



南京工业大学
NANJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

《过程控制工程》课程设计

基于 simulink 的三容水箱液位控制仿真

本 科 生 姓 名: 李泽中

学 号: 1802160115

指 导 教 师: 薄翠梅 教授

专 业 名 称: 自动化

二〇一九年三月

摘 要

本文主要介绍和讨论了武汉大学硕士毕业论文的 \LaTeX 模板. 指明了编译方法, 强调了公式排版的一些细节问题, 也指出了一些常见的排版错误.

关键词: 毕业论文, \LaTeX , 模板, XeLaTeX

目 录

摘要	I
1 基于 simulink 的 PID 半经验法参数整定	1
1.1 半经验法概述	1
1.2 临界比例度法	2
1.3 衰减曲线法	3
1.4 整定结果的分析和改进	4
2 基于 simulink 的三容水箱液位控制仿真	5
2.1 对于三容水箱系统的机理建模	5
2.2 基于 simulink 的三容水箱液位控制仿真	6
参考文献	9
致谢	11

1 基于 simulink 的 PID 半经验法参数整定

1.1 半经验法概述

所谓 PID 参数的整定，就是通过选择合适的比例系数 K_p 、积分时间常数 T_i 和微分时间 T_d ，使 PID 控制器能够将系统调节到最佳的运行状态。PID 参数的整定方法主要有：经验整定法，半经验法和理论算法。其中，半经验法采用单纯 P 作用先行搜索，获得所需衰减的响应曲线，然后根据相应参数，利用半经验公式计算出 PID 控制器的参数。工程整定的半经验法不需要获得调节对象的准确动态特性，直接在闭合的调节回路中进行整定，方法简单、计算方便、容易掌握，适合在工程实际中应用。

图1.1是基于 simulink 的 PID 半经验法整定实例，其中 G_p 模块的传递函数为： $\frac{3.5}{10s^2+7s+1}$ 。在进行半经验法 PID 参数整定之前，我们做了以下两点准备工作：

- 考虑到 matlab 的绘图函数拥有比 simulink 中 scope 更强的绘图能力，我们在系统中添加了“simout”模块，用以将系统的阶跃响应数据以时间序列的形式传输至 matlab 中的 workspace，方便曲线绘制
- 为了使响应曲线更加完整，将仿真时间调至“100s”

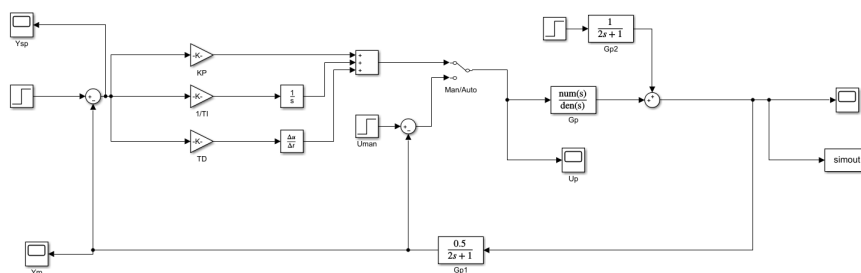


图 1.1: 基于 *simulink* 的 PID 半经验法参数整定实例

将模块 K_p 的值调至 1，模块 $\frac{1}{T_i}$ 和 T_d 调至 0，进行仿真，并用 matlab 的 plot 函数绘制出未加 PID 的系统的响应曲线。

图1.2显示了未加 PID 控制器前的响应曲线。从图中可以看出，系统能够稳定运行，但存在稳态误差。下文将分别选用 PI 和 PID 控制器，并采用临界比例度法和衰减曲线法两种半经验方法进行参数整定，并对整定结果进行分析和改进，希望通过 PID 校正，能够使系统消除稳态误差，并且改善其快速性。

