

## 实验二：PID 控制器设计与参数整定 实验报告

二〇二一年十二月

# 目录

一 实验目的.....	1
二 实验设备 .....	1
三 实验内容及数据记录.....	1
3.1 PID 单回路控制系统设计.....	1
3.1.1 工艺分析.....	1
3.1.2 确定被控量, 控制量, 干扰量, 检测量.....	2
3.1.3 确定控制器 .....	2
3.1.4 选定控制系统.....	2
3.2 PID 参数整定 .....	3
3.2.1 比例增益 $K_c$ 作用 .....	3
3.2.2 积分时间常数 $T_I$ 作用.....	4
3.2.3 微分时间常数 $T_D$ 作用 .....	5
3.2.4 控制器参数整定 .....	6
3.3 针对不同水箱 PID 参数的研究 .....	8
3.3.1 水箱模型辨识.....	8
3.3.2 不同水箱 PID 参数讨论.....	9
四 实验结论 .....	10

## 一 实验目的

- 掌握单回路系统分析和设计方法
- 掌握 PID 控制器各参数的控制作用与整定方式
- 理解对象和控制器变化对控制效果的影响

## 二 实验设备

- MATLAB
- Portal 15.1
- Siemens S7-300

## 三 实验内容及数据记录

### 3.1 PID 单回路控制系统设计

#### 3.1.1 工艺分析

若要对水箱液位进行控制，需要先对其工艺进行相关分析，实验室水箱效果图如图 3-1 所示：

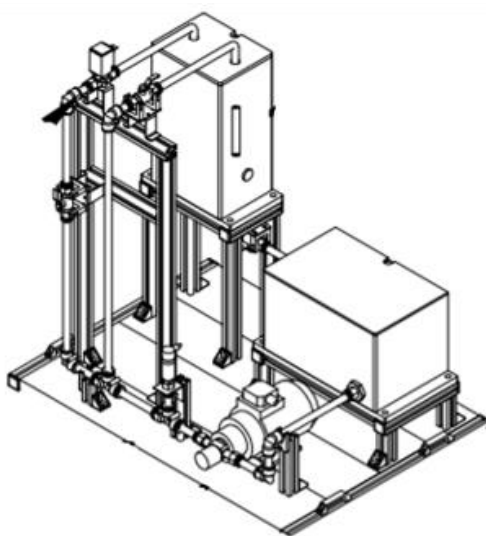


图 3-1 水箱效果图

在储水箱中加入一定量的水，通过变频磁力泵将水流通过管道打入水箱当中，

在进入水箱前，有由比例阀和手动阀控制的并行水流管道，用于控制管道内的水流量。水流通过管道流入水箱形成相应的液位高度，在水箱侧面留有阀门开口，水能从此处再重新流入储水箱，以此循环往复。除此之外，设备还装有压力检测变送仪表用于检测泵口流体压力，装备液位检测变送仪表用于检测水箱内的液位实际高度。

### 3.1.2 确定被控量，控制量，干扰量，检测量

通过对系统的工艺分析，可以对控制系统的被控量，控制量，干扰量以及检测量进行确定。

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。因此水箱液位为被控量。

当选择变频电磁泵作为执行器时，相应控制量为泵口的出水流量，选择比例阀为控制器时，控制量为阀门后的水流量。

考虑到系统存在的干扰，主要干扰是管道压力的波动，以及手工阀内的液体流量，水箱向储水箱的水流量。

检测量可以根据检测装置确定主要包括泵口的流体压力以及水箱内的液位高度。

### 3.1.3 确定控制器

在实验一的系统辨识过程中可以发现单容水箱是典型的一阶系统，由于控制要求包括调节精度，可以采用 PID 控制器对液位进行调整，在保证控制精度的同时要求较好的动态特性。

