



21 世纪高等院校经典教材同步辅导
ERSHIYISHIJIGAODENGYUANXIAOJINGDIANJIAOCAITONGBUFUDAO

自动控制原理

»» **第五版**

全程导学及习题全解

王莹莹 袁少强 韩磊 编程 涛 主审

- ◆ 知识归纳 梳理主线重点难点
- ◆ 习题详解 精确解答教材习题
- ◆ 提高练习 巩固知识迈向更高



中国时代经济出版社
China Modern Economic Publishing House

自动控制原理

第五版

全程导学及习题全解

中国时代经济出版社

内容简介

本书是结合高等院校教材《自动控制原理》(科学出版社,第五版,胡寿松主编)编写的学习辅导教材与习题全解参考书。全书紧扣教材内容,对教材中的相应内容进行了系统、全面的归纳和总结,有助于读者全面掌握基本知识。本书重点对教材中全部习题给出了详细的解答过程,可以作为读者自我考核的标准与参考,同时还针对每章学习内容的重点、难点进行了知识要点概括,并给出重点难点分析,对精选的典型例题进行讨论,以便读者对所学的知识进行巩固与提高。

本书可以作为高等院校在校学生及自考生学习《自动控制原理》课程教学辅导材料和复习参考书,也可作为考研强化复习的指导书和教师的教学参考书。

前 言

自动控制理论作为研究自动控制共同规律的技术科学,既是一门古老的、已臻成熟的学科,又是一门正在发展的、具有强大生命力的新兴学科。随着计算机技术的发展和应用,自动控制理论和技术在宇航、机器人控制、导弹制导及核动力等高新技术领域中的应用也愈来愈深入广泛,并已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其它许多社会生活领域中,成为现代社会生活中不可缺少的一部分。而由胡寿松教授主编、科学出版社出版的《自动控制原理》(第五版)是一本广泛使用的教材,该教材自1979年第一版出版以来,历经五版修订,本书是与该教材配合使用的学习辅导用书。

本书紧扣教材,内容结构与教材一致,共分为十章。其中1~8章为经典控制理论:1~6章介绍以传递函数为基础的线性系统的分析和设计方法,给出了经典控制理论中的三种基本分析方法(时域法、根轨迹法和频域法)以及线性系统的频域设计方法;第7章介绍离散系统的分析与设计方法;第8章主要介绍函数法和相平面法两种常用的非线性系统分析方法。第9章介绍线性系统的状态空间分析与综合,给出了系统可控性与可观测性判据、李亚普诺夫稳定性分析及反馈结构和状态观测器的设计方法。第10章介绍最优控制的基本原理、方法以及应用。每章包括以下三个部分:

一、本章知识要点

本章知识要点,对教材中的相应内容进行了系统、全面的归纳和总结,有助于读者全面掌握基本知识,清晰把握各章知识的脉络。这一部分也可以作为复习备考的重要手册。

二、重点难点分析

重点难点分析,针对每一章中的重点、难点以及一些容易混淆的知识点进行了强调,同时也给出一些经典例题的详细解答,从而帮助学习者真正掌握各章的精髓。

三、习题全解

习题全解,对原教材中的全部习题做了详细解答。从学习者的角度,给出了解题的思路和步骤,对培养学习者的思维能力,树立理论联系实际的科学观点,提高综合分析问题和解决问题的能力等,都有着较好的帮助作用。

全书由王莹莹、袁少强、韩磊、杨增逵等编写,程涛主审。本书编写过程中得到王美清、谢晓惠,齐宏宇等老师们的大力帮助,并得到中国时代经济出版社的领导和编辑的支持和帮助,在此表示衷心的感谢!对《自动控制原理》教材作者胡寿松教授,表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有疏漏与不妥之处,恳请各位专家及广大读者批评指正。

