第4章 计算机控制系统的基本控制策略

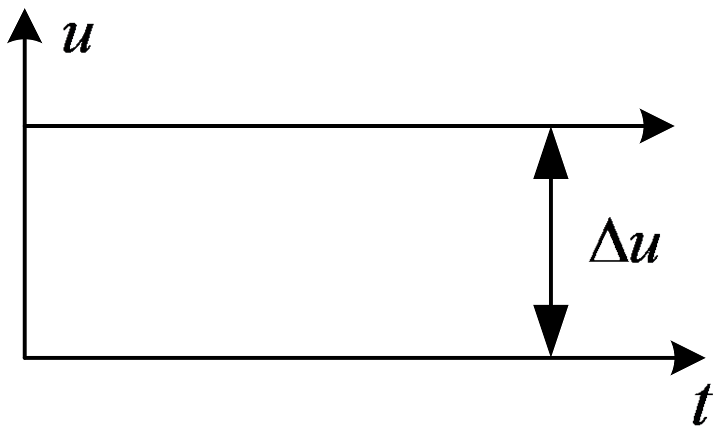
主要学习内容

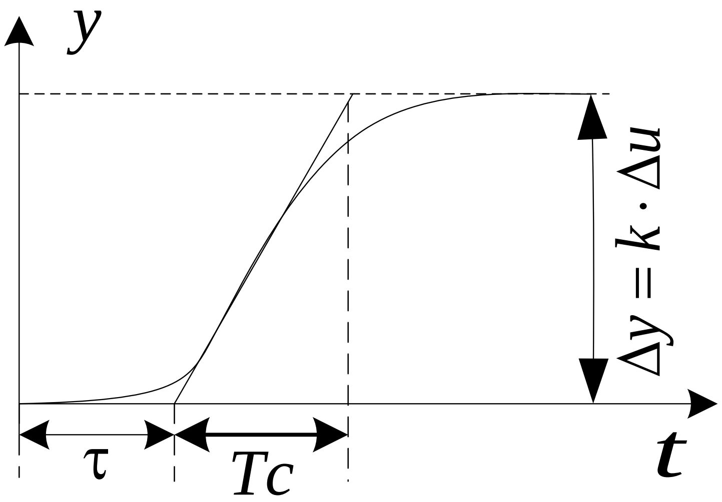
复杂计算机控制系统设计方法

- 大纯延迟Smith预估控制
- 串级控制
- 前馈控制

大纯延迟Smith预估控制

➢ **大纯延迟对象：** $\tau / T_c > 0.5$





• 对象**反应慢**，引起超调和震荡。

大纯延迟Smith预估控制

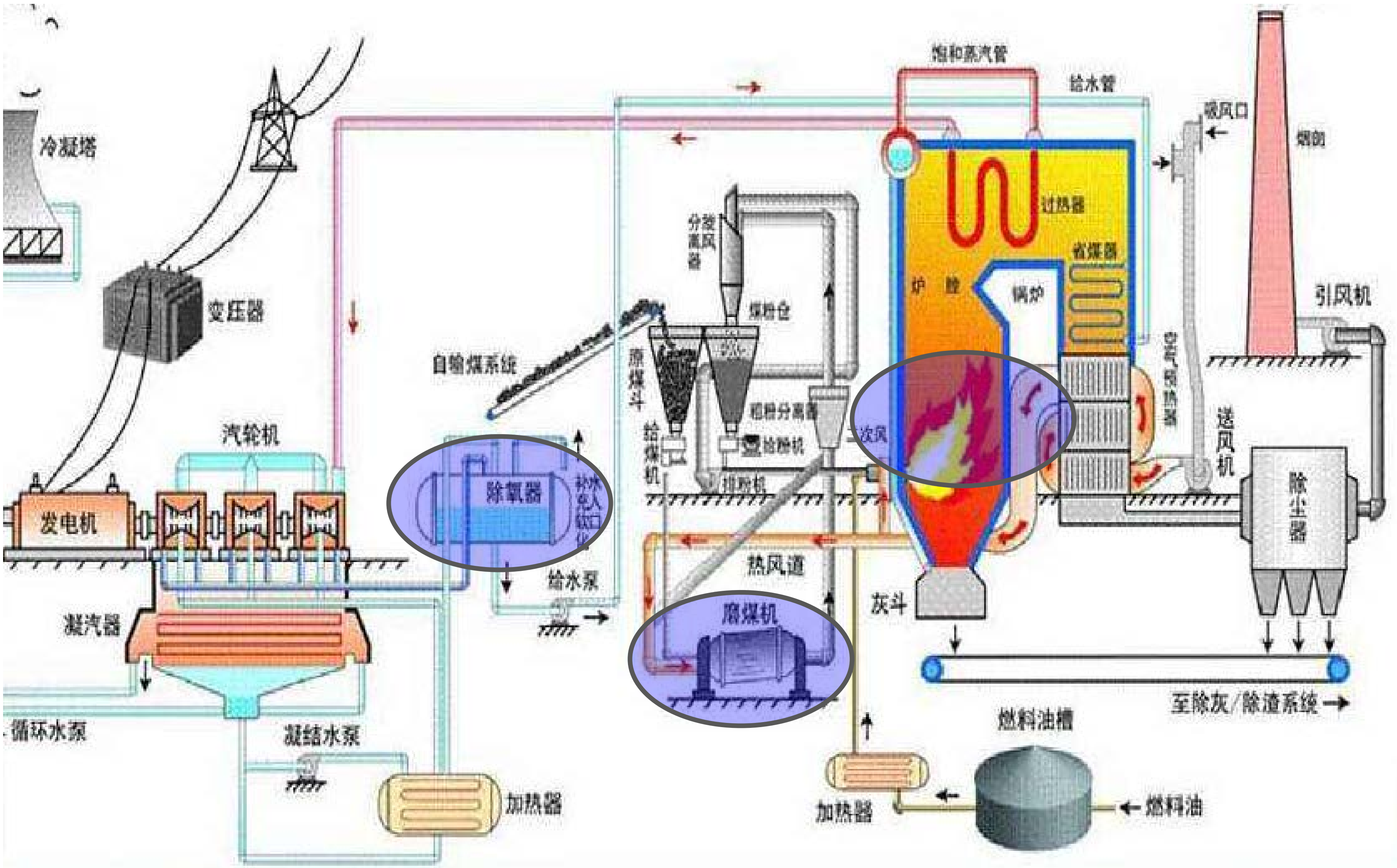
