

西安交通大学

Xi'an Jiaotong University

电器理论基础

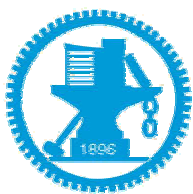
Fundamentals of Electrical Apparatuses

西安交通大学
电器教研室

史宗谦
贾申利

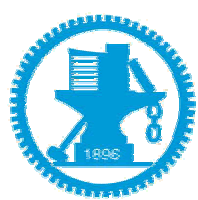
zqshi@mail.xjtu.edu.cn
sljia@mail.xjtu.edu.cn

2008.2~2008.5



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



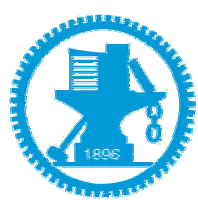
第五章 开关电器典型灭弧装置的工作原理

§ 5-0 序

§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

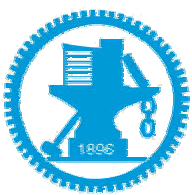
§ 5-2 提高灭弧装置开断能力的辅助方法

§ 5-3 新型开断装置简介



§ 5-0 序

- 若不采取任何措施，空气中**自由燃烧电弧**（**Free burning arc**），其**开断能力非常有限**
- 为减少电弧对触头的烧损和限制电弧扩展的空间，通常需**采取加强灭弧能力的措施**
- 灭弧装置的**灭弧原理**
 - ◆ 拉长电弧
 - 触头分开，机械拉长
 - 磁场作用，电动力拉长
 - ◆ 耐弧材料狭缝、绝缘栅，冷却、消电离
 - ◆ 金属栅片，串联短弧

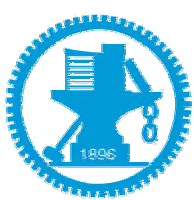


§ 5-0 序

■ 灭弧装置的灭弧原理

- ◆ 固体产气材料，提高气压、吹弧
 - 熔断器
 - 新型低压断路器
- ◆ 变压器油，电弧分解产生气体，压力升高、吹弧
- ◆ 压缩空气吹弧
- ◆ SF₆气体灭弧
- ◆ 真空灭弧
- ◆ 石英砂等固体介质，限制电弧直径，加强冷却

■ 多数情况下多个灭弧原理综合利用



§ 5-0 序

■ 组合式灭弧装置的灭弧原理

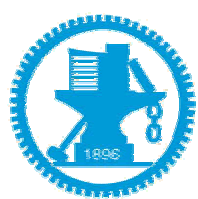
◆ 同步开断装置

- 选相分闸
- 要考虑电流过零时弧隙电压承受能力
- 分相操作

◆ 触点开关与电力电子器件混合开断

◆ 弧隙两端并联低值电阻

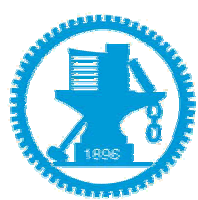
◆ 限流器 + 断路器



§ 5-0 序

■ 组合式灭弧装置的灭弧原理

- ◆ SF_6 灭弧室 + 真空灭弧室
- ◆ 爆炸母线 + 熔断器
- ◆ 高压直流开断
 - 快速断路器 + 人工过零回路



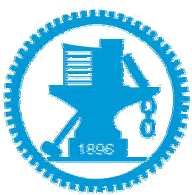
第五章 开关电器典型灭弧装置的工作原理

§ 5-0 序

§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

§ 5-2 提高灭弧装置开断能力的辅助方法

§ 5-3 新型开断装置简介

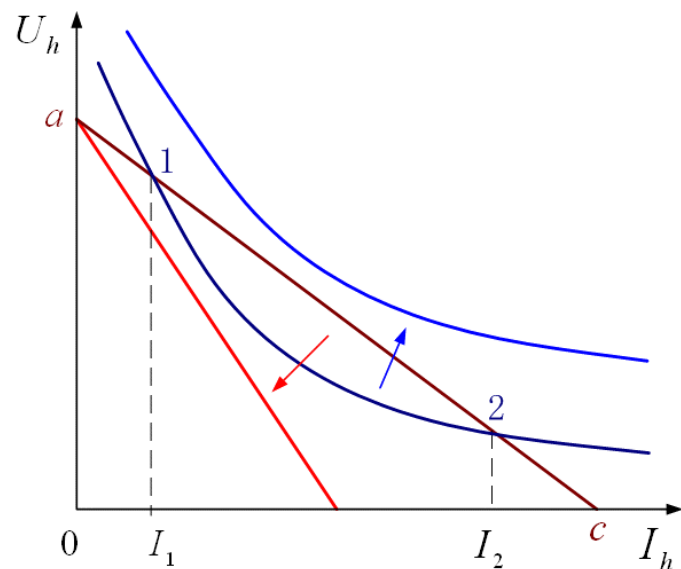


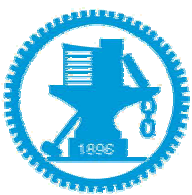
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 简单开断

◆ 在大气中分开触头，拉长电弧使电弧熄灭的方法

- **原理**：提高电弧电压
 - **临界长度**：使电弧恰好熄灭所需的电弧长度
 - 开断**交流**电弧所需的临界长度比开断**直流**电弧时小
- ➡ 交流情况下，电流有**自然过零点**



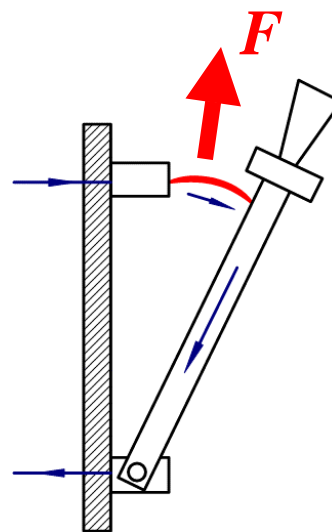
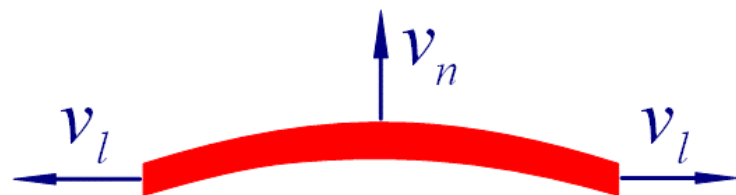


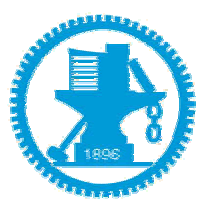
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 简单开断

◆ 在大气中分开触头，拉长电弧使电弧熄灭的方法

- 沿切向或法向拉长电弧
- 方法
 - ➡ 电极打开，切线拉长
 - ➡ 磁场作用，法向拉长
- 刀开关





§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 简单开断

◆ 在大气中分开触头，拉长电弧使电弧熄灭的方法

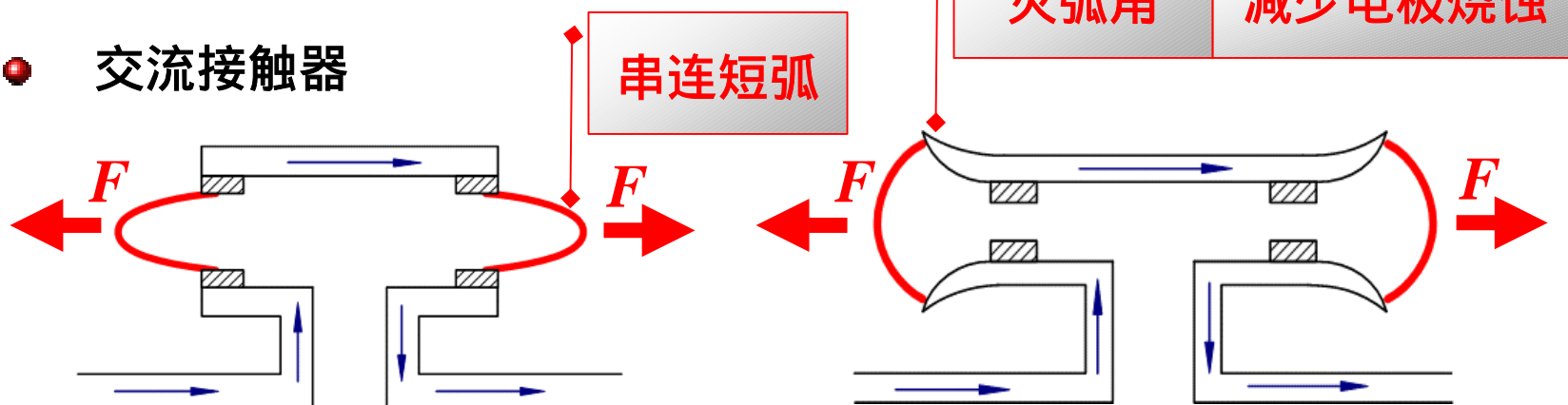
- 沿切向或法向拉长电弧

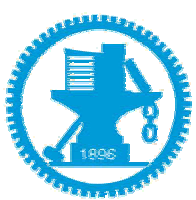
- 方法

- ➡ 电极打开，切线拉长

- ➡ 磁场作用，法向拉长

- 交流接触器

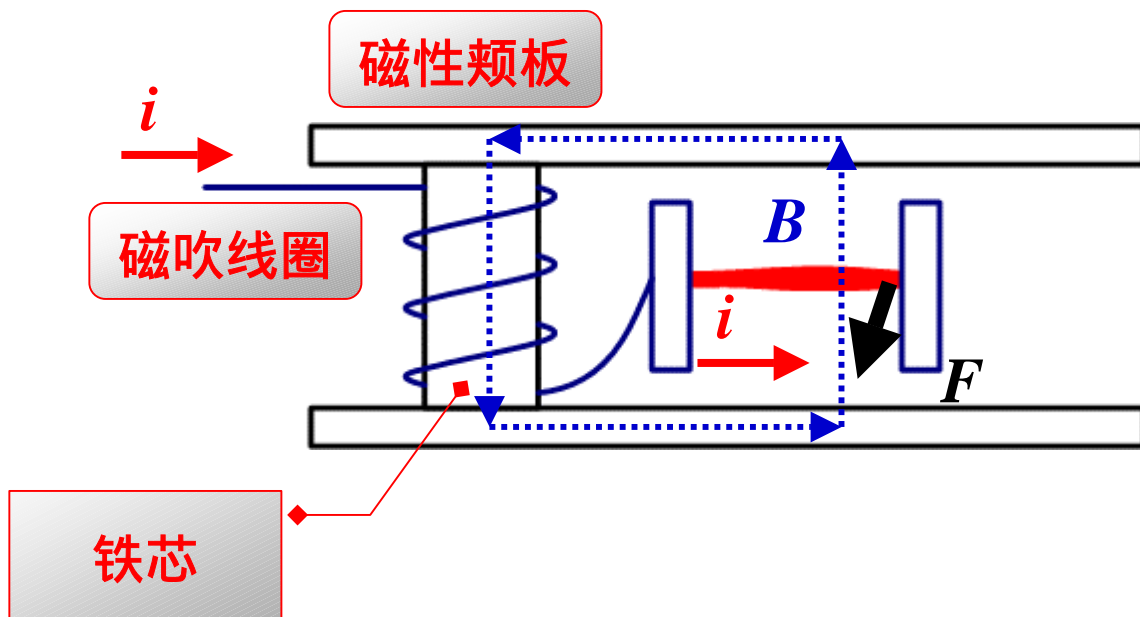


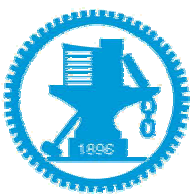


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 磁吹线圈

- ◆ 产生附加磁场，使电弧迅速移动和拉长



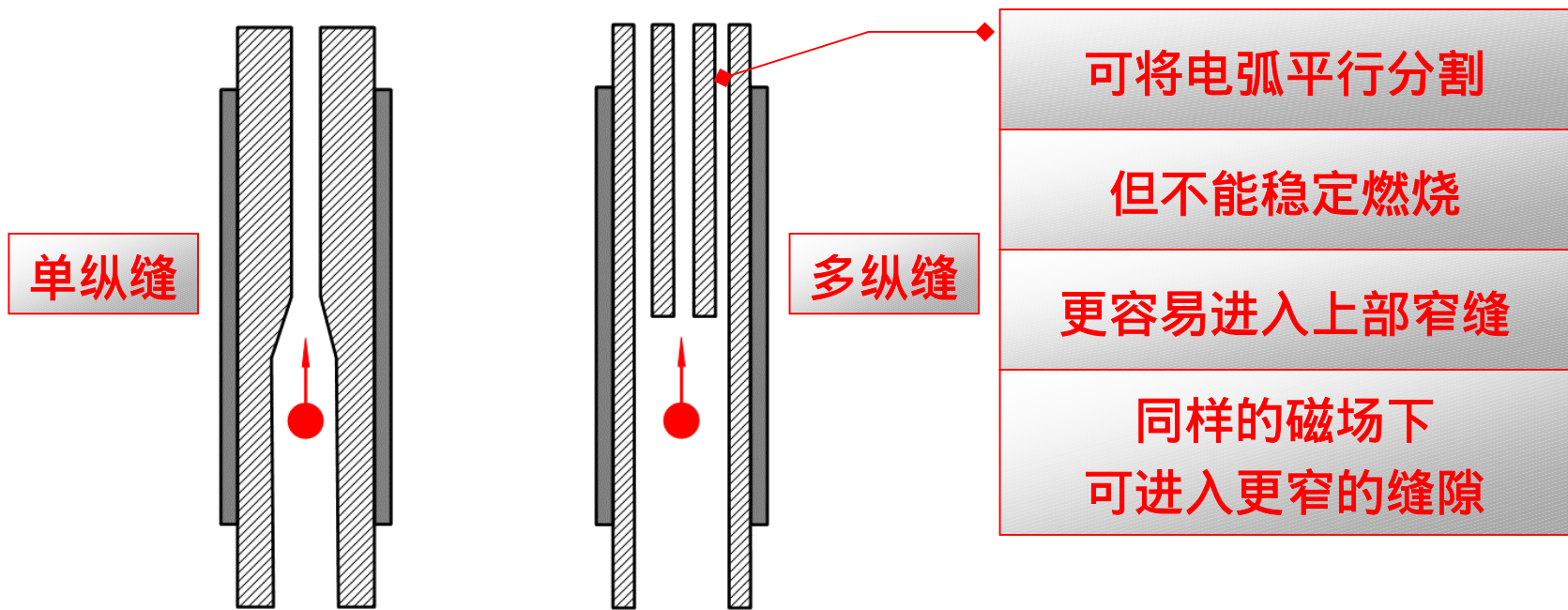


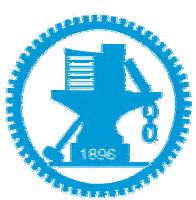
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 纵缝灭弧

◆ 磁场驱动电弧进入耐弧绝缘材料制成的纵缝中灭弧

- **纵缝**：缝隙方向与电弧轴线平行
- **原理**：冷却、消电离，提高电场强度和电弧电压





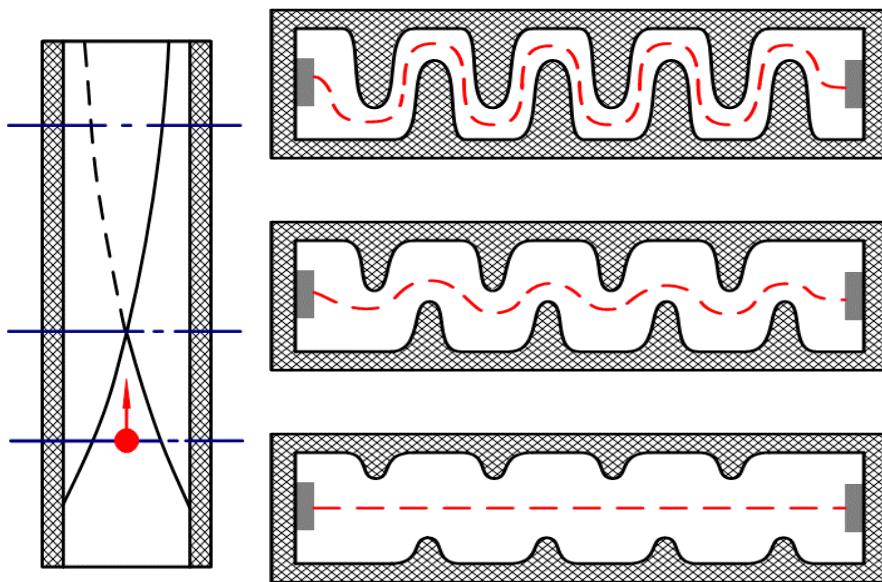
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 纵缝灭弧

◆ 磁场驱动电弧进入耐弧绝缘材料制成的纵缝中灭弧

- **纵缝**：缝隙方向与电弧轴线平行
- **原理**：冷却、消电离，提高电场强度和电弧电压

纵向曲缝
(迷宫式)



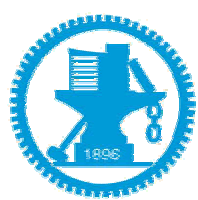
电弧与纵缝的接触面积

冷却、消电离

电场强度

电弧长度

电弧电压

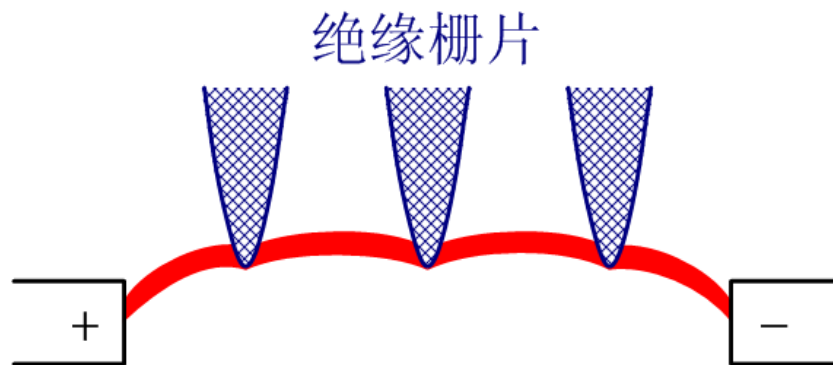


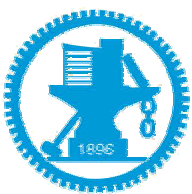
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 绝缘栅片灭弧

