

高等学校试用教材

# 机械控制工程

J · X · K · Z · G · C

黄真棠 许纪 编著



华南理工大学出版社

高等学校试用教材

# 机械控制工程

黄真棠 许 纪 编著

华南理工大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据:**

机械控制工程/黄真棠等编著. —广州: 华南  
理工大学出版社, 1994.10  
ISBN 7-5623-0676-1

- I. 机…
- II. 黄…
- III. 机械工程—自动控制
- IV. TP2

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山·邮编 510641)

责任编辑:赖淑华

责任校对:叶锐燕

华南理工大学印刷厂印装 各地新华书店经销

1994年10月第1版 1995年6月第2次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:445千

印数:3001~5000

定价:17.50元

TH-05  
9

## 前 言

《机械控制工程》作为机械类专业一门新的课程，是始于1980年前后。当时，北京清华大学受一机部教育司的委托，编写了一本名为《控制工程基础》的教学讲义，并于1981年交由全国近九十多所高等院校的有关专业教师在北京进行集体讨论。次年，即1982年春，由清华大学张伯鹏主编、西安交通大学阳含和主审的《控制工程基础》正式出版了。随即，全国大多数高等院校的机械类专业先后将该课列为本科生的必修课程。此后，经过十多年的教学实践，一些高等院校结合各自的教学情况又陆续编写了一些教材。其中较有代表性的为华中理工大学杨叔子等主编的《机械工程控制基础》、西安交通大学已故教授阳含和编著的《机械控制工程》上册和北京机械工业管理学院朱骥北主编的《机械控制工程基础》。所有这些教材和著作，都为《机械控制工程》内容的充实和提高作出了贡献。

鉴于“机械控制工程”是一门新的学科，在当今日新月异的科技发展的推动下，其内容也在不断地发展和更新；再者，由于各院校在专业课程与基础课程的设置上也存在不少的差异，所以很难说得清哪一本教材真正做到了“通用”。正是从以上两点考虑出发，我们才编写了现在这本《机械控制工程》教材。在编写过程中，我们特别注意到如下几个问题：（1）机械控制工程并不是单纯的机械动力学的延伸，而应当是机电一体化控制的综合；（2）在控制理论的指导下，要重视例题的分析，力求“虚”、“实”结合；（3）内容要通俗易懂，叙述要层次分明，分析要条理清晰，不说则已，要说则要说清说透；（4）注意与专业课程及基础课程的衔接，并适当增补一些有关的数学知识；（5）本教材的内容按50~60个学时进行取舍。

全书由黄真棠和许纪编著，由谢存禧教授和吴捷教授负责主审。

本书在编写过程中，自始至终得到华南理工大学谢存禧教授的支持和帮助，在此表示衷心的感谢！此外，华南理工大学机械工程一系邵汝椿教授、梁灼焕副教授、陈坤副教授、郭炽盛副教授和方伟强讲师等也对全书的编写提了不少宝贵的意见并给予了大力的帮助，在此也一并致谢。

由于本课程是新近发展起来的新学科，许多问题有待于探讨和检验，因此，书中可能会有错漏和缺点，恳请广大读者批评指正。

黄真棠 许 纪

1993年4月于广州

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§ 1-1 控制系统的基本概念.....	1
§ 1-2 控制系统的分类.....	6
§ 1-3 本课程的内容和学习方法.....	9
§ 1-4 控制理论发展简史.....	11
<b>第二章 控制系统的数学模型</b> .....	13
§ 2-1 系统的数学模型.....	13
§ 2-2 非线性数学模型的线性化.....	24
§ 2-3 系统元件间的负载效应.....	35
<b>第三章 拉氏变换</b> .....	38
§ 3-1 拉氏变换的定义.....	38
§ 3-2 拉氏变换的几个定理.....	47
§ 3-3 拉氏反变换.....	56
§ 3-4 用拉氏变换解微分方程.....	65
<b>第四章 控制系统的传递函数</b> .....	74
§ 4-1 系统的脉冲响应与传递函数.....	74
§ 4-2 典型环节的传递函数.....	77
§ 4-3 复合环节的传递函数.....	94
§ 4-4 相似原理.....	99
§ 4-5 传递函数的框图.....	102
§ 4-6 题例分析.....	111
§ 4-7 信号流程图.....	119
<b>第五章 控制系统的时间响应</b> .....	129
§ 5-1 时间响应和典型输入信号.....	129
§ 5-2 一阶系统的时间响应.....	133
§ 5-3 二阶系统的时间响应.....	135
§ 5-4 时间响应的性能指标.....	140
§ 5-5 题例分析.....	146
§ 5-6 高阶系统的时间响应.....	151

