第四节　系统的动态结构图

求取传递函数时，需要对微分方程组或经拉氏变换后的代数方程组进行消元。如果方程组的子方程数较多，消元仍是比较麻烦，而且消元之后，仅剩下输入输出两个变量,信号中间的传递过程得不到反映。而采用结构图或信号流图，将便于求取系统的传递函数，同时能形象直观地表明信号在系统或元件中的传递过程。因此，结构图和信号流图作为一种数学模型，在控制理论中得到了广泛的应用。

一、动态结构图的概念

二、动态结构图的建立(绘制方法)

三、结构图的等效变换

一、动态结构图的概念(组成)

把各环节或元件的传递函数填在系统原理方块图的方块中，并把相应的输入输出以拉氏变换来表示，就可得到传递函数方块图。

这种图既说明了信号之间的数学物理关系，又描述了系统的动态结构，因此称为系统的动态结构图。

以RC网络为例说明动态结构图的一般构成。

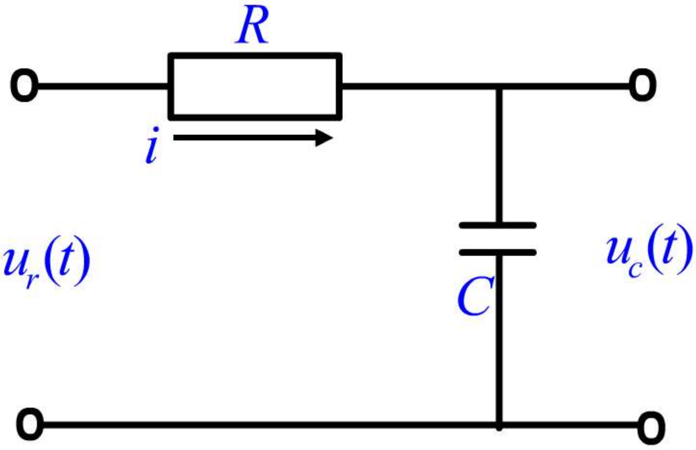


图2-17　RC网络

*RC*网络的微分方程式为:

$$i(t)R+u_c(t)=u_r(t) \quad (1)$$

$$u_c(t)=\frac{1}{C}\int i(t)\mathrm{d}t \quad (2)$$

$$u_r-u_c=i(t)R \quad (3)$$

$$U_r(s)-U_c(s)=RI(s) \quad (2\text{-}35a)$$

$$U_c(s)=\frac{1}{Cs}I(s) \quad (2\text{-}35b)$$

$$\frac{1}{R}[U_r(s)-U_c(s)]=I(s) \quad (2\text{-}35c)$$

$$\frac{1}{R}[U_r(s)-U_c(s)]=I(s) \quad \text{(2-35c)} \qquad U_c(s)=\frac{1}{Cs}I(s) \quad \text{(2-35b)}$$

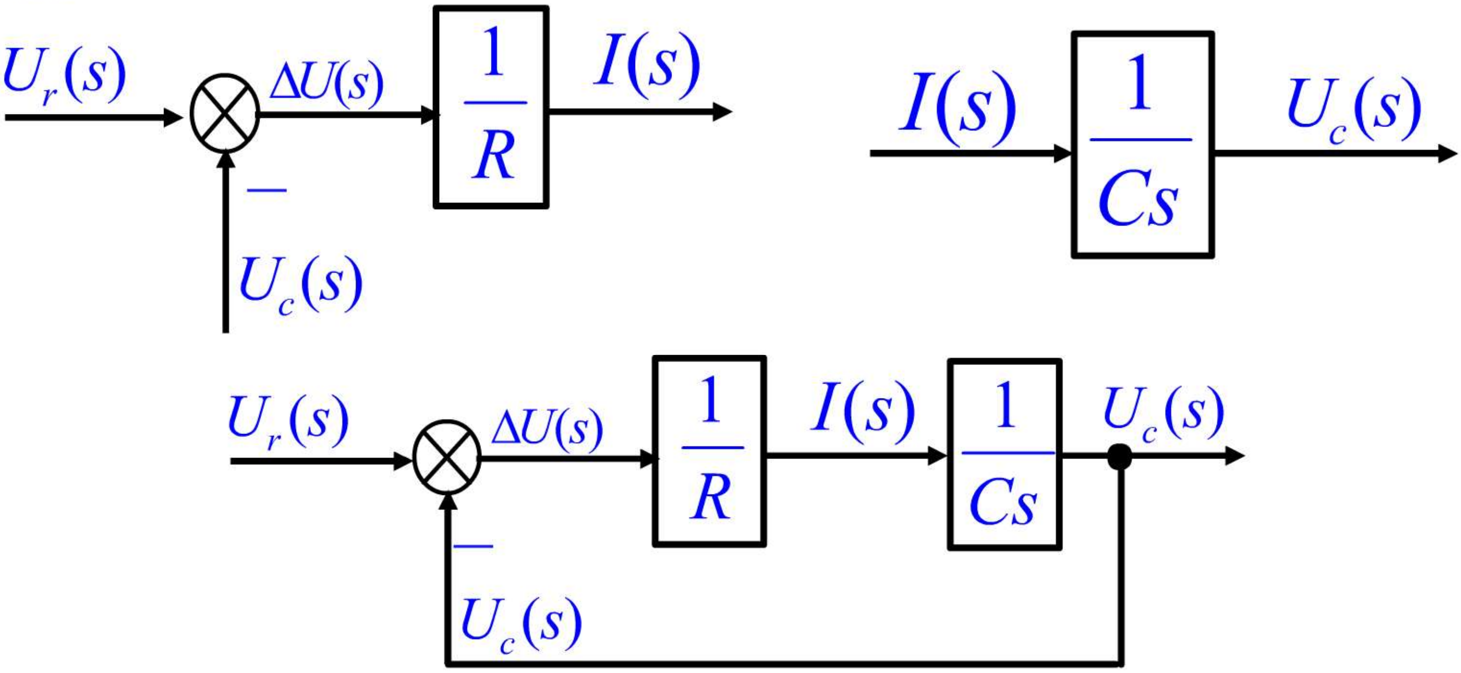


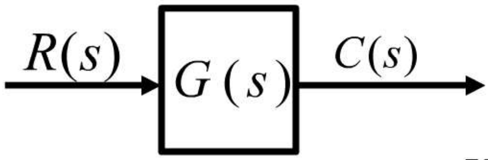
图2-18　RC网络的结构图

图中各符号的说明：

(1) 信号线 ⟶ 箭头表示信号的传递方向，信号只能单向传递。

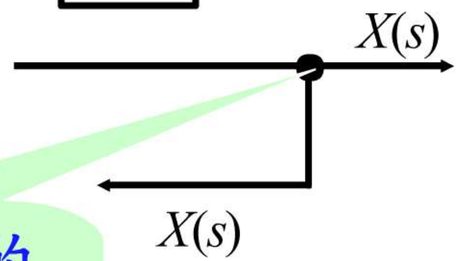
(2) 综合点 (信号比较点)  表示信号的代数和。(只有具有相同量纲的量才可以进行加减法运算)

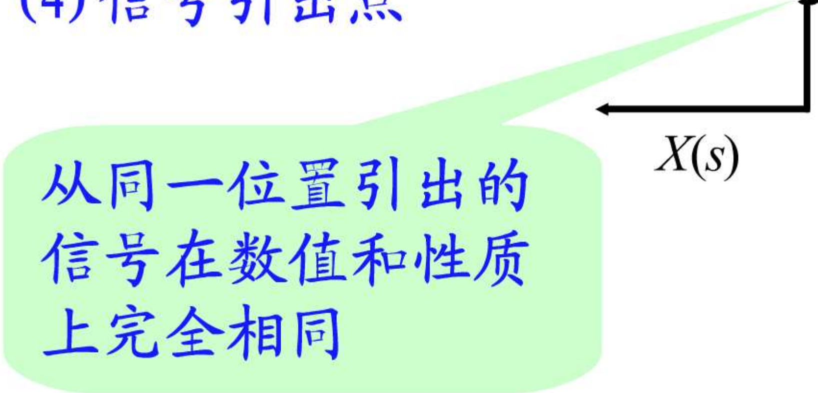
(3) 方块单元



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

(4) 信号引出点





二、系统动态结构图的建立(绘制方法)

