

489930

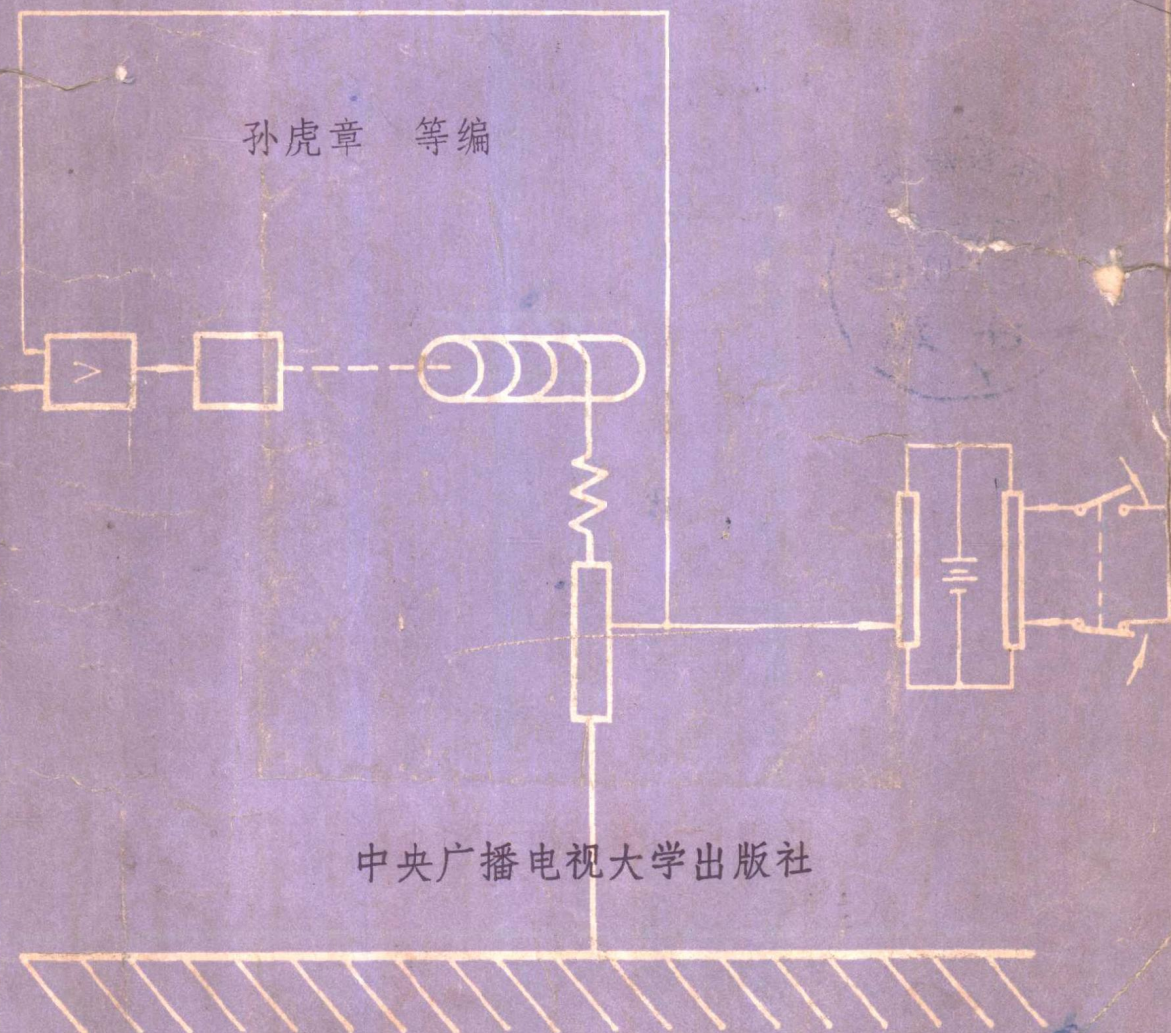
73.622054

S.H.Z

# 自动控制原理

## 学习辅导

孙虎章 等编



中央广播电视大学出版社

# 自动控制原理学习辅导

孙虎章等编

中央广播电视大学出版社

## 自动控制原理学习辅导

孙虎章 等编

\*

中央广播电视大学出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
北京外文印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张7.125 千字187

1986年9月第1版 1988年2月第2次印刷

印数 42,001~79,000

书号15300·45 定价1.40元

ISBN 7-304-00171-2/TP·6

## 前 言

自动控制理论作为一门学科,其性质属于技术科学,研究的主要对象是自动控制系统;研究的中心问题是系统的精度,或者说是系统在控制过程中的性能。学科的基本内容分数学模型、工程分析计算方法和系统一般规律三个部分。

自动控制原理课是为了专业课和控制工程实践的直接需要而设置的,课程按照中央广播电视大学制订的教学大纲进行。教学内容为经典控制中的线性理论和一部分非线性理论,有关离散系统理论和随机控制理论以及现代控制部分均未涉及,因此所选内容系学科最基本的,但是当前应用较为普遍的内容,同时也是学习其它分支的基础。

该课程前后内容联系密切、系统性强,学生在学习中要不断复习学过的部分,注意连贯性。课程中一些定义和理论的建立是严格的、严密的,但分析计算方法却大量运用了典型化、图解化和近似化处理,具有明显的理论性和工程性,学习中也要注意这些特点。并且要逐步重视“定性分析、定量估算和仿真实验”这种研究问题的方法。

