

# 过程控制实验指导书

## 实验一 对象动态特性和 PI 控制器特性

### 实验目的：

- 1、熟悉液位过程控制实验系统；
- 2、学习被控对象动态特性的工程测试方法；
- 3、掌握被控对象动态特性特征参数的求取方法；
- 4、绘制比例积分系统控制过程的图谱；
- 5、掌握控制器比例积分参数对控制过程动态品质指标的影响规律。

### 实验要求：

- 1、预习实验指导书中的有关附录和内容；
- 2、预习被控对象、控制器控制规律和单回路控制系统有关章节；安排好实验计划；作好前期准备；
- 3、用工程测试的方法绘制被控对象的飞升特性；
- 4、依据实验曲线求取被控对象动态特性的特征参数；
- 5、按给定的控制器参数绘制比例积分系统随比例带和积分时间变化的图谱。

### 实验内容：

- 1、运行仿真实验环境：
  - (1) 运行基于 Matlab 开发的 Tanks 仿真程序（见附录三）。
  - (2) 仿真对象为三容水箱（相当于物理装置开注水阀 11、连通阀 1 和连通阀 2；放水阀 2 开 50%左右（可调节）；关其它各阀）。
- 2、液位对象动态特性及工作点的影响（非线性）：
  - (1) 建立初稳态（调整控制器操纵值 MV，使第三水柱的液位稳定在 10~20 左右）。
  - (2) 施加控制器操纵值 MV 阶跃扰动（手动调整，使其阶跃增加 5~7）。
  - (3) 以新的稳态为基础，同方向施加控制器操纵值 MV 阶跃扰动（手动调整，使其阶跃增加 5~7）。
  - (4) 记录并绘制两次飞升曲线（阶跃曲线），记做曲线 1.1 和曲线 1.2（可保存数据成 txt 文本文件）；求取三容液位对象的特征参数。

注意：如果两次阶跃后导致第一个液柱达到 100，则需要减小控制器操纵值的增量。

3、绘制控制过程随比例带和积分时间变化的图谱：

- (1) 建立初稳态（调整控制器操纵值 MV，使第三水柱的液位稳定在 20~25 左右）。
- (2) 比例积分系统的基准参数取  $\delta_0=75\%$  和  $T_{i0}=50$  秒。
- (3) 分别按下列要求设置比例带和积分时间：
  - 将  $\delta = \delta_0$ ； $T_i=T_{i0}$  的曲线记作 1.3；
  - 将  $\delta = 0.5 \delta_0$ ； $T_i=T_{i0}$  的曲线记作 1.4；
  - 将  $\delta = \delta_0$ ； $T_i=2T_{i0}$  的曲线记作 1.5；
  - 将  $\delta = \delta_0$ ； $T_i=0.5T_{i0}$  的曲线记作 1.6；
  - 将  $\delta = 2 \delta_0$ ； $T_i=T_{i0}$  的曲线记作 1.7。
- (4) 将控制器置于自动状态。
- (5) 施加设定值 SP 阶跃扰动（闭环；设定值 SP 阶跃增加 5），记录控制过程的曲线。
- (6) 等待液位平稳，如果出现 3 个波峰后仍不平稳，切换为开环，等待平稳。
- (7) 以不同参数重复步骤(3)~(6)。

**实验结果分析：**

1、绘制曲线：

- (1) 液位对象：第 3 水柱液位的飞升特性曲线 1.1~1.2。
- (2) 不同参数下比例积分控制过程的曲线 1.3~1.7。

2、记录参数：认真记录对应上述各曲线的实验条件和控制器参数。

3、数据整理：

- (1) 依据曲线 1.1~1.2 分别求取液位对象动态特性的特征参数 ( $K$ 、 $T$ 、 $\tau$ )。

4、实验结果分析：

- (1) 采用机理建模方法求取单容水箱的传递函数，分析平衡点容积参数变化对传递函数的影响。
- (2) 对比曲线 1.1 和曲线 1.2 所求得特征参数，总结液位对象容积参数变化对飞升特性的特征参数等方面的影响。
- (3) 根据曲线，总结比例带和积分时间对控制过程的影响规律。

## 实验二 单回路控制系统

**实验目的：**

- 1、学习单回路控制系统的工程整定方法；
- 2、了解控制器参数对控制过程动态品质指标的影响规律；
- 3、了解各类扰动对控制过程动态品质指标影响的差异。

### 实验要求：

- 1、预习单回路控制系统有关章节；安排好实验计划；作好前期准备；
- 2、用两种不同的工程整定方法（其中一种为动态特性参数法）整定同一个被控对象；
- 3、“看曲线，调参数”，将三容对象的控制过程调整为最佳；
- 4、保持最佳参数，改变扰动的形式和位置，观察、记录各类扰动对控制过程的影响。

### 实验内容：

- 1、运行仿真实验环境：
  - (1) 运行基于 Matlab 开发的 Tanks 仿真程序（见附录三）。
  - (2) 仿真对象为三容水箱（相当于物理装置开注水阀 11、连通阀 1 和连通阀 2；放水阀 2 开 50%左右（可调节）；关其它各阀）。
- 2、动态特性参数法（见附录六）：
  - (1) 建立初稳态（调整控制器操纵值 MV，使第三水柱的液位稳定在 20~25 左右）。
  - (2) 施加控制器操纵值 MV 阶跃扰动（手动调整，使其阶跃增加 5~10）。
  - (3) 记录飞升曲线（阶跃曲线），求取三容液位对象的特征参数。
  - (4) 根据动态特性参数法相关公式（见附录六）和对象的飞升特性，计算 P、PI、PID 控制器参数。
  - (5) 将 PI 计算参数置于控制器；将控制器投自动。
  - (6) 系统稳定后，改变控制器设定值 SV（阶跃增 5~10），记录控制过程的曲线 2.1。
- 3、衰减曲线法（见附录六）：
  - (1) 重新建立初稳态。
  - (2) 求取纯比例系统  $\psi=75\%$  时的  $\delta_s$  和  $T_s$ 。

将控制器置于自动、纯比例 ( $T_i=9999$  秒、 $T_d=0$  分、 $\delta$  取较大值，如 100)。逐步减小比例带，施加设定值 SV 的阶跃(阶跃增或减 5~10)，观察控制过程，直至控制过程的衰减率  $\psi=75\%$ 。将此控制过程记作曲线 2.0，此时的比例带记作  $\delta_s$ 、控制周期记作  $T_s$ 。
  - (3) 根据衰减曲线法相关公式（见附录六），计算 P、PI、PID 控制器参数。
  - (4) 将 PI 算参数置于控制器；将控制器投自动。
  - (5) 改变控制器设定值 SV（阶跃增 5~10），直到系统重新稳定。记录控制过程的曲线 2.2。

4、看曲线，调参数，求取最佳控制过程：

(1) 以步骤 3 的实验结果为基础。

(2) 根据 PI 参数对控制性能的影响，求取 PI 控制器的最佳整定参数  $\delta_0$  和  $T_{i0}$ 。

加设定值 SV 扰动，依据曲线形态适当修改控制器参数，直到  $\psi=75\%$ 。记能使衰减率  $\psi=75\%$  的比例带为  $\delta_0$ ；积分时间为  $T_{i0}$ 。记录控制过程的曲线 2.3。

**注意：**如果步骤 2 的结果已经能使衰减率  $\psi=75\%$ ，则步骤 3 可省略。

5、变换扰动位置，记录控制过程：

(1) 以步骤 3 的实验结果为基础，放水阀 3 开 10%~20% 左右。

(2) 泄水位置从“无”变为“液柱 1”，为第 1 水柱加扰动，记录控制过程的曲线 2.4。

(3) 泄水位置从“液柱 1”变为“无”，等待重新稳定。

(4) 泄水位置从“无”变为“液柱 3”，为第 3 水柱加扰动，记录控制过程的曲线 2.5。

### 实验结果分析：

1. 绘制曲线：

(1) 由动态特性参数法计算参数求得的 PI 控制过程的曲线 2.1；

(2) 由衰减曲线法计算参数求得的 PI 控制过程的曲线 2.2

(3) 经过调整 PI 参数求得的最佳 PI 控制过程的曲线 2.3；

(4) 在第 1 水柱处加泄水扰动求得的 PI 控制过程的曲线 2.4；

(5) 在第 3 水柱处加泄水扰动求得的 PI 控制过程的曲线 2.5。

2. 记录参数：认真记录对应上述各曲线的实验条件和控制器参数。

3. 实验结果分析：

(1) 用 2.1 与 2.2 比较两种工程整定法使用的方便程度和准确程度。

(2) 用 2.4 与 2.5 比较不同位置扰动对控制过程动态品质指标的影响规律。

## 实验三 数字 PID 控制

### 实验目的：

1、在物理装置上学习数字 PID 控制器的编程实现。

### 实验要求：

1、预习单回路控制系统有关章节；安排好实验计划；作好前期准备；

- 2、使用组态软件的编程功能实现数字 PID 算法；
- 3、使用 PID 控制器实现三容水箱实验台对象的控制。

### 实验内容：

#### 1、数字 PID 控制器实现：

- (1) 打开紫金桥组态软件，了解组态软件的点组态和画面组态（见附录五）。
- (2) 打开实验界面的画面组态（单回路控制/离散 PID）。
- (3) 双击 Action 项，打开编程界面。
- (4) 在已有程序框架下，实现数字 PID 算法（微分作用使用理想微分）、零阶保持器算法及控制周期内的界面刷新算法。
- (5) 将组态软件切换至运行模式，对算法进行调试。

#### 2、数字 PID 控制性能：

- (1) 将组态软件切换至运行模式，进入实验界面（单回路控制/离散 PID）（见附录四）。
- (2) 设置三容水箱对象（开注水阀 11、连通阀 1 和连通阀 2；放水阀 2 开 30~70%左右；关其它各阀）（见附录一）。
- (3) 建立初稳态（手动调整控制器输出 MV，使第 3 水柱的液位 PV 稳定在 20~30%左右）。
- (4) 设置控制器参数（比例  $\delta=75\%$ 、积分  $T_i=50$  秒，微分分别取  $T_d=0$  和  $T_d=2$  秒两种）。
- (5) 施加设定值 SP 阶跃扰动（闭环；设定值 SP 阶跃增加 5%），记录控制过程的曲线 3.1 和 3.2。
- (6) 等待液位平稳，如果出现 3 个波峰后仍不平稳，切换为开环，等待平稳。

### 实验结果分析：

#### 1. 绘制曲线：

- (1) PID 控制过程的曲线。

#### 2. 记录参数：认真记录所编写 PID 算法的代码和曲线的实验条件和控制器参数。

#### 3. 实验结果分析：

- (1) 总结数字 PID 控制器实现中的问题。

## 实验四 串级控制系统

### 实验目的：

- 1、熟悉基于流程模拟的虚拟装置实验系统；
- 2、熟悉加热炉的工艺流程，理解出口温度的影响因素；
- 3、了解串级控制系统对各类扰动控制过程的动态品质指标影响的差异。

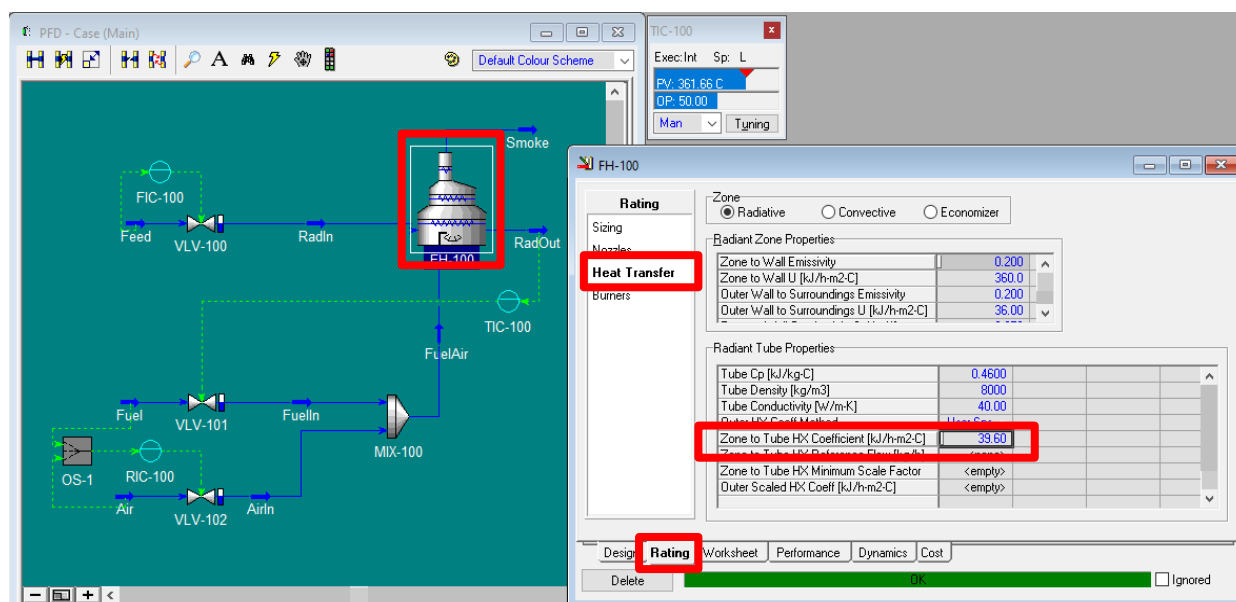
### 实验要求：

- 1、预习串级控制系统有关章节；安排好实验计划；作好前期准备；
- 2、以出口温度作主参数、燃气流量或炉膛温度作副参数，组成串级控制系统；
- 3、改变扰动的位置，观察、记录各类扰动对控制过程的影响。

### 实验内容：

#### 实验前的参数调整工作：

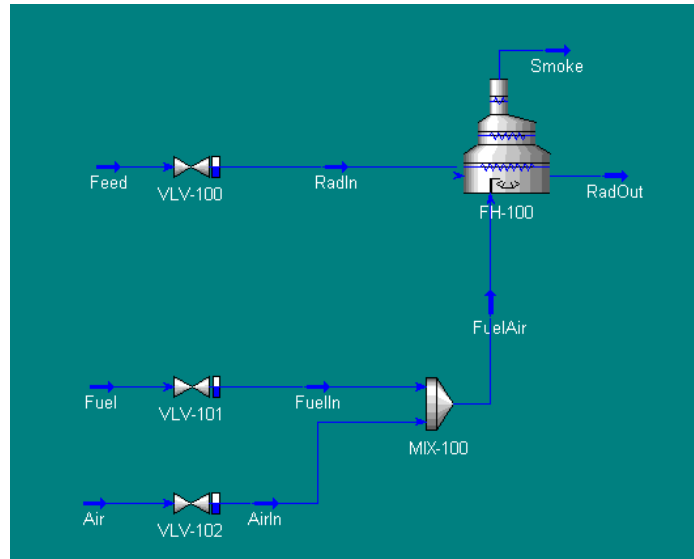
为了各组之间的仿真有特性区别，因此调整一下加热炉辐射段炉膛对炉管的传热系数。



在如下各个仿真文件中，双击加热炉对象，在弹出的对话框中找到“Zone to Tube HX Coefficient”，默认是 39.6。以组内同学学号后两位（多位同学取平均值）除以 2 加上 40 作为新的传热系数，填入表中。运行动态仿真，直到曲线重新稳定下来，以此作为工作点。

#### 1、加热炉仿真基本控制：

- (1) 打开仿真文件 (FurnaceDyDir)，查看基本流程。



- (2) 双击物料流，分别了解进料 Feed、燃气 Fuel、空气 Air 和出料 RadOut、烟气 Smoke 的关键性质和组成。

Stream Name	Feed
Vapour / Phase Fraction	0.0000
Temperature [C]	200.0
Pressure [kPa]	151.2
Molar Flow [kgmole/h]	670.9
Mass Flow [kg/h]	2.000e+005
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	251.9
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-4.505e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole C]	1205
Heat Flow [kJ/h]	-3.022e+008
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	252.2
Fluid Package	Basis-1
Phase Option	Multiphase

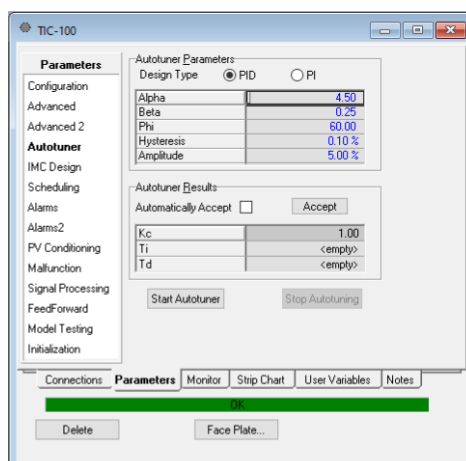
Component	Mole Fractions
Nitrogen	0.000000
CO	0.000000
CO2	0.000000
H2O	0.000000
n-Octane	0.055998
n-C12	0.111106
n-C16	0.166660
n-C20	0.222212
n-C25	0.222212
n-C30	0.222212
Total	1.000000

