



国家精品课程“自动控制原理”配套实验教材

电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

控制原理与系统分析

实验教程

吴怀宇 主编

吕建林 陈琳 熊凌 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国家精品课程“自动控制原理”配套实验教材
电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

控制原理与系统分析实验教程

吴怀宇 主编

吕建林 陈琳 熊凌 副主编

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是国家精品课程“自动控制原理”配套实验教材。全书共分8章,包括控制系统的数学模型建立、控制系统的时域分析、根轨迹法、控制系统的频域分析、控制系统的校正与设计、非线性控制系统、离散控制系统、状态空间分析法等,并对部分设计性实验提供了附录以作参考。与同类书相比,本书具有以下突出特点:运用了 MATLAB/Simulink 系统仿真技术,模拟实验与仿真实验相结合,基础性实验与提高性实验相结合,必做实验与选做实验相结合,控制系统分析与设计相结合。

本书既可作为高等学校自动化及其相关专业本科生“自动控制原理”课程的实验教材和参考书,也可作为相关工程技术人员进行科学研究的实验参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

控制原理与系统分析实验教程/吴怀宇主编. —北京:电子工业出版社, 2009.5

电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

ISBN 978-7-121-08697-7

I. 控… II. 吴… III. ①自动控制理论—实验—高等学校—教材②自动控制系统—实验—高等学校—教材 IV. TP13-33 TP273.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 062689 号

策划编辑:段丹辉

责任编辑:段丹辉

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×980 1/16 印张:9.75 字数:197 千字

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:21.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@sphci.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@sphci.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

“自动控制原理”作为自动化、电气工程及自动化、机械工程及自动化等专业的一门重要技术理论基础课程，具有较强的专业性和实践性，掌握自动控制原理基本理论、技术和方法等知识，对掌握自动化学科知识结构和提高科技创新能力具有重要作用，将自动控制理论与实践应用有效结合是自动化学科领域人才培养体系的重要组成部分。

本书是国家精品课程“自动控制原理”配套实验教材。全书共分8章，包括控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、根轨迹法、控制系统的频域分析、控制系统的校正与设计、非线性控制系统、离散控制系统和状态空间分析法，并对部分设计性实验提供了附录以作参考。与同类书相比，本书具有以下突出特点：运用了MATLAB/Simulink系统仿真技术，模拟实验与仿真实验相结合，基础性实验与提高性实验相结合，必做实验与选做实验相结合，控制系统分析与设计相结合。此外，针对冶金行业对应用型人才需求的要求，本书从工程实际中选取了一些典型实验问题，如实验3.4——带钢厚度检测延时系统根轨迹分析、实验3.5——轧机厚度控制系统根轨迹分析等，有助于学生了解自动控制技术在冶金工业中的应用，从而为工程实践奠定良好的基础。因此，本书既可作为高等学校自动化相关专业本科生“自动控制原理”课程的实验教材和参考书，也可作为相关工程技术人员进行科学研究的实验参考资料。

在本书的编写过程中，研究生王川、熊薇薇等同学参加了部分实验验证和书稿校对工作。作者借鉴和参考了相关专著、教材和论文，在此谨向本书参考文献中所列出的文献的编著者们和所有在出版本书过程中给予帮助和支持的领导、专家、同事和研究生们表示衷心的感谢！另外，作者还要特别感谢电子工业出版社的各位领导和编辑为本书的出版所付出的大量心血。由于作者学识水平有限，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

本书出版得到了国家精品课程“自动控制原理”建设项目[教高函(2008)22号]、全国高等学校教学研究中心课题(FIB070335-A1-10)等项目的资助。

编 者

目 录

第 1 章 控制系统的数学模型	1
实验 1.1 典型环节的电路模拟与数字仿真研究	1
一、实验目的	1
二、实验内容	1
三、实验步骤	3
四、实验要求	3
五、思考题	3
实验 1.2 基于 MATLAB 的系统数学模型建立与转换	3
一、实验目的	3
二、实验内容	3
三、实验步骤	4
四、实验要求	5
五、思考题	5
实验 1.3 双容水箱液面系统数学模型的建立	5
一、实验目的	5
二、实验内容	6
三、实验步骤	7
四、实验要求	8
五、思考题	8
实验 1.4 基于 MATLAB 的控制系统结构图化简	8
一、实验目的	8
二、实验内容	8
三、实验步骤	8
四、实验要求	10
五、思考题	10
第 2 章 控制系统的时域分析	11
实验 2.1 基于 MATLAB 的控制系统阶跃响应分析	11
一、实验目的	11

