



高等学校电气信息类规划教材

electric
information

自动控制原理

(第二版)

李益华 主编

湖南大学出版社

高等学校电气信息类规划教材

总主编 王耀南

自动控制原理

(第二版)

主 编 李益华

副主编 杨 玉 潘湘高

湖南大学出版社

2010·长沙

内 容 简 介

本书系统地介绍了自动控制原理的基本理论及其应用。第1章深入浅出地介绍了自动控制原理的基本概念、基本分类及自动控制理论的发展历史。第2章以机械、电气系统等实际对象为例,介绍控制系统的数学建模方法。第3章到第6章针对线性定常控制系统,介绍时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及控制系统的校正与设计方法。其中第3章讨论二阶系统的时域响应和相应的性能指标,以及用于稳定性分析的劳斯判据;第4章介绍根轨迹的原理、作图方法和基于根轨迹的系统分析;第5章介绍控制系统分析的频域方法,讨论基于奈奎斯特图和基于对数坐标的频率特性图的绘制及其在系统性能分析和稳定性分析中的应用;第6章针对单输入单输出线性定常系统,介绍基于根轨迹和频域方法的控制系统校正和设计方法。第7章主要讨论描述函数法、相平面法等常用的非线性系统分析方法。第8章介绍线性离散系统的基础理论、数学模型、稳定性、稳态误差以及动态性能分析方法等。

本书可用作高等学校电气信息类各专业《自动控制原理》课程的教材,也可作为有关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理(第二版)/李益华主编. —长沙:湖南大学出版社,2010.9

(高等学校电气信息类规划教材)

ISBN 978-7-81113-876-4

I. ①自… II. ①李… III. ①自动控制原理—高等学校—教材

IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 164455 号

自动控制原理(第二版)

Zidong Kongzhi Yuanli(Di'er Ban)

主 编:李益华

责任编辑:金 伟

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山

电 话:0731-88822559(发行部),88821142(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

电子邮箱:pressjinw@hnu.cn

网 址: <http://press.hnu.cn>

印 装:长沙瑞和印务有限公司

开本:787×1092 16开

版次:2010年9月第2版

书号:ISBN 978-7-81113-876-4/TP·67

定价:38.00元

责任校对:全 健

责任印制:陈 燕

邮 编:410082

印张:18.75

印次:2010年9月第1次印刷

字数:445千

印数:1~4 000册

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

高等学校电气信息类规划教材

编辑委员会

主任:章 兢
(湖南大学副校长,教授,博士生导师)

总 主 编:王耀南
(湖南大学电气与信息工程学院院长,教授,博士生导师)

常务副主任:彭楚武 罗 安 何怡刚 黄辉先 黎福海 黄守道 王英健

副 主 任:(按姓氏笔画为序)
王新辉 邓曙光 朱荣辉 刘志壮 陈日新 杨家红 张万奎
张忠贤 周少武 贺达江 黄绍平 彭解华 瞿遂春

委 员:(按姓氏笔画为序)
丁跃尧 方厚辉 王 辉 王 群 王建君 田学军 包 艳
刘祖润 肖强晖 李益华 李正光 李茂军 李春树 李欣然
余建坤 汪鲁才 张学军 金可音 孟凡斌 欧青立 唐勇奇
康 江 黄智伟 揭 屿 曾喆昭 熊芝耀 戴瑜兴

参 编 院 校

(排名不分先后)

湖南大学	南华大学	湖南城市学院
国防科学技术大学	株洲工学院	邵阳学院
湘潭大学	湖南工程学院	怀化学院
湖南师范大学	吉首大学	零陵学院
长沙理工大学	湖南商学院	长沙学院
湖南科技大学	湖南理工学院	湖南工学院(筹)
湖南农业大学	湖南文理学院	

序

我国高等教育已经发展到大众化教育的新阶段。随着国家工业化建设的迅猛发展,电气信息类专业技术人才的需求也日益增大。为了适应人才培养的这种新形势,跟踪科学技术的前沿进展,我们根据教育部面向 21 世纪电气信息类课程改革的要求,结合湖南大学和兄弟院校长期教学教改的经验,为大学电气信息类本科生编写了这套教材。

电气信息类课程是培养电类专业人才的基础课程,大量概念、理论、方法和工程案例构成了一个完整的技术知识体系。学生要开启心智、培育形成电类专业思维、打下电类专业人才的技术知识基础,必须系统地扎实地学好这些课程。为此,我们在组织编写这套教材时,特别注意了以下几个方面:

一是保证基础。作为大学基础课程,应确保基本概念、基本原理和基本方法的学习。只有透彻地理解和掌握了基础知识,才能顺利地进入电气信息技术领域的大门,才有可能进一步深造。

二是跟踪新技术。电气信息技术发展日新月异,大学教材必须及时吸纳最新技术,使学生了解学科发展动态。本套教材一方面注意反映学科各方面的最新进展,安排了扩充阅读的相关文献题录,指引学生直接接触学科前沿;另一方面还根据学科与技术的发展趋势,对经典知识进行重新组织编排。本套教材还将及时再版,及时更新内容,确保与时俱进,始终处于技术发展的最前沿。

三是注重应用。电气与信息理论源于工程实践,源于科学发现和技术发明,就像艺术源于生活一样。本套教材在讲述基本理论的同时,注重联系工程实际,并把作者的研究成果应用到其中。在正文、例题和习题中,特意安排了大量工程实用问题,通过理论和工程实际的结合,使学生学到知识并掌握方法。

四是文理渗透、启发诱导。为了提升素质,开阔视野,培养科学创新意识,理工科学生应适当了解与学科相关的课程外知识。为此,在许多教材中精心安排了“扩展与思考”的内容,使学生从中体会科学思想、科学方法以及科技与人文、科学与艺术相互交融的精神和境界。

五是部分教材以多媒体 CAI 课件配合。这样可以将重要的知识点以生动形象的画面表现出来,深化认识,提高学习效果,也便于课堂教学。

本套教材经过充分研讨和论证,聘请各院校教学经验丰富、科研基础深厚的教授和副教授担任主编和编写者,是湖南所有电气信息类院校团结协作的成果,是全省最优秀的电气信息工程学科专家学者集体智慧的结晶。

本套教材的编写和出版,得到了湖南大学、国防科学技术大学、湘潭大学、湖南师范大学、长沙理工大学、湖南农业大学、湖南科技大学、南华大学、株洲工学院、湖南工程学院、吉首大学、湖南商学院、湖南理工学院、湖南城市学院、湖南文理学院、邵阳学院、怀化学院、零陵学院、长沙学院、湖南工学院(筹)等高校的通力合作,得到了湖南大学出版社的支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

王耀南

2004 年 6 月于岳麓山

再版前言

自动控制理论作为当代高新技术的基础之一,已广泛应用于制造业、农业、交通、航空、航天、国防等几乎所有产业领域,甚至开始融入人类的日常生活中。进入 21 世纪以来,自动控制理论从理论到实践都有了更加广泛深入的发展,计算机、微电子技术研究开发日新月异,为自动控制理论的应用提供了充足的技术手段,也为自动控制理论这一经典学科注入了新的活力。

经典控制理论是整个控制理论的基础,是进一步学习研究其他控制理论的先导课程。本书按照教育部有关电气信息类专业教学改革的精神,根据自动化、电气工程、测控、通信、计算机与机械电子工程等专业新修订的教学大纲,在高等学校电气信息类规划教材编委会的直接指导下,由对这门课程有多年教学经验的教师联合编写。

本书主要讲述经典控制理论。经过编写组多次讨论,本书编写突出了以下特点:

(1)先进性:顺应现代科技的发展潮流,将计算机辅助工具 MATLAB 融入系列教材编写中,用于系统的分析、计算、设计与仿真;

(2)适用性:控制理论教学要求学生具有较强的数理概念,为此,着重加强理论与实践的结合,尽量淡化繁冗的理论推导,注重基本概念和基本方法的讲解,力求将枯燥的理论生动的实例结合起来,用自动控制理论解决日常生活与生产中的实际问题;

(3)系统性与渐进性:遵循控制理论的发展规律,教材各章节之间注重由浅入深,融会贯通,充分体现控制理论发展的系统性和渐进性。

为了适应控制技术和控制理论发展形势的需要,我们对 2005 年出版的《自动控制原理》进行了修订,这次修订除保持本书深入浅出、理论严谨、系统性强以及便于自学的特点外,突出了工程系统设计的应用,加强了系统建模的内容,并对每章后的习题做了较大的改动与充实,其他各章未做大的改动,修正了某些错误和不妥之处。修订后的内容基本保持了原书的体系,特色不变,但在内容编排上更紧凑、连贯。

本书第二版由长沙理工大学李益华教授任主编。参加编写工作的人员还有:潘湘高、杨玉、凌云、王玉凤等。本书第一版的作者,或者由于退休、或者由于工作调动等原因而不再参与第二版的工作,但他们对本书的工作是不可磨灭的。在此,谨向曾参与本书第一版编写的刘湘涛、邱德润、邓曙光、孙炜、罗培等教授们表示感谢。此外,王国伟、周黎明在本书的修订过程中也付出了大量的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,得到了湖南大学电气与信息学院王耀南院长、黎福海副院长,湘潭大学信息工程学院黄辉先副院长,长沙理工大学电气与信息工程学院李茂军副院长等领导、专家的指导和帮助,谨向他们表示衷心感谢!

