



南開大學
Nankai University

《过程控制系统》

第7章 补偿控制系统

于宁波

南开大学人工智能学院

第7章 补偿控制系统

➤ 7.1 补偿控制的原理

➤ 7.2 前馈控制系统

➤ 7.3 大时延控制系统

➤ 7.4 利用MATLAB对补偿控制系统进行仿真

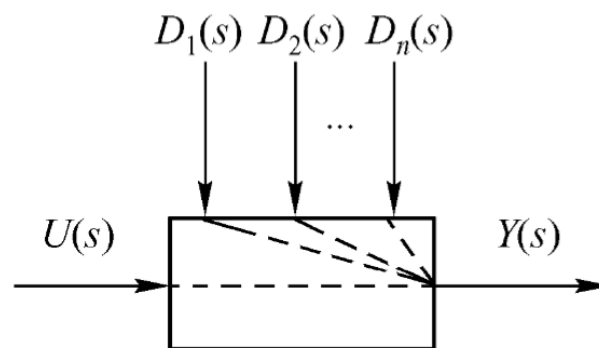
反馈控制系统

- 在前面所讨论的控制系统中，控制器都是按照被控变量与设定值的偏差进行控制的，这就是所谓的反馈控制系统。
- 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，以调节扰动对被控变量的影响，它是一种基于偏差而消除偏差的调节过程。
- 如果扰动虽已发生，但被控变量还未发生变化时，控制器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，控制很难达到及时，尤其对于某些存在较大频繁变化扰动的系统，控制效果很不理想。
- 另外，对于存在较大迟延的系统，利用反馈控制方式很难满足要求。

不变性原理

- 随着生产过程的强化和设备的大型化，对自动控制提出了越来越高的要求。
- 虽然反馈控制能满足大多数控制对象的要求，但是在对象特性呈现出大迟延（包括容积时延和纯迟延）、多干扰等难以控制的特性，而又希望得到较好的过程响应时，**反馈控制系统**往往会令人失望。
- 为了适应更高的控制要求，各种特殊控制规律和措施便应运而生。
- 控制理论中提出来的不变性原理在这个发展过程中得到较充分的应用。
- 所谓**不变性原理**是指，控制系统的被控变量与扰动量绝对无关或者在一定准确度下无关，也即**被控变量完全独立或基本独立**。

补偿控制系统



➤ 设被控对象受到干扰 $D_i(t)$ 的作用如图所示。

➤ 被控变量 $y(t)$ 的不变性可表示为

$$\text{当 } D_i(t) \neq 0 \text{ 时, 有 } y(t) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

➤ 即：被控变量 $y(t)$ 与干扰 $D_i(t)$ 独立无关。

➤ 基于不变性原理组成的自动控制系统，称为补偿控制系统。

➤ 补偿控制系统实现了系统对全部干扰或部分干扰的不变性，实质上是一种按照扰动进行补偿的开环系统。

第5章 简单控制系统

- 7.1 补偿控制的原理
- **7.2 前馈控制系统**
- 7.3 大时延控制系统
- 7.4 利用MATLAB对补偿控制系统进行仿真

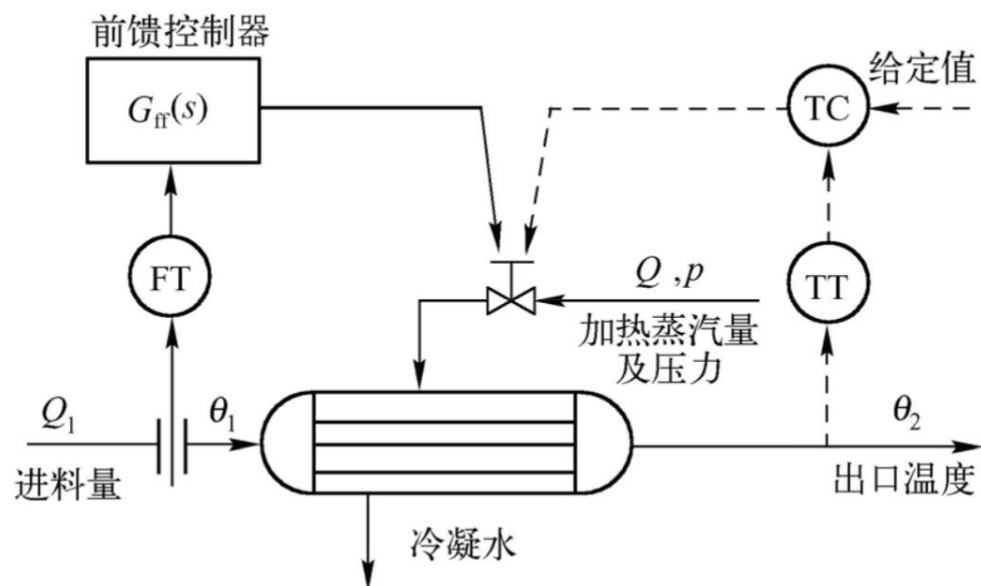
前馈控制的概念

- 前馈控制是以不变性原理为理论基础的一种控制方法，在原理上完全不同于反馈控制系统。
- 反馈控制是按被控变量的偏差进行控制的。其控制原理是将被控变量的偏差信号反馈到控制器，由控制器去修正控制变量，以减小偏差量。因此，反馈控制能产生作用的前提条件是被控变量必须偏离设定值。
- 应当注意，在反馈系统把被控变量调回到设定值之前，系统一直处于受扰动的状态。

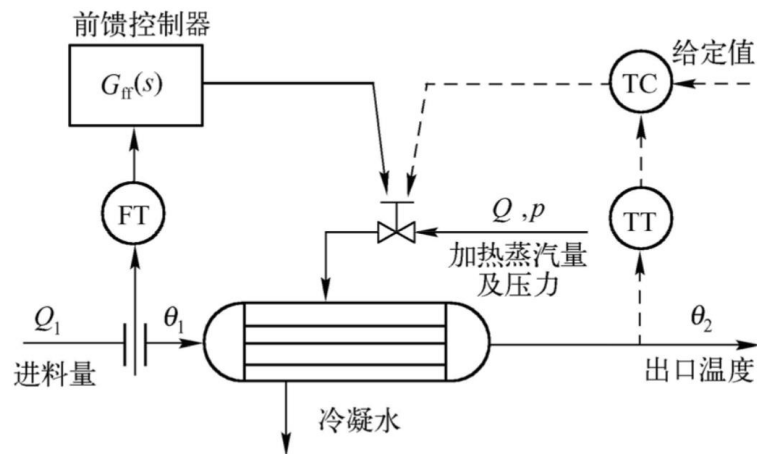
前馈控制的概念

- 产生偏差的直接原因是扰动。因此，如果直接按扰动来实施控制，而不是按偏差进行控制，从理论上来说，就可以把偏差完全消除。
- 在这样的一种控制系统中，
 - 1) 一旦出现扰动，
 - 2) 立即将其测量出来，
 - 3) 通过控制器，根据扰动量的大小和方向来改变控制变量，
 - 4) 从而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，控制器就已进行控制，所以称这种控制方式为前馈控制或扰动补偿控制。
- 前馈控制是按扰动量的变化进行补偿控制的。这种补偿作用如能恰到好处，可使被控变量不再因扰动而产生偏差，因此它比反馈控制及时。

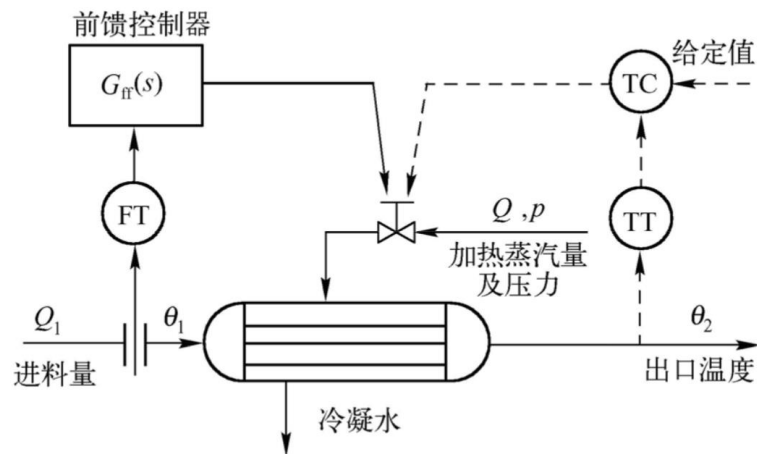
例



- 如图所示为换热器温度控制系统。
- 利用蒸汽对物料进行加热，系统的被控变量为物料的出口温度 θ_2 。
- 在这系统中，引起温度 θ_2 改变的因素很多，例如被加热的物料流量 Q 、入口温度 θ_1 和调节阀前的蒸汽压力 p 等。
- 其中，主要的扰动因素是物料的流量，即进料量 Q

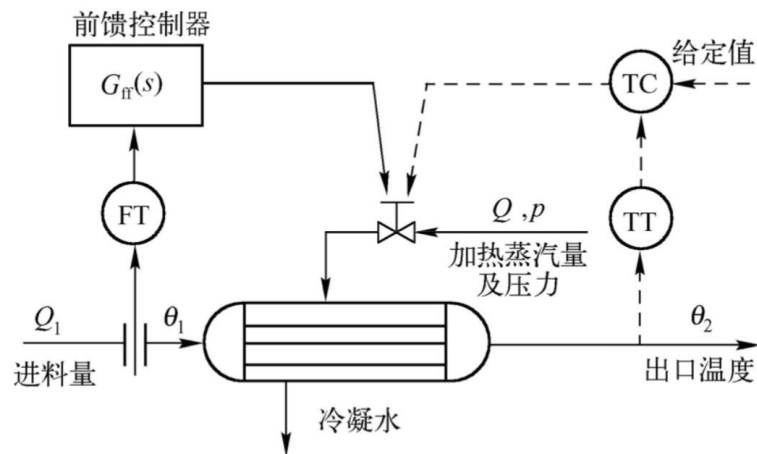


- 为了维持物料的出口温度 θ_2 一定，可采用温度的单回路反馈控制系统，如图中的虚线部分：
 - 对于蒸汽侧的扰动如蒸汽压力 p 扰动等，该系统能达到较好的控制效果；
 - 如有其它因素影响了出口温度 θ_2 ，也能通过温度反馈控制收到一定效果。
- 但是，根据生产的需要，进料量 Q 的大小会随时改变：
 - 当进料量 Q 发生扰动时，物料的出口温度 θ_2 就会偏离设定值。温度控制器 TC 接受偏差信号，运算后改变调节阀的阀位，从而改变蒸汽量 Q_0 来适应进料量 Q 的要求。
 - 如果进料量 Q 的变化幅度大而且十分频繁，那么这个系统是难于满足要求的，物料出口温度 θ_2 将会有较大的波动。



➤ 如果根据主要扰动进料量 Q 的变化，设计一个前馈控制系统，如图中的实线部分。此时，

- 1) 流量变送器FT测得进料量 Q ，
- 2) 送至前馈控制器 $G_{ff}(s)$ ，
- 3) 前馈控制器对此信号经过一定的运算处理，
- 4) 输出合适的控制信号，
- 5) 操纵蒸汽控制阀，
- 6) 改变加热蒸汽量，
- 7) 补偿进料量 Q 对被控温度 θ_2 的影响。

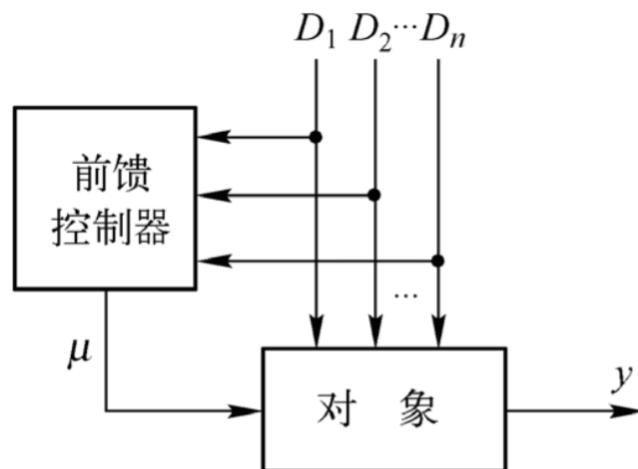


例如，

- 当进料量 Q 减少时，会使出口温度 θ_2 上升。
- 前馈控制器的校正作用是，在测取进料量 Q 减少时，就按照一定的规律减小加热蒸汽量 Q_0 。
- 只要蒸汽量改变的幅值和动态过程合适，就可显著地减小由于进料量 Q 的波动而引起的出口温度 θ_2 的波动。
- 从理论上讲，只要前馈控制器设计合理，就可以实现对扰动量 Q 的完全补偿，从而使被控变量 θ_2 与扰动量 Q 完全无关。

前馈控制系统的方框图

- 前馈控制系统的方框图如图所示。
- 它的特点是
 - 信号向前流动，
 - 系统中的被控变量没有象反馈控制那样用来进行控制，
 - 只是将负荷扰动测出，送至前馈控制器。
- 十分明显，前馈控制与反馈控制之间存在着一个根本的差别，即：
 - 前馈控制是开环控制而不是闭环控制，它的控制效果将不通过反馈来加以检验；
 - 反馈控制是闭环控制，它的控制效果却要通过反馈来加以检验。



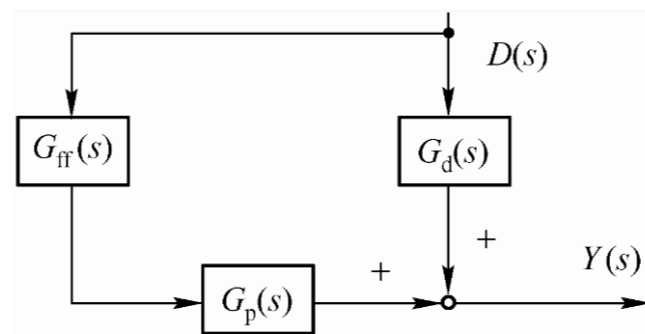
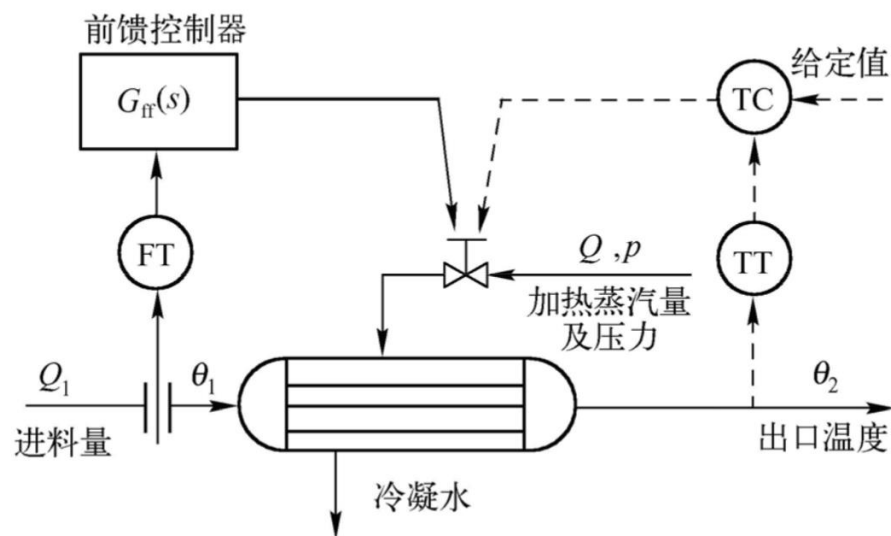
前馈控制系统的结构

