



普通高等教育“十二五”规划教材
自动化专业规划教材

自动控制原理

黄江平 主 编

占自才 杨 静 龚锦红 祝振敏 参 编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

014057278

普通高等教育“十二五”规划教材
自动化专业规划教材

自动控制原理

黄江平 主编

占自才 杨 静 龚锦红 祝振敏 参编



TP13-43
139

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1742810

内 容 简 介

本书比较全面地阐述了自动控制的基本理论及应用。主要内容有线性系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统校正方法、离散控制系统、非线性控制系统的分析方法,以及PID控制器设计,并且每章都有关于MATLAB与Simulink在控制系统分析与设计中的应用。

本书从实际应用出发,力求突出物理概念,紧密结合具体的自动控制系统介绍经典控制理论的最基本内容。内容叙述深入浅出、通俗易懂。

本书可作为应用型本科院校自动化类专业必修课教材,电子信息类专业及电气工程类专业的教材,也可作为相关专业师生和从事自动化技术工作的人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/黄江平主编. —北京:电子工业出版社,2014.8

自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-23197-1

I. ①自… II. ①黄… 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(2014)第095766号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16 字数:500千字

版 次:2014年8月第1版

印 次:2014年8月第1次印刷

印 数:2500册 定价:39.90元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学理论。随着我国经济建设和高技术的快速发展,各个行业对自动化应用型人才的需求量越来越大,为控制工程的持续发展提供了广阔的空间。自动控制原理是高等工科院校自动化类专业、电子信息类专业以及电气工程类专业的一门重要技术基础课程。

本书是作者在进行多年“自动控制原理”课程教学的基础上,突出理论联系实际,学以致用为目的而编写的。本书全面地介绍了经典控制理论,共8章。第1章介绍自动控制的基本概念;第2章介绍线性连续控制系统时域和复数域数学模型及其结构图和信号流图;第3~5章分别介绍线性连续控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、频率分析法;第6章详细阐述线性连续控制系统的频域设计法以及PID控制器设计;第7章重点介绍离散控制系统的数学模型、稳定性分析及最小拍控制器设计;第8章主要介绍一种非线性连续系统分析方法——描述函数法。

本书在编写过程中,根据应用型本科院校的特点,适当降低了理论深度,内容编写力求深入浅出、循序渐进,注重物理概念的阐述,尽量避免烦琐的数学推导,紧密结合具体的自动控制系统介绍经典控制理论的最基本的内容,使抽象的控制理论与系统分析、设计相结合,理论和实际相结合,为学生后续专业课程学习奠定基础。

本书在控制系统的分析与设计中,合理地利用MATLAB软件辅助课程教学。在每章最后一节介绍对应知识点的MATLAB仿真指令,以加深学生对自动控制理论的理解和掌握,并有助于学生以后的控制系统工程实践。

本书的参考学时为72~80学时,各高校可根据专业需要和课时情况,自行组合加以取舍。对于48学时的课程,可讲授第1、2、3、5、7章,其内容为经典控制理论中系统模型、时域分析法、频率分析法和离散控制系统。对于56学时的课程,可讲授第1、2、3、5、6、7章,其内容为经典控制理论中系统模型、时域分析法、频率分析法、系统校正和离散控制系统。

本书由黄江平主编,并负责全书的统编定稿。第1、6、8章由黄江平编写,第7章由占自才编写,第2、3章由杨静编写,第4章由龚锦红编写,第5章由祝振敏编写。本书在编写过程中,参阅了国内外专家、学者的教材、著作,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处和错误,恳请读者批评指正(hjping65@163.com)。

编 者

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念	(1)
1.1 自动控制与自动控制系统	(1)
1.2 自动控制的方式	(2)
1.2.1 开环控制与闭环控制	(2)
1.2.2 闭环控制系统的组成	(4)
1.3 自动控制系统的分类	(5)
1.4 对自动控制系统的基本要求	(7)
1.5 自动控制系统的分析与设计工具	(8)
本章小结	(10)
习题	(10)
第 2 章 控制系统的数学模型	(12)
2.1 引言	(12)
2.2 控制系统的时域数学模型	(12)
2.2.1 线性元件的微分方程	(12)
2.2.2 控制系统的微分方程的建立	(14)
2.2.3 线性微分方程的求解	(15)
2.2.4 非线性元件微分方程的线性化	(16)
2.3 控制系统的复数域数学模型	(18)
2.3.1 传递函数的定义和性质	(19)
2.3.2 传递函数的几种表示形式	(20)
2.3.3 典型环节及其传递函数	(21)
2.4 控制系统的方块图及其等效变换	(25)
2.4.1 方块图定义	(25)
2.4.2 方块图组成及绘制	(25)
2.4.3 方块图的等效变换	(26)
2.4.4 控制系统的传递函数	(28)
2.5 控制系统的信号流图	(33)
2.5.1 信号流图及其等效变换	(33)
2.5.2 梅森公式及其应用	(36)
2.6 数学模型的实验测定法	(37)
2.7 MATLAB 在控制系统数学模型中的应用	(40)
本章小结	(43)
习题	(43)
第 3 章 线性系统的时域分析法	(47)
3.1 典型输入信号及性能指标	(47)
3.1.1 典型输入信号	(47)
3.1.2 稳态指标与动态指标	(48)