➢大纯延迟对象举例

烧水

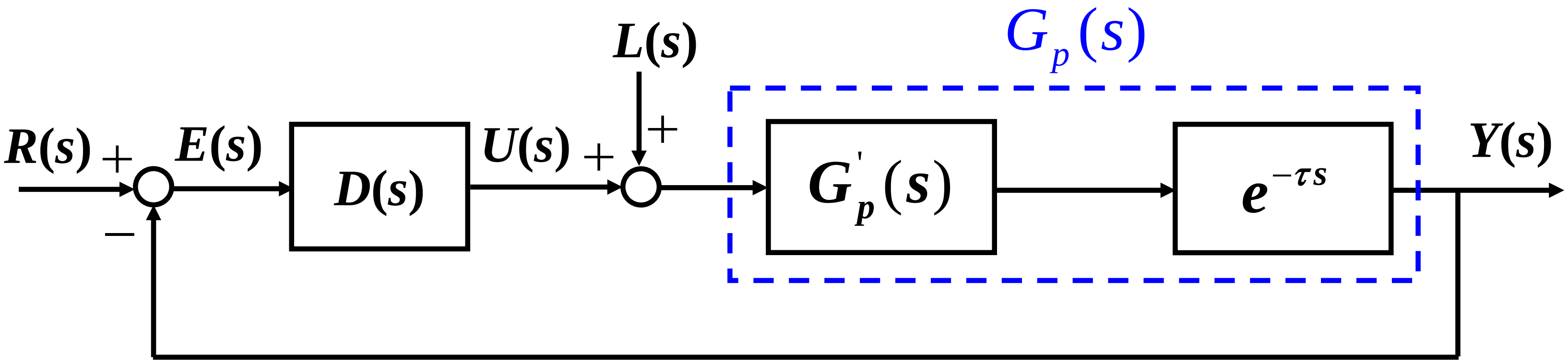
室内温度调节

大纯延迟Smith预估控制

➢大纯延迟对象举例



大纯延迟Smith预估控制-原理

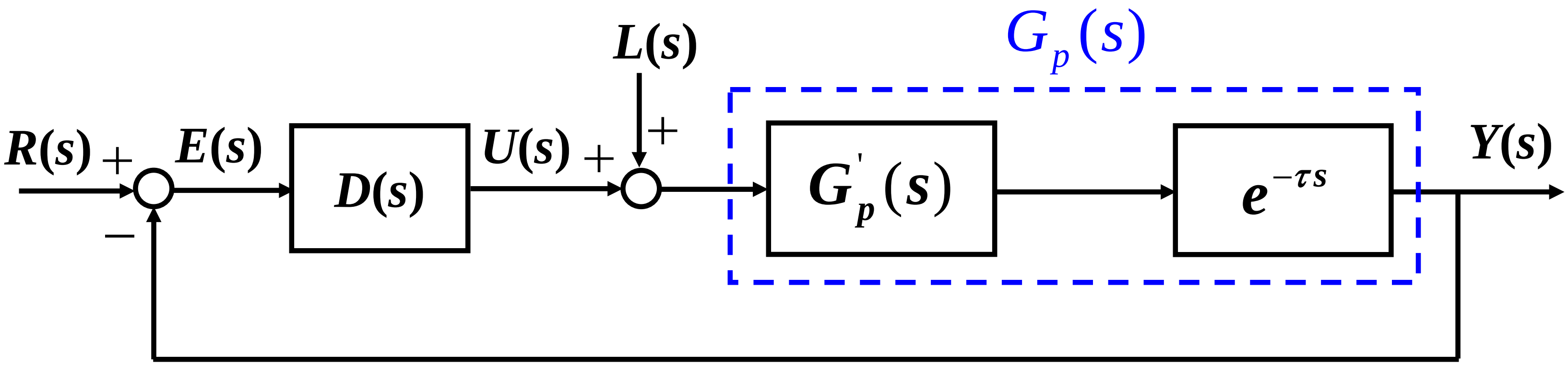


有纯延迟对象的常规负反馈系统

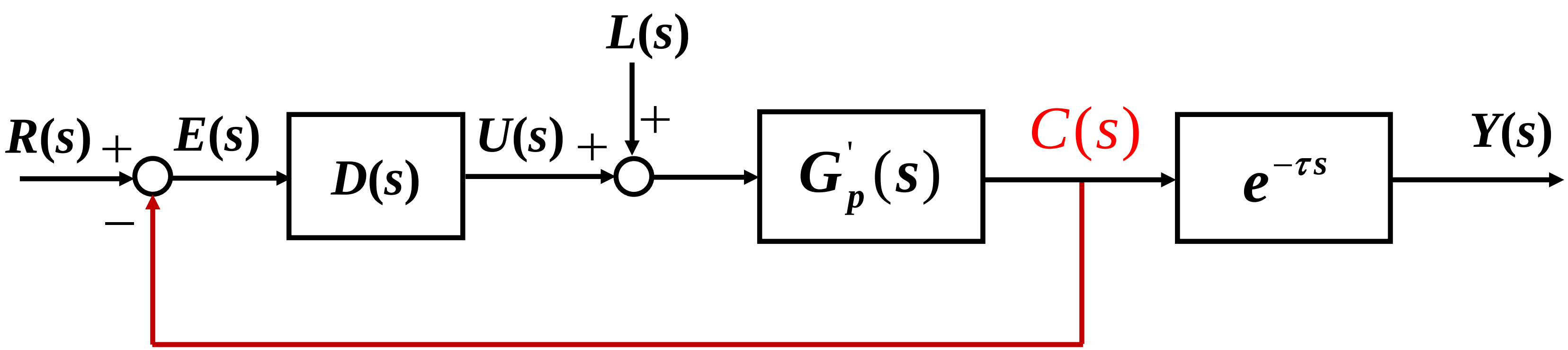
- **闭环传递函数：** $\phi(s)=\dfrac{D(s)\cdot G_p'(s)\cdot e^{-\tau s}}{1+D(s)\cdot G_p'(s)\cdot e^{-\tau s}}$
