

# 仪器仪表综合实践能力训练

## 课程综合设计报告

学校： 山东大学

班级： 15 级测控二班

姓名： 景然

学号： 201500171027

## 基于 LabVIEW 的自动水箱液位控制系统

**摘要：**本文介绍了一项基于 LabVIEW 的自动水箱液位控制系统。该系统通过液位传感器、变送器、水泵、调节阀、IDAQ-USB-6009 数字采集卡和 LabVIEW 上位机实现了具有液位调节、阀门控制、液位警报、数据记录等功能的水箱控制系统。该项目完整实现了一个基本的工业控制系统，在本报告中，我们介绍了控制系统设计方案确定，仪表选型，仪表安装与电气接线，计算机控制系统软件设计以及系统调试与参数整定等多项内容。通过本次课程的学习和该项目的设计实践，我们进一步理解了仪器仪表和计算机控制的基本原理及在过程控制系统中的应用；进一步理解了控制理论中控制系统的工程建模、控制系统分析、PID 参数整定方法及在过程控制系统中的应用；掌握了控制系统设计的基本方法；掌握了系统调试实践技能。

**关键词：**PID 控制；LabVIEW；液位控制；仪表选型；PID 参数整定

**Abstract:** This paper introduces an automatic water tank level control system based on LabVIEW. The system realizes the water tank control system with functions of liquid level adjustment, valve control, liquid level alarm and data recording through liquid level sensor, transmitter, water pump, regulating valve, IDAQ-USB-6009 digital acquisition card and LabVIEW host computer program. In this essay, we focus on the design of control system, instrument selection, instrument installation and electrical wiring, software design of computer control system, system debugging and parameter setting. Through the study of this course and the design practice of this project, we further understood the basic principles of instrumentation and computer control and its application in process control system; got a further understanding of the engineering modeling, control system analysis, PID parameter tuning method of control system in control theory and its application in process control system; mastered the basic methods of control system design and mastered the system debugging practice skills.

**Key words:** PID control; LabVIEW; liquid level control; instrument selection; PID parameter setting

一、控制系统设计方案

为完成系统设计目标，实现实时响应的水箱液位控制，设计系统控制方案如下：

- (1) 系统由蓄水箱、控制水箱、输水管道、循环水泵、调节阀、液位传感器、变送器、数据采集卡、计算机控制器以及供电系统组成。系统硬件和逻辑结构示意图如图 1 所示。

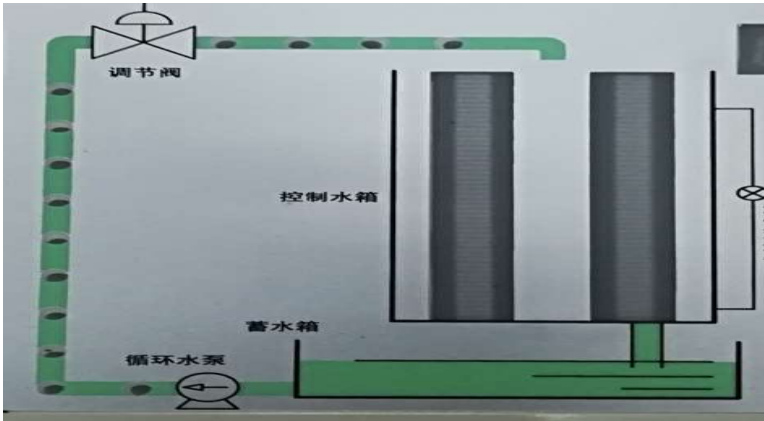


图 1

- (2) 根据过程控制课程中所学习的知识总结，可知液位控制系统是一个单回路控制系统，绘制单回路控制系统结构框图示意图如图 2 所示。

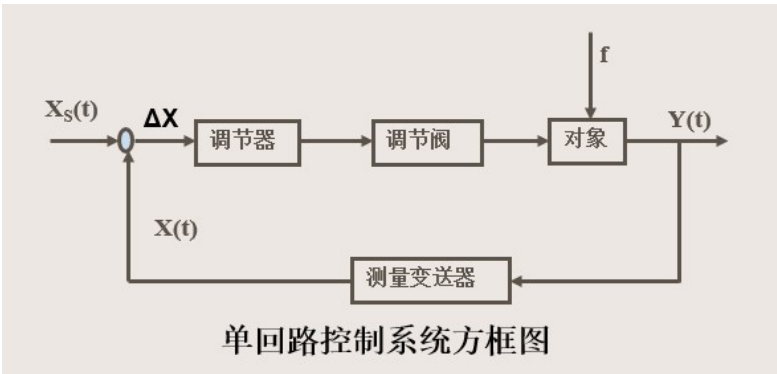


图 2

- (3) 由于使用计算机 LabVIEW 软件作为逻辑控制器，需要将模拟量进行离散化处理，在数据采集卡前后两端需进行 A/D 和 D/A 转换操作，绘制计算机控制系统部分结构图示意图如图 3 所示。

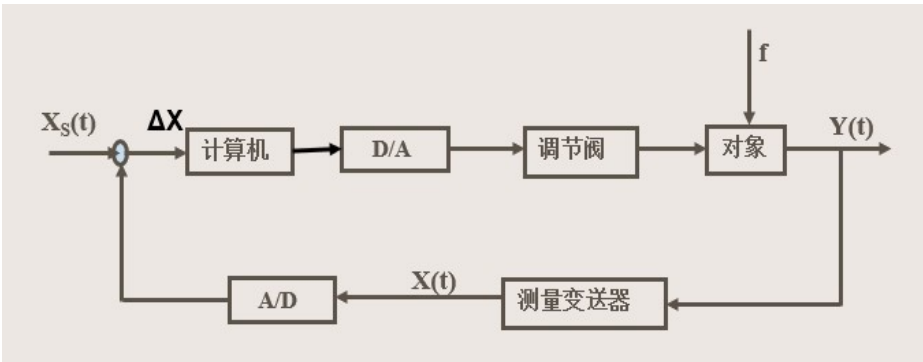


图 3

- (4) 根据上述思路进行整理，理清液位控制系统的系统结构，从软件和硬件角度开始着手进行具体化的预设计，包括系统空间结构和机械结构设计，系统电气连接及布线

预设计，系统软件结构预设计等等，以提高设计过程中的效率，减少错误发生概率。并在后续的实践过程中就预设计中的漏洞和错误进行不断完善。

## 二、仪表选型与校验

本实验过程中调节阀和液位传感变送元件选用了模拟实验设备进行模拟，设备可通过内部电路结构产生 4-20mA 的标准变送电流信号。经过转换电路可以得到 1-5V 的电压信号。