通过学习,要求学生能够正确理解和运用课程的基本概念及基本理论,初步掌握一套较完整的分析计算方法。

针对电视教学的特点,中央广播电视大学组织编写了《自动控制原理学习辅导》,以供同学们在学习过程中配合录象课及教材使用。

本辅导材料按照教学的顺序,逐章明确了学习的基本要求,对主要内容作了提要性说明和适当补充。并通过较多的例题,阐述了运用基本理论和方法来分析、解决问题的正确思路和步骤。另外,补充习题中的一部分,将作为课程的作业题。书中最后附有课程的实验指导书及教学进度计划表。

参加本材料编写工作的有:北京航空学院孙虎章(第一、五章)、天津广播电视大学夏国平(第二、六章)、四川广播电视大学简德华(第三、七章)、中央广播电视大学刘晓晴(第四章、实验指导书)。中央广播电视大学陶琳对初稿提出了宝贵意见。

错误及不当之处,敬希指正。

编 者

# 目 录

<b>第一章 自动控制的一般概念</b> .....	(1)
§ 1-1 基本要求及内容提要 .....	(1)
§ 1-2 例题分析 .....	(2)
<b>第二章 控制系统的数学模型</b> .....	(6)
§ 2-1 基本要求 .....	(6)
§ 2-2 内容提要 .....	(6)
§ 2-3 例题分析 .....	(13)
§ 2-4 补充习题 .....	(20)
<b>第三章 时域分析法</b> .....	(24)
§ 3-1 基本要求 .....	(24)
§ 3-2 内容提要 .....	(24)
§ 3-3 例题分析 .....	(31)
§ 3-4 补充习题 .....	(36)
<b>第四章 根轨迹法</b> .....	(38)
§ 4-1 基本要求 .....	(38)
§ 4-2 内容提要 .....	(38)
§ 4-3 例题分析 .....	(44)
§ 4-4 补充习题 .....	(59)
<b>第五章 频率法</b> .....	(62)
§ 5-1 基本要求 .....	(62)
§ 5-2 内容提要 .....	(62)
§ 5-3 例题分析 .....	(68)
<b>第六章 控制系统的校正</b> .....	(76)
§ 6-1 基本要求 .....	(76)
§ 6-2 内容提要 .....	(76)
§ 6-3 例题分析 .....	(84)
<b>第七章 非线性系统分析</b> .....	(91)
§ 7-1 基本要求 .....	(91)
§ 7-2 内容提要 .....	(91)
§ 7-3 例题分析 .....	(96)
<b>附 1: 自动控制原理实验指导书</b> .....	(100)
实验一 典型环节的电模拟及一阶二阶系统的阶跃响应分析.....	(100)
实验二 频率特性的测试.....	(104)
实验三 三阶系统的串联校正.....	(108)
实验四 随动系统或调速系统的动态过程及其校正.....	(110)

# 第一章 自动控制的一般概念

## § 1-1 基本要求及内容提要

### 一、基本要求

1. 明确自动控制的任务,正确理解受控对象、被控量、控制装置和自控系统等概念。
2. 正确理解三种控制方式,特别是反馈控制。
3. 初步掌握由系统工作原理图画原理方块图的方法,并能判别系统的控制方式。
4. 要重视过渡过程,要有时间的概念,要逐步建立“系统”的观点和“动态”的观点。

### 二、内容提要

#### 1. 自动控制的任务

所谓**控制**,有主动干预、管理、操纵之意。利用控制装置操纵受控对象,使其被控量按技术要求变化,这就是自动控制的任务。

承担上述任务的受控对象和控制装置的总体,称为**自动控制系统**。

**受控对象**:指工作状态(或工况)需要给以控制的生产机械或技术装置。而表征其工作状态的基本参量(物理量或化学量)就是**被控量**。受控对象是自控系统的主体,系统控制性能的好坏,归根结底就是看它的被控量在控制过程中是否符合要求。因此,了解一个系统,首先应该明确什么是受控对象,有哪些被控量。

受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、机床、天文望远镜;也可能是很小的机构,如记录笔、电位计、录象机磁头等。

被控量可以是受控对象工况的转速、温度、电压、频率、方位角、进刀量;也可能是流量、压强、pH值等等。

**控制装置**:是指除受控对象之外自控系统中其它部分,也常称控制器、自动调节器。控制装置一般具有信号的**测量、变换、运算、放大和执行**等功能。但是对于具体系统,承担某一功能可能需要一个部件或较为复杂的装置,也可能一个简单的元、部件就起到几种功能的作用,差别是很大的。

#### 2. 三种控制方式

应从控制的基本原理、系统的原理方块图和信号传递等几个方面来认识控制方式的特点。且主要看系统的被控量是什么,测量的又是什么量。

测量的相当于被控量对给定值的偏差,则称系统的控制方式为**按偏差控制或反馈控制**。信号在这种系统中是循环往复闭路传递的(见图 1-1(a)(b)),故又称闭式控制。

