

自动控制理论实验

◎马 慧 吕宏诗 李 婷 陈 白 编著

中国农业科学技术出版社

自动控制理论实验

马 慧 吕宏诗 李 婷 陈 白 编著

中国农业科学技术出版社

（北京）

（北京）

（北京）

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论实验/马慧,吕宏诗,李婷,陈白编著. —北京:中国农业科学技术出版社,2011. 8

ISBN 978-7-5116-0502-3

I. ①自… II. ①马…②吕…③李…④陈 III. ①自动控制理论
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 114519 号

责任编辑 崔改泵

责任校对 贾晓红

出版发行 中国农业科学技术出版社

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编:100081

电 话 (010) 82109704(发行部) (010) 82106631(编辑室)

(010) 82109703(读者服务部)

传 真 (010) 82106624

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 新华书店北京发行所

印 刷 者 河北省昌黎县第一印刷厂

开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张 11

字 数 230 千字

版 次 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

定 价 17.00 元

内 容 简 介

为适应教学改革及学时压缩的需要,本书以最新教学大纲为依据,对作者多年教学改革实践的经验进行总结,分别用经典控制理论与现代控制理论的分析与设计方法来实现系统的实验研究,并利用计算机仿真技术来实现系统的计算机辅助设计与分析。

全书共分三章,内容有古典控制理论基础实验,现代控制理论基础实验,控制理论 MATLAB 仿真实验。利用的实验设备 XMN-2 型自动控制理论学习机、示波器在附录中均给出了详细使用说明。

前 言

自动控制理论是一门理论性和工程应用性都很强的技术基础课。加强实验教学,不但有助于理论联系实际,深化理论教学,而且有助于培养学生的科学实验和工程实践能力。针对传统自动控制理论实验教学存在的不足之处,在广泛调研和反复实验的基础上,我们以培养学生的基本操作技能、知识综合应用能力和创新能力为目标,提出对自动控制理论实验教学进行改革,开设研发综合性实验。这就需要一部完整的实验教材,以便学生自学和进行实验预习。本着这一目的,作者对多年教学改革实践的经验进行了总结,将经典控制理论与现代控制理论的实验教学内容有机地结合起来,增加了综合实验和计算机辅助设计内容,编著了本书。

本书以实验原理、实验任务和注意事项为主要内容,而实验方案、方法和步骤等可由学生根据自动控制理论的有关知识和老师的相关指导自己确定。实验过程中,要求学生自主设计完成实验,并进行分析总结实验结果,给出相关结论。采用这种方式,既有利于充分发挥学生的主观能动性,又有利于学生分析、解决问题和创新能力的提高。

自动控制理论实验的重点就是用先进的科学方法和实验仪器,研究系统的动态特性并实现计算机仿真,本书第1、第2章分别用经典控制理论与现代控制理论的分析与设计方法实现系统的实验研究;第3章主要利用计算机仿真技术实现系统的计算机辅助设计与分析。本书可以作为自动化、电气工程及其自动化、检测技术与自动化装置、电子信息工程、计算机科学与技术、通信工程等电气信息类专业的本科生实验教材,经选择也可作为其他非自动化专业的自动化课程实验教材,还可供从事自动控制系统工程的技术人员参考。

书中实验可根据教学要求和实验条件的不同选做,部分实验可供学生课余扩展研究使用。一般情况下,古典控制理论实验需10学时;现代控制理论实验需6学时。

本书共分3章。第1章和附录部分由马慧、李婷编写,第2章由吕宏诗、李婷编写,第3章由王振春、陈白编写,张强参与了部分内容的修改,全书由马慧统稿完成。

由于水平有限,不当之处在所难免,恳请读者不吝指教。

编 者
2011年7月

目 录

第1章 古典控制理论基础实验	1
1.1 典型基本环节模拟研究的原理与实验	1
1.1.1 原理	1
1.1.2 典型基本环节的模拟研究实验	4
1.2 典型系统的瞬态响应和稳定性原理与实验	12
1.2.1 原理	12
1.2.2 典型系统的瞬态响应与稳定性实验	17
1.3 控制系统校正概论与实验	23
1.3.1 原理	23
1.3.2 控制系统校正实验(一)	27
1.3.3 控制系统校正实验(二)	31
1.4 采样过程、采样定理与实验	34
1.4.1 原理	34
1.4.2 采样系统分析实验	36
1.4.3 采样控制系统校正实验	40
第2章 现代控制理论基础实验	42
2.1 典型非线性环节的原理与实验	42
2.1.1 原理	42
2.1.2 典型非线性环节实验	46
2.2 非线性控制系统的原理与实验	49
2.2.1 原理	49
2.2.2 非线性系统实验	50
2.3 状态反馈	55
2.3.1 原理	55
2.3.2 状态反馈实验	56
2.4 控制系统不同状态模型原理与实验	59
2.4.1 原理	60
2.4.2 控制系统不同状态模型实验	62

