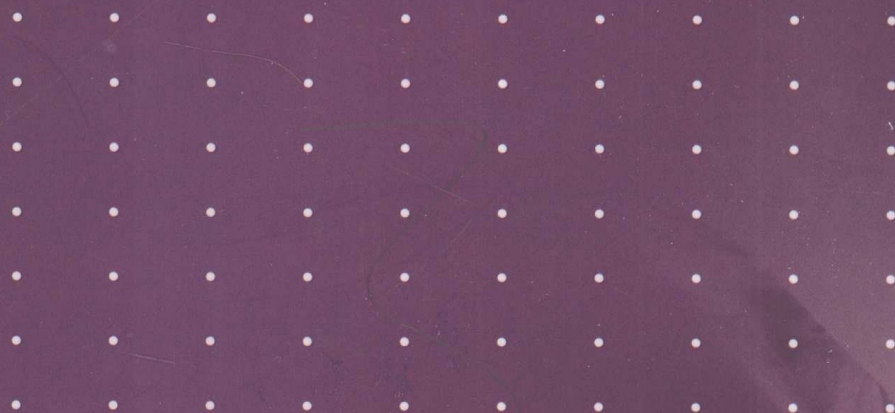


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 自动控制原理

(第三版)

■ 孙亮 编著



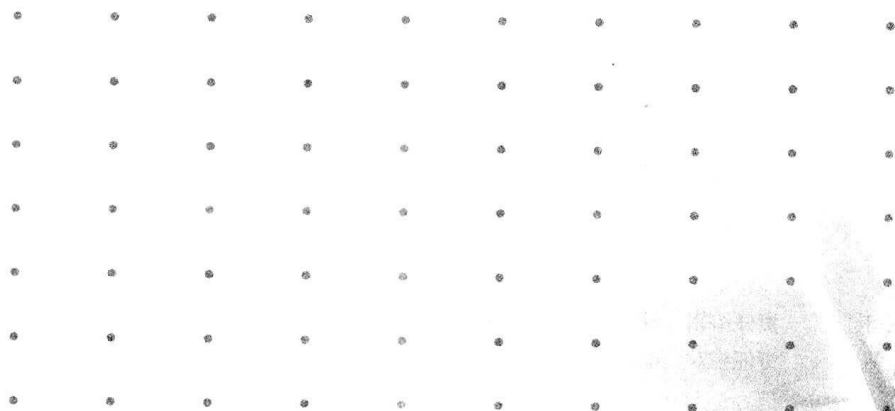
高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 自动控制原理

(第三版)

■ 孙 亮 编著



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书是为适应高等院校工程教育教学改革而编写的控制类课程基础教材, 主要介绍经典控制理论的基础知识, 在讲解理论知识的同时, 介绍一些实际应用的控制系统, 有利于学习者更好地掌握控制理论内容。全书共 8 章, 分别是: 自动控制系统概述, 控制系统的数学描述方法, 控制系统的时域分析, 根轨迹法, 频率分析法, 控制系统的校正方法, 非线性系统分析以及采样控制系统分析基础。书后附有部分习题参考答案。

本书的主要特点是保留了传统的基础知识, 删减了繁冗陈旧的内容。此外还编入了有特色的一些新知识, 如基于同伦映射的根轨迹校正, 非线性控制器及其应用, 采样信号的  $\varepsilon$  变换等。

本书适合作为高等院校信息控制类专业及其他工科相关专业的大学本科教材, 相关的工程专业人员也可阅读参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理 / 孙亮编著. —第 3 版. —北京: 高等教育出版社, 2011.6

ISBN 978-7-04-032254-5

I. ①自… II. ①孙… III. ①自动控制理论-高等学校-教材  
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 071966 号

策划编辑 欧阳舟      责任编辑 韩颖      封面设计 赵阳      版式设计 马敬茹  
插图绘制 尹莉      责任校对 俞声佳      责任印制 张福涛

---

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	北京奥鑫印刷厂	网上订购	<a href="http://www.landrac.com">http://www.landrac.com</a>
开 本	787×1092 1/16		<a href="http://www.landrac.com.cn">http://www.landrac.com.cn</a>
印 张	25.75	版 次	2011 年 6 月第 3 版
字 数	630 000	印 次	2011 年 6 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	39.80 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

物料号 32254-00

# 序

自1999年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

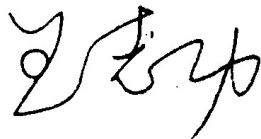
2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过2~3年的试用,形成适用于本层次教学的教材。

3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010年12月

## 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进行严厉打击。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 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

## 第三版前言

本教材自 1999 年出版以来,已经被许多院校选用作为本科生的控制理论基础知识教材,第二版于 2006 年被评为北京高等教育精品教材。经过约十余年的教学实践,使用者普遍认为,该教材在内容编排、讲述方法以及新知识介绍等诸多方面,都比较适用于本科生的理论教学与学生自学。

