

第1章

自动控制系统概述

学习目标

- 理解自动控制系统的构成，能正确分析控制系统的工作原理
- 能正确叙述自动控制的概念
- 能正确找出控制系统的输出信号、给定输入信号、扰动输入信号和反馈信号
- 能正确判断控制系统的控制方式
- 理解控制系统性能指标之间的相互制约性，能以辩证的观点看待问题

教学导航

本章从自动控制水温系统入手，介绍了自动控制、自动控制系统等基本概念，重点介绍自动控制的基本方式及自动控制系统的工作原理分析，最后叙述控制系统的性能指标、分类及发展。

1.1 自动控制的基本概念

在科学技术发展的过程中，自动控制技术扮演了十分重要的角色。飞行器制导、机器人控制、现代机器制造业生产流水线和工业过程控制方面，到处能看到自动控制的影子。没有自动控制技术的应用就没有现代工业的成果。日常生活中也有许多自动控制的应用实例，如市场上常见的高压锅上的安全阀就是一个简单的自动控制系统，当锅内因过热导致压力过高时，安全阀会自动打开从而减压。下面以水温控制系统为例来分析一下控制系统的工作原理。

1.1.1 了解自动控制系统

1. 人工控制的水温控制系统

如图 1-1 所示，水箱下端进冷水，为了将水箱中的水加热到预定温度 80 $^{\circ}\text{C}$ ，需要人工通过温度计检测温度，将测量的温度值与人大脑中的预定温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 进行比较。若测量的实际温度小于预定温度，人的大脑经过分析后向手发出命令去开阀门，阀门打开后热蒸气进入管道，在水箱中利用热交换将水箱中的水加热。如测量的实际温度大于预定温度，则关小阀门使热交换减慢从而降低水箱的温度。

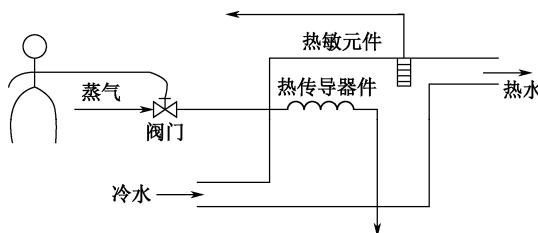


图 1-1 水温人工控制系统原理图

控制工作情况可以分解为如图 1-2 所示的人工水温控制系统方框图。图中水箱为被控对象，为了完成“水箱中水的温度达到预定温度”这一控制任务，将温度计、人的眼睛、大脑、手、阀门等联系在了一起。而按一定方式连接的各种元件、设备称为控制装置。控制装置包括检测装置（如温度计、眼睛）、比较装置（如大脑）、执行装置（如手、阀门）等。控制系统由控制装置和被控对象构成。

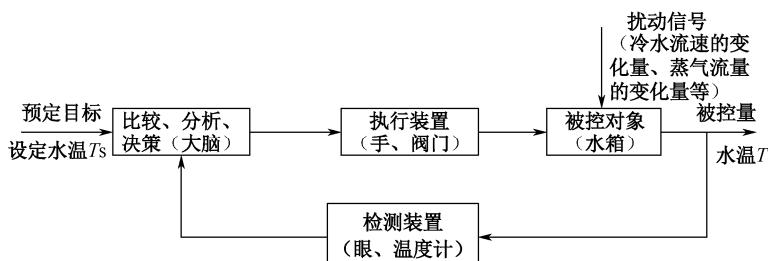


图 1-2 水温控制系统方框图

练一练 1

冬要加衣，夏要减衣。请描述人对体温感觉时的生物反馈过程。生物反馈是人能够自觉而且成功地调整脉搏、疼痛反应和体温等感觉的一种机能。（扫二维码，了解体感温度）



2. 自动控制的水温控制系统

在人工控制的水温系统中将温度计用热电偶替换，如图 1-3 所示。热电偶将温度的高低转换成热电动势的大小，热电动势通过放大后作为反馈电压 u_f ，并与给定温度 T_s 所对应的给

定电压 u_s 作比较，将温度差转换成电压差，如果所测水的实际温度不等于给定温度，即 T_s ，则有电压差 $\Delta u = u_s - u_f$ ，它通过放大器放大后去控制电动机，带动阀门，带动蒸气阀已调节水温。若 $T < T_s$ ，则 $u_f < u_s$ ， Δu 为正，使电动机正转开大阀门，升高水温，反之则关小阀门。直到 $T=T_s$ ， $\Delta u=0$ 时，电动机停转。其方框图如图 1-4 所示。

