输电等级真空开断技术

VACUUM SWITCHING TECHNOLOGY ON TRANSMISSION VOLTAGE

汇报人：刘志远

电力设备电气绝缘国家重点实验室

State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment

西安交通大學 XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

汇 报 内 容

1. 研究背景：输电等级需要“真空”技术

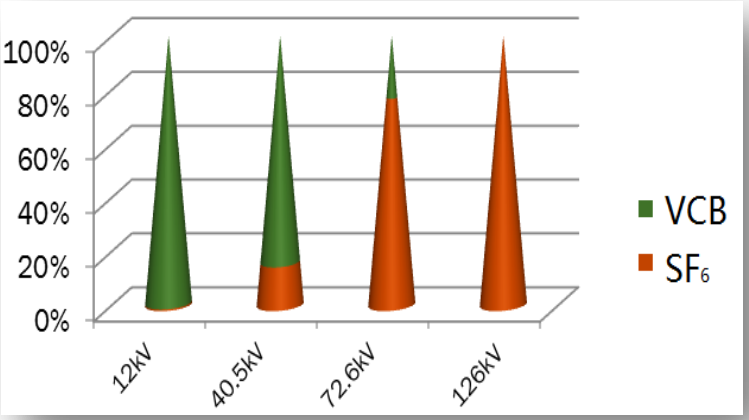
2. 研究内容：在输电等级真空开断领域解决了哪些关键技术问题

3. 研究展望：输电等级真空开断技术的发展前景

在输电等级为什么需要真空开断技术？

- 以电力开关设备为代表的输配电设备领域使用的SF6气体占其总产量的80%以上。我国电力开关行业每年使用的SF6气体超过1万吨。
- SF6是《京都议定书》指出的6种温室气体中温室效应最强的一种，其温室效应系数是CO_2的23900倍，而且它在大气中的寿命长达3200年。
- 2010年全球电力系统的SF6气体泄漏量为2189.1吨（美国环境保护局）。
- 电力开关设备中使用的SF6气体在电弧作用下的分解物有强烈的腐蚀性和剧毒性。

1100kV SF6气体绝缘金属封闭开关设备



SF6断路器在输电等级占据绝对优势

在输电等级为什么需要真空开断技术？

- SF6气体的削减与替代成为当前电力开关行业急迫解决的问题，也是电力开关设备研究领域不可推卸的责任和义务。

- 实现SF6气体的削减与替代的主要途径：
  - 寻找SF6气体的替代品或采用SF6混合气体

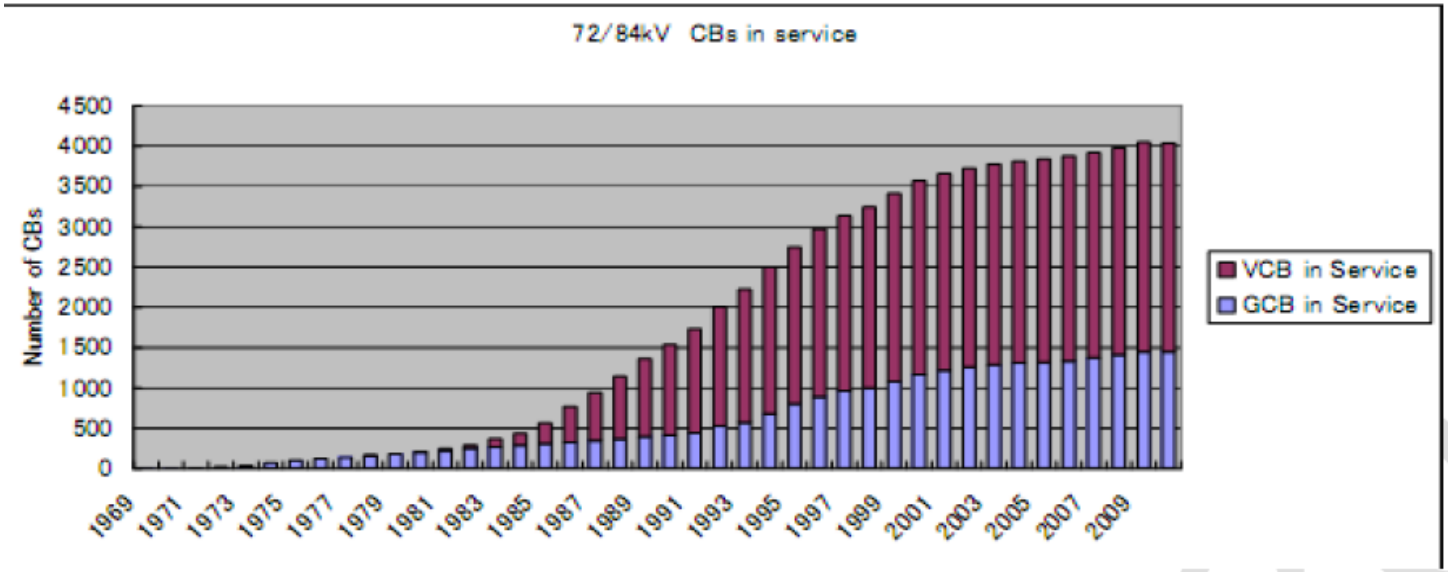
    近30年来，国内外一直开展该领域的研究工作，但至今尚未得到满意的结果。
  - **在输电等级采用环境友好型的真空开断技术**
    - 发展环境友好型真空断路器替代SF6断路器，是在电力开关领域削减和替代SF6气体的切实可行的途径。
    - 作为工作组成员，于2009年参加了国际大电网会议“输电等级真空开断技术”工作组。

输电等级真空开断技术成为研究热点

- 以日本为代表的输电等级真空开断技术最高水平已发展到单断口电压等级126kV和145kV，但其额定电流只达到2000A。
- 欧洲和美国的单断口真空断路器电压等级只达到72.5kV。
- 中国的北开电气、东源电器、中国西电研制126kV瓷柱式真空断路器，额定电流仍只有2000A。
- 现有126kV真空断路器产品的额定电流不能满足输电等级主开关设备的要求。

日本145kV真空断路器

日本已有一万台72/84KV真空断路器用于工业用户和电力用户



: *History of introducing high-voltage VCBs into 72 kV transmission systems in Tohoku Electric Power Company, Japan*

我们的目标：以126kV真空断路器为突破口，探索输电等级真空断路器中的关键共性技术问题

- 以研发环境友好型，额定电流达到2500A，具有完全自主知识产权的126kV真空断路器为基础，解决发展输电等级真空断路器的一系列关键共性技术问题。

中国发明专利，王建华，耿英三，刘志远等，非SF6气体绝缘的户外高压真空断路器，2008 1 0018 057.9,2011

技术参数

序号	名　　称	单 位	数 值	备 注
1	额定电压	kV	126	
2	额定雷电冲击耐受电压峰值	kV	550	
3	1 min 工频耐受电压	kV	230	
4	额定频率	Hz	50	
5	额定工作电流	A	2500	

技术参数

6	额定短路开断电流	kA	40	
7	额定短路关合电流	kA	100	
8	额定短时耐受电流	kA	40 (4s)	
9	首相开断系数		1.5	
10	额定短路开断电流开断次数	次	20	
11	额定瞬时恢复电压峰值	kV	216	
12	合闸时间	ms	110±10	

技术参数

26	动静触头允许磨损累计厚度	mm	< 3	
27	机械寿命	次	10000	
28	电寿命	次	20	
29	总重量	kg	3000	

126 kV/2500A/40kA 真空断路器通过型式试验考核

- 绝缘试验
  - ✓ 工频耐压试验
  - ✓ 冲击耐压试验
- 基本短路开断方式
  - ✓ T10，T30，T60，T100s，T100a
- 切空载长线试验
  - ✓ LC1
- 近区故障试验
  - ✓ L75，L90
- 失步开断试验
  - ✓ OP1，OP2
- 异相接地试验
  - √ 通过
- 电寿命试验
  - √ 20次通过
- 动热稳定试验
  - √ 通过
- √ 温升试验
- √ 机械寿命试验

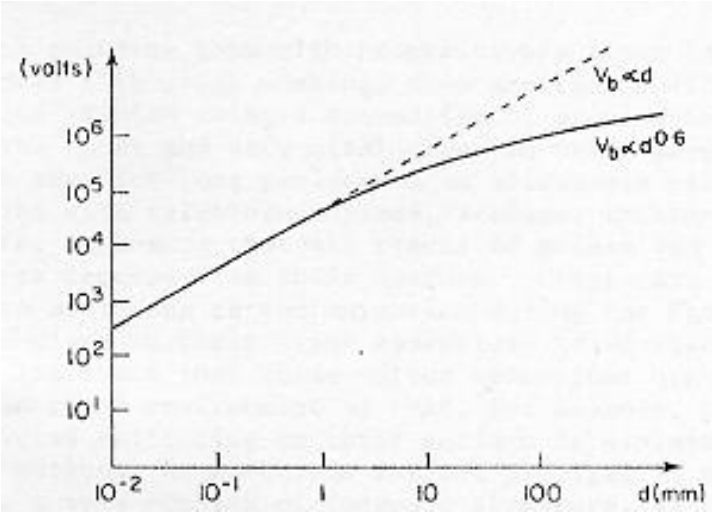
输电等级真空断路器领域的共性关键技术

- 真空绝缘与饱和曲线
- 输电等级的大电流真空分断
- 合闸、分闸与操动机构
- 额定电流的提升

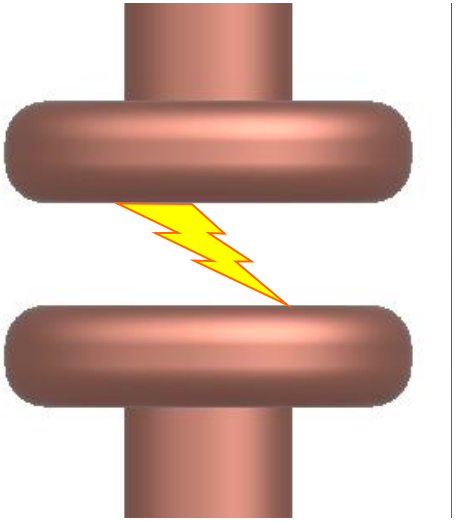
输电等级真空断路器领域的共性关键技术

- 真空绝缘与饱和曲线
- 输电等级的大电流真空分断
- 合闸、分闸与操动机构
- 额定电流的提升

真空绝缘与饱和曲线



R.V. Latham, High Voltage Vacuum Insulation: The Physical Basis, Academic Press, 1981



关键词：耐压

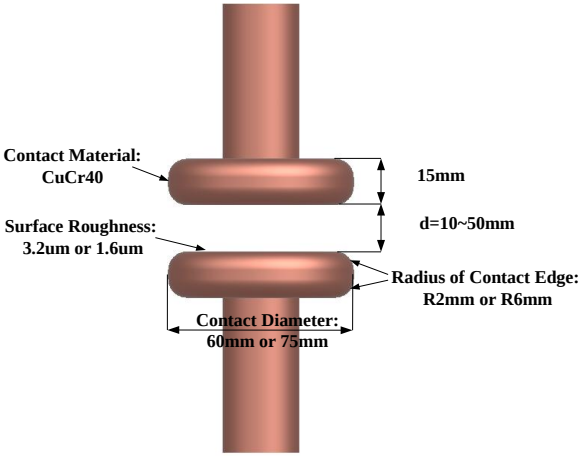
触头开距10～50mm情况下真空灭弧室雷电冲击电压击穿特性

研究目的：

研究触头开距10～50mm情况下真空灭弧室标准雷电冲击电压击穿特性及触头参数对击穿电压特性的影响。

触头参数包括以下三种：

触头直径：75mm & 60mm；触头表面粗糙度：1.6μm & 3.2μm；触头曲率半径：6mm & 2mm。



板——板电极结构

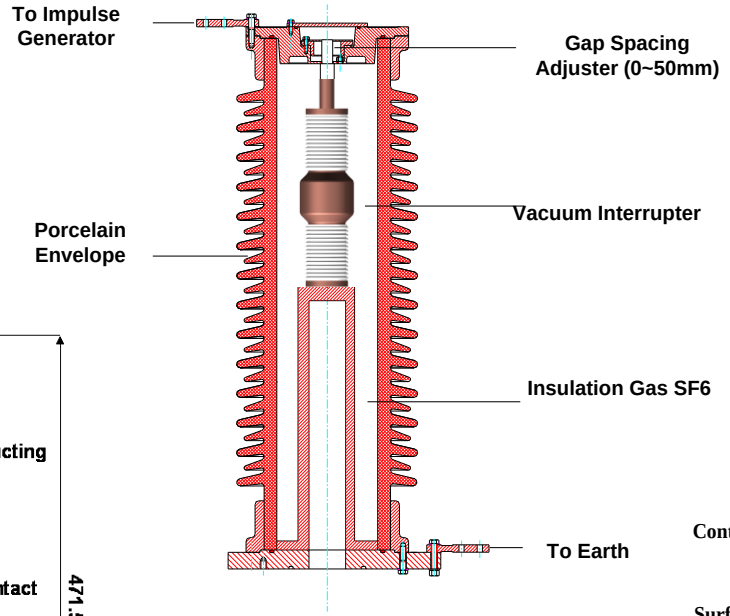
板——板电极结构：触头曲率半径、触头表面粗糙度、触头直径

VI	触头曲率半径(mm)	表面粗糙度(μm)	触头直径(mm)
No.1	6	1.6	60
No.2	2	1.6	60
No.3	6	3.2	60
No.4	6	1.6	75