◆ 磁场驱动电弧与耐弧绝缘材料接触

- **原理**：拉长、冷却、消电离
- 可利用电弧**自生磁场**

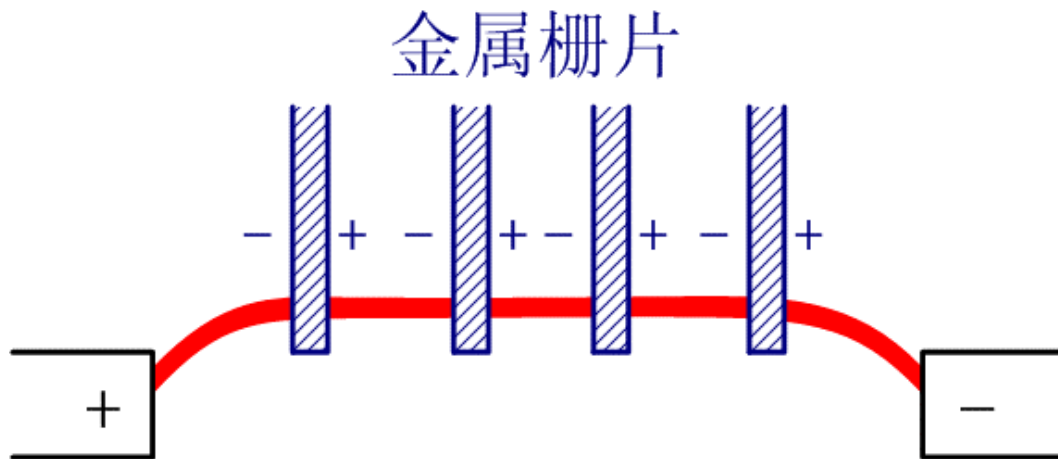


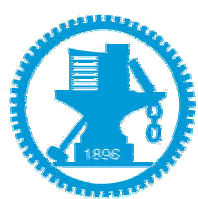


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 金属栅片（去离子栅）灭弧

- **原理**：将电弧分成许多**串联短弧** $U_h = nU_0 + El$ ，提高电弧电压，**限流开断**。
- 电流过零后，提高**介质初始恢复强度特性**（ nU_{jfo} ）





§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

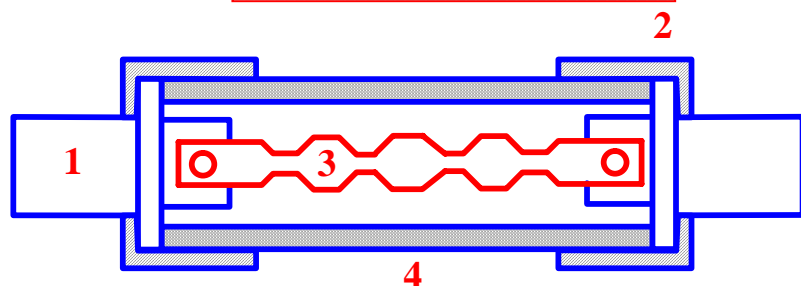
■ 固体产气灭弧装置

◆ 固体绝缘材料在电弧作用下气化

- **固体绝缘材料**：钢纸、有机玻璃、聚四氟乙烯.....
- **原理**：提高气压或利用气体吹弧

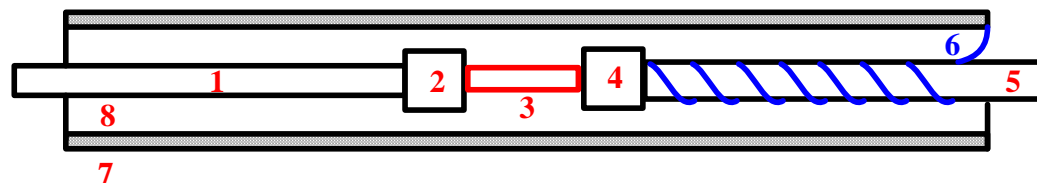


1：触刀 2：端帽
3：熔片 4：熔管

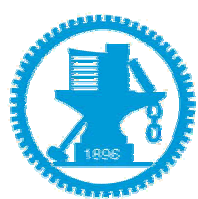


低压密封式熔断器

1、5：软线； 2、4：夹片；
3：熔丝；6：弹簧
7：胶纸管；8：钢纸管



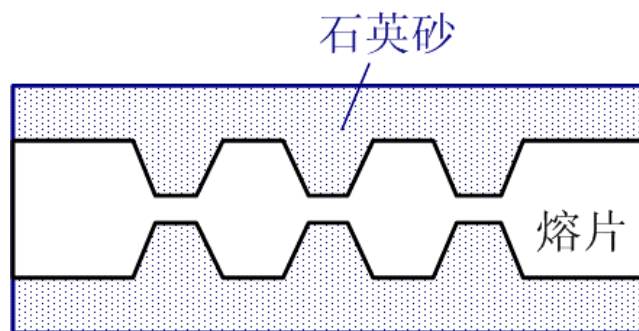
高压跌落式熔断器熔管



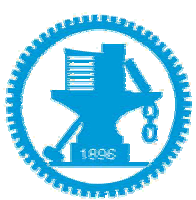
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 石英砂灭弧装置

- ◆ 限制弧柱扩展并冷却
- ◆ 采用三种灭弧原理
 - 多断口串联
 - 提高气压
 - 狭缝冷却



石英砂熔断器的熔管



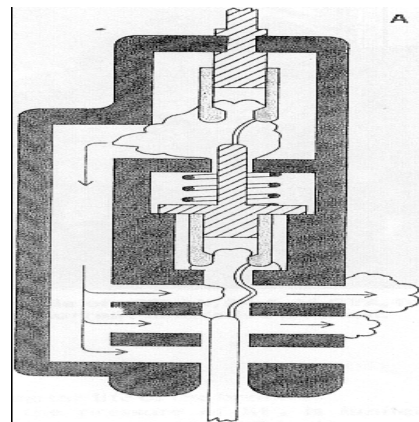
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

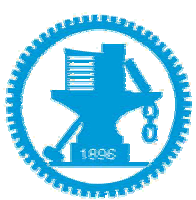
■ 变压器油灭弧装置（1900年）

◆ 将油气化分解产生高压，以推动冷油和气体吹弧

- 油气的主要成份：氢气
- 氢气具有很高的导热系数，利于散热
- 也可采用油吹

◆ 随着少油化趋势，已逐渐被淘汰





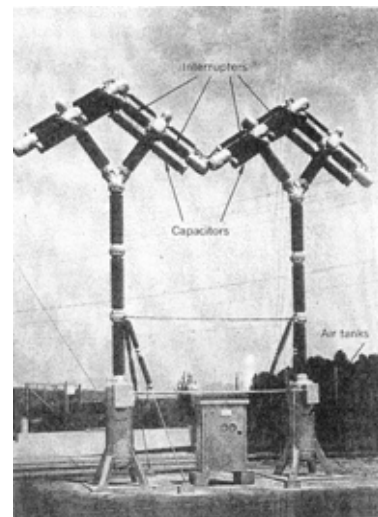
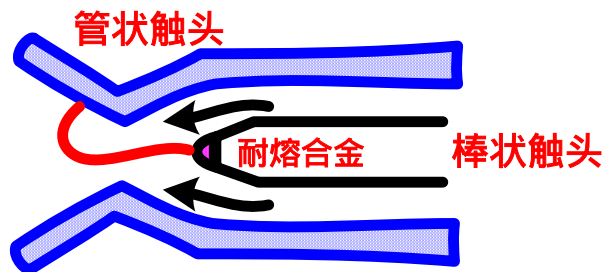
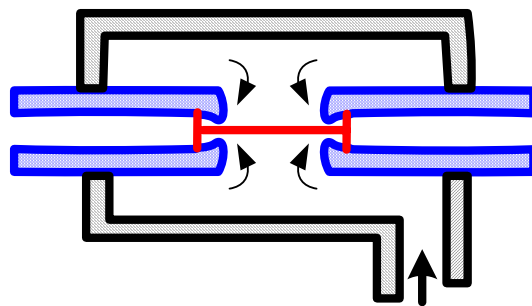
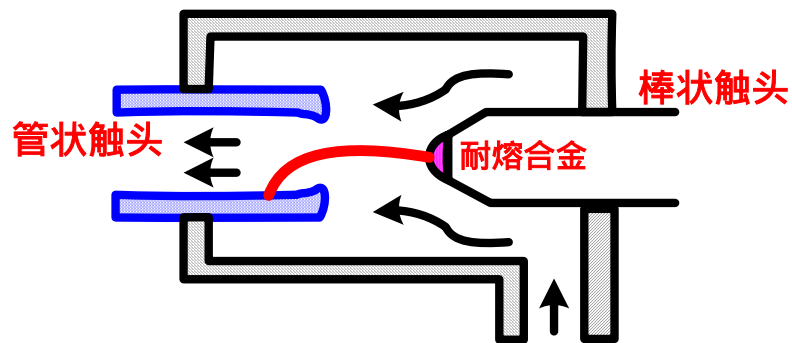
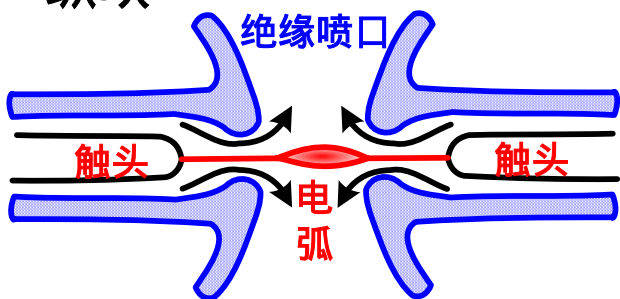
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

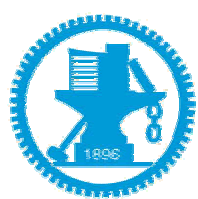
■ 压缩空气灭弧装置（1930年）

◆ 利用压缩空气吹弧，并提高压力

● 横吹（已淘汰）

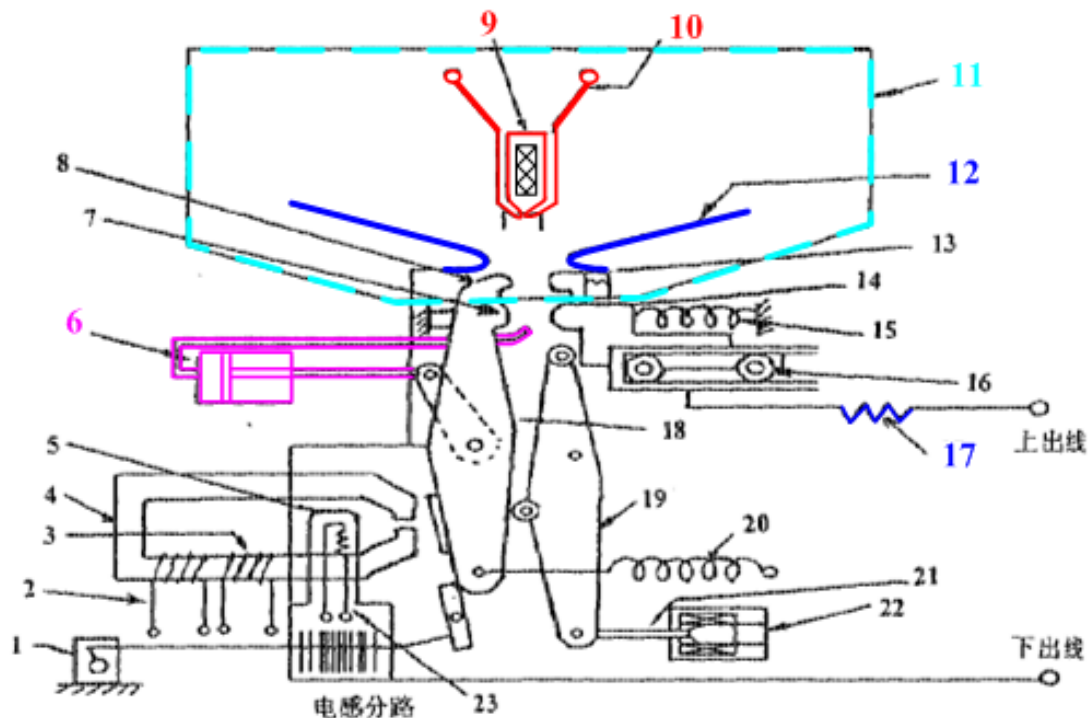
● 纵吹



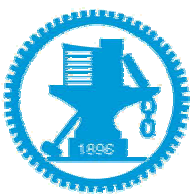


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 气吹 + 磁吹



- 1.辅助转换开关 2.测试线圈 3.保持线圈 4.保持电磁铁 5.去磁分路 6.气吹
7.动主触头 8.动弧触头 9.二次吹弧线圈 10.二次引弧角 11.灭弧罩 12.一次引弧角
13.静弧触头 14.静主触头 15.触头弹簧 16.小车 17.一次吹弧线圈 18.触头杆
19.合闸杠杆 20.脱扣弹簧 21.合闸连杆 22.合闸电磁铁 23.分励线圈



§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

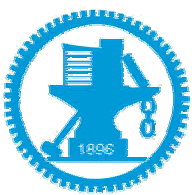
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置 (1950年)

◆ SF₆的物理特性

- 纯净的SF₆：无色、无味、无毒、不易燃烧、密度为空气的5倍
- 液化温度
 - ➡ 0.1MPa : - 62
 - ➡ 1.2MPa : 0
 - ➡ 一般充入断路器的SF₆气体压力为0.35 ~ 0.65MPa范围，其液化温度为-40

◆ SF₆的电气性能

- 绝缘性能高
 - ➡ 负电性气体
 - ➡ 0.1MPa时击穿电压为氮气的5 ~ 6倍
 - ➡ 0.16MPa时击穿电压与变压器油相当
 - ➡ 击穿电压是压缩空气的2~3倍



§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

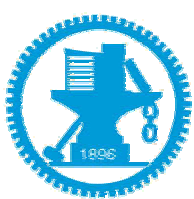
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆的物理特性

- 纯净的SF₆：无色、无味、无毒、不易燃烧、密度为空气的5倍
- 液化温度
 - ➡ 0.1MPa : - 62
 - ➡ 1.2MPa : 0
 - ➡ 一般充入断路器的SF₆气体压力为0.35 ~ 0.65MPa范围，其液化温度为-40

◆ SF₆的电气性能

- 灭弧能力强
 - ➡ 电弧等离子体电离度高，因而电弧电压低，电弧能量小
 - ➡ 电弧直径小，电弧时间常数小，介质恢复速度上升快
 - ➡ 负电性阻碍弧后电场电离。提高介质恢复速度的上升速度



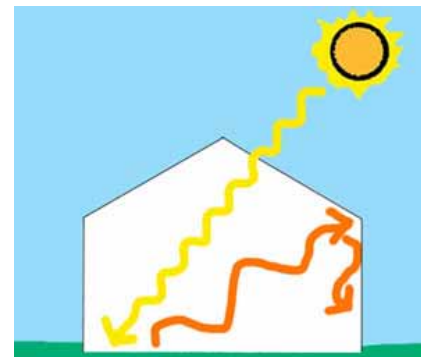
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

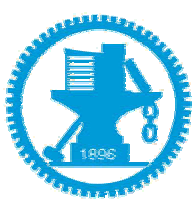
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆的危害

- 分解物：HF , SO₂ , SOF₂ , SOF₄ , SO₂F₄有**剧毒**、**强腐蚀性**
- 严重的**温室效应气体** (green house gas)
 - ➡ 全球变暖潜能 (Global Warming Potential) (GWP) : 在某一时间框架内 , 各种温室气体的温室效应对应于相同效应的**二氧化碳**的质量。
 - ➡ SF₆气体的分子结构非常稳定,其寿命长达 **3200年**

	二氧化碳	甲烷	氧化亚氮	氢氟碳化物	全氟化碳	六氟化硫
GWP	1	21	310	140 ~ 11700	6500~9200	23900





§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

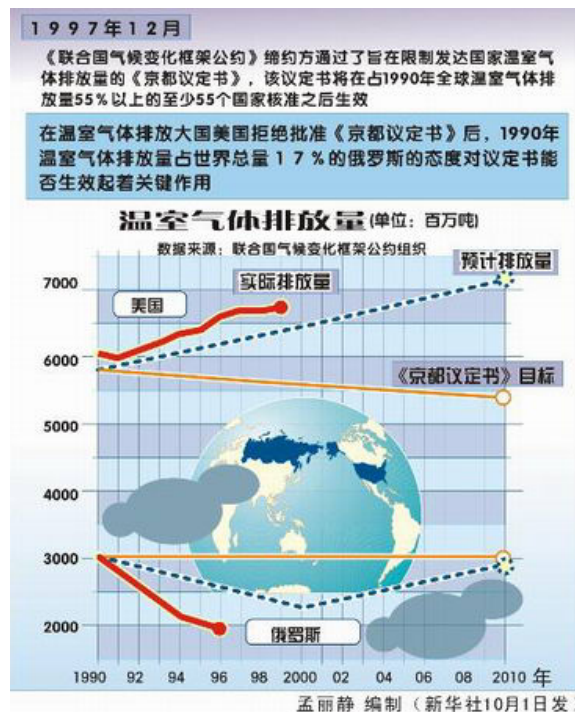
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

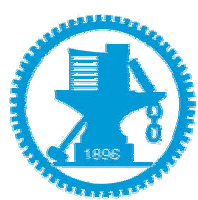
◆ SF₆的危害

- 分解物：HF , SO₂ , SOF₂ , SOF₄ , SO₂F₄有**剧毒**、**强腐蚀性**
- 严重的**温室效应气体** (green house gas)

