即将直播授课

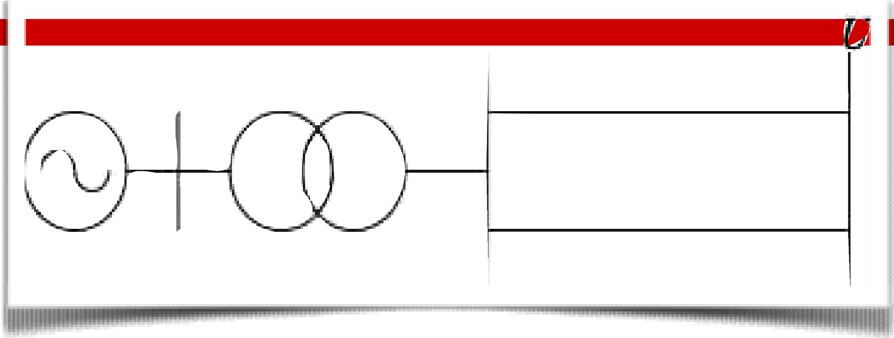
- **下载腾讯课堂学生端APP：**
  https://ke.qq.ocm/s

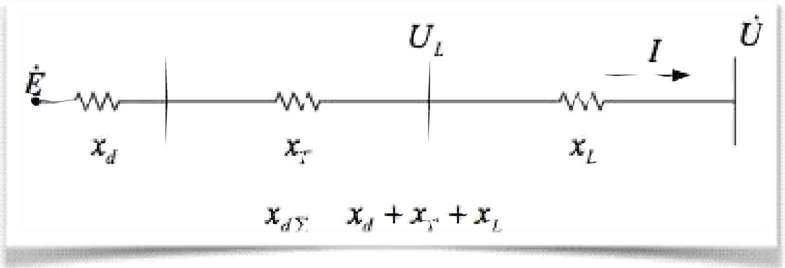
- **扫码进课**
- **也可以看回放**

- **进一次以后，下次再进课堂不需要再扫码：**
  我的—最近看过—刘宗茹的课堂

- **请将昵称改为：学号姓名**

简单电力系统





- 无限大母线
  - 容量无限大
  - 惯性时间常数无限大

→ **受端系统频率为常数**
电压U的大小和相位为常数

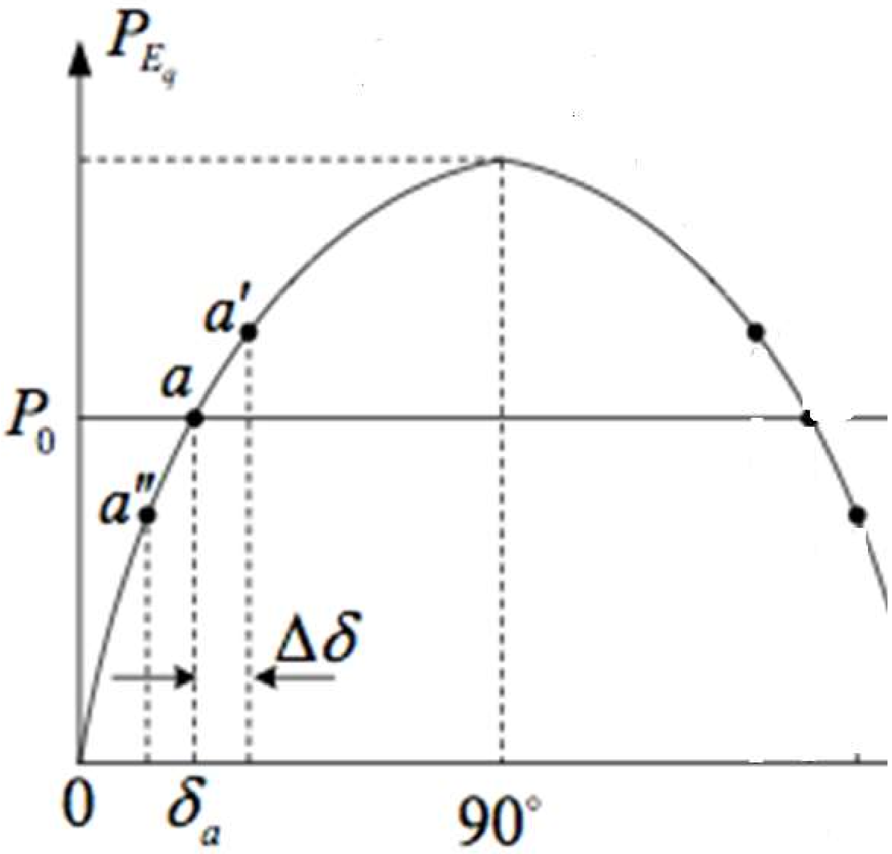
- 单机是理想电机
  - 发电机为隐极机 → $$P_E = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta$$
  - 不考虑发电机励磁调节器的作用 → **Eq恒定**
  - 不计原动机调速器作用 → **P_T不变**
  - 忽略发电机的风阻、摩擦等机械阻力和各阻尼的影响 → **只有P_E和P_T**

