第4章 计算机控制系统的基本控制策略

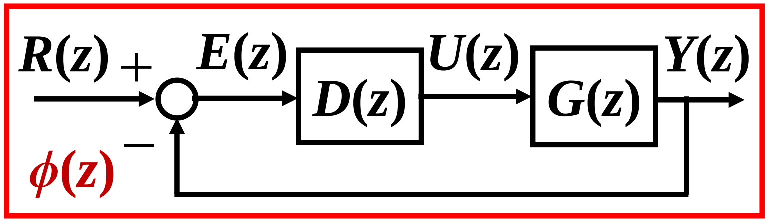
主要学习内容

直接数字设计方法

- ◆设计思想
- ◆解析设计法
  - 最少拍系统的设计
  - 无波纹最少拍系统的设计
- ◆Z平面根轨迹设计法 （自学）
- ◆大林算法 （自学）

回　顾

■ 典型输入最少拍系统闭环特性的选择



$$R(z)=\frac{A(z)}{(1-z^{-1})^{N}}$$

$$D(z)=\frac{1}{G(z)}\frac{\phi(z)}{\phi_e(z)}$$

闭环特性	零稳态误差	物理可实现	稳定性
$\phi(z)$		z^{-l}	$\prod_i(1-z_i z^{-1}),\lvert z_i\rvert\geq 1$
$\phi_e(z)$	$(1-z^{-1})^{N}$		$\prod_j(1-p_j z^{-1}),\lvert p_j\rvert\geq 1$

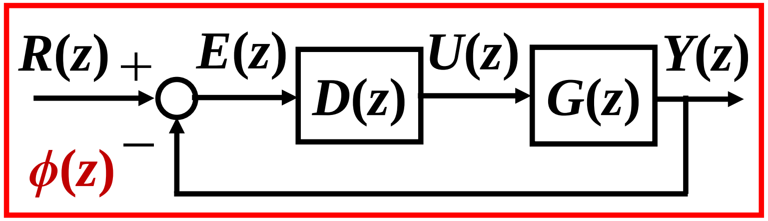
说明: 1．**输入:** $r(t)=1, N=1; r(t)=t, N=2; r(t)=\frac{1}{2}t^{2}, N=3$

2．l 为对象纯迟延幂次　　3.　z_i、p_j为$G(z)$的零极点

4.　假设$G(z)$的极点中有J个临界点（p_j=1），那么$\phi_e(z)$中（$1-z^{-1}$）的指数为max（N, J）。

回 顾

■ **例题** 对象 $G(s)=\dfrac{10}{s(s+1)}$， 输入信号为单位速度， T=1s，零阶保持器，求最少拍控制器。



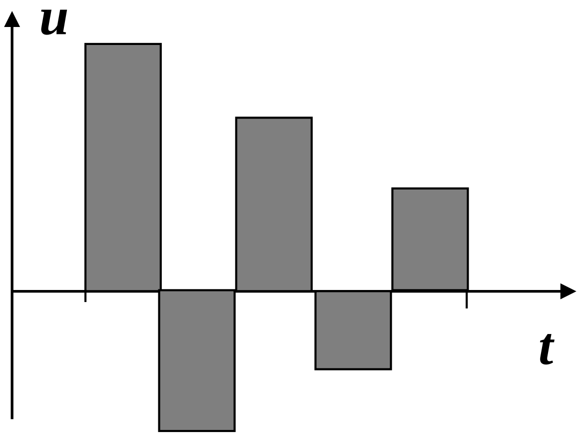
解： $G(z)=3.679\cdot\dfrac{z^{-1}(1+0.718z^{-1})}{(1-z^{-1})(1-0.3679z^{-1})}$

