西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

自 动 控 制 理 论
Automatic Control Theory

工业自动化系

上节课要点复习

线性系统的结构图

是描述系统各元部件之间信号传递关系的图形化数学模型。

作用原理（方框图） + 数学模型 ➜结构图

结构图的构成

4种元素：信号线、引出点、比较点、方框

结构图的等效变换和简化

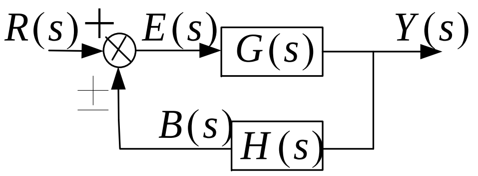
串联、并联和反馈连接

比较点和引出点的移动

复杂结构图的简化

解除交叉（同类互移），交叉嵌套变层层嵌套

反馈连接方框图的等效简化

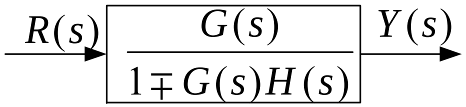


(a)

$Y(s)=G(s)E(s)$ $B(s)=H(s)Y(s)$ ***G*(s)是前向通道传递函数**

$E(s)=R(s)\pm B(s)$ ***H*(s)反馈通道传递函数**

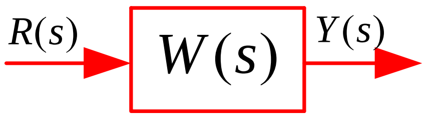
$H(s)=1$ 单位反馈系统



(b)

$$Y(s)=G(s)\left[R(s)\pm H(s)Y(s)\right]=\frac{G(s)}{1\mp G(s)H(s)}R(s)$$

$$G_o(s)=B(s)/E(s)=G(s)H(s)$$ 开环传递函数



反馈连接及其简化

$$Y(s)=W(s)R(s)$$

$$W(s)=\frac{G(s)}{1\mp G(s)H(s)}=\frac{\text{前向通道传递函数}}{1\mp\text{开环传递函数}}$$

式中负号对应正反馈连接，正号对应负反馈连接

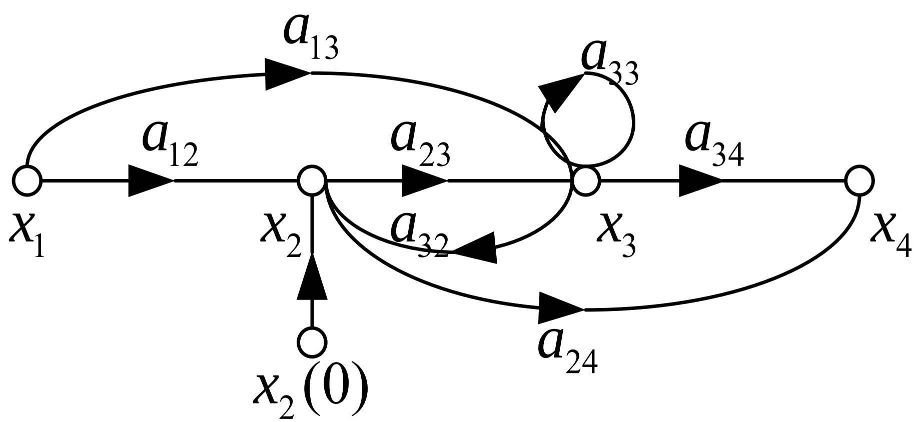
闭环传递函数

信号流图的基本概念

- 信号流图，是一种表示一组联立线性代数方程的网络图，是一种图形表示的数学模型。
- 信号流图，是由节点和支路组成的一种信号传递网络图。（2个要素）

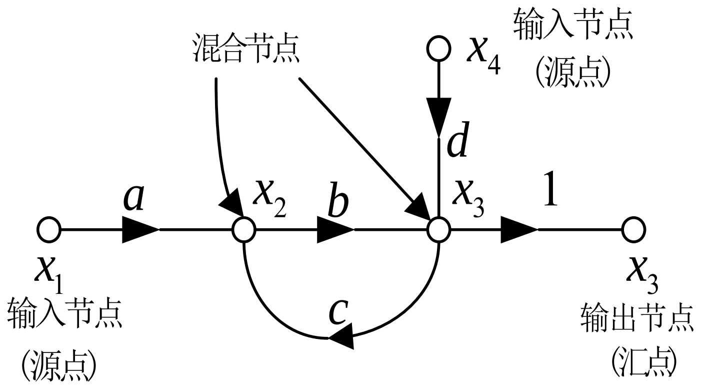
线性系统

$$x_2 = a_{12}x_1 + a_{32}x_3 + x_2(0)$$
$$x_3 = a_{13}x_1 + a_{23}x_2 + a_{33}x_3$$
$$x_4 = a_{24}x_2 + a_{34}x_3$$



信号流图的基本概念

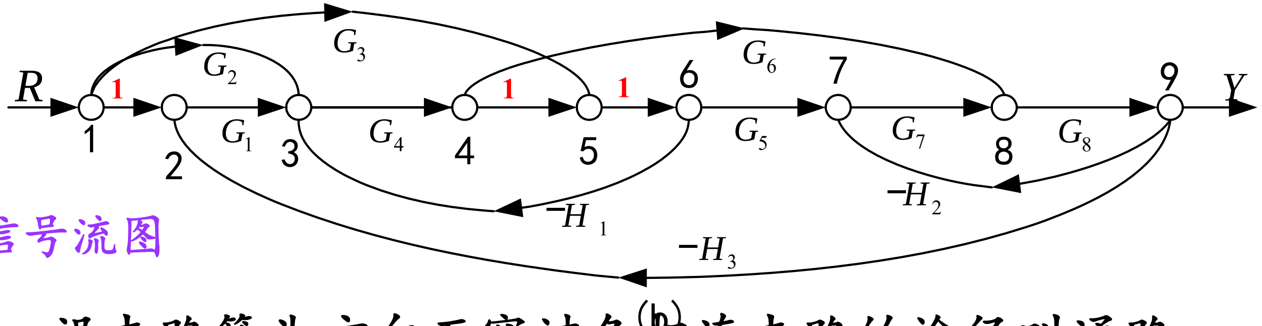
- **节点：** 是用来表示变量；节点可以把所有输入支路的信号叠加，并把总和信号传送到所有输出支路。
- **支路：** 支路是连接两个节点的有向线段，信号只能沿着支路上的箭头方向通过。
- **增益：** 支路上标明的乘法因子，反应了节点（信号）间的函数关系；
- **输入节点(源点)：** 只有输出支路的节点，对应自变量；
- **输出节点(汇点)：** 只有输入支路的节点，对应因变量；
- **混合节点：** 既有输入支路，又有输出支路；



信号流图

2.5 线性系统的信号流图

信号流图的基本概念

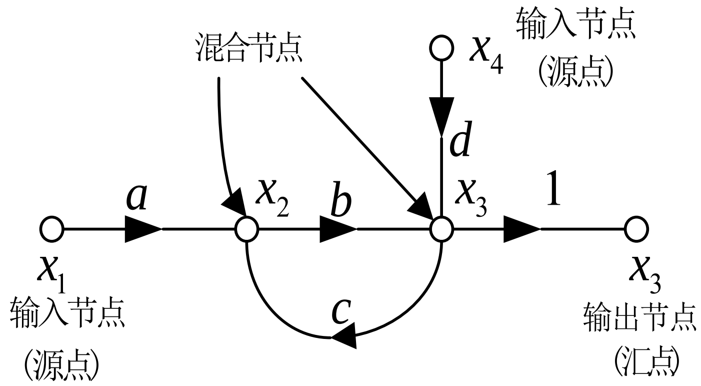


信号流图

- **通路：**沿支路箭头方向而穿过各相连支路的途径叫通路；
- **回环：**通路的终点就是通路的起点，并且与任何其它节点相交不多于一次；
- **回环增益：**回环中各支路增益的乘积；
- **不接触回环：**如果一些回环没有任何公共节点，则叫做不接触回环；
- **前向通道：**如果从输入节点（源点）到输出节点（汇点）的通路上，通过任何节点不多于一次，则该通路叫做前向通道。
- **前向通道增益：**前向通道中，各支路增益的乘积，叫前向通道增益。

信号流图的性质

（1）支路表示了一个信号对另一个信号的函数关系。信号只能沿着支路上的箭头方向通过。



信号流图

（2）节点可把所有输入支路信号叠加，并把总和信号传送到所有输出支路。

（3）具有输入和输出支路的混合节点，通过增加一个具有单位增益的支路，可以把它变成输出节点来处理，如图中x3。

（4）同一系统的信号流图不是唯一的。由于同一系统的方程可以写成不同的形式，所以对于给定的系统，可以画出许多种不同的信号流图。

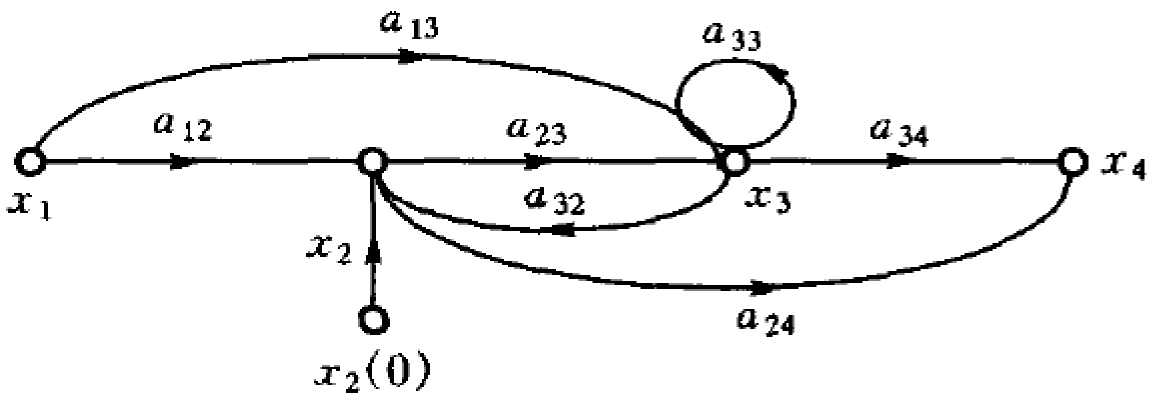
2.5 线性系统的信号流图

信号流图的绘制

(1) 由微分方程绘制

$$x_2 = a_{12}x_1 + a_{32}x_3 + x_2(0)$$
$$x_3 = a_{13}x_1 + a_{23}x_2 + a_{33}x_3$$
$$x_4 = a_{24}x_2 + a_{34}x_3$$

- 节点 x1, x2, x3, x4, x2(0)