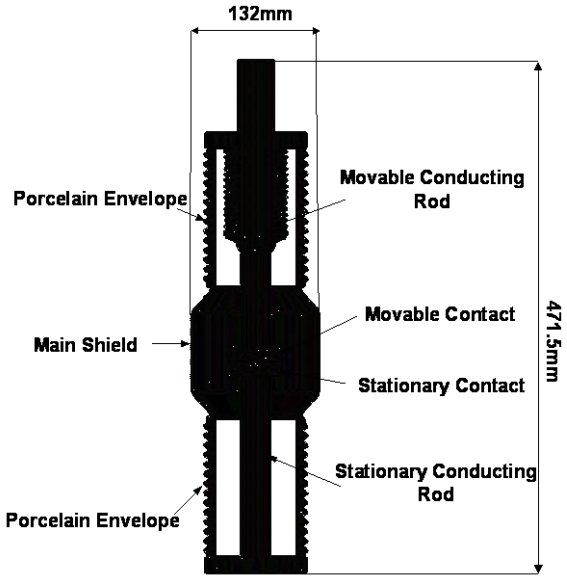
* No.1 VI 做为其他不同参数触头的对比标准

Yingyao Zhang, Zhiyuan Liu, Yingsan Geng, etc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011

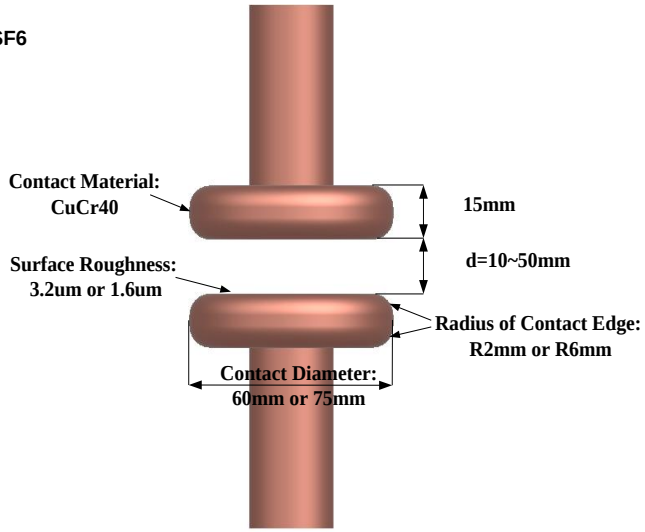
触头开距10～50mm情况下真空灭弧室雷电冲击电压击穿特性



试验设计



试验用真空灭弧室



板——板电极结构

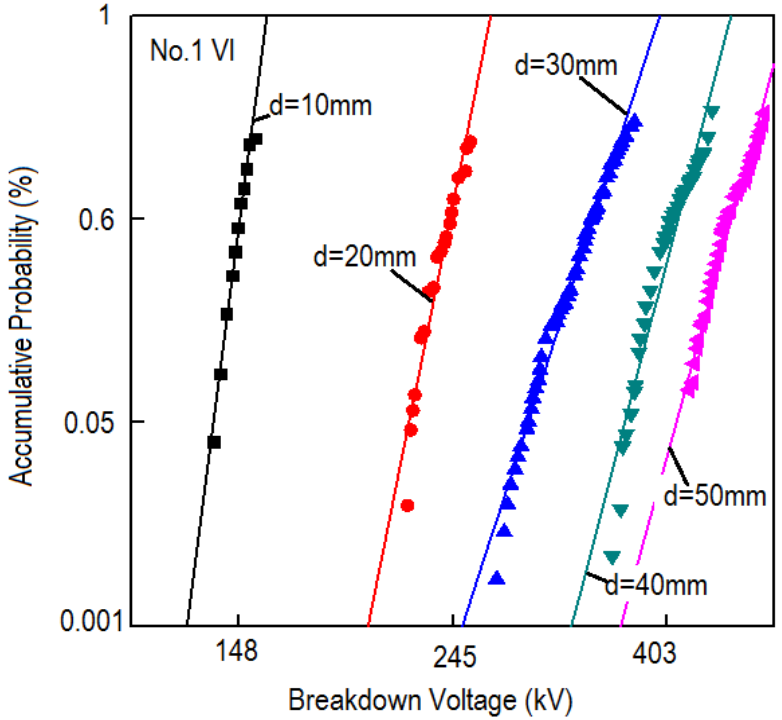
Yingyao Zhang, Zhiyuan Liu,Yingsan Geng, etc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011

触头开距10～50mm情况下真空灭弧室雷电冲击电压击穿特性

结论（1）：击穿电压的概率分布

试验发现触头开距在10～50mm内标准雷电冲击击穿电压的概率分布仍满足威布尔分布。

50% 击穿电压U_{50}

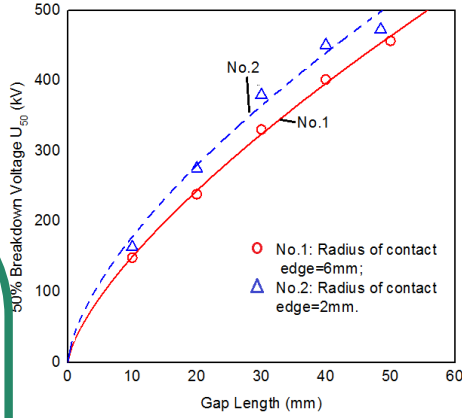


Yingyao Zhang, Zhiyuan Liu, Yingsan Geng, etc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011

触头开距10～50mm情况下真空灭弧室雷电冲击电压击穿特性

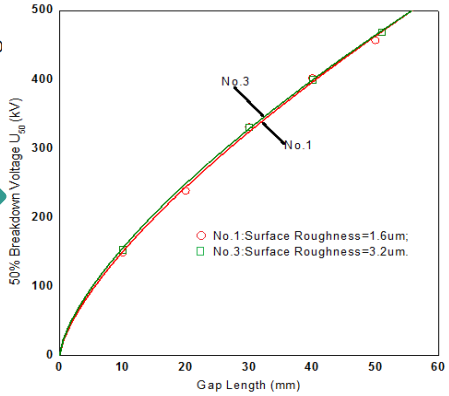
结论（2）：触头参数对击穿电压的影响

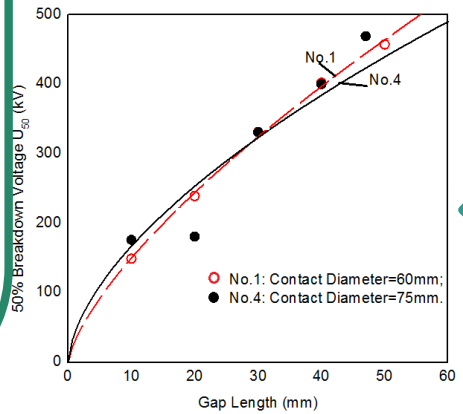
试验发现触头开距在10～50mm范围内标准雷电冲击击穿电压进入饱和区的程度远小于预期。



触头曲率半径对击穿电压的影响

触头表面粗糙度对击穿电压的影响





触头直径对击穿电压的影响

Yingyao Zhang, Zhiyuan Liu, Yingsan Geng, etc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011

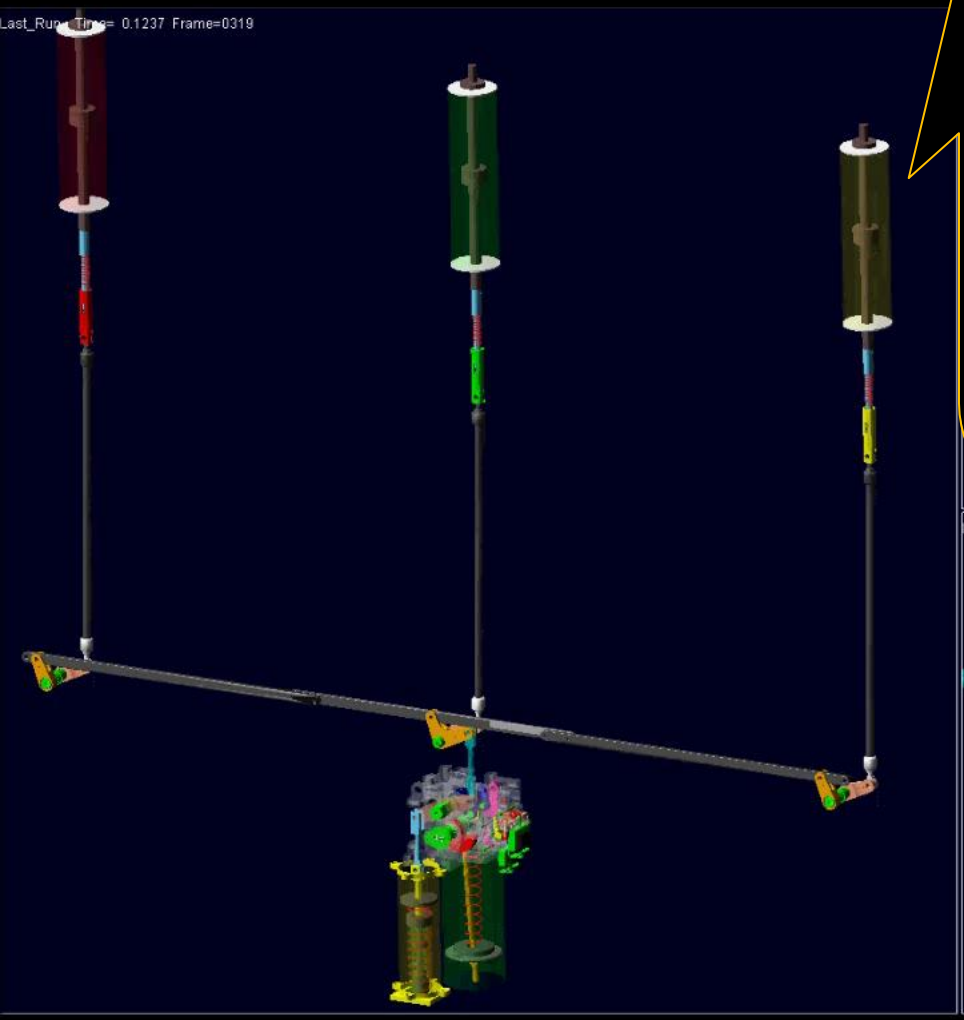
输电等级真空断路器领域的共性关键技术

- 高真空绝缘与饱和曲线
- 输电等级的大电流真空分断
- 合闸、分闸与操动机构
- 额定电流的提升

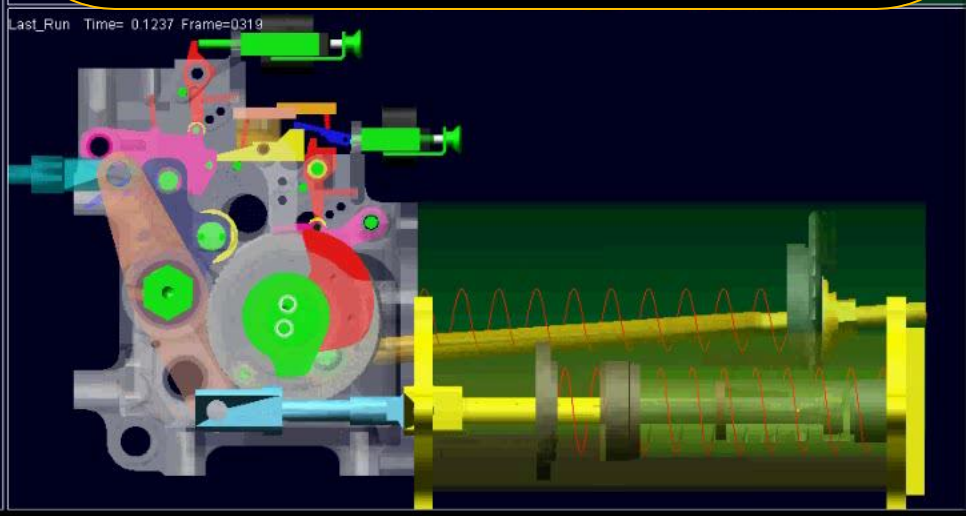
输电等级的大电流真空分断技术

关键词：真空电弧, 纵向磁场，暂态恢复电压

真空电弧现象(峰值22kA)

