教学模块4数字控制器的模拟化设计方法

教学单元4 Smith预估控制

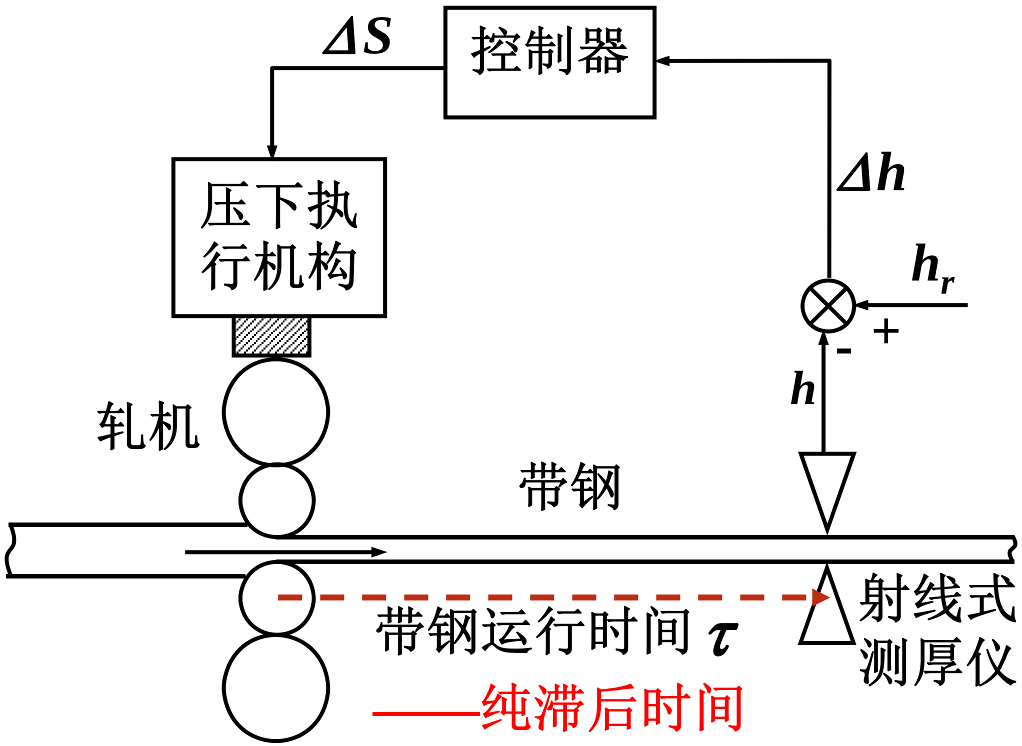
东北大学 · 刘建昌
liujianchang@ise.neu.edu.cn

教学单元4 Smith预估控制

- 纯滞后问题的提出
- Smith预估控制设计原理
- Smith预估控制算法的工程化改进

4.1 纯滞后问题的提出

◆ 实例：轧制过程的纯滞后现象



测厚仪式带钢厚度控制系统原理图

h_r—出口厚度基准值；

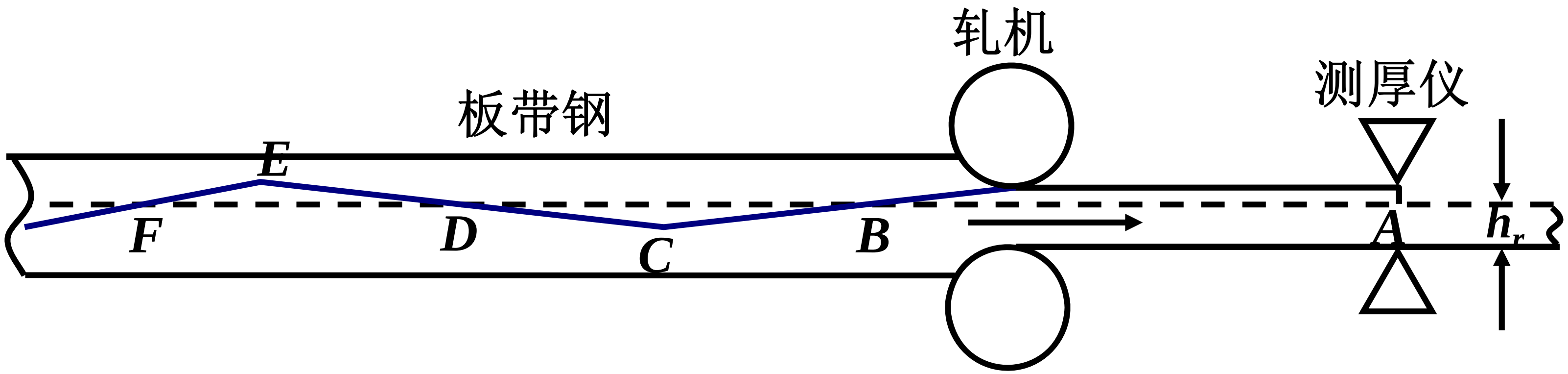
h —出口厚度实际值；

Δh—出口厚差；

ΔS—辊缝调节量。

4.1 纯滞后问题的提出

◆ 测厚仪式厚度自动控制系统的不稳定现象：



$\tau / T_m \geq 0.3$ ——具有大滞后或大迟延的工艺过程

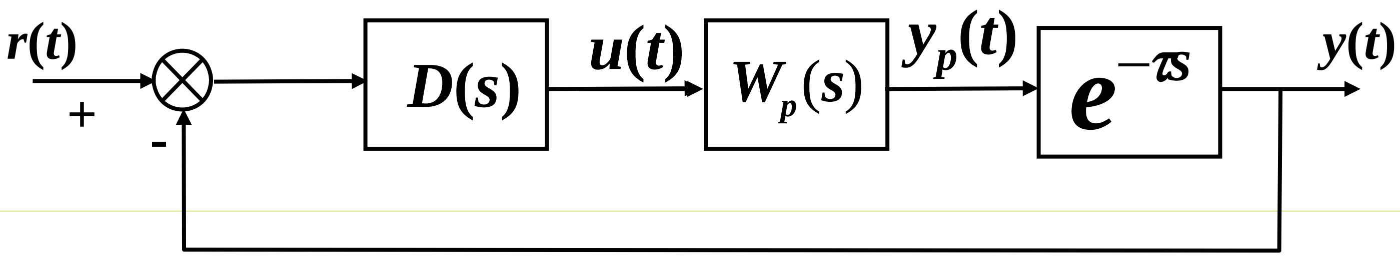
$\tau / T_m \geq 0.5$ ——采用常规的**PID**控制会使系统稳定性变差，甚至产生振荡

