

第一部分 基础知识篇

第一章 系统

计算机类自动控制系统的控制过程主要包括产品的工艺形成过程、生产设备的工作过程、设备指标的参数确定过程、执行机构的选型过程、检测元件的信号采集过程、控制结构的模块组合过程、控制软件的程序设计过程、生产线的安装调试过程、系统设备的运行维护过程等。

在本章中，1.1 节主要介绍自动控制系统的执行机构、检测及传感器机构、电气液控制机构、机械本体机构、动力源机构 5 部分组成，以及各组成部分的作用。1.2 节从自动控制系统是否形成闭合回路、输入与反馈信号的数量与来源特点、给定值信号的变化特点、控制通道的线性特点、控制系统信号的连续性等多个方面对自动控制系统进行分类介绍，并给出具体图示以方便理解。1.3 节介绍自动控制系统需要具有稳定性、快速性和准确性。1.4 节介绍自动控制系统经历的开关仪表的就地控制阶段、模拟仪表控制阶段、集中式数字控制阶段、集散式控制阶段等发展阶段，以及其发展趋势。1.5 节介绍电气控制系统的控制回路由继电器、单片机、PLC（可编程控制器）等形式的主控单元与接触器、电磁铁、电磁阀、驱动器等形式的电路执行元件及主令开关等组成，需要借助循环动作图、动作表、时序图、流程图、功能表图等对控制过程进行描述，从而实现对系统主回路的控制。通过学习本章内容，应该能够对自动控制系统具有整体的把握，以为后面各典型系统的详细分析打下良好的基础。

1.1 自动控制系统的组成

自动控制系统主要由执行机构、检测及传感器机构、电气液控制机构、动力源机构、机械本体机构 5 部分组成。

1.1.1 绪论

系统，是指一个相互关联的分离件（元素）的集合体（集合）。系统按形成方式分为自然系统和人工系统。自然系统一般是指生命机体系统、宇宙天体系统、社会系统等非人力形成的系统。人工系统是指为实现某种功能而人为设计、规划、制造的具有一定独立性的系统。设备是为实现某种功能而由相关零件和部件组成的人工系统。这个系统可以是相对完整的功能系统，如工作过程不需要人工参与的全自动化设备；也可以是相对不完整的功能系统，如

工作过程需要人工辅助参与的半自动化设备。在工业领域中,机械电气设备、生产线等都属于人工系统。

自动化就是自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,机器生产设备可以按照事先设定的工艺生产过程自动运行,这个事先设定的工艺生产过程具有特定的顺序,包括工作状态或参数的设定、自动检测、自动调节、自动驱动。自动控制系统的控制过程是循环往复的,从工作的开始到工作的结束,每一个步骤都是承上启下、逻辑性很强的数据控制过程,也是产品形成的加工过程,更是工业系统所要研究的工艺控制过程。例如,钢铁生产线、水泥生产线、设备组装生产线、设备性能测试生产线等都是典型的自动控制技术应用的实例,都使用了自动控制系统。自动控制系统包括自动化设备及生产线,是集成了机械、电子、仪表、电气、信息处理、计算机、液压与气动等多种技术的综合控制系统。

生产线也可以称为流水线,是指产品及零部件的各主要生产机械按生产工艺顺序进行排列,并由输送机械连接成一条具有加工、运送、装配、检验等一系列生产活动所需要的功能的加工路线。生产线按自动化程度可分为由全自动加工设备和全自动输送设备构成的全自动生产线、借助人工对主加工设备进行上下料操作的半自动生产线、由人工进行设备操作和生产加工的手工生产线。自动生产线按控制方式和加工模式可分为刚性自动生产线和柔性自动生产线,刚性自动生产线上各主机设备的生产节拍具有完全配套性或加工模式具有单一性,因此各主机设备不具备独立工作的能力,这种生产线的控制系统大多采用集中控制形式。柔性自动生产线在各主机设备的前面增加一台自动上料设备,并在各主机设备的后面增加一台自动下料与入库设备,使各主机设备的生产过程既具有配套性又具有独立性,同时控制系统采用离散控制形式,这样其各主机设备的加工过程在生产节奏、实施工艺、控制形式、功率配备和功率消耗、人员分配、管理模式、检修过程、材料消耗等方面都具有生产的独立性和成套的协调性。

自动控制系统按其体积大小可分为大型控制系统和小型控制系统;按其结构复杂性可分为复杂控制系统和简单控制系统;按其功能多少可分为多功能控制系统和简单操作控制系统。控制系统大多是由机械零部件和液压与气动机构,以及电子电器装置等组成的功能整体。自动控制系统按电气控制方式不同一般可分为继电器控制系统、单片机控制系统、PLC 控制系统、计算机控制系统等。

1.1.2 各组成部分的作用

1. 执行机构

执行机构的作用是按照控制器发出的各种指令实现特定的能量转换、完成预期的能量加载。从能量转换的角度看它应由能量转换执行元件组成,如电机等;但从执行过程看它应由能量转换执行元件和传动机构两部分组成,如电机和减速器等。这样既能实现给定的运动形式,又能传递足够的基础动力,并具有良好的传动稳定性。对于自动控制系统,当电气控制部分发出的控制信号传到执行机构之后,执行机构就要完成特定的能量转换和基本能量的匹配输出等功能。

对于自动控制系统,其执行机构有电机传动系统(包括伺服电机系统)、步进电机系统、交直流调速电机系统、气缸或液压缸、气马达或液压马达、旋转马达等。执行结构主要指由具有功率消耗的做功元件组成的系统。

