

控制与通信技术基础

邵大川 编著

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

信息和通信技术的发展带来了经济和技术的腾飞。本书把信息、控制和通信理论统一在信息及其传递的中心思想下,深入浅出地讲述了它们的基本原理及应用。全书分控制与通信两篇,以信息传递为主线。在控制篇中突出信息传递的原理和应用,从而为建立一个具有无失真传递的信息高速公路打下基础。而在通信篇中则突出有关信息高速公路的基本概念和应用技术及在这种无失真信息高速公路上怎样进行最佳的信息传递。该书通俗易懂,主题突出,可作为各大专院校及有关工程技术人员教材及参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

控制与通信技术基础/邵大川编著—北京:
机械工业出版社,1995.8
ISBN 7-111-04717-6

I. 控… II. 邵…

III. ①自动控制理论②通信-基础理论

IV. ①TP13②TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 04256 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街 1 号 邮政编码:100037)

责任编辑:张政民 周保东

封面设计:姚 毅

迁安县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1995 年 8 月第 1 版 · 1995 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16 · 18 印张 · 493 千字

印数:0001—2200 册

定价:24.00 元

信息科学
方兴未艾

母国光

一九九五年

前 言

理工科大专院校许多专业都开设了控制理论课。除通信专业外,还很少有开通信理论课的。但是,近一、二年来,随着通信事业和计算机网络的快速发展,高信息已经提上了日程,信息、信道和关于它们的理论也就变得越来越重要,而且可以预料到,在未来的 21 世纪中各行各业或人人都得有点通信常识。所以,面对这种情况,许多院校和工程技术人员都开始考虑通信理论学习的问题,并准备开设有关课程。但是怎样开通信课,似乎难以处理。《通信技术基础》一书就是为解决这个问题而出版的。该书别开声面地把两者统一在信息及其传递的中心思想下,深入浅出地讲述了控制与通信的基本理论和技术;同时又尊重了各自的理论与体系,依然分为控制与通信两篇。这样,两个部分的内容既可合着讲,也可分着讲,十分方便。把控制与通信合在一起的原因,是从信息的角度看他们本来就是分不开的。正如控制论创始人维纳曾说过的那样:“控制工程的问题和通信工程的问题是不能分开的,而且这些问题的关键并不是围绕着电子技术,而是围绕着更为基本的信息概念。”该书的另一个特点就是删繁就简,突出主要问题,如在控制篇中传递函数设计和应用是重点,省去了无关的内容。在通信篇中突出基本概念,删去了大量的数学推导。本书不追求高深,为的是强调入门和应用。因此,不难看出,本书最适合于作为理工大专院校的非自控专业、非通信专业的专业基础课的教材,也适合于做中高级工程技术人员和中专以上学历工人必备的专业参考书之一。

未来是信息和智能化的时代,我们为了培养适合于这个时代的 21 世纪人才,采用《通信技术基础》一书作为教材是一个合适的选择。

南开大学校长毋国光教授在百忙之中认真审阅了本书的内容并题了词,作者再次表示衷心的感谢。

笔者学识菲薄,虽书中所述力校再三,但错误仍恐难免,还期盼您的不吝指正,谢谢!

作 者

1994 年 12 月于沈阳

目 录

上篇 控制技术基础

第一章 控制系统和信息	(3)
第一节 控制系统的构成和分类	(3)
第二节 控制系统的数学模型	(4)
第三节 传递函数	(8)
第四节 信息和信号	(15)
小 结	(19)
习 题	(19)
第二章 控制系统特性的描述方法	(22)
第一节 瞬态响应法	(22)
第二节 方块图	(23)
第三节 坐标图法—频响法	(28)
小 结	(38)
习 题	(38)
第三章 控制系统特性的分析	(42)
第一节 系统的特性	(42)
第二节 系统的稳定性	(43)
第三节 系统稳定的精确度	(56)
第四节 系统瞬态特性分析	(63)
第五节 常见的非线性因素及其对系统特性的影响	(85)
习 题	(88)
第四章 控制系统特性的设计	(94)
第一节 系统特性的补偿设计法	(94)
第二节 系统特性的综合设计法	(112)
第三节 复杂系统的特性设计	(116)
第四节 系统设计前的准备工作	(119)
习 题	(121)