<b>第六章 系统稳态误差及稳定性分析</b> .....	155
§ 6-1 系统的稳态误差分析和计算 .....	155
§ 6-2 控制系统的稳定性 .....	171
§ 6-3 改善系统品质的方法 .....	184
<b>第七章 频率响应分析</b> .....	190
§ 7-1 频率响应和频率特性 .....	190
§ 7-2 频率特性的极坐标图 .....	195
§ 7-3 频率特性的对数坐标图 (波德图) .....	207
§ 7-4 最小相位系统和非最小相位系统 .....	217
§ 7-5 闭环频率特性 .....	221
§ 7-6 频率响应和时间响应 .....	224
<b>第八章 系统稳定性的频域判据</b> .....	227
§ 8-1 乃魁斯特判据 .....	227
§ 8-2 乃魁斯特判据应用举例 .....	237
§ 8-3 系统的相对稳定性 .....	245
<b>第九章 控制系统性能分析与校正</b> .....	253
§ 9-1 系统的性能指标 .....	253
§ 9-2 系统校正的一般概念 .....	256
§ 9-3 增益校正 .....	258
§ 9-4 相位超前校正 .....	261
§ 9-5 相位滞后校正 .....	267
§ 9-6 相位滞后-超前校正 .....	273
§ 9-7 反馈校正 .....	278
§ 9-8 复合校正 .....	284
<b>主要参考文献</b> .....	294

# 第一章 绪 论

在科学技术迅猛发展的当代社会，控制论作为一门系统理论，已越来越为人们所重视。由控制论所阐明的各种控制作用和方法，不但对科学技术的发展产生了显著的影响，而且也为规划社会经济活动和其他领域的发展提供了一种先进的科学研究手段。可以预料，随着社会的发展和科学文明的进步，控制论作为一门新兴的学科，必将发挥其日益重要的作用。

控制论与工程技术的结合，便产生了“工程控制论”，而控制论与机械工程的结合，则产生了“机械控制工程”这门新的学科。由于当前机械制造技术正向着高度自动化的方向发展，各种先进的自动控制加工系统不断涌现，过去那种只侧重于局部和静态的机械研究方法已经不能适应。事实上，即使是对过去那种普通的机械加工过程，也不能孤立地只去研究  $v$ 、 $f$ 、 $a_p$  的选择。因为在整个加工过程中，实际上是存在着一种动力的传递过程，也就是说，这实际上是一个动力系统在工作。从这一点出发，我们就可以把它归纳到动态系统的范围内来加以研究。

“机械控制工程”这门学科正是抓住问题的本质，将机械加工过程各个环节的组合看作是一个系统，因而就可以从控制论的角度来研究和解决加工中所出现的各种技术问题。就本课程而言，它主要是向读者介绍控制论的基础知识，也就是在“古典控制理论”的范围内，将控制论运用到机械工程这一领域中去进行分析和讨论。

## § 1-1 控制系统的基本概念

控制论是在研究系统工作原理的基础上建立起来的。而系统工作原理的中心问题，则是系统中的控制问题。据此，为了以后讨论问题的方便，我们先从“控制”的基本概念说起，然后再介绍有关控制系统的一般概念。

所谓控制，有主动干预、管理和操纵之意，具体来说，就是指人或能代替人的器械使被控对象按照给定的条件来动作。工程上一般把上述的“人或能代替人的器械”称作控制装置。

所谓被控对象，广义地可指生物体、经济或社会的某些部门，在工程上则一般是指工作状态（或者生产过程）需要给予控制的生产机械或技术装置；而表征被控对象工作状态的参量（物理量或化学量）则称为被控量。

由控制装置与被控对象所组成的总体就称为控制系统。

被控对象可以是很复杂、庞大的生产机械或科技设施，如轧钢机、电冶炉、发电机

组、化工反应塔、船闸、舰艇、飞机、火炮群、雷达、天文望远镜、机床；也可以是很小的机构，如记录笔、电位器、录像机磁头等等。

被控量可以是被控对象的转速、角位移、进给量、温度、电压、频率、功率；也可以是流量、压强、pH值等等。

控制装置也常称控制器、自动调节器，它一般具有信号的测量、变换、运算、放大和执行等功能。但对于一个具体的系统来说，承担某一功能可能需要一个部件或较为复杂的装置，也可能是一个简单的元件、部件就能具备几种功能。

下面将通过一些例子进一步说明上述的有关概念。

图1-1a是工人操纵普通机床加工零件的控制图。如果我们将产品看成被控对象，则操纵人员和机床便是控制装置。这个例子称为人工控制。因为操纵人员与产品之间存在实时的关系。

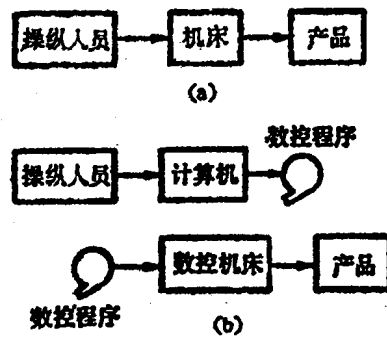


图1-1

图1-1b是数控机床加工零件的控制框图。在这里，产品是被控对象，其余部分则是控制装置。在这个例子中，操纵人员预先编好源程序，然后输入计算机得到数控程序，再由数控机床按照数控程序的指令，对产品进行加工。在这个例子中，操纵人员在加工过程中不直接参与操作，与产品之间没有实时的联系，故此称为自动控制。

