

5.1 串级控制系统

5.1.1 串级控制系统的提出

串级控制系统是在简单控制系统的基础上发展起来的。当对象的滞后较大,干扰比较剧烈、频繁时,采用简单控制系统往往控制质量较差,无法满足工艺要求,这时可考虑串级控制系统。

例如,管式加热炉是工业生产中常用的设备之一。工艺要求被加热物料(原油)的温度为某一定值,将该温度控制好,一方面可延长炉子的寿命,防止炉管烧坏;另一方面可保证后面精馏分离的质量。为了控制原油的出口温度,依据简单控制系统的方案设计原则,可以考虑选取加热炉的出口温度为被控变量,燃料量为操纵变量,构成如图 5-1(a)所示的简单控制系统(出口温度控制系统),根据原油出口温度的变化控制燃料控制阀的开度,即通过改变燃料量维持原油出口温度,使其保持在工艺所规定的数值上。

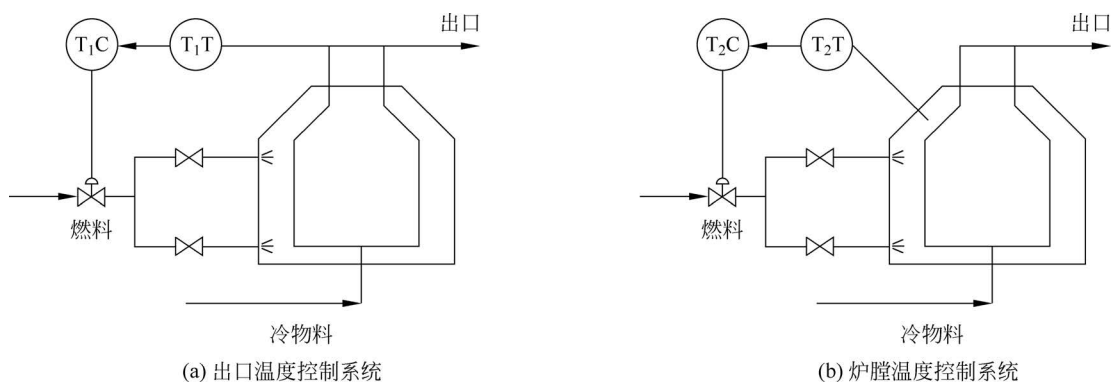


图 5-1 加热炉温度简单控制系统

初看之下,上述控制方案的构成是可行的、合理的,它将所有对温度的扰动因素都包括在控制回路之中,只要扰动导致温度发生了变化,控制器就可通过改变控制阀的开度改变燃料油的流量,将变化了的温度重新调节为设定值。但在实际生产过程中,特别是当加热炉的燃料压力或燃料本身的热值有较大波动时,上述简单控制系统的控制质量往往很差,原料油

的出口温度波动较大,难以满足生产要求。

控制失败的原因在于,当燃料压力或燃料本身的热值变化后,先影响炉膛温度,然后通过传热过程才能逐渐影响原料油的出口温度,这个通道的容量滞后很大,时间常数约为 15 分钟,反应缓慢,而温度控制器 T_1C 是根据原料油的出口温度与设定值的偏差工作的,所以当扰动作用于过程后,并不能较快地产生控制作用以克服扰动对被控变量的影响。由于控制不及时,所以控制质量很差。当工艺上对原料油的出口温度的要求非常严格时,上述简单控制系统无法实现控制效果。为了解决容量滞后问题,还需对加热炉的工艺做进一步分析。

管式加热炉内是一根很长的受热管道,它的热负荷很大。燃料在炉膛内燃烧后,是通过炉膛温度与原料油温度的温差将热量传递给原料油的。燃料量的变化或燃料热值的变化,首先使炉膛温度发生变化。因此,为减小控制通道的时间常数,选择炉膛温度为被控变量,燃料量为操纵变量,设计如图 5-1(b)所示的简单控制系统(炉膛温度控制系统),以维持炉出口温度的稳定要求。

炉膛温度控制系统的特点是:对于包含在控制回路中的燃料油压力及热值的波动 $f_2(t)$ 、烟囱抽力的波动 $f_3(t)$ 等能及时有效地克服。但是,因为来自原料油方面的进口温度及流量波动等扰动 $f_1(t)$ 未包括在该系统内,所以系统不能克服扰动 $f_1(t)$ 对炉出口温度的影响。实际运行情况表明,该系统仍然不能达到生产工艺要求。

综上所述,为了解决管式加热炉的原料油出口温度的控制问题,人们在生产实践中,往往根据炉膛温度的变化,先改变燃料量,然后再根据原料油出口温度与其设定值之差,进一步改变燃料量,以保持原料油出口温度的恒定。模仿这样的人工操作程序就构成了以原料油出口温度为主要被控变量的加热炉出口温度与炉膛温度的串级控制系统,如图 5-2 所示。该串级控制系统的方框图如图 5-3 所示。

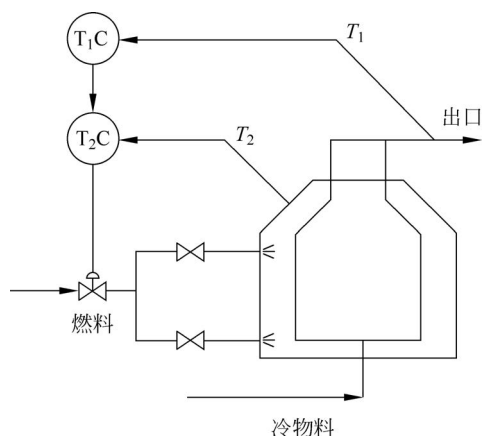


图 5-2 加热炉出口温度与炉膛温度串级控制系统

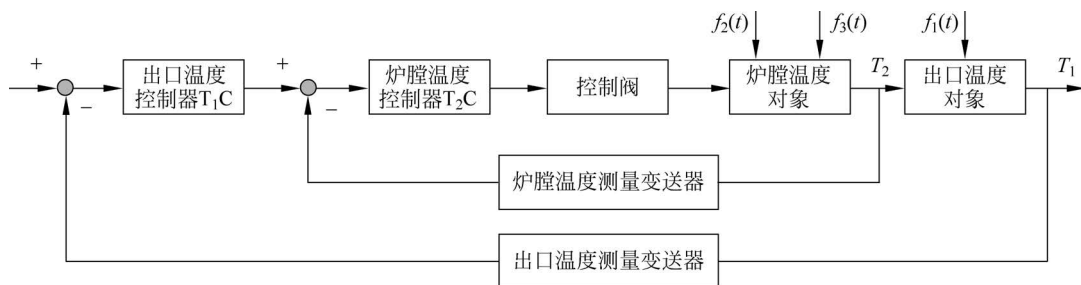


图 5-3 加热炉出口温度与炉膛温度串级控制系统方框图

由图 5-2 或图 5-3 可以看出,在这个控制系统中,有两个控制器 T_1C 和 T_2C ,它们分别接收来自对象不同部位的测量信号,其中, T_1C 的输出作为 T_2C 的设定值,而 T_2C 的输出去调节控制阀以改变操纵变量。从系统的结构来看,这两个控制器是串联连接工作的。

5.1.2 串级控制系统的组成

串级控制系统是一种常用的复杂控制系统,它是根据系统结构命名的。串级控制系统由两个控制器串联连接组成,其中一个控制器的输出作为另一个控制器的设定值。串级控制系统的通用结构如图 5-4 所示。

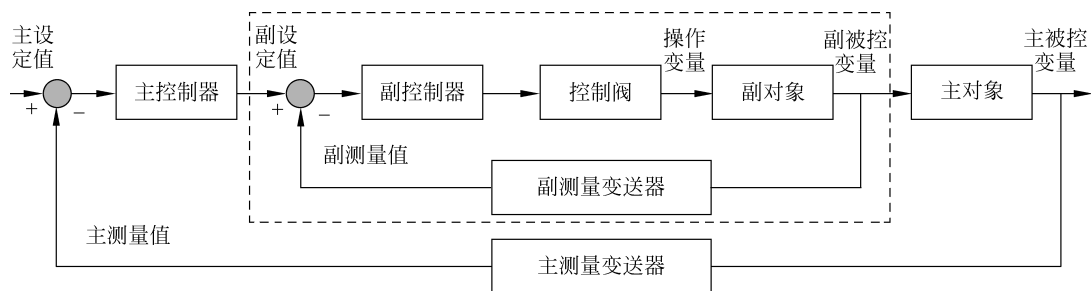


图 5-4 串级控制系统的通用结构

1. 主被控变量

主被控变量是生产过程中的工艺控制指标,在串级控制系统中起主导作用,简称主变量。如上例(指加热炉出口温度与炉膛温度串级控制系统,下同)中的原料油出口温度 T_1 。

2. 副被控变量

串级控制系统中为了稳定主被控变量而引入的中间辅助变量,称为副被控变量(简称副变量)。如上例中的炉膛温度 T_2 。

3. 主对象(主过程)

主对象是生产过程中所要控制的、为主变量表征其特性的生产设备。其输入量为副变量,输出量为主变量,它表示主变量与副变量之间的通道特性。如上例中原料油的炉内受热管道。

4. 副对象(副过程)

副对象是为副变量表征其特性的生产设备。其输入量为操纵量,输出量为副变量,它表示副变量与操纵变量之间的通道特性。在上例中主要指燃料油燃烧装置及炉膛部分。

5. 主控制器

主控制器按主变量的测量值与设定值的偏差而工作,其输出作为副变量设定值。如上例中的出口温度控制器 T_1C 。

6. 副控制器

副控制器的设定值来自主控制器的输出,并按副变量的测量值与设定值的偏差进行工

作,其输出直接去操纵控制阀。如上例中的炉膛温度控制器 T_2C 。

7. 主设定值

主设定值是主变量的期望值,由主控制器内部设定。

8. 副设定值

副设定值是指由主控制器的输出信号提供的副控制器的设定值。

9. 主测量值

主测量值是由主测量变送器测得的主变量值。

10. 副测量值

副测量值是由副测量变送器测得的副变量值。

11. 副回路

处于串级控制系统内部的,由副控制器、控制阀、副对象和副测量变送器组成的闭合回路称为副回路,又称内回路,简称副环或内环(见图 5-4 中虚线框内部分)。

12. 主回路

由主控制器、副回路、主对象和主测量变送器组成的闭合回路称为主回路。主回路为包括副回路的整个控制系统,又称外回路,简称主环或外环。

13. 一次扰动

一次扰动指作用在主对象上、不包含在副回路内的扰动。如上例中被加热物料的流量和初温变化 $f_1(t)$ 。

14. 二次扰动

二次扰动指作用在副对象上,即包含在副回路内的扰动。如上例中燃料油压力及热值的波动 $f_2(t)$ 和烟囱抽力的波动 $f_3(t)$ 。

一般来说,主控制器的设定值是由工艺规定的,它是一个定值,因此主环是一个定值控制系统。而副控制器的设定值是由主控制器的输出提供的,它随主控制器输出的变化而变化,因此副回路是一个随动控制系统。

由图 5-4 可以看出,串级控制系统在结构上具有以下特征:

- (1) 将原被控对象分解为两个串联的被控对象。
- (2) 以连接分解后的两个被控对象的中间变量为副被控变量,构成一个简单控制系统,称为副控制系统、副回路或副环。
- (3) 以原对象的输出信号(即分解后的第二个被控对象的输出信号)为主被控变量,构成一个控制系统,称为主控制系统、主回路或主环。
- (4) 主控制系统中控制器的输出信号作为副控制系统控制器的设定值,副控制系统的

输出信号作为主被控对象的输入信号。

(5) 主回路是定值控制系统。对主控制器的输出而言,副回路是随动控制系统;对进入副回路的扰动而言,副回路是定值控制系统。

5.1.3 串级控制系统的工作过程

仍以管式加热炉为例,说明串级控制系统是如何有效地克服被控对象的容量滞后而提高控制质量的。对于如图 5-2 所示的加热炉出口温度与炉膛温度串级控制系统,为了便于分析,先假定已根据工艺的实际情况选定控制阀为气开式,当气源中断时关闭控制阀,以防止因炉管烧坏而酿成事故。温度控制器 T_1C 和 T_2C 都采用反作用方式(控制阀气开、气关形式的选择原则与简单控制系统时相同),并且假定系统在扰动作用之前处于稳定的“平衡”状态,即此时被加热物料的流量和温度不变,燃料的流量与热值不变,烟囱抽力也不变,炉出口温度和炉膛温度均处于相对平衡状态,燃料控制阀也相应地保持在一定的开度上,此时炉出口温度稳定在设定值上。

当某一时刻系统中突然引入了某个扰动时,系统的稳定状态遭到破坏,串级控制系统便开始了其控制过程。下面针对不同的扰动情况分析该系统的工作过程。

1. 当只有二次扰动作用时

进入副回路的二次扰动来自燃料热值的变化、燃料油压力及热值的波动(即 $f_2(t)$)和烟囱抽力的波动(即 $f_3(t)$)。

$f_2(t)$ 和 $f_3(t)$ 先影响炉膛温度,使副控制器产生偏差,于是副控制器的输出立即开始变化,去调整控制阀的开度以改变燃料流量,克服上述扰动对炉膛温度的影响。当扰动的幅值不太大时,由于副回路的控制速度比较快,及时校正了扰动对炉膛温度的影响,因此该类扰动对加热炉出口温度几乎无影响;当扰动的幅值较大时,经过副回路的及时校正也可使其对加热炉出口温度的影响比无副回路时大大减弱,再经主回路进一步控制,使加热炉出口温度及时调到设定值。由此可见,副回路使控制作用变得更快、更强。

2. 当只有一次扰动作用时

一次扰动主要来自被加热物料的流量波动和初温变化(即 $f_1(t)$)。一次扰动直接作用于主过程,首先使加热炉出口温度发生变化,副回路无法实施及时的校正,主控制器立即开始动作,通过主控制器输出的变化去改变副回路的设定值,再通过副回路的控制作用去及时改变燃料量以克服扰动 $f_1(t)$ 对加热炉出口温度的影响。在这种情况下,副回路的存在仍可加快主回路的控制速度,使一次扰动对加热炉出口温度的影响比简单控制(无副回路)时要小。这表明,当扰动作用于主对象时,串级控制系统能有效克服。

