



过程控制原理与应用技术 I:

过程控制原理与仪表

课内实验报告

课程名称: 过程控制原理与应用技术 I: 过程控制原理与仪表

老 师: 何王勇

班 级: 220211

学 院: 未来技术学院

学 号: 20211003337

姓 名: 曾康慧

小组序号: A4

实习日期: 2023 年 12 月

目录

实验一 对象特性分析与过程控制系统结构设计	2
1. 实习目的	3
2. 实验环境介绍	3
2.1 可变多容水箱设备和执行器	3
2.2 传感器	7
2.3 系统 UI 设计	9
3. 实验内容	11
2.1 单容水箱动态特性分析	11
3.2 系统分析	13
3.3 系统辨识	15
4. 实验结论	16
实验二 PID 控制器设计与参数整定	17
1. 实习目的	17
2. 实验内容	17
2.1 PID 控制器原理	17
2.2 PID 整定方式	18
2.3 系统分析	19
3. 实验结论	20
3.1 纯 P 控制	20
3.2 PI 控制	22
3.3 PID 控制	24
实验三 串级控制系统设计与分析	26
1. 实习目的	26
2. 实验内容	26
2.1 实验原理	26
2.2 串级 PID 参数整定方式	27
2.3 实际系统应用	27
2.3.1 主、副控制器参数的选择	27
3. 实验结论	28

实验一 对象特性分析与过程控制系统结构设计

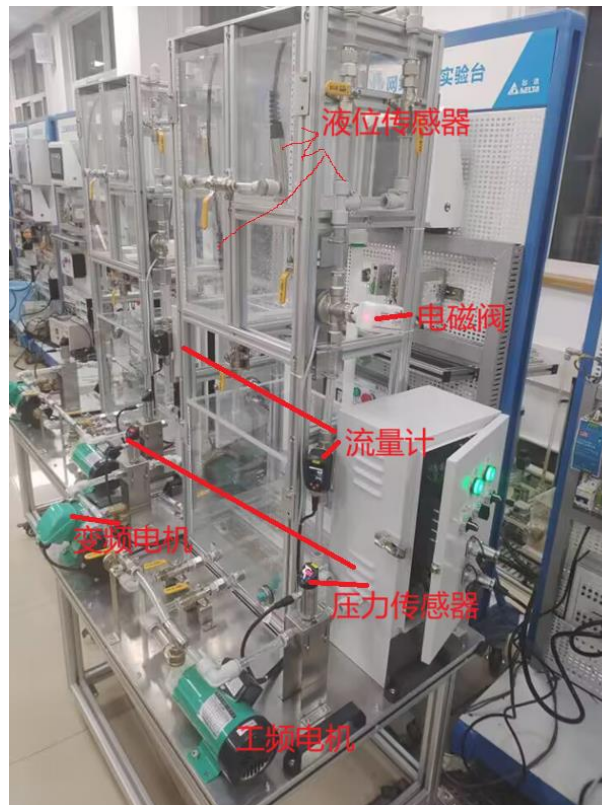
1. 实习目的

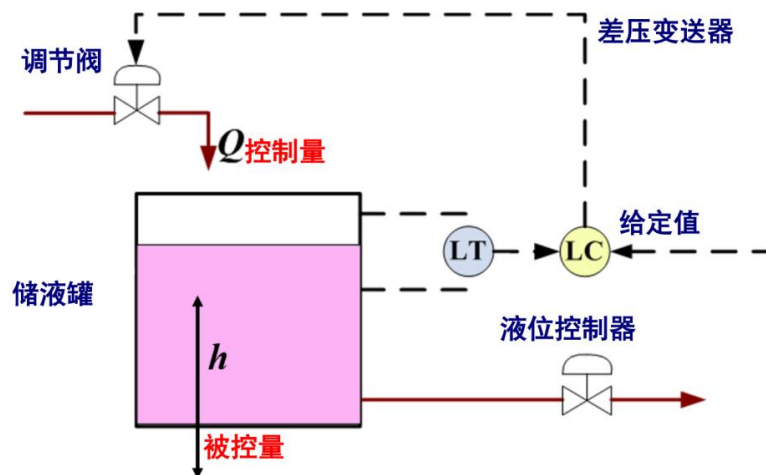
- (1) 掌握工业过程系统典型被控对象的动态特性分析和测试方法；
- (2) 掌握检测仪表、执行机构、PLC 控制器的使用方法；
- (3) 掌握基于 PLC 的过程控制系统的软硬件设计。

2. 实验环境介绍

2.1 可变多容水箱设备和执行器

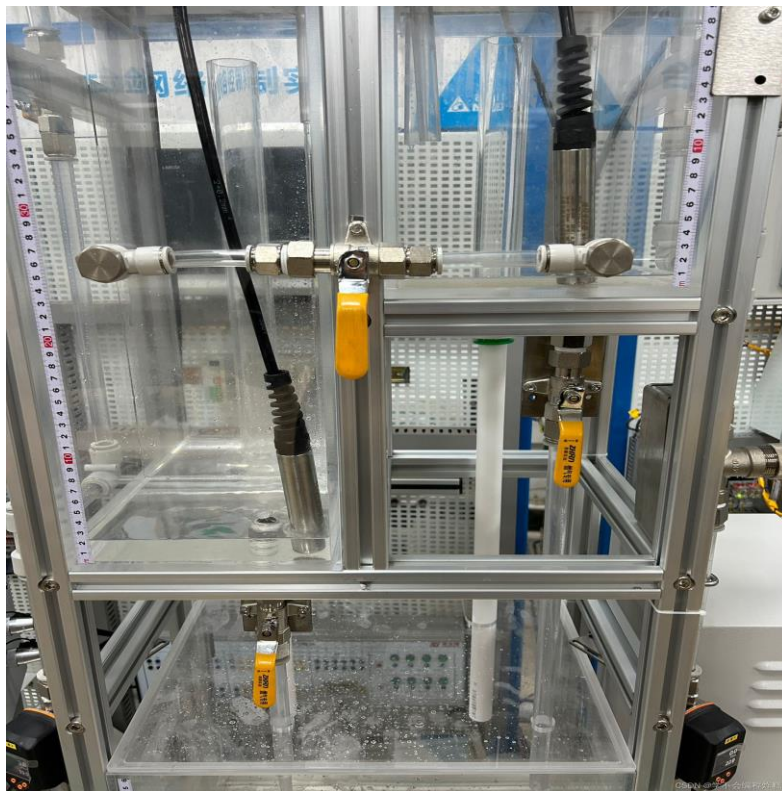
该水箱设备的主要由三个水箱容器、一个工频泵（定频泵）、一个变频泵、一个电动调节阀和若干手动调节阀组成。





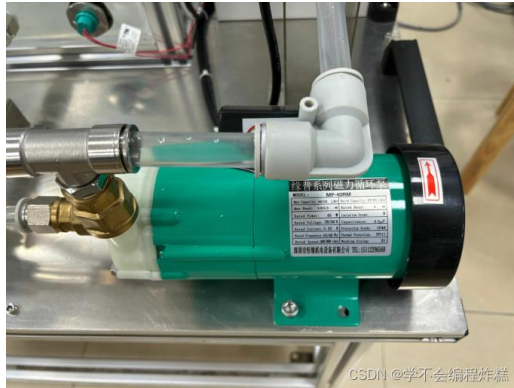
2.1.1 水箱容器

水箱容器有三个，其中最下方的为蓄水池，只承担蓄水功能，如果水箱整体水较少时，需要向蓄水池中加水；上方右侧为水箱容器 1，其水箱最高；上方左侧为水箱容器 2，其水箱底部稍低于水箱容器 1，当容器 1（右水箱）和容器 2（左水箱）之间手动阀打开时，两水箱将不会独立，容器 1 中的水会因为重力而一部分向左水箱流入，形成负载效应。