3.2	一阶系统的时域分析	(49)
3.2.1	一阶系统的单位阶跃响应	(50)
3.2.2	一阶系统的单位脉冲响应	(50)
3.2.3	一阶系统的单位斜坡响应	(51)
3.2.4	一阶系统的单位加速度响应	(51)
3.3	二阶系统的时域分析	(52)
3.3.1	二阶系统的阶跃响应	(52)
3.3.2	二阶系统阶跃响应的性能指标	(55)
3.3.3	二阶系统性能指标的改善	(57)
3.4	高阶系统的时域分析	(60)
3.5	线性系统的稳定性分析	(62)
3.5.1	稳定的基本概念和系统稳定的充要条件	(63)
3.5.2	劳斯稳定判据	(64)
3.5.3	劳斯稳定判据的应用	(67)
3.6	线性系统的稳态误差	(68)
3.6.1	稳态误差的定义	(68)
3.6.2	系统类型	(70)
3.6.3	给定作用下的稳态误差	(70)
3.6.4	扰动作用下的稳态误差	(73)
3.6.5	减小或消除稳态误差的措施	(73)
3.7	MATLAB 在时域分析法中的应用	(77)
	本章小结	(80)
	习题	(81)
第 4 章	线性系统的根轨迹分析法	(84)
4.1	根轨迹的基本概念	(84)
4.1.1	根轨迹	(84)
4.1.2	根轨迹的幅值条件和相角条件	(85)
4.2	根轨迹的绘制法则	(86)
4.2.1	绘制常规根轨迹一般法则	(86)
4.2.2	根轨迹绘制举例	(94)
4.3	广义根轨迹	(96)
4.3.1	参量根轨迹	(96)
4.3.2	零度根轨迹	(98)
4.4	开环零极点变化对根轨迹的影响	(100)
4.4.1	开环零极点位置的相对变化对根轨迹的影响	(100)
4.4.2	增加开环零点对根轨迹的影响	(101)
4.4.3	增加开环极点对根轨迹的影响	(102)
4.5	根轨迹法分析控制系统	(103)
4.5.1	根轨迹确定系统的闭环极点	(103)
4.5.2	系统的稳定性分析及相关参数的确定	(103)
4.5.3	根轨迹分析系统的动态性能	(105)
4.6	MATLAB 在根轨迹分析中的应用	(105)

4.6.1	系统根轨迹绘制	(106)
4.6.2	由根轨迹图分析系统性能	(107)
本章小结		(109)
习题		(109)
第 5 章	线性系统的频域分析法	(112)
5.1	频率特性及其表示法	(112)
5.1.1	频率特性的基本概念	(112)
5.1.2	频率特性的几种表示法	(114)
5.2	频率特性的极坐标图(Nyquist 图)	(116)
5.2.1	典型环节频率特性的极坐标图	(116)
5.2.2	系统开环频率特性的极坐标图	(119)
5.3	频率特性的对数坐标图	(122)
5.3.1	典型环节频率特性的 Bode 图	(122)
5.3.2	系统开环频率特性的 Bode 图	(126)
5.3.3	最小相位系统	(128)
5.3.4	传递函数的频域实验确定	(129)
5.4	频率域的稳定判据	(130)
5.4.1	幅角原理	(130)
5.4.2	奈奎斯特稳定判据	(131)
5.4.3	对数频率稳定判据	(134)
5.5	稳定裕度	(135)
5.5.1	稳定裕度的定义	(135)
5.5.2	稳定裕度的计算	(136)
5.6	利用开环频率特性分析系统的性能	(138)
5.7	利用闭环频率特性分析系统的性能	(140)
5.7.1	闭环频率特性	(140)
5.7.2	闭环频域指标与时域指标的关系	(140)
5.7.3	开环频域指标与时域指标的关系	(142)
5.8	MATLAB 在频率分析法中的应用	(143)
本章小结		(145)
习题		(145)
第 6 章	控制系统的校正	(148)
6.1	引言	(148)
6.2	PID 控制方法的分析	(150)
6.2.1	P 控制器	(150)
6.2.2	PI 控制器	(150)
6.2.3	PD 控制器	(151)
6.2.4	PID 控制器	(151)
6.2.5	PID 控制器参数整定	(154)
6.3	常用校正装置及其特性	(156)
6.3.1	超前校正装置及其特性	(157)
6.3.2	滞后校正装置及其特性	(157)

