
过程控制原理及应用技术I

实验报告



学 院： 自动化学院
指导老师： 安剑奇
学 号： 20211002601
班 级： 231215
姓 名： 张所鑫
时 间： 2024年1月18日

目录

实验一 对象特性分析与过程控制系统结构设计	1
一、实验目的与要求	1
二、实验环境	1
2.1 硬件环境	1
2.2 软件环境	1
三、实验内容	1
3.1 系统整体设计分析	1
3.2 硬件系统	2
3.3 控制系统通道	3
3.4 单容水箱系统辨识	4
实验二 PID 控制器设计与参数整定	8
一、实验目的与要求	8
二、实验环境	8
2.1 硬件环境	8
2.2 软件环境	8
三、实验内容	8
3.1 被控量，控制量，干扰量，检测量的选择	8
3.2 控制器的选择	8
3.3 单回路控制系统	8
3.4 P、I 参数整定	9
3.5 针对不同水箱 PID 参数的研究	12
实验三 串级控制系统设计与分析	13
一、实验目的与要求	14
二、实验环境	14
2.1 硬件环境	14
2.2 软件环境	14
三、实验内容	14
3.1 内外环控制量、干扰量的选择	14
3.2 主\副控制器算法	14
3.3 双容串级控制系统	14
3.4 外环P、I 参数和内环P参数整定	15
3.5 与单回路控制系统的对比	15
实验心得体会	18

实验一 对象特性分析与过程控制系统结构设计

一、实验目的与要求

- (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。

二、实验环境

2.1 硬件环境

水箱实验台（含液位、压力、流量传感器、电磁阀、变频电机和工频电机等）
西门子S7-1200PLC、西门子输入输出通道及端子排、台达HMI

2.2 软件环境

博图TIA15、DOPSoft 2.00.07、Matlab 2022B

三、实验内容

3.1 系统整体设计分析

本次实验以实验室水箱试验台为实验对象(如图1所示),水箱出水口由一个手动阀控制(阀门开度保持在一定比例),进水口可以自动（电磁阀）或者手动进行控制，在水箱内部有一个液位传感器可测出当前液位的高度，同时变频电机的转速影响着电磁泵的抽水量，在电机和进水阀之间还有一个压力传感器，可以测出管道两侧压力变化情况。

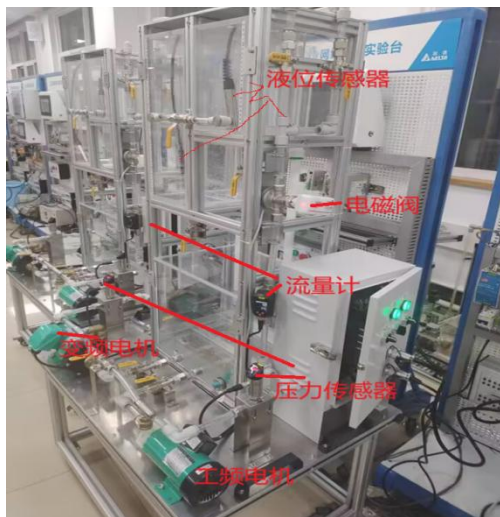


图1 水箱试验台

本实验室的水箱试验台控制系统采用了一种精细的水流控制和监测机制。首先，水从储水箱中被抽取，通过由变频电机驱动的泵送入管道，这一过程中，管道内的水压由压力传感器实时监控。而水流量的调控则通过比例阀和手动阀来实现。系统还在水箱和储水箱之间设置了手动阀，用于控制水流回流至储水箱的速度，进而形成了一个可控的循环系统。整个水流的流动过程图如图2所示。

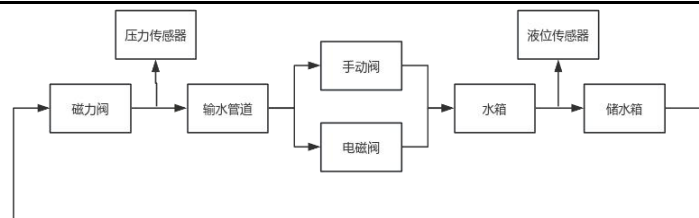


图2 水流流动过程

3.2 硬件系统

3.2.1 控制器（使用自己编写的PID）

➤位置式PID

①直观和易于理解：位置式PID控制器的原理和结构相对直观，容易被理解和实施。这使得工程师和技术人员能够较容易地设计和调整控制系统。

②广泛的适用性：由于其简单有效的特性，位置式PID控制器可以应用于多种不同的控制系统中，包括但不限于温度控制、速度控制和压力控制等。

③稳定的控制效果：在大多数情况下，位置式PID控制器能够提供良好的稳态和动态性能，使得控制系统能够快速且准确地达到设定的目标值。

④适用于模拟和数字实现：位置式PID控制器既可以在模拟控制系统中实现，也可以在数字控制系统（如使用微处理器或PLC）中实现。

⑤良好的稳态精度：由于积分作用，位置式PID控制器能够有效地消除稳态误差，提供高精度的控制。

➤增量式PID

①防积分饱和：增量式PID通过计算输出增量来避免积分饱和问题，这对于一些具有长时间常数或死区的控制系统特别重要。

②适应性强：增量式PID更容易适应数字计算环境，特别是在采用微处理器或PLC实现控制逻辑时。

③便于实现离散控制：在实现数字控制时，增量式PID可以方便地与前一时刻的控制量进行比较，便于实现离散控制。

④抗干扰能力强：对于存在较大干扰的系统，增量式PID在应对突变或干扰时表现更好。

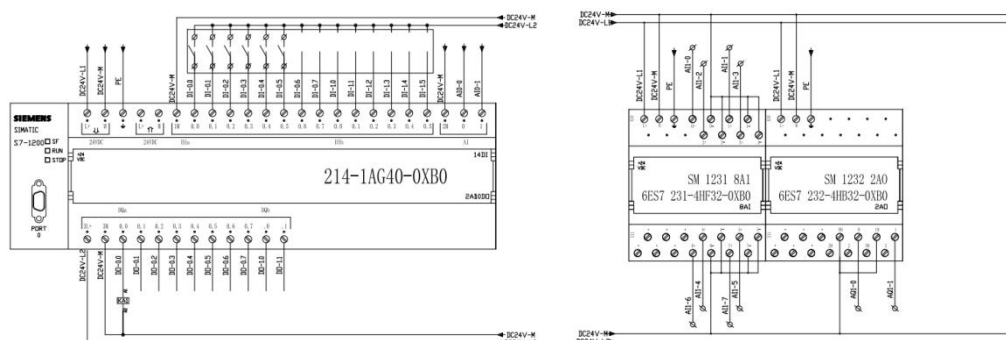


图3 PLC控制接线图

采用Siemens S7-1200，其中DI-00接浮子开关信号，DI-01接变频水泵手自动信号，DI-02接变频水泵运行反馈，DO-0.0接变频水泵启停控制。AI1-0接调节阀