**注意**,为了得到偏差信号,被控量的反馈必须是负反馈

测量的(或系统接收的)只是给定值或指令信号,则称系统的控制方式为**按给定值操纵的开式控制**,见图 1-1(c)。

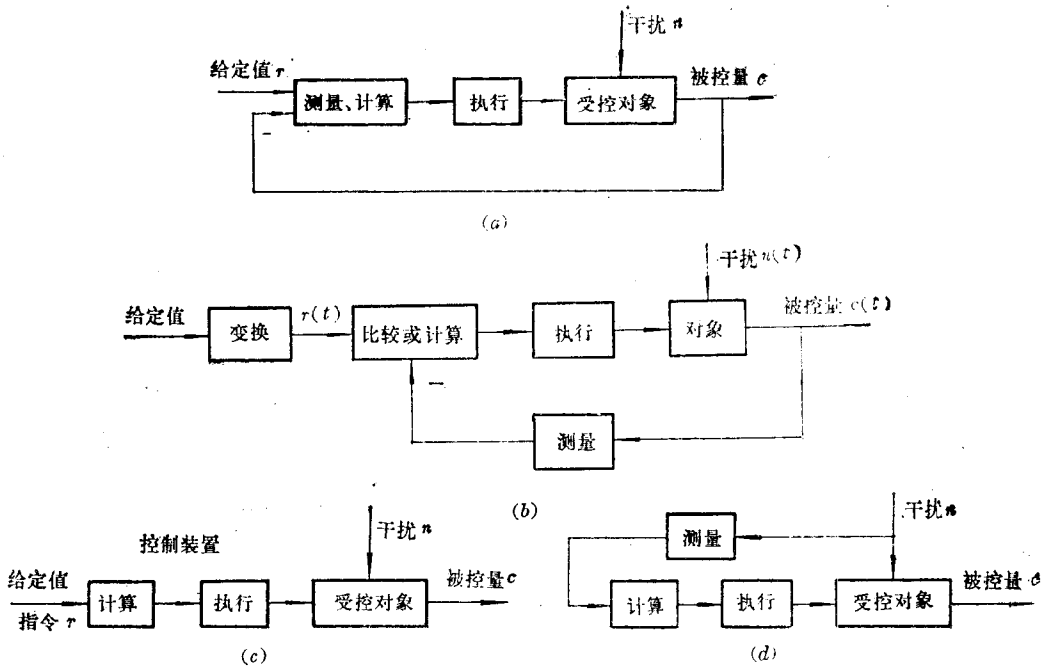


图 1-1

测量的如果只是干扰,则称系统的控制方式为按干扰补偿的开式控制,见图 1-1(d)。

### 3. 恒值系统、程控系统、跟踪系统

按照给定值或指令的特点来划分,自控系统又可分作三种类型。

给定值或指令输入信号为常值的控制系统,称为恒值控制系统或镇定系统。如恒速系统、恒温箱、发电机的电压控制系统和调频系统。这种系统除了在合闸起动的初始阶段外,工作过程中主要考虑的是抗干扰的问题,要求对于干扰(如负荷变化)有足够的镇定能力。

给定值或指令输入信号按预定程序变化的控制系统,称程序控制系统或简称程控系统。如程控机床(仿形和数控式)、热处理炉的温控系统、按一定载荷曲线加载的力系统。

给定值或指令输入信号是随意变化而事先无法知道的控制系统,称自动跟踪系统或简称跟踪系统。如跟踪目标的雷达系统,火炮群控系统、导弹制导系统、参数的自动检测系统。受控对象较简单,只相当于一个机械载荷,这种跟踪系统又常称作随动系统或伺服系统。如 X-Y 记录仪、仪表随动系统、磁头伺服系统。对随动系统而言,工作过程中主要考虑的是跟踪指令复现输入信号,抗干扰的问题则处于次要地位。这是因为一个较简单的纯机械式受控对象,其结构参数、特性不易改变,如果工作环境比较优越,干扰的影响是很小的。

