

# 一种基于 MSP430 微处理器的电控浮体装置的设计

高清泽 陈长久 彭飞

(中国船舶重工集团公司 第760研究所 大连 116013)

**摘要:** 针对水下大体积测量设备自动回收的应用需求,介绍了一种基于压力传感器和微处理器的电控浮体装置的设计方案。本方案以 TI 公司的低功耗微处理器 MSP430F149 为控制核心,以 Intersema 公司的 MS5541C 压力传感器为感知单元,以电磁阀为受控动作单元,采用电容储能释放的方式对电磁阀进行驱动并可实时检测电磁阀保持电流大小并进行反馈调节。同时该浮体装置可根据水下测量设备上浮和下潜不同工况的需求自动控制电磁阀的吸合和释放,调整浮体气囊的充放气状态,具有高可靠性和低功耗的优点,并在现场试验中得到应用。

**关键词:** 电控浮体装置;MSP430F149;MS5541C 压力传感器;电磁阀

**中图分类号:** TP368.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Design of electronic control buoyancy mechanism based on MSP430 microprocessor

Gao Qingze Chen Changjiu Peng Fei

(The 760 Research Institute of CSIC, Dalian 116013, China)

**Abstract:** According to the need of underwater measurement equipment automatic recycling application, this paper introduces a design of electronic control buoyancy mechanism based on microprocessor. This mechanism takes the TI company's low power consumption microprocessor MSP430F149 as the core, the Intersema MS5541C pressure sensor as the sensing unit, the pneumatic solenoid valve as the controlled unit and takes the method of capacitor stored energy and release to drive the pneumatic solenoid valve and detects the maintain current to feedback regulate it. According to the demand of different condition of underwater measurement equipment to rise and descend, the buoyancy mechanism can control the pneumatic solenoid valve to close and release for adjusting the state of floating gasbag. This buoyancy mechanism has the advantages of high reliability and low power consumption.

**Keywords:** electronic control buoyancy mechanism; MSP430F149. MS5541C Pressure sensor; solenoid valve

### 1 引言

21 世纪是海洋的世纪,海洋拥有丰富的生物、矿产资源成为经济发展的重要支点,同时海洋因其通透性和天然的地理格局成为重要的国防屏障<sup>[1]</sup>,随着人们对海洋探知的不断深入,水下测量设备应用也越来越广泛,比如各类水下传感器阵列、海床基设备、水下大型测量平台等,而该类装置大多体型较大,布放深度深,采用传统的吊放回收方式难度大,而水下电控浮体装置搭载浮力气囊跟随测量设备布放,在水面平台通过水声释放器可远程无线遥控海底水下测量设备的自动上浮回收,可极大降低设备的回收难度。由于水下电控浮体装置需要跟随水下测量装置长期独立处

于海底进行工作,所以系统工作的可靠性和低功耗成为首要要求。根据需求,提供了一种智能电控浮体主控装置的设计方案并在实际试验中得到成功应用。

### 2 系统总体构成

该文设计的电控浮体装置的总体构成如图 1 所示。主要由 TI 公司的 MSP430F149 构成核心控制模块, MSP430 单片机是一款具有精简指令集的 16 位超低功耗混合型单片机,具有高性能的模拟技术和丰富的片内外设,非常适用于电池供电和空间受限的工作环境以及便携式应用场合<sup>[2]</sup>。

