

自动控制原理

陈玉宏 向凤红 主编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书内容包括:自动控制系统的基本概念,物理系统的数学模型,系统的时间响应,系统的反馈控制及其特性,根轨迹设计方法,频率响应设计方法,数字控制系统,非线性控制系统,附录和参考文献等。

本书适合于自动化及相关专业的本科生作教材使用,也可供有关科技工作者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/陈玉宏,向凤红主编. —重庆:重庆大学出版社,2003.9

(自动化专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-2811-5

.自... . 陈... 向... . 自动控制理论—高等学校—教材 . TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 061048 号

自动控制原理

陈玉宏 向凤红 主编

责任编辑:谭 敏 胡道全 版式设计:谭 敏

责任校对:任卓惠 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:21.75 字数:542千

2003年9月第1版 2003年9月第1次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2811-5/TP·413 定价:26.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

本书是自动化专业本科系列教材之一。根据系列教材内容的分工,本书讲述自动控制理论中的经典控制理论部分,作为 80 学时的《自动控制原理》课程的教材,并和《现代控制理论》教材一起,向学生讲授自动控制系统分析和设计的基本理论和方法。

在编写中,特别考虑了以下几点:

1. 处理和《信号与系统》的关系,注意和《信号与系统》内容的衔接,避免不必要的重复。这样有利于突出自动控制系统作为一种特定的反馈系统自身的特点和相应的分析设计方法。

2. 处理分析和设计的关系。工科学生学习自动控制理论的目的主要在于应用。对于工科学生应当强调设计与综合能力的培养。特别是在学生已经有了《信号与系统》关于系统基本分析方法基础的情况下,更应如此。所以本教材以设计为主线来讲述自动控制的基本理论。当然,分析是设计的基础。自动控制系统的基本分析方法是学生首先应当掌握的。而在自动控制系统分析中,响应特性的分析比响应的求解更重要。为此,本书以极点零点为线索讲述系统的基本分析方法。

3. 处理和计算机辅助设计软件的关系。近年来,控制界正越来越普遍地使用 MATLAB 等计算机软件来解决控制系统分析和设计的各种问题。一方面, MATLAB 的这种应用必须以自动控制理论为基础。另一方面,它的应用也使自动控制理论中的一些难于应用的方法变得容易应用了;同时,又使在手工计算和图解时的一些非常重要的方法和规则变得不那么重要了。考虑到自动控制理论和 MATLAB 之间的这种“互动”关系,尽管作为一本自动控制理论课程的教材,其任务不是教会学生使用 MATLAB,本书仍然指出了 MATLAB 的一些可能的应用。同时,也尽可能反映 MATLAB 等计算机软件对于控制系统分析设计方法的影响。

根据这样的考虑,本书的内容安排如下:第1章~第3章讲述自动控制系统的基本概念、物理系统的数学模型和系统的时间响应,属于控制系统分析的基本部分。第5章和第6章讲述根轨迹和频率响应设计方法,属于控制系统设计方法部分。在这两部分之间安排第4章讲述反馈的基本原理,作为由前一部分向后一部分过渡的转折点,以帮助学生理解对系统实现反馈控制的基本原理和特性。在学习了连续时间控制系统的各种分析设计方法的基础上,第7章讲述数字控制系统的分析和设计,以便于将两种系统的分析设计方法对照起来进行学习。考虑到用微型计算机构成的数字控制器应用日益广泛,本章用“数字控制”作为标题以加强内容的针对性。在前面讲述线性系统的基础上,第8章讲述非线性控制系统。在每章的前面提出了该章拟讲述的主要内容,后面给出了全章内容小结,以帮助学生抓住学习的线索,掌握关键概念和基本内容。在本书最后的附录中,给出了控制设计的基本步骤和一个较为完整的控制系统设计实例,以期读者在学习本课程后,对于理论的应用有一个系统的了解。

在本书编写过程中,不少同行专家提出了许多宝贵的意见和建议,还得到了编者所在学校领导和同仁们以及重庆大学出版社的大力支持和帮助,编者在此表示深切感谢。

本书第3,4,5,7章和附录由陈玉宏编写,第1,6章由向凤红编写,第2章由张莲编写,第8章由杨琳编写。全书由陈玉宏负责统稿。

编者

2002年10月

目录

第 1 章 自动控制系统的基本概念	1
1.1 自动控制系统及其作用	1
1.2 开环控制系统和闭环控制系统	2
1.3 控制系统的构成	5
1.4 自动控制系统的分类和应用	6
1.5 自动控制理论发展简史	9
1.6 自动控制系统的分析和设计与本书的主要内容 ...	11
小 结	12
习 题	13
第 2 章 物理系统的数学模型	15
2.1 引言	15
2.2 系统的微分方程模型	16
2.3 非线性系统微分方程模型的线性化	19
2.4 传递函数	22
2.5 系统的结构图及其等效变换	28
2.6 自动控制系统的传递函数	36
2.7 信号流图	39
小 结	43
习 题	44
第 3 章 系统的时间响应	49
3.1 引言	49
3.2 系统的极点零点和自然响应	49
3.3 标准二阶系统的时间响应 以极点表示的性能 指标	54
3.4 增加零点和极点的影响	59
小 结	63
习 题	64
第 4 章 系统的反馈控制及其特性	67
4.1 引言	67
4.2 反馈的作用	68

