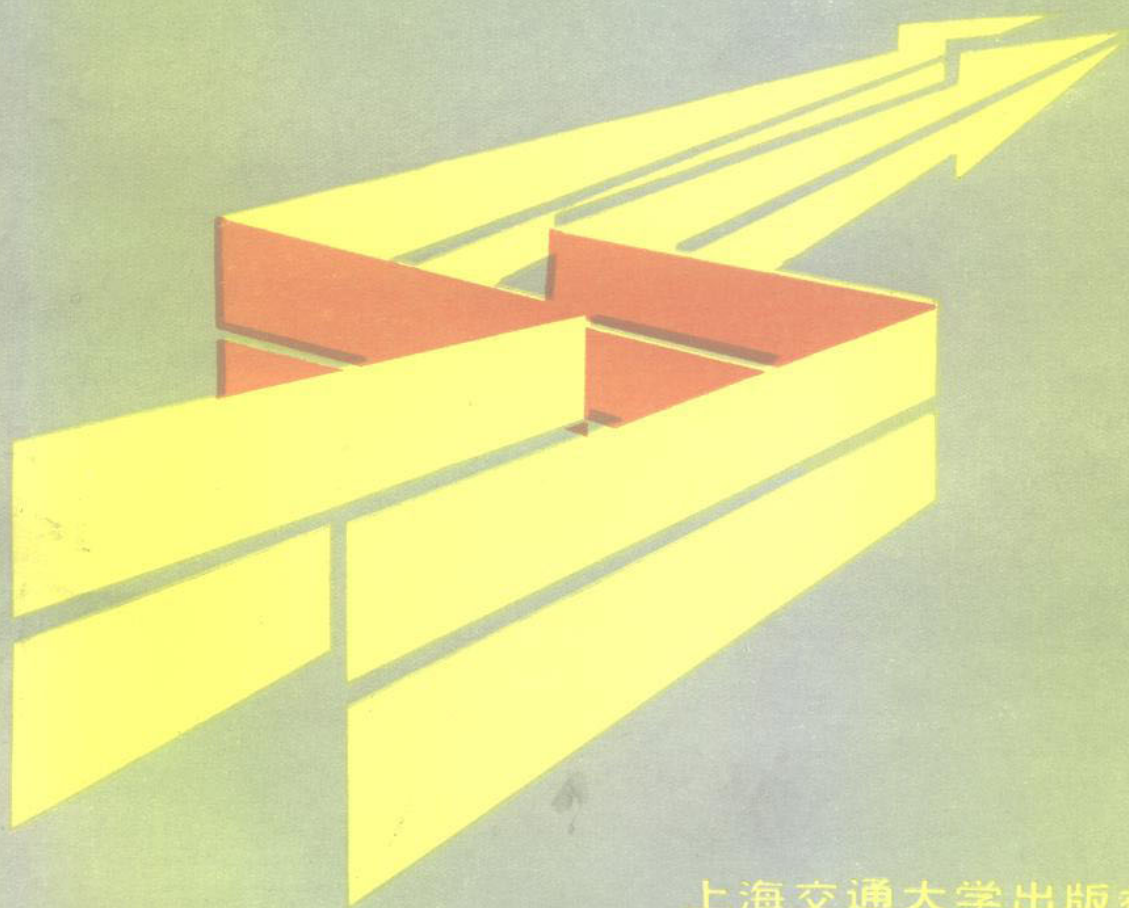


GONG CHENG  
KONG ZHI LI LUN

---

# 工程控制理论

田作华 柴国芬 陆中群 编



上海交通大学出版社

# 工 程 控 制 理 论

田作华 柴国芬 陆中群 编

工  
程  
控  
制  
理  
论  
山

上海交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍工程中自动控制系统的基本原理及其分析、设计的方法。该书在内容的收集和编排上较传统的教科书相比作了较大地变动,以适应目前科学技术的发展。全书共分三部分:前六章主要介绍反馈控制系统的基本原理、物理系统在不同域中数学模型的建立及其性能分析、系统校正等内容;第七章为计算机控制系统;第八章介绍了专家系统初步及其在工程控制中的应用。书中每章均附有例题和习题。

本书可作为高等院校电类非自控专业的必修或选修教材,也可供有关专业教师、科技人员和学生的自学参考。

### 工程控制理论

出 版:上海交通大学出版社  
(淮海中路 1934 弄 19 号)

发 行:新华书店上海发行所

印 刷:常熟市印刷二厂

开 本:787×1092(毫米)1/16

印 张:20.5

字 数:498000

版 次:1991年1月 第一版

印 次:1991年2月 第一次

印 数:1—2500

科 目:239—279

ISBN 7—313—00791—7/TB·1

定价: 4.10 元

# 前言

自动控制是技术改造和技术发展的重要手段,是当代大工业的核心,也是近代技术革命的重要内容。所以,在自动控制这个领域内,无论是理论还是实践方面,都受到人们的极大关注。近些年来,计算机技术的广泛普及和应用,大大地促进了工程控制理论的进步。为了更好地适应社会主义现代化建设的需要,我们本着“加强基础,由浅入深,削枝强干,逐步更新”的指导思想,对原来的《自动控制理论与应用》教材的内容形式与结构编排作了较大的变动,其整体框架如图1所示。