第3章 控制理论实验 MATLAB 仿真	67
3.1 控制系统计算机仿真概述	67
3.1.1 计算机仿真和辅助设计	67
3.1.2 仿真的分类	69
3.1.3 仿真技术的应用与发展	69
3.1.4 计算机仿真软件	70
3.2 MATLAB 基础	71
3.2.1 窗口环境	71
3.2.2 矩阵运算及多项式处理	74
3.2.3 绘图	80
3.2.4 程序设计	83
3.3 MATLAB 系统建模	88
3.3.1 传递函数描述	88
3.3.2 状态空间描述	90
3.3.3 模型的转换与连接	91
3.4 MATLAB 系统分析	94
3.4.1 稳定性分析	94
3.4.2 时域分析	94
3.4.3 频域分析	95
3.4.4 根轨迹分析	97
3.5 SIMULINK 初步	98
3.5.1 模型建立	99
3.5.2 功能模块操作	101
3.5.3 线的处理	102
3.5.4 自定义功能模块	103
3.5.5 仿真运行	104
3.5.6 仿真实例	108
3.6 控制理论 MATLAB 仿真实验	110
3.6.1 实验一 典型环节	110
3.6.2 实验二 系统的瞬态响应和稳定性	115
3.6.3 实验三 根轨迹和频率特性法	118
3.6.4 实验四 控制系统校正	122
3.6.5 实验五 采样系统	124
3.6.6 实验六 典型非线性环节	131

3.6.7 实验七 非线性控制系统	135
3.6.8 实验八 状态反馈	137
3.6.9 实验九 控制系统不同状态模型实现	139
附录1 XMN-2型自动控制原理学习机使用说明	144
附录2 数字示波器使用介绍	150
参考文献.....	166

$$(1-1) \quad \frac{1}{1+sT} = \frac{C(s)}{R(s)} = C(s)$$

第1章 古典控制理论基础实验

1.1 典型基本环节模拟研究的原理与实验

实际的系统往往是很复杂的。为了分析方便起见,一般把一个复杂的控制系统分成一个个小部分,称为环节。从动态方程、传递函数和运动特性的角度看,不宜再分的最小环节称为基本环节。控制系统虽然是各种各样的,但是常见的典型基本环节并不多。本节分两部分介绍,一是最常见的典型基本环节原理,二是典型基本环节实验。

1.1.1 原理

以下是基本环节及其传递函数。叙述中设 $r(t)$ 为环节的输入量, $c(t)$ 为环节的输出量, $G(s)$ 为传递函数。

1. 比例环节(放大环节)

比例环节的动态方程为

$$c(t) = Kr(t) \quad (1-1)$$

由式(1-1)可求出比例环节的传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K \quad (1-2)$$

式中: K 为常数,称为放大系数。比例环节又称为放大环节,它的输入量与输出量成比例,它的传递函数是一个常数。

几乎每一个控制系统中都有比例环节。由电子线路组成的放大器是最常见的比例环节。机械系统中的齿轮减速器,以输入轴和输出轴的角位移(或角速度)作为输入量和输出量,也是一个比例环节。伺服系统中使用的绝大部分测量元件,如电位器、旋转变压器、感应同步器、光电码盘、光栅、直流测速发电机等,都可以看成是比例环节。

2. 惯性环节

惯性环节的动态方程为

$$T \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) \quad (1-3)$$

由式(1-3)可求得惯性环节的传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (1-4)$$

式中: T 为时间常数。

惯性环节又称为非周期环节。自动控制系统中,经常包含有惯性环节,它具有一个储能元件。惯性环节的特点是,在阶跃信号作用下,输出 $c(t)$ 不能立刻达到稳态值,瞬态输出以指数规律变化。如直流电机的励磁电路就是一个惯性环节。

3. 积分环节

积分环节的动态方程为

$$T \frac{dc(t)}{dt} = r(t) \quad (1-5)$$

由式(1-5)可得积分环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts} \quad (1-6)$$

式中: T 为时间常数。

积分环节的输出量等于输入量的积分。积分环节具有记忆功能,常用来改善系统的稳态性能。

4. 振荡环节

振荡环节的动态方程是

$$T^2 \frac{d^2c(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) \quad (0 \leq \xi < 1) \quad (1-7)$$