3. 当一次扰动和二次扰动同时作用时

当作用在主对象、副对象上的一次扰动、二次扰动同时出现时,两者对主变量、副变量的影响又可分为同向和异向两种情况。

1) 一次扰动、二次扰动同向作用时

在系统各环节设置正确的情况下,如果一次扰动、二次扰动的作用是同向的,也就是均使主变量、副变量同时增大或同时减小,则主控制器、副控制器对控制阀的控制方向是一致的,即大幅度关或开阀门,加强控制作用,使炉出口温度很快调到设定值。

例如,当炉出口温度因原料油流量的减小或初温的上升而升高,同时炉膛温度也因燃料压力的增大而升高时,炉出口温度升高,主控制器感受的偏差为正,因此它的输出减小,也就是说,副控制器的设定值减小。与此同时,炉膛温度升高,使副测量值增大。这样一来,副控制器感受的偏差是两方面作用之和,是一个较大的正偏差。于是它的输出要大幅度地减小,控制阀则根据这一输出信号,大幅度地关小阀门,燃料流量大幅度地减小,使炉出口温度很快调节到设定值。

2) 一次扰动、二次扰动反向作用时

如果一次扰动、二次扰动的作用使主变量、副变量反向变化,即一个增大而另一个减小,此时主控制器、副控制器控制阀的方向是相反的,控制阀的开度只需进行较小的调整即可满足控制要求。例如,当炉出口温度因原料油流量的减小或初温的上升而升高,而炉膛温度却因燃料压力的减小而降低时,炉出口温度升高,使主控制器的输出减小,即副控制器的设定值也减小。与此同时,炉膛温度降低,副控制器的测量值减小。这两方面作用的结果,使副控制器感受的偏差较小,其输出的变化量也较小,燃料油流量只需进行很小的调整就可以了。事实上,主变量、副变量反向变化,它们之间本身就有互补作用。

从上述分析中可以看出,在串级控制系统中,由于引入了一个副回路,因而能及早克服从副回路进入的二次扰动对主变量的影响,又能保证主变量在其他扰动(一次扰动)作用下能及时加以控制,因此能大大提高系统的控制质量,以满足生产的要求。

5.1.4 串级控制系统的分析

从总体来看,串级控制系统仍然是一个定值控制系统,因此主变量在扰动作用下的过渡过程和简单定值控制系统的过渡过程具有相同的品质指标和类似的形式。但是和简单控制系统相比,串级控制系统在结构上增加了一个与之相连的副回路,因此具有很多特点,下面具体介绍。

1. 副回路改善了对对象的动态特性,提高了系统的工作频率

串级控制系统在结构上区别于简单控制系统的主要标志是用一个闭合的副回路代替了原来的一部分被控对象。因此,也可以将整个副回路看作主回路的一个环节,或将副回路称为等效副对象 $G'_{p2}(s)$,如图 5-5(a)和图 5-5(b)所示。

$G'_{p2}(s)$ 可表示为

$$G'_{p2}(s) = \frac{Y_2(s)}{X_2(s)} = \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{m2}(s)} \quad (5-1)$$

设 $G_{c2}(s) = K_{c2}$, $G_v(s) = K_v$, $G_{p2}(s) = K_{02}/(T_{02}s + 1)$, $G_{m2}(s) = K_{m2}$,代入式(5-1),化简为一阶形式,可得

$$G'_{p2}(s) = \frac{K_{c2} K_v K_{02}}{T_{02}s + 1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}} = \frac{\frac{K_{c2} K_v K_{02}}{1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}}}{1 + \frac{T_{02}s}{1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}}} = \frac{K'_{02}}{T'_{02}s + 1} \quad (5-2)$$

其中,

$$K'_{02} = \frac{K_{c2} K_v K_{02}}{1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}} \quad (5-3)$$

$$T'_{02} = \frac{T_{02}}{1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}} \quad (5-4)$$

因为在任何条件下, $1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2} > 1$, 所以可得

$$T'_{02} < T_{02} \quad (5-5)$$

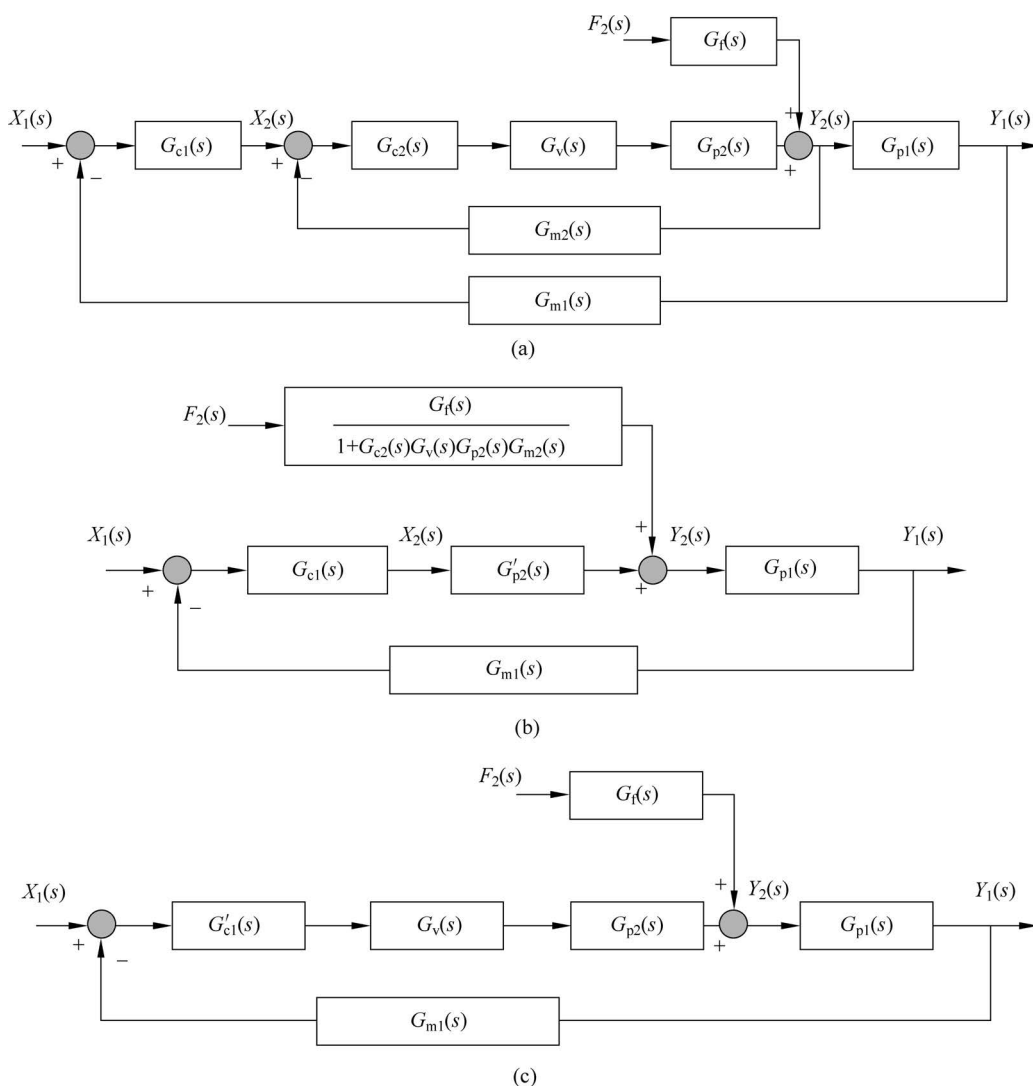


图 5-5 副回路内扰动的影响

由于副过程在一般情况下可以用一阶滞后环节表示,所以如果副控制器采用纯比例作用,那么由于副回路的存在,串级控制系统改善了过程的动态特性,使等效副对象的时间常数 T'_{02} 减小到副对象原值的 $1/(1+K_{c2}K_vK_{02}K_{m2})$ 。等效副对象时间常数的减小,意味着对象的容量滞后减小,这会使系统的反应速度加快,控制更为及时,并且这种效果随着副控制器放大倍数 K_{c2} 的增加而更加显著。如果匹配得当,则在主控制器投入运行时,副回路能很好地随动,近似于一个 $1:1$ 的比例环节。主控制器的等效对象将只是原来被控对象中剩下的部分,因此对象容量滞后的减小,相当于增加了微分作用的超前环节,使控制过程加快,所以串级控制系统对于容量滞后大的对象是有效的。

从其他方面分析,由于等效副对象时间常数减小,所以系统的工作频率可获得提高。

根据图 5-5(b),可得串级控制系统的闭环特征方程为

$$1 + G_{c1}(s)G'_{p2}(s)G_{p1}(s)G_{m1}(s) = 0 \quad (5-6)$$

设 $G_{p1}(s) = K_{01}/(T_{01}s + 1)$, $G_{c1}(s) = K_{c1}$, $G_{m1}(s) = K_{m1}$, 则有

$$T_{01}T'_{02}s^2 + (T_{01} + T'_{02})s + (1 + K_{c1}K'_{02}K_{01}K_{m1}) = 0 \quad (5-7)$$

式(5-7)与二阶标准形式 $s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2 = 0$ 相比较,可得

$$2\xi\omega_0 = \frac{T_{01} + T'_{02}}{T_{01}T'_{02}} \quad (5-8)$$

于是可得串级控制系统的主环工作频率为

$$\omega_{串} = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{2\xi} \frac{T_{01} + T'_{02}}{T_{01}T'_{02}} \quad (5-9)$$

根据如图 5-5(c)所示的简单控制系统方框图,可得同等条件下简单控制系统的特征方程为

$$\begin{cases} 1 + G'_{c1}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{p1}(s)G_{m1}(s) = 0 \\ 1 + K'_{c1}K_v \frac{K_{02}}{T_{02}s + 1} \frac{K_{01}}{T_{01}s + 1} K_{m1} = 0 \end{cases} \quad (5-10)$$

$$T_{01}T_{02}s^2 + (T_{01} + T_{02})s + (1 + K'_{c1}K_vK_{02}K_{01}K_{m1}) = 0 \quad (5-11)$$

式(5-11)与二阶标准形式 $s^2 + 2\xi'\omega'_0s + \omega'^2_0 = 0$ 相比较,可得

$$2\xi'\omega'_0 = \frac{T_{01} + T_{02}}{T_{01}T_{02}} \quad (5-12)$$

于是可得简单控制系统的工作频率为

$$\omega_{单} = \omega'_0 \sqrt{1 - \xi'^2} = \frac{\sqrt{1 - \xi'^2}}{2\xi'} \frac{T_{01} + T_{02}}{T_{01}T_{02}} \quad (5-13)$$

若使串级控制系统和简单控制系统具有相同的衰减比,则衰减系数 $\xi = \xi'$, 于是可得

$$\frac{\omega_{串}}{\omega_{单}} = \frac{(T_{01} + T'_{02})/T_{01}/T'_{02}}{(T_{01} + T_{02})/T_{01}/T_{02}} = \frac{1 + T_{01}/T'_{02}}{1 + T_{01}/T_{02}} \quad (5-14)$$

因为

$$\frac{T_{01}}{T'_{02}} > \frac{T_{01}}{T_{02}} \quad (5-15)$$

所以

$$\omega_{\text{串}} > \omega_{\text{单}} \quad (5-16)$$

由此可见,当主对象、副对象都是一阶惯性环节,主控制器、副控制器均采用纯比例作用时,与简单控制系统相比,在相同衰减比的条件下,串级控制系统的工作频率要高于简单控制系统。而且当主对象、副对象特性一定时,副控制器的放大系数 K_{c2} 整定得越大,串级控制系统的工作频率提高得越明显。当副控制器的放大系数 K_{c2} 不变时,随着 T_{01}/T_{02} 比值的增加,串级控制系统的工作频率也提高。即使扰动作用于主对象,系统的工作频率仍然可以提高,衰减振荡周期就可以缩短,过渡过程的时间相应地也将减小,因而控制质量可获得改善。

综上所述,由于副回路的存在,串级控制系统改善了被控对象的动态特性,控制过程加快,从而有效地解决了容量滞后问题,整个系统的工作频率比简单控制系统的工作频率有所提高,进一步提高了控制质量。

2. 能迅速消除进入副回路的扰动的影 响,提高了系统的抗扰动能力

与同等条件下的简单控制系统相比较,串级控制系统由于副回路的存在,能迅速消除进入副回路的扰动的影响,从而大大提高抗二次扰动的能力(抗一次扰动的能力也有所提高)。这是因为当扰动进入副回路后,在它还未影响到主变量之前,首先由副变量检测到扰动的影响,并通过副回路的定值控制作用,及时调节操纵变量,使副变量调节到设定值,从而使扰动对主变量的影响减小,即副回路对扰动进行粗调,主回路对扰动进行细调。由于对进入副回路的扰动有两级控制措施,因此串级控制系统能迅速消除进入副回路扰动的影响。

如果采用方框图分析,则可进一步揭示问题的本质。如图 5-5(a)所示,对串级控制系统的方框图进行变换,其等效方框图如图 5-5(b)所示。与如图 5-5(c)所示的简单控制系统相比较,扰动作用的影响将减少到原来的 $1/[1+G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{m2}(s)]$ 。由此可见,串级控制系统由于副回路的存在,扰动作用的影响将大为减小,因而对于进入副回路的二次扰动具有较强的克服能力。

根据生产实践的统计数据,与简单控制系统的控制质量相比,当扰动作用于副回路时,串级控制系统的质量提高 10~100 倍;当扰动作用于主回路时,串级控制系统的质量也将提高 2~5 倍,所以串级控制系统改善了控制系统的性能指标。

3. 对负荷变化有一定的自适应能力

在简单控制系统中,控制器的参数是在一定的负荷(即一定的工作点)、一定的操作条件下,根据该负荷下的对象特性,按一定的质量指标整定得到的。因此,一组控制器参数只适用于一定的生产负荷和操作条件。如果被控对象具有非线性,那么随着负荷和操作条件的改变,对象特性就会发生改变。这样,在原负荷下整定所得的控制器参数就不再适用,需要重新整定。如果仍用原来的参数,那么控制质量就会下降。这一问题在简单控制系统中是难以解决的。

但是,在串级控制系统中,主回路虽然是一个定值控制系统,但副回路对主控制器来说是一个随动控制系统,其设定值是随主控制器的输出而变化的。这样,当负荷或操作条件发生变化时,主控制器就可以按照负荷或操作条件的变化情况,及时调整副控制器的设定值,使系统运行在新的工作点上,从而保证在新的负荷和操作条件下,控制系统仍然具有较好的