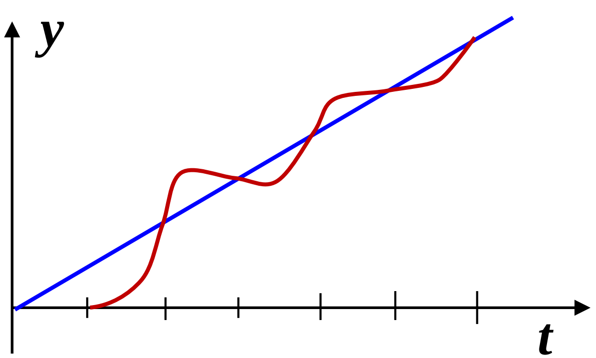
$$D(z)=\frac{0.5436(1-0.5z^{-1})(1-0.3679z^{-1})}{3.679(1-z^{-1})(1+0.718z^{-1})}$$

$$E(z)=z^{-1}\qquad Y(z)=2z^{-2}+3z^{-3}+4z^{-4}+....$$

$$U(z)=E(z)\cdot D(z)=z^{-1}\cdot\frac{0.5436(1-0.5z^{-1})(1-0.3679z^{-1})}{(1-z^{-1})(1+0.718z^{-1})}$$

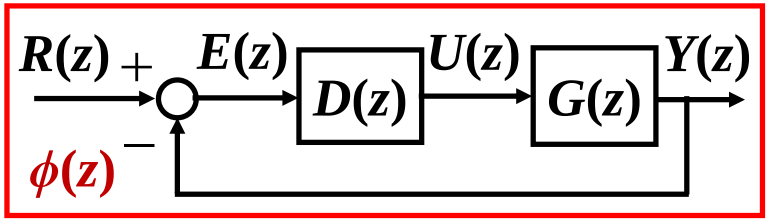
$$=0.54z^{-1}-0.32z^{-2}+0.4z^{-3}-0.124z^{-4}+0.25z^{-5}....$$



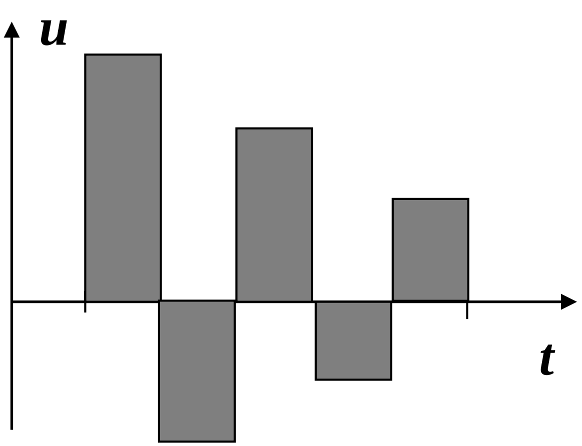


解析设计法- 最少拍系统的设计

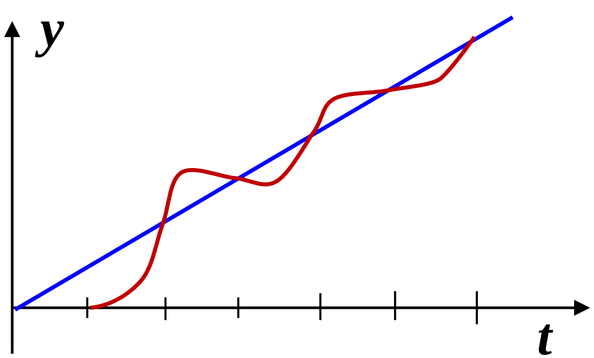
- 在最少的几个采样周期后系统的响应在**采样点时稳态误差为零**。



- 控制系统输出信号*y*(*t*)有纹波存在，故称为**最少拍有纹波控制系统**。



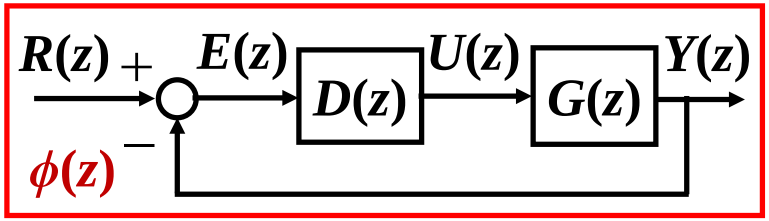
- *y*(*t*)的纹波在采样点上观测不到，用修正*z*变换方才能计算两个采样点之间的输出值，称为**隐蔽振荡**(hidden oscillations)。



