



“十三五”普通高等教育本科规划教材



Automatic Control Theory (Fourth Edition)

自动控制理论 (第四版)

陈 青 主 编
张 利 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

自动控制理论

(第四版)

主 编 陈 青
副主编 张 利
编 写 李 霞 贾春娟 朱常青
高湛军 负志皓
主 审 文 锋 贾光辉



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

全书共分为十章，主要内容包括自动控制概述、线性系统的数学模型、线性系统的时域分析法、线性系统的频率响应法、线性系统的根轨迹法、控制系统的校正、离散控制系统、非线性系统分析、线性系统状态空间分析法和基于 MATLAB 的控制系统分析。

书中着重介绍自动控制理论的基本内容和基本工程分析方法，以经典控制理论为主，并简要介绍了现代控制理论状态空间法的基本内容。最后一章介绍了用 MATLAB 进行相关工程仿真计算的基本方法。

本书可作为高等学校电气工程、工业自动化及相近专业的教学用书，也可供从事电气自动化工作的工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制理论/陈青主编. —4 版. —北京: 中国电力出版社, 2017. 7

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-0197-7

I. ①自… II. ①陈… 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 (2016) 第 318924 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 乔 莉 (010-63412535) 孙 晨

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 郝晓燕 赵姗姗

责任印制: 赵 磊

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 1998 年 8 月第一版 2017 年 7 月第四版

印 次: 2017 年 7 月第七次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 23.25

字 数: 570 千字

定 价: 49.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

本书是根据高等院校电气工程自动控制理论课程教学大纲编写的。该书最初由中国电力出版社在 1998 年出版, 2002 年修订出版第二版, 2007 年重新编写第三版作为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”出版。此次作为“‘十三五’普通高等教育本科规划教材”重新编写修订, 在保留原版特色及广泛征求意见和建议的基础上, 更加注重了理论与实际的结合, 突出了工程应用举例; 增加了第十章, 加强了 MATLAB 的仿真及应用。

本书由陈青教授主编, 并编写第二、三章; 第一、四章由张利副教授编写, 第五章由贾春娟副教授编写, 第六章由高湛军副教授编写, 第七章由朱常青副教授编写, 第八、九章由李霞副教授编写, 第十章由负志皓副教授编写。

全书由山东大学文锋教授及贾光辉副教授主审。

本书可作为高等学校电气工程、工业自动化及相近专业的教学用书, 也可供电气自动化工程技术人员学习参考。

书中不当之处, 敬请读者批评指正。

编 者

2017 年 3 月

第二版前言

本书是根据高等学校电气工程及工业自动化类专业自动控制理论教学大纲编写的。

该书自 1998 年由中国电力出版社出版以来，在多所工科院校使用，根据广大师生在教学中的体会及教学改革的需要，在此次修订中，充分考虑到教学计划的变更和学生考研的要求，并注意到工科类专业教学的特点，特别注重了基本概念、基本原理和基本工程方法的讲述，在理论综述和公式推导中，尽量精选内容，用经典例题代替一般性文字的叙述，增加例题和练习题的数量，加强工程技术方法的分析和训练；练习题按章分为基本型（A 类）练习，供学生作业练习之用；提高型（B 类）练习，是带有一定技巧性和综合性的题目，多选自全国重点大学考研试题汇编，供高水平学生复习考研之用。练习题后附有部分参考答案，便于读者自学。

参加本书编写的有：山东大学贾光辉（第一、五章）、济南大学黄明键（第二章）、山东理工大学李素玲（第三章）、山东大学文锋（第四、六、九章）、山东科技大学常青（第七章）、山东大学张利（第十章），第八章由张利与贾光辉合编。

本书由文锋教授、贾光辉副教授主编，李素玲副教授与张利副教授任副主编。全书由山东轻工业学院常易康教授主审。

本书可作为高等学校电气工程、工业自动化及相近专业的教科书，也可供电气自动化工程类技术人员学习参考。

限于编者水平，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2002 年 1 月

第三版前言

本书是根据高等院校电气工程自动控制理论课程教学大纲编写的。该书最初由中国电力出版社在 1998 年出版。2002 年修订出版第二版以来,已在多所工科院校使用。此次作为“十一五”国家级规划教材考虑重新编写,广泛征求了兄弟院校授课教师及学生的意见和建议,突出以下特点。

(1) 结合电力系统及工业自动化方面工程类专业的实际,注重对自动控制的基本概念、基本原理及基本工程方法的讲述,并从应用角度考虑力求简明扼要、通俗易懂。

(2) 在理论综述和公式推导中,尽量精选内容,并用经典例题代替一般性步骤的叙述,加强工程技术方法的分析和训练。

(3) 为提高读者的工程技能,增加了例题和练习题的数量,并将其按章分为两种类型。基本型(A类题),供教师布置作业和学生基本练习;提高型(B类题),带有一定技巧和综合性的题目,多选自重点大学考研试题汇编,可供学生考研复习参考。书后附有部分参考答案,便于读者自学。

