



1.1 自动控制的发展概述

当前,自动控制技术几乎渗透到国民经济的各个应用领域及社会生活的各个方面,如在工农业生产、交通运输、国防建设、航空航天工程、家用电器等许多领域获得了越来越广泛的应用。在工业生产过程中,采用自动控制技术可以对压力、温度、流量、液位和成分等参数进行检测与控制,使生产过程实现自动化操作、提高劳动生产率、稳定产品质量、降低能源和原材料消耗、改善操作人员劳动条件、保证安全生产、减少对环境的污染,从而取得明显的经济效益和社会效益。

自动控制和反馈是自动控制系统中的重要概念。自动控制是在没有人的干预下,通过检测装置和执行装置,使被控对象或过程按照预定的规律运行;反馈是通过检测装置将系统的输出返回到系统的输入端,与设定值进行比较,产生偏差信号作为控制器的输入量。在古代,人类对控制与反馈的抽象概念早就有了认识,并利用它们制造了一些著名的装置,如我国古代的铜壶滴漏装置、指南车、水运仪象台,古希腊人制作的滴水时钟等。1769年,瓦特发明了蒸汽发动机离心式调速机构,如图1-1所示。

图1-1是一个与蒸汽机轴相连的机械装置,当蒸汽机的负载减轻或者蒸汽压力升高时,蒸汽机转速升高,飞球调节器的转速也升高,离心力增加,金属球升高,带着套环上升,操纵连杆关小蒸汽阀门,减少蒸汽流量,从而降低蒸汽机速度;反之,当蒸汽机的负载增加或者蒸汽压力下降时,蒸汽机转速降低,飞球调节器的转速也下降,离心力减小,金属球降低,带着套环下降,操纵连杆开大蒸汽阀门,蒸

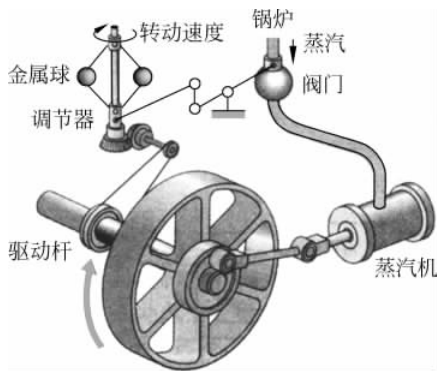


图 1-1 瓦特发明的离心式调速机构

汽流量增加,从而提高蒸汽机速度。

蒸汽机的发明标志着英国工业革命的开始,飞球调节器的发明进一步推动了蒸汽机的应用,促进了工业生产的发展,奠定了自动化技术发展的基础。然而,当时为了提高调速精度,蒸汽机速度反而出现大幅度振荡,那时还不能从控制原理上解释这一现象。直到 1868 年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立了基于飞球调节器的蒸汽机控制系统的数学模型,解释了蒸汽机调速机构存在不稳定现象,指出了避免这种现象的调速器的设计原则,并提出了一种不直接求解微分方程、适用于低阶微分方程描述的系统的稳定性代数判据。1895 年,劳斯(Routh)及赫尔维茨(Hurwitz)把这种思想扩展到用高阶微分方程描述的更为复杂的系统,他们独立地发现了两种著名的代数判据,用于判断由任意阶线性定常微分方程所描述的系统稳定性。1927 年,伯德(H. W. Bode)分析了反馈放大器,提出了反馈控制系统频率域的分析方法。1932 年,奈奎斯特(H. Nyquist)提出了一种基于系统开环频率特性判别闭环系统稳定与否的判据,并能够给出一个稳定系统稳定程度的一种简单度量方法。1948 年,伊文思(W. R. Evans)根据反馈系统开环、闭环传递函数之间的内在联系,提出了直接由开环传递函数寻求闭环特征根(即闭环极点)的根轨迹法。

目前,在有些自动控制原理教科书中,把在第二次世界大战前后形成的、以系统的传递函数作为数学模型,以频率响应和根轨迹作为设计方法的控制理论,称为经典控制理论;而把在 1960 年前后形成的、以系统的状态变量描述作为数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波作为设计方法的控制理论,称为现代控制理论。控制理论的发展及应用历程简表如表 1-1 所示。近年来,控制理论的应用范围已经扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多领域,自动控制技术已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。随着微处理器、单片机及微型计算机的应用和发展,大大促进了自动控制理论的发展进程。控制理论在与其他学科的互相渗透与促进之中必将导致新的发明和创造。