下篇 通信技术基础

第五章 通信系统	(127)
第一节 通信系统的模型	(127)
第二节 通信系统的分类	(128)
第三节 通信系统的性能指标	(131)
小 结	(132)
第六章 通信理论基础	(133)
第一节 信息和信息论	(133)

第二节 信道及其基本理论.....	(144)
习 题.....	(150)
第七章 模拟线性幅调制	(152)
第一节 基本的调幅类型.....	(152)
第二节 线性调制系统的抗噪声性能.....	(165)
第三节 频分多路复用及线性调制应用举例.....	(169)
习 题.....	(174)
第八章 模拟角调制	(176)
第一节 角调制基本概念.....	(176)
第二节 调频信号的基本频谱.....	(180)
第三节 调频信号的产生与解调.....	(183)
第四节 抗噪声性能.....	(185)
第五节 采用预加重/去加重改善信噪比	(192)
第六节 改善门限效应的解调方法.....	(194)
第七节 调频应用举例.....	(197)
习 题.....	(199)
第九章 数字信号的传输	(202)
第一节 基带传输.....	(202)
第二节 载波传输.....	(214)
第三节 纠错编码.....	(227)
习 题.....	(232)
第十章 通信同步原理	(234)
第一节 载波同步.....	(234)
第二节 位同步.....	(239)
第三节 帧同步.....	(245)
第四节 网同步的基本概念.....	(252)
习 题.....	(254)
第十一章 光纤通信	(256)
第一节 概论.....	(256)
第二节 点一点光纤链路.....	(261)
第三节 波分复用(WDM)	(267)
第四节 数据总线.....	(270)
第五节 线路编码.....	(274)
小 结.....	(277)
习 题.....	(278)
参考文献.....	(280)

上 篇

控制 技术 基础

第一章 控制系统和信息

第一节 控制系统的构成和分类

一、控制系统的构成

所谓控制，就是为改善对象的功能，去获得信息并在这信息的基础上选出的加于该对象上的作用。而自动控制则是指在没有人直接参与的情况下利用控制装置根据所获信息使被控制对象自动地按照预定的规律运行或达到预定状态的作用。因此，系统是由被控对象和控制装置通过传递体连接而成。被控对象是指要求实现控制的机器、设备或生产过程，如飞机、锅炉、机床及化工生产过程等。也可以广义地指生物体、经济和社会的某些部门。控制装置是指对被控对象起控制作用的设备总体。其中包括：测量、给定、比较、放大、校正和执行功能的各元部件。所以，一般情况下控制系统的构成如图 1-1 所示。图中测量元件就是后面将要讲述的反馈元件。

