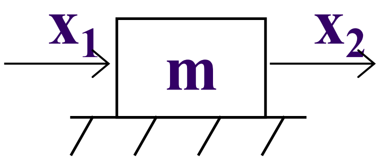
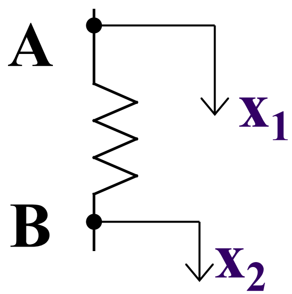
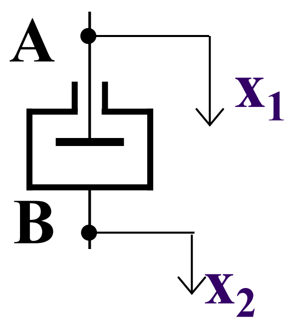
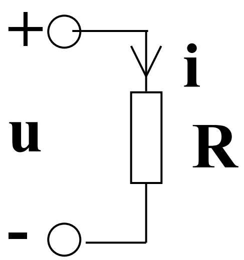
第二章 控制系统的数学模型

一、微分方程模型的建立

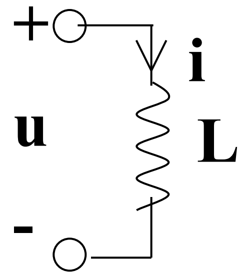
1. 力学：

<table>
<tr><td>
</td><td>$x_1=x_2$为位移，粘性摩擦系数为f，
则产生阻力 $F(t)=-m\dfrac{dx_1(t)}{dt}$</td></tr>
<tr><td>
</td><td>$x_1\neq x_2$为位移，弹性系数为f，
则在A点产生反弹力 $F_1(t)=-f(x_1-x_2)$
在B点产生反弹力 $F_2(t)=f(x_1-x_2)$</td></tr>
<tr><td>
</td><td>$x_1\neq x_2$为位移，阻尼系数为f，
则在A点产生阻力 $F_1(t)=-f\dfrac{d}{dt}(x_1-x_2)$
在B点产生阻力 $F_2(t)=f\dfrac{d}{dt}(x_1-x_2)$</td></tr>
</table>

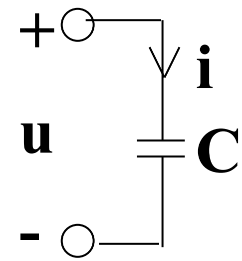
2. 电学



$$u = Ri$$



$$u = L\frac{di}{dt}$$



$$i = C\frac{du}{dt}$$

3. 流体力学等：参见具体例子。

◆最后化成微分方程模型**标准形式**：

•与输入量相关的在右边，

•与输出量相关的在左边，

•两端变量的导数项均按降幂排列。

二、非线性微分方程的线性化

- 小偏差理论或小信号理论。
- 线性化的方法：

$$\boxed{z = f(x, y)}$$

$\downarrow$ 选工作点

$$\boxed{\text{工作点为}(x_0, y_0)}$$

$\downarrow$ 泰勒级数展开

$$\boxed{z = f(x, y) = f(x_0, y_0) + \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{\substack{x=x_0\\y=y_0}}(x - x_0) + \left.\frac{\partial f}{\partial y}\right|_{\substack{x=x_0\\y=y_0}}(y - y_0) + \ldots\ldots}$$