(4) 在每章后设有相应的 MATLAB 仿真实验内容,可使读者掌握自动控制理论在工程及实验中的应用方法,以提高工程计算和仿真能力。

本书由文锋教授和陈青教授主编,贾光辉副教授和张利副教授担任副主编。其中,第一、四章由文锋教授编写,第二、三章由陈青教授编写,第五章由贾光辉副教授编写,第八、九章由李霞副教授编写,第七章由朱常青副教授编写,第六章由高湛军博士编写。每章后的 MATLAB 仿真内容由张利副教授编写。全书由华中科技大学涂光瑜教授和山东大学张荣祥教授主审,在审阅过程中提出了很多有价值的意见和建议,在此表示衷心的感谢!

限于编者水平和经验,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2007 年 11 月

目 录

前言	
第二版前言	
第三版前言	
第一章 自动控制概述 (Introduction to Automatic Control)	1
第一节 自动控制和自动控制技术 (Automatic Control and Automatic Control Technology)	1
第二节 自动控制系统的组成及分类 (Composition and Classification of Automatic Control Systems)	6
第三节 自动控制理论概要 (Outline of Automatic Control Theory)	9
第四节 控制系统的计算机辅助分析与设计 (Computer Aided Analysis and Design of Control Systems)	10
练习题 (Exercises)	11
第二章 控制系统的数学模型 (Mathematical Models of Control Systems)	14
第一节 控制系统的微分方程 (Differential Equations of Control Systems)	14
第二节 控制系统的传递函数 (Transfer Function of Control Systems)	19
第三节 控制系统框图 (Block Diagram of Control Systems)	27
第四节 控制系统的信号流图 (Signal-Flow Graph of Control Systems)	36
练习题 (Exercises)	41
第三章 线性系统的时域分析法 (Time Response Analysis Methods for Linear System)	47
第一节 系统的时域性能指标 (Performance Measures of Linear Systems for Time-domain)	47
第二节 一阶系统的时域分析 (Time Response Analysis for First-order Systems)	51
第三节 二阶系统的时域分析 (Time Response Analysis for Second-order Systems)	53
第四节 高阶系统的时域分析 (Time Response Analysis for Higher-order Systems)	67
第五节 线性系统的稳定性分析 (The Stability Analysis of Linear Feedback Systems)	70
第六节 线性系统的稳态误差分析 (Analysis for Steady-state Error of Linear Systems)	77
练习题 (Exercises)	88

第四章 线性系统的频率响应法 (Frequency Response Methods of Linear Systems)	93
第一节 频率特性概述 (Introduction to Frequency Response)	93
第二节 极坐标图 (Polar Plot)	96
第三节 对数坐标图 (Bode Diagram)	100
第四节 控制系统稳定性分析 (Analysis for Stability of Control Systems)	115
第五节 闭环系统的频率特性 (Frequency Responses of Closed-loop Systems)	125
第六节 频域指标与时域指标的关系 (Relationship of Measurements Between Frequency-domain and Time-domain)	130
练习题 (Exercises)	134
第五章 线性系统的根轨迹法 (Root Locus Method of Linear Systems)	140
第一节 根轨迹的基本概念 (Basic Concept of Root Locus)	140
第二节 绘制根轨迹的基本规则 (Basic Procedure for Root Locus)	143
第三节 广义根轨迹 (Generalized Root Locus)	153
第四节 控制系统的根轨迹分析方法 (Analytical Method for Root Locus of Control Systems)	158
第五节 根轨迹法工程应用实例 (Engineering Applications of Root Locus Method)	165
练习题 (Exercises)	168
第六章 控制系统的校正 (Compensation of Control Systems)	172
第一节 校正方法和校正装置 (Compensation Methods and Compensators)	172
第二节 频率响应法校正 (Compensation Using Frequency Response Methods)	180
第三节 局部反馈校正 (Compensation Using Local Feedback Methods)	191
第四节 复合控制校正 (Complex Control Compensation)	193
第五节 根轨迹法校正 (Compensation Using Root Locus Method)	195
练习题 (Exercises)	201
第七章 离散控制系统 (Discrete Control Systems)	206
第一节 离散控制系统概述 (Introduction to Discrete Control Systems)	206
第二节 采样过程与采样定理 (Sampling Process and Sampling Theorem)	207
第三节 保持器 (Hold)	210
第四节 z 变换理论 (z -transform theory)	213
第五节 线性差分方程 (Linear Differential Equation)	219
第六节 脉冲传递函数 (Pulse Transfer Function)	221
第七节 离散系统的时域分析 (Analysis of Discrete Systems in Time-domain)	226
第八节 频率响应法、根轨迹法在离散系统中的应用 (Application of Frequency Response and Root Locus Methods in Discrete Systems)	233
第九节 离散系统的校正 (Discrete Systems Melioration)	235

