课程内容

第二章　导体的发热和电动力

第一节　导体的发热和散热

第二节　短路时导体发热与计算

第三节　短路时导体电动力计算

课程内容

第二章 导体的发热和电动力

Part 1 导体的发热和散热

1.1 概述

1、电气设备通过电流时产生的损耗

- 正常运行： → **长期发热**
  - 载流导体的电阻损耗
  - 绝缘材料内部的介质损耗
  - 金属构件中的磁滞和涡流损耗
- 故障状态： → **短时发热**
  - 短路电流

短时发热的特点：

本质：故障电能转化为热能

1）短路电流大，发热功率大

2）时间短，热量不易散出

导体温度迅速升高

Part 1 导体的发热和散热

1.1 概述

2、发热对电气设备的影响

- 绝缘性能降低：
  - 温度升高 → 有机绝缘材料老化加快

    变压器6度法则：温度每升高6℃，绝缘性能下降一半
- 机械强度下降：
  - 温度升高 → 材料退火软化
- 接触电阻增加：
  - 温度升高 → 接触部分的弹性元件因退火而压力降低，同时接触表面氧化，接触电阻增加，引起温度继续升高，产生恶性循环

Part 1 导体的发热和散热

1.1 概述

3、一般导体最高允许温度

- 正常运行：
  - ≤70℃
  - 计及日照≤ 80 ℃
  - 导体接触面镀锡≤ 85 ℃
  - 表面镀银≤ 95 ℃
- 短路故障：
  - 硬铝及铝锰合金≤ 200 ℃
  - 硬铜≤ 300 ℃

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

- **导体的发热**：
  - 导体电阻损耗的热量
  - 导体吸收太阳辐射的热量
- **导体的散热**：
  - 导体对流散热
  - 导体辐射散热
  - 导体导热散热

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

- **导体的发热**：
  - 导体电阻损耗的热量 Q_R
  - 导体吸收太阳辐射的热量
- **导体的散热**：
  - 导体对流散热
  - 导体辐射散热
  - 导体导热散热

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

1、导体电阻损耗的热量 Q_R

$$Q_R = I_W^2 R_{ac} \qquad \text{(W/m)}$$

$$R_{ac} = \frac{\rho\left[1+\alpha_t\left(\theta_W - 20\right)\right]}{S} K_f \qquad (\Omega/\text{m})$$

- 导体的集肤效应系数K_f 与电流的频率、导体的形状和尺寸有关。

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

- **导体的发热**:
  - 导体电阻损耗的热量
  - 导体吸收太阳辐射的热量
- **导体的散热**:
  - 导体对流散热
  - 导体辐射散热
  - 导体导热散热

1.2 导体的发热和散热

2、导体吸收太阳辐射的热量 Q_t

太阳辐射功率密度（W/㎡），一般取1000 W/㎡

$$Q_t = E_t A_t D \qquad (\mathrm{W/m})$$

导体的吸收率，一般取0.6

导体的外直径

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

- **导体的发热**：
  - 导体电阻损耗的热量
  - 导体吸收太阳辐射的热量
- **导体的散热**：
  - 导体对流散热
  - 导体辐射散热
  - 导体导热散热

1.2 导体的发热和散热

3、导体对流散热量 Q_l

- 对流：由气体各部分发生相对位移将热量带走的过程。

$$Q_l = \alpha_1 \left(\theta_W - \theta_0\right) F_l$$

θ_W —— 导体温度；

θ_0 —— 周围空气温度。

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

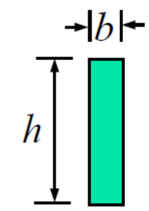
3、导体对流散热量 Q_l

■ 对流：由气体各部分发生相对位移将热量带走的过程。

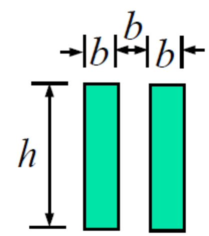
$$Q_l = \alpha_1(\theta_W - \theta_0)F_1$$

F_1 ——单位长度导体散热面积。

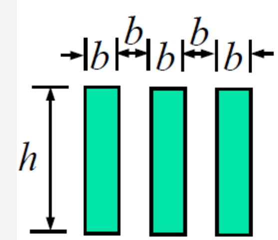
主要与导体尺寸、布置方式等因素有关。导体片（条）间距离越近，对流条件就越差，故有效面积相应减小。



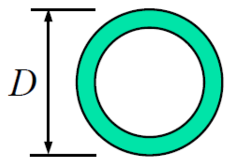
$$A_1 = \frac{h}{1000} \qquad A_2 = \frac{b}{1000} \qquad F_1 = 2(A_1 + A_2)$$



$$当b = \begin{cases} 6\text{mm} \\ 8\text{mm} \\ 10\text{mm} \end{cases}, \quad F_1 = \begin{cases} 2A_1 \\ 2.5A_1 + A_2 \\ 3A_1 + 4A_2 \end{cases}$$



$$当b = \begin{cases} 8\text{mm} \\ 10\text{mm} \end{cases}, \quad F_1 = \begin{cases} 3A_1 + 4A_2 \\ 4(A_1 + A_2) \end{cases}$$



$$F_1 = \pi D$$

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

3、导体对流散热量 Q_l

■ 对流：由气体各部分发生相对位移将热量带走的过程。

$$Q_1 = \alpha_1 \left(\theta_W - \theta_0\right) F_1$$

α_1——对流散热系数。根据对流条件的不同，有不同的计算公式。

■ 自然对流散热系数 $\alpha_1 = 1.5\left(\theta_W - \theta_0\right)^{0.35}$

■ 强迫对流散热系数 $\alpha_1 = N_u \lambda / D$

如果风向与导体不垂直，还需要乘以修正系数 $\beta = A + B\left(\sin\varphi\right)^n$

修正后的强迫对流散热： $Q_1 = \dfrac{N_u \lambda}{D}\left(\theta_W - \theta_0\right)\left[A + B\left(\sin\varphi\right)^n\right]\pi D$

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

- 导体的发热:
  - 导体电阻损耗的热量
  - 导体吸收太阳辐射的热量
- **导体的散热:**
  - 导体对流散热
  - 导体辐射散热
  - 导体导热散热