编者

2009年8月

目 录

第一章 自动控制的一般概念	(1)
一、本章知识要点	(1)
二、重点难点分析	(1)
三、习题全解	(2)
第二章 控制系统的数学模型	(8)
一、本章知识要点	(8)
二、重点难点分析	(10)
三、习题全解	(18)
第三章 线性系统的时域分析法	(41)
一、本章知识要点	(41)
二、重点难点分析	(45)
三、习题全解	(50)
第四章 线性系统的根轨迹法	(76)
一、本章知识要点	(76)
二、重点难点分析	(79)
三、习题全解	(87)
第五章 线性系统的频域分析法	(128)
一、本章知识要点	(128)
二、重点难点分析	(131)
三、习题全解	(138)
第六章 线性系统的校正方法	(162)
一、本章知识要点	(162)
二、重点难点分析	(167)
三、习题全解	(174)

第七章 线性离散系统的分析与校正	(217)
一、本章知识要点	(217)
二、重点难点分析	(227)
三、习题全解	(232)
第八章 非线性控制系统分析	(265)
一、本章知识要点	(265)
二、重点难点分析	(272)
三、习题全解	(280)
第九章 线性系统的状态空间分析与综合	(320)
一、本章知识要点	(320)
二、重点难点分析	(330)
三、习题全解	(339)
第十章 动态系统的最优控制方法	(383)
一、本章知识要点	(383)
二、重点难点分析	(387)
三、习题全解	(393)

第一章 自动控制的一般概念

一、本章知识要点

1. 理解自动控制的概念

自动控制:利用控制装置自动地操纵机器设备或生产过程,使其具有希望的状态或性能。

自动控制系统:能够实现自动控制任务的系统,由控制器与控制对象所组成。

控制对象:要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。

控制器:对控制对象起控制作用的控制装置总体。

输出量:位于控制系统输出端,并要求实现自动控制的物理量。

输入量:作用于控制系统输入端,并可使系统具有预定功能或预定输出的物理量。

扰动:破坏系统输入量和输出量之间预定规律的信号。

反馈控制系统的基本组成:测量元件、给定元件、比较元件、放大元件、执行元件、校正元件,其定义如下。

给定元件:其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量。

比较元件:其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参据量进行比较,求出它们之间的偏差。

放大元件:其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大,用来推动执行元件去控制被控对象。

执行元件:其职能是直接推动被控对象,使其被控量发生变化。

校正元件:也称补偿元件,它是结构或参数便于调整的元部件,用串联或反馈的形式连接在系统中,以改善系统的性能。

2. 掌握对某个实际自动控制系统的原理和结构分析方法

3. 理解自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。例如,按控制方式可分为开环控制、反馈控制、复合控制等;按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等;按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等;按系统性能可分为线性系统 and 非线性系统,连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等;按参据量变化规律又可分为恒值控制系统,随动系统和程序控制系统等。

4. 理解自动控制系统的基本要求:稳定性、快速性、准确性

二、重点难点分析

本章重点在于理解自动控制系统的相关基本概念,并在此基础上,能够针对一个实际的自动控制系统,分析其工作原理和结构类型。

三、习题全解

1-1 图 1-1 是液位自动控制系统原理示意图。在任意情况下,希望液面高度 c 维持不变,试说明系统工作原理并画出系统方块图。

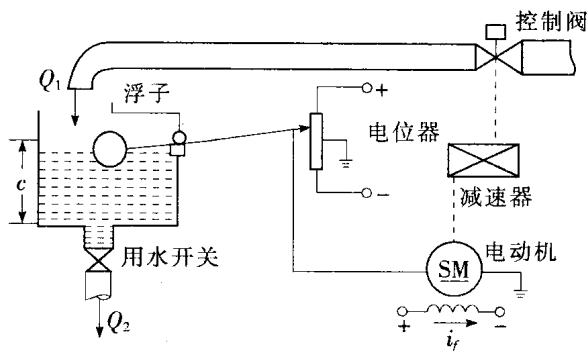


图 1-1 液位自动控制系统

解:图 1-3-1 是液位自动控制系统方块图。图中,盛液容器水箱为被控对象,液面高度 C 是被控量,参据量是给定的常值液面高度 C_0 。偏差液面高度 $C_e = C_0 - C_i$,经电位器转换后驱动电动机,并通过减速器带动控制阀,从而控制水箱的进水量 Q_1 ,达到控制液面高度的目的。其中浮子的作用是测量并反馈实际液面高度 C_i 。

