

第一章 自动控制系统的基础知识

第一节 自动控制系统的基本概念

人类企图控制自然的要求，一直是整个历史发展的动力。控制自然的目的是完成超出人们力所能及的任务。长期以来，人们一直进行着不懈的努力，自动控制技术是人们实现这一要求的重要手段，人们利用自动控制技术已把人类的许多希望和梦想变成了现实。

自动控制是一门介于许多学科之间的科学，又渗透到各个专业领域。不仅高精尖领域（如人造卫星、宇宙飞船、人类登上月球、人工智能等）离不开它，在工业领域（如电气、机械、航空、化工、核反应等）及非工业领域（如经济、管理、生物工程、社会学等）也都广泛采用自动控制技术。自动控制这门多科性的学科，今天已被列为最有前途的领域之一，它的发展趋势是无可限量的。

一、控制与自动控制

在日常生活、生产过程、军事、航天等领域中，控制和自动控制的应用非常广泛。例如，自行车速度控制、汽车驾驶、热处理炉的恒温控制、导弹飞行控制、人造卫星和宇宙飞船控制等。

控制就是指通过控制装置，使生产设备或生产过程的某些物理量按特定的规律变化。在没有人直接参与的情况下完成的控制称之为自动控制；相反，在有人直接参与的情况下完成的控制称之为人工控制。能对生产设备或生产过程的工作状态进行自动控制的系统称为自动控制系统。

自行车速度控制是人根据道路的交通情况，人为地加快骑行速度或减慢骑行速度。汽车驾驶是驾驶员根据道路的交通情况，通过转动方向盘改变方向，通过加油门、刹车等改变速度。这两者属于人工控制。热处理炉的恒温控制是人根据生产工艺要求，在系统的温控器上设定一个设定值，随后整个系统自动完成恒温控制，当炉温高于用户所设定的温度时，温控系统工作，使炉内温度下降；当炉温低于用户所设定的温度时，温控系统工作，使炉内温度上升。导弹飞行控制包含飞行姿态控制、自动纠正方向、自动导向目标等。在茫茫太空中，人造卫星、宇宙飞船控制系统要确保它们严格按预定轨道飞行，对它们的姿态进行控制，使太阳能电池板一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球。这三者属于自动控制。

显然，自动控制是控制发展的方向。

二、自动控制系统的组成及术语

1. 反馈与反馈控制

反馈就是把系统的输出信号回送到系统的输入端并加到输入信号中。

反馈分为正反馈和负反馈两种类型。如果由于反馈的存在，使得系统的输出信号单调地朝着某一个方向变化并趋于极限，或者说使系统的被控量与给定值之间的偏差不断增大的反馈，这样的反馈称为正反馈，这样的系统称为正反馈系统。如炸药的爆炸、军备竞赛、电子振荡过程等。如果由于反馈的存在，使得系统的输出信号趋于稳定在原来的水平上，或者更严

格地说，使输出信号与给定值的差趋于减小，这样的反馈称为负反馈，这样的系统称为负反馈系统。几乎所有的自动控制系统都是负反馈系统。

反馈控制就是利用负反馈的作用来减小系统的误差（输出信号与给定值的差），又称闭环控制。反馈控制是一种基本的控制规律，它具有自动修正被控制量偏离给定值的作用，因而可以抑制内扰和外扰所引起的误差。在组成系统的元器件精度相对不高的条件下，采用反馈控制可以达到较高的控制精度，因此应用很广。

现以某贮槽的液位控制系统为例来说明反馈控制的基本工作原理。图 1-1 所示为贮槽液位控制系统的原理结构图，图中 Q_1 为进入贮槽的液体流量， Q_2 为流出贮槽的液体流量。控制的目的是使贮槽中的液位 H 以一定的精度稳定于某一高度 H_0 。当外部负载（负荷）改变，即 Q_2 改变时， $Q_1 \neq Q_2$ ，液位将上升或下降。图中的液位变送器（差压变送器）将自动地检测液位的变化，并把液位高低的变化变换成与之成比例的统一信号（一般为电气信号），此信号称为测量信号。将测量信号送入控制器，并与控制器中的液位给定值进行比较，得出两者的差，称之为偏差信号。控制器根据偏差信号的大小，按某种运算规律计算出控制器应输出的控制信号。控制信号送到执行器，执行器去调整调节阀的开度，使 Q_1 发生变化，从而使液位保持在所希望的数值 H_0 （液位给定值）上，实现了贮槽液位的自动控制。

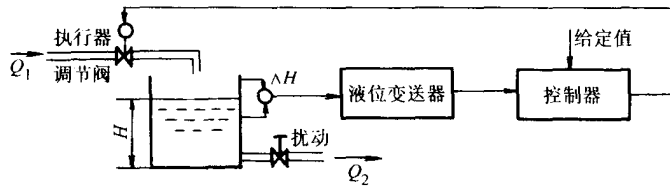


图 1-1 贮槽液位控制系统的原理结构图

2. 自动控制系统的组成与框图

一个控制系统由若干个环节组成，每个环节有其特定的功能。在讨论一个自动控制系统时，若将系统中所有环节的内部结构都画出来，会十分麻烦，甚至非常繁杂。为了便于分析并能清楚地表示系统各组成环节间的相互影响和信号传递关系，一般习惯于把自动控制系统用框图（或称方块图）来表示。在框图中，系统的每一个组成部分（或称环节）用一个方框来代表，环节间用带箭头的的作用线连接起来，表示环节之间的信号传递关系，箭头的方向代表作用方向。一个环节所接受的作用称为该环节的输入量，而输入量在该环节中引起的变化称为该环节的输出量。

图 1-2 所示是一般自动控制系统框图。图中的每个方框是一个环节，每个环节都有输入端和输出端，所有方框配合起来组成控制系统。各环节的作用及有关术语含义如下：

(1) 反馈环节对系统输出量的实际值进行测量，将它转换成反馈信号，并使反馈信号成为与给定信号同类型、同数量级的物理量。

(2) 比较器将给定信号和反馈信号进行比较，产生偏差信号。

(3) 控制器根据输入的偏差信号，按一定的控制规律产生相应的控制信号。

(4) 执行器将控制信号进行功率放大，并带动执行机构工作。

(5) 调节机构直接改变控制系统的输入量，使被控量恢复到给定值。

(6) 被控对象控制系统所要控制的设备或生产过程，它的输出量就是被控量。

- (7) 被控量对象的某个变量。控制系统的目的通常就是要使该变量与设定值或给定值相符。控制系统也用该变量的名称来称呼，如温度控制系统、压力控制系统等。
- (8) 调节量对被控装置的被控量具有较强的直接影响且便于调节的变量。
- (9) 干扰对象中除了调节量以外，能对被控变量具有影响作用的所有变量。
- (10) 偏差给定值与反馈量之差。
- (11) 给定值也称为设定值，是被控量的期望值。它可以是恒定值，也可以按程序变化。

