

# 自动控制实用教程

贺智修 编著



電子工業出版社



# 自动控制实用教程

贺智修 编著

電子工業出版社

## 内 容 提 要

当代科学技术发展的特点之一是各学科、各专业的相互渗透,电气自动化和机械专业相互渗透形成机电一体化专业是工程领域的一种趋势。本书是为适应机电一体化发展而编著的控制理论实用教程,书中广泛涉及电气和机械领域的控制工程,因此既适用于机电一体化专业,也适用于工业自动化专业和机械专业。内容包括:系统数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统的综合与校正、非线性系统分析、离散系统分析与综合、状态空间法。

本书讲述方法的独到之处在于:从各种机电实际工程背景出发,导出基本公式和理论;进而又用导出的基本理论去分析和综合机电工程实例,符合认识发展规律。书中以典型的交流调速电梯、雷达天线跟踪系统、自动机床进给系统等实际工程的分析、综合为中心贯穿于全书,极有利于读者对机电控制系统设计能力的培养建立。

本书可作为机电一体化专业和工业电气自动化专业本科大学生、函授大学生的教材,也适于工程技术人员在分析和设计机电控制系统时参考。

## 自 动 控 制 实 用 教 程

贺智修 编著

特约编辑 舒文

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

大厂回族自治县印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:23.75 字数:608 千字

1996 年 3 月第一版 1996 年 3 月北京第一次印刷

印数:3000 册 定价:40.00 元

ISBN7-5053-3223-6/TN·894

# 目 录

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| <b>第一章 自动控制的一般概念 .....</b>           | <b>( 1 )</b> |
| § 1-1 自动控制与自动控制系统的基本概念 .....         | ( 1 )        |
| § 1-2 开环控制与闭环控制 .....                | ( 2 )        |
| § 1-3 闭环控制系统举例与控制系统分类 .....          | ( 4 )        |
| § 1-4 闭环控制系统的基本组成和术语 .....           | ( 8 )        |
| § 1-5 对控制系统的基本要求与常用典型测试信号 .....      | ( 8 )        |
| 习题 .....                             | (11)         |
| <b>第二章 控制系统的数学模型 .....</b>           | <b>(12)</b>  |
| § 2-1 控制系统微分方程描述 .....               | (12)         |
| § 2-2 非线性运动方程式的线性化 .....             | (17)         |
| § 2-3 传递函数 .....                     | (19)         |
| § 2-4 动态结构图 .....                    | (33)         |
| § 2-5 结构图的等效变换 .....                 | (41)         |
| § 2-6 自动控制系统动态结构图的一般表示形式及其传递函数 ..... | (45)         |
| § 2-7 信号流程图 .....                    | (48)         |
| 习题 .....                             | (53)         |
| <b>第三章 自动控制系统的时域分析法 .....</b>        | <b>(55)</b>  |
| § 3-1 典型控制过程及性能指标 .....              | (55)         |
| § 3-2 一阶系统的时域分析 .....                | (56)         |
| § 3-3 二阶系统的时域分析 .....                | (59)         |
| § 3-4 三阶系统的单位阶跃响应 .....              | (70)         |
| § 3-5 高阶系统的时域分析 .....                | (72)         |
| § 3-6 系统对任意输入信号的响应 .....             | (73)         |
| § 3-7 控制系统的稳定性分析 .....               | (74)         |
| § 3-8 稳态误差分析 .....                   | (79)         |
| 习题 .....                             | (90)         |
| <b>第四章 自动控制系统的根轨迹分析法 .....</b>       | <b>(94)</b>  |
| § 4-1 根轨迹与根轨迹方程 .....                | (94)         |
| § 4-2 绘制根轨迹的基本法则 .....               | (97)         |
| § 4-3 零度根轨迹和参数根轨迹 .....              | (104)        |
| § 4-4 用根轨迹分析控制系统 .....               | (108)        |
| 习题 .....                             | (116)        |
| <b>第五章 自动控制系统的频域分析法 .....</b>        | <b>(118)</b> |
| § 5-1 引言 .....                       | (118)        |
| § 5-2 频率特性的定义和求取方法 .....             | (119)        |
| § 5-3 频率特性的图示方法 .....                | (122)        |

|            |                       |       |
|------------|-----------------------|-------|
| § 5-4      | 典型环节的频率特性             | (125) |
| § 5-5      | 开环系统的频率特性             | (130) |
| § 5-6      | 奈魁斯特稳定判据              | (135) |
| § 5-7      | 应用奈氏判据分析延迟系统的稳定性      | (141) |
| § 5-8      | 对数频率稳定判据              | (147) |
| § 5-9      | 系统的相对稳定性              | (149) |
| § 5-10     | 闭环频率特性曲线的绘制           | (151) |
| § 5-11     | 闭环频域指标与时域指标间的关系       | (154) |
| § 5-12     | 开环频率特性与时域指标间的关系       | (157) |
|            | 习题                    | (160) |
| <b>第六章</b> | <b>自动控制系统的校正</b>      | (162) |
| § 6-1      | 控制系统校正的概念             | (162) |
| § 6-2      | 基本控制规律分析              | (163) |
| § 6-3      | 串联超前校正                | (167) |
| § 6-4      | 串联滞后校正                | (176) |
| § 6-5      | 串联滞后—超前校正             | (182) |
| § 6-6      | 按期望特性对系统进行串联校正        | (190) |
| § 6-7      | 反馈校正                  | (202) |
|            | 习题                    | (207) |
| <b>第七章</b> | <b>非线性控制系统</b>        | (209) |
| § 7-1      | 机电系统中常见的非线性及其对系统性能的影响 | (209) |
| § 7-2      | 非线性系统的特点和分析           | (211) |
| § 7-3      | 描述函数法                 | (213) |
| § 7-4      | 相平面法                  | (224) |
|            | 习题                    | (246) |
| <b>第八章</b> | <b>线性离散系统的分析与综合</b>   | (248) |
| § 8-1      | 离散控制系统的基本概念           | (248) |
| § 8-2      | 采样过程与采样定理             | (252) |
| § 8-3      | 信号的恢复                 | (254) |
| § 8-4      | Z变换理论                 | (257) |
| § 8-5      | 离散系统的数学模型             | (264) |
| § 8-6      | 离散系统的稳定性分析            | (274) |
| § 8-7      | 离散系统的稳态误差             | (280) |
| § 8-8      | 离散系统动态性能分析的时域法        | (281) |
| § 8-9      | 离散控制系统的根轨迹法           | (284) |
| § 8-10     | 离散控制系统的频域法            | (287) |
| § 8-11     | 计算机控制系统采样周期 T 的确定     | (291) |
| § 8-12     | 离散系统的校正与设计            | (294) |
| § 8-13     | 计算机控制系统设计举例           | (301) |
|            | 习题                    | (308) |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 第九章 状态空间分析和设计.....                     | (310) |
| § 9-1 基本概念.....                        | (310) |
| § 9-2 线性定常系统的状态空间表达式.....              | (312) |
| § 9-3 多输入多输出(MIMO)系统的状态空间表达式和传递矩阵..... | (322) |
| § 9-4 线性定常系统状态方程的求解.....               | (325) |
| § 9-5 离散系统状态空间表达式和状态方程解法.....          | (329) |
| § 9-6 线性系统的能控性与能观测性.....               | (334) |
| § 9-7 控制系统的状态空间综合法.....                | (344) |
| § 9-8 李雅普诺夫稳定性分析.....                  | (349) |
| 习题.....                                | (358) |
| 附录 常用函数拉普拉斯变换对照表.....                  | (360) |

