



欢迎来到高电压工程课  
请进入雨课堂

# 清华大学电机系

## 2024春《高电压工程》第六讲

梁曦东

2024-4-7



## 第3章 高压外绝缘及沿面放电

3.1 大气条件对空气间隙放电的影响

3.2 高压外绝缘及高压绝缘子

3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

3.4 绝缘子的雨中放电

3.5 绝缘子的污秽放电

往届同学的难点：  
从简化的理论模型  
到复杂的工程实际

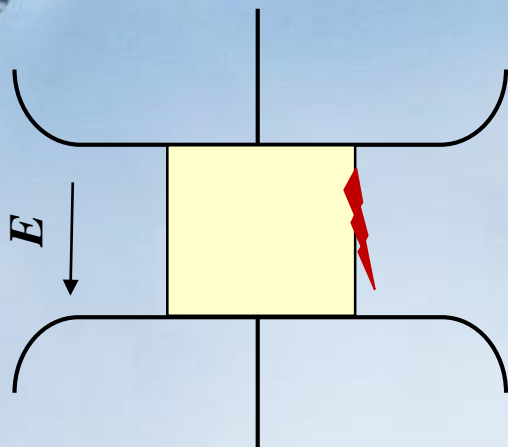
掌握科学原理  
了解技术措施  
理解工程规范  
规范之外会如何？

### 本章核心概念：

大气条件修正、高压绝缘子、外绝缘、沿面放电、滑闪放电、污秽放电、憎水性迁移、硅橡胶有机外绝缘

### 3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

#### (1) 均匀电场中的沿面放电



沿面闪络电压低、无法计算！  
只能自己试验或查找他人试验结果  
这样的绝缘结构尽量避免或优化

- 1—空气间隙击穿
- 2—雷电冲击沿面闪络
- 3—工频电压沿面闪络

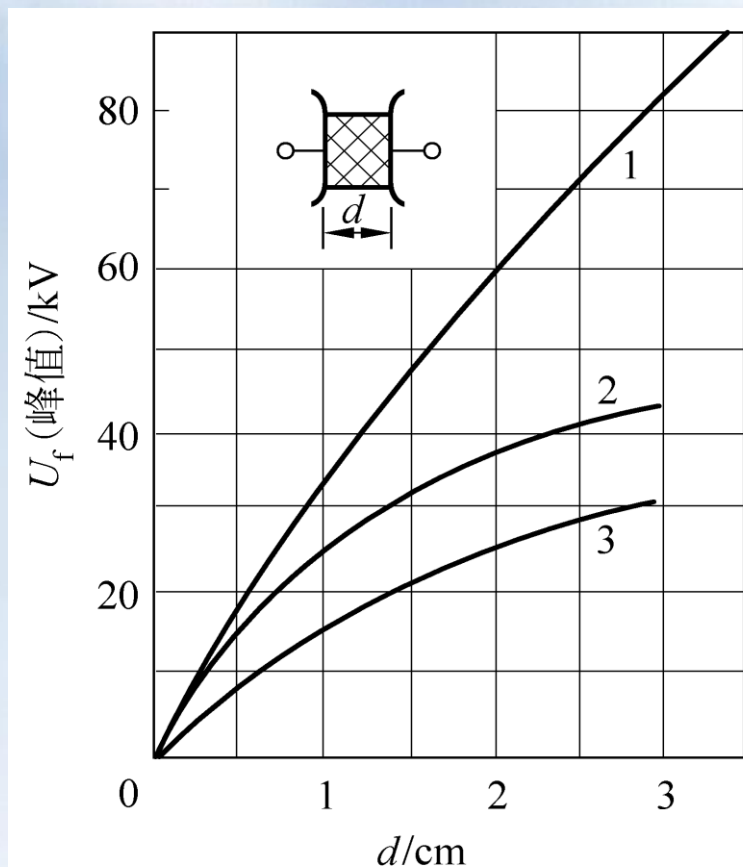
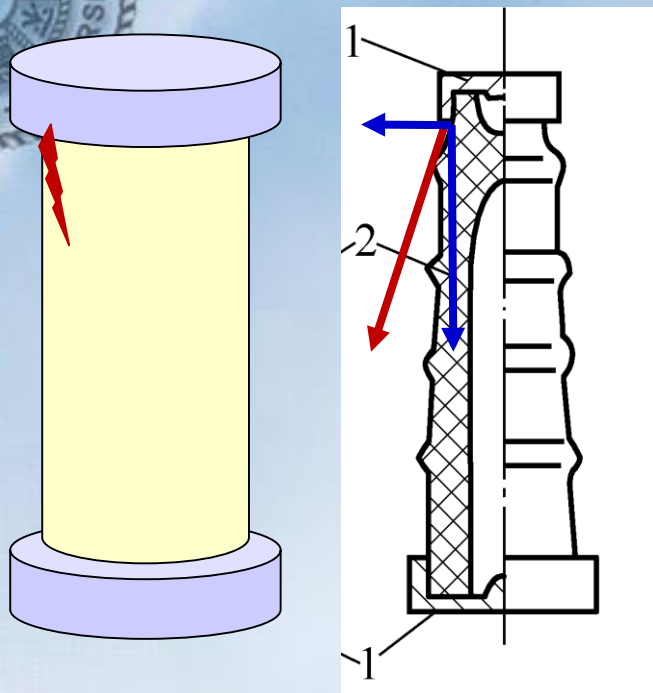


图3-6 均匀电场，沿玻璃表面空气中的闪络电压与闪络距离的关系

沿面闪络电压比纯空气间隙或纯固体间隙的击穿电压都低！

## (2) 有弱垂直分量的极不均匀电场的沿面放电



**沿面闪络电压低、无法计算！**

只能自己试验或查找他人试验结果  
这样的电极结构应优化或采用屏蔽

沿面闪络电压比纯空气间隙或纯固体间隙的**击穿**电压都低。

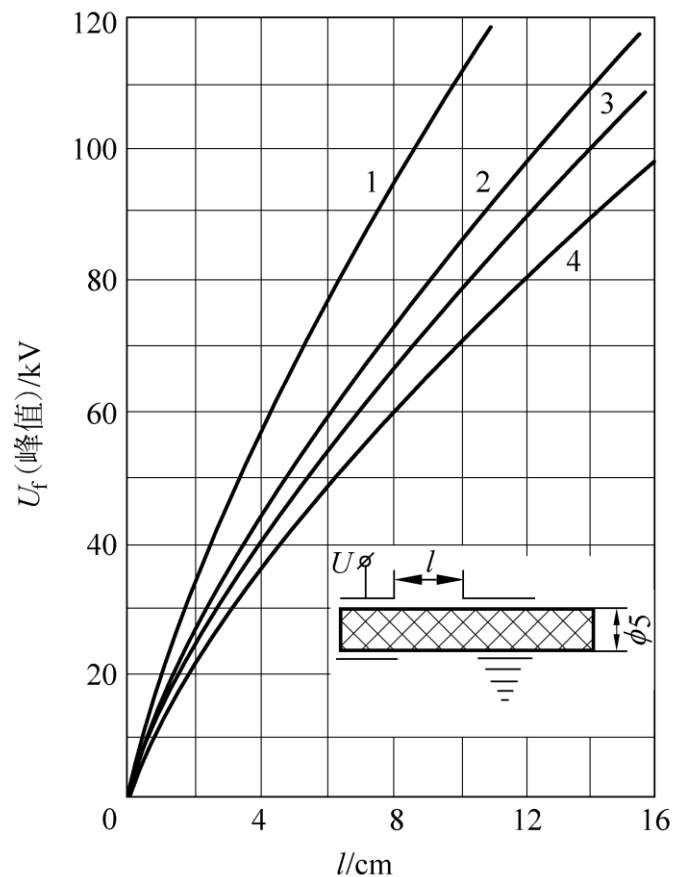


图3-7不均匀电场，沿面工频闪络电压与闪络距离的关系

1— 纯空气隙； 2— 石蜡  
3— 胶纸； 4— 瓷、玻璃

(3) 有强垂直分量的极不均匀电场的沿面放电

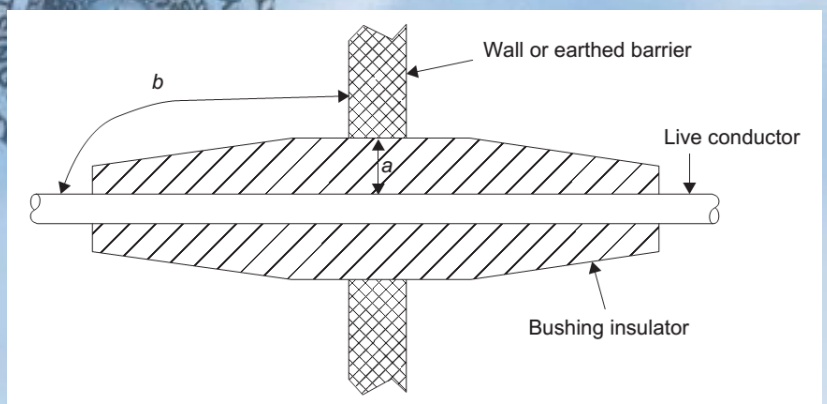


图3-9 穿墙套管电场分布示意图

$$U_0 = \frac{E_0}{\sqrt{\omega C_0 \rho_s}}$$

接地法兰外的沿面场强最高！  
介质电容电流和沿面电阻电流  
影响沿面电压分布！

理解滑闪放电现象的关键：  
法兰外径向电容电流 $i_c$ 与沿面电阻电流 $i_r$ 之比

沿套管表面电场分布示意

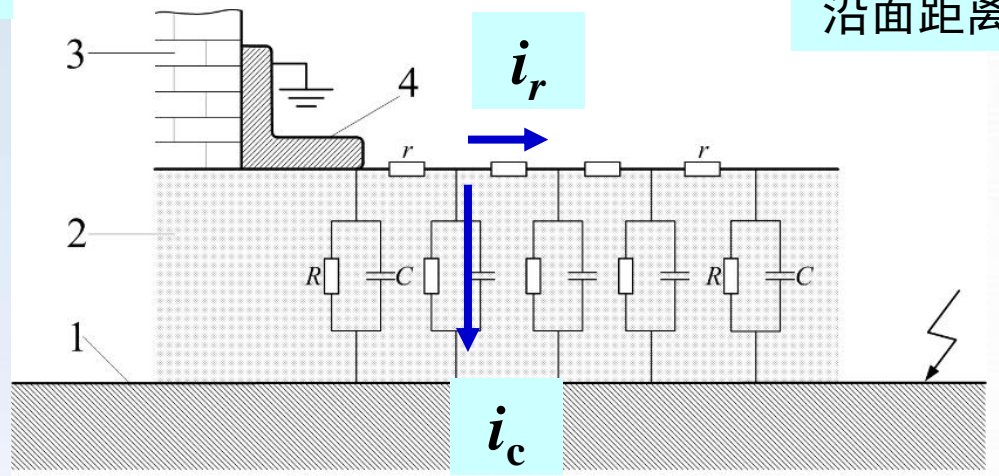
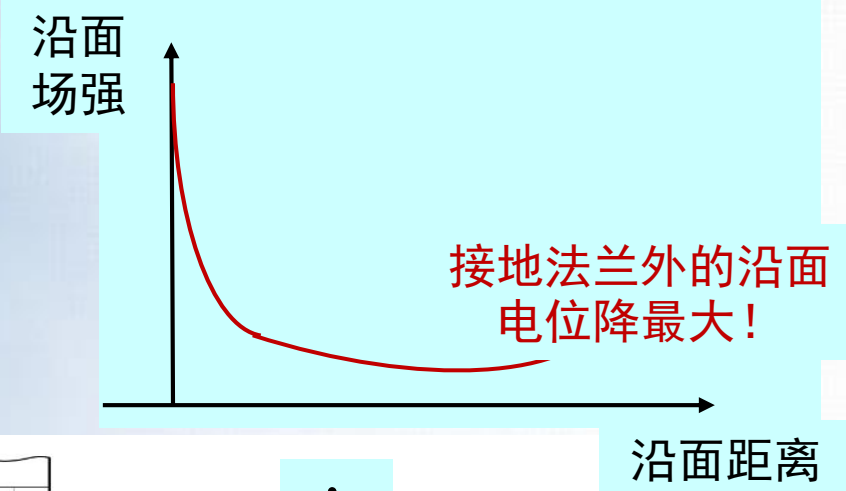


