

第三章 灭弧原理及主要开关电器



第一节 断路器和隔离开关

第二节 电弧的形成和熄灭

第三节 交流电弧电压的恢复过程

第四节 交流电弧熄灭的基本方法

第三章 灭弧原理及主要开关电器



第一节 断路器和隔离开关

第二节 电弧的形成和熄灭

第三节 交流电弧电压的恢复过程

第四节 交流电弧熄灭的基本方法

1.1 概述

- 用开关电器切断通有电流的电路时，只要电源电压大于10~20V，电流大于80~100 mA，在开关电器的动、静触头分离瞬间，触头间就会出现电弧。
- 电弧产生后，触头虽已分开，但电路中的电流还在继续流通。只有电弧熄灭，电路才被真正断开。
- 一般用以切断电流的开关电器（高压断路器、低压开关电气和熔断器）中，均设置有专门用来熄灭电弧的灭弧装置。



Part 1

断路器和隔离开关

1.1 断路器

断路器符号： 



具备灭弧功能，既可断开或闭合正常工作电流，也可断开或闭合过负荷电流或短路电流。如高压断路器、低压自动空气断路器等



Part 1

断路器和隔离开关

1.2 隔离开关

隔离开关符号： 



不具备灭弧功能，不能断开或闭合电流，只能在检修时隔离电压。



第三章 灭弧原理及主要开关电器



第一节 断路器和隔离开关

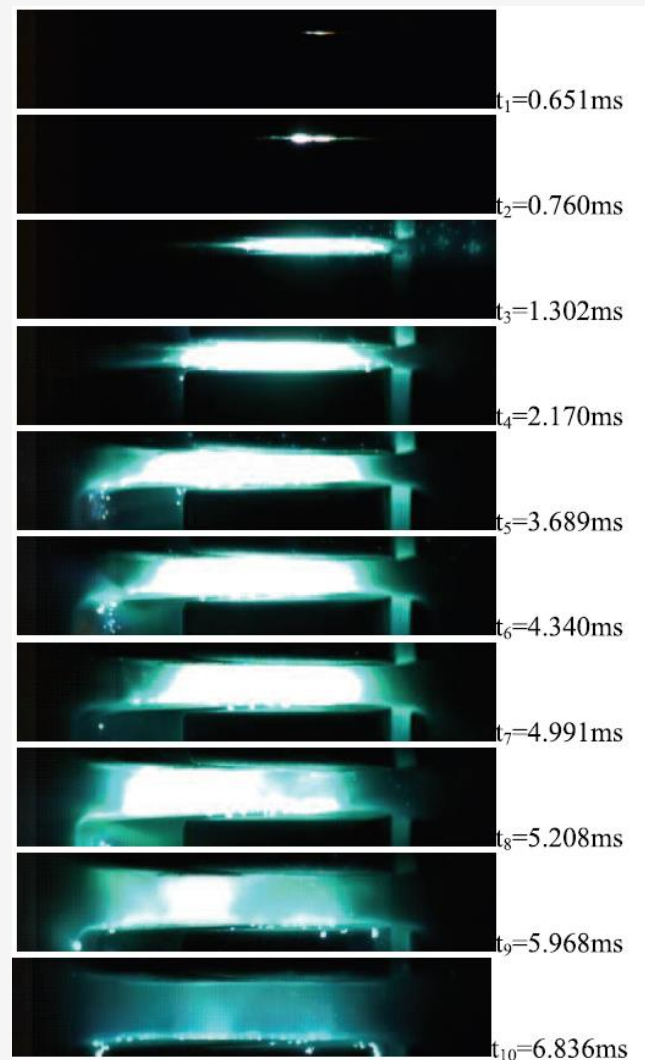
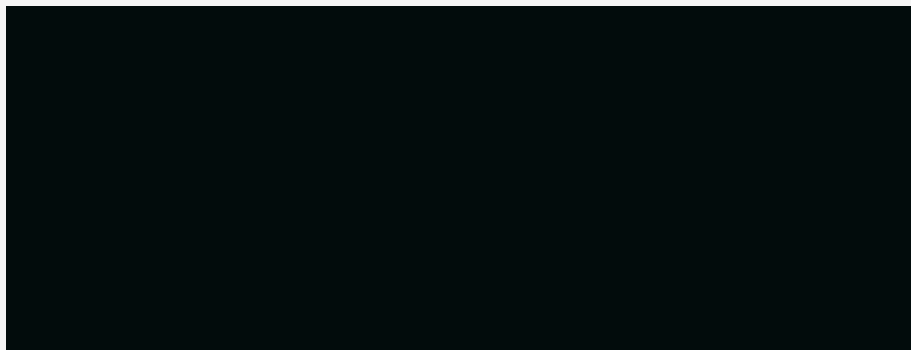
第二节 电弧的形成和熄灭

第三节 交流电弧电压的恢复过程

第四节 交流电弧熄灭的基本方法

2.1 概述

- 电弧的产生和维持是触头绝缘介质的中性质点（分子和原子）被游离的结果。
- 游离是中性质点转化为带电质点。
- 电弧的形成过程是气态、液态、固态介质向等离子体态的转化过程。
- 电弧本质是一束游离的气体放电现象。



2.1 电弧的产生与维持

① 电子发射

- 热电子发射
- 强场发射

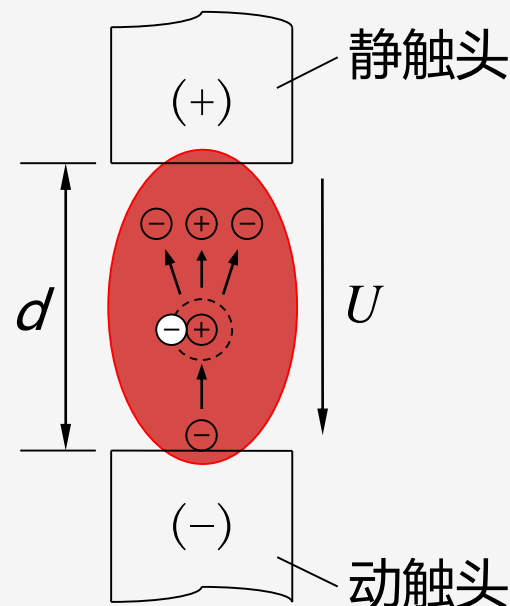
$$E = \frac{U}{d} \quad E > 3 \times 10^6 \text{ V/m}$$

