

实验步骤

步骤 1：系统认知

通过网址进入虚拟实验界面，点击开始按钮，进入虚仿实验系统，点选“系统认知”按钮后，自主学习“原理认知”、“设备认知”、“实验步骤”等内容，然后完成“小测试”并提交。

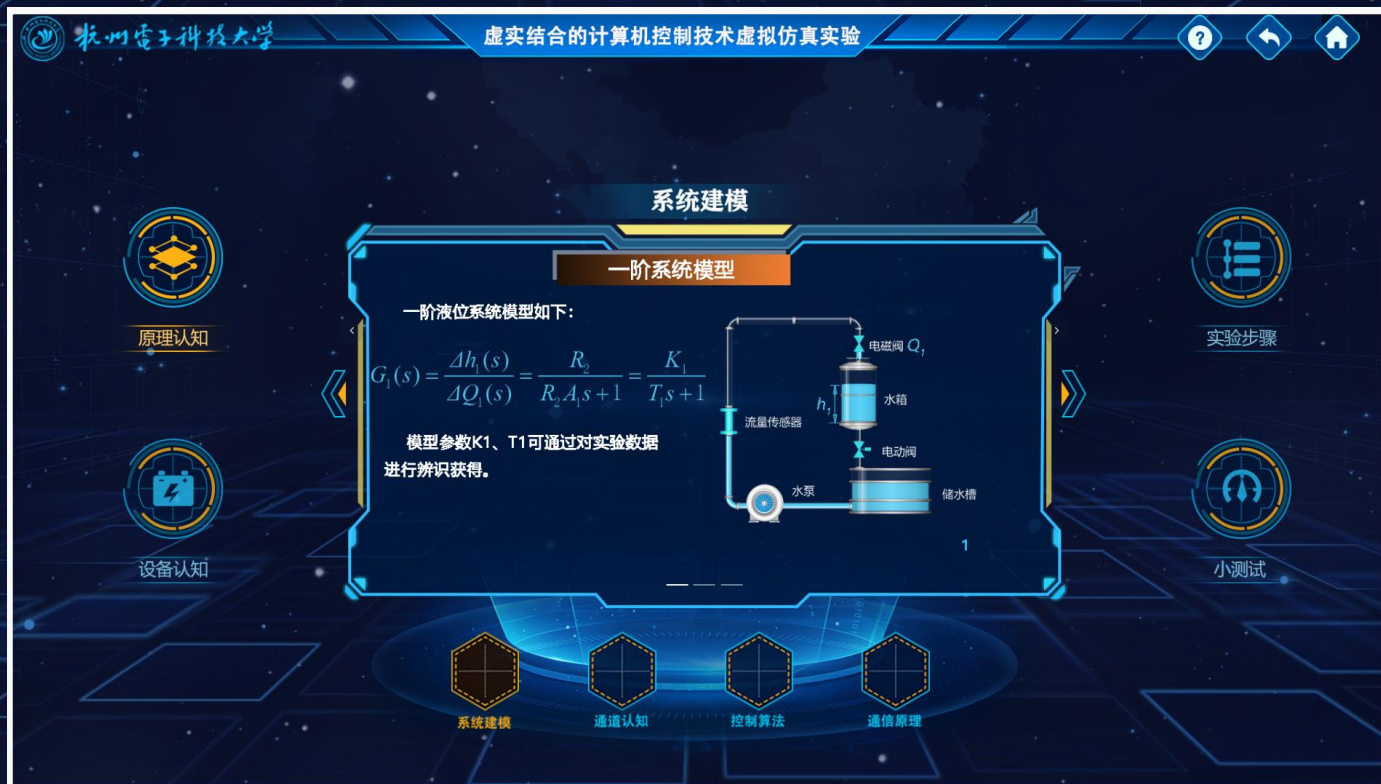


图 1 系统认知模块

步骤 2：系统建模与模型参数辨识

1) 点击  按钮，返回实验引导界面，点选“在线实验”按钮，进入在线实验平台（图 2），点击左侧的“系统模型参数辨识”按钮，进行系统模型建模与参数辨识实验。

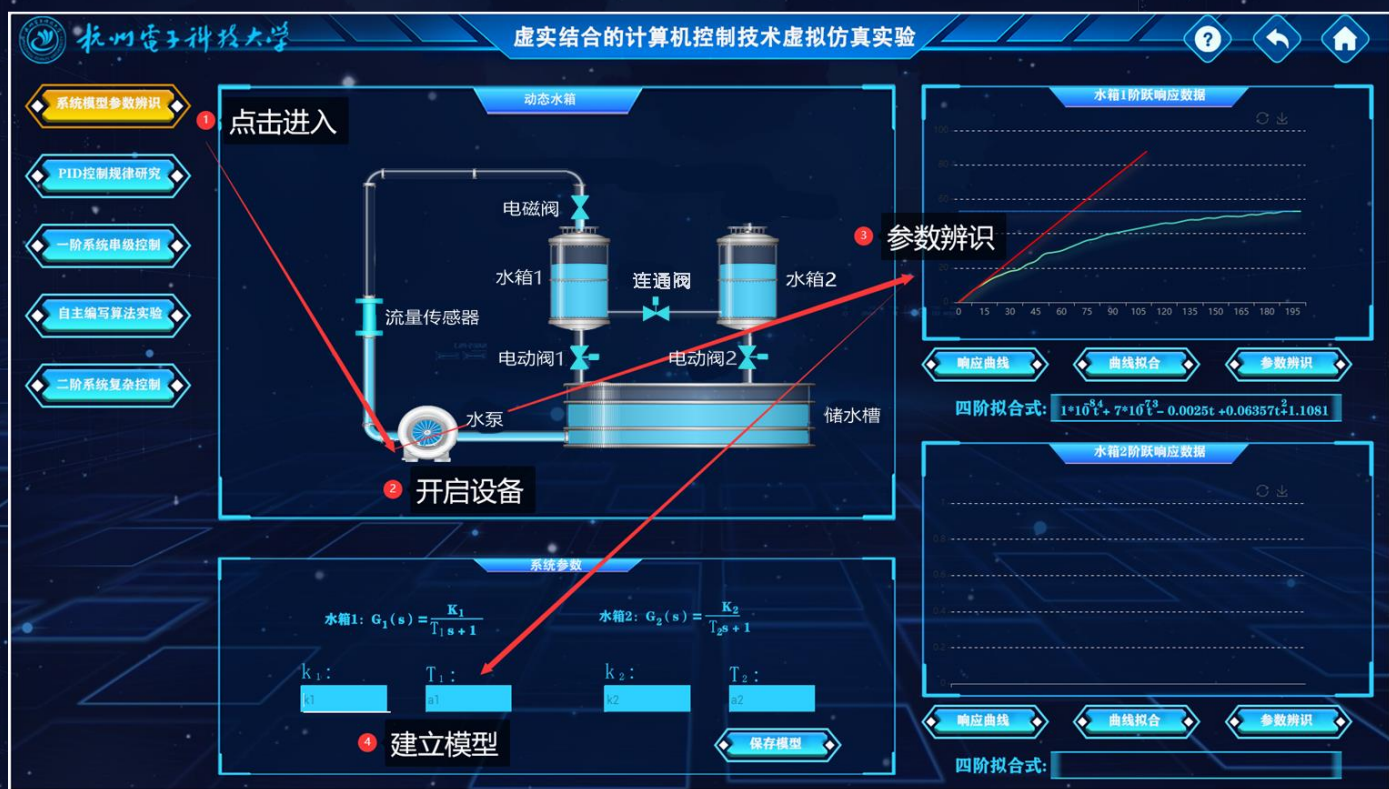


图 2 系统建模与模型参数辨识

2) 将左侧动态界面中的“水泵”、“电磁阀”、“连通阀”、“电动阀 2”设置为“开”状态；将“电动阀 1”设置为关状态，构成二阶液位系统；

3) 在“水箱 1 阶跃响应曲线”界面，点击“响应曲线”按钮，获取水箱 1 的阶跃响应数据，并绘制阶跃响应曲线（图 5）；由响应曲线图可知，水箱 1 模型可用一阶惯性环节表示（式 1）。

$$G(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (1)$$

其中，模型参数 K_1 和 T_1 可由阶跃响应曲线获得。

4) 点击“曲线拟合”按钮对阶跃响应曲线进行四阶多项式拟合，并绘制拟合曲线；点击“参数辨识”按钮对拟合曲线进行参数辨识，得到一阶液位系统的模型参数 K_1 和 T_1 ，填入“系统参数”界面。

