

哈尔滨工业大学飞行器控制实验教学中心

系统与amp;控制实验指导书

实验二 控制系统时域控制器设计

项目一 控制系统时域控制器设计 Simulink 建模仿真

时域分析法可以求出系统的动态指标，若动态指标不能满足设计要求，需要使用改善系统动态性能的方法。常用的时域方法有速度反馈、PD 控制、PI 控制、PID 控制等。

一、实验目的

- 1、理解控制系统时域控制器设计方法
- 2、掌握控制系统时域控制器 Simulink 仿真调试过程

二、实验内容及步骤

给定系统的开环传递函数为

$$G_o(s) = \frac{1}{(s+1)(0.5s+1)} \quad (1-1)$$

多项式表达式 $G_o(s) = \frac{1}{0.5s^2 + 1.5s + 1} \quad (1-2)$

注1：在Simulink仿真中，控制对象使用传递函数模块（Transfer Fcn模块）进行建模即可，无需搭建电路模型。

1、单位负反馈控制

在Simulink中，建立单位负反馈控制仿真程序，采用阶跃响应实施系统控制，观察记录系统的稳定性、稳态误差 e_{ss1} ，上升时间 t_r 、调整时间 t_s （ $\Delta=0.02$ ）、超调量 σ_p 。

2、PI控制器闭环控制仿真

在Simulink中，建立包含PI控制器的闭环控制仿真程序，PI控制器结构如下：

$$G_{PI}(s) = K_1 + K_2 \frac{1}{s} \quad (1-3)$$

注2：在加入控制器的控制系统Simulink仿真中，需要加入与半实物仿真类似的饱和模块，来测试控制器输出的信号是否超过-10~+10的范围，添加位置在控制器模块和被控对象模块中间，示例如下

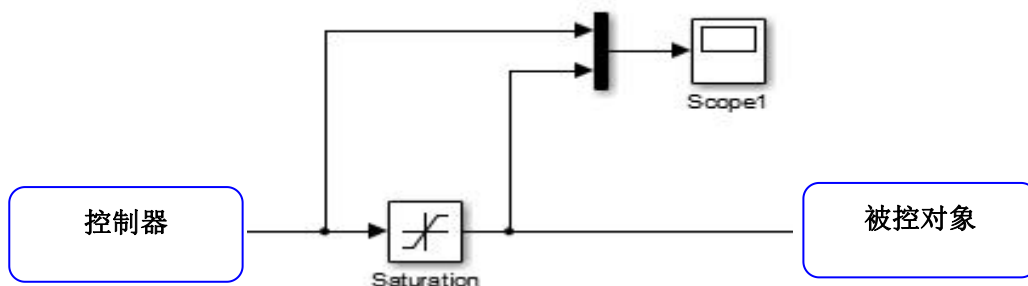


图1 饱和模块添加位置示意图

测试系统阶跃响应时，若通过scope模块若观察到饱和模块前后的信号不一致，则需进一步减小输入信号（阶跃）的幅值，或减小控制器增益，使得饱和模块前后信号一致。

(1) PI闭环控制1

设计合适的 K_1 、 K_2 ，采用阶跃响应实施系统控制，实现闭环控制指标：

- 开环放大倍数 $K_p \geq 0.9$ ；
- 超调量 $3\% \leq \sigma_p \leq 5\%$ ；
- 调整时间 $t_s \leq 6s$ ($\Delta=0.02$)；

观察记录阶跃响应的稳定性、上升时间 t_r 、调整时间 t_s (Δ

=0.02)、超调量 σ_p 。再将输入信号改为斜坡信号，测试斜坡响应的稳态误差 e_{ss2} （在输出饱和位置附近测量即可）。

（2）PI闭环控制2

设计合适的 K_1 、 K_2 ，采用阶跃响应实施系统控制，实现闭环控制指标

- 开环放大倍数 $K_p \geq 0.9$ ；
- 超调量 $5\% \leq \sigma_p \leq 15\%$ ；
- 调整时间 $t_s \leq 6s$ （ $\Delta=0.05$ ）；

观察记录阶跃响应的稳定性、上升时间 t_r 、调整时间 t_s （ $\Delta=0.05$ ）、超调量 σ_p 。再将输入信号改为斜坡信号，测试斜坡响应的稳态误差 e_{ss2} （在输出饱和位置附近测量即可）。