② 碰撞游离

- 游离是指中性质点转化为带电质点

③ 热游离

- 电弧形成后，弧隙电阻减小、电压下降，无碰撞游离；
- 弧隙温度很高，发生热游离。



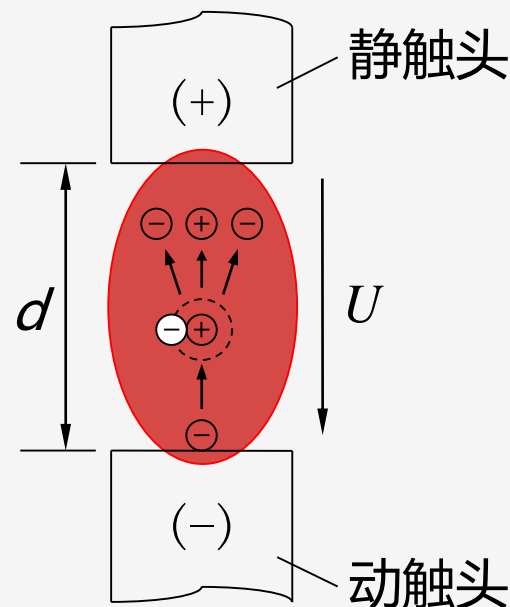
2.2 去游离与电弧的熄灭

① 去游离

- 去游离是指带电质点减少
- 去游离有复合和扩散两种

② 电弧的熄灭

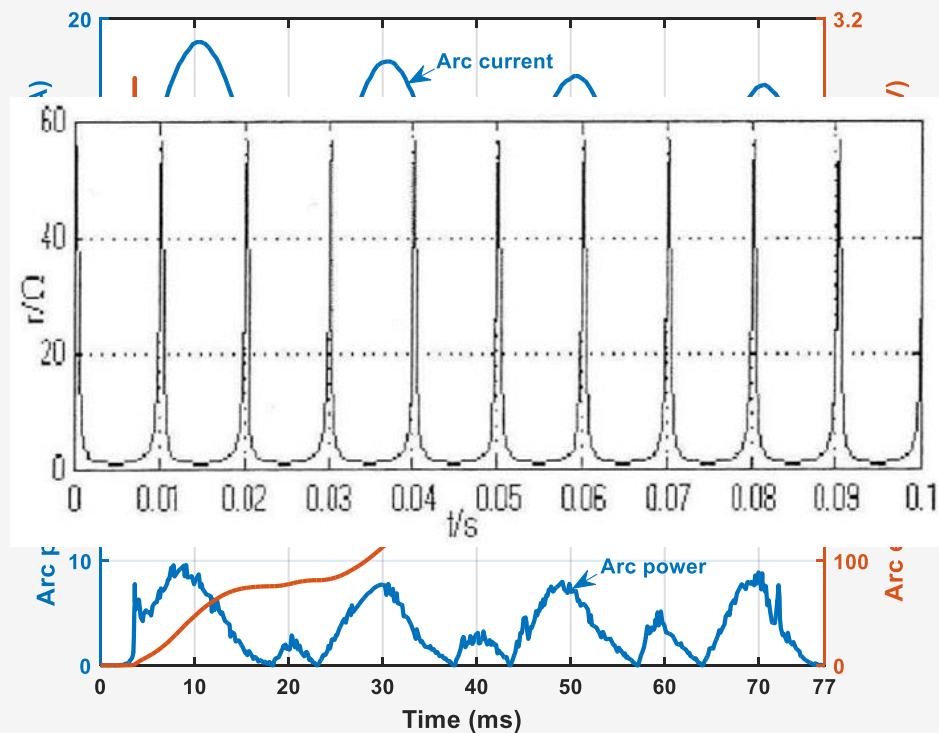
- 若游离过程大于去游离过程，则电弧继续燃烧；
- 若去游离过程大于游离过程，则电弧逐渐熄灭



2.3 交流电弧的特性

① 动态的伏安特性

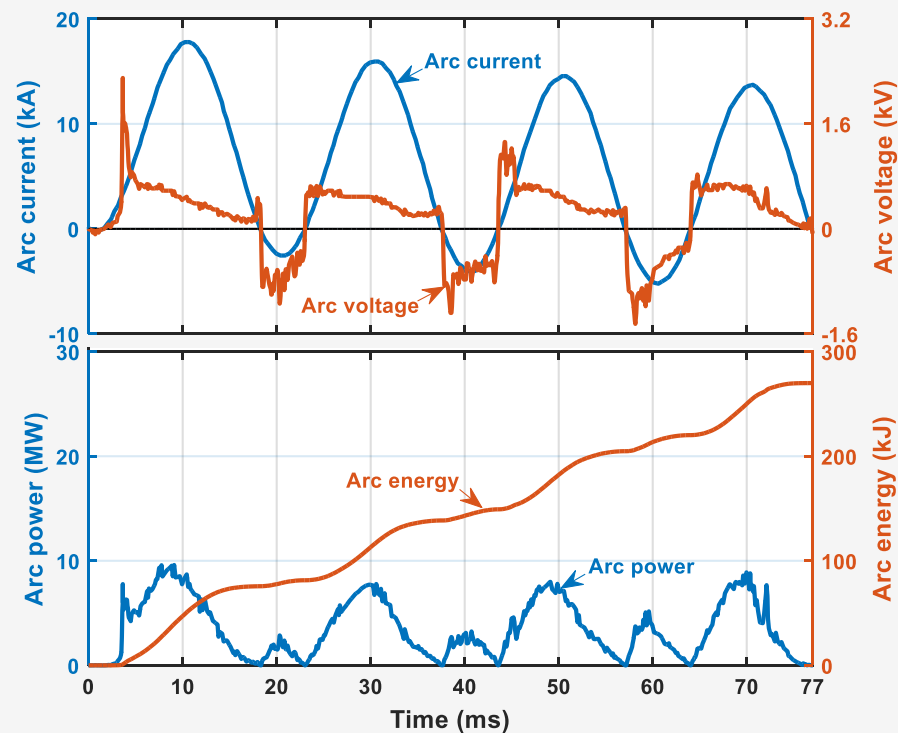
- 电弧电流随时间变化，电弧功率也随电弧电流变化。
- 电弧介质电阻是由游离程度所决定，因此电弧的伏安特性是非线性的。



2.3 交流电弧的特性

② 电弧有热惯性

- 电弧的温度跟不上电流的变化，存在一个滞后过程。滞后为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。