$\downarrow$ 忽略高阶项，写成增量形式

$$\boxed{\Delta z = a\Delta x + b\Delta y}$$

三、线性定常系统的传递函数

◆**基本概念**求传递函数：零初始条件下输出与输入拉氏变换之比。

◆与微分方程模型之间的转换。

◆与**单位脉冲响应**间的关系：拉氏变换与反变换的关系。

◆标准形式：求出传递函数后要**化成标准形式**(有理分式形式)。

◆几个概念：前向通道、反馈通道、开环传递函数、误差传递函数、特征方程、传递系数/放大系数K(时间常数形式的系数)、根轨迹增益k(零极点形式的系数)。

$$G(s)=K\frac{(\tau_1 s+1)(\tau_2^2 s^2+2\zeta\tau_2 s+1)\cdots(\tau_{m'}s+1)}{(T_1 s+1)(T_2^2 s^2+2\zeta T_2 s+1)\cdots(T_{n'}s+1)}=k\frac{\prod_{i=1}^{m}(s-z_i)}{\prod_{j=1}^{n}(s-p_j)}$$

三、线性定常系统的传递函数

◆典型环节的传递函数：

比例 $G(s)=K$	积分 $G(s)=\dfrac{1}{s}$	微分 $G(s)=s$
惯性 $G(s)=\dfrac{1}{Ts+1}$	振荡 $G(s)=\dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\omega_n\zeta s+\omega_n^2}$	
一阶微分环节 $G(s)=\tau s+1$	二阶微分环节 $G(s)=\tau^2 s^2+2\tau\zeta s+1$	延滞 $G(s)=e^{-\tau s}$

四、结构图

◆绘制结构图：

•输入在左，输出在右。

原理图

↓ 依元部件或信号流向

微分方程

↓ 拉氏变换

子方块图

↓ 按变量传递顺序连接

结构图

◆**等效变换**求传递函数：

•串联、并联、反馈的等效变换。

•综合点的前后移动(前除后乘)。

•引出点的前后移动(前乘后除)。

•避免综合点与引出点相邻，尽量将交叉回路拆开。

•注意反馈回路的正负号。

五、信号流图：

◆**概念：**

•节点、支路、通路、
•前向通路(从输入节点到输出节点且与其它节点相交不多于一次)、
•回路(终点就是起点、且与其它节点相交不多于一次)、
•不接触回路(无任何公共节点)、接触回路。

◆**由方块图绘制信号流图：**

•节点：方块图的输入、输出、综合点、引出点、各方块的输入输出点。

•支路增益：各方块的传递函数。

◆**梅逊公式：**

$$G(s)=\frac{\sum_{k=1}^{m}P_k\Delta_k}{\Delta}\qquad \Delta=1-\sum_{1}^{n}L_i+\sum_{1}^{n_2}L_iL_j-\sum_{1}^{n_3}L_iL_jL_k+\cdots$$

一、稳定性

◆**定义**：扰动消失后系统由初始偏差状态恢复到原平衡状态的性能。

◆线性定常系统稳定的**充要条件**：所有特征根具有负实部。

◆劳斯判据：

•适用于**闭环特征方程**。

•系统稳定的**充要条件**是Routh表中第一列各项元素均为正。

•**特殊情况**1(某行第一列为0而其余不为0或没有其余项)：若Routh表第一列均为正，则系统为临界稳定。

•**特殊情况**2(某一行全为零)：有关于原点对称的根。若Routh表第一列均为正，则系统为临界稳定。

•存在全零行时由辅助多项式构成的方程的解是关于原点对称的根。

•第一列变号的次数是具有正实部的根的个数。

•**稳定裕量**的检验：$s=z-\sigma$。

◆**赫尔维茨判据：**

- **赫尔维茨矩阵的列写(n阶行列式)。**
- **系统稳定的充要条件是$a_n > 0$时行列式各阶主子式均大于零。**

$$
\begin{array}{cccccc}
a_{n-1} & a_n & 0 & 0 & \cdots & 0 \\
a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & 0 & \cdots \\
a_{n-5} & a_{n-4} & a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & \cdots \\
a_{n-7} & a_{n-6} & a_{n-5} & a_{n-4} & a_{n-3} & \cdots \\
a_{n-9} & a_{n-8} & a_{n-7} & a_{n-6} & a_{n-5} & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & a_0
\end{array}
$$