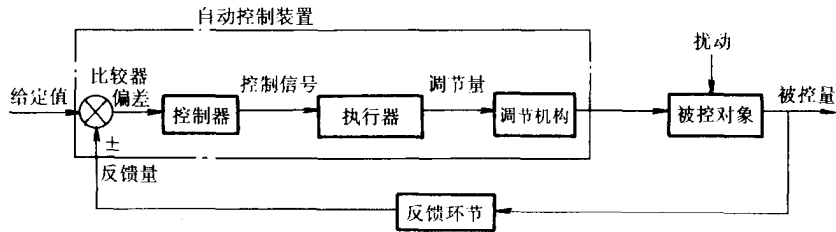


图 1-2 自动控制系统的组成框图

从上面介绍的贮槽液位的自动控制系统中可以看出，它包括了被控对象、变送器、控制器、执行器、调节阀五个主要环节，它的组成框图就如图 1-2 所示。当被控对象贮槽受到扰动影响时，被控量液位就发生变化，测量元件、变送器将被变化的值与给定值进行比较，产生偏差。偏差值（或称偏差信号）送入控制器并按一定控制规律运算后输出控制信号，该信号再经执行器控制调节阀，改变调节阀的开度，使被控量恢复到原有数值 H_0 。

三、自动控制系统的分类

随着自动控制技术的不断发展，生产过程自动化水平的不断提高，各种各样的新型自动控制系统不断出现。因此，很难确切地列举它们的全部分类，下面仅介绍几种常用的分类方法。

1. 按自动控制系统是否形成闭合回路分类

(1) 开环控制系统开环控制是一种最简单的控制方式，其特点是在控制器与被控制对象之间只有正向作用而没有反馈作用，即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统的示意框图如图 1-3 所示。

在开环系统中，对于每一个输入量，都有一个与之相对应的工作状态和输出量。系统的精度取决于元器件的精度和特性调整的精度。开环系统结构简单，设计、调整容易。当系统的内扰和外扰影响不大并且控制精度要求不高时，可以考虑采用开环控制系统。

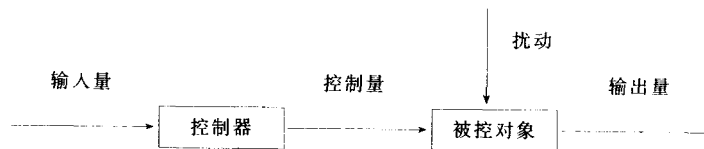


图 1-3 开环控制系统的示意框图

图 1-4 所示的直流电动机速度控制系统是开环控制的一个实例。在系统中，被控量即输出量是电动机 M 的转速 n 。控制器是晶闸管整流装置，它输出的控制作用 U_m 仅由输入电压 U_r 决定，而不受输出量转速 n 的影响。因此，确定了输入电压 U_r 的大小，就确定了对输出量期望值的要求，输入电压 U_r 称为给定输入或参考输入。在 U_r 已经确定的情况下，由于负载转矩的变化（例如负载增大），使电动机转速偏离了原来的设定值时，系统没有使转速恢复的能力。影响输出量转速 n 大小的负载转矩称为扰动输入。

从图中可看出，只有从输入端到输出端的信号作用路径，而没有从输出端到输入端的信号作用路径。当扰动作用（如晶闸管整流装置特性的变化或负载转矩变化等）引起电动机转速偏离原来校准的数值时，系统没有修正偏差的能力。该系统的精度取决于系统校准精度和系统中元器件特性的稳定程度。因此，开环控制系统对所采用的元器件的精度和稳定性，提出了较高的要求。

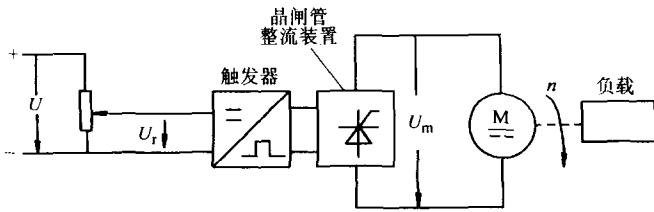


图 1-4 直流电动机速度开环控制系统示意图

(2) 闭环控制系统闭环控制系统的优点是，在控制器和被控对象之间不仅存在着正向作用，而且存在着反馈作用，即系统的输出量对控制量也发生直接影响。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，其示意框图如图 1-5 所示。

反馈控制是一种基本的控制规律，它具有自动修正被控量偏离给定值的作用，因而可以抑制内扰和外扰引起的误差。在组成系统的元器件精度相对不高的条件下，采用反馈控制也可以达到较高的控制精度，因此应用很广。与此同时，反馈的引入使本来是稳定运行的开环系统可能出现强烈的振荡，甚至出现不稳定的现象，这是在采用反馈控制构成的闭环控制系统时必须注意并应当解决的问题。

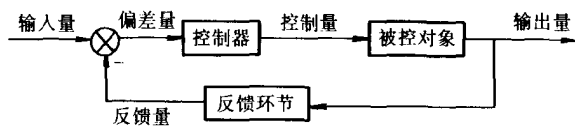


图 1-5 闭环控制系统示意框图

图 1-6 所示为直流电动机速度闭环控制系统。图中 TG 为测速发电机，它将电动机 M 的转速 n 转换成与其成正比的反馈电压 U_f ，并与给定电压 U_r 相比较，得到偏差信号 $U = U_r -$

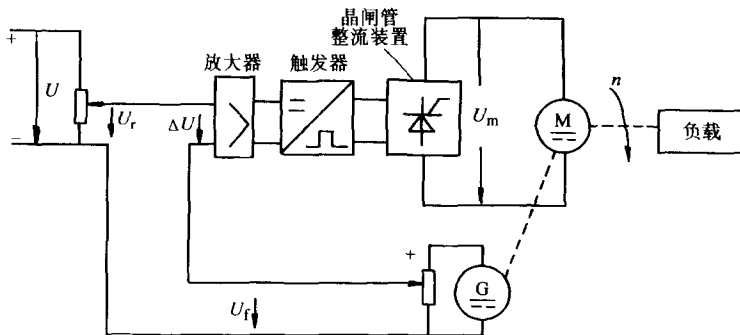


图 1-6 直流电动机速度闭环控制系统示意图

U_f 。 ΔU 经过放大器放大后，送到晶闸管整流装置，晶闸管整流装置输出的控制信号 U_m 取决于 U 的大小。在运行时，如果因负载增加使电动机转速下降，反馈电压 U_f 也随之下降，在给定电压 U_r 不变的情况下，偏差 U 将增大，控制信号 U_m 也将增大，使电动机的转速恢复或接近扰动作用前的数值。

在有些情况下，适当地把开环控制与闭环控制结合起来，组成复合控制系统，往往能取得较好的效果。

2. 按给定信号的特点分类

(1) 恒值控制系统当自动控制系统运行时，被控量保持恒定不变，也就是使被控量始终与给定值保持一致，这是生产过程自动控制系统中应用得最多的一种控制系统。例如电动机转速控制系统、空调器温度控制系统、容器的液位控制系统、电力网的频率控制系统等都是恒值控制系统。

(2) 随动控制系统随动控制系统简称随动系统，它是被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。它的作用是使被控量随时跟踪给定值的变化。例如，在锅炉燃烧过程的控制中，要求空气量随时跟踪燃料量的变化而成比例地变化；运动目标的自动跟踪；跟踪卫星的雷达自动控制系统；工业控制中的位置控制系统等都属于随动控制系统。

