



普通高等学校“十一五”规划教材

自动控制原理 实验教程

郑 勇 徐继宁 胡敦利 李艳杰 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等学校“十一五”规划教材

自动控制原理实验教程

郑勇 徐继宁 胡敦利 李艳杰 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书密切配合“自动控制原理”课程的理论教学,结合现代先进的实验教学方法,精心设计了16个控制理论实验及2个课程设计,内容兼顾经典控制理论和现代控制理论。每个实验都尽量提供了分立元件电路模拟和MATLAB软件仿真等多种实现方法。为方便读者,各实验前均有相关理论的知识点小结,可以帮助读者加强对实验过程的理解,提高分析解决问题的能力。

本书可作为高等学校自动化、电气类、机电类各专业自动控制原理实验的指导书,也可作为其他相关理工科学生和工程技术人员的实践参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理实验教程/郑勇等编著. —北京:国防工业出版社,2010.6

普通高等学校“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-06760-6

I. ①自... II. ①郑... III. ①自动控制理论—高等学校—教材②自动控制—实验—高等学校—教材
IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第072464号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京市李史山胶印厂

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12 $\frac{1}{4}$ 字数 306千字

2010年6月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价24.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

“自动控制”是一门理论性和实践性都很强的专业基础课,是自动化、电气、仪表及检测、机电、电子信息等工科专业的必修课程。通过本门课程的学习使学生建立模型、系统和控制的概念,学会系统分析和系统设计的方法。

这门课程理论性较强,较抽象,学生学习掌握有一定的难度,因此实验环节教学效果的好坏,对学生牢固掌握课堂理论知识,提高课程的教学质量起着非常重要的作用。在目前普遍课时压缩、教学要求提高的条件下,实验课程需要解决以下几个方面问题:如何通过实验教学加深学生对课程中基本理论和基本概念的理解,提高学生理论联系实际的能力;如何培养学生实践动手能力,分析解决工业控制过程中实际问题的能力;如何在实验教学中融入新的科技发展成果,培养利用现代化的实验和仿真手段,迅速检验和实施新的控制理论和算法的能力。

本书作者多年从事自动控制理论教学和实验指导工作,结合最新的现代计算机仿真实验手段,将控制系统理论知识灵活运用于实践教学环节中,内容丰富,层次分明,特色是理论与实验及仿真紧密结合,互相对照,将自控原理若干重要知识点分解到若干实验中去,使学生在完成实验的过程中加深对理论知识的理解,锻炼动手能力,以理论指导实践,以实践验证基本理论、探索理论应用,旨在提高学生分析问题、解决问题的能力 and 建立系统控制观念。同时通过实验思考题等方式引导学生对相关理论问题进行较深入的思考。

本书尽量避免对专用实验设备和实验场地的依赖,精心设计了16个控制理论实验及2个课程设计,内容兼顾经典控制理论和现代控制理论。每个实验都尽量提供了分立元件电路模拟和计算机软件仿真等多种实现方法,详细阐述了与实验相关的理论知识,并给出实验内容、实验要求与实验思考题,但一般不限制具体的实验步骤,方便师生根据本校的实际条件灵活选择实验方法,这些实验涉及的大多是基本的控制理论知识,因此适用于各种版本的控制理论教材。

本书由郑勇担任主编,参加编写的还有徐继宁、胡敦利、李艳杰。张若青、李志军、阎红娟等提出了宝贵建议和意见,研究生张红、徐兴虎、张路娟承担了部分内容的图形绘制和程序调试工作,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏不妥之处,恳请读者不吝赐教。联系邮箱为 cntzy@ncut.edu.cn。

作者

目 录

绪论 自动控制理论实验的实现方式	1
实验一 典型环节的特性分析	8
实验二 二阶系统的阶跃响应	18
实验三 线性系统的稳定性分析	28
实验四 线性系统的稳态误差分析	34
实验五 线性系统的根轨迹法	44
实验 5.1 控制系统的根轨迹	44
实验 5.2 根轨迹校正	47
实验 5.3 线性定常系统仿真环境 LTI Viewer	52
实验六 典型环节和系统频率特性实验	54
实验七 系统校正	70
实验八 PID 控制实验	89
实验九 典型非线性环节的静态特性	101
实验十 非线性系统的相平面分析法	106
实验十一 非线性系统的描述函数法	113
实验十二 采样系统分析	122
实验十三 数字 PID 控制实验	133
实验十四 极点配置全状态反馈控制	139
实验十五 状态反馈与状态观测器设计	150
实验十六 线性二次型最优控制器设计	160
课程设计一 双闭环直流调速系统课程设计	168
课程设计二 直线一级倒立摆控制系统课程设计	176
参考文献	191