### 3.1.4 选定控制系统

此次实验系统存在两个检测变送装置，两个执行器，可以设计出四种单回路控制系统如下：

- 液位-比例阀单回路控制系统
- 液位-变频磁力泵单回路控制系统
- 压力-比例阀单回路控制系统
- 压力-变频磁力泵单回路控制系统

由于此次实验主要针对被控量为水箱液位，则选用液位变送器作为检测装置，在实验中发现比例阀存在滞后性大的问题控制效果不如变频磁力泵及时，因此选

用变频磁力泵作为执行器，综上可以绘制出控制系统框图如图 3-2 所示。

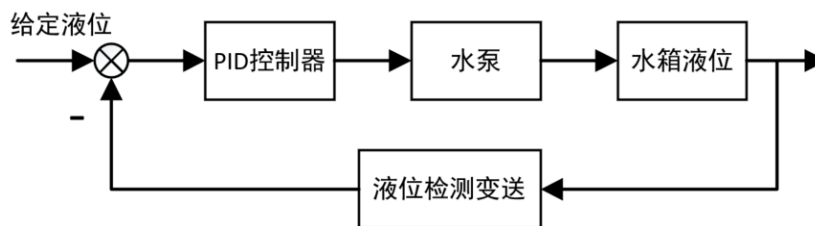


图 3-2 液位-变频磁力泵单回路控制系统

## 3.2 PID 参数整定

在课程学习的过程中，针对 PID 参数整定学习了临界比例度法、衰减曲线法、反应曲线法等，但是在实际过程中由于现场环境以及设备影响，以上方法均无法得到较好的控制效果，最终选用经验法进行 PID 参数的相关整定。

针对 PID 控制器，其输出表达式为：

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_c T_D \frac{de(t)}{dt}$$

通过调节参数  $K_c$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  使实际水箱液位曲线尽可能符合期望效果。

### 3.2.1 比例增益 $K_c$ 作用

为了探讨比例增益  $K_c$  对控制效果的影响，关闭 PID 控制器的积分项以及微分项，选取  $K_c$  值分别为 10000, 40000, 60000, 100000 时对系统输出进行相关分析，其结果图如图 3-3 所示。

通过实验可以发现，当  $K_c$  取 10000 时，系统无明显波动，但是稳态误差较大，不符合期望曲线，随着  $K_c$  的增大，即  $K_c$  取 40000, 60000 时，稳态误差明显减小，但是仍不能减小稳态误差，当  $K_c$  取到 100000 时，系统开始出现振荡现象即系统稳定性受到了比例增益增大的影响。