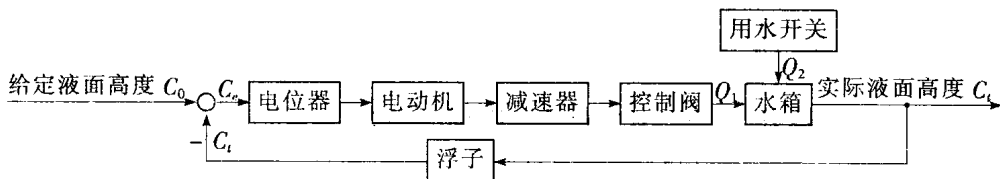


图 1-3-1 液位自动控制系统方块图

1-2 图 1-2 是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开闭的工作原理并画出系统方块图。

解:图 1-3-2 是仓库大门自动开闭控制系统的方块图。图中,仓库大门为被控对象,其“开门”和“关门”两个开关是互锁的,即任意时刻只能存在开门(或关门)一个状态。这一状态,对应的端子电压 U_0 和与大门连接的滑动端子对应的电压 U_i 反接,形成偏差电压 U_e 被放大器放大为 U ,并驱动伺服电动机,从而带动纹盘以控制门的开启和关闭。

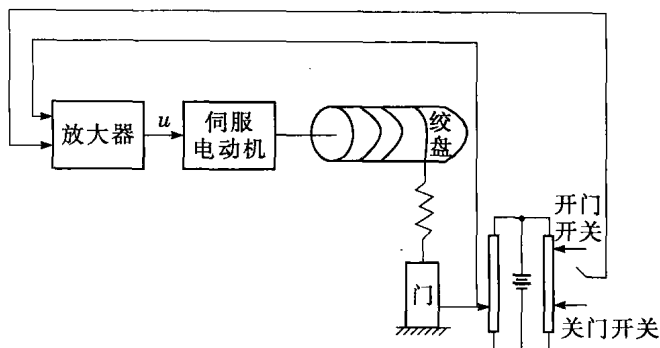


图 1-2 仓库大门自动开闭控制系统

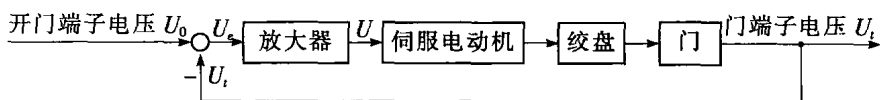


图 1-3-2 仓库大门自动开闭控制系统方块图

1-3 图 1-3(a)和(b)均为自动调压系统. 设空载时,图(a)与图(b)的发电机端电压均为 110V. 试问带上负载后,图(a)与图(b)中哪个系统能保持 110V 电压不变? 哪个系统的电压会稍低于 110V? 为什么?