2.1.2 工频泵

工频泵位于多容水箱设备右侧，与底部水箱相连接。频率一定，开关只可通过右侧接线盒的工频泵开关手动开启（导致了无法利用控制启停 PWM 的方法来控制抽水效率）。



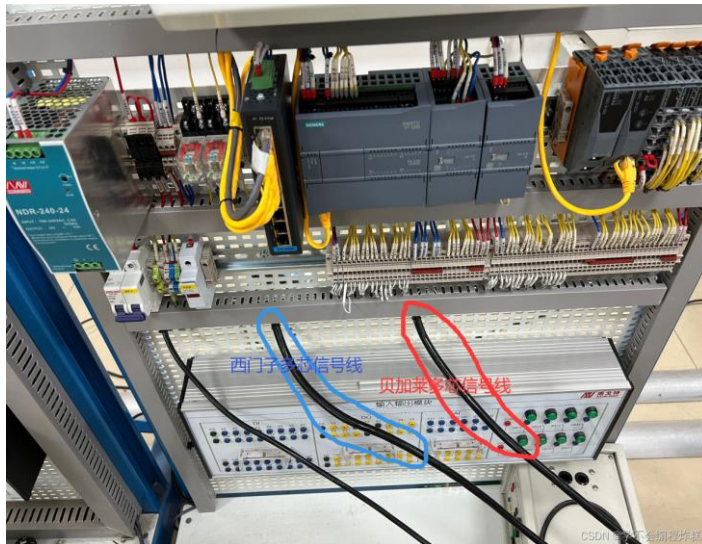
2.1.3 变频泵

变频泵位于多容水箱设备左侧，也与底部蓄水箱相连接，但是变频泵频率可改变，因此可以通过控制变频泵工作频率直接控制抽水效率，额定频率最高为 50Hz。



2.1.4 水箱操作盒

水箱操作盒位于多容水箱右侧，其中有三个旋转开关，分别控制工频泵和变频泵。另外还有两根多芯信号线（上面那根粗的多芯信号线可更换为西门子控制器接线或者贝加莱控制器接线），西门子控制器接线为中间那根，贝加莱控制器接线为右侧那根（选择不同控制器同学记得检查和更改接线），如下图所示：



2.1.5 电动调节阀

电动调节阀位于多容水箱设备右侧侧面中部，与工频泵相距较近，与工频泵相组合，可以受控改变该调节阀开度，从而控制抽水效率。

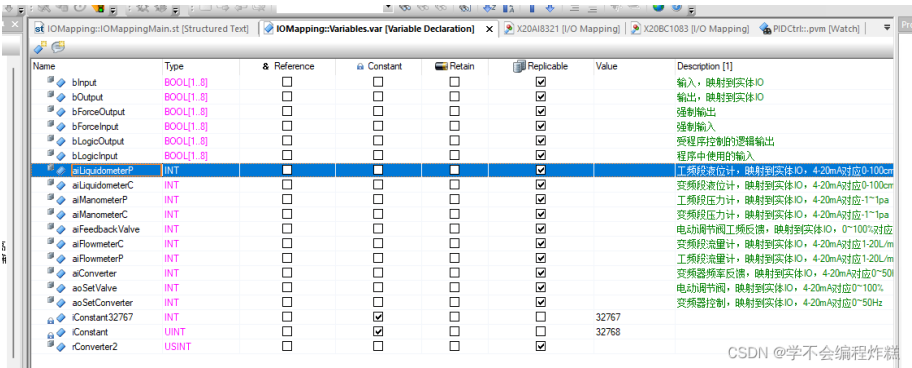


2.2 传感器

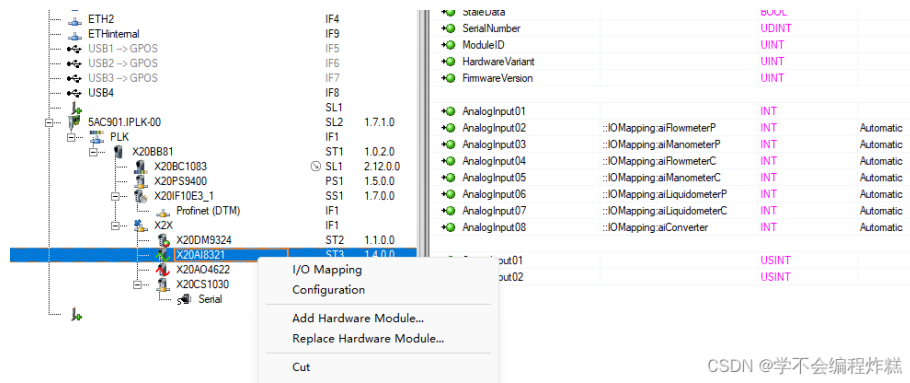
水箱设备中具有很多传感器负责将真实物理量转换为电信号 4-20mA 进行输出，比如液位传感器、流量传感器等。

2.2.1 液位传感器和信号

将对于的液位传感器输入变量，绑定到 AutomationStudio 软件硬件组态中 X20-AI8421 模块的 IOMapping 中。如下图所示：

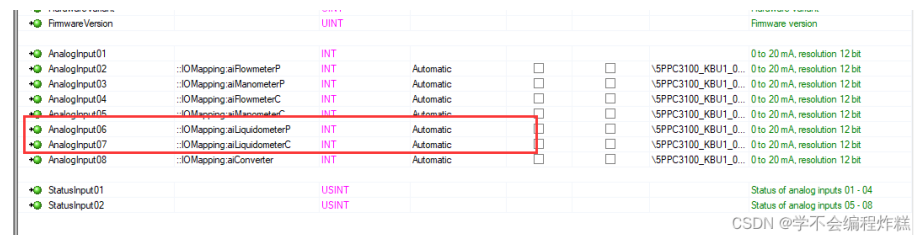


以下是 X20-AI8321 模块 IOMapping 配置操作



CSDN @学不会编程炸糕

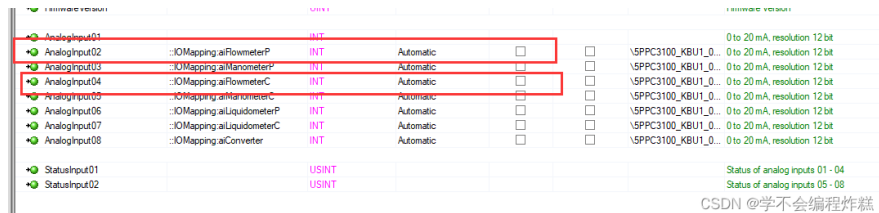
如下即为液位传感器输入信号绑定位置：



CSDN @学不会编程炸糕

2.2.2 流量传感器和信号

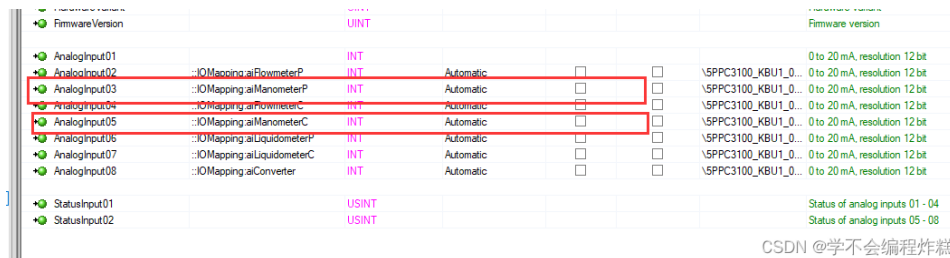
同理，将流量传感器输入变量绑定到 X20-AI8321 模块 IOMapping 的第 2、4 位。