τ ——纯滞后时间

T_m——对象的主导时间常数

4.1 纯滞后问题的提出

◆ 纯滞后对系统稳定性影响的理论分析



有纯滞后环节的常规反馈控制系统

系统的闭环传递函数为：

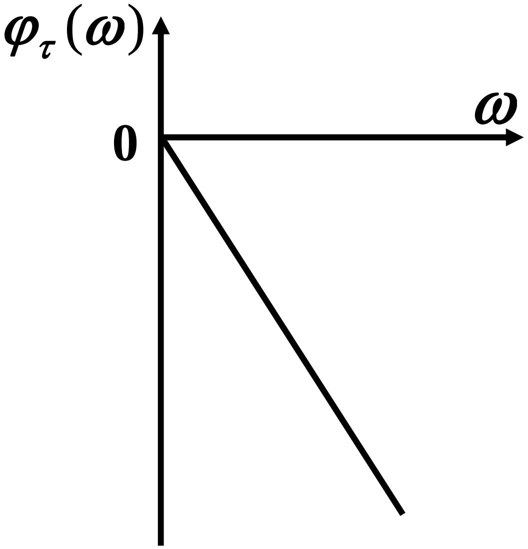
$$W_B(s)=\frac{D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}{1+D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}$$

4.1 纯滞后问题的提出

◆ 系统特征方程为： $1+D(s)W_p(s)e^{-\tau s}=0$

◆ 时滞环节的相频特性为：

$$\varphi_\tau(\omega)=-\tau\omega$$



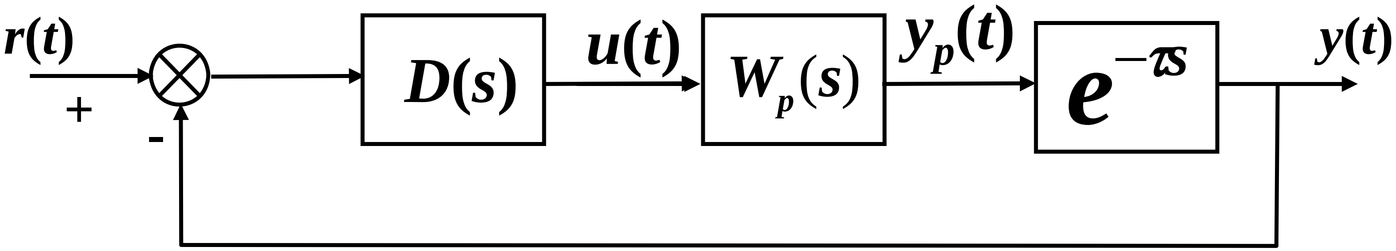
因此，系统纯滞后大时，系统性能变差，甚至不稳定。

4.2 Smith预估控制设计原理

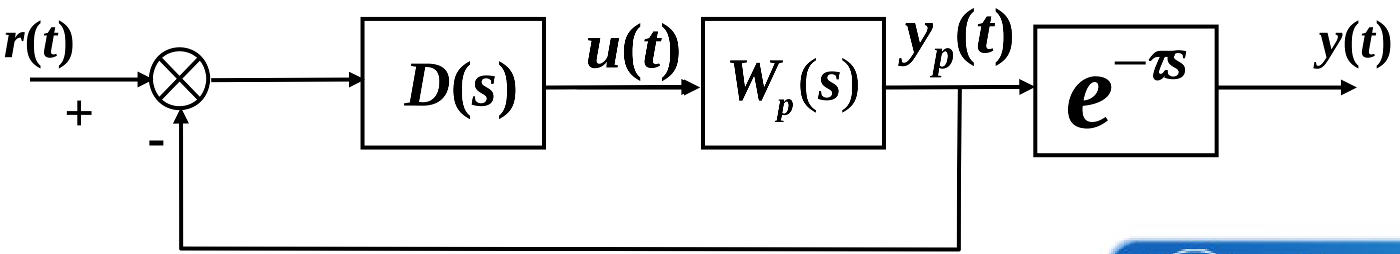
Smith预估控制——美国学者O.J.M.Smith于1957年创立，建立在模型基础上的一种控制策略。

