



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ZIDONG KONGZHI LILUN

自动控制理论

(第三版)

文 锋 陈 青 主 编
贾光辉 张 利 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHUYI WU GAOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

TP13/132=2

2008

ZIDONG KONGZHI LILUN

自动控制理论

(第三版)

主 编	文 锋	陈 青	
副主编	贾光辉	张 利	
编 写	李 霞	朱常青	高湛军
主 审	涂光瑜	张荣祥	



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分九章，主要内容包括自动控制概述、线性系统的数学模型、时域分析法、频率响应法、根轨迹法、控制系统的校正、离散控制系统、非线性系统分析及现代控制理论基础。本书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初步内容。在每章后面介绍了用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信息类及相关专业教材，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/文锋, 陈青主编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2008.3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-6493-3

I. 自… II. ①文…②陈… 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 (2008) 第 011041 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://jc.cepp.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1998 年 8 月第一版

2008 年 2 月第三版 2008 年 2 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 546 千字

定价 33.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

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

第三版前言

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以及教学改革的需要,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,系带有一定技巧性和综合性题目,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。

由于编者水平所限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2002年1月

目 录

前言

第二版前言

第一章 自动控制概述	1
第一节 自动控制和自动控制技术	1
第二节 自动控制系统的组成及分类	4
第三节 自动控制理论概要	7
第四节 控制系统的计算机辅助分析与设计	8
练习题	10
第二章 线性系统的数学模型	13
第一节 线性系统的微分方程	13
第二节 控制系统的传递函数	17
第三节 控制系统方框图	24
第四节 控制系统的信号流图	33
第五节 控制系统模型在 MATLAB 中的表达与转换	38
练习题	42
第三章 时域分析法	48
第一节 系统的时域性能指标	48
第二节 一阶系统分析	52
第三节 二阶系统分析	54
第四节 高阶系统分析	67
第五节 线性系统的稳定性分析	70
第六节 线性系统的稳态误差分析	77
第七节 MATLAB 在时域分析中的应用	88
练习题	94
第四章 频率响应法	98
第一节 频率特性概述	98
第二节 极坐标图	101
第三节 对数坐标图	105
第四节 控制系统稳定性分析	117
第五节 闭环系统的频率特性	127
第六节 频域指标与时域指标的关系	132
第七节 用实验法确定系统的传递函数	136
第八节 MATLAB 在频域分析中的应用	139

练习题	144
第五章 根轨迹法	150
第一节 根轨迹的基本概念	150
第二节 绘制根轨迹的基本规则	153
第三节 广义根轨迹	162
第四节 控制系统的根轨迹分析方法	167
第五节 用 MATLAB 绘制根轨迹	174
练习题	176
第六章 控制系统的校正	181
第一节 控制系统校正的概述	181
第二节 校正方法和校正装置	181
第三节 频率响应法校正	190
第四节 局部反馈校正	200
第五节 复合控制校正	203
第六节 根轨迹法校正	205
第七节 用 MATLAB 仿真工具进行控制系统校正	211
练习题	213
第七章 离散控制系统	219
第一节 离散控制系统概述	219
第二节 采样过程与采样定理	220
第三节 保持器	223
第四节 z 变换理论	226
第五节 线性差分方程	232
第六节 脉冲传递函数	234
第七节 离散系统的时域分析	239
第八节 频率响应法、根轨迹法在离散系统中的应用	245
第九节 离散系统的校正	248
第十节 用 MATLAB 分析离散控制系统	253
练习题	256
第八章 非线性系统分析	261
第一节 非线性系统概述	261
第二节 典型非线性环节及其对系统的影响	263
第三节 描述函数法	266
第四节 用描述函数法分析非线性系统	275
第五节 相平面法	280
第六节 非线性系统的相平面分析	286
第七节 利用非线性特性改善系统的控制性能	294
第八节 基于 MATLAB 的非线性系统分析	296
练习题	298