本教材的主要特点表现在以下两个方面:

一是在教材常规内容编写方面的特点。在本教材的编写中,本着内容简洁、通俗实用的原则,在课程内容的选择上删繁就简,在典型例题设计上循序渐进,在习题训练上精选深化。在知识讲授上既做到了基础理论严格、重点突出,又能够做到深入浅出、易读易懂,重点在于学生能力的培养。

二是新知识与新内容介绍方面的特点。本教材中编入了一些新知识与新方法的介绍。在控制系统校正方法一章中,编入了基于同伦映射的根轨迹校正设计的内容;在非线性系统分析一章中,编入了非线性积分器与非线性控制器的相关内容;在采样控制系统分析一章中,介绍了采样信号  $e$  变换的基础知识。

本次修订的教材第三版,不改变主要章节的基本内容。主要的变动部分为:第五章中频域稳定性判据的证明方法,为了符合基础性与普遍性,改写为映射定理的证明方法,并且加强了频域系统分析的内容。在第六章中增加了 PID 调节器一节内容,目的在于加强理论与工程的紧密联系。在部分章节适量地作了一些修改与补充,改正了原书中的许多错误。另外书中除了说明性的附图之外,凡是仿真用图废弃了手工作图,全部使用计算机仿真绘图取代。

教材主要章节的内容简介如下:

在第二章控制系统的数学描述方法一章中,强调参数模型的必要性以及参数模型的基本要素与其表达。要求学生基本概念的基础上能够熟练地掌握传递函数、结构图和它们的一些变换关系。

在第三章控制系统的时域分析一章中,以传统教学内容为基础,舍弃了时域分析中的一些扩展知识;以精简教材内容为目的,通过加强实践教学来巩固理论教学的效果。

在第四章根轨迹法一章中,编入根轨迹作图的基本内容。关于根轨迹法的系统分析能力的训练可以与系统校正一章相结合来实现教学目的。

第五章频率分析法为经典控制理论的重点内容。因此,在第五章中加强了从时间信号的傅里叶变换来定义控制系统频率特性的描述,加强了通过时频关系的对应性来使用频率分析法分析控制系统。

由于在应用中逐渐减少,本书删减了许多基础内容。有关 Nichols 图、对数幅相图等内容读者可以参阅其他教材。

在第六章控制系统的校正方法一章中,编入了基于根轨迹法校正设计的基本内容,叙述了基于频率特性的超前校正与滞后校正的应用设计方法,以及参考模型法校正,反馈校正等基础内

## II 第三版前言

容。作为新知识的扩充,编入了同伦法根轨迹校正方法。作为与工程的衔接,扩充编入了PID调节器一节内容。

在第七章非线性系统分析中,除了保证相平面法和描述函数法的经典教学内容之外,作为描述函数法的扩展应用,增加了非线性积分器分析与应用的内容。另外作为扩展应用,增加了PWM控制器和非线性输入控制器的应用内容。

第八章采样控制系统分析基础一章,在计算机硬件与软件技术广泛应用的今天越来越重要。作为基础理论保留了传统内容。作为新知识扩展,编入了关于采样信号 $\varepsilon$ 变换的基础内容。

本教材适用于控制类专业本科生的课内教学,内容是按照100学时左右编写的。考虑到不同专业对控制理论教学中教学大纲与教学学时的不同需求,在讲授时,按照需要可以压缩为90学时、80学时或72学时来讲授。对于非控制专业的少学时授课,也可以以选讲方式完成。

本教材第三版的修订工作由北京工业大学乔俊飞教授主持,由北京工业大学孙亮副教授主编完成。全书的习题勘校工作由北京工业大学于建均副教授负责,全书例题和习题的仿真验证工作由北京工业大学陈梅莲工程师负责。其他参与教材修订工作的还有李振龙副教授、杨金福副教授、严爱军副教授等。北京工业大学阮晓钢教授承担了全书的主审工作。

教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会委员、南京理工大学吴晓蓓教授仔细审阅了本书,对本书的特色给予肯定并提出了详尽的修改建议,作者在此表示衷心的感谢。

在本教材使用的十余年中,许多专家对本教材无论是书写风格,内容安排,还是例题图表,均提出了许多权威性的建议,教师与学生对于书中出现的错误也提出了宝贵的意见。值此教材第三版出版的机会,向那些在本教材的各项工作中提供帮助的各界人士表示衷心的感谢。另外在教材编写出版工作中一定还存在许多不尽如人意之处,有望同行专家不吝指教,请将您的批评与建议发至作者信箱:sunliang@bjut.edu.cn。

