

高等学校教材

*Gao Deng Xue Xiao Jiao Cai*

# 自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

(非自动化类)

孟庆明 主编

高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

# 自动控制原理

(非自动化类)

孟庆明 主编

高等教育出版社

## 内容简介

这是一本为非控制类、工科高年级学生编写的教材。本书简练地论述了连续控制系统的分析和综合研究方法,包括系统数学模型的建立和动态结构图等变换法则,利用经典控制理论的时域分析法、复域分析法、频域分析法对控制系统进行分析,应用串联校正、反馈校正和前馈校正进行系统的设计和补偿。同时阐述了采样控制系统的分析和综合方法,并对控制系统的状态空间分析法及能控性和能观测性进行了论述。书中部分章节适当增加了 MATLAB 应用的内容。

本书适合高年级本科生、研究生和工程技术人员使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/孟庆明主编. —北京:高等教育出版社, 2003.9

非自动化类

ISBN 7-04-011867-X

I. 自… II. 孟… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 058614 号

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

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

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国青年出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16

印 张 21.5

字 数 400 000

版 次 2003 年 9 月第 1 版

印 次 2003 年 9 月第 1 次印刷

定 价 26.90 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 前 言

近年来,在一些高等院校,非控制类工科专业相继开设了自动控制原理课程,且逐渐成为许多工科专业的技术基础课。为满足其教学的需要,我们特编写了非控制类工科专业选用的《自动控制原理》这本教材。

自动控制原理是一门工程性很强的技术基础课,为使学生通过阅读本书,能够正确理解有关控制理论的基本概念,掌握分析自动控制系统性能的基本方法,并初步具备综合设计较简单的自动控制系统的的能力,本书不盲目追求理论体系的完整与内容的全面详尽,而是偏重于内容的精练,着眼于运用自动控制理论的基本规律解决一些实际工程应用问题能力的培养。

目前,国际上许多新版控制理论书籍,都把 MATLAB 作为一种工具语言,用于控制系统分析、设计和系统仿真研究,取得了很好的效果。我国高等院校也开始重视 MATLAB 的工程应用。本书也融入了 MATLAB 语言的应用,在一些主要章节里的部分问题采用了 MATLAB 求解。本书没有涉及有关 MATLAB 的预备知识。

本书在北京航空航天大学本科非控制类专业高年级自动控制原理课上进行过多次教学实践。如果本书作为 32 学时一学期的课程教材,可以讲授前 6 章的主要内容。如果把本书作为 64 学时的双学期课程教材,则本书中的全部内容均可讲授。在教学的过程中,各有关专业可按具体的教学大纲取舍讲授内容,只要灵活地删除部分内容即可。

本书附录摘编了北航自动化学院编写的《自动控制原理实验说明书》的部分内容。若教学计划安排 6 学时的实验,则非控制类专业的学生只要求做实验一、实验二和实验三。若双学期教学,安排 8 学时的实验,可加做实验四。实验中的系统结构及其参数的具体数值仅供参考。通过实验课的教学,对学生深入理解自动控制原理的基本概念和掌握分析问题基本方法是很有益处的。

为了使非控制类专业的自动控制原理教学跨上一个台阶,我们制作了本课程的计算机辅助教学课件,已试用了一个学期,待完善后可以向兄弟院校提供该课件。

参加本书编写工作的有北京航空航天大学孟庆明(第1、2、4、5、8章)、王涛(第3、6章)、程涛(第7章)。王涛还负责增补了第1~6章中的部分内容和MATLAB应用示例。“附录”由自动化学院自控实验室提供。孟庆明负责全书的统稿。在编写过程中,学习和汲取了国内部分有关教材的内容。

全书由北京联合大学孙虎章老师审阅,他提出了许多宝贵意见和建议,在此谨表诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2003年3月6日

# 教学要求

总的教学要求是理解概念,掌握方法。

## 第1章 绪 论

1. 正确理解自动控制的有关概念,如控制器、受控对象、指令信号、偏差信号、被控信号(被控量)、自动控制系统、开环控制、闭环控制(负反馈控制或按偏差调节)等。

2. 初步掌握由系统工作原理图绘制系统职能方框图的方法,并能判别系统的控制方式。

## 第2章 控制系统的数学模型

1. 对建立系统的运动方程作一般的了解。

2. 要清楚系统数学模型的不同形式及其相互转换关系。

3. 正确理解系统传递函数的定义、性质,并能熟练地求出  $\Phi_r(s)$ 、 $\Phi_m(s)$ 、 $G(s)$ 、 $\Phi_e(s)$ 、 $\Phi_n(s)$ ,熟记各典型环节传递函数标准型。

