

西安交通大学

Xi'an Jiaotong University

电器理论基础

Fundamentals of Electrical Apparatuses

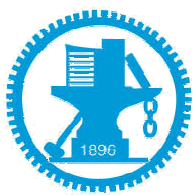
西安交通大学
电器教研室

贾申利
史宗谦

sljia@mail.xjtu.edu.cn

zqshi@mail.xjtu.edu.cn

2009.2~2009.5



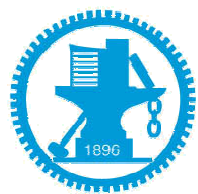
电器理论基础

■ 课程实验

- ◆ 联系老师：王宣东
- ◆ 东一楼，东210室
- ◆ 电话：82668583
- ◆ Email: jds08@mail.xjtu.edu.cn

■ 课件下载

- ◆ <http://sljia.gr.xjtu.edu.cn>



电器 (Electric Apparatus)

■ 电器的定义

- ◆ 用于**接通**或**断开**电路
- ◆ 断续或连续改变电路参数实现对电路或非电对象**切换**、**控制**、**保护**、**检测**、**变换**和**调节**的电气设备 (Equipments)

■ 电器的分类

- ◆ 交流、直流电器
- ◆ 高压、低压电器
- ◆ 工业、农用、航空、矿用电器 (防爆电器.....)
- ◆ 控制电器、保护电器、切换电器



电器 (Electric Apparatus)

■ 典型电器

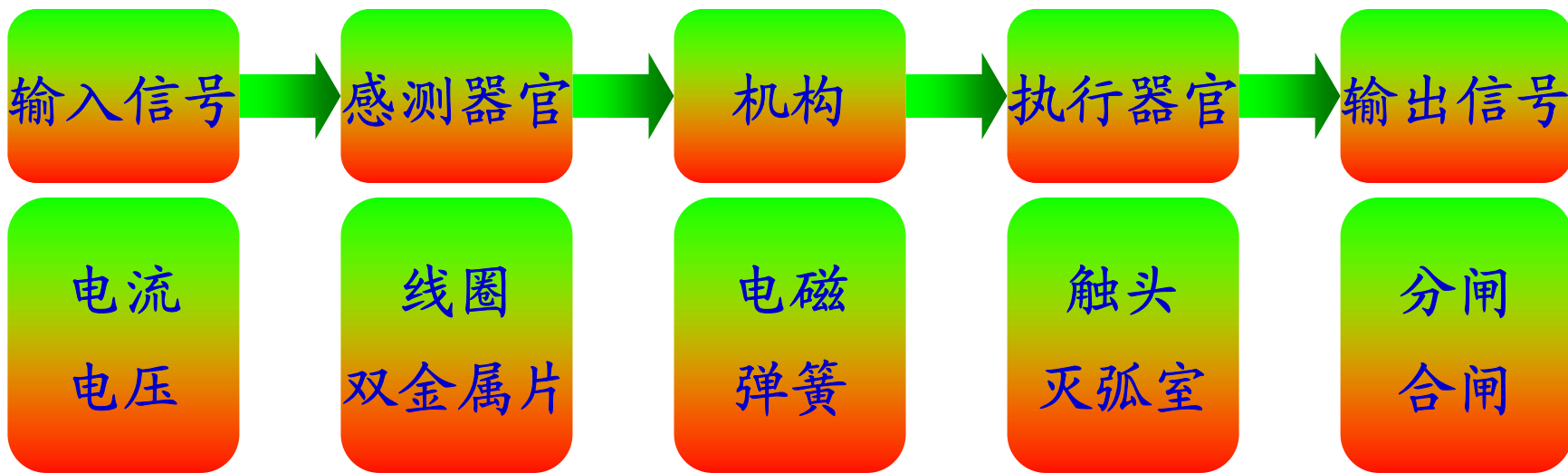
- ◆ 继电器: **Relay** (电磁式、半导体、数字)
- ◆ 接触器: **Contactor**
- ◆ 断路器: **Circuit Breaker**
- ◆ 熔断器: **Fuse**
- ◆ 隔离开关: **Disconnecter**
- ◆ 限流器: **Current Limiter**
- ◆ 互感器: **Transformer (PT、CT)**



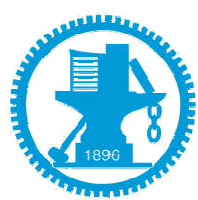
电器 (Electric Apparatus)

■ 典型电器的结构原理

- ◆ 从控制角度来看: 输入部分 + 输出部分
- ◆ 从结构角度来看: 感测器官 + 执行器官



举例



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



第一章 电器导体的发热计算

§ 1-1 电器的允许温升

§ 1-2 电器中的热源

§ 1-3 电器中的热传递形式

§ 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式

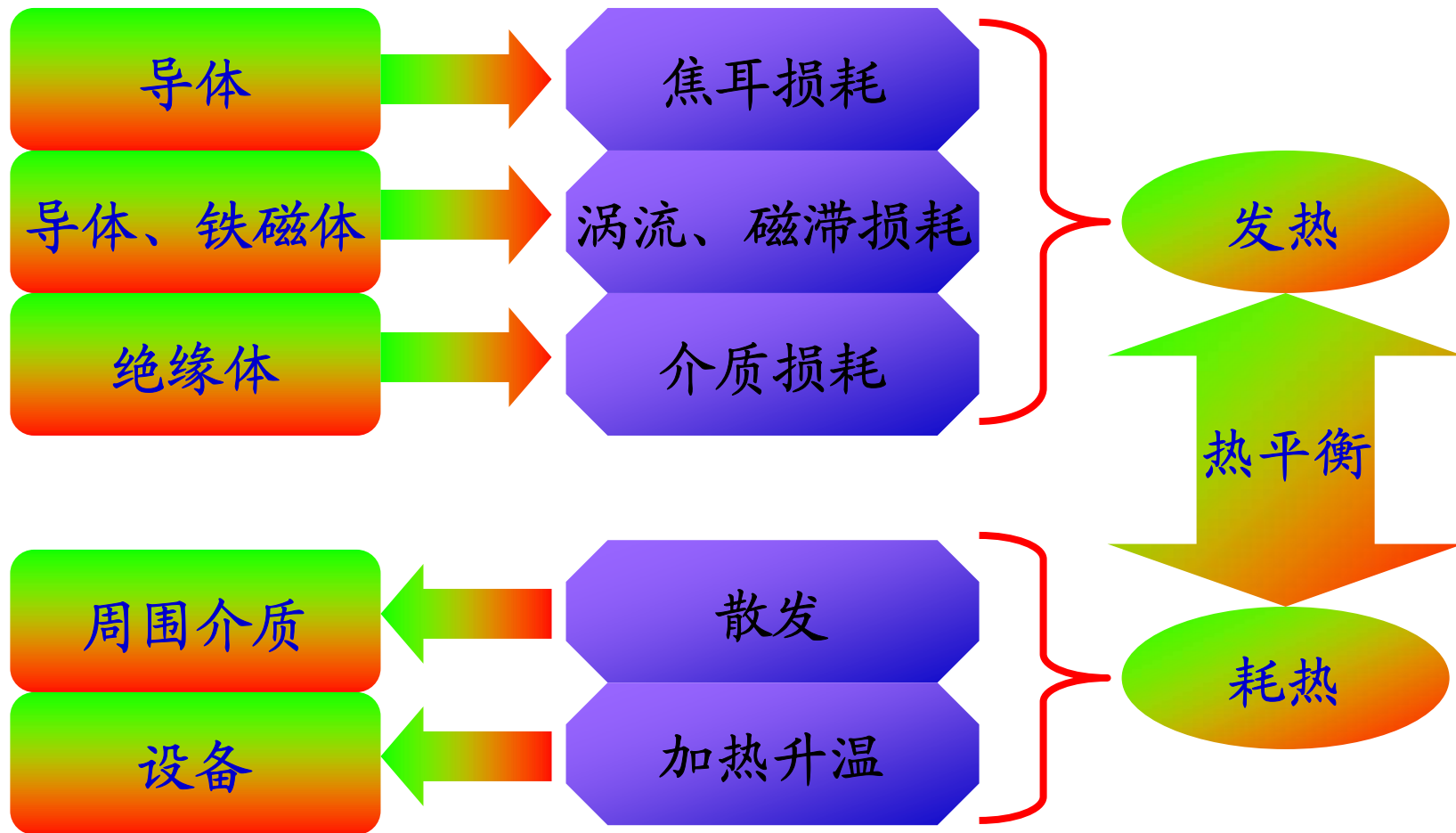
§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性



§ 1-1 电器的允许温升

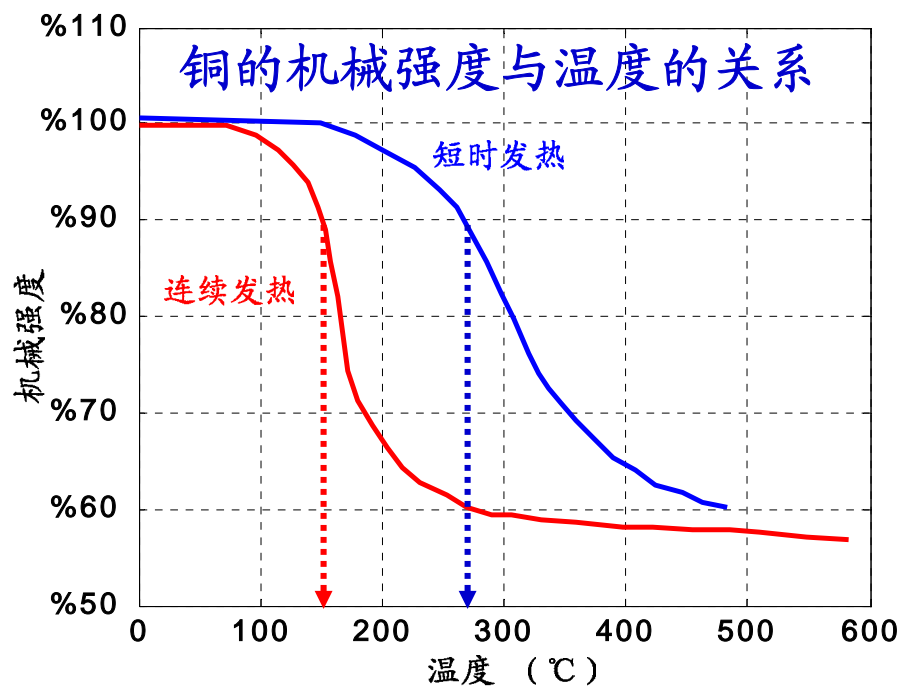
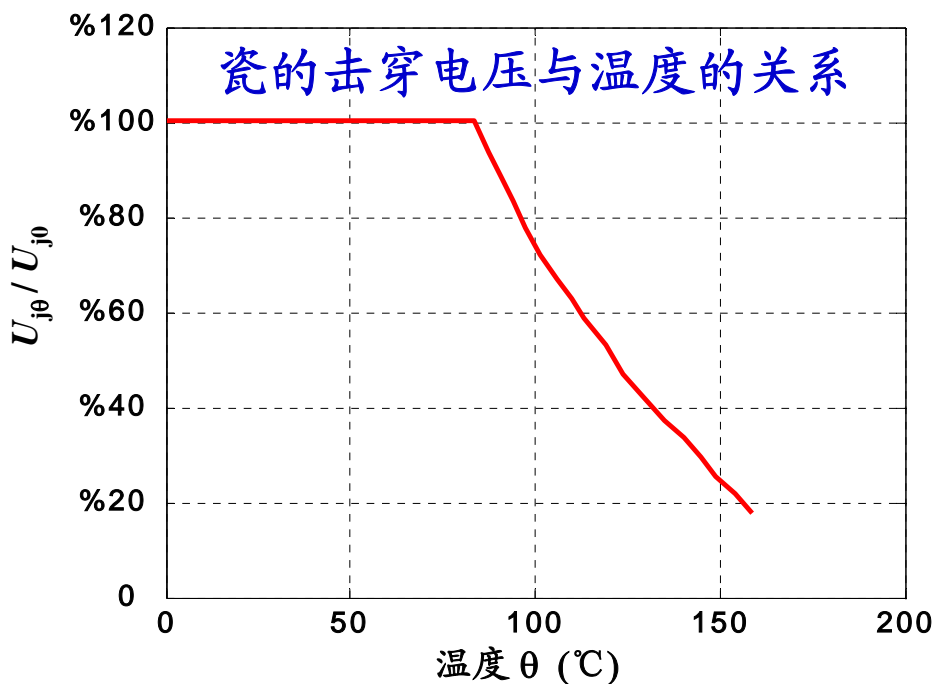


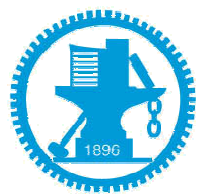


§ 1-1 电器的允许温升

■ 电器温度过高的影响

- ◆ 绝缘材料的**绝缘强度**明显下降
- ◆ 金属材料的**机械强度**显著降低（长时与短时发热不同）
- ◆ 加速触头材料等的**氧化**、发生**熔焊**等





§ 1-1 电器的允许温升

■ 极限允许温升(Temperature rise)

定义

- ◆ 电器极限允许温度与工作环境温度之差

$$\tau = \theta - \theta_0$$

- ◆ 我国标准规定周围空气的温度范围为 $\pm 40^\circ\text{C}$

制定依据

- ◆ 保证电器的绝缘不致因温度过高而损坏，或使工作寿命过分降低；
- ◆ 导体和结构部分不致因温度过高而降低其机械性能。



第一章 电器导体的发热计算

§ 1-1 电器的允许温升

§ 1-2 电器中的热源

§ 1-3 电器中的热传递形式

§ 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式

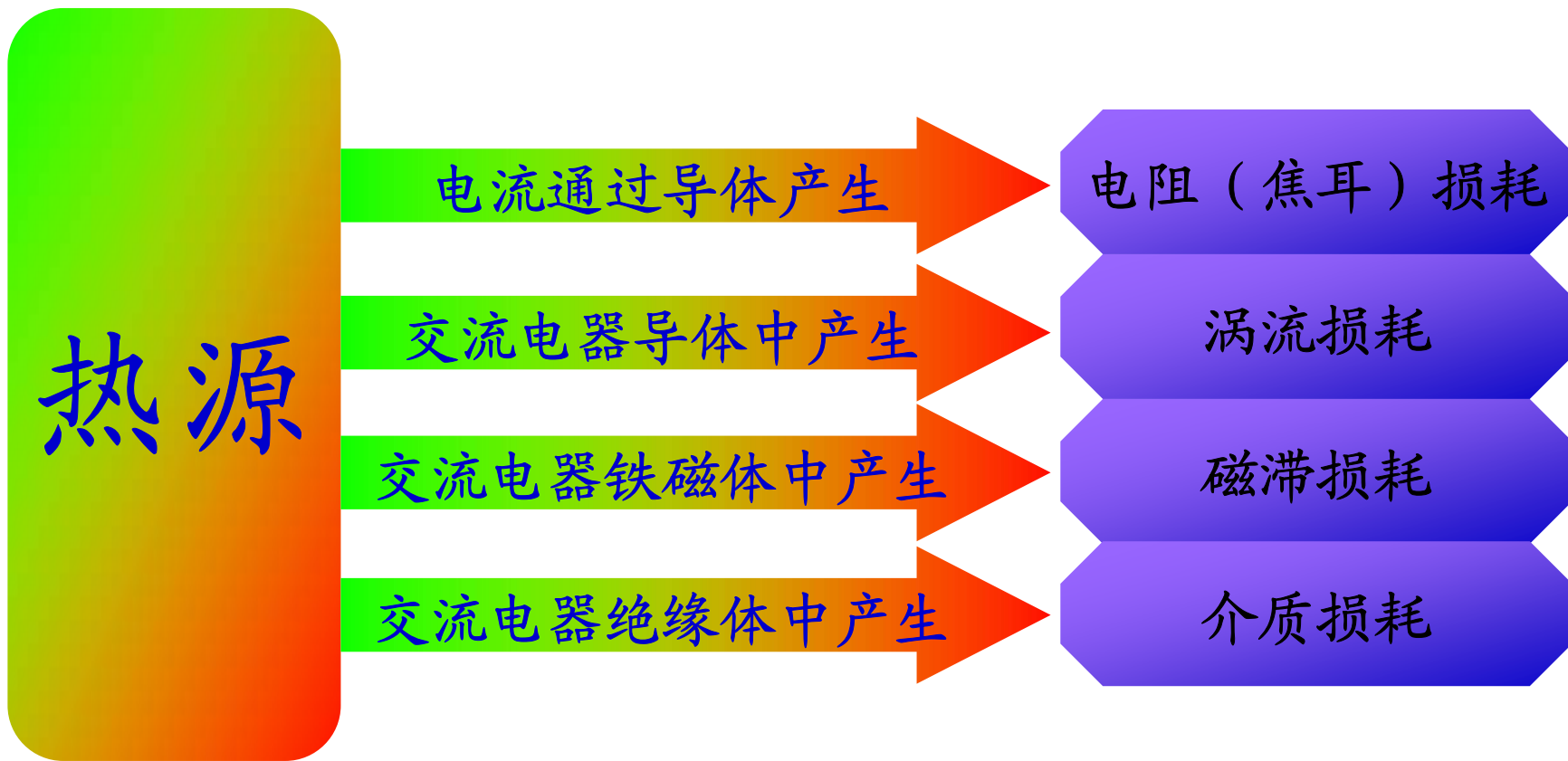
§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

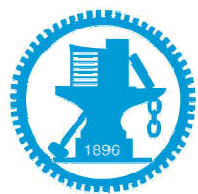
§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性



