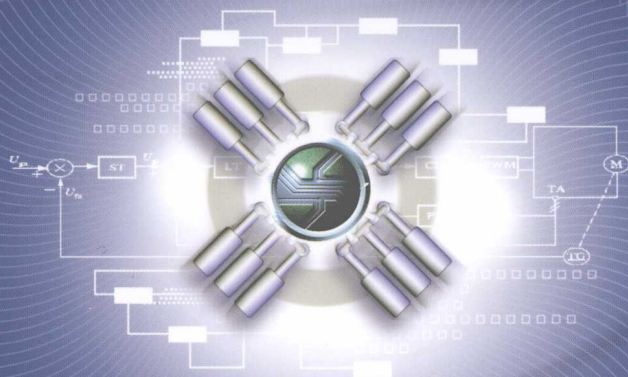




21世纪高职高专规划教材·机电类

自动控制原理与系统

主 编 叶明超 副主编 黄 海 刘阿玲



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21 世纪高职高专规划教材·机电类

自动控制原理与系统

主 编 叶明超
副主编 黄 海 刘阿玲

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书介绍了经典控制理论的基本概念、基本理论和控制系统的基本分析方法及实际应用, 主要内容包括自动控制的基本概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法和频域分析法、控制系统的校正、直流调速系统、直流脉宽调速系统、位置随动系统、交流变频调速系统等。各章均配有内容提要、小结和大量习题。

“自动控制原理与系统”是一门理论性很强的课程。根据高职教育人才培养的特点, 即理论知识够用、强调实际应用, 书中给出了大量的应用实例, 并针对实例中的问题由浅入深地给出解决方法。全书力求突出物理概念、定性分析, 避免繁琐的数学推导; 叙述深入浅出、通俗易懂。

本书可作为高职电气技术、自动化技术、机电一体化技术以及电子技术等电类专业学生的教学用书, 也可作为从事自动化工作的工程技术人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理与系统/叶明超主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2008.3

21 世纪高职高专规划教材·机电类

ISBN 978 - 7 - 5640 - 1419 - 3

I. 自… II. 叶… III. ①自动控制理论 - 高等学校: 技术学校 - 教材②自动控制系统 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. TP13 TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 020384 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 18.25

字 数 / 368 千字

版 次 / 2008 年 3 月第 1 版, 2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 29.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 周瑞红

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

出版说明

当前,高度发达的制造业和先进的制造技术已经成为衡量一个国家综合经济实力和科技水平的重要标志之一,成为一个国家在竞争激烈的国际市场上获胜的关键因素。

如今,中国已成为制造业大国,但还不是制造业强国。我们要从制造业大国走向制造业强国,必须大力发展以机电一体化为主的先进制造技术,提高计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)的技术水平。

制造业要发展,人才是关键。尽快培养一批高技能人才和高素质劳动者,是先进制造业实现技术创新和技术升级的迫切要求。高等职业教育既担负着培养高技能人才的任务,也为自身的发展提供了难得的机遇。

为适应制造业的深层次发展和机电一体化技术的广泛应用,根据高等职业教育发展与改革的新形势,北京理工大学出版社组织知名专家、学者,与生产制造企业的技术人员反复研讨,以教育部《关于加强高职高专人才培养工作的若干意见》等文件对高职高专人才培养的要求为指导思想,确立了“满足制造业对人才培养的需求,适应行业技术改革,紧跟前沿技术发展”的思路,编写了这套高职高专教材。本套教材力图实现:以培养综合素质为基础,以能力为本位,把提高学生的职业能力放在突出位置,加强实践性教学环节,使学生成为企业生产服务一线迫切需要的高素质劳动者;以企业需求为基本依据,以就业为导向,增强针对性,又兼顾适应性;课程设置和教学内容适应技术发展,突出机电一体化、数控技术、模具等应用专业领域的新知识、新技术、新工艺和新方法;教学组织以学生为主体,提供选择和创新的空間,构建开放、富有弹性、充满活力的课程体系,适应学生个性化发展的需要。