开度反馈/工频段，AI1-1接流量计流量/工频段，AI1-2接工频段水管压力，AI1-3接流量计流量/变频段。AI1-4接变频段水管压力，AI1-5接工频段水箱液位，AI1-6接变频段水箱液位，AI1-7接变频器频率反馈。

3.2.2 执行机构

使用动态压差平衡电动调节阀，（所谓压差平衡，就是为确保阀门在工作范围内工作，请测量阀门两端的压差。如果 ΔP 的值高于启动值，则阀处于工作范围内。如果 ΔP 测量值低于启动值，则该阀将用作固定节流阀），接收控制器4~20mA电流信号，可以实现自动调节，也可以实现自动和手动调节的相互切换。当控制器置于手动操作时，可通过按钮直接控制电机的电源，易实现执行机构输出轴的正传或反转。



图4 动态压差平衡电动调节阀

3.2.3 检测仪表

涡街流量计（实验所用流量计名称），记录管道内流量变化；PD压力传感器（必感电子），记录管道内压力变化；投入式液位变送器，传送液位变化值。

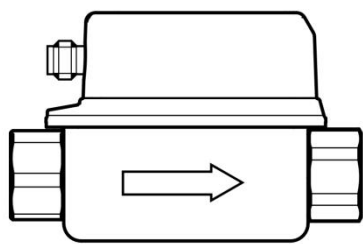


图5 涡街流量计



图6 PD压力传感器



图7 投入式液位变送器

3.3 控制系统通道

由3.2节可知，检测仪表选择涡街流量计作为检测水箱液位，采用PD压力传感器作为检测变频磁力泵出水压力的检测机构，投入式液位变送器用于检测水箱液位高度的检测机构，三者输出电流均为 4~20mA；执行机构方面选择动态压差平衡电动调节阀作为系统执行器。控制系统通道方面，考虑到检测仪表输出以及磁力泵控制信号输入均为模拟量，可以采用 PLC 的 AI 和 AO 模块对控制系统通道进行输入输出，并配置为电压输入输出方式。

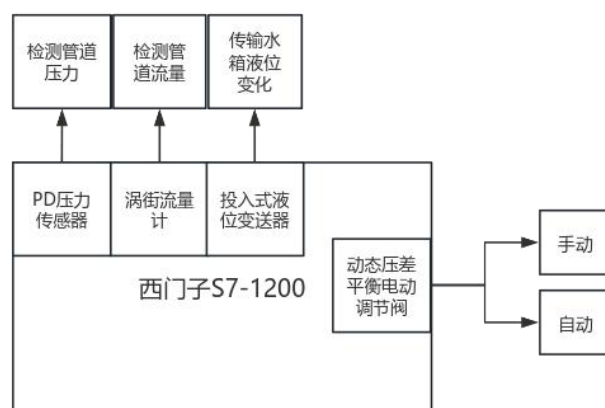


图8 控制系统通道

3.4 单容水箱系统辨识

3.4.1 单容水箱简介

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：

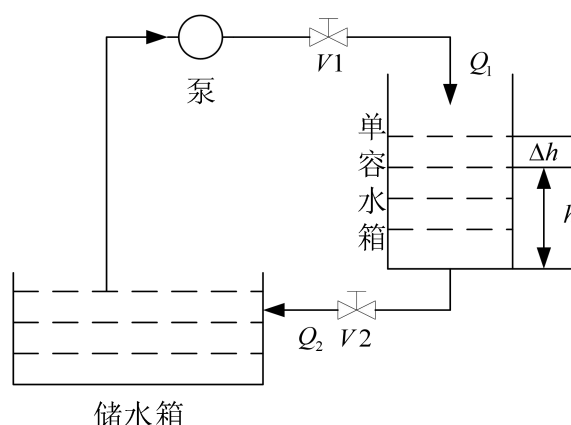


图9 单容水箱实验台示意简图

图9中，水从储水箱通过水泵和两个固定开度的手动阀流入单容水箱，然后再流回储水箱。单容水箱液位高度由水泵转速控制，这一转速又由电机驱动的变频器控制。因此，实验的被控对象是单容水箱，被控变量是水箱液位高度，控制变量是变频器的工作频率。此外，当水泵转速增加，会导致更多的水流入单容水箱时，水箱的液位会上升。而随着液位的升高，重力作用下流出水箱的水流量也会增加。最终，流出量将与流入量相等，此时水箱的液位达到一个新的稳定状态。反之，如果水泵转速减少，流入量减少，液位下降，流出量也随之减少，直到与减少后的流入量平衡。由此可得，单容水箱具有自衡能力。

接下来对单容水箱的数学模型进行推导。

根据动态物料平衡关系，即：贮罐中液体贮存量的变化率=单位时间内液体流入量-单位时间内液体流出量，得

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 = A \frac{d\Delta h}{dt} \quad (1)$$

当 Q_1 发生变化时，液位 h 随之改变，使贮罐出口处的静压发生变化， Q_2 也发生相应变化。假设 Q_2 与 h 近似呈线性正比关系，与阀门 V_2 处的液阻 R_2 （近似为常量）呈反比关系，则有：

$$\Delta Q_2 = \frac{\Delta h}{R_2} \quad (2)$$

消除中间变量，将式（2）代入式（1）中，经整理可得单容液位过程的微分方程增量表示形式

$$R_2 A \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = R_2 \Delta Q_1 \quad (3)$$