第九章 现代控制理论基础.....	305
第一节 线性系统的状态空间描述.....	305
第二节 状态空间表达式的建立	308
第三节 线性系统状态方程的解	314
第四节 线性系统的能控性和能观性	316
第五节 用 MATLAB 进行状态空间分析	318
练习题	321
附录 I 常用函数的拉普拉斯变换和 z 变换表.....	324
附录 II 部分练习题参考答案.....	325
参考文献.....	348

第一章 自动控制概述

(Introduction to Automatic Control)

近几十年来,自动控制技术已在工农业生产、交通运输、国防和航天以及经济管理、生物工程等几乎所有科学技术领域中得到了广泛应用。

自动控制技术应用于军事领域中,可使火炮、雷达、自动跟踪系统自动瞄准并击中目标。在航天技术方面,要将重达数吨甚至上百吨的宇宙飞行器准确无误地发射上天,并使其自动地运行于预定的轨道,圆满地完成太空探测和科学考察任务。

在工业生产过程中,自动控制技术的应用更为普遍。如钢铁企业轧钢过程,应用自动控制技术能使钢材停止、反向、调速并使这些操作互相配合,在很短的时间内完成。

在现代农业生产中,自动控制技术的应用也日益广泛,如良田的自动灌溉、农产品的质量检测、疫情检测等都离不开自动控制技术。

随着科学技术和经济的发展,自动控制所起的作用将越来越重要。

第一节 自动控制和自动控制技术

(Automatic Control and Technic)

一、自动控制的概念

什么叫自动控制 (automatic control)? 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 (automatic control system)。

二、自动控制的基本方式

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方式。

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 1-1 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 1-2 是开环控制系统的原理方框图。图 1-1 所示开环控制系统的输入量是给定电压 u_r , 输出量 (被控制量) 是转速 n 。电动机励磁电压为常数,采用电枢控制方式。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转速。如果出现扰动如负载转矩增加,电动机转速便随之降低而偏离给定值。要维持给定转速不变,操作人员必须经过判断,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原给定值。

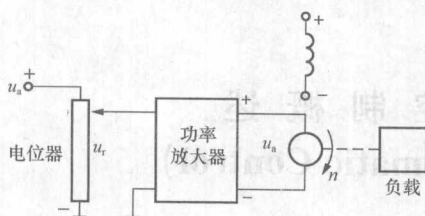


图 1-1 直流电动机转速开环控制系统

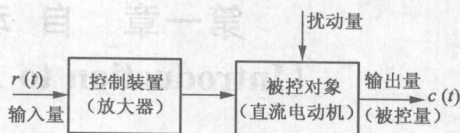


图 1-2 开环控制系统原理方框图

这种控制系统线路简单、成本低、工作稳定。由于开环控制系统不具备自动修正被控量偏差的能力，所以系统的精确度低。如采用闭环控制系统，或在开环控制基础上附加扰动控制等，则可提高控制精度。

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。直流电动机转速的闭环控制系统如图 1-3 所示。这种系统的控制过程如下：由测速发电机检测得电动机的实际转速 n ，并转换成与给定电压相同的物理量 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_c 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（扰动）增大，电动机转速下降，测速发电机输出电压（反馈电压） u_f 减小，与给定电压 u_r 比较后的偏差电压 u_c 增大，电枢电压 u_a 相应增大，从而使电动机的转速升高，反之亦然，从而使系统基本上恒速运行。闭环控制系统的方框图如图 1-4 所示。

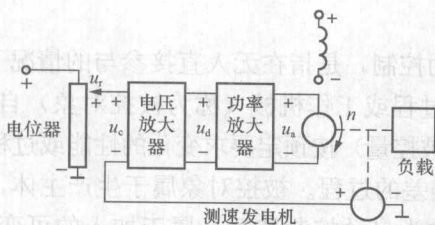


图 1-3 直流电动机转速闭环控制系统



图 1-4 闭环控制系统方框图

由以上分析可知，闭环控制系统采用的是负反馈控制原理：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，因此又可称为按偏差控制。

开环控制与闭环控制的基本区别在于闭环控制具有反馈控制，它的特点是具有自动修正被控量偏离给定值的能力，因此可以抑制内部和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，采用反馈控制也可以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时，系统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，它可以在扰动产生不利影响以前就产生补偿作用；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。