- **特征方程：** $1+D(s)\cdot G_p'(s)\cdot e^{-\tau s}=0$
- **特征方程中的 $e^{-\tau s}$ 使闭环系统的稳定性下降。**
- **消除 $e^{-\tau s}$ 能否提高稳定性？ 能 or 不能**

如何消除分母上的 $e^{-\tau s}$ ？

大纯延迟Smith预估控制-原理



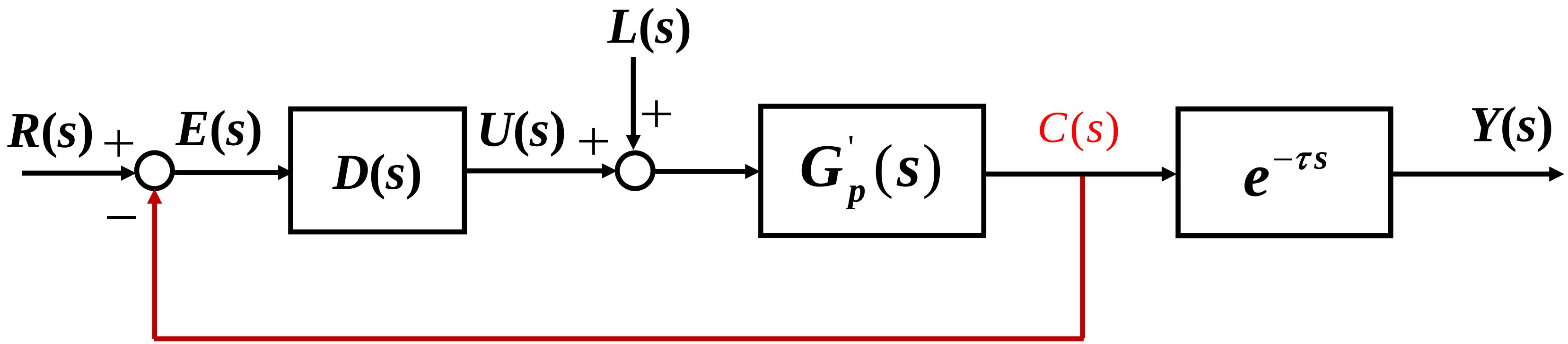
$$1 + D(s)\cdot G_p^{'}(s)\cdot e^{-\tau s} = 0$$