控制质量。从这一意义上讲,串级控制系统具有一定的自适应能力。

由以上分析可知,如果过程存在非线性,那么在系统设计时可以通过选择适当的副变量而将过程的非线性部分纳入副回路中。当操作条件或负荷发生变化时,虽然副回路的衰减比会发生一些变化,稳定裕度会降低一些,但是它对主回路稳定性的影响很小。具体分析如下:

等效副对象的放大系数为

$$K'_{02} = \frac{K_{c2} K_v K_{02}}{1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}} \quad (5-17)$$

当副控制器的放大倍数(比例增益) K_{c2} 整定得足够大时,副回路前向通道的放大倍数将远大于1,即 $K_{c2} K_v K_{02} K_{m2} \gg 1$, 则

$$K'_{02} = \frac{K_{c2} K_v K_{02}}{1 + K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}} \approx \frac{K_{c2} K_v K_{02}}{K_{c2} K_v K_{02} K_{m2}} = \frac{1}{K_{m2}} \quad (5-18)$$

也就是说,当副控制器的放大倍数 K_{c2} 整定得足够大时,等效副回路的放大倍数只取决于测量变送环节的放大系数 K_{m2} ,而与副对象的放大系数 K_{02} 无关。

由以上分析可以看出,由于副回路的存在,串级控制系统具有一定的自适应能力,适应负荷和操作条件的变化。

综上所述,串级控制系统由于副回路的存在,对于进入其中的扰动具有较强的克服能力;由于副回路的存在改善了过程的动态特性,提高了系统的工作频率,所以控制质量比较高;此外,副回路的快速随动特性使串级控制系统对负荷的变化具有一定的自适应能力。因此,对于控制质量要求较高、扰动大、滞后时间长的过程,当采用简单控制系统达不到质量要求时,采用串级控制方案往往可以获得较为满意的效果。不过串级控制系统比简单(单回路)控制系统所需的仪表多,系统的投运和参数的整定相应地也要复杂一些。因此,当单回路控制系统能够解决问题时,尽量不要采用串级控制方案。

5.1.5 串级控制系统的设计

根据工艺控制要求合理地设计串级控制系统,才能使串级控制的优越性得到充分的发挥。串级控制系统的设计工作主要包括主变量、副变量的选择和主控制器、副控制器控制规律的选择及正、反作用方式的确定。

1. 主变量、副变量的选择

主变量的选择与简单控制系统中被控变量的选择原则相同。当主变量确定以后,副变量的选择是串级控制系统设计的关键问题。副变量选择得合理与否,决定了串级控制系统的特点能否得到充分的发挥,以及串级控制系统的控制质量能否比简单控制时有明显的提高。因此,副变量的选择原则是要充分发挥串级控制系统的优点。

主变量、副变量的选择原则如下:

1) 根据工艺过程的控制要求选择主变量

主变量应反映工艺指标,并且主变量的选择应使主对象有较大的增益和足够的灵敏度。

2) 副变量的选择应使副回路包含主要扰动,并且应包含尽可能多的扰动

由于串级控制系统的副回路具有控制速度快、抗二次扰动能力强的特点,所以如果在设

计中把对主变量影响最严重、变化最剧烈、最频繁的扰动包含在副回路内,就可以充分利用副回路快速抗扰动的性能,将扰动的影响抑制在最低限度,这样,扰动对主变量的影响就会大大减小。而在某些情况下,系统的扰动较多而难以分出主次,这时应考虑使副回路能尽量多地包含一些扰动,这样可以充分发挥副回路的快速抗扰动功能,以提高串级控制系统的控制质量。

必须指出,副回路应尽可能多地包含一些扰动,但并非越多越好。副变量越靠近主变量,它包含的扰动量越多,但同时通道变长,滞后增加;副变量越靠近操纵变量,它包含的扰动量越少,通道越短。因此,要选择一个适当的位置,使副过程在包含主要扰动的同时,能包含适当多的扰动,从而使副回路的控制作用得以更好的发挥。对于加热炉出口温度的控制问题,由于产品质量主要取决于出口温度,而且工艺上对它的要求也比较严格,为此需要采用串级控制方案。现有 3 种方案可供选择,如下所述。

(1) 控制方案一是以出口温度为主变量、燃料油流量为副变量的串级控制系统,如图 5-6 所示。该控制系统的副回路由燃料油流量控制回路组成。因此,当燃料油上游侧的压力波动时,因扰动进入副回路,所以,能迅速克服该扰动的影响。但该控制方案因燃料油的黏度较大、导压管易堵而不常被采用。

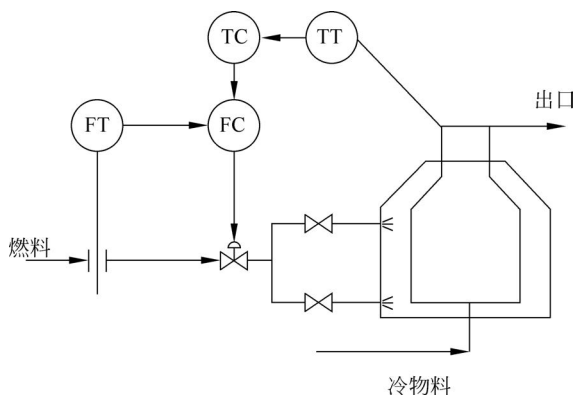


图 5-6 加热炉出口温度与燃料油流量串级控制系统

(2) 控制方案二是以出口温度为主变量、燃料油压力为副变量的串级控制系统,如图 5-7 所示。该控制系统的副回路由燃料油压力控制回路组成。因阀后压力与燃料油流量之间有一一对应关系,因此用阀后压力作为燃料油流量的间接变量,组成串级控制系统。同样,该控制方案因燃料油的黏度大、喷嘴易堵,故常用于使用自力式压力控制装置进行调节的场合,并需要设置燃料油压力的报警联锁系统。这种方案的副对象仅仅是一段管道,时间常数很小,可以更及时地克服燃料油压力的波动。

(3) 控制方案三是以出口温度为主变量、炉膛温度为副变量的串级控制系统。该控制系统的副回路由炉膛温度控制回路组成,用于克服燃料油热值或成分的变化造成的影响,这是控制方案一和方案二所不及的。但炉膛温度检测点的位置应合适,要能够及时反映炉膛温度的变化。

3) 主回路、副回路的时间常数不应太接近,即工作频率错开,以防“共振”现象的发生

在串级控制系统中,主对象、副对象的时间常数不能太接近。这一方面是为了保证副回路具有快速的抗扰动性能,另一方面是由于串级控制系统中主回路、副回路之间是密切相关

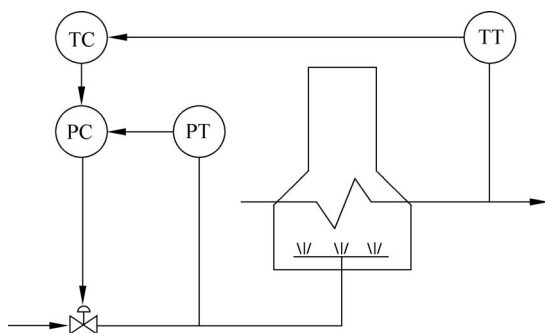


图 5-7 加热炉出口温度与燃料油压力串级控制系统

的，副变量的变化会影响到主变量，而主变量的变化通过反馈回路又会影响到副变量。如果主对象、副对象的时间常数比较接近，那么主回路、副回路的工作频率也就比较接近，这样一旦系统受到扰动，就有可能产生“共振”。系统的“共振”，轻则会使系统的控制质量下降，严重时会导致系统发散而无法工作，因此，必须设法避免串级控制系统“共振”的发生。防止“共振”现象发生的措施是，在设计阶段选择副变量时，应使主对象、副对象的时间常数错开，即有一个很好的匹配。

通常希望副变量有较高的灵敏度，当扰动进入后能及时调节，但不要苛求副对象时间常数的减小。若副对象的时间常数过小，则副回路包含的扰动越少，系统的抗扰动能力反而减弱，对于对象动态特性的改善也较少；反之，若副对象的时间常数过大，虽然副回路包含了更多的扰动，但其调节迟缓，对扰动不能及时克服，克服干扰的灵敏度就降低了。这样，当扰动影响副回路时也会直接影响主回路，副回路的超前调节作用不明显。因此，必须保证 $T_{01} > 3T_{02}$ 。原则上，主对象、副对象的时间常数之比应在 3~10 范围内，以减少主回路、副回路的动态联系，避免“共振”。

特别需要指出的是，在以克服过程容量滞后为主要目的的串级控制系统的设计中，必须注意主对象、副对象时间常数的匹配问题，以防“共振”的发生。这是保证串级控制系统正常运行和安全生产的前提。

4) 主变量、副变量之间应有一定的内在联系

在串级控制系统中，副变量的引入往往是为了提高主变量的控制质量。因此，在主变量确定以后，选择的副变量应与主变量有一定的内在联系。换句话说，在串级控制系统中，副变量的变化应在很大程度上能影响主变量的变化。

选择串级控制系统的副变量一般有两类情况，如下所述：

一类情况是选择与主变量有一定关系的某一中间变量作为副变量，例如，在前面多次举例的管式加热炉出口温度与炉膛温度串级控制系统中，选择的副变量是燃料进入量至原料油出口温度通道中间的一个变量，即炉膛温度。由于它的滞后小、反应速度快，可以提前预报主变量的变化，因此控制炉膛温度对平稳原料油出口温度的波动有着显著的作用。

另一类情况是选择的副变量就是操纵变量本身，这样能及时克服它的波动，减小对主变量的影响。例如，在管式加热炉出口温度与燃料油流量串级控制系统中，燃料油流量既是操纵变量，又是副变量。这样，当扰动来自于操纵变量方面，即燃料油的流量或上游侧的压力波动时，副回路能及时加以克服。

图 5-8 所示的是精馏塔塔釜温度与蒸汽流量串级控制系统的示意图。精馏塔塔釜温度是保证产品分离纯度(主要指塔底产品的纯度)的重要间接控制指标,一般要求它保持为一定的数值。通常采用改变进入再沸器的加热蒸汽量来克服扰动(如精馏塔的进料流量、温度及组分的变化等)对塔釜温度的影响,从而保持塔釜温度恒定。但是,由于温度对象的滞后比较大,当蒸汽压力波动比较厉害时,会造成控制不及时,控制质量不够理想。所以,为了解决这个问题,可以构成如图 5-9 所示的塔釜温度与加热蒸汽流量的串级控制系统。温度控制器 TC 的输出作为蒸汽流量控制器 FC 的设定值,亦即由温度控制的需要来决定流量控制器设定值的“变”与“不变”,或变化的“大”与“小”。通过这套串级控制系统,能够在塔釜温度稳定不变时,使蒸汽流量保持恒定值;而当塔釜温度在外来扰动作用下偏离设定值时,又要求蒸汽流量能做相应的调整,以使能量的需要与供给之间得到平衡,从而使塔釜温度保持在工艺要求的数值上。

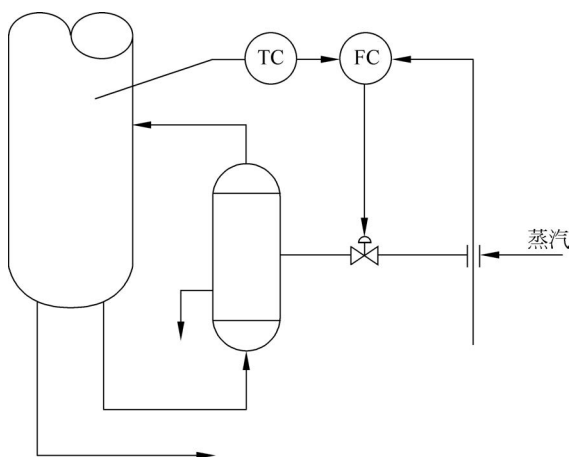


图 5-8 精馏塔塔釜温度串级控制系统

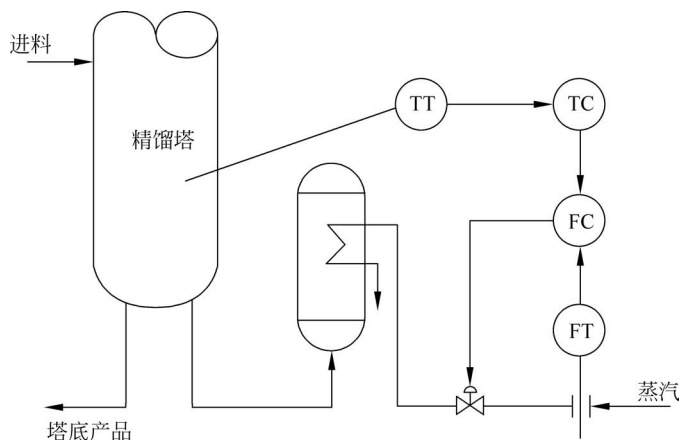


图 5-9 精馏塔塔釜温度与蒸汽流量串级控制系统

在这个例子中,选择的副变量就是操纵变量(加热蒸汽量)本身。这样,当主要扰动来自蒸汽压力或流量的波动时,副回路能及时加以克服,以大大减小这种扰动对主变量的影响,使塔釜温度的控制质量得以提高。

5) 当被控过程具有非线性环节时,副变量的选择一定要使过程的主要非线性环节纳入副回路中

前面分析,串级控制系统具有一定的自适应能力。当操作条件或负荷变化时,主控制器可以适当地修改副控制器的设定值,使副回路在一个新的工作点上运行,以适应变化的情况。非线性环节被包含在副回路之中,它的非线性对主变量的影响就很小了。如图 5-10 所示的乙酸乙炔合成反应器中部温度与换热器出口温度串级控制系统就是一例。

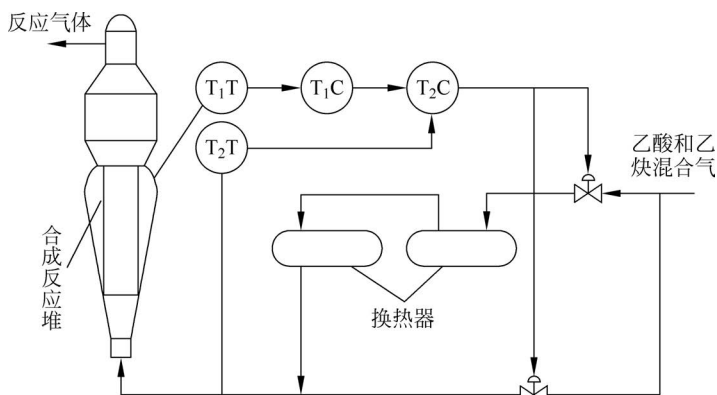


图 5-10 合成反应器中部温度与换热器出口温度串级控制系统

必须指出,在将非线性环节纳入副回路时,仍需注意主、副过程时间常数的匹配。

6) 所选的副变量应使副回路尽量少包含或不包含纯滞后

对于具有较大纯滞后的对象,往往由于控制不及时而使控制质量很差,这时可采用串级控制系统,并通过合理选择副变量尽量将被控过程的纯滞后部分放到主对象中去,以提高副回路的快速抗扰动能力,及时对扰动采取控制措施,将扰动的影响抑制在最小限度内,从而提高主变量的控制质量。