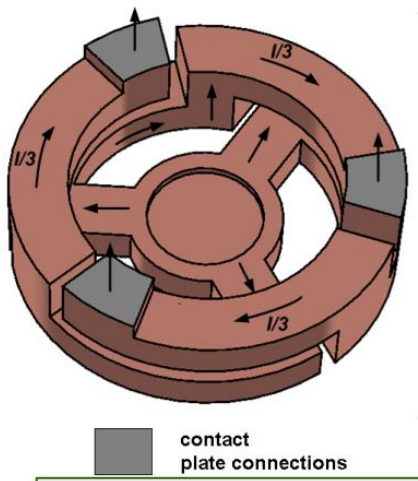


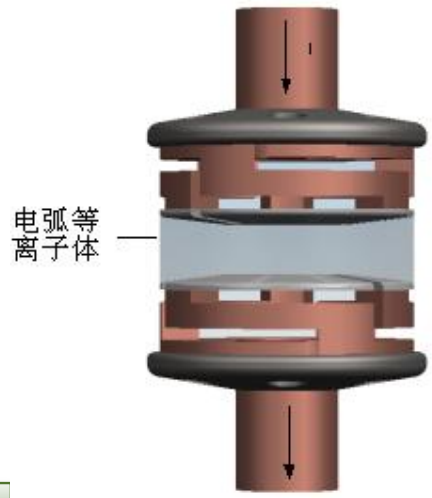
126kV 真空断路器虚拟样机



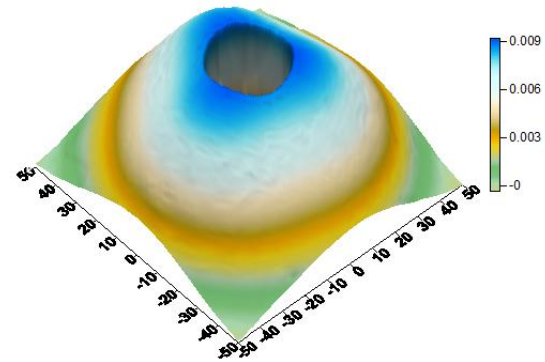
126kV 弹簧操纵机构

126kV单断口真空灭弧室的纵向磁场

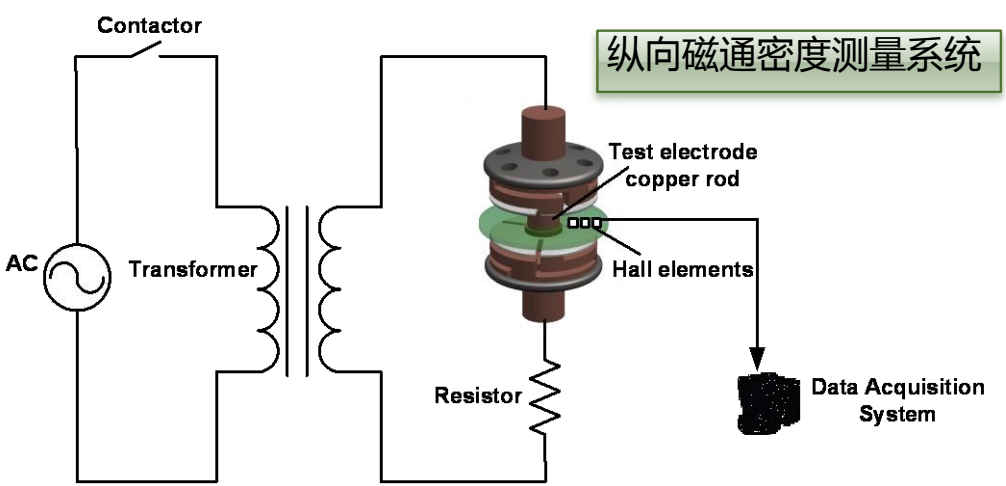




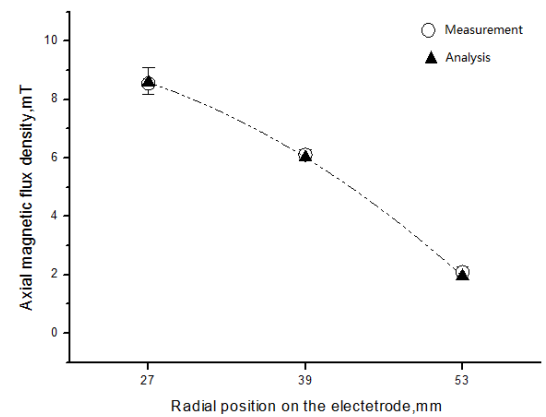
2/3 线圈纵磁触头结构



触头间隙中间平面纵向磁通密度分布



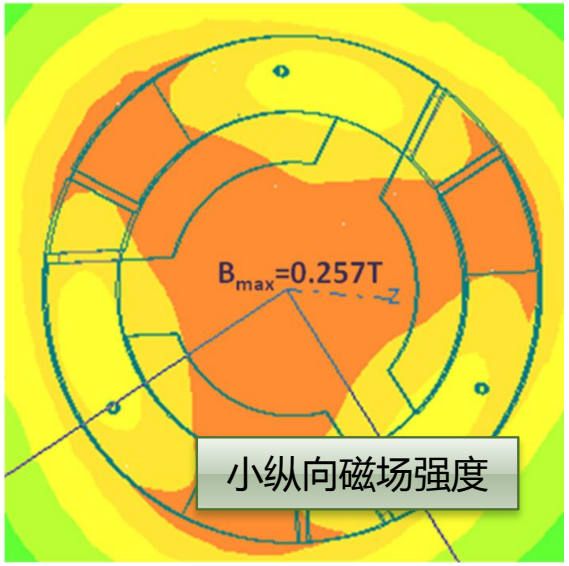
纵向磁通密度测量系统

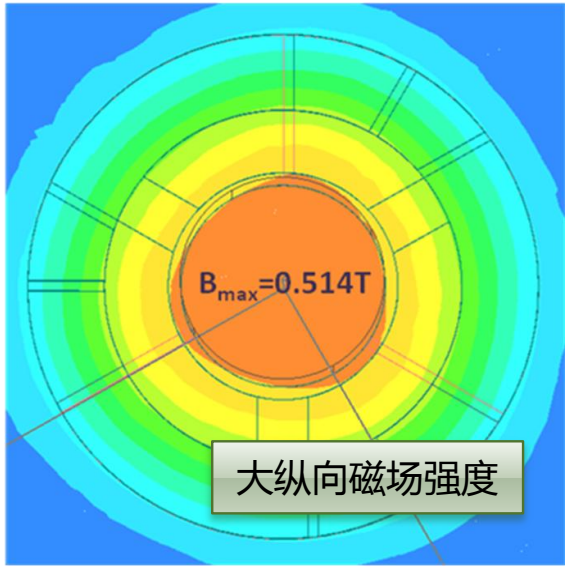


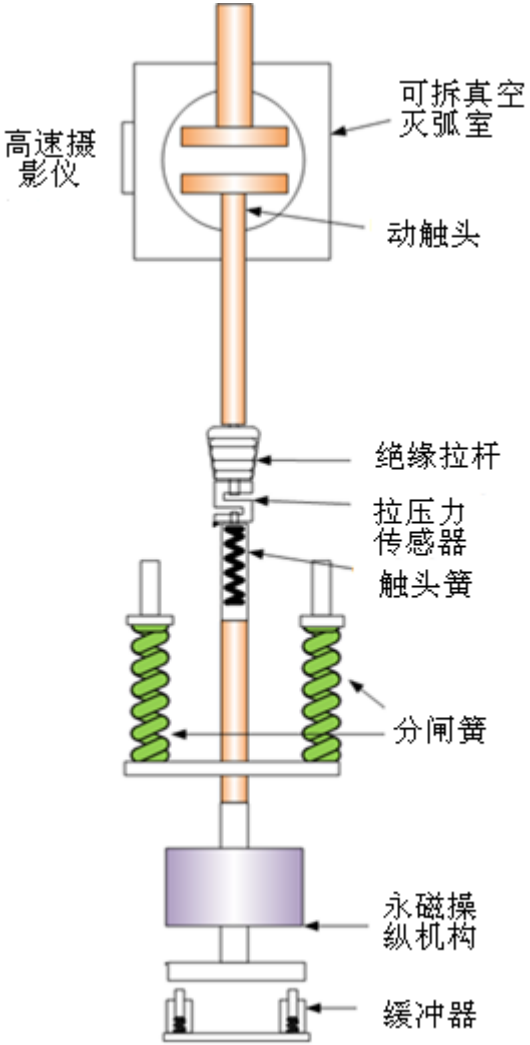
触头间隙中间平面沿半径方向从中心至边缘纵向磁通密度曲线

中国 发明专利: 刘志远，王建华，王季梅，耿英三等，一种252kV单断口真空灭弧室，2007 1 0018 001.9,2009

纵向磁场对真空电弧的影响

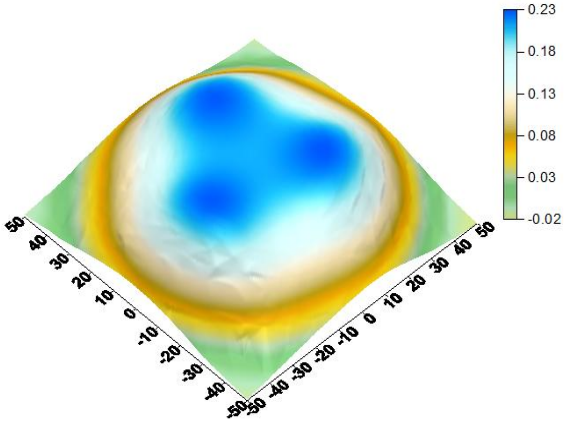




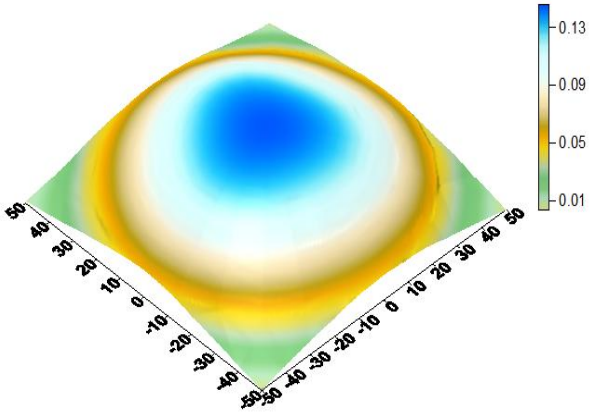


Zhiyuan Liu, Shaoyong Cheng, et al. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008

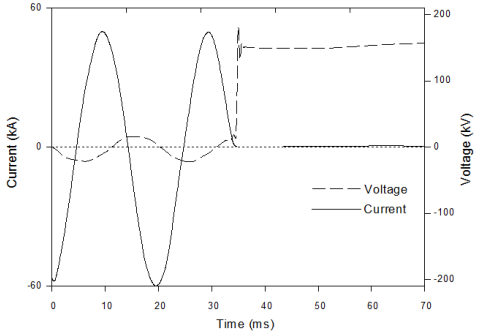
126kV单断口真空灭弧室纵向磁场



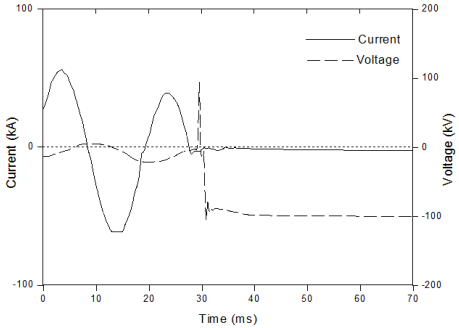
触头开距20mm时，纵向磁场分布
(电流40kA RMS), Bz=235mT



触头开距50mm时，纵向磁场分布
(电流40kA RMS), Bz=146mT



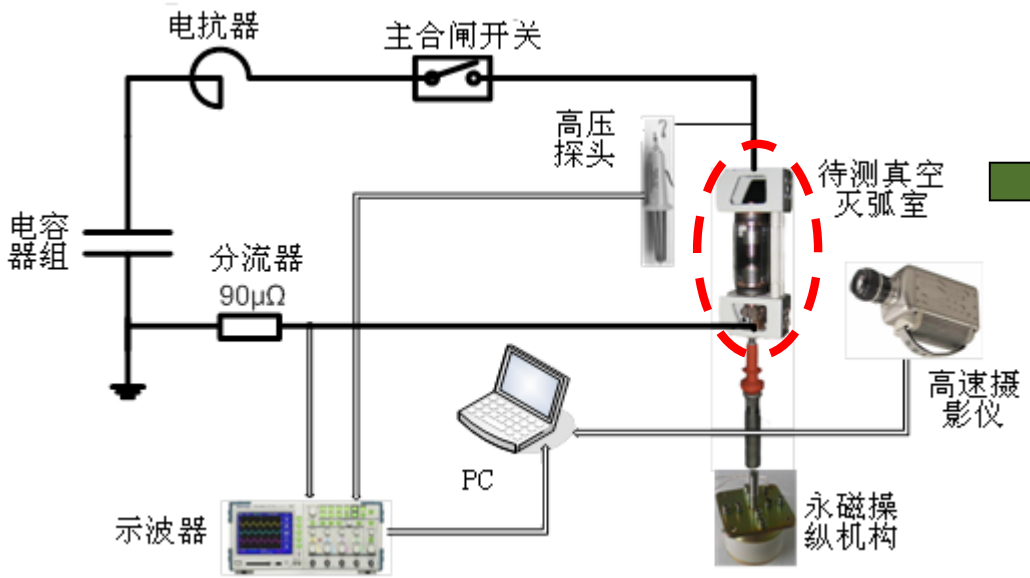
触头开距20mm情况下，成功开断时
电压电流波形

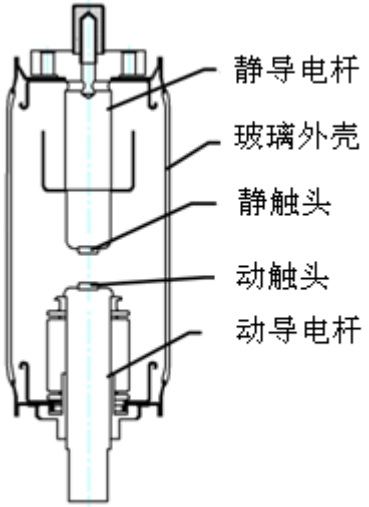


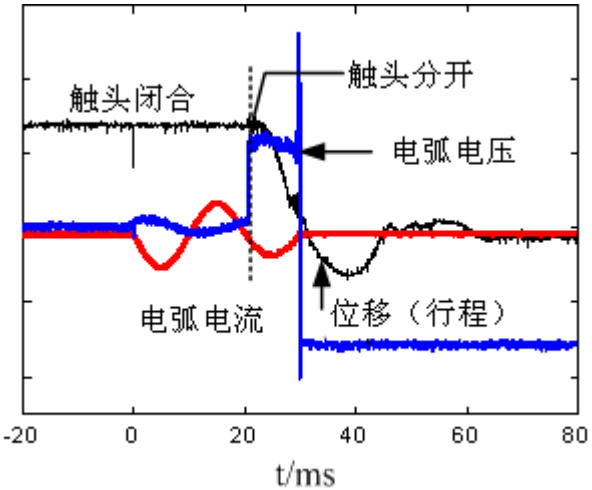
触头开距20mm情况下，开断失败时
电压电流波形

Yingyao Zhang, Yingsan Geng, Zhiyuan Liu et al. Proceedings of the XXIVth ISDEIV, Braunschweig, Germany 2010

