

# 基于国产可编程逻辑门阵列的近钻头 随钻测量系统设计

潘勇, 李国光, 柳敬云

(中科亿海微电子科技(苏州)有限公司, 北京 100160)

**摘要:**在地质勘探、煤矿开采、石油钻井以及地热资源开发中,近钻头随钻测量在实时探测工具姿态等工程参数和地层的地质参数、实施导向钻井中发挥着重要的作用。本文介绍了随钻测量系统的工作原理,重点描述了姿态角的物理模型以及解算方法;同时,基于国产化耐高温的可编程逻辑门阵列(FPGA)芯片、三轴加速度传感器、三轴磁阻传感器,进行了近钻头随钻测量系统的设计。测试实验结果表明,系统性能指标可满足实际工程应用。

**关键词:**近钻头随钻测量;姿态角;耐高温;可编程逻辑门阵列;三轴加速度传感器;三轴磁阻传感器

**中图分类号:**P634.7;TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0410-04

## Near-drill bit measurement system design while drilling based on domestic FPGA

PAN Yong, LI Guoguang, LIU Jingyun

(Zhongke eHiway Microelectronics Technology (Suzhou) Co., Ltd., Beijing 100160, China)

**Abstract:** In geological exploration, coal mining, oil exploration and geothermal resource development, near-bit MWD plays an important role in real-time detection of engineering parameters such as tool attitude and formation geological parameters, and implementation of guided drilling. This paper introduces the working principle of MWD system focusing on the physical model of attitude angle and its solution, at the same time, based on the domestic high temperature resistant programmable logic gate array (FPGA) chip, three-axis acceleration sensor and three-axis reluctance sensor, the near bit MWD system is designed. The test results show that the performance index of the system can meet the practical engineering application.

**Key words:** near-drill MWD; attitude angle; high temperature resistance; programmable logic gate array; triaxial accelerometer; triaxial magneto resistive sensor

### 0 引言

矿产资源是国家经济发展的重要基础,其对于国家的发展和国家安全具有重要意义,可确保国家经济的安全稳定。新一轮找矿突破战略行动的主要目的是为了寻找和发现新的矿产资源,需要运用先进的科学技术手段,包括地质勘探技术、遥感技术、地球物理技术等。矿产开采过程对环境造成的影响较大,通过找矿突破行动,可以更好地规划和管理

矿产资源开发,实现经济发展与生态环境保护的协调。

随钻测量(Measuring While Drilling, MWD)是在钻井过程中,进行近钻头井眼轨迹参数(井斜、方位、工具面角)和地质参数(电阻率、放射性、声波及核磁)的实时测量及控制,并具有可视化功能,可以直接了解到井内实际情况,从而为钻井作业提供钻进导向数据。面对我国严峻的能源需求形势,必须

收稿日期:2023-06-30; 修回日期:2023-08-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.065

第一作者:潘勇,男,汉族,1974年生,讲师,检测技术专业,长期从事FPGA技术及其应用开发工作,北京市丰台区南四环西路128号,panyong@ehiway.cn。

引用格式:潘勇,李国光,柳敬云.基于国产可编程逻辑门阵列的近钻头随钻测量系统设计[J].钻探工程,2023,50(S1):410-413.

PAN Yong, LI Guoguang, LIU Jingyun. Near-drill bit measurement system design while drilling based on domestic FPGA[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):410-413.

加大油气资源勘探开发的步伐,提高钻井效率和开采效果,采用多分支井、大斜度井和大位移井等新钻井技术成为必然,而随钻测量技术是实现这些高新钻井技术必备的有利工具。

## 1 国内外MWD技术现状

### 1.1 国外随钻测量技术现状

国外随钻测量技术相对成熟,在全球范围内广泛应用,基本满足钻井需求。例如,Schlumberger公司推出的随钻测量工具Tele Scope,可以测量旋转状态下方位和井斜、磁工具面、重力工具面,还可以选择性测量自然伽马、轴向、径向、轴向振动和井下钻头压力、扭矩、温度等。由于该测量工具采用了ORION技术,其信号稳定性和传输效率较高,可达18 bit/s,在不限制机械钻速情况下最高可达120 bit/s<sup>[1]</sup>。

近钻头测量工具表现优秀的有Schlumberger公司的GST<sup>[2]</sup>,其近钻头电阻率、方位电阻率、方位伽马、井斜和方位的测点距离钻头分别为0.66、1.34、2.0、2.9 m;PathFinder公司设计的iPZIG近钻头图形伽马和测斜工具;Halliburton公司的Geo-Pilot<sup>[3-8]</sup>工具则可以测量距井底1.35 m的井斜和距井底2.25 m的伽马;2013年Baker Hughes公司研发的FASTrak随钻技术可以不限次数地进行地层压力测量和地层流体取样<sup>[9]</sup>。