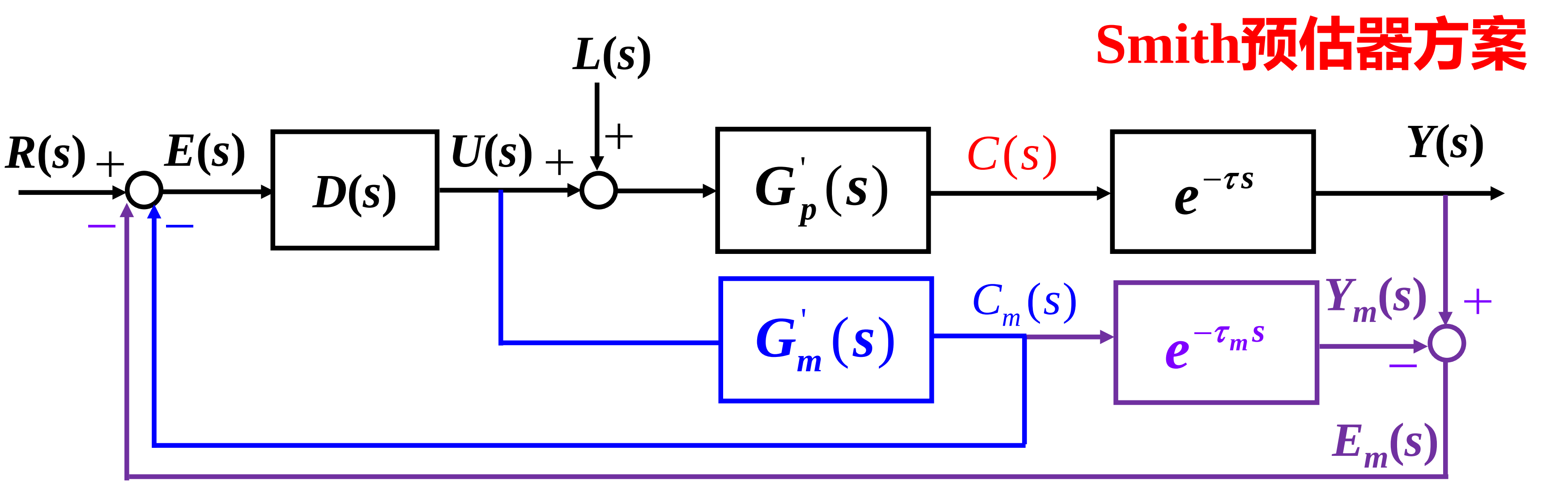
$$1 + D(s)\cdot G_p^{'}(s) = 0$$

确定 $G_p^{'}(s)$，提高控制稳定性。

大纯延迟Smith预估控制-原理



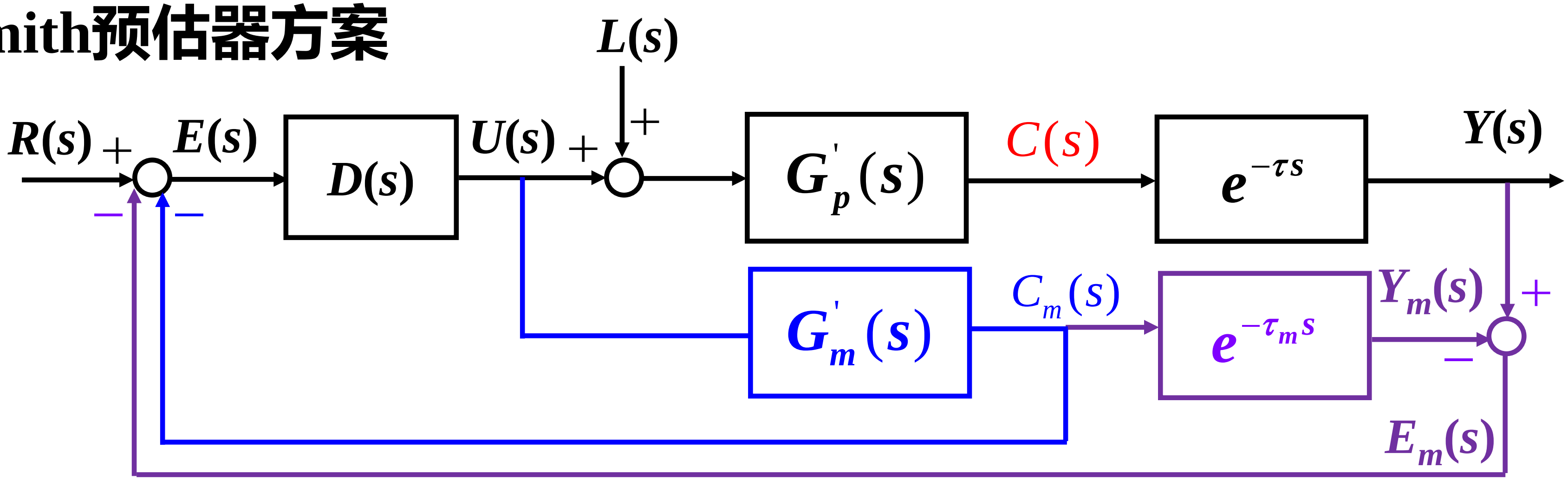
- $C(s)$虚拟变量不可测量
- 建立$G_m'(s)$，逼近$G_p'(s)$