在本次设计中，不主要针对练习变送器的选型和设计，由上述说明可知：

系统反馈信息：

液位高度（cm）（0-100%）对应电压（1-5V）；

调节阀开度（无量纲）（0-100%）对应电压（1-5V）；

由于需使用计算机控制系统，需将模拟电压转换为数字电压进行输入输出操作，在本设计中选用 IDAQ-USB-6009 数字采集卡进行 A/D 和 D/A 转换，实物如图 4。



图 4

IDAQ-USB-6009 数字采集卡具有 8 路 14 位高精度 A/D 输入通道可供选择，同时提供两路高精度 D/A 输出通道，对于本项目中的单回路控制系统而言，其资源足够满足单输入单输出要求。其在拥有较高精度的前提下，同时拥有价格低、学习曲线平缓、参考资料相对丰富等多种优点，适合成本较低的，对于精度和稳定性要求不十分严苛的应用场合，尤其适合教学使用。

根据我们的系统特点和自身编程和硬件调试能力，我们最终选择了 IDAQ-USB-6009 数字采集卡作为输入输出设备。同时，我们选择一台搭载 Intel Core i7 8550-U（1.8Ghz）处理器，运行 windows10 操作系统和 LabVIEW2015 的笔记本进行开发。

## 三、仪表安装与电气接线图

当完成选型后，我们使用带有接线端子的防呆插头和 0.6mm 电线进行了电路连接。

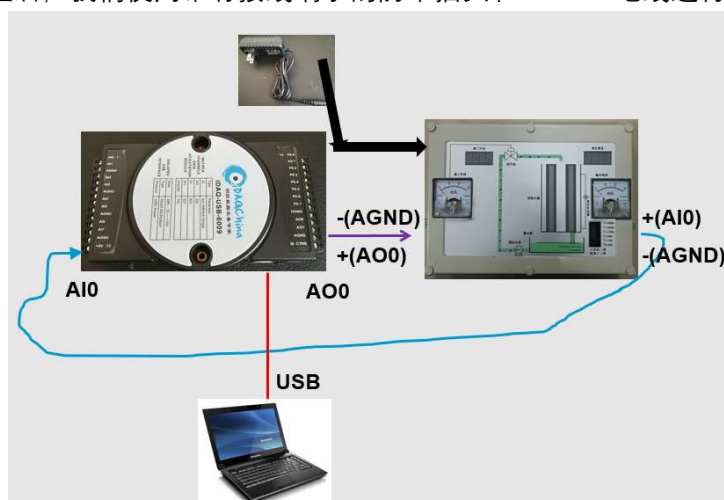


图 5

接线图如图 5 所示, 我们选用 AI0 输入通道和 AO0 输出通道连接到模拟仪器两端进行电压测量。对于模拟试验箱, 我们选用 12V1A 电源进行供电, 对于 IDAQ-USB-6009 数字采集卡, 我们选用 USB-TypeB 转 TypeA 连接线直接连接到计算机上进行供电和数据传输。在电路连接的过程中, 可以注意使用不同颜色的线 (e.g, 红色代表高电平 黑色代表地线) 来区分电路和接口。

#### 四、计算机控制系统软件设计

##### (1) 程序功能设计

根据系统设计要求, 我们设计了基于 LabVIEW 的上位机程序, 并实现了基础功能以及具有更高用户操作度的拓展功能如下:

基础功能:

1. 显示实时调节阀开度, 可手动调整调节阀开度。
2. 显示实时控制水箱液位高度, 可设置目标液位高度并进行自动 PID 液位自动控制。
3. 将采集的液位数据以数据库或 TXT 文件格式存储。
4. 对输入变量进行标度变换、滤波等预处理。
5. 显示静态工艺流程画面和动态数据, 按周期更新。
6. 能够处理键盘操作、鼠标操作、画面热点操作的各种命令, 能够通过界面操作实现手动/自动切换、PID 参数修改、阀门手动控制等功能。
7. 历史数据和实时数据的趋势显示软件。
8. 报警信息的显示、记录与处理软件。
9. 历史数据的记录与存储软件。

拓展功能:

1. 多种标度的数值显示和控制控件 (数值/百分比显示共存、按钮/滑块/键盘输入共存)。
2. 带有 6 组系统默认的 PID 参数(配合整套模拟仪器参数: 一阶/二阶系统、 $T_1=10/50/100s$ ), 同时也可随时进行自定义 PID 参数。
3. 液位实时的数值, 设定值, 报警上限, 报警下限 4 项数据的存储, 可随时显示存储在计算机中的上述 4 项历史数据。
4. 可随时调整系统的报警上下限, 拥有多种报警示警图案, 可选择限制液位稳定在报警上下限内 (无人模式)。
5. 可进行自定义的采样和滤波参数。
6. 易懂美观的操作界面, 清晰细致的程序注释, 丰富的自定义选项 (是否存储历史数据/是否查看历史数据/是否使用默认 PID 参数/是否进行强制限幅等等)。

##### (2) 前面板设计

1. 历史液位信息 (实时值, 设定值, 报警上限, 报警下限四合一显示)