小扰动下的响应过程分析——a点

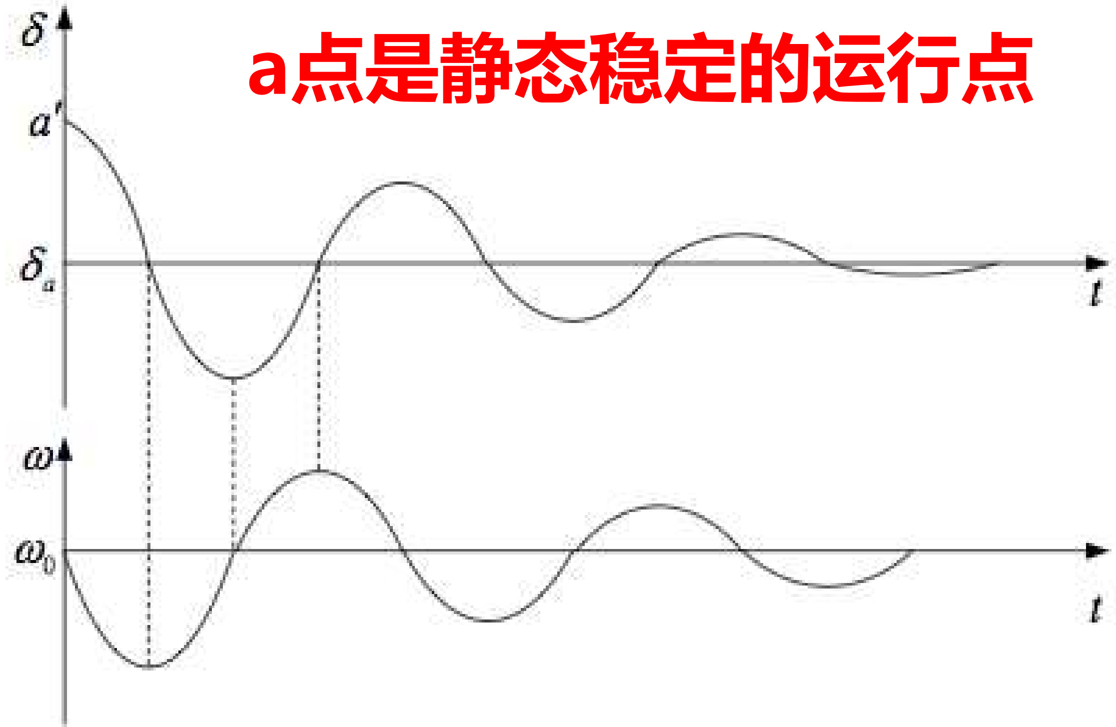
扰动发生后，分两种情况讨论：

- 一种是扰动使转子角增大
- 一种是扰动是转子角减小

$$
\begin{cases}
\dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\
\dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J}\cdot\left(P_{T*} - P_{E*}\right)
\end{cases}
$$



a点是静态稳定的运行点



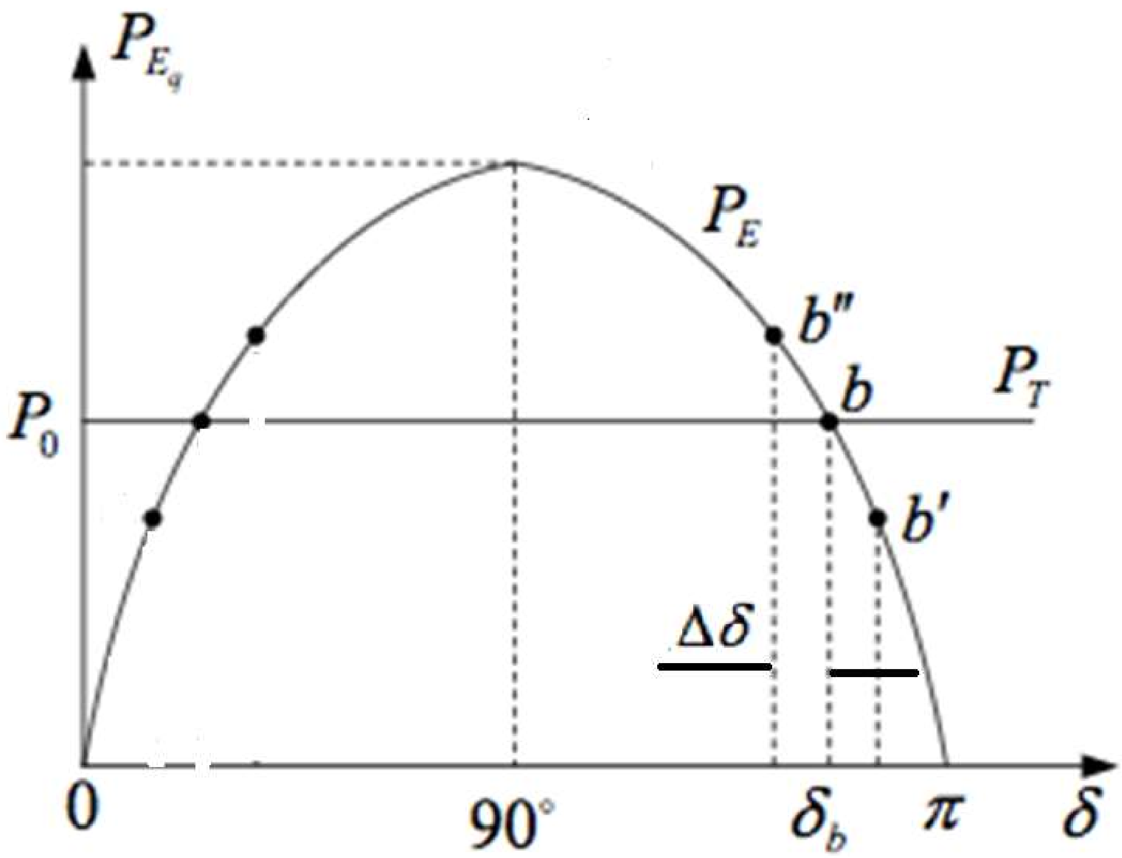
刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

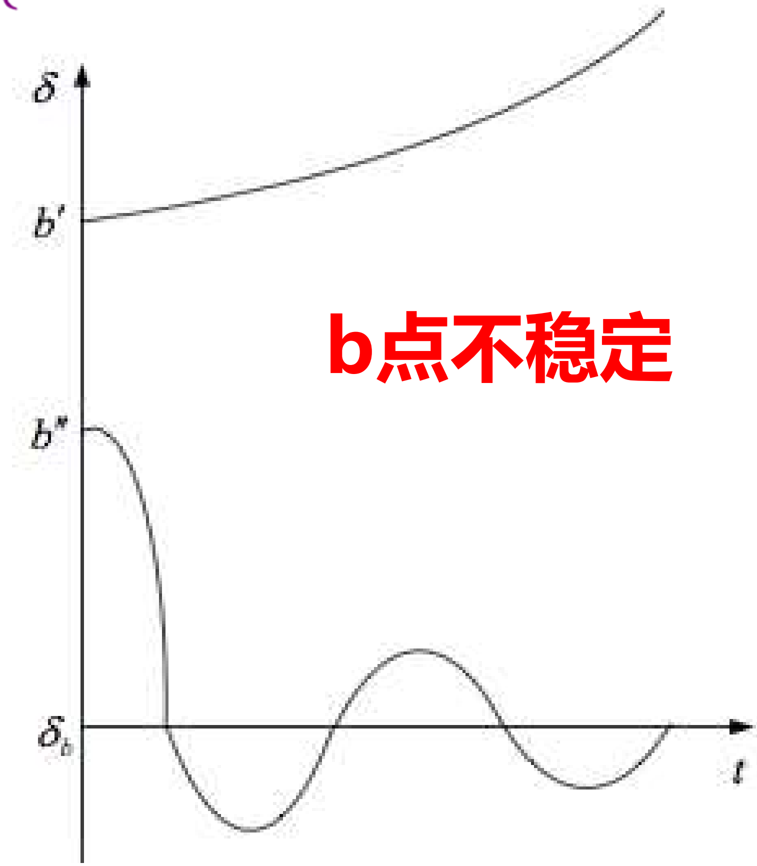
小扰动下的响应过程分析——b点

扰动发生后，分两种情况讨论：

- 一种是扰动使转子角增大
- 一种是扰动是转子角减小

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J} \cdot (P_{T*} - P_{E*}) \end{cases}$$

