

基于 MSP430 的深海低功耗数据采集系统*

杨 微, 秦华伟

(杭州电子科技大学 机械电子工程研究所, 杭州 310018)

摘 要: 针对深水作业条件下对数据采集设备的特殊要求, 提出了具有低功耗、高精度、耐高压特点的水下多通道数据采集器的设计方法。该系统采用 MSP430F169 作为核心微控制芯片, 并通过精心的外围电路设计, 实现了系统低功耗和高精度运行; 同时通过对电路板机械封装, 满足了水深 3 000 m 高压环境下对系统的耐压防漏要求。高压仓试验结果表明, 该数据采集系统采集到的数据稳定性能良好、精度高, 机械封装设计能够满足深海密封防漏要求。

关键词: 数据采集器; 低功耗; MSP430; 深海; 机械封装

中图分类号: TM933. 2

文献标识码: A

文章编号: 1001 - 4551(2009)05 - 0016 - 04

Low power-consumption deep-sea data logger based on MSP430

YANG Wei, QIN Hua-wei

(Institute of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To meeting the special requirement for data acquirement instrument (data logger) in deep-sea water, a design of data logger system was proposed, which was featured by low power consumption, high accuracy and high compression resistance. By using MSP430F169 as its micro-controller unit(MCU) and employing low-power chips in peripheral circuits, the demand for low-power consumption and high accuracy was fulfilled. A design of mechanism encapsulation for protecting data logger in 3 000 m was also proposed. A high-pressure storehouse was used to simulate the deep-sea high pressure for experimental investigations. The experimental results show that the data acquired by the data logger system is accurate and steady, the leak proof requirement of system in scientific research in deep-sea can be met by the mechanism encapsulation.

Key words: data logger; low power-consumption; MSP430; deep-sea; mechanism encapsulation

0 引 言

海底是人类认识地球内部过程的窗口^[1-3], 热液活动区生物群落奇异的生命表现改变了极端环境下无生命存在的传统认识。在对热液区各种环境参数的科学考察过程中, 需要对诸如温度、盐度、深度、磁场、溶解氧等参数进行测量, 相应传感器输出的信号需要通过数据采集器记录并处理^[4-5]。受到深海工作环境的限制, 要求数据采集系统应具有低功耗, 系统机械封装密封防水、耐深海高压等特点。

基于 MSP430 系列单片机的数据采集系统, 具有功耗低、精度高、尺寸小等特点, 所使用的 MSP430F169 单片机自带 12 位 A/D 模块, 并具有 5 种低功耗工作方式^[6]: LMP0 ~ LMP4, 在保证高精度采集的同时能够大大降低功耗。为了方便科学家能够及时地分析所采集数据, 采集器可通过有线或无线方式与上位机进行通

讯, 方便数据的读出和管理。机械封装采用两侧开盖的圆筒形设计, 满足深海 3 000 m 的外压设计要求。

本研究主要探讨基于 MSP430 的深海低功耗数据采集系统的设计。

1 数据采集系统的软硬件设计

1.1 系统组成

数据采集器的系统组成如图 1 所示。数据采集系统由模拟信号的检测、滤波与放大、数字信号的存储与处理、数据信号的通讯传输等部分组成。

系统工作时, 将采集到的热液口附近的多种物理、化学传感器信号经过滤波、放大后, 输入到主处理器 CPU 自带的 12 位 A/D 转换模块中, 以实现模拟信号的数字化转换。同时, 主处理器从外围实时时钟芯片读取采样时间, 并将上述数据处理编码通过 SPI 串行通讯模式储存到 flash 存储芯片中。系统还可以通过

收稿日期: 2008 - 10 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675055)

作者简介: 杨 微(1983 -), 男, 辽宁盘锦人, 主要从事机电系统集成与深海装备技术方面的研究. E-mail: yang_wei510@yahoo. cn

通信联系人: 秦华伟, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师. E-mail: qinhw@hdu. edu. cn

