

高精度恒压计量泵控制系统的设计

崔丹丹¹, 崔高伟²

(1. 中原工学院 信息商务学院, 河南 郑州 450007;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘要: 针对传统计量泵在压力调节、流量控制方面存在精度低、稳定性差等问题, 设计了一种基于嵌入式系统的高精度恒压恒速计量泵控制系统。该系统以 ARM 处理器为开发平台, 采用模块化的设计思想, 硬件部分设计了数据采集模块、数据存储模块、数据处理模块、控制模块以及通讯模块等。通过单片机 STM32 的定时器输出 PWM 波实现对步进电机的精密控制, 利用光电编码器以及压力变送器采集电机的转速和计量泵出口压力值, 求出计量泵出口压力值与理论值的差值, 采用模糊 PID 算法将压力差值转换为控制脉冲信号, 实现对恒压恒速输出过程的实时调节。实际试验结果表明, 设计的计量泵控制系统具有控制精度高、稳定性好等优点, 具有广泛的应用价值。

关键词: 恒压计量泵; 高精度; 脉宽调制; 模糊 PID 算法

中图分类号: TP934 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19241

Design of High Precision Constant Pressure Metering Pump Control System

CUI Dandan¹, CUI Gaowei²

(1. College of Information&Business, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, Henan, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the problems of low precision and poor stability in pressure regulation and flow control with traditional metering pump, a high precision constant pressure and constant speed metering pump control system based on embedded system was designed. The ARM processor was taken as the development platform, the modular design idea was adopted, the data acquisition module, the data storage module, the data processing module, the control module and the communication module and so on were designed in the hardware part. PWM wave was outputted from single chip microcomputer STM32 timer to realize precision control of step motor, the motor rotation speed was collected by photoelectric encoder and pump outlet pressure value was metered by pressure transmitter, and the difference between metering pump outlet pressure value with the theoretical value was given, fuzzy PID algorithm was used to convert pressure difference into control pulse signal, the process of constant pressure constant speed output was real-time adjusted. The actual test results show that the designed metering pump control system has the advantages of high control accuracy and good stability, and has extensive application value.

Key words: constant pressure metering pump; high precision; pulse-width modulation (PWM); fuzzy proportion integration differentiation algorithm

随着人类社会的发展以及工业化进程的不断加快, 石油、天然气等稀缺资源过度开采造成资源短缺, 因此需要改进技术提高开采资源的效率^[1-2]。而计量泵作为一种计量仪器, 在石油、煤炭、化工等领域都有着广泛的使用, 市面上出现的计量泵由于压力和流量控制精度低、稳定性差

不能满足高效率开采的需要。

本文设计了一种基于嵌入式系统的高精度恒压恒速计量泵控制系统。系统以 32 位单片机为控制核心, 通过步进电机控制活塞的往复运动来控制液压缸内的压力, 利用压力变送器把实时采集到的泵出口压力反馈给单片机, 最后运用模

基金项目: 2017 年河南省科技厅攻关基金项目: 基于 plc 控制变频器的液位控制系统设计 (172102210158)

作者简介: 崔丹丹 (1983-), 硕士, 讲师, Email: cuidandan19830313@163.com

糊PID控制算法改变单片机的定时器输出PWM波的频率来调节步进电机的转速,以达到稳定计量泵出口压力的效果。实际使用结果表明,该系统与传统的计量泵相比,具有成本低、体积小、压力控制精度高、稳定可靠等优点,具有一定的推广应用价值^[3-4]。

1 系统总体设计

恒压计量泵控制系统主要是由液压泵体、丝杆、步进电机、减速器以及电磁阀5部分组成^[5]。STM32单片机的定时器输出的PWM波控制步进电机转动,步进电机通过减速器与丝杆相连,当步进电机转动时它带着丝杆上的活塞一起往复运动,通过交替控制2个电磁阀的吸合来控制吸液和排液2个过程,通过改变活塞往复运动的速度来调节液压泵体内的压力。恒压计算泵控制系统中恒压计量泵结构示意图如图1所示。