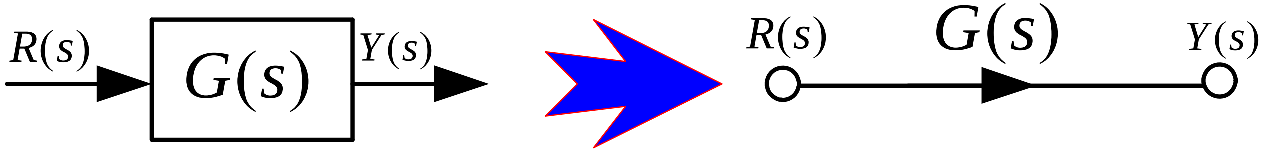
2.5 线性系统的信号流图

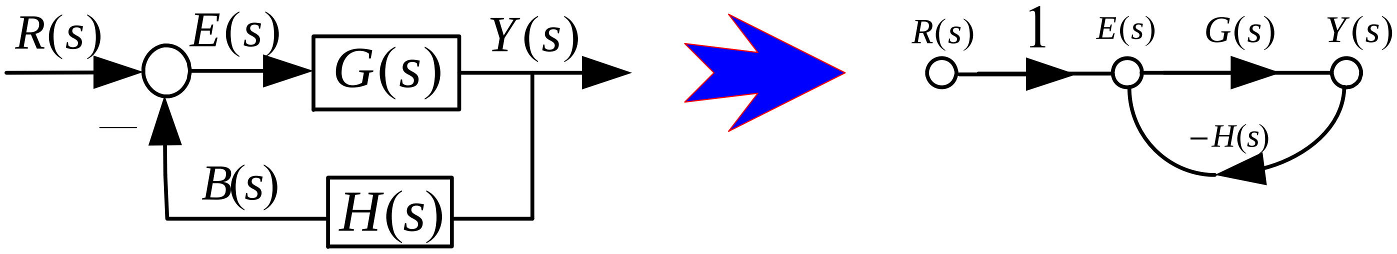
信号流图的绘制

(2) 由方框图绘制　　分支点、比较点 ➞ 节点

信号线、方框 ➞支路

必要时增加支路、节点





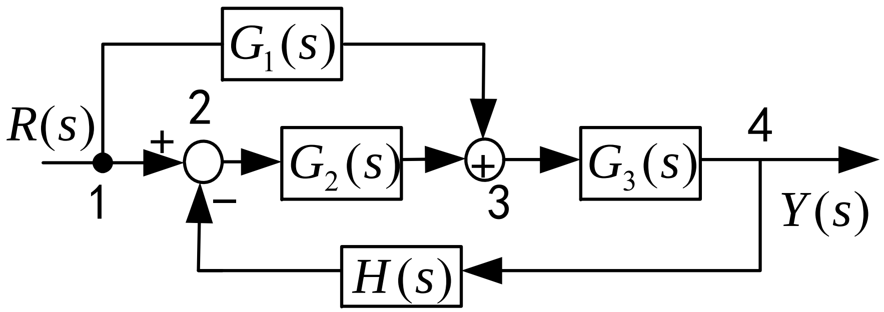
信号流图的绘制

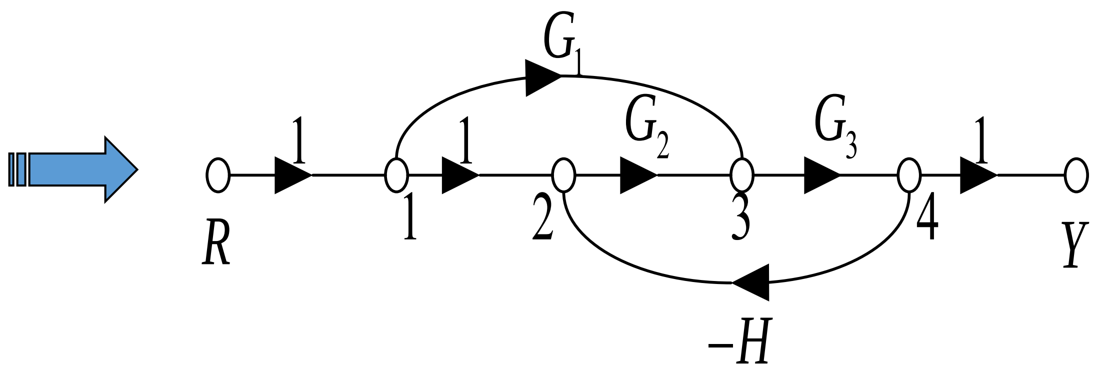
(2) 由方框图绘制

分支点、比较点 → 节点

信号线、方框 →支路

必要时增加支路、节点





梅逊增益公式

利用梅逊增益公式可以很方便地求出信号流图的总增益或系统的总传递函数

输入节点与**输出**节点之间的**总增益P**是：

$$P=\frac{\sum_{k=1}^{n}p_k\Delta_k}{\Delta}$$

n — 前向通道数；

p_k — 从输入节点到输出节点之间第k条前向通道的增益，输入节点到输出节点不止一条前向通道，只要有一条新的支路，就可以当做一条新的前向通道（选择回环也是如此）。

梅逊增益公式

$$P=\frac{\sum_{k=1}^{n}p_k\Delta_k}{\Delta}$$

$\Delta=1-\sum L_1+\sum L_2-\sum L_3+\cdots$ —— 系统特征式；

$\sum L_1$ —— 所有单独回环的增益之和；

$\sum L_2$ —— 所有两两互不接触回环的增益乘积之和；

$\sum L_3$ —— 所有三个互不接触回环的增益乘积之和；

Δ_k —— 第*k*个残余流图的特征式：把第*k*条前向通道（包括其中所有的节点和支路）去掉之后，在余下的信号流图(残余流图)上求得的Δ。

梅逊增益公式

$$P=\frac{\sum_{k=1}^{n}p_k\Delta_k}{\Delta}$$

$$\Delta=1-\sum L_1+\sum L_2-\sum L_3+\cdots$$ —— 系统特征式；

用Mason增益公式计算总增益的要点：

① 前向通道（数目，增益；残余流图）；

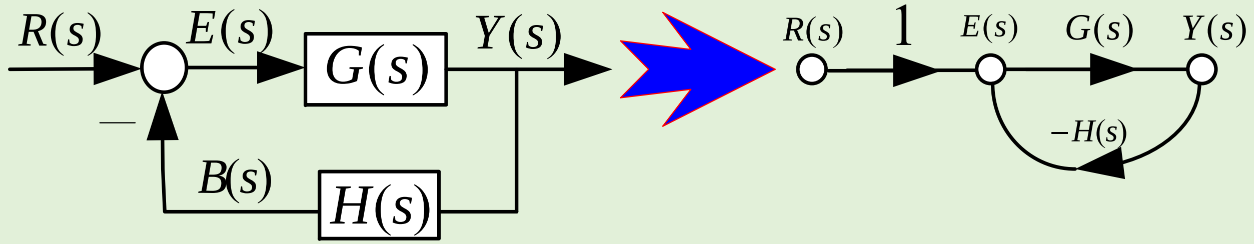
② 回环（数目，增益；不相接触回环）；

③ 不论前向通道还是回环，每个节点只允许经过一次；

④ 牢记公式。

梅逊增益公式—示例

例：



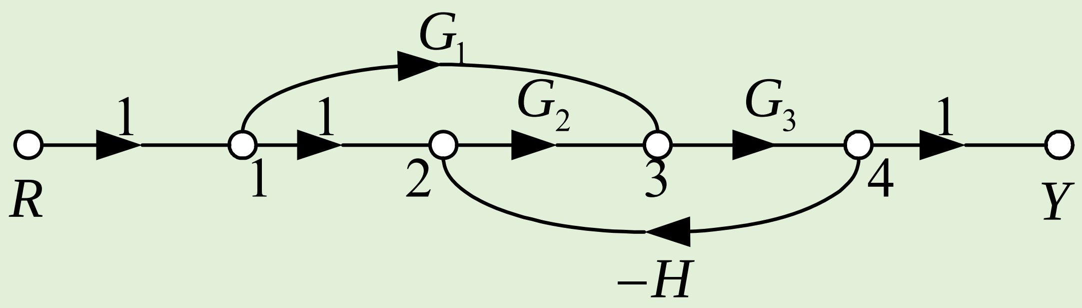
1条前向通道：　$P_1 = G(s)$　　$\Delta_1 = 1$

1个回环：　$\sum L_1 = -G(s)H(s)$

$$P = \frac{\sum_{k=1}^{n} p_k \Delta_k}{\Delta} \Rightarrow G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$

梅逊增益公式—示例

例2.9：



2条前向通道：

$$P_1 = G_2G_3 \qquad \Delta_1 = 1$$

$$P_2 = G_1G_3 \qquad \Delta_2 = 1$$

1个回环：

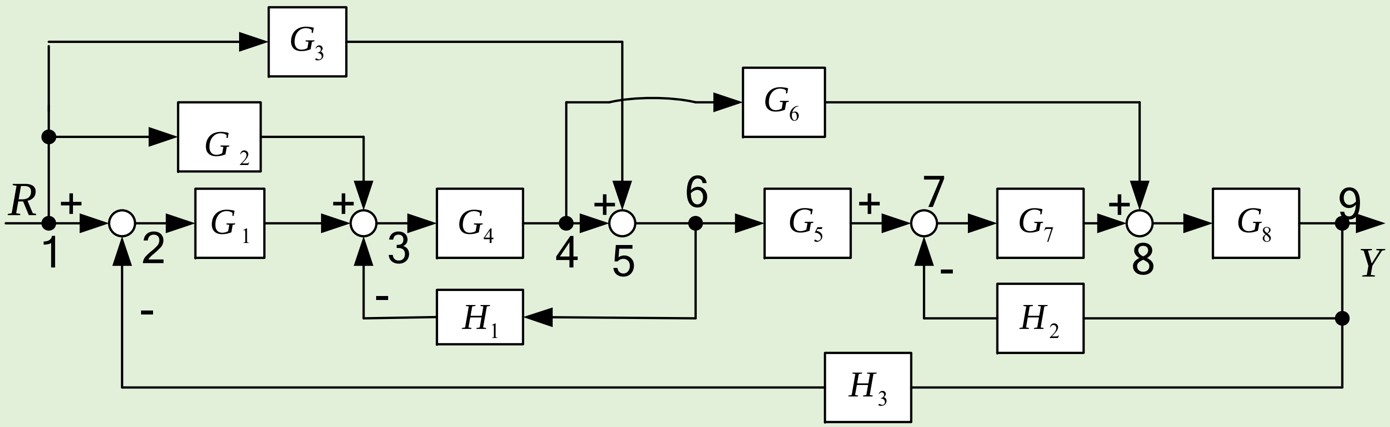
$$\sum L_1 = -G_2G_3H$$

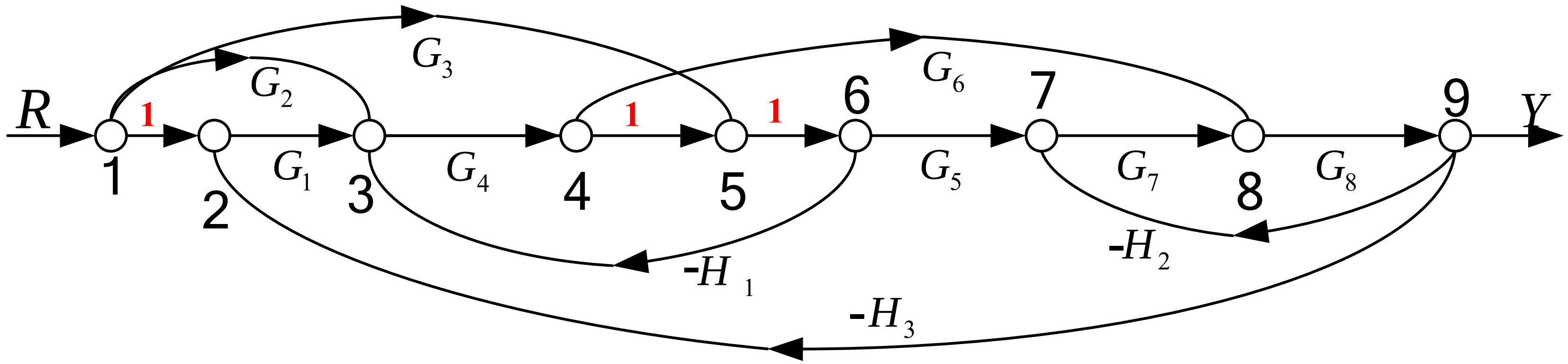
$$P = \frac{\sum_{k=1}^{n} p_k\Delta_k}{\Delta} \Rightarrow G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_2(s)G_3(s) + G_1(s)G_3(s)}{1 + G_2(s)G_3(s)H(s)}$$