某化纤厂纺丝胶液压力的工艺流程如图 5-11 所示。其中,纺丝胶液由计量泵(作为执行器)输送至板式换热器中进行冷却,随后送往过滤器滤去杂质,然后送往喷丝头喷丝。工艺上要求过滤前的胶液压力稳定在 0.25MPa,因为压力波动将直接影响过滤效果和后面工序的喷丝质量。由于胶液黏度大,且被控对象控制通道的纯滞后比较大,单回路压力控制方案效果不好,所以为了提高控制质量,可在计量泵与冷却器之间,靠近计量泵(执行器)的某个适当位置选择一个压力测量点,并以它为副变量组成一个压力与压力的串级控制系统。当纺丝胶液的黏度发生变化或因计量泵前的混合器有污染而引起压力变化时,副变量会及时作出反应,并通过副回路进行克服,从而稳定了过滤器前的胶液压力。

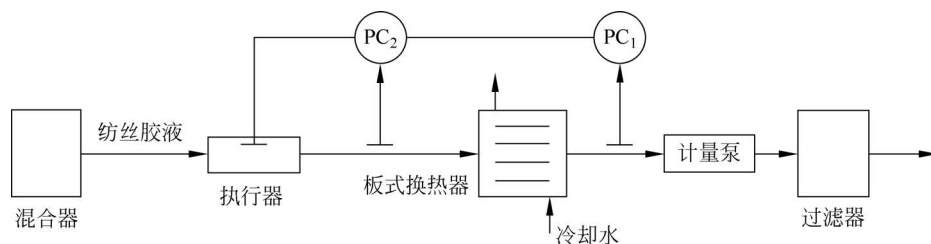


图 5-11 压力与压力的串级控制系统

应当指出,利用串级控制系统克服纯滞后的方法有很大的局限性,即只有当纯滞后环节能够大部分乃至全部都可以被划入主对象中时,这种方法才能有效地提高系统的控制质量,否则将不会获得很好的效果。

7) 选择副变量时需考虑到工艺上的合理性和方案的经济性

在选择副变量时,除了必须遵守上述几条原则以外,还必须考虑到控制方案在工艺上的合理性。一方面,主变量、副变量之间应有一定的内在联系;另一方面,因为自动控制系统是为生产服务的,因此在设计系统时,首先要考虑到生产工艺的要求,考虑所设置的系统是否会影响到工艺系统的正常运行,然后再考虑其他方面的要求,否则将会导致所设计的串级控制系统从控制角度上看是可行的、合理的,但不符合工艺操作上的要求。基于以上两方面的原因,在选择副变量时,必须考虑副变量设定值的变动在工艺上是否合理。

在选择副变量时,常会出现不止一个可供选择的方案,在这种情况下,可以根据对主变量控制性能的要求及经济性等原则来决定取舍。

丙烯冷却器是基于液丙烯气化需吸收大量热量的原理而使热物料冷却的工艺设备。图 5-12(a)、(b)分别为丙烯冷却器的两种串级控制方案。两者均以被冷却气体的出口温度作为主变量,但副变量的选择各不相同,方案(a)是以冷却器液位为副变量,而方案(b)是以蒸发后的气丙烯压力为副变量。从控制的角度看,以蒸发压力作为副变量的方案(b)要比以冷却器液位作为副变量的方案(a)灵敏、快速,但是,假如冷冻机入口压力(气体丙烯返回冷冻压缩机冷凝后重复使用)在两种情况下都相等,那么方案(b)中的丙烯蒸发压力必须比方案(a)中的气相压力要高一些,才能有一定的控制范围,这样冷却温差就要减小,这会使冷却剂利用不够充分。方案(b)还需要另外设置一套液位控制系统,以维持一定的蒸发空间,防止气丙烯带液进入冷冻机而危及后者的安全,这样方案(b)的仪表投资费用相应地也要有所增加。相比之下,方案(a)虽然较为迟钝(因为它是借助于传热面积的改变以达到控制温度的目的的,因此反应比较慢),不如方案(b)灵敏,但是较为经济,所以,在对出口温度的控制要求不是很高的情况下,可以采用方案(a)。当然,决定取舍时还应考虑其他各方面的条件及要求。

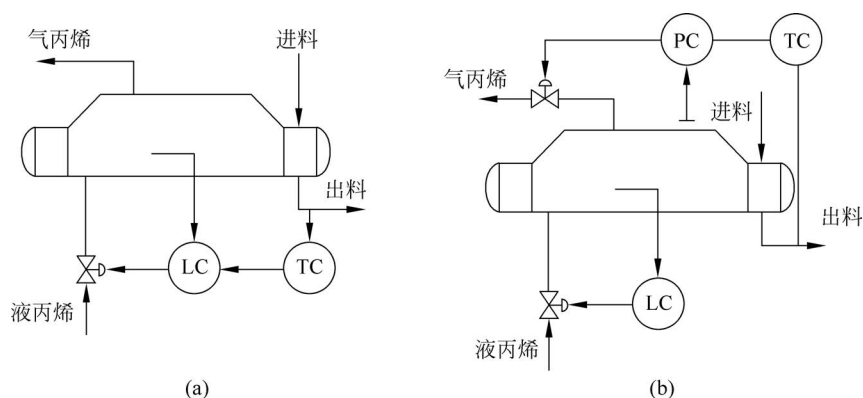


图 5-12 丙烯冷却器两种不同的串级控制方案

以上虽然给出了主变量、副变量选择的基本原则,但是,在一个实际的被控过程中,可供选择的副变量并非都能满足控制要求,必须根据实际情况综合考虑。

2. 主控制器、副控制器控制规律的选择

串级控制系统有主、副两个控制器,它们在系统中所起的作用是不同的。主控制器起定值控制作用,副控制器起随动控制作用,这是选择控制规律的基本出发点。

从串级控制系统的结构上看,主回路是一个定值控制系统,因此主控制器控制规律的选择与简单控制系统类似。但采用串级控制系统的主变量往往是工艺操作的主要指标,工艺要求较严格,允许的波动范围很小,一般不允许有余差。因此,通常都采用比例积分(PI)控制规律或比例-积分-微分(PID)控制规律。这是因为比例作用是一种最基本的控制作用,为了消除余差,主控制器必须具有积分作用,有时,过程控制通道的容量滞后比较大(像温度过程和成分过程等),为了克服容量滞后,可以引入微分作用来加速过渡过程。

副回路既是随动控制系统又是定值控制系统,而副变量则是为了稳定主变量而引入的辅助变量,对其一般无严格的指标要求。为了提高副回路的快速性,副控制器最好不带积分作用,在一般情况下,副控制器只采用纯比例(P)控制规律就可以了。但是在选择流量参数作为副变量的串级控制系统中,流量过程的时间常数和时滞都很小,为了保持系统稳定,比例度必须选得较大,这样,比例控制作用偏弱,为了防止同向扰动的积累,也会适当引入较弱的积分作用,这时副控制器采用比例积分(PI)控制规律。此时引入积分作用的目的是不是消除余差,而是增强控制作用。一般副回路的容量滞后相对较小,所以副控制器无须引入微分控制作用。这是因为副回路本身就起着快速随动作用,如果引入微分规律,那么当其设定值突变时易产生过调而使控制阀动作幅度过大,对系统控制不利。

综上所述,主控制器、副控制器控制规律的选择应根据控制系统的要求确定。

(1) 主控制器控制规律的选择。

根据主回路是定值控制系统的特点,为了消除余差,应采用积分控制规律;通常串级控制系统用于慢对象,为此,也可采用微分控制规律。据此,主控制器的控制规律通常为PID或PI。

(2) 副控制器控制规律的选择。

副回路对主回路而言是随动控制系统,对副变量而言是定值控制系统。因此,从控制要求看,通常无消除余差的要求,即可不用积分作用;但当副变量是流量并有精确控制该流量的要求时,可引入较弱的积分作用。因此,副控制器的控制规律通常为P或PI。

例如,在加热炉出口温度与炉膛温度控制系统中,主(出口温度)控制器应选PID控制规律,而副控制器只需选择纯比例(P)控制规律就可以了。而在加热炉出口温度与燃料流量控制系统中,副控制器则应选择比例积分(PI)控制规律,并且应将比例度选得较大。

3. 主控制器、副控制器正、反作用的选择

与简单控制系统一样,一个串级控制系统要实现正常运行,其主回路、副回路都必须构成负反馈,因而必须正确选择主控制器、副控制器的正、反作用方式。

根据各种不同情况,主控制器、副控制器的正、反作用方式的选择方法如下所述。

(1) 串级控制系统中副控制器作用方式的选择,是根据工艺安全等要求,在选定控制阀的气开、气关形式后,按照使副回路构成副反馈系统的原则来确定的。因此,副控制器的作用方式与副对象特性及控制阀的气开、气关形式有关,其选择方法与简单控制系统中控制器

正、反作用的选择方法相同。这时可不考虑主控制器的作用方式,只是将主控制器的输出作为副控制器的设定值就行了。

为了保证副回路为负反馈,必须满足:副控制器、执行器、副对象三者的作用符号相乘为负,即

$$(\text{副控制器} \pm) \times (\text{执行器} \pm) \times (\text{副对象} \pm) = (-) \quad (5-19)$$

满足该式的各环节作用符号的确定与简单控制时完全一样,这里不再重述。

(2) 串级控制系统中主控制器作用方式的选择完全由工艺情况确定,而与控制阀的气开、气关形式及副控制器的作用方式完全无关,即只需根据主对象的特性,选择与其作用方向相反的主控制器的正、反作用。

选择时,把整个副回路简化为一个方框,该方框的输入信号是主控制器的输出信号(即副变量的设定值),而输出信号就是副变量,且副回路(即副环)方框的输入信号与输出信号之间总是正作用,即输入增加,输出亦增加。这样,就可将串级控制系统简化成如图 5-13 所示的形式。

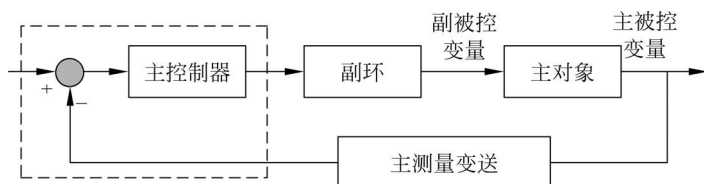


图 5-13 简化的串级控制系统方框

由于副回路是一个随动控制系统,因此,整个副回路可视为一个特性(放大系数)为“正”的环节看待。这样,主控制器的正、反作用实际上只取决于主对象的放大系数符号。主控制器作用方式的选择亦与简单控制系统一样,为使主回路构成负反馈控制系统,主控制器的正、反作用方式应满足:

$$(\text{主控制器} \pm) \times (\text{主对象} \pm) = (-) \quad (5-20)$$

即主控制器的正、反作用方式应与主对象的特性相反。

对于图 5-9 所示的塔釜温度与加热蒸汽流量串级控制系统,其主控制器、副控制器正、反作用的选择步骤如下所述。

(1) 分析主变量、副变量。

主变量:塔釜温度;

副变量:加热蒸汽流量。

(2) 确定副控制器的正、反作用。

控制阀:气关阀,符号为“-”;

副对象:因加热蒸汽流量既是操纵变量又是副变量,故该环节为“+”;

副控制器:为保证副回路构成负反馈,应选正作用。

(3) 确定主控制器的正、反作用。

主对象:当加热蒸汽流量增加时,塔釜温度随之升高,因此,该环节为“+”;

主控制器:为保证主回路构成负反馈,应选反作用。

(4) 主控制器方式更换。

由于副控制器是正作用,因此,当控制系统从串级切换到主控时,应将主控制器的作用

方式从原来的反作用切换到正作用。

4. 串级控制系统的实施

在主变量、副变量和主控制器、副控制器的选型确定之后,就可以考虑串级控制系统的构成方案了。由于仪表种类繁多,生产上对系统功能的要求也各不相同,因此对于一个具体的串级控制系统有着不同的实施方案。究竟采用哪种方案,要根据具体的情况和条件而定。

一般来说,在选择具体的实施方案时,应考虑以下几个问题。

(1) 所选择的方案应能满足指定的操作要求。主要是考虑在串级运行之外,是否需要副回路或主回路单独进行自动控制,然后才能选择相应的方案。

(2) 实施方案应力求实用,简单可靠。在满足要求的前提下,所需仪表装置应尽可能投资少,这样既可使操作方便,又能保证经济性。采用仪表越多,出现故障的可能性也就越大。

(3) 所选用的仪表信号必须互相匹配。在选用不同类型的仪表组成串级控制系统时,必须配备相应的信号转换器,以达到信号匹配的目的。

(4) 所选用的副控制器必须具有外给定输入接口,否则无法接收主控制器输出的外给定信号。

(5) 实施方案应便于操作,并能保证投运时实现无扰动切换。串级控制系统有时要进行副回路单独控制,有时要进行遥控,甚至有时要进行“主控”(即主控制器的输出直接控制控制阀。当有“主控”要求时,需增加一个切换开关,作“串级”与“主控”的切换之用),所有这些操作之间的切换工作要能方便地实现,并且要求切换时应保证无扰动。

为了说明上述原则的应用,下面以 DDZ-Ⅲ型(或 DDZ-Ⅱ型)单元组合仪表组成的串级控制系统为例进行说明。

图 5-14 所示的是一般的串级控制方案。该方案中采用了两台控制器,主变量、副变量通过一台双笔记录仪进行记录。由于副控制器的输出信号是 DC 4~20mA,而气动控制阀只能接收 20~100kPa 的气压信号,因此,在副控制器与气动控制阀之间设置了一个电-气转换器,由它将 DC 4~20mA 的电流信号转换成 20~100kPa 的气压信号送往控制阀(也可直接在控制阀上设置一台电-气阀门定位器来完成电-气信号的转换工作)。此外,如果副变量是流量参数,而采用孔板作为流量测量元件时,应在副变送器之后增加一台开方器(如果主变量是流量,也需进行如此处理)。本方案可实现串级控制、副回路单独控制和遥控 3 种操作,比较简单、方便、实用,是使用较为普遍的一种串级控制方案。