表 1-1 控制理论的发展及应用历程简表

年 份	控制理论发展的主要内容
1769	瓦特发明的蒸汽发动机离心式调速机构,标志着英国(也是世界)工业革命的开始
1868	麦克斯韦发表了“论调节器”一文,利用线性微分方程对离心式调速机构的动态性能进行了分析和研究
1895	劳斯和赫尔维茨把这种思想扩展到高阶微分方程描述的更为复杂的系统,他们独立地发现了两种著名的代数判据,用于判断由任意阶线性定常微分方程所描述的系统稳定性
1927	伯德分析了反馈放大器,提出了基于频域分析(即 Bode 图)的控制系统稳定判据,它能够给出一个稳定系统趋于不稳定的程度的一种简单度量方法
1932	奈奎斯特分析了系统开环频率特性,提出一种判别系统稳定与否的判据(即 Nyquist 图),它能够给出一个稳定系统趋于不稳定的程度的一种简单度量方法
1942	齐格勒(Ziegler)和尼科尔斯(Nichols)提出了控制器参数的最优整定方法,并将该方法应用于生产过程
1946	美国福特公司的机械工程师哈德最先提出“自动化”一词,并用来描述发动机气缸的自动传送和加工的过程

续表

年 份	控制理论发展的主要内容
1948	伊文思根据反馈系统开环、闭环传递函数之间的内在联系,提出了由开环传递函数寻求闭环特征根(即闭环极点)的根轨迹法
1950—1959	自动调节器和经典控制理论的发展,使自动化进入以单变量自动调节系统为主的局部自动化阶段。美国数学家卡尔曼(R. Kalman)提出了著名的卡尔曼滤波器
1960—1969	卡尔曼提出系统的可控性和可观测性问题,为现代控制理论的发展奠定了基础。随着现代控制理论的发展和电子计算机的推广应用,自动控制与信息处理结合起来,使自动化进入到生产过程的最优控制与过程信息管理的综合自动化阶段
1970—1979	针对大规模的工业生产过程、复杂的工程和非工程系统等,运用一般控制理论已难以解决复杂的控制问题。开展这些问题的研究,促进了自动控制理论和控制技术的发展,于是出现了大系统控制、自适应控制、智能控制等
1980—现在	单片微处理机的出现对控制技术产生了重大影响,使综合自动化和集成自动化成为现实。综合利用计算机技术、通信技术、系统工程和人工智能控制技术等,研制成功的一体化集成系统有 DCS 系统、FCS 系统、柔性制造系统、计算机集成制造系统、办公自动化系统、智能机器人、协同控制系统等

1.2 控制系统工作原理

所谓自动控制,就是利用各类自动控制装置和仪表(包括工业控制计算机)代替人的操作,使生产过程或机器设备自动地按预定的规律运行,或使它的某些参数(如温度、压力、流量、成分、电流、电压、转速等)按预定要求变化或在一定的精度范围内保持恒定。自动控制可以说是人工操作的模仿和发展。下面以一个温度控制系统为例,说明自动控制系统的构成和一些基本概念。

图 1-2 所示为一个液槽液位系统的例子,在该系统中人起到了控制器的作用,他希望使液槽的液位保持在设定值 H 上。为了测量液槽的实际液位,在液槽壁上安装了一个可视液位计 S 。操作者始终监视着液位计 S , h 为实际液位值。当发现液位高于设定值时,就开大液槽出口阀,以降低其液位;当发现液位低于设定值时,操纵者就关小液槽出口阀,使液槽流出量减少,以升高液位。在这个例子中。输出量的反馈(液位)与参考输入量(设定值)的比较,以及控制作用都是通过人工来实现的,这就是一种基于人工的反馈控制系统(或叫做人工闭环控制系统)。

如果用自动控制器来取代人工操作,如图 1-3 所示,就构成了自动控制系统,或叫反馈控制系统。控制系统的输出量,即液槽的实际液位,由传感器检测后通过变送器将输出液位变换成标准信号,与输入量(即设定值)进行比较并作为控制器的输入,在控制器中进行某种运算后,转换成标准信号输出并施加到控制阀上,从而改变控制阀的开度,使液槽的输出流量发生相应变化,最后使实际的液位得到校正。如果没有误差信号,就不必改变阀的开度。在上述系统中,环境温度的变化以及输入流量的变化等,都可以看作是系统的外部干扰。