纳米触头材料对真空电弧的影响：



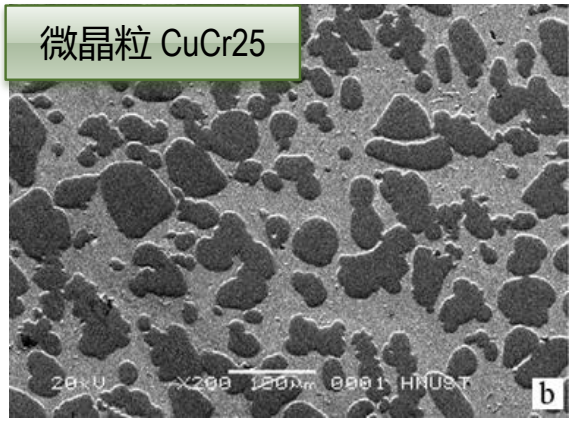




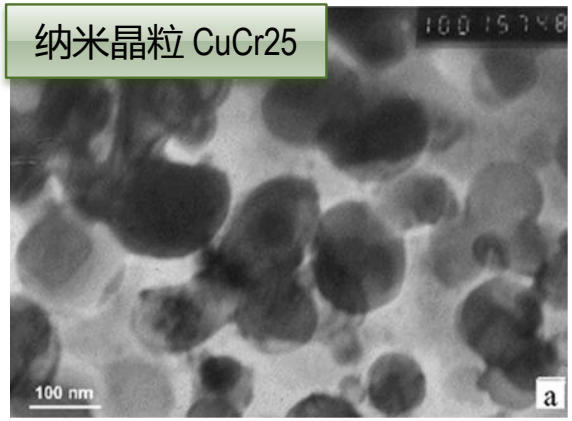
触头材料	触头直径（mm）	
纳米晶粒 CuCr25	12	25
微晶粒CuCr25	12	25
CuCr50 (微晶粒)	12	25
Cu (微晶粒)	12	25

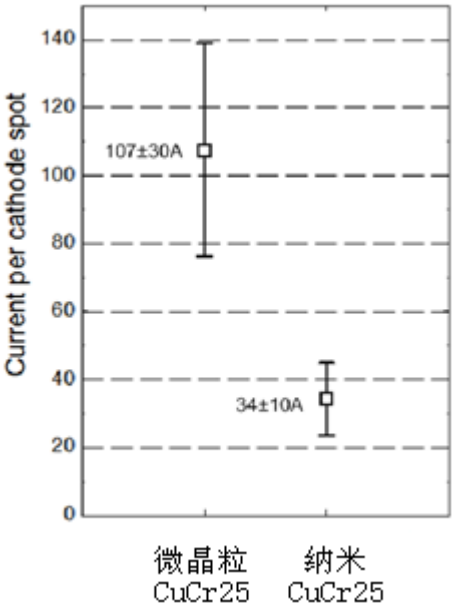
试验结果——纳米晶粒CuCr25C触头材料阴极现象

微晶粒 CuCr25



纳米晶粒 CuCr25





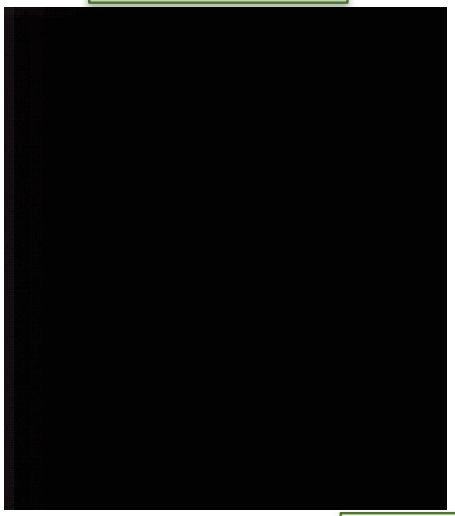
[redacted]

[redacted]

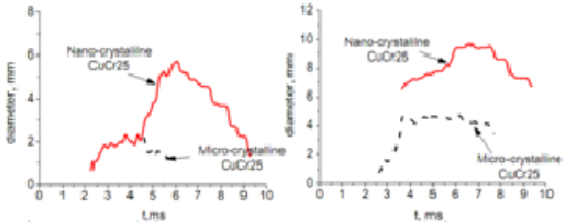
阴极现象

试验结果——纳米晶粒CuCr25C触头材料阳极现象

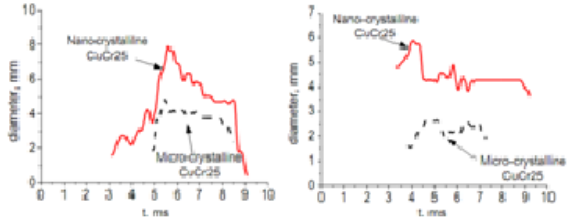
微晶粒CuCr25



纳米晶粒 CuCr25

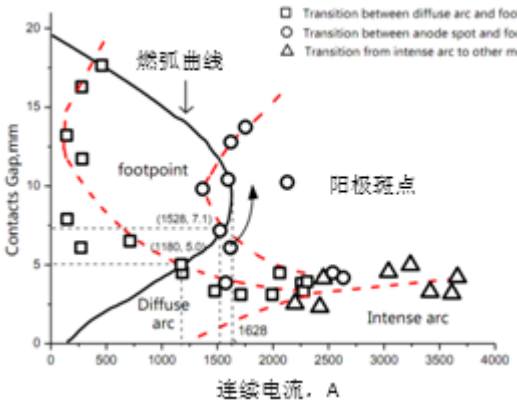


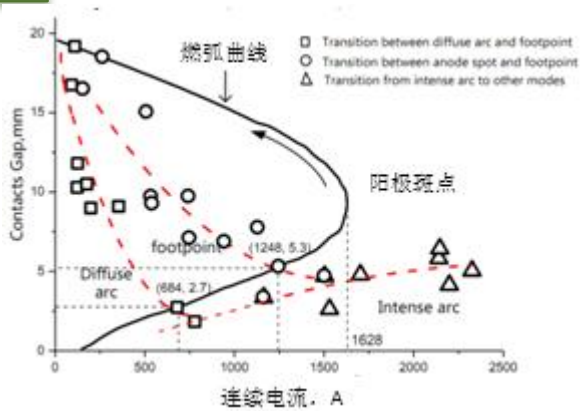
(a)触头直径12mm,分闸速度2.0m/s,峰值电流2.0kA (b)触头直径12mm,分闸速度1.1m/s,峰值电流2.8kA

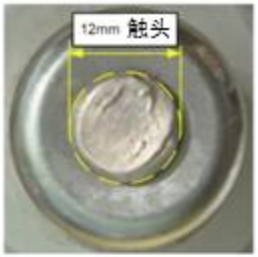


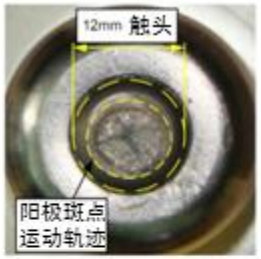
(c)触头直径25mm,分闸速度2.0m/s,峰值电流2.6kA (d)触头直径25mm,分闸速度1.1m/s,峰值电流3.1kA

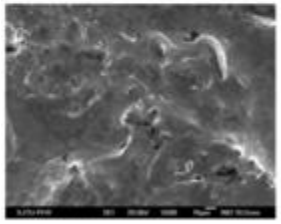
阳极现象



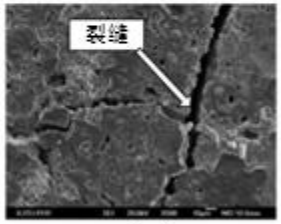








微晶粒
CuCr25



纳米
CuCr25

Yu Li, Wang Jianhua, Yingsan Geng, Zhiyuan Liu, IEEE Transactions on Plasma Science, 2011

大电流真空电弧阳极现象与分闸速度关系

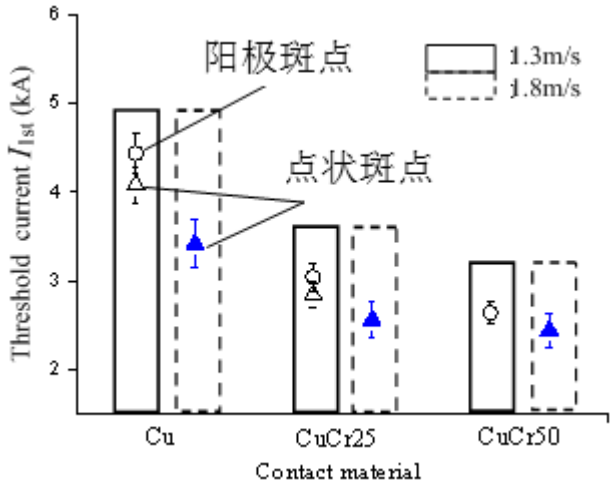
分闸速度 —影响→ 大电流真空电弧阳极现象

首次出现的大电流阳极现象:

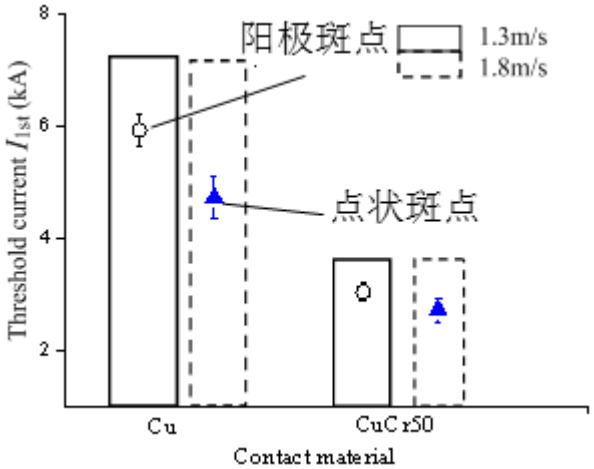
- 第一个阳极斑点
  - 1.3m/s
    - 阳极斑点（可能性最大）

    - 点状斑点（有时出现）
  - 1.8m/s
    - 点状斑点

Kong Guowei, Liu Zhiyuan, etc. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011



触头直径=12mm



触头直径r=25mm

临界电流 I_{1st}：

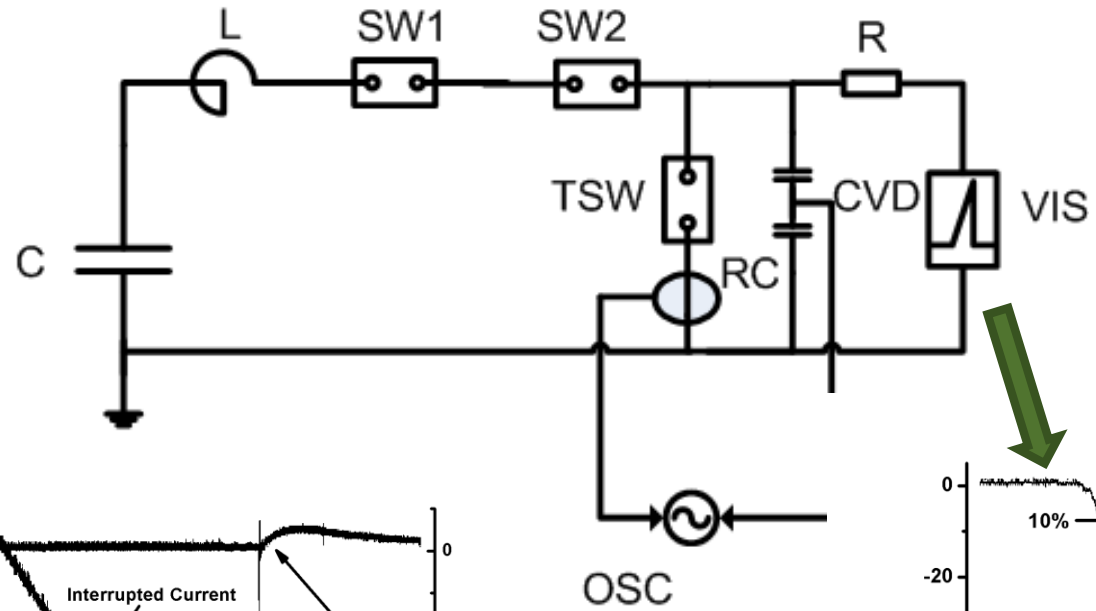
- 首次出现的大电流阳极模式
- 峰值电弧电流

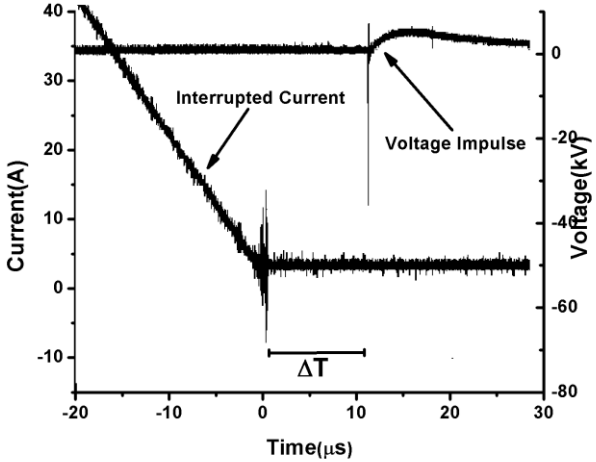
临界电流I_{1st}

分闸速度	触头材料	触头直径
低速> 高速	Cu > CuCr25 > CuCr50	25mm>12mm

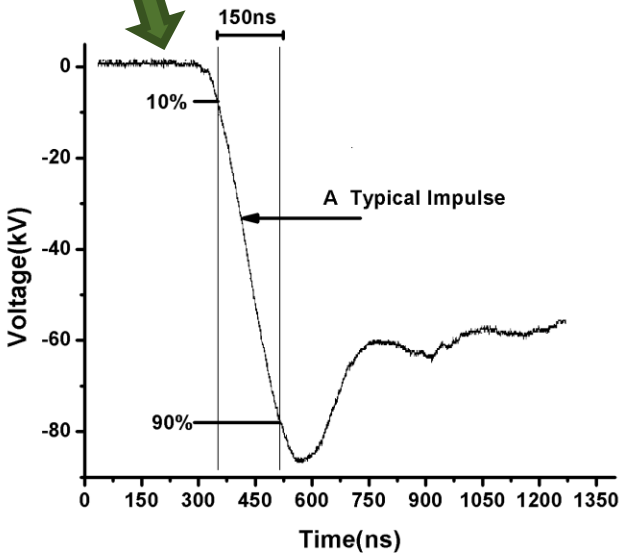
Kong Guowei, Liu Zhiyuan, etc. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011