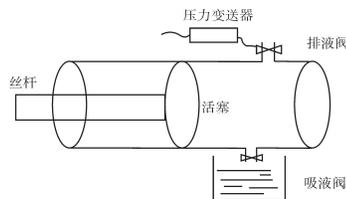


图1 计量泵结构示意图

Fig.1 Structure diagram of metering pump

控制系统的恒压计量泵控制过程如下^[6]:当步进电机快速转动时,与之相连的丝杆带动活塞就会一起做往复运动,此时在液压泵体内就会产生压力,利用压力变送器实时采集泵的出口压力,并把压力数据反馈给单片机,单片机把反馈的压力值与设定的压力值相比较,并把差值通过模糊PID控制算法计算得到相应的脉冲频率,以此脉冲频率来调节单片机输出的PWM波频率来修正步进电机的转速,进而达到稳定计量泵出口压力的效果。

2 系统的硬件设计

高精度恒压计量泵控制系统主要由恒压控制系统和数据监测系统2部分组成^[7-8]。恒压控制装置是整个系统的核心,其主要是由单片机STM32、压力变送器、光电编码器以及电磁阀构成。数据监测装置主要是利用上位机实时显示系统整个恒压过程中压力的波动情况。

光电编码器与步进电机的输出轴相连,当电机转动时光电编码器就会产生与电机转动速度

成比例的脉冲,利用STM32的I/O口实时采集此脉冲,由此实现对电机转速的采集与反馈;利用压力变送器实时采集计量泵出口的压力值,并把该值送入STM32内部与设定的压力值比较,最后把差值转换为相应频率的脉冲信号来调节步进电机的转速;通过电磁阀控制计量泵吸取、排除出液体;系统采用继电器实现对电磁阀的隔离控制,通过STM32的I/O口输出有效的数字信号来实现电磁阀的开关。

系统硬件框图如图2所示。

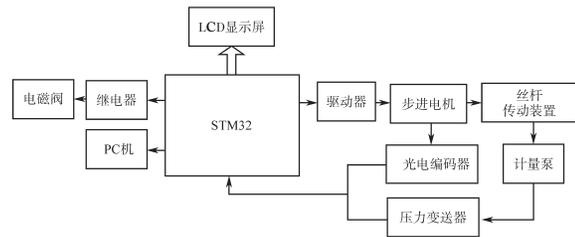


图2 系统硬件框图

Fig.2 The block diagram of system hardware

2.1 主控芯片选择

系统采用ST公司生产的STM32F407IGT6作为主控芯片,其是基于M4核的32位芯片,主频高达168 MHz且具有丰富的I/O资源。

STM32F4与STM32F1相比,最大的优势就是增加了FPU单元以及DSP指令集,这使得其在浮点数方面的运算能力大大增加。此外,STM32F4拥有多达192 kB的片内SRAM,以及更快的模数转换速度、更低的ADC/DAC工作电压。STM32F407IGT6内部集成了SPI控制器、FLASH控制器、UART控制器、DAC/ADC控制器等,具有丰富的外设资源供研发人员选择,大大节约了开发的时间。

2.2 压力变送器采集模块的设计

压力采集电路是通过压力变送器实时采集计量泵出口的压力值,并把测量得到的值反馈给单片机处理,然后根据压力差值重新补偿步进电机的转速以达到稳定计量泵出口压力的效果^[9]。因此,压力变送器测量的精度从根本上决定着系统恒压输出的准确度。

控制系统选用的是美国Senex公司生产的压力变送器DG1300,该型号的压力变送器测量精度高达0.25级,压力测量范围广,约在0~70 Mpa。系统使用DC 24 V直流给压力变送器供电,压力变送器把测量的压力值通过4~20 mA电流的形式输出。