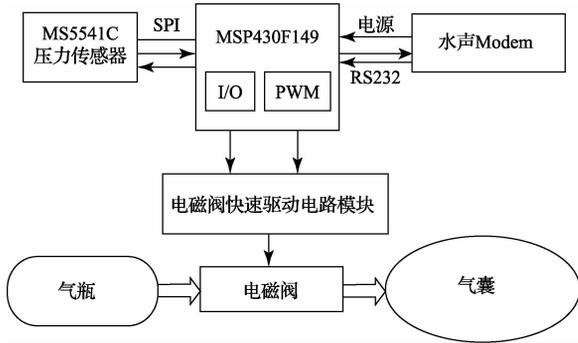


图 1 系统模块的总体构成

整个系统由 MSP430F149 核心控制模块、MS5541C 压力传感器感知模块、电磁阀快速驱动电路模块、受控电磁阀以及气囊部件和外部水声释放器模块组成,整个系统工作所需的 6V 直流电源的由外部水声释放器提供,同时 MSP430F149 微处理器通过 SPI 总线与 MS5541C 压力传感器相连,通过本身的 I/O 端口和 PWM 方波输出接口连接电磁阀快速驱动电路,完成对受控原件电磁阀的控制,同时通过 RS232 串口模块完成与外部水声 Modem 的信息交换。

### 3 开关电磁阀的动态特性

$$F = K(IW)^2 S / \delta^2 \times 9.8 \times 10^{-8} \quad (1)$$

式中: $F$  为电磁吸引力; $K$  为常数; $I$  为线圈电流; $W$  为线圈匝数; $S$  为铁芯截面积; $\delta$  为气隙大小<sup>[3]</sup>可知,电磁吸力与线圈中通过的电流  $I$  的平方成正比,与工作气隙  $\delta$  的平方成反比,通过调节流过线圈中电流  $I$  的大小可以方便地对电磁阀电磁吸合力进行调节<sup>[3-4]</sup>。

为提高电磁阀动作的可靠性,瞬间以较大幅度增加电磁吸合力,控制电磁阀开启时应在短时间内加大通过线圈中的驱动电流,即设法使  $di/dt$  为一个较大的数值,电磁线圈在电路形式上等效为一个电阻  $R$  和一个电感  $L$  的串连的

器件,所以当施加外电压  $U$  时,线圈中的电流变化规律满足方程:

$$U = iR + Ldi/dt \quad (2)$$

为使  $Ldi/dt$  为一较大的数值,在其他参数一定的情况下,应增大外加电压  $U$  值,实现电磁阀的快速开启。

电磁阀开启后,因工作气隙  $\delta$  较小,所以保持电磁线圈通入较小的电流便能产生足够的电磁作用力维持电磁阀状态,同时较小的电流可以有效降低能量消耗,减小线圈发热。

综上所述,高速电磁阀驱动电路的设计要求应根据电磁阀的不同工作阶段,调节相应的驱动电流大小。电磁阀线圈电流在整个工作过程中的理想曲线如图 2 所示。

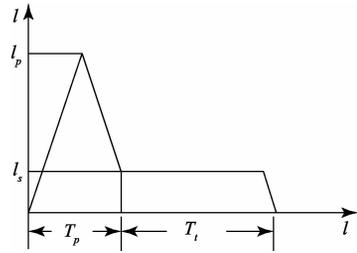


图 2 电磁阀工作理想电流

### 4 电磁阀快速驱动电路模块设计

对电磁阀的控制一般为开关量控制,单片机的 I/O 口输出信号为 TTL 电平,无法直接驱动电磁阀,因此需要将控制信号进行功率放大,再加载到电磁阀上<sup>[5]</sup>。系统采用的电磁阀额定工作电压为 12 V,电磁阀线圈阻抗约为 45  $\Omega$ ,即开启电流约为 270 mA,系统中电磁阀快速驱动电路模块原理如图 3 所示。主要由前级升压电路模块和电磁阀驱动模块构成,采用电容储能释放激励的方式,主要作用是将控制器发出的控制信号进行功率放大,以驱动电磁阀快速动作<sup>[6]</sup>。