4.3	反馈控制系统的指标	73
4.4	系统稳定性的概念 渐近稳定性和 BIBO 稳定性	75
4.5	劳斯稳定判据	77
4.6	稳态误差和系统的类型	82
4.7	反馈控制作用的类型	89
4.8	灵敏度函数和控制性能	93
	小 结	95
	习 题	97
第 5 章	根轨迹设计方法	101
5.1	引言	101
5.2	根轨迹的基本概念	102
5.3	根轨迹的作图	107
5.4	根轨迹作图方法的扩展	119
5.5	由根轨迹选择增益	125
5.6	串联超前和滞后校正	128
5.7	反馈校正	134
	小 结	141
	习 题	143
第 6 章	频率响应设计方法	148
6.1	频率响应的基本概念和表示方法	148
6.2	典型环节的频率特性	152
6.3	系统开环频率特性的绘制	161
6.4	用频率法分析控制系统的稳定性	168
6.5	系统瞬态特性和开环频率特性的关系	179
6.6	闭环系统频率特性	185
6.7	系统瞬态特性和闭环频率特性的关系	189
6.8	串联校正	191
6.9	反馈校正	205
6.10	前馈校正	207
	小 结	210
	习 题	212
第 7 章	数字控制系统	216
7.1	引言	216
7.2	数字控制系统的构成	217
7.3	数字计算机的数学模型	219
7.4	脉冲传递函数	223
7.5	采样数据系统的结构图分析	227

7.6	自然响应和稳定性	233
7.7	终值定理和系统的稳态误差	242
7.8	数字控制器的连续设计法	243
7.9	数字控制器的离散设计法	252
7.10	数字控制器的直接设计法	266
	小 结	271
	习 题	273
第 8 章	非线性控制系统	279
8.1	非线性特性与非线性系统	279
8.2	相平面法的基本概念和奇点	283
8.3	相轨迹图的绘制	285
8.4	非线性系统的稳定性	288
8.5	非线性系统的相平面分析	293
8.6	描述函数法的基本概念	299
8.7	描述函数的推导	301
8.8	非线性系统的描述函数分析	308
8.9	Popov 稳定判据	313
	小 结	316
	习 题	318
附录	321
附录 A	控制系统设计步骤和实例研究	321
A.1	控制系统设计步骤	321
A.2	控制系统设计实例研究	324
附录 B	拉普拉斯变换的性质和拉普拉斯变换表	329
附录 C	z 变换的性质和 z 变换表	331
附录 D	MATLAB 指令	333
参考文献	336

第 1 章

自动控制系统的基本概念

在本章,你将学习

自动控制的作用和意义及其发展史

什么是开环控制和闭环控制。为什么要采用闭环控制

控制系统的基本结构和术语

控制系统的分类和应用

什么是控制系统的分析和设计

1.1 自动控制系统及其作用

众所周知,系统存在于世间万物,是人类迄今认识的重要事物之一。正如数学中的集合一样,很容易被人们从感性上理解并予以接受,却难以定义。但单就工程技术领域而言,可以将系统理解为“由一些相互联系和相互制约的环节组成并具有特定功能的整体”。这是一个非常广泛的概念。从很小的一个细胞到规模很大的自动化工厂,以及地球生态圈等,都是不同类型的系统。在工业生产中,一台机器、一套设备或任一工艺过程,如加热炉、轧钢机、化学反应釜、核反应堆等等都称为系统。而“控制”也是一个具有广泛意义的概念,它可以指人与人的关系,也可以指其他方面的关系。当指人-机关系时,指的是人对于机器或设备的控制。为使某一机器、设备或过程处于希望的状态而对其进行的操作,称为控制。把这些被控制的机器、设备或过程称为受控对象或对象。受控对象要实现控制的量称受控变量或输出变量(简称被控量或输出量),如飞机的飞行速度、船舶的航迹、电机的转速、生产过程中的压力、温度、流量、湿度等。在人直接参与下完成的控制,称为人工控制。如果使用某种装置代替人的作用,在没有人直接参与的情况下,使受控对象自动按照预定的规律运行并达到预期的状态或性能要求,这就是自动控制。这种能代替人对控制对象施加控制作用的装置,称为自动控制装置。把由自动控制装置和被控制的对象所组成的系统称为自动控制系统。

在现代生活的所有方面,自动控制发挥着重要的作用。而且,这一作用将随着社会的发展与日俱增。从宇宙飞船、导弹制导和飞机驾驶到机器制造和工业生产过程,自动控制系统都是极其重要且不可缺少的组成部分。例如,在化工生产过程中,对压力、温度、流量、液位和成分

的控制;在机器制造工业中,机器零件的加工、处理和装配,也广泛采用自动控制。而且,自动控制还将日益渗透到我们的日常生活之中。

随着自动控制理论和实践不断发展,给人们提供了获得动态系统最佳性能的方法。将自动控制技术用于生产,可以提高劳动生产率,改进产品质量,降低生产成本,改善劳动条件和加强企业管理。将自动控制技术用于国防领域,可提高部队的战斗力,促进国防现代化。自动控制技术在探索新能源、发展空间技术、改善人们生活以至处理经济、社会问题等方面都起着日益重要的作用。

自动控制系统中,大量使用着如机械、电、电子、液动、气动以及其他不同种类的元器件,因此,从事自动控制系统分析、研究、设计、实现和调试的工程技术人员,不仅必须熟悉控制对象的工作原理与特性,而且也必须熟悉这些元器件的原理和特性。

自动控制理论是一门使用很多数学方法的边缘学科。它不仅汲取众多领域的研究成果和知识,而且,它的不断发展和深入研究还有利于把很多分离研究的学科融合到一起,并应用于同一问题之中。同时,自动控制理论的概念也正在扩充和渗透到诸多其他研究领域。

1.2 开环控制系统和闭环控制系统

自动控制系统种类繁多,其功能和组成也是多种多样的,就其工作原理而言,可分为开环控制、闭环控制和这两种控制的组合——复合控制。相应的控制系统称为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统

1.2.1 开环控制系统

如果控制系统的输出量对系统本身没有控制作用,这种系统称为开环控制系统。在开环控制系统中,输入端与输出端之间,只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端的反馈通路。因此,开环控制系统又称为无反馈控制系统,开环控制系统由控制器(控制装置)与受控对象组成。

