

西安交通大学

Xi'an Jiaotong University

电器理论基础

Fundamentals of Electrical Apparatuses

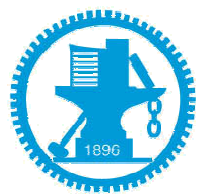
西安交通大学
电器教研室

贾申利
史宗谦

sljia@mail.xjtu.edu.cn

zqshi@mail.xjtu.edu.cn

2009.2~2009.5



电器理论基础

- 绪论 电力系统简介
- 第一章 电器导体的发热计算
- 第二章 电器中的电动力计算
- 第三章 电弧的基本特性
- 第四章 交流电弧的熄灭原理
- 第五章 开关电器典型灭弧装置的工作原理
- 第六章 电接触理论
- 第七章 电磁系统



第二章 电器中的电动力计算

- § 2-1 电器中的电动力现象
- § 2-2 计算电动力的基本方法和公式
- § 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算
- § 2-4 单相正弦交流下的电动力
- § 2-5 三相正弦交流下的电动力
- § 2-6 载流导体与导磁体间的电动力
- § 2-7 电器的电动稳定性



§ 2-1 电器中的电动力现象

■ 电动力(Electric Force)

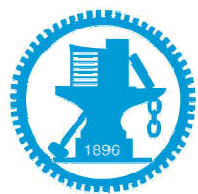
- ◆ 载流导体之间因**磁场**而受到力的作用

■ 电动力的危害

- ◆ 机械冲击
- ◆ 产生危害电弧
- ◆ 熔焊

■ 电动力的应用

- ◆ 限流断路器触点速断
- ◆ 驱动电弧
- ◆ 电磁炮、电磁弹射

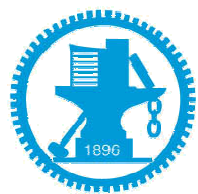


§ 2-1 电器中的电动力现象

■ 影响电动力的因素

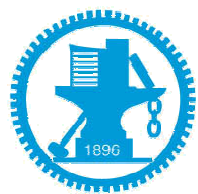
- ◆ 电流的种类、大小、方向
- ◆ 回路形状、相对位置、介质
- ◆ 导体截面形状等

■ 从抑制和应用的角度来看，须对电动力作定量计算



第二章 电器中的电动力计算

- § 2-1 电器中的电动力现象
- § 2-2 计算电动力的基本方法和公式
- § 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算
- § 2-4 单相正弦交流下的电动力
- § 2-5 三相正弦交流下的电动力
- § 2-6 载流导体与导磁体间的电动力
- § 2-7 电器的电动稳定性



§ 2-2 计算电动力的基本方法和公式

■ 电动力计算的常用方法

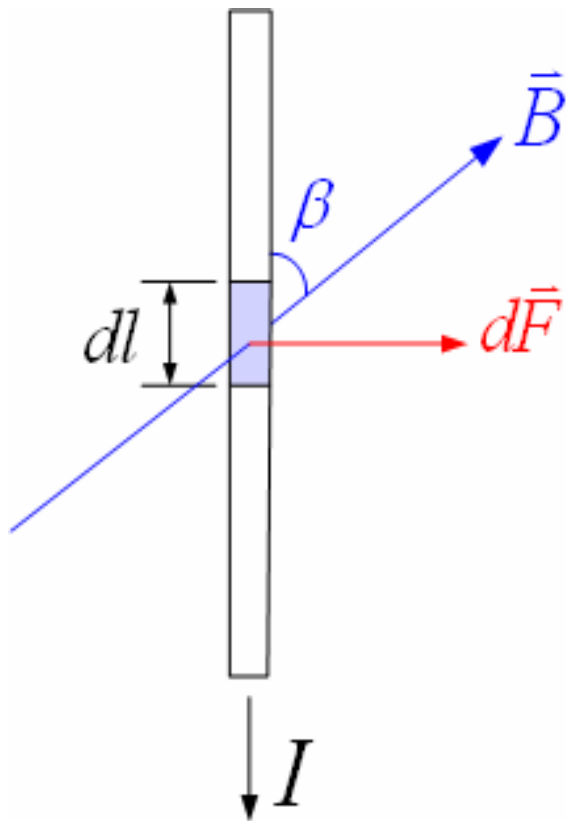
- ◆ 毕奥-沙伐尔定律
- ◆ 能量平衡法

■ 二者本质相同，但对具体问题各有方便之处。



§ 2-2 计算电动力的基本方法和公式

毕奥-沙伐尔定律



洛伦兹力 (Lorenz)

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

• $d\vec{l}$ 的取向与 I 相同

$$dF = IB \sin \beta dl$$

• β 为 \vec{B} 与 $d\vec{l}$ 的夹角

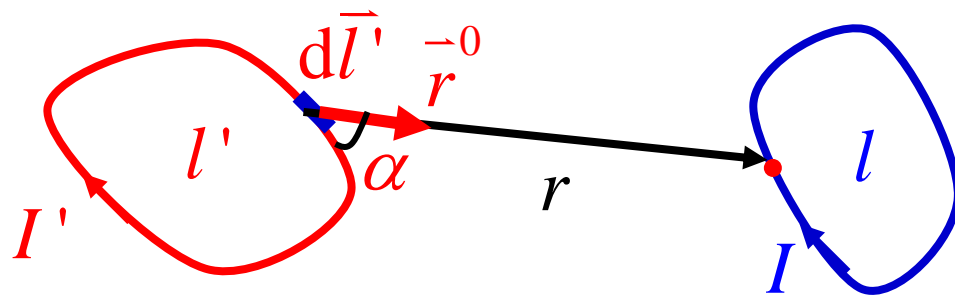
◆ $d\vec{F}$ 的方向由左手法则确定



§ 2-2 计算电动力的基本方法和公式

毕奥-沙伐尔定律

◆ 假设 \vec{B} 为另一电流为 I' 的载流导体 l' 产生



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I' \frac{d\vec{l}' \times \vec{r}^0}{r^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I' \int_{l'} \frac{d\vec{l}' \times \vec{r}^0}{r^2}$$

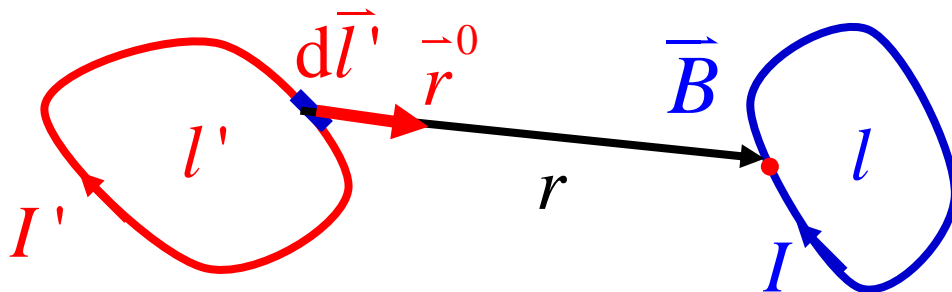
毕奥-沙伐尔定律

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I' \int_{l'} \frac{\sin \alpha}{r^2} dl'$$



§ 2-2 计算电动力的基本方法和公式

毕奥-沙伐尔定律

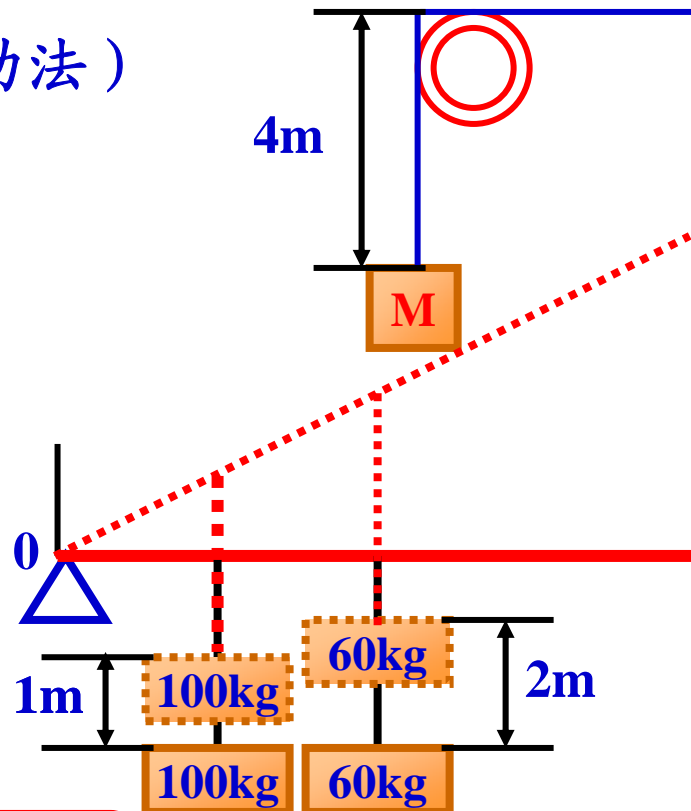
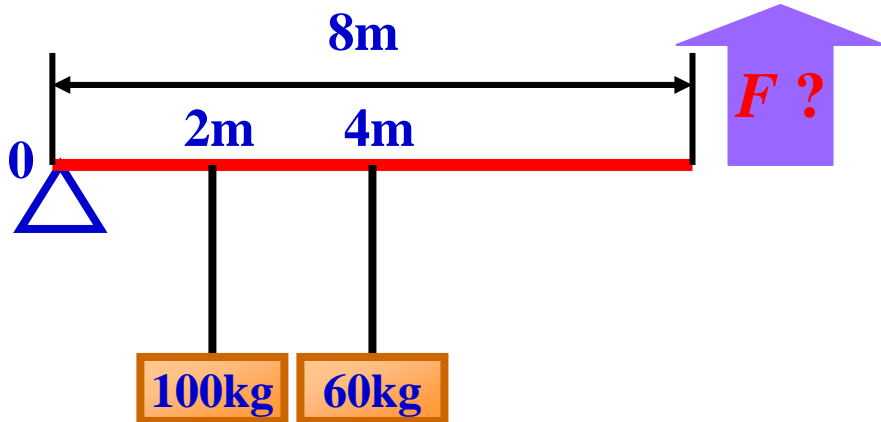


$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I' \int_{l'} \frac{d\vec{l}' \times \vec{r}^0}{r^2} \xrightarrow{\text{代入}} d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \xrightarrow{\text{积分}} \vec{F}$$
$$dF = IB \sin \beta dl$$



§ 2-2 计算电力的基本方法和公式

■ 能量平衡原理 (虚位移法) (虚功法)



力平衡法

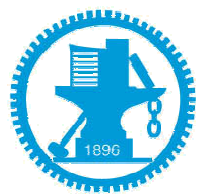
$$F \times 8 = 100 \times 2 + 60 \times 4$$

解 $F = 55\text{kg}$

虚位移法

$$M \times 4 = 100 \times 1 + 60 \times 2$$

解 $M = 55\text{kg}$



§ 2-2 计算电动力的基本方法和公式

■ 能量平衡原理（虚功法）（虚位移法）

- ◆ 导体系统中，导体产生位移所作的功等于系统贮能（磁能）的变化

$$\partial W = F \partial x$$

● x : 广义坐标

- ◆ 两个磁耦合的载流导体系统中，储能为

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2$$

- ◆ 若某导体产生虚位移 dx 时，电流不变

$$F = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial x} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial x} + I_1 I_2 \frac{\partial M}{\partial x}$$