上述人工反馈和自动反馈控制系统的工作原理是相似的,操作者的眼睛类似于误差测量装置;操纵者的头脑类似于自动控制器;而操作者的肌体则类似于执行机构。

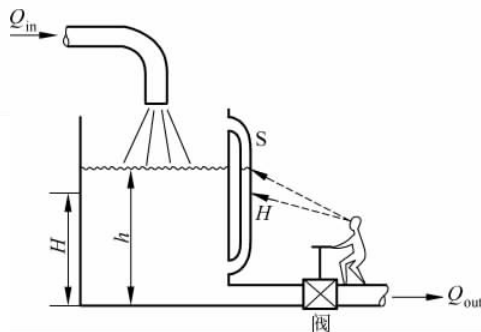


图 1-2 基于人工操作的液位控制系统

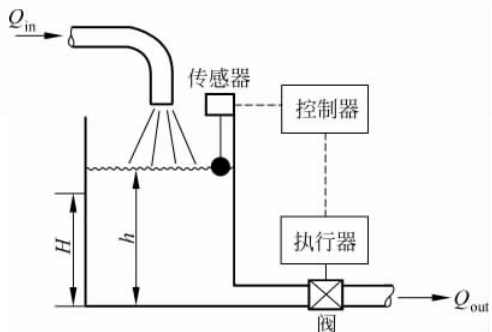


图 1-3 基于控制器的液位自动控制系统

在复杂的控制系统中,由于系统中各变量之间存在着错综复杂的关系,所以就很难进行人工操作。应当指出,即使在简单的系统中,采用自动控制器也有利于消除人工操作所造成的误差。所以,如果要求精确控制,就必须采用自动控制系统。

要实现对液槽液位的自动控制,至少必须有检测元件和变送器、控制(调节)器、控制(调节)阀、液槽等四个部分,它们组成一个简单的自动控制系统。流量、压力、液位、成分等过程参数的控制系统同样也是由这四部分组成的。

常规的自动控制系统由被控对象、测量装置、控制器以及执行器组成,如图 1-4 所示。

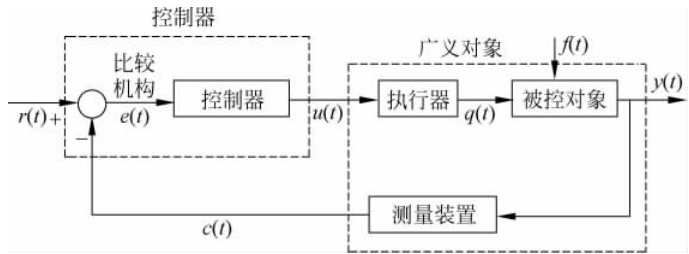


图 1-4 自动控制系统的组成

$r(t)$ —设定值; $y(t)$ —被控参数(实际值); $e(t)$ —偏差, $e(t) = r(t) - c(t)$;
 $u(t)$ —控制量(控制器输出); $c(t)$ —被控参数(测量值); $q(t)$ —操纵量; $f(t)$ —扰动

下面说明控制系统中常用的一些术语。

测量装置(包括检测元件和变送器):检测现场的被控参数 $y(t)$,并将其转化为标准测量值 $c(t)$ 。例如,用热电阻或热电偶测量温度,并用温度变送器将其转换为标准直流信号(0~10mA 或 4~20mA)。

比较机构:比较设定值 $r(t)$ 与测量值 $c(t)$ 并输出其偏差值。

控制器:根据偏差值的正负、大小及变化情况,按某种预定的控制规律给出控制量 $u(t)$ 。比较机构通常包含在控制器里,统称为控制器。目前在工业中应用的控制器有气动式或电动式控制器、智能型控制器或工业控制计算机(简称工控机)。

执行器:接受控制器输出的 $u(t)$,相应地去改变操纵量 $q(t)$ 。工业生产过程中应用的执行器为气动控制阀、电动控制阀等执行机构。

被控对象(过程):一般是指工业生产中需要进行控制的设备、装置或生产过程。如图 1-3 所示的液位自动控制系统中,液槽就是控制对象。

被控参数：在控制对象中要求按预定规律变化的物理量，即被控制的物理量，又称被调参数。在图 1-3 的液位控制系统中，液槽的液位就是被控参数。

控制量：也称调节量，是控制（调节）器的输出，它通过执行器（例如控制阀）改变作用在被控对象上的控制作用大小（例如出口流量），从而对被控对象实现控制。

扰动（干扰）：在自动控制系统中，干扰又称扰动作用。除控制量以外引起被控参数变化的所有作用因素都可视为干扰。如在液位控制系统中，入口流量的变化是扰动作用。又如在蒸汽加热的温度控制系统中，冷流体流量的变化、蒸汽压力的变化等都是扰动因素。

