

# 基于 Small RTOS51 的旋转导向钻井工具主控制器设计

孟巍<sup>1</sup> 郭书生<sup>2</sup> 孙师贤<sup>1</sup> 朱伟红<sup>1</sup>

(1. 中海油田服务股份有限公司油田技术研究院 北京 101149; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 湛江 524000)

**摘要:** 根据旋转导向钻井系统的需要,设计了一种基于嵌入式实时操作系统的主控制器模块。介绍了主控制器的具体功能,单片机的选型,硬件电路设计和实时操作系统的软件设计。在基于 C51 的单片机 ADUC845 上,移植了适合 C51 系统的嵌入式实时操作系统 Small RTOS51,并通过精心设计进程任务和信号量实现了主控制器的全部功能,实时性也满足要求。经实验验证和现场作业,该主控制器在复杂恶劣的井下环境中,可以实现对旋转导向钻井工具稳定可靠的控制,展示出良好的应用前景。

**关键词:** 旋转导向;导向力控制系统;C51 单片机;实时操作系统;small RTOS51

**中图分类号:** TE927;TN919 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Design of RSS main controller based on small RTOS51

Meng Wei<sup>1</sup> Guo Shusheng<sup>2</sup> Sun Shixian<sup>1</sup> Zhu Weihong<sup>1</sup>

(1. Well-tech R&D institutes, China Oilfield Services Ltd., Beijing 101149, China; 2. CNOOC Ltd. Zhanjiang, Zhanjiang 524000, China)

**Abstract:** A down-hole main controller based on MCU is designed for RSS tools (rotary steerable system). The detailed functions of the main controller, the selection of MCU, hardware design, and the software design based on RTOS (Real-time Operation System) are introduced. The module utilizes ADUC845 which has a C51 core, and an embedded RTOS, SMALL RTOS51, which is suitable for C51 MCU, is transplanted to implement all the functions needed with proper design of the thread tasks and semaphores. The real-time performance meets the requirement too. Experiments and field applications have proved that this main controller can guarantee steady and stable control of the RSS tool in harsh down-hole environment, which proves it has brilliant application prospects.

**Keywords:** rotary steerable system (RSS); Steering force control system; C51 MCU; RTOS; small RTOS51

## 0 引言

20 世纪末开始,旋转导向系统 (rotary steerable system, RSS) 逐渐发展,到今天已经成熟,并被用到各类商业钻井中,特别是从式井和水平井。它能在钻柱旋转钻进时,随钻实时完成导向功能,引导钻柱在地层深处按照设计好的轨迹钻进,直达油藏。

RSS 是一个非常复杂的自动化控制系统,需要一系列配备的工具和模块来共同实现。导向短节是其中最核心的部分,它在靠近钻头的位置,有 3 个独立的导向翼肋。翼肋在旋转钻进时推出,形成一股合力支撑井壁,而井壁以反作用力推着钻柱向设计的方向去偏转<sup>[1]</sup>。

导向短节是旋转导向钻井系统的导向控制及执行单元,负责产生液压力,控制翼肋产生所需的推靠力<sup>[2]</sup>,实

现导向角度的精确控制;同时,它还具有近钻头井斜、高边工具面角测量等功能。为了实时的协调这么多功能模块的协作,设计了一个实时性很强的中央控制器,即旋转导向主控制器,是旋转导向工具的“大脑”。它基于小型嵌入式实时操作系统 Small RTOS51,负责实时处理通信命令和向上位机应答;用有限的硬盘资源实现上述各种复杂的功能控制,在调度功能和实时性上均能满足系统要求

## 1 主控制器概述

以主控制器为大脑的导向系统如图 11 所示,它是一个自动闭环系统<sup>[3]</sup>。它的工作原理:导向系统工作时,导向系统的不旋转外套相对系统静止,但是 3 个翼肋可内外伸缩。地面下达导向指令,通过通信模块发送到井下的主控制器,主控制器根据指令进行力的分解,换算成压强值分别发送

