



清华大学自动化实验教学中心

控制理论实验室（中央主楼 520 室）

自动控制理论 实验指示书

赵世敏 编

清华大学自动化实验教学中心

2020 年 8 月

1 简介

1.1 NZJK-II 型自控/计控多功能实验系统简介

NZJK-II 型自控/计控多功能实验系统采用混合计算机半实物仿真的实验方案，结构图如图 1-1 所示，计算机通过串口或 USB 接口与 A/D、D/A 接口板实现信号发生器、示波器的功能，完成实验数据的采集、存储和计算处理，在实验时可以将实验结果与理论分析值进行对比，提高了实验效率，配套实验软件人机界面操作简便，实验数据可导入 Matlab 进行分析。图 1-2 为实验装置实物，图 1-3 为实验软件界面。

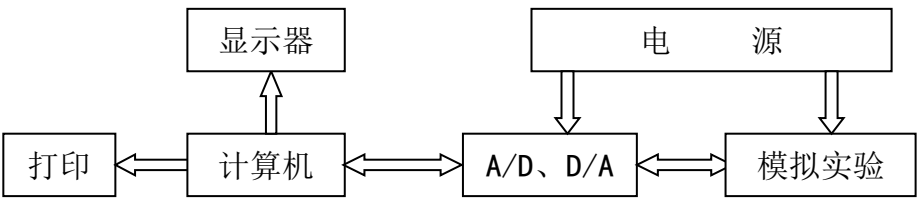


图 1-1 NZJK-II 型自控/计控多功能实验系统结构图

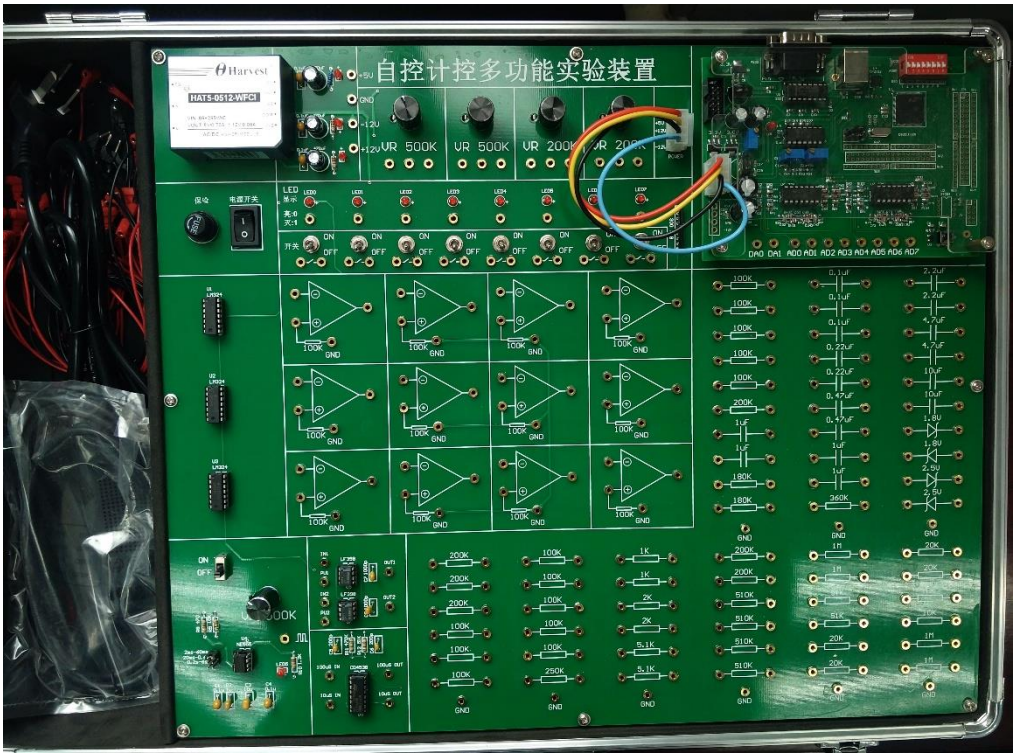


图 1-2 NZJK-II 型自控/计控多功能实验装置

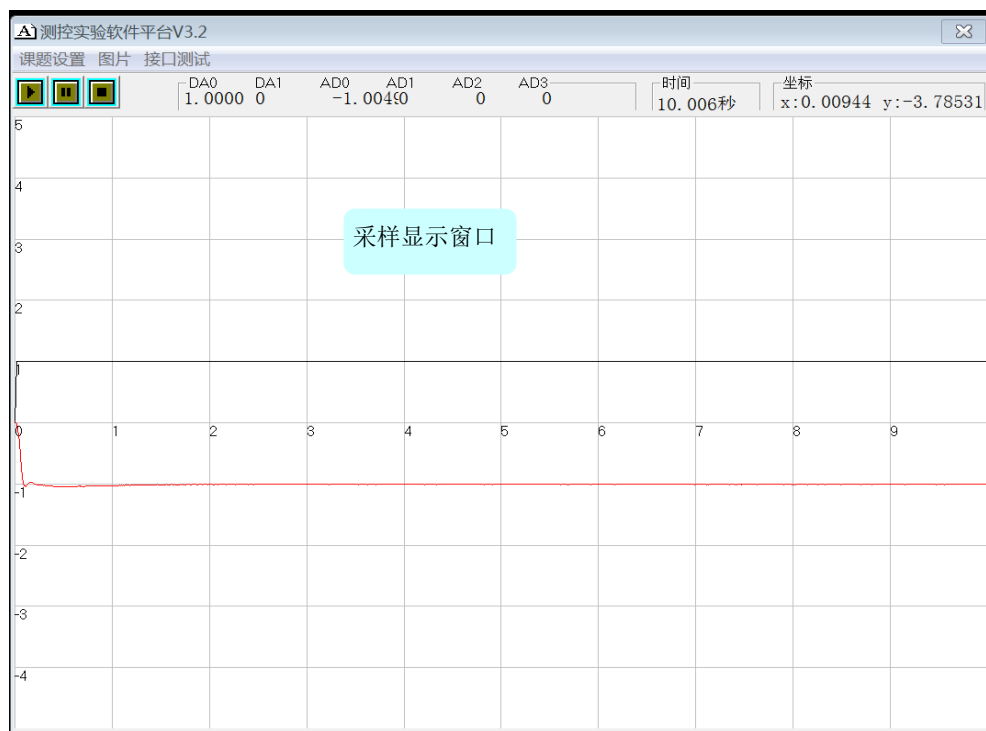
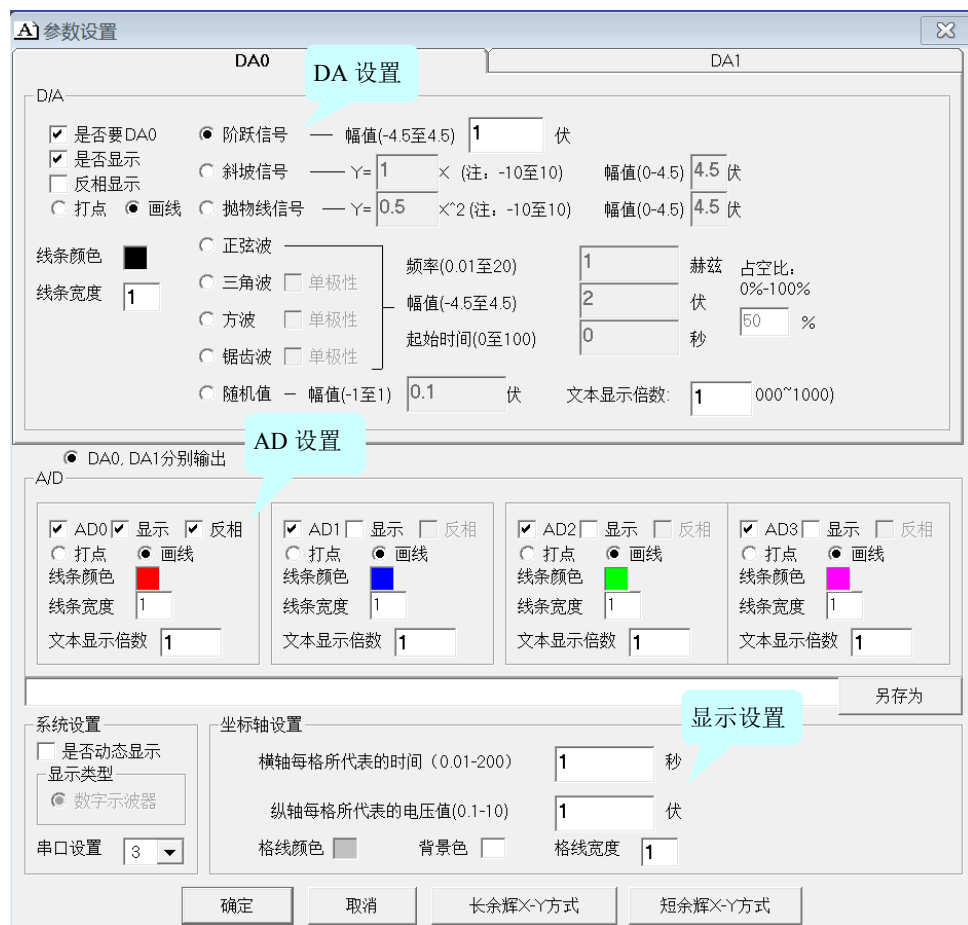




图 1-3 实验软件界面

实验步骤：（1）按照系统模拟电路图接线；（2）打开实验箱面板电源；（3）点击桌面“自控原理实验”图标；（4）“课题设置”菜单中进行参数设置；（5）点击开始实验采样，“图片”菜单可以保存图片，下一次实验开始采样前点击刷新显示窗口，释放缓存。