§ 1-2 电器中的热源





§ 1-2 电器中的热源

■ 电阻损耗（焦耳损耗）

◆ 电流通过导体所产生的能量损耗

$$P = K_f I^2 R$$

- P : 功率 (W)
- I : 电流 (A)
- R : 电阻 (Ω)
- K_f : 考虑交变电流集肤效应和邻近效应对电阻影响的系数，称为附加损耗系数

$$K_f = K_j K_l$$

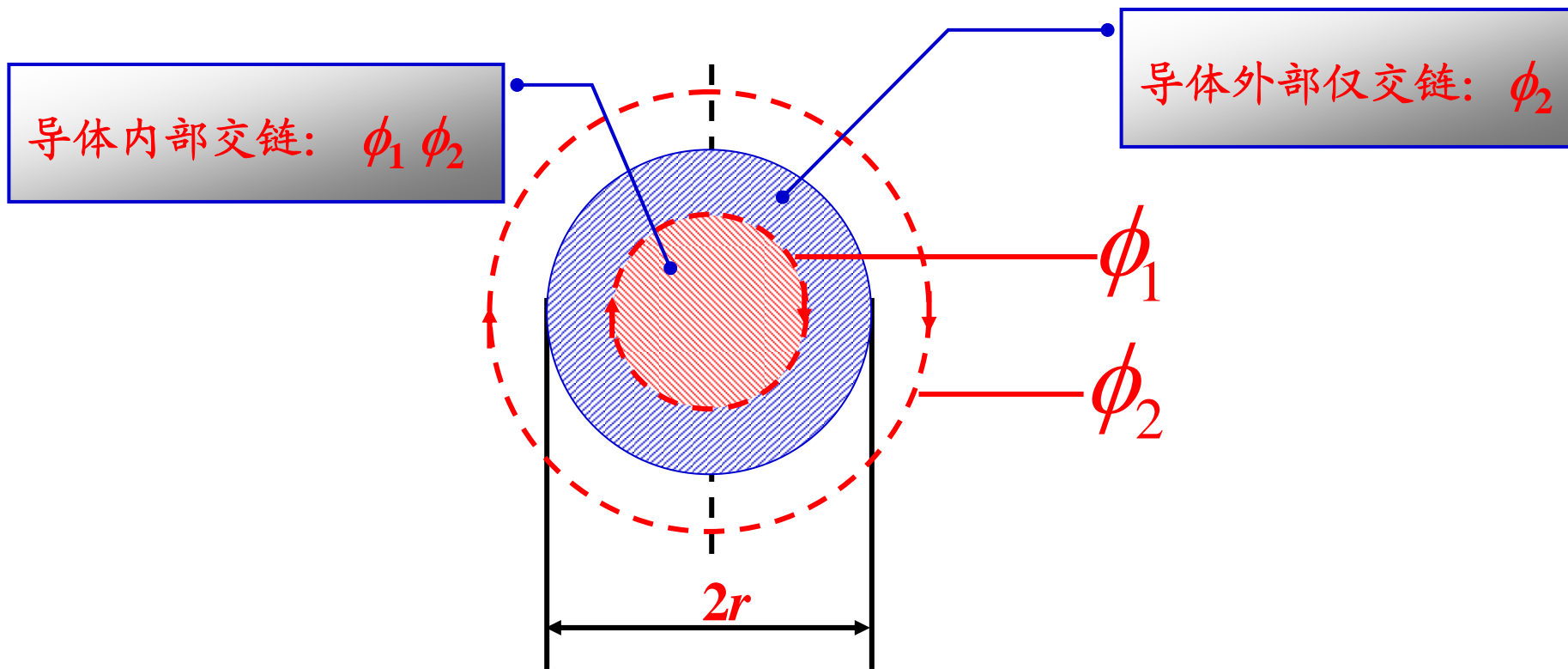
- K_j : 集肤系数
- K_l : 临近系数

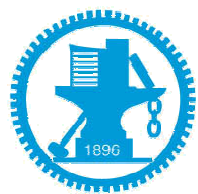


§ 1-2 电器中的热源

■ 集肤效应

◆ 导体内部电流交链的磁通不同





§ 1-2 电器中的热源

■ 集肤效应

- ◆ 导体内部电流交链的磁通不同
- ➡ 交变磁通产生的反电势不同
- ➡ 导体中电流分布不同

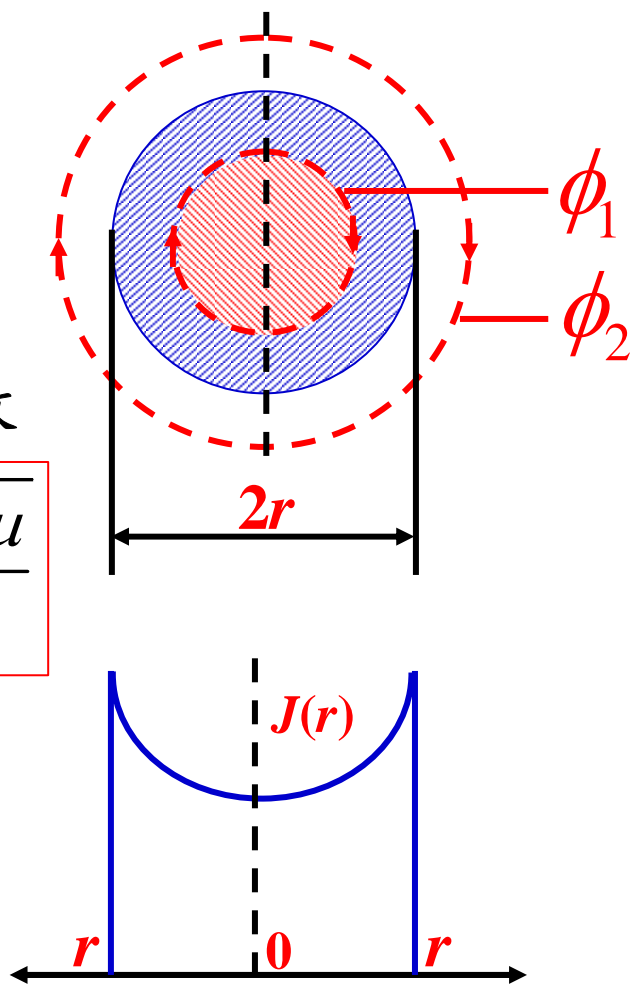
◆ 透入深度

◆ 集肤效应系数

$$b = \sqrt{\rho / (2\pi f \mu)}$$

$$K_j = \frac{A}{p} \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\rho}}$$

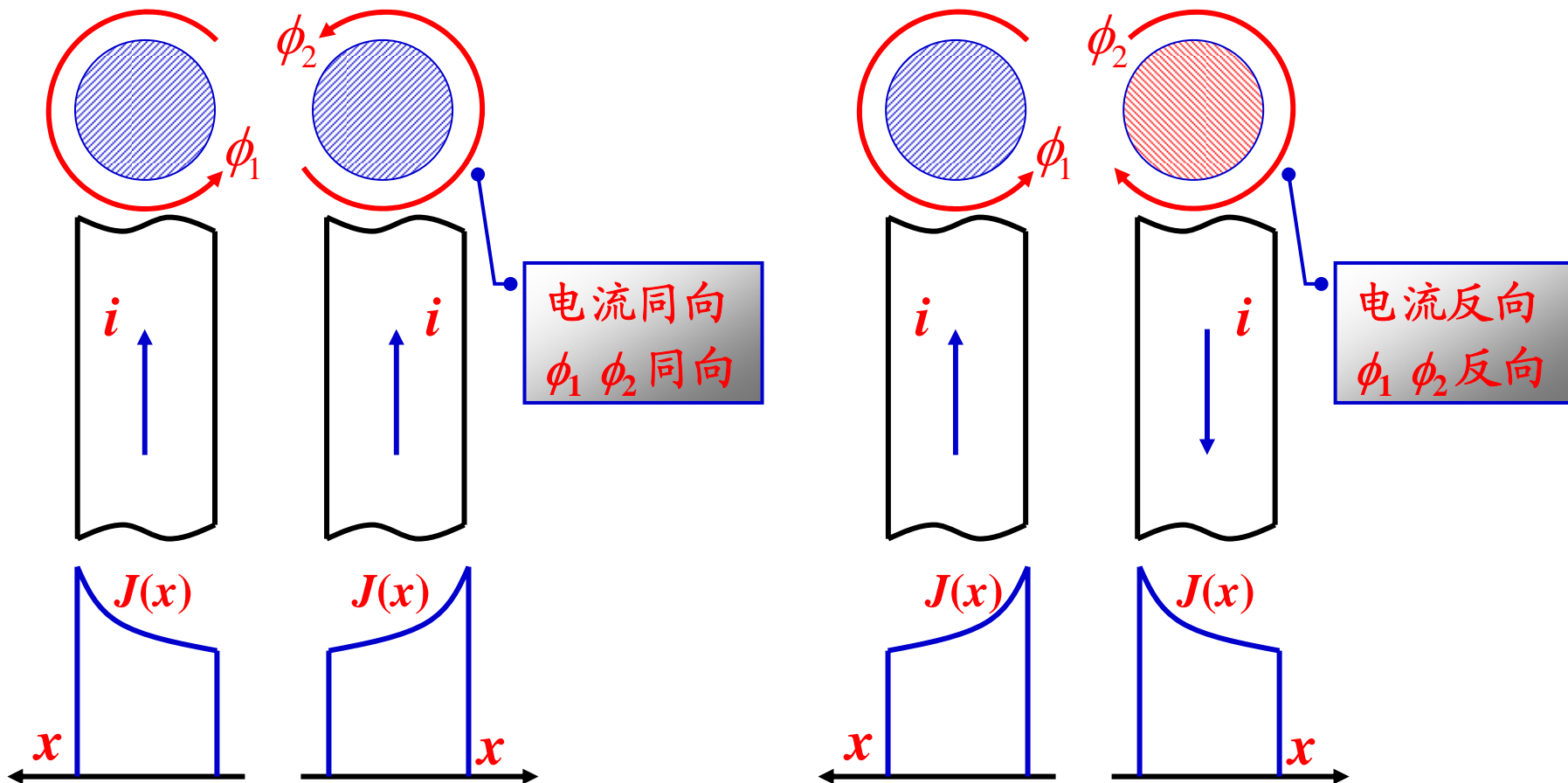
- A : 截面积 (m^2)
- p : 周长 (m)
- f : 电流频率 (Hz)
- ρ : 电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)
- μ : 磁导率 (H/m)





§ 1-2 电器中的热源

■ 临近效应





§ 1-2 电器中的热源

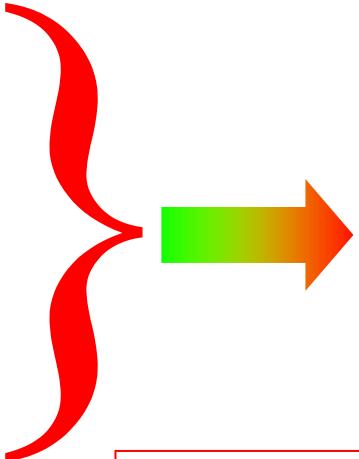
■ 电阻损耗（焦耳损耗）

$$P = K_f I^2 R$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$I = J \times A$$

$$m = \gamma l A$$

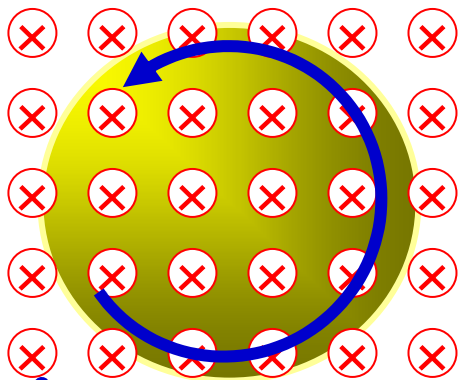

$$P = \frac{K_f J^2 m \rho}{\gamma}$$

- A : 导体截面积 (m^2)
- l : 导体长度 (m)
- ρ : 电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) (**与温度有关**)
- J : 电流密度 (A/m^2)
- m : 导体的质量 (kg)
- γ : 密度 (kg/m^3)

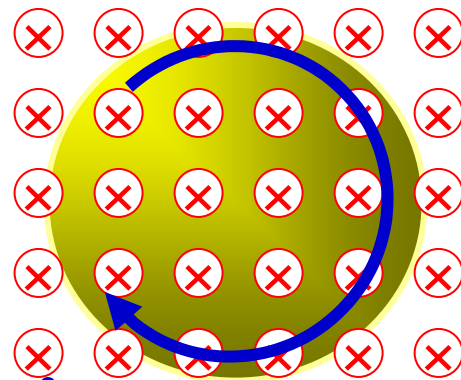


§ 1-2 电器中的热源

■ 涡流 (eddy current) 损耗



$$\frac{dB}{dt} > 0$$



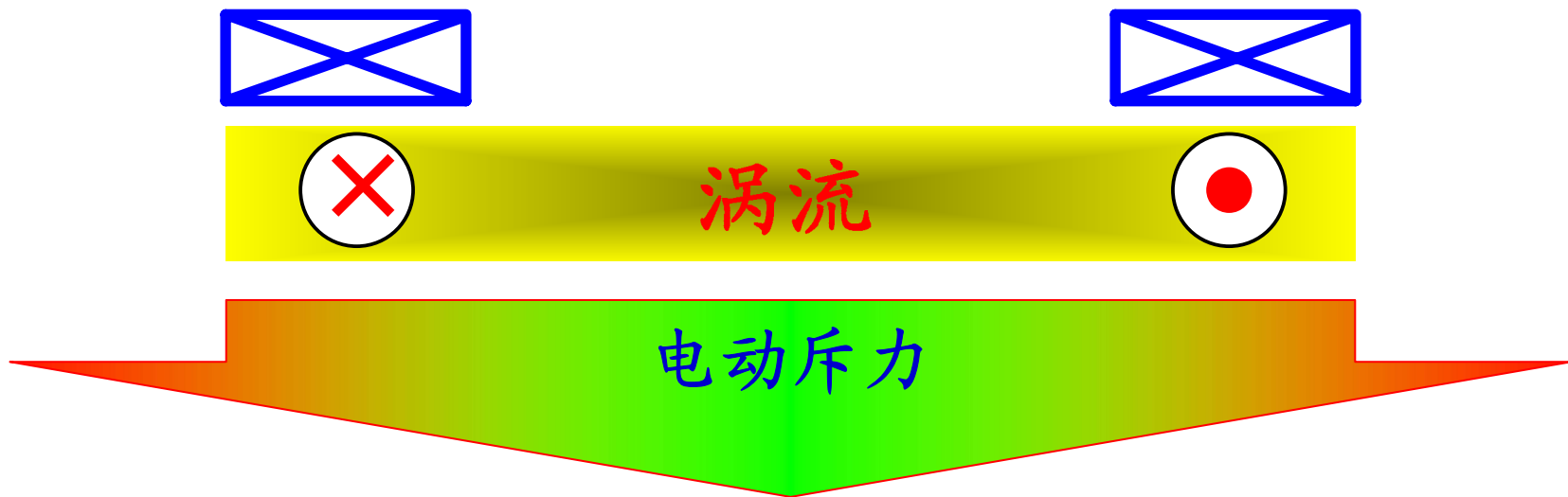
$$\frac{dB}{dt} < 0$$



§ 1-2 电器中的热源

■ 涡流的应用

- ◆ 涡流加热
- ◆ 斥力机构

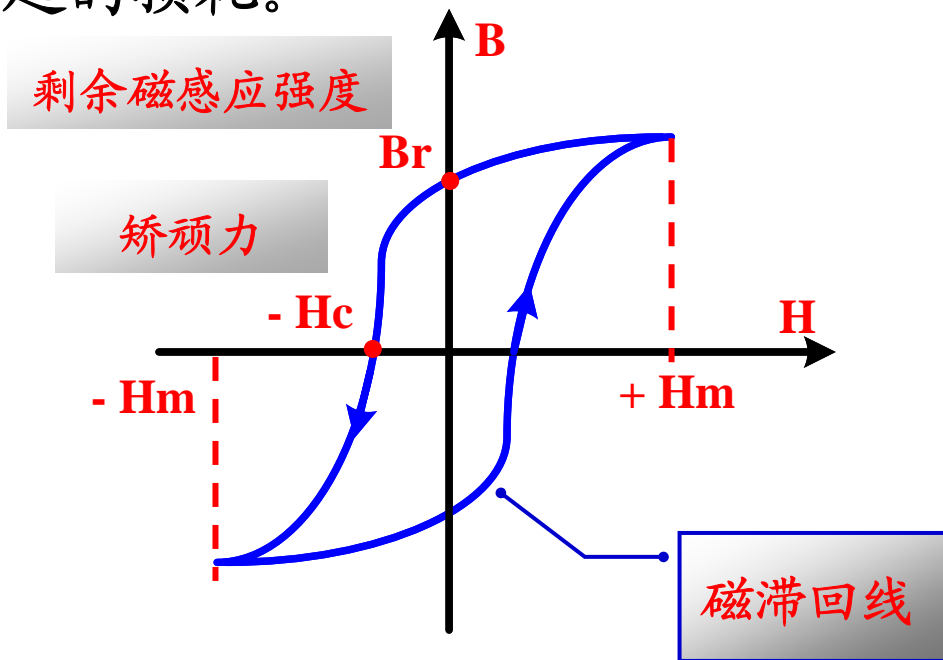




§ 1-2 电器中的热源

■ 磁滞 (magnetic hysteresis) 损耗

- ◆ 铁磁材料在交变磁场的作用下反复磁化时，内部的磁畴不停地往返倒转，磁畴之间不停地互相磨擦而消耗能量，引起的损耗。





§ 1-2 电器中的热源

■ 介质损耗

- ◆ 电介质中的带电质点在**交变电场**的作用下，往复的移动和重新排列，而质点来回移动需要克服质点间的相互作用力，即分子之间的内摩擦力，由此造成的能量损耗称为介质损耗。
- ◆ 与**电场强度**和**频率**有关
- ◆ **介质损耗角** ($\tan\delta$) 表征介质损耗的大小：**电介质内流过的电流向量和电压向量之间的夹角的余角**



第一章 电器导体的发热计算

§ 1-1 电器的允许温升

§ 1-2 电器中的热源

§ 1-3 电器中的热传递形式

§ 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式

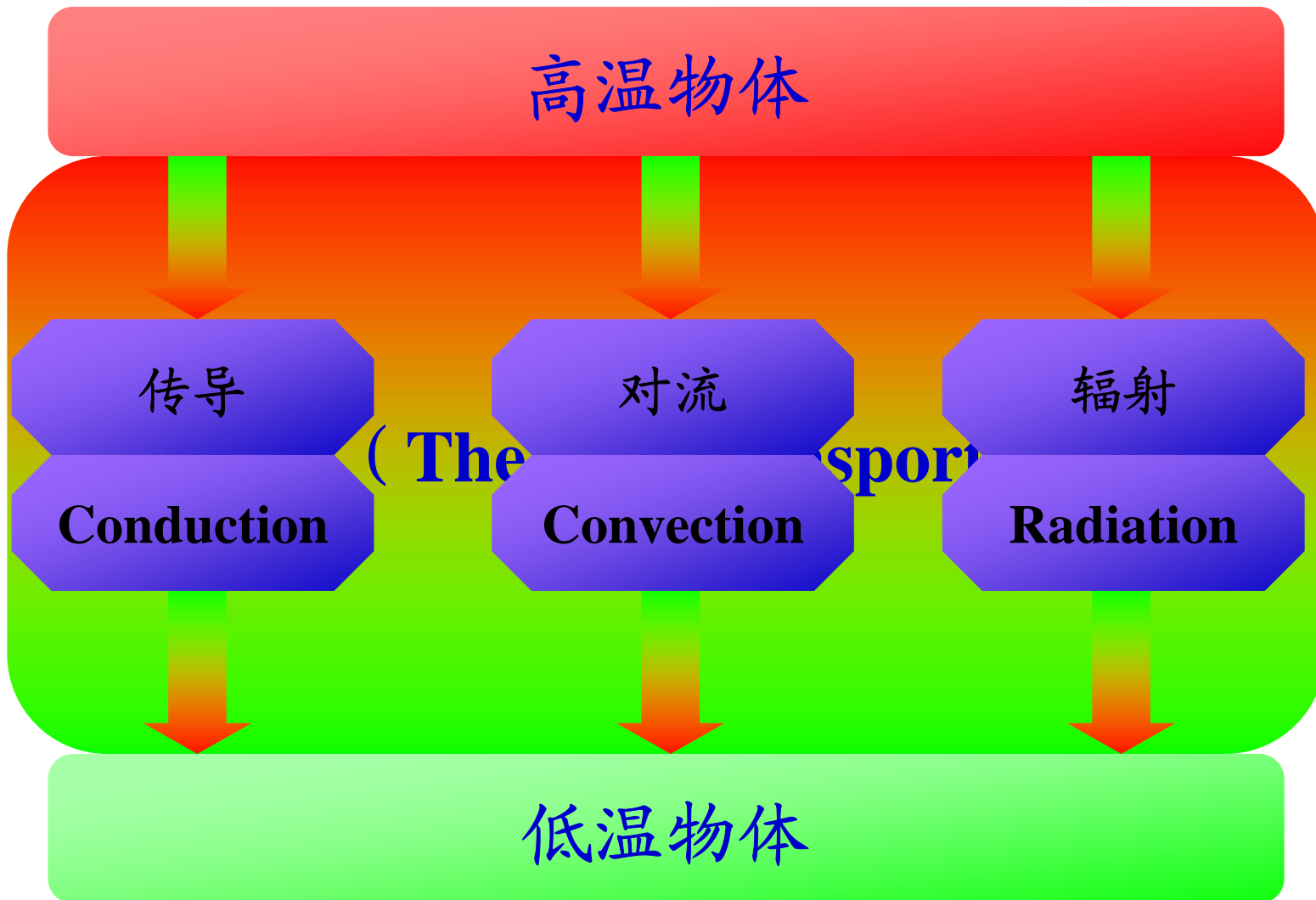
§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性



