

项目 1 单闭环直流调速系统的基本工作原理

学习目标

- 能正确判断单闭环直流调速系统的控制目的，正确找到其被控制对象及被控量。
- 能正确判断单闭环直流调速系统的控制装置，正确找到其控制量与执行机构。
- 能正确判断单闭环直流调速系统的控制方案，理解开环控制与闭环控制方案的特点，并正确找到闭环控制方案中的反馈装置及反馈量。
- 通过分析，能将给定的单闭环直流调速系统的原理图绘制成系统组成框图，并借助组成框图对控制系统的基本工作原理进行分析。

拓展能力

- 了解自动控制系统的基本概念及特点。
- 了解开环控制与闭环控制方案的特点。
- 理解自动控制系统各个组成部件图形化描述方法的基本原则，并掌握自动控制系统的图形化描述方法。
- 理解自动控制系统组成框图中各种信号流与环节功能化抽象的基本意义。
- 掌握利用自动控制系统的系统组成框图来定性分析自动控制系统基本工作原理的工作方法。

工作任务

- 将单闭环直流调速系统的各个物理部件按功能进行抽象，建立图形化的功能描述。
- 通过对单闭环直流调速系统的控制目的、控制装置、被控量与控制量之间关系的分析，正确找到各物理部件之间的信号传递关系，并建立单闭环直流调速系统的系统组成框图。
- 在正确建立单闭环直流调速系统组成框图的基础上，正确分析该自动控制系统的的基本工作原理。
- 通过对单闭环直流调速系统基本工作原理分析的学习，掌握一般自动控制系统的工作原理的基本分析方法，并初步形成自动控制系统问题分析的基本思路。

相 关 知 识

(一)自动控制系统

控制系统是一个非常普通的概念，它具有很多特性。如果一个系统是由人来完成对机



器的操作,例如开汽车,那么可称之为人工控制(manual control)。如果一个系统仅由机器来完成操作任务,例如智能空调器自动调节室内温度,那么就称之为自动控制(automatic control)。

图 1-1 所示是液位控制的示意图,图中两个控制系统的目的都是期望容器中的液体能停留在指定的高度上。不同的是:图 1-1(a)中,期望结果是由人进行操作完成的,是人工控制系统;而图 1-1(b)中,期望结果不需要人来干预就可以自动完成,所以是自动控制系统。

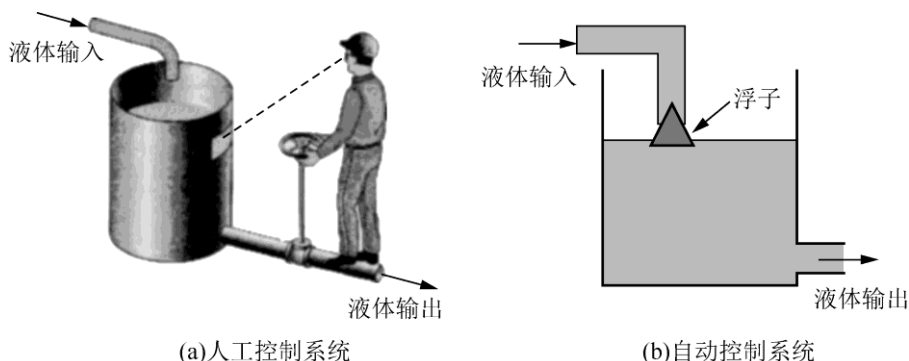


图 1-1 液位控制

下面再通过一个实例来进一步明确自动控制的基本概念。

【例 1-1】 热力系统的控制。在如图 1-2(a)所示的人工控制系统中,人是温度控制的主体,其目的是使热水保持在给定温度上。为此,可以考虑在系统的热水输出管道内安装一支温度计,并以此来测量热水的实际温度。操纵者(人)始终监视着温度计,当发现水温高于希望值时,就操作蒸汽阀门,减少输送到系统中的蒸汽量,以降低水温;当发现水温低于希望值时,就反向操纵蒸汽阀门,使进入系统的蒸汽量增大,以提高水温。

如果用自动控制器来取代操作者(人)的工作,那么,要完成人工控制所需要完成的任务,就必须在系统中增加一个能够模仿人、并能完成整个操作过程所需要的判断与操作装置,如图 1-2(b)所示。

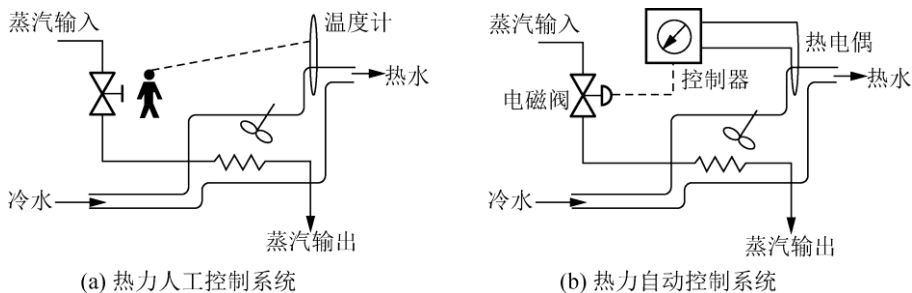


图 1-2 热力系统的温度控制

图 1-2(b)所示的自动控制系统的特点如下。

(1) 用热电偶和控制器代替操作者对温度计的观察与判断。热电偶将温度变换成电信号输给控制器,由控制器来判断温度是否与期望值(设定值)相同。

(2) 用电磁阀取代人对送气阀门的操作。控制器将判断的结果送给电磁阀,以决定是

关闭蒸汽阀门降低蒸汽输入，还是打开蒸汽阀门增加蒸汽输入。

在系统中增加了这些能模仿人进行判断和操作的控制设备后，这个热力系统就由人工控制变成了自动控制。因此，一般来说，所谓的自动控制就是指在没有人直接参与的情况下，利用可以模拟人进行判断与操作的控制装置，对生产过程、工艺参数、目标要求等进行自动调节，使之按照某种预定的方案达到希望效果或期望目标的过程。

通过对【例 1-1】的分析，可以总结出自动控制的一般规律。

(1) 所谓自动控制就是为了完成某种“目标”而采用的一整套的方法与步骤，而这些方法与步骤通常又包含了能够更好地实现这些“目标”的最佳策略(控制方案)。

(2) 所谓控制往往是对一个动态(运动)过程所实施的动态监测与动态调节过程。一个过程如果没有变化(运动)也就无所谓控制。

因此，简单来说，所谓自动控制系统是指能按照所设定的控制策略(或控制方案)，自动完成某项工作任务，并达到预定目标的机械和电气系统。

(二)自动控制系统的控制方案——开环与闭环(反馈)控制

1. 开环与闭环控制系统

【例 1-2】 太阳能高效抽水系统。

图 1-3 所示的太阳能高效抽水系统的工作原理并不复杂，其目的是：白天太阳能收集器收集太阳能并通过太阳能—电能转换机组产生电能，以驱动电动机将地下水抽到蓄水池中储存起来。显而易见，这个控制过程只考虑了太阳能转换为电能并带动水泵抽水的过程，却并没有考虑蓄水池的蓄水情况。因此，在天气持续晴好而无须每天灌溉的情况下，势必会存在水资源的浪费问题。如果把供给水泵的电流作为该系统的输入，而蓄水情况作为输出的话，则电流供给水泵抽水(输入)与其目标——蓄水情况(输出)之间没有关联。这样的自动控制过程就是开环控制，而实施这种控制方案的系统称之为开环控制系统。

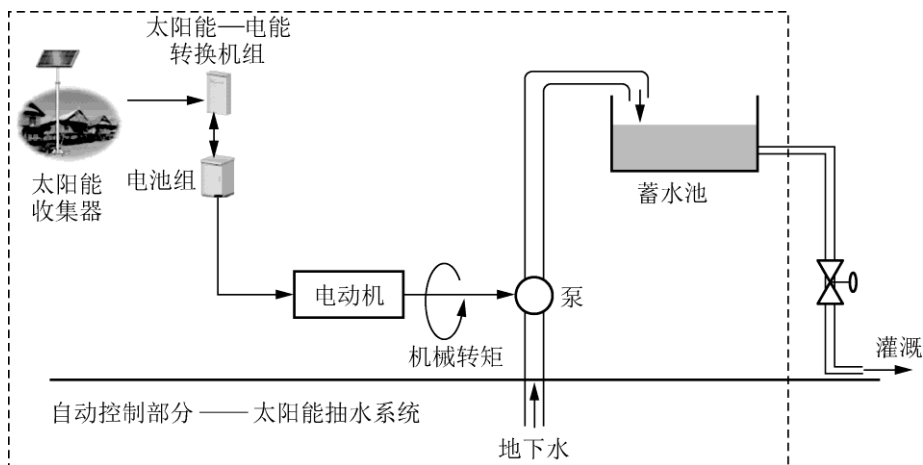


图 1-3 太阳能高效抽水系统——开环控制

分析【例 1-2】系统中存在的问题可知，造成这一问题的原因在于没有对蓄水池的蓄水情况进行监控。为了解决【例 1-2】系统中的问题，可以考虑给蓄水池增加一个可以用于监

视蓄水池水位变化的测量转换装置。它负责将蓄水池里的水位高低变换成电信号送至控制装置,控制装置将该信号与给定的水位高度信号进行比较,然后将比较结果送给执行机构,由执行机构负责按控制装置送来的比较结果切断或连通太阳能电池与电动机之间的电力输送,以完成根据蓄水池水位情况来确定是抽水还是不抽水的节水方案。上述系统如图 1-4 所示。