对该式进行拉普拉斯变换，得到过程的传递函数

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_2}{R_2 A s + 1} \quad (4)$$

令 $T = R_2 C$, $K = R_2$, $C = A$ ，式中 T 为被控过程的时间常数， K 为被控过程的静态增益， C 为被控过程的容量系数，则（4）可被重写为：

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{T_s + 1} \quad (5)$$

考虑整个过程的时滞，单容水箱的传递函数进一步表示为：

$$\frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (6)$$

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：

$$G(s) = \frac{H(s)}{U(s)} = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (7)$$

需要注意的是，式(7)与式(6)的 K 数值上并不相等。所以，接下来的参数辨识可视为辨识出 K ， T 和 τ 的大小。

3.4.2 下水箱参数辨识

本次实习的辨识方法采用实验辨识法，先利用PID控制器让下水箱在约为15cm处达到稳态，此时变频器的输出为12000（值为代码放缩后的结果，并非实际频率），然后使用阶跃输入（将变频器输出改为15000）对系统进行激励，等待自恒水箱稳定，发现水箱液位在约为30cm处重新稳定，采集该过程的液位变化，用MATLAB绘出如图10所示的液位变化曲线，可以看到输出曲线在开始阶段有较为明显的纯滞后现象。

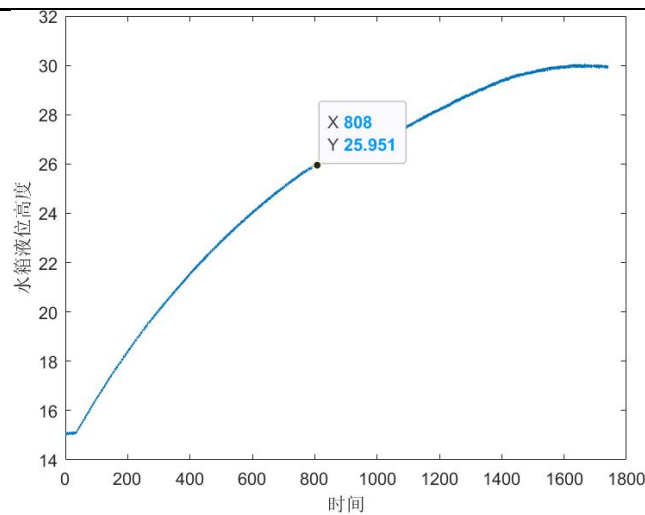
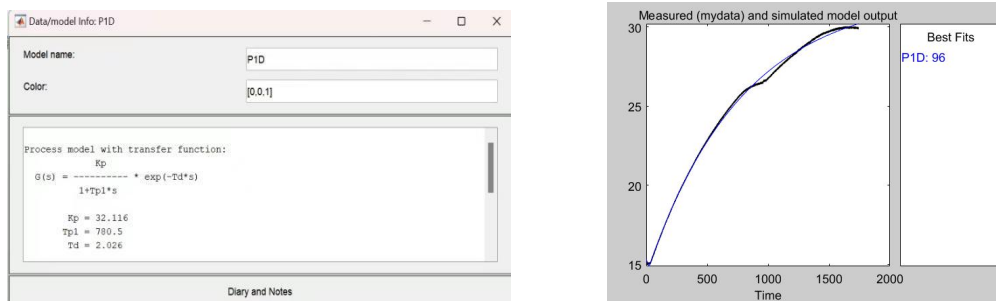


图10 下水箱液位变化曲线

将采集回的数据放入 MATLAB System Identification 中选择模型Process Models，选择无积分有延时的一阶系统模型作为待辨识模型：



可以得出下水箱最终的传递函数模型如下，准确度为96%：

$$G(s) = \frac{32.116}{780.5s + 1} e^{-2.026s} \quad (8)$$

3.4.3 上水箱参数辨识

同样采用实验辨识法，先利用PID控制器让上水箱在约为10cm处达到稳态，此时变频器的输出为12000（值为代码放缩后的结果，并非实际频率），然后使用阶跃输入（将变频器输出改为13500）对系统进行激励，等待自恒水箱稳定，发现水箱液位在约为12.4cm处重新稳定，采集该过程的液位变化，用MATLAB绘出如图11所示的液位变化曲线，可以看到输出曲线在开始阶段有较为明显的纯滞后现象。

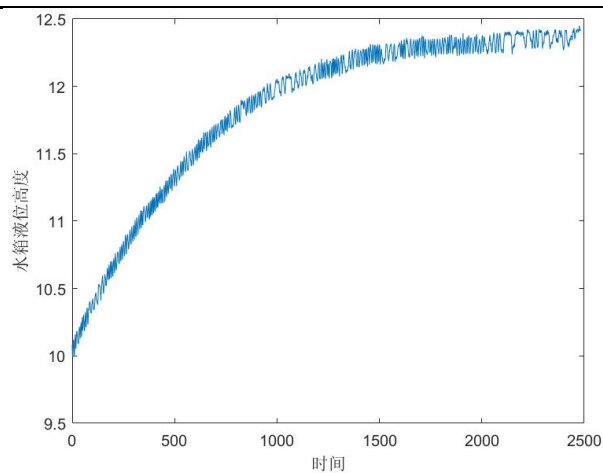
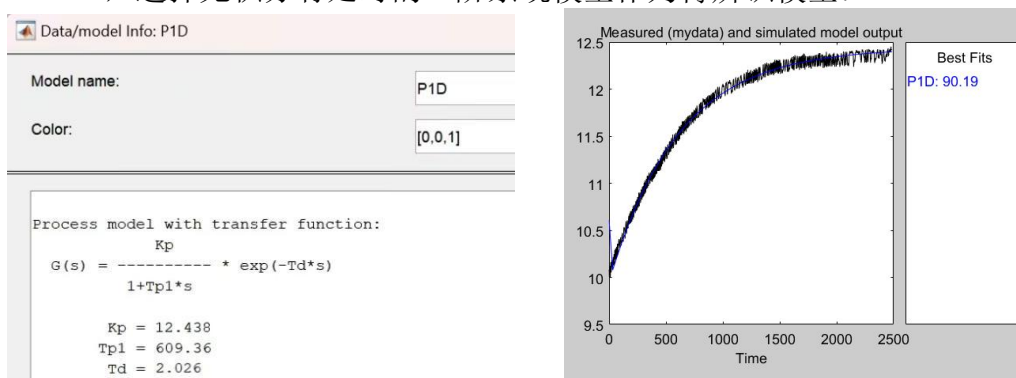


