



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

- ◆ SF₆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



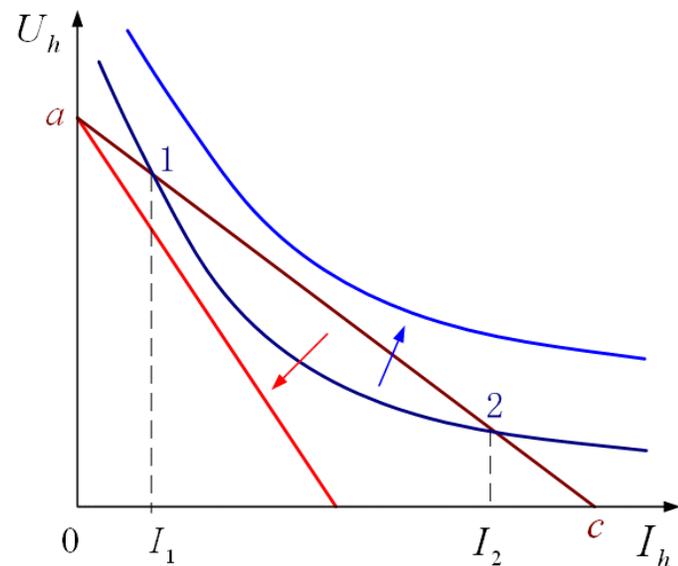
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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**



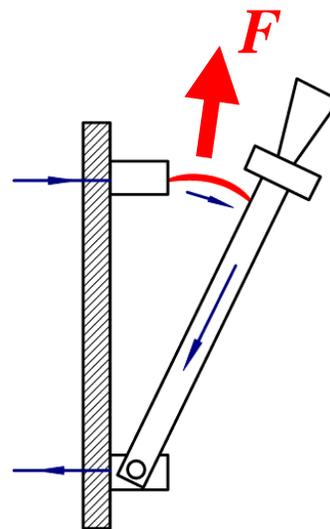
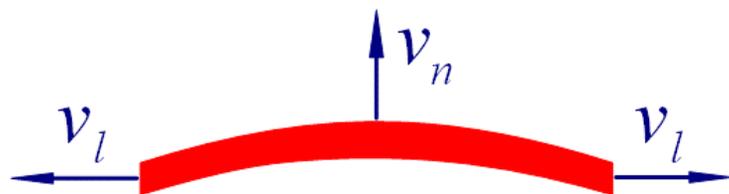


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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

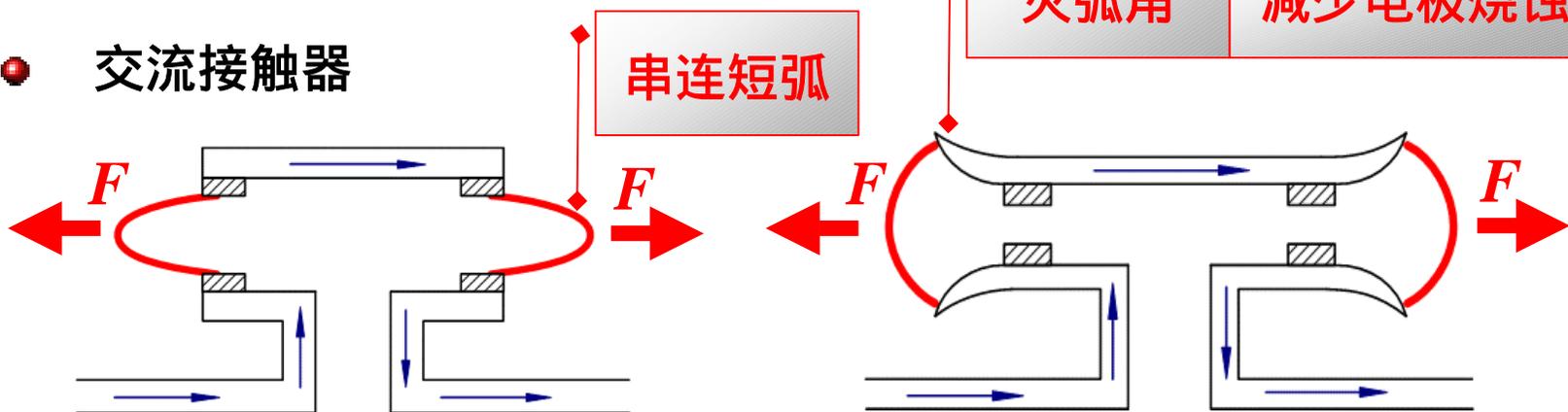
沿切向或法向拉长电弧

方法

电极打开，切线拉长

磁场作用，法向拉长

交流接触器

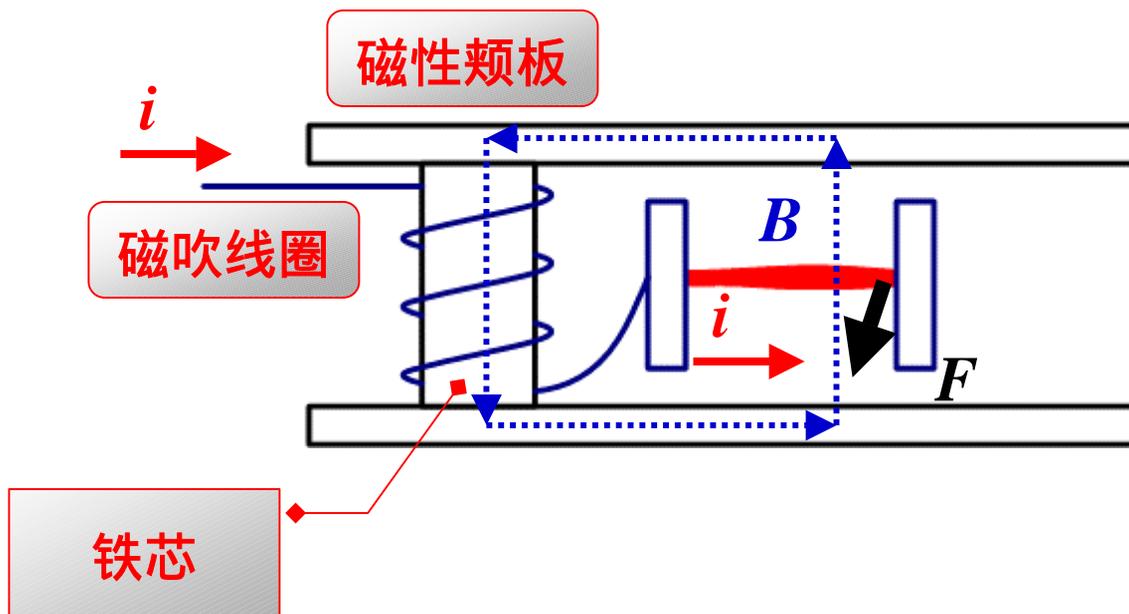




§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 磁吹线圈

- ◆ 产生附加磁场，使电弧迅速移动和拉长



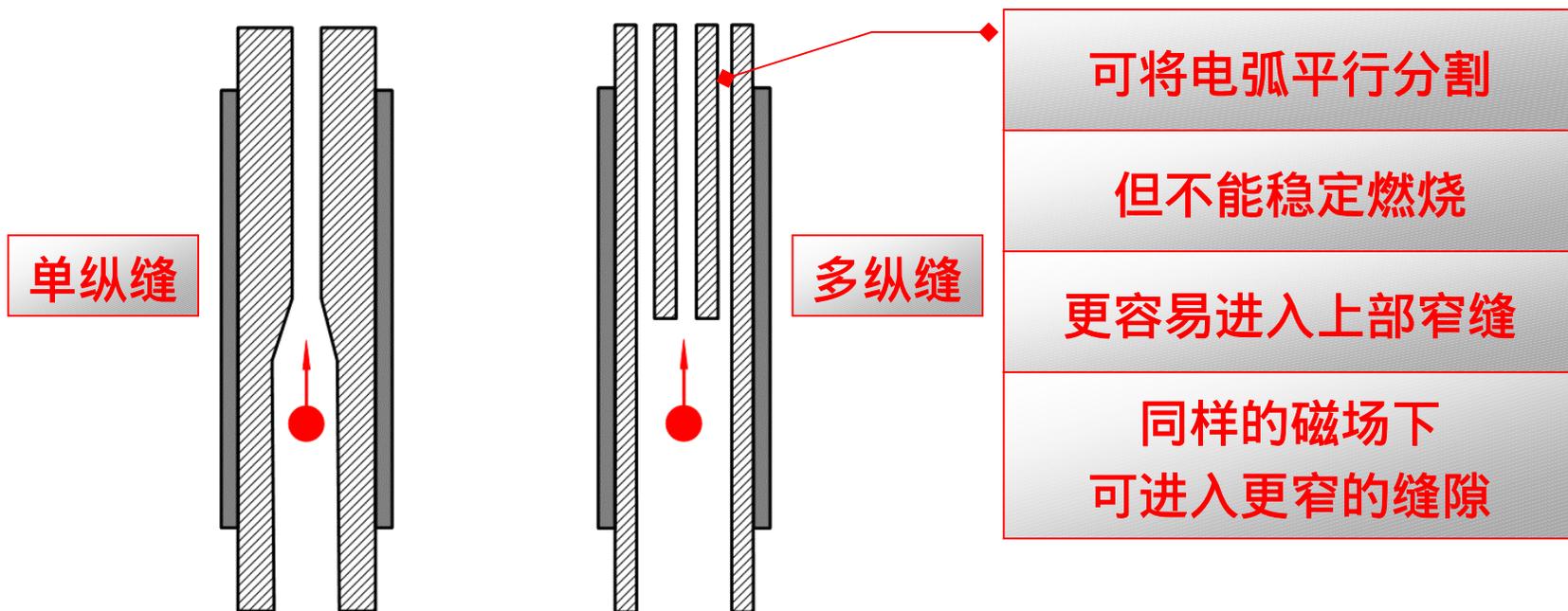


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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



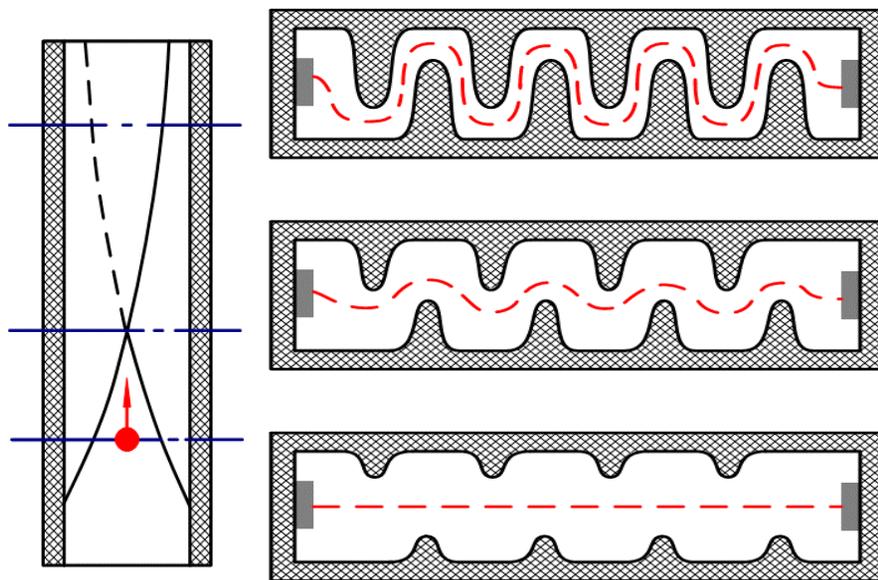


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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 |

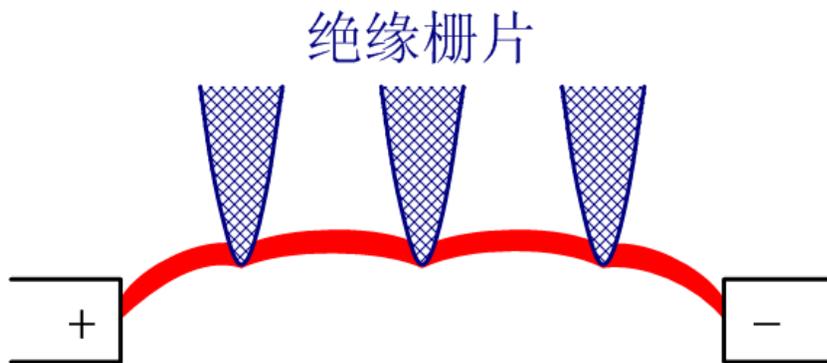


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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

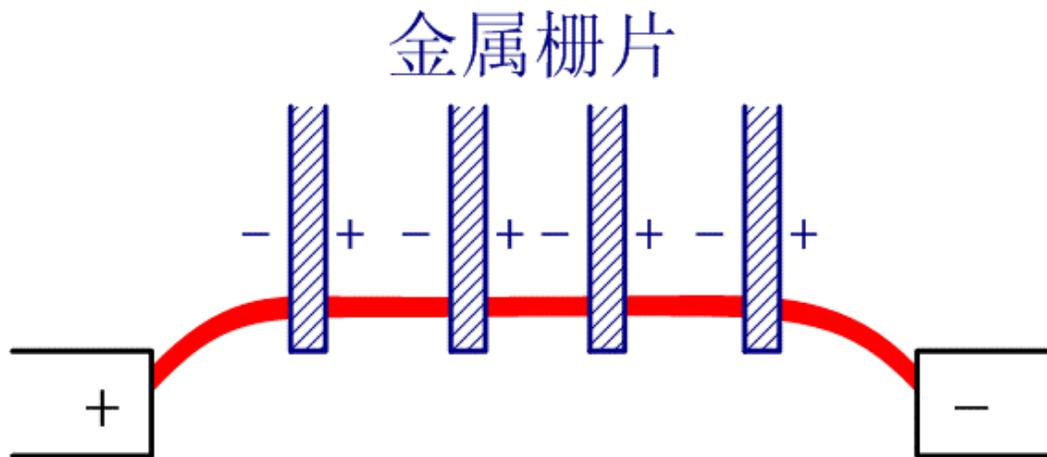




§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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