# 第一章 自动控制的一般概念

随着生产和科学技术的发展,自动控制技术所起的作用愈来愈重要。除了在人造卫星发射运行、导弹制导和飞机驾驶系统等领域中,自动控制系统具有特别重要的作用之外,对于机电制造业和各种工业生产过程来说,采用自动控制同样是实现现代化和向高技术发展的无可替代的手段。以计算机应用为例,若不是简单地只把计算机当作逻辑开关和数据计算器使用,则任何一种计算机控制系统的使用和设计只能建立在自动控制理论的基础上。现代所有技术发达国家,在生产技术发展过程中都非常重视自动控制理论的教育,使工程技术人员掌握判别系统是否稳定和变更某些参数以改善系统性能的综合方法。同样,自动控制理论和自动控制技术对我国科学技术和生产发展正愈来愈显示出其重要性和巨大潜力。

尽管本教材仅涉及机电工程控制领域,但讨论的概念对其它专业领域具有普遍意义。

## § 1-1 自动控制与自动控制系统的概念

什么是自动控制?为了说明这个概念,首先让我们举例分析一个人工控制过程,因为很多自动控制方法的实现,都是受人工控制启发而得到的。

### 一、电炉炉温的人工控制

机电工业中常用的原材料——硅钢片在热处理过程中需要 10 小时连续保持恒温  $680 \pm 5^\circ\text{C}$  后,才能达到预期的性能。这就需要对电炉的温度进行控制。

设有一个电炉(见图 1-1),用调压器对电炉供电,使其温度升高到  $680^\circ\text{C}$ ,并保持不变。人工控制过程:①用眼睛观察温度计,测出的炉温指示值;②用大脑将指示值与规定温度  $680^\circ\text{C}$  比较,是高了还是低了,并算出两者的差

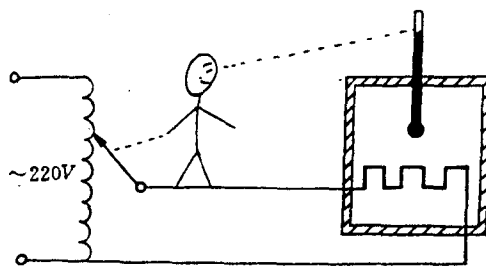


图 1-1 电炉炉温人工控制系统

值;③最后用手执行大脑的命令:若炉温指示值偏高,就朝着减小加热电流的方向转动调压器手柄,使炉温降低;若炉温指示值偏低,就朝着加大加热电流的方向转动调压器手柄,使炉温上升。直到炉温回到  $680 \pm 5^\circ\text{C}$  范围为止。人工控制过程就是通过眼、脑、手三个器官,分别担负检测、比较判断和执行三个作用来完成的。

### 二、电炉炉温的自动控制

图 1-2 是一个炉温自动控制系统,电炉称为被控对象,其余部分统称为控制装置。控制装置包括三个部分:第一部分热电偶完成测量炉温,并把炉温转换为相应电压  $u_2$  的任务,称为测量元件。测量元件相当于人的眼睛;第二部分控制器是由比较线路和放大器构成。比较线路中给定电压信号  $u_1$  与炉温的希望值  $680^\circ\text{C}$  相对应,并接受测量元件的电压信号  $u_2$ ,将  $u_2$

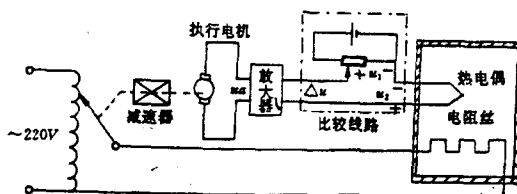


图 1-2 电炉炉温自动控制系统

与  $u_1$  相比较得到电压差  $\Delta u = u_1 - u_2$ ,  $\Delta u$  叫做偏差信号, 只要  $\Delta u \neq 0$  就意味着炉温偏离了希望值。  $\Delta u$  经过放大器放大后可驱动执行电机。控制器的作用相当于人的大脑; 第三部分执行电机称为执行元件, 它相当于人手。

现在, 分析一下具体的控制过程。若炉温  $T$  高于要求的炉温值  $T_0 = 680^\circ\text{C}$ , 即  $T > T_0$ , 则有  $u_1 < u_2$ , 得偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2 < 0$ 。偏差信号  $\Delta u$  经放大后将控制直流电动机产生角位移, 并通过减速器带动调压器手柄朝减小加热电流的方向转动, 使炉温  $T$  及电压信号  $u_2$  下降, 进而使偏差信号  $\Delta u$  及放大器输出信号  $u_a$  下降。直到  $u_1 = u_2$ , 偏差信号  $\Delta u = 0$ ,  $u_a = 0$  时, 电动机停止转动, 电炉的温度恢复到要求的数值, 从而完成了一个控制过程。

