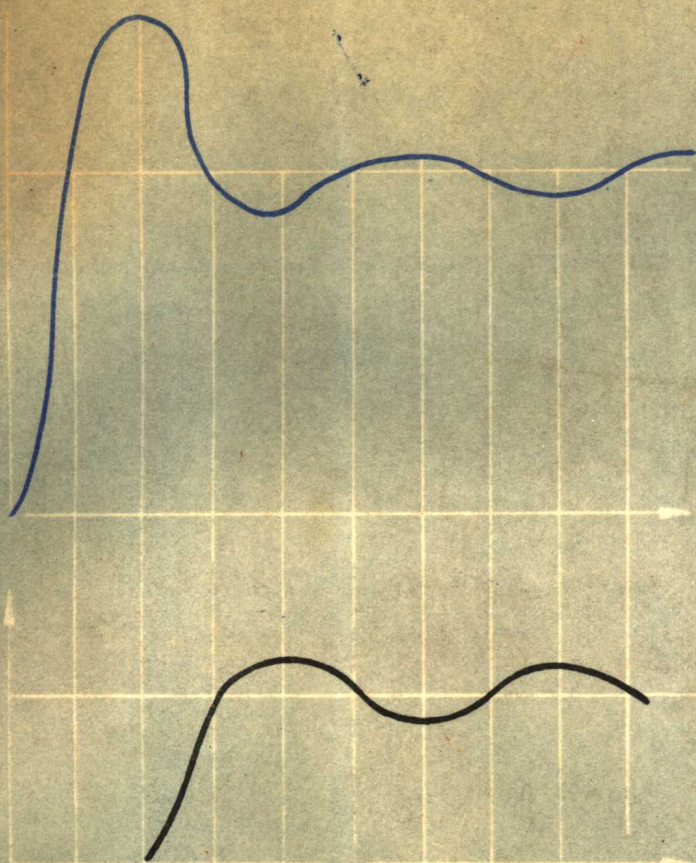




KONGZHI
LILUN
JICHU

北京航空学院 陈哲主编

控制理论基础

贵州人民出版社

控制理论基础

北京航空学院 陈 哲 主编

贵州人民出版社

责任编辑 黄绍琨
装帧设计 夏顺利
封面设计 谢元庆

控制理论基础

陈 哲 主编

贵州人民出版社出版, 发行
(贵阳市延安中路5号)

贵州省新华书店经销

贵州省地质矿产局区调队制印厂印刷

787×1092毫米 16开本 18印张 400千字

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数1—4000册

书号: 15115·174 定价: 3.40元

前 言

在科学技术应用于解决工程实际问题的发展过程中,自动控制理论起着很重要的作用。它已变成现代机器制造业和工业生产过程中不可缺少的组成部分。“控制理论基础”实质上就是将自动控制原理应用于解决各式各样工程实际问题的新兴科学。因此,它并不是单纯针对解决某门学科(如物理、化学、生物)或某类工程(如机械、电气、液压)的理论,而是从所有这些学科与工程问题中,抽象出共通的自动控制规律和理论,以指导科学实验与工程实践。

随着控制理论和实践的不断发展,在解决工程实际问题中,引起了从静态过渡到动态的质的飞跃,给人们提供了获得处理各类工程结构和系统动态特性最佳性能的方法;提高了产品质量,降低了成本,扩大了劳动生产率;同时,还使人们从繁重的体力劳动和复杂的手工操作中解放出来。因此,现代的工程技术人员和科学工作者,都必须具备一定的控制理论知识。

控制理论是在近四十年中形成和发展起来的,四十年代中到四十年代末,形成了经典控制理论,比较成功的解决了单输入-单输出问题。但是,对于五十年代后期出现的大型复杂的控制系统,例如宇航技术、导弹控制系统、火炮自动瞄准系统等多输入-多输出,高精度,参数时变系统的分析和设计问题,经典控制理论表现出一定的局限性。从五十年代开始,出现了现代控制理论并获得迅速发展。快速和微型数字电子计算机的出现,使现代控制理论进入了实用阶段。然而,现代控制理论并不能取代经典控制理论,这要看所需解决的具体工程问题,灵活选用。实际上工程实践中所遇到的大量课题是单输入-单输出的。因此,经典控制理论仍占有很重要的地位。世界上许多工业发达的先进国家,都很重视发展和应用控制理论,以用于加速国民经济的发展和国防工业的建设。

本书从工程实际出发,采用由浅入深的叙述方式,着重讲透分析和设计自动控制系统所必需的基础理论,不追求面面俱到,重在讲清基本概念;力求通过工程实例来阐述基本理论和应用方法;尽量避免冗长的公式推导与论证,以使工程问题的物理概念与数学方法作到有机的结合。同时也照顾到理论上的严格性与系统性,对现代控制理论主要介绍其数学基础、研究方法、可控性与可观测性等重要理论。为了帮助读者了解现代控制理论的发展,还概述了现代控制理论发展中的若干课题。