设定（给定）值：指与被控参数工艺规定值相对应的信号值，又称控制目标值，是控制系统的输入变量。

偏差值：指设定值与被控参数测量值之差，在自动控制系统中，一般规定偏差值 $e(t) = r(t) - c(t)$ 。

广义对象：在系统中，控制器以外的各部分组合在一起，即被控对象、执行器、检测装置的组合称为广义对象。

1.3 自动控制系统的类型

由于自动控制技术广泛应用于诸多领域，因此，自动控制系统的种类是很多的，为了对自动控制系统的应用范围和不同系统的主要特点有个概括的了解，在此只介绍一些典型的、不同类型的控制系统。

1.3.1 开环控制系统和闭环控制系统

开环控制是比较简单的控制方式，其特点是，系统的输出量对系统的控制作用没有影响，即没有反馈控制作用，这种系统称为开环控制系统。

图 1-5 所示为直流电动机速度控制系统，这是一个开环控制系统，其输入量是设定电压 U_g ，输出量是电动机转速 n 。当改变电位器滑动端位置时，就相应地改变了设定电压 U_g 和可控硅整流装置的输出电压 U_d 。电位器滑动端的位置对应电动机的转速，改变电位器滑动端的位置，就可对电动机的转速进行控制。

当系统中出现扰动（如电动机的负载变化、可控硅的电源电压变化或可控硅的移相特性变化）时，电动机转速将偏离设定值。此时要维持设定的转速不变，必须人工重新调整电位器滑动端的位置。例如负载突然增加，电动机的转速相应地降低，偏离了设定值。操作人员检测到实际转速并与设定值进行比较，判断出转速低于设定值时，可相应调整电位器的滑动端子，增加设定电压 U_g ，使电动机转速恢复到设定值。图 1-6 所示的结构图，可以表示这种系统的输入量与输出量之间的关系。这种开环控制系统多用于轧钢厂的许多辅助传动设备中。在这些传动过程中，有的只需要控制其起、制动过程，或者有的转速率需要精确地加以控制。



图 1-6 开环控制系统结构图

图 1-7 所示闭环调速系统是闭环控制系统的一个例子。这里用测速发电机 CF 检测输出量,并将其转换成反馈电压 U_f ,反馈到输入端与给定电压 U_g 相比较,其偏差值经过放大器放大后,用来控制可控硅电压和电动机的转速。

当电位器滑动端在某一位置时,电动机就以一个指定的转速运转。当出现外部或内部扰动时,例如由于负载突然增加,使电动机转速降低,那么,这一速度的变化,将由测速机检测出来。此时反馈电压 U_f 相应降低,与给定电压 U_g 比较后,偏差电压增大,再经过放大器放大后,将使可控硅的移相角前移,整流电压升高,从而减小或消除电动机的转速差。这样,系统就可以自动保持给定速度近似不变。图 1-8 示出了这种系统的输入量、输出量和反馈量之间的关系。这种把输出量直接或间接地反馈到输入端构成闭环,实现自动控制的系统称为闭环控制系统。由于系统是根据负反馈原理按照偏差进行控制的,因此,也叫做反馈控制系统或偏差控制系统。

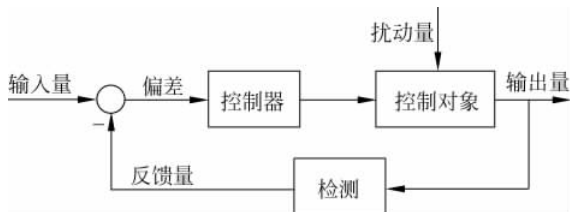


图 1-8 闭环控制系统结构图

在工业生产中,按照偏差控制的闭环系统的种类很多,尽管它们所完成的控制任务不同,具体结构不一样,但是,从检测出偏差、利用偏差信号对控制对象进行控制,以减小或纠正输出量的偏差这一控制过程却是相同的。

