

第 1 章

自动控制技术概述

章节内容

1. 控制技术基本概念,控制系统类型,以及工程上对自动控制系统性能的要求。
2. 引入自动控制技术应用实例,说明控制系统框图和控制系统组成部分等概念。
3. 自动控制技术发展历史。

1.1 自动控制技术认知

控制技术是从人类控制活动实践中产生的一门科学技术,具有很强的应用背景,尤其在现代人类社会,控制技术渗透到各个领域,影响着人类生活和生产。早期的控制技术都是凭经验的控制活动,后来逐步发展为具有科学性和定量理论指导的自动控制技术。

自动控制技术是以自动控制理论为基础,以电子技术、传感技术、计算机技术和通信技术为工具,实现生产设备或生产过程某些物理量自动地按照特定规律变化的科学技术。借助自动控制技术能够使活动或工作过程控制自动化,如食品加工过程自动化、太阳能电池板追踪太阳轨迹自动化。采用自动控制技术实现生产过程,或某一机械自动地按照预定目标运行的装置或设备被称为自动控制系统,自动控制系统一般由给定环节、控制器装置、执行机构、被控对象、反馈环节 5 大部分组成。

1. 人工控制与自动控制

完成控制任务有人工控制和自动控制两种方法。人工控制是指控制活动中,控制目标是在人参与控制过程的情况下实现的,如图 1-1 所示驾驶员驾驶汽车,驾驶员通过调节方向盘改变汽车行驶方向,达到控制汽车行驶路线的目的。这种人工控制调节过程总结如下:

- ① 驾驶员眼睛测量汽车实际运行路线;
- ② 测量汽车实际路线与期望路线通过人的大脑进行比较,得出路径偏差大小和方向;
- ③ 大脑根据偏差大小和方向得出盘调整方向及大小控制指令,人手执行指令作用方向盘实现汽车行驶路径校正,使汽车按照期望路径行驶。



图 1-1 人驾驶汽车示意图

反之,控制过程没有涉及到人参与,仅由装置使被控对象按照预定的规律运动或变化,这就是自动控制。如图 1-2 所示房间温度控制,人启动电源开关和用遥控器设定室内期望

温度值后,空调控制装置会自动调节压缩机改变冷(热)释放量来调整房间温度,使房间温度保持在期望温度值的一定误差范围内(在容许的范围),人没有参与房间温度调整过程,属于温度自动控制。这种空调控制装置实现房间温度自动调节过程总结如下:

- ① 空调控制器接收遥控器发射的房间预设温度信息;
- ② 空调室内温度传感器检测室内温度,反馈至室内控制器;
- ③ 室内机控制器比较温度期望值和实际测量值得出温度差值大小和方向,并与室外机控制器通信;
- ④ 室外机控制器在接收到室内控制器发送信息后,发出适当指令控制压缩机运转速度,实现空调制冷(制热)量大小调节,最终达到室内温度自动调节功能。

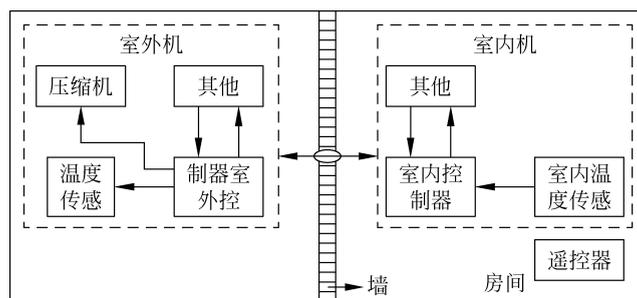


图 1-2 空调自动调节室内温度示意图

2. 控制系统常见类型

随着自动控制技术不断发展,自动控制系统类型越来越丰富。自动控制系统类型常根据参考信号特征、控制方式、控制系统元部件特性、控制系统输入输出数量等划分。

1) 根据参考输入信号与时间的关系划分

(1) 恒值控制系统

恒值控制系统是指系统参考输入(给定信号)与时间为恒定的常数关系,控制任务是使被控参数保持恒定。如图 1-3 所示开关稳压电源,参考输入(基准电压)与时间是恒定常数关系,控制器的作用就是接收系统输出电压采样电路的输出值,并与参考电压比较得到偏差,根据偏差调整控制信号(若为 PWM,则改变占空比)改变高频开关电路的开关管导通时间,达到输出电压稳定目的。

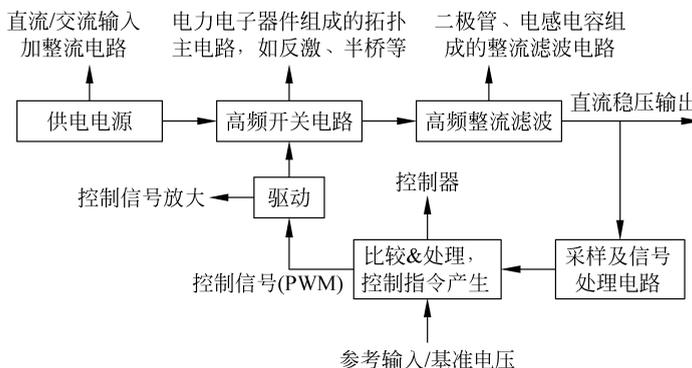


图 1-3 开关稳压电源基本电路示意图

在生产过程中,一般都要求在各种干扰作用下,系统通过反馈控制使过程参数(温度、压力、液位,成分等)维持在工艺给定值保持不变,所以生产过程很多控制系统都属于恒值控制系统。

(2) 程序控制系统

程序控制系统是指系统参考输入(给定信号)随时间按照一定规律变化,即给定信号(参考输入)大小变化规律是可以预先确定的时间函数,控制任务是使系统输出按照事先预设的规律变化。如图 1-4 所示热处理炉的温度控制,热处理炉在启动前,预先通过面板设定了炉体内部温度按照时间变化的规律曲线(期望温度曲线),在正常工作过程中,温度控制器实时接收温度变送器送回的炉体内部温度,并与预先存储的期望温度曲线作比较,根据差值产生控制信号调整晶闸管导通时间,控制加热丝释放热量速度和总量,实现炉体内部温度按照期望温度变化,即炉体内部实际的温度时间曲线复现期望温度时间曲线。