绪论 自动控制理论实验的实现方式

自动控制理论实验可以通过多种方式来实现，虽然本实验教程所设计的实验并不依赖于特定的实验装置和实验环境，但是一个设计合理、功能完善、使用方便的实验平台无疑对提高实验教学效果起到非常重要的作用。

下面介绍电路分立元件模拟控制系统的原理及其装置。

机械、电气、热力学等各类物理系统的运动形式是多种多样的，但就其数学模型的描述而言却往往是一致的。两类具有同样运动规律但却有着不同物理属性的系统，表征它们状态的微分方程在数学形式上是相同的。人们可以利用对一类物理系统的研究代替对另一类具有同样微分方程的物理系统的研究，从而给自动控制系统的实验带来很大方便，考虑到经济性和教学要求，往往利用高性能运算放大器配合不同的输入阻抗网络和反馈阻抗网络来模拟控制系统的各种环节，再由多个环节组成系统对整个控制系统进行模拟。

图 0-1 是运算放大器的表示符号，图中“-”表示反相输入端，“+”表示同相输入端。因为同相放大电路共模电压的影响，易于导致运算误差，因此在自动控制理论实验中，一般采用反相端输入，同相端通过一个平衡电阻接地。

运算放大器在线性电路使用中，须构成负反馈电路，其输入端连接输入阻抗 Z_i ，在输出端和反相输入端之间要连接反馈阻抗 Z_f 。如图 0-2 所示，这时根据理想运放虚短和虚断的特性，运算放大器反相输入端电压为零、电流为零，可得到公式 $\frac{U_o}{Z_f} = -\frac{U_i}{Z_i} \Rightarrow \frac{U_o}{U_i} = -\frac{Z_f}{Z_i}$ ，这是运算放大器联系输出量与输入量的基本关系。电阻的阻抗是 R ，电容 C 的阻抗为 $\frac{1}{Cs}$ ，适当选择输入阻抗和反馈阻抗的形式和数值，就可实现各种不同环节和运算功能。

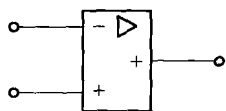


图 0-1 运算放大器的表示符号

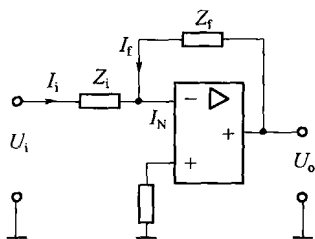


图 0-2 运算放大器的基本电路

1. 采用传统仪器的控制理论实验方案

图 0-3 是采用传统仪器的控制理论实验方案，一般由模拟实验箱、函数信号发生器、示波器、频谱分析仪等组成。

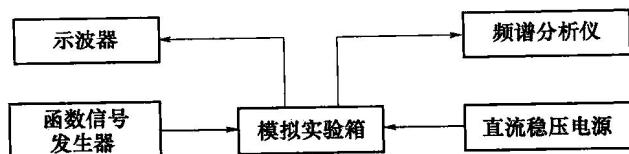


图 0-3 采用传统仪器的控制理论实验方案

这种方案的优点在于学生可以在做实验的过程中较熟练地掌握各种传统仪器的使用方法，但实验效果也受到仪器性能的制约，如普通示波器没有余辉显示功能，读数不准确等，另外调试仪器也占用了实验时间。

2. 采用计算机半实物仿真的实验方案

随着计算机技术的发展，如图 0-4 所示的计算机半实物仿真的实验方案逐渐显示出优势，图 0-5 是作者研制的基于这种方案的实验装置。这种实验方案将传统的实验方法与计算机结合起来，不仅使操作更灵活方便，实验内容更丰富，分析手段更科学化，而且明显提高了学生的学习兴趣。该系统中由计算机通过串口或 USB 接口与 A/D-D/A 接口板连接，计算机上安装有作者开发的实验软件，实现信号发生器、示波器、频率特性分析、计算机控制器等功能，使用非常方便。本系统充分发挥了计算机的优势，由计算机完成实验数据的采集、存储、回放和计算处理，在实验时就可以将实验结果与理论分析值进行对比，提高了实验效率。本实验装置还具有实验方案配置灵活、便于扩展实验项目等优点，由于计算机在不做实验时也可被充分利用，实际上也节约了设备投资。实验软件界面如图 0-6 所示。