(3) 程序控制系统被控量的给定值是一个已知的时间函数，控制的目的是保证被控量按确定的给定值的时间函数来改变。程序控制系统可以是开环系统，也可以是闭环系统。例如，发电厂汽轮机的起动过程中，要求转速按预先规定的时间函数进行升速。又如热处理中的升温、加温过程控制系统等都属于程序控制系统。

3. 按控制系统的传递信号是时间的连续函数还是断续函数分类

(1) 连续（时间）控制系统当控制系统的各个环节的输入信号和输出信号都是时间的连续函数时，这种系统称为连续控制系统。连续控制系统又常称为模拟量控制系统（相对于数字量控制系统而言）。目前大部分控制系统都是连续控制系统。

(2) 离散（时间）控制系统在控制系统中有一处或几处的信号是脉冲序列或以数字编码形式出现的系统称为离散控制系统。离散控制系统的主要特点是，在系统中采用采样开关，将连续信号转变为离散信号。如果系统中的连续信号被采样成脉冲序列，这种系统称为脉冲控制系统；如果系统中的连续信号采样后被量化成数字信号，这种系统称为数字控制系统。

4. 按控制系统主要元件的特性分类

(1) 线性控制系统当控制系统各元件的输入输出特性具有线性关系，系统的动态过程可以用线性微分方程来描述时，这种系统称为线性控制系统。线性系统的特点是可以应用叠加原理。

(2) 非线性控制系统当控制系统中含有一个或一个以上的非线性元件时，系统就要用非线性方程来描述。由非线性方程描述的系统称为非线性控制系统。在控制系统中，典型的非线性特性有饱和非线性、死区非线性、继电器特性非线性等。非线性系统不能应用叠加原理，而且其动态特性与初始条件有关，而线性系统的动态过程则与初始条件无关。

5. 其他分类

计算机技术和应用的发展，为现代控制理论在生产过程控制系统中的应用开辟了广阔的空间，控制系统向着更高层次发展，各类新型控制系统层出不穷，如最优控制系统、模糊控制系统、预测控制系统、神经控制系统等。

四、自动控制系统的性能指标

结合生产实际，对于自动控制系统的性能要求可以概括为五个方面：稳定性、快速性、准确性、适应性和经济性。

(1) 稳定性 稳定是任一控制系统正常工作的必要条件，不稳定的系统是不能工作的。所谓稳定，是指系统受到扰动偏离原来的平衡状态后，若去掉扰动，系统仍能恢复到原状态或达到新的平衡状态，否则称系统不稳定。

(2) 快速性 在系统稳定的前提下，希望控制过程（过渡过程）进行得愈快愈好，但如果过渡过程时间太短，可能会使动态偏差过大。合理的设计应兼顾这两方面的要求。

(3) 准确性 准确性要求动态误差（偏差）和稳态误差（偏差）都愈小愈好。当与快速性有矛盾时，应兼顾两方面的要求。

(4) 适应性（或称鲁棒性） 适应性要求自动控制系统能适应生产过程较大范围的工况变化。因为工况变化后被控对象的特性将会发生变化。因此，要求参数也能够有较大范围的调整余地，从而使控制系统仍可获得良好的控制品质。

(5) 经济性 经济性要求控制系统消耗的能量最少，波动最小，成本低，投资省

第二节 自动控制的典型环节

一个控制系统是由许多元器件组合而成的。虽然元器件的结构和作用原理多种多样，但若考察其数学模型，却可以划分成为数不多的几种基本类型，称之为典型环节。这些典型环节是比例环节、非周期环节、积分环节、振荡环节、微分环节和延迟环节。

下面分别介绍这些典型环节。

一、比例环节

比例环节又称放大环节，它的输出量 $y(t)$ 与输入量 $u(t)$ 之间，在任何时候都是一个固定的比例关系，或者说它的输出量能毫无失真和滞后地以一定比例复现输入量，具体表示为

$$y(t) = Ku(t) \quad (1-1)$$

应用实例有分压电路（输入电压-输出电压）、放大电路（输入电压-输出电压）、测速发电机（转速-电压）、齿轮箱（主动轴转速-从动轴转速）等。

二、非周期环节

非周期环节又称惯性环节，其输入量 $u(t)$ 与输出量 $y(t)$ 之间的关系是输出量变化落后于输入量的变化。

由图 1-7 可知，当输入量 $u(t)$ 发生突变（即输入量为阶跃信号）时，输出量不能突变，只能按指数规律逐渐变化，即两者之间存在时间上的延迟，说明该环节具有惯性。常用时间常数 T 来度量惯性，时间常数愈大，惯性愈大。 K 为比例系数，在自动控制系统中，比例系数不一定是无量纲的。因为输入与输出不一定是同一量纲的物理量。前述比例环节及以后各环节都有这一特点。

实际物理系统中，惯性环节是经常遇见的，如他励直流发电机（励磁电压-电动势）、RC 滤波器（输入

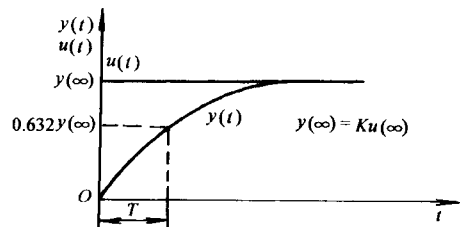


图 1-7 惯性环节的阶跃响应

电压-电容电压)等。

三、积分环节

积分环节的输出量是输入量对时间的累积,即输出量是与输入量的积分成正比例。积分时间常数是积分环节的重要参数。

当积分环节的输入 $u(t)$ 为单位阶跃信号时,即

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

响应为

$$y(t) = \frac{1}{T}t \quad (1-2)$$

上式表明只要有一个不变的输入量作用于积分环节,其输出量就会随时间成正比地增长,而不是在某一稳态值上固定下来;只有在输入为零时,输出才固定在某一稳态值。积分环节的阶跃响应如图 1-8 所示,其中 T 为积分时间常数。

积分环节的实例也很多,如以电动机轴的转速 $n(t)$ (r/min) 为输入量,以减速齿轮最后带动负载运动时轴的角位移 θ (rad) 为输出量,此时电动机就是一个积分环节。当转速稳定后,转速与角位移的关系为

$$\theta(t) = \frac{2\pi}{60i}nt$$

式中, i 是减速齿轮的减速比。

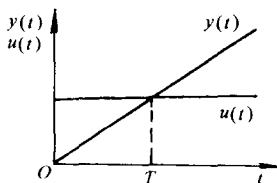


图 1-8 积分环节的阶跃响应

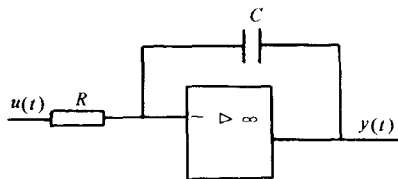


图 1-9 运算放大器做成的积分器

用运算放大器做成的积分器如图 1-9 所示。根据运算放大器的特点可知,当输入信号为单位阶跃信号时

$$y(t) = \frac{1}{RC}t$$

应该指出,这些实际元件或电路用上述理想的积分环节去描述,都是有条件的。如前例仅在不考虑弹性变形、间隙等非线性因素时,才有该式的结果。对于后例,同样没有考虑放大器的非线性及惯性,由于放大器都有饱和特性,故输出电压不可能无限增大, $y(t)$ 与 $u(t)$ 的积分关系仅在极限输出值以下时才成立。