到 3 个液压电机控制模块,电机转动并驱动油压产生一定的对外推靠力,推动翼肋伸出对外推在岩壁上,完成旋转导向钻井。三路翼肋的合力控制导向系统最终前进的轨迹方

向<sup>[4]</sup>。导向短节上的轨迹测量模块会实时将井眼轨迹相关数据传给主控制器,由主控制器处理后发送给上位机,最终再通过泥浆信道通过科学合理的编码传送到地面系统<sup>[5-7]</sup>。

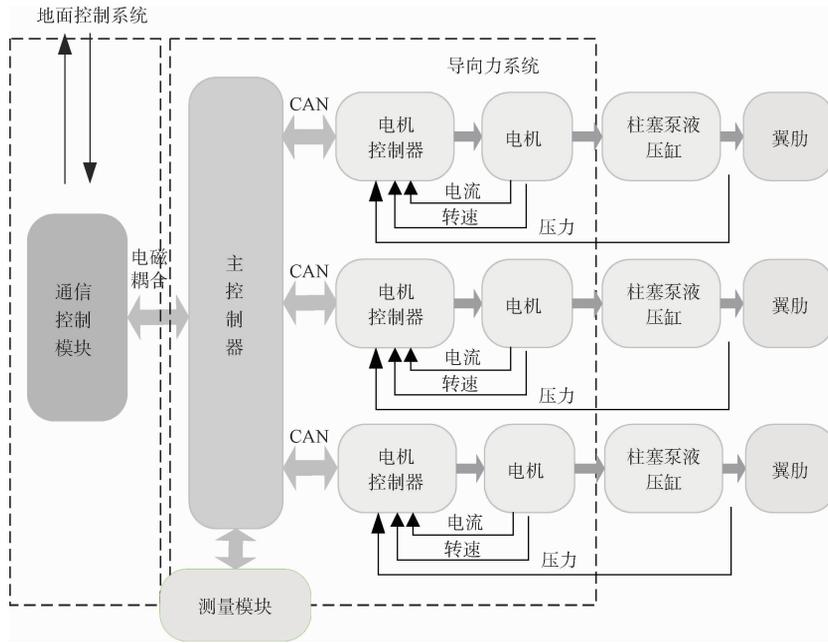


图 1 导向力系统整体设计

主控制器的主要功能有以下几点:

- 1)接收地面通过泥浆分流编码传送来的下传指令;
- 2)接收 MWD 随钻系统的中控下发的查询指令;
- 3)回复 MWD 中控的查询指令,并向中控发送工况和轨迹数据;
- 4)定期向 3 个电机控制板发送压力调整指令,实现导向力的实时调整;
- 5)接收 3 个电机控制板反馈的工况数据;
- 6)接收近钻头模块传来的测量数据,作为导向力分解的参考;
- 7)根据导向指令对导向力进行分解计算;

8)对井下的工作情况进行存储,保存在 FLASH 里;

9)系统初始化时读取保存在片内 EE/FLASH 里面的设定资料。

## 2 主控制器硬件设计

主控制器相当于整个系统的 CPU,负责整个井下系统的总体控制,如图 2 所示,包括信号传输控制、系统监测、数据读写等功能。它利用内置的串口与上层通信模块进行通信,接收指令、响应指令并上传状态参数;同时与下位机通信通过 SPI 通信。