二、实验内容	11
三、实验步骤	12
四、实验要求	13
五、思考题	14
实验 2.2 二阶系统阶跃响应分析	14
一、实验目的	14
二、实验内容	14
三、实验步骤	15
四、实验要求	16
五、思考题	16
实验 2.3 基于 MATLAB 的控制系统的脉冲响应分析	16
一、实验目的	16
二、实验内容	16
三、实验步骤	17
四、实验要求	18
五、思考题	18
实验 2.4 典型系统的电路模拟及系统性能分析	19
一、实验目的	19
二、实验内容	19
三、实验步骤	19
四、实验要求	21
五、思考题	22
实验 2.5 系统稳态误差分析	22
一、实验目的	22
二、实验内容	22
三、实验步骤	23
四、实验要求	23
五、思考题	23
实验 2.6 基于 MATLAB 的控制系统稳定性分析	23
一、实验目的	23
二、实验内容	24
三、实验步骤	25
四、实验要求	25
五、思考题	26

第3章 根轨迹法	27
实验 3.1 控制系统的根轨迹分析	27
一、实验目的	27
二、实验内容	27
三、实验步骤	28
四、实验要求	30
五、思考题	30
实验 3.2 开环增益与零极点对系统性能的影响	30
一、实验目的	30
二、实验内容	30
三、实验步骤	30
四、实验要求	35
五、思考题	36
实验 3.3 基于 MATLAB 的控制系统根轨迹绘制	36
一、实验目的	36
二、实验内容	36
三、实验步骤	37
四、实验要求	39
五、思考题	39
实验 3.4 带钢厚度检测延时系统根轨迹分析	40
一、实验目的	40
二、实验内容	40
三、实验步骤	41
四、实验要求	41
五、思考题	42
实验 3.5 轧机厚度控制系统根轨迹分析	42
一、实验目的	42
二、实验内容	42
三、实验步骤	44
四、实验要求	46
五、思考题	47
第4章 控制系统的频域分析	48
实验 4.1 典型环节的频率特性测量	48
一、实验目的	48

二、实验内容	48
三、实验步骤	49
四、实验要求	50
五、思考题	50
实验 4.2 单容水箱液位 PID 控制实验	50
一、实验目的	50
二、实验内容	50
三、实验步骤	51
四、实验要求	52
五、思考题	52
实验 4.3 控制系统稳定性的研究	53
一、实验目的	53
二、实验内容	53
三、实验步骤	54
四、实验要求	55
五、思考题	55
实验 4.4 基于 MATLAB 的控制系统的伯德图绘制及分析	55
一、实验目的	55
二、实验内容	55
三、实验步骤	56
四、实验要求	57
五、思考题	58
实验 4.5 基于 MATLAB 的控制系统的奈奎斯特图绘制及分析	58
一、实验目的	58
二、实验内容	58
三、实验步骤	59
四、实验要求	60
五、思考题	60
第 5 章 控制系统的校正与设计	61
实验 5.1 PID 控制器的动态特性	61
一、实验目的	61
二、实验内容	61
三、实验步骤	63

四、实验要求	63
五、思考题	63
实验 5.2 基于 MATLAB 的系统超前校正设计	63
一、实验目的	63
二、实验内容	64
三、实验步骤	64
四、实验要求	65
五、思考题	65
实验 5.3 基于 MATLAB 的系统滞后校正设计	65
一、实验目的	65
二、实验内容	65
三、实验步骤	66
四、实验要求	67
五、思考题	68
实验 5.4 基于 MATLAB 的系统滞后-超前校正设计	68
一、实验目的	68
二、实验内容	68
三、实验步骤	68
四、实验要求	70
五、思考题	70
实验 5.5 随动系统的校正	70
一、实验目的	70
二、实验内容	71
三、实验步骤	71
四、实验要求	72
五、思考题	72
第 6 章 非线性控制系统	73
实验 6.1 典型非线性环节的 Simulink 仿真	73
一、实验目的	73
二、实验内容	73
三、实验步骤	73
四、实验要求	73
五、思考题	74