四、振荡环节

在自动控制系统中,若包含着两种不同形式的储能单元,这两种单元的能量又能相互交换,在能量的储存

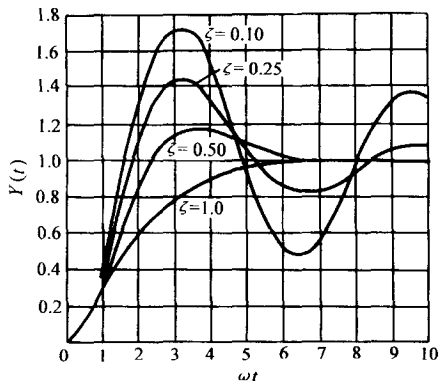


图 1-10 振荡环节的阶跃响应

和交换过程中，就可能出现振荡而构成振荡环节。振荡环节的单位阶跃响应曲线如图 1-10 所示。

该图说明了输出量经短时间的周期振荡后，最后趋于稳定。振荡的程度与阻尼比 ζ 有关， ζ 值越小，则振荡越强。当 $\zeta=0$ 时，输出量作自持振荡，这时的振荡频率称为无阻尼自然振荡频率 ω ；当 $\zeta \geq 1$ 时，其输出量则为单调上升曲线（这时已不是振荡环节了）。

RLC 振荡电路是振荡环节的典型例子。

五、微分环节

微分环节的特点是在暂态过程中，输出量是输入量的微分。因此可以说该环节可完成微分运算。

理想的微分环节的输出量 $y(t)$ 与输入量 $u(t)$ 的变化率成正比关系。

$$y(t) \approx T \frac{u(t)}{\Delta t}$$

式中， T 称为微分时间常数， $\Delta u(t)$ 为 $u(t)$ 在一定时间间隔 Δt 内的变化量。

若对理想微分环节输入单位阶跃函数 $u(t)=1(t)$ ，则其输出的单位阶跃响应为

$$y(t) = T\delta(t) \quad (1-3)$$

这是一个脉冲函数，脉冲的宽度为零，面积（强度）为 T ，幅度是无穷大。脉冲过后（ $t > 0$ ），其幅度立即降为零，即

$$y(t) = 0(t > 0)$$

在实际物理系统中是得不到这种理想微分环节的。下面介绍一种实际微分环节的例子。

RC 串联电路如图 1-11 所示，以电压 $u(t)$ 为输入量，电阻 R 上的压降 $y(t)$ 为输出量。这个电路不是纯微分环节，而是相当于一个微分环节与惯性环节的串联组合，称为实用微分环节。显然，当这个电路的 $RC=T \ll 1$ 时，近似得到微分环节。

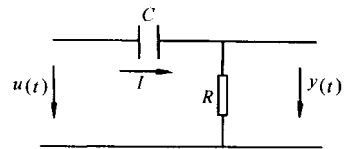


图 1-11 RC 串联电路

六、延迟环节

延迟环节又称纯滞后环节，是指在输入量作用后，一段时间内环节的输出来一直未变，但等到一定时间后，输出量却能无偏差地复现输入量（或按比例复现输入量）。其关系式为

$$y(t) = u(t - \tau) \quad (1-4)$$

式中， τ 为纯滞后时间。

若纯滞后环节的输入函数 $u(t)$ 为阶跃函数，则输出结果如图 1-12 所示。

在自动控制系统中，晶闸管整流装置（控制电压-输出电压）便是延迟环节的典型例子。

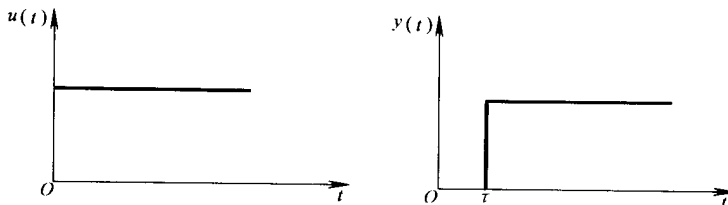


图 1-12 延迟环节的阶跃响应

第三节 控制器与控制规律

在控制系统中，对象的特性是固定的，不易改变；测量元件及变送器的特性比较简单，一般也是不可以改变的；执行器可有一定程度的调整，但灵活性不大；主要可以改变参数的就是控制器。系统设置控制器的目的，就是通过它改变整个控制系统的特性，以达到控制目的。

一、控制器简介

控制器的功能示意图如图 1-13 所示，由比较点和控制规律两大部分构成。在控制系统框图中，控制规律方框通常就标为控制器。

对恒值系统而言，控制器的给定值是不变的，因此控制器就只有一个输入变量，即反馈信号；也仅有一个输出变量，即控制信号。

控制器的控制规律种类很多，常见的有比例控制、比例积分控制、比例微分控制和比例积分微分控制四种。具有这四种控制规律的控制器的控制规律分别称为比例（P）控制器、比例积分（PI）控制器、比例微分（PD）控制器和比例积分微分（PID）控制器。

比例作用的强度、积分时间和微分时间的数值随着对象的不同而不同，对于具体的对象可以通过调试确定。

二、比例控制规律

控制规律方框的输入信号（即偏差信号） e 与输出信号（即控制信号） p 之间具有如下比例关系

$$p = K_p e \quad (1-5)$$

式中， K_p 是比例放大系数。

比例控制是最简单的一种控制，它的特点是控制作用比较及时，过渡时间短，抗干扰能力强；缺点是控制过渡过程存在偏差。因此，比例控制适用于一些允许有偏差存在的且不太重要的场合。几乎所有的控制规律都包括比例控制。

三、比例积分控制规律

控制规律方框的输入信号 e 与输出信号 p 之间具有比例关系和积分关系

$$p = K_p e + \frac{1}{T_I} p_i \quad (1-6)$$

式中， K_p 还是比例放大系数； T_I 是积分时间； p_i 是积分控制规律（积分项）。

比例积分控制器比比例控制器多了积分项。由于这个积分项的存在，只要偏差 e 不为零，控制器的输出就不断地增加或减小，直至偏差为零。因此，带有积分作用的控制系统，其过渡过程偏差为零，这是积分控制作用的最突出的优点。但加上积分作用后，系统的稳定性有所下降，这是精确性与稳定性之间的矛盾。

由于比例作用控制及时、反应快，而积分作用可以克服偏差，这两者的结合是当前应用最普遍的控制规律。它适合于调节通道滞后小、负荷变化小、不允许有偏差的参数，如流量和压力等。

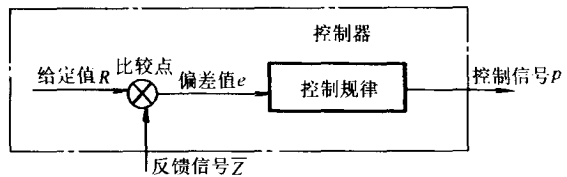


图 1-13 控制器功能示意图

四、比例微分控制规律

输入信号 e 与输出信号 p 之间具有比例关系和微分关系

$$p = K_{pe} + T_D p_D \quad (1-7)$$

式中, T_D 是微分时间; p_D 是微分控制规律(微分项)。

引入微分作用以后,当 e 有变化时,微分项起作用;当 e 保持不变时,微分项为零,对系统不起作用。这可以克服过程的容量滞后,加快控制作用,增加系统的稳定性,减小偏差。它可用于容量滞后较大的场合。