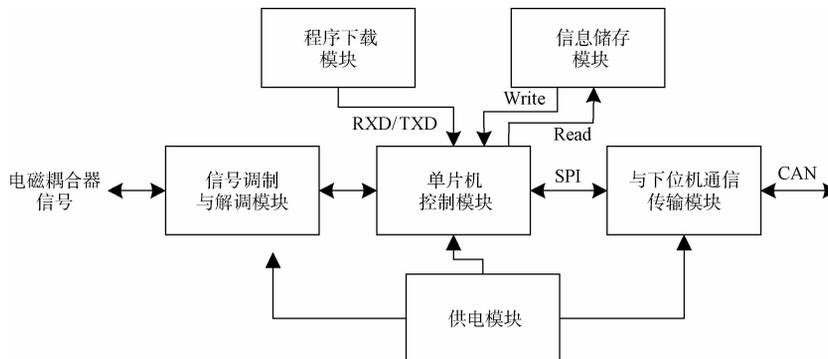


图 2 主控制器结构

在非井下仪器当中,实现这种主从式的上位机和下位机之间的控制和调度相对容易一些,因为地面软件的硬件资源更丰富,比如用 LABVIEW, VisualStudio 等都能很方便的进行自控系统的开发<sup>[8-10]</sup>。但井下电路资源很受限,要考虑高温和振动的影响,更要兼顾性能和可靠性的平衡,且可靠性通常更加重要。所以,很多 PC 端开发的现成系统和平台都不能直接用于井下电路控制系统。

研究旋转导向系统,其投入和花费非常巨大。经济性、稳定可靠性,是设计旋转导向控制的第一要务<sup>[6]</sup>。在井下,电路要经受高温(最高可达 150°)和振动的考验,所以器件的可靠性非常重要。经过大量的调试和高温实验,综合已有的研究成果以及工程化的需要,采用 AD 公司 ADUC845 单片机作为主控制器的主芯片。该芯片兼容 8051 指令集,开发方便,体积小,功能强大。ADUC 由 3.3 V 电源供电,工作在 6.291 456 MHz 最高频率时,消耗

电流不超过 11 mA,功耗较低。该芯片集成了丰富的功能:

- 1) 单周期指令高性能处理器;
- 2) 个独立通道的 24 位高分辨率的  $\Sigma$ - $\Delta$ ADC;
- 3) 62 KB 的 Flash 程序存储器;
- 4) 4 KB 的 Flash 数据存储器;
- 5) 2 304 KB 的 RAM 存储器;
- 6) 无需另外硬件的串行下载功能;
- 7) 集成的 PLL,利用片外 32.768 kHz 晶振可以倍频至 6.291 456 MHz;
- 8) 1 个中断源,2 个中断优先级;
- 9) 双数据指针,扩展的 11 位堆栈指针;
- 10) 上电自复位电路;
- 11) UART、SPI、IIC 串行通信接口。

