基于单片机的变频增压泵控制系统设计

为克服增压泵压力开关的频繁起动，本着经济实用、高效节能的原则，采用单片机控制变频器，设计了基于单片机的变频恒压增压泵控制系统。单片机将采集到的增压泵出水压力，通过增量式数字PID运算后，去控制单相变频器的输出频率，实现增压泵的出水压力闭环调节。为保证高效节能，设计了水流检测开关来控制增压泵的起停。详细介绍了在单片机中实现增量式数字PID的控制算法和增量式数字PID参数的整定方法。实践表明，采用单片机控制单相变频器实现恒压增压供水，跟可编程逻辑控制器（PLC）作为控制器相比，具有成本低、体积小和便于一体化等优点，跟水压开关控制的增压供水相比，具有噪声小、不存在频繁起停和高效节能等优点，特别适合于高层建筑使用。

雷学堂　李桂林／黄冈师范学院电子信息学院

雷学堂／副教授

关键词／Keywords
增压泵控制系统·
单片机·
恒压供水·
变频器·

0　引言

随着楼房越来越高，高楼供水压力不足已是普遍问题，家用增压泵的需求越来越大。目前市场上的增压泵都是采用串接出水口压力开关控制增压泵的起停，来实现增加水压。这种增压泵价格低廉，但存在起停频繁问题，特别是水笼头出水流量调小的时候，增压泵频繁起停一方面缩短了电动机的使用寿命；另一方面浪费了大量电能（电动机的起动电流是其工作的3～7倍），还存在噪声大的问题[1]。采用可编程逻辑控制器（PLC）控制变频器来调节增压泵的转速能有效避免前述问题，但成本太高，也不便于一体化[2]。本设计采用单片机控制单相小功率变频器来调节增压泵的转速，实现恒压增压供水，有效克服了增压泵的频繁起停，同时还具有成本低、噪声小等优点。

1　恒压供水原理

恒压供水是基于水泵具有平方转矩负载特性，当用水量减少时，电动机转速降低，电动机转速的微量减小，将使输出功率大幅下降来实现[3]。水泵的负载特性为

$$\begin{cases} M \propto n^2 \\ P \propto n^3 \end{cases} \tag{1}$$

式中，n为电动机转速；M为输出转矩；P为输出功率。

恒压增压泵控制原理如图1所示。压力传感器检测增压泵出水口当前压力值$c(t)$，在单片机内跟水压设定值$r(t)$进行比较，得到误差值$e(t)=r(t)-c(t)$，

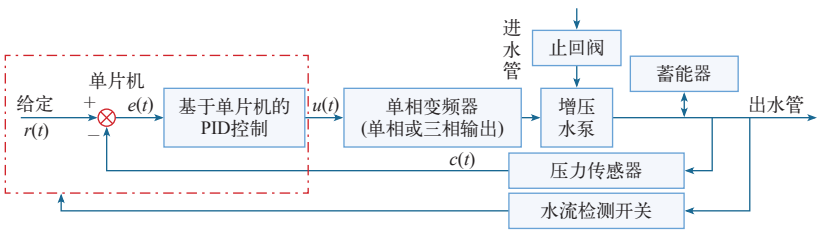


图1　恒压增压泵控制原理图

黄冈师范学院科研项目资助：高度模拟燃油教练车操控特性的电动教车控制系统设计（项目编号：2015014703）。

该误差值$e(t)$经单片机的PID运算，输出控制电压$u(t)$调节变频器输出频率，从而调节增压泵的转速，使增压泵出口水压向设定值改变，达到出口水压恒定在设定值。

为达到节能目的，当用户不用水时应使增压泵停止工作。故在增压泵的进水口安装止回阀，在其出水口安装水流检测开关和蓄能器。由于止回阀和蓄能器保证了增压泵出水口的压力，当水流检测开关检测到用户不用水时，通过单片机控制变频器停止输出，从而关闭增压泵；当用户打开水笼头时，水流检测开关检测到用户正在用水，此时单片机起动变频器工作。