实验 6.2 典型非线性环节的电路模拟与数字仿真研究	74
一、实验目的	74
二、实验内容	74
三、实验步骤	74
四、实验要求	75
五、思考题	75
实验 6.3 非线性系统相平面法的电路模拟与数字仿真研究	75
一、实验目的	75
二、实验内容	75
三、实验步骤	75
四、实验要求	76
五、思考题	76
实验 6.4 非线性系统描述函数法的电路模拟与数字仿真研究	76
一、实验目的	76
二、实验内容	76
三、实验步骤	76
四、实验要求	77
五、思考题	77

第 7 章 离散控制系统

实验 7.1 采样控制系统动态性能和稳定性的混合仿真研究	78
一、实验目的	78
二、实验内容	78
三、实验步骤	78
四、实验要求	79
五、思考题	79
实验 7.2 采样控制系统串联校正的混合仿真研究	79
一、实验目的	79
二、实验内容	79
三、实验步骤	80
四、实验要求	80
五、思考题	80
实验 7.3 基于 MATLAB 的采样控制系统分析	81
一、实验目的	81

二、实验内容	81
三、实验步骤	81
四、实验要求	82
五、思考题	82
实验 7.4 采样控制系统的设计	82
一、实验目的	82
二、实验内容	82
三、实验步骤	83
四、实验要求	83
五、思考题	83
第 8 章 状态空间分析法	84
实验 8.1 基于 MATLAB 的线性系统状态空间描述	84
一、实验目的	84
二、实验内容	84
三、实验步骤	84
四、实验要求	86
五、思考题	86
实验 8.2 状态观测器模拟电路仿真与分析	86
一、实验目的	86
二、实验内容	86
三、实验步骤	86
四、实验要求	87
五、思考题	87
实验 8.3 基于 MATLAB 的状态反馈系统的设计与分析	88
一、实验目的	88
二、实验内容	88
三、实验步骤	88
四、实验要求	91
五、思考题	92
实验 8.4 极点配置全状态反馈控制的电路模拟与数字仿真	92
一、实验目的	92
二、实验内容	92
三、实验步骤	93
四、实验要求	93
五、思考题	93

实验 8.5 基于状态空间方法的二级倒立摆控制算法设计	93
一、实验目的	93
二、实验内容	93
三、实验步骤	96
四、实验要求	97
五、思考题	97
实验 8.6 基于 MATLAB 的最少拍控制系统设计	97
一、实验目的	97
二、实验内容	97
三、实验步骤	99
四、实验要求	103
五、思考题	104
实验 8.7 基于 MATLAB 的线性二次最优控制器设计	104
一、实验目的	104
二、实验内容	104
三、实验步骤	105
四、实验要求	106
五、思考题	107
附录 A ACT-I 实验箱典型环节的电路模拟实验方案	108
附录 B ACT-I 实验箱惯性环节的电路模拟实验方案	111
附录 C Simulink 仿真环境简介	115
附录 D 实验 6.2 的参考方案	117
附录 E 实验 6.3 的参考方案	121
附录 F 实验 6.4 的参考方案	126
附录 G 实验 7.1 的参考方案	129
附录 H 实验 7.2 的参考方案	132
附录 I 实验 8.4 的参考方案	135
附录 J 实验 5.4 中 leadc 函数示例	139
附录 K 实验 5.4 中 perf 函数示例	141
参考文献	143

第 1 章

控制系统的数字模型

实验 1.1 典型环节的电路模拟与数字仿真研究

一、实验目的

1. 通过实验熟悉并掌握实验装置和上位机软件的使用方法。
2. 通过实验熟悉各种典型环节的阶跃响应曲线, 了解参数变化对动态特性的影响。
3. 掌握电路模拟和数字仿真研究方法。

二、实验内容

1. 完成各种典型环节模拟电路的阶跃响应测试, 并研究参数变化对典型环节阶跃响应的影响。

(1) 比例环节

比例环节模拟电路的典型电路图如图 1.1 所示。比例环节的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K, \quad K = \frac{R_1}{R_0}$$