6.3.3	滞后-超前校正装置及其特性	(158)
6.4	基于频率法的串联校正设计	(159)
6.4.1	串联超前校正	(159)
6.4.2	串联滞后校正	(161)
6.4.3	串联超前-滞后校正	(163)
6.4.4	按期望特性对系统进行串联校正	(165)
6.5	反馈校正	(166)
6.5.1	利用反馈校正改变局部环节的结构与参数	(167)
6.5.2	利用负反馈可以消除系统不可变部分中的不希望有的特性	(168)
6.5.3	利用反馈校正抑制一些严重扰动	(168)
6.6	MATLAB 在控制系统校正中的应用	(169)
6.6.1	MATLAB 指令在系统校正中的应用	(170)
6.6.2	Simulink 在系统校正中的应用	(171)
	本章小结	(172)
	习题	(173)
第 7 章	线性离散控制系统	(175)
7.1	引言	(175)
7.2	采样与保持	(176)
7.2.1	采样过程	(177)
7.2.2	理想采样过程	(178)
7.2.3	保持器	(179)
7.3	z 变换	(181)
7.3.1	时间函数的 z 变换	(181)
7.3.2	z 变换的性质	(184)
7.3.3	z 反变换	(186)
7.4	脉冲传递函数	(188)
7.4.1	脉冲传递函数的推导与计算	(188)
7.4.2	开环脉冲传递函数	(189)
7.4.3	闭环系统脉冲传递函数	(192)
7.5	离散控制系统的稳定性分析	(196)
7.5.1	s 平面与 z 平面之间的映射	(196)
7.5.2	z 平面上的稳定性分析方法	(197)
7.5.3	双线变换性	(198)
7.5.4	w 平面上的稳定性分析方法	(199)
7.6	离散控制系统的时间响应	(199)
7.6.1	闭环极点与冲激响应的关系	(199)
7.6.2	离散系统的动态响应指标	(202)
7.6.3	离散系统的稳态误差	(203)
7.7	离散控制系统的校正	(205)
7.7.1	数字控制器的脉冲传递函数	(205)
7.7.2	最少拍系统设计	(206)
7.7.3	数字校正装置的实现	(209)

7.8 利用 MATLAB 进行离散控制系统分析	(209)
7.8.1 数学模型的处理	(210)
7.8.2 离散系统的输出响应	(211)
7.8.3 用 Simulink 对离散系统进行仿真	(212)
本章小结	(212)
习题	(213)
第 8 章 非线性系统分析	(216)
8.1 非线性系统的概述	(216)
8.1.1 典型的非线性特性	(216)
8.1.2 非线性系统的特点	(218)
8.2 描述函数分析法	(219)
8.2.1 描述函数的基本概念	(219)
8.2.2 典型非线性环节的描述函数	(221)
8.2.3 非线性系统的简化	(224)
8.2.4 基于描述函数法的非线性系统的分析	(226)
8.3 基于 MATLAB/Simulink 的非线性系统分析	(230)
本章小结	(231)
习题	(231)
附录 A 习题参考答案	(233)
参考文献	(244)

第 1 章 自动控制的一般概念

自动化技术几乎渗透到国民经济的各个领域及社会的各个方面，是当代发展最迅速、应用最广泛的技术，是推动新的技术革命和产业革命的关键技术。从某种程度上来说，自动化是现代化的代名词。自动控制原理是研究分析、设计自动控制系统的基本方法。本章主要介绍自动控制的一般概念、自动控制系统的组成和分类、对控制系统的要求及系统分析与设计工具。

1.1 自动控制与自动控制系统

所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备和装置，使机器设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。将完成自动控制所需的物理部件构成的有机整体称为自动控制系统。

在自动控制系统中，外加的设备或装置称为控制器或控制装置，机器设备或生产过程统称为控制对象，被控制的工作状态或参数称为被控量或输出量。输出的期望值为给定量，即输入量。妨碍控制量对被控量进行正常控制的所有因素称为扰动量。给定量和扰动量都是控制系统的输入量。自动控制的任務就是使系统按照给定量所设定的规律运行。