➤ 常用的前馈控制系统有三种结构形式：

- 单纯前馈控制系统
- 前馈-反馈控制系统
- 前馈-串级控制系统。

前馈控制系统的结构： 1. 单纯前馈控制

- 单纯前馈控制系统是开环控制系统。
- 根据左图中实线所示的换热器前馈控制系统，可得一般单纯前馈控制系统的方框图右图所示：



单纯前馈控制系统方框图

前馈控制系统的结构： 1. 单纯前馈控制

- 确定前馈控制器的控制律是实现
对系统干扰完全补偿的关键。
- 由图可知，在扰动量 $D(s)$ 作用下，
系统的输出为

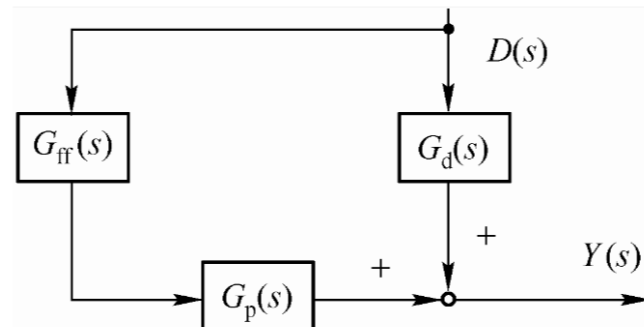
$$Y(s) = G_d(s)D(s) + G_p(s)G_{ff}(s)D(s)$$

- 系统对扰动量 $D(s)$ 实现完全补偿
的条件是：

$$D(s) \neq 0, \text{ 而 } Y(s) = 0$$

即

$$G_d(s) + G_p(s)G_{ff}(s) = 0$$



单纯前馈控制系统方框图

可得前馈控制器的传递函数 $G_{ff}(s)$ 为

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)}$$

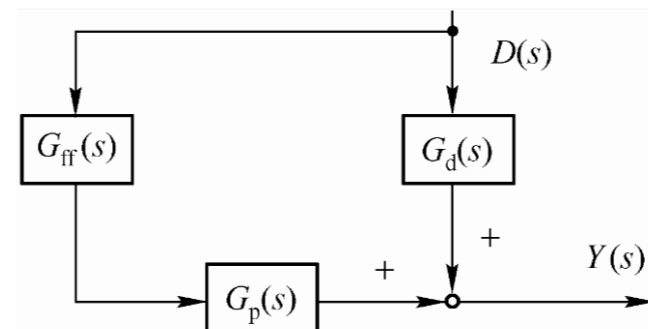
则不论扰动量 $D(s)$ 为何值，总有

$$Y(s) = 0$$

这就是完全补偿。

前馈控制系统的结构： 1. 单纯前馈控制

- 不难看出，要实现对扰动量的完全补偿，必须保证 $G_d(s)$ 、 $G_p(s)$ 和 $G_{ff}(s)$ 等环节的传递函数是精确的。
- 否则，就不能保证 $Y(s)$ 等于零，而被控量与设定值之间就会出现偏差。
- 因此，在实际工程中，一般不单独采用前馈控制方案。



单纯前馈控制系统方框图

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)}$$

前馈控制系统的结构： 1. 单纯前馈控制

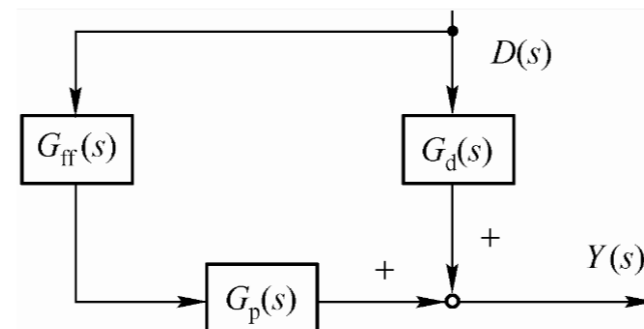
- 前馈控制分为静态前馈控制和动态前馈控制两种。

(1) 静态前馈控制

- 干扰通道和控制通道动态特性相同的情况下，有

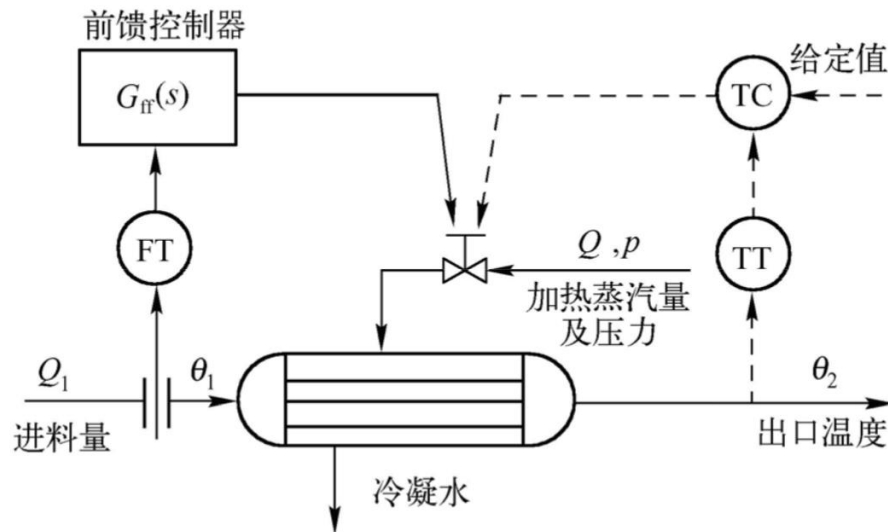
$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} = -K_{ff}$$

- 上式表明，前馈控制器的输出仅仅是输入信号的函数，而与时间无关，满足这个条件就称为静态前馈控制。
- 式中 K_{ff} 称为静态前馈系数。它可以通过实验方法确定，若能建立有关参数的静态方程，则 K_{ff} 也可通过计算确定。
- 这种校正作用只能保证过程在稳态下补偿扰动作用，称为静态前馈。



单纯前馈控制系统方框图

例



➤ 如图所示为换热器温度控制系统。热量平衡关系为

$$Q_0 H_0 \cancel{=} Q c_p (\theta_2 - \theta_1) \quad Q H = Q_1 c_p (\theta_2 - \theta_1)$$

- 1) 静态前馈控制方程？
- 2) 控制通道增益？
- 3) 扰动通道增益？
- 4) 静态前馈控制器增益？

前馈控制系统的结构： 1. 单纯前馈控制

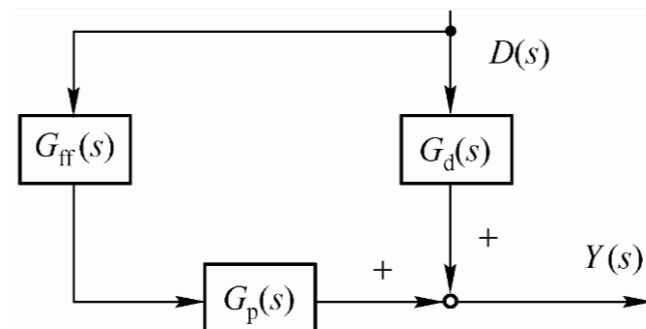
(1) 静态前馈控制

➤ 优点：

- ✓ 较高的控制精度
- ✓ 固有的稳定性
- ✓ 很强的自平衡倾向
 - ✓ 对生产过程来说，方程较容易写出，包含较少的未知量
 - ✓ 不随时间而变
- ✓ 实施方便，不需要特殊仪表

➤ 缺点

- X 每一次的负荷变化，都伴随着一段动态不平衡过程，表现为瞬时温度误差。
- X 负荷情况与当初调整系统时的情况不同，会出现偏差，静态前馈补偿不能解决。

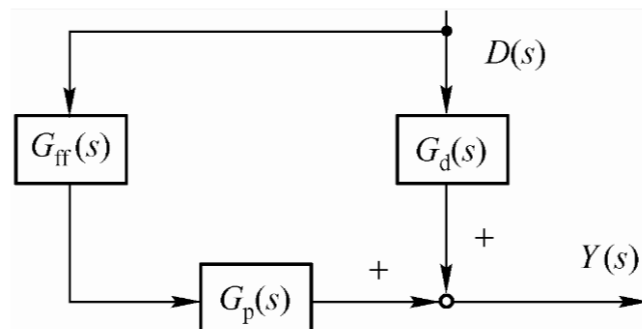


单纯前馈控制系统方框图

前馈控制系统的结构： 1. 单纯前馈控制

(2) 动态前馈控制

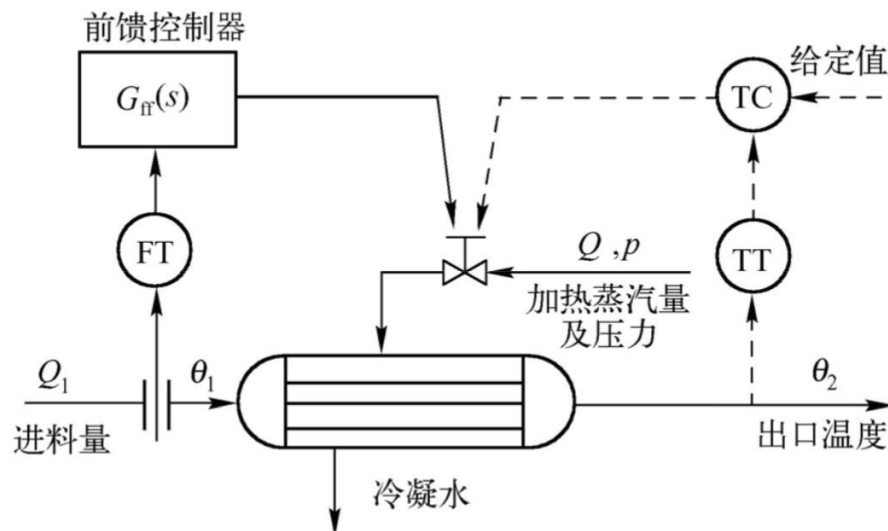
- 在实际过程控制系统中，被控对象的控制通道和干扰通道的传递函数往往都是时间的函数。



单纯前馈控制系统方框图

- 因此，采用静态前馈控制方案，不能很好地补偿动态误差，尤其是在对动态误差控制精度的要求很高的场合，必须考虑动态前馈控制方式。
- 动态前馈控制的设计思想是，通过选择适当的前馈控制器，使得干扰信号经过前馈控制器至被控变量通道的动态特性，完全复制对象干扰通道的动态特性，并且使它们的符号相反，从而实现对干扰信号进行完全补偿的目标。
- 这种控制方案，不仅保证了系统的静态偏差等于零或接近于零，而且可以保证系统的动态偏差等于零或接近于零。

例

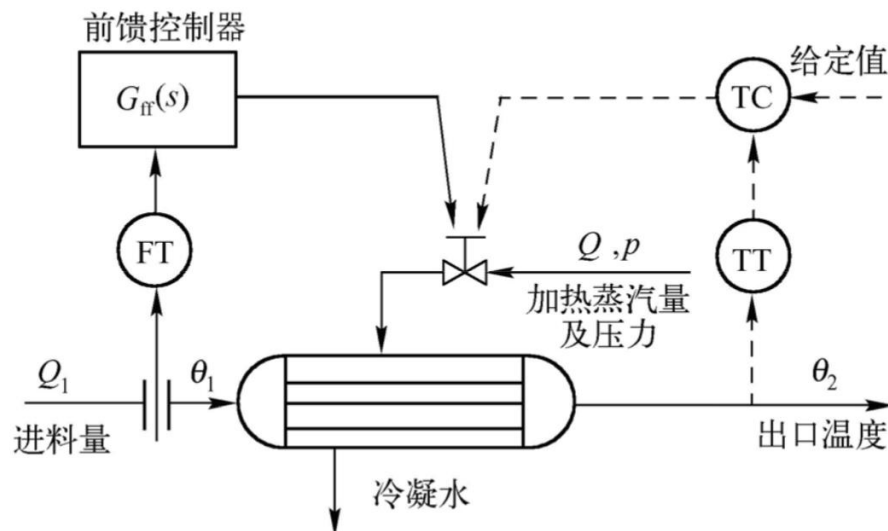


- 如图所示为换热器温度控制系统。在对进料量干扰 Q 的前馈补偿控制中，假设干扰通道和控制通道的传递函数分别为

$$G_d(s) = \frac{K_d e^{-\tau_d s}}{T_d s + 1} \quad G_p(s) = \frac{K_p e^{-\tau_p s}}{T_p s + 1}$$

- 当对扰动量 Q 完全补偿时，有

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} = -\frac{K_d (T_p s + 1) e^{-(\tau_d - \tau_p)s}}{K_p (T_d s + 1)}$$



- 若实际系统的 $\tau_p = \tau_d$ ，则动态前馈控制器为 $G_{ff}(s) = -\frac{K_{ff}(T_p s + 1)}{T_d s + 1}$
- 如果 $T_p = T_d$ ，则 $G_{ff}(s) = -K_{ff}$
- 当被控对象的控制通道和干扰通道的动态特性完全相同时，动态前馈补偿器的补偿作用相当于一个静态前馈补偿器。
- 实际上，静态前馈控制只是动态前馈控制的一种特殊情况。
- 由于动态前馈控制器是时间 t 的函数，必须采用专门的控制装置，所以实现起来比较困难。

前馈控制系统的结构： 1. 单纯前馈控制

综上所述，前馈控制系统的特点：

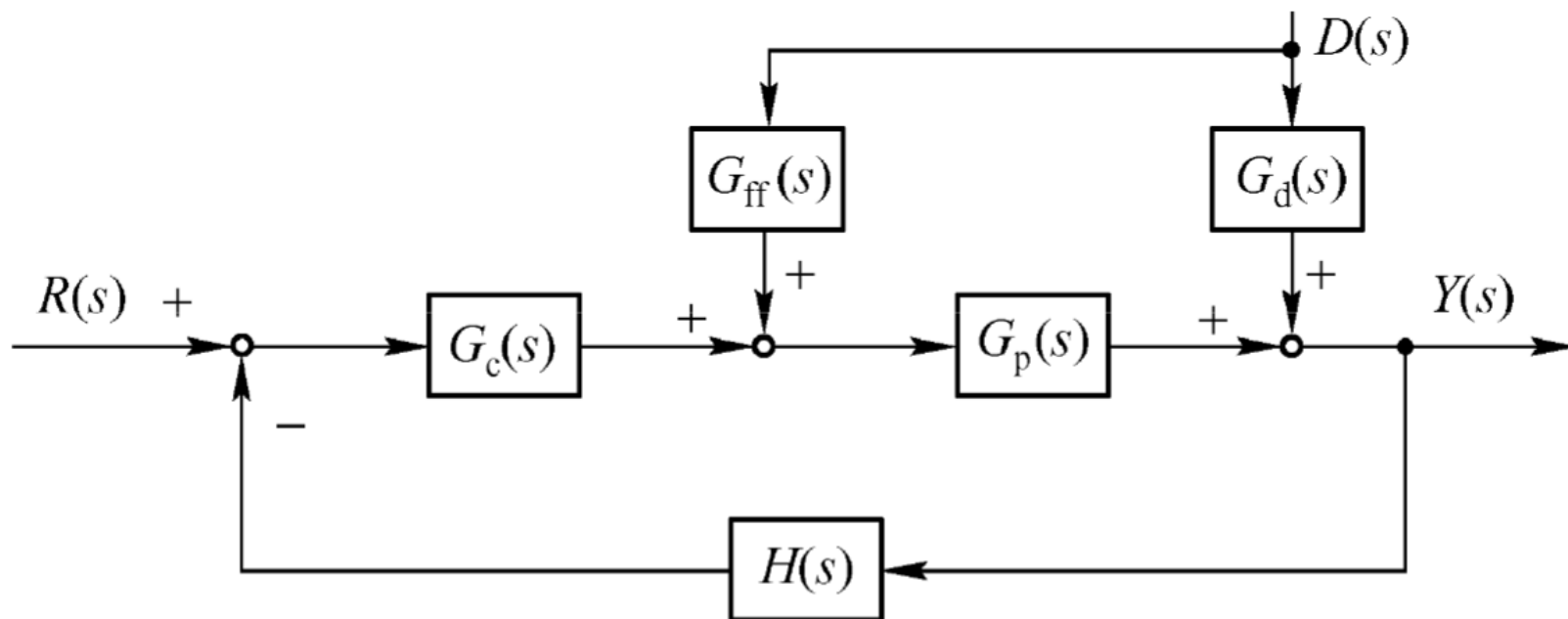
- ① 前馈控制是一种开环控制。
- ② 前馈控制是一种按扰动大小进行补偿的控制。
- ③ 一种前馈控制器只能克服一种扰动。
- ④ 前馈控制只能抑制可测不可控扰动对被控变量的影响。
- ⑤ 前馈控制使用的是视对象特性而定的专用控制器。