根据以上现象可以得出以下结论：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。

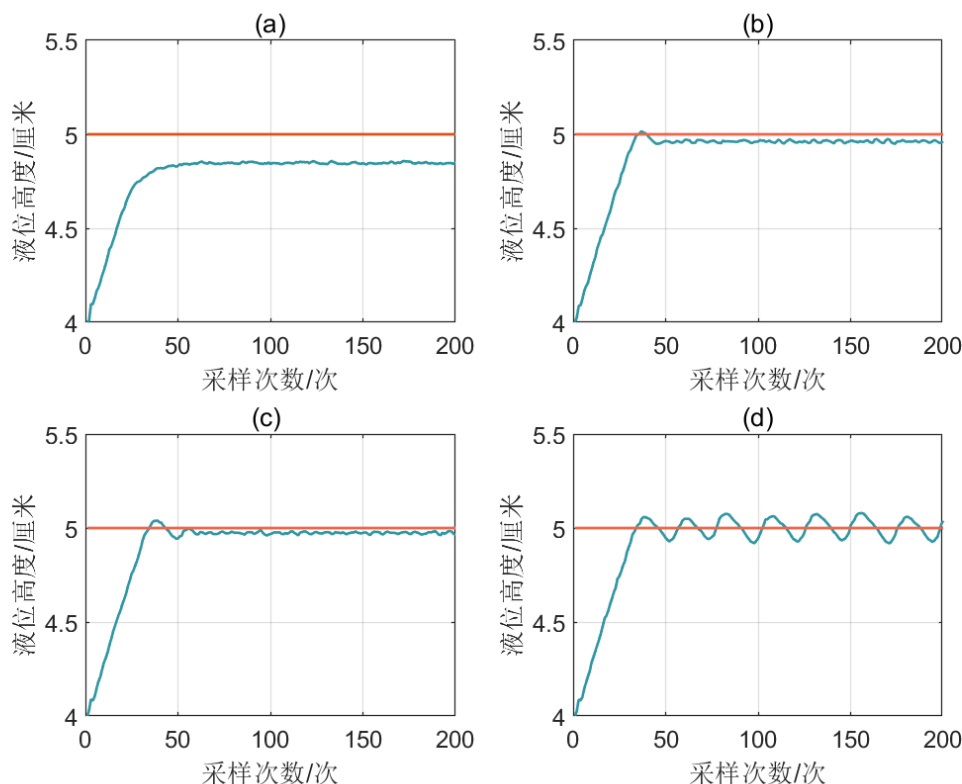


图 3-3 P 控制 (a)  $K_c = 10000$ , (b)  $K_c = 40000$ , (c)  $K_c = 60000$ , (d)  $K_c = 100000$

### 3.2.2 积分时间常数 $T_I$ 作用

在 3.2.1 的实验过程中发现，当 $K_c$ 取值为 20000 时系统稳态误差较少且超调较小，选用 20000 的比例增益，通过设计不同积分时间常数的 PI 控制器来分析积分时间常数 $T_I$ 的作用，分别取 $T_I$ 值为 4s, 6s, 8s, 10s 对系统输出进行相关分析，其结果如图 3-4 所示。

通过实验结果可以发现，当 $T_I = 4s$ 时，系统存在振荡， $T_I = 6s$ 系统存在超调但是动态性能相比之前有所改善，当 $T_I = 8s$ 时，系统动态性能进一步改善，当 $T_I = 10s$ 时，也就意味着积分项作用进一步减弱，调节时间增长但是系统超调量减小以及峰值大小相应减小。

根据以上现象可以得出以下结论：比例积分控制是一种无差控制，可以实现将稳态误差调整为 0，当固定比例增益时，随着积分时间常数的减小，积分项作用增大，系统相应速度加快，但是随之超调量增加，调节时间增加甚至可能导致系统等幅振荡或出现不稳定现象。

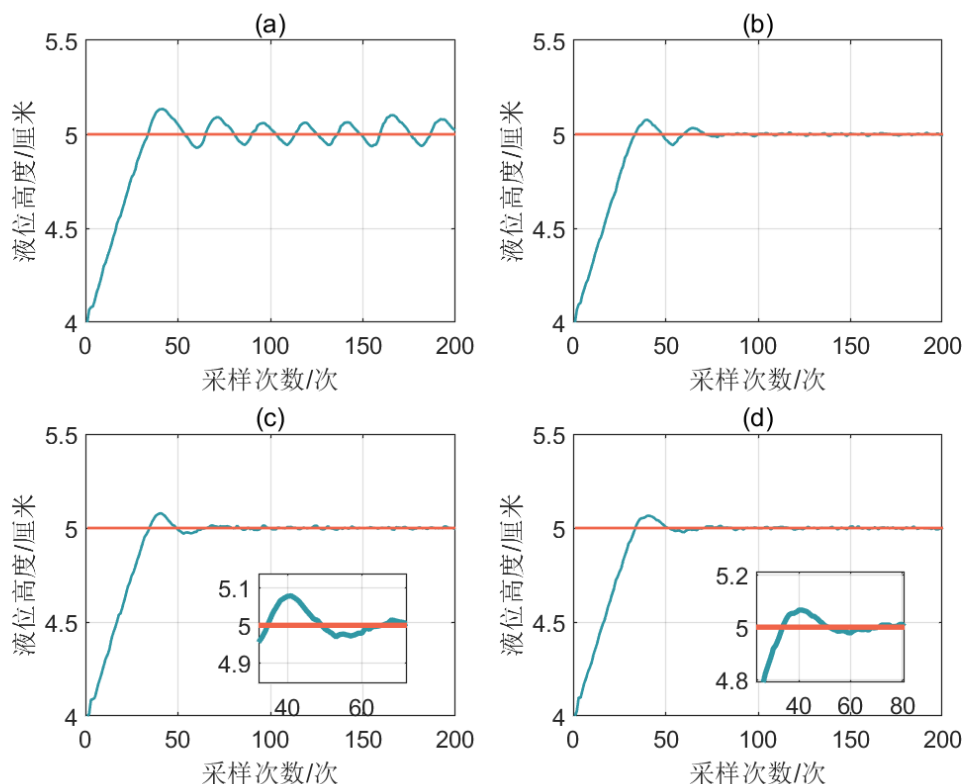


图 3-4 PI 控制 $K_c=20000$  (a)  $T_i = 4s$ , (b)  $T_i = 6s$ , (c)  $T_i = 8s$ , (d)  $T_i = 10s$