五、比例积分微分控制规律

输入信号 e 与输出信号 p 之间同时具有比例、积分和微分关系

$$p = K_{pe} + \frac{1}{T_I} p_I + T_D p_D \quad (1-8)$$

比例积分微分规律综合了三种基本控制规律的优点,适当调整 K_P 、 T_I 和 T_D ,可以获得相当好的控制系统过渡过程及很高的控制精度。它适用于容量滞后大、负荷变化大且控制精度要求高的场合。

小 结

本章介绍了自动控制的基本概念,着重介绍了反馈控制原理。负反馈控制的原理是检测偏差,抑制或消除偏差。本章还通过分析开、闭环控制系统的工作原理和框图,介绍了分析控制系统的方法,指出了各组成环节的作用,同时介绍了自动控制理论的一些常用术语。对自动控制系统的要求及分类方法作了简单介绍。简述了控制系统典型环节的输入-输出特性、常见控制规律及常见控制器。

习 题

1. 试举几个开环和闭环自动控制系统的例子,画出它们的框图,并说明它们的工作原理。
2. 什么叫闭环控制系统?试比较开环与闭环系统各自的优缺点。
3. 图 1-14 所示是电炉恒温自动控制系统。要求(1)画出系统的结构图;(2)当电源电压下降时,试述系统的调节过程;(3)系统为什么能维持温度不变?

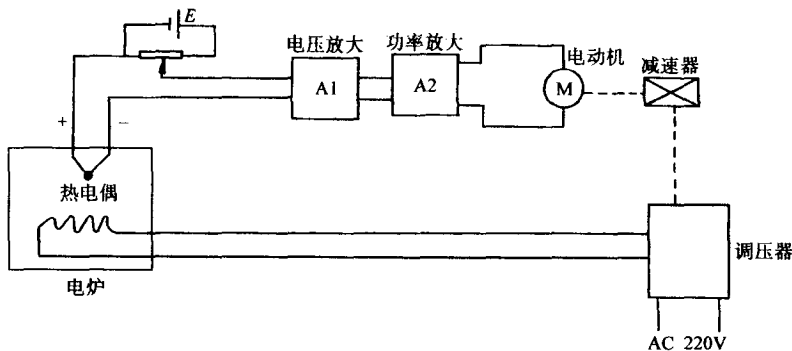


图 1-14 电炉恒温自动控制系统

4. 试举出比例环节、惯性环节的例子各一个。
5. 控制器的常用控制规律有哪些?各有什么特点?适合于什么场合?

第二章 直流调速系统

第一节 直流调速系统概述

调速即速度控制，是指在直传动系统中人为或自动地改变电动机的转速，以满足工作机械对不同转速的要求。直流电动机电路有两个独立的回路，一个是电枢回路，有关物理量的角标用 a 表示；另一个是励磁回路，有关物理量的角标用 f 表示，如图 2-1 所示。电枢回路有电阻 R_a 和漏磁电感 L_a ，其等效电路如图 2-2 所示。

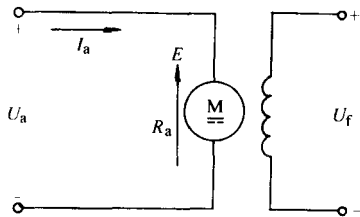


图 2-1 直流电动机电路图

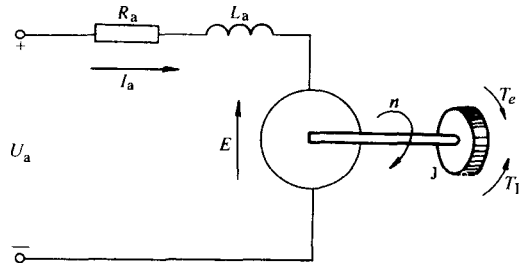


图 2-2 直流电动机电枢回路等效电路图

当电动机处十稳定运行时，各物理量间的关系为

$$U_a = I_a R_a + E \quad \text{或} \quad I_a = (U_a - E) / R_a$$

$$T_e = K_T \Phi I_a$$

$$T_e = T_L$$

$$E = K_e \Phi n \quad \text{或} \quad n = E / (K_e \Phi)$$

式中 U_a 为电枢电压； E 为电枢电动势； I_a 为电枢电流； R_a 为电枢电阻； T_e 为电磁转矩； Φ 为磁通； K_T 为转矩常数； K_e 为电动势常量； n 为转速； T_L 为摩擦和负载的阻力矩。

由上式可得

$$n = (U_a - I_a R_a) / (K_e \Phi) = [U_a - T_L R_a / (K_T \Phi)] / (K_e \Phi)$$

对于特定的电动机， K_T 、 K_e 、 R_a 是常量。当负载一定时，要调节电动机的转速 n 可通过调节电枢电压 U_a 或改变磁通 Φ 来进行。改变磁通 Φ 是通过改变励磁回路中的 $I_f(U_f)$ 进行的。也有在电枢回路中串联电阻，通过改变电阻值来进行调速的。由此一般可将直流电动机的调速方法分为调压调速和调磁调速两种。

调压调速是指保持励磁恒定（ Φ 恒定），改变电枢电压 U_a 的调速方法。有很大一部分工作机械，其负载性质属于恒转矩类型，即在调速过程中不同的稳定速度下，电动机的转矩为常数。如果选择的调速方法能使 $T_L \propto I_a = \text{常数}$ ，则在恒转矩负载下，电动机不论在高速还是低速下运行，其发热情况始终是一样的。这就使电动机容量能被合理而充分地利用。这种调速方法称为恒转矩调速方法，调压调速就是恒转矩调速，因为此时有 $T_L = T_e = T = K_T \Phi I_a$ ， $I_a = \frac{T}{K_T \Phi}$ 为常数。

调磁调速是指保持电枢电压 U_a 恒定，改变励磁电流 I_f 或励磁电压 U_f 的调速方法。这种调速方法属于恒功率调速，适用于具有恒功率特性的负载，即负载在调速过程中负载功率 P_L 为常数，负载转矩 $T_L = \alpha/n$ (α 为常数)，若仍采用上述恒转矩调速方法，使调速过程保持 $T \propto I_a$ ，则在不同转速时，电动机的电流将不同，并在低速时电动机将过载。用恒功率调速方法去带动恒转矩性质的负载是不合理的，在高速时电动机将过载。