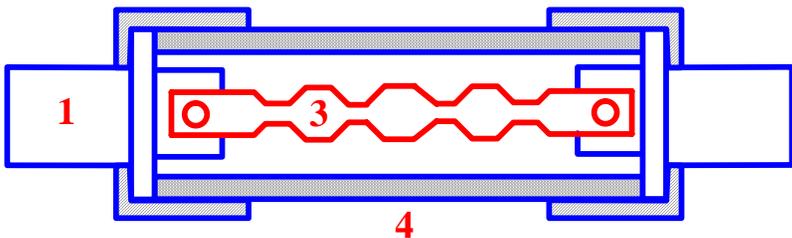
◆ 固体绝缘材料在电弧作用下气化

- **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



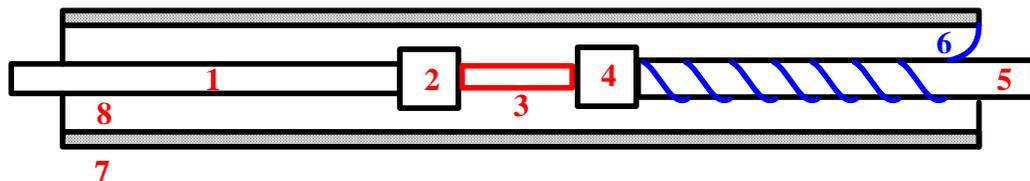
1：触刀 2：端帽
3：熔片 4：熔管

2



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

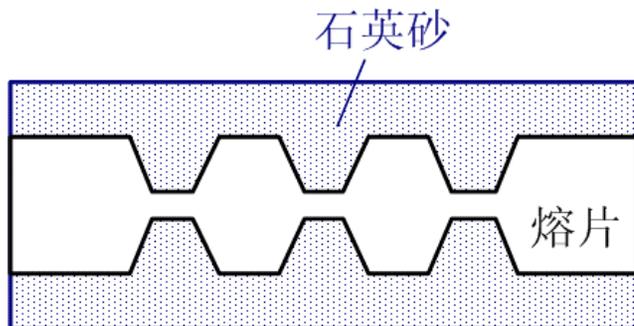


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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



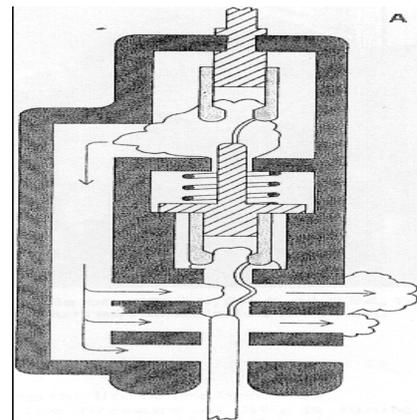
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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**



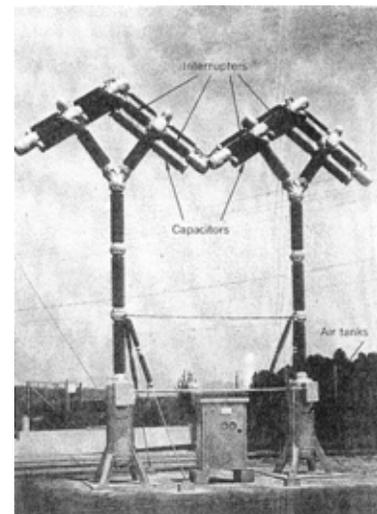
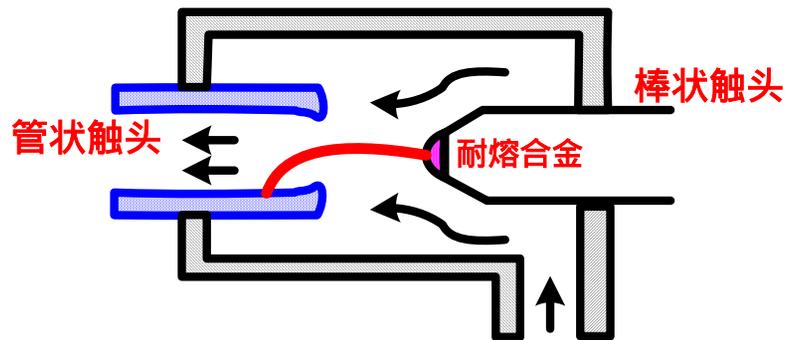
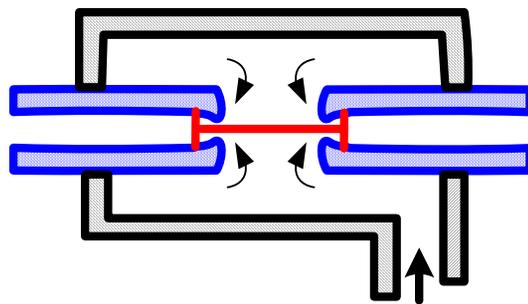
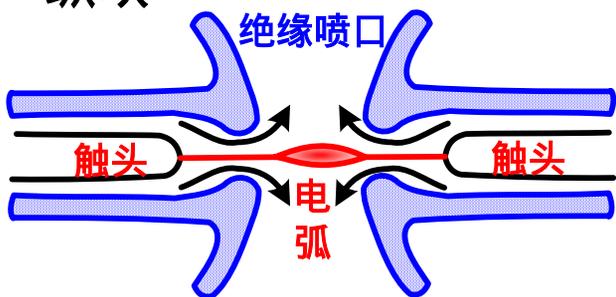


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 压缩空气灭弧装置 (1930年)

◆ 利用压缩空气吹弧，并提高压力

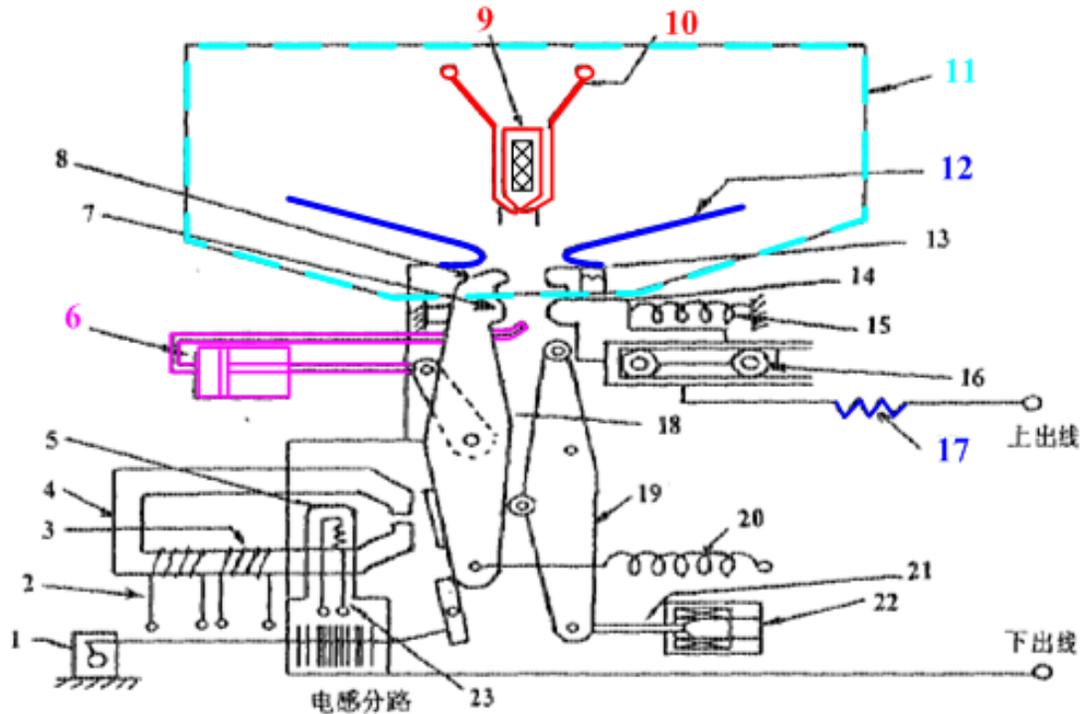
- 横吹 (已淘汰)
- 纵吹





§ 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

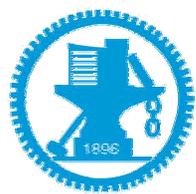
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ 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



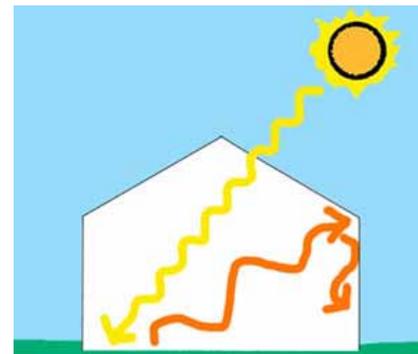
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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

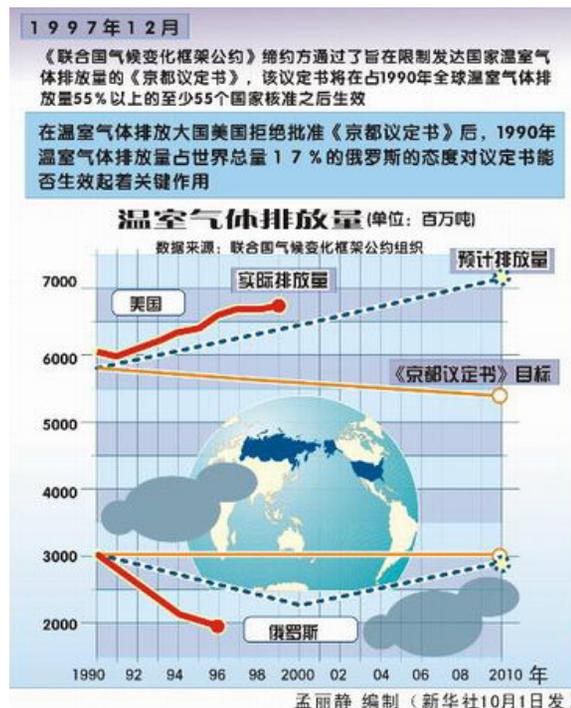
■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ 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

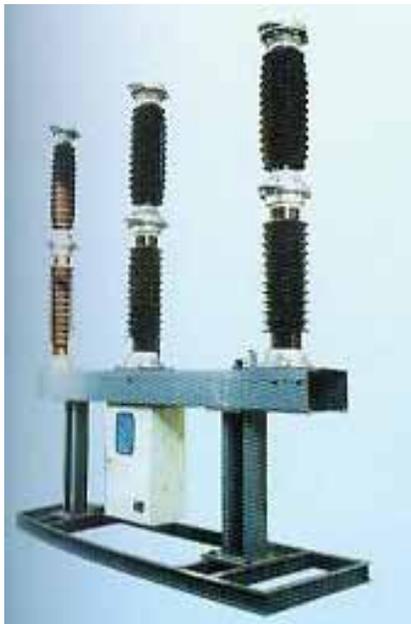
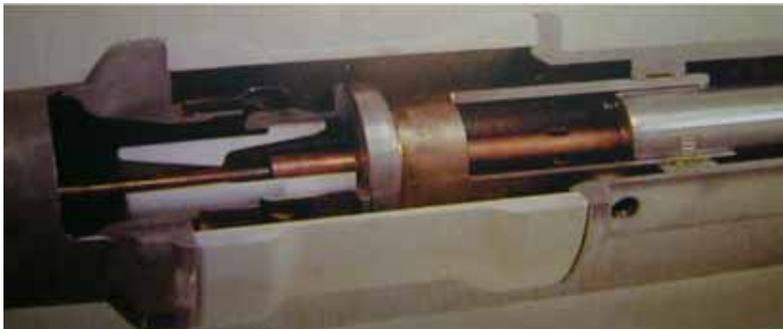
- 减少SF₆的排放、泄漏
- 寻找SF₆的**替代绝缘**、**灭弧介质**