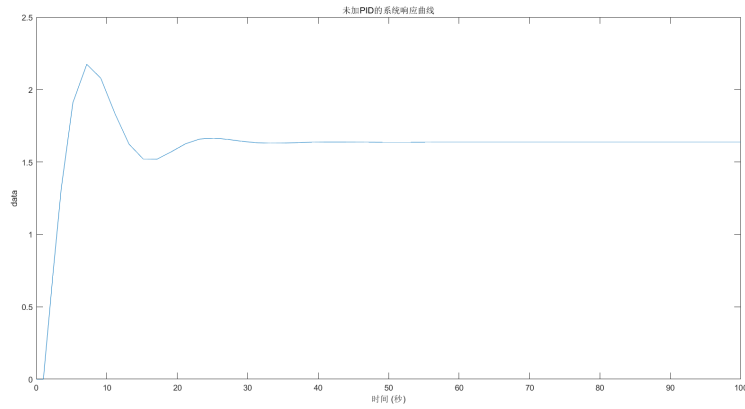


图 1.2: 未加 PID 响应曲线

1.2 临界比例度法

临界比例度法又称 Ziegler-Nichols 整定法。调整方法是：先调整比例度，使过渡过程为等幅振荡，这时的比例度为临界比例度 δ_k ，振荡周期为临界振荡周期 T_k ，可按表1.1整定控制器参数。

表 1.1: 临界比例度法整定控制器参数

控制作用	临界比例度法		
	$\delta/\%$	T_i	T_d
P	$2\delta_k$		
PI	$2.2\delta_k$	$0.85T_k$	
PID	$1.7\delta_k$	$0.50T_k$	$0.125T_k$

具体整定过程如下：

- 在 K_p 模块中将比例系数 K_p 设置一个较大的初值 100 并运行（注意：在实际场合进行 PID 控制器参数整定时绝对不能将比例系数 K_p 预设一个较大的值，在仿真过程中采用本方法可以迅速找到合适的 K_p ），在 matlab 中用 plot 函数绘制本次响应曲线，曲线呈发散振荡形式
- 采用数学中的二分法进行搜索，即：将比例系数 K_p 逐次减半（ $K_p=50, 25, 12.5, 6.25 \dots$ ），直到曲线等幅振荡
- 记录此时的比例系数 $K_p=5.6$ 和临界振荡周期 $T_k=9.3593$ ，根据 $K_p=5.6$ 求得临界比例度 $\delta_k = \frac{1}{K_p} \times 100\% = 17.85\%$
- 根据表1.1记录得到控制作用为 PID 时 $K_p = \frac{1}{1.7 \times 17.85\%} = 3.29544, \frac{1}{T_i} = \frac{1}{0.5 \times 9.3593} = 0.2137, T_d = 0.125 \times 9.3593 = 1.16991$ ，控制作用为 PI 时 $K_p = \frac{1}{2.2 \times 17.85\%} = 2.5454, \frac{1}{T_i} = \frac{1}{0.85 \times 9.3593} = 0.1257$

图1.3显示了采用临界比例度法分别整定 PID 和 PI 控制作用参数后的系统响应曲线，从图中可以明显看出：得益于微分作用的加入，PID 曲线的上升时间略短，快速性优于 PI 控制；但两者的超调量达到了稳态值的 75%，并且最终达到稳态的时间过长，大约在 70s 左右。临界比例度法的参数整定结果虽然可以令系统消除稳态误差，但快速性和超调量两方面仍有待提高。

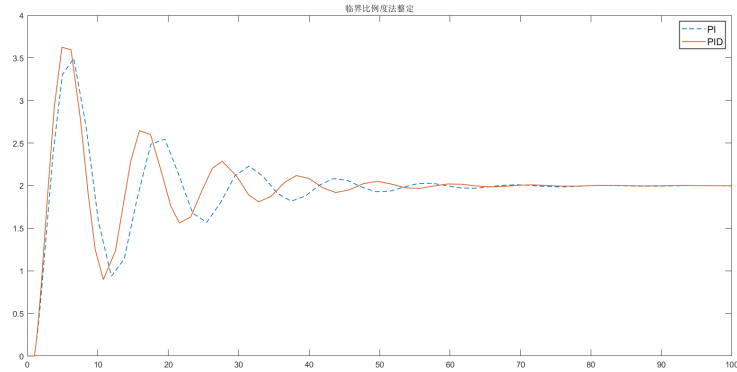


图 1.3: 临界比例度法整定结果

1.3 衰减曲线法

衰减曲线法和临界比例度法具有类似的调整方式，即通过调整比例系数 K_p ，使控制系统过渡过程响应曲线的衰减比为 10: 1（随动控制系统），得到上升时间 t_r 或 4: 1（定制控制系统），得到系统的振荡周期 T_p ，此时比例度为 δ_s ，按表1.1整定 P，PI 或 PID 控制器的参数。