单片机并不能直接处理4~20 mA的电流信号,系统利用高精度采样电阻 R_{20} 把电流信号转换为0.4~2.0 V的电压信号,再经过运算放大电路把信号放大到适合AD转换器采集的电压范围,具体电路图如图3所示。

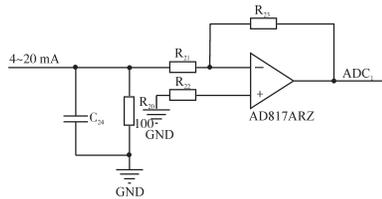


图3 压力信号采集电路

Fig.3 Acquisition circuit of pressure signal

2.3 光电编码器模块的设计

本文设计的控制系统通过光电编码器来检测步进电机的转速。光电编码器主要是由光栅盘和光电探测装置组成,光电编码器与步进电机的输出轴连接,当电机转动时,光栅盘与电机以相同的速度转动,此时由发光二极管组成的光电探测装置就会根据电机转动的速度输出相应频率的脉冲信号。通过STM32的I/O口实时采集光电编码器输出的脉冲信号的频率来实现对电机转速的测量^[10-11]。通过STM32的定时器输出的PWM波的频率来实现对电机速度的控制。光电编码器产生的A、B信号彼此相差90°,当A超前B 90°时代表电机正转,而当A落后B 90°时代表电机反转。

光电编码器结构原理图如图4所示。

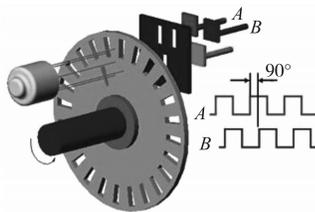


图4 光电编码器原理图

Fig.4 Schematic of photoelectric encoder

系统选用的是上海公司生产的ST50系列光电编码器来检测电机的转速。该型号编码器采用集电极开路输出,供电范围可选DC 5 V和DC 24 V 2种,系统选用DC 5 V直接供电。由于STM32的I/O口输出的是3.3 V的高低电平,光电编码器输出的高电平与3.3 V不兼容,因此采用电平转换芯片SN74LVC4243DW把光电编码输出的电平转换为3.3 V的高低电平后再与STM32连接。

系统电平转换的具体转换电路图如图5所示。

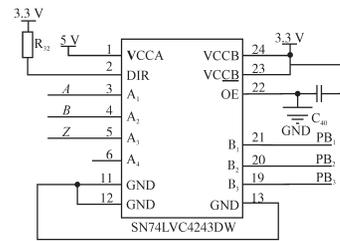


图5 电平转换电路

Fig.5 Level conversion circuit

如图5所示,电平转换芯片的A₁、A₂、A₃与光电编码器的3个输出端连接,B₁、B₂、B₃与STM32的3个管脚相连,经过转换使得STM32的I/O口可以直接读出光电编码器输出的高低电平的频率,以此计算出电机的转速。

2.4 电磁阀控制电路的设计

计量泵的吸液和排液2个过程是通过电磁阀控制的,系统采用光耦实现单片机对电磁阀的隔离控制^[12-13],当光耦的Close端输出低电平时光耦导通,电磁阀吸合;当Close端为高电平时光耦不通,电磁阀断开。电磁阀控制电路的具体电路图如图6所示。