图1-2是人工控制的可控硅调速系统原理图，要求正常工作时直流电机D的转速 $n$ 为某一恒值。若电机由于受外界干扰（如电源电压的波动或负荷的突变等）的影响而使转速 $n$ 偏离规定值，则可通过人工旋动电位器R的触点来改变可控硅的输出电压 $U_D$ ，从而控制电机转速 $n$ 的变化。在这里，电机为被控对象，其转速 $n$ 为被控参量，其余部分则是控制装置。

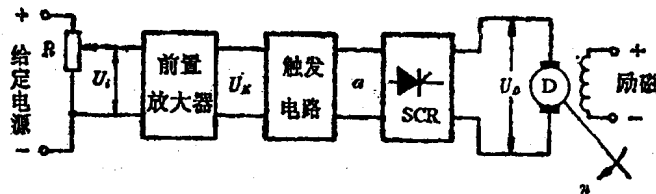


图1-2

具体的控制过程是这样的：通过测速仪表对被控参数 $n$ 进行测量，并把测量结果与规定的转速进行比较，由此得到两者之差值（称为偏差）的方向与大小，然后据此对转速进行调节。例如，当出现电机转速比规定值低时，可通过人工往上旋动电位器R的触点，以提高输入电压 $U_i$ （亦即提高可控硅的整流电压 $U_D$ ），使电机转速上升到规定值；反之，当出现电机转速比规定值高时，可通过人工往下旋动电位器R的触点，以降



低输入电压  $U_i$  (亦即降低可控硅的整流电压  $U_D$ )，使电机转速回到规定值。

上述这种控制一般称为人工恒值控制。人在这种控制中所起的作用是检测偏差及纠正偏差，或简称为“求偏与纠偏”。显然，由人工来完成这种“求偏与纠偏”的动作太慢，跟不上电机转速的变化。若希望这个动作能自动地迅速地完成，则可将上述的人工调节代之以一个测速发电机来完成，这时系统就变成一个自动控制系统，如图1-3所示。

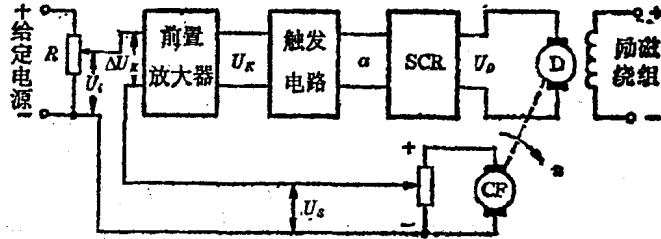


图1-3

在图1-3中，测速发电机CF与电机D同轴旋转，它所发出的电压  $U_s$  与电机的转速  $n$  成正比。将  $U_s$  与给定电压  $U_i$  反接，则得到偏差电压  $\Delta U_k$ ，从而控制可控硅的控制角  $\alpha$  及可控硅的整流电压  $U_D$ ，进而控制电机的转速  $n$ 。

在正常工作时， $\Delta U_k = (U_i - U_s)$  为一定值；因此电机也在规定的转速下工作。如果由于负载突然增加，电机转速  $n$  便会下降，测速发电机的电压  $U_s$  也跟着下降；但由于给定电压  $U_i$  固定不变，故  $\Delta U_k$  便会增加，从而使电机转速回升。其具体控制过程如下：

$n \downarrow \rightarrow U_s \downarrow \rightarrow \Delta U_k \uparrow \rightarrow U_k \text{ (前置放大器输出电压)} \uparrow \rightarrow \alpha \downarrow \rightarrow U_D \uparrow \rightarrow n \uparrow$

反之，若电机由于外界电源波动而使电机转速增加时，则控制过程的各个参数会自动按上述反方向变化，从而使电机转速迅速下降。就这样，经过自动调节，使电机转速经常保持在一个规定值上。

应当指出，上述的控制是依赖偏差电压  $\Delta U_k$  来控制电机的转速的。从原理上说，这种控制总是存在偏差的（详见第六章），所以它只能用在工艺要求不高的生产线上（如卷烟机的控制）。如果要用在一般机床的进给控制，则须在图1-3的基础上再增加一个由直流伺服电机CD与电位器W组成的所谓积分调节器。此时系统如图1-4所示。