表 1.2: 衰减曲线法整定控制器参数

控制作用	衰减曲线法		
	$\delta/\%$	T_i	T_d
P	δ_s		
PI	$1.2\delta_s$	$2t_r$ 或 $0.5T_p$	
PID	$0.8\delta_s$	$1.2t_r$ 或 T_p	$0.4t_r$ 或 $0.1T_p$

具体整定过程如下：

- 对于同一系统，我们通过临界比例度法已经得到可以使产生等幅振荡的比例系数 $K_p=5.6$ ，此时等幅振荡的曲线衰减比为 1: 1（衰减比定义为两个相邻同方向幅值之比，在本例中视为第一个波峰峰值与稳态值之差同第二个波峰峰值与稳态值之差的比值）。
- 继续运用二分法，小范围调整比例系数 K_p 的值，得到产生衰减比 4: 1 的 $K_p=2.255$ ，记录此时的振荡周期 $T_p=13.3309$
- 根据表1.2记录得到控制作用为 PID 时 $K_p = \frac{1}{0.8 \times \frac{1}{2.255}} = 2.81875, \frac{1}{T_i} = \frac{1}{0.3 \times 13.3309} = 0.250046, T_d =$

$0.1 \times 13.3309 = 1.33309$; 控制作用为 PI 时, $K_p = \frac{1}{1.2 \times \frac{1}{2.255}} = 1.87917, \frac{1}{T_i} = \frac{1}{0.5 \times 13.3309} = 0.150027$

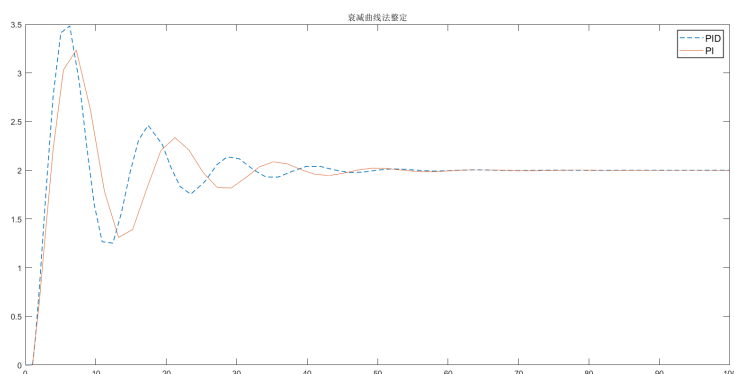


图 1.4: 衰减曲线法整定结果

图1.4显示了采用衰减曲线法分别整定 PID 和 PI 控制作用参数后的系统响应曲线，其中 PI 的超调量为稳态值的 62.5%，稳态时间在 65s 左右，较之临界比例度法的整定过后系统的快速性和稳定性有所提升，这主要得益于采用衰减曲线法所计算出的比例系数 K_p 有所减小，积分时间 T_i 和 T_d 有所增大。因此，我们沿用此种改进思路，根据人工经验，继续适当的减小比例系数 K_p ，增大积分时间 T_i 和 T_d ，最终得出了改进后的整定结果（ $K_p = 1.3, \frac{1}{T_i} = 0.2, T_d = 2.5$ ），如图1.5。