### 3.2.3 微分时间常数 $T_D$ 作用

在 3.2.2 的实验过程中发现，当 $K_I$ 取值为 7.5s 时系统能够消除稳态误差较少且超调较小，但是不满足衰减比为 4: 1 的理想曲线，因此选用 20000 的比例增益，7.5s 的积分时间常数，通过设计不同微分时间常数的 PID 控制器来分析积分时间常数 $T_D$ 的作用，分别取 $T_D$ 值为 200ms, 400ms, 600ms, 800ms 对系统输出进行相关分析，其结果如图 3-5 所示。

通过实验结果可以发现，增加了微分项的 PID 控制器相比于 PI 控制器超调量减少，具有较好的动态特性，在此次实验中发现针对不同的 $T_D$ 值系统输出曲线差异不大，可以根据实际需求进行调节。例如在本次实验中需要调节 4: 1 衰减比曲线，可以以此为控制目标具体调节 $T_D$ 的大小。

根据以上现象可以得出以下结论：微分时间常数 $T_D$ 越大微分项效果越明显，可以用于减小系统超调以及调节时间，在一定程度上有利于增加系统动态特性，但是由课程内容可知，微分项的存在会导致系统对高频干扰的敏感程度增加。

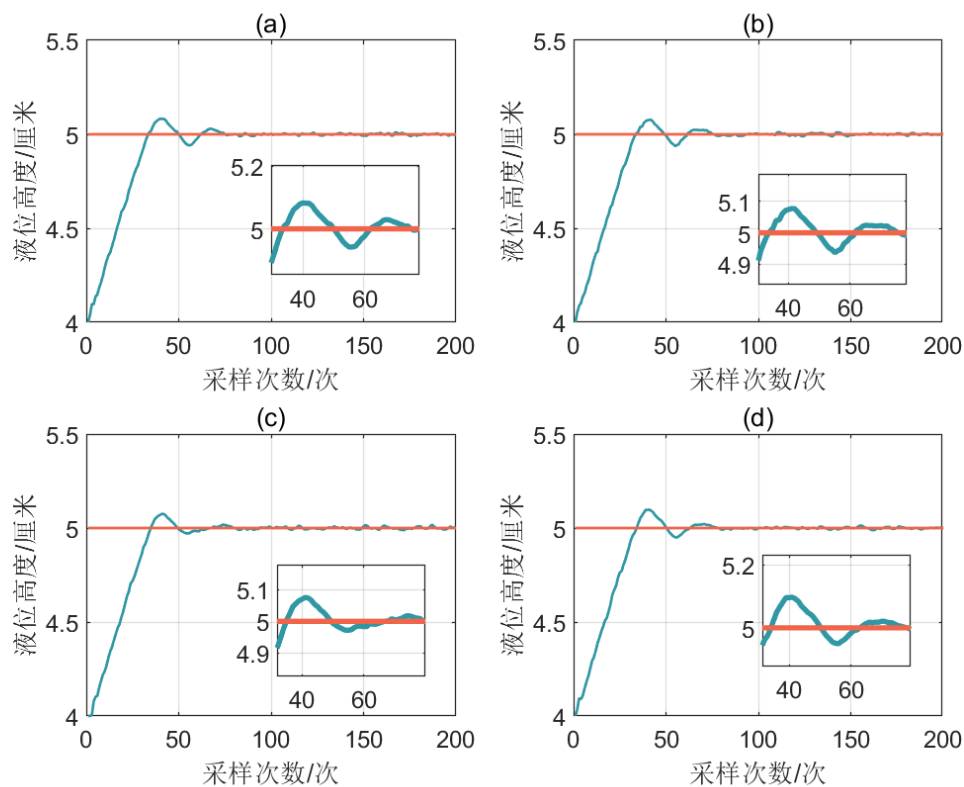


图 3-5 PID 控制  $K_c=20000$ ,  $T_I=7.5s$  (a)  $T_D=200ms$ , (b)  $T_D=400ms$ , (c)  $T_D=600ms$ ,  
(d)  $T_D=800ms$