4. 熟练掌握由系统运动方程组建立系统动态结构图(方块图)的方法,并根据等效结构变换法则,正确地计算出系统传递函数。

## 第3章 时域分析法

1. 正确理解单位阶跃响应及其时域性能指标( $\sigma\%$ 、 $t_s$ 、 $e_{ss}$ )、稳定性、 $K_p$ 、 $K_v$ 、 $K_a$ 。

2. 牢固掌握一阶、二阶系统的标准型及阶跃响应的特点,并能熟练地掌握分析及综合一、二阶系统的方法,即正问题:已知参数计算性能指标;反问题:已知性能指标反求结构参数。

3. 正确运用代数判据判定系统的稳定性,并能进行参数的分析、计算。

4. 熟练掌握系统稳态误差  $e_{ss}$  的两种计算方法——终值定理法及观察法,一定注意先判定系统的稳定性再计算  $e_{ss}$ 。

## 第4章 复域分析法——根轨迹法

1. 正确理解通过开环研究闭环根轨迹。开环零点、开环极点、闭环零点、闭环极点、主导极点等重要的概念。
2. 理解根轨迹方程的概念,熟记绘制根轨迹的基本法则,并能正确运用法则画出闭环根轨迹图。
3. 正确运用主导极点和偶极子的概念分析系统的动态品质。

## 第5章 频域分析法——频率法

1. 正确理解频率特性的物理意义、定义及求取方法,并能根据定义进行分析计算。
2. 熟记典型环节频率特性  $G(j\omega)$ 、 $|G(j\omega)|$ 、 $\angle G(j\omega)$ 、 $20\lg|G|$  及其特征点的特征值。
3. 熟练掌握绘制开环对数幅频和相频特性的方法。已知最小相位系统开环对数幅频,应会反求其传递函数。
4. 正确运用对数频率判据判定闭环系统的稳定性,并能正确计算模稳定裕度和相稳定裕度。
5. 正确理解零频幅比  $A(0)$ 、峰值  $M_r(A_m)$ 、频宽  $\omega_b$ 、穿越频率(截止频率)  $\omega_c$ 、相裕度  $\gamma$ 、模裕度  $L_h$  以及三频段的概念,明确其和系统阶跃响应的定性关系。

## 第6章 自动控制系统的设计与校正

1. 明确 P、I、D 基本控制规律,正确理解它们在改善系统性能中的作用。
2. 掌握二阶最佳模型串联校正法,初步了解高阶(四阶)期望模型串联校正法。
3. 了解反馈校正和复合校正的特点及其作用。
4. 通过一个具体的位置伺服系统的设计实例,了解控制系统的工程设计方法和步骤。

## 第7章 采样数据控制系统分析

1. 正确理解采样控制系统的基本概念,如采样定理、连续信号、采样信号、数字信号、脉冲传递函数等。
2. 掌握求取开环、闭环脉冲传递函数的方法步骤,在求取的过程中应注意采样开关的位置,要正确区分 Z 变换的积和积的 Z 变换。
3. 要注意采样系统有的能写出脉冲传递函数,而有的则只能写出系统的输

出信号表达式。

4. 会用脉冲传递函数分析采样控制系统的性能。

## 第 8 章 状态空间分析法

1. 正确理解状态变量、状态空间、状态方程、能控性及能观测性等基本概念。
2. 正确绘出系统的状态空间表达式的方框图,掌握由系统传递函数求取系统能控标准型和能观测标准型的方法。
3. 掌握线性定常系统能控性、能观测性的判定准则。



# 主要符号

$r(t)$ ——指令信号(或称给定值、参考输入信号)

$c(t)$ ——被控量(或称输出信号)

$b(t)$ ——反馈信号

$n(t)$ ——干扰信号

$e(t)$ ——偏差信号(或称误差信号)

$e_{ss}$ ——稳态误差(或称静态误差)

$s$ ——算子符( $s = \sigma + j\omega$  为复变量)

$L$ ——拉氏变换符号

$Z$ —— $Z$ 变换符号

$G(s)$ ——传递函数符号,前向通道传递函数

$\Phi(s)$ ——闭环传递函数

$G(s)H(s)$ ——开环传递函数

$G_h(s)$ ——零阶保持器传递函数

$H(s)$ ——反馈通道传递函数

$K$ ——开环增益(或称开环放大系数)

$K^*$ ——开环根轨迹增益

$T$ ——时间常数(s)

$\tau$ ——微分时间常数(s)

$\omega$ ——角频率(rad/sec 或 1/s)

$\omega_n$ ——无阻尼自然角频率(1/s)

$\omega_d$ ——有阻尼自然角频率(1/s)

$\omega_r$ ——峰值频率(或  $\omega_m$ )

$\omega_c$ ——穿越频率(或称截止频率、交接频率)