1.2 利用 MATLAB/Simulink 软件实现控制理论实验

MATLAB 是 MathWorks 公司开发的一套具有强大的科学及工程计算功能和丰富的图形显示功能的软件。MATLAB 语言具有强大的数学运算功能和丰富的图形表现方法。

MATLAB 语言的程序可以用两种方式来执行，即命令行方式和 m 文件方式，m 文件由命令描述行写成之后存储，在 MATLAB 平台上单独调用执行。

MATLAB 的 Simulink 是一个用来对动态系统进行建模、仿真与分析的软件包。进入 MATLAB 界面后，在命令窗口中键入“Simulink”，回车后便打开一个名为 Simulink Library Browser 模块库浏览器，如图 1-4 所示。可以看见该模块库中包括：Commonly Used Blocks（常用模型库）、Continuous（连续时间模型库）、Discrete（离散时间模型库）、Math（数学运算模型库）、Sinks（输出节点库）、Sources（源节点库）等等。Simulink 为用户提供了用方框图进行系统建模的图形窗口，采用这种建模方式绘制控制系统的动态模型结构图，只需要通过鼠标的点击和拖曳，将模块中提供的各种标准模块拷贝到 Simulink 的模型窗口中，就可以完成模型的创建。

基于 MATLAB 的控制系统的仿真实验，能快速、直观地分析连续系统、离散系统、非线性系统的动态性能和稳态性能。下面通过一个例子来说明如何使用 MATLAB 命令行方式与 Simulink 进行系统的建模与仿真。

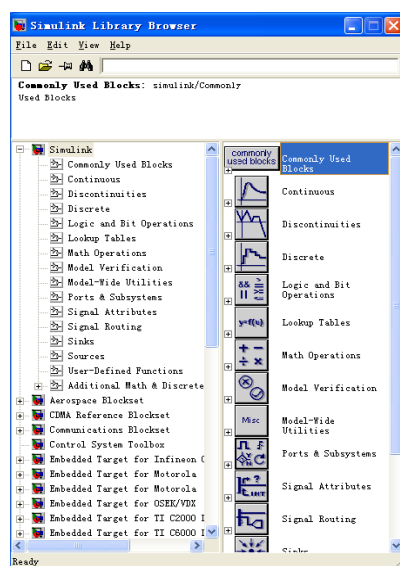


图 1-4 Simulink 模块库浏览器

以下对如图 1-5 的系统进行阶跃响应仿真。

MATLAB 命令行方式，写出系统的传递函数。采用阶跃响应函数求阶跃响应，得到阶跃响应曲线（图 1-6）。具体程序如下：

```

n1=[50];d1=[1 10 0];      % 采用矩阵形式表示传函分子，分母
[n2,d2]=cloop(n1,d1,-1);   % cloop 为单位负反馈函数
printsys(n2,d2)            % 显示传递函数的多项式模型
num/den =
          50
-----
      s^2 + 10 s + 50
step(n2,d2)                %Step 为阶跃响应函数

```

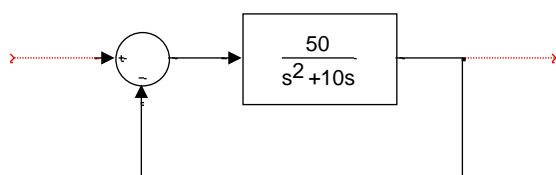


图 1-5 系统方框图

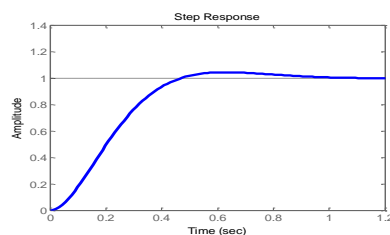


图 1-6 系统阶跃响应

Simulink 方式：在 MATLAB 命令窗口中执行 Simulink 命令打开 Simulink Library Browser 窗口。在 File 菜单中建立一个新的 Model 文件。

建立系统动态结构图：分别从 Sources（源节点库）、Math（数学运算模型库）、Continuous（连续时间模型库）、Sinks（输出节点库）中需要的元件和环节调到 Model 文件中，并按照图示连接方法将各模块连接起来，如图 1-7 所示。