§ 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

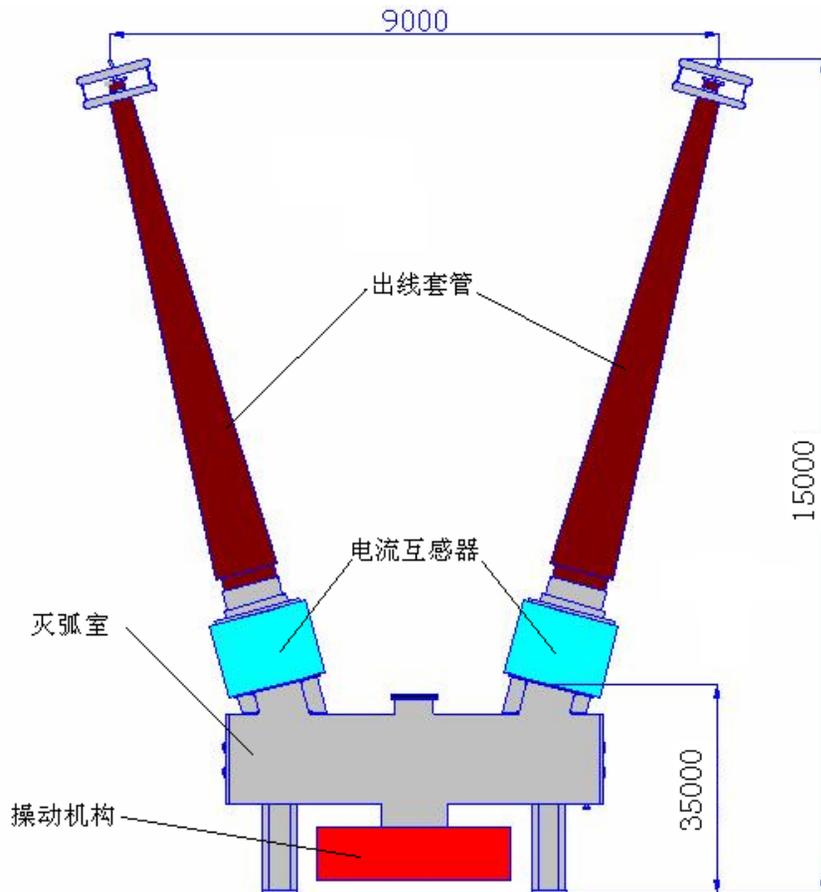


日本东京电力公司1000kV试验变电站



§ 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

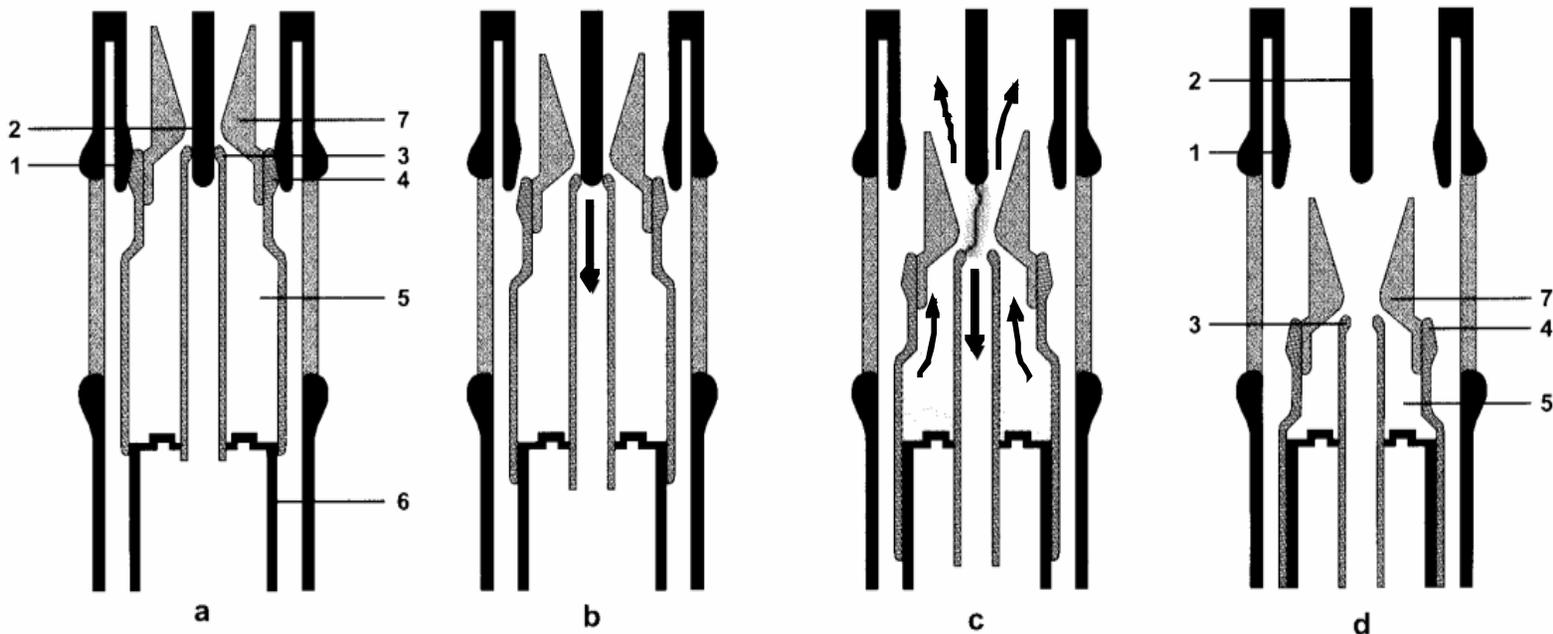


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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 | |

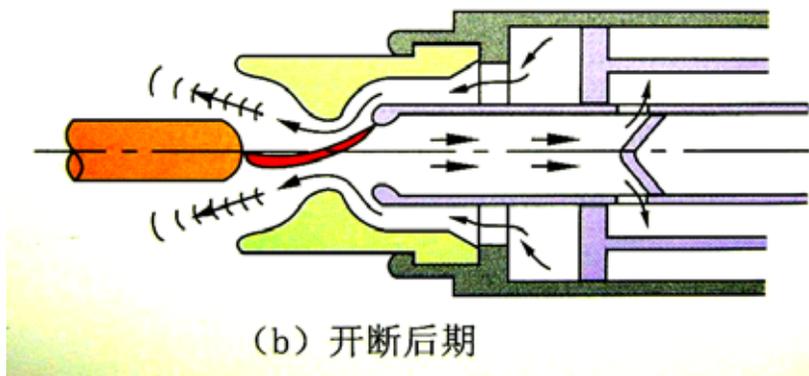
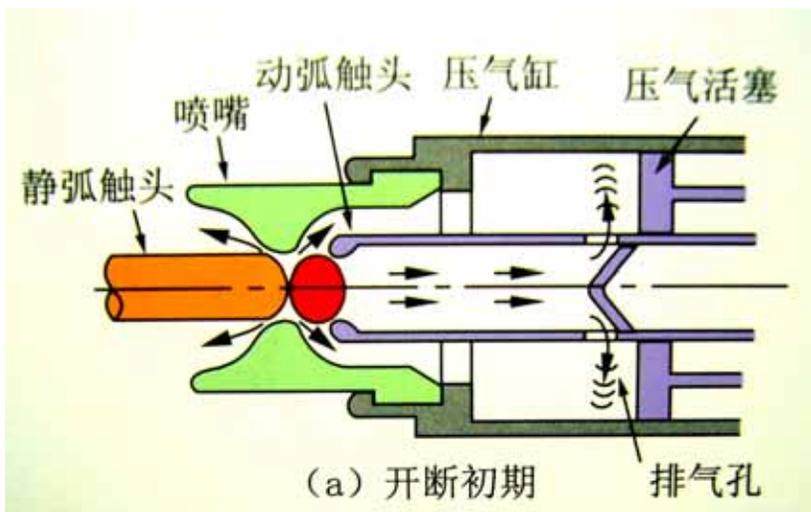


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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

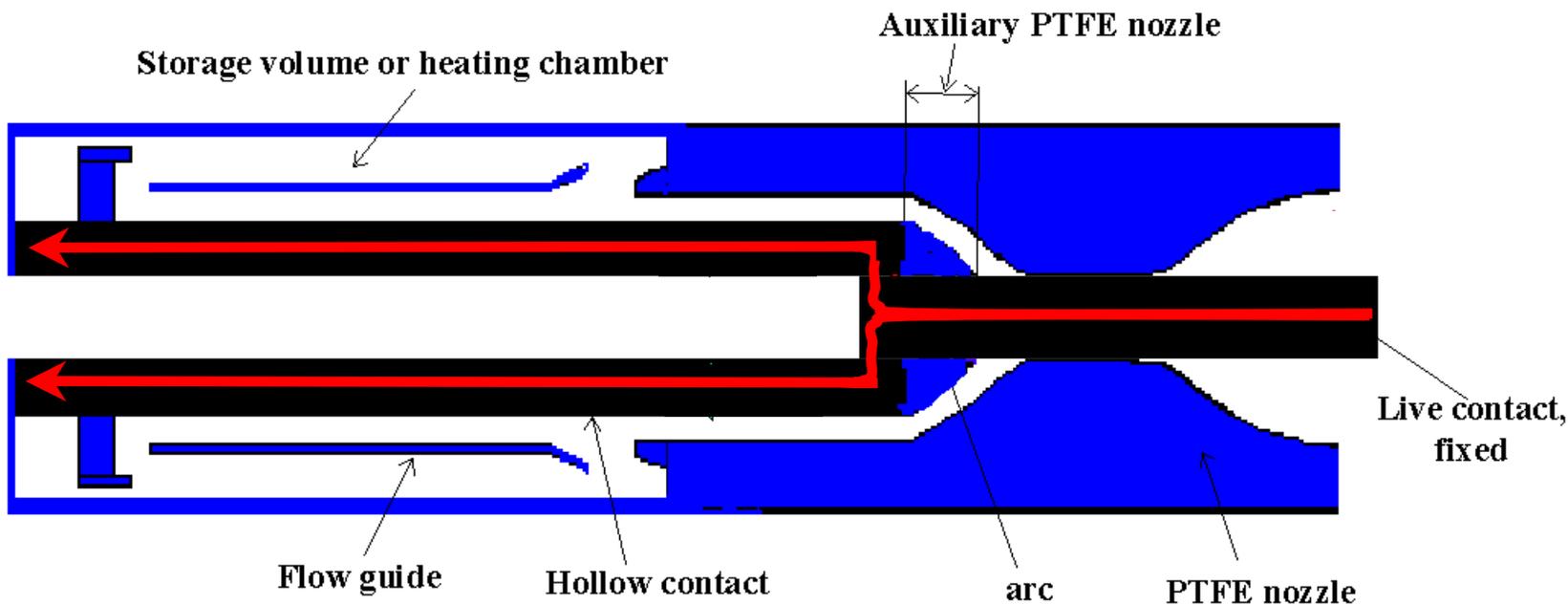


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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

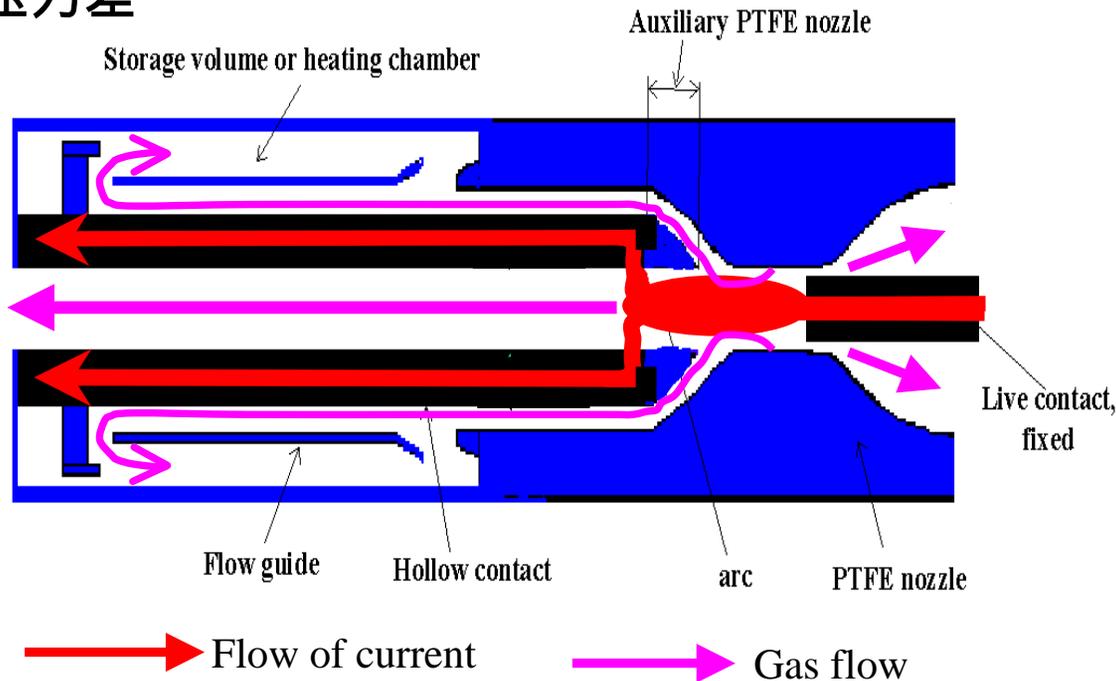


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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

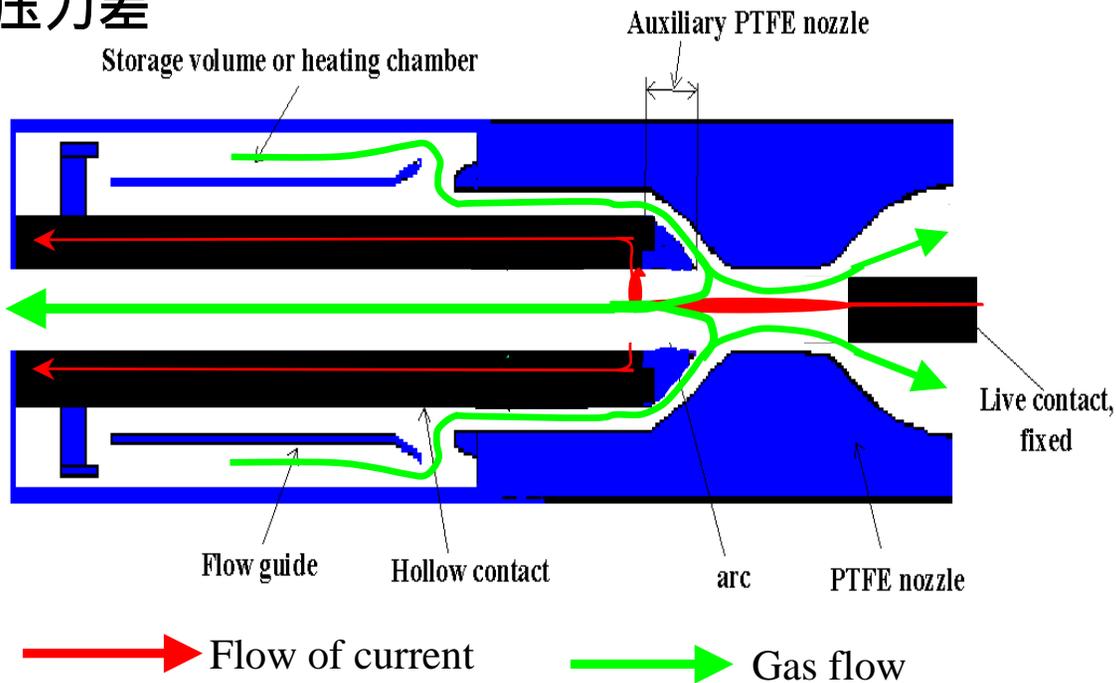


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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