自动控制系统的种类较多，被控制的物理量也是各种各样，如温度、压力、流量、电压、转速和位移等。组成这些控制系统的元、部件虽然有较大的差异，但是系统的基本结构却相类同，且一般都是通过机械、电气和液压等方法来代替人工控制。为了解自动控制系统的结构，下面分析图 1.1-1 所示的水池液位控制系统。

图 1.1-1 中 F_1 为出水阀， F_2 为进水阀，控制要求希望液位等于 h_0 。当人参与控制时，就要不断地将实际液位与希望液位做比较，根据比较的结果，决定进水阀 F_2 开度是增大还是减小，以达到维持液位不变的目的。

图 1.1-2 为人参与该系统控制的方框图。由图 1.1-2 可见，人在参与控制中起以下 3 方面的作用。

- (1) 测量实际液位 h_1 ——用眼睛。
- (2) 将测得实际液位 h_1 与希望液位 h_0 相比较——用脑。
- (3) 根据比较的结果，即按照偏差的正负去决定控制的动作——用手。

显然，如果用自动控制去代替上述的人工控制，那么在自动控制系统中必须具有上述 3 种职能机构，即测量机构、比较机构和执行机构。如果将图 1.1-1 改为图 1.1-3 所示的液位自动

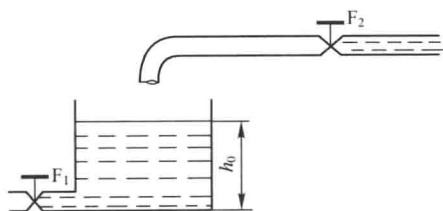


图 1.1-1 水池液位控制系统



图 1.1-2 液位人工控制系统的方框图

控制系统，就可以实现不论经出水阀 F_1 流出的流量如何变化，系统总能自动地维持其液位高度在允许的偏差范围之内。

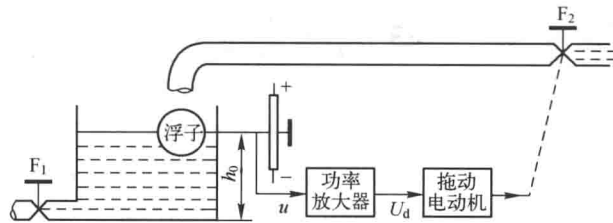


图 1.1-3 液位自动控制系统

假设水池液位因 F_1 阀开度的增大而降低，则系统立即产生一个与降落液位成比例的误差电压 u ，该电压经放大器放大后供电给进水阀的拖动电动机，使阀 F_2 的开度也相应地增大，从而使水池的液位恢复到所希望的高度。

图 1.1-3 所示的液位控制系统由以下 5 个部分组成：

- (1) 被控对象——水池。
- (2) 测量元件——浮子。
- (3) 比较机构——浮子的希望位置与实际位置之差。
- (4) 放大机构——提高系统的控制精度。
- (5) 执行元件——驱动被控对象，以改变被控制的量。

以上 5 个部分也是一般自动控制系统的基本组成单元。此外，为了改善控制系统的动、静态性能，通常还需在系统中引入某种形式的校正装置。

为了使控制系统的表示既简单又明了，在控制工程中可用方框图的形式直观地表示系统的输入量与输出量之间的关系。图 1.1-4 是水池液位自动控制系统的方框图，图中箭头方向表示信号传递方向。



图 1.1-4 水池液位自动控制系统的方框图

1.2 自动控制的方式

1.2.1 开环控制与闭环控制

控制系统按其结构可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

1. 开环控制

若系统中的信号只从控制装置向被控对象传递，而无反向传递，即信号传递路径不构成闭合回路，这类控制称为开环控制，相应的控制系统称为开环控制系统，如图 1.2-1 所示。

由图 1.2-1 可见，这种控制系统的特点是结构简单，所用的元件少，成本低，系统容易稳定。然而，由于开环控制系统既不要对它的被控量进行检测，又没有将被控量反馈到

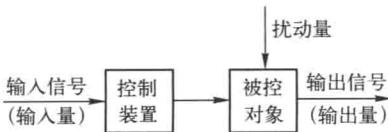


图 1.2-1 开环控制系统方框图

系统的输入端和参考输入相比较，所以当系统受到干扰作用后，被控制量一旦偏离了原有的平衡状态，系统就没有消除或减小误差的功能，这是开环控制系统的一个“致命”缺点。

图 1.2-2(a) 为一个开环直流调速系统，对应的系统方框图如图 1.2-2(b) 所示。图中 U_g 为给定的参考输入，它经触发器和晶闸管整流装置转变为相应的直流电压 U_d ，并给直流电动机供电，使之产生一个 U_g 所期望的转速 n 。但是，当电动机的负载、交流电网的电压以及电动机的励磁稍有变化时，电动机的转速就会随之变化，不能再维持 U_g 所期望的转速。