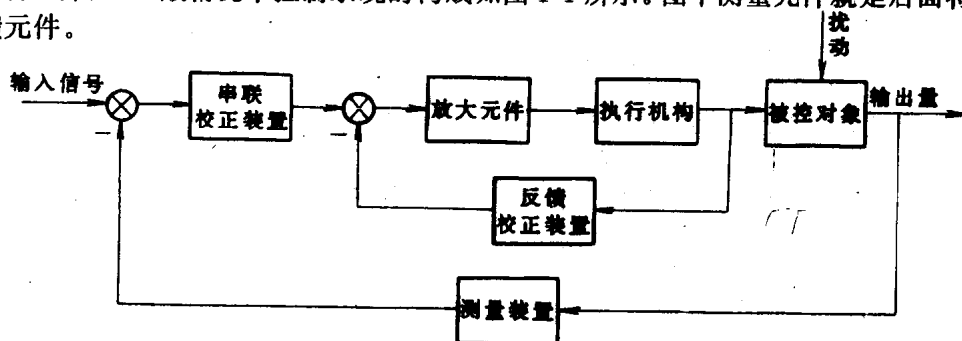


图 1-1 控制系统的构成

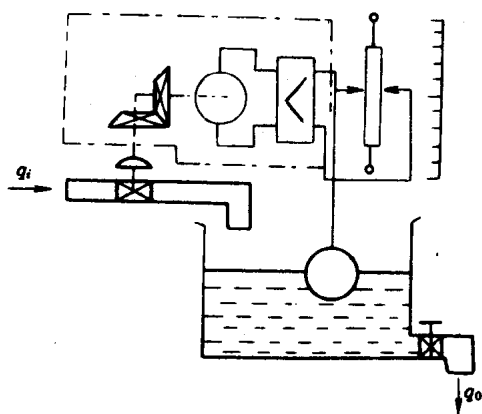


图 1-2 水箱水位控制系统

图 1-2 是水箱水位控制系统图。水箱是被控对象，水位是被控制量。进水量 q_i 是控制这一作用的直接表现，通常就称它为控制量。而出水量 q_o 则是干扰，因为它对保持水位来说是破坏因素。也就是说，系统中一切破坏被控量达到要求状态的因素都称为干扰。电位器是输入信号元件。水位控制系统方块图如图 1-3 所示。把它和图 1-2 比较以后可知，一个功能元件不一定是一个实际元件，或许是几个实际元件，如水箱控制系统中执行元件是由电机、齿轮及阀门三部分组成的。另外，一个实际元部件也可能是几个功能元件。

此后把功能元件简称为元件，但不要把二者相混同。

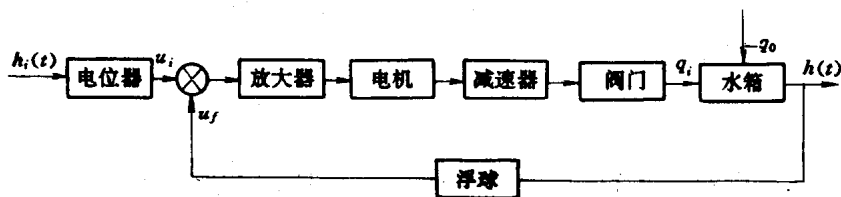


图 1-3 水箱水位控制系统的方框图

二、控制系统的分类

(一) 按控制方式分类

按控制方式分类可以把控制分为顺序控制和反馈控制两种。顺序控制又可分为矩阵式和可编程序式。矩阵式顺序控制是用二极管组成逻辑矩阵来实现逻辑顺序控制和步进顺序控制的。可编程序顺序控制则是采用计算机和与其相应的程序来完成顺序控制。显见，随着计算机技术的发展，单板机和单片机的出现，可编程序顺序控制技术愈来愈被广泛应用与推广。反馈控制与顺序控制不同之处在于前者由闭环回路构成，而后者是开环回路构成。反馈控制在控制中起着中心作用。本书主要研究内容就是反馈控制，下面分类也是针对它的。

(二) 按要求值分类

分为定值控制和随值控制两种。随值控制又分为三类：

1. 随动控制 控制的输入信号是任意的时间函数。
2. 程序控制 输入信号是预先给定的时间函数。
3. 比率控制 输入信号是按一定比例关系变化的随值控制。

(三) 按被控量来分类

从原理上说这种分类不是实质性的，因为它并不从根本上影响研究的方法。但实际上这是很有用的分类方法，它们由不同的系统构成。

1. 过程控制 许多物理量，如温度、压力、流量、液位、粘度及 pH 值等都是与整个生产过程有关的量，若想保证生产过程所需的环境条件，就必须控制这些物理量的变化。所以这些物理量被称之为过程控制量。以这些过程控制量为被控量的控制就称之为过程控制。显见，在冶金、化工、石油及食品等各种生产过程中往往应用的就是这种控制。

2. 伺服控制 被控量是位移、速度、角度等力学量的一类控制。

3. 自动控制 指被控量是电压、电流、频率等电学量的一类控制（本书主要内容就是这一类控制，所以不再加以区分）。

其他分类法还有很多种，如按能源可分为电动、气动及液动控制系统；按理论的性质则可分为单回路和多回路控制系统，线性与非线性控制系统，连续与离散值控制系统等。

第二节 控制系统的数学模型

工程上对控制性能都有具体的数量要求，常称为技术指标。因此，只定性地分析控制系统的原理和粗略的运动过程是不够的，还必须深入地掌握系统在外作用下的运动规律，从理论上对系统性能进行定量的分析和综合，以便实现技术指标。要做到这一点，必须首先建立控制系统的模型。用模型研究代替真实系统研究是自动控制理论的主要手段和方法。

但是，建立完美无缺的模型是不可能的，每个模型的真实性和合理性是相对的，有局限性。模型来源于实践，又受到科学水平和人们认识水平的制约。模型要在应用中不断证实，不

断修正和完善,乃至被更新。例如,控制理论在 50 年代的主要模型是微分方程和传递函数,在 60 年代就出现了现代控制论的数学模型,即状态空间中矩阵方程组,在 90 年代电脑模拟已成了智能控制的主角。