2　增量式PID控制算法

（1）模拟PID的运算关系

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一，其模拟PID组成如图2所示。图2中，$r(t)$为设定值，$e(t)$为偏差值，$c(t)$为当前值，$u(t)$为控制值，K_P、K_I和K_D分别为比例常数、积分时间常数、微分时间常数[4-5]，其运算关系式为

$$\begin{cases} e(t)=r(t)-c(t) \\ u(t)=K_P\left[e(t)+\dfrac{1}{K_I}\int_0^{\tau}e(t)\mathrm{d}t+K_D\dfrac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right] \end{cases} \quad (2)$$

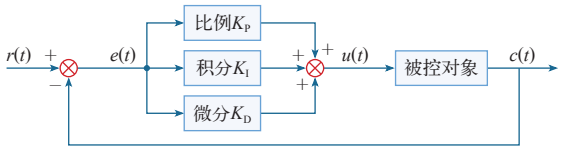


图2　PID组成框图

（2）数字式PID的运算关系

将式（2）中的时间离散化，令$t=kT$，T为采样时间间隔，则式（2）变为

$$\begin{cases} e(kT)=r(kT)-c(kT) \\ u(kT)=K_P\left\{e(kT)+\dfrac{T}{K_I}\sum_{j=0}^{k}e(jT)+\dfrac{K_D}{T}[e(kT)-e(k-1 \end{cases} \quad (3)$$

式中，k为采样序号，$k=1,2,\cdots$；j为$0\sim k$的整数；T为采样周期。

上述离散化过程中，采样时间T必须足够短，才能保证有足够的准确度[6]。

（3）增量式数字PID的运算关系

为书写方便，将$e(kT)$简化表示成$e(k)$，即省去T。可以得到离散的PID表达式为

$$u(k)=K_P\left\{e(k)+\frac{T}{K_I}\sum_{j=0}^{k}e(j)+\frac{K_D}{T}[e(k)-e(k-1)]\right\} \quad (4)$$

将式（4）中的k用$k-1$替代，则可得上一次的PID输出控制电压$u(k-1)$为

$$u(k-1)=K_P\left\{e(k-1)+\frac{T}{K_I}\sum_{j=0}^{k-1}e(j)+\frac{K_D}{T}[e(k-1)-e(k-2)]\right\} \quad (5)$$

将式（4）跟式（5）相减即得PID的输出增量值$\Delta u(k)$为

$$\Delta u(k)=K_P\left(1+\frac{T}{K_I}+\frac{K_D}{T}\right)e(k)-K_P\left(1+\frac{2K_D}{T}\right)e(k-1)+K_P\frac{K_D}{T}e(k-2) \quad (6)$$

当前值采样电路确定后，采样周期T成为常数，当PID参数整定后，K_P、K_I和K_D也为常数，故可令$a_0=K_P\left(1+\dfrac{T}{K_I}+\dfrac{K_D}{T}\right)$，$a_1=K_P\left(1+\dfrac{2K_D}{T}\right)$，$a_2=K_P\dfrac{K_D}{T}$，则式（6）变为

$$\Delta u(k)=a_0e(k)-a_1e(k-1)+a_2e(k-2) \quad (7)$$

式（7）中系数a_0、a_1和a_2都可以事先求出，实际控制时只须获得$e(k)$、$e(k-1)$和$e(k-2)$即可。

（4）增量式数字PID的优缺点

增量式数字PID运算量小，适合在单片机这类低速MCU中实现。将本次计算出的增量跟上次输出的控制量相加作为本次的控制量，反馈回路的扰动对本次输出控制量的影响小，因此抗干扰能力强[6-8]。

由于调节式（7）中系数a_0、a_1和a_2都会影响到K_P、K_I和K_D参数，使得PID原有的K_P、K_I和K_D跟其动态和稳态对应关系不明显，只能通过试探的方法整定。另外，反馈数据的采样时间T必须固定，否则会导致系数a_0、a_1和a_2波动，影响到PID控制的动态和稳态特性，最好将数据采集放到定时中断中进行。

3 增压泵控制电路设计

增压泵控制电路如图3所示。单片机U1采集水压传感器的当前水压，经内部增量PID运算，控制PWM输出的占空比，该PWM脉冲经U2A和U2B两级二阶低通滤波后，得到控制电压$u(t)$去控制变频器的输出频率，从而调节增压泵的转速实现恒压供水。