图 6

2. 静态工艺流程图和液位、阀门输入控件设计

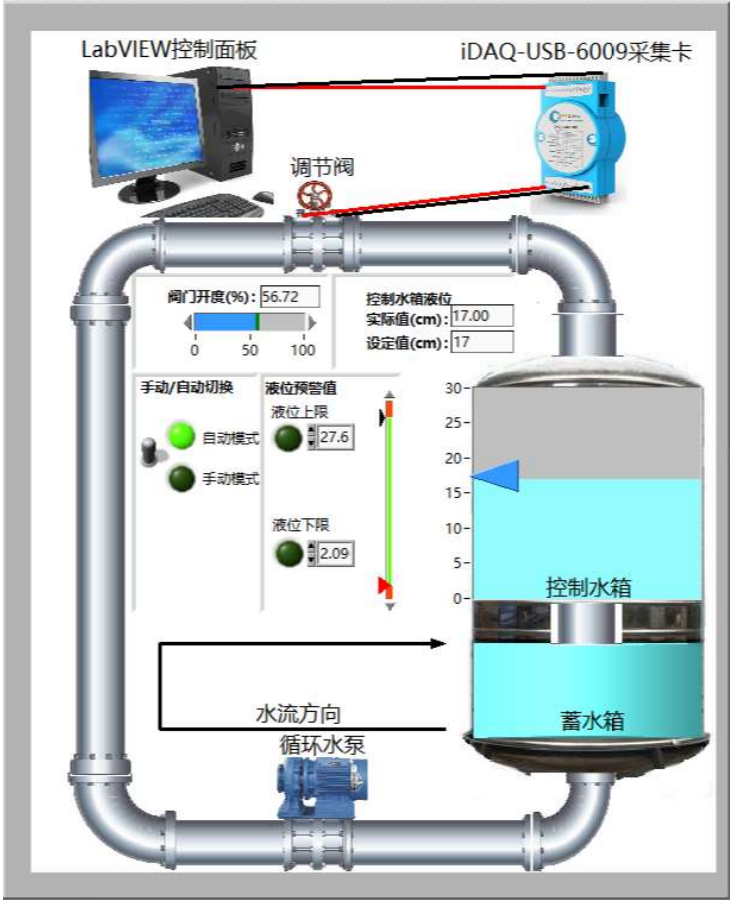


图 7

通过从互联网上寻找大量的素材经过修图处理后复制到 LabVIEW 剪切板进行拼接，达到画面和谐真实的实际效果。提高系统交互界面的易读性和美观程度。

3. 实时数据（阀门开度与液位四合一同步显示）

上方的图表为液位曲线，下方为阀门开度曲线。

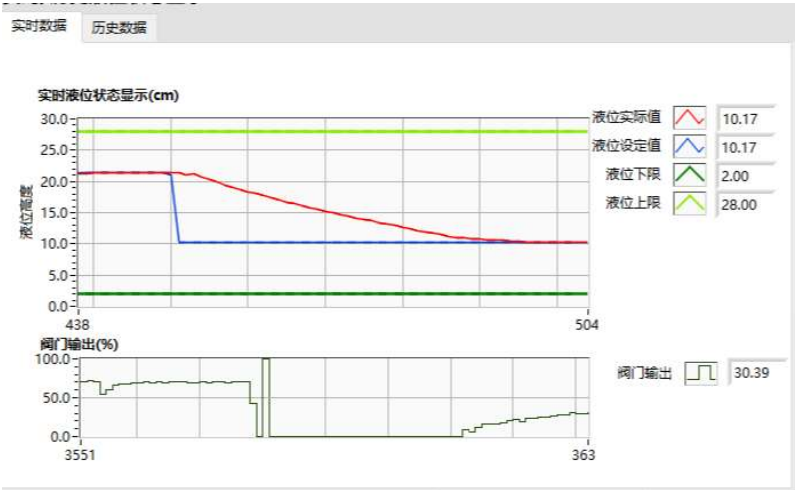


图 8

(3) 程序面板设计

系统主程序框图如图 9 所示：

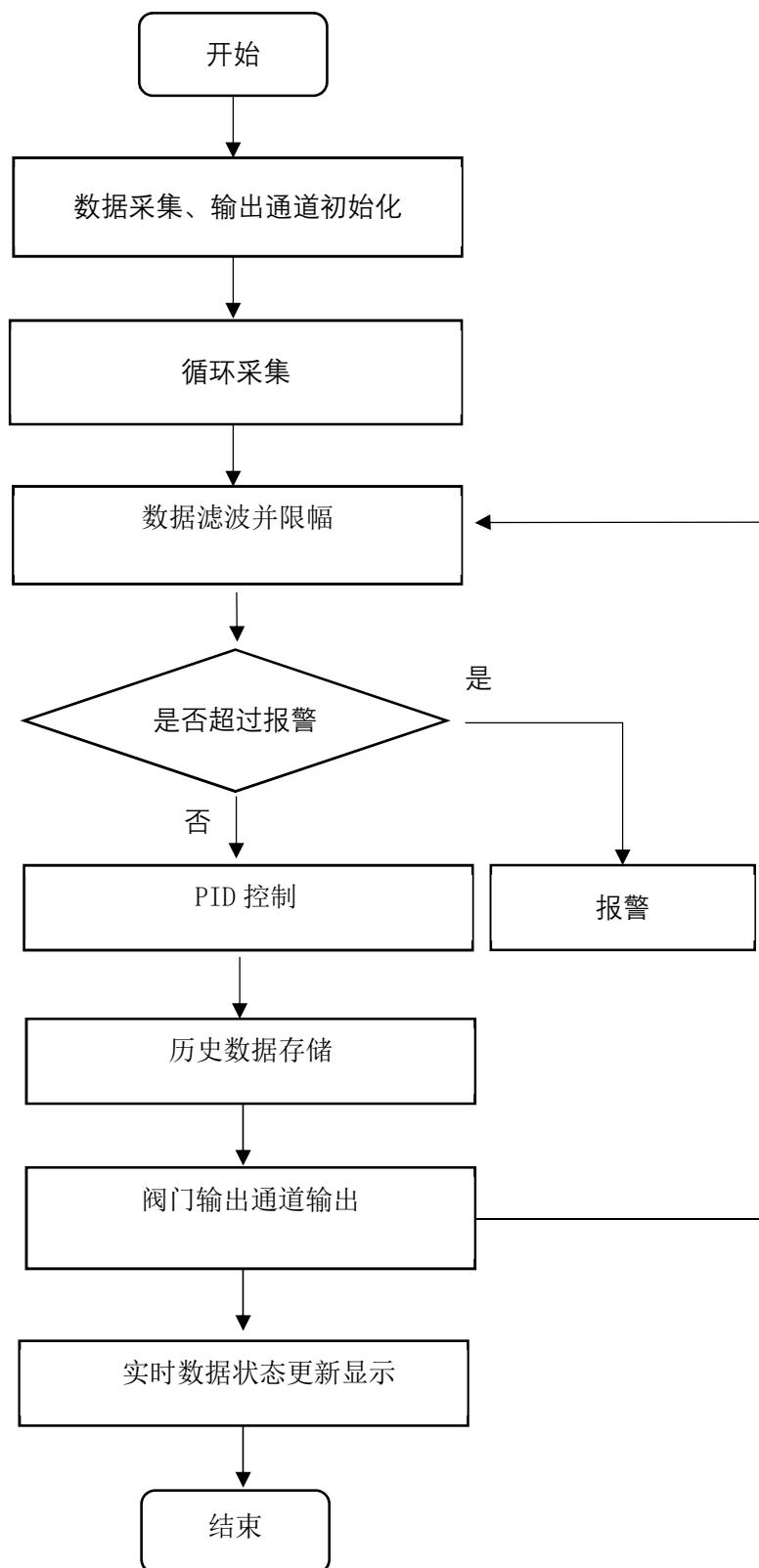


图 9

完整的程序框图和前面板显示控件见附录 2 和附录 3。  
本节的内容是不同程序功能部分的独立介绍。



1. 程序采集与标度变换部分

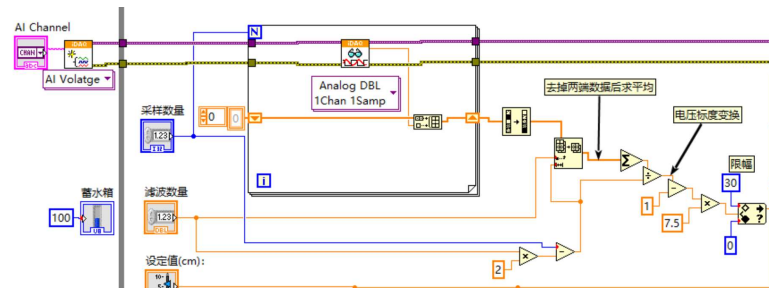


图 10

此部分为采样和滤波以及标度变换的程序，首先是通过循环结构连续采样  $n$  次， $n$  为采样数量，将结果通过移位寄存器存放在一维数组里，而后通过数组排序和索引，去掉最大和最小的  $m$  个，再取平均完成滤波，随后进行从 1-5v 到 0-30cm 的标度变换，再将结果限幅避免负值。