(1)按照系统的结构和工作原理，列出描述系统各元部件的运动(微分)方程式。

(2)在零初始条件下，对各元件的微分方程进行拉氏变换，求出每个环节的传递函数，并将它们用结构图的形式表示出来。

(3)按系统中各变量的传递顺序，依次将各环节的结构图连接起来，置系统的输入变量于左端，输出变量于右端，便得到系统的结构图。

例11　位置随动系统如图2-19所示，试建立系统的结构图。

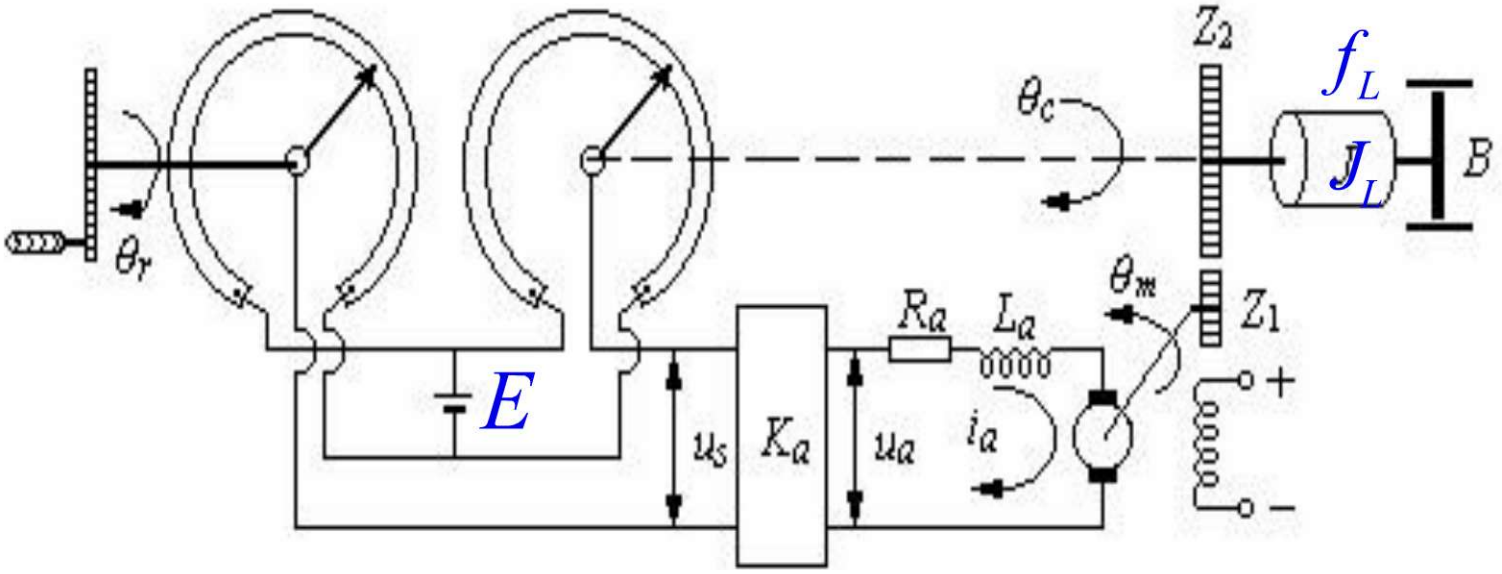


图2-19　位置随动系统原理图

系统各部分微分方程如下：

$$\theta_e(t)=\theta_r(t)-\theta_c(t) \quad \text{(2-36a)}$$

$$u_s(t)=K_s\theta_e(t) \quad \text{(b)} \qquad u_a(t)=K_a u_s(t) \quad \text{(c)}$$

$$u_a(t)=R_a i_a(t)+L_a\frac{di_a(t)}{dt}+E_b(t) \quad \text{(d)}$$

$$M_d=C_m i_a(t) \quad \text{(e)}$$

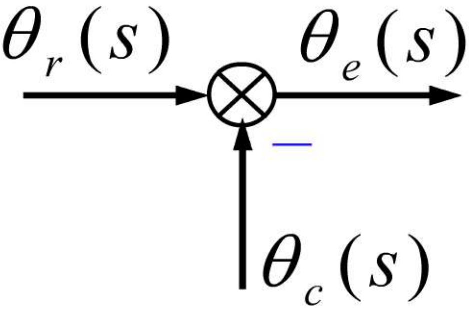
$$J\frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2}=M_d-M_L-f\frac{d\theta_m}{dt} \quad \text{(f)}$$

$$E_b(t)=K_e\frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad \text{(g)} \qquad \theta_c(t)=\frac{1}{i}\theta_m(t) \quad \text{(h)}$$

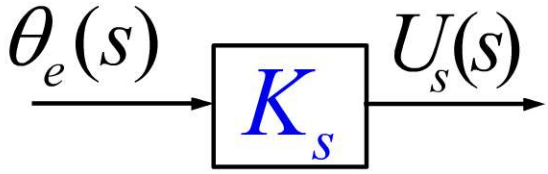
11 12

$$\theta_e(s)=\theta_r(s)-\theta_c(s) \quad \textbf{(2-37a)}$$

$$U_s(s)=K_s\theta_e(s) \quad \textbf{(b)}$$



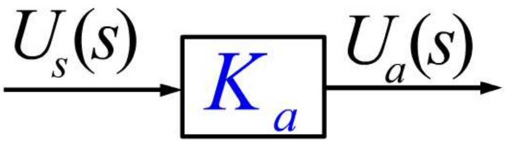
(a)



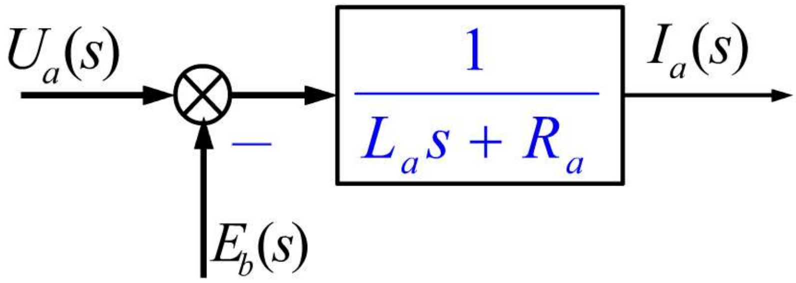
(b)

$$U_a(s)=K_aU_s(s) \quad \textbf{(c)}$$

$$I_a(s)=\frac{U_a(s)-E_b(s)}{L_as+R_a} \quad \textbf{(d)}$$

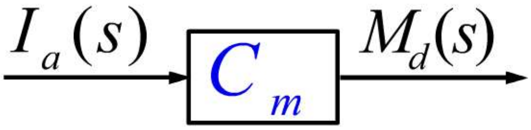


(c)



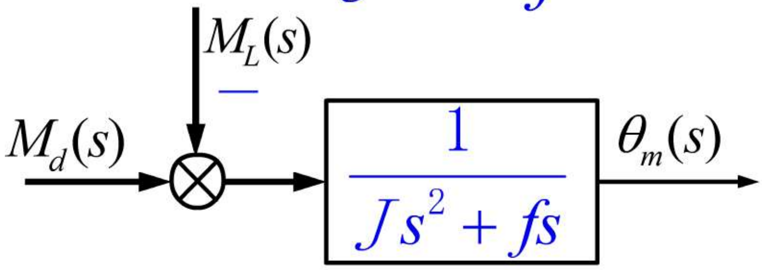
(d)

$$M_d(s) = C_m I_a(s) \quad \text{(e)}$$



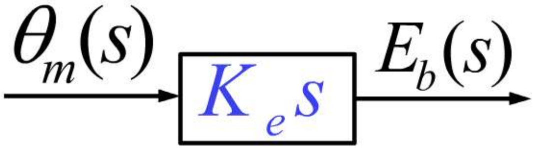
(e)

$$\theta_m(s) = \frac{M_d(s) - M_L(s)}{Js^2 + fs} \quad \text{(f)}$$



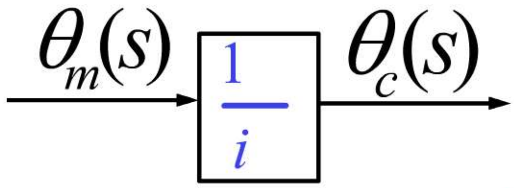
(f)

$$E_b(s) = K_e s \theta_m(s) \quad \text{(g)}$$



(g)

$$\theta_c(s) = \frac{1}{i} \theta_m(s) \quad \text{(h)}$$



(h)

