

# 真空开关应用及 技术新动态

主讲人：刘志远

西安交通大学

电力设备电气绝缘国家重点实验室

2011-9-20

# 内容提要

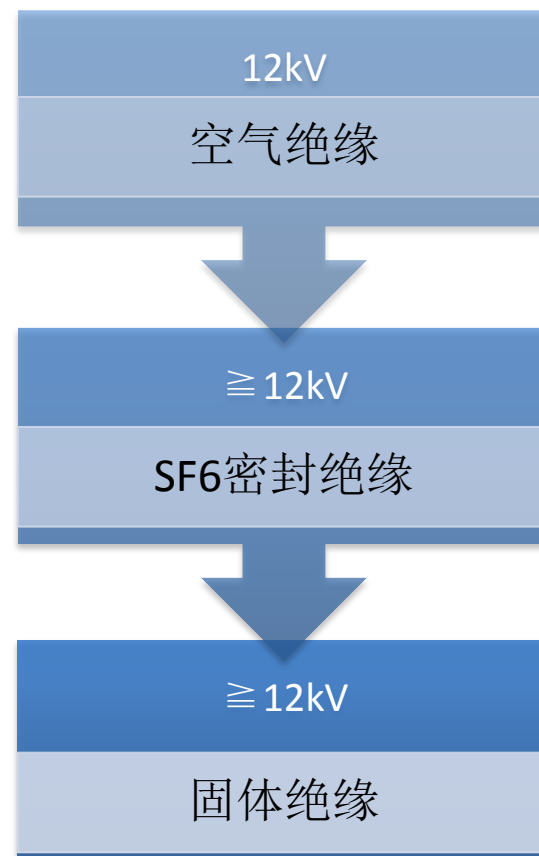
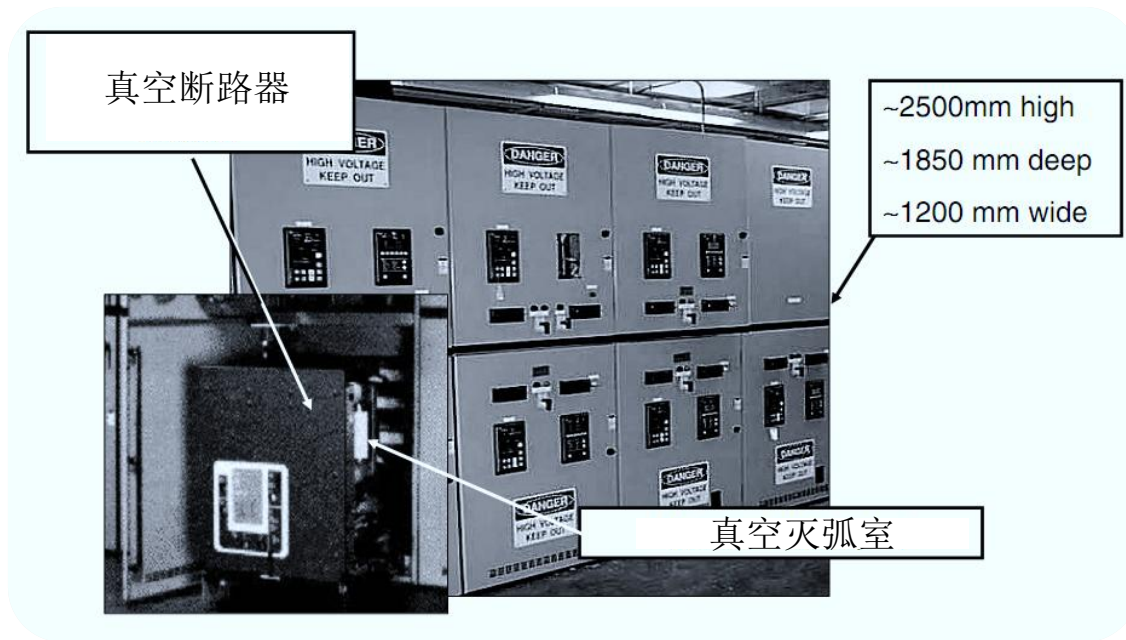
真空开关应用

真空开关技术新动态

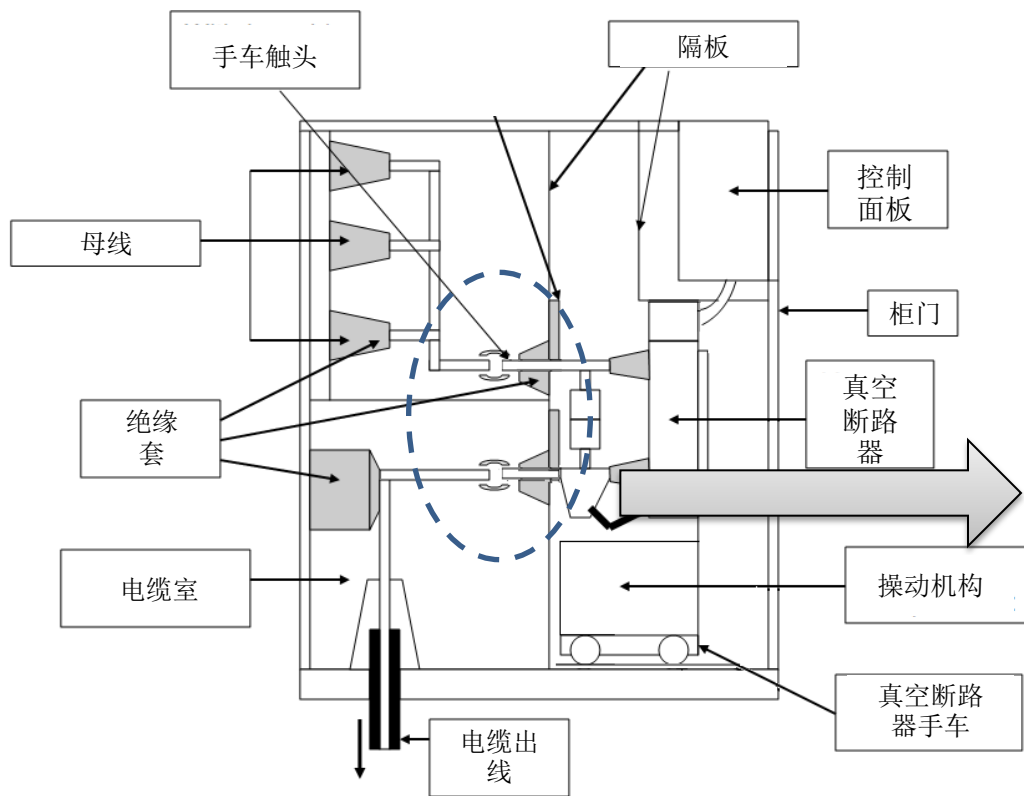
# 一、真空开关应用



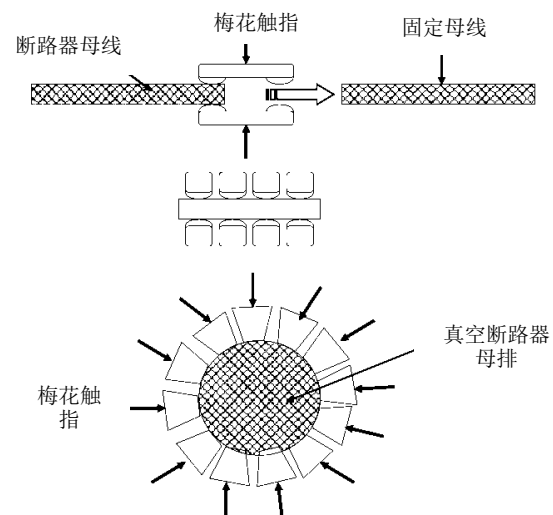
# ◆户内真空开关



- 户内用真空开关柜

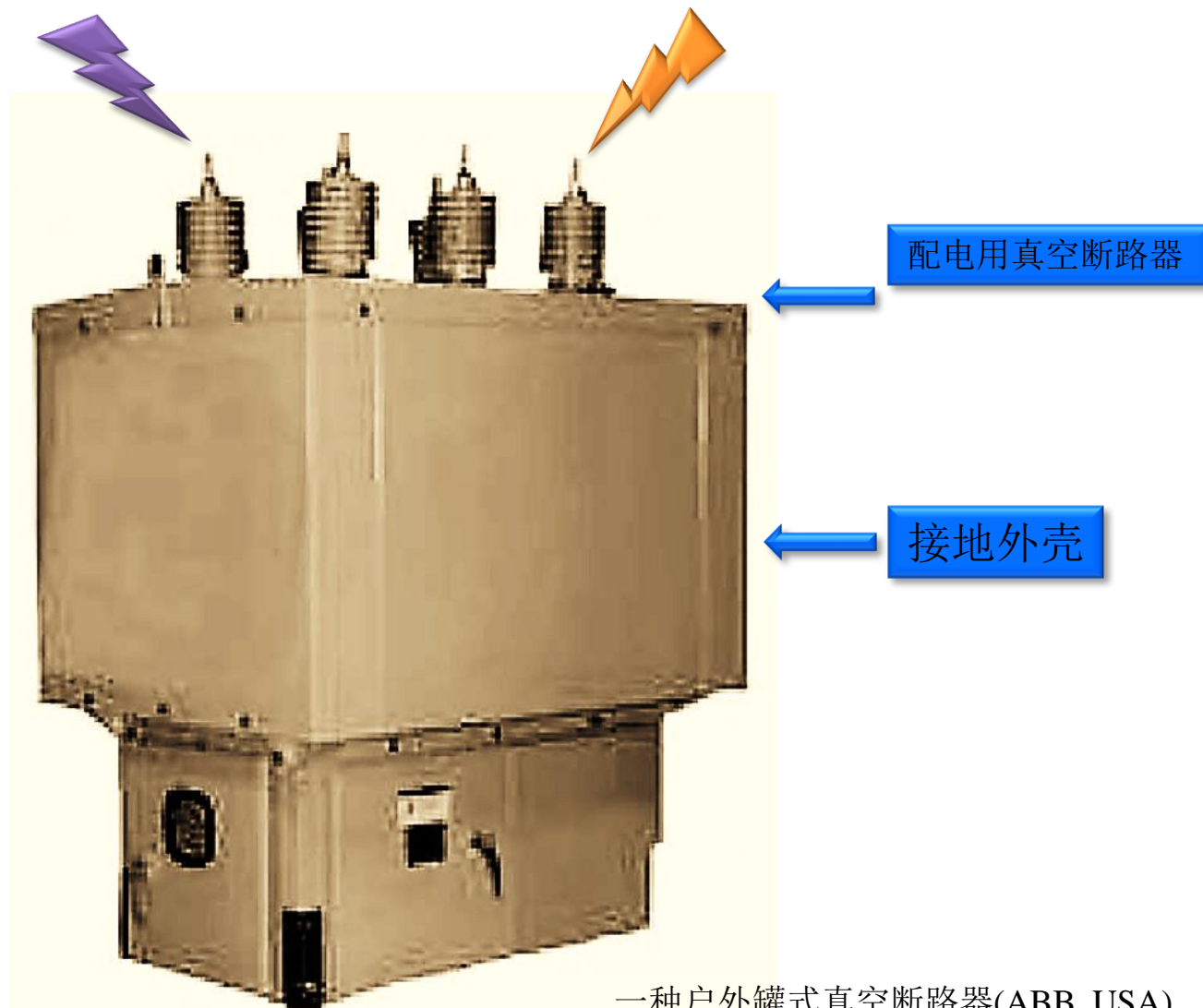


真空断路器与开关柜母线通过梅花触指相连



- 户内真空开关柜内部结构

## ◆户外真空开关



一种户外罐式真空断路器(ABB, USA)