本书第一、八、十、十一、十二章由北京航空学院陈哲编写;第二、三章由西安公路学院邓起孝编写;第四、九章由扬州工专谢达荣编写;第五、七章由昆明工学院管前新编写;第六章由哈尔滨工业大学程述声编写。全书由副主编胡泽滋负责编纂与审校工作。昆明工学院袁子荣同志为本书的编写做了许多工作,在此表示感谢。

由于时间仓促,内容取材上难免不当,望读者批评指正。

编 者

1985年10月

内 容 简 介

本书从运用工程的观点出发,比较全面地阐述了自动控制的基本原理,重点分析经典控制理论,同时也简要地介绍了近十多年来发展起来的现代控制理论。全书共十二章,包括概述、拉氏变换、数学模型、时域分析、频率响应、根轨迹法、设计与校正、非线性系统、矩阵、状态空间法、可控性与可观测性及现代控制理论发展中的若干课题。

本书反映了本学科在科研和学术上的较新成就。书中所举例题及习题能与生产实际紧密结合,不局限于一般教材的基本内容,因此有较广泛的适应性。

本书可供从事机械、电气、化工、动力、矿冶等生产过程自动化的工程技术人员及有关自动控制领域科研工作者阅读参考;也可作为工科院校公共技术基础课教材。

目 录

前 言

第一章 自动控制系统概述	(1)
§ 1—1 引言	(1)
§ 1—2 自动控制系统的定义与分类	(3)
§ 1—3 控制系统的质量指标及其典型外作用	(9)
§ 1—4 控制系统的分析与设计问题概述	(11)
习 题	(12)
第二章 古典控制理论的数学基础——拉普拉斯变换	(13)
§ 2—1 引言	(13)
§ 2—2 拉普拉斯变换的定义与定理	(13)
§ 2—3 拉普拉斯反变换	(24)
§ 2—4 用拉普拉斯变换方法解线性微分方程	(29)
习 题	(33)
第三章 控制系统的数学模型	(35)
§ 3—1 引言	(35)
§ 3—2 传递函数	(40)
§ 3—3 传递函数方块图及其结构变换	(46)
§ 3—4 典型环节的传递函数	(52)
习 题	(56)
第四章 时域分析法	(59)
§ 4—1 引言	(59)
§ 4—2 系统的稳定性	(62)
§ 4—3 稳态误差分析	(66)
§ 4—4 一阶系统	(73)
§ 4—5 二阶系统	(76)
§ 4—6 高阶系统	(85)
习 题	(89)
第五章 频率响应法	(91)
§ 5—1 引言	(91)
§ 5—2 频率特性的基本概念	(91)
§ 5—3 典型环节的频率特性	(99)
§ 5—4 开环对数频率特性的绘制和实验确定法	(107)
§ 5—5 闭环对数频率特性的绘制	(113)

§ 5—6	奈魁斯特稳定判据	(118)
§ 5—7	频率域品质指标与时域指标的联系	(129)
	习 题	(134)
第六章	根轨迹法	(137)
§ 6—1	引言	(137)
§ 6—2	根轨迹方程	(140)
§ 6—3	绘制根轨迹的基本法则	(143)
§ 6—4	根据闭环零极点确定系统品质	(152)
	习 题	(159)
第七章	线性系统的设计和校正	(161)
§ 7—1	引言	(161)
§ 7—2	系统设计的一般问题	(161)
§ 7—3	串联校正	(163)
§ 7—4	反馈校正	(169)
§ 7—5	顺馈校正	(172)
§ 7—6	系统串联校正的设计	(175)
	习 题	(182)
第八章	非线性系统	(183)
§ 8—1	引言	(183)
§ 8—2	描述函数法	(186)
§ 8—3	相平面法	(193)
	习 题	(204)
第九章	现代控制理论的数学基础——矩阵	(206)
§ 9—1	引言	(206)
§ 9—2	矩阵的有关概念	(206)
§ 9—3	矩阵的基本运算	(211)
§ 9—4	凯莱-哈密尔顿定理	(224)
	习 题	(227)
第十章	状态空间法	(229)
§ 10—1	引言	(229)
§ 10—2	系统的状态空间表达式	(230)
§ 10—3	状态方程的解与状态转移矩阵	(238)
§ 10—4	传递矩阵与系统交连的解耦	(242)
	习 题	(247)
第十一章	线性控制系统的可控性与可观性	(249)
§ 11—1	引言	(249)
§ 11—2	可控性	(251)

§ 11—3 可观测性	(255)
§ 11—4 系统可控性及可观测性与传递函数零极点对消的关系	(257)
§ 11—5 极点配置	(260)
习 题	(264)
第十二章 现代控制理论发展中的若干课题	(266)
§ 12—1 引言	(266)
§ 12—2 现代控制理论发展中的若干课题	(266)
参考文献	(278)