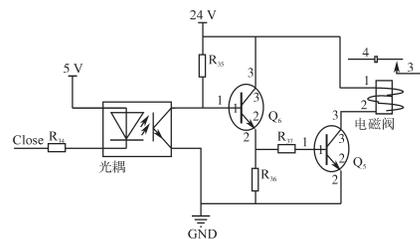


图6 电磁阀控制电路

Fig.6 Control circuit of solenoid valve

2.5 A/D采集电路的设计

系统AD采样电路具体的A/D转换电路结构图如图7所示^[14-15]。

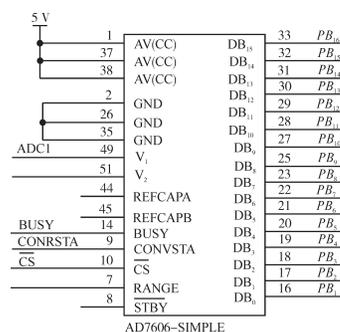


图7 A/D转换电路

Fig.7 Conversion circuit of A/D

系统采用Analog Devices公司生产的AD7606芯片来实现对压力变送器模块输出电压的采样,AD7606具有8个采样通道,16位分辨率且采样速度高达200 kS/s,采用DC 5 V供电,它通过并行总线的方式与STM32单片机相连,AD7606的最快转换时间为4 μ s,采样输入电压在-10~+10 V。

3 软件设计

系统的软件设计主要分为压力采集软件设计、步进电机转速采集软件设计以及恒压软件设计等。系统上电后首先执行复位操作,然后压力变送器模块开始采集计量泵出口的压力值,并把采集到的压力值与设定的压力值比较,最后把压力差值通过模糊PID算法转换为相应的脉冲频率来补偿步进电机的转速,以实现计量泵恒压的控制。

系统软件流程图如图8所示。

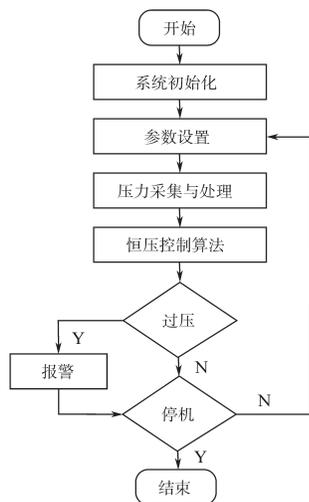


图8 系统软件流程图

Fig.8 Flow chart of system software

4 实验数据分析处理

4.1 模糊PID控制算法设计与实现

计量泵恒压恒速系统主要是通过调节步进电机的转速实现的。

控制系统通过安装在计量泵上的传感器组实时采集计量泵的出口压力值、电机转速大小等数据,将计量泵出口压力值与设定的理论值进行比较,得出差值。利用模糊PID控制算法将差值信号转换成与之对应的控制脉冲信号 $u(\omega)$,同时将 $u(\omega)$ 反馈给步进电机,对步进电机的速度进行调整,实现对计量泵恒压恒速输出的控制。

4.2 实验数据分析

系统设计的恒压控制范围是0~50 MPa,试验分辨记录了30 MPa,40 MPa时系统恒压的控制输出曲线。利用串口通讯把系统采集到的数据发送到上位机显示,记录在30 MPa,40 MPa时系统恒压控制随时间变化的数据,具体数据如表1所示。

表1 恒压工作模式实验数据

Tab.1 Experiment datas of constant pressure working mode

时间/s	压力设定值为30.000 0/MPa		压力设定值为40.000 0/MPa	
	压力设定值	实际输出值	压力设定值	实际输出值
0	30.000	0.154	40.000	0.561
2	30.000	12.341	40.000	20.812
4	30.000	17.591	40.000	36.782
6	30.000	19.673	40.000	38.782
8	30.000	20.087	40.000	39.985
10	30.000	19.983	40.000	40.089
20	30.000	20.091	40.000	40.091
30	30.000	20.068	40.000	39.981
40	30.000	20.097	40.000	39.985
50	30.000	20.016	40.000	40.062
60	30.000	20.891	40.000	40.086

图9、图10分别为30 MPa和40 MPa恒压控制过程压力随时间波动的曲线。

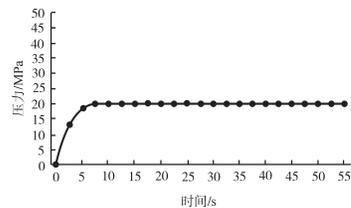


图9 设定压力随时间波动曲线(30 MPa)

Fig.9 Pressure fluctuation curve over time(30 MPa)