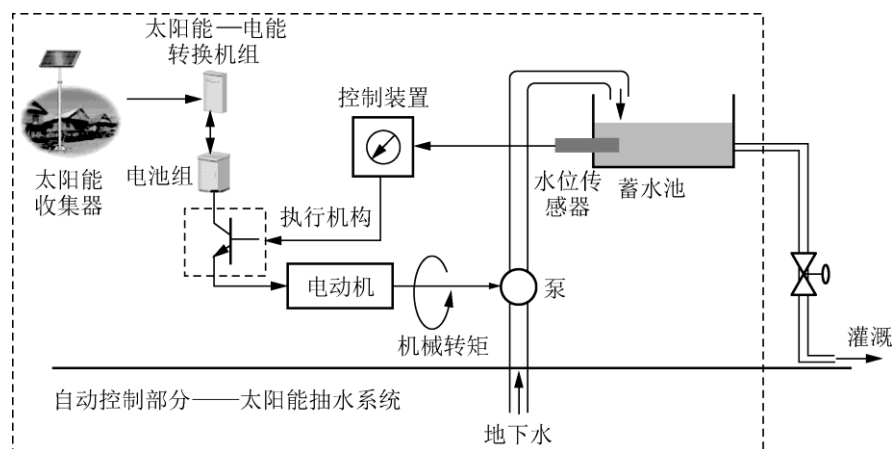


图 1-4 太阳能高效抽水系统——闭环控制

与图 1-3 所示的系统相比,图 1-4 所示的系统中添加了水位传感器、控制装置和执行机构(驱动装置)。这些装置的作用如下。

(1) 水位传感器。负责检测蓄水池中水位的高低,并将检测到的结果变成电信号送给控制装置。

(2) 控制装置。负责接收由水位传感器传送过来的水位检测信号,并将该信号与设定的水位信号进行比较,然后将比较结果作为控制信号送给执行机构。

(3) 执行机构。执行机构也叫驱动装置,它负责接收控制器送来的控制信号,并按照该控制信号切断或连通电池组与电动机之间的电力供应,确定电动机的运行状态。

在图 1-4 所示系统的控制方案中,电动机旋转与停转(抽水与不抽水)的运行状态完全抛开了天气因素,而只与蓄水池的蓄水情况有关。系统通过水位传感器将输出(蓄水)情况反馈给输入(设定水位高度)端,并通过比较结果来控制电动机动作。因此,这种控制方案被称之为闭环控制,而实施这种控制方案的系统也就被称为闭环控制系统。

很明显,闭环控制方案虽然增加了系统设备的复杂程度,却有效地解决了水资源的浪费问题。相比之下,闭环控制系统是具有一定“智慧与判断能力”的自动控制系统。

通过【例 1-2】,可给出以下定义:若控制系统没有使用系统输出的测量信号,则这样的系统称为开环控制系统(open-loop control system);若测量了系统的输出信号并将其应用于控制装置的控制信号中,则这样的系统称为闭环控制系统(closed-loop control system)。

闭环控制系统往往又称为反馈控制系统(feedback control system)。在闭环控制系统中,系统需要测量输出状态,然后将此状态变换成某种信号送回给控制装置(或设备)与输入信号进行比较,并将比较的结果作为控制信号来控制相应的执行机构动作。这种将输出信号反馈送回输入端,进而产生控制信号(偏差信号)的过程称为反馈;利用其产生的控制信号(偏差

信号)实现控制被控制目标(被控对象)的设备称为反馈系统;而其中实现这一控制目标的装置,如检测装置、传感装置等,则被统称为反馈装置。因此,一个自动控制系统是不是反馈(闭环)系统,只需要看这个系统的输入与输出之间是否存在反馈装置。若存在,则自动控制系统就是闭环控制系统。本书所介绍的有关自动控制系统的內容都是围绕反馈(闭环)控制系统展开的,所提到的自动控制系统在无特别说明的情况下,都是指反馈控制系统。

2. 反馈(闭环)控制系统中的反馈控制类型

反馈的概念在模拟电子电路中有所涉及,即反馈放大器有正反馈和负反馈之分。而在采用了反馈(闭环)控制方案的自动控制系统中,类似的问题同样存在,一般可定义如下两个概念。

(1) 正反馈。反馈环节测量并返回了系统的输出信号,并以“加”的形式应用于控制器控制信号的计算中。其特点表现为,输入量与反馈量的作用相互增强,从而导致控制信号使输出量偏离于期望的结果。

(2) 负反馈。反馈环节测量并返回了系统的输出信号,并以“减”的形式应用于控制器控制信号的计算中。其特点表现为,输入量与反馈量的作用相互削弱,从而导致控制信号使输出量逼近于期望的结果。

【例 1-3】 用于孵化鸡蛋的孵卵器(Drebbel, 1620 年设计)。

图 1-5 所示为 1620 年由 Cornelis Drebbel 设计的一种能自动控制加热温度的孵卵器。火炉有一个箱子,用于围控火苗,箱子顶部设有通气管并安装了一个烟道挡板。火箱里面是双层隔板的孵卵箱,隔板间充满了水以均衡整个孵化室的受热。温度传感器是一个玻璃容器,里面装的是酒精和水银,安装在孵卵器周围的水套中。当火加热箱子和水的时候,由于酒精具有正温度效应,所以受热后酒精体积膨胀,将提升杆向上抬起,从而降低通气管上的烟道挡板,使火势减小,温度降低。如果孵卵箱过冷,则酒精体积收缩,提升杆下降将烟道挡板打开,火势变旺,以提供更多的热量。

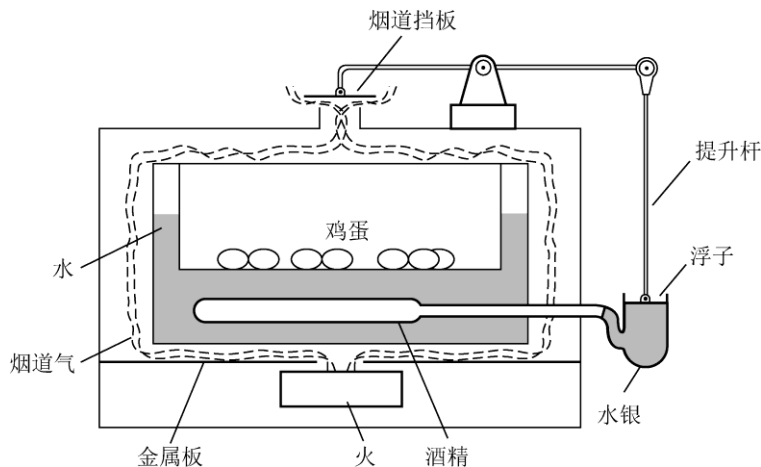
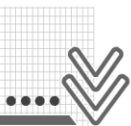


图 1-5 用于孵化鸡蛋的孵卵器

分析这个控制过程,不难发现该孵化设备的控制特点是:输入量(这里是火势的大小)与反馈量(温度)的作用是相互抵消的,其结果是当温度高过期望值时,输出量(火势)减小,



温度降低。

在本例中,如果不改变孵化设备的装置结构,只是将温度传感器中具有正温度效应的酒精和水银换成具有负温度效应的某种液体。那么其控制过程就变成了:当温度上升时,具有负温度效应的液体体积收缩,提升杆下降,从而打开烟道挡板,使火势变旺,温度进一步升高;而当温度过低时,具有负温度效应的液体体积膨胀,提升杆向上抬起,降低通气道上的烟道挡板,使火势变小,温度又进一步降低。这样的改变造成的结果是:输入量(这里是火势的大小)与反馈量(温度)的作用是相互加强的,最终导致当温度高过期望值时,输出量(火势)不减反增,使温度进一步上升。

比较【例 1-3】中的两种反馈方式,可以总结出正反馈与负反馈控制的性能特点如下。

(1) 正反馈。反馈信号不是制约输入信号的活动,而是促进与加强输入信号的活动。正反馈的意义在于使控制目标处在不断加强的控制过程中。

(2) 负反馈。反馈信号与输入信号的作用相反,因而它可以纠正控制信号所出现的偏差效应。负反馈调节的主要意义在于维持控制目标的实现。

通常,如果输入量与反馈量不是相互抵消,而是相互加强的,那么对于自动控制系统来说,则不可能实现稳定的期望(输出)结果。所以,只有输入量与反馈量的作用相反的负反馈才能使自动控制系统按照预定方案达到人们所期望的控制目标,而这正是负反馈(闭环)控制系统的控制精髓所在。在不特别说明的情况下,自动控制系统一般是指具有负反馈控制方案的闭环控制系统。

(三)自动控制系统的组成框图

1. 自动控制系统组成框图的建立

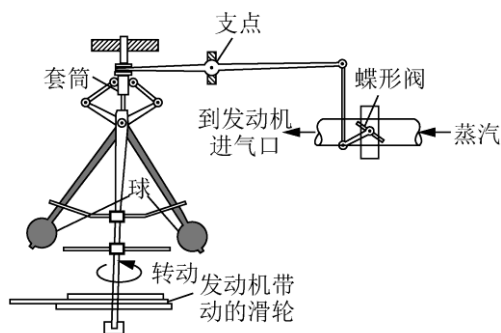
在实践中,要对某个自动控制系统进行分析与调试,就必须了解这个自动控制系统是如何工作的,也就是要了解这个自动控制系统大致的工作原理。而要完成这个任务,了解自动控制系统由哪些相互关联的部件或装置组成就成为对自动控制系统进行分析的第一个步骤。由于早期自动控制系统的组成部件结构简单,所以对它的分析总是可以借助于系统本身的原理示意图来进行。但是随着生产技术和自动控制技术的不断发展,现代自动控制系统的内部关联部件及组成结构也变得愈来愈复杂,单凭原理示意图(见图 1-6)已不足以帮助人们分析并设计出一个现代的自动控制系统。因此,建立一种有助于了解自动控制系统工作原理的图形化模式——系统组成框图,就成为应用自动控制理论分析实际自动控制系统的重要一步。