按系统中各元件的相互关系，分清各输入量和输出量，将各结构图正确地连接起来。

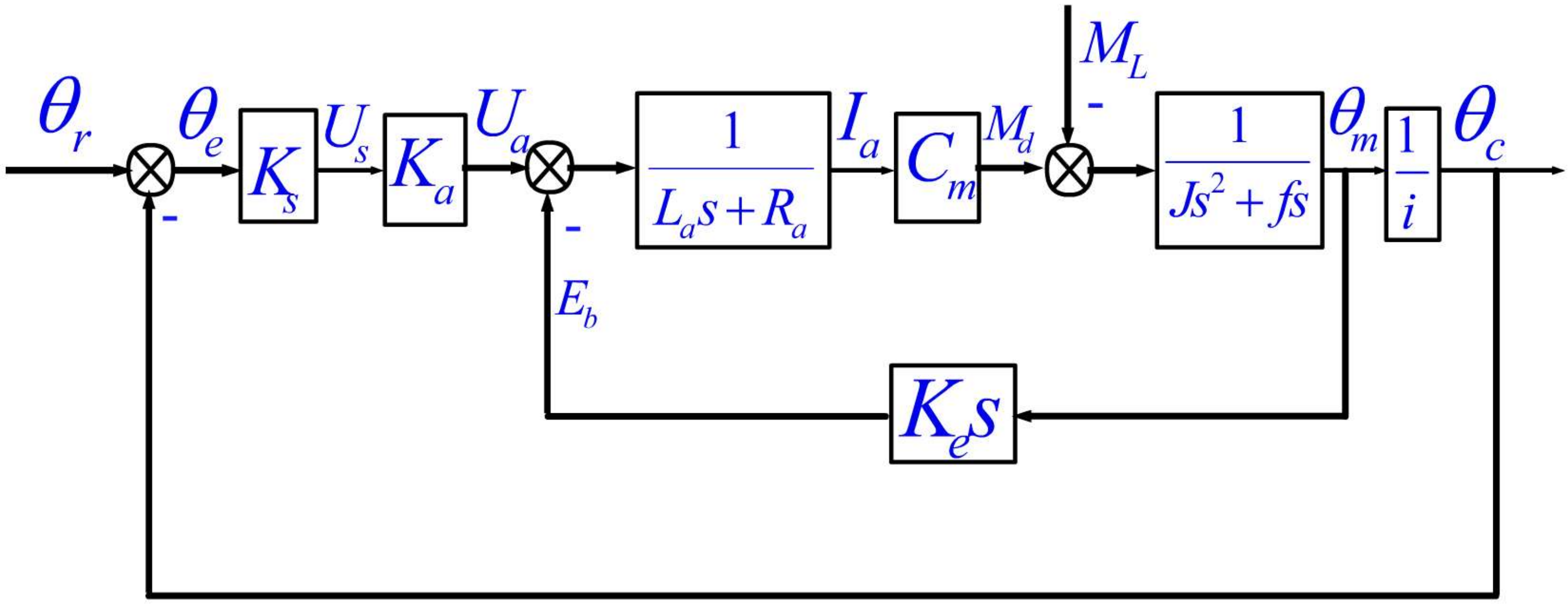


图2-20(a) 位置随动系统结构图

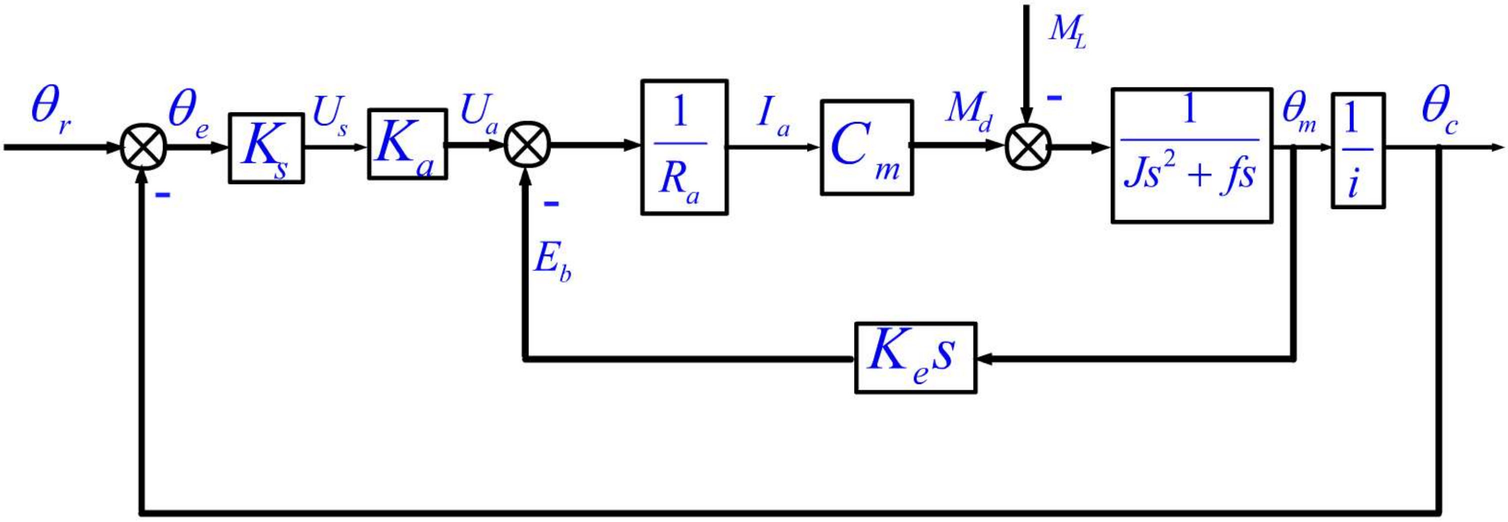


图2-20(b) La=0的位置随动系统结构图

练习 试绘制图2-21所示无源网络的结构图。

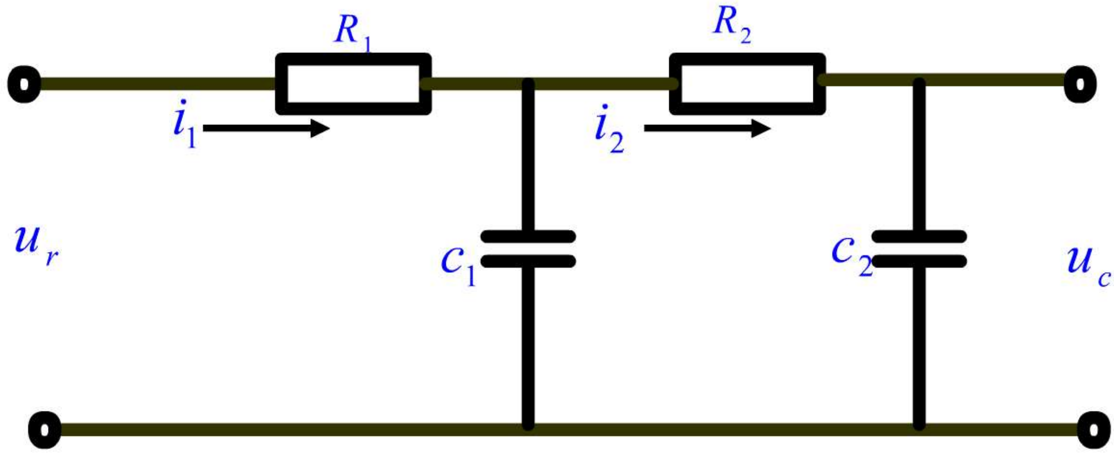


图2-21两级RC滤波网络

u_r为输入，u_c为输出。

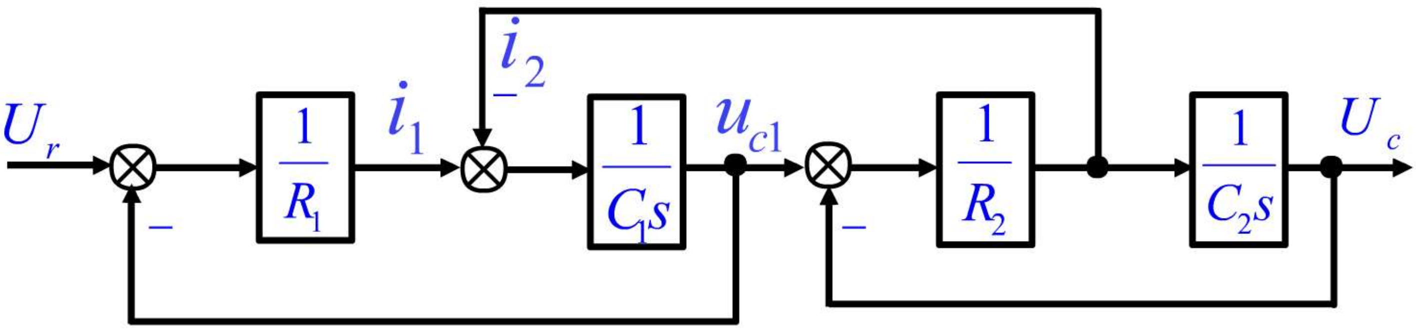


图2-22　例11网络结构图

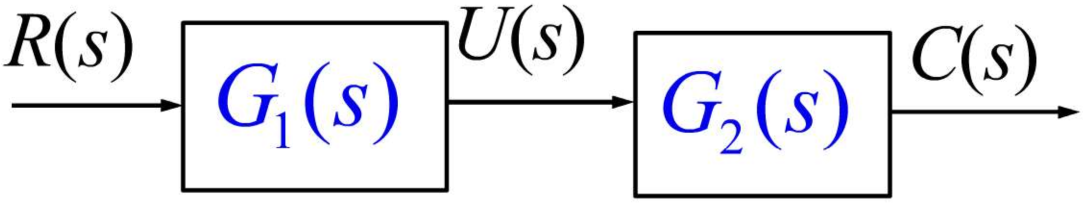
三 、结构图的等效变换

结构图的变换应按等效原理进行。

1. 结构图的基本组成形式

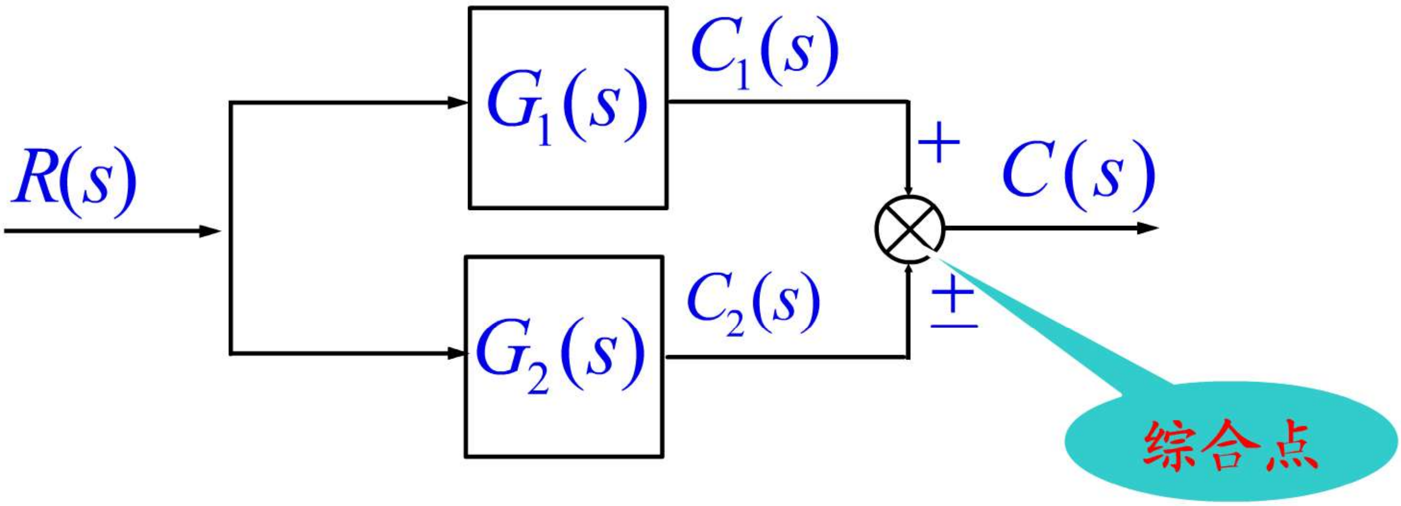
- (1) 串联连接
- (2) 并联连接
- (3) 反馈连接

串联连接　方框与方框首尾相连。前一个方框的输出，作为后一个方框的输入。



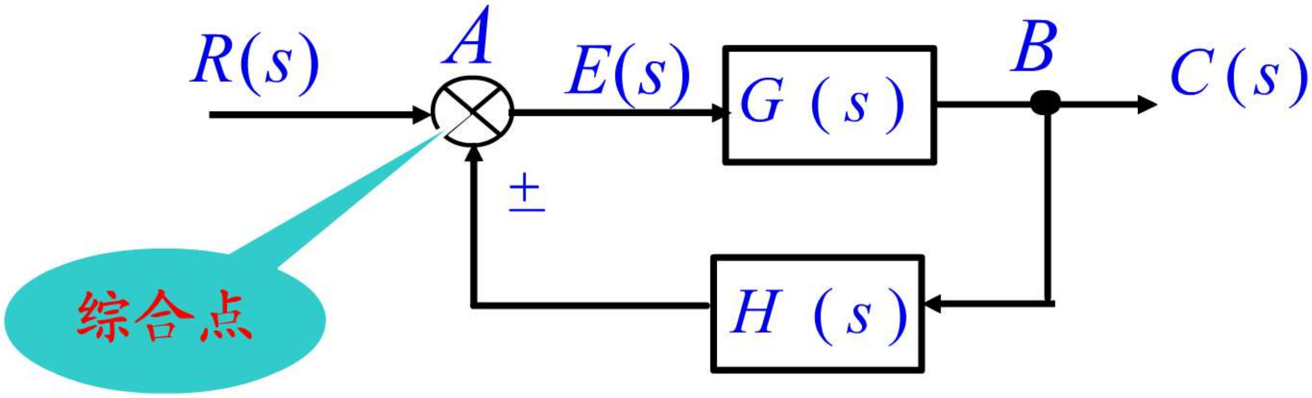
2-23 (a)串联连接

并联连接 两个或多个方框，具有同一个输入，而以各方框输出的代数和作为总输出。



2-23(b) 并联连接

反馈连接 一个方框的输出，输入到另一个方框，得到的输出再返回作用于前一个方框的输入端。



2-23(c) 反馈连接

2. 结构图的等效变换法则

(1) 串联方框的等效变换

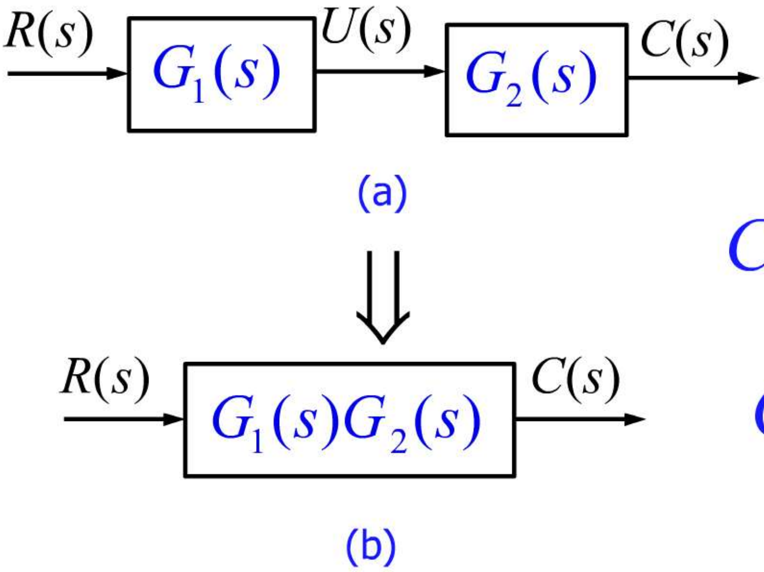