### 1.2 国内随钻测量技术现状

国内MWD技术研究起步较晚,2000年前,主要依赖引进国外的设备,消化吸收后创建作业队伍和研究力量,在仪器数据传输、耐高温(一般对高温的定义为地层静温 $>150\text{ }^{\circ}\text{C}/300\text{ }^{\circ}\text{F}$ )、耐高压(一般

对高压的定义为 $>70\text{ MPa}$ )、抗振性、近钻头等方面的研发,取得了一些成就,缩短了部分领域与国际间的差距。

中石油自主研制的无线电磁波随钻测量系统DREMWD<sup>[10-13]</sup>,利用空气作为循环流体来定向钻井,适合应用于低压、低渗油田。该系统最高数据传输速率达11 bit/s,数据刷新闻隔15 s,最高工作温度 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高工作压力100 MPa。

北京蓝海科技公司研发的一种结构小巧泥浆脉冲随钻测量系统具有较高的抗振性和较低的成本,适合小井眼钻井。大庆油田钻探工程公司研制的DQ-LWD仪器,能在 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内稳定工作并适应297.9 Hz工作环境<sup>[14]</sup>。

目前国内近钻头随钻测量产品及方案受可用器件、算法规模、硬件成本、整体功耗、预期功能及性能指标等约束,数字信号处理部分基本采用进口的MCU、DSP、MCU+CPLD等以嵌入式处理器为主的技术方案,可以充分发挥嵌入式系统开发的灵活高效,但也受到嵌入式处理器的算力限制,而无法提供更高的测量精度和分辨率<sup>[15-19]</sup>。

## 2 随钻测量系统实现过程

本系统使用国产可编程逻辑门阵列(FPGA)芯片作为随钻测量核心处理单元,避免了供应链方面风险,同时大大提高目前国产系统的计算精度和处理速度,实现地质信息采集、复杂信号实时处理和外设器件控制等功能。

### 2.1 工作原理

随钻测量系统的工作框图如图1所示。

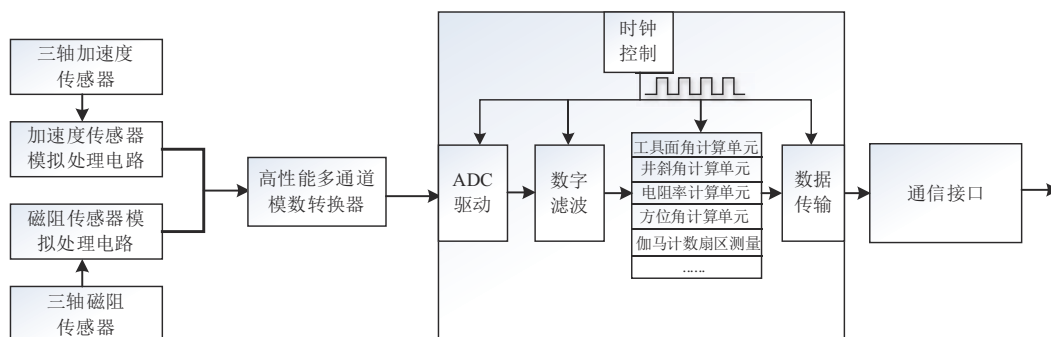


图1 随钻测量系统工作原理

随钻测量系统利用各种姿态传感器(加速度传感器、磁阻传感器等)实时感知并收集井下钻杆的姿

态变化,将传感器输出的数据进行信号预处理(模拟放大、滤波等)来满足模拟数字转换器(Analog digi-

tal converter, ADC)的输入要求,再由数字信号处理部分根据特定的算法解算角度,最终输出井下钻杆的位姿,来反映钻杆在井下所处的地质环境<sup>[20-24]</sup>。

井下钻杆的姿态主要通过重力工具面角、方位角和井斜角来反映。钻井工作人员通过井下测井仪器MWD上传的井下钻杆姿态信息,实时调整钻井的井眼轨迹,使钻杆朝油藏丰富的方向钻进<sup>[25-26]</sup>。

## 2.2 主要技术

FPGA技术天然具备的算法并行处理能力可以有效地解决嵌入式处理器的技术局限,国产耐高温FPGA可以在高达175℃环境温度中连续稳定可靠工作,采用国产高温FPGA实现的近钻头随钻测量方案可以从根本上解决石油钻井行业所面临的技术瓶颈。