- (3) 增加进料流量 PID 控制器，命名为 FIC-100，PV 选择 Feed 的 Mass Flow，OP 选择 VLV-100 的 Actuator Desired Position，PV 的 Range 为 0~4.0e5kg/h，PID 参数设为  $K_c=0.9$ ， $T_i=0.05$ minutes， $T_d=0$ 。把进料 Feed 的动态 Dynamics 指定量 Specs 从流量改为压力。
- (4) 增加空燃比计算器，用 Selector Block 组件，命名为 OS-1，增加两个 PV：Air 的 Std Gas Flow 和 Fuel 的 Std Gas Flow，Selection Mode 中选择除法 Quotient，并将 Output Variable Type 定为 Unitless。
- (5) 增加空燃比 PID 控制器，命名为 RIC-100，PV 选择 OS-1 的 Output Value，OP 选择 VLV-102 的 Actuator Desired Position，PV 的 Range 为 0~25，PID 参数设为  $K_c=0.9$ ， $T_i=0.05$ minutes， $T_d=0$ 。
- (6) 将上述两个 PID 控制器设为自动 Auto 模式，进料流量控制器 FIC-100 的 SP 为 2.0e5kg/h，空燃比控制器 RIC-100 的 SP 为 12，运行一段时间，达到初稳态。

## 2、单回路控制：

- (1) 增加炉出口温度的单回路 PID 控制器，命名为 TIC-100，PV 选择 RadOut 的

- Temperature, OP 选择 VLV-101 的 Actuator Desired Position, PV 的 Range 为 0~500C。
- (2) 用软件的自动整定功能整定控制器 TIC-100 的参数 (PI 或 PID), 并置于控制器。



注：自整定功能页面见上图，选择 PID 或 PI 控制，点击“Start Autotuner”按钮，开始进行自整定测试和计算（可以对照课本思考所用的自整定方法）。整定结束后，Kc、Ti、Td 显示整定结果。点击“Accept”按钮，整定结果直接复制到控制器的参数配置页。

- (3) 系统稳定后，将控制器设为自动 Auto 模式，SP 阶跃增 3~5 度，记录控制过程的曲线 4.1。
- 3、变换扰动位置，记录控制过程：
- (1) 重新建立初稳态。
- (2) 为燃气气源压力 (Fuel 的 Pressure) 加扰动，增加 5kPa。记录控制过程的曲线 4.2。
- (3) 将燃气气源压力改回原值，等待重新稳定。
- (4) 为进料流量控制器 FIC-100 设定值 SP 加扰动，增加 5000kg/h。记录控制过程的曲线 4.3。
- 4、炉膛温度串级控制的一步整定法：
- (1) 打开仿真文件 (FurnaceDyTCas)，确定主、副控制器位号，记录初稳态位置。
- (2) 设置副控制器 TIC-101：PI 控制 Kc<sub>2</sub>=1.5、Ti=0.3min、串级 Casc。
- (3) 用软件的自动整定功能整定主控制器的参数 (PI 或 PID，但注意与单回路控制器一致)，并置于控制器。
- (4) 系统稳定后，将主控制器设为自动 Auto 模式，SP 阶跃增 3~5 度，记录控制过程的曲线 4.4。
- 5、变换扰动位置，记录控制过程：
- (1) 重新建立初稳态。
- (2) 为燃气气源压力 (Fuel 的 Pressure) 加扰动，增加 5kPa。记录控制过程的曲线 4.5。



- (3) 将燃气气源压力改回原值，等待重新稳定。
- (4) 为进料流量控制器 FIC-100 设定值 SP 加扰动，增加 5000kg/h。记录控制过程的曲线 4.6。
- 6、燃气流量串级控制的一步整定法：
  - (1) 打开仿真文件 (FurnaceDyFCas)，确定主、副控制器位号，记录初稳态位置。
  - (2) 设置副控制器 FIC-101：PI 控制  $K_{c2}=0.7$ 、 $T_i=0.1\text{min}$ 、串级 Cascade。
  - (3) 用软件的自动整定功能整定主控制器的参数 (PI 或 PID，但注意与单回路控制器一致)，并置于控制器。
  - (4) 系统稳定后，将主控制器设为自动 Auto 模式，SP 阶跃增 3~5 度，记录控制过程的曲线 4.7。
- 7、变换扰动位置，记录控制过程：
  - (1) 重新建立初稳态。
  - (2) 为燃气气源压力 (Fuel 的 Pressure) 加扰动，增加 5kPa。记录控制过程的曲线 4.8。
  - (3) 将燃气气源压力改回原值，等待重新稳定。
  - (4) 为进料流量控制器 FIC-100 设定值 SP 加扰动，增加 5000kg/h。记录控制过程的曲线 4.9。

## 实验结果分析：

- 1、绘制曲线：
  - (1) 单回路设定值阶跃控制过程的曲线 4.1；
  - (2) 燃气气源压力扰动时的控制过程的曲线 4.2；
  - (3) 进料流量扰动时的控制过程的曲线 4.3；
  - (4) 炉膛温度串级下设定值阶跃控制过程的曲线 4.4；
  - (5) 加燃气气源压力扰动时的控制过程的曲线 4.5；
  - (6) 加进料流量扰动时的控制过程的曲线 4.6；
  - (7) 燃气流量串级下设定值阶跃控制过程的曲线 4.7；
  - (8) 加燃气气源压力扰动时的控制过程的曲线 4.8；
  - (9) 加进料流量扰动时的控制过程的曲线 4.9。
- 2、记录参数：认真记录对应上述各曲线的实验条件和控制器参数。
- 3、实验结果分析：
  - (1) 用曲线 4.5 与 4.6、曲线 4.8 与 4.9 比较串级控制系统对两种扰动的控制过程动态品质指标。
  - (2) 用曲线 4.4、4.7 与曲线 4.1 比较串级控制系统与单回路控制系统对给定值跟踪的

控制过程动态品质指标。

- (3) 用曲线 4.5、4.6、4.8、4.9 与曲线 4.2、4.3 与比较串级控制系统与单回路控制系统对不同位置扰动的控制过程动态品质指标。

## 实验五 前馈控制

### 实验目的：

- 1、熟悉基于流程模拟的虚拟装置实验系统；
- 2、熟悉加热炉的工艺流程，理解出口温度的影响因素；
- 3、掌握前馈控制的基本原理与前馈控制器的设计方法；
- 4、了解前馈控制系统对扰动的针对性。

### 实验要求：

- 1、预习前馈控制有关章节；安排好实验计划；作好前期准备；
- 2、掌握前馈控制的结构，以进料流量作特定的可测扰动，设计前馈补偿器的数学模型，并进行前馈控制器参数整定；
- 3、改变扰动的位置，观察、记录各类扰动对控制过程的影响，理解前馈控制的针对性。

### 实验内容：

- 1、加热炉出口温度的动态特性：
  - (1) 打开燃气流量做副参数的串级控制仿真文件 (FurnaceDyFCas)，记录初稳态位置。
  - (2) 对燃气流量设定施加阶跃扰动 (燃气流量副控制器 FIC-101：PI 控制  $K_{c2}=0.7$ 、 $T_i=0.1\text{min}$ 、串级 Cascade；手动调整主控制器输出 OP，使其阶跃增加 5)。
  - (3) 求取燃气流量设定 SP 对出口温度的飞升特性；绘制曲线 5.1。
  - (4) 将燃气流量设定改回原值，等待重新稳定。
  - (5) 对进料流量施加阶跃扰动 (进料流量控制器 FIC-100 置于手动 Man 状态，输出值 OP 阶跃增加 5%，记录对应的测量值 PV 的变化量)。
  - (6) 求取进料流量 PV 对出口温度的飞升特性；绘制曲线 5.2。
- 2、炉出口温度的前馈控制：
  - (1) 打开前馈控制仿真文件 (FurnaceDyFfwd)，记录初稳态位置。
  - (2) 使用燃气流量设定对出口温度及进料流量对出口温度的动态特性参数，计算主控

- 制器 TIC-100 的前馈补偿器，并将计算参数置于控制器的前馈控制面板（注意设置合理的量程； $K_p$  是无量纲的对象增益的商， $T_{p1}$  位于分子， $T_{p2}$  位于分母）。
- (3) 主控制器 TIC-100 保持手动、前馈补偿投自动，燃气流量副控制器 FIC-101 设为 PI 控制  $K_{c2}=0.7$ 、 $T_i=0.1\text{min}$ 、串级。
  - (4) 系统稳定后，为燃气气源压力 (Fuel 的 Pressure) 加扰动，增加 5kPa。记录控制过程的曲线 5.3。
  - (5) 将燃气气源压力改回原值，等待重新稳定。
  - (6) 为进料流量控制器 FIC-100 设定值 SP 加扰动，增加 5000kg/h。记录控制过程的曲线 5.4。

### 实验结果分析：

#### 1、绘制曲线：

- (1) 燃气流量设定和进料流量分别阶跃变化时，出口温度的飞升特性曲线 5.1、5.2；
- (2) 前馈控制下燃气气源压力和进料流量分别阶跃变化时的控制过程的曲线 5.3、5.4；

#### 2、记录参数：认真记录对应上述各曲线的实验条件和控制器参数；

#### 3、数据整理：

- (1) 依据曲线 5.1、5.2 分别求取控制通道和干扰通道的动态特性的特征参数 ( $K$ 、 $T$ 、 $\tau$ )，计算前馈补偿器参数。

#### 4、实验结果分析：

- (1) 用曲线 5.4 与实验四中曲线 4.9 比较前馈控制系统对特定扰动的控制过程动态品质指标。
- (2) 用曲线 5.3 与实验四中曲线 4.8 比较前馈控制系统对非特定扰动的控制过程动态品质指标。

## 实验六 预测控制

### 实验目的：

- 1、熟悉基于流程模拟的虚拟装置实验系统；
- 2、熟悉加热炉的工艺流程，理解出口温度的影响因素；
- 3、掌握预测控制的基本原理与预测控制器的设计方法。

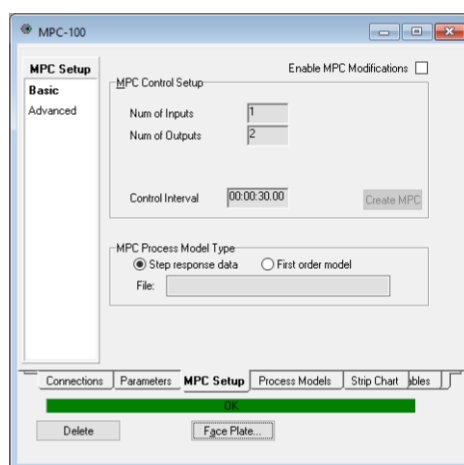
### 实验要求：

- 1、预习预测控制有关章节；安排好实验计划；作好前期准备；
- 2、掌握预测控制的结构，设计预测控制器的数学模型，实现预测控制，并进行控制器参数整定。

## 实验内容：

### 1、加热炉出口温度预测模型建立：

- (1) 打开仿真文件 (FurnaceDyMPC)，记录初稳态位置。
- (2) 查看并调整预测控制器 MPC-100 的结构，即 1 个输入（被控变量，为炉出口温度），1 个输出（操纵变量，为燃气流量控制器 FIC-101 的设定）。



注：每次需要调整预测控制器的配置时，都需要在 MPC Setup 页中，先勾选“Enable MPC Modifications”，改完后点击“Create MPC”按钮。

- (3) 将燃气流量 PID 控制器 FIC-101 投串级，预测控制器 MPC-100 的 Parameter 页 Operation 中的 ControllerMode 从 Off 改成手动 Manual。
- (4) 通过预测控制器对燃气流量施加阶跃扰动（调整预测控制器 Parameter 页 Operation 中 Outputs 表里对应燃气流量控制器 FIC-101 的输出，使其阶跃增加 5%）。
- (5) 求取燃气流量对出口温度的飞升特性；绘制曲线 6.1。
- (6) 从曲线 6.1 获得阶跃响应模型和传递函数模型。

注：阶跃响应模型要按照预测控制器周期（30s）来抽取曲线的数据来构成。

### 2、加热炉出口温度的预测控制（基于传递函数模型）：

- (1) 将预测控制器输出改回原值，等待重新建立初稳态。
- (2) 在预测控制器 MPC Setup 页上选择使用“First order model”，将步骤 1 中建立的传递函数模型参数分别输入模型参数 Process Models 页，并将其对应的阶跃响应模型复制导出（支持直接粘贴到 Excel 表）；
- (3) 将预测控制器 Parameter 页 Operation 中的 ControllerMode 从手动 Manual 改成自

动 Automatic。

- (4) 系统稳定后，将预测控制器 Parameter 页 Operation 中 SPs and PVs 表里炉出口温度设定值 SP 阶跃增 2~3 度，记录控制过程的曲线 6.2(包括被控变量和操纵变量)。

### 3、预测控制参数影响：

- (1) 在理解预测控制各参数含义基础上，按照下表对参数(MPC Setup 页 Advanced 中)进行调整：

曲线 编号	预测时域（步） Prediction Horizon	控制时域（步） Control Horizon	操纵变量权值 Gamma_U	被控变量权值 Gamma_Y	参考轨迹时间 常数（秒） Ref. Trajectory
6.3	25	2	0.1	1	1
6.4	25	2	0.02	1	1
6.5	25	2	1	0.3	1
6.6	25	2	0.1	1	180
6.7	25	2	0.1	1	300
6.8	10	2	0.02	1	1
6.9	25	5	0.02	1	1

- (2) 按步骤 2(4)进行设定值阶跃，记录控制过程的曲线。

## 实验结果分析：

### 1、绘制曲线：

- (1) 燃气流量设定值阶跃变化时，出口温度的飞升特性曲线 6.1；  
(2) 传递函数模型并使用默认参数下预测控制设定值阶跃的控制过程的曲线 6.2；  
(3) 其他研究内容的曲线。

### 2、记录参数：认真记录对应上述各曲线的实验条件和控制器参数；

### 3、数据整理：

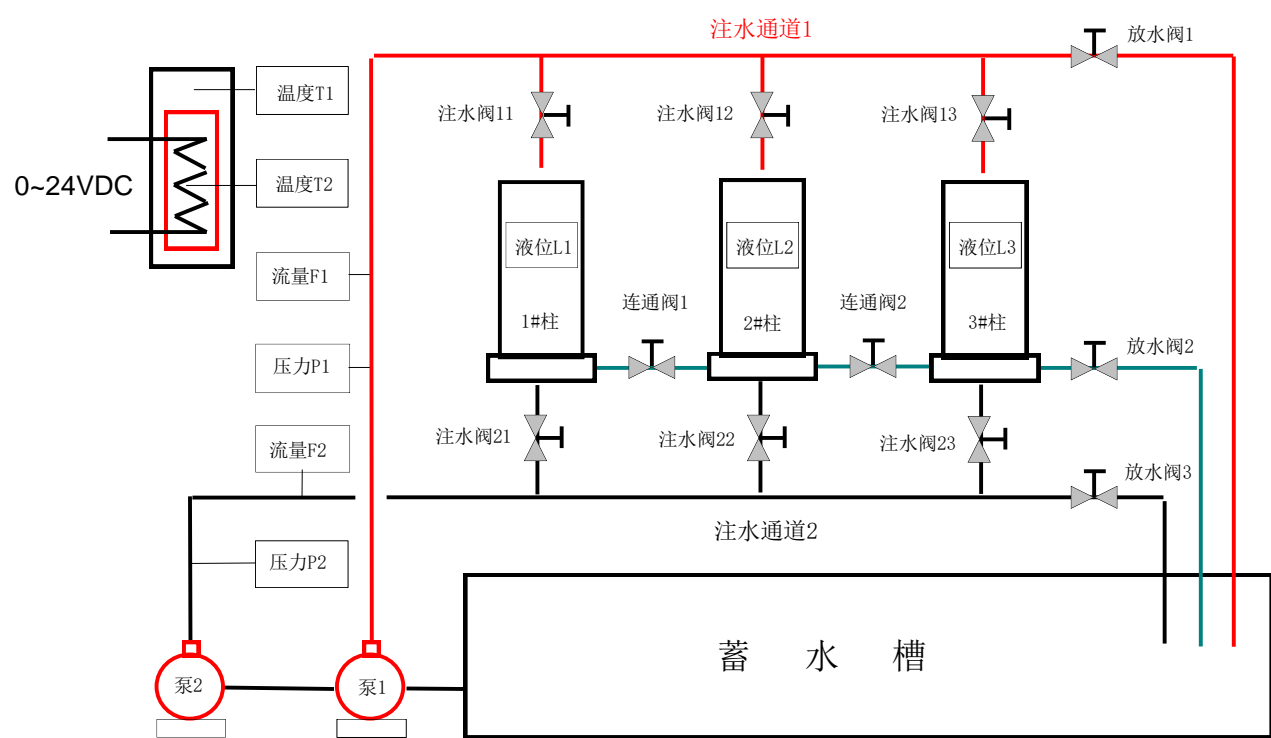
- (1) 依据曲线 6.1 求取控制通道的动态特性的特征参数 (K、T、 $\tau$ )；  
(2) 预测控制器输入传递函数模型后生成的阶跃响应模型数据，绘制曲线记做 6.1-1。