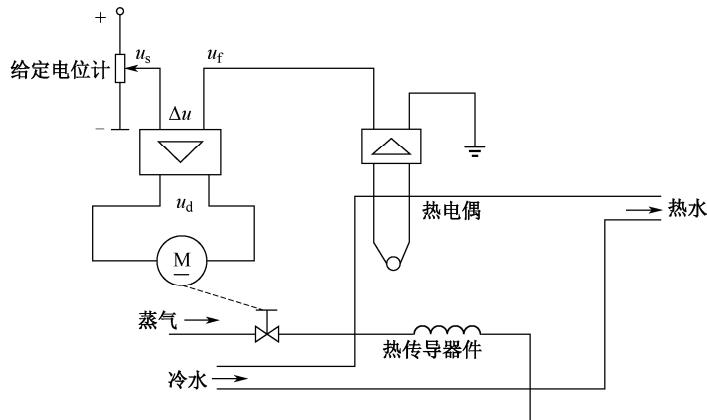


图 1-3 自动控制水温系统的原理图

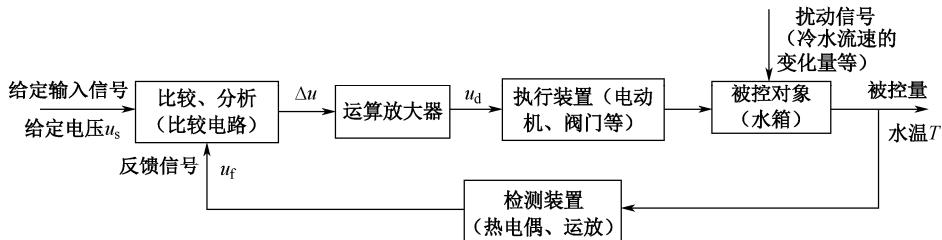


图 1-4 自动控制水温系统的方框图

比较以上人工控制水温系统和自动控制水温系统，可以发现这两个控制系统的控制任务相同——使水的实际温度达到设定温度。这两个控制系统的不同点有：

- (1) 自动控制系统中用热电偶、运算放大器替换了人工控制系统中温度计、人眼的检测作用。
- (2) 用运算放大器代替了人的大脑完成比较、分析、决策任务。
- (3) 用电动机代替了手的动作。
- (4) 将人工控制系统中的给定温度替换成给定电压。

综合这些不同点，说明自动控制系统去掉了人的直接参与。人作为间接参与者负责系统的设计、监视该系统的运行。

所谓自动控制 (Automatic Control)，就是在人不直接参与下，靠控制装置使被控制对象完成控制任务 (自动地按照预定规律运行，或使某个被控制的参数按预定要求变化)。

练一练 2

图 1-5 所示为液位自动控制系统原理图，希望液面高度维持不变，试说明其工作原理 (水箱底部的阀门开度一定)。

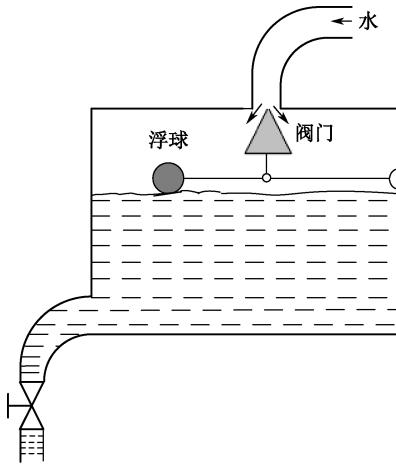


图 1-5 液位自动控制系统原理图

1.1.2 控制系统中的信号

控制系统中的信号分为输出信号、输入信号和反馈信号。

1. 输出信号

输出信号也就是系统的被控量，在自动控制水温系统中输出信号为水箱中水的实际温度。

2. 输入信号

输入信号是能影响被控量的外来信号，通常分为以下两种。

(1) 给定输入信号。它是人们期望出现的外来信号，是系统的输出按照这种输入的要求而变化的控制量。自动控制水温系统中 u_s 即是该系统的给定输入信号。

(2) 扰动输入信号。它是人们不希望出现的外来信号，它的出现会使输出信号偏离希望值。如自动控制水温系统中，当水箱的实际水温已调节至给定温度，此时进入冷水管的水流速突然增大，那么水箱中水的实际温度会下降。因此，自动控制水温系统中进入水箱的冷水流速的变化就是该系统的一种扰动输入信号。

3. 反馈信号

反馈信号是从输出信号中取得，直接或经过某种变换后返回到输入端参与系统控制的一种信号。自动控制水温系统的输出信号（实际水温）经过热电偶、运算放大器后转换成 u_f 信号，再与 u_s 进行比较所得的偏差来控制电动机、阀门以调节水温。因此， u_f 即自动控制水温系统的反馈信号。

练一练 3

试对图 1-5 所示的液位控制系统画出其方框图，并找出该系统的输出信号、给定输入信

号、扰动输入信号（至少一种）及反馈信号。

小提示

① 画系统方框图时，一般来说，给定输入信号在最左边，输出信号在最右边，反馈信号与给定输入信号进行比较。

② 控制装置、被控对象画在各方框里。各信号写在方框外。

③ 方框图中要用箭头表示信号的流向。（扫二维码，了解绘制方框图的规律）



1.2 自动控制的基本方式

按照自动控制系统的结构及控制方式，可将其分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统三种。

1.2.1 开环控制系统

控制装置与被控对象之间只有顺向作用而无反向联系时，称为开环控制（Open-Loop Control），相应的控制系统称为开环控制系统。

图 1-6 所示为一驱动盘片匀速旋转的转台，这种转台在 CD 机、计算机磁盘驱动器等许多装置中广泛应用。该系统利用电池提供与预期速度成比例的电压信号 U_s ，直流放大器将给定 U_s 信号进行功率放大后，用来驱动直流电动机，即 U_d 正比于 U_s 。根据直流电动机的机械特性方程 $n = \frac{U_d - I_d R}{C_e}$ 可知，在 I_d 不变时，直流电动机的转速 n 与加在其电枢上的电压 U_d 成

比例，也就是改变 U_s ， U_d 改变 n 变化。即改变输入信号 (U_s)，输出信号 (n) 跟着改变。输入决定输出也就是说控制装置与被控对象之间具有顺向作用。

