例：电阻电容串联电路

图2中, R, C为已知常数, $e_i(t)$ 是输入；$e_o(t)$ 是输出，请列写关于电路输出$e_o(t)$和输入$e_i(t)$的方程

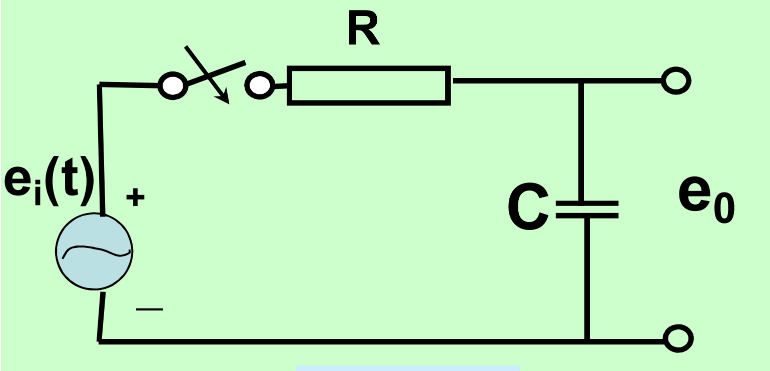


Fig. 2

解：动态阻抗（复阻抗）法

电容 $u_C = \dfrac{1}{CD} i_C$

电阻 $u_R = R i_R$

$$e_0 = \frac{\frac{1}{CD}}{R + \frac{1}{CD}} e_i = \frac{1}{RCD + 1} e_i$$

$$RCDe_0 + e_0 = e_i \qquad RC\frac{\mathrm{d}e_0}{\mathrm{d}t} + e_0 = e_i$$

$$T\frac{\mathrm{d}e_0}{\mathrm{d}t} + e_0 = e_i$$

其中，T=RC称为电路的时间常数

由一阶微分方程描述的系统称为一阶系统

单边拉普拉斯变换简介

- 一个连续时间信号$x(t)$的单边拉普拉斯变换$X(s)$定义为

$$X(s)=\mathcal{L}[x(t)]=\int_{0_-}^{\infty}x(t)e^{-st}\,\mathrm{d}t$$

$x(t):[0,+\infty)\to\mathbb{R}$（时域）　　$X(s):\mathbb{C}\to\overline{\mathbb{C}}$（复频域）

- 单位脉冲信号$\delta(t)$

$$\mathcal{L}[\delta(t)]=1$$

- 单位阶跃信号$1(t)$

$$1(t)=\begin{cases}1, & t\geq 0\\ 0 & t<0\end{cases}$$

$$\mathcal{L}[1(t)]=\frac{1}{s}$$

单边拉普拉斯变换简介

- 单位斜坡信号$t\cdot 1(t)$　　$\mathcal{L}[t\cdot 1(t)]=\dfrac{1}{s^2}$

- 单位抛物线信号$0.5t^2\cdot 1(t)$　　$\mathcal{L}[0.5t^2\cdot 1(t)]=\dfrac{1}{s^3}$

- 单位正弦信号$\sin\omega t\cdot 1(t)$　　$\mathcal{L}[\sin\omega t\cdot 1(t)]=\dfrac{\omega}{s^2+\omega^2}$

- 指数信号$e^{-at}\cdot 1(t)$　　$\mathcal{L}[e^{-at}\cdot 1(t)]=\dfrac{1}{s+a}$

单边拉普拉斯变换简介

$$X(s)=\mathcal{L}[x(t)] \qquad X_1(s)=\mathcal{L}[x_1(t)] \qquad X_2(s)=\mathcal{L}[x_2(t)]$$

- 线性 $$aX_1(s)+bX_2(s)=\mathcal{L}[ax_1(t)+bx_2(t)]$$
- 时域平移 $$\mathrm{e}^{-\tau s}X(s)=\mathcal{L}[x(t-\tau)\cdot 1(t-\tau)]$$
- 时域卷积 $$\begin{aligned}X_1(s)X_2(s)&=\mathcal{L}\left[\int_0^t x_1(t-\tau)x_2(\tau)\mathrm{d}\tau\right]\\&=\mathcal{L}\left[\int_0^t x_2(t-\tau)x_1(\tau)\mathrm{d}\tau\right]\\&=\mathcal{L}[x_1(t)*x_2(t)]=\mathcal{L}[x_2(t)*x_1(t)]\end{aligned}$$
- 时域微分 $$s^nX(s)-s^{n-1}x(0_-)-s^{n-2}x^{(1)}(0_-)-\cdots-x^{(n-1)}(0_-)=\mathcal{L}[x^{(n)}(t)]$$
- 时域积分 $$\frac{X(s)}{s}=\mathcal{L}\left[\int_{0_-}^t x(\tau)\mathrm{d}\tau\right]$$
- 初值定理，终值定理

电路系统的机理建模（传递函数）

- 零初始条件：

系统 $a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_0 y(t) = b_m x^{(m)}(t) + \cdots + b_0 x(t)$

x(t)为输入，y(t)为输出，a_n不等于零，b_m不等于零

其零初始条件为

$$y(0\_) = y^{(1)}(0\_) = \cdots = y^{(n-1)}(0\_) = 0$$

$$x(0\_) = x^{(1)}(0\_) = \cdots = x^{(m-1)}(0\_) = 0$$

- 传递函数的定义：传递函数是在零初始条件下，系统输出单边拉普拉斯变换除以输入单边拉普拉斯变换的商

- 因果系统：指当且仅当输入信号激励系统时，才会出现输出（响应）的系统。因果系统的（响应）不会出现在输入信号激励系统的以前时刻；也就是说系统的输出仅与当前与过去的输入有关，而与将来的输入无关的系统

电路系统的机理建模（传递函数）

- 考虑如下由时域微分方程描述的 n 阶系统

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_0 y(t) = b_m x^{(m)}(t) + \cdots + b_0 x(t)$$

通常有 **n≥m**（因果系统）

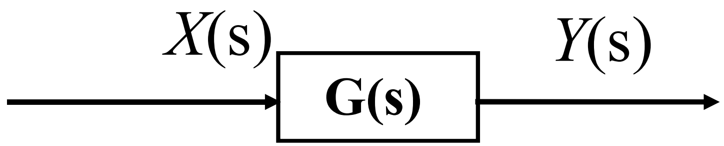
在零初始条件下作拉普拉斯变换

$$a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s)$$
$$= b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \cdots + b_1 s X(s) + b_0 X(s)$$

- 其传递函数是

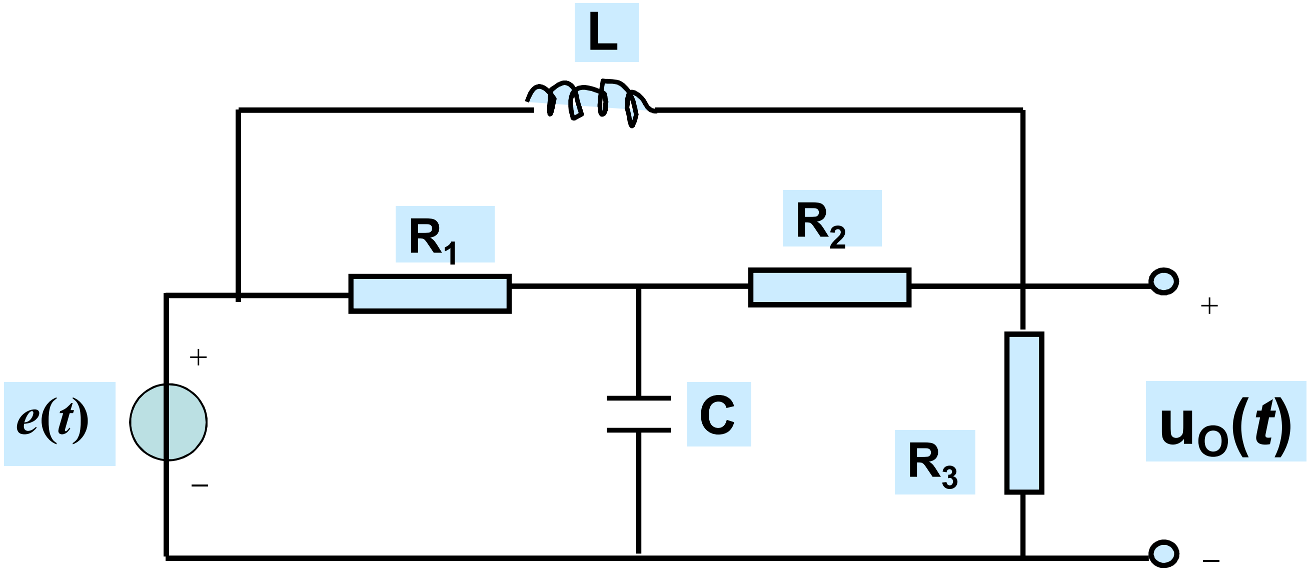
$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}$$

$$Y(s) = G(s) X(s)$$



电路系统的机理建模（传递函数）

- 例：如图电路中，输入$e(t)$,输出$u_O(t)$，求传递函数



$$R_1(R_2+R_3)LC\ddot{u}_o+\left(R_1R_2R_3C+(R_1+R_2+R_3)L\right)\dot{u}_o+(R_1+R_2)R_3u_o$$
$$=(R_1R_2R_3C+R_3L)\dot{e}+R_3(R_1+R_2)e$$

$$G(s)=\frac{U_o(s)}{E(s)}=\frac{(R_1R_2R_3C+R_3L)s+R_3(R_1+R_2)}{R_1(R_2+R_3)LCs^2+\left(R_1R_2R_3C+(R_1+R_2+R_3)L\right)s+(R_1+R_2)R_3}$$

例：电阻电感电容（RLC）串联电路

在图3中, **R, L, C** 为已知常数, **e(t)** 是输入；**u_c(t)**是输出。请列写电路的传递函数

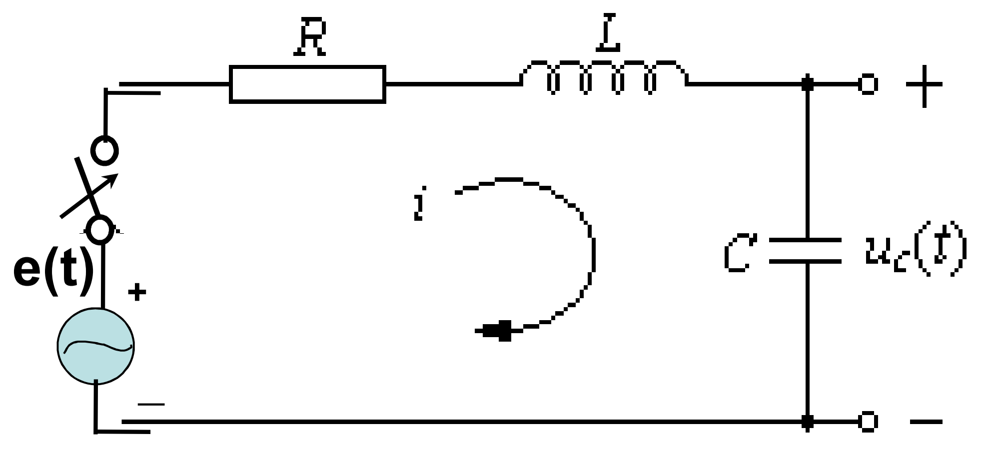


Fig .3

解：动态阻抗（复阻抗）法

电容 $U_C(s) = \dfrac{1}{Cs} I_C(s)$

电感 $U_L(s) = LsI_L(s)$

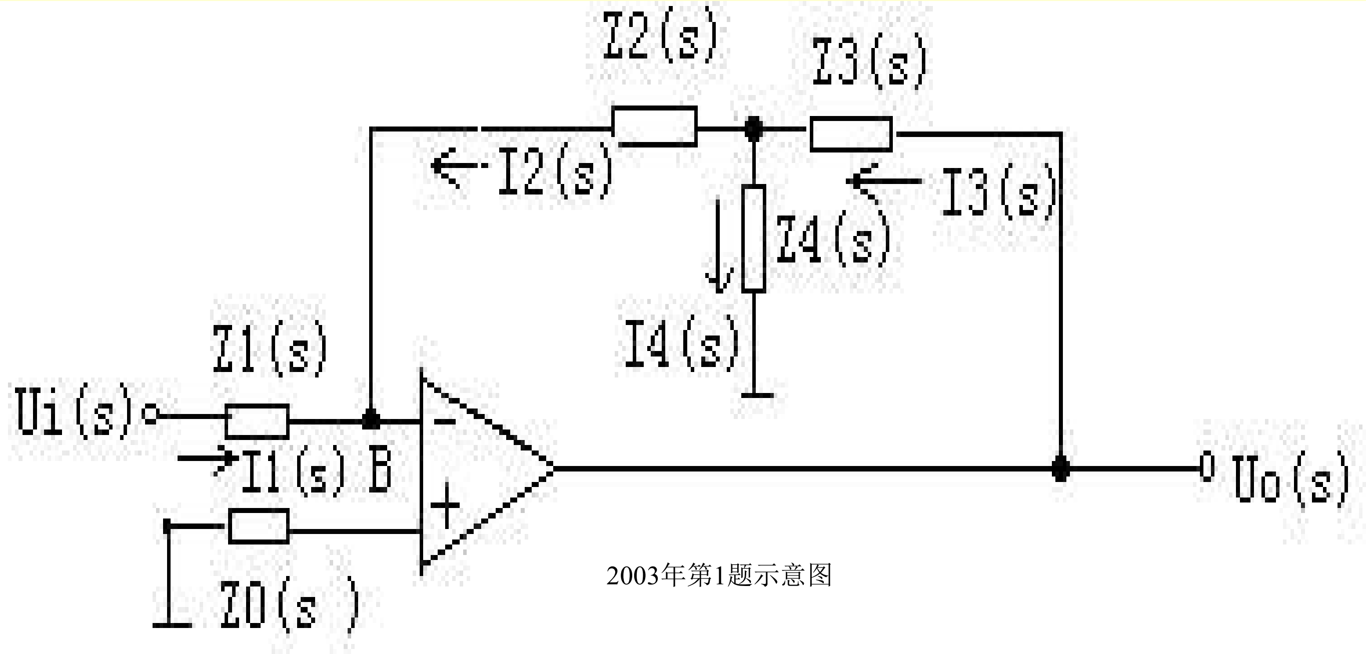
$$U_C(s) = \frac{\dfrac{1}{Cs}}{R + Ls + \dfrac{1}{Cs}} E(s)$$

$$\frac{U_C(s)}{E(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

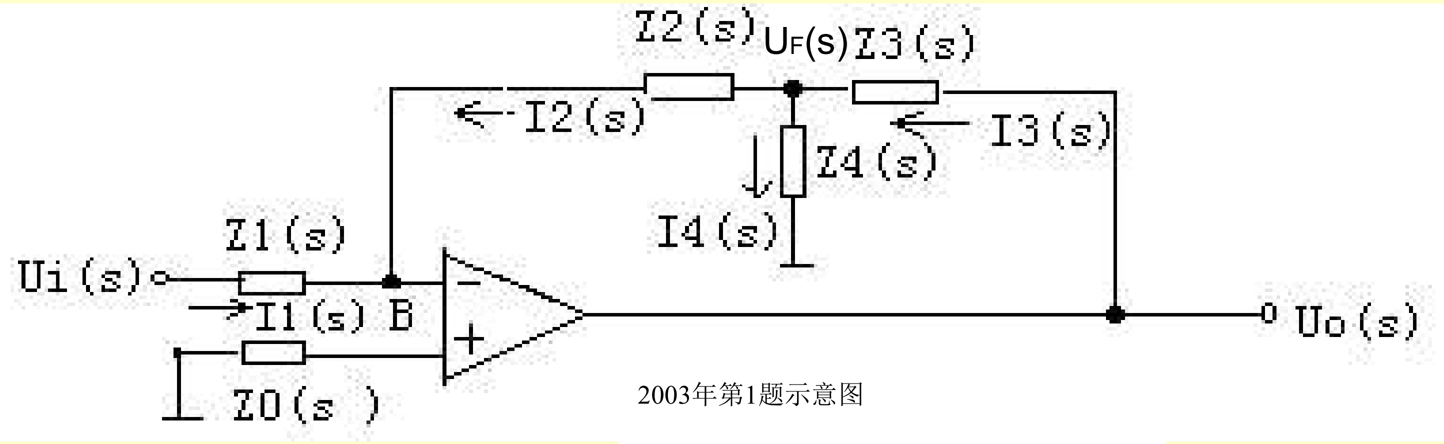
该系统为二阶系统

电路系统的机理建模（I/O微分方程模型）

一．1．求理想运算放大器的传递函数，结构图如下：(2003年)



2003年第1题示意图



2003年第1题示意图

解：结点法

$$i_1 + i_2 = 0 \text{（虚断）}$$

$$i_3 = i_2 + i_4$$

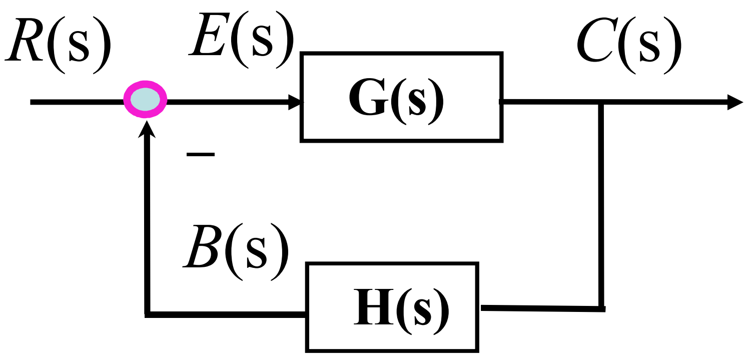
$$\begin{cases} \dfrac{U_i(s) - U_B(s)}{Z_1(s)} + \dfrac{U_F(s) - U_B(s)}{Z_2(s)} = 0 \\ \dfrac{U_O(s) - U_F(s)}{Z_3(s)} = \dfrac{U_F(s) - U_B(s)}{Z_2(s)} + \dfrac{U_F(s)}{Z_4(s)} \end{cases}$$

$$U_B(s) = 0 \quad \text{（虚短）}$$

消去 $U_F(s)$

得：$$\frac{U_O(s)}{U_i(s)} = -\frac{Z_2(s)Z_3(s) + Z_3(s)Z_4(s) + Z_2(s)Z_4(s)}{Z_1(s)Z_4(s)}$$

