

哈尔滨理工大学

# 实 验 报 告

实验课程名称 计算机控制技术

实验场所名称 自动控制理论与计算机控制技术实验室

实验场所代码 155104J

实验室房间号 A401

姓名班级学号

指导教师姓名 赵阳

实验总评成绩

实 验 日 期

## 实验室安全管理个人注意事项

1. 进入实验室工作、实验和研究人员必须进行实验室安全承诺，务必遵守学校及实验室各项规章制度和仪器设备操作规程。
2. 熟悉紧急情况下的逃离路线和紧急应对措施，清楚急救箱、灭火器材、紧急洗眼装置和冲淋器的位置。
3. 进行实验操作时，在做好个人防护的同时，要根据实验风险需要选择合适的实验个体防护用品。使用前应确认其使用范围、有效期及完好性等，熟悉其使用、维护和保养方法。
4. 不得在实验室吸烟、饮食、储存食品、饮料等个人生活物品；不得做与实验、研究无关的事情。
5. 触电事故特点：
  - 5.1 被电击会导致人身伤害，甚至死亡；
  - 5.2 短路有可能导致爆炸和火灾；
  - 5.3 电弧或火花会点燃物品或者引燃具有爆炸性的物料；
  - 5.4 冒失地开启或操作仪器设备可能导致仪器设备的损坏，使身体受伤；
  - 5.5 电器过载会令其损坏、短路或燃烧。
6. 触电事故的预防：
  - 6.1 检查电线、插座和插头，一旦发现损坏要立即更换。
  - 6.2 仪器设备开机前要熟悉该仪器设备的操作规程，确认完好后方可接通电源。
  - 6.3 当手脚或身体沾湿或站在潮湿的地上时切勿启动电源开关或接触电器用具。
7. 触电事故应急措施：
  - 7.1 使触电者脱离电源：立即切断电源，采用关闭电源开关，用干燥木棍挑开电线电闸。救护人员注意穿上绝缘靴或站在干燥木板上，尽快使伤员脱离电源。
  - 7.2 检查伤员：触电者脱离电源后，将其移到通风的地方仰卧，检查伤员情况。
  - 7.3 急救并求医：根据情况确定处理方法，对心跳、呼吸停止的，立即就地采用人工心肺复苏，拨打 120 急救电话。坚持不懈地做心肺复苏，直到医生到达。

**上述注意事项请仔细阅读后签字确认！**

参加实验人员：\_\_\_\_\_（签名）

日 期： 年 月 日

## 一、实验过程记录

实验名称	实验一、数/模转换实验、模/数转换实验				
课程目标	本课程主要讲述计算机控制系统的结构组成、工作原理、IO 接口设计、IO 通道设计和数字控制器设计，学生通过学习本课程能够对计算机控制系统进行分析、设计、仿真和调试，具备计算机控制系统的软硬件设计、控制算法设计和系统实现的能力，并能够将复杂工程问题的理念和解决方案纳入到系统设计中。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	
				同组同学	

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

- 1、掌握数/模转换器 DAC0832 芯片的性能及编程。
- 2、编写程序控制 D/A 输出的波形，使其输出周期性的三角波。
- 3、了解模/数转换器 A/D 芯片 ADC0809 转换性能及编程。
- 4、编制程序通过 0809 采样输入电压并转换成数字量值。

### 2 实验原理图：

数/模转换实验框图见图 1-1 所示。

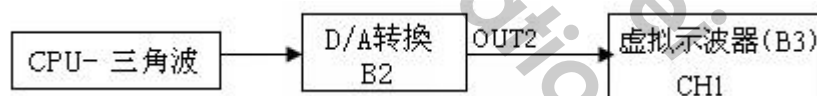


图 1-1 数/模转换实验框图

模/数转换实验框图见图 1-2 所示。

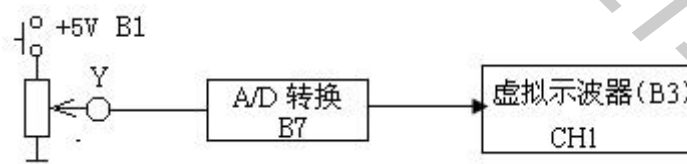


图 1-2 模/数转换实验框图

模/数转换器（B7 单元）提供 IN4~IN7 端口，供用户使用，其中 IN4、IN5 有效输入电平为 0V~+5V，IN6 和 IN7 为双极性输入接法，有效输入电平为 -5V~+5V，有测孔引出。

## 三、实验内容：

### 1 实验方法及步骤：

1. 自动加载程序控制 D/A 输出的波形，使其输出周期性的三角波。

运行 **LABACT** 程序，选择**微机控制**菜单下的**数/模转换**实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击**开始**后将自动加载相应源文件，可选用虚拟示波器（B3）单元的 CH1 测孔测量波形。

测孔连线	数/模转换器（B2）单元 OUT2→虚拟示波器（B3）输入端 CH1（选 X1 档）。
------	---

2. (1) 将信号发生器 (B1) 的幅度控制电位器中心 Y 测孔, 作为模/数转换器 (B7) 输入信号: B1 单元中的电位器左边 K3 开关拨下 (GND), 右边 K4 开关拨上 (+5V)。

(2) 测孔连线: B1 (Y) → 模/数转换器 B7 (IN4) (信号输入)。

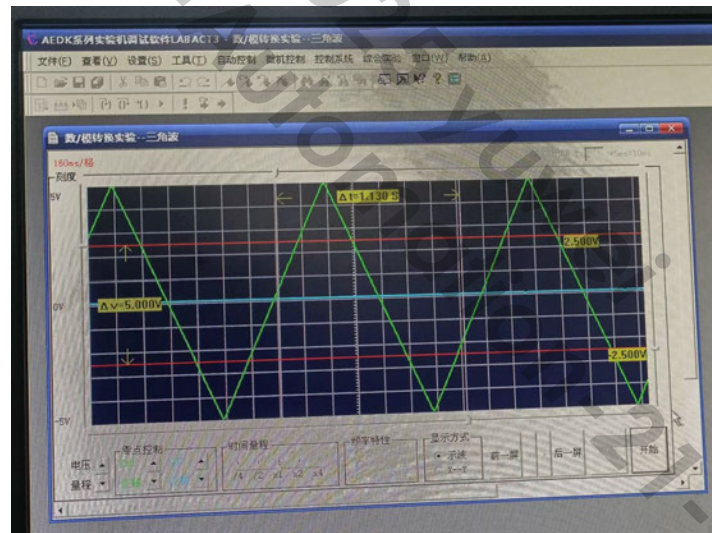
(3) 运行、观察、记录:

运行 **LABACT** 程序, 选择**微机控制**菜单下的**模/数转换**实验项目, 就会弹出虚拟示波器的界面, 点击**开始**后, 在虚拟示波器屏幕上显示出即时模/数转换二进制码及其对应的电压值; 每旋转 B1RW1 可调电位器一次, 再次点击**开始**, 将继续转换及显示, 满 17 次后回到原点显示。

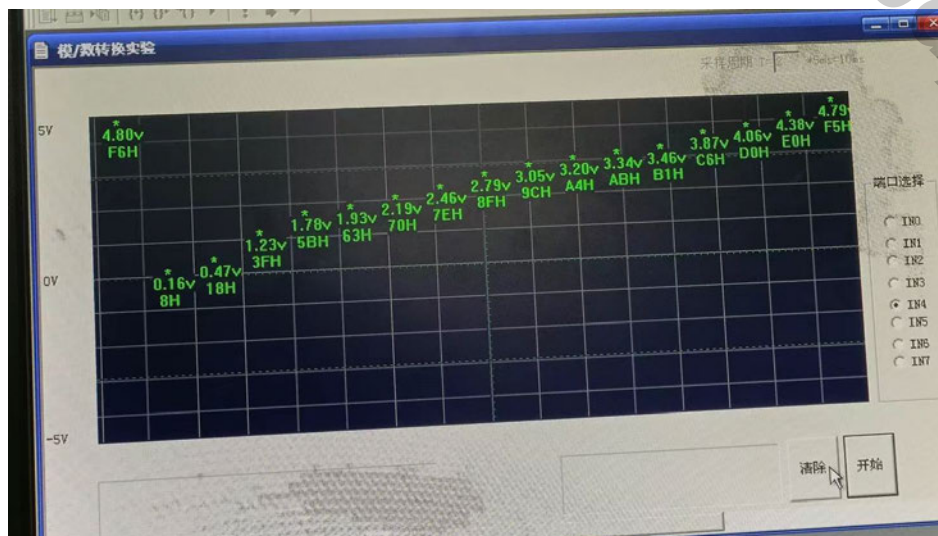
屏幕上 X 轴表示模/数转换的序号, Y 轴表示该次模/数转换的结果。每次转换后将在屏幕出现一个“\*”, 同时在“\*”下显示出模/数转换后的二进制码及对应的电压值, 所显示的电压值应与输入到模/数转换单元 (B7) 的输入通道电压相同。每转换满 17 次后, 将自动替代第一次值。

## 2 实验数据处理 (数据、曲线、图表):

D/A: 运行程序, 用示波器观测输出波形并记录:



A/D: 运行程序, 记录 A/D 输出的曲线。



## 四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）

### ● 实验误差分析

1. 量化误差：ADC0832 和 DAC0809 都是 8 位转换器，量化误差是不可避免的。误差范围为  $\pm 1 \text{ LSB}$ （最小有效位）。
2. 非线性误差：转换器的非线性误差会导致输出信号与理想线性关系之间的偏差。可以通过标定和线性化处理来减少影响。
3. 噪声：模拟信号中的噪声会影响采样精度。可以通过增加滤波电路来减少噪声。
4. 温度漂移：转换器的性能受温度影响，需要在设计中考虑温度补偿。

### ● 现象和分析

现象：采集到的数字量值与输入的模拟电压成线性关系。使用示波器可以观察到模拟输入信号与数字输出信号的对应关系。

分析：①数字量值的波动可能是由于输入信号的噪声或 ADC 的量化误差。

②采样速率应与输入信号的变化速率匹配，避免失真。

③多次测量同一电压以计算平均值，可以减少随机误差。

### ● 收获

通过这个实验，我收获颇丰，不仅深入理解了数模转换和模数转换的原理，还掌握了 DAC0832 和 ADC0809 芯片的具体使用方法，能够通过编程实现特定的输出波形和采集输入信号。在实验中遇到的波形失真和数字量值波动等问题，使我了解了实际应用中的误差来源，如量化误差、非线性误差、噪声和温度漂移，并学习了如何分析和处理这些误差。此外，这次实验还提升了我解决问题的能力，加深了我对电子电路和嵌入式系统的理解，使我能够更全面地看待和应用这些技术。这些收获对我未来的学习和工作都有很大的帮助。

## 一、实验过程记录

实验名称	实验三 标准数字 PID 控制算法实验				
课程目标	本课程主要讲述计算机控制系统的结构组成、工作原理、IO 接口设计、IO 通道设计和数字控制器设计，学生通过学习本课程能够对计算机控制系统进行分析、设计、仿真和调试，具备计算机控制系统的软硬件设计、控制算法设计和系统实现的能力，并能够将复杂工程问题的理念和解决方案纳入到系统设计中。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	
				同组同学	

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

1. 了解和掌握连续控制系统的 PID 控制算法的模拟表达式（微分方程）。
2. 了解和掌握被控对象数学模型的建立。
3. 了解和掌握数字 PID 调节器控制参数的工程整定方法。
4. 了解和掌握采用微分方程直接建立后向差分方程的方法。
5. 观察和分析在标准 PID 控制系统中，P、I、D 参数对系统性能的影响。

### 2 实验原理图：

#### 1. 数字 PID 控制

在一个控制系统中，采用比例、积分和微分控制方式控制，称之为 PID 控制。它对于被控对象的传递函数  $G(s)$  难以描述的情况，是一种应用广泛，行之有效的控制方式。数字 PID 控制器是基于连续系统的计算机数字模拟设计技术，它把输入信号离散化，用数字形式的差分方程代替连续系统的微分方程，对它进行处理和控制。

设采样周期  $T$  足够小，远小于时间常数  $\tau$ ，当  $t=kT$  时，可将微分方程中的导数用差分项代替，积分项用求和式代替，函数用序列表示，时间  $t$  变成离散量  $kT$ ，即：

$$\begin{cases} t = kT \\ C(t) = C(k) \\ \frac{dC(t)}{dt} = \frac{\Delta c}{\Delta t} = \frac{c(k) - c(k-1)}{T} \\ \int_0^t C(t)dt = \sum_{n=0}^{k-1} C(n) * T \end{cases} \quad (3-1-1)$$