CSDN @学不会编程炸糕

2.2.3 压力传感器和信号

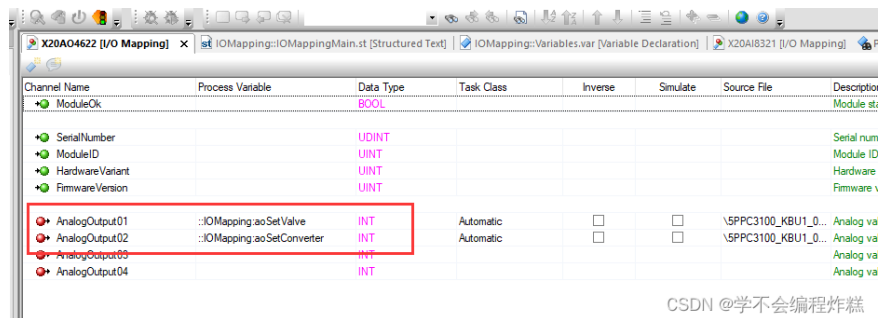
同理，将压力传感器输入变量绑定到 X20-AI8321 模块 IOMapping 的第 3、5 位。



CSDN @学不会编程炸糕

2.2.4 变频泵频率输出和调节阀控制输出

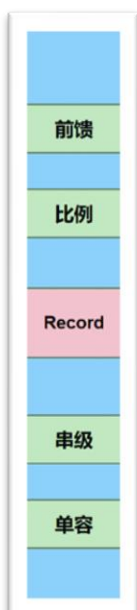
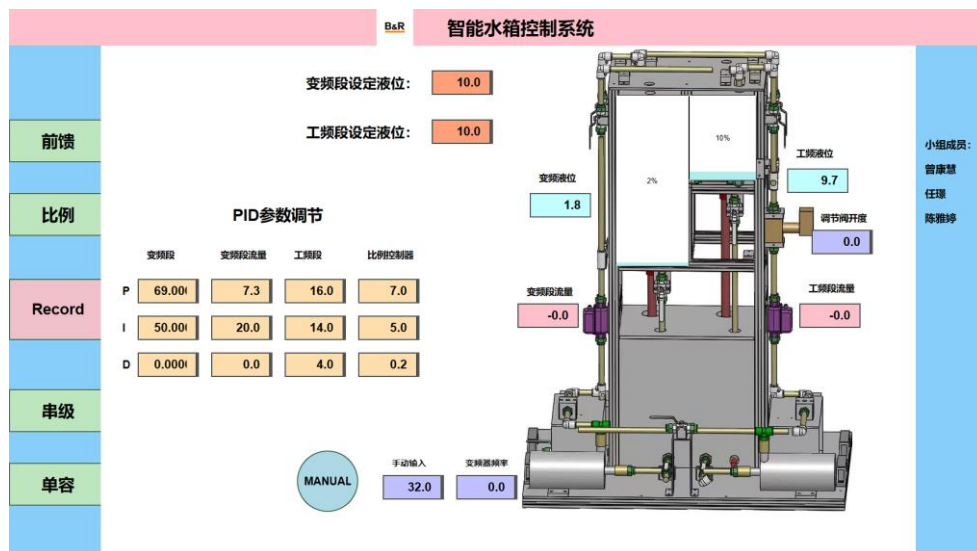
从 X20-AD4622 模块的接线图示可以看出,我们需要将调节阀控制输出和变频泵频率输出分别绑定到 AS 软件 X20-AD4622 模块的第 1、2 位。



CSDN @学不会编程炸糕

2.3 系统 UI 设计

主界面:



左边的菜单栏:

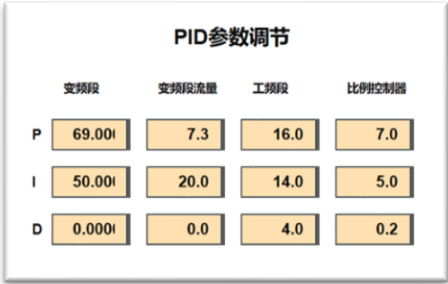
——>实现前馈-反馈控制

——>实现前馈-反馈控制

——>数据记录页面

——>实现串级控制

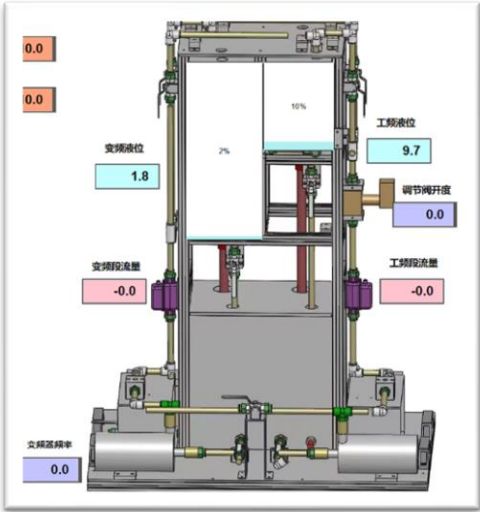
——>实现单容控制



PID 调节模块:

可在主页面直接修改以下 PID 控制器参数:

- 1. 变频段主回路控制器
- 2. 变频段副回路控制器
- 3. 工频段控制器
- 4. 比值控制器



水箱监控模块:

可实时监控水箱的变频段和工频段的液位、流量以及变频器频率，调节阀开度

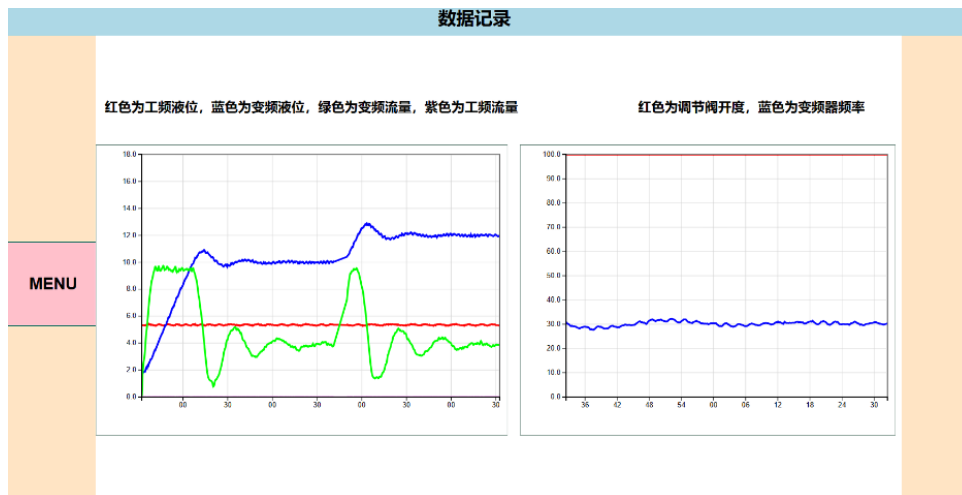


手动输入变频器频率



可改变变频段和工频段的设定液位

数据记录页面：



左图：红色为工频液位，蓝色为变频液位，绿色为变频流量，紫色为工频流量

右图：红色为调节阀开度，蓝色为变频器频率

（本次实习使用变频段水箱）

3. 实验内容

- (1) 设计以水箱为典型对象构建过程控制硬件系统；
- (2) 完成包括检测仪表、执行机构、PLC 控制器的控制系统通道；
- (3) 测试和理解对象的动态特性。