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

4、导体辐射散热量 Q_f

- 辐射：热量从高温物体以热射线方式传给低温物体的传播过程。

$$Q_f = 5.73\varepsilon\left[\left(\frac{273+\theta_W}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+\theta_0}{100}\right)^4\right]F_f$$

F_f ——单位长度导体的辐射散热面积，依导体形状和布置情况而定。

ε ——为导体材料的相对辐射系数，衡量物体表面向外辐射能量的强弱。

Part 1 导体的发热和散热

1.2 导体的发热和散热

- 导体的发热:
  - 导体电阻损耗的热量
  - 导体吸收太阳辐射的热量
- 导体的散热:
  - 导体对流散热
  - 导体辐射散热
  - 导体导热散热

1.2 导体的发热和散热

5、导体导热散热量 Q_d

■ 导热:

- 固体中，由于晶格振动和自由电子运动，使热量由高温区传至低温区。
- 气体中，气体分子不停地运动，高温区域的分子比低温区域的分子具有较高的速度，分子从高温区运动到低温区，便将热量带至低温区。

高温区温度

导热面积

低温区温度

$$Q_d = \lambda F_d \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta}$$

导热系数

物体厚度

1.3 导体载流量的计算

1、导体的载流量

- 定义
  - 导体长期运行允许通过的电流。

- 为什么要计算导体载流量?
  - 在长期通过工作电流时，导体发热且温度升高。所以，需要根据要求计算导体的长期**允许电流（载流量）**。

1.3 导体载流量的计算

2、导体的温升过程

- 导体的发热： $Q_R = I^2 R$
- 导体的散热： $Q_l + Q_f + Q_d \approx Q_l + Q_f = \alpha_W (\theta_W - \theta_0) F$
- 热平衡方程： $Q_R = Q_l + Q_f + \Delta Q$
- 在dt时间里： $I^2 R\mathrm{d}t = \alpha_W F(\theta_W - \theta_0)\mathrm{d}t + mc\mathrm{d}\theta_W$

Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

2、导体的温升过程

$$I^2R\mathrm{d}t=\alpha_W F\left(\theta_W-\theta_0\right)\mathrm{d}t+mc\mathrm{d}\theta_W$$

- 导体通过正常工作电流时，其温度变化范围不大，因此：
  - 电阻R、散热系数α_W以及比热容c均可视为常数

$$\mathrm{d}t=-\frac{mc}{\alpha_W F}\frac{1}{I^2R-\alpha_W F\left(\theta_W-\theta_0\right)}\mathrm{d}\left[I^2R-\alpha_W F\left(\theta_W-\theta_0\right)\right]$$

- 对上式进行积分，当时间由0→t时，温度从初始温度θ_k上升至相应温度θ

$$t=-\frac{mc}{\alpha_W F}\ln\frac{I^2R-\alpha_W F\left(\theta-\theta_0\right)}{I^2R-\alpha_W F\left(\theta_k-\theta_0\right)}$$

Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

2、导体的温升过程

- 设开始温升为 $\tau_k = \theta_k - \theta_0$；时间由0→$t$时，$t$时刻的温升为$\tau$带入上式

$$t = -\frac{mc}{\alpha_W F}\ln\left(\frac{I^2R - \alpha_W F\tau}{I^2R - \alpha_W F\tau_k}\right)$$

$$\tau = \frac{I^2R}{\alpha_W F}\left(1 - e^{-\frac{\alpha_W F}{mc}t}\right) + \tau_k e^{-\frac{\alpha_W F}{mc}t}$$

- 当t→∞时，导体的温升将趋于稳定值 $\tau_W = \dfrac{I^2R}{\alpha_W F}$

- 令 $T_r = \dfrac{mc}{\alpha_W F}$ ——导体的散热时间常数，得到导体温升最终表达式

$$\tau = \tau_W(1 - e^{-\frac{t}{T_r}}) + \tau_k e^{-\frac{t}{T_r}}$$

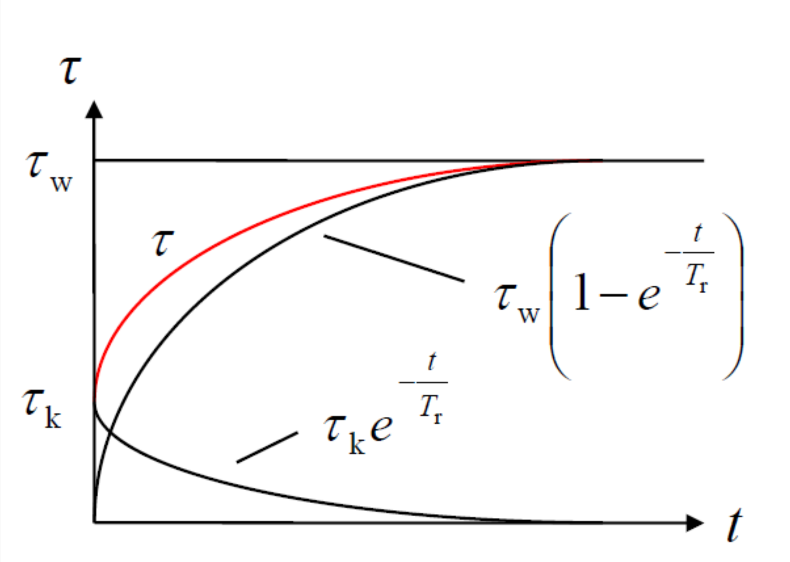
Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

2、导体的温升过程

- 导体温升最终表达式 $\tau=\tau_W(1-e^{-\frac{t}{T_r}})+\tau_k e^{-\frac{t}{T_r}}$

- 导体温升变化曲线



Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

3、导体的载流量

■ 导体长期通过电流，稳定温升为：

$$\tau_W = \frac{I^2 R}{\alpha_W F}$$

■ 则，导体的载流量为：

$$I = \sqrt{\frac{\alpha_W F\left(\theta_W - \theta_0\right)}{R}} = \sqrt{\frac{Q_l + Q_f - Q_t}{R}}$$

1.3 导体载流量的计算

3、导体的载流量

- 导体的载流量为： $I=\sqrt{\dfrac{\alpha_W \boxed{F}\left(\theta_W-\theta_0\right)}{\boxed{R}}}=\sqrt{\dfrac{Q_l+Q_f-Q_t}{R}}$