### 4、实验结果分析：

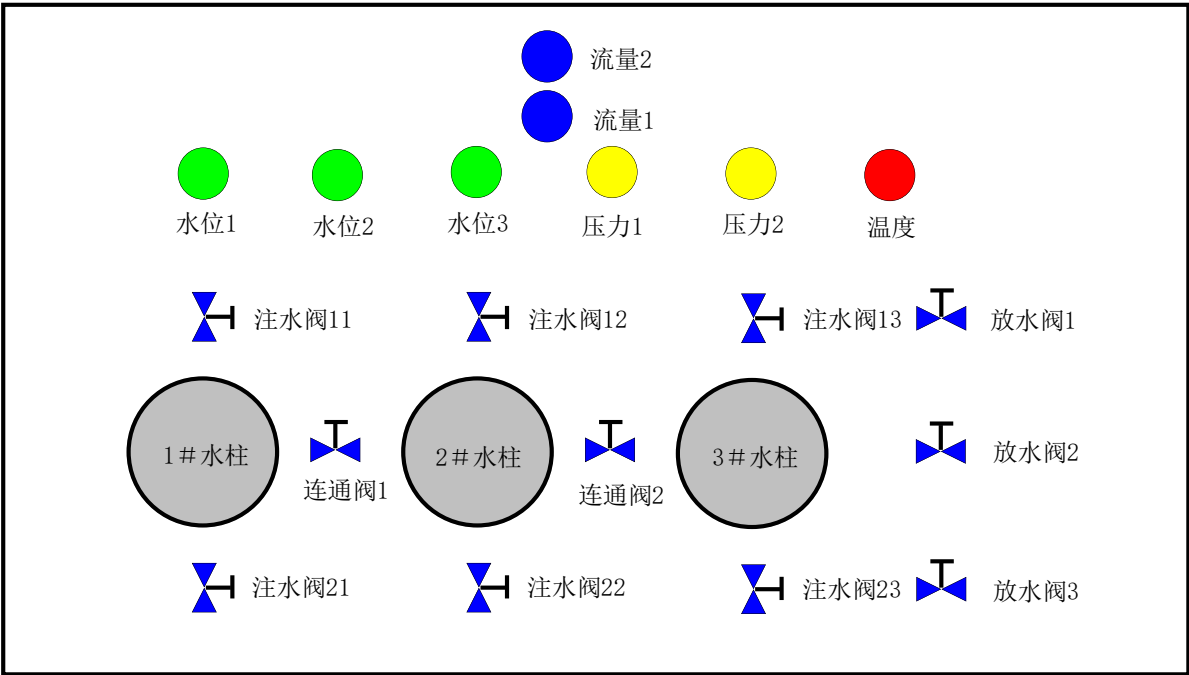
- (1) 用曲线 6.1-1 与曲线 6.1 比较传递函数模型与原始阶跃响应模型的差距。  
(2) 用曲线 6.2 和步骤 3 中获取的其他曲线与实验四中曲线 4.1、4.4 比较预测控制、单回路控制、串级控制的控制过程动态品质指标。  
(3) 比较曲线 6.2~6.9 并分析参数对控制性能的影响。

# 附录一：三容水箱过程控制实验台

## 一、实验设备示意图



## 二、台面布置



## 三、主体结构介绍

### 1、水柱 (内、外管与底座的集成)

- 内管用于溢流。防止因失控或失误引发跑水。

- 外管用于表达实验进程的工作水位。内、外管的截面积差 (约  $47\text{CM}^2$ ) 为容积系数。
- 底座用于内、外管的组装，以及组装后的水柱与台面连接。

## 2、功能阀

- 功能阀集成于台面内部管路。左旋为开、右旋为关。
- 与实验流程有关的阀有 3 种 11 个。其中：
  - 注水阀 6 个 (注水阀 11、注水阀 12、注水阀 13、注水阀 21、注水阀 22、注水阀 23)  
位于注水通道，决定该水柱是否与注水通道连通。用于改变实验流程 (与连通阀配合)。
  - 连通阀 2 个 (连通阀 1、连通阀 2)  
位于连接通道，决定相邻水柱是否连通。用于改变实验流程 (与注水阀配合使用)。
  - 放水阀 3 个 (放水阀 1、放水阀 2、放水阀 3)  
放水阀 1 和 3 与注水通道相连。用于手动调整该通道的压力和流量。  
放水阀 2 位于 3# 水柱的泄水通道，用于调整 3# 水柱的出口阻力。  
**注意：放水阀务须保持一定开度 (如：10% 左右)，以便形成循环。**

## 3、测控点

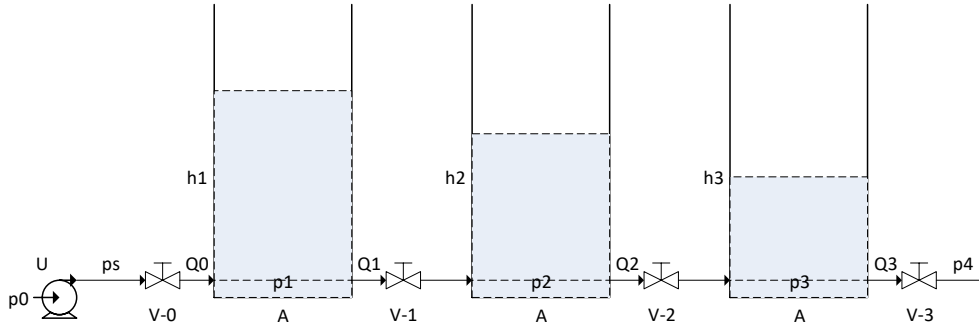
- 压力测点 2 个，用于测量泵出口的压力 ( $0\sim 35\text{Kpa}$ ； $4\sim 20\text{mA}$ )。
- 流量测点 2 个，用于测量注水流量 ( $0\sim 100\text{L/Min}$ )。
- 液位测点 3 个，用于测量各实验水柱的水位 ( $0\sim 300\text{mmH}_2\text{O}$ ； $4\sim 20\text{mA}$ )。

## 四、照片 (请与台面布置相互参照)



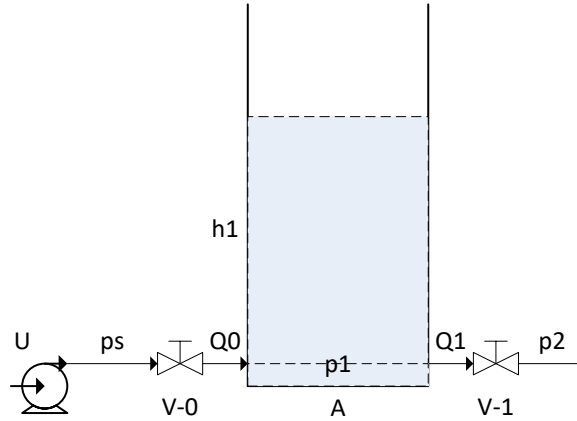
## 附录二：三容水箱过程仿真

### 一、三容水箱原理示意图



$h_1$  is height of the level (set the middle position of valve as zero position),  $A$  is the cross-sectional area of the liquid column,  $Q_0$  is the flowrate into the liquid column,  $Q_1$  is the flowrate out of the liquid column,  $U$  is the output voltage of the controller,  $p_s$  is the pressure after the pump,  $p_1$  is the pressure at zero position in the liquid column,  $p_2$  is the pressure after the valve 1.

### 二、单容水箱建模



Therefore, the liquid pressure formula ( $p_2$  is also equivalent to liquid pressure).

$$p_1 = \rho g h_1$$

$$p_2 = \rho g h_2$$

and Bernoulli equation (ignoring pipe resistance)

$$p_s = k_p U^2 - \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q_0}{a} \right)^2$$

$$p_s - p_1 = \zeta_0 \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q_0}{a} \right)^2$$

$$p_1 - p_2 = \zeta_1 \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q_1}{a} \right)^2$$

$\zeta$  is the valve resistance coefficient,  $a$  is the cross-sectional area of the pipeline.

Substitute to the dynamic equation for liquid column



$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{Q_0(t) - Q_1(t)}{A}$$

get

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{a\sqrt{\frac{2}{1+\zeta_0}}\sqrt{\frac{k_p U^2(t)}{\rho} - gh_1(t)} - a\sqrt{\frac{2}{\zeta_1}}\sqrt{gh_1(t) - gh_2(t)}}{A}$$

Linearize it and get

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} = & - \left( \frac{ag}{A\sqrt{2(1+\zeta_0)\left(\frac{k_p U^2}{\rho} - gh_1\right)}} + \frac{ag}{A\sqrt{2\zeta_1 g(h_1 - h_2)}} \right) h_1(t) \\ & + \frac{2a\frac{k_p U}{\rho}}{A\sqrt{2(1+\zeta_0)\left(\frac{k_p U^2}{\rho} - gh_1\right)}} U(t) + \frac{ag}{A\sqrt{2\zeta_1 g(h_1 - h_2)}} h_2(t) \end{aligned}$$

So the transfer function is

$$\begin{aligned} h_1(s) = & \frac{\frac{2a\frac{k_p U}{\rho}}{A\sqrt{2(1+\zeta_0)\left(\frac{k_p U^2}{\rho} - gh_1\right)}}}{s + \left( \frac{ag}{A\sqrt{2(1+\zeta_0)\left(\frac{k_p U^2}{\rho} - gh_1\right)}} + \frac{ag}{A\sqrt{2\zeta_1 g(h_1 - h_2)}} \right)} U(s) \\ & + \frac{\frac{ag}{A\sqrt{2\zeta_1 g(h_1 - h_2)}}}{s + \left( \frac{ag}{A\sqrt{2(1+\zeta_0)\left(\frac{k_p U^2}{\rho} - gh_1\right)}} + \frac{ag}{A\sqrt{2\zeta_1 g(h_1 - h_2)}} \right)} h_2(s) \end{aligned}$$

### 三、三容水箱建模

Cascade the three tanks, then get

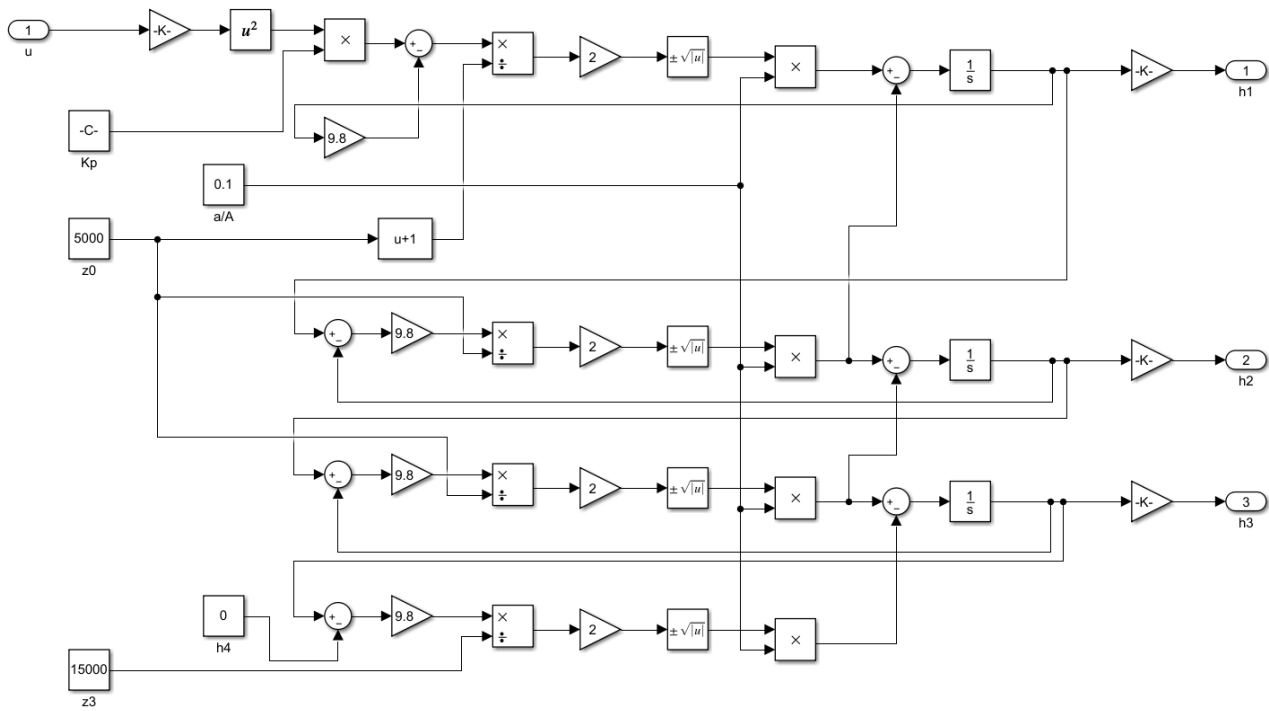
$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{a\sqrt{\frac{2}{1+\zeta_0}}\sqrt{\frac{k_p U^2(t)}{\rho} - gh_1(t)} - a\sqrt{\frac{2}{\zeta_1}}\sqrt{gh_1(t) - gh_2(t)}}{A}$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{a\sqrt{\frac{2}{\zeta_1}}\sqrt{gh_1(t) - gh_2(t)} - a\sqrt{\frac{2}{\zeta_2}}\sqrt{gh_2(t) - gh_3(t)}}{A}$$

$$\frac{dh_3(t)}{dt} = \frac{a\sqrt{\frac{2}{\zeta_2}}\sqrt{gh_2(t) - gh_3(t)} - a\sqrt{\frac{2}{\zeta_3}}\sqrt{gh_3(t) - gh_4}}{A}$$

$h_4$  is the equivalent liquid level height of the pressure drop after the 3 drain valve of the liquid column does not change with time.

#### 四、Matlab Simulink 实现



# 附录三：三容水箱仿真实验运行环境

## 一、Matlab 本地版的下载和安装、运行

三容水箱仿真实验基于 Matlab 软件开发，清华大学正版软件系统提供了 2015b 到现在各个版本的下载。

登录 [info.tsinghua.edu.cn](http://info.tsinghua.edu.cn)，点击左边栏“公共服务及其他”下“软件资源”项，打开“校园公共软件下载”页面，进入“计算软件”类。找到需要的 Matlab 版本，点击下载。

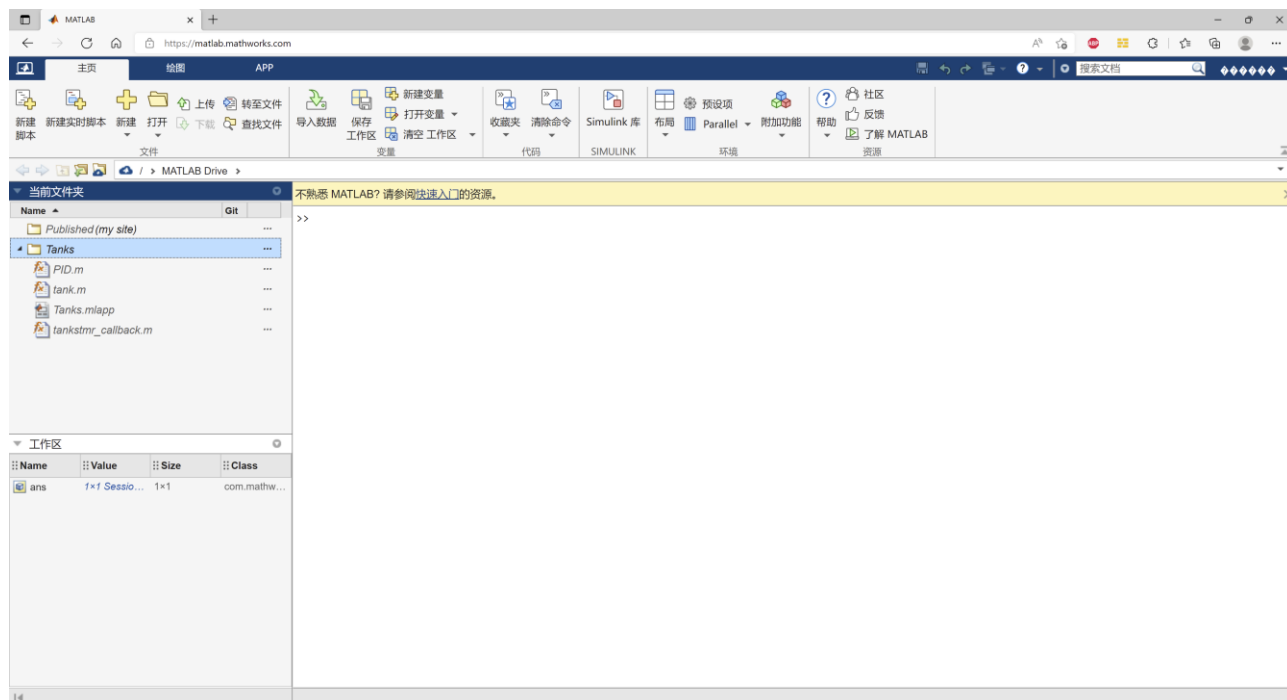
根据 Matlab 安装手册及相关文件，安装 Matlab。安装有两种授权方式：Matlab 账号（使用清华邮箱注册）和授权码