二、时域分析

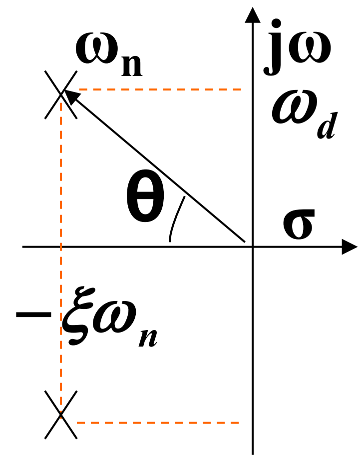
◆求系统输出响应：直接方法。先求输出的拉氏变换，再部分分式展开求拉氏反变换。

◆一阶系统动态性能指标： $G_B(s)=\dfrac{K}{Ts+1}$

- 当t=T时，c(t)=0.632c(∞)
- 上升时间$t_r=2.2T$
- 延滞时间$t_d=0.69T$
- 调整时间$t_s=3T(\Delta=5\%)$或$t_s=4T(\Delta=2\%)$

◆**二阶系统动态性能指标：**

$$G(s)=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}$$



$$s_{1,2}=-\xi\omega_n\pm\omega_n\sqrt{\xi^2-1}$$

- **不同阻尼比时的动态响应特点(几种工作状态)。**

? **响应曲线单调递增到稳态值，确定参数范围。**

- **欠阻尼的单位阶跃响应**

$$c(t)=1-\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}e^{-\xi\omega_n t}\sin(\omega_d t+\theta)$$

$$\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\qquad\qquad \theta=\arccos\xi$$

◆二阶系统动态性能指标： $G(s)=\dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}$

•欠阻尼单位阶跃响应二阶性能指标：

$t_r=\dfrac{\pi-\theta}{\omega_d}$	$t_p=\dfrac{\pi}{\omega_d}$
$\sigma_p\%=e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}\times 100\%$	$t_s=\dfrac{3}{\xi\omega_n}\sim\dfrac{4}{\xi\omega_n}$

•性能指标与参数的关系：

ξ减小则σ_p增大，t_r和t_p减小，t_s增大。

ω_n增大则t_r、t_p和t_s都减少。

◆高阶系统分析：

- 偶极子：距离很近的零极点对。
- 主导极点：两个条件(附近没有零点，且其余极点远离虚轴)。
- 近似成低阶系统的准则：保持闭环放大系数不变。
- 不能忽略的闭环极点对系统的影响：减少超调量、增加调节时间。
- 不能忽略的闭环零点对系统的影响：增大超调量、加快响应初期速度。

◆稳态误差：e(t)=r(t)-b(t)

•在系统**稳定的前提**下才有意义。

•系统型别：开环传递函数中含有的积分环节个数。

•**静态误差系数**：由开环传递函数来求：

$$K_p = \lim_{s\to 0} G(s)H(s) \qquad K_v = \lim_{s\to 0} sG(s)H(s) \qquad K_a = \lim_{s\to 0} s^2 G(s)H(s)$$

•**有用输入引起的误差**：

$$r(t) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \qquad e_{ss} = a_1 \frac{1}{1+K_p} + a_2 \frac{1}{K_v} + 2a_3 \frac{1}{K_a}$$

•**扰动输入引起的误差、非标准定义的误差**：

直接法：求出误差的拉氏变换，用终值定理求 $e_{ss} = \lim_{s\to 0} sE(s)$

•消除或减小稳态误差的方法：扰动点之前引入积分环节、增大开环放大系数、采用复合控制。

- 系统设计：根据给出的性能指标确定参数（一般原则）
  - 根据稳态误差或稳定性求开环放大系数的范围；
  - 根据动态指标给出主导极点后，确定二阶参数；
  - 其他极点只要选择为实部是主导极点的5倍及以上即可。
- 控制系统的灵敏度分析：
  - 灵敏度的定义和求解