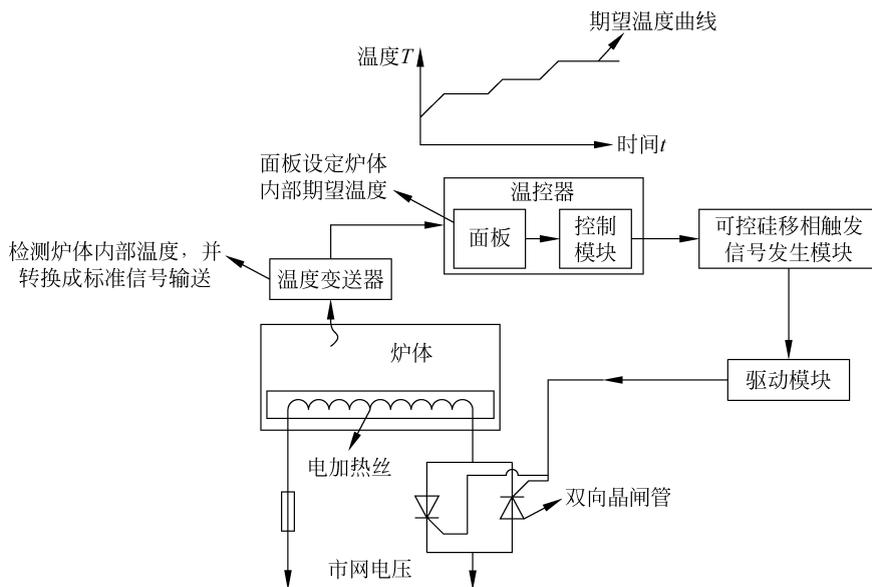


图 1-4 热处理炉温度控制示意图

(3) 随动控制系统

随动控制系统,也称为伺服控制系统或追踪控制系统,是指系统的参考输入(给定信号)随时间任意变化的系统,即给定信号(参考输入)大小变换规律是无法预先确定的时间函数,控制任务是在各种情况下保证输出以一定的精度跟随参考输入信号的变化而变化。如图 1-5 基于光敏检测元件的太阳轨迹跟踪系统,如果电池板固定不动,太阳运动导致光线不能垂直入射电池板表面,同时由于事先无法知道太阳准确的实时位置,故需要光电传感器实时检测出太阳位置发送给控制器,控制器输出控制指令控制步进电机 A 和步进电机 B 调整太阳能电

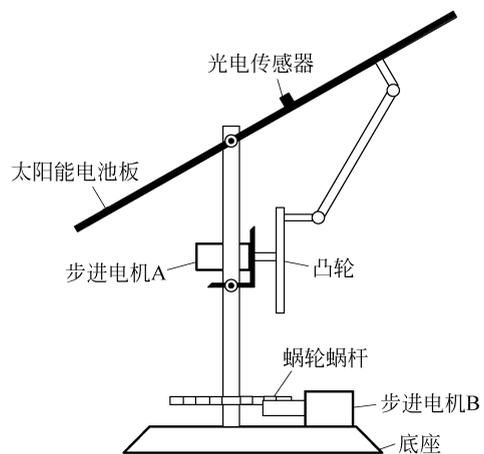


图 1-5 基于光敏检测元件的太阳轨迹跟踪系统

池板水平角和方位角,使得太阳光线垂直入射电池板表面。

2) 根据信号类型划分

(1) 连续控制系统

连续控制系统也称为模拟控制系统,是指构成控制系统的各个环节的输入和输出信号都是时间的连续函数。采用模拟仪器、仪表实现生产自动化控制的系统都属于连续控制系统。

(2) 离散控制系统

离散控制系统是指构成控制系统的某些环节或元件的输入或输出信号在时间上是离散的。离散信号可由连续信号通过采样开关获得,因此具有采样功能的系统属于离散控制系统。

3) 根据系统控制方式划分

(1) 闭环控制系统

图 1-6 所示为晶闸管调速系统,从图可知 ΔU 通过放大器、触发器和晶闸管整流装置顺向作用控制电机速度;电机转速通过测速发电机(BR)电路输出与转速成一定关系的反馈电压 U_f , U_f 与给定电压 U_i 之差为 ΔU ,故系统输出转速通过测速发电机与输入建立了反向联系,并影响速度变化。通常将这类控制装置与被控对象之间既存在顺向作用,又存在反向联系的控制系统称为**闭环控制系统**,由于是基于偏差来实现速度调节,又称为**反馈控制系统**。

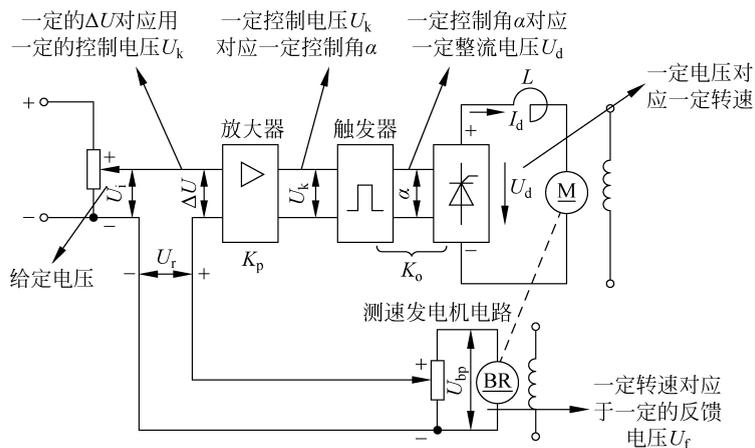


图 1-6 晶闸管调速系统

(2) 开环控制系统

如果将图 1-6 所示晶闸管调速系统的测速发电机电路去掉,系统的控制器与被控对象电机之间就只存在顺向作用,系统信号流向是单向从输入端流向输出端,作用路径不是闭环的,这类控制系统称为**开环控制系统**。