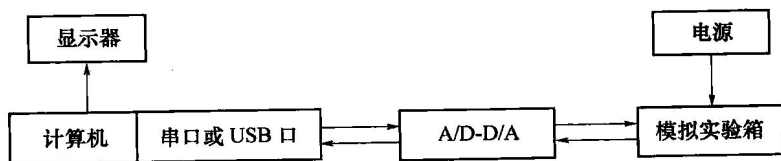


图 0-4 新型自动控制/计算机控制实验系统结构图

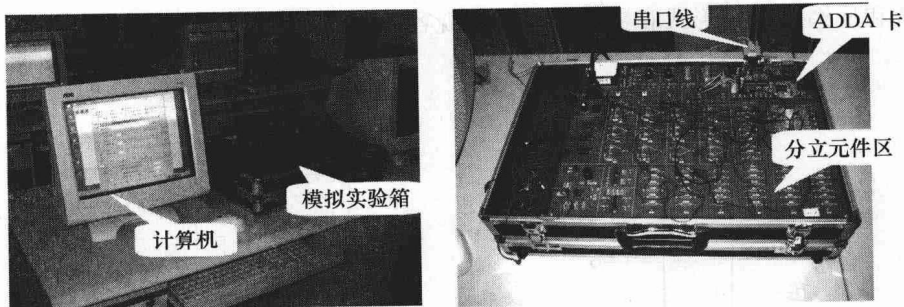


图 0-5 新型自动控制/计算机控制实验装置

作者设计的新型自动控制理论/计算机控制实验装置的特点：

(1) A/D-D/A 接口板采用 SOC 型单片机 cygnalF020，集成度高，板上拥有 2 路 D/A，8 路 A/D，精度为 12 位，范围 $-5V \sim +5V$ ，通过串口或 USB 接口与计算机相连，数据传输速度达到 115200b/s。

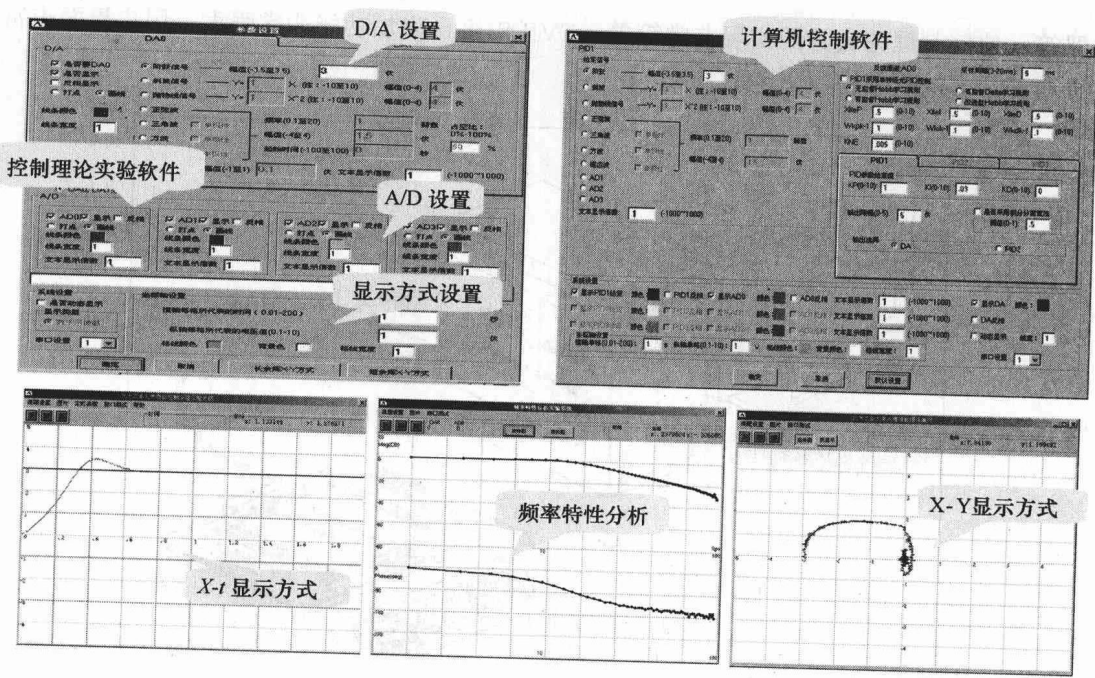


图 0-6 实验软件界面

- (2) 为适应不同的实验要求，信号发生器部分的设计具有丰富的波形产生功能及灵活性，可以实现 2 路 D/A 的同时使用，可发出阶跃、斜坡、加速度、正弦、方波、三角、锯齿、随机等多种信号，且幅值、频率、极性、初始相位可调，2 路 D/A 之间相位可调、可叠加。
 - (3) A/D 信号可选择多种显示方式（正反、颜色、线宽、打点画线等）。
 - (4) 可实现连续采集（只受硬盘容量限制）。
 - (5) 具有长余辉 X-Y（适合于相平面法分析）与短余辉 X-Y（适合于李莎育图形观察）显示方式。
 - (6) 实验数据可生成数据文件导入 MATLAB 进行分析，明显增强了实验效果。
 - (7) 频率特性测试模块可自动进行频率特性分析，生成 60 组数据，自动绘制波特图、奈奎斯特图。
 - (8) 计算机控制实验模块可以实现单个数字 PID 调节器或单神经元自适应 PID 调节器的设计，还可实现多至三个 PID 调节器的串级控制实验，所有控制算法均不需编程。
 - (9) 波形显示窗口右上方显示鼠标所在位置的 X-Y 坐标值，方便读取记录幅值时间等实验数据。
 - (10) 工具栏上的三个按钮分别是启动、暂停和停止。
- 在软件界面设计方面，特别注意了易操作性，学生不需专门学习即可使用。实验平台的软硬件均采用了通用性、开放性设计，不特别针对某些具体的实验项目，可充分满足教师学生自主开发设计型、创新性实验的需要。