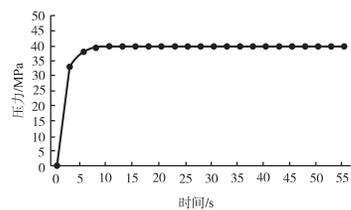


图10 设定压力随时间波动曲线(40 MPa)

Fig.10 Pressure fluctuation curve over time(40 MPa)

由上述实验数据可知,当设定的恒定压力在30 MPa时,系统的控制精度约为0.3%,从图9可以得出:在0~5 s时压力迅速增加,当接近设定压力20 MPa时,此时开始缓慢增加,最终系统把压力控制在20 MPa左右,响应数据约为7 s;当设

定的恒定压力在 40 MPa 时,系统的控制精度约为 0.12%,从图 10 可以得出,0~5 s 时压力迅速增加,当接近设定压力 40 MPa 时,增长趋势减缓,最终系统把压力控制在 40 MPa 左右,此时系统的响应时间约为 8 s。

综上所述,本文设计的基于嵌入式系统的高精度恒压恒速计量泵控制系统的控制精度较高,控制精度在 2% 左右,且响应速度快,响应时间小于 8 s,满足设计预期。

5 结论

针对传统恒压计量泵在恒压工作模式下在压力调节、流量控制方面存在精度低、稳定性差等弊端,设计了一种基于嵌入式系统的高精度恒压恒速计量泵控制系统。系统以高性能 ARM 芯片 STM32F407IGT6 为控制核心,采用具有细分控制技术的步进电机控制器和 PWM 定时器实现对步进电机的精确控制,利用模糊 PID 算法来调节电机的转速,最终实现对计量泵恒压的控制。

仿真和实验结果表明,研制的计量泵恒压控制系统具有精度高、稳定性好等优点,具有一定的推广应用价值。

参考文献

[1] 王晶,魏晋宏,冯超. 基于嵌入式 Linux 的恒压计量泵控制系统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2015(11):52-54.

- [2] 蔡小磊. 高精度恒压恒速计量泵的研制[D]. 扬州:扬州大学,2013.
- [3] 杨凯,廖义德,陈绪兵,等. SCR 系统高精度隔膜计量泵设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(7):390-394.
- [4] 陈以恒,顾煜佳,王申健,等. 隔膜计量泵三相异步电机转速跟踪控制[J]. 电子设计工程,2018,26(5):81-87,89.
- [5] 李琴. 基于嵌入式技术的小型恒压控制系统的设计与实现[J]. 现代电子技术,2017,40(8):81-85.
- [6] 何晓东,史耀耀,赵鹏兵. 复合材料布带缠绕成型压力控制技术[J]. 航空学报,2014,35(3):868-877.
- [7] 王晶. 基于嵌入式 Linux 的恒压计量泵控制系统的设计[D]. 太原:太原理工大学,2015.
- [8] 王楠,蒋薇,严伟,等. 光刻机智能控制系统的设计[J]. 红外与激光工程,2013,42(S2):317-322.
- [9] 程云昊,王勇. 嵌入式标定平台控制系统设计[J]. 机床与液压,2015,43(11):88-90,100.
- [10] 李江峰. 基于 DSP 的微量计量泵控制系统的设计与实现[D]. 秦皇岛:燕山大学,2013.
- [11] 丁言丰. 计量泵远程监控系统及其优化运行的研究与设计[D]. 浙江:浙江工业大学,2015.
- [12] 杨艳萍. 基于 MSP430 单片机的微量计量泵控制系统设计[D]. 兰州:兰州交通大学,2014.
- [13] 姚舜才,马铁华,李峰. 煤层气水力压裂非线性滑模控制器设计[J]. 工矿自动化,2016,42(3):69-74.
- [14] 郑志浪. 基于单向阀的 SCR 计量泵的优化设计与试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2017.
- [15] 唐齐新. 柴油车 SCR 电磁驱动计量泵的开发及其试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2017.

收稿日期:2018-06-25

修改稿日期:2018-10-20