4) 根据系统输入/输出数量划分

(1) 单变量控制系统

如果一个系统的被控参数和作用被控对象的控制量均各只有 1 个,那么这类系统称为单变量控制系统,也称为单输入单输出控制系统,如图 1-6 所示调速系统为单变量控制系统。

(2) 多变量控制系统

被控参数和作用控制对象的控制量都多于 1 个,且各控制回路之间有耦合关系,那么这类系统称为多变量控制系统,也称为多输入多输出控制系统。如广泛应用于化工行业使液

态混合物各成分物质分离的精馏塔系统,被控参数有移位和温度,控制量有液位和温度 2 个控制量,且温度和液位控制回路相互影响,则为多变量控制系统。

5) 根据系统元件特性划分

(1) 线性控制系统

构建系统的所有环节或元件的特性可以用线性微分方程(差分方程)来描述的控制系统称为线性控制系统。线性控制系统的特点是满足线性叠加原理,即当参考输入为多个输入时,控制系统的总输出为单个输入信号作用时系统输出分量之和。

如果描述系统特性的微分方程(差分方程)的系数为常数,这类系统为线性时不变系统(线性定常系统);反之,系数是时间函数的这类系统称为线性时变系统。

(2) 非线性控制系统

构建系统的环节或元件的特性存在需要用非线性方程来描述的控制系统称为非线性控制系统。非线性系统不能采用叠加原理。实际的控制系统严格来说都是非线性系统,为了便于研究,如果在工作区间内系统变量表现为单值关系,可将其简化为线性关系处理,这样便于采用线性控制理论加以分析和讨论,如使用运放的控制系统,由于运放存在线性区和非线性区,若控制系统工作范围为运放线性区,则把运放作为线性元件考虑。而对于无法线性化的非线性控制系统需要用非线性控制理论分析和讨论。

3. 自动控制系统性能特性

在食品加工、纺织、造纸、电力、化工、轧钢等制造业上,在航空、汽车,运输工业和国防工业上,在农业种子培育、播种,收割上都广泛使用了自动控制技术。采用自动控制系统使上述各行各业的机械运行,或生产过程都实现了自动化,尽管不同控制任务对控制系统的具体要求不同,但总的来说,稳定性、动态特性和稳态特性是对控制系统的基本技术要求。

(1) 稳定性

稳定性反映了系统在各种激励作用下且激励信号消失后,系统恢复到平衡状态的能力。系统是否稳定是系统能否使用的前提。如图 1-3 所示的开关稳压电源系统,如果不稳定,就表现为系统在电磁干扰、负载波动,或电网电压波动等扰动作用后,其输出无法保持在某一固定电压不变,而是振荡或发散,即控制装置无法使被控量(系统输出)跟随指令运行,显然这样的开关电源是无法为其他电子设备提供所需的电压值,故不稳定的开关稳压电源无法使用。

(2) 动态特性

动态特性主要反映了系统在过度过程的振荡幅度、振荡频繁度以及时间长短等特性。所谓过度过程是指系统在各种有效或无效信号激励作用下从一个平衡状态到达另一平衡状态的过程,这个过程也称为系统的动态响应过程。如图 1-4 所示的恒温控制系统,炉体内部常温是一个平衡状态,设定温度为另一状态,在启动恒温控制系统后,炉体内部温度在温控系统的控制作用下,温度反复被调整直至稳定在设定温度值的过程为恒温控制系统的动态响应过程。显然,动态过程可能出现温度在期望温度值上下波动的振荡情况,这反映了系统不太平稳;到达期望温度所需时间有长有短,越短说明系统能快速复现指令信号,反之说明系统反映迟钝。过度过程时间长短、振荡强度和频度、输出最大值等是衡量系统动态特性的具体参数。实际控制工程对控制系统动态特性都提出了不同要求。

(3) 稳态特性

稳态特性是反映了系统在过度过程结束阶段(通常也指的是正常工作阶段)系统的实际输出值与期望值之间的差值大小,也称为稳态精度,一般用稳态误差 e_{ss} 来衡量,越小说明系

统控制精确性越高。在实际应用中,都会对控制系统提出精度要求,如图 1-3 所示的开关稳压电源输出电压精度为 $\pm 0.1\%$ 、定位控制系统定位精度为 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 等都反映了对控制系统稳态特性的要求。

综上所述,我们期望控制系统在上述 3 个方面的特性都表现很优异,但实际上由于 3 个方面的特性都是相互制约,即如果缩短系统过度过程,则会使系统振荡性加强;如果提高系统的控制精度,则会引起动态特性变化;如果改善系统的相对稳定性,系统过度过程会加长,反应迟缓(这种相互制约特性将在后面章节详细讨论)。由于应用在各行各业的自动控制系统的控制对象、目的、要求不同,因而对动态特性和稳态特性的要求也不相同,如恒值系统对稳态特性要求相对较高,随动控制系统侧重对快速性要求,因此控制系统设计师的工作就是充分利用控制理论和设计方法寻求一种满足控制任务要求的折中方案。

本书主要关心的是用线性时不变方程描述的线性时不变自动控制系统,也会简要提到离散系统、可线性化的非线性时变系统。

1.2 自动控制技术的应用实例

1.2.1 可编程精密烤箱

图 1-7 所示为可编程精密烤箱,其主要用途是用于工业烘烤各种电子元器件产品。可编程精密烤箱主要由箱体(被控对象)、电气系统(系统供电及电气保护)、控制系装置组成。其中,控制装置是控制箱体内部温度与湿度在预定值的核心部分,其主要功能是控制箱体内部温度保持在设定值的 $\pm 0.1\%$ 和湿度保持在设定值的 $\pm 1\%R \cdot H$ (相对湿度)。

