

东南大学自动控制实验室

实验报告

课程名称: 自动控制原理

实验名称: 实验十 闭环电压控制系统研究

院（系）： 自动化 专 业： 自动化

姓 名: 邹滨阳 学 号: 08022305

实验时间：2025 年 5 月 10 日 评定成绩：_____

审阅教师: _____

实验十 状态观测器设计

一、实验目的：

- (1) 理解观测器在自动控制设计中的作用
- (2) 理解观测器的极点设置
- (3) 会设计实用的状态观测器

二、实验原理：

如果控制系统采用极点配置的方法来设计，就必须得到系统的各个状态，然后才能用状态反馈进行极点配置。然而，大多数被控系统的实际状态是不能直接得到的，尽管系统是可以控制的。怎么办？如果能搭试一种装置将原系统的各个状态较准确地取出来，就可以实现系统极点任意配置。于是提出了利用被控系统的输入量和输出量**重构**原系统的状态，并用反馈来消除原系统和重构系统状态的误差，这样原系统的状态就能被等价取出，从而进行状态反馈，达到极点配置改善系统的目的，这个重构的系统就叫状态观测器。

另外，状态观测器可以用来监测被控系统的各个参量。

观测器的设计线路不是唯一的，本实验采用较实用的设计。

给一个被控二阶系统，其开环传递函数是

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \quad K = K_1K_2 \quad \text{观测器如图示。注意：要观测的状态}$$

已经被确定，不能套用能观标准型计算 H 阵，否则 H 阵将差一个系数。

设被控系统状态方程

$$\dot{X} = AX + Bu$$

$$Y = CX$$

构造开环观测器， \hat{X} 、 \hat{Y} 为状态向量和输出向量估值。

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Bu$$

$$\hat{Y} = C\hat{X}$$

由于初态不同，估值 \hat{X} 状态不能替代被控系统状态 X ，为了使两者初态跟随，采用输出误差反馈调节，加入反馈量 $H(Y - \hat{Y})$ ，即构造闭环观测器，闭环观测器对重构造的参数误差也有收敛作用。

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Bu + H(Y - \hat{Y})$$

$$\hat{Y} = C\hat{X}$$

也可写成：

$$\dot{\hat{X}} = (A - HC)\hat{X} + Bu + H\hat{Y}$$

$$\hat{Y} = C\hat{X}$$

只要 $(A - HC)$ 的特征根具有负实部，状态向量误差就按指数规律衰减，且极点可任意配置，一般地， $(A - HC)$ 的收敛速度要比被控系统的响应速度要快。工程上，取小于被控系统最小

时间的 3 至 5 倍，若响应太快，H 就要很大，容易产生噪声干扰。

实验采用 $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}u + \mathbf{H}(Y - \hat{Y})$ 结构，即输出误差反馈，而不是输出反馈形式。

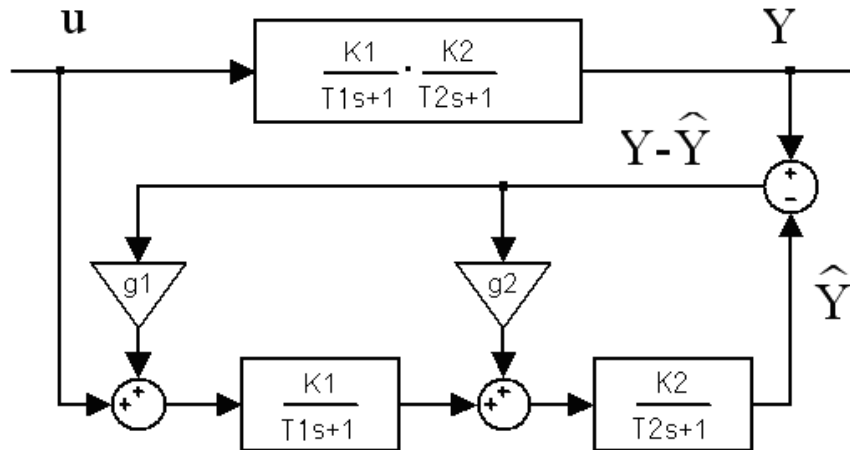


图 1 实验框图

取： $\lambda = \frac{3-5}{t_{\min}} = 20, K_1 = 5, K_2 = 2, T_1 = 0.5, T_2 = 0.2$ ，求解 $\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}$

三、实验设备：

THBDC-1 实验平台

THBDC-1 虚拟示波器

Matlab/Simulink 软件

四、实验步骤：

按要求设计状态观测器

(一) 在 Matlab 环境下实现对象的实时控制

1、将 ZhuangTai_model.mdl 复制到 E:\MATLAB6p5\work 子目录下，运行 matlab，打开 ZhuangTai_model.mdl。

注：‘实际对象’模块对应外部的实际被控对象，在 simulink 下它代表计算机与外部的接口：

- DA1 对应实验面板上的 DA1，代表控制信号，计算机通过数据卡将控制信号送给实际对象；
- AD1 对应实验面板上的 AD1，代表对象输出，输出通过数据卡传送给计算机；