5) 同理，得到水箱 2 的模型参数 K_2 和 T_2 ，填入“系统参数”界面。

6) 点击“保存模型”按钮，完成系统建模。

步骤 3：一阶系统的 PID 控制规律研究

1) 点击“在线实验”界面中的“PID 控制规律研究”按钮，进入数字 PID 控制界面（图 3）。研究一阶系统

的 PID 控制规律。

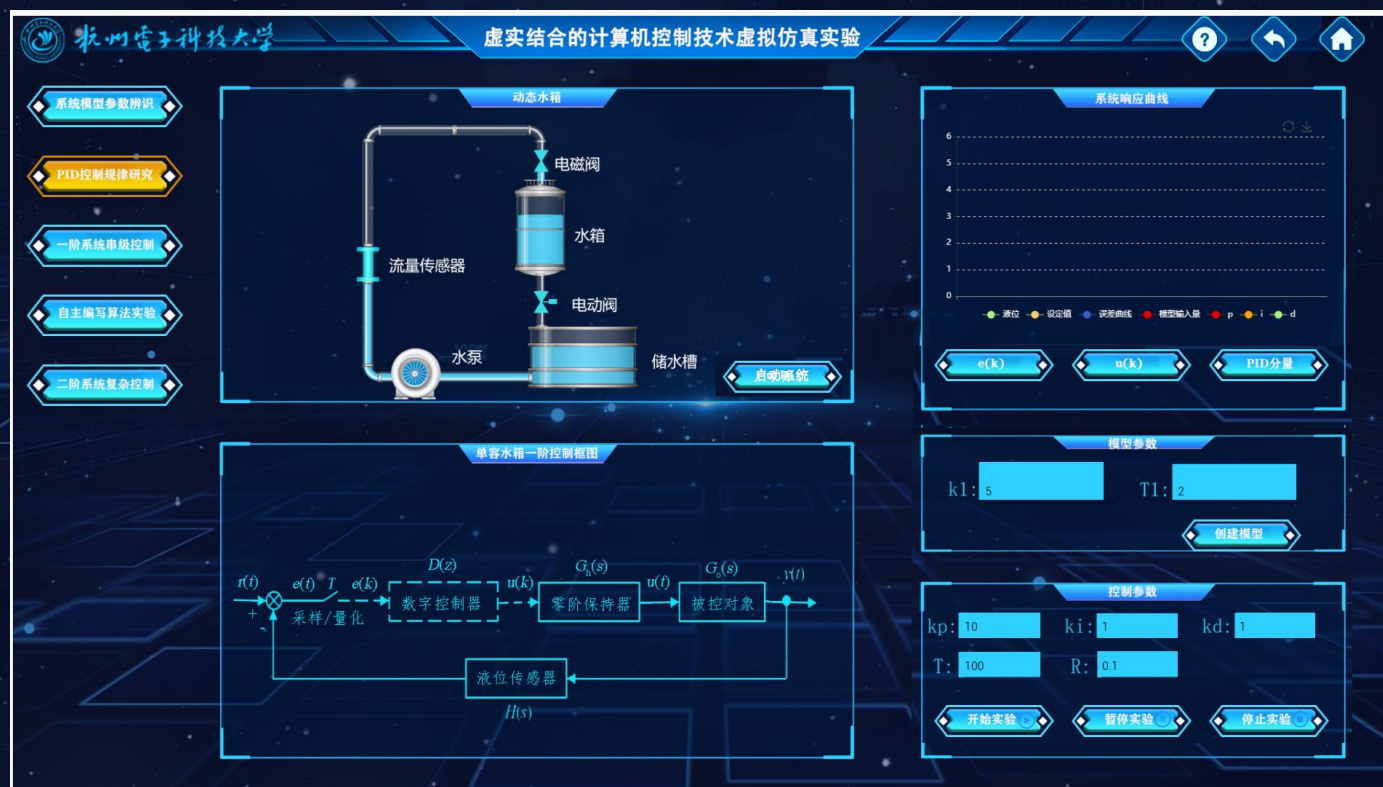


图 3 PID 控制规律研究

- 2) 将左侧动态界面中“水泵”、“电磁阀”、“电动阀”设置为“开”状态，点击“启动系统”按钮开始实验；
- 3) 在控制界面上“模型参数”框中，填入上一步骤中建立的模型参数 K_1 、 T_1 ，点击“创建模型”按钮，建立一阶被控系统的传递函数模型；
- 4) 将采样/控制周期 T 设置为 $0.1s$ ，设定值 R 设置为 100 ；
- 5) 研究 PID 控制规律中比例环节 P 的作用：将控制参数 K_i 和 K_d 设置为“0”，设置比例系数 K_p 为不同的值（由小到或大到小），观察响应曲线图，分析不同比例系数对控制效果的影响。
- 6) 挑选理想的纯比例控制参数 K_p ，在此基础上加入积分环节 K_i ，考察积分环节对控制效果的影响。
- 7) 继续加入微分环节 K_d ，考察微分环节对系统控制效果的影响。
- 8) 选取不同的采样/控制周期 T ，考察数字 PID 控制中采样/控制周期 T 对控制效果的影响。