3. 采用 NI EVILS 平台的实验方案

随着测试仪器的数字化、计算机化的发展，虚拟仪器逐渐取代传统仪器。NI 公司提出“软件就是仪器”的说法，这在 EVILS 平台上充分体现了出来。

如图 0-7 所示，EVILS 平台集成了许多功能性仪器，如电源、波形发生器、万用表、示

波器等, 使控制理论实验的实现非常简单, EVILS 平台附加功能非常强大, 用户界面丰富, 可以通过其开发软件实现更多的功能。

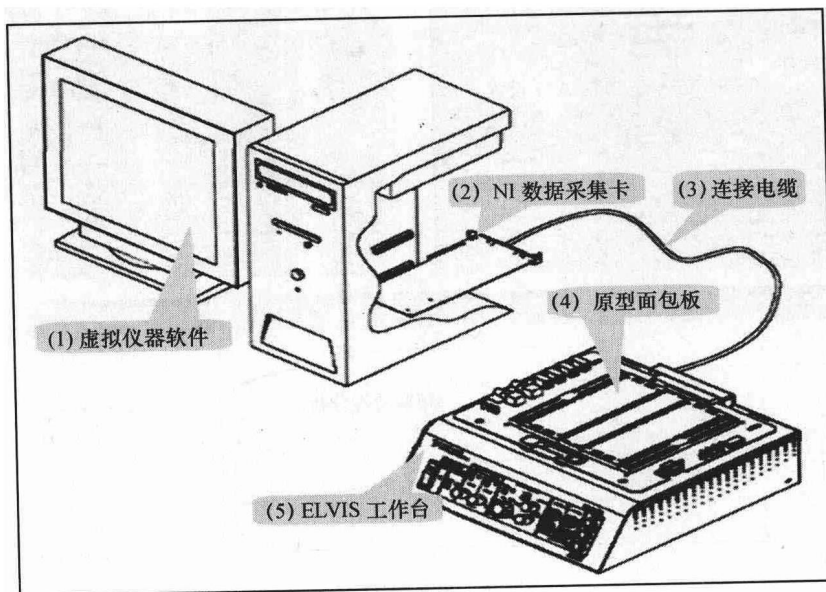


图 0-7 NI EVILS 实验平台的组成

(1) 安装在计算机上的软面板仪器, 包括实验中典型通用仪器的虚拟仪器(可编程电源、波形发生器、万用表、示波器、频谱分析仪等)。

(2) 多功能数据采集设备, 即 DAQ 装置, 基于 PCI 总线的数据采集卡, PCI-6251, 具有 8 路差分模拟输入, 采样频率达到 250kS/s; 2 路 16 位精度模拟输出; 24 个数字 I/O 口; 2 个 32 位、80MHz 的定时/计数器等性能。

(3) 连接电缆。

(4) 原型面包板上给出了 EVILS 所有信号终端, 分别列在面包板两旁, 并通过连接电缆接至 PCI 数据采集卡, 在原型面包板上可搭建电子电路。

(5) 工作台上的控制面板上有波形发生器、万用表、示波器等基本仪器。

EVILS 平台的开发软件就是 LabVIEW 软件。LabVIEW 软件是一种图形化的编程语言, 经常用于测量和自动化应用。在 LabVIEW 中, 可以使用一系列的工具和对象创建一个用户界面, 用户界面也称为前面板, 然后添加仪器功能。程序框图包含实现前面板仪器功能图标的连接及函数功能。而在 EVILS 中, 实验所用到的示波器等显示器件都嵌入其中, 直接使用即可。图 0-8 和图 0-9 为相关实验软件界面。

4. 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。其功能包括: 数值分析、矩阵运算、信号和图像处理、系统建模、控制和优化、计算结果和功能可视化等, MATLAB 将这些功能集成在一个极易使用的交互式环境中。基于 MATLAB 的控制系统的仿真实验, 是用 MATLAB 语言及 Simulink 对系统建模、分析与设计的一种实验方法。它能快速、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。下面简要介绍一下基于 MATLAB/Simulink 的控制系统建模与仿真的基本方法。