练习题 (Exercises)	240
第八章 非线性系统分析 (Nonlinear System Analysis)	245
第一节 非线性系统概述 (Brief Introduction of Nonlinear Systems)	245
第二节 描述函数法 (Describing Function Method)	248
第三节 相平面法 (Phase Plane Method)	255
练习题 (Exercises)	263
第九章 线性系统状态空间分析法 (State Space Method for Linear Systems)	269
第一节 线性系统的状态空间描述 (State Space Description for Linear Systems)	269
第二节 线性系统状态方程的解 (The Solution of State Equation for Linear Systems)	281
第三节 线性系统的能控性和能观性 (Controllability and Observability of Linear Systems)	284
第四节 线性定常系统的状态反馈与状态观测器 (State Feedback and State Observers for Linear Systems)	286
第五节 线性控制系统的稳定性 (Stability of Linear Control Systems)	294
练习题 (Exercises)	299
第十章 基于 MATLAB 的控制系统分析 (Control System Analysis Based on MATLAB)	303
第一节 MATLAB 编程基础 (MATLAB Fundamentals)	303
第二节 基于 MATLAB 的控制系统分析 (Control System Analysis Based on MATLAB)	312
第三节 直流他励电动机调速控制综合实验 (Comprehensive case of Separately Excited DC Machine Speed Control)	338
附录 I 常用函数的拉普拉斯变换和 z 变换表	340
附录 II 部分练习题参考答案	341
参考文献	362

第一章 自动控制概述

(Introduction to Automatic Control)

在现代科学技术的众多领域中,如工农业生产、交通运输、国防和航天,以及经济管理、生物工程等,自动控制技术无不得到广泛的应用。特别是随着电子计算机技术的发展和应 用,自动控制技术已扩展到更多的社会生活领域中,成为现代社会不可或缺的重要组成部分。例如,我国的探月计划正稳步推进,嫦娥三号实现了在月球表面着陆,玉兔月球车开展了月面巡视勘察工作,并传回了大量图像数据 [如图 1-1 (a) 所示];汽车通过车载传感系统感知道路环境,以车内的计算机进行分析和运算,再根据计算结果控制行驶,实现了无人驾驶 [如图 1-1 (b) 所示]。尽管人们有时并未注意到自动控制对很多器件和系统的重要性,但毫无疑问的是,越来越多与自动控制相关的应用正在不断地涌现,其优势也在日益突显。

将自动控制技术应用于生产,可提高劳动生产率,改进产品质量,改善劳动条件;将自动控制技术应用于国防,可提高部队的战斗力,促进国防现代化;将自动控制技术应用于生活,可改善人民的生活质量。总之,随着科学技术和经济社会的发展,自动控制所起的作用将越来越重要。

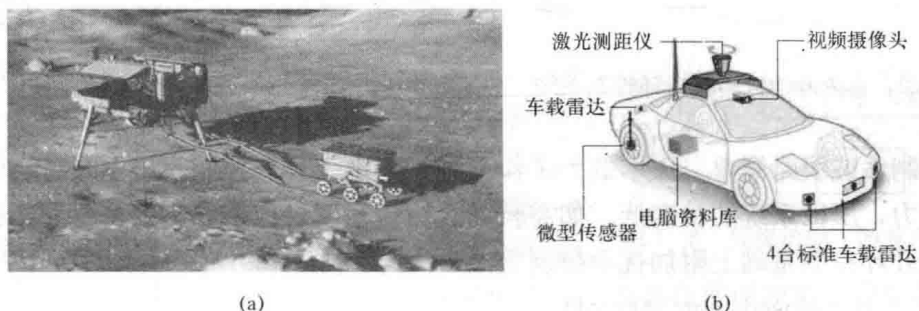


图 1-1 自动控制技术的应用
(a) 嫦娥三号登月效果; (b) 谷歌无人驾驶汽车构造示意

第一节 自动控制和自动控制技术

(Automatic Control and Automatic Control Technology)

一、自动控制的概念

什么叫自动控制?所谓自动控制,是指在无人直接参与的情况下,利用自动控制装置(通常简称控制器),使整个生产过程或工作机械(称为被控对象)自动地、按预先设定的规律运行,或使它的某些参数(称为被控量)按预定要求变化的性能或过程。

自动控制的过程是一个不断检测偏差、纠正偏差的过程。被控对象属于生产主体,是不可变的基本部分。而能自动完成此种工作的装置称为自动控制装置,属于加入的可变

部分, 自动控制装置与被控对象结合构成的整体, 则称为自动控制系统。

二、自动控制的方式

自动控制系统有两种最基本的控制方式, 即开环控制和闭环控制。有时, 将开环控制和闭环控制结合起来构成复合控制。

1. 开环控制 (open-loop control)