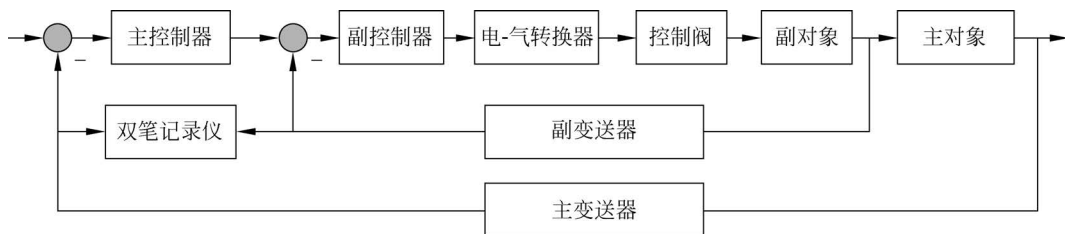


图 5-14 用 DDZ-Ⅲ型、DDZ-Ⅱ型仪表组成串级控制系统方框图

图 5-15 所示的是能实现主控-串级切换的串级控制方案。本方案的特点是在副控制器的输出端上增加了一个主控-串级切换开关,并且与主控制器的输出相连接。因此,该方案

除能进行手动遥控、副回路自控和串级控制外,还能实现主回路直接自控。但是,对这种主回路的直接自控方式应当限制使用,特别是当副控制器为正作用时,只有主控制器改变原作用方式后,方可进行这种主回路的直接自控。当切换回串级控制时,主控制器又要进行换向,否则将会造成严重的生产事故,这一点必须引起重视。因此,在不是特别需要的情况下,建议不要采用这种方案。

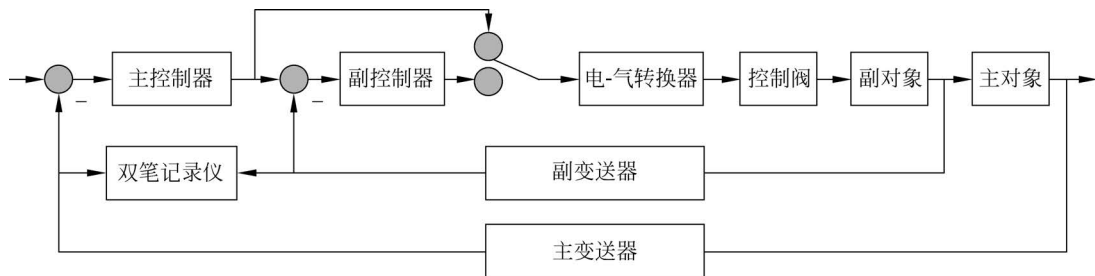


图 5-15 用电动Ⅲ型、Ⅱ型仪表组成主控-串级控制方块图

5.1.6 串级控制系统整定方法

串级控制系统在结构上有主、副两个控制器相互关联,因其控制器参数的整定要比简单控制系统复杂,所以在整定串级控制系统的控制器参数时,首先必须明确主回路、副回路的作用,以及对主变量、副变量的控制要求,然后通过控制器参数整定,使系统运行在最佳状态。

从整体上看,串级控制系统的主回路是一个定值控制系统,要求主变量有较高的控制精度,其控制品质的要求与简单定值控制系统控制品质的要求相同;但就一般情况而言,串级控制系统的副回路是为提高主回路的控制品质而引入的一个随动控制系统,因此,对副回路没有严格的控制品质的要求,只要求副变量能够快速、准确地跟踪主控制器的输出变化,即作为随动控制系统考虑。这样对副控制器的整定要求不高,从而可以使整定简化。

串级控制系统的整定方法比较多,有逐步逼近法、两步整定法和一步整定法等。整定的顺序都是先副环后主环,这是它们的共同点。在此仅介绍目前在工程上常用的两步整定法和一步整定法。

1. 两步整定法

所谓两步整定法,就是分两步进行整定,先整定副环,再整定主环。具体步骤如下所述。

(1) 在工况稳定,主回路、副回路闭合,主控制器、副控制器都在纯比例作用的条件下,将主控制器的比例度先置于 100% 的刻度上,用简单控制系统的整定方法按某一衰减比(如 4:1)整定副环,求取副控制器的比例度 δ_{2s} 和振荡周期 T_{2s} 。

(2) 将副控制器的比例度置于所求的数值 δ_{2s} 上,把副回路作为主回路中的一个环节,用同样的方法整定主回路以达到相同的衰减比,求得主控制器的比例度 δ_{1s} 和振荡周期 T_{1s} 。

(3) 根据所得到的 δ_{1s} 、 T_{1s} 、 δ_{2s} 、 T_{2s} 的数值,结合主控制器、副控制器的选型,按前面简单控制系统整定时所给出的衰减曲线法经验公式,计算出主控制器、副控制器的比例度 δ 、

积分时间 T_I 和微分时间 T_D 。

(4) 按“先副环、后主环”“先比例次积分最后微分”的整定顺序,将上述计算所得的控制器参数分别加到主控制器、副控制器上。

(5) 观察主变量的过渡过程曲线,如不满意,可对整定参数做适当调整,直到获得满意的过渡过程为止。

两步整定法虽能满足主变量、副变量的要求,但要分两步进行,需寻求两个 4 : 1 的衰减振荡过程,比较烦琐费时。为了简化步骤,串级控制系统中主控制器、副控制器的参数整定可以采用一步整定法。

2. 一步整定法

所谓一步整定法,就是根据经验先将副控制器的参数一次设置好,不再变动;然后按照一般简单控制系统的整定方法,直接整定主控制器的参数。

一步整定法的依据是:在串级控制系统中,一般来说,主变量是工艺的主要操作指标,直接关系到产品的质量或生产过程的正常运行,因此,对它的要求比较严格;而副变量的设置主要是为了提高主变量的控制质量,对副变量本身没有很高的要求,允许它在一定范围内变化。因此,在整定时不必将过多的精力放在副环上,只要根据经验把副控制器的参数置于一定数值后,一般不再进行调整,而集中精力整定主环,使主变量达到规定的质量指标要求即可。虽然按照经验一次设置的副控制器参数不一定合适,但是没有关系,因为对于一个具体的串级控制系统来说,在一定范围内,主控制器、副控制器的放大系数是可以互相匹配的。如果副控制器的放大系数(比例度)不合适,那么可以通过调整主控制器的放大系数(比例度)来进行补偿,结果仍然可使主变量实现 4 : 1 的衰减振荡过程。经验证明,这种整定方法对于对主变量的精度要求较高,而对副变量没有什么要求或要求不严,允许它在一定范围内变化的串级控制系统,是很有效的。

根据长期实践和大量的经验积累,人们总结得出副控制器在不同副变量情况下的经验比例度取值范围,见表 5-1。

表 5-1 副控制器比例度经验值

副变量类型	温度	压力	流量	液位
比例度/%	20~60	30~70	40~80	20~80

一步整定法的整定步骤如下所述。

(1) 在生产正常、系统为纯比例运行的条件下,按照表 5-1 所列的经验数据,将副控制器的比例度调到某一适当的数值。

(2) 将串级控制系统投运后,按简单控制系统的某种参数整定方法直接整定主控制器参数。

(3) 观察主变量的过渡过程,适当调整主控制器参数,使主变量的性能指标达到规定的质量要求。

(4) 如果系统出现“共振”现象,可加大主控制器或减小副控制器的比例度值,以消除“共振”。如果“共振”剧烈,那么可先转入手动,待生产稳定后,再在比产生“共振”时略大的控制器比例度下重新投运和整定,直至取得满意的效果。

5.1.7 串级控制系统的应用举例

1. 用于具有较大纯滞后的过程

一般工业过程均具有纯滞后,而且有些比较大。当工业过程纯滞后时间较长,用简单控制系统不能满足工艺控制要求时,可考虑采用串级控制系统。其设计思路是,在离控制阀较近、纯滞后较小的地方选择一个副变量,构成一个控制通道短且纯滞后较小的副回路,把主要扰动纳入副回路中。这样就可以在主要扰动影响主变量之前,由副回路对其实施及时的控制,从而大大减小主变量的波动,提高控制质量。

应该指出,利用副回路的超前控制作用来克服控制过程的纯滞后仅仅是对二次扰动而言的。当扰动从主回路进入时,这一优越性就不存在了。因为一次扰动不直接影响副变量,只有当主变量改变以后,控制作用通过较大的纯滞后才能对主变量起控制作用,所以对改善控制性能作用不大。

1) 锅炉过热蒸汽温度串级控制系统

锅炉是石油、化工、发电等工业过程中必不可少的重要动力设备,它所产生的高压蒸汽既可作为驱动涡轮的动力源,又可作为精馏、干燥、反应、加热等过程。热源锅炉设备的控制任务是,根据生产负荷的需要,供应一定具有压力或温度的蒸汽,同时要使锅炉在安全、经济的条件下运行。锅炉的蒸汽过热系统包括一级过热器、减温器、二级过热器。工艺要求选取过热蒸汽温度为被控变量,减温水流量作为操纵变量,使二级过热器出口温度 T_1 维持在允许范围内,并保护过热器使管壁温度不超过允许的工作温度。

影响过热蒸汽温度的扰动因素很多,如蒸汽流量、燃烧工况、减温水量、流经过热器的烟气温度和流速等。在各种扰动下,控制过程的动态特性都有较大的惯性和纯滞后,这给控制带来了一定的困难,所以要选择合理的控制方案,以满足工艺要求。

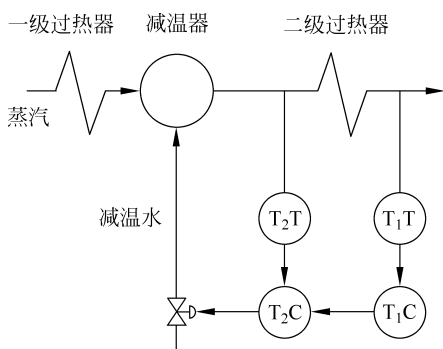


图 5-16 过热蒸汽温度串级控制系统

根据工艺要求,如果以二级过热器出口温度作为被控变量,选取减温水流量作为操纵变量组成简单控制系统,由于控制通道的时间常数及纯滞后均较大,则往往不能满足生产的要求。因此,常采用如图 5-16 所示的串级控制系统,以减温器出口温度 T_2 作为副变量,将减温水压力波动等主要扰动纳入纯滞后极小的副回路,利用副回路具有较强的抗二次扰动能力这一特点将其克服,从而提高对过热蒸汽温度的控制质量。

2) 网前箱温度串级控制系统

某造纸厂网前箱的温度控制系统,如图 5-17 所示。纸浆用泵从储槽送至混合器,在混合器内用蒸汽加热至 72°C 左右,经过立筛、圆筛除去杂质后送到网前箱,再去铜网脱水。为了保证纸张质量,工艺要求网前箱温度保持在 61°C 左右,最大偏差不得超过 1°C 。

若采用简单控制系统,从混合器到网前箱的纯滞后达 90s,当纸浆流量波动为 $35\text{kg}/\text{min}$ 时,温度最大偏差达 8.5°C ,过渡过程时间长达 450s。控制质量较差,不能满足工艺要求。

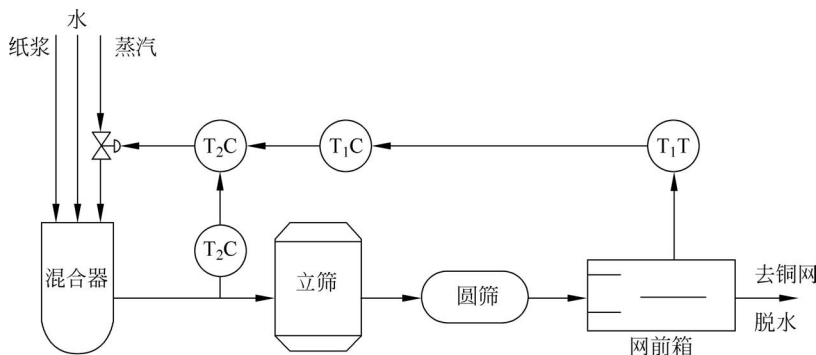


图 5-17 网前箱温度串级控制系统

为了克服 90s 的纯滞后,选择距控制阀较近处的混合器出口温度为副变量,网前箱出口温度为主变量,构成串级控制系统,将纸浆流量达 35kg/min 的波动及蒸汽压力波动等主要扰动包括在了纯滞后极小的副回路中。当上述扰动出现时,由于副回路的快速控制,网前箱温度的最大偏差在 1℃ 以内,过渡过程时间为 200s,因此完全能够满足工艺要求。

2. 用于具有较大容量滞后的过程

在工业生产中,有许多以温度或质量参数作为被控变量的控制过程,其容量滞后往往比较大,而生产上对这些参数的控制要求又比较高。如果采用简单控制系统,则因容量滞后较大,对控制作用反应迟钝而使超调量增大,过渡过程时间长,其控制质量往往不能满足生产要求。如果采用串级控制系统,则可以选择一个滞后较小的副变量组成副回路,使等效副过程的时间常数减小,以提高系统的工作频率,加快响应速度,增强抗各种扰动的能力,从而取得较好的控制质量。但是,在设计和应用串级控制系统时要注意:副回路时间常数不宜过小,以防止包括的扰动太少;但也不宜过大,以防止产生共振。副变量要灵敏可靠,有代表性,否则串级控制系统的优势得不到充分发挥,控制质量仍然不能满足要求。

如图 5-18 所示为一个辊道窑温度串级控制系统。道窑主要用于素烧或釉烧地砖、外墙砖、釉面砖等产品。由于辊道窑烧成时间短,要求烧成温度在较小的范围内波动,所以必须对烧成带和其他各区的温度实现自动控制。其中烧成带窑温控制可确保其窑温稳定,以保证烧成质量。由于辊道窑有马弗板,窑温过程的时间常数很大,放大系数较小;随着窑龄的增长,马弗板老化与堆积物的增多,使其传热系数减小,火道向窑道的传热效率降低,时间常数增大。这里选取火道温度为副变量构成串级控制系统的副回路,它对于燃料油的压力和黏度、助燃风量的变化等扰动所引起的火道温度变化都能快速进行控制。当产品移动速度变化、窑内冷风温度变化等扰动引起窑道温度变化时,由于主回路的控制作用能使窑道温度稳定在预先设定的数值上,所以采用串级控制,提高了产品质量,满足了生产要求。