限于编者水平和经验,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2010 年 6 月

第一版前言

自动控制理论作为当代高新技术的基础之一,已广泛应用于制造业、农业、交通、航空、航天、国防等几乎所有产业领域,甚至开始融入人类的日常生活中。进入 21 世纪以来,自动控制理论从理论到实践都有了更加广泛更加深入的发展,计算机、微电子技术研究开发日新月异,为自动控制理论的应用提供了充足的技术手段,也为自动控制理论这一经典学科注入了新的活力。

经典控制理论是整个控制理论的基础,是进一步学习研究其他控制理论的先导课程。本书按照教育部有关电气信息类专业教学改革的精神,根据自动化、电气工程、测控、通信、计算机与机械电子工程等专业新修订的教学大纲,在高等学校电气信息类规划教材编委会的直接指导下,由对这门课程有多年教学经验的教师联合编写。

本书主要讲述经典控制理论。经过编写组多次讨论,本书编写突出了以下特点:

(1)先进性:顺应现代科技的发展潮流,将计算机辅助工具 MATLAB 融入系列教材编写中,用于系统的分析、计算、设计与仿真;

(2)适用性:控制理论教学要求学生具有较强的数理概念,为此,着重加强理论与实践的结合,尽量淡化繁冗的理论推导,注重基本概念和基本方法的讲解,力求将枯燥的理论与生动的实例结合起来,用自动控制理论解决日常生活与生产中实际问题;

(3)系统性与渐进性:遵循控制理论的发展规律,教材各章节之间注重由浅入深,融会贯通,充分体现控制理论发展的系统性和渐进过程。

本书在讲述方法上注意数理概念的结合,深入浅出,通俗易懂,加强基本概念;在内容安排上,考虑到各专业的通用性和便于教学时数的取舍。为了便于学生加深对概念和理论的消化理解,每章都有足够的例题和习题以供练习。

根据高等学校电气信息类规划教材编委会统一部署,本书由长沙理工大学李益华教授任主编,杨玉副教授、湖南文理学院潘湘高教授任副主编。参加编写的人员有:李益华、李茂军、潘湘高、杨玉、邓曙光、邱德润、凌云、王玉凤、罗培、王国伟。

在本书编写过程中,得到了湖南大学电气与信息学院王耀南院长、黎福海副院长,湘潭大学信息工程学院黄辉先副院长,长沙理工大学电气与信息工程学院、李茂军副院长等领导、专家的指导和帮助,谨向他们表示衷心感谢!

编 者

2004 年 7 月 15 日

目 次

第 1 章 绪 论

1.1 引 言	(1)
1.2 自动控制系统的基本结构	(2)
1.2.1 开环控制系统	(2)
1.2.2 闭环控制系统	(4)
1.3 自动控制系统的分类	(5)
1.3.1 按系统输入信号的变化规律分类	(5)
1.3.2 按系统的响应特性分类	(6)
1.4 控制系统性能的基本要求和典型输入信号	(7)
1.4.1 控制系统性能的基本要求的提法	(7)
1.4.2 典型输入信号	(8)
1.5 基于 MATLAB 的控制系统分析与设计	(10)
本章小结.....	(10)
习 题.....	(10)

第 2 章 控制系统的数学模型

2.1 控制系统微分方程的建立	(13)
2.1.1 列写系统或元件微分方程的一般方法	(13)
2.1.2 非线性数学模型的线性化	(17)
2.2 控制系统的传递函数	(18)
2.2.1 传递函数的概念	(19)
2.2.2 传递函数的表达式和性质	(19)
2.2.3 传递函数的求法	(20)
2.2.4 典型环节的传递函数	(22)
2.3 控制系统的传递函数方框图与信号流图	(26)
2.3.1 传递函数方框图的建立	(26)
2.3.2 方框图的等效变换规则	(29)
2.3.3 典型闭环系统方框图及其传递函数	(36)
2.3.4 信号流图与梅逊公式	(38)
2.4 数学模型的实验测定法	(41)
2.5 MATLAB 在求解线性微分方程及系统方框图化简中的应用	(46)
2.5.1 MATLAB 在求解线性微分方程中的应用	(46)
2.5.2 MATLAB 在系统方框图化简中的应用	(51)