◆普通**根轨迹**：

反馈系统开环传递函数为 $G(s)H(s)=K_r\dfrac{\prod_{j=1}^{m}(s-z_j)}{s^{\nu}\prod_{i=1}^{n-\nu}(s-p_i)}$

则根轨迹方程 $K_r\dfrac{\prod_{j=1}^{m}(s-z_j)}{\prod_{i=1}^{n}(s-p_i)}=-1$

幅值条件：$K_r=\dfrac{\prod_{i=1}^{n}|s-p_i|}{\prod_{j=1}^{m}|s-z_j|}$

相角条件：$\sum_{j=1}^{m}\angle(s-z_j)-\sum_{i=1}^{n}\angle(s-p_i)=(2k+1)\pi, k=0,\pm1,\pm2,\cdots$

◆ 180度根轨迹：以**开环根轨迹增益**K_r为可变参数绘制普通根轨迹的 8条基本规则：(开环极点数n,开环零点数m)

☑ **根轨迹的起点与终点**：根轨迹起始于开环极点，终止于开环零点。若n>m，则有n-m条根轨迹终止于s平面的无穷远处(无限零点)；若m>n，则有m-n条根轨迹起始于s平面的无穷远处(无限极点)。

☑**根轨迹的分支数**：根轨迹的分支数等于m和n中的较大者，根轨迹连续且对称于实轴。

☑ **实轴上的根轨迹**：若实轴上某线段右侧的开环零、极点的个数之和为**奇数**，则该线段是实轴上的根轨迹。

☑**根轨迹的渐近线**：当n>m时，有n−m条根轨迹分支沿着n−m条渐近线趋向无穷远处，这n-m条渐近线在实轴上的交点坐标为

$$\sigma_a = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i - \sum_{j=1}^{m} z_j}{n-m}$$

这n-m条渐近线与实轴的夹角分别为

$$\varphi_a = \frac{2k+1}{n-m}\pi \qquad (k = 0,1,2,....,n-m-1)$$

☑**根轨迹的分离点和分离角**：根轨迹的分离点的坐标d是下面方程的解

$$\sum_{j=1}^{m} \frac{1}{d-z_j} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d-p_i} \qquad \dot{A}(s)B(s) = A(s)\dot{B}(s)$$

分离角为 $\frac{1}{l}(2k+1)\pi$ ，其中l为进入分离点的根轨迹的分支数。

☑根轨迹的起始角和终止角：根轨迹的起始角θ_{pl}和终止角θ_{zl}可根据下面公式计算：

$$\theta_{p_l}=(2k+1)\pi+\sum_{j=1}^{m}\angle(p_l-z_j)-\sum_{\substack{i=1\\i\neq l}}^{n}\angle(p_l-p_i)$$

$$\theta_{z_l}=(2k+1)\pi-\sum_{\substack{j=1\\j\neq l}}^{m}\angle(z_l-z_j)+\sum_{i=1}^{n}\angle(z_l-p_i)$$

❗当p_l或z_l是**重根**时，利用相角条件来求起始角或终止角。

☑ 根轨迹与虚轴的交点：如根轨迹与虚轴相交，则交点上的K_c和ω_c值可用劳斯判据判定，也可令闭环特征方程中的$s=j\omega$，然后分别求解虚部方程和实部方程即可得K_c和ω_c。