§ 1-3 电器中的热传递形式

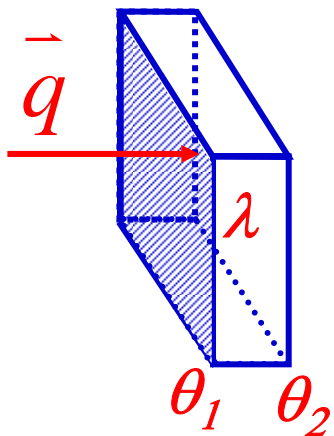




§ 1-3 电器中的热传递形式

■ 热传导

- ◆ **傅里叶定律**: 单位时间内通过物体单位面积的热量与该处的温度梯度成正比。



$$\vec{q} = -\lambda \nabla \theta$$

负号表示热量的传递方向与温度梯度相反，即向温度降低的方向传递

- \vec{q} : 能流密度 ($\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$)
- λ : 热导率 ($\text{W}/\text{K}/\text{m}$)

- ◆ 热导率与材料、温度等因素有关



§ 1-3 电器中的热传递形式

■ 热对流

- ◆ 仅在**流体**（液体和气体）中存在，常伴随着热传导
- ◆ 有**层流**（Laminar）和**紊流**（Turbulence）两种形式
- ◆ 对流的方式：**自然对流**和**强迫对流**
- ◆ 自然对流换热公式：

$$P_{dl} = K_{dl} (\theta - \theta_0) A$$

- P_{dl} : 功率 (W)
- K_{dl} : 对流换热系数 (W/m²/K)
- θ : 发热体表面温度 (K)
- θ_0 : 流体介质温度 (K)
- A : 冷却表面面积 (m²)



§ 1-3 电器中的热传递形式

■ 热辐射

- ◆ 由电磁波传播能量的方式
- ◆ 斯忒藩-玻尔兹曼定律

$$P_{fs} = \sigma \varepsilon_f (T_2^4 - T_1^4)$$

- P_{fs} : 单位面积的辐射功率 (W/m^2)
- σ : 斯忒藩-玻尔兹曼系数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4$)
- ε_f : 发射率
- T_2 : 发热体表面温度 (K)
- T_1 : 接收辐射物体的温度 (K)



第一章 电器导体的发热计算

§ 1-1 电器的允许温升

§ 1-2 电器中的热源

§ 1-3 电器中的热传递形式

§ 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式

§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性



§ 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式

- 工程上常把三种散热（传导、对流、辐射）合并考虑，用牛顿公式计算

$$P_s = K_T A \tau$$

- P_s : 总散热功率 (W)
- A : 有效散热面积 (m^2)
- τ : 发热体温升 (K)
 $\tau = \theta - \theta_0$ (θ : 发热体温度; θ_0 : 周围介质温度)
- K_T : 综合散热系数 ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)



§ 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式

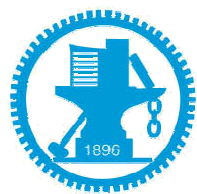
■ 电器中线圈的综合散热系数公式

◆ 当散热面积为 $A=(1\sim 100) \times 10^{-4}\text{m}^2$ 时

$$K_T = 46 \left[1 + 0.005(\theta - \theta_0) \right] / \sqrt[3]{A \times 10^4}$$

◆ 当散热面积为 $A=(0.01\sim 0.05) \text{m}^2$ 时

$$K_T = 23 \left[1 + 0.05(\theta - \theta_0) \right] / \sqrt[3]{A \times 10^4}$$



第一章 电器导体的发热计算

- § 1-1 电器的允许温升
- § 1-2 电器中的热源
- § 1-3 电器中的热传递形式
- § 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式
- § 1-5 不同工作制下电器的热计算
- § 1-6 电器典型部件的稳定温升分布
- § 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

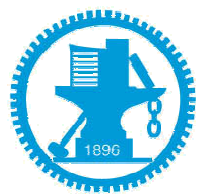
■ 电器有四种工作制

◆ 长期工作制

◆ 八小时工作制

◆ 短时工作制

◆ 反复短时工作制



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 根据热平衡原理

发热

=

散热

+

升温

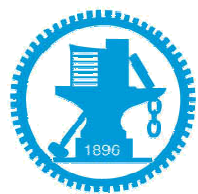
$$Pdt = K_T A \tau dt + cmd\tau$$

dt 时间内的
总发热量

dt 时间内的
总散热量

dt 时间内的温度升高
 $d\tau$ 时所吸收的热量

- dt : 时间间隔 (s)
- P : 总发热功率 (W)
- K_T : 综合散热系数 ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)
- A : 有效散热面积 (m^2)
- τ : 发热体温升 (K)
 $\tau = \theta - \theta_0$ (θ : 发热体温度; θ_0 : 周围介质温度)
- c : 比热 ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$)
- m : 质量 (kg)
- $d\tau$: 温升变化量 (K)



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

◆ 工作时间通常 > 8小时

一阶常系数线性微分方程

$$Pdt = K_T A \tau dt + cm d\tau \longrightarrow \frac{cm}{K_T A} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{P}{K_T A}$$

$$\frac{P}{K_T A} : t \rightarrow \infty \longrightarrow d\tau \rightarrow 0 \longrightarrow \tau = \tau_w = \frac{P}{K_T A}$$

● τ_w : 电器经过无限长时间后的稳定温升 (K)

$$\frac{cm}{K_T A} = T$$

● T : 电器的热时间常数 (s)



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

$$\frac{cm}{K_T A} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{P}{K_T A}$$
$$\frac{P}{K_t A} = \tau_w$$
$$\frac{cm}{K_T A} = T$$
$$T \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_w$$



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

$$T \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_w$$

$$\begin{cases} t = 0 & \tau = \tau_0 \\ t = \infty & \tau = \tau_w \end{cases}$$

- τ_w : 电器经过无限长时间后的**稳定温升** (K)
- τ_0 : 电器开始通电时的**起始温升** (K)

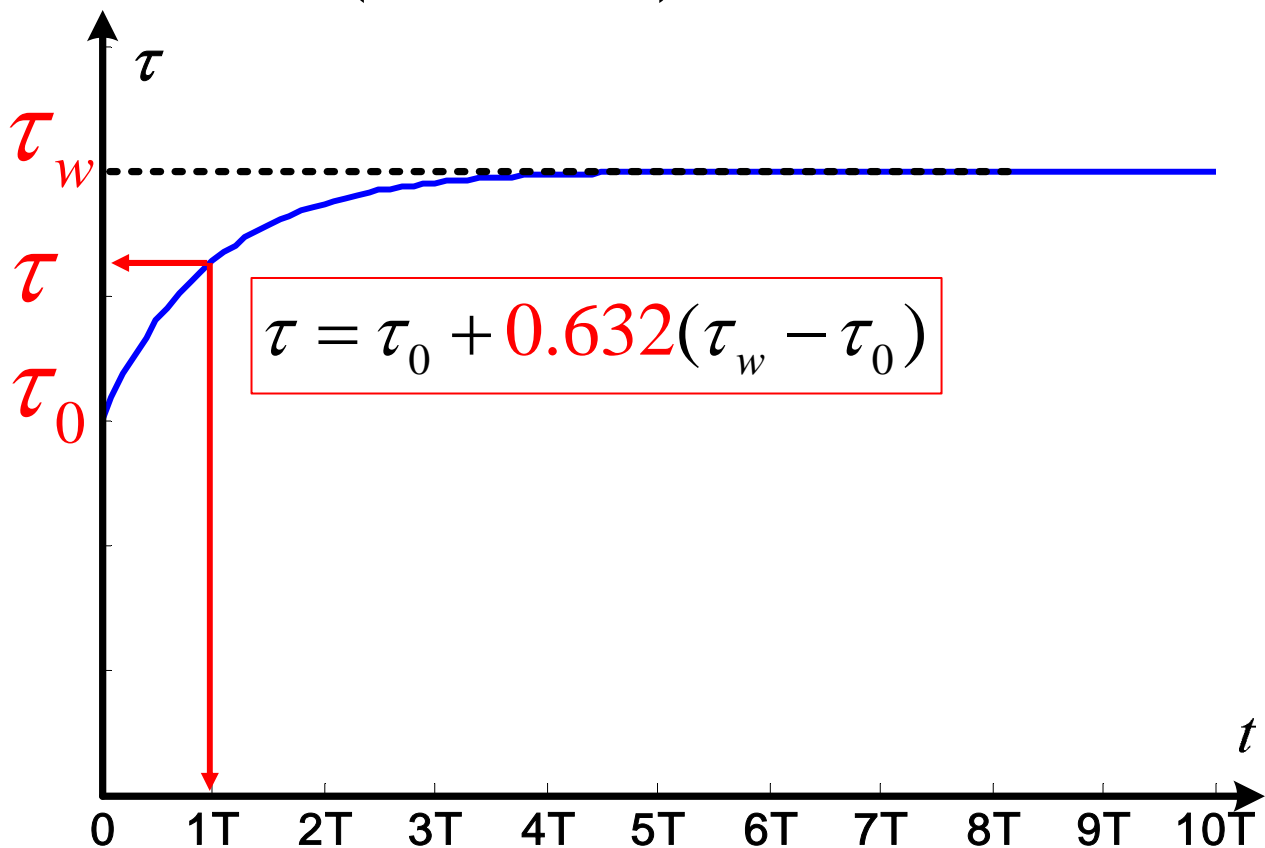
$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-t/T} \right) + \tau_0 e^{-t/T}$$



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-t/T}\right) + \tau_0 e^{-t/T}$$





§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-t/T} \right) + \tau_0 e^{-t/T}$$

◆ $\tau_0=0$ 时

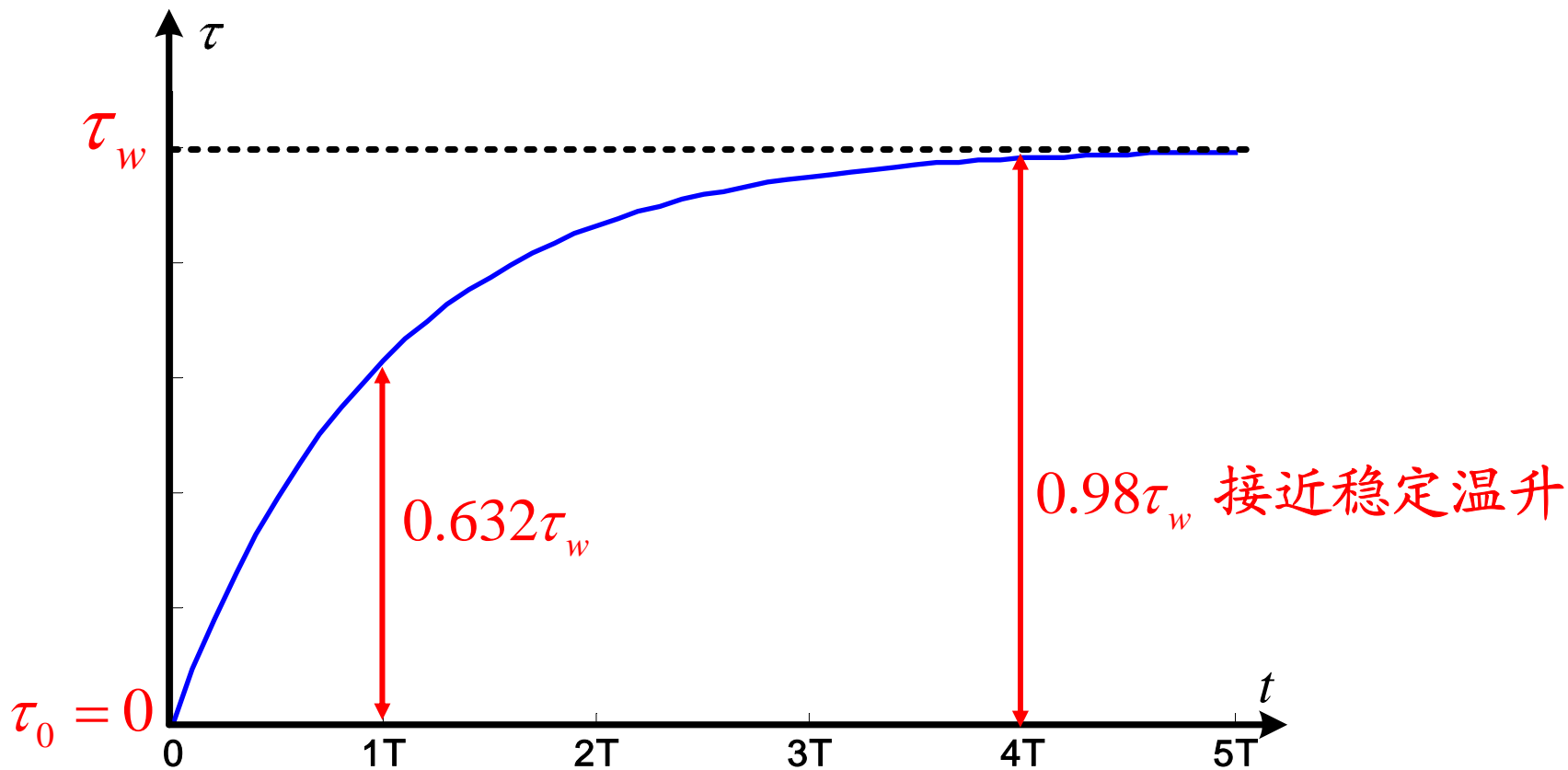
$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-t/T} \right)$$



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-t/T} \right)$$





§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

◆ 若发热全被吸收，散热为零，即绝热过程

$$Pdt = K_T A \tau dt + cm d\tau \xrightarrow{K_T A \tau dt = 0} \frac{d\tau}{dt} = \frac{P}{cm}$$

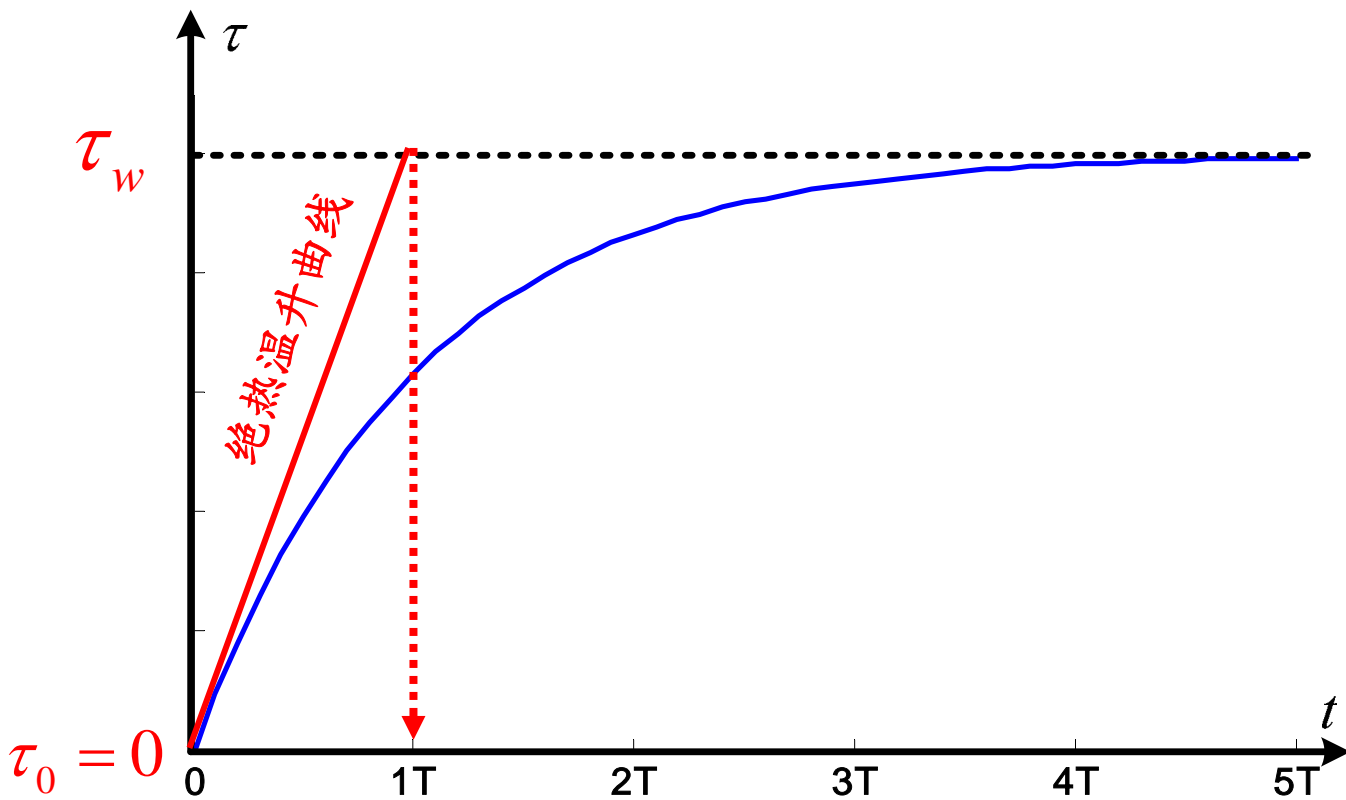
◆ $t=T$ 时

$$\tau = \frac{P}{cm} \times T = \frac{P}{cm} \times \frac{cm}{K_t A} = \frac{P}{K_t A} = \tau_w$$