用式（3-1-1）就可以把微分方程直接变为差分方程。差分方程的求解有经典法、迭代法和 Z 变换法。

数字 PID 控制实验的原理方框图见图 3-1 所示：

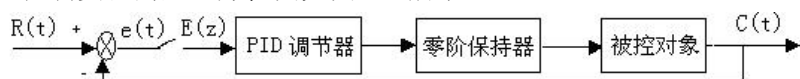


图 3-1 数字 PID 控制实验的原理方框图

PID 控制算法的微分方程表达式是：

$$P(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3-1-2)$$

式中， $P(t)$ —调节器的输出信号； $e(t)$ —调节器的偏差信号； $K_p$ —调节器的比例系数；

$T_i$ —调节器的积分时间常数； $T_d$ —调节器的微分时间常数；

## 2. 被控对象数学模型的建立

### (1) 确立模型结构

在工程中 PID 控制多用于带时延的一阶或二价惯性环节组成的工控对象，即有时延的单容被控过程，其传递函数：
$$G_0(s) = K_0 \times \frac{1}{T_0 s + 1} e^{-\tau s} \quad (3-1-5)$$

有时延的单容被控过程可以用二个惯性环节串接组成的自平衡双容被控过程来近似，本实验采用该方式作为实验被控对象，见图 3-2 所示。

$$G_0(s) = K_0 \times \frac{1}{T_1 s + 1} \times \frac{1}{T_2 s + 1} \quad (3-1-6)$$

### (2) 被控对象参数的确认

对于这种用二个惯性环节串接组成的自平衡双容被控过程的被控对象，在工程中普遍采用阶跃输入实验辨识的方法确认  $T_0$  和  $\tau$ ，以达到转换成有时延的单容被控过程。阶跃输入实验辨识的原理方框图如图 3-2 所示：

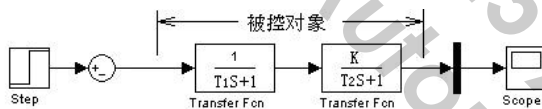


图 3-2 阶跃输入实验辨识的原理方框图

## 三、实验内容：

### 1 实验方法及步骤：

#### 1. 被控对象参数的确认

被控对象参数的确认构成如图 3-4 所示。本实验将函数发生器（B5）单元作为信号发生器，矩形波输出（OUT）施加于被测系统的输入端 R，观察矩形波从 0V 阶跃到 +1V 时被控对象的响应曲线。

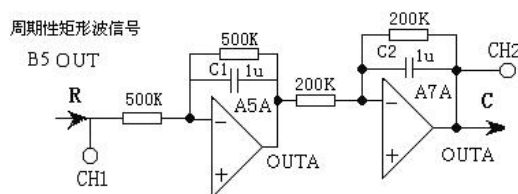


图 3-4 被控对象参数的确认构成

**实验步骤：注：将‘S ST’用‘短路套’短接！**

- ① 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- ② B5 的量程选择开关 S2 置下档，调节“设定电位器 1”，使之矩形波宽度 > 3 秒（D1 单元左显示）。
- ③ 调节 B5 单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压 = 1V 单位阶跃（D1 单元右显示）。
- ④ 构造模拟电路。
- ⑤ 运行、观察、记录。

### (3) 求得数字 PID 调节器控制参数及确定采样周期

据式 (3-1-8) (用开环整定法) 求得数字 PID 调节器控制参数  $K_p$ 、 $T_I$ 、 $T_D$

**Kp=1.28, Ti=0.36, Td=0.055, 取采样周期 T=0.015 秒。**

#### (4) 数字 PID 闭环控制系统实验

数字 PID 闭环控制系统构成如图 3-6 所示。本实验将函数发生器 (B5) 作为信号发生器, 矩形波输出(OUT) 施加于被测系统的输入端  $U_i$ , 观察矩形波从 0V 阶跃到 +1V 时被测系统的 PID 控制特性。

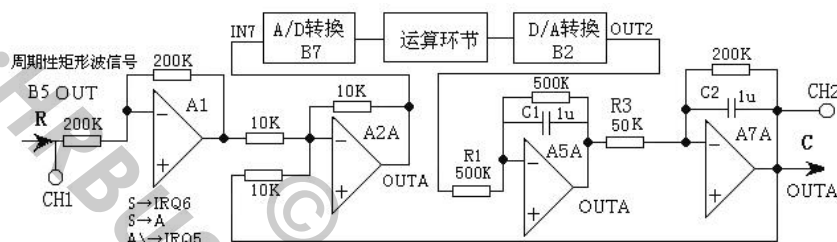


图 3-6 数字 PID 闭环控制系统实验构成

- ① 在显示与功能选择 (D1) 单元中, 通过波形选择按键选中 ‘矩形波’ (矩形波指示灯亮)。
- ② B5 的量程选择开关 S2 置下档, 调节 “设定电位器 1”, 使之矩形波宽度  $>5$  秒 (D1 单元左显示)。
- ③ 调节 B5 单元的 “矩形波调幅” 电位器使矩形波输出电压 = 1V 单位阶跃 (D1 单元右显示)。
- ④ 构造模拟电路。
- ⑤ 运行、观察、记录。

② B5 的量程选择开关 S2 置下档, 调节“设定电位器 1”, 使之矩形波宽度 $>5$  秒 (D1 单元左显示)。

③ 调节 B5 单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 1V 单位阶跃 (D1 单元右显示)。

④ 构造模拟电路。

⑤ 运行、观察、记录。

B) 在程序运行中，需在界面上设置 **Kp=1.28, Ti=0.36, Td=0.055**，然后再点击发送。

C) 点击**停止**，观察实验结果即数字 PID 闭环控制系统实验响应曲线。

### (5) 数字 PID 调节器控制参数的修正

采样周期保持  $T=0.015$  秒,为了使系统的响应速度加快,可增大比例调节的增益  $K_p$  (设  $K_p=2.4$ );又为了使系统的超调不致于过大,牺牲一点稳态控制精度,增加积分时间常数  $T_i=0.5$ ,微分时间常数  $T_d$  不变,观察实验结果即数字 PID 闭环控制系统实验响应曲线。