◆ 1997年《京都议定书》限制了SF₆气体使用

- 减少SF₆的排放、泄漏
- 寻找SF₆的**替代绝缘**、**灭弧介质**

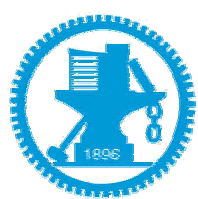




§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置



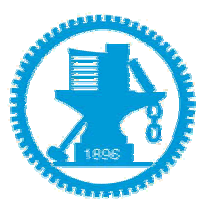


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

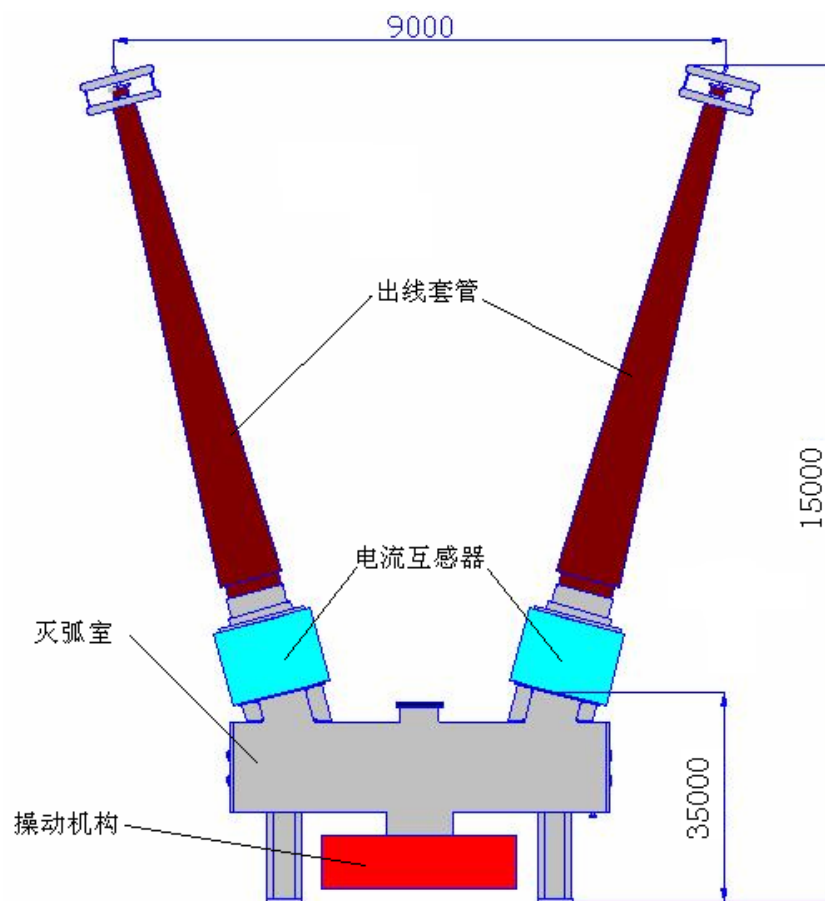


日本东京电力公司1000kV试验变电站

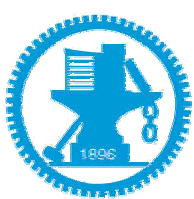


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置



800kV罐式SF6断路器示意图

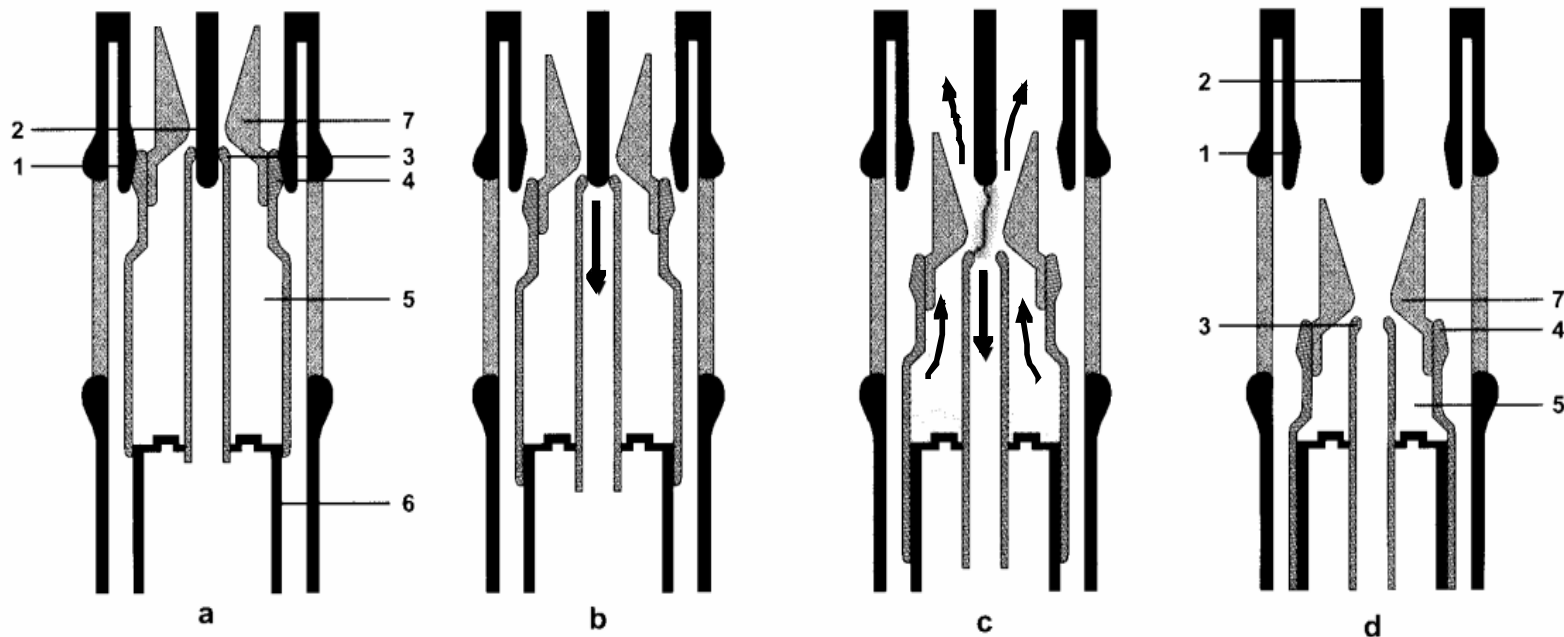


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

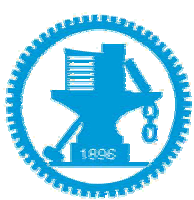
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆灭弧装置的灭弧方式

● 压气式 (Puffer) : 利用活塞压缩气体, 形成压力差



1— 静主触头 2— 静弧触头 3— 动弧触头 4— 动主触头
5— 压气缸 6— 压气活塞 7— 喷口

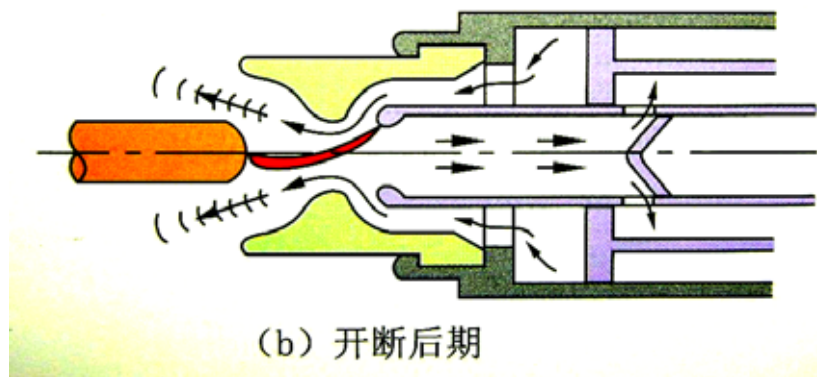
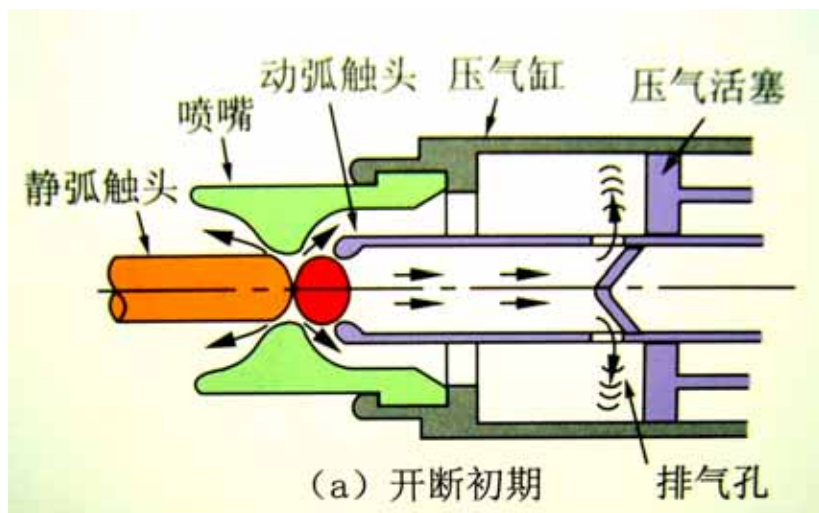


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

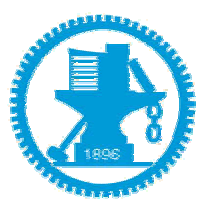
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆灭弧装置的灭弧方式

- 压气式 (Puffer) : 利用活塞压缩气体, 形成压力差



改良压气型灭弧室的开断

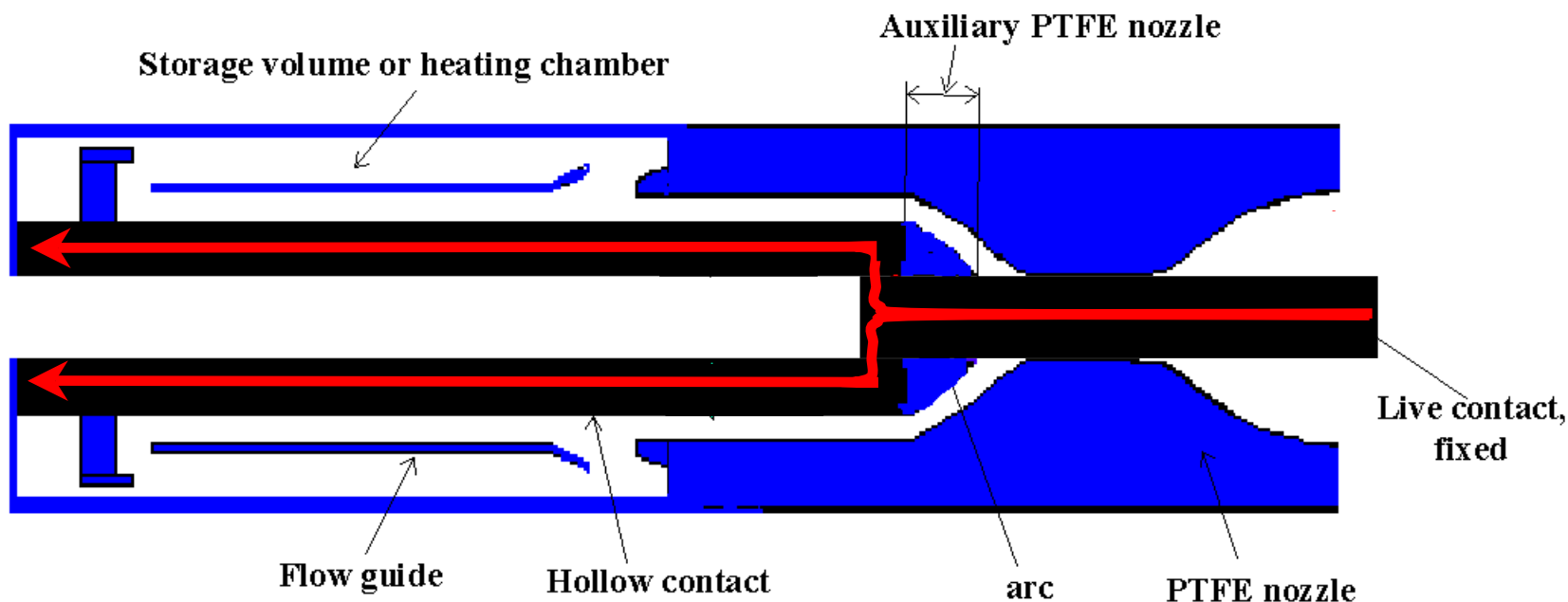


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

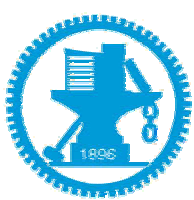
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆灭弧装置的灭弧方式

- 自能式 (Auto-expansion) : 利用电弧自身的能量加热气体 , 形成压力差



导通状态

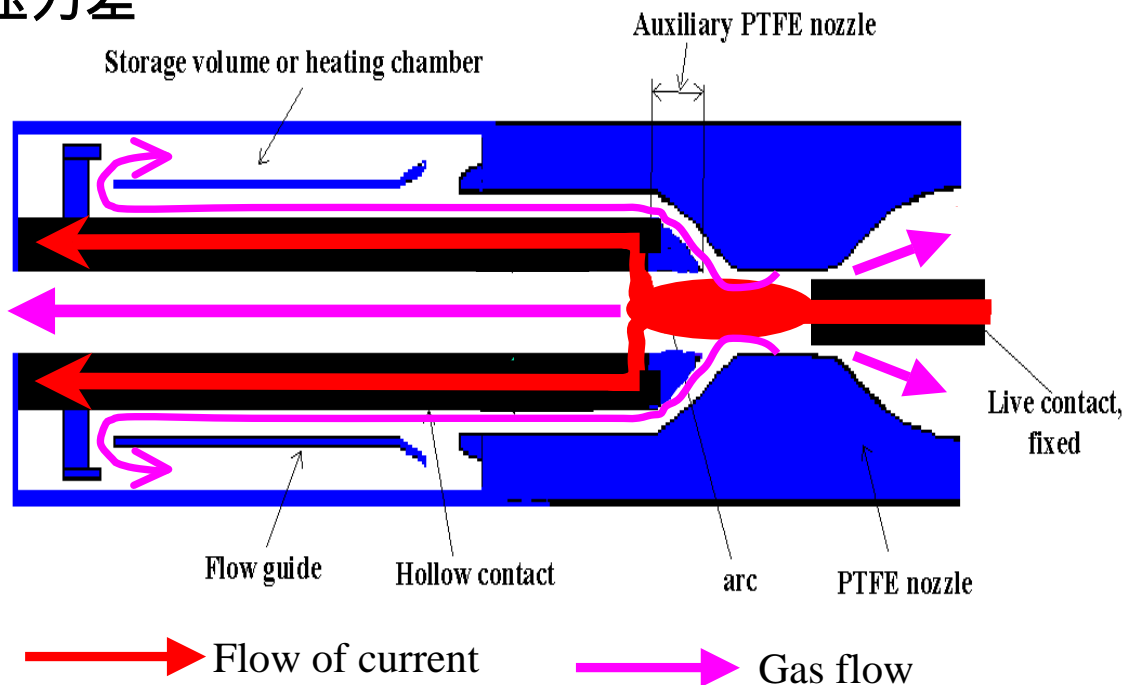


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

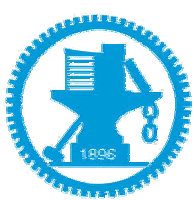
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆灭弧装置的灭弧方式

- 自能式 (Auto-expansion) : 利用电弧自身的能量加热气体 , 形成压力差



开断过程：大电流阶段

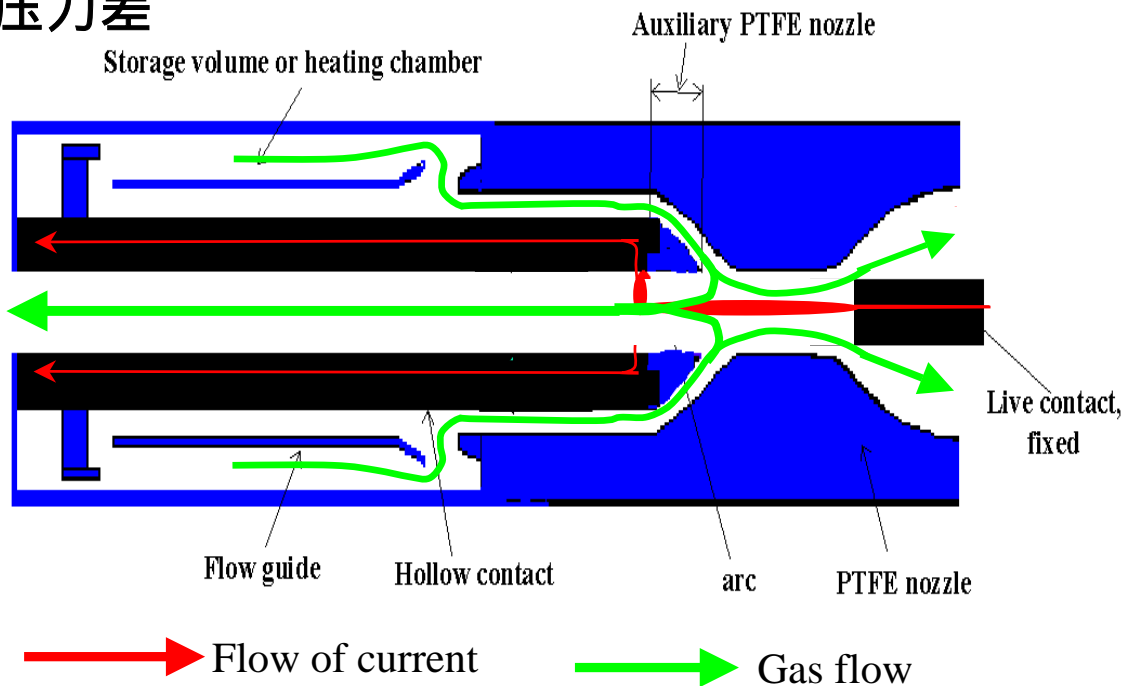


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

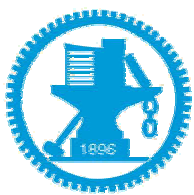
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆灭弧装置的灭弧方式