图3-10 穿墙套管等效电路

1—高压导杆；2—电介质；  
3—墙体；4—接地法兰

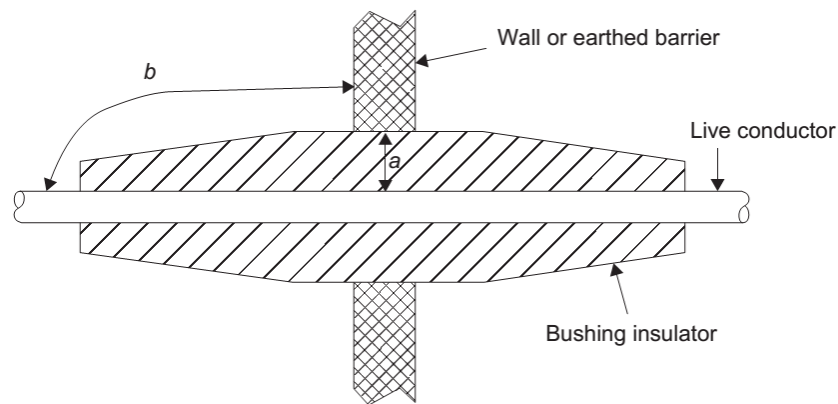


Figure 12.1 Non-condenser bushing

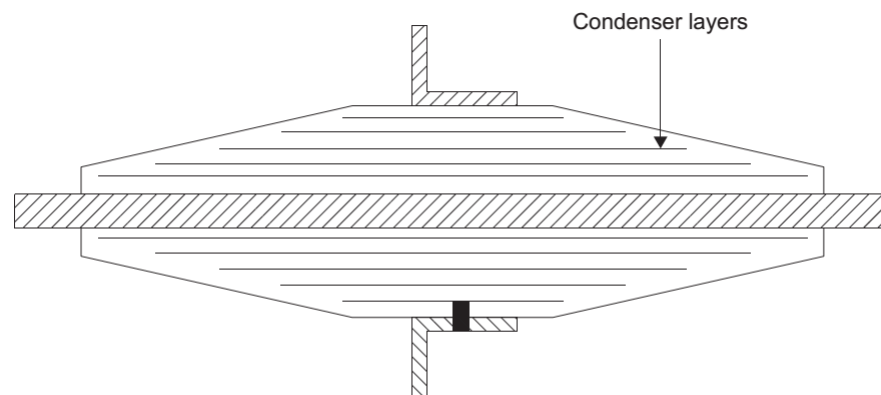
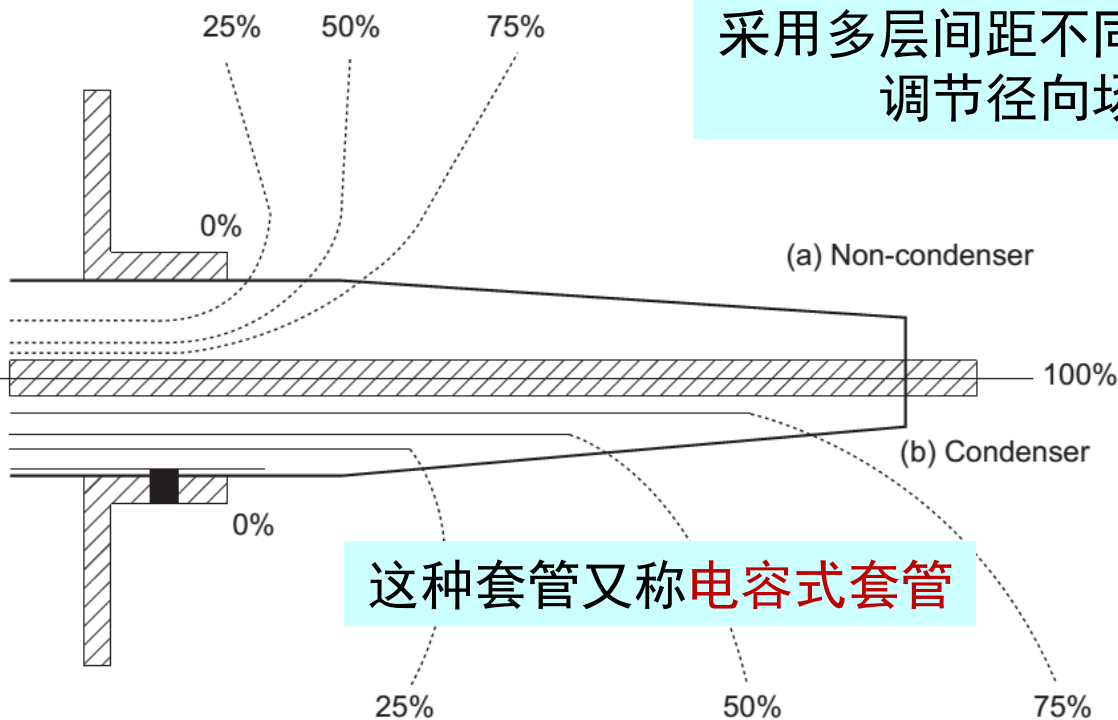


Figure 12.4 Condenser bushing



无电容屏

有电容屏

这种套管又称电容式套管

采用多层间距不同、长度不同的电容屏  
调节径向场强和沿面场强

采用电容屏、  
应力锥等方式  
后，滑闪放电  
现象可以有效  
控制或避免！

Figure 12.5 Field distribution in non-condenser and condenser bushings



### 3.4 绝缘子的雨中放电

线路悬式绝缘子在标准雨水电导率  
(20°C时100Ωm)和标准雨量(1~2mm/min)  
下,雨闪与干闪电压之比如下:

雷电冲击电压:

$$U_{\text{雨闪}} = (0.9 \sim 0.95) U_{\text{干闪}}$$

一分钟工频电压:

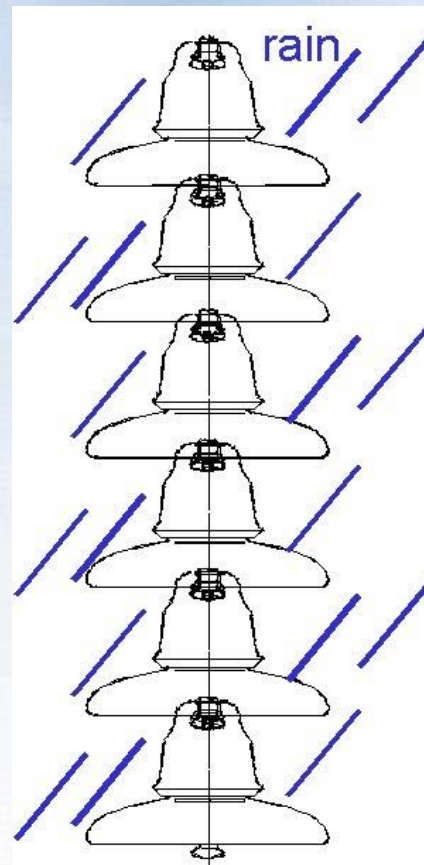
$$U_{\text{雨闪}} = (0.50 \sim 0.72) U_{\text{干闪}}$$

一分钟直流电压:

$$U_{\text{雨闪}} = (0.36 \sim 0.50) U_{\text{干闪}}$$

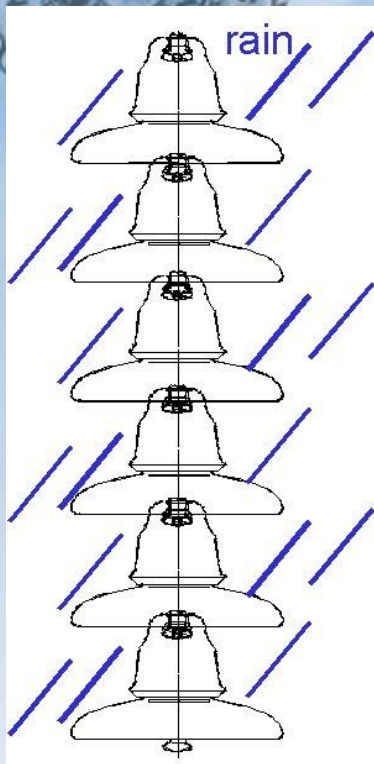
绝缘子的交、直流湿闪电压大幅度下降!

绝缘子的雨闪性能受哪些因素影响?



淋雨是户外绝缘子常见的情况  
绝缘子的湿耐受电压必须高于  
运行电压,并有足够裕度。  
绝缘子伞裙的重要作用之一!