本章小结	(57)
习 题	(57)

第3章 线性定常系统的时域分析

3.1 时域分析的性能指标	(62)
3.1.1 典型输入信号作用下系统的时域响应	(62)
3.1.2 时域响应的性能指标	(63)
3.2 一阶系统的时域分析	(64)
3.2.1 数学模型	(64)
3.2.2 单位阶跃响应	(65)
3.2.3 时间常数 T 的求法	(65)
3.2.4 减小时间常数的措施	(66)
3.3 二阶系统的时域分析	(67)
3.3.1 典型的数学模型	(67)
3.3.2 单位阶跃响应	(67)
3.3.3 欠阻尼响应的性能指标	(71)
3.3.4 实际二阶系统	(73)
3.3.5 改善欠阻尼响应性能指标的措施	(74)
3.4 稳定性分析	(77)
3.4.1 稳定的概念和稳定的条件	(77)
3.4.2 劳斯判据	(78)
3.5 稳态性能分析	(82)
3.5.1 误差与稳态误差	(83)
3.5.2 给定输入下的稳态误差 e_{ssr}	(84)
3.5.3 扰动稳态误差 e_{ssn}	(86)
3.5.4 用动态误差系数表示系统的稳态误差	(87)
3.5.5 降低稳态误差的措施	(89)
3.6 MATLAB在系统时域分析中的应用	(90)
3.6.1 MATLAB在分析系统稳定性中的应用	(90)
3.6.2 MATLAB在系统的动态特性分析中的应用	(91)
3.6.3 系统单位阶跃响应的求法	(93)
本章小结	(94)
习 题	(94)

第4章 根轨迹法

4.1 根轨迹的概念与根轨迹方程	(97)
4.1.1 根轨迹	(97)
4.1.2 根轨迹方程	(98)
4.2 绘制根轨迹的基本规则及根轨迹的绘制	(99)

4.2.1 绘制根轨迹的基本规则	(99)
4.2.2 根轨迹的绘制	(105)
4.3 广义根轨迹	(109)
4.3.1 参数根轨迹	(109)
4.3.2 多回路的根轨迹	(110)
4.3.3 正反馈回路的根轨迹	(111)
4.3.4 迟后系统的根轨迹	(112)
4.4 利用根轨迹分析系统的性能	(114)
4.4.1 主导极点的概念	(114)
4.4.2 增加开环零点对根轨迹的影响	(115)
4.4.3 根轨迹增益的确定及系统性能的分析	(115)
4.5 利用 MATLAB 绘制根轨迹图	(117)
4.5.1 常规根轨迹的绘制	(117)
4.5.2 零度根轨迹的绘制	(122)
本章小结	(123)
习 题	(124)

第 5 章 频域分析法

5.1 频率特性	(126)
5.1.1 频率特性的概念	(126)
5.1.2 频率特性与传递函数的关系	(128)
5.1.3 频率特性图示方法	(129)
5.2 典型环节的频率特性	(131)
5.3 系统的开环频率特性	(137)
5.3.1 开环幅相频率特性(极坐标图)	(138)
5.3.2 开环对数频率特性(Bode 图)	(141)
5.3.3 开环对数幅相频率特性(Nichols 图)	(145)
5.4 Nyquist 稳定判据	(145)
5.4.1 数学基础	(145)
5.4.2 Nyquist 稳定判据	(147)
5.4.3 Nyquist 稳定判据在 Bode 图上的应用	(149)
5.5 系统的相对稳定性	(150)
5.6 系统的闭环频率特性	(153)
5.7 系统频域指标与时域指标的关系	(159)
5.8 频率特性的实验测定法	(161)
5.9 MATLAB 在频域分析中的应用	(164)
5.9.1 应用 MATLAB 绘制 Bode 图	(165)
5.9.2 应用 MATLAB 绘制 Nyquist 图	(167)