- $E_m(s)$作为第二反馈回路，对扰动和模型误差进行补偿。

大纯延迟Smith预估控制-原理

Smith预估器方案



$$Y(s) = E(s)D(s)G_p^{'}(s)e^{-\tau s}$$

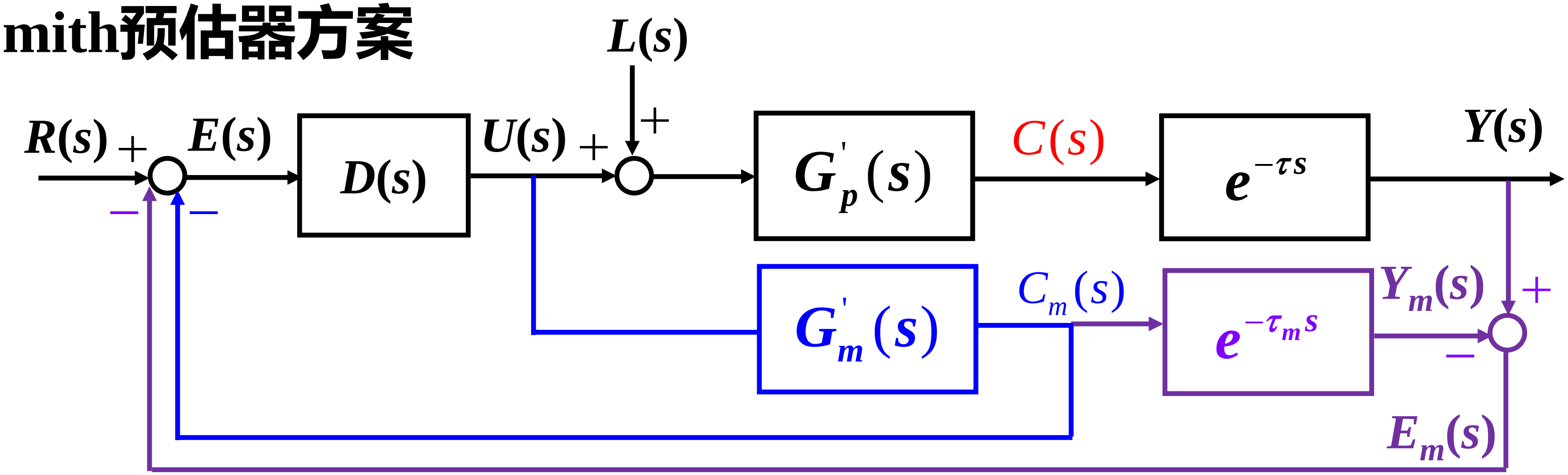
$$E(s) = R(s) - C_m(s) - E_m(s)$$

$$= R(s) - E(s)D(s)G_m^{'}(s) - [Y(s) - E(s)D(s)G_m^{'}(s)\cdot e^{-\tau_m s}]$$

$$\phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{D(s)G_p^{'}(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_m^{'}(s) - D(s)G_m^{'}(s)e^{-\tau_m s} + D(s)G_p^{'}(s)e^{-\tau s}}$$

大纯延迟Smith预估控制-原理

Smith预估器方案



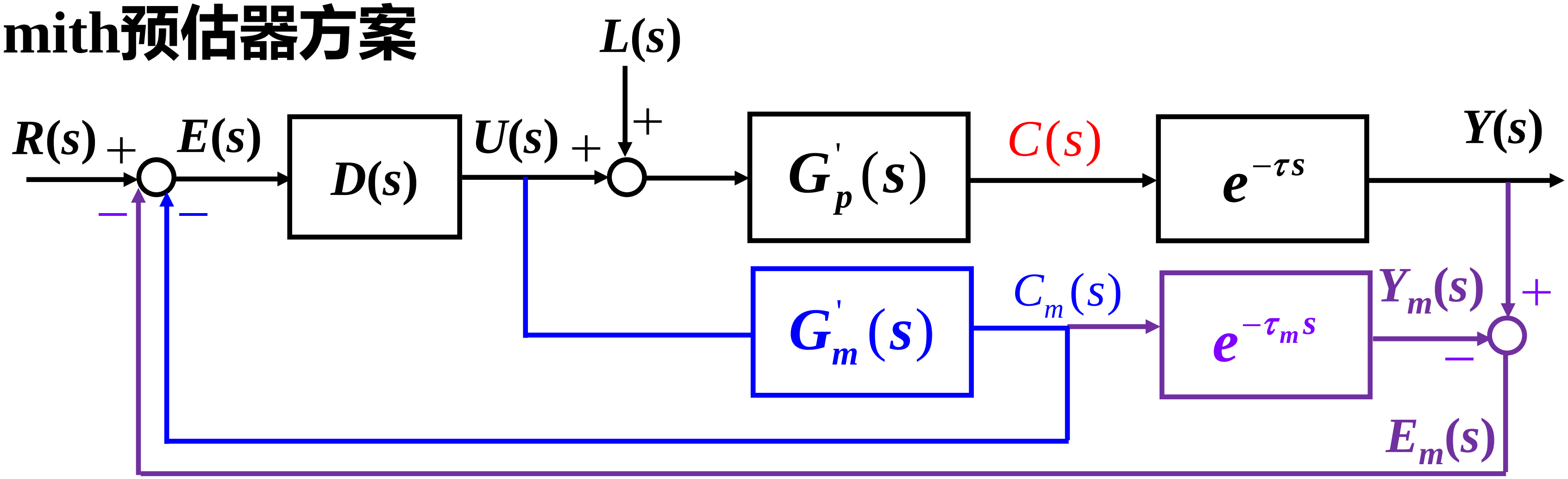
$$\phi(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{D(s)G_p^{'}(s)e^{-\tau s}}{1+D(s)G_m^{'}(s)\cancel{-D(s)G_m^{'}(s)e^{-\tau_m s}+D(s)G_p^{'}(s)e^{-\tau s}}}$$