- 自能式 (Auto-expansion) : 利用电弧自身的能量加热气体 , 形成压力差



开断过程：过零阶段

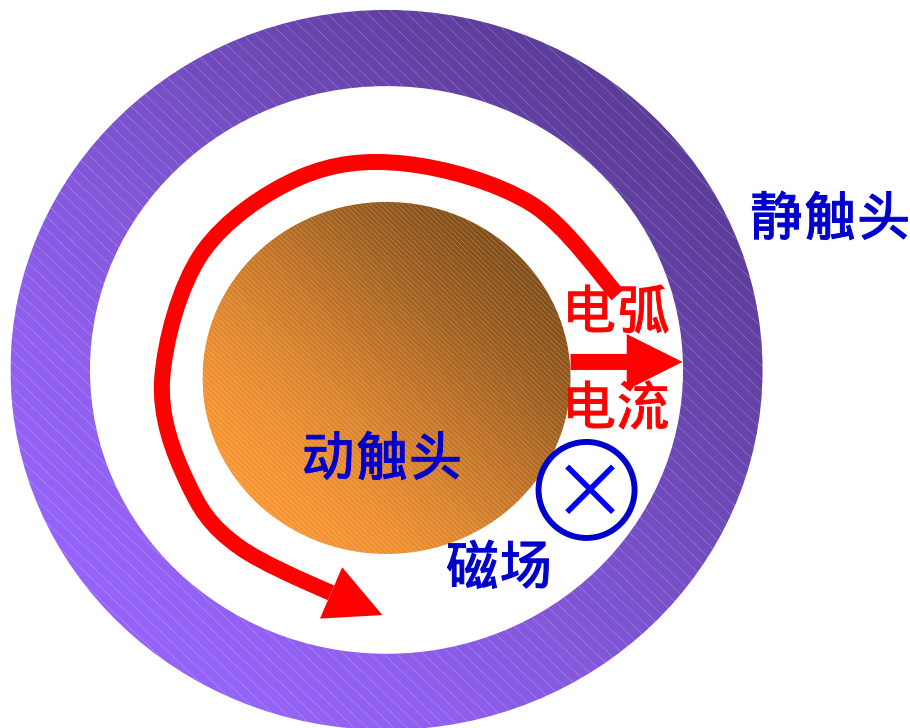


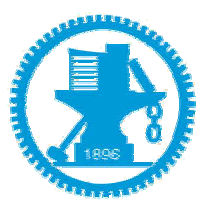
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆灭弧装置的灭弧方式

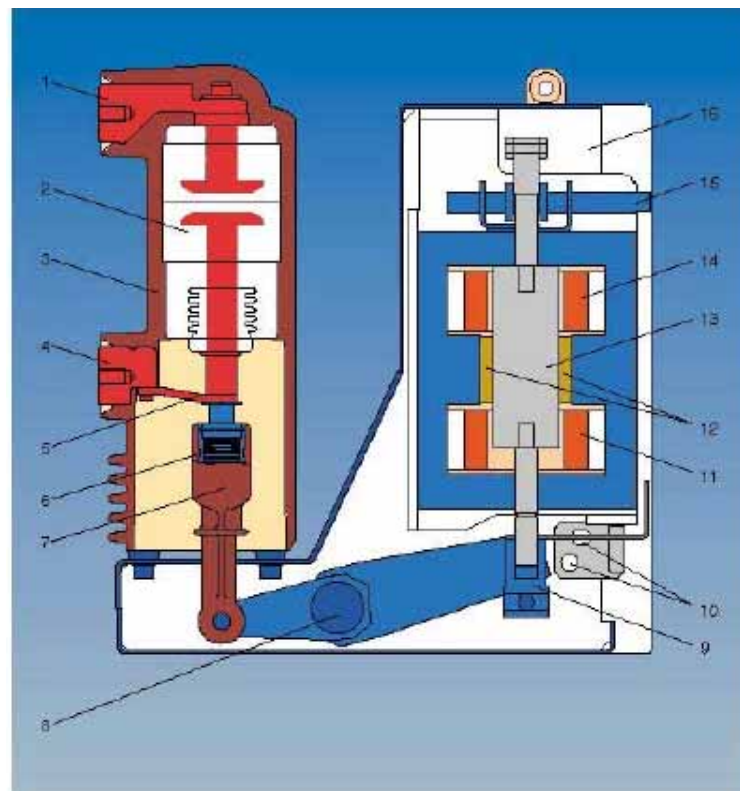
- 旋弧式 (Rotary Arc) : 利用**磁场** , 使电弧**旋转**、**冷却** (**1970年**)

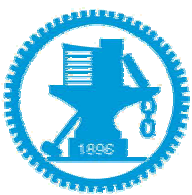




§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置



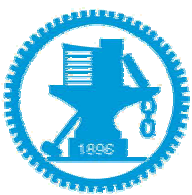


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空灭弧室的特点

- 真空间隙**击穿强度高**
 - ➡ 电极开距 (**8-10mm @ 12kV**) 小于气体间隙 , **体积小** , 操作机构小
 - ➡ 零后**介质恢复强度上升速度高** , 利于电弧熄灭
- 真空电弧电压低 , **燃弧能量小**
 - ➡ 电弧**熄灭容易**
 - ➡ 触头烧蚀轻微 , **电寿命高**
- 触头材料不易氧化 , 接触电阻小
- **环境友好** , 无起火危险
- 灭弧室**免维护** , 使用寿命长 (灭弧室保证20年)

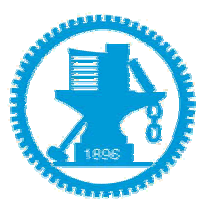


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 存在的问题

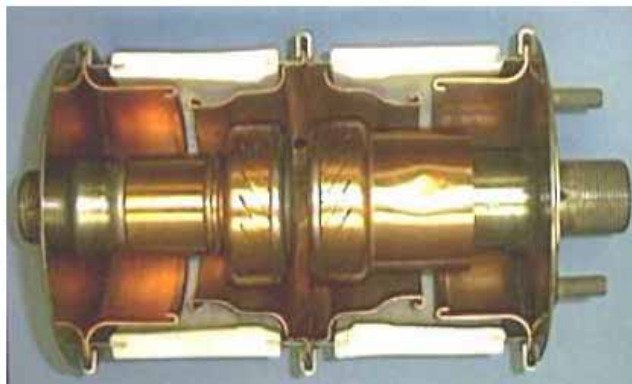
- 截流过电压 (chopping current)
 - ➡ 可通过**电极材料**解决
- 真空度监测
 - ➡ **在线监测**难度大
- 高电压等级真空灭弧室
 - ➡ 真空间隙的耐压强度**非线性**
 - ➡ **长间隙击穿的机理？**



§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空灭弧室 (Vacuum Interrupter) 结构

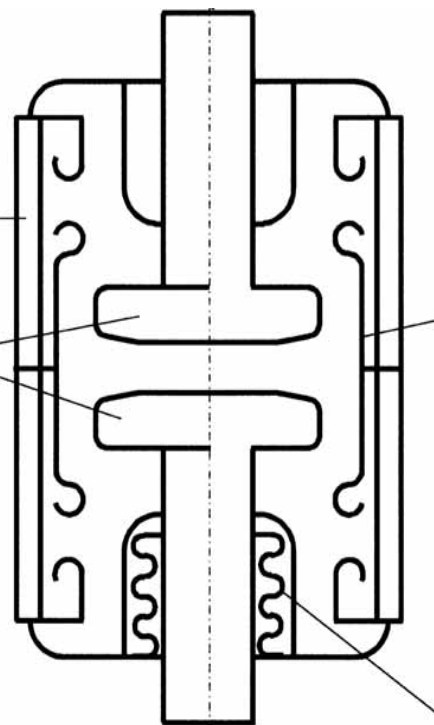


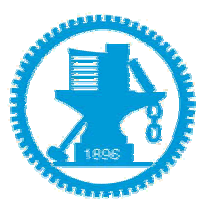
陶瓷外壳
ceramic insulator

触头
contacts

屏蔽罩
metal screen

波纹管
metal bellows

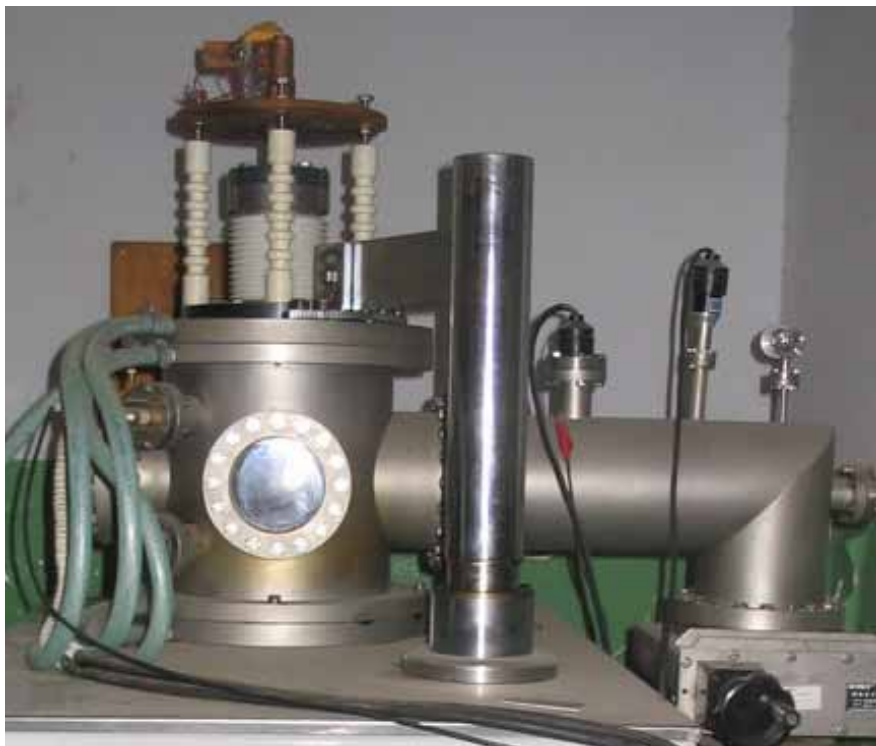




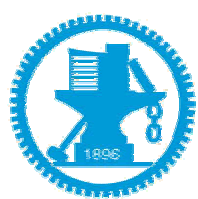
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的研究设备



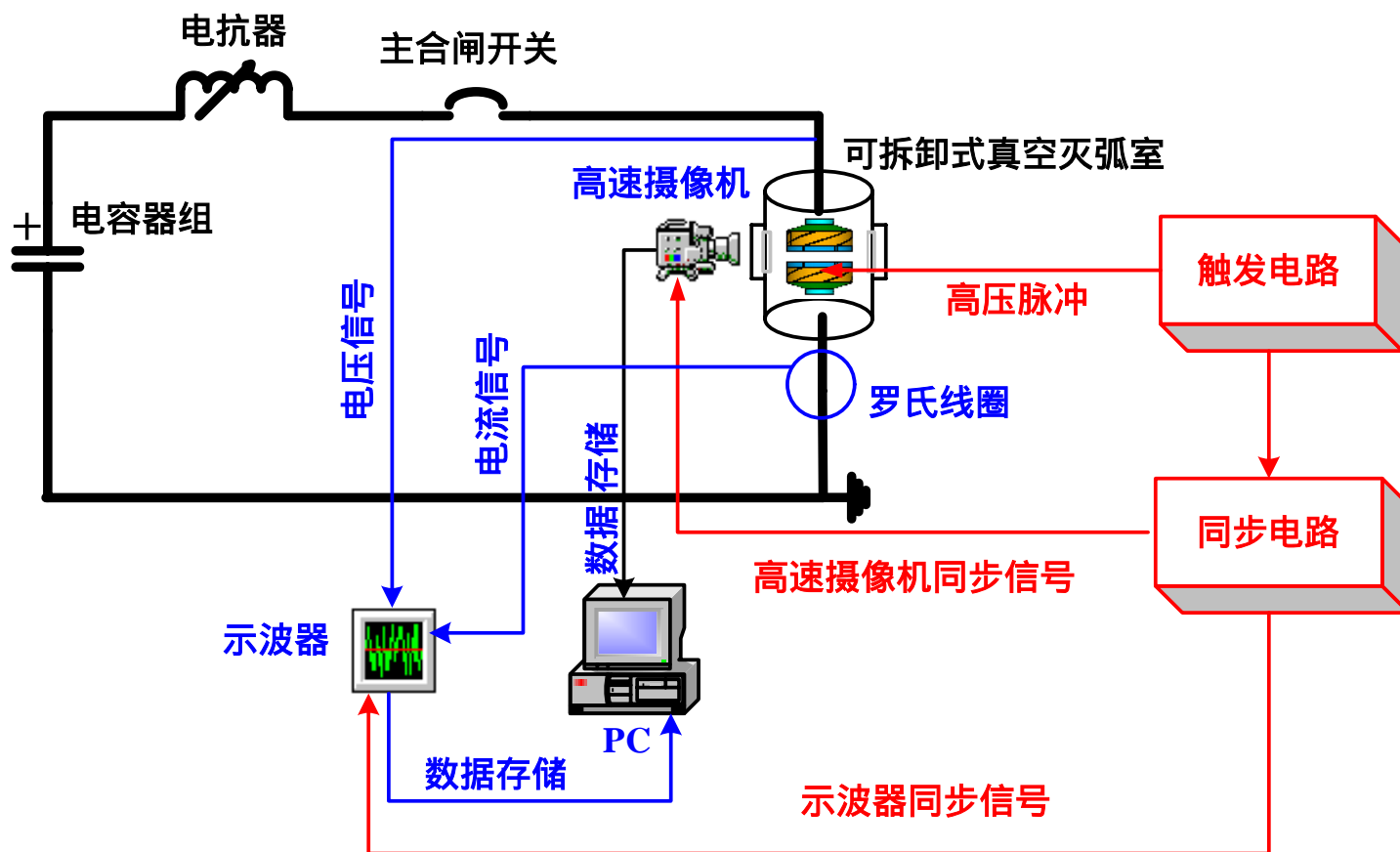
可拆卸式真空灭弧室
Detachable Vacuum Chamber

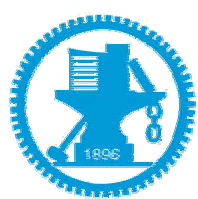


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

真空 (Vacuum) 灭弧装置

研究真空电弧的实验线路



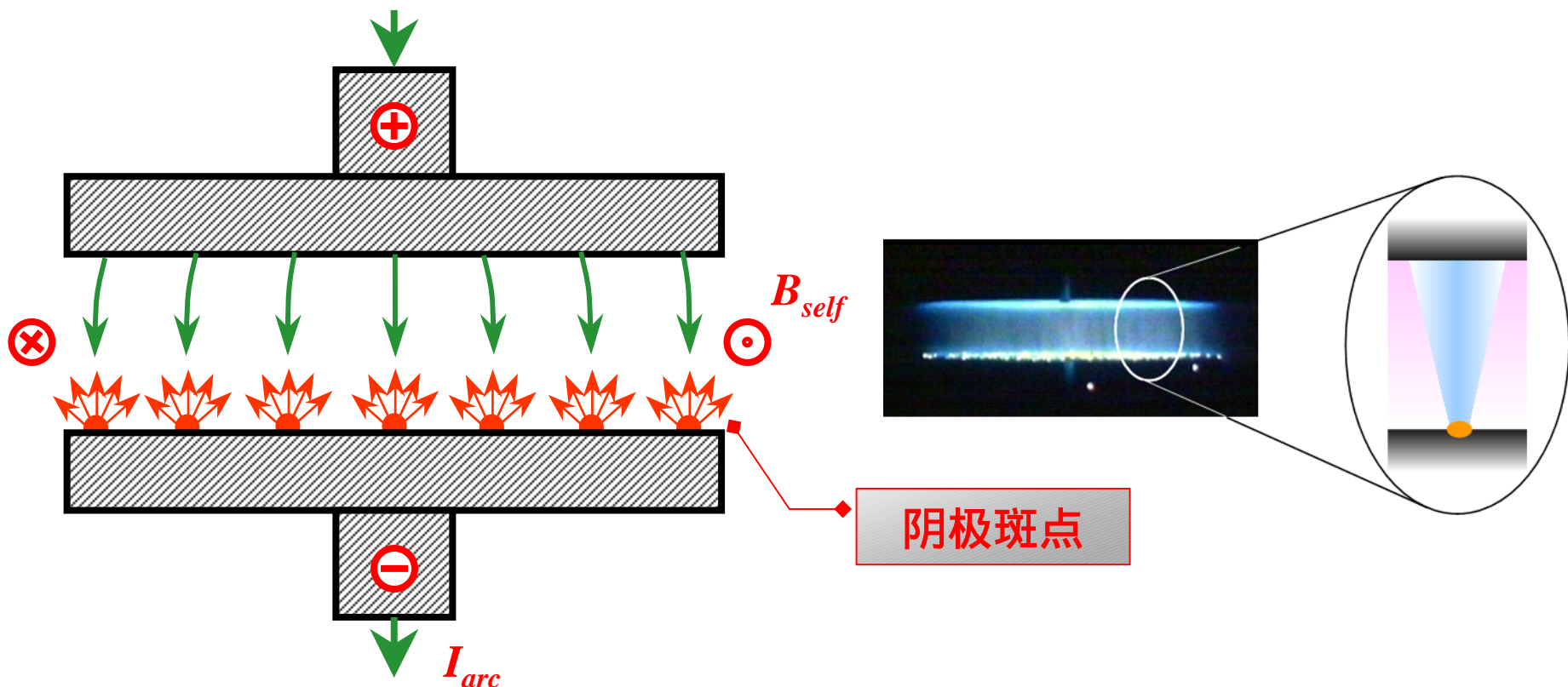


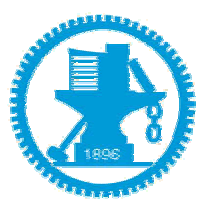
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的形态

- 小电流时为**扩散弧** (7~8kA以下)