当 U_s 不变时，经过运算放大器、直流电动机与转台间顺向的作用，转速 n 达到预期速度不变。此时，若转台上的负载增大，即 I_d 增大，转速 n 将减小。由于没有控制装置与被控对象间的反向联系，变化了的转速 n 不能反馈到系统的输入端与给定值进行比较，即被控量不对系统产生控制作用，故属开环控制系统。

转台速度开环控制系统方框图如图 1-7 所示。

这种转台在电机或其他部件的参数不发生变化的情况下，可以保持恒定的转速，但在电机和直流放大器受到任何扰动，如电网电压的波动，环境温度变化引起的放大系数的变动、转台上负载的变动等都会引起速度 n 的改变，而这种变化未能反馈至控制装置并影响控制过程，因此，系统无法克服由此产生的偏差。

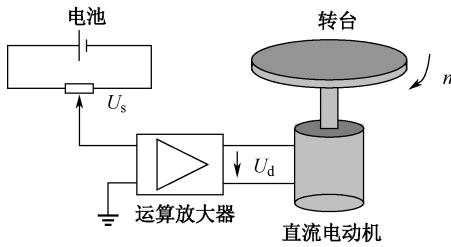


图 1-6 转台速度开环控制系统

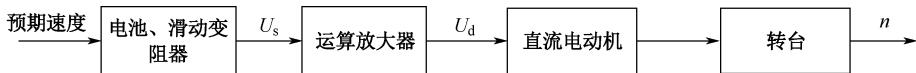


图 1-7 转台速度开环控制系统的方框图

开环控制系统的优点是系统结构和控制过程简单，但由于这类系统抗扰能力较差，控制精度较低，因而限制了它的应用范围。开环控制一般用于逻辑控制、顺序控制、扰动少及对控制性能要求不高的场合。

1.2.2 闭环控制系统

控制装置与受控对象之间既有顺向作用又有反向联系时，称为闭环控制（Closed-Loop Control），相应的控制系统称为闭环控制系统。

图 1-8 所示为转台速度闭环控制系统，对应的系统方框图如图 1-9 所示。

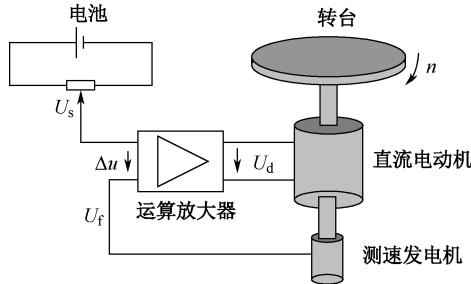


图 1-8 转台速度闭环控制系统

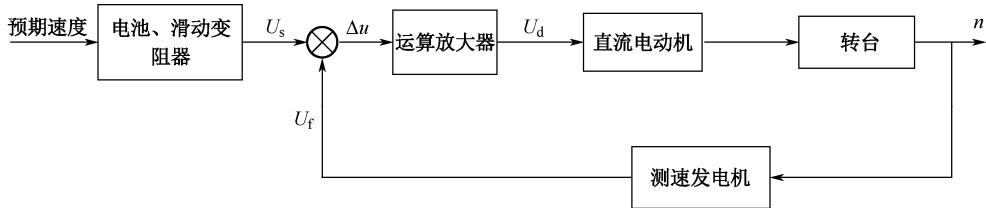


图 1-9 转台速度闭环控制系统的方框图

系统中，与转台、直流电动机同轴连接的测速发电机起检测作用，测速发电机输出的电压 U_f 与转速 n 成正比。受转台负载扰动的影响，若转台的实际转速 n 减小，测速发电机的输

出电压 U_f 将减小，在 U_s 一定时，电压偏差信号 $\Delta u = U_s - U_f$ 将增大，经放大后的电动机端电压 U_d 将增大，转台实际转速 n 最终也将跟着增大，使实际速度接近或等于预期速度，从而消除扰动对速度的影响，提高系统的控制精度。整个系统的控制过程为：

$$U_s \text{ 一定, } I_d \text{ 时, } n = U_f + \Delta u = U_s - U_f + U_d = n.$$

由图 1-9 可以看出，测速发电机是控制装置与被控对象反向联系的通道，通过测速发电机实时地将输出信号 n 的变化情况反馈至控制装置，根据偏差信号 Δu 实施控制，使实际速度接近或等于预期速度。

练一练 4

试在图 1-8 所示的转台速度闭环控制系统中找出该系统的输出信号、给定输入信号、扰动输入信号及反馈信号。

练一练 5

在图 1-8 所示的转台速度闭环控制系统中，在转台的实际转速达到预期速度时，试分别分析：① 转台负载增大时；② 转台负载减小时；③ 转台负载不变时系统中物理量 n 、 U_f 、 Δu 、 U_d 的变化情况。



(扫扫二维码，了解练一练 5 的第③种情况里各物理量变化的分析过程)

闭环控制系统的特点如下：

(1) 具有两种传输信号的通道：由给定值至被控量的通道称为前向通道或主通道；由被控量至系统输入端的通道为反馈通道。

(2) 由于系统的控制作用是通过给定值与反馈量的差值 Δu 来实施的，即 $\Delta u \neq 0$ 就有控制过程，故这种控制常称为按偏差控制，又称为反馈控制。

(3) 无论取什么物理量进行反馈，作用在反馈环内前向通道上的扰动所引起的被控量的偏差值，都会得到减小或消除，使得系统能基本抑制这些扰动。

正是由于以上特性，使得闭环控制系统在控制工程中得到了广泛的应用。

闭环控制系统相较于开环控制系统，结构更复杂，对前向通道上的干扰信号，抗干扰能力更强。由于反馈通道上扰动信号所引起的输出量的偏差不能被减小或消除，因此对反馈通道的精度要求较高。