# 绝缘子的人工淋雨（湿闪）试验方法



模拟雨水的标准电阻率：

$(100 \pm 15) \Omega \cdot \text{m}$

降雨方向： $\approx 45^\circ$

降雨量：水平1.0-2.0mm/min

垂直1.0-2.0mm/min

预淋时间：15min

湿耐受时间：1min

大气修正：仅空气密度修正

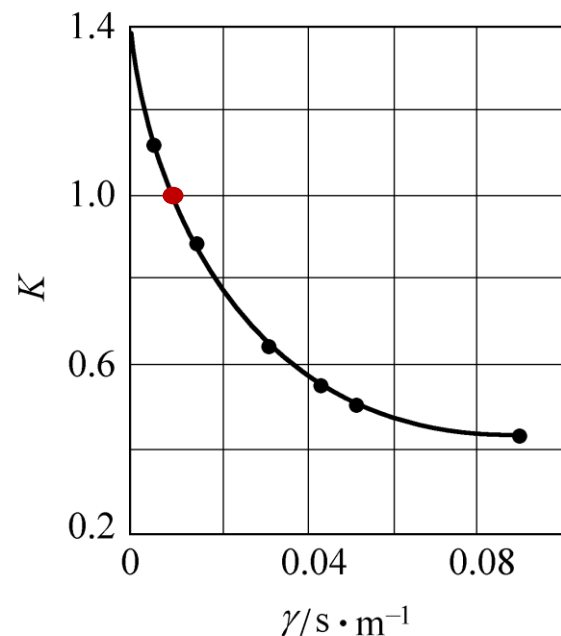


图3-19 雨水电导率  
对雨闪电压的影响

实现大范围内符合要求的均匀降雨不容易  
特高压绝缘子的湿闪试验难度大

提高湿闪电压的措施：

伞形参数、憎水性表面、大尺寸隔雨伞

取雨水电导率为 $10^{-4} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$   
时的闪络电压为1.0





## 第3章 高压外绝缘及沿面放电

3.1 大气条件对空气间隙放电的影响

3.2 高压外绝缘及高压绝缘子

3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

3.4 绝缘子的雨中放电

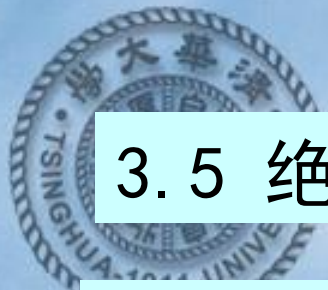
3.5 绝缘子的污秽放电

往届同学的难点：  
从简化的理论模型  
到复杂的工程实际

清洁表面的电场、非清洁  
表面的电路或场路混合对  
放电起始的影响

### 本章核心概念：

大气条件修正、高压绝缘子、外绝缘、沿面放电、滑闪放电、  
污秽放电、憎水性迁移、硅橡胶有机外绝缘



## 3.5 绝缘子的污秽放电

多问些问题，带着问题  
学习，效果更好！

3.5.1 绝缘子污秽闪络的特点

3.5.2 从积污到污闪

3.5.3 污秽试验与污闪特性

3.5.4 污秽地区绝缘子的配置

3.5.5 绝缘子的覆冰闪络

3.5.6 提高瓷绝缘子污闪电压的方法

3.5.7 硅橡胶复合绝缘子及有机外绝缘

什么是污闪？有多严重？

影响因素？污闪电压为什么低？

如何实验室再现，定量模拟？

污秽地区如何选用绝缘子？

冰闪过程、特性、方法？

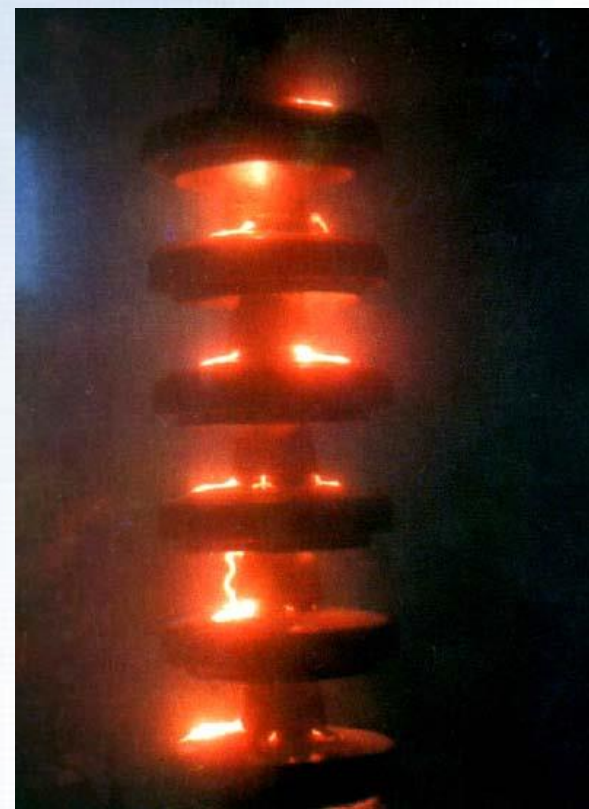
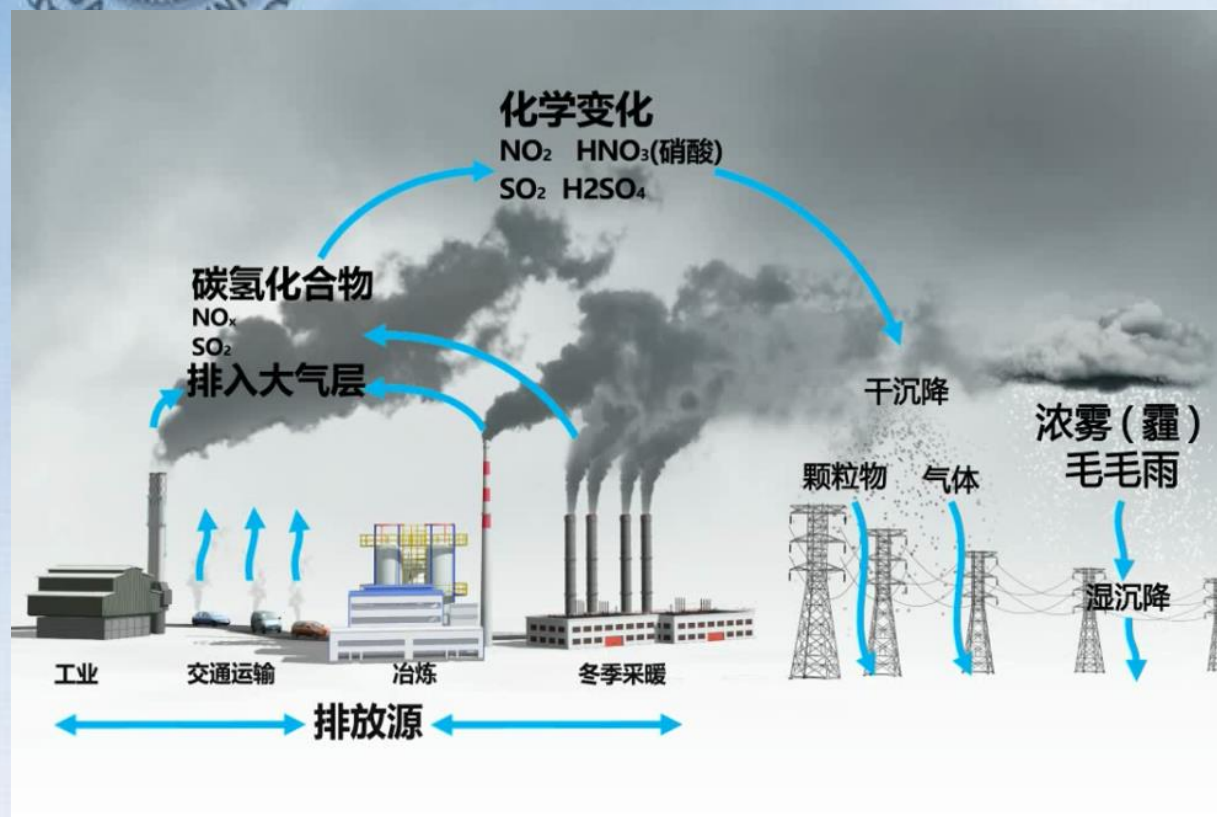
如何提高绝缘子污闪电压？

有机外绝缘如何防污闪？

清洁表面的沿面放电可以通过电场控制等措施从设计阶段就解决，  
但是绝缘子的污秽放电问题却严重得多！

### 3.5.1 绝缘子污秽闪络的特点

什么是污闪？有多严重？



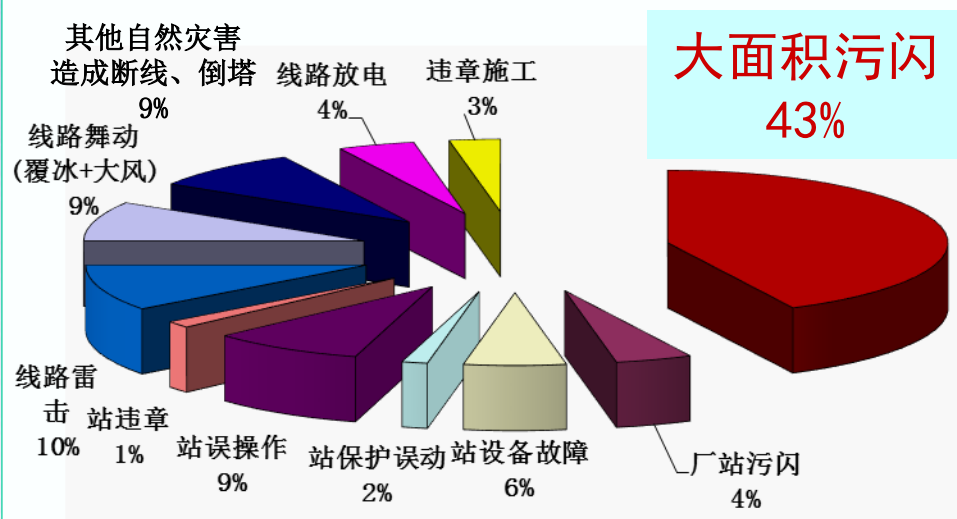
大气中的污染物在绝缘子表面积聚，在潮湿条件下引发沿面闪络

先看看绝缘子污闪的教学录像，认识污闪现象，与雨闪、滑闪比较一下

### 3.5.1 绝缘子污秽闪络的特点

什么是污闪？有多严重？

1981-2001年我国电网的严重停电事故68起  
大面积污闪引发的29起，占总数的43%



三十年大面积污闪不断：

1974：辽宁；

1976-1981：华东

1987：陕西

1988-1989：江苏、上海、浙江；

1990：河南、河北、京津唐、山西、  
山东、辽宁；

1991：青海、上海、浙江；

1992：四川、广东、江苏；

1994：山西；

1996：湖北、湖南、江西、安徽、浙江  
江苏、上海、福建、河北；

1997：陕西、新疆；

1998：河南、山东；

1999：京津唐；

2000：陕西；

2001：河南、河北、山东、京津、辽宁；

2004：浙江、上海；

2005：广东、福建；

2006：河北、河南、山东

绝缘子设计改进之后，雨闪很少，滑闪都避免了，污闪为什么如此严重？

## 什么是污闪？有多严重？

大面积污闪多集中于**经济发达、人口稠密**地区

每5至6年发生一次污闪跳闸高峰期，出现横跨多省的特大面积污闪

### 京津冀晋豫鲁辽 (1990年初)

- 172条110kV~500kV线路跳闸，500kV线路全部跳闸，81条线路27座变电站停电，事故点354处
- 覆盖面积约32万km<sup>2</sup>

### 苏浙沪湘鄂赣皖 (1996年末)

- 60条220kV~500kV线路跳闸/停运，3座220kV变电站(厂)停电，系统跳闸367次。
- 覆盖面积约14万km<sup>2</sup>
- 96-97华北、西北、鲁

### 京津冀辽豫鲁 (2001年初)

- 238条66kV~500kV线路跳闸和34座变电站停电，事故点433处
- 覆盖面积约30万km<sup>2</sup>

### 粤闽珠三角 (2005年初)

- 12条500kV线路污闪
- 广东500kV南部环网解列

### 发展中国家的大范围污闪停电事故

- ✓ 1989年，南非东部两天内污闪177处
- ✓ 2006至2010年印度电网发生4次大面积污闪，其中2008年新德里及周边连续3天大范围停电

### 发达国家的大范围污闪停电事故

- ✓ 50年代前期英格兰东南部和斯堪的纳维亚
- ✓ 60年代前苏联顿巴斯
- ✓ 1965-1968北美五大湖、加州南部工业区
- ✓ 70年代日本沿海工业区
- ✓ 1991年美国佛罗里达半岛