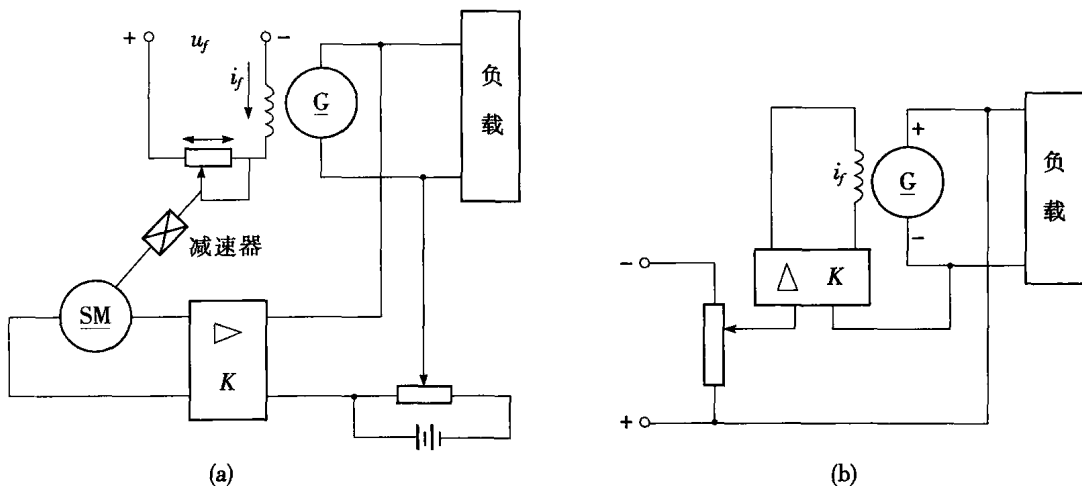


图 1-3 自动调压系统

解:带上负载之后,由于负载的影响,图(a)和图(b)中的发电机端电压在开始的时候都要下降,但图(a)中所示系统的电压能恢复到 110V,而图(b)中的系统不能。

对于图(a)中的系统,当输出电压 U 低于给定电压时,其偏差电压经过放大器 K ,使电机 SM 转动,经减速器带动电刷减小发电机 G 的激磁回路电阻,使发电机的激磁电流 i_f 增大,提高发电机的端电压,从而使偏差电压减小,直至偏差电压为零时,电机才停止转动. 因此,图(a)系统能保持 110V 电压不变。

对于图(b)所示系统,当输出电压 U 低于给定电压时,其偏差电压经放大器 K ,直接使发电

机激磁电流 i_f 增大,提高发电机的端电压,使发电机 G 的端电压回升,偏差减小,但是偏差电压始终不可能等于零.因为当偏差电压为零时, $i_f = 0$,发电机就不能工作.偏差电压的存在是图(b)系统正常工作的前提条件.即图(b)中系统的输出电压会低于 110V.

1-4 图 1-4 为水温控制系统示意图.冷水在热交换器中由通入的蒸气加热,从而得到一定温度的热水.冷水流量变化用流量计测量.试绘制系统方块图,并说明为了保持热水温度为期望值,系统是如何工作的?系统的被控对象和控制装置各是什么?

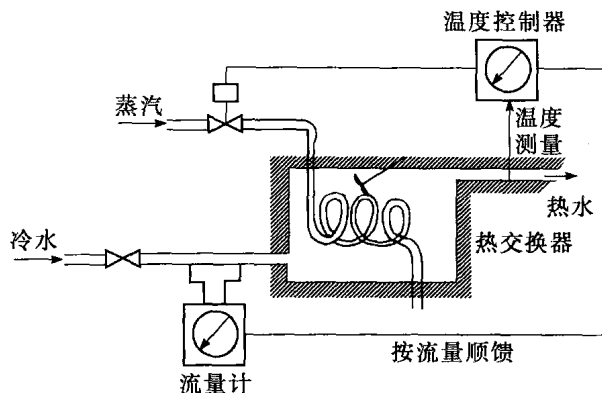


图 1-4 水温控制系统示意图

解:图 1-3-4 是水温控制系统的方块图.图中,热交换器为被控对象,温度控制器、蒸汽阀和流量计、温度测量是控制装置.参量是热水温度的期望值 T_0 ,经温度测量得实际热水温度 T_i ,温差 $T_e = T_0 - T_i$ 经温度控制器带动蒸汽阀,控制加热用蒸汽的通入量,达到控制水温的目的.本系统还利用流量计测量流入冷水流量有扰动量,对温度控制进行补偿,形成顺馈控制.

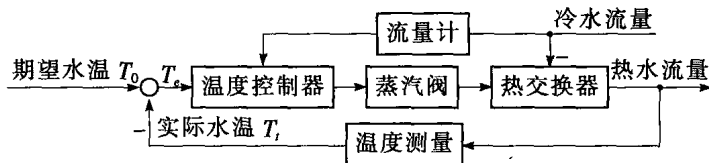


图 1-3-4 水温控制系统的方块图

1-5 图 1-5 是电炉温度控制系统原理示意图.试分析系统保持电炉温度恒定的工作过程,指出系统的被控对象、被控量以及各部件的作用,最后画出系统方块图.

解:图 1-3-5 为电炉温度控制系统的方块图.图中,电炉为被控对象,电炉温度为被控量.热电偶电压与给定电压 U_0 形成电压差值 U_e ,经电压放大和功率放大之后带动电动机,从而控制电炉中的电阻丝两端的电压,改变其发热量,其中热电偶用来测量电炉温度以形成反馈.