## ◆真空重合器



柱上真空  
重合器

该种重合器具有以下特点：

可频繁操作

快速重合检测暂时或非永久故障

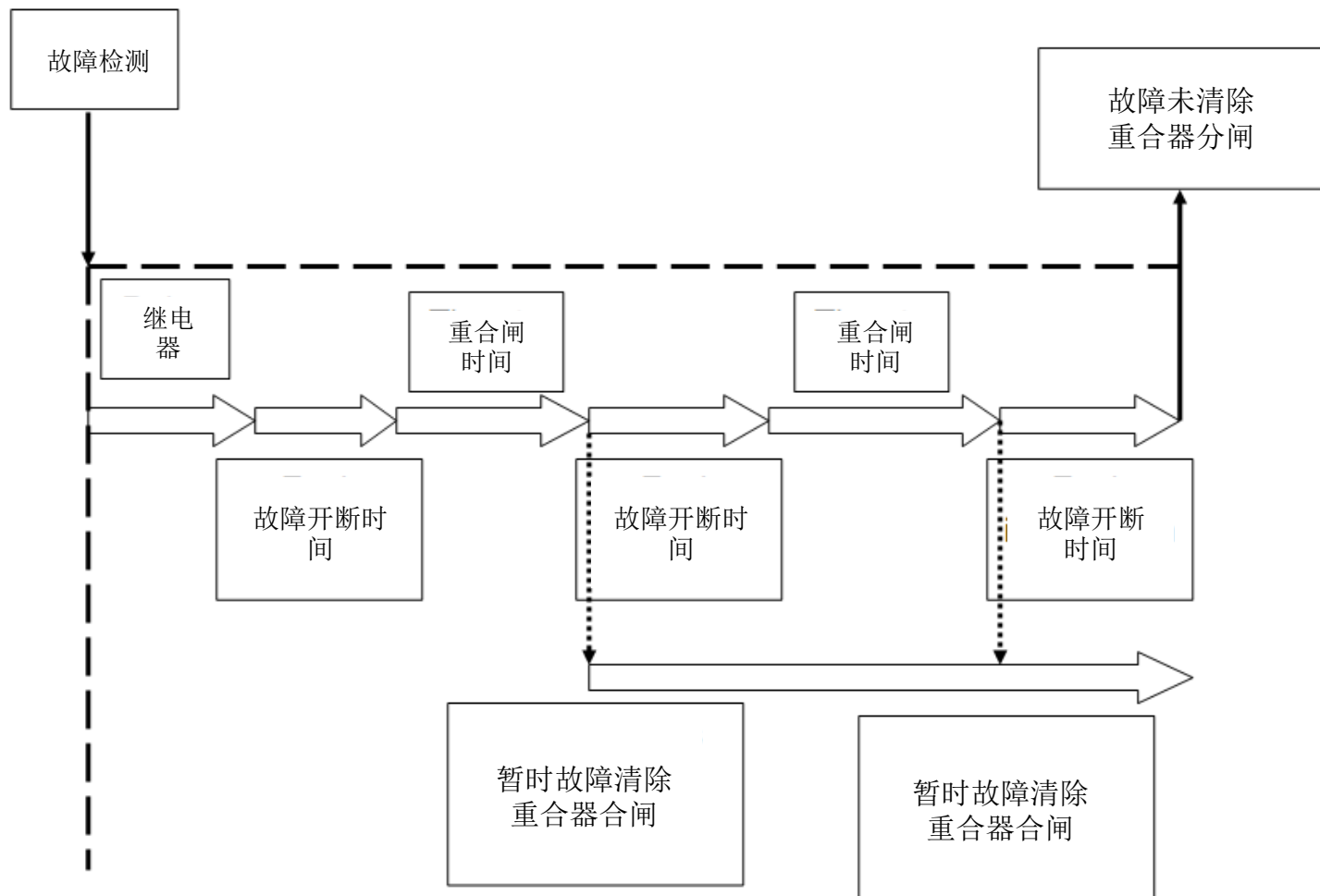
常用在故障水平较低的长配电线路上

雷电冲击耐受能力不高

累积开断电流能力强



### 真空重合器动作次序





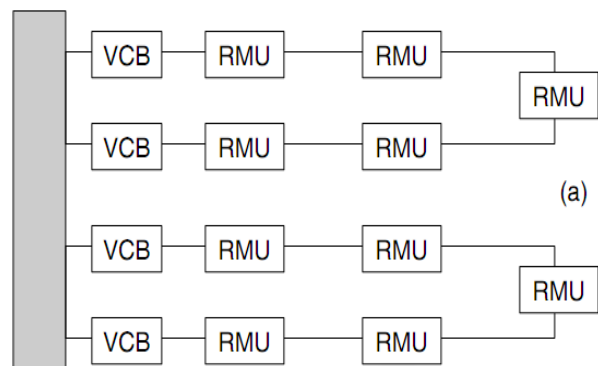
## ◆二次配电环网柜

隔离环网系统故障侧，维持系统其他侧正常供电，提高环网系统的利用率。

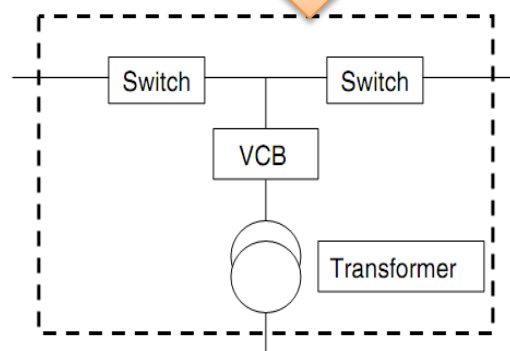


Xiria系列固体环网柜(Eaton)

变电站

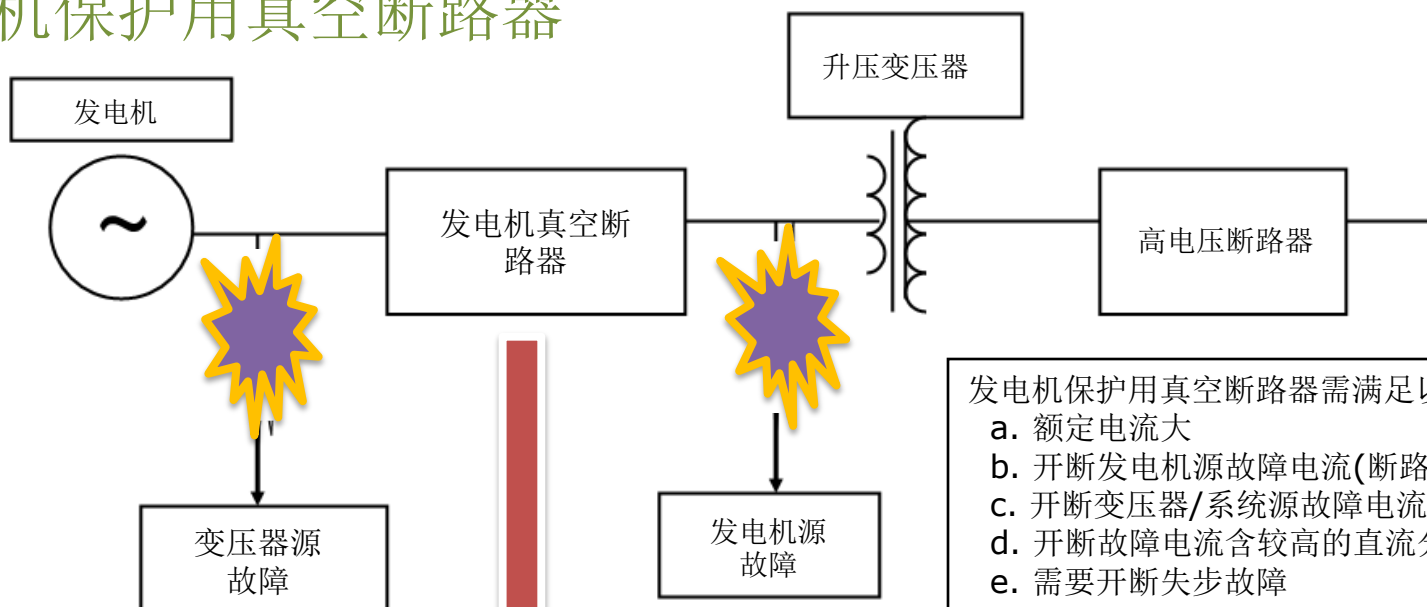


(a) 环网系统



(b) 环网柜示意图

## ◆ 发电机保护用真空断路器

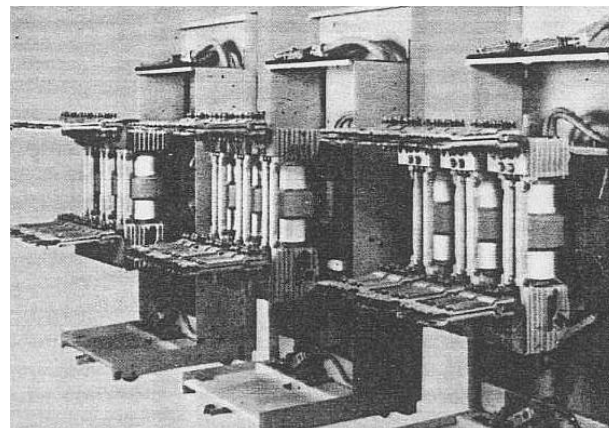


发电机保护用真空断路器需满足以下要求：

- 额定电流大
- 开断发电机源故障电流(断路器右侧)
- 开断变压器/系统源故障电流(断路器左侧)
- 开断故障电流含较高的直流分量
- 需要开断失步故障



15 kV, 75 kA, 4000 A ( Eaton )

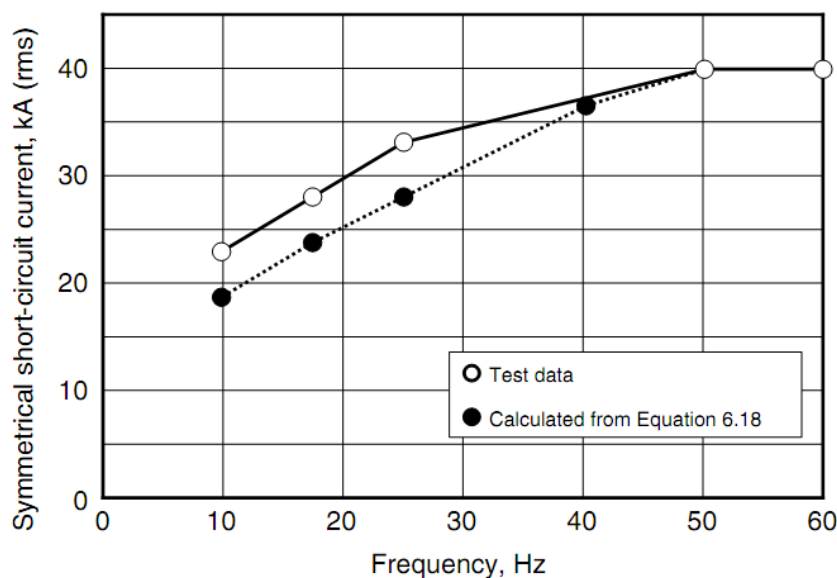


8000A., (courtesy of Siemens AG)

# ◆ 铁道用真空断路器

世界各地电气化铁道系统电网电压等级及频率

Country	kV	Hz
USA	15.5	25-60
France	24	50
Germany	15	$16\frac{2}{3}$
Norway, Sweden	15	$16\frac{2}{3}$
UK, Denmark	24	50
Taiwan	25	60
Other systems	1 and 3	DC



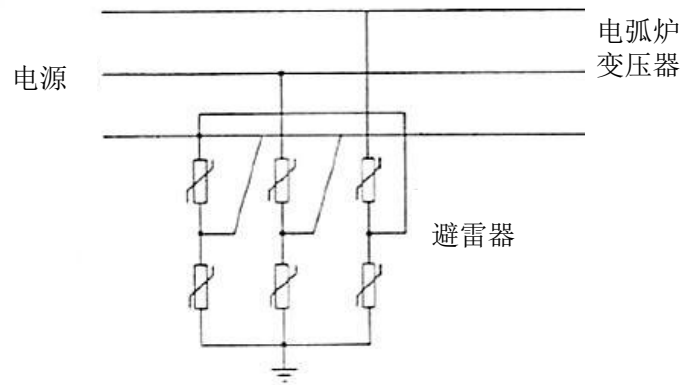
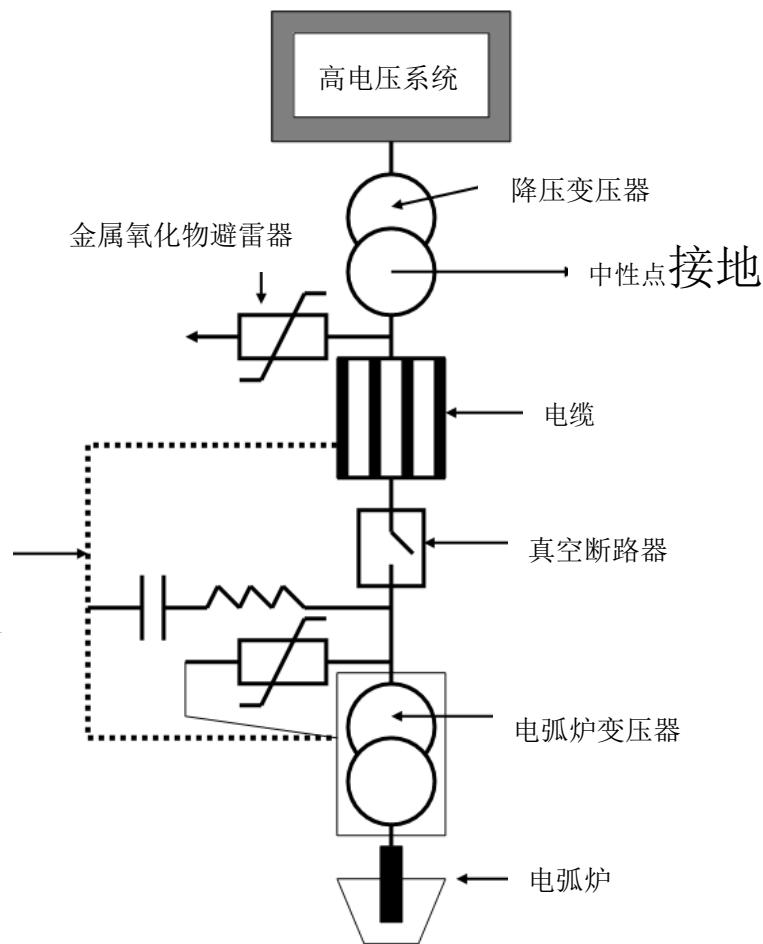
$$\frac{i_{sc}(f_1)}{i_{sc}(f_2)} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$$