精密烤箱工作原理如图 1-8 所示。工作人员通过触摸设定箱体温度 T_i ; 控制器把接收到的箱体实际温度 T_r 送给液晶显示装置显示,以便工作人员实时了解工作状态; T_f 为检热体 K 型热电偶(如图 1-9 所示)检测箱体内部温度的信号。控制器接收了箱体的期望温度 T_i ,也接收了箱体内部的实际温度的反馈信息 T_f 。根据工作目的是使箱体内部实际温度 T_r 复现期望温度 T_i (容许误差为 $\pm 0.1\%$),当箱体内部元件吸收热量与其他因素造成的热量损失总和 Q_s 与加热体向箱体提供的热量 Q_m



图 1-7 精密烤箱

达到平衡时,箱体内部温度保持不变,若 Q_s 大于 Q_m 则会引起箱体内部温度下降,反之温度则会上升。由于元件数量、烘烤元件所处的不同阶段、环境变化等因素都会造成 Q_s 的波动,引起箱体内部温度波动,这就需要通过调节加热体(陶瓷加热片)的工作时间和功率进行调节,改变 Q_m 变化速度和大小进而实现箱体内部温度控制。图 1-8 中的 SSR 为固态继电器,其通断是可控的,控制信号为 T_c 。 T_c 是由控制器发出的控制量 T_c 经过驱动装置放大得到的信号。

通过上述描述,可以知道当可编程精密烤箱需要维持温度在某一设定值的工作过程:当因某种因素使得箱体内部温度低于设定温度时,即 $T_r < T_i$,控制器根据差值大小输出合适的 T_c 信号使 SSR 接通,加热装置工作发热,经过热传导,使箱体内部温度上升,直至“相

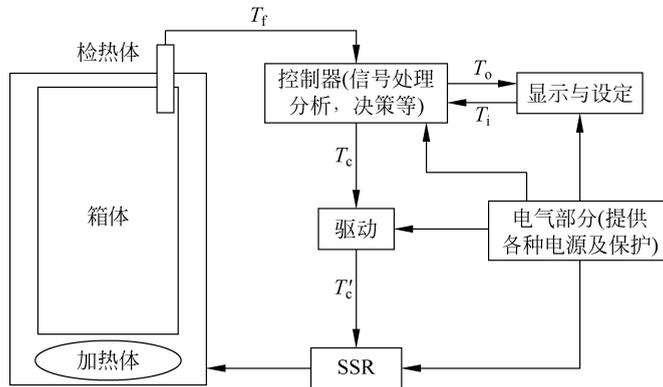


图 1-8 精密烤箱工作原理图



图 1-9 热电偶

等”，反之，即 $T_o > T_i$ ，控制器输出 T_c 使 SSR 断开，加热装置停止工作，箱体内部温度会通过一定方式自动降低。上述温度控制过程也可通过绘制方框图更清晰地表达，见图 1-10 所示。

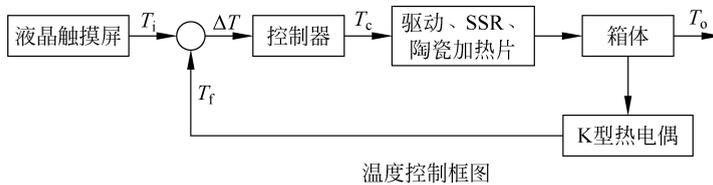


图 1-10 温度控制方框图

图 1-10 能够清晰地反映出信号是系统某一个环节的输出，又作用于另一个环节，系统的各个环节功能也非常清楚。在控制技术学科中，称图 1-10 为可程式精密烤箱的控制系统方框图。控制系统方框图构成要素是：带箭头线(→)、矩形框(□)，信号汇合点(⊗)3 要素组成。三要素的作用分别如下。

- ① 带箭头线(→)：用于表示信号在系统中的流动方向。
- ② 矩形框(□)：用于表示系统各个功能模块，并用功能名作为文字标注。
- ③ 信号汇合点(⊗)：仅用于表示信号的汇合(通常在比较器汇合并进行比较等运算)。

1.2.2 电脑刺绣机控制系统

图 1-11(a)为电脑刺绣机,图 1-11(b)为用于驱动刺绣机针头的步进电机及其驱动器。在电脑刺绣设备中,计算机控制器将图案转换成针头的动作指令输给步进电机驱动器,驱动步进电机运转带动针头按照指令前后左右运动;步进电机是脉冲控制型电机,即 1 个输入脉冲对应电机旋转一个固定角度(称为一步),故给一定数量的脉冲就能实现一定位移运动控制。针头工作台运动控制原理方框图如图 1-12 所示。

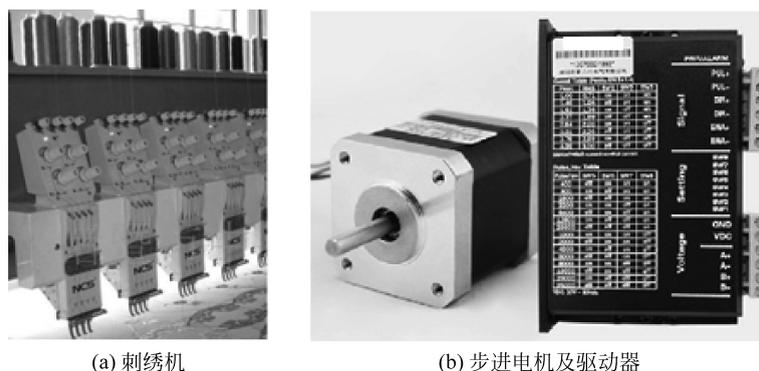


图 1-11 电脑刺绣机



图 1-12 针头工作台运动控制框图

图 1-13 所示为刺绣机工作台 X-Y 轴向位置控制原理方框图。为了实现工作台 X-Y 轴向位置的精准控制,工作台采用了伺服电机驱动实现。图 1-13 中位置传感器将刺绣机工作台 X-Y 轴位置检测出来,并反馈回输入端。计算机控制器输出的给定位置信号与位置传感器输出信号在信息处理单元中进行比较得到位置偏差,伺服控制器将偏差按照一定控制规律(如 PID 控制等)运算得出控制电机运行指令,控制指令经过放大后驱动伺服电机完成工作台 X-Y 轴向运动控制。