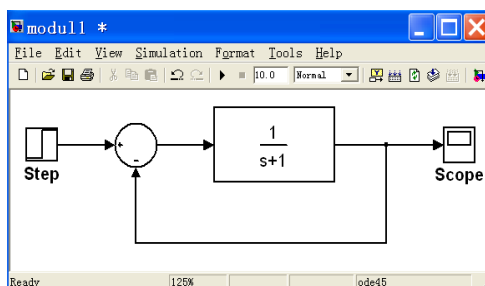


图 1-7 建立 Simulink 模块文件示例

参数修改：分别双击需要修改参数的模块，进入参数对话框修改相应参数，如图 1-8 所示。

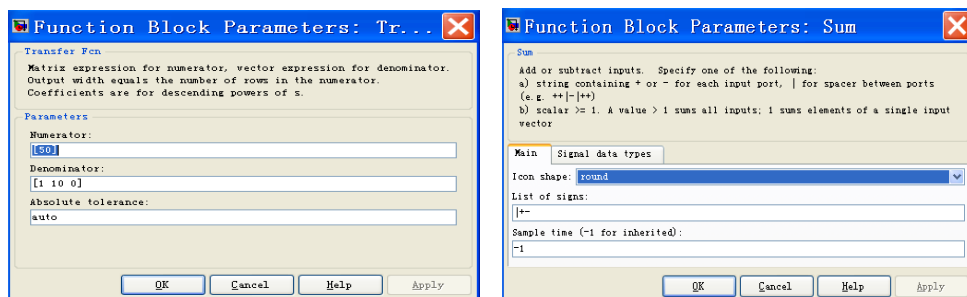


图 1-8 参数修改示例

仿真：经过上述步骤以后即可得到图 1-9 所示系统的动态结构图，单击 Simulation 菜单下的 Start 命令

可进行系统仿真，双击 Scope 可观察到系统的单位阶跃响应，如图 1-10 所示。

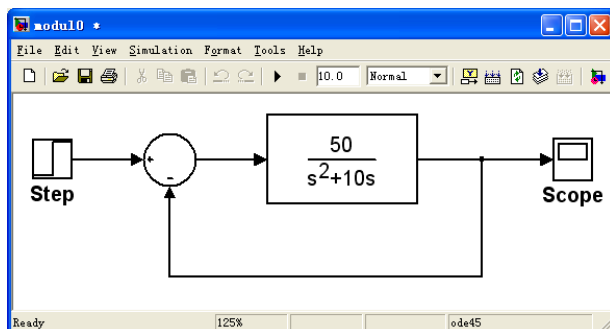


图 1-9 系统动态结构图

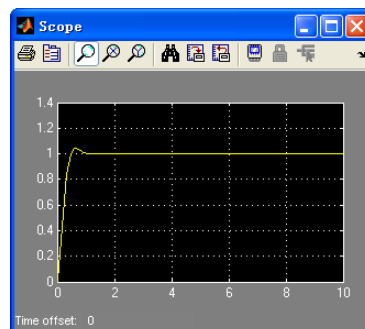


图 1-10 系统阶跃响应

MATLAB 软件功能强大，内容丰富，以上仅从完成实验的角度对涉及到的 MATLAB 软件功能简单说明，如有需要系统学习 MATLAB 控制理论编程知识请另行参阅相关书籍。

2 实验一 二阶系统阶跃响应、连续系统校正

2.1 实验目的

1. 学会根据模拟电路确定系统传递函数。
2. 研究二阶系统的两个重要参数：阻尼比 ξ 和无阻尼自振角频率 ω_n 对系统动态性能的影响。
3. 学习串联校正的基本设计方法，观察串联超前、滞后校正对改善系统性能的作用。

2.2 二阶系统阶跃响应

二阶系统模拟电路图如图 2-1 所示。

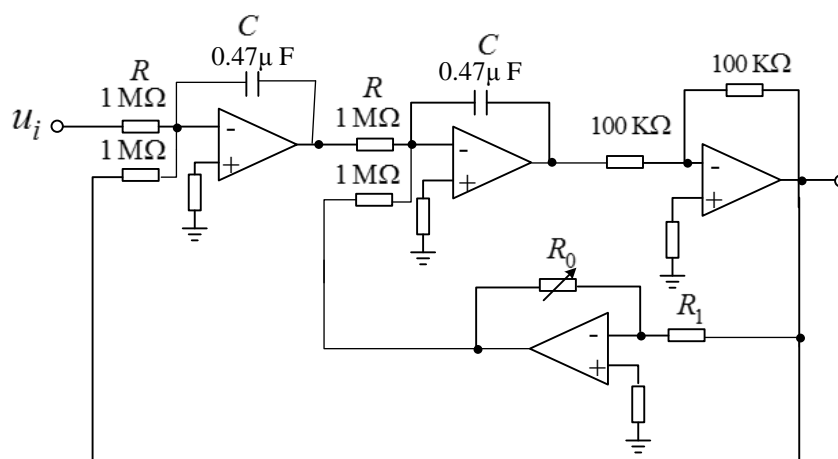


图 2-1 二阶系统模拟电路图

系统特征方程为 $T^2 s^2 + KTs + 1 = 0$ ，其中 $T = RC$ ， $K = \frac{R_0}{R_1}$ 。根据二阶系统的标准形式可知， $\xi = K/2$ ，通过调整 K 可使 ξ 获得期望值。

1. 实验计算

- 写出图 2-1 控制系统的传递函数。
- 分别计算出 $T = 0.47$, $\xi = 0.25, 0.5, 0.75$ 时, 系统阶跃响应的超调量 σ 和过渡过程时间 t_s 。
- 分别计算出 $\xi = 0.5$, $T = 0.22, 0.47, 1.0$ 时, 系统阶跃响应的超调量 σ 和过渡过程时间 t_s 。