2. 检测及传感器机构

检测及传感器机构的作用是，获取系统运行过程中各执行元件的相关参数的动态信息。该机构通过装在自动控制系统上的各种检测元件及传感器获取需要的各种信号，并对检测到的信号进行放大、变换后，将其传送到控制部分进行分析和处理。检测部分可以使用多种形式的检测元件，如行程开关、接近开关、光电开关、射频开关、压力开关、流量开关、温度开关、相应可输出脉冲或模拟量信号的传感器件、旋转编码器、智能检测仪表等，其工作过程涉及光、电、气、液、机等多种机理，并包括信息转换、显示、记录等部分。可以说检测及传感器机构是一个有输入、输出、电源接口、内部处理核心的相对独立的系统。

3. 电气液控制机构

电气液控制机构的作用是处理系统运行过程中得到的各种信息数据并对其进行相应的比较判断、选择决策和指令输出。在自动控制系统中，电气控制部分，即控制器，是系统的指挥中心，它利用检测及传感器机构将检测到的信号数据传送到其控制部分，并将这些信号数据与要求的值进行比较、分析、判断之后，向执行机构发出执行动作命令。电气控制部分的控制过程是一个随机信息数据的处理控制过程。

电气控制部分需要具有信息处理和控制的功能，其功能的复杂性要根据系统性能要求而定，其处理的数据量可大可小，处理过程可长可短，但信息处理速度必须快。随着计算机技术的发展，与电气控制应用密切相关的机电一体化技术也得到了进一步普及，计算机已成为电气控制部分的主体。机电一体化技术能够提高系统控制部分的信息处理速度、数据精度及可靠性，减小系统占用的空间体积，同时提高系统整体的抗干扰性能等。目前自动控制系统大多为电、气、液综合控制系统，因此其控制部分应由主控单元、电路执行元件及主令控制开关组成。按主控单元的形式划分，自动控制系统的控制部分可以分成如下几种形式。

(1) 继电器控制系统。简单系统大多由继电器控制系统实现。例如，简单功能的自动冲床、半自动机床等。

(2) 单片机控制系统。特定或专用小型系统大多由单片机控制系统实现。例如，智能仪表、电子计量秤、小型电热锅炉等。

(3) PLC 控制系统。一般通用设备系统都是由 PLC 控制系统实现的，工业企业的现场设备几乎都采用了 PLC 控制系统。例如，自动包装机、自动切割机床、数控机床等。

(4) 计算机控制系统。对于综合控制系统一般由计算机控制系统实现，DCS 系统的上位机几乎都采用了计算机控制系统。例如，水泥、钢铁的自动生产线等。

对于电气线路而言，其执行元件包括变频器、控制电机的控制器、电磁阀、继电器、接触器等，而它们也是对电机、气缸、气马达、液压缸、液压马达等系统执行元件实现控制的系统控制装置的一部分，因此，它们也属于系统控制元件。系统主控单元是指 PLC、单片机、继电器电路及逻辑控制电路等。系统控制元件是指变频器、驱动器、接触器及功率开关电路等部分。系统主控单元控制系统控制元件，系统控制元件控制系统执行元件。

4. 动力源机构

动力源机构的作用是向系统（如自动化设备及生产线等）供应和输送特定形式的能源动力，以驱动系统正常运转。常用的动力源有电源、液压源、气压源等。

5. 机械本体机构

在自动控制系统中，机械本体机构是完成给定工作的主体，它具有整体结构支撑、机构及部件之间的连接固定、实现能量的中间传递、改变能量的传递方向、实现特定的运动形式等功能，是机、电、气、液一体化技术的载体。一般机械本体机构包括机壳、机架、机械传动部件及各种连杆机构、凸轮机构、联轴器等。由于自动控制系统一般都具有高速运转、高精度配合、高效率生产和高复杂性的特点，所以其机械本体机构应满足稳定安全、精密可靠、维护方便、具有模块集成等性能要求；并具备轻巧美观、操作简单和实用耐用等特点。

1.2 自动控制系统的分类

随着自动控制理论的不完善及自动控制技术的不断发展，生产过程的自动化水平得到不断提高，自动控制系统也日臻完善，并出现了各种各样的新型自动控制系统。因此，很难确切地列举自动控制系统的全部分类。下面介绍几种常用的分类方法。

1.2.1 按形成闭合回路分类

自动控制系统有两种基本的控制形式，即开环控制系统和闭环控制系统。其中，闭环控制系统是工业生产中应用较为广泛的系统。

1. 开环控制系统

如果在某控制系统的控制器的输入信号中，不包含被控制对象输出端的被控制量的反馈信号，则称该控制系统为开环控制系统。开环控制系统易受各种干扰的影响，虽然其控制精度较低，但其结构简单、成本低、容易实现，可用于对控制要求不高的小型机器设备。而对控制要求较高的大型装置和设备，则需要采用闭环控制系统。开环控制是一种较为简单的控制方式，其特点是在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用，即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统方框图如图 1-1 所示。由图 1-1 可知在该控制系统中控制信号的流动是单方向的，并未形成闭合回路。

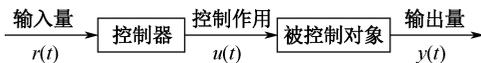


图 1-1 开环控制系统方框图

常见的开环控制系统有以下两种。

1) 按给定值操作的开环控制系统

这里以工业中常见的加热炉为例进行介绍。加热炉的加热能源通常是燃油、煤气和电力等。在加热炉的温度控制系统中，要求炉内的温度按某种性能条件保持在一定的数值范围内。如果采用燃油炉，为控制炉温通常需要通过阀门向炉内喷入具有一定压力的燃油，即燃油流量是控制量，而被加热工件的数量和环境温度是干扰量。为了实现对炉温的控制，需要采用改变燃油流量的方式来抵消干扰因素对炉温的影响。即用燃油流量的大小控制加热炉内部产生的热量多少，从而平衡被加热工件数量和环境温度高低的变化导致的炉内热量的改变，保证炉内温度的恒定可控。如果事先以单个加热工件按照环境温度变化规律计算出满足温度条件所需要的燃油流量，然后通过操作阀门向加热炉内喷入设定的燃油流量，之后不再通过判