2.1 单容水箱动态特性分析

整个单容水箱实验台包含两个水箱。位于下方的水箱为储水箱，位于上方的水箱称为单容水箱，是整个实验的被控对象。单容水箱实验台简单示意如图 1：

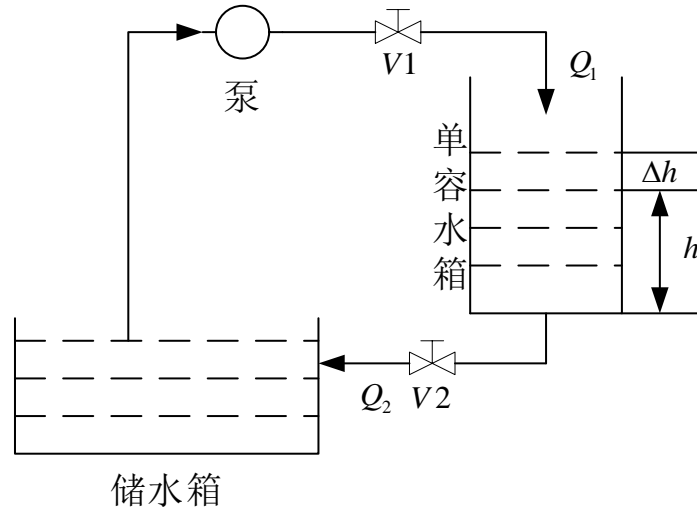


图 1：单容水箱实验台示意简图

图 1 中，包含两个手动阀 $V1$ 和 $V2$ ，两个阀开度一般固定不变。整个实验过程中，储水箱中的水通过水泵的抽取经过手动阀 $V1$ ，以一定流量 Q_1 流入单容水箱；单容水箱中的水又经过手动阀 $V2$ ，以一定流量 Q_2 回到储水箱；

可以知道，当手动阀开度不变时，进入单容水箱水的流量 Q_1 与水泵的转速相关，即通过控制水泵的转速来控制单容水箱液位高度 h 。实际上水泵是由电机驱动，而电机又是由变频器变频驱动。因此在本实验中，我们的被控对象是单容水箱，被控变量是单容水箱液位高度 h ，控制变量则是变频器工作频率。

此外，还需要说明的是单容水箱是具有自衡能力的。简单来讲，无论水泵的转速有多大，流量 Q_1 有多大，经过一段时间后， $Q_1 = Q_2$ ，单容水箱液位高度 h 会稳定在一个值附近。

接下来对单容水箱的数学模型进行推导。

根据物料平衡关系得，

在平衡状态时：

$$Q_{10} = Q_{20} \quad (0.1)$$

动态时则有：

$$Q_1 - Q_2 = \frac{dV}{dt} \quad (0.2)$$

式中, V 为单容水箱的储水体积, $\frac{dV}{dt}$ 为单容水箱储水体积的变化率, 它与 h 的关系为 $dV = Adh$, 即:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} \quad (0.3)$$

式中, A 为单容水箱的底面积。将式(1.3)代入式(1.2)得:

$$Q_1 - Q_2 = A \frac{dh}{dt} \quad (0.4)$$

基于 $Q_2 = \frac{h}{R_s}$, R_s 为手动阀 V_2 的液阻, 则上式可改写为 $Q_1 - \frac{h}{R_s} = A \frac{dh}{dt}$, 即:

$$AR_s \frac{dh}{dt} + h = R_s Q_1 \quad (0.5)$$

令 $K = R_s$; $T = AR_s$; 将上式进行拉氏变换, 得到单容水箱传递函数:

$$\frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (0.6)$$

考虑整个过程的时滞, 则单容水箱的传递函数进一步表示为:

$$\frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (0.7)$$

进一步的, 由于水泵电机转速与流量 Q_1 成正比, 而水泵电机转速与变频器输出频率也成正比, 因此变频器输出频率与单容水箱液位的传递函数如下:

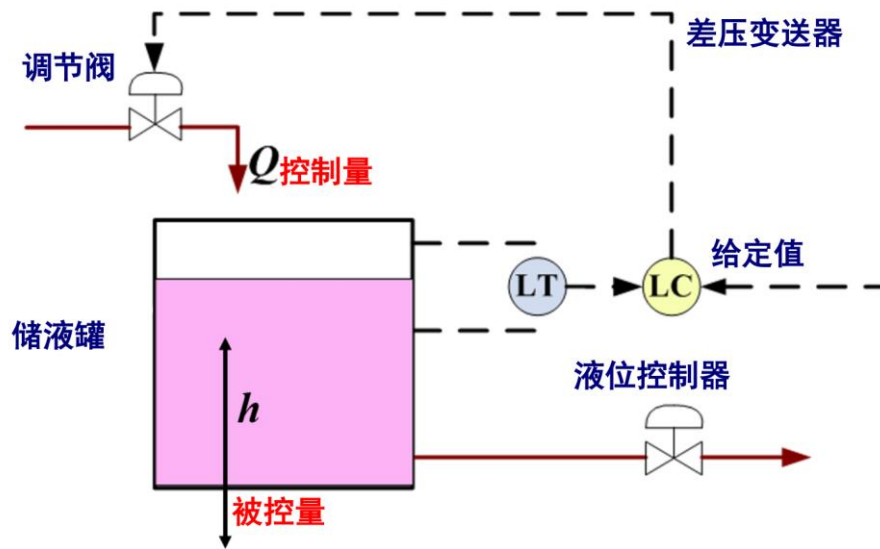
$$G(s) = \frac{H(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (0.8)$$

3.2 系统分析

单回路控系统最制中最简单的一种形式, 用一个调节器, 也有一个闭环。能满足大对数的工艺生产要求, 因此, 它是一种最基本的、使用最广泛的控制系统。它是由被控对象、执行器、调节器和测量变送器组成一个单闭环控制系统。系统的给定量是某一定值, 要求系统的被控制量稳定至给定量。由于这种系统结构简单, 性能较好, 调试方便等优点, 故在工业生产中已被广泛应用。