第一章 自动控制系统概述

§ 1—1 引言

自动控制就是在没有人直接参加的情况下,利用控制装置使被控制的对象(如机器、设备或生产过程)自动地按照预定的规律运行或变化。自动控制技术已广泛地应用于工业、农业、交通运输、国防建设等部门。控制理论就是研究自动控制共同规律的一门技术科学,对这门学科的学习、应用与发展必将推动我国四个现代化的事业以更高的速度前进。

一、控制理论发展过程的历史回顾

通过对控制理论发展过程的了解,有助于我们认识科学技术的发展是如何促进了控制理论的形成与发展,而控制理论的发展和应用,又如何推动生产水平的提高,从而理解控制理论对科学技术的发展所起到的重大作用。

(一)早期的自动控制系统

控制理论与其他的任何学科一样,都是产生于生产与科学实验。

追溯自动控制技术的发展历史可以看到,我国是最早采用自动控制技术的国家。我国古代就发明了指南车,这是一种开环自动调节系统。公元1086—1089年(北宋哲宗元祐初年)我国又发明了水运仪象台,这是一种闭环自动调节系统^[1]。

随着科学技术与工业生产的发展,到了十八世纪,自动控制技术逐渐应用到近代工业中去。其中最卓越的代表就是在第一次工业革命中起到重大作用的,由詹姆斯·瓦特(James Watt)发明的蒸汽机离心调速器(在本章后面的例题中还要介绍)。从1786—1800年,瓦特的工厂共生产了五百多台蒸汽机,成为大工业发展的推动力,加速了工业革命的步伐。

然而在这一漫长的发展时期中,自动控制技术作为一门系统的理论性学科还远未形成。

(二)古典控制理论的发展与形成^[2]

1868年马克斯威尔(J.C.Maxwell)解决了蒸汽机调速系统中出现的剧烈振荡的不稳定性问题,提出了简单的稳定性代数判据。1895年劳斯(Routh)与古尔维茨(Hurwitz)把这种思想扩展到用高阶微分方程描述的更复杂系统,提出了两个著名的稳定性判据——劳斯判据与古尔维茨判据。当时的自动控制系统,主要是将被控制的输出量维持在某一常值,主要的设计准则是静态准确度和防止不稳定。上述理论基本上满足了二十世纪初期控制工程的需要。

到了第二次世界大战的前后,这种情况迅速地改变了。对自动控制系统的全程控制或伺服控制的要求;对控制系统的准确跟踪与补偿能力的要求;对系统静态准确度、特别是动态

准确度的要求都越来越高了。这就促进了控制理论的迅速发展。1932年奈魁斯特(H. Nyquist)提出了在频率域内研究系统的频率响应法, 提供了一个具有高质量的动态品质及静态准确度的国防控制系统所需要的分析工具。1948年伊万斯(W. R. Evans)提出了在复数域内研究系统的根轨迹法。由于这两项重大的贡献使控制理论发展的第一阶段基本上完成了。建立在奈魁斯特的频率响应法及依万斯的根轨迹法基础上的理论, 目前通称为古典控制理论。

控制论的奠基人维纳(N. Wiener)在1947年把控制论引起的自动化同“第二次工业革命”联系起来。我国著名学者钱学森将控制论应用于工程实践, 于1954年出版了《工程控制论》, 为控制理论的发展与应用做出了卓越的贡献。

这样, 在四十年代到五十年代中形成与发展的古典控制理论, 比较成功地解决了简单控制系统的分析与设计问题。古典控制理论的发展与应用使整个世界的科学技术水平有了巨大的飞跃。几乎在工业、农业、交通运输、国防建设的各个领域中都广泛地采用了自动控制技术。

(三) 现代控制理论的形成与发展

随着科学技术的飞速发展, 在五十年代末到六十年代初, 出现了核能技术、电子数字计算机以及航天技术等项现代技术革命。生产与科学实验的发展对控制系统提出了高速度 高精度的要求, 并出现了许多大型复杂的控制问题, 例如多输入-多输出系统、高速度 高精度系统及参数时变系统的分析与设计问题。这时古典控制理论的局限性就明显地暴露出来。在控制理论的发展上蕴育着一场新的变革。

1962年卡尔曼(Kalman)在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法, 从而使现代控制理论在六十年代迅速地发展起来。由于采用了状态空间法, 这就为在时间域内对各种(诸如非线性系统、时变系统、多变量系统等)复杂系统进行研究提供了有效的工具, 并且便于实现最优控制与实时控制。但是, 由此使分析与设计中产生了广泛的费时的计算。所以, 现代控制理论的这一新发展恰好出现在高速、小型电子计算机已相当普遍的时候, 这绝非偶然。