ADUC845 详细功能框图如图 3 所示;实际的电路图如图 4 所示。

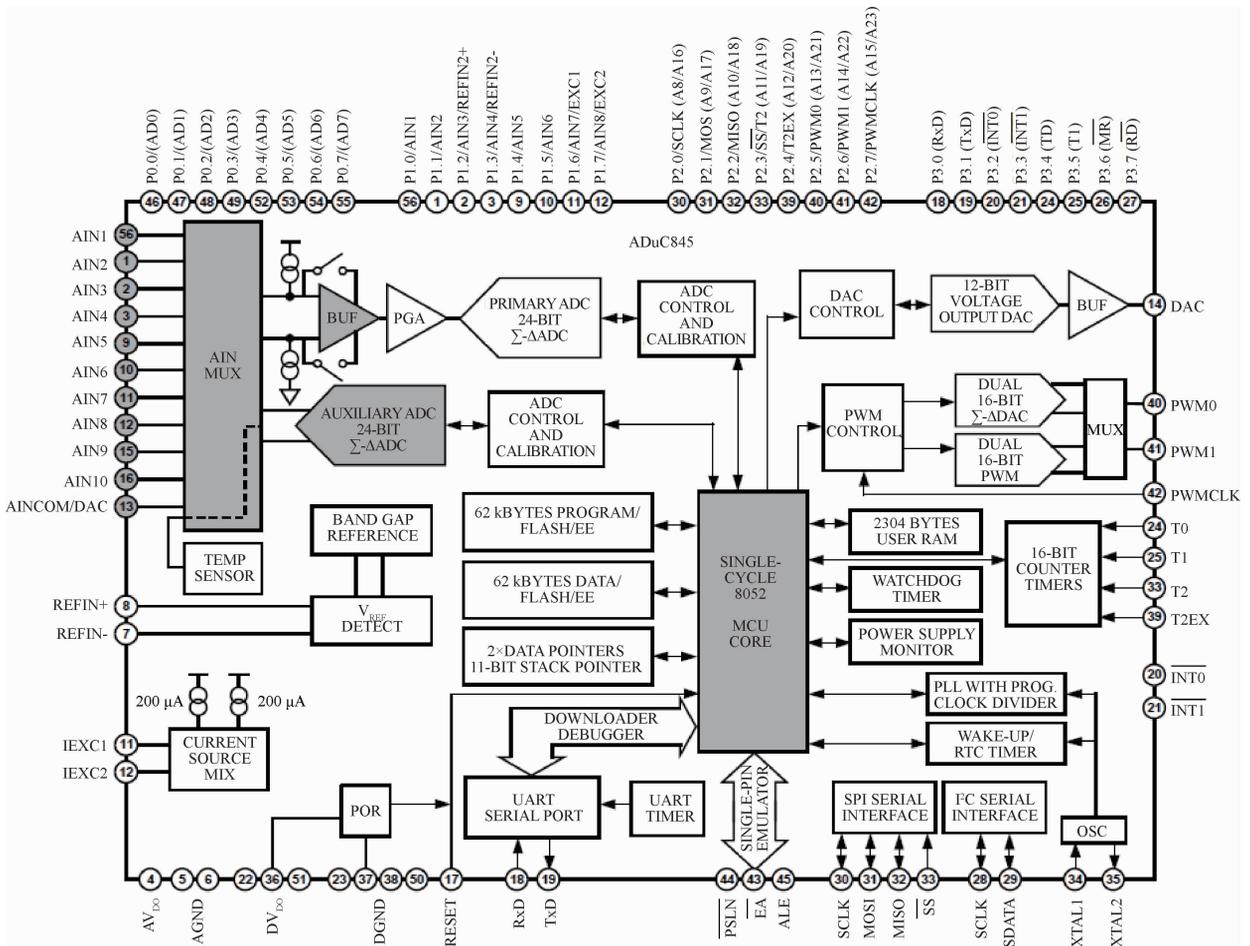


图 3 ADUC845 功能框图

它的主要功能模块有 3 个:

- 1) 串口通信模块:16 和 17 管脚是串口通信管脚,主控制器和上位机的所有交互,都是通过此串口来实现。
- 2) 存储电路模块:主控制器在井下工作时,需要将一

些关键的参数上传到地面,便于地面工作人员的分析、发现故障、探测井下当前的运转情况;以及当井下出现故障后,需要根据状态参数进行分析识别系统的故障,以便于后期处理。因此需要有非易失性存储器,这里使用的是如