本章小结·····	(170)
习 题·····	(171)
第 6 章 控制系统的综合与校正	
6.1 系统校正与综合概述 ·····	(174)
6.1.1 控制系统设计的步骤 ·····	(174)
6.1.2 性能指标 ·····	(175)
6.1.3 校正方式 ·····	(175)
6.1.4 校正方法 ·····	(176)
6.2 基本控制规律简介 ·····	(177)
6.3 常用校正装置及其特性 ·····	(179)
6.3.1 无源校正装置 ·····	(179)
6.3.2 有源校正装置 ·····	(184)
6.4 串联校正装置的频域设计 ·····	(186)
6.4.1 串联超前校正装置 ·····	(186)
6.4.2 串联滞后校正装置 ·····	(188)
6.4.3 串联滞后—超前校正 ·····	(190)
6.5 反馈校正 ·····	(193)
6.6 根轨迹法在系统校正中的应用 ·····	(197)
6.6.1 超前校正 ·····	(197)
6.6.2 串联滞后校正 ·····	(199)
6.7 MATLAB 在系统校正中的应用 ·····	(202)
本章小结·····	(205)
习 题·····	(206)
第 7 章 非线性控制系统分析	
7.1 非线性系统的基本概念 ·····	(208)
7.2 常见非线性特性及其对系统运动的影响 ·····	(208)
7.2.1 饱和特性 ·····	(209)
7.2.2 死区特性 ·····	(209)
7.2.3 间隙特性 ·····	(209)
7.2.4 继电特性 ·····	(210)
7.2.5 非线性系统的分析方法 ·····	(210)
7.3 相平面法 ·····	(210)
7.3.1 相轨迹及其绘制方法 ·····	(211)
7.3.2 非线性系统的相平面分析 ·····	(219)
7.4 描述函数法 ·····	(224)
7.4.1 描述函数的概念 ·····	(224)
7.4.2 典型非线性特性的描述函数 ·····	(225)

7.4.3 用描述函数分析非线性系统	(231)
本章小结	(234)
习 题	(234)
第8章 线性离散系统	
8.1 概 述	(236)
8.1.1 离散控制系统的组成	(236)
8.1.2 离散控制系统的特点	(237)
8.2 信号的采样与采样定理	(237)
8.2.1 采样过程	(237)
8.2.2 采样定理	(238)
8.2.3 采样周期的选取	(240)
8.3 信号恢复	(240)
8.4 Z变换	(243)
8.4.1 Z变换的定义	(243)
8.4.2 Z变换的求法	(243)
8.4.3 Z变换的性质	(245)
8.4.4 Z反变换	(247)
8.5 离散系统的数学模型	(249)
8.5.1 离散系统的线性差分方程	(249)
8.5.2 脉冲传递函数	(250)
8.6 离散控制系统分析	(257)
8.6.1 线性离散控制系统的稳定性分析	(257)
8.6.2 线性离散控制系统的动态性能分析	(262)
8.6.3 线性离散控制系统的稳态性能分析	(265)
8.6.4 MATLAB在离散系统中的应用	(268)
本章小结	(272)
习 题	(272)
附 录 常用数学工具	
附1 拉普拉斯变换	(275)
附2 z变换	(280)
参考文献	(283)

第 1 章 绪 论

自动控制理论是自动化学科的重要理论基础,本章将专门研究自动控制系统中的基本概念、基本原理和基本方法。本章介绍自动控制系统的基本结构、自动控制系统的类型和自动控制系统的基本要求等问题。

1.1 引 言

自动控制作为技术改造和技术发展的重要手段,在工业、农业、国防乃至日常生活和社会科学领域中都起着极其重要的作用。尤其近几十年来,随着电子计算机技术的发展和应用,在宇宙航行、机器人控制、导弹制导以及核动力等高新技术领域中,自动控制技术更具有特别重要的作用,不仅如此,自动控制技术的应用范围现已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域中,自动控制已成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(统称被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。

按照上述定义,自动控制在生产和生活中的例子举不胜举。

例如,厨房中的电冰箱能自动控制温度,按照指定的温度变化;数控机床能按照预定程序自动地切削工件;化学反应炉的温度或压力能自动地维持恒定;人造卫星能按照预定的轨道运行并返回地面;无人驾驶飞机能按照预定航迹自动升降和飞行等,这一切都是以应用高水平的自动控制技术为前提的。

能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统,称为自动控制系统。它一般包括控制装置和被控对象两大部分,而控制装置是由具有一定职能的各种基本元件组成。