# ◆ 电弧炉用真空开关



## 电弧炉

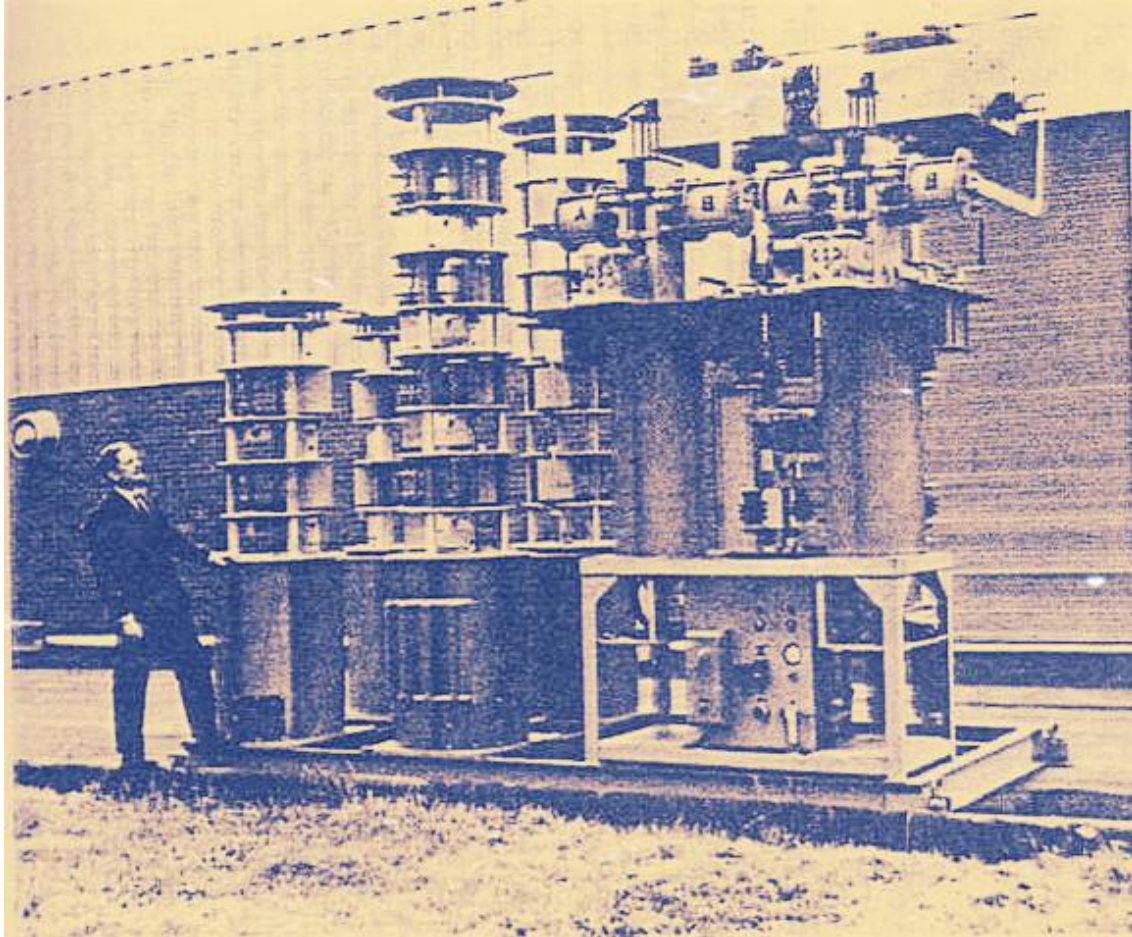
- 主要功能: 废金属熔化
- 所用真空开关频繁操作(100次/天)
- 低电压, 大电流, 高阻抗.



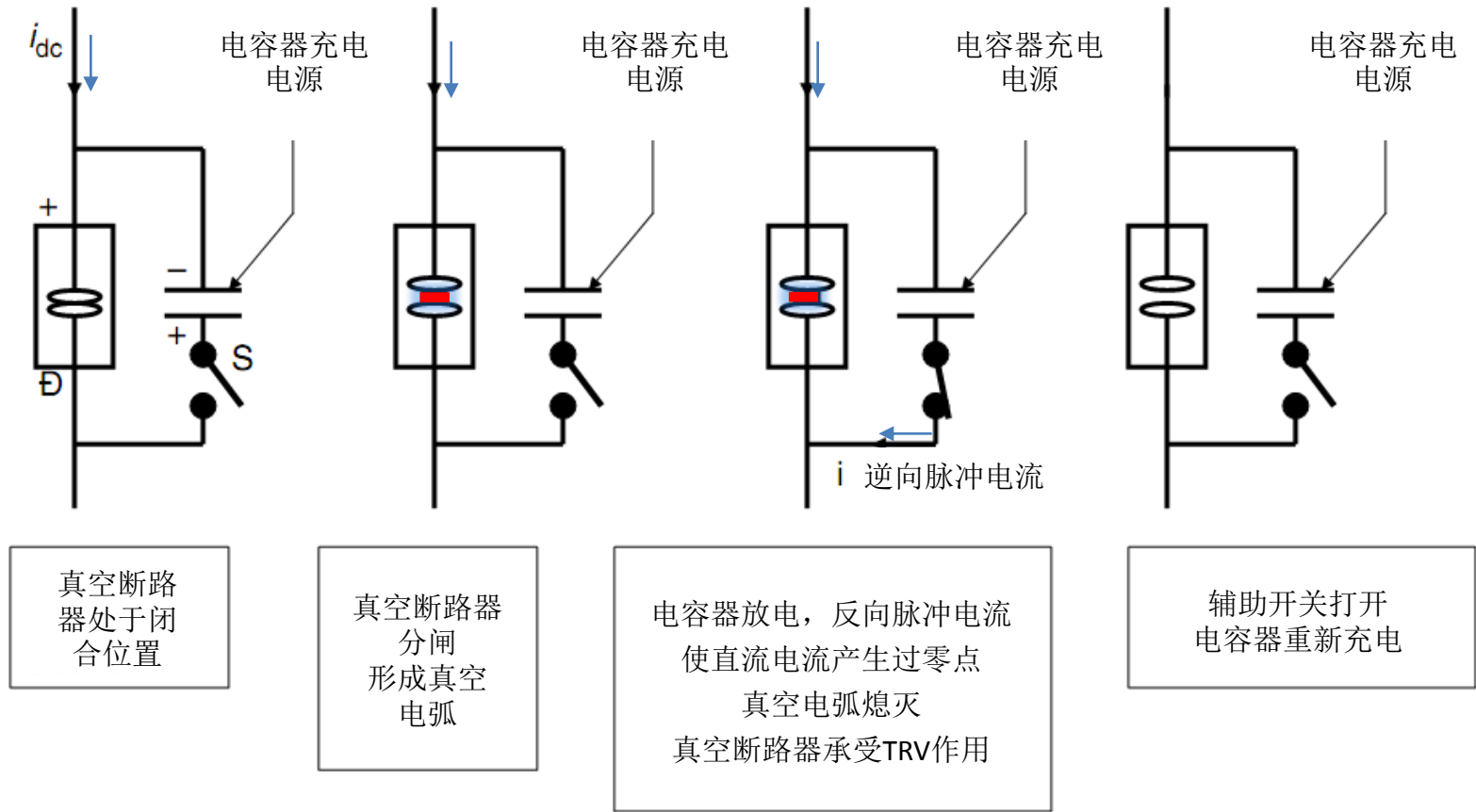
电弧炉浪涌电压保护



## ◆ 直流开断用真空开关

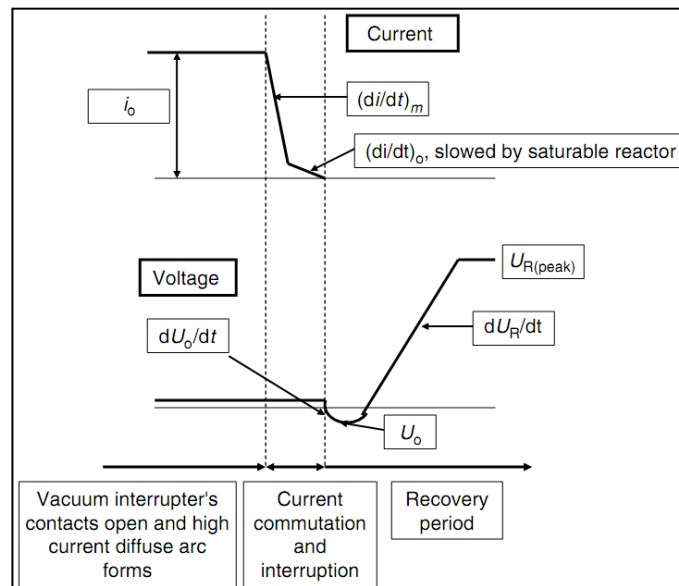
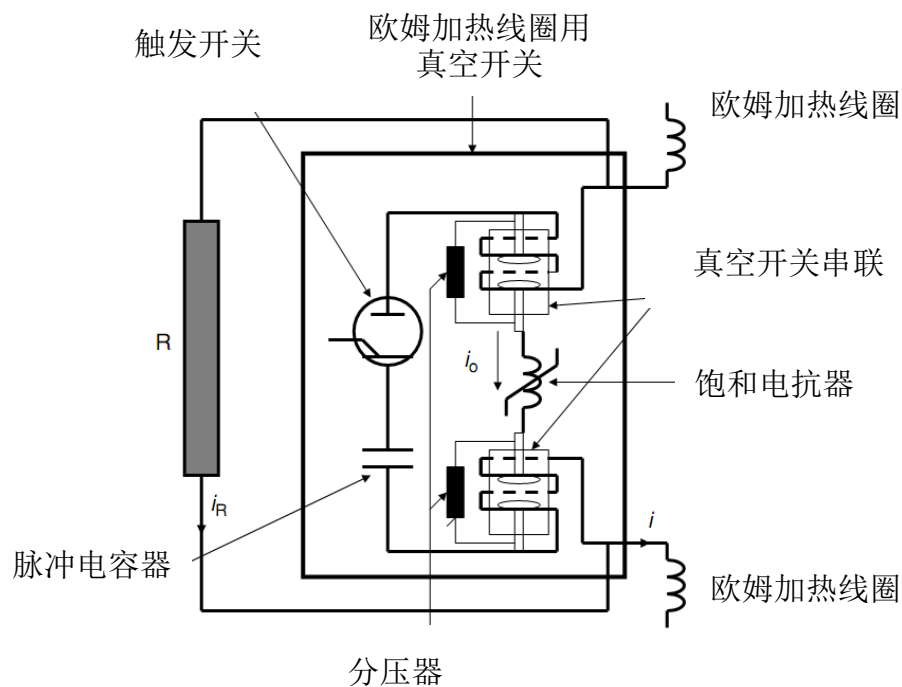


HVDC 真空断路器  
5kA , 100kV  
Mr. Greenwood  
(Courtesy of GE)