前馈控制的概念可以用图 1-5 按扰动输入的复合控制系统说明，它是在图 1-4 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。

4. 自动控制系统举例

图 1-6 是一个恒温箱自动控制系统的原理图。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 1-6 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，控制执行电机，再由传动装置拖动调压器滑动触头改变加热电压。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，电机停转，保持调压器滑动触头位置不变。图 1-7 为恒温箱温度自动控制系统原理方框图。

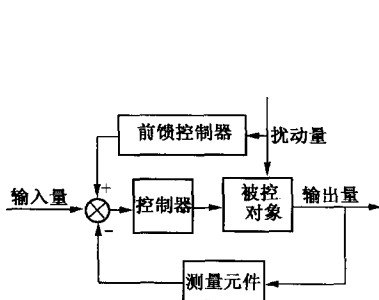


图 1-5 按扰动输入的复合控制系统

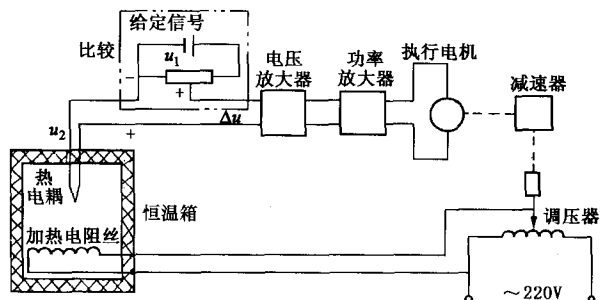


图 1-6 恒温箱自动控制系统原理图

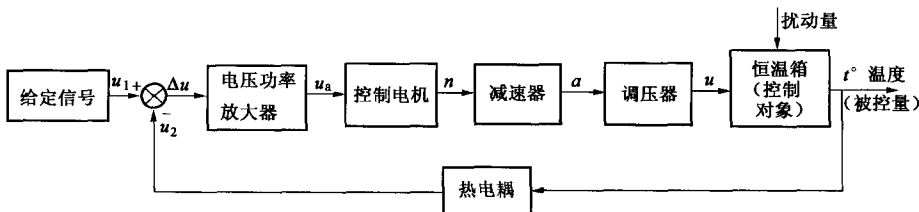


图 1-7 恒温箱温度自动控制系统原理方框图

三、自动控制的发展史

自动控制理论是研究自动控制共同规律的科学。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。

在 18 世纪人们发明了两类机器:机器工具机和机器发动机,来代替人手和体力,开始实现机械化。但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。在 20 世纪的 40、50 年代即第二次世界大战期间和以后,由于军事上和生产上的需要,自动控制技术开始迅速发展,发明了第三类机器——机器控制器,来代替人的一部分简单的管理工作,形成了自动控制系统。而研究它的理论即自动控制理论也相应得到发展。到 20 世纪 50 年代末,自动控制理论已经形成比较完整的理论体系,成为以频率特性为主要工具的一整套自动控制理论,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 年代以来,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。由于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,目前已成功地应用在航天、航空、航海和工农业生产中。当前在我国工农业生产等方面的大部分控制系统都是建立在经典控制理论基础上,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。

四、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分析法;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。最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。

第二节 自动控制系统的组成及分类

(Composing and Classifying of Automatic Control Systems)

一、自动控制系统的组成

自动控制系统的基本组成方框图如图 1-8 所示。

自动控制系统可以分为两大组成部分,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。

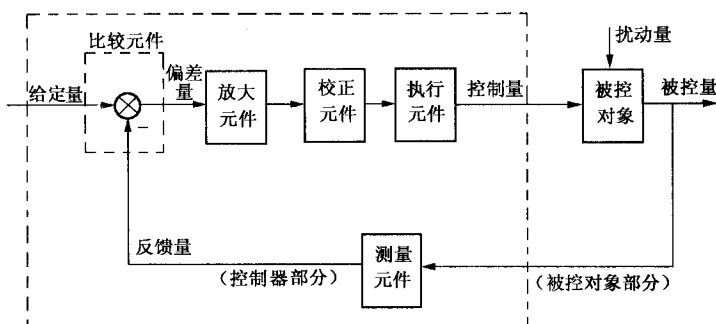


图 1-8 自动控制系统基本组成方框图

(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：

给定量（输入量）：系统输出量的要求值。

被控量（输出量）：被控系统所控制的物理量。

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。

偏差量：给定量与主反馈量之差。

控制量：作用于被控对象的信号。

扰动量：对系统输出量有不利影响的输入量。

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以分成不同的类型，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