自动控制理论就是研究自动控制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原理,随着工业生产与科学技术的发展,现已发展成为一门独立的学科——控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。工程控制论主要研究自动控制系统中的信息变换和传送的一般理论及其在工程设计中的应用。而自动控制原理则仅仅是工程控制论的一个分支,主要用于工业控制论。第二次世界大战期间,对于军用装备如飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用装备的设计与制造的强烈需求,进一步促进并完善了自动控制理论的发展。第二次世界大战后,由于生产和军事的需要,自动控制技术开始迅速地发展起来。到 20 世纪 50 年代末期,自动控制理论已形成完整的理论体系,即经典控制理论,它是以传递函数为数学工具,采用频率域方法,研究“单输入—单输出”的线性定常系统的分析和设计问题,但存在一定的局限性,即对复杂多变量系统、时变和非线性系统显得无能为力。20 世纪

60 年代初期,随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用,为适应宇航技术的发展,自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要以状态空间法为基础,研究多输入—多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析与设计问题。最优控制、最佳滤波、自适应控制、系统辨识、随机控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近年来,随着技术革命和大规模复杂系统的发展,已促使自动控制理论开始向第三代发展,即第三代控制理论——大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制理论等。

虽然控制理论已经历了第一代经典控制理论和第二代现代控制理论两个发展阶段,并已进入第三代,但经典控制理论仍不失其价值和实用意义,仍是进一步学习现代控制理论和智能控制理论的基础。

本书将对经典控制理论的基本内容作系统、详细的介绍。

1.2 自动控制系统的基本结构

自动控制系统的性能,在很大程度上取决于系统的控制器为了产生控制作用而必须接收的信息。这个信息有两个可能的来源:一是来自系统外部,即由输入端输入的参考输入信号,另一个来源于被控对象的输出端,即反映被控对象的行为或状态的信息。把从被控对象输出端获得的信息,通过中间环节(称为反馈环节)再送回到控制器的输入端,称为反馈。传送反馈信息的载体,称为反馈信号,是否采用反馈,对控制系统的性能影响很大。因此,系统的基本控制方式也就按有无反馈分为两大类:开环控制系统和闭环控制系统。

1.2.1 开环控制系统

一个控制系统,如果控制装置与被控对象之间只有正向控制作用而没有反向联系的控制过程,按这种方式组成的系统称为开环控制系统,如图 1.1 所示。

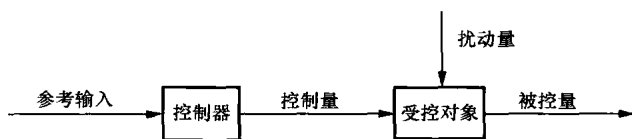


图 1.1 开环控制系统

这种控制系统结构较简单,控制作用直接由系统的参考输入产生,对应于每一个给定值,其被控量便有一个对应的固定工作状态,控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度。当系统存在干扰时,会直接影响被控量,而无法自动补偿,因而系统的控制精度难以保证。所以这种系统只适合于输入与输出关系已知,且系统不存在干扰(或干扰很弱)的场合,如一些自动化流水线、数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制。

下面我们来举例说明。图 1.2(a)为开环直流调速系统,图 1.2(b)为系统方框图。

图中 U_r 为给定参考输入,经触发器和晶闸管整流后产生直流电动机的供电电压 U_1 ,使电机产生期望的转速 n 。但是若电动机负载、电网电压或激磁电流稍有变化,电动机转

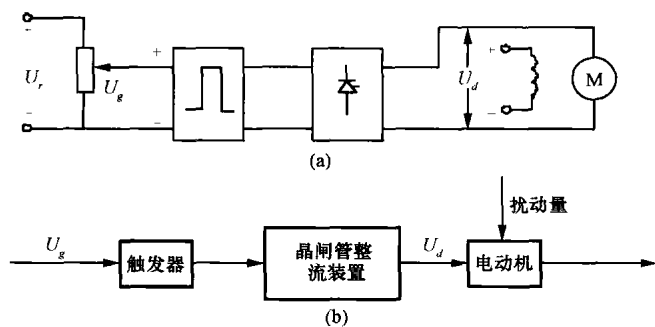


图 1.2 开环直流调速系统

速 n 就会随之而变化,不能维持 U_r 所对应的期望转数 n 不变,显然该系统无抗干扰的能力。

但可以考虑一个补偿措施:将扰动的信息引入控制器的输入端,利用控制器的控制作用来抵消扰动对被控对象的影响。具体做法是:设法将负载引起的电流变化测量出来,并按其大小产生一个附加的控制作用,用以补偿由它引起的转速下降,这样就可以构成按扰动控制的开环控制系统,如图 1.3(a)、1.3(b)所示。可见,这种按扰动控制的开环控制方式是直接从扰动取得信息,并可以改变被控量,因此,其抗扰动性好,控制精度也较高,但它只适用于扰动是可测量的场合,而且一个补偿装置只能补偿一种扰动因素,对其余扰动均不起补偿作用。对多种扰动、多种因素引起的输出的变化,采用一一补偿的办法几乎是不可能的,即使可能,也是十分困难的,因此必须采用闭环控制系统。