注意：如果用网络授权码方式，需要在校园网内运行；如果在校外，需要另外安装校园网的 SSL-VPN，登录到校园网内。

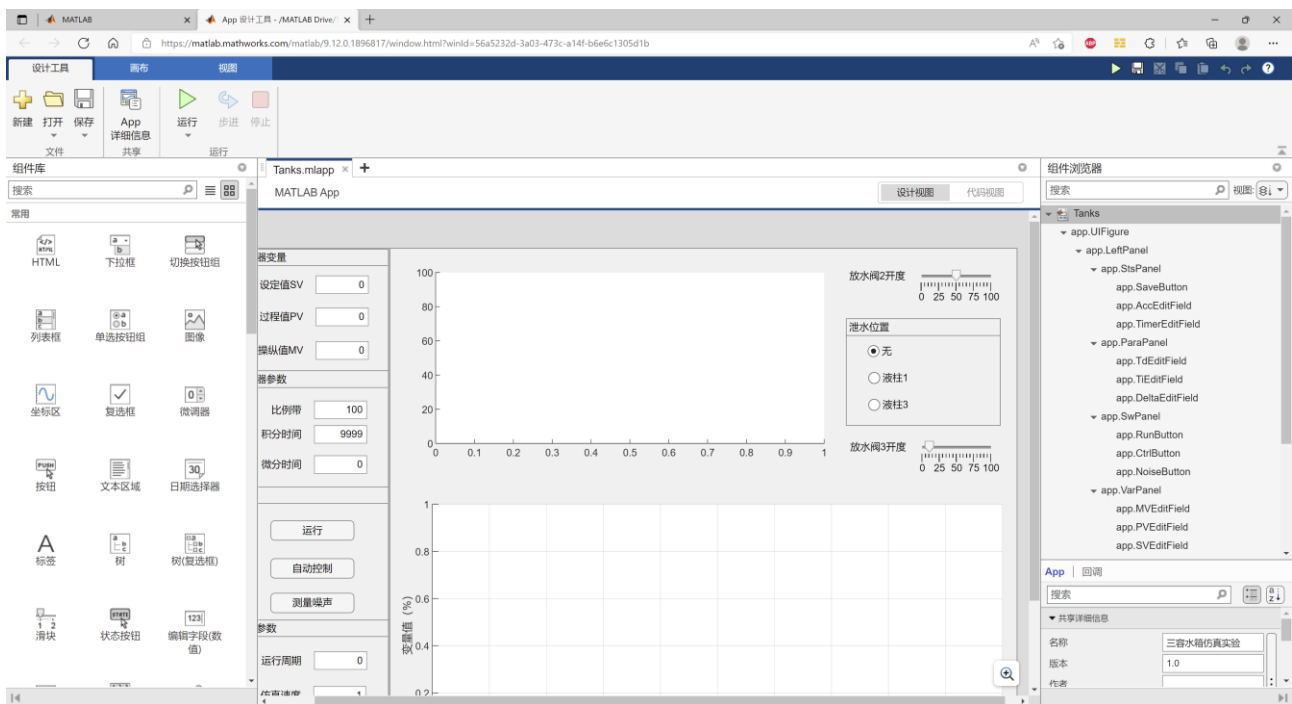
## 二、仿真实验软件

此软件基于 Matlab 开发，需要 Matlab 运行环境（本地版或者线上版 Matlab Online）。

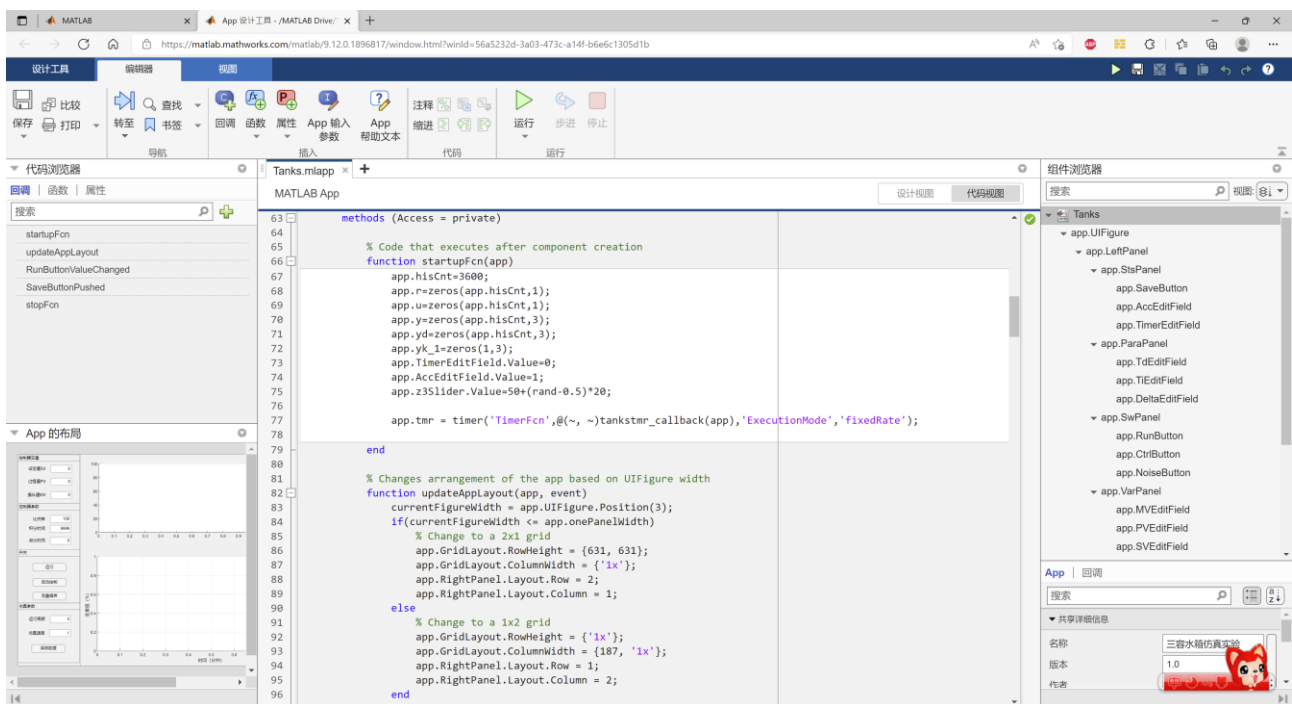
以下示例截图为 Matlab Online 环境，本地运行环境类似。



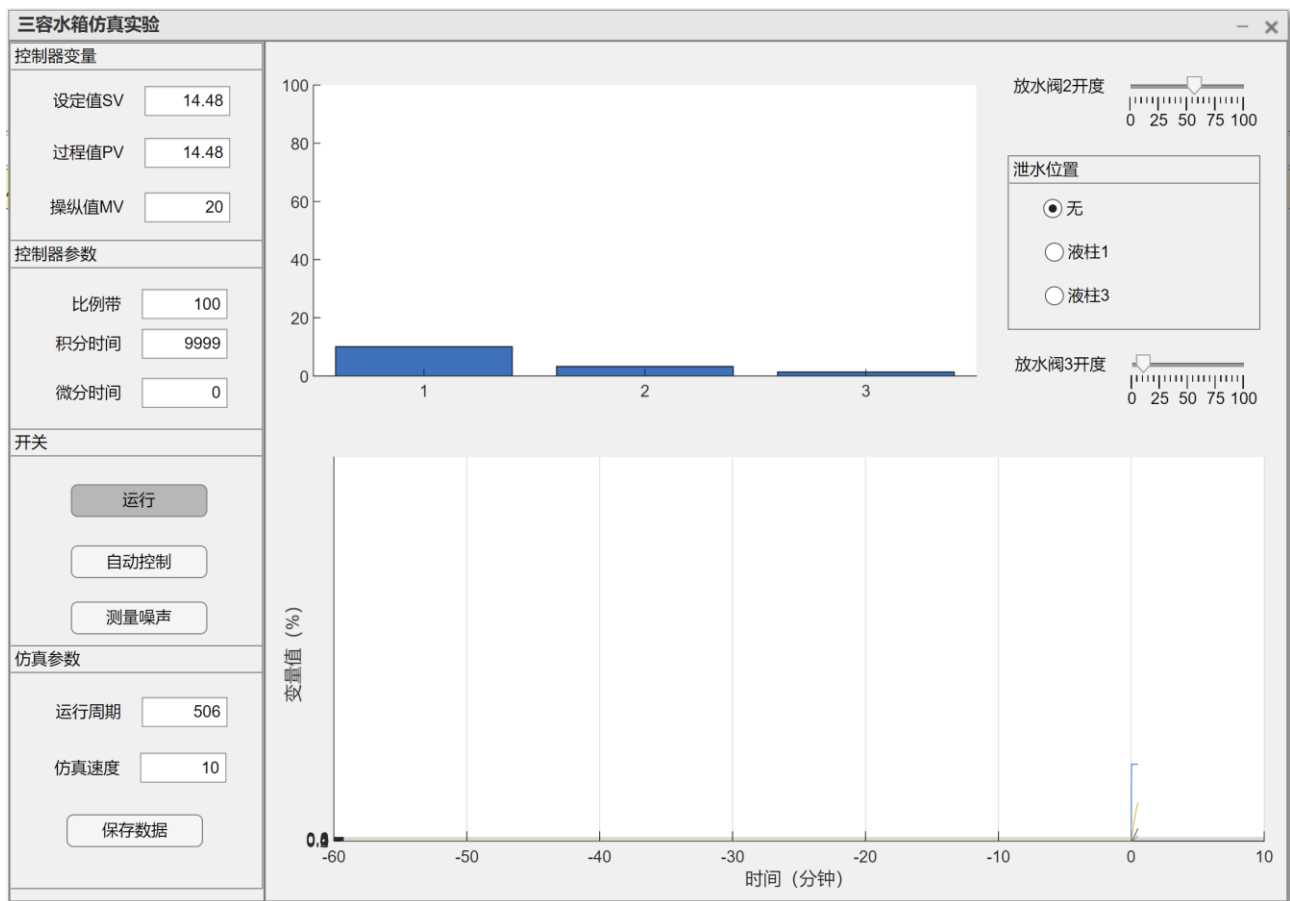
双击 Tanks.mlapp，打开 App 设计工具环境  
其中设计视图如下



代码视图如下



点击运行按钮后，进入仿真运行状态



软件界面如图所示，分为左侧参数设置区和右侧仿真对象区。其中仿真对象区显示了液柱高度和历史曲线，以及通过滑动条调整放水阀 2 和放水阀 3 的开度，并选择泄水扰动的位置。

仿真程序启动后，点击“运行”按钮，开始仿真。之后按实验步骤开展实验，运行周期显示当前已运行时间（秒）。再次点击“运行”按钮会暂停仿真。

点击“保存数据”按钮可保存当前显示区域的历史数据，**注意超出显示范围的历史数据无法找回。**

仿真速度最多可以加速到 30 倍，**注意速度太快后界面响应会不及时，例如修改操纵值 MV 后仍然运行好多步后才开始执行。**

# 附录四：过程控制教学实验系统

## 一. 实验系统软件

过程控制教学实验系统是针对三容水箱过程控制实验台，基于紫金桥工业组态软件开发的实验教学应用程序。

实验者可以按照系统菜单提示，方便地进入所需要的实验界面。

进入的实验界面中均包括工艺流程图、调节器面板和记录曲线。与实际操作现场环境相似，实验所需要的基本操作都可以通过调节器面板和相应的菜单完成。

实验操作大致分三类：

(1) 通过调节器面板直接修改调节器的输出，手动控制实验系统的运行状态。

(2) 修改调节器相关参数。

- PID 参数 ( $\delta=0\sim 200\%$ 、 $T_i=0\sim 99$  分钟、 $T_d=0\sim 99$  分钟)；
- 给定值 ( $0\sim 100\%$ )；
- 手/自动状态 (MANL 或 AUTO)。

(3) 调用系统运行相关参数记录曲线。

- 实时数据曲线；
- 历史趋势曲线；

## 二. 实验系统结构及操作指南

打开计算机，进入“过程控制实验系统”欢迎界面，如图6-1所示。在欢迎界面中点击“进入”按钮即可进入实验内容选择界面。



图 6-1 系统主界面

实验内容选择界面如图6-2所示，在此界面中，可选择想要进行的实验，也可以返回到首页，或者退出系统。所有的实验按实验类型分为七类。选择实验内容后，系统跳转至实验操作主界面。

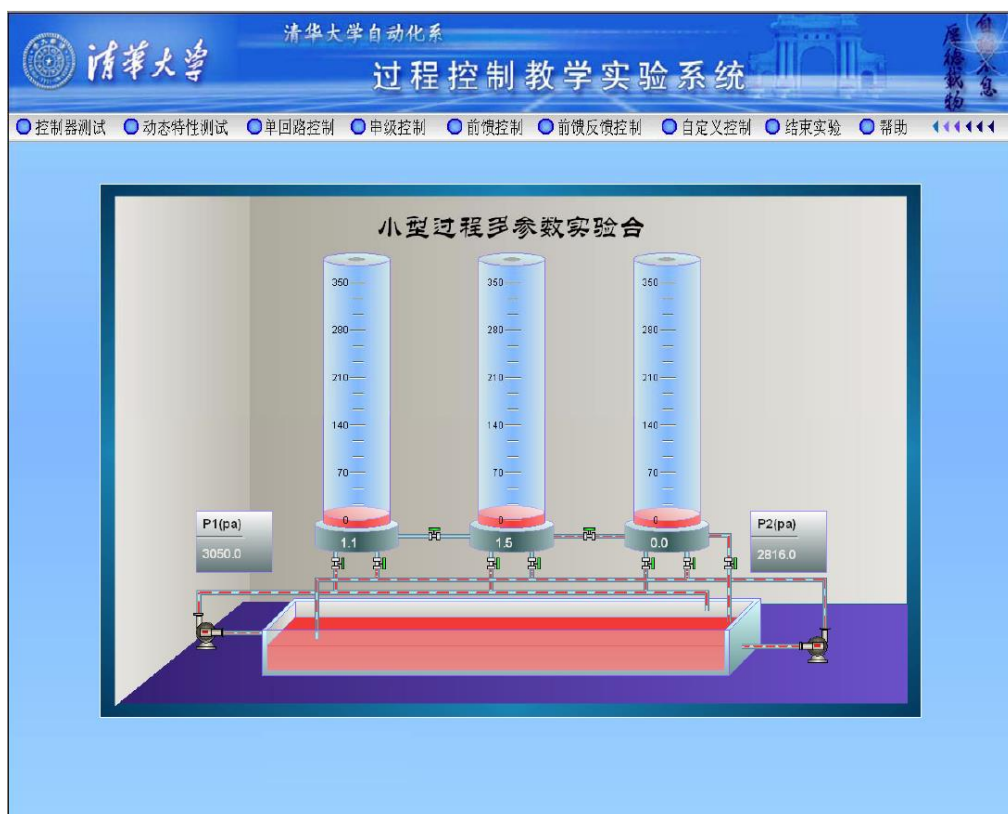


图 6-2 实验平台选择界面

实验操作主界面包括：实验台动态显示区、实验数据显示区、控制器参数设置区和功能按钮区四个区域，如图6-3所示。

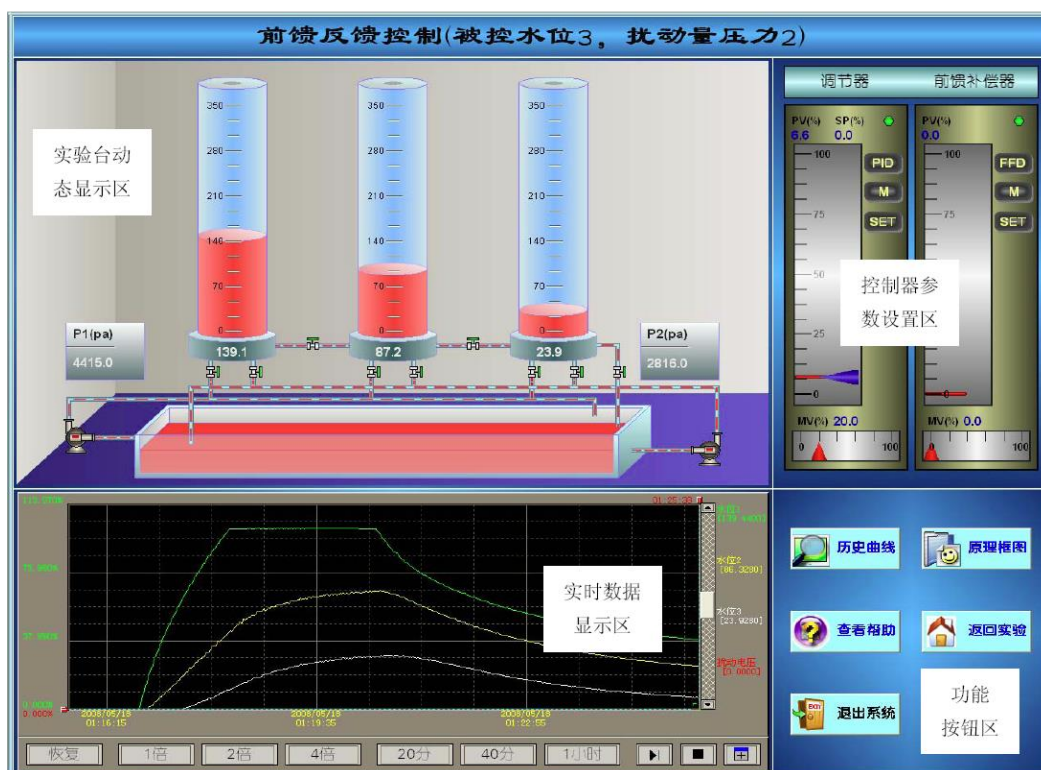


图 6-3 实验平台主界面

实验台动态显示区中动态的显示三个液位当前值以及两个泵出口压力值，此区域中还包含各个阀门的开关状态信息，实验时保证实验台上阀门开关状态与图中的一致即可，如图6-4所示。