- **如何消除这一隐蔽振荡?**

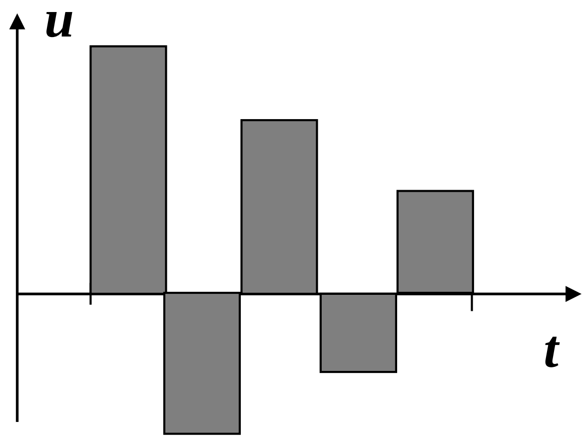
$\boxed{\text{最少拍无纹波控制器}}$

无波纹最少拍系统的设计



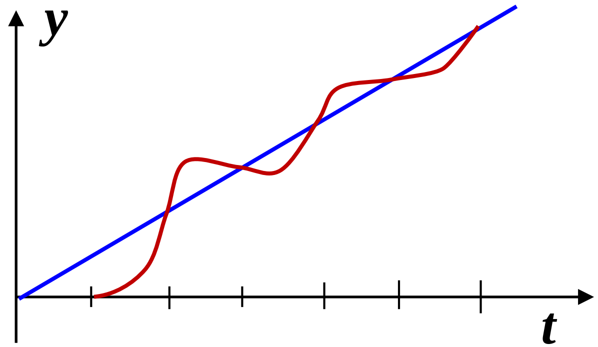
➢ 最少拍无纹波设计的要求

- 经过有限拍，输出误差为零
- 控制器具有稳定性
- 在采样点之间没有振荡



➢ 纹波产生的原因，引起的后果

- 原因：控制量$u(t)$波动不稳定
- 后果：输出有波动，造成机械机构的摩擦



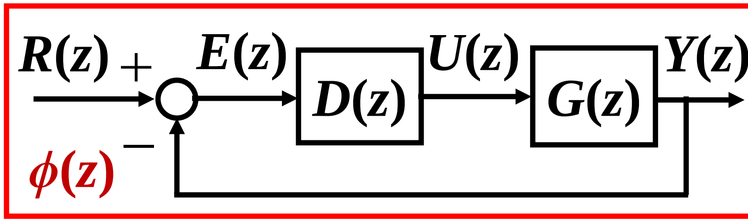
目　标?

$u(i)=u(i+1)=u(i+2)=\ldots$ *Constant*

无波纹最少拍系统的设计

■ **目标：**

$u(i)=u(i+1)=u(i+2)=\dots$ *Constant*



$$U(z)=\frac{Y(z)}{G(z)}=\frac{\phi(z)R(z)}{G(z)}=\phi(z)\cdot\frac{G_D(z)}{G_N(z)}\cdot R(z),\quad \begin{cases} G_N(z)=\prod_i(1-z_i z^{-1}) & \text{零点多项式} \\ G_D(z)=\prod_j(1-p_j z^{-1}) & \text{极点多项式} \end{cases}$$

✓ **只要** $\phi(z)\cdot\dfrac{G_D(z)}{G_N(z)}$ **是z^{-1}的有限项，就可以使$u(k)$在稳态过程中为常数或0。**

