梅森公式

# 自动控制系统的数学模型 结构图和信号流图

#### Outline

- 1 结构图介绍
- ② 结构图化简方法
- ③ 结构图等效变换
- 4 信号流图
- 5 梅森公式

### Topic

- 1 结构图介绍

- 5 梅森公式

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 。 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 。 工程上使用广泛
  - 。 可描述线性或非线性系统
  - 。同一结构图可用不同元器件构成实现
  - 。 对于某一确定系统或元件, 其结构图不是唯一的

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 。工程上使用广泛
  - 可描述线性或非线性系统
  - 。 同一结构图可用不同元器件构成实现
  - 。 对于某一确定系统或元件, 其结构图不是唯一的

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 。 工程上使用广泛
  - 可描述线性或非线性系统
  - 同一结构图可用不同元器件构成实现
  - 。 对于某一确定系统或元件, 其结构图不是唯一的

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 工程上使用广泛
  - 可描述线性或非线性系统
  - 。 同一结构图可用不同元器件构成实现
  - 。 对于某一确定系统或元件, 其结构图不是唯一的

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 工程上使用广泛
  - 可描述线性或非线性系统
  - 。 同一结构图可用不同元器件构成实现
  - 对于某一确定系统或元件, 其结构图不是唯一的

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 工程上使用广泛
  - 可描述线性或非线性系统
  - 。 同一结构图可用不同元器件构成实现
  - 对于某一确定系统或元件, 其结构图不是唯一的

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统 中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 工程上使用广泛
  - 可描述线性或非线性系统
  - 同一结构图可用不同元器件构成实现

- 结构图是系统中各元件功能和信号流向的图解,它表示系统中各元部件的相互连接以及信号在系统中的传递路线。
- 特点
  - 形象直观
  - 可以评价各元部件对系统性能的影响
  - 工程上使用广泛
  - 可描述线性或非线性系统
  - 同一结构图可用不同元器件构成实现
  - 对于某一确定系统或元件, 其结构图不是唯一的

- 16万线
- 引出点(分支点)
- 比较点 (累加点)
- 传递函数环节

- 信号线
- 引出点(分支点)
- 比较点 (累加点)
- 传递函数环节

- 信号线
- 引出点 (分支点)
- 比较点(累加点)
- 传递函数环节

- 信号线
- 引出点 (分支点)
- 比较点 (累加点)
- 传递函数环节

- 信号线
- 引出点 (分支点)
- 比较点 (累加点)
- 传递函数环节

梅森公式

## 环节连接方式

#### 3 种连接方式:

- 串联
- 并联
- 反馈

# 环节连接方式

- 3 种连接方式:
  - 串联

## 环节连接方式

3 种连接方式:

- 串联
- 并联
- 反馈

## 环节连接方式

- 3 种连接方式:
  - 串联
  - 并联
  - 反馈

结构图化简方法

结构图等效变换

#### 串联

#### 结构图

$$R(s) \longrightarrow G_1(s) \longrightarrow G_2(s) \longrightarrow G_3(s) \longrightarrow C(s)$$

传递函数计算

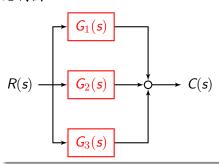
• 等效传递函数等于各环节传递函数的乘积

结构图化简方法 结构图等效变换

等效变换 信号流图

## 并联

#### 结构图



#### 传递函数计算

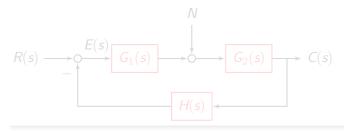
• 等效传递函数等于各环节传递函数的代数和

# 反馈

#### 结构图

$$R(s) \xrightarrow{E(s)} G(s) \xrightarrow{G(s)} C(s)$$

结构图

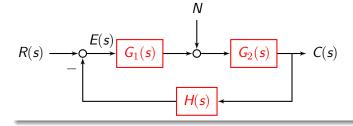


# 反馈

#### 结构图

$$R(s) \longrightarrow C(s)$$
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 
 $E(s)$ 