(扫扫二维码，拓展了解日常生活中所接触到的闭环与开环控制系统)



1.2.3 复合控制系统

反馈控制是在外部（给定或扰动）作用下，系统的被控量发生变化以后才进行相应调节和控制的。如果扰动因素已知，并能直接或间接检测出来，那么也可以利用扰动信号来产生一种补偿作用，以抵消扰动信号对被控量的影响，这称为按扰动前馈补偿控制。前馈补偿控制与反馈控制相结合，就构成了复合控制。公元 235 年，古人马钧研制出用齿轮传动自动指示方向的指南车，类似按扰动补偿的自控系统。按扰前馈补偿复合控制系统的方框图如图 1-10 所示。

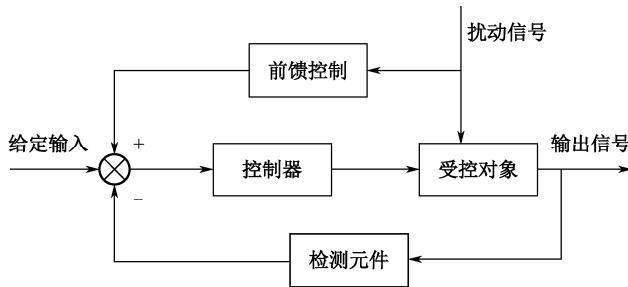


图 1-10 按扰动前馈补偿的复合控制

1.3 控制系统的性能指标

前两节叙述了控制系统的组成及控制系统的基本方式，让大家知道了要构建一个控制系统完成控制任务，必须要有被控对象、检测装置、比较装置、执行装置等控制装置，按照开环或闭环的控制方式组成系统。那么构建的控制系统的性能好坏如何来判断呢？

例如，现在构建了 3 个水温自动控制系统，希望水温最终能维持在 80 ℃。假设 3 个系统的实际水温随时间变化的曲线分别如图 1-11 (a) (b) 所示，哪个系统的性能更好呢？

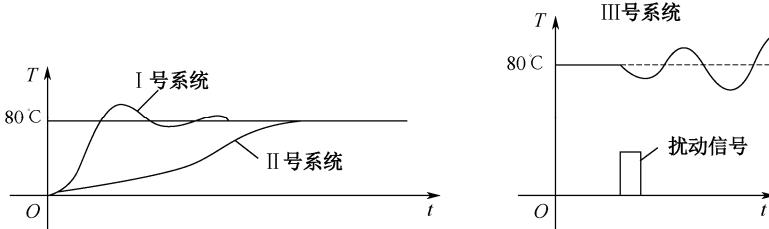


图 1-11 (a) 、(b) 号系统水箱温度随时间变化曲线图

要想知道系统的性能好坏，必须要知道判断系统性能的指标。衡量控制系统性能好坏的指标有稳定性、快速性和准确性。其中稳定性是决定系统能否正常工作的首要条件。

下面先来学习这 3 个指标，然后再判断这 3 个水箱温度控制系统的性能好坏。

1. 稳定性

稳定性包括绝对稳定性和相对稳定性。

1) 绝对稳定性

一个处于某平衡状态的线性定常系统，若在外部作用下偏离了原来的平衡状态，当外部作用消失后，系统仍能回到原来的平衡状态，则称该系统是绝对稳定的。否则，系统为不稳定。

我们来看以下的凹面系统和凸面系统。在图 1-12 (a) 中，小球原来处于平衡位置——凹面的底部，在外来 F 的作用下，小球会偏离原来的位置沿着凹面向上移动，外力 F 消失

后，小球因惯性作用会在平衡位置附近摆动几次，最终还是会回到原来的平衡位置，那么图 1-12 (a) 所示的凹面系统是稳定的。而在图 1-12 (b) 中，没有外力 F 的作用时，小球也会在平衡位置静止不动——凸面的顶点，在外力 F 的作用下，小球会偏离原来的位置沿着凸面向下移动，外力 F 消失后，小球离原来平衡位置越来越远，小球不能回到原来的平衡位置，那么该凸面系统是不稳定的。



图 1-12 凹凸面系统结构示意图

从图 1-12 (a)、(b) 两图比较可以看出，系统是否稳定与外力 F 的大小无关，只与系统自身的结构、参数有关。

2) 相对稳定性

系统的相对稳定性指系统振荡的程度，也就是平稳性。振荡越厉害，平稳性越差。图 1-11(a) 中 I 号系统水的实际温度 T 在预期温度 80°C 上下振荡几次最终达到稳定值，II 号系统的温度平缓上升到 80°C 。I 号系统的平稳性较差，II 号系统的平稳性较好。

2. 快速性

快速性可以通过动态时间的长短来表征。过渡过程时间越短，表明快速性越好，反之亦然。快速性表明了系统输出对输入响应的快慢程度。图 1-11 (a) 中 I 号系统的快速性比 II 号系统要好。

3. 准确性

准确性是由输入给定值 $r(t)$ 与输出响应 $c(t)$ 的终值之间的差值来表征的。准确性的指标为稳态误差 e_{ss} 。突加恒值给定信号时的情形如图 1-13 所示。准确性反映了系统在一定外部信号作用下的稳态精度。若系统的最终误差为零，则称为无差系统，否则称为有差系统。