标志着控制理论这一新阶段的几项重要的科研成果是: 线性系统的可控性与可观测性; 极值控制中的极大值原理; 最小方差递推滤波等。目前现代控制理论在许多方面已开始进入应用阶段; 但在许多领域中还有许多尚未解决的问题, 例如最优控制、系统辨识等。

二、控制理论的两个组成部分

控制理论包括古典控制理论与现代控制理论两个组成部分。下面分别给出它们的定义及研究方法。

(一) 古典控制理论

古典控制理论是以拉普拉斯变换为数学工具, 在频率域或复数域内进行单输入-单输出系统的分析与设计的一种理论。它的研究方法是传递函数法。

(二) 现代控制理论

现代控制理论是以矩阵为数学工具, 在时间域内对多输入-多输出系统、时变系统等复杂系统进行分析与设计的一种理论。它的研究方法为状态空间法。

尽管古典控制理论具有一定的局限性, 也尽管高速、微型计算机的出现使现代控制理论逐渐进入应用阶段, 然而现代控制理论并不能取代古典控制理论。工程技术中的大量问题仍然要用古典控制理论来解决。科技人员应善于根据实际情况具体分析, 灵活选用。

本书的宗旨在于使初学者能在较少的学时中掌握控制理论的最基本知识。由于目前在工程实践中广泛应用的还是古典控制理论, 而且它又是掌握现代控制理论的基础, 因此本书的重点在于介绍古典控制理论, 使初学者能达到既会分析又会设计的效果。至于现代控制理论, 本书将以线性定常系统为对象, 介绍现代控制理论的基本概念、研究方法及系统分析与设计中的一般问题。对于现代控制理论中的主要课题, 本书将在最后一章中做概述性的介绍, 使读者对其能有个入门性的了解。

§ 1—2 自动控制系统的定义与分类

一、关于自动控制系统的感性认识

为了使初学者对自动控制系统能有个感性认识, 我们先来举二个控制实例。

例1—1 人工控制的电阻丝加热炉

在工业生产过程中常需要对零件或产品进行烘干或热处理等工序, 这项工作可以借助于电阻丝加热炉来完成。图1—1示出了一种人工控制的电阻丝加热炉。图1—1(a)为电炉的工作原理简图。在电炉内插入一只指示炉温的温度计。操作员不时地用眼睛观测温度计的示数, 并将这一信号送入大脑。大脑将这一实测温度与事先预定的理想控制温度进行对比。如果实测温度低于预定温度, 大脑就给手下达指令, 合上开关 K 。加热电阻丝接通电源, 对电炉加热, 炉温就会上升。如果实测温度高于预定温度, 大脑给手下达指令断开开关 K , 电阻丝停止加热, 炉温就会下降。这样操作员就需要在电炉旁进行观测温度与进行开关电源的操作。将这一控制过程用原理方块图表示出来, 如图1—1(b)所示。原理方块图中用方框表示系统中的各个组成部分, 并在方框中注明该部分的名称或功

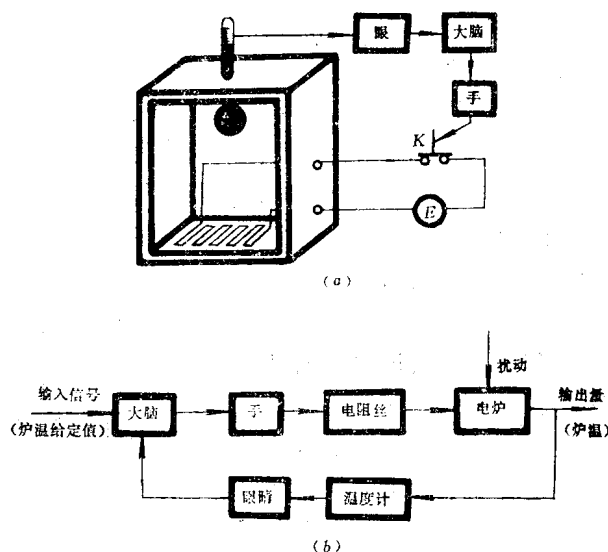


图1—1 人工控制的电阻丝加热炉

(a) 工作原理图 (b) 方块图

能，用一根带箭头的线表示信号的传递。

例1—2 自动控制的电阻丝加热炉

如果电炉的温度采用自动控制，其工作原理简图如图 1—2 (a) 所示。电阻丝线圈的通断由接触式水银温度计控制。水银温度计的两个触点 a 和 b 接在常闭继电器的线圈电路中。调整触点 a 的位置可以改变炉温的预定值。当触点 b 低于触点 a 时，继电器不工作，开关 K 接通（常闭），电阻丝对电炉加热，炉温上升；当触点 b 与 a 接通时，继电器工作，将开关 K 吸开，电阻丝停止加热，炉温下降，这样就把炉温控制在预定值附近。上述的控制过程可用图 1—2 (b) 的原理方块图表示。