控制 LTC1385 芯片实现与系统外计算机的 RS232 通讯,以实现采集数据的读取。

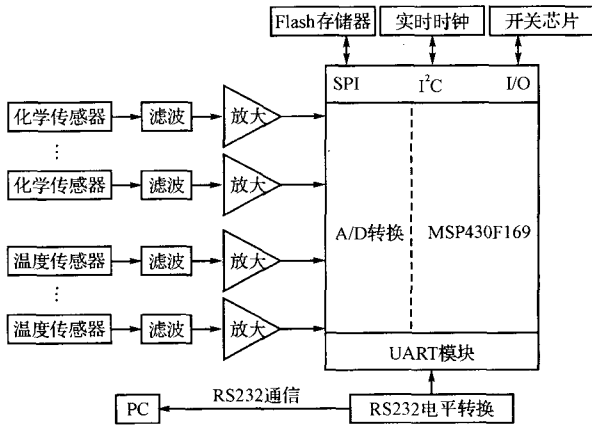


图 1 深海数据采集系统组成框图

1.2 系统硬件低功耗设计

受水下环境的局限性,电源供给不能使用体积过大的电池。但设计上要求采集系统能够连续工作 20 天,因此数据采集系统必需进行低功耗设计,以达到降低电能消耗,延长使用时间的目的。要实现低功耗,从硬件结构设计角度而言,主要从两方面入手:

(1) 选用低功耗器件。实现同一种功能的芯片型号有很多,但是功耗差异很大,供电电压、封装尺寸也不尽相同。对于 3.3 V 供电的低功耗器件,其选型如表 1 所示。

(2) 电路结构上的低功耗设计。笔者采用了开关芯片,对分时工作的芯片采用分时供电,在不采集数据的时间间隔里,通过开关芯片切断模拟部分的电源供给。对于带有关闭 (shutdown) 引脚的芯片,在其不工作时,通过该引脚的配置关闭该数字芯片。

表 1 低功耗器件选型表

器件类型	器件型号	主要功耗
微处理器	MSP430F169	低功耗模式下 40 μ A
实时时钟	PCF8563	< 200 μ A
Flash 存储	AT45DB321B	读写 4 mA 静态 3 μ A
RS232 电平转换	LTC1385	200 μ A

1.3 系统精度设计

深海用的化学传感器多为自制,部分传感器表现为很低的电流提供能力和很大的源阻抗,这就要求后级放大电路不能从传感器电极上获取过大的电流,否则会影响溶液的化学比例,从而影响测量精度。针对信号特点,本系统采用了高精度、高输入阻抗、低吸收电流、低功耗的射极跟随技术;选用性能优越的低功耗、低噪声运算放大器,使得数据采集器信号输入端达到 $10^{13} \Omega$ 输入阻抗,从电极上最多获取 2 fA 的输入偏置电流,输出噪声在 1 kHz 下只有 83 nV。

MSP430F169 自带的 12 位 A/D 的参考电压为 2.5 V,所以要将输入进入 A/D 的信号范围调整到 0 ~ 2.5 V 之间,信号滤波与调理电路如图 2 所示。

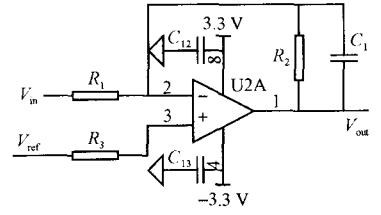


图 2 信号滤波与调理

传感器产生的信号为直流信号。对于直流信号,输入信号 V_{IN} 与输出信号 V_{OUT} 有如下关系:

$$\frac{V_{IN} - V_{REF}}{R_1} = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{R_2} \quad (1)$$

令 $R_1 = R_2, V_{REF} = 0.625 \text{ V}$,可以得到 $V_{OUT} = 1.25 - V_{IN}$ (单位为 V)。

如果输入信号 V_{IN} 的范围在 $-1 \sim +1 \text{ V}$,那么输入进入 A/D 的信号范围为 $0.25 \sim 2.25 \text{ V}$,满足工作条件。相对于有效直流信号而言,交流信号属于噪声信号,应该予以去除。图 2 电路同时具有一阶低通滤波器的作用^[7-8],以去除交流干扰。信号传递函数为:

$$A_u(s) = -\frac{R_2 // \frac{1}{sC_1}}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j2\pi f R_2 C_1} \quad (2)$$