一、数学模型

控制系统的数学模型,是描述系统内部各物理量(或变量)之间关系的数学表达式。在静态条件下(变量的各阶导数为零),描述各变量之间关系的数学方程,称为静态模型;在动态条件下,各变量之间的关系,称为动态模型。由于微分方程中包含系统各变量的导数,表示了系统特性随时间变化的特征,因此,微分方程完全可以描绘控制系统动态过程是系统动态数学模型。

控制系统的数学模型可以用分析法和实验法建立。采用分析法时,应从系统所依据的物理或化学规律出发,建立数学模型并经实验证实。例如,电气网络是基于基尔霍夫定律,机械系统则基于牛顿运动定律。采用实验法时,应对系统加入一定形式的信号,求得系统的输出响应后来建立数学模型。

建立合理的动态数学模型是一项极为重要的工作,它直接关系到控制系统能否去实现给定的任务。许多情况表明,由于建立的被控对象的数学模型不合理,控制系统也就失去了它应有的作用。但是,这并不意味着数学模型越复杂越合理。合理的数学模型应有最简化的形式,正确地代表系统的动态特性。通常,可以暂时先忽略一些比较次要的因素,或根据不同的工作范围得到简化的数学模型,例如在下面的经典控制理论中就是针对线性定常系统而言,即系统的微分方程是线性的且系数为常数。这种模型就是忽略了非线性因素的简化模型,但是它在许多地方都是行之有效的。

二、系统的微分方程

由上可知,描述控制系统各变量间关系的最直接的方法是用微分方程,它既描述了变量间动态关系,又描述了静态关系。所以,微分方程就是控制系统在时域中的动态数学模型。在给定外作用和初始条件后,求解微分方程就可以得到系统的输出响应,从而掌握了系统具有的特性。特别是借助计算机,可以迅速而准确地求得结果。若要列写一个线性定常控制系统的微分方程,一般的步骤是:画出系统结构图;列写元件微分方程(非线性的要进行线性化处理);导出系统的微分方程。

(一) 元件微分方程的列写

下面以一些实例来说明功能元件微分方程的列写过程。

〔例 1. 1〕试列出图 1-4 所示回路输入—输出间关系的微分方程。

〔解〕设回路输入、输出量为电压 u_i 和 u_o , 回路电流为 i , 由基尔霍夫定律可知

$$Ri + \int \frac{i}{C} dt = u_i \quad (1-1)$$

和

$$\int \frac{i}{C} dt = u_o \quad (1-2)$$

合并后得

$$RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (1-3)$$

即是所求的回路微分方程式

〔例 1. 2〕列出图 1-5 所示他励式电枢调速直流电机的微分方程。

〔解〕从图 1-5 可知输入量为电枢电压 e_a , 输出量为电机转速 $n = d\theta/dt$, 电枢电流为 i_a 。此电流与磁场相互作用产生电磁转矩(电机的动力矩)为

$$M_m = C_m \cdot i_a$$

电磁转矩驱动负载并克服摩擦力矩满足平衡方程为

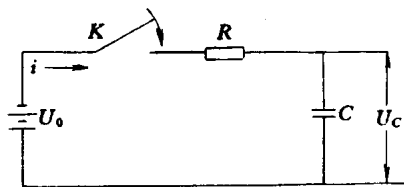


图 1-4 RC 回路

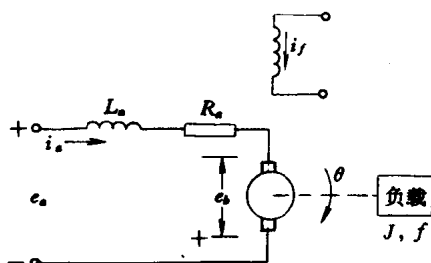


图 1-5 电枢调速直流电机

$$M_m = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f_m \frac{d\theta}{dt} = J \frac{dn}{dt} + f_m n \quad (1-4)$$

J 为电机轴上总转动惯量 (等于转子本身惯量 J_m 和负载转动惯量 J_2 之和), f_m 为粘性摩擦系数)。

电枢转动时产生反电动势为

$$e_b = k_b \frac{d\theta}{dt} \quad (1-5)$$

电枢中有电势平衡方程

$$e_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (1-6)$$

联立式 (1-4) ~ (1-6) 得出所求的微分方程为

$$\frac{L_a J}{C_m} \frac{d^3\theta}{dt^3} + \frac{R_a J + f_m L_a}{C_m} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{R_a f_m}{C_m} + K_b \right) \frac{d\theta}{dt} = e_a$$