编者

2011年1月

# 目 录

<b>第 1 章 自动控制系统概述</b> .....	1	5-4 频域稳定性判据 .....	187
1-1 引言 .....	1	5-5 闭环频率特性分析 .....	201
1-2 开环控制与闭环控制 .....	1	5-6 开环频率特性分析 .....	205
1-3 自动控制与自动控制系统 .....	3	思考题 .....	215
1-4 自动控制理论的发展 .....	8	习题 .....	216
思考题 .....	10	<b>第 6 章 控制系统的校正方法</b> .....	220
<b>第 2 章 控制系统的数学描述方法</b> .....	11	6-1 系统校正基础 .....	220
2-1 控制系统的微分方程 .....	12	6-2 根轨迹法校正 .....	222
2-2 非线性微分方程的线性化 .....	17	6-3 同伦法根轨迹校正 .....	237
2-3 拉普拉斯变换及其应用 .....	21	6-4 频率法校正 .....	243
2-4 传递函数 .....	34	6-5 参考模型法校正 .....	252
2-5 动态结构图 .....	46	6-6 频率法反馈校正 .....	263
2-6 反馈控制系统 .....	53	6-7 PID 调节器 .....	269
思考题 .....	58	6-8 控制系统的结构设计 .....	273
习题 .....	59	思考题 .....	281
<b>第 3 章 控制系统的时域分析</b> .....	63	习题 .....	282
3-1 时域分析的一般方法 .....	63	<b>第 7 章 非线性控制系统分析</b> .....	286
3-2 一阶系统分析 .....	68	7-1 控制系统的非线性特性 .....	286
3-3 二阶系统分析 .....	73	7-2 相平面分析法 .....	289
3-4 高阶系统分析 .....	91	7-3 描述函数法 .....	304
3-5 控制系统的稳定性分析 .....	94	7-4 非线性控制器及其应用 .....	313
3-6 控制系统的稳态误差分析 .....	104	思考题 .....	327
思考题 .....	119	习题 .....	328
习题 .....	120	<b>第 8 章 采样控制系统分析基础</b> .....	331
<b>第 4 章 根轨迹法</b> .....	124	8-1 信号的采样与采样定理 .....	331
4-1 根轨迹法的基本概念 .....	124	8-2 信号复现与零阶保持器 .....	337
4-2 绘制根轨迹图的基本法则 .....	127	8-3 采样信号的 $z$ 变换 .....	340
4-3 控制系统根轨迹的绘制 .....	139	8-4 脉冲传递函数 .....	355
4-4 控制系统的根轨迹法分析 .....	153	8-5 采样系统的性能与控制 .....	364
思考题 .....	156	8-6 采样信号的 $\varepsilon$ 变换 .....	382
习题 .....	157	思考题 .....	390
<b>第 5 章 频率分析法</b> .....	161	习题 .....	391
5-1 频率特性 .....	161	<b>附录 部分习题参考答案</b> .....	395
5-2 典型环节的频率特性 .....	169	<b>参考文献</b> .....	401
5-3 控制系统开环频率特性作图 .....	178		



# 第 1 章 自动控制系统概述

## 1-1 引言

---

从 20 世纪 40 年代起,特别是第二次世界大战以来,由于工业生产的活跃和军事技术上的需要,科学技术的发展十分迅速。控制科学与工程作为一个专门学科也得到了迅速的发展,研究成果获得了广泛的应用。

自动控制技术不仅广泛应用于工业控制中,在军事、农业、航空、航海、核能利用、导弹制导等领域中也得到了广泛应用。例如在工业控制中,对压力、温度、流量、湿度、配料比等的控制,都广泛采用了自动控制技术。对于高温、高压、剧毒等对人身体健康危害很大的场合,自动控制技术的应用更是必不可少。在军事和空间技术方面,宇宙飞船准确地发射和返回地面,人造卫星按预定轨道飞行、导弹准确地击中目标等,使得自动控制技术的应用水平又达到了更高的标准。

自动控制,就是在没有人员参与的情况下,通过控制器或者控制装置来控制机器或者设备等物理装置,使得机器设备的受控物理量按照希望的规律变化,达到控制的目的。

自动控制原理是控制科学与工程学科的基础理论,是一门理论性较强的工程科学。本课程的主要任务是研究与讨论控制系统的一般规律,从而设计出合理的自动控制系统,满足工农业生产和各种工程上的需要。

自动控制理论的发展与应用,不仅改善了劳动条件,把人类从繁重的劳动中解放出来,而且由于自动控制系统能够以某种最佳方式运行,因此可以提高劳动生产率,提高产品质量,节约能源,降低成本。自动控制理论的应用是实现工业、农业、国防等领域科学技术现代化的有利工具。自控制学科创建以来,自动控制理论得到了充分的发展,必定会在未来得到更为广泛的应用。