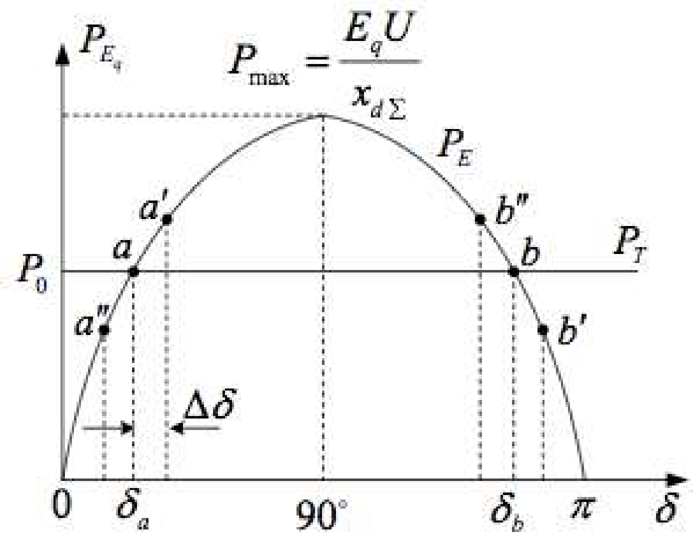




b点不稳定

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

小扰动下的响应过程分析结论



	a 点 **稳定**	b 点 **不稳定**
机械功率	$P_T = P_0$	$P_T = P_0$
电磁功率	P_E	P_E
转子角	$\delta_a < 90^\circ$	$\delta_b > 90^\circ$
变化趋势	$\delta\uparrow$时，$P_E\uparrow$	$\delta\uparrow$时，$P_E\downarrow$
结论	$\Delta\delta$ 与 ΔP 是否同号是稳定与否的关键	

- **对分析结论的数学描述** → **系统静态稳定判据：整步功率系数大于零**

$$\frac{\Delta P_E}{\Delta\delta} > 0$$ **系统稳定**

$$\frac{\Delta P_E}{\Delta\delta} < 0$$ **系统不稳定**

$$\boxed{\frac{\Delta P_E}{\Delta\delta} > 0}$$

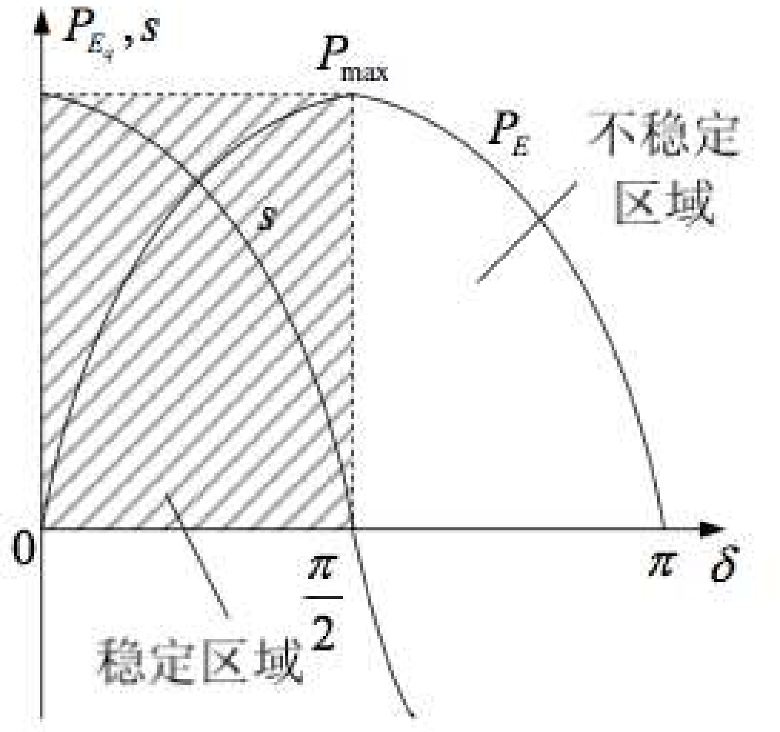
它的数值大小说明系统静态稳定的程度，或者说，表示了发电机维持同步运行的能力。

单机无穷大系统静态稳定判据

- 计算单机无穷大系统的整部功率系数（隐极机）

$$P_E = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta$$

$$\frac{\Delta P_E}{\Delta \delta} > 0$$



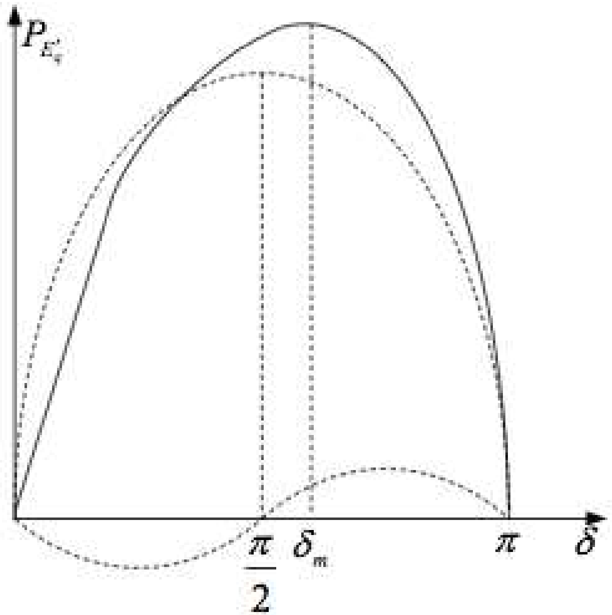
稳定极限实际上指的是发电机的角度极限值。即发电机能够达到的最大转子角。

单机无穷大系统静态稳定判据

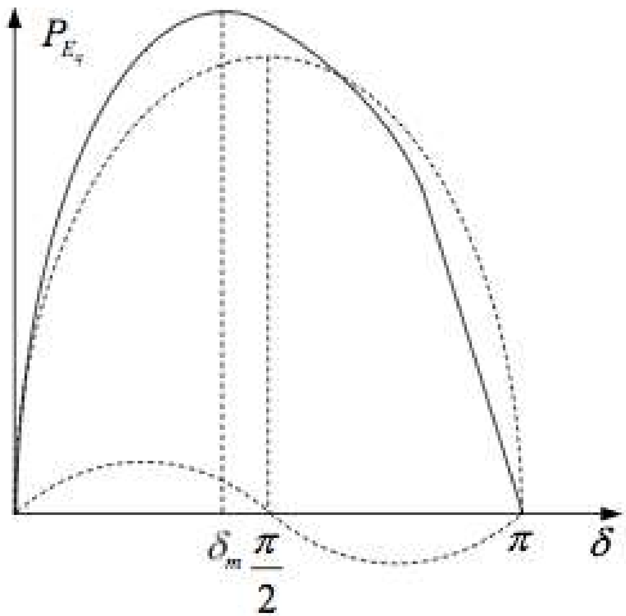
▪计算不同情况下单机无穷大系统的整部功率系数

$$P_E = \frac{E_q'U}{x_{d\Sigma}'}\sin\delta - \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{x_{d\Sigma}'} - \frac{1}{x_{q\Sigma}}\right)\sin 2\delta$$

$$P_E = \frac{E_qU}{x_{d\Sigma}}\sin\delta + \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{x_{q\Sigma}} - \frac{1}{x_{d\Sigma}}\right)\sin 2\delta$$