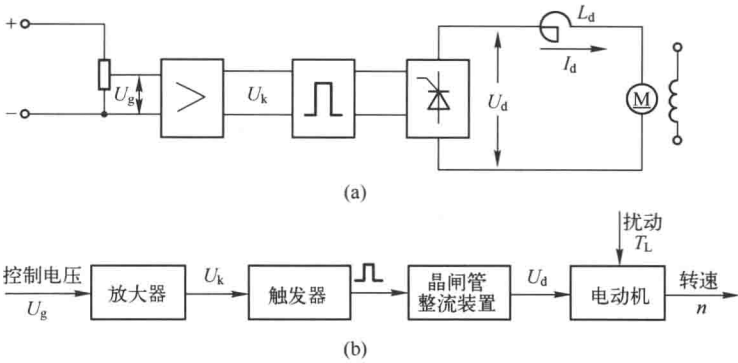


图 1.2-2 开环直流调速系统

2. 闭环控制

在控制系统中，通过测量装置检测输出量，并与输入信号进行比较，进而使控制装置按照二者的偏差来调节输出量，此类控制方式称为闭环控制。此时系统中存在信号的反向传递，通过测量装置使信号流构成闭合回路。闭环控制又称为反馈控制或偏差控制，相应的控制系统称为闭环控制系统，如图 1.2-3 所示。

图 1.2-4(a) 为一个闭环直流调速系统，对应的系统方框图如图 1.2-4(b) 所示。本系统中用测速发电机 TG 检测输出量——电动机 M 转速 n ，并将其转换成反馈电压 U_m ，然后反馈到输入端，与给定电压 U_g 相比较。其偏差经过运算放大器放大后，用来控制晶闸管整流装置输出电压 U_d 和电动机的转速 n 。当电位器滑动端在某一位置时，电动机就以指定的转速运转。

如果由于外部或内部扰动(例如由于负载突然增加)使电动机转速降低，那么这一速度变化将由测速发电机检测出来。此时反馈电压相应降低，与给定电压比较后，偏差电压增大，再经过运算放大器放大后，将使晶闸管整流装置输出电压 U_d 升高，从而减小或消除电动机的转速偏差。调节过程如下：

$$\left. \begin{matrix} T_L \uparrow \\ u_- \downarrow \end{matrix} \right\} \rightarrow n \downarrow \rightarrow U_m \downarrow \rightarrow \Delta U = (U_g - U_m) \uparrow \rightarrow U_k \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

闭环控制系统具有如下特点：

- (1) 由于系统的控制作用是通过给定量与反馈量的偏差进行的，所以这种控制称为偏差控制或反馈控制。
- (2) 这类控制系统具有两种传输信号的通道。由给定量至被控量的通道称为前向通道，由被控量至系统输入端的通道称为反馈通道。