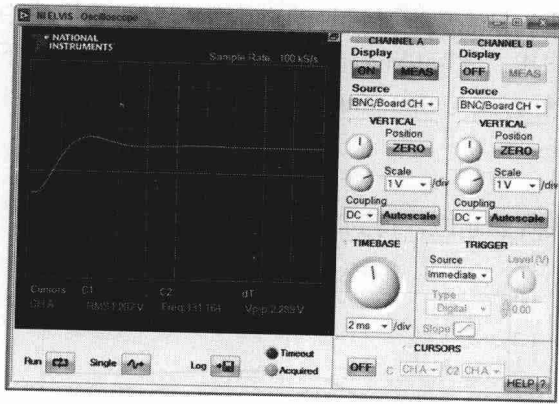


图 0-8 二阶系统阶跃响应

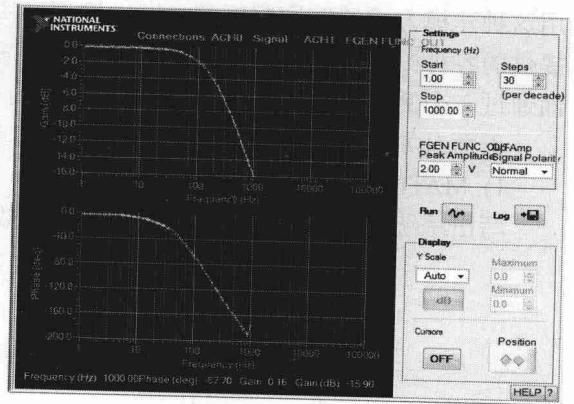


图 0-9 系统频率特性

1) MATLAB 语言

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，对应于函数 m 文件和独立 m 文件。独立 m 文件由命令描述行写成之后存储，即可在 MATLAB 平台上单独调用执行。函数 m 文件需要相应的输入输出变量参数方可执行，实验中采用 MATLAB 命令行方式。

2) Simulink 简介

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 的模块库浏览器，如图 0-10 所示。可以看见该模块库中包括以下几个子模块库：Continuous（连续时间模型库），Discontinuities（非连续时间模型库），Discrete（离散时间模型库），Math Operations（数学运算模型库），Ports&Subsystems（端口与子系统模型库），Signals Routing（信号路由库），Sinks（输出节点库），Sources（源节点库），User-Defined Functions（用户定义函数模型库）等。Simulink 为用户提供了用方框图进行系统建模的图形窗口，采

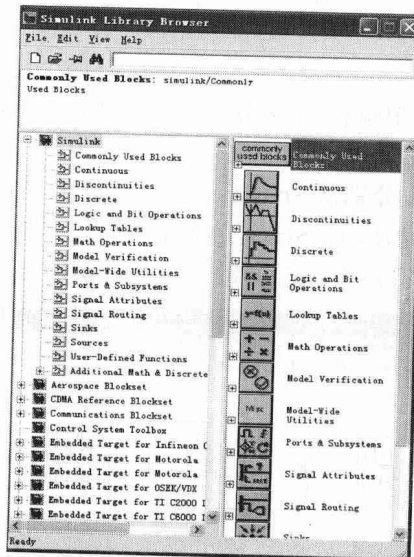


图 0-10 Simulink 模块库浏览器

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复制到 Simulink 的模型窗口中，就可以轻而易举地完成模型的创建。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。

下面对如图 0-11 的系统进行阶跃响应仿真。

1) 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 0-12）。

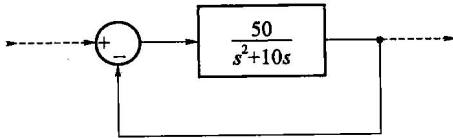


图 0-11 二阶系统方框图

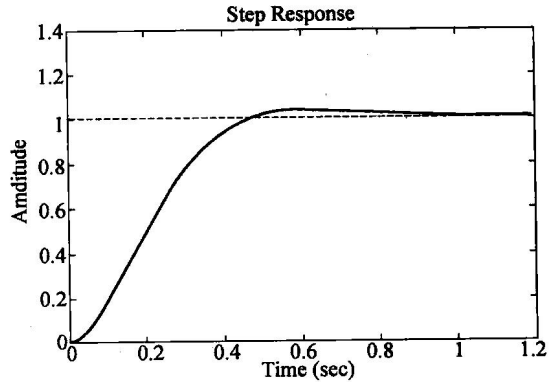


图 0-12 二阶系统阶跃响应

具体程序如下：

```

n1=[50];d1=[1 10 0];           %采用矩阵形式表示传递函数分子、分母
[n2, d2]=cloop(n1, d1, -1);    %构成单位负反馈闭环系统
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
    
```