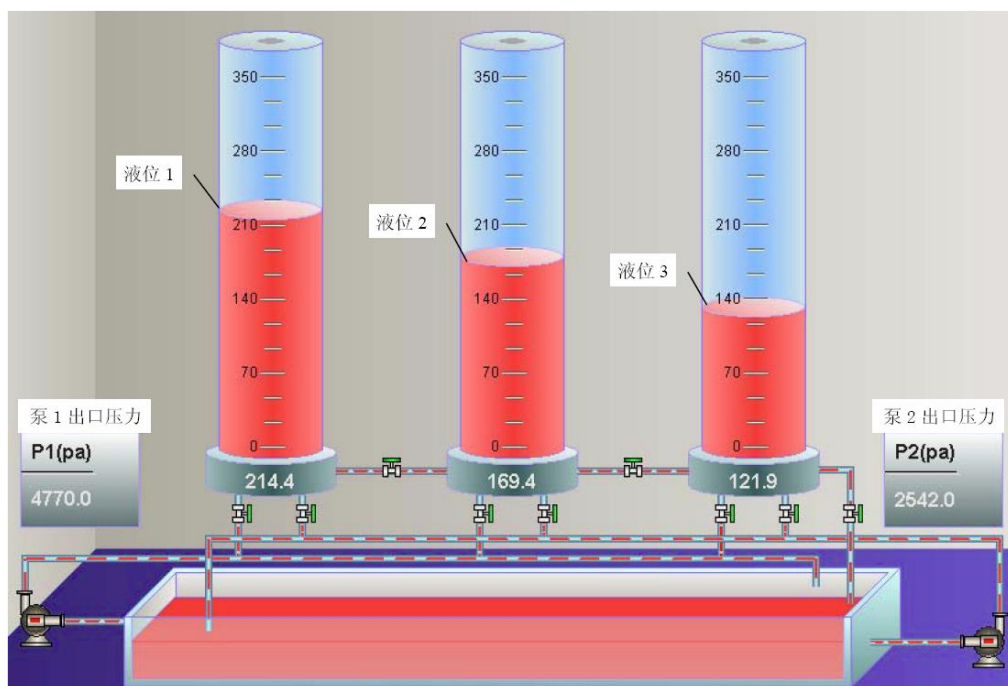


图6-4 实验台参数动态显示

实验数据显示区中实时显示与实验相关的数据。通过点击相应的按钮，可以控制实时曲线更新的停止和开始，可以增加实验曲线、设定曲线的放大倍数、设定曲线的时间跨度、恢复曲线的放大倍数为1及时间跨度为10分钟，如图6-5所示。

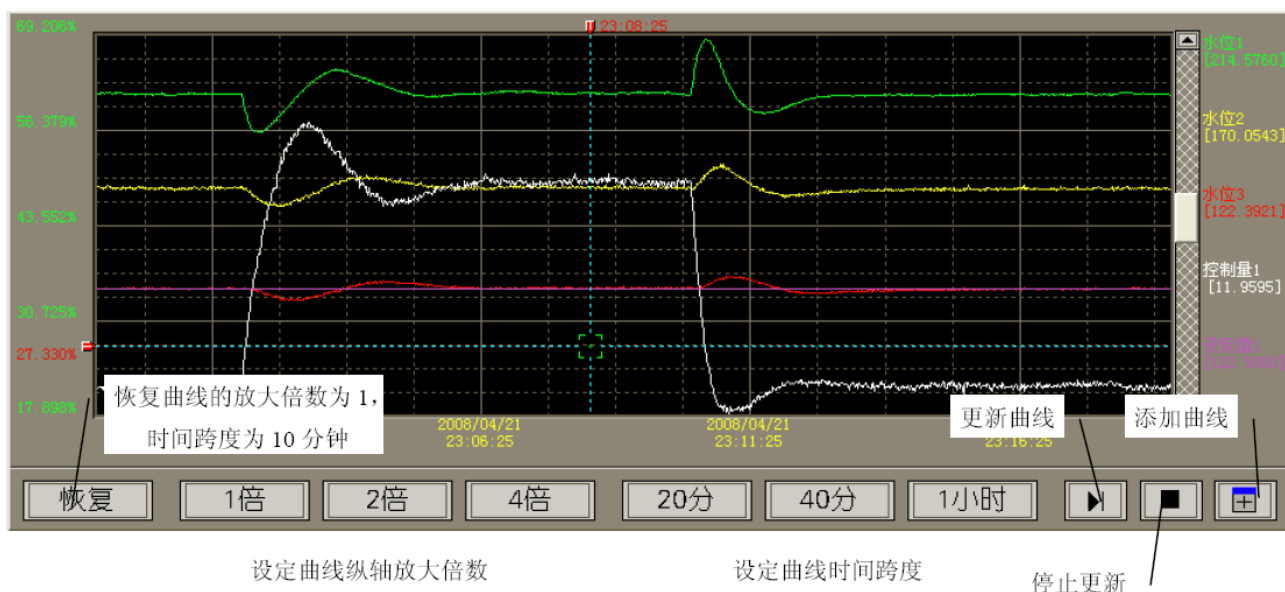


图6-5 实时数据显示区

控制器参数设置区如图6-6所示。在此区域中，针对PID控制器，可以设置手自动状态、手动输出量、设定值、串级和单回路切换，其中手动输出量和设定值可以通过拖拽控件和数字输入两种方式改变。点击“SET”按钮可设置PID的参数，如图6-7所示。



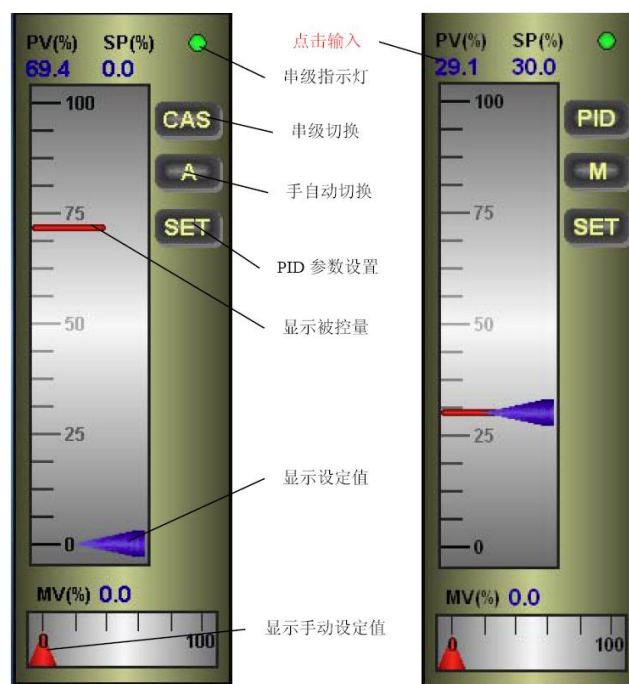


图6-6 PID操作面板

Figure 6-7 is a dialog box titled 'PID参数设置的面板' (PID Parameter Setting Panel). It prompts the user to '请输入PID的三个参数:' (Please enter the three PID parameters:). The parameters are:
 

- 比例带(1~1000)  $\delta$  = 50.00 (Keyboard input for Proportional Band)
- 积分时间(5~2000s)  $T_i$  = 100.00 (Keyboard input for Integral Time)
- 微分时间(0~200s)  $T_d$  = 3.00 (Keyboard input for Derivative Time)

 At the bottom are buttons for '确定' (OK) and '取消' (Cancel). Labels on the right side point to the input fields: '键盘输入比例带' (Keyboard input for Proportional Band), '键盘输入积分时间' (Keyboard input for Integral Time), and '键盘输入微分时间' (Keyboard input for Derivative Time).

图6-7 PID参数设置界面

针对FFD 补偿器，可以设置手自动状态、手动输出量，其中手动补偿量也是可通过拖拽控件和数字输入两种方式改变。点击“SET”按钮可设置FFD 的参数，如图6-8所示。

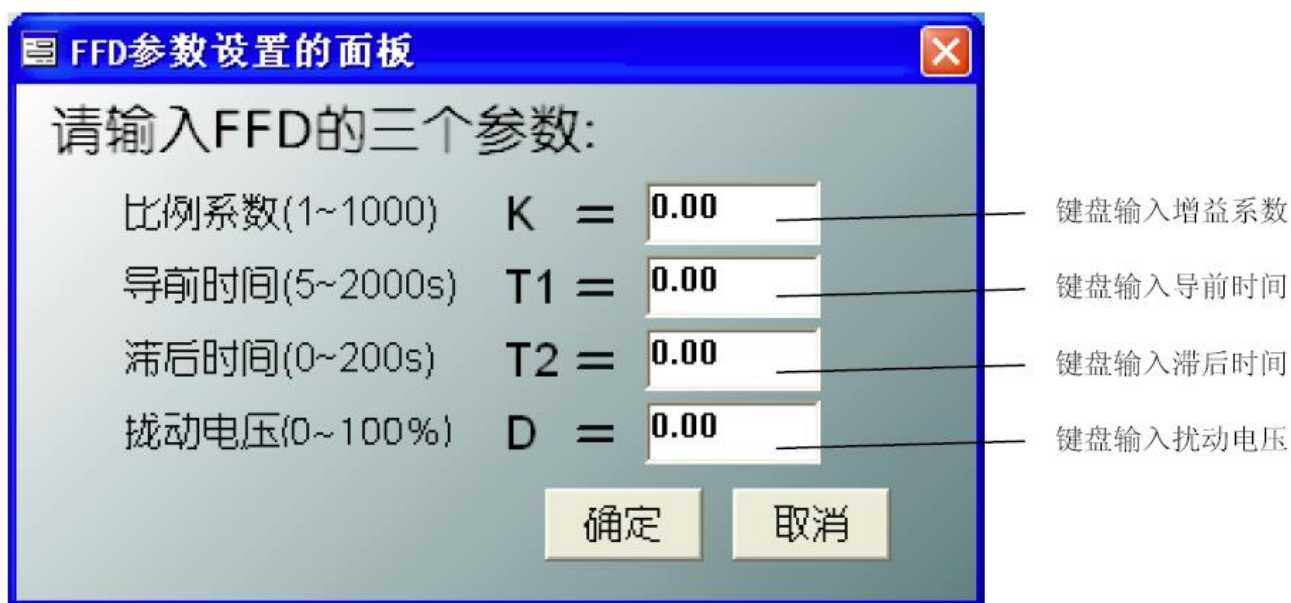


图 6-8 FFD 参数设置界面

功能按钮区如图6-9所示，包括“历史曲线”、“原理框图”、“查看帮助”、“返回实验”和“退出系统”五个按钮，其中“返回实验”将结束本次实验返回到实验内容选择界面，“退出系统”则会退出整个实验教学系统。



图6-9 功能按钮区

### 三. 参数标识说明

标识符	意 义	量程与量纲	说 明
H1	液位 1 的测量值	0~200 毫米	第一水柱液位
H2	液位 2 的测量值	0~200 毫米	第二水柱液位
H3	液位 3 的测量值	0~200 毫米	第三水柱液位
T1	温度 1 的测量值	0~200 ℃	温度对象腔室温度
T2	温度 2 的测量值	0~200 ℃	加热体温度
Q	给水流量的测量值	0~20 升/分钟	给水总流量

P	给水压力的测量值	0~70KPa	泵出口压力
U <sub>P</sub>	水泵电机的控制电压	0~24 伏	对应泵转速
U <sub>T</sub>	电热元件的加热电压	0~24 伏	对应加热体电压
SP	调节器的给定值	0~100%	调节器的给定值
PV	调节器的测量值	0~100%	调节器的测量值
OP	调节器的输出值	0~100%	调节器的输出值

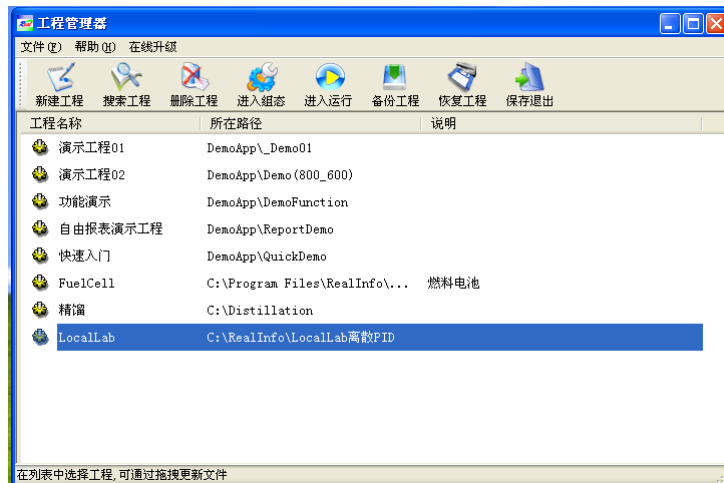
## 附录五：紫金桥组态软件的使用

### 一、软件使用

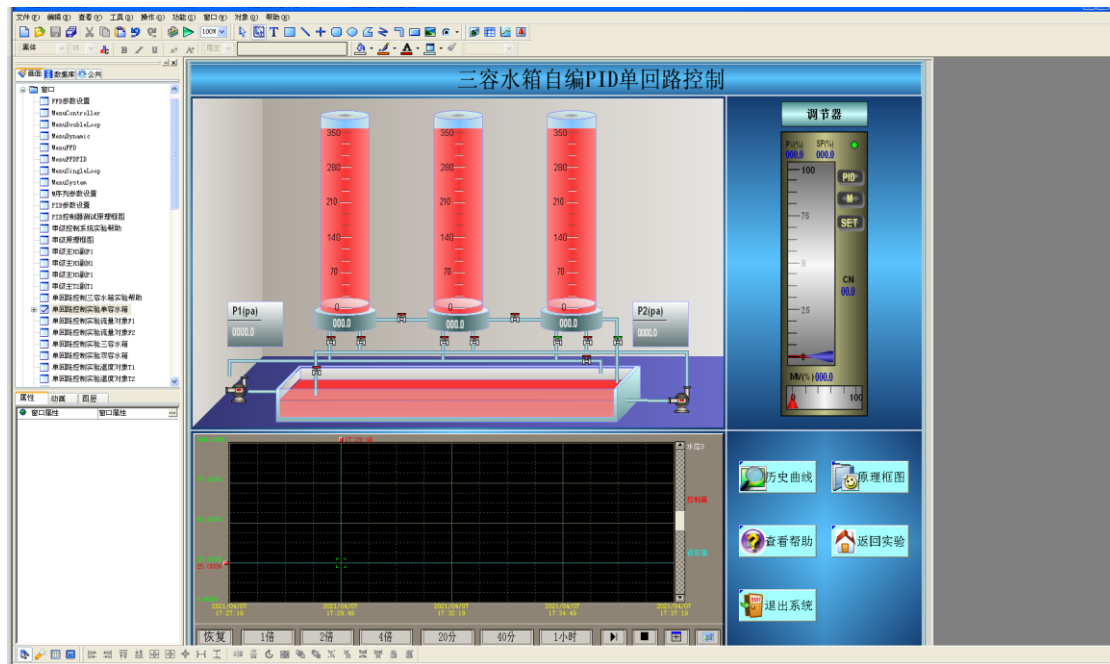
1、安装紫金桥组态软件，并在 IO Servers 目录下添加实验室开发的 Modbus 接口驱动