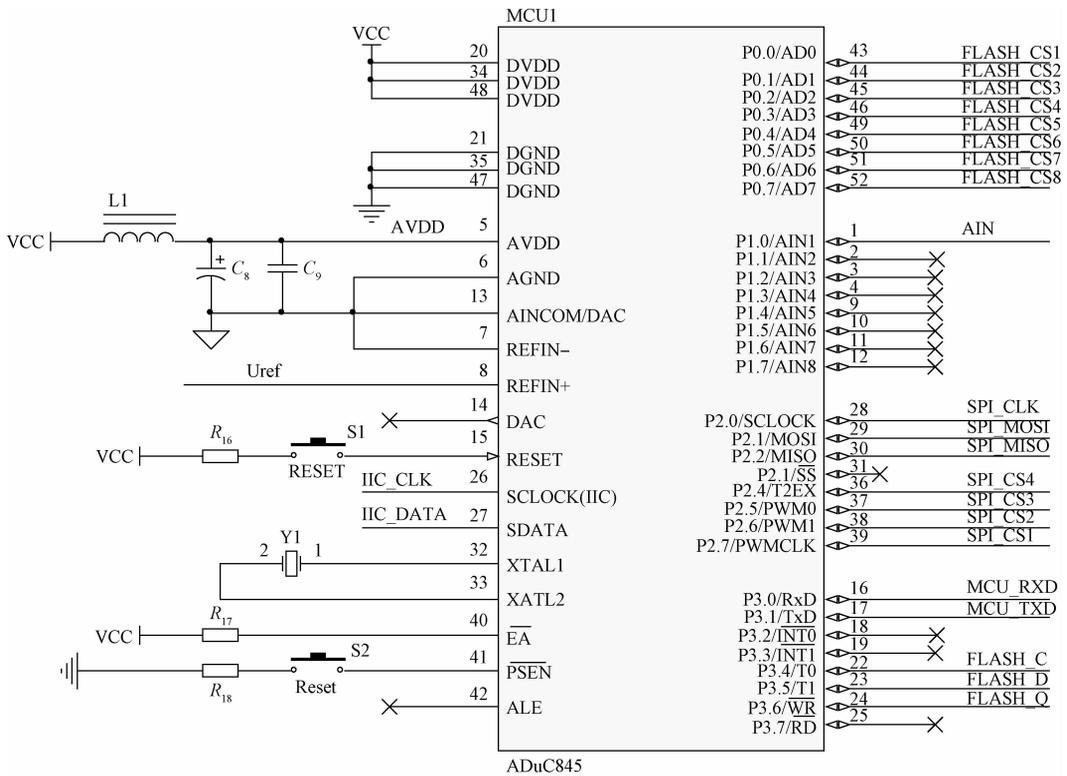


图 4 ADUC845 电路

图 5 所示的 8M 字母单片的串行 FLASH 芯片,一共 8 片。P0 端口是单片机输出的 FLASH 片选信号,它可以指定 8 片 FLASH 中的其中任一片进行读写。P3.4~P3.6 是 FLASH 的时钟和读写信号。

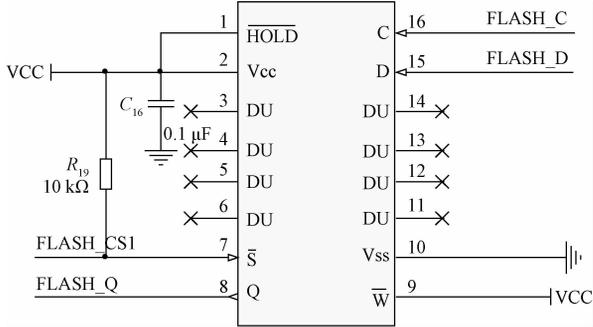


图 5 FLASH 芯片电路

其中 P3.4 接 FLASH 的 C 端,负责由单片机程序输出读写时钟信号, P3.5 接 FLASH 的 D 端,从主控制器输出数据写入 FLASH, P3.6 接 FLASH 的 Q 端口,从 FLASH 读取数据在主控制器。

3) SPI 通信模块: P2.4~P2.7 是 SPI 通信模块的 SLAVE 端选择信号,主控制器是 SPI 的 MASTER 端。而 SLAVE 端接有 4 个模块:1#、2#、3# 电机控制模块和近钻头测量模块。

### 3 基于 SMALL RTOS51 的主控制器软件设计

#### 3.1 软件系统的选择

基于此款单片机的主控制器系统,功能相对较为复杂,用单纯的逻辑循环语言结合状态机的办法已经不能满足实际的需求,采用一个有任务管理等功能的操作系统能满足我们的要求。

通用操作系统的设计注重每次执行的平均响应时间而不关心某次特定执行的响应时间。对于实时操作系统(RTOS),它除了要满足应用的功能需求以外,更重要的是还要满足应用提出的实时性要求,而组成一个应用的众多实时任务对于实时性的要求是各不相同的。此外实时任务之间可能还会有一些复杂的关联和同步关系,如执行顺序限制、共享资源的互斥访问要求等。与通用操作系统不同,实时操作系统注重的不是系统的平均表现,而是要求每个实时任务在最坏情况下都要满足其实时性要求。所以考虑在单片机上实现一个小型实时操作系统,以便仪器在井下作业时,实时的调度多种功能模块,并有组织的运行,满足作业的需要。