（1）Smith预估器的设计思想

◆ 有纯滞后环节的常规反馈控制系统

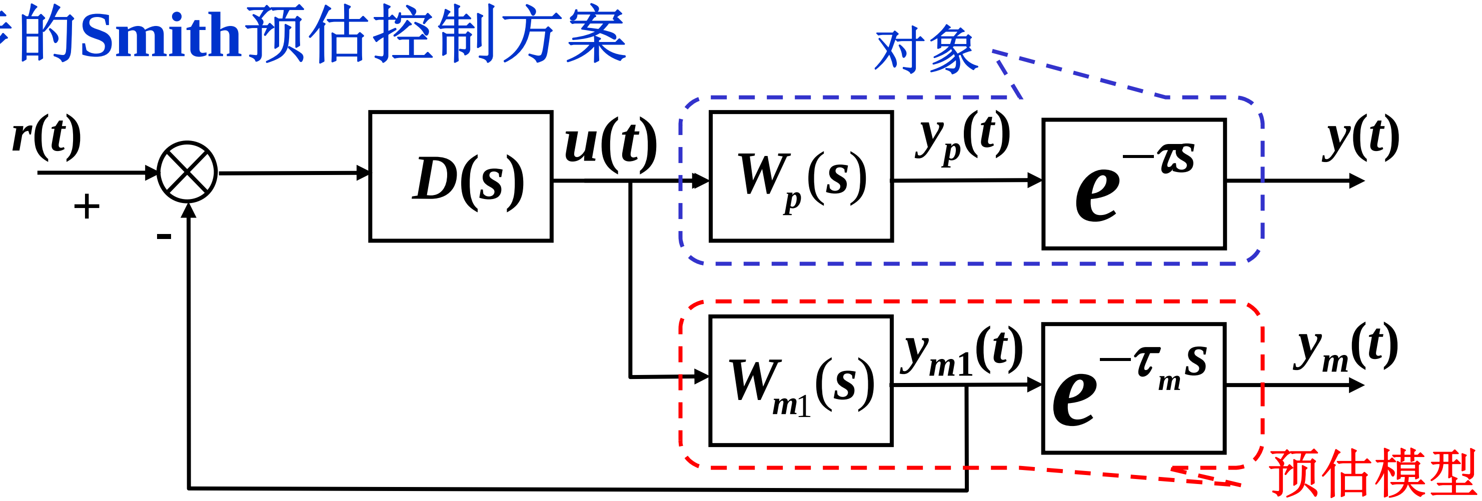


◆ 反馈回路的期望配置

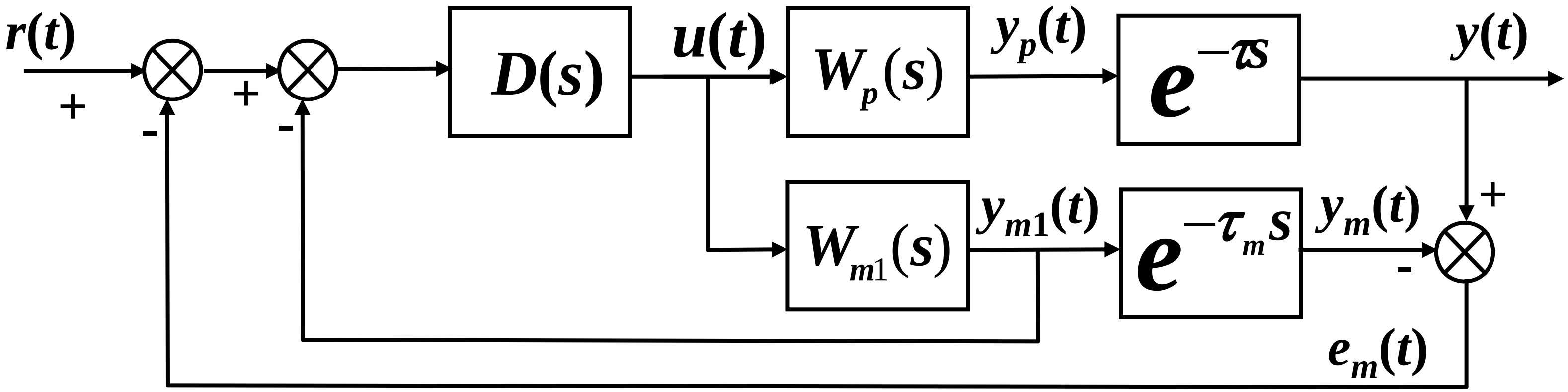


（1）Smith预估器的设计思想

◆ 初步的Smith预估控制方案

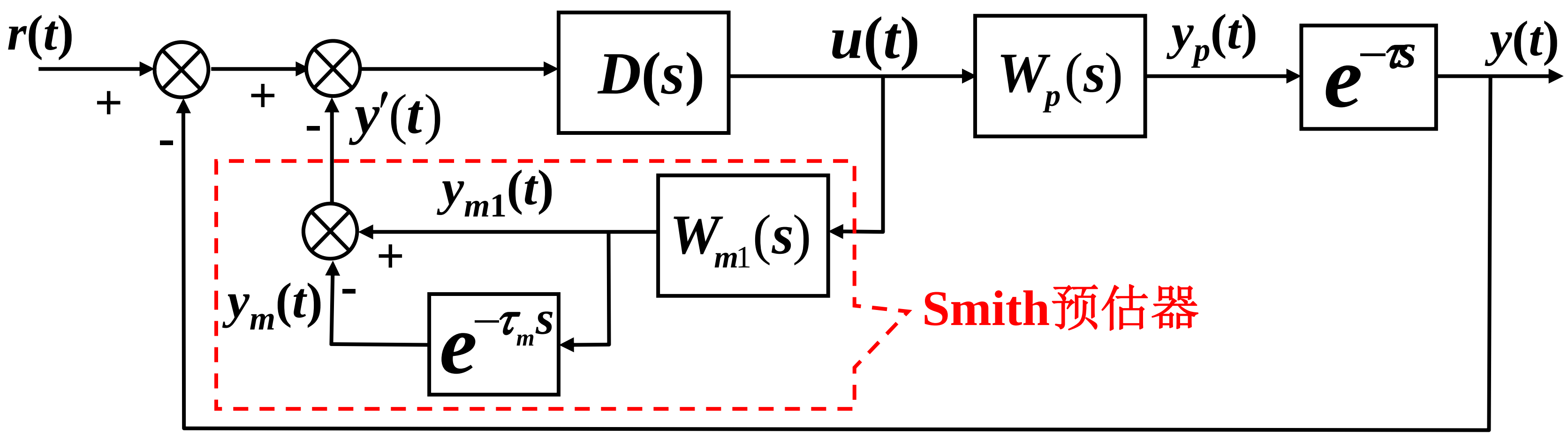


◆ 完整的Smith预估控制方案



（2） Smith 预估控制系统的稳定性分析

◆ 等效的Smith预估控制方案



◆ Smith预估器的传递函数为：

$$D'(s)=\frac{Y'(s)}{U(s)}=W_{m1}(s)(1-e^{-\tau_m s})$$

◆ 系统闭环传递函数为：

$$W_B(s)=\frac{D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}{1+D(s)W_{m1}(s)+D(s)W_p(s)e^{-\tau s}-D(s)W_{m1}(s)e^{-\tau_m s}}$$