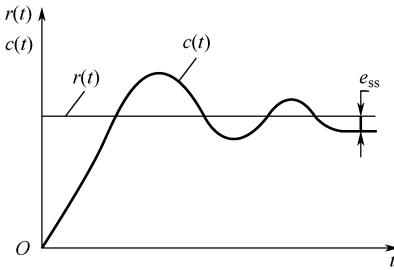


图 1-13 控制系统的稳态精度

现在再来看一下图 1-11 所示的 3 个系统性能的好坏，显然 III 号系统不稳定，I 号系统的快速性较好，而平稳性较差。II 号系统的平稳性好，而快速性较差。稳定性、快速性和准确

性往往是互相制约的。在设计与调试过程中，若过分强调系统的稳定性，则可能会造成系统响应迟缓和控制精度较低的后果；反之，若过分强调系统响应的快速性，则又会使系统的振荡加剧，甚至引起系统不稳定。

以各种机床为主的加工类企业，要求带动机床工作的电动机能快速响应：启动、电动机调速等命令，这类控制系统在满足基本精度的前提下要求快速性比较好，称为运动控制系统。而在化工企业，生产各种化工产品如液体时要首先保证液位不能超出安全范围，即平稳性要好，这类系统为过程控制系统。

小提示

正是由于过程控制系统更注重平稳性多于快速性，运动控制系统更偏重于快速性，也可以把自动控制系统分为运动控制系统和过程控制系统，而大家在大学里学习的关于自动化方面的学科也经常按照这两个分支来进行。

怎样根据工作任务及要求的不同，分析和设计自动控制系统，使其对三方面的性能有所侧重，并兼顾其他，以全面满足性能要求，这正是本课程所要研究的内容。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法很多，常见的有以下几种。

1. 线性系统和非线性系统

满足叠加原理的系统是线性系统，否则是非线性系统。

2. 定常系统和时变系统

若系统方程的系数不是时间变量的函数，则称此类系统为定常系统，如 RLC 串联网络。若线性系统方程的系数为常数，则称这类系统为线性定常系统。若系统方程的系数是时间变量的函数，则称此类系统为时变系统，如对航天器的飞行过程控制的系统。

3. 连续系统和离散系统

若系统中所有信号都是连续信号，则称为连续时间系统，简称为连续系统。如果系统中有一处或几处的信号是离散信号，则称为离散时间系统，简称为离散系统。

4. 恒值系统、随动系统和程序控制系统

根据给定值的特征，可将控制系统分为恒值系统、随动系统和程序控制系统。

(1) 恒值系统

若系统的给定值为一定值，控制任务就是克服扰动，使被控量保持恒值，此类系统称为恒值系统。例如，电机恒速控制系统，恒温、恒压、水位控制系统等。

(2) 随动系统

若系统的给定值按照事先不知道的时间函数变化，并要求被控量跟随给定值变化，则此类控制系统称为随动系统。例如，军工上的自动火炮等控制系统。

图1-14所示为一种控制轮舵位置的随动系统。控制的任务是手柄转动 θ_i 时，工作机械(轮舵)跟随着转 θ_c 角，要求 $\theta_{c(t)} = \theta_{i(t)}$ 。工作原理分析：轮舵的操作手柄与发送电位器的滑动节点联动，工作机械(轮舵)与接收电位器的滑动节点联动。发送电位器的输出电压 U_r 正比于 θ_i ，接收电位器的输出电压 U_c 正比于 θ_c 。舵手根据前方航行路线，将操作手柄转过一个角度，此时 $\theta_i = \theta_c$ ， $U_r = U_c$ ，偏差电压 $U_e = U_r - U_c$ 经放大后控制电动机正反转，经过减速器带动工作机，使工作机跟踪手柄转动，力图消灭角差。当手柄转过一定角停下，工作机将转过相同的角，到 $\theta_c = \theta_i$ 时停下。由于手柄的操作是任意的，工作机必须跟踪转动，故也称它为自动跟踪系统或伺服系统。

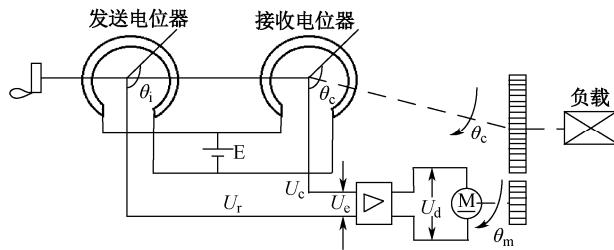


图1-14 轮舵位置随动系统的原理图

轮舵位置随动系统方框图如图1-15所示。

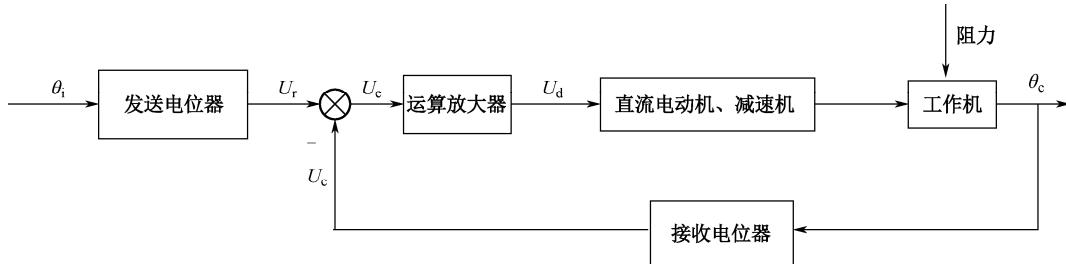


图1-15 轮舵位置随动系统的方框图

练一练 6

轮舵位置随动系统的操纵手柄左转，即 θ_i 角增大时，系统如何工作？试确定该系统的给定输入信号、扰动输入信号、输出信号及反馈信号。

从控制作用上看，以上系统是一个按偏差控制的反馈系统，因此恒值系统和随动系统在控制原理上是一样的，区别在于前者主要是克服扰动影响，后者主要是克服本身惰性影响，以跟随控制量的变化。恒值系统要求稳定性高、稳态误差小，而随动系统则对快速性要求较高。