2. Matlab/ Simlink 仿真

用 Matlab/ Simlink 搭建仿真模型, 单位阶跃信号为系统输入, 观测系统输出波形。

- 通过改变 K , 使 ξ 获得 $0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 等值, 记录过渡过程曲线、超调量 σ 和过渡过程时间 t_s 。
- 当 $\xi = 0.5$ 时, 令 $T = 0.22$ 秒, 0.47 秒, 1.0 秒, 记录过渡过程曲线、超调量 σ 和过渡过程时间 t_s , 比较三条阶跃响应曲线的异同。

3. 模拟实验

- 设置 DA0 输出 $1V$ 阶跃信号, 做为系统输入, 在模拟实验箱上按照图 2-1 接线, 系统输出连接到 AD0;
- 通过改变 K , 使 ξ 获得 $0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 等值, 在输入端加同样幅值的阶跃信号, 记录过渡过程曲线、超调量 σ 和过渡过程时间 t_s , 将实验值和理论值进行比较。
- 当 $\xi = 0.5$ 时, 令 $T = 0.22$ 秒, 0.47 秒, 1.0 秒 ($T = RC$, 改变两个 C), 记录过渡过程曲线、超调量 σ 和过渡过程时间 t_s , 比较三条阶跃响应曲线的异同。

附：实验参考

二阶系统超调量: $\sigma\% = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \times 100$

二阶系统过渡过程时间 (近似估计值):

$$t_s(5\%) \approx \frac{3T}{\xi}, 0 < \xi < 0.9$$

$$t_s(2\%) \approx \frac{4T}{\xi}, 0 < \xi < 0.9$$

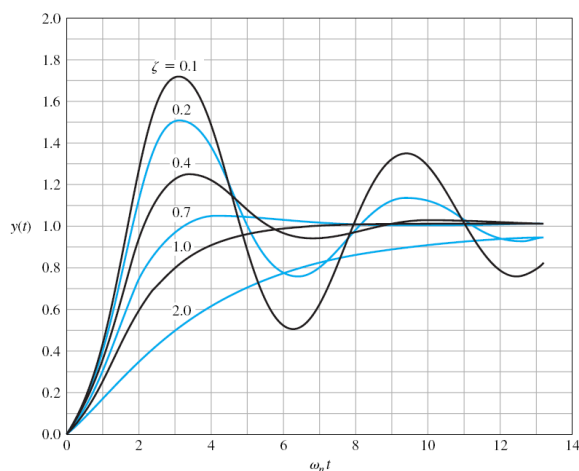


图 2-2 二阶系统单位阶跃响应

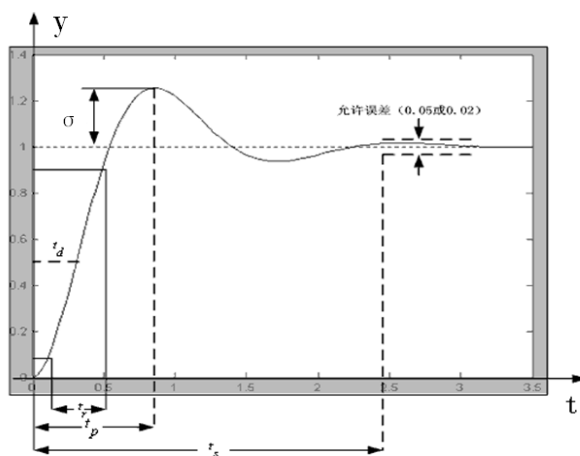


图 2-3 线性控制系统的典型阶跃响应

2.3 连续系统串联校正

- 已知系统开环传递函数（图 2-4 为参考模拟电路图）：

$$G_0(s) = \frac{100}{s(0.1s + 1)(0.01s + 1)}$$

- 设计一个超前校正装置，要求速度误差系数 $K_v \geq 100s^{-1}$ ，截止角频率 $\omega_c \geq 40rad/s$ ，相角稳定裕度 $\phi \geq 30^\circ$ ，超调量 $\sigma \leq 40\%$ ，这里给出一个参考的超前校正（图 2-5 为参考模拟电路图）：

$$G_c(s) = \frac{0.044s + 1}{0.0044s + 1}$$

- 计一个滞后校正装置，要求 $K_v \geq 100s^{-1}$ ， $\omega_c \geq 4rad/s$ ， $\phi \geq 30^\circ$ ， $\sigma \leq 40\%$ ，这里给出一个参考的滞后校正（图 2-6 为参考模拟电路图。）：

$$G_c(s) = \frac{0.5s + 1}{10s + 1}$$

1. 实验内容

- 分别画出系统固有部分、加入超前校正、滞后校正的 Bode 图；估算出上述 3 种情况下系统相角裕量、阶跃响应的超调 σ 与过渡过程时间 t_s 。
- 用 Matlab/Simlink 搭建仿真模型，以单位阶跃信号为系统输入，观测并记录 3 种情况下系统阶跃响应曲线、超调 σ 与过渡过程时间 t_s 。
- 在模拟实验箱上搭建图 2-4、图 2-5、图 2-6 模拟电路，以单位阶跃信号为系统输入，观测并记录 3 种情况下系统阶跃响应曲线、超调 σ 与过渡过程时间 t_s 。
- 根据实验结果，总结不同校正的作用。