前馈控制系统的结构： 2. 前馈-反馈复合控制

- 单纯前馈控制是一种开环控制，在控制过程中，完全不测取被控变量的信息。因此，
 - 这种控制方式只能对指定的扰动量进行补偿控制，而对其他的扰动量无任何补偿作用；
 - 即使是对指定的扰动量，由于环节或系统数学模型的简化、工况的变化以及对象特性的漂移等，也很难实现完全补偿；
 - 此外，在工业生产过程当中，系统的干扰因素较多，如果对所有的扰动量进行测量并采用前馈控制，必然增加系统的复杂程度。而且有些扰动量本身就无法直接测量，也就不可能实现前馈控制。
- 因此，在实际应用中，通常采用前馈与反馈相结合的复合控制方式。
 - 前馈控制器用来消除扰动量对被控变量的影响，
 - 反馈控制器则用来消除前馈控制器不精确和其他不可测干扰所产生的影响。

前馈控制系统的结构： 2. 前馈-反馈复合控制

➤ 典型的前馈-反馈复合控制系统结构图如图所示：



前馈控制系统的结构： 2. 前馈-反馈复合控制

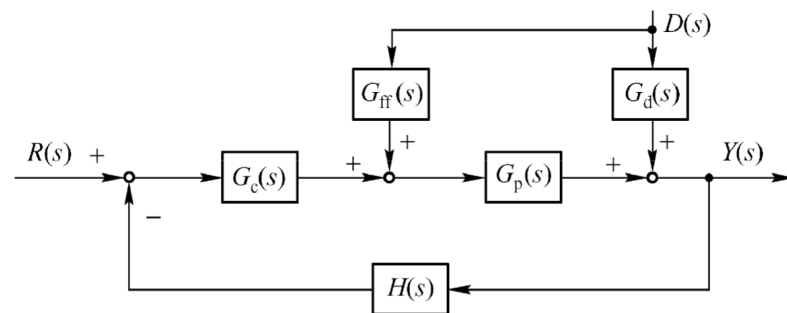
- 干扰对被控量的闭环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d(s) + G_p(s)G_{ff}(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_p(s)}$$

- 干扰作用下，对被控量完全补偿的条件是： $D(s) \neq 0$ ，而 $Y(s) = 0$

- 因此有 $G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)}$

- 可以看出，从实现对系统主要干扰完全补偿的条件来看，采用单纯的前馈控制或是采用前馈-反馈控制，前馈控制器的特性不会因为增加了反馈回路而改变。



- 前馈-反馈控制对扰动完全补偿的条件与前馈控制时完全相同。
- 反馈回路中加入前馈控制不会对反馈调节器所需整定的参数带来多大变化。只是反馈调节器所需完成的工作量显著减小。

前馈控制系统的结构： 2. 前馈-反馈复合控制

综上所述，前馈-反馈控制系统的优点有：

- 在前馈控制中引入反馈，有利于对系统中的主要干扰进行前馈补偿，对系统中的其他干扰进行反馈补偿。这样既简化了系统结构，又保证了控制精度。
- 由于增加了反馈控制回路，所以降低了前馈控制器精度的要求。这样有利于前馈控制器的设计和实现。
- 在单纯的反馈控制系统中，提高控制精度与系统稳定性是一对矛盾。往往为保证系统稳定性而无法实现高精度控制。而前馈-反馈控制系统既可以实现高精度控制，又能够保证系统稳定运行。因而一定程度上解决了稳定性与控制精度之间的矛盾。

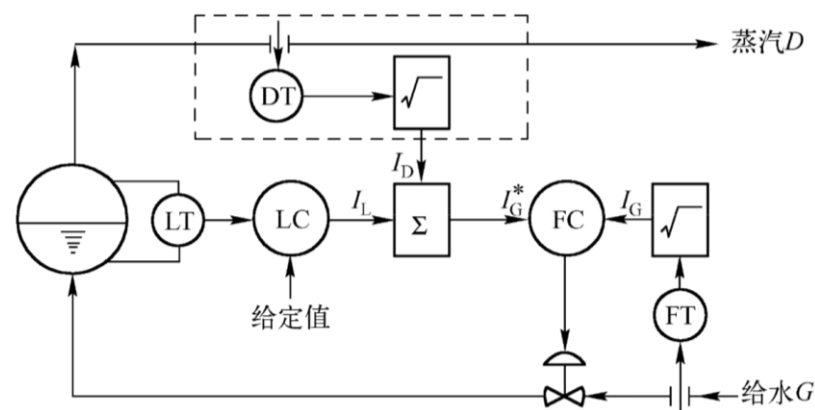
由于前馈-反馈控制系统具有上述优点，它在工程实际上已经获得了十分广泛的应用。

前馈控制系统的结构： 3. 前馈-串级控制

➤ 在实际生产过程中，如果被控对象的主要干扰频繁而又剧烈，而生产过程对被控参量的精度要求又很高，可考虑采用前馈-串级控制方案。

➤ 例如，对如右图所示的供汽锅炉的水位控制系统：

- 给水 G 经过蒸汽锅炉，受热产生蒸汽 D 供给用户；
- 为了维持锅炉水位 H 稳定，采用液位-给水流量串级控制系统。



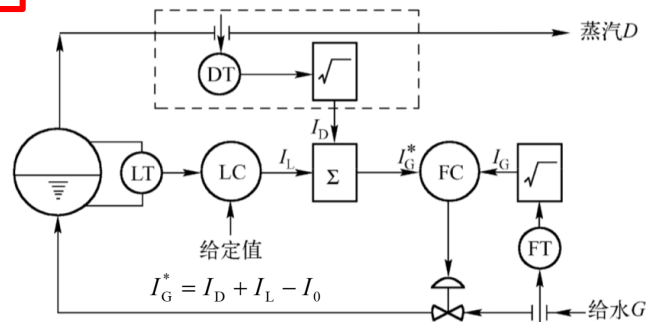
供汽锅炉水位控制系统图

- 对于供水侧的扰动如给水压力扰动等，串级系统能达到较好的控制效果。
- 如有其他因素影响了水位，也能通过串级控制收到一定效果。



$$I_G^* = I_D + I_L - I_0$$

- 由于工业供汽锅炉主要是**负荷扰动**，即外界的用户需要随时改变负荷的大小。
 - 当负荷 D 发生扰动时，锅炉水位就会偏离设定值。
 - **液位控制器LC**，接受偏差信号，运算后经加法器改变**流量控制器FC**的设定值，
 - **流量控制器FC**响应设定值的变化，改变调节阀的阀位（开度），从而改变给水流量来适应负荷 D 的要求。
- 如果 D 的**变化幅度大且十分频繁**，那么这个系统是难于满足要求的，**水位 H 将会有较大的波动**。
- 另外，负荷对水位的影响还存在着“**假水位**”现象，调节过程会产生更大的动态偏差，而调节过程也会加长。

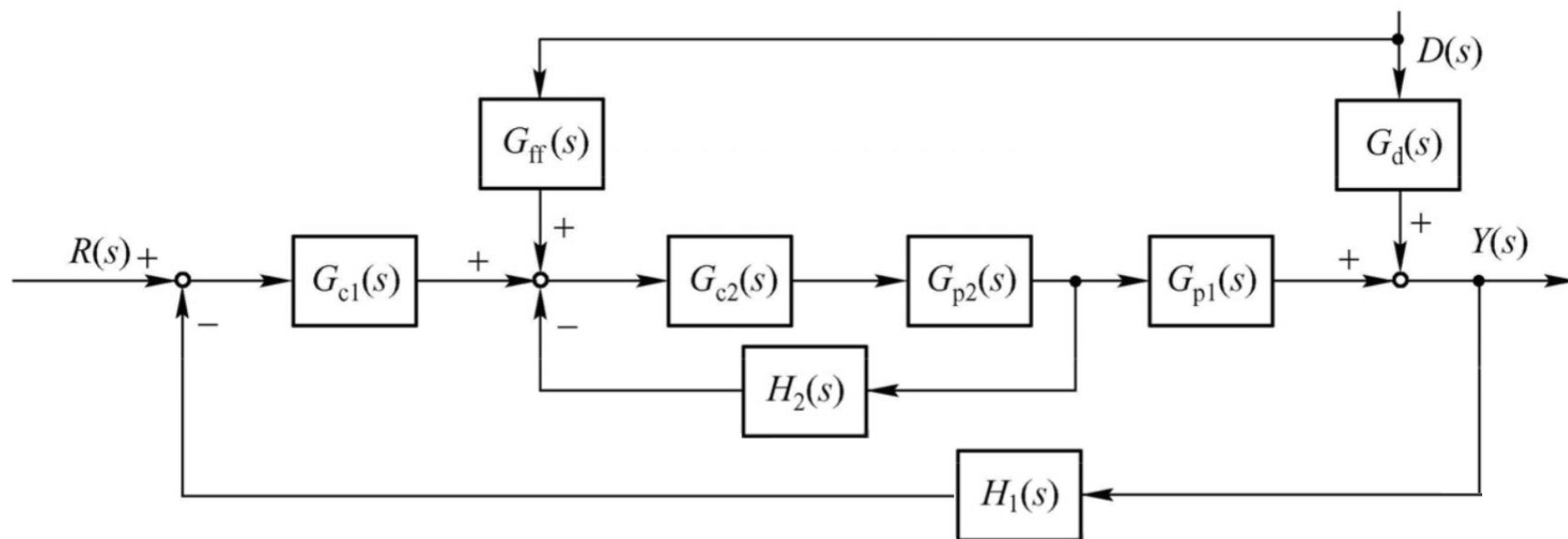


供汽锅炉水位控制系统图

- 此时，如果增加图中**虚线框内的部分**，该部分**根据外界负荷的变化先行调节给水量**，使得给水量紧紧跟随负荷量，而不需要像反馈系统那样，等到水位变化后再进行调节。
- 如果操作得当，使得锅炉中给水和负荷之间保持着物质平衡，水位可以调节到几乎不偏离设定值，这是反馈控制器无法达到的控制效果。

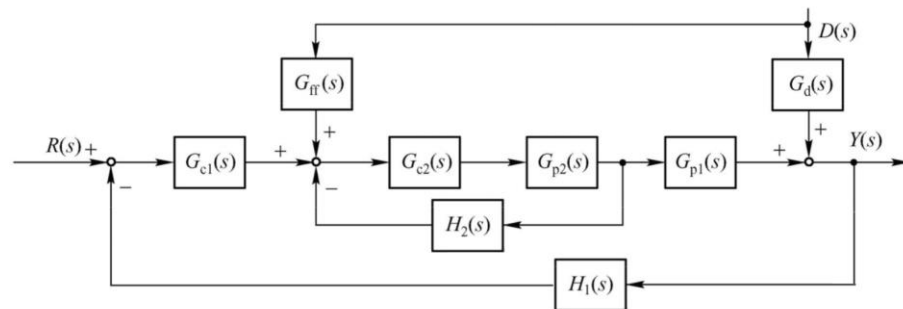
前馈控制系统的结构： 3. 前馈-串级控制

➤ 典型的前馈-串级控制系统结构图如下：



前馈控制系统的结构： 3. 前馈-串级控制

- 干扰 $D(s)$ 对系统输出 $Y(s)$ 的闭环传递函数为



前馈-串级控制系统方框图

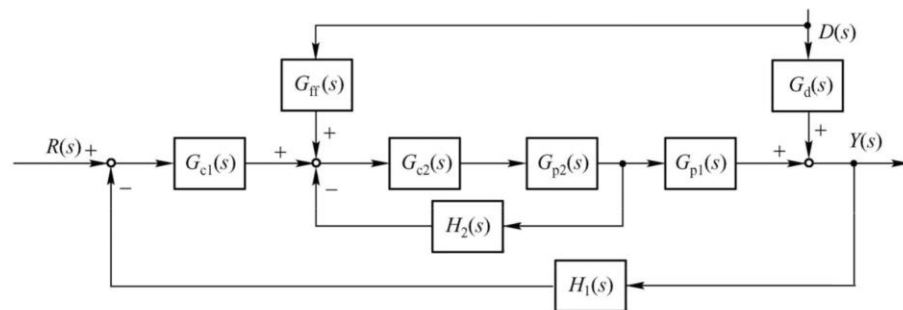
$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d(s)}{1 + \frac{G_{c2}(s)G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{p2}(s)} H(s)G_{c1}(s)G_{p1}(s)} + \frac{G_{ff}(s) \frac{G_{c2}(s)G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{p2}(s)} G_{p1}(s)}{1 + \frac{G_{c2}(s)G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{p2}(s)} H(s)G_{c1}(s)G_{p1}(s)}}$$

前馈控制系统的结构： 3. 前馈-串级控制

- 串级控制系统中，当副回路的工作频率远大于主回路的工作频率时，如副回路等效时间常数是主回路时间常数的1/10，副回路的传递函数可以近似表示为

$$\frac{G_{c2}(s)G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{p2}(s)} \approx 1$$

- 又因为扰动 $D(s)$ 对被控量 $Y(s)$ 完全补偿的条件是：
 $D(s) \neq 0$ ，而 $Y(s) = 0$



前馈-串级控制系统方框图

- 因此，可求得前馈控制器的传递函数

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_{p1}(s)}$$

前馈控制系统的设计： 1. 扰动量的选择

➤ 前馈控制器的输入变量是扰动，扰动量选择的依据如下：

- (1) 扰动量可测但不可控，例如换热器进料量和供汽锅炉的负荷变化等；
- (2) 扰动量应是主要扰动，变化频繁且幅度较大；
- (3) 扰动量对被控变量影响大，用反馈控制较难实现所需控制要求；
- (4) 扰动量虽然可控，但工艺要经常改变其数值，进而影响被控变量。

前馈控制系统的设计：2. 引入前馈控制的原则

- 采用前馈控制的条件必然与干扰及对象特性有关。一般说来，在系统中引入前馈必须遵循以下几个原则：
 - 1) 系统中的扰动量是可测不可控的。
 - 2) 系统中的扰动量的变化幅值大、频率高。
 - 3) 控制通道的纯迟延时间较大或干扰通道的时间常数较小。
 - 4) 当工艺上要求实现变量间的某种特殊关系，需要通过建立数学模型来实现控制时，可选用前馈控制。