(3) 程序控制系统

若系统的给定值按照事先已经知道的时间函数变化，并要求被控量跟随给定值变化，则此类控制系统称为程序控制系统，如程控机床及一些工艺过程自动化的生产线等属这类控制系统。

1.5 趣味了解自动控制理论的发展

自动控制理论研究的是如何按被控对象和环境特征，通过能动地采集和运用信息，施加控制作用，使系统在变化或不确定的条件下正常运行并具有预定功能。它是研究自动控制共同规律的技术科学，其主要内容涉及被控对象、环境特征、控制目标和控制手段及它们之间的相互作用。

具有“自动”功能的装置自古有之，公元前14世纪至公元前11世纪，中国、埃及和巴比伦出现自动计时漏壶；中国古代自动化方面的辉煌成就有：公元130年，张衡发明水运浑象仪，公元132年他又研制出自动测量地震的候风地动仪；公元235年，马钧研制出用齿轮传动自动指示方向的指南车，类似按扰动补偿的自控系统；公元725年，一行、梁令瓒发明有自动报时机构的水运浑象仪，其中使用了一个天衡装置，是一个按被调量偏差调节的自动调节器；公元1086—1092年，苏颂和韩公廉建造具有“天衡”自动调节和自动报时机构的水运仪象台；公元1135年，宋代王普记述“莲华漏”上使用浮子—阀门式机构自动调节漏壶的水位；公元1637年，明代宋应星的《天工开物》一书中记载有程序控制思想的提花织机结构图。

世界上公认的第一个自动控制系统是1769年瓦特发明的蒸汽机。1788年瓦特发明飞球调节器，进一步推动了蒸汽机的应用，促进了工业的发展。飞球调节器有时使蒸汽机速度出现大幅度振荡。其他自动控制系统也有类似现象。由于当时还没有自控理论，因此不能从理论上解释这一现象。为了解决这个问题，盲目探索了大约一个世纪之久。

1868年英国麦克斯韦尔的“论调速器”论文指出：不应单独研究飞球调节器，必须从整个系统分析控制的不稳定因素。建立系统微分方程，分析微分方程解的稳定性，从而分析实际系统是否会出现不稳定现象。这样，控制系统稳定性的分析，变成了判别微分方程的特征根的实部的正、负号问题。麦克斯韦尔的这篇著名论文被公认为自动控制理论的开端。

1948年，维纳出版了《控制论》，形成了完整的经典控制理论，标志着控制学科的诞生。维纳成为控制论的创始人！维纳的《控制论》是关于怎样把机械元件和电气元件组合成稳定的并且具有特定性能的系统的科学。这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素。可是，在其他各门自然科学中，这些因素是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是：一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质，以及整个系统的总体运动状态。

第二次世界大战结束后，各国大力发展空间技术，经典控制理论不能满足需要，需要研究新的控制理论。现代控制理论在空间技术取得的巨大成功，促进了空间技术的发展。但由于工业过程控制中普遍存在的不确定性和干扰，难以取得预期的效果。模拟人的控制技术——智能控制产生，虽然不能实现精确的控制，但对各种复杂系统都能够做到比较满意的控制。

虽然现代控制理论的内容很丰富，与经典控制理论相比较，它能解决更多更复杂的控制问题，但对于单输入、单输出线性定常系统而言，用经典控制理论来分析和设计，仍是最实用最方便的方法。同时，经典控制理论涉及的基本原理和主要方法也是控制理论的基础和核心。

总之，自动控制理论正随着技术和现代工程的发展而不断发展，而它反过来又成为高新技术发展的重要理论依据。本书所介绍的内容是该理论中最基本的也是最重要的内容，即经典控制理论部分。

你知道吗？

自动控制技术在都江堰水利工程中的应用

都江堰市，位于成都以西，因都江堰水利工程而得名。两千多年前由秦国蜀郡太守李冰修建的都江堰水利工程，是全世界年代最久、唯一留存、以无坝引水为特征的水利工程，也是目前中国保存最完整的古代水利工程，工程位于都江堰市城西的岷江干流上。

岷江是长江上游的一条较大的支流，发源于四川省北部高山地区。每当春夏季节，山洪江水奔腾而下，但岷江东岸的玉垒山阻碍了江水东流，造成东旱西涝。都江堰的建成，使成都平原成为沃野，人称“天府之国”。