$\omega_b$ ——闭环频带(或称频宽、通频带)

$\omega_p$ ——相频宽

$\xi$ ——阻尼比(无量纲)

$h(t)$ ——阶跃响应

$t_s$ ——调节时间(s)  
 $t_p$ ——峰值时间  
 $t_r$ ——上升时间  
 $\sigma\%$ ——超调量  
 $\nu$ ——积分环节数目( $\nu=0,1,2$ ,即0型、I型、II型)  
 $K_p$ ——稳态位置误差系数  
 $K_v$ ——稳态速度误差系数  
 $K_a$ ——稳态加速度误差系数  
 $M(\omega)$ ——幅频特性(或 $A(\omega)$ 、 $|\Phi(j\omega)|$ )  
 $\varphi(\omega)$ ——相频特性(或 $\angle\Phi(j\omega)$ )  
 $\Phi(j\omega)$ ——频率特性, $\Phi(j\omega) = |\Phi(j\omega)|\angle\Phi(j\omega)$   
 $L(\omega)$ ——对数幅频特性  
 $h$ ——模稳定裕度( $L_h$ (dB))  
 $\gamma$ ——相稳定裕度  
 $M_r$ ——峰值( $A_m$ )  
A/D——模/数转换  
D/A——数/模转换  
 $\omega_s$ ——采样频率  
 $\theta$ ——转角  
 $\prod$ ——求积符号  
 $\sum$ ——求和符号  
 $e^*(t)$ ——脉冲序列  
 $\delta_T(t)$ ——单位理想脉冲序列  
 $G(z)$ ——脉冲传递函数( $z$ 传递函数)  
 $\mathbf{X}$ ——状态向量  
 $\mathbf{A}$ ——系数矩阵  
 $\mathbf{B}$ ——控制矩阵  
 $\mathbf{C}$ ——输出矩阵  
 $\mathbf{D}$ ——直接传递矩阵

策划编辑	金春英
责任编辑	李葛平
封面设计	于文燕
责任绘图	朱 静
版式设计	陆瑞红
责任校对	尤 静
责任印制	韩 刚

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

**传 真：**(010) 82086060

**E - mail：**dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

**邮 编：**100011

**购书请拨打电话：**(010)64014089 64054601 64054588

# 目 录

<b>第1章</b>	<b>绪论</b> .....	1
1-1	自动控制系统的基本概念和发展简史 .....	1
1-2	自动控制的基本方式 .....	6
1-3	对控制系统的性能要求 .....	10
1-4	自动控制系统示例 .....	11
	小结 .....	16
	习题 .....	16
<b>第2章</b>	<b>控制系统的数学模型</b> .....	18
2-1	拉氏变换 .....	18
2-2	传递函数 .....	25
2-3	动态结构图及其等效变换 .....	28
2-4	典型环节的传递函数 .....	37
2-5	自动控制系统的传递函数 .....	45
2-6	MATLAB 的应用 .....	48
2-7	示例——磁盘驱动读取系统 .....	52
	小结 .....	54
	习题 .....	54
<b>第3章</b>	<b>时域分析法</b> .....	57
3-1	典型输入信号及性能指标 .....	57
3-2	一阶系统分析 .....	61
3-3	二阶系统分析 .....	65
3-4	高阶系统分析 .....	83
3-5	稳定性及代数判据 .....	85
3-6	稳态精度分析 .....	95

3-7	MATLAB 的应用 .....	108
	小结 .....	114
	习题 .....	114
<b>第4章</b>	<b>复域分析法——根轨迹法</b> .....	118
4-1	根轨迹的基本概念 .....	118
4-2	绘制根轨迹图的基本法则 .....	122
4-3	利用根轨迹分析系统的动态性能 .....	130
4-4	广义根轨迹 .....	136
4-5	用 MATLAB 绘制根轨迹 .....	140
	小结 .....	144
	习题 .....	144
<b>第5章</b>	<b>频域分析法——频率法</b> .....	147
5-1	频率特性 .....	147
5-2	典型环节的频率特性 .....	152
5-3	控制系统开环频率特性 .....	164
5-4	稳定判据及稳定裕度 .....	173
5-5	闭环频率特性 .....	183
5-6	用实验法求传递函数 .....	192
5-7	利用 MATLAB 分析系统稳定性 .....	194
	小结 .....	196
	习题 .....	197
<b>第6章</b>	<b>自动控制系统的设计与校正</b> .....	200
6-1	控制系统的设计步骤 .....	200
6-2	性能指标与系统设计的基本思路 .....	201
6-3	基本控制规律 .....	206
6-4	常用串联校正网络 .....	211
6-5	常用的串联校正方法 .....	223
6-6	反馈校正 .....	233
6-7	复合校正 .....	237
6-8	控制系统设计实例 .....	241
	小结 .....	246
	习题 .....	247