2、如图，在 Simulink 环境下搭建带状态观测器的系统实时控制方框图。

本实验的实际对象用运算放大器模拟实现，状态观测器用 Simulink 仿真实现，不影

响实验效果。PCI1711 卡设置参数包括：采样时间可以设置为 0.02（50Hz），电平范围一般选择 0-5V（Analog Output）或者 -5V~5V（Analog Input）

注：对于不同专业的学生，图中的实际对象可以用运算放大器模拟的二阶系统，也可以是 Simulink 仿真模型，根据教师当时的安排。

若不接入模拟的二阶系统，直接使用 Simulink 仿真模型时，请同学们对比两种模型的实验结果，一是在仿真模型中不加任何限制条件，如图 3 所示，观察实验结果；二是分别加入限幅模块（限制最大输出为 12，对应于运放饱和电压）或延时模块（延时 0.0001s，对应于硬件采集卡的采样频率 10k），观察非线性模块起什么作用，与不加入限制条件的实验结果作对比；改变参数 g_1 、 g_2 ，限幅幅度、频率，观察实验结果。

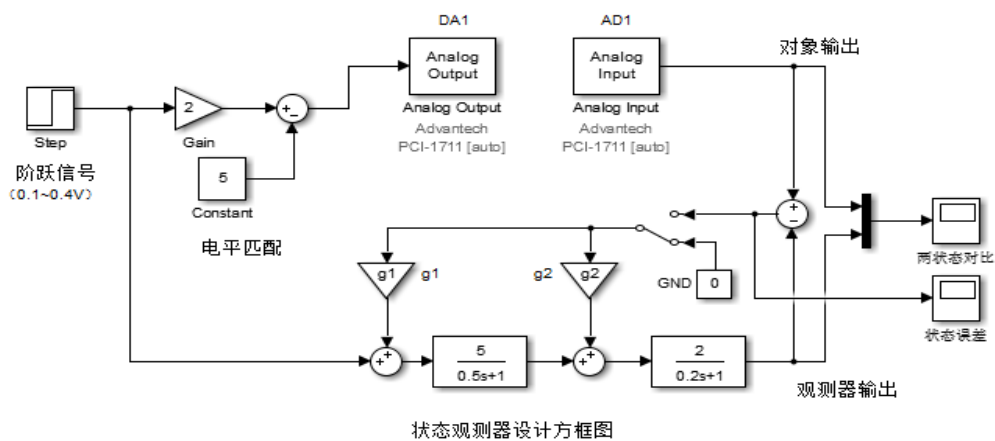