2. 报警与报警限幅部分

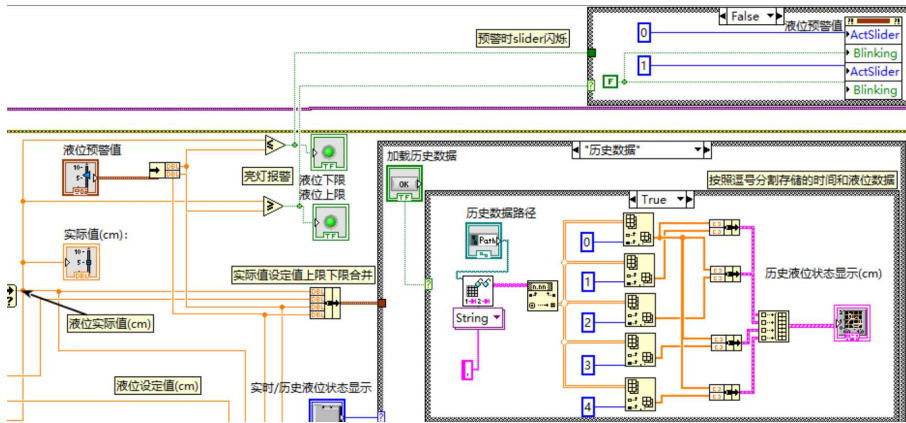


图 11

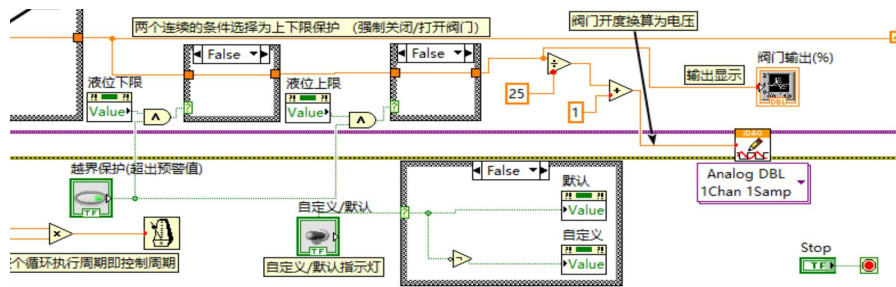


图 12

图 11 左侧的部分主要是将实际值和实时的预警值上下限进行比较，如果超过限制则点亮指示灯，并触发滑块闪烁等效果，同时对于移动拖块使得液位下限大于液位上限的情况加以限制，但限制仍可以做得更好。

图 12 的上侧穿过两个条件分支结构的是 PID 输出的阀门开度值，此处的两个条件分支是为了实现在液位超过上下限限制时直接调整阀门开度全开/全闭的操作。这样当液位触及上下限时，阀门会因为频繁的开闭使得液位保持在临界值附近，不会继续上升/下降造成巨大损失。

此处的设计存在的问题是无法解决当移动拖块使得液位下限大于液位上限的情况，此时如果液位位于最大值和最小值之间，阀门开度会变为 0，但不会造成什么不良影响。此处的解决方案还有待提升。在条件结构后是另一次标度变化，从 PID 输出的 0-100%到