真空断路器直流开断过程

# ◆核聚变用真空开关



核聚变用欧姆加热线圈电流流开断

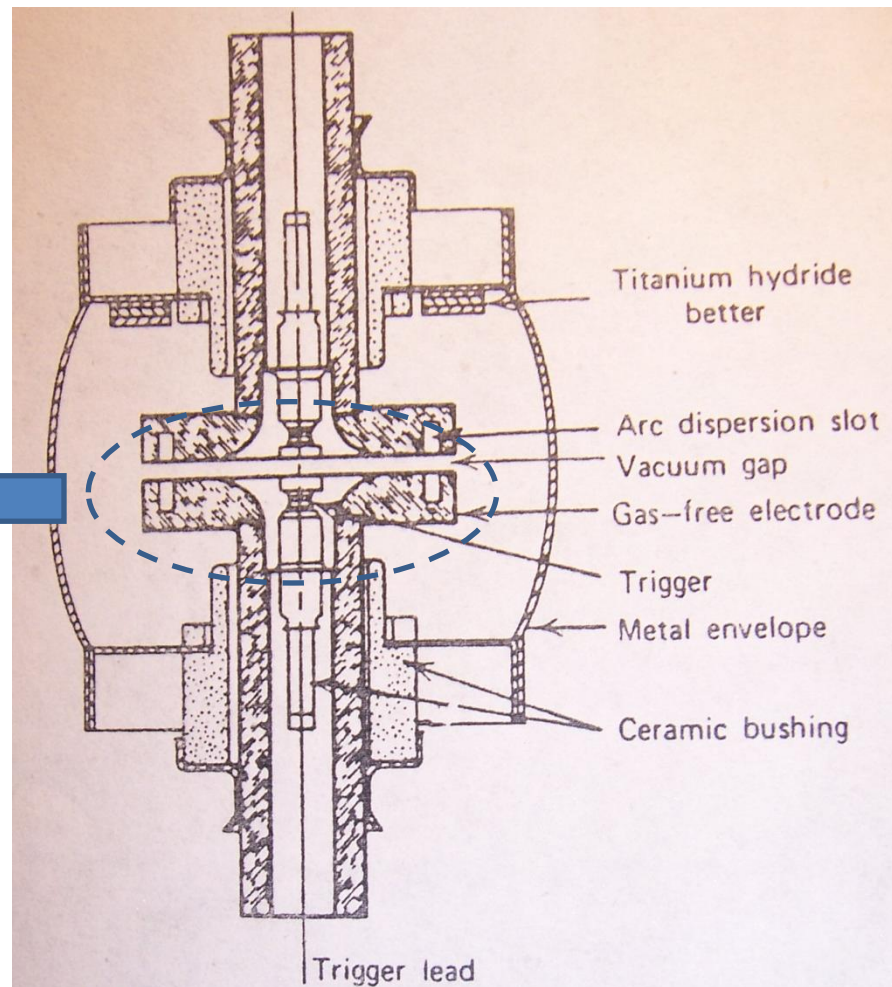
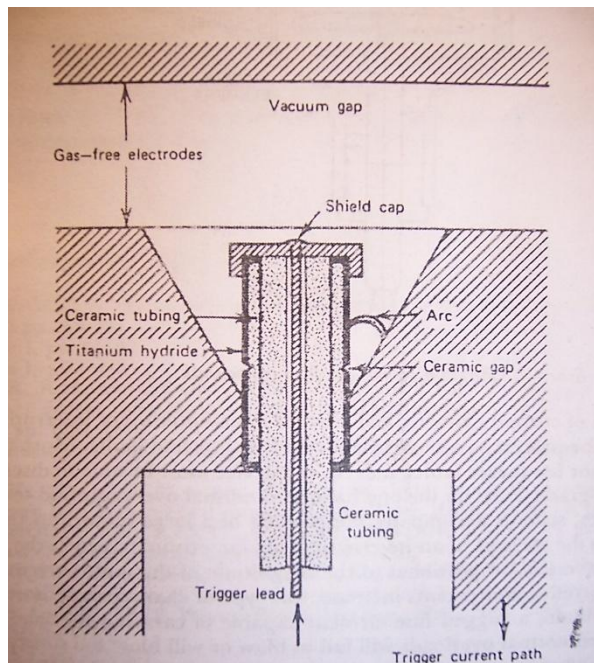
- 用于核聚变技术
- 流过线圈直流电可达24kA
- 美国、欧洲、日本

欧姆加热线圈用真空开关额定参数

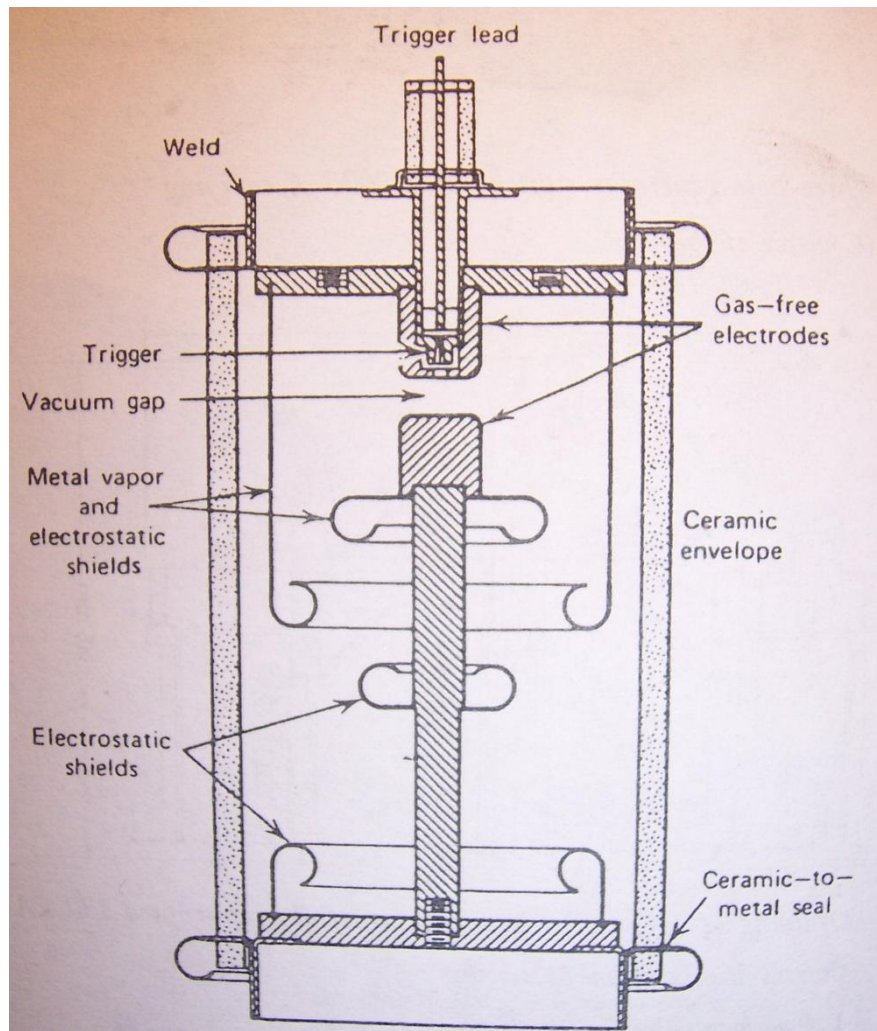
Property	Rating
BIL to ground	95 kV
Maximum interruption current	24 kA dc
High current withstand rating for the vacuum interrupters	24 kA for 0.1 s with a repetition rate of $\leq 300$ s
Maximum $i^2t$ rating	$5.8 \times 10^7 \text{ A}^2 \text{ s}$
$(di/dt)_m$	$\sim 150 \text{ A s}^{-1}$
$(di/dt)_0$	$\sim 30 \text{ A s}^{-1}$
Recovery voltage peak, $U_{R(\text{peak})}$	25 kV (+2 kV/-0 kV)
$(dU_R/dt)$	5-12 kV $\text{ms}^{-1}$
Recovery voltage withstand time	$\geq 15$ ms



## ◆真空触发开关

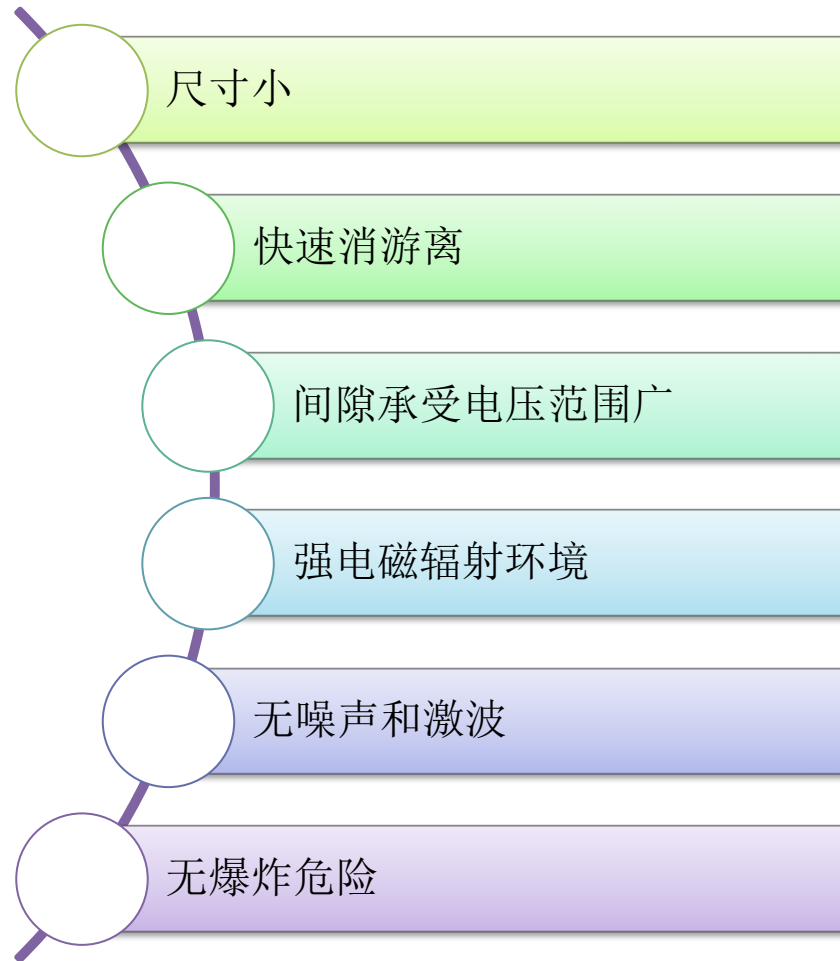


- 基于真空间隙与触发放电技术，
- 广泛应用于高脉冲功率等技术领域
- 可用于脉冲功率领域中的特种电源 (如大功率激光器电源)、电物理研究领域中的储能系统、以及电磁发射等控制

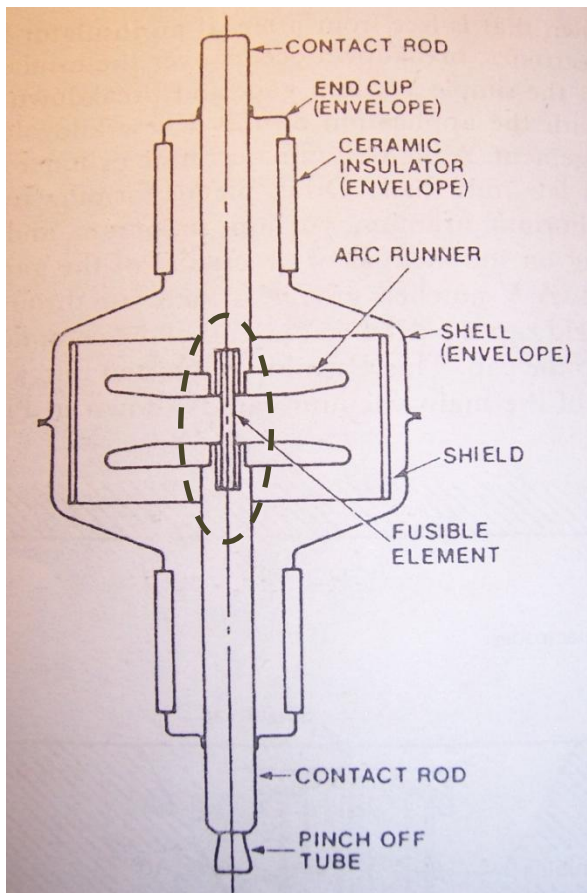


微秒级真空触发开关

### 真空触发开关特点



## ◆真空熔断器



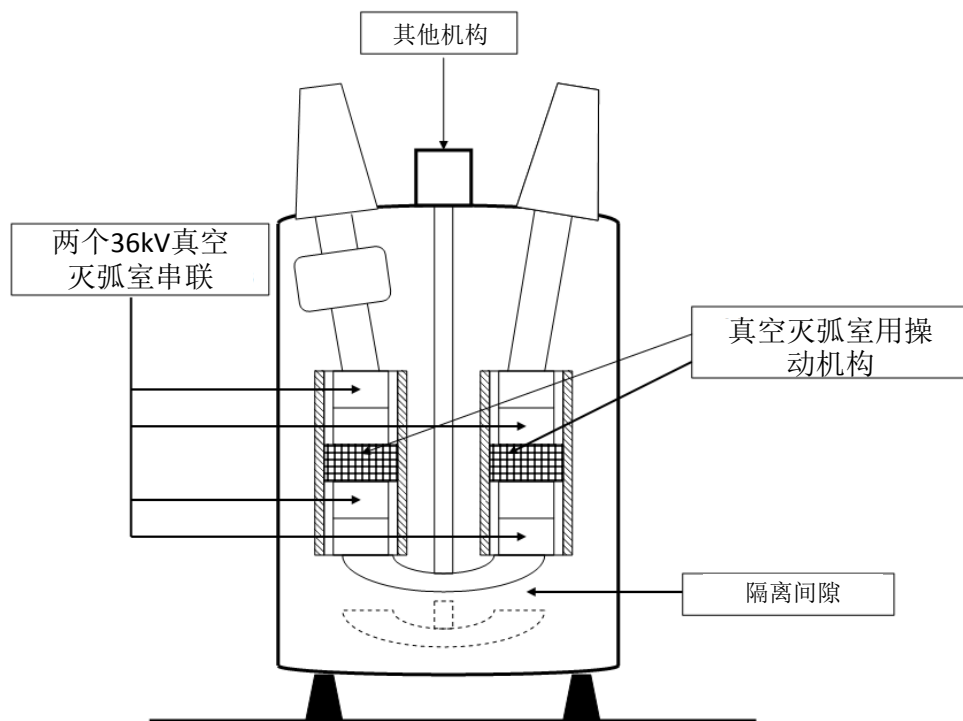
真空熔断器结构图

### 真空熔断器特点：

- 两端“触头”固定静止，无操动机构无碰撞
- 无气体产生
- 质量轻 15kV, 300A, 12kA 真空熔断器重 1.134kg

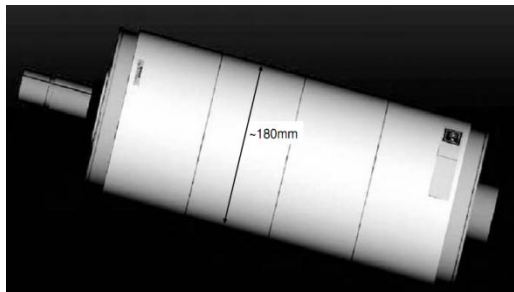


# ◆ 输电等级真空断路器



120kV 罐式真空断路器  
(AE POWER)