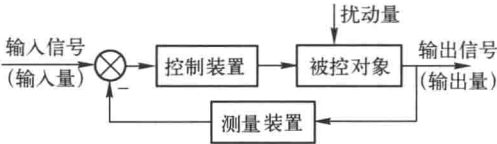


图 1.2-3 闭环控制系统的方框图

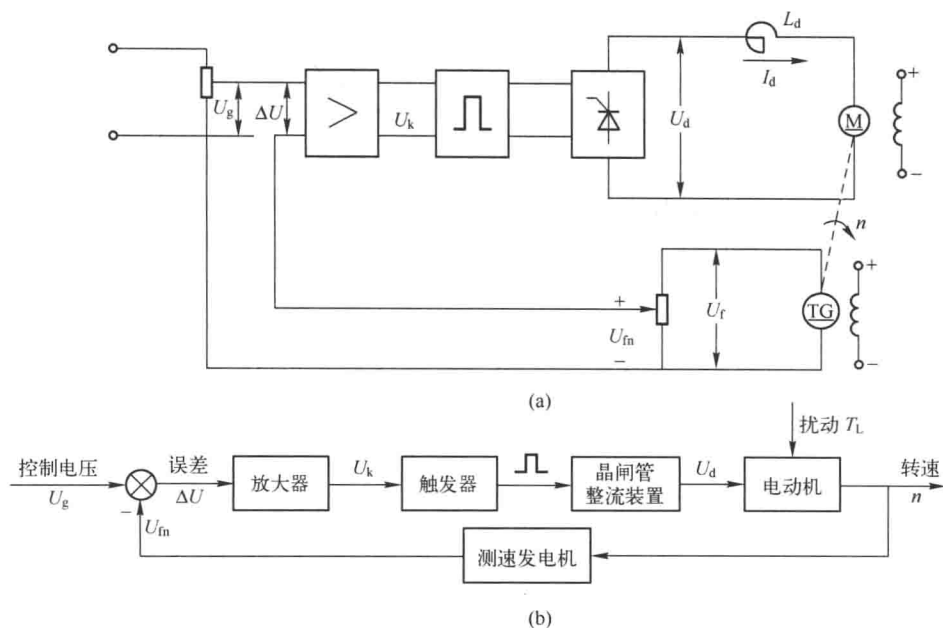


图 1.2-4 闭环直流调速系统

(3) 不论取什么物理量进行反馈，作用在反馈环内前向通道上扰动所引起的被控量的偏差值，经系统调节和控制，都会得到减小或消除，使得系统的被控量基本不受该扰动的影响。正是由于这种特性，使得闭环控制系统在控制工程中得到了广泛的应用。

3. 复合控制

反馈控制是在外部的给定量及扰动量作用下，系统的被控量发生变化后才做出相应调节和控制的，若系统中有些环节有较大的惯性，或有纯滞后特性，其控制作用则难以及时影响被控量，因而影响控制质量的提高。为了克服此缺点，出现了前馈补偿控制，它将给定量或扰动量直接折算到系统输入端，对控制量的大小进行修正，即在偏差产生之前就进行了防止偏差产生的控制。在图 1.2-5(a)中通过输入补偿装置来实现对输入信号的补偿控制，在图 1.2-5(b)中，在扰动信号可测时，通过扰动补偿装置来实现对扰动信号的补偿控制。在前馈补偿控制方式中，由于被控量对控制过程不产生任何影响，故它属于开环控制。前馈补偿控制与反馈控制相结合，就构成了复合控制。复合控制有两种基本形式：按输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制，如图 1.2-5 所示。

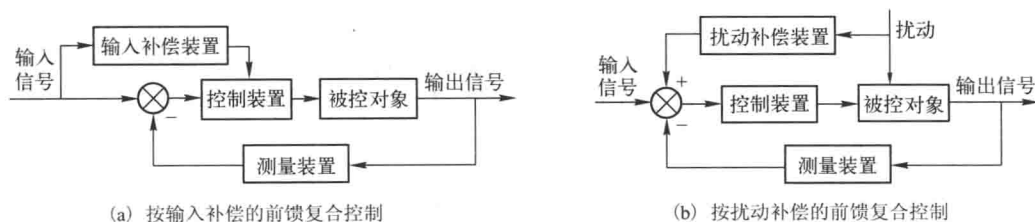


图 1.2-5 复合控制示意图

1.2.2 闭环控制系统的组成

闭环控制是自动控制系统中应用广泛的一种控制方式。一般闭环控制系统的组成如图 1.2-6 所示。



图 1.2-6 闭环控制系统组成方框图

- 给定环节是设定给定值的装置，为控制系统设定一定输入信号以决定系统的期望输出，如电位器可以给出恒值输入信号。数字给定装置可以给出较精确的恒值信号或序列值信号。
 - 比较环节将给定环节输出的给定值与检测装置测量的输出值(反馈值)进行比较，从而产生期望值与实际值的偏差，通常用给定值减去反馈值，以使闭环系统构成负反馈。常用的比较环节的元件有差分放大器、机械差动装置、电桥电路等。
 - 校正环节按某种规律对偏差信号进行运算，用运算的结果控制执行机构以改善被控系统的性能。
 - 功放环节的作用是提升控制信号的功率，以驱动执行机构。
 - 执行环节的作用是控制被控对象的行为以改变其输出值。用来作为执行机构的元件有：阀、电动机、液压马达等。
 - 检测装置用来检测被控量，如热电偶、测速发电机等，并将其转换为与给定量相同的物理量。因为检测装置的误差无法通过闭环控制得到修正，故实际系统对检测装置要求较高。
 - 被控对象受控制器输出量的控制，其输出就是系统的被控量。
- 在控制系统中，常把比较环节、校正环节合在一起称为控制器。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统按不同分类方法可分为多种类型。常见的分类方法有以下几种。

1. 按元件特性分类

自动控制系统按其主要元件的特征方程的输入输出特性，可以分为线性控制系统和非线性控制系统。

(1) 线性控制系统

若组成系统的元件的输入输出特性都具有线性特性，则称这种系统为线性控制系统。这种系统输入与输出之间的关系，一般用微分方程、传递函数或状态方程来描述。用线性微分方程描述，其一般形式为

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_0 c(t) \\ & = b_m \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t) \end{aligned}$$