步骤 4：PID 参数的工程整定法——扩充临界比例法

- 1) 选择合适的初始采样周期 T_0 ，将控制器设置为比例（P）控制器，形成闭环，改变比例系数，使得系统对阶跃输入的响应达到临界振荡状态（临界稳定）。将这时的比例系数记为 K_r ，振荡周期记为 T_r 。

2) 选择控制度 Q ，控制度 Q 的定义是以数字 PID 控制和模拟 PID 控制所对应的过渡过程误差平方的积分之比。

3) 根据齐格勒-尼柯尔斯 (Ziegler-Nichols) 经验公式，表 1 给出由这两个基准参数得到不同类型调节器的调节参数。

表 1 扩充临界比例法确定采样周期及数字控制器参数

控制度 Q	控制规律	T/T_r	K_p/K_r	T_i/T_r	T_d/T_r
1.05	PI	0.03	0.53	0.88	—
	PID	0.014	0.63	0.49	0.14
1.20	PI	0.05	0.49	0.91	—
	PID	0.043	0.47	0.47	0.16
1.50	PI	0.14	0.42	0.99	—
	PID	0.09	0.34	0.43	0.20
2.00	PI	0.22	0.36	1.05	—
	PID	0.16	0.27	0.40	0.22

4) 将由表 1 得到的控制参数填入仿真界面，观察响应曲线，如控制效果不理想，再根据步骤 4 的结果适当调整 PID 各参数，直至得到满意的控制效果。

步骤 5：PID 控制算法的积分项改进

- 1) 在主界面上点选“积分分离 PID 控制”按钮，进入积分分离 PID 控制界面（图 4）。
- 2) 将步骤 4 中得到的 PID 整定参数输入相应的控制参数框。
- 3) 设定积分分离阈值 ε ，调整 PID 参数，得到理想的响应曲线。
- 4) 调整阈值 ε 的大小，观察阈值对积分分离式 PID 控制效果的影响。
- 5) 与步骤 4 得到的基本 PID 控制的响应曲线比较，分析二者的优劣。