他励直流电动机的调压调速的机械特性和调压调速的调节特性如图 2-3 所示。由于调压调速用途较广，本章主要讲述调压调速的应用及特性。

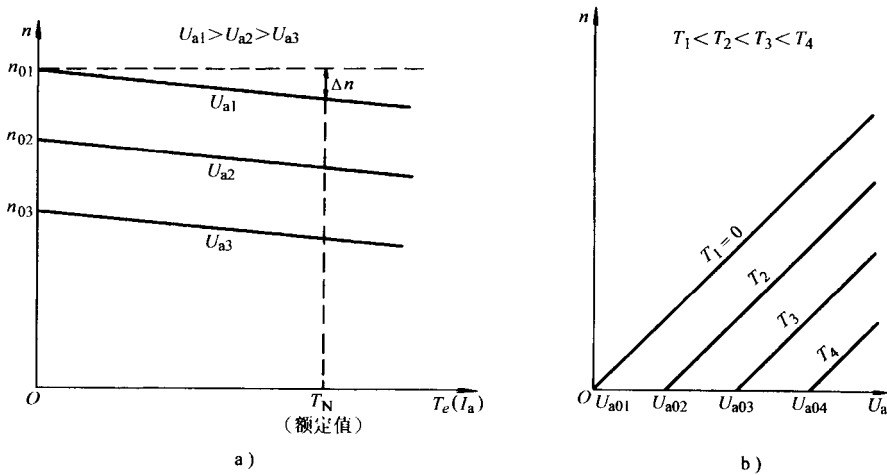


图 2-3 调压调速的机械特性和调节特性

a) 机械特性 b) 调节特性

调磁调速的机械特性和调节特性如图 2-4 所示，图中 $I_{Lr} = U_N / R_a$ 为堵转电流。

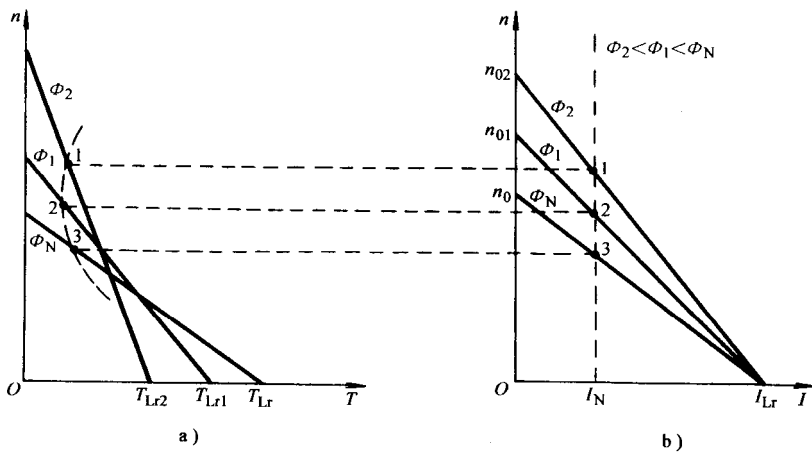


图 2-4 调磁调速的机械特性和调节特性

a) 机械特性 b) 调节特性

第二节 单闭环有静差调速系统

一、转速控制的要求和调速指标

若供给的电枢电压可连续调节,则能实现直流电动机的平滑调速。目前,由晶闸管(或电力器件)组成的半导体变流装置,可将单相或三相交流电转换成可调输出电压的直流电,给直流电动机供电。由此组成的晶闸管直流调速系统具有调速范围宽、精度高、动态性能好、效率高、易控制等优点,在机械、冶金、纺织、印刷、造纸等行业得到广泛使用,并已有成熟的系列产品。本书主要介绍晶闸管直流调速系统,其开环控制系统如图 2-5 所示。

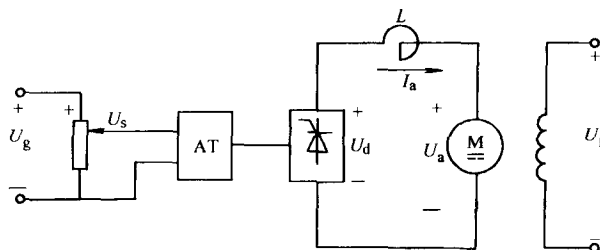


图 2-5 开环直流调速系统

图中的 L 为平波电抗器,其作用是使电动机的工作电流连续平稳,以使电动机的机械特性变硬。当转速平稳后, $U_d = U_a$ (忽略平波电抗器 L 的绕线电阻)。

已知,稳定时 $n = (U_a - I_a R_a) / (K_e \Phi)$, $I_a = T_L / K_T \Phi$, 则

$$n = U_a / (K_e \Phi) - I_a R_a / (K_e \Phi) = U_a / (K_e \Phi) - (T_L R_a / (K_T K_e \Phi^2))$$

从上式可知,稳定后的转速 n 是与负载的阻力矩 T_L 成线性关系的。负载 T_L 引起的转速变化部分为 Δn

$$\Delta n = I_a R_a / (K_e \Phi) = T_L R_a / (K_T K_e \Phi^2) \propto T_L$$

当 $T_L = 0$, 即理想空载情况下,其转速为理想空载转速 n_0 , 则

$$n_0 = U_a / (K_e \Phi)$$

$$n = n_0 - \Delta n$$

Δn 也就称作负载引起的转速降。

例 2-1 图 2-5 中电动机型号为 Z3-33 型,额定参数值为: $P_N = 2.2 \text{ kW}$, $U_N = 160 \text{ V}$, $I_N = 16.5 \text{ A}$, $n_N = 1500 \text{ r/min}$; $R_a = 0.93 \Omega$, $L_a = 27 \text{ mH}$, $K_e \Phi = 0.096 \text{ V/(r/min)}$, 求加上额定负载后的转速降为多少? 若要求调速系统的调速范围为 $100 \sim 1000 \text{ r/min}$, 能否达到?

解 加额定负载后引起的转速变化即为其转速降

$$\Delta n_N = I_N R_a / (K_e \Phi) = 16.5 \times 0.93 / 0.096 = 160 \text{ r/min}$$

当最低转速 $n_{N\min} = 100 \text{ r/min}$ 时,加上额定负载后引起的转速降为 $160 \text{ r/min} > n_{N\min}$, 显然,当负载由空载向额定负载变化时系统无法在 100 r/min 低速运行,其调速范围达不到要求。

由上例可知,负载引起的转速降影响了系统的调速范围及稳速精度。这是开环调速系统无法解决的。

衡量调速系统的指标有动态指标和静态指标两类,一般以其静态指标为主,静态指标包括调速范围和静差率两个指标。

(1) 调速范围 控制对象要求电动机能提供的额定负载时的最高转速 $n_{N\max}$ 和最低转速 $n_{N\min}$ 之比叫作调速范围,通常用 D 表示,即

$$D = n_{N\max} / n_{N\min}$$

(2) 静差率 电动机在某一转速下运行时,负载由理想空载变到额定负载所产生的转速降与理想空载转速之比称为静差率,常用百分数表示。自动调速系统的静差率通常是对最低额定转速而言的,常用 S 表示,即

$$S = \Delta n_N / n_{0\min} \times 100\%$$

式中, Δn_N 为负载由空载到额定负载的转速降; $n_{0\min}$ 为调速系统最低转速 $n_{N\min}$ 所对应的理想空载转速。

对不同的控制对象,除要求有一定的调速范围外,对静差率有不同的要求,如普通车床允许静差率为 10%~20%,龙门刨床为 6%,冷轧机为 2%,热轧机为 2%~0.5%,造纸机为 10% 以下等。