- ◆ 已知系统的 L 和 M ，即可确定电动力



§ 2-2 计算电动力的基本方法和公式

■ 能量平衡原理（虚功法）（虚位移法）

$$F = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial x} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial x} + I_1 I_2 \frac{\partial M}{\partial x}$$

$$I_1=0$$

$$F = \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial x}$$

$$I_2=0$$

$$F = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial x}$$

$$I_1 \neq 0; I_2 \neq 0$$

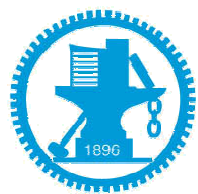
L_1, L_2 与 x 变化无关

$$F = I_1 I_2 \frac{\partial M}{\partial x}$$



第二章 电器中的电动力计算

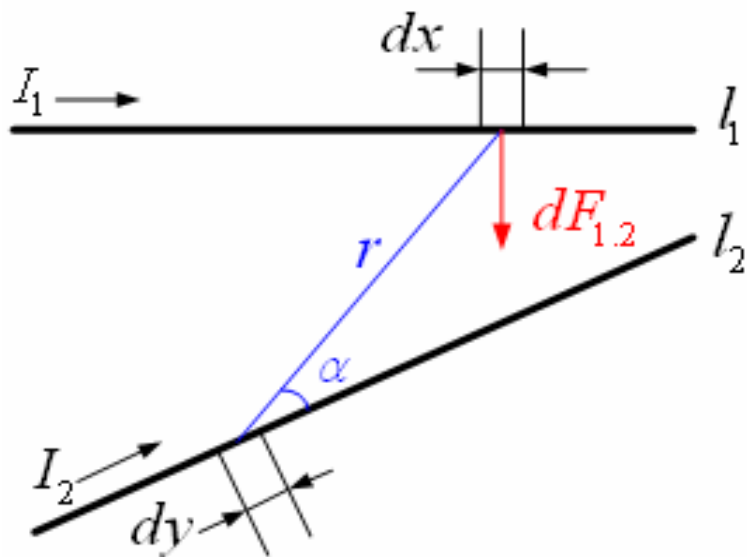
- § 2-1 电器中的电动力现象
- § 2-2 计算电动力的基本方法和公式
- § 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算
- § 2-4 单相正弦交流下的电动力
- § 2-5 三相正弦交流下的电动力
- § 2-6 载流导体与导磁体间的电动力
- § 2-7 电器的电动稳定性



§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体回路对电动力的影响

◆ 两无限细导体 l_1 , l_2 , 分别通过电流 I_1 , I_2



$$dF_{1,2} = I_1 B \sin \beta dx$$

- β : \vec{B} 与 $d\vec{x}$ 之间的夹角
- B : I_2 在 dx 处产生的磁感应强度

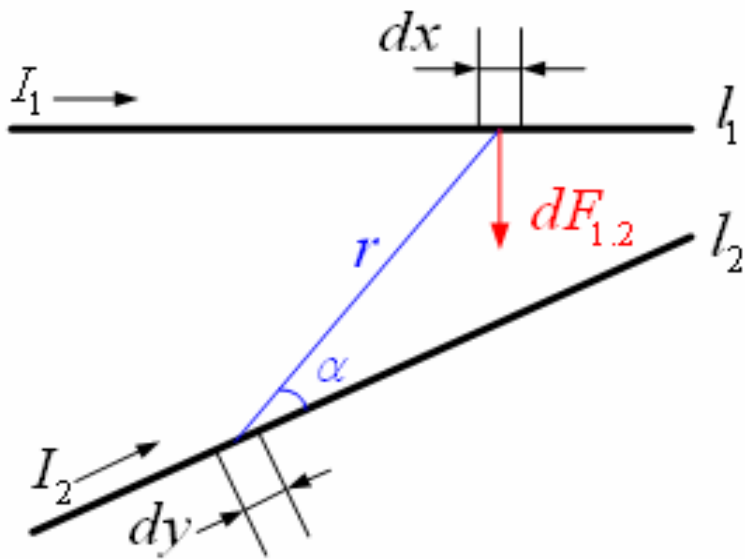
毕奥-沙伐尔定律

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I_2 \int_{l_2} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$



§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体回路对电动力的影响



$$dF_{1,2} = I_1 B \sin \beta dx$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I_2 \int_{l_2} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$

$$F_{1,2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \int_{l_1} dx \int_{l_2} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$

$$k_{1,2} = \int_{l_1} dx \int_{l_2} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$

回路因数

- 回路因数与导体回路的形状、长度、布置等因素有关
- 对于复杂回路，回路因数的计算困难
- 可通过实验确定回路因数
- 电动力实际上是一种分布力

$$F_{1,2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_{1,2}$$



§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体回路对电动力的影响

$$k_{1,2} = \int_{l_1} dx \int_{l_2} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$

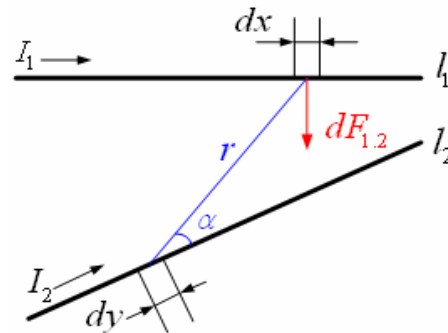
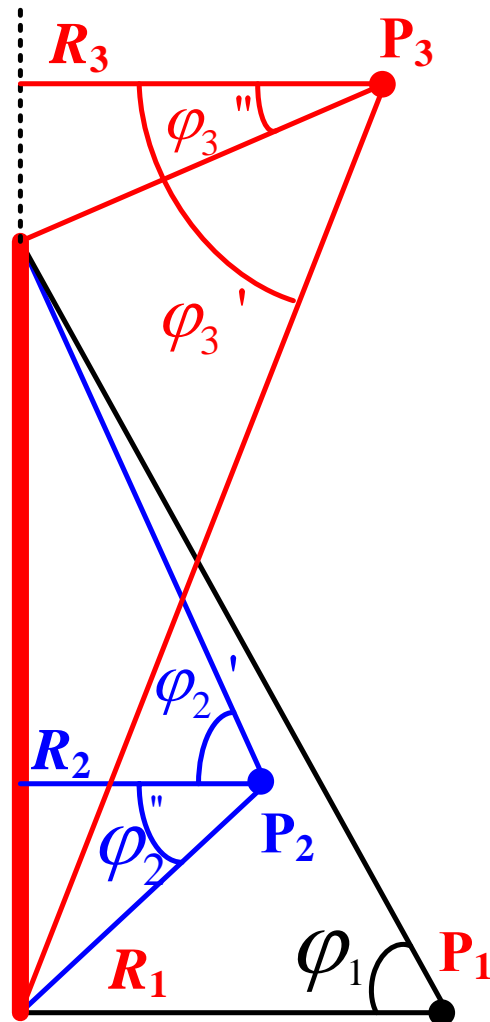
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I_2 \int_{l_2} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$

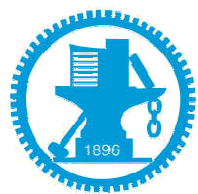
◆ 对于有限长直导线

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_1} \sin \varphi_1$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_2} (\sin \varphi_2' + \sin \varphi_2'')$$

$$B_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R_3} (\sin \varphi_3' - \sin \varphi_3'')$$

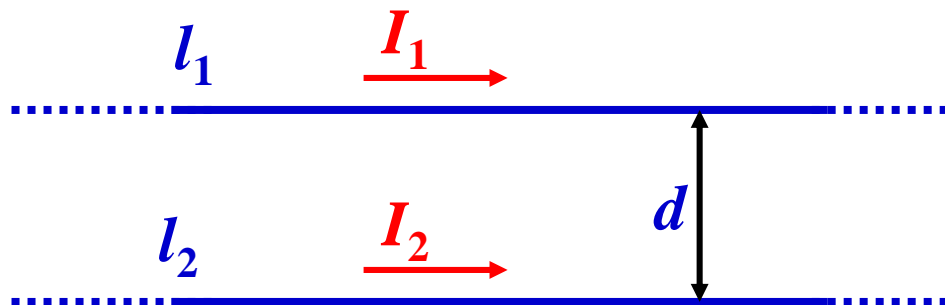




§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体回路对电动力的影响

◆ 两平行无限长直线导体



◆ L长度导体段的回路因数

$$k_{1.2} = \frac{2L}{d}$$



◆ 总电动力 $F_{1,2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_{1,2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{2L}{d}$

◆ 电动力分布 (单位长度上所受电动力)

$$f_{1,2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{2}{d}$$

◆ 电动力方向:

同向相吸，异向相斥



§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体回路对电动力的影响

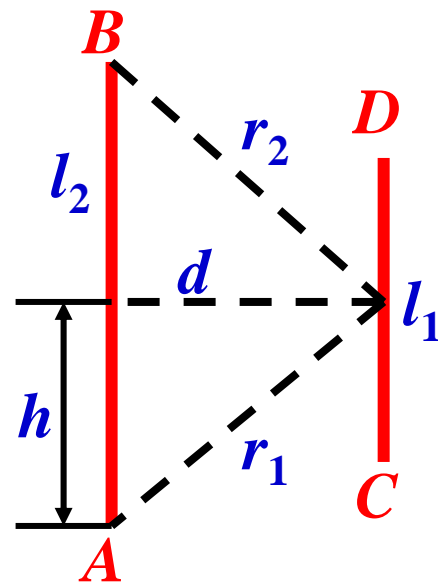
◆ 两平行有限长直线导体

$$k_{1.2} = \frac{(AD + BC) - (AC + BD)}{d}$$

◆ 若 $l_1 = l_2 = l$ ，且齐头布置

$$k_{1.2} = \frac{2l}{d} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2} - \frac{d}{l} \right] \xrightarrow{d \ll l} k_{1.2} = \frac{2L}{d}$$

无限长直导线



◆ 有限长导体电动力分布不再均匀，导体 l_1 上力的分布

$$f_{1.2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{1}{d} \left(\frac{h}{r_1} + \frac{l_2 - h}{r_2} \right)$$



§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

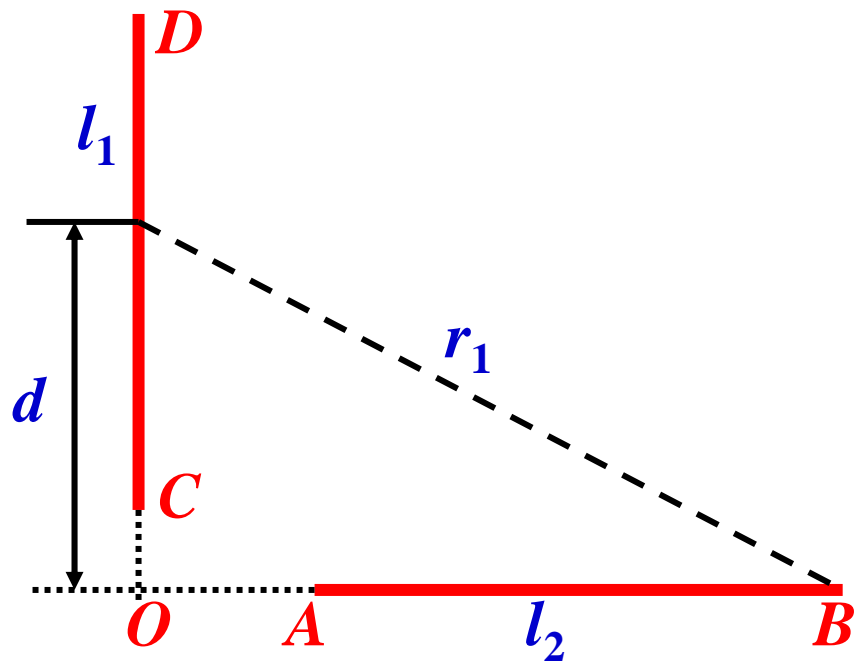
■ 导体回路对电动力的影响

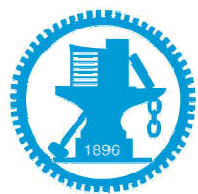
◆ 两垂直有限长直线导体

$$k_{1.2} = \ln \frac{(OB + BC)(OA + AD)}{(OB + BD)(OA + AC)}$$

◆ 导体 l_1 上电动力的分布

$$f_{1.2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{1}{d} \left(\frac{l_2}{r_1} \right)$$