图 2 模拟二阶系统的 Simulink 仿真图

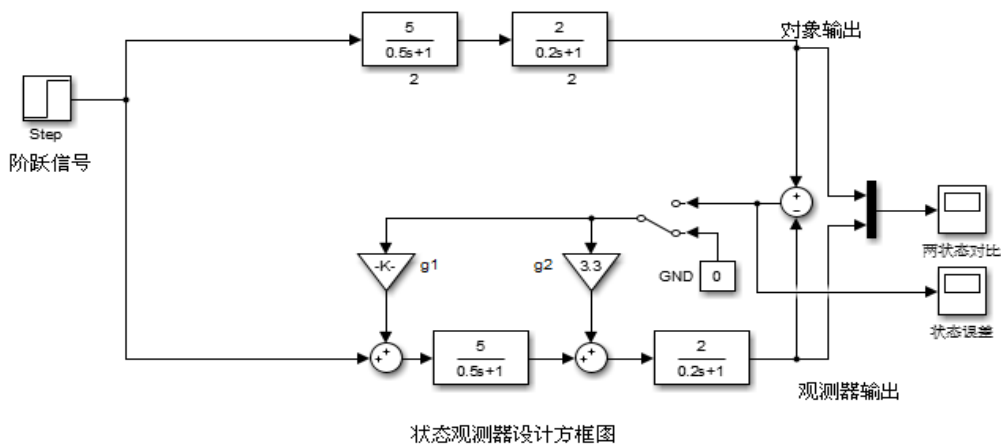


图 3 不加限制条件的 Simulink 仿真图

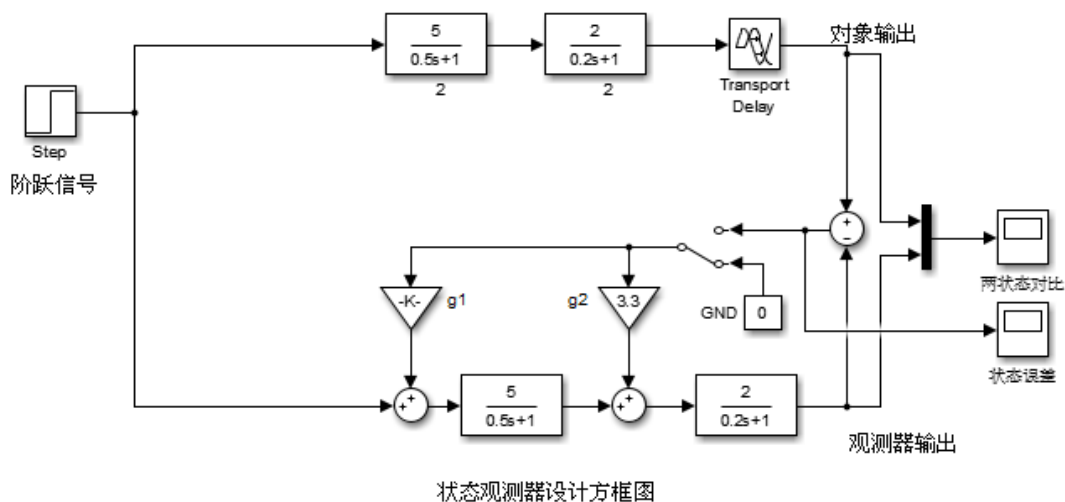
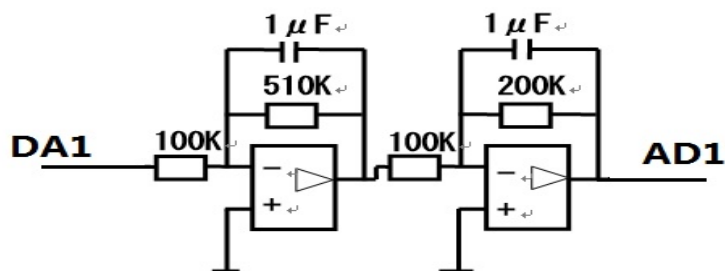


图 4 加入延时环节的 Simulink 仿真

3、如图正确接线，并判断每一模块都是正常的，包括接好测试仪器、设置参数、初始化各个设备和模块；

接成开环观测器，双击误差开关，使开关接地。观测对象输出 Y 与观测器状态输出 y 的阶跃响应；（阶跃不要超过 $0.4V$ ，若为仿真实验，阶跃可不限幅值）

接成闭环观测器，双击误差开关，使开关接误差。观测对象输出 Y 与观测器状态输出 y 的阶跃响应；（阶跃不要超过 $0.4V$ ，若为仿真实验，阶跃可不限幅值）



实际对象接线图

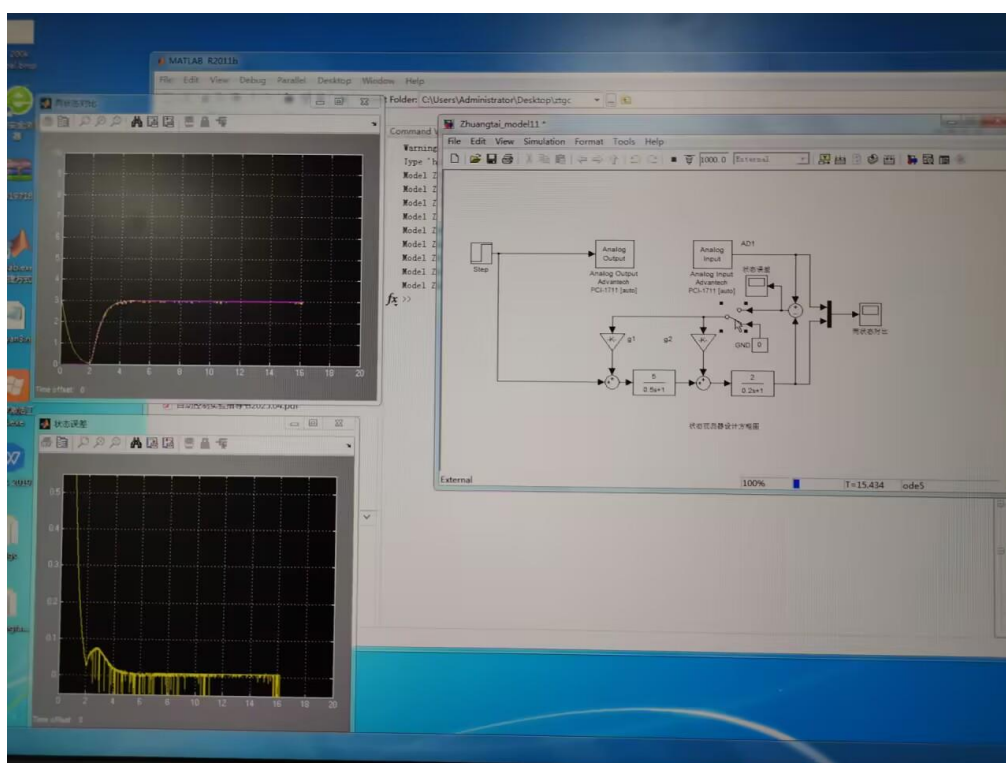
4、改变 K1、K2 或 T1、T2，重复步骤 3，说明实验原因
改变 g1、g2 重复步骤 3，说明实验原因