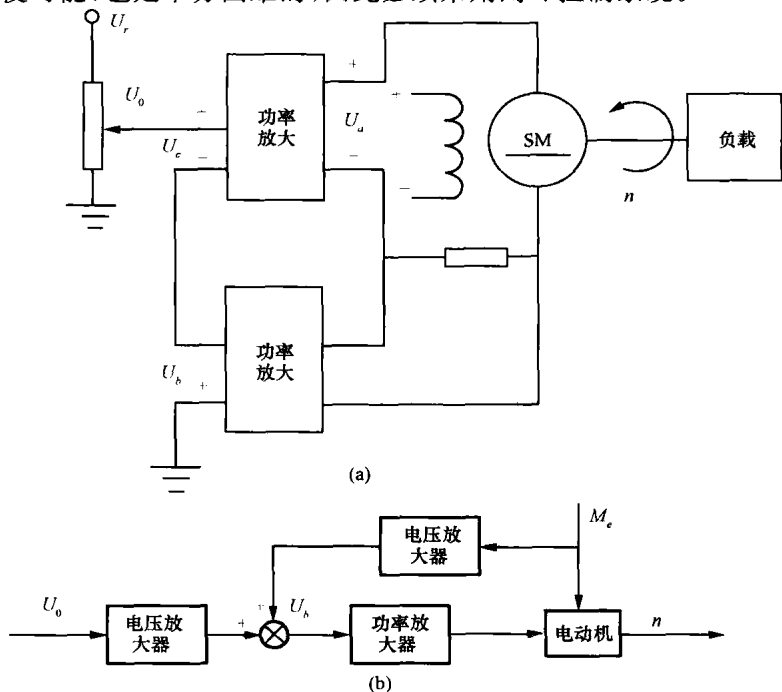


图 1.3 按扰动控制的速度控制系统

1.2.2 闭环控制系统

闭环控制系统是将系统的输出量检测出来,经过物理量的转换,再反馈到输入端与输入量进行比较,则构成了闭环控制系统,其系统框图如图 1.4 所示。

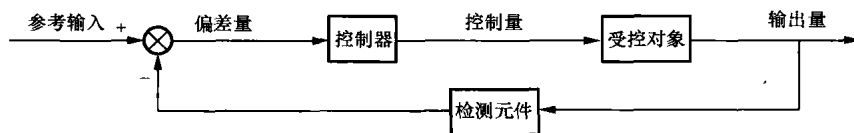


图 1.4 闭环系统框图

闭环控制系统的特点是,在控制器输入量与被控对象之间,不仅存在正向作用,而且存在反馈作用。若反馈信号与输入信号相减,则称为负反馈;反之,若反馈信号与输入信号相加,则称为正反馈。输入信号与反馈信号之差,称为偏差信号。此信号通过控制器,产生控制量使输出量趋于给定的数值。闭环控制系统的实质是按偏差进行控制,其特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时,必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差,使被控量与期望值趋于一致。可以说,按反馈控制方式组成的负反馈控制系统,具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力,有较高的控制精度。但这种系统使用的元件多,结构复杂,特别是系统的性能分析和设计也较麻烦。尽管如此,它仍是一种重要的并被广泛应用的控制方式,自动控制理论主要的研究对象就是用这种控制方式组成的系统。闭环控制系统的实例如图 1.5 所示。