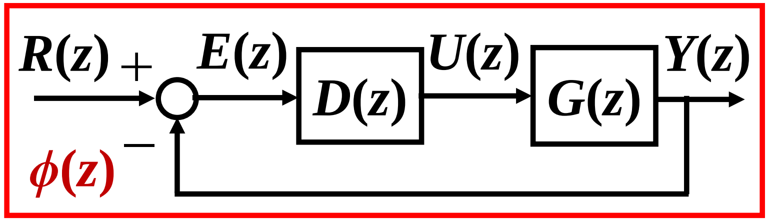
$\phi(z)$要包含G(z)所有的零点。

典型输入无波纹最少拍系统闭环特性的选择

闭环特性	零稳态误差	物理可实现	稳定性	无波纹
$\phi(z)$		z^{-l}	$\prod_i(1-z_i z^{-1}),\lvert z_i\rvert\ge 1$	$\prod_i(1-z_i z^{-1}),\lvert z_i\rvert<1$
$\phi_e(z)$	$(1-z^{-1})^N$		$\prod_j(1-p_j z^{-1}),\lvert p_j\rvert\ge 1$	

无波纹最少拍系统的设计

■ **例题** **对象** $G(s)=\dfrac{10}{s(s+1)}$ ， **输入信号为单位速度，** T=1s，**零阶保持器，求最少拍控制器。**



$$D(z)=\frac{1}{G(z)}\frac{\phi(z)}{\phi_e(z)}$$

解： **1. 求广义对象传递函数：**

$$G(z)=Z[G_h(s)G(s)]=Z[\frac{1-e^{-Ts}}{s}\cdot\frac{10}{s(s+1)}]$$

$$=10(1-z^{-1})Z[\frac{1}{s^2(s+1)}]=10(1-z^{-1})\cdot Z[\frac{1}{s^2}-\frac{1}{s}+\frac{1}{s+1}]$$

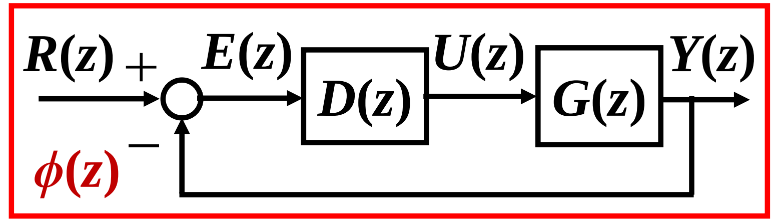
$$=10(1-z^{-1})[\frac{Tz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}-\frac{1}{1-z^{-1}}+\frac{1}{1-e^{-T}z^{-1}}]$$

$$=\frac{10}{e}\cdot\frac{z^{-1}[1+(e-2)z^{-1}]}{(1-z^{-1})(1-e^{-1}z^{-1})}=\frac{3.679z^{-1}(1+0.718z^{-1})}{(1-z^{-1})(1-0.3679z^{-1})}$$

其中，（1-0.718z^{-1}）和（1-0.3679z^{-1}）是稳定的零极点，1-z^{-1}是临界点.

无波纹最少拍系统的设计

■ **例题** 对象 $G(s)=\dfrac{10}{s(s+1)}$，输入信号为单位速度，T=1s，零阶保持器，求最少拍控制器。



$$D(z)=\frac{1}{G(z)}\frac{\phi(z)}{\phi_e(z)}$$

解：1. 求广义对象传递函数：

$$G(z)=\frac{3.679z^{-1}(1+0.718z^{-1})}{(1-z^{-1})(1-0.3679z^{-1})}$$

其中，（1-0.718z^{-1}）和（1-0.3679z^{-1}）是稳定的零极点，1-z^{-1}是临界点.

2. 确定$\phi(z)$、$\phi_e(z)$：

$$\begin{cases}\phi(z)=z^{-1}(1+0.718z^{-1})F_1(z)\\ \phi_e(z)=(1-z^{-1})^2F_2(z)\end{cases}$$