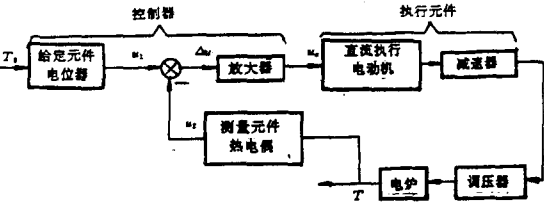


图 1-3 炉温自动控制系统方块图

炉温自动控制系统的控制过程可用图 1-3 所示方块图表示。图 1-2 中的比较线路由比较元件符号  $\otimes$  表示, 负号表示两信号相减, 一般地说, 比较元件的输出信号等于各输入信号的代数和。要求的炉温值  $T_0$  称为希望值。炉温  $T$  称为被控量。图 1-3 中测量元件、控制器、执行元件统称为控制装置。电炉称为被控对象。这样就可表示为图 1-4 系统。

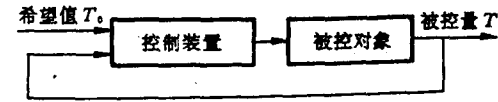


图 1-4

从上看, 测量元件代替了人的眼睛, 控制器代替了人脑, 执行元件代替了人手。总之, 用控制装置代替了人, 完成了对被控对象——电炉的控制。所以, 自动控制就是在没有人直接参与的情况下, 利用控制装置使被控对象的某被控量自动地按预先规定的规律运行。被控对象与控制装置的总称就是自动控制系统。

## § 1-2 开环控制与闭环控制

自动控制系统有各种各样具体形式和分类, 若根据有无反馈信号作用的原则分类, 可分为开环控制与闭环控制两类。关于反馈信号的作用在图 1-3 炉温自动控制系统中就存在, 其情况是: 电压  $u_2$  是反馈信号, 它与电压  $u_1$  进行比较后, 产生电压偏差信号  $\Delta u$ , 从而产生一系列控制作用。所以, 图 1-3 是闭环控制系统。

### 一、开环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路, 输出量对系统的控制作用没有影响, 这样的系统称为开环控制系统。图 1-1 不考虑人的控制作用, 其方块图如图 1-5, 该系统显然没有反馈信号, 不存在反馈回路, 为开环控制系统。开环控制系统的抗干扰性能很差, 例如炉门开闭的次数变化、外界环境温度变化、电源电压的波动都能使被控量 (或称输出量) 偏离希望值。使被控量偏离希望值的因素统称为干扰。

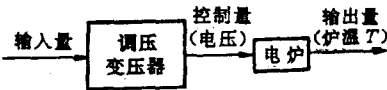


图 1-5 开环控制系统

图 1-6 所示电机转速控制系统也是开环控制系统。当给定电压改变时, 电机转速也跟着变化, 但这个控制系统经受不住负载力矩改变时对转速的影响。

开环控制系统的控制方式如图 1-6(c) 所



示。其特点是信号流通是单方向的，输出端对

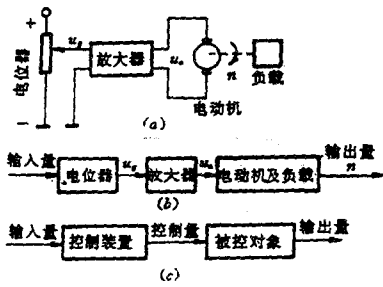


图 1-6

输入端无反馈作用。优点是系统装置简单、成本低。缺点是抗干扰性能差，控制精度低。为了说明以上问题，现详细分析负载力矩改变等干扰对转速的影响：根据  $u_s$  和  $n$  的对应关系， $u_s = u_{s1}$  时， $n = n_1$ 。如果出现干扰（例如负载力矩改变），将引起转速变化，出现误差。但该开环系统由于无测量转速的设备，即无测量元件，也就没有测量元件输出的反馈信号，当然也就不能产生按偏差的控制作用来调节转速。这时实际转速不等于  $n_1$ ，即  $u_{s1}$  和  $n_1$  的对应关系在有干扰情况下是不精确的。

## 二、闭环控制系统

在说明什么是闭环控制系统之前，先明确介绍反馈这个术语的意义。把系统的输出量送回到输入端，以增强或减弱输入信号的效应称为反馈。凡使输入信号增强者称为正反馈；使输入信号减弱者称为负反馈。闭环控制系统则是和负反馈紧紧地联系在一起的。

在闭环系统中，必须对输出量进行测量并反馈到输入端。这个负反馈信号与输入信号进行比较，产生输入信号与反馈信号的差值，叫做偏差信号。偏差信号通过控制器产生控制作用，应能减小系统的偏差，使系统的输出量趋于所希望的值。

在图 1-6 开环系统基础上组成直流电动机转速的闭环控制系统如图 1-7 所示。图 1-7 系统中，输出量是转速  $n$ ，输入信号是电压  $u_s$ 。转速和电压是不同的物理量。作为测量元件的测速发电机，能将转速变换成电压 ( $u_n = kn$ ,  $k$  是

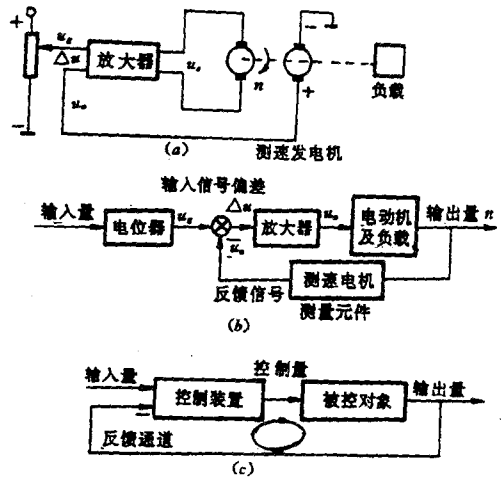


图 1-7

常数)，并反馈到输入端和输入信号电压  $u_s$  相减后得到偏差  $\Delta u$ ，即  $\Delta u = u_s - u_n$ 。偏差电压  $\Delta u$  经放大器放大为控制电压  $u_c$  去调节电动机转速。系统的工作过程如下：假设系统已调整好，当  $u_s = u_{s1}$  时， $n = n_1$ 。一旦扰动作用引起转速变化，例如转速小于  $n_1$ ，测速发电机输出电压  $u_n$  降低，偏差电压  $\Delta u = u_s - u_n$  相应增大，使  $u_c$  增大，转速上升。反之，当转速大于  $n_1$ ， $\Delta u$  减小， $u_c$  也相应减小，转速下降。这种由反馈构成闭环，按偏差产生控制作用的系统，任何因素引起转速的变化都将引起自动调节转速的过程，以减小或消除偏差，获得较高控制精度。