前馈控制系统的设计：3. 前馈控制的选用原则

- 当决定选用前馈控制方案后，还需要确定前馈控制系统的结构，其结构的选择要遵循以下原则：

(1) 优先性原则

采用前馈控制的优先性次序为：静态前馈控制、动态前馈控制、前馈-反馈控制和前馈-串级控制。

(2) 经济性原则

由于动态前馈的设备投资高于静态前馈，而且整定也较复杂，因此，当静态前馈能满足工艺要求时，不必选用动态前馈。

(3) 控制系统精确辨识原则

在采用单纯前馈控制系统时，要求构成系统的任何一个环节，都应当尽可能精确辨识。

非自衡系统：不适用单纯前馈，开环系统不改变被控系统的非自衡特性

前馈控制系统的设计：4. 前馈控制系统的实施

- 通过对前馈控制系统几种典型结构形式的分析可以知道，前馈控制器的控制规律取决于被控对象的控制通道和干扰通道的动态特性。
- 而工业对象的特性极为复杂，这就导致了前馈控制规律的形式繁多，按不变性原理实现完全补偿，很多情况下只有理论意义，实际做不到。
 - 一方面，是因为工业过程的动态特性很难测得准确，而且一般具有不可忽视的非线性，特别是在不同负荷下动态特性变化很大。因此，用一般的线性补偿器就无法满足不同负荷下的要求；
 - 另一方面，写出了补偿器的传递函数并不等于能够实现它。如果 $G_p(s)$ 中包含的纯迟延时间比 $G_d(s)$ 中的纯迟延时间大，那就没有实现完全补偿的可能。
- 从工业应用的观点来看，尤其是使用常规控制仪表组成的控制系统，总是力求控制系统的模式具有一定的通用性，以便设计、投运和维护。

前馈控制系统的设计：4. 前馈控制系统的实施

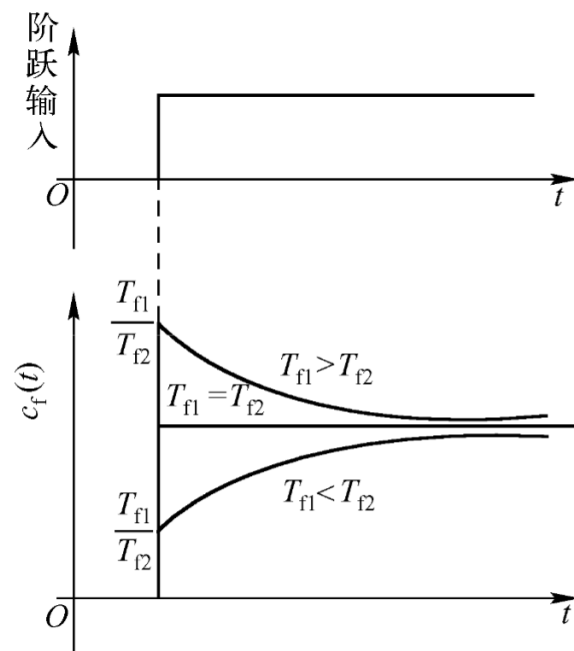
- 实际上，可以采用前馈控制的大部分过程，其扰动通道和控制通道的传递函数在性质上和数量上都相近，通常可用一阶或二阶环节表示。
- 虽然在两者中还可能碰到纯迟延，但是它们的数值一般也比较接近。
- 所以，在大多数的情况下，只需要考虑主要的惯性环节，也就是实现部分补偿。
- 通常，采用简单的超前-滞后装置作为动态补偿器也就能够满足要求。它的传递函数是

$$G_{ff}(s) = -K_f \frac{T_{f1}s + 1}{T_{f2}s + 1}$$

超前-滞后

$$G_{ff}(s) = -K_f \frac{T_{f1}s + 1}{T_{f2}s + 1} \quad c_f(t) = 1 + \frac{T_{f1} - T_{f2}}{T_{f2}} e^{-\frac{t}{T_{f2}}}$$

- 超前-滞后环节的单位阶跃响应:
- 其中, T_{f1} 为超前时间, T_{f2} 为滞后时间。
- 超前-滞后环节的阶跃响应曲线如图所示。
 - $T_{f1} > T_{f2}$ 时, 前馈补偿具有超前特性, 适用于控制通道滞后大于扰动通道滞后的对象;
 - $T_{f1} < T_{f2}$ 时, 前馈补偿具有滞后特性, 适用于控制通道滞后小于扰动通道滞后的对象。
 - $T_{f1} = T_{f2}$ 时, 前馈补偿呈现为比例特性, 即为静态特性。

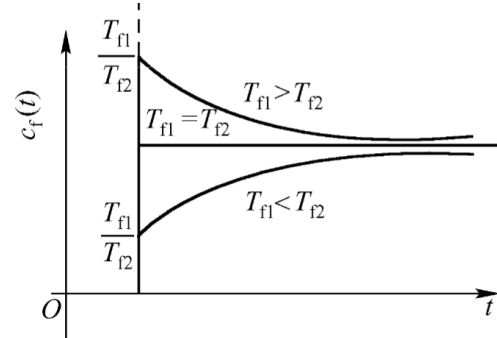


超前-滞后环节的阶跃响应

- 阶跃响应曲线表明, 它有一个瞬时增益为 T_{f1}/T_{f2} , 恢复到稳态值63%所需时间为 T_{f2} 。

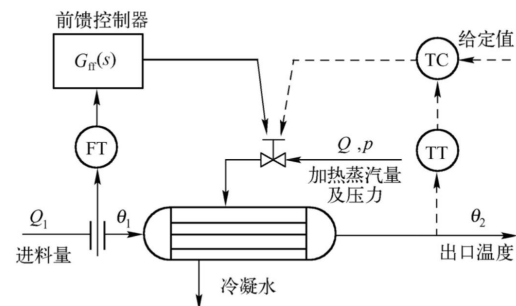
超前-滞后

$$G_{ff}(s) = -K_f \frac{T_{f1}s + 1}{T_{f2}s + 1}$$

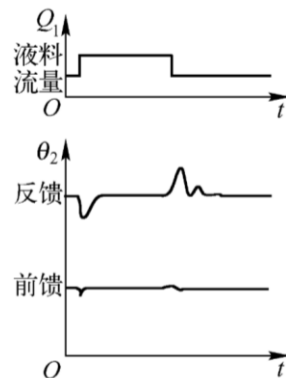
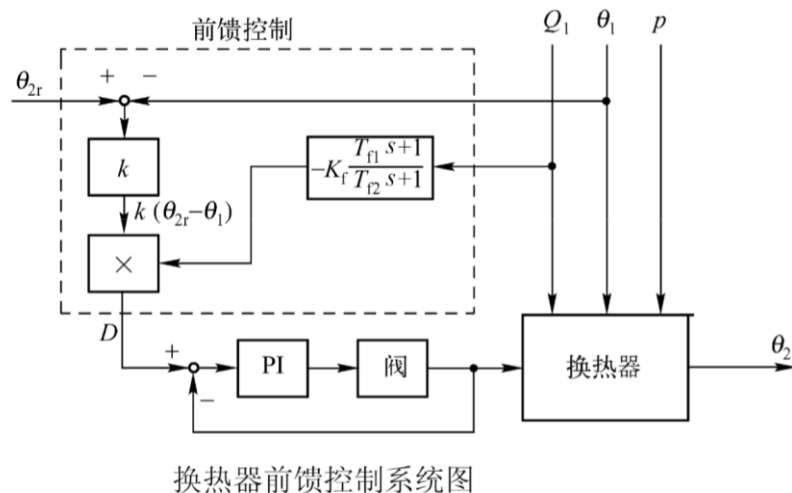


- 超前滞后环节最重要的性能是静态精度。如果在静态下不能很准确地复现输入，超前-滞后环节就要降低前馈控制的性能。
- 因此，作为动态补偿器，在线性、复现性和没有滞环特性等各方面的要求比对常规控制器的要求还要高。
- 另外，超前时间和滞后时间必须是可以调整的，以便与大多数过程的时间常数相匹配。
- 利用超前-滞后补偿器进行前馈控制时，负荷发生变化，补偿器能通过控制通道，给过程输入比较多(或比较少)的能量或物质，以改变过程的能量水平。
- 在它的输入和输出函数间的累积面积应该与未经补偿的过程响应曲线中的面积相匹配。如果那样做了，那么响应曲线之净增面积将是零。

例：换热器温度控制：前馈



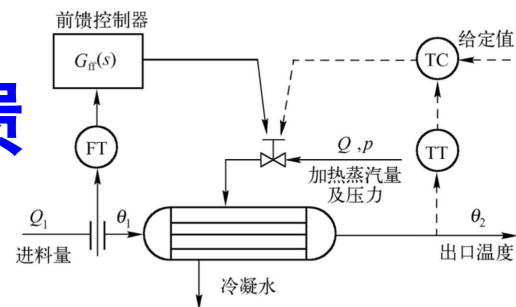
- 应用超前-滞后环节对料液流量扰动进行动态补偿，得到前馈控制系统和响应如图所示。
- 将换热器出口温度在动态前馈控制下的负荷响应曲线与在反馈控制下的负荷响应曲线进行比较，可以看到，当进料流量发生变化时，静态前馈将使出口温度的静态偏差为零，动态偏差也可以补偿到很小的数值，可以说基本保持不变，控制效果显然优于反馈控制。
- 对入口温度也可以进行动态补偿，只是由于入口温度变化缓慢，通常无须考虑。



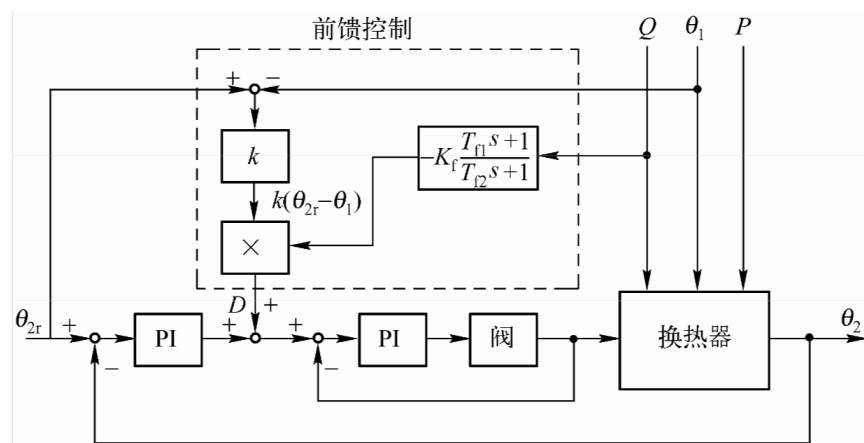
换热器前馈和反馈控制响应

- 与反馈控制相比，前馈控制不但控制质量好，而且不会出现闭环控制系统的稳定性问题。
- 在前馈控制系统中甚至不需要被控变量的测量信号，这种情况有时候使得前馈控制成为唯一可行的控制方案。

例：换热器温度控制：前馈-反馈



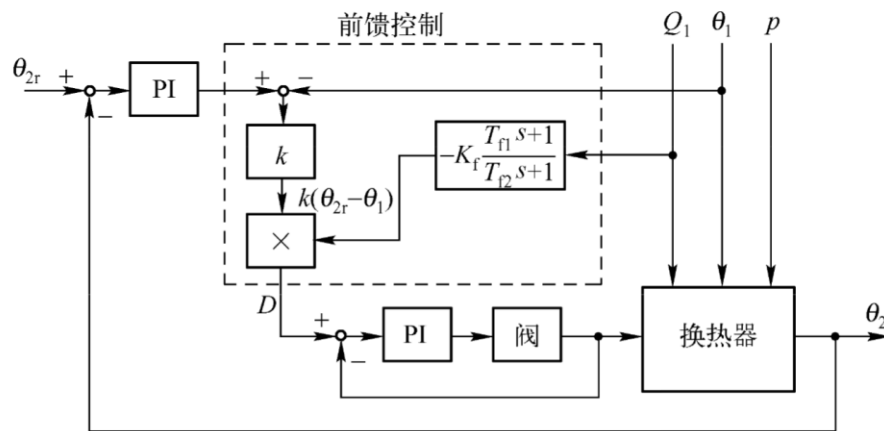
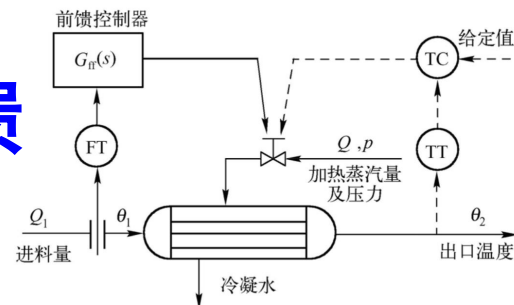
- 图示为在换热器中实现前馈-反馈控制。
- 当负荷扰动 Q 或入口温度 θ_1 变化时，由前馈通道改变蒸汽量 D 进行控制，除此以外的其他各种扰动的影响及前馈通道补偿不准确带来的偏差，均由反馈控制器来校正。
- 例如，它可以用来校正热损失。也就是要求在所有负荷下都给过程增添一些热量，这好像对前馈控制起了调零的作用。
- 又如，反馈控制器可以校正和控制加热蒸汽压力 P 的变化等其他干扰的作用。
- 因此，可以说，在前馈-反馈系统当中，前馈回路和反馈回路在控制过程中起着相辅相成、取长补短的作用。



换热器前馈-反馈控制系统方案 1

例：换热器温度控制：前馈-反馈

- 图示为在换热器中实现前馈-反馈控制的另一种方案。
- 由于前馈回路包含了一个反馈信号，它能够通过这个反馈信号控制那些未加以测量的扰动。
- 前馈回路反过来使反馈回路能适应过程增益的变化。
- 从换热器系统在前馈-反馈控制方案1下的负荷响应可以看到，随着负荷增加，过渡过程衰减很快；而随着负荷减小，过渡过程振幅变大，衰减变慢。
- 这表明过程的增益与料液流量成反比，过程呈现出非线性特性。



换热器前馈-反馈控制系统方案2

- 如果使反馈控制器增益与流量成正比，将弥补此非线性特性，使系统增益不随负荷变化。
- 图中方案2恰好能做到这一点。反馈回路把 θ_2 作为输入信号，把 D 作为输出。但在回路的内部，反馈控制器的输出值要先减去 θ_1 ，然后再乘以 Q 。其中减法是线性运算，但乘法是非线性运算，它使反馈回路的开环增益与流量成正比，抵消了换热器本身增益的变化。

前馈控制和反馈控制

- 由上例可以看到，前馈控制和反馈控制之间，
 - 前馈是快的，有智能的和敏感的，但是它不准确;
 - 反馈是慢的但却是准确的，而且在负荷条件不明的情况下还有控制能力。
 - 这两种回路的相互补充，相互适应构成了一种十分有效的控制方案。
- 为了控制难控的过程，在所有一切方法中前馈是最有力的方法。
- 某些反馈方式，如补偿反馈、采样和非线性环节等，可能把单位负荷变化下的累积误差减小两倍左右，而前馈控制却可能成百倍地改善。一个与反馈系统相结合的前馈系统，只需要模型精确到±10% 就可以改善10 倍。
- 实现前馈控制当然也需要付出代价，这就是要求干扰可以在线检测，而这一点正妨碍了前馈控制的广泛采用。
- 虽然前馈控制承担着大部分负荷，但反馈控制在应用中仍十分重要。在实践中，前馈一反馈控制系统正越来越多地得到采用，而且收到十分显著的控制效果。