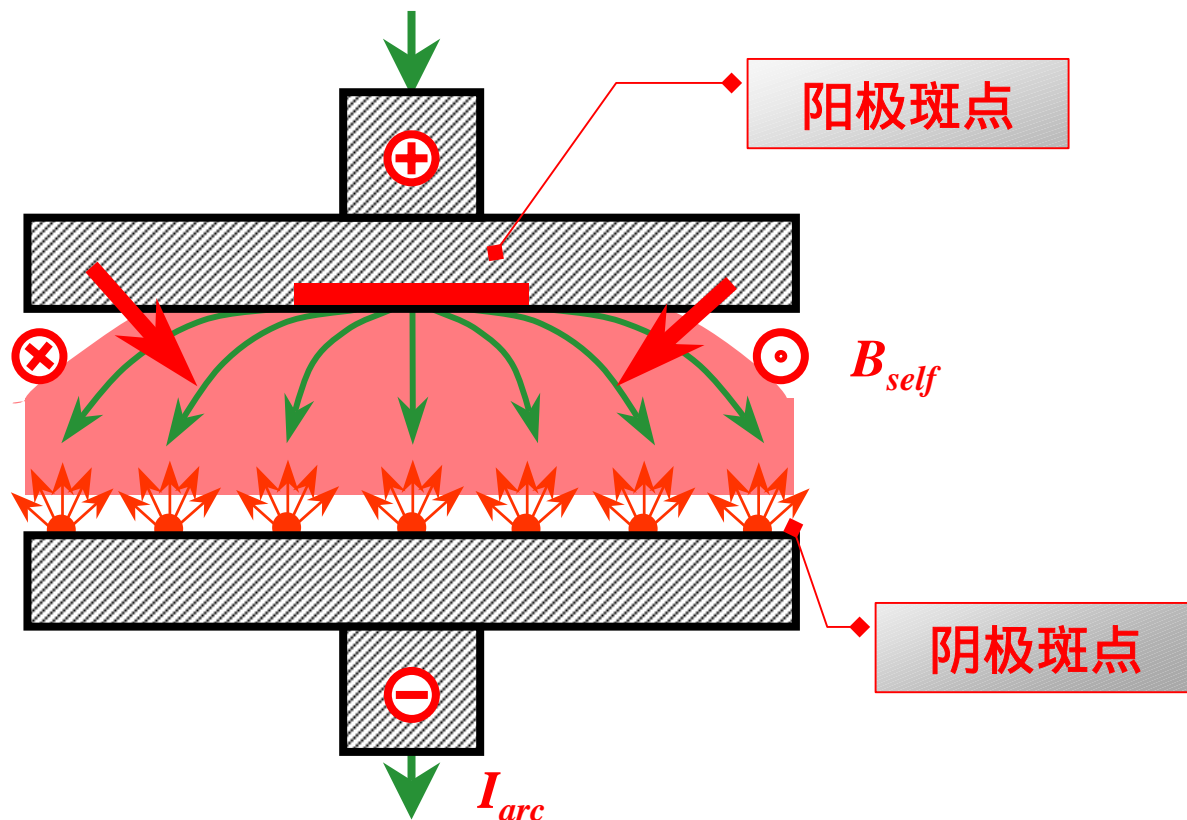


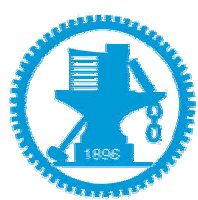
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的形态

- 电流增大时开始**集聚** (7~8kA以上) , 且不稳定



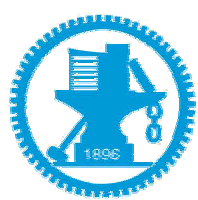


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的形态

- 电流增大时开始**集聚** (7~8kA以上) , 且不稳定



§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

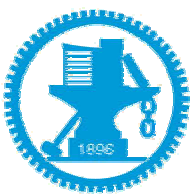
◆ 电弧集聚的危害

- 电极烧蚀严重
- 蒸发大量金属蒸汽，不利于电弧熄灭

◆ 解决方案

- 利用**横向磁场 (Cross Magnetic Field) (CMF)** 驱动电弧运动，避免电极局部过渡烧蚀
- 利用**纵向磁场 (Axial Magnetic Field) (AMF)**，抑制电弧集聚，提高电弧集聚的临界电流



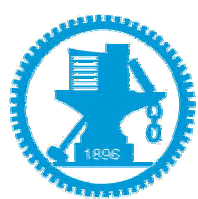


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的磁场控制技术

- 利用**横向磁场 (Cross Magnetic Field) (CMF)** 驱动电弧运动，避免电极局部过渡烧蚀
 - ➡ 电弧运动由安培力 $\vec{J} \times \vec{B}$ 控制
- 电弧运动速度由对**等离子体材料损失的补偿**而决定
- **关键的物理过程**
 - ➡ 电极材料的蒸发
 - ➡ 新蒸发材料的加速
 - ➡ **过零前**：电弧转变为扩散型

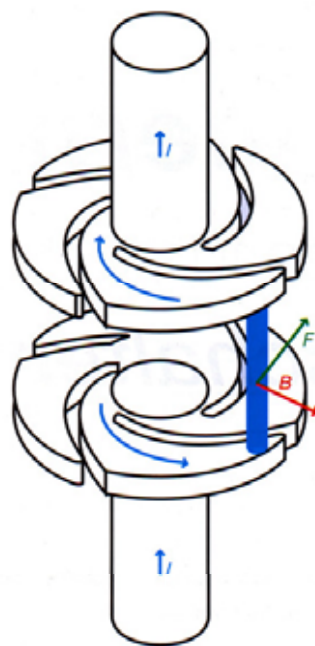


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

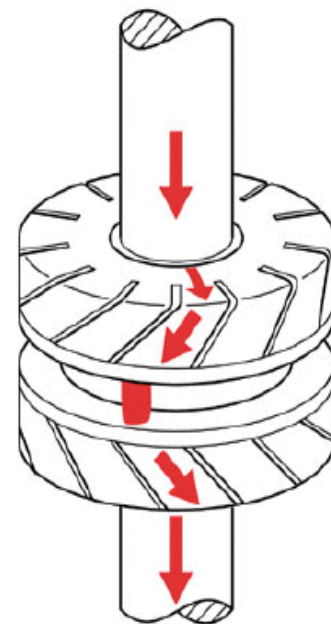
■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的磁场控制技术

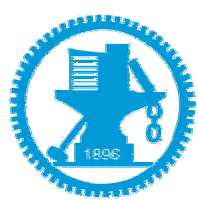
- 利用**横向磁场 (Cross Magnetic Field) (CMF)** 驱动电弧运动，避免电极局部过渡烧蚀
- **问题**
 - ➡ 高电压 (大开距) 时的喷溅



螺旋槽型 (Spiral Type)



杯状 (Cup Type)

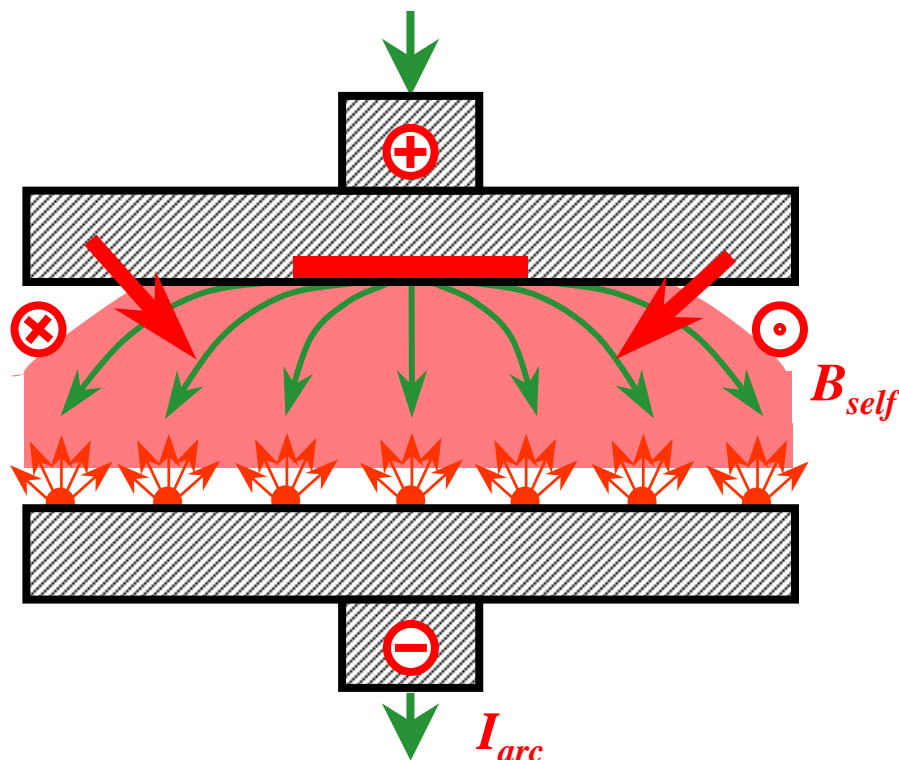


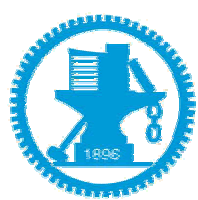
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的磁场控制技术

- 利用**纵向磁场 (Axial Magnetic Field) (AMF)** , 抑制电弧集聚, 提高电弧集聚的临界电流



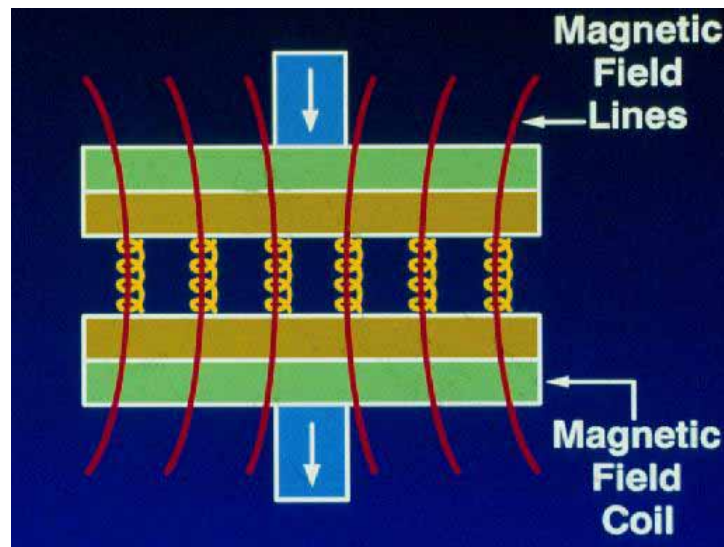


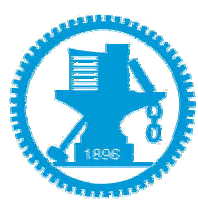
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的磁场控制技术

- 利用**纵向磁场 (Axial Magnetic Field) (AMF)** , 抑制电弧集聚, 提高电弧集聚的临界电流
- 纵向磁场的作用 Hot
 - ➔ 约束电弧等离子体径向运动
 - ➔ 抑制电弧收缩
 - ➔ 减少等离子体的径向损耗
 - ➔ 使真空电弧在较大电流时仍能保持在扩散态
 - ➔ 从**根本上**解决电弧集聚的问题





§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

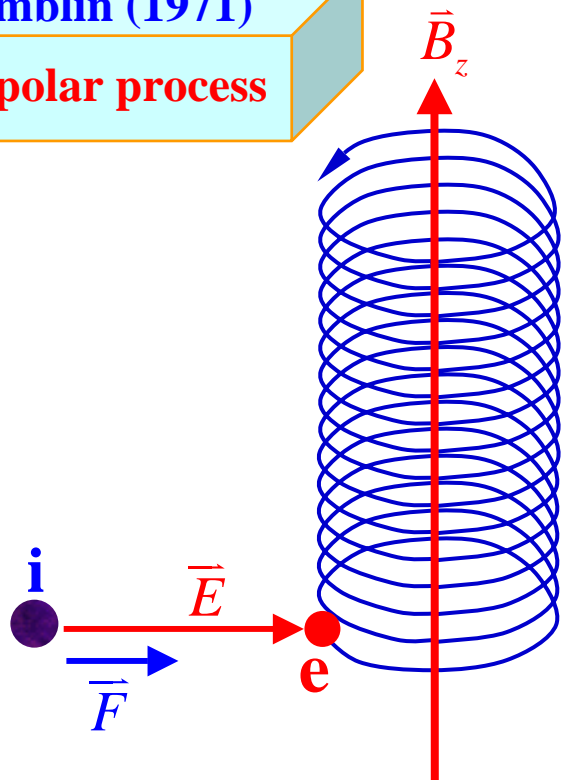
真空 (Vacuum) 灭弧装置

真空电弧的磁场控制技术

纵向磁场的作用机理 - 约束效应 (瞄准效应)

Kimblin (1971)
Ambipolar process

Rondeel (1974)
Criterion



Hall coefficient

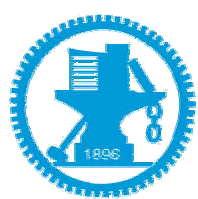
$$\alpha_H \left(= \frac{\omega_e}{\nu} \right) \sim 1$$

ω_e

Cyclotron frequency of electron

ν

Collision frequency of electron

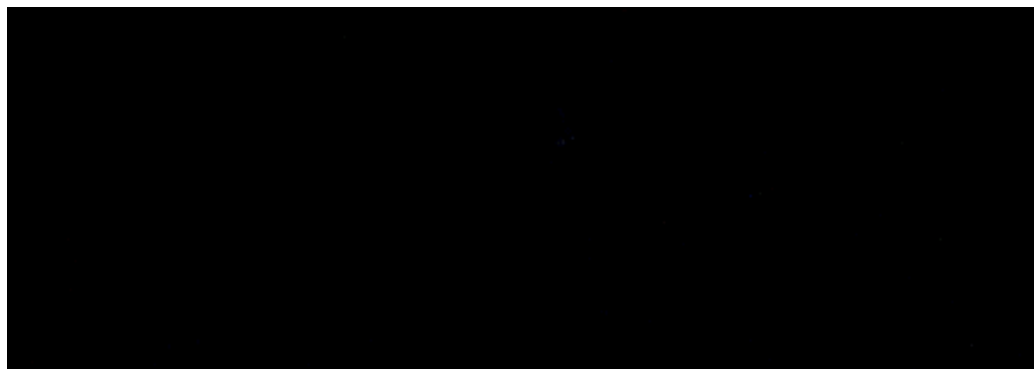
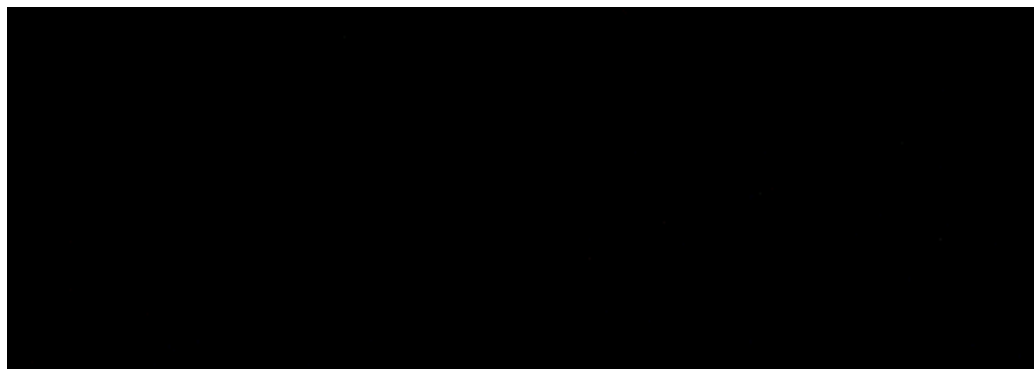


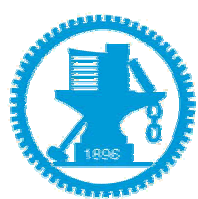
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的磁场控制技术

- 纵向磁场的**作用机理 - 约束效应 (瞄准效应)**



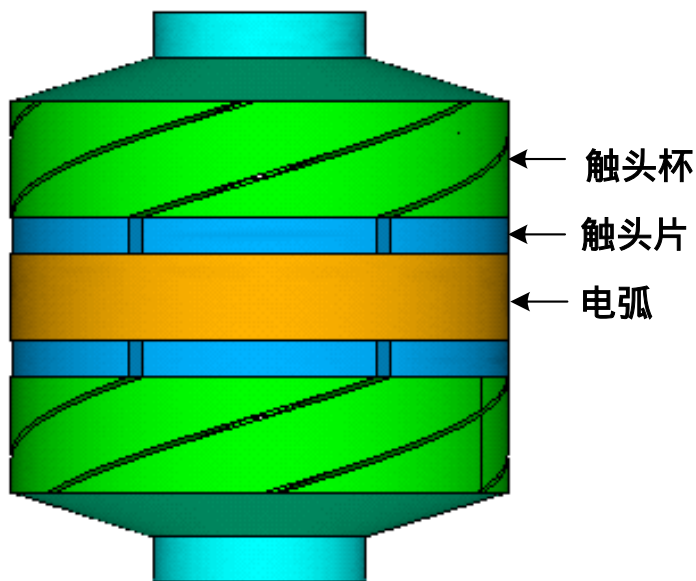


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

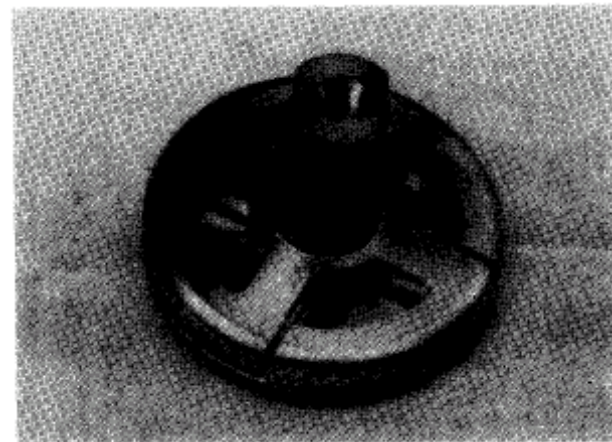
真空 (Vacuum) 灭弧装置

真空电弧的磁场控制技术

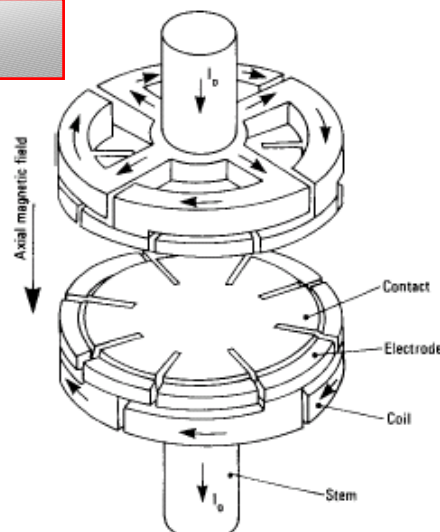
纵向磁场电极的结构



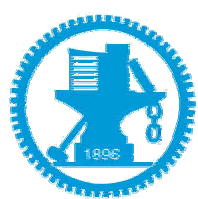
杯状 (Cup Type)