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制 - 绝热情况



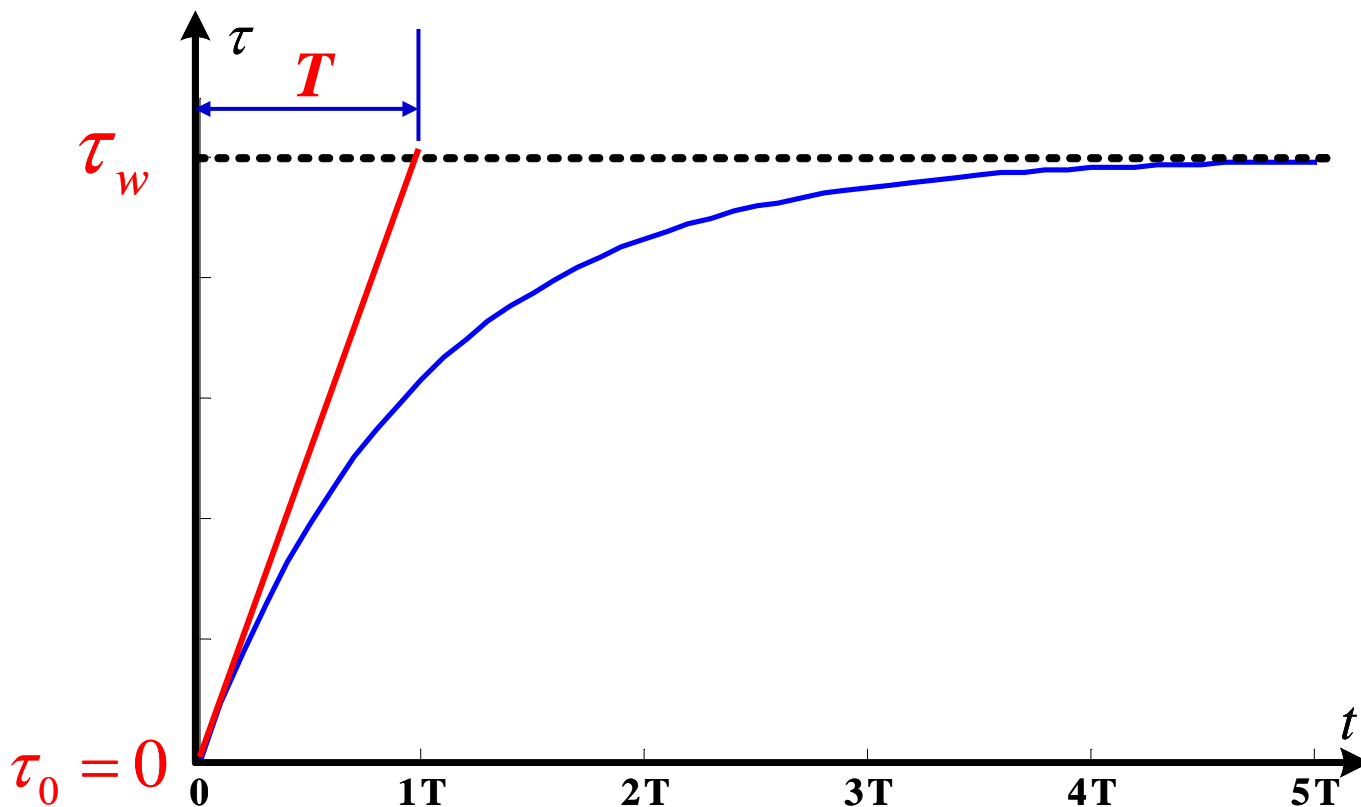
◆ 绝热条件下 τ 达到 τ_w 所需时间恰好为 T



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 热时间常数 T 的物理意义

◆ 电器在绝热条件下温升达到 τ_w 所需的时间

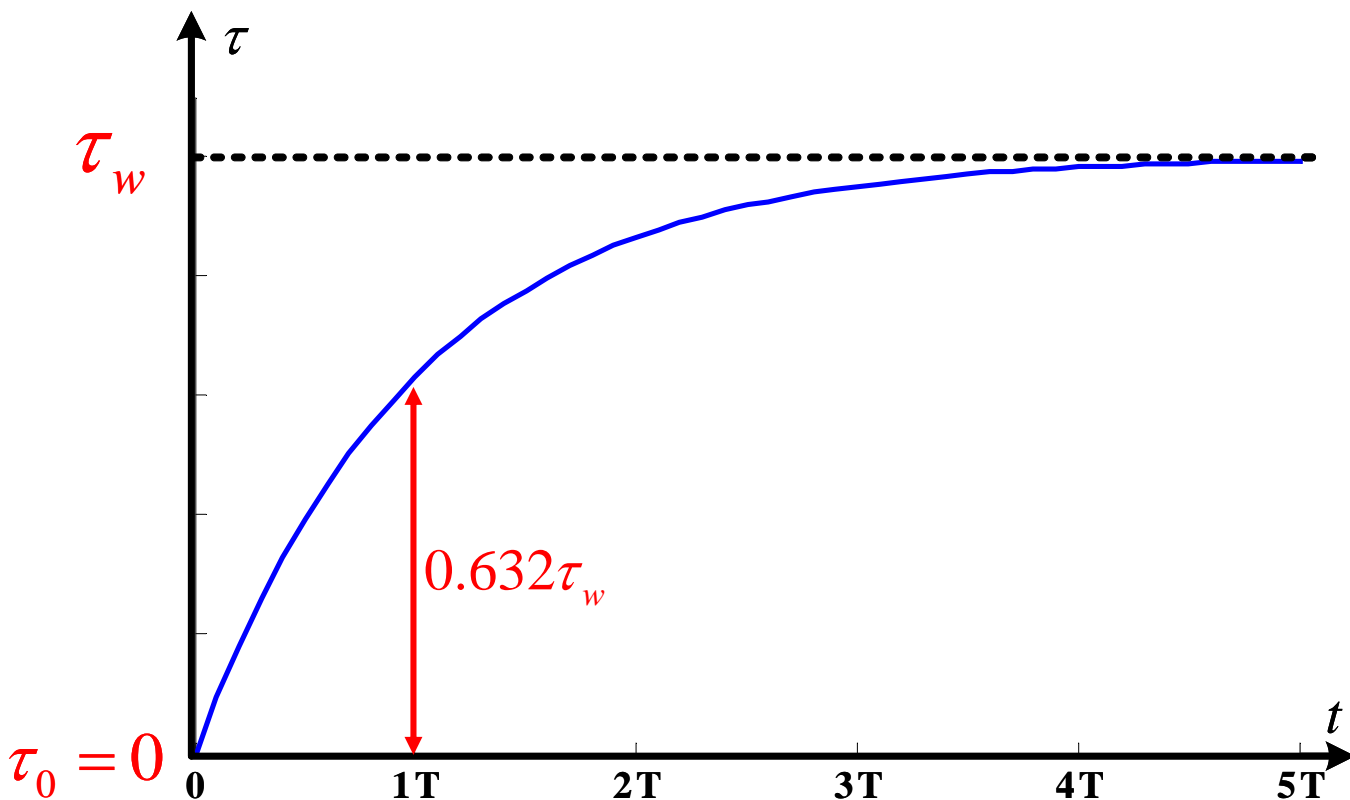




§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 热时间常数 T 的物理意义

- ◆ 电器在绝热条件下温升达到 τ_w 所需的时间
- ◆ 在非绝热情况下，温升从零上升到 $0.632\tau_w$ 所需的时间



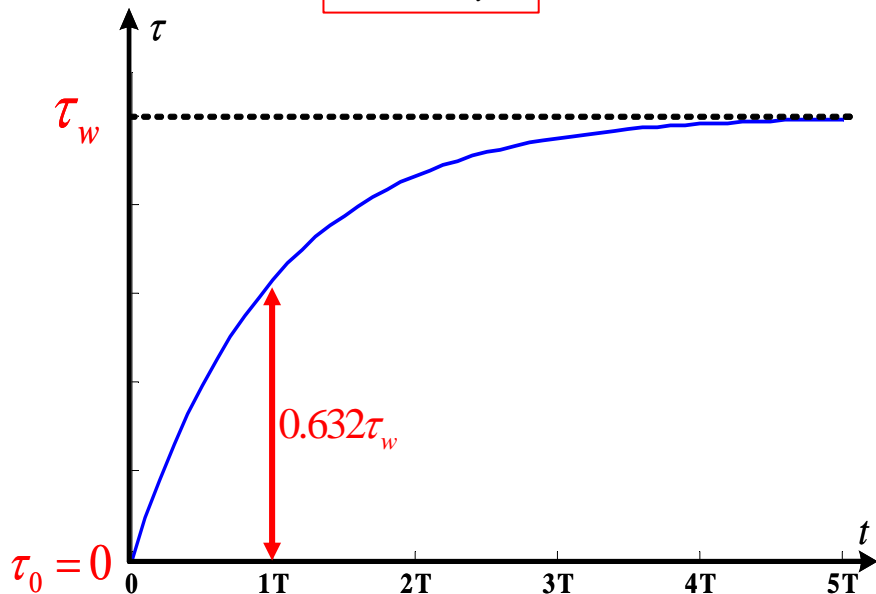


§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

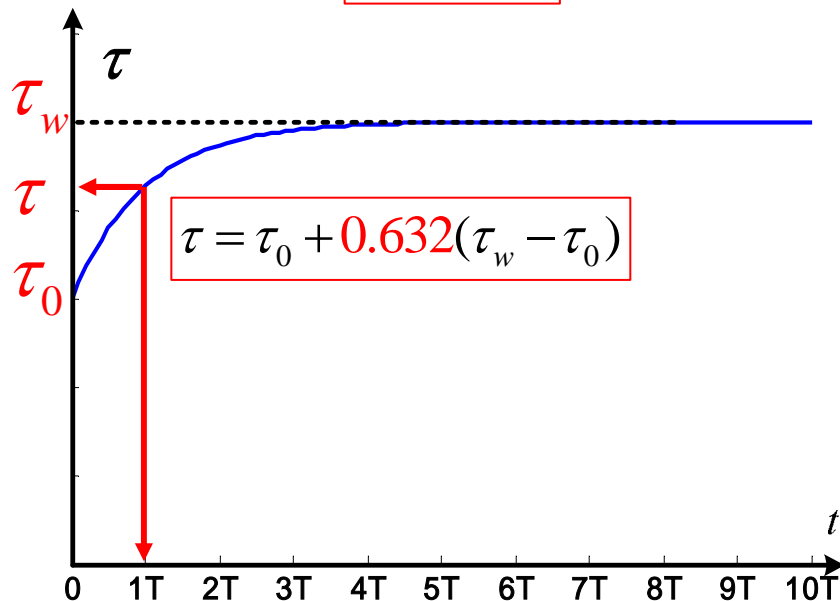
■ 热时间常数 T 的物理意义

- ◆ 电器的稳定温升与初始温升无关
- ◆ 热时间常数表征温升上升的快慢

$$\tau_w = \frac{P}{K_t A}$$



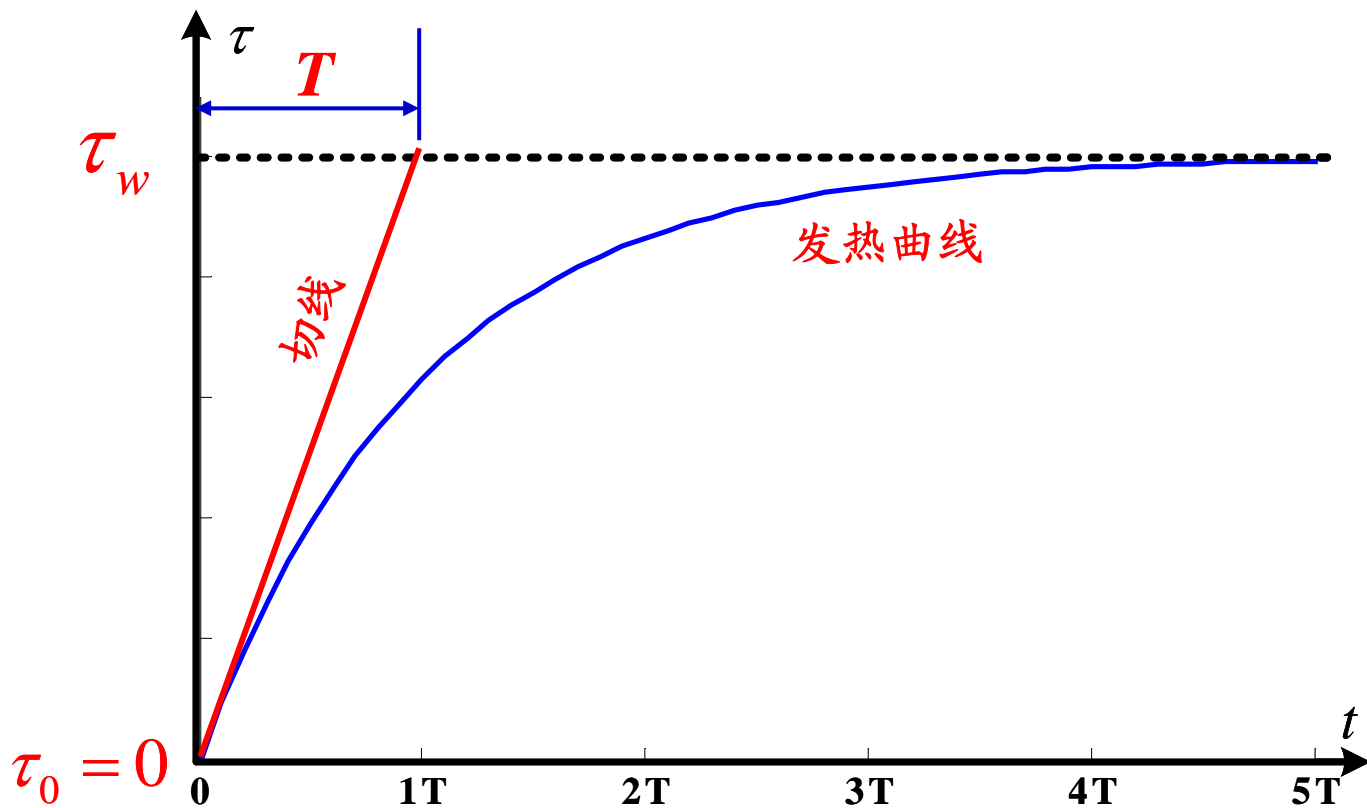
$$\tau_w = \frac{P}{K_t A}$$





§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 已知发热曲线，求热时间常数 T 的作图法



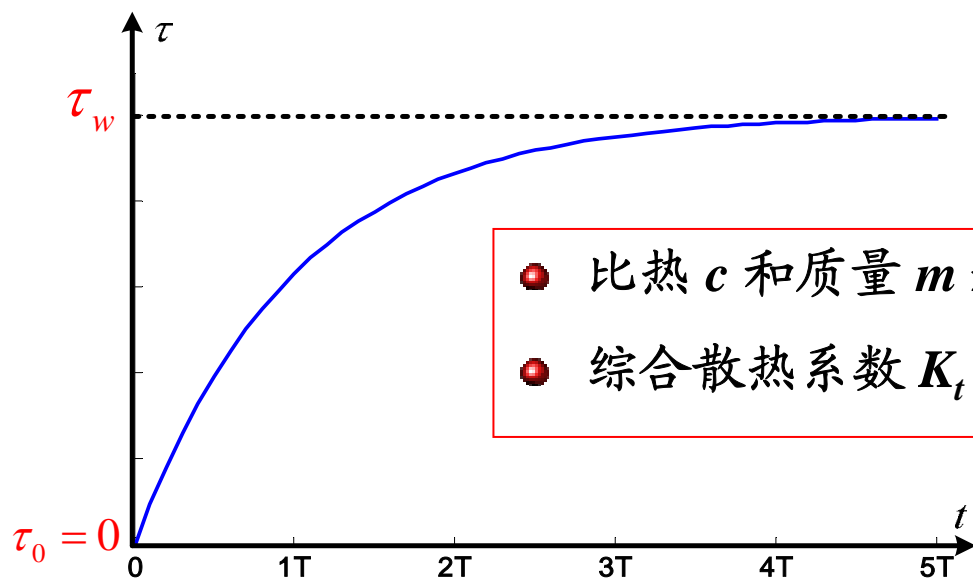
如果真是绝热情况，发热过程会怎样？



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 电器的热惯性

- ◆ 温升不能随时间瞬时变化的现象称为电器的热惯性
- ◆ 热时间常数 T 是代表热惯性大小的主要参量



$$T = \frac{cm}{K_T A}$$

- 比热 c 和质量 m 越大，则时间常数越大
- 综合散热系数 K_T 和散热面积 A 越小，则时间常数越大



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 长期工作制

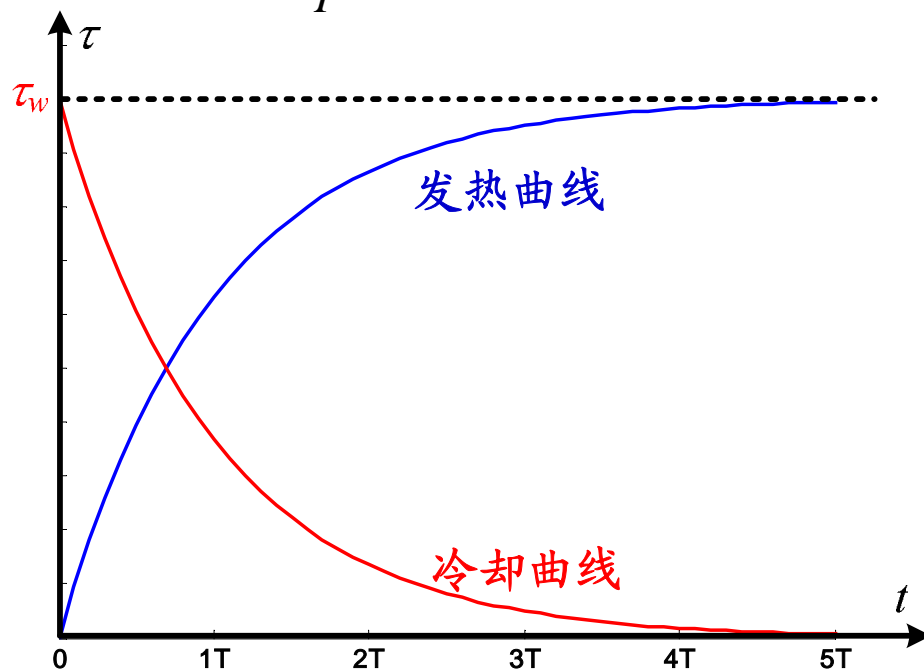
◆ 切断电源，温升下降，则热平衡方程变为冷却方程

$$Pdt = K_T A \tau dt + cmd\tau \xrightarrow{Pdt = 0} K_T A \tau dt + cmd\tau = 0$$



$$\tau = \tau_w e^{-t/T}$$

◆ 冷却曲线是发热曲线的镜像



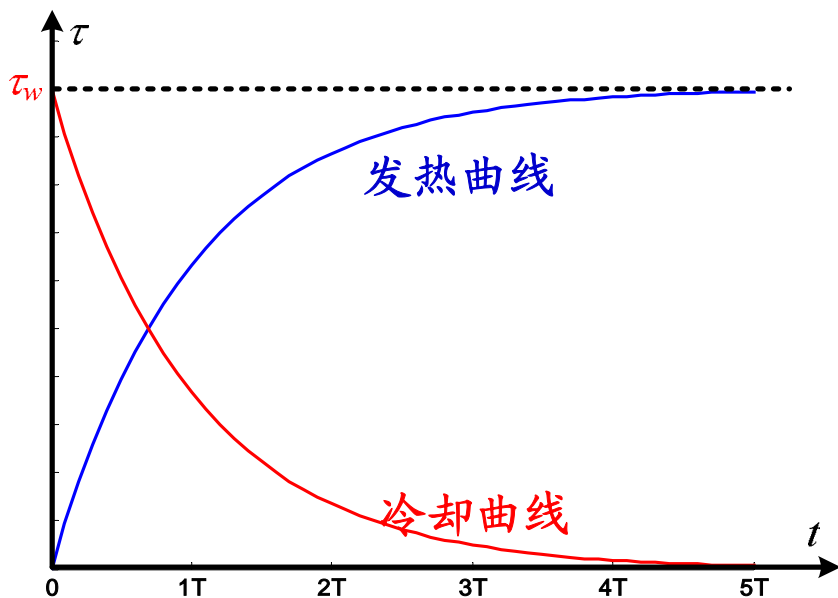


§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

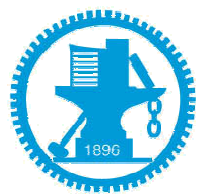
■ 长期工作制

- ◆ 通电或断电时间超过**4T**时，电器的热过程已基本达到稳定。
- ◆ 通电（或断电）时间超过**4T**，即可按长期工作制考虑，不必要求工作时间大于**8小时**。
- ◆ 长期工作制下发热计算公式

$$P = K_T A \tau_w$$



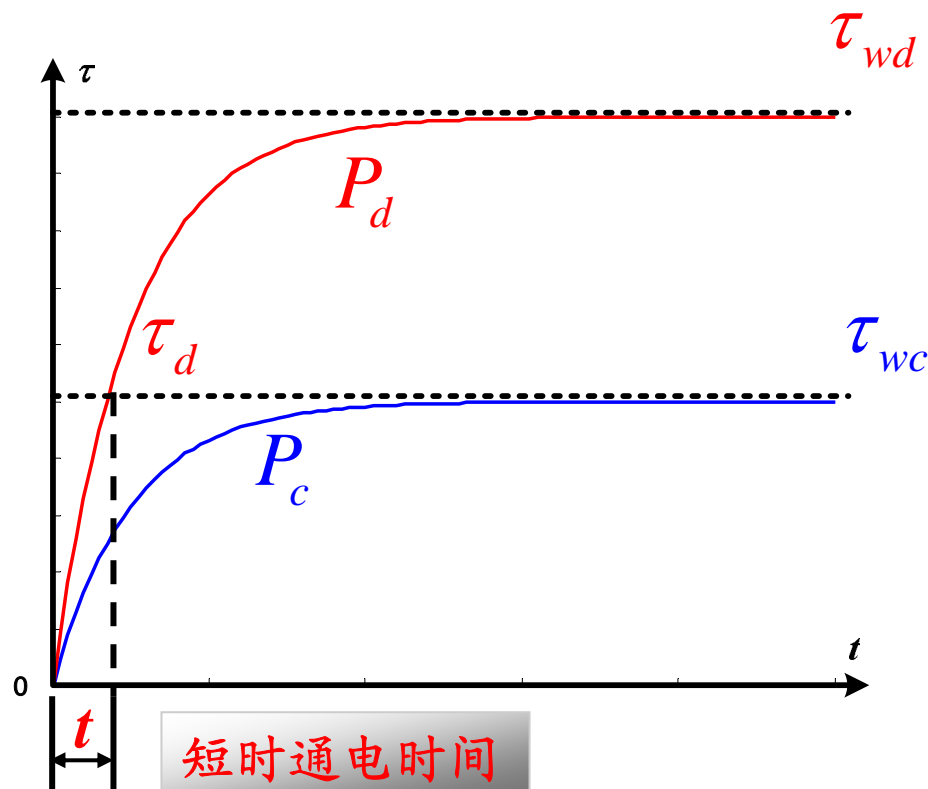
$$t = \infty, \tau = \tau_w = \frac{P}{K_T A}$$