断加热效果对其燃油给定量进行调控,那么这种控制系统就是按给定值操作的开环控制系统,其方框图如图 1-2 所示。显然,这种控制系统当被控对象受到某种干扰时被控参数偏离预期值,无法实现自动补偿,因此,系统的控制精度很难得到保证。当控制系统的结构参数稳定、干扰极弱或控制精度要求不高时,可采用开环控制系统。

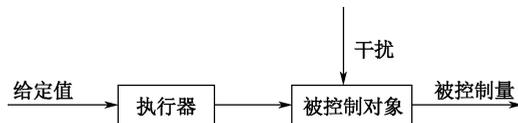


图 1-2 按给定值操作的开环控制系统方框图

2) 按干扰量补偿的前馈控制系统

通过前面对炉温控制的分析可知,要想稳定炉温,就要在干扰信号出现时,通过操作控制量(燃油流量)使被控制量(炉内温度)发生变化以抵消干扰量对被控制量的影响,从而保持被控制量不变。这样就产生了利用干扰量去克服干扰的控制思路,该控制系统的方框图如图 1-3 所示。

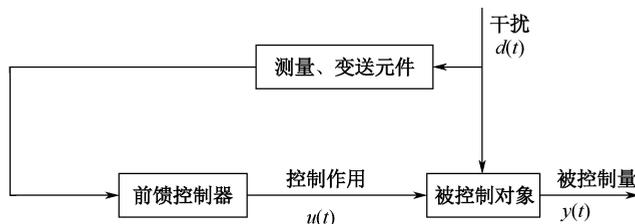


图 1-3 按干扰量补偿的前馈控制系统方框图

在按干扰量补偿的前馈控制系统中,由于测量的是干扰量,故只能对可测干扰进行补偿,而对不可测干扰无法进行控制,虽然其控制精度受到结构的限制,但其性能优于按给定值操作的开环控制系统。

(1) 前馈控制系统的主要特点如下。

- ① 前馈控制系统是基于参数特性基本不变的原理工作的,具有控制及时、有效的特性。
- ② 前馈控制系统是事先补偿的控制方式,要根据干扰对象的特性而定,因此其控制具有专用性,前馈与干扰是一一对应的,一种前馈只能克服一种干扰。
- ③ 前馈控制系统是一种开环控制系统。

(2) 前馈控制主要用于下列场合。

- ① 干扰幅值大且干扰频繁,对被控制量影响较大,使用反馈控制达不到要求时。
- ② 主要干扰为可测不可控的变量时。
- ③ 输出对象的控制通道滞后大时。当反馈控制不及时而造成控制质量差时,可采用前馈与输出反馈相结合的综合控制系统,以提高控制质量。

2. 闭环控制系统

如果某控制系统的控制器的输入信号包含来自输出端被控制对象的被控制量的反馈信号,则称该控制系统为闭环控制系统,或反馈控制系统。

闭环控制系统可以使输出端被控制量具有更高的控制性能。因为在闭环控制系统中,当

被控制对象受到干扰时,向控制器反馈变化后的被控制量可以使控制器输入端综合比较后的控制信号发生变化,从而使控制器对变化信号进行趋势判断、参数比较、数值控制、调节放大后重新驱动系统执行机构,以使被控制量不被干扰而处于稳定状态,将被控制量参数恢复至给定值,而开环控制系统则无法实现这种控制。闭环控制的特点是在控制器与其输出端的被控制对象之间,不仅存在正向驱动关系,还存在反馈关系,即系统的输出量对被控制量有直接的过程调节影响。闭环控制系统方框图如图 1-4 所示。

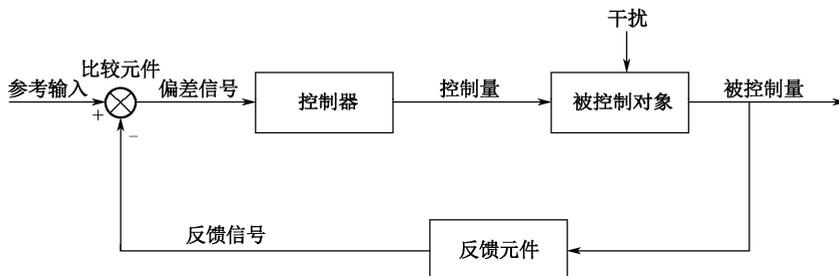


图 1-4 闭环控制系统方框图

图 1-4 中的⊗为比较元件(又称为比较器),在比较元件中,给定值信号作为参考输入与反馈信号进行比较,两者的差值即偏差信号,偏差信号就是控制器的输入信号。在该控制系统中,控制信号的流动形成了闭合回路,所以该控制系统被称为闭环控制系统。

将检测出来的输出量送至系统的输入端,并与输入量进行比较的过程称为反馈。若反馈信号与输入信号相减,则称为负反馈;若相加,则称为正反馈。给定值信号与反馈信号之差,称为偏差信号。偏差信号作用于控制器,用于使系统的输出量趋向于给定值。由此可以看出,闭环控制的实质就是利用负反馈的作用来减小系统的误差,因此闭环控制又称为反馈控制。