Yanabu, 1989



线圈型 (Cup Type)



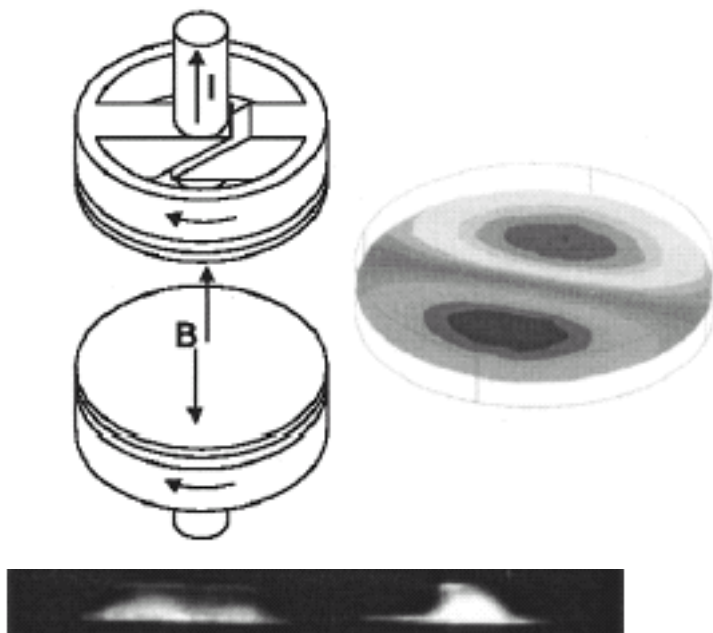
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

真空 (Vacuum) 灭弧装置

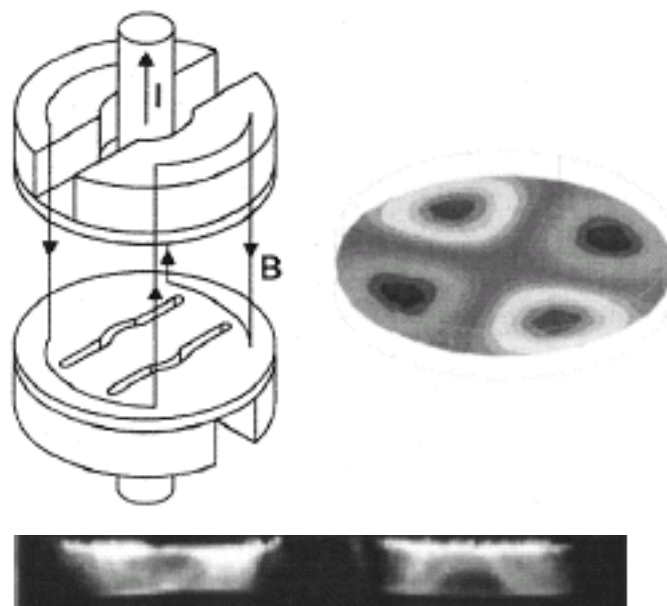
真空电弧的磁场控制技术

纵向磁场电极的结构

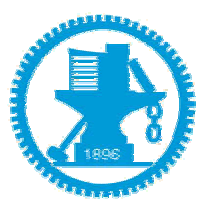
W. Shang, 2003



两极型电极 (Bipolar contact)



四极型电极 (Quadruple contact)



§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

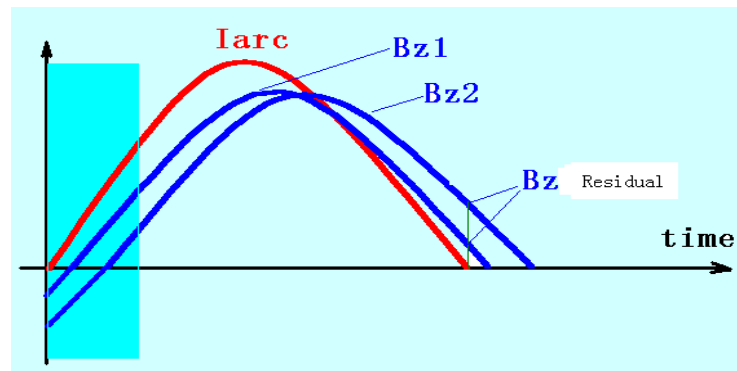
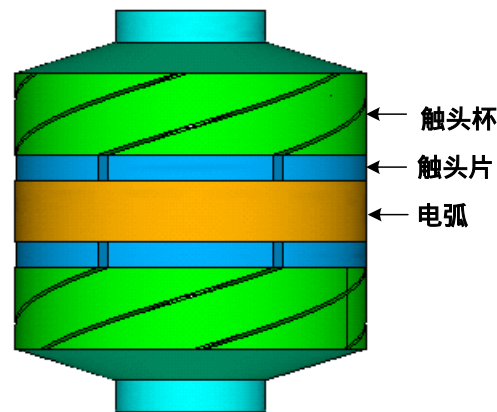
真空 (Vacuum) 灭弧装置

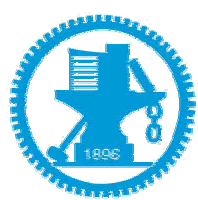
真空电弧的磁场控制技术

- 利用**纵向磁场 (Axial Magnetic Field) (AMF)** , 抑制电弧集聚, 提高电弧集聚的临界电流

问题

- ➡ 电流过零时存在**剩余纵向磁场**
- ➡ **原因** : 电极系统中的**涡流**
- ➡ **影响** : 限制电流过零时弧隙等离子体的扩散, 不利于弧后介质恢复
- ➡ 纵向磁场的**径向分布**对电弧特性也有显著影响



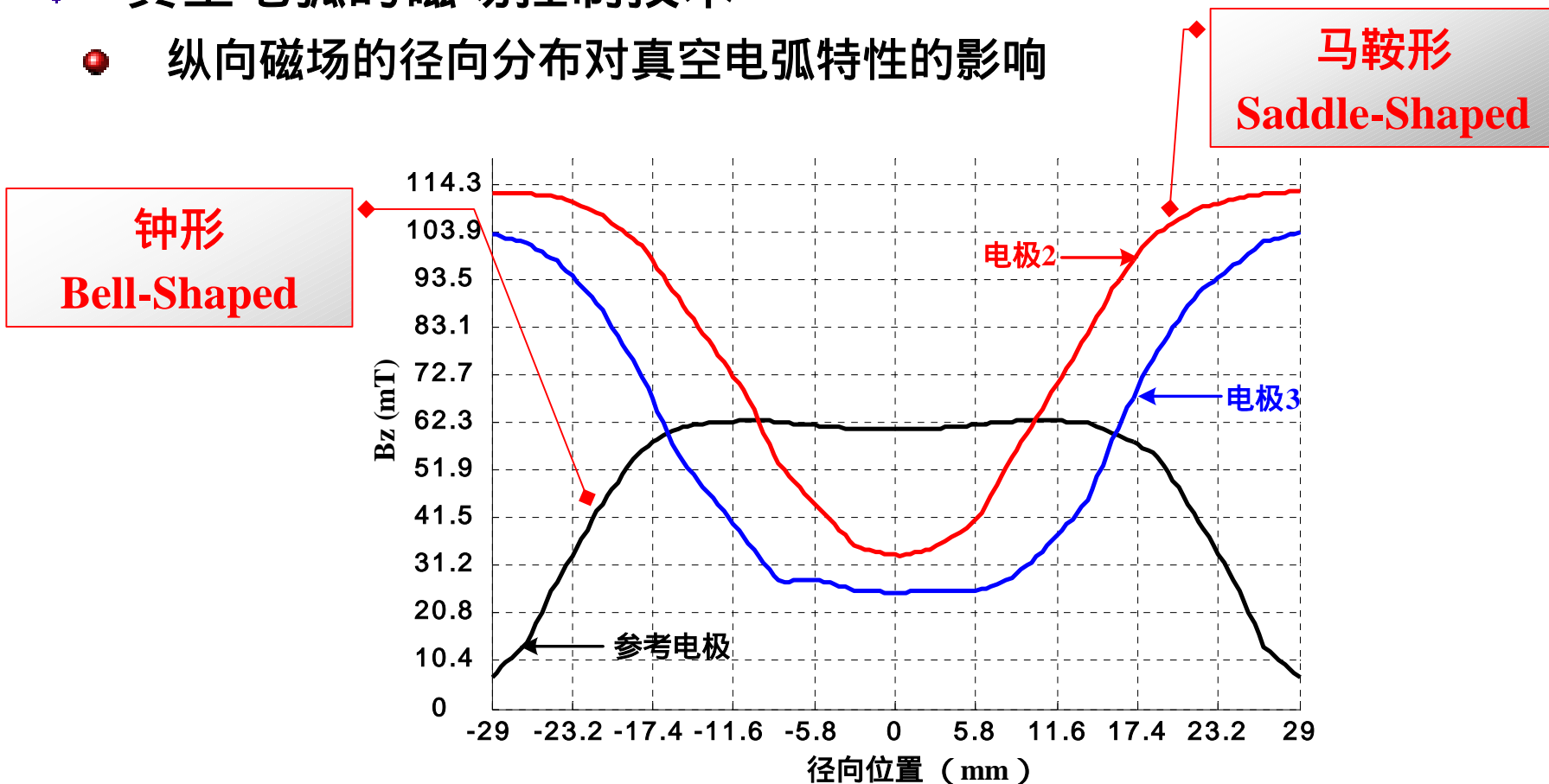


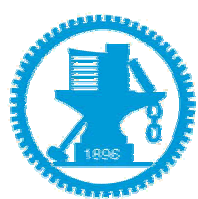
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

真空 (Vacuum) 灭弧装置

真空电弧的磁场控制技术

纵向磁场的径向分布对真空电弧特性的影响



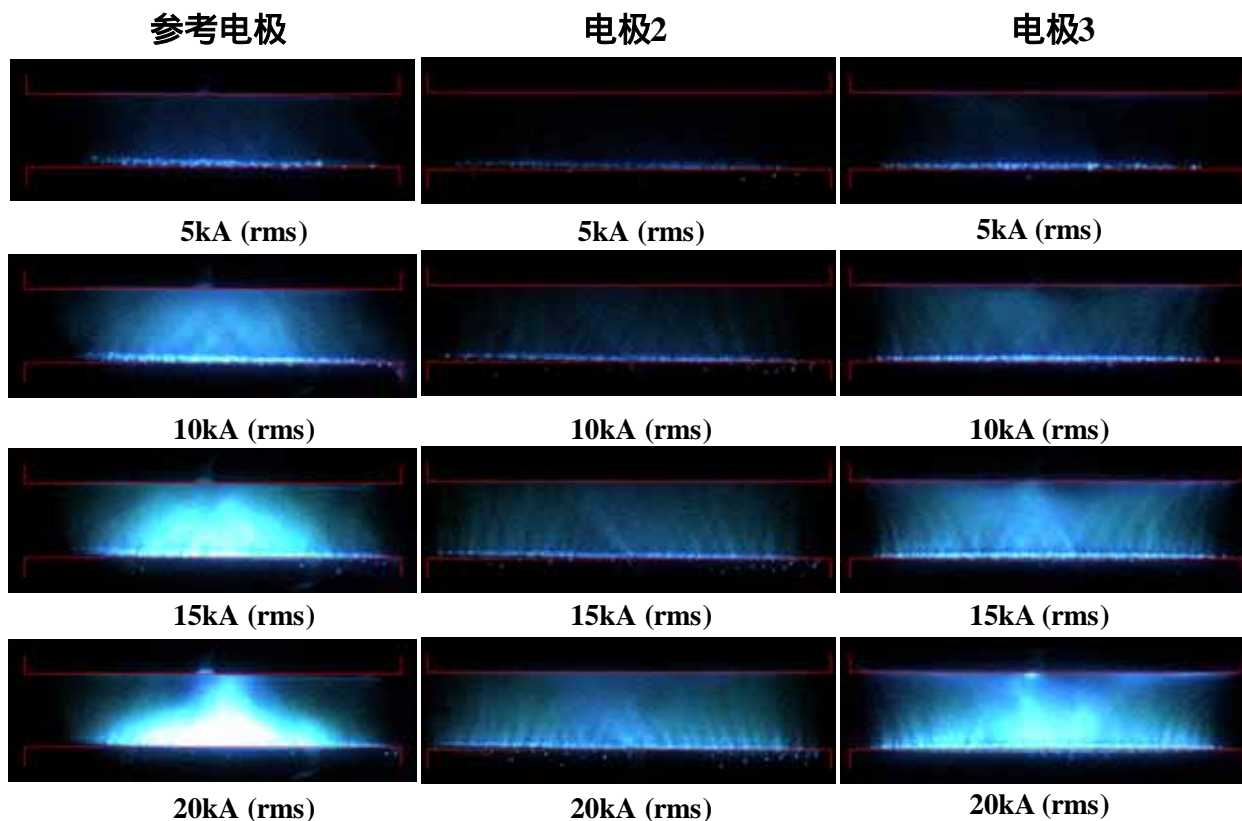


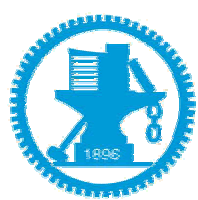
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

真空 (Vacuum) 灭弧装置

真空电弧的磁场控制技术

纵向磁场的径向分布对真空电弧特性的影响



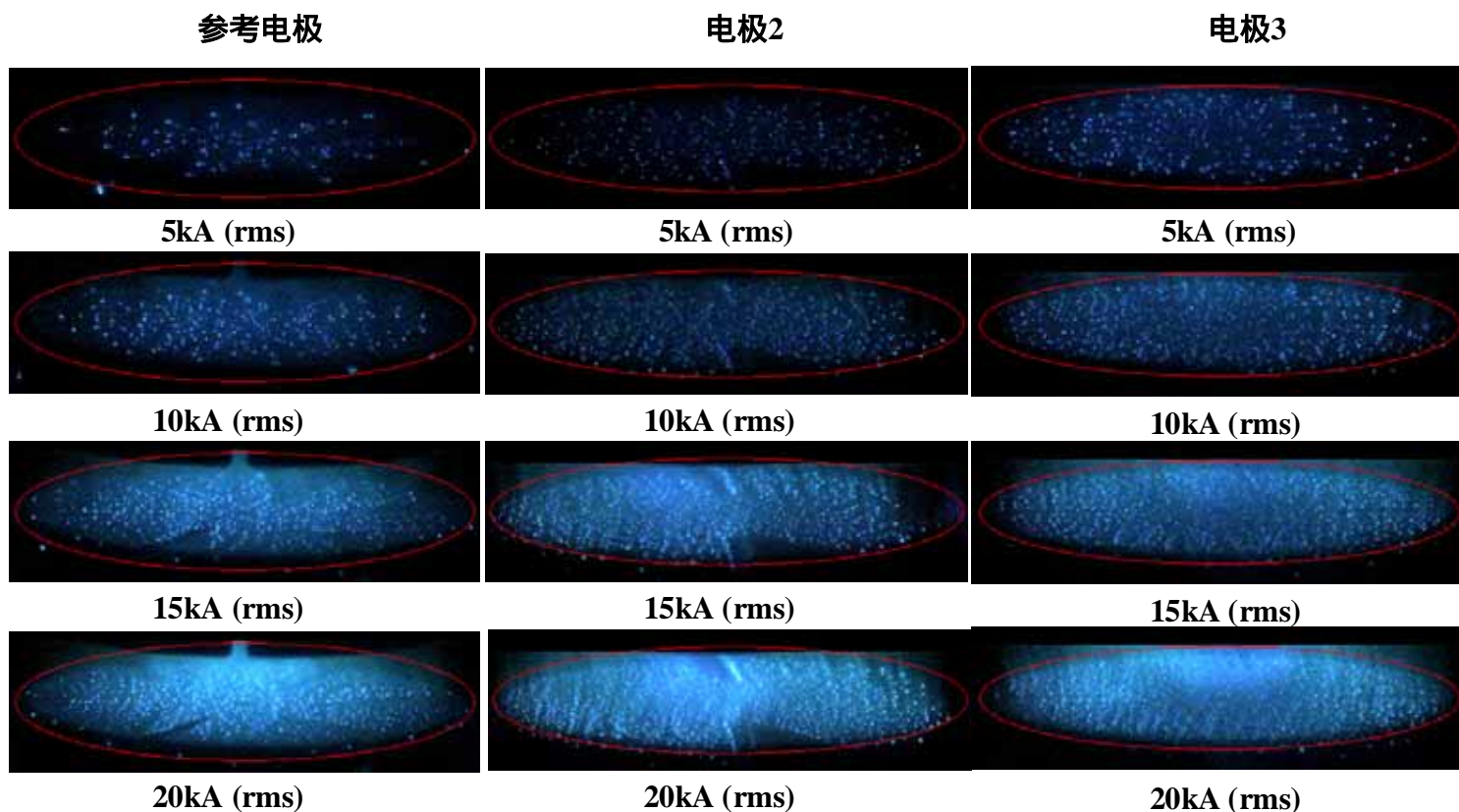


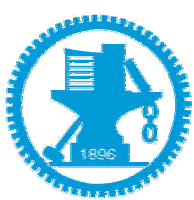
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