图 1.1 给出了一个加热炉炉温控制系统原理图。该控制系统要求炉温维持在给定值附近一定的范围内。给定炉温所要求的期望值(给定值,参考输入)后,根据经验和实验数据,把调压器滑头置于某一给定位置上,接通电源后,通过电阻丝给电炉加热。该系统受控对象是加热炉,被控量是炉内温度,控制装置是调压器、电阻丝。由于电源的波动,炉门开闭的次数不同,炉内实际温度与期望的温度(给定值)会出现偏差,有时偏差可能较大。但该系统不可能由于存在偏差,自动调整调压器滑头的位置,通过改变电阻丝的电流来消除温度偏差,也就是说输出量对系统的控制作用没有任何影响。因此,该炉温控制系统是一个开环控制系统,可用图 1.2 的方框图表示。

开环控制有两种形式:按给定值控制的开环控制,图 1.3(a)就是这种形式的开环控制;另一种形式是按扰动补偿的开环控制,如图 1.3(b)所示,该系统对扰动进行测量,利用测量得到的扰动值修正控制作用,补偿扰动对被控量的影响,从扰动作用端至输出端,也仅有顺向作用而无反向联系,因此,也是开环控制。这种控制方式的前提条件是扰动能够被测量。

目前国民经济各部门都广泛应用开环控制系统,如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生

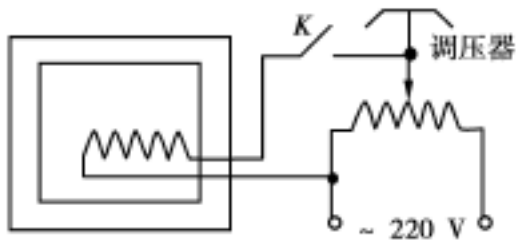


图 1.1 开环控制的电加热炉原理图



图 1.2 开环控制的电加热炉方框图



图 1.3 两种开环控制形式方框图

(a) 按给定值控制的开环控制; (b) 按扰动补偿的开环控制

产流水线及交通指挥的红绿灯转换等。

1.2.2 闭环控制系统

闭环控制则是由在开环控制基础上引入人工干预过程演变而来的。对于图 1.1 所示系统, 如果要实现无论是否出现扰动, 都能使炉温保持恒定, 就需人工干预。那么操作人员怎么保证炉温恒定, 即人工干预过程是怎么进行的呢? 首先, 操作人员要测量炉内的温度, 然后与生产工艺所要求的温度数值相比较, 再根据二者之间的差值(又称偏差) 适当地调整调压器滑动端位置来减小乃至完全消除偏差。这里, 操作人员的工作顺序是测量输出量、将其转换成与给定量相同的物理量(反馈量), 反馈到系统的输入端与给定量进行比较, 根据给定量与反馈量的差值调整变压器滑动端的位置。操作人员的关键性作用是使得系统的输出量参与了系统的控制, 系统一旦出现偏差, 就调整控制量, 从而保证了输出量的恒定。图 1.4 所示的系统, 就是采用一系列的物理器件来取代操作人员的上述功能, 实现对炉温的闭环控制。在这里, 电加热炉内的温度要稳定在某一个给定的温度 T_r 值附近, T_r 值是由给定的电压信号 u_r 反映的, 热电偶作为温度测量元件, 测出炉内实际温度 T_c , 热电偶输出电压 u_c 比例于炉内实际温度 T_c , 偏差信号反映炉内期望的温度与实际温度的误差值, 即 $e = u_r - u_c$ 。该偏差信号经放大后控制电机旋转以带动变压器滑头移动, 通过改变流过加热电阻丝的电, 消除温度偏差, 使炉内实际温度等于或接近预期的温度值。图 1.5 描述了该系统的输入量、输出量和反馈量之间的作用关系。这种系统是把输出量直接(或间接) 地反馈到输入端形成闭环, 使得输出量参与系统的控制, 所以称为闭环控制系统。

闭环控制系统又称反馈控制系统。在闭环控制系统中, 既存在由输入端到输出端的信号前向通路, 也存在从输出端到输入端的信号反馈通道, 两者组成一个闭合的回路。控制系统要达到预定的目的或规定的性能, 必须把输出量的信息反馈到输入端进行控制。换言之, 闭环控制系统是把输出量检测出来, 经过物理量的转换, 再反馈到输入端去与给定值(参考输入) 进行比较(相减), 并利用比较后的偏差信号, 以一定的控制规律产生控制作用, 抑制内部或外部扰动对输出量的影响, 逐步减小以至消除这一偏差, 从而实现要求的控制性能。闭环控制是最

常用的一种控制方式,显然,有简单的闭环控制,也有复杂的闭环控制。闭环控制在工程系统和社会经济系统中正得到广泛的应用,在生命有机体的生长和进化过程中也普遍存在着这种反馈控制。生命有机体为适应环境的变化而做出有效的动作反应,主要是依靠这种反馈作用。人具有学习能力,能通过学习积累经验,用过去的经验来调节未来行为的策略,并具有通过学习来适应环境和改造世界的能力,本质上也是一种反馈控制。