RTOS 系统是一段在嵌入式系统启动后首先执行的后台程序。用户的应用程序是运行在 RTOS 之上的各个任务,RTOS 根据各个任务的要求,进行资源(包括存储器、外设等)管理、消息管理、任务管理和异常处理等工作。在 RTOS 支持的系统中,各个任务均有一个优先级,RTOS

根据各个任务的优先级,动态地切换各个任务、保证对实时性的要求。适合 51 系列单片机的操作系统主要的有  $\mu\text{C}/\text{OS-II}^{[11]}$ 、RTX51 和 Small RTOS51 等<sup>[12]</sup>。

### 3.2 Small RTOS51 的特点

Small RTOS 是一个源代码公开的多任务实时操作系统,Small RTOS 51 是其在 8051 系列处理器上的移植(使用 Keil C51)。Small RTOS 可以简化那些复杂而且时间要求严格的工程的软件设计工作。

Small RTOS 有以下的特点:

1) 公开源代码:只要遵循许可协议,任何人可以免费获得源代码。

2) 可移植:尽量把与 CPU 相关部分压缩到最小,与 CPU 无关部分用 ANSI C 编写。

3) 占先式:Small RTOS 可以管理 17 个任务,用户最多可以使用 16 个任务,每个任务优先级不同。

4) 中断管理:中断可以使正在执行的任务挂起。如果优先级更高的任务被中断唤醒,则高优先级的任务在中断嵌套全部退出后立即执行。中断嵌套层数可达 255 层。如果需要,可以禁止中断嵌套管理。

5) RAM 需求小:Small RTOS 为小 RAM 系统设计,因而 RAM 需求小,相应的,系统服务也少。

### 3.3 主控制器软件的实现

Small RTOS51 的移植主要是配置 Oscfg. h、Oscpu. h 和 Config. h 3 个文件<sup>[13]</sup>,比较容易上手,可以集中精力来设计软件需要的功能,而不用在移植和剪裁上花费太多精力。

基于该系列的实际需要,在主函数里创建了 6 大任务,5 个信号量,1 个通信队列,代码如下:

```
void main(void)
{
    .....
    PLLCON = 0x01;
    OSInit();
    InitSerial();
    InitTimer2();
    InitADc();
    InitSPI();

    OSQCreate(SerialDataOut,14);
    OSSemCreate ( 0, 1 );//Semphone0: the sharing
resource uart
    OSSemCreate(1,0);//Semphone1:the signal to start
the Task of Response
    OSSemCreate(2,0);//Semphone2:the signal to start
calculate task
    OSSemCreate(3,1);//for flash
    OSSemCreate(4,1);//for EE
```

```
OSTaskCreate(Restart,NULL,0); //Uart receive
OSTaskCreate ( ProcessCmd, NULL, 1 );//
Uart receive
OSTaskCreate ( SPI, NULL, 2 );//
SPI Communication
OSTaskCreate(Calculate, NULL,3);
OSTaskCreate(RealTime, NULL,4);//Get the real
time from the RTC
OSTaskCreate(Flash, NULL,5);//Flash operation
.....
}
```

6 个任务的作用如下:

1) Restart:负责设备的初始化过程和工作状态的恢复,包括工作参数,工作状态和更新状态字。此任务每次系统上电时运行一次。

2) ProcessCmd:响应上位机和地面发来的命令,并进行回复、控制或数据保存。这个任务需要和串口中断程序配合,并需要信号量唤醒。

3) SPI:和电机控制板与近钻头测量模块通信,进行工作参数的更新和工具状态的获取,并在 HOLD 模式下对井斜进行跟踪,动态调整工作参数以稳斜。这个任务是每隔一段设定的时间运行一次,读取最新的电机和近钻头测量模块的状态。

4) Calculate:根据变动后的命令参数和工作状态,进行新的工作参数的计算,并通过 SPI 下载到液压电机单元以调整工作参数。此任务也需要信号量来唤醒。

5) RealTime:通过实时芯片进行时间的读取,以保证各通信单元的同步和工作状态记录的时间戳的精确。

6) Flash:RST 工作时,定时在 Flash 里保存实时的工作状态,当仪器回到地面时,读取 Flash 里面的工作状态,进行作业后或作业间的分析。此任务每隔一段设定的时间运行一次。