二、开、闭环调速系统性能的比较

图 2-6 所示为带有速度负反馈的单闭环直流调速系统,这是一种典型的调速系统。

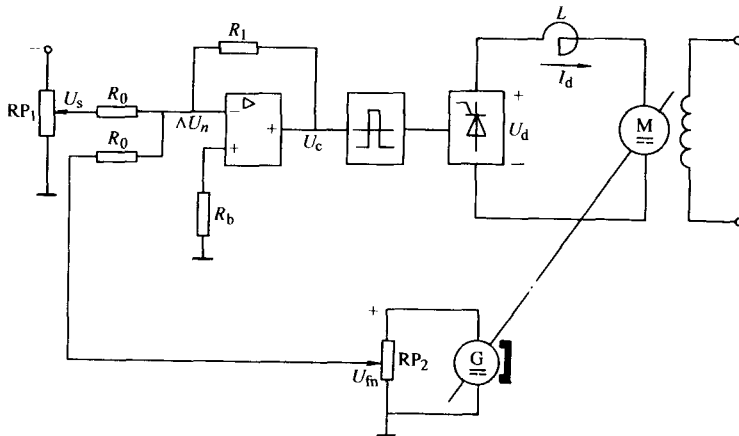


图 2-6 带有转速负反馈的单闭环直流调速系统

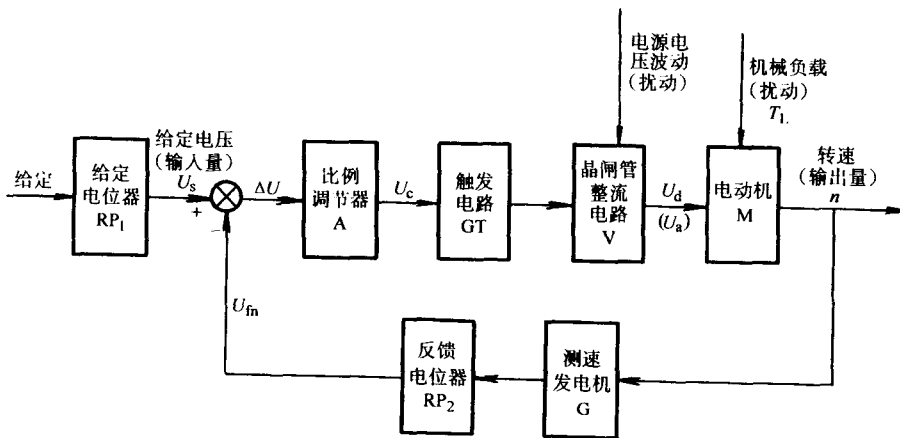


图 2-7 单闭环直流调速系统框图

该调速系统由他励式直流电动机、晶闸管整流装置、永磁式测速发电机、放大器、触发器等

组成，测速发电机实现电动机转速的测量实现转速-电压变换和速度负反馈。测速反馈信号 U_{fn} 与转速成正比 $U_{fn} = \alpha n$ ， α 称为转速反馈系数。系统框图如图 2-7 所示。

系统框图中各环节输入和输出间的静态关系为

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_s - U_{fn} \\ U_c &= K_p \Delta U \\ U_a &= K_s U_c \\ n &= (U_a - I_a R_a) / (K_e \Phi) \\ U_{fn} &= \alpha n\end{aligned}$$

式中， ΔU 为偏差信号； K_p 为放大器的电压放大倍数； K_s 为整流装置的电压放大倍数； U_a 为整流输出理想空载电压（忽略变流装置的内阻抗 $U_d = U_a$ ）， R_a 为电枢回路总电阻， I_a 为电动机工作电流， $K_e \Phi$ 为电动机常数。

在自控理论的分析中，该系统常画成如图 2-8 所示的调速系统静态结构框图。各方框内所标注的是该环节的放大倍数或传递函数（忽略电源电压波动）。

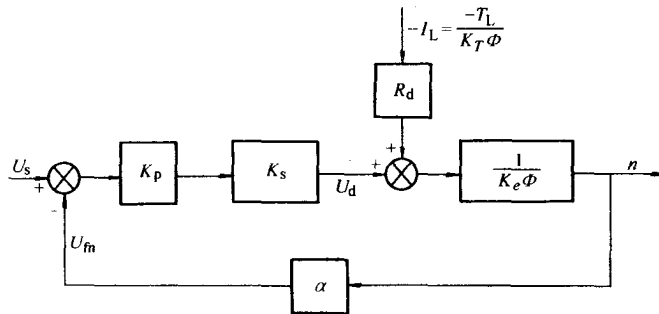


图 2-8 单闭环调速系统静态结构框图

根据框图运算方法，或由上面式子可推得

$$n = K_p K_s U_s / (K_e \Phi) - 1 / (1 + K) I_a R_a / (K_e \Phi) = n_0 - n'$$

同样 n_0 为系统理想空载 ($I_a = 0$) 时的转速， $\Delta n'$ 为负载引起的转速降， $K = K_p K_s \alpha / (K_e \Phi)$ 称为开环增益。

若调速系统不设转速负反馈，即开环系统，则 $\alpha = 0$ ，也即 $K = 0$ ，于是转速降 $n = I_a R_a / (K_e \Phi)$ ，这与前面分析的结论相同。对照开环系统和闭环系统的转速降可知，调速系统增设了负反馈环节后，将使转速降减少为开环时的 $1 / (1 + K)$ ，从而大大提高了系统的控制精度，这是反馈控制系统的一个突出优点。

例 2-2 某单闭环直流电动机转速负反馈调速系统，采用的电动机型号和参数同例 2-1，系统中的其他参数为： $\alpha = 0.01 \text{V}/(\text{r}/\text{min})$ ， $K_p = 40$ ， $K_s = 15$ ，调速范围为 $100 \sim 1000 \text{r}/\text{min}$ 求系统的静差率 S 。

解 开环系统的开环增益为

$$K = K_p K_s \alpha / (K_e \Phi) = 40 \times 15 \times 0.01 / 0.096 = 62.5$$

额定负载下的转速降为

$$\Delta n'_N = I_a R_a / (K_e \Phi (1 + K)) = 16.5 \times 0.93 / (0.096 (1 + 62.5)) = 2.5 \text{r}/\text{min}$$

所以 $S = \Delta n'_N / n_{N\text{min}} \times 100\% = 2.5 / 100 \times 100\% = 2.5\%$

若不设反馈环节，即为开环系统时 $\alpha=0, K=0$ 转速降为

$$\Delta n_N = I_a R_a / (K_e \Phi) = 16.5 \times 0.93 / 0.096 = 160 \text{r/min}$$

这样大的转速降，若负载变化较大，系统无法在低速运行。

三、系统的自动调节过程及其机械特性

1. 电动机内部的自动调节过程

当电动机负载转矩 T_L 发生变化时，直流电动机内部将会产生以适应外界负载转矩变化的自动调节过程，以达到新的 $T_e = T_L$ 的平衡状态。图 2-9 所示为 T_L 增加时的调节过程。

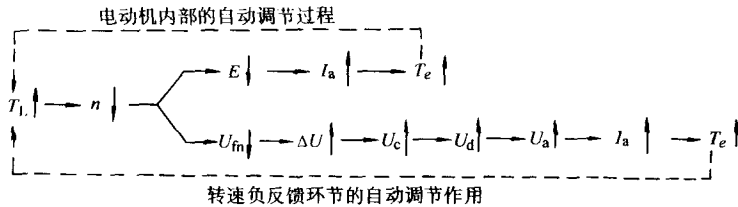


图 2-9 具有转速负反馈的直流调速系统的自动调节过程

可见，电动机本身存在着闭合的因果关系，相当于一个反馈系统。这一调节过程主要是通过电动机内部电动势 E 的变化来进行调节的，直到 $T_e = T_L$ 为止。调节过程是以转速改变为前提的，显然 T_L 增加到稳定后，电动机转速将有所下降。