（2） Smith 预估控制系统的稳定性分析

- 系统特征方程为：

$$1 + D(s)W_{m1}(s) + D(s)W_p(s)e^{-\tau s} - D(s)W_{m1}(s)e^{-\tau_m s} = 0$$

- 若 $W_{m1}(s) = W_p(s)$ $\tau_m = \tau$

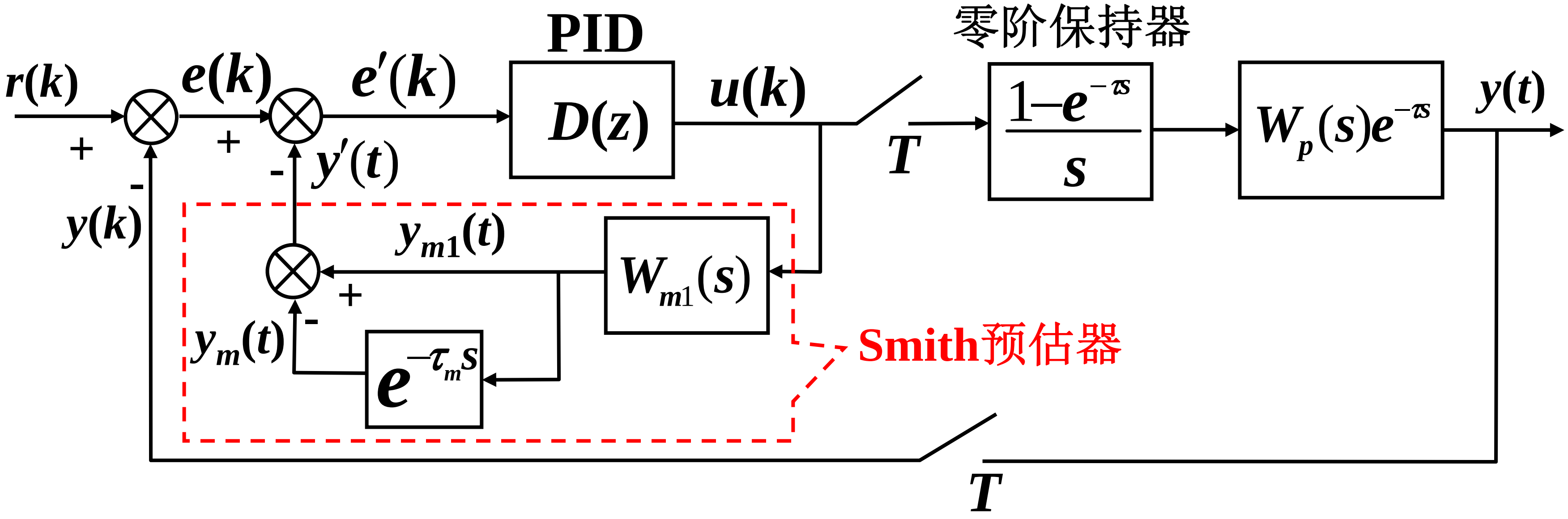
- 则系统特征方程变为：

$$1 + D(s)W_p(s) = 0$$

特征方程中纯滞后环节消失， **Smith**预估控制有效地解决了纯滞后系统的稳定性问题

（3） 数字Smith预估控制系统的设计

◆ 由计算机实现的Smith预估控制系统



具体设计步骤如下：

（1）计算反馈回路偏差

$$e(k) = r(k) - y(k)$$

（3） 数字Smith预估控制系统的设计

（2）计算Smith预估器的输出$y'(k)$

设被控对象为具有较大纯滞后的一阶惯性环节

$$W(s)=W_p(s)e^{-\tau s}=\frac{K_p}{1+T_p s}e^{-\tau s}$$

对象预估模型

$$W_m(s)=W_{m1}(s)e^{-\tau_m s}=\frac{K_m}{1+T_m s}e^{-\tau_m s}$$

Smith预估器传递函数为

$$D'(s)=\frac{Y'(s)}{U(s)}=W_{m1}(s)(1-e^{-\tau_m s})=\frac{K_m}{1+T_m s}(1-e^{-NTs})$$

$$\tau_m=\tau=NT$$

（3） 数字Smith预估控制系统的设计

Smith预估器传递函数

$$D'(s)=\frac{Y'(s)}{U(s)}=W_{m1}(s)(1-e^{-\tau_m s})=\frac{K_m}{1+T_m s}(1-e^{-NTs})$$