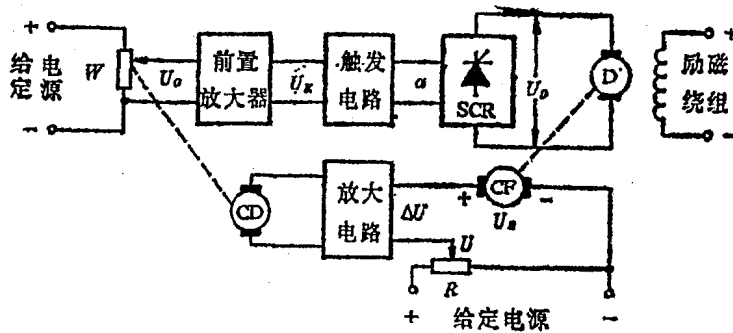


图1-4

在图1-4中,电机的转速是由电压 $U_G$ 控制的。例如,当电机的转速发生变化而偏离规定值时,便会产生偏离电压 $\Delta U = U_i - U_s \neq 0$ ,经放大后驱动直流伺服电机CD正转或反转(由 $\Delta U$ 的极性确定),并带动电位器W的活动触点上、下移动,从而增加或减少电压 $U_G$ ,直到电机转速回到规定值并且 $\Delta U = U_i - U_s = 0$ 时,伺服电机便停止转动。这种系统在原理上是可以做到无偏差的。

在控制工程中,为了便于对控制系统进行分析和了解其各个组成部分的作用,常将系统的原理图画成框图(又称方框图)来表示。这样,相应于图1-3和图1-4的框图便分别如图1-5及图1-6所示。应当指出:这种框图是根据元件的功能来划分的,这与后面第四章所介绍的传递函数框图在意义上是有所区别的。

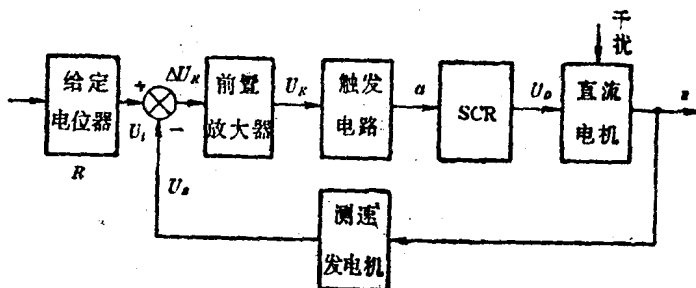


图1-5

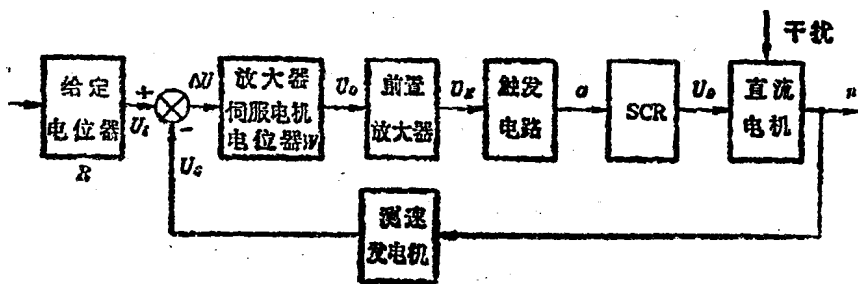


图1-6

从图1-5、图1-6中可以明显看到,在系统的输出端与输入端之间,存在一条将输出信号引回到输入端的通道,称为反馈通道。所谓反馈,就是指将输出信号的一部分或全部引回到输入端,并与输入信号进行比较,从而加强或削弱输入信号。如果引回的信号是加强输入信号的,就称正反馈;反之,则称负反馈。在控制系统中的反馈,一般属负反馈的居多。

由图1-5、图1-6还可以看出,控制系统虽然从大的方面可划分为被控对象与控制装置两大部分;但按其各组成部分的功能,还可进一步细分。如控制装置,还可以将它看成是由下面的一些功能元件组成:

(1) 控制元件(又称给定元件) 是指用于产生控制信号(给定信号)的元件。如图1-5、图1-6中的给定电位器R。

(2) 测量元件 是指用来测量被控参量,并起反馈作用的元件。如图1-5、图1-6中

的测速发电机。常见的还有炉温控制的热电偶及数控机床上的光栅和同步感应器。

(3) 比较元件 是指用来比较输入和反馈信号，从而产生偏差信号的元件。在图1-5、图1-6中用符号 $\otimes$ 表示。常见的还有数字电路中的鉴相鉴频器。

(4) 执行元件 是指用来对被控对象进行直接操作的元件。如图1-5、图1-6中的可控硅和后面第二章图2-13中的变压器。

(5) 放大元件 是指用来推动执行元件工作的元件。如图1-5、图1-6中的前置放大器和触发器。

(6) 校正元件 是指用来改善系统性能的调节元件。如图1-6中的直流伺服电机CD及电位器W。

此外，对于什么是被控对象（亦称控制对象）和被控量，则要根据系统最终控制的目的和任务来确定。如图1-5、图1-6中所示的系统，其控制的目的是保持电机D的转速 $n$ 恒定，所以电机D是被控对象，而转速 $n$ 是被控量。又如后面第二章图2-13中，控制的目的是保证炉膛的温度不变，故炉膛是被控对象，而温度则是被控量。