3. 用于存在变化剧烈和较大幅值扰动的过程

在分析串级控制系统的特点时已指出,串级控制系统对于进入副回路的扰动具有较强的抑制能力。所以,在工业应用中只要将变化剧烈而且幅值大的扰动包含在串级系统的副回路之中,就可以大大减小其对主变量的影响。

例如,精馏塔提馏段塔釜温度控制系统。为了保证塔底产品符合质量要求,以塔釜温度

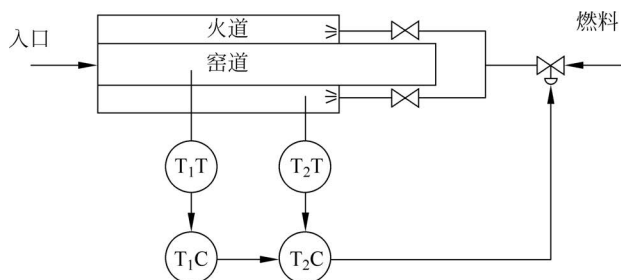


图 5-18 窑道温度与火道温度的串级控制系统

作为控制指标,生产工艺要求塔釜温度控制在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 范围内。在实际生产过程中,蒸汽压力变化剧烈,而且幅度大(有时从 0.5MPa 突然降到 0.3MPa)。对于如此大的扰动作用,若采用简单控制系统,在达到最好的整定效果时,塔釜温度的最大偏差仍达 10°C 左右,无法满足生产工艺要求。以蒸汽流量为副变量、塔釜温度为主变量的串级控制系统,将蒸汽压力变化这个主要扰动包括在副回路中,充分利用了串级控制系统对于进入副回路的扰动具有较强抑制能力的特点,并将副控制器的比例度调到 20% ,实际运行表明,塔釜温度的最大偏差不超过 1.5°C ,完全能够满足生产工艺要求。

4. 用于具有非线性特性的过程

一般工业过程的静态特性都有一定的非线性,负荷的变化会引起工作点的移动,导致过程的静态放大系数发生变化。当负荷比较稳定时,这种变化不大,因此可以不考虑非线性的影响,可使用简单控制系统。但当负荷变化较大且频繁时,就要考虑它所造成的影响了。因负荷变化频繁,显然用重新整定控制器参数来保证系统的稳定性是行不通的。虽然可通过选择控制阀的特性来补偿,使整个广义过程具有线性特性,但常常受到控制阀种类等各种条件的限制,所以这种补偿也是很不完全的,此时简单控制系统往往不能满足生产工艺要求。有效的办法是利用串级控制系统对操作条件和负荷变化具有一定自适应能力的特点,将被控对象中具有较大非线性的部分包括在副回路中,当因负荷变化而引起工作点移动时,由主控制器的输出自动地重新调整副控制器的设定值,继而由副控制器的控制作用来改变控制阀的开度,使系统运行在新的工作点上。虽然这样会使副回路的衰减比有所改变,但它的变化对整个控制系统的稳定性影响较小。

在乙酸乙炔合成反应器的中部温度是保证合成气质量的重要参数,工艺要求对其进行严格控制。由于在中部温度的控制通道中包括了两个换热器和一个合成反应器,所以当乙酸和乙炔混合气的流量发生变化时,换热器的出口温度随着负荷的减小而显著升高,并呈现出明显的非线性变化,因此整个控制通道的静态特性随着负荷的变化而变化。如果选取反应器中部温度为主变量,换热器出口温度为副变量构成串级控制系统,将具有非线性特性的换热器包括在副回路中,则由于串级控制系统对于负荷的变化具有一定的自适应能力,从而提高了控制质量,达到了工艺要求。

综上所述,串级控制系统的适用范围比较广泛,尤其是当被控过程滞后较大或具有明显的非线性特性、负荷和扰动变化比较剧烈的情况下,对于单回路控制系统不能胜任的工作,串级控制系统则显示出了它的优越性。但是,在具体设计系统时应结合生产要求及具体情况,抓住要点,合理地运用串级控制系统的优点。如果不加分析地到处套用,不仅会造成设

备的浪费,也得不到预期的效果,甚至会引起控制系统的失调。

5.2 前馈控制系统

5.2.1 前馈控制系统的基本概念

对于闭环的控制系统所采取的反馈控制,按照被控变量与设定值的偏差进行控制。反馈控制的特点在于,总是在被控变量出现偏差后,控制器才开始动作,以补偿扰动对被控变量的影响。如果扰动已发生,但被控变量还未变化时,控制器则不会有任何控制作用,因此,反馈控制作用总是落后于扰动作用,很难达到及时的控制效果。即便是采用微分控制,虽可用来克服对象及环节的惯性滞后和容量滞后,但是此方法不能消除纯滞后 τ_0 。

考虑到产生偏差的直接原因是扰动,因此,如果直接按扰动实施控制,而不是按偏差进行控制,从理论上说,可以把偏差完全消除,即在这样的一种控制系统中,一旦出现扰动,控制器就直接根据所测得的扰动大小和方向,按一定的规律实施控制作用,以补偿扰动对被控变量的影响。由于扰动发生后,在被控变量还未出现变化时,控制器就已经进行控制,所以称此种控制为“前馈控制”(或称为扰动补偿控制)。这种前馈控制作用如能恰到好处,可以使被控变量不再因扰动作用而产生偏差,因此它比反馈控制及时。

图 5-19 所示的是换热器的前馈控制系统及其方框图。其中,加热蒸汽流过换热器,把换热器套管内的冷物料加热。热物料的出口温度用蒸气管路上的控制阀来调节。引起出口温度变化的扰动有冷物料的流量与初温、蒸汽压力等,其中最主要的扰动是冷物料的流量 Q 。

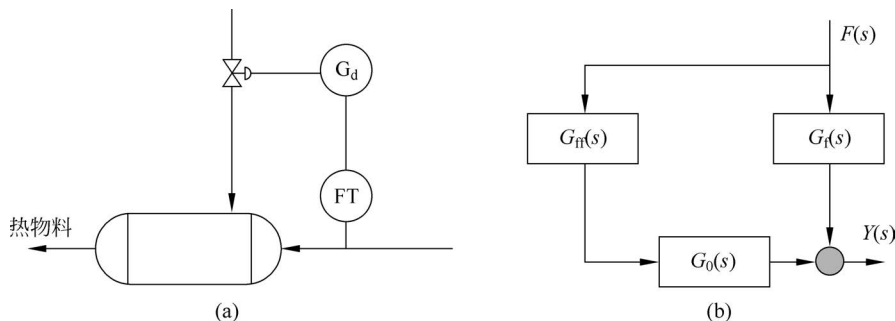


图 5-19 换热器的前馈控制系统及其方框

设 $G_f(s)$ 为扰动通道的传递函数, $G_0(s)$ 为控制通道的传递函数, $G_{ff}(s)$ 为前馈补偿控制单元的传递函数,如果将扰动值(进料流量)测量出来,并通过前馈补偿控制单元进行控制,则

$$Y(s) = G_f(s)F(s) + G_{ff}(s)G_0(s)F(s) = [G_f(s) + G_{ff}(s)G_0(s)]F(s) \quad (5-21)$$

为了使扰动对系统输出的影响为零,应满足

$$G_f(s) + G_{ff}(s)G_0(s) = 0 \quad (5-22)$$

即

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_f(s)}{G_0(s)} \quad (5-23)$$

为完全补偿时的前馈控制器模型。

由此可见,前馈控制的好坏与扰动特征和对象模型密切相关。对于精确的对象与扰动数学模型,前馈控制系统可以做到无偏差控制。然而,这只是理论上的愿望。实际过程中,由于过程模型的时变性、非线性,以及扰动的不可完全预见性等影响,前馈控制只能在一定程度上补偿扰动对被控变量的影响。

5.2.2 前馈控制系统的特点及局限

1. 前馈控制的特点

(1) 前馈控制是一种开环控制。

在如图 5-19 所示的系统中,当测量到冷物料流量变化的信号后,通过前馈控制器的输出信号直接控制控制阀的开度,从而改变加热蒸汽的流量。但加热器出口温度数据并不反馈回来,它是否被控制在原来的数值上是得不到检验的,所以前馈控制是一种开环控制,从某种意义上说这是前馈控制的不足之处。因此,前馈控制对被控对象特性的掌握必须比反馈控制更清楚,才能得到一个较合适的前馈控制作用。

(2) 前馈控制是一种按扰动大小进行补偿的控制。

扰动一旦出现,前馈控制器就检测到其变化情况,及时有效地抑制扰动对被控变量的影响,而不是像反馈控制那样,要待被控变量产生偏差后再进行控制。在理论上,前馈控制可以彻底消除偏差。如果控制作用恰到好处,前馈控制一般比反馈控制要及时。这也是前馈控制的一个主要特点。基于这个特点,可对前馈控制与反馈控制进行比较,具体见表 5-2。

表 5-2 前馈控制与反馈控制的比较

控制类型	控制的依据	检测的信号	控制作用的发生时间
反馈控制	被控变量的偏差	被控变量	偏差出现后
前馈控制	扰动量的大小	扰动量	偏差出现前

(3) 前馈控制使用的是视对象特性而定的“专用”控制器。

一般的反馈控制系统均采用通用类型的 PID 控制器,而前馈控制器的控制规律为对象的扰动通道与控制通道的特性之比,如式(5-23)所示。

(4) 一种前馈控制作用只能克服一种扰动。

由于前馈控制作用是按扰动进行工作的,而且整个系统是开环的,因此根据一种扰动而设置的前馈控制只能克服这一扰动,而对于其他扰动,前馈控制器无法检测到,也就无能为力了;而反馈控制可以克服多种扰动。所以,这也是前馈控制系统的一个弱点。

(5) 前馈控制只能抑制可测、不可控的扰动对被控变量的影响。

如果扰动是不可测的,则不能进行前馈控制;如果扰动是可测可控的,则只要设计一个定值控制系统即可,而无须采用前馈控制。

2. 前馈控制的局限

前馈控制虽然是减少被控变量动态偏差的一种有效方法,但实际上,它做不到对扰动的

完全补偿,主要原因如下所述。

(1) 在实际工业生产过程中,影响被控变量的扰动因素很多,不可能对每个扰动都设计一套独立的前馈控制器。

(2) 对不可测的扰动无法实现前馈控制。

(3) 前馈控制器的控制规律取决于控制通道传递函数 $G_0(s)$ 和扰动通道传递函数 $G_f(s)$,而 $G_0(s)$ 和 $G_f(s)$ 的精确值很难得到,即便得到有时也很难实现。所以为了获得满意的控制效果,合理的控制方案是把前馈控制和反馈控制结合起来,组成前馈-反馈复合控制系统。这样,一方面可以利用前馈控制有效地减少主要扰动对被控变量的影响;另一方面可利用反馈控制使被控变量稳定在设定值上,从而保证系统具有较高的控制质量。

5.2.3 前馈-反馈控制系统

单纯的前馈控制往往不能很好地补偿扰动,存在不少局限性。主要表现在:首先,不存在被控变量的反馈,无法检验被控变量的实际值是否为希望值;其次,不能消除其他扰动引起的误差。为了克服这一局限性,可以将前馈与反馈结合起来使用,构成前馈-反馈控制系统,以达到既能发挥前馈控制校正及时的特点,又保持了反馈控制能消除多种扰动并能始终对被控变量予以检验的优点。

图 5-20 为换热器前馈-反馈控制系统,其中图 5-20(a)为系统示意图,图 5-20(b)为系统方框图。由图 5-20 可知,当冷物料(生产负荷)流量发生变化时,前馈控制器及时发出控制命令,补偿冷物料流量变化对换热器出口温度的影响;同时,对于未引入前馈控制的冷物料的温度、蒸汽压力等扰动,其对出口温度的影响则由 PID 反馈控制器来消除。前馈作用加反馈作用,使得换热器的出口温度稳定在设定值上,获得较理想的控制效果。

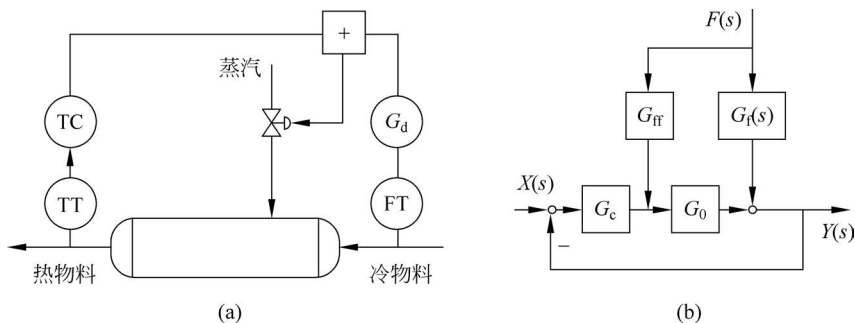


图 5-20 换热器前馈-反馈控制系统

在前馈-反馈复合控制系统中,控制输入 $X(s)$ 、扰动输入 $F(s)$ 对输出的共同影响为

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)}X(s) + \frac{G_f(s) + G_{ff}(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)}F(s) \quad (5-24)$$

如果要对扰动 $F(s)$ 的完全补偿,则式(5-24)的第二项应为零,即

$$G_f(s) + G_{ff}(s)G_0(s) = 0 \quad (5-25)$$

可见,前馈-反馈复合控制系统对扰动 $F(s)$ 实现完全补偿的条件与开环前馈控制相同。所不同的是,扰动 $F(s)$ 对输出的影响应为开环前馈控制的情况下的 $1/[1 + G_c(s)G_0(s)]$,这是由于反馈控制起作用的结果。这就表明,经过开环补偿以后,输出的变化已经不太大

了,再经过反馈控制进一步减小为原来的 $1/[1+G_c(s)G_0(s)]$,从而充分体现了前馈-反馈复合控制的优越性。

此外,由式(5-24)可知,复合控制系统的特征方程式为

$$1 + G_c(s)G_0(s) = 0 \quad (5-26)$$

这一特征方程式只与 $G_c(s)$ 、 $G_0(s)$ 有关,而与 $G_{ff}(s)$ 无关,即与前馈控制器无关。这就说明,加入前馈控制器并不影响系统的稳定性,系统的稳定性完全取决于闭环控制回路。这就给设计工作带来了很大的方便。在设计复合控制系统时,可以先根据闭环控制系统的设计方法进行设计,而暂不考虑前馈控制器的作用,使系统满足一定的稳定性要求和一定的过渡过程品质要求。当闭环系统确定以后,再根据不变性原理设计前馈控制器,进一步消除干扰对输出的影响。