## § 1-2 例题分析

例 1-1 带钢连轧机架轧辊的转速控制系统如图 1-2 所示。

试简要分析系统的工作原理,并画出系统的原理方块图。

解 连轧机在轧钢过程中,通过各机架的带钢必须保持秒流量相等,否则将出现拉钢或叠钢,影响产品质量或造成故障。这就要求各机架轧辊的转速保持一定比例,而对某机架轧辊

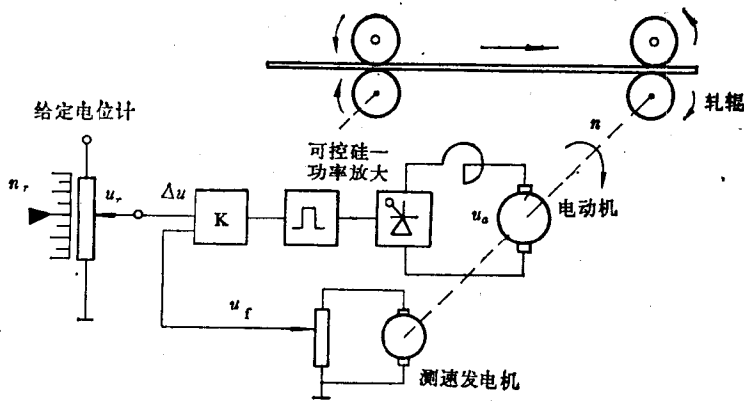


图 1-2

来说,即要求其转速恒定。

需要控制的是轧辊的转速,故首先应明确:受控对象是轧辊,被控量是轧辊的转速  $n$ 。

直接拖动轧辊转动的是直流电动机,电机又是由可控硅整流装置供电的,故电动机承担了执行的功能,整流装置相当于变换和放大部件。

要求的转速值  $n_r$ ,是通过给定电位计(或指令机构)以电压  $u_r$  给出的。 $n_r$  称给定值, $u_r$  则相当于指令信号。

轧辊实际转速是通过同轴的测速发电机测量的,并以电压  $u_f$  输出。

$n_r$  与  $n$  的比较是由线路上  $u_r$  与  $u_f$  的相减实现的,比较电路就相当于计算装置。

按照信号的传递顺序,将受控对象置于最右方,指令机构置于最左端,则得图 1-2 系统的原理方块图,见图 1-3。

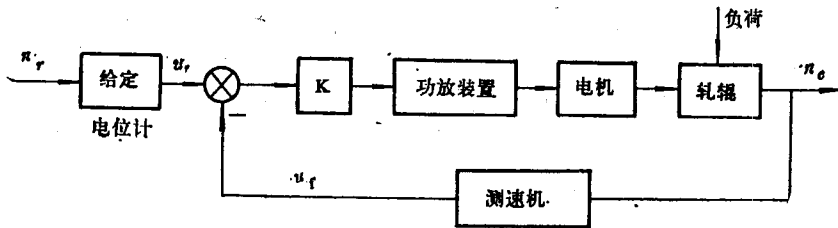


图 1-3

如果由于负荷的扰动使轧辊转速下降了,则  $u_f$  随之下降, $u_r - u_f$  上升,可控硅整流功放输出的电压  $u_a$  加大,从而电机拖动轧辊增速,完成了控制作用,补偿了扰动对被控量  $n$  的影响。

系统的被控量是轧辊转速  $n$ ,而测量的也是  $n$ ,并且按  $n$  对  $n_r$  的偏差(亦即  $u_r - u_f$ ) 进行控制,故该系统属于按偏差控制的负反馈控制方式。

例1-2 液面控制系统如图 1-4 所示。

要求在运行中容器的液面高度保持不变。试筒

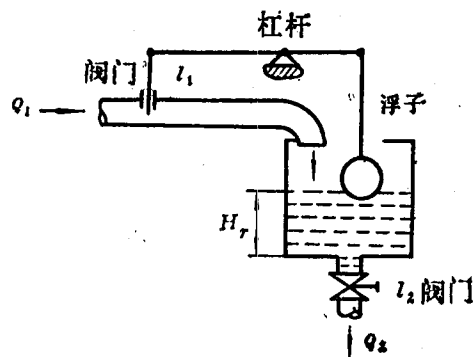


图 1-4



述其工作原理,并画出系统原理方块图。

**解** 由控制的要求可知,受控对象是容器,其液面高度 $H$ 应为被控量。

浮子跟随液面上下浮动,可以反映出液面的实际高度 $H$ ,也可以表明实际高度对给定高度的偏差 $H_r - H$ ,相当于测量元件。

浮子带动杠杆,杠杆联动节门以调节进入容器的流量,进而控制液面高度,故杠杆相当于放大、执行元件。

由以上分析可画出系统的原理方块图如图 1-5 所示。

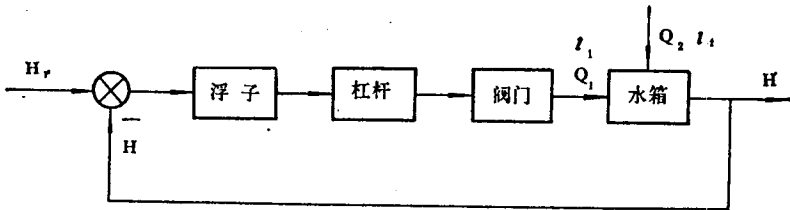


图 1-5

明显看出,被控量是 $H$ ,测量的是 $H_r - H$ ,故系统属于负反馈控制方式。

假设在额定需用流量 $Q_{20}$ 下,容器的液面高度 $H$ 恰好为给定值 $H_r$ ,而由节门 1 的开度决定的进入容器的液体流量 $Q_1$ 也恰恰等于 $Q_{20}$ ,则系统处于要求的工作状态。

若需用流量发生变化,如关小节门 2、 $Q_2$ 减小,一时进入容器的液体流量 $Q_1$ 还没改变,则 $Q_1 > Q_2$ ,液面高度上升。而 $H$ 变化将导致浮子上移,杠杆联动节门 1 关小,使 $Q_1$ 减小,直到 $Q_1$ 重新等于 $Q_2$ ,液面高度又保持常值。

移动杠杆的支点,加大杠杆传动比,可强化控制的效果,浮子移动量很小就会使 $Q_1$ 变化很大,从而保证液面高度 $H$ 的波动量在允许的误差范围内。但是图 1-4 系统从根本上讲,需用流量改变以后,容器的液面高度 $H$ 再也不能恢复到给定值 $H_r$ 。这和控制装置各部件的特性有着密切的关系,请自行分析其原因。因此,不能认为采用按被控量偏差控制的系统,最终一定能使被控量等于给定值,完全消除偏差。这是不尽然的,问题还取决于系统内部其它方面的规律性。