2) Simulink 方式

(1) 在 MATLAB 命令窗口中执行 Simulink 命令，打开 Simulink Library Browser 窗口。

(2) 在 File 菜单中建立一个新的 Model 文件。

(3) 建立系统动态结构图：分别从 Sources（源节点库）、Math Operations（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 0-13 所示。

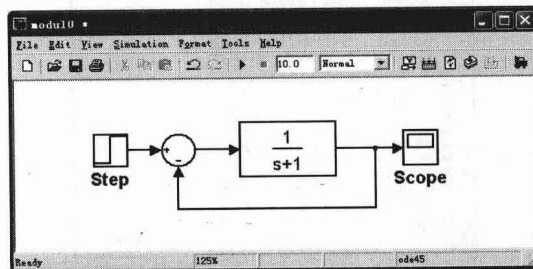


图 0-13 建立 Simulink 模块文件示例

(4) 参数修改: 分别单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 0-14 所示。

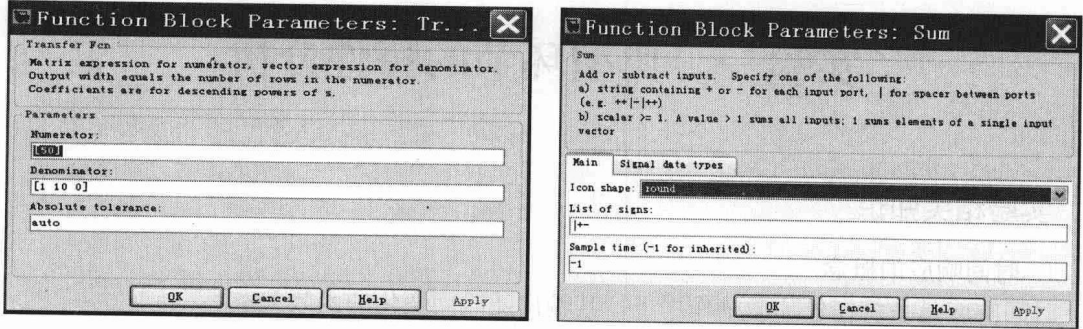


图 0-14 参数修改示例

(5) 仿真: 经过上述步骤以后即可得到图 0-11 所示系统的动态结构图, 如图 0-15 所示。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 0-16 所示。

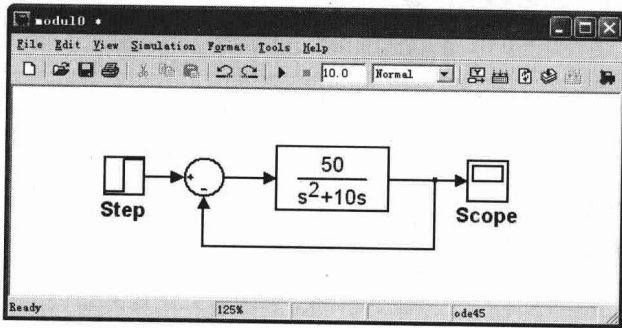


图 0-15 二阶系统动态结构图

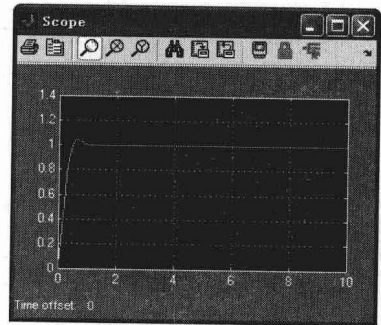


图 0-16 二阶系统阶跃响应

需要说明的是, MATLAB 软件功能强大, 内容丰富, 本书仅从完成实验的角度对相关涉及到的 MATLAB 软件功能加以说明, 如有需要系统学习 MATLAB 控制理论编程知识的读者, 请另行参阅相关书籍。

实验一 典型环节的特性分析

一、实验相关知识

1. 时间响应的概念

时间响应是系统在外加激励作用下，其输出随时间变化的函数关系。

1) 典型输入信号

控制系统中常用的典型输入信号有：单位脉冲函数，单位阶跃函数，单位斜坡函数，单位加速度函数，正弦函数等。这些函数都是简单的时间函数，便于数学分析和实验研究。表 1-1 列出了各种典型输入信号的时间函数、拉普拉斯变换及函数曲线。

表 1-1 典型输入信号

名称	时间函数	拉普拉斯变换	函数曲线
单位脉冲函数	$f(t) = \begin{cases} \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{1}{t_0} [1(t) - 1(t-t_0)], & 0 < t < t_0 \\ 0, & t < 0 \text{ 或 } t > t_0 \end{cases}$	1	
单位阶跃函数	$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$	$\frac{1}{s}$	
单位斜坡函数	$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t \geq 0 \end{cases}$	$\frac{1}{s^2}$	
单位加速度函数	$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1}{2}t^2, & t \geq 0 \end{cases}$	$\frac{1}{s^3}$	