为了协调各任务的运行,运用了 5 个信号量,如表 1 所示。

除此之外,还应用了 2 个中断服务程序,分别对应单片机的第 4 中断向量——串口中断和第 7 中断向量——SPI 中断。

工作参数表、FLASH 当前地址和当前导向指令数据需要保存在片内掉电非易失的 EE/Flash 存储器里。主控制器在上电或井下重启时需要在在 EE/FLASH 存储器里将所需的数据读取出来,以便做好初始化和工况恢复。

为了跨任务进行串口写操作,创建了一个消息队列:SQCreate(SerialDataOut, 14)。基于 SmallRTOS51 的应用程序由一系列独立的任务构成——每个任务都是具有独立权限的函数实例。这些独立的任务之间需要通过相互通信以提供必要的系统功能。SmallRTOS51 中所有的通信与同步机制都是基于队列实现的。队列可被多任务

表 1 信号量列表

序号	用途	初始信号量
1	串口资源的信号量	1
2	识别命令头后,增加信号量,启动任务 2	0
3	收到导向指令后,启动任务 4,对导向指令进行力的分解计算	0
4	读写 FLASH 的互斥信号量	1
5	读写片内的 EEROM 的互斥信号量	1

存取,是具有自己独立权限的内核对象,并不属于或赋予任何任务。所有任务需要串口发出去的数据都可以向消息队伍里写入,然后再将队列里的数据放入串口的数据寄存器里。

## 4 测试和应用

### 4.1 仪器联调测试

在实验室环境对仪器的导向短节进行联调时,在 PC 上用上位机中监控程序为系统演示程序,主要完成与旋转导向主控制器的串口通信和实现数据动态显示功能。其界面的主体部分是主控制器监控并反馈给上位机的 3 个液压机构的压强和近钻头测量模块监测到的角度信息和温度。此程序还包括一个发送命令区,通讯用的测试包和命令包可从此处发出给主控制器。

在实际的测试当中,一共测试了 100 种不同的控制指令。可以从界面上看出,系统均能正确接受指令,再通过 SPI 的进程将数据发给电机控制板,并把正确的状态或数据返回到界面上,从返回的时间戳上看出,响应时间在 0.04 s 之内。

SPI 模块用 100 Hz 的频率进行查询,改变仪器的斜度 20 次,改变不旋转外套的位置 20 次,能迅速的在界面上显示出相应的最新测量结果,响应时间在 0.02 s 之内。在上述的组合测试中,主控制器工作稳定,各进程协调良好,未出现一次通信错误或是返回数据不合理的情况。

### 4.2 自动工况测试

用 PC 端测试软件作为上位机每隔 20 s 向主控制器发送具有一定规律的三缸的压力指令,主控制器接到指令后控制 3 个液压模块分别按设定值工作,形成的压力曲线如图 6 所示。

从执行结果看来,三缸压力均正确下发,在此过程中,每隔 0.5 s 就进行 1 次三缸压力、电机转速的查询,一共通信 6 250 次,错误次数为 0。在压力指令下发后 0.02 s 的时间内,SPI 模块就对 3 个电机控制板的参数进行了更新,实时性是满足作业需求的。

### 4.3 EE/FLASH 读写测试

通过 PC 端上位机下发旋转导向参数表和近钻头测量

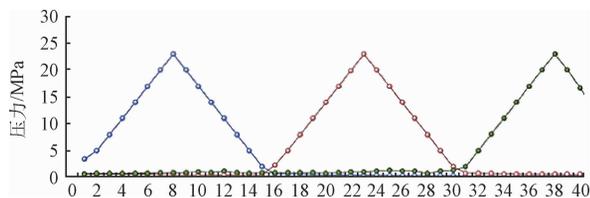


图 6 自动工况测试

模块参数表共计 234 Byte。主控制器接收到参数后,通过 EE/FLASH 写线程将参数写入片内 EE/FALSH;重新上电后,再通过上位机的查询指令将参数读出,和原始参数对照。重复操作 30 次,均准确无误。