**例1-3** 电冰箱制冷控制系统的工作原理图如图 1-6 所示。

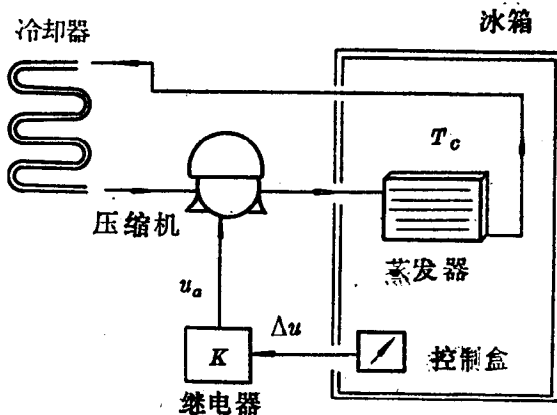


图 1-6

试简述系统的工作原理,并画出原理方块图。

**解** 系统的任务是保持箱内的温度  $T_c$  等于给定的温度  $T_r$ 。

系统由箱体、温度控制盒、电动机、压缩机、冷却管、蒸发器等部件组成。

温度控制盒通过双金属感温元件,测量箱内的温度,并和要求的温度比较。偏低时则接通继电器、接触器,输出供给电动机的电压  $u_o$ 。故温度控制盒起到了测量、比较、变换的作用。

电动机带动压缩机,将蒸发器中的高温低压氟里昂气态制冷剂,送经冷却管散热,降温后的低温低压制冷剂增压成低温高压液态进入蒸发器,急速降压扩散成气态,吸收箱体内的热量,冰箱的温度随之下降。而高温低压氟里昂又被压缩机从蒸发器中吸出送入冷却管,如此循环流动,使冰箱达到制冷的效果。其中,电动机相当于执行元件。但是,电机需要通过氟里昂循环系统才能控制冰箱的温度。该循环系统也可以看作是执行装置,而一般常称作调节机构。可视为“执行”和“受控对象”的中介。

受控对象是什么?控制的目的是保持冰箱的低温。故箱体应该是受控对象,箱内温度应该是被控量。应该明确的是,不能认为电机等执行元件所直接拖动的机构就是受控对象,而这个机构的位置或转速就是被控量。这是不尽然的,只有对简单的纯机械式受控对象才是如此。因此,一定要看系统最终的控制目的和任务。本例中的压缩机循环系统以及例 1-2 中的节流 1 及管路装置,都不是受控对象,这个概念应分清。

电冰箱的原理方块图如图 1-7 所示。

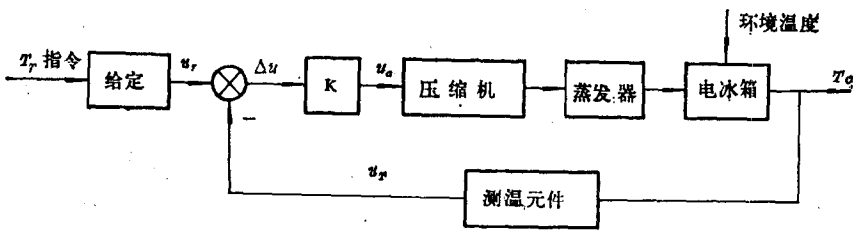


图 1-7

方块图中,方块可以画得多一些,将功能部件分得较细;也可以概括一些,将几个部分用一个方块表示。同一系统,原理方块图不是唯一的,但是各方块所代表的具体部件,以及方块之间的联系,必须和系统的实际情况一致。

从图 1-7 中看出,电冰箱也是采用的按被控量偏差控制的反馈控制方式。

反馈控制是自控系统最基本的、且较完备的控制方式。

按干扰补偿的开式控制的系统,可参阅教材中的习题 1-6。

## 第二章 控制系统的数学模型

### §2-1 基本要求

1. 了解动态微分方程建立的一般方法及小偏差线性化的方法。
2. 熟悉典型信号的拉普拉斯变换,掌握较复杂控制信号的分解计算。
3. 熟记拉普拉斯变换的基本定理,并掌握运用拉普拉斯变换解微分方程的方法。
4. 正确理解传递函数的定义、性质和意义。
5. 正确理解由传递函数派生出来的系统的开环传递函数、闭环传递函数、对控制和对于扰的传递函数、误差传递函数以及典型环节的传递函数等概念。
6. 掌握结构变换的基本法则,并能正确较熟练地运用。
7. 熟练掌握由系统微分方程组建立动态结构图,并通过等效变换计算系统传递函数的方法。

### §2-2 内容提要

教材中的第二章主要介绍了描述系统输入、输出变量及内部各变量之间动态关系的三大数学模型,即微分方程、传递函数和动态结构图。同时也介绍了和这三大模型密切相关的一些问题,如建立系统微分方程的一般方法;小偏差线性化的方法;用拉普拉斯变换求解微分方程的方法;传递函数的基本求取方法;结构图的画法;等效变换法则以及梅逊公式等等。下面就上述内容做一小结和必要的补充。