令 $f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$,代入式(2)有:

$$A_u(s) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_0}} \quad (3)$$

可以得到截止频率 $f_p = f_0$ 。

取 $R_2 = 100 \text{ k}\Omega, C_1 = 0.1 \mu\text{F}$,那么截止频率为 15.91 Hz。系统测量值精度为: $2500 \div 2^{12} = 0.61 \text{ mV}$,可以满足测量信号的精度要求。

2 数据采集系统的软件设计

2.1 系统软件的低功耗设计

MSP430F169 的数据采集和通信均采用中断方式进行,并充分利用芯片的休眠和低功耗功能。当采集时间点到达时,中断将 MSP430F169 从低功耗模式唤醒开始工作;而后发出控制电平将电源芯片打开,开始对系统供电。完成数据采集工作后,关闭开关芯片和带开关功能的数字芯片, MSP430f169 进入 LPM3 低功耗模式,在 LMP3 模式下,CPU 的 CPU、MCLK、SMCLK、DCO 都处于休眠状态,ACLK 信号仍然处于活动状态。

当数据采集器作为从机与主机电脑进行 RS232 通

信时,由主机发起,从机的 USART 模块接收来自主机的信号产生直接调用异步通信中断子程序,这样既降低了功耗,又简化了软件流程。在所有中断服务子程序结束时,最后一定要调用 LPM3_EXIT 函数,使 MSP430F169 在退出中断后退出低功耗模式并再次循环进入主程序的处理中。

2.2 系统软件流程

系统软件流程如图 3 所示,程序开始后,进行初始化工作。本系统的采样间隔时间由定时器 A 来产生,允许定时器 A 中断。然后设置 CPU 的工作模式为 LPM3 低功耗模式,程序指令不再执行,直至由中断唤醒回到活动模式。CPU 的唤醒功能由定时器 A 完成。定时器 A 计数满时产生溢出中断请求,此时在定时器 A 的中断服务子程序中判断采样时间是否到,没有到时,使时间计数器加 1 并返回。

如果采样时间已到,则在定时器 A 的中断服务子程序中设置 CPU 进入活动模式。此时 CPU 被激活,程序继续往下执行。分时供电部分开始供电后,启动 A/D 转换,MSP430 通过自身的模/数转换功能,将转换结果存储在 A/D 自带的转换结果寄存器中。转换完毕后,触发 A/D 转换完成中断请求,进入 A/D 转换完成的中断服务子程序中。A/D 中断子程序完成后,CPU 将存放在 A/D 转换结果存储寄存器中的数据转移到 MSP430 的 flash 存储器中。

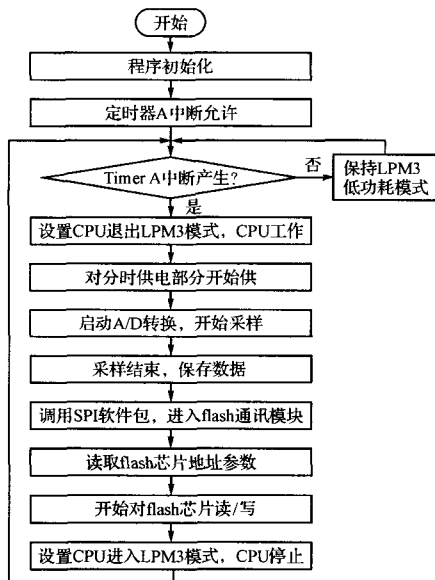


图 3 系统软件流程图

3 数据采集器的集成封装

随着工作水深的不断加大,深海数据采集器所承受的外压也越来越大,为保证系统能在深海环境下正

常工作,必须对传感器探头电极及其信号处理电路进行密封封装。根据 3 000 m 水深的的设计指标,本研究采用圆柱筒壳体加平盖封头的方式进行密封封装,并选用不锈钢 30CrMnSi 作为封装壳体材料。

设计指标:外压 $P = 30 \text{ MPa}$,初步估计所要容纳的电路板尺寸为 $70 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,密封圆柱筒壳体上安装水密接头,初定长度 $L = 220 \text{ mm}$,内直径 $D = 54 \text{ mm}$ 。集成封装装配图如图 4 所示。