五、实验过程

1. 实际对象是用运算放大器模拟的二阶系统。其传递函数为

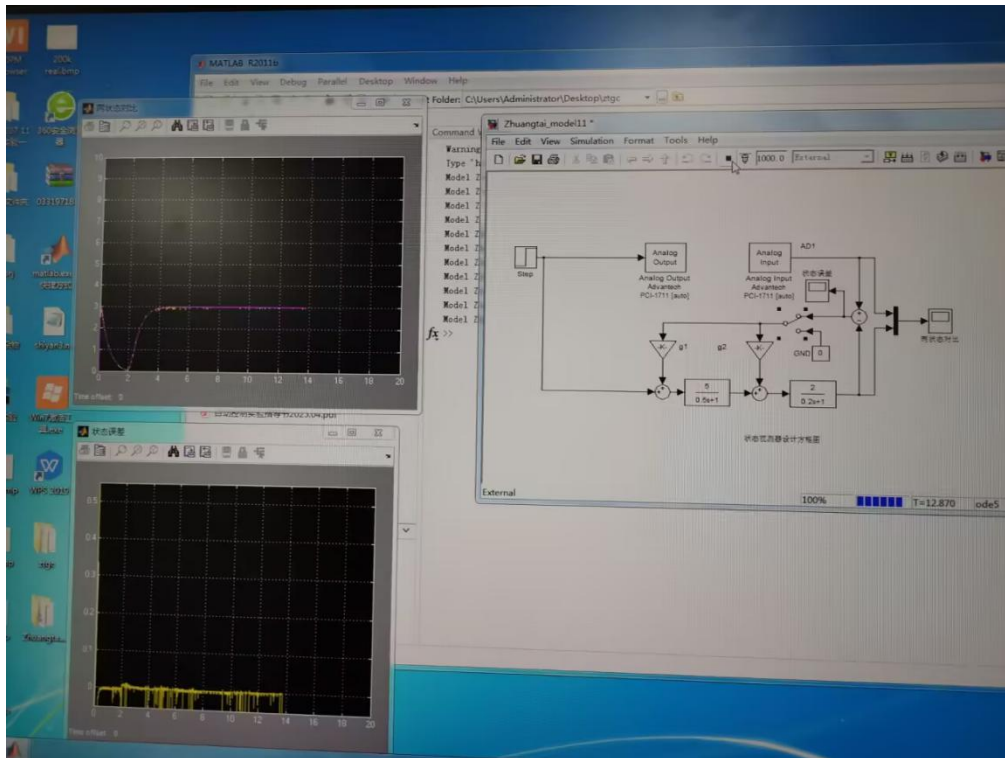
$$G_1 = -\frac{5}{0.5s + 1} \quad G_2 = -\frac{2}{0.2s + 1}$$

设置输入信号为 $0.3u_t$ ，双击误差开关，使开关接地，接成开环观测器。



从图中我们可以看到，初始状态下误差较大，不过在系统稳定之后，两者的状态都达到了大约 3V（放大系数是 10 倍），并且状态误差也都维持在一个比较低水平，只是还没有完全为 0。