1-6 图 1-6 是自整角机随动系统原理示意图.系统的功能是使接收自整角机 TR 的转子角位移 θ_r 与发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_t 始终保持一致.试说明系统是如何工作的,并指出被控对象、被控量以及控制装置各部件的作用并画出系统方块图.

解:图 1-3-6 为自整角机随动系统的方块图.图中,接收自整角机 TR 为被控对象,接收自整角机 TR 的转子角位移 θ_r 为被控量.发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_t 与接收自整角机的转子角位移 θ_r 的角度差值 θ_e 经相敏整流放大和功率放大,带动电动机使 θ_t 和 θ_r 之间始终保持一致.测速发电机在系统结构中起内反馈补偿作用.2-15 题是本题的一个实际应用.

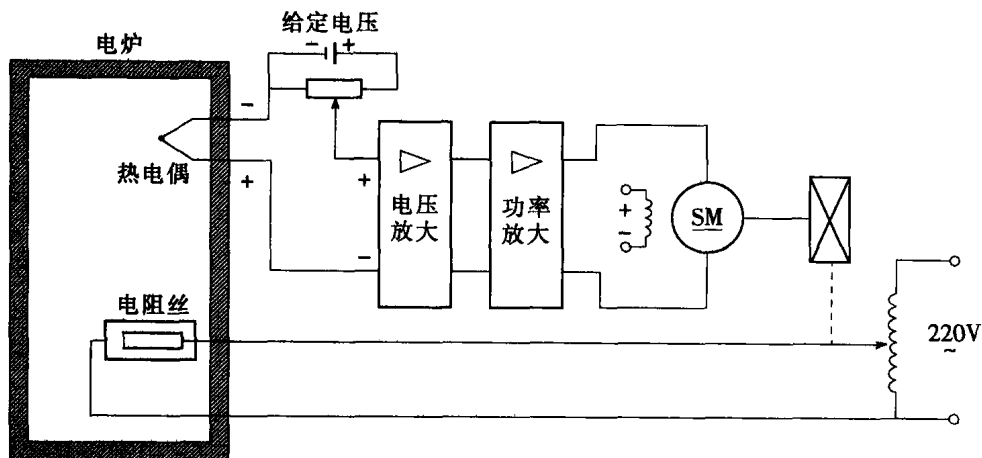


图 1-5 电炉温度控制系统原理图

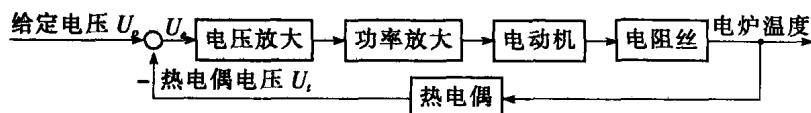


图 1-3-5 电炉温度控制系统方块图

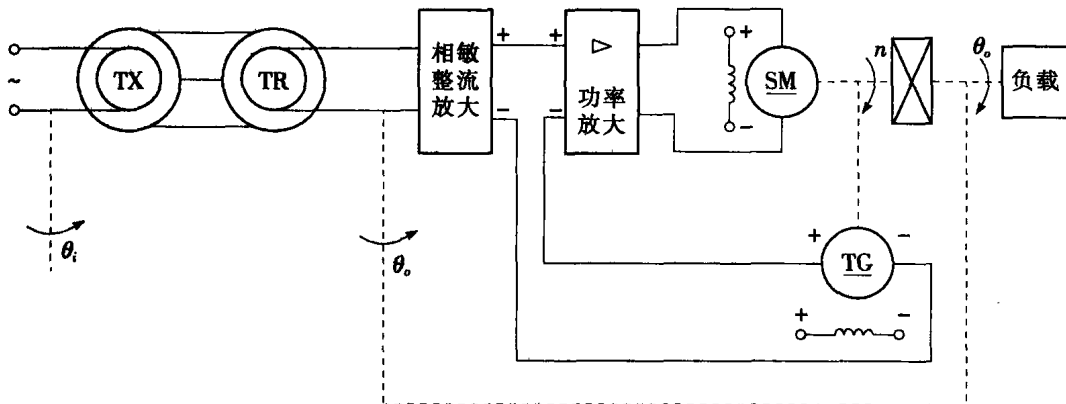


图 1-6 自整角机随动系统原理图

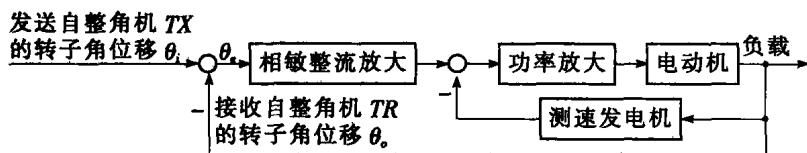


图 1-3-6 自整角机随动系统方块图

1-7 在按扰动控制的开环控制系统中,为什么说一种补偿装置只能补偿一种与之相应的扰动因素? 对于图 1-7 按扰动控制的速度控制系统,当电动机的激磁电压变化时,转速如何变化? 该补偿装置能否补偿这个转速的变化?