据上所述，控制系统的组成一般可用图1-7所示的框图来表示。

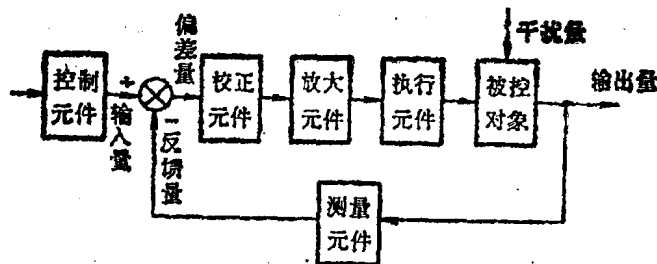


图1-7

最后，参照图1-7，将控制系统中常用到的术语介绍如下：

(1) 输出量（即被控量，又称被控参量） 是指最终控制的目标值。如图1-5、图1-6中的转速 $n$ 。

(2) 控制量（又称给定量） 是指依设计要求与输出量相适应的预先给定信号，如图1-5、图1-6中的电压 $U$ 。

(3) 干扰量（又称扰动量） 是指引起输出量变化的各种外部条件（如电源电压的波动或负载的变化等）和内部条件（如系统中某些元件的变坏等）。应当指出，干扰量属于一种偶然的无法人为控制的随机输入信号。

(4) 输入量 是指控制量与干扰量的统称；但在一般情况下多指控制量。

(5) 反馈量 是指由输出端引回到输入端的信号。如图1-5、图1-6中的电压 $U$ 。

(6) 偏差量 是指控制量与反馈量之差值。如图1-5中的 $\Delta U$ 和图1-6中的 $\Delta U$ 。

(7) 误差量 是指实际输出量与希望输出量之差值。应当指出，误差量和偏差量是可以互相表达的，在特定的条件下，误差量就是偏差量（见后面第六章介绍）。

## § 1-2 控制系统的分类

控制系统的类型是多种多样的。按照其控制的方式和特点可分为下列几种：

### 一、按系统有无反馈通道来划分

#### 1. 开环系统

所谓开环系统，就是输出端与输入端之间没有反馈通道联系的系统。在上述的图1-7中，当取消反馈通道之后就是开环系统。其一般形式则如图1-8所示。



图1-8

由图1-8可以看出，开环系统的输出量对系统的控制作用是没有影响的，因此，一旦输入量确定后，系统的工作状态（如速度、位移等）亦即随之确定。当然，假如系统受到干扰的影响，输出量就会偏离规定值而产生误差，使控制目标难于实现。所以，在一些生产工艺要求较高的控制系统中不宜采用开环控制。不过由于开环控制系统的结构比较简单，成本低，故在很多场合下还是得到广泛应用。如家庭洗衣机和交通管理系统的控制，就是其中的例子。

#### 2. 闭环系统

所谓闭环系统，就是输出端与输入端之间有反馈通道联系的系统。如上述图1-7所示的框图就是闭环系统。其一般形式也可用图1-9表示。

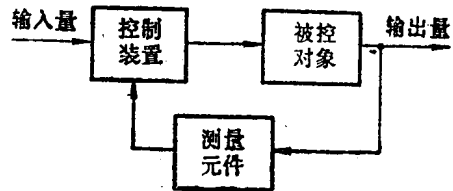


图1-9

由于闭环系统有反馈，所以其输出量对系统的控制作用有着直接的影响。在这种系统中，输入量与反馈量比较后所产生的偏差，就是系统的控制信号。因此，输出量的变化将会直接影响到系统的工作状态。然而，正是由于这一点，使闭环系统具有自动“纠偏”的作用，即当系统受到干扰影响而产生误差时，闭环系统能使这种误差减少到最低程度；当然，也正是由于闭环系统有反馈，所以若系统中的元件有惯性或者匹配不当时，则系统容易产生振荡，导致系统不易稳定。因此，在设计闭环系统时，要着重考虑其稳定性问题。总的说来，由于闭环系统具有“抑制干扰，减少误差”的作用，故其工作精度较高。在工程上使用的控制系统，大都属于闭环系统。本书所讨论的对象基本上也是这类系统。

### 二、按给定量的特点来划分

#### 1. 恒值系统

所谓恒值系统，就是给定量为恒值时的系统。这种系统的特点是要求输出量必须保

持恒定不变。当因为工作要求而需要把给定量调整为一新的恒值时，与之对应的输出也必须为一新的恒值输出量。因此，为了保持输出量基本不变，就要注意干扰量对系统的影响，要求系统具有自动“纠偏”的能力。故此这种系统必须是闭环系统。

恒值系统的例子很多，上述图1-5、图1-6所示的可控硅调速系统以及后面第三章介绍的炉温控制系统都属于这一类系统。至于家庭用的稳压电源也是其中的一种。

## 2. 随动系统

所谓随动系统，就是给定量为变量（一般为时间的函数）的系统。其特点是要求输出量能按给定量的变化规律而变化。因此，输出量也是一个变量。例如，高炮雷达跟踪系统就是随动系统。飞机的位置是输入，高炮的指向是输出。高炮的指向随飞机位置的变动而变动。又如各种平衡记录仪，输入是来自传感器的信号，输出则是记录笔的位移。