由(1-7)式可得振荡环节的传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (0 \leq \xi < 1) \quad (1-8)$$

式中: T, ξ, ω_n 皆为常数,且 $\omega_n = 1/T$ 。 T 为该环节的时间常数; ω_n 为无阻尼自振角频率, ξ 为阻尼比。此环节属于二阶环节,当 $0 \leq \xi < 1$ 时,该环节称为振荡环节,因为这时它的输出信号具有振荡的形式。如图 1-1 所示的 LRC 电路在阻尼比 ξ 小于 1 时就是一个振荡环节,如图 1-2 所示的机械系统在阻尼比 ξ 小于 1 时也是一个振荡环节。

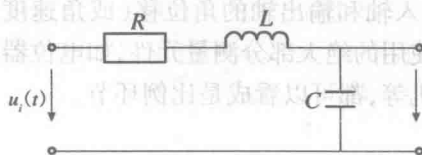


图 1-1 LRC 电路

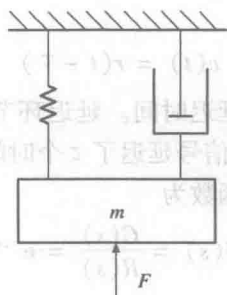


图 1-2 机械系统

5. 纯微分环节

纯微积分环节往往简称为微分环节,它的微分方程为

$$c(t) = \frac{dr(t)}{dt} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可得纯微分环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = s \quad (1-10)$$

纯微分环节的输出信号是输入信号的微分。理想微分环节的输出量与输入量的变化速度成正比,常用来改善系统的动态特性。

6. 一阶微分环节

一阶微分环节的微分方程为

$$c(t) = \tau \frac{dr(t)}{dt} + r(t) \quad (1-11)$$

式中: τ 为该环节的时间常数。

由式(1-11)可得一阶微分环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \tau s + 1 \quad (1-12)$$

7. 二阶微分环节

二阶微分环节的微分方程为

$$c(t) = \tau^2 \frac{d^2 r(t)}{dt^2} + 2\xi\tau \frac{dr(t)}{dt} + r(t) \quad (1-13)$$

由式(1-13)可得二阶微分环节的传递函数是

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1 \quad (1-14)$$

式中: ξ 为常数, τ 为该环节的时间常数。

8. 延迟环节

延迟环节的动态方程为

$$c(t) = r(t - \tau) \quad (1-15)$$

式中: τ 为常数, 称为该环节的延迟时间。延迟环节任意时刻的输出值等于 τ 时刻以前的输入值, 也就是说, 输出信号比输入信号延迟了 τ 个时间单位。

延迟环节是线性环节, 它的传递函数为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = e^{-\tau s} \quad (1-16)$$

1.1.2 典型基本环节的模拟研究实验

1. 实验目的

(1) 了解并掌握 XMN-2 型自动控制原理学习机模拟电路的组成、工作原理及使用方法。

(2) 掌握典型环节传递函数及模拟电路的构成方法, 培养学生实验技能。

(3) 熟悉各种典型环节的阶跃响应曲线。

(4) 了解参数变化对典型环节阶跃响应的影响。

(5) 掌握示波器的使用方法。

2. 实验要求

(1) 实验前复习教材中的相关内容, 做好实验预习报告。

(2) 画出实验模拟电路, 按实验步骤进行实验。

(3) 观测各种典型环节的单位阶跃响应曲线, 如实记录原始数据与输出波形图。

(4) 观测参数变化对典型环节阶跃响应的影响。

(5) 解释实验中出现的各种现象, 并将实验结果与理论结果进行比较分析。

(6) 回答思考题, 并写出对本实验的体会和意见。

3. 实验仪器

(1) XMN-2 型自动控制原理学习机。

(2) 示波器。

(3) 计算机(MATLAB 仿真可选)。

4. 实验原理和电路

本实验是利用运算放大器的基本特性(开环增益高、输入阻抗大、输出阻抗小、输入与输出间呈线性特性等), 设置不同的反馈网络来模拟各种环节。

典型环节原理方框图及其模拟电路如下:

(1) 比例(P)环节, 其方框图如图 1-3 所示。

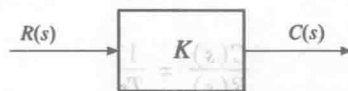


图 1-3 比例环节原理方框图

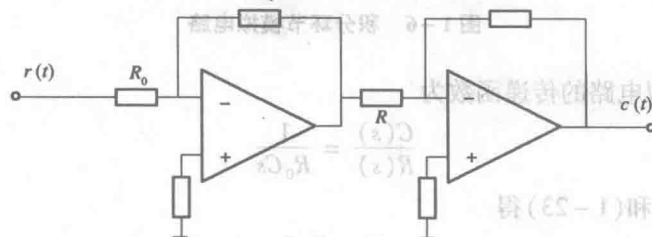
其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = K \quad (1-17)$$