§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体回路对电动力的影响

◆ 单圆圈形导体

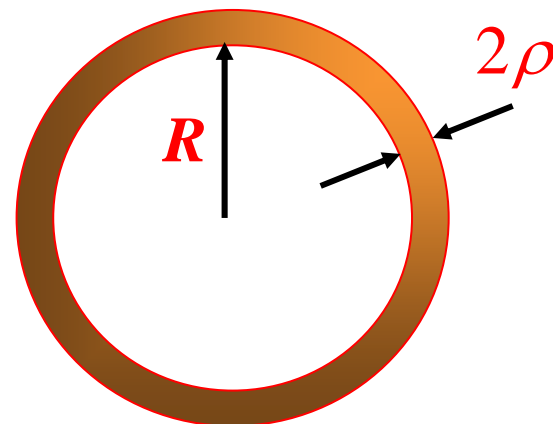
◆ 电动力的作用和方向



使线圈
膨胀

径向力

虚功法



$$f_R = \frac{F}{2\pi R} = \frac{1}{2\pi R} \times \frac{1}{2} \times I^2 \frac{\partial L}{\partial R}$$

◆ 圆形线圈自感

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{\rho} - 1.75 \right)$$

$$\frac{\partial L}{\partial R} = \mu_0 \left(\ln \frac{8R}{\rho} - 1.75 \right) + \mu_0$$

$$f_R = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \frac{1}{R} \left(\ln \frac{8R}{\rho} - 0.75 \right)$$



§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体回路对电动力的影响

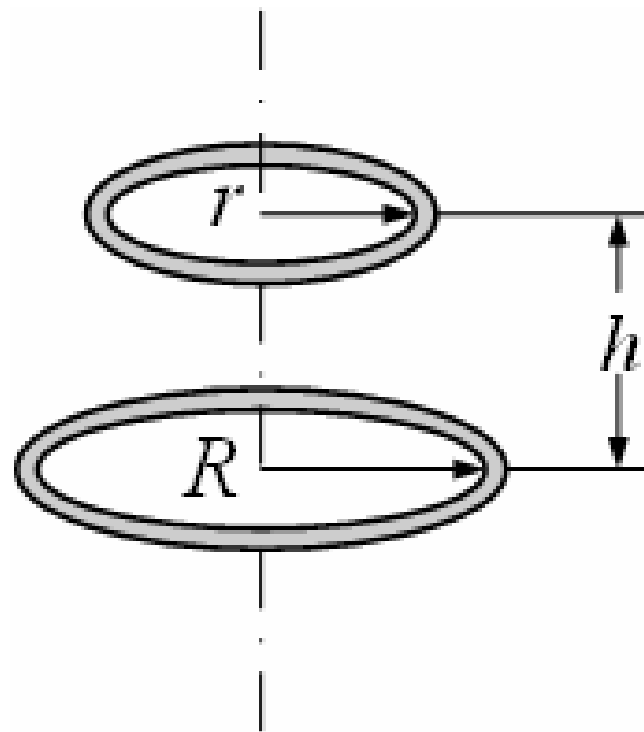
◆ 同轴两圆圈导体间

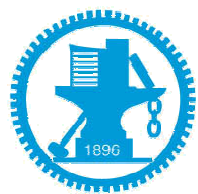
$$F = I_1 I_2 \frac{\partial M}{\partial h}$$

虚功法

◆ 若两线圈半径相同 ($r = R$)

$$F = \mu_0 I_1 I_2 \frac{R}{h}$$

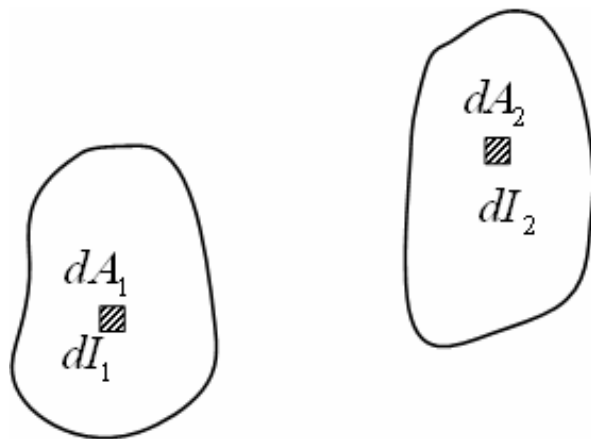




§ 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算

■ 导体截面对电动力的影响

- ◆ 利用微积分的思想，得到电动力计算的一般公式



$$F_{1.2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_h k_c$$

- k_h : 回路因数 (= $k_{1,2}$)
- k_c : 截面因数

- ◆ 截面因数与导体的截面形状、截面大小、相互距离有关
- ◆ 一般来说：当导体相隔空间距离大于导体截面周长时， $k_c \approx 1$
- ◆ 常将 k_c 制成曲线以便查用

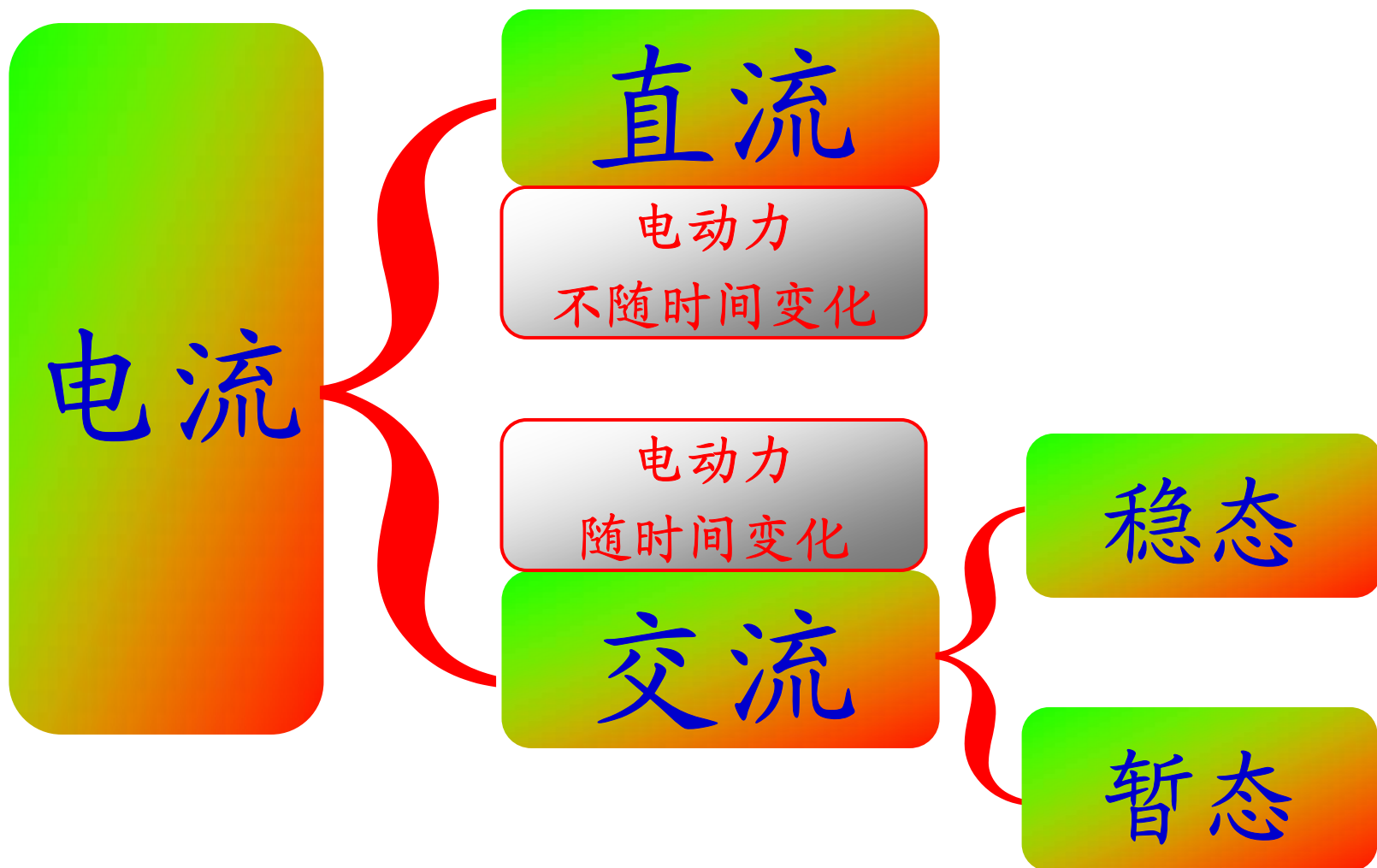


第二章 电器中的电动力计算

- § 2-1 电器中的电动力现象
- § 2-2 计算电动力的基本方法和公式
- § 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算
- § 2-4 单相正弦交流下的电动力
- § 2-5 三相正弦交流下的电动力
- § 2-6 载流导体与导磁体间的电动力
- § 2-7 电器的电动稳定性



§ 2-4 单相正弦交流下的电动力





§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流稳态下的电动力

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_h k_c$$

- k_h : 回路因数
- k_c : 截面因数

$$\frac{\mu_0}{4\pi} k_h k_c = C$$

$$F = C I_1 I_2$$

◆ 设系统中电流相位相同

$$i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

◆ 导体所受电动力

$$\begin{aligned} F &= C i^2 = C I_m^2 \sin^2 \omega t = C I_m^2 \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) \\ &= C I^2 - C I^2 \cos 2\omega t = \underline{F}_- + \underline{F}_\sim \end{aligned}$$