图 11 上水箱液位变化曲线

将采集回的数据放入 MATLAB System Identification 中选择模型 Process Models，选择无积分有延时的一阶系统模型作为待辨识模型：



可以得出上水箱最终的传递函数模型如下，准确度为90.19%：

$$G(s) = \frac{12.438}{609.36s + 1} e^{-2.026s} \quad (9)$$

实验二 PID 控制器设计与参数整定

一、实验目的与要求

- (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。

二、实验环境

2.1 硬件环境

水箱实验台(含液位、压力、流量传感器、电磁阀、变频电机和工频电机等)、西门子S7-1200PLC、西门子输入输出通道及端子排、台达HMI

2.2 软件环境

博图TIA15、DOPSoft 2.00.07、Matlab 2022B

三、实验内容

由于在实验一中已经对水箱系统进行了工艺分析，这里不再赘述，直接进行设计单回路控制系统设计。

3.1 被控量，控制量，干扰量，检测量的选择

单回路控制系统目标是水箱液位达到期望高度，并保证动态过渡曲线满足控制要求。因此水箱液位应作为被控量。选择电磁泵作为执行器，相应控制量为泵的出水流量。考虑到系统存在的干扰，主要干扰是管道压力的波动，以及管道内的液体流量，水箱向储水箱的水流量。检测量可以根据检测装置确定，可以是水管内压力、水箱内的液位高度或者水管内流量。

3.2 控制器的选择

由实验一的辨识结果可知，单容水箱是一个典型的一阶系统。鉴于控制精度的要求（老师说液位调整精度需控制在0.5厘米以内），采用PI控制器成为了合理的选择。其中的比例环节可以快速减小液位偏差，而积分环节有助于消除长期稳态误差，确保液位稳定。此外，之所以不选择PID的原因是微分控制响应于误差的变化率，主要用于预测性控制和减少超调，这与一阶系统比较平缓的动态误差不符合，因为其超调和快速变化的问题不太明显，使得微分控制的效果不理想。同时，微分控制对噪声敏感，可能会导致系统稳定性下降。因此，在考虑到系统的稳定性以及易于调整的需求，采用PI而非PID控制器，既能满足精确度要求，又能保持系统的稳定性和简洁性。

3.3 单回路控制系统

给定水箱液位高度，当水箱液位高度低于给定液位时，电机转速增加，使得水箱进水量增加，液位上升，最终趋于给定液位高度；当水箱液位高度高于给定液位时，变频电机转速减小，使得水箱进水量减小，液位下降，最终趋于给定液位高度，系统框图如图12。

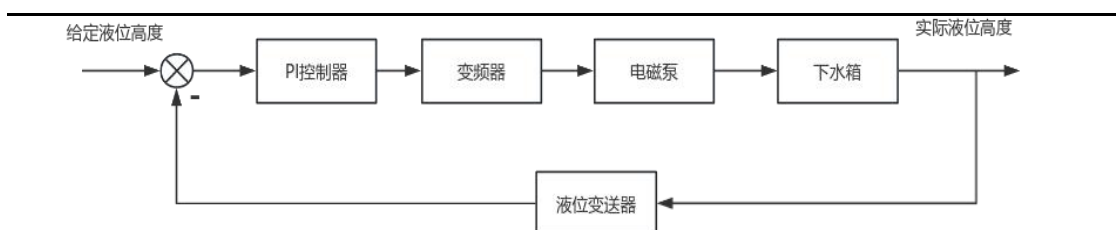


图12 水箱液位单回路控制系统框

3.4 P、I参数整定

3.4.1 衰减曲线法调整参数

整定步骤：

(1) 将控制器的积分时间 T_I 置于最大($T_I = \infty$)，微分时间 T_D 置零($T_D = 0$)，比例带 δ 置为较大的数值，把系统投入闭环运行。

(2) 系统稳定后，施加一个阶跃扰动，观察系统响应，调节比例带，直到出现衰减比 $n = 4:1$ 的振荡过程为止。记录比例带 δ_s 及衰减振荡周期 T_s 或上升时间 t_p 。

(3) 根据 δ_s ， T_s ， t_p ，采用表中的经验公式，计算控制器各参数

衰减率 ψ	控制规律	δ	T_I	T_D
0.65	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	$0.8\delta_s$	$1.2T_r$	$0.4T_r$

图13 衰减曲线法整定计算公式

(4) 按先P，后I的操作顺序，将控制器整定参数调到计算值上；观察其运行曲线，再作一步调整。

结合上述基本原则以及在实习过程中的实际情况，最终关于单回路PI参数整定的取值为 $K_p=1000$ ， $K_I=4$ ，此时在一个震荡周期内，衰减比刚好是1：0.25即4：1。