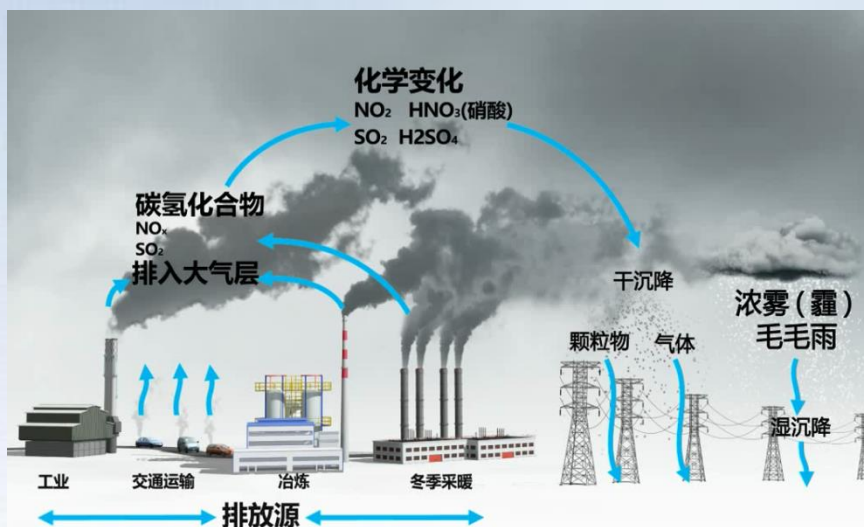
绝缘污闪，或因电压升高、或因绝缘下降

## 电网污闪的特点：

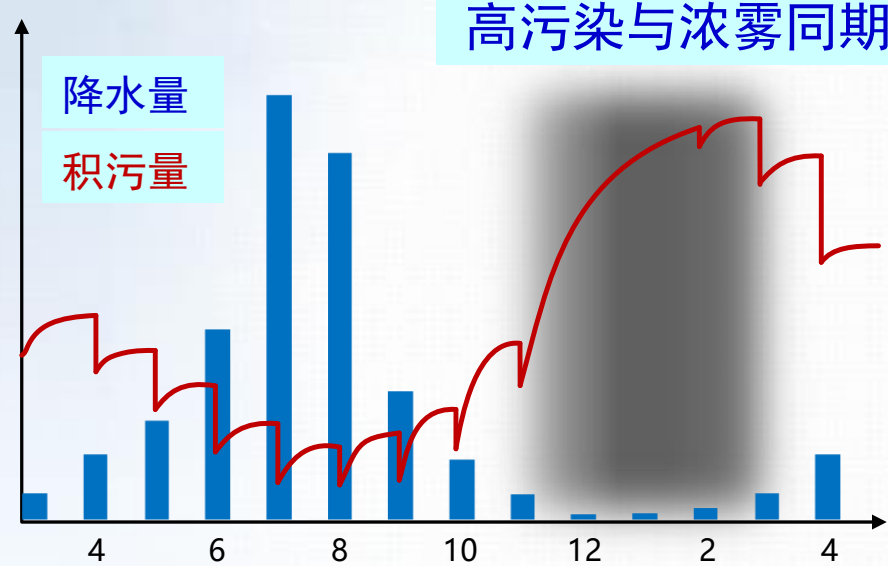
大范围内所有绝缘子串都面临同样的积污和受潮条件，绝缘持续下降；  
污闪发生在运行电压下，不是雷击转瞬即逝，污闪可能发生的时间长；  
污闪跳闸后，潮湿污层的闪络条件仍在，重合闸成功率低。