1.4 整定结果的分析和改进

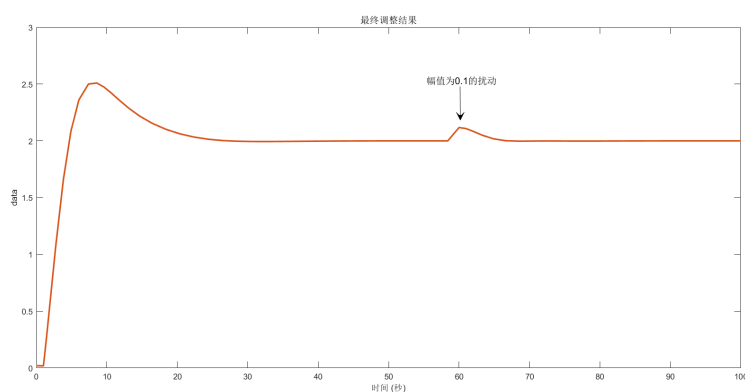


图 1.5: 最终整定结果

图1.5显示：改进后的超调量为稳态值的 50%，并且系统进入稳态的时间在 30s 左右，其快速性和稳定性较之前结果有明显的提升。在 60s 时添加一个幅值为 0.1 的带限白噪声，系统在不到 10s 后又重新回到稳态，证明改进后的整定结果使系统具有较强的抗扰动性。本次实验结果表明，半经验法与人工经验最终修正的结合，是整定 PID 控制器参数的有效方法。

2 基于 simulink 的三容水箱液位控制仿真

2.1 对于三容水箱系统的机理建模

根据过程内在机理，应用物料和能量平衡及有关的化学、物理规律建立过程模型的方法是机理建模的方法，又称为过程动态学方法。其特点是建立的模型物理概念清晰、准确，可给出系统输入变量、输出变量、状态变量之间的关系。

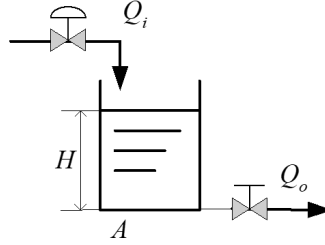


图 2.1: 单容水箱系统

图2.1是一个典型的单容水箱系统。根据物料守恒和流体运动学知识，我们可以建立单容水箱系统的数学模型：

$$\begin{cases} A \frac{dH}{dt} = Q_i - Q_o \\ Q_o = k\sqrt{H} \end{cases} \quad (2.1)$$

其中： Q_i, Q_o 分别表示阀门后的流体流量， H 表示液位高度， A 表示水箱的横截面积。我们可以据此建立三容水箱系统（图2.2）的数学模型：

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -Q_{13} \\ Q_{32} - Q_{20} \\ Q_{13} - Q_{32} \end{bmatrix} + \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1(h, Q) \\ \eta_2(h, Q) \\ \eta_3(h, Q) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$Q_{13} = aZ_1 S_p \text{sign}(h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|}$$