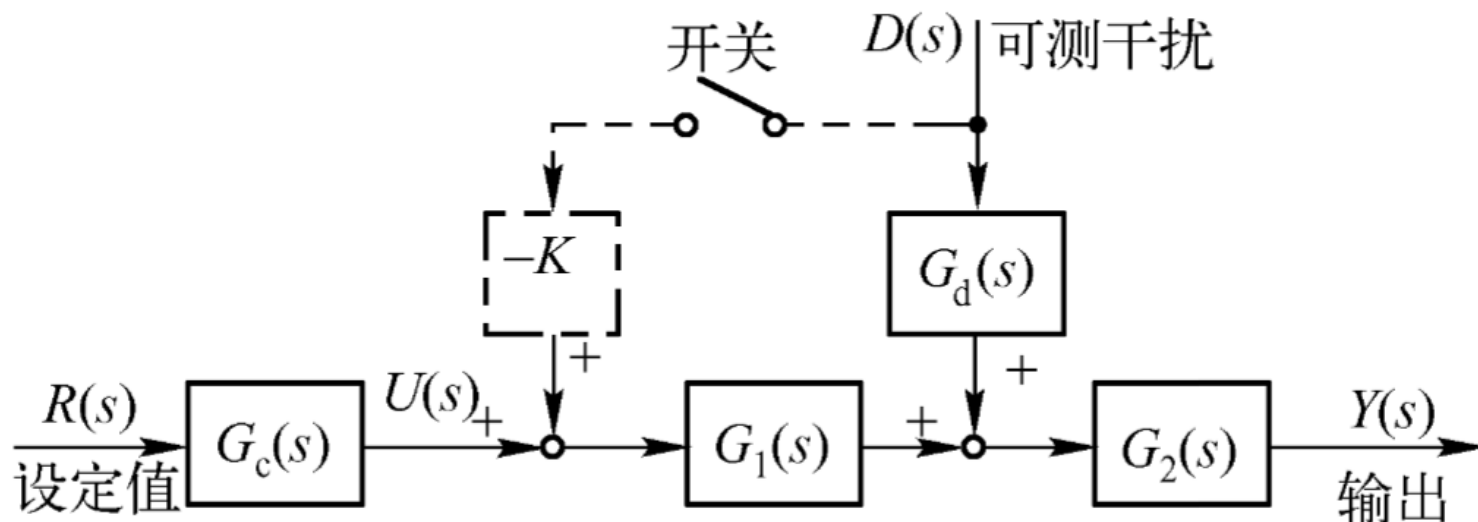
前馈控制系统的整定

- 前馈控制系统整定的主要任务是确定反馈控制器（针对前馈-反馈控制系统或前馈-串级控制系统）和前馈控制器的参数。
- 确定前馈控制器的方法主要有理论计算法和工程整定法。
- 理论计算法是通过建立物质平衡方程或能量平衡方程，然后求取相应参数的方法。
- 实际上，往往理论计算法所得参数与实际系统相差较大，精确性较差，甚至有时前馈控制器的理论整定难以进行。
- 因此，工程应用中广泛采用工程整定法。

静态前馈控制系统的工程整定

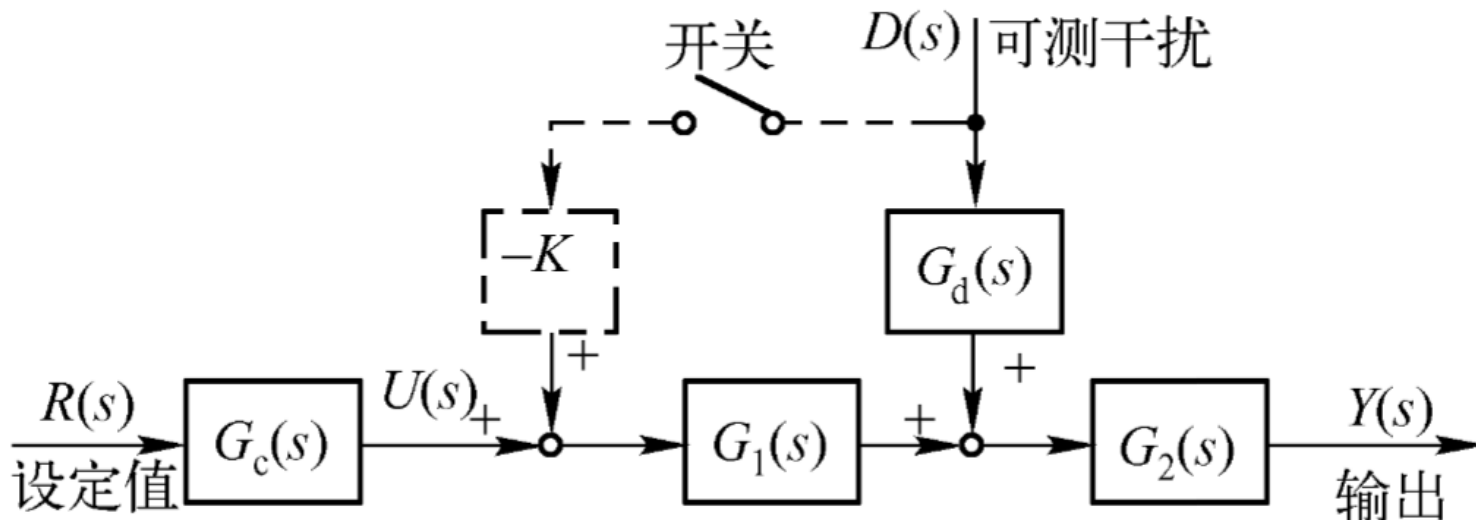
➤ 静态前馈控制系统就是确定静态前馈控制器的静态前馈系数 K_{ff} ，主要有以下三种方法。

1) 实测扰动通道和控制通道的增益，然后相除就可得到静态前馈控制器的增益 K_{ff} 。



静态前馈控制系统的工程整定

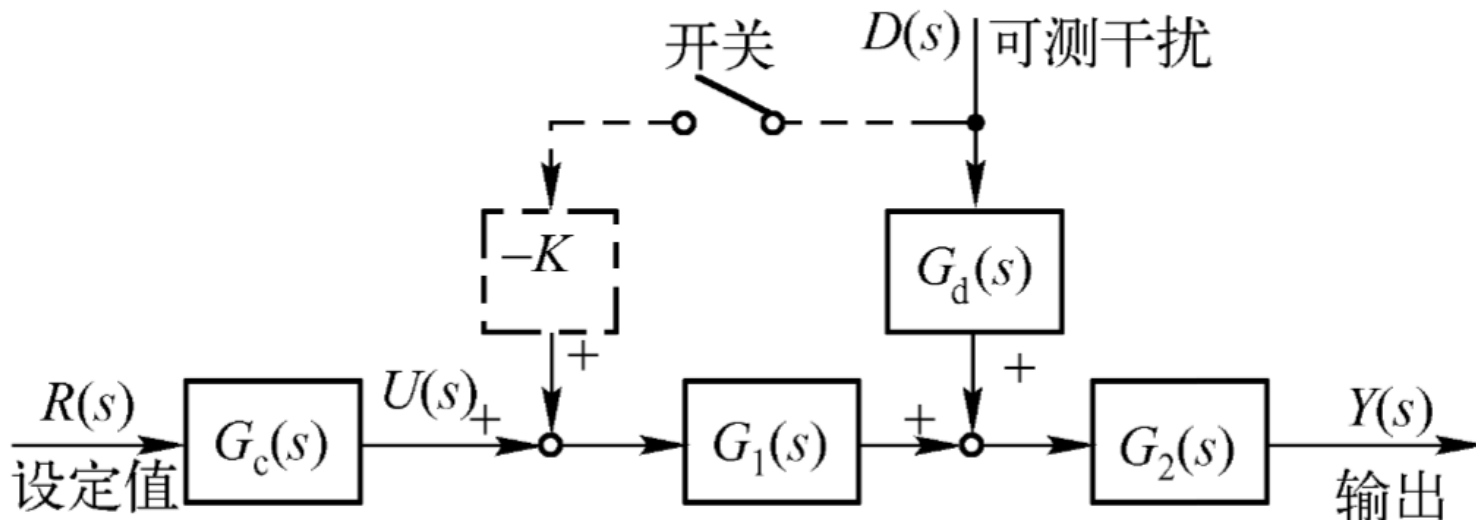
- 2) 对于如图所示的系统，无前馈控制（图中开关处于打开状态）时，设
- 系统在输入为 r_1 （对应的控制变量为 u_1 ）、扰动为 d_1 作用下，系统输出为 y_1 ；
 - 改变扰动为 d_2 ，调节输入为 r_2 （对应控制变量为 u_2 ），以维持系统输出 y_1 不变。
 - 所求的静态前馈系数 K_{ff} 为
$$K_{ff} = \frac{u_2 - u_1}{d_2 - d_1}$$



静态前馈控制系统的工程整定

3) 若系统允许，也可以按图所示进行现场调节。

- 首先，系统无前馈控制（图中开关处于打开状态）时，在输入为 r_1 （对应的控制变量为 u_1 ）、扰动为 d_1 作用下，系统输出为 y_1 ；
- 然后，关闭开关，调节前馈补偿增益 K ，使系统的输出恢复为 y_1 ；
- 此时的 K 值即为所求的静态前馈系数 K_{ff} 。

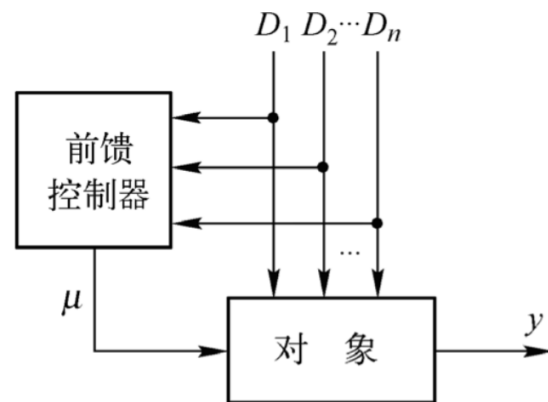


动态前馈控制系统的工程整定

- 采用动态前馈控制时，需要确定超前-滞后环节的参数，它也有以下两种方法。

方法一

- 利用实验法得到扰动通道和前馈广义对象的带纯迟延的一阶惯性传递函数，其中前馈广义对象包含扰动量的测量变送装置、执行器和被控对象。
 - 当扰动量是流量时，可用实测的执行器和被控对象的传递函数近似；
 - 当扰动量不是流量或动态时间常数较大时，应实测扰动量测量变送装置的传递函数。
- 然后确定动态前馈的超前-滞后环节的参数 T_{f1} 和 T_{f2} 。



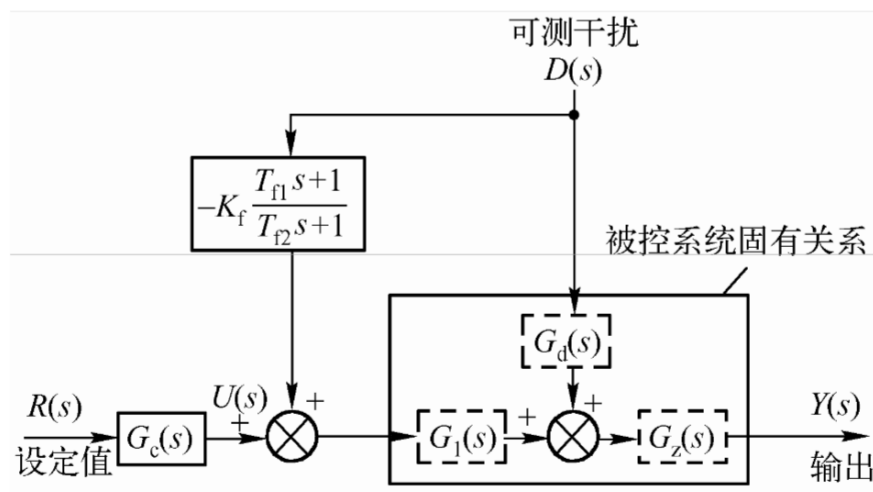
动态前馈控制系统的工程整定

方法二

➤ 经验法。系统方框图如下，分成系数整定和时间常数整定两步。

① 系数 K_f 的整定

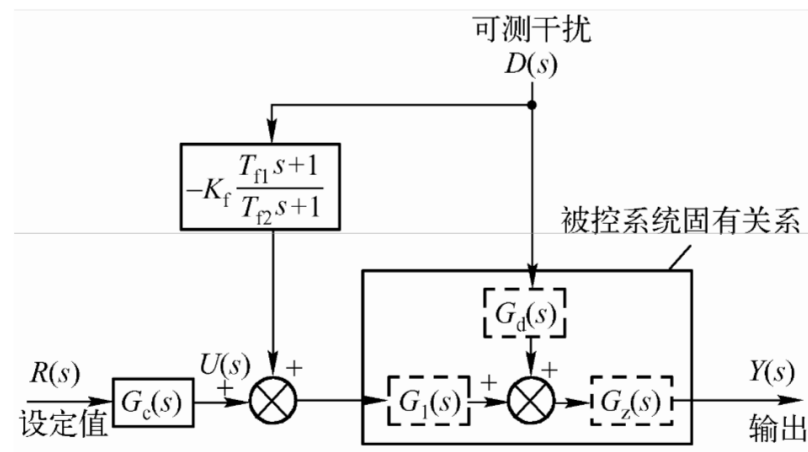
- 系数整定时，令 $T_{f1}=0$ 和 $T_{f2}=0$ ，并将系统的时间常数和纯延迟均设为零，即不考虑时间的影响。
- 此时，动态前馈控制相当于静态前馈控制，而系数的整定方法同静态前馈。



动态前馈控制系统的工程整定

② 时间常数 T_{f1} 和 T_{f2} 的整定

- 在静态前馈系数整定的基础上，对时间常数进行整定。
- 动态前馈的超前-滞后环节的参数整定比较困难。在整定时，
 - 首先，判别系统扰动通道和前馈通道的超前和滞后关系。
 - 其次，利用超前或滞后关系确定超前-滞后环节中两个时间常数的大小关系，若起超前补偿作用， $T_{f1} > T_{f2}$ ；反之，若起滞后补偿作用， $T_{f1} < T_{f2}$ 。
 - 最后，逐步细致地调整系数 T_{f1} 和 T_{f2} ，使系统的输出 $y(t)$ 的震荡幅度最小。