如果系统的输出量不参与对系统的控制, 则称为开环控制。图 1-2 所示直流电动机转速控制系统就是开环控制系统的一例。图 1-3 是开环控制系统的工作原理。图 1-2 所示开环控制系统是通过对输入量给定电压 u_r 进行设定, 来控制系统输出量 (被控制量) 转速 n 达到期望值的。直流电动机励磁电压为常数, 转速 n 由电枢电压 u_a 控制。调整给定电位器滑臂的位置, 可得到不同的给定电压 u_r 和电枢电压 u_a , 从而控制电动机的转速 n 。当负载转矩不变时, 给定电压 u_r 和电动机转速 n 有一一对应关系。因此, 可由给定电压直接控制电动机达到期望转速。但当负载转矩变化时, 如负载转矩增加, 电动机转速便随之降低而偏离期望值, 即系统控制受到了扰动。要维持期望转速不变, 操作人员必须对输出量进行测量, 相应地调整电位器滑臂的位置来提高给定电压 u_r , 使电动机转速恢复到期望值。

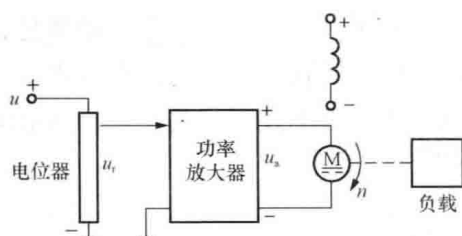


图 1-2 直流电动机转速开环控制系统



图 1-3 开环控制系统原理

这种控制系统线路简单、成本低、工作稳定, 但由于开环控制系统不具备自动修正被控量偏差的能力, 所以系统的精度低。如需较高的控制精度, 应采取下面将要介绍的闭环控制系统, 或在开环控制基础上附加扰动控制等。

2. 闭环控制 (closed-loop control)

如果系统的输出量参与对系统的控制, 则称为闭环控制。直流电动机转速闭环控制系统如图 1-4 所示。这种系统的控制过程如下: 由测速发电机测得电动机的实际转速 n , 并转换成与给定电压类同的物理量 u_f , 然后反馈到输入端, 与给定电压 u_r 相比较, 其偏差值 u_e 经放大器放大后, 用来控制电动机的转速, 使电动机保持在与给定电压 u_r 相对应的转速状态下运转。

如果负载增大 (产生扰动), 电动机转速就下降, 测速发电机输出电压 (反馈电压) u_f 也减小, 与给定电压 u_r 比较后的偏差电压 u_e 增大, 电枢电压 u_a 相应增大, 进而使电动机的转速下降得到补偿; 反之, 如果负载减小, 电动机转速上升, 系统同样可将上升的转速抑制下来。总之, 系统基本上可保持恒速运行。闭环控制系统原理如图 1-5 所示。

根据上述分析, 闭环控制系统的原理可归纳为负反馈控制原理: 将系统输出量引回输入端, 与输入量相比较, 利用所得偏差进行控制, 使偏差减小或消除。由于其控制特点是检测偏差、纠正偏差, 因此又可称为偏差控制。

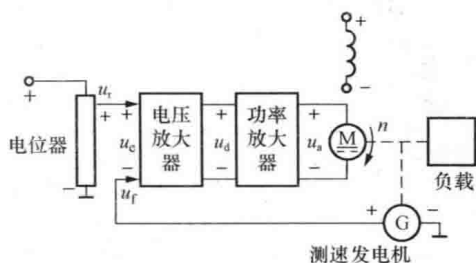


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

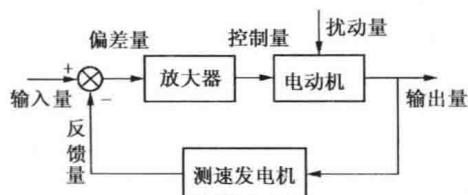


图 1-5 闭环控制系统原理

开环控制与闭环控制的根本区别在于闭环控制引入了输出量的反馈作用，具有自动修正被控量偏离给定值的能力，因此可抑制外部干扰所引起的偏差，具有较强的抗干扰能力。同时，在组成系统的元器件精度不高的情况下，采用反馈控制也可达到较高的控制精度，所以应用很广。但正是由于引入了反馈作用，如果系统参数配合不当，闭环控制系统也容易产生振荡甚至不稳定，使系统无法工作，这是闭环控制系统中非常突出的现象，也是自动控制系统要解决的主要问题之一。

3. 复合控制 (complex control)

在有些情况下，将开环控制和闭环控制结合起来构成复合控制，往往能取得更好的效果。因为补偿扰动所产生的影响，并非只有采取反馈控制一种方法。当扰动可以测量时，利用前馈控制也是消除干扰对系统影响的有效方法，而且，它可在扰动产生不利影响之前就产生补偿作用；而在闭环控制中，只有当输出受到影响后才能产生补偿作用，因此前馈控制有其突出的优点。

前馈控制的概念可用图 1-6 按扰动输入的复合控制系统说明，它是在图 1-5 所示系统中引入前馈控制器组成的。前馈控制器用来测量扰动量，并产生控制作用加在系统的输入端，用于补偿扰动对输出的不良影响。但是由于前馈控制是开环控制，受到系统结构精度的限制，所以在一般情况下，不能补偿未被测量的扰动量的影响。因此在前馈控制系统中仍然保留反馈回路。