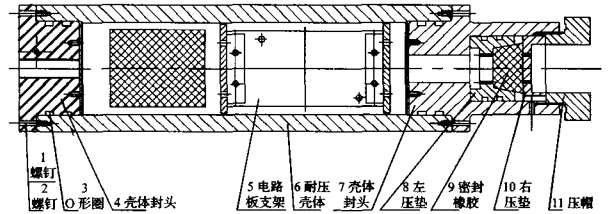


图 4 数据采集器集成封装装配图

3.1 电路腔耐压壳体壁厚设计

不锈钢 30CrMnSi 的屈服强度 $\sigma_{0.2} = 885 \text{ MPa}$,若取 $n_s = 2$,则:

$$[\sigma_s] = \sigma_{0.2}/n_s = 885/2 = 442.5 \text{ MPa} \quad (4)$$

抗拉强度 $\sigma_b = 1\ 080 \text{ MPa}$,若取 $n_b = 3$,则:

$$[\sigma_b] = \sigma_b/n_b = 1\ 080/3 \approx 360 \text{ MPa} < 442.5 \text{ MPa} \quad (5)$$

故许用应力取 $[\sigma]^t = 360 \text{ MPa}$ 。

(1) 外压压力容器壁厚计算。

根据受外压压力容器壁厚计算公式:

$$\delta \geq \frac{P_c D_i}{2[\sigma]^t \varphi - P_c} = \frac{30 \times 54}{2 \times 360 - 30} = 2.35 \text{ mm} \quad (6)$$

取腐蚀余量为 1.5 mm,加工余量为 0.5 mm,为防止失稳,取 $\delta_e = 10 \text{ mm}$ 。则耐压壳外径取:

$$D_0 = 54 + 2 \times 10 = 74 \text{ mm}$$

(2) 对外压容器壁厚进行失稳校核。

受外压的长、短筒可以用临界长度 L_{cr} 作为区别的界限:若圆筒的长度 $L > L_{cr}$,则属长圆筒,失稳时波数 $n = 2$;当 $L < L_{cr}$,则属短圆筒。

$$L_{cr} = 1.17 D_0 \sqrt{D_0/\delta} \approx 1.17 \times 74 \sqrt{74/10} = 235.6 \text{ mm} \geq L = 220 \text{ mm} \quad (7)$$

(3) 对外压容器壁厚进行稳定性校核。

$$[p] = \frac{2.59E \cdot \delta^2}{m L D_0 \sqrt{D_0/\delta}} = \frac{2.59 \times 2.0 \times 10^5 \times 10^2}{3 \times 220 \times 74 \sqrt{74/10}} = 423 \text{ MPa} > 30 \text{ MPa} \quad (8)$$

其中, m 为稳定安全系数,此处取 3。

故采用本设计壁厚是安全的。

3.2 电路腔耐压壳体封头设计

在高压容器中,由于容器直径较小,厚壁成形封头制作难度较大,成本较高,故常采用平盖。根据平盖的厚度计算式,得:

$$s = D \sqrt{\frac{0.31 P_i}{[\sigma]}} + C = 54 \sqrt{\frac{0.31 \times 30}{360}} + 1 = 8.68 \text{ mm} \quad (9)$$

考虑腐蚀余量,厚度 s 取整为 12 mm。

考虑到连接平盖与电路腔的螺钉尺寸,取平盖外径: $D_1 = 100 \text{ mm}$ 。平盖与电路腔腔体用 4 个 M6 螺钉紧固,端盖与电路腔本体上各安装一个两个水密接插件,以实现电路腔与外界信号的连通。

4 试验研究

4.1 高压环境下的系统工作试验

将设计完成的数据采集系统放在 70 MPa 高压舱中进行试验,加压曲线如图 5 所示。根据压力容器的试验要求,最大试验压力为设计压力的 1.25 倍,因此,本试验最终试验压力稳定在 40 MPa(相当于 4 000 m 深水压环境),维持两个小时。在此过程中,pH 传感器置于 pH=6.86 的标准溶液中(pH 标准液与高压仓的水通过软塑料囊隔开)。