- 提高导体载流量的措施：

  ①采用电阻率小的材料，如铝、铝合金等；

  ②采用表面积较大的形状，如矩形、槽形；

  ③采用散热效果最佳的方式，如矩形导体竖放。

Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

例2-1 室内配电装置装有100mm×8mm的矩形铝导体，表面涂漆，导体正常运行温度$\theta_w = 70$℃，周围空气温度$\theta_0 = 25$℃，计算导体载流量。

解

$$I = \sqrt{\frac{Q_l + Q_f}{R}}$$

(1) 计算对流散热Q_l $\quad Q_l = \alpha_1 (\theta_W - \theta_0) F_l$

$$\alpha_1 = 1.5(\theta_W - \theta_0)^{0.35} = 1.5(70 - 25)^{0.35} = 5.68 \ \text{W/(m}^2\cdot{}^\circ\text{C)}$$

$$F_l = 2(A_1 + A_2) = 0.246 \ \text{m}^2/\text{m}$$

$$Q_l = 5.68 \times (70 - 25) \times 0.216 = 55.26 \ \text{W/m}$$

Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

例2-1 室内配电装置装有100mm×8mm的矩形铝导体，表面涂漆，导体正常运行温度$\theta_w = 70℃$，周围空气温度$\theta_0 = 25℃$，**计算导体载流量**。

解

$$I = \sqrt{\frac{Q_l + Q_f}{R}}$$

(2) 计算辐射散热Q_f $$Q_f = 5.73\varepsilon\left[\left(\frac{273+\theta_W}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+\theta_0}{100}\right)^4\right]F_f$$

导体表面涂漆，查表的辐射系数 $\varepsilon=0.95$

$$F_f = 2(A_1 + A_2) = 0.246 \ \text{㎡/m}$$

$$Q_f = 5.73\times0.95\left[\left(\frac{273+70}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+25}{100}\right)^4\right]\times0.216 = 69.65 \ \text{W/m}$$

Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

例2-1 室内配电装置装有100mm×8mm的矩形铝导体，表面涂漆，导体正常运行温度$\theta_w=70°C$，周围空气温度$\theta_0=25°C$，**计算导体载流量**。

解

$$I=\sqrt{\frac{Q_l+Q_f}{R}}$$

(3) 计算交流电阻R $R_{ac}=R_{dc}K_f=\dfrac{\rho\left[1+\alpha_t\left(\theta_W-20\right)\right]}{S}K_f$

直流电阻 $R_{dc}=\dfrac{0.029\left[1+0.004\left(70-25\right)\right]}{100\times 8}=0.04355\times 10^{-3}\ \Omega/m$

根据：$\sqrt{\dfrac{f}{R_{dc}}}=\sqrt{\dfrac{50}{0.04355}}=33.88$ 且 $\dfrac{b}{h}=0.08$

集肤效应查图，有 $K_f=1.05$　　因此，交流电阻 $R_{ac}=0.04573\times 10^{-3}\ \Omega/m$

1.3 导体载流量的计算

例2-1 室内配电装置装有100mm×8mm的矩形铝导体，表面涂漆，导体正常运行温度$\theta_w = 70℃$，周围空气温度$\theta_0 = 25℃$，计算导体载流量。

解

$$I=\sqrt{\frac{Q_l+Q_f}{R}}$$

(4) 计算导体载流量

$$I=\sqrt{\frac{Q_l+Q_f}{R}}=\sqrt{\frac{55.26+69.65}{0.04573\times10^{-3}}}=1653\ \text{A}$$

1.3 导体载流量的计算

4、大电流导体附近钢构件的发热

- 产生原因：大电流导体周围产生的强大交变电磁场，使附近钢构件中产生很大的磁滞和涡流损耗。

- 不良影响：

  ①因热应力而导致材料变形和损坏；

  ②钢筋受热膨胀，导致混凝土裂缝。

- 钢构最高允许温度的规定：

  ①人可触及的钢构为70℃，人不可触及的钢构为100℃；

  ②混凝土中钢筋为80℃。

Part 1 导体的发热和散热

1.3 导体载流量的计算

4、大电流导体附近钢构件的发热

- 减少钢构损耗和发热的措施：

间的距离；

路；

课程内容

第二章 导体的发热和电动力

Part 2 短路时导体发热与计算

2.1 引言

短路时发热的含义：

- 导体短路时发热，是指从短路开始至短路切除为止很短一段时间内导体发热的过程。

短路时发热的特点：

- 短路电流大，发热量多
- 时间短，热量不易散发

导体的温度迅速升高，绝热过程

- 电阻和比热容不能再视为常数

短路时发热计算的目的：

- 确定短路时导体达到的最高温度。

Part 2 短路时导体发热与计算

2.2 导体短路时发热过程

热平衡关系：

$$Q_{\mathrm{R}} = \underbrace{Q_{\mathrm{l}} + Q_{\mathrm{f}}}_{\text{散热}\approx 0} + \overset{\text{升温}}{Q_{\mathrm{c}}} = Q_{\mathrm{c}}$$

在dt时间内：

$$i^2 R\mathrm{d}t = mC\mathrm{d}\theta \quad \Longrightarrow \quad i_{\mathrm{kt}}^2 R_\theta \mathrm{d}t = mC_\theta \mathrm{d}\theta$$

$$R_\theta = \rho_0(1+\alpha\theta)\frac{l}{S} \qquad C_\theta = C_0(1+\beta\theta) \qquad m = \rho_{\mathrm{m}} S l$$

$$\Longrightarrow \quad i_{\mathrm{kt}}^2 \rho_0 (1+\alpha\theta)\frac{l}{S}\mathrm{d}t = \rho_{\mathrm{m}} S l C_0 (1+\beta\theta)\mathrm{d}\theta$$

Part 2 短路时导体发热与计算

2.2 导体短路时发热过程

$$i_{\mathrm{kt}}^2\rho_0(1+\alpha\theta)\frac{l}{S}\mathrm{d}t=\rho_{\mathrm{m}}SlC_0(1+\beta\theta)\mathrm{d}\theta$$