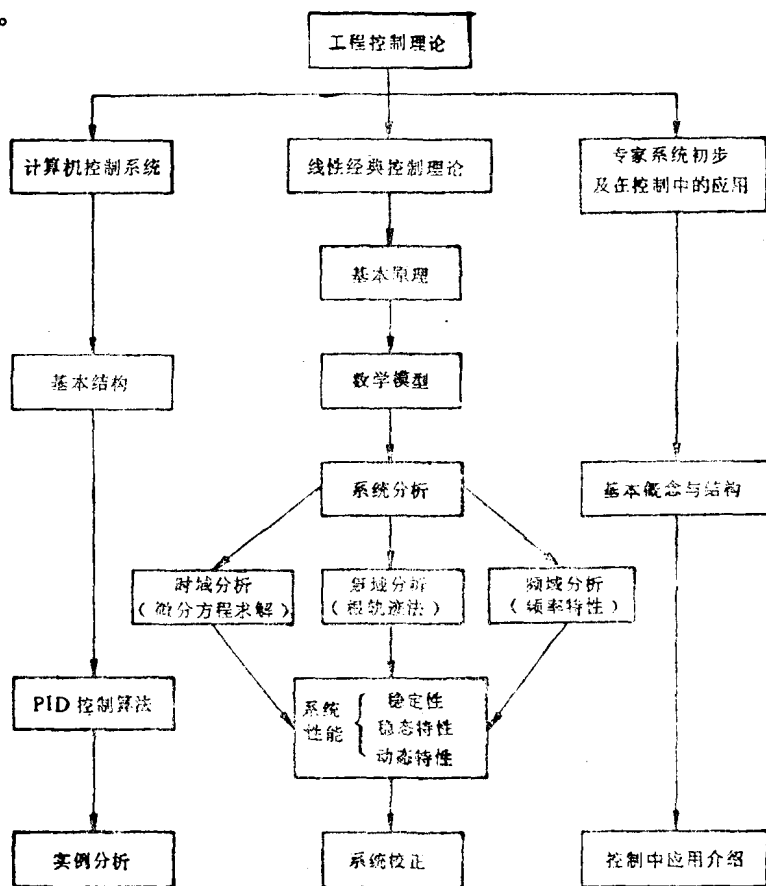


图1

在本书的编写过程中,我们力求突出下面的一些特点。

1. 线性经典控制理论部分:抓住两条线。第一条线是结合数学模型,讲清工程上实际求解与数学上理论计算之间的内在联系与区别。具体地说,就是要搞清楚如图2所示的几种数学模型之间的相互关系。

这里重点说明了,对于一个具体的系统,人们可以根据对象的特点、工程的要求、求解的方便及本人的习惯,人为地建立各个不同域中的数学模型,如时域中的数学模型——微分方程,

复域中的数学模型——传递函数或频域中的数学模型——频率特性，这些数学模型之间存在着严格的数学变换关系。学习中，所有问题的分析与求解都是建立在数学模型基础上的。所以，学会建立系统的精确模型，掌握各种模型之间的特点与内在联系，对一个工程控制人员来说是至关重要的。我们认为，加深对这条线的理解，能使学习者统观全局，树立一个“纵向”的思路。

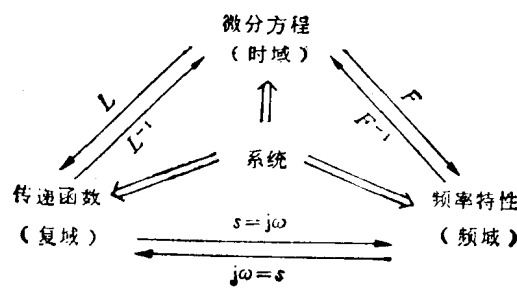


图 2

第二条线是掌握系统分析的三要素：稳定特性、静态特性和动态特性，具体地说，就是要弄清楚如表 1 中所涉列的内容。

表 1

| 数学模型 | 时域[t]                                       | 复域[s]                                                       | 频域[ω]<br>频率特性——频率法(以伯德图为例)                               |
|------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 性能分析 | 微分方程——数学求解                                  | 传递函数——根轨迹法                                                  |                                                          |
| 稳定性  | 系统特征方程的根具有负实部，则系统稳定                         | 闭环传递函数的极点全部位于s平面的左边，则系统稳定                                   | 相位裕量 $\gamma > 0$ ，则系统稳定                                 |
| 稳态特性 | 增大系统的开环放大系数 $K$ ，系统的稳态误差 $e_{ss}$ 将减小       | 系统工作点处的开环根迹增益 $K_1$ 越大，稳态误差 $e_{ss}$ 将越小                    | 取决于系统开环伯德图低频段的特性                                         |
| 动态特性 | 系统的过渡过程时间 $t_s$ 小，超调量 $\sigma_p\%$ 小，则动态特性好 | 主要取决于系统主导极点的位置，具体指标为系统的无阻尼自然振荡频率 $\omega_n$ 和阻尼比 $\zeta$ 等。 | 取决系统伯德图中频段的特性，具体指标为开环增益剪切频率 $\omega_c$ 和相位裕量 $\gamma$ 等。 |