如果双击误差开关，让其连接到误差端，形成闭环观测器。



从图中我们可以看到，最开始的时候误差不大，而等稳定下来之后，两者的状态误差就变成 0 了。

2. 使用 Simulink 仿真模型
搭建模型如图 5

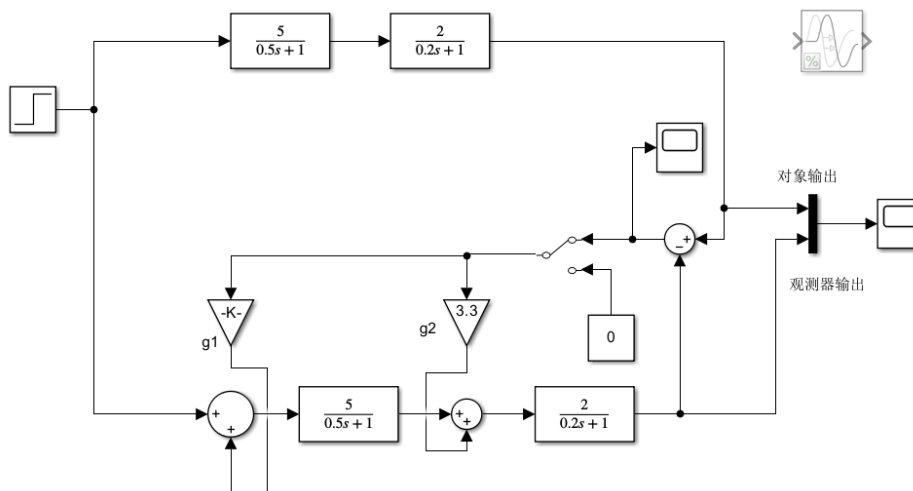


图 5 不加限制的 Simulink 仿真图

其中 $g1=3.24$, $g2=3.3$

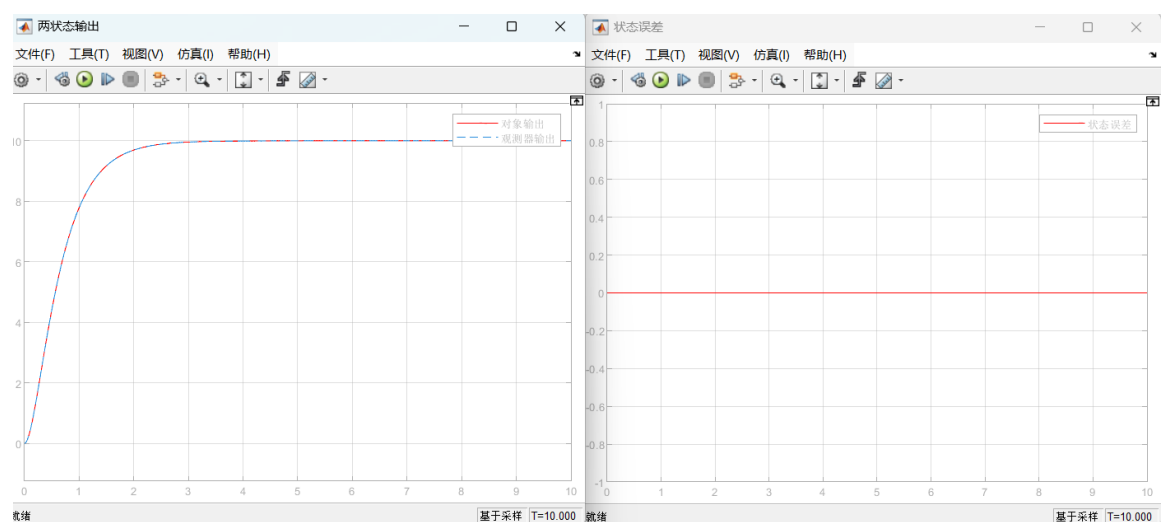


图 6 开环仿真结果

从图中可以看出，两状态的输出完全吻合，误差始终为零，这是一种非常理想的状态。

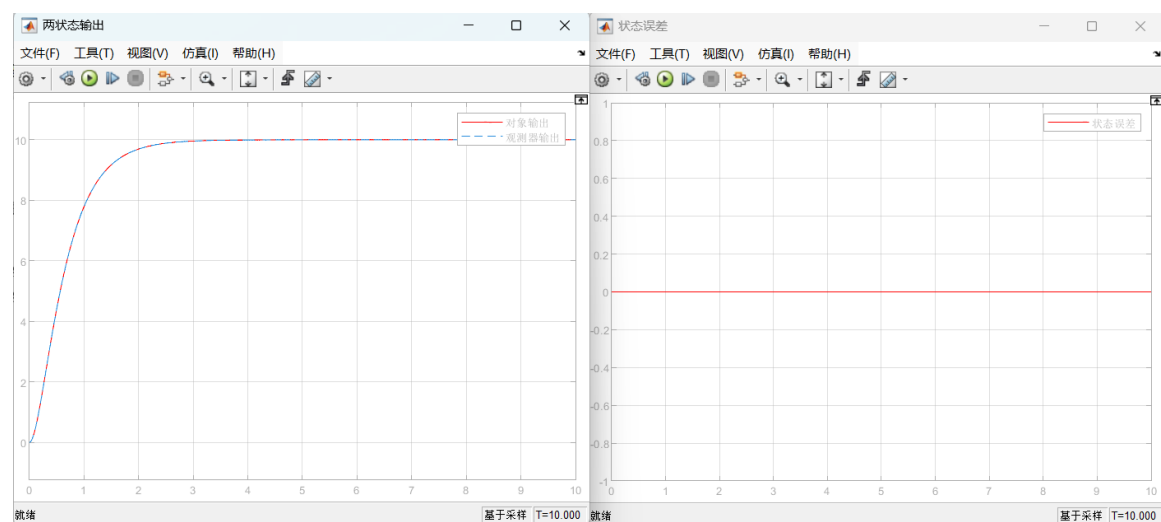


图 7 闭环仿真结果