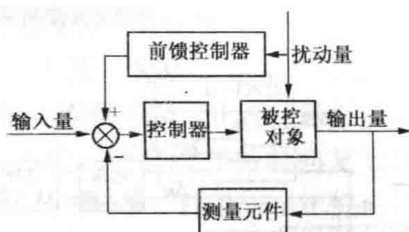


图 1-6 按扰动输入的复合控制系统

图 1-7 所示为恒温搅拌槽原理及其在各种控制方式下的温差控制效果（本例取自 MATLAB[®] 控制工具箱示例）。当冷的液体加入搅拌槽后，槽内液体的温度会下降，为维持槽内温度恒定，需开启阀门，通入蒸汽进行加热。采用开环控制、闭环控制及复合控制方式的温差控制效果分别如图 1-7 (b) ~ (d) 所示。

三、自动控制系统举例

图 1-8 是恒温箱自动控制系统原理。被控对象是一个封闭的容器，自动控制的任务是克服外来干扰（如电源电压波动、环境温度变化等），保持恒温箱内的温度恒定。图 1-8 所示自动控制系统由恒温箱（被控对象）、比较环节、电压放大器、功率放大器、执行机构（包括执行电动机、减速器和调压器）和温度检测元件——热电偶等组成。恒温箱温度由给定电压 u_1 控制。当各种干扰引起箱内温度变化时，热电偶将恒温箱温度转换为电压信号 u_2 ，与给定电压 u_1 进行比较，得到与温度偏差相对应的电压偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。 Δu 经电压放大器和功率放大器放大后，控制执行电动机，再由传动装置拖动调压器滑动触头改变加热