表 1 是系统分析的基础，是衡量一个系统好坏的重要标志，也是对系统进行校正的主要依据，抓住这条线，就是抓住了系统分析改造的关键，有利于学习者建立一个“横向”的思路。

2. 计算机控制系统部分：在学习了计算机原理和模拟的 PID 调节理论上，着重介绍数字 PID 的控制算法及其在实际控制系统中的实现技术，并通过具体实例的分析，使读者能独立地设计一般的计算机控制系统。

3. 专家系统初步及在控制中的应用部分:专家系统是人工智能成功运用的突出范例,究其基本思想,从本质上来说,即学会编制含有人类“智能”的计算机程序。在实际工业控制中,将理论的、实际的知识、窍门、经验,“巧妙地”运用到控制中去,能“根据不同的对象选择不同的控制策略,根据不同的情况,采用不同的控制参数”,对解决复杂系统的建模、控制有着独特的优越性。为此,要力求全面深入地理解图3所示的基本结构、功能和内在联系。

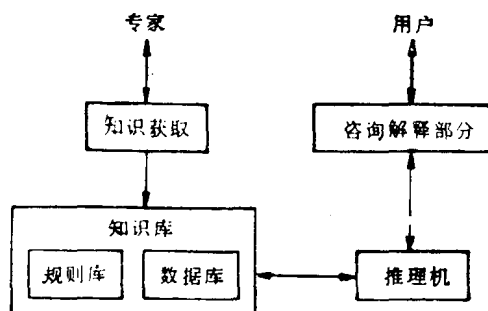


图3

本书的原稿曾作为上海交通大学电类非自控专业讲授《自动控制技术》等相近课程的讲义,在使用过程中,编者进行了多次修改、充实和整理,使之更趋于合理和完善。

参加本书编写工作的有田作华(第一、二、四、六、八章)、柴国芬(第三、五章)、陆中群(第七章)。全书由田作华主编,陆中群校核。在编写过程中,曹梅芬、徐永才等同志做了许多工作,在此谨致衷心的感谢。

本书的整体结构内容及其编排方式,是一种初步的尝试,肯定有不少错误和不当之处,殷切地期望广大读者批评指正。

1989.4 于上海

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 前 言                        | I  |
| 第一章 自动控制的基本原理              | 1  |
| § 1-1 引言                   | 1  |
| § 1-2 自动控制系统的工作原理及其组成      | 3  |
| § 1-3 自动控制系统的分类            | 6  |
| 一、按信号的传递路径来分               | 6  |
| 二、按系统输入信号的变化规律不同来分         | 8  |
| 三、按系统传输信号的性质来分             | 8  |
| 四、按描述系统的数学模型不同来分           | 9  |
| 习题一                        | 10 |
| 第二章 控制系统的模型                | 11 |
| § 2-1 控制系统中常用的几种数学模型及其内在联系 | 11 |
| 一、时间域中的数学模型——微分方程          | 11 |
| 二、复数域中的数学模型——传递函数          | 12 |
| 三、频率域中的数学模型——频率特性          | 14 |
| 四、控制系统三种数学模型的内在联系          | 15 |
| § 2-2 典型环节及其数学模型           | 17 |
| § 2-3 控制系统的图模型——方块图        | 25 |
| § 2-4 控制系统图模型的另一种形式——信号流程图 | 31 |
| 一、几个定义                     | 31 |
| 二、信流图的性质及运算法则              | 32 |
| 三、控制系统的信号流程图               | 32 |
| 四、梅逊公式                     | 33 |
| 习题二                        | 35 |
| 第三章 控制系统的时域分析              | 41 |
| § 3-1 概述                   | 41 |
| § 3-2 控制系统的稳定性             | 43 |
| 一、稳定的概念和定义                 | 43 |
| 二、劳斯稳定判据                   | 44 |
| § 3-3 控制系统的稳态误差            | 48 |
| 一、稳态误差                     | 48 |
| 二、动态误差系数                   | 52 |
| 三、由扰动引起的稳态误差               | 54 |
| 四、提高系统稳态精度的方法              | 55 |