E_q' 恒定时发电机的功角特性曲线 $\delta_m > 90^\circ$



E_q 恒定时的凸极机的功角特性曲线 $\delta_m < 90^\circ$

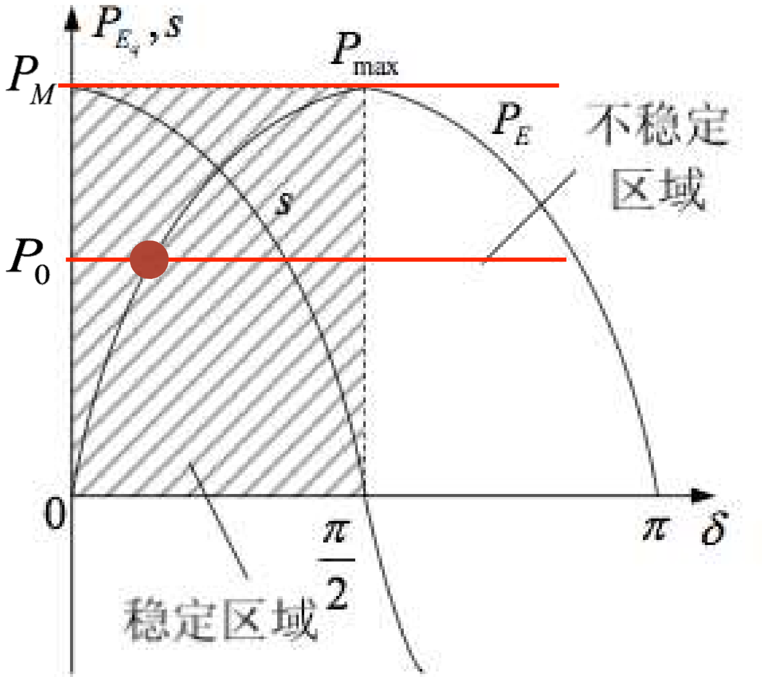
刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

稳定储备系数

系统静态稳定判据：整步功率系数大于零

$$\frac{\Delta P_E}{\Delta \delta} > 0$$

它的数值大小说明系统静态稳定的程度，或者说，表示了发电机维持同步运行的能力。



- **稳定储备系数（功角判据）**

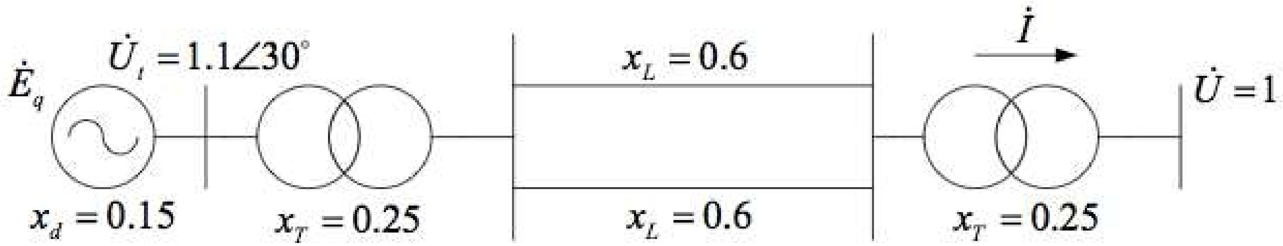
$$K_p = \frac{P_M - P_0}{P_0} \times 100\%$$

- **稳定储备系数取值**
  - **过小：经济性好，稳定性差**
  - **过大：稳定性好，经济性差**

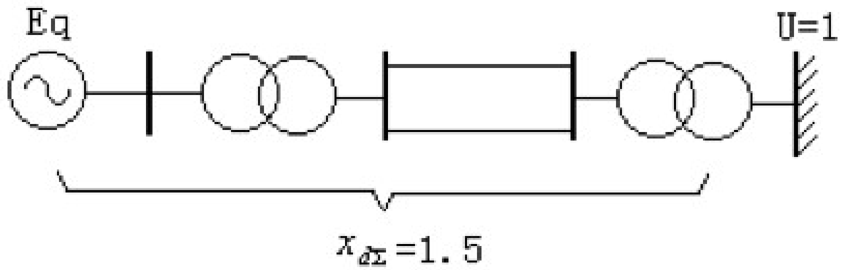
《电力系统安全稳定运行导则》https://mp.weixin.qq.com/s/NMHJhvRBcnDgoUWQj6sykw

第六次作业（稳定储备系数）

- 单机无限大系统及参数如图。求系统的（1）初始功角；（2）发电机功率极限（假定发电机内电势恒定）；（3）稳定储备系数。



- 单机无限大系统及参数如图，发电机运行在额定状态，无限大母线处的功率因数为coφ=0.8。求系统的（1）功率极限（2）静态稳定储备系数。



整步功率系数大于零的判据

A　对单机无穷大系统有效

B　对复杂系统也有效

C　是通用判据

D　从目前的分析不好判断是不是通用判据

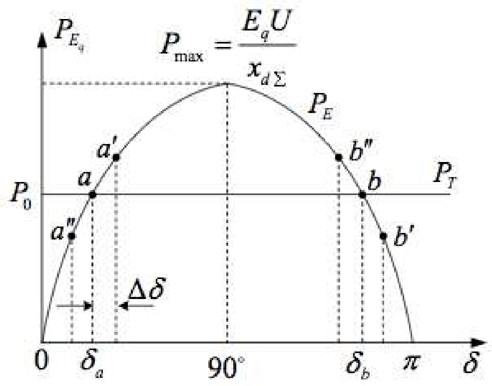
整部功率系数判据是否通用?