## 1-2 开环控制与闭环控制

---

系统的定义十分广泛。在自动控制领域,系统指由内部互相联系的部件按照一定规律组成,能够完成一定功能的有机整体。

开环控制和闭环控制是控制系统的两种最基本的形式,如图 1-1(a)、(b)所示。

开环控制是最简单的一种控制方式。它的特点是,控制量与输出量之间仅有前向通路,而没有反馈通路。也就是说,输出量不能对控制量产生影响。由于开环控制系统

## 2 第1章 自动控制系统概述

具有结构简单、维护容易、成本低、不存在稳定性问题等诸多优点,因此广泛地应用于许多控制设备中。

开环控制系统的缺点是:控制精度取决于组成系统的元件的精度,因此对元器件的要求比较高。由于输出量不能反馈回来影响控制量,所以输出量受扰动信号的影响比较大,系统抗干扰能力差。根据上述特点,开环控制方式仅适用于输入量已知、控制精度要求不高、扰动作用不大的情况。

开环控制系统一般是根据经验来设计的。如普通的洗衣机,对输出信号即衣服的洁净度不作监测;普通电烤箱,不考虑开门时的扰动对于烤箱温度的影响等,所以系统只有一条从输入到输出的前向通路。

比较图 1-1 中闭环控制系统与开环控制系统,很容易发现它们的区别。闭环控制系统不仅有一条从输入端到输出端的前向通路,还有一条从输出端到输入端的反馈通路。输出信号的物理量通过一个反馈元件(测量变送元件)被反馈到输入端,与输入信号比较后得到偏差信号来作为控制器的输入,反馈的作用是减小偏差,以达到满意的控制效果。闭环控制又称为反馈控制。

上述系统的输出信号通过测量变送元件返回到系统的输入端,并和系统的输入信号作比较的过程就称为反馈。如果输入信号和反馈信号相减则称为负反馈,反之,若二者相加,则称为正反馈。控制系统中一般采用负反馈方式。输入信号与反馈信号之差称为偏差信号。

闭环控制系统在控制上具有以下特点。

由于输出信号的反馈量与给定信号作比较产生偏差信号,利用偏差信号实现对输出信号的控制或者调节,所以系统的输出信号能够自动地跟踪给定信号,减小跟踪误差,提高控制精度,抑制扰动信号的影响。除此之外,负反馈构成的闭环控制系统还有其他的优点:引进反馈通路后,使得系统对前向通路中元件参数的变化不灵敏,从而系统对于前向通路中元件的精度要求不高;反馈作用还可以使得整个系统对于某些非线性影响不灵敏等。下面来举例说明开环控制和闭环控制。

图 1-2 是直流电动机转速开环控制示意图。图 1-3 是直流电动机转速闭环控制示意图。在图 1-2 中,电动机带动负载以一定的转速转动。当调节电位器的滑臂位置时,可以改变功率放大器的输入电压,从而改变电动机的电枢电压,最终改变电动机的转速。所以,电动机的转速可以通过调节电位器来给定。但是当电动机受到负载变化影响时,电动机的转速是要发生变化的。

在这个系统中,电位器滑臂的分压值是系统的输入量,放大器作为控制器,电动机是受控对象,电动机的转速是系统的输出量。当外界有扰动时,即使输入量没有变化,输出量也会改变。这种开环控制系统的输出转速在负载扰动影响下不可能稳定在希望的数值上,所以开环控制系统不能做到自动调节,控制的精度是比较低的。为了实现系统的自动控制,提高控制精度,可以改变控制方法,增加反馈回路来构成闭环控制系统。

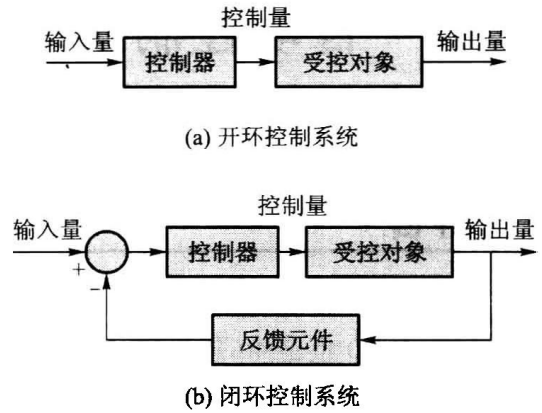


图 1-1 开环控制系统与闭环控制系统

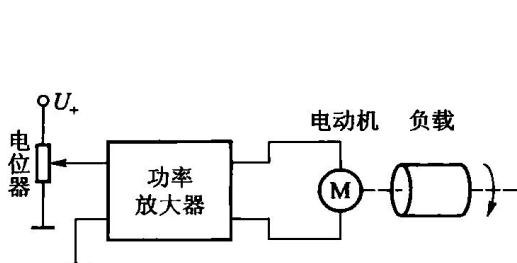


图 1-2 直流电动机转速开环控制

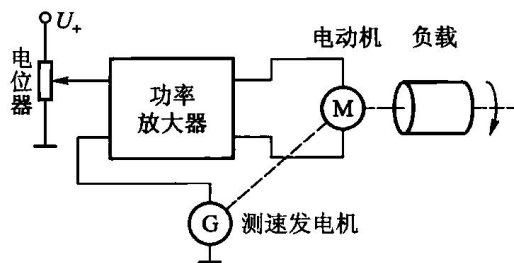


图 1-3 直流电动机转速闭环控制

在图 1-3 中,在原来开环控制的基础上,增加了一个由测速发电机构成的反馈回路,检测输出转速的变化并反馈。由于测速发电机的反馈电压大小与电动机的转速成正比,反馈电压与输入值(电位器滑臂的分压值)作差值运算后,再经过控制器(功率放大器)来控制电动机的转速,可以实现电动机转速的自动调节。系统自动调节电动机转速的过程如下。