闭环控制系统的控制方式如图 1-7(c) 所示。其特点是信号流通是闭环形的，输出端对输入端存在反馈通道，从而使闭环具有以下三个重要机能：①测量输出量；②将测量输出量所得反馈信号与输入信号进行比较，得到偏差；③根据偏差对输出量进行调节，使输出量趋于所希望的值，偏差随之减小或消除。以上闭环控制过程可概括为“检测偏差，纠正偏差”的过程。所以闭环控制的实质是按偏差控制。因为有反馈才有偏差和控制，闭环控制又叫反馈控制。

下面将说明只有负反馈才能使闭环系统正常工作的问題。如果反馈信号的极性与输入信

号的极性相反,称为负反馈;反之,如果反馈信号的极性与输入信号的极性相同,则称为正反馈。只有负反馈才能使闭环系统正常工作。若系统采用了负反馈,当系统输出量偏离了希望值时,反馈后与输入信号比较(两者相减)产生偏差,从而去控制输出量向减小偏差方向移动,使输出量恢复到希望值。如果系统采用了正反馈,例如某种原因使输出量比希望值增大了,由于正反馈信号的极性与输入信号的极性是相同的,正反馈后与输入信号不能比较(两者不能相减),而是叠加(两者相加)后使偏差增大,输出量继续向增大的方向移动,最终使输出量超出安全工作范围,破坏了系统的正常运行。

闭环控制系统的优点是具有自动修正输出量偏离的能力,抗干扰性能好,控制精度较高。缺点是结构较复杂,更主要的是,如果设计得不好,系统将不稳定。而开环控制系统则不存在稳定性问题。

## § 1-3 闭环控制系统举例与控制 系统分类

### 一、举例

#### 1. 定值调节系统(也称自动镇定系统)

定值调节系统的输入信号为恒定的常量。系统的基本任务是在存在扰动的情况下,使输出量保持在给定的希望值上。

图 1-2 炉温控制系统和图 1-7 转速控制系统均为定值调节系统。但两者还有如下差别:图 1-2 炉温控制系统处于平衡状态时偏差电压  $\Delta u_0 = 0$ ;而图 1-7 转速控制系统处于平衡状态时偏差电压  $\Delta u_0 \neq 0$ ,这时  $n = n_0$ 、 $u_s = u_{s0}$ 、 $u_c = u_{c0}$ 、 $u_a = u_{a0}$ 、 $\Delta u_0 = u_{s0} - u_{a0}$ 。前者称为无差系统,后者称为有差系统。下面介绍的图 1-8 系统也是有差定值调节系统的例子。

图 1-8 所示为工作台速度控制系统。该系统由指令电位器、放大器、电-液伺服阀、液压缸、工作台、齿条齿轮副、测速发电机组成,其功能是控制工作台速度为某一恒值。

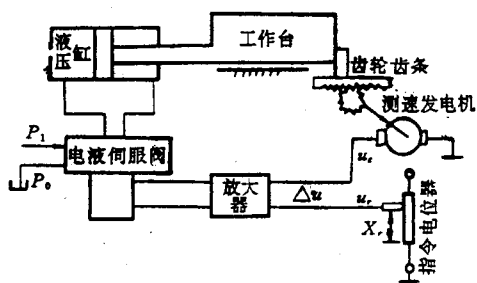


图 1-8

图 1-8 所示系统中,电-液伺服阀输出油液流量的大小和液流方向分别由电液伺服阀的输入电流大小和方向决定。改变电-液伺服阀输入电流的大小和方向,便可改变工作台运动速度和方向。工作台运动速度由测速装置(该装置由齿条、齿轮和测速发电机组成,测速发电机的输出电压与输入转速成正比)检测并转换为电压  $u_c$ ,  $u_c$  与给定电压  $u_r$  比较,其偏差电压为  $\Delta u = u_r - u_c$ 。

当工作台运动速度为给定速度  $V_0$  时,测速发电机输出电压为  $u_{c0}$ ,此时偏差电压为  $\Delta u_0 = u_r - u_{c0}$ ,放大器输出电流为  $i_0$ ,电-液伺服阀输出流量为  $Q_0$ ,该流量是保持工作台运动速度  $V_0$  所必需的。此时系统的工作状态为平衡工作状态。在系统工作过程中,如果由于负载、油温或其他因素变化引起速度波动,则  $u_c \neq u_{c0}$ 。若工作台运动速度  $V$  大于给定速度  $V_0$ ,则  $u_c > u_{c0}$ ,因而  $\Delta u = u_r - u_c < \Delta u_0$ ,于是放大器输出电流  $i$  减小,从而使电-液伺服阀输出油液流量减小,工作台运动速度  $V$  下降,当工作台运动速度  $V$  等于给定速度  $V_0$  时,系统恢复平衡工作状态;反之,如果某因素使工作台速度下降小于给定速度  $V_0$  时,则  $u_c < u_{c0}$ ,因而  $\Delta u = u_r - u_c > \Delta u_0$ ,于是放大器输出电流加大,工作台运动速度上升,直至达到  $V_0$ ,系统恢复平衡状态。该系统的方块图如图 1-9 所示。

#### 2. 随动系统(也称自动跟踪系统)

随动系统的输入信号是一个随时间任意变

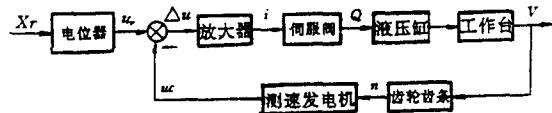


图 1-9

化的函数(事先无法预测其变化规律),系统的任务是在存在扰动的情况下,保证输出量以一定的精度跟随输入信号的变化而变化。在这种系统中,输出量通常是机械位移、速度或加速度。随动系统也称为跟踪系统,或伺服系统。