$$Q_{32} = aZ_3 S_p \text{sign}(h_3 - h_2) \sqrt{2g|h_3 - h_2|}$$

$$Q_{20} = aZ_2 S_p \sqrt{2gh_2}$$

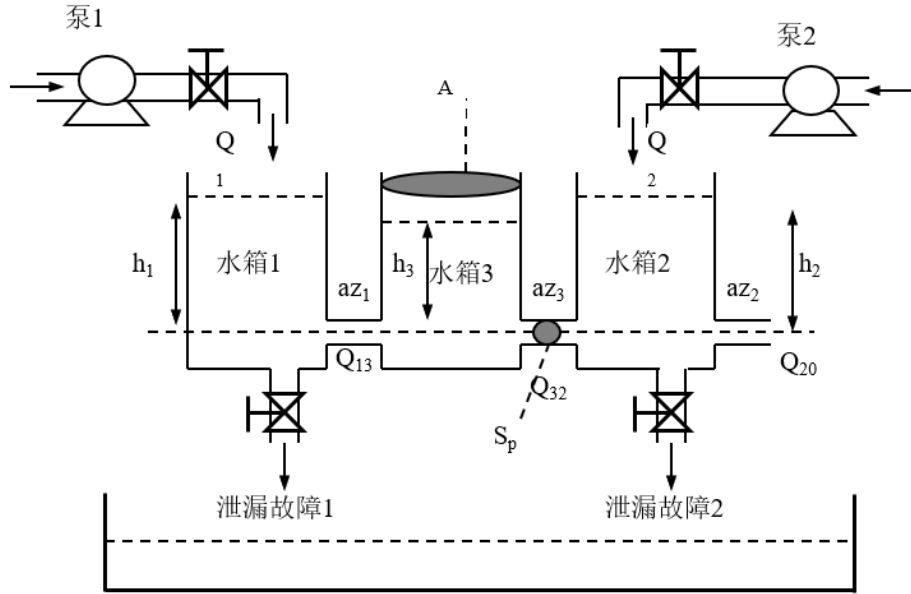


图 2.2: 三容水箱系统

其中 h_i 表示液位高度 (cm) $i = 1, 2, 3$, Q_{13}, Q_{32} 表示水箱之间的流速, Q_1, Q_2 表示进水流速 (cm^3/s); A 表示水箱的横截面积, S_p 表示连接管的横截面积, aZ_i 表示水流系数, g 表示重力加速度 (cm/s^2). $\text{sign}()$ 表示符号函数。实验模型的技术参数数据: $A = 154\text{cm}^2$, $S_p = 0.5\text{cm}^2$, $aZ_1 = 0.45$, $aZ_2 = 0.61$, $aZ_3 = 0.46$, $Q_{1\max} = Q_{2\max} = 100\text{cm}^3/\text{s}$, $h_{\max} = 62\text{cm}$, $= 980 (\text{cm}/\text{s}^2)$

2.2 基于 simulink 的三容水箱液位控制仿真

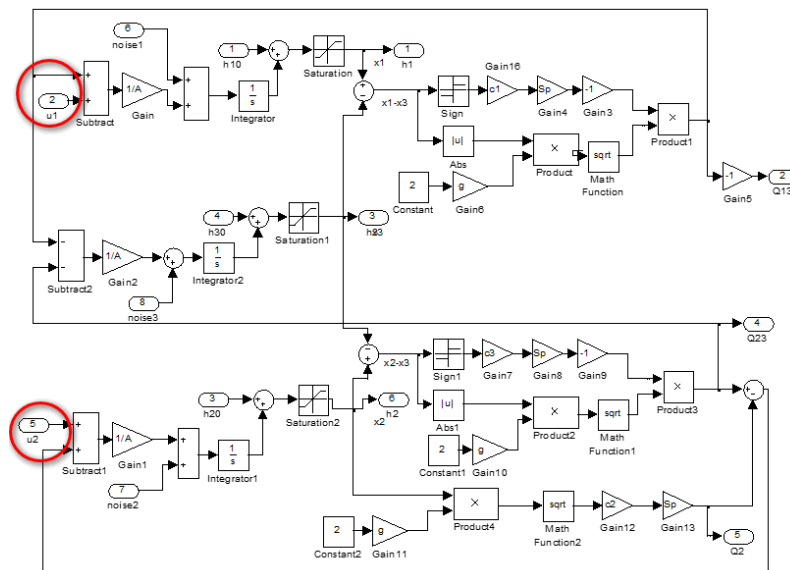


图 2.3: 参考文献中的三容水箱系统 simulink 模型搭建

图2.3是参考文献中对于三水箱液位系统的 simulink 搭建,在阅读本图时,我们对 PID 模块(控制器)应该放置的位置产生了疑惑:图2.3中用两个红色圆圈标记的两路信号分别是 u_1 (即图2.2中的 Q_1 , 量纲为 cm^3/s) 与 h_1 (量纲为 cm) 之差, u_2 (即图2.2中的 Q_2 , 量纲为 cm^3/s) 与 h_2 (量纲为 cm) 之差. 我们对于两个量纲不同的物理量作差的画法感到有些困惑, 并且本系统需要实现的要求是: 用户设定一号和二号水箱的设定值, 通过 PID 控制器控制一, 二号水箱的阀门开度, 进而使系统最终和用户的设定值无静差. 在参考文献的画法中, PID 模块究竟应该放置在什么位置? 控制器的输出与流量又具有怎样的关系? 这是我们需要解决的关键性问题。

经过思考后, 我们重新审视了 PID 控制器的核心: 即控制器的输出一定是偏差信号 (在本系统中指用户对于一, 二号水箱的期望设定值与实际液位值的差), 所以 PID 模块一定要放在偏差信号后面, 至于 PID 模块的输出, 我们可以完全理解为是一个电信号, 这个电信号包含了 PID 模块校正的控制信息, 至于执行器(阀门)是如何解读这一信号的, 我们觉得对于仿真结果完全没有任何影响. 所以我们以参考文献的画法为基础, 对红色标记的区域做了微小改动. 如图2.4.