电路系统的机理建模（传递函数）



•开环系统的传递函数(简称**开环传函**)

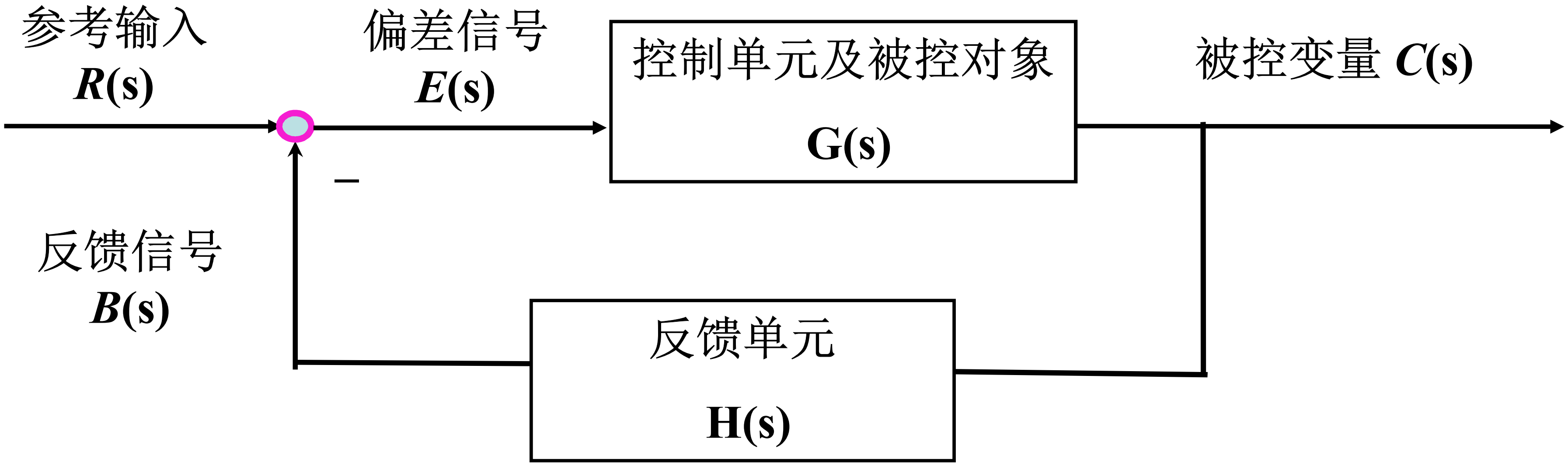
$$G_o(s)=\frac{B(s)}{E(s)}=G(s)H(s)$$

•闭环系统的传递函数(简称**闭环传函**)

$$\Phi(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}=\frac{G(s)}{1+G_o(s)}$$

电路系统的机理建模（传递函数）

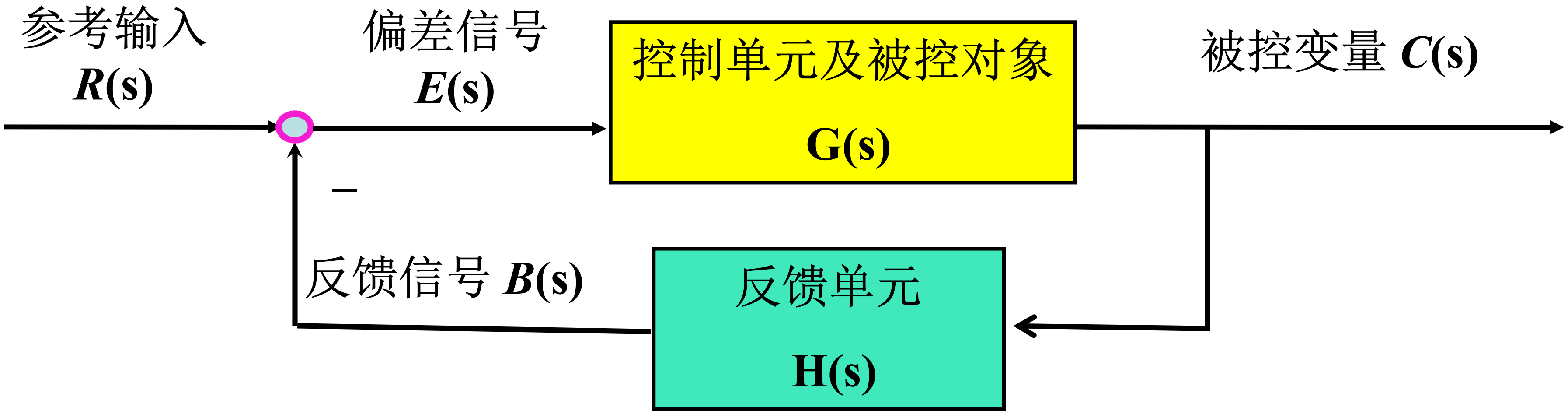
- 对于典型的闭环控制系统



- 整个系统的传递函数 – 被控变量 C(s) 与参考输入 R(s) 的比值。

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

电路系统的机理建模（传递函数）



- 开环传递函数 – 对于任意给定的反馈环，反馈通路输出变量 B(s) 与误差信号 E(s) 的比值（注意：系统仍然是闭环控制系统）。

$$G(s)=\frac{B(s)}{E(s)}=G(s)H(s)$$

- 前向通路传递函数 – 被控变量 C(s) 与误差信 E(s) 的比值 $G_f(s)=\frac{C(s)}{E(s)}=G(s)$

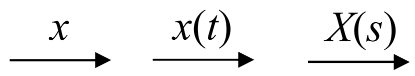
- 反馈通路传递函数

$$G_b(s)=\frac{B(s)}{C(s)}=H(s)$$

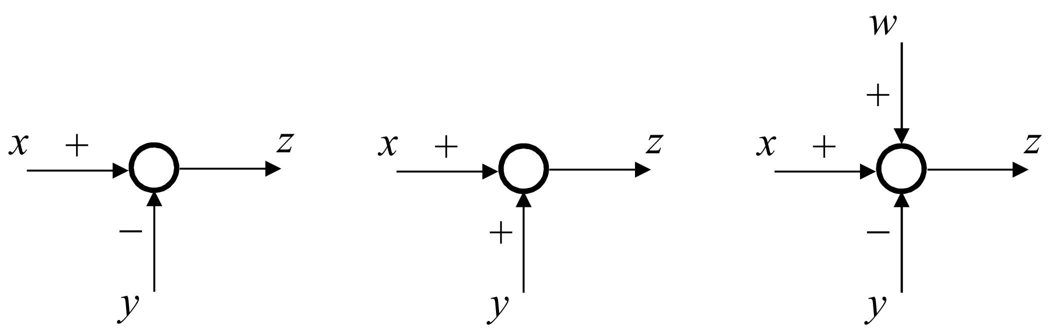
电路系统的机理建模（方块图）

方块图的基本元素

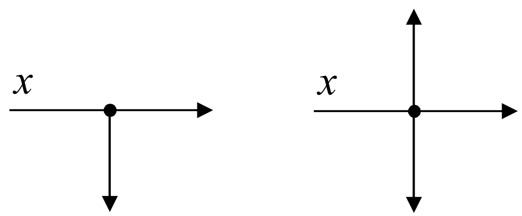
方框（环节）表示子系统或对信号的变换



带单向箭头的线段（信号线）表示信号及其流向



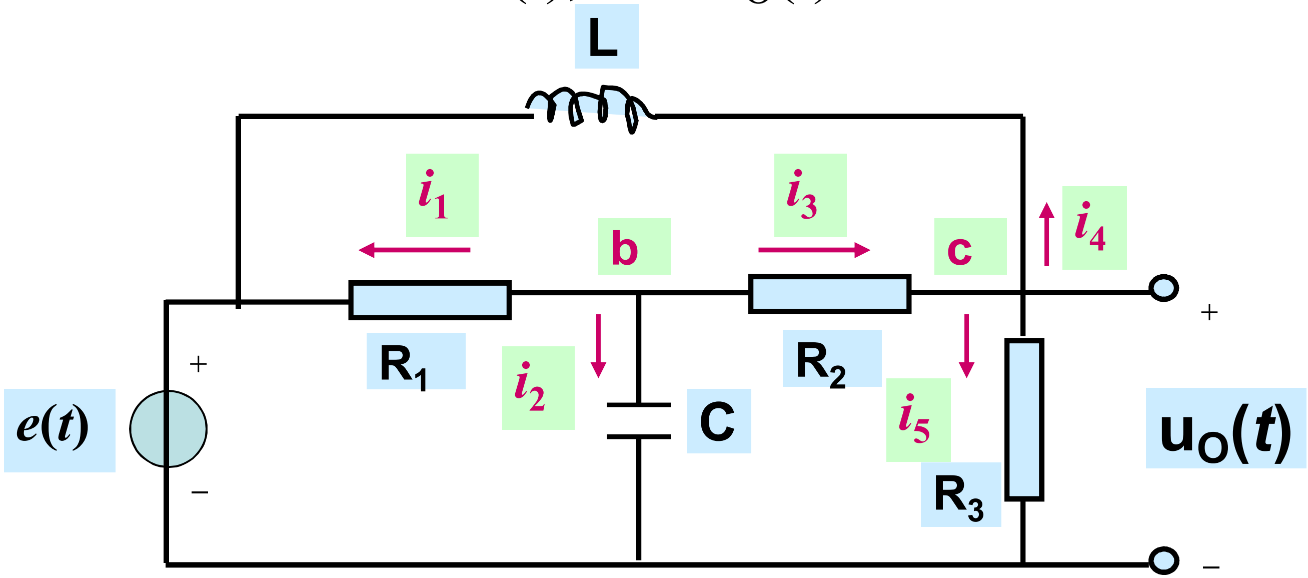
比较点（综合点）表示对两个或以上信号的加减运算



引出点表示同一个信号被引至多个不同的位置使用

电路系统的机理建模（方块图）

◆ 例：如图电路中，输入$e(t)$,输出$u_O(t)$，要求用方块图表示电路模型



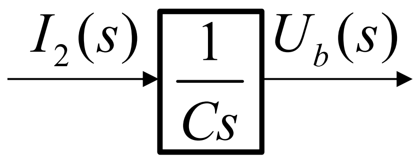
结点方法：

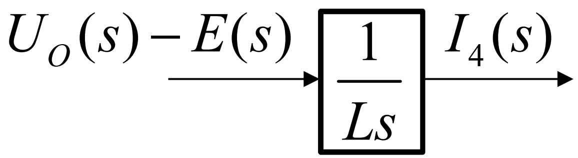
对于节点b $\quad i_1+i_2+i_3=0$

对于节点c $\quad -i_3+i_4+i_5=0$

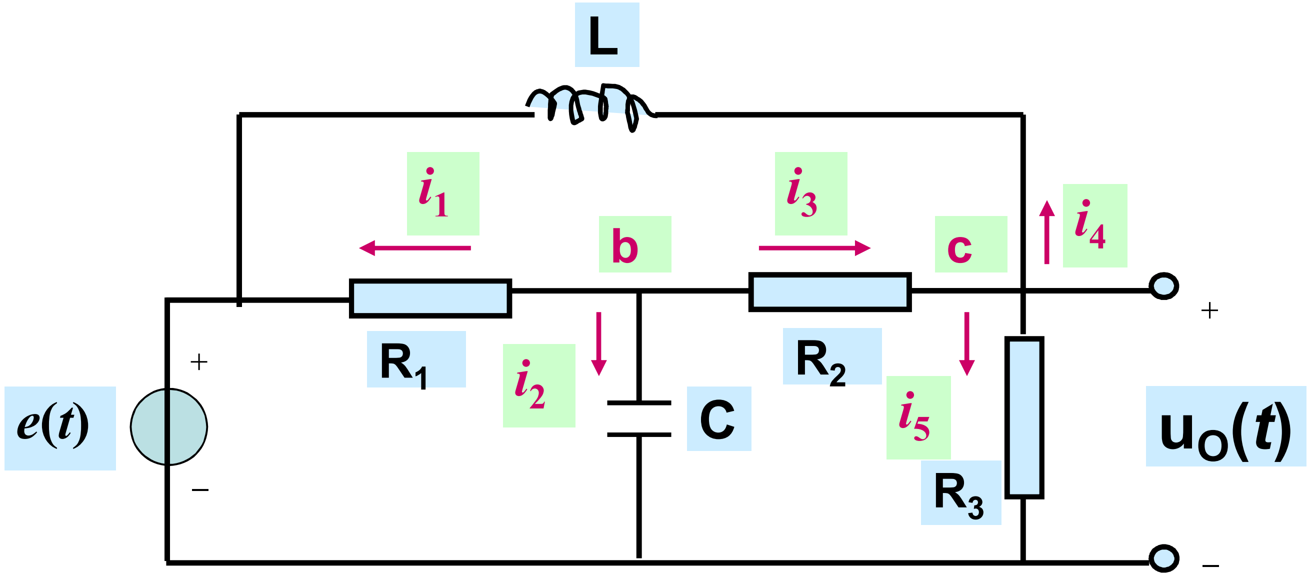
对于电容C $\quad i_1=C\dfrac{\mathrm{d}u_b}{\mathrm{d}t}$

对于电感C $\quad u_O-e=L\dfrac{\mathrm{d}i_4}{\mathrm{d}t}$





电路系统的机理建模（方块图）

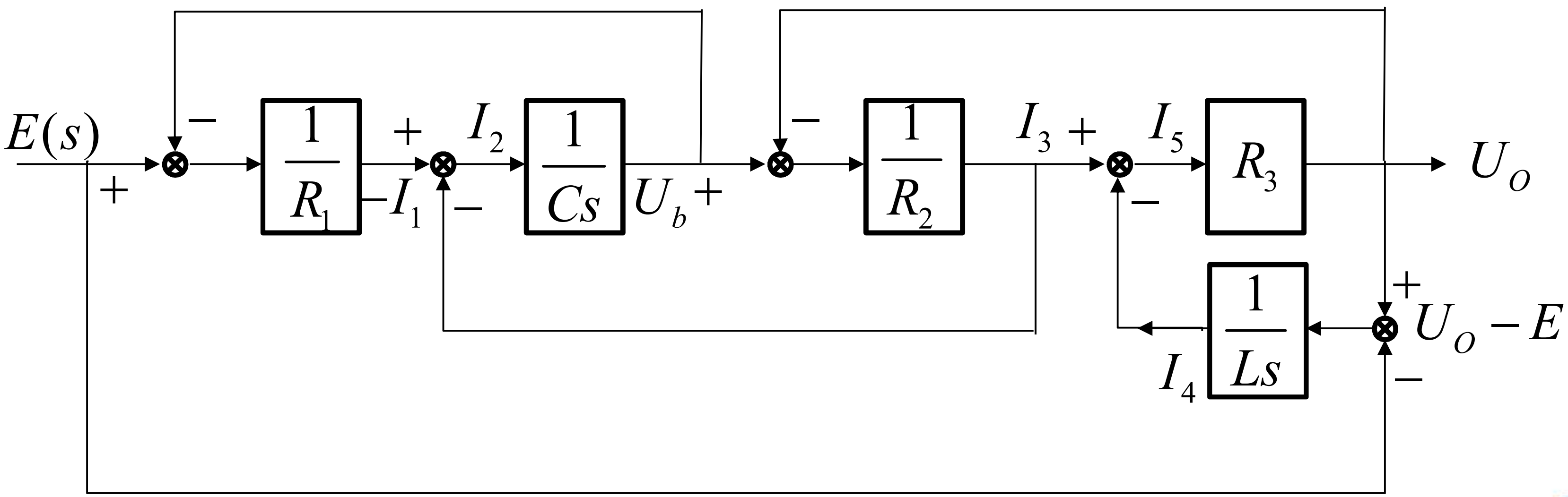


$$i_2 = -i_1 - i_3$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

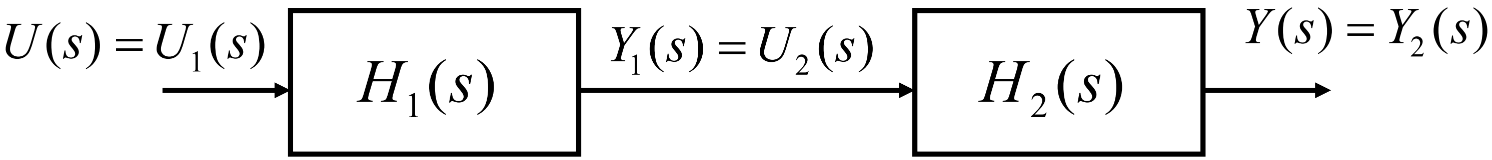
$$-i_3 + i_4 + i_5 = 0$$

$$i_5 = i_3 - i_4$$



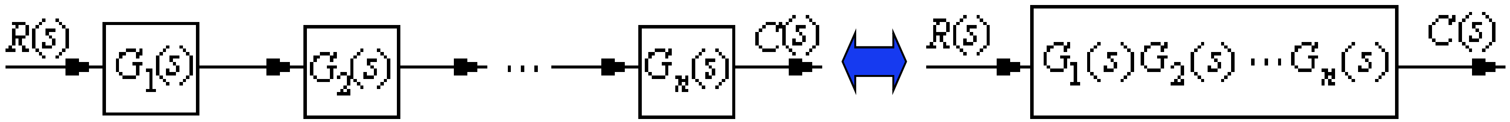
电路系统的机理建模（方块图）

串联（cascade）



$$Y(s)=Y_2(s)=H_2(s)U_2(s)=H_2(s)Y_1(s)=H_2(s)H_1(s)U(s)$$

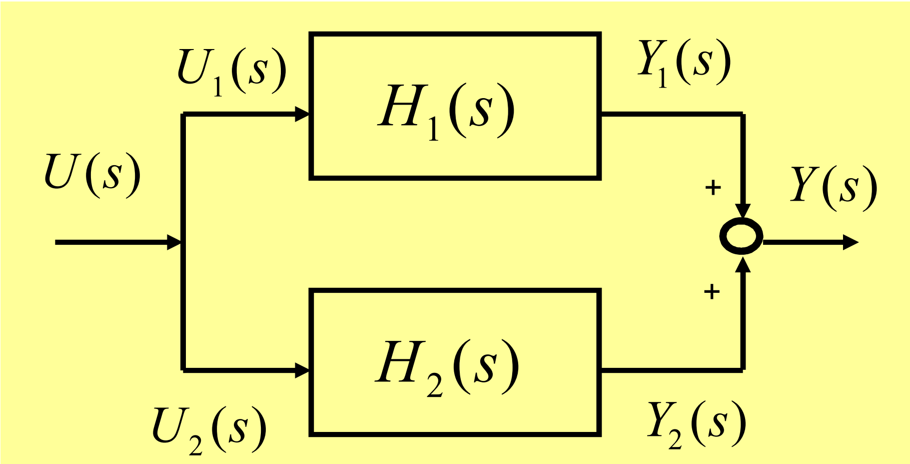
$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=H_2(s)H_1(s)$$