整理得到：

$$\frac{1}{S^2}i_{\mathrm{kt}}^2\mathrm{d}t=\frac{C_0\rho_{\mathrm{m}}}{\rho_0}\left(\frac{1+\beta\theta}{1+\alpha\theta}\right)\mathrm{d}\theta$$

两边积分：

$$\frac{1}{S^2}\int_0^{t_{\mathrm{k}}}i_{\mathrm{kt}}^2\mathrm{d}t=\frac{C_0\rho_{\mathrm{m}}}{\rho_0}\int_{\theta_{\mathrm{w}}}^{\theta_h}\frac{1+\beta\theta}{1+\alpha\theta}\mathrm{d}\theta$$

求解得到：

$$\frac{1}{S^2}\int_0^{t_{\mathrm{k}}}i_{\mathrm{kt}}^2\mathrm{d}t=\frac{C_0\rho_{\mathrm{m}}}{\rho_0}\left[\frac{\alpha-\beta}{\alpha^2}\ln\left(1+\alpha\theta_{\mathrm{h}}\right)+\frac{\beta}{\alpha}\theta_{\mathrm{h}}\right]-\frac{C_0\rho_{\mathrm{m}}}{\rho_0}\left[\frac{\alpha-\beta}{\alpha^2}\ln\left(1+\alpha\theta_{\mathrm{w}}\right)+\frac{\beta}{\alpha}\theta_{\mathrm{w}}\right]$$

Part 2 短路时导体发热与计算

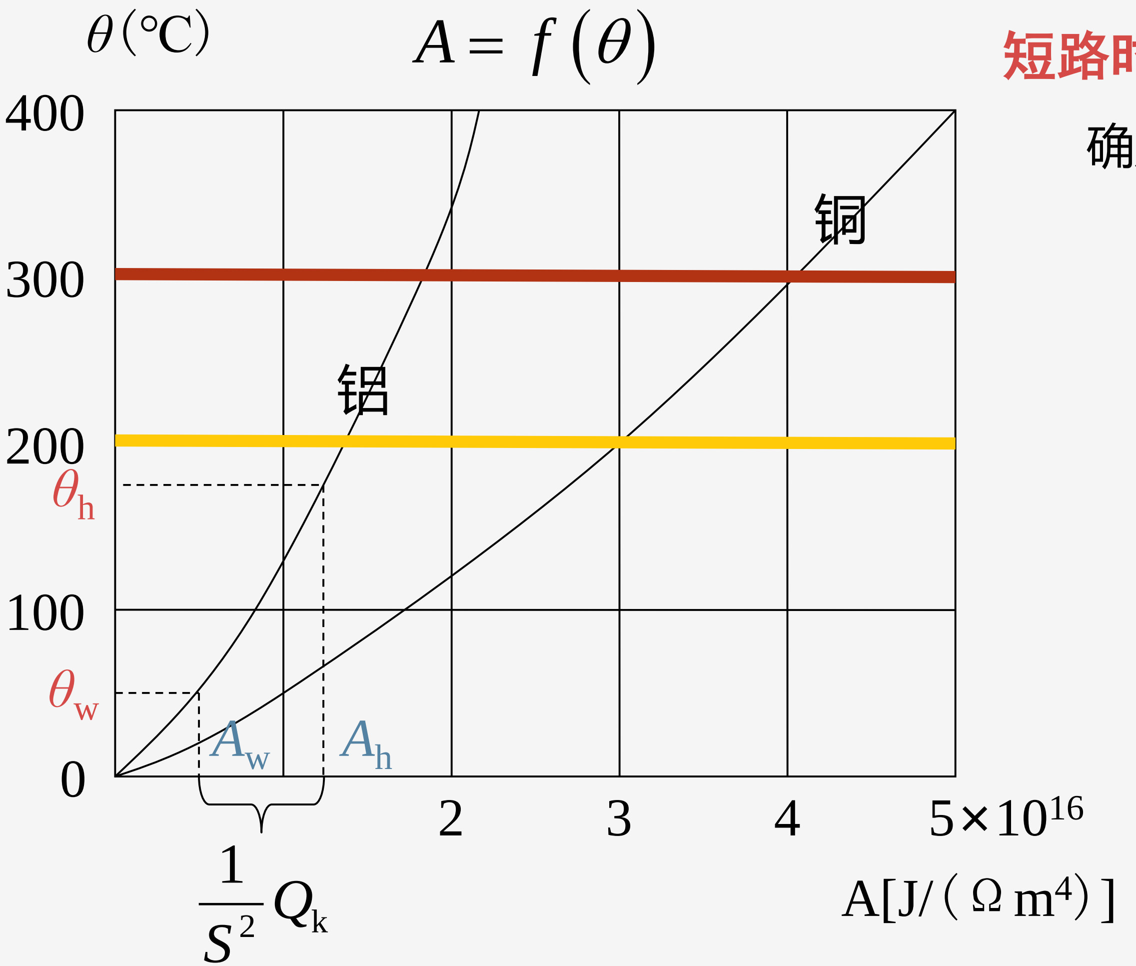
2.2 导体短路时发热过程

$$\frac{1}{S^2}\int_0^{t_k} i_{kt}^2 \,\mathrm{d}t = \frac{C_0\rho_m}{\rho_0}\left[\frac{\alpha-\beta}{\alpha^2}\ln\left(1+\alpha\theta_h\right)+\frac{\beta}{\alpha}\theta_h\right] - \frac{C_0\rho_m}{\rho_0}\left[\frac{\alpha-\beta}{\alpha^2}\ln\left(1+\alpha\theta_w\right)+\frac{\beta}{\alpha}\theta_w\right]$$

$Q_k = \int_0^{t_k} i_{kt}^2 \,\mathrm{d}t$ ——短路电流的热效应，或热脉冲

$$\left.\begin{aligned} A_h &= \frac{C_0\rho_m}{\rho_0}\left[\frac{\alpha-\beta}{\alpha^2}\ln\left(1+\alpha\theta_h\right)+\frac{\beta}{\alpha}\theta_h\right] = f(\theta_h) \\ A_w &= \frac{C_0\rho_m}{\rho_0}\left[\frac{\alpha-\beta}{\alpha^2}\ln\left(1+\alpha\theta_w\right)+\frac{\beta}{\alpha}\theta_w\right] = f(\theta_w) \end{aligned}\right\} A = f(\theta)$$