1-5v 送至阀门。

### 3. PID 计算和 PID 参数选择部分

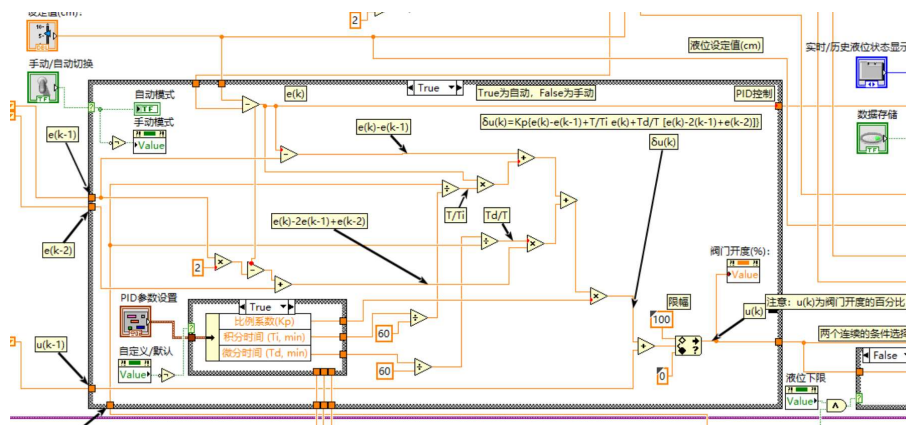


图 13

从图 13 中可以看到，本系统选取了增量式 PID 计算方式进行 PID 参数的整定和设计。数字 PID 控制的设计有位置式及增量式两种 PID 算法，其表达式如下：  
位置式 PID：

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{Td}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$

增量式 PID：

$$\Delta u(k) = K_p \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{Td}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\}$$

相比于增量式 PID 算法，位置式 PID 算法需要对  $e(k)$  进行累加，增大了计算机的计算量，容易造成执行机构的大幅度动作，因此，本设计使用增量式 PID 算法。

### 4. 历史数据的保存与显示部分

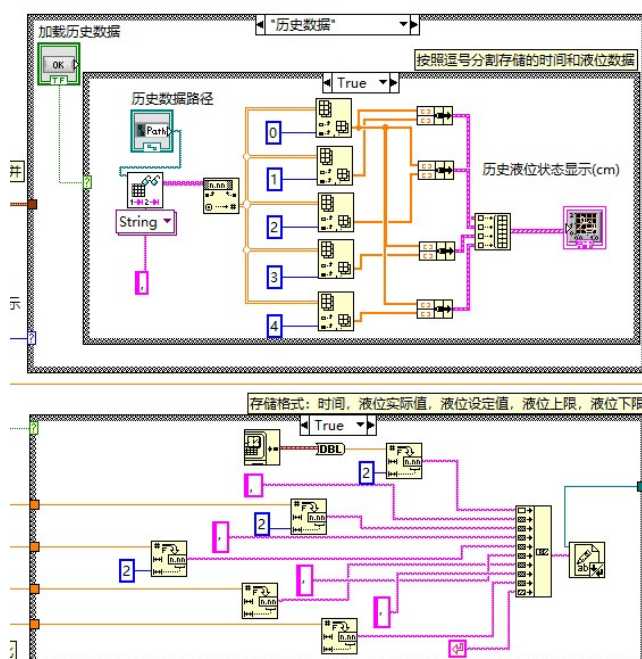


图 14

图 14 中位于下部的程序框图实现将液位的实时数据按照逗号分隔进行保存，其中每一行的第一个元素为时间，四个液位相关的变量保存在之后，所有的数据存储时需转换为字符串格式。

图 14 中位于上部的程序框图实现将保存好的元素读取并显示在 X\_Y 图上。其中需要按照列把文件数组进行分解，并将四个液位元素和时间进行两两组合再一同输出到 X-Y 图中。

#### (4) 程序细节介绍

1. 自定义/默认状态切换下 PID 参数输入情况如图 15 所示。

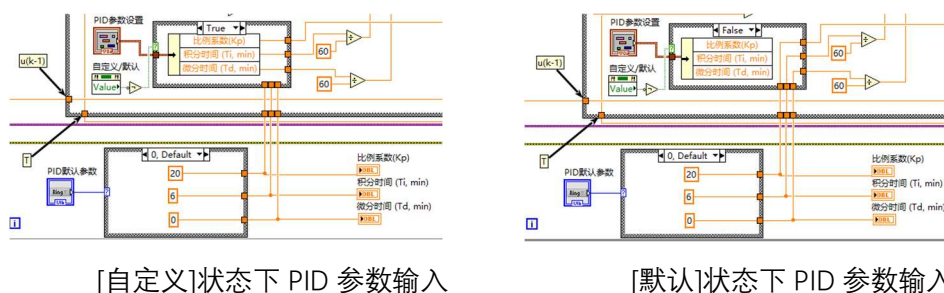


图 15

默认状态下的 PID 参数会选择保存在程序框图中的常量作为 PID 参数的输入，不同默认值的切换通过一个枚举类型完成。而在自定义模式下则选用前面板的输入控件作为 PID 参数的输入。两者的切换通过布尔型选择控件完成。

### 五、系统调试与参数整定

#### (1) 系统调试与参数整定步骤：

1. 计算机与控制仪表之间采用 USB 接口的数据采集板卡连接。
2. 检查接线是否正确，接通电源检查各仪表信号是否正常。
3. 运行控制软件。
4. 用鼠标点击界面中的“手动/自动”切换“按钮”，使系统处于“手动”工作方式，手动改变控制器输出信号大小，使调节阀处某一开度，观察水箱液位变化。
5. 当水箱液位稳定后，将调节器切换至“自动”方式，投入自动运行。
6. 按照计算法、经验法、临界比例度法、四分之一衰减曲线法等整定 PID 调节器的比例度、积分时间、微分时间，作给定值扰动实验，观察水箱液位波动情况，将 PID 参数整定至最佳状态。
7. 长时间运行控制系统，观察系统稳定性及调节精度。
8. 检查控制软件的各种功能是否正常，发现问题进行修改、完善。