简化为

$$T_m \frac{d^2 n}{dt^2} + T_d \frac{dn}{dt} + n = K_m e_a$$

T_m 、 T_d 、 K_m 为有关常数, $n = \frac{d\theta}{dt}$ 。

从以上可以看出, 在推导元件微分方程时, 应该注意什么是输入量和什么是输出量, 以及它们之间的关系。同一元件, 不同输入量和输出量的关系会完全不一样。

(二) 系统微分方程的建立

以一个常见系统为例, 说明系统微分方程的建立。

〔例 1. 3〕列出图 1-6 所示系统的微分方程描述式, 输入是电源波动引起的扰动电压 U_T 。

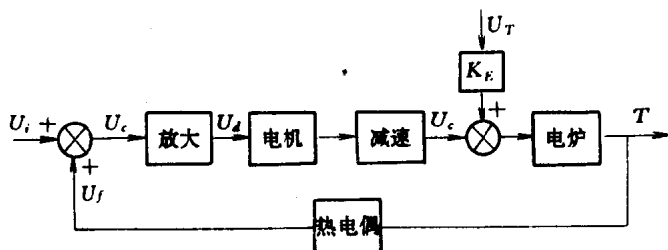


图 1-6 炉温控制系统方块图

〔解〕把各个元件的微分方程描述式列出; 然后消去中间元就可以得到系统的微分方程描述式。

1. 对象 (电炉) 扰动电压 U_T 从调压器一次侧耦合到二次侧, 叠加在加热电压 u_c 之上, 耦合系数为 K_c , 则关于炉温 T 的微分方程可写出

$$K_o \frac{dT}{dt} + T = K_e u_e + K_T u_T$$

式中, K_o 、 K_e 、 K_T 均为常数。

2. 执行元件 这部分包括电机、调速器和调压器。由于电机时间常数(惯性)远比电炉的小, 所以可假设电机转速 n 正比于激励电压 u_d , 即

$$n = K_1 \cdot u_d$$

对于减速器有

$$\alpha = K_2 \cdot \int_0^t n dt$$

式中 α 为减速器输出到调压器上的角位移, K_2 为减速比。

对于调压器有

$$u_e = K_3 \cdot \alpha$$

u_e 为调压器输出电压, K_3 为转换系数。

于是执行元件的微分方程由上述三式组合而成:

$$u_e = K_1 K_2 K_3 \cdot \int_0^t u_d dt = K_m \int_0^t u_d dt$$

式中, $K_m = K_1 K_2 K_3$ 。

3. 放大元件

$$U_d = K_c \cdot u_e$$

4. 比较元件 只有扰动输入下, 即 $u_i = 0$

$$u_e = -u_f$$

5. 反馈元件

$$u_f = K_f \cdot T$$

联立并消去中间元, 得出只有扰动输入下的系统特性的微分方程描述式为

$$K_o \frac{d^2 T}{dt^2} + \frac{dT}{dt} + K_B T = K_T u_T \quad (1-7)$$

式中, $K_B = K_c K_m K_f$ 。

(三) 微分方程的解法

微分方程的解法一般有直接法和拉氏变换法两种。前者直观, 可以借助计算机得出较为准确的结果。但是若是系统中某个参数变化或结构形式改变便需要重新列写微分方程, 因此不便于分析和设计。后者是用拉氏变换来求解微分方程, 可以得到系统在复数域中的数学表达式和引入传递函数概念, 这给系统的分析和设计带来许多方便, 经典自动控制理论的基本内容和方法就建立在拉氏变换和由其导出的传递函数的基础上。下面我们以例子来说明微分方程的拉氏变换解法。

〔例 1. 4〕在图 1-7 所示的电路中, $i(t)$ 为电流源, $u_c(0)$ 为电容两端的初始电压, 试求输出电压 $u(t)$ 。

〔解〕回路中电流如图 1-7 中所示, 对其列出基尔霍夫方程为

$$\begin{cases} i_1(t)R = u(t) \\ 2i_1(t)R - i(t)R = u_c(t) \\ 2i_1(t)R - 2i_c(t)R - i(t)R + u_c(t) = 0 \\ i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \end{cases}$$