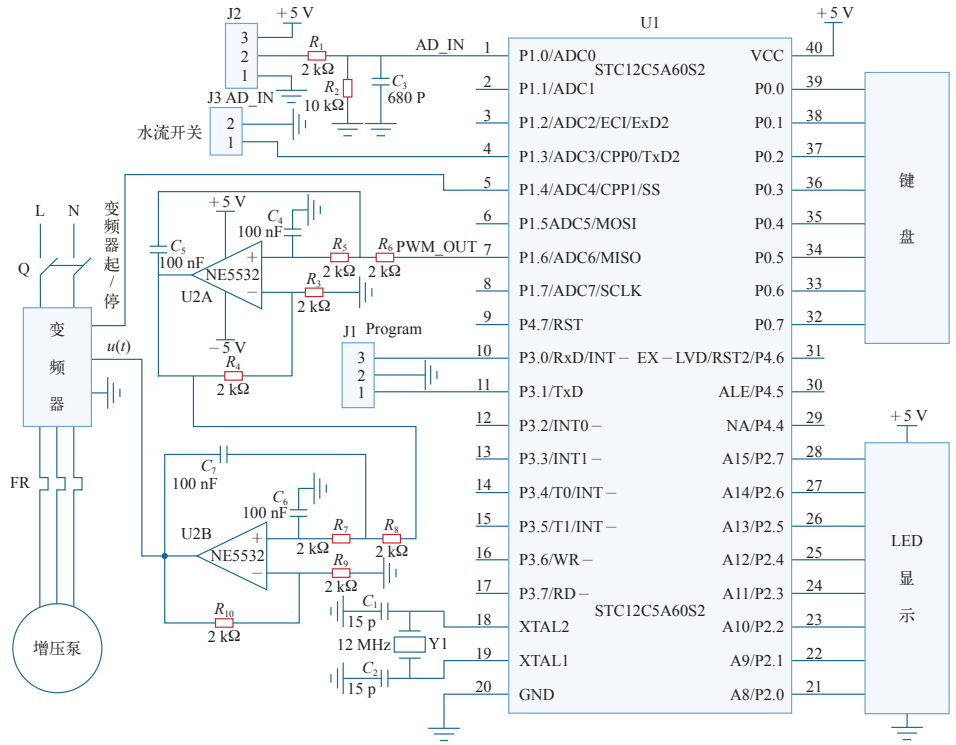
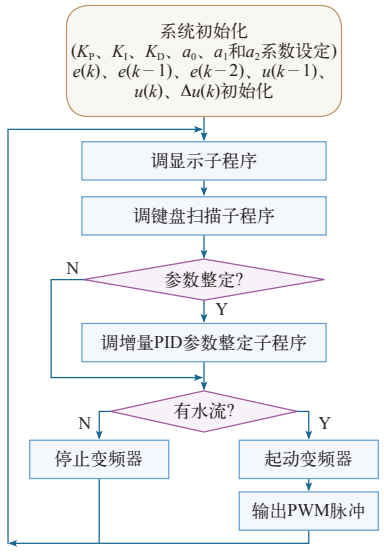


图3 增压泵控制电路图

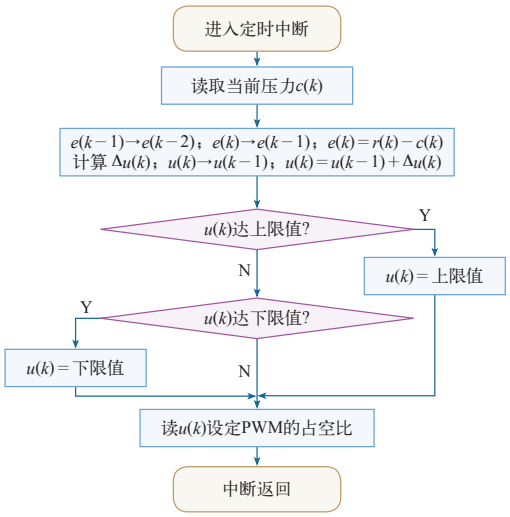
4 增量式PID控制算法的实现

变频恒压增压泵控制程序由主程序、定时中断服务子程序和PID参数整定子程序三大部分组成，流程如图4所示。主程序中只完成初始化、显示、按键、根据水流有无起停变频器和PWM输出。为保证采样周期T的稳定和PID调节的速率恒定，将当前压力的采集、偏差值的计算、增量PID值的计算、PID控制值的计算和PWM脉冲占空比的修改都放到定时中断服务子程序中完成。