当组成系统的元件的特性都是线性的, 其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, 总是或多或少存在着不同程度的非线性特性。为研究问题方便, 当非线性特性不显著或者系统非线性特性区域的工作范围不大, 可将其视为线性的; 或将它们线性化, 然后按线性系统处理。将可以线性化的元件称为非本质非线性特性元件; 将不能线性化的元件称为本质非线性特性元件。系统中只要包含一个本质非线性特性元件, 系统的性能即由非线性微分方程描述, 用这种非线性微分方程描述的系统称为非线性控制系统或称非线性系统。在非线性系统中, 不能使用叠加原理。非线性微分方程式的求解尚无完整统一的方法, 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。

典型本质非线性特性简称非线性特性。如图 1-9 所示的几种常见非线性特性, 其中图 1-9 (a) 为饱和非线性; 图 1-9 (b) 为死区非线性; 图 1-9 (c) 为间隙非线性; 图 1-9 (d) 为继电非线性。

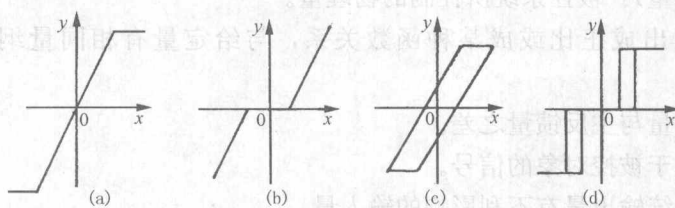


图 1-9 几种非线性特性

(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, 上例所举都是连续系统。

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统, 简称数字控制系统。

离散系统的性能用差分方程描述, 如果差分方程是线性的称为线性离散系统, 如果差分方程为非线性的称为非线性离散系统。

(四) 按系统输入输出信号的数量分类

(1) 单输入单输出系统: 只有一个输入量、一个输出量的系统。

(2) 多输入多输出系统: 有两个或两个以上输入量或输出量的系统。

第三节 自动控制理论概要 (Outline of Automatic Control Theory)

自动控制系统虽然有不同的类型, 但其研究内容和方法是类似的。自动控制理论就是对系统进行分析和设计的一般理论; 自动控制系统的设计首先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要求是系统的稳定性。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、运动机械的增幅振荡等都属于系统不稳定。

在系统稳定的前提之下, 要求系统具有好的动态性能和稳态性能。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, 工程上常从稳、快、准三个方面来评价自控系统的总体精度。即动态平稳性、响应快速性、跟踪准确性。

自动控制系统的上述三条基本要求可简单地用图 1-10 来表示。

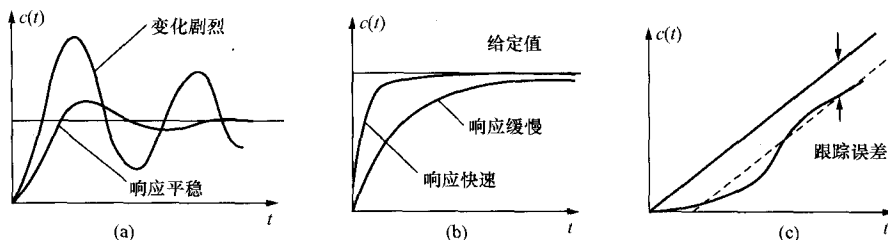


图 1-10 自动控制系统的的基本要求

(a) 动态平稳性; (b) 响应快速性; (c) 跟踪准确性

图 1-10 (a) 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情况比较。图 1-10 (b) 显示了给定恒值信号时, 系统达到稳态值的快速性。图 1-10 (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察一个控制系统时, 上述三条均需要有定量的要求, 这也正是本门课程中系统分析与设计的任务。