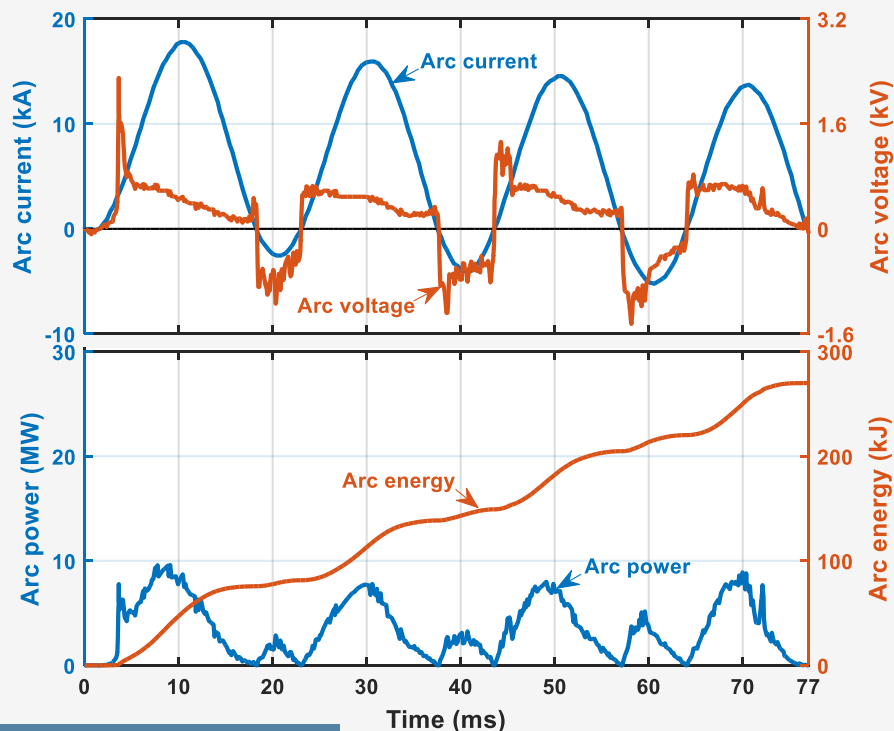


2.3 交流电弧的特性

③ 交流电弧每半周自动熄灭一次

- 交流电流是周期性变化的，电弧电流每隔半周过零一次。
- 在电弧电流自然过零前后，电源向弧隙输送的能量较少，电弧温度和热游离下降，电弧过零将暂时自然熄灭。

但不等于最终熄灭！



交流电弧为什么会过零重燃？发生了什么？

2.4 交流电弧灭弧的基本原理

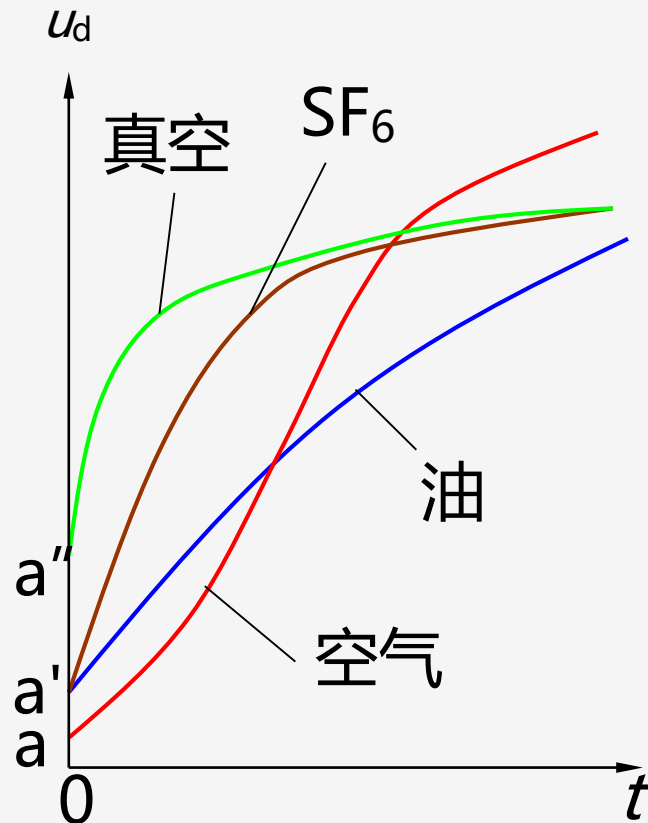
- 在交流电弧自动熄灭后，弧隙中存在两个恢复过程：
 - 弧隙介质强度恢复过程
 - 弧隙电压恢复过程



2.4 交流电弧灭弧的基本原理

1. 弧隙介质强度恢复过程

- 含义：弧隙中介质的绝缘能力在经过一定时间恢复到绝缘的正常状态的过程。以能耐受的电压 u_d 表示。
- 影响因素：主要是断路器灭弧装置的结构和灭弧介质的性质。



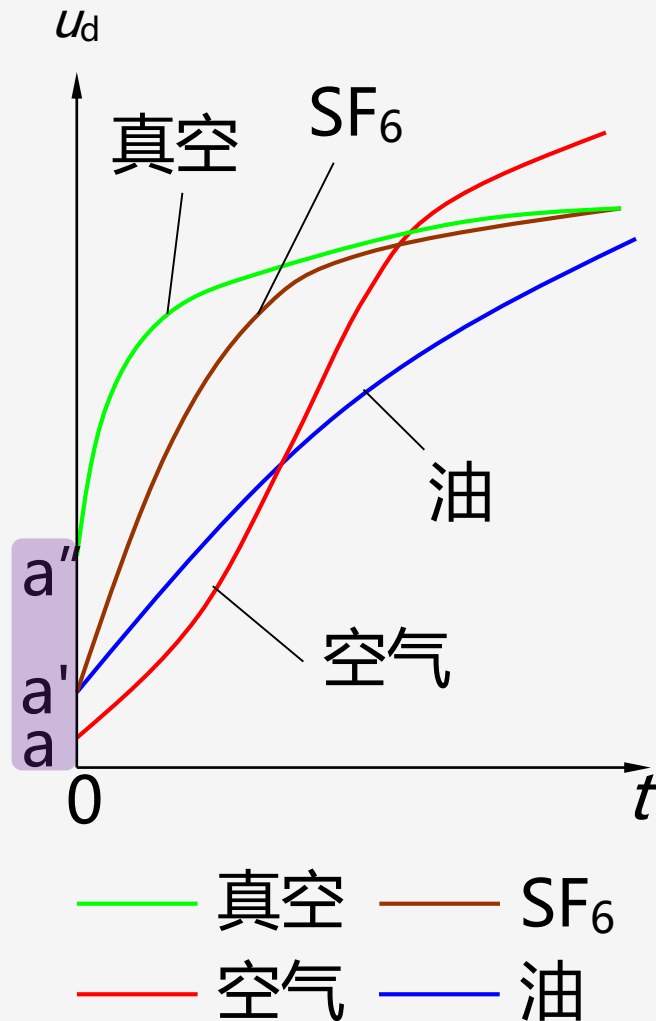
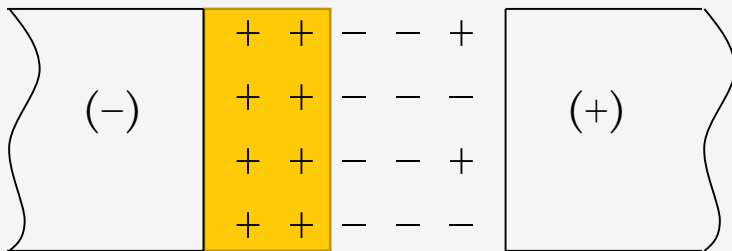
真空断路器和 SF_6 断路器灭弧性能较好。

— 真空 — SF_6
— 空气 — 油



2.4 交流电弧灭弧的基本原理

- **近阴极效应**：在 $t=0$ 的电流过零瞬间，介质强度突然升高的现象。
- **原因**：电弧电流过零之前，弧隙充满电子及正离子。电流过零后，电极极性发生反转，弧隙中各种带电粒子的运动方向随之改变，质量较小的电子立即向正极方向运动，而质量1000余倍的正离子几乎未动，从而在阴极附近形成了电导很低的空间，阻碍阴极发射电子，使得弧隙出现150V~250V的起始介质强度。