## 3 系统设计

本系统主要实现了井下钻井近钻头的井斜角、方位角、重力工具面角等姿态信息的实时采集处理输出等功能,并利用外部伽马数据进行扇区划分姿态。本系统基于本公司自主设计的EQ6GL9型特种FPGA芯片为主要的信号处理单元,利用高灵敏度三轴加速度传感器、三轴地磁传感器、多通道高精度ADC以及各种高温电源芯片等器件构成井下钻杆姿态信息测量系统,实现在钻井过程中的地磁场、加速度、振动强度等信息的测量<sup>[27-31]</sup>。

EQ6GL9型特种FPGA芯片具有小尺寸、超低静态功耗、耐高温、高算力等显著优势,在本系统中主要完成重力工具面角、井斜角、方位角、磁性工具面角、高边工具面角的解算;并且还实现了伽马计数、扇区划分以及对外的数据传输的通信协议等功能。系统框图如图2所示。

EQ6GL9型特种FPGA可以在125~175℃环境温度中连续稳定可靠工作,结合FPGA灵活高效

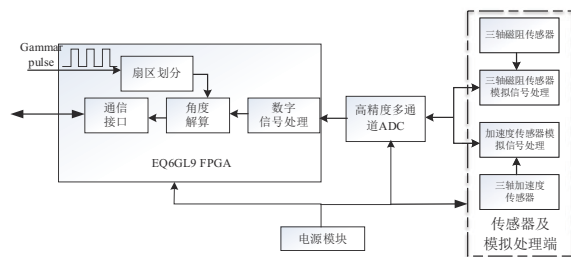


图2 系统硬件总体架构

可扩展性强、开发周期短、高效率的算力特性,可以提供更高的测量精度和分辨率。

如图3所示,高温随钻测量板是由三轴加速度传感器、三轴磁阻传感器以及磁阻传感器的置位复位脉冲信号产生电路、传感器的模拟处理电路、高精度多通道模数转换电路、FPGA、电源电路和通信接口电路等部分组成,从真正意义上实现了井下钻杆高精度实时采集运算及输出的功能。

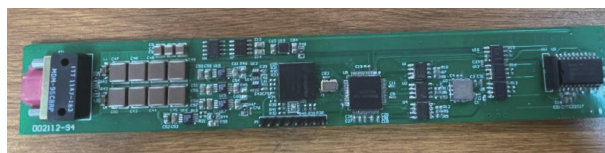


图3 MWD测量板实物

## 4 现场测试情况

基于FPGA实现的近钻头随钻测量模组在高温125℃环境下进行了转台设备实验,目的是测试在125℃环境温度中不同姿态工况下本模组的测量误差情况。由于实验环境并非是无磁环境,所以只对与加速度传感器相关的井斜角和工具面角进行分析和总结。

表1为分别固定井斜角0°、10°、30°、50°、70°时,工具面角以30°/s旋转测得井斜角最大、最小、平均、平均值与预设值的差值、偏差百分比。

其中,井斜角\_min——井斜角最小值;井斜角

表1 改变工具面角时的井斜变化

设定值	参 数					
	井斜角_min/(°)	井斜角_max/(°)	井斜角_avr/(°)	平均值与预设值的差值/(°)	井斜角_GTF0/(°)	偏差百分比/%
0	151.146	155.875	153.484			
10	162.4531	166	168.173	11.827		7.0326
30	149.1875	168.875	148.6094	1.3906	146.0269	0.9357
50	123.9063	134.0781	126.1237	14.8763	111.375	3.0734
70	101.2625	104.4219	105.1721	15.8279	106.8438	4.5904

\_max——井斜角最大值;井斜角\_avr——井斜角平均值;预设值:180°——设定值。

从表1可以看出,在转动工具面角过程中,井斜角波动范围比较大,在30°时,误差为1.3906°,从平均值来看,误差大概不超过16°。

## 5 结语

本系统使用了自主可控的国产FPGA作为主处理单元,极大提高了系统集成度、设计便利性及系统稳定性。在高温环境下测试数据满足设计要求,可进行井下实验测试,下一步将做井下实际测试验证其性能。

但是由于本设计中所用FPGA芯片资源限制,只实现了姿态角的静态测量,并且在井下由于强磁环境会极大影响磁阻传感器的测量结果。所以,在未来的工作中会采用更高精度的动态测量算法来提高姿态角的测量精度。