假设：

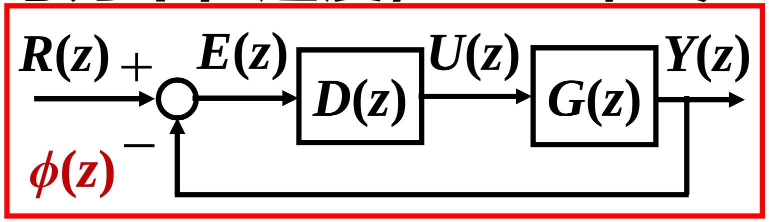
$$\begin{cases}F_1(z)=b+cz^{-1}\\ F_2(z)=1+az^{-1}\end{cases}$$

$$1=\phi(z)+\phi_e(z)=1+(a+b-2)z^{-1}+(-2a+0.718b+c+1)z^{-2}+(a+0.718c)z^{-3}$$

$$\begin{cases}a+b-2=0\\ -2a+0.718b+c+1=0\\ a+0.718c=0\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}a=0.592\\ b=1.408\\ c=-0.825\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\phi(z)=z^{-1}(1+0.718z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})\\ \phi_e(z)=(1-z^{-1})^2(1+0.592z^{-1})\end{cases}$$

无波纹最少拍系统的设计

■ **例题** **对象** $G(s)=\dfrac{10}{s(s+1)}$ **，输入信号为单位速度，** T=1s**，零阶保持器，求最少拍控制器。**



解：

$$G(z)=\frac{3.679z^{-1}(1+0.718z^{-1})}{(1-z^{-1})(1-0.3679z^{-1})}$$

$$\begin{cases}\phi(z)=z^{-1}(1+0.718z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})\\ \phi_e(z)=(1-z^{-1})^2(1+0.592z^{-1})\end{cases}$$

3. 求*D*(*z*)：

$$D(z)=\frac{1}{G(z)}\frac{\phi(z)}{\phi_e(z)}=\frac{(1-z^{-1})(1-0.3679z^{-1})}{3.679z^{-1}(1+0.718z^{-1})}\cdot\frac{z^{-1}(1+0.718z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})}{(1-z^{-1})^2(1+0.592z^{-1})}$$

$$=\frac{(1-0.3679z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})}{3.679(1-z^{-1})(1+0.592z^{-1})}$$

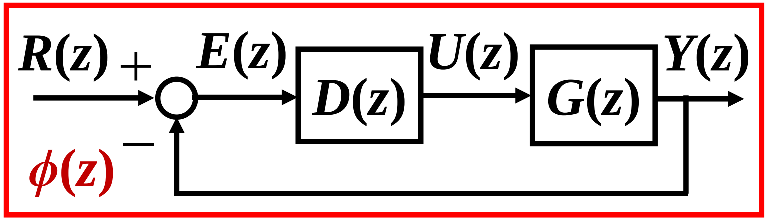
$$E(z)=\phi_e(z)\cdot R(z)=(1-z^{-1})^2(1+0.592z^{-1})\cdot\frac{Tz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}=z^{-1}(1+0.592z^{-1})$$

$$Y(z)=\phi(z)\cdot R(z)=z^{-1}(1+0.718z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})\cdot\frac{Tz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}$$

$$=1.408z^{-2}+3z^{-3}+4z^{-4}+\ldots.$$

无波纹最少拍系统的设计

■ **例题** 对象 $G(s)=\dfrac{10}{s(s+1)}$，输入信号为单位速度，T=1s，零阶保持器，求最少拍控制器。



解：

$$D(z)=\frac{(1-0.3679z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})}{3.679(1-z^{-1})(1+0.592z^{-1})}$$

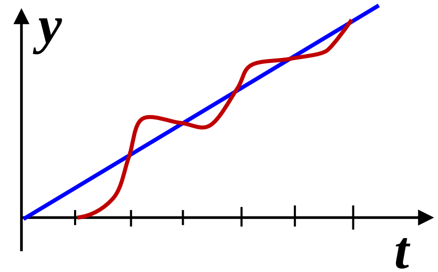
$$E(z)=z^{-1}(1+0.592z^{-1})$$

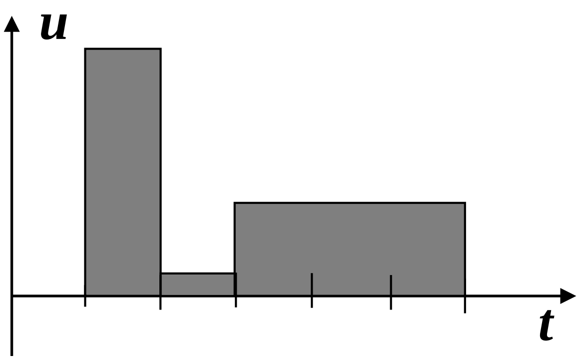
$$Y(z)=1.408z^{-2}+3z^{-3}+4z^{-4}+....$$