进行拉氏变换

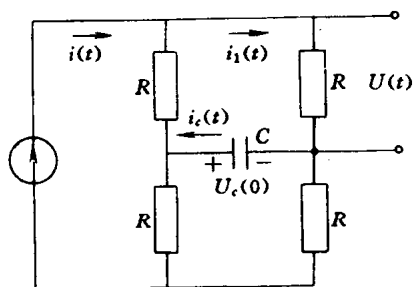


图 1-7 阻容电路

$$\begin{cases} I_1(S)R=U(S) \\ 2I_1(S)R-I(S)R=U_c(S) \\ 2I_1(S)R-2I_c(S)R-I(S)R+U_c(S)=0 \\ I_c(S)=CSU_c(S)-CU_c(0) \end{cases}$$

消去中间元 I_c 、 I_1 和 U_c ，最后得出

$$U(S)=\frac{R}{2}I(S)+\frac{RC}{2(RCS-1)}U_c(0)$$

求拉氏反变换便得到所求的输出电压为

$$u(t)=\frac{R}{2}i(t)+\frac{1}{2}u_c(0)e^{\frac{1}{RC}t}$$

如有 $u_c(0)=0$ 则

$$U(S)=\frac{R}{2}I(S) \quad (1-8)$$

第三节 传递函数

一、传递函数的定义和性质

运用拉氏变换的结果是将时域中的数学模型（微分方程）转换成复数域（ S 域）的数学模型——传递函数。它的定义如下：对于线性定常系统来说在零初始条件下，系统输出量的拉氏变换与输入量拉氏变换之比称为该系统的传递函数。线性定常系统（见图 1-8）由 n 阶线性微分方程描述

$$a_0c^{(n)}(t)+a_1c^{(n-1)}(t)+a_2c^{(n-2)}(t)\cdots a_nc(t) \\ =b_0r^{(m)}(t)+b_1r^{(m-1)}(t)+\cdots b_mr(t)$$

在初始条件为零时，上式两边取拉氏变换，得

$$a_0S^nC(\Phi)+a_1S^{n-1}C(\Phi)+\cdots+a_nC(\Phi) \\ =b_0S^mR(\Phi)+b_1S^{m-1}R(\Phi)+\cdots+b_mR(\Phi) \\ \therefore \frac{C(\Phi)}{R(\Phi)}=\frac{b_0S^m+b_1S^{m-1}+\cdots+b_m}{a_0S^n+a_1S^{n-1}+\cdots+a_n} \quad (1-9)$$

$$\therefore \text{令} \quad G(\Phi)=\frac{C(\Phi)}{R(\Phi)} \quad (1-10)$$

$G(\Phi)$ 就称为系统的传递函数。这样一来，系统在时域中的输出—输入之间的复杂关系（微分和积分的运算）变成了 S 域中的简单代数关系，

$$C(\Phi)=G(\Phi)R(\Phi)$$

根据定义不难看出例 1.4 中阻容电路的传递函数为 $\frac{R}{2}$ 。

如此定义的传递函数有下面几点性质：

- (1) 传递函数的存在只取决于系统（元件）的结构，与外界作用形式无关。
- (2) 传递函数是复变量 S 的有理分式（ $m \leq n$ ），且所有系数均为实数。这是因为系统必然有惯性，且能量有限致使 $m \leq n$ 。各系数均为实数是因为它们取决于元件的参数，而元件参数只能是实数。
- (3) 传递函数表征着两信号间的传递关系，信号变量选取的不同，对应着不同的传递函数。
- (4) 用传递函数表示系统动态特性时是有一定局限性的，这是因为系统内部往往有多种

变量，它们并不能都由输出变量反映出来。一旦出现这种情况，传递函数不再能正确表现系统的特性，甚至会导致错误的结果。这时只有采用现代控制理论的状态空间法来描述系统。虽然如此，作为经典理论基本概念的传递函数，在工程实践中仍不失其重要性。

(5) 每个传递函数都有自己的“零、极点分布”图。这个分布图能够表明系统的状态。

首先把传递函数 G 中的分子和分母分别进行因式分解，然后把它改写为

$$G(S) = \frac{C(S)}{R(S)} = \frac{K(S-Z_1)(S-Z_2)\cdots(S-Z_m)}{(S-P_1)(S-P_2)\cdots(S-P_n)} \quad (1-11)$$