2.2 导体短路时发热过程



短路时发热计算的目的：

确定短路时导体达到的**最高温度**

$$\frac{1}{S^2}Q_k = A_h - A_w$$

$$A_h = A_w + \frac{1}{S^2}Q_k$$

$$Q_k = \int_0^{t_k} I_{kt}^2 \, dt$$

Part 2 短路时导体发热与计算

2.3 短路电流热效应Q_k的计算

$$I_{kt}=\sqrt{2}I_{pt}\cos\omega t+i_{np0}e^{-\frac{t}{T_a}}$$

非周期分量衰减时间常数

短路电流周期分量有效值

短路电流非周期分量起始值

$$Q_k=\int_0^{t_k}I_{kt}^2\,\mathrm{d}t=\int_0^{t_k}\left(\sqrt{2}I_{pt}\cos\omega t+i_{np0}e^{-\frac{t}{T_a}}\right)^2\mathrm{d}t$$

$$\approx\int_0^{t_k}I_{pt}^2\,\mathrm{d}t+\frac{T_a}{2}\left(1-e^{-\frac{2t_k}{T_a}}\right)i_{np0}^2=Q_p+Q_{np}$$

- 由于短路电流I_{kt}的表达式很复杂，一般难于用简单的解析式求解Q_k，工程上常采用近似计算法计算。

2.3 短路电流热效应Q_k的计算

1. 短路电流周期分量热效应Q_p的计算

- 数值积分的Simpson法

任意曲线 $y=f(x)$ 的定积分，可用下式近似计算：

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x=\frac{b-a}{3n}[(y_0+y_n)+2(y_2+\cdots+y_{n-2})+4(y_1+\cdots+y_{n-1})]$$

若n=4，则

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x=\frac{b-a}{12}[(y_0+y_4)+2(y_2)+4(y_1+y_3)]$$

因为 $y_1+y_3\approx 2y_2$，则

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x=\frac{b-a}{12}[y_0+10y_2+y_4]$$

2.3 短路电流热效应Q_k的计算

1. 短路电流周期分量热效应Q_p的计算

- 短路电流周期分量的热效应

$$Q_p=\int_0^{t_k} I_{pt}^2\,\mathrm{d}t \qquad \int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x=\frac{b-a}{12}[y_0+10y_2+y_4]$$

$$y=f(x)=I_{pt}^2 \qquad a=0 \qquad b=t_k$$

$$y_0=I''^2 \qquad y_2=I_{t_k/2}^2 \qquad y_4=I_{t_k}^2$$

$$Q_p=\int_0^{t_k} I_{pt}^2\,\mathrm{d}t=\frac{t_k}{12}[I''^2+10I_{t_k/2}^2+I_{t_k}^2]$$

Part 2 短路时导体发热与计算

2.3 短路电流热效应Q_k的计算

2. 短路电流非周期分量热效应Q_{np}的计算的计算

$$Q_{np}=\frac{T_a}{2}\left(1-e^{-\frac{2t_k}{T_a}}\right)i_{np0}^2 \qquad i_{np0}=-\sqrt{2}I''$$

$$=\frac{T_a}{2}\left(1-e^{-\frac{2t_k}{T_a}}\right)\left(-\sqrt{2}I''\right)^2=T_a\left(1-e^{-\frac{2t_k}{T_a}}\right)I''^2=TI''^2$$

非周期分量等效时间，可查表得。

- 若t_k>1s，则Q_{np}可忽略。

Part 2 短路时导体发热与计算

2.3 短路电流热效应Q_k的计算

$$Q_k = \int_0^{t_k} I_{kt}^2 \, \mathrm{d}t = Q_p + Q_{np}$$

$$= \frac{t_k}{12}\left(I''^2 + 10 I_{t_k/2}^2 + I_{t_k}^2\right) + T I''^2$$

$$A_h = A_w + \frac{1}{S^2} Q_k$$

从而实现对导体短路发热的最高温度的计算

Part 2 短路时导体发热与计算

2.3 短路电流热效应Q_k的计算

铝导体型号为LMY-100×8，正常工作电压U_N=10.5 kV，正常负荷电流I_w =1500A。正常负荷时，导体的温度θ_w = 46℃，继电保护动作时间 t_{pr}=1s， 断路器全开断时间 t_{br}= 0.2s， 短路电流I''=28kA，$I_{0.6s}$=22kA，$I_{1.2s}$=20kA。计算短路电流的热效应和导体的最高温度。

解 (1) 计算短路电流的热效应

$$t_k = t_{pr} + t_{br} = 1 + 0.2 = 1.2(\mathrm{s})$$

$$\because t_k = 1.2\mathrm{s} > 1\mathrm{s}$$

$$\therefore Q_k \approx Q_p = \frac{t_k}{12}[I''^2 + 10 I_{t_k/2}^2 + I_{t_k}^2] = \frac{1.2}{12}[28^2 + 10\times 22^2 + 20^2]$$

$$= 602.4\times 10^6 (\mathrm{A}^2\cdot \mathrm{s})$$

2.3 短路电流热效应Q_k的计算

铝导体型号为LMY-100×8，正常工作电压U_N=10.5 kV，正常负荷电流I_w =1500A。正常负荷时，导体的温度θ_w = 46°C，继电保护动作时间 t_{pr}=1s， 断路器全开断时间 t_{br}= 0.2s， 短路电流I''=28kA，$I_{0.6s}$=22kA，$I_{1.2s}$=20kA。计算短路电流的热效应和导体的最高温度。

解 (2) 计算导体的最高温度

由 $\theta_w = 46°C$，查图得 $A_w = 0.35\times10^{16}$ J/(Ω·m^4)

$$A_h = A_w + \frac{1}{S^2}Q_k = 0.35\times10^{16} + \frac{1}{\left(\frac{100}{1000}\times\frac{8}{1000}\right)^2}\times602.4\times10^6$$

$$= 0.444\times10^{16}[\mathrm{J}/(\Omega\cdot\mathrm{m}^4)]$$

查图得 $\theta_h = 60°C < 200°C$（铝导体最高允许温度）

第二章 导体的发热和电动力

第一节 导体的发热和散热

第二节 短路时导体发热与计算

第三节 短路时导体电动力计算

Part 3 短路时导体电动力计算

3.1 引言

什么是电动力?

