

# 2024-2025 学年度春季



## 课程名称：《自动控制原理（一）》 第5讲 控制系统的结构图-Part 2

课程学时：共56学时

课程性质：专业基础课

学生对象：自动化2305班  
(26人)

授课教师：刘骁康

课程目标：掌握自动控制的基本原理、控制系统的建模、性能分析和综合设计方法

## ■ 第4讲 控制系统的结构图-Part 1

### ➤ 传递函数的基本环节

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K \frac{s^l(\tau_1 s + 1)(\tau_2^2 s^2 + 2\zeta_2 \tau_2 s + 1) \cdots (\tau_{m'} s + 1)}{s^\nu(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\zeta'_2 T_2 s + 1) \cdots (T_{n'} s + 1)}$$

$K$ 、 $\tau_i$ 、 $\zeta_i$ 、 $T_j$ 、 $\zeta'_j$ 为常数。非负整数 $l$ 和 $\nu$ 不同时非零。

✓ 比例环节

✓ (理想)微分环节

✓ (理想)一阶微分环节

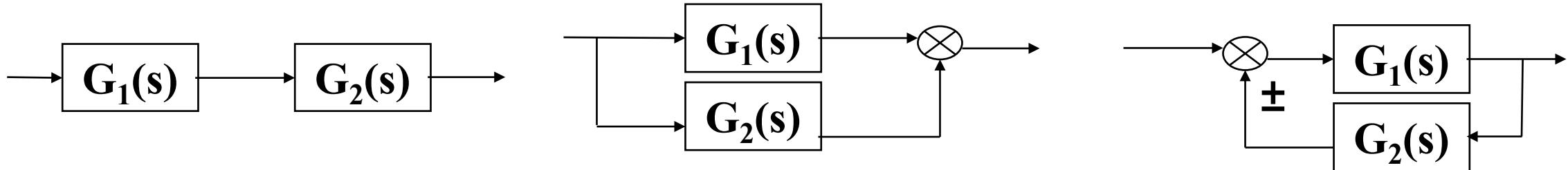
✓ (理想)二阶微分环节

✓ 积分环节

✓ 惯性环节

✓ 振荡环节(二阶环节)

## ■ 第4讲 控制系统的结构图-Part 1



等效变换法则：

【法则1】串联连接的等效变换

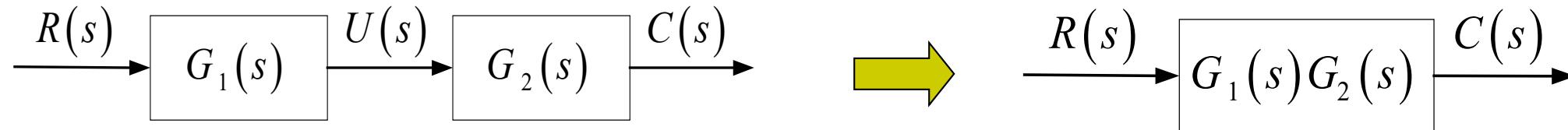
【法则2】并联连接的等效变换

【法则3】反馈连接的等效变换

【法则4】综合点的前后移动

【法则5】引出点的前后移动

## 【法则1】串联连接的等效变换



$$U(s) = G_1(s)R(s)$$

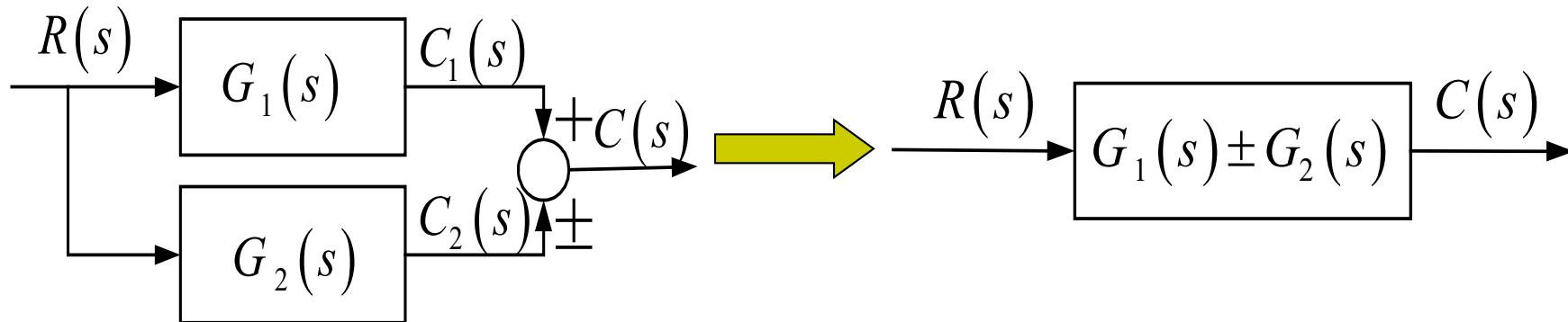
$$C(s) = G_2(s)U(s)$$

$$C(s) = G_1(s)G_2(s)R(s) = G(s)R(s)$$

$$G(s) = G_1(s)G_2(s)$$

- ◆  $n$ 个传递函数依次串联的等效传递函数，等于 $n$ 个传递函数的乘积。

## 【法则2】并联连接的等效变换



$$C_1(s) = G_1(s)R(s)$$

$$C_2(s) = G_2(s)R(s)$$

$$C(s) = C_1(s) \pm C_2(s) = [G_1(s) \pm G_2(s)]R(s)$$

$$G(s) = G_1(s) \pm G_2(s)$$

- ◆ n个传递函数并联的等效传递函数，等于n个传递函数的代数和。

### 【法则3】反馈连接的等效变换

$G(s)$ 称为前向通路传递函数，  
 $H(s)$ 称为反馈通路传递函数。

$$E(s) = R(s) \pm B(s) \quad C(s) = G(s)E(s)$$

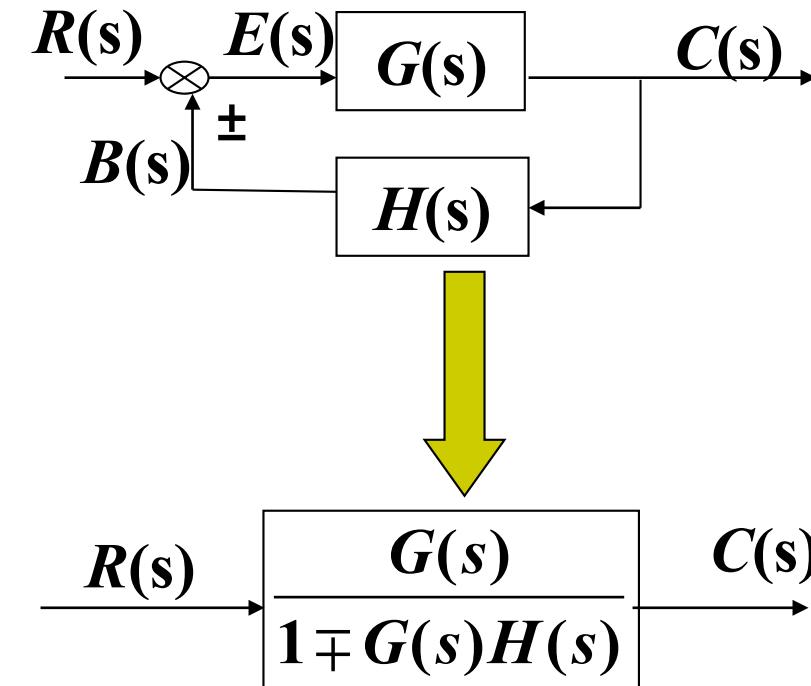
$$B(s) = H(s)C(s)$$

$$C(s) = G(s)[R(s) \pm H(s)C(s)]$$

$$G_B(s) = \Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 \mp G(s)H(s)}$$