前馈-反馈和前馈-串级控制系统的工程整定

- 前馈-反馈控制系统和前馈-串级控制系统的工程整定主要有两种方法。

方法一：

- 前馈控制系统和反馈或串级控制系统分别整定，各自整定好参数；
- 把两者组合在一起。

方法二：

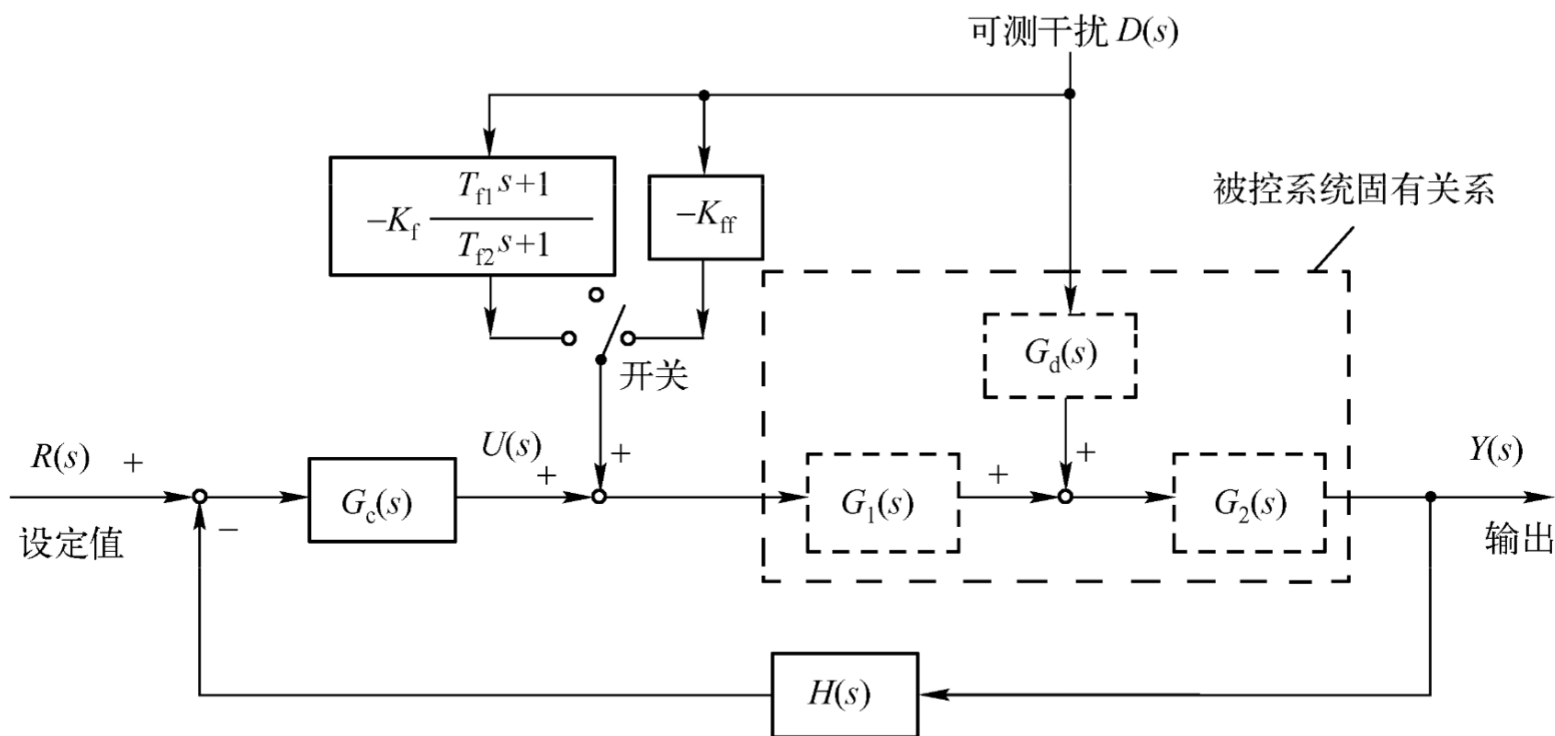
- 首先，整定反馈或串级控制系统；
- 然后，在整定好的反馈或串级控制系统基础上，引入并整定前馈控制系统。

(1) 前馈控制系统和反馈或串级控制系统分别整定

- 整定前馈控制时，不接入反馈或串级控制。
 - 前馈控制的整定方法与静态前馈控制或动态前馈控制相同。
- 整定反馈或串级控制时，不引入前馈控制。
 - 它们的整定方法也与单回路控制系统和串级控制系统相同。
- 前馈控制和反馈或串级控制分别整定好后，将它们组合在一起即可。

(2) 先整定反馈或串级控制系统，后整定前馈控制系统

- 前馈-反馈控制系统和前馈-串级控制系统的工程整定方法基本相同。
- 下面针对前馈-反馈控制系统的整定过程予以介绍，整定系统如图所示。



(2) 先整定反馈或串级控制系统，后整定前馈控制系统

① 整定反馈或串级控制

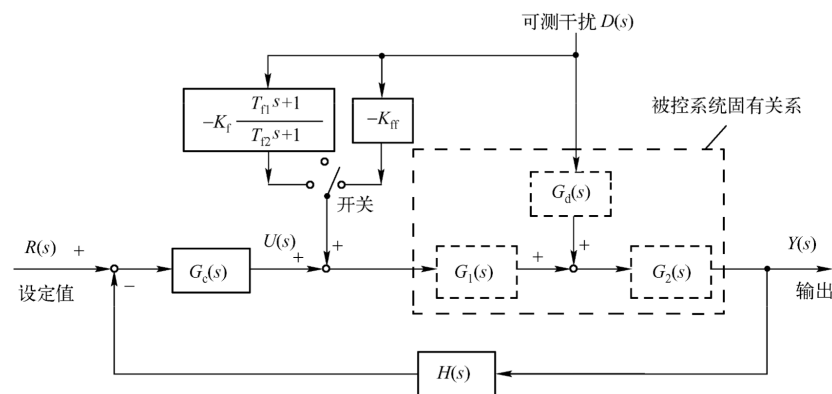
- 当整定反馈或串级控制系统时，将图中的开关置于中间位置。反馈或串级控制的整定方法与单回路控制系统或串级控制系统相同。

② 整定静态前馈系数

- 当整定静态前馈控制时，首先把开关置于右侧，将静态前馈系数引入控制系统。
- 然后保证系统的设定值端信号不变，干扰端产生一个阶跃扰动信号。整定的过程就是逐步调整静态前馈系数使系统的输出减小震荡幅度的过程，系统输出的震荡幅度为最小时的静态前馈系数即为所求。

③ 整定动态前馈的超前-滞后环节的参数

- 当整定动态前馈控制时，把图中开关置于左侧，将超前-滞后环节引入控制系统。
- 首先，要判别系统扰动通道和前馈通道的超前和滞后关系。
- 其次，利用超前或滞后关系确定超前-滞后环节中两个时间常数的大小关系。
- 最后，逐步调整各系数使系统的输出震荡幅度最小。



第5章 简单控制系统

- 7.1 补偿控制的原理
- 7.2 前馈控制系统
- **7.3 大时延控制系统**
- 7.4 利用MATLAB对补偿控制系统进行仿真

大迟延系统概述

- 在工业生产过程中，被控对象除了具有容积迟延外，往往不同程度地存在着纯迟延。
- 例如，在热交换器中，被调量是被加热物料的出口温度，而控制量是载热介质，当改变载热介质流量后，对物料出口温度的影响必然要迟延一个时间，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、多个设备串联以及用分析仪表测量流体的成分等等过程都存在着较大的纯迟延。
- 一般认为大延迟对象是指：广义对象的时滞与时间常数之比大于0.5。

大迟延系统概述

- 在这些过程中，由于纯迟延的存在，使得被调量不能及时反映系统所承受的扰动，即使测量信号到达调节器，调节机关接受调节信号后立即动作，也需要经过纯迟延时间 τ 以后，才波及被调量，使之受到控制。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 占整个过程动态的份额的增加而增加。
- 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，被调量超过安全限，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，成为重要的研究课题之一。

大迟延控制系统的设计

- 大迟延系统的解决方法很多。
- 最简单的是利用常规控制器适应性强、调整方便的特点，经过仔细个别的调整，可以在控制要求不太苛刻的情况下，满足生产过程的要求。
- 当对系统进行特别整定后还不能获得满意结果时，还可以在常规控制的基础上稍加改动。
- 如果在控制精度要求很高的场合，则需要采取其它的控制手段，例如补偿控制等。

大迟延控制系统：1. 常规控制方案

- 在大迟延系统控制中，为了充分发挥PID控制的作用，改善滞后问题，主要采用常规PID的变形方案，如：

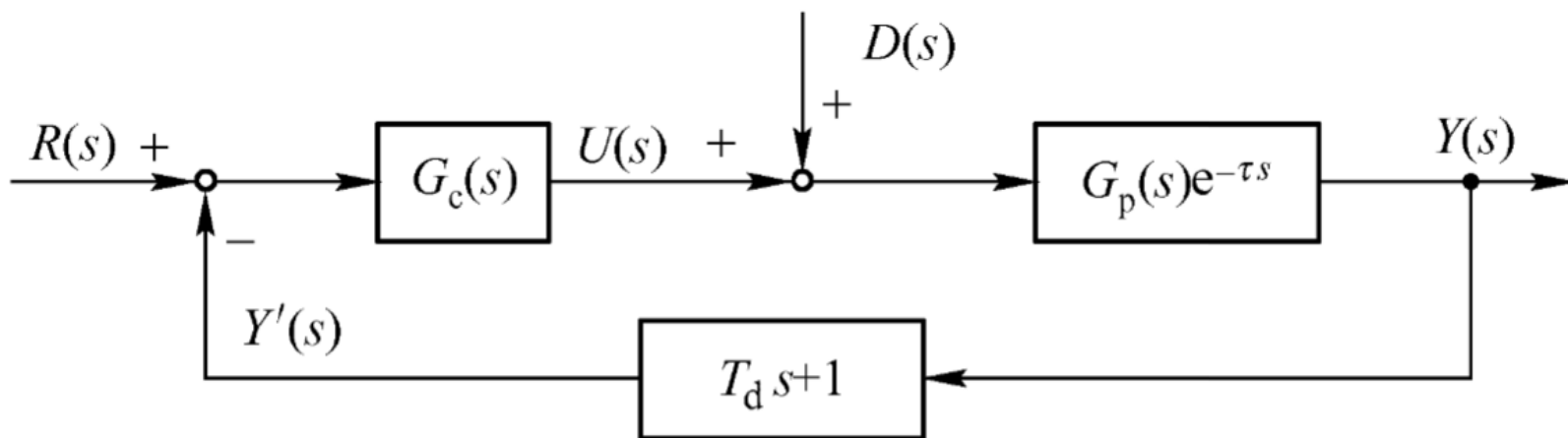
1.1 微分先行控制方案

1.2 中间微分控制方案

- 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。

1.1 微分先行控制

- 如图所示，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，这样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。



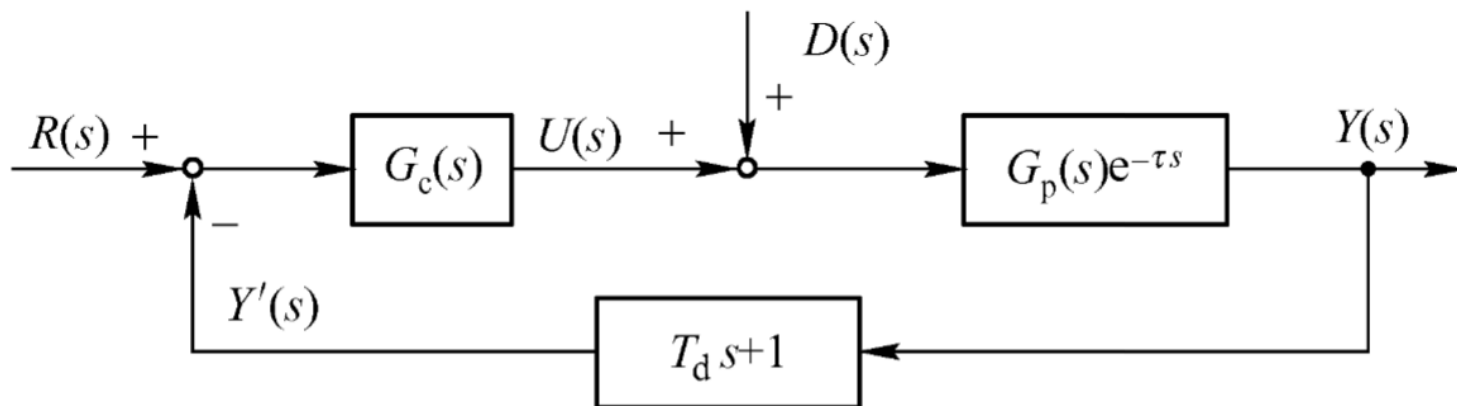
- 采用微分环节，可推导出系统输出 $Y(s)$ 与输入 $R(s)$ 之间的传递函数为

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

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

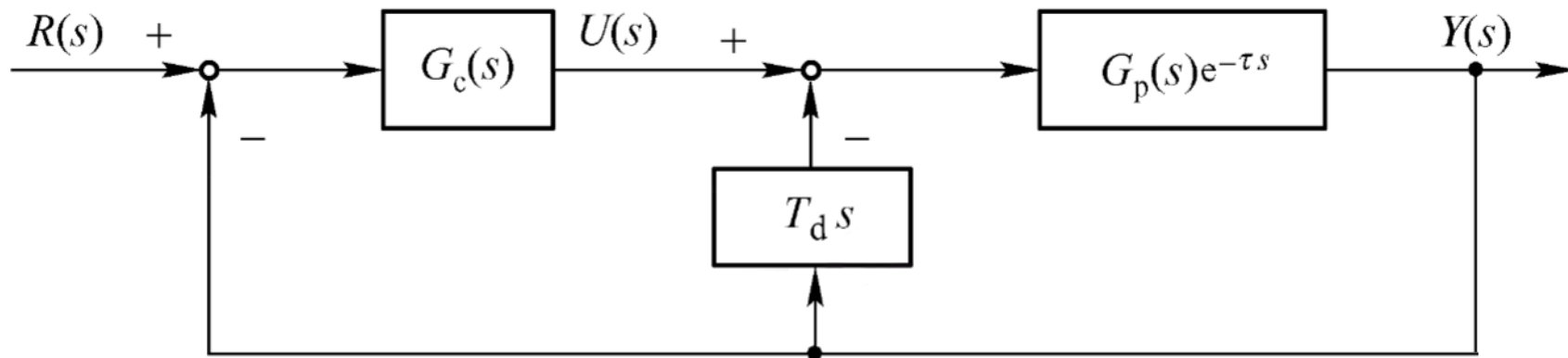
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}$$

- 采用微分环节的微分先行控制之后，系统的开环传递函数多了一个零点。
- 实践表明，采用PI控制器的微分先行控制方案可较好抑制系统的超调量，反应速度明显加快，控制品质得到较大改善。



1.2 中间微分控制

- 如图所示，与微分先行控制方案的设想类似，中间微分控制也是适当配置零极点以改善控制品质。
- 由图可见，微分只是对系统输出起作用，并作为控制变量的一部分。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。



大迟延控制系统：1. 常规控制方案

➤ 微分先行和中间微分控制都能

- 有效地克服超调现象
- 缩短调节时间，
- 而且无需特殊设备

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，

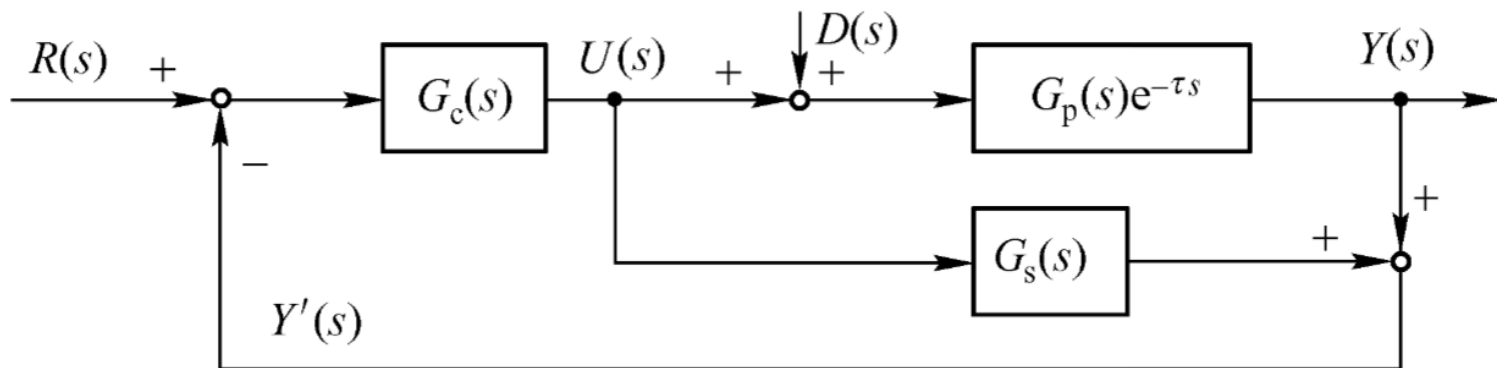
所以不适于应用在控制精度要求很高的场合。

大迟延控制系统： 2. Smith补偿控制方案

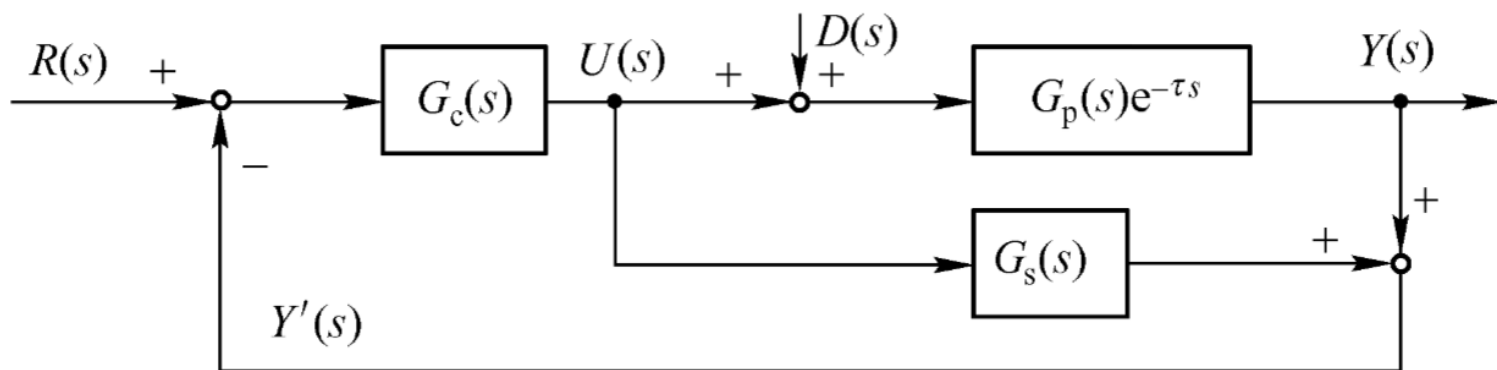
- 在大迟延系统中采用的补偿方法，不同于前馈补偿，它是按照过程的特性设想出一种模型加入到反馈控制系统中，以补偿过程的动态特性。
- 这种补偿反馈也因其构成模型的方法不同而形成不同的方案。史密斯（Smith）预估补偿方法是得到广泛应用的方案之一。