随动系统在工业、交通和国防等部门有着极为广泛的应用,如机床的自动控制、舰船的操舵系统、火炮控制系统及雷达导航系统等。下面首先介绍机床工作台随动系统的例子。

图 1-10 所示为工作台位置控制系统。该系统由指令电位器、反馈电位器、放大器、伺服电机、齿轮减速器、滚珠丝杠及工作台组成,其功用是控制工作台位置按指令电位器给出的规律变化。工作原理如下。

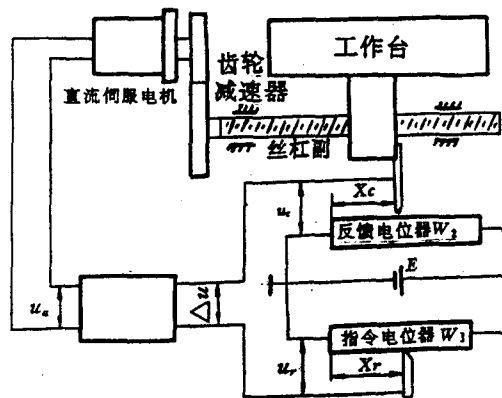


图 1-10

通过指令电位器的滑动触点给出工作台的位置指令  $x_r$ , 并转换为控制电压  $u_r$ 。被控制工作台的位移  $x_c$  由反馈电位器检测, 并转换为反馈电压  $u_c$ 。两电位器接成桥式电路。当工作台位置  $x_c$  与给定位置  $x_r$  有偏差时, 桥式电路的

输出电压为  $\Delta u = u_r - u_c$ 。设开始时指令电位器和反馈电位器滑动触点都处于左端, 即  $x_r = x_c = 0$ , 则  $\Delta u = u_r - u_c = 0$ , 此时, 放大器无输出, 直流伺服电机不转, 工作台静止不动, 系统处于平衡状态。

当给出位置指令  $x_r$  时, 在工作台改变位置之前的瞬间,  $x_c = 0$ ,  $u_c = 0$ , 则电桥输出为  $\Delta u = u_r - u_c = u_r - 0 = u_r$ , 该偏差电压经放大器放大后控制直流伺服电机转动, 直流伺服电机通过齿轮减速器和滚珠丝杠驱动工作台右移。随着工作台的移动, 工作台实际位置与给定位置之间的偏差逐渐减小, 即偏差电压  $\Delta u$  逐渐减小。当反馈电位器滑动触点的位置与给定位置一致, 即输出完全复现输入时, 电桥平衡, 偏差电压  $\Delta u = 0$ , 伺服电机停转, 工作台停止在由指令电位器给定的位置上, 系统进入新的平衡状态。当给出反向指令时, 偏差电压极性相反, 伺服电机反转, 工作台左移, 当工作台移至给定位置时, 系统再次进入平衡状态。如果指令电位器滑动触点的位置不断改变, 则工作台位置也跟着不断变化。该系统的控制过程可用图 1-11 所示方块图表示。

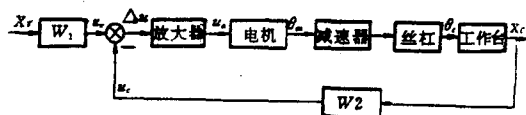


图 1-11

由系统上述工作过程可知, 为了使输出量复现输入量, 系统通过反馈电位器不断地对输出量进行检测并返回到输入端与输入量进行比较得出偏差信号, 再利用所得偏差信号控制系统运动, 以便随时消除偏差。从而实现了工作台位置按指令电位器给定规律变化的目的。

利用上例的动作原理, 可实现导弹、火炮自动定位系统、船用随动舵等一系列随动系统, 如图 1-12 所示。

导弹和火炮随动系统除上述方位角控制, 须再加一套高低角控制就可对准任何目标。除

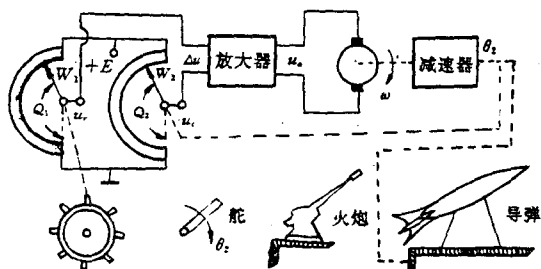


图 1-12

此外，雷达天线跟踪、记录仪、水闸自动升降、卡车前轮等需要工作机械的位置快速精确地跟随指令信号动作者均适用。系统的方块图如图 1-13 所示。

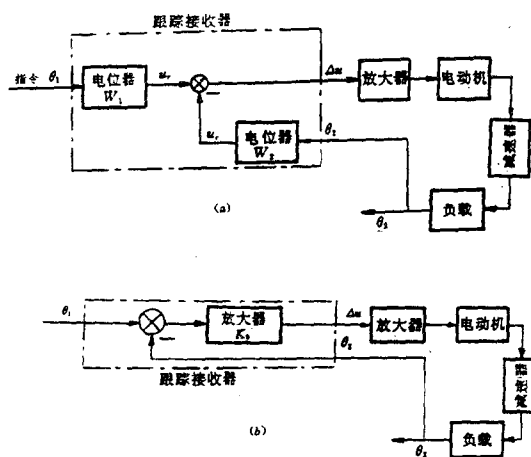


图 1-13

图 1-13 (a) 和 (b) 跟踪接收器的两种表示法是等效的。 $k_0$  放大器有两个作用：①变换信号的作用，将角度偏差信号变换成电压偏差信号。②比例放大作用，反映了偏差电压  $\Delta u$  与偏差角度  $e$  的比例放大  $k_0$  倍的关系，即  $\Delta u = k_0 e$ 。以上介绍的跟踪接收器是由电位计测量线路组成，也可由自整角机测角线路组成，其方块图与图 1-13(b) 的跟踪接收器表示方法一样。

下面的随动系统例子是卫星跟踪天线系统

(图 1-14)。通讯卫星被送入轨道后，最后将固定在地面上方的某点，并与地球保持相对静止，这种卫星称为同步卫星。但是事实上卫星的位置还是在不断稍有变动，因而必须使通讯天线跟踪卫星的位置。技术条件要求天线的仰角和方位角的误差在  $\pm 3$  角分 ( $1 \text{ 角分} = 9 \times 10^{-4}$  弧度) 以内。