$G_B(s)$ 称为闭环传递函数。

✓ 反馈通路传递函数  $H(s) = 1$  时闭环系统称为单位反馈系统。



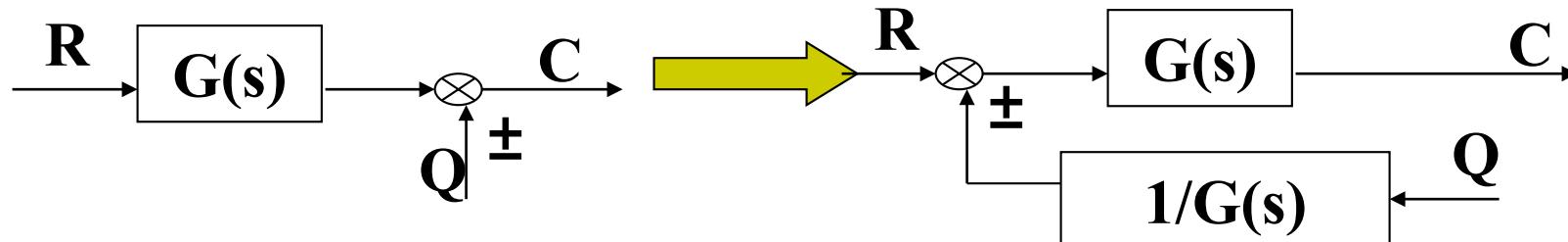
注意：减号对应于正反馈

## 【法则4】综合点的前后移动

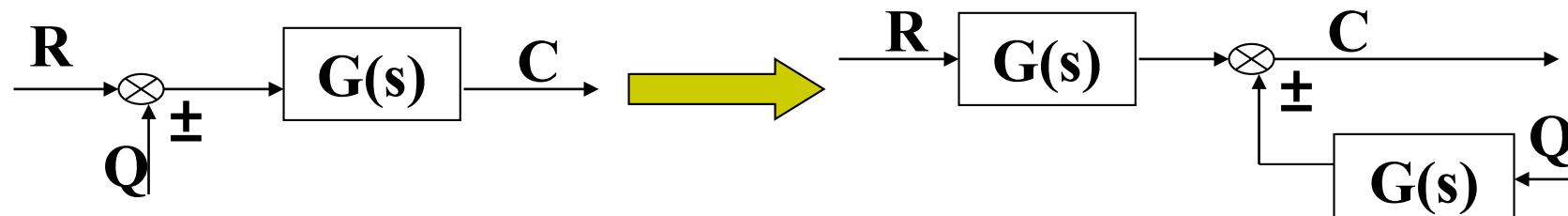
综合点前移在移动的支路上除以综合点跨越模块的传递函数。

综合点后移在移动的支路上乘以综合点跨越模块的传递函数。

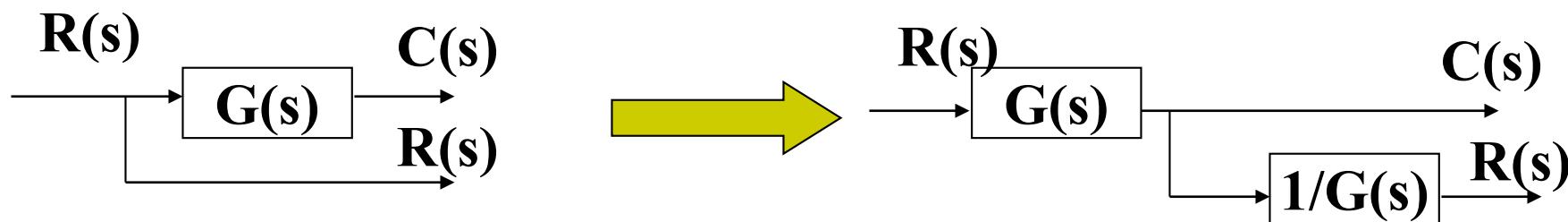
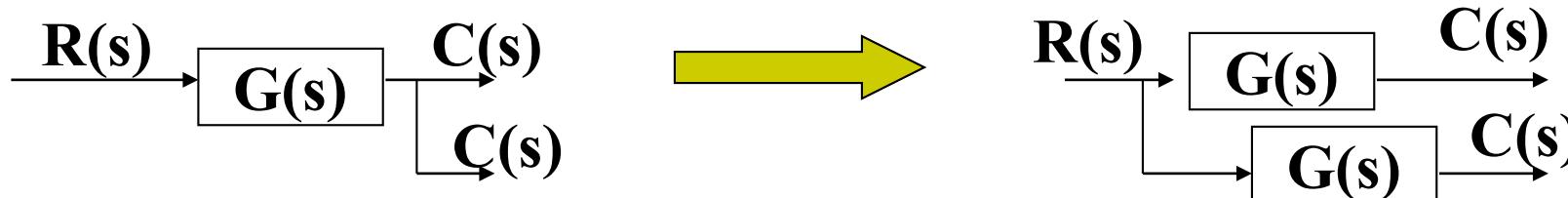
注：前移后移是相对信号流向而言，顺着信号流向为后移。



$$C(s) = G(s)R(s) \pm Q(s) = G(s)[R(s) \pm Q(s)/G(s)]$$



## 【法则5】引出点的前后移动



引出点后移，在移动的支路上除以引出点跨越的模块传递函数。

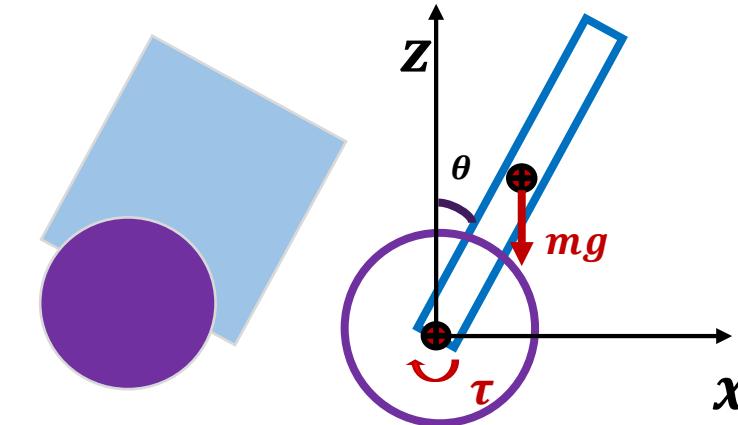
引出点前移，在移动的支路上乘以引出点跨越的模块传递函数。

## ■ 第4讲 控制系统的结构图-Part 1

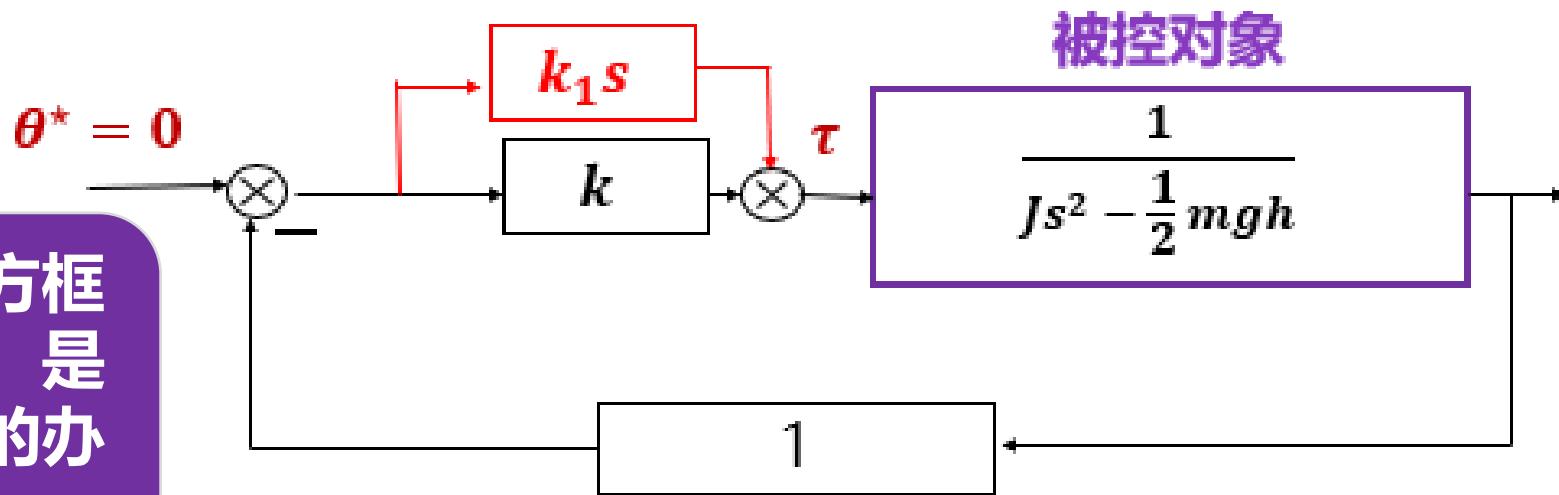
【测试】轮式机器人平衡控制改进方法的结构图

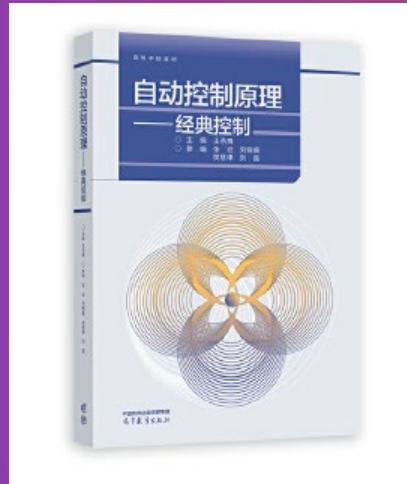
$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{1}{2}mgh\theta + \tau$$

其中俯仰角为 $\theta$ , 机器人主体质量为 $m$ , 高度为 $h$ 转动惯量为 $J$   
机器人主体受到重力的转矩和电机作用的转矩 $\tau$



添加的红色方框  
为理想单元，是  
否还有其他的办  
法呢？





## 第二章：控制系统的数学模型 第5讲 控制系统的结构图-Part2

Block diagram of Control Systems – Part 2

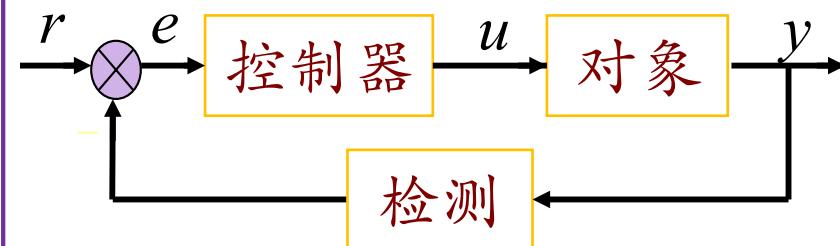
### 本讲内容

一、结构图的等效变换(续)

