



基于单片机的小球平衡控制系统实验设计

耿兴华¹, 李简文¹, 郭 飞²

(1. 大连理工大学 工程训练中心, 大连 116023; 2. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116023)

摘要: 针对综合设计型实验课程, 研制了一套小球平衡控制的实验系统。该系统以单片机 STC12C5A60S2 为核心处理器, 通过外设 PWM 占空比的调整控制风扇转速, 从而调整风速的大小, 利用超声波测量距离传感器测量小球在管内位置并反馈给单片机, 单片机通过 PID 算法计算出所需要的 PWM 占空比驱动风扇, 形成完整的闭环控制系统。PID 系数整定采用 Z-N 系数法整定, 整个系统实现了快速稳定控制小球在中心位置。

关键词: 综合实验; 单片机; PID 系数整定; 平衡控制

中图分类号: TP29

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20200148

Design of MCU-based Small Ball Balance Control System Experiment

GENG Xinghua¹, LI Jianwen¹, GUO Fei²

(1. Engineering Training Center, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In view of the comprehensive design experiment course, an experimental system of small ball balance control is developed. The system, with the STC12C5A60S2 as the core processor of the system, adjusts the wind speed through the adjustment of the peripheral PWM duty cycle. The ultrasonic measuring distance sensor is used to measure the position of the small ball in the tube and give feedback to the MCU. Next, the MCU calculates the PWM duty cycle needed to drive the fan via PID algorithm, thus forming a complete closed-loop control system. The whole system, adopting the Z-N coefficient method in the PID parameter tuning, realizes the fast and stable control of the small ball in the central location.

Key words: comprehensive experiment; MCU; PID parameter tuning; balance control

PID 控制算法诞生于 20 世纪 20 年代^[1], 同时也是当今世界最为通用的控制算法, PID 控制器及其衍生算法的新型控制器占据当今控制器市场的 90% 以上, PID 控制器以其结构简单、性能优越、有较强的适用性、易于操作等优点, 广泛应用于各类工业过程控制中, 如平衡车、无人机、无人驾驶等领域^[2-6]。为提高单片机综合设计型实验教学质量, 提高学生对 PID 系数的整定过程的理解, 增强参加电子设计竞赛、机械创新设计竞赛和工程训练综合能力竞赛的学生的调试能力, 设计了小球平衡控制系统实验。

1 PID 算法

1.1 PID 控制器原理

PID 控制器将比例、积分、微分进行线性组

合, 通过调整系数来达到系统控制的稳定, 其原理框图如图 1 所示。

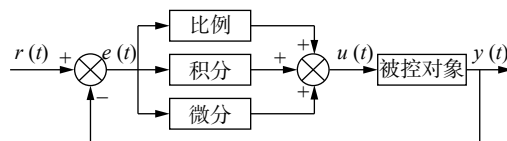


图 1 PID 控制器原理框图

图 1 中的 $r(t)$ 是设定值, $y(t)$ 是系统的实际输出值, 设定值与实际输出值的偏差为:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

PID 控制器的输入为 $e(t)$, 输出为 $u(t)$, PID 控制器的输出规律可表示为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(51775085); 大连理工大学教学改革项目(YB2018060, YB2019033)。

作者简介: 耿兴华(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事自动控制和嵌入式应用方面的研究。

式中, K_p 为比例系数, T_i 为积分系数, T_d 为微分系数。比例系数越大, 控制过程越快; 积分系数越大, 系统在过渡时越不容易产生振荡; 微分的系数越大, 偏差的变化越小, 快速调节过程稳定, 达到控制效果。

1.2 PID 参数整定

数字化的 PID 算法首先要将积分部分和微分部分进行离散化。将反馈信号的时间长轴中等距抽取若干采样点, 采样值的差值乘以采样时间求和作为积分部分; 在差值的序列中向后继续差分, 差分后的值除以采样时间作为微分部分。这样可以直接表达为:

$$\begin{cases} t \approx kT (k=0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t e(t)dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e_j \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)带入式(2)整理得:

$$u_k = K_p e_k + K_i \sum_{j=0}^k e_j + K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (4)$$