要画出一个实际自动控制系统的系统组成框图,就必须明确下面三个问题。

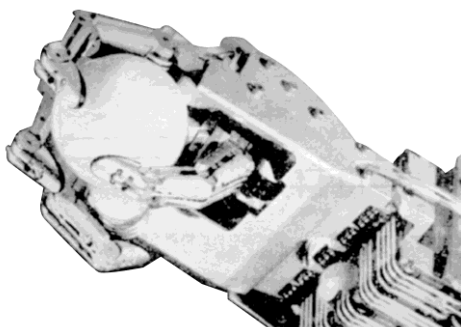
(1) 控制的目的是什么?对这个问题的回答,有助于分析者找到被控制对象及被控量(输出量)。

(2) 控制的装置是什么?对这个问题的回答,有助于分析者找到控制量及执行控制过程的执行元件或驱动装置。

(3) 被控制量与控制量之间是否存在关联?对这个问题的回答,有助于分析者找到反馈装置及反馈量。



(a) 飞球调速系统原理示意图(1769年, 瓦特)



(b) 四指机械手(2001年, 美国)

图 1-6 不同时期的自动控制系统的原理示意

在正确回答以上问题, 并得到系统组成框图的基础上, 可以进一步分析系统输入量与反馈量之间的比较关系, 从而确定其反馈类型。

【例 1-4】 建立如图 1-5 所示孵卵器(Drebbel)的系统组成框图, 并分析其工作原理。

解: (1) 控制的目的: 保持孵卵器温度恒定。由此可以找到以下两个量。

被控制对象(物理实体): 孵卵器。

被控量(输出物理实量): 孵卵器温度。

(2) 控制的装置: 烟道挡板。由此可以找到以下两个量。

控制量(输入物理实量): 火。

执行机构: 水银、浮子及提升杆。

(3) 被控制量与控制量之间是否存在关联: 存在。

反馈环节及其控制过程: 酒精检测温度 → 浮子及提升杆动作 → 改变烟道挡板的高度。

反馈量: 温度变化。

因此, 可得到孵卵器系统的组成框图如图 1-7 所示。图中, “○”表示对输入量与反馈量进行比较的控制器件。

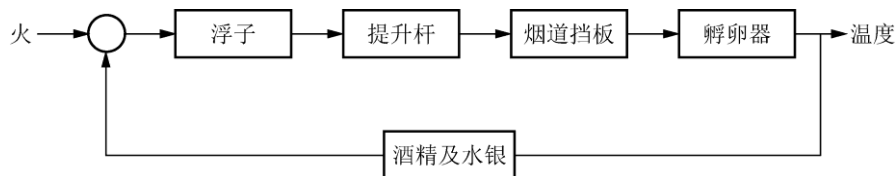


图 1-7 孵卵器的基本组成框图

正如【例 1-3】所分析的那样, 要想让孵卵器达到自动控制的目的, 即保持孵化箱内的温度恒定, 必须采用负反馈。于是, 在用“○”这个符号表示实现输入量与反馈量进行比较、并产生控制信号的控制装置的同时, 对于输入这个控制装置的输入量, 一般可用“+”来表示它的信号极性。由于本例中的反馈类型是负反馈, 所以反馈量就用“-”来表示其信号类型。这样一个完整的系统组成框图就如图 1-8 所示。

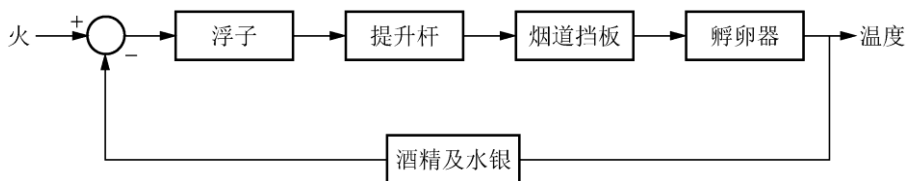
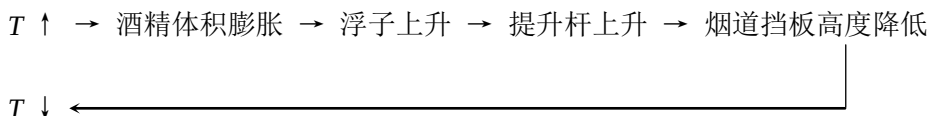


图 1-8 孵卵器完整的系统组成框图

下面分析其工作原理。

当假定孵卵器由于某种原因使箱体温度增加时，系统有如下的调节过程(工作原理)存在。



【例 1-5】建立图 1-9 所示的电炉箱自动恒温系统的系统组成框图，并分析其工作原理。

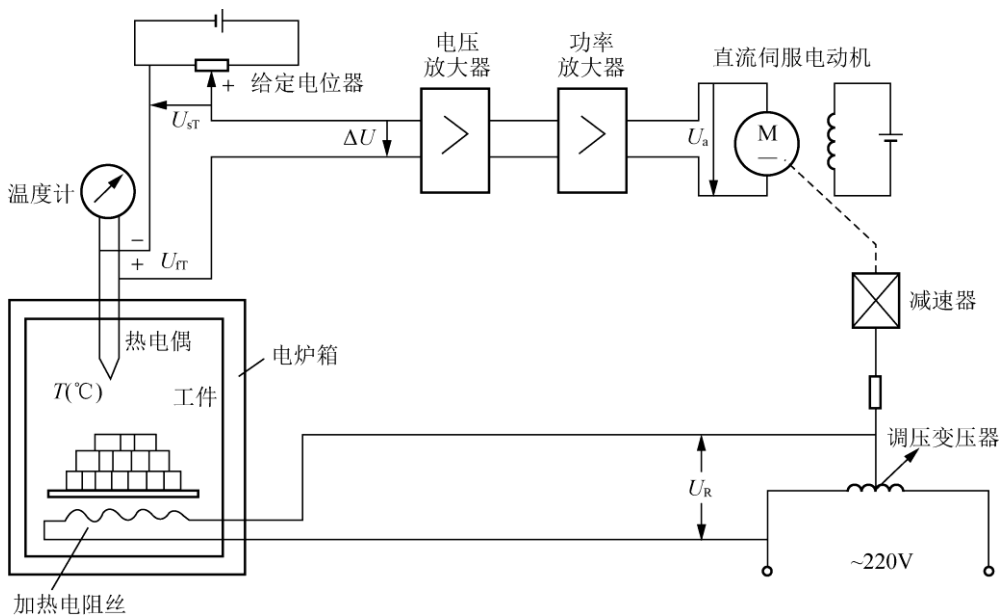


图 1-9 电炉箱自动恒温系统的原理示意

解：(1) 控制的目：保持电炉温度恒定。由此可以找到以下两个量。

被控制对象(物理实体)：电炉箱。

被控量(输出物理实量)：电炉箱温度。

(2) 控制的装置：加热电阻丝。由此可以找到如下两个量。

控制量(输入物理实量)：给定电压 U_{sT} 。

执行机构：调压变压器、减速器和直流伺服电动机。

(3) 被控制量与控制量之间是否存在关联：存在。

反馈环节及其控制过程：热电偶 → 给定电压 → 改变电动机转动方向 → 调节电阻丝两端的电压大小。

反馈量：温度变化 U_{fr} 。

因此，得到电炉箱自动恒温系统的系统组成框图如图 1-10 所示。

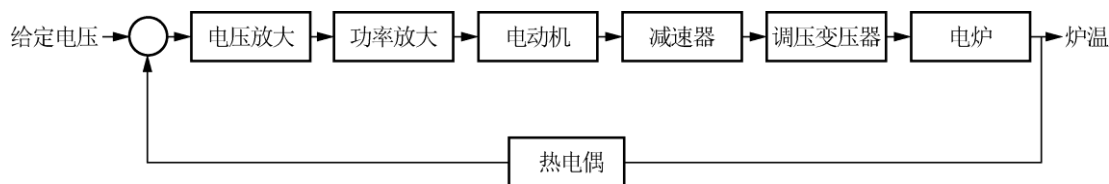


图 1-10 电炉箱自动恒温系统的基本组成框图

接下来可以进一步分析输入量与反馈量的比较结果。

如果炉子的温度事先已由给定电压 U_{st} 设定好了，那么当某种扰动出现(如放入工件时打开炉盖等)时，会使炉子的温度下降，这时需要增加电压使电阻丝迅速加温；反之，如果电阻丝加热到超出设定温度，则需要减小电压，使电阻丝少发热或不发热。由此可知：电炉箱自动恒温系统采用的应该是负反馈，其完整的系统框图如图 1-11 所示。

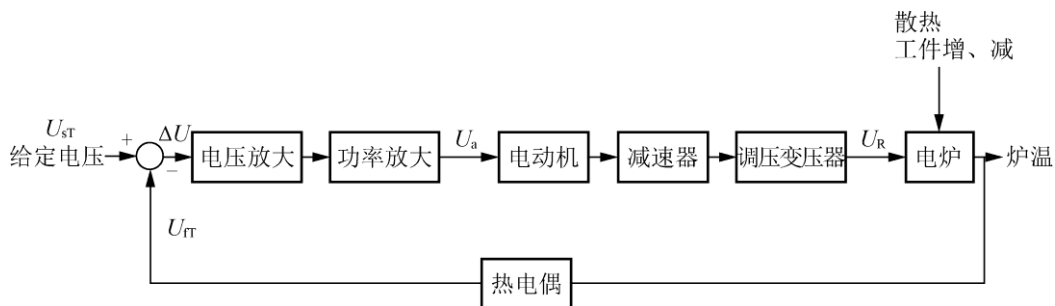


图 1-11 电炉箱自动恒温系统的完整系统组成框图

下面分析其工作原理。

当假定电炉箱温度由于某种原因增加时，系统有如下的调节过程(工作原理)存在。

$T \uparrow \rightarrow U_{\text{fr}} \uparrow \rightarrow \Delta U = U_{\text{st}} - U_{\text{fr}} \downarrow \rightarrow$ 电动机经减速器带动调压器运行使 $U_R \downarrow$