## 2 实验数据处理（数据、曲线、图表）：

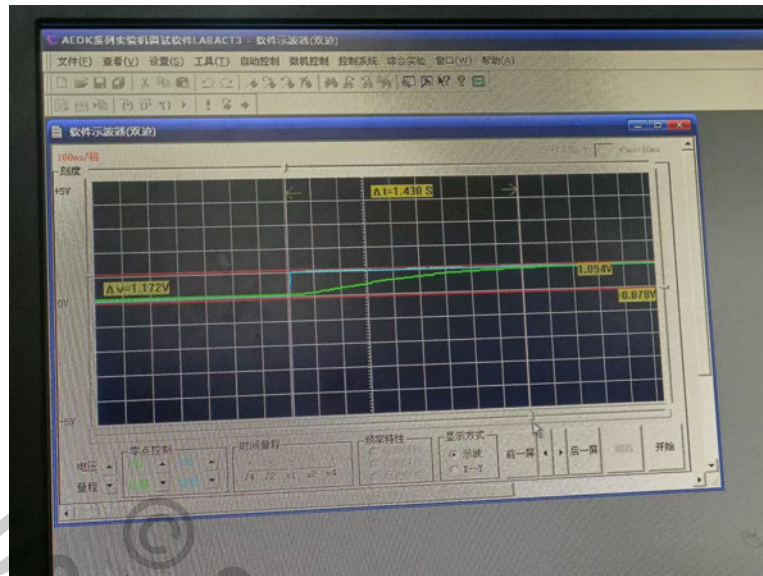
将相关结果填入下表:

实验被控对象传递函数:  $G_0(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} \times \frac{K_0}{T_2 s + 1}$

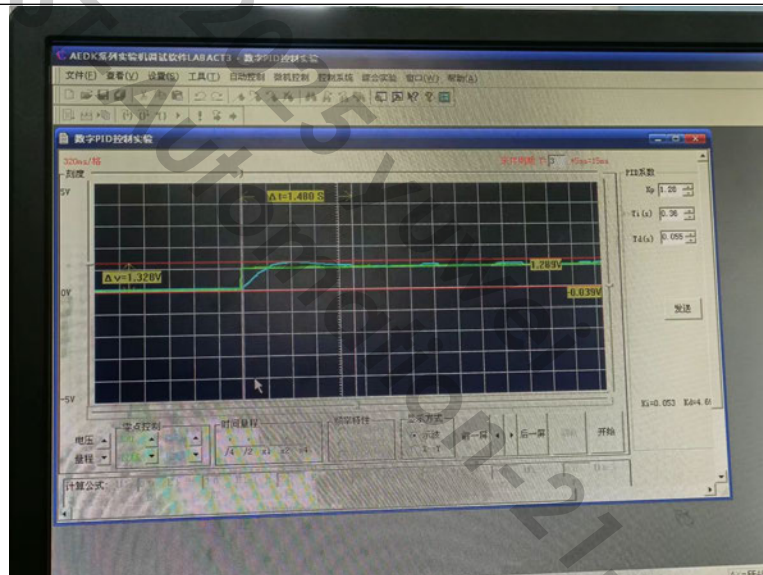
被控对象传递函数:	$T_o$	$\tau$	$T$	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$M_p$	$t_p$	$t_s$
数字 PID 闭环控制参数	0.567	0.158	0.015	1.28	0.36	0.055	0.328	0.680	1.480
修正后 PID 闭环控制参数	0.567	0.158	0.015	1.00	2.45	0.00	0.212	0.420	1.280



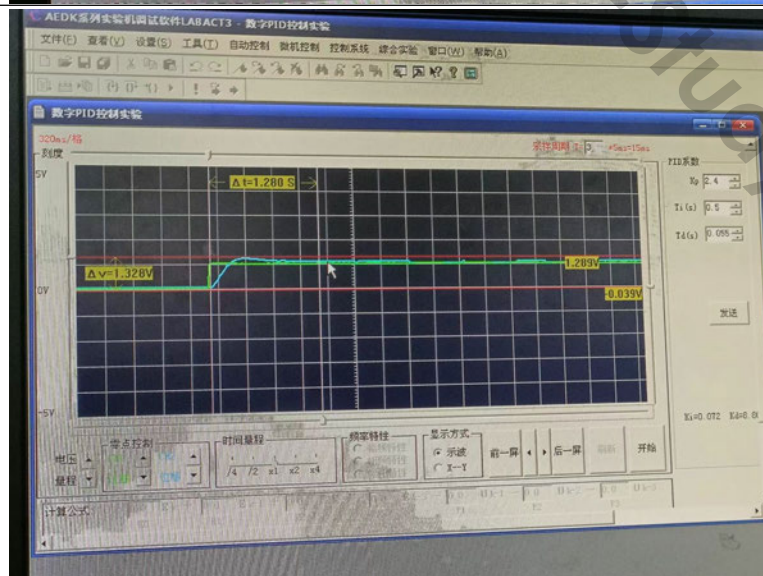
被控对象响应曲线



数字 PID 闭环控制系统响应曲线



修正后数字 PID 闭环控制系统响应曲线



注：修正后数字 PID 调节器控制系统，要求其超调量  $M_p \leq 25\%$ ，调节时间  $t_s$  应尽量小，

并从定性的角度写出 PID 调节器控制参数  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  对系统性能的影响。

#### 四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）

- 现象观察

**P 参数的影响：**随着比例增益  $K_p$  的增加，系统的响应速度加快，但也可能导致较大的超调和振荡。如果  $K_p$  过高，系统会变得不稳定，出现持续的振荡或发散。

**I 参数的影响：**增加积分增益  $K_i$  可以消除稳态误差，使系统的输出能够精确跟踪设定值。过大的  $K_i$  会导致系统响应变慢，并可能引入较大的超调和振荡。

**D 参数的影响：**增大微分增益  $K_d$  可以提高系统的稳定性，减小超调，抑制振荡。过高的  $K_d$  会使系统对噪声非常敏感，导致输出剧烈波动。

- 实验误差分析

①**量化误差：**数字 PID 控制中，信号的量化误差不可避免。量化误差会引入噪声，影响控制精度。高分辨率的 ADC 和 DAC 可以减小量化误差，但无法完全消除。

②**采样时间误差：**采样时间的选择对系统性能有重要影响。采样时间过长，系统响应迟钝；采样时间过短，会引入更多的高频噪声。理想的采样时间应使系统在响应速度和噪声抑制之间达到平衡。

③**模型不准确性：**被控对象的数学模型可能不完全准确，这会导致实际系统行为与理论分析有偏差。实验中的未建模动态和参数变化也会影响控制效果。

④**外界干扰：**实验环境中的噪声和干扰会影响系统的输出稳定性和精度。适当的滤波和抗干扰措施可以改善系统性能。

## 一、实验过程记录

实验名称	实验四 大林算法				
课程目标	本课程主要讲述计算机控制系统的结构组成、工作原理、IO 接口设计、IO 通道设计和数字控制器设计，学生通过学习本课程能够对计算机控制系统进行分析、设计、仿真和调试，具备计算机控制系统的软硬件设计、控制算法设计和系统实现的能力，并能够将复杂工程问题的理念和解决方案纳入到系统设计中。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	
				同组同学	