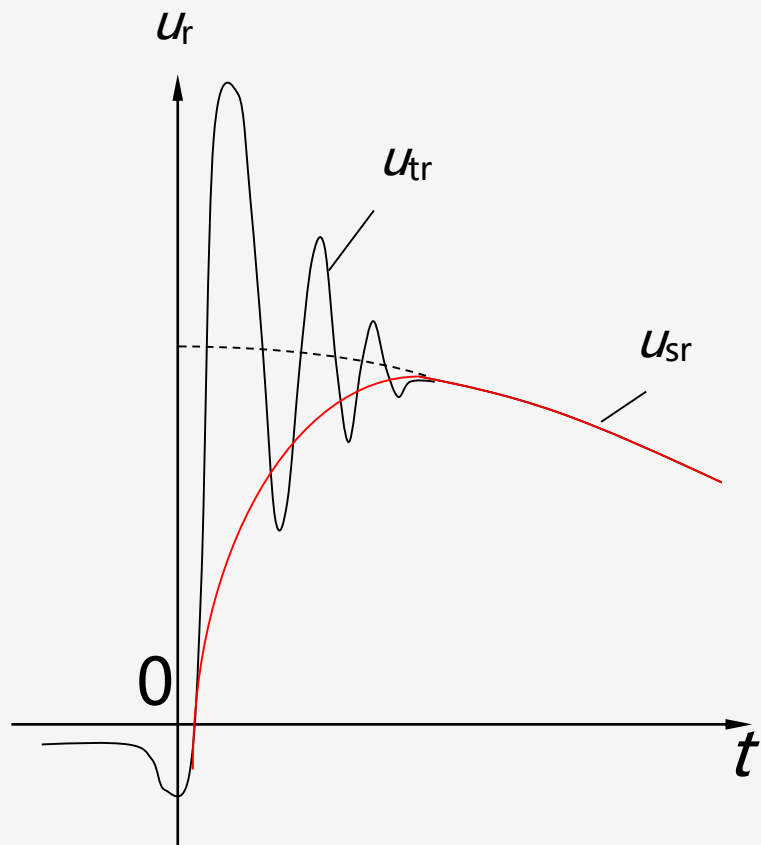


2.4 交流电弧灭弧的基本原理

2. 弧隙电压恢复过程

- 含义：弧隙电压由熄弧电压逐渐恢复到电源电压的过程。以 u_r 表示。
- 影响因素：线路参数、负荷性质等。

对不同的线路参数，弧隙电压恢复过程可能是周期性的变化过程或非周期性的变化过程。



U_{tr} ——瞬态恢复电压

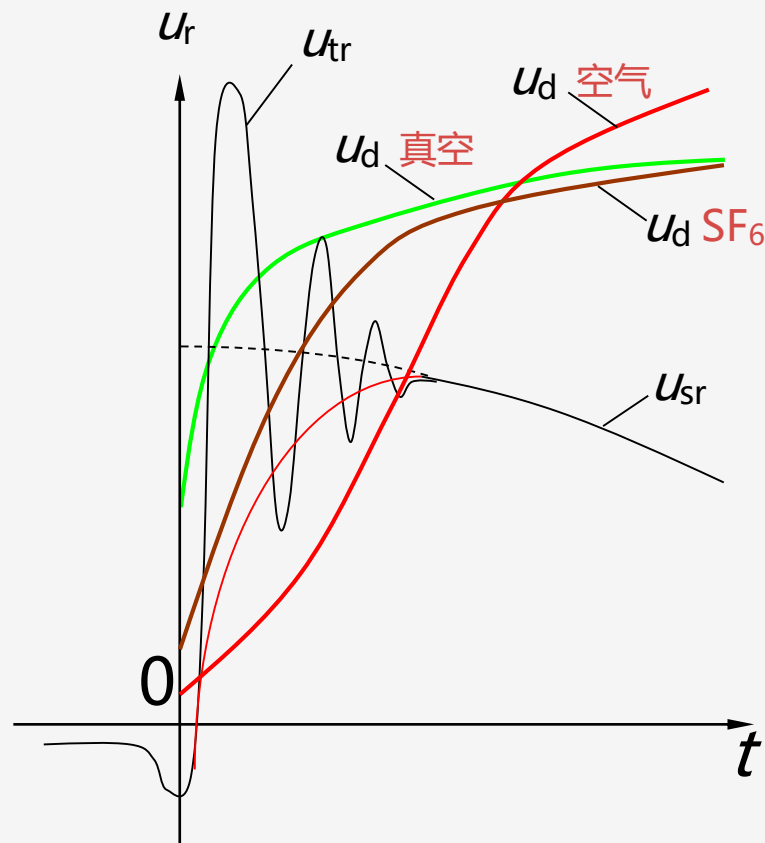
U_{sr} ——工频恢复电压

2.4 交流电弧灭弧的基本原理

- 两个恢复过程的竞争：
 - 如果弧隙电压高于介质强度耐受电压，则弧隙被击穿，电弧重燃。
 - 如果弧隙电压低于介质强度耐受电压，则电弧不再重燃，即最终熄灭。

可见，断路器开断交流电路时，
电弧熄灭的条件应为

$$u_{d(t)} > u_{r(t)}$$



U_{tr} ——瞬态恢复电压

U_{sr} ——工频恢复电压

第三章 灭弧原理及主要开关电器



第一节 断路器和隔离开关

第二节 电弧的形成和熄灭

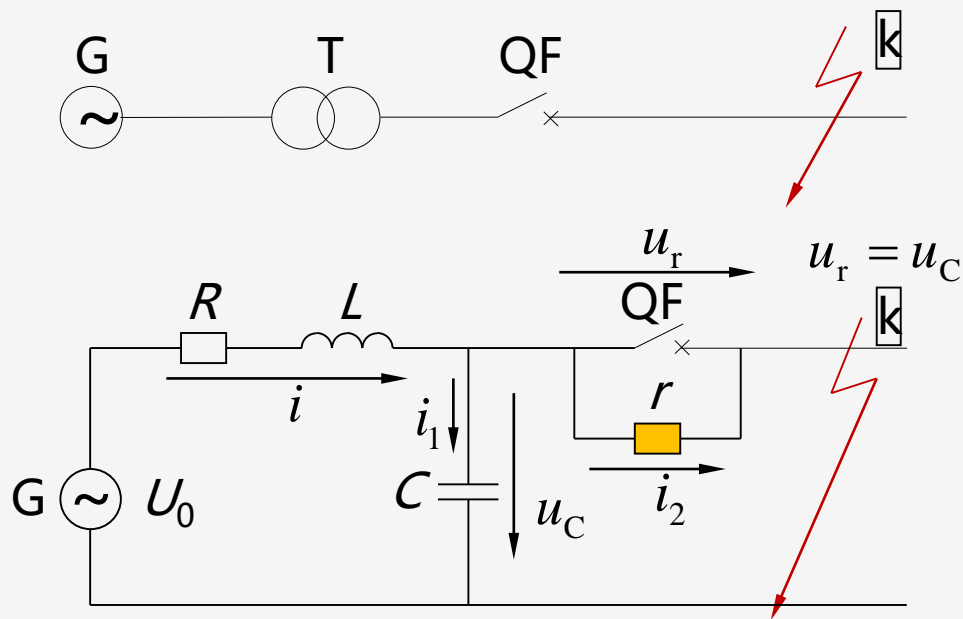
第三节 交流电弧电压的恢复过程

第四节 交流电弧熄灭的基本方法

Part 3

交流电弧电压的恢复过程

3.1 弧隙电压恢复过程分析



$$U_0 = iR + L \frac{di}{dt} + u_C$$

$$i = i_1 + i_2 = C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{r}$$

微分方程的通解:

$$u_r = u_C = \frac{rU_0}{R+r} + c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t}$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)$$

$$\pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

微分方程:

线性常系数微分方程

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \left(RC + \frac{L}{r} \right) \frac{du_C}{dt} + \left(\frac{R}{r} + 1 \right) u_C = U_0$$



3.1 弧隙电压恢复过程分析

- 1) 当 $\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC}\right)^2 > \frac{1}{LC}$ 时, α_1 、 α_2 为实根。

弧隙电压恢复过程是**非周期性**的。

恢复电压最大值不会超过 U_0 。

- 2) 当 $\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC}\right)^2 < \frac{1}{LC}$ 时, α_1 、 α_2 为虚根。