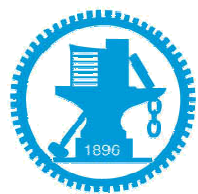


§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 短时工作制

- ◆ 工作时间 $< 4T$ ， τ 不会达到 τ_w
- ◆ 为使电器得到充分利用，运行电流可**超载** ($P_d > P_c$)
- ◆ 只要温升不超过长期通电时的稳定温升即可

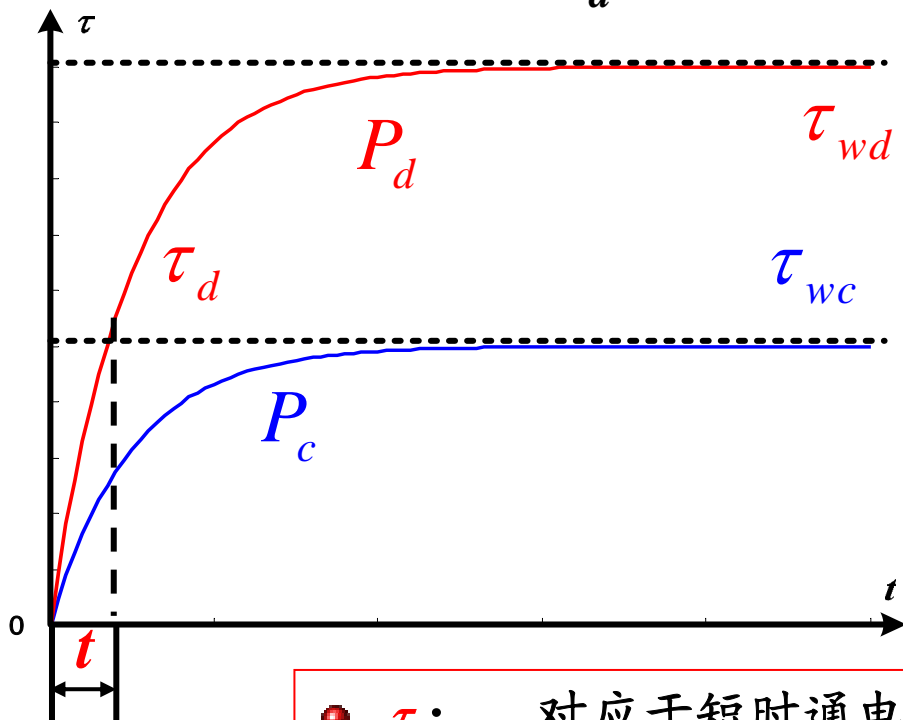




§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 短时工作制

◆ 使短时发热的温升 τ_d 小于长时发热的稳定温升 τ_{wc}



$$\tau_d = \tau_{wd} \left(1 - e^{-t/T} \right) = \tau_{wc}$$

- τ_d : 对应于短时通电时间 t 末的短时温升
- τ_{wd} : 对应于短时工作功率 P_d 下的电器稳定温升
- τ_{wc} : 对应于长期工作功率 P_c 下的电器稳定温升



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 短时工作制

◆ 使短时发热的温升 τ_d 小于长时发热的稳定温升 τ_{wc}

$$\tau_d = \tau_{wd} \left(1 - e^{-t/T} \right) = \tau_{wc}$$

◆ 功率过载系数

$$P = K_T A \tau_w$$

$$p_p = \frac{P_d}{P_c} = \frac{\tau_{wd}}{\tau_{wc}} = \frac{1}{1 - e^{-t/T}}$$

◆ 电流过载系数

$$p_i = \frac{I_d}{I_c} = \sqrt{p_p}$$



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 短时工作制

$$p_p = \frac{P_d}{P_c} = \frac{\tau_{wd}}{\tau_{wc}} = \frac{1}{1 - e^{-t/T}}$$

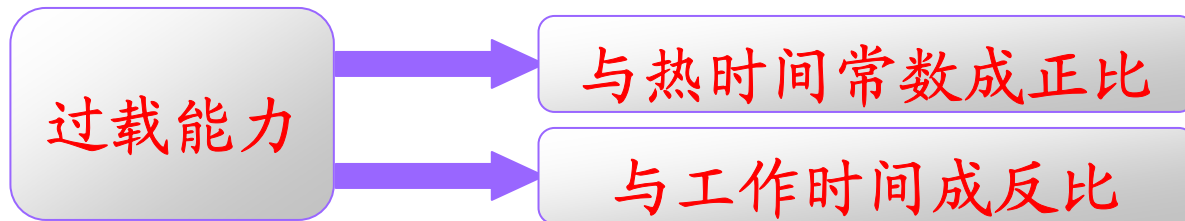
$$p_i = \frac{I_d}{I_c} = \sqrt{p_p}$$

◆ 若短时工作时间远小于热时间常数 ($t \ll T$)

$$e^{-t/T} = 1 - \frac{t}{T} + \dots$$

$$p_p = \frac{T}{t}$$

$$p_i = \sqrt{\frac{T}{t}}$$

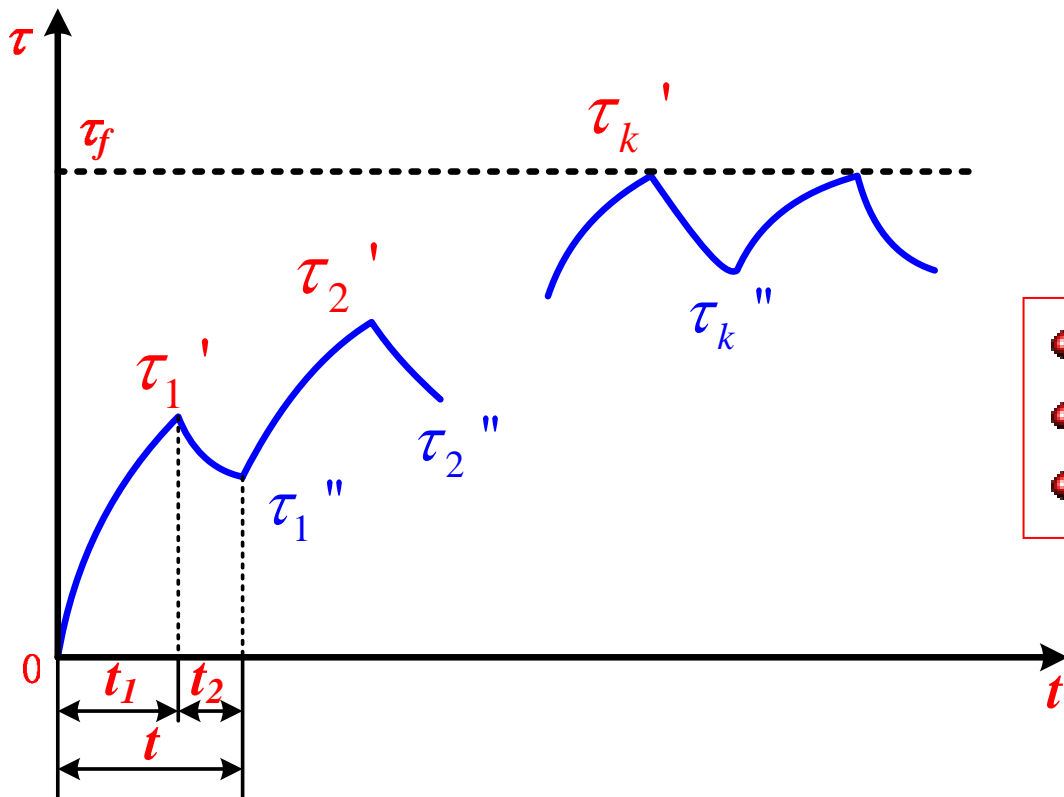




§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 反复短时工作制

◆ 通电断电交替循环，通电和断电时间均 $<4T$



- t_1 : 通电时间
- t_2 : 断电时间
- t : 工作周期 ($t = t_1 + t_2$)



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 反复短时工作制

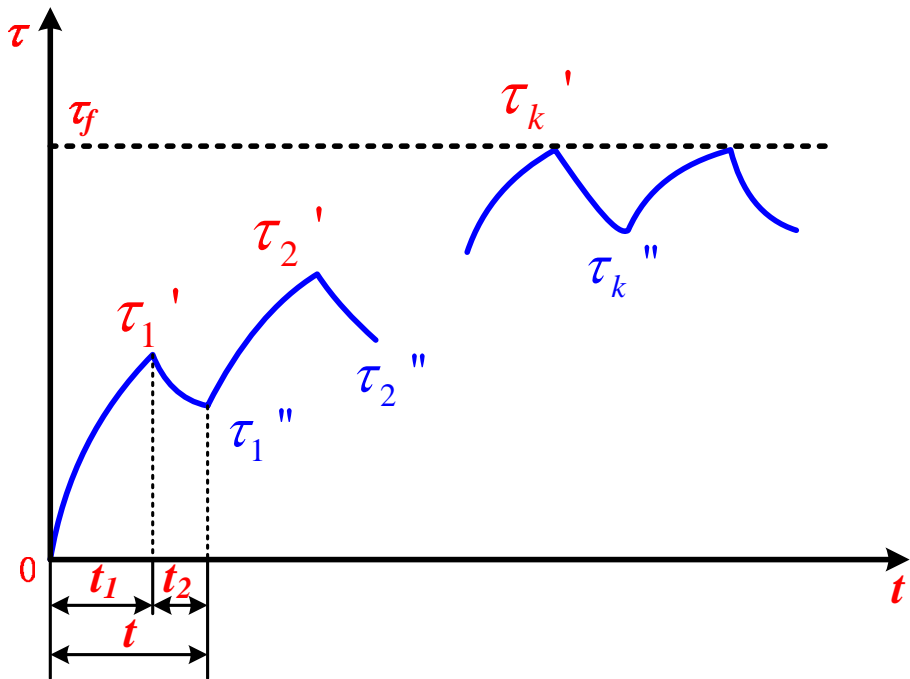
- P_f : 反复短时工作的功率
- τ_{wf} : 功率 P_f 对应的稳定温升

$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-t/T} \right) + \tau_0 e^{-t/T}$$

第1个周期

升温: $\tau_1' = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T})$

降温: $\tau_1'' = \tau_1' e^{-t_2/T} = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) e^{-t_2/T}$





§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 反复短时工作制

第1个周期

升温: $\tau_1' = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T})$

降温: $\tau_1'' = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) e^{-t_2/T}$

$$\tau = \tau_w (1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T}$$

第2个周期

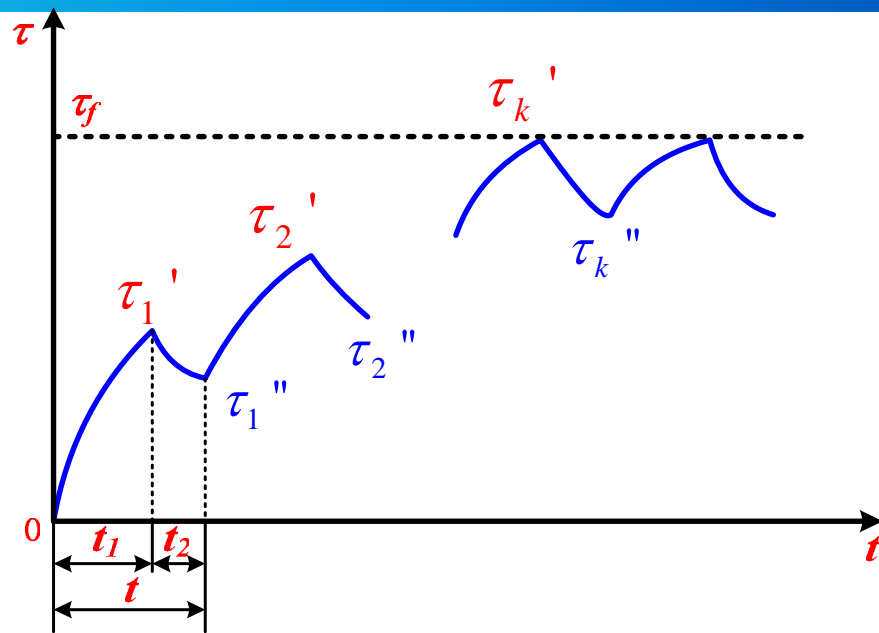
升温: $\tau_2' = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) + \tau_1'' e^{-t_1/T}$

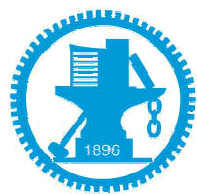
$$= \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) + \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) e^{-(t_1+t_2)/T}$$

$$= \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) \left[1 + e^{-(t_1+t_2)/T} \right]$$

降温:

$$\tau_2'' = \tau_2' e^{-t_2/T}$$





§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 反复短时工作制

第2个周期

$$\text{升温: } \tau_2' = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) \left[1 + e^{-(t_1+t_2)/T} \right]$$

$$\text{降温: } \tau_2'' = \tau_2' e^{-t_2/T}$$

第k个周期

$$\text{升温: } \tau_k' = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) \left[1 + e^{-(t_1+t_2)/T} + e^{-2(t_1+t_2)/T} + \dots + e^{-(k-1)(t_1+t_2)/T} \right]$$

$$= \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) \frac{1 - e^{-k(t_1+t_2)/T}}{1 - e^{-(t_1+t_2)/T}}$$

$$\text{降温: } \tau_k'' = \tau_k' e^{-t_2/T}$$



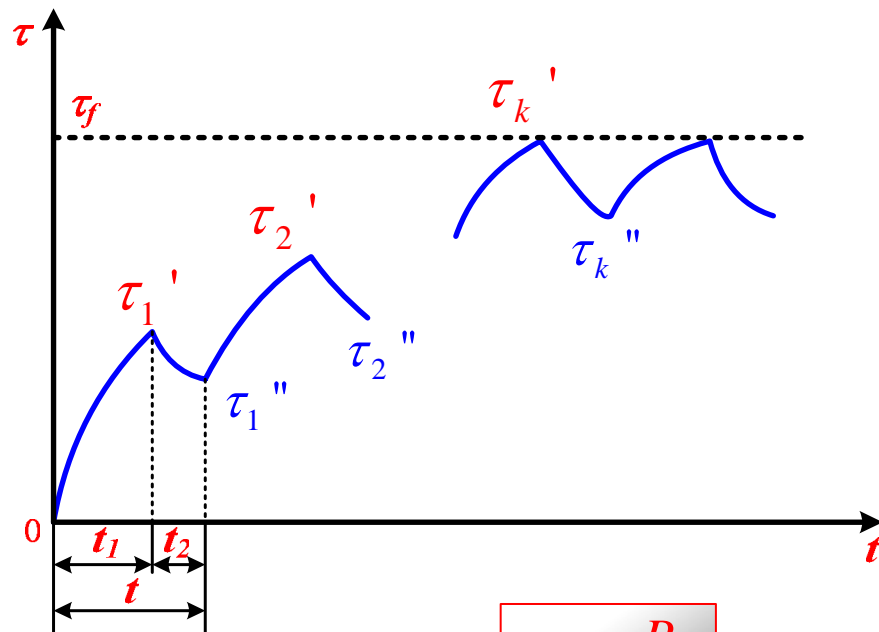
§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 反复短时工作制

第k个周期

升温: $\tau_k' = \tau_{wf} (1 - e^{-t_1/T}) \frac{1 - e^{-k(t_1+t_2)/T}}{1 - e^{-(t_1+t_2)/T}}$

降温: $\tau_k'' = \tau_k' e^{-t_2/T}$



第k个周期的温升 τ_k'

=

长期工作 P_c 对应的稳定温升 τ_{wc}

$$\tau_w = \frac{P}{K_t A}$$

◆ 功率过载系数 $P_p = \frac{P_f}{P_c} = \frac{\tau_{wf}}{\tau_{wc}} = \frac{\tau_{wf}}{\tau_k'} = \frac{1}{1 - e^{-t_1/T}} \frac{1 - e^{-(t_1+t_2)/T}}{1 - e^{-k(t_1+t_2)/T}}$



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 反复短时工作制

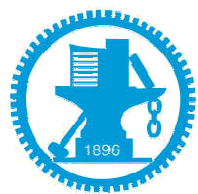
◆ 功率过载系数 $P_p = \frac{1}{1 - e^{-t_1/T}} \frac{1 - e^{-(t_1+t_2)/T}}{1 - e^{-k(t_1+t_2)/T}}$

若 $t \ll T$, 且 $k \rightarrow \infty$

$$P_p = \frac{1}{1 - (1 - \frac{t_1}{T})} \frac{1 - (1 - \frac{t}{T})}{1 - 0} = \frac{T}{t_1} \frac{t}{T} = \frac{t}{t_1}$$