2.5 线性系统的信号流图

梅逊增益公式—示例

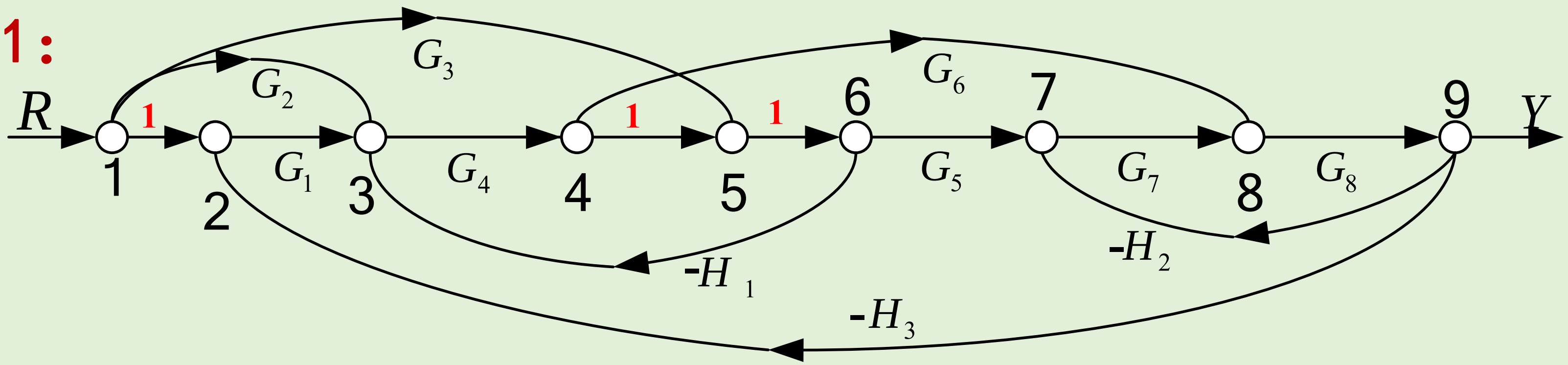
例2. 11：





梅逊增益公式—示例

例2. 11：



6条前向通道：

$$P_1 = G_1G_4G_5G_7G_8 \qquad \Delta_1 = 1$$

$$P_2 = G_2G_4G_5G_7G_8 \qquad \Delta_2 = 1$$

$$P_3 = G_3G_5G_7G_8 \qquad \Delta_3 = 1$$

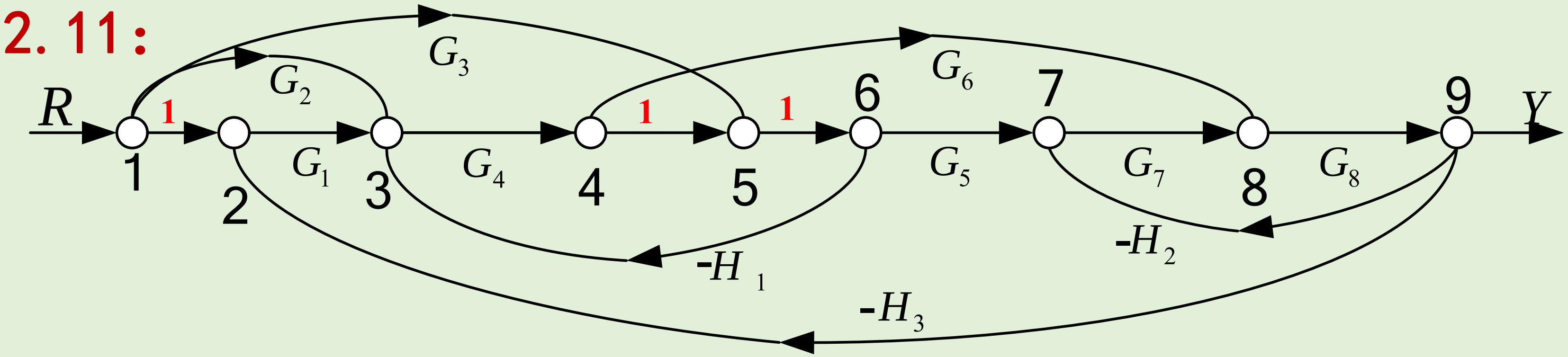
$$P_4 = G_1G_4G_6G_8 \qquad \Delta_4 = 1$$

$$P_5 = G_2G_4G_6G_8 \qquad \Delta_5 = 1$$

$$P_6 = G_3(-H_1)G_4G_6G_8 \qquad \Delta_6 = 1$$

梅逊增益公式—示例

例2.11：



4个回环：

$$\sum L_1 = (-G_4H_1) + (-G_7G_8H_2) + (-G_1G_4G_5G_7G_8H_3) + (-G_1G_4G_6G_8H_3)$$

一对两互不相接触回环：

$$\sum L_2 = (-G_4H_1)(-G_7G_8H_2)$$

$$G = \frac{Y}{R} = \frac{\sum_{k=1}^{n} p_k\Delta_k}{\Delta}$$

梅逊增益公式—总结

$$P=\frac{\sum_{k=1}^{n} p_k \Delta_k}{\Delta}$$

用Mason增益公式计算总增益的要点：

① 前向通道（数目，增益；残余流图）；

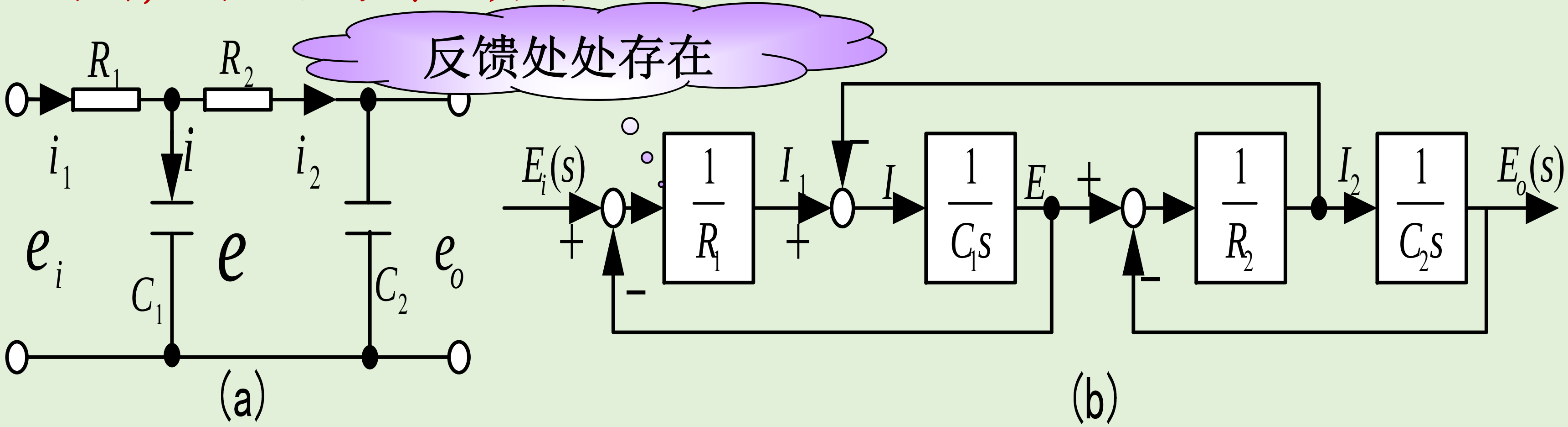
② 回环（数目，增益；不相接触回环）；

③ 不论前向通道还是回环，每个节点只允许经过一次；

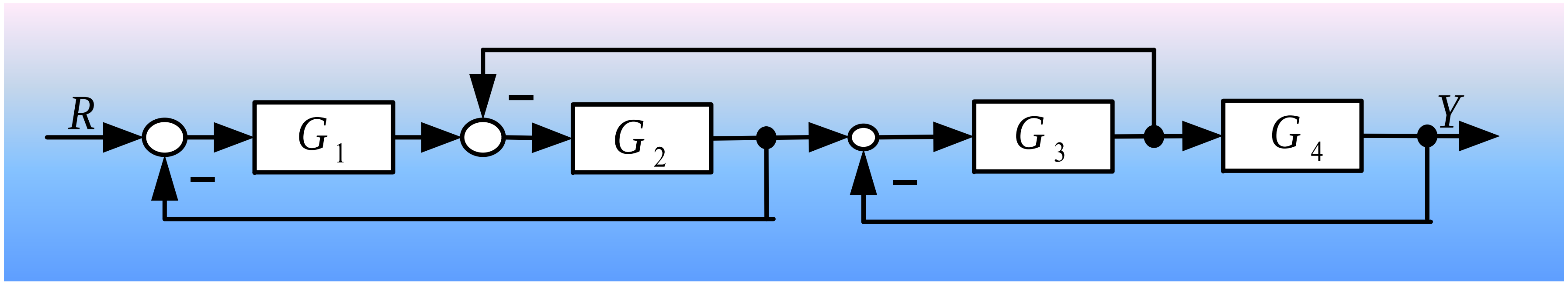
④ 牢记公式。

2.6 线性控制系统数学模型的建立

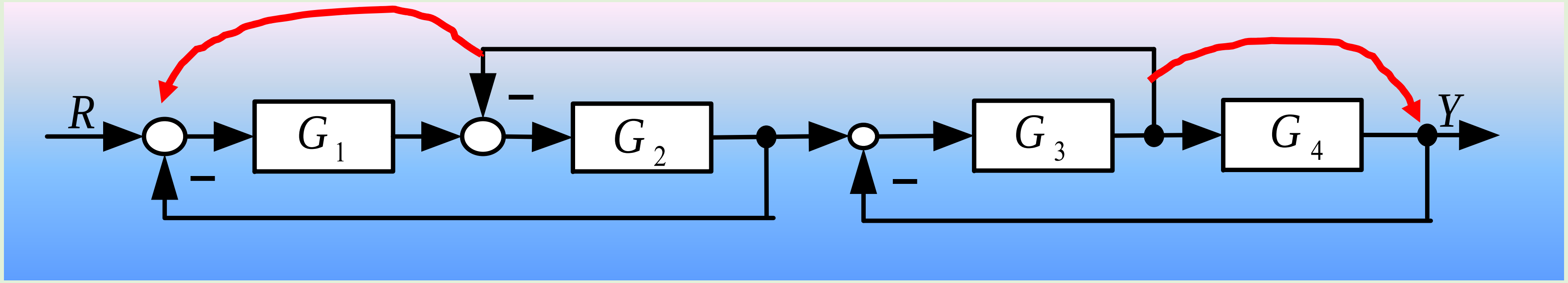
例2.12：图(a)是两级RC滤波电路，若从控制系统角度看待它，则图(b)是其结构图，则很容易得出其传递函数。



例2.8

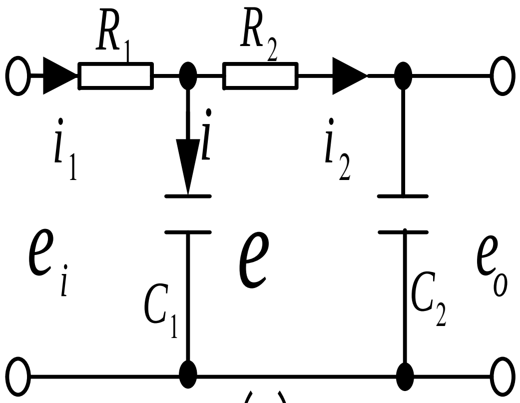


例2.8

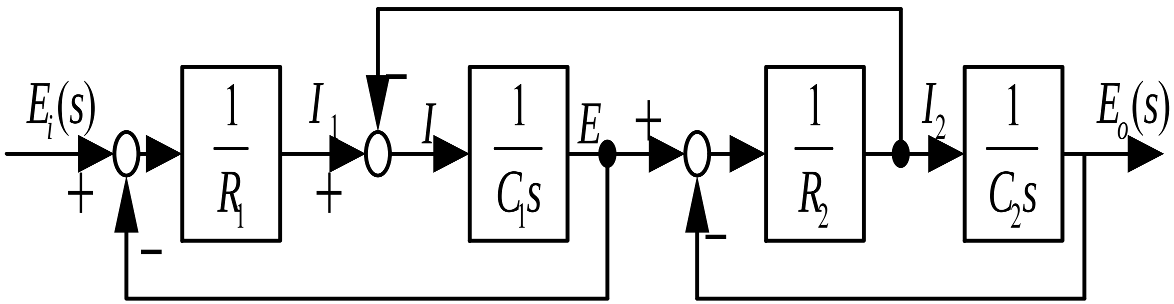


$$G=\frac{Y}{R}=\frac{G_1G_2G_3G_4}{(1+G_1G_2)(1+G_3G_4)+G_2G_3}$$

$$G(s)=\frac{E_o(s)}{E_i(s)}=\frac{1}{R_1C_1R_2C_2s^2+(R_1C_1+R_2C_2+R_1C_2)s+1}$$