在工业生产过程中,闭环控制系统大多采用偏差控制,尽管它们完成的控制任务不同、具体结构也不同,但它们都是通过检出偏差、利用偏差信号对被控制对象进行控制,以达到减小或纠正输出量的偏差这一目的的。归纳而言,闭环控制系统的特点如下。

(1) 在开环控制系统中,只有输入量对输出量产生控制作用;从控制结构来看,开环控制系统只有从输入端到输出端的正向传递的信号通道。在闭环控制系统中,除正向通道外,还必须具有从输出端到输入端的反馈通道,以使输出信号也参与控制调节。因此,可以说闭环控制系统是由正向通道和反馈通道组成的自动控制系统。

(2) 为了检测偏差,必须直接或间接地检测出输出量的相关参数值,并将其转换为与输入的给定值信号相同的物理量,以便与给定值信号进行比较得出偏差信号。所以闭环控制系统必须具有传感器检测环节、给定值信号环节和反馈比较信号环节。

(3) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号纠正偏差的,因此在该控制系统中必须具有纠正偏差这一环节。闭环控制系统是将偏差信号进行放大来推动执行机构,从而进一步对被控制对象进行控制的。只要输出量与给定值之间存在偏差,就有连续控制的调节作用存在,从而纠正这一偏差。由于闭环控制系统是利用偏差信号作为控制信号的,其能自动纠正输出量与给定值之间的误差,所以它可以构成精确的控制系统。一个完整的控制系统应由以下元件或单元构成。

① 被控制量。任何控制系统都有被控制对象,即系统要操控的对象,被控制对象的输出是被控制量,被控制量可以是一个参数或一组参数。例如,电机的电压、电流;锅炉的温

度、压力等。

② 给定元件或单元。系统在工作时，都要事先给定系统一个与被控制量成一定比例关系的、相对标准的、稳定的激励信号，用来控制和调节系统的被控制量参数值，这个事先给定的激励信号可以由一个或几个简单的元件实现，也可以由相对复杂的单元实现。

③ 检测元件或单元。为了检测被控制量，系统需要具有可以直接或间接地精确测量被控制量的元件或单元。用于检测的元件或单元的测量精度直接关系到系统的调节控制精度，所以应尽可能采用精度高的检测元件或单元及合理的检测线路以实现输出量的反馈调节。

④ 比较元件或单元。为了及时稳定被控制量的状态，需要将反馈信号和给定值信号进行比较，以便产生偏差信号，因此系统必须设有比较元件或单元，以实现反馈信号和给定值信号的快速、综合、有效比较。

⑤ 放大元件或单元。由于偏差信号一般都比较微弱，同时信号是间接采集的，因此要对比较后的偏差信号进行放大，使它具有足够的幅值和功率，因此系统还必须设有具备匹配和调节功能的放大元件或单元。

⑥ 执行元件或单元。由于被控制量与偏差信号形成的控制量之间的参数形式不能构成直接联系，需要用偏差信号驱动一个被控制对象作为中间转换媒介，这个中间转换媒介具有对被控制量的再控制作用，使被控制量最终按控制要求的变化规律动作，而这个中间转换媒介就是执行元件或单元，它是能量转换的动力元件或单元。

⑦ 校正元件或单元。为改善系统的控制性能，还需要在系统的偏差信号至被控信号间的正向通道中或反馈通道中加入线性或非线性的具备调节参数功能的校正元件或单元。

3. 控制系统简例

1) 水位控制系统

例 1-1 在水位控制系统中 [见图 1-5 (a) ~ (c)]，被控制量是水池中的水位高度 h ，出水量 Q_2 为干扰量。水位开环控制系统如图 1-5 (a) 所示，进水阀和出水阀的开度位置需要事先由人工设定，使水位在需要的高度，只要进水量 Q_1 等于出水量 Q_2 ，就可保持需要的水位高度。一旦出水量 Q_2 发生变化，就不能保持需要的水位高度。

例 1-2 水位负反馈闭环控制系统如图 1-5 (b) 所示，该控制系统通过水位高度的变化来改变浮子浮力，并借助杠杆增力原理实现对进水阀的开度位置的控制，水位与进水阀的开度是反向关系，即水位越高，进水量 Q_1 越小，从而使水位减速回调至需要的恒定高度。

例 1-3 水位正反馈闭环控制系统如图 1-5 (c) 所示，水位与进水阀的开度是正向关系，即水位越高，进水量 Q_1 越大，水位正反馈闭环控制系统无法保证水池中的水位高度恒定。

2) 燃油加热炉温度控制系统

例 1-4 在燃油加热炉温度控制系统中，如图 1-5 (d) 所示，当单位时间内的被加热件的数量和受热体积大小，以及环境温度等干扰量发生变化时，炉温将受到影响并偏离需要的温度，需要通过温度检测装置检测出实际炉温，并把这个温度信号送至控制系统的比较元件与需要的温度值进行比较，得出偏差信号，并利用该信号控制阀门开度，由此增大或减小燃油流量，进而实现炉温的升高或降低以得到需要的温度。