二、小组测试与讨论

三、案例分析

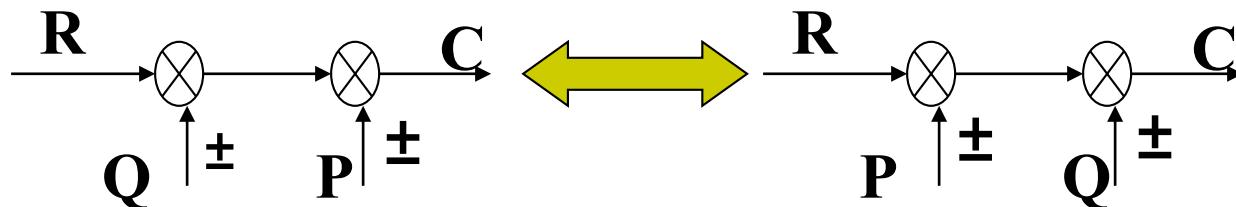
### 典型控制结构图



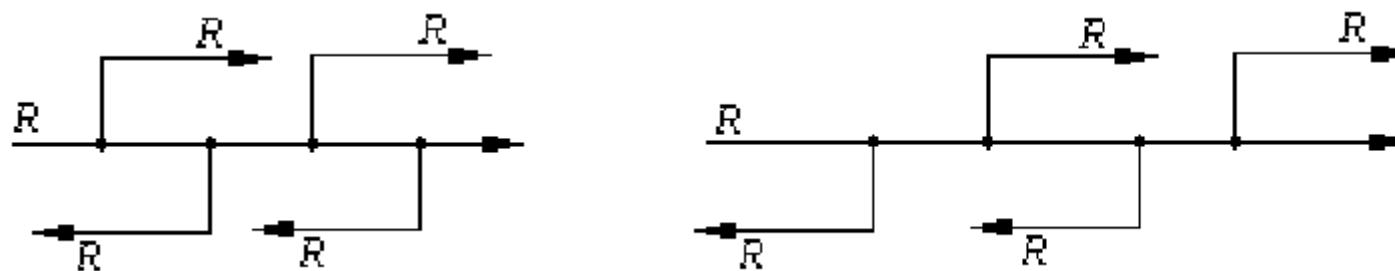
# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【法则6】相邻综合点的移动/相邻引出点的移动

两个或多个相邻的综合点可以任意移动



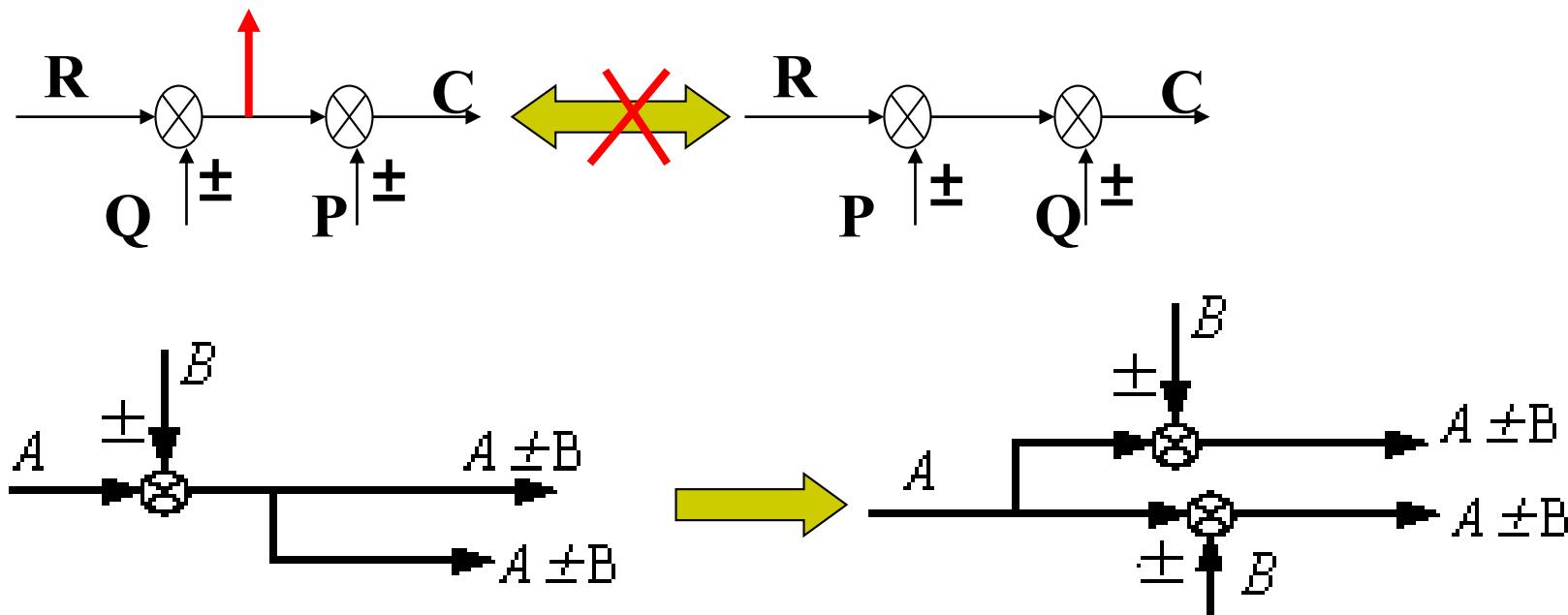
两个或多个相邻的引出点可以任意移动



# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【法则6】相邻综合点的移动/相邻引出点的移动

注意：引出点与综合点间的移动

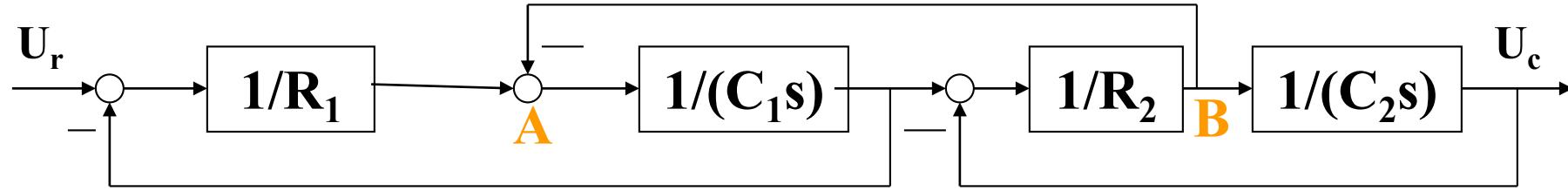


! 引出点与综合点间一般不做移动。

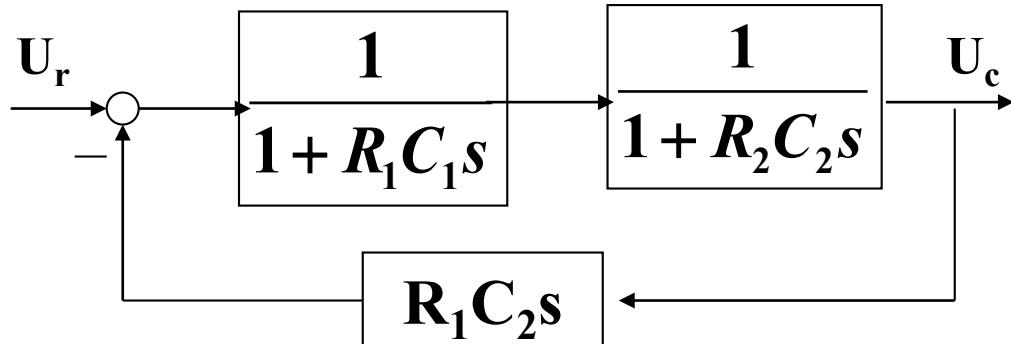
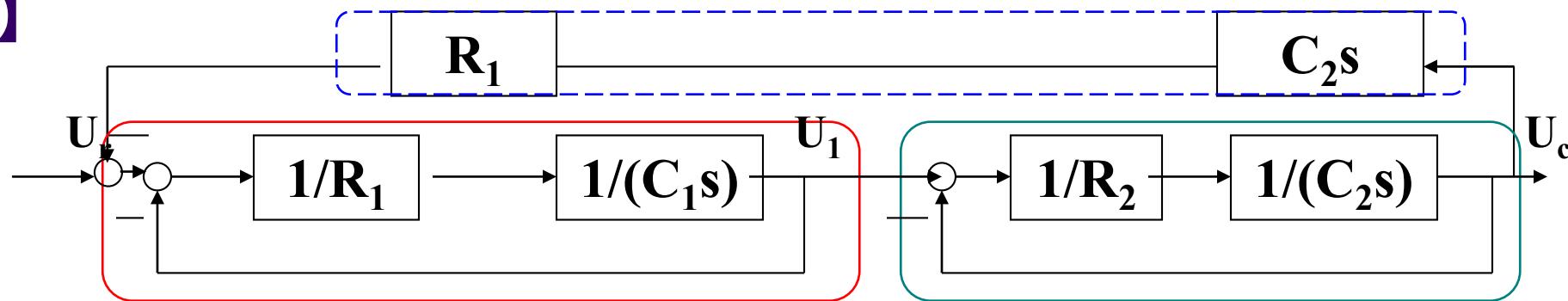
! 等效变换时，引出点与综合点尽量向同类移动。

# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【例题1.1】具有交叉回路的结构图等效变换



【解】



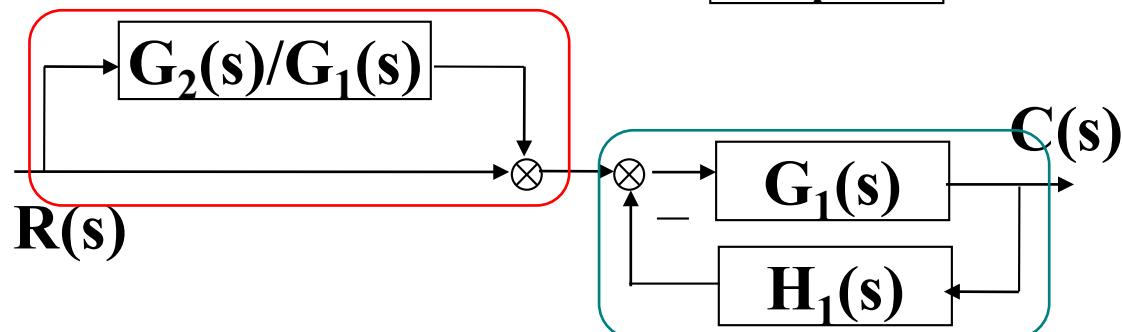
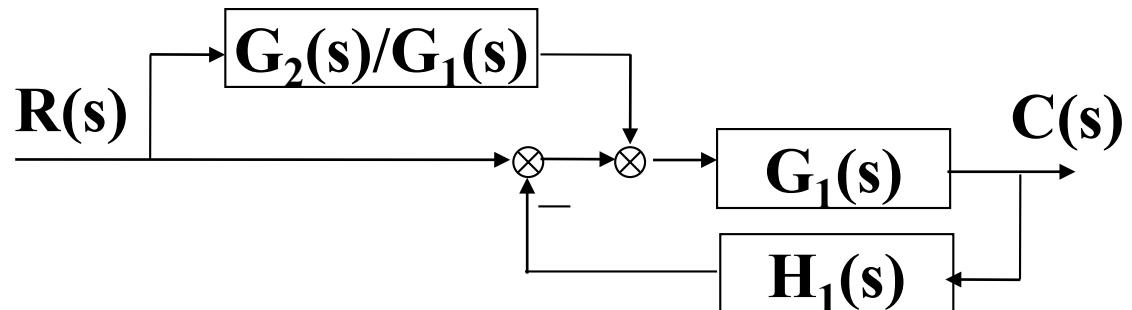
则系统的传递函数

$$G(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2)s + 1}$$

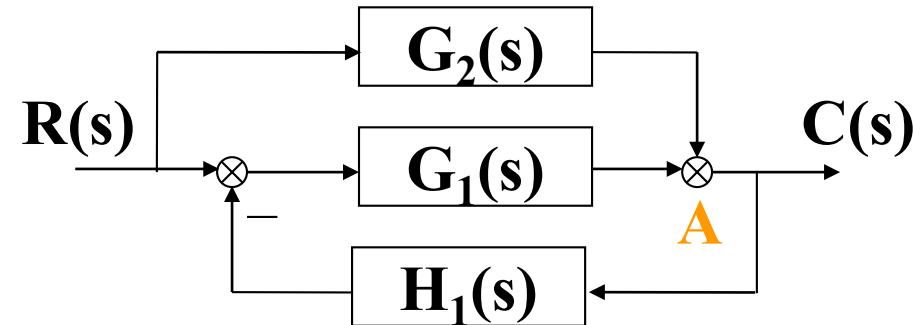
# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【例题1.2】具有顺馈和反馈交叉回路的结构图等效变换

【解】将综合点A前移，得到



$$R(s) \rightarrow \left[ 1 + \frac{G_2(s)}{G_1(s)} \right] \rightarrow \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)H_1(s)} \rightarrow C(s)$$



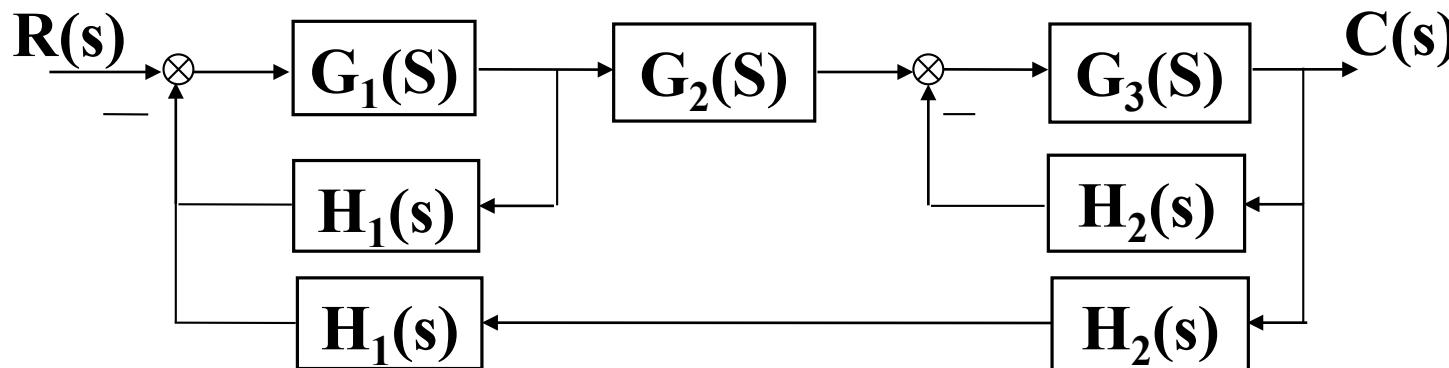
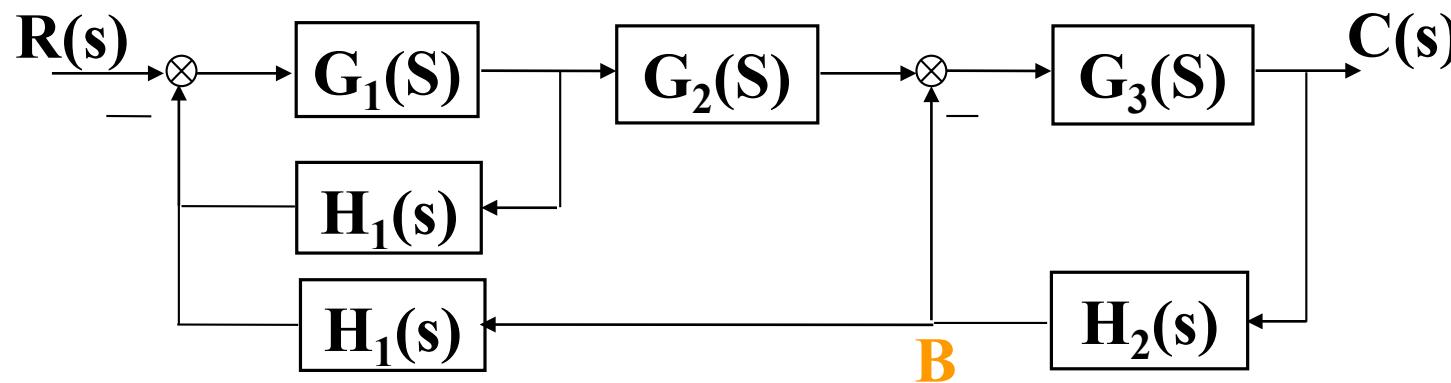
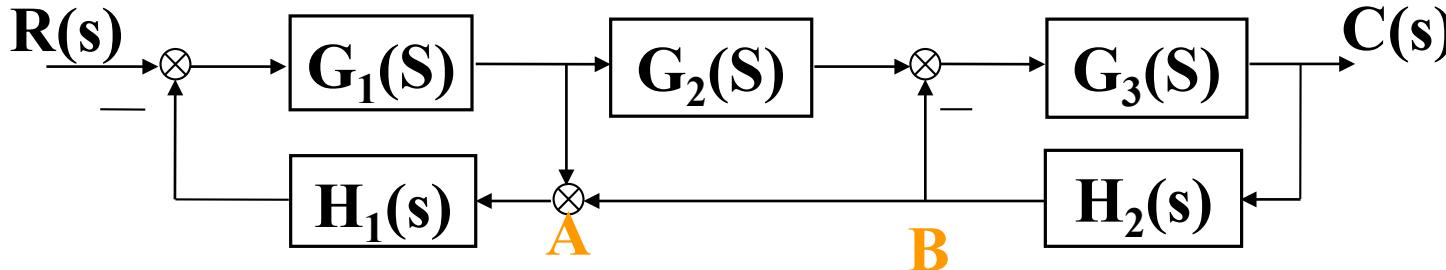
则系统的传递函数