式中， $Z_1, Z_2, \cdots, Z_m$ 是分子多项式等于零时的根，把它们称为传递函数的零点。

$P_1, P_2, \cdots, P_n$ 为分母多项式等于零的根，即 $(S-P_1)(S-P_2)\cdots(S-P_n)=0$ 的根，称作为传递函数的极点。这是因为，变量 S 等于任一 P_n 时都会使传递函数 $G(S)$ 的值为无穷大。

把传递函数的零点和极点同时在复平面 S 上画出来，就构成了传递函数的“零、极点分布”图。

图 1-9 就是 $G(S) = \frac{S+2}{(S+3)(S^2+2S+2)}$ 的零极点分布图。图中，零点用“0”来表示，极点用“×”表示。

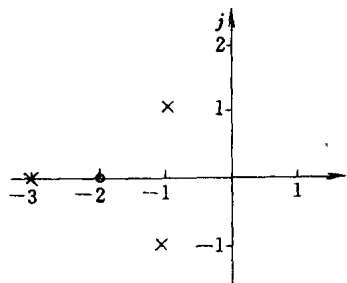


图 1-9 零、极点分布图

二、传递函数的求取和分类

系统或元件的传递函数可以用实验法和解析法来求取。实验法有两种，即频率特性法和脉冲响应

法。解析法则包括微分方程求取法和方块图法。在本节中先介绍解析法中的微分方程法

(一) 基本环节与它们的传递函数

在控制系统中元件往往是按动特性而不是按静特性（即功能）来划分的，其原因是系统特性主要取决于元件的动特性而不是静特性。为区别起见，我们把功能元件简称为元件，而把按动态特性划分出来的部份简称为环节。这样，一个环节不一定是一个元件，或许是几个元件，而一个元件或系统也可以包含几个环节。同一功能元件由于结构的千差万别可以有各种各样的传递函数，但是对于环节来说可以分开的传递函数类别一般只有六类。这六类传递函数的形式叫做典型传递函数，对应的环节则称之为典型环节。下面介绍这些典型环节的构成以及它们的传递函数的求取。

1. 比例环节 控制系统中使用的电子放大器、电位器、测速发电机、杠杆、减速器、测水位的浮子、热电偶及弹簧管等都是比例环节，它们的微分方程为

$$c(t) = Kr(t)$$

$$C(S) = KR(S)$$

所以比例环节（图 1-10）的传递函数为：

$$G(S) = \frac{C(S)}{R(S)} = K \quad (1-12)$$

最简单的例子是图 1-11 所示的放大器，它的输入量和输出量都是电压， K 为放大倍数。

比例环节的阶跃响应为 $h(t) = K \cdot i(t)$

2. 积分环节 图 1-12 中三个元件都可近似看作是积分环节，它们的输入输出微分方程形式均为

$$C(t) = \frac{1}{T_i} \int r(t) dt$$

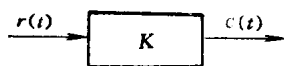


图 1-10 比例环节的方块图

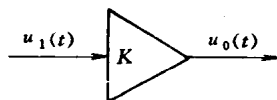


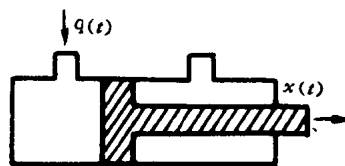
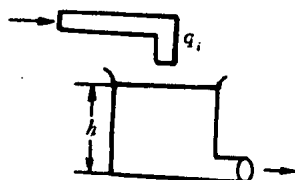
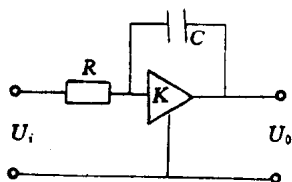
图 1-11 放大器