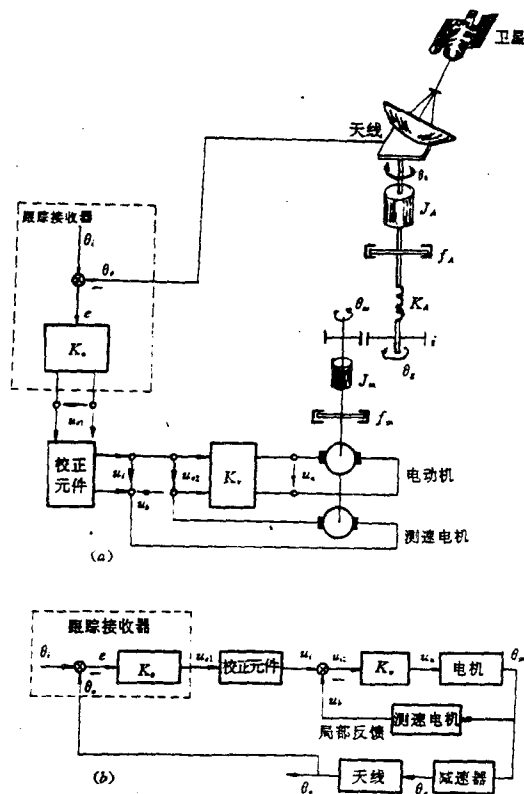


图 1-14 卫星跟踪天线系统

通讯天线上装有四个分立的信号检测器，当天线对准卫星时，每个信号检测器接收到的信号强度相同。如果天线与卫星没有对准，四个检测器接收到的信号强度就不一样，这时跟踪接收器就会把四个信号的差别转换成卫星与天线之间不对准度的电信号，即偏差信号。偏差信号经放大后送往校正元件，校正元件按预定的控制规律对放大的偏差信号进行运算，送出一个控制量  $u_i$ 。 $u_i$  与测速发电机测得的速

度信号  $u_0$  相减后（注意，这是一个局部负反馈）得到  $u_{e2}$ 。 $u_{e2}$  经过功率放大后驱动直流电动机，并经过减速器减速后带动天线旋转，从而使天线对准通讯卫星。需要指出的是：天线的实际位置  $\theta_0$  和卫星的实际位置  $\theta_i$  之间的偏差  $e$  是由跟踪接收器根据四个分立的信号检测器接收到的信号经过计算以后得到的，而不是预先分别测量  $\theta_0$  和  $\theta_i$  相减所得。这又是另一种跟踪接收器，其表示方法同前面图 1-13(b) 的跟踪接收器。

从图 1-14(b) 可清楚看到局部反馈构成了一个内环，主反馈  $\theta_0$  又构成了一个外环，这是一个多环系统。系统增加局部反馈和校正元件是为了进一步改善系统性能。

### 3. 程序控制系统

这种系统的输入信号为已知给定的时间函数，即是事先确定的程序。程序预先编成，并记录在程序的载体上（如磁带、凸轮、靠模等），将其装在输入装置中。控制过程就是由程序载体按一定的时间顺序，发出指令，输入装置将其变成控制输入信号，通过控制系统的作用，使被控对象按照指定的要求动作。工业生产中很多自动机床的控制系统就属此类系统。

## 二、控制系统的分类

1) 按信号传递路径分类：可分为开环控制系统与闭环控制系统。

2) 按输入信号特征分类：可分为定值调节系统、随动系统、程序控制系统。

3) 按描述系统的数学表达式的不同分类：可分为线性系统与非线性系统。

### (1) 线性系统

组成系统的元件的特性均为线性的，其输出输入关系都能用线性微分方程描述，即该系统的运动方程式可以用如下的线性微分方程描述

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

$$+ b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t)$$

式中  $r(t)$ ——系统的输入量；

$c(t)$ ——系统的输出量。

线性系统最重要特点是满足叠加原理。叠加原理包含叠加性和齐次性（或叫均匀性）。

叠加性是：若在  $r_1(t)$  作用下，输出是  $c_1(t)$ ；

在  $r_2(t)$  作用下，输出是  $c_2(t)$ ；

则在  $r_1(t) + r_2(t)$  作用下，输出是  $c_1(t) + c_2(t)$ 。

齐次性是：若在  $r(t)$  作用下，输出是  $c(t)$ ；

则在  $kr(t)$  作用下，输出是  $kc(t)$ ，其中  $k$  为常数。

叠加性和齐次性是鉴别系统是否为线性的根据。显然由线性系统的齐次性和叠加性可知：作用于线性系统的多个输入（可以作用在不同的输入端）信号的总响应等于各个输入信号单独作用时产生的响应的代数和。

如果线性微分方程中的所有系数是不随时间而变化的常数，则称此系统是线性定常系统或线性时不变系统。若系统有随时间变化的函数，则称系统是线性时变系统。本书只讨论定常系统。