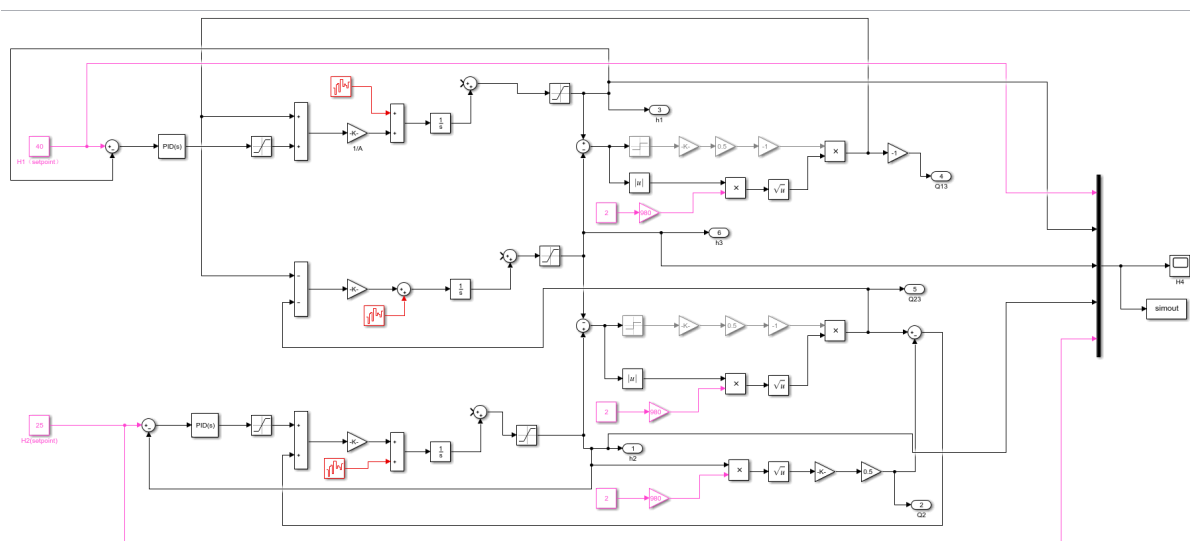


图 2.4: 三容水箱系统 simulink 模型搭建

在未加扰动的情况下, 设定 $H_1(setpoint) = 40(cm)$, $H_2(setpoint) = 25(cm)$, H_1, H_2, H_3 三个水箱的初始液位是 0. 利用半经验法和人工经验最终修正调整图2.4中两个 PID 的参数, 我们最终得到一号水箱 PID 的参数为: 比例系数 $K_p = 20$, $\frac{1}{T_i} = 0.44$, $T_d = 20$, 二号随想 PID 的参数为: 比例系数 $K_p = 20$, $\frac{1}{T_i} = 0.55$, $T_d = 20$. 系统响应如图2.5.

三水箱系统是一个大时滞, 大惯性的系统. 从图中可以明显看出: 一号水箱具有 50% 的超调量, 在 250s 左右完全消除稳态误差; 二号水箱具有 40% 的超调量, 在 200s 左右基本消除稳态误差, 对于工业级系统而言, 本次整定的效果较好. 为了测试 PID 校正后系统的抗干扰性, 我们为每个水箱都添加了不同幅度的带限白噪声 (采样时间为 0.5s): 一号水箱带限白噪声幅值 $= 0.35cm$,