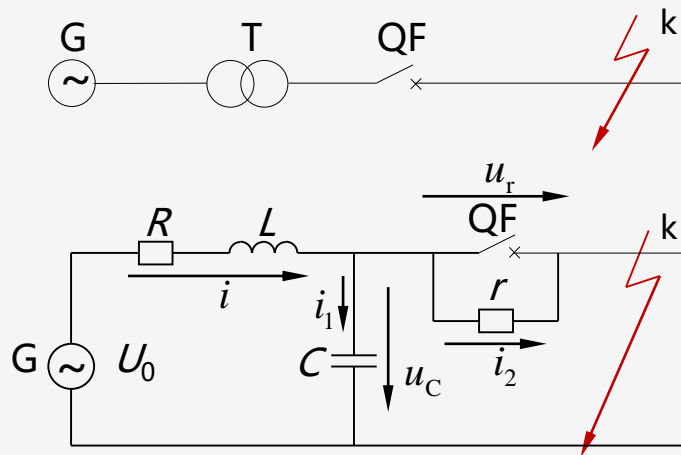
弧隙电压恢复过程是**周期性振荡**的。

恢复电压最大值可达 $2U_0$ 。

- 3) 当 $\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC}\right)^2 = \frac{1}{LC}$ 时, α_1 、 α_2 为实数重根。

弧隙电压恢复过程仍是**非周期性**的。

恢复电压最大值不会超过 U_0 。

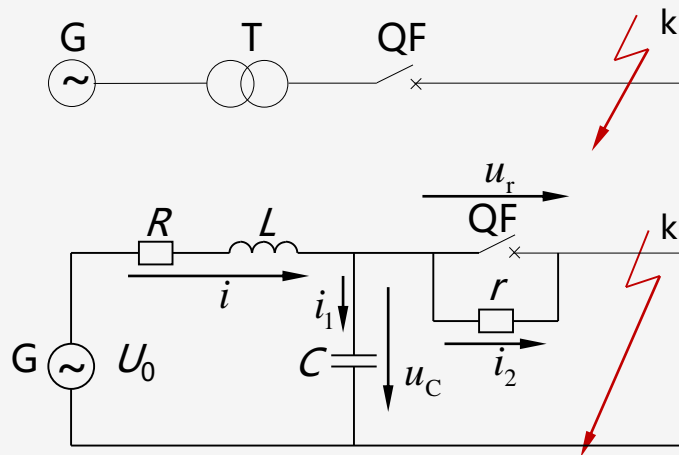
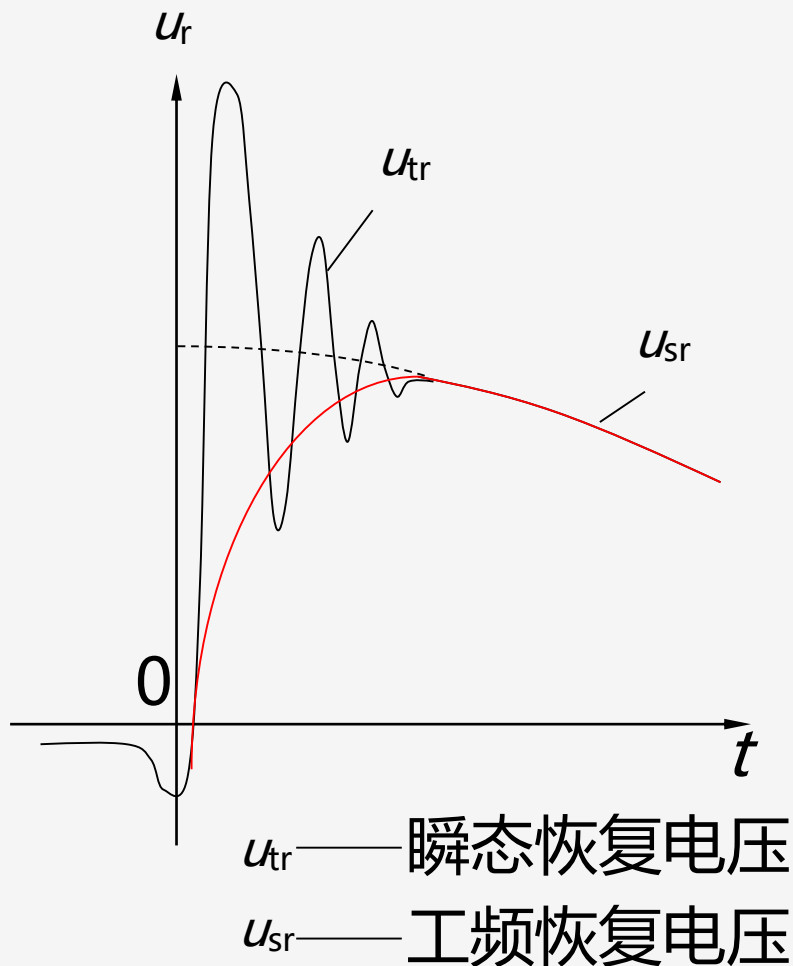


微分方程的通解:

$$u_r = u_C = \frac{rU_0}{R+r} + c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t}$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2}\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

3.1 弧隙电压恢复过程分析



临界并联电阻为

$$r_{cr} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- 当 $r < r_{cr}$ 时, 电压恢复过程为非周期性;
- 当 $r > r_{cr}$ 时, 电压恢复过程为周期性振荡。

3.2 不同短路类型对断路器开断能力的影响

① 开断单相短路电路

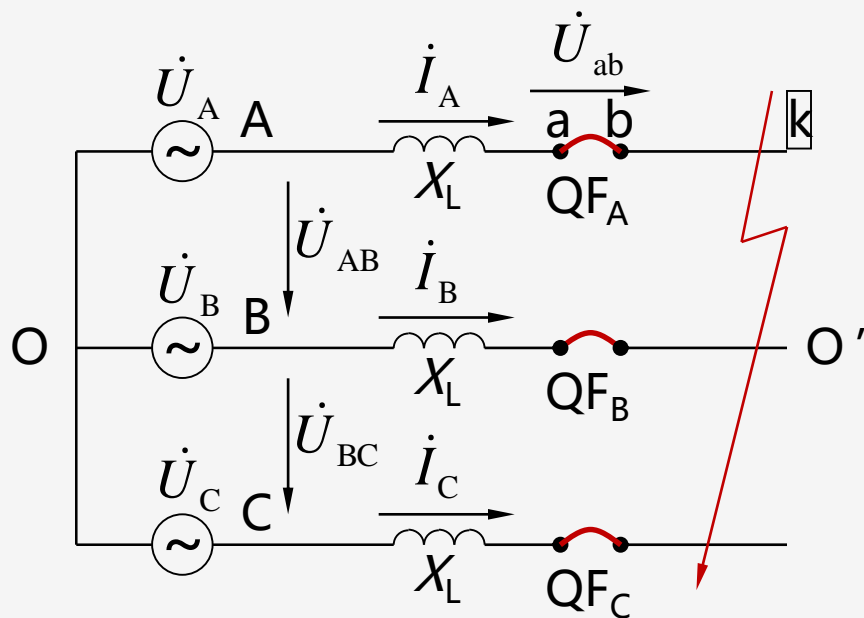
当电流过零时，工频恢复电压的瞬时值 $U_0 = U_m \sin \varphi$ 。