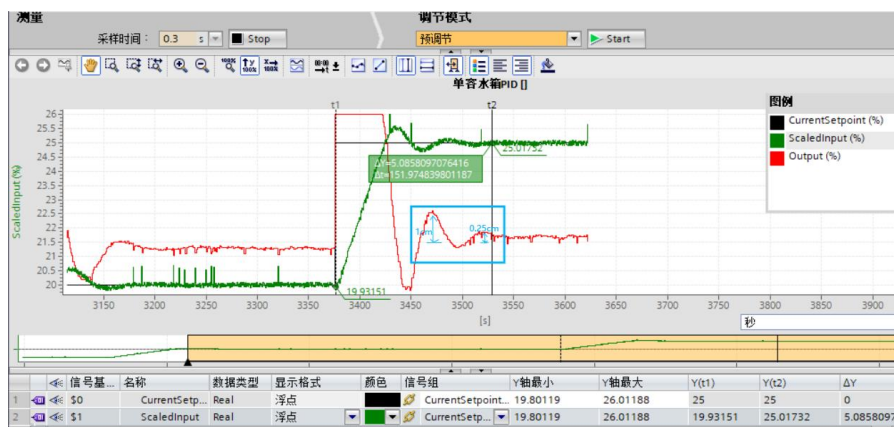


图14 单回路P、I参数整定

同时，利用实验一3.4节得到的下水箱模型，即式(9)，可以直接SIMULINK进行仿真验证所得参数是否正确。单回路仿真图如图15。

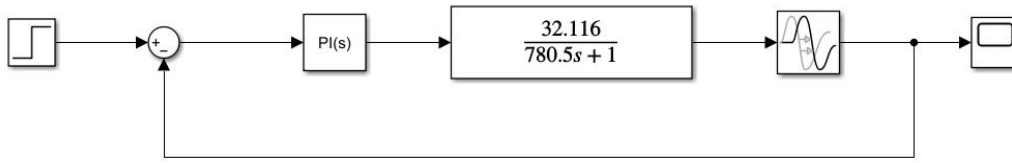


图15 单回路仿真图

将所得的 $K_p=1000$ ， $K_I=4$ 输入到PI控制器中，得到结果如图15。

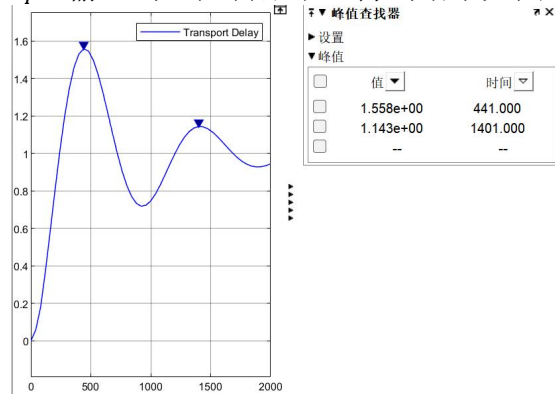


图16 参数验证 4: 1 衰减比液位高度曲线

从图16可看出，在阶跃信号为1时，两个波峰分别为1.558和1.143，近似满足4: 1，仿真曲线拟合度很好，说明得到的P、I参数是正确的，可以用在实际控制系统中。

3.4.2 调整P参数观察效果

在 $K_p=1000$ 的基础上，增加或减小以观察P参数对于系统的影响：

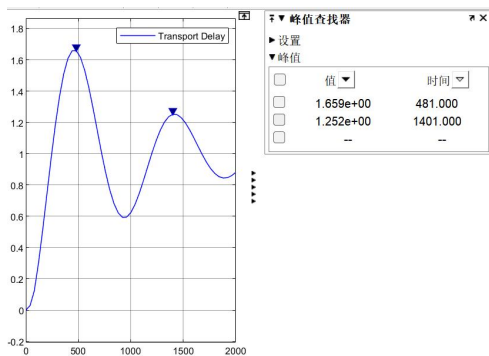


图17.1 $K_p=500$

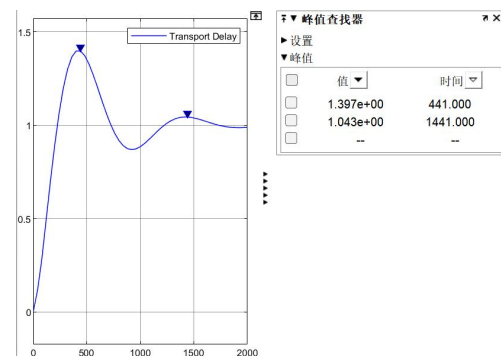


图17.2 $K_p=2000$

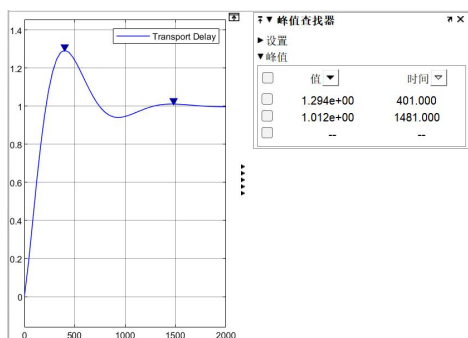


图17.3 $K_p=3000$

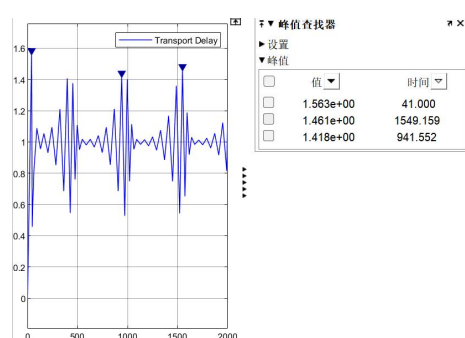


图17.4 $K_p=10000$

通过对比 $K_p = 500, 1000, 2000, 3000$ 值下的系统响应，可以发现如下结论：

➤ 稳态误差：

当 K_p 降低为原来的一半时，系统的稳态误差增加，因为 K_p 减小会导致系统对偏差的修正不够及时。相反，当 K_p 提升为原来的两倍、三倍时，系统的稳态误差减少。

➤ 调节时间：

在 K_p 为降低为原来的一半时，系统到达第一个波峰的时间为 481，比 $K_p=1000$ 时的 441 略长，表明响应速度变慢。当 K_p 增加到原来的两倍、三倍时，第一个波峰出现的时间分别为 441、401 和 401，响应时间有所减少，这说明系统的响应速度随着 K_p 的增加而加快。

➤ 系统稳定性：

在 K_p 较低（例如 500）时，由于控制作用较弱，系统的稳定性较差，表现为较大的超调量和较长的调节时间。在 K_p 增加时，系统的稳定性提高，超调量减少，响应速度变快，但如果 K_p 过高（比如 $K_p=10000$ ，为原来的10倍时），系统出现震荡。