### (2) 非线性系统

若系统中存在非线性元件，它的输入输出关系要用非线性微分方程来描述的，就称为非线性系统。显然，只要系统中有一个元件是非线性的，整个系统就是非线性的。

4) 按控制系统中的信号性质分类：可分为连续控制系统和离散控制系统。

(1) 连续控制系统：系统各部分的信号都是连续函数形式的模拟量。

(2) 离散控制系统：系统的某处或数处的信号是以脉冲序列或数码形式传递的系统。计算机控制系统就是离散控制系统的例子。

除上面介绍的分类方法外，系统还可根据所使用的能源不同，分为电气、液压和气动系统；根据误差不同，分为有静差系统和无静差系统等等。



## § 1-4 闭环控制系统的基本组成和术语

### 一、闭环控制系统的基本组成

从以上各节的分析可以知道,为了组成一个闭环控制系统一般应包括图 1-15 所示基本元件。

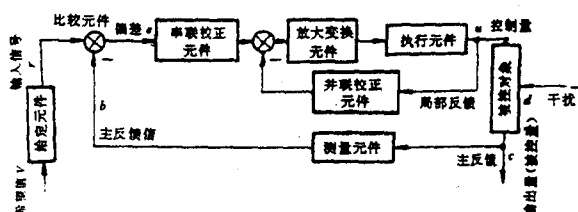


图 1-15 典型闭环控制系统方块图

1) 测量元件: 对被控量进行测量, 并转换成能和输入信号进行比较的物理量。通常为比例元件。

2) 给定元件: 将希望值转换成能和主反馈信号比较的输入信号 (若希望值直接能和主反馈信号比较, 则给定元件就省去了)。

3) 比较元件: 将主反馈信号与输入信号比较, 产生偏差信号。比较元件往往不是一个专门的物理元件, 多数情况是和测量元件或线路结合在一起的。

4) 放大元件: 对微弱的偏差信号进行变换放大, 以满足执行元件对能量形式和功率大小的需要。

5) 执行元件: 接受偏差信号, 控制被控对象, 使被控量趋向希望值。

6) 校正元件: 或称校正装置, 用以稳定控制系统、提高系统性能。有反馈校正和串联校正两种形式。

一般说来, 尽管闭环控制系统的控制任务各不相同, 使用元件的结构和能源形式亦有所不同, 但就其信号的传递、变换的职能来说, 都可抽象成图 1-15 所示的方块图。它表示了控制系统的基本组成。

### 二、控制系统中常用的名词和术语

1) 输出量 (被控量)  $c$ : 被控对象中要求控制的量。控制的目的在于使它维持在希望值给定的数值上。

2) 希望值 (指令、给定值)  $v$ : 由控制者确定的对系统预定的指令性量值, 控制的目的是使被控量与希望值相等。

3) 输入信号 (参考输入)  $r$ : 直接输入到闭环系统比较元件上的信号, 一般正比于希望值。

4) 主反馈信号  $b$ : 是被控量经测量元件变换处理后再送到比较元件中的反馈量。主反馈信号  $b$  与输入信号  $r$  比较后产生偏差  $e$ 。因为只有量纲相同的物理量才能进行比较, 所以,  $b$  与  $r$  有相同的量纲。

5) 偏差信号  $e$ : 它是输入信号与主反馈信号之差, 即  $e=r-b$ 。是使闭环系统动作的最原始控制信号, 通常很微弱, 但却是闭环系统产生控制动作的基础。

6) 控制量  $u$ : 执行元件作用于被控对象的控制信号, 通常具有一定的功率, 并且是能够为被控对象接受的一种物理量。

7) 干扰 (扰动)  $d$ : 是系统不需要而又难于避免的输入, 它影响被控量的控制精度, 使被控量偏离希望值。干扰可能来自系统之外, 也可能来自系统内部。这种输入在分析系统时必须认真考虑。

8) 输入量: 是指对系统输出量有直接影响的输入, 包括希望值  $v$  及干扰  $d$  两种。

## § 1-5 对控制系统的基本要求与常用典型测试信号

### 一、对控制系统的基本要求

对反馈控制系统的基本要求有三项: 稳定性、暂态性能和稳态性能。

#### 1. 稳定性要求

一般没有外作用时, 系统处于平衡状态, 系统输出量也是确定的。当系统受到外作用时, 其输出量必将发生相应变化, 但由于系统含有具有惯性或贮能特性的元件, 输出量不可能立即

达到与输入相应的值,而需有一个过渡过程。如图 1-10 所示工作台位置控制系统,给出图 1-16 (a)所示位置指令  $r(t)$  后,工作台不会立即达到指令位置,而要经历一定的过渡过程如图 1-16 (b)和(c)所示。稳定的系统其过渡过程曲线  $c$

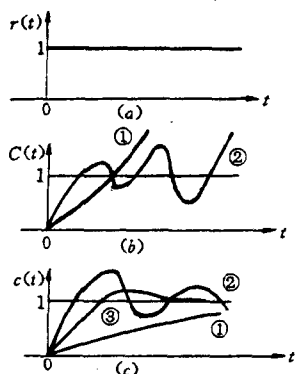


图 1-16

(t)如图 1-16(c)所示,其输出量  $c(t)$  随时间的增长逐渐趋于希望值。其中曲线①为单调增长过程,曲线②、③均为衰减振荡过程,它们最终都趋于希望值,所以系统是稳定的。不稳定的系统,其输出量  $c(t)$  的过渡过程随时间的增长而发散(如图 1-16(b)所示)或呈现为持续的等幅振荡。显然,系统若能正常工作,则必须是稳定的。

2. 暂态性能(或称过渡过程性能,也可称动态性能)要求

一个暂态性能好的系统既要过渡过程时间短(快速性,简称“快”),又要过渡过程平稳、振荡幅度小(平稳性,简称“稳”)。如图 1-16(c)中曲线②的平稳性不好,但快速性还可以;曲线①的平稳性好,但快速性差;曲线③平稳性和快速性都好。

3. 稳态性能要求

暂态过程结束后系统进入稳态。对于稳态,要求被控量以一定的精度达到希望值。精度要求高,就是指系统的稳态误差要小。以上要求也称为系统的准确性,简称“准”。

综上所述,对控制系统的基本要求是:在稳定的前提下,系统要稳、快、准。这个基本

要求,通常称为系统的动态品质。

同一个系统稳、快、准是相互制约的。提高了快速性,可能会引起系统强烈振荡;改善了平稳性,控制过程又可能很迟缓,甚至精度也差。分析和解决这些矛盾,将是本学科讨论的重要内容。

要了解系统的动态品质,必须通过实验对控制系统过渡过程进行测试。又为了对测试得到的过渡过程曲线(如图 1-16(c)曲线)确切评价,有必要对过渡过程定义几个具体的品质指标,这个任务将在第三章完成。然而,系统输出响应的过渡过程形式,又与输入信号形式有关。为了比较不同系统的动态品质,应该选取同一种典型的输入信号。因此,在介绍过渡过程的具体品质指标之前,首先介绍几种常用的典型输入信号,也可称典型测试信号。