比例环节的模拟电路如图 1-4 所示。

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{R_1}{R_0} \quad (1-18)$$



$$R_0 = 200\text{k}\Omega; R_1 = 100\text{k}\Omega (200\text{k}\Omega); R = 10\text{k}\Omega$$

图 1-4 比例环节模拟电路

比较式(1-17)和式(1-18)得

$$K = R_1/R_0 \quad (1-19)$$

当输入信号为单位阶跃信号,即 $r_i(t) = 1(t)$ 时, $R_i(s) = 1/s$,则由式(1-17)得

$$C(s) = K \cdot \frac{1}{s} \quad (1-20)$$

所以输出响应为:

$$c(t) = K \quad (t \geq 0) \quad (1-21)$$

(2) 积分(I)环节,其原理方框图如图 1-5 所示。

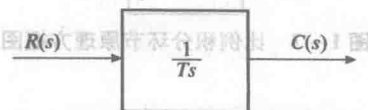
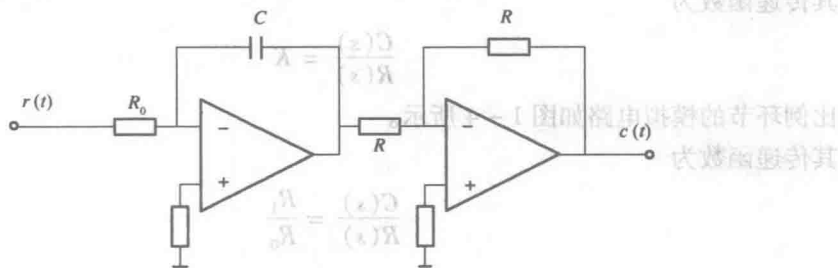


图 1-5 积分环节原理方框图

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts} \quad (1-22)$$

积分环节的模拟电路如图 1-6 所示。



$$C = 1\mu\text{F} (2.2\mu\text{F}); R_0 = 200\text{k}\Omega; R = 10\text{k}\Omega$$

图 1-6 积分环节模拟电路

积分环节的模拟电路的传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{R_0 C s} \quad (1-23)$$

比较式(1-22)和(1-23)得

$$T = R_0 C \quad (1-24)$$

当输入为单位阶跃信号,即 $r_i(t) = 1(t)$ 时, $R_i(s) = 1/s$,则由式(1-22)得

$$C(s) = \frac{1}{Ts} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{Ts^2} \quad (1-25)$$

所以输出响应为

$$C(t) = \frac{1}{T} t \quad (1-26)$$

(3) 比例积分(PI)环节,其方框图如图 1-7 所示。

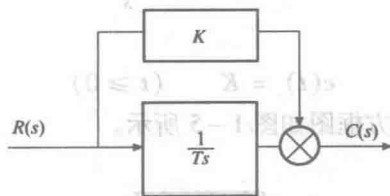
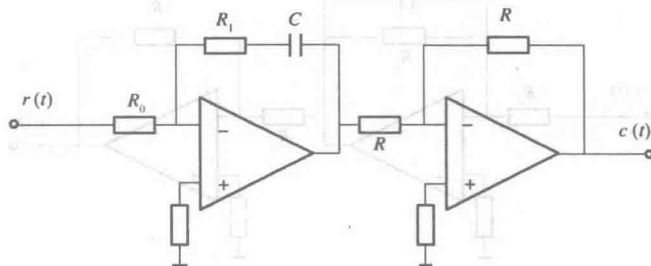


图 1-7 比例积分环节原理方框图

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = K + \frac{1}{Ts} \quad (1-27)$$

比例积分环节模拟电路如图 1-8 所示。



$$R_0 = 200\text{k}\Omega; R_1 = 100\text{k}\Omega; C = 1\mu\text{F} (2.2\mu\text{F}); R = 10\text{k}\Omega$$

图 1-8 比例积分环节模拟电路

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{R_1 C s + 1}{R_0 C s} = \frac{R_1}{R_0} + \frac{1}{R_0 C s} \quad (1-28)$$