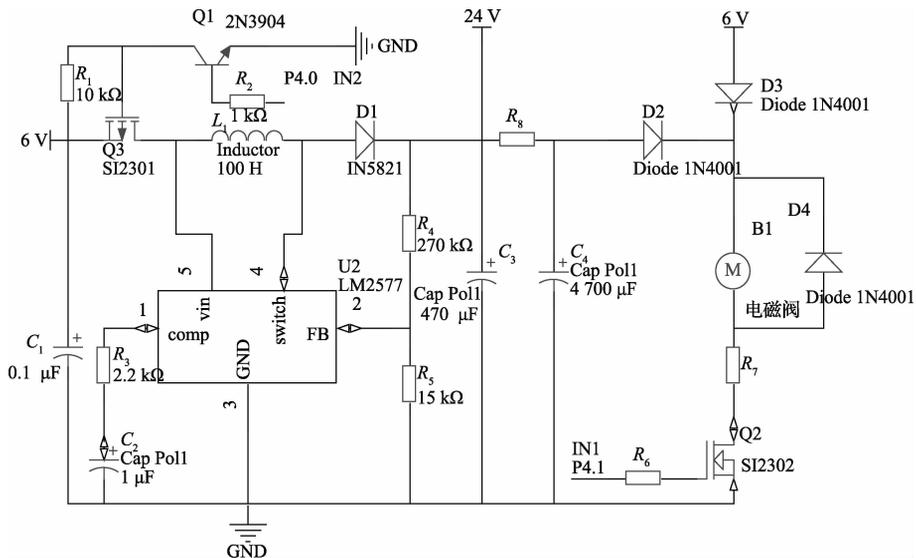


图 3 快速驱动电路模块

MSP430F149 微处理器通过 P4.1 和 P4.0 端口分别输出 PWM 信号 IN1 和升压电路选通信号 IN2。

P4.0 端口通过 P 沟道 MOS 管 Q3 作用升压电路前端,当输入信号 IN2 为低电平,三极管 Q1 关断,功率管 Q3 栅极和源级之间无电势差,Q3 不导通,升压电路不工作,当 IN2 输出高电平,三极管 Q1 导通,功率管 Q3 栅极和源级之间存在电势差,Q3 导通,升压电路开始工作,通过 LM2577 DC/DC 升压模块后得到的 24 V 直流通过电阻向储能电容 C<sub>1</sub> 进行充电。

P4.1 端口通过 N 沟道 MOS 管 Q2 作用于电磁阀回路。待前级 DC/DC 升压电路对储能电容充电完成,前级 DC/DC 升压电路关断,电容 C<sub>1</sub> 锁存能量。当系统接收指令需要开启电磁阀的时刻,MSP430F149 微处理器输出信号 IN1 为高电平,储能电容 C<sub>1</sub> 通过二极管 D2 向电磁阀 B1 放电,瞬间约为 530 mA 的驱动电流可以加速电磁阀吸合,待储能电容放电至低于 6 V 时,D2 关断,D3 导通,6 V 直流电源直接给电磁阀供电,由于此时电磁阀已经吸合,所以 6 V 直流电源提供的 130 mA 小电流依然可以维持电磁阀处于吸合状态。

若要继续减小电磁阀的保持电流以达到更低功耗的目的,MSP430F149 微处理器的 P4.1 端口可由高电平输出转为输出占空比可变的 PWM 方波信号,由于 PWM 脉冲周期远远小于线圈的充放电时间,脉冲信号的占空比越长,线圈的平均电流也就越大,电磁阀线圈的维持电流便可以通过控制高频 PWM 脉冲波的占空比方便地进行调节,该信号通过功率 MOS 管 Q2 控制 6 V 电源输入的占空比。从而精确调节流过电磁阀电流大小,最大限度的保持系统低功耗。

经实际测量,电磁阀确定的情况下,电磁阀的频率决定了保持电流的纹波,该系统 PWM 频率为 20 kHz,纹波满足系统要求,占空比决定了保持电流的大小,不同占空比下对应的电磁阀保持电流如表 1 所示,占空比的选择应能尽量使保持电流维持在一个较小的数值同时也要确保

电磁阀稳定地维持开启状态,通过试验发现使保持电流的大小约为开启电流的 30%~40%效果较好,本系统中保持电流大小应尽量维持在 90 mA 左右,当保持电流低于 80 mA 时,电磁阀无法维持打开状态,所以为确保系统可靠性,电磁阀保持电流不得低于 85 mA。