当系统受到负载扰动作用时,如果负载增大,则电动机的转速降低,测速发电机的端电压减小,功率放大器的输入电压增加,电动机的电枢电压上升,使得电动机的转速增加。如果负载减小,则电动机转速调节的过程与上述过程相反。这样,消除或者抑制了负载扰动对于电动机转速的影响,提高了系统的控制精度。

综上所述,闭环控制系统的自动控制或者自动调节作用是基于输出信号的负反馈作用而产生的,所以经典控制理论的主要研究对象是负反馈的闭环控制系统,研究目的是得到它的一般规律,从而可以设计出符合设计要求的,满足实际需要的,性能优良的控制系統。

## 1-3 自动控制与自动控制系统

### 1-3-1 自动控制系统的组成及定义

自动控制系統的基本结构如图 1-4 所示。下面以图 1-4 为例来介绍自动控制系统的组成部分以及一些常用术语。

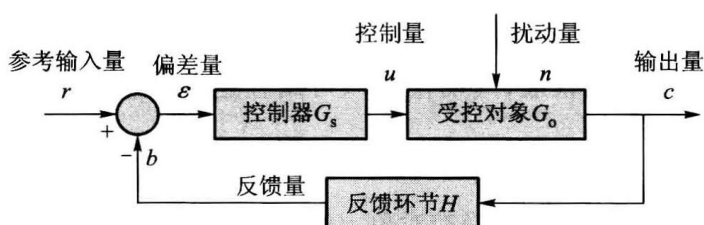


图 1-4 典型自动控制系统

#### 1. 控制系统的一些常用术语

## 4 第1章 自动控制系统概述

### (1) 受控对象

是指被控制的装置或者设备(如电动机、车床等),有时也指受控的物理量。受控物理量的变化过程称为受控过程。例如化学反应过程、水泥窑炉的温度变化过程等,一般用符号  $G_c$  表示。

### (2) 参考输入量(设定值)

系统的给定输入信号,或者称为希望值,一般用符号  $r$  表示。

### (3) 控制量

施加给受控对象的外部作用,使受控对象按照一定的规律运行,一般用符号  $u$  表示。

### (4) 输出量

控制系统的输出,即受控的物理量,一般用符号  $c$  表示。

### (5) 偏差量

系统的参考输入量与反馈量之差称为偏差量,是控制系统中的一个重要参数,一般用符号  $\varepsilon$  表示。

### (6) 扰动量

外界或者系统内部影响系统输出的干扰信号。外部的扰动称为外扰,它是系统的一个不希望的输入信号。内部的扰动称为内扰,也可以等价为系统的一个输入信号。在设计控制系统时要采取一定的方法来减少或者消除它的影响。一般用符号  $n$  表示。

### (7) 前向通路

从输入端到输出端的单方向通路。

### (8) 反馈通路

从输出端到输入端的反方向通路。对于一个复杂系统,前向通路及反馈通路都不止一条。

## 2. 控制系统的组成

虽然现实当中的系统复杂多样,但它们都可以抽象为典型的系统来描述。一个典型的控制系统由以下几部分组成。

### (1) 受控对象(或者受控过程,其定义如前所述)

### (2) 定值元件

在常规仪表控制中用它来产生参考输入量或者设定值。设定值既可以由手动操作设定也可以由自动装置给定。参考输入量的值根据实际情况而定,其类型与变送器的类型一致。在当前的计算机控制中,参考输入量或者设定值一般可以由计算机给出,因此不需要专用的定值元件。

### (3) 控制器

接收偏差信号或者输入信号,通过一定的控制规律给出控制量,送到执行元件。如某种专用运算电路、常规控制仪表(电动仪表,气动仪表)、可编程逻辑控制器(PLC)、工业控制计算机等都属于控制器。

### (4) 执行元件

有时控制器的输出可以直接驱动受控对象。但是大多数情况下受控对象都是大功率级的,控制信号与受控对象功率级别不等。另外控制信号一般是电信号,而受控对象的输入信号多是其他形式的非电物理量,物理量纲不等。因此控制器的输出不能直接驱动受控对象。两者之间实现功率级别转换或者物理量纲转换的装置称为执行元件,又常称为执行机构或者执行器。常见的执行元件有步进电动机、电磁阀、气动阀、各种驱动装置等。在图 1-4 中是将其并入控制器