◆ 电流过载系数

$$P_i = \sqrt{P_p} = \sqrt{t/t_1}$$



§ 1-5 不同工作制下电器的热计算

■ 反复短时工作制

◆ 功率过载系数

$$P_p = \frac{t}{t_1}$$

◆ 电流过载系数

$$P_i = \sqrt{t/t_1}$$

◆ 电器标准中通常用**通电持续率TD%**表示反复短时工作制的繁重程度

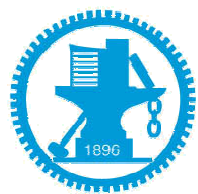
$$\text{TD}\% = \frac{t_1}{t}$$

◆ 功率过载系数

$$P_p = 1/(\text{TD}\%)$$

◆ 电流过载系数

$$P_i = \sqrt{1/(\text{TD}\%)}$$

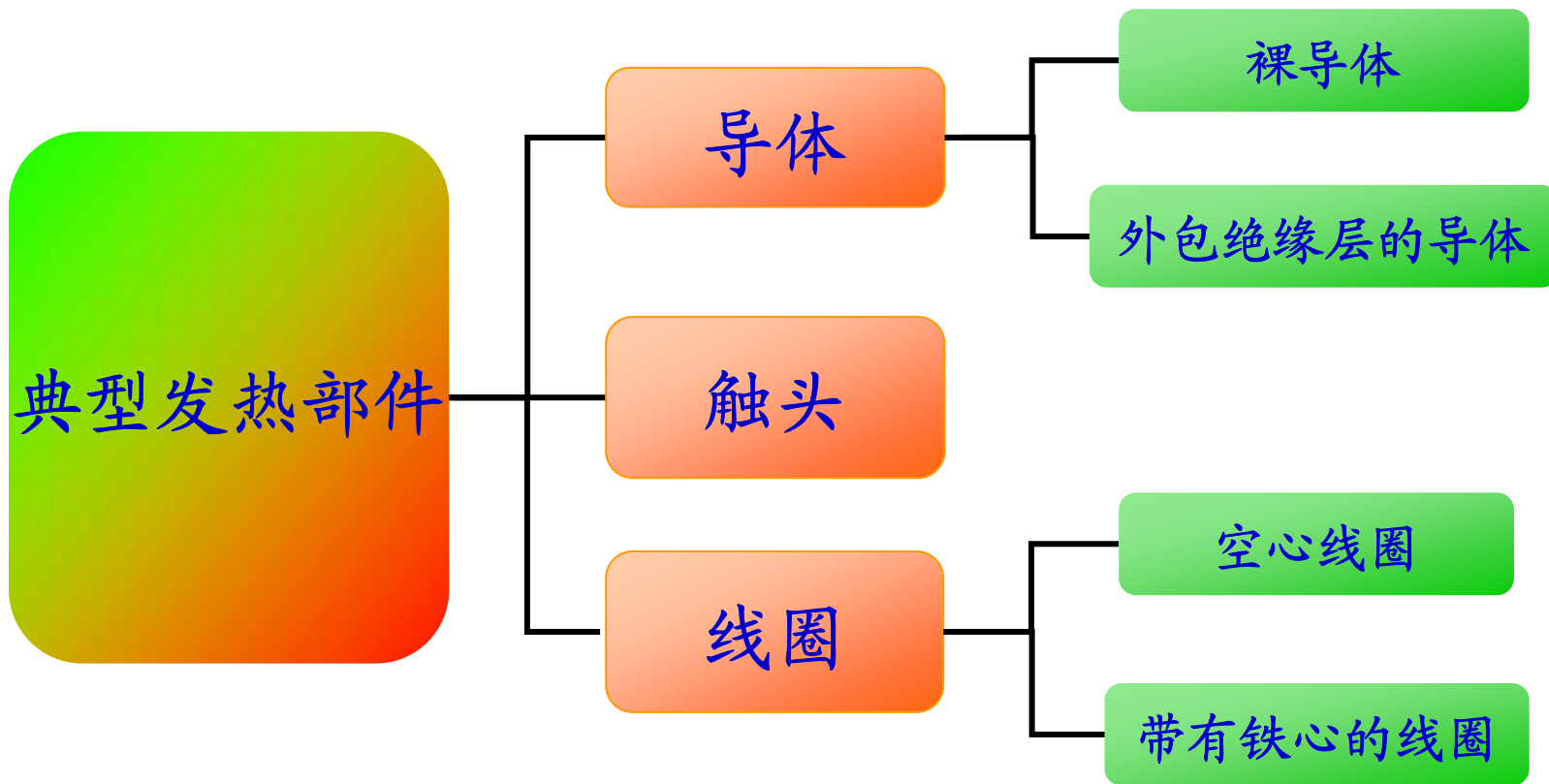


第一章 电器导体的发热计算

- § 1-1 电器的允许温升
- § 1-2 电器中的热源
- § 1-3 电器中的热传递形式
- § 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式
- § 1-5 不同工作制下电器的热计算
- § 1-6 电器典型部件的稳定温升分布**
- § 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性



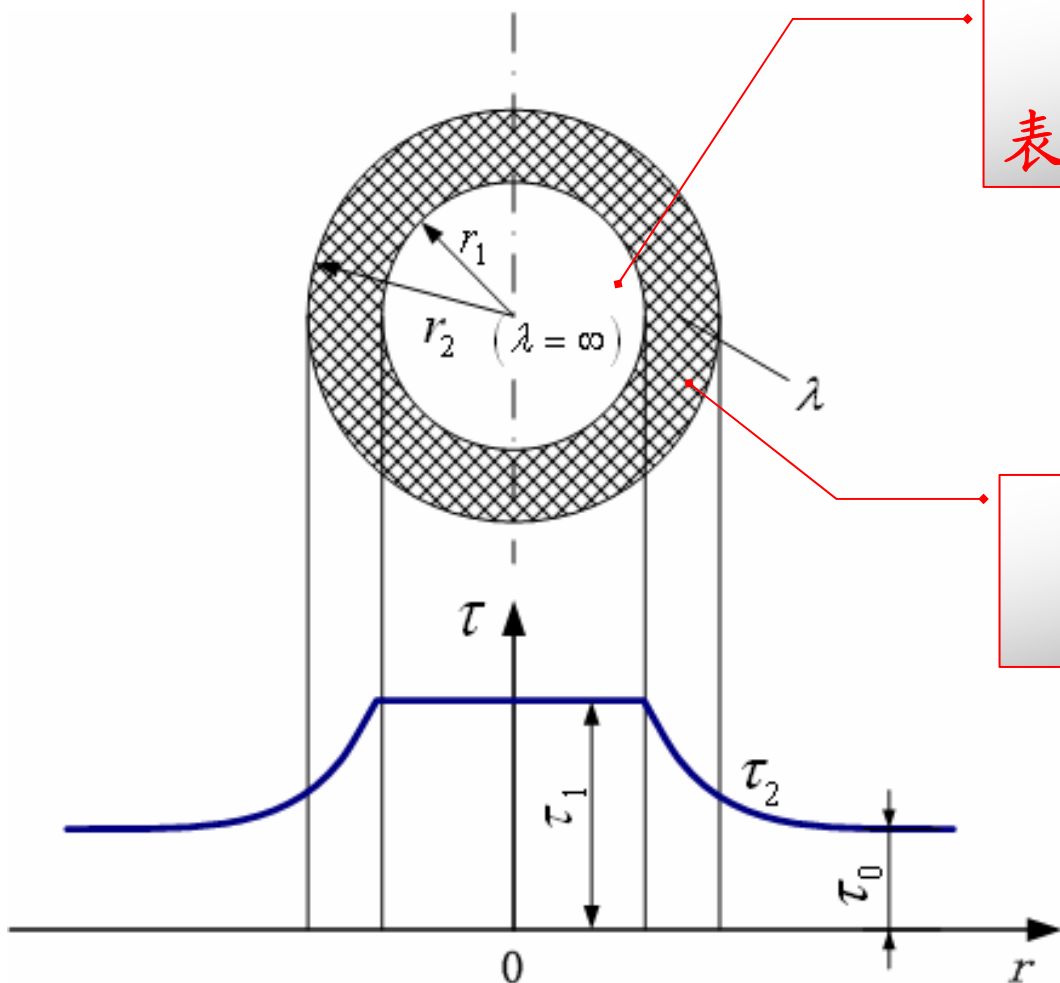
§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布





§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 外包绝缘层的均匀截面导体



裸导体热导率大
表面与内部温度基本相同

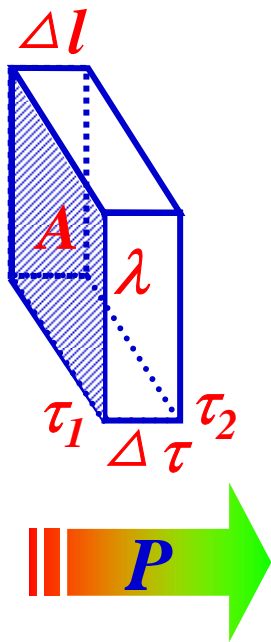
绝缘层热导率小
产生较大温度降落



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 外包绝缘层的均匀截面导体

◆ “场”问题“路”化



- 平板厚度: Δl
- 截面积: A
- 热导率: λ
- 温度差: $\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2$

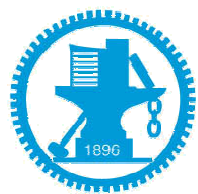
单位时间传导的热量?

傅里叶定律

$$\vec{q} = -\lambda \nabla \theta$$

负号表示热量的传递方向与温度梯度相反，即向温度降低的方向传递

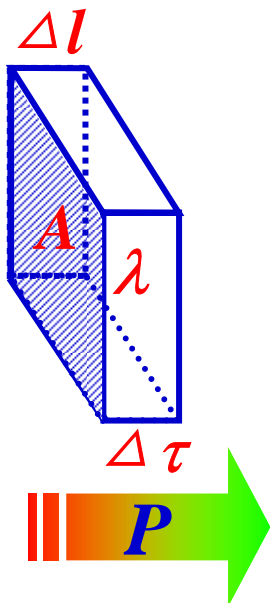
- \vec{q} : 能流密度 ($\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$)
- λ : 热导率 ($\text{W}/\text{K}/\text{m}$)



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 外包绝缘层的均匀截面导体

◆ “场”问题“路”化



单位时间传导的热量？

$$\vec{q} = -\lambda \nabla \theta$$

$$q = \frac{P}{A} = \lambda \frac{\Delta \tau}{\Delta l} \longrightarrow P = A \lambda \frac{\Delta \tau}{\Delta l}$$

$$\longrightarrow P = \frac{\Delta \tau}{\frac{1}{\lambda} \frac{\Delta l}{A}} \longrightarrow P = \frac{\Delta \tau}{R_T}$$

- 平板厚度: Δl
- 截面积: A
- 热导率: λ
- 温度差: $\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2$

$$\text{热阻: } R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta l}{A}$$



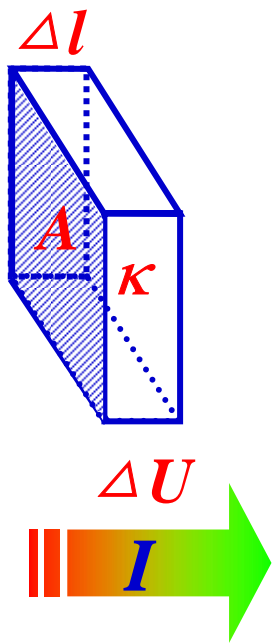
§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 外包绝缘层的均匀截面导体

◆ “场”问题“路”化

◆ 欧姆定律

- 导体长度: Δl
- 截面积: A
- 电导率: κ
- 电位差: ΔU



$$I = \frac{\Delta U}{\frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{A}} = \frac{\Delta U}{R_N}$$

电阻: $R_N = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{A}$

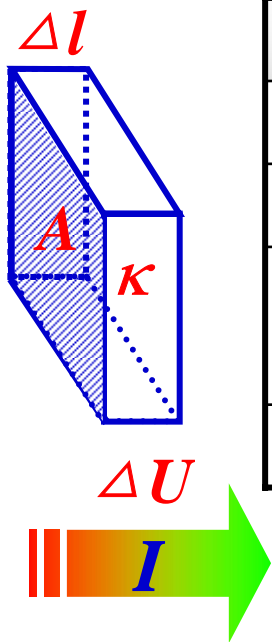


§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

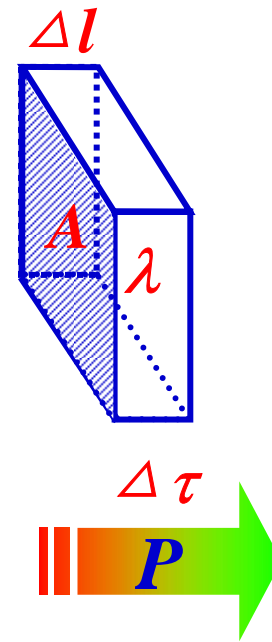
■ 外包绝缘层的均匀截面导体

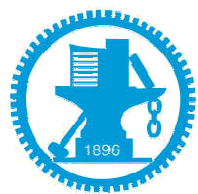
◆ “场”问题“路”化

电路和热路的对应关系



电路	热路
电流: I	热流: P
电位差: ΔU	温度差: $\Delta \tau$
电阻: $R_N = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{A}$	热阻: $R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta l}{A}$
电导率: κ	热导率: λ





§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 外包绝缘层的均匀截面导体

$$P = \frac{\Delta \tau}{R_T} \longrightarrow$$

在一定的 P 作用下, 若已知 R_T , 则可计算 $\Delta \tau$

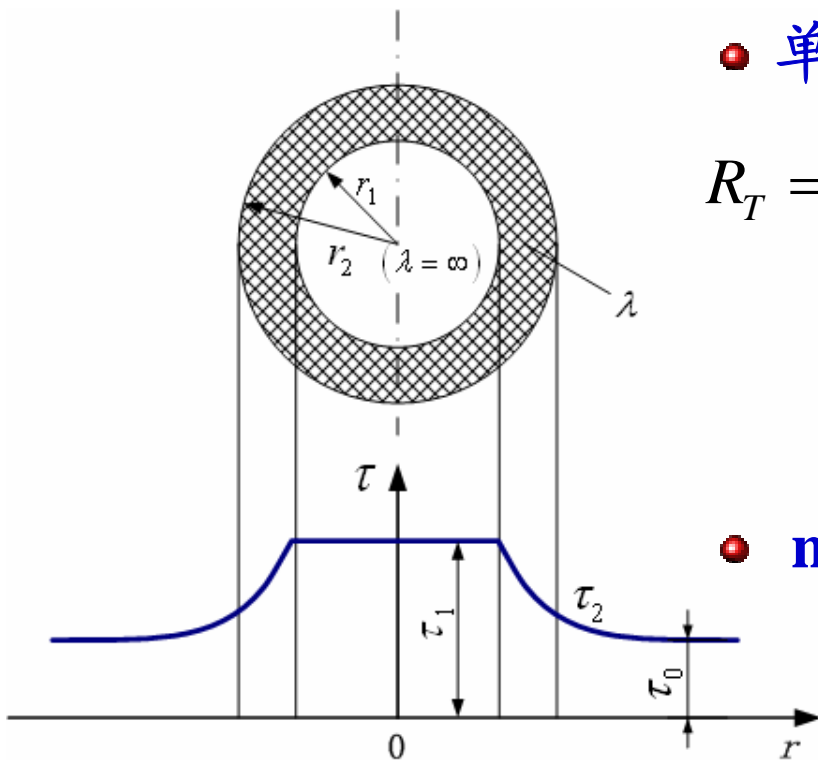
● 单位长度导体绝缘层的热阻

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta l}{A} = \frac{1}{2\pi\lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$\Delta \tau = P \left(\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} \right)$$

● n层绝缘层

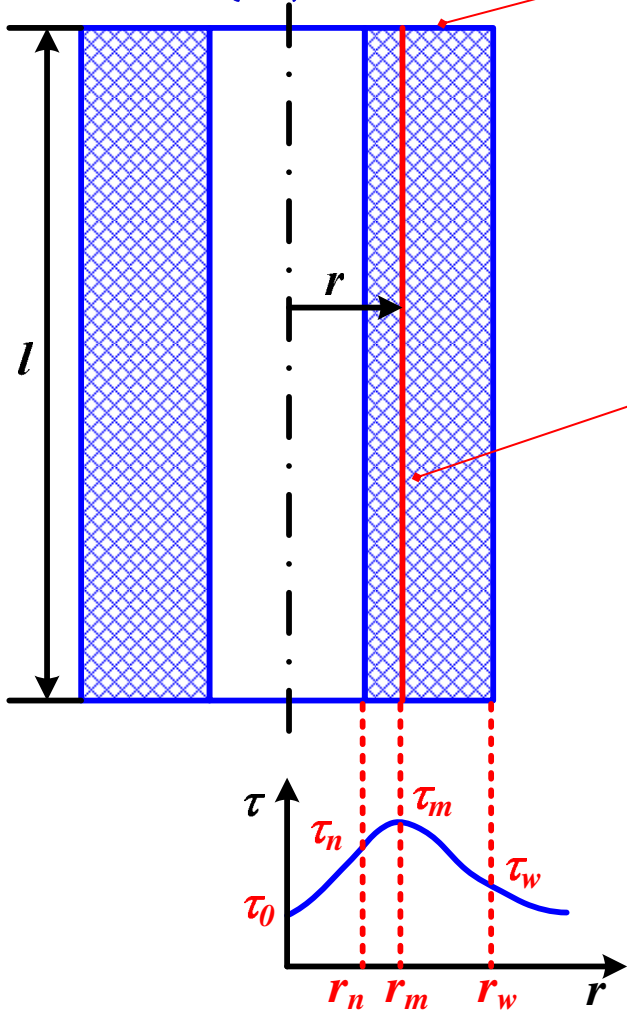
$$R_T = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}$$





§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈



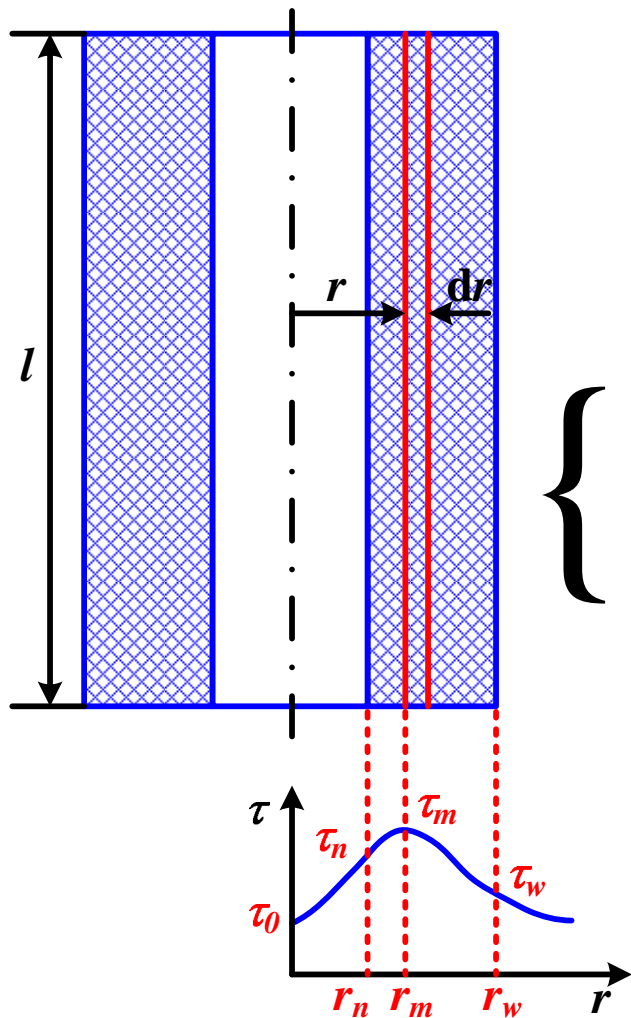
对细高线圈
忽略两端散热
只考虑径向的传热和散热

线圈内、外表面温升较低
内部某一处温升最高



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈



- P_0 : 线圈单位体积产生的功率 (W/m^3)
- λ : 线圈的热导率 ($\text{W}/\text{K}/\text{m}$)

热平衡关系

$$\left\{ \begin{array}{l} r > r_m : \\ r < r_m : \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} p_0 \pi (r^2 - r_m^2) l = -\lambda \cdot 2\pi r l \frac{d\tau}{dr} \\ p_0 \pi (r_m^2 - r^2) l = \lambda \cdot 2\pi r l \frac{d\tau}{dr} \end{array}$$