附：参考经验公式： $\sigma\% \approx \frac{2000}{\phi} - 20$ ；最小相位系统 $\omega_c t_s = 4 \sim 7$ ；非最小相位系统 $\omega_c t_s = 5 \sim 9$ 。

2. 实验参考模拟电路

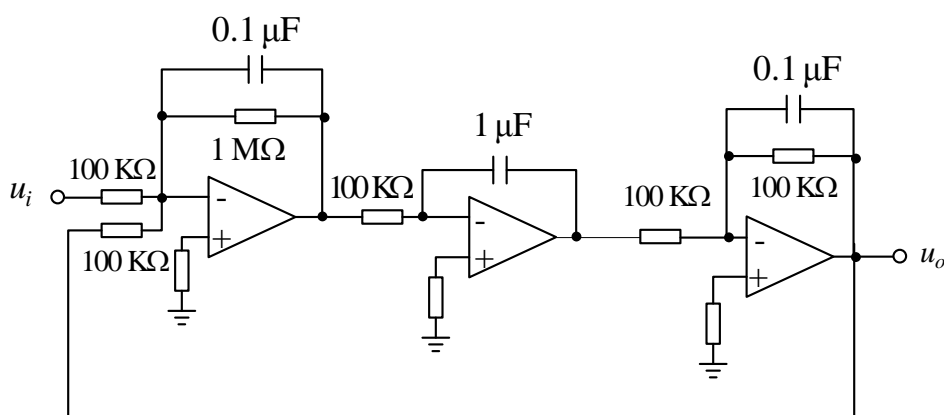


图 2-4 不加校正时的模拟电路图

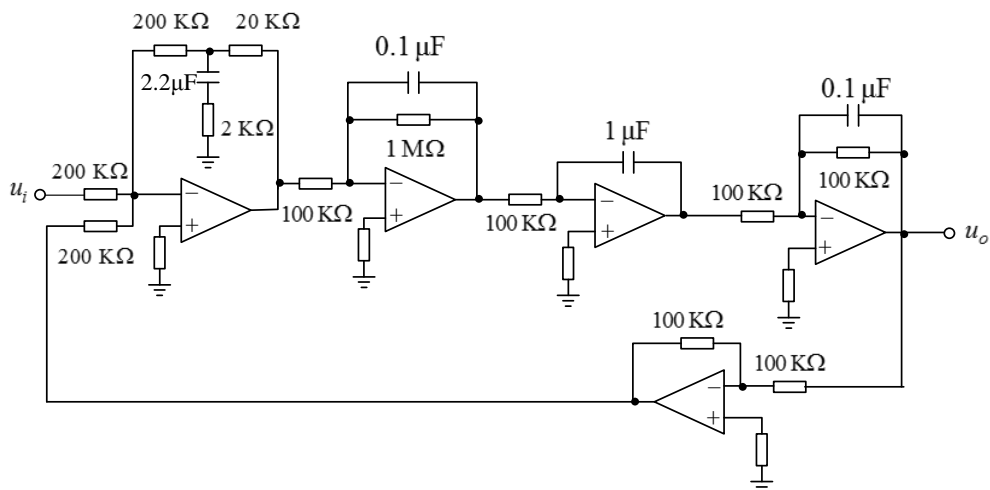


图 2-5 加超前校正的电路图

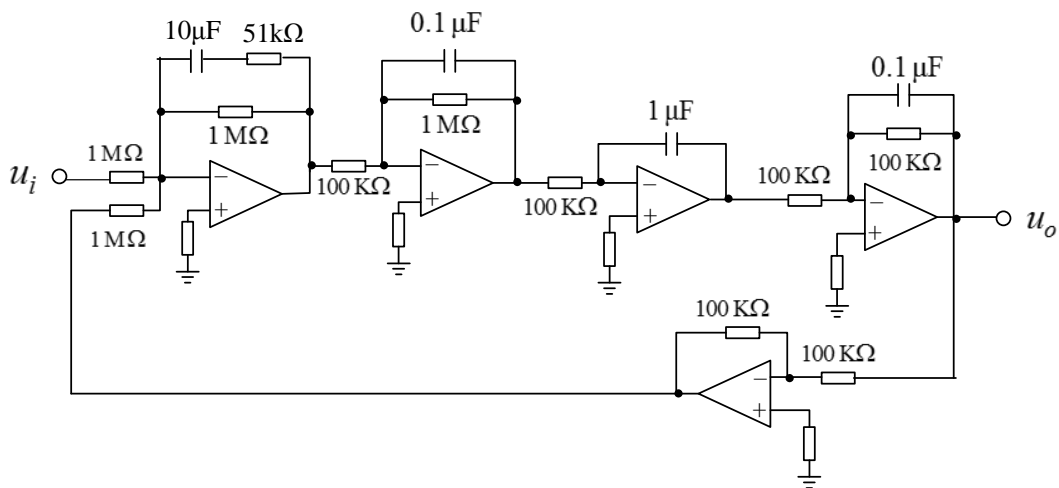


图 2-6 加滞后校正的电路图

3 实验二 状态反馈控制

3.1 实验目的

1. 训练设计模拟实验方案的能力。
2. 掌握用状态反馈的方法实现控制系统闭环极点的配置。
3. 观察状态反馈的性能，研究极点配置对系统闭环阶跃响应的影响。

3.2 实验原理简介

对于线性定常单输出系统 $\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$

判断系统能控性、能观性：

在 MATLAB 中，可利用能控性矩阵计算函数 $ctrb()$ 和能观性矩阵计算函数 $obsv()$ 和来求出系统的能控性和能观性矩阵，从而确定系统的能控性和能观性。其调用格式为：

$P = ctrb(A, B)$ 或 $P = ctrb(sys)$ ，其中 sys 为状态空间模型的对象。

$Q = obsv(A, C)$ 或 $Q = obsv(sys)$ ，其中 sys 为状态空间模型的对象。

用状态反馈的方法来配置系统极点，使之具有特定的性能。加入状态反馈后系统结构如图 3-1 所示：

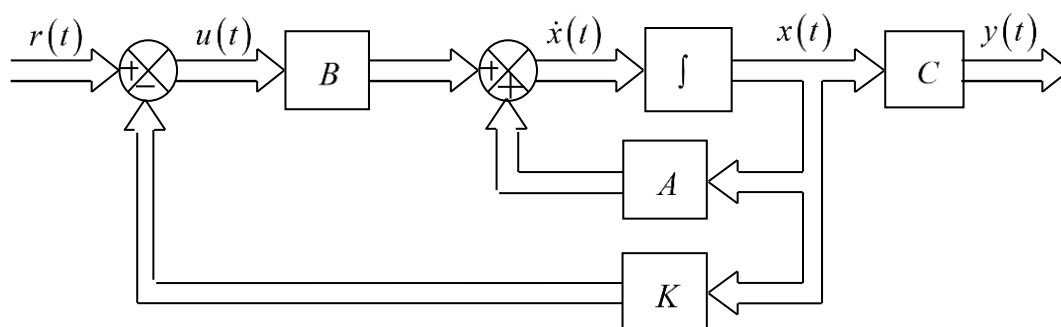


图 3-1 加入状态反馈后的系统结构

图 3-1 中受控系统 $\Sigma_0(A, B, C)$ 的状态空间表达式为：
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