$T \downarrow$

总结【例 1-5】，可以得到以下结论。

(1) 一般情况下，自动控制系统总是用“+”号来表示所给出的输入量，而对于反馈量，可根据其控制目的及控制作用，分别用“+”号或者“-”号来表示其反馈性质。当反馈量造成的控制作用加剧了输出量变化趋势时，用“+”号表示其反馈性质为正反馈；当反馈量造成控制作用减弱并稳定了输出量的变化趋势时，用“-”号表示其反馈性质为负反馈。一般来说，有效的自动控制系统往往是负反馈系统。

(2) 为了表明自动控制系统的组成以及信号的传递情况，通常把系统各个组成部件的



作用,用“方框+装置的功能特征说明”的方式进行表示。除此之外,还用箭头标明各关联装置之间作用量(能量或信号)的传递情况。而这样做的好处在于,在对实际问题进行分析时,可以避免画复杂的系统示意图,同时也可以把系统主要装置之间的相互作用关系(功能作用),能量或者信号的传递途径简单而明了地表达出来,从而为下一步系统的定量分析提供一个简单而明确的图形化模型(系统框图)做准备。

2. 自动控制系统组成框图中的信号与环节

对于自动控制系统而言,无论采用哪种控制方式,从完成自动控制目标这一职能来看,任何一个自动控制系统都必然包含被控对象和执行机构。与开环控制相比,闭环控制系统因为要测量被控制对象的控制效果(输出量),并将结果送回控制器(比较环节)与控制器中的期望值(输入量)进行比较,然后再将比较结果作为控制量(偏差信号)来驱动执行机构,因此,闭环控制系统从结构上来说要比开环控制系统复杂。

组成自动控制系统的某些器件或设备,如用于检测和转换的反馈装置、用于比较和控制的控制器、用于控制信号输入的给定装置等,都是实现自动控制过程的关键器件和设备。在不同的应用场合,它们的材料结构、制造原型或尺寸大小可能完全不同,但它们在控制系统中所实现的控制任务和控制功能有可能完全一致。因此,从实现控制功能的角度来看,由于任何一个自动控制系统的控制过程基本类似,所以在对任何一个实际的自动控制系统进行分析时,通常可以忽略这些实际器件或设备的外部特征(如结构、类型等),而按其所完成的功能进行抽象,即在对系统进行分析时,只考虑它所实现的功能行为,而不考虑其装置结构。经过这样的抽象,一个实际的自动控制系统就可以简化成由几种典型“环节”或“元件”所组成的系统模型。

图 1-12 表示了一个典型的反馈控制系统的基本组成模型。一般自动控制系统组成模型中大致包括两类元素,即信号流与环节(或元件)。

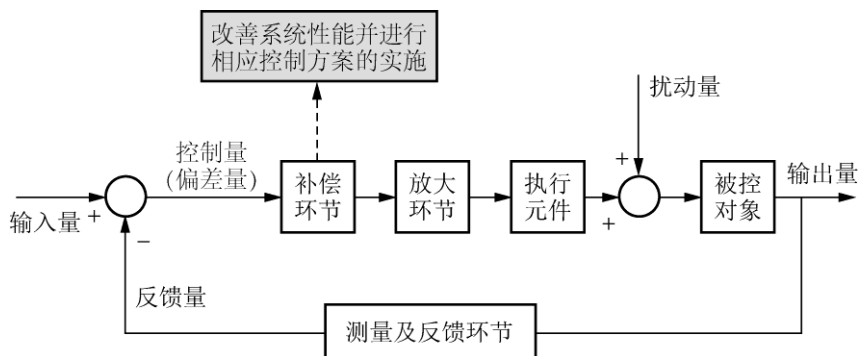


图 1-12 自动控制系统的典型组成框图

1) 信号流

信号流指一个自动控制系统中所有相互作用的信号的组合。一个给定的自动控制系统中一般包括以下 6 个信号量。

(1) 输入量(input variable)。输入量是指让自动控制系统按期望要求工作时的信号输入值,该物理量又常被称为给定量或参考量。

(2) 输出量(output variable)。输出量是指自动控制系统工作或动作的实际情况。它可以

是任何被控制对象的实际输出值,如炉温温度、电动机转速、水位高度或机械加工设备的加工轨迹等。该物理量又常被称为被控量。

(3) 反馈量(feedback variable)。反馈量是输出量的一部分或全部。在电气控制系统中,非电量一般要转换成电量。

(4) 控制量(control variable)。控制量也称为偏差量,它是由输入量与反馈量比较得来的。这是一个非常重要的物理量,自动控制系统就是利用这个物理量,以闭环方式来控制被控对象的。

(5) 扰动量(disturbance variable)。扰动量是指引起输出量与期望值不一致的各种变化因素。它可以来自自动控制系统内部,如电子设备的零点漂移、温度导致的器件参数变化等;也可以来自自动控制系统外部,如电网电压变化,负载、阻力及环境温度等变化。

(6) 中间变量(middle variable)。中间变量是指自动控制系统各关联部件或装置之间相互作用的信号。其基本原则是:前一装置的输出量是后一装置的输入量。在系统模型中,中间变量的物理性质不一定是相同的,如电动机,它的输入量是电量,而输出量是机械转矩。

在自动控制系统的组成框图中,一般用带有箭头的有向线段来表示信号的传递方向或信号的流向。沿箭头方向从输入端(左侧)到达输出端(右侧)的传输通路称为自动控制系统的前向通路,输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称为反馈通路。

2) 环节或元件

环节或元件是指组成某一自动控制系统的各装置或设备的理想模型。它只反映了这些组成装置或设备所要完成的功能或任务,而与这些装置或设备的物理结构无关。一个给定的自动控制系统一般可以分成以下几个环节或元件。

(1) 给定元件(Command Element)。其任务是给出与期望的被控量相对应的系统输入量(也叫给定量或参考量)。

(2) 测量及反馈环节。其任务是测量被控量(输出量),并将其反馈到输入端。在电控系统中,如果这个被测量的物理量是非电量,一般要转换为电量。

例如,测速发电机可用于检测电动机轴的速度,并将其转换为电压信号;湿敏传感器可利用“湿—电”效应来检测湿度,并将其转换成电信号;旋转变压器、自整角机等可以用于检测角度,并将其转换为电压信号;热电偶可用于检测温度,并将其转换为电压等。

(3) 比较环节。其任务是测量元件检测到的反馈量与给定元件给出的输入量进行求和运算,然后将其结果作为控制量(偏差量)输出,用以控制执行元件的运作。图中用“○”号代表比较元件(见图 1-12),它表示了反馈量与输入量所进行的比较运算。在一般的分析过程中,通常约定给定输入量为“+”,因此,若反馈量用“-”号,则代表了负反馈;若反馈量用“+”号,则代表正反馈。常用的比较元件有差动放大器(运算放大器)、机械差动装置和电桥等。

(4) 补偿环节。补偿环节也称校正元件或控制器。其作用是对系统实施相应的控制策略,以改善系统的性能,使自动控制系统能更好地按要求达到期望的控制目标。这个环节是结构或参数都便于调整的装置或部件,常用串联方式或反馈方式(局部反馈)连接在系统中。最简单的补偿环节可以由电阻、电容或放大器组成的无源或有源网络,复杂的则可



用计算机芯片来完成。

(5) 放大环节。放大环节是将比较元件输出的控制量进行放大,以推动执行元件去控制被控对象。如电压偏差信号,可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器或功率放大器加以放大。

(6) 执行元件。执行元件直接推动被控对象,使其按控制量的要求作相应的变化与动作。用来作为执行元件的设备有阀门、电动机等。

(7) 被控对象。被控对象是由一些机器零件有机地组合在一起的某种设备,其作用是完成某个预先设定的动作。一般来说,任何被控物体(如加热炉、电动机转动、水箱、化学反应器或宇宙飞船等)都可称为被控对象。

【例 1-6】 比较环节的物理器件分析——加法器。

解: 图 1-13 所示是一个可以实现给定信号(输入量)与反馈信号(反馈量)进行比较的物理器件,它由运算放大器构成。

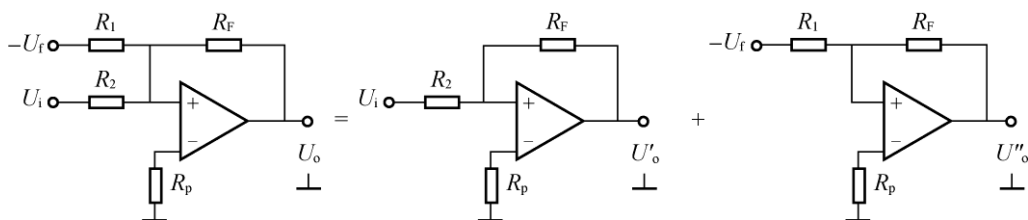


图 1-13 比较控制器

由叠加定理可知,当线性放大器输入端有两个信号源共同作用时,其输出为这两个信号源单独作用时所产生的输出的叠加。

当 U_i 单独作用时,此电路进行反相比例运算。由反相比例运算公式可得

$$U'_o = -\frac{R_F}{R_2} \times U_i$$

当 U_f 单独作用时,此电路为反相比例运算。再由反相比例运算公式得

$$U''_o = -\frac{R_F}{R_1} \times (-U_f) = \frac{R_F}{R_1} \times U_f$$

则当 U_i 和 U_f 同作用时,此电路的输出电压为

$$U_o = -\frac{R_F}{R_2} \times U_i + \frac{R_F}{R_1} \times U_f = -\left(\frac{R_F}{R_2} \times U_i - \frac{R_F}{R_1} \times U_f \right)$$