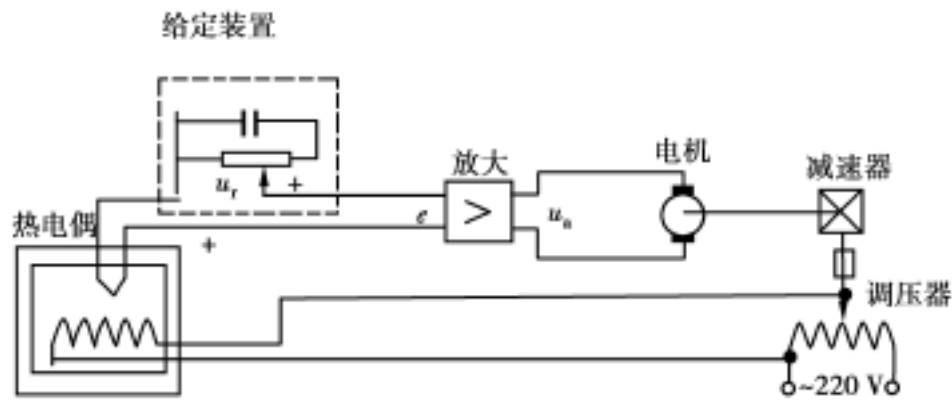


图 1.4 闭环控制的电加热炉原理图

在图 1.4 所示的闭环控制系统中,如果某一时刻, $e > 0$, 表明 $T_r > T_c$, 电机旋转带动滑头向右移动, 通过电阻丝电流增大, 炉温升高, 直到偏差 e 等于或接近零。如果 $e < 0$, 电机旋转带动滑头向左移动, 通过电阻丝电流减小, 炉温继续下降, 直到偏差 e 等于或接近零。本反馈控制系统中, 偏差为输入信号与反馈信号之差, 称为负反馈; 若偏差为输入信号与反馈信号之和, 则称为正反馈。实现反馈, 首先要测量输出量, 然后再与输入量相比较而构成反馈回路。因此, 存在比较、测量装置是闭环控制系统的基本结构特征。加热炉炉温闭环控制系统方框图如图 1.5 所示, 其中箭头表示信号的作用方向, “-”表示负反馈。



图 1.5 闭环控制的电加热炉方框图

一般地说, 开环控制系统结构比较简单, 成本较低。开环控制系统的缺点是控制精度低和抑制扰动能力差, 而且对系统参数变化很敏感。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合, 如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

同开环控制相比, 闭环控制具有很大优点。尽管闭环系统种类繁多, 具体结构不一样, 而且它们完成的控制任务也不相同, 但从检出偏差、利用偏差信号对受控对象进行控制, 以减小或纠正输出量的偏差这一控制过程却是相同的。归纳起来, 这种系统的特点如下:

(1) 在开环系统中, 只有输入量对输出量产生控制作用; 从控制结构上来看, 只有从输入端到输出端的信号传递通道(该通道称为正向通道或前向通道)。闭环控制系统中除正向通道外, 还必须有从输出端到输入端的信号传递通道, 使输出信号也参与控制作用, 该通道称为反馈通道。闭环控制系统就是由正向通道和反馈通道组成的。

(2) 为了检测偏差, 必须直接或间接地检测出输出量, 并变换为与输入量相同的物理量,

以便与给定值相比较, 得出偏差信号。所以闭环系统必须有检测环节、给定环节和比较环节。

(3) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的, 因此系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行机构。闭环系统正是靠放大的偏差信号产生的控制作用来推动执行机构, 进一步对受控对象进行控制的。只要输出量与给定值之间存在偏差, 就有控制作用存在, 力图纠正这一偏差。因而, 对于闭环控制系统, 不论是输入信号的变化, 或者扰动的影响, 或者系统内部的变化, 只要是被控量偏离了给定值, 都会产生相应的作用去消除偏差。

因此, 闭环控制抑制扰动能力强, 与开环控制相比, 对参数变化不敏感, 并能获得满意的动态特性和控制精度。但是引入反馈增加了系统的复杂性, 如果闭环系统参数的选取不适当, 系统可能会产生振荡, 甚至系统失稳而无法正常工作, 这是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

1.2.3 复合控制系统

反馈控制是在外部作用(参考输入或扰动)对受控对象产生影响后才能做出相应的控制, 尤其是受控对象具有较大延迟时, 反馈控制不能及时地影响输出的变化。前馈控制能预测输出随外部作用的变化规律, 在受控对象还没有受到影响之前就做出相应的控制, 使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。前馈控制和反馈控制相结合构成了复合控制, 也就是说复合控制是开环控制和闭环控制相结合的一种控制形式。复合控制是构成高精度控制的一种有效控制方式, 使自动控制系统具有更好的控制性能。复合控制基本上具有两种形式: 按参考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 1.6 所示。

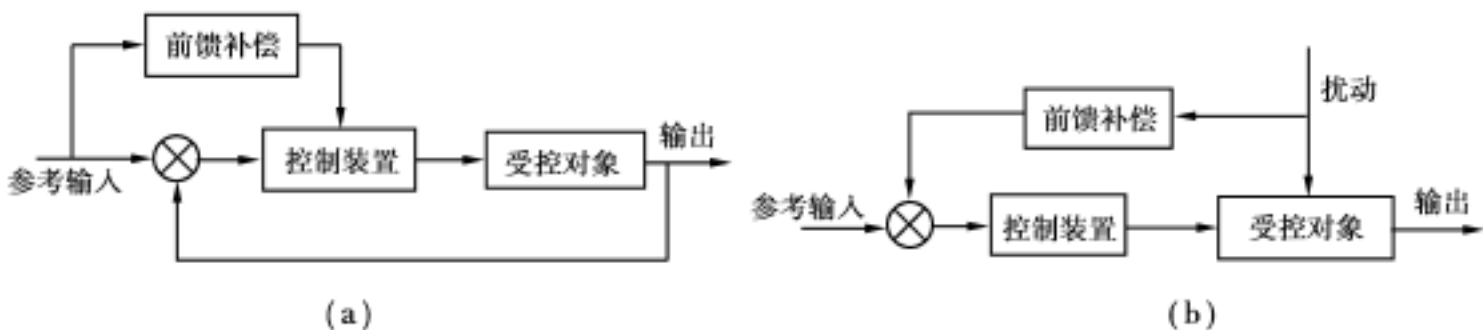


图 1.6 复合控制系统

(a) 附加参考输入补偿的复合控制系统; (b) 附加扰动补偿的复合控制系统

1.3 控制系统的构成

从上一节讲述的闭环控制的典型例子, 画出其一般形式的方块图如图 1.7 所示。我们看到, 一个基本的反馈控制系统, 通常由以下几个部分构成:

(1) 受控对象(或过程), 指需要对它的某个特定的量进行控制的设备或过程。受控对象的输出变量是受控变量, 常常记作 $c(t)$ 或 $y(t)$ 。受控对象除了受到控制作用外, 还受到外部扰动作用, 图 1.7 中用 $d(t)$ 表示。受控对象是控制系统的核心部分, 它的特性, 对控制系统的性能具有重要影响。

(2) 测量装置, 如传感器和测量仪表, 它感受或测量受控变量的值并把它变换为可以进行

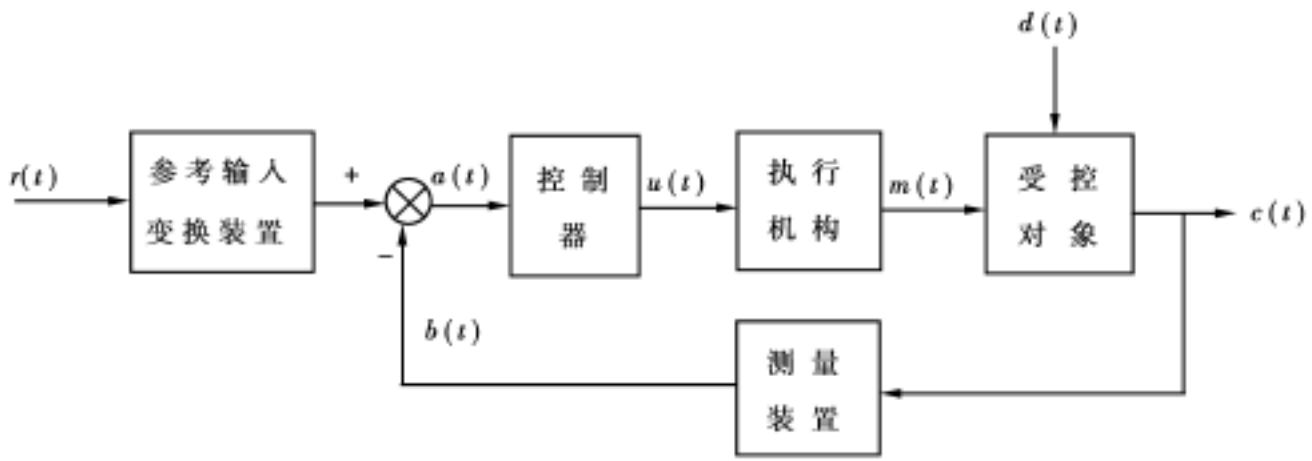


图 1.7 控制系统的构成

比较的信号。测量装置的输出信号是反馈信号 $b(t)$ 。

(3) 参考输入变换装置, 或称参考输入传感器, 有时也称给定装置。它的输入信号是受控变量的希望值。通常称为参考输入或指令输入或设定值, 记作 $r(t)$ 。它的作用是把参考输入变换为能和反馈信号 $b(t)$ 相比较(同量纲)的信号。

(4) 比较装置, 它比较参考输入变换装置的输出信号和反馈信号 $b(t)$ 。其输出为激励信号 $a(t)$ (或称偏差信号) 作为控制器的输入, 以产生校正误差的控制作用。由于比较装置中是减去反馈信号, 因此形成一个负反馈的系统。

(5) 控制器, 对其输入即激励信号 $a(t)$, 按一定规律进行处理, 产生控制信号 $u(t)$ 作为其输出信号。实际的控制器常常兼有参考输入传感器、比较装置与控制器的功能。

(6) 执行机构, 是能够影响受控过程的装置或设备, 例如电动机、气动控制阀等。通常, 为了能够影响受控过程, 必须把控制信号变换为具有一定功率的信号, 执行机构正是起这一作用的。它的输入信号为控制器的输出 $u(t)$, 其输出信号为受控过程的输入信号 $m(t)$, 常常称为操纵变量。

应当指出, 系统中某一部分本身可能就是一个具有反馈的系统, 例如, 一个复杂系统的执行机构本身, 可能是用带反馈或不带反馈的控制来实现的。在这个意义上, 这里讲的是“基本”的反馈控制系统的构成, 忽略了系统中的某些细节。

1.4 自动控制系统的分类和应用

自动控制系统的功能和组成多种多样, 因而自动控制系统有多种分类方法。按其工作原理可分为开环控制、闭环控制和复合控制; 按其数学模型可以分为线性系统和非线性系统, 非时变系统和时变系统; 按系统内部的信号特征可分为连续系统和离散系统; 也可按系统的功能分类, 如温度控制系统、位置控制系统等; 按系统装置类型可分为机电系统、液压系统和电气系统等; 按系统参考输入变化规律可分为伺服控制系统(也称随动系统或跟踪系统)、恒值控制系统和程序控制系统等。有关线性系统和非线性系统、非时变系统和时变系统、连续系统和离散系统的概念, 《信号与系统》课程已做了讲述。这里讨论控制系统按参考输入的分类。

控制系统的基本要求是使被控变量和参考输入保持一致, 参考输入反映了被控变量的要求。因此, 常按参考输入的特征对系统进行分类。

(1) 恒值控制系统: 系统的参考输入为零或为某一常值, 当系统受到各种干扰作用时, 该系统能使输出量与恒定的参考输入保持一致, 称恒值控制系统或恒值调节系统。常见到的有恒速、恒温、恒压等自动控制系统, 水位调节系统, 稳压电源, 导航稳定平台, 船舶稳定系统都属于这一类系统, 恒值控制系统在工业、农业、国防等部门有广泛的应用。