综上所述，单纯的比例控制可以加快系统的响应速度，并且可以减小系统的稳态误差，但是不能消除系统的稳态误差，同时过大的比例增益会降低系统稳定性导致系统出现振荡现象，这与课本知识一致。

3.4.3 调整I参数观察效果

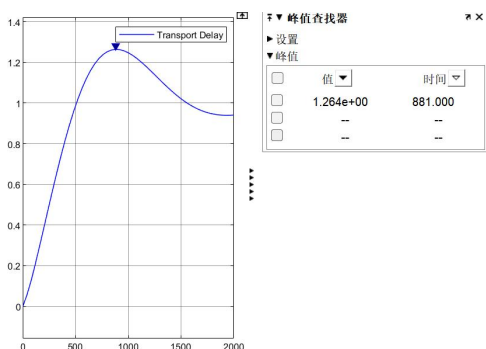


图18.2 $K_I=1$

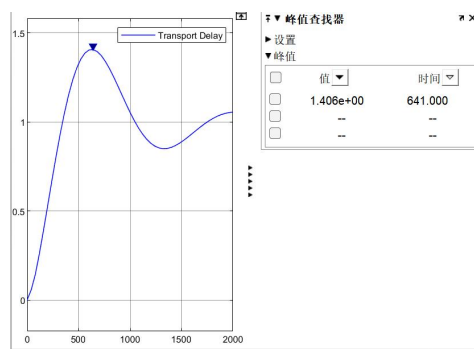


图18.2 $K_I=2$

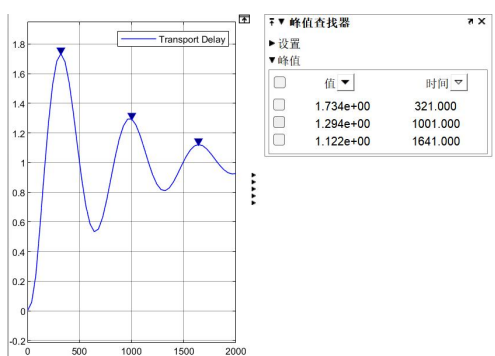


图18.3 $K_I=8$

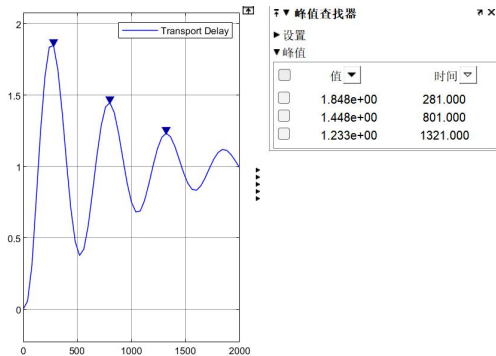


图18.4 $K_I=12$

通过对比 K_I (K_I 与 T_I 成反比)不同值下的系统响应进行分析,我们可以得出以下结论:

➤稳态误差:

当 K_I 减少至原来的四分之一时,系统的稳态误差增加。这表明较低的 K_I 值使得系统对偏差的积分修正作用减弱,从而导致稳态误差的增加。相反,当 K_I 增加至原来的两倍和三倍时,系统的稳态误差减少,表明较高的积分增益加强了对偏差的修正,有助于减少稳态误差。

➤调节时间:

随着 K_I 的减少,系统到达第一个波峰的时间从原来的 441 增加到881,表明响应速度变慢。而当 K_I 增加时,系统到达第一个波峰的时间不断缩短,例如 K_I 为原来的两倍时,时间减少至 321,这反映出系统的响应速度随着 K_I 的增加而加快。

➤系统稳定性:

在 K_I 较低时,系统稳定性表现得较好,如 K_I 为原来的四分之一时,系统只展现了一个波峰。然而,随着 K_I 的增加,系统展现出更多的波峰,例如 K_I 为原来的两倍和三倍时,分别出现了三个波峰,这表明过高的积分增益可能导致系统稳定性降低,表现为更多的超调和较长的调节时间。

综上所述,积分增益 K_I 对系统动态响应有显著影响。适当的 K_I 值可以减少系统的稳态误差并加快响应速度,但是过高的 K_I 值可能会降低系统的稳定性,这与课本知识一致。

3.5 针对不同水箱 PID 参数的研究

将下水箱调整好的P、I参数 ($K_P = 1000$, $K_I = 4$) 作用于上水箱 (式9) 中可得:

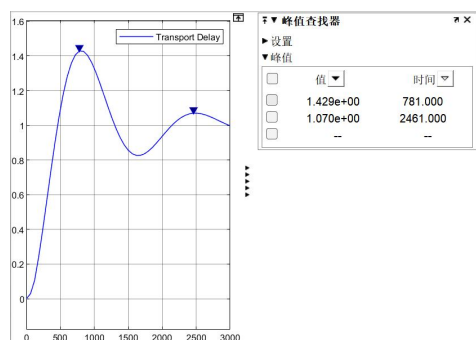


图19.1 原曲线

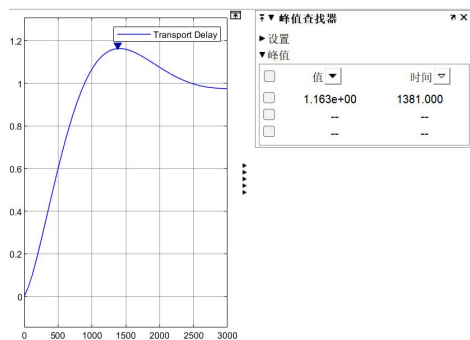


图19.2 改成上水箱参数的曲线

首先,由于下水箱系统的传递函数为 $G(s) = \frac{12.438}{609.36s+1}e^{-2.026}$, 相比于上水箱的 $G(s) = \frac{32.116}{780.5s+1}e^{-2.026}$, 有较低的增益和较快的时间常数。这意味着新系