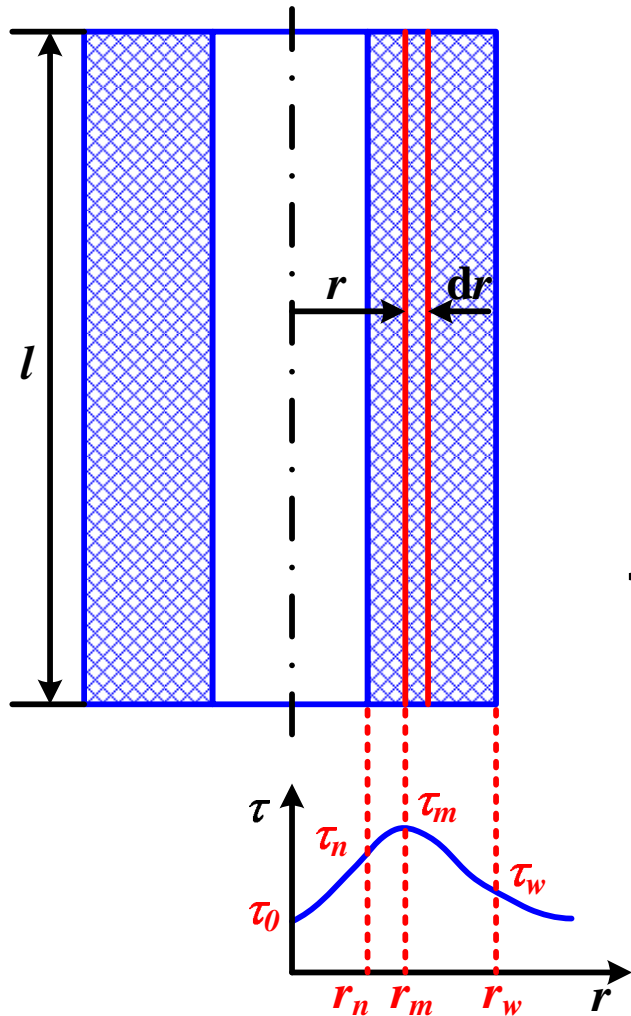
$$\vec{q} = -\lambda \nabla \theta$$

- \vec{q} : 能流密度 ($\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$)
- λ : 热导率 ($\text{W}/\text{K}/\text{m}$)



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈



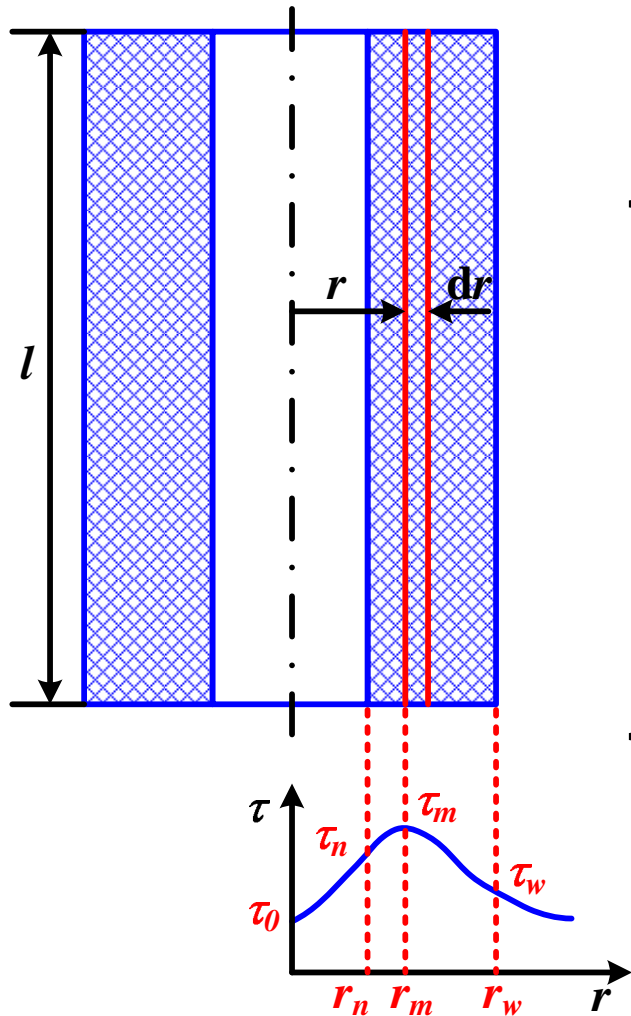
$$\left\{ \begin{array}{l} r > r_m : \quad p_0 \pi (r^2 - r_m^2) l = -\lambda \cdot 2\pi r l \frac{d\tau}{dr} \\ r < r_m : \quad p_0 \pi (r_m^2 - r^2) l = \lambda \cdot 2\pi r l \frac{d\tau}{dr} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_0 \int_{r_m}^{r_w} \left(r - \frac{r_m^2}{r} \right) dr = -2\lambda \int_{\tau_m}^{\tau_w} d\tau \\ p_0 \int_{r_n}^{r_m} \left(\frac{r_m^2}{r} - r \right) dr = 2\lambda \int_{\tau_m}^{\tau_n} d\tau \end{array} \right.$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈



$$p_0 \int_{r_m}^{r_w} \left(r - \frac{r_m^2}{r} \right) dr = -2\lambda \int_{\tau_m}^{\tau_w} d\tau$$

$$p_0 \int_{r_m}^{r_n} \left(\frac{r_m^2}{r} - r \right) dr = 2\lambda \int_{\tau_m}^{\tau_n} d\tau$$

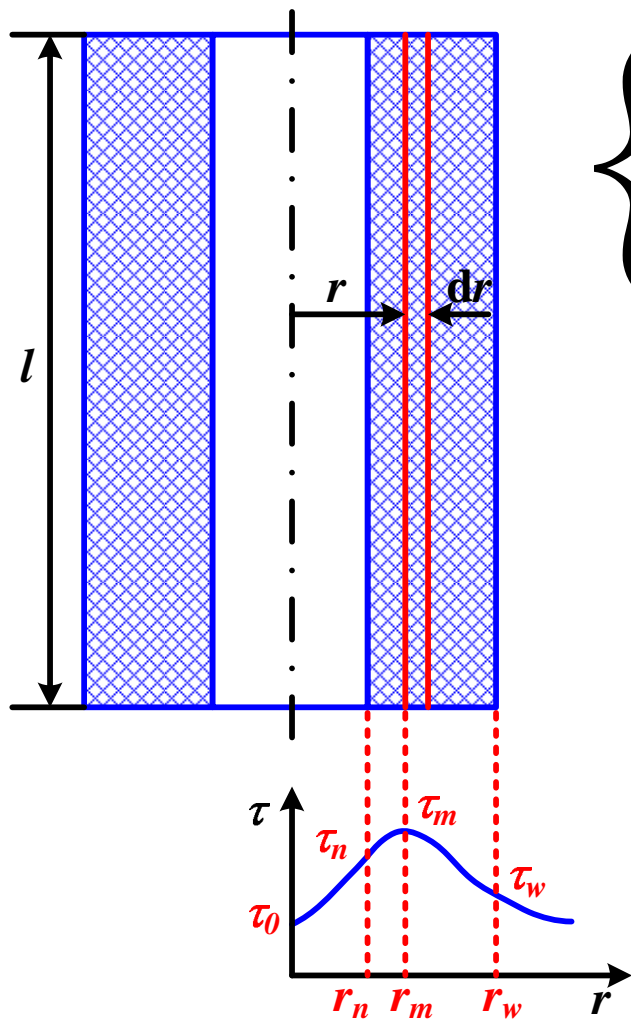
$$\tau_m - \tau_w = \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_m} \right]$$

$$\tau_m - \tau_n = \frac{p_0}{2\lambda} \left[r_m^2 \ln \frac{r_m}{r_n} - \frac{r_m^2 - r_n^2}{2} \right]$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈



$$\tau_m - \tau_w = \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_m} \right] \quad (1)$$

$$\tau_m - \tau_n = \frac{p_0}{2\lambda} \left[r_m^2 \ln \frac{r_m}{r_n} - \frac{r_m^2 - r_n^2}{2} \right] \quad (2)$$

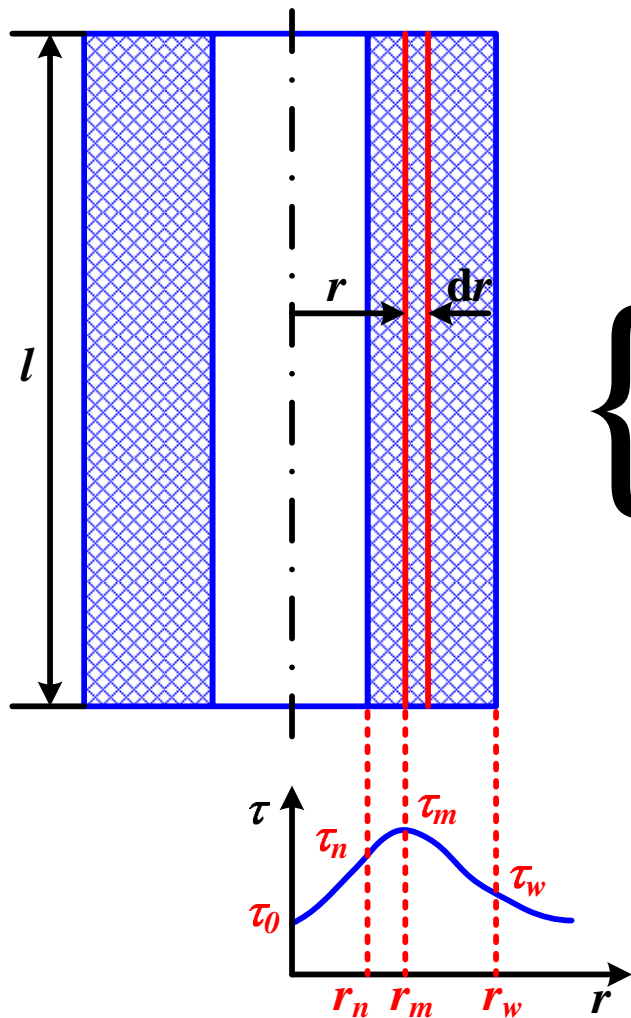
未知量

- 1: τ_w
- 2: τ_n
- 3: τ_m
- 4: r_m



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈



在线圈表面的热平衡关系

$$\left\{ \begin{array}{l} r = r_w : \quad p_0 \pi (r_w^2 - r_m^2) = 2\pi r_w K_{T_w} \tau_w \quad (3) \\ r = r_n : \quad p_0 \pi (r_m^2 - r_n^2) = 2\pi r_n K_{T_n} \tau_n \quad (4) \end{array} \right.$$

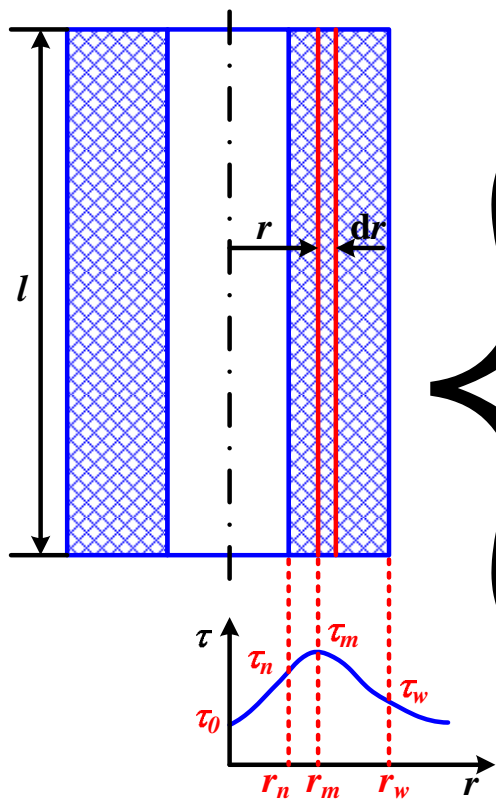
$$\left\{ \begin{array}{l} r = r_w : \quad p_0 \pi (r_w^2 - r_m^2) = 2\pi r_w K_{T_w} \tau_w \quad (3) \\ r = r_n : \quad p_0 \pi (r_m^2 - r_n^2) = 2\pi r_n K_{T_n} \tau_n \quad (4) \end{array} \right.$$

$$P_s = K_T A \tau$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈



$$\tau_m - \tau_w = \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_m} \right] \quad (1)$$

$$\tau_m - \tau_n = \frac{p_0}{2\lambda} \left[r_m^2 \ln \frac{r_m}{r_n} - \frac{r_m^2 - r_n^2}{2} \right] \quad (2)$$

$$p_0 \pi (r_w^2 - r_m^2) = 2\pi r_w K_{Tw} \tau_w \quad (3)$$

$$p_0 \pi (r_m^2 - r_n^2) = 2\pi r_n K_{Tn} \tau_n \quad (4)$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈

$$\tau_m - \tau_w = \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_m} \right] \quad (1)$$

$$\tau_m - \tau_n = \frac{p_0}{2\lambda} \left[r_m^2 \ln \frac{r_m}{r_n} - \frac{r_m^2 - r_n^2}{2} \right] \quad (2)$$

$$(1) - (2) \longrightarrow \tau_n - \tau_w = \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_n^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_n} \right] \quad (5)$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈

$$p_0 \pi (r_w^2 - r_m^2) = 2\pi r_w K_{Tw} \tau_w \quad (3)$$

$$p_0 \pi (r_m^2 - r_n^2) = 2\pi r_n K_{Tn} \tau_n \quad (4)$$

$$(3) + (4) \longrightarrow p_0 (r_w^2 - r_n^2) = 2(r_w K_{Tw} \tau_w + r_n K_{Tn} \tau_n)$$

$$\longrightarrow \tau_n = \frac{p_0}{2K_{Tn} \tau_n} (r_w^2 - r_n^2) - \frac{r_w K_{Tw}}{r_n K_{Tn}} \tau_w \quad (6)$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈

$$\tau_n - \tau_w = \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_n^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_n} \right] \quad (5)$$

$$\tau_n = \frac{p_0}{2K_{Tn}\tau_n} (r_w^2 - r_n^2) - \frac{r_w K_{Tw}}{r_n K_{Tn}} \tau_w \quad (6)$$

(6) → (5) →

$$\tau_w = \left\{ \frac{p_0 (r_w^2 - r_n^2)}{2K_{Tn}\tau_n} - \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_n^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_n} \right] \right\} \frac{r_n K_{Tn}}{r_w K_{Tw} + r_n K_{Tn}} \quad (7)$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 空心线圈

$$\tau_w = \left\{ \frac{p_0 (r_w^2 - r_n^2)}{2K_{Tn}\tau_n} - \frac{p_0}{2\lambda} \left[\frac{r_w^2 - r_n^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_w}{r_n} \right] \right\} \frac{r_n K_{Tn}}{r_w K_{Tw} + r_n K_{Tn}} \quad (7)$$

$$p_0 \pi (r_w^2 - r_m^2) = 2\pi r_w K_{Tw} \tau_w \quad (3)$$

(7) → (3) →

$$r_m = \sqrt{\frac{\frac{1}{2\lambda} (r_w^2 - r_n^2) + \frac{r_w}{K_{Tw}} + \frac{r_n}{K_{Tn}}}{\frac{1}{K_{Tw} r_w} + \frac{1}{K_{Tn} r_n} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_w}{r_n}}}$$

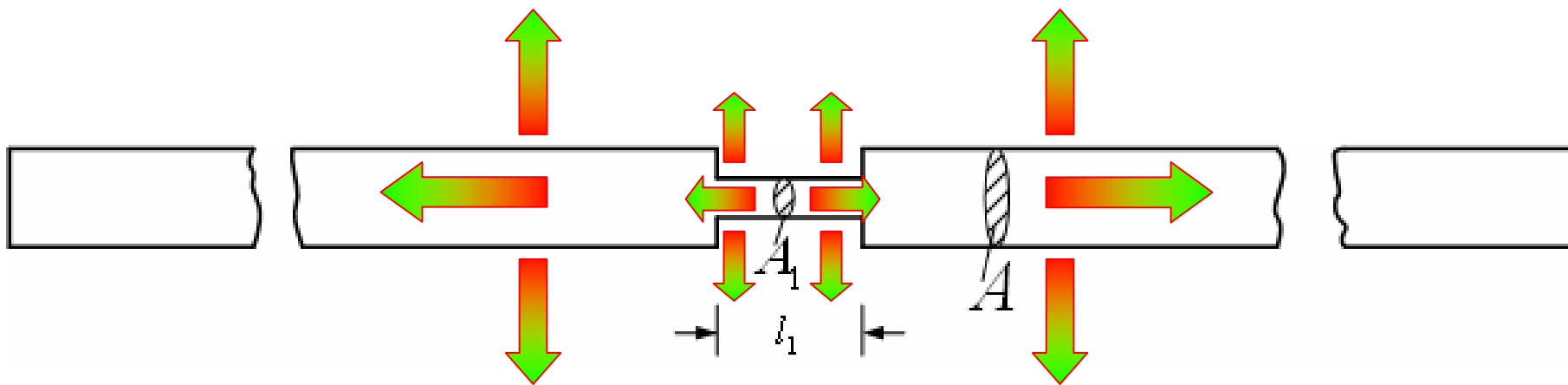


§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 变截面导体

- ◆ 导体常会因需要而设置变截面，如熔断器的熔片等。

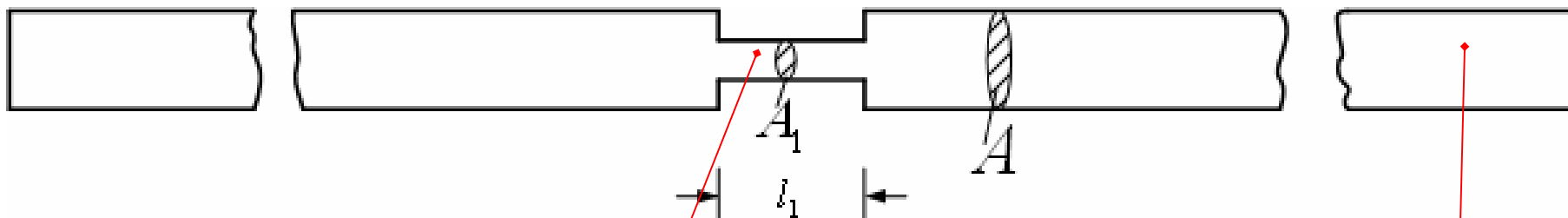
中间收细的变截面导体模型





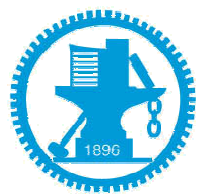
§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 变截面导体



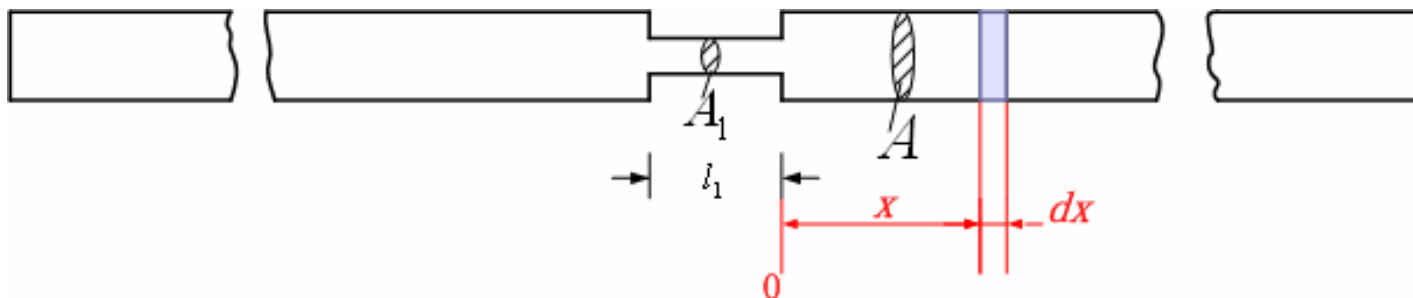
收细部分很短
可假定为等温体

粗截面部分长度无限延伸
忽略径向温度变化
只考虑轴向温度分布

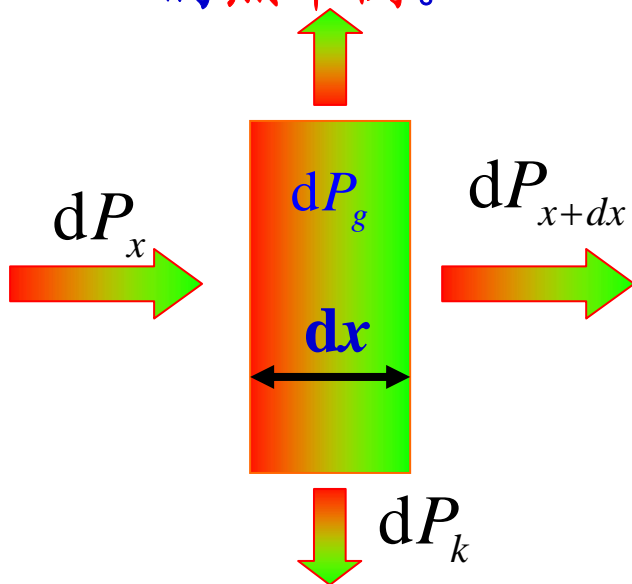


§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

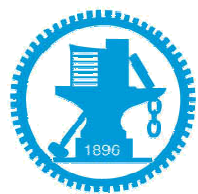
■ 变截面导体



◆ 研究粗导体中离原点（截面过渡处） x 处、厚为 dx 薄层的热平衡。



- dP_g : dx 薄层导体的发热功率 (W)
- dP_x : 传入 dx 薄层的功率 (W)
- dP_{x+dx} : 传出 dx 薄层的功率 (W)
- dP_k : 由 dx 薄层侧表面散失的功率 (W)