都江堰工程由鱼嘴分水堤、飞沙堰溢洪道、宝瓶口引水口三大主体工程和百丈堤、人字堤等附属工程构成。如图 1-16 所示。

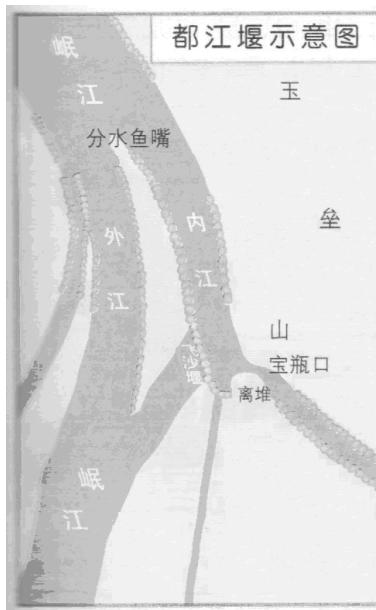


图 1-16 都江堰示意图

在江中修筑的“分水鱼嘴”是都江堰的分水工程，如图 1-17 所示。鱼嘴分水堤位于岷江出山口 1950 米处的岷江江心，形如弯月，前端扁平入水，形如鱼的嘴巴，故名“鱼嘴”。鱼

嘴屹立于岷江江心，包括百丈堤、金刚堤等一整套相互配合的设施，是都江堰水利工程的重要组成部分。分水堤位于渠首顶端，迎着岷江波涛，巧妙地江水分为内外两江。西边外江是自然河道，俗称“金马河”，是岷江正流，其作用是在雨季排泄大量洪水。内江是李冰率众开凿的河道，它把江水源源不断地送往成都平原进行灌溉。

在古代，鱼嘴是以竹笼装卵石垒砌成的。由于它建筑在岷江冲出山口呈弯道环流的江心，冬春季江水较枯，水流经鱼嘴上面的弯道绕行，主流直冲内江，内江进水量约 6 成，外江进水量约 4 成；夏秋季水位升高，水势不再受弯道制约，主流直冲外江，内、外江江水的比例自动颠倒：内江进水量约 4 成，外江进水量约 6 成。这就利用地形，完美地解决了内江灌区冬春季枯水期农田用水及人民生活用水的需要和夏秋季洪水期的防涝问题。



图 1-17 都江堰“分水鱼嘴”

在鱼嘴的下游，凿开玉垒山，打开内江通路，这一人工通道称为“宝瓶口”。内江之水通过宝瓶口引入支流，用来灌溉农田。宝瓶口仿佛一道闸门，能自动控制内江进水量，因其功能奇特又形似瓶口而得名。宝瓶口右边的山丘，是当年开挖时留下的石堆，称“离堆”。宝瓶口自然景观瑰丽，有“离堆锁峡”之称。

飞沙堰溢洪道又称“泄洪道”，具有泻洪、排沙和调节水量的显著功能，故又称为“飞沙堰”。飞沙堰是都江堰三大件之一，看上去十分平凡，其实它的功用非常大，可以说是确保成都平原不受水灾的关键设施。它的主要作用是调节水量。当内江的水量超过宝瓶口上限时，让大量江水回归岷江正流。另一作用是“飞砂”，将上游带来的泥沙和卵石，巧妙地利用离心力作用，从这里抛入外江，确保内江通畅。

为了便于观测和及时控制内江水量，古人雕刻了三个石桩人像放于水中如图 1-18 所示，以“枯水（低水位）不淹足，洪水（高水位）不过肩”为标志，一目了然。古人还凿制石马置于江心，用作衡量每年淘滩深浅的标准。

都江堰的水利工程就是一个典型的自动控制系统。系统的被控量是内江的水量，具有四、六分水功能的分水鱼嘴为系统提供了冬春季枯水期及夏秋季洪水期不同时期的内江进水量（给定输入），宝瓶口作为比较装置、控制装置决定了进入内江水量的



图 1-18 汉代李冰石人水尺（都江堰出土）

大小，若水量超过宝瓶口所定的上限时，由执行装置——飞沙堰，将多余的水量送至外江。

两千多年来，都江堰仍发挥着重要作用，可灌溉土地上千万亩，成为我国古代规模最大、效益最好、历史最久的水利工程。2000年，都江堰与青城山被联合国教科文组织列入“世界文化遗产名录”。

本 章 回 顾

(1) 控制系统包括控制装置和被控对象。控制装置是控制系统中检测装置、比较装置、执行装置等装置的总称。

(2) 所谓自动控制，就是在人不直接参与下，靠控制装置使被控制对象完成控制任务（自动地按照预定规律运行，或使某个被控制的参数按预定要求变化）。

(3) 自动控制系统中的信号有输出信号、反馈信号、输入信号。输入信号是外界强加给系统的信号，包括给定输入信号、扰动输入信号。

(4) 要分析一个自动控制系统，首先必须弄清楚系统的工作原理，它的组成方式及参与控制的量。分析组成时又需注意各组成部分的作用及其相互关系。分析原理时，要了解清楚控制作用是如何产生的，有无反馈，偏差是怎样纠正的。并能用系统方框图来表示各部分的作用及关系和信号的传递，这样才能进一步进行定量分析。

(5) 对于一个控制系统，主要围绕其完成控制任务的性能如何而进行分析研究。衡量控制系统性能好坏的指标有：稳定性、准确性、快速性。其中稳定性是决定系统能否正常工作的首要条件。这些性能指标间往往是互相制约的。