PID控制性能优劣的关键在于比例、积分和微分三个参数的设置与调整，在本设计的增量式PID控制系统调试中，关键是系数a_0、a_1和a_2的整定。由于改变系数a_0、a_1和a_2中的任何一个参数都会改变比例、积分和微分的三个参数，系数a_0、a_1和a_2的取值跟PID控制的动态和静态性能之间的对应关系不明显。编程时只能设定a_0、a_1和a_2的大概数值，然后通过反复现场调试才能找到相对理想的参数值，通过直接设定系数a_0、a_1和a_2的值来整定PID参数十分困难。



(a) 主程序流程图



（b）定时中断服务子程序流程图

图4　增压泵控制程序中的主程序和定时中断服务子程序流程

为解决PID参数整定问题，增量PID中的系数a_0、a_1和a_2不直接设置，而是通过设置K_P、K_I和K_D后，再由PID参数整定子程序计算得出，这样就保留了PID参数K_P、K_I和K_D跟PID控制的动态和静态性能之间的对应关系，增量PID参数整定子程序流程如图5所示。

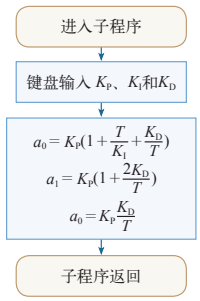


图5　PID参数设定流程

5　增压泵控制系统的调试和测试

本文设计的增压泵控制系统其系数a_0、a_1和a_2经反复整定后，进水口压力为0 kPa的条件下，测试结果如下表所示。

表　恒压增压泵控制参数记录

设定压力/kPa	稳定时间/s	稳定下限/kPa	稳定上限/kPa	超调量/kPa
100	2	97	104	9
150	2.5	146	153	12
200	3	195	204	13
250	3	247	255	15

增压泵出口压力跟设定压力偏差在±5 kPa以内，相对偏差小于5%，相对超调量小于10%，响应速度快，完全能够满足家庭供水要求。

6　结束语

本文设计的基于单片机的单相变频恒压增压泵控制系统，设计了不用水时自动停止增压泵的检测和控制电路，还专门设计了增量PID的参数整定子程序，使增量PID的参数整定跟一般PID的参数整定方法相同。与目前普遍使用的水压开关控制增压泵相比，具有高效节能、有响应快、超调小、准确度高和稳定性好等特点，延长水泵电动机寿命、运行噪声小等优点；与PLC控制的变频恒压供水系统相比，具有成本低的优点，适合于家庭恒压供水使用。

参考文献

[1] 石艳．组态软件在恒压供水控制系统中的应用 [J]．微计算机信息：测控自动化，2008，24 (19)：75-77.

[2] 梁远博，王珊珊，雷红玲．基于专家知识的恒压供水控制算法研究 [J]．现代电子技术，2009 (15)：178 -180.

[3] 王岚．居民小区变频恒压供水控制系统设计与实现 [D]．南京：南京理工大学，2008.

[4] 刘天．基于单片机的恒温控制系统的设计研究 [J]．IT技术，2009 (3)：29-34.

[5] 刘迪，谭春亮，李建海，等．基于数字PID和89C52 单片机的温度控制系统 [J]．电子设计工程，2010 (4)：28-30.

[6] 魏英智，丁红伟，张琳，等．数字PID控制算法在温控系统中的应用 [J]．现代电子技术，2010，33 (17)：157-159.

[7] 高立兵，康雁林．基于AVR单片机的 PID温控系统设计 [J]．工业控制计算机，2010，23 (4)：91-92.

[8] 邹海军，杨颖杰，张维，等．基于数字 P I D和89C 52单片机的恒温控制器设计与实现 [J]．实验室科学，2011，14 (2)：74-76.

（收稿日期：2016－07－24）EA