(2) 程序控制系统: 系统的参考输入按照预定的时间函数变化的控制系统, 称为程序控制系统。如数字程序控制机床, 热处理加热炉的炉温控制等。

(3) 随动控制系统: 又称伺服系统或跟踪系统, 这种系统中, 参考输入按照事先不知道的时间函数变化, 要求系统的输出以一定的精度和快速性跟踪参考输入变化。在很多情况下, 伺服系统专指被控量是机械位移(或位移、速度、加速度)的闭环控制系统, 即要求输出的机械位移(或转角)跟踪参考输入的位移(或转角)。伺服系统要求高精度的测量元件。伺服系统按所采用的执行机构的类型可分为机电伺服系统、液压伺服系统和气动伺服系统等。伺服系统最初用于船舶的自动驾驶、火炮控制和指挥仪中, 后来逐步推广到很多领域, 如带钢飞剪机控制系统, 天线位置伺服系统, 导弹和飞船的制导等。

各种类型的控制系统有着广泛的应用。

图 1.4 给出的炉温控制系统是一个恒值控制系统。该控制系统的控制功能是在各种干扰作用下, 维持炉温不变。图 1.8 给出的是一个调速系统工作原理图。控制任务是保持电机转速恒定。当电机负载加大或减小时, 电机转速下降或上升, 测速发电机输出电压变化, 与给定值 u_r 比较后, 偏差信号将增大或减小, 使电机电枢电压也跟着增大或减小, 从而使电机转速得到补偿, 而维持电机转速恒定。调速系统的方框图如图 1.9 所示。

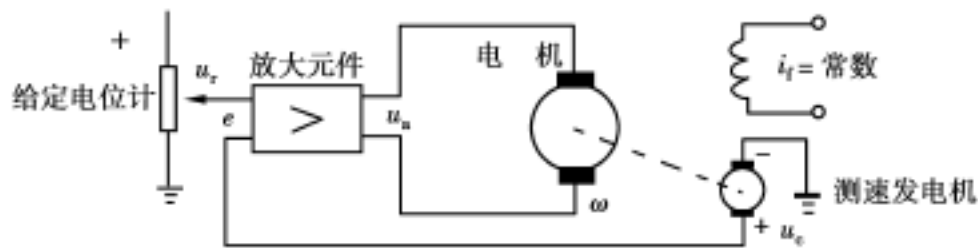


图 1.8 调速系统原理图



图 1.9 调速系统方框图

图 1.10 给出了一个位置伺服系统的工作原理图, 控制的任务要求工作机械和输入指令机构同步转动, 即要求工作机械输出角位置 θ_c 以一定的精度和快速性跟踪输入指令转角位置 θ_r 。在这个系统中, 控制对象是工作机械, 被控量是工作机械输出角位置 θ_c , 输入量是 θ_r , 测量装置是两个相同的电位计, 分别把转角 θ_c 、 θ_r 转换成电压 u_c 和 u_r , 其偏差信号经放大元件放大后送至执行机构, 驱动工作机械转动。双电位计结构实现测角和比较作用。位置伺服系统方框图如图 1.11 所示。

图 1.12 是一个火炮伺服系统原理图, 火炮伺服系统的任务是控制火炮跟踪空中目标, 以

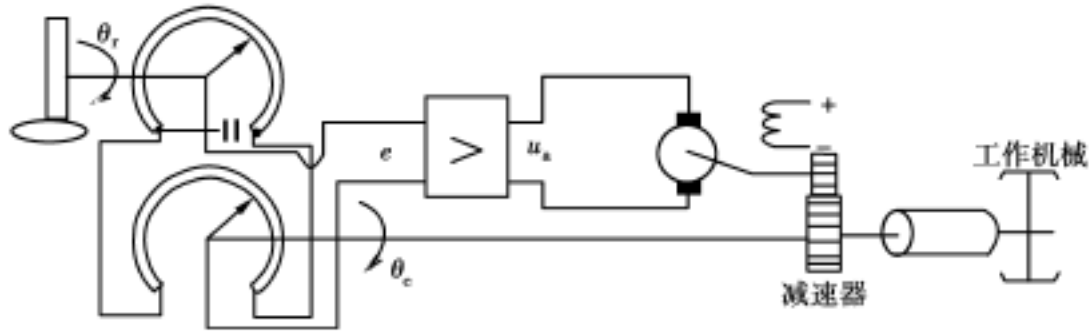


图 1.10 位置伺服系统工作原理图

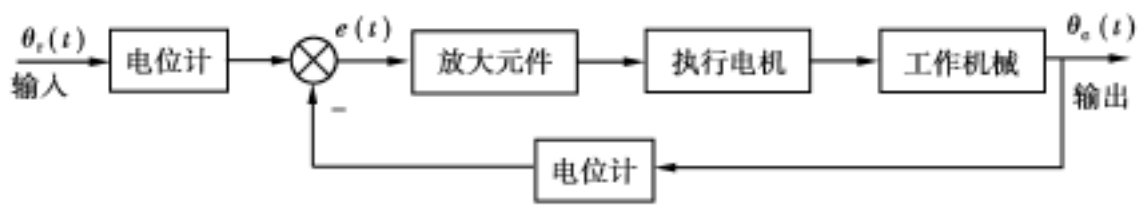


图 1.11 位置伺服系统方框图

便适时开炮, 并提高命中精度。图中一对自整角机组成测角线路, “ I ”为自整角发射机, 它的转子轴与系统的输入轴相固联; “ II ”为自整角接收机, 它的转子轴与火炮的转轴相固联, 此轴为系统的输出轴。这一对自整角机组成的测角线路, 测出系统的输入轴与输出轴之间的角度差, 并转换成相应的电压, 其电压的幅值与角度差成正比, 而输出电压的相位由差角的符号决定, 即