☑特征根之和与特征根之积：若$n-m\geq2$，则根之和与开环根轨迹增益K_r无关。

绘制根轨迹的注意事项：

☑根轨迹的起点用“×”标示，终点用“O”标示。

☑用箭头标示根轨迹运动的方向。

☑要标出一些特殊点的K_r值。

☑要会求解根轨迹曲线部分的曲线方程。

第四章 根轨迹

- **参数根轨迹**：首先求出系统的等效开环传递函数。
- **正反馈系统**：0^{O}根轨迹：

规则三：实轴上的根轨迹是那些在其右侧的开环实零点和开环实极点之和为**偶数**的线段。

规则四：当n>m时，有n−m条根轨迹分支沿着n−m条渐近线趋向无穷远处，这n-m条渐近线在实轴上相交于一点，交点坐标σ_a与180^{O}根轨迹相同。

这n-m条渐近线与实轴的夹角为$\varphi_a = \dfrac{2k}{n-m}\pi, k = 0,1,2,\ldots, n-m-1$

规则六：起始角和终止角为

$$\theta_{p_l} = 2k\pi + \sum_{j=1}^{m}\angle(p_l - z_j) - \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq l}}^{n}\angle(p_l - p_i)$$

$$\theta_{z_l} = 2k\pi - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq l}}^{m}\angle(z_l - z_j) + \sum_{i=1}^{n}\angle(z_l - p_i)$$

◆**非最小相位系统的根轨迹**：

•将开环传递函数写成标准形式，为保证分子和分母中s的最高次幂系数为正，**如果有负号提出**，则按0^{O}根轨迹的规则作图，否则按180^{O}根轨迹规则作图。

◆由根轨迹分析系统性能：

•稳定性分析：开环根轨迹增益的临界值。

•动态性能分析：指定**阻尼比**如何获知相应的开环放大系数，并进一步获得主导极点信息以分析系统的性能。

◆增加开环零极点对系统根轨迹的影响。

•增加开环负实零点可将根轨迹向左“拉” ，有利于改善系统的稳定性。

◆稳定的系统：传递函数为G(s)，则

输入： $r(t)=A\sin(\omega t)$

输出： $y_{ss}(t)=|G(j\omega)|A\sin(\omega t+\varphi)$

◆频率特性的表示方法

$$G(j\omega)=u(\omega)+jv(\omega)=|G(j\omega)|e^{j\varphi}$$

- 1.实频特性u(ω)，虚频特性v(ω)
- 2.幅频特性，相频特性
- 3.幅相特性曲线：幅相曲线，极坐标图。
- 4.对数频率特性图：对数坐标图、伯德图或Bode图

◆典型环节的相频特性：

1. 比例环节 $\varphi(\omega) = 0^0$

2. 积分环节 $\varphi(\omega) = -90^0$

3. 微分环节 $\varphi(\omega) = 90^0$

4. 惯性环节 $\angle G(j\omega) = -\arctan\omega T$

5. 一阶微分(比例微分)环节 $\varphi(\omega) = \arctan\omega T$

6. 振荡环节 $$\varphi(\omega) = \begin{cases} -tg^{-1}\dfrac{2\xi\omega T}{1-\omega^2T^2}, \omega T \le 1 \\ -\left(180^0 - tg^{-1}\dfrac{2\xi\omega T}{\omega^2T^2-1}\right), \omega T > 1 \end{cases}$$

◆**典型环节的相频特性：**

7. 二阶微分环节 $$\angle G(j\omega)=\begin{cases}\arctan\dfrac{2\xi\omega T}{1-\omega^2T^2},\omega T\le 1\\ 180^0-\arctan\dfrac{2\xi\omega T}{\omega^2T^2-1},\omega T>1\end{cases}$$

8. 延迟环节 $\angle G(j\omega)=-\omega\tau$

9. 不稳定环节

$$\frac{1}{Ts-1}\qquad \varphi=-\left(180^\circ-\arctan\omega T\right)$$

$$Ts-1\qquad \varphi=180^0-\arctan\omega T$$

◆典型环节的相频特性：

9. 不稳定环节

$$\boxed{G(s)=\frac{1}{T^2s^2-2\xi Ts+1}}$$

$$\varphi(\omega)=\begin{cases} tg^{-1}\dfrac{2\xi\omega T}{1-\omega^2T^2}, & \omega T\le 1 \\ 180^0-tg^{-1}\dfrac{2\xi\omega T}{\omega^2T^2-1}, & \omega T>1 \end{cases}$$

$$\boxed{T^2s^2-2\xi Ts+1}$$

$$\varphi(\omega)=\begin{cases} -tg^{-1}\dfrac{2\xi\omega T}{1-\omega^2T^2}, & \omega T\le 1 \\ -180^0+tg^{-1}\dfrac{2\xi\omega T}{\omega^2T^2-1}, & \omega T>1 \end{cases}$$