单机无限大系统

- 理想电机
- 系统容量无限大

$$\begin{cases}\dfrac{d\delta}{dt}=(\omega-1)\omega_0\\ \dfrac{d\omega}{dt}=\dfrac{1}{T_J}\cdot(P_{T*}-P_{E*})\end{cases}$$

- 在功率曲线上做定性分析



$$\frac{\Delta P_E}{\Delta\delta}>0$$

能在数学上证明这个结论吗？它有没有适用条件呢?

- 对复杂系统能用吗?

$$P_{Ei}=P_{Di}+U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\cos\delta_{ij}+B_{ij}\sin\delta_{ij})$$

$$Q_{Ei}=Q_{Di}+U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\sin\delta_{ij}-B_{ij}\cos\delta_{ij})$$

- 当系统中含有三台以上发电机的情况下，**无法用曲线**作出发电机的功角特性。 那怎么分析呢?

小干扰法——状态空间表征

- **状态空间表征**
  - **动态系统的行为可以用一组n个一阶微分方程组描述**

$$\dot{x}_i = f_i\left(x_1, x_2, \cdots, x_n; u_1, u_2, \cdots, u_r; t\right) \quad i = 1, 2, \cdots n$$

- **用矢量符号重写**

$$\dot{x} = f\left(x, u, t\right)$$

  - **列向量x表示状态向量，其元素x_i表示状态变量。**
  - **列向量u是输入向量，是影响系统行为的外部信号。**
  - **t表示时间。**

小干扰法——自治系统

$$\dot{x} = f(x,u,t)$$

- 如果状态变量的导数不是时间的显函数，系统称为**自治系统**。

$$\dot{x} = f(x,u)$$

- 我们常常对输出变量感兴趣，输出变量可以用输入变量和状态变量来描述：

$$y = g(x,u)$$

小干扰法——线性化

- 自治系统的数学表达：

$$\dot{x} = f\left(x,u\right)$$

$$y = g\left(x,u\right)$$

- 非线性系统可能有多个平衡点。

- 设某平衡点为x0，u0，y0，有：

$$\dot{x}_0 = f(x_0,u_0) = 0$$

$$y_0 = g(x_0,u_0)$$

- 发生扰动：

$$x = x_0 + \Delta x$$

$$u = u_0 + \Delta u$$

- 系统的数学表达：

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta\dot{x} = f(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u)$$

$$y = y_0 + \Delta y = g(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u)$$

- 线性化的手段是？条件是？

小干扰法——线性化

- 泰勒展开
  - 之前的专业课中在哪里用过?

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$y = g(x, u)$$

在x0、u0点泰勒展开：

$$\dot{x}_0 + \Delta\dot{x} = f(x_0, u_0) + \frac{\partial f}{\partial x^T}\Delta x + \frac{\partial f}{\partial u^T}\Delta u + h_f(\Delta x, \Delta u)$$

$$y_0 + \Delta y = g(x_0, u_0) + \frac{\partial g}{\partial x^T}\Delta x + \frac{\partial g}{\partial u^T}\Delta u + h_g(\Delta x, \Delta u)$$

小干扰法——线性化

- **泰勒展开（忽略高阶项）**

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \dot{\boldsymbol{x}}_0 + \Delta\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{u}_0) + \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}^T}\Delta\boldsymbol{x} + \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{u}^T}\Delta\boldsymbol{u}$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{y}_0 + \Delta\boldsymbol{y} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{u}_0) + \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{x}^T}\Delta\boldsymbol{x} + \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{u}^T}\Delta\boldsymbol{u}$$

- **每个方程的具体表达**

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \dot{x}_{i0} + \Delta\dot{x}_i = f_i(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u) \\ &= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1}\Delta x_1 + \cdots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1}\Delta u_1 + \cdots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r}\Delta u_r\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}y_j &= y_{j0} + \Delta y_j = g_j(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u) \\ &= g_j(x_0, u_0) + \frac{\partial g_j}{\partial x_1}\Delta x_1 + \cdots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1}\Delta u_1 + \cdots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r}\Delta u_r\end{aligned}$$

小干扰法——线性化

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \dot{\boldsymbol{x}}_0 + \Delta\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{u}_0\right) + \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}^T}\Delta\boldsymbol{x} + \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{u}^T}\Delta\boldsymbol{u}$$

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{y}_0 + \Delta\boldsymbol{y} = \boldsymbol{g}\left(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{u}_0\right) + \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{x}^T}\Delta\boldsymbol{x} + \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{u}^T}\Delta\boldsymbol{u}$$

$$\Delta\dot{\boldsymbol{x}} = \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}^T}\Delta\boldsymbol{x} + \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{u}^T}\Delta\boldsymbol{u}$$

$$\Delta\boldsymbol{y} = \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{x}^T}\Delta\boldsymbol{x} + \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{u}^T}\Delta\boldsymbol{u}$$

$$\boxed{\begin{aligned}\Delta\dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u\end{aligned}}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

小干扰法——稳定判据

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$

零输入系统

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x$$

$$\Delta y = C\Delta x$$

拉普拉斯变换

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s)$$

方程整理

$$(sI - A)\Delta x(s) = \Delta x(0)$$

方程求解

$$\Delta x(s) = (sI - A)^{-1}\Delta x(0) = \frac{adj(sI - A)}{\det(sI - A)}\Delta x(0)$$

$$\Delta y(s) = C\frac{adj(sI - A)}{\det(sI - A)}\Delta x(0)$$

系统稳定的条件?

Δx(s)和Δy(s)的极点是方程

det(sI-A)=0的根

特征方程、特征根

特征方程 det(sI-A)=0，|sI-A|=0

方程的解，称为矩阵A的特征值。

小干扰法——稳定判据

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$
$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$

泰勒展开

(忽略高阶项)

$$\dot{x} = f(x,u)$$
$$y = g(x,u)$$

零输入系统

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x$$
$$\Delta y = C\Delta x$$