本套教材的主要特色有：

1. 借鉴国内外职业教育先进教学模式，顺应现代职业教育教学制度的改革趋势；
2. 以就业为导向，进行了整体优化；
3. 理论与实践一体化，强化了知识性和实践性的统一。

本套教材适合于作为高职高专院校机电一体化、数控技术、机械制造及自动化、模具设计与制造等专业的课程教学和技能培训用书。

北京理工大学出版社

前 言

“自动控制原理与系统”是电类专业一门重要的技术基础课。高职高专及成人院校的人才培养模式和教学体系与本科院校有很大的不同，学生的基础也不一样。因此，我们根据 21 世纪高职高专教育模式和教学体系特点并结合学生的实际情况编写了本书。

本书主要介绍经典控制理论的基本概念、基本理论及基本分析方法，并以较大篇幅通过对几个典型控制系统实例的分析引导学生深入思考，掌握分析系统的方法。全书共 10 章，具有以下特点：

(1) 本书针对高等职业教育特点，突出理论联系实际，强调学生正确应用公式和结论能力的培养，减少非重点公式和结论理论推导过程。

(2) 本书介绍理论从应用角度入手，重点内容的来龙去脉讲解清晰，辅助内容触类旁通，概念准确，条理清楚，叙述通俗易懂。

(3) 本书在例题的选择上力求典型、简明、有说服力，并尽量结合实际。

(4) 参与本书编写的人员，全部是长期讲授高职高专“自动控制原理”课程的教师，他们熟悉教学大纲，经验丰富，力图通过此书使学生掌握基本控制理论，熟悉分析控制系统的基本方法，掌握用典型控制理论分析一些实际控制系统。

本书由江苏联合职业技术学院无锡交通分院的叶明超（负责第 1、2、3、4、5 章）、刘阿玲（负责第 6 和 9 章）、黄海（负责第 7、8、10 章）共同讨论编写，叶明超负责全书的统稿和定稿。

限于编者水平有限，加上时间仓促，本书的不足之处在所难免。希望广大师生和读者不吝指教，提出批评建议。

编 者

目 录

第1章 自动控制的基本概念	1
1.1 自动控制理论概述	1
1.2 简要发展历史	2
1.3 自动控制系统的组成	3
1.3.1 人工控制与自动控制	3
1.3.2 自动控制的基本概念与组成	3
1.3.3 系统术语	4
1.3.4 自动控制系统的方块图表示	5
1.4 自动控制系统的分类	5
1.4.1 开环控制系统和闭环控制系统	6
1.4.2 定值、随动和程序控制系统	7
1.4.3 线性和非线性控制系统	8
1.4.4 连续和离散控制系统	8
1.4.5 单变量和多变量控制系统	9
1.5 自动控制系统举例	9
1.5.1 温度控制系统	10
1.5.2 位置随动系统	11
1.5.3 自动调速系统	13
1.6 自动控制系统的基本要求	14
1.7 本课程的学习任务与学习要求	15
本章小结	16
习题1	17

第2章 拉普拉斯变换及其应用	19
2.1 拉氏变换的概念	19
2.2 拉氏变换的运算定理	25
2.3 拉氏反变换	29
2.4 拉氏变换应用举例	32
本章小结	38
习题2	38
第3章 自动控制系统的数学模型	40
3.1 控制系统的微分方程	41
3.1.1 控制系统微分方程的建立	41
3.1.2 控制系统微分方程的求解	43
3.2 传递函数	44
3.2.1 传递函数的定义	44
3.2.2 传递函数的求取	45
3.2.3 传递函数的性质	47
3.3 控制系统的动态结构图	47
3.3.1 动态结构图的组成与画法	47
3.3.2 动态结构图的等效变换及化简	49
3.3.3 用公式法求传递函数	55
3.4 典型环节的数学模型及阶跃响应	58
3.4.1 典型环节的数学模型	58
3.4.2 典型环节的传递函数及阶跃响应	62
3.5 控制系统的传递函数	67
本章小结	69
习题3	71
第4章 控制系统的时域分析法	73
4.1 典型控制过程及性能指标	73
4.1.1 典型初始状态	73
4.1.2 典型输入信号	74