下面简单介绍两个典型的前馈-反馈控制系统。

1. 蒸发器浓度控制系统

蒸发是借加热作用使溶液浓缩或使溶液质析出的物理操作过程。它在轻工、化工等生产过程中得到了广泛的应用,如造纸、制糖、海水淡化、制碱等,都采用蒸发工艺。在蒸发过程中,对浓度的控制是必需的。下面以葡萄糖生产过程中蒸发器浓度控制为例,介绍前馈-反馈控制在蒸发过程中的应用。图 5-21 所示是葡萄糖生产过程中蒸发器浓度控制流程图。

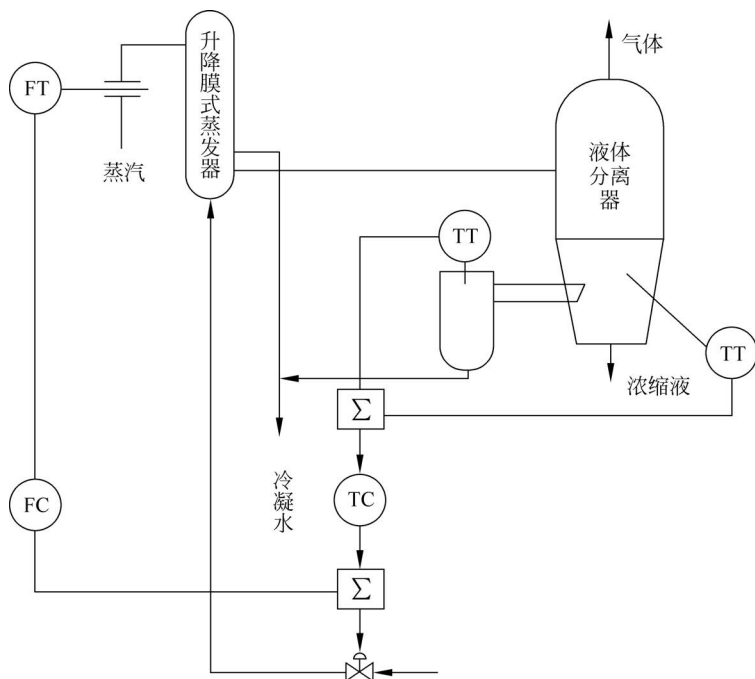


图 5-21 蒸发器浓度控制前馈-反馈控制系统

初蒸浓度为 50% 的葡萄糖液,用泵送入升降膜式蒸发器,经蒸汽加热蒸发至 73% 的葡萄糖液,然后送至下一道工序。由蒸发工艺可知,在给定压力下,溶液的浓度与溶液的沸点和水的沸点之差(温差)有较好的单值对应关系,故以温差为间接质量指标作为被控参数以反映浓度的高低。

由图 5-21 可知,影响温差的主要因素有:进料溶液的浓度、温度及流量,加热蒸汽的压力及流量等,其中对温差影响最大的是进料溶液的流量和加热蒸汽的流量。为此,采用以加热蒸汽流量为前馈信号、以温差为反馈信号、进料量溶液为控制参数构成的前馈-反馈控制系统。

2. 锅炉锅筒水位控制系统

锅炉是火力发电工业中的重要设备。在锅炉的正常运行中,锅筒水位是其重要的工艺指标。当锅筒水位过高时,易使蒸汽带液,这不仅会降低蒸汽的质量和产量,而且会导致汽轮机叶片的损坏;当水位过低时,轻则影响汽、水平衡,重则会使锅炉烧干而引起爆炸。所以必须严格控制水位在规定的工艺范围内。

锅炉锅筒水位控制的主要任务是使给水量能适应蒸汽量的需要,并保持锅筒水位在规定的工艺范围内。显然,锅筒水位是被控参数。引起锅筒水位变化的主要因素为蒸汽用量和给水流量。蒸汽用量是负荷,随发电需要而变化,一般为不可控因素;给水流量可以作为控制参数,以此构成锅炉锅筒水位控制系统。但由于锅炉锅筒在运行过程中常常出现“虚假水位”,即在燃料量不变的情况下,当蒸汽用量突然增加时,会使锅筒内的压力突然降低,导致水的沸腾加剧,气泡大量增加。由于气泡的体积比同重量水的体积大得多,结果形成了锅筒内水位“升高”的假象。反之,当蒸汽量突然减少时,由于锅筒内蒸汽压力上升,水的沸腾程度降低,又导致锅筒内水位“下降”的假象。无论上述哪种情况,均会引起锅筒水位控制的误动作而影响控制效果。解决这一问题的有效办法之一是,将蒸汽流量作为前馈信号,锅筒水位作为主被控参数,给水流量作为副被控参数,构成前馈-反馈串级控制系统,如图 5-22 所示。

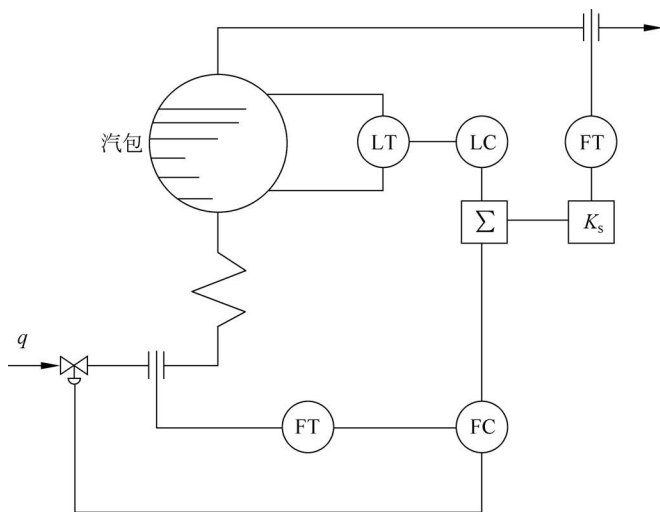


图 5-22 锅炉锅筒水位前馈-反馈串级控制系统

该系统不但能通过副回路及时克服给水压力这一很强的干扰,而且还能实现对蒸汽负荷的前馈补偿以克服“虚假”水位的影响,从而保证了锅炉锅筒水位具有较高的控制质量,满足工艺要求。

5.3 大滞后过程控制系统

5.3.1 大滞后过程与常规控制方案

1. 大滞后过程

在工业生产过程中,被控对象除了具有容积时延外,往往不同程度地存在着纯迟延。如在热交换器中,被控变量是被加热物料的出口温度,而操作变量是载热介质,当改变载热介质流量后,对物料出口温度的影响必然要滞后一个时间,即介质经管道所需的时间。此外,如反应器、管道混合、皮带传送、轧辊传输、多容量、多个设备串联及用分析仪表测量流体的成分等过程都存在着较大的纯迟延。在这些过程中,由于纯迟延的存在,被控变量不能及时反映系统所受到的扰动,即测量信号到达控制器,控制机构接收控制信号后立即动作,也需要经过纯迟延时间 τ 以后,才影响被控变量,使其受到控制。因此,这样的过程必然会产生较明显的超调量和较长的调节时间。所以,具有纯迟延的过程被公认为是较难控制的过程,其难控程度将随着纯迟延 τ 占整个过程动态份额的增加而增加。一般认为,广义被控对象的纯迟延时间 τ 与时间常数 T 之比大于 0.5,则称该过程是具有大迟延的工艺过程。当 τ/T 增加,过程中的相位滞后增加,使上述现象更为突出,有时甚至会因为超调严重而出现聚爆、结焦等停产事故;有时则可能引起系统的不稳定,被控变量超过安全限,从而危及设备及人身安全。因此大迟延系统一直受到人们的关注,成为控制理论研究的重要课题之一。

为了强调广义被控对象中存在较大的时间延迟 τ ,本节中凡涉及广义被控对象的特性均用 $G_p(s)e^{-\tau s}$ 表示,其中, $G_p(s)$ 表示广义被控对象除去纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 后剩下的动态数学模型。

2. 常规控制方案

在大滞后系统控制中,为了充分发挥 PID 控制的作用,解决滞后问题,主要采用常规 PID 的变形方案,如微分先行控制方案和中间微分控制方案等。

微分先行控制和中间微分控制都是为了发挥微分作用提出的。微分的作用是超前,根据变化规律提前求出其变化率,相当于提取信息的变化趋势。所以可对大迟延系统进行有效的提前控制。

1) 微分先行控制

在微分先行控制方案中,将微分作用移到反馈回路,微分环节的输出信号包括了被控变量及其变化速度值。将它们作为测量值输入到 PI 控制器中,可使系统克服超调的作用加强,从而补偿过程滞后,达到改善系统控制品质的目的。微分先行控制系统方框图如图 5-23 所示。其中, $G_p(s)$ 为广义被控对象除去纯迟延环节 $e^{-\tau s}$ 后的传递函数; $G_c(s)$ 为比例积分控制器的传递函数; $T_d s + 1$ 为微分环节的传递函数。

若系统采用微分环节,则从图 5-23 可以推导出系统输出 $Y(s)$ 与输入 $R(s)$ 之间的传递

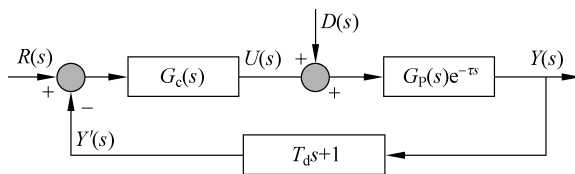


图 5-23 微分先行控制系统方框图

函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + (T_d s + 1)G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (5-27)$$

若不采用微分环节,则系统输出 $Y(s)$ 与输入 $R(s)$ 之间的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (5-28)$$

显然,采用微分环节的微分先行控制与不采用微分环节的常规控制形式相比,系统的开环传递函数多了一个零点。实践经验表明,采用 PI 控制的微分先行控制方案可较好地抑制系统的超调量,反应速度明显加快,控制品质得到较大改善。

2) 中间微分反馈控制

与微分先行控制方案的设想类似,中间微分反馈控制也是适当配置零极点以改善控制品质。中间微分反馈控制系统方框图如图 5-24 所示。由图 5-24 可知,微分只是对系统输出起作用,并作为操作变量的一部分,这样的方式能在被控变量变化时及时根据其变化的速度大小起附加校正作用。微分校正作用与 PI 控制器的输出信号无关,仅在动态时起作用,而在静态时或在被控变量变化速度恒定时就失去作用。

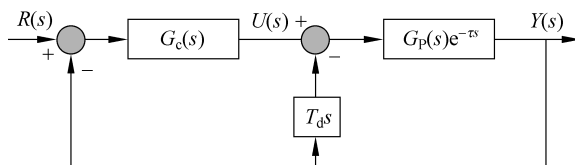


图 5-24 中间微分反馈控制系统方框图

由图 5-24 可得系统输出 $Y(s)$ 与输入 $R(s)$ 之间的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + [T_d s + G_c(s)]G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (5-29)$$

微分先行控制与中间微分反馈控制都能有效地克服超调现象,缩短调节时间,而且它无须使用特殊设备,因此有一定使用价值。但这两种控制方式仍有较大的超调,且响应速度很慢,不适于应用在控制精度要求很高的场合。

5.3.2 大滞后过程的预估补偿控制

1. 史密斯预估控制

不同于前馈补偿,针对大滞后过程的预估补偿控制是按照过程的特性预估出一种模型加入到反馈系统中,以补偿过程的动态特性,这种预估补偿控制也因其预估模型的不同而形

成不同的方案。史密斯预估补偿方法是得到广泛应用的方案之一。

史密斯预估控制的基本思想是预先估计出被控过程的动态模型,然后设计一个预估器对其进行补偿,使被滞后了 τ 时间的被控变量能提前反馈到调节器的输入端,使调节器提前动作,以减小超调和加速调节过程。其控制系统框图如图 5-25 所示。

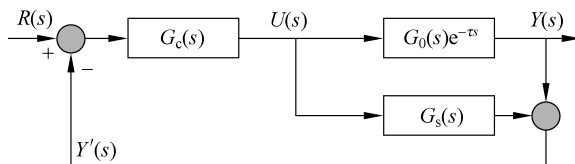


图 5-25 史密斯预估控制系统框图

在图 5-25 中, $G_0(s)$ 是被控过程无纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 的传递函数; $G_s(s)$ 是史密斯预估器的传递函数。假如没有此预估器,则由控制器 $U(s)$ 到被控变量 $Y(s)$ 之间的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_0(s)e^{-\tau s} \quad (5-30)$$

式(5-30)表明,受到调节器作用的被控变量要经过纯滞后时间 τ 之后才能反馈到调节器的输入端,这就导致调节作用不及时。此外,系统的闭环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}} \quad (5-31)$$

由式(5-31)可见,闭环特征方程中含有 $e^{-\tau s}$ 项,这会对系统的稳定性产生不利影响。当采用史密斯预估器以后,调节器量 $U(s)$ 与反馈到调节器输入端的信号 $Y'(s)$ 之间的传递函数则为

$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_0(s)e^{-\tau s} + G_s(s) \quad (5-32)$$

为使调节器接收的反馈信号 $Y'(s)$ 与操作变量 $U(s)$ 间不存在纯滞后时间 τ ,则要求式(5-32)为

$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_0(s)e^{-\tau s} + G_s(s) = G_0(s) \quad (5-33)$$

由此可得预估器的传递函数为

$$G_s(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau s}) \quad (5-34)$$

史密斯预估控制系统的实施框图如图 5-26 所示,由此可得系统的闭环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0(s)} \quad (5-35)$$