真空 (Vacuum) 灭弧装置

真空电弧的磁场控制技术

纵向磁场的径向分布对真空电弧特性的影响





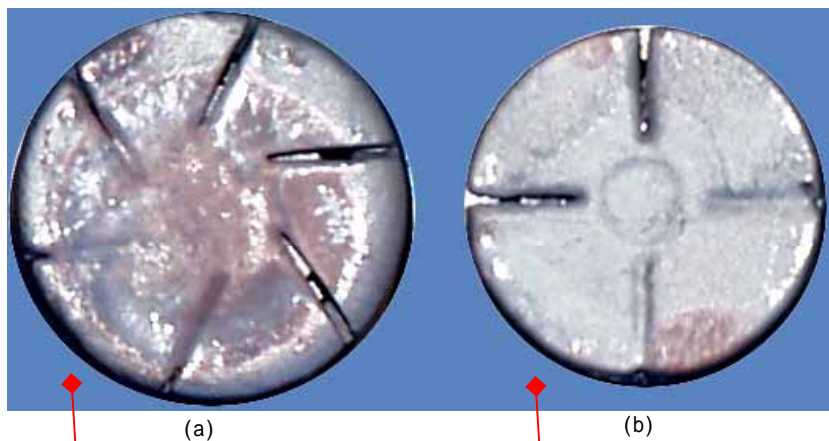
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

真空 (Vacuum) 灭弧装置

真空电弧的磁场控制技术

纵向磁场的径向分布对真空电弧特性的影响

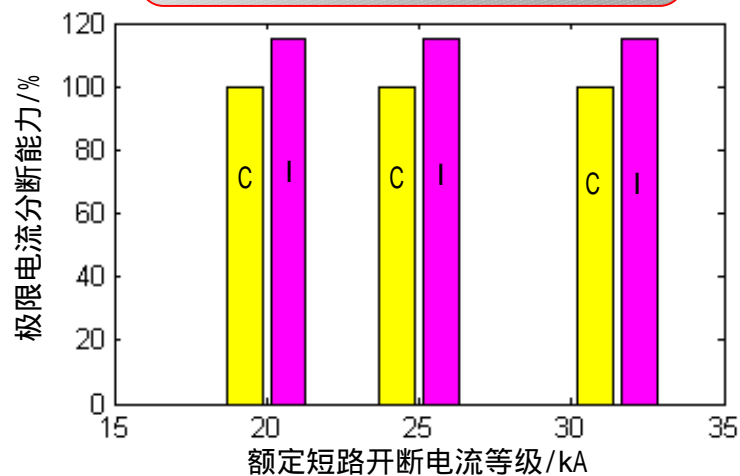
20kA
开断30次后的触头照片

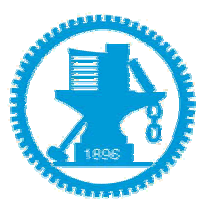


原有的杯状
纵磁触头

加入铁芯的线
圈式纵磁触头

铁芯式纵磁触头对极
限开断能力的提高





§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的磁场控制技术

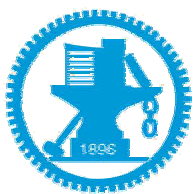
- 纵向磁场的径向分布对真空电弧特性的影响

用于发电机保护真空断路器的TD-12/6300-80型灭弧室照片

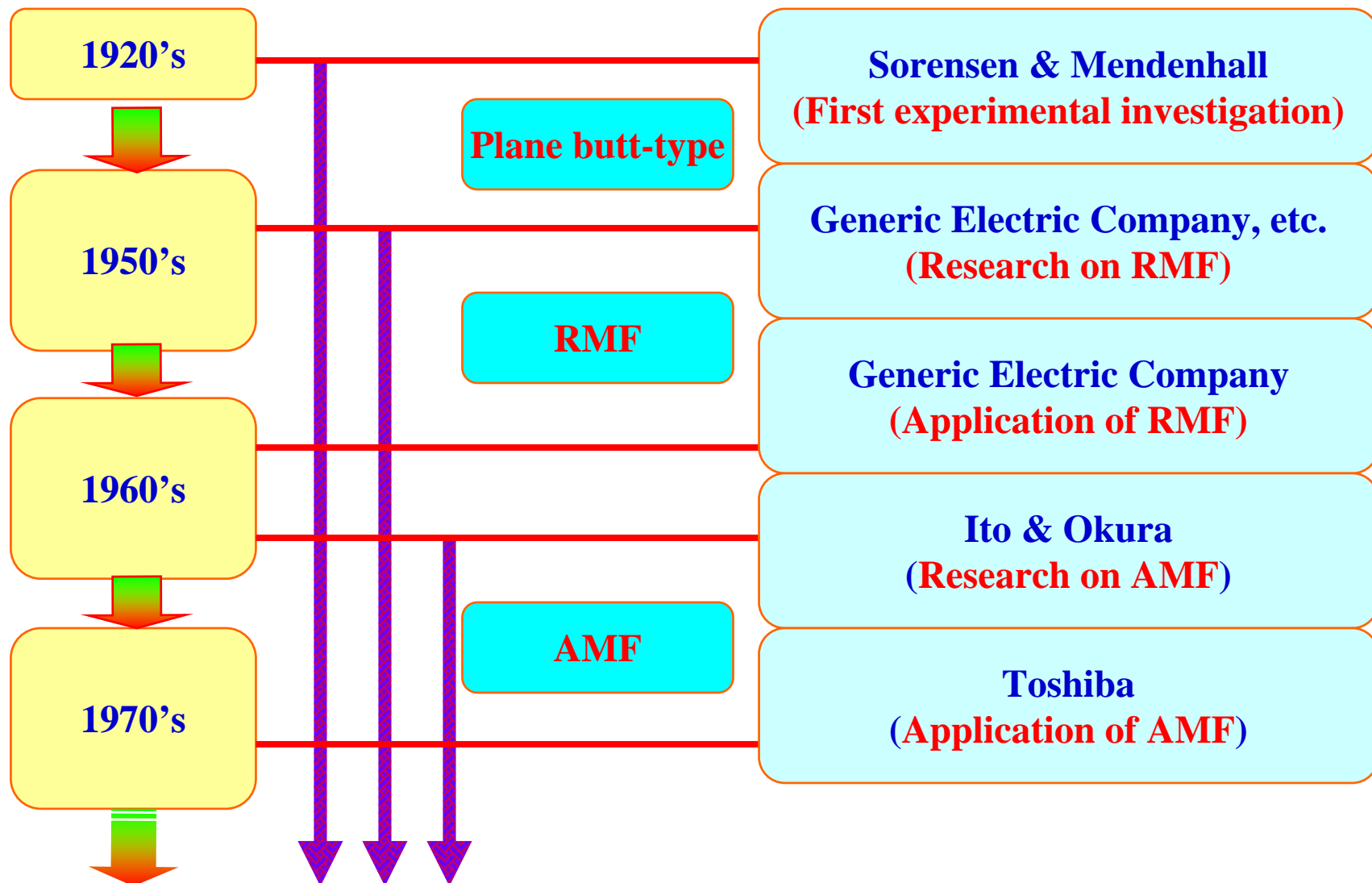


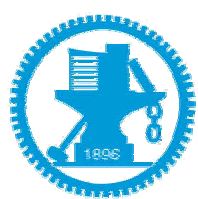
额定电压：12kV
额定电流：6300A
额定短路开断电流：80kA

165mm × 394mm



§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理



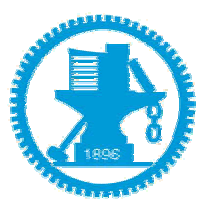


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧控制技术的发展

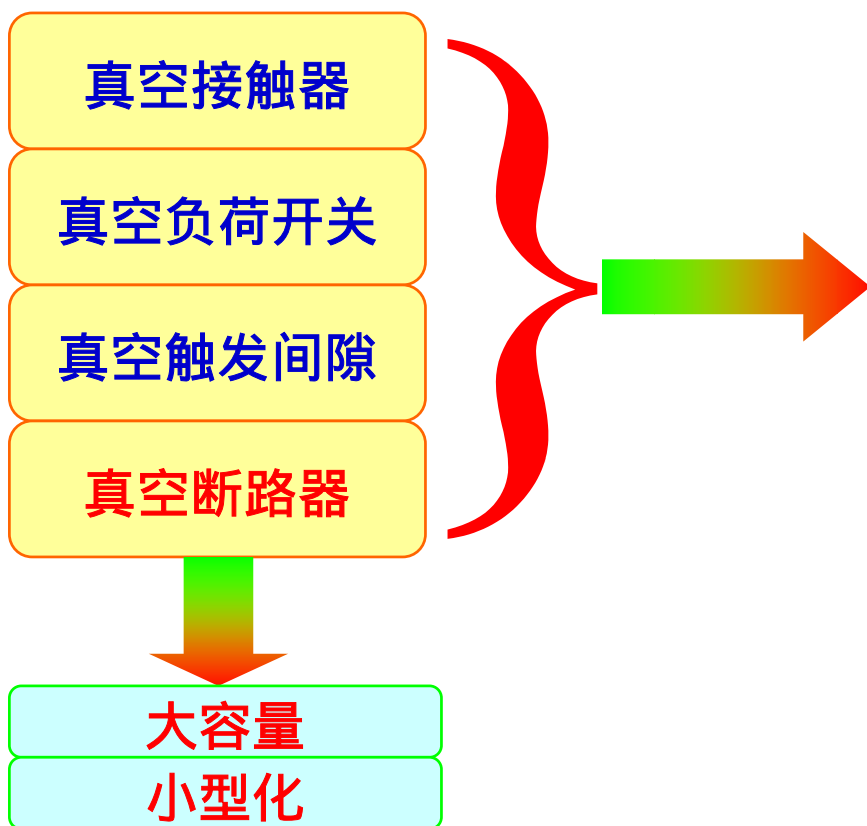
$\begin{matrix} \text{I} \\ \text{U} \end{matrix}$	<20kA	25kA	31.5kA	>31.5kA
$\leq 1\text{kV}$	RMF	RMF	RMF	RMF
12kV	RMF	RMF	RMF	AMF
24kV	RMF	RMF/AMF	AMF	AMF
36kV	RMF	AMF	AMF	AMF
>36kV	AMF	AMF	AMF	AMF

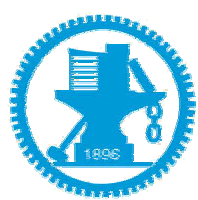


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空开关的发展趋势





§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 高电压真空开关的研究与开发

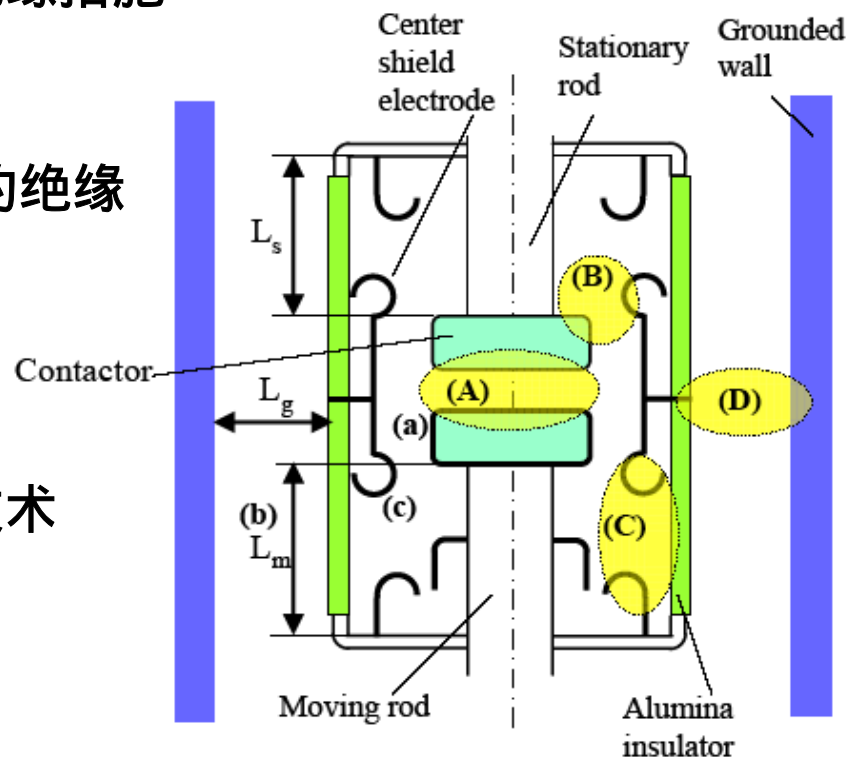
● 关键的科学问题

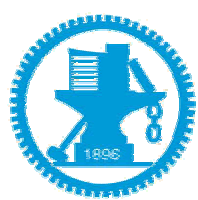
➡ 长间隙真空击穿的机理及其绝缘措施

- ◆ (A) 主电极之间的绝缘
- ◆ (B) 导电杆与屏蔽罩之间的绝缘
- ◆ (C) 屏蔽罩与外壳的绝缘
- ◆ (D) 外绝缘

➡ 大开距真空电弧的磁场控制技术

- ◆ 大开距真空电弧的不稳定性





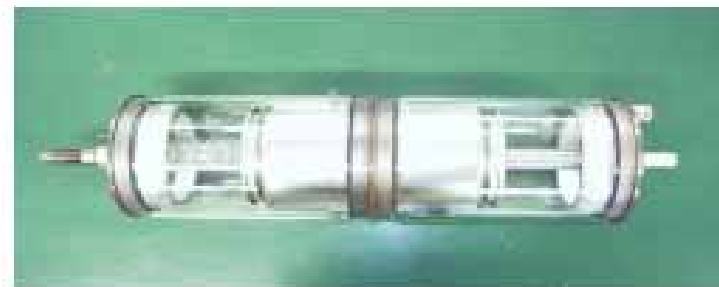
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

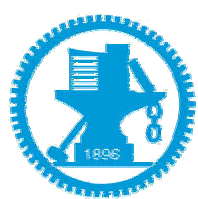
◆ 高电压真空开关的研究与开发



145kV/40kA单断口真空断路器



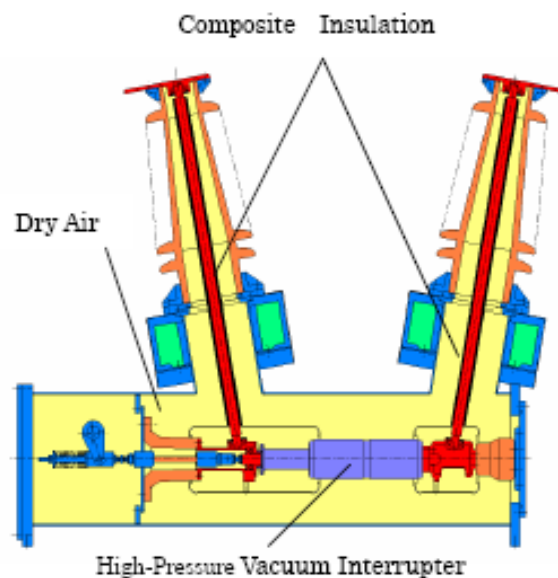
真空灭弧室



§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

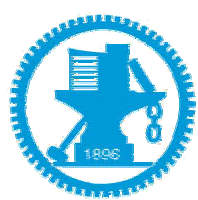
■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 高电压真空开关的研究与开发



内部结构

72/84kV/31.5kA无SF₆气体真空断路器



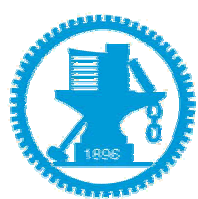
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 高电压真空开关的研究与开发



168kV/40kA双断口罐式真空断路器



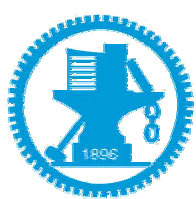
第五章 开关电器典型灭弧装置的工作原理

§ 5-0 序

§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

§ 5-2 提高灭弧装置开断能力的辅助方法

§ 5-3 新型开断装置简介



§ 5-2

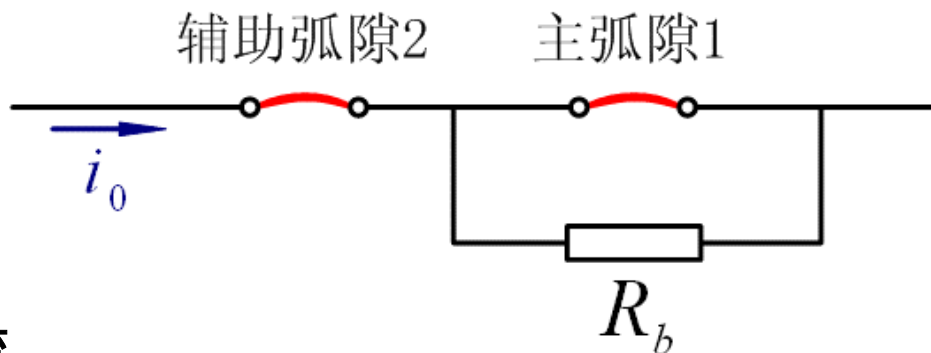
提高灭弧装置开断能力的辅助方法

■ 弧隙两端并联低值电阻

● 主弧隙先开断

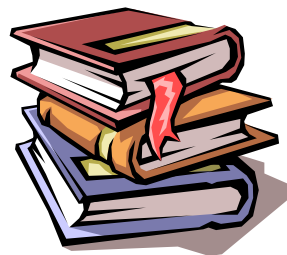
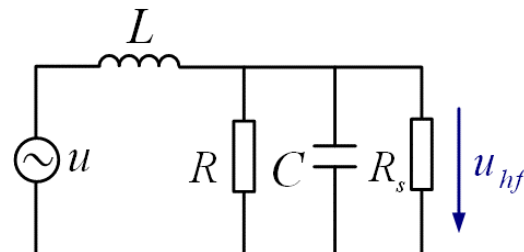
➡ 并联电阻的作用

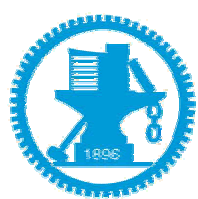
- ◆ 分流，减小主弧隙电流
- ◆ 主弧隙过零后，相当于并联了电阻，振荡频率减小，阻尼作用加强，利于主弧隙电弧熄灭



实际弧隙

$$\begin{cases} \delta_s = \frac{1}{2RC} + \frac{1}{2R_s C} \\ \omega_s = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC} + \frac{1}{2R_s C} \right)^2} \end{cases}$$