4.1.3 阶跃响应的性能指标	76
4.2 一阶系统的时域分析	77
4.3 二阶系统的时域分析	78
4.4 系统稳定性分析	85
4.4.1 稳定的基本概念	85
4.4.2 线性系统稳定的充分必要条件	86
4.4.3 劳斯稳定判据	87
4.4.4 两种特殊情况	88
4.4.5 劳斯稳定判据在系统分析中的应用	90
4.5 稳态性能的时域分析	90
4.5.1 稳态误差的基本概念	90
4.5.2 系统类型	91
4.5.3 参考输入信号作用下的稳态误差	92
4.5.4 扰动输入信号作用下的稳态误差	93
本章小结	95
习题4	96
第5章 控制系统的频域分析法	98
5.1 频率特性的概念	98
5.1.1 频率特性的基本概念	98
5.1.2 频率特性与传递函数的关系	99
5.1.3 频率特性的性质	100
5.1.4 频率特性的图形表示方法	100
5.2 典型环节的伯德图	101
5.2.1 比例环节	101
5.2.2 积分环节	102
5.2.3 微分环节	103
5.2.4 惯性环节	104
5.2.5 比例微分环节	105
5.2.6 振荡环节	106
5.2.7 一阶不稳定环节	108

5.2.8 最小相位系统的概念	108
5.3 系统开环对数频率特性曲线的绘制	112
5.3.1 系统开环对数频率特性曲线绘制的一般步骤	112
5.3.2 开环对数频率特性曲线绘制举例	113
5.4 系统稳定性的频域分析	119
5.4.1 对数频率稳定判据	119
5.4.2 稳定裕量	121
5.5 动态性能的频域分析	123
5.5.1 三频段的概念	123
5.5.2 典型系统	126
本章小结	128
习题 5	129
第 6 章 自动控制系统的校正	132
6.1 常用校正装置	132
6.1.1 无源校正装置	133
6.1.2 有源校正装置	134
6.2 串联校正	134
6.2.1 串联比例校正	135
6.2.2 串联比例微分校正	137
6.2.3 串联比例积分校正	138
6.2.4 串联比例积分微分校正	140
6.3 反馈校正	142
6.4 前馈控制的概念	144
6.5 自动控制系统的一般设计方法	145
6.5.1 自动控制系统设计的基本步骤	145
6.5.2 系统固有部分频率特性的简化处理	146
6.5.3 系统预期开环对数频率特性的确定	148
本章小结	149
习题 6	150

第7章 直流调速系统	151
7.1 直流调速系统概述	151
7.1.1 直流调速系统的基本概念	151
7.1.2 直流调速的三种方式	152
7.1.3 调压调速的三种主要形式	153
7.1.4 直流调速系统的性能指标	156
7.2 单闭环直流调速系统	160
7.2.1 闭环调速系统常用调节器	160
7.2.2 单闭环直流调速系统	165
7.2.3 无静差调速系统概述及积分控制规律	171
7.3 带电流截止负反馈的闭环调速系统	172
7.3.1 电流截止负反馈的引入	172
7.3.2 带电流截止负反馈的闭环调速系统静特性	173
7.3.3 带电流截止负反馈的闭环调速系统启动过程	174
7.4 闭环调速系统设计实例	175
7.5 多环直流调速系统	180
7.5.1 转速、电流双闭环调速系统及其静特性	180
7.5.2 三环控制的直流调速系统	185
本章小结	186
习题7	187
第8章 PWM 直流脉宽调速系统	190
8.1 直流脉宽调制电路的工作原理	191
8.1.1 不可逆、无制动力 PWM 变换器	191
8.1.2 不可逆、有制动力 PWM 变换器	192
8.1.3 可逆 PWM 变换器	194
8.2 脉宽调速系统的控制电路	197
8.2.1 直流脉宽调制器	197
8.2.2 逻辑延时电路	198
8.2.3 基极驱动电路和保护电路	198
8.3 PWM 直流调速装置的系统分析	199