图2-24　串联结构的等效变换

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

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

$$\Downarrow$$

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

$$\Downarrow$$

$$G(s)=G_1(s)G_2(s) \qquad (2\text{-}38)$$

两个环节串联的等效传递函数，等于该两个传递函数的乘积。

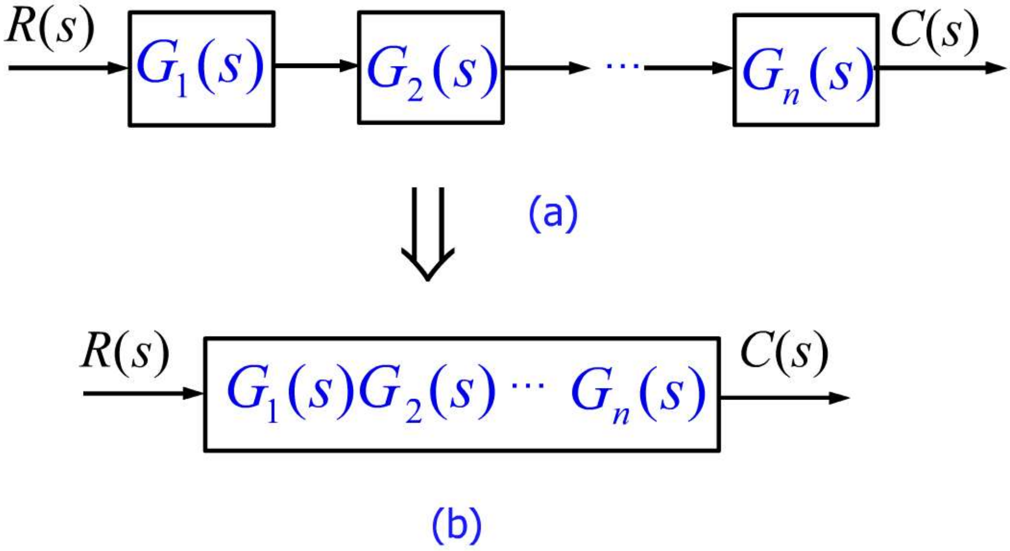


图2-25　n个方框串联的等效变换

结论

n个环节依次串联的等效传递函数，等于n个传递函数的乘积。即

$$G(s)=G(s)_1G_2(s)\cdots G_n(s)$$

(2) 并联连接的等效变换

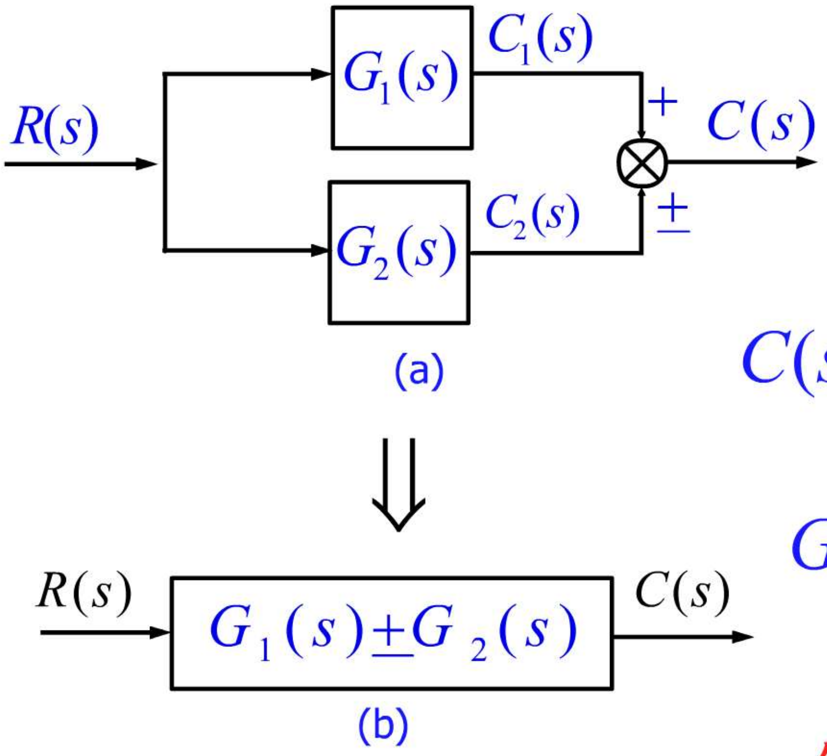


图2-26 两个方框并联的等效变换

$$C(s)=C_1(s)\pm C_2(s)$$

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

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

$$\Downarrow$$

$$C(s)=R(s)(G_1(s)\pm G_2(s))$$

$$\Downarrow$$

$$G(s)=G_1(s)\pm G_2(s) \qquad \textbf{(2-39)}$$

两个环节并联的等效传递函数,等于该两个传递函数的代数和.