(a) (b)

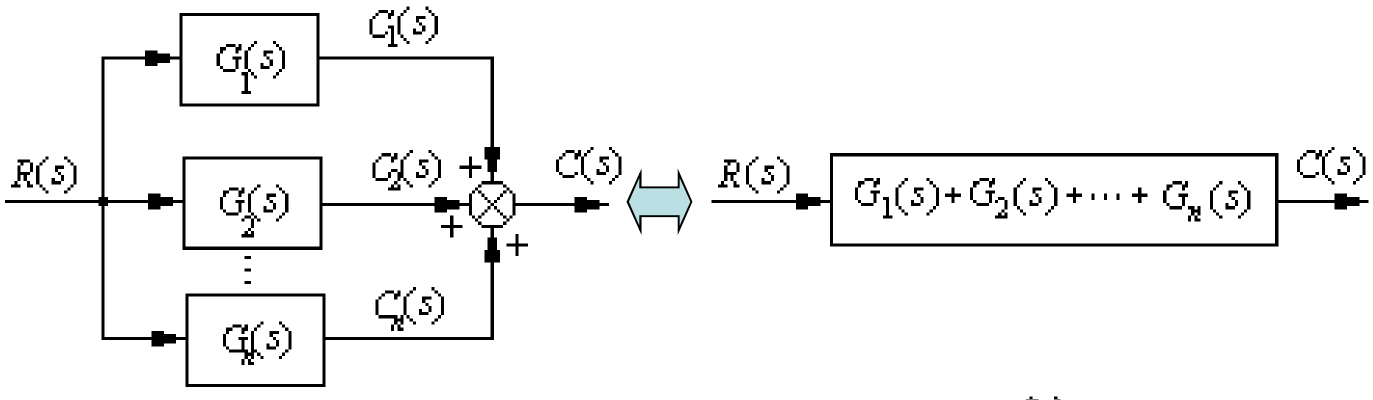
电路系统的机理建模（方块图）

并联（parallel）



$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=H_1(s)+H_2(s)$$

$$Y(s)=Y_1(s)+Y_2(s)=H_1(s)U_1(s)+H_2(s)U_2(s)=\big(H_1(s)+H_2(s)\big)U(s)$$



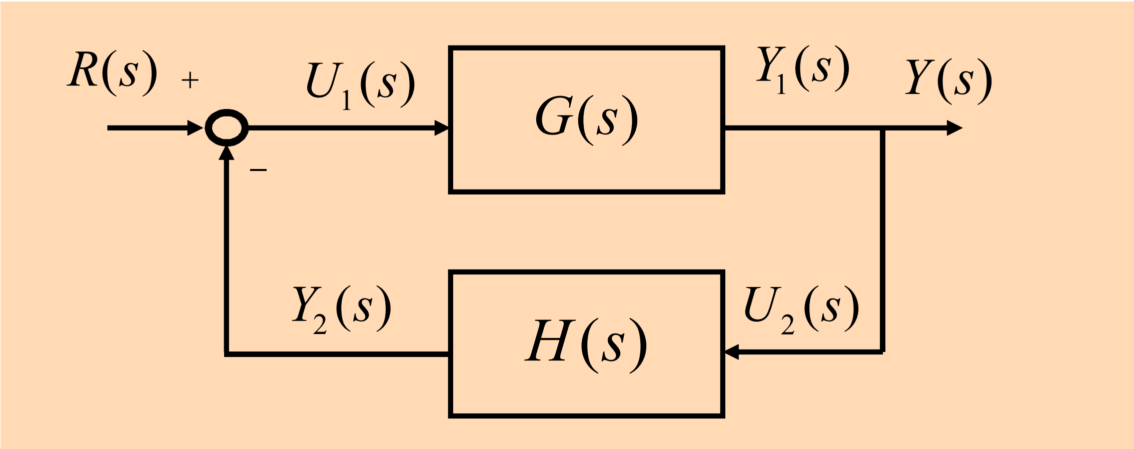
(a) (b)

电路系统的机理建模（方块图）

负反馈

（negative feedback）

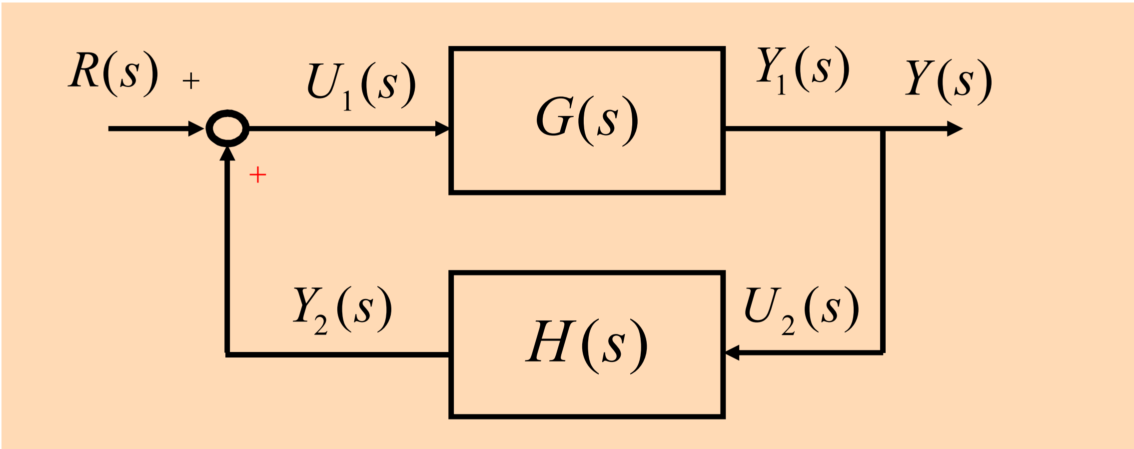
$$\Phi(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$



正反馈

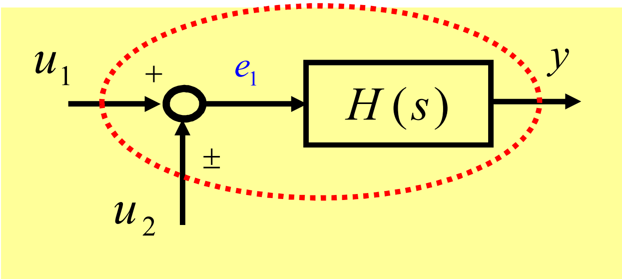
（positive feedback）

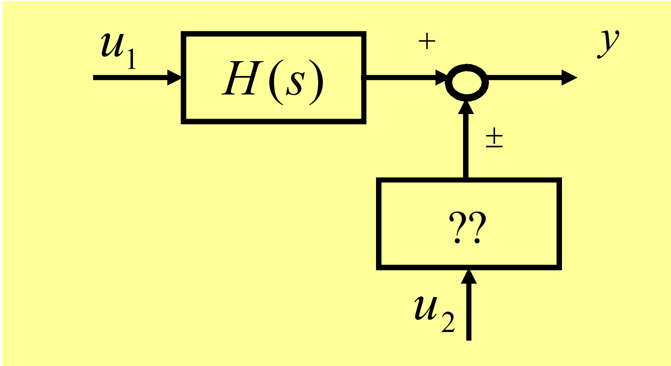
$$\Phi(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1-G(s)H(s)}$$