中来考虑的,因此未画出。

#### (5) 测量变送元件

又称传感器,用于检测受控对象的输出量,如温度、压力、流量、位置转速等非电量,并转换成标准信号(一般是电信号)后作为反馈量送到控制器。例如各种压力传感器、流量传感器、差压变送器、测速发电机等。

#### (6) 比较元件

用以产生偏差信号来形成控制,有的系统以标准装置的方式配以专用的比较器,大部分是以隐藏的方式合并在其他控制装置中,如计算机控制系统等。

## 1-3-2 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的,按照不同的分类方法可以分成不同的类型。实际系统可能是几种方式的组合。

前面已经介绍过开环控制系统与闭环控制系统,这是按照控制原理来分类的。下面再介绍自动控制系统的另外几种主要分类方法。

### 1. 恒值控制系统与随动控制系统

这是根据给定的参考输入信号的不同来分类的。

当系统的参考输入信号为恒值或者波动范围很小,系统的输出量也要求保持恒定,这类控制系统称为恒值控制系统。例如恒温控制系统和转速控制系统等。

随动控制系统又称伺服控制系统,其参考输入值不断地变化,而且变化规律未知。控制的目的是使得系统的输出量能够准确地跟踪输入量的变化。随动控制系统常用于军事上对于机动目标的跟踪,例如雷达-火炮跟踪系统、坦克炮自稳系统等。

### 2. 线性系统与非线性系统

这是根据系统数学性质的不同来分类的。

线性系统的主要特征是满足叠加定理,即

当系统在输入信号  $r_1(t)$  的作用下产生系统的输出  $c_1(t)$ ,当系统在输入信号  $r_2(t)$  的作用下产生系统的输出  $c_2(t)$ ,如果满足系统的输入信号为

$$ar_1(t) + br_2(t)$$

时,系统的输出为

$$ac_1(t) + bc_2(t)$$

系数  $a, b$  可以是常数,也可以是时变参数  $a(t), b(t)$ 。这样的系统称为线性系统,否则称为非线性系统。

由于线性系统的理论比较成熟,其中特别是线性定常系统,可以方便地用于系统的分析与设计,因此本书所研究和讨论的主要是线性定常系统。

### 3. 连续时间系统与离散时间系统

这是根据时间信号的不同方式来对系统进行分类的。当系统的输入信号与输出信号均是连续时间函数  $r(t)$  与  $c(t)$  来表示,则称为连续时间系统。当系统的输入信号与输出信号均以离散时间量  $r(kT)$  与  $c(kT)$  来表示,则称为离散时间系统。注意,两种类型信号之间的等价是有条件

## 6 第1章 自动控制系统概述

的,因此两类系统之间的等价也是有条件的,两类时间信号如图 1-5 所示。

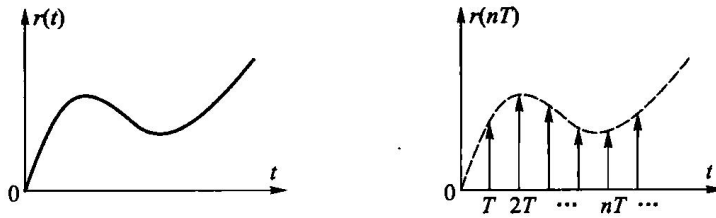


图 1-5 连续时间信号与离散时间信号

相对于实际的离散时间系统,在数字化与计算机控制的当今时代,是将连续时间系统等价为离散时间系统来分析与研究的,这样可以方便地利用计算机作为控制器来实现系统的控制。计算机控制系统如图 1-6 所示。

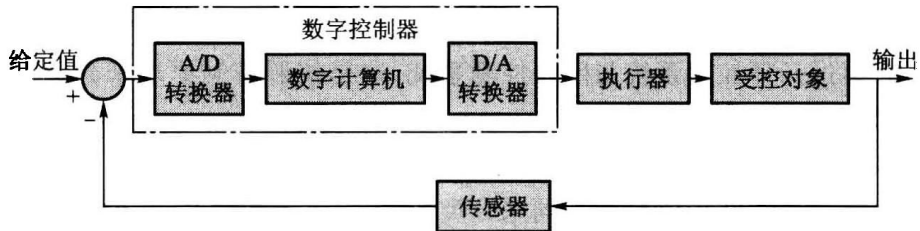
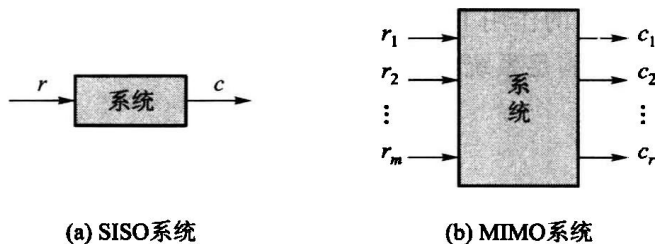