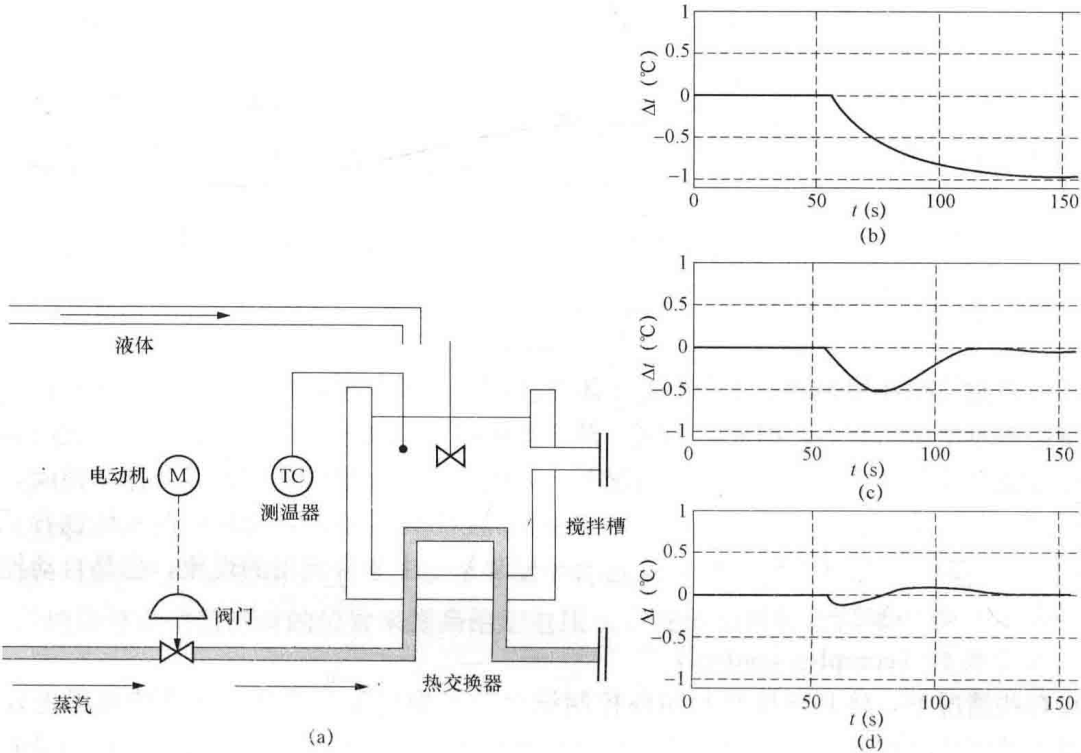


图 1-7 恒温搅拌槽原理及其在各种控制方式下的温差控制效果
(a) 搅拌槽温度控制系统原理；(b) 开环控制；(c) 闭环控制；(d) 复合控制

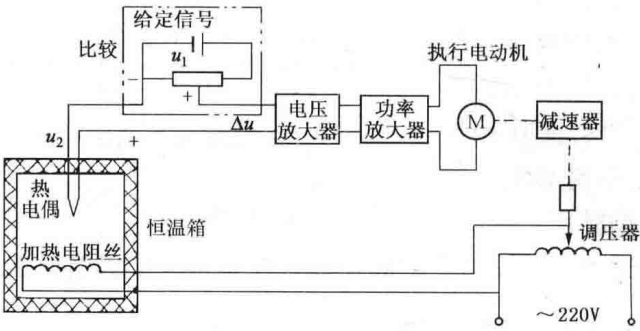


图 1-8 恒温箱自动控制系统原理

电压。当 $\Delta u < 0$ 时，箱内温度高于给定温度，调压器滑动触头向降低加热电压的方向移动，使电阻丝产生的热量减小，最终使恒温箱内温度与给定温度相同。反之则增加电热器电压，使恒温箱内温度上升。当恒温箱内温度与给定温度相同时，执行电动机停转，保持调压器滑动触头位置不变。恒温箱温度自动控制系统各元部件之间信号传递关系可用图 1-9 表示，图

中标出了系统的主要部件，并标明了信号在系统各部分间的流动方向。

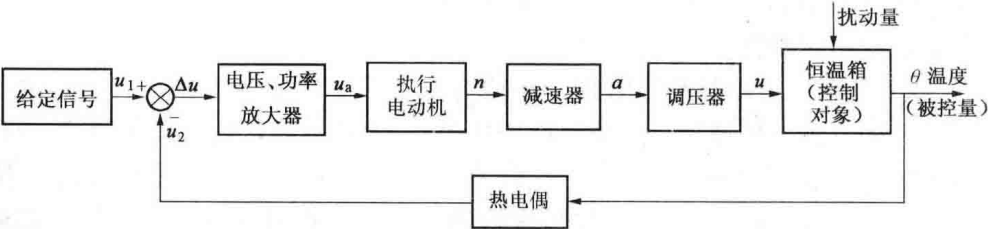


图 1-9 恒温箱温度自动控制系统原理

四、自动控制的发展史

自动控制理论是研究自动控制系统共同规律的科学。它最初是从反馈控制动力学研究发端的,随着工业生产和科学技术的发展,现在已发展成为一门独立的学科——控制论。

古代的一些机械装置已经出现了反馈控制的身影,如我们今天的抽水马桶水箱仍在使用的液面浮球控制装置,就是沿用了古代的酒容器液位控制。在18世纪,人们发明了两类机器:机器工具机和机器发动机,来代替人hand和体力,开始实现机械化。同时,人们总希望能用机器来代替人的非创造性的脑力劳动,实现自动化。一个闻名于世的例子是詹姆斯·瓦特(James Watt)发明的飞球调速器(图1-10)。发动机工作在平衡状态时,两只重球以一定角度绕着中心轴旋转。当蒸汽发动机负载增加时,速度降低,调速器的球随之降低一定角度,并通过控制杆加大蒸汽室的阀门开度,引入更多蒸汽推动发动机做功,从而补偿负载加重导致的速度减小。詹姆斯·瓦特在实践中对调速器性能完善做出了很大贡献,但他并没有对调速器做理论分析。

1840年,格林威治天文台的天文学家 G. B. Airy 试图利用飞球调速器控制天文望远镜的转动,以便克服地球旋转的影响来相对静止地长期观察某个固定的恒星,但他发现望远镜的运动非常不稳定,于是用微分方程分析了这种系统的运动。这标志着反馈控制理论研究的开端。1868年, J. C. Maxwell 在“关于调速器”一文中指出,系统的稳定性决定于某个特定方程(特征方程)的根是否有负实部。最终, E. J. Routh 在1877年证明了特征方程的根具有负实部时,特征多项式的系数必须满足的条件(可参考第三章中的劳斯稳定判据)。

在电话通信的发展过程中,为弥补信号远距离传输的能量损失,大量电子放大器被采用,受电子管品质的影响,多级放大后信号必然会产生严重失真。为减少失真(误差),系统的开环增益必须设计得非常大,但随着增益的增大,系统会变得不稳定。而这种系统的微分方程比较复杂,阶数很高,劳斯判据的使用遇到困难。因此,研究者开始转向复数域分析,从频率响应和复变量代数的角度寻求解决问题的途径。1932年, H. Nyquist 提出通过开环幅相频率图确定系统稳定性的方法(可参考第四章中的奈奎斯特图及稳定判据)。1945年, Bode 提出一种根据对数频率图设计反馈放大器的方法(可参考第四章中的伯德图和第六章中的频率响应法校正),在工程中得到广泛应用。