#### 结构图



- 前向通道及其传递函数:信号从 R(s)->C(s) 的通道称为前 向通道,前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函 数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反馈通道,反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函数
- 开环系统传递函数:  $G_{open}(s) = G(s)H(s)$
- 误差传递函数:  $\Phi_{e}(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = 1 \frac{C(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+G(s)H(s)}$
- 。 扰动传递函数:  $\Phi_f(s) = rac{C(s)}{N(s)} = rac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$
- 闭环传递函数:  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

- 前向通道及其传递函数:信号从 R(s)->C(s) 的通道称为前 向通道,前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函 数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反馈通道,反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函数
- 反馈连接的等效传递函数:
  - $G(s) = \frac{1}{1 \pm \hat{n}}$  向通道传递函数×反馈通道传函数
- 开环系统传递函数:  $G_{open}(s) = G(s)H(s)$
- 。误差传递函数:  $\Phi_e(s)=rac{E(s)}{R(s)}=1-rac{C(s)H(s)}{R(s)}=rac{1}{1+G(s)H(s)}$
- 扰动传递函数:  $\Phi_f(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$
- 闭环传递函数:  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

- 前向通道及其传递函数:信号从 R(s)->C(s)的通道称为前向通道,前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反 馈通道,反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函 数
- 反馈连接的等效传递函数:

- 开环系统传递函数: Gopen(s) = G(s)H(s)
- 误差传递函数:  $\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = 1 \frac{C(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}$
- 扰动传递函数:  $\Phi_f(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$
- 闭环传递函数:  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

- 前向通道及其传递函数:信号从 R(s)->C(s) 的通道称为前 向通道,前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函 数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反 馈通道,反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函 数
- 反馈连接的等效传递函数:
   G(s) = 前向通道传递函数
   1±前向通道传递函数×反馈通道传函数
- 开环系统传递函数:  $G_{open}(s) = G(s)H(s)$
- 。误差传递函数:  $\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = 1 \frac{C(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+G(s)H(s)}$
- 扰动传递函数:  $\Phi_f(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$
- 闭环传递函数:  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

- 前向通道及其传递函数: 信号从 R(s)->C(s) 的通道称为前 向通道, 前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函 数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反 馈通道, 反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函 数
- 反馈连接的等效传递函数:  $G(s) = \frac{$ 前向通道传递函数}{1±前向通道传递函数×反馈通道传函数
- 开环系统传递函数:  $G_{open}(s) = G(s)H(s)$

- 前向通道及其传递函数:信号从 R(s)->C(s)的通道称为前 向通道,前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反 馈通道,反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函 数
- 开环系统传递函数:  $G_{open}(s) = G(s)H(s)$
- 误差传递函数:  $\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = 1 \frac{C(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}$
- 扰动传递函数:  $\Phi_f(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$
- 闭环传递函数:  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

- 前向通道及其传递函数:信号从 R(s)->C(s)的通道称为前向通道,前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反馈通道,反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函数
- 开环系统传递函数:  $G_{open}(s) = G(s)H(s)$
- 误差传递函数:  $\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = 1 \frac{C(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}$
- 扰动传递函数:  $\Phi_f(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$
- 闭环传递函数:  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

- 前向通道及其传递函数:信号从 R(s)->C(s)的通道称为前 向通道,前向通道上各传递函数的乘积称为前向通道传递函数
- 反馈能道及其传递函数:信号从 C(s)->E(s) 的通道称为反馈通道,反馈通道上各传递函数的乘积称为反馈通道传递函数
- 开环系统传递函数:  $G_{open}(s) = G(s)H(s)$
- 误差传递函数:  $\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = 1 \frac{C(s)H(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}$
- 扰动传递函数:  $\Phi_f(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$
- 闭环传递函数:  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$