电路系统的机理建模（方块图）

求和点移动

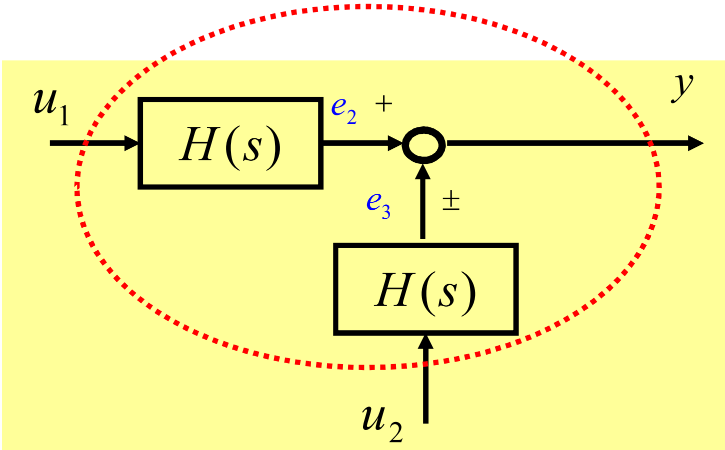




$$Y(s) = H(s)(U_1(s) \pm U_2(s))$$
$$= H(s)U_1(s) \pm H(s)U_2(s)$$

$$Y(s) = H(s)U_1(s) \pm ?? \cdot U_2(s)$$

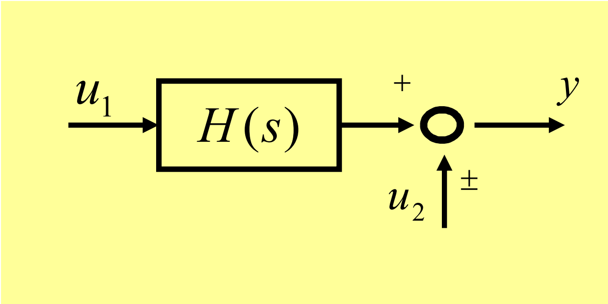
$$?? = H(s)$$



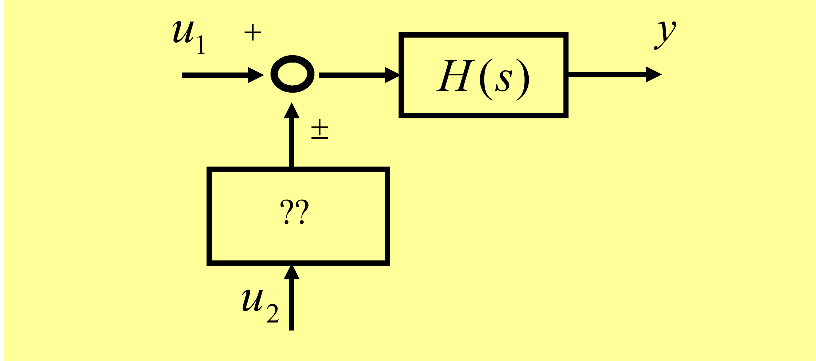
$$Y(s) = H(s)U_1(s) \pm H(s)U_2(s)$$

原则：在变换前后的方块图中，同名“变量对”之间的传递函数不变

电路系统的机理建模（方块图）

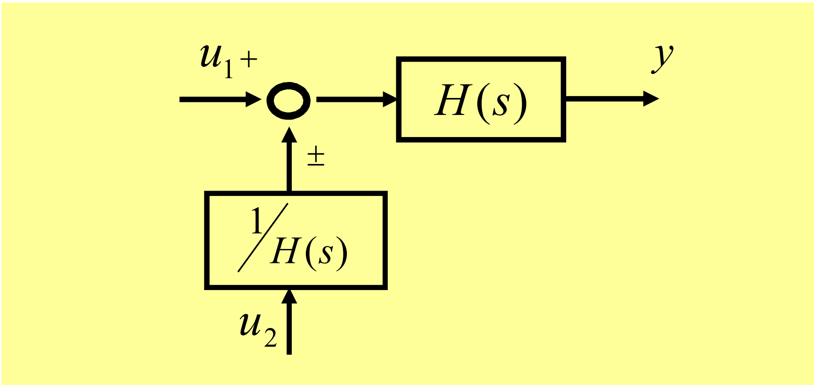


求和点移动



$$Y(s) = H(s)U_1(s) + U_2(s)$$

$$Y(s) = H(s)\{U_1(s) + ??\cdot U_2(s)\}$$



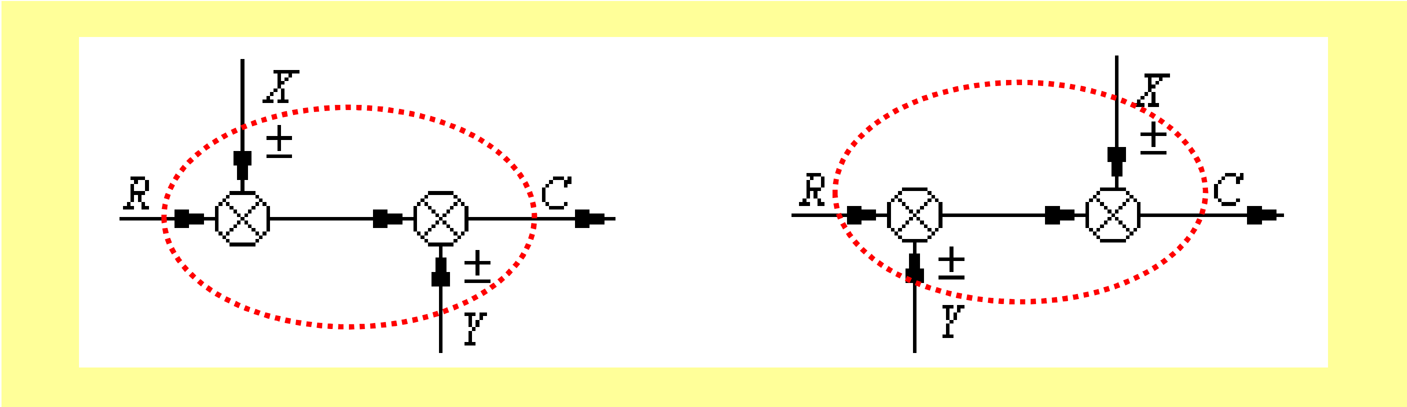
$$??\cdot H(s)U_2(s) = U_2(s)$$

$$?? = H(s)^{-1}$$

原则：在变换前后的方块图中，同名“变量对”之间的传递函数不变

电路系统的机理建模（方块图）

➢ 相邻两个求和点前后移动的等效变换



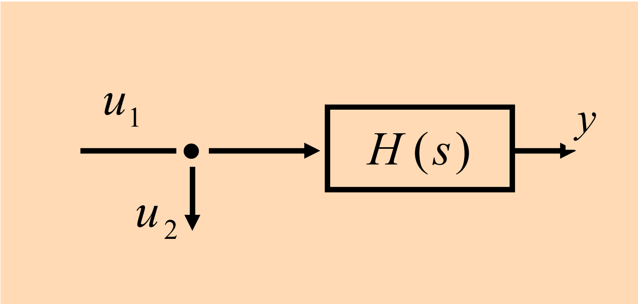
$$C = R \pm X \pm Y$$

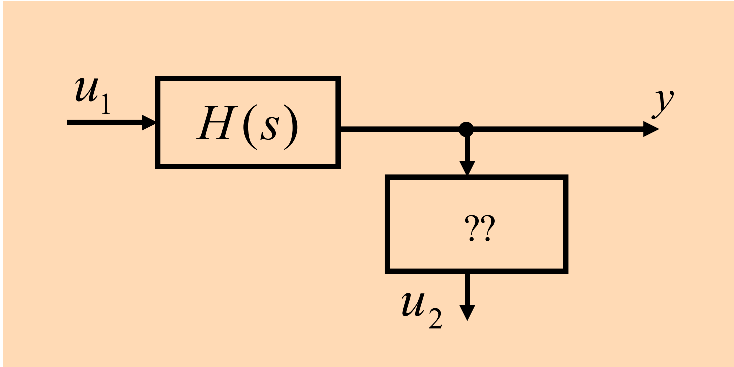
相邻多个求和点可以任意换位

原则：在变换前后的方块图中，同名“变量对”之间的传递函数不变

电路系统的机理建模（方块图）

引出点移动



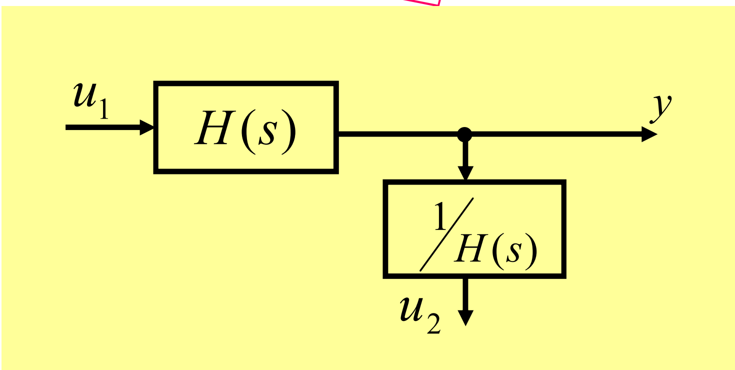


$$Y(s) = H(s)U_1(s); U_2(s) = U_1(s)$$

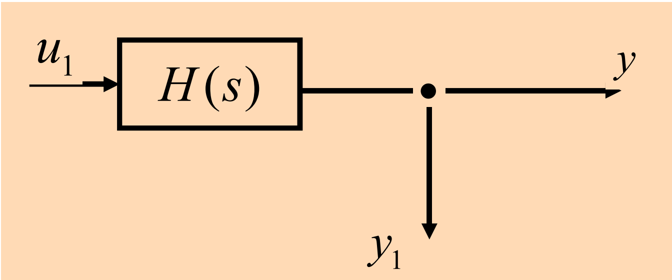
$$Y(s) = H(s)U_1(s)$$

$$U_2(s) = ??\cdot H(s)U_1(s) = U_1(s)$$

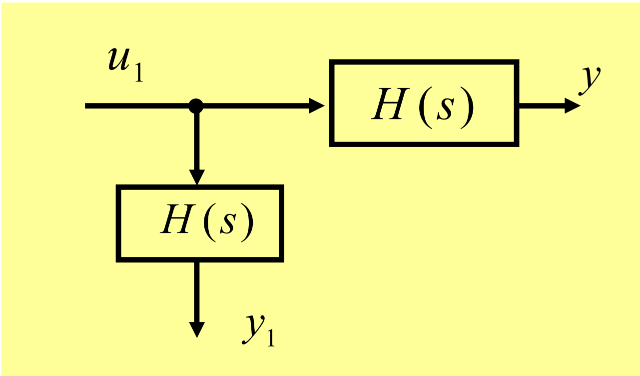
$$?? = H(s)^{-1}$$



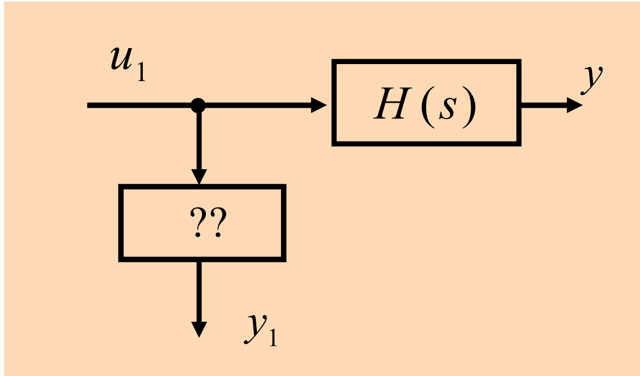
电路系统的机理建模（方块图）



$$Y(s) = H(s)U_1(s); Y_1(s) = Y(s)$$



引出点移动



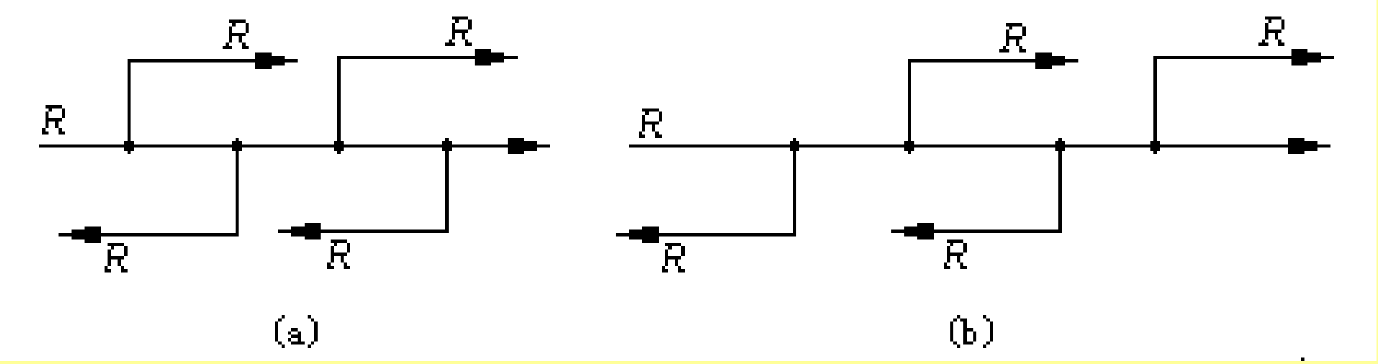
$$Y(s) = H(s)U_1(s)$$

$$Y_1(s) = U_1(s) \cdot ?? = Y(s)$$

$$?? = H(s)$$

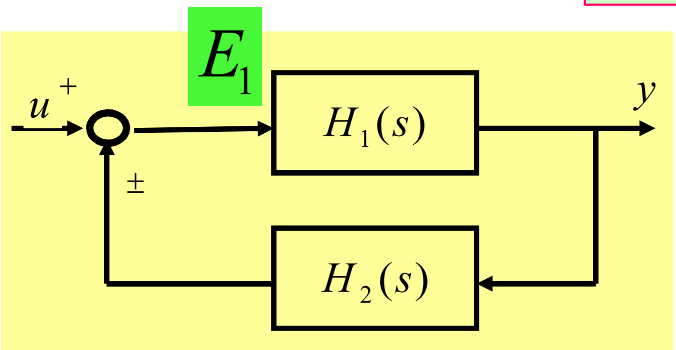
电路系统的机理建模（方块图）

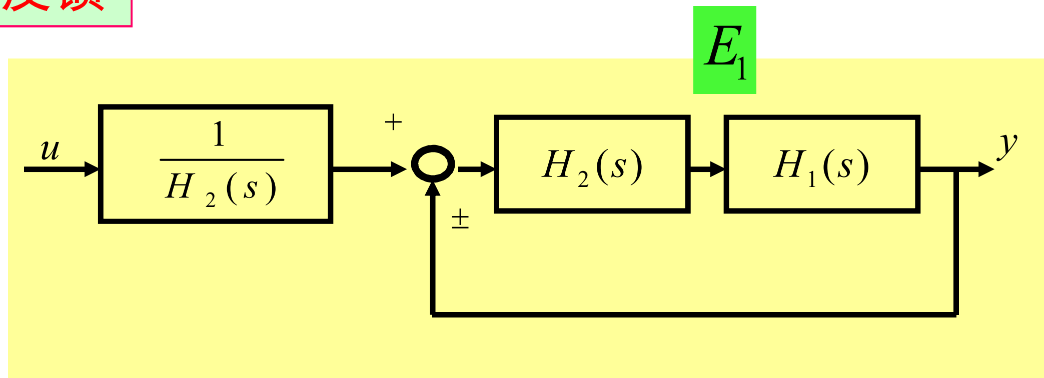
- 相邻多个引出点可以任意换位



电路系统的机理建模（方块图）

等效单位反馈





$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{H_1(s)}{1\mp H_1(s)H_2(s)}$$

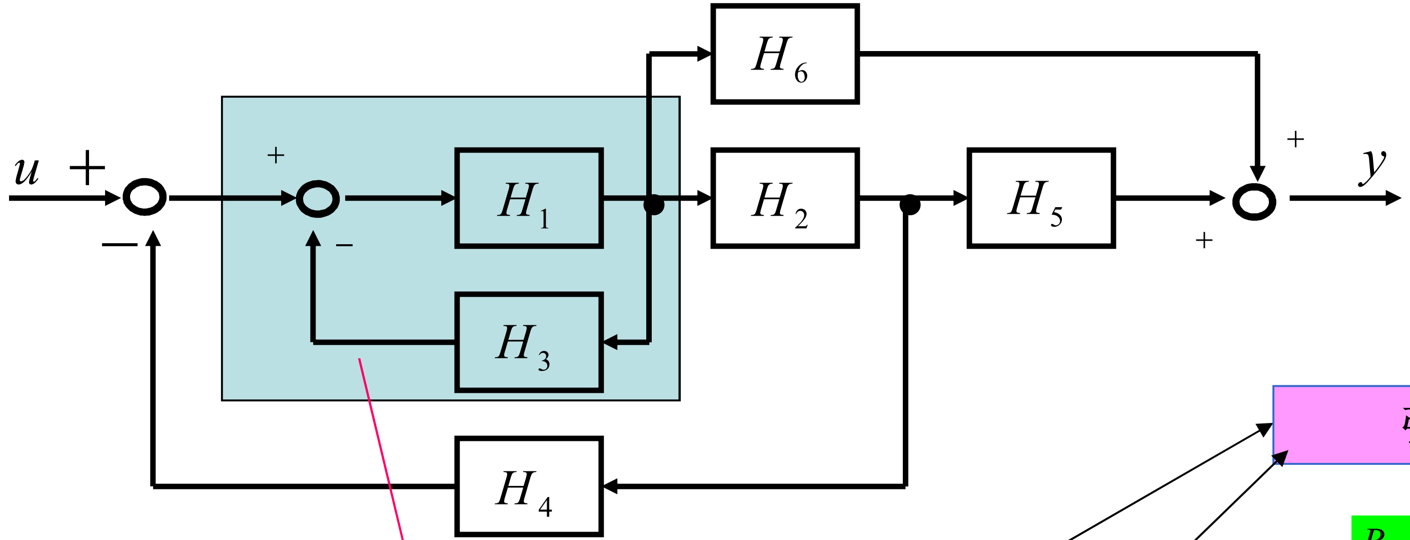
$$G(s)=\frac{1}{\cancel{H_2(s)}}\cdot\frac{H_1(s)\cancel{H_2(s)}}{1\mp H_1(s)H_2(s)}$$

$$E_1(s)=U(s)\pm H_2(s)Y(s)$$

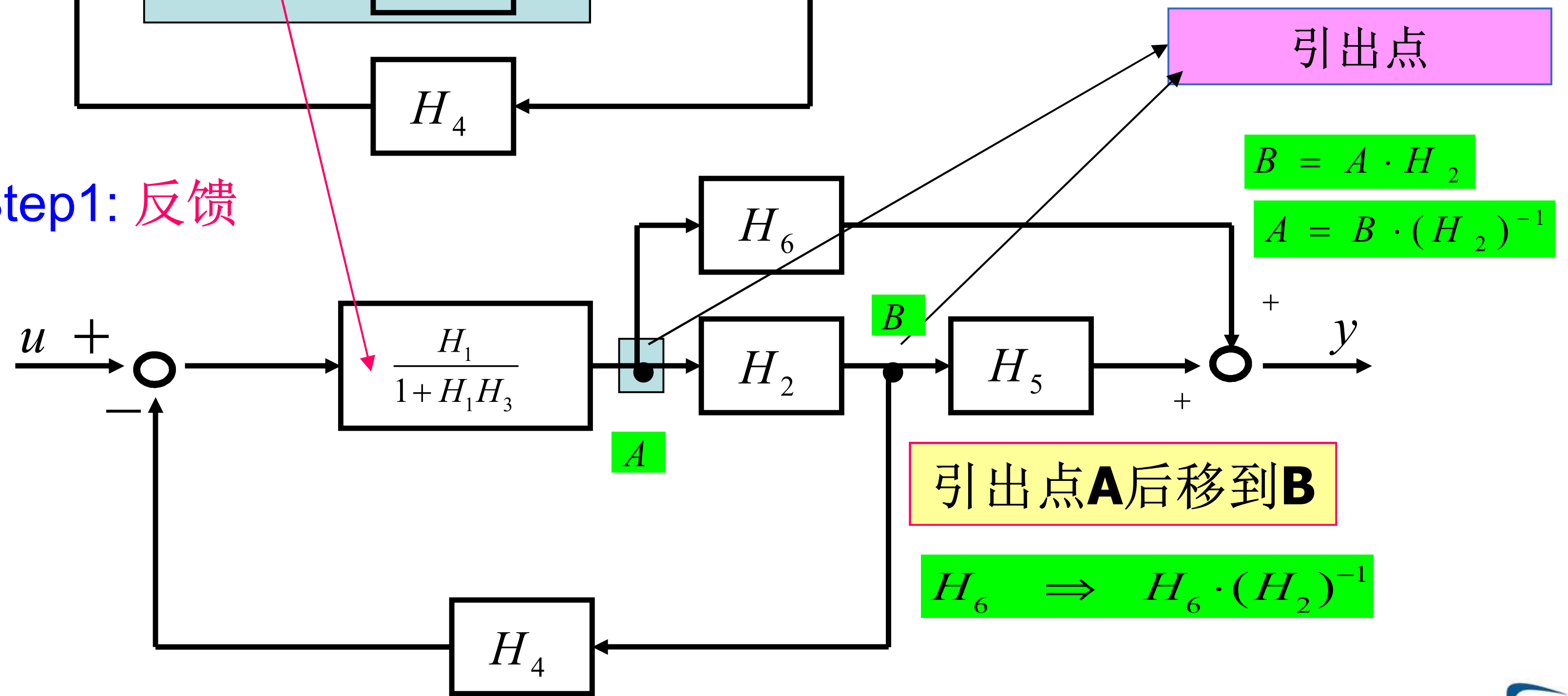
$$E_1(s)=\left(U(s)\frac{1}{H_2(s)}\pm Y(s)\right)H_2(s)$$
$$=U(s)\pm H_2(s)Y(s)$$