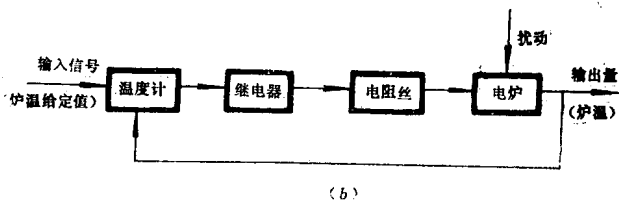
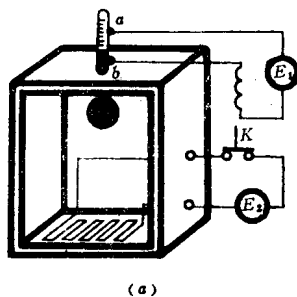


图1—2 自动控制的电阻丝加热炉

(a) 工作原理图 (b) 方块图

比较例1—1与1—2的原理方块图可知，人工控制时温度计、人眼、大脑的功能在自动控制时由带有 a 、 b 两个触点的水银温度计来完成，而手的作用则由继电器来完成。这样，采用电炉炉温自动控制系统便可代替操作人员紧张、繁忙而又十分单调的劳动。

二、自动控制系统有关术语的定义

下面介绍自动控制系统中常用的术语。

1. 自动控制系统：能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统叫做自动控制系统。它一般由控制装置和被控制对象组成。例如图 1—2 (b) 所示的原理方块图就可以抽象为图1—3的典型方块图。

2. 被控制对象或简称对象：被控制对象或对象是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程，例如加热炉、化学反应塔、机床或飞行器等。

3. 控制装置：控制装置是指对被控制对象起控制作用的设备的总体。

4. 过程（也叫被控制量或输出量）：任何被控制的运行状态叫做过程（也叫做被控制量或输出量），如加热炉的温度状态、飞行器的工作状态等。

5. 给定值或称给定信号：被控制量需要达到的数值称为系统的给定值或给定信号。

6. 扰动（或干扰）：扰动是一种对输出产生相反作用的信号。如果扰动产生于系统的内部则称为内扰；扰动产生在系统的外部称为外扰。外扰是系统的输入量。

7. 输入量：泛指输入到自动控制系统中的信号，包括给定值和外扰。通常直接把系统的给定值称为输入量。

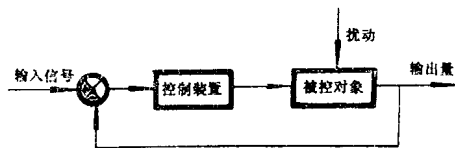


图1—3 闭环控制系统典型方块图

8. 反馈：把对象的输出量馈送到输入端，并与输入量进行比较的过程称为反馈。当与输入量比较取负值时称为负反馈；反之则称为正反馈。在控制系统中主要应用负反馈。
9. 偏差：入量反馈量之差称为偏差。
10. 反馈控制：按偏差进行控制叫做反馈控制。
11. 反馈回路：把被控量取作反馈信号从右向左引向输入端的通道称为反馈回路。
12. 前向回路：从给定元件到被控量从左到右的通道称为前向回路。

三、自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法很多，下面介绍三种分类方法。

（一）按照系统的结构特点分类

按照系统的结构组成方式可以将系统分成如下几类。

1. 开环控制（开环控制）系统：开环控制系统是指在控制系统中只有前向回路而没有反馈回路的系统。

例1—3 开环控制的电阻丝加热炉

图1—2所示的电阻丝加热炉是带反馈回路的闭环控制系统；电阻丝加热炉也可以采用开环控制，如图1—4所示。图中开关 K 的接通、断开时间一般是参照在正常情况下使炉温达到预定温度的经验数据来确定。系统的每一个输入信号（给定温度）必与一个固定的工作状态（一定的接通断开时间）和一个系统的输出量（实际炉温）相对应。这种系统不具有修正由于扰动而使被控量偏离给定值的能力。由于开环系统的抗干扰能力差，因此其使用有一定的局限性。

2. 闭环控制（反馈控制）系统：闭环控制系统是指在系统中包含反馈回路的系统。图1—2所示的炉温控制系统就是闭环控制系统。

闭环控制系统一般都由以下几种基本元件或装置所组成。

（1）测量元件：对系统的输出量进行测量的元件叫做测量元件或敏感元件，如图1—2中的温度计。

（2）比较元件：对系统的输出量与给定信号进行代数运算，起信号综合作用的元件叫做比较元件。这个作用往往由测量元件及比较元件共同完成；有时一个元件同时完成测量与比较的作用，如图1—2的接触式水银温度计。通常把测量元件与比较元件的总体统称为误差检测器。在以后的方块图中常把比较元件或误差检测器用 $\rightarrow \otimes \leftarrow$ 来表示。○表示信号的