#### **Topic**

- 1 结构图介绍
- 2 结构图化简方法
- 3 结构图等效变换
- 4 信号流图
- 5 梅森公式

梅森公式

# 结构图化简

- 化简方法
  - 。串、并、反馈连接
  - 。 比较点、分支点移动

### 结构图化简

- 目地: 求系统的闭环传递函数  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$
- 化简方法
  - 。 串、并、反馈连接
  - 。比较点、分支点移动

#### 结构图化简

- 目地: 求系统的闭环传递函数  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$
- 化简方法:
  - 串、并、反馈连接
  - 比较点、分支点移动

#### 结构图化简

- 目地: 求系统的闭环传递函数  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$
- 化简方法:
  - 串、并、反馈连接
  - 比较点、分支点移动

#### 结构图化简

- 目地: 求系统的闭环传递函数  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$
- 化简方法:
  - 串、并、反馈连接
  - 比较点、分支点移动

结构图化简方法

结构图等效变换

信号流图

梅森公式

例: 求  $\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$ :

$$G(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)}$$
 (1)

$$\Phi(s) = \frac{G(s)G_3(s)}{1 + G(s)G_3(s)}$$
 (2)

$$\Phi(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_2(s) + G_1(s)G_2(s)G_3(s)}$$
(3)

#### 例: 结构图化简

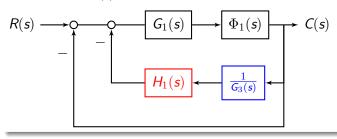
$$R(s) \xrightarrow{Q_1(s)} G_1(s) \xrightarrow{Q_2(s)} G_3(s) \xrightarrow{Q_3(s)} C(s)$$

$$R(s) \xrightarrow{Q_1(s)} G_2(s) \xrightarrow{Q_2(s)} G_3(s) \xrightarrow{Q_3(s)} C(s)$$

$$R(s) \xrightarrow{Q_1(s)} G_2(s) \xrightarrow{Q_2(s)} G_3(s) \xrightarrow{Q_3(s)} C(s)$$

# 例: 结构图化简 (续)

内回路化为  $\Phi_1(s)$ 



内回路化为  $\Phi_2(s)$ 

$$R(s) \longrightarrow \Phi_2(s) \longrightarrow C(s)$$

# 例: 结构图化简 (续)

$$\Phi_1(s) = \frac{G_2 G_3}{1 + G_2 G_2 H_2} \tag{4}$$

$$\Phi_2(s) = \frac{G_1 \Phi_1}{1 + H_1 G_1 \Phi_1 / G_3} \tag{5}$$

$$= \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3 H_2 + G_1 G_2 H_1} \tag{6}$$

$$\Phi(s) = \frac{\Phi_2}{1 + \Phi_2} \tag{7}$$

$$= \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3 H_2 + G_1 G_2 H_1 + G_1 G_2 G_3} \tag{8}$$

(9)

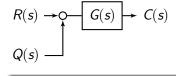
结构图变换规则:各通道传递函数不变,即等效变换

#### Topic

- 1 结构图介绍
- 2 结构图化简方法
- ③ 结构图等效变换
- 4 信号流图
- 5 梅森公式

## 比较点移动

#### 比较点移动



$$R(s) \longrightarrow G(s) \longrightarrow C(s)$$

$$Q(s) \longrightarrow G(s)$$

#### 比较点移动

$$R(s) \longrightarrow G(s) \longrightarrow C(s)$$

$$Q(s) \longrightarrow C(s)$$

$$R(s) \longrightarrow G(s) \longrightarrow C(s)$$

$$Q(s) \longrightarrow \frac{1}{G(s)}$$

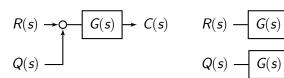
结构图化简方法

结构图等效变换

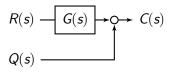
信号流图

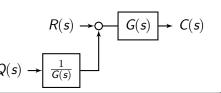
#### 比较点移动





#### 比较点移动





# 分支点移动

#### 分支点移动

$$R(s) \longrightarrow G(s) \qquad C(s) \qquad R(s) \longrightarrow G(s) \qquad C(s)$$

$$Q(s) \qquad G(s) \longrightarrow Q(s)$$

$$R(s) \xrightarrow{G(s)} C(s) \qquad R(s) \xrightarrow{G(s)} C(s) \qquad \downarrow \frac{1}{G(s)} Q(s)$$