8.3.1	总体结构	199
8.3.2	PWM 脉宽调制变换器的传递函数	200
8.3.3	系统分析	200
8.4	由 PWM 集成芯片组成的直流脉宽调速系统实例	200
8.4.1	SG1731 芯片简介	201
8.4.2	由 SG1731 组成的直流调速系统	202
	本章小结	203
	习题 8	204
第 9 章 位置随动系统		205
9.1	位置随动系统的组成及其基本特征	205
9.1.1	位置随动系统的组成	205
9.1.2	位置随动伺服系统的分类	207
9.1.3	随动伺服系统的控制方式	208
9.2	位置伺服系统的部件功能及工作原理	209
9.2.1	位置检测元件	210
9.2.2	执行元件	213
9.2.3	相敏整流与滤波电路	215
9.2.4	放大电路	217
9.3	位置随动伺服系统的控制特点及实例分析	217
9.3.1	系统组成原理图	217
9.3.2	系统组成框图	219
9.3.3	系统自动调节过程	220
9.4	位置伺服系统的控制性能分析与校正设计	220
9.4.1	系统的稳态性能分析	220
9.4.2	系统的动态性能分析	221
	本章小结	222
	习题 9	223
第 10 章 交流变频调速系统		224
10.1	交流变频调速的基本概念	224

10.1.1 交流调速系统简介	224
10.1.2 交流变频调速的基本控制方式	226
10.2 标量控制的变频调速系统	230
10.2.1 控制输出电压的方式	230
10.2.2 U/f 比例控制方式	232
10.2.3 转差频率控制方式	234
10.3 矢量控制的调速系统	236
10.3.1 基于转差频率控制的矢量控制方式	237
10.3.2 无速度传感器的矢量控制方式	238
10.4 脉宽调制型交流变频调速系统	239
10.4.1 PWM 型变频器的工作原理	240
10.4.2 PWM 型变频调速系统的主电路	242
10.4.3 PWM 型变频调速系统的控制电路	245
10.5 数字式通用变频器及其应用	249
10.5.1 通用变频器概况	249
10.5.2 通用变频器的选择	251
10.5.3 通用变频器的运行	257
10.5.4 通用变频器应用实例	262
本章小结	264
习题 10	265
附录 自动控制技术常用术语中、英文对照	266
参考文献	275

第1章

自动控制理论

自动控制的基本概念

✓ 内容提要

本章概括地介绍了自动控制理论的形成和发展、自动控制系统的基本组成、自动控制系统的分类和自动控制系统的性能指标，并简单介绍了自动控制的发展历史和研究方向。

1.1 自动控制理论概述

自动控制理论是研究各种自动控制过程共同规律的技术科学。它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节理论，随着科学技术的进步，现已发展成为一门独立的学科——控制论，包括工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论。工程控制论是控制论中最成熟的分支，主要研究工程领域自动控制系统中的信息分析、变换、传送的一般理论与设计应用。自动控制理论是工程控制论的一个分支，它只研究自动控制系统分析和设计的一般理论。根据自动控制技术发展的不同阶段，自动控制理论相应地分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论是指20世纪50年代末期所形成的理论体系，它主要研究单输入—单输出线性定常系统的分析和设计问题。其理论基础是描述系统输入—输出关系的传递函数，主要采用复频域分析方法。

现代控制理论是在20世纪60年代初期为适应宇航技术发展的需要而出现的新的控制理论，适用于研究具有高性能、高精度的多输入—多输出、线性或非线性、定常或时变系统的分析和设计问题，如最优控制、最优滤波、自适应控制等。描述系统的方法是基于系统状态这一内部特征量的状态空间法，本质上是一种时域方法。