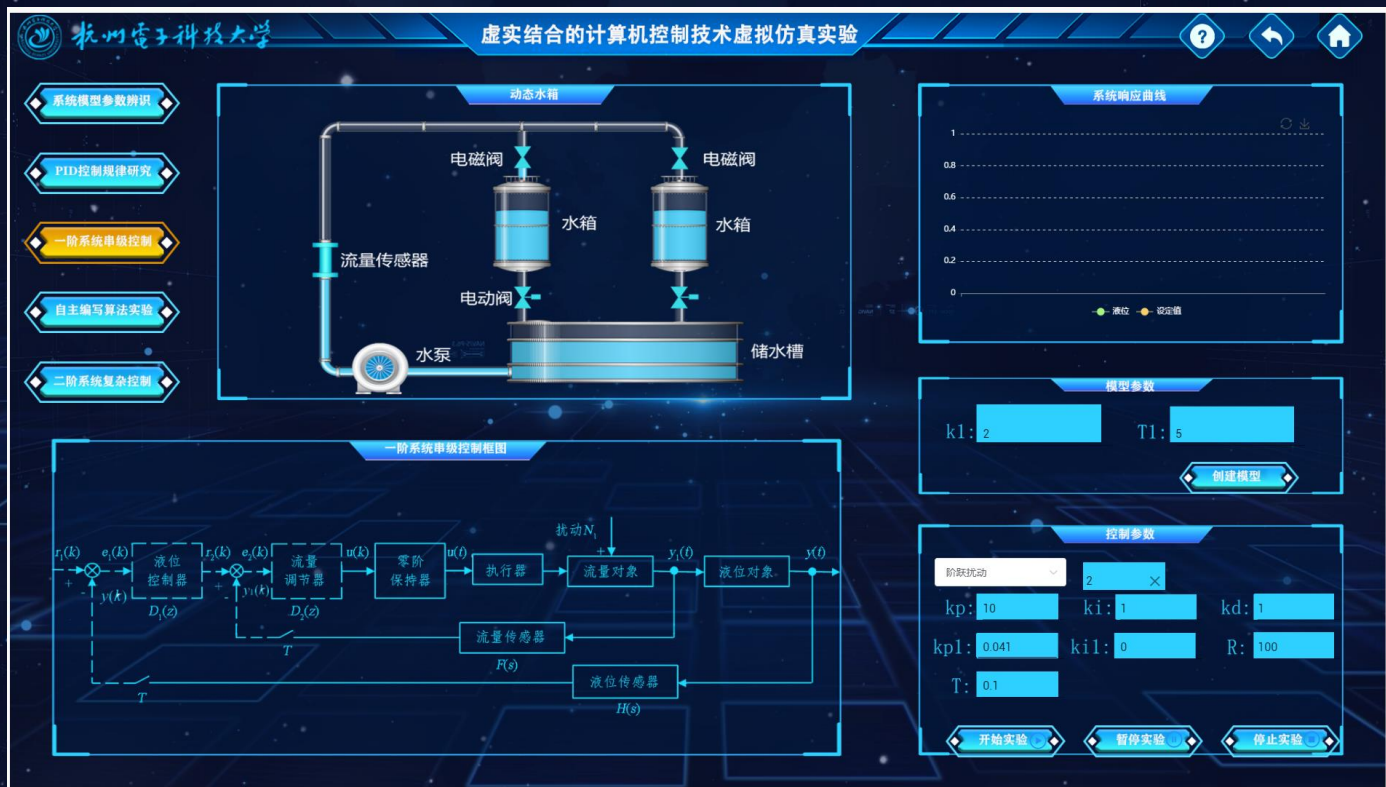


图 4 PID 控制的积分项改进

步骤 6：单水箱串级控制研究

1) 在主界面上点选“单水箱串级控制”按钮，进入单水箱串级控制界面（图 5）。

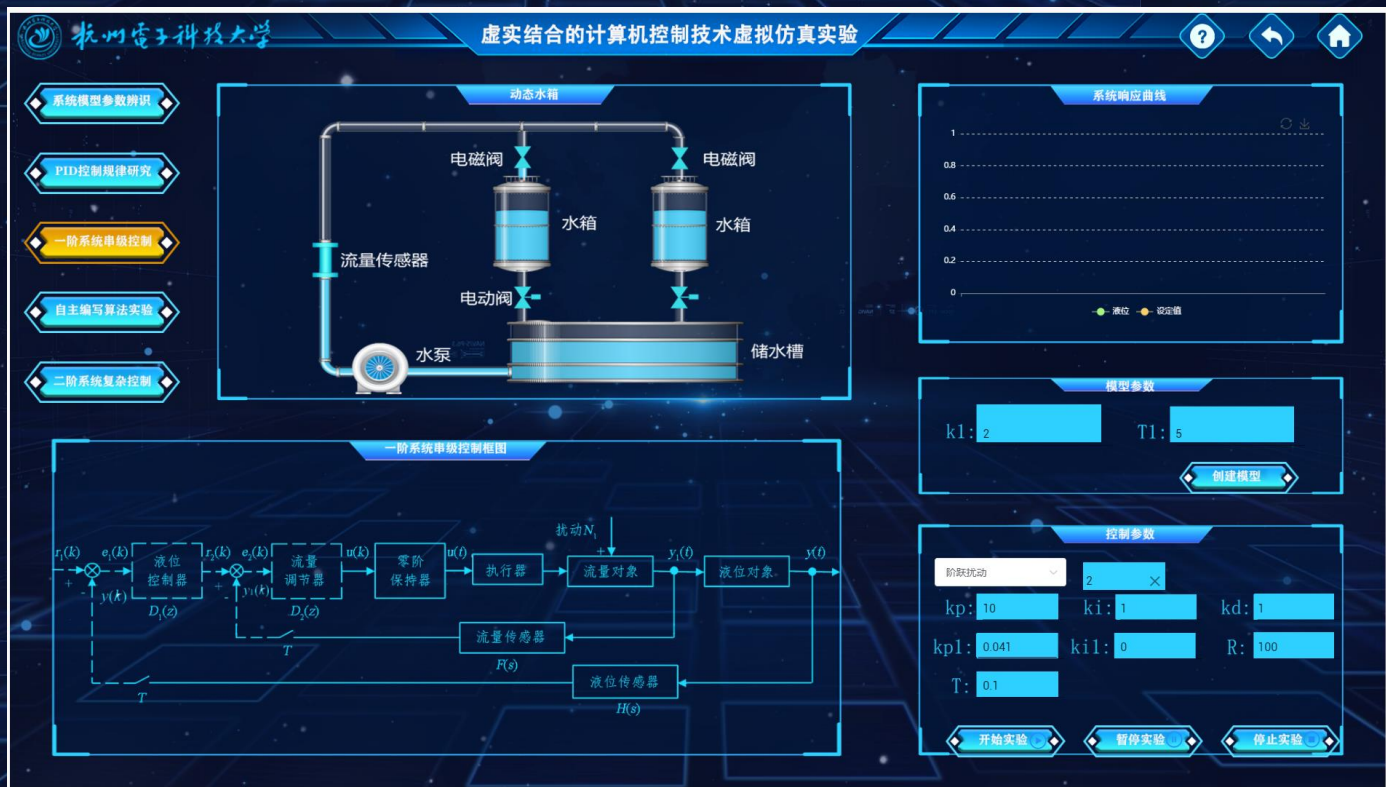


图 5 PID 控制的积分项改进

2) 在控制界面上填入模型参数，并选取干扰的类型，填写必要的干扰参数。

- 3) 采用基本 PID 控制算法 (内环参数 PID 参数设为 0), 观察基本 PID 控制对干扰的抑制效果。
- 4) 调节串级控制系统中内环与外环的 PID 参数, 比较串级控制与基本 PID 控制对干扰的抑制作用。
- 5) 改变干扰的类型, 调整串级控制参数, 观察串级控制对不同干扰的抑制效果。

步骤 7: 双水箱前馈—串级控制研究

- 1) 在主界面上点选“前馈—串级控制”按钮, 进入双水箱前馈—串级控制界面 (图 6)。
- 2) 在控制界面上填入模型参数, 并选取干扰的类型。
- 3) 采用基本 PID 控制算法, 观察基本 PID 控制对干扰的抑制效果。
- 4) 计算前馈控制器的模型, 填入相应的表格。
- 5) 调节控制系统参数, 比较前馈—串级控制与基本 PID 控制对干扰的抑制作用。
- 6) 关闭前馈—串级控制界面, 返回实验系统主界面。