#### 一、线性化的概念与方法

##### 1. 线性化的概念

由于实际系统的元部件都不同程度地存在着非线性关系,因此,严格按照这些关系建立的微分方程必然是非线性微分方程。而非线性微分方程的求解是相当困难的,且没有通用的解法,因此在研究实际系统时,常将非线性问题在允许的范围内转化为线性问题来处理,即所谓非线性特性的线性化。当然,经线性化得到的线性微分方程将有条件地、近似地描述原系统的动态规律,亦即当近似条件成立时,以线性化的数学模型来讨论系统的运动状态才有实际意义。

##### 2. 线性化的方法

非线性特性线性化的方法很多,教材及电视课中只介绍了小偏差法。所谓小偏差法,即将非线性特性在某工作点附近的邻域内作泰勒级数展开,忽略高阶无穷小项及余项,仅取一次近似式,便得到以偏量表示的线性化增量方程。

若  $y = F(x)$  为单变量非线性函数,将其在工作点  $p(x_0, y_0)$  的邻域内展成泰勒级数,即

$$y = F(x) = F(x_0) + \left(\frac{dF}{dx}\right)_0 \cdot \Delta x + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2F}{dx^2}\right)_0 \cdot (\Delta x)^2 + \dots \quad (2-1)$$

当忽略偏量 $\Delta x$ 的高次项,可得到

$$F(x) = F(x_0) + \left(\frac{dF}{dx}\right)_0 \cdot \Delta x \quad (2-2)$$

或

$$\Delta y = F(x) - F(x_0) = \left(\frac{dF}{dx}\right)_0 \cdot \Delta x \quad (2-3)$$

其中式(2-2)或式(2-3)就是非线性函数 $y = F(x)$ 在工作点 $p(x_0, y_0)$ 处的以偏量 $(\Delta x, \Delta y)$ 表示的线性化增量方程。

对双变量和多变量非线性函数,进行线性化处理可采用偏导数的形式来表示,在此不一列出了。

以上是用解析的方法表示的用“小偏差法”进行线性化的方法。另外,也可以通过几何作图的方法求取线性化的结果。图2-1所示的是单变量的非线性特性曲线,由图可见,在工作点附近的邻域内,用曲线在工作点处的切线代替该曲线,即小偏差法的几何含义,切线的斜率即

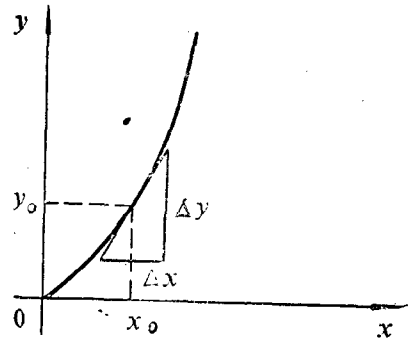


图 2-1

$\left(\frac{dF}{dx}\right)_0$ , 工作点处的坐标为 $(x_0, y_0)$ 。由图还可看出,如果工作点取做坐标原点,则输入与输出的增量即输入、输出变量本身。

### 3. 几点说明

(1) 用小偏差法对非线性特性进行线性化处理不是在任何情况下都适用的,是有条件的。其一,此方法只适用于非本质非线性特性进行线性化。因为函数作泰勒级数展开的条件是在工作点附近的邻域内连续,且各阶导数(或偏导数)存在,而本质非线性特性不满足这个条件,所以不能用这种方法进行线性化处理。其二,此方法是假设变量只在工作点附近的小范围内变化,由控制系统的任务所决定,被控量总是跟随或在给定值附近变化,因此,这种假设是可靠的,在实际系统中是能够满足这种假设条件的。

(2) 小偏差线性化的处理方法,是在工作点附近以工作点处的切线代替曲线,这是一种近似的结果。显见,变量的变化范围越小,线性化后的微分方程反映实际系统工作过程的准确程度越高;若非线性程度较低,即便变化范围较大,仍可使线性化的微分方程在允许的精度范围内反映实际系统的动态规律。因此,线性化后的微分方程描述实际系统的准确程度,取决于该系统的工作范围和非线性程度。

(3) 通常所列的微分方程都是线性化增量方程,但是为了形式上的简单和书写的方便,变量的增量符号 $\Delta$ 经常省略而表示以一般变量。这里从概念上必须明确,线性化微分方程是和工作点有关的一个有条件的近似表达式,工作点不同,方程中的各系数也不同,而工作点不是可以任意选择的,需要依自动控制系统的实际工作状态确定。

### 4. 有关线性问题的一点补充

由于课程中主要研究的是线性系统的控制原理,所以有必要对什么是“线性”关系给以明

确的认识,澄清一些模糊的甚至是错误的概念。

所谓线性关系,从输入角度来说,必须满足齐次性和迭加性;从输出角度来说,必须满足分解性。对于一个线性系统,只有当且仅当系统具有分解性,并满足零输入线性和零状态线性时,该系统才是线性的。那么,象图 2-2 所描述的系统是否为线性的呢?