#### (2) PID 参数整定过程：

##### 1. 过程响应曲线法

过程响应曲线法主要需进行四方面的工作：使过程达到稳态；对过程输入变量施加阶跃扰动；采集从扰动施加开始直到过程再次达到稳态期间输入变量以及相应输出响应的实验数据；用图解算法利用过程响应曲线获得模型参数。

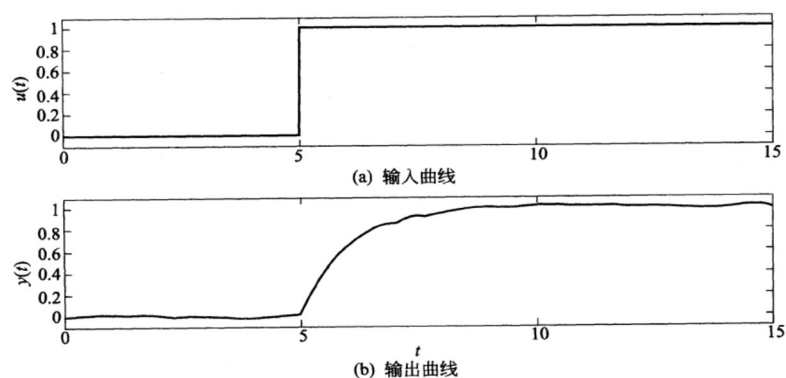


图 16

此次试验涉及的模拟系统仅包含一阶和二阶环节，比较容易进行模型建立和计算。

① 一阶惯性加纯滞后模型

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

② 二阶或  $n$  阶惯性加纯滞后模型

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(Ts + 1)^n}$$

可利用切线法确定系统的具体参数，参数确立方法如图 17 所示：

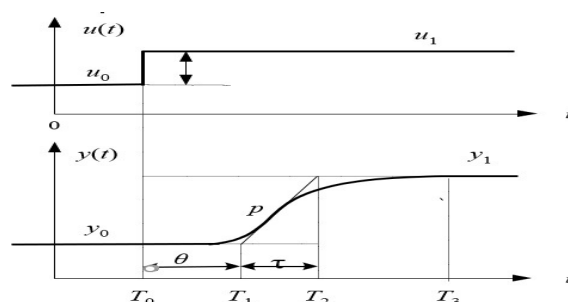


图 17

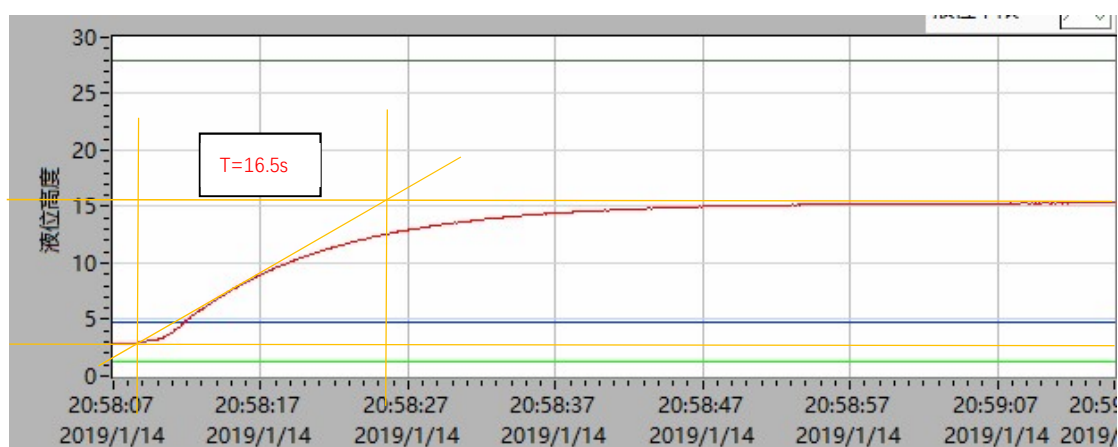


图 18

根据测试，当我们选择模拟试验箱参数  $T_1=10s$ ，系统为一阶系统时，输入阀门开度扰动为 50%，测得系统参数  $T=16.5s$ ， $\tau=2s$

2. 临界比例度法：

一个调节系统, 在阶[使用文档中的独特引言吸引读者的注意力, 或者使用此空间强调要点。要在此页面上的任何位置放置此文本框, 只需拖动它即可。]

跃干扰作用下, 出现既不发散也不衰减的等幅震荡过程, 此过程成为等幅振荡过程, 此时调节器的比例度为临界比例度 $\delta_k$ , 被调参数的工作周期为为临界周期  $T_k$ 。

临界比例度法整定 PID 参数步骤如下：  
将调节器积分时间设定为无穷大、微分时间设定为零（即  $T_i = \infty$ ,  $T_d = 0$ , 有的系统  $T_i=0$  关闭积分作用），比例度适当取值，调节系统按纯比例作用投入。稳定后，适当减小比例度，在外界干扰作用下，观察过程变化情况，寻取系统等幅振荡临界状态，得到我们所需要的临界比例度  $\delta_k$  和临界周期  $T_k$  的数值。根据临界比例度  $\delta_k$  和为临界周期  $T_k$  按表 1 计算出调节器参数整定值。

调节规律	调节器参数		
	比例度 $\delta$ ，单位：%	积分时间 $T_i$ ，单位：min	微分时间 $T_d$ ，单位：min
P	$2 \times \delta_k$	---	---
PI	$2.2 \times \delta_k$	$0.85 \times T_k$	---
PID	$1.7 \times \delta_k$	$0.5 \times T_k$	$0.125 \times T_k$

表 1

3. 四分之一衰减曲线法：

纯比例度作用下的自动调节系统, 在比例度逐渐减小时, 出现 4：1 衰减振荡过程, 此时比例度为 4：1 衰减比例度  $\delta_s$ , 两个相邻同向波峰之间的距离为 4:1 衰减操作周期  $T_s$ 。