(续)

名称	时间函数	拉普拉斯变换	函数曲线
正弦函数	$f(t) = A \sin \omega t$	$\frac{A\omega}{s^2 + \omega^2}$	

2) 动态过程

指系统在典型输入信号作用下，系统输出量从初始状态到最终状态的响应过程，又称瞬态过程或过渡过程。动态过程可以提供关于系统稳定性、响应速度及阻尼等信息。

3) 稳态过程

指系统在典型输入信号作用下，当时间 t 趋于无穷时，系统输出量的状态，稳态过程可以提供有关系统稳态输出、稳态误差等信息。

2. 一阶系统的时域分析

能够用一阶微分方程描述的系统为一阶系统，它的典型形式是一阶惯性环节，即

$$\frac{x_o(s)}{x_i(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (T \text{ 为一阶系统的时间常数})。$$

一阶系统的典型时间响应见表 1-2。常用拉普拉斯变换对照见表 1-3。

表 1-2 一阶系统的典型时间响应

响应名称	响应表达式	响应曲线
单位脉冲响应	$c(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{Ts + 1} \right] = \frac{1}{T} e^{-t/T}$ ($t \geq 0$)	
单位阶跃响应	$c(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \right] = 1 - e^{-t/T}$ ($t \geq 0$)	

(续)

响应名称	响应表达式	响应曲线
单位斜坡响应	$c(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{Ts+1} \cdot \frac{1}{s^2} \right] = t - T + Te^{-\frac{t}{T}}$ $(t \geq 0)$	<p>The graph shows the response \$c(t)\$ of a system to a unit ramp input \$r(t)=t\$. The input is a straight line starting from the origin. The output \$c(t)\$ starts at the origin and follows the input line with a delay \$T\$ and a steady-state error \$T\$. The time constant \$T\$ is indicated by the time it takes for the output to reach half the input value. The steady-state error is the constant vertical distance between the two lines as \$t\$ increases.</p>

表 1-3 常用拉普拉斯变换对照表

象函数 $F(s)$	原函数 $f(t)$	象函数 $F(s)$	原函数 $f(t)$
1	$\delta(t)$, 单位脉冲函数	$\frac{1}{s+a}$	$e^{-at}, a > 0$, 指数函数
$\frac{1}{s}$	$1(t)$, 单位阶跃函数	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$\sin \omega t$, 正弦函数
$\frac{1}{s^2}$	t , 单位斜坡函数	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	$\cos \omega t$, 余弦函数
$\frac{1}{s^3}$	$\frac{1}{2}t^2$, 单位加速度函数	$F(s+a)$	$f(t)e^{-at}$, 与指数函数相乘

二、实验目的

(1) 熟悉各种典型环节的传递函数及其特性,掌握典型环节的电路模拟研究方法和软件仿真研究方法。

(2) 测量各种典型环节的阶跃响应曲线,了解参数变化对其动态性能的影响。

(3) 学习由阶跃响应计算典型环节传递函数的方法。

三、实验原理

自动控制系统是由比例、积分、惯性等典型环节按照一定的关系连接而成的,熟悉这些典型环节对阶跃输入的响应特性,对分析自控系统将十分有益。

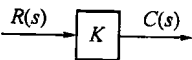
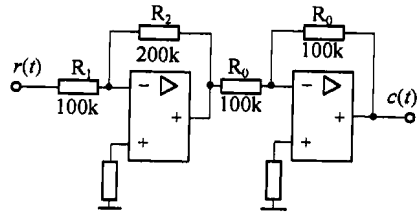
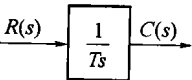
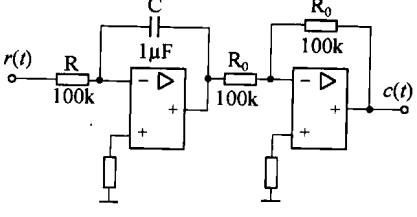
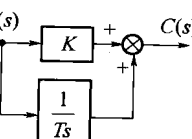
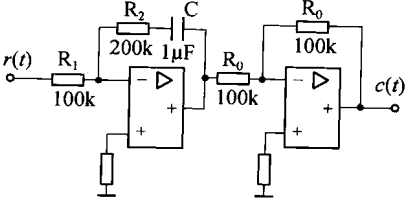
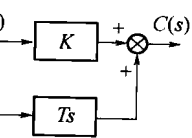
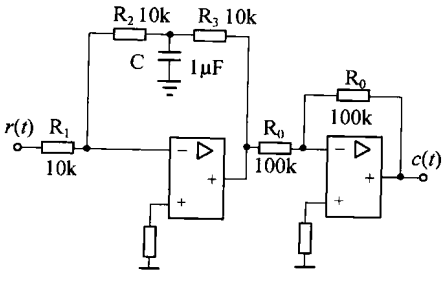
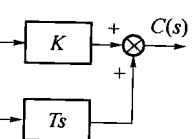
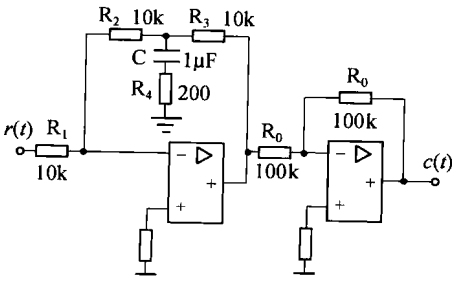
在自动控制理论实验中,往往利用运算放大器配合不同的输入阻抗网络和反馈阻抗网络来模拟控制系统的各种典型环节。