2.1 Smith预估器

- 为了改善大迟延系统的控制品质，1957年史密斯（O. J. M. Smith）提出了一种以模型为基础的预估器补偿控制方法。
- Smith预估器控制原理图如图所示。它的特点是
 - 预先估计出过程在基本扰动下的动态特性，
 - 然后由预估器进行补偿，
 - 力图使被时延了 τ 的被控变量超前反映到控制器，
 - 使控制器提前动作，
 - 从而明显地减小超调量和加速调节过程。



- 假若系统中没有此补偿器，则由调节器输出 $U(s)$ 到被调量 $Y(s)$ 之间的传递函数为
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_p(s)e^{-\tau s}$$
- 上式表明，受到调节作用之后的被调量，要经过纯迟延 τ 之后才能返回到调节器。
- 若系统采用预估补偿器，则调节量 $U(s)$ 与反馈到调节器的信号 $Y'(s)$ 之间的传递函数是两个并联通道之和，即
$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_p(s)e^{-\tau s} + G_s(s)$$



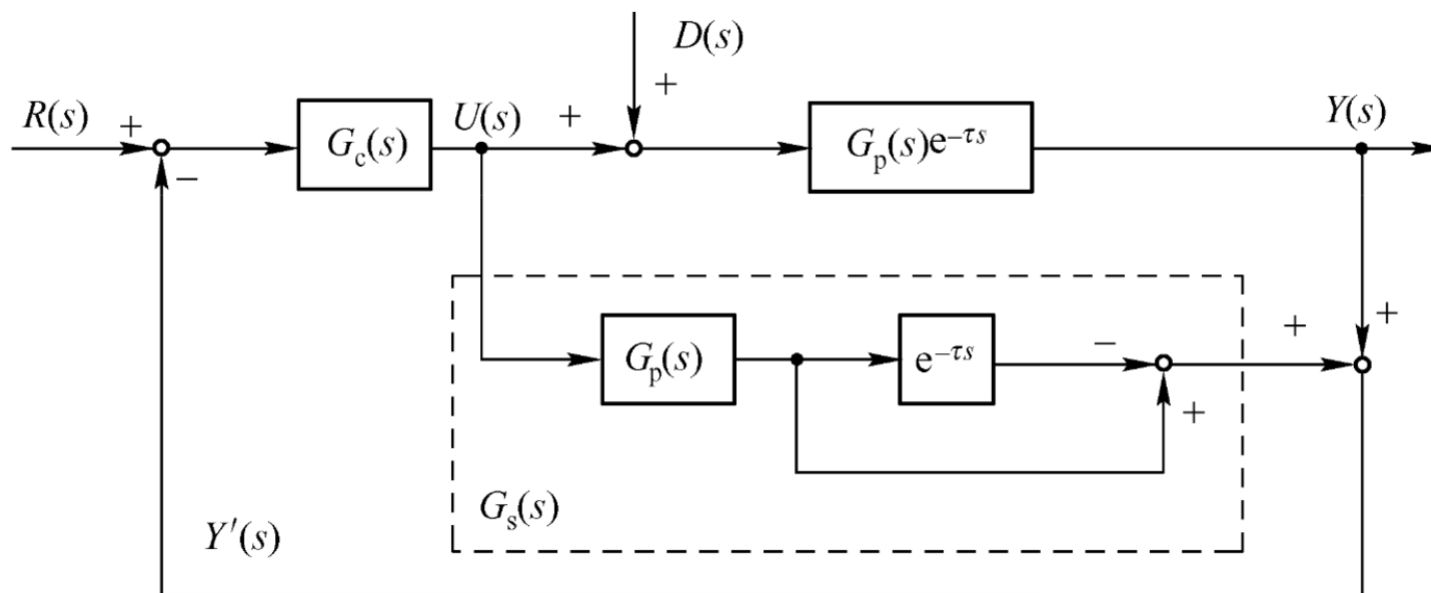
- 为使调节器采集的信号 $Y'(s)$ 不至迟延 τ ，则要求：

$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_p(s)e^{-\tau s} + G_s(s) = G_p(s)$$

- 上式便可得到预估补偿器的传递函数

$$G_s(s) = G_p(s)(1 - e^{-\tau s})$$

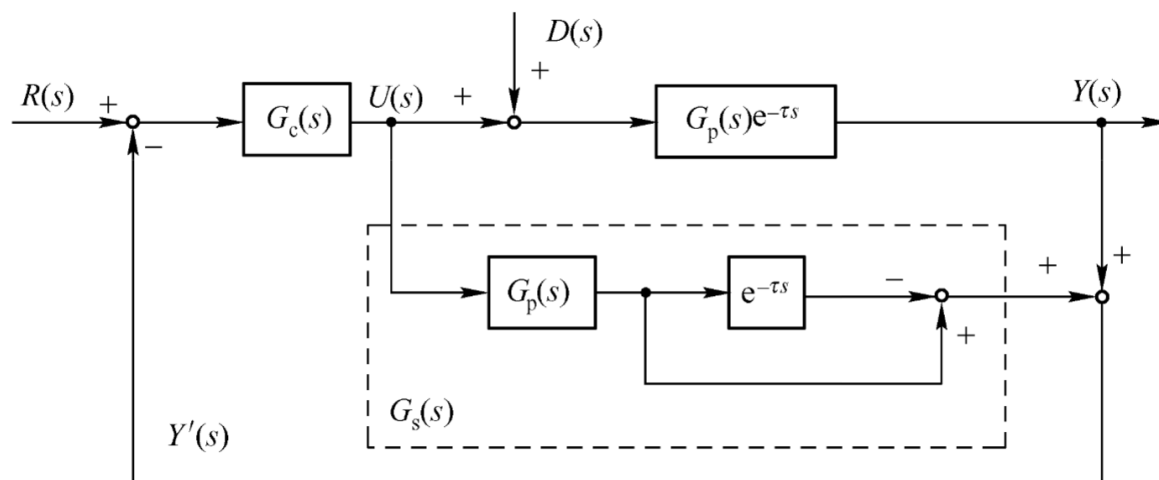
- 一般称上式表示的预估器为**Smith预估器**，其实施框图如下图所示。



➤ 整个系统的闭环传递函数为

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

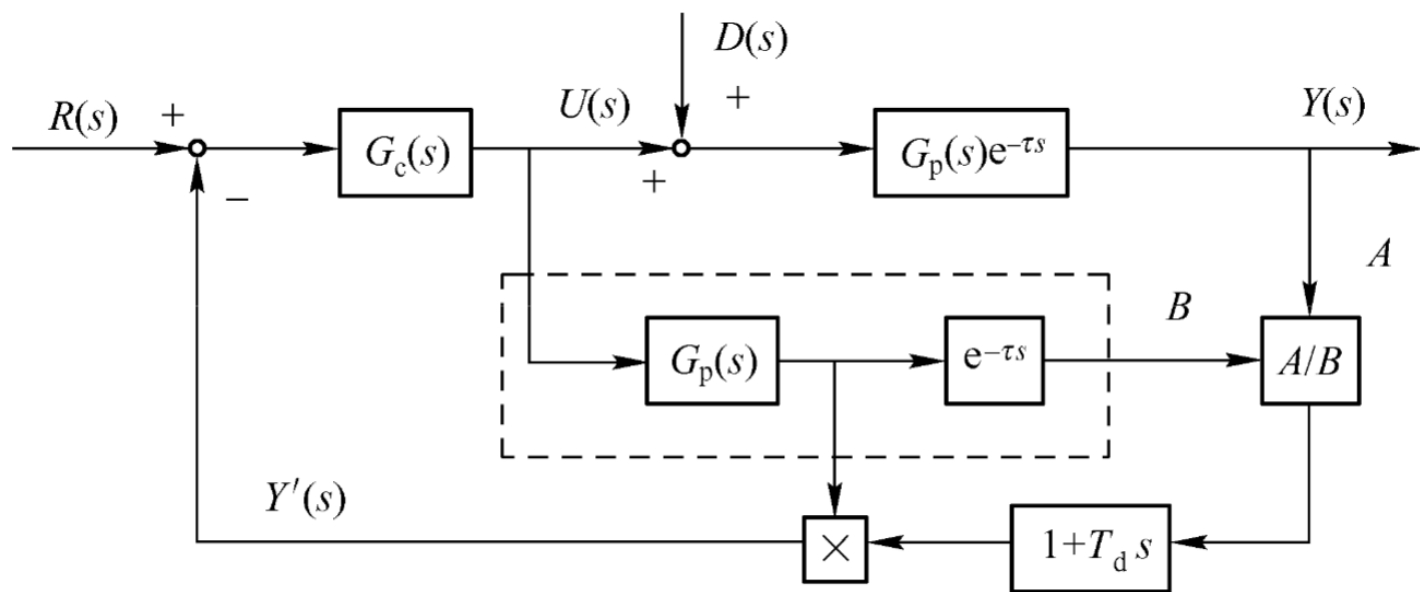
$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{D(s)} &= \frac{G_p(s)e^{-\tau s}[1 + G_c(s)G_p(s)(1 - e^{-\tau s})]}{1 + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s} + G_c(s)G_p(s)(1 - e^{-\tau s})} \\ &= \frac{G_p(s)e^{-\tau s} + G_c(s)G_p^2(s)e^{-\tau s} - G_c(s)G_p^2(s)e^{-2\tau s}}{1 + G_c(s)G_p(s)} \end{aligned}$$



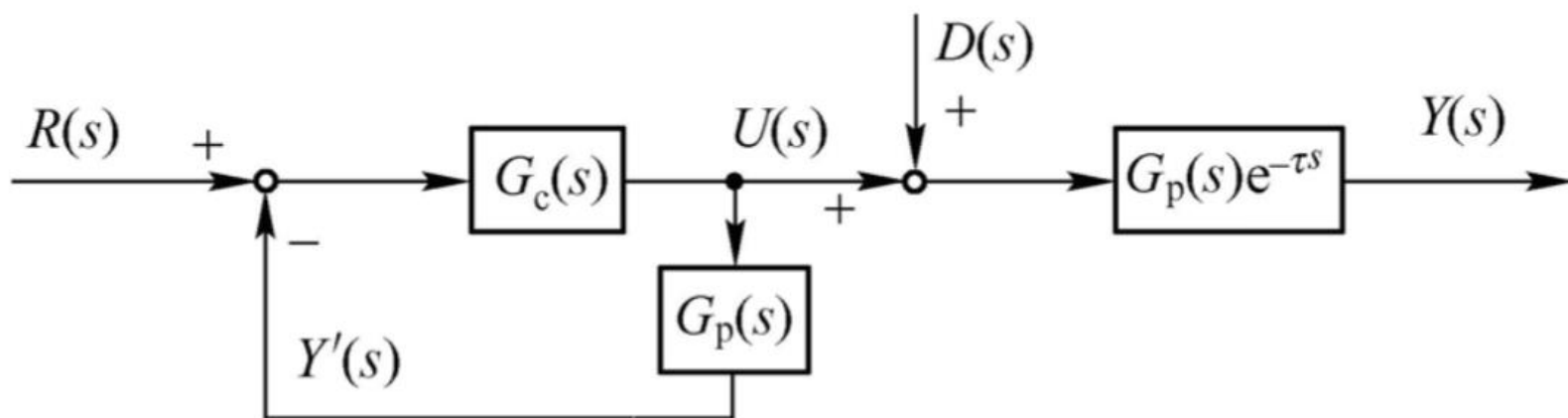
- 显然，在系统的闭环特征方程中，已不再包含纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 。
- 因此，采用Smith预估补偿控制方法，可以消除纯滞后环节对控制系统品质的影响。
- 当然，闭环传递函数分子上的纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 表明，被控量的响应比设定值要滞后 τ 时间。
- 由于Smith预估器对模型的误差十分敏感，因而难于在工业中广泛应用。
- 对于如何改进Smith预估器的性能，研究人员提出了许多改进方案。

2.2 增益自适应补偿控制

- 1977年，贾尔斯（R. F. Giles）和巴特利（T. M. Bartley）在Smith方法的基础上，提出了增益自适应补偿方案，其补偿原理方框图如下图所示。