合，“—”或“+”号表示相加或相减。通常“+”号可略去不写。

（3）放大元件：对微弱的偏差信号进行放大和变换，输出足够的功率和要求的物理量

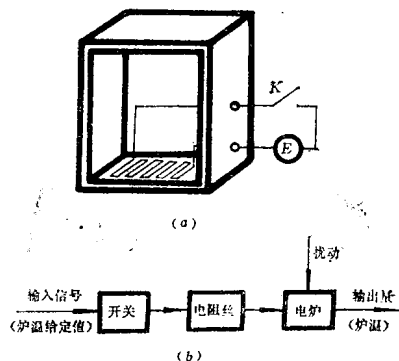


图1—4 开环控制的电阻丝加热炉

的元件叫做放大元件。

(4) 执行机构：根据放大后的偏差信号，对被控对象执行控制任务，被控制量与给定值趋于一致的装置叫做执行机构。例如图1—2中的加热电阻丝就是执行机构。

(5) 被控对象：前面已定义，如电炉。

(6) 校正装置：其参数与结构便于调整，用于改善系统性能的装置叫做校正装置。通常分串联校正装置与反馈校正装置两种。

典型的闭环控制系统的基本组成可由图1—5所示的方块图表示。

将闭环控制系统与开环控制系统相比较可以看出它们各自的优缺点。开环控制系统具有结构简单、成本低廉、工作稳定等优点，特别是当系统的输入预先知道且不存在扰动时，使用开环系统具有一定的优越性。但由于它不能自动修

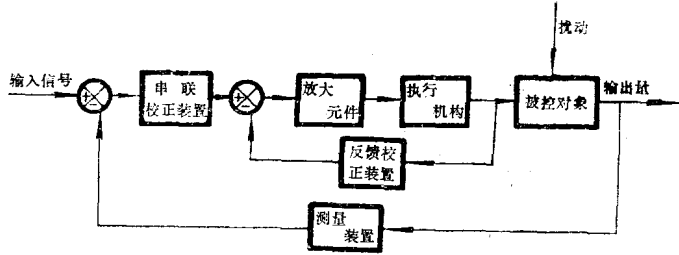


图 1—5 闭环控制系统的基本组成

正被控量的偏差，所以当元件的参数发生变化以及外界扰动引起的误差对控制精度的影响较大时，一般不采用开环控制。而闭环控制则具有自动修正被控量偏差的能力，因此可以修正元件参数变化以及外界扰动引起的误差，其控制精度较高；但由于引入负反馈，系统可能产生振荡，甚至无法工作，这就提出了系统的稳定性问题。这是控制系统设计中必须解决的一个重要课题。

3. 复合控制系统：复合控制就是将开环控制与闭环控制相结合的一种控制方式。采用复合控制的系统叫做复合控制系统。复合控制就是在闭环控制的基础上，用开环通路提供一个附加的输入作用，以提高系统的控制精度和动态性能。开环通路通常是由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置所组成，分别称为按输入的补偿和按扰动的补偿，如图1—6所示。详见第七章。

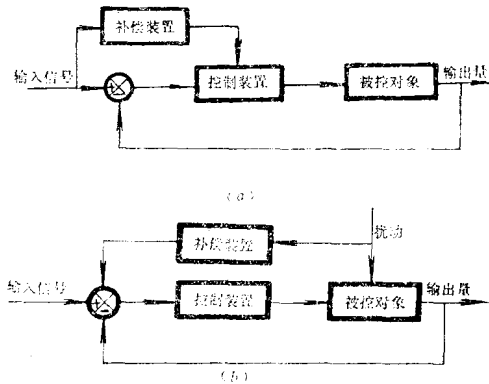


图 1—6 复合控制方块图

(二) 按照系统的数学模型分类

将被控对象、执行机构及系统中一切元件的运动规律（运动规律是指它们在一定条件下所必然产生的相应运动）用数学形式表达出来就得到数学模型。数学模型就是控制系统运动规律的数学描述。对于单变量系统，只取一个变量 y ，就可以描述这个系统对时间的函数 $y(t)$ ，即系统在某时间过程中的运动状态。通常 $y(t)$ 的规律用微分方程来描述。根据微分方

程的形式可以对系统进行分类。

1. 根据 $y(t)$ 及其各阶导数的次数可将系统分为线性系统和非线性系统。例如 $m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = 0$ 是线性系统；而 $\ddot{y} + y\dot{y} + y^2 = 0$ 则为非线性系统。

2. 根据 $y(t)$ 及其各阶导数的系数是否随时间变化可将系统分为定常系统和时变系统。例如 $a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_0 y = 0$ ，其中 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ 都是实常数，它所描述的系统为线性系统；而 $y + k(at)y = 0$ 所描述的系统则是时变系统。