真空开断的介质恢复特性





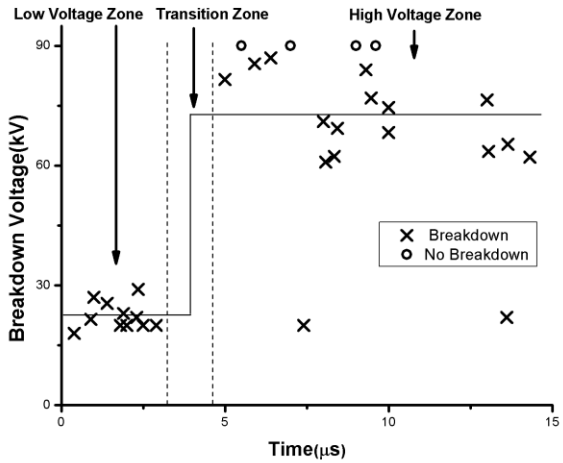
电流过零点附近电压、电流波形



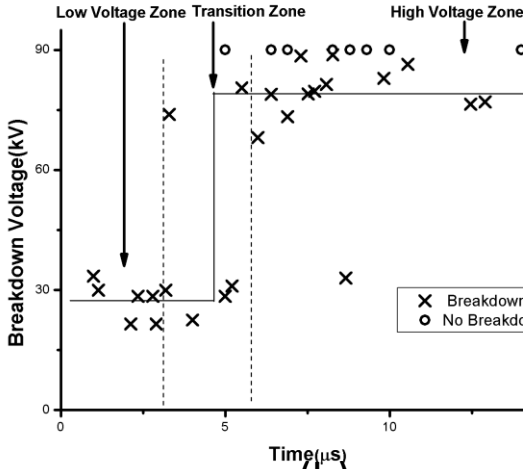
电压脉冲波形

Zhenxing Wang, Yingsan Geng, Zhiyuan Liu, IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2012

开断扩散态真空电弧的“阶跃”式介质恢复特性

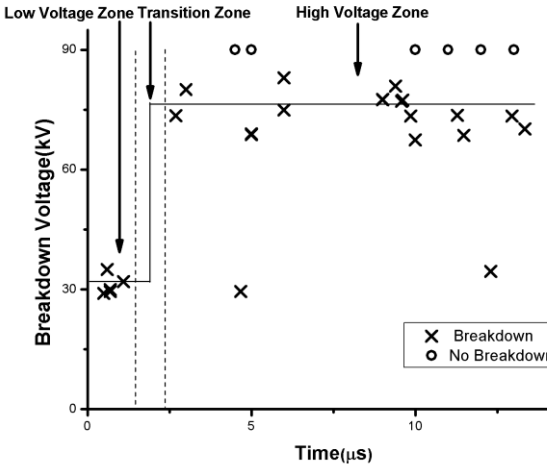


(a)

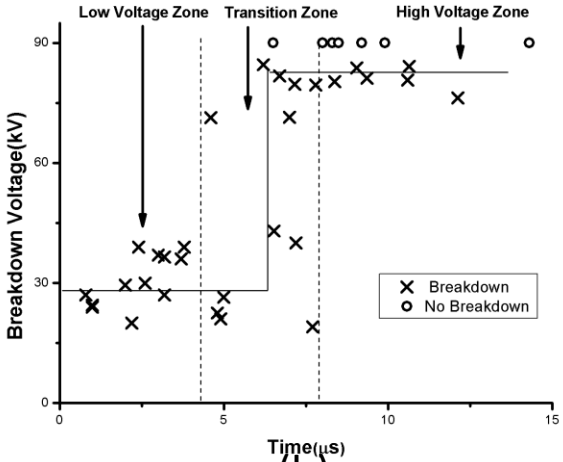


(b)

Cu : (a) 12mm; (b) Φ25mm.

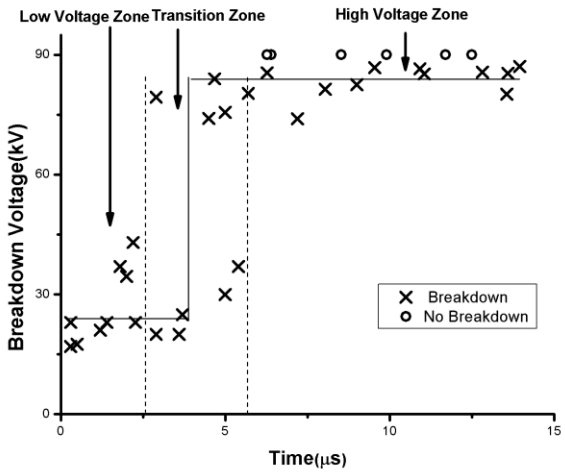


(a)

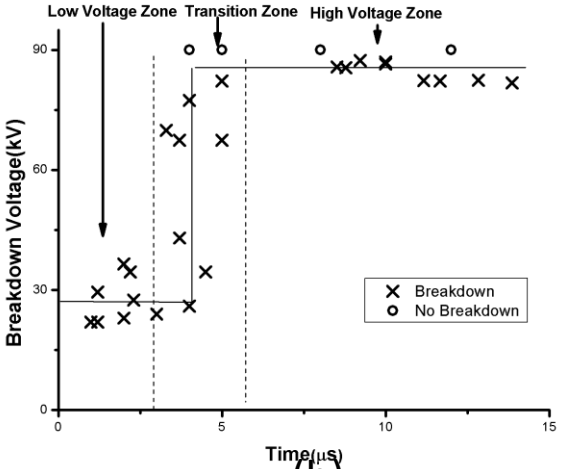


(b)

CuCr25 : (a) 12mm; (b) Φ25mm.



(a)

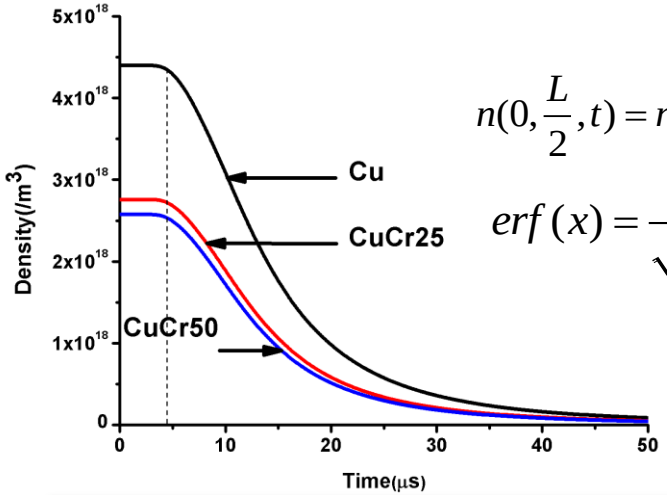


(b)

CuCr50 : (a) 12mm; (b) Φ25mm.

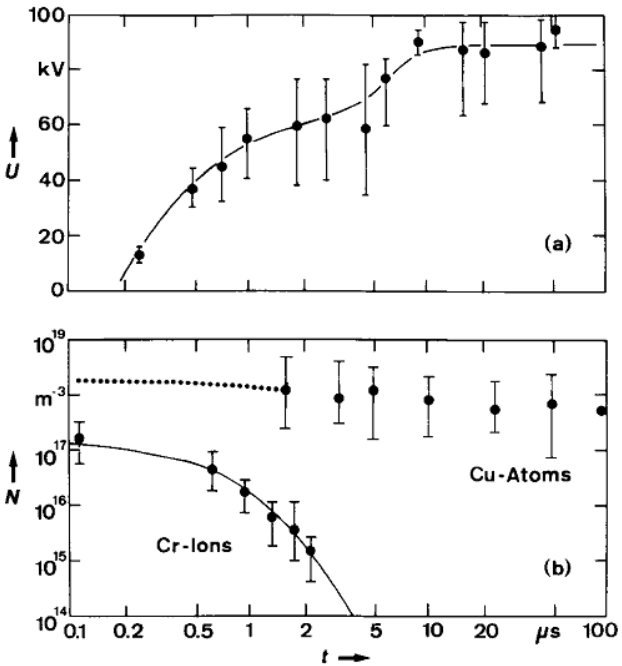
Zhenxing Wang, Yingsan Geng, Zhiyuan Liu, IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2012

“阶跃”式介质恢复特性解析

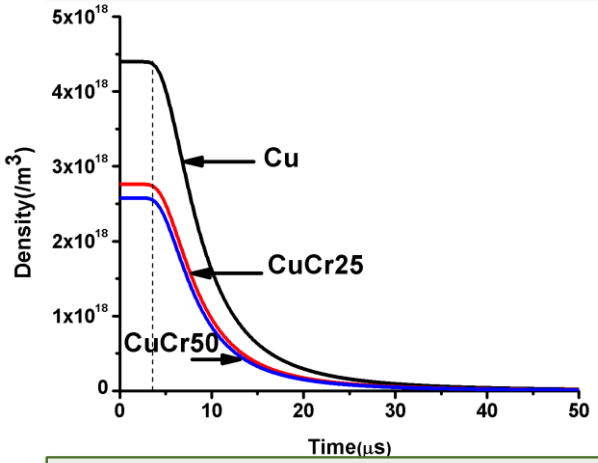


$$n(0,\frac{L}{2},t)=n_0[1-e^{-\frac{1}{\alpha^2}}]erf[\frac{1}{2}(\frac{L}{R})(\frac{1}{\alpha})]$$

$$erf(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt \quad \alpha=\frac{t}{R}\sqrt{\frac{2kT}{m}}$$



金属蒸汽密度衰减时间：触头直径12mm.



金属蒸汽密度衰减时间：触头直径25mm.

金属蒸汽密度在弧后介质的逐步自恢复行为中不是主要影响因素

金属蒸汽密度与离子密度曲线，开断电流：200A正弦交流.

G. Lins, IEEE Trans. Plasma Sci., 1991

弧后介质自恢复过程呈阶越性增长可能是离子密度变化引起的，而非金属蒸汽密度。

Zhenxing Wang, Yingsan Geng, Zhiyuan Liu, IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2012