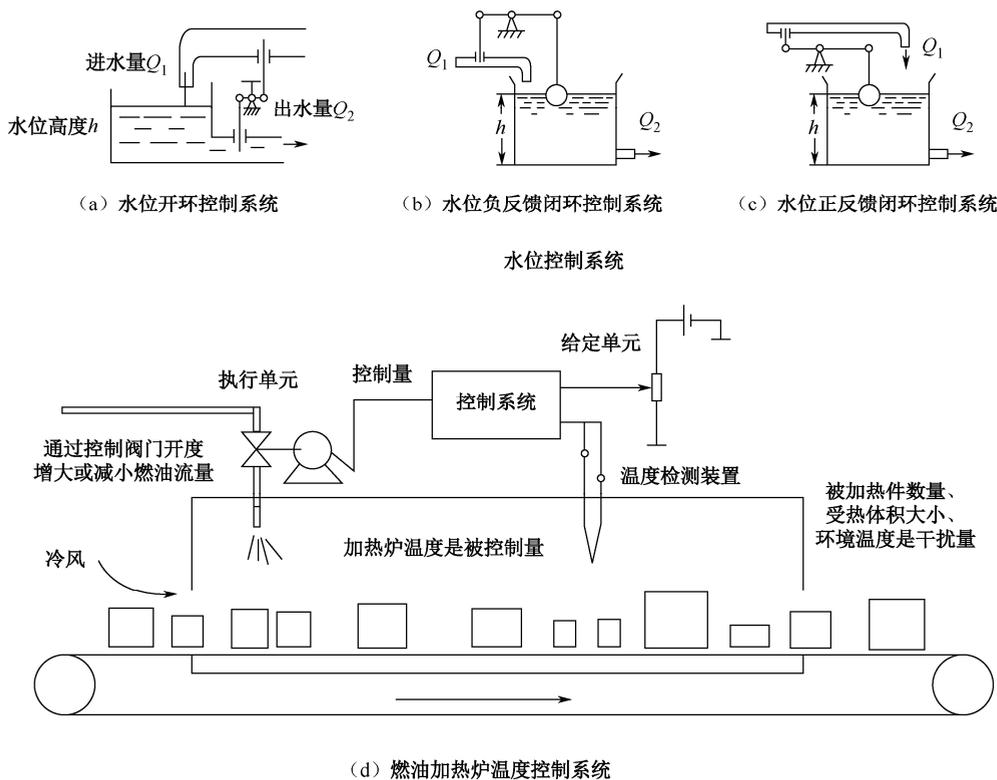


图 1-5 控制系统示例

1.2.2 按输入与反馈信号的数量与来源分类

1. 多回路反馈控制系统

反馈控制系统是根据被控制量和给定值的偏差进行调节的，其使系统消除偏差，达到被控制量等于给定值的目的。因为反馈控制系统是将被控制量变化的信号反馈至控制器的输入端，形成闭合回路的，所以反馈控制系统一定是闭环控制系统。反馈控制系统是生产过程控制系统中最基本的一种。产品的生产过程通常是很复杂的，因而用于生产的控制系统往往也很复杂，除被控制量的反馈信号外，传输通道中还有多个干扰信号，这些干扰信号也要通过反馈的方式进行消除，从而组成多个闭合回路，这种由多条闭合回路组成的控制系统称为多回路反馈（信号）控制系统，如图 1-6 所示。

在图 1-6 中，除了被控制量 y 的主反馈信号 b ，还有由中间环节输出信号 y_1 形成的局部反馈信号 b_1 ， b_1 是受控对象的一部分， b 、 b_1 与参考输入 r 一起在比较元件中进行比较，形成偏差信号 e ，所以控制器的输入端实际有 3 个输入信号，当被控制对象在中间环节受到干扰后，中间环节的输出信号 y_1 的变化要比被控制量 y 的变化提前，因而局部反馈信号 b_1 要比主反馈信号 b 更早作用于控制器，并利用中间环节的特征参数变化提前反馈使控制器动作，实现对输出的被控制量的快速调节，使得输出被控制量更稳定，干扰引起的变化量也更小。

此外，多回路反馈控制系统的参考输入 r 有时不止一个，可能有 m 个参考输入 r_1, r_2, \dots, r_m 。由多个参考输入共同控制的系统称为多输入（信号）系统；仅有一个参考输入的系统称为单输入（信号）系统。

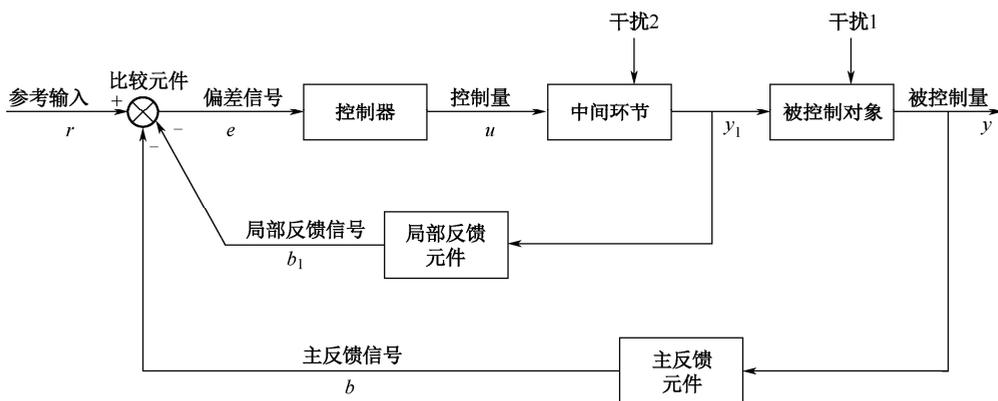


图 1-6 多回路反馈（信号）控制系统方框图

2. 前馈—反馈复合控制系统

图 1-7 为前馈—反馈复合控制系统方框图，前馈—反馈复合控制系统在反馈控制系统的基础上增加了对主要干扰 $d(t)$ 的前馈补偿作用。图 1-7 中的补偿环节可以是一个较简单的控制环节（控制效果必须明显），对于控制要求较高的被控制对象，前馈补偿环节也是一个控制器，即前馈控制器。当干扰 $d(t)$ 发生后，补偿信号会及时地作用于系统的控制器，从而及时消除干扰对被控制量的影响，实现系统前馈控制。而反馈回路将保证被控制量 $y(t)$ 能够较精确地受控于给定值信号，提高了被控制量 $y(t)$ 的控制精度。