图1-10是一种典型的随动系统原理图。系统中采用一对电位器作为比较元件，其中

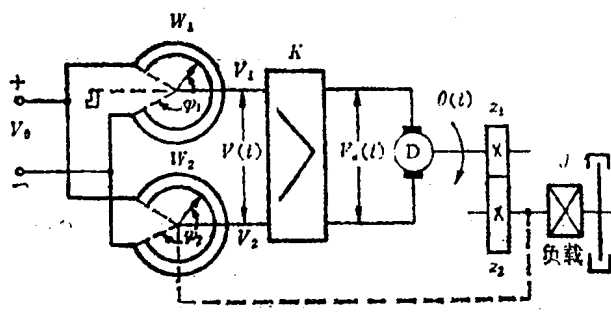


图1-10

电位器  $W_1$  作为输入器，电位器  $W_2$  作为输出器。当顺时针方向移动  $W_1$  的滑动臂输入一角度  $\phi_1(t)$  时，由于此时两电位器的滑动臂相对于接地点的位置不同，于是便产生偏差电压  $V(t) = V_1(t) - V_2(t)$ ，经放大后为电压  $V_c(t)$ ，从而驱动直流电动机（即被控对象）转动一个角度  $\theta(t)$ ，并同时带动  $W_2$  的滑动臂顺时针方向转动一个角度  $\phi_2(t)$ 。当  $\phi_2(t) = \phi_1(t)$  时，则  $V(t) = V_1(t) - V_2(t) = 0$ ，于是直流电动机便停止转动。这就是说，直流电动机的转角  $\theta(t)$  是跟随输入角  $\phi_1(t)$  的。

图 1-11a 所示的单边随动阀控制的液压仿形刀架，又是随动系统的另一个典型例子。其中  $p_1$  和  $p_2$  分别为油缸左、右腔的油压。假定开始时系统处于平衡状态，即  $p_1 = p_2$ 。当杠杆的触头沿着靠模的形状向左运动时，杠杆机构就带动随动阀向右运动，使随动阀与阀体（也是仿形刀架）之间的阀口增大，右油腔压力下降，破坏了原来的平衡状态，使  $p_2 < p_1$ 。由于活塞固定不动，故阀体在  $p_1$  的作用下向左运动，并同时带动杠杆机构使阀口复原，重新恢复平衡状态。当杠杆触头继续向左运动时，平衡状态又被打破，通过阀体左移又使阀口复原。就这样，系统在这种平衡—不平衡—平衡的转换过程中，阀体（即刀架）不断跟着触头作仿形运动。图 1-11b 是这种系统的框图。从上述分析可知，随动系统也属闭环系统。

## 3. 程序控制系统

所谓程序控制系统，就是输入量按照预先编定的程序变化的系统。例如数控机床的

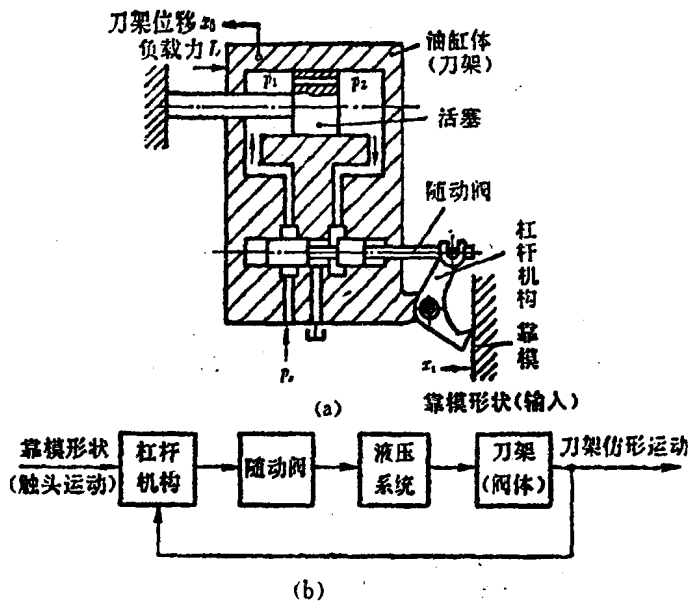


图1-11

进给系统就是程序控制系统。这种系统可以是开环的，也可以是闭环的。

图1-12是没有反馈的数控机床进给系统。数控装置根据穿孔纸带上的数据和指令，经过运算发出输出脉冲，送到步进电机或者电液步进马达，使其转过一定角度，带动丝杆螺母使工作台移动一定距离。显然，该控制系统是开环的。