2、离线运行开发环境，熟悉软件操作：

运行软件“紫金桥监控组态软件 6.5”，点击搜索工程，找到已有的工程文件，显示在列表中：

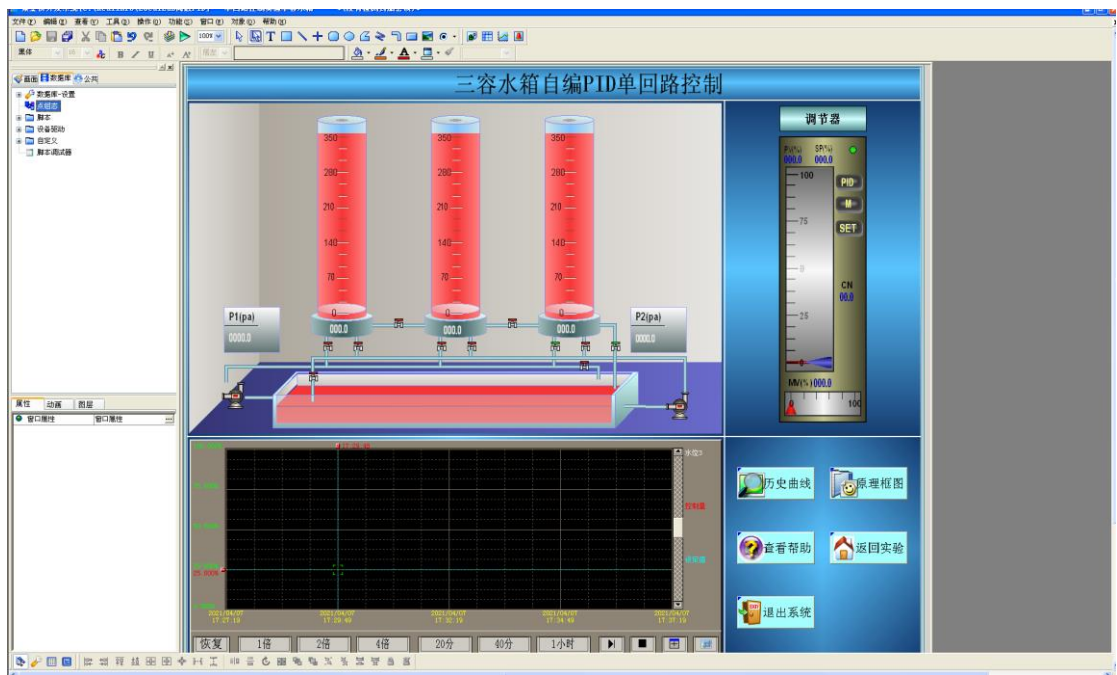


双击后打开此工程，开始对其编辑。默认进入画面分页：



1) 数据库及点组态

切换到数据库分页，



双击点组态，查看和编辑已建模拟 I/O 点及其配置，基本参数项

工程(E) 表格(T) 编辑(E) 帮助(H)

数据库 区域0 模拟I/O点 控制点 用户程序 数据连接 Tank 内部连接 历史组态

点号	点名 [NAME]	类型 [KIND]	说明 [DESC]	外部连接 [Link]	历史组态 [Hist]
1	A1	模拟I/O点	附加点1	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	
2	A2	模拟I/O点	附加点2	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	
3	A3	模拟I/O点	附加点3	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	
4	A4	模拟I/O点	附加点4	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 10H	
5	A5	模拟I/O点	附加点5	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 11H	
6	A6	模拟I/O点	附加点6	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 12H	
7	A7	模拟I/O点	附加点7	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 13H	
8	A8	模拟I/O点	附加点8	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 14H	
9	Control1	模拟I/O点	电压控制量1	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	PV=定时保存: 1
10	Control2	模拟I/O点	电压控制量2	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	PV=定时保存: 1
11	Control3	模拟I/O点	电压控制量3	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	PV=定时保存: 1
12	FFB_AM	模拟I/O点	前馈控制器的手自动		
13	FFB_DV	模拟I/O点	前馈控制器的扰动量		
14	FFB_DV_1	模拟I/O点	前馈控制器的前一时刻扰动量		
15	FFB_K	模拟I/O点	前馈控制器的增益系数K		
16	FFB_OP	模拟I/O点	前馈控制器的外反馈输出		
17	FFB_OF_1	模拟I/O点	前馈控制器的前一时刻的输出值		
18	FFB_T1	模拟I/O点	前馈控制器的导前时间		
19	FFB_T2	模拟I/O点	前馈控制器的滞后时间		
20	Flux1	模拟I/O点	流量1	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	
21	Flux2	模拟I/O点	流量2	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 0H	
22	Pressure1	模拟I/O点	压力1	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 4H	
23	Pressure2	模拟I/O点	压力2	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 5H	PV=定时保存: 1
24	Temperature1	模拟I/O点	温度1	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 6H	
25	Temperature2	模拟I/O点	温度2	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 7H	
26	testPIDAM	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的手自动		
27	testPIDOp	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的系统		
28	testPIDOUT	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的输出		
29	testPIDSP	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的设定值		
30	testPIDTd	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的微分时间		
31	testPIDTi	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的积分时间		
32	water1	模拟I/O点	水位1	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 1H	PV=定时保存: 1
33	water2	模拟I/O点	水位2	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 2H	PV=定时保存: 1
34	water3	模拟I/O点	水位3	PV=Tank: 液位保持寄存器 地址: 3H	PV=定时保存: 1
35					

基本参数 报警参数 数据连接 历史组态

点名 (NAME) water3 单元 (UNIT) 0 安全区 无 小数位 3

点说明 水位3

☐ 是否统计 (STATIS) ☐ 开平方 (SQRTFL)

测量初值 0 工程单位

☐ 分段线性化 (LINEFL) ☐ 分段线性化表

☐ 变化率限制 (BOCFL) 变化率限值 100 灵敏度 0

☒ 量程变换 (SCALEFL) ☐ 超限限值开关 (OVERCUT) 按比例定义

量程下限 0 模拟量下限 0

量程上限 350 模拟量上限 15000

数据连接项

PLC/RTU Configuration 1001

工程(E) 表格(T) 编辑(E) 帮助(H)

数据库 区域0 模拟I/O点 控制点 用户程序 Tank 数据连接 内部连接 历史组态

	点名 [NAME]	类型 [XIND]	说明 [DESC]	外部连接 [Link]	历史组态 [His]
1	A1	模拟I/O点	附加点1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:DH	
2	A2	模拟I/O点	附加点2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:EH	
3	A3	模拟I/O点	附加点3	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:FH	
4	A4	模拟I/O点	附加点4	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:10H	
5	A5	模拟I/O点	附加点5	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:11H	
6	A6	模拟I/O点	附加点6	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:12H	
7	A7	模拟I/O点	附加点7	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:13H	
8	A8	模拟I/O点	附加点8	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:14H	
9	Control1	模拟I/O点	电压控制量1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:AH	PV=定时保存:1
10	Control2	模拟I/O点	电压控制量2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:BH	PV=定时保存:1
11	Control3	模拟I/O点	电压控制量3	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:CH	PV=定时保存:1
12	FFD_AM	模拟I/O点	前馈控制器的手自动		
13	FFD_DV	模拟I/O点	前馈控制器的扰动量		
14	FFD_DV_1	模拟I/O点	前馈控制器的前一时刻扰动量		
15	FFD_K	模拟I/O点	前馈控制器的增益系数K		
16	FFD_OF	模拟I/O点	前馈控制器的补偿输出		
17	FFD_OF_1	模拟I/O点	前馈控制器的前一时刻的输出值		
18	FFD_T1	模拟I/O点	前馈控制器的导前时间		
19	FFD_T2	模拟I/O点	前馈控制器的滞后时间		
20	Flux1	模拟I/O点	流量1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:6H	
21	Flux2	模拟I/O点	流量2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:9H	
22	Pressure1	模拟I/O点	压力1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:4H	
23	Pressure2	模拟I/O点	压力2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:5H	PV=定时保存:1
24	Temperature1	模拟I/O点	温度1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:6H	
25	Temperature2	模拟I/O点	温度2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:7H	
26	testPIDAM	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的手自动		
27	testPIDKp	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的系统		
28	testPIDOUT	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的输出		
29	testPIDSP	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的设定值		
30	testPIDT4	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的微分时间		
31	testPIDTi	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的积分时间		
32	water1	模拟I/O点	水位1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:1H	PV=定时保存:1
33	water2	模拟I/O点	水位2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:2H	PV=定时保存:1
34	water3	模拟I/O点	水位3	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:3H	PV=定时保存:1
35					

基本参数 报警参数 数据连接 历史组态

参数 连接设备 连接项

☒ PV Tank HD保持寄存器 地址:3H

更多参数... 删除数据连接

☒ I/O连接 ☐ 远程数据库 ☐ 内部连接

设备 Tank 定义I/O设备

连接项 HD保持寄存器 地址:3H

故障时 保持原值

## 历史组态项

PLC/RTU Configuration 1001

工程(E) 表格(T) 编辑(E) 帮助(H)

数据库 区域0 模拟I/O点 控制点 用户程序 Tank 数据连接 内部连接 历史组态

	点名 [NAME]	类型 [XIND]	说明 [DESC]	外部连接 [Link]	历史组态 [His]
1	A1	模拟I/O点	附加点1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:DH	
2	A2	模拟I/O点	附加点2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:EH	
3	A3	模拟I/O点	附加点3	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:FH	
4	A4	模拟I/O点	附加点4	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:10H	
5	A5	模拟I/O点	附加点5	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:11H	
6	A6	模拟I/O点	附加点6	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:12H	
7	A7	模拟I/O点	附加点7	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:13H	
8	A8	模拟I/O点	附加点8	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:14H	
9	Control1	模拟I/O点	电压控制量1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:AH	PV=定时保存:1
10	Control2	模拟I/O点	电压控制量2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:BH	PV=定时保存:1
11	Control3	模拟I/O点	电压控制量3	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:CH	PV=定时保存:1
12	FFD_AM	模拟I/O点	前馈控制器的手自动		
13	FFD_DV	模拟I/O点	前馈控制器的扰动量		
14	FFD_DV_1	模拟I/O点	前馈控制器的前一时刻扰动量		
15	FFD_K	模拟I/O点	前馈控制器的增益系数K		
16	FFD_OF	模拟I/O点	前馈控制器的补偿输出		
17	FFD_OF_1	模拟I/O点	前馈控制器的前一时刻的输出值		
18	FFD_T1	模拟I/O点	前馈控制器的导前时间		
19	FFD_T2	模拟I/O点	前馈控制器的滞后时间		
20	Flux1	模拟I/O点	流量1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:6H	
21	Flux2	模拟I/O点	流量2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:9H	
22	Pressure1	模拟I/O点	压力1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:4H	
23	Pressure2	模拟I/O点	压力2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:5H	PV=定时保存:1
24	Temperature1	模拟I/O点	温度1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:6H	
25	Temperature2	模拟I/O点	温度2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:7H	
26	testPIDAM	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的手自动		
27	testPIDKp	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的系统		
28	testPIDOUT	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的输出		
29	testPIDSP	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的设定值		
30	testPIDT4	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的微分时间		
31	testPIDTi	模拟I/O点	PID控制器测试时PID的积分时间		
32	water1	模拟I/O点	水位1	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:1H	PV=定时保存:1
33	water2	模拟I/O点	水位2	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:2H	PV=定时保存:1
34	water3	模拟I/O点	水位3	PV=Tank:HD保持寄存器 地址:3H	PV=定时保存:1
35					