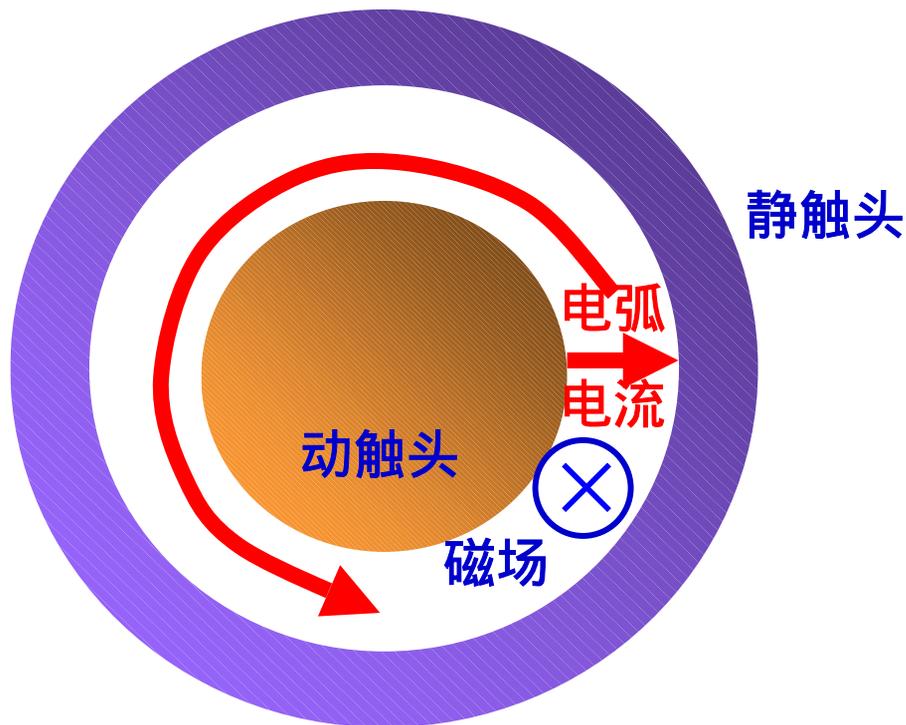


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ SF₆ (Sulphur hexafluoride) 灭弧装置

◆ SF₆灭弧装置的灭弧方式

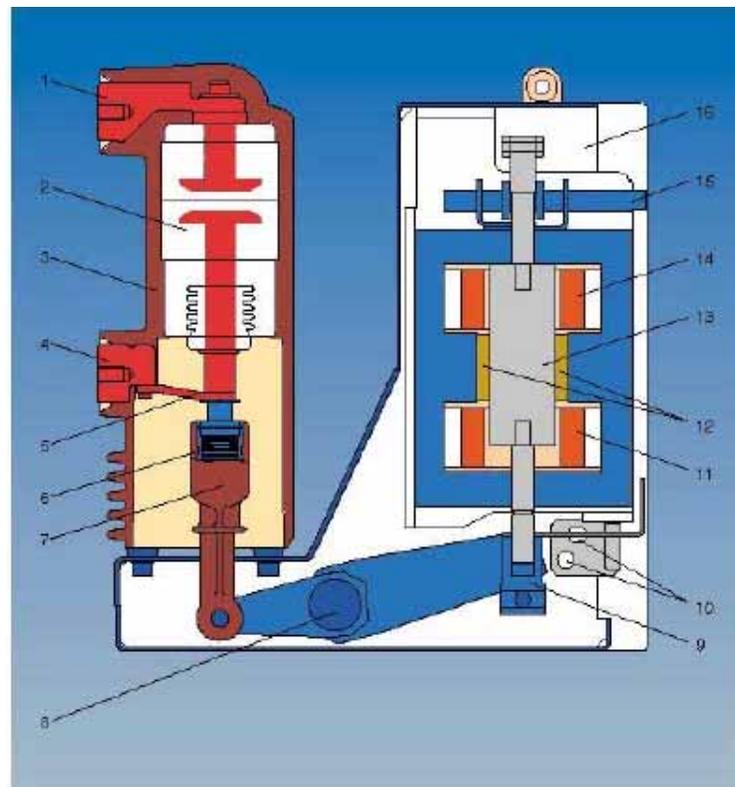
- 旋弧式 (Rotary Arc) : 利用**磁场** , 使电弧**旋转**、**冷却** (1970年)





§ 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快** , 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

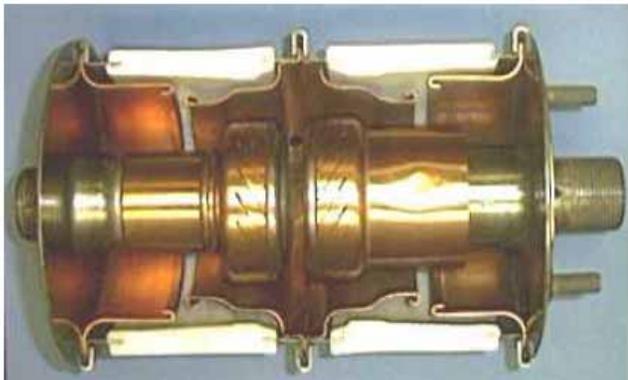
- 截流过电压 (chopping current)
 - ➔ 可通过**电极材料**解决
- 真空度监测
 - ➔ **在线监测**难度大
- 高电压等级真空灭弧室
 - ➔ 真空间隙的耐压强度**非线性**
 - ➔ **长间隙击穿**的机理？



§ 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

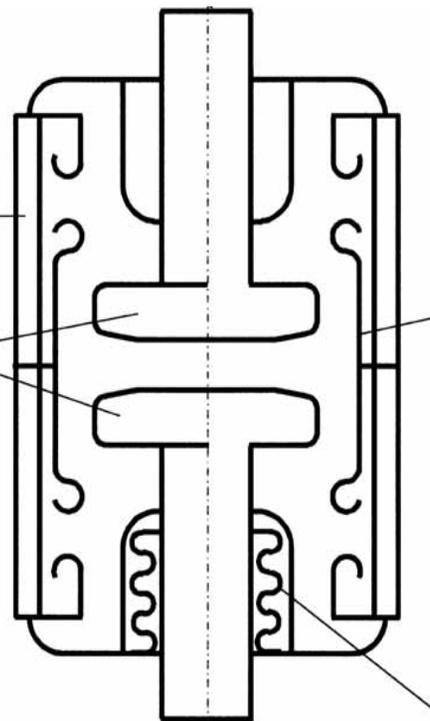


陶瓷外壳
ceramic insulator

触头
contacts

屏蔽罩
metal screen

波纹管
metal bellow

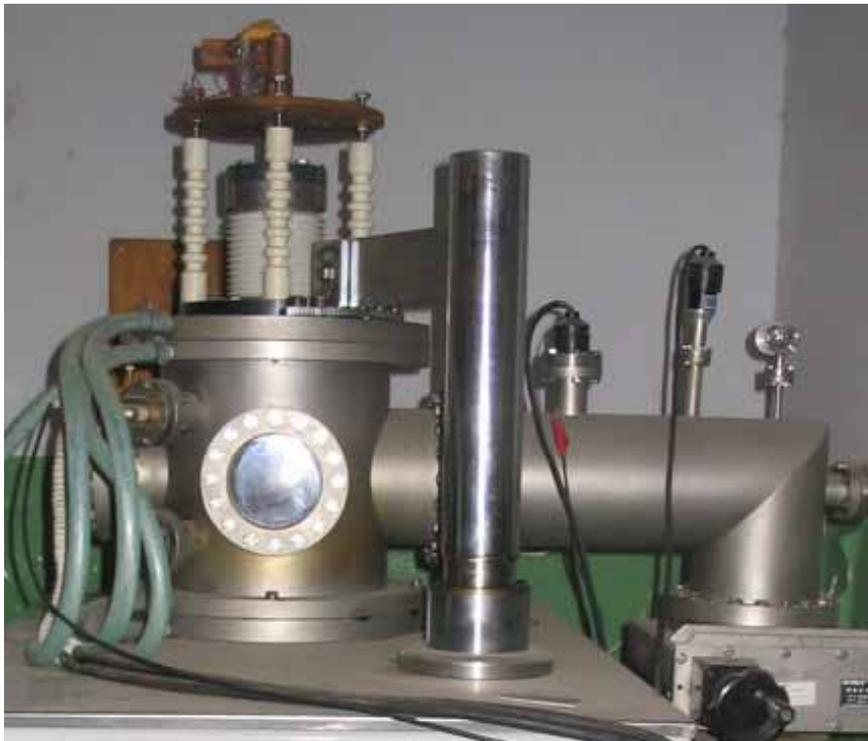




§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 真空 (Vacuum) 灭弧装置

◆ 真空电弧的研究设备



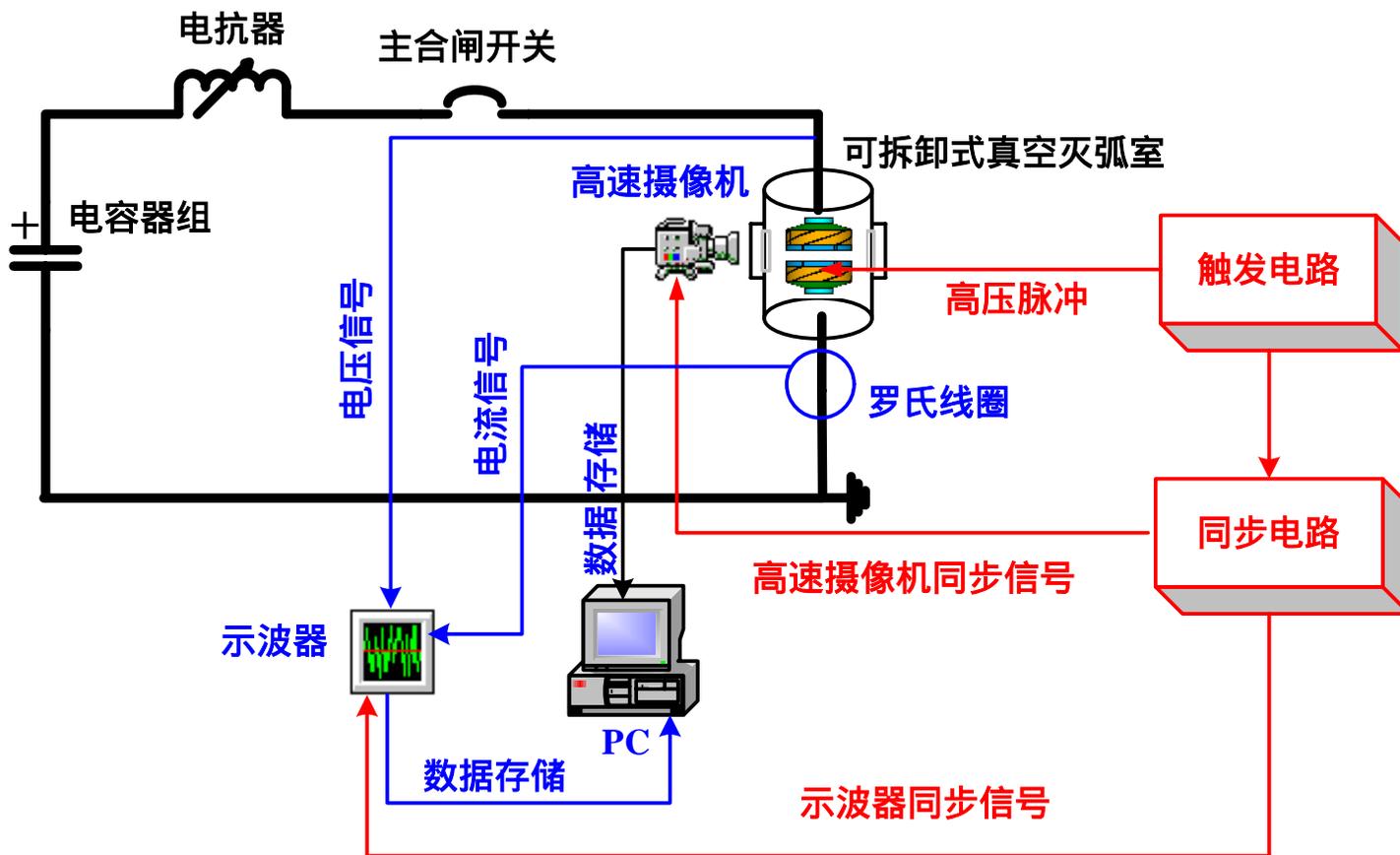
可拆卸式真空灭弧室
Detachable Vacuum Chamber



§ 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



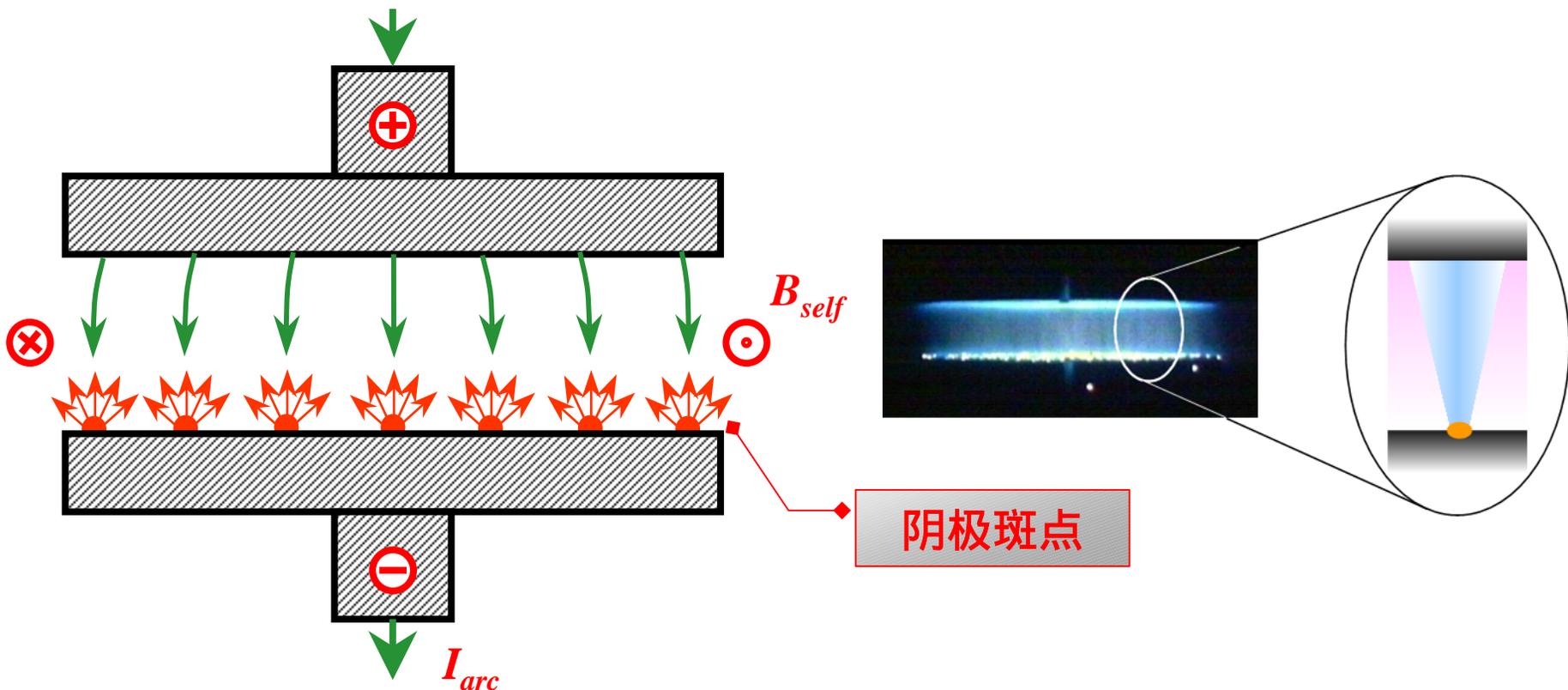


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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)