$$K_i = K_p T / T_i \quad (5)$$

$$K_d = K_p T_d / T \quad (6)$$

式中, K_i 为积分系数, 可由式(5)计算得出; K_d 为微分系数, 可由式(6)计算得出。在此基础上采用 Ziegler-Nichols 提供的经验公式对 PID 控制系统进行参数整定^[7-10], 从小到大改变比例系数, 使系统对阶跃输入的响应接近等幅振荡状态, 针对本实验的小球位置作为目标控制, 即采用一定 PWM 的波形驱动风扇转动, 风吹小球在风洞中心位置附近振荡, 调整系数使小球振动较小范围的 PWM 占空比系数, 并记录系数 K_u , 从 K_u 的分布中找出峰值之间的时间间隔记为 T_u , 根据 K_u 和 T_u 的数值带入表 1 计算出控制器的其他 K_p 、 T_i 和 T_d 的值, 便可以计算出 K_i 和 K_d , 至此整个 PID 控制器的系数基本确定。

表 1 控制器参数对应关系

控制器类型	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_u$		
PI	$0.45K_u$	$0.85T_u$	
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

2 小球平衡控制总体方案

小球平衡控制系统的机械模型采用的是直径

为 45 mm 的有机玻璃管, 长度为 400 mm, 两端分别固定一个直径为 55 mm 的风扇, 如图 2 所示。采用 STC12C5A60S2 为核心控制器, 通过 I/O 控制两个风扇电机旋转, 吹动小球在有机玻璃管中滚动, 超声波测量距离模块反馈小球在管中的位置, 单片机根据设定的位置计算出偏差, 采用 PID 算法计算出控制风扇的 PWM 占空比, 以达到小球平稳地到达设定位置, 整个过程小球在管中的位置在 LCD 液晶显示模块上实时显示。

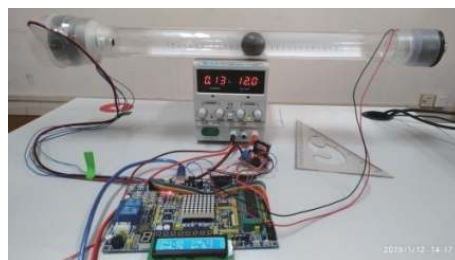


图 2 系统实物图

3 硬件电路设计

3.1 测量距离

超声波测量距离原理为超声波模块电信号触发发射换能器发射超声波, 遇到障碍物后返回, 超声波接收换能器接收到超声信号后转换为电信号, 两个电信号的时间间隔即为超声波在空气中传播的时间, 距离的测量转换为时间的测量。超声波测距模块采用 HC-SR04 模块, 该模块测量范围为 20 ~ 4500 mm, 分辨率为 1 mm, 其测距时序如图 3 所示。单片机定时器测量发送和接收信号前后的时间, 计算障碍物的距离等价于间隔时间和超声波在空气中传播速度乘积的一半^[11-13]。由于超声波在空气中传播路径成喇叭状, 被测量的障碍物在一定距离外要有一定的高度才能被检测到, 小球在有机玻璃管中的滚动有效距离为 400 mm, 直径为 44 mm, 经实验证明可以被检测到。

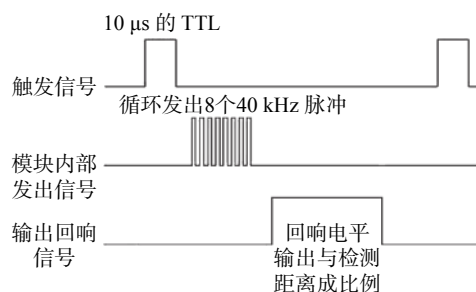


图 3 超声波测距工作时序图

3.2 风扇电机驱动

电机驱动模块的选取主要是根据风扇额定电压和电流来确定,给风扇电机施加 12 V 直流电压,其电流为 200 mA 左右。故采用 L298N 作为驱动芯片

是可行的。L298N 内部具有两个 H 桥,可以同时驱动两个电机,典型应用电路^[14]如图 4 所示。两个风扇对吹,一个采用固定 PWM 占空比,另外一个采用变 PWM 占空比来实现小球在有机玻璃管中的滚动。