(6) 控制系统的分类方法很多，根据给定量的特征，可将系统分为恒值系统、随动系统和程序控制系统。自动控制理论大致分为经典控制理论和现代控制理论两部分。

习 题 1

1-1 正确叙述下列术语的意义。

自动控制；控制装置与被控对象；给定输入信号；扰动输入信号；反馈信号；输出信号；恒值系统；随动系统；程序控制系统。

1-2 带有独立的冷热水阀门的家用淋浴器是一个常见的人工控制系统的实例，其使用目的是获得预期的水温和水流量，请画出该闭环控制系统的框图。

1-3 衡量控制系统性能好坏的指标有：_____、_____、_____. 其中_____是决定系统能否正常工作的首要条件。

1-4 图1-19所示为一个简单水位自动控制系统示意图，试分析其工作原理，画出该闭环控制系统的框图，并确定系统的给定输入、扰动输入、输出信号及反馈信号。

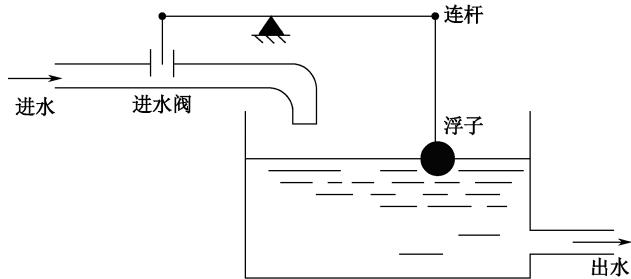


图 1-19 简单水位自动控制系统示意图

1-5 图 1-20 所示为一个较复杂水位的自动控制系统示意图,试分析在手动出水阀开度一定时该系统的工作原理,画出该闭环控制系统的框图,并确定系统的给定输入、扰动输入、输出信号及反馈信号。

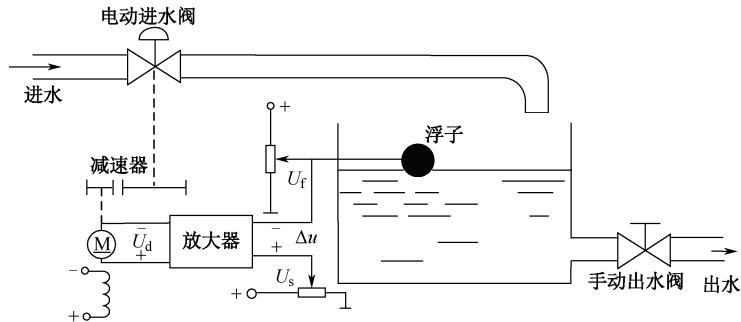


图 1-20 较复杂水位自动控制系统示意图

1-6 根据给定值的特征,将控制系统分为_____、_____和程序控制系统。

1-7 日常生活中所接触到的以下控制系统中,不是恒值系统的是()。

- | | |
|---------|-----------------|
| A . 空调 | B . 高压锅 |
| C . 电冰箱 | D . 伸手打空中正在飞的蚊子 |

1-8 画出图 1-21 所示自动门开闭系统的方框图,分析其工作原理,并确定系统的输出信号、给定输入信号、扰动输入信号、反馈信号。

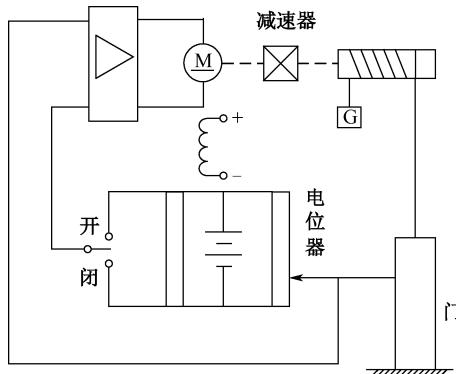


图 1-21 自动门开闭系统的原理图

1-9 画出图 1-22 所示炉温控制系统的方框图,分析其工作原理,并确定系统的输出信号、

给定输入信号、扰动输入信号、反馈信号。

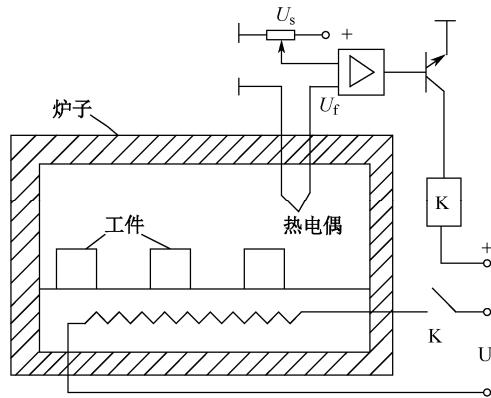


图 1-22 炉温控制系统的原理图

1-10 炉温控制系统示意图如图 1-23 所示，要求：

(1) 指出系统输出量、给定输入量、扰动输入量、被控对象和自动控制器的各组成部分，并画出其方框图。

(2) 说明该系统是怎样消除或减少偏差的。

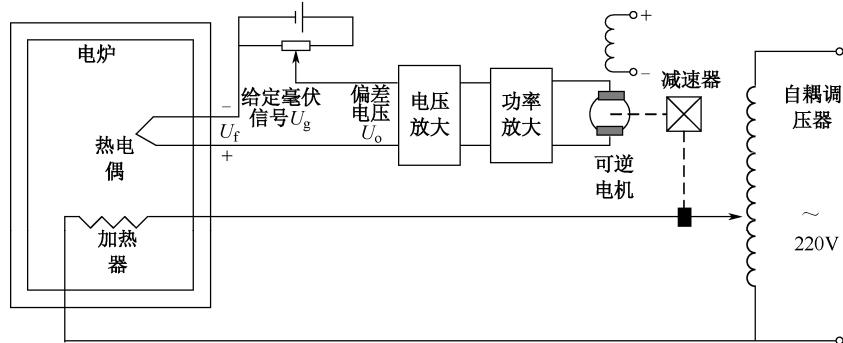


图 1-23 炉温控制系统示意图