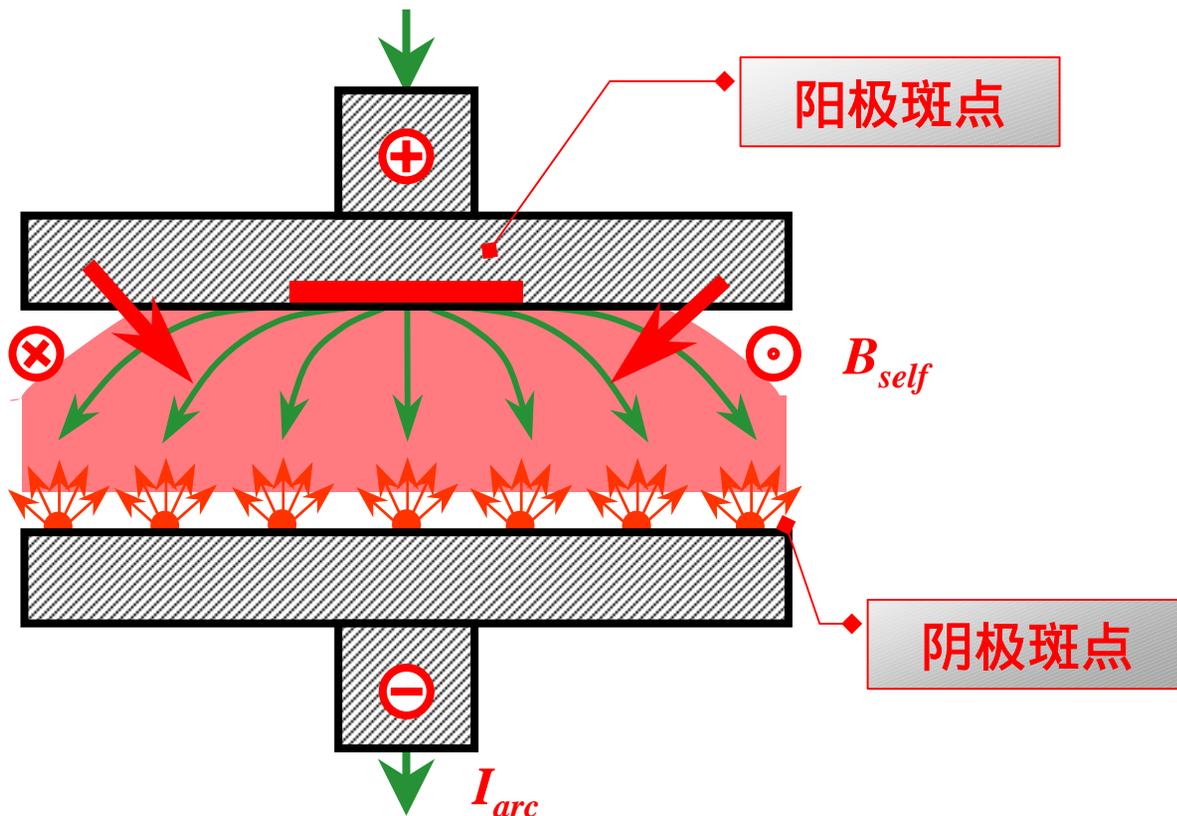


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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

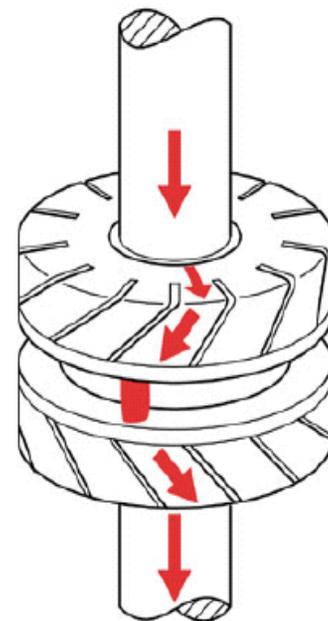
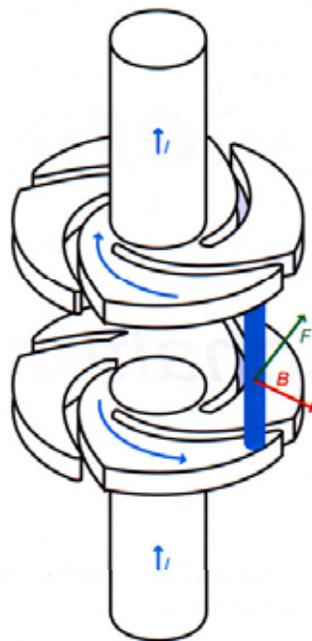
真空 (Vacuum) 灭弧装置

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)

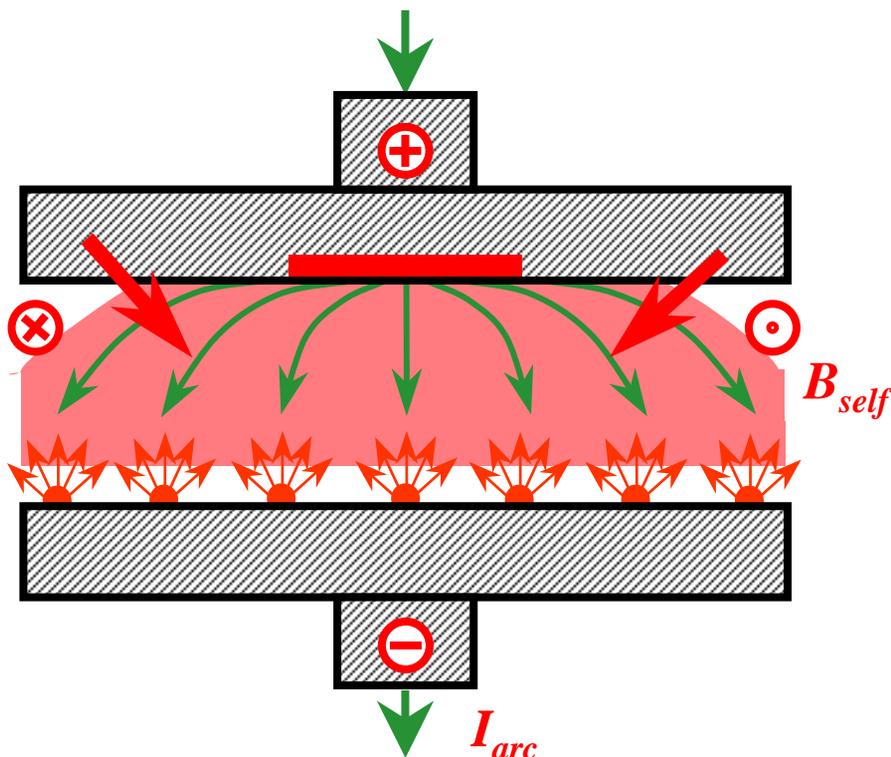


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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

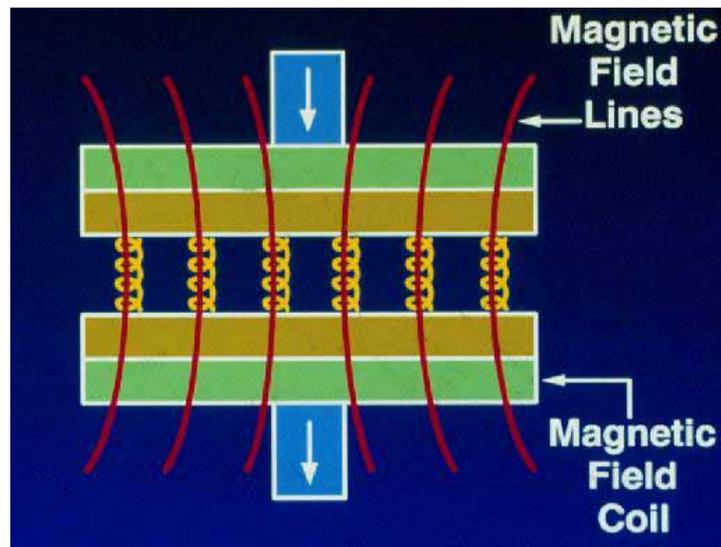
真空 (Vacuum) 灭弧装置

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

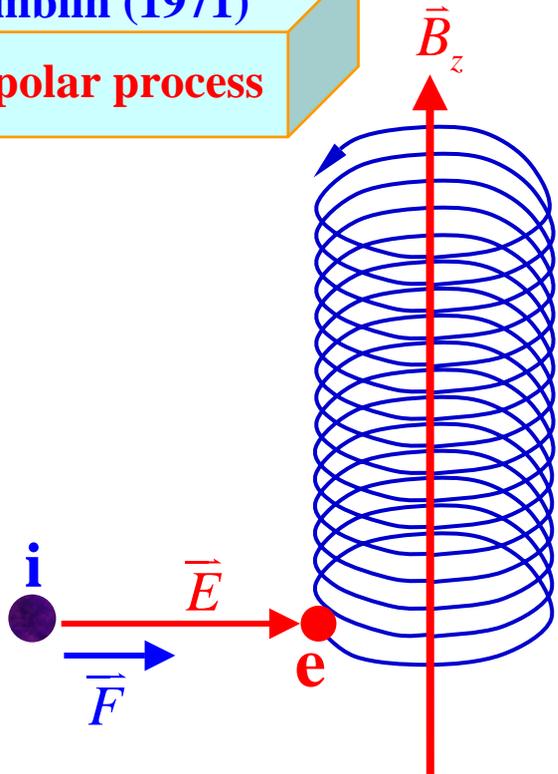
真空 (Vacuum) 灭弧装置

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

ω_e \rightarrow Cyclotron frequency of electron

ν \rightarrow Collision frequency of electron

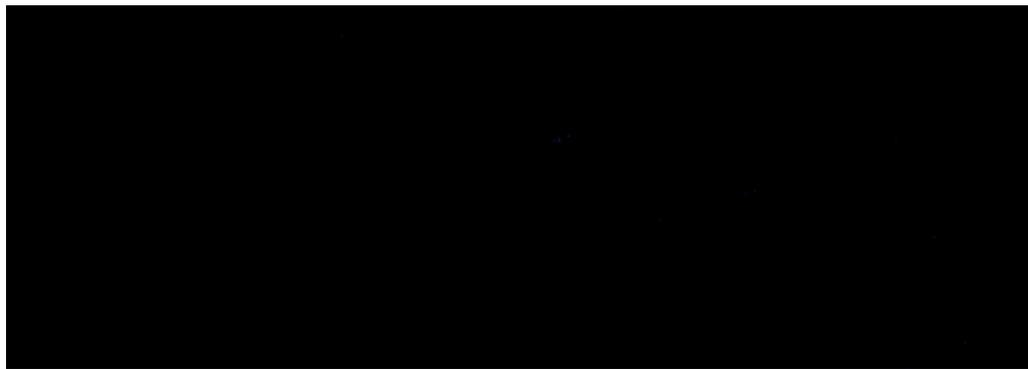
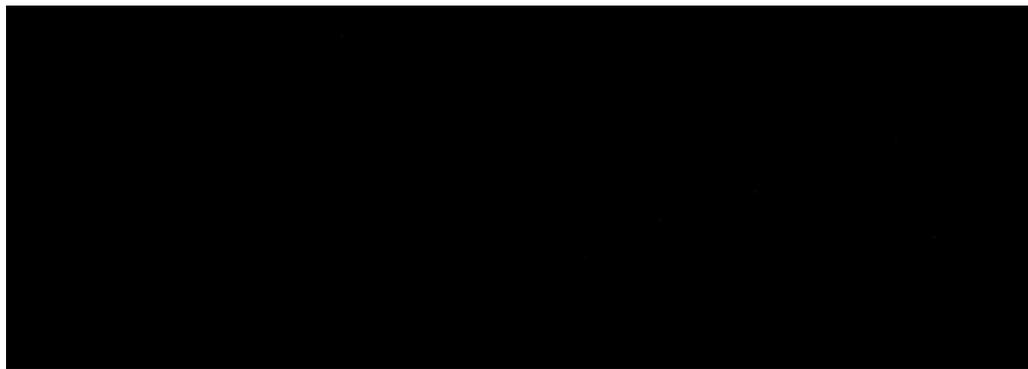


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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)**