一种从油断路器改进的输电等级真空断路器



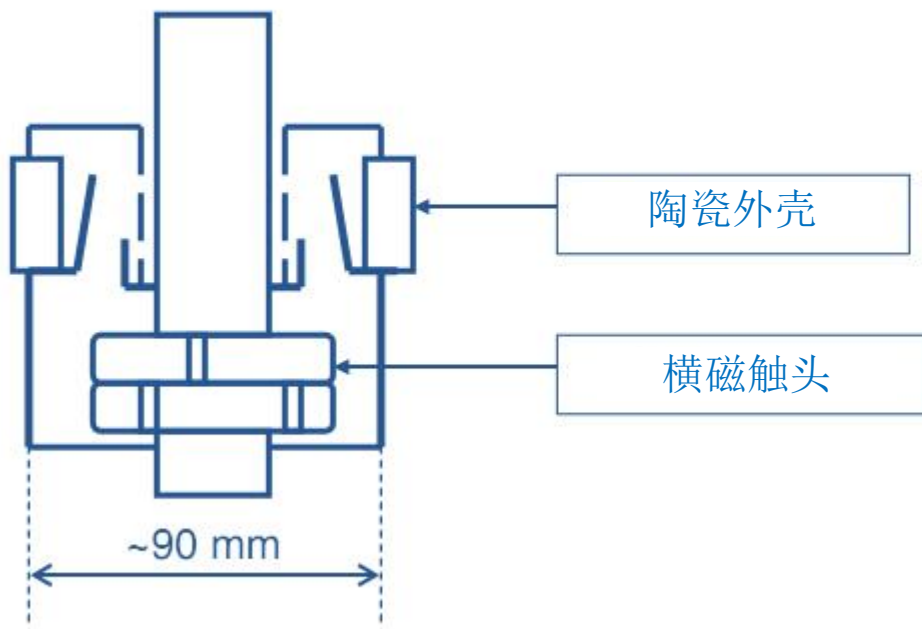
一种输电等级真空灭弧室

- 72kV, 31.5kA, 2000A, 35mm 触头开距
- 额定雷电冲击电压水平 350kV

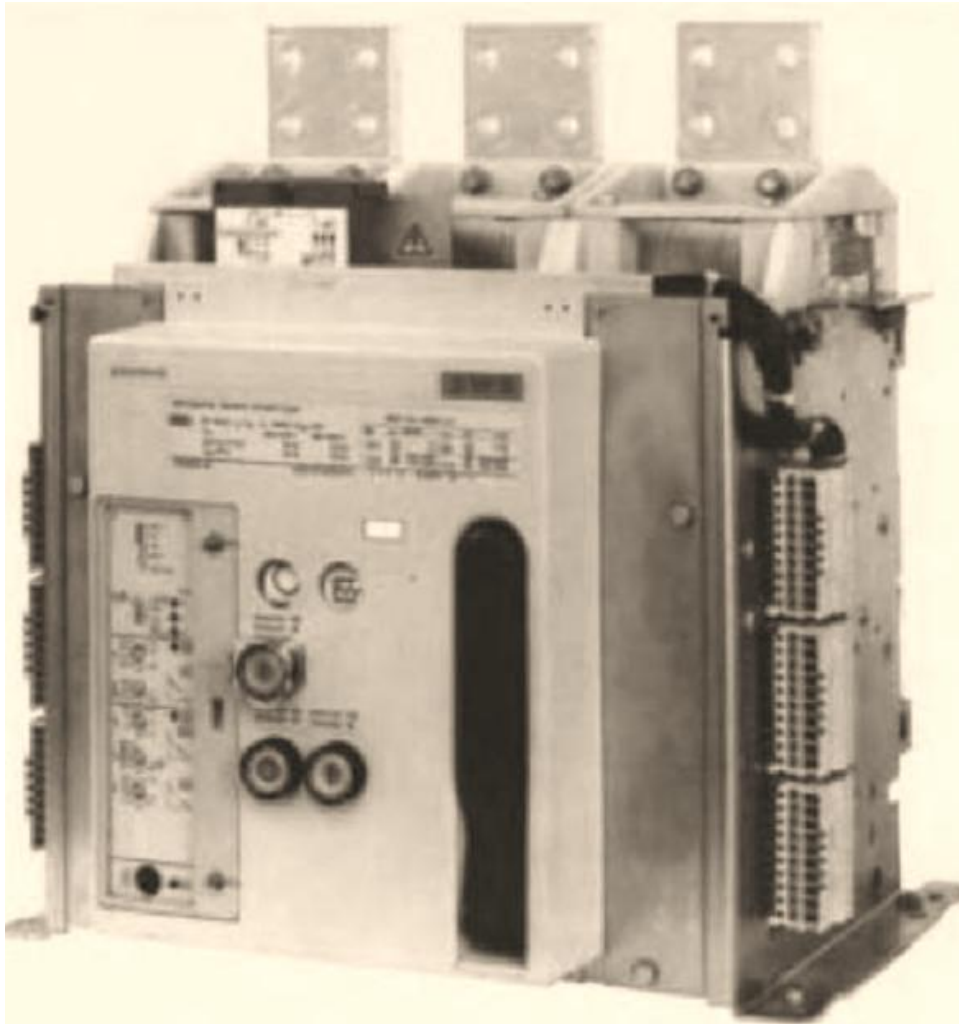
不同输电等级下的真空断路器耐受工频和额定雷电冲击电压水平

系统电压	1分钟工频, kV	BIL, kV
38	80	150/200
48	105	250
72	160	350
121	260	550
145	275	650
169	315	750
242	425	900
362	555	1300
550	860	1800
800	950	2050

## ◆ 低压真空断路器



- 一种低压真空灭弧室的设计(Siemens AG)



- 一种商用低压真空断路器(Siemens AG)

## 真空开关应用小结

- 早在1960s就已经开始应用，现在发展情况已经超出当时最乐观估计
- 现在中压配电开关领域真空断路器占有统治地位，从全球来讲
  - 北美和日本: 接近 100%
  - 北欧: 大约 80%
  - 欧洲其他: 总的趋势是逐渐替代SF<sub>6</sub> 断路器
  - 中国，印度和南亚: 大约 85%
  - 南美，非洲，中东和俄罗斯: 发展强劲，趋近 80%



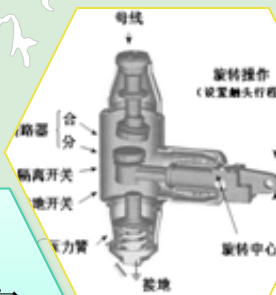
## 真空开关应用小结

### 真空灭弧室具有以下优点

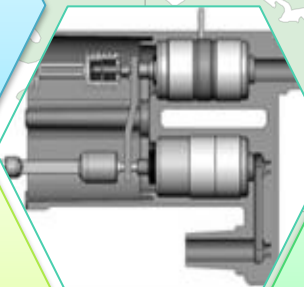
- 环境友好.
- 电寿命长，甚至可大于机械寿命
- 最高机械寿命可达  $10^6$  次.
- 满足重合闸和断路器电寿命考核
- 额定短路电流开断次数可实现10, 30, 50, 100, 300次
- 免维护
- 电流开断没有盲点
- 可成功开断长燃弧以及高分量非对称短路电流
- 可以可靠开断高于或低于工频的短路电流
- 可开断发展性故障
- 可用在腐蚀性高，易燃易爆以及其他恶劣环境
- 对机构匹配灵活
- 可配合高性能检测及控制装置
- 结构紧凑，布局自由
- 全寿命周期成本低