### 3.2.4 控制器参数整定

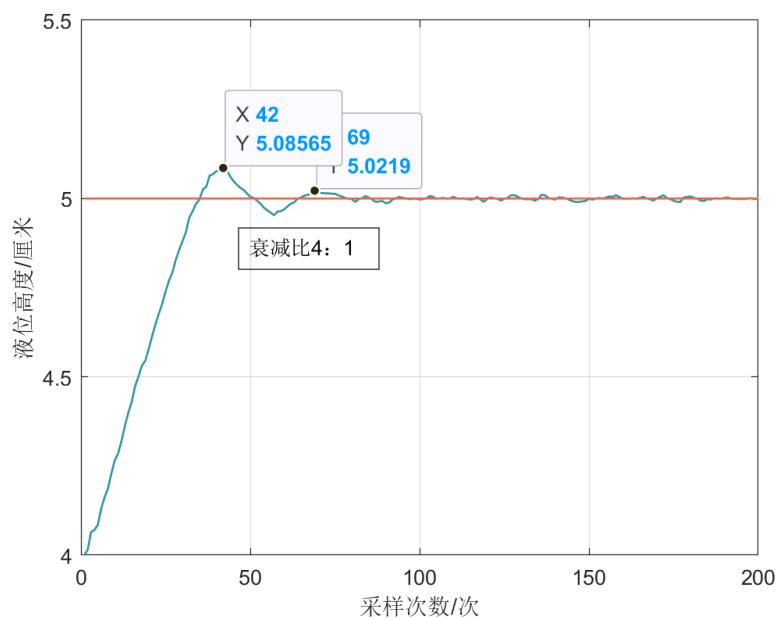


图 3-6 PID 参数整定 4: 1 衰减比液位高度曲线



根据以上实验内容的分析,理解了 PID 三个参数的作用后,在 3.2.3 的参数调整基础之上,以 4: 1 衰减比曲线为目标曲线,对 PID 控制器三个参数进行相应调节,经经验法尝试后可以得出三个参数值为,绘制系统输出曲线如图 3-6 所示