电路系统的机理建模（方块图）

例: 求如下系统的传递函数

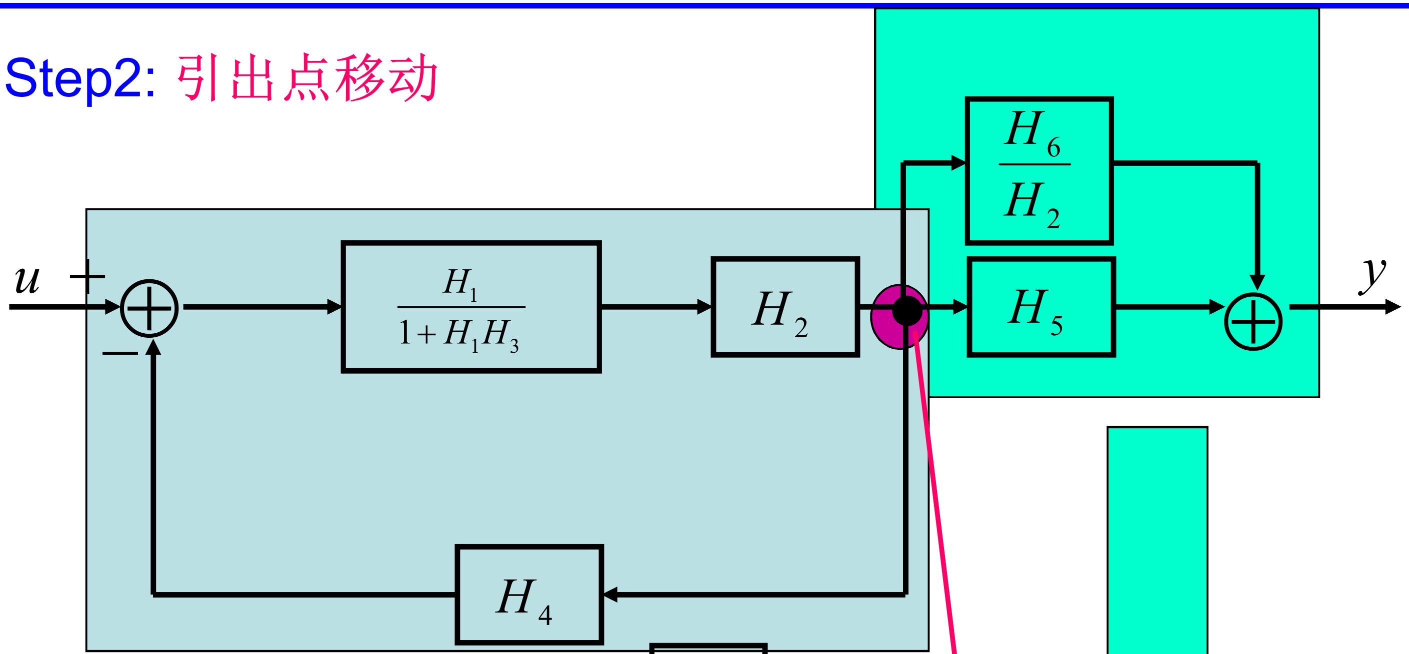


- Step1: 反馈

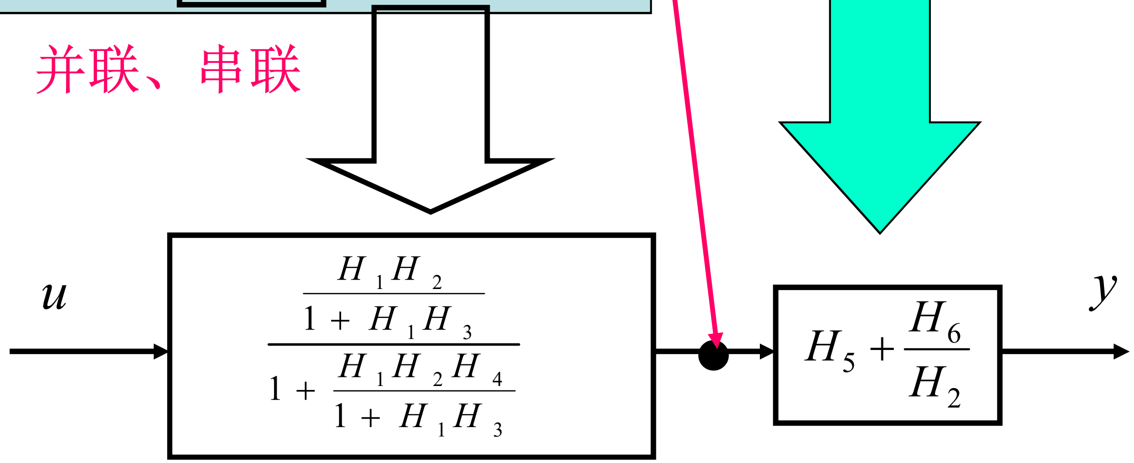


电路系统的机理建模（方块图）

- Step2: 引出点移动

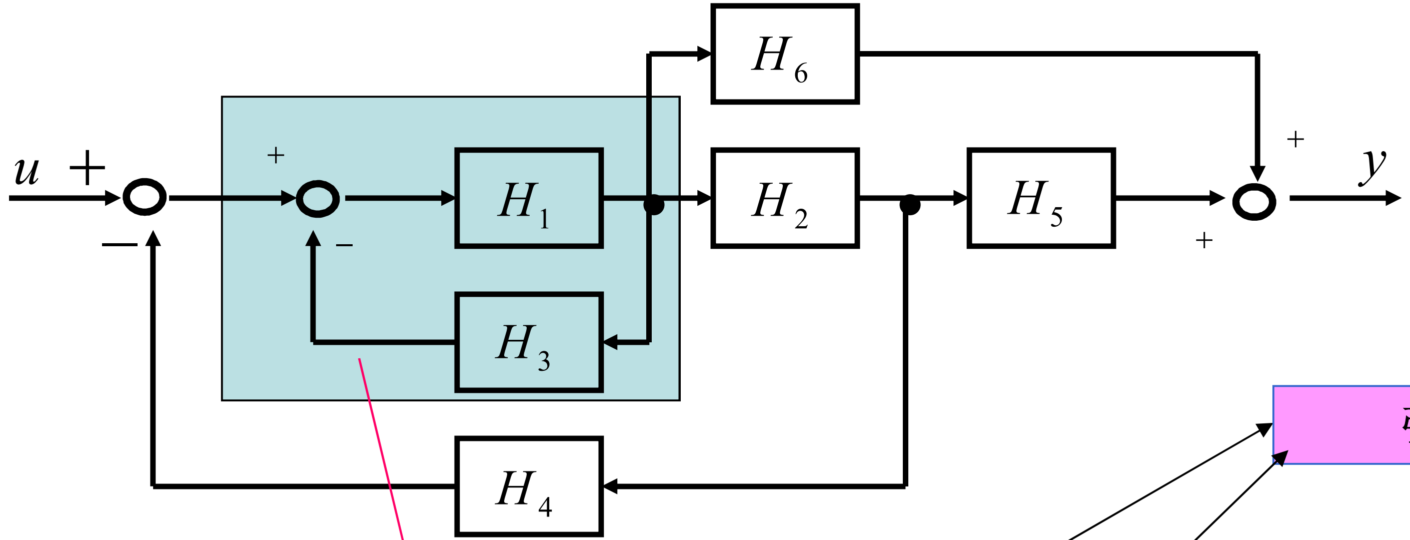


- Step3: 反馈、并联、串联

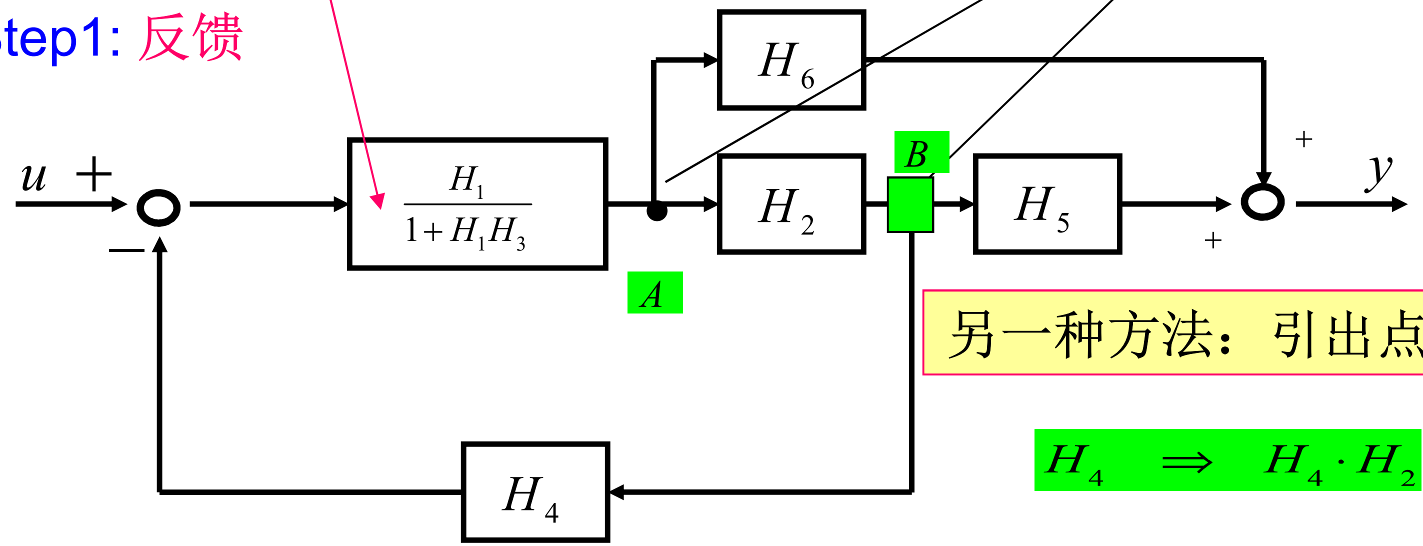


电路系统的机理建模（方块图）

例: 求如下系统的传递函数



- Step1: 反馈



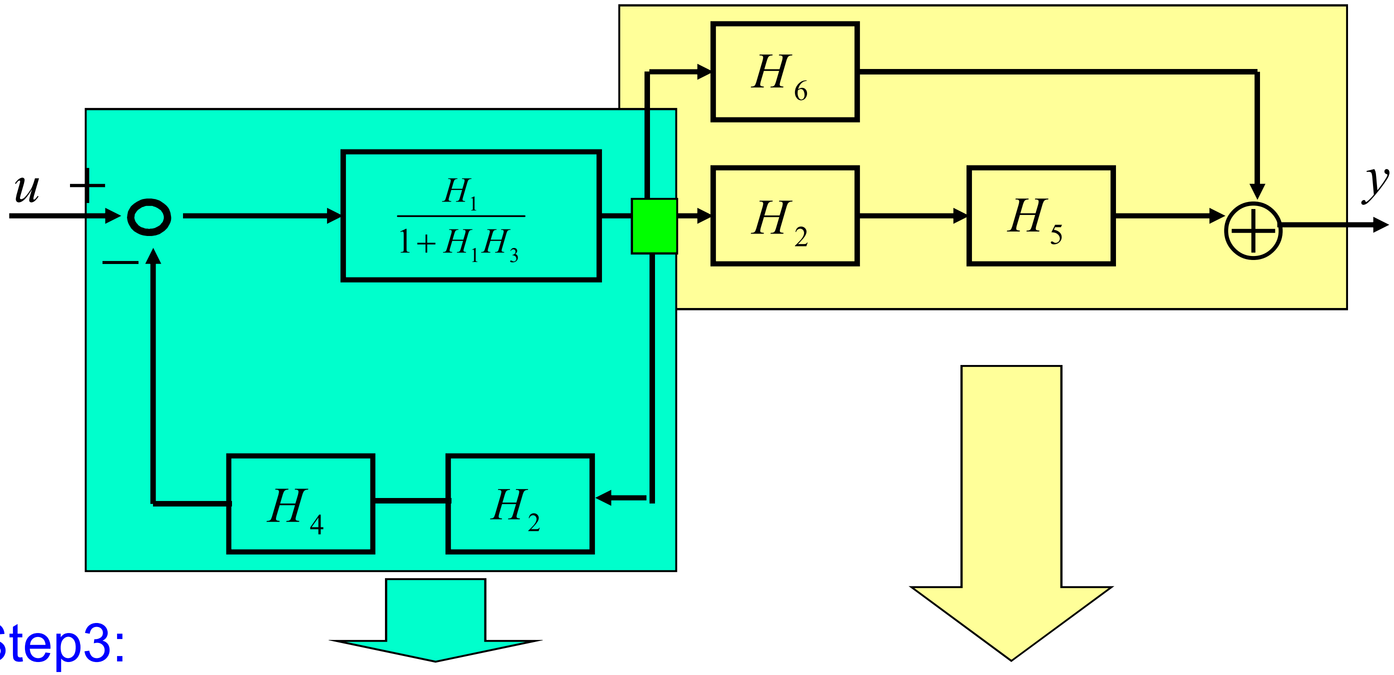
引出点

另一种方法：引出点**B**前移到**A**

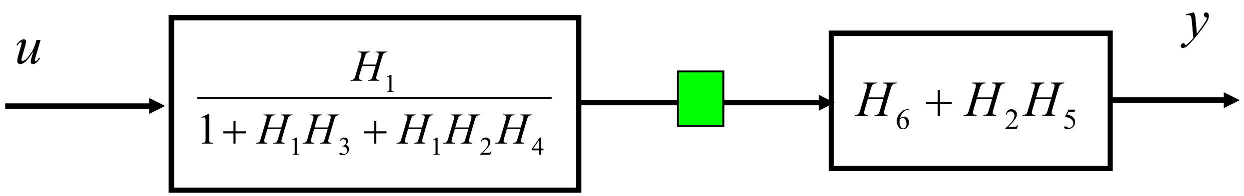
$H_4 \Rightarrow H_4 \cdot H_2$

电路系统的机理建模（方块图）

- Step2:



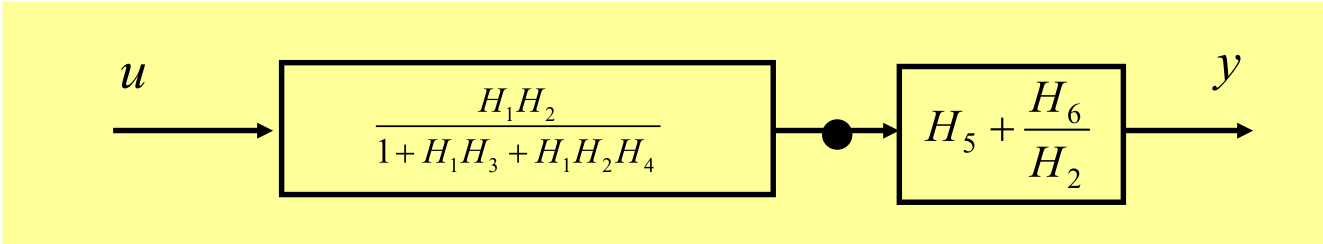
- Step3:



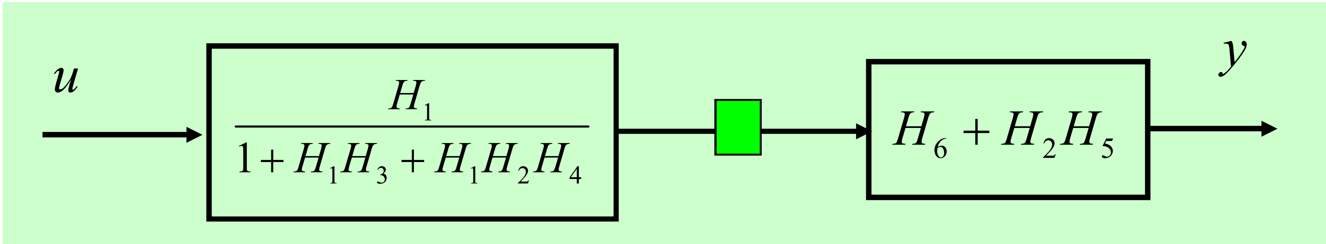
电路系统的机理建模（方块图）

◆ 获得传递函数

引出点A后移



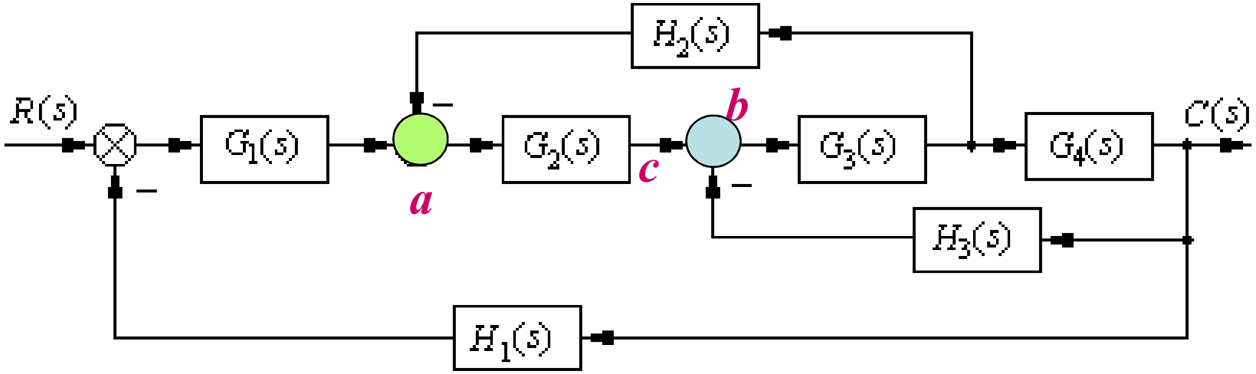
引出点B前移



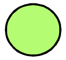
$$\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{\dfrac{H_1H_2}{1+H_1H_3}}{1+\dfrac{H_1H_2H_4}{1+H_1H_3}}\left(H_5+\frac{H_6}{H_2}\right)=\frac{H_1H_2H_5+H_1H_6}{1+H_1H_3+H_1H_2H_4}$$

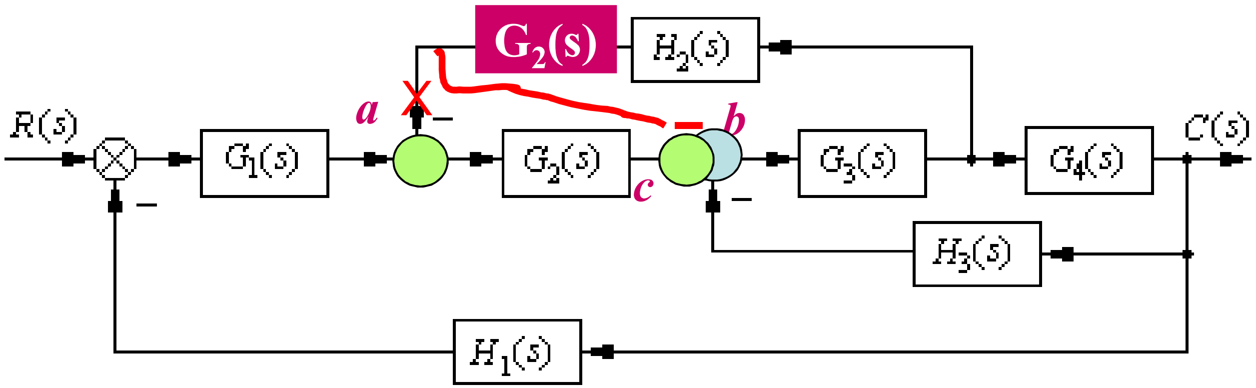
电路系统的机理建模（方块图）

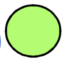
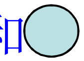
例: 求如下系统的传递函数



2个求和点：a ， b

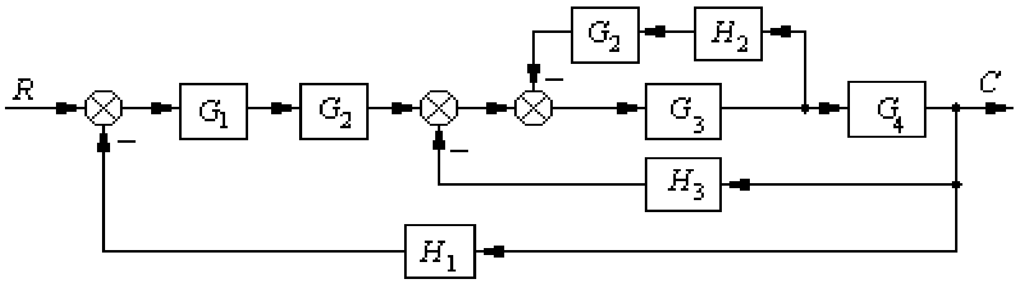
- Step1: (1) 将  从a移动到c



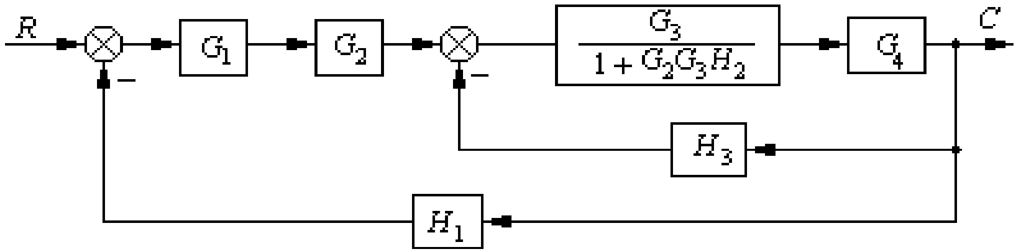
(2) 和换位

电路系统的机理建模（方块图）

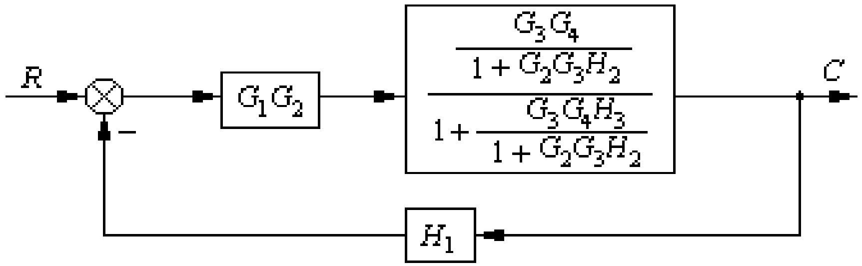
Step2: 串级控制



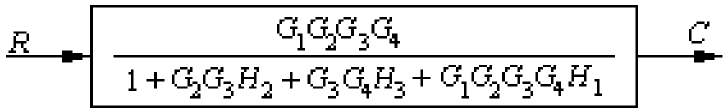
(a)



(b)



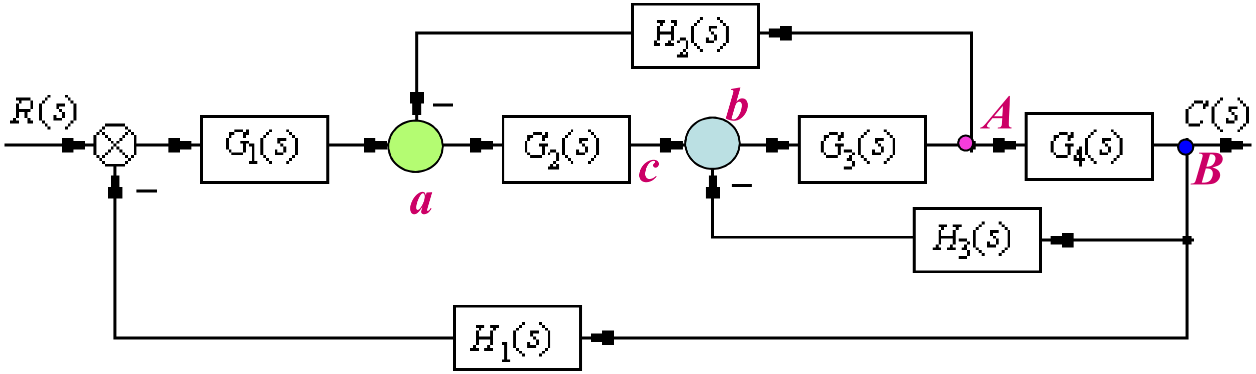
(c)