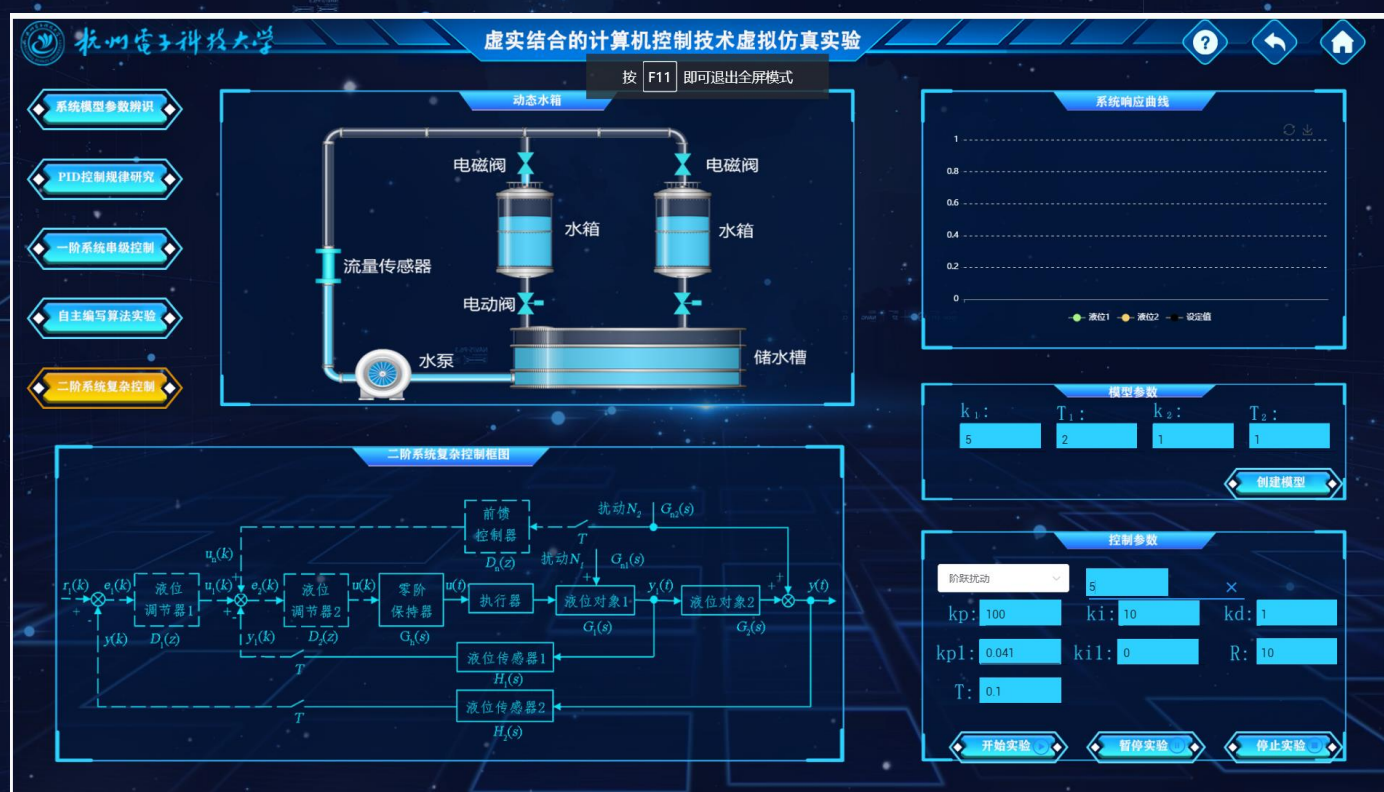


图 6 PID 控制的积分项改进

步骤 8：自主设计控制算法

- 1) 在主界面上点选“算法设计”按钮，进入自主算法设计界面。
- 2) 在控制界面上填入模型参数。
- 3) 采用基本 PID 控制算法，调节控制参数，得到理想的响应曲线。
- 4) 点击界面上的“程序设计”按钮，在弹出的设计界面中，根据特定控制要求，自主编写控制算法。
- 5) 对控制算法进行编译，保持后返回控制界面。
- 6) 点击“自主控制”按钮，采用自主设计的控制算法，对液位进行控制，观察响应曲线。
- 7) 重复 4)~6)，直至算法满足控制效果。
- 8) 保存实验结果后，返回主界面。



图 7 自主编写算法实验

步骤 9：远程单水箱液位 PID 控制

- 1) 在主界面上点选“远程实验”按钮，按提示远程登陆本地实体实验平台（图 8）。

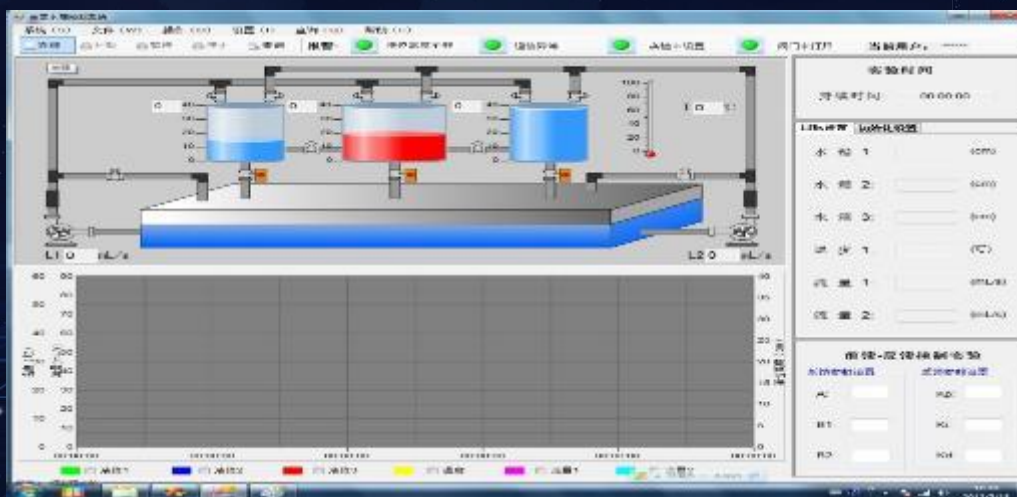


图 8 就地计算机控制实验系统

2) FLASH 中点击电动阀，将其状态设置为“开”，放空将水箱 1。如图 9 所示。

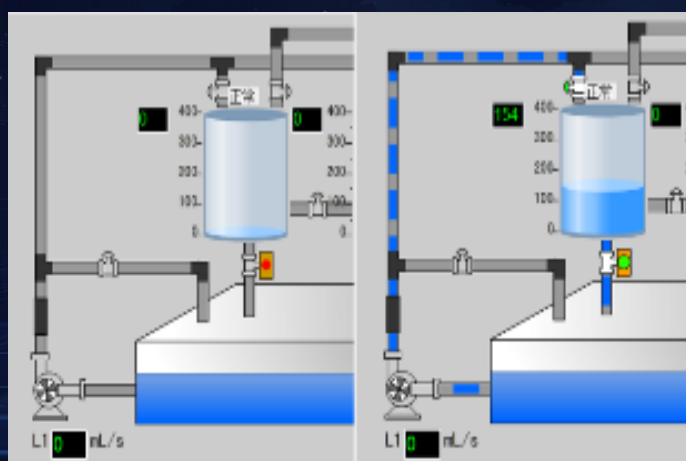
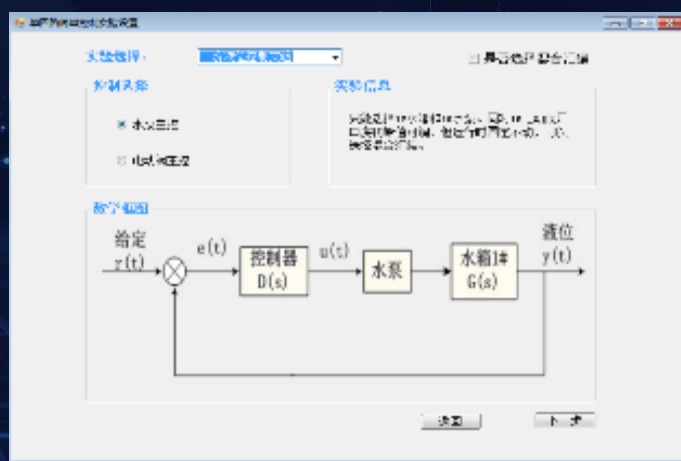