比较(1-27)和(1-28)得

$$\begin{cases} K = R_1/R_0 \\ T = R_0 C \end{cases} \quad (1-29)$$

当输入信号为单位阶跃信号,即 $r_i(t) = 1(t)$ 时, $R_i(s) = 1/s$,则由式(1-27)得

$$C(s) = \left(K + \frac{1}{Ts}\right) \cdot \frac{1}{s} \quad (1-30)$$

所以输出响应为

$$C(t) = K + \frac{1}{T}t \quad (1-31)$$

(4) 惯性(T)环节,其方框图如图 1-9 所示。

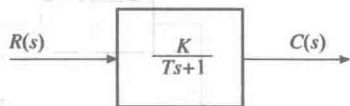
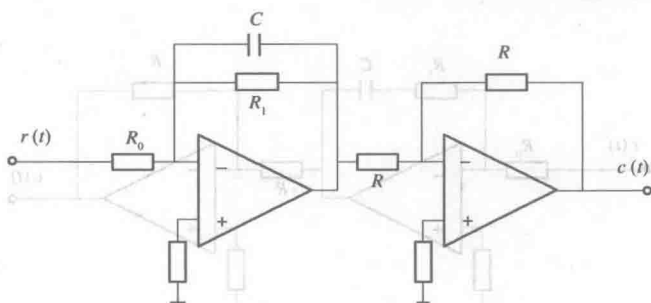


图 1-9 惯性环节原理方框图

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1-32)$$

惯性环节的模拟电路如图 1-10 所示。



$$R_0 = 200\text{k}\Omega; R_1 = 100\text{k}\Omega; C = 1\mu\text{F} (2.2\mu\text{F})$$

图 1-10 惯性环节模拟电路

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{R_1/R_0}{R_1Cs + 1} \quad (1-33)$$

比较式(1-32)和(1-33)得

$$\begin{cases} K = \frac{R_1}{R_0} \\ T = R_1C \end{cases} \quad (1-34)$$

当输入信号为单位阶跃信号,即 $r_i(t) = 1(t)$ 时, $R_i(s) = 1/s$,则由式(1-32)得

$$C(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (1-35)$$

所以输出响应为

$$c(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-36)$$

(5) 比例微分(PD)环节,其原理方框图如图 1-11 所示。

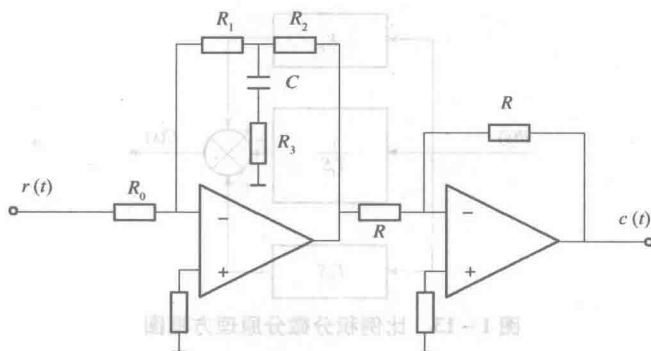


图 1-11 比例微分原理方框图

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = K(1 + Ts) \quad (1-37)$$

比例微分环节模拟电路如图 1-12 所示。



$$R_0 = 10\text{k}\Omega; \quad R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega (20\text{k}\Omega); \quad R_3 = 200\Omega; \quad C = 1\mu\text{F}$$

图 1-12 比例微分环节模拟电路

其传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} \left(1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{Cs}{R_3 Cs + 1} \right) \quad (1-38)$$

式(1-38)中 $R_3 \ll R_1, R_3 \ll R_2$, 所以

$$\frac{C(s)}{R(s)} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_0} \left(1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot Cs \right) \quad (1-39)$$

比较式(1-37)和式(1-39)得

$$\begin{cases} K = \frac{R_1 + R_2}{R_0} \\ T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{cases} \quad (1-40)$$

当输入信号为单位阶跃信号, 即 $r_i(t) = 1(t)$ 时, $R_i(s) = 1/s$, 则由式(1-37)得

$$C(s) = K(1 + Ts) \cdot \frac{1}{s} = \frac{K}{s} + KT \quad (1-41)$$

所以输出响应为

$$c(t) = KT\delta(t) + K \quad (1-42)$$

式中: $\delta(t)$ 为单位脉冲函数; T 为时间常数; K 为常数。

式(1-42)为理想的比例微分环节的输出响应, 考虑到比例微分环节的实际模拟电路的传递函数为式(1-38), 则实际输出响应为

$$c(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_0} + \frac{R_1 R_2}{R_0 R_3} e^{-\frac{t}{R_3 C}} \quad (1-43)$$

(6) 比例积分微分(PID)环节。其原理方框图如图 1-13 所示。