Smith预估器的微分方程

↓拉氏反变换

$$T_m\frac{dy'(t)}{dt}+y'(t)=K_m[u(t)-u(t-NT)]$$

Smith预估器的差分方程

↓反向差分代替微分

$$\boldsymbol{u(t)\overset{?}{=}u(k-1)}$$

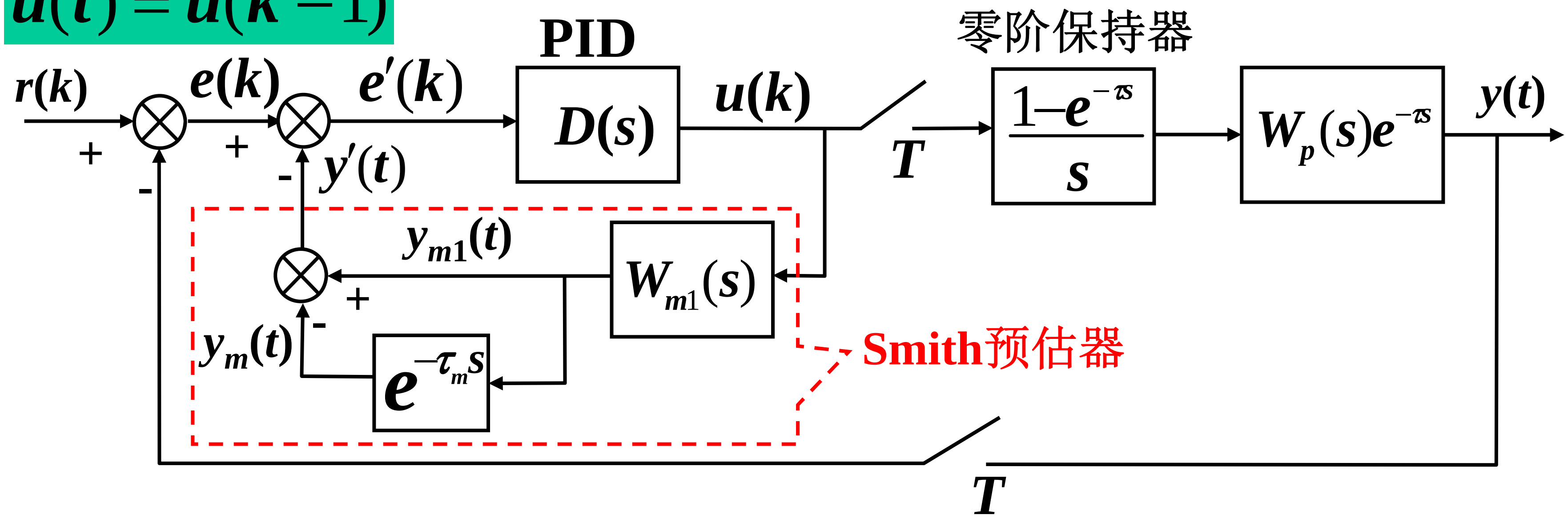
$$y'(k)=\underbrace{\frac{T_m}{T+T_m}}_{a}y'(k-1)+\underbrace{\frac{TK_m}{T+T_m}}_{b}[u(k-1)-u(k-(1+N))]$$

$$y'(k)=ay'(k-1)+b[u(k-1)-u(k-(1+N))]$$

——Smith预估器的数字算法

（3） 数字Smith预估控制系统的设计

$u(t) \overset{?}{=} u(k-1)$



（3）计算PID的输入偏差 $e'(k) = e(k) - y'(k)$

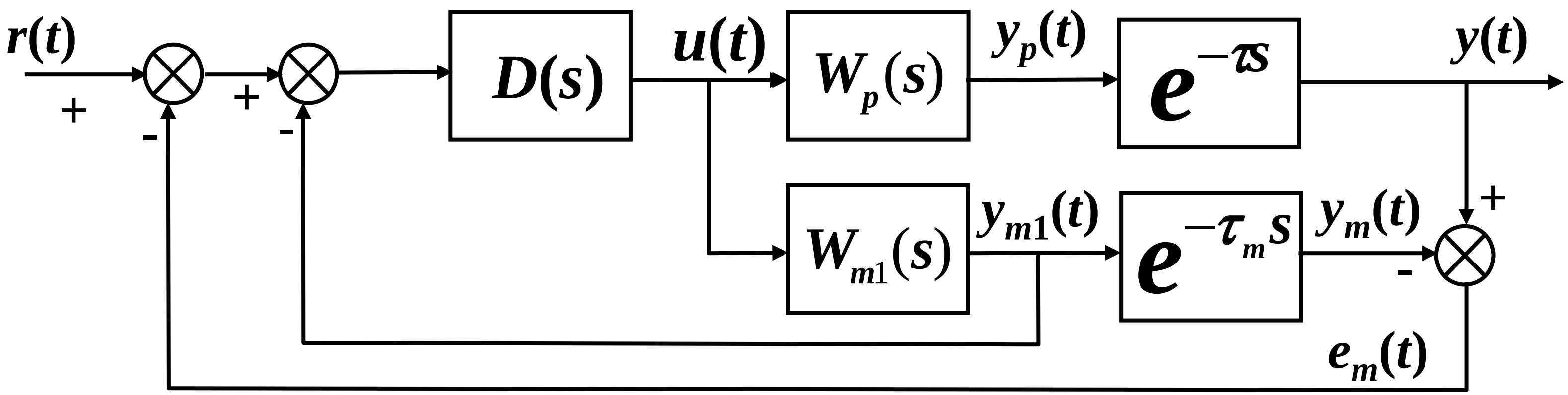
（4）计算数字PID的输出

$$
\begin{aligned}
u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k) \\
&= u(k-1) + K_p\left[e'(k) - e'(k-1)\right] + K_i e'(k) \\
&\quad + K_d\left[e'(k) - 2e'(k-1) + e'(k-2)\right]
\end{aligned}
$$