- I : 电流有效值



§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流稳态下的电动力

$$i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

$$F = CI^2 - CI^2 \cos 2\omega t$$

$$= F_- + F_~$$

恒定分量

交变分量

交流电动力
的平均值

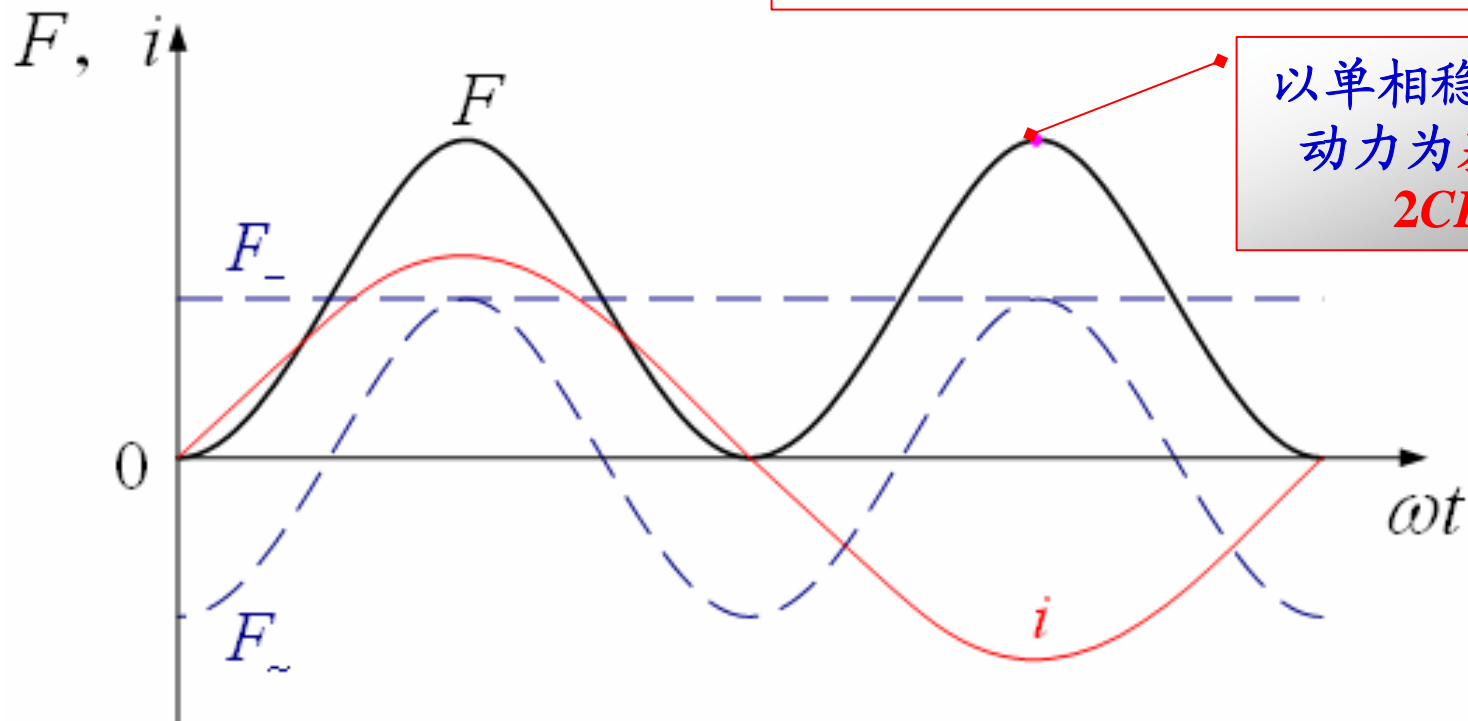
频率为电流的
2倍



§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

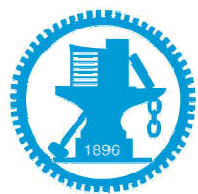
■ 单相交流稳态下的电动力

$$F = CI^2 - CI^2 \cos 2\omega t = F_- + F_~$$



以单相稳态最大电动力为基准尺度
 $2CI^2 = F_0$

- 最大值: $F_{\max} = 2CI^2 = 2F_-$
- 最小值: $F_{\min} = 0$
- 作用方向: 不变 (吸力)



§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力

◆ 系统发生单相短路时，短路电流的一般表达式

短路电流
周期分量有效值

短路瞬间
电压的相位角

电流滞后于电压的
相位角

- R : 线路电阻
- L : 线路电感
- R/L : 非周期分量的衰减系数

$$i = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

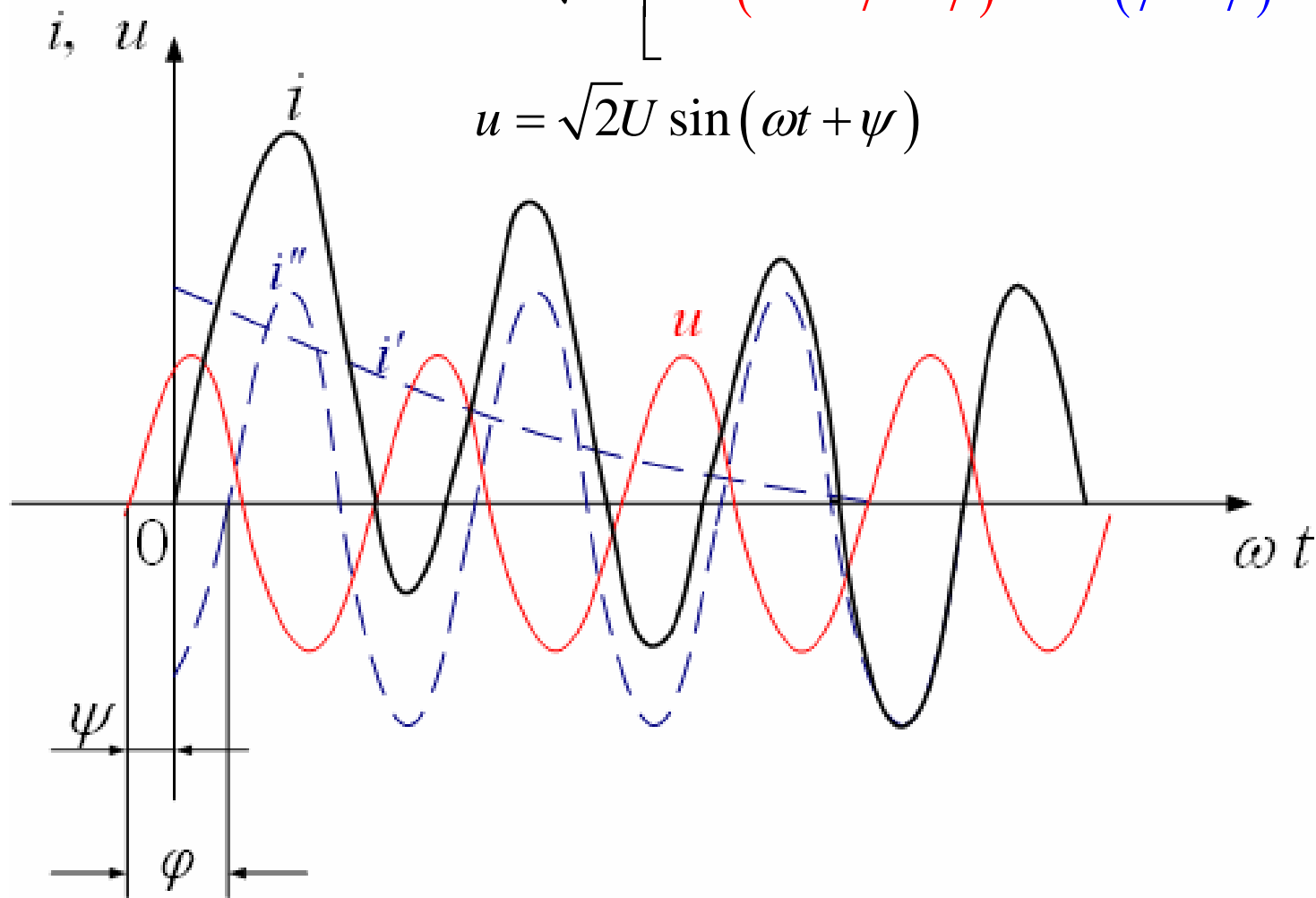
稳态分量
周期分量 i''

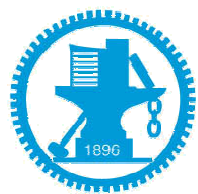
暂态分量
非周期分量
直流分量 i'



§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力
$$i = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$



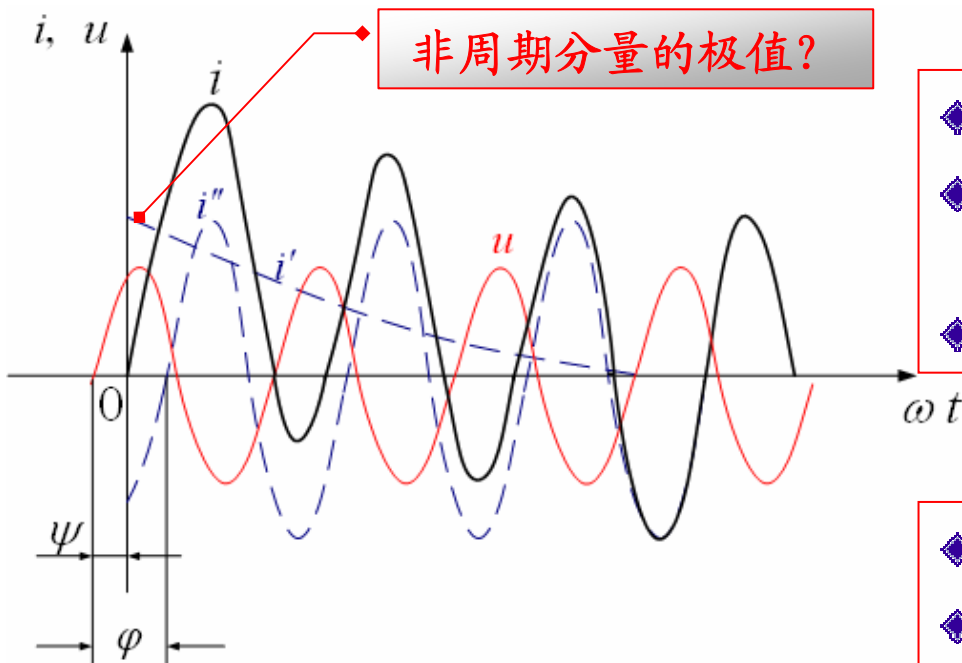


§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力

$$i = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right] = i'' + i'$$

$$\psi = \varphi$$



非周期分量的极值?

- ◆ 非周期分量电流为零
- ◆ 短路电流不经过渡过程而按稳定状态变化
- ◆ 总电流的最大值最小

$$\psi = \varphi - \pi/2$$

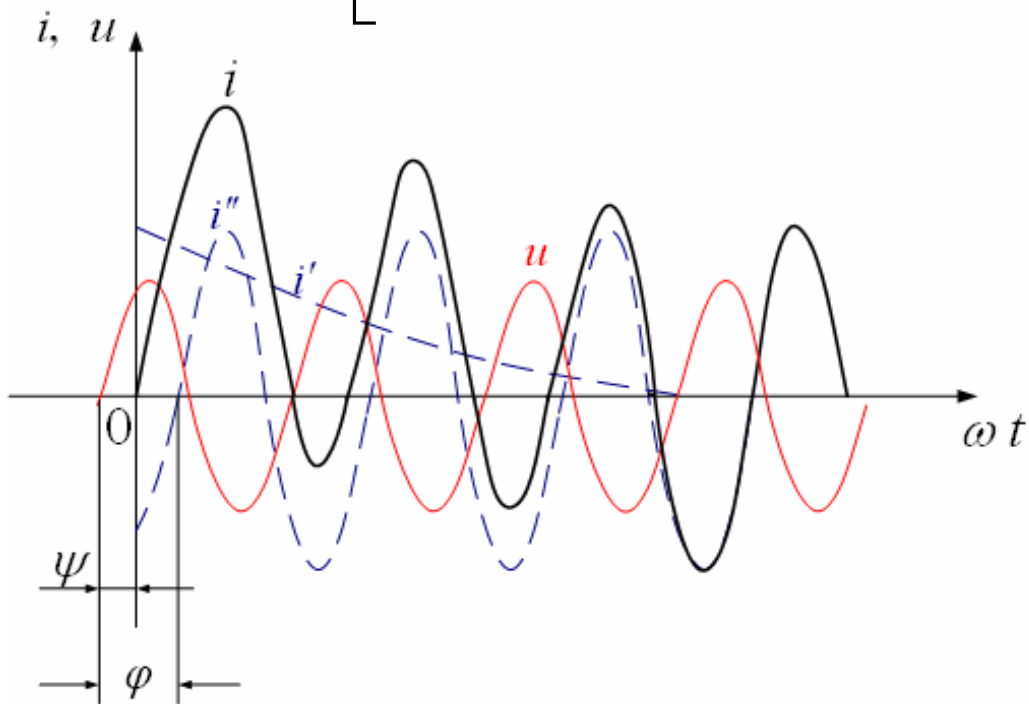
- ◆ 非周期分量电流最大
- ◆ 短路电流过渡过程最长
- ◆ 总电流的最大值最大