本实验中，被控对象为下水箱液位，控制对象为进水量，因此，选择单回路控制即可满足要求。

单回路的工艺流程图如图所示：



单回路的系统框图如图所示：



系统的最终设计目标是稳定水箱液位。

分析有：

控制器：PID 控制器（正作用）

控制对象：进水量

被控对象：水箱液位高度。

传感器：液位变送器、运输通道中的压力、流量变送器

执行器：变频泵（气开）

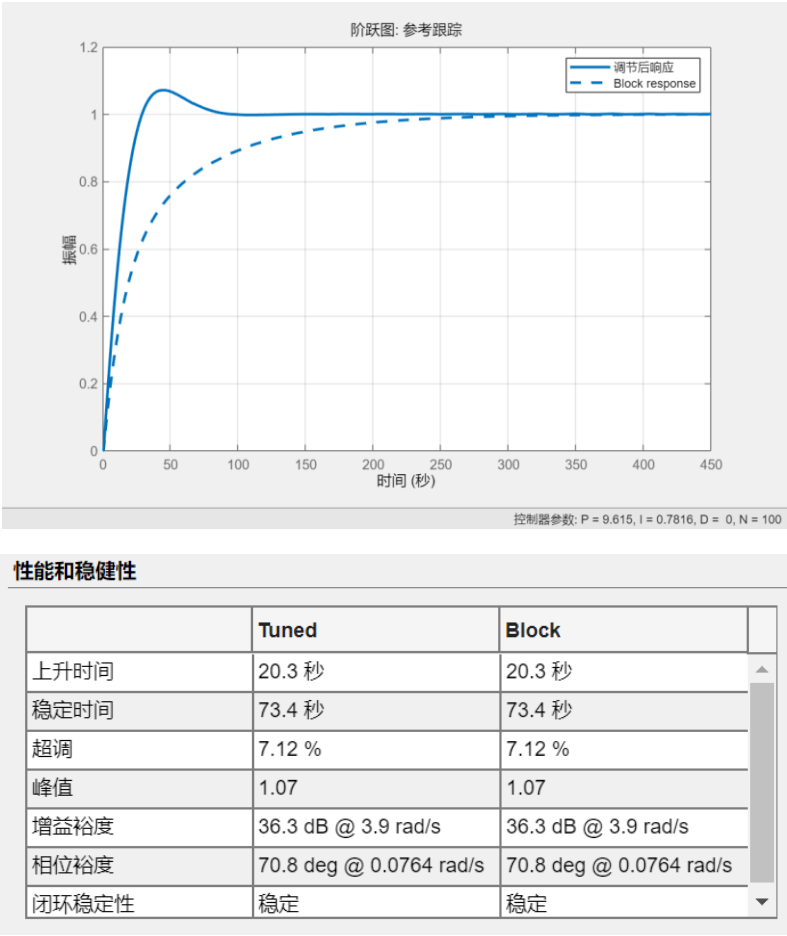
3.3 系统辨识

在水箱液面为零时，变频器一定的频率给水箱进水，即给水箱施加一个阶跃，等待液面稳定，并记录数据。

用 Matlab 自带的系统辨识工具箱辨识得：
传递函数模型：

```
tfl =  
  
    从输入 "u1" 到输出 "y1":  
          0.006244  
exp(-0.4*s) * -----  
          s + 0.04291  
  
名称: tfl  
Continuous-time identified transfer function.  
  
Parameterization:  
Number of poles: 1   Number of zeros: 0  
Number of free coefficients: 2  
Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.  
  
Status:  
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".  
Fit to estimation data: 86.23% (stability enforced)  
FPE: 0.007961, MSE: 0.007923
```

Simulink 虚拟调试 pid:



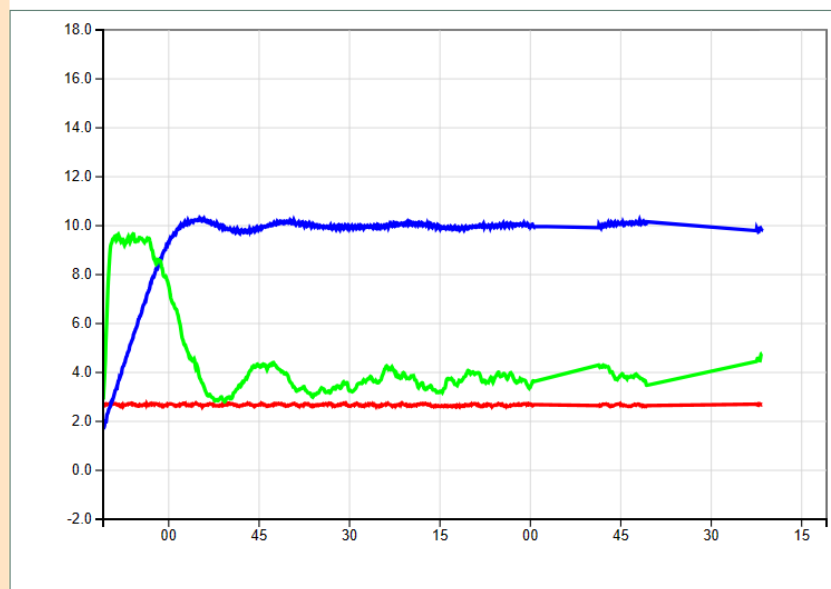
4. 实验结论

PID 参数:

变频段

P 15.00I
I 10.00I
D 0.400I

红色为工频液位，蓝色为变频液位，绿色为变频流量



实验二 PID 控制器设计与参数整定

1. 实习目的

- (1) 掌握单回路系统分析和设计方法；
- (2) 掌握 PID 控制器各参数的控制作用与整定方式；
- (3) 理解对象和控制器的变化对控制效果的影响。

2. 实验内容

- (1) 以水箱为对象，设计 PID 单回路控制系统；
- (2) 整定 PID 参数，理解各参数的作用；
- (3) 分析和对比不同水箱，不同 PID 参数的控制效果。

2.1 PID 控制器原理

工程实际中，应用最广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制，简称 PID 控制。它的优点是结构简单、稳定性好、不依赖精确的数学模型。当控制理论的其他技术难以实施时，系统控制器的结构与参数就依赖于现场调试与经验，PID 在这样的情况下应用十分简单可靠。当对一个系统不完全了解，或是不能通过有效的测量手段对系统参数进行测量时，PID 控制技术是最适合使用的。PID 控制器就是利用系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制。

比例环节用于加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。 K_P 越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但是随之而来的是超调量增大，甚至导致系统不稳定。 K_P 过小，会降低调节精度，使响应速度变慢，从而延长调节时间，使系统特性被破坏。积分环节主要用来消除静差， T_I 越小，系统的静差消除越快，但是 T_I 过小，在响应过程的初期会产生积分饱和现象，从而引起响应过程的超调量较大。如果 T_I 过大，系统的静差将难以消除，会影响系统的调节精度。微分环节能改善系统的动态特性，可以在响应过程中抑制偏差的变化，对偏差的变化有提前预报的能力。但是 T_D 过大，会使响应过程提前停止，从而延长调节时间，降低系统的抗干扰性能。

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_c T_D \frac{de(t)}{d(t)}$$

2.2 PID 整定方式

下面介绍两种常用的 PID 参数整定方式，分别为临界比例度法与衰减曲线法。

临界比例度法

a. 先将控制器的积分时间 T_I 置于最大，微分时间 T_D 置零，比例带系数 K_P 置为较大的数值，使系统投入闭环运行。

b. 等系统运行稳定后，对设定值施加一个阶跃扰动，并减小 K_P 直到系统出现等幅振荡为止。记录此时的 K_P 与等幅振荡周期 T_k 。根据记录的数据与经验公式计算出控制器参数。

控制规律	δ	T_I	T_D
P	$2\delta_k$	-	-
PI	$2.2\delta_k$	$0.85T_k$	-
PID	$1.66\delta_k$	$0.5T_k$	$0.125T_k$

衰减曲线法

衰减曲线法与临界比例度法类似，不同的是衰减曲线法不需要出现等幅振荡过程。

a. 先将控制器的积分时间 T_I 置于最大，微分时间 T_D 置零，比例带系数 K_P 置为较大的数值，使系统投入闭环运行。

b. 等系统运行稳定后，对设定值施加一个阶跃扰动，然后观察系统的响应。若响应震荡衰减太快，就减小比例带系数；反之则增大比例带系数。如此反复，直至系统出现衰减比为 $n=4:1$ 或 $n=10:1$ 的震荡过程，记录此时的比例带系数 K_s ，以及相应的衰减震荡周期 T_s 或者输出响应的上升时间 T_p 。

衰减率 ψ	控制规律	δ	T_I	T_D
0.75	P	δ_s	-	-
	PI	$1.2\delta_s$	$0.5T_s$	-
	PID	$0.8\delta_s$	$0.3T_s$	$0.1T_s$
0.90	P	δ_s	-	-
	PI	$1.2\delta_s$	$2T_r$	-
	PID	$0.8\delta_s$	$1.2T_r$	$0.4T_r$