◆绘制幅相曲线：

- 由频率特性得到实频特性和虚频特性，根据它们的符号确定频率特性曲线会经过哪些象限。
- 由ω从$0 \to +\infty$ ，计算起点和终点的幅频和相频特性，分析ω变化的趋势，绘出相应的幅相曲线。
- 求出幅相曲线与坐标轴的交点的值并标注在图上。
- 用箭头标出ω从$0 \to +\infty$变化的方向。
- 如果存在渐近线，则标出渐近线的值。

◆**最小相位系统**幅相曲线的起点：设积分环节的个数为r，则

▪若r=0且有微分环节，则起始于原点。若r=0 (无微分环节时)，则起始于正实轴上(K,0)点

▪若r>0，则起始于无穷远处，相角为$-r90^0$。

◆**最小相位系统**幅相曲线的终点：设分母的阶次为n，分子的阶次为m，则

▪当n=m时，曲线终止于正实轴上某点。

▪当n>m时，终点在原点，且以(n-m) ×(-90^0)的角度进入原点。

◆绘制Bode图：

➢ 对数幅频特性

- ✓ 确定各典型环节的转折频率并标注在横轴上。
- ✓ 确定对数幅频特性渐近线起始段的斜率和位置，画出渐近线起始段，即过ω=1， L(ω)= 20lgK点，斜率为-r20dB/dec。r为积分环节的个数。
  - ✓ 向左延伸到低频段(直到ω=0)，
  - ✓ 向右一直画到第一个转折频率处为止。
- ✓ 将L(ω)向高频段(向右)延伸，且每过一个转折频率，渐近线的斜率就相应地改变Δ。
- ✓ 标出**幅值穿越频率**（难点）。

▪对于最小相位系统，已知渐近对数幅频特性，求对应的传递函数。

◆绘制Bode图：

- **对数相频特性：**
- 判断起始渐近线：合并滞后（超前）相角
- 判断终止渐近线
- 最小相位系统：对数幅频特性曲线的**负斜率**加大时，对数相频特性负相角增加；否则减小。

第五章 频域分析

◆奈氏稳定判据：

- 绘制开环传递函数的幅相曲线
- 绘制对称部分，并绘制增补段：$\omega:0_- \rightarrow 0_+$时**顺时针**绕原点以无穷大半径转$\nu\pi$角度。
- 求出P：位于S平面右半平面的开环传函极点数
- 求出N：为奈氏曲线逆时针方向包围(-1,j0)点的次数

则闭环系统右半平面**不稳定的根的个数**为$Z=P-N$。

◆推论：若奈氏曲线顺时针包围(-1,j0)点，则系统一定不稳定。

第五章 频域分析

◆相对稳定性：

- 相角裕度γ： $\gamma = \varphi(\omega_c) - \left(-180^0\right) = 180^0 + \varphi(\omega_c)$

  其中**剪切频率**ω_c满足$|G(j\omega_c)H(j\omega_c)|=1$

- 幅值裕度K_g：

$$K_g = \frac{1}{\left|G(j\omega_g)H(j\omega_g)\right|}$$

$$K_g = -20\lg\left|G(j\omega_g)H(j\omega_g)\right| = -L\left(\omega_g\right)dB$$

  其中**相位穿越频率**ω_g满足$\angle G(j\omega_g)H(j\omega_g)= -180^0$

▪对于最小相位系统，若$K_g>1$且$\gamma>0^0$ ，则系统**稳定**

◆二阶系统：

谐振: $\omega_r = \frac{1}{T}\sqrt{1-2\xi^2}$ $M_r = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \geq 1 \quad \left(\xi \leq 1/\sqrt{2}\right)$