(d)

电路系统的机理建模（方块图）

例: 求如下系统的传递函数



其它**3**种解法：

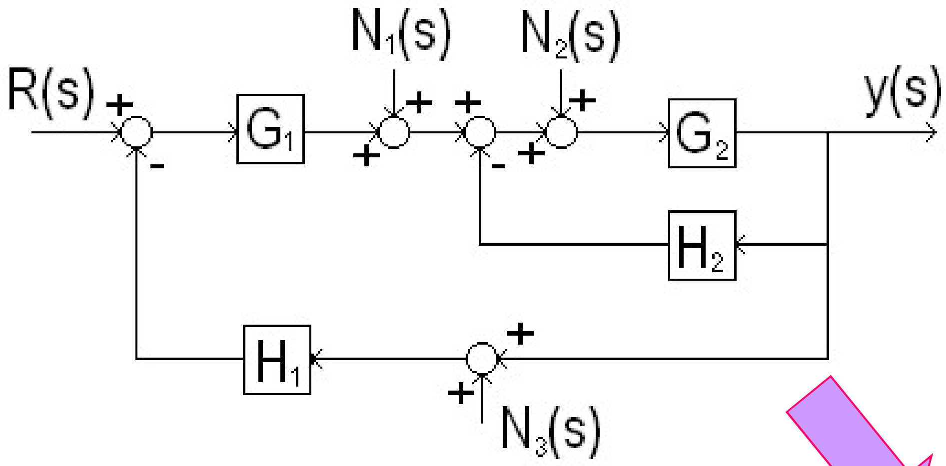
求和点b移动到求和点a附近

引出点A移动到引出点B附近

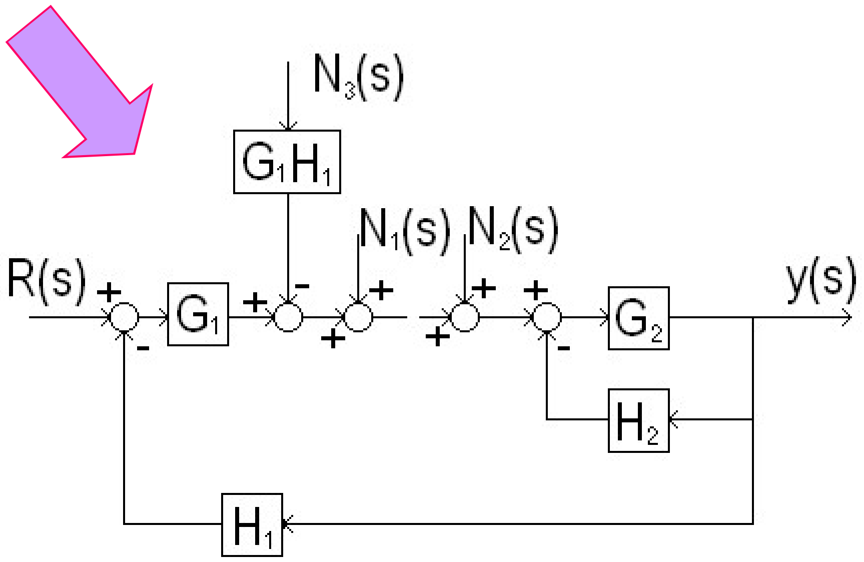
引出点B移动到引出点A附近

电路系统的机理建模（方块图）

◆例：　求如图所示系统输出的表达式



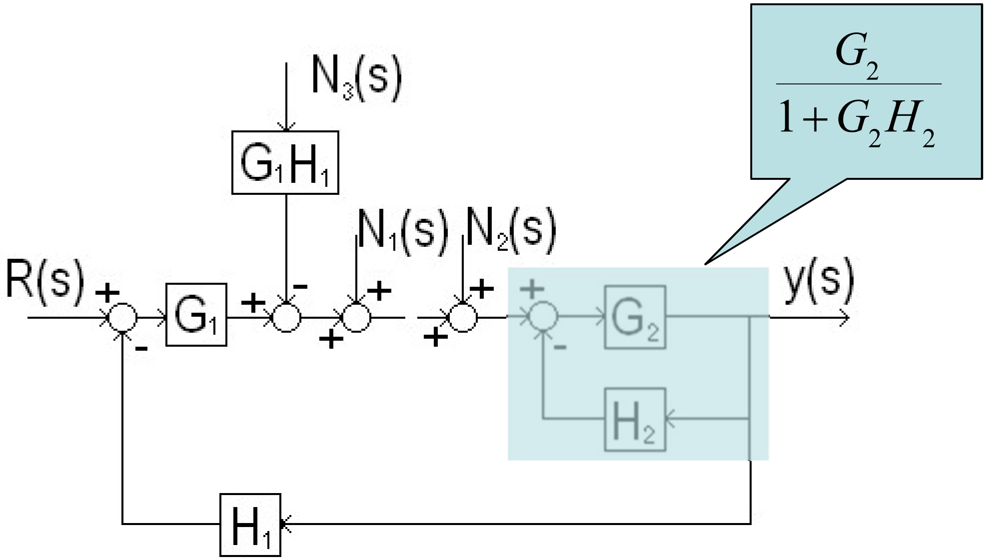
解：移动相加点：N_2前移，N_3越过H_1、G_1前移



电路系统的机理建模（方块图）

$$Y(s)=\frac{G_1\dfrac{G_2}{1+G_2H_2}}{1+G_1H_1\dfrac{G_2}{1+G_2H_2}}R(s)+\frac{\dfrac{G_2}{1+G_2H_2}}{1+G_1H_1\dfrac{G_2}{1+G_2H_2}}\left(N_1(s)+N_2(s)-G_1H_1N_3(s)\right)$$

$$=\frac{G_2N_1(s)+G_2N_2(s)-G_1H_1G_2N_3(s)+G_1G_2R(s)}{1+G_2H_2+G_1H_1G_2}$$



电路系统的机理建模（方块图）

◆例：系统框图见图2-1，要求将系统等效变换成图2-2、图2-3框图结构，并求H(s)，G(s)表达式

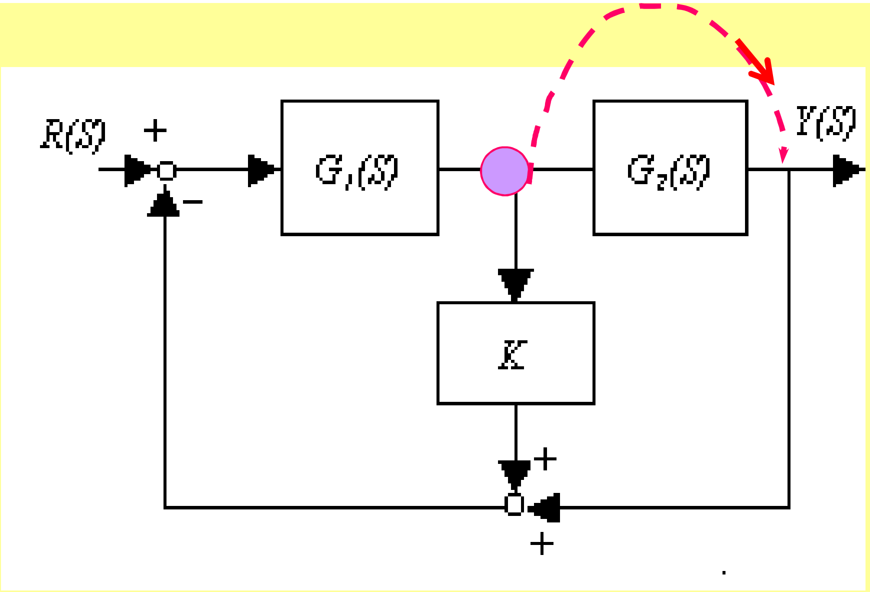


图 2-1

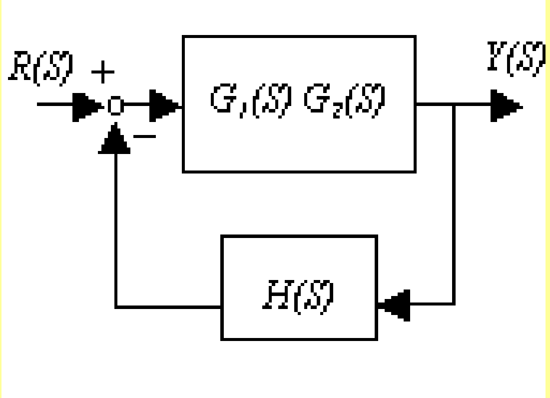


图 2-2

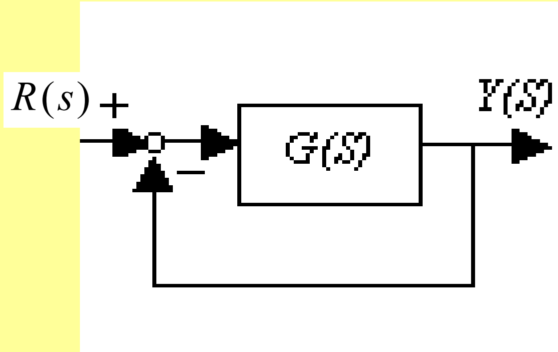


图 2-3

电路系统的机理建模（方块图）

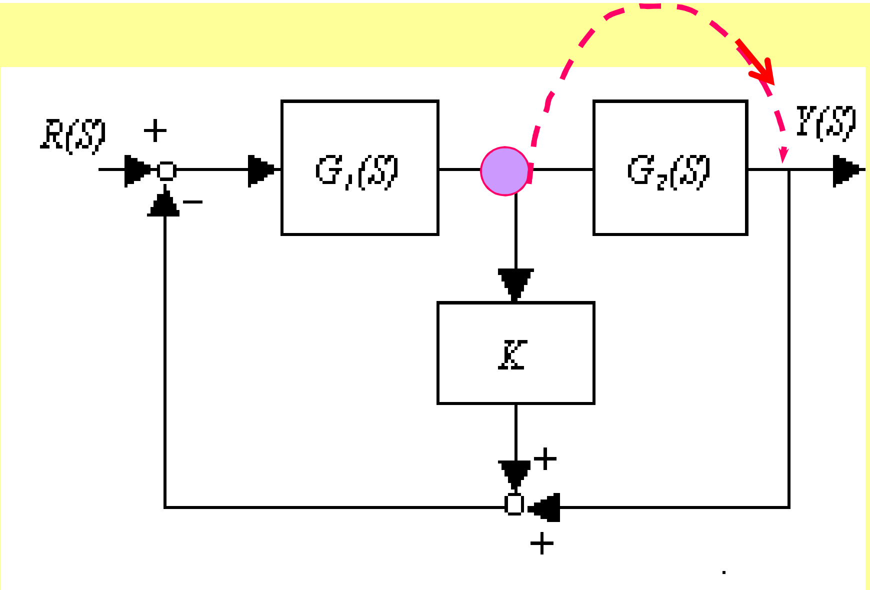
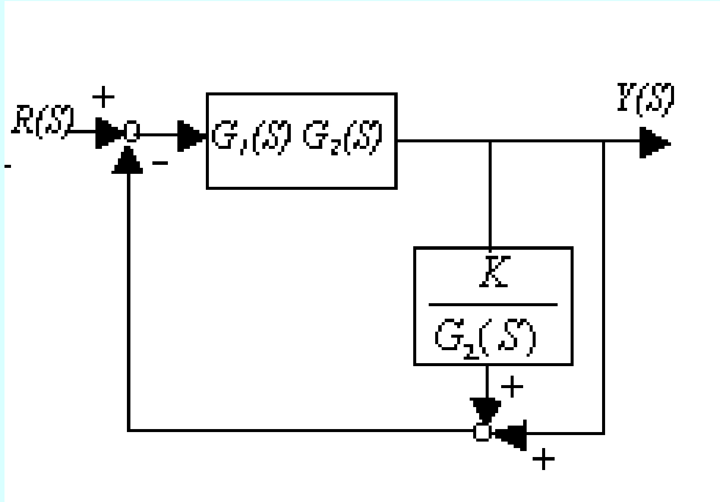


图 2-1



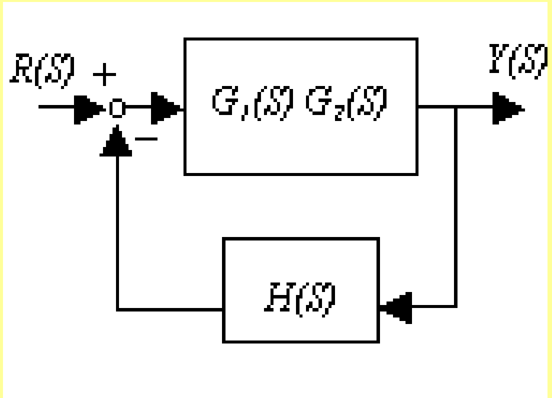


图 2-2

$$H(s) = 1 + \frac{K}{G_2(s)}$$

电路系统的机理建模（方块图）

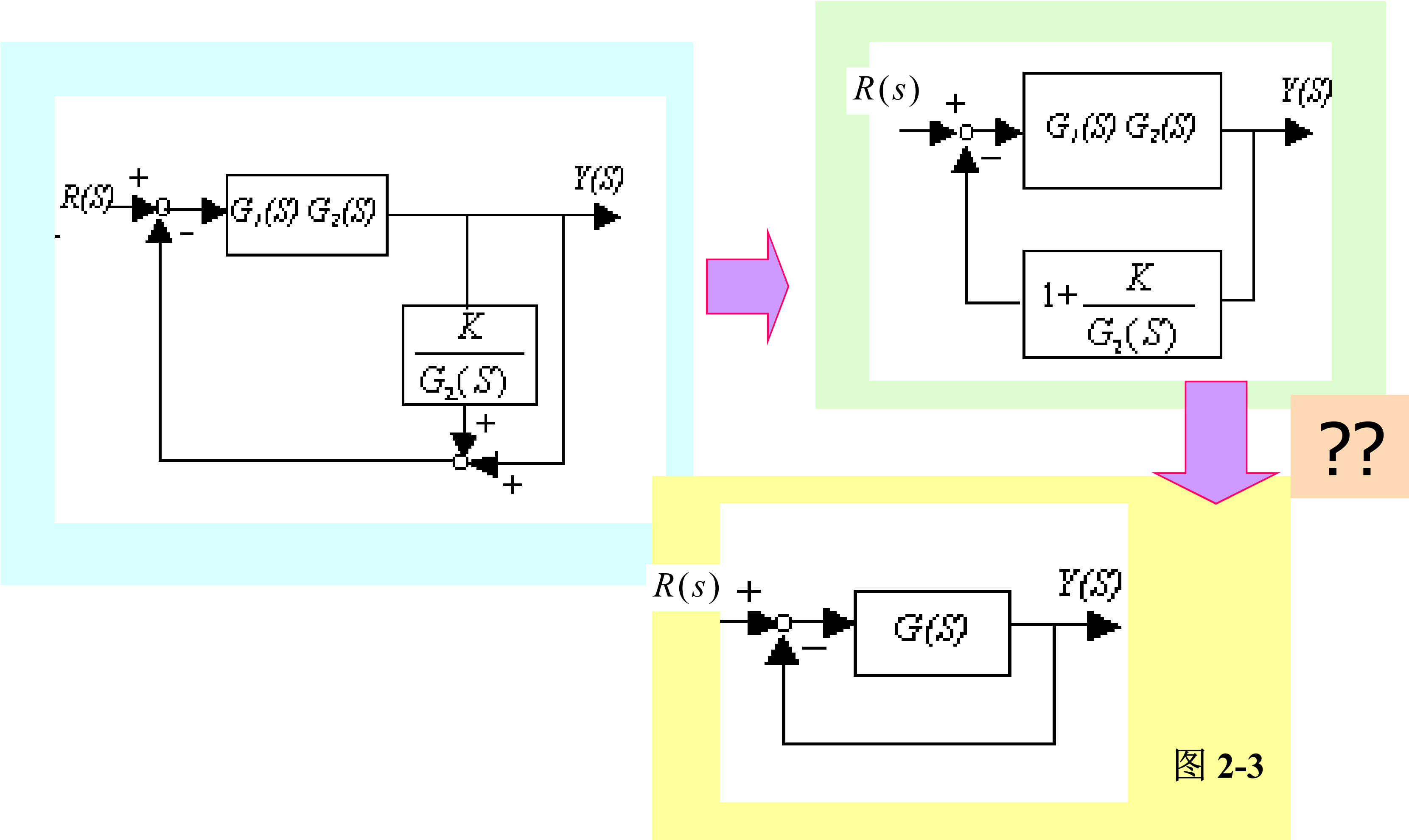
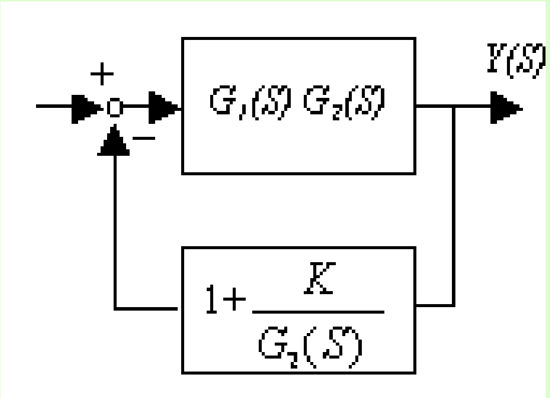
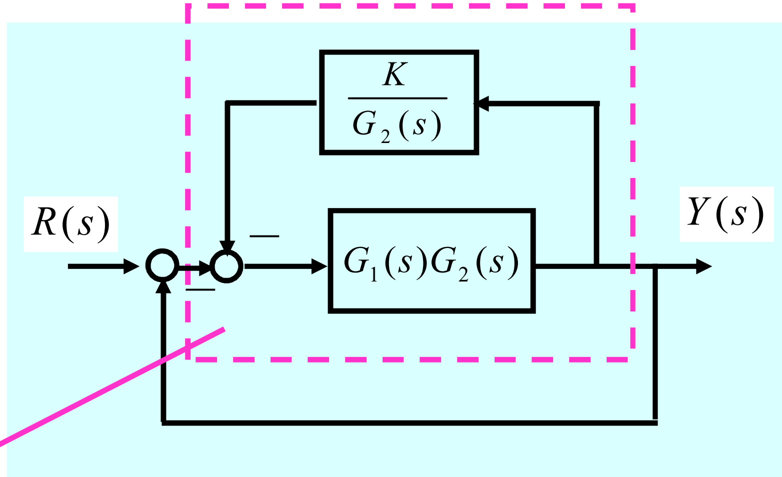