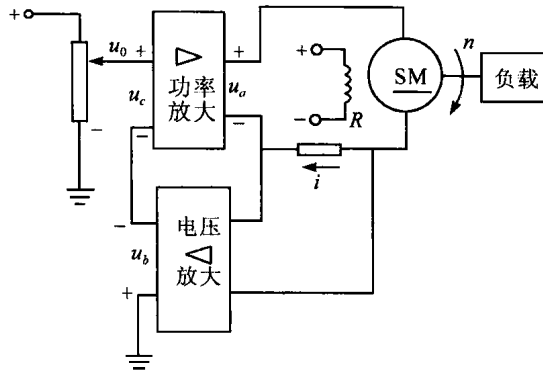


图 1-7 按扰动控制的速度控制系统

解:在按扰动控制的开环系统中,一个补偿装置只能针对某种扰动量进行测量,并按其大小产生一种相应的补偿作用,从而减小或抵消这种扰动量对输出量的影响。

对于题中图示的按扰动控制的速度控制系统,当电动机的激磁电压升高(或降低)时,转速也随之升高(或降低)。图示补偿装置能够补偿负载变化对转速的影响,这是由于转速的变化是电枢回路的电压降引起的,图示中通过测量电枢回路电流(即电枢回路电压)的变化,用来补偿由它引起的转速的变化。

1-8 图 1-8 为谷物湿度控制系统示意图。在谷物磨粉的生产过程中,有一种出粉最多的湿度,因此磨粉之前要给谷物加水以得到给定的湿度。图中,谷物用传送装置按一定流量通过加水点,加水量由自动阀门控制。加水过程中,谷物流量、加水前谷物湿度以及水压都是对谷物湿度控制的扰动作用。为了提高控制精度,系统中采用了谷物湿度的顺馈控制,试画出系统方块图。

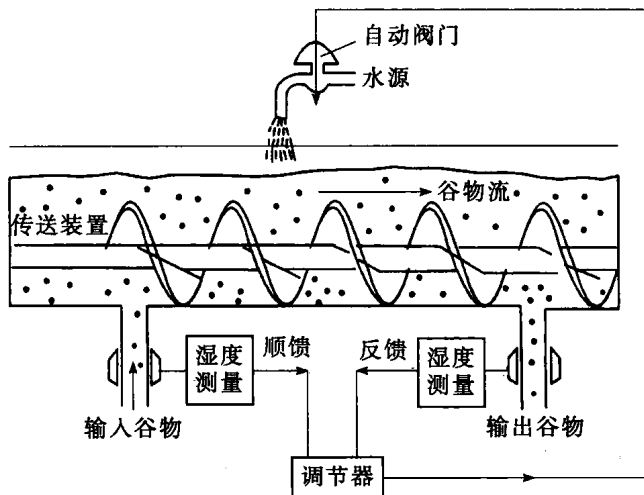


图 1-8 谷物湿度控制系统

解:谷物湿度控制系统的方块图如图 1-3-8 所示。

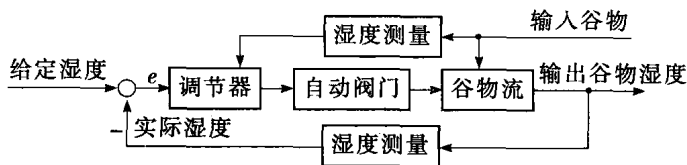


图 1-3-8 谷物湿度控制系统方块图

1-9 图 1-9 为数字计算机控制的机床刀具进给系统. 要求将工件的加工过程编制成程序预先存入数字计算机, 加工时, 步进电动机按照计算机给出的信息动作, 完成加工任务. 试说明该系统的工作原理.