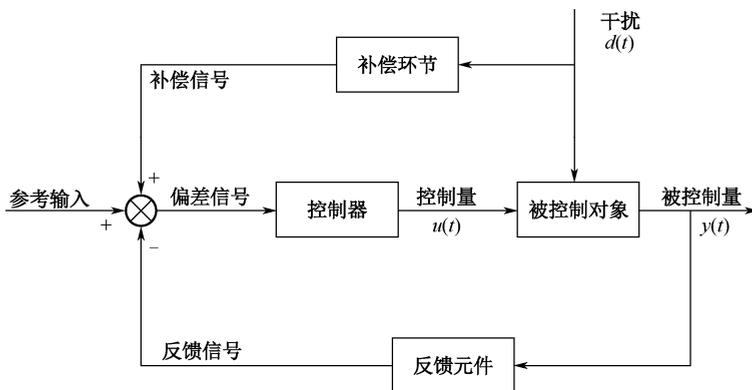


图 1-7 前馈—反馈复合控制系统方框图

1.2.3 按给定值信号的变化特点分类

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的任务是使输出的被控制量符合要求的给定值并保持恒定不变，即被控制量在调整过程结束时必须等于要求的给定值。恒值控制系统也是生产过程中常用的一种控制系统。例如，电机电压控制，电机转速控制，电力网的频率（周波）控制，各种恒温、恒压、恒液位等控制都属于恒值控制系统。在恒值控制系统中，作为参考输入的给定值信号与输出的被控制量的要求值都是常量，即它们的图形是水平的直线，但两个参数的性质可能不同。

2. 随动控制系统

随动控制系统简称随动系统，其作为参考输入的给定值信号随时间的变化规律事先是不能确定的，随动系统在各种条件下，要求被控制量能够快速、准确地跟踪给定值信号的变化。例如，自动定位空中目标的跟踪卫星的控制系统、飞机的雷达天线控制系统、工业控制过程中的位置定位控制系统、工业自动化仪表中的显示记录系统等均属于随动系统。

3. 程序控制系统

在程序控制系统中，给定值信号是按事先预定的轨迹变化的，它的轨迹既不是直线，也不是无周期性的曲线，而是一个已知的具有相关规律的时间函数图形，控制的目的是要求被控制量按确定的给定值信号的时间函数来改变，如机械加工中的数控机床的控制系统、加热炉自动温度控制系统。

1.2.4 按控制通道的线性特点分类

1. 线性控制系统

当控制系统的各元件或单元的输入和输出的函数关系成线性时，控制系统的动态过程具有线性，输入信号和输出被控制量的关系图形是一条直线，如图 1-8 所示。

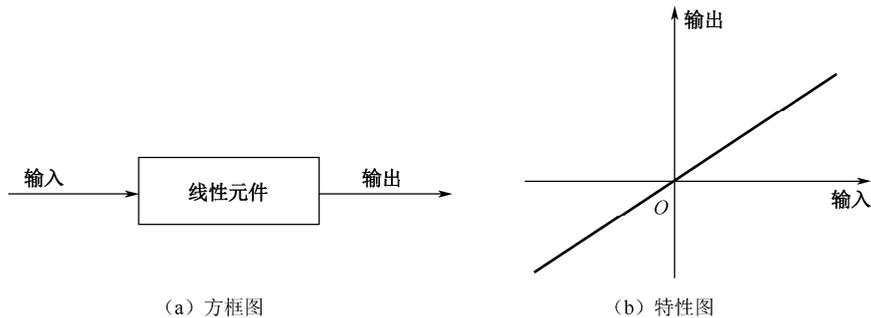


图 1-8 线性元件的特性

线性控制系统的特点是可以利用叠加原理进行数值和图形的逻辑运算，对于多输入系统，系统的输出值等于各个输入信号分别作用于系统时的输出值之和。多个输入信号可以通过逻辑叠加得到综合形式的输入信号，输出端的各个被控制量也可以通过逻辑叠加得到综合形式的被控制量，叠加后的输入信号和输出被控制量之间依然具有线性关系。

输入和输出的这种线性控制关系的直线斜率是一个常数，具有这种特性的线性控制系统称为线性定常系统，线性定常系统的响应曲线只取决于输入信号的形状和系统的特性，与输入信号施加的时刻无关。若系统的输入和输出的关系图形的斜率是随时间的变化而变化的，即输入和输出受时间影响，其输入和输出之间的关系系数是基于时间的函数而非常数，则这种线性控制系统称为线性时变系统，这种系统的响应曲线不仅与输入信号的形状和系统的特性有关，还与输入信号施加的时刻有关。

2. 非线性控制系统

当控制系统中有一个或一个以上的非线性元件时，系统的输入和输出特性就不能用线性

关系来描述，输入信号和输出被控制量之间的关系也不能简单地用叠加原理表示，这种控制系统称为非线性控制系统。在非线性控制系统中，常见非线性元件或单元形成的输入和输出关系特性有如图 1-9 所示的几种。