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| § 3-4 控制系统的瞬态响应 .....                           | 56  |
| 一、一阶系统的瞬态响应 .....                               | 57  |
| 二、二阶系统的瞬态响应 .....                               | 57  |
| 三、欠阻尼二阶系统参数 $\zeta$ 、 $\omega_n$ 与性能指标的关系 ..... | 60  |
| 四、高阶系统的瞬态响应 .....                               | 63  |
| 五、用数字计算机计算控制系统的响应 .....                         | 66  |
| 习题三 .....                                       | 68  |
| <b>第四章 控制系统的复域分析——根轨迹法</b> .....                | 73  |
| § 4-1 根轨迹法 .....                                | 73  |
| 一、根轨迹的基本概念 .....                                | 73  |
| 二、根轨迹的特性 .....                                  | 75  |
| 三、绘制根轨迹的步骤 .....                                | 76  |
| § 4-2 绘制根轨迹图的基本规则 .....                         | 77  |
| 一、根轨迹的起点和终点 .....                               | 77  |
| 二、根轨迹的分支数 .....                                 | 78  |
| 三、根轨迹的对称性 .....                                 | 78  |
| 四、根轨迹的渐近线 .....                                 | 78  |
| 五、根轨迹在实轴上的分布 .....                              | 79  |
| 六、根轨迹在实轴上的分离点与会合点 .....                         | 80  |
| 七、根轨迹的出射角与入射角 .....                             | 85  |
| 八、根轨迹与虚轴的交点 .....                               | 86  |
| 九、根轨迹的走向 .....                                  | 88  |
| 十、根轨迹上 $K_1$ 值的计算 .....                         | 89  |
| § 4-3 控制系统性能的复域分析 .....                         | 94  |
| 一、基于根轨迹图的系统特性分析 .....                           | 94  |
| 二、增加开环零、极点对系统性能的影响 .....                        | 94  |
| 三、闭环零、极点对系统动态性能的影响 .....                        | 96  |
| 习题四 .....                                       | 98  |
| <b>第五章 控制系统的频域分析</b> .....                      | 102 |
| § 5-1 频率特性 .....                                | 102 |
| § 5-2 频率特性的三种图示法 .....                          | 103 |
| 一、典型环节的极坐标图 .....                               | 103 |
| 二、对数坐标图 .....                                   | 108 |
| 三、最小相位系统 .....                                  | 116 |
| 四、对数幅-相图 .....                                  | 117 |
| § 5-3 控制系统的稳定性分析 .....                          | 118 |
| 一、奈奎斯特稳定性判据 .....                               | 118 |
| 二、控制系统的相对稳定性 .....                              | 125 |
| 三、对数坐标图与系统稳态误差 .....                            | 128 |



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| § 5-4 闭环频率特性                | 129 |
| 一、等 $M$ 圆                   | 129 |
| 二、等 $N$ 圆                   | 131 |
| 三、尼柯尔斯图线                    | 132 |
| 四、非单位反馈系统的闭环频率特性            | 136 |
| 五、极坐标图、伯德图及对数幅-相图的关系        | 137 |
| § 5-5 频域性能指标与时域性能指标的关系      | 138 |
| 一、闭环频域指标与时域指标之间的关系          | 139 |
| 二、开环频域指标与时域指标之间的关系          | 141 |
| § 5-6 传递函数的实验确定法及频率特性的计算机求解 | 143 |
| 一、传递函数的实验确定法                | 143 |
| 二、用数字计算机求解系统的频率特性           | 146 |
| 习题五                         | 147 |
| 第六章 控制系统的校正                 | 152 |
| § 6-1 引言                    | 152 |
| 一、校正方式                      | 152 |
| 二、不同域中性能指标的表示方法及其相互转换       | 153 |
| § 6-2 频率域中的无源串联校正           | 157 |
| 一、超前校正装置与超前校正               | 158 |
| 二、迟后校正装置与迟后校正               | 162 |
| 三、迟后-超前校正装置与迟后——超前校正        | 166 |
| § 6-3 频率域中的反馈校正             | 169 |
| 一、比例反馈校正                    | 170 |
| 二、速度反馈校正                    | 171 |
| 三、速度微分反馈校正                  | 174 |
| § 6-4 复合控制系统                | 177 |
| 一、按输入作用进行补偿的复合控制系统          | 177 |
| 二、具有扰动补偿的复合控制系统             | 179 |
| § 6-5 复数域中的无源串联校正           | 180 |
| 一、根轨迹校正的基本思想                | 180 |
| 二、串联超前校正                    | 181 |
| 三、串联迟后校正                    | 183 |
| 四、迟后——超前校正                  | 187 |
| § 6-6 模拟 PID 调节器            | 188 |
| 一、比例(P)调节器及其控制规律            | 189 |
| 二、比例微分(PD)调节器及其控制规律         | 191 |
| 三、比例积分(PI)调节器及其控制规律         | 195 |
| 四、比例、积分、微分(PID)调节器及其控制规律    | 197 |
| 习题六                         | 199 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第七章 计算机控制系统</b>        | 209 |
| § 7-1 概述                  | 209 |
| § 7-2 计算机控制系统的硬件组成        | 211 |
| § 7-3 采样过程的数学处理           | 215 |
| 一、采样开关的数学描述及特性            | 216 |
| 二、保持器的频率特性                | 220 |
| § 7-4 $Z$ 变换              | 222 |
| 一、 $Z$ 变换的定义              | 222 |
| 二、 $Z$ 变换的基本性质            | 223 |
| 三、 $Z$ 变换的求法              | 225 |
| 四、 $Z$ 反变换的求法             | 227 |
| § 7-5 脉冲传递函数              | 229 |
| 一、开环脉冲传递函数                | 229 |
| 二、含有数字控制器的开环系统脉冲传递函数      | 232 |
| 三、闭环脉冲传递函数                | 234 |
| § 7-6 离散控制系统的性能分析         | 238 |
| 一、离散控制系统的稳定性              | 238 |
| 二、离散控制系统过渡过程的分析           | 241 |
| 三、离散控制系统的稳态误差             | 245 |
| § 7-7 数字控制器的直接设计          | 249 |
| 一、在伯德图上设计数字控制器 $D(z)$     | 249 |
| 二、在根轨迹图上设计数字控制器 $D(z)$    | 257 |
| § 7-8 数字控制器的连续域——离散化设计方法  | 260 |
| 一、采样保持器的处理                | 261 |
| 二、模拟调节器 $D(s)$ 的离散化方法     | 261 |
| § 7-9 数字 PID 调节器          | 267 |
| 一、位置式数字 PID 控制器           | 267 |
| 二、增量式数字 PID 控制器           | 269 |
| 三、PID 参数的整定               | 271 |
| 习题七                       | 274 |
| <b>第八章 专家系统初步及在控制中的应用</b> | 283 |
| § 8-1 人工智能                | 283 |
| 一、智能与人工智能                 | 283 |
| 二、人工智能的研究方法               | 285 |
| § 8-2 专家系统                | 288 |
| 一、专家系统的定义                 | 289 |
| 二、专家系统的结构                 | 289 |
| 三、专家系统的应用及分类              | 291 |
| § 8-3 产生式系统               | 294 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 一、人工智能中的“知识表达”技术 .....     | 294 |
| 二、产生式专家系统的组成及冲突解决策略 .....  | 301 |
| 三、产生式系统的优缺点及其发展 .....      | 302 |
| § 8-4 产生式专家系统示例 .....      | 303 |
| § 8-5 产生式系统在工程控制中的应用 ..... | 308 |
| 一、控制对象情况介绍与特性分析 .....      | 309 |
| 二、温度控制的产生式系统 .....         | 310 |
| 习题八 .....                  | 312 |