表 1 占空比保持电流对照

占空比	保持电流/mA
直流高电平	125.6
5 : 1	102.1
4 : 1	97.0
3 : 1	91.5
2 : 1	79.3
1 : 1	62.8

### 5 PWM 方波产生程序的设计

MSP430F149 微处理器对于电磁阀电流精确控制是通过输出频率和占空比可调的 PWM 方波完成,系统中 PWM 方波的产生是依靠 MSP430F149 微处理器内部定时器模块 Timer\_B 的捕获/比较单元实现。Timer\_B 是 16 位计数器,包含 7 个具有 8 种输出模式的可配置输出单元。可支持序列时序的控制、多个捕获/比较功能、多种 PWM 波形输出等功能<sup>[7]</sup>。

Timer\_B 定时器具有 3 种计数模式分别为增计数模式、连续模式、增/减计数模式<sup>[8]</sup>。系统采用增计数模式,即当计数器增计数到 TBCL0 的值,定时器复位并从 0 开始重新计数。

每个捕获/比较模块包含一个输出单元用于发生 PWM 方波,每个输出单元有 8 种工作模式,当定时器计数到 TBCL1 或从 TBCL0 计数到 0 时,输出信号按选择的输出模式发生改变,各种模式输出波形如图 4 所示,系统采用输出模式 7: PWM 复位位置产生方波。由图中可知, PWM 方波占空比为 TBCL0/TBCL1。

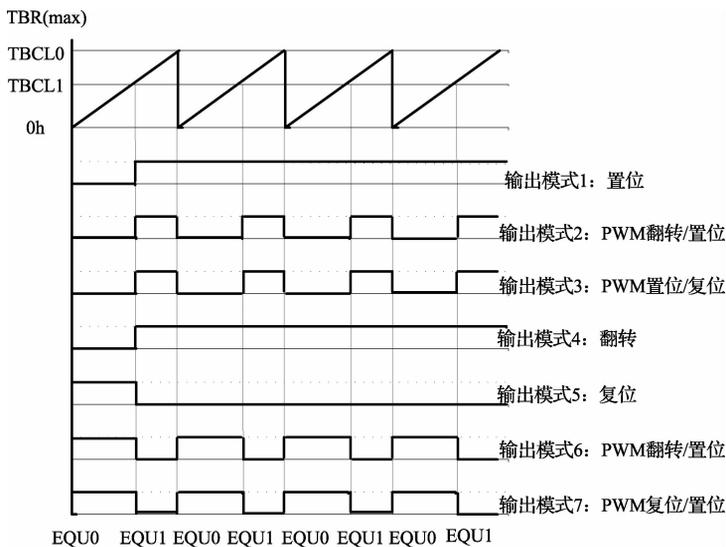


图 4 增计数模式输出实例

## 6 电磁阀保持电流检测电路的设计

系统的另一特点是采用电流检测反馈控制 PWM 信号占空比的输出,与恒定 PWM 占空比输出控制方式相比,这样做的好处是在电池电压变化或者其他情况下保证电磁阀保持电流的恒定,这对于确保系统的可靠性至关重要。

电磁阀保持电流检测电路如图 5 所示。

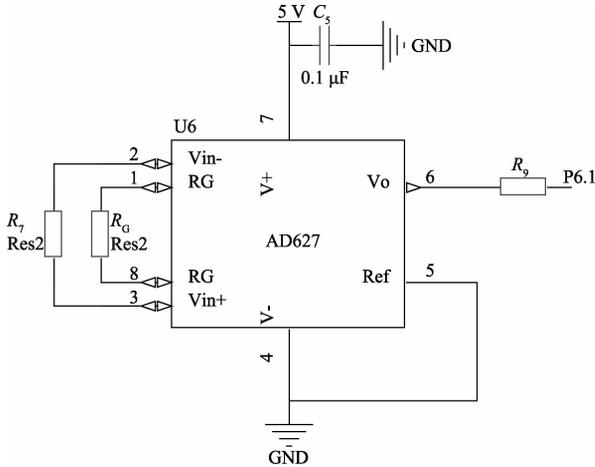


图 5 电磁阀保持电流检测电路

AD627 为低功耗差分放大器,通过电阻  $R_G$  可以调节差分增益,增益范围为  $5 \sim 1\,000$ ,增益计算公式为:

$$G = 5 + (200\text{ k}\Omega / R_G)$$

$R_7$  为高精度电流采样电阻,串联在电磁阀回路中,将流过电磁阀的保持电流转化为标称电压信号  $U_1$ ,  $U_1 = iR_7$ ,  $U_1$  经 AD627 放大 7 倍送入 MSP430F149 微处理器的 A/D 转换模块, MSP430F149 微处理器实时监控保持电流的变化,并将其反馈给内部定时器模块 Timer\_B,调节 PWM 脉宽调制信号的占空比,确保保持电流的恒定。即始终保持标称电压  $U_1$  与 PWM 方波占空比  $TBCL0/TBCL1$  乘积为一定值,当由于外在原因(例如电池供电电压降低)导致电磁阀保持电流减小时,系统自动调高 PWM 方波占空比,增加流过电磁阀线圈保持电流的大小,维持电磁阀电磁吸合力,提高系统工作的可靠性。

## 7 系统软件设计

整个系统的工作流程为,系统跟随水下测量设备布防,在接收到回收命令之前,水声 Modem 处于待机状态,其他系统部分处于掉电状态,没有任何的能量损耗,当外部水声 Modem 接收到水面平台的水声遥控指令和信息交换指令后,会向整个系统提供 6 V 直流电源,系统上电开始工作, MSP430F149 微处理器通过 P4.1 和 P4.0 端口启动电磁阀快速驱动电路,以瞬间的极大电流可靠地激励电磁阀,气囊开始充气,当电磁阀成功激励之后, MSP430F149 微处理器自动调节流过电磁阀线圈保持电流的大小,减少系统整体功耗,同时确保电磁阀一直处于开启状态,直到水下设备开始上浮。

系统采用 MS5541C 数字压力传感器为感知单元, MS5541C 采用 3 线的 SPI 接口,可以数字形式直接输出压力和温度的测量值,可与所有具有 SPI 接口的微处理器进行通信, MS5541C 的主频时钟 MCLK 为 32.768 kHz,由 MSP430F149 提供,简化了线路的复杂性,稳定可靠<sup>[9]</sup>。

MS5541C 每隔 5 s 时间检测一次压力,并将压力数据传送给 MSP430F149,在 MSP430F149 内部程序将压力的绝对数据转化为水下设备上浮的平均速度信息  $s_p$ ,当上浮速度达到预设值  $u_p$  或者绝对压力值小于某一预设值  $top$  时, MSP430F149 控制电磁阀驱动电路闭合电磁阀,停止给气囊充气,此时可认定测量设备已正常上浮或者已经快上浮至海面。

设备上浮至海面后,可能会遇到打捞回收过程困难,导致设备长时间在海面停留,由于外部不可知的原因引发气囊漏气,设备下沉的情况,所以 MS5541C 压力传感器会不停检测压力数值,当水压值大于某一预设值  $floor$  时, MSP430F149 会重新控制电磁阀驱动电路打开,为浮体气