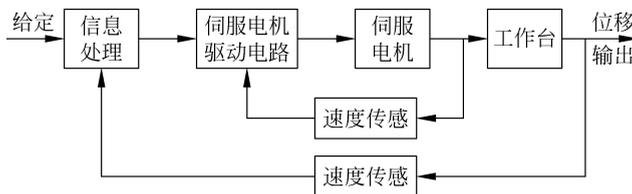


图 1-13 刺绣机工作台 X-Y 轴向位置控制方框图

根据开环控制和闭环控制定义,图 1-7 所示程式精密烤箱温度控制和图 1-13 所示刺绣机工作台 X-Y 轴向位置控制均为闭环控制系统。图 1-12 所示刺绣机针头工作台位移控制为开环控制。开环控制和闭环控制的基本控制原理方框图一般用图 1-14 和图 1-15 表示。控制原理方框图显示了开环控制与闭环控制的结构不同:闭环控制系统存在反馈环节,开环控制没有反馈环节;在特性方面,开环控制系统在受到干扰信号作用时,没有自动

调节能力,系统输出量会偏离目标值,而闭环控制系统由于反馈环的存在,在系统受到干扰使系统输出偏离目标值时,能够自动调节实现系统输出重新回到目标值。

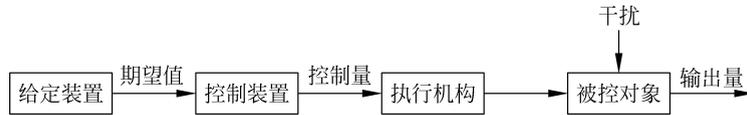


图 1-14 开环控制系统基本方框图

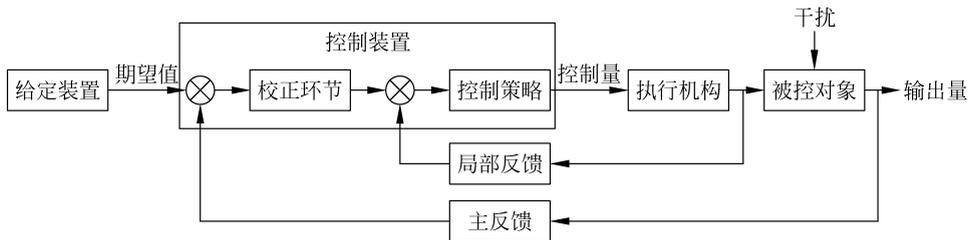


图 1-15 闭环控制系统基本方框图

因此开环控制系统常用于控制要求不高、系统输入/输出关系明确、干扰少且小的场合；而闭环控制系统控制精度高,抗干扰能力强,应用范围很广泛,但由于增加了反馈环节,会引起系统稳定性问题,且使系统结构变得复杂,增加系统成本。

1.2.3 汽车巡航控制系统(CCS)

自动控制技术广泛使用于现代汽车,如发动机的燃油控制系统、CCS (Cruise Control System)、电子点火提前角控制系统、电子制动分配系统、驱动防滑控制系统等。CCS 是一种舒适性驾驶设备,能减轻驾驶员的操纵劳动强度,提高汽车行驶舒适性的自动控制装置。

CCS 的具体作用是:驾驶员在汽车行驶过程中按照所需要的速度给出指令,不用踩油门踏板就可以自动地保持车速,使汽车以恒定的速度行驶。尤其装有自动变速器的汽车,因无需使用离合器,驾驶员在 CCS 的辅助下,只需要手握方向盘就可以轻松驾驶,减轻疲劳,同时减少不必要的车速变化,能得到较好的燃油经济性。图 1-16 为汽车装有 CCS 的示意图。

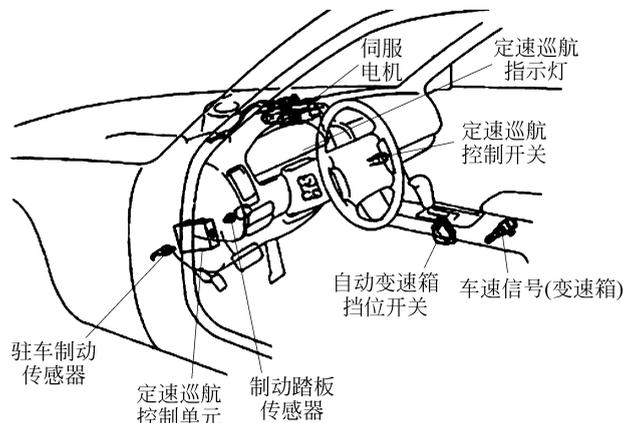


图 1-16 汽车装有 CCS 示意图

图 1-17 为 CCS 的结构框图,汽车 CCS 的构成包括车速传感器、电子控制单元(ECU)、巡航控制开关(ON/OFF 开关)、汽车制动开关、执行器等。

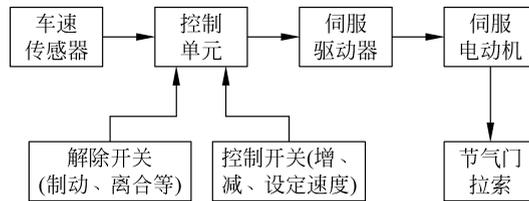


图 1-17 CCS 结构框图

图 1-18 为巡航控制系统实现汽车定速行驶的控制原理图。巡航控制系统完成汽车行驶速度恒定控制是通过闭环控制方式实现的。控制器将驾驶员的设定车速与车速传感器检测的汽车实际行驶速度相比较,得出车速误差信号。经过处理后成为节气门的控制信号,并送至伺服执行机构调节节气门的开度大小,修正汽车速度,使得汽车维持在恒定速度上行驶。