## 自动控制的基本原理

### § 1-1 引言

只要仔细观察,人们不难发觉,自动控制作为一种技术手段已经广泛地应用于工业、农业、国防乃至日常生活的许多领域。例如,数控车床按照预先编制好的程序加工部件,雷达自动跟踪空中的飞行体,人造地球卫星在指定的轨道上运行并准确地回收等,所有这些都离不开自动控制技术。

自动控制技术的广泛应用,不仅可以改善劳动条件,减少劳动强度,提高劳动生产率和产品质量,而且在人类征服自然、探知未来、建设高度文明的新社会等方面有着重要的意义。作为一个工程技术人员,了解、掌握自动控制方面的知识是十分必要的。

那么,到底什么是自动控制?自动控制主要解决一些什么问题?此门学科的发展状况如何?这就是本节讨论的。

所谓自动控制就是指脱离人的直接干预,利用某种装置使被控对象按已确定的目标进行动作。这里的“装置”一般又被称为“控制器”,这里的被控对象可以是温度、压力、流量、电压、速度等,也可以是一个生产过程。对于任何一个控制系统,它都可以分为三个组成部分:输入部分、控制系统部分和输出部分,见图 1-1

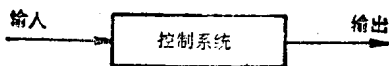


图 1-1 系统组成

输入部分给出系统的控制目标,它是通过输入信号体现出来的,也是人的意志的反映。

控制系统部分主要解决对有关信号的加工、处理,发出控制信号,驱动被控对象。通常包括作为控制对象引入的本体部分和为了提高控制效果而引入的控制器装置部分。

输出部分即系统的控制结果,反映了被控对象的运行状态。

从物理角度上来看,自动控制理论研究的是特定激励作用下的系统响应变化情况;从数学角度上来看,研究的是输入与输出之间的映射关系。

一个具体的工程控制系统常常要用到多方面的部件,如机械的、电气的、电子的、液压的、气动的以及它们的组合部件。它从不同的领域汲取知识,把原来看起来似乎相互独立的学科汇集起来,去解决共同的问题。因此,从事控制领域工作的人,要努力掌握多方面的知识,如各种装置的原理和特性,以及由这些装置组合而成的一个控制系统的设计、分析、改造等。

随着科学技术的进步,自动控制的概念也在扩大,人们已赋予它更广泛、更深远的意义。政治、经济、社会等各个领域也越来越多地被认为与自动控制有关。现在已发展成为一门独立的

学科——控制论。其中包括：工程控制论、生物控制论和经济控制论。从这个意义上来说，自动控制系统的应用几乎是无限的。

根据自动控制理论的发展历史，大致可分为以下四个阶段：

1. 经典控制理论：正如先有房子，后有建筑学一样。一个闭环的自动控制装置的应用，可以追溯到 1788 年瓦特发明的飞锤调速器的研究，然而最终形成完整的理论体系，是在 40 年代末。现在该理论已经成熟，在工程实践中得到了广泛的应用。

2. 现代控制理论：由于航天事业和电子计算机的迅速发展，60 年代初，在原有“经典控制理论”的基础上，又形成了所谓的“现代控制理论”，这是人类在自动控制技术认识上的一次飞跃。有关经典与现代控制理论的特点可列表比较，如表 1-1 所示。