图 2-3

电路系统的机理建模（方块图）





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

$$=\frac{G_1(s)G_2(s)}{1+KG_1(s)}$$

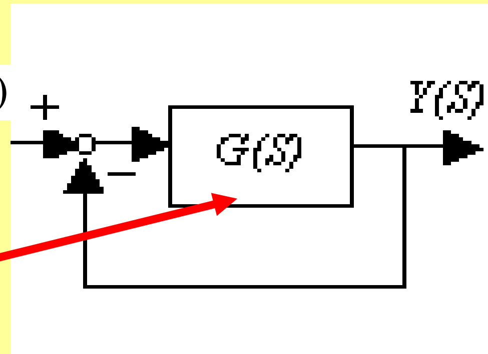
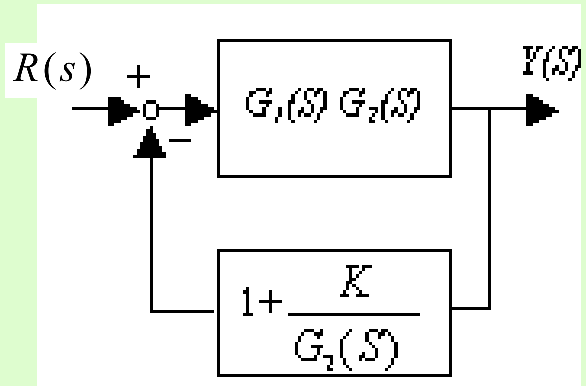


图 2-3

电路系统的机理建模（方块图）

- 另一种方法求G(s)和H(s)

利用闭环传函相等(代数方法)



$$\Phi(s)=\frac{G_1(s)G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)\left(1+\dfrac{K}{G_2(s)}\right)}=\frac{G_1(s)G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)+KG_1(s)}$$

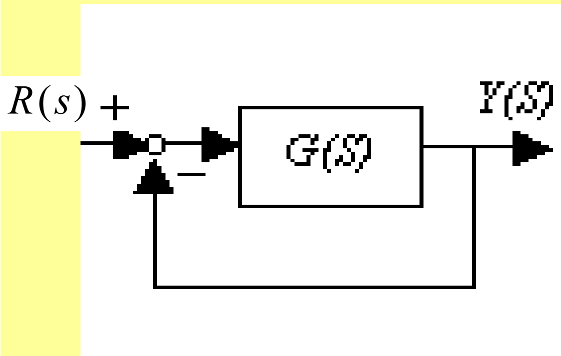


图 2-3

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

$$\Phi(s)+\Phi(s)G(s)=G(s)$$

$$\Phi(s)=(1-\Phi(s))G(s)$$

$$G(s)=\frac{\Phi(s)}{1-\Phi(s)}$$

$$G(s)=\frac{\dfrac{G_1(s)G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)+KG_1(s)}}{1-\dfrac{G_1(s)G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)+KG_1(s)}}=\frac{G_1(s)G_2(s)}{1+KG_1(s)}$$

电路系统的机理建模（方块图）

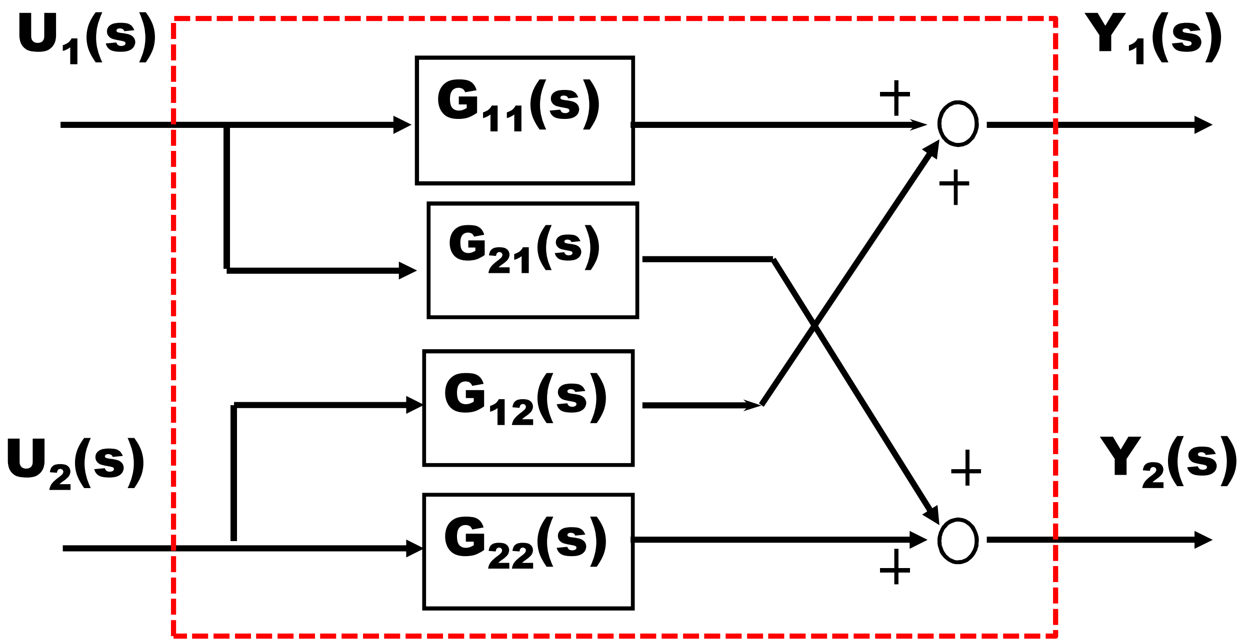
简化方块图求总传递函数的要点

1. 确定输入量与输出量。如果作用在系统上的输入量有多个(分别作用在系统的不同部位)，则必须分别对每个输入量逐个进行结构变换，求得各自的传递函数；对于有多个输出量的情况，也应分别变换。
2. 若方块图中有交叉结构，按同名变量对间传递函数不变原则，将交叉消除，化为无交叉的多回路
3. 对多回路结构，可由里向外进行变换(或按照要求进行方块图的简化)，直至变换为一个等效的方框，即得到所求的传递函数。

电路系统的机理建模（方块图）

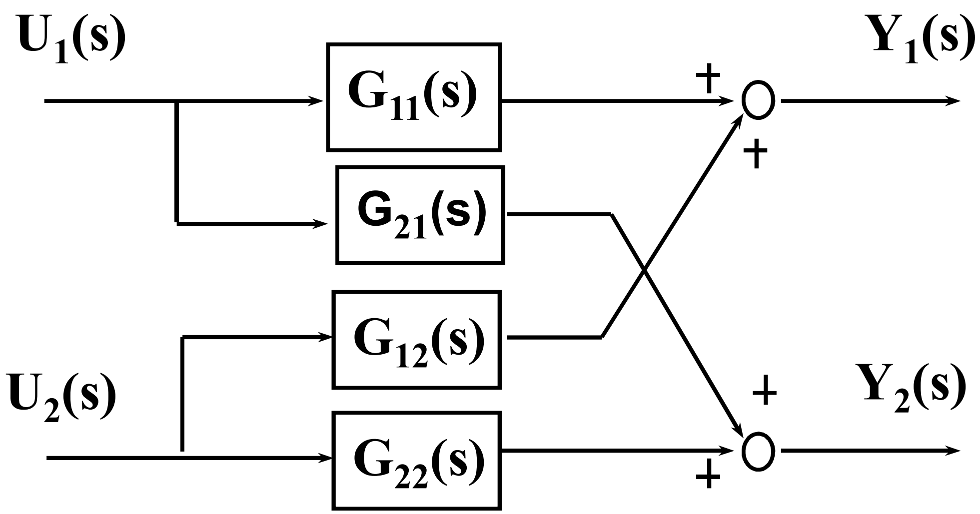
多变量系统的传递函数矩阵表示

将描述单输入单输出(SISO)系统的传递函数推广到多输入多输出(MIMO)系统，就可用传递函数矩阵来描述多变量系统



如图所示两变量系统，当初始条件为零时，Y_1=? Y_2=?

电路系统的机理建模（方块图）



写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix}$$

传递函数矩阵

如图所示两变量系统，当初始条件为零时，可以用拉氏变换式表示：

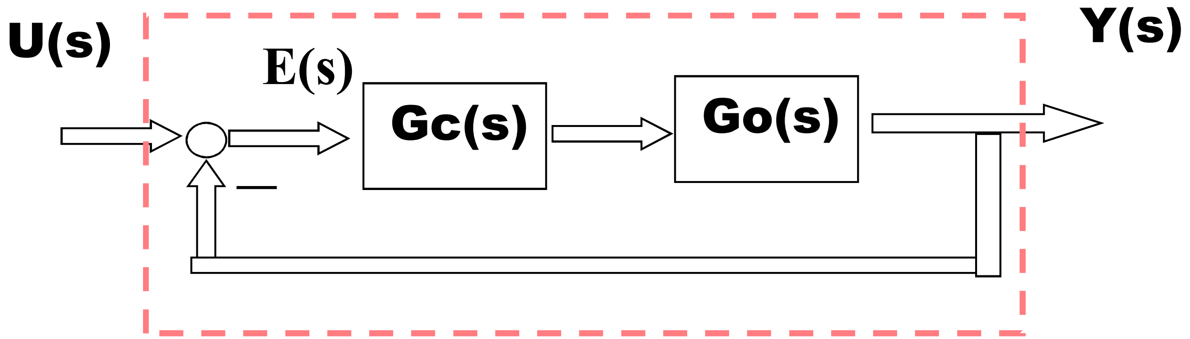
$$Y_1(s) = G_{11}(s)U_1(s) + G_{12}(s)U_2(s)$$
$$Y_2(s) = G_{21}(s)U_1(s) + G_{22}(s)U_2(s)$$

$$\boldsymbol{Y(s) = G(s) \cdot U(s)}$$

传递函数矩阵**G(s)**拓宽了传递函数的概念，它适用于**r**个输入、**m**个输出的系统，这时的**G(s)**为**mxr**维矩阵，其元素$\mathbf{G_{ij}(s)}$表示第**j**个输入对象**i**个输出的传递函数。