统在没有控制器干预时会更快地响应输入变化，但其最终输出的变化幅度会更小。

在下水箱中，当 $K_p = 800$ 和 $K_I = 12$ 时，系统在 3000 秒内达到了衰减比为 4:1，第一个波峰高度为 1.429，第二个波峰高度为 1.07，到达第一个波峰的时间为 781 秒，到第二个波峰的时间为 2461 秒。而如果把 K_p 和 K_I 改成上水箱的 $K_p = 1000$ 和 $K_I = 4$ ，则响应曲线在 3000 秒内只有一个波峰，高度为 1.163，到第一个波峰的时间为 1381 秒。说明在面对同一类型的系统时，尽管使用相同的PID参数可能满足基本的控制要求，但这并不保证系统的动态性能始终处于最优状态。所以，针对不同系统，要对PID参数进行个性化调整，以实现最佳的控制性能。

实验三 串级控制系统设计与分析

一、实验目的与要求

- (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。

二、实验环境

2.1 硬件环境

水箱实验台(含液位、压力、流量传感器、电磁阀、变频电机和工频电机等)、西门子S7-1200PLC、西门子输入输出通道及端子排、台达HMI

2.2 软件环境

博图TIA15、DOPSoft 2.00.07、Matlab 2022B

三、实验内容

3.1 内外环控制量、干扰量的选择

在设计双容水箱的串级控制系统时，目标是实现下水箱的液位控制，同时考虑动态性能和抗干扰能力。所以可以设计主被控量是下水箱液位。由于上水箱液位是波动剧烈且主要的干扰，因此副被控量可设为上水箱液位。控制量为上水箱的进水量，由电磁泵控制。上下水箱的液位通过液位传感器检测并传输。执行机构为电动机，通过调节其转速来控制泵的出水流量。

3.2 主\副控制器算法

为保证系统的稳定性和消除稳态误差，主控制应使用PI算法以细调下水箱水位。而为了快速响应上水箱的液位变化，减少其对下水箱液位的影响，副控制器应该用P算法。

3.3 双容串级控制系统

在正常工况下，系统通过PI控制器维持下水箱的液位稳定，同时P控制器根据上水箱的液位变化调节泵的进水量，以快速补偿可能的扰动。当工况发生变化，例如下水箱的出水量增加，下水箱液位下降，主回路的PI控制器将调整泵的进水量以恢复液位。同时，如果上水箱的液位变化，副回路的P控制器将迅速响应，通过调整上水箱向下水箱的供水量来减少对下水箱液位控制的影响。

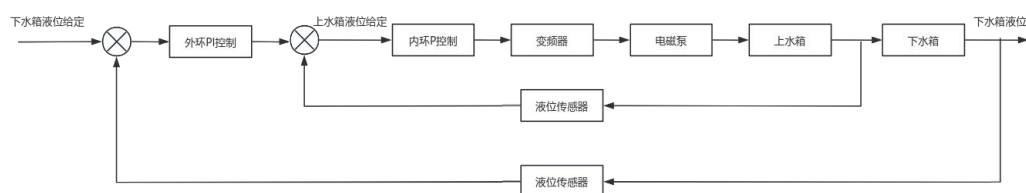


图20 双容串级水箱液位控制系统框图

3.4 外环P、I参数和内环P参数整定

前面已经确定主控制器选择PI控制，副控制器选择P控制，结合实习现场情况和书本知识，串级控制系统调节器的参数整定，选择使用逐步逼近法来调整参数，完整步骤为：

(1) 在主回路开环、副回路闭环的情况下，先整定副调节器参数，采用单回路调节器参数整定实验中选用方法求得副调节器的参数。

(2) 将副回路等效成一个环节，并将主回路闭环，用相同的整定方法求得主调节器的参数。

(3) 按以上两步所得结果，观察系统过渡过程曲线，如满足工艺要求，则参数即为所求的调节器参数；否则，在主回路闭环的情况下再整定副调节器，如此反复进行，直到获得符合控制质量指标的调节器参数为止。