特别地,当 $R_1 = R_2$ 时,有

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} \times (U_i - U_f) = -\frac{R_F}{R_2} \times (U_i - U_f)$$

即实现了输入信号与反馈信号的比较输出。

任务 单闭环直流调速系统基本工作原理分析

任务引导

所谓调速就是指通过某种方法来调节(改变)电动机的转速。如果这种调节电动机的方法是通过人工完成的,那么这种系统就是在本章相关知识(一)中讨论过的人工控制系统,可称之为人工调速系统;如果这种调节电动机转速的方法是通过某种装置自动完成的,那么它就是一个自动控制系统,称之为自动调速系统。由于现实生产生活中所用到的调速系统都是自动控制的,所以,以后讨论的调速系统都指的是自动调速系统。

调速系统可以按照电动机的类型来进行分类。即如果调节的是直流电动机的转速,则可称这类调速系统为直流调速系统;如果调节的是交流电动机的转速,则可称之为交流调速系统。

在电动机原理的相关课程中,已知直流电动机的转速公式是

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

式中: n ——电动机转速;

U_a ——电枢两端的供电电压;

I_a ——流过电枢的电流;

R_a ——电枢回路的总电阻;

Φ ——直流电动机的励磁磁通;

C_e ——由电动机结构决定的电势系数。

由上式可见,调节直流电动机的方法有三种,即改变电枢回路的总电阻 R_a 、减弱电动机磁通 Φ 和调节电枢两端的供电电压 U_a 。

对于要求调速范围较大的无级调速的系统来说,以调节电枢供电电压的调速方案最好。减弱磁通虽然也可以平滑调速,但其调速范围有限,往往只是配合调压方案,在电动机额定转速以上作小范围的升速调节。

任务实施

(一)任务目标

学习将一个自动控制系统的原理示意图按其功能行为变换成系统组成框图,并根据该组成框图分析系统的工作原理。

(二)任务内容

(1) 将单闭环直流调速系统的原理框图转换为系统组成框图,并分析该自动控制系统的的工作原理。

(2) 将系统组成框图中的放大器(参见【例 1-6】)与实际运算放大电路(调节器)进行比较,并给出比例放大器的接线图。

(三)知识点

- (1) 开环闭环控制方案。
- (2) 反馈类型。
- (3) 组成框图。
- (4) 信号与环节。

(四)任务实施步骤

1. 单闭环直流调速系统的组成框图及工作原理分析

任何一个自动控制系统的调试都是先从弄清这个自动控制系统由哪些器件或设备组成,其大致的工作原理及整个系统的工作过程如何开始的。对自动控制系统基本组成及工作原理的分析称为定性分析。

下面就结合本章介绍的相关知识,对一个实际的自动控制系统——单闭环直流调速系统进行工作原理上的定性分析。单闭环直流调速系统的原理示意图如图 1-14 所示。

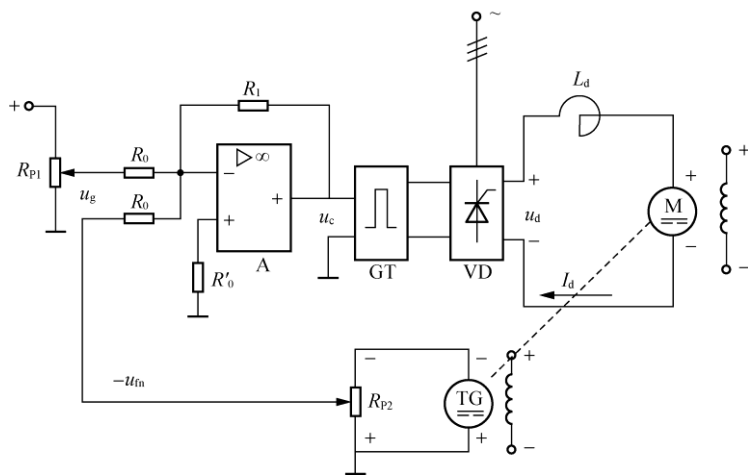


图 1-14 单闭环直流调速系统(M-V 系统)

对于图 1-14 所给出的单闭环直流调速系统的原理示意图,首先应建立它的系统组成框图,这样做的好处除了有助于分析该系统大致的工作原理外,更重要的是可以根据系统组成结构框图来建立下一步(定量)分析所需的数学模型及系统框图。因此,对给出的单闭环直流调速系统进行如下考虑。

- (1) 控制的目的:保持直流电动机的转速恒定。由此可以找到以下两个量。
被控制对象(物理实体):他励直流电动机;
被控量(输出物理实量):直流电动机的转速。
- (2) 控制的装置:晶闸管整流装置(触发、整流)。由此可以找到以下两个量。
控制量:他励直流电动机两端的整流输出电压(电枢电压) u_d ;

执行机构：触发装置 → 整流装置。

- (3) 被控制量与控制量之间是否存在关联：存在。

反馈环节及其控制过程：测速发电机检测转速 → 与给定转速的输入电压进行比较 → 改变触发装置的触发电压 u_c 及晶闸管的导通角 → 改变整流装置的输出电压 u_d 。

反馈量：直流电动机转速 u_m 。

因此，单闭环直流调速系统的组成框图如图 1-15 所示。

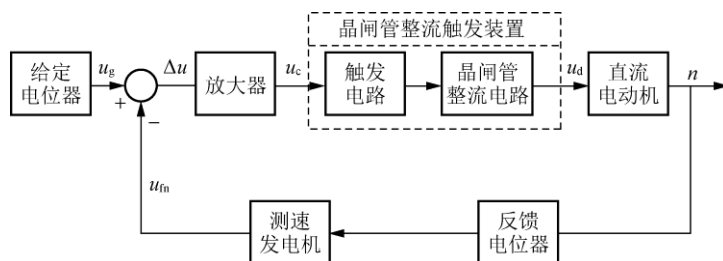
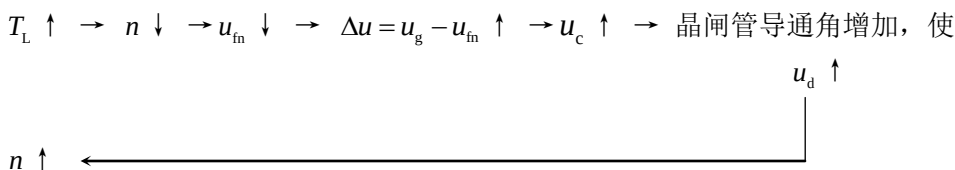


图 1-15 单闭环直流调速系统的组成框图

现在假定电动机转速由于负载转矩 T_L 增加而出现转速 n 下降，则系统有如下的调节过程(工作原理)存在。



2. 系统组成框图中放大器与实际调节电路(调节器)的比较

图 1-16 为实训设备中实际的放大电路，虚线为待接的电阻及电容元件。与【例 1-6】中的加法器进行比较，分析当虚线处只接入电阻 R_1 时，该实际电路所实现的功能；同时查阅相关书籍或资料，分析该电路中 C_0 、 VD_1 、 VD_2 、调零电位器以及限幅电路的作用。

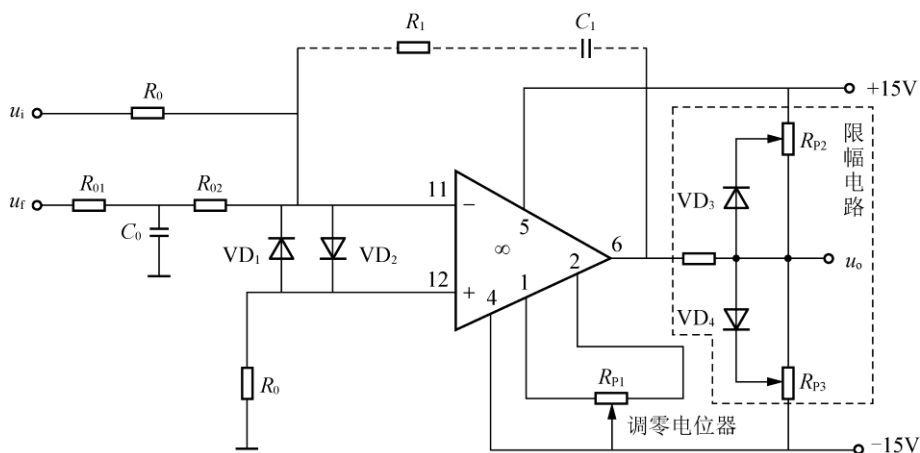
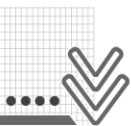


图 1-16 单闭环直流调速系统的调节器电路



(五)任务完成报告

将系统组成框图中的功能框与实际的单闭环直流调速系统进行比较,通过查找相应的资料,分析各部件的实际工作情况。

拓展知识

(一)自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度来进行分类。

1. 按输入量变化的规律分类

1) 恒值控制系统

恒值控制系统(fixed set-point control system)的特点是:控制系统的输入量(给定)是恒量,并且要求系统的输出量相应地保持恒定。恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统。

图 1-4 所示的太阳能抽水系统及图 1-5 和图 1-9 所示的温度控制系统都属于恒值控制系统,除此之外,常见的恒值控制系统还有调速系统,如本次任务中的单闭环直流调速系统。

2) 伺服控制系统(随动系统)

伺服控制系统(servo control system)也叫随动系统,它的特点是:输入量是变化的(有时是随机的),并且要求系统的输出量能随输入量的变化而做出相应的变化。