2. 转速负反馈环节产生的自动调节过程

由于转速负反馈环节的作用而使控制电路产生相应变化的自动调节过程（负载转矩 T_L 增加时）如图 2-9 所示。

两个调节过程中，电动机内部的调节主要是通过电动机反电动势 E 的下降，使电流 I_a 增加；而转速负反馈环节的调节，则主要通过转速负反馈电压 U_{fn} 下降，使偏差电压 U 增加， $(\Delta U = U_s - U_{fn})$ 整流装置电压 U_d 上升，电枢电压 U_a 上升，而使电流 I_a 增加。而电枢电流的增加在磁场的作用下，将使电动机的电磁转矩 T 增加，以适应机械负载转矩 T_L 的增加。这两个调节过程一直进行到 $T_e = T_L$ 时才结束。

3. 转速负反馈对机械特性的影响

图 2-10 所示为转速负反馈环节对调速系统机械特性的影响。

图中 I_a 为整流电流，也即电动机的电枢电流 I_a ， T 为负载转矩，当忽略摩擦转矩时，则 $T_e = T_L = T$ 。当负载转矩由 T_1 增加到 T_3 时，对于开环调速系统，单依靠电动机内部的调节作用，转速将由 n_a 降到 n_d ，（此时整流输出电压平均值为 U_{d1} ）。当设置转速负反馈环节后， T_L 的增加会直接引起转速 n 的下降，导致 $U_{fn} = \alpha n$ 的下降，从而引起 $U = U_s - U_{fn}$ 的增加，这将使晶闸管整流装置的输出平均值由 U_{d1} 增加到 U_{d3} 。这样机械负载增加后的电动机的转速由 n_a 变至 n_c 。由图可见，

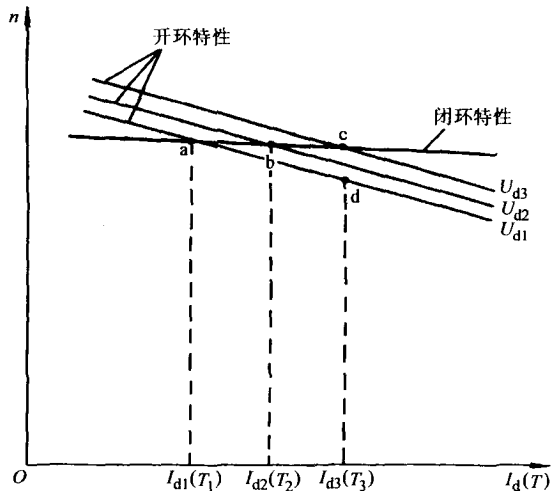


图 2-10 转速负反馈环节对调速系统机械特性的影响

$n_c > n_d$ 显然转速降 n 变小了。这就是说，闭环时调速系统的机械特性要比开环时硬多了。

转速降的减小，是依靠偏差电压 U 的变化来调节的。在这里反馈环节只能是减少转速偏差 n ，而不能消除偏差 ($\Delta n = 0$)。因为倘若转速偏差被完全补偿了，即 n 恢复到原来的数值，那么 U_i 也将恢复到原来的数值，于是 U_c, U_d, U_a 都将恢复到原来的数值，即控制系统没有起调节作用，转速降当然也就不会减少了。所以这种系统是以存在偏差为前提的。反馈环节只是检测偏差、减少偏差，而不能消除偏差，因此它是有静差调速系统。

四、电压负反馈调速系统

采用被控量转速 n 直接反馈的方法构成的闭环控制系统，称速度负反馈调速系统，其调节作用的效果很好，但由于增设了一台测速发电机，安装要求严格，有时还受空间位置的限制而不宜安装，并且维护费用较多。所以在要求不太高的情况下，常采用其他反馈来代替转速负反馈，电枢电压负反馈是其中之一。

在恒定励磁的条件下，速度负反馈实际上就是电动机反电动势负反馈。而电动机反电动势与电动机端电压之间的差值是电枢电阻的压降（稳定时电枢漏感的压降可忽略），此压降值很小，若忽略此压降，电枢电压负反馈基本上能够代替转速负反馈的作用。当负载增加而使供电电流 I_a 增加时，晶闸管整流装置及电源存在的等效内阻 (R_s) 上的压降将增加，这样整流装置的输出电压 U_d （电动机的电枢电压 U_a ）将降低，这将使转速降低。若采用电枢电压负反馈，可使 U_d 的波动减少，从而使转速波动减少。此外，电枢电压负反馈还能抑制电网电压波动对 U_d 的影响。所以，在调速指标要求不高的场合，可以采用电枢电压负反馈来代替转速 n 负反馈；在调速指标要求稍高的场合，可以采用电枢电压负反馈辅以适量的电流正反馈，电流正反馈可补偿电枢电阻压降的影响。电压负反馈直流调速系统的原理图如 2-11 所示。

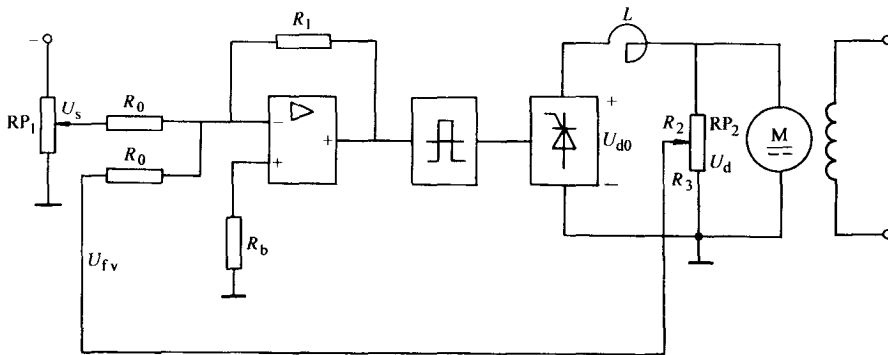


图 2-11 电压负反馈直流调速系统的原理图

电压负反馈直流调速系统框图及静态结构框图，分别如图 2-12、图 2-13 所示。

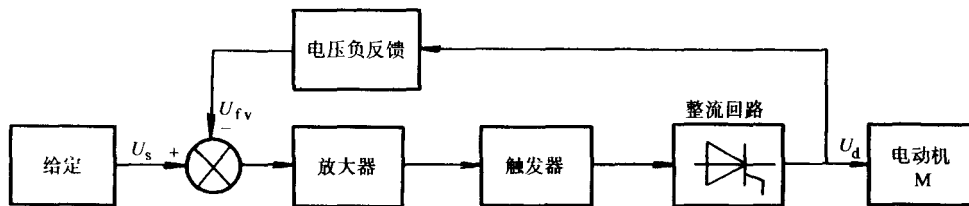


图 2-12 电压负反馈直流调速系统的系统框图

图 2-13 中 γ 为电压反馈系数， R_s 为整流电源内阻与平波电抗器电阻之和， R_a 为电动机电