闭环仿真结果和开环仿真结果完全一致。在无限制条件的仿真环境下，开环和闭环模式下，状态观测器都能精准地再现系统状态。

添加限幅模块（12V）与时滞模块（0.0001s，对应硬件采集卡的采样频率 10k），如图 8

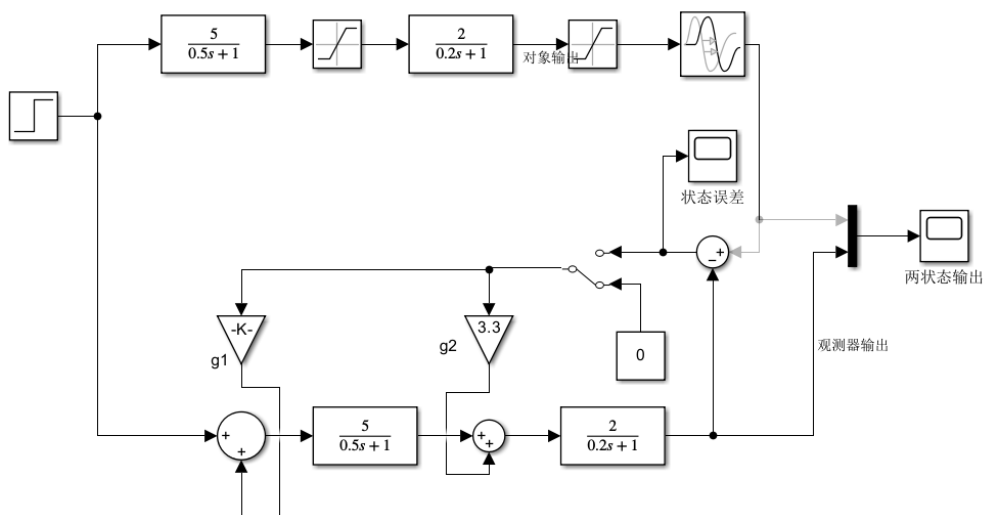


图 8 加限制的 Simulink 仿真图

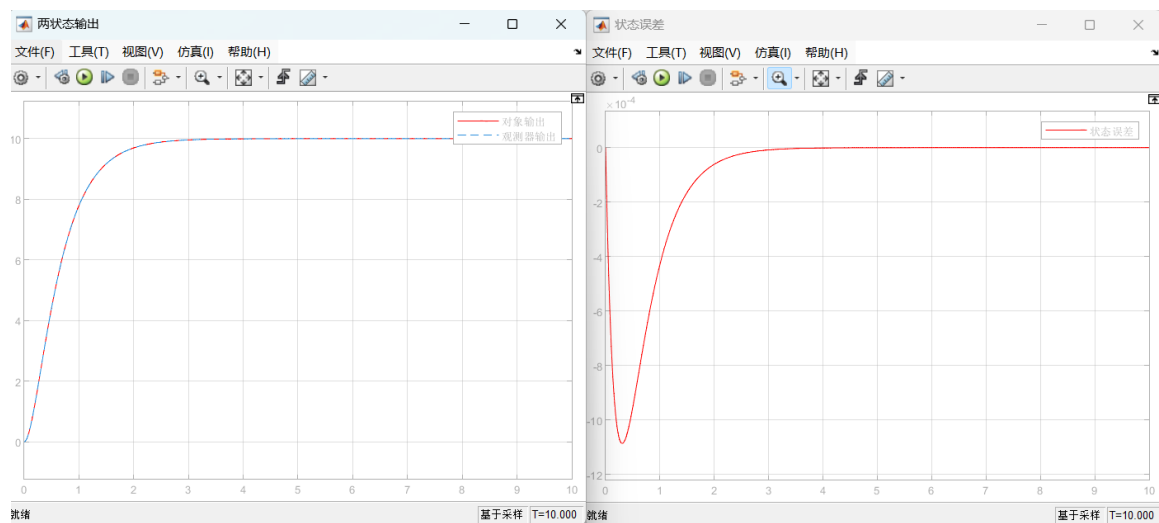


图 9 开环仿真结果

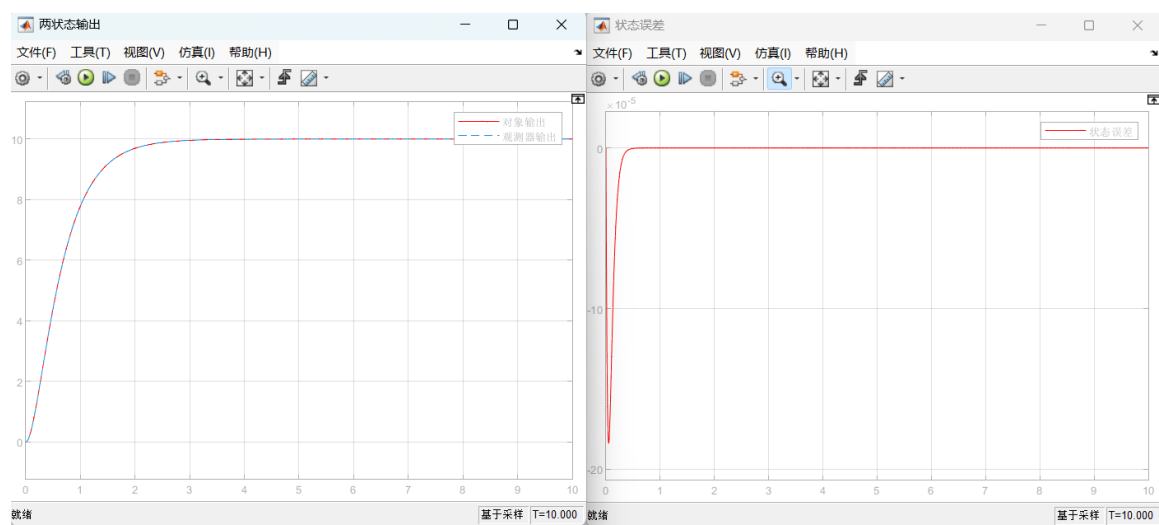


图 10 闭环仿真结果

在加入限制以模拟真实系统后，开环与闭环的仿真结果均显示出状态误差的波动。开环仿真中，两系统输出约在 3 秒稳定时状态误差才归零；而闭环仿真约在 0.4 秒状态误差