1.3.2 定值控制系统、随动控制系统、程序控制系统

1. 定值控制系统

设定值为恒定值并要求被控参数保持恒定或基本上保持恒定的控制系统,称为定值控制系统。这种系统在工业生产过程中应用最为广泛。工业过程控制系统大多是定值控制系统,例如温度、压力、流量、液位和成分等各种参数的控制系统。图 1-9(a)、(b)给出了工业过程中经常遇到的一些典型的定值控制系统。

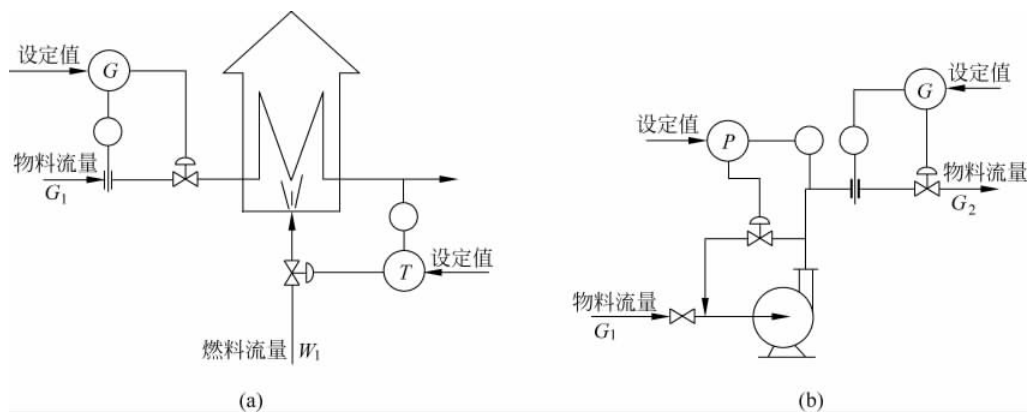


图 1-9 定值控制系统
(a) 加热炉温度、流量定值控制系统; (b) 压力、流量定值控制系统

2. 随动控制系统

设定值随时间变化,要求被控参数以一定精度跟随设定值变化的控制系统称为随动控制系统,又称跟踪系统或伺服系统,随动控制系统的应用也很普遍,如雷达的搜索、武器的自动瞄准等系统。工业自动化仪表中的各种变送器、显示器、记录仪等亦可看成随动系统。化工过程控制中的比值调节系统,实际上也是一种随动控制系统,如图 1-10 所示。其中图 1-10(a)是系统流程图,图 1-10(b)是系统框图。

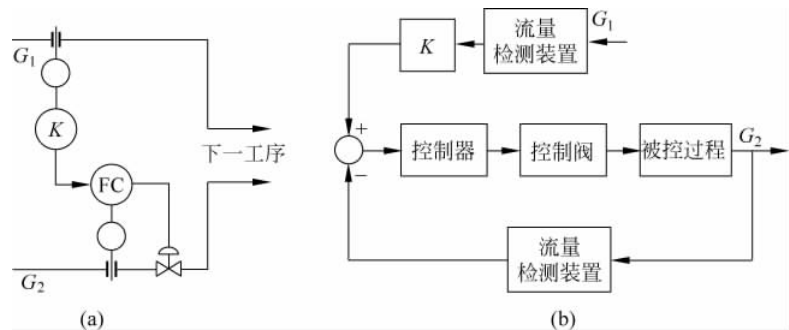


图 1-10 随动(比值)控制系统

工艺生产过程要求将两种物料配成一定比例送至下一工序。 G_1 和 G_2 分别为主要物料和配比物料的参数。若 G_1 发生变化,要求 G_2 随之变化,保持比值 G_2/G_1 不变。为满足这个要求,构成了图 1-10 所示的比值调节系统。当 G_1 变化时,经测量变送,并乘以某一比例系数 K 后,作为配比物料控制器 FC 的设定值。由于设定值变化而产生偏差,控制器根据偏差发出控制信号,通过对 G_2 的调节,使之与 G_1 的比值保持不变。当 G_2 因某种干扰而变化时,由测量值的改变产生偏差使控制器动作,克服干扰影响而使 G_2 恢复到原值,从而保持与 G_1 的比值不变。从图中可清楚地看出,该系统是一类随动系统。