图 1-6 计算机控制系统

### 4. 单输入单输出系统与多输入多输出系统

单输入单输出系统与多输入多输出系统如图 1-7 所示。

单输入单输出系统(SISO)只有一个输入量和一个输出量。由于这种分类方法是从端口关系上来分类的,故不考虑端口内部的通路与结构。单输入单输出系统是经典控制理论的主要研究对象。



(a) SISO系统

(b) MIMO系统

图 1-7 单输入单输出系统与多输入多输出系统

多输入多输出系统(MIMO)有多个输入量和多个输出量,其主要特点是输出与输入之间呈现多路耦合,因此与单输入单输出系统相比,系统的结构要复杂得多,本书基本不予讨论。

除了以上提到的分类方法外,自动控制系统还有其他的分类方法,如集中参数系统与分布参数系统、确定性系统与随机控制系统等。

### 1-3-3 自动控制系统的设计

自动控制系统的设计方法根据实际情况的不同而不同。首先自动控制系统的设计要符合自动控制系统的基本要求,其次要遵循自动控制系统设计的基本原则。

#### 1. 对自动控制系统的基本要求

对于一个控制系统首要的问题是系统的绝对稳定性。否则系统无法正常工作,甚至毁坏设备,造成重大损失。直流电动机的失磁、导弹发射的失控、运动机械的增幅振荡等都属于系统不稳定。

在系统稳定的前提下,要求系统的动态性能和稳态性能要好。系统的动态性能和稳态性能是由相应的性能指标来描述的,这在后面的章节中再详细展开叙述。在此,对于系统的性能要求可以定性地简要概括为:

- (1) 响应动作要快;
- (2) 动态过程平稳;
- (3) 跟踪值要准确。

上述三条自动控制系统的基本要求如图 1-8 所示。

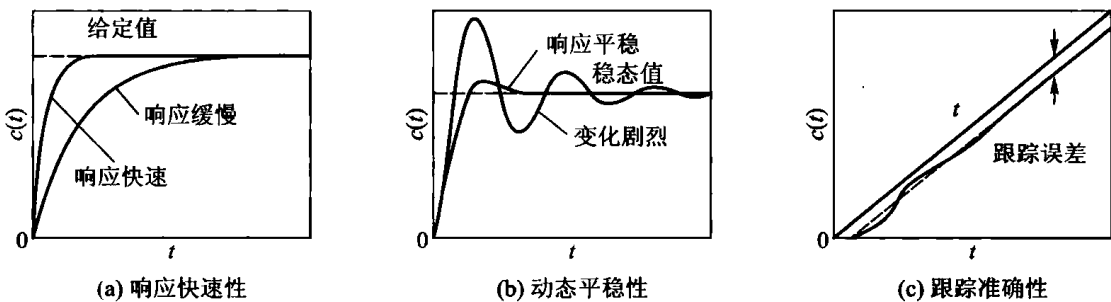


图 1-8 控制系统的基本要求

图(a)显示了给定恒值信号时,系统达到稳态值的快速性。图(b)说明了给定恒值信号时,系统的响应能够很快稳定在稳态值附近与在稳态值附近上下波动的两种比较情况。图(c)说明了跟踪等速率变化信号的系统,系统的响应能否准确地跟踪输入信号。能够准确地跟踪的系统,就没有跟踪误差或者跟踪误差很小,否则,跟踪误差就大。

上述的基本要求只是定性的描述。在设计一个控制系统或者考查一个控制系统时,上述三条均需要有定量的要求,也正是本门课程中系统分析的任务。

#### 2. 自动控制系统的设计原则

自动控制系统设计的目的是要保证系统的输出在给定性能要求的基础上跟踪输入信号,并且要有一定的抗干扰能力。

由于对系统的要求不同,实际中系统的设计可能会复杂多样,但是自动控制系统的设计大体上可以归结为以下几个步骤。

##### (1) 系统分析

首先要了解系统的工作原理,分析系统的性能。系统的分析是在描述系统的数学模型的基础上进行的,利用系统的数学模型就可以将系统分析的工作转化为数学问题来研究与讨论。如何得到系统的数学模型,属于系统的建模问题,在本书中主要利用解析法,即基于物理学的定律来得到系统的数学模型。其他得到数学模型的方法还有实验法等。有了描述系统的数学模型,就可以用数学方法来具体分析一个自动控制系统了。

在系统分析中,利用各种系统分析方法可以得到系统的运动规律和系统的运动性能。采用什么分析方法来分析一个自动控制系统?如何来评价系统的性能?如何加以改进和修正?这些问题都是系统分析中需要解决的问题。