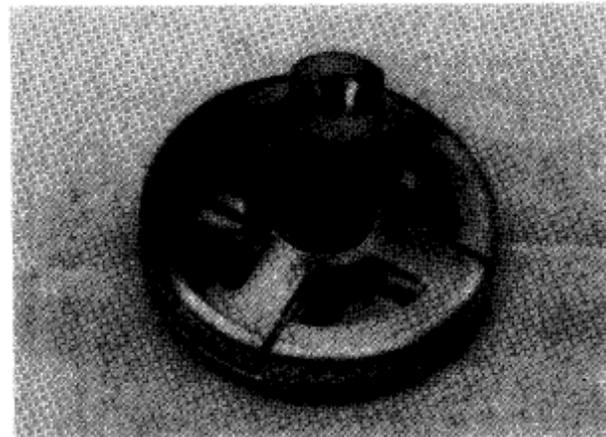


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

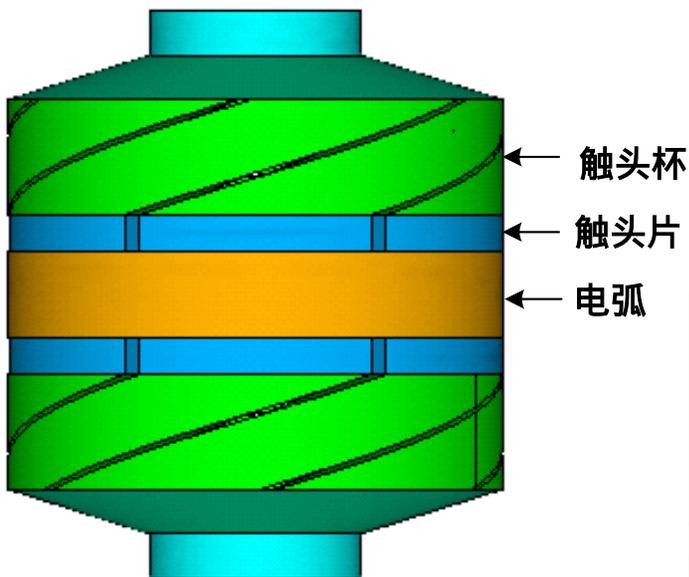
真空 (Vacuum) 灭弧装置

真空电弧的磁场控制技术

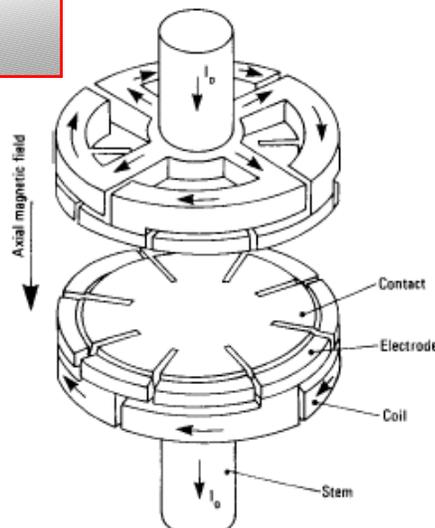
纵向磁场电极的结构



Yanabu, 1989



杯状 (Cup Type)



线圈型 (Cup Type)



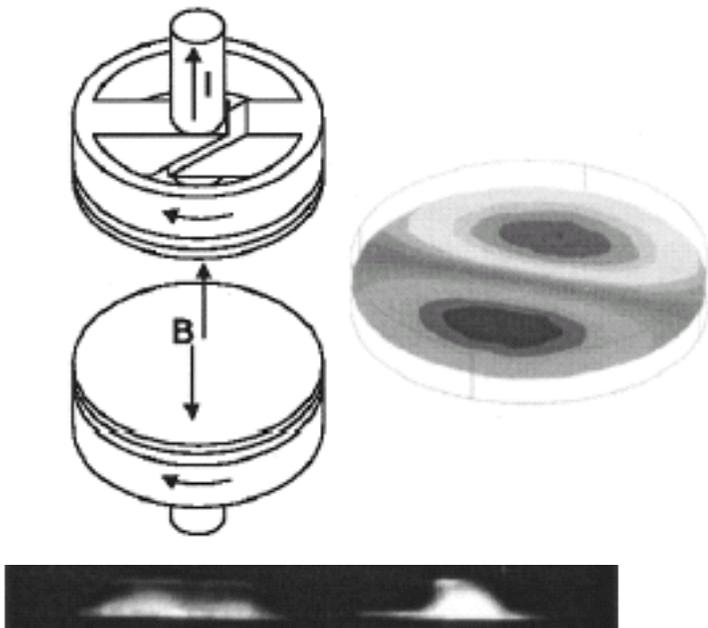
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

真空 (Vacuum) 灭弧装置

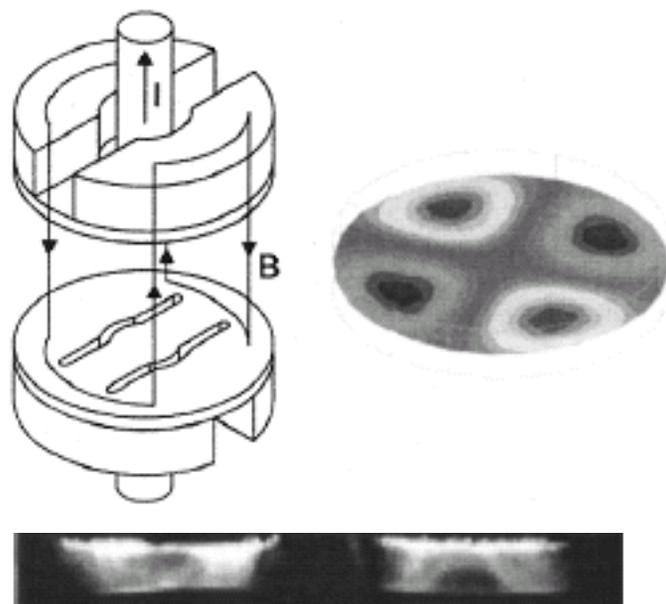
真空电弧的磁场控制技术

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

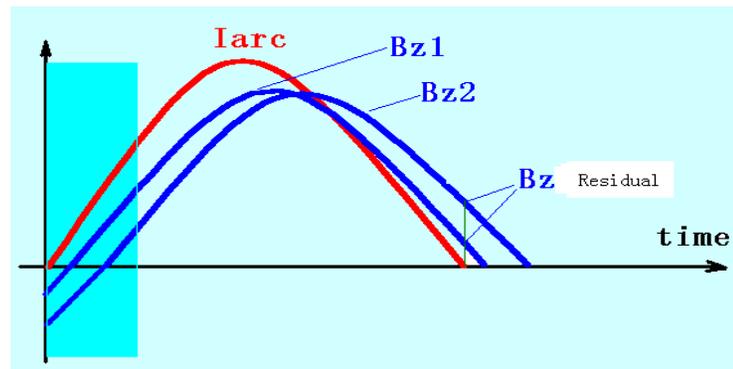
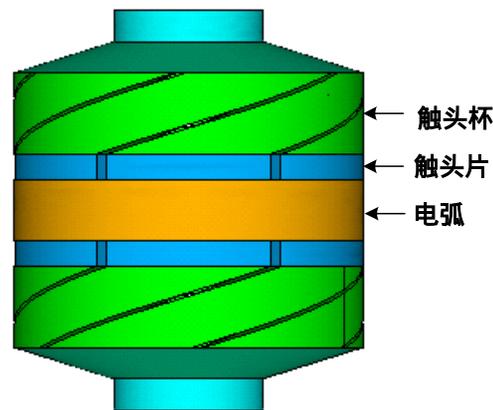
真空 (Vacuum) 灭弧装置

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



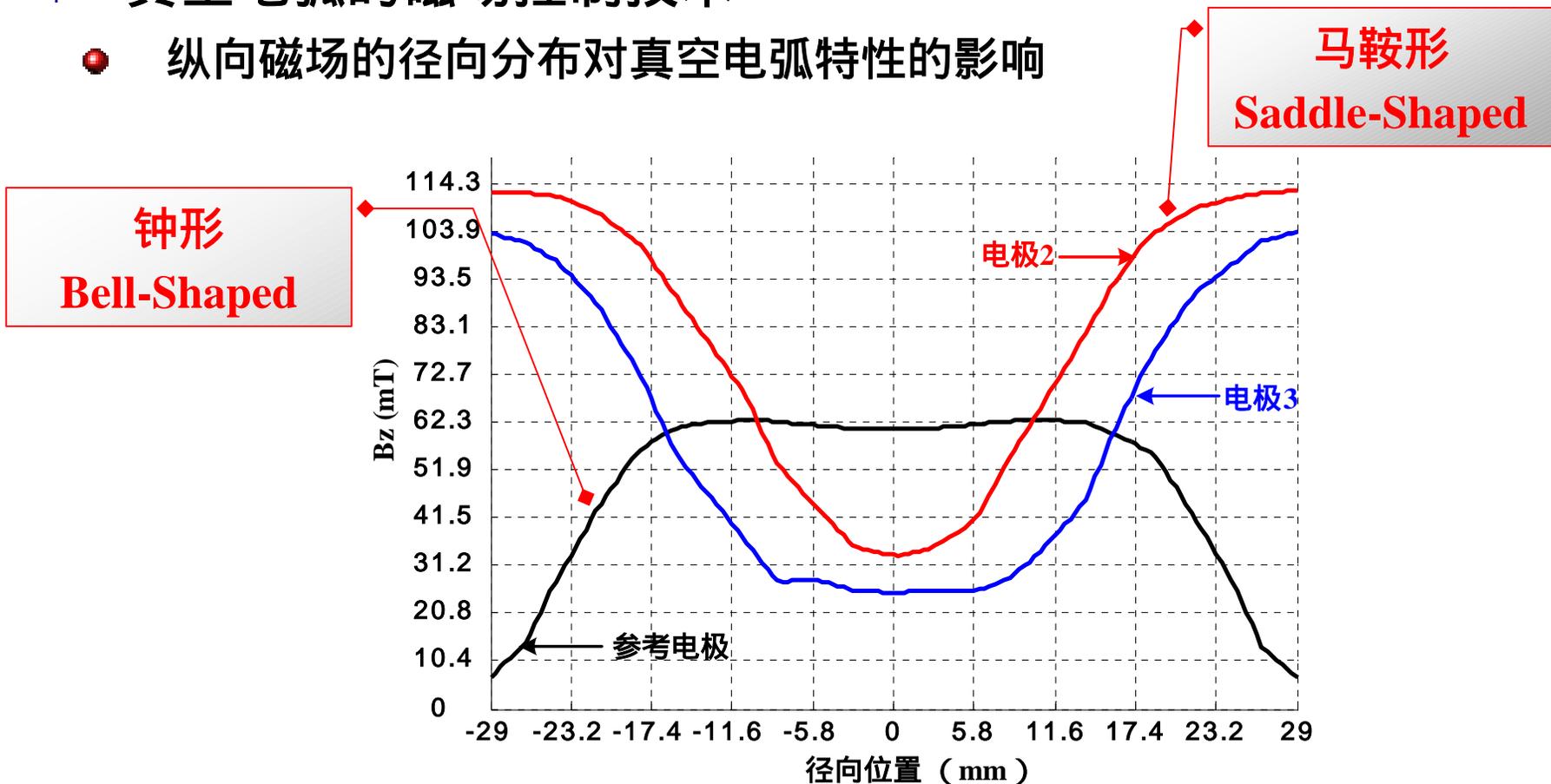


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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



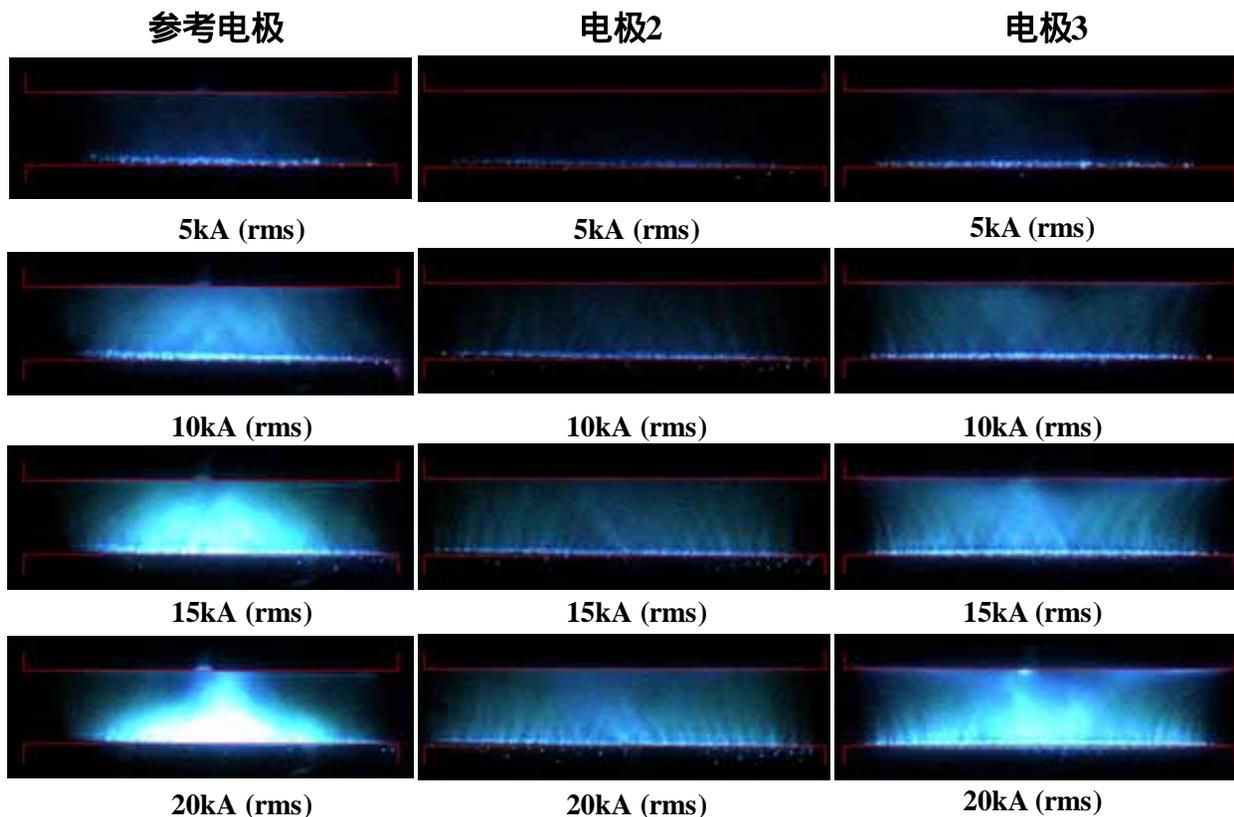


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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