信息技术特别是大规模信息网络技术的发展对控制理论提出了新的需求，现代应用数学、大系统理论、人工智能理论和计算机技术的进步则为控制理论的发展提供了强有力的支持。因此，现代控制理论正向大系统控制理论和智能控制理论等方向深入发展。

经典控制理论和现代控制理论构成了全部的控制理论。控制理论的发展促进了自动控制技术和相关学科的发展。生产、管理、流通、军事等各个领域自动化的要求促使现代自动控制在机械、冶金、石油、化工、电力、航空、航海、核反应堆、通信、交通运输、生物学及工业管理等领域得到了越来越普遍的应用。自动控制理论与技术的发展前景十分广阔。

1.2 简要发展历史

控制理论发展初期,众多杰出的学者做出了重大贡献。1788年英国科学家詹姆斯·瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器,可以誉为自动控制领域的第一项重大成果。为了克服当时调节器的振荡现象,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)于1868年对微分方程系统稳定性进行分析,后来又出现了劳思(E. J. Routh)和霍尔维茨(A. Hurwitz)分别于1874年和1895年对稳定性的研究成果。1892年,李雅普诺夫对调节理论的发展做出了重要贡献,他提出了几个重要的稳定性判据。1922年,迈纳斯基(Minorsky)研制出船舶操纵自动控制器,证明了从描述系统的微分方程确定系统稳定性的方法。1932年,奈奎斯特(Nyquist)提出了一种可以根据稳态正弦输入的开环响应确定闭环系统稳定性的简便方法。1934年,海森(H. L. Hazen)提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念。

为了设计满足性能指标要求的线性闭环控制系统,20世纪40年代发展了系统的频域分析方法,它是在奈奎斯特、伯德(Bode, 1945)等早期关于通信学科频域研究工作的基础之上建立起来的。1942年,哈里斯(Harris)提出传递函数的概念首次将频域分析方法应用到了控制领域,构成了控制系统领域理论研究的基础。20世纪40年代末到20世纪50年代初,伊万思(W. R. Evans)提出并完善了线性反馈系统的根轨迹分析技术,成为那个时代的另一个里程碑。

频域分析法和根轨迹法是经典控制理论的核心,采用这两种方法可以设计出稳定的且满足一定性能指标要求的系统。但是,通过这两种方法设计出的系统还不是最优系统。因此,从20世纪50年代开始,控制系统设计问题的研究重点转移到最优系统的设计上。原苏联学者庞特里亚金(Pontryagin)于1956年提出的极大值原理、贝尔曼(Bellman)于1957年提出的动态规划和卡尔曼(Kalman)于1960年提出的状态空间分析技术开创了控制理论研究的新篇章,这些理论当时被统称为“现代控制理论”。从那个时期以后,控制理论研究中出现了线性二次型最优调节器(Kalman, 1959)、最优状态观测器(Kalman, 1960)以及线性二次型高斯(LQG)问题的研究。

在1960—1980年这段时间内,人们对确定系统和随机系统的最优控制、复杂系统的自适应控制和学习控制进行了充分的研究。大约从1960年起,电子计算机开始应用于控制系统的设计。

从1980年到现在,现代控制理论的研究主要集中于Robust(鲁棒)控制等相关的课

题,其中鲁棒控制是控制系统设计中又一个令人瞩目的研究领域。1981年,美国学者查默斯(Zames)提出了基于哈代(Hardy)空间范数最小化方法的鲁棒最优控制理论。1992年,多依尔(Doyle)等人提出了最优控制的状态空间数值解法,为该领域的发展做出了重要的贡献。