$$G(s) = \frac{G_1(s) + G_2(s)}{1 + G_1(s)H_1(s)}$$

# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【例题1.3】具有复杂反馈通路的结构图等效变换

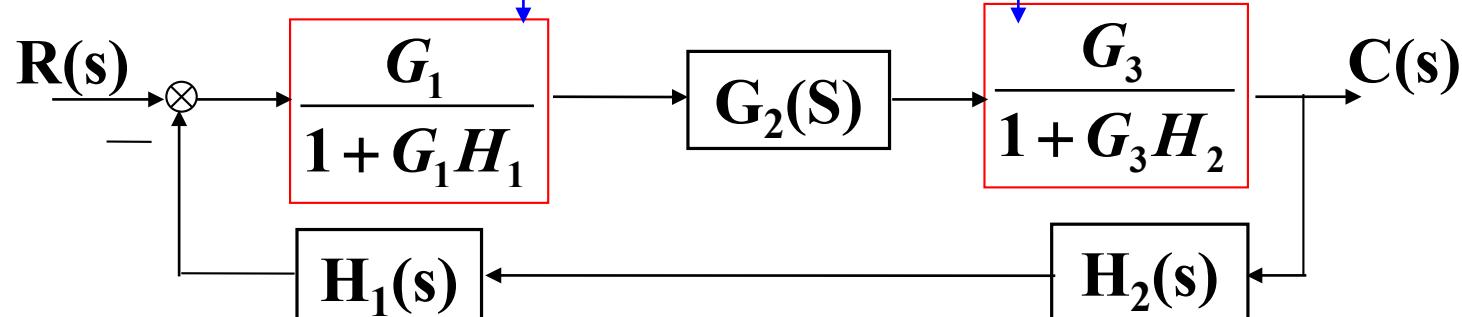
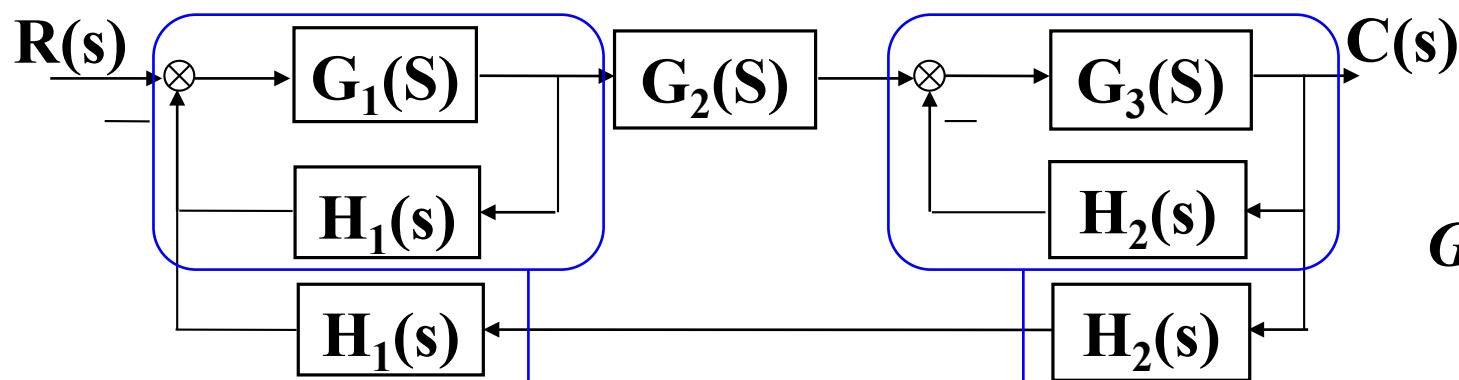
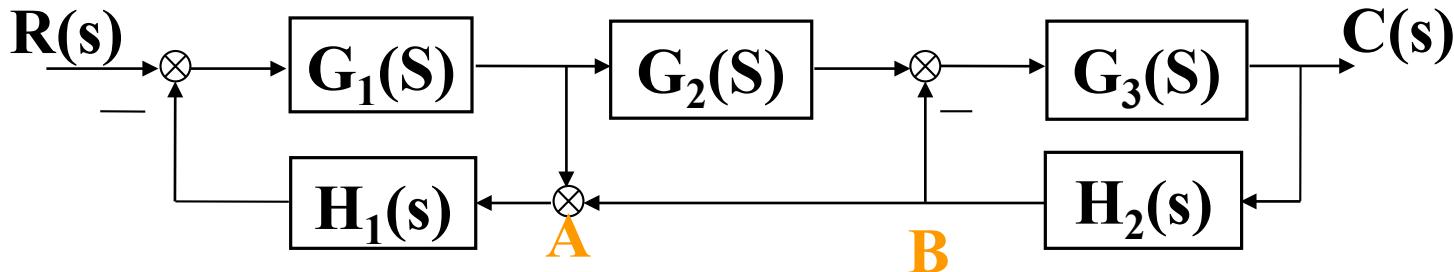
【解】



# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【例题1.3】具有复杂反馈通路的结构图等效变换

【解】

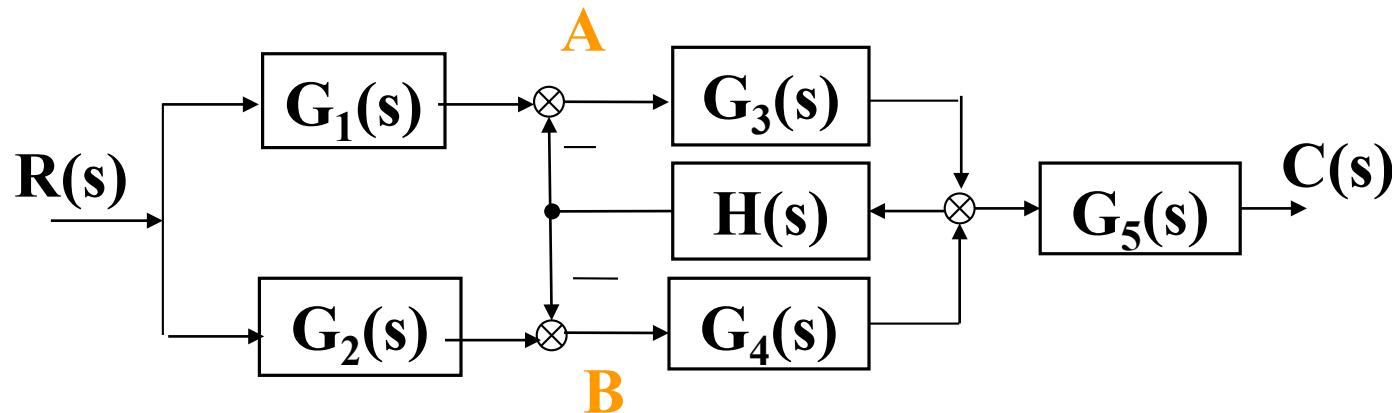


则系统的传递函数

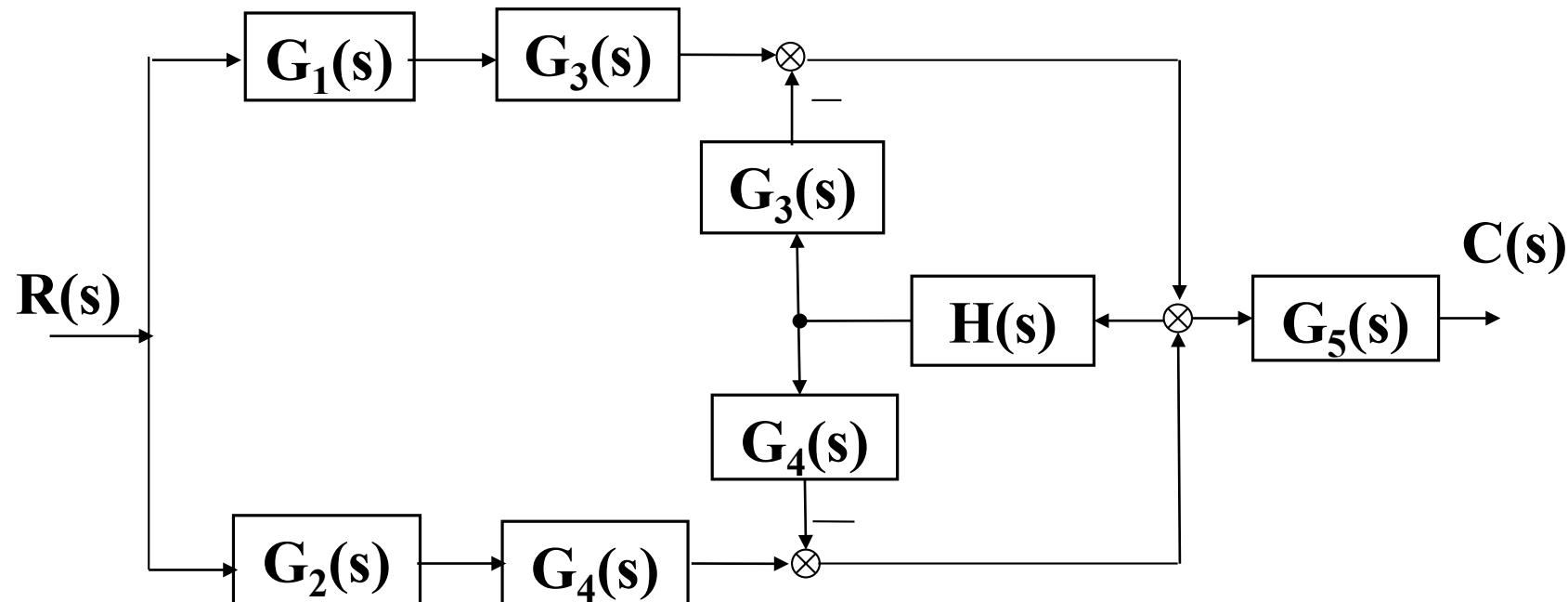
$$G(s) = \frac{\frac{G_1 G_2 G_3}{(1+G_1H_1)(1+G_3H_2)}}{1 + \frac{G_1 G_2 G_3 H_1 H_2}{(1+G_1H_1)(1+G_3H_2)}}$$

# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【例题1.4】具有共用反馈通路的结构图等效变换

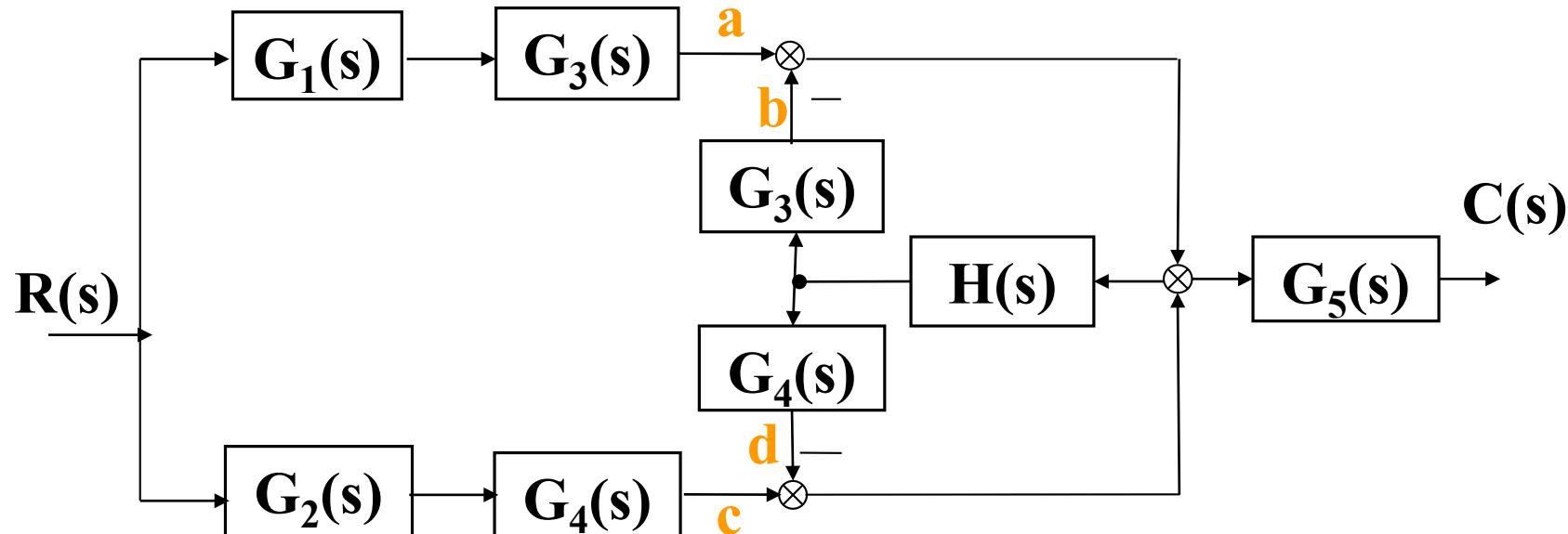


【解】将综合点向相邻的综合点移动

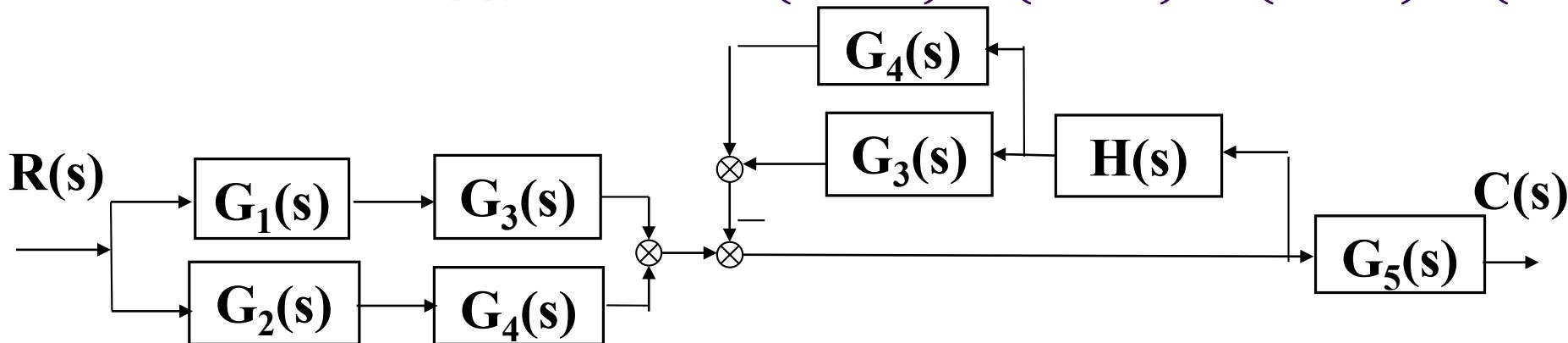


# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【例题1.4】具有共用反馈通路的结构图等效变换

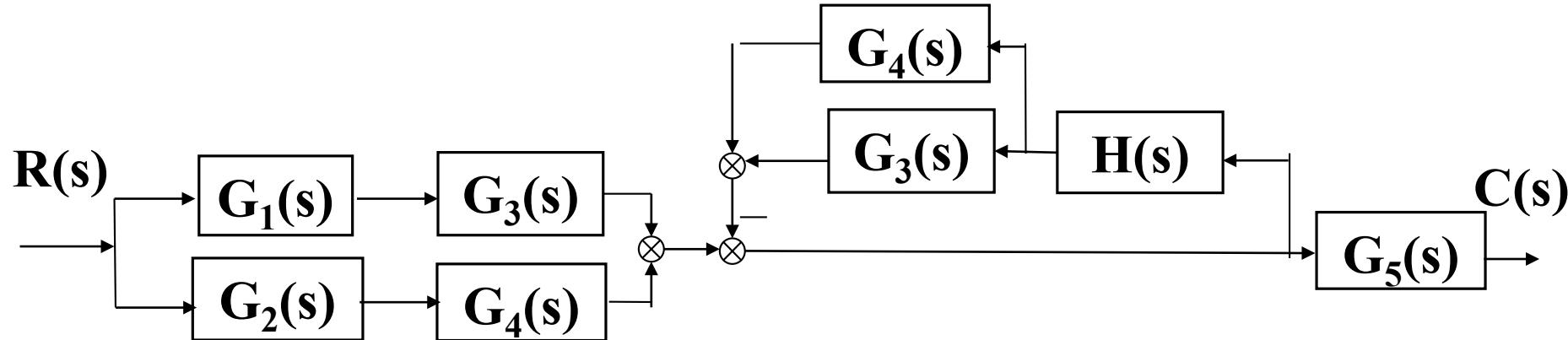


同时交换3个相邻的综合点的位置:  $(a - b) + (c - d) = (a + c) - (b + d)$

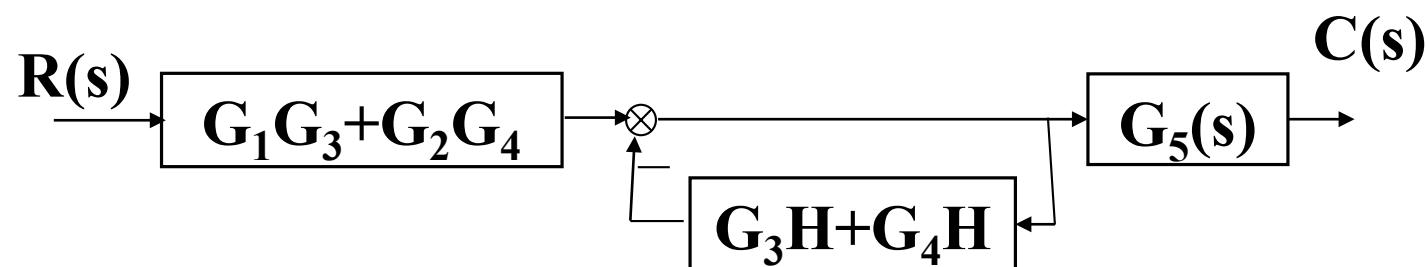


# 一、结构图的等效变换 (续)

## 【例题1.4】具有共用反馈通路的结构图等效变换



简化两处并联

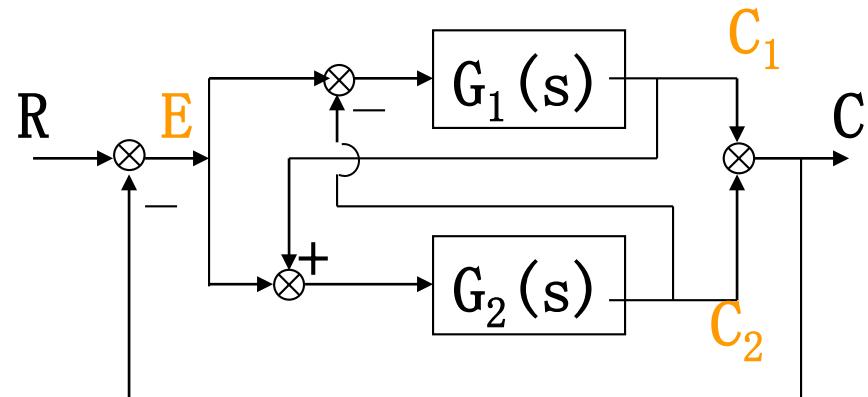


则系统的传递函数

$$G(s) = \frac{(G_1G_3 + G_2G_4)G_5}{1 + G_3H + G_4H}$$

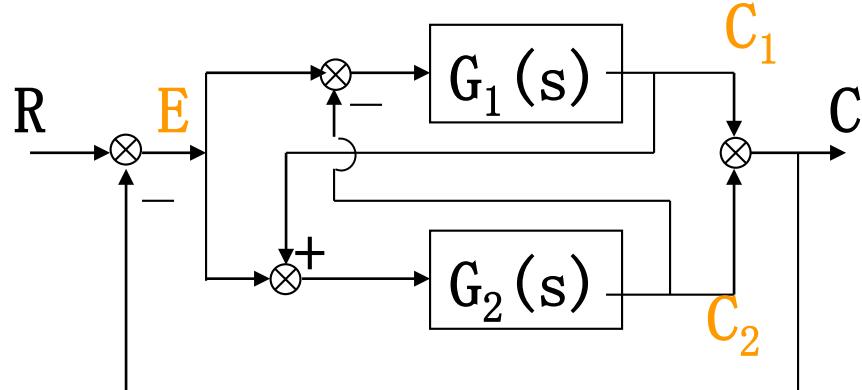
# 一、结构图的等效变换 (续)