- 载流导体位于磁场中，将受到磁场力的作用，称为电动力。

为什么要进行电动力计算?

- 短路时，导体中通过很大的短路电流，导体会遭受巨大的电动力作用。如果机械强度不够，将使导体变形或损坏。

物理本质：故障电能转化为机械能

Part 3 短路时导体电动力计算

3.1 引言

比奥——萨伐尔定律

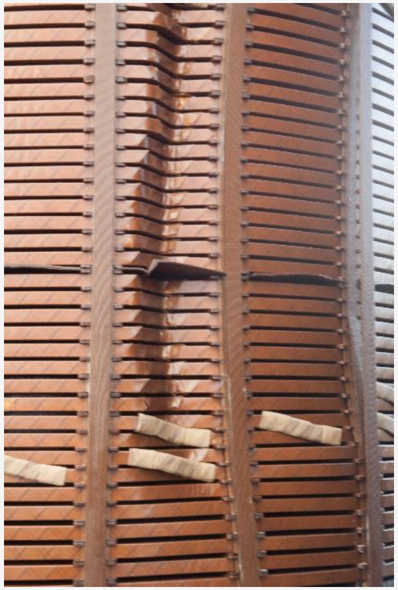
$$\vec{F} = \vec{i} \times \vec{B}$$

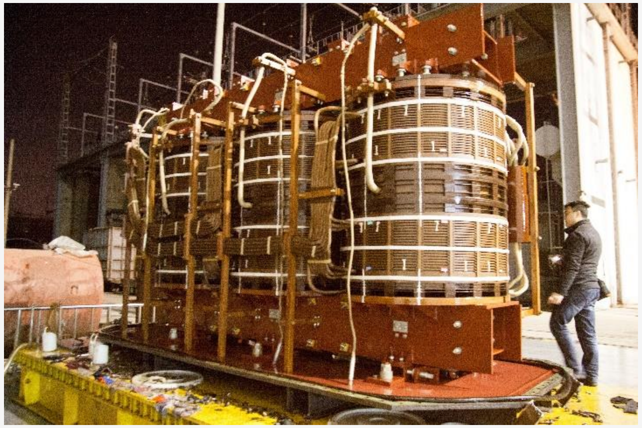
单位长度dl上，导体所受电动力dF为

$$\mathrm{d}F = iB\sin\alpha\,\mathrm{d}l$$

$$F = \int_0^L iB\sin\alpha\,\mathrm{d}l$$

$$F \propto i^2$$

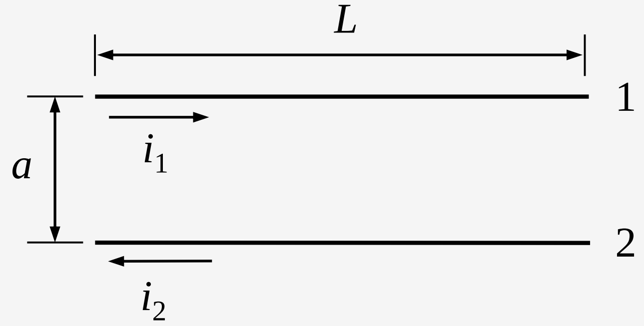




Part 3 短路时导体电动力计算

3.2 两条平行细长载流导体间的电动力

- 两条平行细长载流导体间的电动力



$$F = 2\times10^{-7}\frac{L}{a}i_1 i_2$$

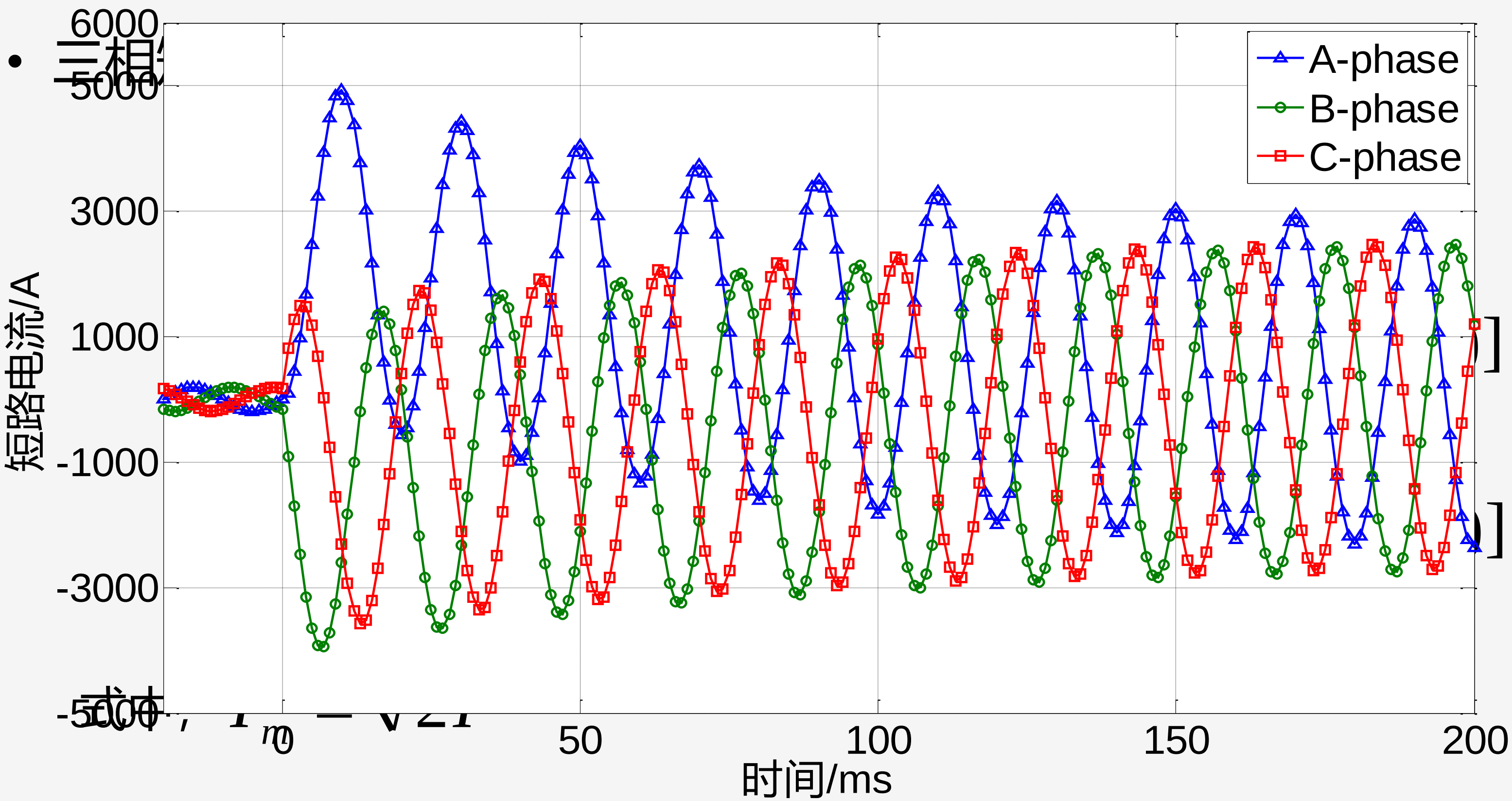
- 考虑导体截面尺寸和形状的影响
  - 截面形状：矩形、圆形、槽形等
  - 工程计算：乘以形状系数，即 $F = 2\times10^{-7}\frac{L}{a}i_1 i_2 K$