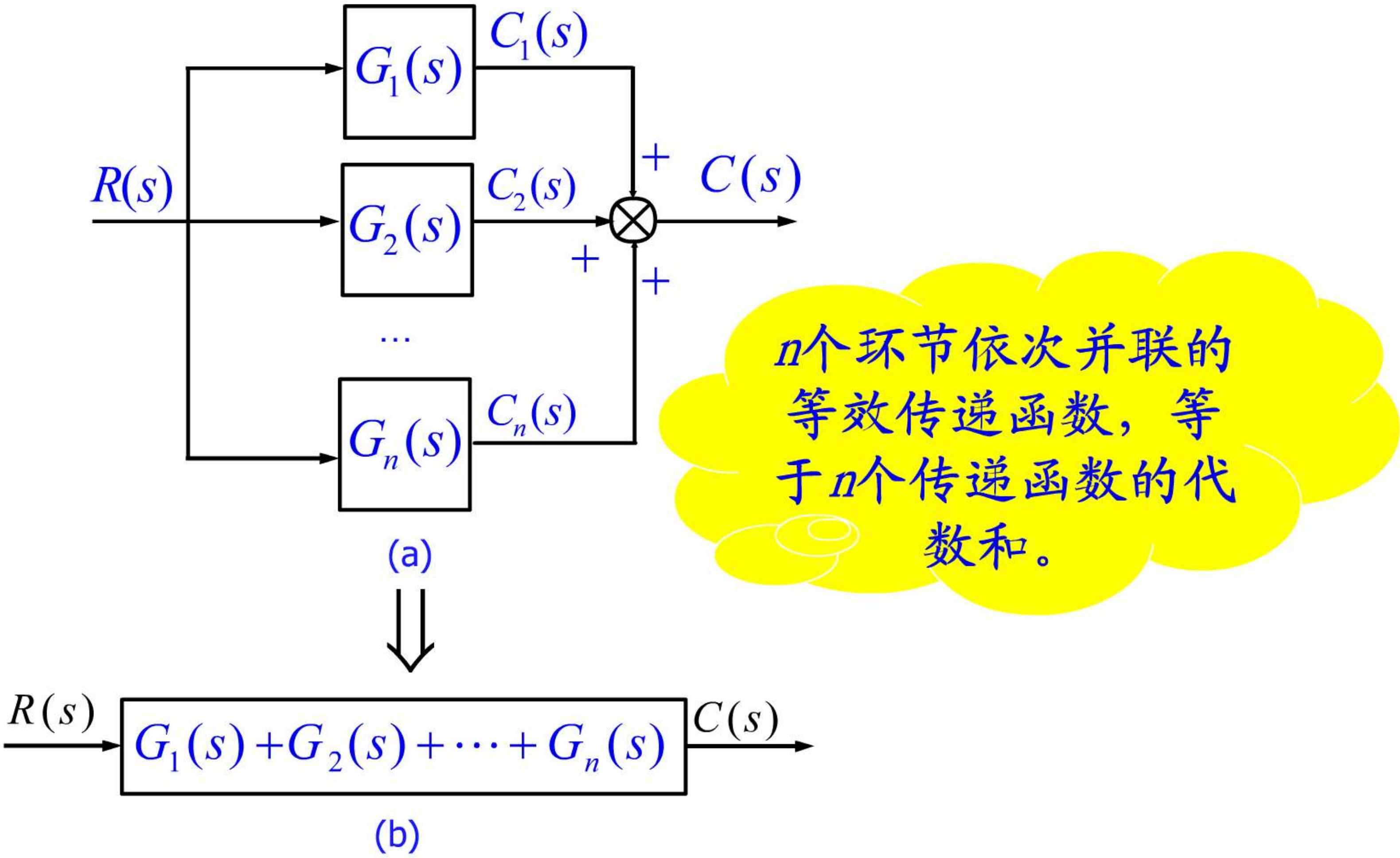
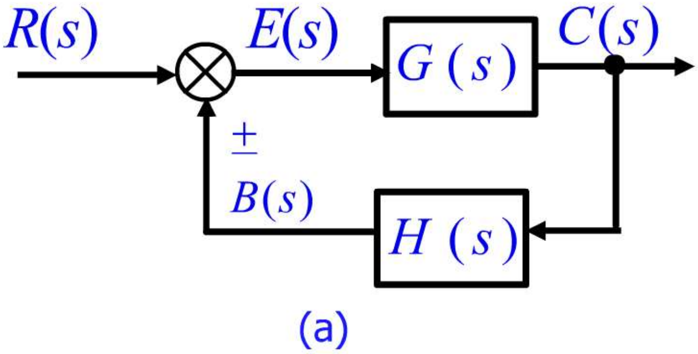


图2-27　n个方框并联的等效变换

(3) 反馈连接的等效变换



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

图2-28 反馈连接的等效变换

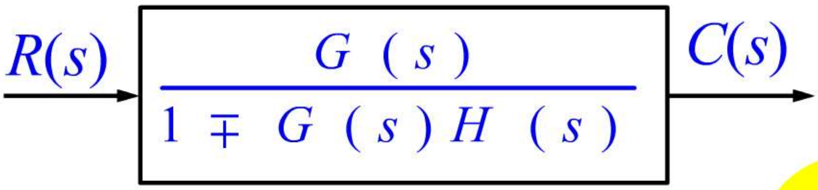
$$\Downarrow$$

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

$$[1\mp G(s)H(s)]C(s)=G(s)R(s)$$

$$\Downarrow$$

$$G_B(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1\mp G(s)H(s)} \qquad (2\text{-}40)$$



(b)