电路系统的机理建模（方块图）

对于MIMO系统，在画方块图时，往往采用带箭头的双线表示信息流向



对于多变量系统的方块图运算，特别要注意乘法的前后次序不能颠倒

$$Y(s) = G(s)E(s) = G_0(s)G_c(s)E(s)$$

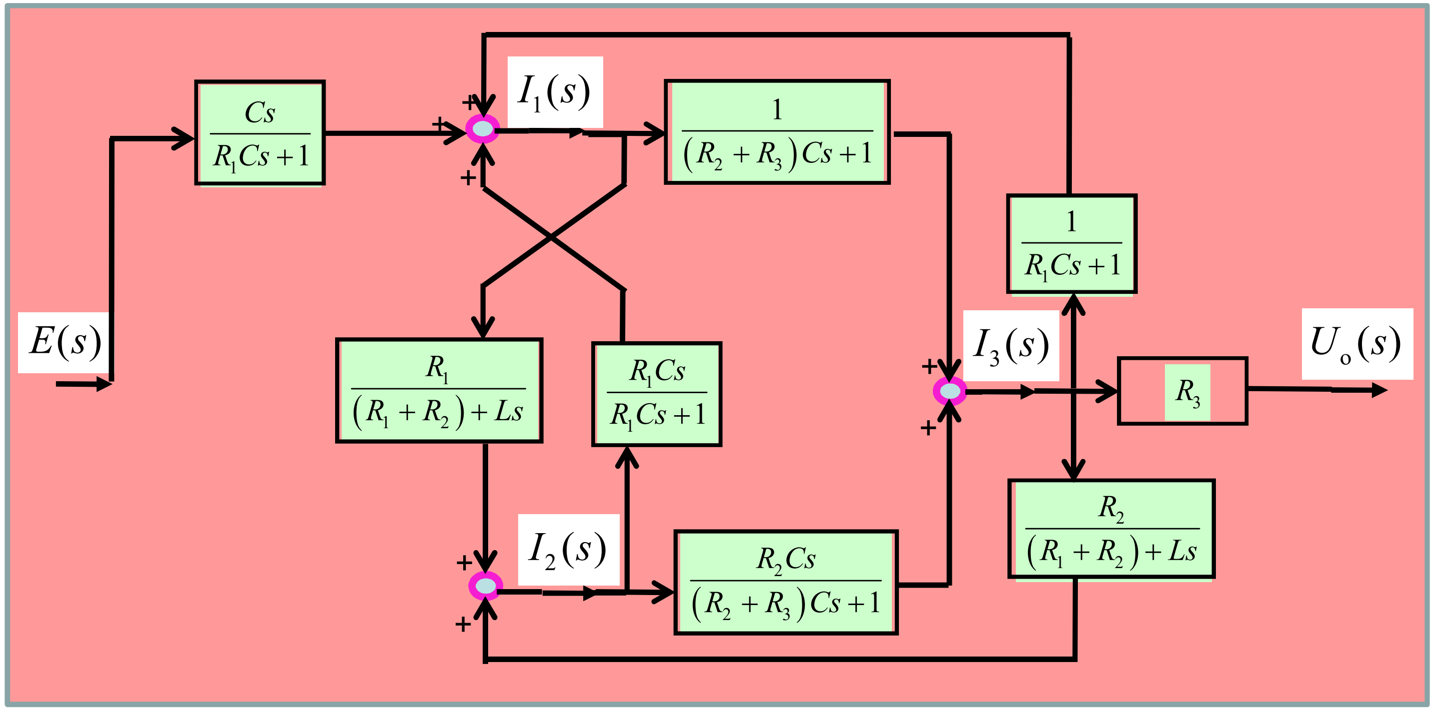
G(s)称为系统的开环传递函数矩阵

$$Y(s) = \Phi(s)U(s) = \left[I + G(s)\right]^{-1} G(s)U(s)$$

$$= G(s)\left[I + G(s)\right]^{-1} U(s)$$

Φ(s)称为系统的闭环传递函数矩阵

电路系统的机理建模（信号流图）



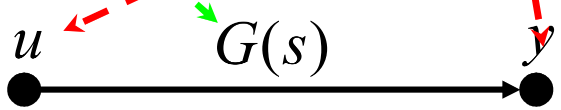
化简此方块图，几何方法非常繁
需要研究系统化的代数方法

信号流图（SFG，Signal Flow Graph）
梅逊增益公式（简称梅逊公式）

电路系统的机理建模（信号流图）

信号流图（SFG）定义

- 信号流图是由节点和支路组成的信号传递网络
  - 节点表示系统中的变量（信号）
  - 系统元件的传递函数可以由连接两个节点的有向支路表示。



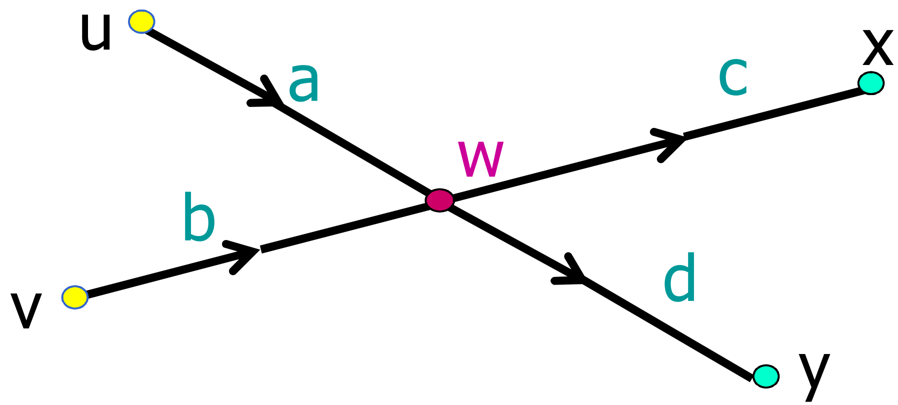
$$y = G(s)u$$

•连接两个节点的支路相当于单向乘法器：方向由箭头表示；乘法运算因子（传递函数或增益）置于相应的支路上。

注意：增益可正可负

电路系统的机理建模（信号流图）

- 节点还具有两种作用：
  (1)　对所有来自于流入支路的信号作加法运算
  (2)　将流入信号之和传输给所有的流出支路



$$w = au + bv$$

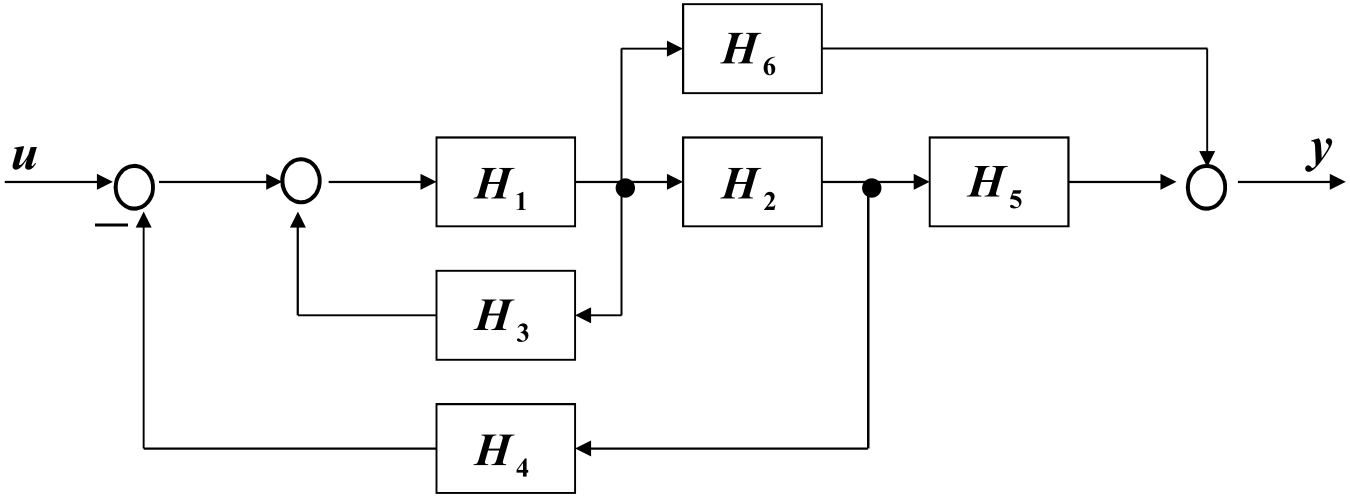
$$x = cw = c(au + bv)$$

$$y = dw = d(au + bv)$$

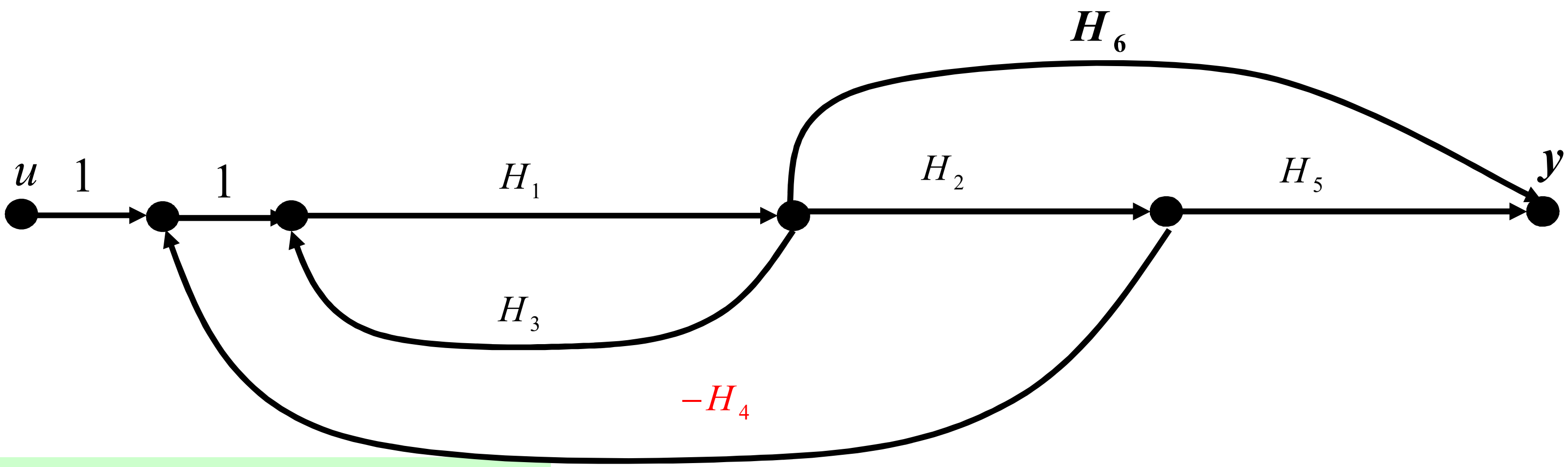
- 因此，可以利用 **SFG** 表示输入输出关系

电路系统的机理建模（信号流图）

例：试用信号流图表示如下系统



解：



电路系统的机理建模（信号流图）

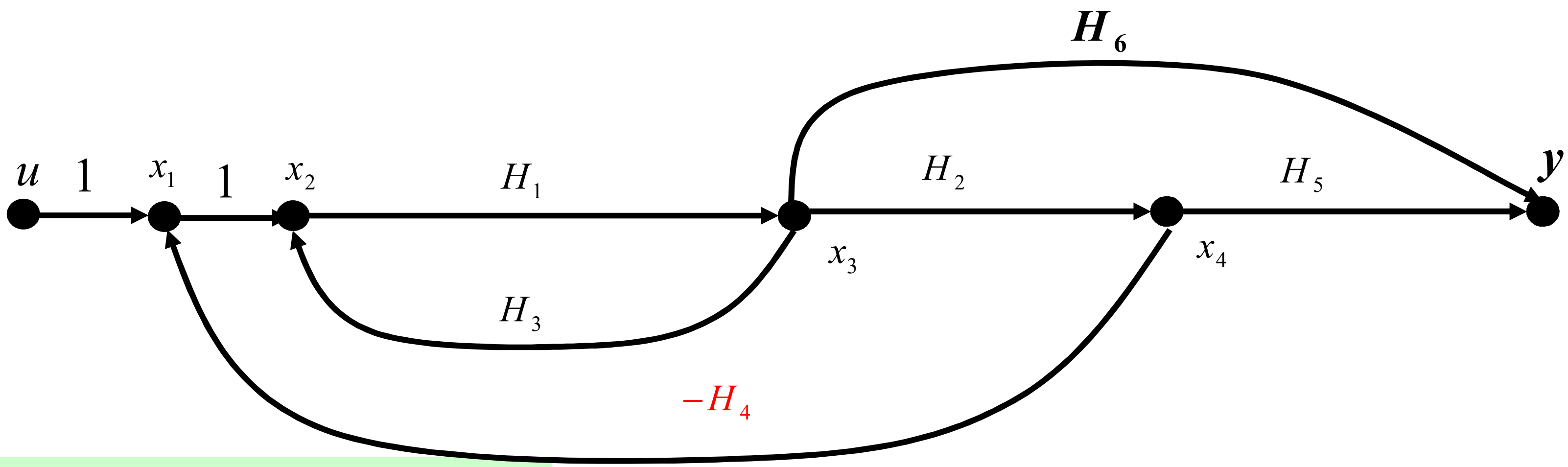
$$x_1 = u - H_4 x_4$$
$$x_2 = x_1 + H_3 x_3$$
$$x_3 = H_1 x_2$$
$$x_4 = H_2 x_3$$
$$y = H_6 x_3 + H_5 x_4$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -H_4 \\ 1 & 0 & H_3 & 0 \\ 0 & H_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$x = Ax + bu$$
$$y = Cx$$

$$x = (I - A)^{-1} bu$$
$$y = C(I - A)^{-1} bu$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & H_6 & H_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$



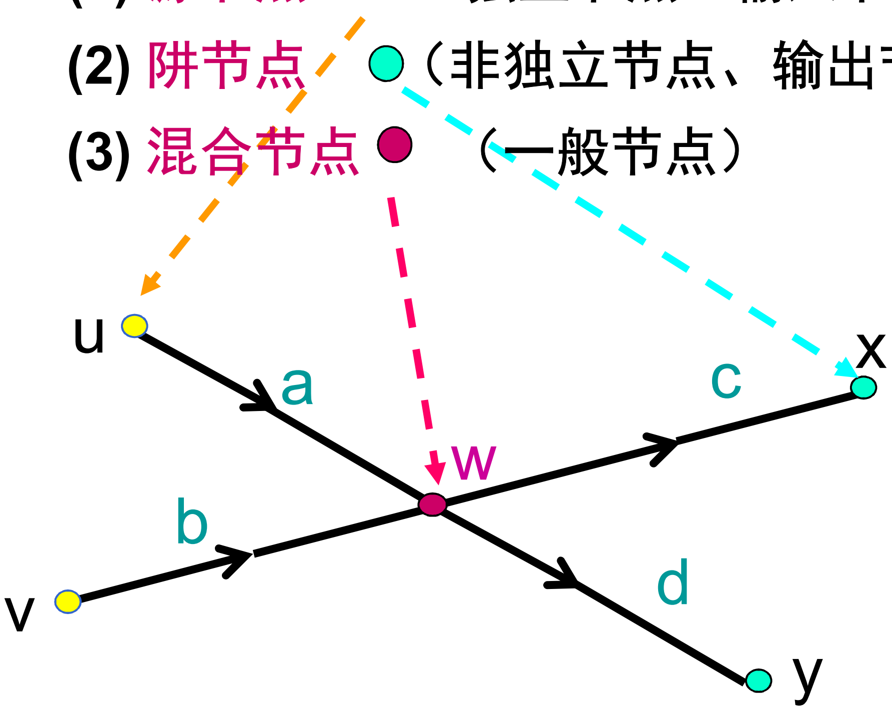
电路系统的机理建模（信号流图）

◆ 节点有三种类型

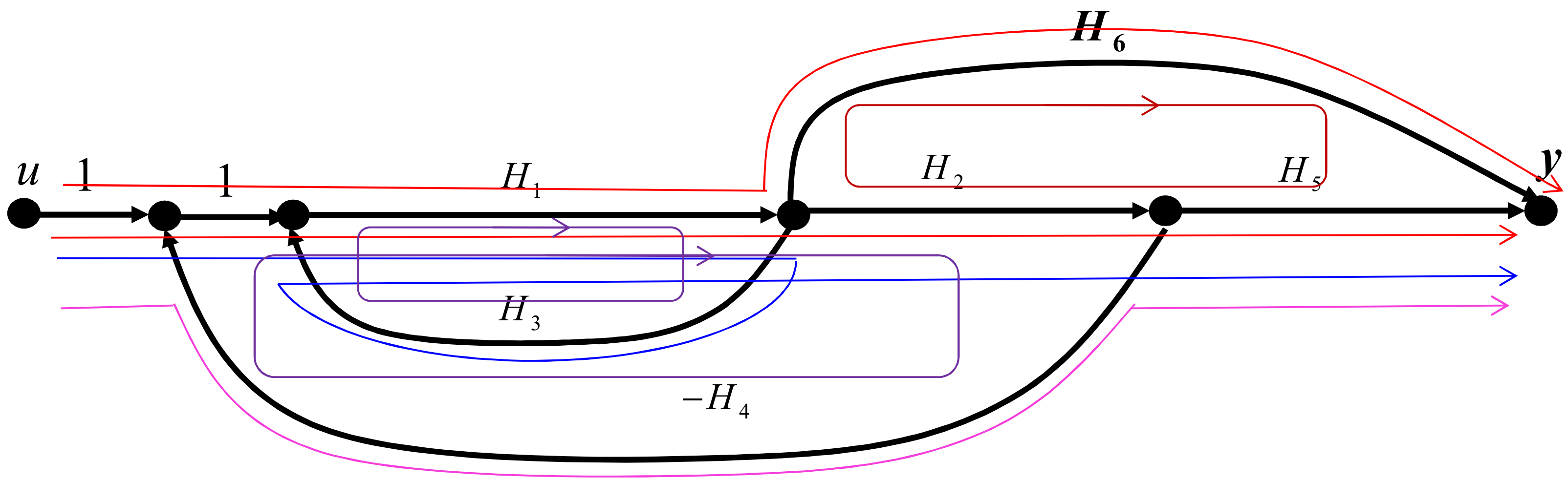
(1) 源节点 （独立节点、输入节点）：仅有流出支路

(2) 阱节点 （非独立节点、输出节点）：仅有流入支路

(3) 混合节点 （一般节点）



电路系统的机理建模（信号流图）



前向通路：从源节点到阱节点的一条可循箭头方向走通的有向路径，该路径与其上的节点相交不多于一次

前向通路增益：前向通路中各支路增益的乘积

回路：一条可循箭头方向走通的闭合有向路径，该路径与其上的节点相交不多于一次

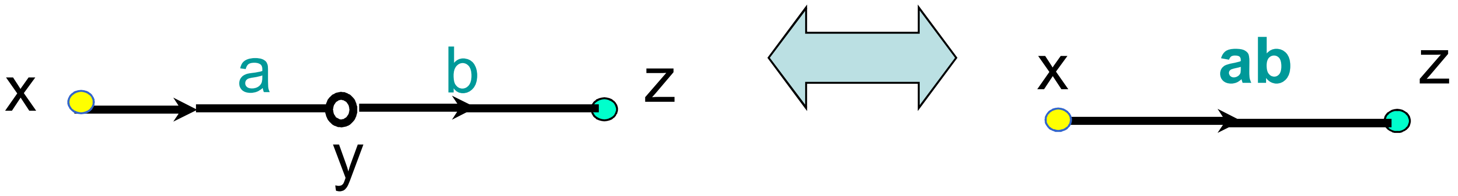
回路增益：回路中各支路增益的乘积

电路系统的机理建模（信号流图）

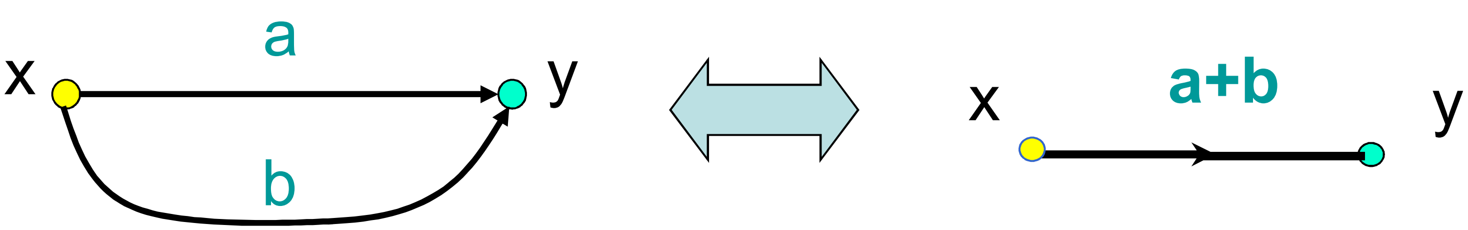
信号流图（SFG）的若干变换

- 串联通路

原始图　　　　　　等效图

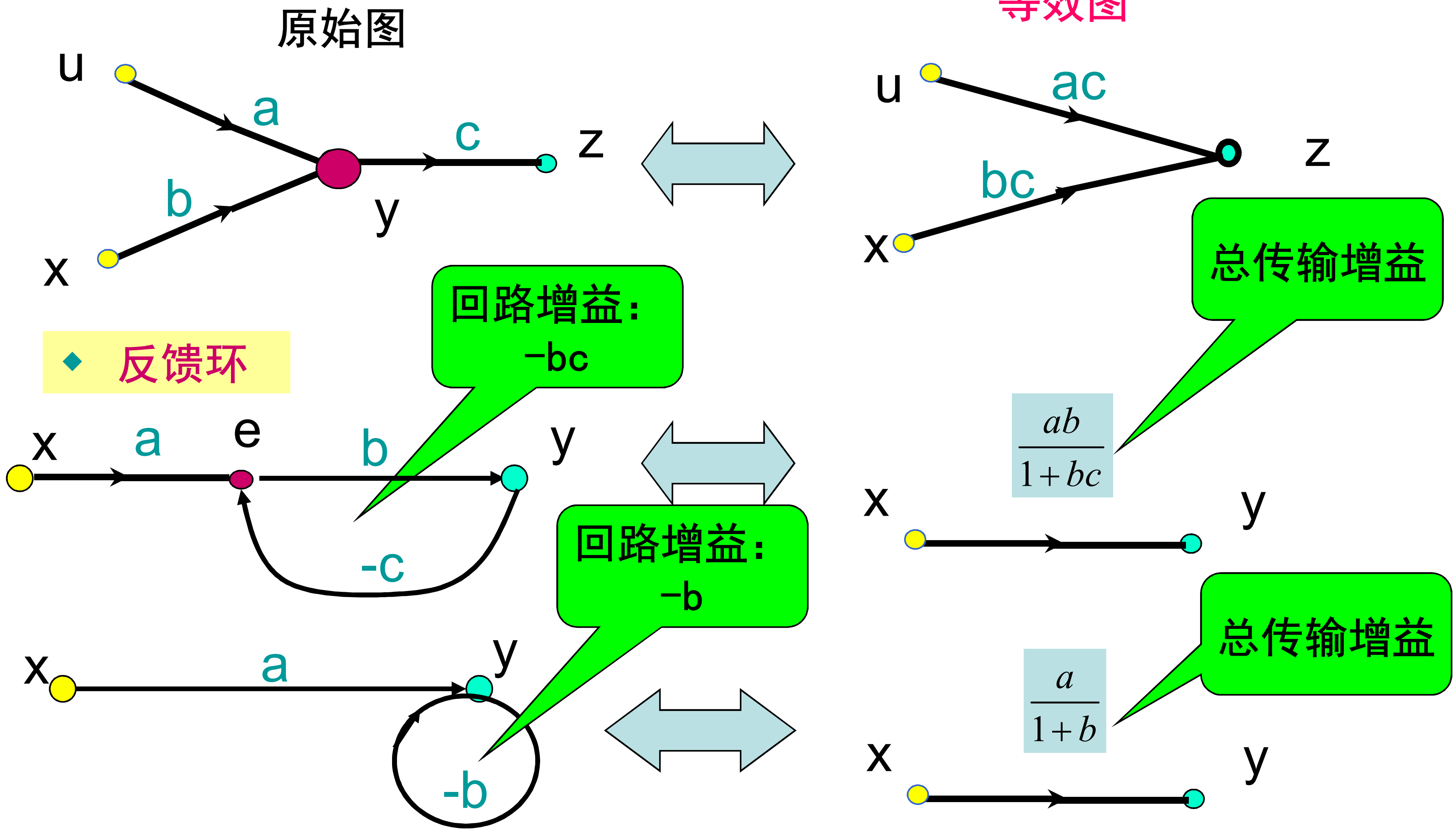


- 并联通路



电路系统的机理建模（信号流图）

- 节点消除
- 反馈环



回路增益相当于开环传函，总传输增益相当于从输入到输出的传递函数