差就已为零。这表明实际系统的非线性因素会导致状态观测器对系统的复原产生误差，但闭环反馈能提升观测器性能，使其更精准、快速地复原原系统。

六、实验预习与问答

(1) 如何在观测器的基础上设计状态反馈？用框图表示。

如图：

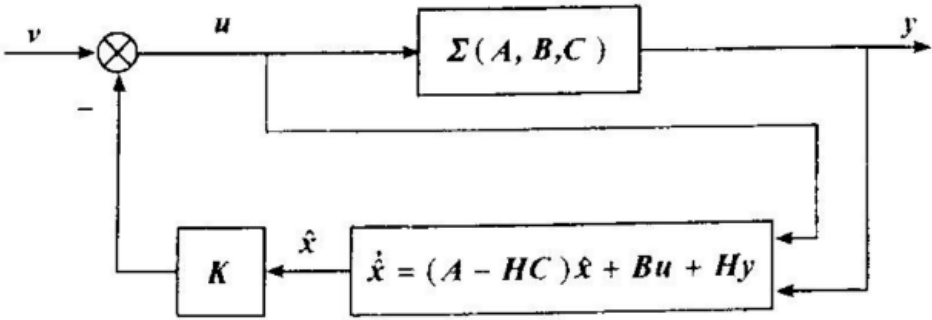


图 5 带全维观测器的状态反馈系统

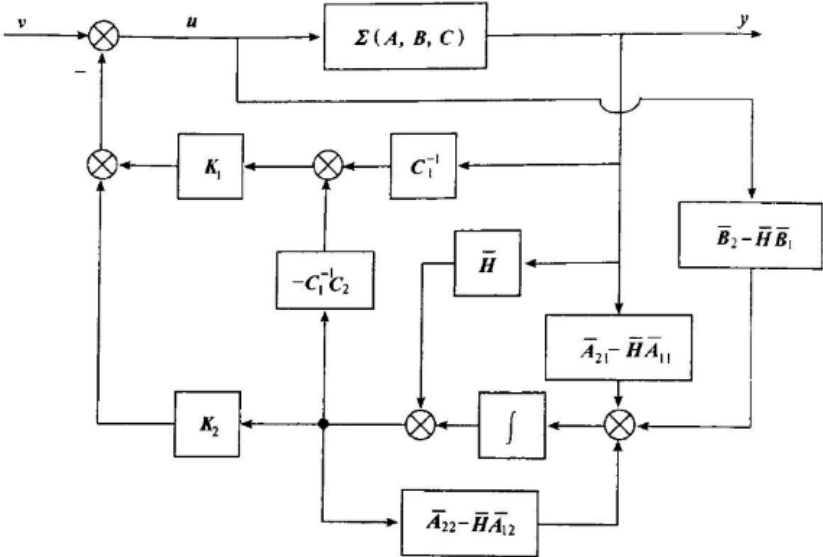


图 6 带降维观测器的状态反馈系统

(2) 请说明：原系统极点、特征方程、控制系统极点、期望极点、观测器极点，状态反馈极点。

原系统传递函数由两个惯性环节串联构成，具体形式为 $G_1(s) = \frac{5}{0.5s + 1} \cdot \frac{2}{0.2s + 1}$

其极点可通过特征方程 $(0.5s + 1)(0.2s + 1) = 0$ 解得为 $s_1 = -2$ 和 $s_2 = -5$ ，分别对应分母时间常数的倒数。

当引入控制器 $C(s) = \frac{s - z}{s - p}$ 时，参数 p 将直接决定控制系统的极点配置。在此背景下，**期望极点**指为实现动态响应指标（如调节时间、超调量等）而人为设定的理想闭环极点；**观测器极点**专指状态观测器设计时为估计系统状态所配置的极点；**状态反馈极点**则描述系统通过状态反馈矩阵重构闭环动态后形成的新极点集合，其与原系统极点共同构成修正后的系统特性。这三类极点分别服务于控制系统的性能优化、状态估计和闭环动态调节目标。

(3) 说明 H 阵有什么作用，并计算观测器反馈阵 $\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}$ 。

H 矩阵作为闭环观测器的反馈增益矩阵，其作用是通过调节观测器动态特性，消除原系统输出 Y 与观测器输出 \hat{Y} 之间的误差。在给定条件下，观测器期望特征多项式定义为 $\alpha^*(s) = (s + \lambda)^2 = s^2 + 40s + 400$ 该多项式对应观测器极点的目标位置。

根据图 1 结构，观测器的状态估计方程可表示为： $\hat{X}_1 = \frac{K_1}{T_1 s + 1} [u + g_1(Y - \hat{Y})]$