$$u_1 = K_1(\theta_r - \theta_c)$$

式中, K_1 是自整角机的传递系数, 单位是伏/密位或伏/度。电压信号 u_1 经交流放大、相敏检波、滤波、直流校正、放大后, 通过执行机构, 控制火炮的方位角和俯仰角以一定的精度和快速性跟踪输入信号 $\theta_r(t)$ 的运动。输入信号 $\theta_r(t)$ 是指挥仪根据炮弹的飞行弹道、空中目标的速度、高度、距离和飞行方位等数据, 计算出使炮弹能击中目标时 t 时刻火炮口应有的角度值, 火炮伺服系统的方框图如图 1.13 所示。为了提高火炮伺服系统的跟踪精度, 采用复合控制系统, 指挥仪引出的方位角信号 $\theta_r(t)$ 经前馈补偿装置产生前馈补偿信号送入放大器。

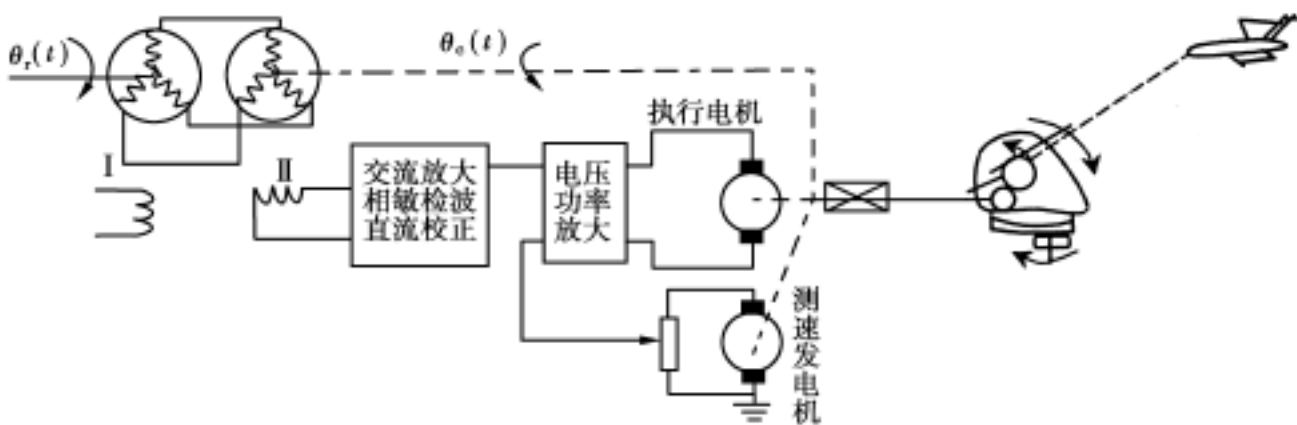


图 1.12 火炮伺服系统工作原理图

以表征生产过程的参数为被控量的自动控制系统称为过程控制系统。生产过程是指在生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用和转换过程, 表征过程的主要参数有温度、压力、流量、液位、成分、浓度等。相应的控制系统又称为温度控制系统、压力控制系统等。通过对过程参数的控制, 可使生产过程中产品的产量增加、质量提高和能耗减少。

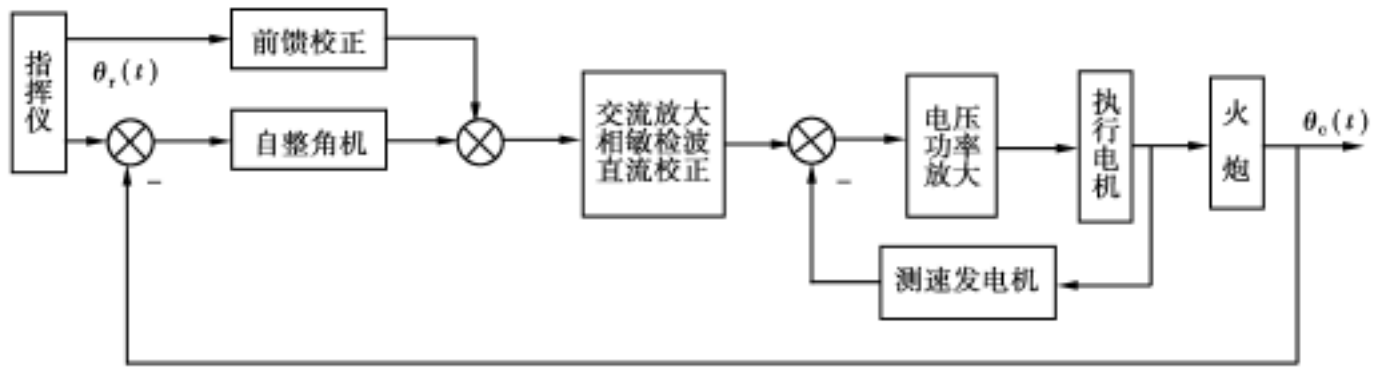


图 1.13 火炮伺服系统方框图

在实际生产过程中,往往有多个参数(被控量)需要控制,又有多个变量可以作为控制量。在很多情况下,被控量与控制量之间呈现出交互影响的关系,每个控制量的变化会同时引起几个被控量变化,这种变化间的交互影响称为耦合。耦合的存在会使过程控制系统变得复杂化。

过程控制在生产过程中有广泛的应用,当前出现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的多级计算机控制系统。