§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力

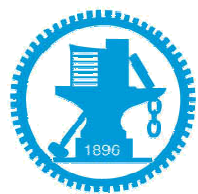
$$i = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right] = i'' + i'$$



$$\psi = \varphi - \pi/2$$

- ◆ 非周期分量电流最大
- ◆ 短路电流过渡过程最长
- ◆ 总电流的最大值最大
- ◆ 电动力的最大值也最大

$$i = \sqrt{2}I \left[-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

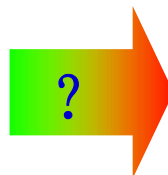


§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力

$$\psi = \varphi - \pi/2$$

$$i = \sqrt{2}I \left[-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$



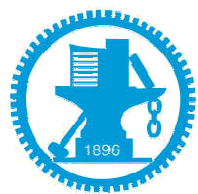
电动力的
最大值

◆ 当 $\omega t = \pi$ ($t = 0.01\text{s}$) 时, i 达到最大, 电动力也达到最大值

◆ 电力系统中, R/L 的平均值约为 22.311s^{-1}

$$i_{\max} = \sqrt{2}I(-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t}) = \sqrt{2}I(1 + 0.8) \approx 1.8I_m = 2.5I$$

◆ 单相短路电流最大值是稳态短路电流峰值的1.8倍, 是稳态短路电流有效值的2.5倍

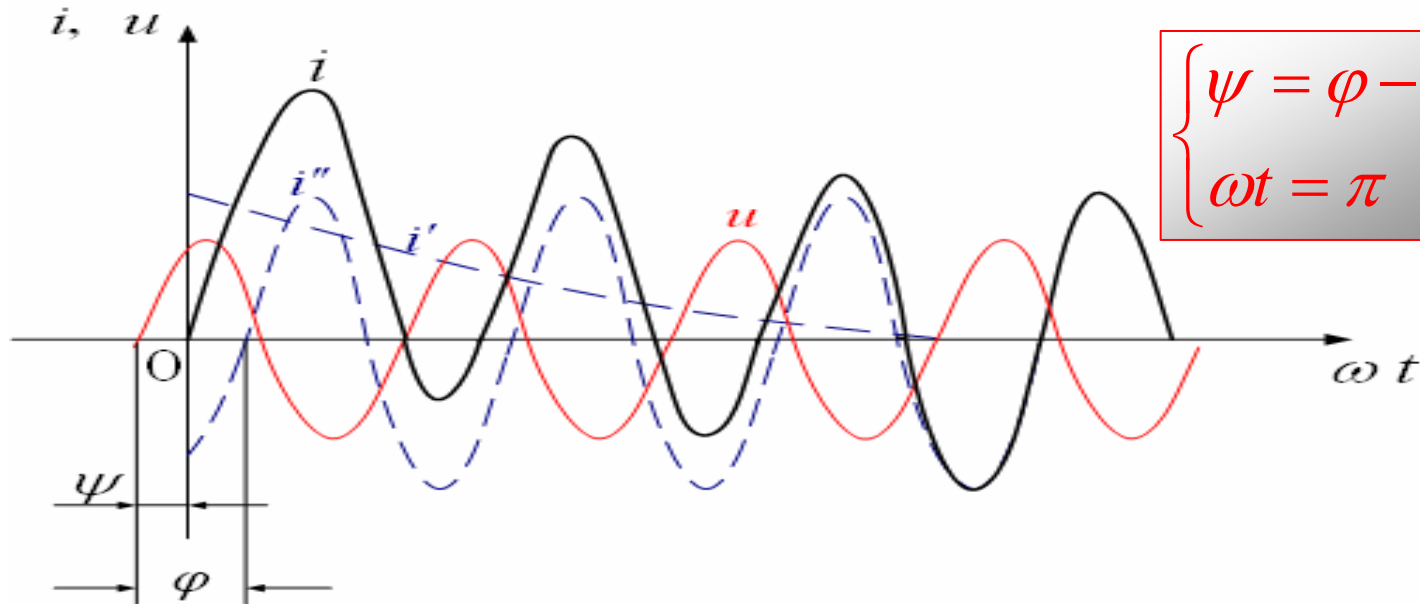


§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力

$$i_{\max} = \sqrt{2}I(-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t}) = \sqrt{2}I(1 + 0.8) \approx 1.8I_m = 2.5I$$

◆ 单相短路电流最大值是稳态短路电流峰值的**1.8倍**，是稳态短路电流有效值的**2.5倍**





§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力

$$\psi = \varphi - \pi/2 \quad i = \sqrt{2}I \left[-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

◆ 当 $\omega t = \pi$ ($t = 0.01\text{s}$) 时, i 达到最大, 电动力也达到最大值

$$i_{\max} = \sqrt{2}I(-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t}) = \sqrt{2}I(1 + 0.8) \approx 1.8I_m = 2.5I$$

$$F_m = Ci_{\max}^2 = 2CI^2 \times 3.24 = 3.24F_0$$

特别注意

◆ 单相短路时, 电动力的最大值是稳态短路电流引起电动力最大值的3.24倍



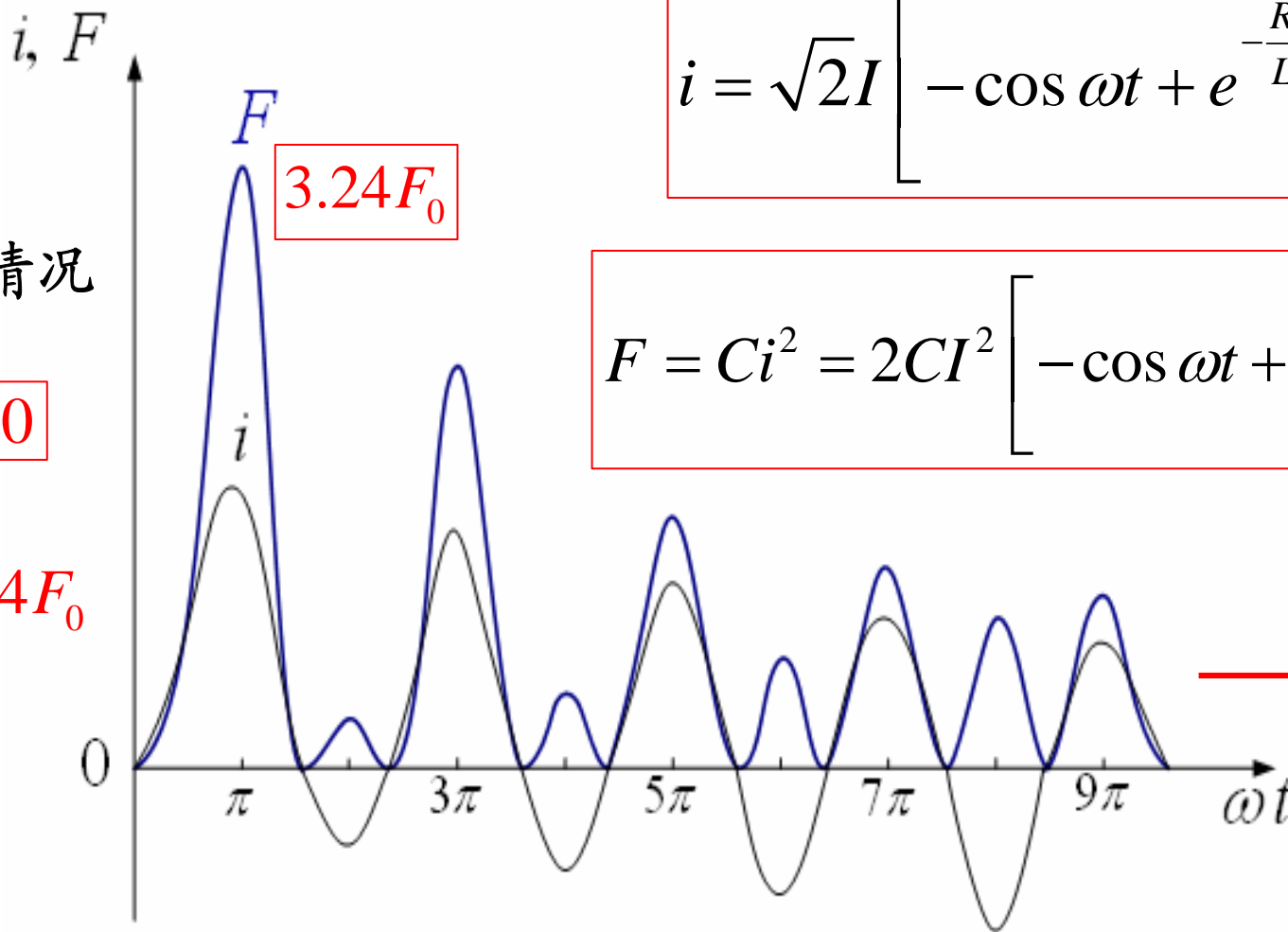
§ 2-4 单相正弦交流下的电动力

■ 单相交流暂态下的电动力

◆ 极限情况

$$R = 0$$

$$F_m = 4F_0$$



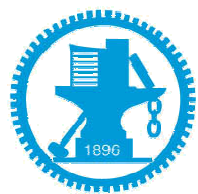
$$i = \sqrt{2}I \left[-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

$$F = Ci^2 = 2CI^2 \left[-\cos \omega t + e^{-\frac{R}{L}t} \right]^2$$



第二章 电器中的电动力计算

- § 2-1 电器中的电动力现象
- § 2-2 计算电动力的基本方法和公式
- § 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算
- § 2-4 单相正弦交流下的电动力
- § 2-5 三相正弦交流下的电动力**
- § 2-6 载流导体与导磁体间的电动力
- § 2-7 电器的电动稳定性



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

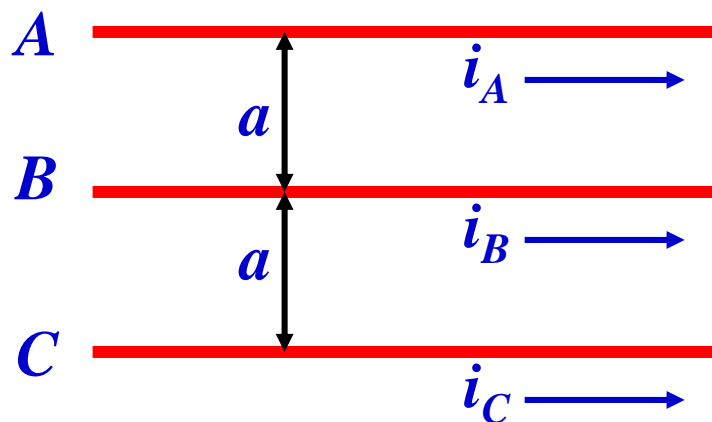
■ 三相交流稳态下的电动力

- ◆ 三相导体作直列布置
- ◆ 三相电流相位分别差 120°

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_B = \sqrt{2}I \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_C = \sqrt{2}I \sin (\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

- ◆ A 相导体所受电动力

$$F_A = C_1 i_A i_B + C_2 i_A i_C$$



$$C_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} (k_h)_{A.B} k_c$$
$$C_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} (k_h)_{A.C} k_c$$