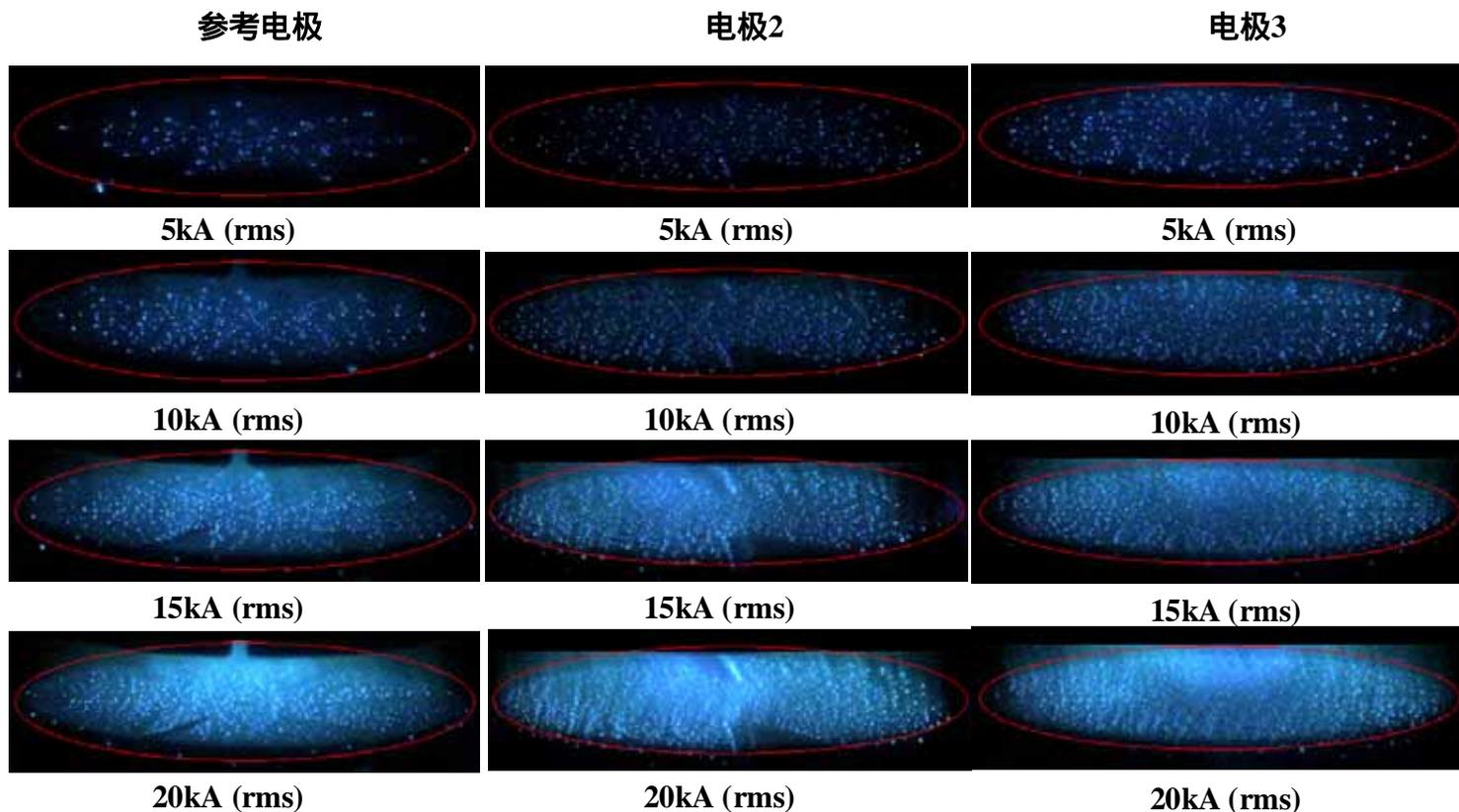


§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

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



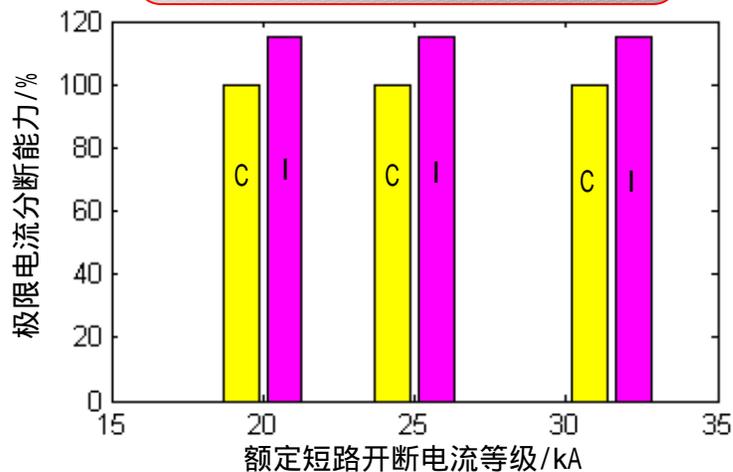
(a)

(b)

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

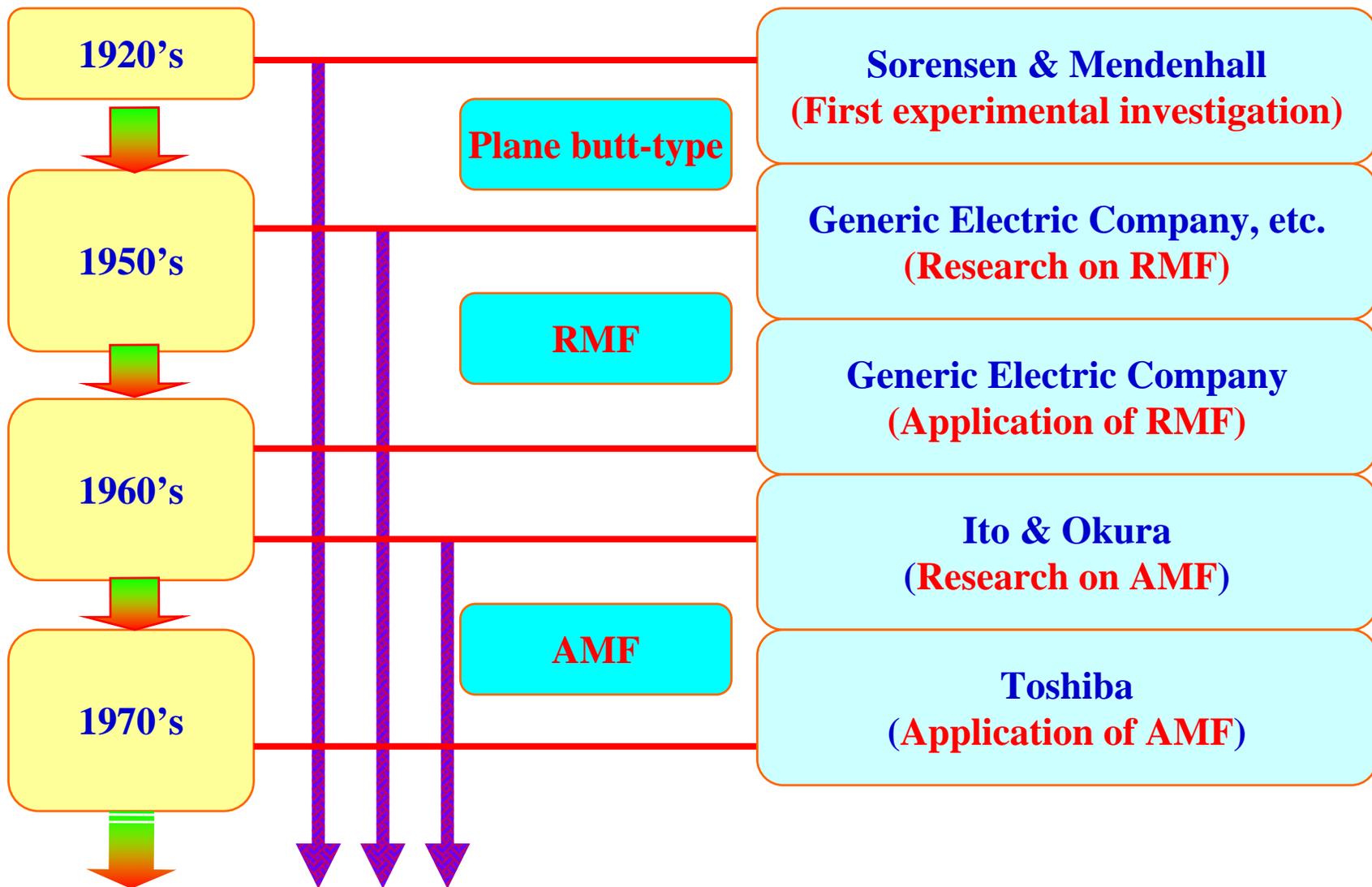


额定电压：12kV
额定电流：6300A
额定短路开断电流：80kA

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

| $U \backslash I$ | $<20\text{kA}$ | 25kA | 31.5kA | $>31.5\text{kA}$ |
|-------------------|----------------|---------------|-----------------|------------------|
| $\leq 1\text{kV}$ | RMF | RMF | RMF | RMF |
| 12kV | RMF | RMF | RMF | AMF |
| 24kV | RMF | RMF/AMF | AMF | AMF |
| 36kV | RMF | AMF | AMF | AMF |
| $>36\text{kV}$ | 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

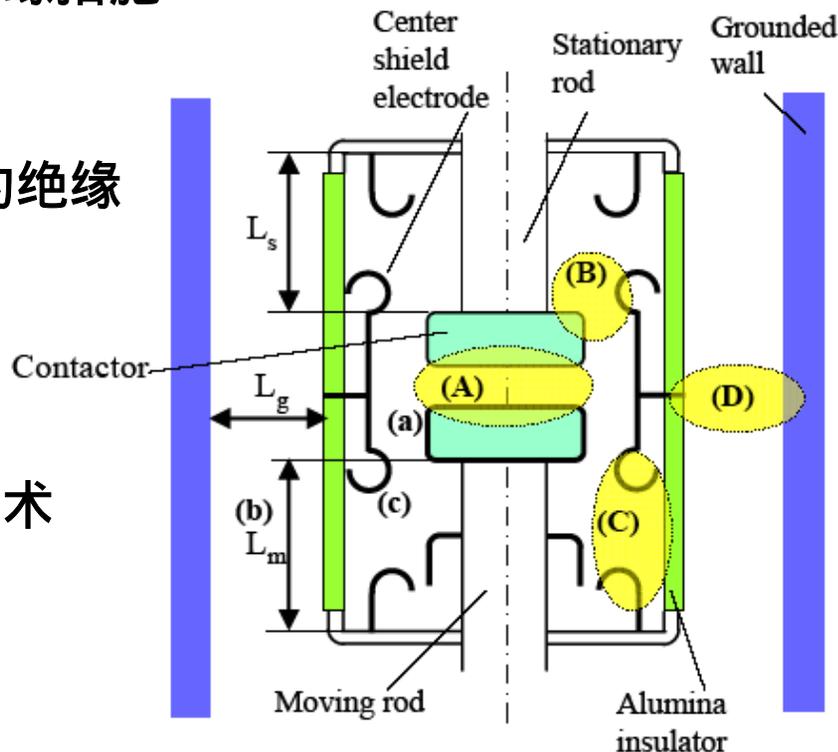
关键的科学问题

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





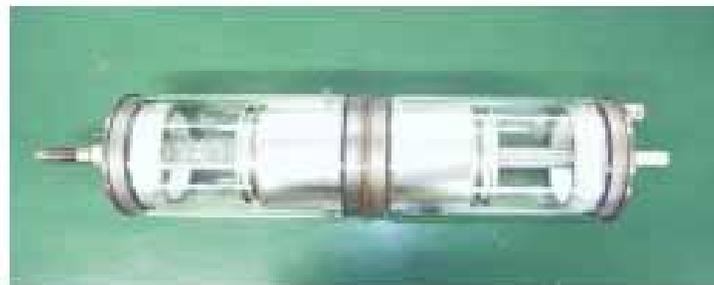
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的工作原理

■ 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



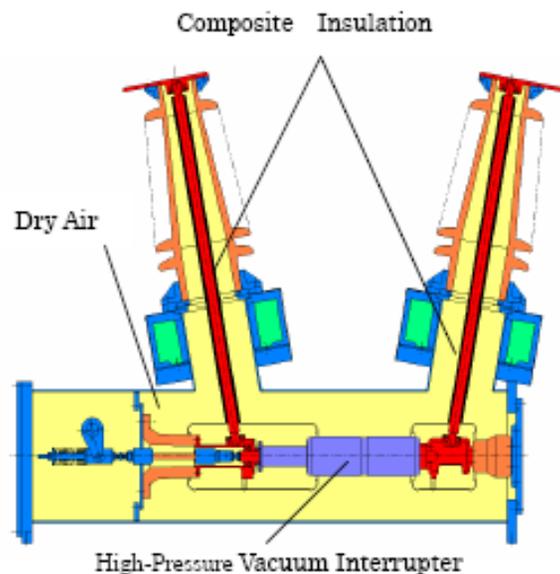
真空灭弧室



§ 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

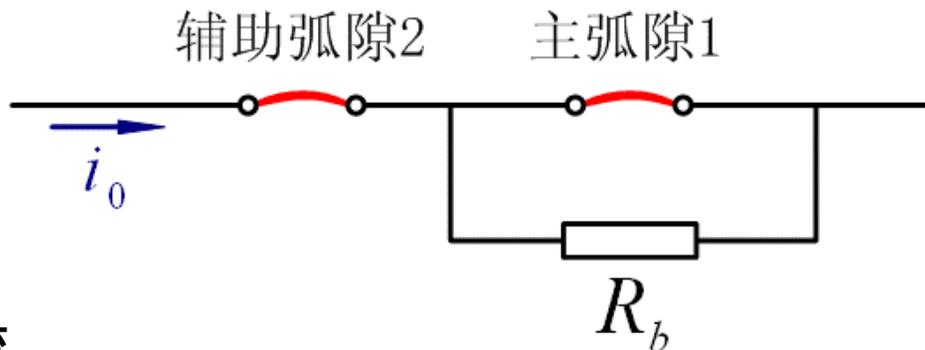
提高灭弧装置开断能力的辅助方法

弧隙两端并联低值电阻

主弧隙先开断

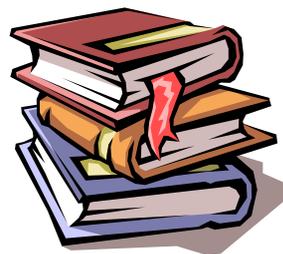
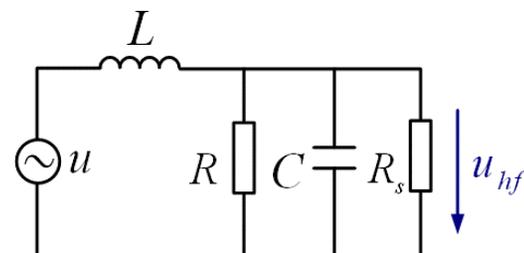
并联电阻的作用