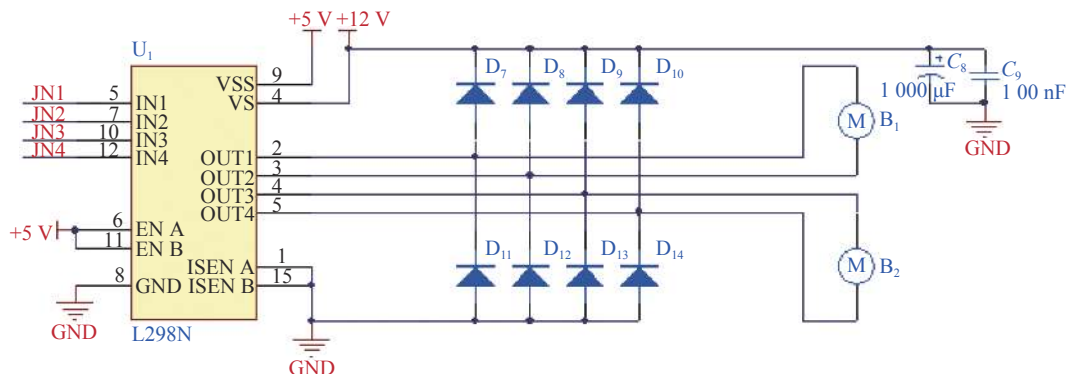


图 4 L298N 典型应用电路

3.3 人机交互设计

人机交互由按键模块和液晶模块组成,按键模块为 4×4 矩阵键盘,直接连接到单片机的 I/O,按键既可以用来设定小球在管中的位置,也可以调整 PID 控制器的系数。LCD 液晶显示模块采用 LCD1602 来显示系统参数,默认显示小球在有机玻璃管中的位置($s=0.2$ cm),同时也可以显示 PID 控制器的 3 个系数,显示效果如图 5 所示。 s 表示距离,风管中心位置为 0,左侧为负,右侧为正(单位:cm)。

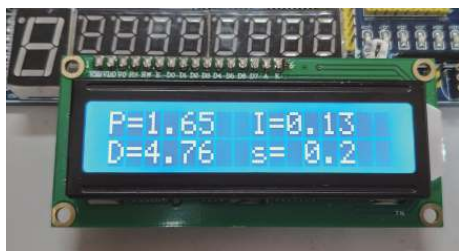


图 5 LCD 液晶显示参数图

4 控制程序设计

小球平衡控制系统的软件分为两个部分：一是 PID 参数的整定；二是小球平衡控制。PID 参数整定采用按键调整 PID 的 3 个系数,根据实验现象调整系数,按照 Ziegler-Nichols 经验公式进行手动整定,并将整定好的系数保存到程序 Flash。

小球平衡控制的软件流程如图 6 所示,系统

上电后初始化定时器和 PWM 输出,由于超声波测量距离传感器有一定的盲区,避免小球初始位置在盲区内,先给电机一定时间的 PWM 波形驱动风扇吹起小球。初始化完成后采用捕捉功能的定时器测量小球在有机玻璃管中的位置,并折算出离中心平衡位置的距离,根据已经整定好的 PID 算法的系数计算出所需要输出的 PWM 占空比,驱动风扇,吹小球,根据定时器定时测量、计算、输出 PWM 等动作实现控制小球稳定在中心位置达到平衡,同时液晶实时显示小球的位置和 PID 系数。