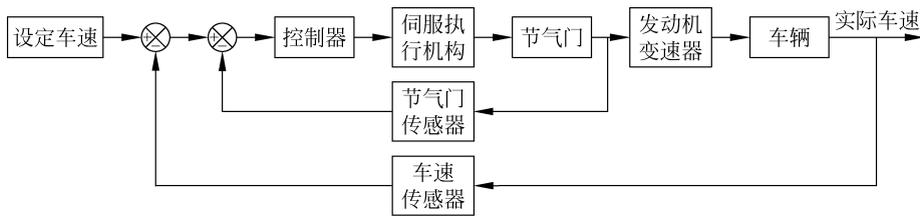


图 1-18 巡航控制系统控制原理图

由图 1-7 所示精密温控箱、图 1-11 所示刺绣机控制系统以及图 1-16 所示汽车自动巡航控制系统可知,自动控制系统基本的组成部分及作用如下。

① 给定装置(环节): 给定环节是用来产生控制系统的输入信号或期望值信号(给定信号)的环节或元件。该环节可能是一个元件,也可能是一个设备,如电位器元件或触摸屏装置。

② 控制装置(控制器): 控制装置功能主要是对输入和反馈信号处理、比较、分析、按照一定算法计算,并发出控制指令——控制量。控制器可以由模拟电路实现,也可以是单片机或计算机数字系统。

③ 反馈环节: 反馈环节所起到的作用是将系统的输出量或系统中间环节的输出量(中间量)进行测量并适当转换成所需信号,反馈回控制器,如图 1-18 中节气门开度与车辆速度被检测元件检测反馈回控制器。反馈环节的输出量被称为反馈量。开环控制系统无此部分,一般闭环控制系统只存在一个主反馈,而没有副反馈(局部反馈),这类系统一般称为简单控制系统。如果一个系统存在多反馈环、多个控制器,则被定义为复杂控制系统,在过程控制系统中多见。反馈环节中完成被控量或中间量检测的常用元件通常有速度传感器(编码器、光栅尺)、压力传感器、温度传感器(热电偶、热电阻)、电压电流传感器(精密电阻、霍尔传感器、互感器)等。

④ 执行机构: 执行机构是执行控制器输出指令(控制量),作用于被控对象,能够把控制量转换成对被控对象产生实际控制作用的环节或部件。在控制系统中执行机构可能不是

单一部件或器件,如在运动控制系统中电机或其他动力产生装置和传动机构都被作为执行机构。控制系统常见执行机构由各类电动机、马达、阀门、功率电子线路等。

⑤ 被控对象:控制系统所要控制的机器设备或生产过程统称为被对象,它的输出量为系统的被控量,如恒温箱的温度、工作台的位移或速度等。

再次分析图 1-19 所示的闭环控制系统基本框图,闭环系统信号流向有 2 个方向,通常信号从输入端流向到输出端的路径被称为顺向通道或向前通道;而从输出端流向到输入端或中间某个环节的通道被称为反馈通道。图 1-19 中反馈通道有 2 条,通常流向输入端的称为主反馈通道,而其他的反馈通道称为局部反馈通道或内环。由图 1-19 可知,控制系统输入端信号是输入信号,该信号是决定系统被控量的变换规律或期望值,是有效的;而在被控对象处也存在一个外部信号,但对系统控制作用是有害的,把这类信号称为干扰信号。干扰信号在控制系统的任何一处都可能存在,在设计控制系统时,必要时需要对这些干扰信号采取抑制措施。

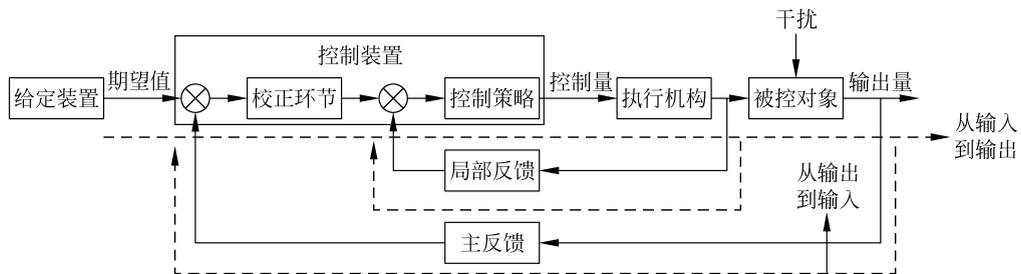


图 1-19 闭环控制系统基本框图

1.3 控制技术发展简述

据《宋史,輿服志》等历史文献记载,我国古代时期为解决战争时因各种烟雾造成的方向迷失问题,发明了能指引方向的仪器——指南车,见图 1-20 所示。该装置能够在前行过程中,无论车是向右还是向东偏转,车上的假人手指一直指向南方。指南车之所以能够一直指向南方是车在运行前人为调整了假人手指指向南方,当车无论是向左偏转一定角度还是向右偏转一定角度,借助内部离合机械装置,控制齿轮转动,补偿车辆方向变动。

在人类近代史上,18 世纪英国的仪器修理工詹姆斯·瓦特改良了蒸汽机使得效率提高,并发明了离心调节器这项技术,用于调节输入蒸汽机的蒸汽量,这完全解决了机器带不同负载时需要人不断地去调节蒸汽阀门改变蒸汽输入量来维持机器速度保持稳定的问题。这极大地推动了蒸汽机的广泛应用和促进了工业生产力的发展。利用离心调节器对蒸汽机速度调节原理如图 1-21 所示。