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

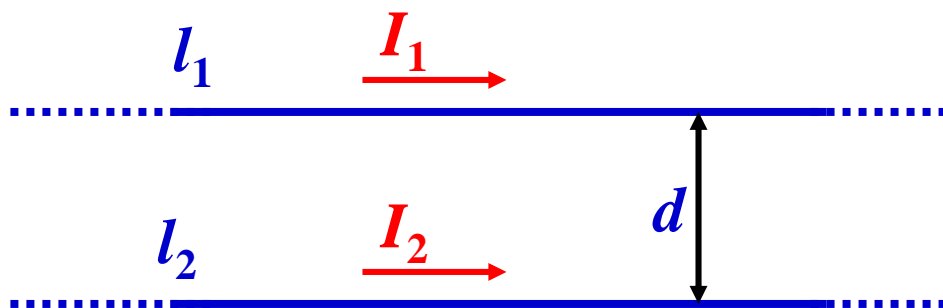
■ 三相交流稳态下的电动力

◆ A相导体所受电动力

$$F_A = C_1 i_A i_B + C_2 i_A i_C$$

$$C_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} (k_h)_{A,B} k_c$$

$$C_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} (k_h)_{A,C} k_c$$



无限长直导线的回路因数

$$k_h = \frac{2L}{d}$$

$$(k_h)_{A,B} = 2(k_h)_{A,C}$$



$$C_2 = \frac{1}{2} C_1$$



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流稳态下的电动力

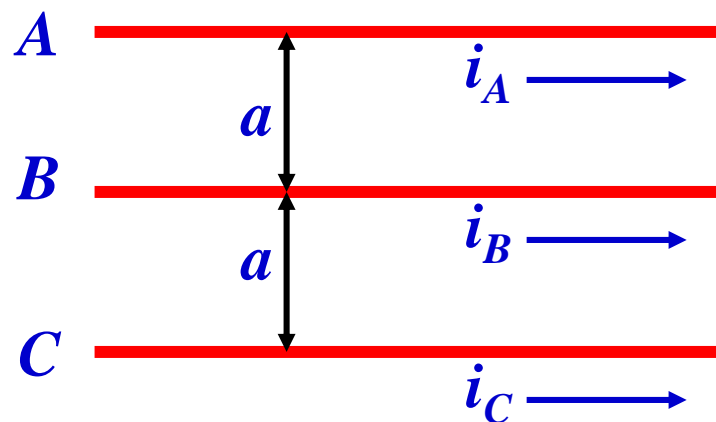
◆ A相导体所受电动力

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_B = \sqrt{2}I \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C = \sqrt{2}I \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

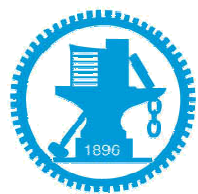
$$F_A = C_1 i_A i_B + C_2 i_A i_C$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_1$$

$$F_A = 2C_1 I^2 \left[\frac{3}{8} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t - \frac{3}{8} \right]$$



电流频率的两倍



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流稳态下的电动力

◆ A相导体所受电动力

$$F_A = 2C_1 I^2 \left[\frac{3}{8} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t - \frac{3}{8} \right]$$

◆ A相导体所受电动力的最大值

$$\frac{dF_A}{d(\omega t)} = 0 \quad \longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega t = n180^\circ + 75^\circ \quad (n = 1, 2, \dots) \\ \omega t = n180^\circ + 165^\circ \quad (n = 1, 2, \dots) \end{array} \right.$$



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流稳态下的电动力

◆ A相导体所受电动力的最大值

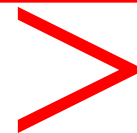
$$\omega t = n180^\circ + 75^\circ \quad F_A = 2C_1 I^2 \left[\frac{3}{8} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t - \frac{3}{8} \right]$$

$$(F_A)_{m-} = -0.808 \times 2C_1 I^2 = -0.808 F_0$$

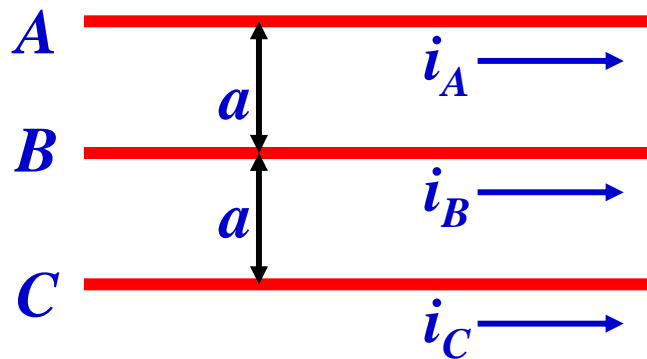
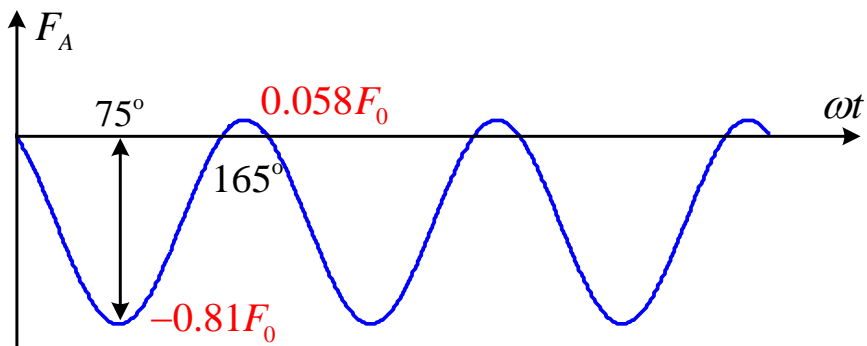
$$\omega t = n180^\circ + 165^\circ$$

$$(F_A)_{m+} = +0.058 \times 2C_1 I^2 = +0.058 F_0$$

A相所受斥力的最大值



A相所受吸力的最大值



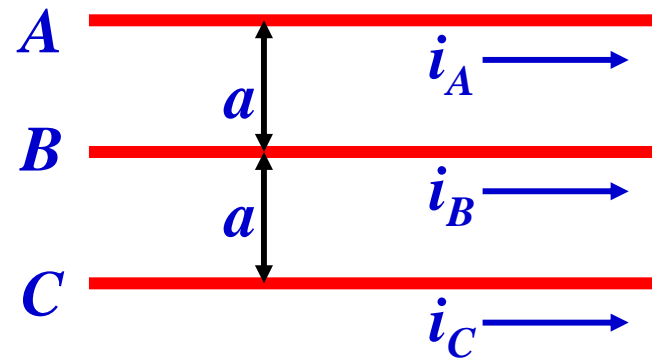


§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流稳态下的电动力

◆ B相导体所受电动力

$$F_B = C_1 i_A i_B - C_3 i_B i_C$$

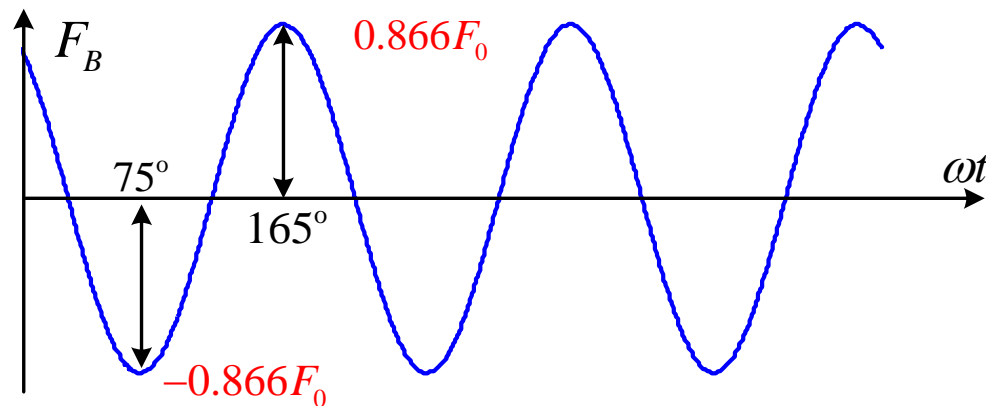


$$\omega t = n180^\circ + 75^\circ$$

$$(F_B)_{m-} = -0.866F_0$$

$$\omega t = n180^\circ + 165^\circ$$

$$(F_B)_{m+} = +0.866F_0$$





§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流稳态下的电动力

◆ C相导体所受电动力

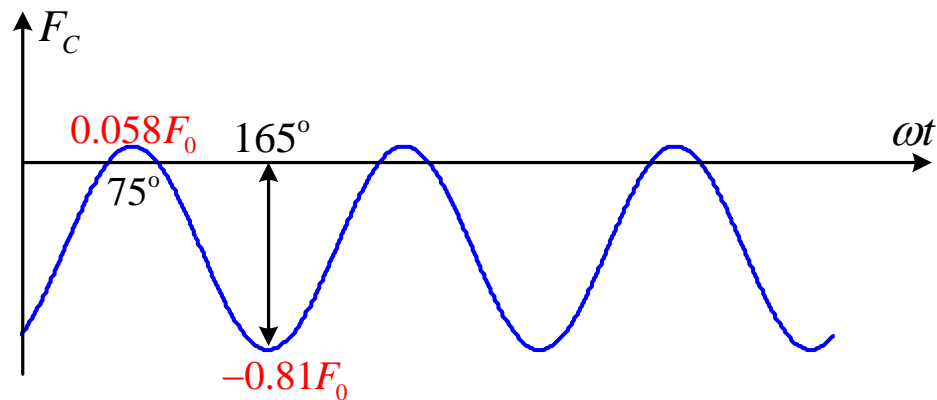
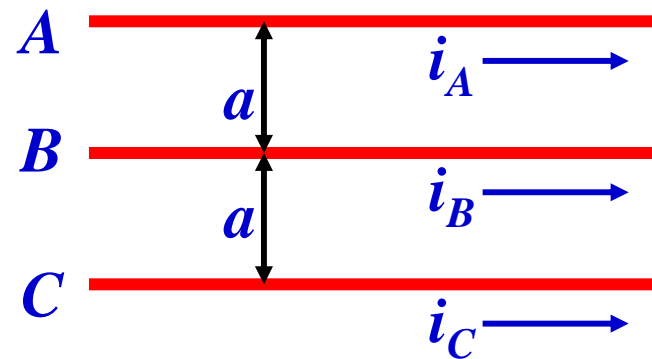
$$F_C = C_2 i_A i_C + C_1 i_B i_C$$