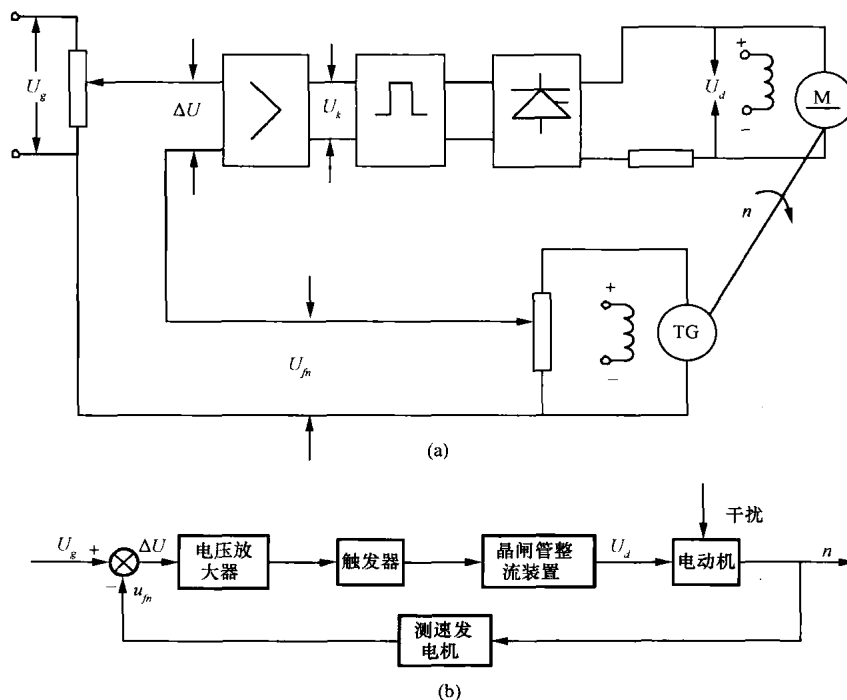


图 1.5 闭环直流调速系统

图中 TG 为测速发电机,通过它不断地对输出转速进行检测,并将测得的结果反馈到输入端与参考输入相减,产生偏差信号 ΔU ,经放大后驱动执行机构,使输出转速完全按照参考输入的要求变化。该系统如果受到外界或内部扰动,可以通过负反馈产生的偏差所取得的控制作用去消除输出量的误差,在本例中,当电动机负载增大时,使电动机流过的电流 I_d 上升,电枢电阻压降增大,导致电动机转速 n 下降,从而测速发电机输出电压 U_{fn} 减小,偏差电压 ΔU 上升,经放大后使触发脉冲前移,晶闸管整流输出电压 U_d 上升,从而补偿了由于负载增大所造成的电机转速下降,使转速 n 近似地保持不变。如果将图 1.5 中所测得的结果反馈到输入端与参考输入相加,则构成一个具有正反馈的控制系统,通过对系统中调节过程的分析,不难看出,在这种情况下当电动机负载增大时,系统的调节作用将不是减少所产生的误差,而是使其误差越来越大,最后使系统失去稳定而无法工作。因此在自动控制系统的研究中,一个很重要的问题是如何解决好“振荡”或“发散”问题。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统的种类繁多,应用范围很广,性能与结构各异,因此可以从不同角度进行分类,下面将列出几种主要的分类方法。

1.3.1 按系统输入信号的变化规律分类

1. 恒值控制系统(或称自动调节系统)

这类系统的特点是输入信号是一个恒定的数值。如发电机励磁控制系统、锅炉液位控制系统、压力控制系统,图 1.2 所示的直流调速系统也是一个恒值控制系统。

在恒值控制系统中,输入信号可以随生产条件的变化而改变,但一经调整后,被控量就应与调整好的输入信号保持一致。因此,恒值控制系统主要研究各种干扰对系统输出的影响以及如何克服这些干扰,使输出量维持在给定值(希望值)上。

2. 程序控制系统

这类系统的特点是输入信号是一个已知的时间函数,系统的控制过程按预定的程序进行,要求被控量能迅速准确地复现给定量,如数字程序控制机床,电厂中蒸汽机温度的控制等都属于这种系统,程序控制系统可以是开环形式,也可以是闭环形式。

3. 随动控制系统(或称伺服系统)

这类系统的特点是输入信号是一个事先无法确定的任意变化的时间函数,要求系统的被控量(输出量)能准确快速地跟随输入信号的变化而变化,即复现给定量。

随动控制系统应用很广泛,如火炮自动瞄准系统、雷达自动跟踪系统。工业自动化仪表中的各种变送器、显示、记录仪等都可看作随动系统。如图 1.6 所示的船舶驾驶舵角位置跟踪系统,该系统的任务是实现船舶舵角位置跟踪操纵杆角位置 θ_i 。被控对象是船舵,被控量(输出量)是船舵的角位置 θ_o ,给定量(输入量)是操纵杆角位置。理想跟踪情况下, $\theta_o = \theta_i$,两环形电位计组成的桥式电路处于平衡状态,输出电压 $U_e = 0$,电动机不转。系统相对静止。如果操纵杆角 θ_i 改变了,而船舵仍处于原位,则电位器输出 $U_e \neq 0$, U_e 经放大