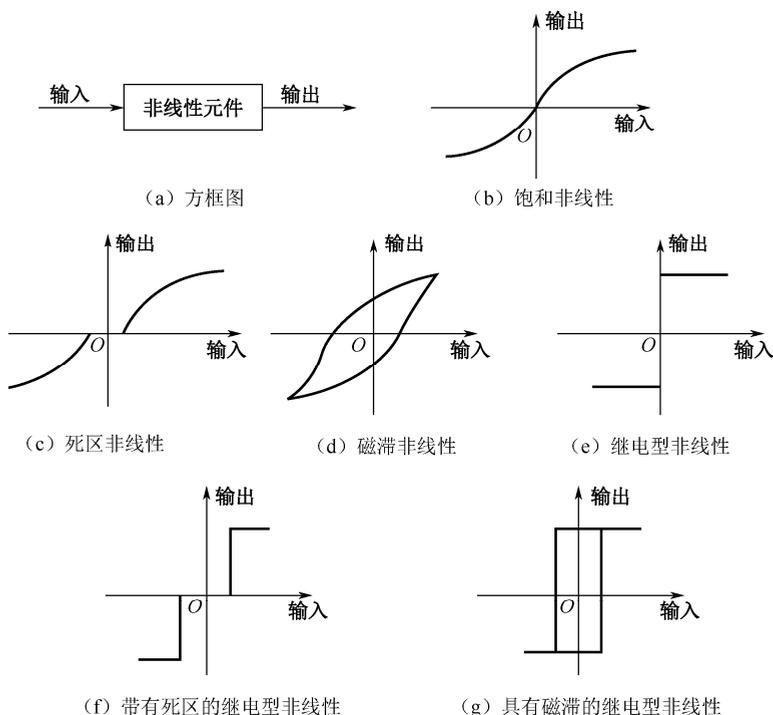


图 1-9 非线性元件静态特性

在控制过程中，控制系统的输入信号和输出被控制量都会受到现场条件下的多个干扰源的影响，而系统的反馈调节单元也只能针对主要的干扰源进行参数设置，因此输入和输出之间的关系特性会随着时间、地点、幅值、频率、温度、湿度、亮度、磁场等因素的变化发生不同程度的变化。严格来说，实际的控制系统都存在不同程度的非线性特性，而非线性控制系统无法利用叠加原理进行相关逻辑运算，更没有严格的规律来实现精准的控制过程。但大部分非线性控制系统在其变量的变化范围较小时，可对非线性特性进行“线性化”处理，这样就可以应用线性控制理论对其进行分析。但在某些控制系统中，输入和输出之间的关系必须符合某些非线性的特征形式，因此如果能正确使用非线性元件，有时也可以获得极佳的控制效果。

1.2.5 按控制系统信号的连续性分类

1. 连续控制系统

若控制系统的输入信号、输出被控制量（包括中间环节的输出量）的反馈信号及传递信号的过程都是基于时间的连续函数，则称这种系统为连续控制系统。连续控制系统的过程传递信号都是模拟量信号，因此又称为模拟量控制系统（相对数字量信号控制系统而言）。目前大部分控制系统都是连续控制系统。

2. 离散控制系统

若控制系统在一处或几处的过程传递信号是脉冲形式或数字形式的，并且过程传递信号在时间上是不连续的，则称这种控制系统为离散控制系统。离散控制系统可利用采样开关将连续信号转变成离散信号。利用如图 1-10 (a) 所示的采样开关 S 将连续信号 $x(t)$ 转变为离散信号 $x^*(t)$ ，连续信号 $x(t)$ 的时间响应曲线如图 1-10 (b) 所示，经采样后的离散信号 $x^*(t)$ 与时间的关系曲线如图 1-10 (c) 所示。

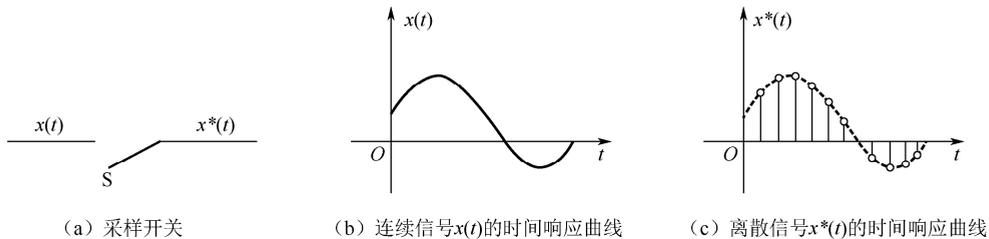


图 1-10 采样开关将连续信号转换成离散信号

1.2.6 其他分类方法

自动控制系统的分类方法还有很多。例如，按控制系统的输入信号和输出信号的数量，可分为单输入/单输出控制系统和多输入/多输出控制系统；按控制器采用常规的模拟量控制器还是采用计算机，可分为常规控制系统和计算机控制系统；按新型控制系统的理论分支结构形式，可分为最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等。

1.3 自动控制系统的基本性能要求

当自动控制系统的作为参考输入的给定值信号发生改变或系统受到各种干扰时，系统输出的被控制量就会发生变化，给定值也会偏离设定的要求值。由于系统具有自动控制功能，所以经过一定时间后，输出的被控制量可能又恢复至原来的稳态值，也可能产生一个新的给定值并在此给定值下保持稳定。这时的自动控制系统就从原来的平衡状态过渡到了一个新的平衡状态，被控制量变化的过程称为动态过程，被控制量处于平衡状态时的状态称为静态或稳态。

因此，对自动控制系统最基本的性能要求是输出的被控制量必须稳定，也就是要求控制系统的被控制量的稳态误差（偏差）为零或在允许的波动范围之内（具体稳态误差需要根据具体的生产过程的参数要求而定）。对于自动控制系统来说，一般要求稳态误差越小越好（稳态误差最好为零）。但在实际生产过程中，稳态误差往往不能完全为零，只能要求稳态误差越小越好，一般要求稳态误差为被控制量额定值的 2%~5%。

1.3.1 自动控制系统的动态过程

自动控制系统除了要求满足稳态性能，还应满足动态过程的性能要求，在具体介绍自动控制系统的动态过程要求之前，首先需要了解控制系统的动态过程（动态特性）有哪几种类型。一般的自动控制系统被控制量变化的动态过程有如下几种。