随动系统在工业和国防上有着极为广泛的应用,如船闸牵曳系统、机床刀架系统、雷达导引系统及机器人控制系统等。

3) 过程控制系统

过程控制系统(process control system)的特点是:输入量通常是随机变化的、不确定的,但要求系统的输出量在整个生产过程中保持恒值或按一定的程序变化。

图 1-17 所示的蒸汽发电机系统就是由计算机控制的过程控制系统。其输入量,即水、燃料和空气在输入过程中都有可能发生变化,但其实际的发电量则要求恒定,不能随输入量的变化而变化。

2. 按系统中的参数对时间的变化规律分类

1) 连续控制系统

连续控制系统(continuous control system)的特点是:各元件的输入量与输出量都是连续量或模拟量,所以它又称为模拟控制系统(analogue control system)。连续控制系统的运动规律通常可以用微分方程来进行描述。图 1-18 所示即为一个用模拟量来进行控制的双闭环直流调速系统。

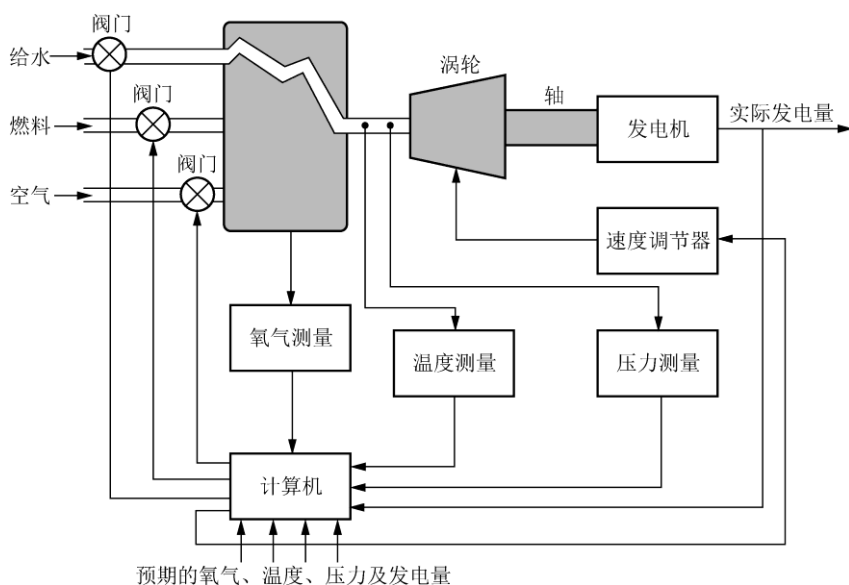


图 1-17 蒸汽发电机的协调控制系统

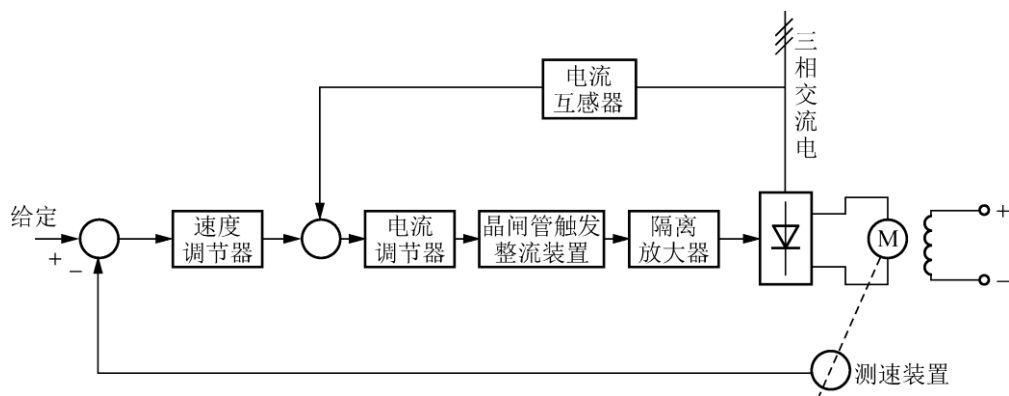


图 1-18 双闭环直流调速系统——连续控制系统

2) 离散控制系统

离散控制系统(discrete control system)又称采样数据控制系统(sampled data control system)。它的特点是：系统中的信号可能是脉冲序列、采样数据量、数字量等。通常采用数字计算机控制的系统都是离散控制系统。图 1-19 所示的是一个用计算机来进行控制的双闭环直流调速系统，其模拟反馈信号由 A/D 转换器转换成数字信号进入计算机，由计算机完成速度及电流的控制信号运算，并通过驱动接口(D/A)转换成模拟信号来改变电动机两端的电压大小，以使电动机转速恒定。

3. 按输出量和输入量间的关系分类

1) 线性控制系统

线性控制系统(linear control system)的特点是：系统全部由线性元件组成，它的输出量与输入量间的关系可用线性微分方程来进行描述。线性控制系统最重要的特性是可以应用

叠加原理。叠加原理是指,两个不同的作用量同时作用于系统时的响应,等于两个作用量单独作用时其输出响应的叠加。

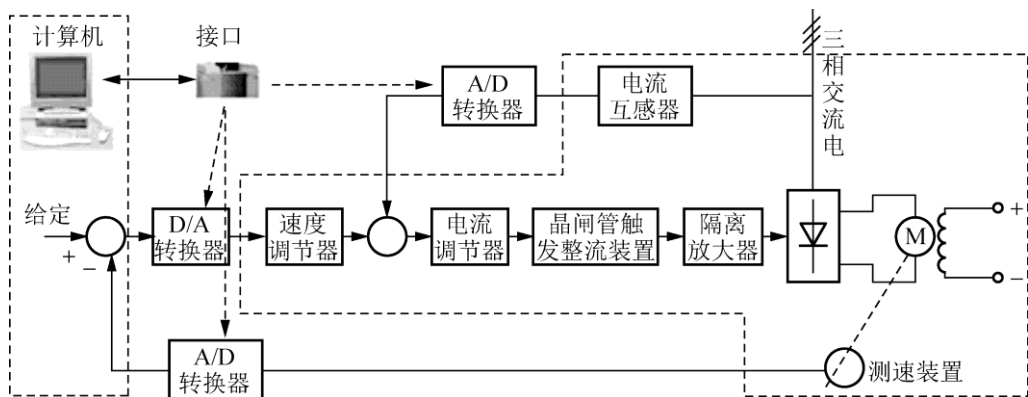


图 1-19 双闭环直流调速系统——离散(计算机)控制系统

2) 非线性控制系统

非线性控制系统(nonlinear control system)的特点是:系统中存在非线性元件,如具有死区、出现饱和、含有库仑摩擦等具有非线性特性的元件。非线性系统不能应用叠加原理,但有一些方法可以将非线性系统处理成线性系统进行近似分析。

4. 按系统中的参数对时间的变化情况分类

1) 定常系统

定常系统(time-invariant system)的特点是:系统的全部参数不随时间变化。实际生活中遇到的绝大多数系统都属于(或基本属于)这一类系统。

2) 时变系统

时变系统(time-varying system)的特点是:系统中有的参数是时间 t 的函数,它随时间变化而改变。例如宇宙飞船控制系统就是时变控制系统,在宇宙飞船飞行过程中,飞船内的燃料质量、飞船所受重力都在发生变化。

当然,除了以上的分类方法外,还可以根据其他的条件对自动控制系统进行分类。本书根据课程教学大纲的要求,只讨论定常线性系统(主要是调速控制系统与随动控制系统)。

(二)自动控制系统的基本要求

相关知识(一)中曾讨论了什么是自动控制系统,并从其定义中知道所谓的自动控制系统是能够模拟人的工作过程,对生产中出现的问题进行判断并加以解决的某种控制装置或控制设备。并由此得出结论,即所谓控制系统是可以完成某种人为规定任务的设备与装置。因此,如何完成任务以及如何更好地完成任务就成为人们对自动控制系统最基本的期望和要求。无论一个自动控制系统所完成的任务是复杂还是简单,也不论这个系统完成这些任务采用何种实现策略(控制策略),对其不外乎三个方面的基本要求,即自动控制系统的稳定性、快速性和准确性。这三方面的要求简单介绍如下。

1. 自动控制系统的稳定性

对于任何自动控制系统来说,其首要条件必须是这个自动控制系统能稳定地正常运行。不稳定的自动控制系统是无法工作的。所以对于任何自动控制系统而言,稳定性是对其最基本的要求,不稳定的系统不能实现人们所预定或期望的任务,因而是没有工程应用价值的。

稳定性通常与自动控制系统的组成结构有关,而与外界因素无关,且对于不同类型的自动控制系统,其稳定性的内容也不尽相同。对于恒值系统,它的稳定性要求一般是:当系统受到外部因素影响(扰动量作用)后,系统能完成自我调整,并在经过一定时间的调整后,能够自动回到原来的期望值上。例如调速控制系统,当电动机所带负载发生变化导致其转速也产生变化时,要求系统经过调整后,其输出转速能保持不变。而对于随动系统而言,其稳定性的一般要求是:当系统受到外部因素影响或输入量突然发生变化时,被控制量能始终跟踪输入量的变化。例如雷达跟踪系统,无论其跟踪的飞机(输入量)是突然加速还是突然转弯,也不论它有没有释放干扰源,都要求雷达能准确跟踪该飞机。

因此,为了能够从理论上给出自动控制系统是否稳定的一般解释,通常定义如下:对于自动控制系统来说,若它的输入量或扰动量的变化是有界的,输出量也是有界(或收敛)的,则这样的自动控制系统就是稳定的;若它的输入量或扰动量的变化是有界的,而它的输出量是无界(或发散)的,则这样的自动控制系统就是不稳定的。