（3）PI闭环控制3

设计合适的 K_1 、 K_2 ，采用阶跃响应实施系统控制，实现闭环控制指标：

- 开环放大倍数 $K_p \geq 0.9$ ；
- 超调量 $15\% \leq \sigma_p \leq 25\%$ ；
- 调整时间 $t_s \leq 6s$ （ $\Delta=0.05$ ）；

观察记录阶跃响应的稳定性、上升时间 t_r 、调整时间 t_s （ $\Delta=0.05$ ）、超调量 σ_p 。再将输入信号改为斜坡信号，测试斜坡响应的

稳态误差 e_{ss2} (在输出饱和位置附近测量即可)。

三、实验结果记录

- 1、保存 Simulink 仿真的阶跃响应曲线
- 2、记录实测的性能指标及设计的 PI 控制器参数

项目	单位负反馈	PI控制1	PI控制2	PI控制3
是否稳定				
稳态误差 e_{ss1}				
稳态误差 e_{ss2}				
超调量 σ_p				
上升时间 t_r				
调整时间 t_s				
K_1				
K_2				

四、实验结果分析

分析单位负反馈及 PI 控制的区别，描述 PI 控制器中比例控制和积分控制的作用，以及比例控制系数 K_1 、积分控制系数 K_2 的设计过程。

项目二 控制系统时域控制器设计 Simulink 半实物仿真

一、实验目的

- 1、理解控制系统的电路模拟方法
- 2、掌握控制系统电路模拟参数计算方法
- 3、掌握控制系统 Simulink 电路模拟对象控制设计

二、控制系统电子对象搭建与控制实验

1、控制系统电路模拟

数学模型为：

$$G_o(s) = \frac{1}{(s+1)(0.5s+1)} \quad (2-1)$$

可使用图 2 电路对其进行电路模拟：

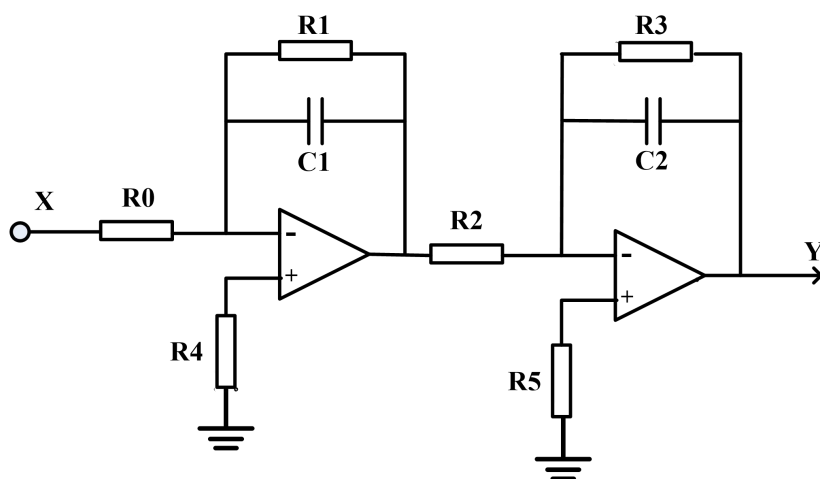


图 2 系统电路模拟图

电阻和电容的数值根据传递函数选取，可供选择的电阻：10K，100 K，200K，300K，以及实验箱上的可变电阻；电容：105（1uF），106（10uF）。

2、Simulink 半实物仿真实验 1

（1）单位负反馈控制实验

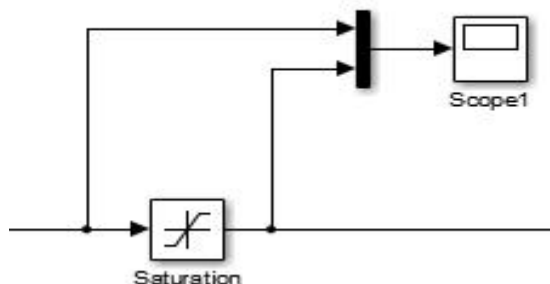
基于 Simulink 半实物仿真文件和搭建的电路，建立闭环仿真

模型，测试其阶跃响应控制效果，并记录时域性能指标。

（2）PI 闭环控制实验 1（ $3\% \leq \sigma_p \leq 5\%$ ）

基于 Simulink 半实物仿真文件和搭建的电路，利用 Simulink 模块实现 PI 控制器，建立闭环仿真模型，参照 **Simulink 仿真中相对应的性能指标**，设计 PI 控制器参数，测试阶跃响应和斜坡响应，并记录实际的时域性能指标。