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

1. 了解和掌握数字控制器的原理和直接设计方法。
2. 了解和掌握被控对象数学模型的建立，并求取广义对象的脉冲传递函数
3. 了解和掌握求取数字调节器  $D(Z)$  的脉冲传递函数。
5. 了解和掌握用  $Z$  传递函数建立后向差分方程的方法。
7. 理解和掌握大林算法中有关振铃产生的原因及消除的方法。
8. 观察和分析大林算法控制系统的输出波形是否符合设计要求。

### 2 实验原理图：

#### 1. 大林算法控制

数字 PID 控制器是基于连续系统的数字模拟设计技术，这种连续化设计技术适用于被控对象难以表达的情况，其质量难以保证。如果能知道系统确切的闭环脉冲传递函数、广义对象的脉冲传递函数，根据采样定理，在线性系统离散化理论的基础上，应用 **Z 变换** 求得数字控制器的脉冲传递函数，就能设计出高质量的数字控制器。这类方法称为数字控制器的直接设计方法。

数字控制器的原理方框图见图 4-1 所示：

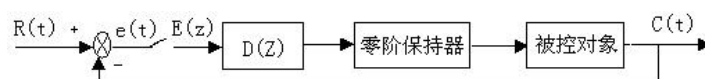


图 4-1 数字控制器的原理方框图

在生产过程中，很多工业对象具有较大的纯滞后时间。对象的纯滞后时间  $\tau$  对控制系统的控制性能会带来不利影响。

带纯滞后的一阶惯性环节的传递函数见式（4-1-1）。

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{T_0 s + 1} = K_0 \frac{e^{-LTs}}{T_0 s + 1} \quad (4-1-1)$$

在式（4-1-1）中， $T_0$  为被控对象的惯性时间常数， $\tau$  为被控对象的纯滞后时间， $T$  为采样周期。为了简化计算，设采样周期  $T$  为  $\tau$  的  $1/L$  倍，即  $\tau = LT$ ， $L$  为正整数。从输出响应曲线中看， $L$  反映了滞后的拍数（每个采样周期  $T$  为一拍）。

其包括零阶保持器在内的广义对象的脉冲传递函数见式 (4-1-2)

$$G_0(z) = Z \left[ K_0 \frac{1-e^{-TS}}{S} \times G_0(s) \right] \quad (4-1-2)$$

大林算法是针对工业生产中含有纯滞后的被控对象所研究的控制算法,即在调节时间允许的情况下,要求系统没有超调量或只有在允许范围中的很小的超调量。大林算法的设计目标是设计一个数字调节器,使整个闭环系统所期望的传递函数相当于一个延迟环节和一个惯性环节的串联,并期望整个闭环系统的纯滞后时间  $\tau$  和被控对象的滞后时间相同。

大林算法控制系统的设计目标,即控制系统的闭环传递函数,见式 (4-1-3)。

$$\phi(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_m s + 1} = \frac{e^{-L_m TS}}{T_m s + 1} \quad (4-1-3)$$

$T_m$  为校正后闭环系统的时间常数,  $\tau$  为校正后闭环系统的纯滞后时间 ( $\tau = L_m T$ ),  $L_m$  校正后闭环系统的滞后的拍数,  $T$  为采样周期。

对闭环系统的传递函数  $\phi(s)$  用零阶保持器离散化,可得系统闭环的脉冲传递函数:

$$\phi(z) = Z \left[ \frac{1-e^{-TS}}{S} \times \phi(s) \right] = Z \left[ \frac{1-e^{-TS}}{S} \times \frac{e^{-L_m TS}}{T_m s + 1} \right] \quad (4-1-4)$$

大林算法控制系统的数字调节器  $D(z)$  的脉冲传递函数见式 (4-1-5)。

$$D(z) = \frac{\phi(z)}{G_0(z)[1-\phi(z)]} \quad (4-1-5)$$

## 2、大林算法振铃现象及其消除方法

振铃现象是指数字调节器  $D(z)$  的输出以  $1/2$  采样频率的频率大幅度衰减振荡,它对系统的输出无影响,但会使执行机构因磨损而造成损坏。

振铃现象并不是大林算法特有的现象,它与最少拍控制中的波纹实质是一致的,振铃现象会引起在采样点间系统输出波纹,在有交互作用的多系数系统中,甚至会威胁到系统的稳定性,因此在系统设计时,必须清除振铃。

振铃现象产生的原因是数字调节器  $D(z)$  中左半平面的极点。

大林算法提出消除振铃的方法是:在不改变校正后闭环系统的时间常数  $T_m$  情况下,找出数字调节器  $D(z)$  左半平面的极点,令该极点的  $Z=1$ ,使之消除振铃现象。

## 三、实验内容:

### 1 实验方法及步骤:

#### A 用 LabACT 实验箱实验被控过程

##### (1) 确立被控对象模型结构

本实验采用二个惯性环节串接组成实验被控对象,  $T_1$ 、 $T_2$  分别为二个惯性环节的时间常数。设  $T_1=0.2S$ ,  $T_2=0.5S$ ,  $K_0=5$ 。

##### (2) 被控对象参数的确认

这种被控对象在工程中普遍采用阶跃输入实验辨识的方法确认  $T_0$  和  $\tau$ 。阶跃输入实验辨识的原理方框图如图 4-3 所示。

被控对象参数的确认构成如图 4-12 所示。本实验将函数发生器 (B5) 单元作为信号发生器,矩形波输出 (OUT) 施加于被测系统的输入端  $U_i$ ,观察矩形波从  $0V$  阶跃到  $+2.5V$  时被控对象的响应曲线。

① 在显示与功能选择 (D1) 单元中,通过波形选择按键选中‘矩形波’ (矩形波指示灯亮)。

③ 调节 B5 单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压=2.5V 左右（D1 单元右显示）。

⑤ 运行、观察、记录。

取  $Y_0(t_1) = 0.3 \times 2.5 = 0.75V$ ，从图中可测得  $t_1 = 0.36S$ ；

据式(4-7-7)确认  $T_0$  和  $\tau$  :  $T_0=0.567$ ,  $\tau=0.158$ 。

$\tau$  为用阶跃输入实验辨识后的被控对象纯滞后时间, 为了简化计算, 设其  $\tau$  为采样周的整数倍, 即  $\tau = LT$ 。由于  $\tau = 0.158$ , 设  $L=2$ , 则取采样周期  $T \approx 0.08$ 。