### 4.4 现场作业

该主控制器已经应用于本公司自主研发的旋转导向钻井系统 Welleader<sup>®</sup>。它实现了与上位机和下位机的通信,并实现了复杂的,稳定可靠的实时自动化控制。2015 年 5 月 3 日,该旋转导向系统和本公司的 Drilog<sup>®</sup>随钻测井系统在渤海联袂完成作业。这标志着我国在这两个技术领域打破了国际垄断,中国海洋石油成为全球第四、国内首个同时拥有该两项技术的企业,中国成为世界上第二个拥有该项技术的国家,填补了我国在这方面的空白<sup>[14]</sup>。

目前,仪器已经完成超过 30 口井的作业任务,累计进尺超过 15 000 m,最大井深达到 4 382 m,井下温度 110 ℃,入井无故障工作时间超过 200 h,本嵌入式实时操作系统在石油钻井过程中经受了振动、冲击、高温高压等工作环境的考验,能够稳定工作。

每次作业完毕,用上位机通过主控制器读取仪器在作业过程中在片外 FLASH 中保存的工况数据。历次作业的工况数据超过 100 MB,和现场实时上传的数据也都保持了一致,说明主控制器在处理控制指令,收集最新状态数据的同时,也很好的处理了 FLASH 的读写任务,系统线程调度合理。

## 5 结 论

本文利用 C51 单片机和嵌入式实时操作系统 Small RTOS51 设计了一种井下使用的旋转导向钻井系统的主控制器;用有限的硬件资源,实现了一个小型嵌入式实时操作系统。测试和现场作业结果证明,运用高温性能好,可靠性高,功能适中的单片机,经过合理的系统设计,完全满足井下的实时自动化控制需要。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 贾建波,刘俊彦,孙师贤,等. 旋转导向钻井工具中的压力采集系统设计[J]. 电子测量技术,2015,38(2): 126-129.

- [3] 吴超,菅志军,郭云,等. 旋转导向钻井系统关键技术研究与实钻试验[J]. 中国海上油气,2012,24(3):52-53.
- [4] 艾维平,邓乐. 垂直钻井系统中纠斜推力的测量与控制[J]. 测控技术,2010,29(10):73-76.
- [5] 李婷,史晓锋. 泥浆信道数据压缩和纠错联合编码研究[J]. 电子测量技术,2016,39(4):133-135.
- [6] 涂兵,廖万强,王思成,等. 基于 PLM 编码的泥浆脉冲信号提取算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(2):227-232.
- [7] 刘均,袁峰. 钻柱内连续波信号传输模型与幅频特性研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(1):118-125.
- [8] 徐华中,黄丽萍. 基于 LabVIEW 和 DSP 串口的多通道电机参数采集系统[J]. 电子测量技术,2011,34(4):66-69.
- [9] 黄幸,孟进,唐健,等. 基于 LabVIEW 的干扰消除装置测试系统设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(12):57-62.
- [10] 陈小荣,唐涛,王晋. 基于 VisualStudio 的多通道相参接收机测试系统设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(12):63-68.
- [11] 刘世隆,祖家奎,黄海,等. 多硬件中断环境下的  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统的移植与驱动开发[J]. 电子测量技术,2016,39(4):76-80.
- [12] 方安平,刘俊,黄志宏. 采用 Small RTOS51 的智能温度巡检仪设计[J]. 电子科技,2006(6):70-74.
- [13] 李永波,关海龙,胡旭东. 基于 Small RTOS51 的船用智能巡检仪的设计[J]. 浙江理工大学学报,2008,25(2):174-178.
- [14] 冉永平. 中海油突破两项世界先进钻井技术[N]. 人民日报,2015-05-05:2版.

### 作者简介

孟巍,工学硕士,中级工程师,主要研究方向为旋转导向钻井系统井下电路等。

E-mail: mengwei5@cosl.com.cn