四分之一衰减曲线法整定 PID 参数步骤如下：  
将调节器积分时间设定为无穷大、微分时间设定为零（即  $T_i = \infty$ ,  $T_d = 0$ ），比例度适当取值，调节系统按纯比例作用投入。系统稳定后，逐步减小比例度，根据工艺操作的许可程度加 2%-3%的干扰，观察调节过程变化情况，直到调节过程变化达到规定的 4：1 衰减比为止，得到 4：1 衰减情况下的比例度  $\delta_s$  和衰减操作周期  $T_s$ 。根据  $\delta_s$  和  $T_s$  值按表 2 计算出调节器整定参数。

调节规律	调节器参数		
	比例度 $\delta$ ，单位：%	积分时间 $T_i$ ，单位：min	微分时间 $T_d$ ，单位：min
P	$\delta_s$	---	---
PI	$0.2 \times \delta_s$	$0.5 \times T_s$	---
PID	$0.8 \times \delta_s$	$0.3 \times T_s$	$0.1 \times T_s$

表 2

经过整定，选取 PID 参数  $K_p=56$ ,  $T_i=23min$ ,  $T_d=1min$ ，液位调节模拟箱上对应  $T_1=10s$  的系统在此参数下拥有良好的响应曲线，当要求给定值变化 10cm 时，超调量约为 0.1cm，超调量 1%。

## 六、总结

在本次仪器仪表综合实践能力训练中，我了解了 IDAQ-USB-6009 数据采集板的工作原理，了解了数据采集板的校验方法。对变送器进行零点迁移和量程调整的方法有了实际应用，进一步理解了测量传感器、变送器、电动调节阀、PID 调节器等工作原理和应用方法。

通过课程的学习我进一步理解控制理论中控制系统的工程建模、控制系统分析、控制系统的综合、掌握了控制系统设计与控制仪表选型的基本方法；掌握系统集成、仪表调校、系统调试等等工程控制领域的基本实践技能，加强了对仪器仪表原理及应用的认识，提高了工程意识和实践技能。经过一个学期的实践训练，我可以初步做到分析影响控制系统的各种因素，论证所提解决方案的合理性，初步具备了控制系统设计能力。

同时通过实际应用 LabVIEW 开发实际的控制系统，我对控制系统的整体设计，设计细节和流程，注意事项等问题产生了基本的了解和认识。在自己设计交互界面和程序逻辑的过程中，不断认识了系统设计的复杂性和面临的种种问题。在这种情况下，我对硬件和软件开发的流程和方法都有了进一步的加强。

综上所述，在本次训练中，我不仅加深了对计算机控制系统和工业控制系统的设计特点和方法的了解，熟悉了控制系统的现场调试方法，掌握了 PID 系统的软件编程方法，也掌握了控制系统 PID 参数的整定方法。非常感谢能够有这样一个机会使我获得这样的提升和收获，我会在以后的日子里继续努力，争取成为一个拥有扎实专业能力的工程技术人才。

## 七、附录

### 附录 1 参考文献

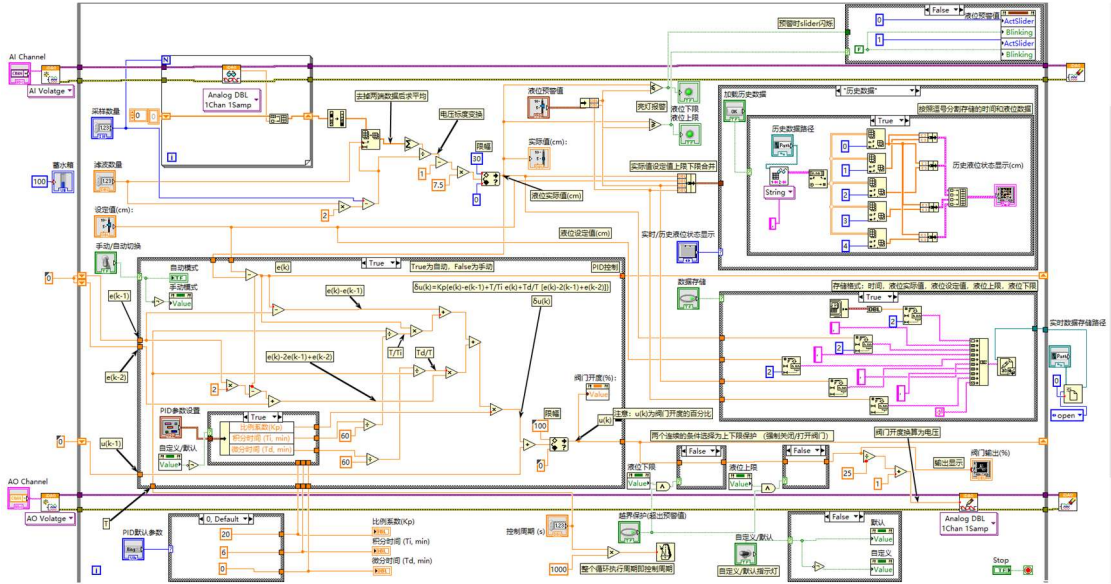
- [1] John Essick. 邓科 等译. 精通 LabVIEW 教程—由浅入深的范例学习 (第二版), 2017
- [2]FD3051 智能压力/差压变送器使用说明书, 淄博福瑞德测控系统有限公司
- [3]电动执行机构使用说明书, 上海奥罗森阀门制造有限公司
- [4]SFY-78 便携式压力校验仪使用说明书, 杭州中创电子有限公司
- [5]VICTOR78 过程万用表使用说明书, 深圳胜利高电子科技有限公司
- [6]李亚芬. 过程控制系统及仪表 (第三版). 大连: 大连理工大学, 2010.
- [7]丁炜. 过程控制仪表及装置 (第三版). 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [8]林德杰. 过程控制仪表及控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9]周泽魁 等. 控制仪表及计算机控制装置. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [10] 智能自整定 PID 调节控制仪使用手册, 福建上润精密仪器有限公司