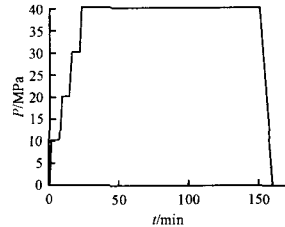


图 5 试验高压舱加载压力曲线

试验结束,取出数据采集系统,拆开机械封装,如图 6 所示。批量读取数据采集系统采集到的传感器数据。对信号结果进行信号稳定性分析,其结果如图 7 所示。

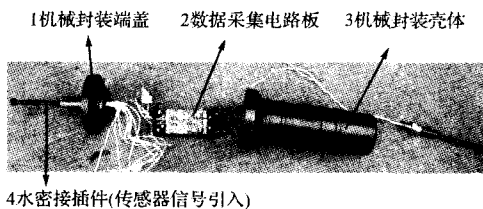


图 6 数据采集器电路板及其机械封装实物图

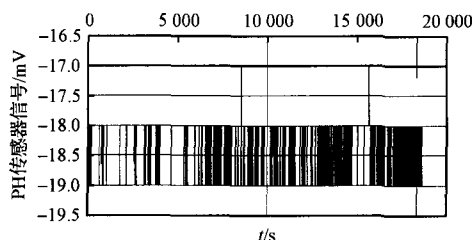


图 7 高压仓中测量到的 pH 传感器信号

4.2 数据采集器测量通道的线性度试验

用精度为 0.001 mV 的精密直流信号源输出高精度直流信号,将该信号接入到数据采集器的信号引入端,并记录采集到的数据。改变信号源的信号输出值,记录多组信号输入值和信号采集值。将信号输入值和信号采集值进行线性拟合,得到如图 8 所示的拟合结果,从图中可以看到采集到的信号值线性度非常好,经计算,相关系数为 1,均方差小于 1 mV。

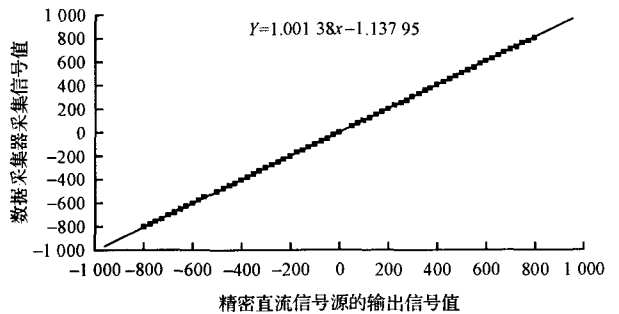


图 8 数据采集器测试通道的线性度拟合直线

在高压环境中,电路板置于机械封装中,与外部高压环境隔绝,因而仍然处于常压状态。在常压环境中对电路板采集通道进行标定是可信的,外部处于高压环境中其线性度不会受到影响。

5 结束语

- (1) 本研究所设计的深海数据采集系统具有低功耗特性,能够满足长时间深海数据采集的特殊要求。
- (2) 数据采集电路精度可以达到 $\pm 1 \text{ mV}$,能够满足精度要求。经过试验,采集到的数据比较稳定。
- (3) 数据采集电路的外部机械封装能够承受 3 000 m 水深外压压力,满足耐压防漏要求。

参考文献 (References):

- [1] 陈 鹰,潘依雯. 深海科考探险日记[M]. 杭州:浙江大学出版社,2004.
- [2] 冯 军,李江海,牛向龙. 现代海底热液微生物群落及其地质意义[J]. 地球科学进展,2004,19(6):931-938.
- [3] 赵生才. 海底热液作用与极端生态系统[J]. 地球科学进展,2005,20(2):257-260.
- [4] 王岩峰,张 杰,易杏甫,等. 用于海洋生态动力监测的拖曳系统设计[J]. 高技术通讯,2006,16(9):975-979.
- [5] 张雪彤,张荣华,胡书敏,等. 大洋中脊热水探测与新型传感器[J]. 地质论评,2006,52(6):843-847.
- [6] 沈建华,杨艳琴. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 童诗白,华成英. 模拟电子技术[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [8] 陈延奎. 基于 80C51 单片机的通用数据采集与处理系统[J]. 机械,2008,35(4):49-51.