Part 3 短路时导体电动力计算

3.3 三相导体短路的电动力

1. 电动力的计算

- 三相

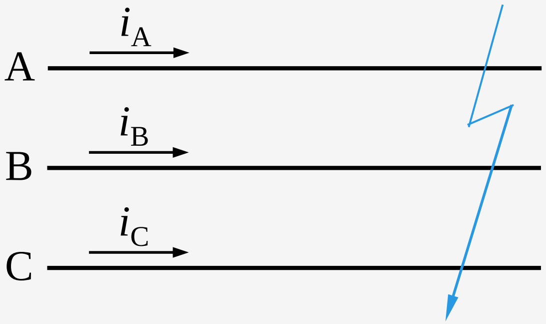


式中，

3.3 三相导体短路的电动力

1. 电动力的计算

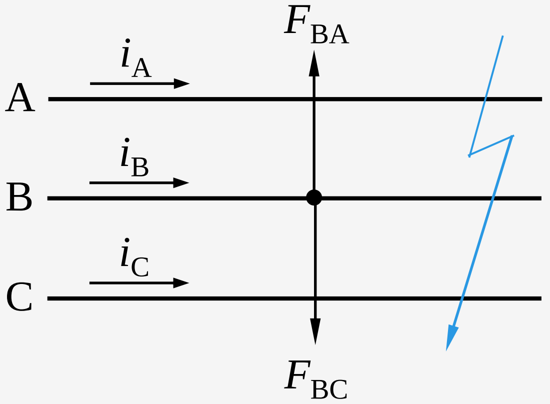
- 假设三相导体布置在同一平面内
- 在三相短路时，中间相（B 相）和外边相（A、C相）的受力情况并不相同



Part 3 短路时导体电动力计算

3.3 三相导体短路的电动力

作用在中间相的电动力



$$F_B = F_{BA} - F_{BC}$$

$$= 2\times10^{-7}\frac{L}{a}\left(i_B^{(3)}i_A^{(3)} - i_B^{(3)}i_C^{(3)}\right)$$

$$= 2\times10^{-7}\frac{L}{a}I_m^2\left\{\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\left(2\phi_A - \frac{4}{3}\pi\right)e^{-\frac{t}{T_a/2}}\right.$$

按 $\frac{T_a}{2}$ 衰减的非周期分量

$$-\sqrt{3}\sin\left(\omega t + 2\varphi_A - \frac{4}{3}\pi\right)e^{-\frac{t}{T_a}}$$

按 T_a 衰减的工频分量

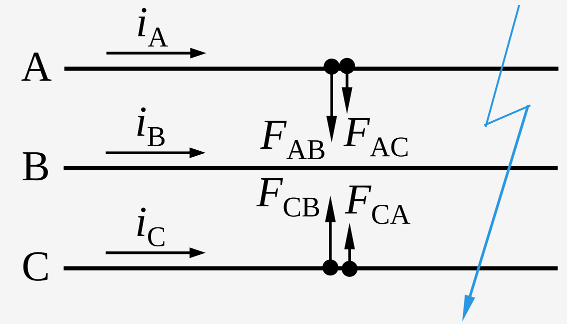
$$\left.+\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\left(2\omega t + 2\varphi_A - \frac{4}{3}\pi\right)\right\}$$

不衰减的2倍工频分量

Part 3 短路时导体电动力计算

3.3 三相导体短路的电动力

作用在外边相的电动力



$$F_A = F_{AB} + F_{AC}$$

$$= 2\times10^{-7}\frac{L}{a}\left(i_A^{(3)}i_B^{(3)} + 0.5 i_A^{(3)}i_C^{(3)}\right)$$

$$= 2\times10^{-7}\frac{L}{a}I_m^2\left\{\frac{3}{8}\right.$$

$$+\left[\frac{3}{8}-\frac{\sqrt{3}}{4}\cos\left(2\phi_A+\frac{\pi}{6}\right)\right]e^{-\frac{t}{T_a/2}}$$

$$-\left[\frac{3}{4}\cos\omega t-\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\left(\omega t+2\varphi_A+\frac{\pi}{6}\right)\right]e^{-\frac{t}{T_a}}$$

$$\left.-\frac{\sqrt{3}}{4}\cos\left(2\omega t+2\varphi_A+\frac{\pi}{6}\right)\right\}$$

不衰减的固定分量

按 $\frac{T_a}{2}$ 衰减的非周期分量

按 T_a 衰减的工频分量

不衰减的2倍工频分量

3.3 三相导体短路的电动力

2. 电动力的最大值

- 出现最大值的条件：

  1) 非周期分量为最大，初相角需满足一定条件；

  2) 短路后半个周期，即$t = 0.01$s时，三相冲击电流 $i_{\text{sh}}^{(3)} = 1.82 I_m$

- 则 $$F_{\text{A max}} = 1.616\times10^{-7}\frac{L}{a}[i_{\text{sh}}^{(3)}]^2$$

$$F_{\text{B max}} = 1.73\times10^{-7}\frac{L}{a}[i_{\text{sh}}^{(3)}]^2$$

可见 $F_{\text{B max}} > F_{\text{A max}}$ 故计算最大电动力时应取B相的值。

3.3 三相导体短路的电动力

2. 电动力的最大值

- 比较两相短路和三相短路时的电动力

由于 $I''^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''^{(3)}$ 即 $i_{sh}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sh}^{(3)}$