1. 单调过程

输出的被控制量 $y(t)$ 向目标值方向平稳接近, 缓慢地达到新的平衡状态 (新的稳态值), 其系统控制过程的偏差量是一个单方向的调整变化量, 即没有“正”“负”的变化, 如图 1-11 (a) 所示, 这种控制形式一般具有较长的动态调整时间 (达到新的平衡状态所需要的时间)。

2. 衰减振荡过程

输出的被控制量 $y(t)$ 的动态调整过程是一个振荡过程, 但是振荡的变化幅度不断地衰减, 在调整过程结束时, 被控制量会达到新的稳态值, 如图 1-11 (b) 所示。这种控制过程的最大幅度变化量称为超调量。

3. 等幅振荡过程

输出的被控制量 $y(t)$ 的动态调整过程是一个持续等幅振荡过程, 被控制量在要求的目标值附近进行有规律的上下波动, 始终不能达到新的稳态值, 如图 1-11 (c) 所示。如果这种控制过程振荡的幅度较大, 在生产过程是不允许的, 并会被认为是一种不稳定的控制过程; 如果振荡的幅度较小, 且生产过程允许, 也可以认为是一种稳定的控制过程。

4. 渐扩振荡过程

输出的被控制量 $y(t)$ 的动态调整过程是一个振荡的过程, 但是振荡的幅度越来越大, 甚至会大大超过被控制量参数值允许的误差范围, 如图 1-11 (d) 所示, 这是一种典型的不稳定控制过程, 一般在设计自动控制系统时要避免出现这种情况。

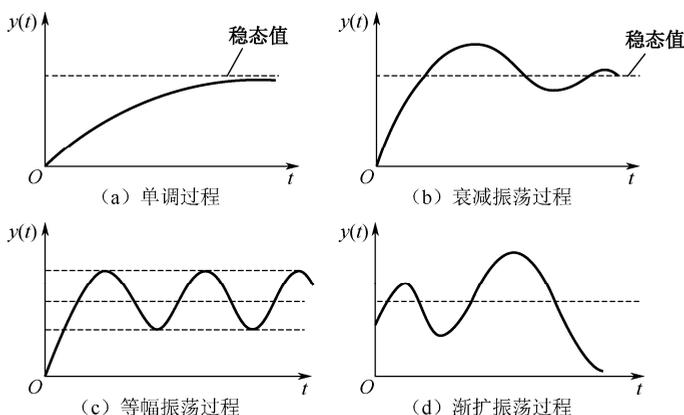


图 1-11 自动控制系统被控制量的动态特性

1.3.2 自动控制系统性能要求

如果一个自动控制系统设计合理, 其动态过程多为衰减振荡过程。为了满足生产过程的要求, 我们不仅希望控制系统的动态过程是稳定的, 还希望调整时间更短、振荡幅度更小、衰减得更快。

因此对于一个自动控制系统的性能要求可以概括为稳定性、快速性和准确性。

1. 稳定性（稳）

自动控制系统可以用于生产加工的最基本要求就是系统的调整过程必须是稳定的。如何判断系统是否稳定，最主要的就是检测和衡量控制系统的输出被控制量的参数变化情况，其最大误差值（超调量的绝对值）能否达到系统目标参数值的最低要求。

2. 快速性（快）

在系统稳定控制的前提下，调整过程进行得越快越好，但是这又与系统的稳定性相矛盾，如果系统要求的调整时间很短，那么动态误差可能会过大。合理的系统设计应该兼顾稳定性和快速性。

3. 准确性（准）

对于一个系统而言，动态误差和稳态误差越小越好，当这两个参数的准确性与快速性相矛盾时，应兼顾这两方面。

基于半导体集成电路技术的发展，智能仪表技术、变频器技术、单片机技术、PLC 技术、计算机技术等都得到了快速发展，其产品性能也得到了很大提升。因此过去的控制系统中的干扰问题、信号传递过程中的失真问题、控制调节过程中的滞后问题在目前的工业系统中都能得到很好地解决。



二维码 01：自动控制系统的发展



二维码 02：电气控制系统

思考题

1. 什么是自动控制系统？该系统由哪几部分组成？说明各部分在自动控制系统中的作用。
2. 开环控制系统与闭环控制系统有什么区别？
3. 分别从自动控制系统是否形成闭合回路、输入信号与反馈信号的数量与来源特点、给定值的变化特点、控制通道的线性特点、控制信号的连续性 5 个方面来描述系统。
4. 按自己对自动控制系统的理解对其进行特点分类。
5. 自动控制系统的性能要求体现在哪几个方面？
6. 简述自动控制系统的发展方向。
7. 电路中的开关触点状态形式有几种？
8. 接触器和继电器有什么区别？
9. 继电器实现的或门电路和与门电路各有什么特点？画出这两种电路形式。
10. 记忆电路具有什么功能？画出其电路形式。
11. 延时电路可以实现哪几种控制形式？画出其电路形式。
12. 按控制电路通用结构图说明系统主控单元的输入信号和输出信号有几种形式。

13. PLC 由哪几部分组成，其工作过程分为几个阶段？
14. 系统控制过程的描述形式一般有几种？
15. 是否可以说 PLC 是取代继电器—接触器的智能系统，而 PLC 的梯形图是由继电器—接触器的逻辑开关电路衍生的，继电器—接触器是硬件逻辑控制系统，PLC 是通过梯形图编程的软件逻辑控制系统，即逻辑开关装置？
16. 简述 PLC 组成的控制系统应包括哪几部分，以及各部分的作用。