通常短路时， φ 角接近 90° ，所以 $U_0 = U_m \sin \varphi = U_m$ 。



3.2 不同短路类型对断路器开断能力的影响

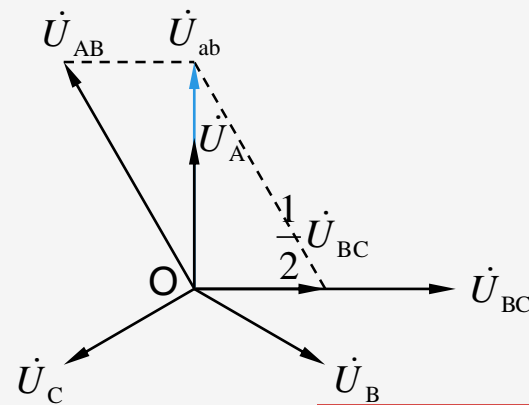
② 开断中性点不直接接地系统中的三相短路电路



■ 首先开断相：

■ 电弧电流先过零，电弧先熄灭。

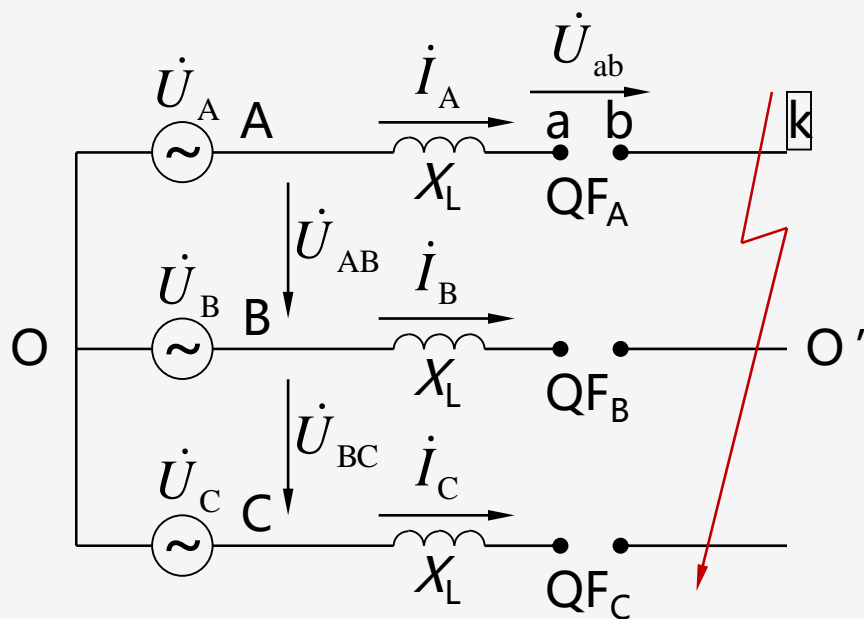
$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AO'} = \dot{U}_{AB} + \frac{1}{2}\dot{U}_{BC} = 1.5\dot{U}_A$$



- 在A相熄弧后，经过0.005s(90°)，B、C两相电流同时过零，电弧同时熄灭。
- 每个断口电压为 $0.5U_{BC}=0.866U_B(U_C)$ 。

3.2 不同短路类型对断路器开断能力的影响

② 开断中性点不直接接地系统中的三相短路电路



- 在A相熄弧后，经过0.005s(90°)，B、C两相电流同时过零，电弧同时熄灭。
- 每个断口电压为 $0.5U_{BC}=0.866U_B(U_C)$ 。

■ 首先开断相：

- 电弧电流先过零，电弧先熄灭。

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AO'} = \dot{U}_{AB} + \frac{1}{2}\dot{U}_{BC} = 1.5\dot{U}_A$$

■ 结论：

- 首先开断相的恢复电压最大，为1.5倍的相电压；
- 后续开断相的燃弧时间比首先开断相延长0.005s。

3.2 不同短路类型对断路器开断能力的影响

③ 开断中性点直接接地系统中的三相接地短路电路

- 三相接地短路：
 - 当零序阻抗与正序阻抗之比不大于3时，
 - 首先开断相恢复电压的工频分量为相电压的1.3倍；
 - 第二开断相恢复电压的工频分量为相电压的1.25倍；
 - 最后开断相恢复电压的工频分量为相电压。
- 三相直接短路：
 - 各相工频恢复电压与中性点不直接接地系统中的三相短路分析结果相同，即首先开断相恢复电压的工频分量为相电压的1.5倍。



3.2 不同短路类型对断路器开断能力的影响

④ 开断两相短路电路

- 中性点直接接地系统：
 - 工频恢复电压可达相电压的1.3倍。
- 其余情况：
 - 工频恢复电压为相电压的0.866倍。



3.2 不同短路类型对断路器开断能力的影响

小结:

- 影响工频恢复电压的因素：
 - 中性点接地方式
 - 短路故障类型
 - 三相开断顺序
- 首先开断相的工频恢复电压最大值：

$$U_{1m} = K_1 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{sm} = 0.816 K_1 U_{sm}$$

$$K_1 = \begin{cases} 1.3 & \text{中性点直接接地} \\ 1.5 & \text{中性点不接地} \end{cases}$$

- K_1 ——首先开断相开断系数；
- U_{sm} ——电网最高运行电压。
- 一般 $K_1=1.73$



第三章 灭弧原理及主要开关电器



第一节 断路器和隔离开关

第二节 电弧的形成和熄灭

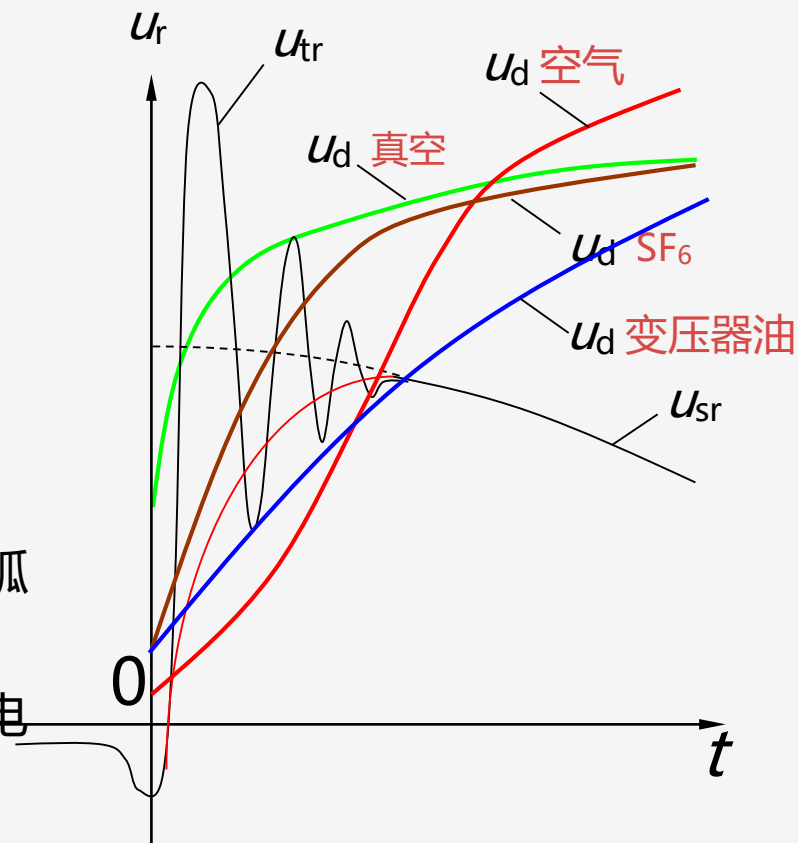
第三节 交流电弧电压的恢复过程

第四节 交流电弧熄灭的基本方法

4.0 弧隙电压恢复过程分析

- 交流电弧自然过零前后，电弧将自然熄灭
- 交流电弧自动熄灭后，弧隙中存在两个恢复过程。
 - 如果弧隙电压高于介质强度耐受电压，则弧隙被击穿，电弧重燃。
 - 如果弧隙电压低于介质强度耐受电压，则电弧不再重燃，即最终熄灭。