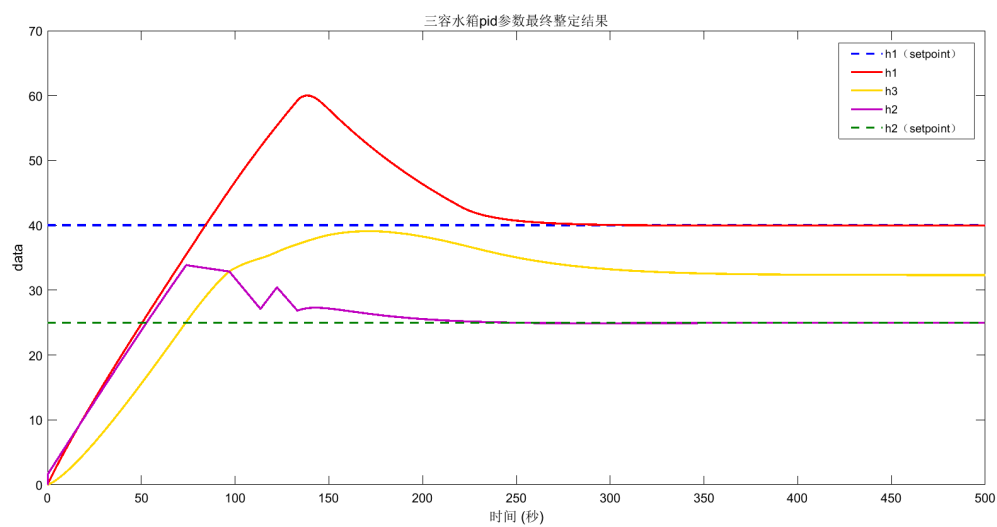


图 2.5: 未加噪声的三容水箱系统最终整定

二号水箱带限白噪声幅值 $=0.25\text{cm}$, 三号水箱带限白噪声幅值 $=0.65\text{cm}$. 系统响应结果如图2.6.

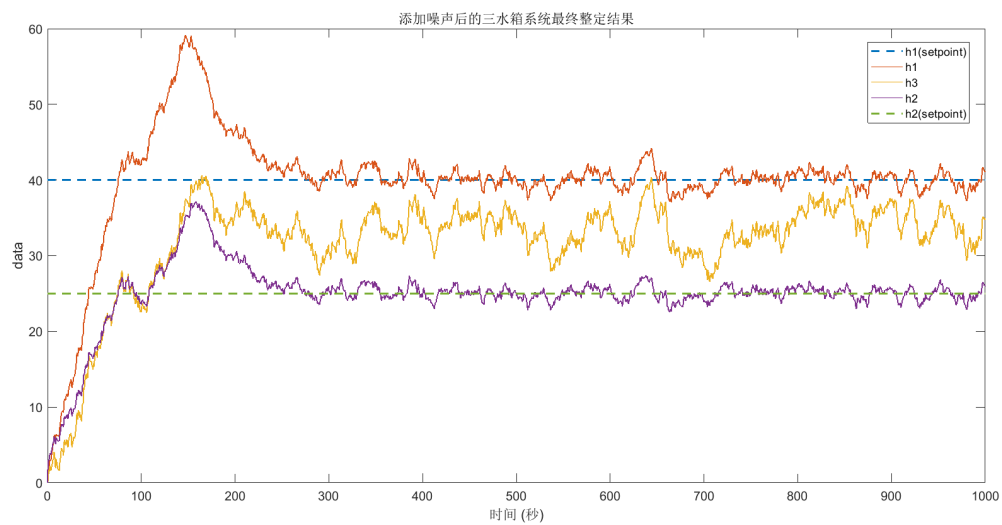


图 2.6: 添加噪声后的三容水箱系统最终整定

参考文献

- [1] 作者, 文章题目, 期刊名, 年份 (期数): 起止页码
- [2] 作者, 书名, 年份, 版次, 出版地: 出版单位, 起止页码
- [3] 邓建松等, 《 $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ 科技排版指南》, 科学出版社
- [4] 吴凌云, 《CTeX FAQ (常见问题集)》, *Version 0.4*, June 21, 2004
- [5] Herbert Voß, Mathmode, <http://www.tex.ac.uk/ctan/info/math/voss/mathmode/Mathmode.pdf>.

致 谢

感谢你, 感谢他和她, 感谢大家.

武汉大学学位论文使用授权协议书

本学位论文作者愿意遵守武汉大学关于保存、使用学位论文的管理办法及规定, 即: 学校有权保留学位论文的印刷本和电子版, 并提供文献检索与阅览服务; 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文; 在以教学与科研服务为目的前提下, 学校可以在校园网内公布部分及全部内容.

- 1、 在本论文提交当年, 同意在校园网内以及中国高等教育文献保障系统 (CALIS) 高校学位论文系统提供查询及前十六页浏览服务.
- 2、 在本论文提交 ☐ 当年/ ☐ 一年/ ☐ 两年 / ☐ 三年/ ☐ 五年以后, 同意在校园网内允许读者在线浏览并下载全文, 学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务.(保密论文解密后遵守此规定)

论文作者 (签名): _____

学 号: _____

学 院: _____

日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