取 $R_0 = 100 \text{ k}\Omega$, $R = 10 \text{ k}\Omega$ 。

从输入端加入阶跃信号, 观察 $K = 1, 2, 3$ 时的输出波形, 并记录之。绘制曲线时, 应将输入、输出信号绘制于同一坐标系中, 以下记录波形时都要这样进行处理。

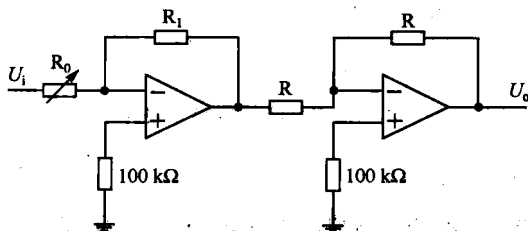


图 1.1 比例环节模拟电路

(2) 积分环节

积分环节模拟电路的典型电路图如图 1.2 所示。积分环节的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{Ts}, \quad T = R_0 C$$

取 $R_0 = 100 \text{ k}\Omega$, $R = 10 \text{ k}\Omega$ 。

改变电容 C 的阻值大小, 可以得到不同的积分时间常数 T 。

输入阶跃信号, 观测 $T = 0.1, 0.2 \text{ s}$ 时的输出波形, 并记录之。

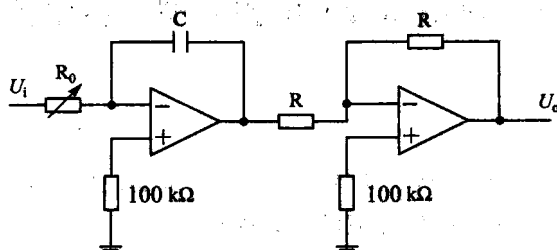


图 1.2 积分环节模拟电路

(3) 惯性环节

惯性环节模拟电路的典型电路图如图 1.3 所示。惯性环节的传递函数为

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{K}{Ts + 1}, \quad K = \frac{R_1}{R_0}, \quad T = R_1 C$$

取 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R = 10 \text{ k}\Omega$ 。

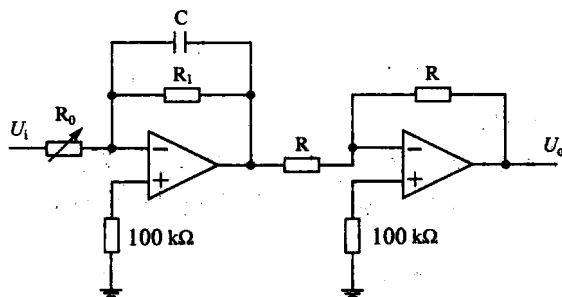


图 1.3 惯性环节模拟电路

从输入端加入阶跃信号,

①保持 $K = R_1/R_0 = 1$ 不变, 分别观测 $T = 0.1, 0.2 \text{ s}$ 时的输出波形, 并记录之。

②保持 $T = R_1 C = 0.1 \text{ s}$ 不变, 分别观测 $K = 0.5, 1$ 时的输出波形, 并记录之。

2. 运行所编制的程序,完成以上典型环节阶跃响应的数字仿真研究。

注意:波形记录应比较准确,特别是时间刻度。

三、实验步骤

1. 熟悉实验设备,设计并连接各种典型环节的模拟电路。

2. 利用实验设备完成各典型环节模拟电路的阶跃响应测试,并研究参数变化对典型环节阶跃响应的影响。

3. 调用上位机上的软件仿真程序,完成各典型环节阶跃响应的数字仿真研究,并与电路模拟测试的结果作比较。

4. 分析实验结果,完成实验报告。

注:实验方法可参见附录 A。

四、实验要求

1. 记录实验线路原始数据,测量参数及波形图。

2. 对实验内容(3),从绘制的阶跃响应曲线上求出 K, T 和 t_s ,并将 t_s 与理论计算值进行比较,将 K, T 与实验时设置的值进行比较。

3. 根据实验结果,分析一阶系统 t_s 与 K, T 之间的关系。

4. 比较并分析模拟与仿真实验结果,作出必要的结论。

五、思考题

1. 积分环节和惯性环节的主要区别是什么?在什么情况下惯性环节可视为积分环节?

2. 惯性环节在什么条件下可视为比例环节?能否通过实验验证?

3. 积分时间常数如何从阶跃响应的输出波形中测出?