（4） Smith预估控制存在的问题

- ◆ 对模型误差十分敏感
- ◆ 扰动对系统造成影响依然存在

完整的Smith预估控制方案



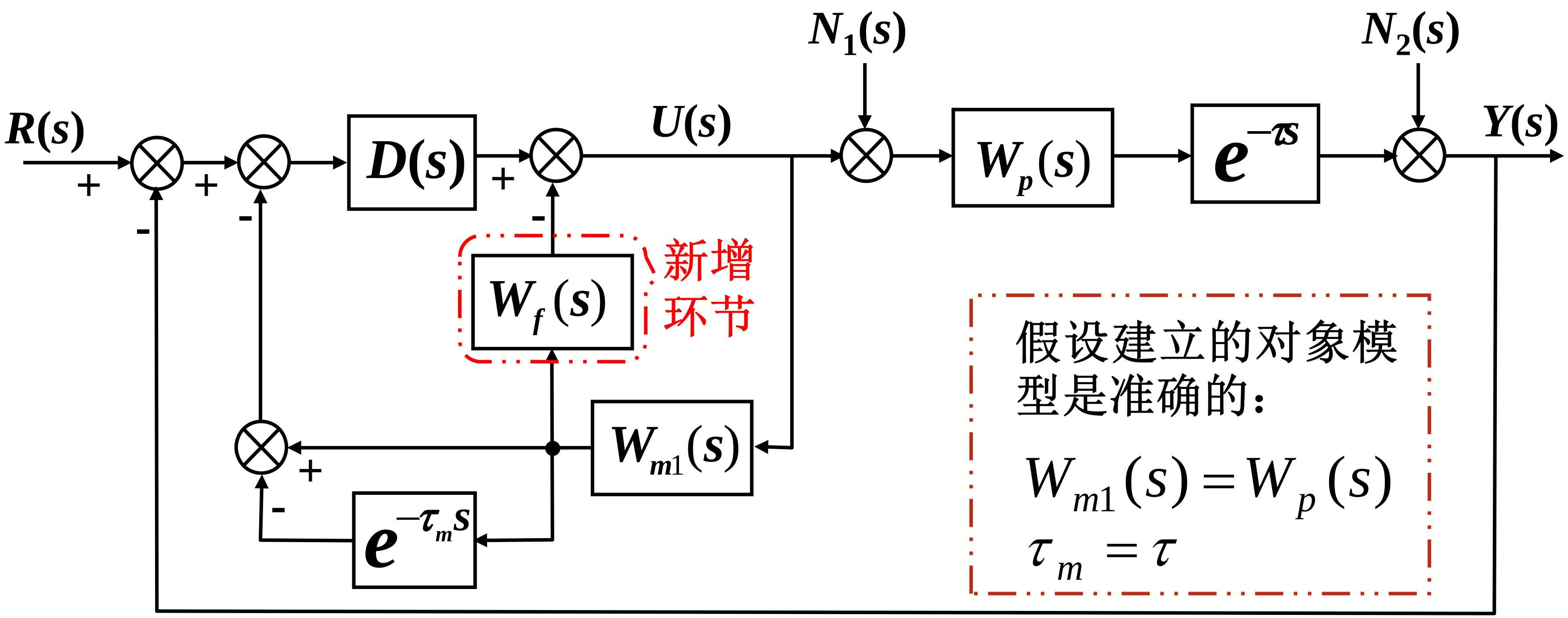
系统闭环传递函数为

$$W_B(s)=\frac{D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}{1+D(s)W_{m1}(s)+D(s)W_p(s)e^{-\tau s}-D(s)W_{m1}(s)e^{-\tau_m s}}$$

4.3 Smith预估控制算法的工程化改进

◆ Smith预估控制存在的问题
- 对模型误差十分敏感
- 扰动对系统的影响依然存在

（1）Smith预估器的完全抗干扰改进



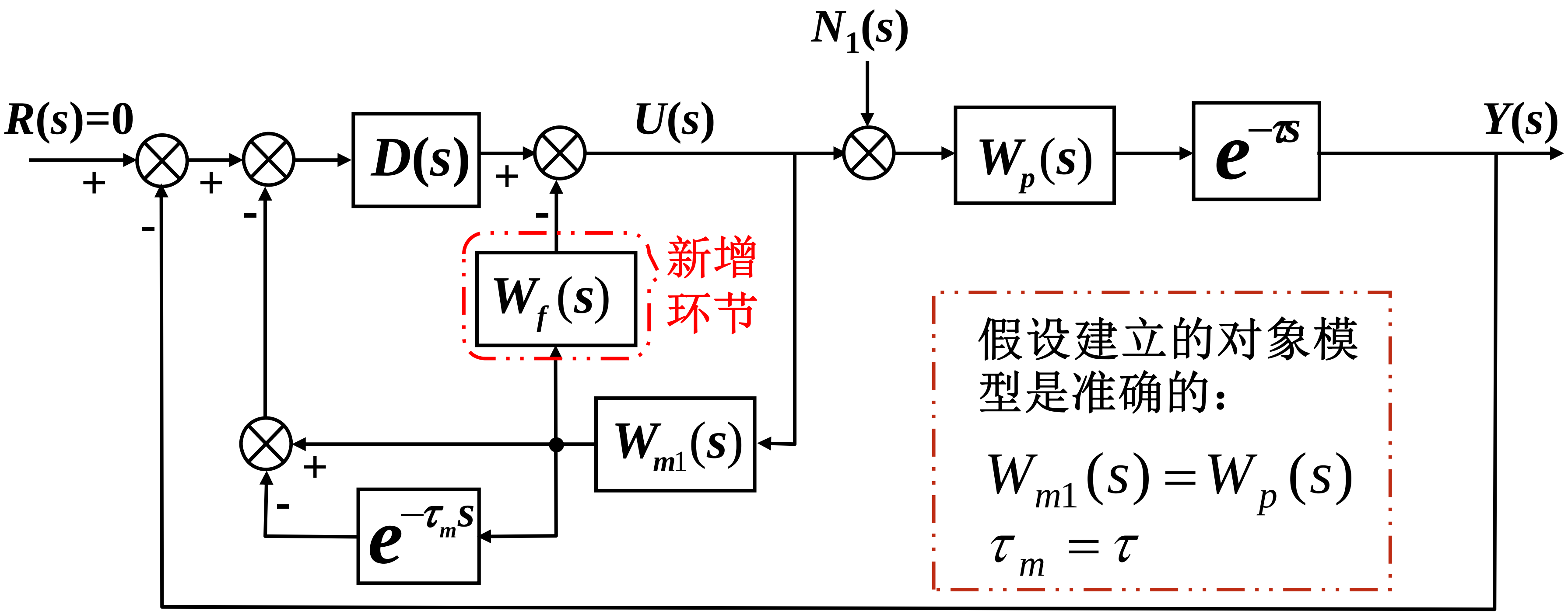
假设建立的对象模型是准确的：

$$W_{m1}(s) = W_p(s)$$

$$\tau_m = \tau$$

（1）Smith预估器的完全抗干扰改进

◆ 对于干扰信号 $N_1(s)$ ，求扰动传递函数



$$[N_1(s)+U(s)]W_p(s)e^{-\tau s}=Y(s)$$

$$U(s)=-Y(s)D(s)-U(s)W_{m1}(s)W_f(s)-U(s)W_{m1}(s)(1-e^{-\tau_m s})D(s)$$

（1）Smith预估器的完全抗干扰改进

◆ 对于干扰信号 $N_1(s)$，扰动闭环传递函数：

$$\frac{\boldsymbol{Y}(s)}{\boldsymbol{N}_1(s)}=\frac{\left[1+W_{m1}(s)W_f(s)+W_{m1}(s)(1-e^{-\tau_m s})D(s)\right]W_p(s)e^{-\tau s}}{1+W_{m1}(s)W_f(s)+W_{m1}(s)D(s)-D(s)W_{m1}(s)e^{-\tau_m s}+D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}$$