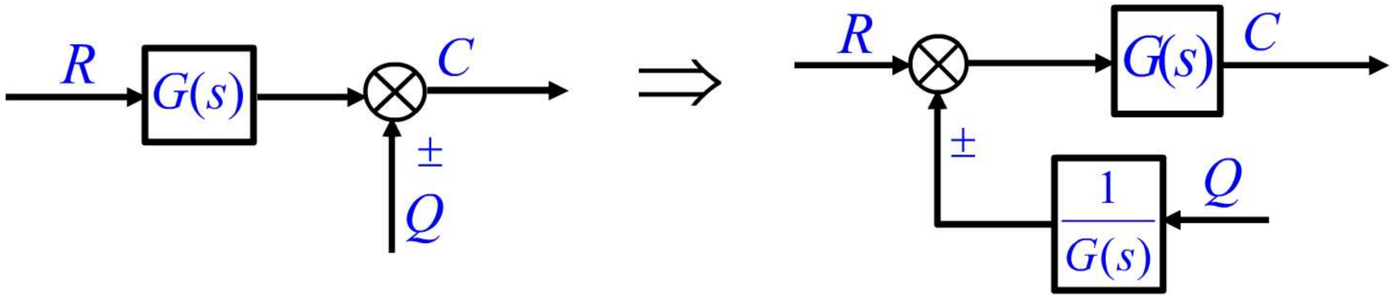
负号表示正反馈，正号表示负反馈

图2-28　反馈连接的等效变换

$$G_B(s)=\frac{G(s)}{1\mp G(s)}\tag{2-41}$$

(4) 综合点与引出点的移动

a. 综合点前移



(a) 原始结构图　　　(b)等效结构图

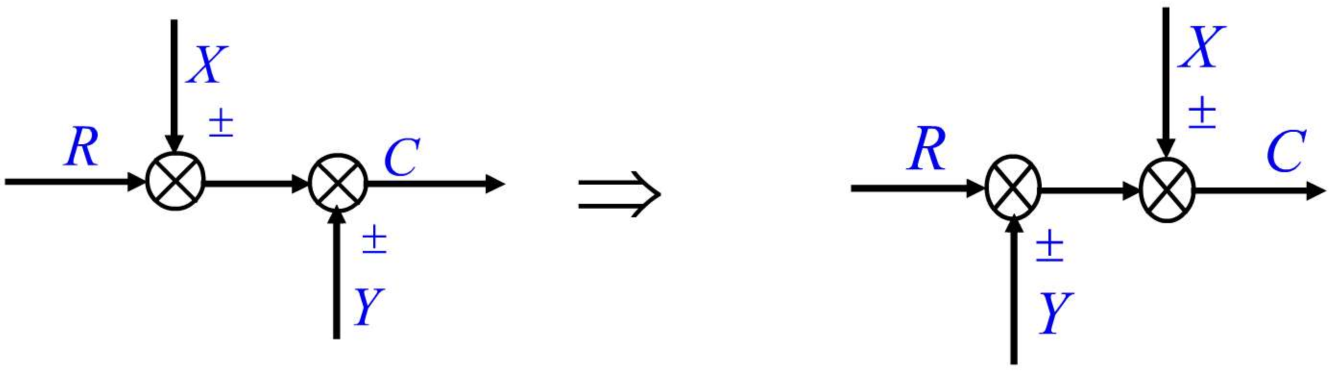
图2-29　综合点前移的变换

$$C = G(s)R \pm Q$$

$$C = G(s)[R \pm \frac{1}{G(s)}Q]$$

$$= G(s)R \pm Q$$

b. 综合点之间的移动



(a)原始结构图　　　　(b) 等效结构图

图2-30　　相邻综合点的移动

$$C = R \pm X \pm Y \qquad C = R \pm Y \pm X$$

c. 引出点后移

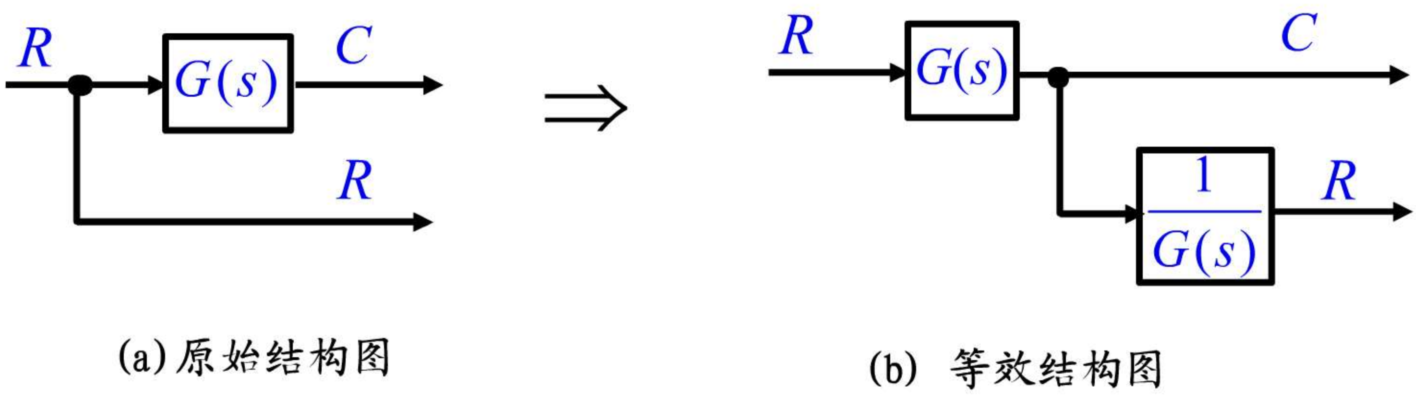


图2-31　引出点后移的变换

$$R = \frac{1}{G(s)} G(s) R = R$$

d. 相邻引出点之间的移动

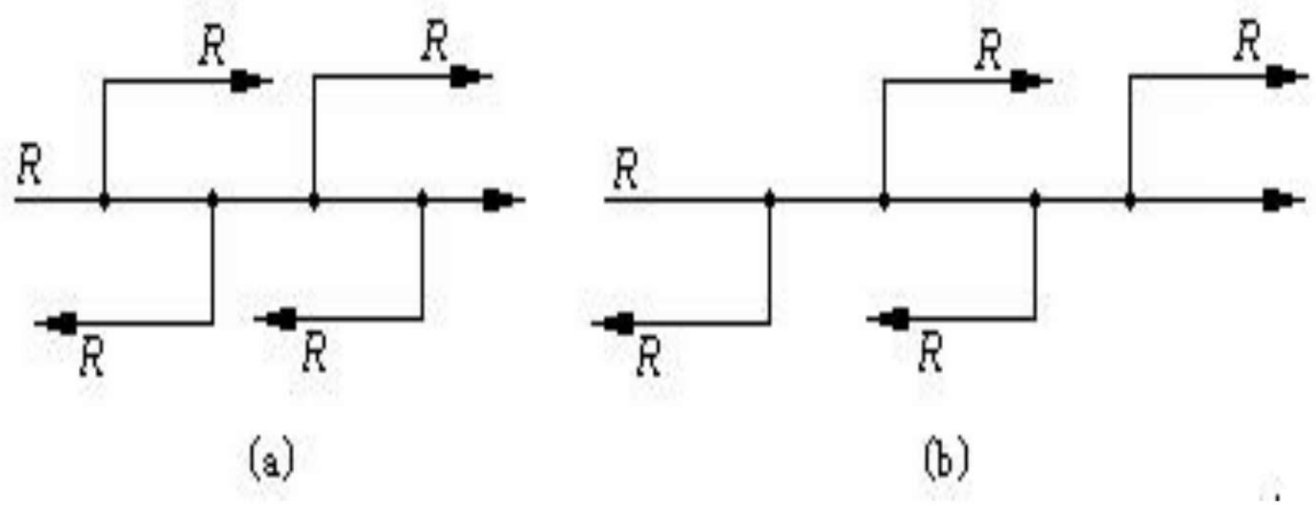


图2-32　相邻引出点的移动

若干个引出点相邻，引出点之间相互交换位置，完全不会改变引出信号的性质。

例13 简化图2-33所示系统的结构图，并求系统传递函数$G_B(s)$〔即$C(s)/R(s)$〕。

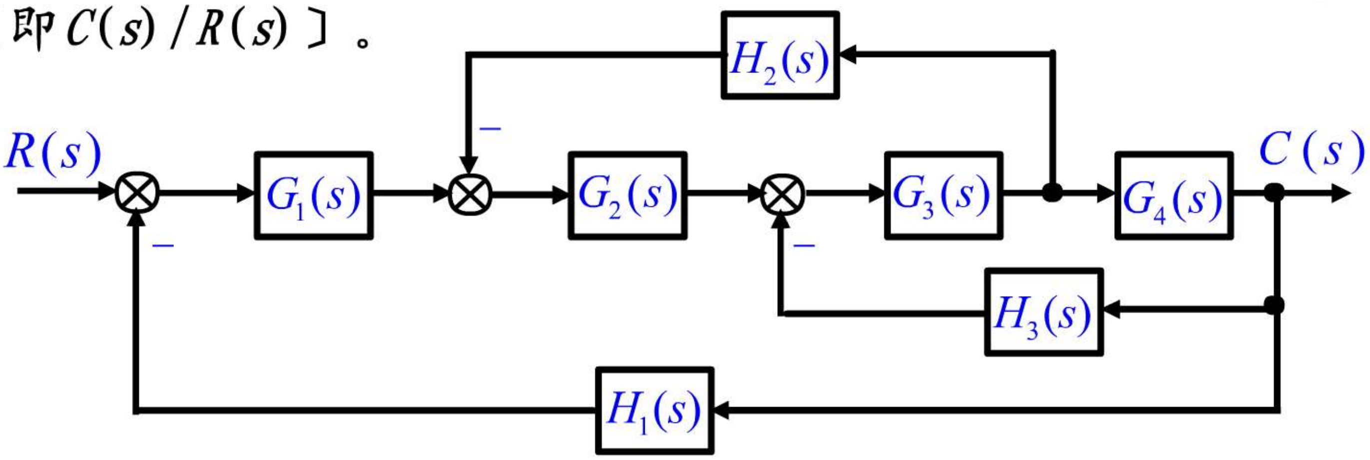
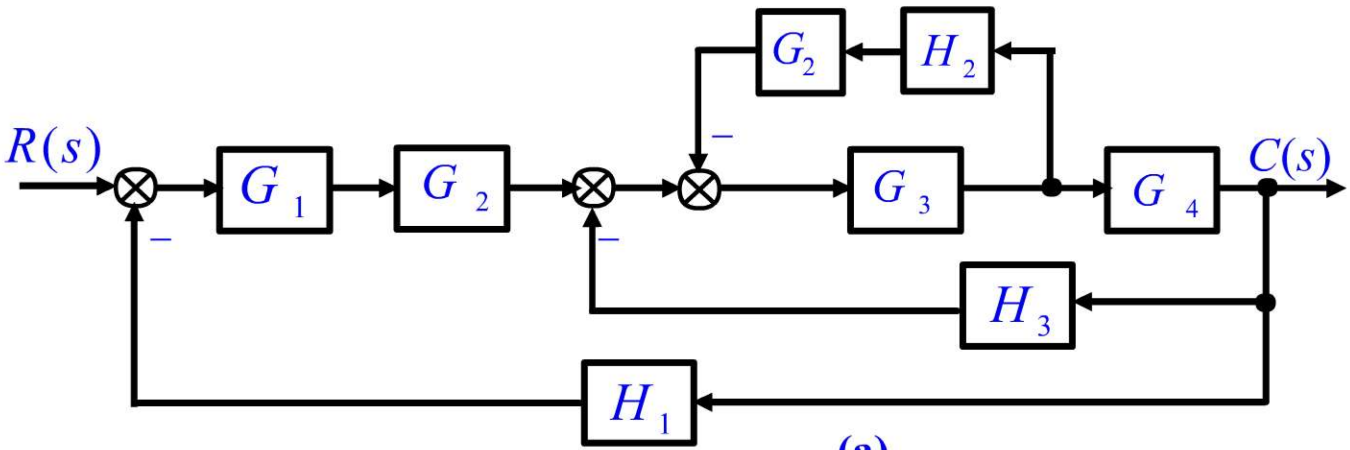
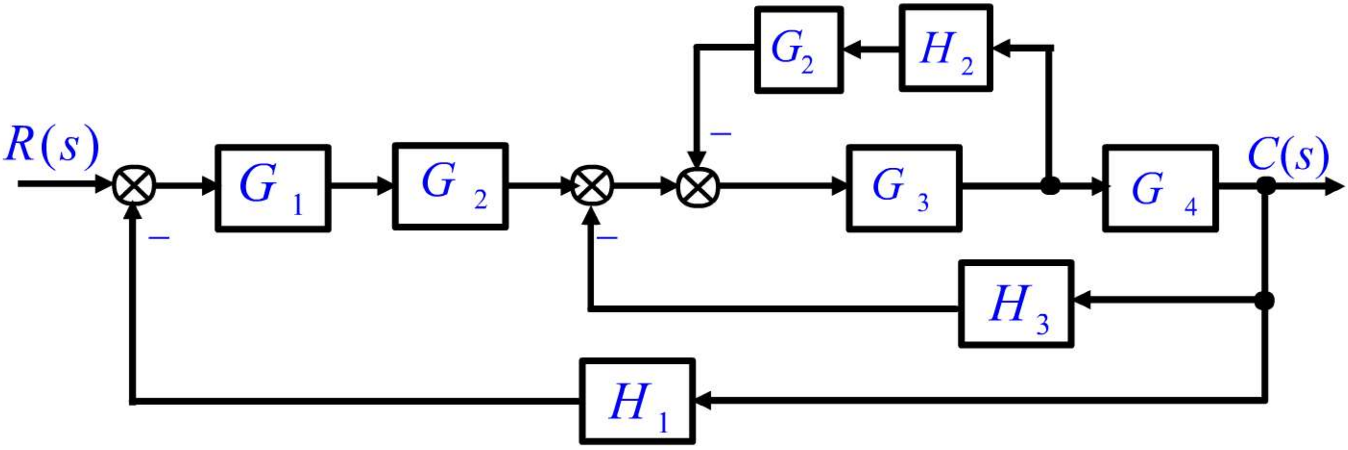


图2-33　多回路系统结构图

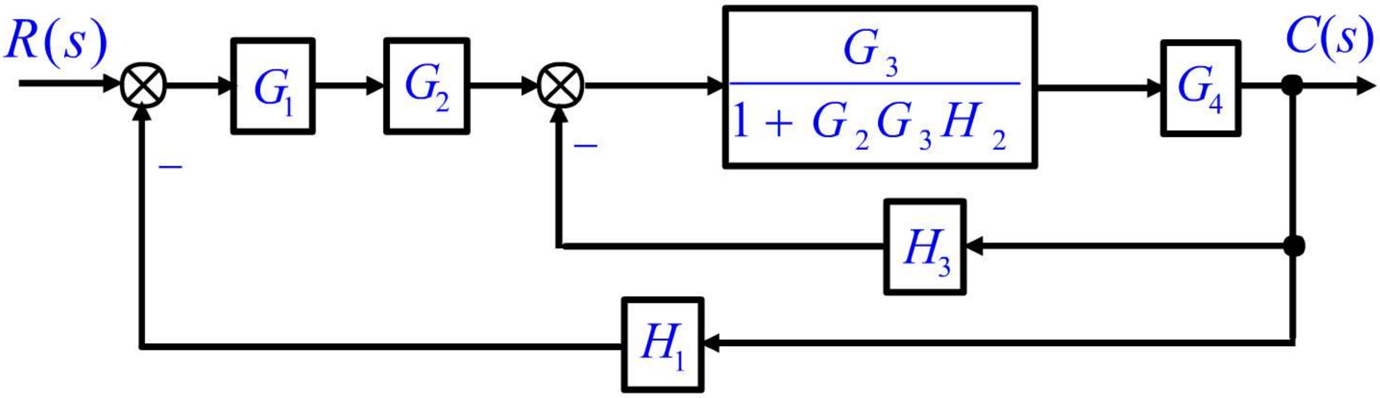


(a)