- ◆ 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

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





■ 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

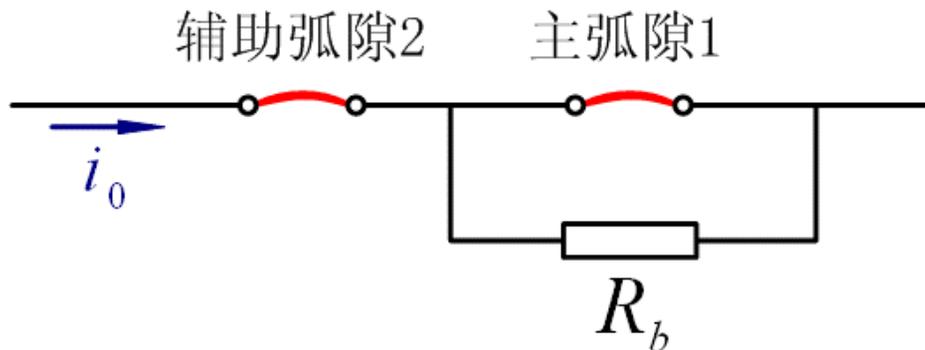
● 辅助弧隙后开断

➔ 并联电阻的作用

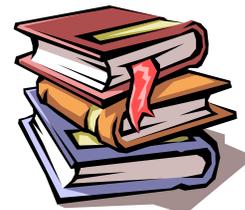
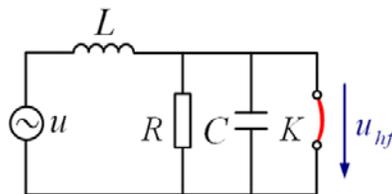
◆ 串入电阻，减小电流

◆ 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 |

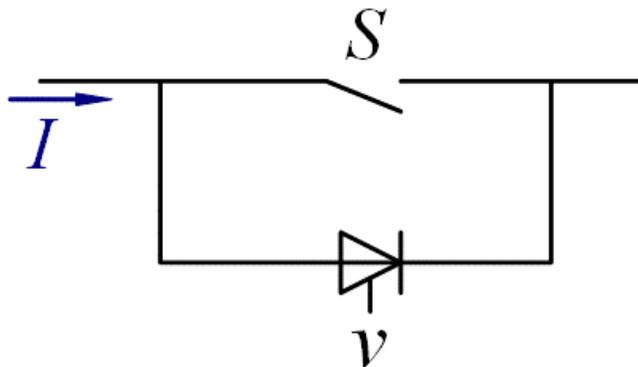


■ 附加晶闸管装置

◆ 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



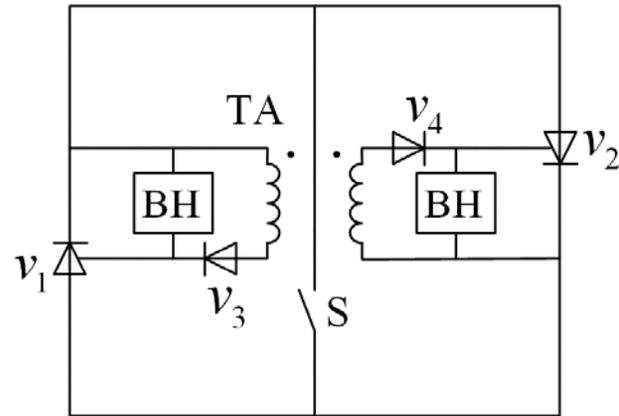


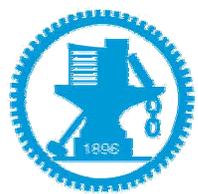
附加晶闸管装置

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

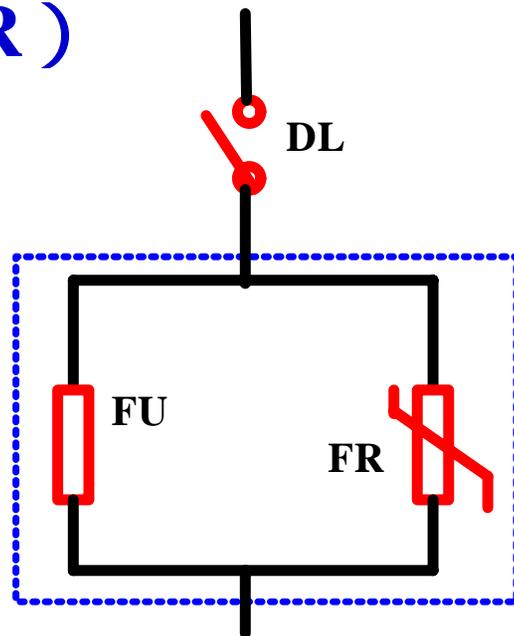
■ 高压限流熔断器组合保护装置 (FUR)

◆ 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

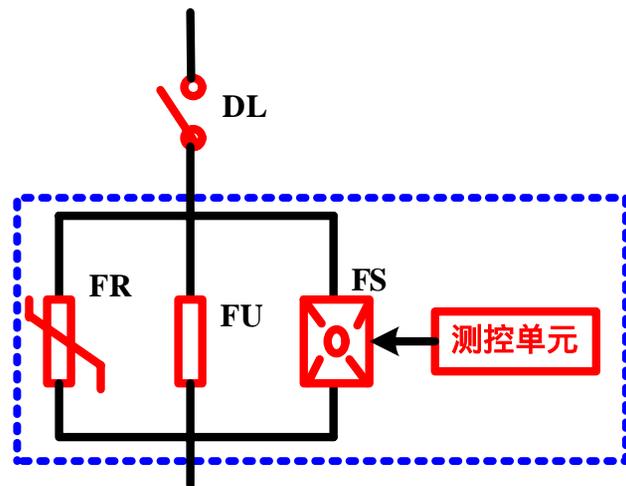


§ 5-3 新型开断装置简介

■ 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

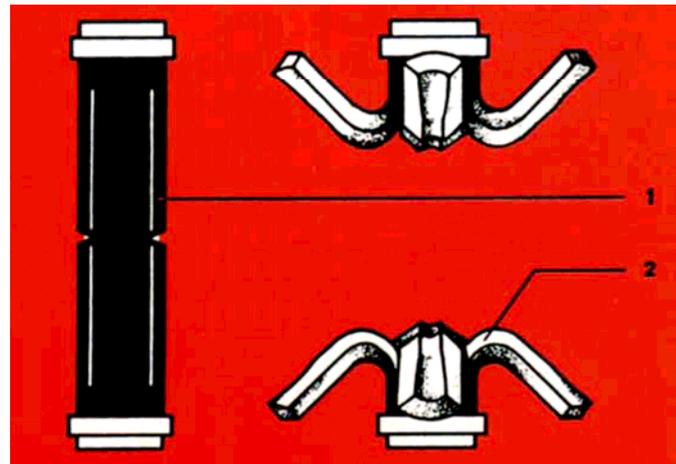
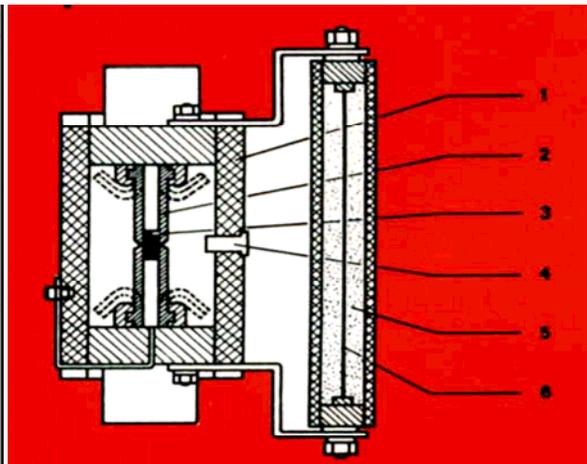
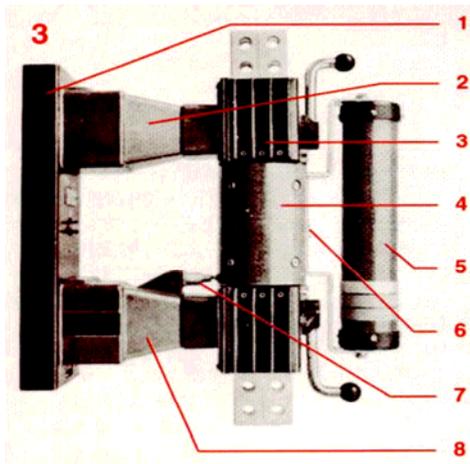
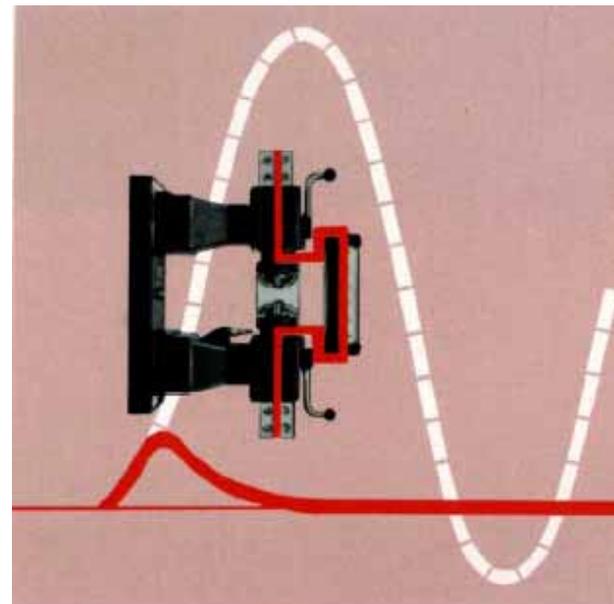


§ 5-3 新型开断装置简介

■ 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

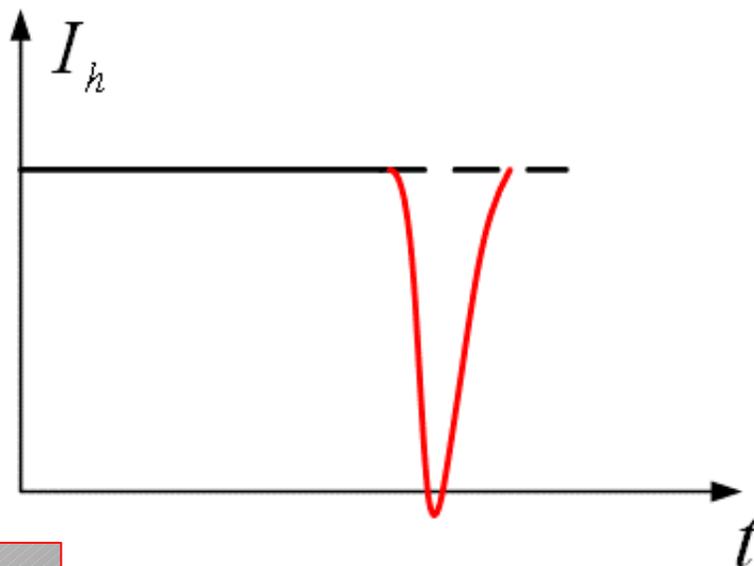
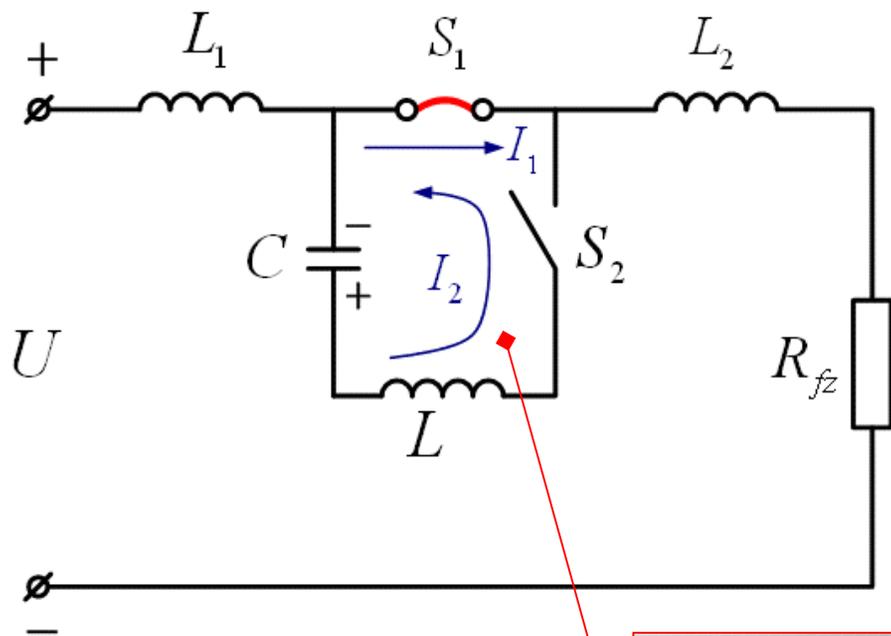




§ 5-3 新型开断装置简介

■ 新型直流真空开断装置

◆ 原理：反向电流注入、人工过零



加反向电流
使 I_h 强迫过零



§ 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