§ 5-2

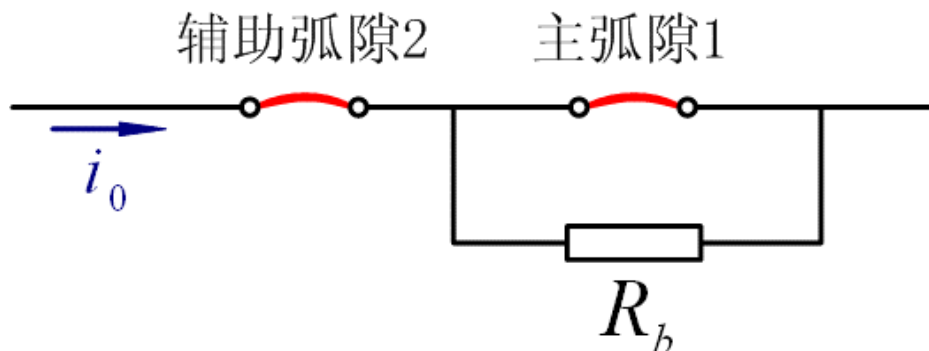
提高灭弧装置开断能力的辅助方法

■ 弧隙两端并联低值电阻

● 主弧隙先开断

➡ 并联电阻的作用

- ◆ 分流，减小主弧隙电流
- ◆ 主弧隙过零后，相当于并联了电阻，振荡频率减小，阻尼作用加强，利于主弧隙电弧熄灭

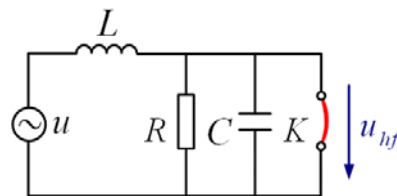


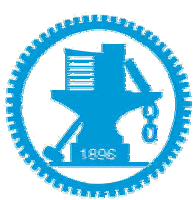
● 辅助弧隙后开断

➡ 并联电阻的作用

- ◆ 串入电阻，减小电流
- ◆ 增大电路的阻性
- ◆ 辅助弧隙过零时，工频恢复电压瞬时值减小，瞬态恢复电压的幅值和上升速度也减小，利于电弧熄灭

$$u_{hf} = U_{gm} - U_{gm} \sqrt{\left(\frac{\delta_0}{\omega_0}\right)^2 + 1} e^{-\delta_0 t} \sin(\omega_0 t + \varphi)$$





■ 附加同步开断装置

◆ 同步开断：理想情况

- 触头在电流过零瞬间以很高的速度打开至不发生间隙击穿的距离
 - ➡ 不产生电弧
 - ➡ 不存在热击穿阶段
 - ➡ 耐受恢复电压所需的电极开距较小
- 难点
 - ➡ 很难保证在电流过零时打开触头
 - ➡ 需要很高的分闸速度

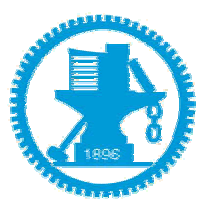
◆ 同步开断：实际应用

- 触头在电流过零瞬间前以较高的速度打开
 - ➡ 电弧电流小
 - ➡ 燃弧时间短

要求

选相装置

高稳定性操动机构



§ 5-2

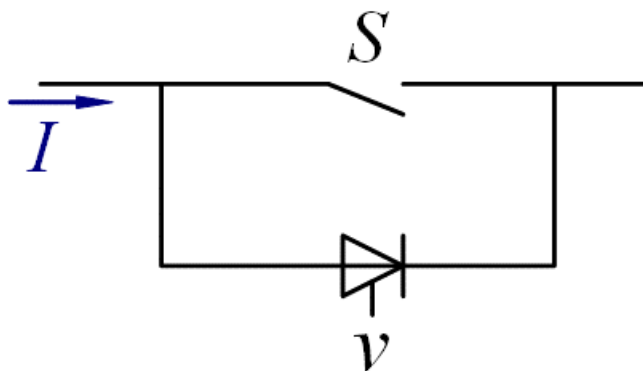
提高灭弧装置开断能力的辅助方法

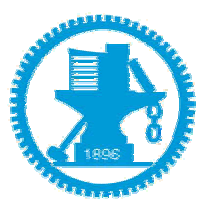
■ 附加晶闸管装置

◆ 有触点开关和无触点开关的结合（混合式开关）

◆ 原理

- 开断时**电流转移**至晶闸管
- 晶闸管正向压降小于**生弧电压**，主间隙电弧熄灭
- 电流过零时，晶闸管**自关断**，完成开断





§ 5-2

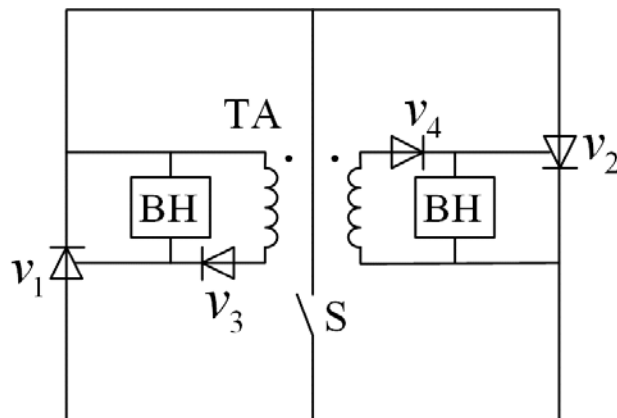
提高灭弧装置开断能力的辅助方法

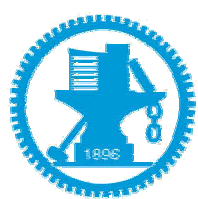
■ 附加晶闸管装置

◆ 应用

- 正常运行时由主开关导通电流（长期工作，发热）
 - ➡ V_3 和 V_4 轮流导通
 - ➡ V_1 和 V_2 轮流接收控制信号
- 主间隙开断过程中弧隙电流转移至 V_1 或 V_2
 - ➡ 弧隙电压施加于 V_1 或 V_2 ，在控制信号作用下导通分流
 - ➡ 主间隙电弧熄灭
 - ➡ V_1 或 V_2 电流过零时自关断
 - ➡ 另一晶闸管关断（无控制信号）
 - ➡ 完全开断

◆ 缺点：结构复杂，成本高





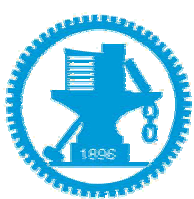
第五章 开关电器典型灭弧装置的工作原理

§ 5-0 序

§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

§ 5-2 提高灭弧装置开断能力的辅助方法

§ 5-3 新型开断装置简介



§ 5-3 新型开断装置简介

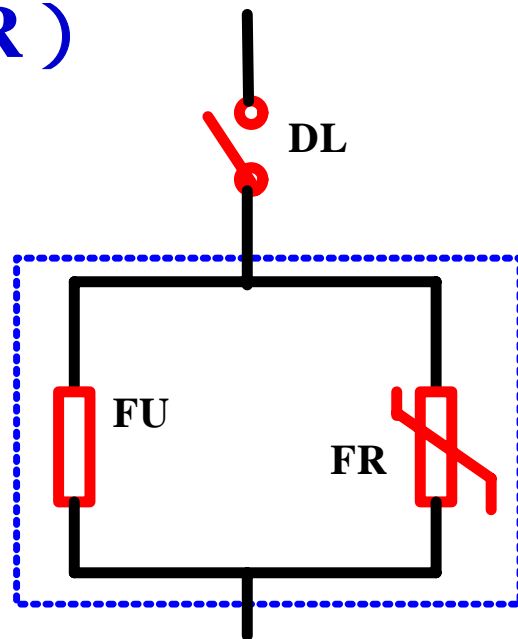
■ 高压限流熔断器组合保护装置 (FUR)

◆ 原理

- 正常运行时：限流熔断器导通电流
- 短路时：
 - ➡ 熔断器熔断：电弧电压增大，限流
 - ➡ 非线性电阻导通：吸收磁能、限制过电压
 - ➡ 断路器与熔断器联动：完成开断、形成电气断口

◆ 应用

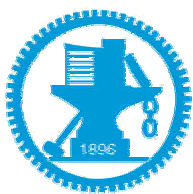
- 发电机出口
 - ➡ 短路电流大
 - ➡ 上升速度快
 - ➡ 可能“失零”



FU：高压限流熔断器

FR：非线性电阻

DL：断路器

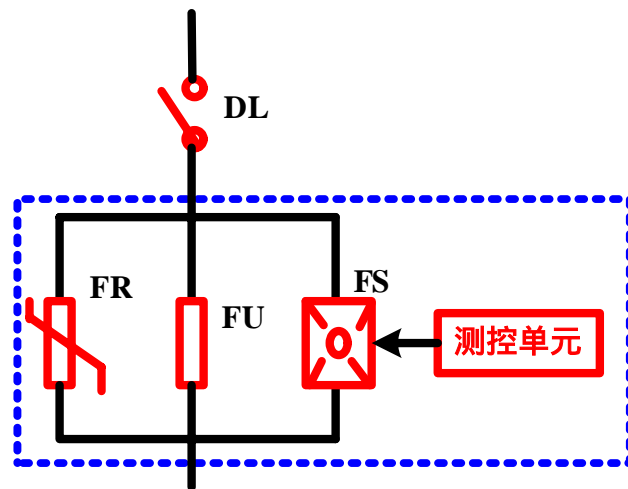


§ 5-3 新型开断装置简介

■ 大容量高速开关装置 (FSR)

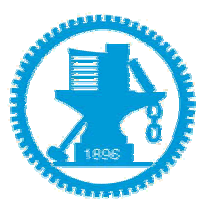
◆ 原理和应用 (与FUR类似)

- 正常运行时：桥体导通电流
- 短路时：
 - ➡ 桥体：爆炸、断开，电流转移至熔断器
 - ➡ 熔断器熔断：电弧电压增大，限流
 - ➡ 非线性电阻导通：吸收磁能、限制过电压
 - ➡ 断路器：完成开断、形成电气断口



FU：高压限流熔断器
FR：非线性电阻
FS：桥体
DL：断路器

演示

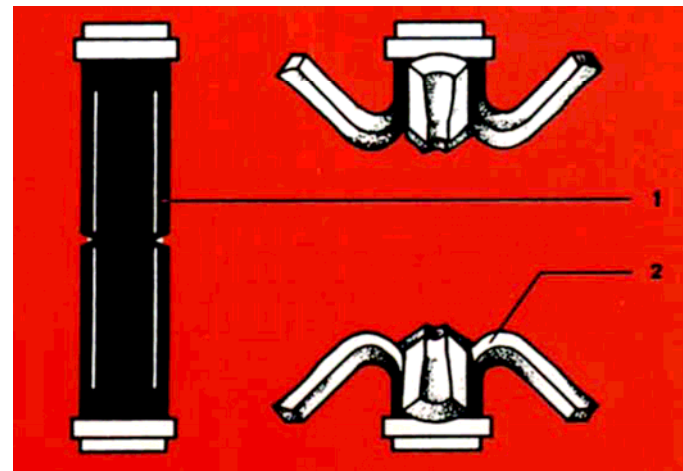
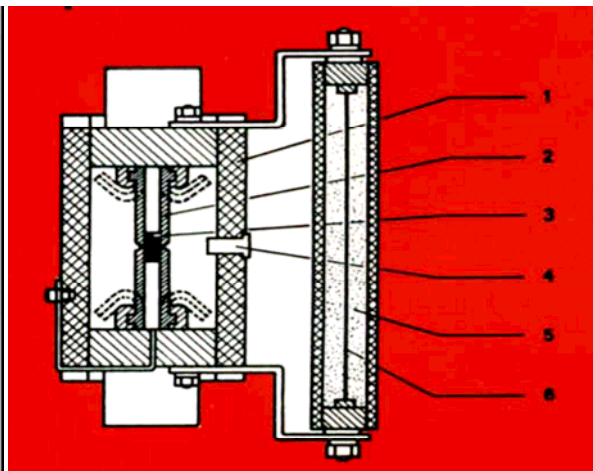
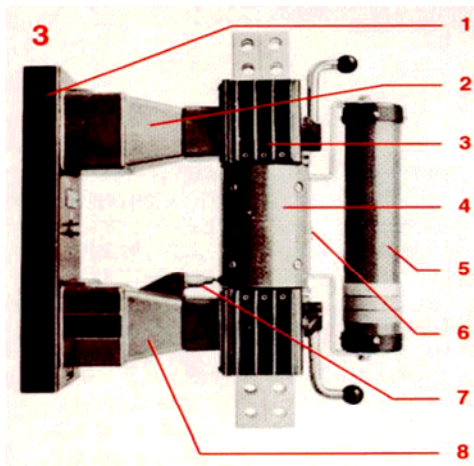
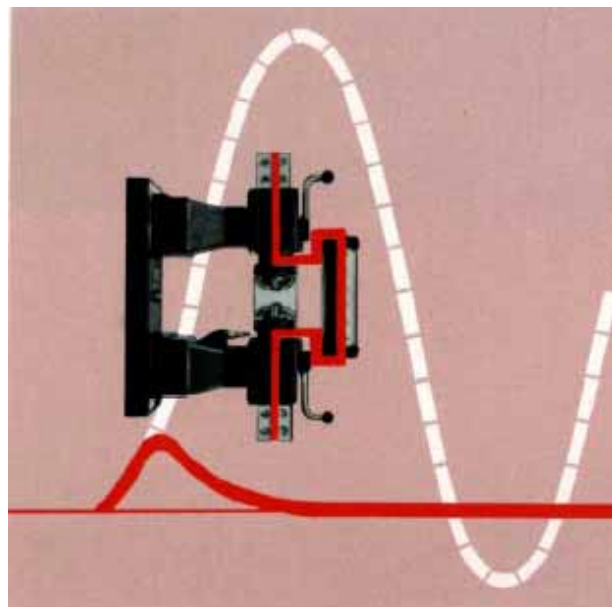


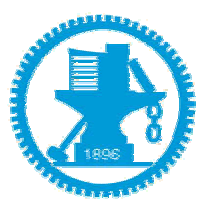
§ 5-3 新型开断装置简介

■ Is-限流器 (ABB)

◆ 原理

- 正常运行时：母排导通电流
- 短路时：
 - ➡ 母排爆炸，电流转移至熔断器
 - ➡ 熔断器：限流开断

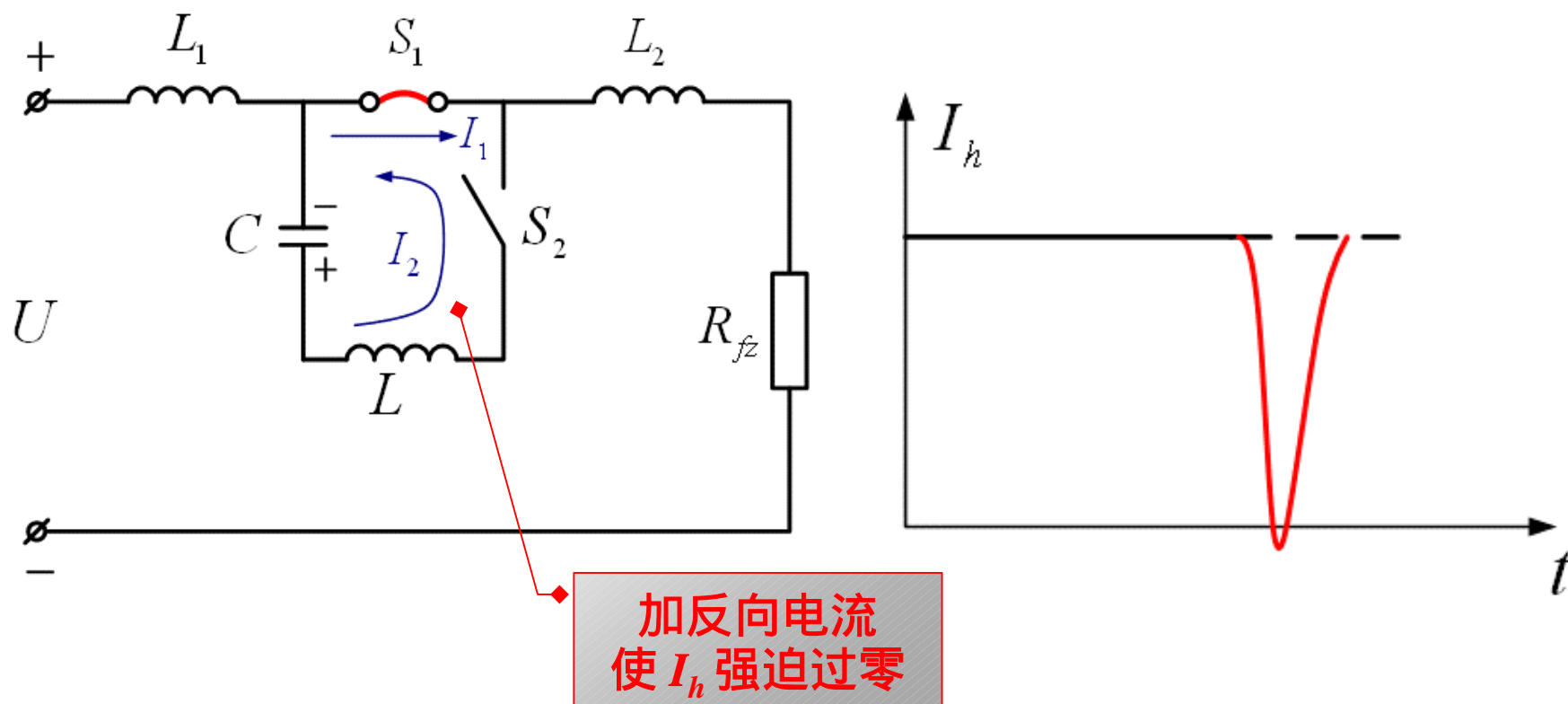


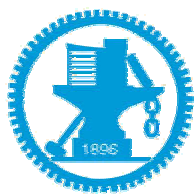


§ 5-3 新型开断装置简介

■ 新型直流真空开断装置

◆ 原理：反向电流注入、人工过零





§ 5-3 新型开断装置简介

■ 新型直流真空开断装置（波兰Lodz大学）

◆ 电流转移过程

- 主断路器 换流断路器
- 换流断路器 避雷器