基本参数 报警参数 数据连接 历史组态

参数 退出保存 保存方式 参数

☒ PV 否 定时保存 1

☒ PVRAWLO 是

☒ PVRAWHI 是

更多参数... 删除历史组态

☒ 保存历史

☐ 数据变化保存

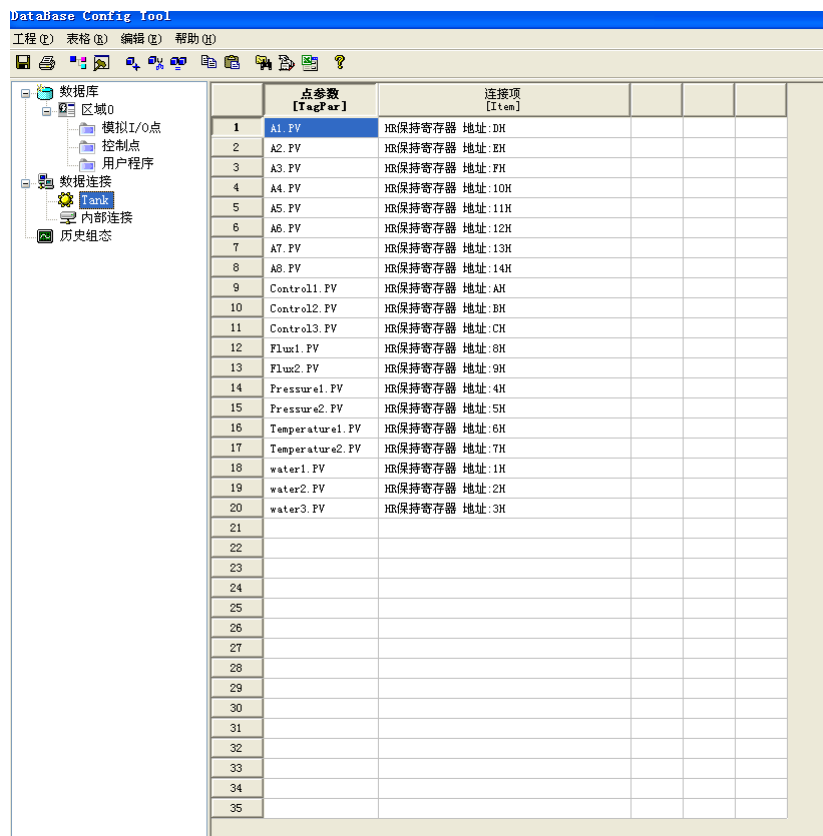
精度: 1 %

☒ 数据定时保存

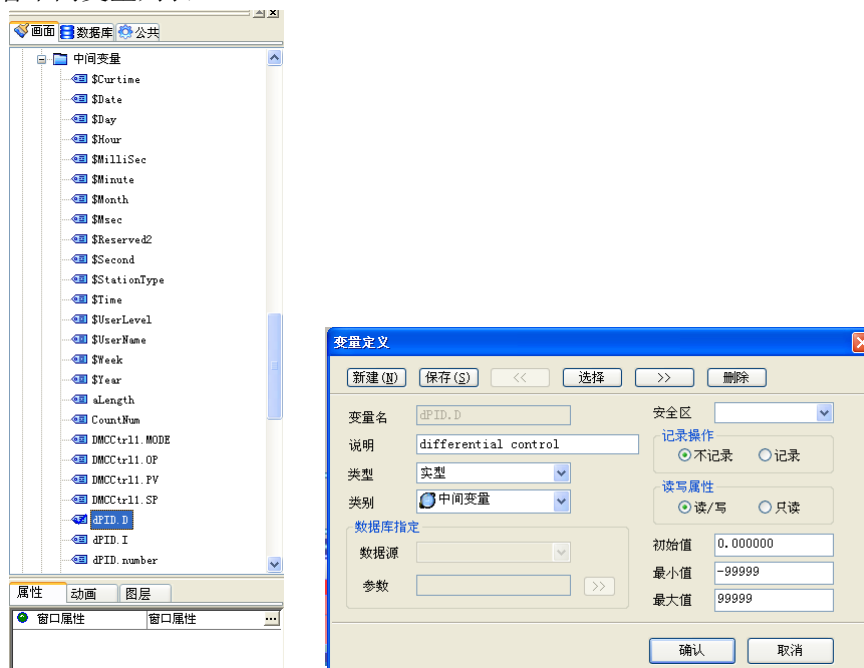
每隔: 1 秒

☐ 退出时保存实时值作为下次启动初值

## 查看数据连接（寄存器）汇总

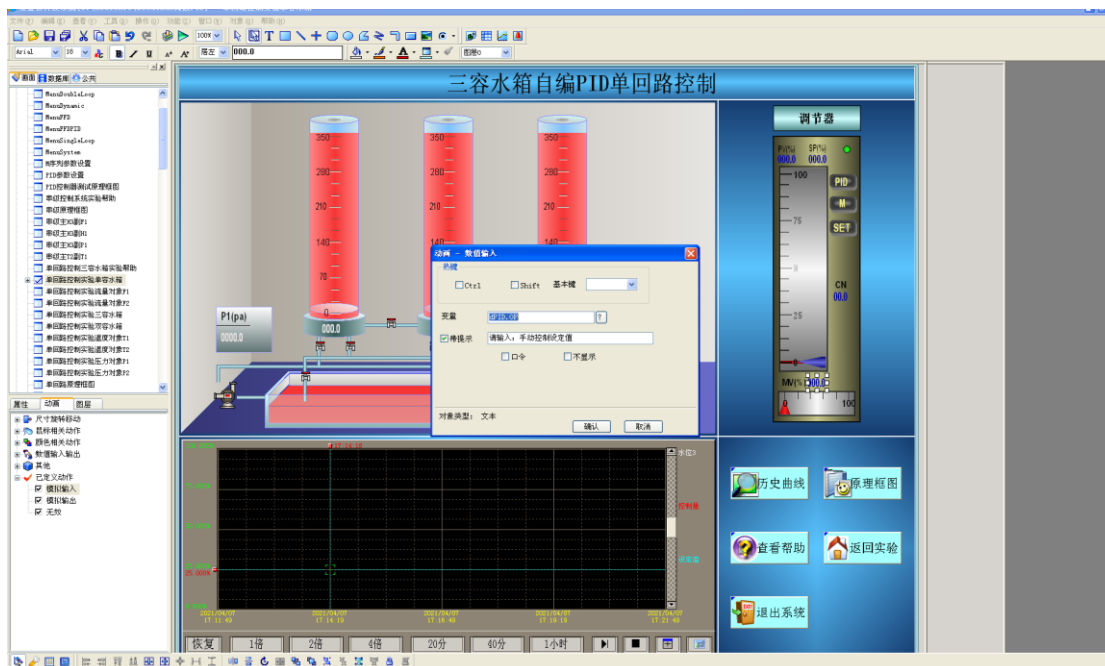


2) 中间变量的添加与查看  
在画面分页，查看中间变量列表：

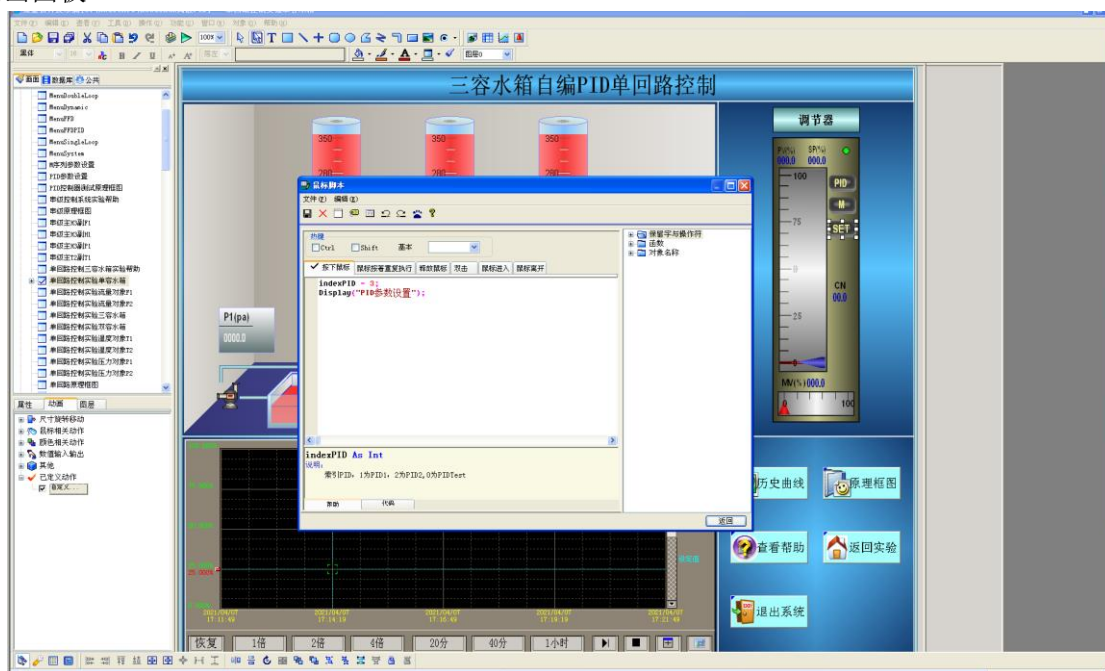


3) 界面绘制，组件与变量的互动  
打开某个画面，画面中每个组件可以配置显示属性和互动的内容，例如数值显示与输入





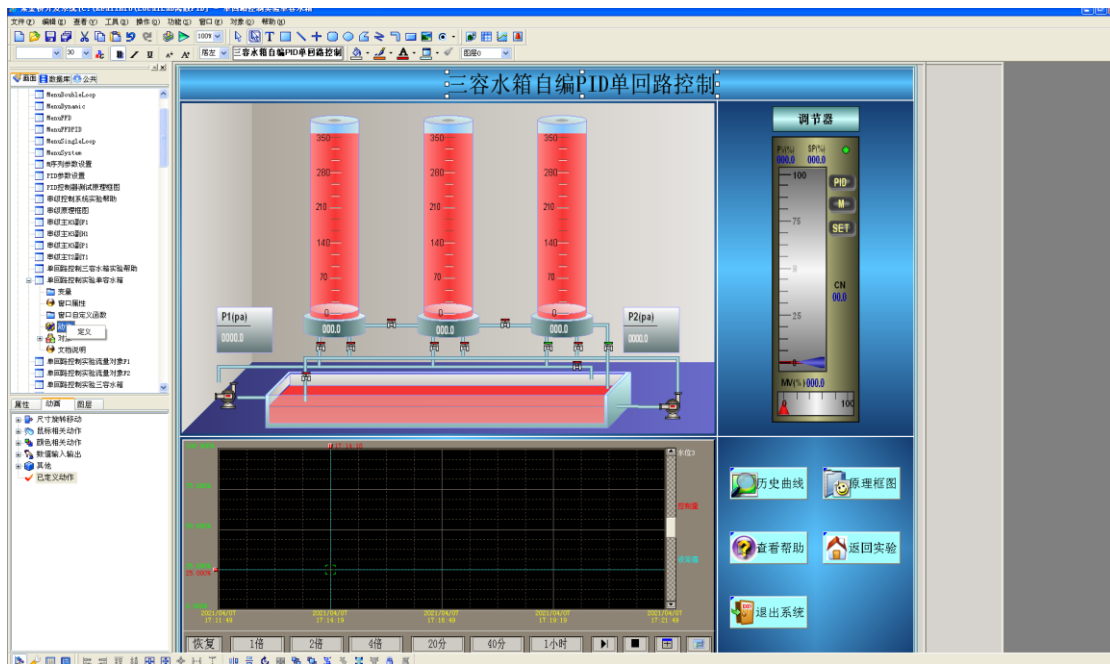
点击调出面板



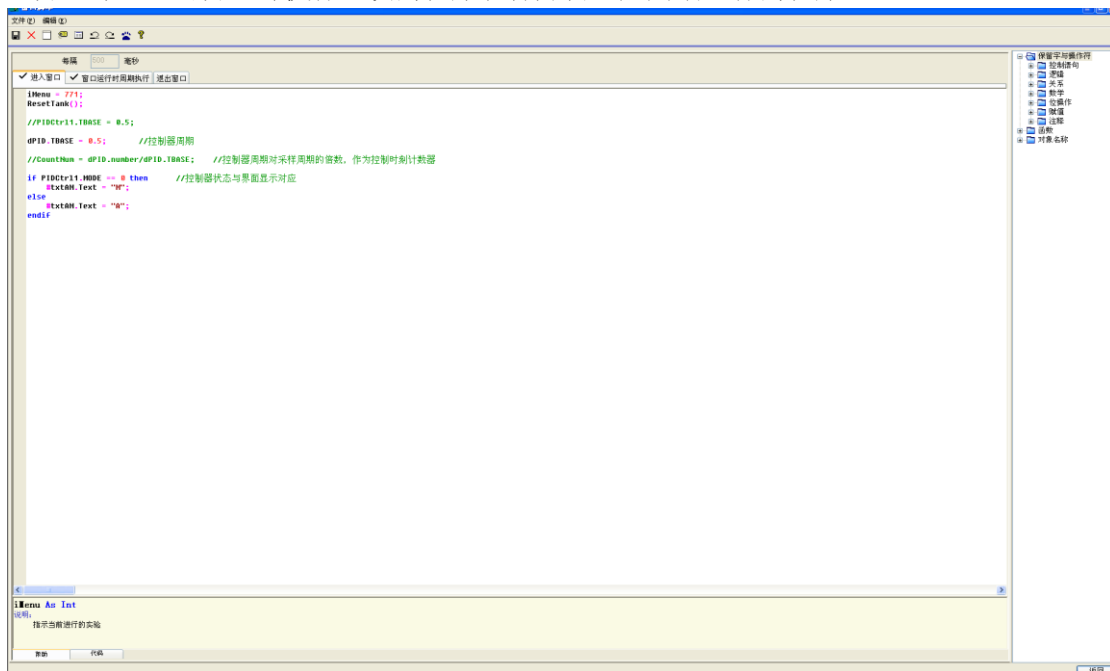
#### 4) 界面附加程序的修改

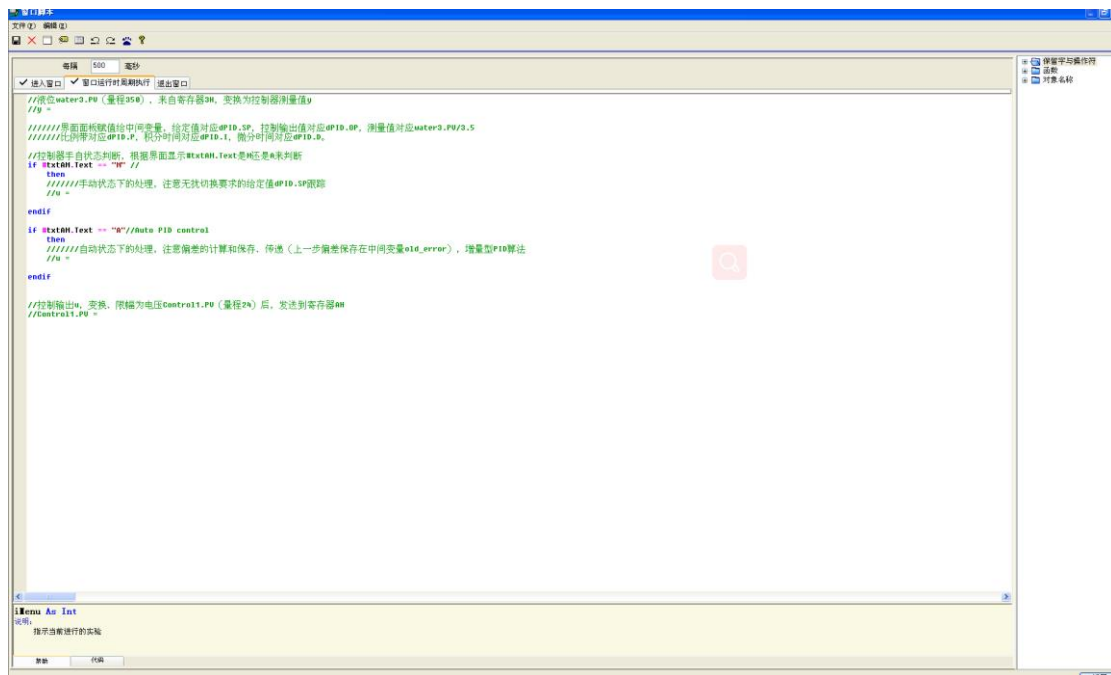
打开某个画面的“动作”下的程序块进行修改





分为进入窗口时、退出窗口时执行一次的程序和打开窗口后周期运行的程序，





## 二、PID 算法准备

理解周期运行部分的程序框架

```
//液位 water3.PV（量程 350），来自寄存器 3H，变换为控制器测量值 y
//y =

////////界面面板赋值给中间变量，给定值对应 dPID.SP，控制输出值对应 dPID.OP，测量值对应 water3.PV/3.5
////////比例带对应 dPID.P，积分时间对应 dPID.I，微分时间对应 dPID.D。

//控制器手自状态判断，根据界面显示#txtAM.Text 是 M 还是 A 来判断
if #txtAM.Text == "M" //Manual
    then
        //////////手动状态下的处理，注意无扰切换要求的给定值 dPID.SP 跟踪
        //u =

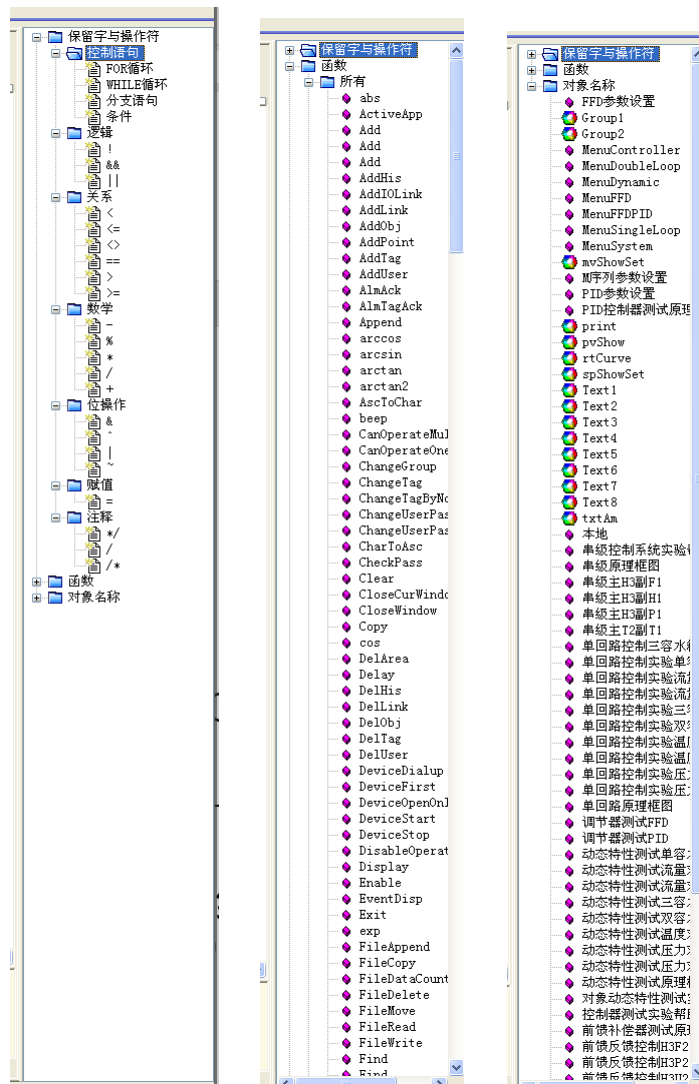
endif

if #txtAM.Text == "A"//Auto PID control
    then
        //////////自动状态下的处理，注意偏差的计算和保存、传递（上一步偏差保存在中间变量 old_error），增量
        型 PID 算法
        //u =

endif

//控制输出 u，变换、限幅为电压 Control1.PV（量程 24）后，发送到寄存器 AH
//Control1.PV =
```

编程语言的关键字、函数、可引用组件和变量，在编程界面右侧有提示：



# 附录六：控制系统的整定

自动控制系统的参数整定是控制系统运行之前必须解决的一个重要问题。

系统设计确定了控制方案。为了控制系统的正常运行、提高控制品质，需要恰当地选择调节器的比例带 $\delta$ 、积分时间 $T_i$ 和微分时间 $T_d$ 。为调节器确定适当参数的工作称作参数整定。

参数整定应当权衡利弊、综合考虑，既符合工艺指标的要求、又适合系统结构的特点。力求迅速克服扰动的影响，使被控参数平稳或接近恒定。

以下介绍的几种工程整定法，简单易行，且行之有效。

## 一、单回路控制系统的整定

### 1、动态特性参数法

方法要点：先依据被控对象的飞升特性求得动态特征参数  $K$ 、 $T$ 、 $\tau$ ，再依据求得的动态特征参数求取调节器的整定参数。

(1) 求取动态特征参数  $K$ 、 $T$ 、 $\tau$

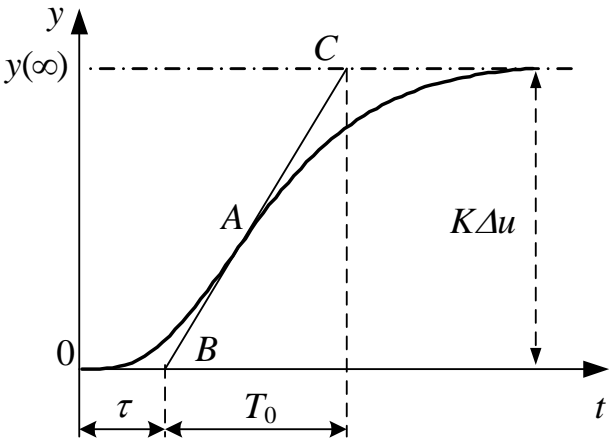


图 5-1 飞升特性曲线

过拐点 A 做切线，交时间轴于 B；稳态值于 C。

$K$ ：广义对象的增益；

$T_0$ ：等效时间常数；单位与时间轴相同（分或秒）；

$\tau$ ：等效纯滞后时间；单位与时间轴相同（分或秒）。

(2) 求取调节器整定参数

对于 4:1 的衰减比（75% 的衰减率），整定参数参照下表选定。

表 6-1 动态特性参数法整定参数计算表

控制规律	$\delta (\%)$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{K_0 \tau}{T_0} \times 100\%$		
PI	$1.1 \frac{K_0 \tau}{T_0} \times 100\%$	$3.3\tau$	
PID	$0.85 \frac{K_0 \tau}{T_0} \times 100\%$	$2\tau$	$0.5\tau$