◆高阶系统频域指标与时域指标的关系：

$$\sigma_p = 0.16 + 0.4\left(\frac{1}{\sin\gamma} - 1\right) \quad 35^0 \leq \gamma \leq 90^0$$

$$t_s = \frac{K_0\pi}{\omega_c} \quad K_0 = 2 + 1.5\left(\frac{1}{\sin\gamma} - 1\right) + 2.5\left(\frac{1}{\sin\gamma} - 1\right)^2 \quad 35^0 \leq \gamma \leq 90^0$$

$$M_r \approx \frac{1}{\sin\gamma}$$

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

◆ 串联超前校正的步骤

1. 根据稳态性能要求，确定开环放大系数；
2. 绘制原系统Bode图，计算剪切频率ω_{c0}和相角裕度γ_0；
3. 确定补偿量$\Delta\varphi$，由$\varphi_m = \gamma^* - \gamma_0 + \Delta\varphi$确定$\varphi_m$，则超前校正网络的参数$a = \frac{1+sin\varphi_m}{1-sin\varphi_m}$；
4. 计算原系统对数幅频$L_0(\omega) = -10lga$处的频率ω_1，令$\omega_m = \omega_1$；
5. 根据$\omega_m = \frac{1}{T\sqrt{a}}$计算参数$T$，得到串联连接系数为$a$的比例放大器之后的超前校正网络的传递函数$G_c(s) = \frac{aTs+1}{Ts+1}$；
6. 写出校正后系统开环传递函数$G_K(s) = G_0(s)G_c(s)$，绘制校正后系统的Bode图，验算校正的结果。

◆**求幅值时近似的方法：**

判断要求频率位于该环节的哪个频段，若位于该环节的低频段，则近似为1；若位于该环节的高频段，则忽略1.

◆ 串联滞后校正的步骤

1. 根据稳态性能要求，确定开环放大系数；
2. 绘制原系统的Bode图，计算相角裕度γ_0；
3. 选择补偿量$\Delta\varphi$（通常取6°），计算原系统相角$\varphi(\omega)=-180°+\gamma^*+\Delta\varphi$处的频率$\omega_1$，
4. 令$20\lg b+L(\omega_1)=0$，得到参数b；
5. 令$\frac{10}{Tb}=\omega_1$，得到参数T，则串联滞后校正网络的传递函数为$G_c(s)=\frac{1+bTs}{1+Ts}$；
6. 写出校正后系统开环传递函数$G_K(s)=G_0(s)G_c(s)$，绘制校正后系统的Bode图，验算校正的结果。

◆串联滞后-超前校正步骤：

1. 根据稳态性能要求，确定开环放大系数K；
2. 根据性能指标的要求决定超前校正部分，此时需考虑相位滞后部分会带来最多$\triangle\varphi=-6^0$的影响。得到$G_1(s)$；
3. 根据$G_1(s)$性能指标不足部分来决定滞后校正部分

◆**期望频率特性法：**

1. 根据稳态误差要求，确定开环增益K，即**起始段**；
2. 由剪切频率ω_c^*、相角裕度γ^*、谐振峰值M_r确定H、ω_2、ω_3，绘制**中频段**，斜率为$-20dB/dec$，以保证相角裕度要求；
3. 中频段**向左延伸**，**与起始段连接**。若不能与起始段的期望频率特性相连，则**增加直线**，斜率尽量接近相邻线段；
4. 中频段**向右延伸**，根据幅值裕度及抗干扰要求，确定**高频段**。**斜率**尽量与原系统高频段**保持一致**，或完全重合；
5. 将期望对数幅频特性**减去**原系统对数幅频特性，得串联校正装置的对数幅频特性及其**传递函数**；
6. 验算。