(a)

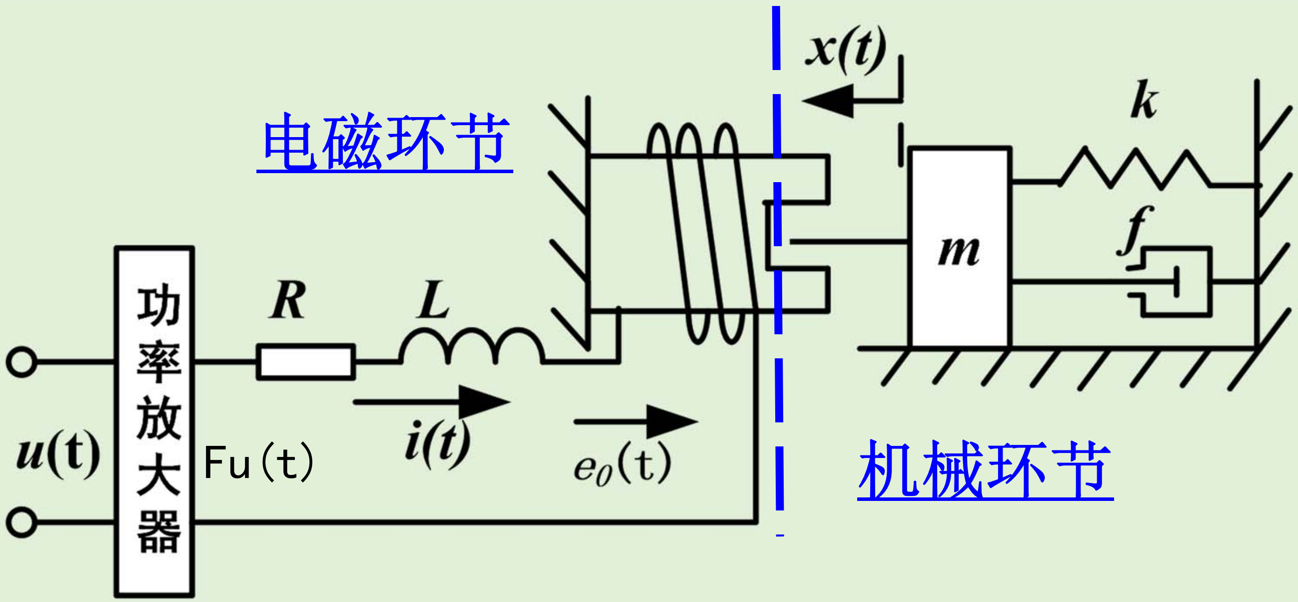


(b)

2.6 线性控制系统数学模型的建立

例2.13 设图2.27所示机电系统的初始条件为零，u(t)为输入电压，x(t)为输出位置，R和L分别为铁芯线圈的电阻和电感，m为物体的质量，k为弹簧的刚度，f为阻尼器的阻尼系数。功率放大器增益为F，铁芯线圈的反电动势为e0=k2dx/dt，线圈电流i(t)在质量m上产生的电磁力为k2i(t)。试画出系统结构图并求总传递函数。

Fu(t)



2.6 线性控制系统数学模型的建立

例2.13

电磁环节：

$$\begin{cases} Fu(t) = Ri + L\dfrac{di}{dt} + e_0 \\ e_0 = k_2\dfrac{dx}{dt} \end{cases}$$

机械环节：

$$k_2 i(t) = kx + f\frac{dx}{dt} + m\frac{d^2x}{dt^2}$$

在零初始条件下对上述方程组进行拉氏变换并整理得：

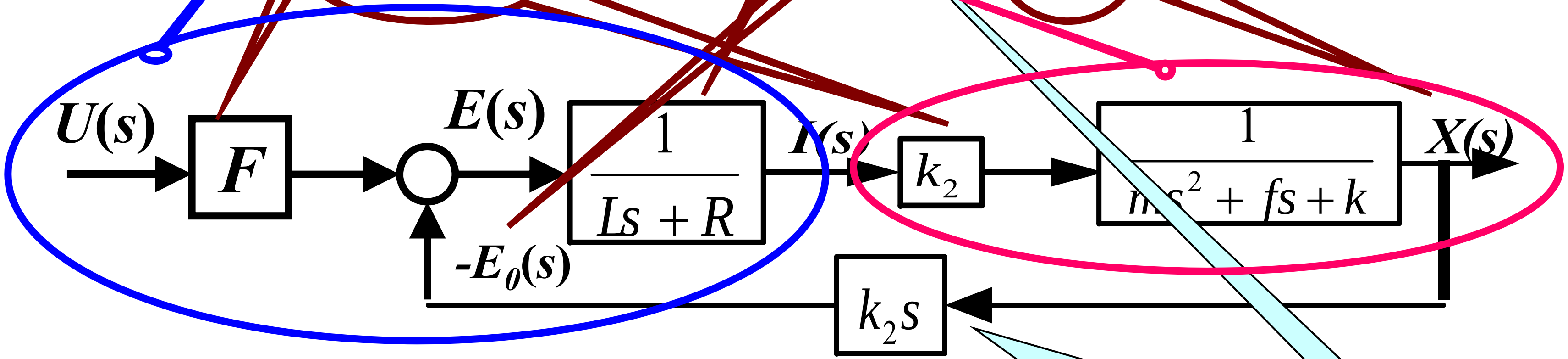
$$FU(s) = (R + Ls)I(s) + E_0(s)$$
$$E_0(s) = k_2 sX(s)$$
$$k_2 I(s) = (k + fs + ms^2)X(s)$$