图 2-2 中  $x$  为输入变量,  $y$  为输出变量,  $k$  为直线的斜率,则有函数关系

$$y = f(x) = kx + b$$

(1) 当  $x = x_1$  时,  $y_1 = kx_1 + b$

$$x = 2x_1 \text{ 时, } y_2 = 2kx_1 + b$$

根据齐次性的定义,当输入变量由  $x_1$  变为  $2x_1$  时,输出变量应为  $y_2 = 2(kx_1 + b) = 2y_1$ 。显然,上式不满足这一条件。

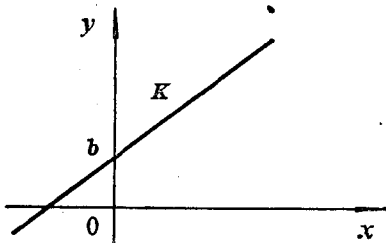


图 2-2

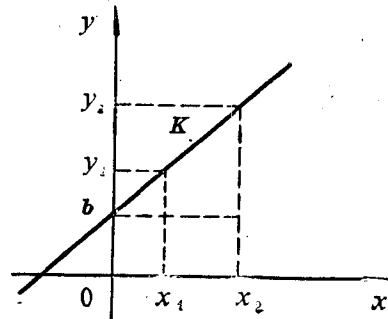


图 2-3

(2) 当  $x = x_1$  时,  $y_1 = kx_1 + b$

$$x = x_2 \text{ 时, } y_2 = kx_2 + b$$

$$\text{则 } x = x_1 + x_2 \text{ 时, } y = k(x_1 + x_2) + b$$

根据迭加性的定义,当输入变量  $x = x_1 + x_2$  时,输出变量应为  $y = y_1 + y_2 = k(x_1 + x_2) + 2b$ 。显然,上式也不满足这一条件,如图 2-3 所示。

由此可见,这样的一条直线所描述的系统对于齐次性和迭加性均不满足,因此这种特性不是线性的。

这里只是举了一个单变量代数方程的例子说明线性的概念。同理,通过拉普拉斯变换可以证明线性微分方程描述的系统是线性系统,而非线性微分方程描述的系统不是线性系统。

## 二、用拉普拉斯变换求解微分方程

下面举例说明用拉普拉斯变换求解微分方程的方法和步骤。

图 2-4 所示网络中,开关于  $t = 0$  时刻闭合。若开关闭合前网络没有贮能,试求网孔电流  $i_1$  和  $i_2$ 。

第一,根据基尔霍夫电压定律可列如下方程:

$$\frac{di_1}{dt} + 20i_1 - 10i_2 = 100 \cdot 1(t)$$

$$\frac{di_2}{dt} + 20i_2 - 10i_1 = 0$$

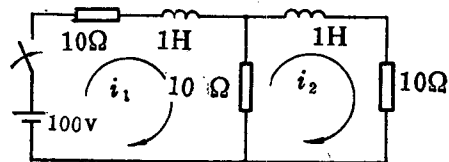


图 2-4

第二,对微分方程两端进行拉氏变换。由于初始状态为零,可得出如下变换方程:

$$(s+20)I_1(s) - 10I_2(s) = \frac{100}{s}$$

$$-10I_1(s) + (s+20)I_2(s) = 0$$

第三,解变换方程,求出待求变量的象函数表达式为

$$I_1(s) = \frac{100(s+20)}{s(s^2+40s+300)}$$

及

$$I_2(s) = \frac{1000}{s(s^2+40s+300)}$$

第四,将  $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$  展成部分分式为

$$I_1(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{B_1}{s+10} + \frac{C_1}{s+30}$$

及

$$I_2(s) = \frac{A_2}{s} + \frac{B_2}{s+10} + \frac{C_2}{s+30}$$

待定系数值为

$$A_1 = I_1(s) \cdot s \Big|_{s=0} = \frac{20}{3}$$

$$B_1 = I_1(s) \cdot (s+10) \Big|_{s=-10} = -5$$

$$C_1 = I_1(s) \cdot (s+30) \Big|_{s=-30} = -\frac{5}{3}$$

同理可得出  $A_2 = \frac{10}{3}$ 、 $B_2 = -5$ 、 $C_2 = \frac{5}{3}$ 。

第五,代入系数值,求  $I_1(s)$  及  $I_2(s)$  的反变换,得网孔电流  $i_1(t)$  及  $i_2(t)$  的响应函数为

$$i_1(t) = \frac{20}{3} - 5e^{-10t} - \frac{5}{3}e^{-30t} \quad (t \geq 0)$$

$$i_2(t) = \frac{10}{3} - 5e^{-10t} + \frac{5}{3}e^{-30t} \quad (t \geq 0)$$

以上是对具有单极点的情况进行了推演,有关复极点的情况请看例题分析部分。

### 三、传递函数

传递函数是在用拉普拉斯变换求解微分方程的过程中得到的一个概念,也是经典控制理论中最重要的一种数学模型。在经典控制理论中,分析线性控制系统的三大方法就是以传递函数为基础的,因而一定要牢固掌握传递函数的定义、性质、求取方法等有关内容。

#### 1. 传递函数的定义(略)

由于传递函数是零初始条件下定义的,因此它不能反映系统输出响应的全貌。另外,传递函数只表明某一个输入量和某一个输出量之间的关系,因此它不能清楚地看出系统内部各变量之间的相互关系。以上是传递函数的局限性。