$$K_c = 20000, T_I = 7.5S, T_D = 500ms$$

在此基础上,为了衡量参数在不同期望值条件下的表现效果,在控制过程中分别将期望值调整为 6cm 以及 5.5cm 观察系统曲线波动情况如图 3-7 所示。

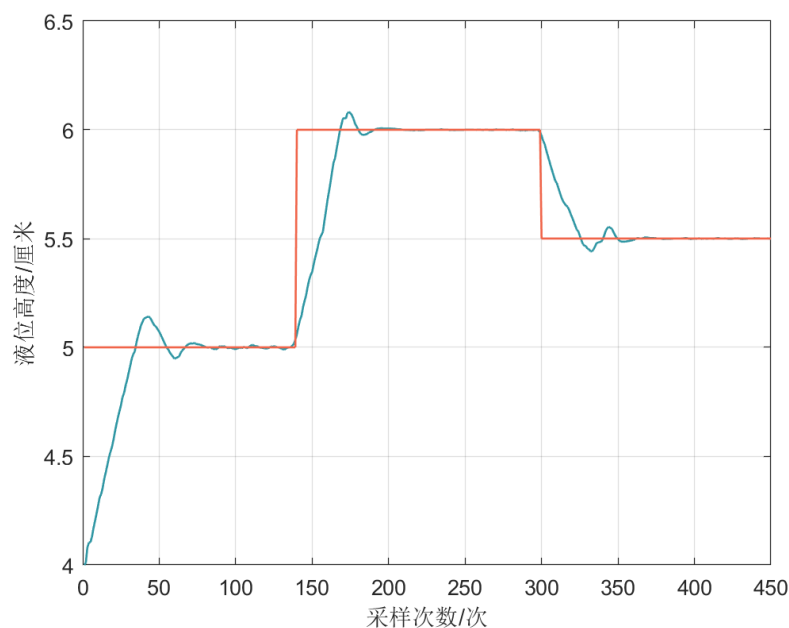


图 3-7 期望液位变动输出曲线图

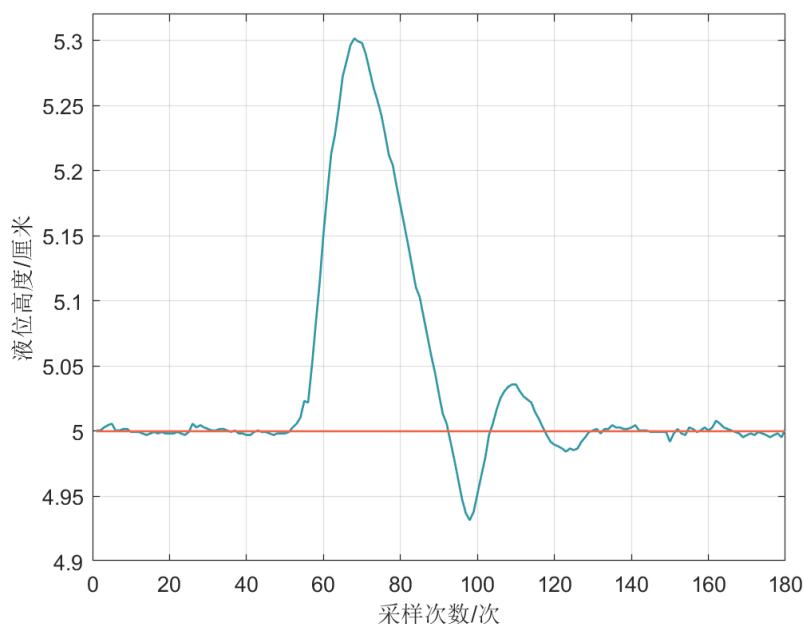


图 3-8 干扰作用下液位曲线

通过实验结果可以发现，系统在期望值变动的情况下能够较快的稳定且基本满足 4: 1 的曲线衰减比。除此之外，我们还对干扰下的系统输出进行了相应测试，输出曲线如图 3-8 所示。在干扰的作用下，系统会受到干扰的影响而导致水箱液位出现波动但是可以较快恢复并回到期望液位高度，符合系统设计要求。

### 3.3 针对不同水箱 PID 参数的研究

#### 3.3.1 水箱模型辨识

在实验一中对所使用的水箱系统进行了辨识，得出系统如下：

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{0.0023}{317.9650s + 1}$$

通过改变水箱流入储水箱的阀门开度即改变了水箱系统的传递函数模型，针对新的水箱模型重新进行实验一中的参数辨识过程。使用相同的方法可以获取液位变送器传回液位高度如图 3-9 所示。

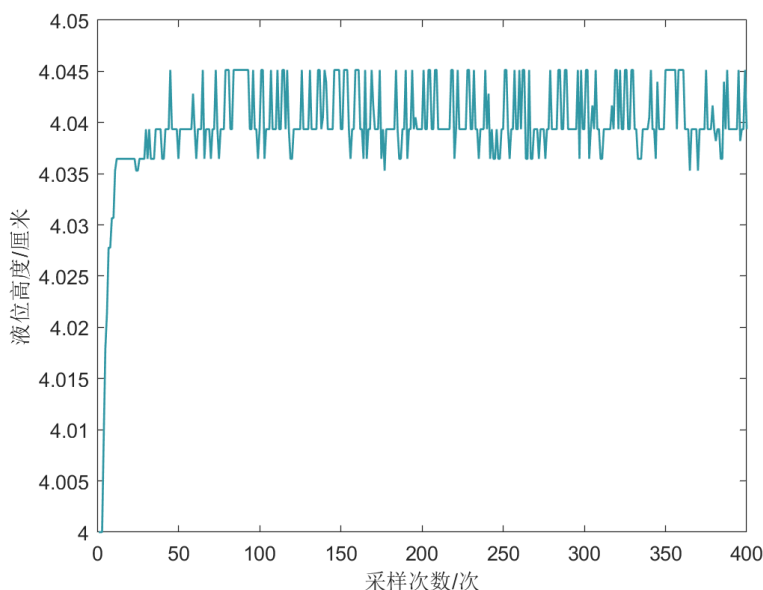


图 3-9 新水箱系统阶跃响应输出曲线

利用 MATLAB 系统辨识工具箱进行辨识可以得出系统传递函数中参数为：

$$K = 6.7503e - 5, T = 5.4526$$

通过与实验一中辨识结果对比可以发现，系统开环增益减小导致系统稳定时其终值明显小于实验一中水箱系统，但是新水箱其时间常数  $T$  小于实验一水箱，系统反应更加迅速。