特征方程、特征根

特征方程 det(sI-A)=0，|sI-A|=0

方程的解，称为矩阵A的特征值。

李雅普诺夫第一方法

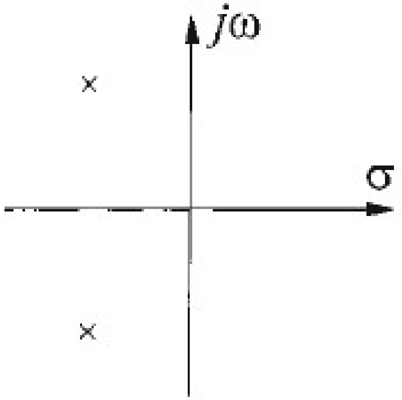
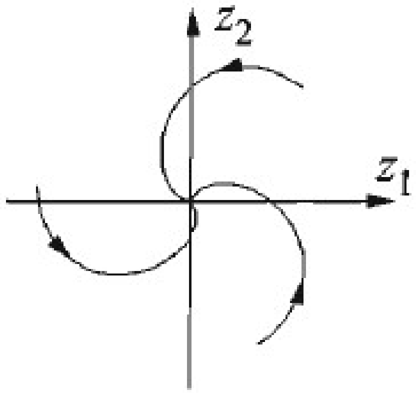
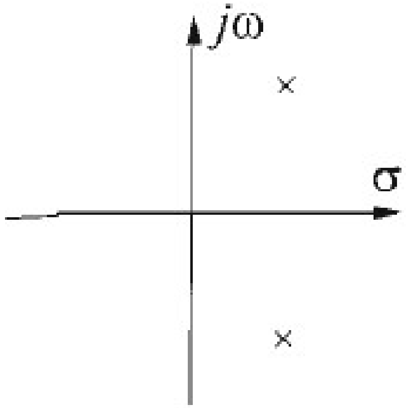
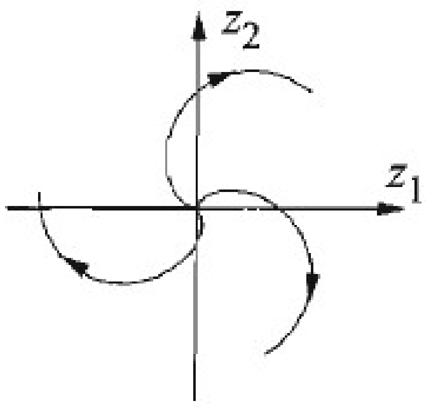
1）所有特征值的实部均为负值，则系统是渐进稳定的；

2）只要任一特征值出现正实部，则系统是不稳定的；

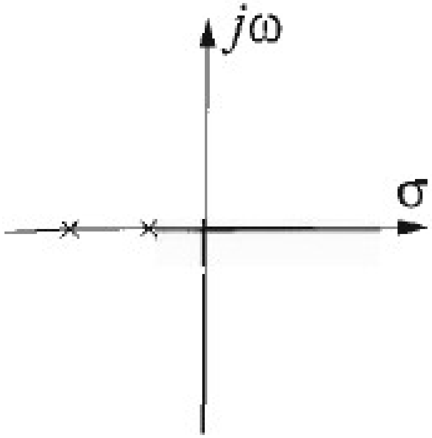
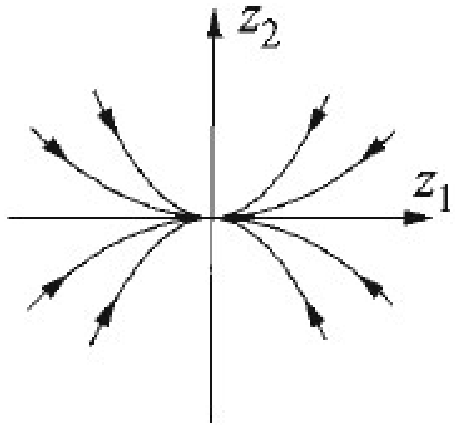
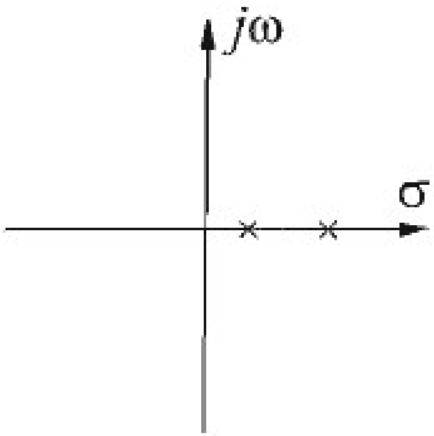
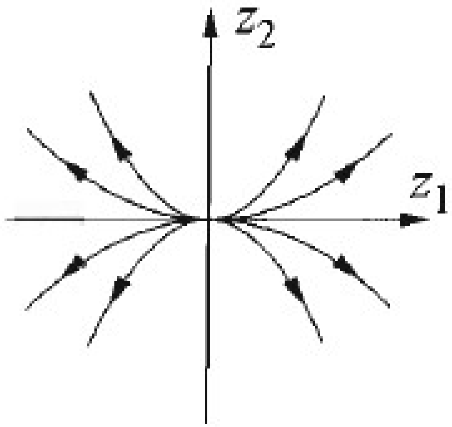
3）如果出现实部为零的特征根，则无法用第一方法判断系统的稳定性。

更正：教材P138页李雅普诺夫判断原则第三条描述有误

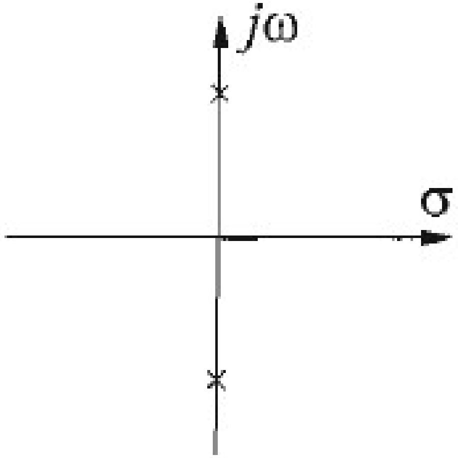
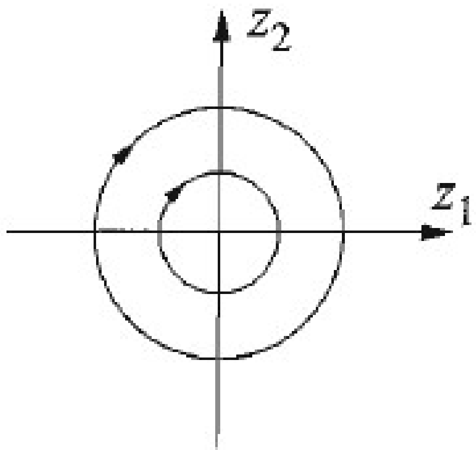
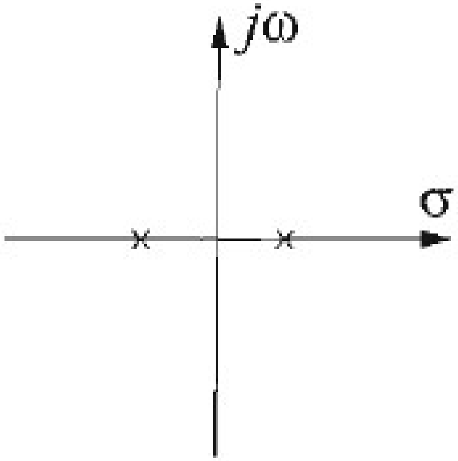
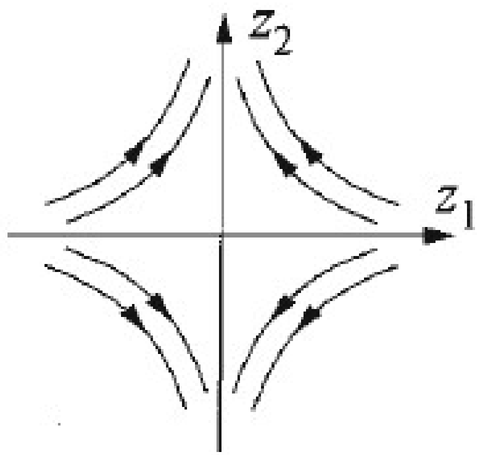
小干扰法——根轨迹