2 2.6 线性控制系统数学模型的建立

$$FU(s)=(R+Ls)I(s)+E_0(s)$$

$$E_0(s)=k_2sX(s)$$

$$k_2I(s)=(k+fs+ms^2)X(s)$$



电磁感应电压和速度信号成正比

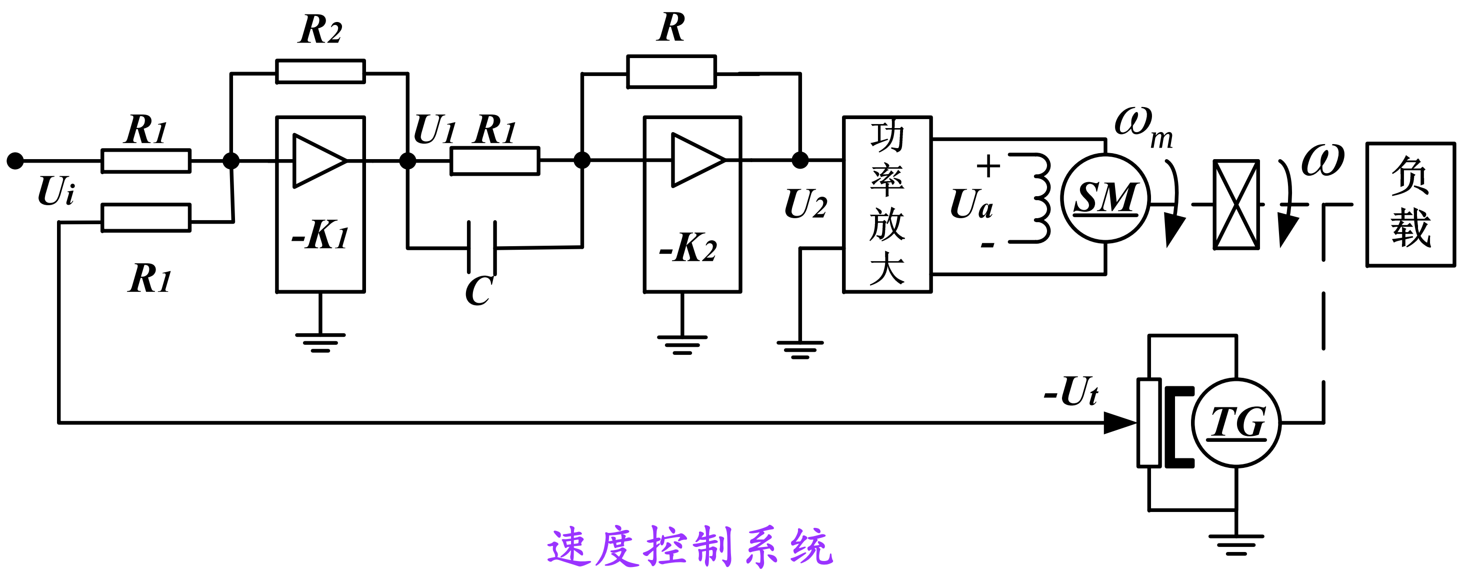
消去中间变量或者根据结构图可得系统总传递函数为：

$$\frac{X(s)}{U(s)}=\frac{Fk_2}{mLs^3+(Lf+Rm)s^2+(kL+Rf+k_2^2)s+Rk}$$

2.6 线性控制系统数学模型的建立

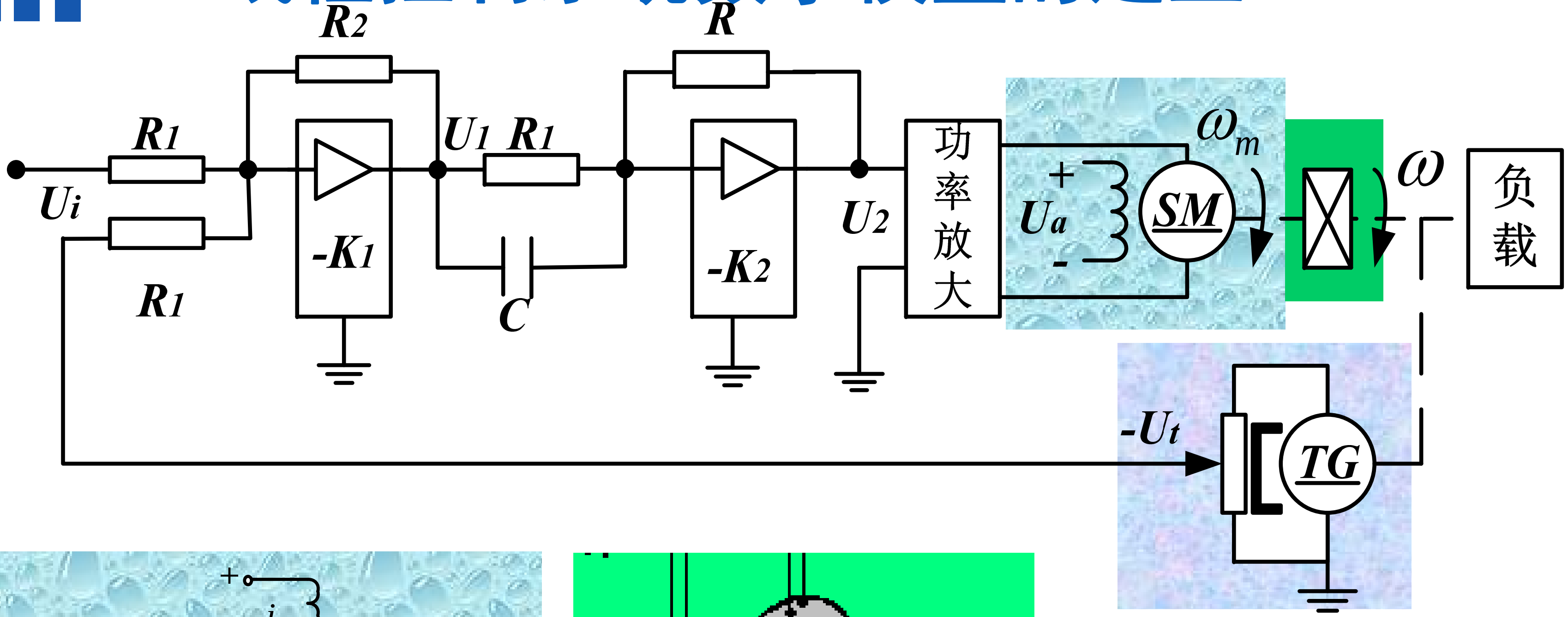
例2.14　试列写图2.29所示速度控制系统的微分方程。

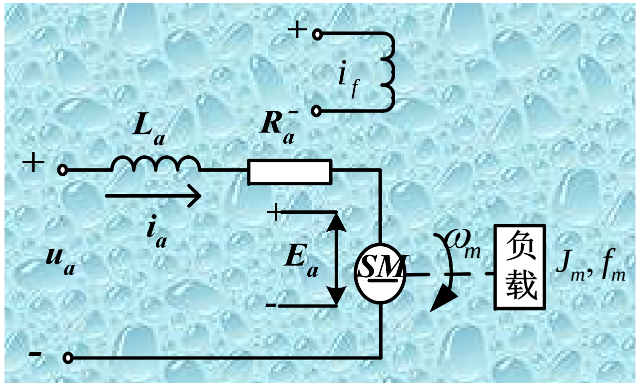
解：系统的被控对象是电动机（带负载），系统的输出量是转速 ω，给定电压是u_i。控制系统由给定电位器、运算放大器I（含比较作用）、运算放大器II（含RC校正网络）、功率放大器、测速发电机、减速器等部分组成。

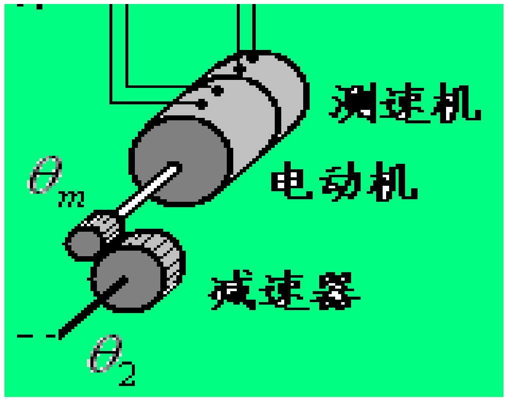


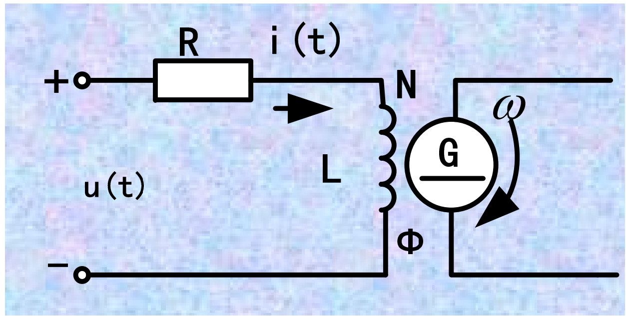
速度控制系统

2.6 线性控制系统数学模型的建立



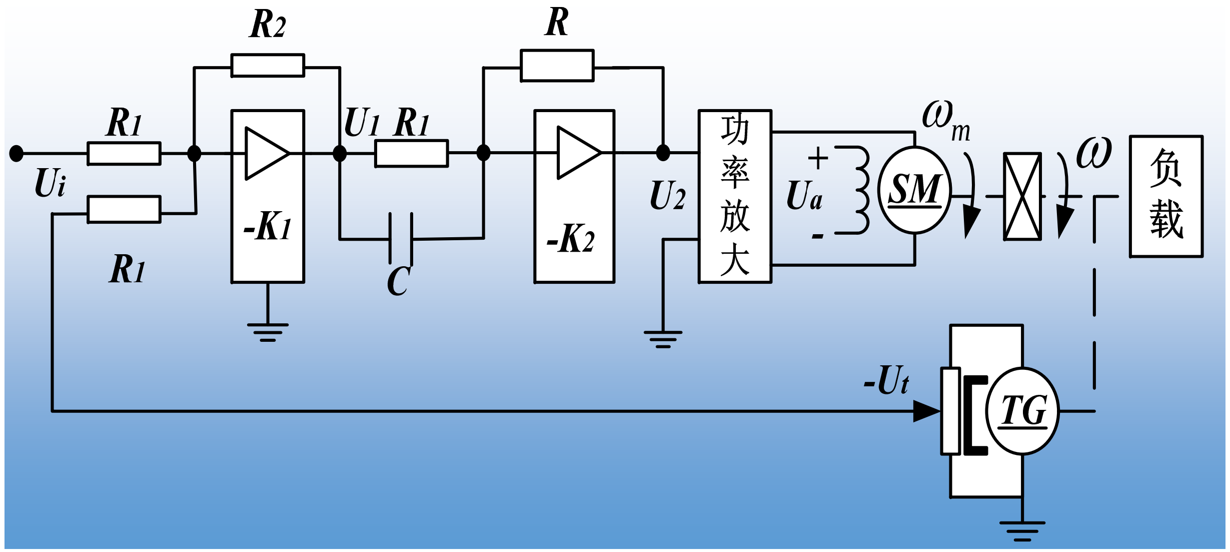






现分别列出各元部件的微分方程（结构图略）。

2.6 线性控制系统数学模型的建立



①运算放大器I　给定电压ui与速度反馈电压ut在此合成，产生偏差电压并经放大，即运算放大器I　为加法电路

$$u_1 = -K_1(u_i - u_t) = -K_1 u_e$$

$K_1 = R_2 / R_1$

——运放I的比例系数

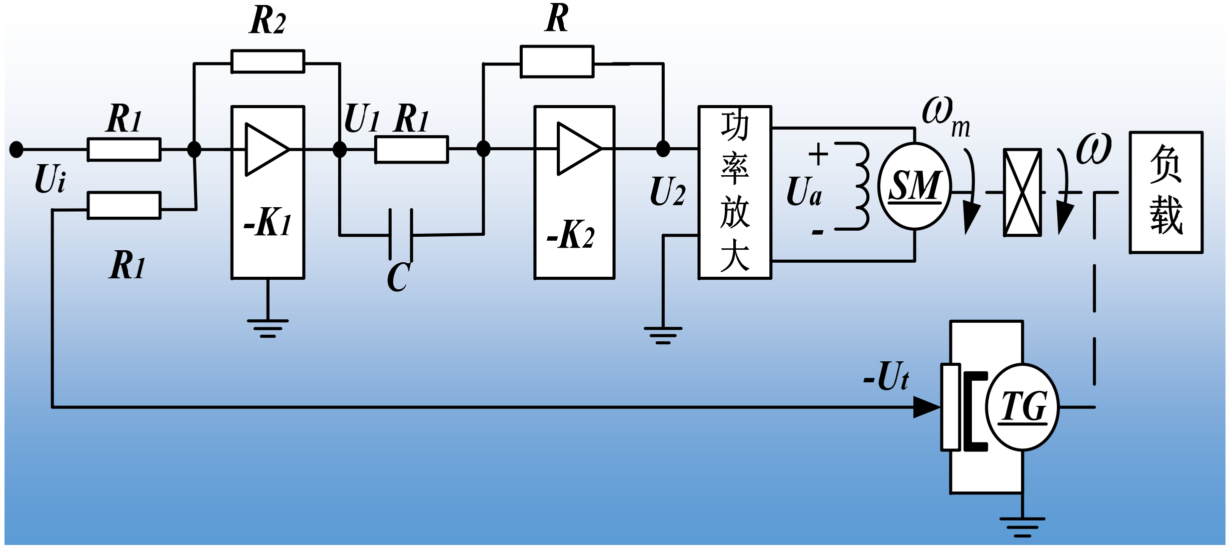
② 运算放大器II　与R_1C网络构成微分电路，u_2 与 u_1 间微分方程

$$u_2 = -K_2\left(\tau \frac{du_1}{dt} + u_1\right)$$

$\tau = R_1 C$ —微分时间常数

$K_2 = R / R_1$ —运放II的比例系数

2 2.6 线性控制系统数学模型的建立



③ 功率放大器 设采用晶闸管整流装置，包括触发电路和晶闸管主回路。忽略晶闸管控制电路的时间滞后，输入输出方程为：

$$u_a = K_3 u_2$$

K_3 ——比例系数

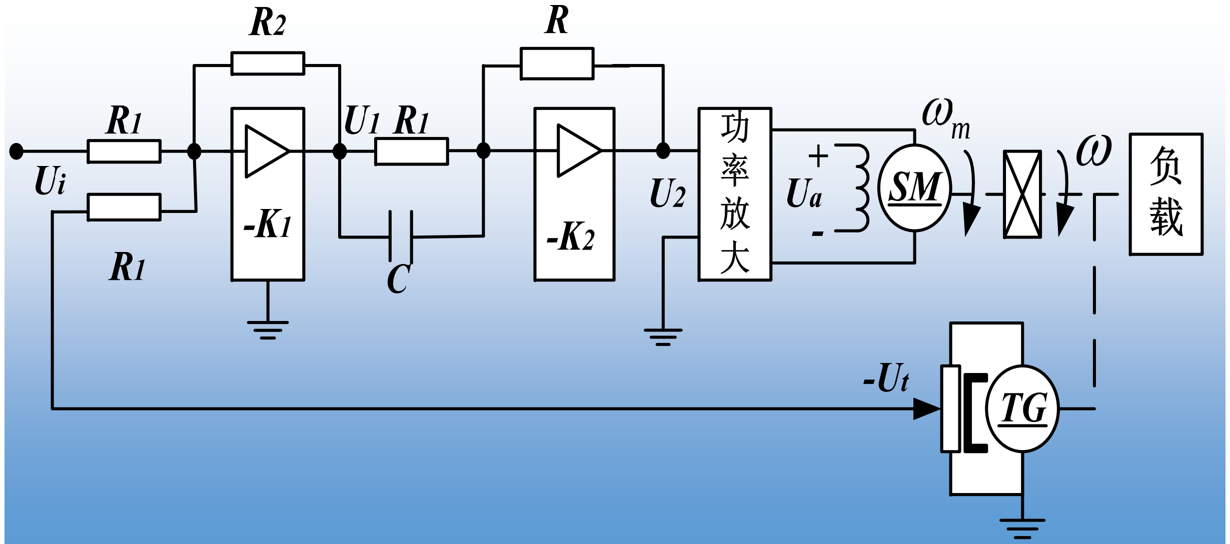
④ 直流电动机 忽略电枢电感

$$T_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + \omega_m(t) = K_1 u_a(t) - K_2 M_c(t)$$

⑤ 齿轮系 设齿轮系的速比为 α ，则电动机转速 ω_m 经齿轮系减速后变为 ω，则

$$\omega = \frac{1}{\alpha}\omega_m$$

2.6 线性控制系统数学模型的建立



⑥ 测速发电机 测速发电机的输出电压 u_t 与其转速 ω 成正比

$$u_t = K_t \omega$$

K_t —测速发电机比例系数

从上述各方程中消去中间变量 u_t 、u_1 、u_2 、u_a 及 ω_m ，整理后便得到控制系统的微分方程

$$T'_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = K'_g \frac{du_i}{dt} + K_g u_i - K'_c M'_c$$