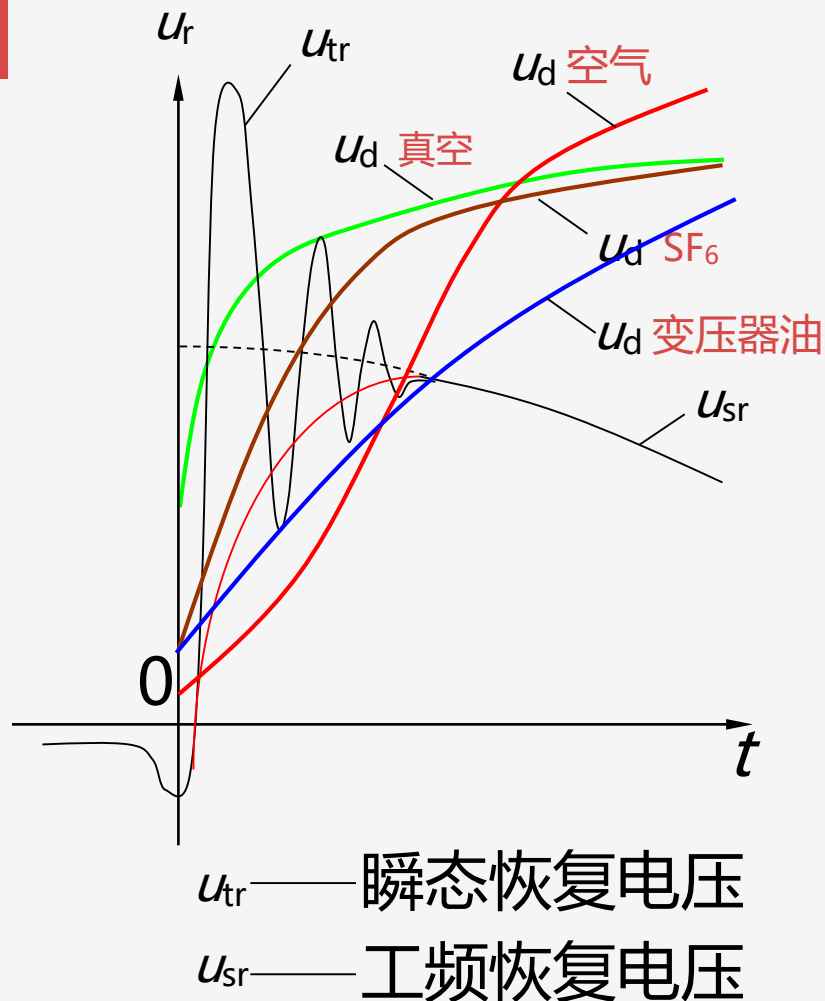
可见，应提高介质强度的恢复速度，降低弧隙电压的恢复速度。



U_{tr} ——瞬态恢复电压
 U_{sr} ——工频恢复电压

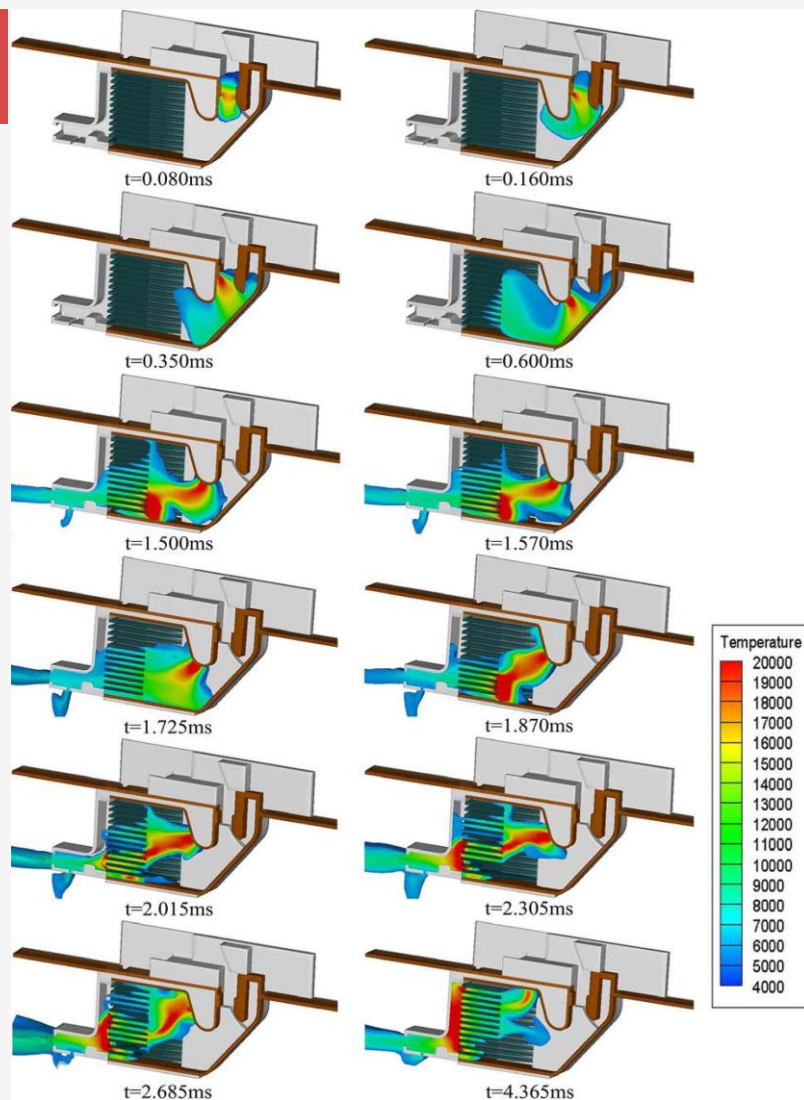
4.1 利用灭弧介质

- 不同灭弧介质具有不同的传热能力、介电强度、热游离温度和热容量。
- 这些参数数值越大，去游离作用就越强，电弧就越容易熄灭。
- 常用灭弧介质：
 - 空气
 - 变压器油
 - SF_6
 - 真空



4.2 设置灭弧栅

- 优点：
 - 把长弧变成短弧，
 - 电弧被拉长，
 - 放大近阴极效应。



4.3 采用特殊金属作灭弧触头

- 采用熔点高、导热系数和热容量大的耐高温金属作触头材料：
 - 可以减少热电子发射和电弧中的金属蒸气
 - 有较高的抗电弧、抗熔焊能力
- 常用的触头材料：
 - 铜、钨合金；
 - 银、钨合金等。