图 9 在 FLASH 中直接点击水泵或阀门进行控制图



10 一阶液位控制实验选择

3) 单击工具栏的“新建”或菜单栏的“系统”的“新建实验”。

4) 进入实验选择窗口，选择“单回路简单控制实验”，如图 10 所示。进入实验设置窗口，选择“一阶液位控制实验”。本实验采用水泵作为控制执行部件，电动阀采用固定开口度进行实验，因此采用默认的控制选择——水泵控制。

5) 单击“下一步”，进入实验设置窗口，输入液位目标值及球阀开口度的初始值，选择“普通 PID 控制算法”。

6) 单击“确定”，完成实验设置，在弹出的实验提示窗口中，按照提示的步骤完成相应的操作进入下一步，勾选已完成上述选择，再点击确定按钮，完成实验设置，并进行实验，实验结果由图中示波器显示。

7) 进入实验主界面后，在右下角的 PID 设置窗口中，用凑试法选择 K_p 、 K_i 、 K_d (K_p 推荐值在 1000 左右， K_i 在 17 左右，实验过程中不能改变 PID 的参数值) 然后点击“开始”按钮，实验开始。如图 11 所示。实验过程中可以直接修改参数值。



图 11 PID 参数设置

8) 在单击“开始”按钮或者菜单栏“操作”的“开始实验”进行实验后，观察实验现象并记录数据，运行一段时间后单击“暂停”实验按钮，然后单击“查询”进入查询项记录数据并填入表格。用户也可保存曲线并导出数据到 Excel，通过 Excel 查看采集到的数据。

9) 每次实验完毕请将水箱里的水放完后，最后单击“停止”按钮，电动球阀关闭后，然后进入“新建”并重复上述实验步骤，以找出最佳 PID 参量。

10) 通过修改 PID 控制参数实现对液位控制的不同效果，观察实验现象，并记录数据。

步骤 10：远程双水箱串级控制

1) 进入系统主界面，单击工具栏的“新建”或菜单栏的“系统”的“新建实验”。进入实验选择窗口，选择“串级控制实验”，进入实验设置窗口，选择“二阶串级液位控制实验”，实验信息框中提示实验的内容，窗口中还给出了实验的原理框图。如图 12。控制选择框中选择水泵控制。干扰选择框中选择“水泵扰动”。



图 12 串级控制实验选择



图 13 串级控制对象参数设置

2) 单击“下一步”进入实验参数设置窗口，输入水箱液位的目标值及球阀开口度的初始值，主回路算法选择 PID 控制算法，副回路算法选择 PI 控制算法（图 13）。

- 3) 点击水泵，设置扰动类型为“阶跃信号”。
- 4) 单击“确定”，完成实验设置，在弹出的实验提示窗口中，按照提示的步骤完成相应的操作。
- 5) 进入实验界面后，在右下角的 PID 设置窗口中，输入适合的主回路、副回路的 PID 控制参数。如图 14 所示。
- 6) 开始实验，观察串级控制系统的液位变化，分析流量曲线与液位曲线的变化。系统稳定后，将自动给入水泵扰动的阶跃信号到水箱 1 的副回路控制中，观察系统的调整曲线。保存控制曲线，并分析控制效果。
- 7) 放空液位，点击水泵，设置扰动类型为“脉冲信号”。重复上述步骤 4)~6)。
- 8) 放空液位，点击水泵，设置扰动类型为“白噪声信号”。重复上述步骤④~⑥。
- 9) 分析串级控制对不同干扰下的控制效果优劣，并分析原因。



串级控制实验	
主回路	副回路
Kp: 5	Kp: 5
Ki: 0.5	Ki: 0.5
Kd: 0	Kd: 0
<button>参数配置</button>	

图 14 串级控制 PID 参数设置