按“用 MATLAB 仿真被控过程”中求得的式 (4-17) 数字调节器  $D(Z)$  的脉冲传递函数, 可列出后向差分方程得到计算参数:

$$P_1 = 0.01, \quad P_2 = -0.68, \quad P_3 = -0.18, \quad P_4 = -0.15$$

大林算法闭环控制系统构成如图 4-14 所示。本实验将函数发生器 (B5) 作为信号发生器, 矩形波输出(OUT)施加于被测系统的输入端  $U_i$ , 观察矩形波从 0V 阶跃到+2.5V 时被测系统的控制特性。

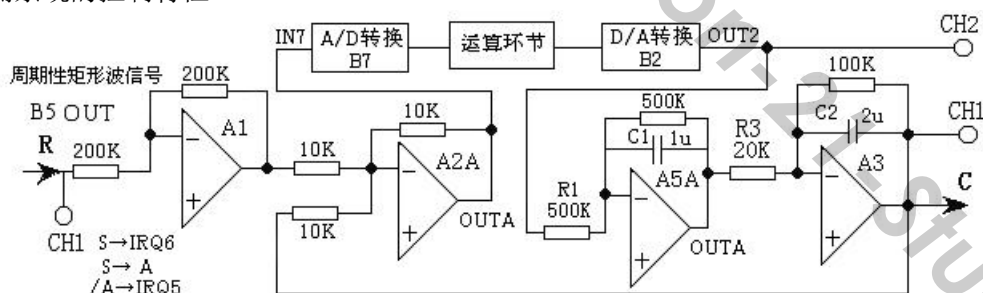


图 4-14 大林算法闭环控制系统实验构成

② B5 的量程选择开关 S2 置下档, 调节“设定电位器 1”, 使之矩形波宽度>2 秒(D1 单元左显示)。

④ 构造模拟电路:

### ⑤ 运行、观察、记录

a) 按“用 MATLAB 仿真被控过程”中求得的式 (4-1-20) 振铃消除后数字调节器  $D(Z)$

$$P_1 = -1, \quad P_2 = 0, \quad P_3 = 0, \quad P_4 = 0,$$

b) 大林算法闭环控制系统实验构成如图 4-14 所示, 构造模拟电路同上。

c) 运行、观察、记录:

运行 **LABACT** 程序, 选择**微机控制**菜单下的**大林算法**下的 **L=2** 选项, 会弹出虚拟示波器的界面, 点击**开始**后将自动加载相应源文件, 运行实验程序。

控制参数设定: 该实验的显示界面中已设定采样周期  $T=0.08\text{S}$  ,

需在界面上“计算公式”栏中设定控制参数:  $K_2 = 0.55, K_3 = -0.83, K_4 = 0.31$   
 $P_1 = -1, P_2 = 0, P_3 = 0, P_4 = 0,$

d) 观察被测系统输入及数字调节器 D(Z)输出的时域特性


虚拟示波器(示波选项)的 CH1 联接到被测系统的输入端 R (A1-H1), CH2 联接到数模转换器 (B2) 单元的 OUT2 端。

e) 观察被测系统输出及数字调节器 D(Z)输出的时域特性

虚拟示波器(示波选项)的 CH1 联接到被测系统的输出端 C (A3-OUT), CH2 联接到数字调节器 D(Z)即数模转换器 (B2) 单元的 OUT2 端。

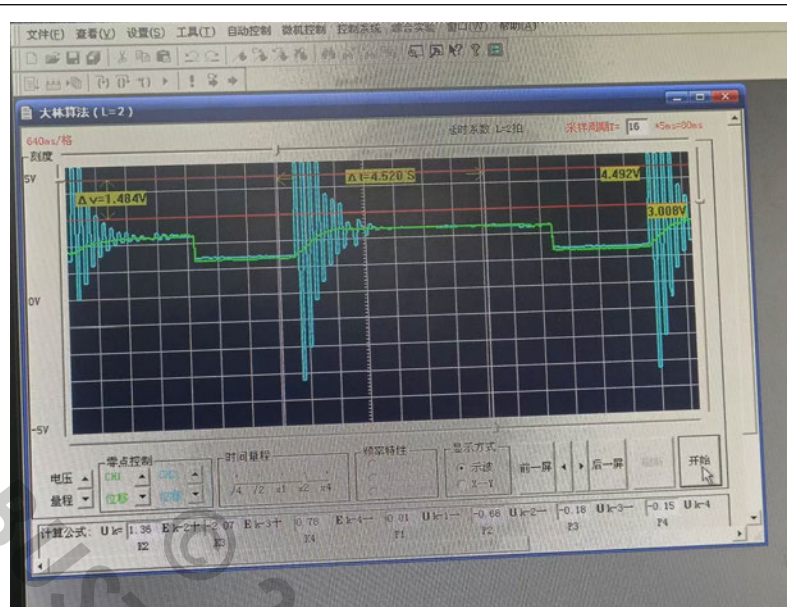
## 2 实验数据处理(数据、曲线、图表):

将相关结果填入下表, 实验被控对象传递函数:  $G_0(s) = \frac{1}{T_1 S + 1} \times \frac{K_0}{T_2 S + 1} \quad (L=2)$

被控对象传递函数	To	$\tau$	T	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
消除振铃前参数	0.567	0.158	0.08	1.36	-2.07	0.78	0.01	-0.68	-0.18	-0.15
消除振铃后参数	0.567	0.158	0.07	0.54	-0.82	0.31	-1	0	0	0
消除振铃前输入响应曲线 数字调节器 D(Z) 输出曲线										