表 1-1 经典控制理论与现代控制理论比较

| 项 目  | 经典控制理论              | 现代控制理论                          |
|------|---------------------|---------------------------------|
| 研究对象 | 线性定常系统<br>(单输入、单输出) | 线性、非线性、定常、时变系统<br>(多输入、多输出)     |
| 描述方法 | 传递函数<br>(输入输出描述)    | 向量空间<br>(状态空间描述)                |
| 研究办法 | 根轨迹法和频率法            | 状态空间法                           |
| 研究目标 | 系统分析及给定输入输出情况下的系统综合 | 揭示系统的内在规律，实现<br>在一定意义下的最优化控制与设计 |

必须指出，由于某些条件的限制(如控制对象精确的数学模型难以建立)，在我国实际工业上，现代控制理论的应用仍不是很广泛，在这个领域中还有不少问题有待解决，目前应用得最多，最普遍的仍是经典控制理论，本书中我们主要对经典控制理论，特别是结合工程上的实际应用，展开深入的分析、讨论。

3. 大系统控制理论：70 年代开始，一方面，现代控制理论继续向深度和广度发展；另一方面，随着控制理论应用范围的扩大，从个别小系统的控制，发展到对子联统相互关联的大系统进行整体控制，从传统的工程控制领域推广到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域，人们开始了对大系统理论的研究。

大系统理论是过程控制与信息处理相结合的综合自动化理论基础，是动态的系统工程理论。概括起来，具有规模庞大、结构复杂、功能综合、目标多样、因素众多等特点。它是一个多输入、多输出、多干扰、多变量的系统。例如人体，我们就可以看作为一个大系统，其中有体温的控制、化学成分的控制、情感的控制等等。

大系统理论目前仍处于发展和开创性阶段。

4. 智能控制：这是近年来新发展起来的一种控制技术，是人工智能在控制上的应用，它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧，解决那些需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。由于智能控制是一门新兴的控制学科，有些问题尚存有争议，然而由于它的实用性

强,能运用人们的经验与技巧解决许多以往控制中难以解决的棘手问题(如建模问题等),因此得到了人们极大的重视,并已卓有成效地运用到实际中去。本书的第八章将对人工智能在实际控制方面的应用作一些初步介绍与分析。

### § 1-2 自动控制系统的工作原理及其组成

自动控制装置种类繁多,但有一个共同之处,就是不需要人的直接参与,而能使被控物理量按照指定的规律变化。到底如何实现对系统的控制、调整,抵消各种干扰和影响呢?下面以一个恒温控制系统的例子加以说明。

实现恒温控制通常采用两种方法:人工的和自动的。我们先来分析一下人工的控制情况(图 1-2)。

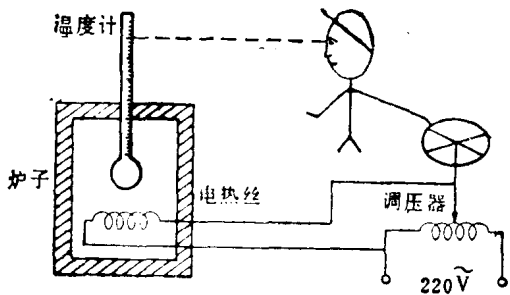


图 1-2 人工控制的恒温箱

工作过程:我们要求温箱的温度恒定在希望数值上,当温度偏离了希望值,则人可以通过调节调压器的中间活动触头来改变通过加热丝中的电流大小,进而达到控制温度的目的。显然,人工控制的过程实质上就是:测量、计算、执行的过程。人体各部分的功能及其相互联系可用框图表示,见图 1-3(a)(b)。

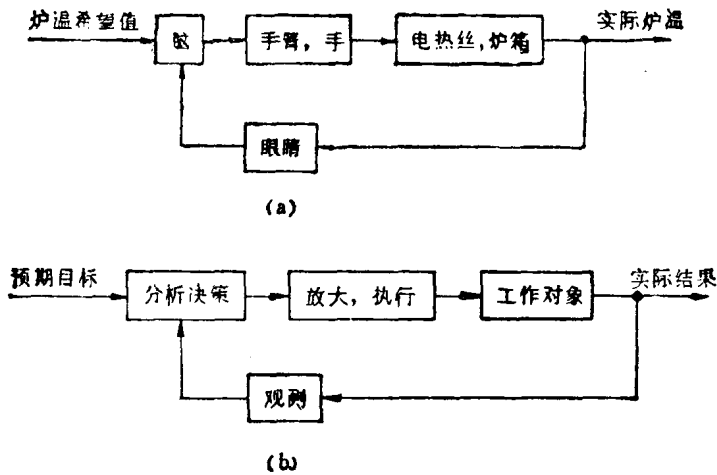


图 1-3 人工温控系统职能图

对于上面的温控过程,我们完全可以用图 1-4 自动控制装置来实现。

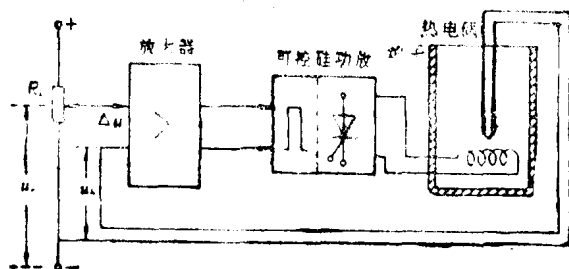


图 1-4 恒温箱的自动控制系统

工作过程：由于某种原因，当炉子的温度发生变化时，测量元件热电偶立即将温度的高低以电压信号  $u_b$  的大小、正负反映出来，与给定的电压信号  $u_r$  相比较，所得到的电压偏差信号  $\Delta u = u_r - u_b$  即反映了实际温度与希望温度偏差的量值。经过电压放大、可控硅功率放大等处理过程后，改变电热丝中电流的大小，从而达到调节炉子温度的目的。