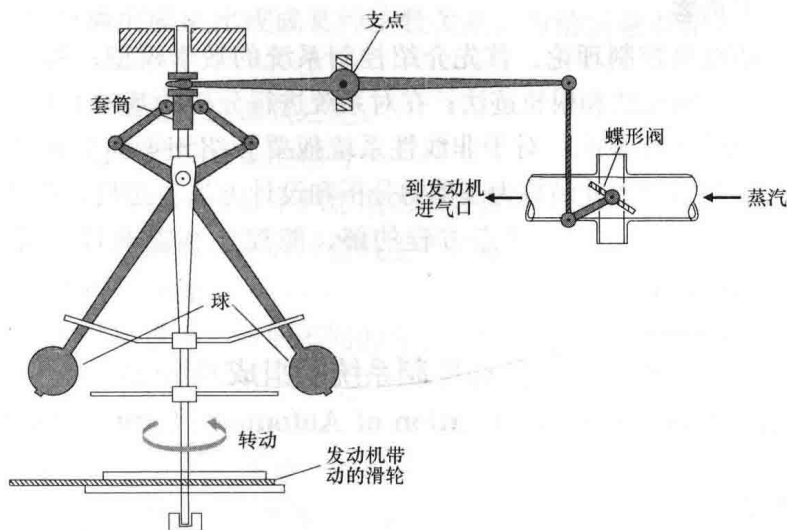


图 1-10 飞球调速器

20 世纪 40 年代第二次世界大战期间,军事上的需要对自动控制理论及技术的发展起了巨大的推动作用。1948 年, W. R. Evans 在飞机导航与控制的研究工作中遇到了系统稳定性随参数变化的问题,这是频率分析法难以解决的,为此他重新回到特征方程的研究上来,提出了描述特征方程的根随某个参数变化的运动轨迹(称为根轨迹)的方法和规则,为控制系统分析与设计提供了新的手段(可参考第五章中的根轨迹法和第六章中的根轨迹法校正)。与此同时, N. Wiener 在火炮瞄准系统的研究中,认识到机器中的通信和控制机能与人的神经、感觉机能具有共同的规律。他将这一深刻思想加以完善,于 1948 年出版了奠基性著作《控制论》,标志着这门新兴的边缘学科的诞生。不论是机器还是生物体,甚至是社会,尽管各属不同性质的系统,但它们都是根据周围环境的某些变化来调整和决定自己的运动,因此,控制论以各类系统所共同具有的通信和控制方面的特征为研究对象。控制论促进了现代科学思维方式和当代哲学观念的一系列变革,是 20 世纪最伟大的科学成就之一。

到 20 世纪 50 年代末,自动控制理论已形成比较完整的理论体系,建立了以频率特性和特征方程为基础的一整套分析与设计方法,并在工程实践中得到成功的应用,一般称它为经典控制理论。它主要研究单输入单输出、线性、定常系统的输出控制,它的数学工具是拉氏变换、传递函数,它的主要方法是频率响应法和根轨迹法。

进入 20 世纪 50 年代,由于航天技术的发展,要求有高性能、高精度的复杂的控制系统,经典控制理论不能满足要求。同时,电子计算机技术的飞速发展,又在客观上提供了必要的技术手段,从而使自动控制理论发展到一个新的阶段——现代控制理论,并出现许多新的学科分支和边缘学科,如“工程控制论”“生物控制论”“社会控制论”等。现代控制理论研究多输入多输出(包括单输入单输出)、线性或非线性、定常或时变系统的状态控制,它的数学工具是矩阵理论、矢量微分方程理论、集合论等,它的主要方法是状态空间分析法。现代控制理论在解决大型、复杂的控制问题上有许多突出的优点,在航天、航空、航海和工农业生产中均得到成功的应用。

每种理论都有其特点,因此现代控制理论不能完全取代经典控制理论,这两种理论各有所长,在解决问题时寻求对它们的最佳利用才是最重要的。

五、本课程主要内容

本课程主要介绍经典控制理论。首先介绍控制系统的数学模型;然后介绍三种分析方法:时域分析法、频率响应法和根轨迹法;在对系统进行分析的基础上介绍校正方法,这些分析和校正均是指线性连续系统。对于非线性系统扼要介绍相平面分析法和描述函数分析法。对于离散系统,介绍以脉冲函数为基础的分析 and 设计方法。之后,简要地介绍现代控制理论的基础,即状态空间表达式、状态方程的解、能控性和能观性。最后,介绍了基于 MATLAB 的控制系统分析。

第二节 自动控制系统的组成及分类

(Composition and Classification of Automatic Control Systems)

一、自动控制系统的组成

自动控制系统的 basic 组成如图 1-11 所示。

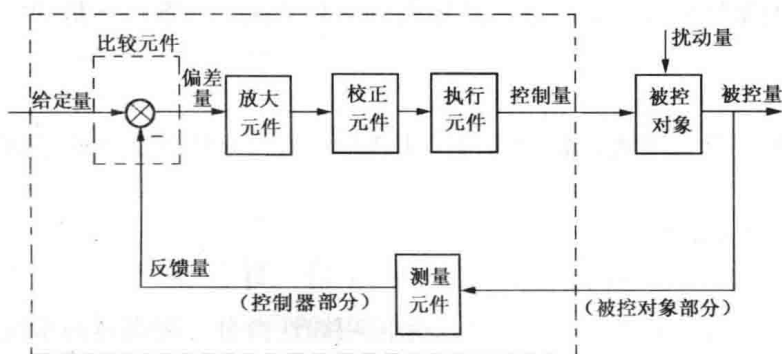


图 1-11 自动控制系统基本组成

自动控制系统可分为两大组成部分，即被控对象和自动控制装置（有时也称为控制器）。自动控制系统中被控制的机器、设备或生产过程等是被控对象。自动控制装置则是自动控制系统中对被控对象起控制作用的各部分的总称，自动控制装置又可分为以下几个部分。