反馈控制为： $u = r - Kx$

此时闭环系统的状态方程为：
$$\begin{cases} \dot{x} = (A - BK)x + Br \\ y = Cx \end{cases}$$

极点配置就是通过状态反馈矩阵 K 的选取，使闭环系统 $\Sigma(A - BK, B, C)$ 的极点，即状态矩阵 $(A - BK)$ 特征值恰好位于所希望的一组极点的位置上。

Matlab 提供了函数 $place()$ 与 $acker()$ ，利用 Ackermann 公式计算全状态反馈增益矩阵 K 。函数期望的调用格式为：

$$K = place(A, B, P)$$

其中 A 、 B 分别为状态矩阵与控制矩阵， P 为期望的极点向量，返回值 K 为状态反馈矩阵。

函数 $acker()$ 的调用格式与 $place()$ 相同。

3.3 实验内容

已知对象状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{10}{(0.5s + 1)(s + 1)}$$

模拟实现为：

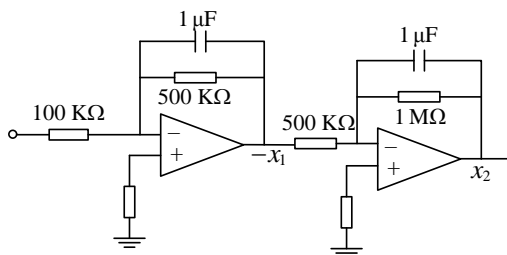


图 3-2 模拟实现图

1. 判断系统能控性、能观性。
2. 搭建 Matlab/Simlink 仿真模型，以单位阶跃信号为系统输入，观测闭环系统的阶跃响应。

(1) 对于状态反馈有

$$u = r - [K_1 \ K_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

r 为阶跃信号，当 $K_1 = 0$ 即为输出反馈。

调节 K_2 ，观测闭环系统的阶跃响应，使闭环系统的输出过渡过程呈无超调、有超调等情况。记录相应的 K_2 、超调量 σ 和过渡过程时间 t_s ，计算闭环系统的极点。

(2) 计算 $K_1 = 0$ 、 $K_2 = 5$ 和 $K_1 = 0.7$ 、 $K_2 = 5$ 两种情况下的闭环系统极点，观测闭环系统的阶跃响应，记录超调量 σ 和过渡过程时间 t_s 。