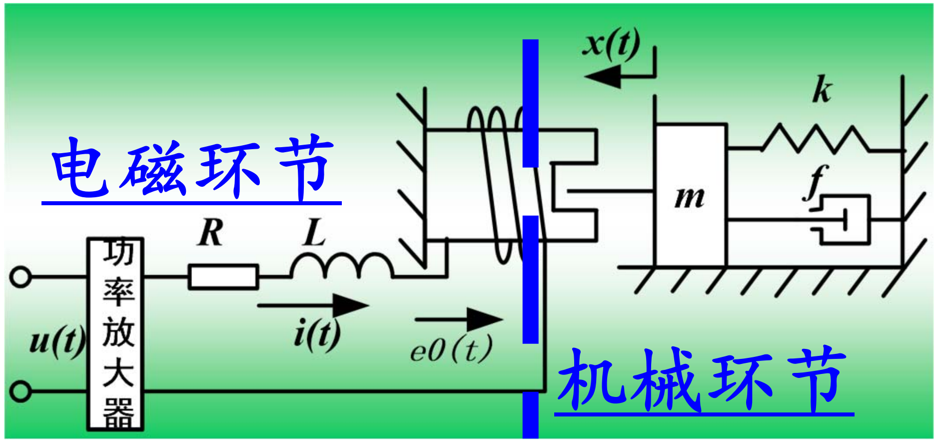
式中

$$T_m' = (\alpha T_m + K_1 K_2 K_3 K_m K_t \tau)/(\alpha + K_1 K_2 K_3 K_m K_t) \quad K_C' = K_C /(\alpha + K_1 K_2 K_3 K_m K_t)$$

$$K_g = K_1 K_2 K_3 K_m /(\alpha + K_1 K_2 K_3 K_m K_t) \quad K_g' = K_1 K_2 K_3 K_m \tau /(\alpha + K_1 K_2 K_3 K_m K_t)$$

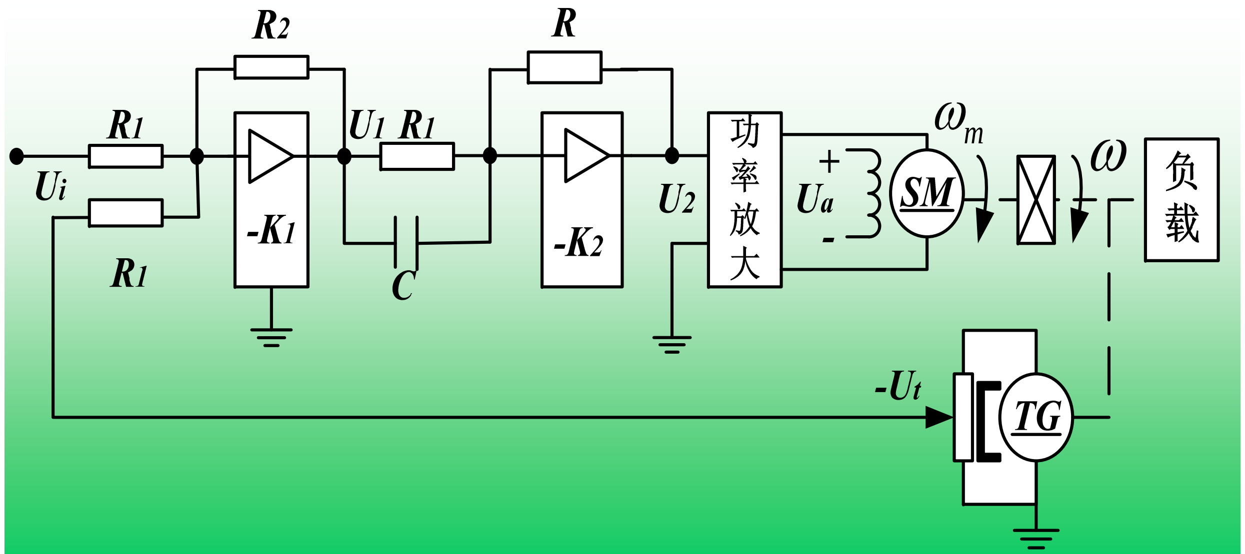
2.6 线性控制系统数学模型的建立

➢ 注意例2.13、2.14中负反馈电压的接线方式。

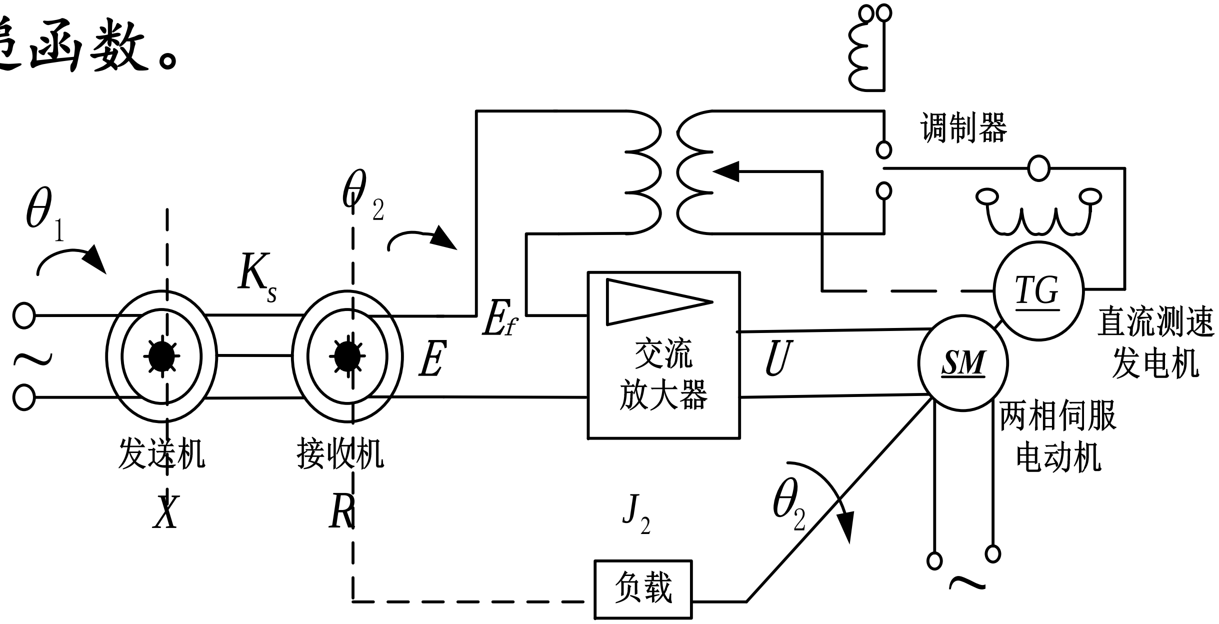


例2.13自然形成

本例依靠接线倒向

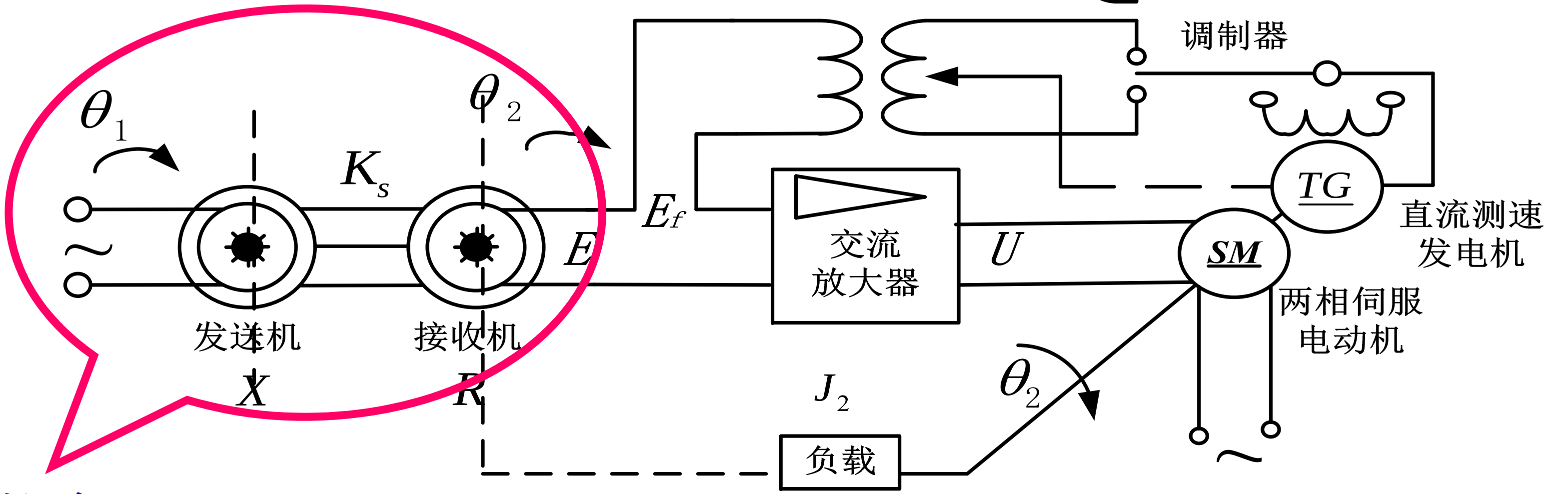


例2.15　交流-直流位置随动系统如图2.30所示，试列写系统的元部件传递函数，绘出系统结构图并求系统传递函数。



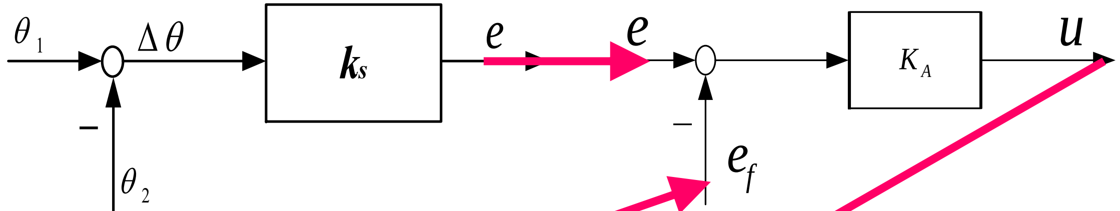
解：设负载效应满足且初始条件为零，列写微分方程→环节传递函数→结构图→ 总传递函数。