解: 本题中图示机床刀具进给系统为一按给定量控制的开环控制系统, 其控制作用直接由数字计算机输入程序既定的加工过程产生, 经过脉冲分配与功率放大, 带动步进电动机, 从而控制刀具的进给, 其控制精度完全取决于所采用的元件精度及校准的精度.

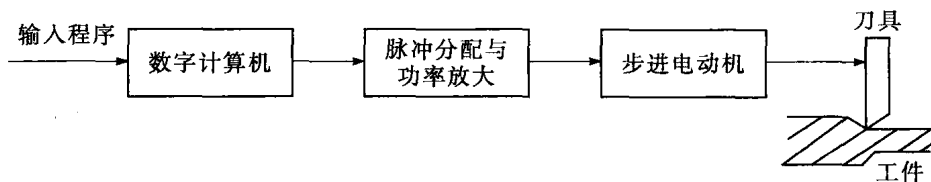


图 1-9 机床刀具进给系统

1-10 下列各式是描述系统的微分方程, 其中 $c(t)$ 为输出量, $r(t)$ 为输入量, 试判断哪些是线性定常或时变系统, 哪些是非线性系统?

$$(1) c(t) = 5 + r^2(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2};$$

$$(2) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t);$$

$$(3) t \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt};$$

$$(4) c(t) = r(t) \cos at + 5;$$

$$(5) c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau;$$

$$(6) c(t) = r^2(t);$$

$$(7) c(t) = \begin{cases} 0, & t < 6, \\ r(t), & t \geq 6. \end{cases}$$

解: (1) 非线性时变系统;

(2) 线性定常系统;

(3) 线性时变系统;

(4) 非线性时变系统;

(5) 线性定常系统;

(6) 非线性定常系统;

(7) 线性时变系统.

第二章 控制系统的数学模型

一、本章知识要点

1. 控制系统的时域数学模型

(1) 建立控制系统的时域数学模型的一般方法

①由系统原理图画系统方块图,分别列写出系统中各方块对应元件单元的微分方程,并确定系统的输入、输出量。

②消去中间变量,便可得到描述系统输出量与输入量之间的微分方程关系式。

(2)线性系统满足叠加原理,即具有可叠加性和齐次性;反之,非线性系统不满足叠加原理。

(3)用拉氏变换法求解微分方程时,可按如下步骤进行:

①考虑初始条件,对微分方程中的每一项分别进行拉氏变换,将微分方程转变为变量 s 的代数方程;

②由代数方程求出输出量拉氏变换函数的表达式;

③对输出量拉氏变换函数求拉氏反变换,得到输出量的时域表达式,即为所求微分方程的解。

常见拉氏变换如表 2-1-1 所示。

表 2-1-1 常用拉氏变换表

$f(t)$ ($t < 0$ 时, $f(t) = 0$)	$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$
$\delta(t)$	1
$1(t)$	$\frac{1}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$t^n (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t)$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2}$

(4) 拉氏变换基本定理

① 线性定理: $\mathcal{L}[a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)] = a_1 F_1(s) + a_2 F_2(s)$ ② 位移定理: $\mathcal{L}[e^{-at} f(t)] = F(s+a)$ ③ 延迟定理: $\mathcal{L}[f(t-\tau)] = e^{-s\tau} F(s)$ ④ 终值定理: $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$ ⑤ 初值定理: $\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$ ⑥ 微分定理: $\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0)$

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2 f(t)}{dt^2}\right] = s^2 F(s) - sf(0) - f'(0)$$