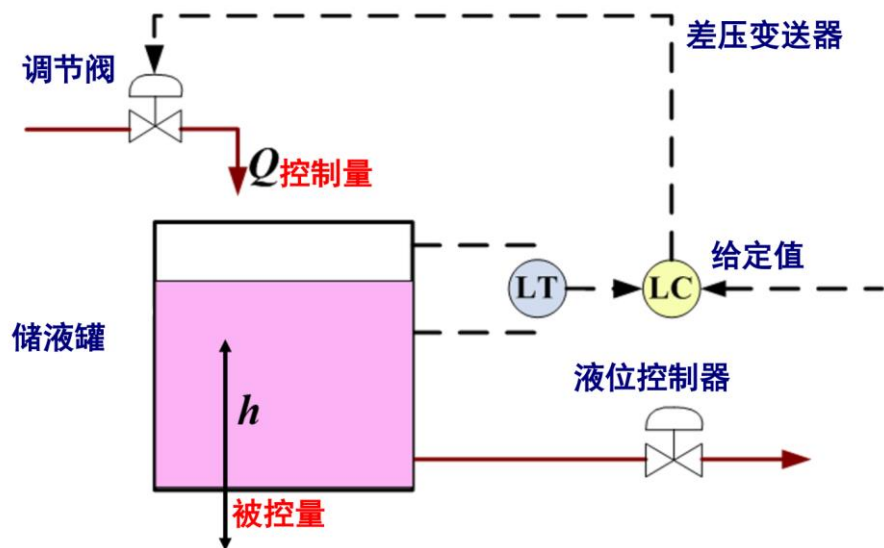
本次我们采用临界比例度法整定参数。

2.3 系统分析

单回路控制系统中最简单的一种形式，用一个调节器，也有一个闭环。能满足大对数的工艺生产要求，因此，它是一种最基本的、使用最广泛的控制系统。它是由被控对象、执行器、调节器和测量变送器组成一个单闭环控制系统。系统的给定值是某一定值，要求系统的被控制量稳定至给定值。由于这种系统结构简单，性能较好，调试方便等优点，故在工业生产中已被广泛应用。

本实验中，被控对象为下水箱液位，控制对象为进水量，因此，选择单回路控制即可满足要求。

单回路的工艺流程图如图所示：



单回路的系统框图如图所示：



系统的最终设计目标是稳定水箱液位。

分析有：

控制器：PID 控制器（正作用）

控制对象：进水量

被控对象：水箱液位高度。

传感器：液位变送器、运输通道中的压力、流量变送器

执行器：变频泵（气开）

3. 实验结论

默认设定液位为 10 cm

3.1 纯 P 控制

PID 参数：

变频段

P: 15

P 15.000

I: 0

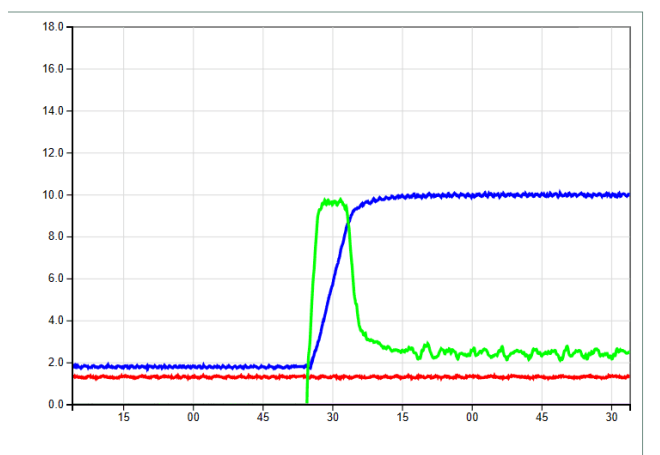
I 0.000

D: 0.0

D 0.000

纯 P 控制效果（无扰）：

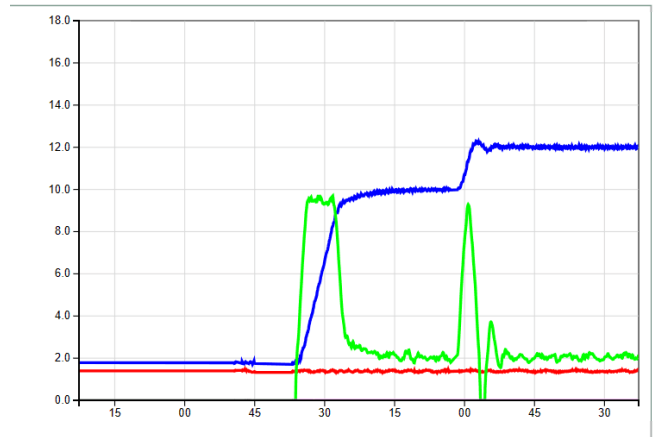
红色为工频液位，蓝色为变频液位，绿色为变频流量，紫色为工频流量



可以看出响应无超调

纯 P 控制效果（+扰动，设定液位 10cm—>12cm）:

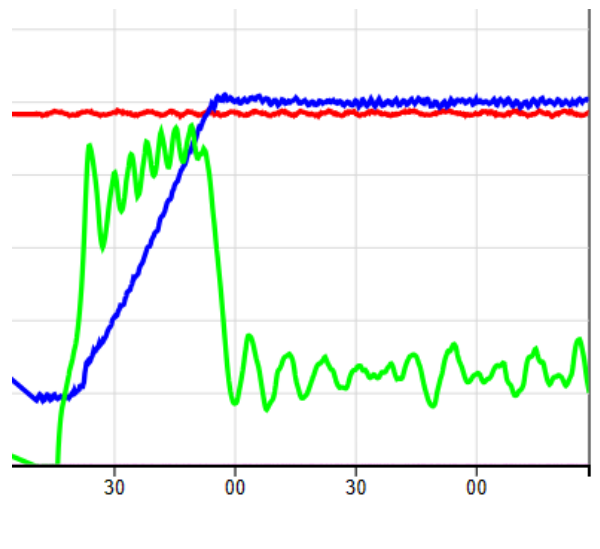
红色为工频液位，蓝色为变频液位，绿色为变频流量，紫色为工频流量



加了扰动后有些许超调

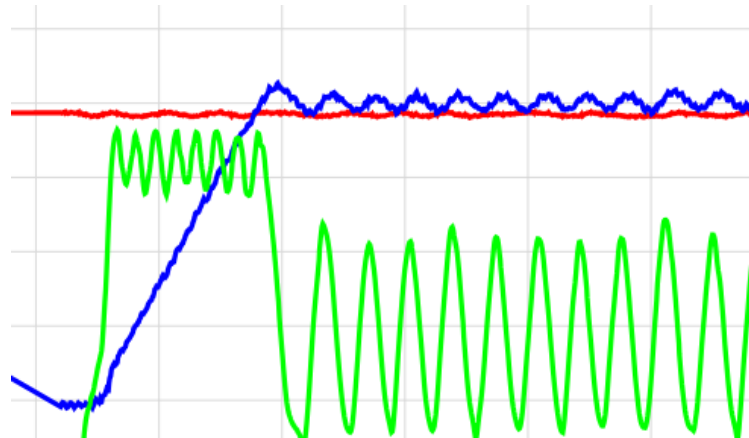
增大 P 参数后的效果:

增加到 P=16:



可以看出有微小超调

增加到 $P=18$:



可以看出此时有超调和等幅振荡

基于此记录临界比例带 δ_K 和等幅振荡周期 T_K ,接下来进行临界比例度法整定参数

结果分析:

1. 增大 P 参数可以加快系统的响应速度, 减小稳态误差。
2. P 参数的取值会影响系统的稳定性, 过大的 P 参数可能导致系统在运行过程中产生振荡, 使系统稳定性变差。

3.2 PI 控制

控制规律	δ	T_I	T_D
P	$2\delta_K$	-	-
PI	$2.2\delta_K$	$0.85T_K$	-
PID	$1.66\delta_K$	$0.5T_K$	$0.125T_K$

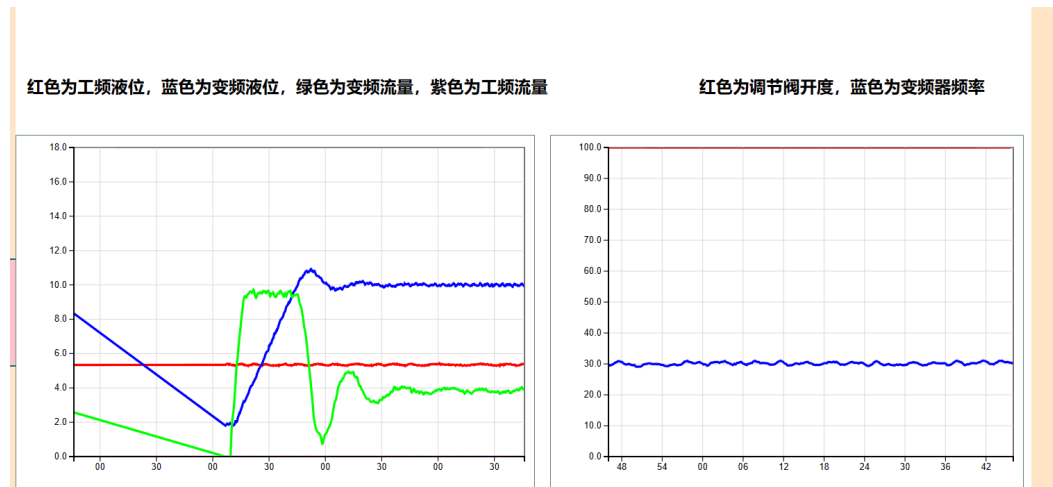
利用临界比例度法整定参数后得到 PI 参数:

PI 参数:

变频段

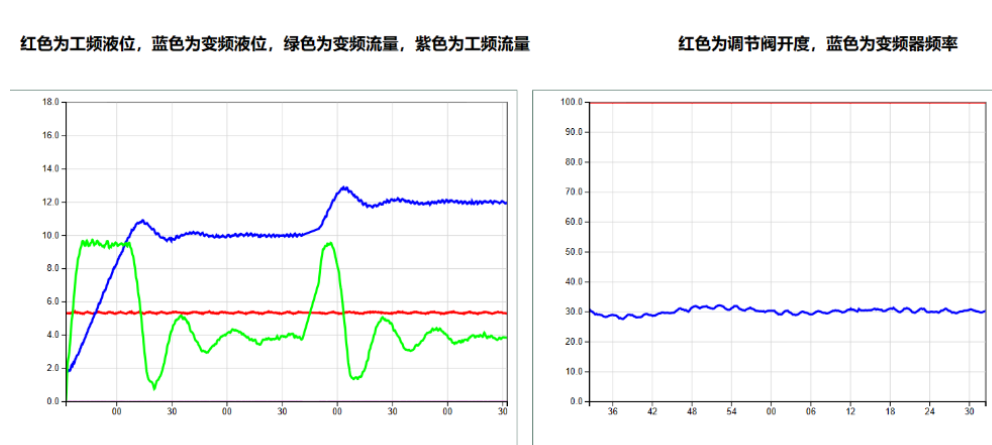
P	8.700	P: 8.7
I	2.650	I: 2.65
D	0.000	D: 0.0

PI 控制效果（无扰）：



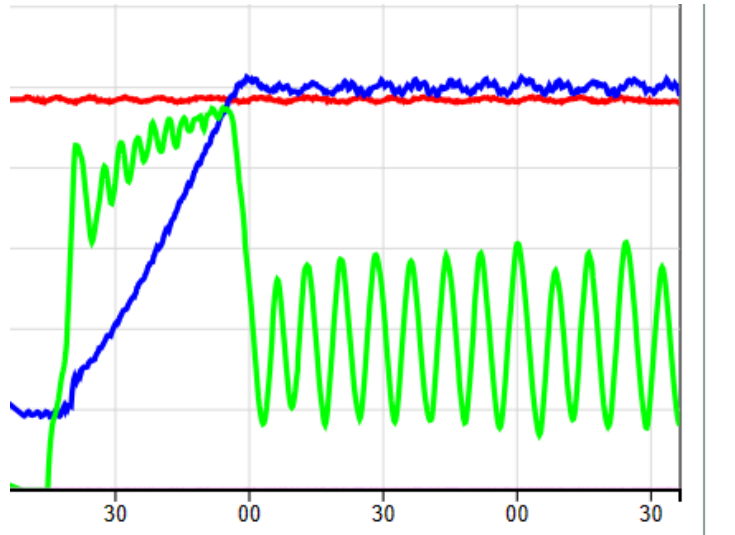
可以看出有超调，但稳定较快，消除了稳态误差

PI 控制效果（有扰动，设定液位 10cm—>12cm）



可以看出能较快克服干扰

参数 P 不变，同时增加参数 I 为 4 时的响应：



增加参数 I 后有微小震荡

结果分析：

1. 相比于上一组纯 P 控制，这组整定参数后的 PI 控制响应有超调，更迅速，消除了稳态误差。因为加入积分控制后，消除了系统稳态误差。因为偏差出现时，比例作用迅速反应输入的变化，积分作用使输出逐渐增加，最终消除稳态误差，可以达到比较好的控制效果。

2. 但是 TI 越大，积分作用越弱，可以有效降低超调量，提高稳定性。TI 减小，积分作用增强，系统振荡加剧，达到稳态的过渡时间也逐渐加长。

3.3 PID 控制

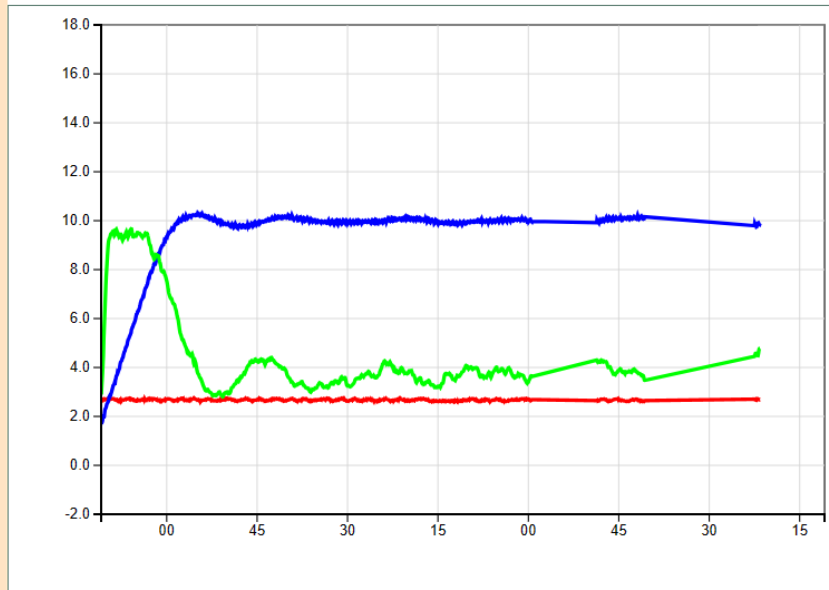
利用临界比例度法整定参数后得到 PID 参数：

PID 参数：

变频段

P	15.00%
I	10.00%
D	0.400%

红色为工频液位，蓝色为变频液位，绿色为变频流量



结果分析:

1. 相比于上一组 PI 控制，这组参数整定后的 PID 控制的响应有通过积分作用消除误差，通过微分控制可缩小超调量、 加快系统响应。
2. 随着 T_d 值的增大，系统超调量逐渐减小，动态特征有改善。是综合了 PI 控制和 PD 控制长处并去除其短处的控制。
3. 但是微分控制对于一些噪声过于敏锐，可能会变频泵的输出频率起伏过大从而损坏仪器。

实验三 串级控制系统设计与分析

1. 实习目的

- (1) 掌握复杂被控对象的分析方法；
- (2) 掌握串级控制系统结构的设计方法；
- (3) 掌握串级系统内外环的设计方法。

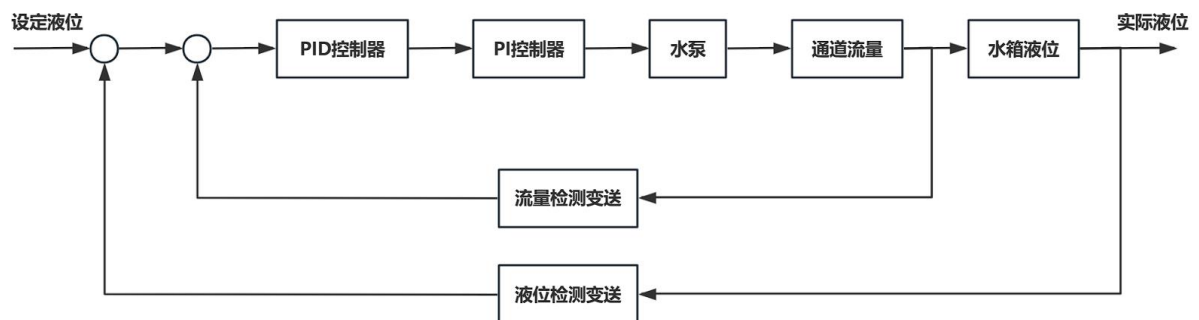
2. 实验内容

- (1) 以多容水箱为对象，设计串级控制系统结构，理解内外环的作用；
- (2) 设计主\副控制器算法，理解主\副控制器作用；
- (3) 分析和对比单回路控制系统，理解串级控制系统的优势。

2.1 实验原理

只使用单闭环 PID 控制器来控制液位的稳定，面临着运输管道内流体压力不稳定的问题。

为了解决这一问题，第二阶段我们考虑使用流量变送器进行副回路设计，通过内环控制器来迅速抑制运输通道内流量变化对系统产生的干扰，最终构成流量-液位串级控制系统来对系统进行更加精准的控制。系统框图如图所示。



分析得：

副过程：正

主过程：正

主控制器：PID 控制器（负作用）

副控制器：PI 控制器（负作用）

主被控量：水箱液位

副被控量：通道流量

控制量：进水量

执行器：变频泵

传感器：流量、液位检测变送器

串级控制系统的特点：

- (1)改善了过程的动态特性；
- (2)能及时克服进入副回路的各种二次扰动，提高了系统抗扰动能力；
- (3)提高了系统的鲁棒性；
- (4)具有一定的自适应能力。

2.2 串级 PID 参数整定方式

串级控制常用的整定方法有逐步逼近法、两步整定法、一步整定法。

1、逐步逼近法

先断开主环，按单回路控制系统整定副控制器，将结果应用于副控制器。将副回路当做主回路一个环节，再整定主控制器，然后循环进行且逐步逼近主、副控制器的最佳值。

2、两步整定法

先整定副控制器，主副控制器均纯比例作用，主控制器比例度 100%，4:1 衰减曲线法整定副回路得 δ_{2s} 和 T_{2s} ；应用副控制器整定结果，将副回路当做主回路一个环节，再整定主控制器，得到主控制器满足 4:1 衰减过程的 δ_{1s} 和 T_{1s} 。最后按经验公式计算出主、副控制器的整定参数并微调。

3、一步整定法

根据经验先确定副控制器比例度（参考值取 $P=5$ ），然后按单回路控制系统整定方法整定主控制器参数

在实习中我们使用两步整定法进行串级 PID 整定

2.3 实际系统应用

主、副控制器参数的选择：

分析：

主控制器起定值控制作用，副控制器起随动控制作用

主控制器选用 PI 或 PID 控制规律

- 主参数是工艺主要指标，允许波动的范围小，一般要求无余差
- 副控制器选择 PI 控制规律
- 副参数为了主参数控制质量，允许有余差

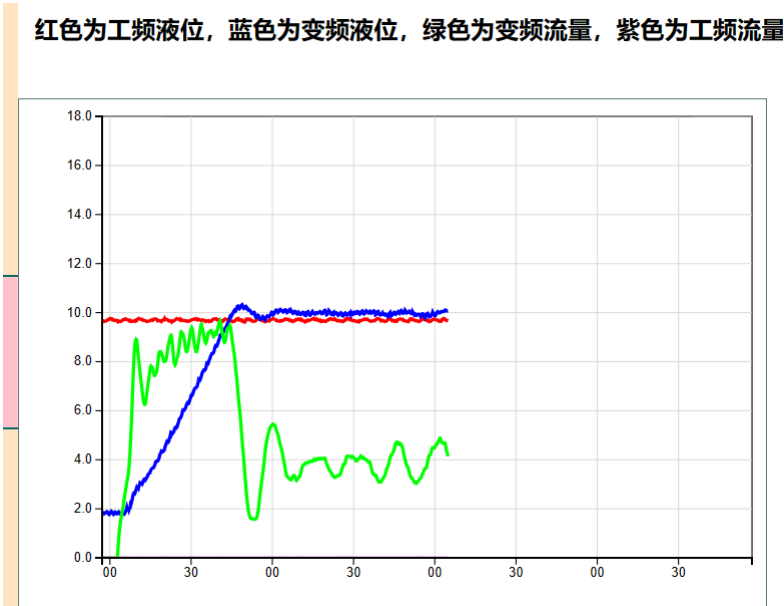
- 引入积分控制， 会延长控制过程， 减弱副回路的快速作用
- 引入微分控制， 因副回路本身起着快速作用， 再引入微分作用会使调节阀动作过大， 对控制不利， 故不采用。

使用两步整定法整定得主副控制器 PID 参数：

	主控制器	副控制器
	变频段	变频段流量
P	20.00	10.0
I	20.00	10.0
D	0.500	0.0

3. 实验结论

串级控制效果：



结果分析：

相比于单回路控制系统，该串级系统能迅速克服副回路干扰，使控制性能和

抗干扰能力的综合指标有明显的提高，响应速度更快，超调量更小。

单回路和串级系统的比较：

单回路控制系统是指只有一个被调参数、一个控制器和一个反馈回路的控制系统。

单回路控制系统的优点是结构简单、易于实现和调节。

但缺点是对扰动的抑制能力较弱、调节速度较慢、稳态误差较大。

串级控制系统是指在单回路控制系统的基础上增加了一个副回路，使得主回路的输出作为副回路的给定值，副回路的输出作为主回路的控制输入。

串级控制系统的优点是对进入副回路的扰动具有较强的克服能力、可以改善对象特性、提高调节速度和精度、具有一定的自适应能力。

但缺点是结构复杂、仪表多、参数整定难。

因此，相比单回路控制系统，串级控制系统对设定值扰动的控制过程动态品质更好，但也更复杂