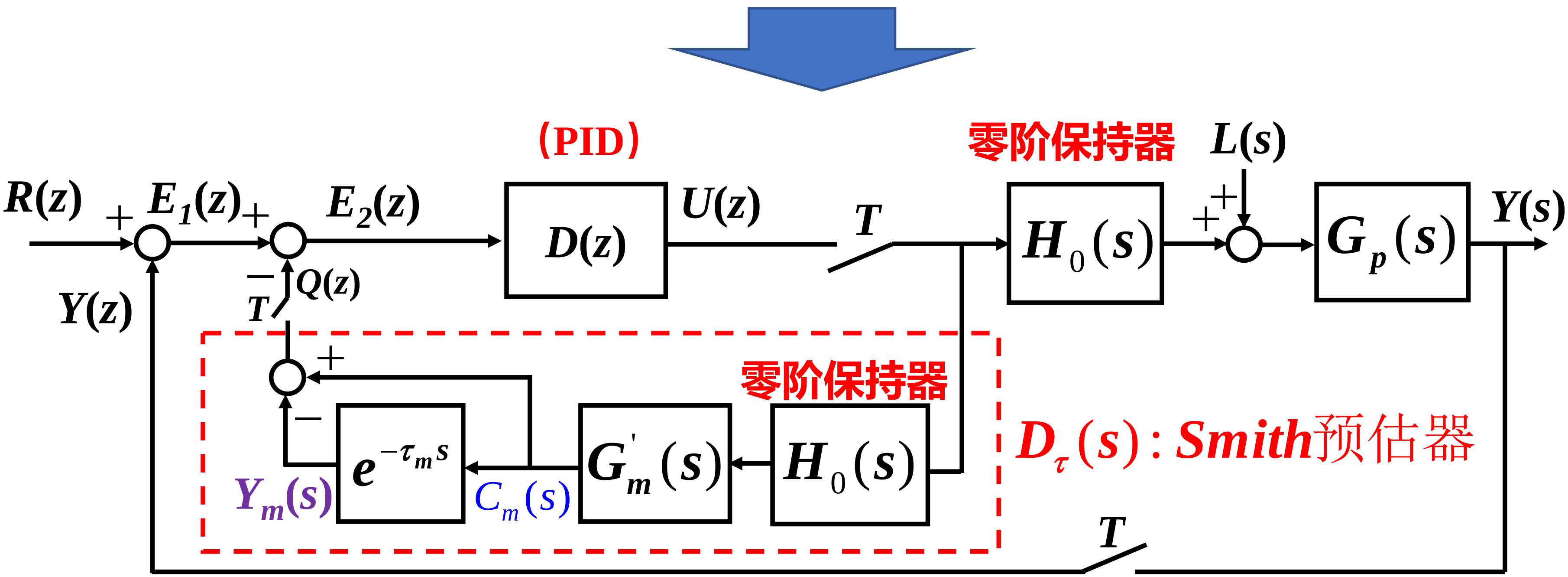
$$\begin{cases}G_m^{'}(s)=G_p^{'}(s)\\ \tau_m=\tau\end{cases} \Rightarrow \phi(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{D(s)G_p^{'}(s)e^{-\tau s}}{1+D(s)G_m^{'}(s)}$$

- **闭环特性中无纯迟延环节，改善了稳定性。**

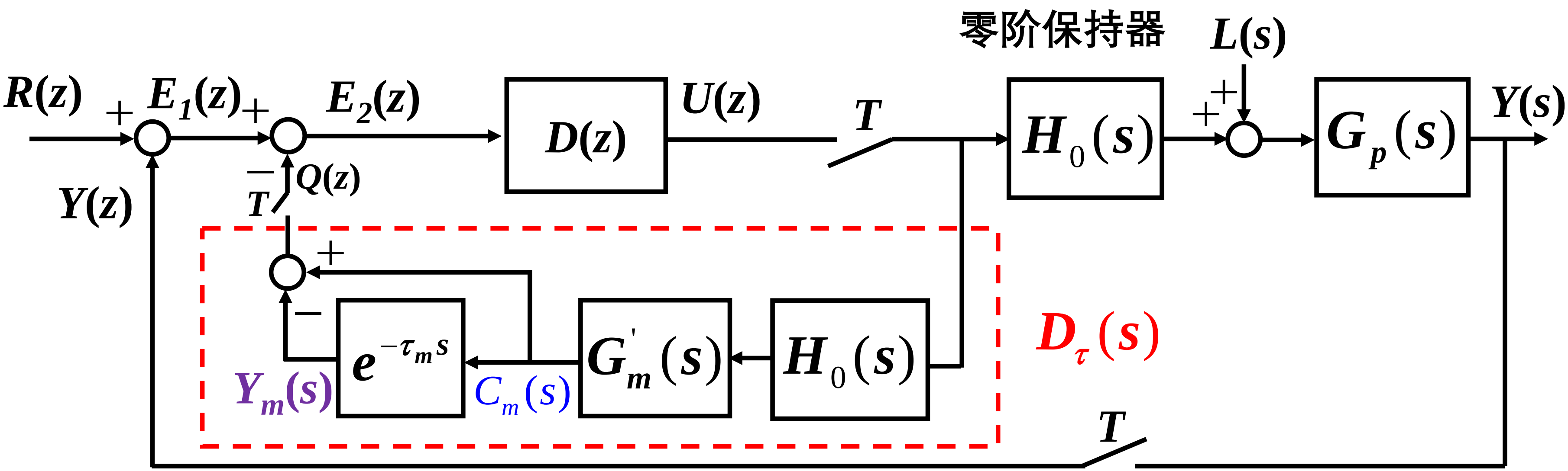
大纯延迟Smith预估控制-计算机实现

Smith预估器方案





大纯延迟Smith预估控制-计算机实现



➢ **带纯延迟的一阶对象:**

$$G_p(s)=\frac{K\cdot e^{-\tau s}}{1+T_1S}=G_p^{'}(s)\cdot e^{-\tau s}$$

➢ **Smith预估器:**

$$D_\tau(s)=(1-e^{-\tau s})\cdot G_p^{'}(s)\cdot H_0(s)=(1-e^{-\tau s})\cdot\frac{K}{1+T_1S}\cdot\frac{1-e^{-Ts}}{s}$$