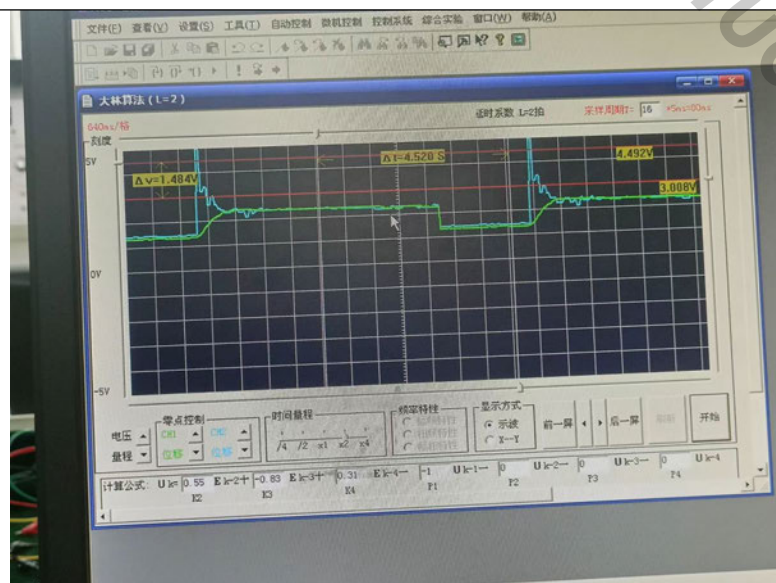
消除振铃前输出响应曲线  
数字调节器  $D(z)$  输出曲线



消除振铃后输入响应曲线  
数字调节器  $D(z)$  输出曲线



消除振铃后输出响应曲线  
数字调节器  $D(z)$  输出曲线



## 四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）

### ● 实验现象

①振铃现象：在大林算法中，当控制系统的增益设置过高或者系统动态特性不够理想时，可能会出现振铃现象。振铃是指输出信号在目标值附近来回波动的现象，导致系统不能稳定地收敛到期望值。

②输出波形：观察到控制系统的输出波形可能出现周期性的振荡或者超调现象。这些波形特征直接反映了控制系统的动态响应特性。

### ● 实验误差分析

①参数设置不当：如果控制系统的参数（如比例增益、积分时间常数等）设置不当，可能导致系统动态响应过度灵敏或不稳定，从而出现振铃现象。

②模型误差：如果控制系统的数学模型与实际系统存在较大差异，例如忽略了一些影响因素或者模型参数不准确，也会导致系统动态响应不理想，产生振铃。

③采样周期选择：在数字控制系统中，采样周期的选择对系统的稳定性和性能有重要影响。选择过大的采样周期可能导致系统响应过慢，选择过小的采样周期可能会引入高频振荡。

### ● 分析

①振铃产生原因：振铃通常是是由于控制系统的过度调整造成的，即控制器对误差的响应过大，导致系统来回振荡。这可能是因为控制器的增益设置过高，或者控制系统的动态响应特性不匹配。

②振铃消除方法：为了消除振铃，可以通过调整控制器的参数，减小增益或者增加系统的阻尼，使系统更加稳定。此外，也可以采用先进的控制策略，如模糊控制、自适应控制等，来提高系统的稳定性和鲁棒性。

### ● 结论

大林算法是一种常用的数字控制方法，但在实际应用中可能会出现振铃等问题。通过本次实验，我们对大林算法的原理和应用有了更深入的理解，同时也学会了如何分析和解决控制系统中可能出现的问题。在实际应用中，需要根据具体情况合理选择控制器参数，并不断优化系统结构和控制策略，以实现系统的稳定、精确控制。



## 一、实验过程记录

实验名称	实验五 温度闭环控制实验				
课程目标	本课程主要讲述计算机控制系统的结构组成、工作原理、IO 接口设计、IO 通道设计和数字控制器设计，学生通过学习本课程能够对计算机控制系统进行分析、设计、仿真和调试，具备计算机控制系统的软硬件设计、控制算法设计和系统实现的能力，并能够将复杂工程问题的理念和解决方案纳入到系统设计中。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	
				同组同学	

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

1. 巩固闭环控制系统的基本概念。
2. 掌握温度的一种采集方法。
3. 掌握 PID 算法数字化的方法和编程。
4. 了解、掌握消除系统积分饱和的‘遇限削弱积分法’使用方法。

### 2 实验原理图：

#### 1. PID 控制

按偏差的比例、积分、微分控制（简称 PID 控制）是过程控制中应用最广的一种控制规则。由 PID 控制规则构成的 PID 调节器是一种线性调节器。这种调节器是将设定值  $U$  与实际输出值  $Y$  构成控制偏差： $e=U-Y$ 。

按比例（P）、积分（I）、微分（D）通过线性组合构成控制量。PID 控制算法的模拟表达式是：

$$P(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5-1-1)$$

式中， $P(t)$ —调节器的输出信号； $e(t)$ —调节器的偏差信号； $K_p$ —调节器的比例系数；

$T_i$ —调节器的积分时间常数；

$T_d$ —调节器的微分时间常数；

在实际应用中，根据对象特征和控制要求，也可灵活改变其结构，取其一部分构成控制，例如：比例（P）调节器、比例积分（PI）调节器、比例微分调节器（PD）等。

**比例调节器**是一种最简单的调节器。它具有反应快、无滞后的特点，抗干扰，使被控参数稳定在给定值附近。但是，对于具有自平衡系统（即系统阶跃响应为一有限值）的被控对象存在静差。对于某一给定系统，当负荷变化时，静差大小与比例作用的强弱有关。加大比例系数可以减小静差，但  $K_p$  过大时，会使动态质量变差，引起控制量振荡甚至导致闭死不稳定。

**比例积分调节器**是在比例调节器的基础上增加积分调节规律。积分调节规律的实质是调节器输出的变化速度与输入偏差的大小成正比。只要有偏差，调节器输出的调节信号就不断变化，执行器就不断动作，直至偏差信号消除。因此，积分作用能消除比例调节器的静差。但是积分调节动作缓慢，其调节作用总是滞后于偏差信号的变化。

在上述 PI 调节器的基础上再加上微分调节环节就构成了 **PID 调节器**。微分调节作用可以克服积分调节作用缓慢性，避免积分作用可能降低系统响应速度的缺点。另外，微分调节的加入有助于减小超调、克服振荡，改善系统的动态性能。

## 2. 遇限削弱积分法

由于温度闭环控制是一种变化十分缓慢的控制系统，因此它很容易产生积分饱和，在积分项的作用下，往往将使系统产生较大的超调量和长时间波动。为此，本实验采用了‘遇限削弱积分’的方法来消除积分饱和。该方法是在实验进行前先设定一个积分量  $|Ki \sum_{j=0}^k e(j)|$  阈值

为  $P_0$ ，则式中  $Ki \sum_{j=0}^k e(j)$  有：

$$Ki \sum_{j=0}^k e(j) = \begin{cases} Ki \sum_{j=0}^k e(j), & \left| Ki \sum_{j=0}^k e(j) \right| < P_0 \\ P_0, & \left| Ki \sum_{j=0}^k e(j) \right| \geq P_0 \end{cases} \quad (5-1-4)$$