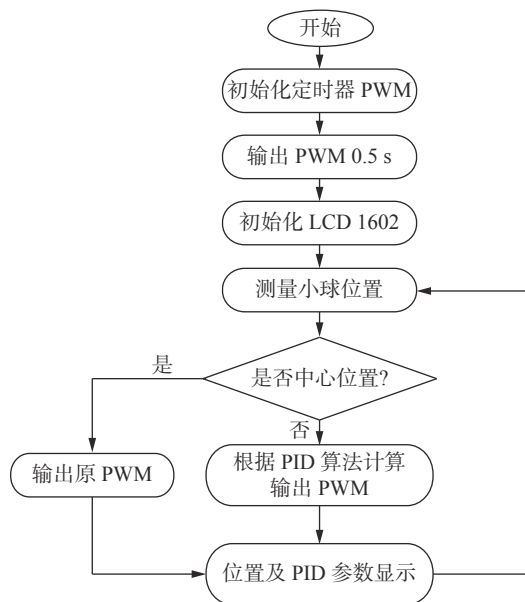


图 6 平衡控制流程图

5 实验及测试

为方便对比, 乒乓球喷漆为黑色。利用 Z-N 系数整定确定 PID 控制器系数($K_p=1.65$, $K_i=0.13$, $K_d=4.76$)。将风洞模型分别置于 90° 、 60° 、 30° 和 0° , 小球在风扇的吹动下很快达到平衡状态, 实现小球平衡在中心位置, 控制效果如图 7 所示。其中图 7(b) 为局部放大图, 控制精度可以达到 $\pm 5\text{ mm}$ 内。经过多次给系统断电, 使小球回到初始位置后重新上电, 在不同角度下小球都能快速达到平衡状态。小球控制系统还可以通过按键设定小球位置, 从而实现小球在风洞模型中的任意位置平衡。

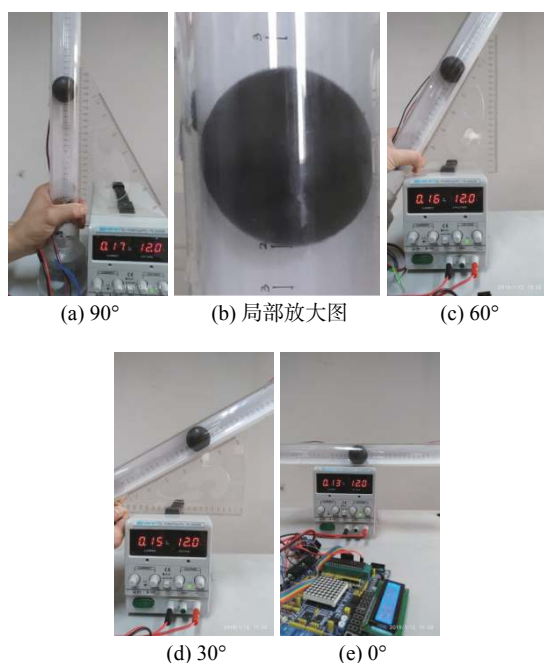


图7 不同角度的中心位置小球平衡

6 结束语

小球平衡系统在创新实践教学及竞赛前培训等环节广泛应用, 尤其是参加单片机应用技术课程的同学。作为综合性实验, 可使学生掌握 PID 系数整定方法; 锻炼学生单片机编写程序能力;

对实际应用中的数字电路、模拟电路、传感器技术等知识的综合应用有初步的认识。

参考文献

- [1] MINORSKY N. Directional stability of automatically steered bodied[J]. Journal of the American Society for Naval Engineers, 1922, 42(2): 280-309.
- [2] 王蕾, 宋文忠. PID控制[J]. 自动化仪表, 2004, 25(4): 1-6.
- [3] 谭宝成, 王宾. 无人驾驶车辆路径跟踪的增量式PID控制[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(12): 996-1001.
- [4] 刘云平, 周玉康, 张永宏, 等. 基于滑模PID的飞行机械臂稳定性控制[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2018, 42(5): 525-532.
- [5] 胡改玲, 桂亮, 权双璐, 等. 串联模糊PID控制的四旋翼无人机控制系统设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(3): 132-135.
- [6] 王素青, 熊维堂. 基于STM32的两轮自平衡小车系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(5): 146-150.
- [7] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum Settings for Automatic Controllers[J]. Transactions of the ASME, 1942, 64: 759-768.
- [8] 历风满. 数字PID控制算法的研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2005, 32(4): 367-370.
- [9] 孙跃光, 林怀蔚, 周华茂, 等. 基于临界比例度法整定PID控制器参数的仿真研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(8): 192-194.
- [10] 金奇, 邓志杰. PID控制原理及参数整定方法[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2008, 22(5): 91-94.
- [11] 隋美蓉, 庄文强, 王辉, 等. 基于单片机的超声测距安全系统实验设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(7): 182-184.
- [12] 高庆华, 王洁, 崔承毅, 等. 适于单片机实验教学的智能小车模块化系统设计[J]. 实验室科学, 2018, 21(1): 10-12.
- [13] 张波, 王朋亮. 基于STC89C51单片机超声波测距系统的设计[J]. 机床与液压, 2010, 38(18): 56-58.
- [14] 崔承毅, 王开宇, 高庆华, 等. 基于智能小车的模块化教学系统设计[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(8): 192-195.

编辑 张莉