⑦ 积分定理: $\mathcal{L}\left[\int f(t) dt\right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{f'(0)}{s}$

$$\mathcal{L}\left[\iint f(t) dt\right] = \frac{F(s)}{s^2} + \frac{f'(0)}{s^2} + \frac{f''(0)}{s}$$

2. 控制系统的复域数学模型

(1) 传递函数的定义和性质

① 定义

线性定常系统的传递函数, 定义为零初始条件下, 系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

设线性定常系统由下述 n 阶线性常微分方程描述:

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} c(t) + a_n c(t) = \\ b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t) \end{aligned}$$

式中, $c(t)$ 是系统输出量, $r(t)$ 是系统输入量, $a_i (i=0, 1, 2, \cdots, n)$ 和 $b_j (j=0, 1, 2, \cdots, m)$ 是与系统的结构和参数有关的常系数。设 $r(t)$ 和 $c(t)$ 及其各阶导数在 $t=0$ 时的值均为零, 即为零初始条件, 则对上式中的各项分别求拉氏变换, 并令 $C(s) = \mathcal{L}[c(t)]$, $R(s) = \mathcal{L}[r(t)]$, 可得 s 的代数方程为:

$$\begin{aligned} [a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n] C(s) = \\ [b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m] R(s) \end{aligned}$$

于是, 由定义得系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} = \frac{M(s)}{N(s)}$$

② 性质

性质 1: 传递函数是复变量 s 的有理真分式函数 ($m \leq n$), 所有系数均为实数。

性质 2: 传递函数表征的是输入量和输出量之间的函数关系, 它只取决于系统的结构和参数, 而与输入量的形式无关。

性质 3: 微分方程的算符 d/dt 与复数 s 相互置换, 可使系统的微分方程和传递函数之间相互转换。

性质 4: 传递函数 $G(s)$ 的拉氏反变换是脉冲响应 $g(t)$ 。

(2) 传递函数的零、极点

传递函数的极点就是微分方程的特征根, 它们决定了所描述系统自由运动的模态, 而且在强迫运动中(即零初始条件响应)也会包含这些自由运动的模态。

传递函数的零点并不形成自由运动的模态, 而是影响各模态在响应中所占的比重。

3. 控制系统的结构图与信号流图

结构图简化的一般方法是移动引出点和比较点, 交换比较点, 进行方框运算将串联、并联和反馈连接的方框合并。在简化过程中应遵循变换前后变量关系保持等效的原则。

信号流图是由节点和支路组成的一种信号传递网络。信号流图中的关键术语包括源节点(输入节点)、阱节点(输出节点)、混合节点、前向通路、回路和不接触回路。应该注意到, 信号在支路上只能沿箭头单向传递。而且对于给定系统, 信号流图不唯一。

4. 梅森增益公式

对于复杂信号流图, 求取从任意源节点到任意阱节点之间传递函数的梅森增益公式记为

$$P = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n p_k \Delta_k$$

式中, P 为从源节点到阱节点的传递函数(或总增益);

n 为从源节点到阱节点的前向通路总数;

p_k 为从源节点到阱节点的第 k 条前向通路总增益。

流图特征式为

$$\Delta = 1 - \sum L_a + \sum L_b L_c - \sum L_d L_e L_f + \dots$$

其中, $\sum L_a$ 为所有单独回路增益之和;

$\sum L_b L_c$ 为所有互不接触的单独回路中, 每次取其中两个回路的回路增益乘积之和;

$\sum L_d L_e L_f$ 为所有互不接触的单独回路中, 每次取其中三个回路的回路增益乘积之和;

Δ_k 为流图余因子式, 它等于流图特征式中除去与第 k 条前向通路相接触的回路增益项之后的余项式。

5. 数学模型的时域实验测定法

将测试所得到的阶跃响应曲线与标准一阶或二阶响应曲线相比较, 以决定相近的传递函数形式, 然后对实验数据进行处理, 以求得相应传递函数的参数。工程上常见被控对象的传递函数一般不超过三阶。

二、重点难点分析

本章重点在于如何建立控制系统的时域和复数域的数学模型, 并以结构图和信号流图的形式表示系统各元件单元的功能和信号流向。希望大家能够熟练掌握利用梅森增益公式写出系统