#### 2. 传递函数的性质

(1) 传递函数是描述线性系统(或元、部件)动态特性的一种数学模型,而形式上和系统的动态微分方程也是一一对应的。

(2) 传递函数只表明输入变量与输出变量之间的动态联系,而不能反映系统内部的信息。

(3) 传递函数只直接反映系统在零状态下的动态特性。

(4) 传递函数完全由系统的结构、参数确定,而与输入信号的形式无关。因此,作为数学

模型它反映了系统自身的动态特点。

请注意,这里是对系统的确定的输入量、输出量而言的。对同一系统,选取不同的输入量和输出量,则传递函数也将不同。从这个意义上讲,可以说传递函数与输入、输出有关。

(5) 同一系统,对不同作用点的输入信号和不同观测点的输出变量之间,传递函数具有相同的分母,所不同的只是分子。故常将传递函数的分母多项式称为特征多项式,它决定着系统响应的基本特点和动态本质。

(6) 实际系统传递函数分母多项式的阶次  $n$  总是大于分子多项式的阶次  $m$ , 即  $n > m$ 。这是因为控制系统总是存在“惯性”,且外部提供的能量总是有限的。

(7) 传递函数是一种数学抽象,因此无法直接由它看出实际系统(或元、部件)的物理构造。物理性质不同的系统(或元、部件),完全可以有相同的传递函数。

### 3. 传递函数的求取

传递函数的求取方法很多,也很灵活,一般可由下列途径获得。

- (1) 由系统的原理图求传递函数。
- (2) 由系统的微分方程求传递函数。
- (3) 由系统的结构图求传递函数。
- (4) 由系统的频率特性曲线求传递函数(见第五章)。
- (5) 由系统的响应曲线或响应的解析式求传递函数。

在教材及电视课中,本章主要强调由系统微分方程组建立动态结构图,并通过结构变换求取传递函数的方法。具体方法详见例题部分。

### 4. 几种典型传递函数的定义

以图 2-5 为例,对几种常用的典型传递函数的定义表述如下。

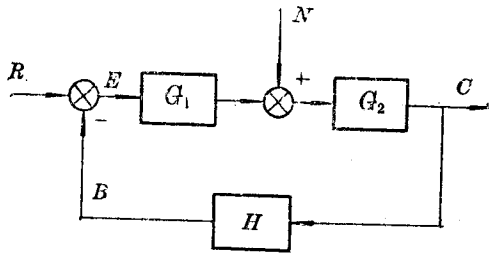


图 2-5

- (1) 对给定量的闭环传递函数

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (\text{当 } N(s) = 0 \text{ 时})$$

- (2) 对扰动量的闭环传递函数

$$\frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (\text{当 } R(s) = 0 \text{ 时})$$

- (3) 若定义误差  $E(s) = R(s) - B(s)$ , 则由给定量引起的误差传递函数

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (\text{当 } N(s) = 0 \text{ 时})$$

由扰动量引起的误差传递函数

$$\frac{E(s)}{N(s)} = \frac{-G_2(s)H(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)} \quad (\text{当 } R(s)=0 \text{ 时})$$

#### (4) 开环传递函数

$$\frac{B(s)}{E(s)} = G_1(s)G_2(s)H(s)$$

#### 5. 典型环节的传递函数

在研究控制系统的动态性能时,主要是依据系统和元部件的数学模型,而不是它的功能。因此,按照数学模型对元部件和系统进行分类,将有助于动态特性的研究。组成系统的几种较为简单的低阶模型(或单元),称之为典型环节。不论元部件是电气的还是机械的,只要属于这种数学模型,它们就是同一环节。

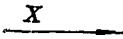
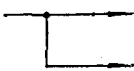

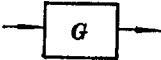
典型环节及其相应的微分方程见教材 § 2-8。

### 四、动态结构图

#### 1. 动态结构图的组成

控制系统的动态结构图由信号线、引出点、比较点和传递函数方框等部分组成。动态结构图是描述系统的又一种数学模型。

表 2-1

名称	符号	说明
信号线		表示系统中信号的流通方向,一般在线上标注信号所对应的变量。注意,信号只能沿箭头方向流通,即信号的传递具有单向性
引出点		表示信号从该点取出。注意,从同一信号线上取出的信号,大小和性质完全相同
比较点		表示两个或两个以上信号在该点相加(+)或相减(-)。注意,比较点处信号的运算符号(正、负)必须标明,一般不标明则取正号
方框		表示输入、输出信号之间的动态传递关系,方框输出信号等于方框输入信号与方框中传递函数的乘积

#### 2. 结构图的特点

(1) 依据微分方程或经拉氏变换得到的变换方程,可以方便地画出结构图。再经过结构图的等效变换,便可求出图中任意两信号(变量)间的传递函数。

(2) 结构图对研究整个控制系统的动态性能及分析各环节对系统总体性能的影响,比较形象和直观。

(3) 同一系统,可以画出不同形式的结构图,即结构图对所描述的系统来说不是唯一的。但是,经结构变换所得的结果应该是相同的,即同一系统的传递函数是唯一的。

(4) 结构图只包含与系统动态特性有关的信息,并不显现系统的物理结构,不同的物理系统有可能具有相同的结构图。

#### 3. 结构图等效变换的规则



表 2-2 结构图等效变换示例

原结构	等效结构	原结构	等效结构
1 		7 	互移 
2 		8 	
3 		9 	串联 
4 		10 	并联 
5 		11 	反馈 
6 		12 	

引出点移动

比较点移动