实验 1.2 基于 MATLAB 的系统数学模型建立与转换

一、实验目的

1. 通过实验熟悉 MATLAB 的实验环境。

2. 掌握 MATLAB 建立系统数学模型的方法。

二、实验内容

1. 用 MATLAB 建立系统 $G(s) = \frac{s+2}{s^2+5s+10}$ 的多项式模型。

2. 用 MATLAB 建立系统 $G(s) = \frac{10(s+1)}{(s+2)(s+5)(s+10)}$ 的零极点模型和多项式模型。

3. 用 MATLAB 求解例 1。

例 1 在图 1.4 中, 已知 $G(s)$ 和 $H(s)$ 两方框所相对应的微分方程分别是

$$6 \frac{dc(t)}{dt} + 10c(t) = 20e(t)$$

$$20 \frac{db(t)}{dt} + 5b(t) = 10c(t)$$

且初始条件为零, 试求传递函数 $C(s)/R(s)$ 及 $E(s)/R(s)$ 。

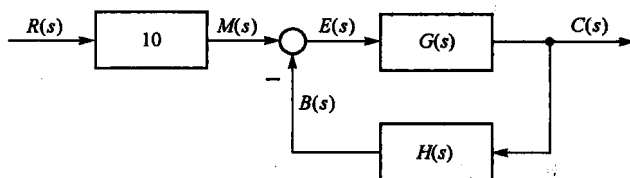


图 1.4 系统原理方框图

注: 在 MATLAB 中, 用函数 `tf()` 可以建立一个连续系统传递函数模型, 用函数 `zpk()` 来直接建立连续系统的零极点增益模型, 用函数 `ss()` 来直接建立连续系统的状态模型。

三、实验步骤

1. 用 MATLAB 建立系统传递函数模型的程序如下:

```
num=[1 2];           %定义变量 num 为传递函数分子系数向量, 并赋值
den=[1 5 10];        %定义变量 den 为传递函数分母系数向量, 并赋值
sys=tf(num,den)      %建立系统传递函数的多项式模型, 赋给变量 sys
```

运行结果为

```
Transfer function:
      s+2
```

```
-----
      s^2+5s+10
```

2. 用 MATLAB 建立系统传递函数模型的程序如下:

```
z=-1;                %定义变量 z 为传递函数的零点向量, 并赋值
p=[-2 -5 -10];      %定义变量 den 为传递函数的极点向量, 并赋值
K=10;                %定义变量 K 为传递函数的增益, 并赋值
sys=zpk(z,p,K)       %建立系统传递函数的零极点增益模型, 赋给变量 sys
```

运行结果为

```
Zero/pole/gain:
10(s+1)
-----
(s+2)(s+5)(s+10)
newsys=tf(sys)    %将系统零极点增益模型 sys 转化为多项式模型 newsys
```

运行结果为

```
Transfer function:
10s+2
-----
s^3+17s^2+80s+100
```

3. 由题可知

$$G(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = \frac{20}{6s+10} = \frac{10}{3s+5}, \quad H(s) = \frac{B(s)}{C(s)} = \frac{10}{20s+5} = \frac{2}{4s+1}$$

用 MATLAB 建立系统传递函数模型的程序和运行结果如下:

```
s=tf('s');          %定义 s 为拉氏变量
G=10/(3*s+5);        %建立 G(s) 模型
H=2/(4*s+1);         %建立 H(s) 模型
Gf=feedback(G,H,-1); %建立闭环的传递函数
Gcr=series(10,Gf)     %求 C(s)/R(s)
Ger=10/(1+G*H)        %求 E(s)/R(s)
```

四、实验要求

1. 记录各实验所求得的传递函数模型, 熟悉函数的各种调用格式。
2. 建立并记录各种类型的系统模型。

五、思考题

1. 如何灵活选择函数的各种不同调用格式?
2. 复杂系统如何用 MATLAB 建立系统模型? 如何对结构图进行化简?
3. 求系统传递函数有哪些方法? 各有何特点? 适用于什么情况?

实验 1.3 双容水箱液面系统数学模型的建立

一、实验目的

1. 熟悉双容水箱液面系统的原理及其数学模型。
2. 通过双容水箱液面系统进一步熟悉运用 MATLAB 建立系统数学模型的方法。