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是复杂多样,但是自动控制系统的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来进行的,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。

仿真的方法除了算法仿真之外,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。

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)

一、概述

计算机辅助分析与设计 (Computer Aided Analysis and Design), 也可称为计算机仿真 (Simulation), 是以计算机作为工具, 辅助人在特定应用领域内分析评价系统运行状态或设计优化未来系统性能与功能的一种技术手段。随着计算机理论与技术的发展, 目前各

个学科与工程领域均已开展了这方面的研究。利用计算机研究控制系统的性能,就是控制系统的计算机辅助分析与设计。它以自动控制理论的基本原理和方法为基础,着重于控制理论问题的计算机求解,可利用各种数值计算方法方便地解决已往难以处理的复杂计算,同时可广泛地应用图形、图像等多种信息,使控制系统的分析结果更加直观和可信。因此,在计算机技术飞速发展的今天,利用计算机对控制系统进行分析和设计已成为一种发展趋势。

进行控制系统的计算机辅助分析与设计,离不开对计算机软件工具的使用。一般来说可以有两种选择:一是通用编程软件,二是专业软件。两者的区别在于,应用通用编程软件,需要利用计算机编程技术去实现控制理论的原理和方法,这就要求使用者既要熟练掌握控制理论知识又要掌握较高的计算机编程技术,因此使用受到限制;而采用专业软件,实际上已经由专业编程人员完成了控制理论原理和方法的编程实现,因此使用者只需知道如何将控制系统问题按专业软件的要求进行表达就可以了,而不需要对计算机十分熟悉,便能利用计算机进行控制系统辅助的分析与设计。在计算机应用的早期阶段,基本采用的是前一种方式。随着计算机软件技术的发展,专业软件的种类增多,功能加强,后一种方式正越来越普及。目前,国际上自动控制领域应用最广泛的专业软件就是 MATLAB 及其控制系统工具箱 (Control Toolbox)。

二、MATLAB 简介

MATLAB 是 MATrix LABoratory 的缩写,由美国 Mathworks 公司在 1984 年正式推出。20 多年来, MATLAB 不断发展,内容不断丰富,所包含的工具箱类型不断增加,工具箱功能越来越完善,到目前已升级到第 7 版。广义的 MATLAB 是指 MATLAB 家族,由科学计算语言 MATLAB、动态建模仿真环境 Simulink 以及多达几十个工具箱组成。狭义的 MATLAB 仅指科学计算语言 MATLAB。功能强大、使用方便、输入简捷、库函数丰富、开放性强等特点使 MATLAB 自推出以来,得到了各行各业科技工作者的欢迎,应用范围越来越广泛。

目前, MATLAB 在高校,特别是理工类院校,得到普遍应用,已经成为学生必须掌握的基本技能之一。在设计研究单位和工业部门, MATLAB 也已经成为研究和解决各种具体工程问题的一种标准软件。

本书的讲述以 MATLAB6.5 为例,所举例题均可在 MATLAB6.5 中运行。

三、MATLAB 与控制系统分析

MATLAB 首次推出之时,正是基于状态空间的控制理论蓬勃发展的阶段,其强大的矩阵运算能力很快引起了控制理论界学者的关注,之后很快就出现了用 MATLAB 语言编写的控制系统工具箱 (Control Toolbox),成为控制理论界的标准计算机语言。后来, MATLAB 语言的持续发展和功能的日益丰富也是受益于控制理论界及相关领域需求的推动。目前, MATLAB 中有大量工具箱是面向控制理论和相关学科的。MATLAB 家族中的 Simulink 仿真环境,由于使用简单,又可与 MATLAB 无缝衔接,因此也成为进行控制系统仿真的主要工具。

由于篇幅所限,本书假设读者已经了解 MATLAB 的基本使用方法,而在各章节中具体介绍 MATLAB 在控制系统分析与设计中的应用。如果读者想了解书中所用 MATLAB 函数的更多内容,可查询 MATLAB 的帮助信息、或查阅 MATLAB 的专业书籍。