式中， $c(t)$ 是系统输出量； $r(t)$ 是系统输入量。 a_0 、 a_1 、 $\cdots$ 、 a_n ， b_0 、 b_1 、 $\cdots$ 、 b_m 是常数时，称为定常系统；如果是随时间变化的，则称为时变系统。

线性系统的特点是满足叠加性和齐次性。叠加性指当多个输入信号同时作用于系统时，其总输出等于各个输入信号单独作用时所产生输出的总和。齐次性指系统输入增大或缩小 n 倍，则系统输出也同时增大或缩小 n 倍。例如，当输入为 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时，如果输出量分别为 $c_1(t)$ 和

$c_2(t)$ ，则当输入量为 $r(t) = ar_1(t) + br_2(t)$ 时，输出量为 $c(t) = ac_1(t) + bc_2(t)$ 。

(2) 非线性控制系统

系统中只要有一个元件的输入输出特性是非线性的，则称这种系统为非线性控制系统。这种系统输入与输出之间的关系，要用非线性微分方程描述。非线性微分方程的特点是系数与变量有关，或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项，例如

$$\ddot{c}(t) + c(t)\dot{c}(t) + c^2(t) = r(t)$$

严格地讲，线性控制系统实际上是不存在的，因为构成系统的实际元件都不同程度地存在非线性特性。例如，系统中应用的放大器，当超过一定应用范围时，就会出现饱和特性；弹簧有非线性特性；甚至有时为了改善系统的性能和节约费用，有意采用非线性元件等。但是，在工程上有时为了简化分析和设计工作，对一些非线性元件，在一定的条件下进行简化和近似处理后，当作线性元件对待，使系统成为工程意义上的线性控制系统。

2. 按系统内信号形式分类

按照自动控制系统中信号的传递方式，可将自动控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。

(1) 连续控制系统

若系统各部分的信号都是时间 t 的连续函数，则这类系统称为连续控制系统。这类系统通常用微分方程来描述。

(2) 离散控制系统

在信号传递过程中，只要有一处的信号是脉冲序列或数字编码时，这类系统就称为离散控制系统。离散控制系统的特点是：信号在特定离散时刻 ($t = kT$) 中，是时间的函数，而在上述离散时刻之间，信号不传递。离散控制系统采用差分方程描述。

随着计算机应用技术的发展，为数众多的自动控制系统都采用计算机作为控制手段。在计算机引入控制系统之后，控制系统就由连续系统变成离散控制系统。

3. 按系统给定信号形式分类

按照给定信号的特征可将系统分为以下三种类型。

(1) 定值(恒值)控制系统

定值控制系统中的给定值是恒定不变的，希望输出维持在某一特定值上。系统主要任务就是当被控量受到某种干扰而偏离期望值时，通过自动调节作用，使它尽可能地恢复到期望值。工业生产过程中广泛应用的温度、压力、流量等参数控制，多半是采用定值控制系统来实现的。

(2) 随动(伺服)系统

随动系统的输入信号是预先不知道的随时间任意变化的函数，要求输出量跟随给定量变化。例如火炮自动瞄准系统、导弹的制导系统。

(3) 程序控制系统

这类系统的输入信号不是常数，而是按照预先知道的时间函数变化，并要求被控量随之变化。如热处理炉温度控制系统中的升温、保温、降温等过程，都是按照预先设定的规律(程序)进行控制的。又如数控机床、全自动洗衣机等。

4. 按系统输入和输出信号的数目分类

按照控制系统的输入信号和输出信号的数目，可分为单输入单输出(SISO)系统和多输入多输出(MIMO)系统。

单输入单输出(SISO)系统通常称为单变量系统,这种系统只有一个输入(不包括扰动输入)和一个输出信号。

多输入多输出(MIMO)系统通常称为多变量系统,这种系统有多个输入和多个输出信号。

5. 按系统的参数是否随时间变化分类

按控制系统的参数是否随时间变化,可分为定常系统和时变系统。

定常系统中的参数不随时间变化。实践中遇到的系统,大多数是属于这类系统,或可以合理地近似成这类系统。

如果系统中的参数是时间 t 的函数,则这类系统称为时变系统。

1.4 对自动控制系统的基本要求

1. 对自动控制系统性能的基本要求

可以归结为稳定性、快速性和准确性。

(1) 稳定性

对恒值系统要求当系统受到扰动后,经过一定时间的调整能够回到原来的期望值。

对随动系统,被控制量始终跟踪参考量的变化。

稳定性是对系统的基本要求,不稳定的系统不能实现预定任务。稳定性通常由系统的结构和参数决定,与外界因素无关。

(2) 快速性

对过渡过程的形式和快慢提出要求,一般称为动态性能。稳定高射炮射角随动系统,虽然炮身最终能跟踪目标,但如果目标变动迅速,而炮身行动迟缓,仍然抓不住目标。

(3) 准确性

用稳态误差来表示。如果在参考输入信号作用下,当系统达到稳态后,其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之差叫做给定稳态误差。显然,这种误差越小,表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。