大面积污闪：事故点多、范围广、恢复送电时间长

我国电网多次大面积污闪的客观原因：大气污染严重、污湿高度重合



大气污染导致线路与电站绝缘子积污



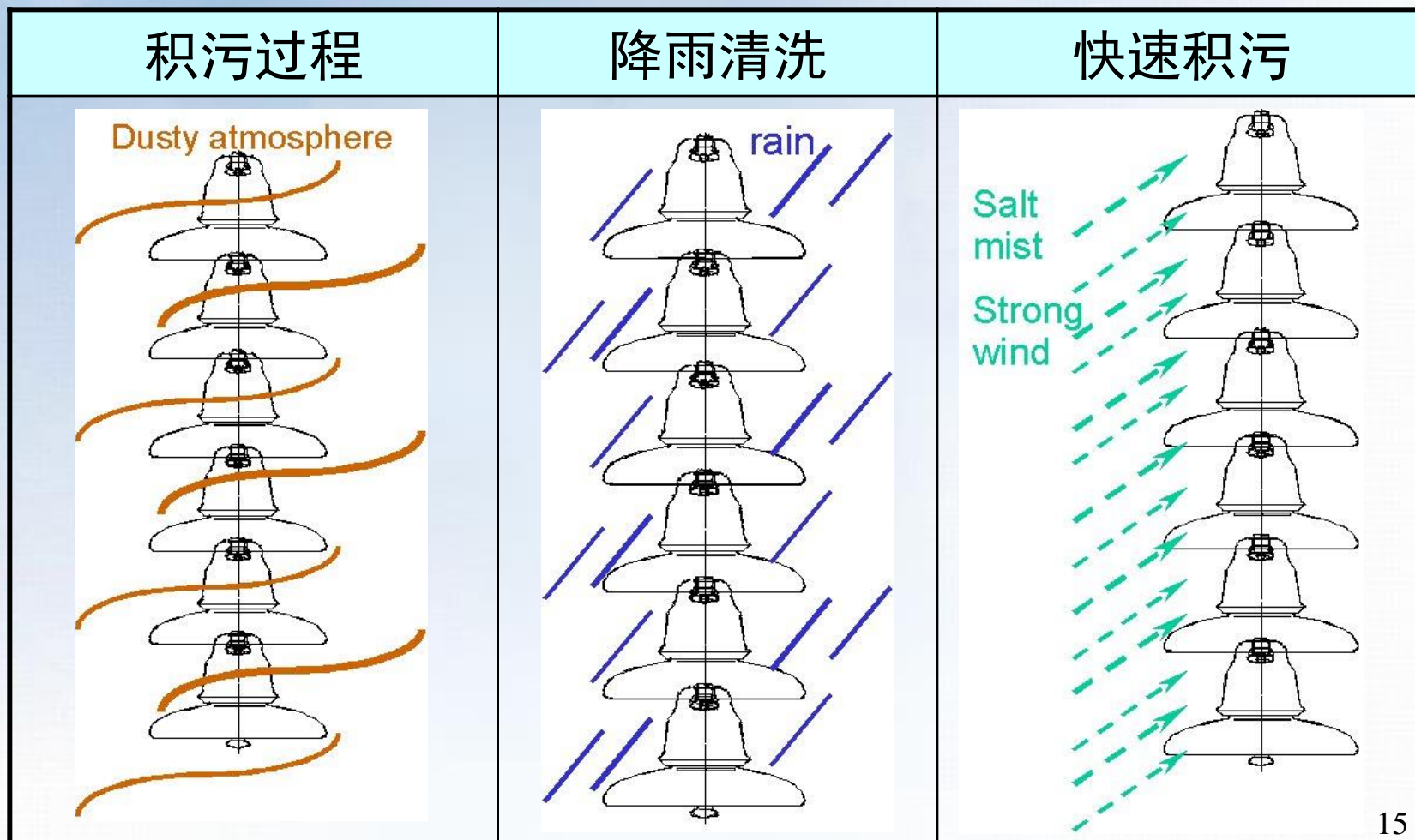
积污变化与降水量、浓雾期



### 3.5.2 从积污到污闪

影响因素？污闪电压为什么低？

绝缘子在多年的户外运行中，积污是难免的  
清洗作用主要来自降雨；伞形对积污和清洗影响很大

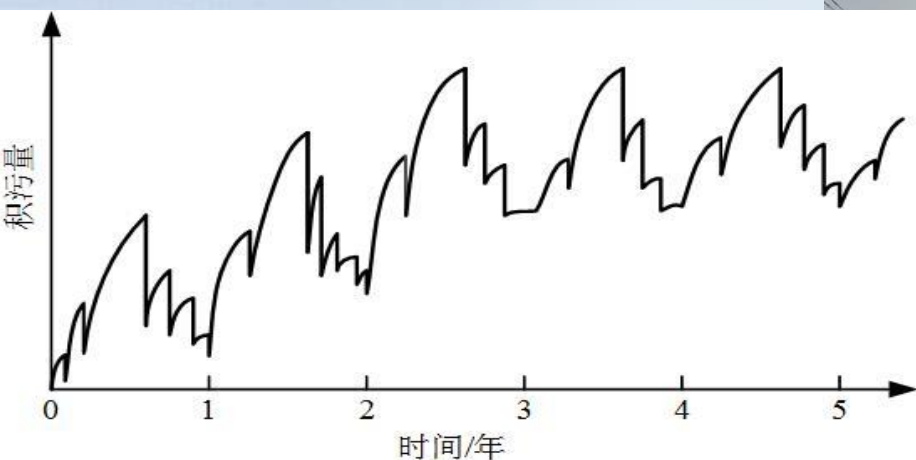


### 3.5.2 从积污到污闪

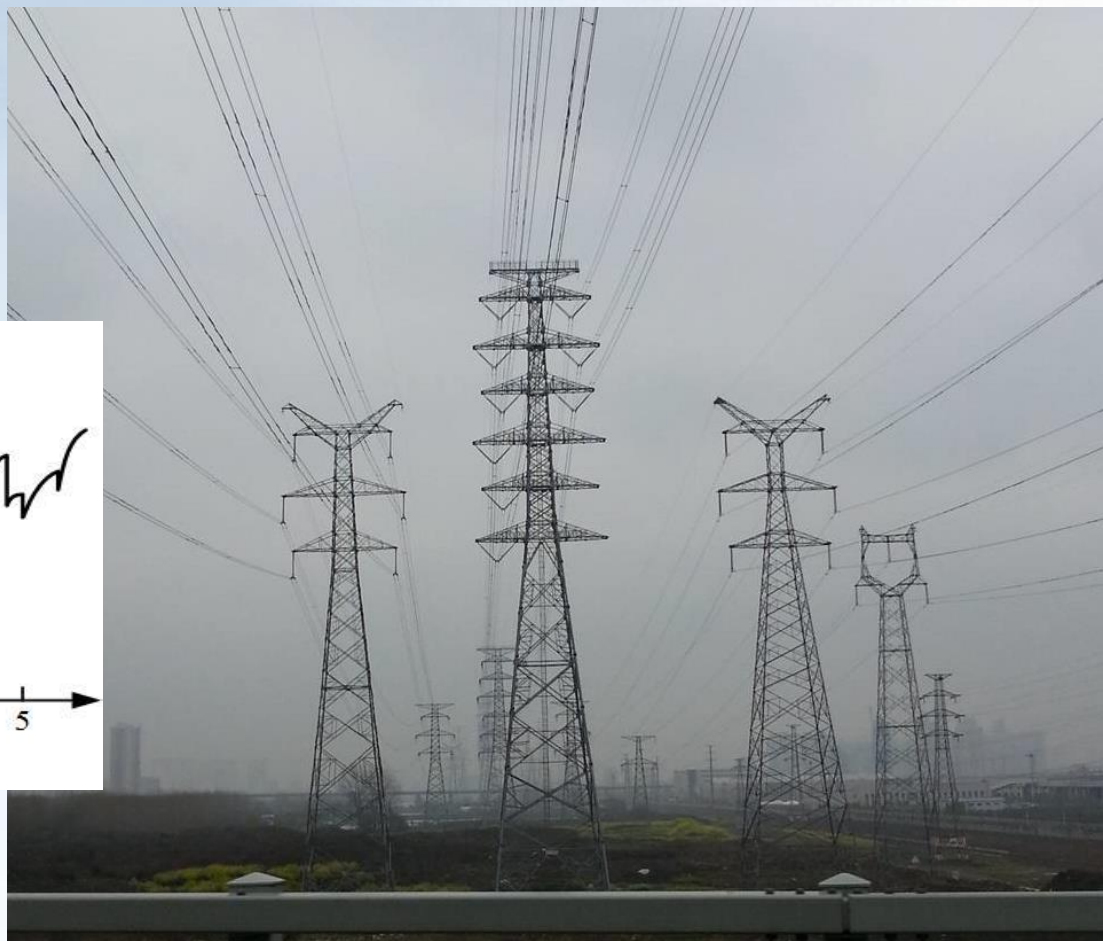
影响因素？污闪电压为什么低？

绝缘子在多年的户外运行中，积污是难免的  
清洗作用主要来自降雨；伞形对积污和清洗影响很大

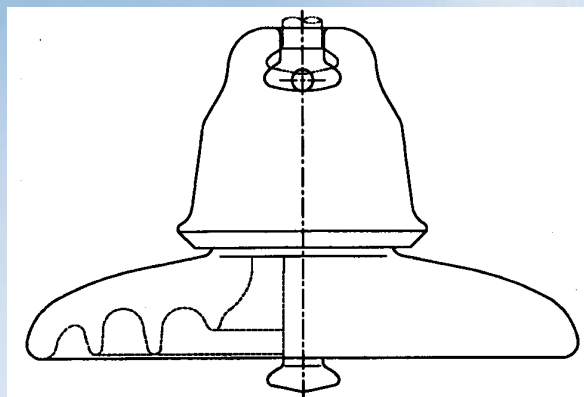
污源类型、降水条件、绝缘子  
伞形共同影响积污



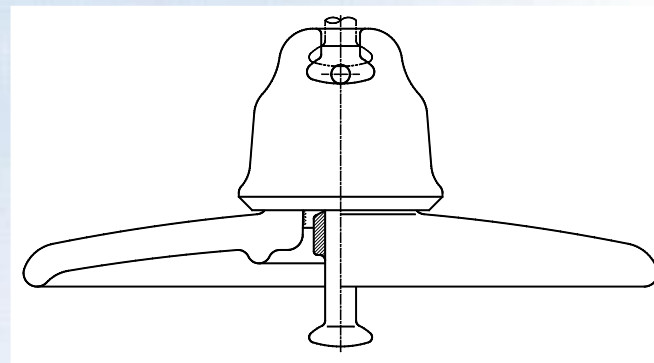
绝缘子表面积污年际变化示意图



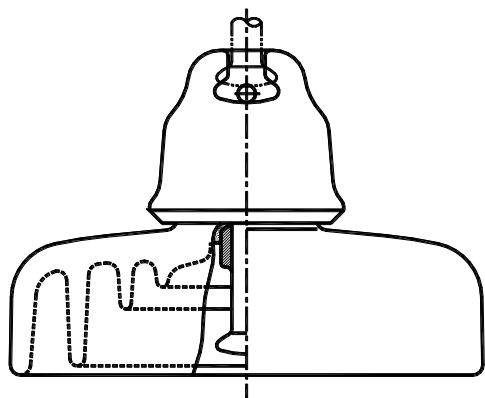
选择不同的伞形以减少积污、或减少下表面受潮  
伞形要合理，还要兼顾增加沿面爬电距离



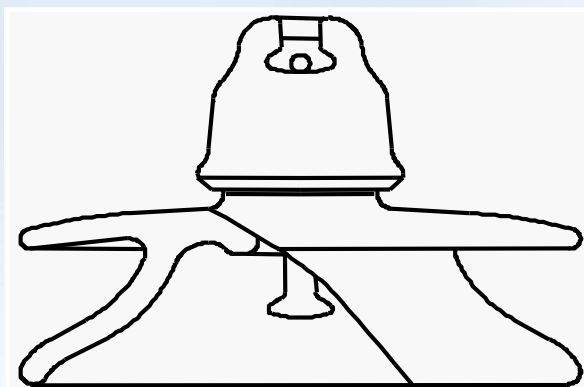
标准型



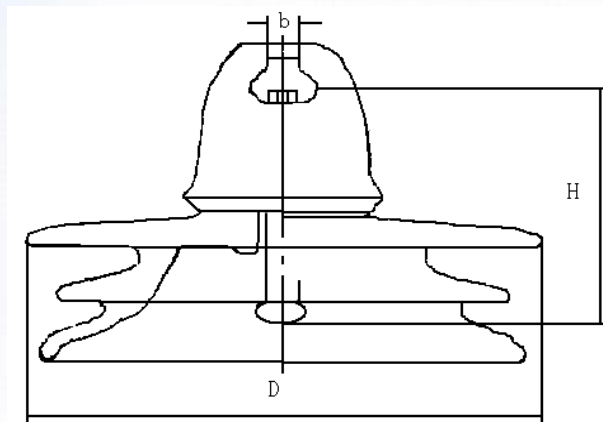
空气动力型



深棱型、防雾型

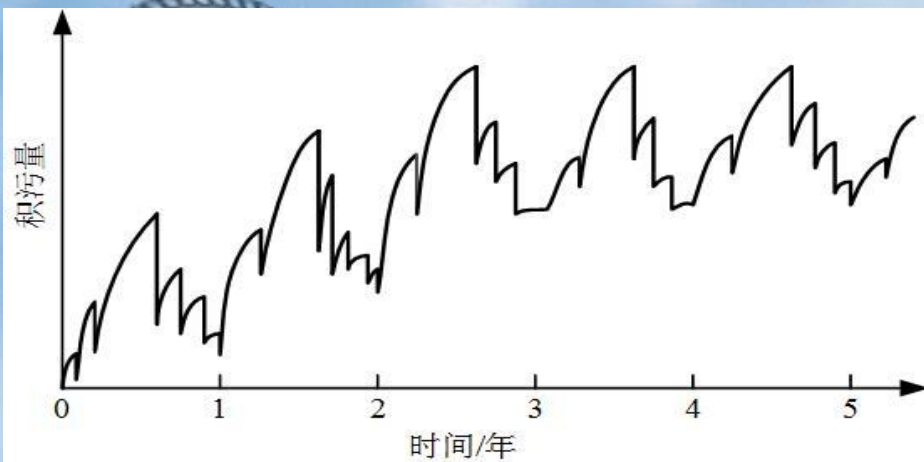


双伞型



三伞型





绝缘子表面积污年际变化示意图



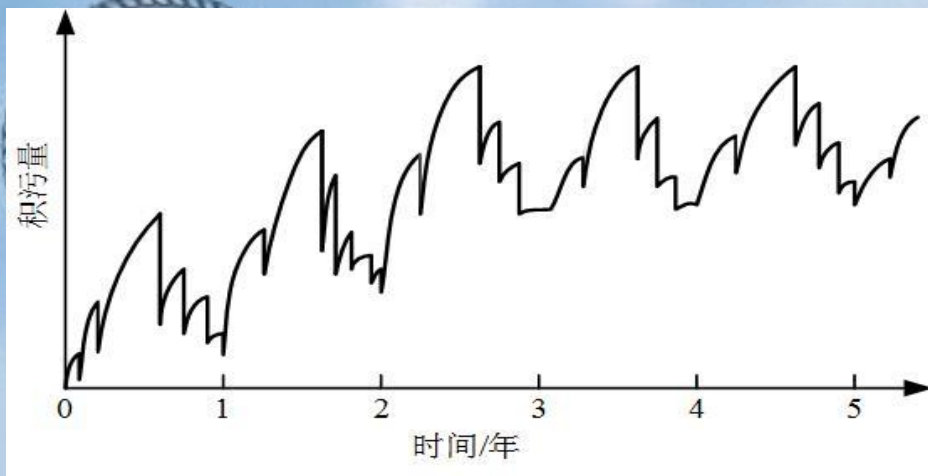
绝缘子污秽度的定量评价:

等值附盐密度ESDD ( $\text{mg NaCl}/\text{cm}^2$ )

附灰密度NSDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )





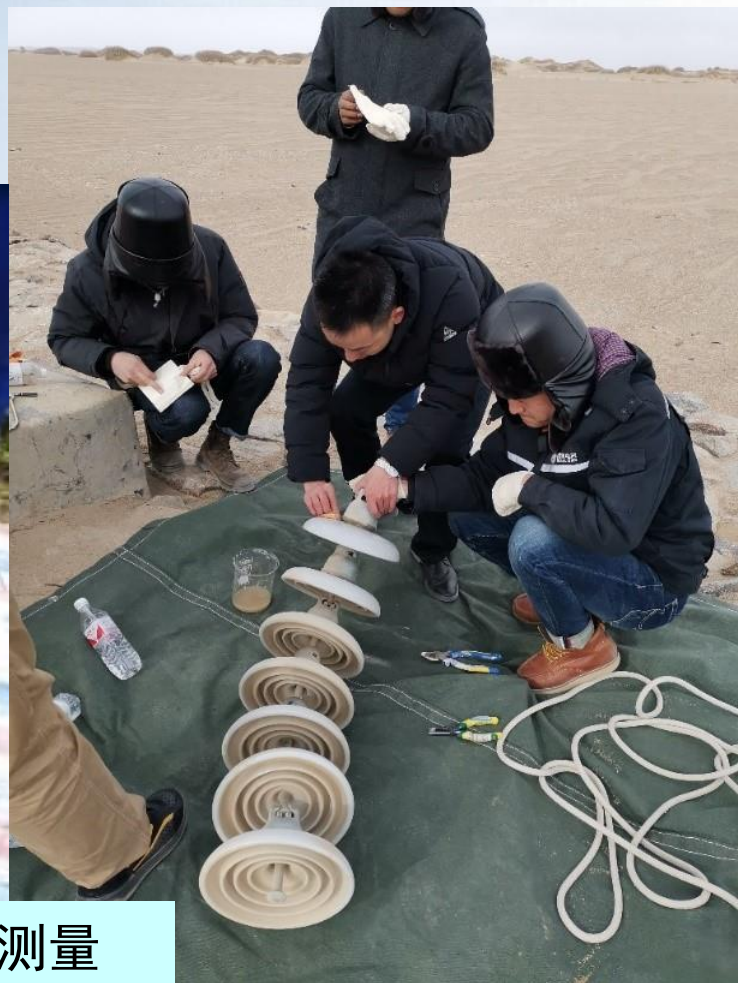


绝缘子表面积污年际变化示意图

绝缘子污秽度的定量评价：  
等值附盐密度ESDD ( $\text{mg NaCl}/\text{cm}^2$ )  
附灰密度NSDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )



绝缘子污秽度现场测量



### 3.5.2 从积污到污闪

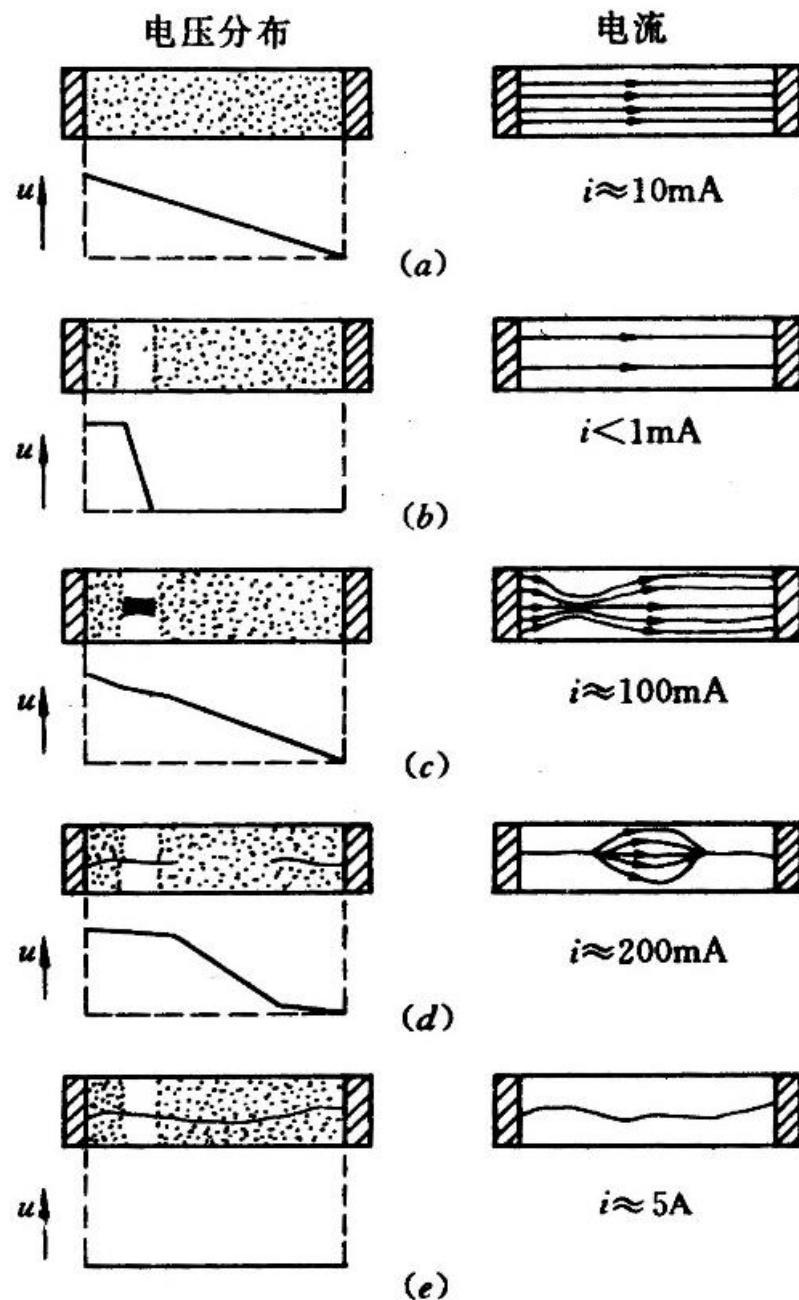
影响因素？污闪电压为什么低？

从清洁绝缘子到污闪的过程  
积污、受潮、局部电弧、闪络

染污绝缘表面放电发展示意图

- (a) 污层受潮初期，电压均匀分布，有泄漏电流
- (b) 干区产生，电压主要加到干区上，电流下降
- (c) 产生干带电弧，电流大大增加
- (d) 电弧发展，电压加在剩余污层，电流增长
- (e) 电弧贯通电极，完成沿面污闪