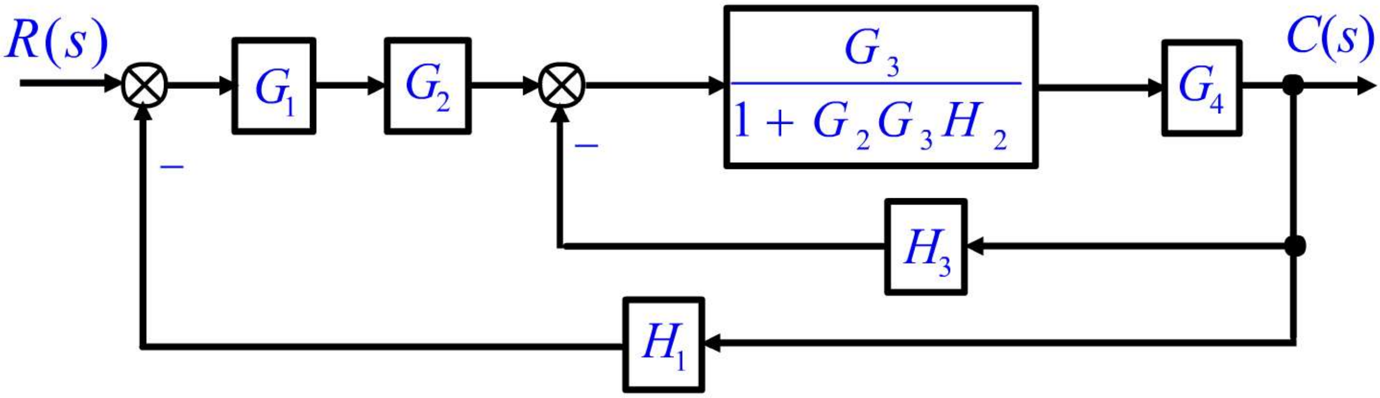


(a)

$\Downarrow$

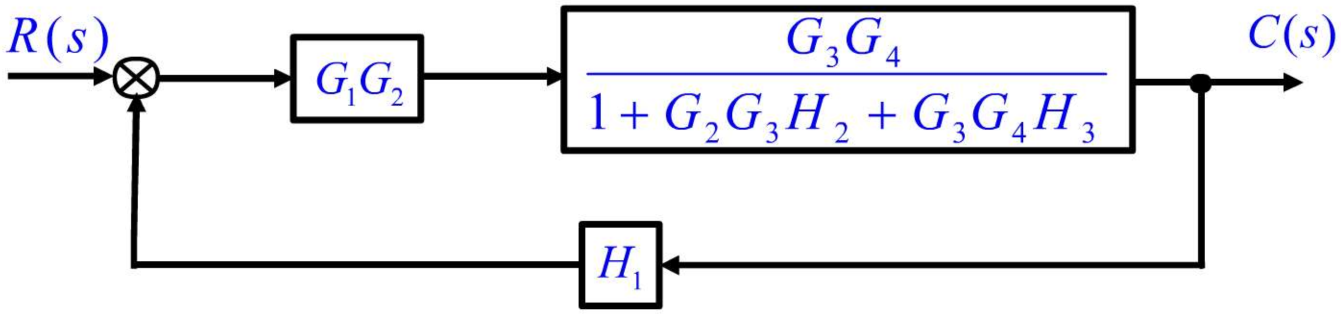


(b)

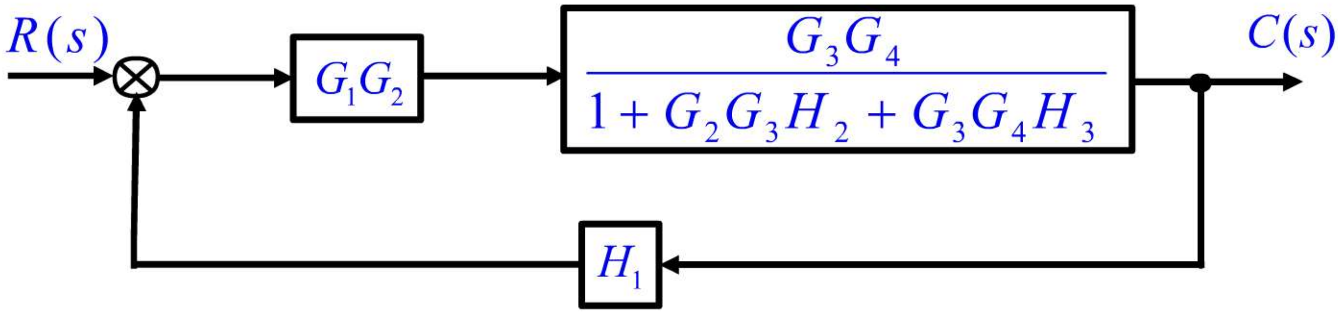


(b)

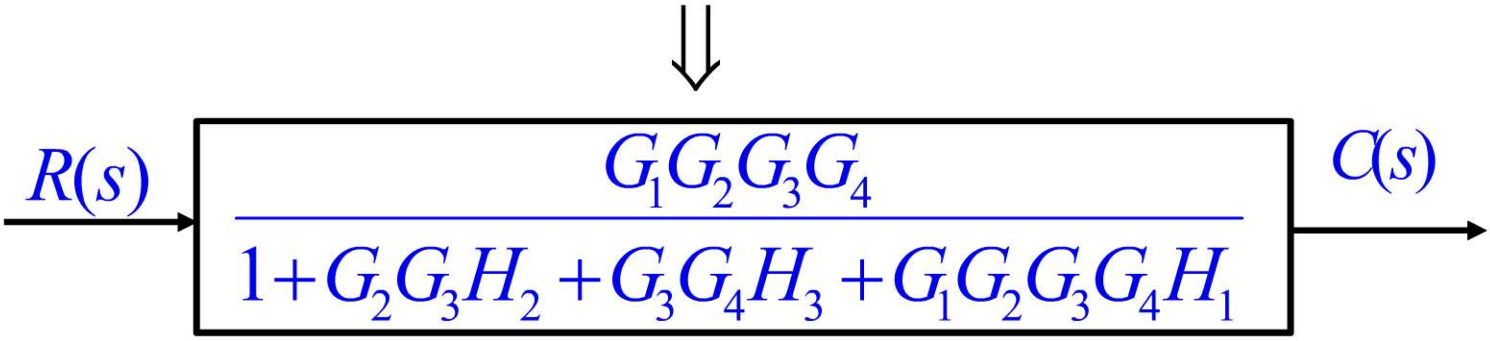
$\Downarrow$



(c)



(c)



(d)

图2-34　　多回路系统结构图

$$G_B(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G_1G_2G_3G_4}{1+G_2G_3H_2+G_3G_4H_3+G_1G_2G_3G_4H_1}$$