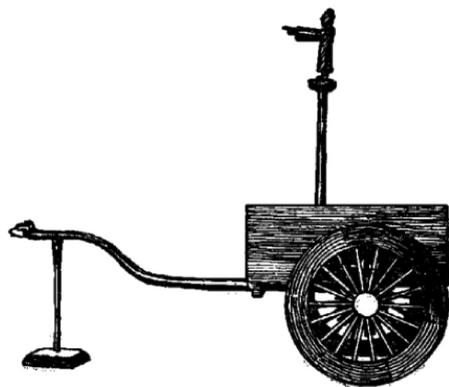


图 1-20 指南车

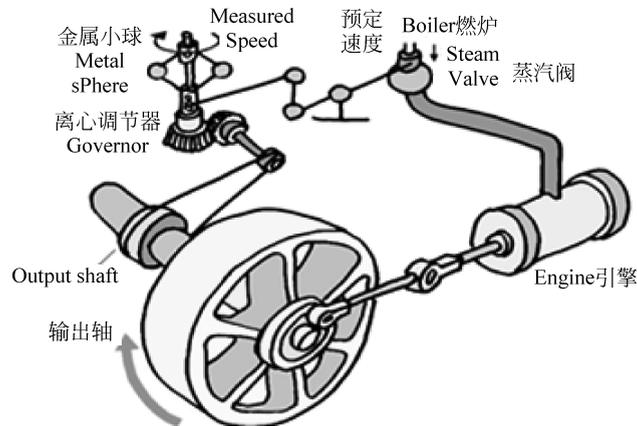


图 1-21 离心调节器实现蒸汽机速度调节原理

离心调节器完成蒸汽机速度调节过程：输出轴的转速高于设定值时，通过传动装置将这一信息传递给离心调节器，离心调节器转速增大，金属小球因此上升，这导致可活动的套筒上升，在连杆机构的作用下使得蒸汽阀门开度减小，蒸汽输入量相应减小，从而使输出轴转速下降；反之亦然。

无论是古代的指南车方向指向调节，还是近代的蒸汽机速度调节都应用了控制技术。按照控制理论的定义，指南车采用了前馈控制技术，而离心调节器实现蒸汽机速度调节则正是闭环控制技术。古代依靠天赋过人的能工巧匠发明独创性很强的控制装置，以及近代的蒸汽机速度离心调节装置都是在实践中直观摸索的结果。由于无理论上的指导，控制系统还是比较简单，控制稳定性和精度不高，控制技术并未得到快速发展。控制技术在各个领域广泛应用，对人类生产活动产生极大影响得益于自动控制技术理论的形成。自动控制理论研究起始于解决瓦特离心调节器引起的振荡问题，发展经历了经典控制理论、现代控制理论以及智能控制理论阶段。

1.3.1 经典控制理论

经典控制理论是以拉氏变换为数学工具，以单输入/单输出的线性定常系统为主要的研究对象，将描述系统的微分方程或差分方程变换到复数域中，得到系统的传递函数，并以此作为基础，使用时域分析法、频率特性分析法、根轨迹法等对系统进行分析和设计，确定控制器的结构和参数。促进经典控制理论结构体系形成的重大事件见表 1-1 所示。

表 1-1 奠定经典控制理论形成重大事件

时间	代表人物	事件
1868 年	J. C. Maxwell	针对离心调速器控制精度和稳定性之间的问题，发表《论调速器》，提出用基本系统的微分方程模型分析反馈控制系统的数学方法
1875 年	E. J. Routh 和 A. Hurwitz	提出根据代数方程的系数判断系统的稳定性方法
1895 年	劳斯与古尔维茨	提出基于特征根和行列式的稳定性代数判别方法

续表

时间	代表人物	事件
1932年	H. Nyquist	用频率特性表示系统,提出了频域稳定性判据,解决了放大器的稳定性问题,而且可以分析系统的稳定裕度,奠定经典控制理论中的频域法分析与综合基础
1938年	A. B. 维哈伊洛夫	发表《频域法》,这标志着经典控制理论的诞生
1945年	H. W. Bode	发表《网络分析和反馈放大器设计》,完善了系统分析和设计的频域方法,并研究了系统频域特性的伯德图表示方法
1948年	N. Wiener	发表《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书,标志控制论的诞生
1948年	W. R. Evans	提出系统的根轨迹分析法,该方法易于工程应用,是求解闭环特征方程根的简单图解法。进一步完善了频域分析方法
1954年	钱学森	出版了《工程控制论》,全面总结了经典控制理论,标志着经典理论体系成熟

1.3.2 现代控制理论

经典控制理论局限于解决单输入-输出线性定常系统控制问题,对于不能线性化的非线性系统、时变系统、多输入-输出控制十分复杂的系统无法得到满意的控制效果。而20世纪50年代中期,计算机的飞速发展,促进核能技术、空间技术迅速兴起。上述领域涉及的工程问题是十分复杂的控制问题,诸如把火箭和人造卫星用最少燃料或最短时间准确地发射到预定轨道等最优控制问题,这促进了现代控制理论的研究和发展。

现代控制理论对控制系统的分析和设计主要通过对系统的状态变量描述,建立系统的状态空间数学模型,基本分析方法是时域方法;研究对象包括线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、单变量和多变量系统。现代控制理论包含的学科内容主要有线性控制理论、非线性控制理论、最优控制理论、随机控制理论和自适应控制理论。现代控制理论体系形成经历的重大事件见表1-2。

表1-2 现代控制理论发展重大事件

时间	代表人物	事件
1959年	庞德亚金(L. S. Pontryagin)等	创立极大值原理,找出最优控制问题存在的必要条件,该理论为解决控制量有约束情况下的最短时间控制问题提供了方法
1953—1957年	贝尔曼(R. Bellman)	解决最优控制问题的动态规律,并依据最优性原理,发展了变分学中的Hamilton-Jacobi理论
1959—1960年	卡尔曼(R. E. Kalman)	提出了滤波器理论,并采用状态方程描述系统,提出了系统的能控性、能观测性。证明了二次型性能指标下线性系统最有控制的充分条件,进而提出了对于估计与预测有效地卡尔曼滤波,证明了对偶性
20世纪	罗森布洛克、欧文斯	研究了使用于计算机辅助控制系统设计的现代频域法理论,将经典控制理论传递函数的概念推广到多变量系统,并探讨了传递函数矩阵与状态方程之间的等价转换关系,为进一步建立统一的线性系统理论奠定了基础
20世纪70年代	奥斯特隆姆、朗道	提出了自适应控制理论和应用

1.3.3 智能控制理论

控制理论从 19 世纪中叶发展,经历了“经典控制理论”和“现代控制理论”阶段,现已进入“大系统理论”和“智能控制理论”阶段。由于经典控制理论和现代控制理论都是建立在对象的数学模型基础上和采用各种方法对系统开展综合分析和设计,但随着分析和设计的系统规模越来越大和越来越复杂,许多复杂的系统难以建立有效的数学模型和用常规的控制理论去做定量分析与计算。为了解决这类系统的控制问题,需要建立新的理论和方法促进了智能控制理论的研究。