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

变截面导体

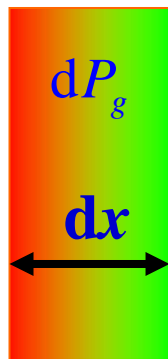
● q : 单位体积的功率损耗 (W/m^3) $q = I^2 \rho / A^2 = J^2 \rho$

$$dP_g = qA dx$$

● ρ : 电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)
● J : 电流密度 (A/m^2)

$$dP_x = -\lambda A \left(\frac{d\tau}{dx} \right)_x$$

dP_x



dP_{x+dx}

$$dP_{x+dx} = -\lambda A \left(\frac{d\tau}{dx} \right)_{x+dx}$$

dP_k

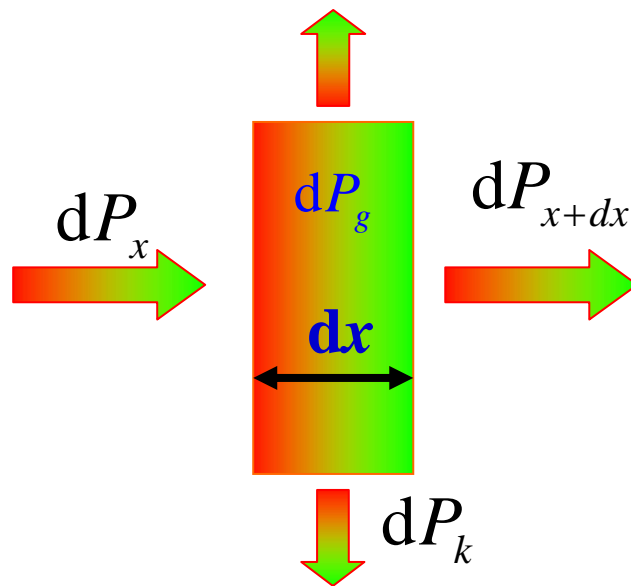
$$dP_k = K_t p \tau dx$$

● p : 侧表面单位长度的散热面积，即截面周长 (m)



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

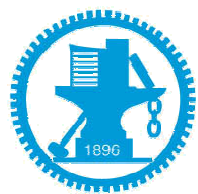
■ 变截面导体



热平衡

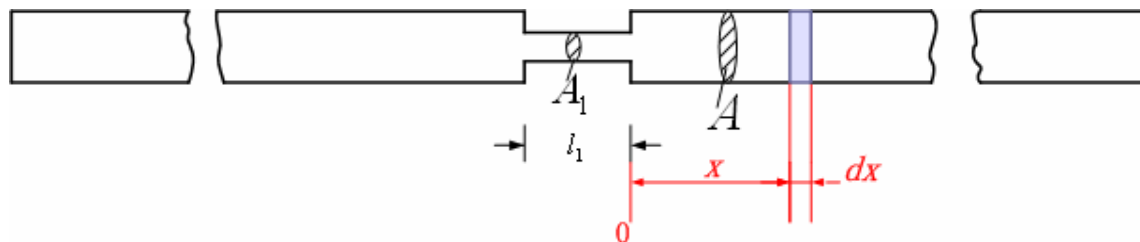
流入热功率+导体发热功率=传出热功率+侧表面散热

$$dP_x + dP_g = dP_{x+dx} + dP_k$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

变截面导体



$$dP_x = -\lambda A \left(\frac{d\tau}{dx} \right)_x$$

$$dP_g = qA dx$$

$$dP_k = K_t p \tau dx$$

$$dP_{x+dx} = -\lambda A \left(\frac{d\tau}{dx} \right)_{x+dx}$$



$$dP_x + dP_g = dP_{x+dx} + dP_k$$



$$\tau = \tau_w + (\tau_m - \tau_w) e^{-\alpha x}$$

● τ_m : $x=0$ 处的温升

● τ_w : $x=\infty$ 处的稳定温升

● $a = \sqrt{K_T p / \lambda A}$

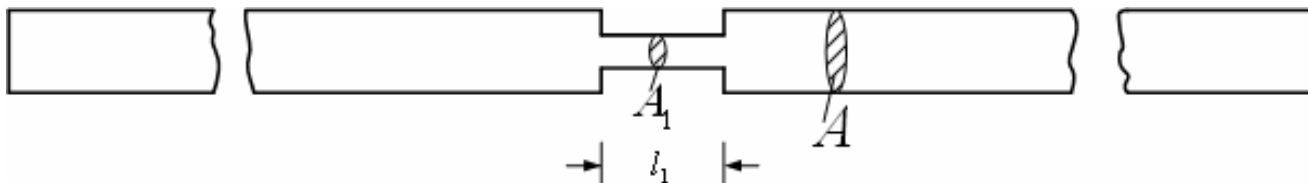
$$\tau_w = \frac{qA}{K_T p} = \frac{I^2 \rho}{K_T p A}$$

$$q = I^2 \rho / A^2 = J^2 \rho$$



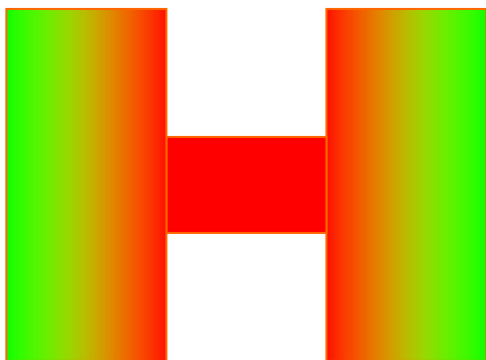
§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 变截面导体



细导体（等温体）的热平衡

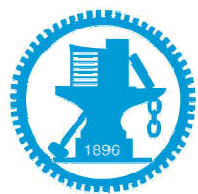
导体发热功率 = 传出热功率 + 侧表面散热



$$q_1 A_1 l_1 = K_T p_1 l_1 \tau_m + 2 \times \left[-\lambda A \left(\frac{d\tau}{dx} \right) \right]$$

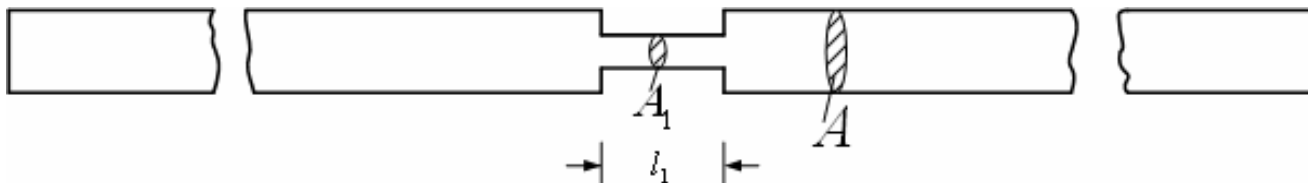
$$-\lambda A \left(\frac{d\tau}{dx} \right) = \alpha \lambda A (\tau_m - \tau_w)$$

$$\tau = \tau_w + (\tau_m - \tau_w) e^{-\alpha x}$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 变截面导体



$$q_1 A_1 l_1 = K_T p_1 l_1 \tau_m + 2\alpha\lambda A(\tau_m - \tau_w)$$

解

$$\tau_m = \frac{q_1 A_1 l_1 + 2\alpha\lambda A \tau_w}{2\alpha\lambda A + K_T p_1 l_1}$$



§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 变截面导体

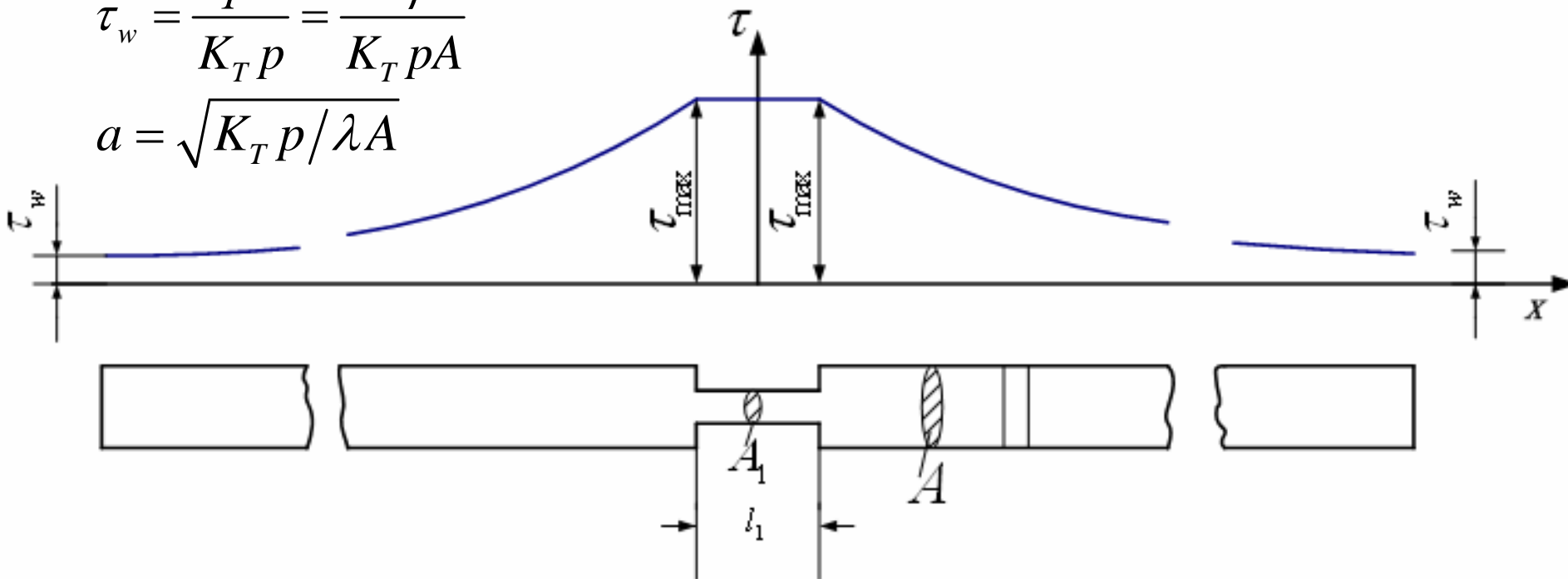
$$\tau = \tau_w + (\tau_m - \tau_w) e^{-\alpha x}$$

$$\tau_m = \frac{q_1 A_1 l_1 + 2a\lambda A \tau_w}{2a\lambda A + K_T p l_1}$$

$$\tau_w = \frac{qA}{K_T p} = \frac{I^2 \rho}{K_T p A}$$

$$a = \sqrt{K_T p / \lambda A}$$

- 轴向温升分布为一指数曲线
- 收细处温升最高
- 远处与均匀导体温升相等

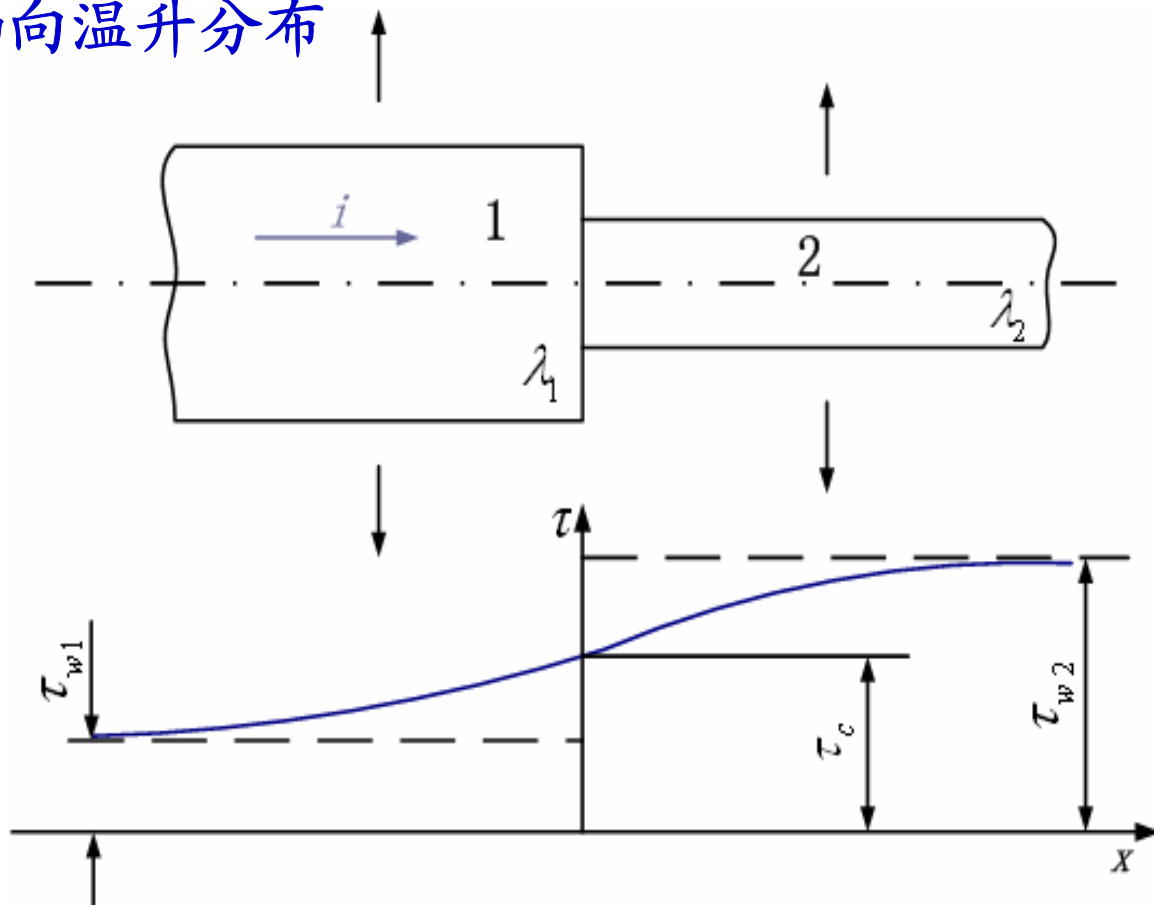




§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布

■ 变截面导体

- ◆ 阶梯形变截面导体：分别对粗、细导体列热平衡方程，求解可得轴向温升分布





第一章 电器导体的发热计算

- § 1-1 电器的允许温升
- § 1-2 电器中的热源
- § 1-3 电器中的热传递形式
- § 1-4 电器表面稳定温升计算 - 牛顿公式
- § 1-5 不同工作制下电器的热计算
- § 1-6 电器典型部件的稳定温升分布
- § 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性



§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性

■ 电器的热稳定性

- ◆ 在一定时间内，电器承受**短路电流**引起的热作用而不至损伤电器的能力

■ 短路电流通过导体时发热的特点

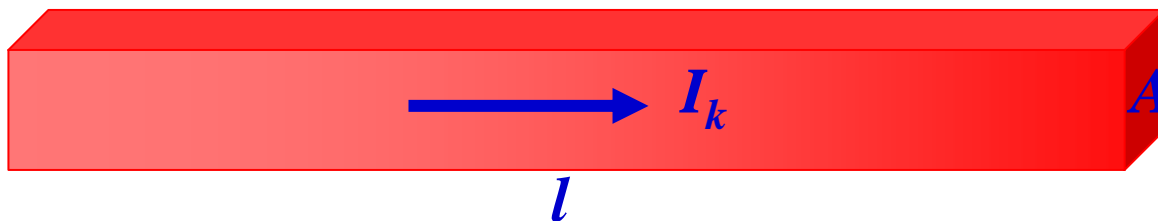
- ◆ 时间短（如：短路时间 $t_k < 0.005T$ ）
 - 可按**绝热(adiabatic)**条件对待
- ◆ 导体允许温度高（如：铜导体为 300°C ）
 - 需考虑电阻率随温度的变化



§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性

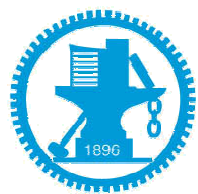
■ 短路时导体的热计算

◆ 绝热：焦耳发热全部用于升温



$$K_f I_k^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta) \frac{l}{A} dt = c \gamma A l d\theta$$

- K_f : 交流附加损耗系数
- ρ_0 : 0°C 时导体的电阻率 ($\Omega\cdot\text{m}$)
- α : 电阻温度系数 (K^{-1})
- γ : 密度 (kg/m^3)
- c : 比热容 ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$)



§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性

■ 短路时导体的热计算

$$\begin{cases} t = 0: & \theta = \theta_0 \\ t = t_k: & \theta = \theta_k \end{cases}$$

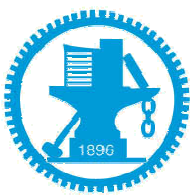
- 短路瞬间的起始温度
- 为周围介质温度加上额定电流下的稳定温升

$$K_f I_k^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta) \frac{l}{A} dt = c \gamma A l d\theta$$

$$\int_0^{t_k} \frac{K_f I_k^2 \rho_0}{c \gamma A^2} dt = \int_{\theta_0}^{\theta_k} \frac{1}{1 + \alpha \theta} d\theta$$



$$\theta_k = \frac{1}{\alpha} \left[(1 + \alpha \theta_0) e^{\frac{K_f I_k^2 t_k \rho_0 \alpha}{A^2 c \gamma}} - 1 \right]$$



§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性

■ 电器的热稳定性

◆ 电器的热稳定性用 $I_k^2 t_k$ 来表示

$$\theta_k = \frac{1}{\alpha} \left[(1 + \alpha\theta_0) e^{\frac{K_f I_k^2 t_k \rho_0 \alpha}{A^2 c \gamma}} - 1 \right]$$



$$I_k^2 t_k = \frac{\gamma c A^2}{K_f \rho_0 \alpha} \ln \left(\frac{1 + \alpha\theta_k}{1 + \alpha\theta_0} \right)$$

◆ 热稳定时间 t_k 一般取 **0.5s、1s、2s、4s** 等



§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的热稳定性

■ 电器的热稳定性

◆ 根据能量（热效应）不变（即 $I_k^2 t_k$ 不变）的原则，对应不同 t_k 相应的 I_k 的关系为

$$\frac{I_{k1}}{I_{k2}} = \sqrt{\frac{t_{k2}}{t_{k1}}}$$

◆ 短路时导体允许的电流密度为

$$I_k^2 t_k = \frac{\gamma c A^2}{K_f \rho_0 \alpha} \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_k}{1 + \alpha \theta_0} \right)$$

$$J_k = \frac{I_k}{A} = \sqrt{\frac{\gamma c}{K_f \rho_0 \alpha t_k} \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_k}{1 + \alpha \theta_0} \right)}$$

◆ 实际情况更复杂：比热容和短路电流随时间变化



作业

- 开关柜中垂直安放的铝母线尺寸为 $80 \times 6\text{mm}^2$ ，表面涂漆，在 85°C 时的散热系数 K_T 为 $12.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，电阻率 $\rho = 3.75 \times 10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$ ，求该铝母线最大长期允许通过的直流电流。