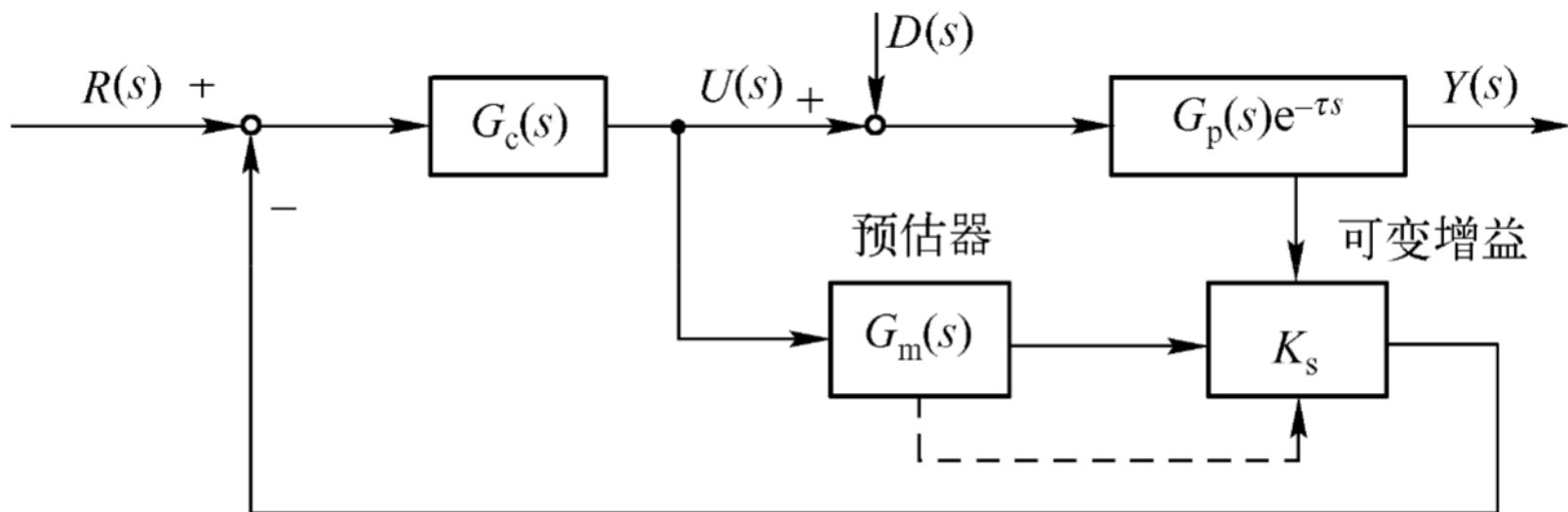


- 在理想条件下，预估器模型准确地复现了过程的输出，除法器输出值为1，其等效方框图如下图所示。
- 很明显，过程的纯延迟环节已被有效地排除在闭环控制回路之外。



理想条件下的增益自适应补偿系统等效方框图

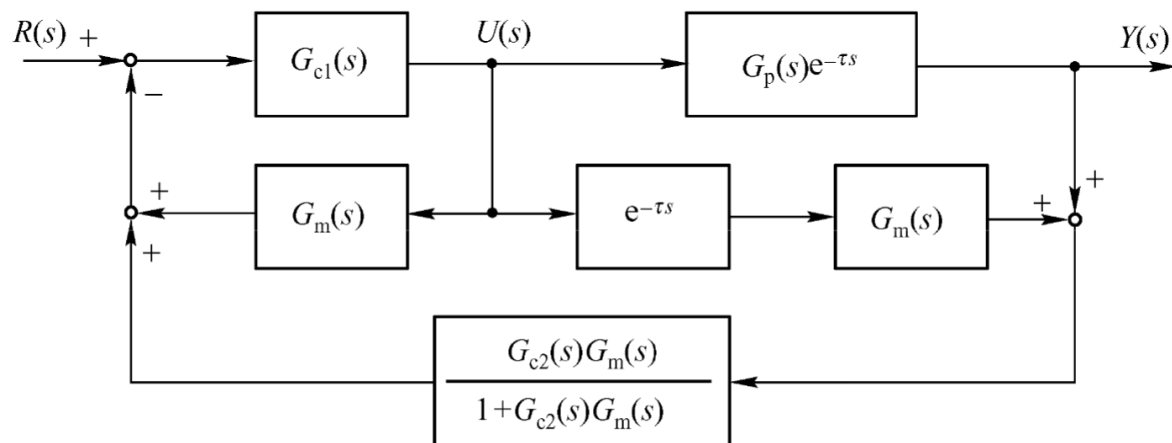
- 在**非理想条件下**，预估器模型输出和过程输出一般是不完全相同的。
- 这种情况下，增益自适应补偿系统，变成一个较为复杂的控制系统。系统的等效方框图如图。



带可变反馈增益的预估补偿系统等效方框图

2.3 改进型Smith预估器

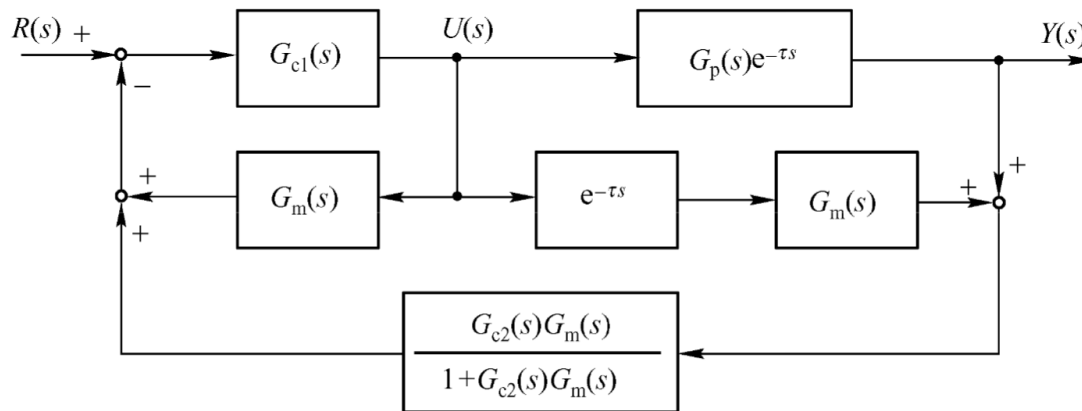
- 改进型Smith预估器，比原方案多了一个控制器，其方框图如下所示：



- 从图中可以看到，这一方案与Smith补偿器方案的区别在于主反馈回路，其反馈通道传递函数不是1而是 $G_f(s)$ ，即

$$G_f(s) = \frac{G_{c2}(s)G_m(s)}{1 + G_{c2}(s)G_m(s)}$$

- 通过理论分析可以证明改进型方案的稳定性优于原Smith补偿方案，且其对模型精度的要求明显降低，有利于改善系统的控制性能。



为了保证系统输出响应无余差，要求两个控制器均为 PI 动作控制器。

其中主控制器 $G_{c1}(s)$ 只需按模型完全准确的情况进行整定。

辅助控制器是在反馈通道上，且与模型传递函数 $G_m(s)$ 一起构成了 $G_f(s)$ 。

假设 $G_m(s)$ 是一阶环节，且设 $T_{i2} = T_m$ ，使控制器的积分时间等于模型的时间常数，

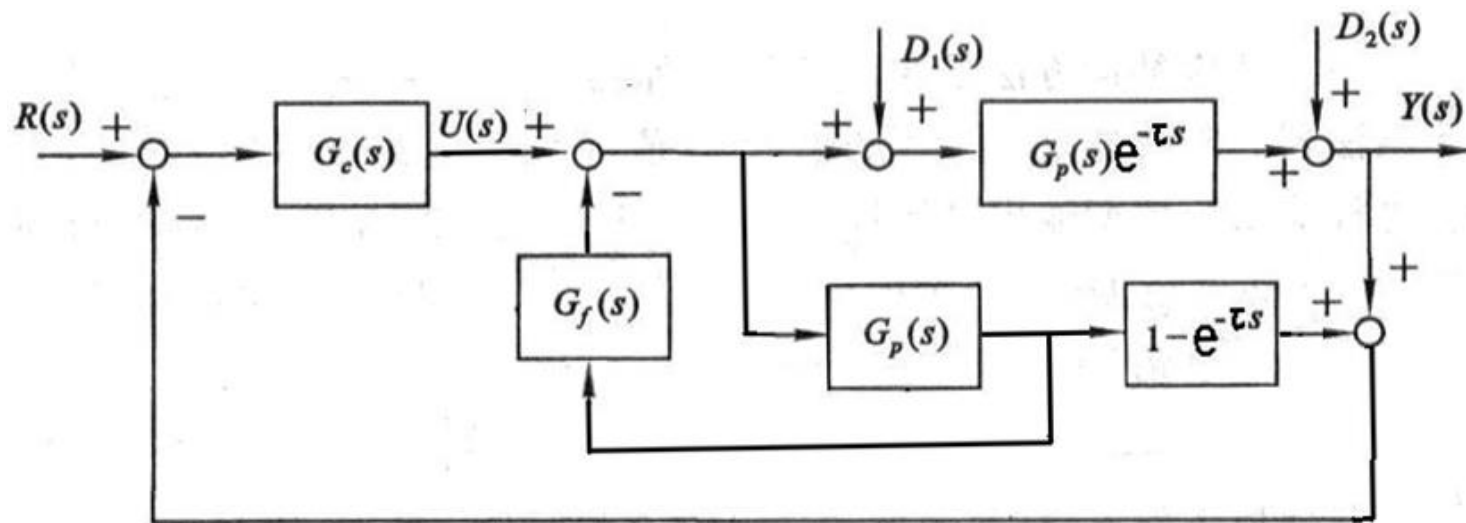
$$G_f(s) = \frac{G_{c2}(s)G_m(s)}{1 + G_{c2}(s)G_m(s)} = \frac{K_{c2} \left(1 + \frac{1}{T_{i2}s} \right) \frac{K_m}{T_m s + 1}}{1 + K_{c2} \left(1 + \frac{1}{T_{i2}s} \right) \frac{K_m}{T_m s + 1}} = \frac{1}{\frac{T_m}{K_{c2}K_m} s + 1} = \frac{1}{T_f s + 1}$$

反馈回路上出现了一个一阶滤波器，其中只有一个整定参数 T_f ，

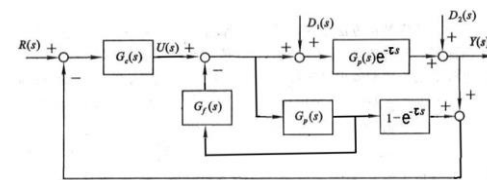
实质上只有 $G_{c2}(s)$ 中的比例增益 K_{c2} 需要整定

2.4 完全抗干扰的Smith预估器

- 抗干扰设计是过程控制系统设计的核心问题之一。
- 所谓**完全抗干扰**通常是指，要求不但在**稳态下**系统的输出响应不受外界干扰的影响，而且在**动态下**系统的输出响应也不受外界干扰的影响。
- 如果在Smith补偿回路中增加一个**反馈环节** $G_f(s)$ ，则系统可以达到完全抗干扰的目的，如图所示。



完全抗干扰的 Smith 预估器



仅考虑干扰 $D_1(s)$ ，则系统的输出响应为

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}R(s) + G_p(s)e^{-\tau s}[1 + G_f(s)G_p(s) - G_c(s)G_p(s)(e^{-\tau s} - 1)]D_1(s)}{1 + G_p(s)G_f(s) + G_c(s)[G_p(s)e^{-\tau s} + G_p(s)(1 - e^{-\tau s})]}$$

➤ 要实现对 $D_1(s)$ 的完全抗干扰设计，必须满足条件

$$1 + G_f(s)G_p(s) - G_c(s)G_p(s)(e^{-\tau s} - 1) = 0$$

➤ 即
$$G_f(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)(e^{-\tau s} - 1) - 1}{G_p(s)}$$

➤ 此时，系统的响应为

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}R(s) = R(s)$$

➤ 由此可见，系统不仅实现了完全抗干扰，而且也实现了完全无偏差。

仅考虑干扰 $D_2(s)$ ，则系统的输出响应为

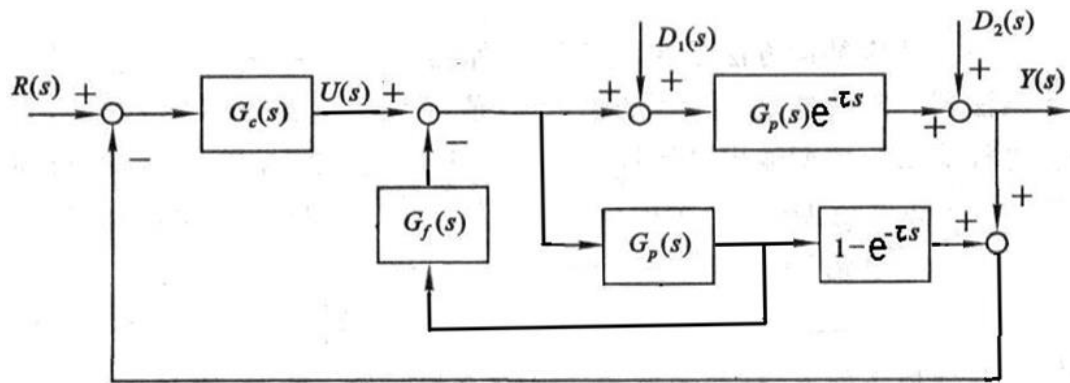
$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}R(s) + [1 + G_f(s)G_p(s) - G_c(s)G_p(s)(e^{-\tau s} - 1)]D_2(s)}{1 + G_p(s)G_f(s) + G_c(s)[G_p(s)e^{-\tau s} + G_p(s)(1 - e^{-\tau s})]}$$

➤ 要实现对 $D_2(s)$ 的完全抗干扰设计，必须满足条件

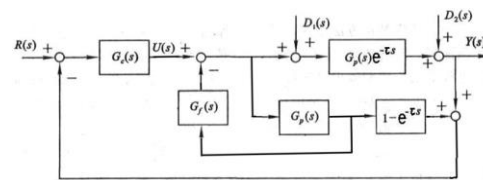
$$G_f(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)(e^{-\tau s} - 1) - 1}{G_p(s)}$$

➤ 由此可见，系统对 $D_1(s)$ 和 $D_2(s)$ 的完全抗干扰条件完全相同。

➤ 即 $G_f(s)$ 与干扰的具体形式无关，也无须测量干扰，而且也保证了系统无偏差

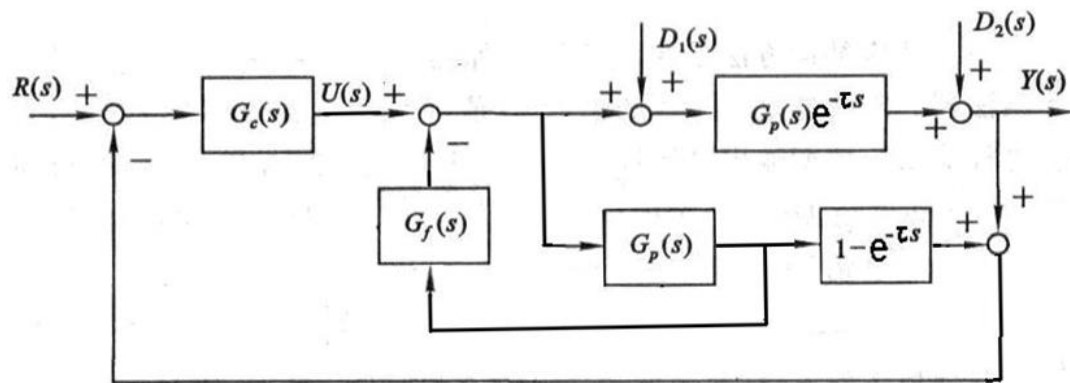


完全抗干扰的 Smith 预估器



THINK AGAIN

IT IS TOO GOOD TO BE TRUE



完全抗干扰的 Smith 预估器

$$G_f(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)(e^{-\tau s} - 1) - 1}{G_p(s)}$$

本章小结

- 基于不变性原理组成的自动控制系统称为补偿控制系统，它实现了系统对全部干扰或部分干扰的补偿。按其结构的不同，补偿控制系统一般有前馈控制系统和大迟延控制系统两种。
- 前馈控制是以不变性原理为理论基础的 control 方法，属开环控制系统。常用的前馈控制系统有单纯前馈控制系统、前馈-反馈控制系统和前馈-串级控制系统等三种结构形式。
- 前馈-反馈控制和前馈串级控制的工程整定主要有两种方法：一是它们分别整定，各自整定好参数后再把两者组合在一起；二是首先整定反馈或串级控制系统，然后再在整定好的反馈或串级控制系统基础上，引入并整定前馈控制系统。
- 一般认为，广义对象的纯迟延时间 τ 与时间常数 T 之比大于0.5，则说该过程是具有大迟延的工艺过程。大迟延系统的解决方法，最简单的是利用常规控制器。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。
- 如果在控制精度要求很高的场合，则需要采取其他控制手段，如补偿控制等。史密斯（smith）预估补偿方法就是得到广泛应用的方案之一。