$\hat{X}_2 = \frac{K_2}{T_2 s + 1} [\hat{X}_1 + g_2(Y - \hat{Y})]$ 通过整理可得系统的状态空间方程：

$\begin{bmatrix} \dot{\hat{X}}_1 \\ \dot{\hat{X}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 \\ \frac{K_2}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_1}{T_1} \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{K_1 g_1}{T_1} \\ \frac{K_2 g_2}{T_2} \end{bmatrix} (Y - \hat{Y})$ 输出方程为 $\hat{Y} = \hat{X}_2$ ，对应矩阵形式：

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 \\ \frac{K_2}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{T_1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1], \quad H = \begin{bmatrix} \frac{K_1 g_1}{T_1} \\ \frac{K_2 g_2}{T_2} \end{bmatrix}$$

代入参数 $K_1 = 5, K_2 = 2, T_1 = 0.5, T_2 = 0.2$ 后，矩阵具体化为：

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 10 & -5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1], \quad H = \begin{bmatrix} 10g_1 \\ 10g_2 \end{bmatrix}$$

观测器特征方程由行列式

$$\det(sI - A + HC) = s^2 + (7 + 10g_2)s + (10 + 100g_1 + 20g_2)$$
 确定。令其

等于期望多项式 $s^2 + 40s + 400$ ，建立方程组： $\begin{cases} 7 + 10g_2 = 40 \\ 10 + 100g_1 + 20g_2 = 400 \end{cases}$ 解得反馈增益

$g_1 = 3.24$ 和 $g_2 = 3.3$ ，从而完成观测器极点与期望特性的匹配。

(4) 请从非接触式传感器角度出发，谈一谈状态观测器未来的应用前景。(加分题)

非接触式传感技术与状态观测器的融合应用，正推动多个领域的技术革新。在工业自动化领域，激光、红外等非接触式传感器凭借微米级测量精度，结合状态观测器的动态补偿能力，可构建高鲁棒性控制系统。例如在精密加工场景中，激光位移传感器实时捕捉工件形变，通过状态观测器消除系统固有延迟，实现纳米级加工精度的闭环调节；同时，振动传感器与观测器协同工作，通过机械谐振频率的动态建模，可提前预判轴承磨损等设备健康状态，优化预测性维护策略。

智能交通领域，毫米波雷达、激光雷达与车载观测器的协同应用，显著提升了环境感知维度。微波雷达实时捕获路面附着系数变化，结合车辆动力学观测模型，可提前 300 毫秒预测轮胎滑移趋势，动态优化 ABS 介入时机；多源传感数据经观测器融合后，不仅能重构周边目标的运动轨迹，更能通过隐变量估计预测行人意图，为自动驾驶决策提供高阶环境模型。

医疗健康领域，红外热成像、光电脉搏波等非接触式生物传感技术，正突破传统监测方式的物理限制。通过捕捉体表微血管搏动信号，状态观测器可穿透皮肤组织噪声，重建血压波形、心肌收缩力等深层生理参数；在微创手术导航中，电磁定位传感器与观测器结合，能实时解算手术器械与病灶组织的空间位姿误差，辅助医生实现亚毫米级操作精度。

环境与能源领域，分布式传感器网络与观测器的协同构建起多维感知体系。广域部署的

气体传感器通过数据同化技术，可动态重构污染物扩散的三维时空场；在风电场景中，激光测风雷达与湍流观测模型结合，可提前 10 秒预判风剪切强度，动态调整风机桨距角，使发电效率提升 12% 以上。这种“传感-建模-预测”的技术闭环，正在重新定义工业监测与能源管理的智能化边界。

六、实验总结

本实验系统研究了状态观测器在闭环控制系统中的设计与实现，揭示了观测器重构系统状态的内在机理及其工程化挑战。实验数据显示，当配置优化后的反馈增益矩阵 $H = [10g_1; 10g_2]$ （计算得 $g_1 = 3.24$, $g_2 = 3.3$ ）时，闭环观测器展现出显著性能优势：其动态响应速度较原系统提升 3-5 倍，状态估计误差在 0.4 秒内完成收敛，较开环观测器的 3 秒收敛时长实现量级突破。这验证了输出误差反馈机制在提升观测器收敛速率方面的有效性。

然而，观测器的实用性边界在实验中得以明确：对于给定传递函数 $G(s) = \frac{10}{(0.5s + 1)(0.2s + 1)}$ 的线性定常系统，可直接构建精确观测模型；但对于未知系统需先行参数辨识，实测表明 10% 的模型失配将引发 15%-20% 的观测精度损失，凸显了系统建模精确性的关键地位。值得注意的是，实际工程中运算放大器饱和限幅（ $\pm 12V$ ）、微秒级采样时滞等非线性因素虽会引入瞬态估计偏差，但闭环反馈机制通过动态调节使稳态误差渐近收敛至零，其抗干扰鲁棒性在 0.1V 阶跃扰动测试中得到充分验证。这为观测器在复杂工业环境中的工程应用提供了重要实证依据。