注 3：在加入控制器的控制系统 Simulink 半实物仿真中，**当测试阶跃响应时**，将 Simulink 半实物仿真文件的饱和模块前后的信号，输入到一个新增的 scope 模块中，来观察到饱和模块前后的信号是否一致，若不一致，需进一步减小输入信号（阶跃）的幅值，或减小控制器增益。



（3）PI 闭环控制实验 2（ $5\% \leq \sigma_p \leq 15\%$ ）

基于 Simulink 半实物仿真文件和搭建的电路，利用 Simulink 模块实现 PI 控制器，建立闭环仿真模型，参照 **Simulink 仿真中相对应的性能指标**，设计 PI 控制器参数，测试阶跃响应和斜坡响应，并记录实际的时域性能指标。

（4）PI 闭环控制实验 3（ $15\% \leq \sigma_p \leq 25\%$ ）

基于 Simulink 半实物仿真文件和搭建的电路，利用 Simulink 模块实现 PI 控制器，建立闭环仿真模型，参照 **Simulink 仿真中相对应的性能指标**，设计 PI 控制器参数，测试阶跃响应和斜坡响应，并记录实际的时域性能指标。

3、Simulink 半实物仿真实验 2

PI 控制器的模拟电路图和传递函数如下所示

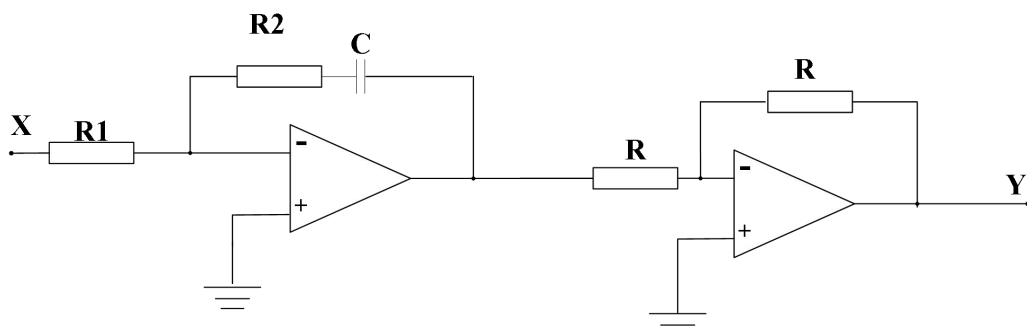


图 3 PI 控制器电路模拟图

$$G_c(s) = \frac{K}{T} \left(\frac{1 + Ts}{s} \right), K = \frac{R_2}{R_1}, T = R_2 C$$

根据所设计的 PI 控制器参数来选择电阻、电容的数值。

在面包板上搭建 PI 控制器电路与原控制系统电路的串联电路，再由 Simulink 建立闭环反馈程序。

(1) PI 闭环控制实验 4 ($3\% \leq \sigma_p \leq 5\%$)

基于 Simulink 半实物仿真文件和搭建的电路，建立闭环仿真模型，参照 Simulink 仿真中相对应的性能指标，调节 PI 控制器的电路参数，测试阶跃响应和斜坡响应，并记录实际的时域性能指标。

(2) PI 闭环控制实验 5 ($5\% \leq \sigma_p \leq 15\%$)

基于 Simulink 半实物仿真文件和搭建的电路，建立闭环仿真模型，参照 Simulink 仿真中相对应的性能指标，调节 PI 控制器的电路参数，测试阶跃响应和斜坡响应，并记录实际的时域性能指标。

(3) PI 闭环控制实验 6 ($15\% \leq \sigma_p \leq 25\%$)

基于 Simulink 半实物仿真文件和搭建的电路，建立闭环仿真模型，参照 Simulink 仿真中相对应的性能指标，调节 PI 控制器的电路参数，测试阶跃响应和斜坡响应，并记录实际的时域性能指标。

三、实验结果记录（详细说明参考报告模板）

- 1、保存 Simulink 半实物仿真的阶跃响应曲线
- 2、保存半实物仿真 2 的电路板图片
- 3、保存实测的性能指标及设计的 PI 控制器参数

项目	单位负反馈	PI控制 1	PI控制 2	PI控制 3	PI控制 4	PI控制 5	PI控制 6
是否稳定							
稳态误差 e_{ss1}							
稳态误差 e_{ss2}							
超调量 σ_p							
上升时间 t_r							
调整时间 t_s							
K_1							
K_2							

四、实验结果分析

简述半实物仿真实验 3 的电路搭建过程，对使用的电子器件类型及数值进行说明。