产生干区和干带电弧所需的电压并不高  
维持电弧沿面爬电的电压也不高  
污闪电压很低很低







影响因素？

污闪电压为什么低？

产生干区和干带电弧所  
需的电压并不高  
维持电弧沿面爬电的  
电压也不高  
污闪电压很低很低

有没有联想到长间隙  
击穿的先导放电？

高速摄影

拍摄的

亲水性表面

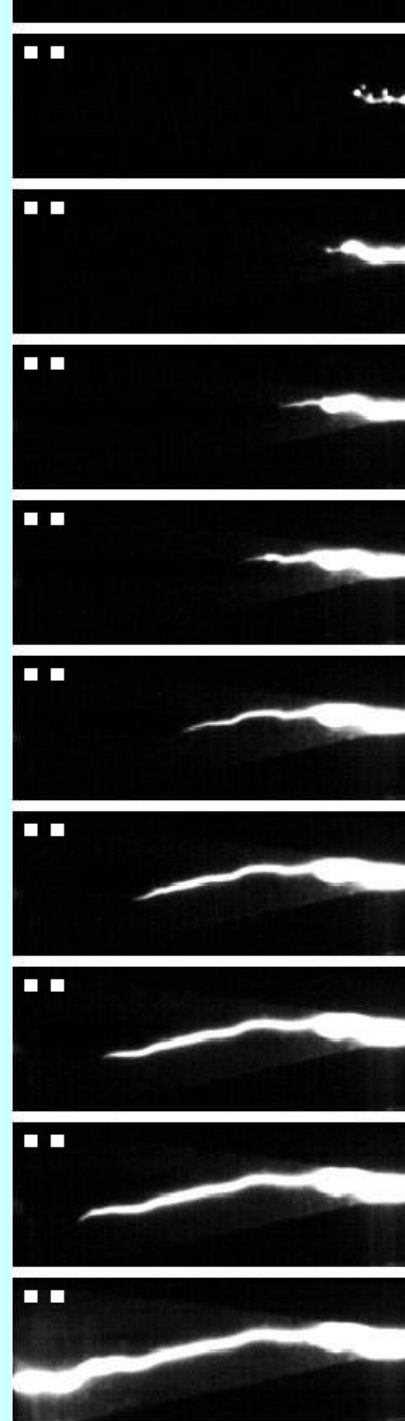
染污放电

爬电过程

2000 pfs拍摄

间隔0.5ms

每幅曝光25us



### 3.5.3 污秽试验与污闪特性

如何实验室再现，定量模拟？

#### 绝缘子污秽闪络的实验室模拟：人工污秽试验



中国电科院  
人工污秽实验室

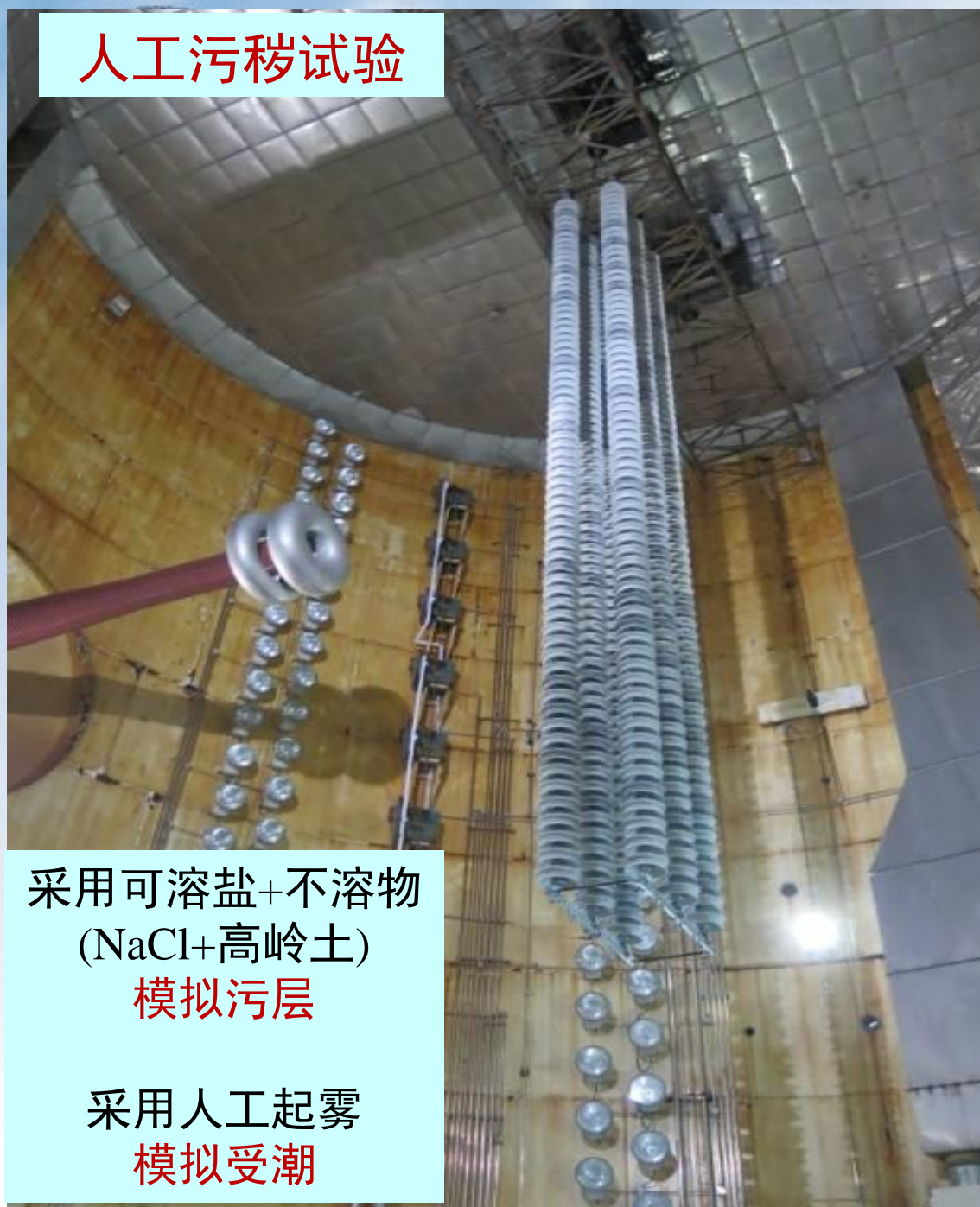
内径20m，高25m  
800kV/6A工频电源

可模拟污湿环境

可模拟平原至  
5000米以上高海拔

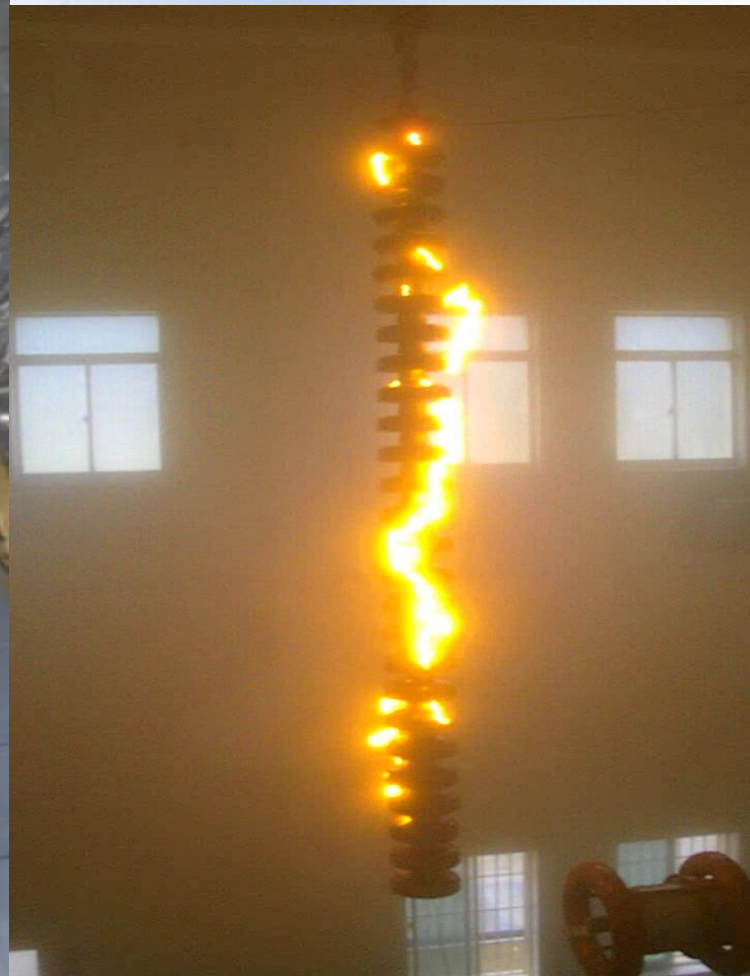
可模拟覆冰(-19°C)

# 人工污秽试验



采用可溶盐+不溶物  
(NaCl+高岭土)  
模拟污层

采用人工起雾  
模拟受潮



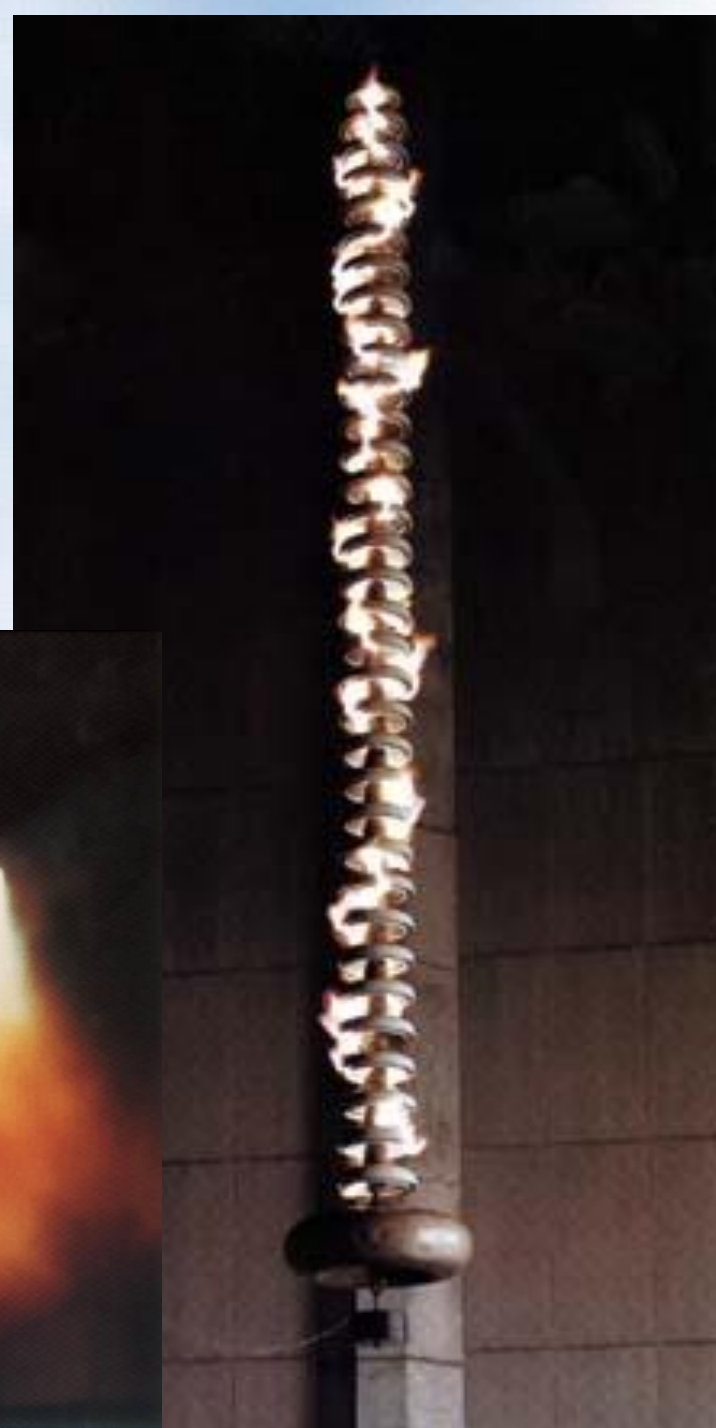
人工污秽试验的标准  
IEC 60507-2013  
GB/T 4585-2004



## 人工污秽试验

采用可溶盐+不溶物  
(NaCl+高岭土)  
模拟污层

采用人工起雾  
模拟受潮





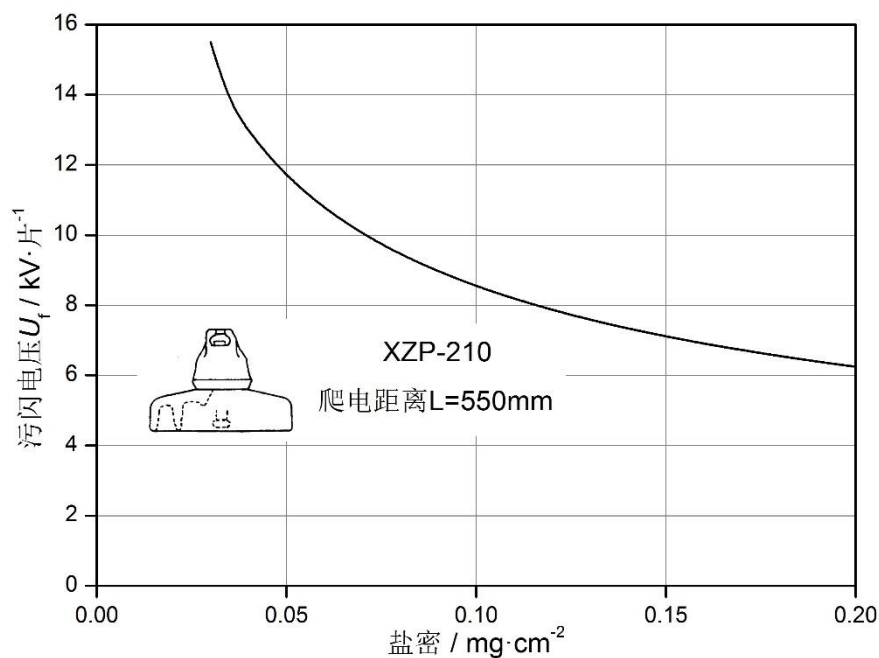
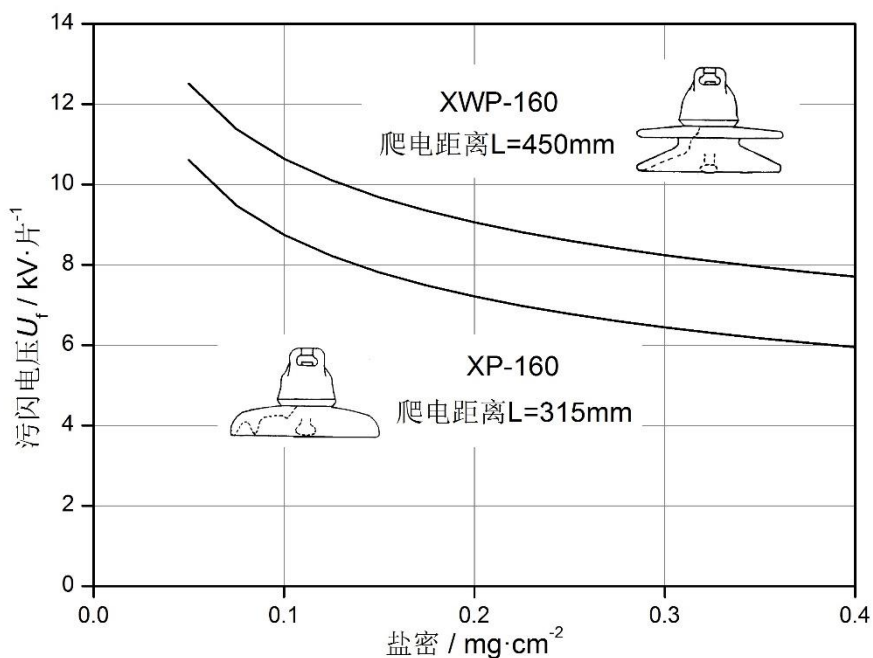
人工污秽试验



### 3.5.3 污秽试验与污闪特性

实验室再现，定量模拟

#### 人工污秽试验获得的绝缘子污闪特性曲线



(a)交流电压下的污闪电压(有效值)