图1-12

图1-13则是具有反馈通道的数控机床进给系统，属闭环。其中测量元件可以是光栅，也可以是同步感应器。

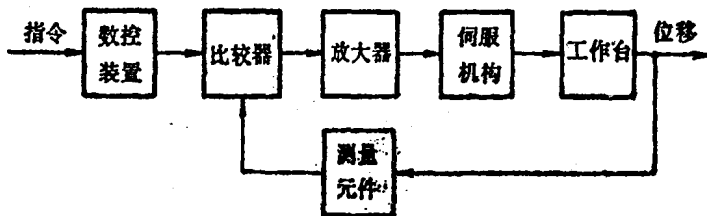


图1-13

### 三、按控制系统对应的数学模型来划分

若控制系统所对应的数学模型是常系数线性微分方程，则该系统称为线性定常系

统。当其系数是时间的函数时，则称为线性时变系统。若系统所对应的数学模型是非线性微分方程，则该系统称为非线性系统。

应当指出，所谓线性系统，在实际工程上是不存在的。因为所有工程上的控制系统多少总会含有一些非线性元件。例如控制系统中所使用的放大器，当输入信号变大时便会出现饱和现象，电动机的磁场通常也有饱和特性。所以，只有在某一工作范围内，当系统的输入与输出具有线性关系（即可应用迭加原理）时，该系统才可认为是线性系统。关于这方面的进一步论述，详见第二章。

上述就是常见的几种系统分类方法。此外，我们还可以按输入信号的连续性和离散性将系统分为连续控制系统和采样（离散）控制系统；按系统的组成可将系统分成机电控制系统、油压控制系统、气动控制系统、生物控制系统等等。凡此种种，不作一一叙述了。

### § 1-3 本课程的内容和学习方法

控制理论是一门正在不断发展着的科学。从30年代古典控制理论的形成，到50年代末（或60年代初）现代控制理论的确立，其间已经历了几个发展阶段。此后，在日新月异的科学技术发展的推动下，控制理论已向着更新更广的领域发展。到目前为止，就其在工程技术上所涉及到的研究内容来说，大致可以归纳为五个方面，即

（1）系统理论分析问题 即在系统和输入已确知的情况下求输出，并通过输出来研究系统本身的特性问题。

（2）最优控制问题 即按照被控对象的特性，选择一个容许控制方案（即最优控制律），使被控对象按照技术指标运行，同时使其性能指标达到最优值（即极大值或极小值）。当然，所谓最优，仅是指某个性能指标最优，而不是任何性能指标都最优。

（3）最优估计问题 所谓“估计”，简单地说，就是从观察数据中提取信息。例如，在做实验时，为了便于说明问题，常把实验结果用曲线的形式表示，需要根据观察数据来估计描述该曲线的方程中的某些参数，这一过程叫做参数估计，这些被估计的参数都是随机变量。再举一个例子，在飞行器导航中，要从带有随机干扰的观察数据中，估出飞行器的位置、速度和加速度等运动状态变量，这就遇到状态变量的估计问题，这些状态变量都是随机过程。因此，估计的任务就是从带有随机误差的观察数据中估出某些参数或某些状态变量。这些被估的参数或状态变量可统称为被估量。显然，被估量愈接近实际愈好。如果估计是在某一确定的准则条件下，按照某种统计方法使被估量达到最优值，则这种估计称为最优估计。应该指出，在自动控制中，为了实现最优控制和自适应控制，将会遇到很多参数估计和状态变量估计问题。而这些问题的出现，又促进了估计理论的发展。

（4）自适应控制问题 所谓“自适应”，就是指系统在外界环境和本身结构不可预测的变化时，能自动调整或修改其本身的参数来适应这种变化。也就是说，系统在运动过程中的各种参数（或状态变量）必须随时被识别，并能据此自动决定保持或调整系

统某些参数，使系统时刻处于最优控制状态。

(5) 系统辨识问题 即根据对已知输入量的输出响应的观测，在指定的一类系统范围内，确定一个与被辨识系统等价的系统。或者更一般地说，是根据被控对象或被辨识系统的输入、输出观测信息，来估计它的数学模型（或与之等效的数学模型）。

上述几个问题，实际上也是机械控制工程所面临的研究课题。不过，就本课程的内容来说，它主要是研究上述的第(1)个问题。具体地说，就是研究线性定常系统在外界条件的作用下，从一定的初始状态出发所经历过的整个动态历程，以及在这个历程中和历程结束后所表现出来的动态特性和静态特性；研究系统的输入及其输出两者之间的动态关系。

所谓“外界条件”，当然也包括了人为的激励、控制输入和干扰输入等。而所谓“动态历程”，就是指系统从一种稳态到达另一种稳态时中间所经历过的过渡过程。而“动态特性”，则是指系统在过渡过程中其输出响应的快速性与稳定性等，也可以泛指系统的数学模型。“静态特性”，则是指在过渡过程结束后，系统工作的准确性（即稳态误差等）。一般来说，动态特性是属于直接将时间当作变量的函数；而静态特性则相反，它跟时间变化无关，即在时间上是固定不变的，或者说，它是在时间 $t$ 趋于无穷时的一个稳定值。应当指出，快速性、稳定性和准确性是设计系统时的三大要求，而其他性能指标都是围绕着这三大要求而提出的。关于这些问题，在本书后面章节中将会逐一进行讨论。