在定值调节系统中,当给定值因生产要求而改变为新的数值时,要求被调参数也随之改变而等于新的给定值。因此,定值调节系统对于给定值而言,也可看作是一种随动控制系统。

3. 程序控制系统

若设定值的变化遵循一定的规律,而且是事先设定的时间函数,则称这种系统为程序控制系统。例如程序升温控制系统、程控机床、自动洗衣机等。这类系统是随动控制系统的一种特殊情况,如图 1-11 所示。

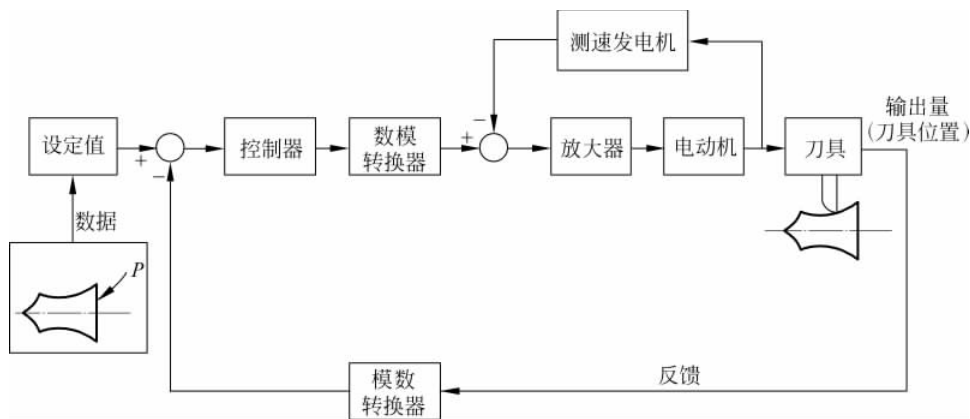


图 1-11 机床程序控制系统

在上述系统中,利用电信号,可以将数字量转化为物理量,这样就把数字量译成直线运动或圆周运动。图 1-11 所示系统的工作原理:按照对工件 P 的要求,通过对工件形状的检测,并将其转换成数字量,作为系统设定值。当系统启动时,设定值与反馈量进行比较。随后数模转换器将数字量转变为模拟信号,即转变为相应的电压值,从而使伺服马达转动起来。刀具的位置由伺服马达的输入信号控制。与刀具连接在一起的转换器,将刀具的运动转变为电信号,然后通过模数转换器,又将它转变为数字量。这一数字量与输入设定值进行比较。控制器根据偏差值进行数学运算,输出控制信号控制伺服马达,以减小这一偏差值。程序控制的优点是,可以在铣床上以最大的速度加工复杂的零件,而公差保持不变。

1.3.3 连续控制系统和离散控制系统

1. 连续控制系统

连续控制系统的所有组成环节的输入输出信号都是时间变量的连续函数。这种系统可

用微分方程描述。模拟式的工业自动化仪表以及用模拟仪表组成的过程控制系统,都属于连续系统。如图 1-12 所示的压力控制系统,炉内的压力由挡板的位置控制,并且由压力测量元件进行测量,测出的压力信号传递到控制器中。与设定值进行比较,若有误差存在,控制器将输出量送到执行机构,执行机构将相应地转动挡板,以减小误差。

2. 离散(采样)控制系统

用数字计算机或数字控制器来进行控制的是一个典型的离散控制系统。通常将模拟控制系统中的控制器的功能用计算机或数字控制器装置来实现,就构成了计算机控制系统(或称采样控制系统)。图 1-13 是一个鼓风炉计算机控制系统。在这个系统中输入量及输出量比较后经过采样开关就变成计算机可以处理的、时间上离散的数字信号。在计算机中进行某种控制算法(如 PID 算法)的运算,运算结果由计算机输出,经过保持器就变成时间上连续的模拟信号了,再输给执行装置以控制对象。