<b>第7章</b>	<b>采样数据控制系统分析</b>	249
7-1	概述	249
7-2	信号的采样与保持	251
7-3	Z变换与Z反变换	258
7-4	脉冲传递函数	267
7-5	采样数据控制系统的性能分析	279
	小结	290
	习题	290
<b>第8章</b>	<b>状态空间分析法</b>	293
8-1	概述	293
8-2	动态系统的状态空间表示法	295
8-3	多输入多输出(MIMO)系统状态空间表达式和传递矩阵	303
8-4	线性系统能控性和能观测性	308
	小结	313
	习题	313
<b>附录</b>	<b>自动控制原理实验测试方法</b>	316
	概述	316
实验一	一、二阶系统的电子模拟及时域响应的动态测试	317
实验二	频率响应测试	320
实验三	控制系统串联校正	323
实验四	采样系统实验研究	325
<b>参考文献</b>		327

# 第 1 章

## 绪 论

在工程和科学技术的发展过程中,自动控制技术起着愈来愈重要的作用。所谓自动控制,是指在人不直接参与的情况下,利用外加的设备或装置,使机器、设备或生产过程的工作状态或参数自动地按照特定规律运行。自动控制的基础是反馈理论和线性系统理论,并综合应用了网络理论和通信理论的相关知识。因此,自动控制并不从属于任一工程学科,而是在航空航天、舰船、化工、机械、环境、电气以及核动力等工程学科中都有着广泛的应用。随着社会的发展,自动控制技术正逐步应用于生物、医学、商业和社会管理等领域。

### 1-1 自动控制系统的基本概念和发展简史

#### 一、技术术语

1. **受控对象** 是指一个装备、工作机器等(如飞机、喷气发动机、汽车、宇宙飞船等),其作用是完成特定的技术要求。

2. **控制器** 又称调节器、控制装置,由控制元部件组成,它接受指令信号,输出控制作用信号于受控对象。

3. **自动控制系统** 受控对象和控制器按照一定方式连接起来,组成一个有机整体,能提供预期的系统响应,以实现各种控制任务。

4. **被控量  $c(t)$**  表征受控对象工作状态的物理参量(或状态参量),如转速、压力、温度、电压、位移等。

5. **给定值或指令信号  $r(t)$**  要求控制系统按一定规律变化的信号,是系统的输入信号。

6. **干扰信号  $n(t)$**  又称扰动值,是一种对系统的被控量起破坏作用的信号。如果干扰产生在系统内部,称为内扰;产生在系统外部,称为外扰。外扰也



是系统的一种输入信号。

7. 反馈信号  $b(t)$  是指被控量经测量元件检测后回馈送到系统输入端的信号。

8. 偏差信号  $e(t)$  是指给定值与被控量的差值,或指令信号与反馈信号的差值。

## 二、自动控制的任務

一个开环的控制系统简图如图 1-1 所示。

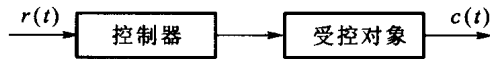


图 1-1 控制系统图

在没有人的直接参与下,利用控制器操纵受控对象,使被控量按照给定值的规律变化,或简单表达为

$$c(t) = r(t)$$

这就是自动控制任务的数学表达式。

## 三、反馈控制原理

在自动控制系统中,被控量是要求严格加以控制的物理量,它可以是一个恒定值,如温度、压力、转速等;也可以是一个变量,如飞机、导弹的飞行轨迹。作为对受控对象施加控制作用的控制装置,可以采用不同的原理和方式完成赋予的任务。其中,最基本的控制原理就是反馈控制原理。基于反馈控制原理组成的控制系统称为反馈控制系统。

在反馈控制系统中,控制装置对受控对象施加控制作用,而控制装置接受的信号是被控量的反馈信号与给定值相比较产生的偏差,根据偏差值的大小产生控制作用,实现控制任务。这就是反馈控制的工作原理。

反馈控制在现代工业和社会生活中的应用十分普遍。理论上讲,人体本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统,人们平日任何最简单的活动都体现着反馈控制原理。例如,如果将驾驶一辆汽车视为一个反馈系统,对其进行分析,首先,人要用眼睛连续目测预定的行车路线,并将信息输入大脑(给定值)。然后与实际测量的行车路线相比较,获得行驶偏差,通过手来操作方向盘,调节汽车使其按照预定行车路线行驶,如图 1-2 所示。可以用图 1-3 所示的框图来表示这一控制过程的组成部分和工作原理。

在这里,人是控制装置,方向盘是执行装置,汽车为受控对象,实际行车路线为被控量,预定行车路线为给定值。