(1) 测量元件（或测量装置）：用于测量被控量的实际值或对被控量进行物理量变换的装置。

(2) 比较元件（或比较器）：它将被控量的实际值（常取负号）与被控量的要求值（常取正号）相比较，得到偏差的大小和符号。

(3) 调节元件：通常包括放大元件和校正元件，它能将偏差信号放大，并使输出的控制信号与偏差信号之间具有一定的数值运算关系（也称为调节规律或控制算法）。

(4) 执行元件：它接受调节元件的输出控制信号，然后产生具体的控制效果，使被控量产生预期的改变。

自动控制系统的常用术语如下。

- (1) 给定量（输入量）：系统期望输出量的要求值。
- (2) 被控量（输出量）：被控系统所控制的物理量。
- (3) 反馈量：与输出成正比或成某种函数关系，与给定量有相同量纲和数量级相同的信号。
- (4) 偏差量：给定量与主反馈量之差。
- (5) 控制量：作用于被控对象的信号。
- (6) 扰动量：对系统输出量有不利影响的输入量。
- (7) 被控对象：被控制的机器、设备或生产过程。

二、自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多，按照不同的分类方法可分成不同的类型，而实际系统可能是几种类型的组合。

（一）按给定信号分类

1. 恒值控制系统（自动调整系统、自动镇定系统）

输入为常数，系统能排除扰动影响，使输出保持恒定不变。恒温、恒压、恒速、恒定水位等系统都属这类。

2. 随动控制系统（跟踪系统、伺服系统）

输入是时间的未知函数，要求输出跟随输入信号变化。如跟踪飞机的雷达——高炮指挥仪系统等。

3. 程序控制系统

输入量是时间的已知函数，要求输出尽快跟随输入信号变化，如热处理的加热炉和程控机床等。

（二）按数学描述分类

1. 线性控制系统

组成元件都具有线性特性、输入输出关系能用线性微分方程描述的系统，称为线性控制系统或线性系统。线性系统的主要特点是具有齐次性和叠加性。当线性微分方程的系数均为常数时，称为线性定常系统或线性时不变系统；当微分方程的系数是时间的函数时，称为线性时变系统。线性定常系统的响应只与输入信号有关，与初始条件无关。

2. 非线性控制系统

严格地讲，实际的物理系统中不存在线性系统，总是不同程度地存在着非线性特性。为研究问题方便，当非线性特性不显著或者系统在非线性特性区域的工作范围不大时，可将其视为线性的，或将非线性部分线性化，然后按线性系统处理。不能线性化的元件称为本质非线性特性元件，其性能由非线性微分方程描述。只要有一个组成元件的特性不能用线性方程描述，系统即为非线性系统。非线性微分方程式的求解尚无完整统一的方法，也不能使用叠加原理。不同于线性系统，非线性微分方程的响应既与输入量有关，也与初始条件有关。

图 1-12 所示是几种常见的非线性特性。

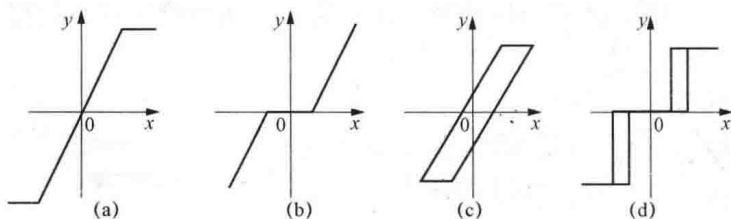


图 1-12 几种非线性特性

(a) 饱和非线性；(b) 死区非线性；(c) 间隙非线性；(d) 继电非线性

（三）按时间信号的性质分类

1. 连续时间系统

当系统各部分的信号都是连续函数形式的模拟量时，称为连续时间系统或称连续数据系统，简称连续系统。连续系统的性能用微分方程描述，前文所举都是连续系统。

2. 离散时间系统

当系统各部分的信号均以脉冲序列或数码的形式传递，称为离散时间系统或离散数据系统，简称离散系统。

离散系统是一个总称，如果系统中使用了采样开关，将连续函数形式的信号转变为离散脉冲序列形式的信号进行控制，这样的系统通常称为采样控制系统或脉冲控制系统。如果使用数字计算机或数字控制器，离散信号以数码形式传递，这样的系统称为采样数字控制系