3. 根据 y 的自变量的个数为1还是大于1，系统的微分方程可分为常微分方程和偏微分方程两种，则它们所描述的系统分别为集中参数系统和分布参数系统。前面所列举的只有一个时间自变量的系统都是集中参数系统；而偏微分方程 $a(x) \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial t^2} + b(t) \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial x^2} = u(t)$ 所描述的系统为分布参数系统。

4. 根据系统的数学模型是用连续的微分方程来描述还是用离散的差分方程来表示，可以将系统分为连续型系统和离散型系统两种。前面列举的例子都是连续型系统；而用差分方程，如 $x_{k+1} = ax_k$ 描述的系统则为离散型系统。当应用数字计算机对系统进行实时控制时，需要将连续型系统化为离散型系统。

不同数学模型的系统，其研究方法也不同。本书在古典控制理论部分只研究单变量集中参数的连续型线性定常系统及简单的非线性系统。而在现代控制理论中只研究多变量集中参数的连续型线性定常系统。

(三) 按照系统的任务分类

按照控制系统所完成的任务的不同可将其分为如下几类。

1. 自动镇定系统（定值控制系统）：系统的输入即给定值是常值或随时间缓慢变化的量，系统的任务是在存在扰动的前提下，使输出的被控量保持在给定值上，这种系统叫做自动镇定（定值控制）系统。前面所举的炉温自动控制系统就属于这类系统。

例1-4 瓦特调速器

图1-7示出了本章前言中提到的蒸汽机上的瓦特调速器的工作原理简图。进入蒸汽机气缸中的蒸气量可根据蒸汽机的希望转速与实际转速的差值自动地进行调整。

首先根据希望的转速调整给定值。如果实际转速低于希望的转速，调速器的离心力下降，控制阀上升，进入的蒸气量增加，转速随之上升，直至到希望的转速值为止；反之，若转速高于希望转速，调速器的离心力增大，控制阀下移，从而减少了蒸气量，转速随之下降，直至下降到希望转速为止。显然离心调速器是自动镇定系统。

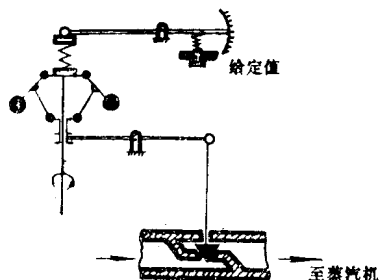
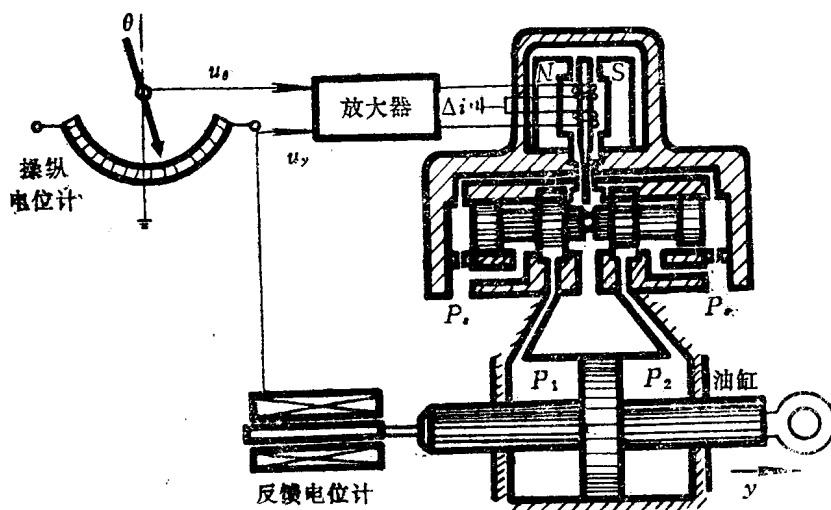


图1-7 离心调速器的工作原理图

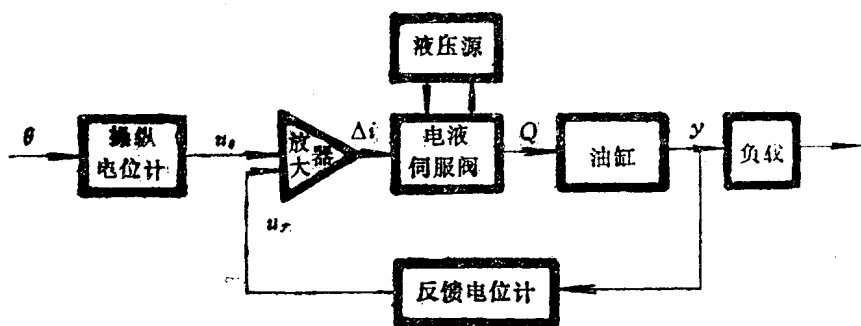
2. 随动系统（伺服系统）：系统的输入即给定值是任一随时间变化的函数，而且事先无法预知其变化规律，系统的任务是保证输出的被控量能以一定的精度跟随输入的变化，这种系统叫做随动系统（伺服系统）。例如跟踪敌机的火炮随动系统就属于这类系统。