#### 分支点移动

#### 分支点移动

$$R(s)$$
  $G(s)$   $C(s)$   $C(s)$ 

#### 分支点移动

$$R(s)$$
  $G(s)$   $C(s)$   $C(s)$   $Q(s)$   $Q(s)$ 

#### 分支点与比较点的相互移动

$$R(s) \xrightarrow{Q(s)} C(s)$$

$$Q(s) \xrightarrow{Q(s)} Y(s)$$

$$Q(s) \xrightarrow{Q(s)} Y(s)$$

$$Q(s) \xrightarrow{Q(s)} Y(s)$$

例: 求 
$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$$

$$R(s)$$
  $G_1(s)$   $X(s)$   $G_2(s)$   $G_3(s)$ 

$$C(s) = R(s)G_1 + X(s)$$

$$X(s) = G_2(R(s) - C(s)G_3)$$

$$C(s) = R(s)G_1 + G_2(R(s) - C(s)G_3)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1 + G_2}{1 + G_2G_2}$$
(13)

#### Topic

- 1 结构图介绍

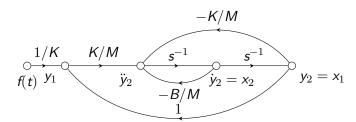
- 4 信号流图
- 5 梅森公式

## 信号流图定义

由节点与有向支路构成的能表征系统功能与信号流动方向的图, 称为系统的信号流图。

$$F(s) \stackrel{H(s)}{\longrightarrow} O Y(s)$$

#### 结构图与信号流图



#### **Topic**

- 1 结构图介绍
- 2 结构图化简方法
- 3 结构图等效变换
- 4 信号流图
- 5 梅森公式

结构图化简方法

结构图等效变换

信号流图

- 优点:不需要对结构图作任何变换,可以直接对复杂的结构图求取系统的闭环传递函数
- 梅森公式

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^{I} P_k \Delta_k$$

- △:系统的特征多项式,△=1-(所有不同回路增益之和)+(所有两两不接触回路增益乘积之和)-(所有三个互不接触回路增益乘积之和)+...
- P₁: 第 k 条前向通道
- $\bullet$   $\Delta_k$ : 系统结构图去除  $P_k$  后的特征多项式

结构图化简方法

结构图等效变换

- 优点:不需要对结构图作任何变换,可以直接对复杂的结构 图求取系统的闭环传递函数
- 梅森公式

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^{l} P_k \Delta_k$$

- △:系统的特征多项式,△=1-(所有不同回路增益之和)+(所有两两不接触回路增益乘积之和)-(所有三个互不接触回路增益乘积之和)+...
- 。 PL: 第 k 条前向通道
  - 。 Δι: 系统结构图去除 Pι 后的特征多项式

- 优点:不需要对结构图作任何变换,可以直接对复杂的结构 图求取系统的闭环传递函数
- 梅森公式

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^{I} P_k \Delta_k$$

- △:系统的特征多项式, △=1-(所有不同回路增益之和)+(所有两两不接触回路增益乘积之和)-(所有三个互不接触回路增益乘积之和)+...
- Pk:第 k条前向通道
- Δk: 系统结构图去除 Pk 后的特征多项式

- 优点:不需要对结构图作任何变换,可以直接对复杂的结构 图求取系统的闭环传递函数
- 梅森公式

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^{I} P_k \Delta_k$$

- $\Delta$ : 系统的特征多项式,  $\Delta$  =1-(所有不同回路增益之和)+(所有两两不接触回路增益乘积之和)-(所有三个互不接触回路增益乘积之和)+...
- PL: 第 k 条前向通道
- $\Delta_k$ : 系统结构图去除  $P_k$  后的特征多项式