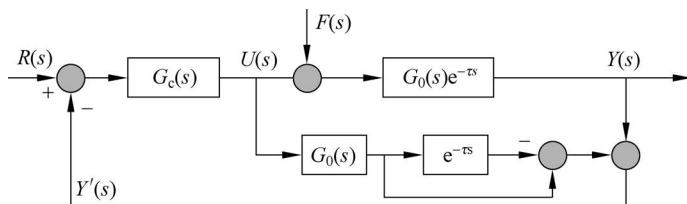


图 5-26 史密斯预估控制系统的实施框图

由式(5-35)可见,史密斯预估控制的闭环特征方程中已经没有 $e^{-\tau s}$ 项。换句话说,该系统

与原系统相比已经消除了纯滞后对系统稳定性的影响。

2. 改进的史密斯预估控制

理论上史密斯预估控制能克服大滞后的影响,但由于史密斯预估器需要知道被控过程精确的数学模型,且对模型的误差十分敏感,因而难以在工业生产过程中广泛应用。

1) 增益自适应补偿控制

1977年,贾尔斯和巴特勒在史密斯预估控制方法的基础上,提出了增益自适应预估控制方案,其原理方框图如图 5-27 所示。

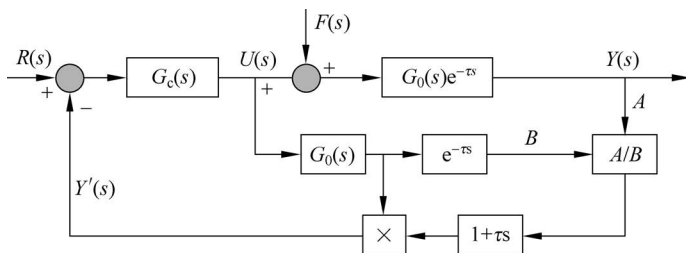


图 5-27 增益自适应预估控制系统方框图

增益自适应预估结构中系统的输出减去预估模型输出的运算被系统的输出除以模型的输出运算所取代,而对预估器输出作修正的加法运算改成了乘法运算。除法器的输出还串有一个超前环节,其超前环节时间常数即为过程的纯滞后时间 τ ,该时间常数对滞后的增益自适应预估结构有一个超前作用。这些运算的结果使预估器的增益可根据预估模型和系统输出的比值有相应的校正值。

增益自适应补偿过程响应一般比史密斯预估器要好,尤其是对模型不准确的情况。

2) 动态参数自适应预估控制

动态参数自适应预估控制由 C. C. Hang 提出的又一改进型史密斯预估控制方案。动态参数自适应预估控制系统方框图如图 5-28 所示。

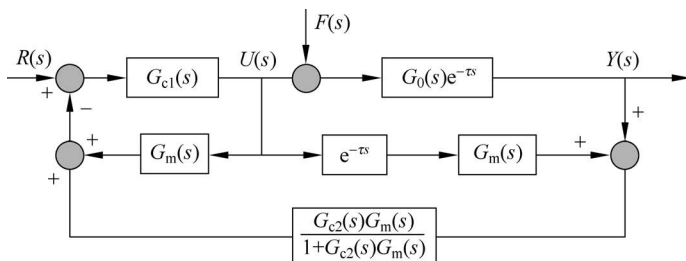


图 5-28 动态参数增益自适应预估控制系统方框图

与史密斯预估控制方案相比,动态参数自适应预估控制方案多了一个调节器 $G_{c2}(s)$,反馈通道的传递函数不是 1 而是 $G_f(s)$,即

$$G_f(s) = \frac{G_{c2}(s)G_m(s)}{1 + G_{c2}(s)G_m(s)} \quad (5-36)$$

通过理论分析可以证明动态参数自适应预估控制方案优于史密斯预估控制方案,且其对模型精度的要求明显降低,可进一步改善系统的控制性能。

下面简单介绍两个典型的使用了增益自适应补偿控制的系统。

(1) 加热炉温度预估补偿控制。

炼钢厂轧钢车间在对工件轧制之前,先要将工件加热到一定的温度。图 5-29 表示其中一个加热工段的温度控制系统。系统中采用 6 台设有断偶报警装置的温度变送器、3 台高值选择器、1 台加法器、1 台 PID 调节器和 1 台电-气转换器。

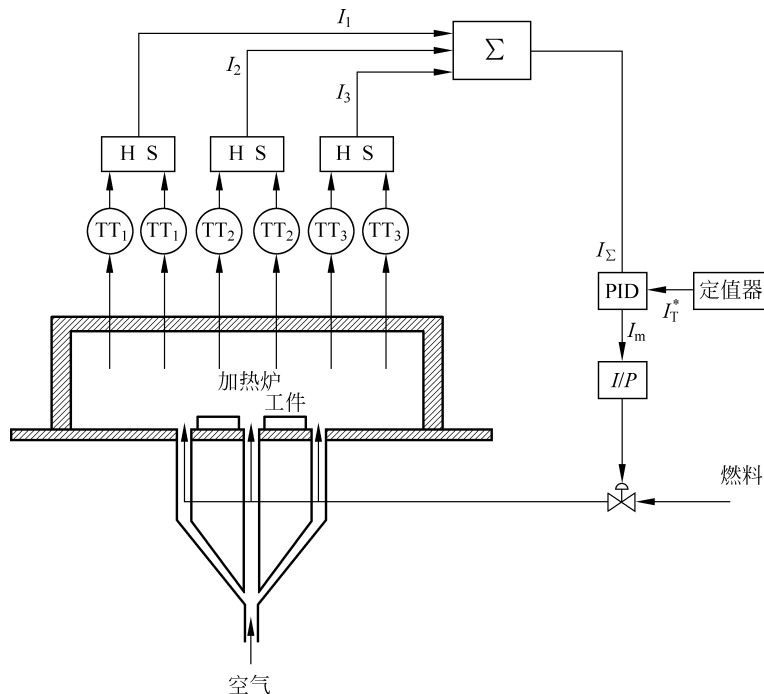


图 5-29 轧钢车间加热炉多点平均温度反馈控制系统

采用高值选择器的目的是提高控制系统的工作可靠性,当每对热电偶中有一个断偶时,系统仍能正常运行。加法器实现 3 个信号的平均,即在加法器的 3 个输入通道均设置分流系数 $\alpha=1/3$,从而得到

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{3}I_1 + \frac{1}{3}I_2 + \frac{1}{3}I_3 \quad (5-37)$$

加热炉是一个大滞后和大惯性的对象。为了提高系统的动态品质,测温元件选用小惯性热电偶。加热炉的燃料是通过具有引风特性的喷嘴进入加热炉的,风量能自动跟随燃料量的变化按比例地增加或减少,以达到经济燃烧,故选择进入炉内的燃料量作为操作变量。通过实验测得加热炉的数学模型为

$$W_1(s) = \frac{9.9e^{-80s}}{120s + 1} \quad (5-38)$$

温度传感器与变送器的数学模型为

$$W_m(s) = \frac{0.107}{10s + 1} \quad (5-39)$$

因此,广义被控对象的数学模型为

$$W_0(s) = W_1(s)W_m(s) = \frac{1.06e^{-80s}}{(120s+1)(10s+1)} \quad (5-40)$$

由于 $10s+1 \approx e^{10s}$, 故上式可转化为

$$W_0(s) = \frac{1.06e^{-90s}}{120s+1} \quad (5-41)$$

由于本例中广义对象的纯滞后时间与其时间常数的比值较大, 即 $\tau/T=0.75$, 采用普通的 PID 调节器(见图 5-29)时, 无论怎样整定, PID 调节器的参数、过渡过程的超调量及过渡过程时间均仍很大。因此, 对该大时间滞后系统, 考虑采用如图 5-30 所示的史密斯预估补偿方案。

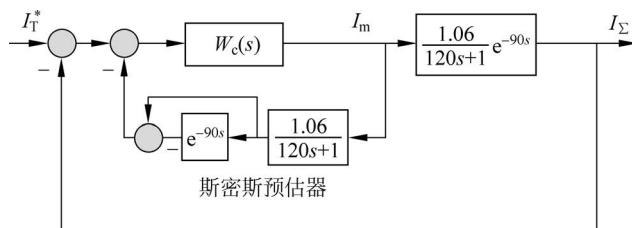


图 5-30 加热炉温度史密斯预估补偿控制系统框图

加入史密斯预估补偿环节后, PID 调节器控制的对象包括原来的广义对象和补偿环节, 从而将被控对象的传递函数等效为

$$\overline{W_0}(s) = \frac{1.06e^{-90s}}{120s+1} + \frac{1.06}{120s+1}(1 - e^{-90s}) = \frac{1.06}{120s+1} \quad (5-42)$$

可见等效被控对象 $\overline{W_0}(s)$ 中, 不再包含纯滞后因素, 因此调节器的整定变得很容易且可得到较高的控制品质。但单纯的史密斯预估补偿方案要求广义对象的模型要有较高的精度和相对稳定性, 否则控制品质会明显下降。而加热炉由于使用时间长短及每次处理工件的数量均不尽相同, 其特性参数会发生变化。为提高加热炉的控制品质, 改用如图 5-31 所示的具有增益自适应补偿的多点温度平均值控制系统。这是一种典型的, 能够适应过程静态增益变化的大滞后补偿控制系统。

(2) 高压聚乙烯熔融值采样控制。

图 5-32 所示为某高压聚乙烯生产线, 原料乙烯和添加剂(C. T. A)先经过压缩, 然后经混合、二次压缩、冷却、反应、高压分离、低压分离等工艺过程, 进入热挤压机, 挤压成型后切粒(成品)。

熔融值是聚乙烯成品的主要质量指标之一(以下简称 MI 指标), 它主要通过调节原料入口处的添加剂量来控制。为此, 在热挤压机出口处安装 MI 值变送器, 其输出为标准的电流信号, 送给 MI 调节器, 调节器的输出经采样器(由采样开关和零阶保持器组成)后, 作为 C. T. A. 流量调节器的外给定, 构成如图 5-32 所示的 MI 值控制系统, 其框图见图 5-33, 为串级采样控制系统。

该系统的 MI 调节器及流量调节器均采用 PI 控制规律, 副被控过程(流量过程)的特性用放大环节来表示, 主被控过程用一阶加纯滞后特性来描述, 其时间常数 $T_0=70\text{min}$, $\tau=15\text{min}$ 。当采样时间(即采样开关信号的宽度)为 4min , 采样周期为 25min , 调节器的整定

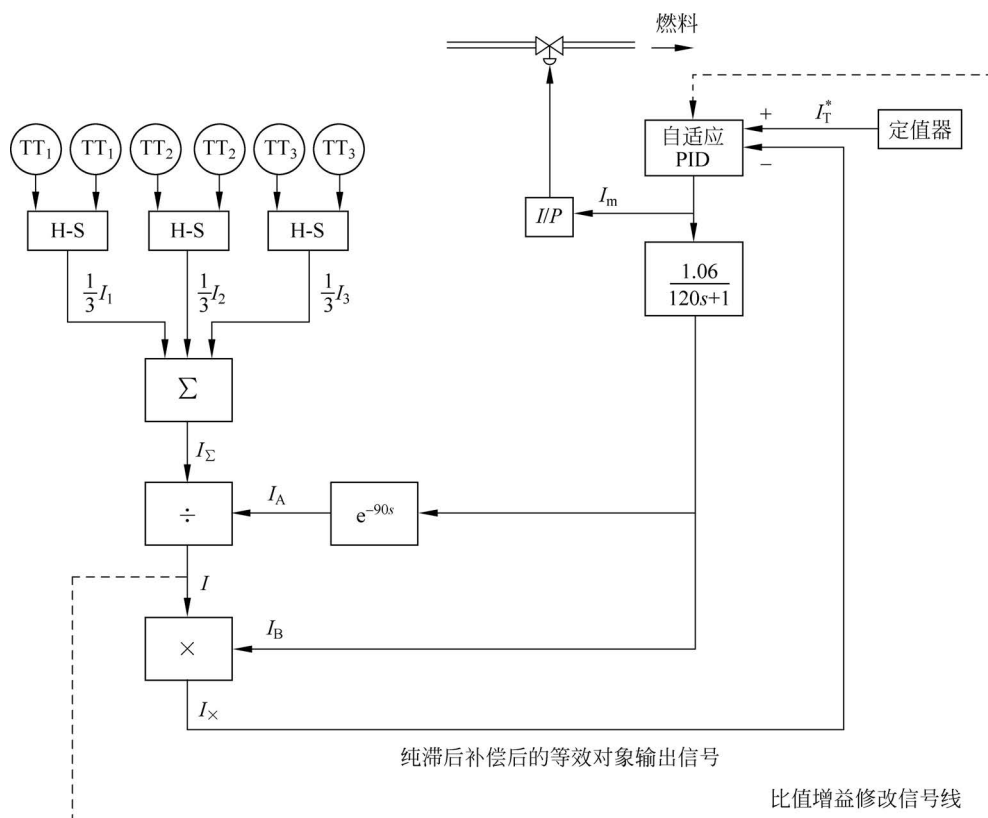


图 5-31 具有增益自适应补偿的加热炉多点温度控制系统原理图

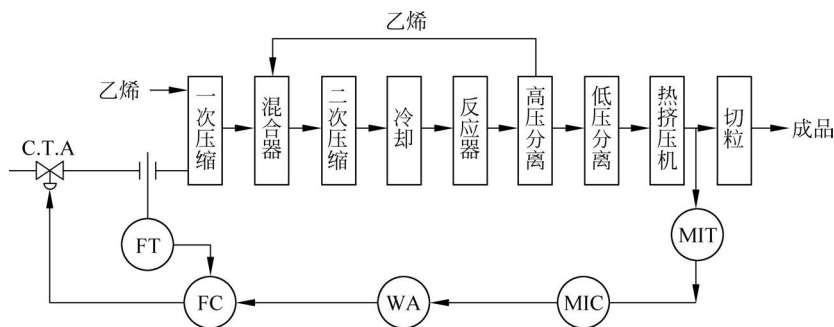


图 5-32 高压乙烯生产线及 MI 值控制

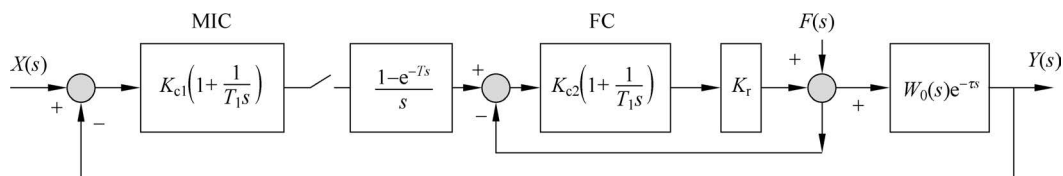


图 5-33 MI 值控制系统框图

参数 $\delta=300\%$, $T_1=30\text{min}$ 时, 系统运行的记录曲线如图 5-34 所示, 满足了生产工艺要求。

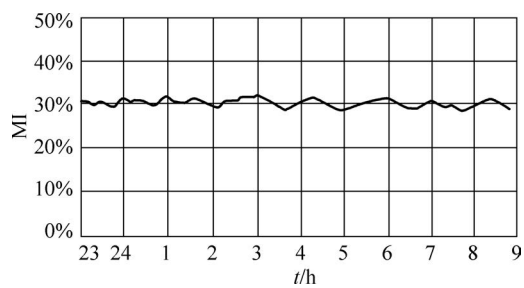


图 5-34 MI 值记录曲线