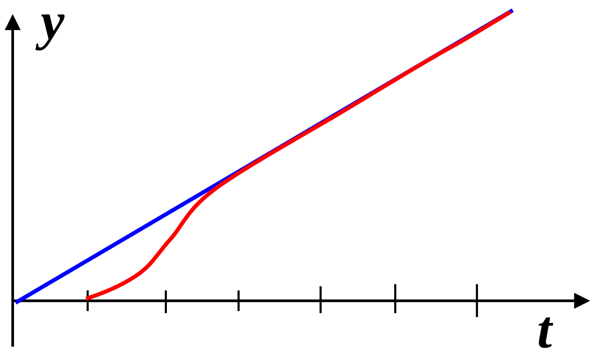
$$U(z)=E(z)\cdot D(z)=z^{-1}(1+0.592z^{-1})\cdot\frac{(1-0.3679z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})}{3.679(1-z^{-1})(1+0.592z^{-1})}$$

$$=\frac{z^{-1}(1-0.3679z^{-1})(1.408-0.825z^{-1})}{3.679(1-z^{-1})}$$

$$=0.383z^{-1}+0.02z^{-2}+0.085z^{-3}+0.085z^{-4}+0.085z^{-5}....$$







无波纹最少拍系统的设计

■最少拍系统的应用局限性

（1）最少拍系统的设计，是以调节时间为唯一性能指标。采样周期越短，调节时间越短，控制输出就越大，执行机构可能会工作在非线性饱和区，系统实际性能指标变坏。所以，T要适当。

（2）控制器针对几种典型输入设计，当输入信号发生变化时，系统性能变差。

a. 低阶输入信号设计，高阶典型输入时出现残差；

b. 高阶输入信号设计，低阶典型输入时出现超调。

c. 实际信号可能是变化的，本系统输入信号的敏感性限制了它的应用。

无波纹最少拍系统的设计

■最少拍系统的改进

① 针对调节时间控制问题，可采用提高$F_1(z)$和$F_2(z)$阶次的方法，拉长调节时间，实现有限拍控制；

② 针对典型输入受限问题，可采用最小均方误差系统设计:

- 传递函数增加一个新极点： $\phi'(z)=\dfrac{\phi(z)}{1-dz^{-1}}$ ，$|n|<1$(稳定极点）。
- 不同输入下 $\sum_{i=0}^{\infty} e^2(t)=\dfrac{1}{2\Pi j}\oint_c E(z)\cdot E(z^{-1})\cdot z^{-1}\cdot dz$ 最小，确定d。
- 得出$\phi'(z)$后，求出$D(z)$。

最少拍系统的设计-总结

典型输入最少拍系统闭环特性的选择

闭环特性	零稳态误差	物理可实现	稳定性	无波纹
$\phi(z)$		z^{-l}	$\prod_i(1-z_iz^{-1}),\lvert z_i\rvert\ge 1$	$\prod_i(1-z_iz^{-1}),\lvert z_i\rvert<1$
$\phi_e(z)$	$(1-z^{-1})^N$		$\prod_j(1-p_jz^{-1}),\lvert p_j\rvert\ge 1$	

最少拍无纹波控制器

- 控制器可实现
- 系统稳定
- 控制器输出稳定
- $E(z)$、$D(z)$、$U(z)$

最少拍有纹波控制器

- 控制器可实现
- 系统稳定
- 控制器输出不稳定
- $E(z)$、$D(z)$

最少拍无差控制器

- 简单
- 本身缺陷多
- $E(z)$

思考题

1、什么是最少拍系统?

2、最少拍控制系统有哪几种典型输入信号?

3、什么是最少拍无纹波系统?

4、解释最少拍控制算法中的波纹现象及其产生原因。