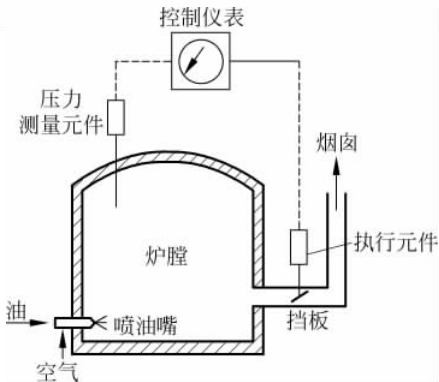


图 1-12 压力控制系统

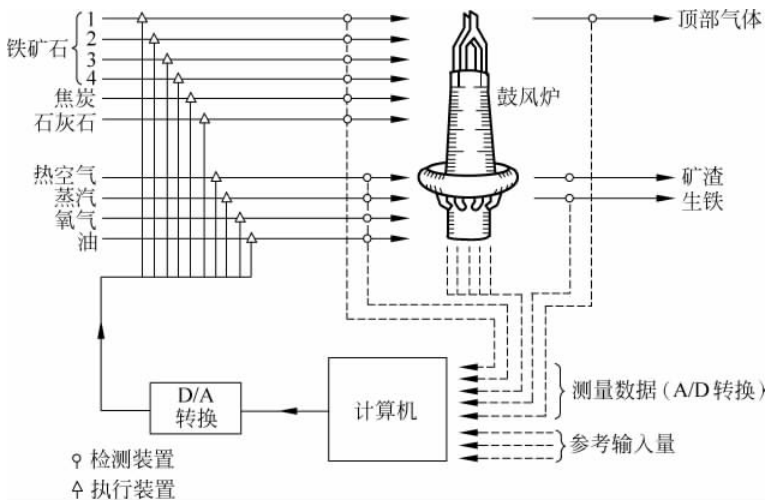


图 1-13 鼓风炉计算机控制系统

1.3.4 线性控制系统和非线性控制系统

1. 线性控制系统

组成系统的各环节和元件的特性可以用线性方程式描述的系统,称为线性控制系统。线性控制系统的主要特点是适用叠加原理,即当有几个输入同时作用于系统时,系统的输出等于各个输入分别作用于系统时的输出之和,如图 1-14 所示。

定义: 如果一个系统具有下列性质:

- (1) 输入 $x_1(t)$ 产生输出 $y_1(t)$;

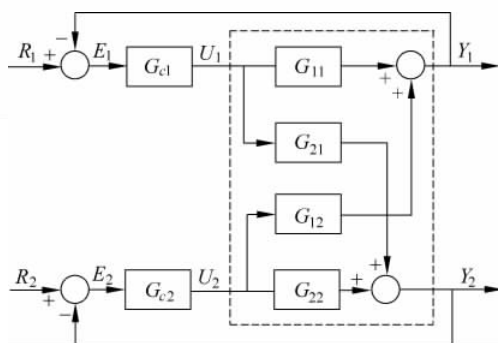


图 1-14 多输入、多输出线性定常控制系统

(2) 输入 $x_2(t)$ 产生输出 $y_2(t)$;

(3) 输入 $c_1x_1(t) + c_2x_2(t)$ 产生输出 $c_1y_1(t) + c_2y_2(t)$ 。

其中, $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 是任意的输入信号, c_1 、 c_2 是任意的常数, 则该系统是线性系统, 否则是非线性系统。

如果描述系统运动状态的线性微分方程的各项系数都是不随时间变化的常数, 则将该系统称为线性定常系统, 又称线性时不变系统。线性微分方程的各项系数中只要有一项系数是时间的函数, 则这种系统就称为线性时变系统。

2. 非线性控制系统

在组成系统的环节和元件中, 只要有一个环节或元件的特性不能用线性微分方程而需用非线性方程描述, 就称为非线性系统。在图 1-15 中采用死区非线性特性来表示非线性环节。

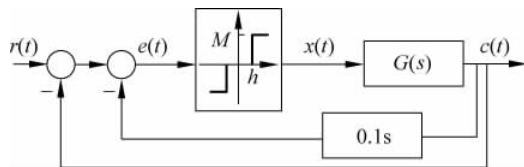


图 1-15 非线性控制系统

在非线性微分方程中, 输出量及各阶导数不全是一次的, 或者有的输出量导数项的系数是输入量的函数。对于非线性系统, 叠加原理是不适用的。非线性系统的动态模型通常用非线性微分方程来表示。

严格地讲, 在工业生产过程中, 纯线性系统实际上是不存在的, 因为所有实际的系统总是不同程度地具有非线性特性的。线性系统实际只是理想化的模型。但是, 如果非线性不严重, 则当系统中的信号变化范围不大时, 可简化为线性系统, 应用成熟的线性控制理论进行分析研究。若非线性特性严重, 则必须采用非线性的理论和方法。

1.3.5 单变量控制系统和多变量控制系统

1. 单变量控制系统

单变量系统又称单输入单输出系统。在这类系统中, 只有一个被控参数, 而且只有一个