Eigenvalues ($\lambda=\sigma\pm j\omega$)	*Trajectory*	*Type of singularity*
(1) 		Stable focus 渐进稳定
(2) 		Unstable focus

小干扰法——根轨迹

Eigenvalues ($\lambda=\sigma\pm j\omega$)	*Trajectory*	*Type of singularity*
(3) 		Stable node 渐进稳定
(4) 		Unstable node

小干扰法——根轨迹

	Eigenvalues $(\lambda=\sigma\pm j\omega)$	*Trajectory*	*Type of singularity*
(5)			Vortex 局部稳定
(6)			Saddle

小干扰法分析简单系统的静态稳定

列出描述系统的

非线性微分方程组

线性化

近似的线性微分方程组

列写特征方程，

求特征根

根据其特征根用李雅普诺夫的

第一方法判断系统的稳定性

零输入系统 $\dot{X} = F(X)$

如果X_0是系统的一个初始平衡状态的向量，即$F[X_0]=0$

在X_0点一阶泰勒展开，得到线性微分方程组

$$\Delta\dot{X} = \mathrm{d}F(X)/\mathrm{d}x\Big|_{X_0}\Delta X = A\Delta X$$

列写特征方程$|A-\lambda I|=0$

求A矩阵的特征根

根据特征根结果判断稳定性

特征值实部均为负值：稳定；
出现正实部特征值：不稳定；
零根：无法判断。

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

小干扰法分析简单系统的静态稳定

列出描述系统的非线性微分方程组

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E) \end{cases} \qquad \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}) = \begin{bmatrix} (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E) \end{bmatrix} \qquad \dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{X})$$

线性化

近似的线性微分方程组

$$\boldsymbol{x}_0 = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \Delta\dot{\boldsymbol{X}} = \left.\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{X}^T}\right|_{X_0} \Delta\boldsymbol{X} = \boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{X} \qquad \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\left.\dfrac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0} & 0 \end{bmatrix}$$

列写特征方程，求特征根

$$|\boldsymbol{A} - \lambda\boldsymbol{I}| = \begin{vmatrix} 0-\lambda & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\left.\dfrac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0} & 0-\lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 + \frac{\omega_0}{T_J}\left.\frac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0} = 0$$

根据其特征根用李雅普诺夫的第一方法判断系统的稳定性

$$\boxed{\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{-\frac{\omega_0}{T_J}\left.\frac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0}}}$$

小干扰法分析简单系统的静态稳定

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E) \end{cases}$$

$$\Delta\dot{X} = \frac{\partial F}{\partial X^T}\bigg|_{X_0} \Delta X = A\Delta X$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\dfrac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \\ \dfrac{d\Delta\omega}{dt} = -\dfrac{1}{T_J}\cdot\dfrac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0}\Delta\delta \end{cases}$$

$$\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{-\frac{\omega_0}{T_J}\frac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0}}$$

分三种情况讨论

$\dfrac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0} < 0$ **一正根，一负根**

$\dfrac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0} = 0$ **零根**

$\dfrac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0} > 0$ **一对虚根**

理论上，Δδ和Δω将等幅振荡，振荡频率约为1Hz左右，通常称为低频振荡。

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\omega_0}{T_J}\frac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0}}$$

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

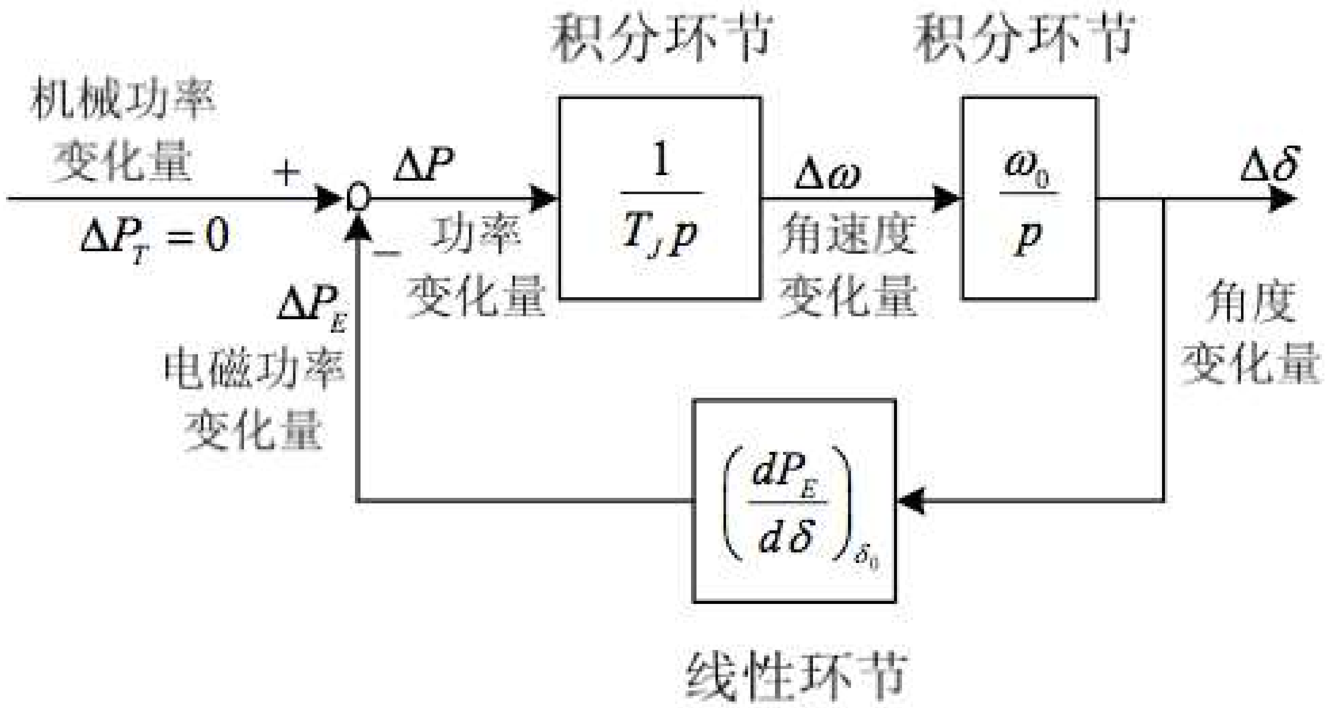
小干扰法分析简单系统的静态稳定

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E) \end{cases}$$

$$\Delta\dot{X} = \left.\frac{\partial F}{\partial X^T}\right|_{X_0} \Delta X = A\Delta X$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\left.\dfrac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \\ \dfrac{d\Delta\omega}{dt} = -\dfrac{1}{T_J} \cdot \left.\dfrac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0} \Delta\delta \end{cases}$$