**【测试】** 请用结构图化简的方法求系统的传递函数

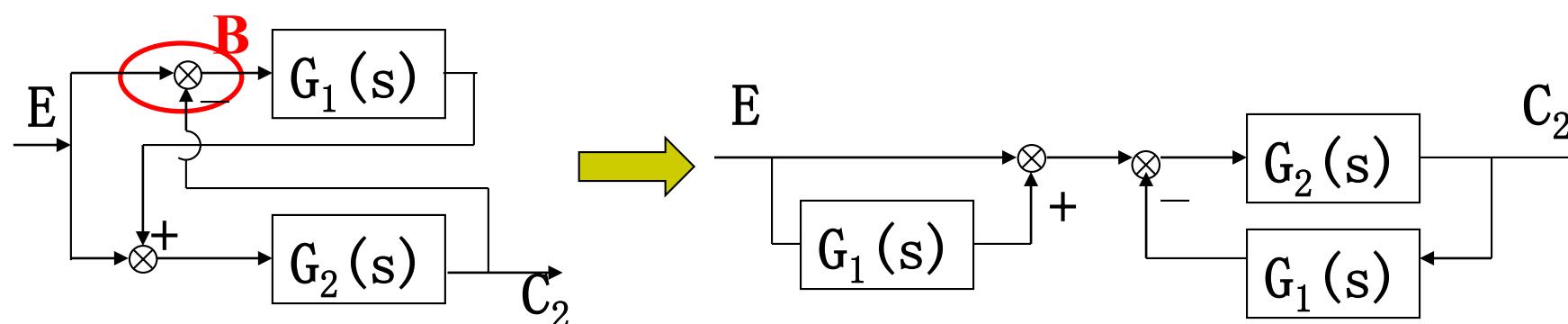
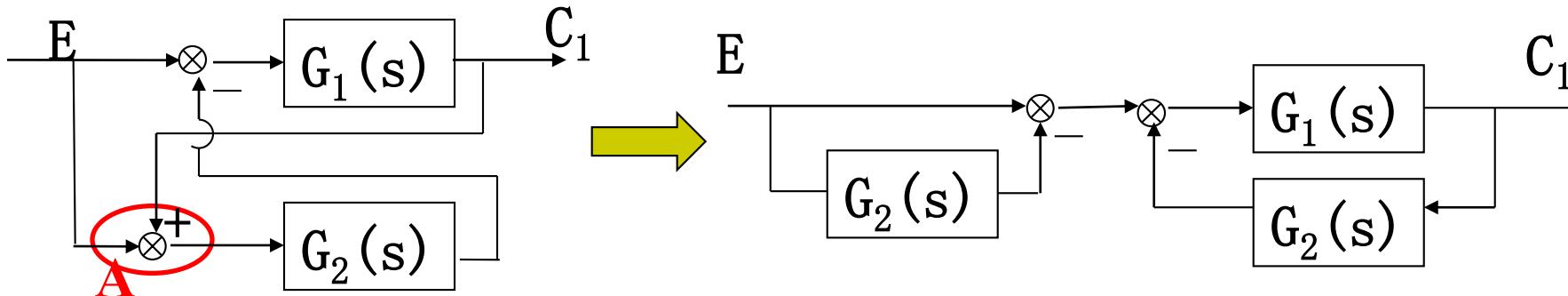