- 优点:不需要对结构图作任何变换,可以直接对复杂的结构图求取系统的闭环传递函数
- 梅森公式

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^{l} P_k \Delta_k$$

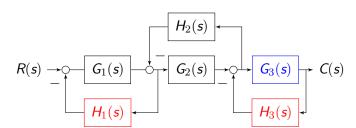
- Δ:系统的特征多项式, Δ=1-(所有不同回路增益之和)+(所有两两不接触回路增益乘积之和)-(所有三个互不接触回路增益乘积之和)+...
- P<sub>k</sub>:第 k 条前向通道
- $\Delta_k$ : 系统结构图去除  $P_k$  后的特征多项式

- 优点:不需要对结构图作任何变换,可以直接对复杂的结构图求取系统的闭环传递函数
- 梅森公式

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^{I} P_k \Delta_k$$

- Δ:系统的特征多项式, Δ=1-(所有不同回路增益之和)+(所有两两不接触回路增益乘积之和)-(所有三个互不接触回路增益乘积之和)+...
- P<sub>k</sub>:第 k 条前向通道
- Δ<sub>k</sub>: 系统结构图去除 P<sub>k</sub> 后的特征多项式

# 梅森公式示例 (结构图):



$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Lambda} \sum P_k \Delta_k ;$$

• 
$$P_1 = G_1 G_2 G_3$$
,  $L_1 = -G_1 H_1$ ,  $L_2 = -G_2 H_2$ ,  $L_3 = -G_3 H_3$ 

• 
$$\Delta_1 = 1$$
;

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3) + L_1 L_3 = 1 + G_1 H_1 + H_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3$$

$$\Phi(s) = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 H_1 + G_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3}$$

$$R(s)$$
 $G_1(s)$ 
 $G_2(s)$ 
 $G_3(s)$ 
 $G_3$ 

• 
$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum P_k \Delta_k$$
;

$$P_1 = G_1 G_2 G_3, L_1 = -G_1 H_1, L_2 = -G_2 H_2, L_3 = -G_3 H_3$$

• 
$$\Delta_1 = 1$$
;

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3) + L_1 L_3 = 1 + G_1 H_1 + H_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3$$

$$\Phi(s) = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 H_1 + G_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3}$$

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum P_k \Delta_k ;$$

$$P_1 = G_1 G_2 G_3, L_1 = -G_1 H_1, L_2 = -G_2 H_2, L_3 = -G_3 H_3 ;$$

• 
$$\Delta_1 = 1$$
 ;

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3) + L_1 L_3 = 1 + G_1 H_1 + H_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3$$

$$\Phi(s) = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 H_1 + G_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3}$$

• 
$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum P_k \Delta_k$$
;

$$P_1 = G_1 G_2 G_3, L_1 = -G_1 H_1, L_2 = -G_2 H_2, L_3 = -G_3 H_3 ;$$

$$\bullet \ \Delta_1 = 1 \ ;$$

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3) + L_1 L_3 = 1 + G_1 H_1 + H_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3$$

$$\Phi(s) = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 H_1 + G_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3}$$

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum P_k \Delta_k ;$$

$$P_1 = G_1 G_2 G_3, L_1 = -G_1 H_1, L_2 = -G_2 H_2, L_3 = -G_3 H_3 ;$$

• 
$$\Delta_1 = 1$$
 ;

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3) + L_1 L_3 = 1 + G_1 H_1 + H_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3 ;$$

$$\Phi(s) = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 H_1 + G_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3}$$

$$R(s)$$
 $G_1(s)$ 
 $G_2(s)$ 
 $G_3(s)$ 
 $G_3$ 

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum P_k \Delta_k$$
;

$$P_1 = G_1 G_2 G_3, L_1 = -G_1 H_1, L_2 = -G_2 H_2, L_3 = -G_3 H_3 ;$$

• 
$$\Delta_1 = 1$$
 ;

• 
$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3) + L_1 L_3 = 1 + G_1 H_1 + H_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3$$
;

$$\Phi(s) = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 H_1 + G_2 H_2 + G_3 H_3 + G_1 G_3 H_1 H_3} .$$