思考：第一步的变换也可采用其它的移动办法。

例14 将图2-35所示两级RC网络串联的结构图化简，并求出此网络的传递函数$G(s)$。

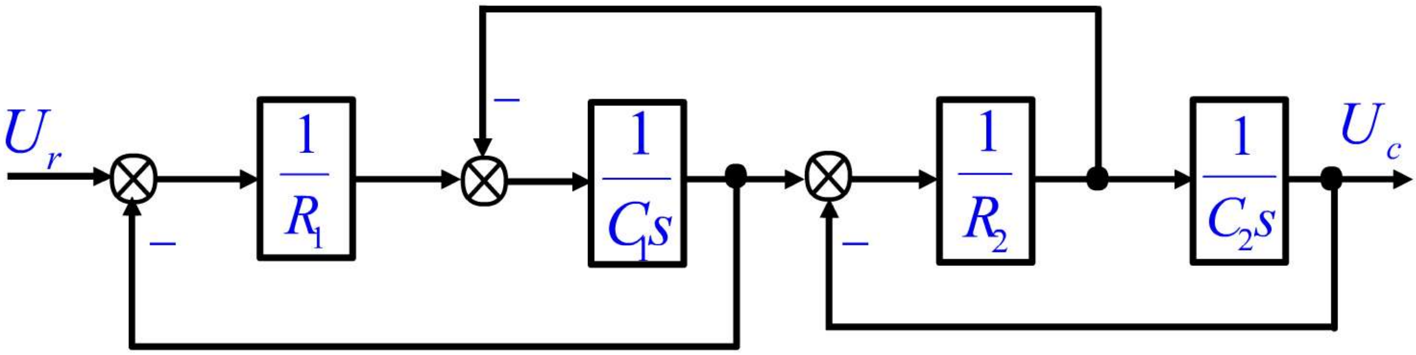
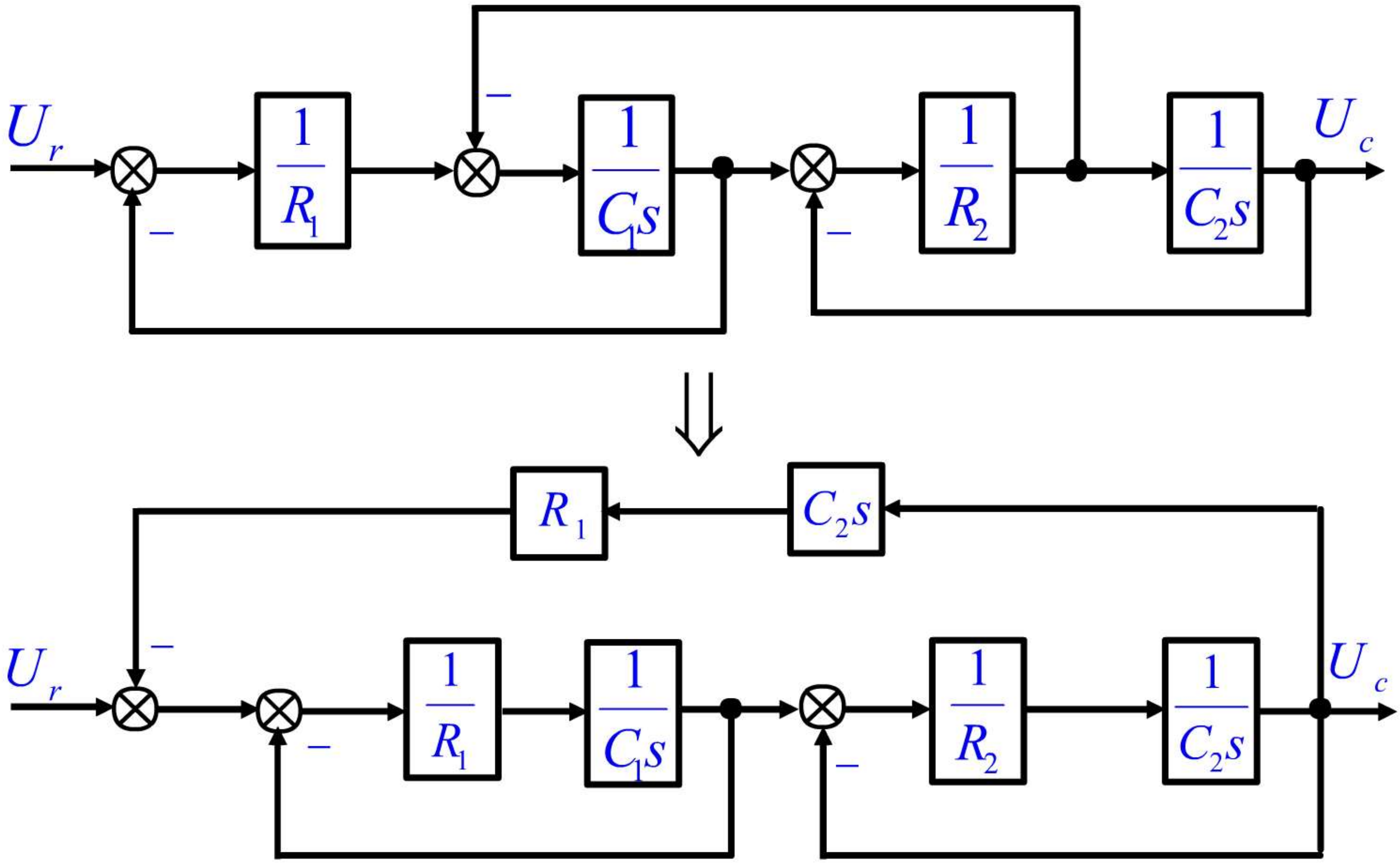
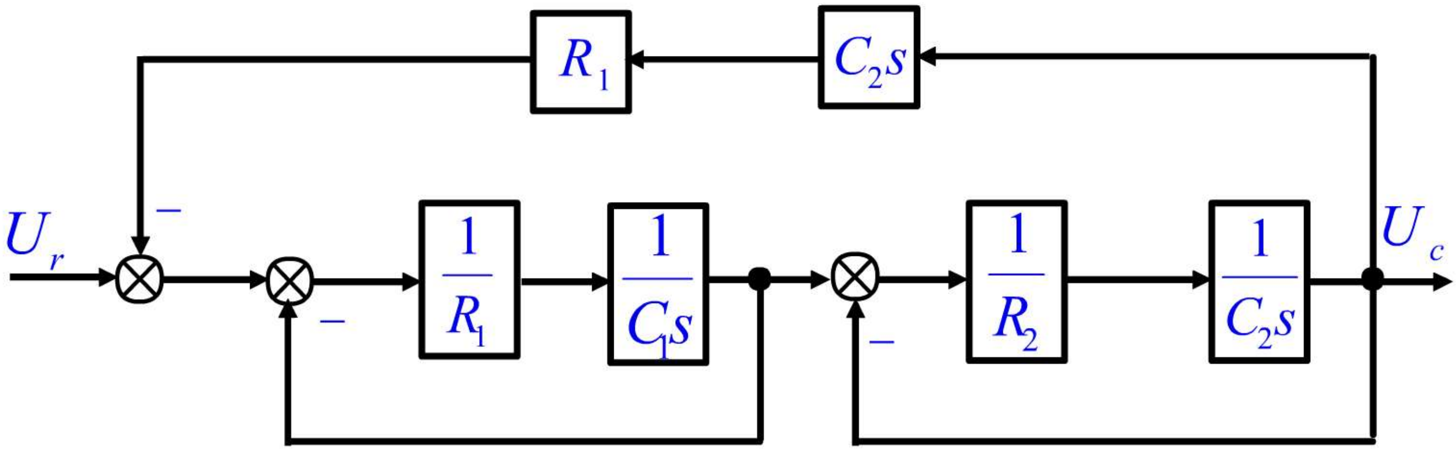


图2-35 两级RC串联网络的结构图

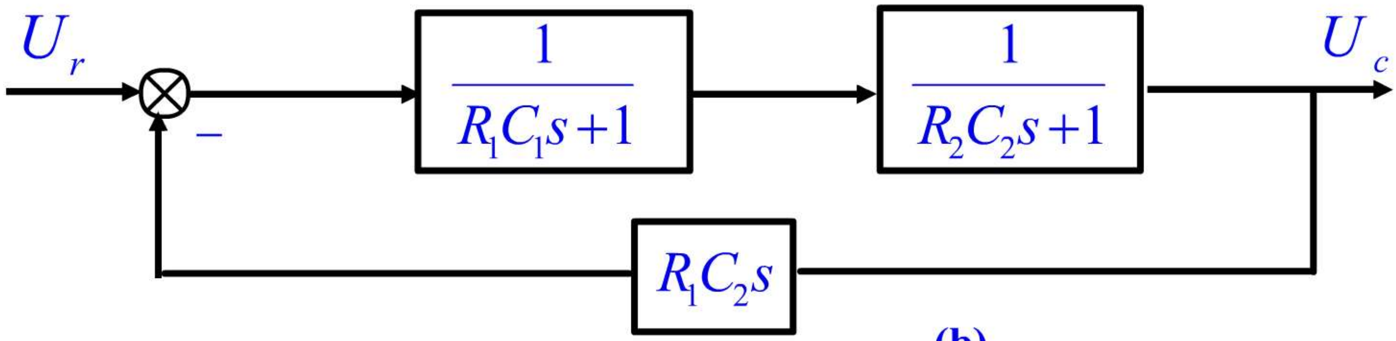


(a)

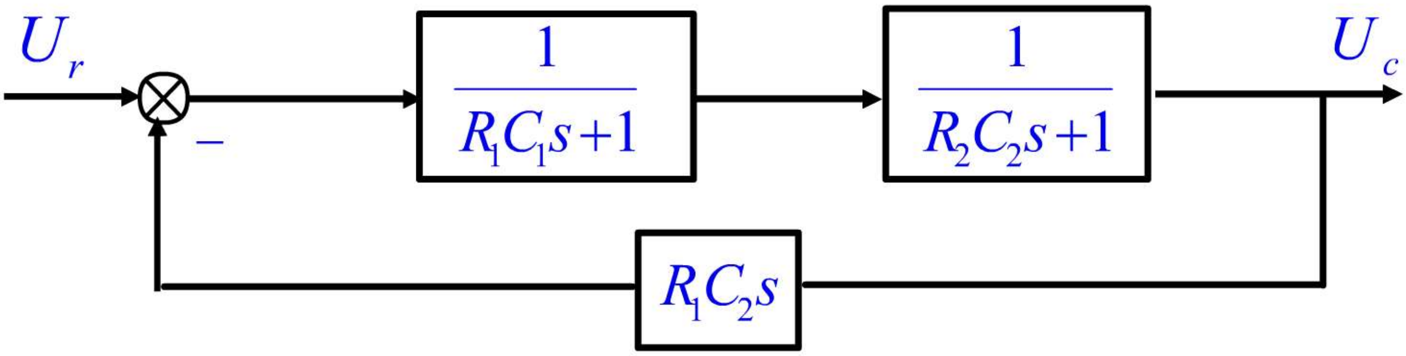


(a)

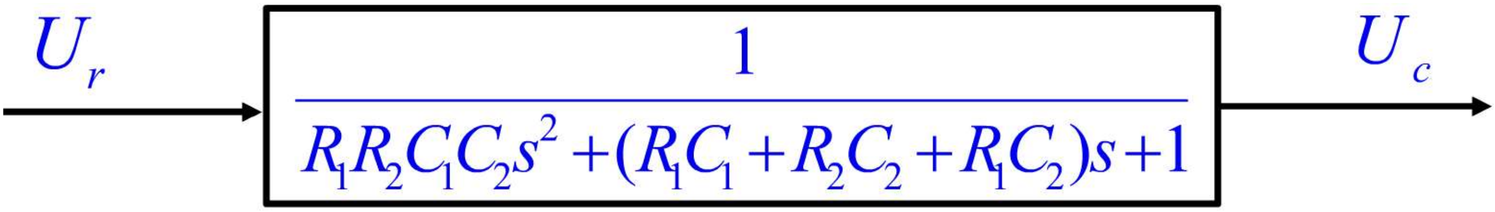
$\Downarrow$



(b)


U_r
$-$
$\frac{1}{R_1C_1s+1}$
$\frac{1}{R_2C_2s+1}$
U_c
R_1C_2s

(b)


U_r
$\frac{1}{R_1R_2C_1C_2s^2+(R_1C_1+R_2C_2+R_1C_2)s+1}$
U_c

(c)