智能控制是控制技术的最新进程,目前还处于发展阶段,没有经典控制理论和现代控制理论的成熟理论体系。但智能控制理论脱离了对研究对象在数学模型上的严格要求,对那些模型未知或知之甚少的对象,诸如对工业过程的病态结构问题、无法预测的干扰等,智能控制理论能够很好地解决,因此智能控制具有很强的生命力,成为控制技术的发展趋势。智能控制理论目前包含了集成或混合控制、分级递阶控制、专家控制、人工神经网络、模糊控制、学习控制等。随着科学技术的发展,智能控制理论和技术也将得到不断发展和完善。智能控制理论发展经历重大事件见表 1-3。

表 1-3 智能控制理论发展重大事件

时间	代表人物	事件
2 世纪 60 年代	K. S. Fu 教授	率先提出把人工智能的启发式推理规则用于学习系统,为自动控制迈向智能化揭开了崭新的一页
1966 年	Mendel	在空间飞行器的学习控制中应用了人工智能技术,并提出了“人工智能控制”的新概念
1971 年	Fu	发表了重要论文,提出了智能控制就是人工智能与自动控制的交叉的“二元论”思想,列举三种智能控制系统——人作为控制器、人机结合作为控制器、自主机器人
1974 年	Mamdani	开创了模糊控制的新方向
1977 年	Saridis	全面地论述了从反馈控制到最优控制、随机控制及自适应控制、自组织控制、学习控制,最终向智能控制发展的过程,提出了智能控制是人工智能、运筹学、自动控制相交叉的“三元论”思想及分级递阶的智能控制系统框架
1984 年	Astrom	提出了建立专家控制的新概念
1984 年	Hopfield,Rumelhart	提出的 Hopfield 网络、BP 算法,开辟了神经网络控制
1987 年		IEEE 控制系统学会与计算机学会联合召开了第一届智能控制国际会议,这标志着智能控制作为一门新学科正式建立起来

思考与练习 1

1.1 自动控制技术广泛应用日常生活和工业生产,试收集有关控制技术的应用案例,说明其是开环控制还是闭环控制,并说明其组成部分。

1.2 汽车驾驶员通过操控方向盘使汽车在期望的运行方向行驶,试画出这一反馈控制系统框图。

1.3 汽车采用计算机控制系统来控制排放和提高燃油效率。在控制系统作用下,汽油机或柴油机的喷射系统自动调整油与空气的混合比例,这样就可以显著提高燃油的燃烧效率,同时减少了不希望的污染排放。试绘制汽车电控燃油喷射控制系统框图。

1.4 在家畜养殖行业,每天都需要对奶牛进行挤奶工作,收集有关资料,实现挤奶工作的自动化。

1.5 试根据恒值、随动、程序控制系统概念判断下列系统属于哪一类?

空调机、交流稳压器、开关稳压电源、数控加工中心、自动跟踪雷达、太阳最大功率跟踪、燃气热水器、电饭煲、仿形加工机床、遥控小车、太阳位置自动追踪装置。

1.6 某机床平台自动控制系统示意图如图 1-22 所示,试完成以下问题:

- (1) 判断该控制系统是开环控制还是闭环控制系统。
- (2) 说明此控制系统的各组成部分分别是由哪些元部件构成,及相应的控制变量。
- (3) 说明控制系统的控制原理。
- (4) 画出此控制系统的系统方块图。

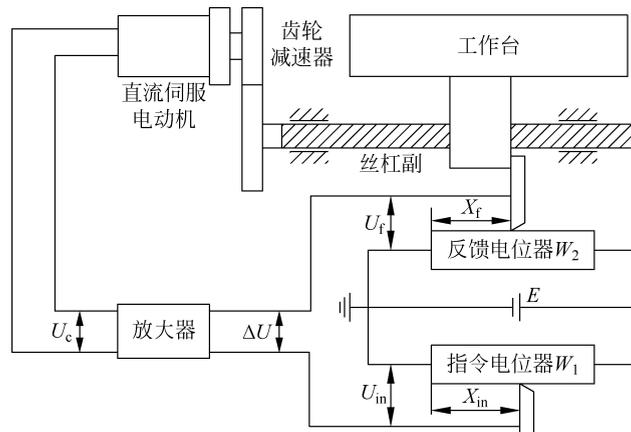


图 1-22 机床位置控制系统示意图

1.7 图 1-23(a)、(b)为一水箱液位的两种控制方案示意图,试说明两种控制方案的控制方式、控制系统组成部分,保持液位恒定的原理,以及绘制控制系统框图。

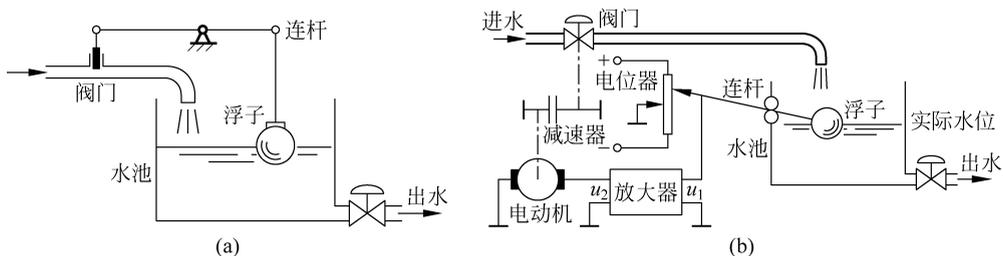


图 1-23 机床位置控制系统示意图

1.8 描述由驾驶员操作摩托车的速度控制系统框图。

1.9 汽车雨刮器(见图 1-24)是帮助驾驶员安全驾驶汽车的重要系统之一,雨刮器的摆动频率可以手动调节,试绘制采用雨滴传感器感应雨的强度自动调节雨刮器摆动频率的自动控制系统框图。



图 1-24 汽车雨刮器