在了解了系统的工作原理以后，即可画出它的方框图 1-5。

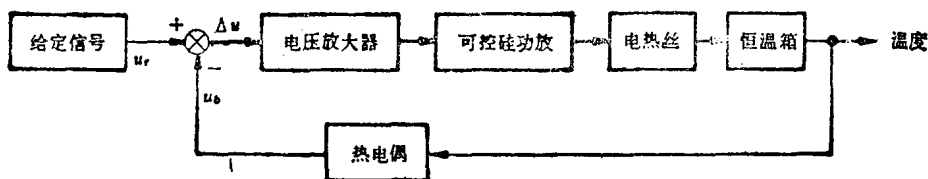


图 1-5 恒温箱温度自动控制系统方块图

图中， $\otimes$ 代表比较元件，箭头代表作用方向。

图 1-5 还可以画成更一般的形式，如图 1-6。

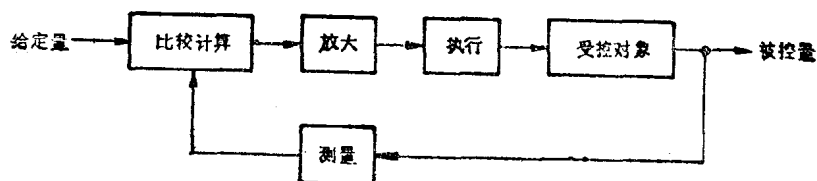


图 1-6 自动控制方框图

下面我们再以运动场上飞蝶打靶运动为例子进一步加以说明。对于运动在立体空间中的飞行体(飞蝶)运动员首先要确定飞行体的位置和状态，再根据射击器械(枪)原来的实际位置，估算出开枪射击时所要的提前量，移动枪口进行射击，只有这样才有可能击中目标。与此相类似的是军事上的“火炮打飞机”，见图 1-7。

火炮自动跟踪系统的工作原理：当雷达捕捉到飞机目标后立即测出有关运动目标参数(如距离、方位、俯仰角等)，由指挥仪计算出提前量等数据输入到受信仪，同时火炮的实际位置也输入到受信仪，在受信仪中进行比较。当火炮不满足提前量要求时，受信仪就会输出一个电压信号，经放大后驱动控制电机，使控制电机按一定的方向和速度旋转，再经过减速装置，一方面带动火炮自动地跟踪目标，另一方面把火炮变化后的位置送入受信仪。就这样，指挥仪不断地把测到的飞机位置诸参数输入到受信仪，受信仪把火炮的实际位置信号与指挥仪输入的飞

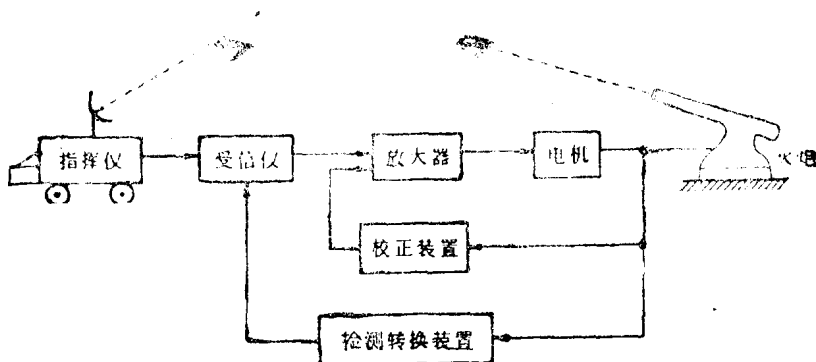


图 1-7 火炮自动跟踪系统

机位置信号相比较后不断地发出控制信号，火炮则不断地按控制信号变化情况自动地跟踪飞机。为了改善系统的跟踪性能，通常在系统中还引入校正装置，这在以后的章节中还将详细地进行讨论。

上述控制系统，完全是模拟了人的实际操作而设计的，它可以取得与人直接参与进行控制的同样实际效果，这也正是自动控制这门学科产生的由来。当然，随着科学的发展，现在人们设计的控制系统在很多场合和方面要比人直接控制来得准确、可靠和经济。