如图 1-20 所示,在有界的扰动信号的作用下,图 1-20(a)所示系统的输出量经过一定时间的调整后又回到了原来的状态,这种情况就称之为收敛,所以它是稳定的系统;而图 1-20(b)所示系统的输出量经过一段时间的调整后不仅没有回到原始状态,其幅值反而逐渐增大,这种情况就称为发散,所以它是不稳定的系统。

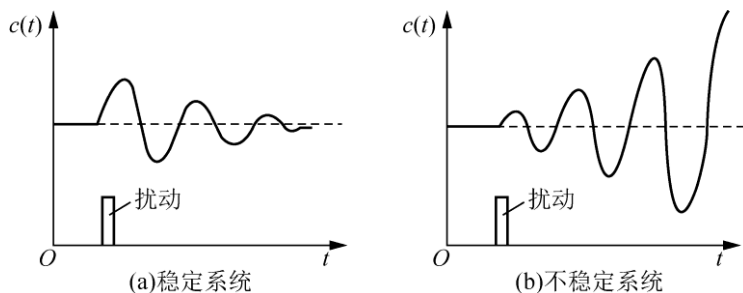


图 1-20 在有界扰动作用下,系统输出量的变化情况

自动控制系统稳定性通常还包括如下两个方面的含义。

(1) 自动控制系统的绝对稳定。即在任何有界的外部作用下,系统的输出量都必须是收敛的。

(2) 自动控制系统的相对稳定。即当自动控制系统是绝对稳定时,其调节过程所反映出来的调整性能(与系统的动态特性有关)。

如图 1-21 所示,在有界扰动信号的作用下,图 1-21(a)与图 1-21(b)所示系统都是稳定的。但比较而言,图 1-21(a)所示系统在调整过程中,其输出量经过了较大的幅值变化和较长的时间才回到预定状态,所以图 1-21(b)所示系统相对稳定性要好于图 1-21(a)所示系统。

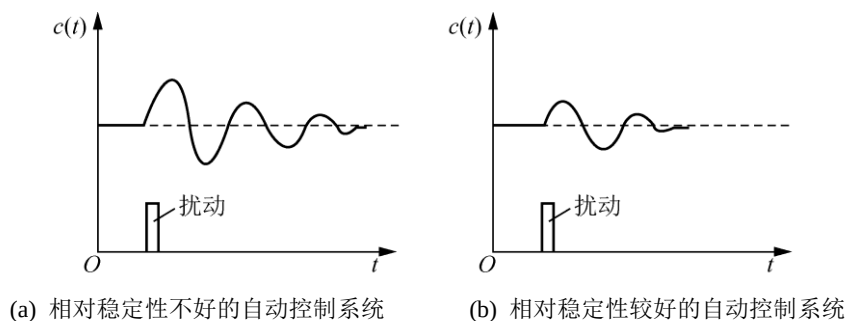


图 1-21 自动控制系统的相对稳定性

2. 自动控制系统的动态特性(快速性)

在实际控制过程中,不仅要求系统稳定,而且还要求系统的实际输出量(被控量)能迅速跟上输入信号所发生的变化。比如,当踩下汽车油门时,人们总是希望汽车的行驶速度能迅速提高。但是,由于任何一个系统来说,当它从一个稳定运行状态向另一个稳定运行状态发生变化时,都要经过一个能量传递与变化(过渡)的过程,也就是说这个系统工作状态的变化是需要花费时间才能完成的。从另一方面来看,由于系统组成结构不同,因此,其能量传递的过程以及能量传递的形式也会有所差别。那么,对于某个系统而言,完成这些工作状态变化过程的快慢(所花时间的长短),以及以哪种形式完成这些工作状态的变化,往往就成为恒量系统是否反应灵敏及如何反应的一个重要指标。所以,一个系统的输出要经过多长时间才能跟上输入量的变化,又以哪种形式跟上输入量的变化,就是一般所讨论的系统快速性的主要内容,如图 1-22 所示。而由于这些问题通常发生在系统工作状态出现变化的过程中,因而一般可以将其归于系统的动态特性。

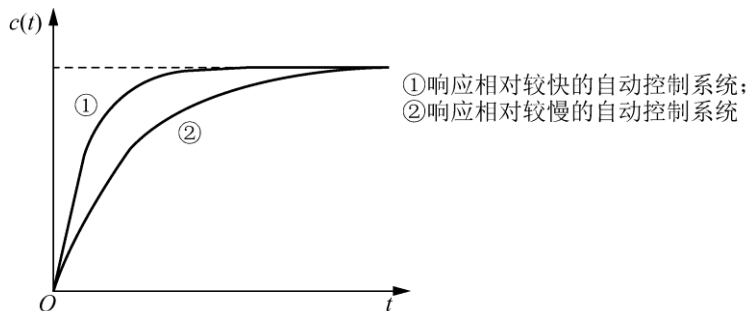


图 1-22 自动控制系统的快速性(动态特性)

3. 自动控制系统的稳态特性(准确性)

一个自动控制系统在平稳工作时,人们总是希望它的工作情况与预先设定好的期望值是百分之百吻合的。而实际情况往往是,由于系统中总是存在诸如机械摩擦、空气阻力等能量消耗等因素,从而使系统的实际输出不可能与人们预先设定好的期望值(输入量)丝毫不差。因此,系统的实际输出与人们期望值之间存在的差别就是自动控制系统在平稳工作时需要考虑的又一个性能指标。由于这种指标反映了系统在平稳工作情况下对输入量进行跟踪的能力,因此,通常也称这种性能指标为自动控制系统的稳态特性或跟(随)踪性能。在以

后的系统性能分析中,大家将进一步了解到所谓系统的稳态特性这以下两方面的内容。

(1) 稳态特性讨论了系统实际输出与期望值之间存在的误差大小。系统在平稳工作情况下,其实际输出与期望输出(期望值)之间的差值被称为跟随误差,如图 1-23 所示。

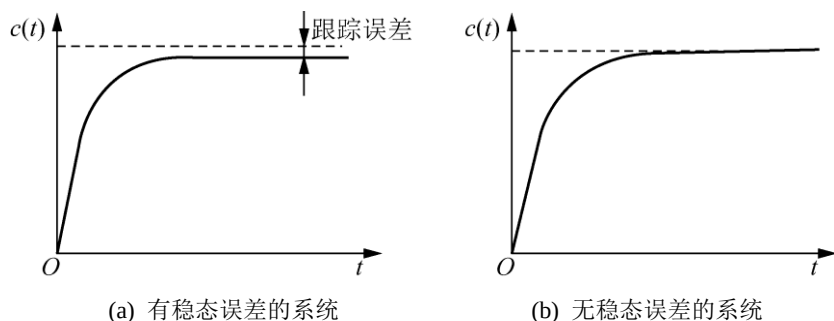


图 1-23 自动控制系统的跟随误差

(2) 稳态特性还讨论了,一个系统平稳工作时,在外部干扰的作用(如电网的电压或电流突然发生变化)下自动返回原始工作状态的能力。当干扰系统的外部因素消失后,如果系统不能回到原始的工作状态,则这种实际输出与期望输出之间存在的差值就被称为扰动误差,如图 1-24 所示。

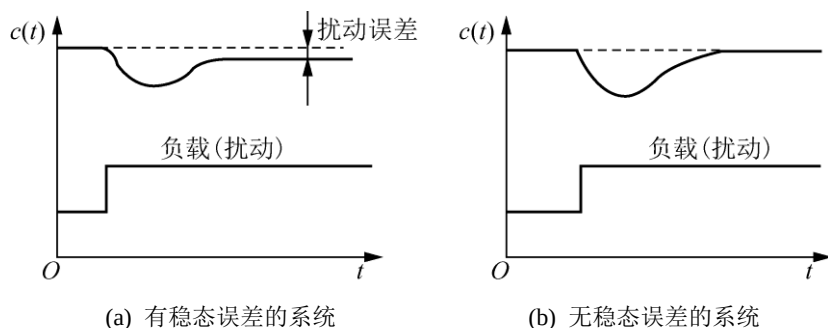
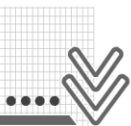


图 1-24 自动控制系统的扰动误差

(三)自动控制系统的分析方法

对自动控制系统进行分析研究,首先是对其进行定性分析。所谓定性分析,主要是搞清系统的组成装置,以及各种装置在系统中所起的作用和它们之间的相互联系、物理量的传递关系,并在此基础上搞清楚系统的工作过程(工作原理)。然后,在定性分析的基础上,通过建立系统的数学模型,利用自动控制理论对其稳定性、快速性和准确性进行定量分析。在系统定量分析的基础上,找到改善自动控制系统性能的有效途径,这也就是所谓的系统的调试(校正)、故障排除等实际工作方法及技术应用手段。

自动控制理论分为经典控制理论(classical control theory)和现代控制理论(modern control theory)。经典控制理论是建立在传递函数(transfer function)概念基础上的,它对单输入—单输出(SISO)系统是十分有效的。现代控制理论是建立在状态变量(state variable)概念基础之上的,它适用于复杂的多输入—多输出(MIMO)控制系统及变参数非线性系统,以实现自动



控制系统的自适应控制(adaptive control)或最优控制(optimal control)等。本书讨论的自动控制系统基本上是单输入—单输出系统,所以应用的是经典控制理论。

在经典控制理论中,自动控制系统的定量分析方法又分为时域分析法(time-domain analysis method)、频域分析法(frequency-domain analysis method)和根轨迹法(the root locus method)等。其中时域分析法是最为直观和容易理解的方法,但由于这种方法要求解自动控制系统的闭环特征根,所以在没有计算机等计算工具前,这种方法显得十分复杂;但随着计算机的出现及自动控制研究方法的更新,现在对自动控制系统的时域分析已不再困难。频域分析法的直观性不如时域分析法,理解也较困难,但这种方法的工程应用价值是几种分析法中最高的,特别适用于自动控制系统的现场调试。因此,本书只介绍时域分析和频域分析这两种方法。