### 2、衰减曲线法

方法要点：先用纯比例控制，将控制过程曲线达到 4:1 或 10:1。记能使控制过程曲线达到 4:1 的比例带为  $\delta_S$ ；控制周期为  $T_P$ 。或是记能使控制过程曲线达到 10:1 的比例带为  $\delta_S$ ；上升时间为  $t_r$ 。再利用已知的  $\delta_S$  和  $T_P$  或  $\delta_S$  和  $t_r$  求取调节器的整定参数。

(1) 求取  $\delta_S$  和  $T_P$  或  $\delta_S$  和  $t_r$

先放置一比例带，并将系统闭环。再适当调整比例带，使控制过程曲线达到 4:1 或 10:1。

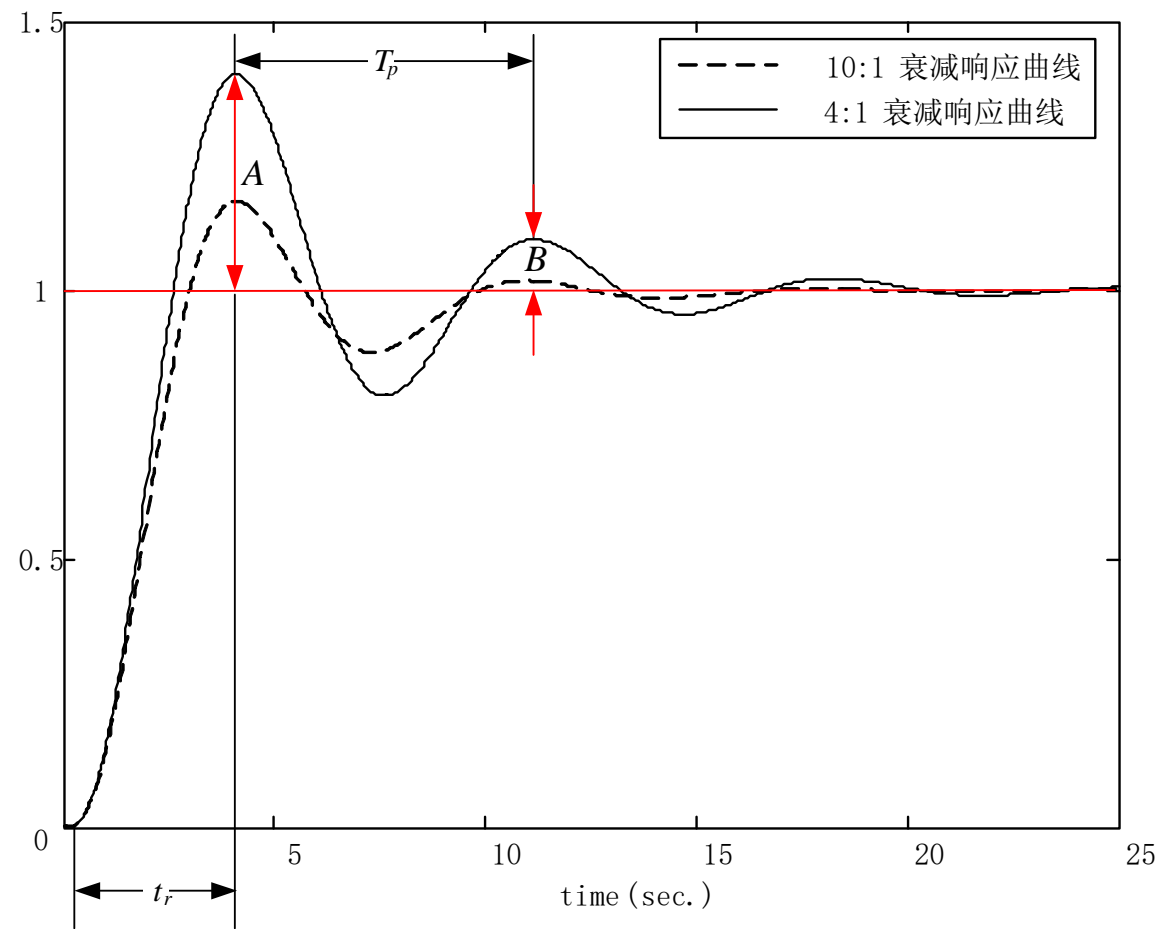


图 5-2 纯比例控制过程曲线的  $T_P$  和  $t_r$

(2) 求取调节器整定参数

对于 4:1 的衰减比 (75%的衰减率)，整定参数参照下表选定。

表 6-2 衰减曲线法 (4:1)整定参数计算表

控制规律	$\delta$ (%)	$T_i$	$T_d$
P	$\delta_S$		
PI	$1.2\delta_S$	$0.5T_P$	
PID	$0.8\delta_S$	$0.3T_P$	$0.1T_P$

对于 10:1 的衰减比 (90%的衰减率)，整定参数参照下表选定。

表 6-3 衰减曲线法 (10:1)整定参数计算表

控制规律	$\delta$ (%)	$T_i$	$T_d$
P	$\delta_S'$		
PI	$1.2\delta_S'$	$2t_r$	
PID	$0.8\delta_S'$	$1.2t_r$	$0.4t_r$

### 3、临界比例度法

方法要点：先用纯比例控制，让控制过程曲线出现等幅振荡。记能使控制过程曲线出现

等幅振荡的比例带为  $\delta_K$ ；振荡周期为  $T_K$ 。再利用已知的  $\delta_K$  和  $T_K$  求取调节器的整定参数。

(1) 求取  $\delta_K$  和  $T_K$

先放置一比例带，并将系统闭环。再适当调整比例带，使控制过程曲线出现等幅振荡。记能使控制过程曲线出现等幅振荡的比例带为  $\delta_K$ ；振荡周期为  $T_K$ 。

(2) 求取调节器整定参数

表 6-4 临界比例度法整定参数计算表

控制规律	$\delta (\%)$	$T_i$	$T_d$
P	$2\delta_K$		
PI	$2.2\delta_{SK}$	$0.85T_K$	
PID	$1.7\delta_K$	$0.5T_K$	$0.13T_K$

#### 4、经验试凑法

方法要点：先依据经验放置一组参数，再依据经验适当调整参数。

(1) 整定参数的预置范围

表 6-5 四类对象的经验参数

被控参数	特 点	$\delta (\%)$	$T_i$ (分)	$T_d$ (分)
温 度	多容、大滞后对象；须用微分	20~60	3~10	0.5~3
压 力	容积滞后不大；不用微分	30~70	0.4~3	
流 量	时间常数小，有噪声； $\delta$ 大， $T_i$ 小，不用微分	40~100	0.1~1	
液 位	若允许有余差则不必加积分，不用微分	20~80	0.1~3	

(2) 试凑的方法

预置调节器参数后，将系统闭环。观察控制过程曲线的形状，按照先比例，再积分，最后微分的顺序反复试凑参数，直到控制质量满足要求为止。

#### 二、串级控制系统的整定

串级控制系统有主、副两个闭合回路、主、副两个调节器。每个调节器的参数都会对整个系统产生影响。因此，串级控制系统的整定比单回路控制系统的整定复杂得多。

设计串级控制系统可能出于多种需求。但是，对参数整定来说，无外乎两种可能：一是力求主参数恒定，允许副参数在相当大的范围内波动；二是对主、副参数都有一定的要求。对前者来说，副参数控制品质可以略差一些。可以把副调节器的控制作用适当加强；对后者来说，我们必须满足设计的要求，兼顾主、副参数的控制品质。本实验属于前者。

为了叙述方便，我们以下图为例，说明串级控制系统的整定方法。

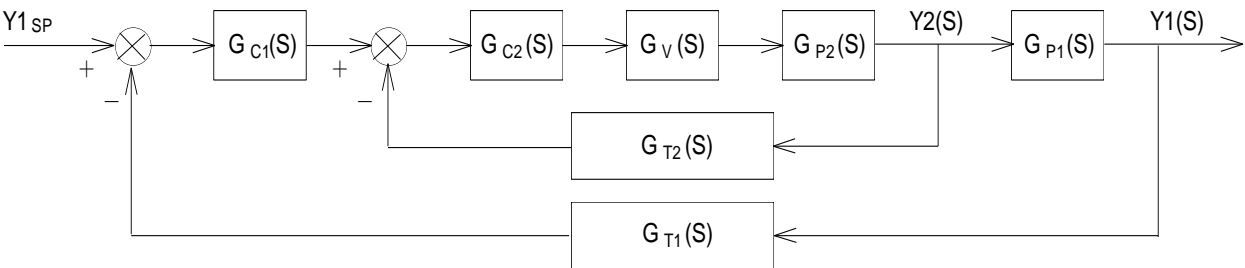


图 5-3 串级控制系统方框图

图中：  $Y1(S)$ ：主参数；  $Y2(S)$ ：副参数  
 $G_{C1}(S)$ ：主调节器的传递函数；  $G_{C2}(S)$ ：副调节器的传递函数；  
 $G_{P1}(S)$ ：主对象的传递函数；  $G_{P2}(S)$ ：副对象的传递函数；  
 $G_{T1}(S)$ ：主变送器的传递函数；  $G_{T2}(S)$ ：副变送器的传递函数；

$Y_{1SP}$ : 主参数的设定值;

$G_V(S)$ : 执行器的传递函数。

### 1、逐步逼近法

- (1) 断开主环, 按单回路控制系统的方法整定副环。求取副调节器的整定参数 $[G_{C2}]^1$ 。
- (2) 依据已知的 $[G_{C2}]^1$ , 把副环作为主环的一个环节 (即主调节器等效对象的一个组成部分), 仍然按单回路控制系统的方法整定主环。求取主调节器的整定参数 $[G_{C1}]^1$  (此时主、副回路都已经闭合了)。
- (3) 主环闭合, 主调节器整定参数为 $[G_{C1}]^1$ , 再求副调节器的整定参数 $[G_{C2}]^2$ 。
- (4) 至此, 完成一个逼近循环。如果控制质量尚未达到规定的指标, 则继续整定主调节器, 求取主调节器的整定参数 $[G_{C1}]^2$ 。
- (5) 依此, 反复循环, 逐步逼近。

### 2、两步整定法

- (1) 在主环闭合, 主、副调节器都为纯比例的条件下, 将主调节器的比例带置于 100%, 按衰减曲线法整定副环, 求取副调节器的  $\delta_{2s}$  (4:1) 或  $\delta_{2s'}$  (10:1)。
- (2) 保持副调节器参数, 用同样的方法整定主环。求取主调节器的  $\delta_{1s}$  (4:1) 或  $\delta_{1s'}$  (10:1)。(3) 依据以上求得两个  $\delta_s$  (4:1) 或  $\delta_{s'}$  (10:1) 值和调节器选型, 求取两个调节器的  $\delta$ 、 $T_i$  和  $T_d$ 。
- (4) 观察曲线形态, 如果不满足控制指标要求, 再适当调整相关参数。

### 3、一步整定法

- (1) 先确定一个合适的副调节器比例带。  
建议:      温度对象: 20~60%;      压力对象: 30~70%;  
              流量对象: 40~80%;      液位对象: 20~80%。  
一次放好, 不再改变。
- (2) 再按单回路控制系统的方法整定主调节器。  
一步整定法特别适合对副参数没有严格要求的系统。

## 三、前馈控制系统的整定

前馈补偿器模型取决于被控对象调节通道和扰动通道的传递函数。简单的前馈补偿器为:

$$G_{ff}(S) = K_{ff} \frac{\tau_1 S + 1}{\tau_2 S + 1}$$

式中:  $K_{ff}$ : 前馈补偿器的静态增益; 它是被控对象扰动通道静态增益与调节通道静态增益的比值。

$\tau_1$ : 前馈补偿器的超前时间; 一般为被控对象调节通道的等效时间常数;

$\tau_2$ : 前馈补偿器的滞后时间; 一般为被控对象扰动通道的等效时间常数;

### 1、确定 $K_{ff}$

#### (1) 开环整定法

先构成一个单纯的静态前馈控制系统, 再为系统施加一个阶跃扰动, 而后由小到大调整前馈补偿器的静态增益  $K_{ff}$ , 直到被控参数准确回到给定值。

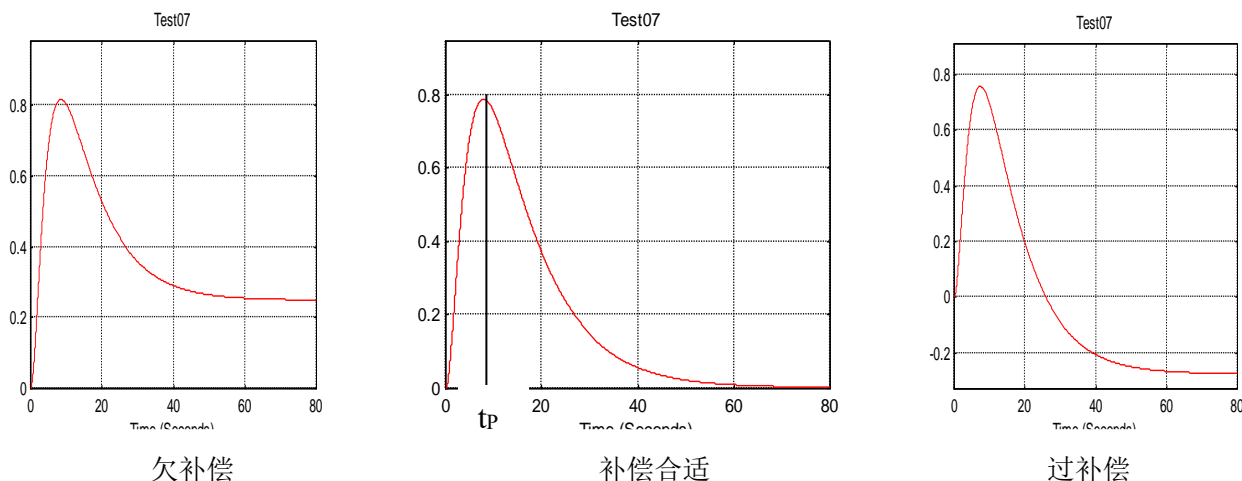


图 5-4 前馈补偿器静态增益的影响

图中  $t_p$  为扰动使被控参数出现最大动态偏差的时间。

## (2) 闭环整定法

断开前馈，只留反馈（比例积分调节器），等系统稳定。记调节器输出的稳态值为  $U_0$ 。而后，为系统施加一个阶跃扰动 ( $\Delta d$ )，记再次稳定后调节器输出的新稳态值为  $U_1$ 。则：

$$K_{ff} = \frac{U_1 - U_0}{\Delta d}$$

式中的 ( $U_1 - U_0$ ) 是单纯反馈控制系统中 PI 调节器为克服扰动  $\Delta d$  所产生的控制作用；亦即单纯前馈控制系统中前馈补偿器为补偿扰动  $\Delta d$  需要产生的控制作用。

## 2、 确定 $\tau_1$ 和 $\tau_2$

### (1) 设初值

- 若  $\tau_1 > \tau_2$  (被控对象调节通道的等效时间常数大于扰动通道的等效时间常数) 则：  
取  $\tau_{20} = 0.7 t_p$  ,  $\tau_{10} = 2\tau_{20}$  ；
- 若  $\tau_1 < \tau_2$  (被控对象调节通道的等效时间常数小于扰动通道的等效时间常数) 则：  
取  $\tau_{20} = 1.4 T_p$  ,  $\tau_{10} = 0.5\tau_{20}$  。

### (2) 求差值

保持  $\tau_{20}$  不变，调整  $\tau_{10}$  使响应曲线的净增面积为零。记此时的  $\tau_1 = \tau_{11}$  。

- 未经动态补偿的曲线与较小时时间常数通道的响应方向一致；
- 反方向的面积偏小，说明补偿量不足 ( $\tau_1$  与  $\tau_2$  的差值偏小)；
- $\tau_1$  与  $\tau_2$  的比值增加，响应曲线穿越给定值的时间减小。

### (3) 定比值

保持  $\tau_{11}$  与  $\tau_{20}$  的差值，调整二者的比值。使响应曲线位于给定值两侧的面积进一步缩小。曲线穿越给定值的时间接近  $t_p$  。

- $\tau_1$  与  $\tau_2$  同时减小，比值增加。响应曲线穿越给定值的时间减小。