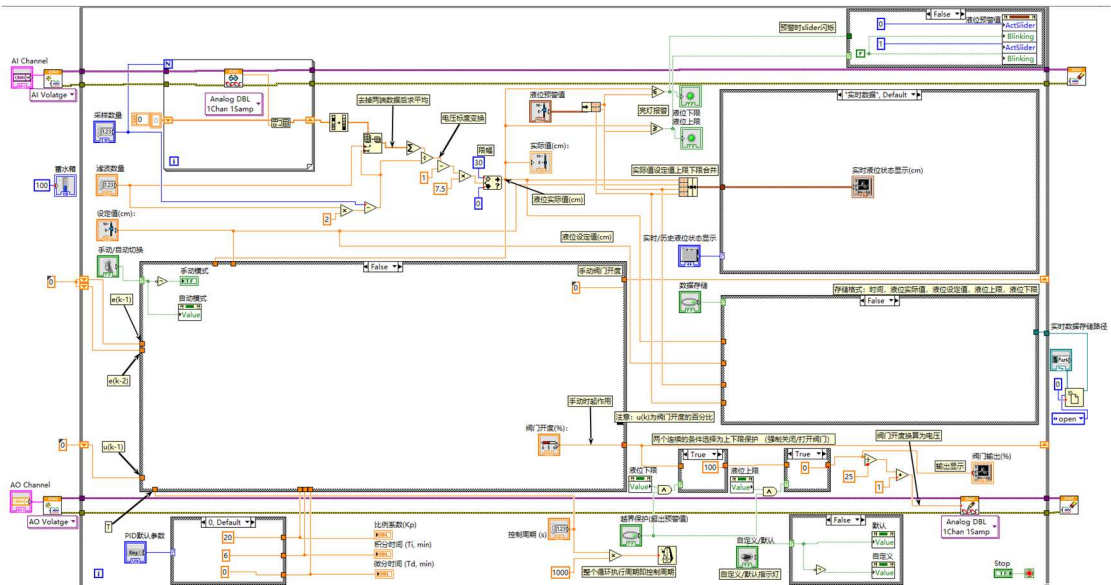
附录 2 完整程序框图

经过设计，本程序的程序面板中的内容恰好可在分辨率为 1920\*1080 的屏幕中以完整一屏进行显示。通过两张图片，几乎可以完整呈现程序面板条件分支结构不同情况下的程序逻辑，在此附上两张程序图，每张图片对应的条件分支情况如小标题所示。

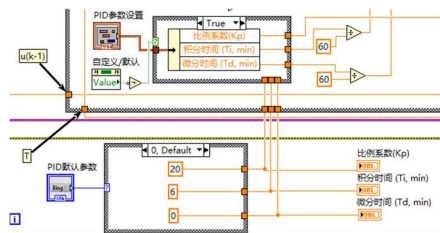
(1) 程序面板-条件分支：PID 控制-历史数据显示-实时数据存储-无越界保护



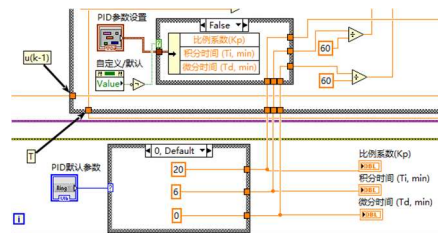
(2) 程序面板-条件分支：手动控制-实时数据显示-无实时数据存储-越界保护



(3) 补充：自定义/默认状态切换下 PID 参数输入情况



[自定义]状态下 PID 参数输入

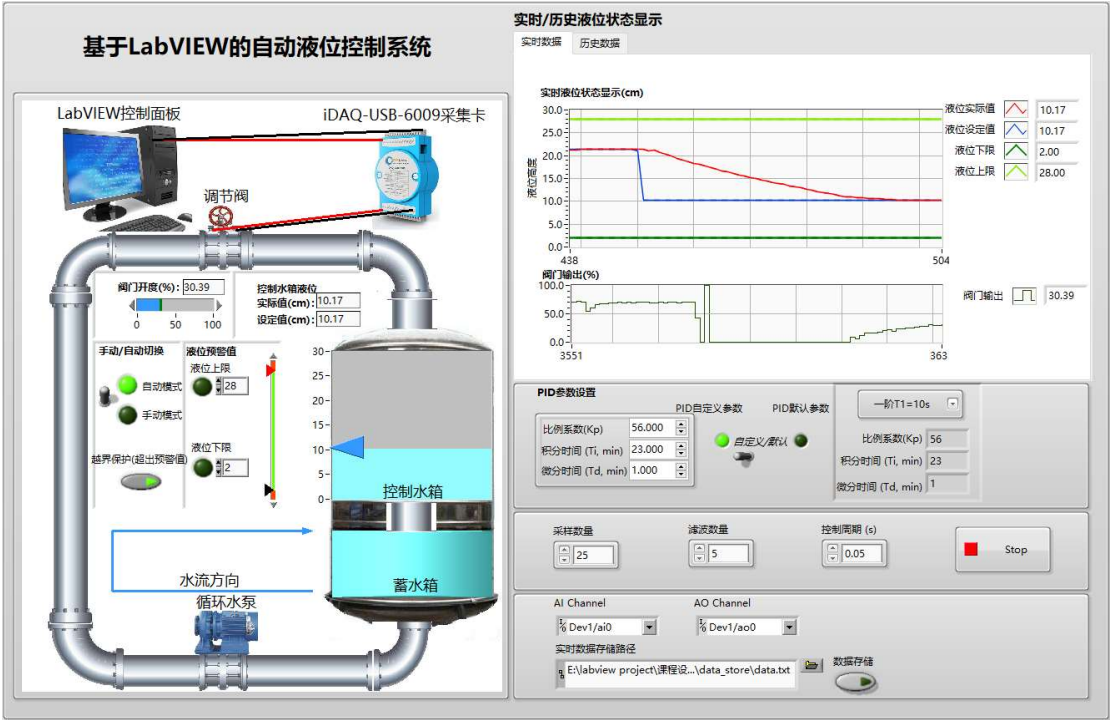


[默认]状态下 PID 参数输入



附录 3 前面板示例

(1) 实时数据显示界面



(2) 历史数据显示界面