大纯延迟Smith预估控制-计算机实现

- **Smith预估器:** $D_\tau(s) = (1-e^{-\tau s}) \cdot G_p^{'}(s) \cdot H_0(s) = (1-e^{-\tau s}) \cdot \dfrac{K}{1+T_1 S} \cdot \dfrac{1-e^{-Ts}}{s}$

$$D_\tau(z) = Z[D_\tau(s)] = Z[\frac{K(1-e^{-\tau s}) \cdot (1-e^{-Ts})}{s(1+T_1 s)}] = (1-z^{-1})(1-z^{-N})Z[\frac{K}{s(1+T_1 s)}]$$

$$= K(1-z^{-1})(1-z^{-N})Z[\frac{1/T_1}{s(1/T_1+s)}]$$

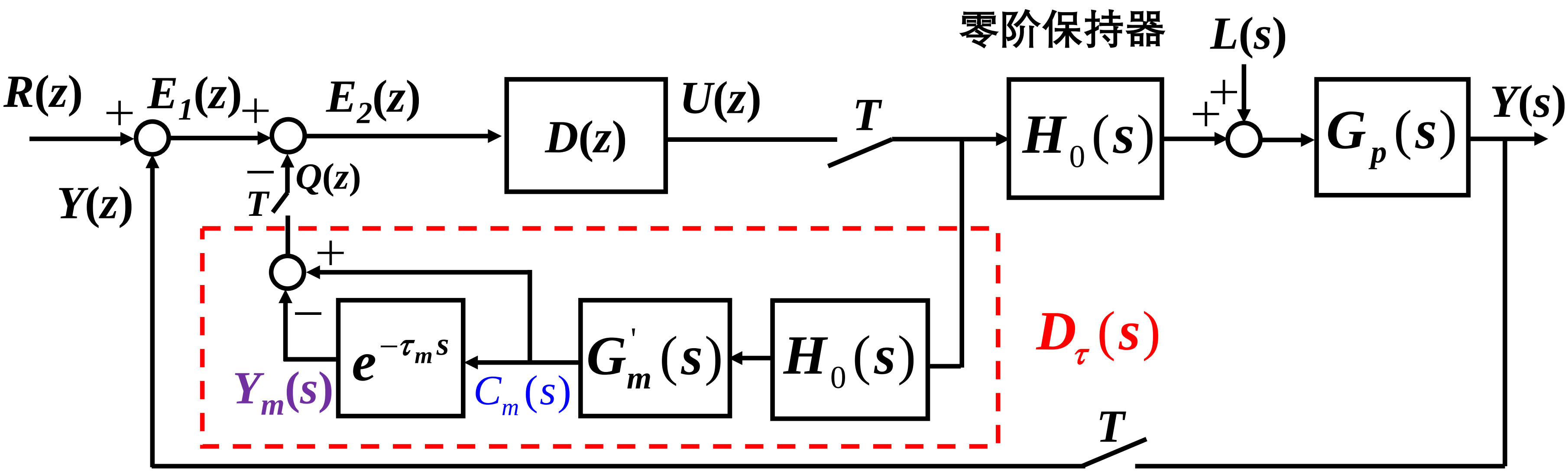
$$= K(1-z^{-1})(1-z^{-N})\frac{(1-e^{-T/T_1})z}{(z-1)(z-e^{-T/T_1})}$$

$$= (1-z^{-N})\frac{K(1-e^{-T/T_1})z^{-1}}{(1-e^{-T/T_1}z^{-1})}$$

$$= (1-z^{-N})\frac{b_1 z^{-1}}{(1-a_1 z^{-1})}$$

$$\boxed{a_1 = e^{-T/T_1}, b_1 = K(1-e^{-T/T_1}), N \approx \tau / T}$$

大纯延迟Smith预估控制-计算机实现

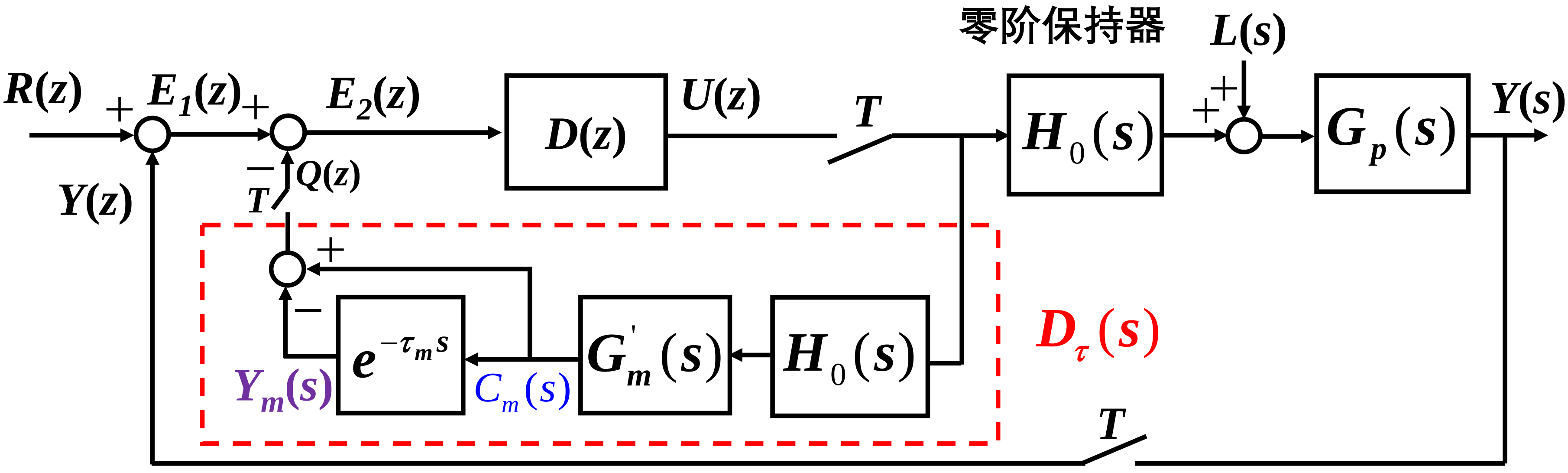


$$D_\tau(z)=(1-z^{-N})\frac{b_1z^{-1}}{(1-a_1z^{-1})}=\frac{Q(z)}{C_m(z)}\cdot\frac{C_m(z)}{u(z)}$$

$$\frac{Q(z)}{C_m(z)}=(1-z^{-N}),\qquad \frac{C_m(z)}{u(z)}=\frac{b_1z^{-1}}{(1-a_1z^{-1})}$$