$$C(S) = \frac{1}{T_i S} R(S)$$

$$G(S) = \frac{1}{T_i S} \quad (1-13)$$

当输入 $r(t) = i(t)$ 时积分环节的输出即单位阶跃响应为

$$h(t) = \frac{t}{T_i} \quad (1-14)$$



a) 运算放大器 b) 水箱水位 h 与进水量 q_i c) 活塞位移 $x(t)$ 与流入量 q

图 1-12 可看作积分环节的功能元件

单位阶跃响应曲线，又称之为动特性曲线如图 1-13 所示。从曲线上可知：

(1) 对于积分环节，只要有输入，不论大小，输出就不断地按直线增长。只有输入为零，输出才停止增长，并保持在增长前的位置。

(2) 曲线的斜率为 T_i ，代表积分增长的快慢，故 T_i 称之为积分时间。如果一积分环节的 T_i 未知，可利用曲线斜率求之。

3. 微分环节 一般情况下理想微分环节是不易得到的，多数获得的是近似微分环节。图 1-14 给出三个例子。理想微分环节微分方程描述式为

$$c(t) = T_d \frac{d}{dt} r(t)$$

$$C(S) = T_d S R(S)$$

$$G(S) = \frac{C(S)}{R(S)} = T_d S \quad (1-15)$$

而近似微分环节的传递函数为

$$G(S) = \frac{T_d S}{T_d S + 1} \quad (1-16)$$

例如 RC 电路以电压为输入，电压为输出时，就是一个近似微分环节。推导出它的传递函数为

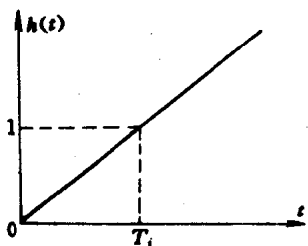
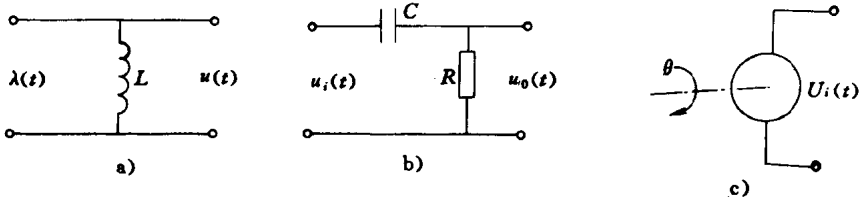


图 1-13 动特性曲线

$$G(S) = \frac{RCS}{RCS + 1}$$



a) 微分环节 (理想) b) RC 电路 c) 测速电机

图 1-14 微分环节实例

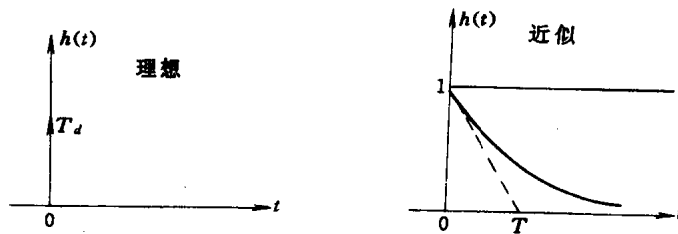
近似微分环节的单位阶跃响应为

$$h(T) = L^{-1} \left[\frac{TS}{TS + 1} \cdot \frac{1}{S} \right] = e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-17)$$

而理想的为

$$h(t) = T_d \delta(t) \quad (1-18)$$

图 1-15 绘出了理想和近似微分环节的动特性曲线可以看出理想微分环节的动特性相当于一个脉冲函数，而实际的微分环节的阶跃响应 $h(t)$ 曲线则是一个指数下降曲线。斜率 T 代表下降快慢，称为微分时间。



a) 理想微分环节的 $h(t)$ b) 近似微分环节的 $h(t)$

图 1-15 微分环节的阶跃响应曲线

4. 惯性环节 又称为非周期环节，实例有 RC 电路、直流电机、水箱水位、气阻气容组合件和电炉等，它们有微分方程

$$T \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = Kr(t)$$

$$G(S) = \frac{C(S)}{R(S)} = \frac{K}{TS + 1} \quad (1-19)$$

阶跃响应

$$h(t) = L^{-1} \left[\frac{K}{TS + 1} \cdot \frac{1}{S} \right] = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-20)$$

其动特性曲线 (响应曲线) 如图 1-16 所示。是一个上升指数曲线，有两个特征量。时间常数 T 表示上升的快慢，可从曲线上实测出来。 K 是静态放大倍数。过原点处的切线为 $\left. \frac{dh(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{K}{T}$ ，它表示与 K 水平线交点必为 T 。不难看出，如图 1-4 所示的 RC 电路的传递函数为