输电等级真空断路器领域的共性关键技术

- 高真空绝缘与饱和曲线
- 输电等级的大电流真空分断
- 合闸、分闸与操动机构
- 额定电流的提升

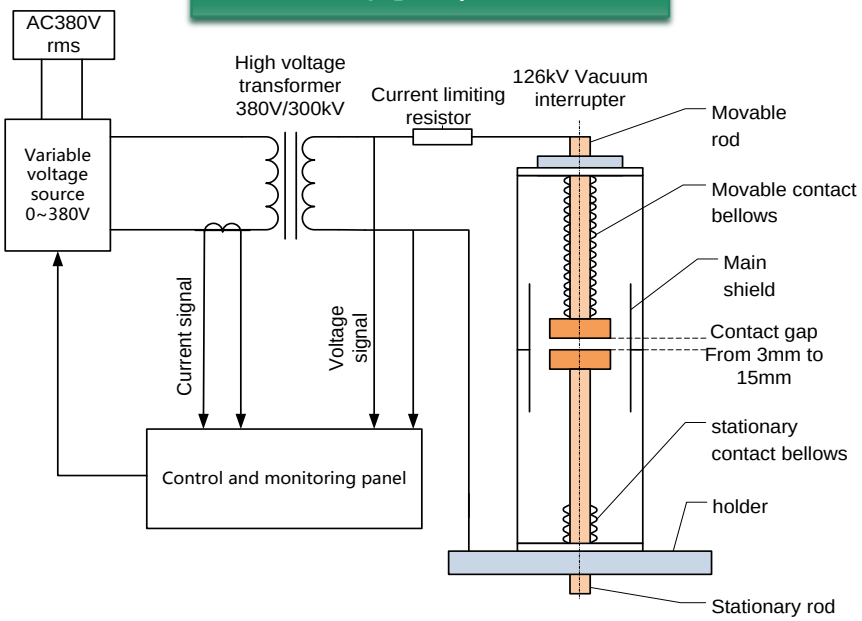
输电等级真空断路器接通、分开电路的技术

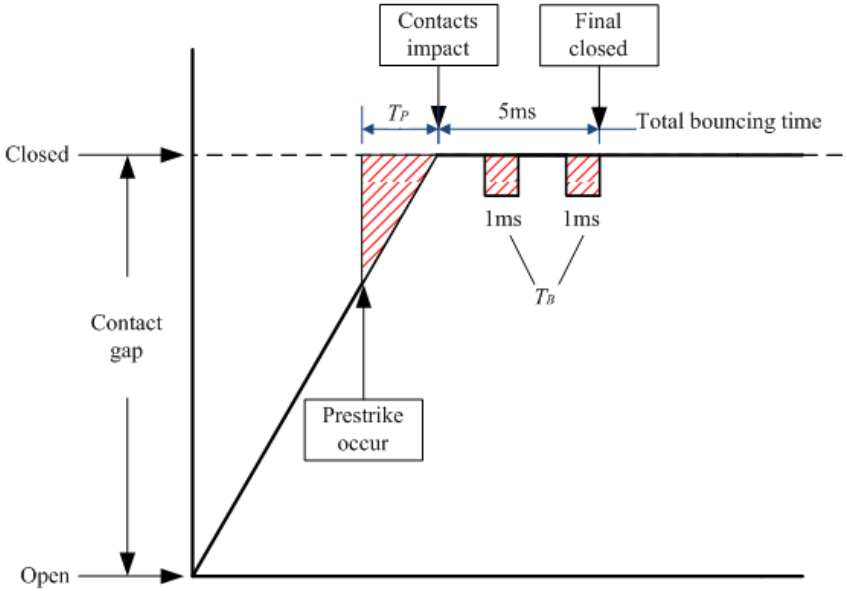
关键词：熔焊, 凸轮，合闸曲线，分闸曲线，优化

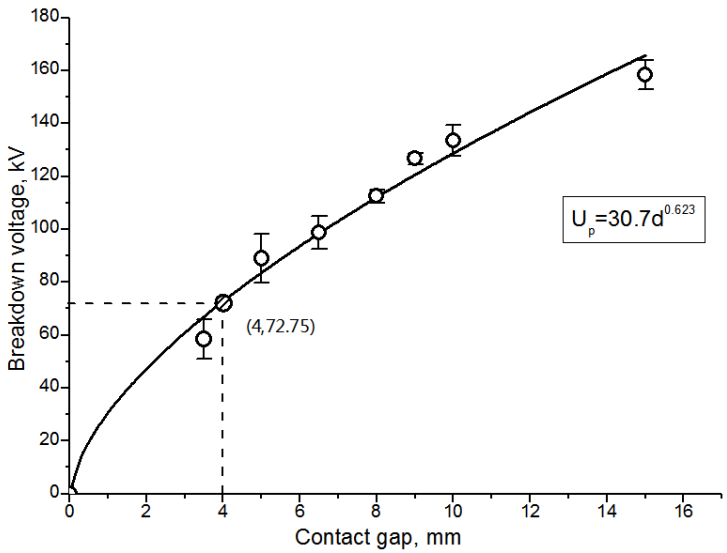
基于动熔焊特性的真空关合技术

$$T_W = T_P + T_B = \frac{d}{v_P} + T(v_P)$$

熔焊时间为预击穿电弧时间与触头合闸弹跳时间之和



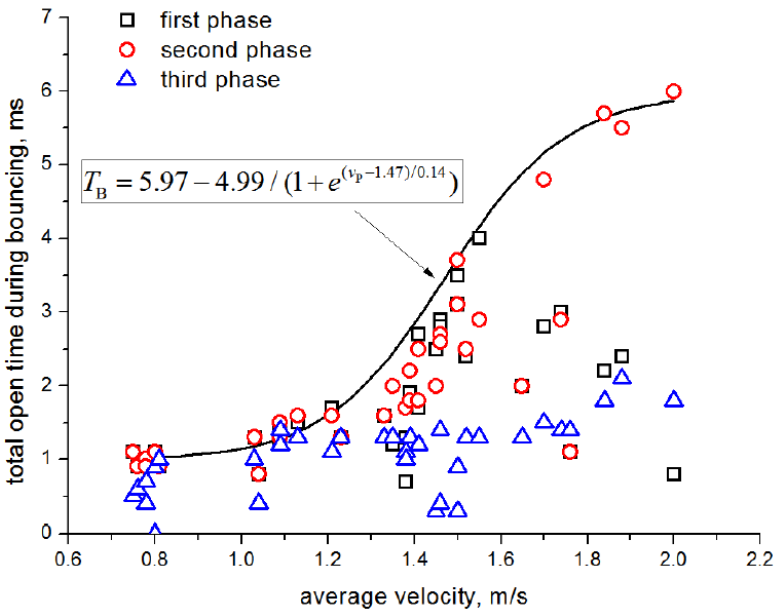


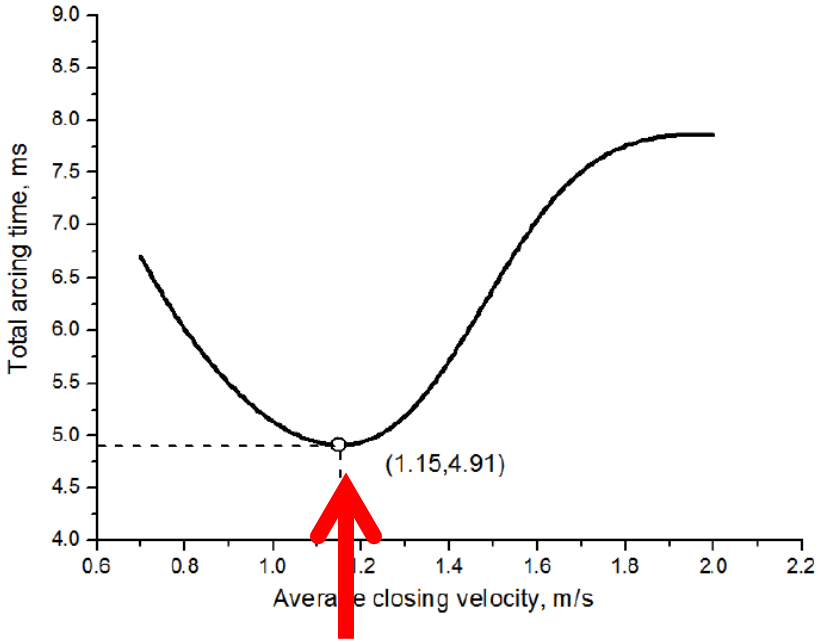


余砾，高电压等级真空断路器机械特性的优化设计，西安交通大学博士学位论文，2011

$$T_W = 4/v_P + 5.97 - 4.99/(1+e^{(v_P-1.47)/0.14})$$

126kV真空断路器合闸弹跳时间曲线

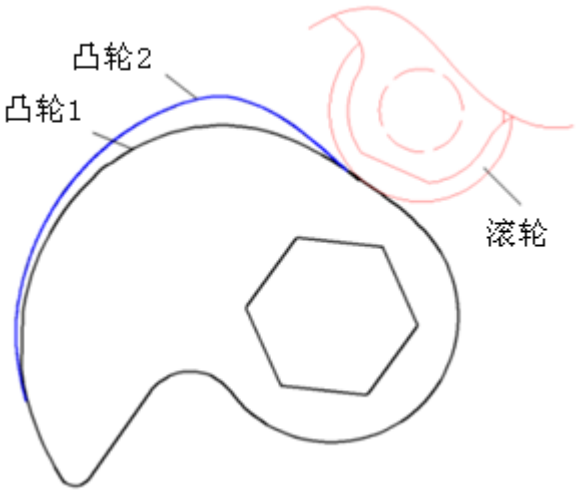




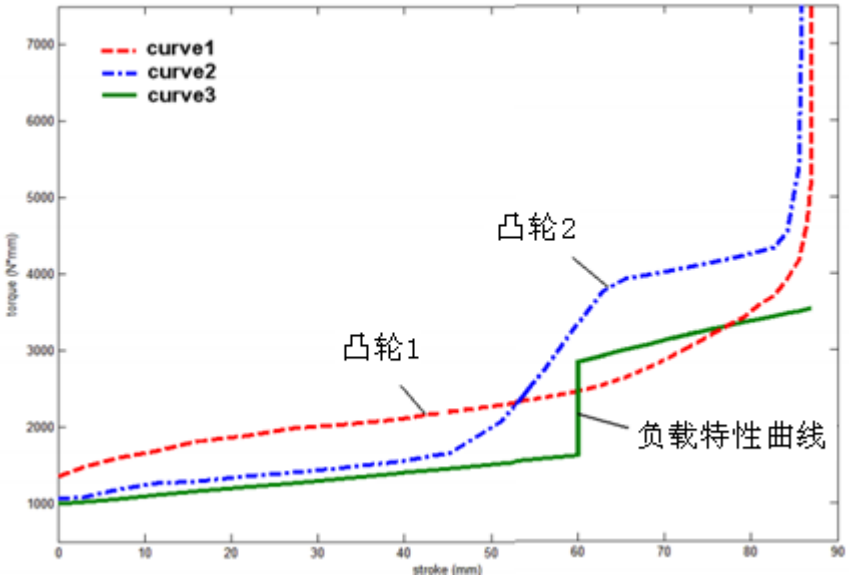
优化的合闸速度

余砾，高电压等级真空断路器机械特性的优化设计，西安交通大学博士学位论文，2011

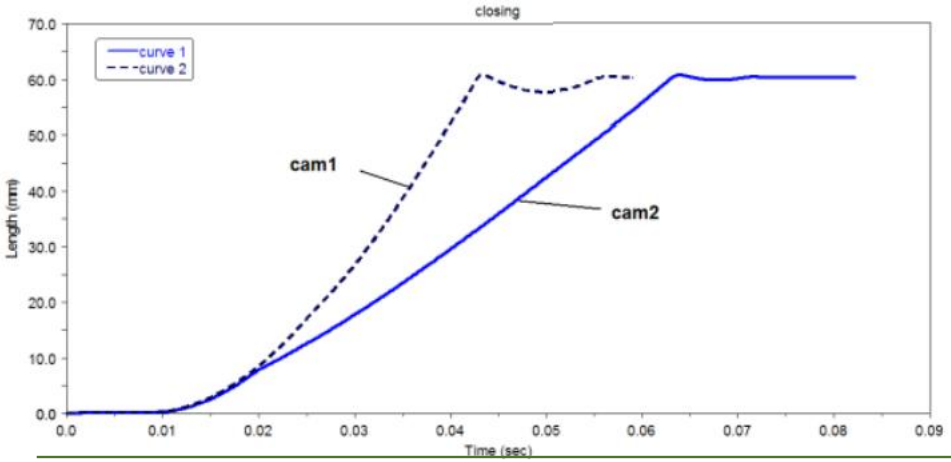
合闸特性与凸轮设计



凸轮1——SF6 断路器 ；凸轮2——真空断路器



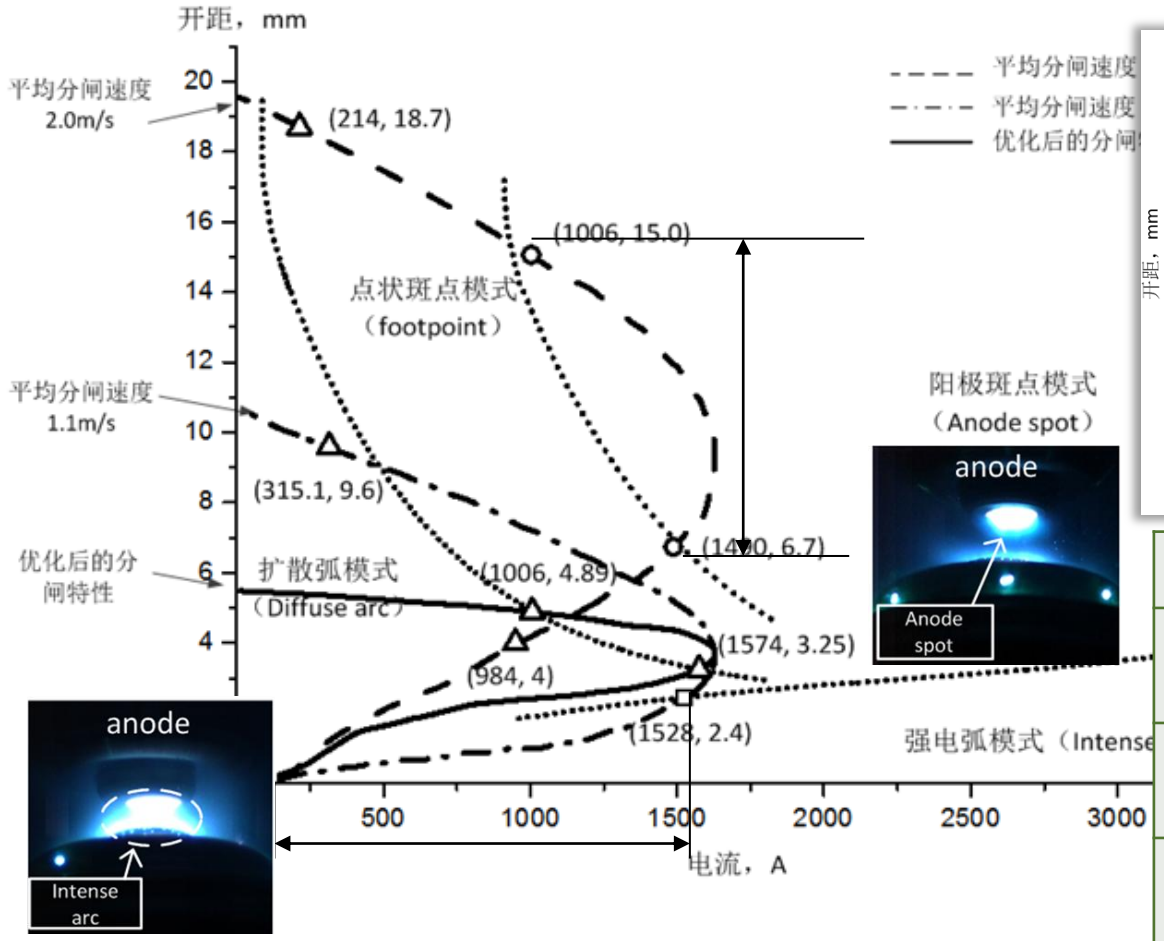
两种凸轮结构输出特性

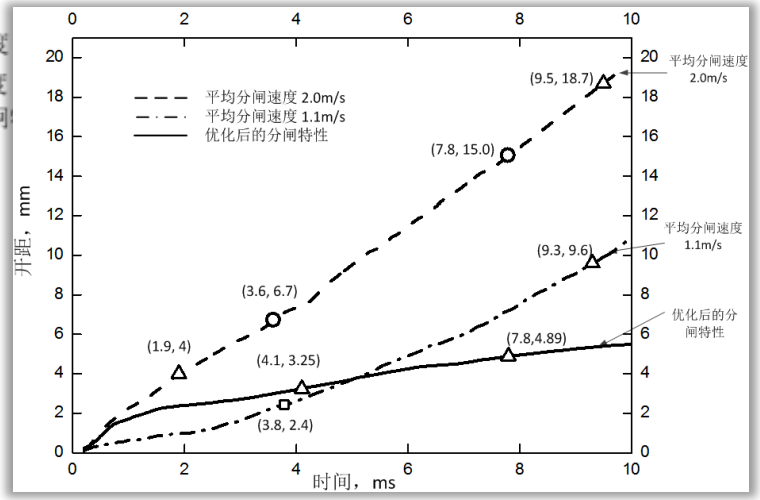


	合闸速度	弹跳量	弹跳时间
凸轮1	2.8m/s	2.42mm	10.5ms
凸轮2	1.3m/s	0.52mm	5.7ms

中国发明专利，耿英三，余砾，王建华，刘志远等，配合126kV真空断路器分合特性的弹簧操动机构，2008 1 0018 283.7，2010

基于真空电弧阳极模式的分闸技术

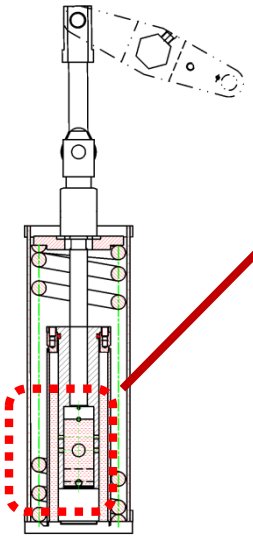