对于一个实际的控制系统，不管其结构如何复杂，实际的功能有何不同，但都可以将其分解为若干个基本元件所组成。图 1-8 就是一个典型的反馈系统的方块图。

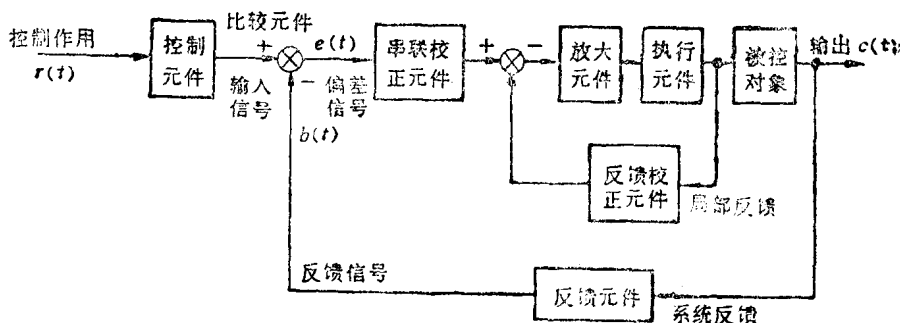


图 1-8 典型的反馈控制系统方块图

控制元件与输入信号  $r(t)$  (又称给定量或控制量)：输入到系统中而控制输出量变化的信号称为输入信号，发出此信号的元件叫控制元件，如图 1-4 中的  $R_w$ ，在这里是作为控制元件使用的。我们若要改变温箱的温度控制值，只要调节电位器  $R_w$ ，改变输入信号的大小即可。

反馈元件与反馈信号  $b(t)$ ：检测系统的输出量并按特定的函数关系 (通常是线性的) 反馈到系统的输入端，完成此功能的器件称为反馈元件，如图 1-4 中的热电偶。反馈元件的输出叫反馈信号。根据反馈信号的极性，又把反馈信号与输入端信号同极性的反馈叫正反馈，反极性的反馈叫负反馈。直接取自系统最终输出端信号反馈到系统输入端的反馈称为主反馈 (或系统反馈)，反馈量为 1 的主反馈又称为全反馈。主反馈一定是负反馈，这是作为一个控制系统所必须具备的条件，否则会使偏差变大，系统失去控制。相对于主反馈，还有局部反馈等。



比较元件与偏差信号  $e(t)$ : 比较元件是把输入信号与反馈信号加以比较, 并求出其差值。此差值即称为偏差信号, 有些场合又称它为误差信号, 简称为误差。比较元件通常用电桥、差动放大器或机械的差动元件等。如图 1-7 中的受信仪就起比较元件的作用。

放大元件: 比较元件给出的信号通常很微弱, 放大元件的主要职能是对微弱信号进行幅值和功率放大。常用的放大元件有晶体管放大器、电机放大器、液压放大器等。图 1-5 中的就是电压功率放大器。

执行元件: 其主要职能是直接推动被控对象, 以改变被控制量, 常用的如电枢控制式直流伺服电机等。如图 1-7 中的执行电机。

校正元件: 或称为校正装置, 它是为了改善系统的性能而加入系统里的。串联校正装置是指串联到系统前向通道内的校正装置。把接成反馈形式的校正装置称为并联校正装置 (或称局部反馈)。最简单的校正装置可以是一个阻容网络, 复杂的校正装置可以是一个微型计算机。

被控对象与输出信号  $c(t)$ : 被控对象即系统的控制对象, 其输出量为系统的输出信号又称为被控制量。如图 1-4 中的恒温箱即为被控对象, 被控制量或输出信号是温度。

扰动信号: 除输入信号外, 影响系统输出的其它输入量我们一般都称为扰动信号。

### § 1-3 自动控制系统的分类

自动控制系统应用范围很广, 种类繁多, 名称上也很不一致, 下面介绍几种常用的分类方法。

#### 一、按信号的传递路径来分

##### 1. 开环系统

指系统的输出端与输入端不存在反馈回路, 输出量对系统的控制作用不发生影响的系统。如工业上使用的数字程序控制机床, 参见图 1-9。

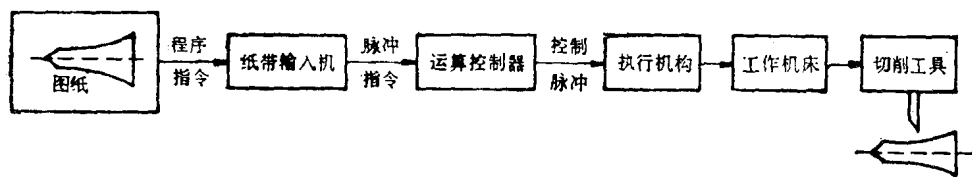


图 1-9 开环控制的数控程序机床

工作过程: 根据加工图纸的要求, 确定加工过程, 编制程序指令, 再把程序指令记录在穿孔纸带上, 由光电输入机把程序指令转换成脉冲电信号送入运算控制器。运算控制器完成对控制脉冲的寄存、交换和计算, 并输出控制脉冲给执行机构, 驱动机床运动, 完成程序指令的要求。这里用的执行机构一般是步进电机。这样的系统每一个输入信号, 必有一个固定的工作状态和一个系统的输出量与之相对应, 但是不具有修正由于扰动而出现的被控制量希望值与实际值之间误差的能力。例如, 执行机构步进电机出现失步, 机床某部分未能准确地执行程序指令的要求等。但由于该系统只按照输入信号对被控对象进行单向控制, 而不对被控制量进