所以 $$F_{\max}^{(2)} = 2\times10^{-7}\frac{L}{a}[i_{\mathrm{sh}}^{(2)}]^2$$

$$= 2\times10^{-7}\frac{L}{a}[\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\mathrm{sh}}^{(3)}]^2 = 1.5\times10^{-7}\frac{L}{a}[i_{\mathrm{sh}}^{(3)}]^2$$

可见 $F_{\mathrm{B}\max} > F_{\mathrm{A}\max} > F_{\max}^{(2)}$

故 $F_{\max} = F_{\mathrm{B}\max} = 1.73\times10^{-7}\frac{L}{a}[i_{\mathrm{sh}}^{(3)}]^2$

Part 3 短路时导体电动力计算

3.3 三相导体短路的电动力

3. 导体振动时的动态应力

- 共振

质量
弹性

$\left.\begin{array}{l}\text{质量}\\ \text{弹性}\end{array}\right\} \longrightarrow$ 弹性系统 $\xrightarrow{\text{一次力作用}}$ 固有振动（f_g）

弹性系统 $\xrightarrow[\text{(振动频率为}f_p\text{)}]{\text{持续力作用}}$ 强迫振动 $\xrightarrow{\text{若}f_p = f_g}$ **共振**

◆ 三相短路电动力中含有工频和 2 倍工频两个分量。

◆ 如果导体的固有频率接近这两个频率之一时，就会出现共振现象，甚至使导体及其构架损坏。

◆ 凡连接发电机、主变以及配电装置的导体，均应避免发生共振。

3.3 三相导体短路的电动力

3. 导体振动时的动态应力

- 一阶固有频率的计算

$$f_1 = \frac{N_f}{L^2}\sqrt{\frac{EJ}{m}}$$

式中 N_f——频率系数；

L——跨距；

E——导体材料的弹性模量；

J——导体截面惯性矩；

m——导体单位长度的质量。

Part 3 短路时导体电动力计算

3.3 三相导体短路的电动力

3. 导体振动时的动态应力

- 动态应力的影响

为了避免导体产生危险的共振，对于重要的导体，应使其固有频率在下述范围以外：

- 单条导体及一组中的各条导体35~135Hz；
- 多条导体及引下线的单条导体35~155Hz；
- 槽形和管形导体30~160Hz。

Part 3 短路时导体电动力计算

3.3 三相导体短路的电动力

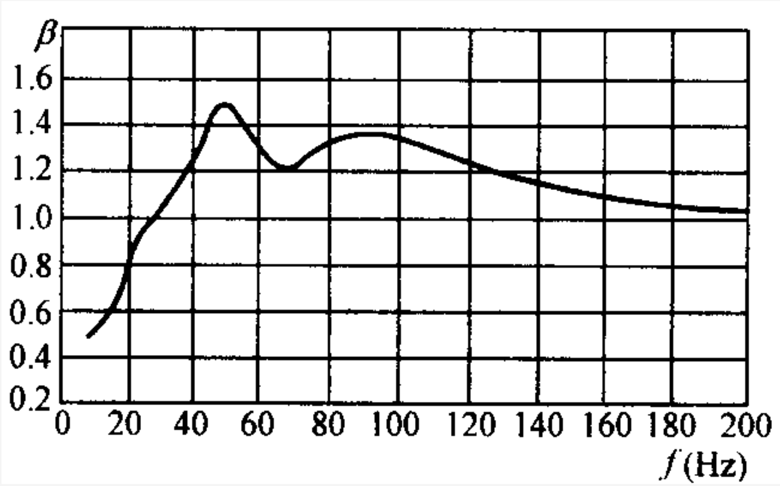
3. 导体振动时的动态应力

- 动态应力的影响

对动态应力力的考虑，一般采用修正静态计算法，即

$$F_{max}=1.73\times10^{-7}\frac{L}{a}[i_{sh}^{(3)}]^2\beta$$

动态应力系数



可见，当固有频率较低时，$\beta<1$；
当固有频率较高时，$\beta\approx1$。

3.3 三相导体短路的电动力

某发电厂装有10kV单条矩形铝导体，尺寸为60×6mm，支柱绝缘子之间的距离L=1.2m，相间距离a=0.35m，三相短路冲击电流i_{sh}=45kA。导体弹性模量E=7×10^{10}Pa，单位长度的质量m=0.972kg/m。

试求导体的固有频率及最大电动力。

解 导体的截面惯性矩 $J=\dfrac{bh^3}{12}=\dfrac{0.6\times6^3}{12}\times10^{-8}=10.8\times10^{-8}(\mathrm{m}^4)$

导体的一阶固有频率为 $f_1=\dfrac{N_f}{L^2}\sqrt{\dfrac{EJ}{m}}$

当导体支撑方式为两端简支，查表得 N_f=1.57，

故有 $$f_1=\frac{1.57}{1.2^2}\sqrt{\frac{7\times10^{10}\times10.8\times10^{-8}}{0.972}}=96.15(\mathrm{Hz})$$

Part 3 短路时导体电动力计算

3.3 三相导体短路的电动力

某发电厂装有10kV单条矩形铝导体，尺寸为60×6mm，支柱绝缘子之间的距离L=1.2m，相间距离a=0.35m，三相短路冲击电流i_{sh}=45kA。导体弹性模量E=7×10^{10}Pa，单位长度的质量m=0.972kg/m。试求导体的固有频率及最大电动力。

解 f_1=96.15Hz在35~135Hz范围以内，应考虑动态应力系数。

查曲线，对应 f = 96.15Hz，β=1.35，

则 $$F_{max}=1.73\times10^{-7}\frac{L}{a}i_{sh}^2\beta$$

$$=1.73\times10^{-7}\frac{1.2}{0.35}\times45000^2\times1.35=1621.5(\mathrm{N})$$