简单系统中的发电机框图

阻尼对系统稳定性的作用

列出描述系统的非线性微分方程组

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E - P_D) \end{cases}$$

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}) = \begin{bmatrix} (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E - P_D) \end{bmatrix}$$

线性化

近似的线性微分方程组

$$\boldsymbol{x}_0 = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta\dot{\boldsymbol{X}} = \frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{X}^T}\bigg|_{X_0} \Delta\boldsymbol{X} = \boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{X}$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\dfrac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0} & -\dfrac{1}{T_J}D \end{bmatrix}$$

列写特征方程，求特征根

$$|\boldsymbol{A} - \lambda\boldsymbol{I}| = \begin{vmatrix} 0 - \lambda & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\dfrac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0} & -\dfrac{D}{T_J} - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 + \frac{D}{T_J}\lambda + \frac{\omega_0}{T_J}\frac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0} = 0$$

根据其特征根用李雅普诺夫的第一方法判断系统的稳定性

$$\boxed{\lambda_{1,2} = -\frac{D}{2T_J} \pm \frac{1}{2T_J}\sqrt{D^2 - 4\omega_0 T_J \frac{dP_E}{d\delta}\bigg|_{\delta=\delta_0}}}$$

阻尼对系统稳定性的作用

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E - P_D) \end{cases} \xrightarrow{\Delta\dot{X} = \frac{\partial F}{\partial X^T}\Big|_{X_0} \Delta X = A\Delta X} \begin{cases} \dfrac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \\ \dfrac{d\Delta\omega}{dt} = -\dfrac{1}{T_J}\cdot\left[\dfrac{dP_E}{d\delta}\Big|_{\delta=\delta_0}\Delta\delta + D\Delta\omega\right] \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\dfrac{dP_E}{d\delta}\Big|_{\delta=\delta_0} & -\dfrac{1}{T_J}D \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{D}{2T_J} \pm \frac{1}{2T_J}\sqrt{D^2 - 4\omega_0 T_J \frac{dP_E}{d\delta}\Big|_{\delta=\delta_0}}$$

分情况讨论

$\dfrac{dP_E}{d\delta}\Big|_{\delta=\delta_0} < 0$ **存在正实根**

$\dfrac{dP_E}{d\delta}\Big|_{\delta=\delta_0} > 0$ →

D>0　实部为负

D<0　实部为正

→

系统稳定的要求：

- **整步功率系数大于零**
- **阻尼系数大于零**

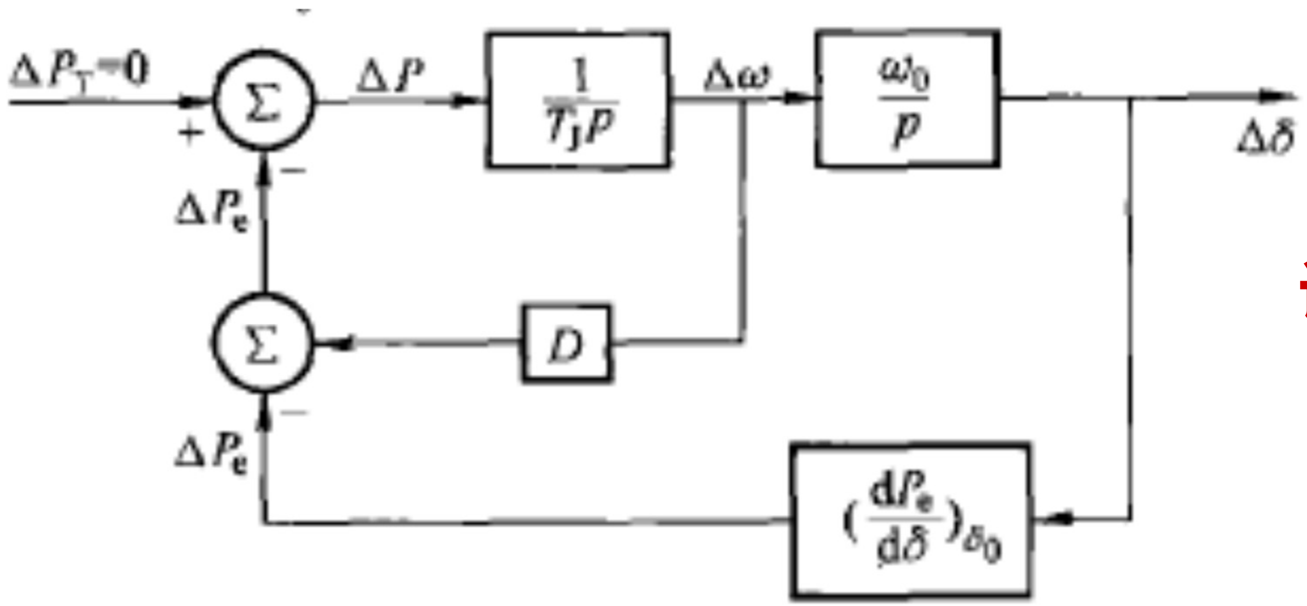
阻尼对系统稳定性的作用

$$\begin{cases} \dfrac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J}(P_T - P_E - P_D) \end{cases}$$

$$\Delta\dot{X} = \left.\frac{\partial F}{\partial X^T}\right|_{X_0} \Delta X = A\Delta X$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\dfrac{1}{T_J}\left.\dfrac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0} & -\dfrac{1}{T_J}D \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dfrac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \\ \dfrac{d\Delta\omega}{dt} = -\dfrac{1}{T_J}\cdot\left[\left.\dfrac{dP_E}{d\delta}\right|_{\delta=\delta_0}\Delta\delta + D\Delta\omega\right] \end{cases}$$



计及阻尼的简单系统中的发电机框图

如果系统不是零输入系统，怎么进行判断呢?

作答