四、实验内容

1. 模拟电路实验方案

在模拟实验箱上搭建各典型环节的模拟电路并分析其阶跃响应(表 1-4、表 1-5)。

表 1-4 典型环节模拟电路及传递函数

典型环节	方框图	模拟电路图	传递函数
比例			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K$ <p>其中</p> $K = \frac{R_2}{R_1}$
积分			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts}$ <p>其中</p> $T = RC$
比例积分			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K + \frac{1}{Ts}$ <p>其中</p> $K = \frac{R_2}{R_1}, \quad T = R_1 C$
理想比例微分			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K(Ts + 1)$ <p>其中 $K = \frac{R_2 + R_3}{R_1}$,</p> $T = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C$
实际比例微分			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K(Ts + 1)$ <p>其中 $K = \frac{R_2 + R_3}{R_1}$,</p> $T = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C$ <p>($R_1, R_3 \gg R_4$)</p>

(续)

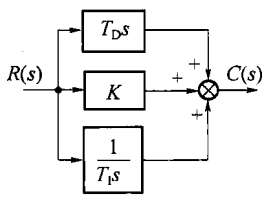
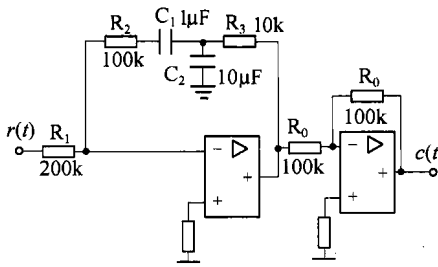
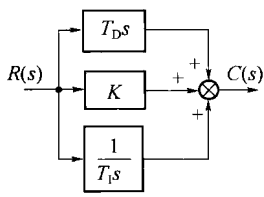
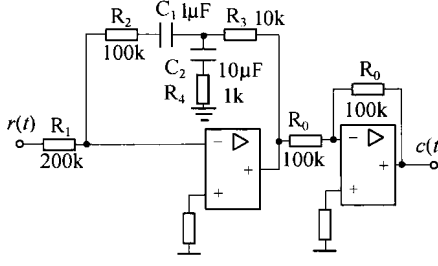
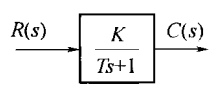
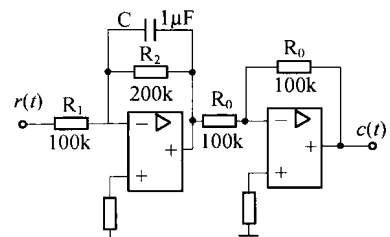
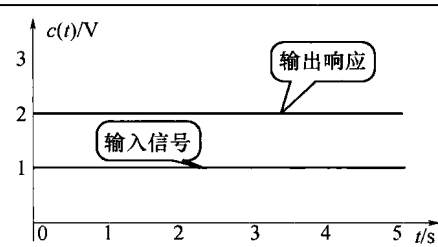
典型环节	方框图	模拟电路图	传递函数
理想比例积分微分			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$ $K_p = \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3 C_2}{R_1 C_1}$ $K_I = 1/R_1 C_1$ $K_D = \frac{R_2 R_3}{R_1} C_2$ <p>($R_2 \gg R_3, C_2 \gg C_1$)</p>
实际比例积分微分			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$ $K_p = \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3 C_2}{R_1 C_1}$ $K_I = 1/R_1 C_1$ $K_D = \frac{R_2 R_3}{R_1} C_2$ <p>($R_2 \gg R_3 \gg R_4, C_2 \gg C_1$)</p>
惯性			$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts+1}$ <p>其中 $K = \frac{R_2}{R_1}, T = R_2 C$</p>

表 1-5 典型环节阶跃响应

典型环节	阶跃响应	阶跃响应曲线
比例	$c(t) = K \quad (t \geq 0)$	
积分	$c(t) = \frac{1}{T} t \quad (t \geq 0)$	