式 (5-1-4) 表示在计算、控制过程中，一旦积分量达到阈值  $P_0$  时，它将不再增加。

按本实验所规定的参数进行实验后，可以看出超调量和波动受到了有效的控制。

## 三、实验内容：

### 1 实验方法及步骤：

#### 1 实验方法及步骤：

(1) 实验测孔连线：

1	加热	C1 单元 (Q8) → C3 单元输入 (脉冲加热)
2	测温	C3 单元 (测温输出) → B7 单元 (IN4) 输入

(2) 运行、观察、记录：

① 运行 **LABACT** 程序，选择**控制系统**菜单下的**温度闭环控制**实验项目，就会弹出温度示波器的界面。点击**开始**后将自动加载相应源文件，然后设定‘温度’参数、积分量阈值和控制系数 P.I.D 后，点击**发送**，即可实现温度闭环控制。

② 在程序运行中，随时可修改‘温度’参数、积分量阈值和控制系数 P.I.D，然后点击**发送**，实现温度闭环控制；无须点击**停止**；只有在需观察实验结果时，才需点击**停止**。

注：一旦点击**停止**后，再点击**开始**，必须再次点击‘发送’键，才能使实验机按照修改过的 P.I.D 控制参数运行；否则，实验机将按照初始设定的 P.I.D 控制参数运行。

③ 该实验的显示界面中“控制系数”栏的比例系数  $K_p$  (0.00~2.00)、调节器的积分时间  $T_i$  (1~99S)、调节器的微分时间  $T_d$  (0~99S) 和积分量  $|Ki \sum_{j=0}^k e(j)|$  阈值  $P_0$  (0~255)，

以及‘温度’参数 (1~80℃) 均可由用户在界面上直接修改，以期获得理想的实验结果。如在控制过程中欲改变这些系数和参数，则改变后，只要再次点击“发送”键，即可使实验机按照新的控制系数和设定参数运行。

③ 修改采样周期  $T$  (界面右上角)，用户必须点击“**停止**”键后，在界面上直接修改，改变采样周期后，要点击“**开始**”键，还要再次点击“**发送**”键，才可使实验机采样周期按照新的设置运行。

该实验的显示界面中已设定：采样周期  $T=200ms$


$K_p=0.5$  ,  $T_i=10 S$  ,  $T_d=2 S$  ,  $P_0=250$  , ‘温度’=60℃ 。

⑤ 在控制过程中，实际温度经数次振荡达到稳定值后，点击停止，把时间轴移至 96 秒/格或更大（在界面的右上角显示），将观测到整个温度闭环控制曲线，见图 5-2-2 所示（压缩了 8 倍的波形）。

⑥ 该实验的显示界面的上方显示有温控运行时间 xxx 秒，每次点击“发送”键将启动时间从 0 开始计数。并同时显示有 PID 位置控制的调节器输出  $P(k)$  值（0~255）。该两项数据的显示对观察实验的全过程将提供很大帮助。

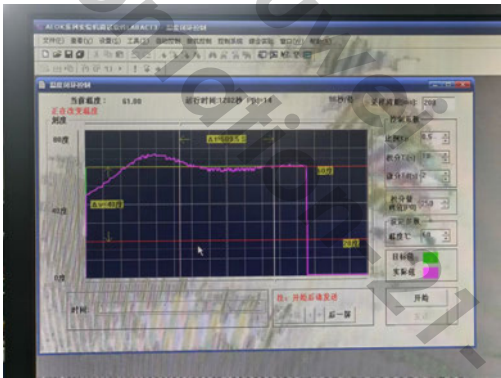
⑦ 冷却：在实验过程中，用户点击“停止”键后，将自动启动风扇转动进行冷却。  
退出界面，风扇停转。

**虚拟示波器的截图：**

点击软件界面工具栏上的示波器截图按钮，弹出保存窗口，选择保存路径保存当前示波器界面图片，默认格式为 BMP 图象文件。

**2 实验数据处理（数据、曲线、图表）：**

将实验结果填入下表：

	Kp	Ti	Td	Po	温度
实验参数	0.5	10	2	250	60
温度闭环控制曲					

**四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）**

**● 实验误差分析**

①温度测量误差：使用的温度传感器可能存在一定的测量误差，这可能导致实际测量值与期望值之间的偏差。

②控制器参数误差：PID 控制器的参数（比例系数、积分时间、微分时间）的设置可能不准确，或者在实际应用中需要经过一定的调试和优化。

③外部环境扰动：外部环境因素（如环境温度变化、风扇风速等）可能会对温度控制系统产生干扰，导致控制系统的性能下降。

**● 实验现象**

①温度稳定性：观察到在闭环控制下，系统温度能够在设定的目标温度附近波动，但是否能够稳定在目标温度附近取决于控制系统的性能。

②超调现象：在系统刚开始进行控制时，可能会出现温度的超调现象，即温度超过了设定的目标值后才逐渐回到稳定状态。这可能是由于控制器参数设置不合理或者系统动态响应特性不够理想造成的。

③稳态误差：即使在闭环控制下，系统仍可能存在一定的稳态误差，即实际温度与目标温度之间的偏差。这可能是由于控制器参数未能完全调整到最佳状态，或者外部环境扰动的影响。

## ● 分析

①误差来源：实验中可能存在的误差主要来自于温度传感器的测量误差、PID 控制器参数设置不准确以及外部环境的干扰等因素。

②影响因素：控制系统的性能受到控制器参数的影响较大。合适的 PID 参数设置可以减小温度波动、减小超调现象和稳态误差，提高系统的稳定性和控制精度。

③改进方法：针对测量误差，可以采用多点校准或者更高精度的温度传感器来提高测量精度；对于控制器参数误差，可以通过试错法或者自适应调整方法来优化 PID 参数；针对外部环境扰动，可以采用外部环境隔离或者更强大的控制策略来抵抗干扰。

④消除积分饱和的方法：使用遇限削弱积分法可以在系统积分饱和时削弱积分作用，防止系统出现振荡或不稳定。这种方法可以有效改善系统的控制性能。

## 五、实验成绩评定

### (1) 出勤情况 (缺勤 1 / 3 次无实验成绩)

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
出勤情况								

注: √ 出勤, ○ 事假, × 缺勤, ▽ 其它。

### (2) 预习情况

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
预习分值								

### (3) 实验过程情况

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
过程分值								

### (4) 实验分析及报告情况

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
分析、 报告分值								

### (5) 实验成绩

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
实验分值								