## 二、真空开关技术新动态

高电压真空开关

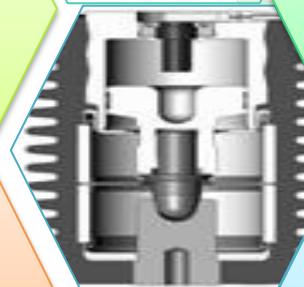


超导限流器



多工位真空开关

快速接地真空开关



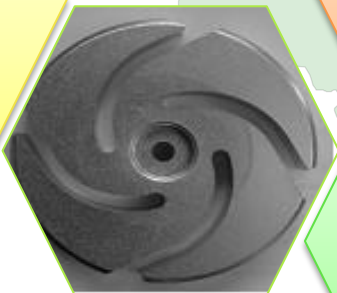
容性电流开断



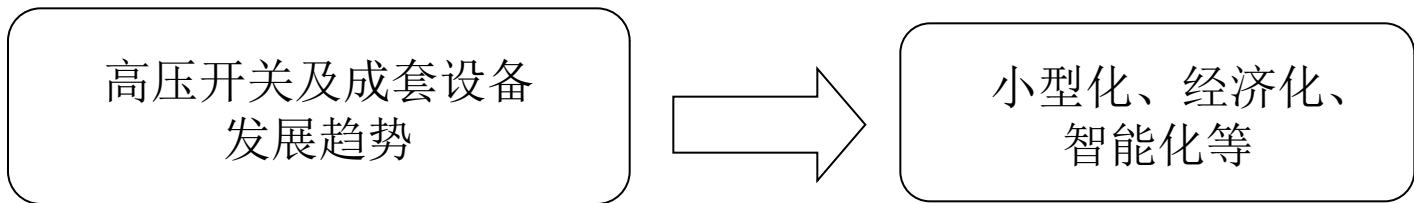
铁道用直流真空断路器

X射线

真空触发开关



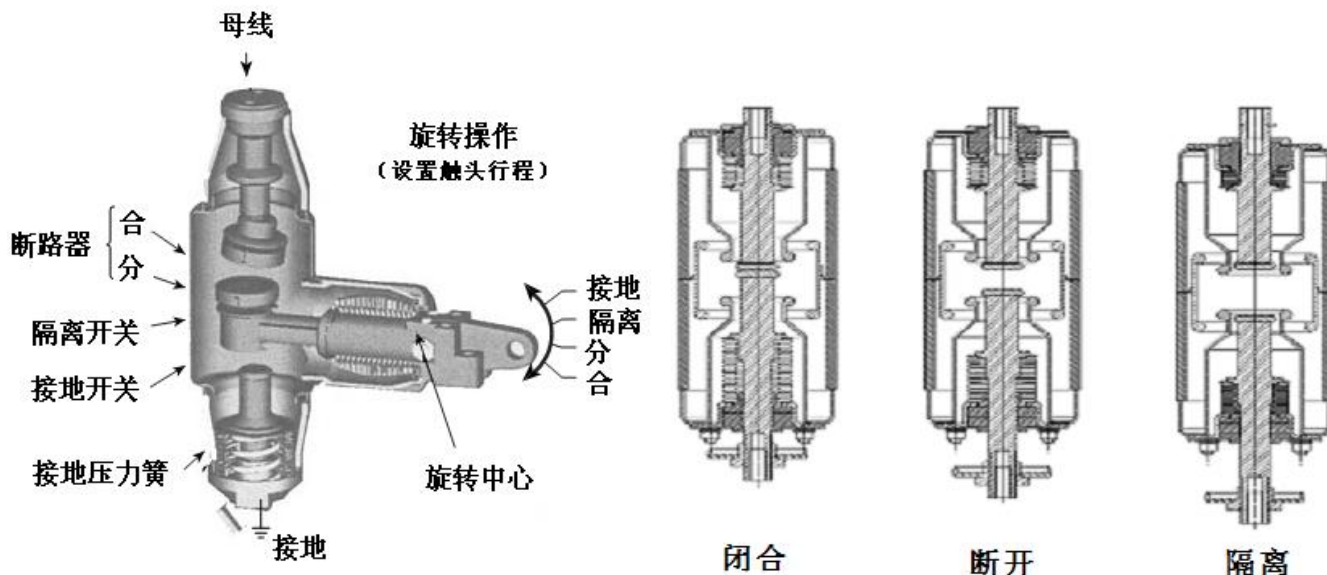
# ◆多工位真空灭弧室



- 短路/负荷电流开断、隔离或接地为一体的开关
- 结构紧凑、功能多样化



➤ 国外情况



- 日立公司24kV 4工位真空开关装置

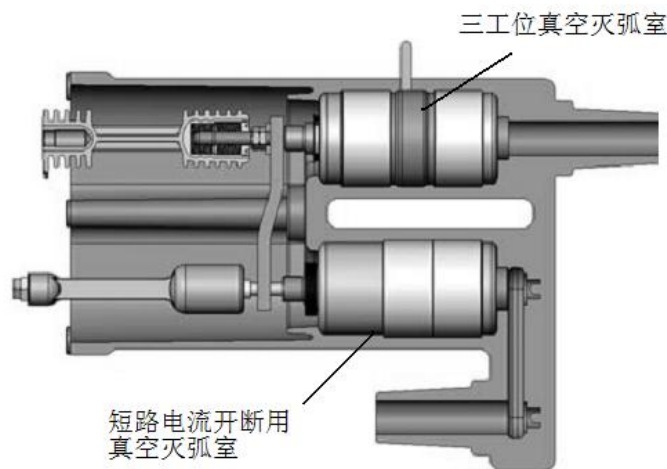
- 法国Schneider真空负荷隔离三工位真空开关

其他: Siemens、Toshiba、Eaton、AE Power等公司也推出了相关产品

➤ 国内情况

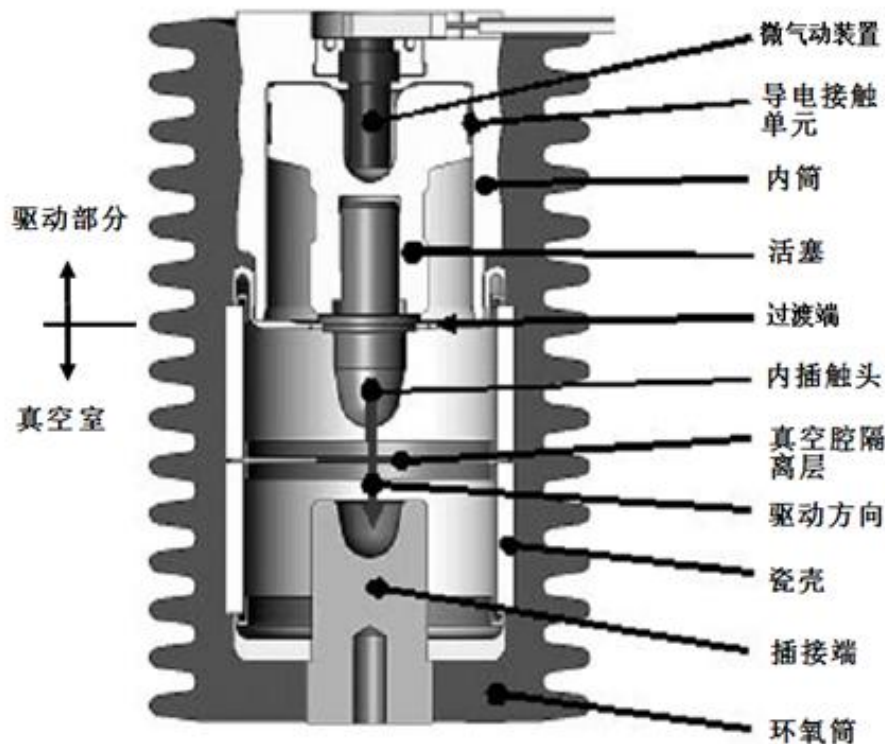
- 正在进行研究和开发

- 德国ABB隔离接地用三工位真空开关在固体环网柜中的应用

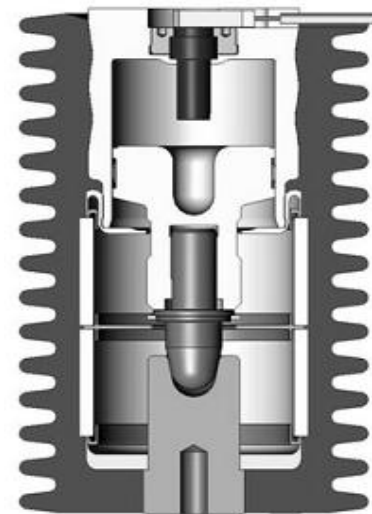


# ◆快速接地真空开关

闭合位置



接地位置



- 气动装置驱动
- 带动内插式触头快速接地
- 大大减小中压开关柜出现电弧故障时的柜内气体压力

40.5kA/63kA快速接地真空开关

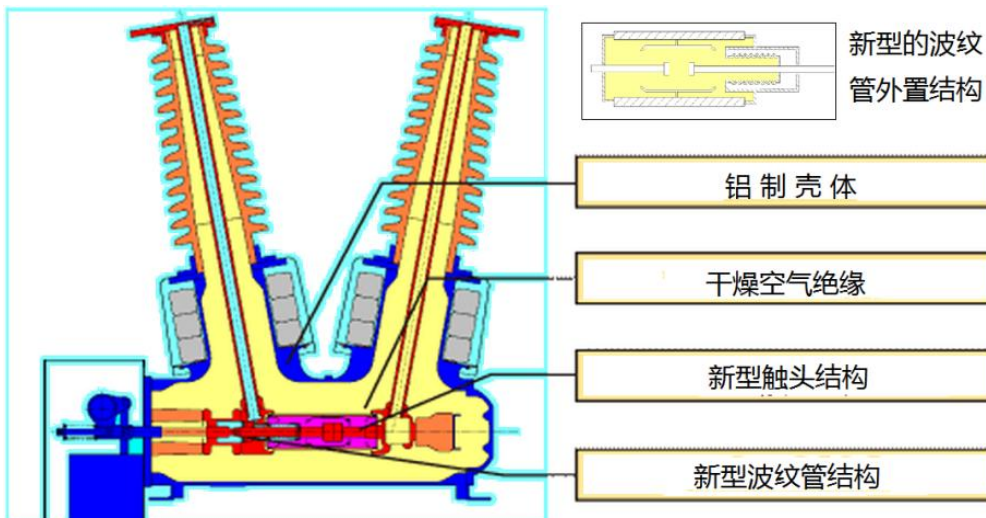
## ◆高电压真空开关

- 120kV, 31.5kA单断口  
罐式真空断路器  
2006, AE power



- 145kV, 2000A, 40kA  
单断口真空断路器  
2002, AE power

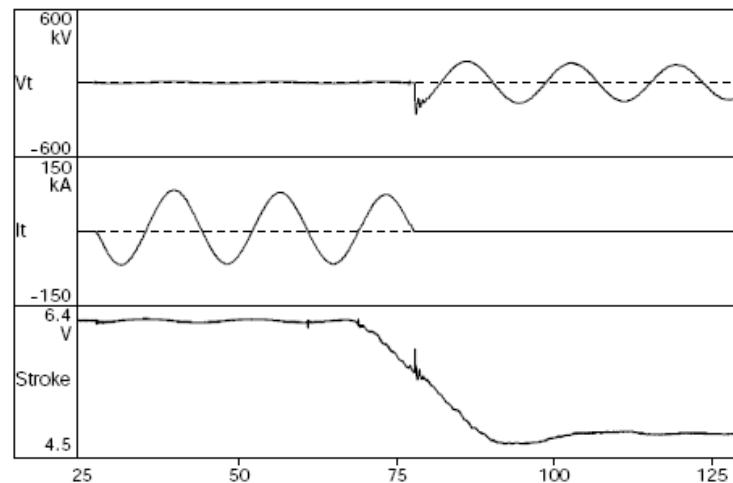
### ▶日本公司近年高电压真空开关



- 72/84 kV单断口罐式真空断路器  
AE power  
高气压干燥空气绝缘  
外置波纹管



➤ 韩国近年高电压真空开关有了很大发展

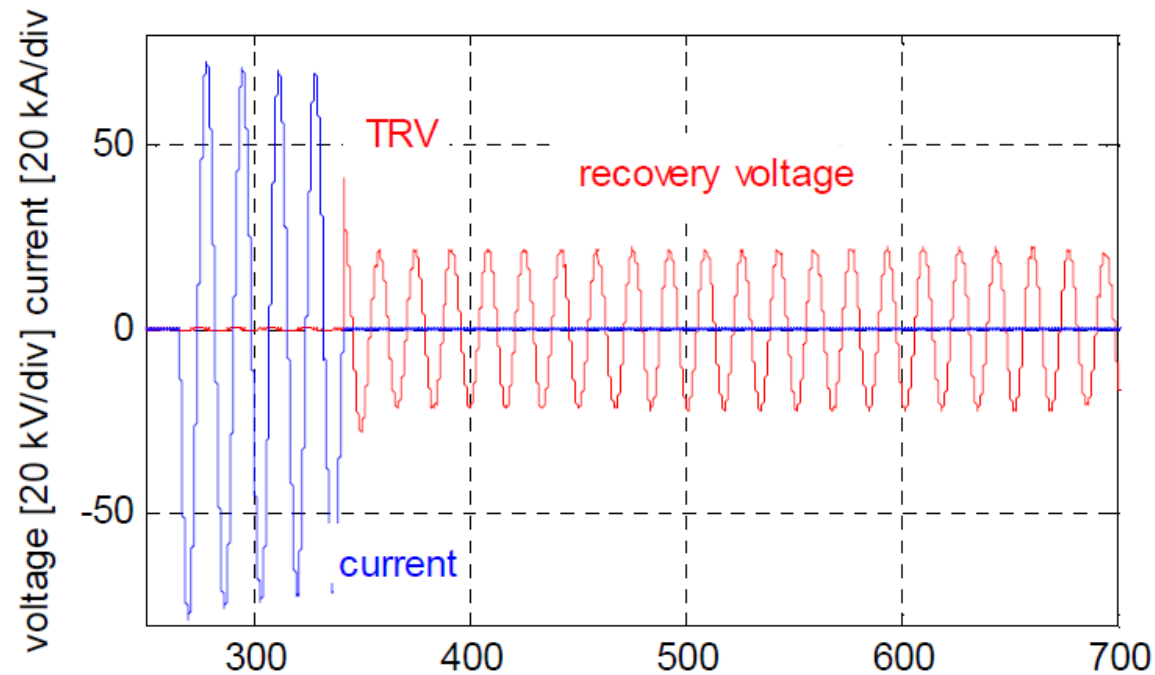


成功开断51.2kA短路电流的试验结果  
暂态恢复电压峰值为254kV

韩国LS产电研制的170kV真空断路器及其试验结果



## ◆与高压真空开关发展同步的试验手段



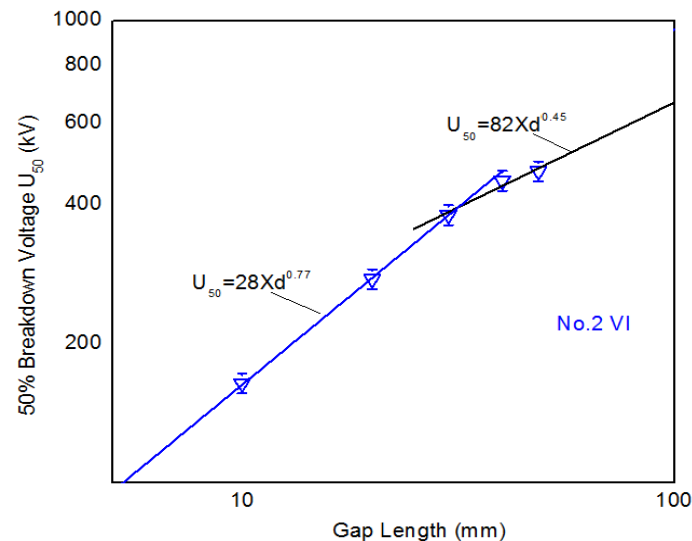
荷兰KEMA试验室设计了一种新型的混合型合成回路

KEMA使用混合型合成回路的试验波形 (ms)

## ◆ 高电压真空绝缘和大电流开断

▶ 西安交通大学对126kV真空灭弧室在触头开距为10~50mm下的标准雷电冲击电压击穿特性进行了研究：

- 老炼后击穿电压的概率分布均符合威布尔分布
- 击穿电压 $UB$ 与开距 $d$ 的关系符合 $UB=kd^\alpha$
- 触头轮廓倒角：R2mm好于R6mm
- 触头表面粗糙度：1.6 $\mu$ m好于3.2 $\mu$ m
- 触头直径：60mm与75mm基本相同