由于被控对象具体情况的不同,各种系统对上述三方面性能要求的侧重点也有所不同。例如随动系统对快速性和稳态精度的要求较高,而恒值系统一般侧重于稳定性能和抗扰动的能力。在同一个系统中,上述三方面的性能要求通常是相互制约的。例如为了提高系统的动态响应的快速性和稳态精度,就需要增大系统的放大能力,而放大能力的增强,必然促使系统动态性能变差,甚至会使系统变为不稳定。反之,若强调系统动态过程平稳性的要求,系统的放大倍数就应较小,从而导致系统稳态精度的降低和动态过程的缓慢。由此可见,系统动态响应的快速性、高精度与动态稳定性之间是一对矛盾。

2. 本课程的任务

本课程所要研究的两大课题:

(1) 对于一个具体的控制系统,如何从理论上对它的动态性能和稳态精度进行定性的分析和定量的计算。

(2) 根据对系统性能的要求,如何合理地设计校正装置,使系统的性能能全面地满足技术上的要求。

1.5 自动控制系统的分析与设计工具

MATLAB 是一种数值计算型科技应用软件,其全称是 Matrix Laboratory(矩阵实验室)。与 Basic, Fortran, Pascal, C 等编程语言相比, MATLAB 具有编程简单、直观,用户界面友善,开放性能强等优点,因此自面世以来,很快就得到了广泛应用。

现今的 MATLAB 拥有了更丰富的数据类型、更友善的用户界面、更加快速精美的可视图形、更广泛的数学和数据分析资源,以及更多的应用开发工具。

这里主要介绍 MATLAB 在控制器设计、仿真和分析方面的功能,即 MATLAB 的控制工具箱。在 MATLAB 工具箱中,常用的有如下 6 个控制类工具箱。

(1) 系统辨识工具箱(system identification toolbox)

该工具箱提供了进行系统模型辨识的工具,其主要功能包括:

- ① 参数化模型辨识。有 AR、ARX、状态空间和输出误差等模型类辨识工具。
- ② 非参数化模型辨识。
- ③ 模型验证。对辨识模型进行仿真并将真实输出数据与模型预测数据进行比较,计算响应的残差。
- ④ 递推参数估计。针对各种参数模型,利用递推估计方法获得模型参数。
- ⑤ 各类模型的建立和转换。
- ⑥ 集成多种功能的图形用户。以图形交互方式实现各类模型的选择和建立,输入输出数据的加载和预处理,以及模型估计。

(2) 控制系统工具箱(control system toolbox)

该工具箱主要处理以传递函数为主要特征的经典控制和以状态空间为主要特征的现代控制中的主要问题。为控制系统,尤其是 LTI 线性定常系统的建模、分析和设计提供了一个完整的解决方案。其主要功能如下:

① 系统建模。建立连续或离散系统的状态空间,传递函数,零极点增益模型,并实现任意两者之间的转换;通过串联、并联、反馈连接及一般的框图连接,建立复杂的系统模型;通过多种方式实现连续时间系统的离散化,离散时间系统的连续化及重采样。

② 系统分析。既支持连续和离散系统,也适用于 SISO 和 MIMO 系统。在时域分析方面对系统的单位脉冲响应、单位阶跃响应、零输入响应及更一般的任意输入响应进行仿真;在频域分析方面,对系统的伯德图(Bode)、奈奎斯特图(Nyquist)进行计算和绘制。

该工具箱还提供了一个框图式操作界面工具——LTI 观测器,可支持 10 种不同类型的系统响应分析,大大简化系统分析和图形绘制的过程。

③ 系统设计。计算系统的各种特性,如可控和可观测 Gramain 矩阵、系统零极点、李雅普诺夫方程、稳定裕度、阻尼系数,以及根轨迹的增益选择等;支持系统的可控和可观测标准型实现、最小实现、降阶实现,以及输入延时的 Pade 设计;对系统进行极点配置、观测器设计以及 LQ 和 LQG 最优控制等。

另一个框图式操作界面工具——SISO 系统设计工具,可用于单输入单输出反馈控制系统的补偿器校正设计。

(3) 鲁棒控制工具箱(robust control toolbox)

该工具箱提供鲁棒分析和设计的工具有:

① 模型建立和转换工具。建立增广状态方程和传递函数模型,进行多变量系统双线性变换等。