$$W_{m1}(s)=W_p(s)\qquad \tau_m=\tau$$

$$\frac{\boldsymbol{Y}(s)}{\boldsymbol{N}_1(s)}=\frac{\left[1+W_p(s)W_f(s)+W_p(s)D(s)(1-e^{-\tau_m s})\right]W_p(s)e^{-\tau s}}{1+W_p(s)W_f(s)+W_p(s)D(s)}$$

为了使系统能完全抗干扰，使得

$$1+W_p(s)W_f(s)+W_p(s)D(s)(1-e^{-\tau s})=0$$

即

$$W_f(s)=\frac{W_p(s)D(s)(e^{-\tau s}-1)-1}{W_p(s)}$$

信息科学与工程学院 COLLEGE OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING

（1）Smith预估器的完全抗干扰改进

此时，系统闭环传递函数

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}{1+W_p(s)W_f(s)+D(s)W_p(s)}$$

$$W_f(s)=\frac{W_p(s)D(s)(e^{-\tau s}-1)-1}{W_p(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}{D(s)W_p(s)e^{-\tau s}}=1$$

可以实现完全跟踪或完全无偏差控制。

（1）Smith预估器的完全抗干扰改进

◆ 对干扰信号 $N_2(s)$ ，扰动闭环传递函数

$$\frac{Y(s)}{N_2(s)}=\frac{1+W_p(s)W_f(s)+W_p(s)D(s)(1-e^{-\tau s})}{1+W_p(s)W_f(s)+W_p(s)D(s)}$$