小 结

(1) 自动控制系统是指由机械、电气等设备所组成的,并能按照人们所设定的控制方案,模拟人完成某项工作任务,并达到预定目标的系统。

(2) 自动控制系统从控制方案上来说,可分为开环控制与闭环控制。开环控制系统具有结构简单、稳定性好的特点,但它不能模拟人对自动控制系统的实际输出值与期望值进行监视、判断与调整。因此这种控制方案只适用于对系统稳态特性要求不高的场合。闭环控制由于设置了模拟人监视实际输出与期望值有无偏差的检测装置(反馈环节)和对偏差进行调整的比较与控制的装置,所以在系统结构上比开环控制系统复杂,但它极大地提高了自动控制系统的控制精度。同时,由于反馈环节的引入,也造成了系统稳定性变坏,但这也正是大家学习自动控制系统理论的意义所在,即如何使一个自动控制系统具有稳、准、快的性能指标。

(3) 尽管组成自动控制系统的物理装置各有不同,但究其控制作用,不外乎几种基本元件或环节。对一个实际的自动控制系统进行组成器件或设备上的抽象,有助于对自动控制系统的工作原理、调节过程进行分析,也有助于为进一步分析自动控制系统性能而建立数学模型。

(4) 自动控制系统可以从不同的角度进行分类。工业加工设备中最为常见的系统是恒值系统与随动系统。

习 题

一、思考题

1. 什么是自动控制系统?
2. 什么是开环控制系统、闭环控制系统?试分析它们的特点。
3. 组成自动控制系统的主要元件或环节有哪些?它们各有什么特点,起什么作用?
4. 反馈分为哪两种类型?各有什么特点?
5. 自动控制系统的比较环节是如何实现的(电气实现)?其作用是什么?

6. 恒值系统、随动系统与过程控制的主要区别是什么？
7. 线性系统与非线性系统的主要区别是什么？
8. 自动控制系统的性能指标有哪些？它们反映了系统哪些方面的要求？
9. 分析直流调速的三种方案，并比较其优劣。

二、综合分析题

1. 学习过程是知识不断积累的过程，图 1-25 所示为构成某一学习过程的反馈模型，试确定该系统中各个模块的内容。判断该学习过程应该属于哪种反馈。

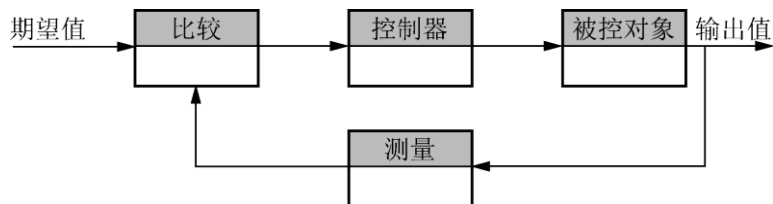


图 1-25 闭环反馈控制系统

2. 图 1-26 所示为一晶体管稳压电源电路图，试分别指出给定量、被控量、反馈量和扰动量，画出其系统组成框图，并分析其自动调节过程。

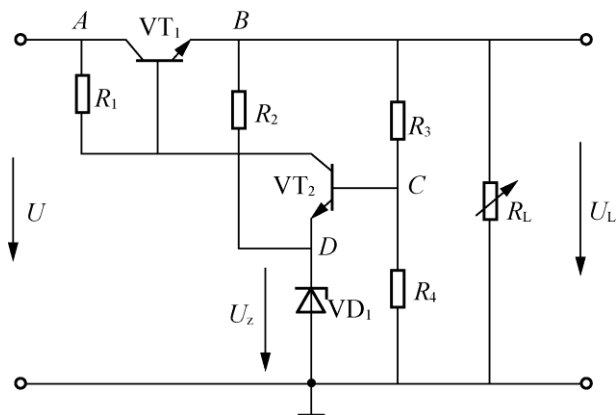


图 1-26 晶体管稳压电源电路

3. 图 1-27 所示为一仓库大门自动控制系统。试说明自动控制大门开启和关闭的工作原理。如果大门不能全开或全关，应该怎样进行调整？

4. 图 1-28 所示为通用压力调节器的内部结构示意图。通过旋转压力调节螺钉可以设定预期压力，设定的压力将压迫弹簧，从而产生一个与横隔板向上运动相反的力。而横隔板的底端承受着被控水压。这样，横隔板就像一个比较器，其运动反映了预期压力与实际压力的差异。于是，连接在横隔板上的阀门将根据压力差运动，最终到达压力差为零的平衡位置。试画出以输出压力为调节变量的控制系统的框图。

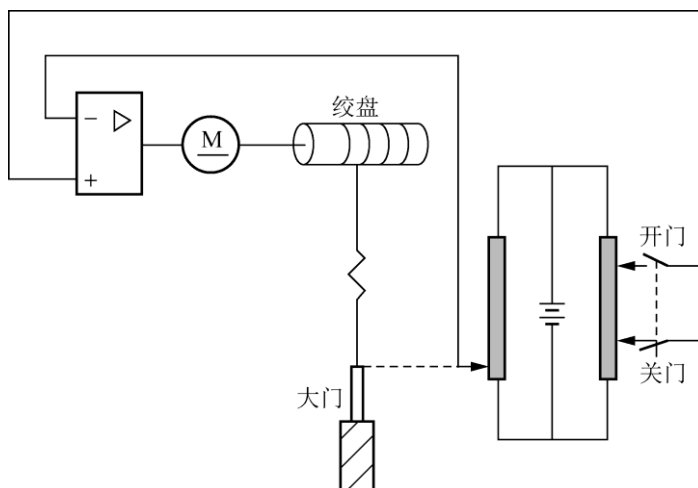


图 1-27 仓库大门控制系统

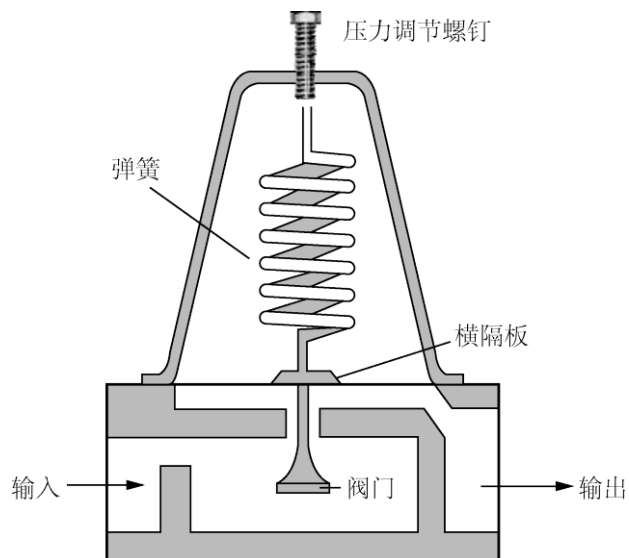


图 1-28 通用压力调节器内部结构示意图

5. 在卷绕加工系统中，为了避免被卷物发生拉裂、拉伸变形或褶皱等不良现象，通常使被卷物的张力保持在某个规定数值上，这就是恒张力控制系统。在图 1-29 所示的恒张力控制系统中，右边是卷绕驱动系统，它以恒定的线速度卷绕被卷物(如纸张等)。右边的速度检测器提供反馈信号以使驱动系统保持恒定的线速度。左边的开卷筒与电气制动器相连，以保持一定的张力。为了保持恒定的张力，被卷物需绕过一个浮动的滚筒，滚筒具有一定的重量，滚筒摇臂的正常位置是水平位置。

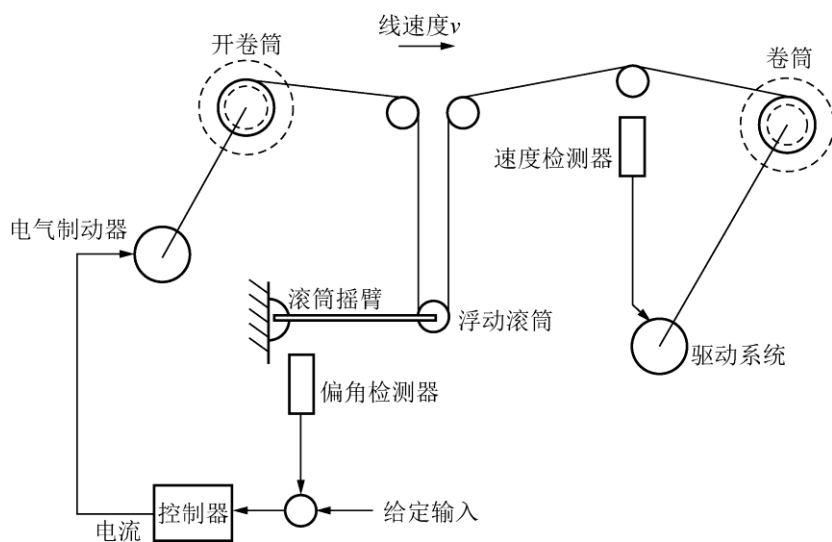


图 1-29 卷绕加工的恒张力控制系统

在实际运行中，因为外部扰动、被卷物的不均匀及开卷筒有效直径的减小而使张力发生变化时，滚筒摇臂便无法保持在水平位置，这时通过偏角检测器测出偏角位移量，并将其转换成电压信号，与给定输入量比较，两者的偏差电压经放大后去控制电气制动器。试画出该系统的组成框图，并分析因外部扰动而使张力减小时，整个系统的自动调节过程。