3.5 与单回路控制系统的对比

3.5.1 双容单回路控制系统结果

建立双容水箱单回路控制系统，控制器选择PI算法，能保证系统的稳定性和消除稳态误差。

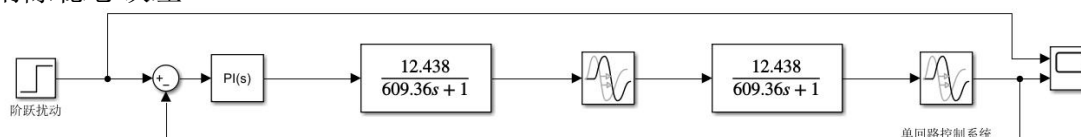


图21 双容水箱单回路控制系统

使用MATLAB自带PID调参功能见图22，求得 $K_p = 170$ ， $K_i = 30$ ，此时输出结果见图23。

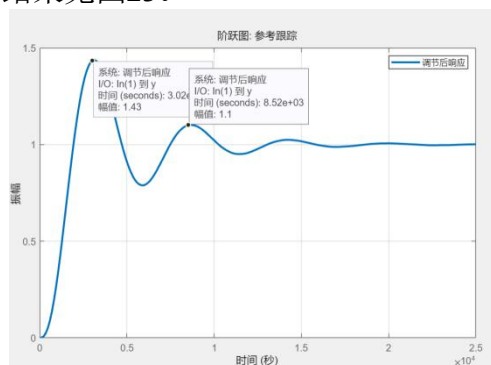


图22 单回路调参

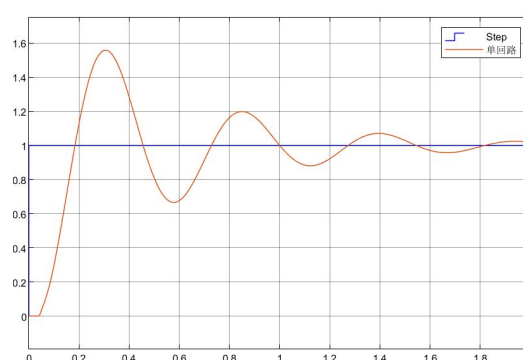


图23 单回路阶跃响应

3.5.2 双容串级控制系统结果

按照3.4节所述，先整定副回路参数，副回路仿真图如图24。

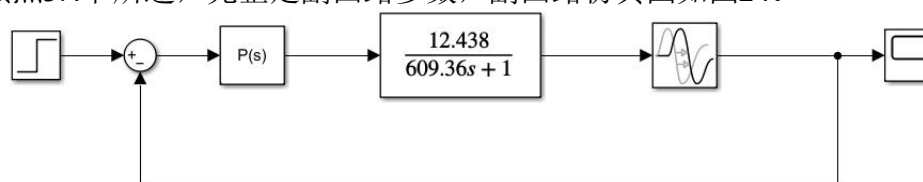


图24 双容副回路仿真图

使用MATLAB自带PID调参功能见图25，求得 $K_P = 2000$ 。

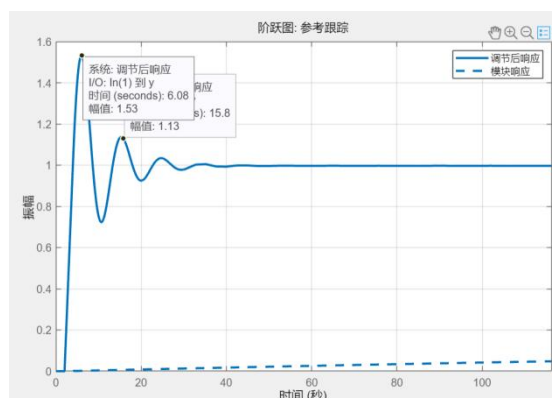


图25 副回路调参

然后进行主回路参数整定，主回路仿真图如图26。

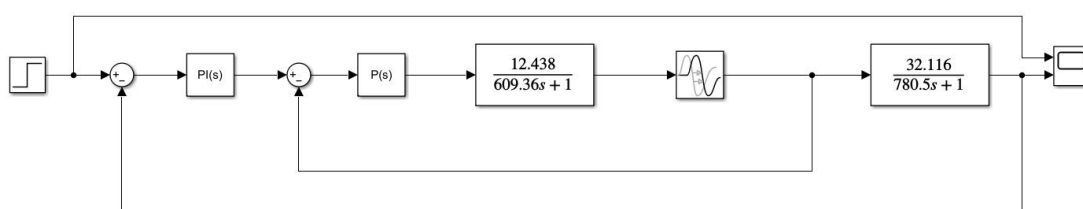


图26 双容水箱串级控制系统

使用MATLAB自带PID调参功能见图27，求得 $K_P = 500$ ， $K_I = 2.5$ ，此时输出结果见图28。

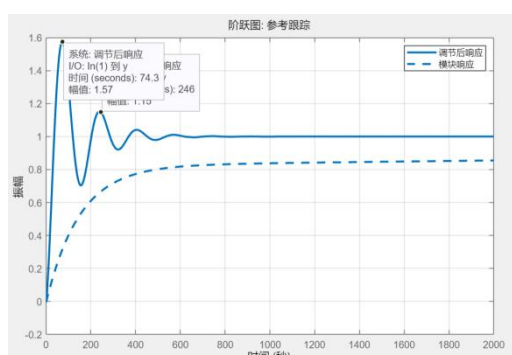


图27 主回路调参

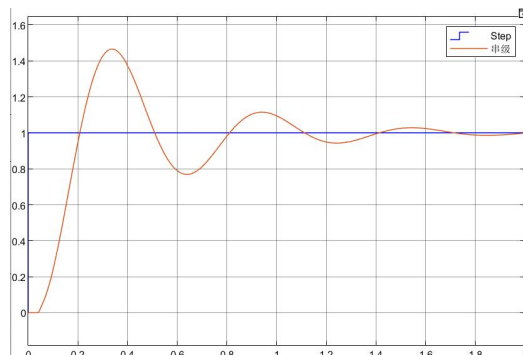


图28 串级阶跃响应

3.5.3 对比结论

通过对比图23（单回路系统）和图28（串级控制系统），可以得到以下结论：

➤超调量：串级系统的超调量明显小于单回路系统。这是因为串级控制通过副回路快速响应上水箱液位的变化，从而减少了对主回路（下水箱液位）的影响，使得系统对液位变化的反应更为精准和稳定。

➤调节时间：在串级控制系统中，调节时间比单回路系统更短。这是由于副回路的引入提高了系统对变化的响应速度，从而缩短了整体的调节时间。

➤稳态误差：串级系统在达到稳态后，其误差较单回路系统小。主要是因为PI控制器在主回路中有效消除了长期稳态误差，而副回路的P控制器则快速

调整流量以响应即时的液位变化，从而使得整体系统在长时间运行后更加稳定，误差更小。

总的来说，串级控制系统相比于单回路控制系统，在动态响应和稳态性能方面都有明显的改善。这种改善主要得益于串级系统中副回路对主回路性能的增强，以及PI和P控制器的合理应用，使得系统在保证控制精度的同时，也提高了响应速度和系统稳定性。

实验心得体会

在写实验报告之前，我有点轻敌，因为之前听说实验报告很简单，都是从实习报告里截取的。但在，当我开始写的时候，我觉得这种说法完全错误。实验报告跟实习报告侧重点完全不一样，实验报告中需要重点介绍原理以及展示结论与课程原理的对应，而这些在实习中并没有特别强调。所以，我需要更加深入的理解PLC、传感器、执行器等等的结构、原理等，还好老师发了说明书，不然这一部分肯定完不成了。除此之外，对数据的处理也是本次实验的重中之重。通过在实习中建立的上下水箱的传递函数来进行仿真，然后根据仿真结果来验证书中原理。这部分也是我认为对我帮助最大的部分，让我对知识不止停留在课本上，而是有了全新的理解。同时，我要感谢现代控制理论给我的SIMULINK基础，让我能熟练的搭建模型，以完成这次实验。

最后，我要特别感谢老师们的悉心指导。每当我在实验中遇到难题时，老师们总是及时回应我的疑问，甚至亲自来到实验室指导我们。正是有了老师们的帮助，我们的实验才能顺利完成。在此，我向老师们表达最深的敬意，并预祝老师们新年快乐、身体健康！