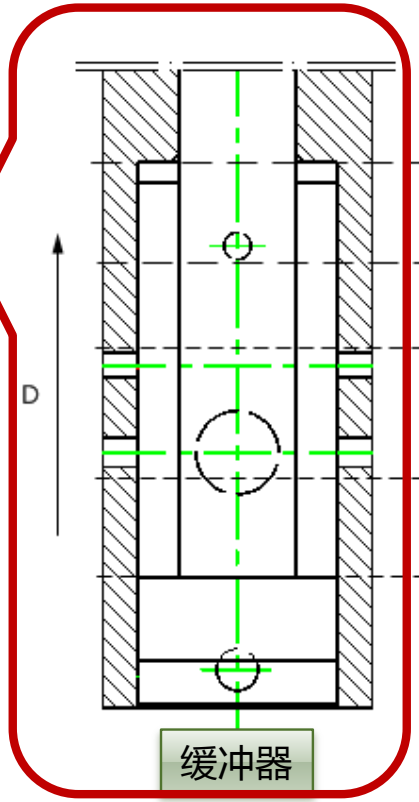
分闸速度	2.0m/s	1.1m/s	**优化后的**
强电弧模式时间（ms）	None	3.8	**None**
阳极斑点模式时间（ms）	4.2	None	**None**
阳极活跃时间（ms）	7.6	9.8	**3.7**

Liqiong Sun, Li, Yu, Zhiyuan Liu, Jiangwang Wang,Yingsan Geng, 1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology, 2011, Best Paper Award

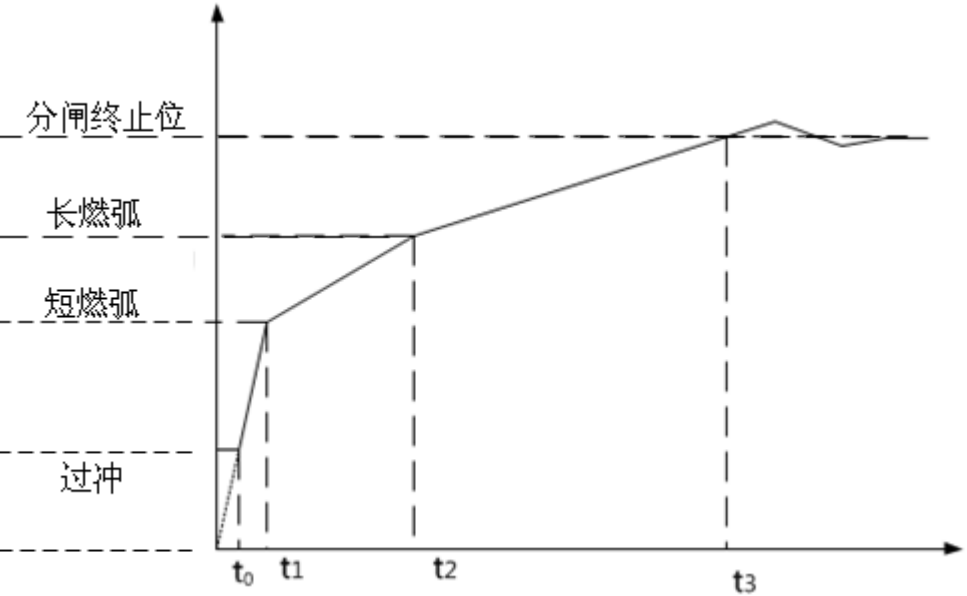
分闸特性设计

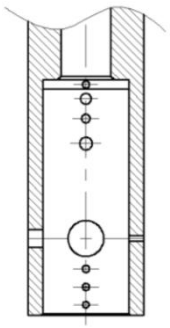


分闸簧

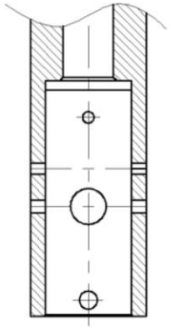


缓冲器

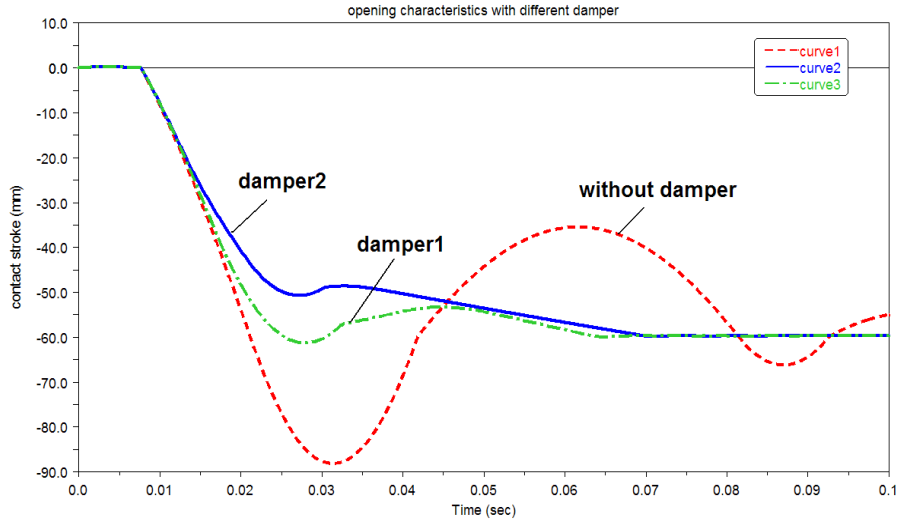




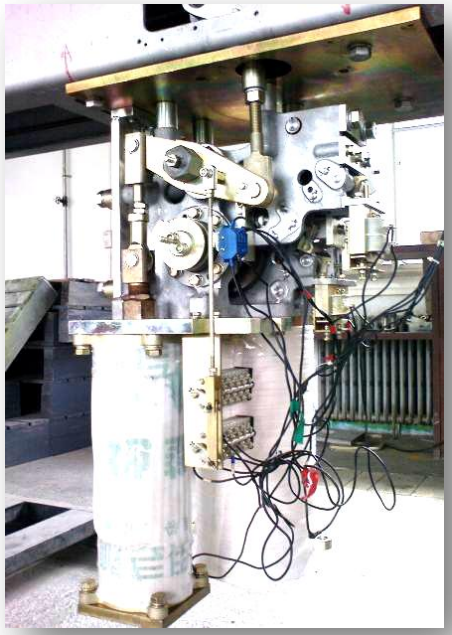
缓冲器1



缓冲器2



126 kV 真空断路器弹簧操动机构技术

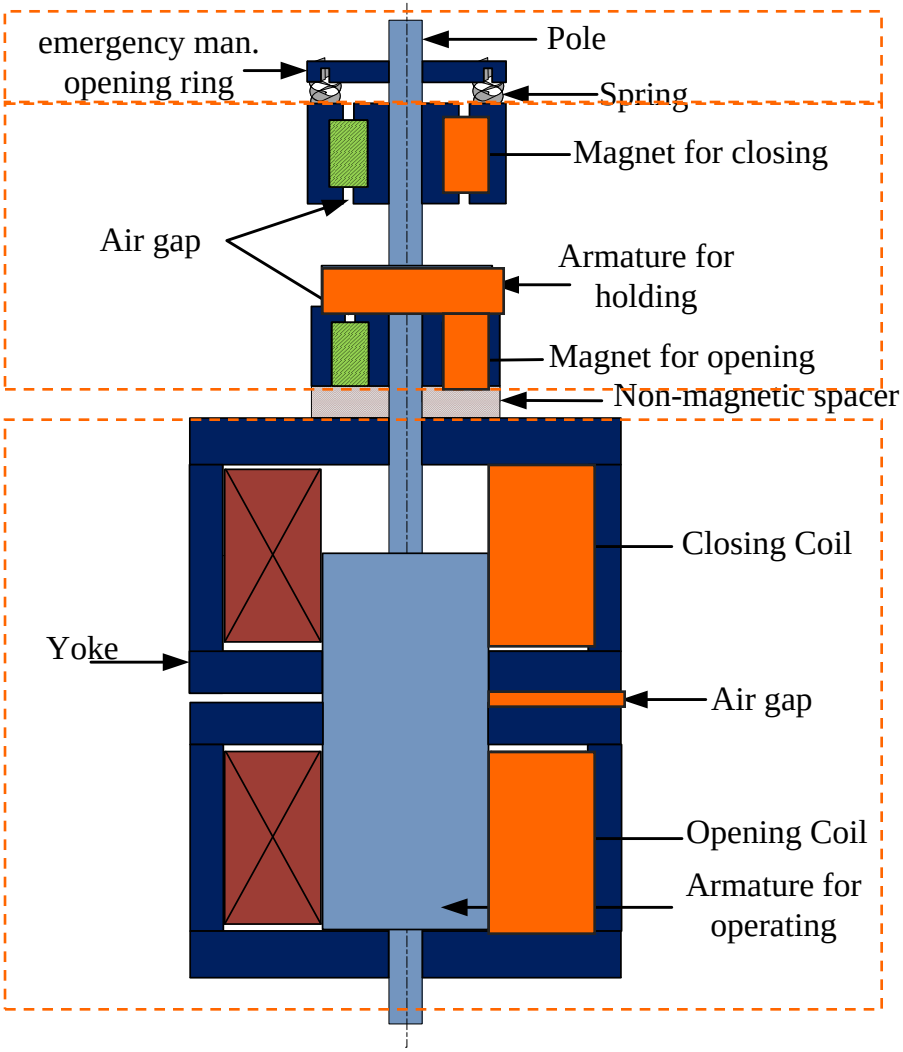


- 通过本方法设计出的高压真空断路器弹簧操动机构配合55 kV铁路真空开关以及72.5 kV真空断路器也成功完成了所有的型式试验。

中国发明专利，耿英三，余砾，王建华，刘志远等，配合126kV真空断路器分合特性的弹簧操动机构，2008 1 0018 283.7，2010

一种新的126kV真空断路器永磁操动机构设计

- 手动分闸环
- 保持单元
- 驱动单元

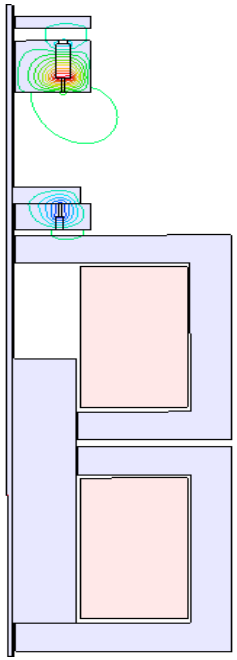


- 新永磁操纵机构，通过将保持与驱动磁路分离，具有较高的速度特性且可应用于高压真空真空断路器。
- 手动分闸环使得紧急分闸操作更便捷

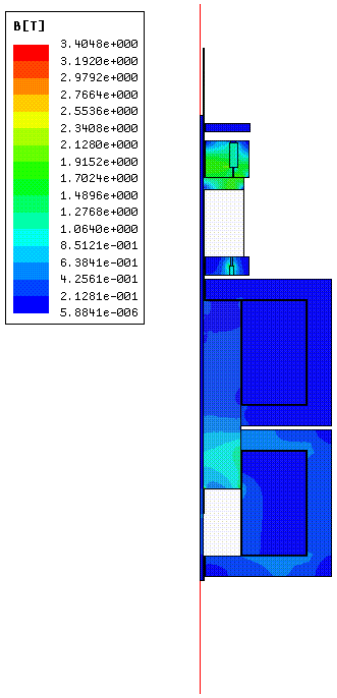
中国发明专利，耿英三，王振兴，刘志远等，一种可提高分闸速度的新型双稳态永磁机构，2010 1 0135 358.7，2012