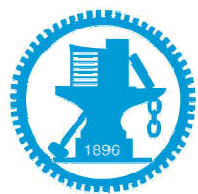
$$\omega t = n180^\circ + 75^\circ$$

$$(F_C)_{m+} = +0.058F_0$$

$$\omega t = n180^\circ + 165^\circ$$

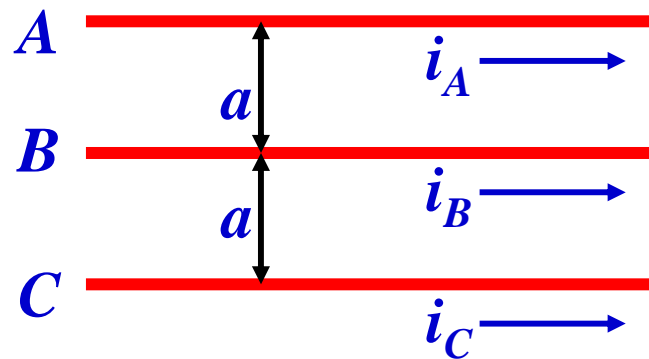
$$(F_C)_{m-} = -0.808F_0$$





§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流稳态下的电动力



$$(F_A)_{m-} = -0.808F_0 \quad (F_A)_{m+} = +0.058F_0$$



$$(F_B)_{m+} = +0.866F_0 \quad (F_B)_{m-} = -0.866F_0$$



$$(F_C)_{m-} = -0.808F_0$$



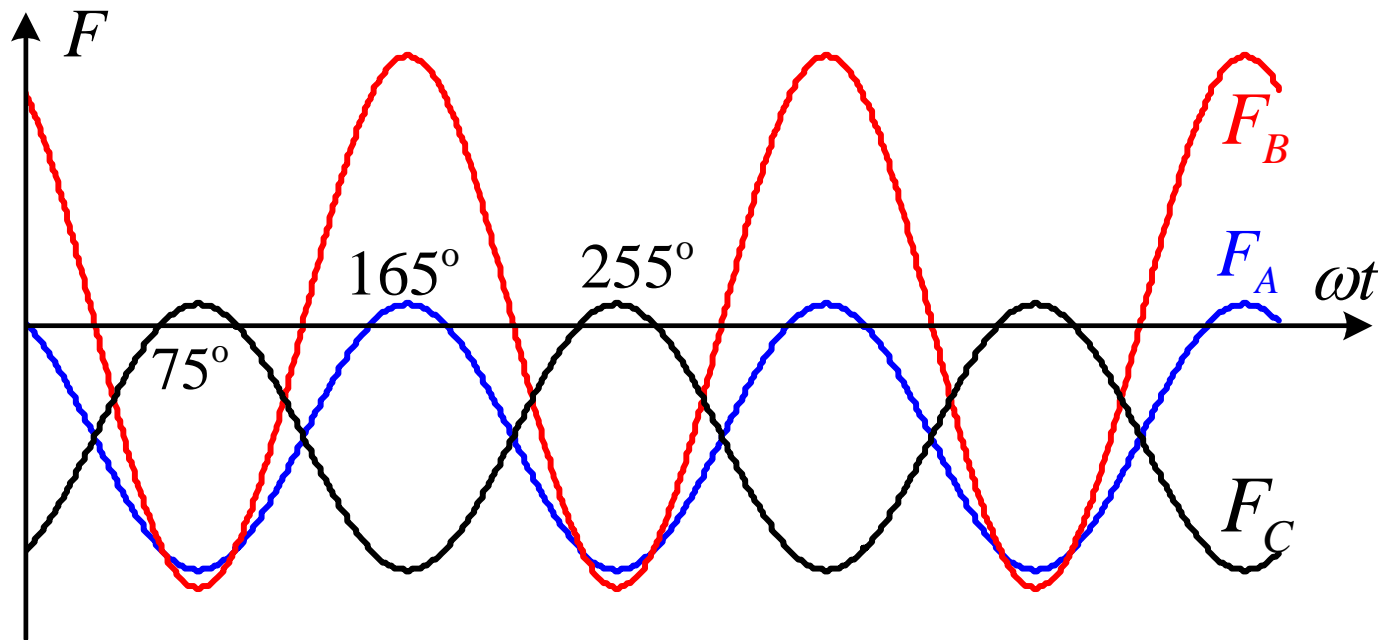
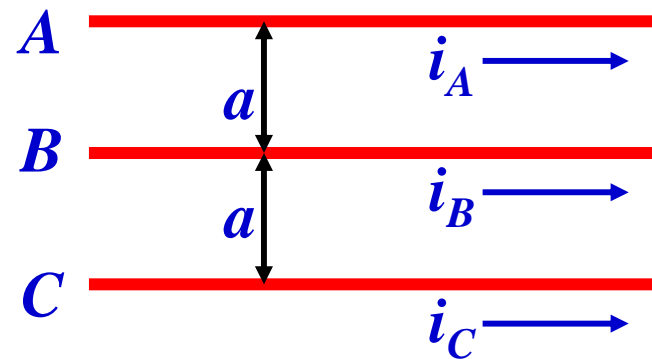
$$(F_C)_{m+} = +0.058F_0$$

◆ **结论：**三相直列布置的导体系统中，**B**相所受电动力最大，机械强度校核以**B**相为准。

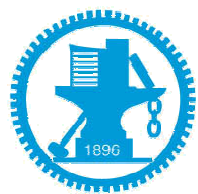


§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流稳态下的电动力



◆ 三相直列布置的导体系统中，3相受力不均匀



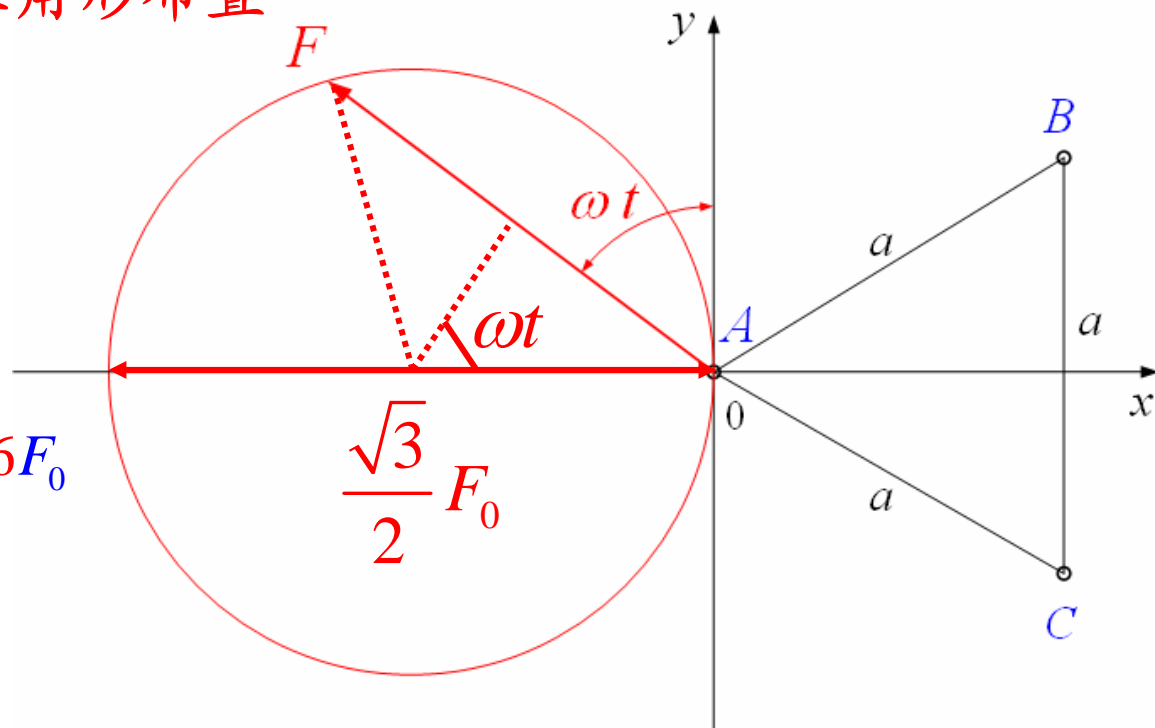
§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

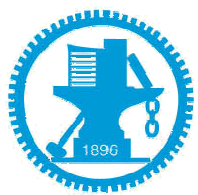
■ 三相交流稳态下的电动力

◆ 三相导体作等边三角形布置

$$F_A = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} F_0 \sin \omega t$$

$$(F_A)_{m+} = |(F_A)_{m-}| = 0.866 F_0$$





§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流暂态下的电动力

◆ 三相系统发生对称短路时的电流

$$i_A = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

$$i_B = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi - 120^\circ) - \sin(\psi - \varphi - 120^\circ) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

$$i_C = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi - 240^\circ) - \sin(\psi - \varphi - 240^\circ) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

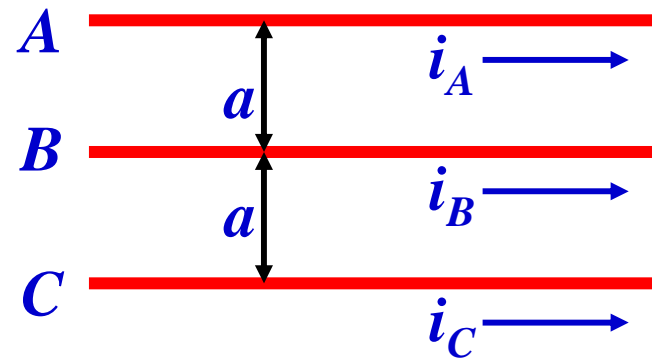
单相短路电流

$$i = \sqrt{2}I \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流暂态下的电动力



◆ 三相导体直列布置，所受电动力分别为

$$F_A = C_1 i_A i_B + C_2 i_A i_C$$

$$F_B = C_1 i_A i_B - C_3 i_B i_C$$

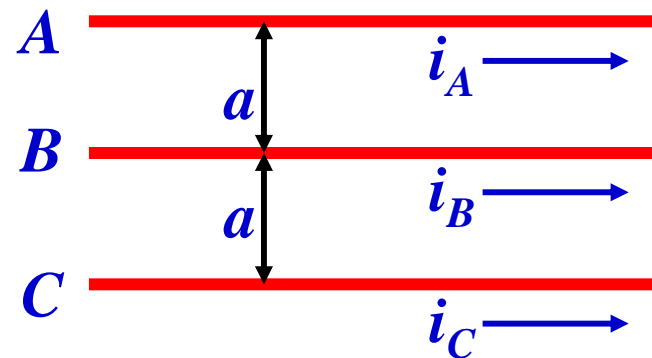
$$F_C = C_2 i_A i_C + C_3 i_B i_C$$

$$\begin{aligned} C_1 &= C_3 \\ C_2 &= \frac{1}{2} C_1 \end{aligned}$$



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流暂态下的电动力



◆ 电力系统中， R/L 的平均值约为 22.311s^{-1}

◆ A, C 相导体受到的最大电动斥力为 $-2.65F_0$

➡ 发生在 $\psi = \varphi - 105^\circ$, $\omega t = \pi$

◆ B 相导体受到的最大电动力为 $\pm 2.8F_0$

➡ 发生在 $\psi = \varphi - 45^\circ$, $\omega t = \pi$



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 三相交流暂态下的电动力

◆ 三相导体作等边三角形布置，若

$$\frac{R}{L} = 0$$

◆ A相导体最大电动力发生在 $\psi = \varphi - 90^\circ$

$$F_A = \pm 2\sqrt{3}F_0 \sin^3 \frac{\omega t}{2}$$

$$(F_A)_m = \pm 2\sqrt{3}F_0$$



§ 2-5 三相正弦交流下的电动力

■ 总结

◆ 单相稳态

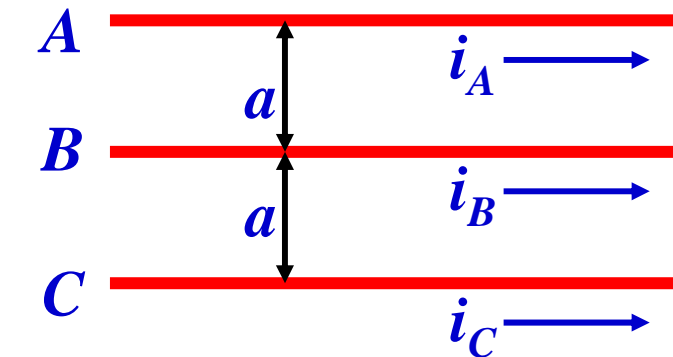
$$F_m = 2CI^2 = F_0$$

◆ 单相短路

$$F_m = 3.24F_0$$

◆ 三相稳态

$$F_m = 0.866F_0$$



中间相

$$F_m = -0.808F_0$$

其他相

◆ 三相短路

$$F_m = 2.8F_0$$

中间相

$$F_m = -2.65F_0$$

其他相



第二章 电器中的电动力计算

- § 2-1 电器中的电动力现象
- § 2-2 计算电动力的基本方法和公式
- § 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算
- § 2-4 单相正弦交流下的电动力
- § 2-5 三相正弦交流下的电动力
- § 2-6 载流导体与导磁体间的电动力
- § 2-7 电器的电动稳定性