目前,自动控制理论正向以控制论、信息论和人工智能为基础的智能控制理论方向发展。同时,由于大规模信息网络管理控制的需要,自动控制理论也在向大系统控制理论方向前进。

1.3 自动控制系统的组成

1.3.1 人工控制与自动控制

在日常生活和生产过程中,人工控制和自动控制的应用非常广泛,下面举一些具体的例子以加深读者对人工控制和自动控制的理解。

1. 人工控制举例

- ① 人的体温控制:天冷时加衣服,天热时减衣服。
- ② 自行车速度控制:根据马路的交通情况,人为地加快骑行速度或减慢骑行速度。
- ③ 汽车驾驶控制:转动方向盘改变方向;加油门、踩刹车等改变速度。
- ④ 收音机音量控制:调节音量旋钮,改变声音的强、弱程度。
- ⑤ 普通洗衣机的控制:人们根据衣服的多少及脏的程度来控制加水 and 洗衣粉的量、洗的次数、甩干时间等。

2. 自动控制举例

- ① 电饭煲温度的自动控制:根据人们事先设计好的顺序,自动进行定时加温、保温。
- ② 空调器的温度控制:根据人们设定的温度自动开关冷气机或调节电机转速使室内保持一定的温度。
- ③ 汽轮机的转速控制:汽轮机的转速高于或低于额定转速时,自动关小或开大主汽阀门,自动维持汽轮机的转速为额定值。
- ④ 声控、光控的路灯:根据脚步声开灯关灯,根据天亮天黑程度关灯开灯等。
- ⑤ 导弹飞行控制:飞行姿态控制,自动调轨等。
- ⑥ 人造卫星、宇宙飞船控制:包括轨道控制;姿态控制;使其携带的各种测试仪器自动工作等。

1.3.2 自动控制的基本概念与组成

所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置操纵被控对象(被控

量),使其按照预定的规律运动或变化。
被控对象是控制系统的主体,是在系统中要求对其参数进行控制的设备或过程,如温度控制系统中的加热炉、转速控制系统中的拖动电机、过程控制系统中的化学反应炉等。

控制装置一般由三部分组成。

① 自动检测装置:自动检测装置包括测量元件和变送元件,起自动检测被控对象的作用,如转速控制系统中的测速发电机、温度控制系统中的热电偶等。

② 自动调节装置:起综合、分析、比较、判断和运算的作用,并能按一定的规律发出控制信号或指令。

③ 执行装置:起具体执行控制信号或指令的作用,给被测对象施加某种作用,使其改变输入量。

对控制系统的组成进行详细分类,可以由下列各部分组成。

① 测量、变送元件:属于反馈元件,职能是把被控物理量测量出来。

② 设定元件:职能是给出被控量应取的数值信号,是设定给定值的元件。

③ 比较元件:职能是将测量信号与给定信号进行比较,并得到差值(偏差信号)。起信号综合的作用。

④ 放大元件:职能是对差值信号进行放大,使其足以推动下一级工作。

⑤ 执行元件:职能是直接推动被控对象,改变其被控物理量,使输出量与希望值趋于一致。

⑥ 校正元件:职能是改变由于结构或参数的原因而引起的性能指标的不适应。

⑦ 能源元件:职能是为系统提供必要的能源。

1.3.3 系统术语

为了便于研究自动控制系统,通过长期的实践,人们逐渐形成了一整套约定的名词和术语,下面分别进行介绍。

① 被控量(被控参数):要求被控对象保持恒定或是按一定规律变化的物理量。通常它是决定被控对象的工作状态或产品产量、质量的主要变量,如加热炉的温度、电动机的转速、流体的流量和压力等。被控量一般是输出量,是时间的函数。

② 给定信号(参考输入信号):控制系统的输入信号,是时间的函数。

③ 偏差信号:是比较元件的输出信号,即给定信号与反馈(测量)信号之差。

④ 误差信号:系统被控量的希望值与实际值之差。在单位反馈系统中偏差信号等于误差信号。在非单位反馈系统中,两者虽然都反映了系统被控量的希望值与实际值之差,但它们的信号类型与量纲是不同的,这一点一定要引起重视。

⑤ 干扰信号:破坏系统平衡,导致系统的被控量偏离其给定值的因素称为干扰信号。干扰信号是系统不希望的信号,它可能来自系统的内部或系统的外部,它们进入系统的作用