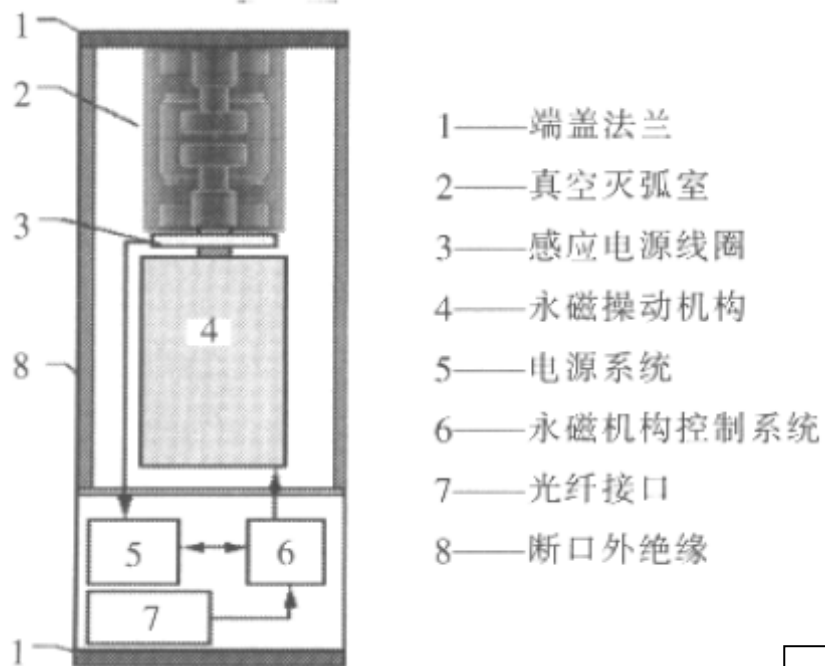
50%击穿电压 $U_{50}$ 与开距的关系

▶ 西安交通大学对126kV单断口真空灭弧室在不同开距下(20mm和50mm)，开断40kA对称短路电流时研究发现：

- (1)在开距20mm下，纵向磁场强度为4.2mT/kA时可以成功开断40kA短路电流
- (2)在开距50mm下，磁场强度为2.6mT/kA不能开断40kA的短路电流

## ►大电流开断的串并联技术

### 串联技术



大连理工大学光控模块式真空断路器单元结构

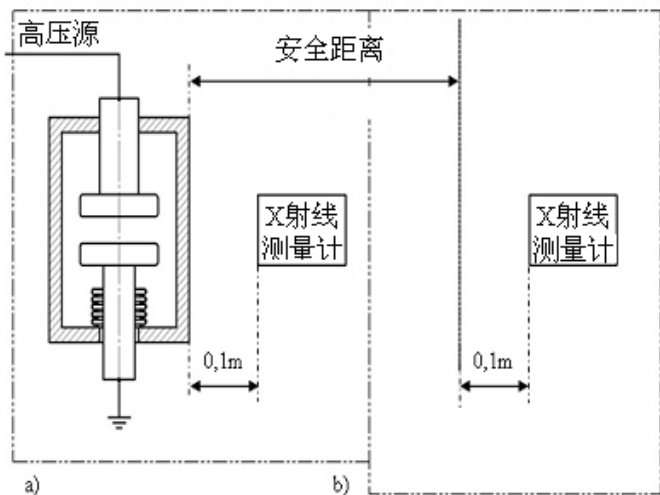
### 并联技术

东京电机大学试验研究发现：

- 纵磁触头的灭弧室并联开断优于横磁触头
- 并联的灭弧室其开断的同期性影响很大

- 基于于永磁操动机构的光控模块式
- 串联成为更高电压等级的多断口真空断路器
- 光纤控制技术具有高电位操动开关的优点

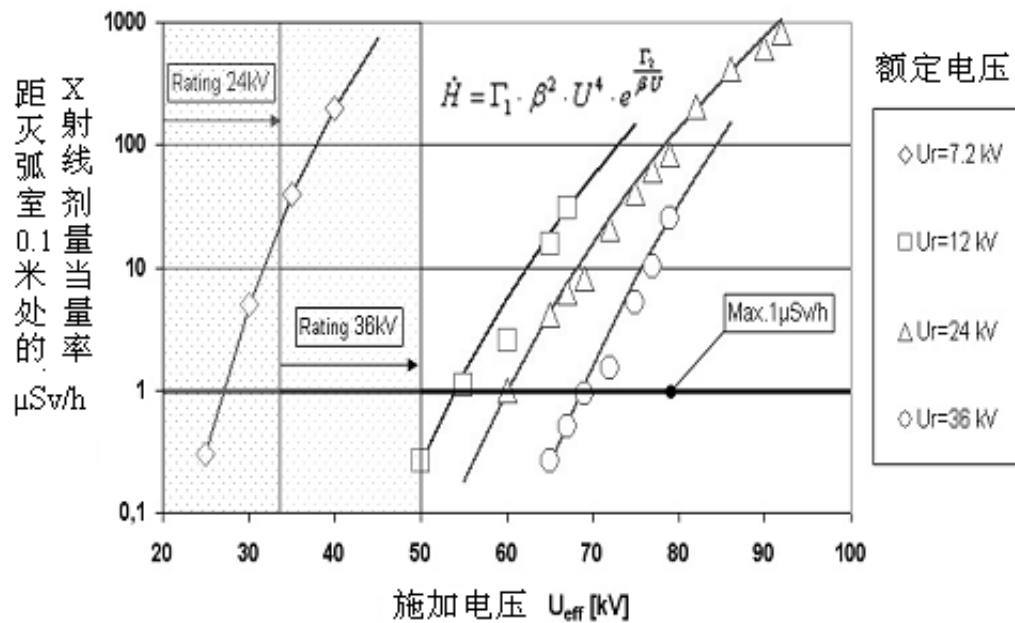
# ◆X射线



X射线测量示意图

a)距灭弧室表面0.1m处测量

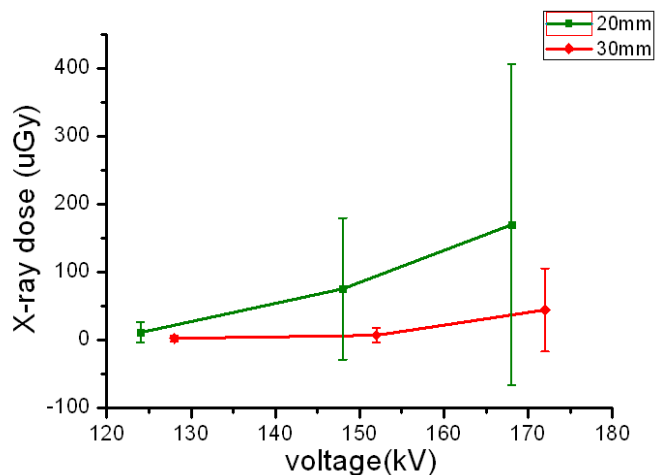
b)安全距离外0.1m处测量



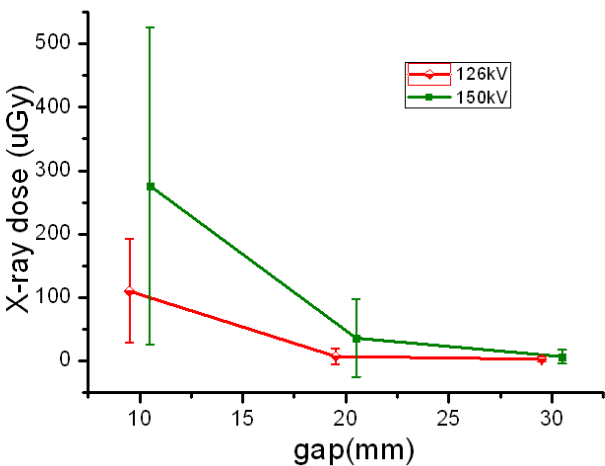
7.2kV-36kV电压等级下的真空灭弧室的X射线剂量值 (ABB,西门子)

系统电压下真空灭弧室所发出的X射线量在距可接触表面0.1m处不会大于人体正常承受的剂量值1μSv/h

➤ 相同开距下1min工频耐压与X射线水平



➤ 相同1min工频耐压下开距与X射线水平



➤ 老炼前后X射线水平

No.	State	230kV		126kV		
		实际值 (uGy)	取10的对数	实际值 (uGy)	取10的对数	
1	老炼前	15	1.1761	老炼前	160	2.2041
	老炼后	3.7	0.5682	老炼后	75	1.8751
2	老炼前	2.25	0.3522	老炼前	225	2.3522
	老炼后	2.07	0.316	老炼后	64.5	1.8096
3	老炼前	5.6	0.7482	老炼前	2400	3.3802
	老炼后	2.35	0.3711	老炼后	1584	3.1998

电压老练后的X射线剂量小于老练前的X射线剂量

➤ 老炼过程中X射线释放量

- 空气中老炼
- 加罐老炼
- 随着距离的平方衰减

西安交通大学126kV真空灭弧室  
X射线水平研究

## 容性电流开断

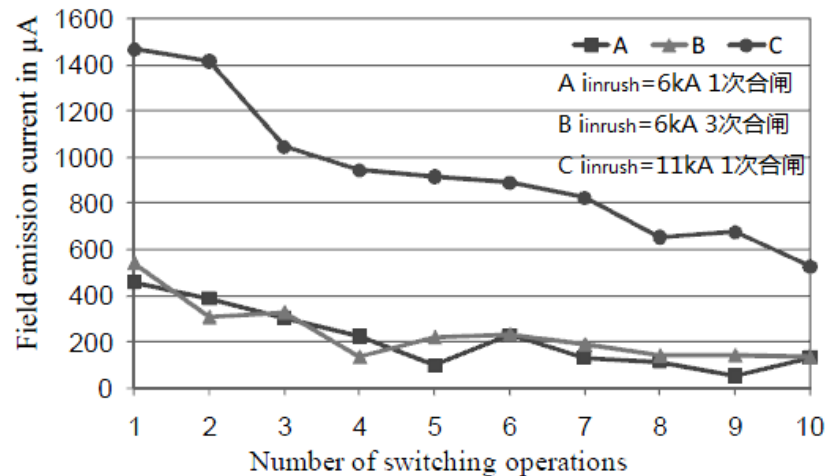
真空断路器用于容性电流操作每年可达300~700次，尤其是投切电容器组

影响容性开断因素包括： 1)合闸速度 2) 合闸涌流 3) 触头材料制备工艺

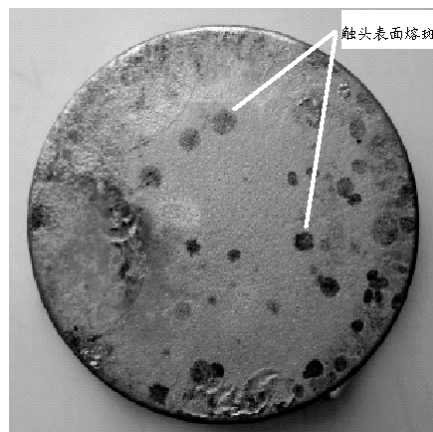
► CuCr75/25真空灭弧室不同合闸速度下的重击穿概率 (ABB)

重击穿概率	合闸速度快	合闸速度慢
真空灭弧室样品1	5.3%	9.4%
真空灭弧室样品2	6.0%	8.7%
平均值	5.7%	9.1%

► 不同合闸涌流下场致发射电流测量平均值 德国 TU Darmstadt



场致发射电流高于500µA时，触头表面烧蚀更为严重，重击穿频繁发生



► 触头材料制备工艺

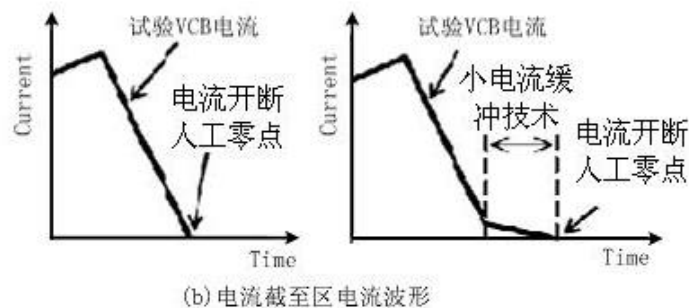
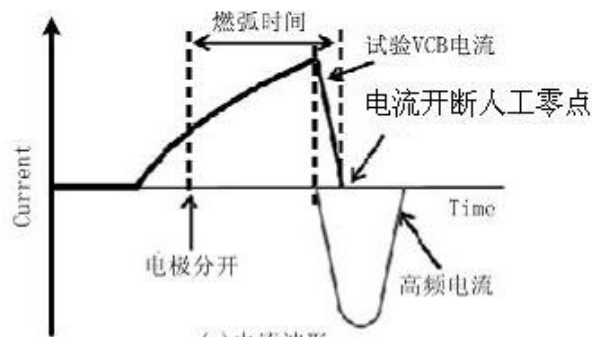
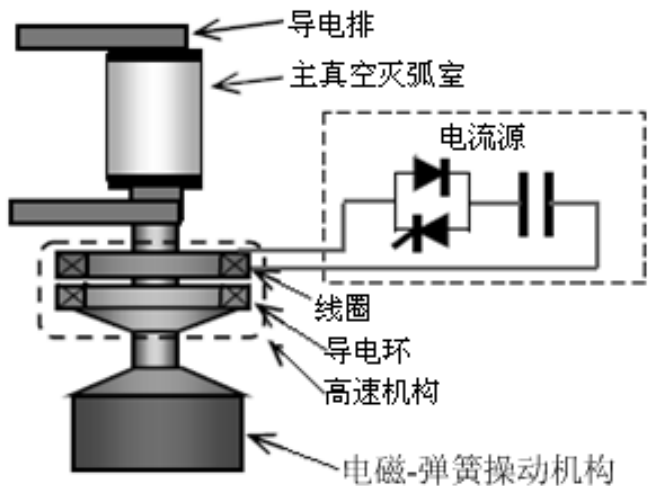
容性开断后触头表面熔斑多，对应于高重击穿概率