2.6 线性控制系统数学模型的建立



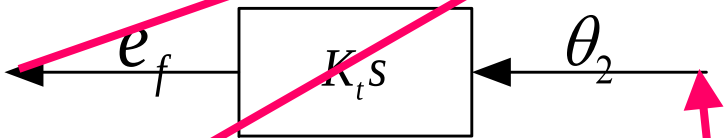
自整角机交流输出

$$\frac{E(s)}{\Delta\Theta(s)} = K_s$$



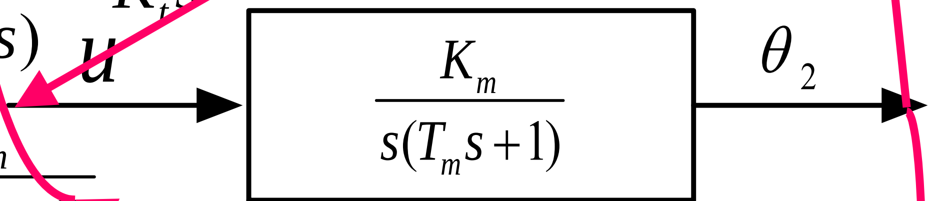
交流放大器

$$\frac{U(s)}{E(s)-E_f(s)} = K_A$$



直流测速发电机与调制器（设调制器增益为1）

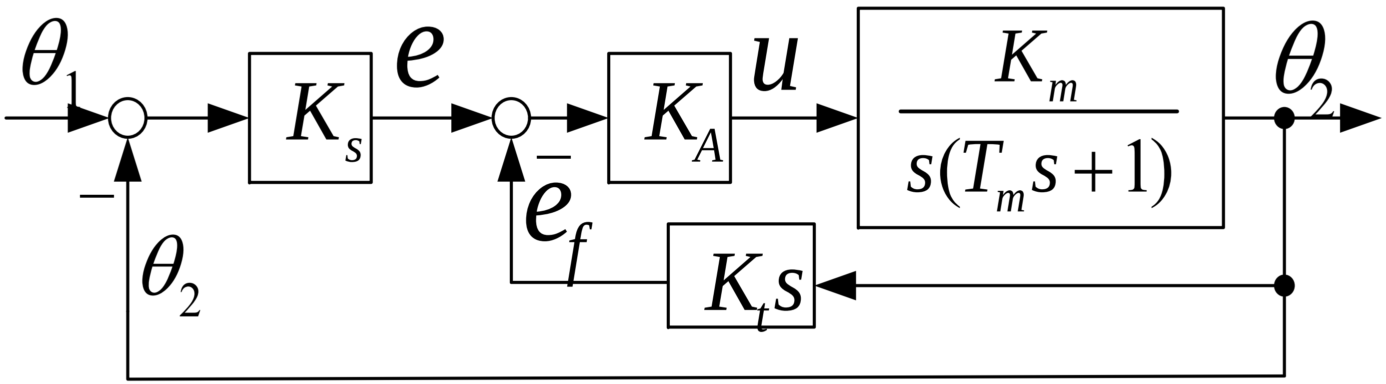
$$\frac{E_f(s)}{\Theta_2(s)} = K_t s$$



两相伺服电动机

$$\frac{\Theta_2(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s+1)}$$

2 2.6 线性控制系统数学模型的建立



系统总传递函数：

$$G(s)=\frac{K_A K_m K_s}{T_m s^2+(K_A K_t K_m+1)s+K_A K_m K_s}$$

2.6 线性控制系统数学模型的建立

线性控制系统数学模型建立过程

- □ 分析物理系统，环节划分
- □ 列写环节微分方程/传递函数
- □ 画环节结构图
- □ 连接环节结构获得系统结构图
- □ 结构图简化求总传递函数（数学模型）

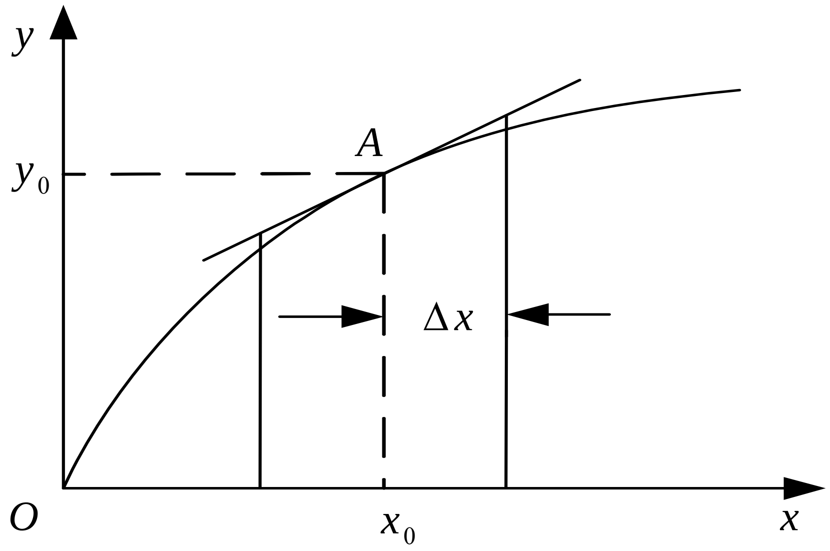
2.7 非线性数学模型的线性化

- 以上所举例数学模型都是针对线性定常系统的，它们的一个重要性质是具有齐次性和叠加性。
- 绝对线性系统是不存在的，系统的运动方程应该都是非线性的。
- 非线性微分方程的建立和求解较为困难，非线性系统的分析比线性系统复杂。
- 在一定条件下，用近似的线性方程代替非线性方程。

2.7 非线性数学模型的线性化

- 控制系统都有一个平衡的工作状态和相应的工作点。
- 基本假设——非线性系统在工作点附近运动（变量对于平衡工作点的偏差很小）。
- 微偏法或小邻域法（ △x➔0 ）——若非线性函数连续，且各阶导数均存在，则可在给定工作点的小邻域内将其展开为泰勒级数，并略去二阶以上各项，即为非线性函数的线性化模型。
- 本质非线性系统（在平衡工作点处的特性不连续），不能应用微偏法。

设非线性元件的输入是x，输出为y，它们的关系如图所示：



非本质非线性特性的线性化

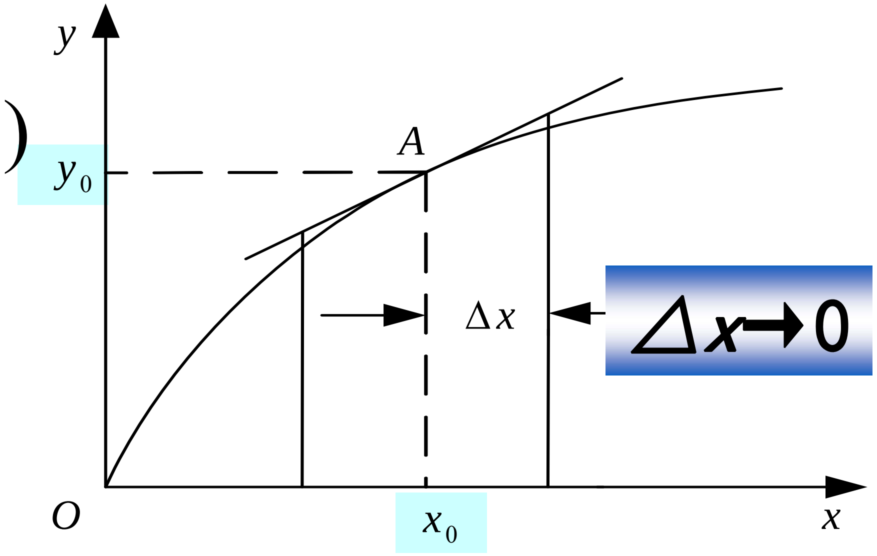
相应的非线性数学表达式为：$y = f(x)$

在给定工作点(x_0, y_0)附近展开成泰勒级数。

2 2.7 非线性数学模型的线性化

$$y = f(x) = f(x_0) + \left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x_0}(x - x_0)$$

$$+\frac{1}{2!}\left.\frac{d^2 f}{dx^2}\right|_{x=x_0}(x - x_0)^2 + \cdots$$



非本质非线性特性的线性化

$$y = y_0 + K(x - x_0)$$ 或 $$\Delta y = K\Delta x$$

$$y_0 = f(x_0)$$

$$\Delta y = y - y_0 \quad \Delta x = x - x_0$$

2.7 非线性数学模型的线性化

例：三相晶闸管整流装置的输入电压u_2与晶闸管的导通角$\alpha \propto u_2$，α与整流输出电压u_a有如下非线性关系：

$$u_a = 2.34 E_2 \cos\alpha$$

E_2 —交流电源相电压有效值。

在工作点(a_0，u_{a0})的小邻域内线性化：

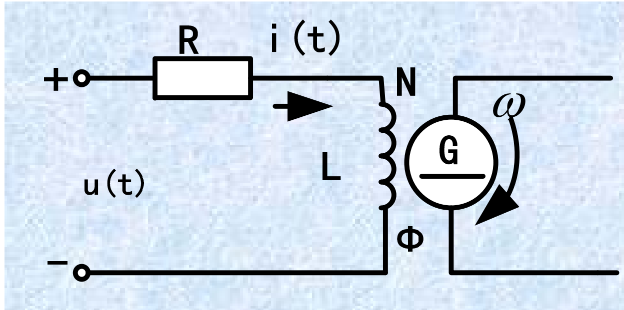
$$u_a = u_{a0} + \frac{du_a}{d\alpha}(\alpha - \alpha_0) \qquad u_{a0} = 2.34 E_2 \cos\alpha_0$$

令 $\left.\frac{du_a}{d\alpha}\right|_{\alpha=\alpha_0} = K$ ←工作点处的切线斜率

$$u_a - u_{a0} = K(\alpha - \alpha_0) \qquad \Delta u_a = K\Delta\alpha$$

2 2.7 非线性数学模型的线性化

例2.4中的直流他励发电机的数学模型 $\phi=k_2i$ 实际上也是从非线性模型经线性化后得到的。



设原非线性模型为：

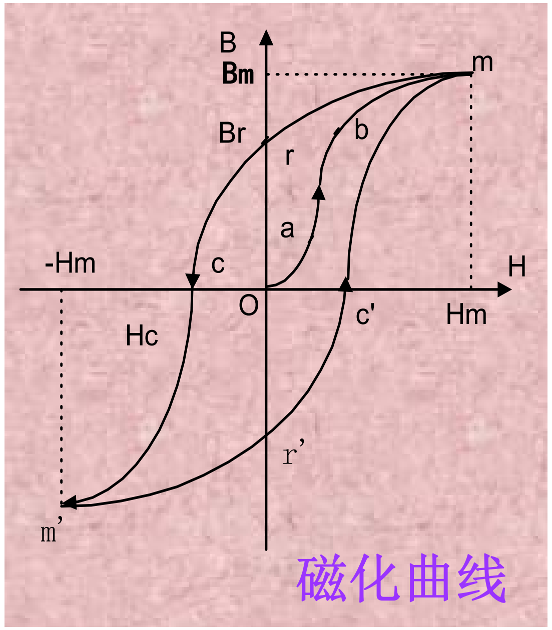
$$\varphi = f(i)$$

$$\varphi=K_2 i$$

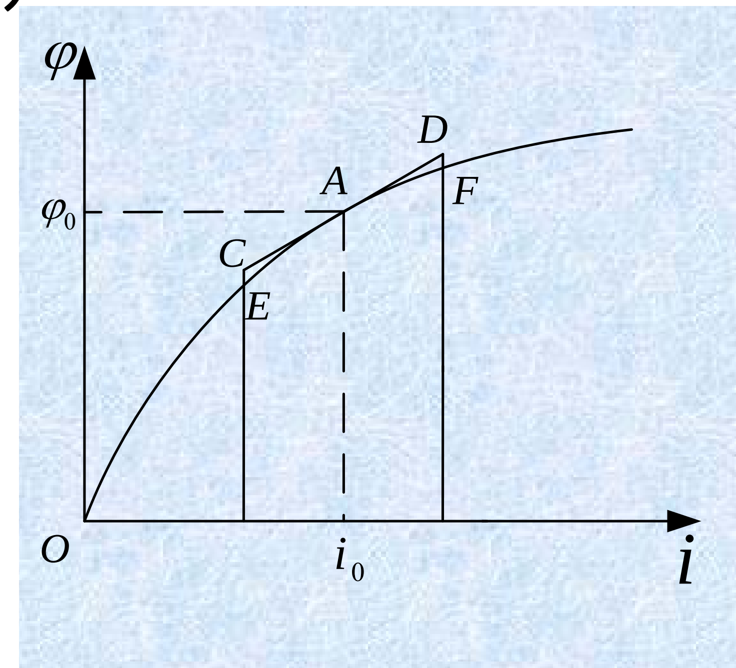
如图2.40所示，设工作点在（ i_0， ϕ_0）

利用泰勒级数进行线性化后得到上述方程，其中：

$$K_2 = \frac{d\varphi}{dt}\Big|_{i = i_0}$$



磁化曲线



2 2.7 非线性数学模型的线性化

- 实际对控制系统建模过程中，我们可以不必关心具体的非线性模型，大多数系统都可以满足小临域条件，唯一与非线性模型相关的线性比例系数K可以通过实验手段测得。

- 仅适用于非本质非线性，不适应本质非线性系统。

2 本节课小结

- 线性系统信号流图的定义、构成

  节点（源点、汇点、混合节点）、支路、增益、通路、回环、回路增益、前向通道

- 信号流图的绘制

  方框图➜信号流图

- 信号流图求传递函数（梅逊增益公式）

  前向通道、前向通道增益、回环、不接触回环、系统特征式、残余流图

$$P=\frac{\sum_{k=1}^{n} p_k \Delta_k}{\Delta}$$

- 线性控制系统数学模型的建立过程及非线性化（了解）

2.10 连续设计示例 硬盘读写系统的数学模型建立

任务：认识驱动器、传感器和控制器。

建立被控对象G(s)和传感器的模型。

硬盘驱动系统典型参数取值：

读写头和臂的惯性系数J=1 N·m·s^2/rad;