### 3.3.2 不同水箱 PID 参数讨论

针对 3.3.1 中建立的新水箱模型，尝试将 3.2.4 节中整定的 PID 参数直接用于新水箱用来探究不同水箱下的 PID 参数使用问题。其系统输出即液位高度曲线如图 3-10 所示。

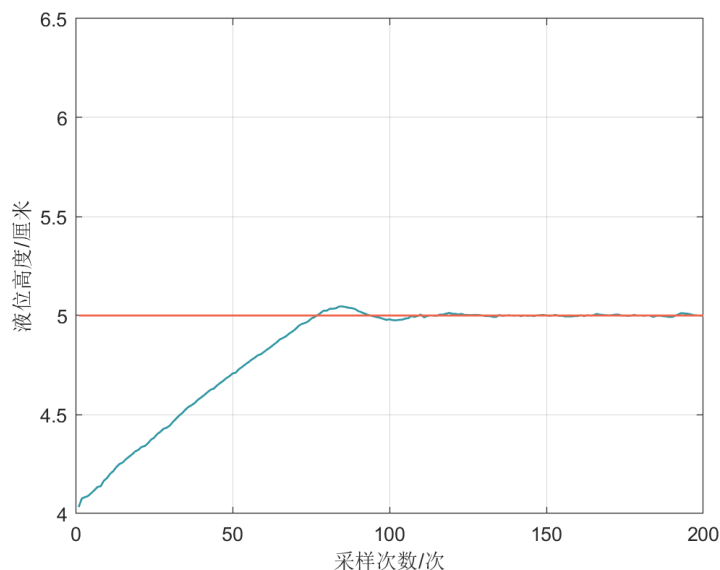


图 3-10 新水箱 PID 参数使用效果曲线

通过新系统的输出曲线可以看出 PID 参数仍然可以使系统达到期望液位高度并消除稳态误差但是系统调节时间较长且不符合 4: 1 的衰减比。可以得出结论，针对同一类型不同系统，其传递函数形式相似但是由于硬件差异可能导致实际传递函数不同，采用相同的 PID 参数可能会满足控制要求，但是系统动态性能并不能始终保持最优。

## 四 实验结论

通过实验二的学习，可以得出实验结论如下：

1. 单回路控制系统设计方面，分析系统工艺后选用液位-变频磁力泵作为实验系统，其中液位变送检测器用于回传液位信息，变频磁力泵作为系统执行器，控制器选用 PID 控制器，要求实现 4: 1 衰减比控制曲线。
2. 在 PID 参数整定过程中，对比例增益，积分时间常数，微分时间常数作用进行了如下分析：
  - 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。
  - 比例积分控制是一种无差控制，可以实现将稳态误差调整为 0，当固定比例增益时，随着积分时间常数的减小，积分项作用增大，系统相应速度加快，但是随之超调量增加，调节时间增加甚至可能导致系统等幅振荡或出现不稳定现象。
  - 微分时间常数 $T_D$ 越大微分项效果越明显，可以用于减小系统超调以及调节时间，在一定程度上有利于增加系统动态特性，但是由课程内容可知，微分项的存在会导致系统对高频干扰的敏感程度增加。
3. 针对同一类型不同系统，其传递函数形式相似但是由于硬件差异可能导致实际传递函数不同，采用相同的 PID 参数可能会满足控制要求，但是系统动态性能并不能始终保持最优。

通过此次实验，我与团队成员设计了针对实验室水箱的单回路 PID 控制系统，并在此基础上对 PID 参数进行整定，分析了比例增益，积分时间常数，微分时间常数对系统调节作用的影响，并在最后针对新的水箱系统尝试使用相同的 PID 参数发现针对新的控制系统 PID 参数并不一定适用需要重新调整。