总之，本书所涉及的内容是属于古典控制理论讨论的范围，即其研究的对象仅是单输入和单输出的线性定常系统，其研究方法就是传递函数和频域法，其最大的特点就是可按迭加原理进行讨论，所以其研究方法比较简单，用手工计算和作图就可解决问题。

当然，随着今后课程设置的调整，“机械控制工程”这门课程也必将逐步介入现代控制理论讨论的范围。因为现代控制理论的研究对象除线性定常系统外，更着重的是研究多输入和多输出的时变和非线性系统；而其研究方法则是以空间状态向量方程作为基本工具，并借助于电子计算机的运算，从而设计出各种最优的控制系统，而这也正是机械工程当前和今后的发展方向。

下面是关于在学习本课程时须要注意的几个问题，亦即学习方法问题。

(1) 要注意用动态的观点分析问题 控制理论就是在分析动态问题的基础上发展起来的。任何系统（当然也包括机电系统）在工作时都是处于某种运动状态，不但系统内部各元件之间的联系（交换信息）在不断地变化着，就是元件本身的参数也在不断地变化着，这些都是不言而喻的。所以我们的任务就是找出这些变化的规律，从而建立起相应的控制模式，来保证系统工作的正常运行。

(2) 研究问题必须从建立数学模型着手 要掌握系统的变化规律，就必须建立系统的数学模型，即根据有关的物理定律、化学定律和统计方法，将系统的变化规律数学化。一旦数学模型确立后，就可以抛开系统原来的物理属性或化学属性，而将它归纳为纯数学问题来处理。例如，当系统的运动方程的解是收敛时，则此系统必然是稳定的；反之，若系统的运动方程的解是发散的，则此系统必然是不稳定的。系统的其他性能，也可进行类似分析。



(3) 要注意系统之间的模拟性质 控制理论处理问题的一个特点, 就是承认系统之间可以相互模拟, 条件是: 两个系统的数学模型要一致。事实上, 当两个系统的数学模型相同时, 它们必然具有相同的动态特性和静态特性。这样, 当我们面临一个较复杂的机械系统(或元件)时, 就可以用一个较简明的电路来模拟, 从而使所研究的问题简单化。

(4) 要注意系统中的反馈作用 在某种意义上来说, 没有反馈就没有自动控制。所以反馈问题是控制理论中的一个重要课题。反馈作用不但使系统实现自动控制成为可能, 而且对系统的动态特性和静态特性都会产生显著的影响。例如, 反馈能提高系统的工作精度, 能使系统的增益上升或下降, 能使系统由不稳定变成稳定或者相反。此外, 反馈亦对诸如系统的阻尼特性、时间常数和频带宽度等都有明显的影响。这些内容都将会在书中逐步论述。所以在研究系统时, 一方面要充分发挥反馈的积极一面, 同时也要注意其消极的影响。

前面所论及的闭环系统, 其反馈都是人们为了改善系统的性能而着意加进去的, 这可称为外加反馈(或简称外反馈)。但在系统工作时往往会存在另一类反馈。这类反馈不是人为所致的, 而是由系统内部产生的, 是一种内部信息流的反馈。这类反馈的存在, 单从物理结构上是很难观察得出来的, 只有通过一定的数学模型转换, 方能判别出来。这类反馈称为内在反馈(或简称内反馈)。

工程上的系统, 尤其动力系统, 都在不同程度上存在内反馈。例如机床在低速情况下加工时所出现的爬行现象, 就是内反馈存在的明显例子(参阅第四章 § 4-6 的例题分析), 所以在研究机电控制系统时, 要特别注意这类反馈作用的影响。

最后要指出的是, 由于本课程是一门较新的课程, 其中所用到的一些名词术语, 在机械类专业的传统课程中很少出现过, 所以读者在阅读时首先要熟习这些名词、术语的含义, 才能逐步加深对本课程内容的理解。另外, 由于本课程的内容是按控制理论所提供的方法来进行讨论的, 故此所涉及的数学问题比较多, 除高等数学外, 尚需用到部分工程数学。至于在分析一些具体例题方面, 读者还须具有一定的力学知识、电工学知识和机械制造专业的基本知识。因此, 我们要求读者在学习本课程的同时, 要复习好高等数学、电子技术、理论力学、机械原理、机械零件和液压传动等课程。此外, 还提倡独立思考, 大胆探索, 提出问题, 总结经验。切忌“书云亦云”, 要努力创新, 不为教材内容所束缚。在掌握一定基本知识的基础上, 向着更新更广的研究领域发展。

## § 1-4 控制理论发展简史

控制理论的研究是从对瓦特(J·Watt)的蒸汽机调速系统进行改进时开始的。1788年, 瓦特发明了蒸汽飞球调速装置, 使人们初步意识到“反馈”作用所带来的效果。后来, 人们在改进这种反馈装置的同时, 奇怪地发现了系统在工作时往往会产生振荡, 甚至不稳定, 但是当时不得其解。此后, 人们为了寻找答案, 开始从理论上进行探索, 经过几十年的努力, 直到1866年, 麦克斯韦(J·C·Maxwell)首先发表了“论调速器”一