# 一、结构图的等效变换 (续)

【测试】请用结构图化简的方法求系统的传递函数

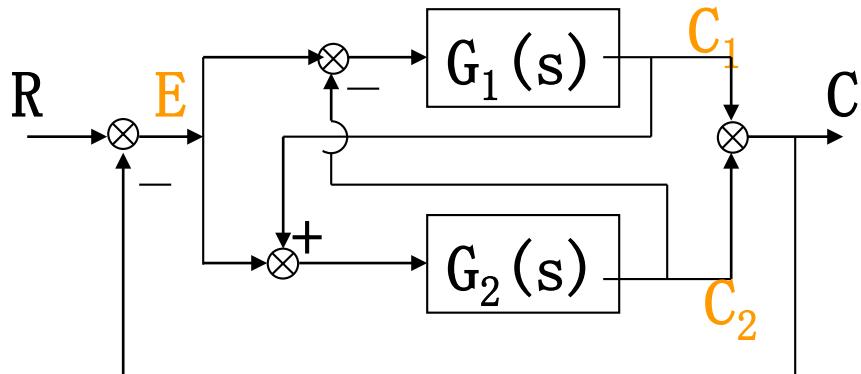


【解】

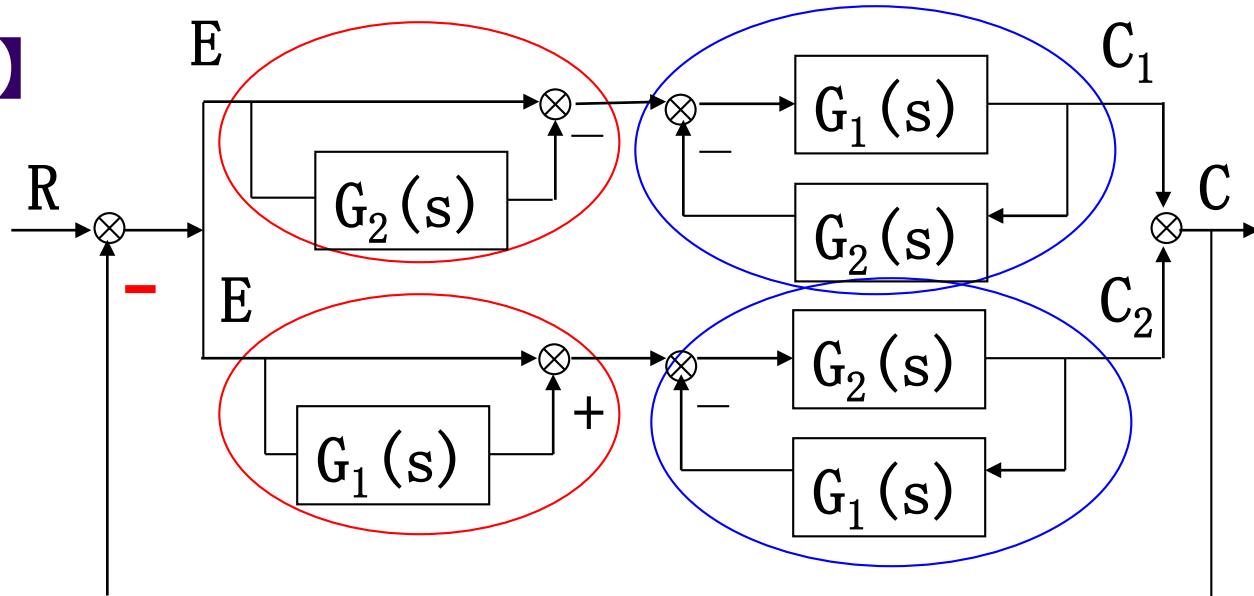


# 一、结构图的等效变换 (续)

【测试】请用结构图等效变换的方法求系统的传递函数



【解】



从而得到传递函数

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

## 二、小组测试与讨论

【测试&讨论】请用结构图等效变换的方法求出系统的传递函数

-- 研讨型授课

- 最快完成且正确的小组，每个组员加2个课堂积分；
- 完成且正确的小组，每个组员加1个课堂积分；
- 检查发现出错误的同学加1个课堂积分。

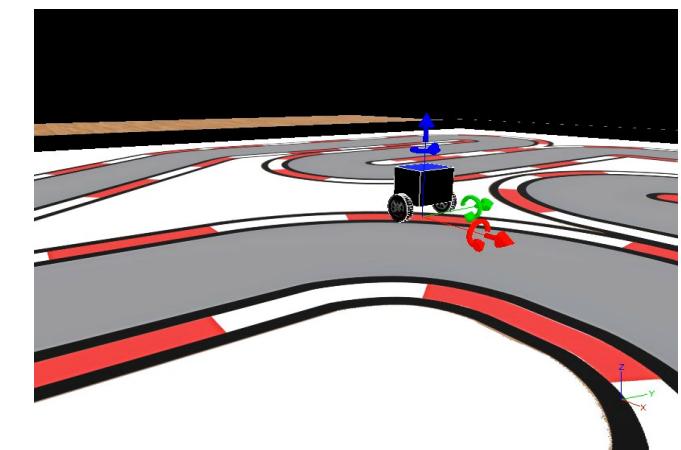
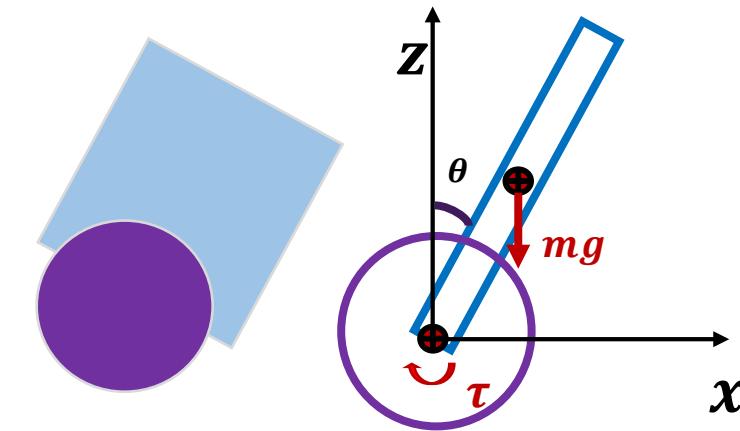
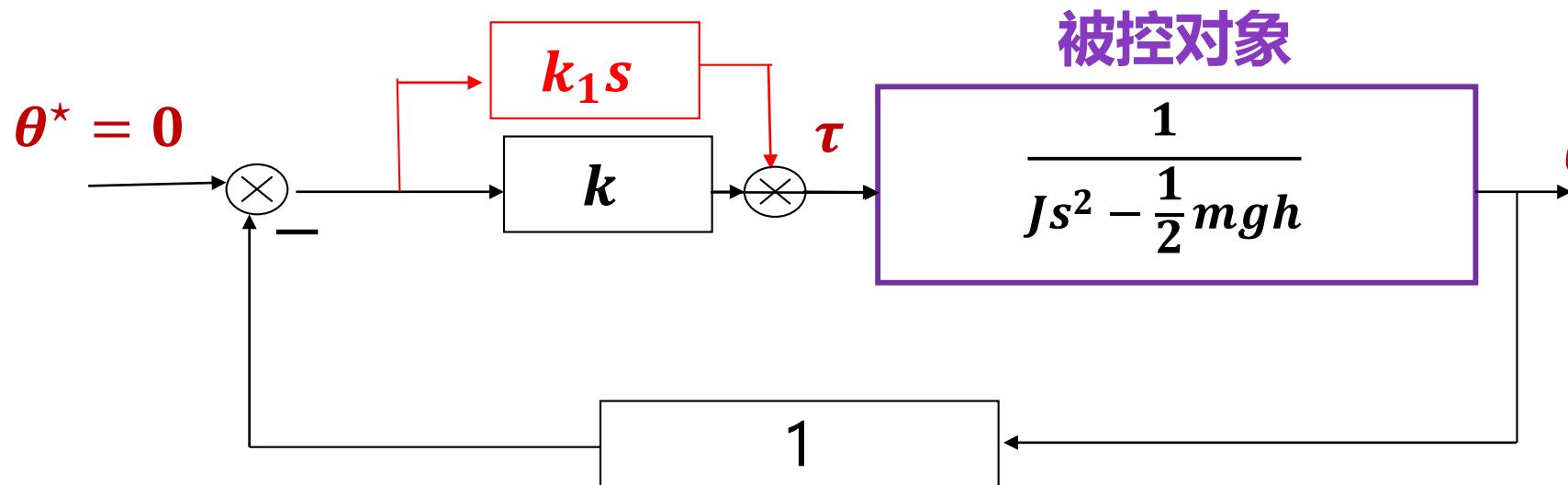
### 三、结构图等效变换的基本法则

【测试】轮式机器人平衡控制改进方法的结构图

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{1}{2}mgh\theta + \tau$$

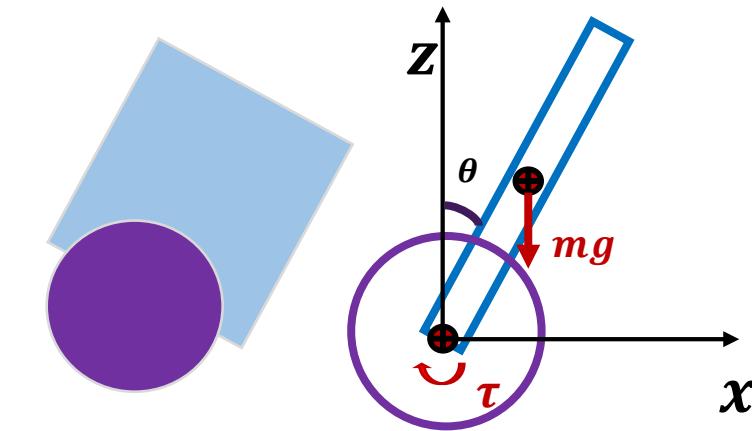
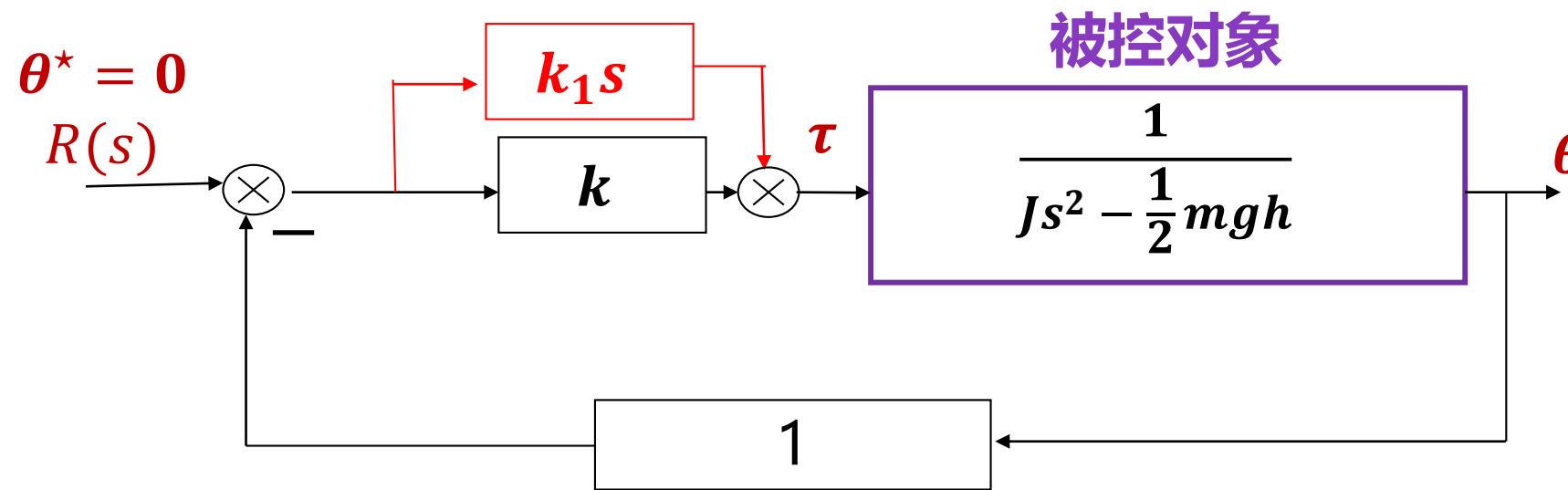
其中俯仰角为 $\theta$ , 机器人主体质量为 $m$ , 高度为 $h$ 转动惯量为 $J$   
机器人主体受到重力的转矩和电机作用的转矩 $\tau$

设计控制量 $\tau = -k\theta - k_1\dot{\theta}$



### 三、结构图等效变换的基本法则

【测试】轮式机器人平衡控制改进方法的结构图



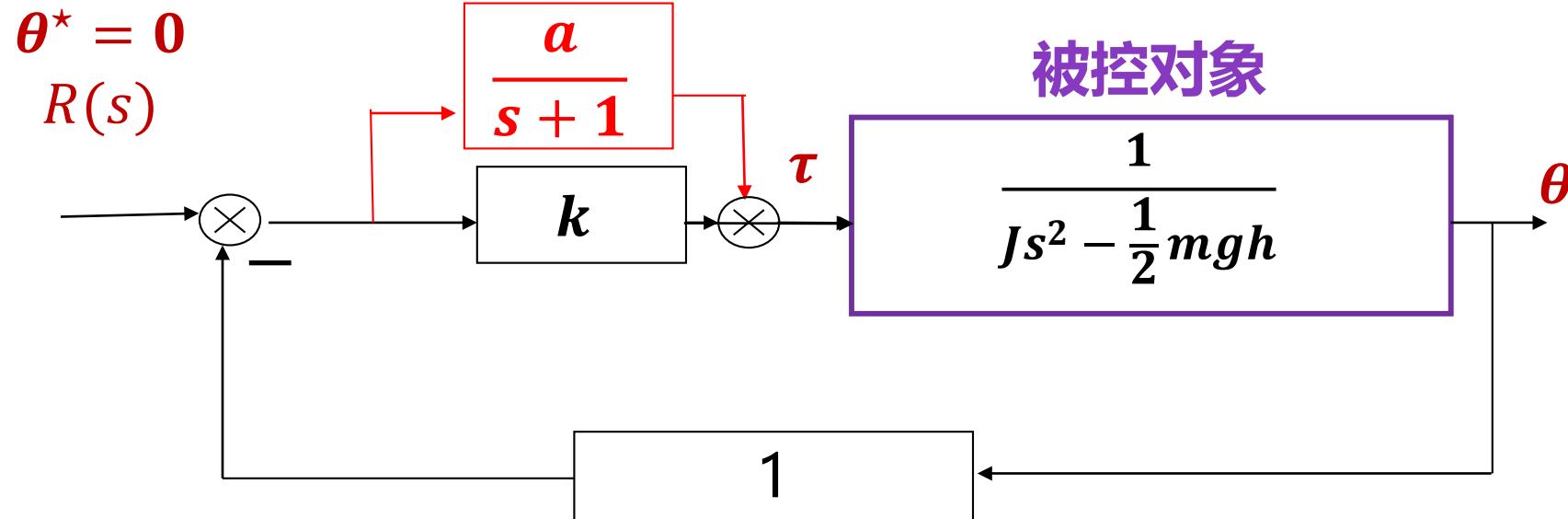
传递函数

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{k_1 s + k}{J s^2 + k_1 s + k - \frac{1}{2} mgh}$$

添加的红色方框为理想单元，是否还有其他的办法呢？

### 三、结构图等效变换的基本法则

【测试】轮式机器人平衡控制改进方法的结构图



- 控制系统的结构图：
  - 结构图的等效变换法则：5个法则 + 1个法则
  - 结构图的等效变化实操：4道例题
  
- 作业：
  - 参考书 2.9
  - 预习信号流图