1.5 自动控制理论发展简史

自动控制理论是研究关于自动控制系统、分析和设计的理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。自动控制理论的任务是研究自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径,为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。

控制理论的形成远比控制技术的应用晚。古代罗马人家里的水管系统中应用按反馈原理构成的简单水位控制装置;我国和希腊古代都发展了包含反馈原理控制水流速度的水钟(“铜壶滴漏”);两千年前我们的祖先就发明了指南车;公元 1086—1089 年我国的苏颂和韩公廉发明了反馈调节装置——水运仪象台;大约在 1620 年 Drebbel 设计的鸡蛋孵化器是恒温控制的一个很好的反馈系统。但是直到 1787 年瓦特离心式调速器在蒸汽机转速控制上得到普遍的应用,才开始出现研究控制理论的需求。

1868 年,英国物理学家 J. C. Maxwell 在论文“论调节器”中首先解释了瓦特速度控制系统中出现的稳定问题,通过线性常微分方程的建立和分析,指出了振荡现象的出现同由系统导出的一个代数方程根的分布有密切的关系,开辟了用数学方法研究控制系统中运动的途径。此后,英国数学家 E. J. Routh 和德国数学家 A. Hurwitz 分别在 1877 年和 1895 年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。1892 年俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)用严格的数学分析方法全面地论述了稳定性问题, Lyapunov 稳定性理论至今仍然是分析系统稳定性的重要方法。

1927 年美国贝尔实验室的电气工程师 H. S. Black 在解决电子管放大器失真问题时首先引入反馈的概念。1925 年英国电气工程师 O. 亥维赛把拉普拉斯变换应用到求解电网络的问题上,创立了运算微积分,不久就被应用到分析自动控制系统的问题上,并取得了显著的成就。传递函数是在拉普拉斯变换的基础上引入的,描述线性定常系统或线性元件的输入输出关系的函数,是分析自动控制系统的重要工具。

1932年,美国物理学家 H. Nyquist 运用复变函数理论的方法建立了以频率特性为基础的稳定性判据。这种方法比当时流行的基于微分方程的分析方法有更大的实用性,也更便于设计反馈控制系统。Nyquist 的工作奠定了频率响应法的基础。随后, H. W. Bode 和 N. B. Nichols 等在 20 世纪 30 年代末和 40 年代初进一步发展了频率响应法。

在研究反馈放大器的同时,反馈控制在工业过程中也得到普遍应用。在这个领域中,受控过程的特性相当复杂,常常是非线性的,而且在执行器和传感器之间的信号传递有很大的时间滞后。此时,在实践中提出了比例-积分-微分控制,即所谓 PID 控制器,这种根据大量的实际经验和对系统动态的线性近似提出的方法,经过调试可获得满意的控制效果。在同一时期,由于用作测量飞机高度和速度的传感器的研制和开发,飞机的导航和控制装置也有很大发展。

第二次世界大战期间,军事科学的需要,如飞机驾驶、火炮控制系统、雷达天线控制系统等都大大促进了反馈控制理论的向前发展。美国麻省理工学院雷达实验室的工程师和数学家把反馈放大器理论, PID 控制以及 N. Wiener 的随机过程理论等结合在一起,形成了一整套称为随动系统的设计方法。

1948年,美国科学家 W. R. Evans 提出了有名的根轨迹的分析方法,并于 1950 年进一步应用于反馈控制系统的设计,形成了与频率响应方法相对应的另一核心方法——根轨迹法。20 世纪 40 年代末和 50 年代初,频率响应法和根轨迹法被推广应用于研究采样控制系统和简单的非线性控制系统。在这一时期,理论上和应用上所获得的成就,促使人们试图把这些原理推广到像生物控制机理、神经系统、经济及社会过程等非常复杂的系统,美国数学家 N. Wiener 在 1948 年出版的《控制论》具有重要的影响。

20 世纪 50 年代中期,空间技术的发展迫切要求建立新的控制理论以解决一类更复杂的控制问题。1956 年,前苏联科学家 L. S. Pontryagin 提出极大值原理。同年,美国数学家 R. Bellman 创立动态规划,极大值原理和动态规划为最优控制提供了理论工具。1959 年美国数学家 R. E. Kalman 提出了著名的卡尔曼滤波器,1960 年 R. E. Kalman 又提出能控性和能观测性的概念。到 20 世纪 60 年代初,一套以状态空间法、极大值原理、动态规划、卡尔曼滤波为基础的分析 and 设计控制系统的新理论和方法已经基本确定。

“经典控制理论”和“现代控制理论”这两个名词是 1960 年在第一届全美联合自动控制会议上提出的。在这次会议上把系统和控制领域中研究单变量控制问题的理论称为经典控制理论,研究多变量控制问题的理论称为现代控制理论。现在,一些学者对“经典”和“现代”的提法是否合适提出了意见。

按经典控制理论和现代控制理论的提法,经典控制理论是自动控制理论中建立在频率响应法和根轨迹法基础上的一个分支,它的研究对象是单输入、单输出的自动控制系统(单变量控制系统),特别是线性非时变系统。经典控制理论是以输入输出特性(主要是传递函数)为系统的数学模型,采用频率响应法和根轨迹法这些图解的方法,分析系统的性能和设计控制装置。现代控制理论可以说是建立在状态空间法基础上的一种控制理论,是自动控制理论的一个主要组成部分。在现代控制理论中,对控制系统的分析和设计主要是通过对系统的状态变量描述进行的,基本方法是时域方法。

20 世纪 60 年代,时域法在空间技术上获得了很好的效果,但是在工业控制系统中却遇到一些困难,其主要原因是难以得到控制对象的精确的数学模型,性能指标不能以确切的形式表达出来,而直接采用最优控制和最优滤波的综合方法所得到的控制器往往结构过于复杂,甚至