Smith预估器的递推形式：
$$\begin{cases}C_m(k)=a_1\cdot C_m(k-1)+b_1\cdot u(k-1)\\ q(k)=C_m(k)-C_m(k-N)\end{cases}$$

大纯延迟Smith预估控制-计算机实现



➢ **带纯延迟的二阶惯性对象：**

$$G_p(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}$$

➢ **Smith预估器：**

$$D_\tau(s) = (1-e^{-\tau s}) \cdot G_p^{'}(s) \cdot H_0(s) = (1-e^{-\tau s}) \cdot \frac{K}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)} \cdot \frac{1-e^{-Ts}}{s}$$

大纯延迟Smith预估控制-计算机实现

- **Smith预估器:** $D_\tau(s)=(1-e^{-\tau s})\cdot G_p^{'}(s)\cdot H_0(s)=(1-e^{-\tau s})\cdot\dfrac{K}{(1+T_1s)(1+T_2s)}\cdot\dfrac{1-e^{-Ts}}{s}$

$$D_\tau(z)=(1-z^{-1})(1-z^{-N})Z[\frac{K}{(1+T_1s)(1+T_2s)s}]$$

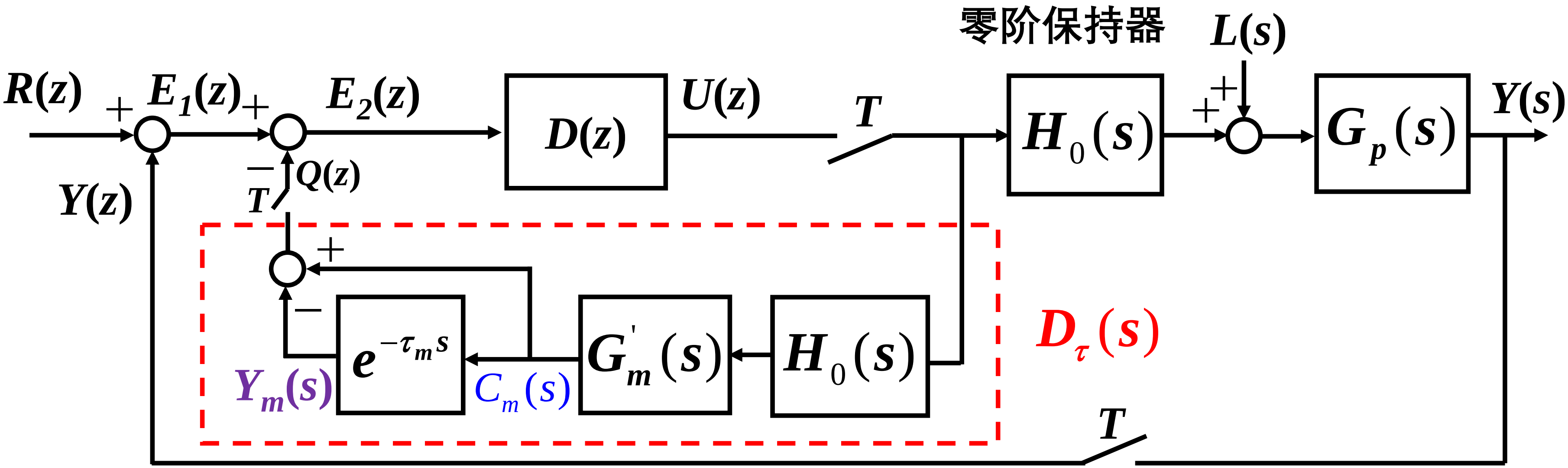
$$=(1-z^{-N})\cdot\frac{b_1z^{-1}+b_2z^{-2}}{1-a_1z^{-1}-a_2z^{-2}}$$

$$a_1=e^{-T/T_1}+e^{-T/T_2}\qquad a_2=e^{-(T/T_1+T/T_2)}+e^{-T/T_2}$$

$$b_1=\frac{k}{T_2-T_1}\cdot[T_1(e^{-T/T_1}-1)-T_2(e^{-T/T_2}-1)]$$

$$b_2=\frac{k}{T_2-T_1}\cdot[T_2e^{-T/T_1}(e^{-T/T_2}-1)-T_1e^{-T/T_2}(e^{-T/T_1}-1)]$$

大纯延迟Smith预估控制-计算机实现



$$D_\tau(z)=(1-z^{-N})\cdot\frac{b_1z^{-1}+b_2z^{-2}}{1-a_1z^{-1}-a_2z^{-2}}=\frac{Q(z)}{C_m(z)}\cdot\frac{C_m(z)}{u(z)}$$

$$\frac{Q(z)}{C_m(z)}=(1-z^{-N}),\qquad \frac{C_m(z)}{u(z)}=\frac{b_1z^{-1}+b_2z^{-2}}{1-a_1z^{-1}-a_2z^{-2}}$$

递推：

$$\begin{cases}C_m(k)=a_1\cdot C_m(k-1)+a_2\cdot C_m(k-2)+b_1\cdot u(k-1)+b_2\cdot u(k-2)\\ q(k)=C_m(k)-C_m(k-N)\end{cases}$$