为了使系统能完全抗干扰，使得

$$1+W_p(s)W_f(s)+W_p(s)D(s)(1-e^{-\tau s})=0$$

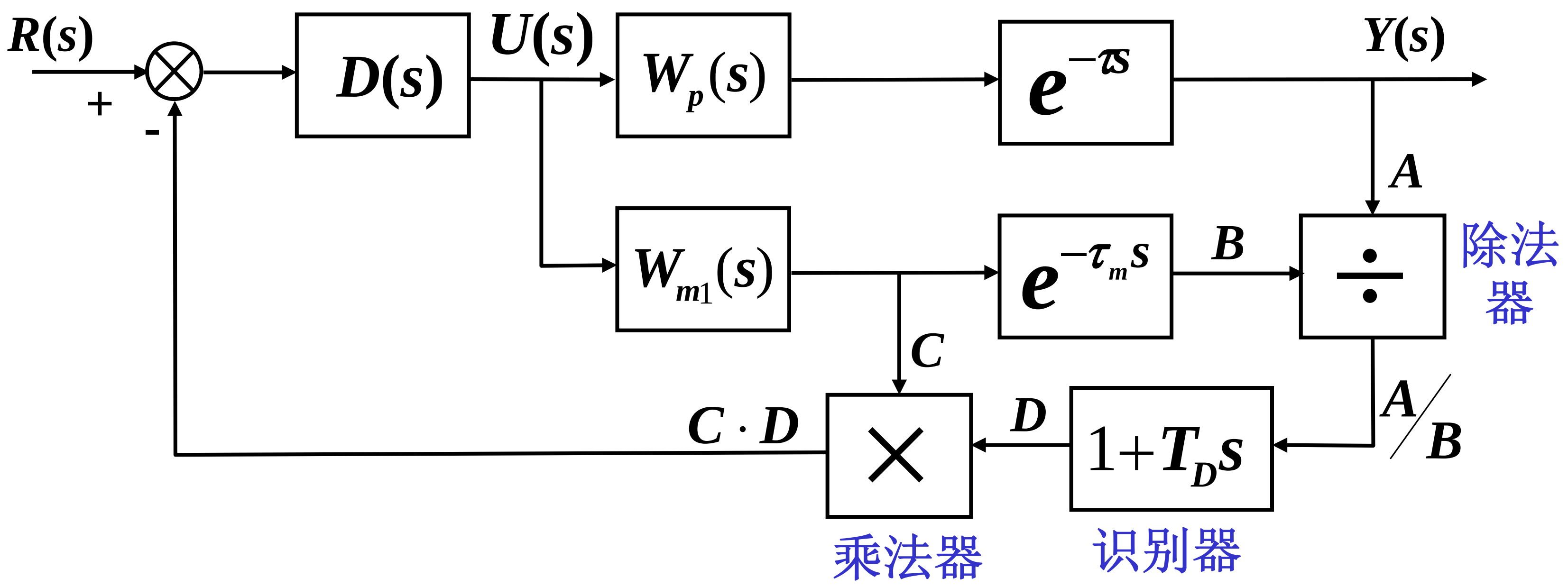
即

$$W_f(s)=\frac{W_p(s)D(s)(e^{-\tau s}-1)-1}{W_p(s)}$$

与消除干扰信号$N_1(s)$时的$W_f(s)$相同。

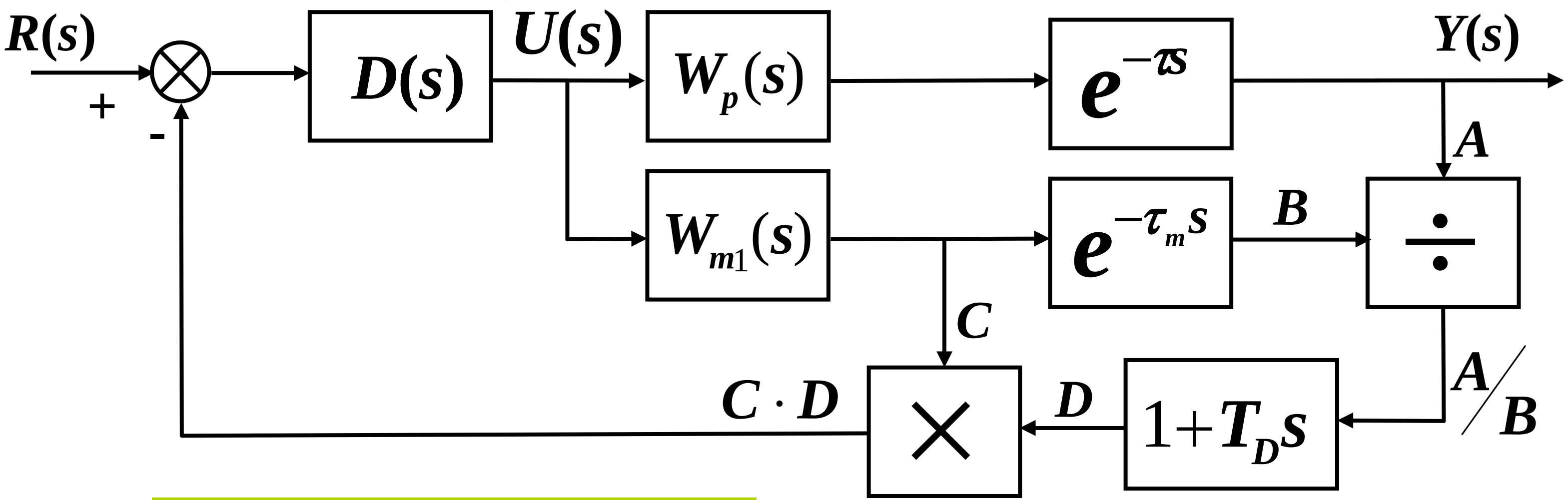
可以实现完全跟踪或完全无偏差控制。

（2）增益自适应Smith预估补偿控制



作用：根据过程输出信号与预估补偿模型输出信号的比值来提供一个自动校正预估器增益的信号，使系统反馈信号自适应地体现模型增益的变化。

（2）增益自适应Smith预估补偿控制　　分析



对象模型 $W_p(s)e^{-\tau s} = K_p W_{p0}(s)e^{-\tau s}$

K_p——对象模型增益， $K_p = K_{p0}$——初始模型增益

预估模型 $W_{m1}(s)e^{-\tau_m s} = K_m W_{m0}(s)e^{-\tau_m s} = K_{p0} W_{p0}(s)e^{-\tau s}$

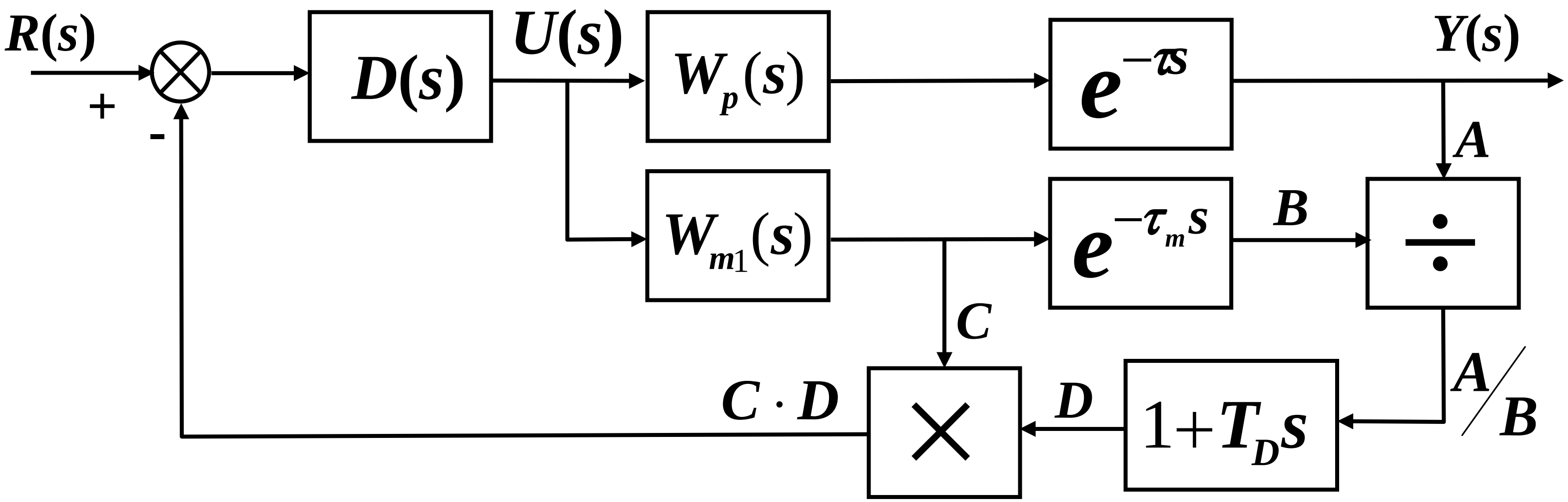
$K_m = K_{p0}$——预估模型增益

◆ 如果对象模型保持不变 $A/B = K_{p0}/K_m = 1$　　$D=1$

$C \cdot D = U(s)W_{m1}(s) = U(s)W_p(s)$

此时该控制方案表现为理想的Smith预估补偿控制。

（2）增益自适应Smith预估补偿控制 分析



◆ 如果对象模型增益发生变化

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p$$

经延时τ

$$A/B = \frac{K_{p0}+\Delta K_p}{K_m} = \frac{K_{p0}+\Delta K_p}{K_{p0}}$$

识别器的比例作用

$$D_p = \frac{K_{p0}+\Delta K_p}{K_{p0}}$$

识别器的微分作用——识别出过程增益变化趋势，加强补偿作用，削弱或避免滞后影响。

·教学单元4结束·