(3) 自行拟定三组 K_1 、 K_2 ，计算闭环系统的极点在所希望的位置上，分别测出阶跃响应的超调量 σ 和过渡过程时间 t_s ，振荡次数 N 等。

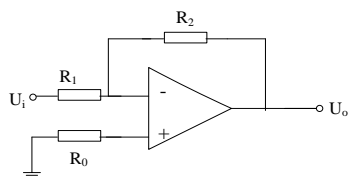
3. 自行设计输出反馈、状态反馈的模拟电路图，在模拟实验箱上完成上述 (1) (2) (3) 实验内容。
4. 根据实验结果，说明状态反馈优点。

4 附 A：控制理论中常用的 MATLAB 函数

函数名称	功能描述
Bode	计算并绘制波德响应图
c2d	把连续时间模型转化为离散时间模型
d2c	把离散时间模型转化为连续时间模型
damp	计算自然频率和阻尼系数
esort	通过实部对连续系统的极点进行排序
feedback	计算反馈闭环系统的模型
freqresp	估计选定频率的频率响应
gensig	产生输入信号
impulse	计算并绘制脉冲响应
initial	计算并绘制给定初始状态下的响应
margin	计算幅值和相角裕度
ngrid	对尼科尔斯 (Nichols) 图添加网格
nichols	绘制尼科尔斯图
nyquist	绘制奈奎斯特图
parallel	系统并联
pole	计算线性时不变模型的极点
pzmap	绘制线性时不变模型的零极点分布图
rlocus	计算并绘制根轨迹
roots	计算多项式的根
series	系统串联
sgrid, zgrid	为根轨迹图或者零极点图添加 s/z 平面网格
sisotool	单输入单输出系统设计工具箱
size	显示输入/输出/数组的维数
step	计算阶跃响应
tf	创建传递函数
zero	计算线性时不变模型的零点
zpk	构造零极点模型
ctrb	计算能控性矩阵
obsv	计算能观性矩阵
acker、place	极点配置函数
plot	绘图函数

5 附 B：典型环节的模拟实现

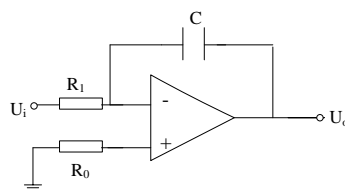
比例环节



$$\frac{U_o}{U_i} = K$$

$$K = \frac{R_2}{R_1}$$

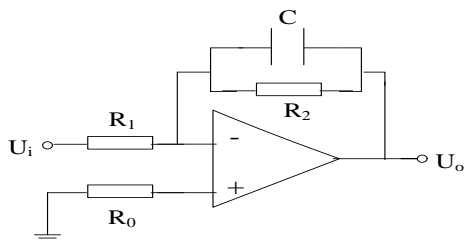
积分环节



$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{TS}$$

$$T = R_1 C$$

惯性环节

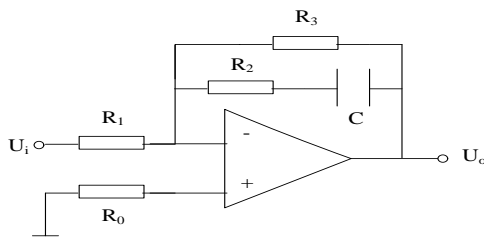


$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{K}{TS + 1}$$

$$K = \frac{R_2}{R_1}$$

$$T = R_2 C$$

比例积分

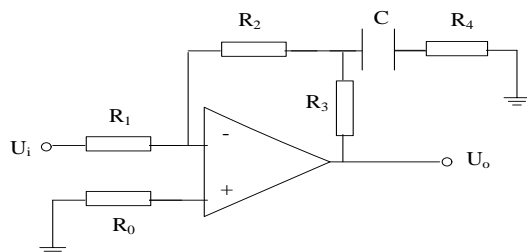


$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{K(\tau S + 1)}{(TS + 1)}$$

$$K = \frac{R_3}{R_1} \quad \tau = R_2 C$$

$$T = (R_2 + R_3) C$$

比例微分



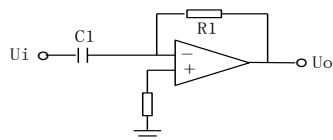
$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{K(\tau S + 1)}{TS + 1}$$

$$K = \frac{R_2 + R_3}{R_1}$$

$$T = R_4 C$$

$$\tau = [(R_2 // R_3) + R_4] C$$

微分环节



$$\frac{U_o}{U_i} = TS$$

$$T = R_1 C_1$$

6 参考文献

- [1] 吴麒, 王诗宓. 自动控制原理 (上), 清华大学出版社, 2006.
- [2] 郑勇 等编著. 自动控制原理实验教程, 国防工业出版社, 2010.
- [3] Control System Toolbox User's Guide: The MathWorks, 2007.
- [4] 赵世敏. 控制理论专题实验指示书: 清华大学自动化系, 2007.