### (2) 系统设计

系统设计的任务就是寻找一个能够实现所要求性能的自动控制系统。设计系统时,要找出影响系统性能的主要因素,确定控制量和被控制量。然后根据要求确定采取什么样的控制规律来改进系统的性能。例如比例控制、比例-微分-积分控制等。要确定和选用合理的控制装置例如控制器、执行器、工控机等。设计过程并不是一次就能够完成的,必须经过反复的选择和试探,才能达到满意的效果。

### (3) 实验仿真

设计工作完成以后,可以利用计算机把数学模型在各种信号及扰动作用下的响应进行测试分析,确定所设计的系统性能是否符合要求,并且加以修正使其进一步完善,以寻求达到最佳的控制效果。

仿真的方法除算法仿真外,还有半物理仿真以及物理仿真。其中算法仿真的费用是最低的,而物理仿真的费用最高。可以根据实际需要来决定仿真实验选用什么样的方式。

### (4) 控制实现

系统仿真工作完成之后,就可以进入样机制作阶段了。对于制作的样机,还要进行反复的实验调试,直至满足设计要求为止。

从上面叙述的设计步骤可以得出,一个自动控制系统的设计,是一个复杂和反复的过程,在本书中,重点从理论上探讨、研究自动控制系统的分析问题和系统的设计问题(自动控制系统的校正)。

## 1-4 自动控制理论的发展

---

自动控制理论的发展到目前为止经历了以下几个阶段。

### 1-4-1 经典控制理论发展阶段

---

早在经典控制理论形成之前,反馈控制的思想,即应用负反馈来实现自动控制的系统已经在实际中得到了应用。图 1-9 所示我国古代的弓箭就是朴素的负反馈控制思想的早期应用。早期工业应用的典型实例是二百多年前蒸汽机的速度控制,如图 1-10 所示。



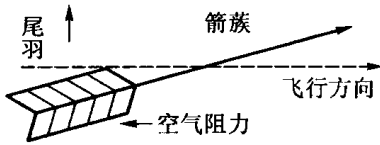


图 1-9 古代的负反馈应用

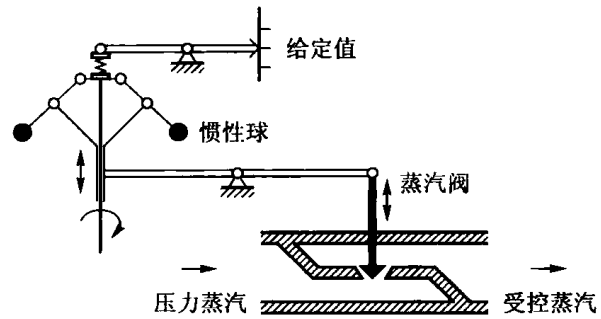


图 1-10 负反馈在早期机器中的应用

到了第二次世界大战时期,由于工业技术发展的需要和战争的需要,在其他相关学科的发展促进下,经典控制理论逐渐发展成熟。以奈奎斯特稳定性判据为核心的频率分析法和根轨迹分析法两大系统分析工具配以数学解析方法的时域分析法,构成了经典控制理论的基础。在此期间,也产生了一些非线性系统的分析方法,如相平面法和描述函数法等,以及采样系统的分析方法。在此阶段较为突出的应用有高射炮随动跟踪系统、直流电动机调速系统以及一些初期的过程控制系统等。

在经典控制理论的研究中,所使用的数学工具主要是线性微分方程和基于拉普拉斯变换的传递函数。研究对象基本是单输入单输出系统,以线性定常系统为主,所以研究的对象和范围有限,还不能解决许多控制中的复杂问题,如时变参数问题、多变量问题、强耦合问题等。

尽管如此,经典控制理论的形成,对于第二次世界大战以来控制学科的发展起到了推动作用。经典控制理论在工业控制和军事技术中的广泛应用,推动了现代科学技术的进步,促进了现代控制理论的产生与发展,取得了不可磨灭的成就。

## 1-4-2 现代控制理论发展阶段

从 20 世纪 50 年代开始,为了适应空间技术与军事技术发展的需要,在经典控制理论充分发展的基础上,现代控制理论问世并得到了长足的发展。许多经典控制理论不能解决的问题,在此期间都得到了满意的答案。

现代控制理论研究所使用的数学工具主要是状态空间法。研究对象更为广泛。如线性系统与非线性系统、定常系统与时变系统、多输入多输出系统、强变量耦合系统等。

现代控制理论的发展与计算机硬件科学与软件科学的飞速发展是同时代的,一是使得计算机科学的发展,更加有了用武之地。二是借助于计算机技术,使得空间技术、导弹制导、自动驾驶等高精技术领域发展到了极为辉煌的时代。

我国在现代控制理论方面的主要成就除了航天方面的火箭发射控制技术之外,较为突出的还有人口模型与中国人口控制问题。这是人文社会科学与工程技术科学相结合的研究成果,该项研究成果协助我国政府实现了中国的短期、中期、长期人口控制发展决策,是一项比较突出的现代控制理论研究方面的研究成果。