仿真分析

磁力线分布



动态仿真

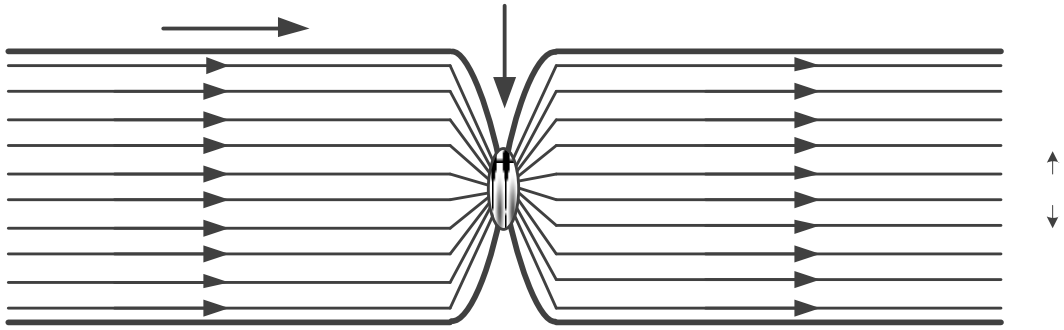


	要求值	仿真结果
平均合闸速度	1.3m/s	2.15m/s
平均分闸速度	3.5m/s	4.24m/s
刚分速度	2.5m/s	3.6m/s

输电等级真空断路器领域的共性关键技术

- 高真空绝缘与饱和曲线
- 输电等级的大电流真空分断
- 合闸、分闸与操动机构
- 额定电流的提升

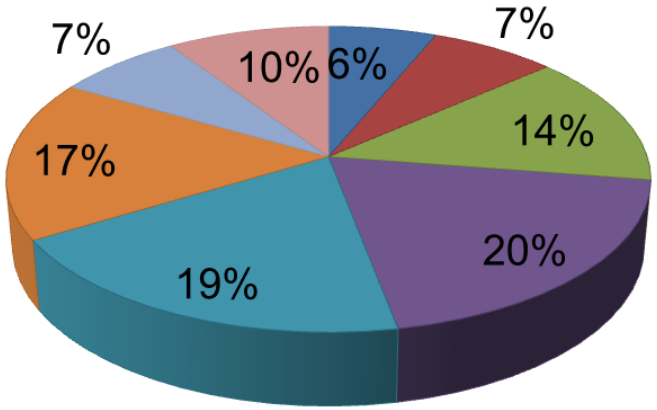
输电等级真空断路器额定电流

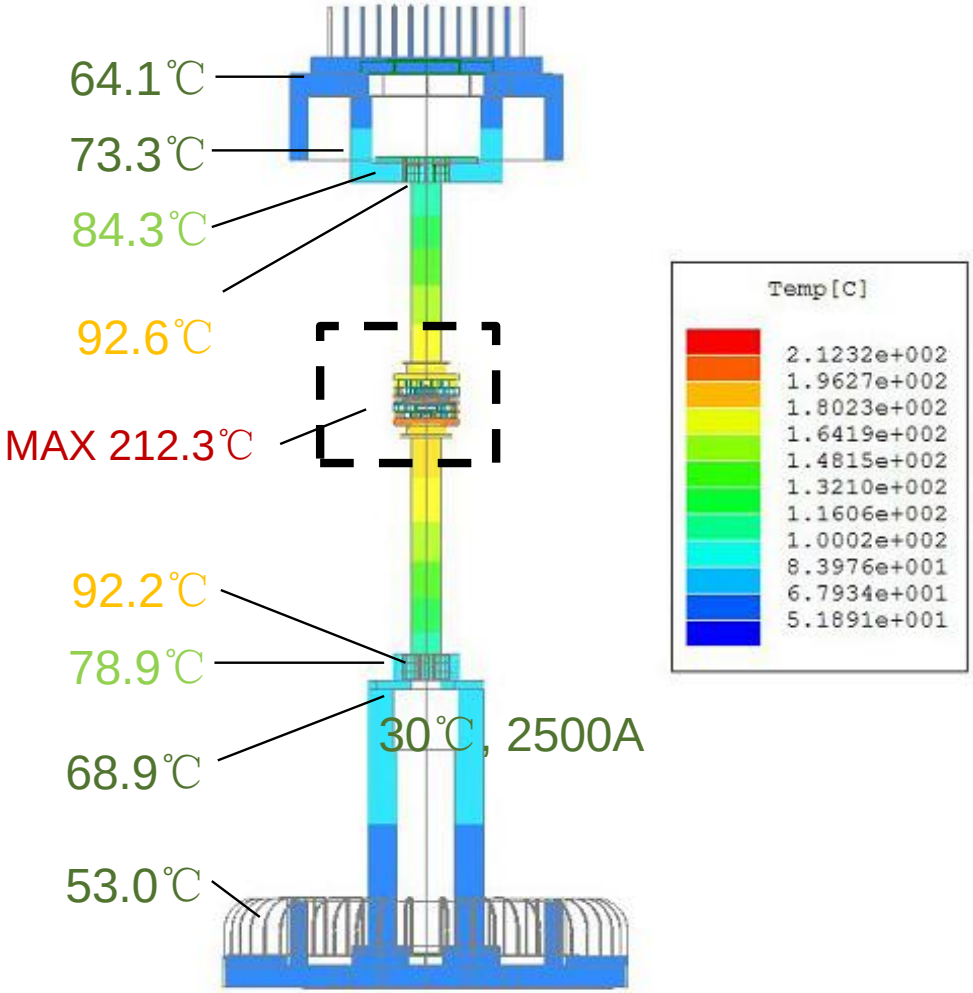


关键词：长导热路径，真空中热传导，温升

126kV真空断路器中的发热源

126kV真空灭弧室发热源





触头接触电阻: 4+5=39%

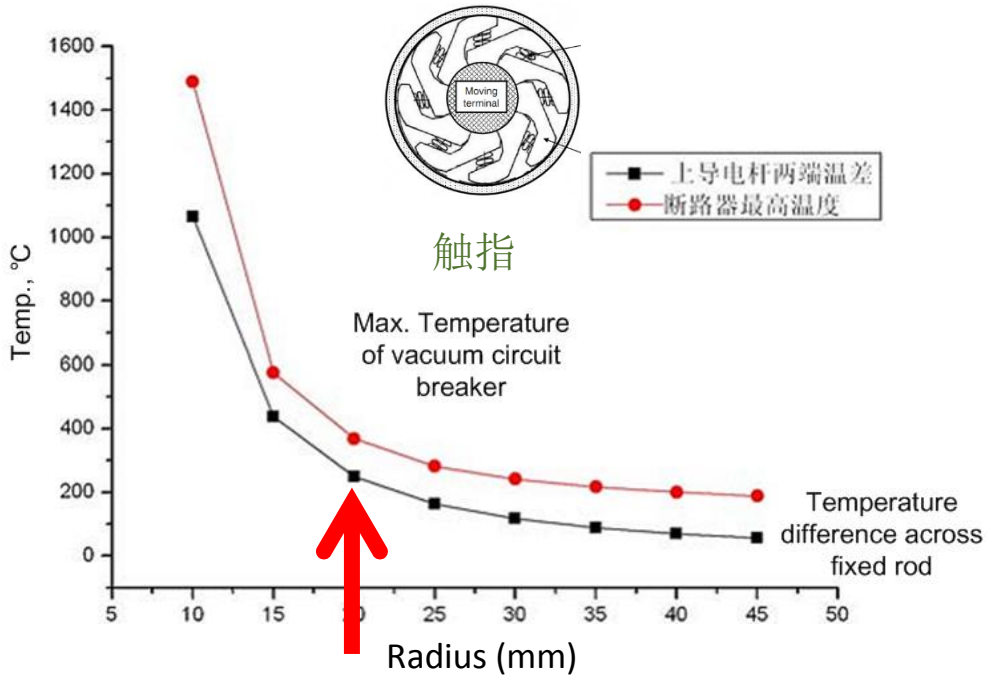
接线电阻: 1+2+7+8=30%

导电杆电阻: 3+6=31%

Xiaoling Yu; Zhiyuan Liu, etc. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, Journal of Power and Energy，2011

温升控制与额定电流的提升技术

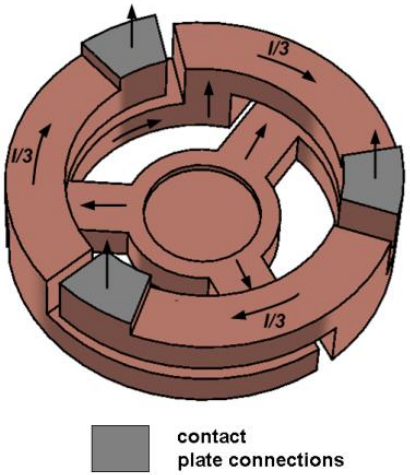
- 导电杆直径的热分析



电流2500A, 环境温度 30℃

Xiao-ling Yu, Zhi-yuan Liu, et al. Journal of Zhejiang University Science A, 2009, 10((9): 1305-1312

- 触头结构-短路开断电流与额定电流的矛盾



2/3匝纵向磁场触头，将额定电流从2000A提升至2500A

中国 发明专利：刘志远，王建华，王季梅，耿英三等，一种252kV单断口真空灭弧室，2007 1 0018 001.9,2009

研究展望：输电等级真空开断技术的发展前景

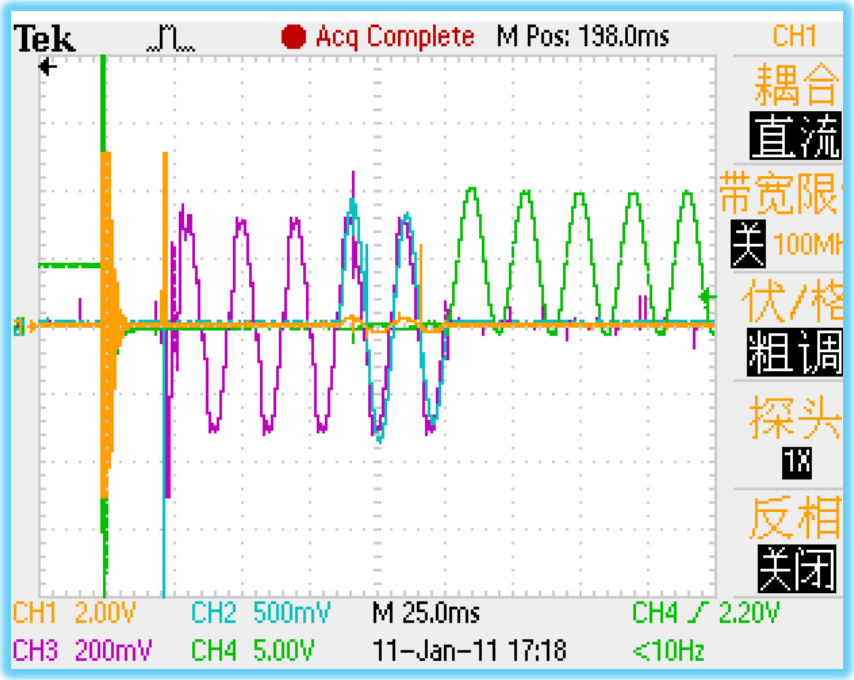
关键词:实验平台，特高压，大额定电流，组合电器

短路电流开断合成回路 126kV/63kA

试验能力	真空断路器	SF6断路器
额定电压	40.5kV、72.5kV、126kV	
短路电流	63kA	31.5kA

容性电流开断合成回路

容性电流开断典型示波图

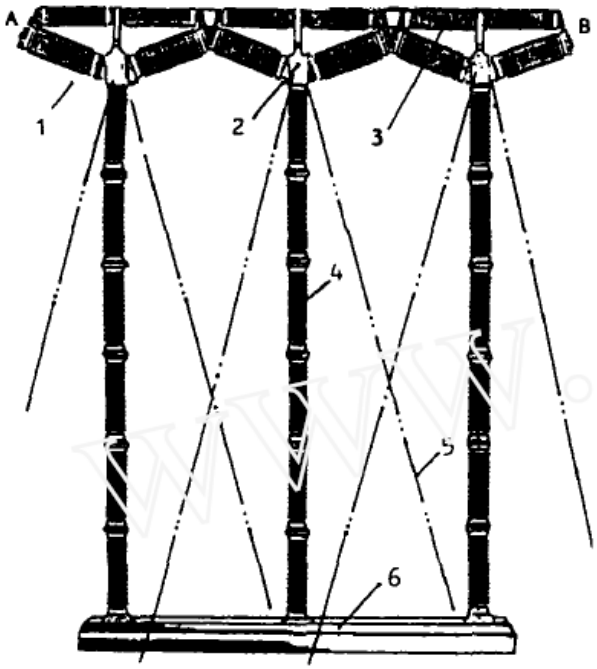


容性电流开断试验时的老练		
浪涌电流	20kA(peak)	4250Hz
开断电流	400A(rms)	50Hz
试验电压	12kV(VI)	$U_m(1-\cos\omega t)$
合分方式	C - O	

输电等级真空开断技术展望

- 1 陶瓷外壳真空灭弧室
- 2 继续提升额定电流
- 3 外绝缘SF6替代
- 4 新型操动机构
- 5 发展组合电器
- 6 直流高压断路器
- 7 超特高压真空断路器

252kV



800kV

国际学术交流

2010年 国际大电网会议“高电压真空开关”工作组会议在西安举行

2011年 联合中日韩创办第一届国际电力开断会议在西安举行

小　结

1. 输电等级真空开断技术已成为国际电力开关领域的前沿和研究热点问题，成为改变电力开关格局，占领电力开关领域制高点的一项新技术。

2. 输电等级真空开断技术需要解决极端条件下的额定电流热应力，电弧热应力，电流开断后的强电场应力等一系列关键技术问题。

谢　谢！