摩擦系数b=20 kg/m/s;

放大倍数K_a=10～1000;

电枢电阻R=1 Ω;

电机常数K_m=5 N·m/A;

电枢电感L=1mH

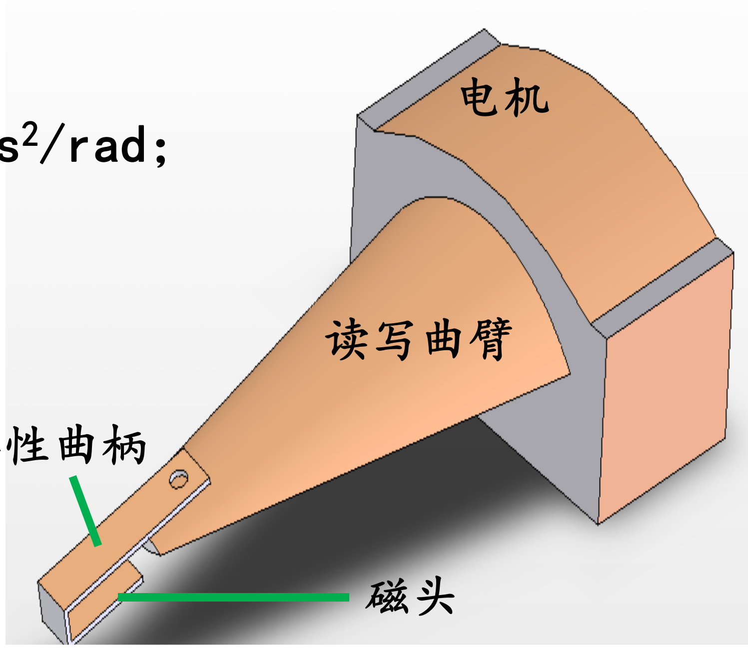
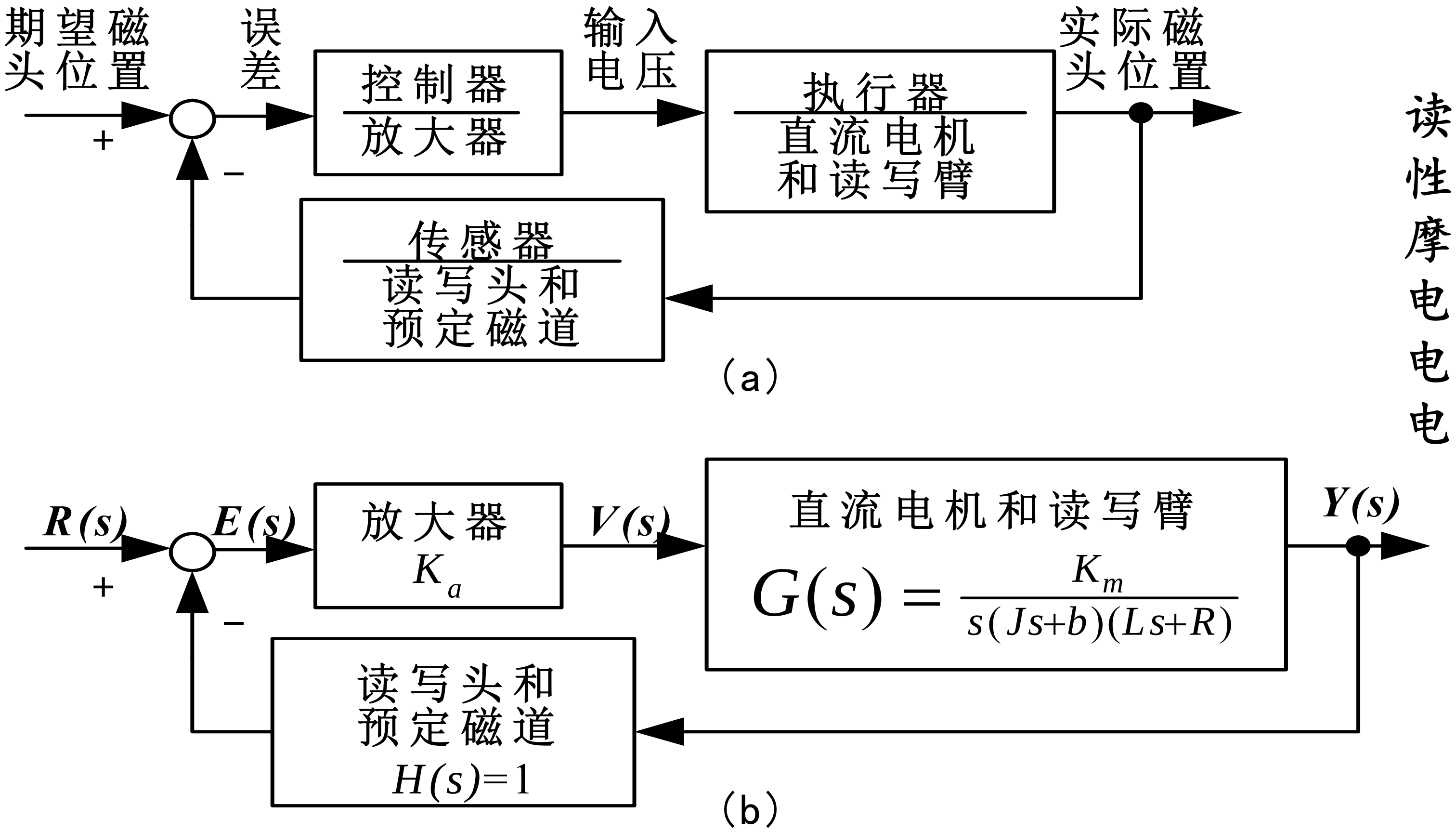


图1-17 弹性连接的滑动曲柄示意图

2.10 连续设计示例 硬盘读写系统的数学模型建立

硬盘驱动系统的控制模型



读写头和臂的惯性系数J

摩擦系数b

电机常数K_m

电枢电阻R

电枢电感L

图2-48　硬盘驱动读写系统的方框图模型

硬盘驱动系统的控制模型

被控对象传递函数：

$$G(s)=\frac{K_m}{s(Js+b)(Ls+R)}=\frac{5000}{s(s+20)(s+1000)}$$

改写为：

$$G(s)=\frac{K_m/bR}{s(\tau_L s+1)(\tau s+1)}$$

其中， $\tau_L=J/b=50$ ms 和 $\tau=L/R=1$ ms，由于 $\tau \ll \tau_L$，所以可以忽略 τ，因而传递函数可简化为典型二阶系统模型：

$$G(s)=\frac{K_m/bR}{s(\tau_L s+1)}=\frac{0.25}{s(0.05s+1)}$$ 或者 $$G(s)=\frac{5}{s(s+20)}$$

2.10 连续设计示例 硬盘读写系统的数学模型建立

硬盘驱动系统的控制模型

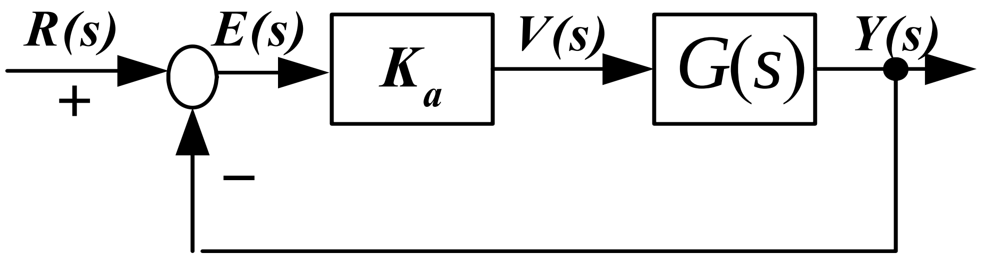
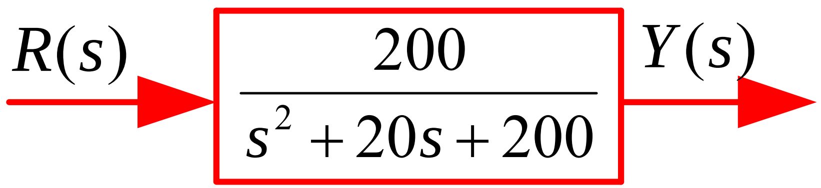


图 2-49 闭环系统方框图

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{K_aG(s)}{1+K_aG(s)}=\frac{5K_a}{s^2+20s+5K_a}$$



若K_a=40，则：

$$\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{200}{s^2+20s+200}$$

第2章 线性系统的数学模型 总结

- 控制系统的数学模型：定义、种类（动态、静态）；
- 输入—输出模型：微分方程的建立（分析法、步骤）；
- 传递函数的定义、性质和特点；
- 传递函数的三种形式（多项式、零极点、时间常数）
- 典型系统的传递函数（6种：比例、惯性、振荡、积分、微分、延迟）。

传递函数的几种形式

多项式形式：

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

零极点形式

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{K\prod_{j=1}^{m}(s+z_j)}{\prod_{i=1}^{n}(s+p_i)}$$

时间常数形式

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{K'\prod_{j=1}^{m}(T_j s+1)}{\prod_{i=1}^{n}(T_i s+1)}$$

2 第2章 线性系统的数学模型 总结

环节名称	传递函数	特点	实例
比例环节 （放大环节）	K	输出量无延迟、无失真地反映输入量变化	电位器（输入电压-输出电压） 晶体管放大器(输入电压-输出电压) 测速机（转速-电压） 齿轮箱（主动轴转速-从动轴转速）
惯性环节 （非周期环节）	$\dfrac{K}{Ts+1}$	输出量变化落后于输入量的变化	它激直流发电机（激磁电压-电势） *RC*滤波器（电源电压-电容电压）
振荡环节	$\dfrac{K}{T^2s^2+2\zeta Ts+1}$ $0<\zeta<1$	有两种储能元件，所储能量相互转换	*RLC* 振荡电路（输入电压-输出电压）
积分环节	$\dfrac{K}{s}$	输出量正比于输入量的积分	传动轴（转速-转角） 积分器 （输入电压-输出电压）
理想微分环节 实际微分环节	Ks $\dfrac{KTs}{Ts+1}$	输出量正比于输入量的导数	直流测速机（转角-电势） *RC*串联微分电路（电源电压-电阻电压）
延迟环节 （时滞环节）	$Ke^{-\tau s}$	输出量经过延迟 τ 后，才复现输入量	晶闸管整流装置（控制电压-输出电压） 传输带（输入流量-输出流量）

2 第2章 线性系统的数学模型 总结

□ 线性系统的结构图

是描述系统各元部件之间信号传递关系的图形化数学模型。

作用原理（方框图） + 数学模型 →结构图

□ 结构图的构成

4种元素：信号线、引出点、比较点、方框

□ 结构图的等效变换和简化

串联、并联和反馈连接

比较点和引出点的移动

□ 复杂结构图的简化

解除交叉，交叉嵌套变层层嵌套

2 第2章 线性系统的数学模型 总结

- 线性系统信号流图的定义、构成

节点（源点、汇点、混合节点）、支路、增益、通路、回环、回路增益、前向通道

- 信号流图的绘制

方框图→信号流图

- 信号流图求传递函数（梅逊增益公式）

前向通道、前向通道增益、回环、不接触回环、系统特征式、残余流图

$$P=\frac{\sum_{k=1}^{n} p_k \Delta_k}{\Delta}$$

- 线性控制系统数学模型的建立过程及非线性化（了解）