本设计可以进一步推广在更多领域,如地质勘探,煤矿开采,页岩气,地热资源开发等领域,进一步推动扩大国产装备的应用领域。

## 参考文献:

- [1] 侯芳.国外随钻测量/随钻测井技术在海洋的应用[J].石油科技论坛,2009,28(3):77.
- [2] 胡大梁,编译.斯伦贝谢iPZIG为定向钻井装上“千里眼”[J].科技信息:石油与装备,2012(3):1.
- [3] Martin T B, Neil K P, Whidborne J F. Rotary steerable directional drilling stick/slip mitigation control[J]. IFAC, 2012, 45(8):66-71.
- [4] Guang Xinjun, Li Jing. Research on application of steerable drilling technologies in shale gas development[J]. Procedia Engineering, 2014, 73:269-275.
- [5] JPT Staff. Hybrid rotary steerable system delivers higher build rates and smoother holes[J]. Journal of Petroleum Technology, 2013, 65(4):32-34.
- [6] Matheus J, Ignova M, Horn B P. A hybrid approach to closed-loop directional drilling control using rotary steerable systems[J]. IFAC, 2012, 45(8):84-89.
- [7] 杨春旭,王瑞和,韩来聚.推靠式旋转导向系统底部钻具组合动态安全评价方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020, 44(2):64-70.
- [8] 薛启龙,丁青山,黄蕾蕾.旋转导向钻井技术最新进展及发展趋势[J].石油机械,2013,41(7):1-6.
- [9] 唐宇,余迎.贝克休斯公司新一代随钻流体分析服务系统FAS-Trak Prism[J].测井技术,2019,43(2):194.

- [10] 罗鸣,冯永存,桂云等.高温高压钻井关键技术发展现状及展望[J].石油科学通报,2021,6(2):228-244.
- [11] 王磊,李林,盛利民,等.DREMWD电磁波随钻测量系统及现场试验[J].石油钻采工艺,2013,35(2):4.
- [12] 王磊,阳传佐.DREMWD随钻电磁波传输地质导向工具的优化设计[C]//2017年油气钻井基础理论研究与前沿技术开发新进展学术研讨会,2017.
- [13] 张崇儒,席文奎,王振宇.随钻地质导向工具结构设计及性能分析[J].机电工程技术,2022(4):51.
- [14] 高玉堂,包璨.DQ-LWD随钻测井仪器的可靠性设计[J].石油工业技术监督,2016,32(4):45-48.
- [15] 贾衡天,窦修荣,艾维平,等.井下随钻近钻头动态参数测量系统[C].2022国际石油石化技术会议暨新能源及节能技术国际会议论文集,2022:191-201.
- [16] 丁元皓,药晓江,李辉.随钻近钻头测井仪的创新结构设计[J].今日制造与升级,2021(12):46-47.
- [17] 宋晓健,郑邦贤,谭勇志,等.基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法[J].石油钻探技术,2022,50(1):38-44.
- [18] 鄢志丹,耿艳峰,魏春明,等.连续波脉冲随钻数据传输系统设计与实现[J].电子测量与仪器学报,2018,32(12):85-92.
- [19] 贾衡天,高文凯,艾维平,等.随钻井下动态参数测量系统[J].电子测量技术,2018,41(15):133-137.
- [20] 王永,余敏,张党生.MWD泥浆正脉冲信号传输特性及现场应用分析[J].中国石油大学胜利学院学报,2022,36(2):78-82.
- [21] 王正辉.连续波泥浆脉冲传输系统设计[D].西安:西安石油大学,2021.
- [22] 贾梦之,耿艳峰,同宏亮,等.高速泥浆脉冲数据传输技术综述[J].仪器仪表学报,2018,39(12):160-170.
- [23] 高杨,药春晖,李琳,等.基于线性调频的泥浆脉冲信号处理技术[J].科技风,2018(33):93.
- [24] 李闪.随钻泥浆脉冲信号检测与处理技术研究[D].北京:中国石油大学,2010.
- [25] 韦海瑞,朱芝同,吴川,等.近钻头随钻测量系统及其小型化设计关键技术分析[J].钻探工程,2022,49(5):156-162.
- [26] 刘潇.近钻头随钻测量及其短传技术的研究[J].现代工业经济和信化,2022,12(1):247-249.
- [27] 王华豫,郭新伦.基于HMC1022的电子罗盘设计[J].中国新通信,2019,21(12):52.
- [28] 贺炜.近钻头井下电磁波无线传输技术研究[D].西安:西安石油大学,2018.
- [29] 贾衡天,张程光,高文凯,等.随钻井下姿态测量系统[J].微型机与应用,2015,34(18):1-4,7.
- [30] 王丽颖,支炜,孙红霞,等.基于HMC1022磁阻传感器的数字电子罗盘的设计与实现[J].电子测量技术,2009,31(1):108-111.
- [31] 曹文.基于磁阻传感器的地磁信号检测[D].武汉:华中科技大学,2007.

(编辑 王文)