## 二、控制系统常用的典型测试信号

### 1. 选取典型测试信号的原则

(1) 应大致反映系统的实际工作情况,而且要从系统工作最不利的情况出发来选取典型测试信号。

(2) 选取的典型信号要尽可能简单,从而保证在现场或实验室中容易产生,且其数学表达式也简单,便于理论计算。

(3) 若任意输入能分解为所选典型信号,则更有意义。

### 2. 典型测试信号

(1) 单位阶跃函数  $1(t)$ , 如图 1-17 所示。

其数学表达式为

$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

如果阶跃函数的幅值为  $R$ ,则可表为  $R \cdot 1(t)$ 。在自动控制系统中,阶跃函数是应用最广的一种典型输入信号,一般用系统对阶跃函数的响应来评价系统的动态品质。例如,突然加重或卸掉电机负荷,电源电压的突跳等,都可近似视为阶跃函数形式。

(2) 单位斜坡函数  $t \cdot 1(t)$ , 如图 1-18 所示。

其数学表达式为

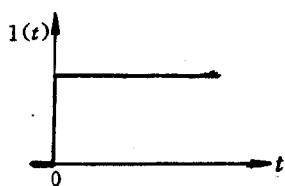


图 1-17 图

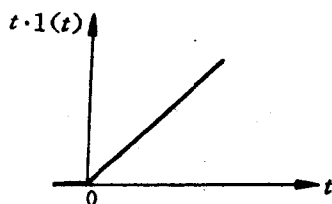


图 1-18

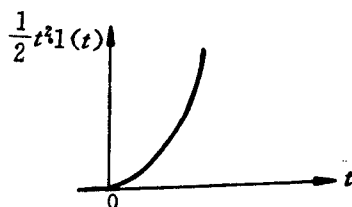


图 1-19

$$t \cdot 1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t \geq 0 \end{cases}$$

式中的  $1(t)$  常省略。斜坡函数又叫速度函数，如果其速度为  $R$ ，则斜坡函数可表示为  $Rt$ 。在实际系统中，这意味着一个随时间以匀速增长的外作用，它可用来检测系统匀速运动的性能。

(3) 单位加速度函数  $\frac{1}{2}t^2 \cdot 1(t)$ ，如图 1-19

所示。

其数学表达式为

$$\frac{1}{2}t^2 \cdot 1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2}t^2 & t \geq 0 \end{cases}$$

式中的  $1(t)$  常省略。如果加速度函数的加速度为  $R$ ，则加速度函数可表示为  $\frac{1}{2}Rt^2$ 。从阶跃→速度→加速度相对  $t$  的变化逐渐加快，实际系统测试很少采用比加速度函数变化更快的信号。

(4) 单位脉冲函数  $\delta(t)$ ，如图 1-20(b) 所表示的。

其数学表达式为

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

单位脉冲函数  $\delta(t)$  可以看成图 1-20(a) 所示面积为 1 的矩形脉冲当宽度  $\tau \rightarrow 0$  时的极限

$$\delta(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\tau} 1(t) - \frac{1}{\tau} 1(t - \tau) \right]$$

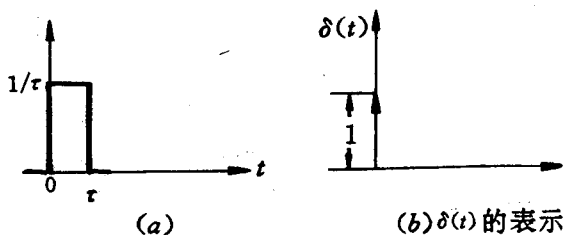


图 1-20

显然，上式  $\delta(t)$  函数的面积为 1。所以脉冲函数不用其幅值的大小来描述脉冲的强度。强度为  $A$  的脉冲函数记为  $A\delta(t)$ 。单位脉冲作用  $\delta(t)$  在现实中是不存在的，它只有数学上的意义，但它却是一个重要的数学工具。在控制系统的研究中有重要作用，如由单位脉冲响应可求任意输入信号作用下的响应。脉动电压信号、冲击

## 习 题

力、阵风等，可近似视为脉冲作用。

(5) 正弦函数  $A \sin \omega t \cdot 1(t)$ ，如图 1-21 所示。

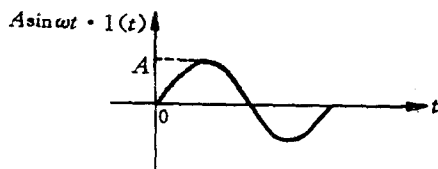


图 1-21

其数学表达式为

$$A \sin \omega t \cdot 1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A \sin \omega t & t \geq 0 \end{cases}$$

式中  $A$  为振幅， $\omega$  为角频率。式中的  $1(t)$  常省略。实际控制过程中，如海浪对船舰的扰动力，电源及机械振动的噪声等等，均可近似为正弦作用。

1-1 试列举几个日常生活中的开环控制和闭环控制系统，并说明它们的工作原理。

1-2 图 1-22 是液位自动控制系统原理示意图。在任何情况下，希望液面高度  $c$  维持不变，试说明系统工作原理，画出方块图，并说明被控对象、给定值、被控量和干扰量是什么？

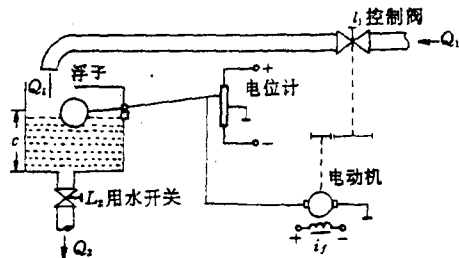


图 1-22 液位自动控制系统

1-3 图 1-23 是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明自动控制大门开关的工作原理并画出系统方块图。

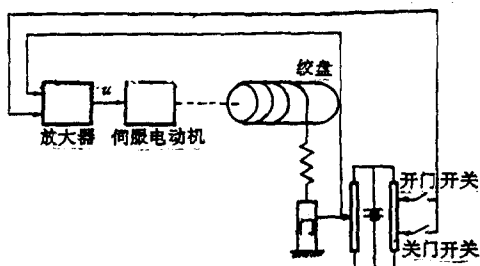


图 1-23 大门自动开关控制系统

1-4 试根据你的经验来分析骑自行车的操作控制过程。说明眼、脑、手的作用，是否也可用一个闭环控制系统的方块图来表示？

1-5 开环控制系统的优缺点是什么？闭环控制系统的优缺点是什么？

1-6 对系统进行动态特性试验为什么最常用阶跃函数作输入？还有哪些常用的输入函数？

1-7 试结合实际例子说明对控制系统有哪些基本要求？