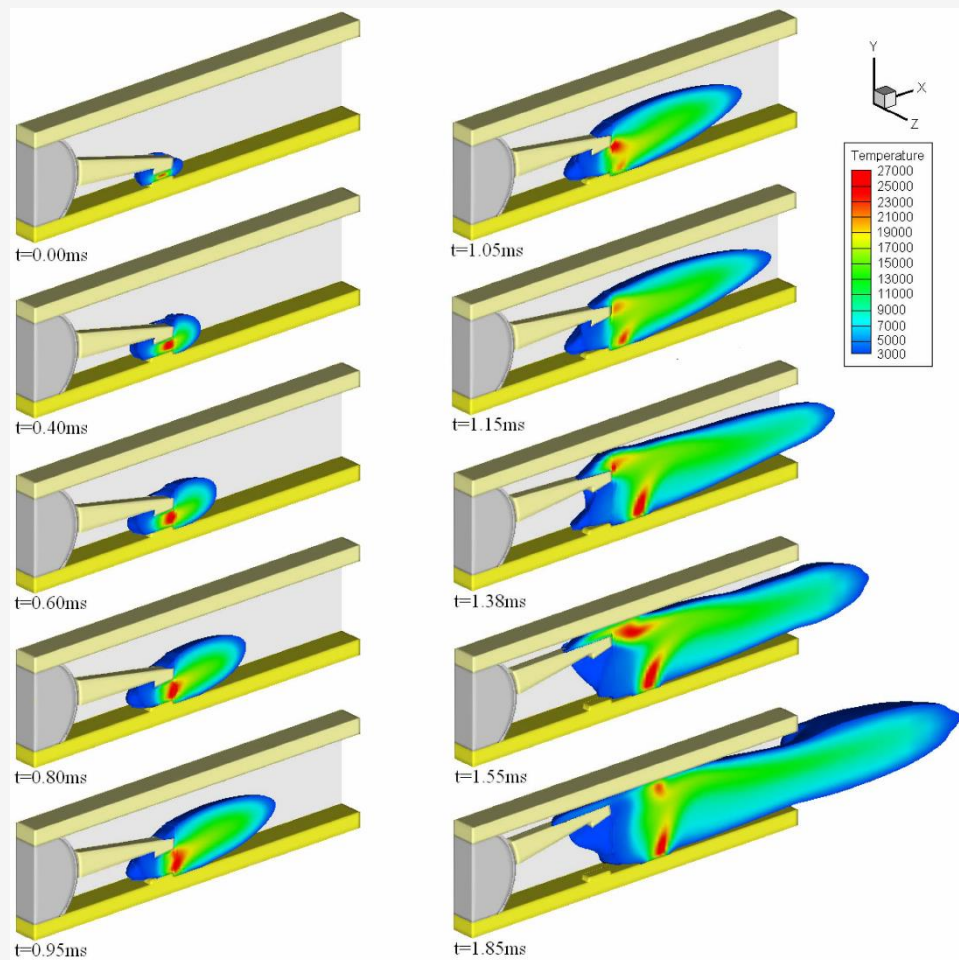
4.4 吹动拉长与冷却电弧

- 空气、油、SF₆断路器：
 - 利用各种结构形式的灭弧室，使气体或油吹动电弧，使带电离子扩散和冷却而复合
- 真空断路器：
 - 利用电弧电流产生的磁场吹动电弧
- 吹弧方向：
 - 纵吹
 - 横吹
 - 纵、横混合吹弧或环吹



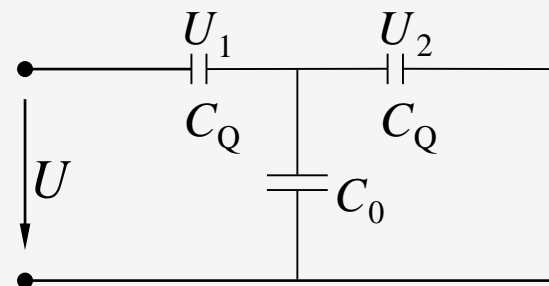
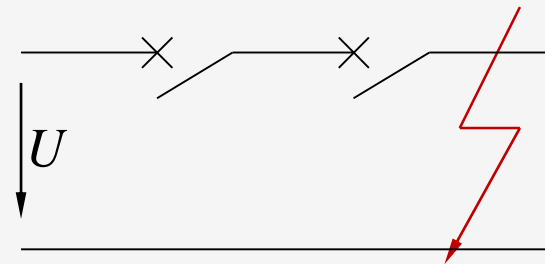
4.4 吹动拉长与冷却电弧

- 吹弧方向：
 - 纵吹
 - 横吹
 - 纵、横混合吹弧或环吹



4.5 采用多断口熄弧

- 优点：
 - 把长弧变成短弧，
 - 电弧被拉长，
 - 触头分离速度加快，
 - 断口电压降低。
- 问题：
 - 断口电压分配不均匀。



$$U_1 = U \frac{C_Q + C_0}{2C_Q + C_0} \approx U$$

$$U_2 = U \frac{C_Q}{2C_Q + C_0} \approx 0$$

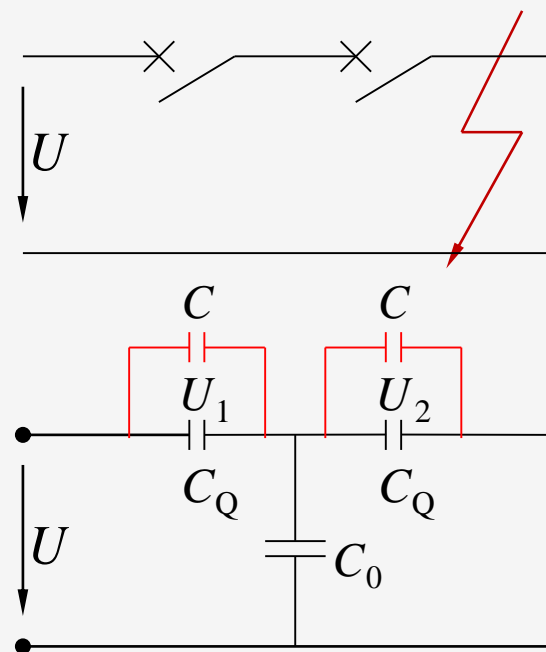
4.5 采用多断口熄弧

- 措施:

- 断口加装并联电容

$$U_1 = U \frac{(C_Q + C) + C_0}{2(C_Q + C) + C_0} \approx \frac{1}{2}U$$

$$U_2 = U \frac{(C_Q + C)}{2(C_Q + C) + C_0} \approx \frac{1}{2}U$$



4.6 提高断路器触头的分离速度

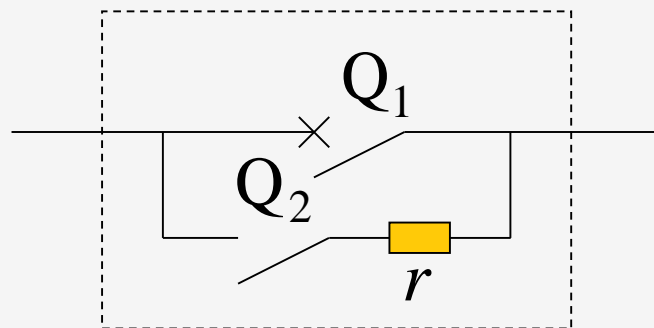
- **迅速拉长电弧**，可使弧隙的电场强度骤降，同时使电弧的表面突然增大，有利于电弧的冷却和带电质点的扩散。



4.7 断口加装并联电阻

• 作用：

- ① 改变恢复电压的恢复特性；
- ② 使电弧电流被分流。



Q_1 —— 主触头

Q_2 —— 辅助触头

4.8 隔离开关拉弧的危害

- 隔离开关暴露在空气中，不具备灭弧能力
 - ① 进行电压隔离
 - ② 等电位操作