例1-5 电液伺服阀

在现代飞机、导弹及机床工作台等控制系统中大量地使用了电液位置伺服系统,如图1—8 (a)所示。当随意旋转操纵电位计, 给出一个与 θ 角成比例的电压信号 u_θ 时: u_θ 经放大器放大, 输入到电液伺服阀一个电流信号 Δi , 使得原来处于平衡状态的衔铁与挡板组件发生偏转, 产生喷嘴与挡板间的前置压差, 推动滑阀离开中立位置, 电液伺服阀输出流量 Q , 高压油进入油缸, 活塞带动负载产生位移 y 。与此同时, 反馈电位计产生与活塞位移 y 成比例的反馈电压 u_y , 并保证 u_θ 与 u_y 相减。这时伺服阀的输入电压就不是原来的 u_θ , 而是 $\Delta u = u_\theta - u_y$, Δu 为偏差信号。 Δu 随着 y 的增大而减小, 直到活塞运动到使 $u_y = u_\theta$ 的位置时, $\Delta u = 0$, 滑阀回到中心位置, 油路重新被切断, 活塞停止运动。这样 y 就随 θ 而变化。图1—8 (b) 示出了电液位置伺服系统的原理方块图。



(a)



(b)

图1—8 电液位置伺服系统图

(a) 工作原理图 (b) 原理方块图

3. 程序控制系统: 输入量的变化是一个已知的函数关系, 系统的任务就是使输出按一定精度随输入而变化, 这种系统叫做程序控制系统。

例1-6 数控机床

图1—9示出了数控机床的原理方块图。根据对工件 p 的几何形状的要求，在纸带上进行二进制编码。纸带上的信息通过读出器送进系统。输入调频脉冲与反馈脉冲进行比较，随后

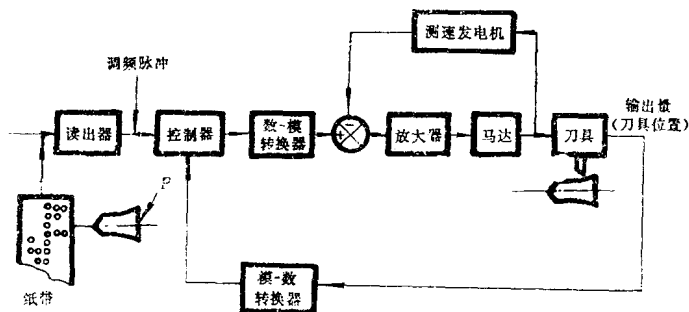


图1—9 数控机床的原理方块图

与输入脉冲信号进行比较，控制器根据脉冲信号的差值进行数学运算。如果存在这个差值，便有信号电压输至伺服马达，以减小这一差值。图中的测速发电机是为了改善系统的性能而设置的校正装置。

4. 过程控制系统：当自动控制系统的输出量是温度、压力、流量、液面或氢离子浓度等一些变量时，这种系统叫做过程控制系统。程序控制系统就是其最常见的一种。

5. 计算机控制系统：由于数字计算机的飞速发展，它的强大的计算能力、信息处理能力以及实时控制能力为自动控制系统的发展开辟了广阔的前景。最佳控制系统、自适应控制系统以及自学习控制系统的出现与发展使得控制系统能够高质量地完成更复杂的控制任务。这方面的内容将在第十二章中概述。

§ 1—3 控制系统的质量指标及其典型外作用

一、控制系统的质量指标

评价一个系统的指标往往是多种多样的，如经济指标、强度指标、动态指标、稳态指标、抗干扰能力等。下面主要研究与控制系统运动规律有直接关系的部分，主要包括以下几点。

1. 控制系统的稳定性：稳定性是描述系统建立或保持系统平衡状态难易程度的指标。系统的稳定性要求是最基本的质量指标。

2. 控制系统的准确性：准确性是描述控制系统工作精度的指标，它可由系统的希望输出量与实际输出量之差来表示。

3. 控制系统的快速性：快速性是描述控制系统被调量复现给定量快慢程度的指标。我们希望系统的动态过程时间短一些，如果出现振荡，则振荡的振幅小一些，振荡的次数少一些，使被控量尽快复现给定的输入量。

上述的稳定性、准确性和快速性要求（可以归纳成“稳”、“准”、“快”三个字），在古典控制理论中构成了最主要的质量指标。

4. 一般积分泛函指标：在现代控制理论中为了实现最佳控制，往往提出一般积分泛函指标（又叫目标函数） J 作为质量指标。最佳控制就是求取使 J 为最小值（或最大值）的控