混粉法触头重击穿概率优于熔炼法

# ◆铁路用直流真空断路器

铁路直流电力系统用真空断路器与空气断路器比较

比较类型	真空断路器	空气断路器
开断次数	>10	<10
开断噪声	小	大
开断时间	稳定	不稳定



日本东芝公司直流高速真空断路器结构图

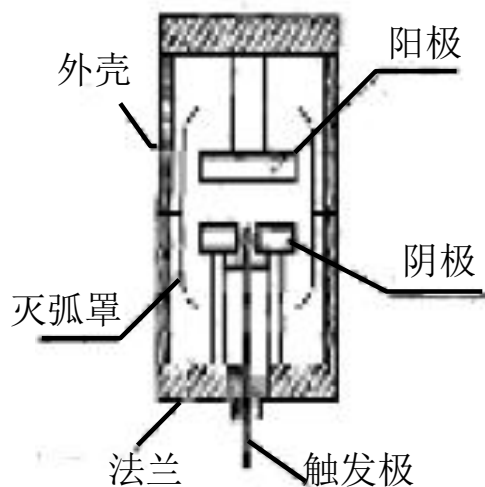
额定参数DC1500V/750V, 25kA/35kA  
已通过JEC-7512 1991标准验证

日本东芝公司直流真空断路器电流波形

- 高频电流源向触头间隙注入反向电流，迫使电流下降到零点
- 在人工零点前采用小电流缓冲技术,有利于成功开断大电流



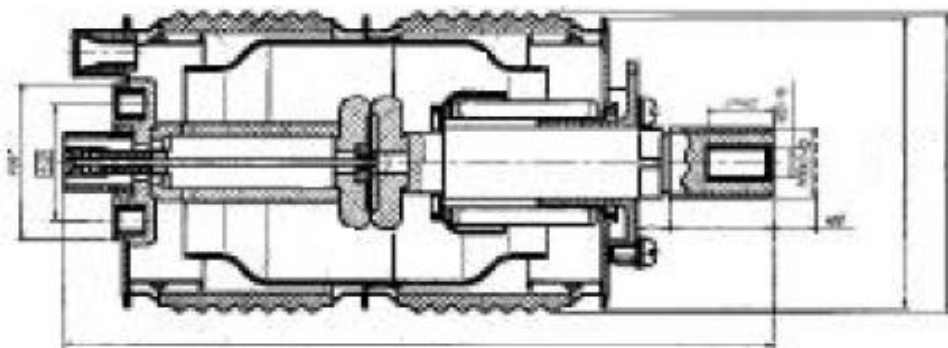
## ◆真空触发开关



- 电极材料CuCr50，直径55mm
- 触发极直径2mm，孔隙直径4mm  
触发材料采用钽-钨合金
- 真空度大于 $1.33 \times 10^{-5}$ Pa

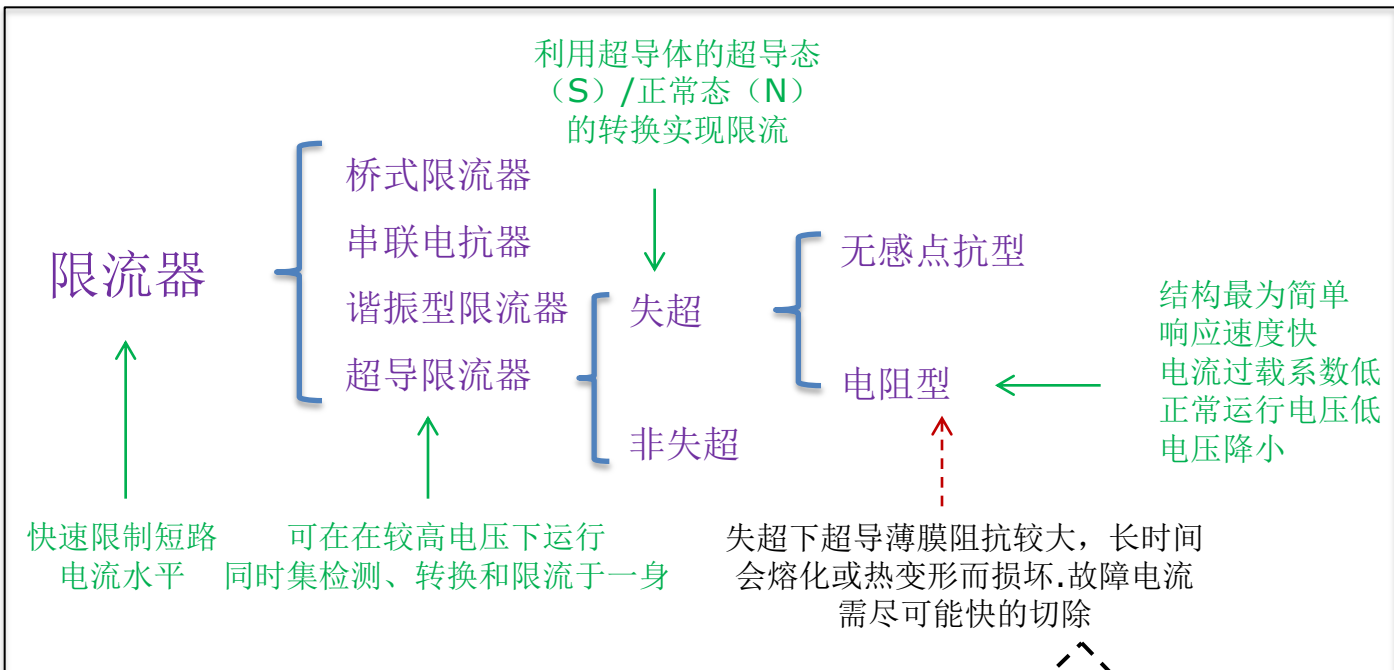
大连理工大学研制的真空触发开关

- 电极间隙可调
- 触头开距20-25mm时可满足额定电压60kV系统的需求
- 大电流开断后的击穿电压满足威布尔分布

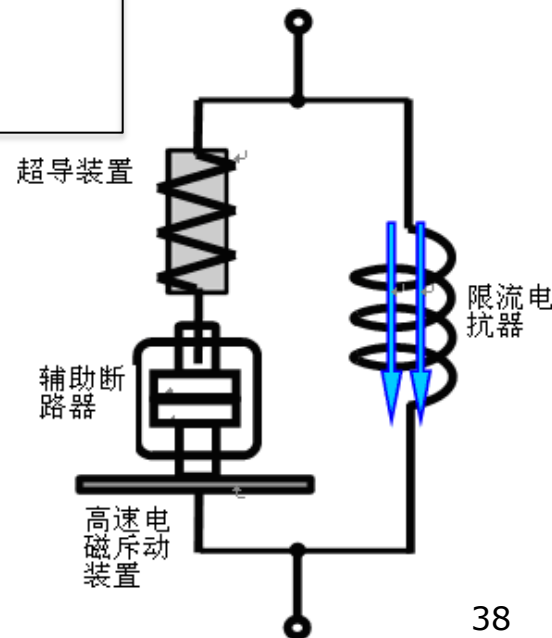


俄罗斯全俄电工研究院大电流真空触发开关

# ◆超导限流器



日本东京电机大学  
超导限流器结构图



## 正常状态时

- 电流经过超导装置和真空断路器

## 系统发生故障时

- 超导装置失超产生很大阻抗, 大部分电流分流经过限流电抗器
- 限流电抗器的大电流产生磁场, 驱动高速电磁斥力装置动作

配有高速电磁斥力装置  
0.5周波内开断故障电流

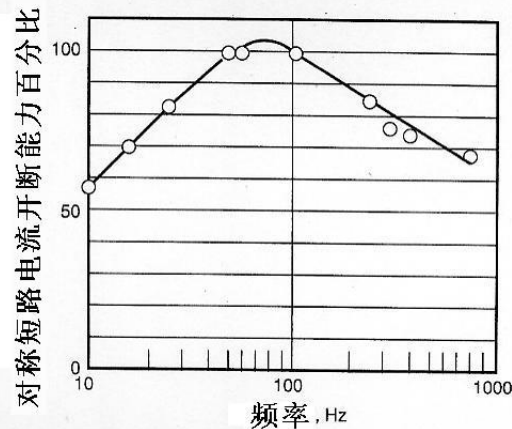
# ◆分频真空开关与中频真空开关

## ➤分频

Eaton公司 Slade研究发现12kV真空断路器开断能力的降低与频率降低的平方根有关

$$\frac{i_{sc}(f_1)}{i_{sc}(f_2)} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$$

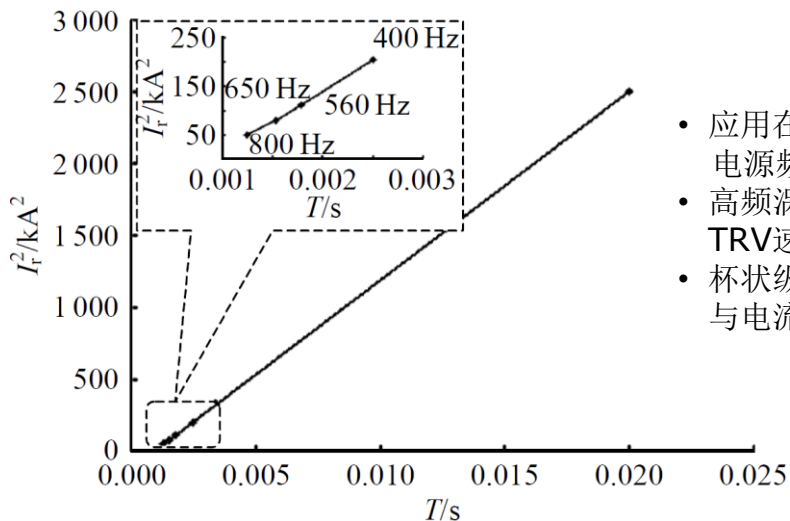
12kV真横磁场空灭弧室，  
触头直径为62mm，  
其短路开断电流50Hz时40kA，  
50/3Hz时25kA



电力系统频率变化时对真空灭弧室开断能力的影响



## ➤中频



- 应用在航空航天领域中  
电源频率360~800 Hz
- 高频涡流效应明显，电流过零时 $di/dt$ 增大  
TRV速度加快
- 杯状纵磁真空灭弧室的极限开断电流平方  
与电流频率近似成反比关系

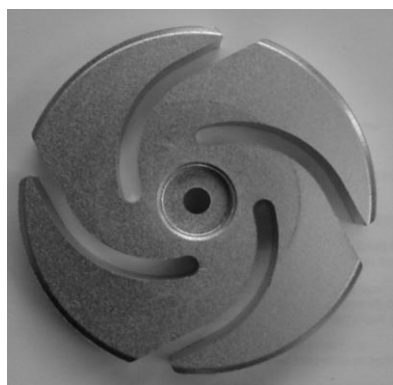
不同频率下杯状纵磁灭弧室的极限开断电流

可应用在风力发电和输电过程中，  
采用分频交流电  
(如50 / 3 Hz)来解决风电并网

## ◆真空灭弧室触头材料与绝缘外壳材料

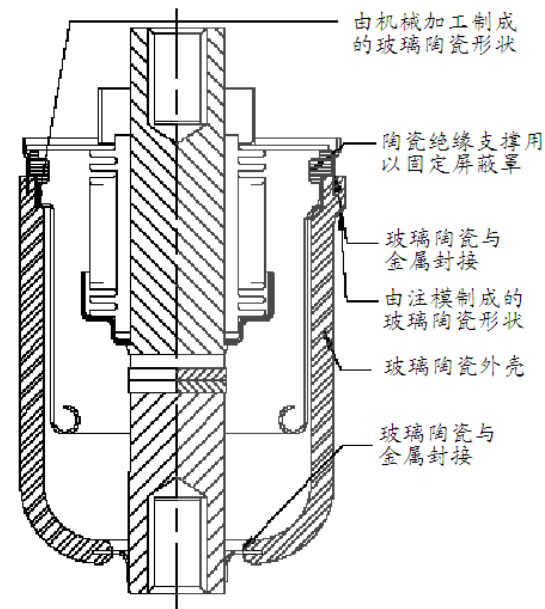
### ➤玻璃陶瓷材料真空灭弧室外壳

#### ➤新的CuCr触头制造工艺



奥地利攀时公司新工艺加工的铜铬触头外观  
及模拟压实后的触头密度分布

- 触头一次制备成型，不需要进行机械加工  
可以降低成本



阿海珐公司采用玻璃陶瓷外壳的真空负荷开关管

- 满足830°C的一次封排要求，并可直接与端法兰封接
- 良好的耐压强度、机械强度以及低介质损耗
- 可通过模具成型，不需要机械加工
- 材料能够循环使用，具有很好的环境效益

## 真空开关技术新动态小结

### 真空开关技术新动态：

- 新型多工位真空开关
- 快速接地真空开关
- 高电压真空开关
- 高压真空开关试验技术
- 真空开关的容性电流开断
- 铁路用直流真空断路器
- 真空触发开关
- 超导限流器
- 分频真空开关和中频真空开关
- 真空灭弧室触头材料和绝缘外壳材料新进展

谢谢!