§ 2-6 载流导体与导磁体间的电动力

■ 计算方法

◆ 解析法

- 适用于结构简单的情况

◆ 有限元 (Finite element) 法

- 能处理任意形状场域、多介质、复杂交界面等情况
- 计算场域需要扩大，计算量大
- 是大多数工程电磁场软件所采用的方法

◆ 积分方程 (Integral equation) 法

- 基于毕奥-萨伐定律
- 不需离散整个场域



第二章 电器中的电动力计算

- § 2-1 电器中的电动力现象
- § 2-2 计算电动力的基本方法和公式
- § 2-3 电器中典型导体系统的电动力计算
- § 2-4 单相正弦交流下的电动力
- § 2-5 三相正弦交流下的电动力
- § 2-6 载流导体与导磁体间的电动力
- § 2-7 电器的电动稳定性



§ 2-7 电器的电动稳定性

■ 电器的电动稳定性

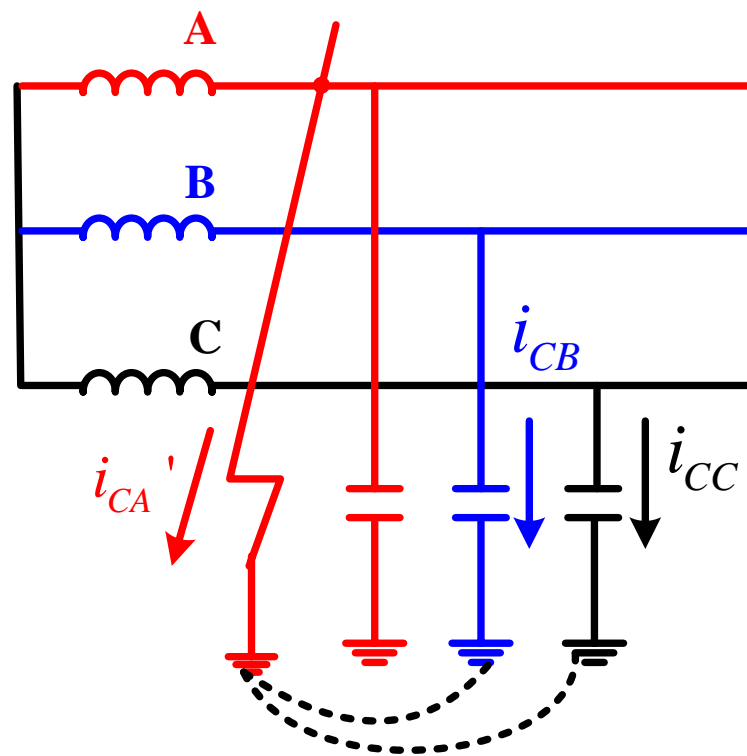
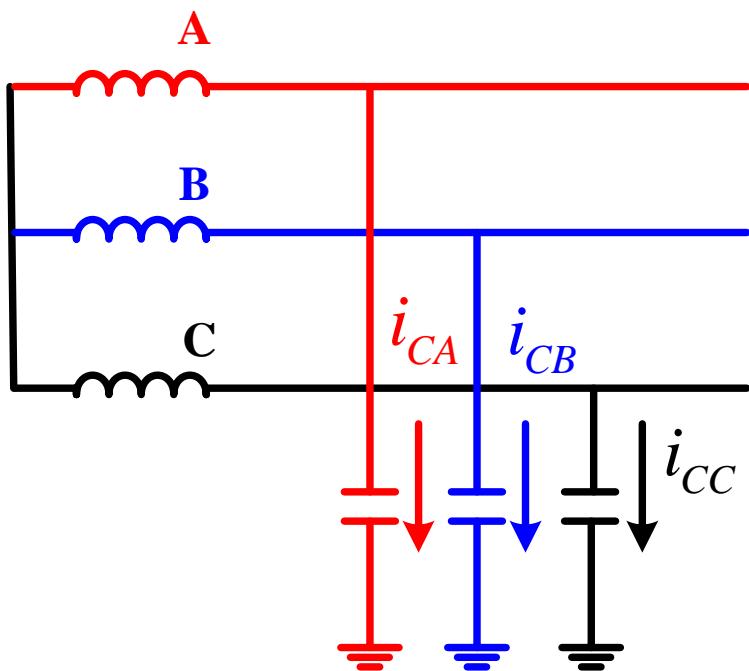
- ◆ 电器能**安全地**承受短路电流电动力的作用而不致破坏或产生永久变形的能力
- ◆ 对**触头**：不应斥开、熔焊
- ◆ 常用电器能承受的**最大冲击电流的峰值**来表示



§ 2-7 电器的电动稳定性

■ 三相交流系统的短路形式

- ◆ 单相短路（中性点不接地系统发生的单相接地短路）



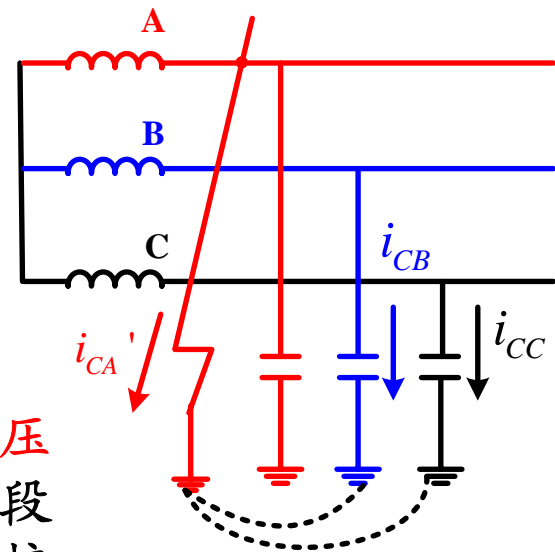


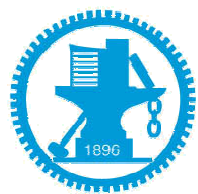
§ 2-7 电器的电动稳定性

■ 三相交流系统的短路形式

◆ 单相短路（中性点不接地系统发生的单相接地短路）

- 中性点不接地系统发生单相接地故障时，**线电压不变**，而非故障相对地电压升高到原来相电压的 $\sqrt{3}$ 倍
- **单相接地电流**等于正常时单相对地电容电流的**3倍**
- **运行可靠性高**：发生单相故障时，电力网的**线电压仍然对称**，用户的三相用电设备仍能照常运行一段时间。但运行时间不能太长，以免另一相又发生接地故障时形成两相接地短路。
- **绝缘投资大**：单相故障时，非故障相对地电压升为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，为确保设备的绝缘安全，系统相对地绝缘按线电压设计，中性点绝缘按相电压设计。





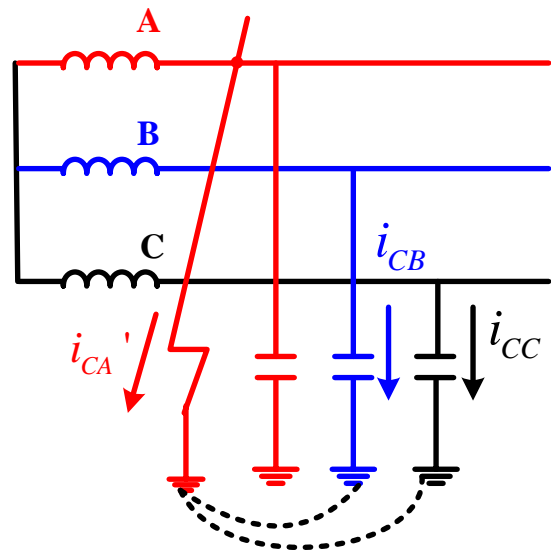
§ 2-7 电器的电动稳定性

■ 三相交流系统的短路形式

◆ 单相短路（中性点**不接地**系统发生的单相接地短路）

● 中性点不接地系统的**适用范围**

- ➡ 单相接地电流小于30A的3~10kV电力网；
- ➡ 单相接地电流小于10A的35kV电力网。

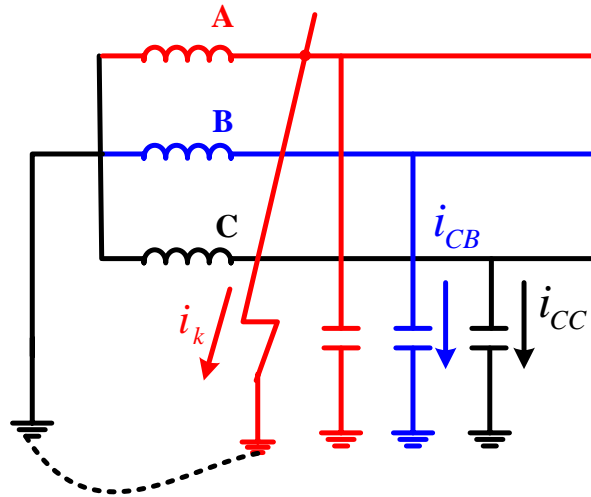




§ 2-7 电器的电动稳定性

■ 三相交流系统的短路形式

- ◆ 单相短路（中性点**接地**系统发生的单相接地短路）



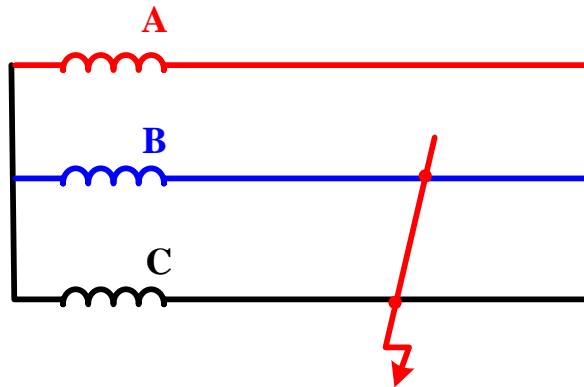
- **节约绝缘投资**：发生单相短路时，非故障相对地电压不变，电气设备绝缘水平可按相电压考虑。
- 我国**110kV及以上**的电力系统基本上都采用中性点直接接地的方式。
- **缺点**：单相短路时，**接地相短路电流很大**



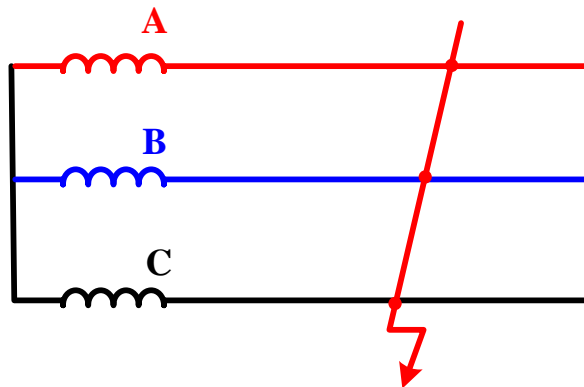
§ 2-7 电器的电动稳定性

■ 三相交流系统的短路形式

◆ 二相短路



◆ 三相短路





§ 2-7 电器的电动稳定性

■ 三相交流系统的短路形式

- ◆ 单相短路（中性点**不接地**系统发生的单相接地短路）
- ◆ 单相短路（中性点**接地**系统发生的单相接地短路）
- ◆ 两相短路
- ◆ 三相短路 ……

$$3.24F_0$$

在短路电流周期分量有效值相同时，单相短路电动力最大

- ◆ 对于**中性点不接地**的系统，一般三相短路电动力最大
- ◆ 一般根据**三相短路电流**来校核电器的电动稳定性
- ◆ 还需要考虑电动力与导体系统**共振**的问题



作业

- 1、某配电设备中三相母线直列布置，长度为2.5m，两排中心距离距0.35m，设短路冲击电流为40kA（峰值），求中间相最大电动力（截面系数取1）
- 2、三平行无限长圆导体中流过的电流和布置如图所示，画出导体2所受最大电动力时的方向，并计算其单位长度上所受的最大电动力（截面系数取1）。