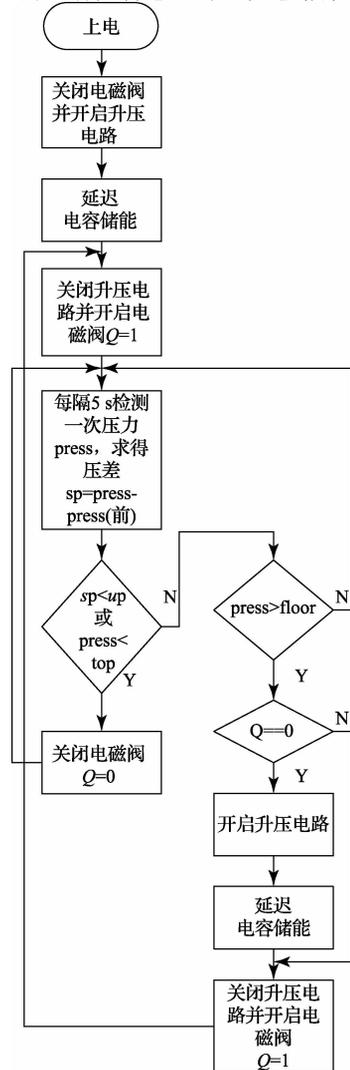


图 6 系统软件流程

囊充气,以最低的消耗尽量保持设备长期在水面漂浮,等待打捞回收。

MSP430F149微处理器的压力检测程序软件总体流程如图6所示。

### 8 低功耗设计

低功耗是系统的重要指标,为了降低功耗,主要采用了以下措施<sup>[10-12]</sup>:

- 1)选择MSP430F149主控单片机具有睡眠功能,系统在水下待机时大部分时间都处于睡眠状态。
- 2)所有的集成电路都选用低功耗器件,包括压力传感器MS5541C,AD627为低功耗差分放大器。
- 3)利用单片机对系统各功能模块的电源进行控制,再控制流程上尽量减少功耗。

### 9 结 论

系统中在实际中已成功应用,效果良好,成功完成多次水下设备自动上浮回收的任务。本系统以TI公司的MSP430F149微处理器为核心,通过电磁阀快速驱动保持电路可以很好的确保系统工作的可靠性,同时在电路设计和软件编程中采取一系列的措施降低系统功耗,可满足系统长时间在水下工作的需求,通过进一步完善可以应用在绝大多数大中型水下测量设备上,比如海床基设备、水下测量平台等,对于该类水下设备布放后的自动回收工作具有一定的借鉴意义。

### 参考文献

[1] 朱心科,金翔龙,陶春辉,等. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. 机器人,2013,35(3):376-384.

[2] 焦冰,叶松,温雅婷. MSP430低功耗原理及其在海温测量中的应用[J]. 现代电子技术,2011,34(10):

189-192.

[3] 朱旭锋,柳柱,谷岩. 电磁阀保持电流的自动调节系统设计研究[J]. 航天控制,2014,32(1):94-98.

[4] 李春青,姜峰,李明海,等. 高速电磁阀动态响应特性的仿真分析[J]. 计算机仿真,2013,30(11):224-227,250.

[5] 胡立群,陈敦军,吴凡超. 基于单片机的多通道控制器的设计[J]. 电子测量技术,2014,37(1):66-69.

[6] 耿守本,韩国华. 一种高速开关电磁阀智能驱动模块的设计[J]. 工业控制计算机,2011,24(2):89-91.

[7] 杨艳琴. MSP430系列16位超低功耗单片机实践与系统设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[8] 高清泽. 卡尔费休双通道微量水分测定仪构建技术研究[D]. 天津大学,2011:68.

[9] 侯培国,邢耀双,姚海兰,等. 基于MSP430的微功耗无线压力变送器的研究与设计[J]. 仪表技术与传感器,2011(2):19-21.

[10] 彭雪峰,徐守品,杜艳. 分布式无线露点压力监测系统的设计[J]. 电子质量,2014(8):28-30.

[11] 王昊,陈仁文. 基于SP37和MSP430的汽车轮胎压力监测系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2014,33(10):67-71,87.

[12] 冷毅,李青侠,刘胜,等. 基于无线传感器和CAN总线的直接式轮胎压力监测系统[J]. 仪器仪表学报,2008,29(4):711-717.

### 作者简介

高清泽,硕士研究生,助理工程师。主要研究方向为仪器与测试技术。  
E-mail:15941160448@163.com