灵活性和可升级性。高效的信号处理对电路的数据吞吐量提出了更高的要求,所以采用了高速 A/D 进行外部数据的采集,为 DSP 处理提供稳定的信号源。

(上接第 666 页)

角度随机游走对惯导系统初始对准收敛速度有较大影响。提出一种卡尔曼滤波模型进行初始对准,并进行了计算机仿真,由图 1、2 均可知,方位误差在对准 5 min 时就已基本趋于稳定,对准已收敛;由此说明对准卡尔曼滤波器有效消除了 FOG-ARW 对初始对准的影响。

#### 参考文献:

- [1] HERVE C L 著. 张桂才, 王巍译. 光纤陀螺仪[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 4-23.
- [2] STOCKWELL D W. Angle random walk[N]. Cross-

#### 参考文献:

- [1] NOURELDIN A. New measurement-while-drilling surveying technique utilizing a set of fiber-optic rotation sensors[D]. Calgary AB, Canada; Ph D dissertation Dept Elect Eng Univ Calgary, 2002.
- [2] NOURELDIN A, TABLER H, IRVINE-HALLIDAY D, et al. Quantitative study of the applicability of fiber-optic gyroscopes for MWD borehole surveying[J]. SPE J, 2000, 5(4): 363-370.
- [3] KORMANIK N J. LN-200 inertial measurement unit [M]. Woodland Hills CA; Litton Guidance and Control Systems, Specification, 2000: 311-875.
- [4] LEDROZ A G, MINTCHEV M P. Utilization of a tactical grade FOG based inertial measurement unit in real-time downhole surveying [C]. Denver, CO; Proc SPE Annu Technical Conf Exhibition, 2003, 5-8: 3 521-3 526.
- [5] WESTON J L, TITTERTON D H. Modern inertial navigation technology and its applications[J]. Electron Commun Eng J, 2000, 12(2): 49-64.
- [6] 陈佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [7] SAVAGE P G. Analytical modeling of sensor quantization in strapdown inertial navigation error equations [J]. J Guid Control Dynam, 2002, 25(5): 833-842.
- [8] KHATCHIKIAN A. A novel method of estimating static bottomhole temperature using array induction logs[C]. Buenos Aires Argentina; Proc SPE Latin American Caribbean Petroleum Engineering Con, 2001, 25-28: 1-8.
- [9] 裴昕国, 李汉舟, 马小霞. 全数字 IMU 方案研究[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(6): 69-74.
- [10] bow Technology, Inc, 2005.
- [3] 陈 哲. 捷联惯导系统原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1986: 128-142.
- [4] PITTMAN D N. Determining inertial errors from navigation-in-place data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1992, 0-7803-0468-3/92.
- [5] ROGERS R M. Applied mathematics in integrated navigation systems[M]. Second Edition 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003: 73-90.
- [6] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 33-56.