(b)直流负极性电压下的污闪电压

盘形悬式瓷绝缘子的人工污秽污闪电压与试验盐密的关系

污闪电压/污耐受电压与污秽度呈负幂指数关系





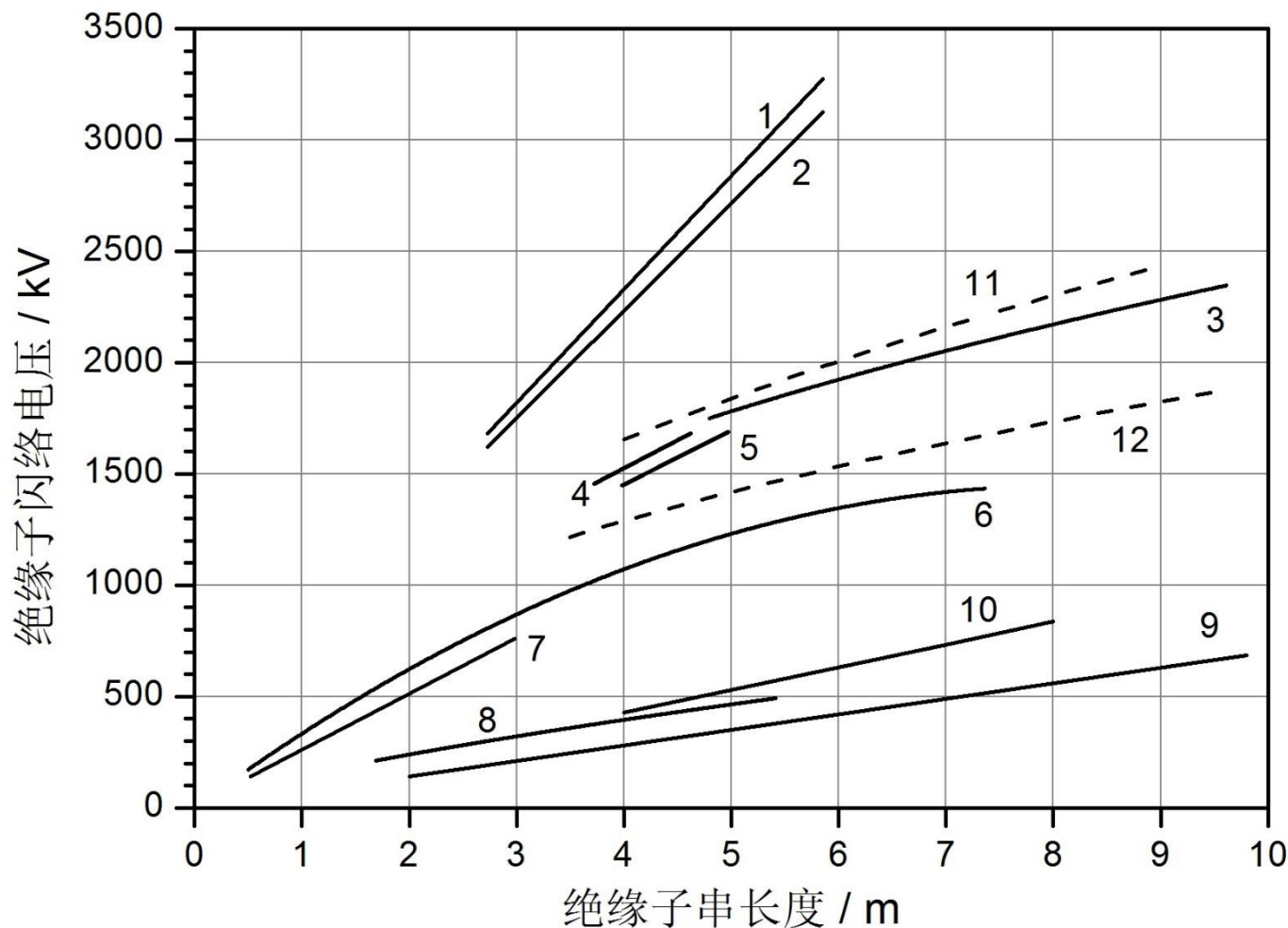
绝缘子的污秽闪络发生在运行电压下，不是电压升高导致的，属于典型的绝缘下降问题。

为什么在很低的运行电压下，绝缘子就发生闪络？  
为什么沿面污闪梯度远低于空气间隙的击穿场强？

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 均匀电场空气间隙击穿场强：      | 30 kV/cm             |
| 正棒板空气间隙(工频)：       | 5 kV/cm              |
| 正棒板10m以上长空气间隙操作冲击： | 200 kV/m<br>(2kV/cm) |
| 交流瓷/玻璃绝缘子沿面污闪梯度：   | 0.3 kV/cm            |
| 直流瓷/玻璃绝缘子沿面污闪梯度：   | 0.2 kV/cm            |
| (以上数值均为峰值)         |                      |



## 不同条件下绝缘子串长与闪络电压的关系



- 1、2—悬式负、正雷干闪；3—支柱正操作干闪；4、5—XP-16正操作干闪、湿闪；  
6、7—XP-10工频干闪、湿闪有效值；8—悬式直流人工污秽冰闪 ( $0.02/1.0\text{mg}/\text{cm}^2$ ,  $50\mu\text{S}/\text{cm}$ , 冰厚 $>2.5\text{cm}$ ；9—XP-300交流人工污闪有效值( $0.05/1.0\text{mg}/\text{cm}^2$ )；  
10—棒形悬式复合绝缘子负极性直流人工污闪( $0.05/(0.3-0.4)\text{mg}/\text{cm}^2$ , HC6级)；  
11、12—棒-棒、棒-板空气间隙正操作击穿电压

## 自然污秽试验

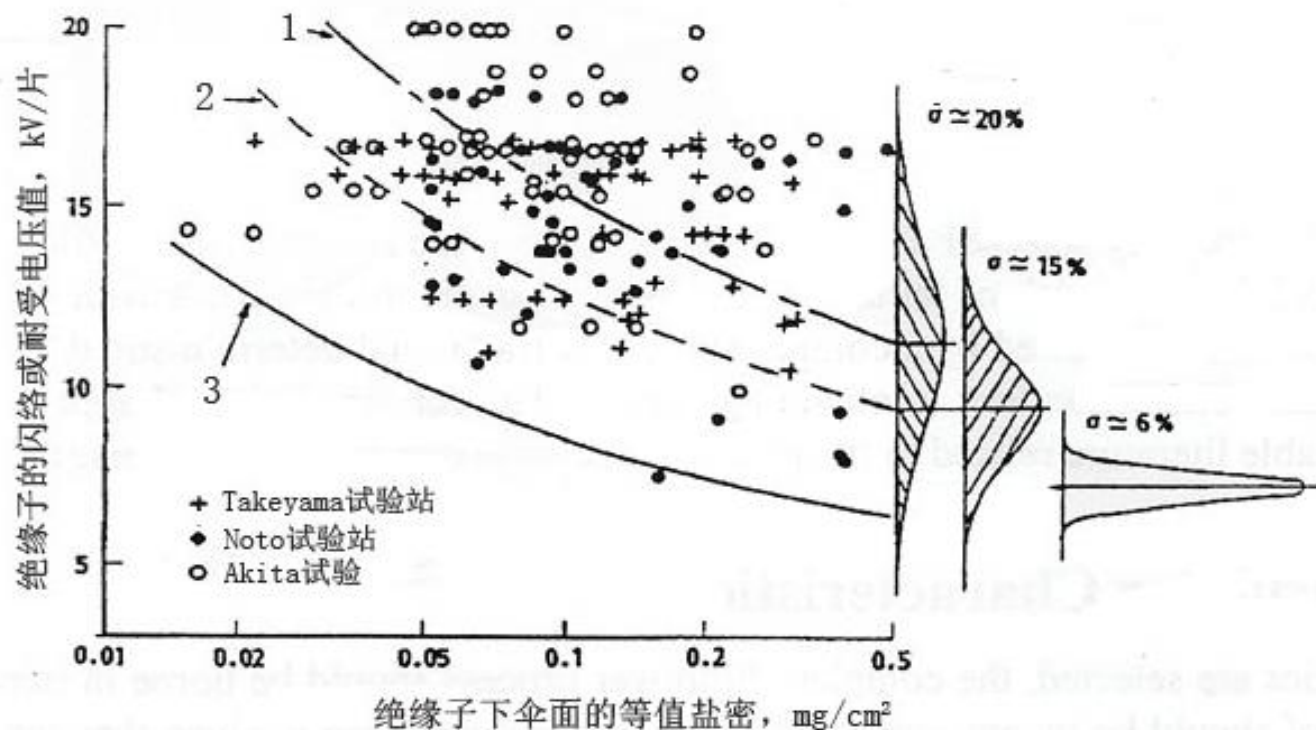


图3-23交流电压下自然污秽试验与人工污秽试验结果的比较

试品为盘径250mm的标准悬式瓷绝缘子

三处自然污秽试验站分别为日本的Takeyama、Noto和Akita试验站

1—自然积污下的污闪电压 $U_{50}$ ，分散性 $\sigma \approx 20\%$

2—自然积污绝缘子在人工雾受潮下的污闪电压 $U_{50}$ ，分散性 $\sigma \approx 15\%$

3—人工污秽试验的耐受电压，灰密采用Tonoko，为 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ ，分散性 $\sigma \approx 6\%$

### 3.5.4 污秽地区绝缘子的配置

按照污秽等级，选定爬电距离

- 按照**现场污秽度** (ESDD、NSDD) 将运行环境划分为 a, b, c, d, e 五级
- 对不同污区配置相应的绝缘子沿面距离

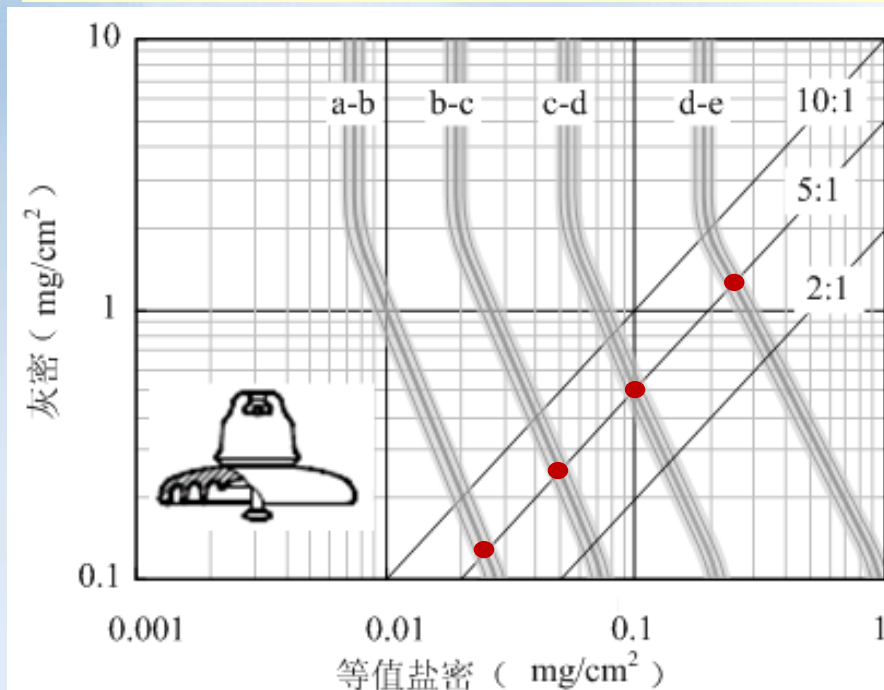
我国绝缘子积污的灰盐比  
基本在 2:1-10:1

表3-5 各级污区瓷和玻璃绝缘子所需的统一爬比距

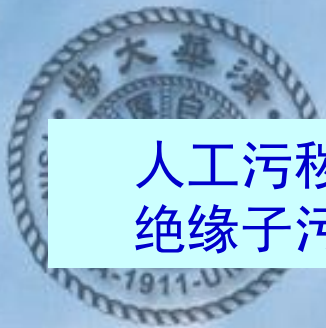
| 污区等级                       | a 很轻 | b 轻  | c 中等 | d 重  | e 很重 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 所需的 <b>统一爬电比距</b><br>mm/kV | 22.0 | 27.8 | 34.7 | 43.3 | 53.7 |

统一爬电比距 = 绝缘子串爬电距离 / 最高运行相电压

输变电工程中如何选配绝缘子  
以应对污秽闪络问题？



普通盘形绝缘子现场污秽度与等值盐密/灰密的关系

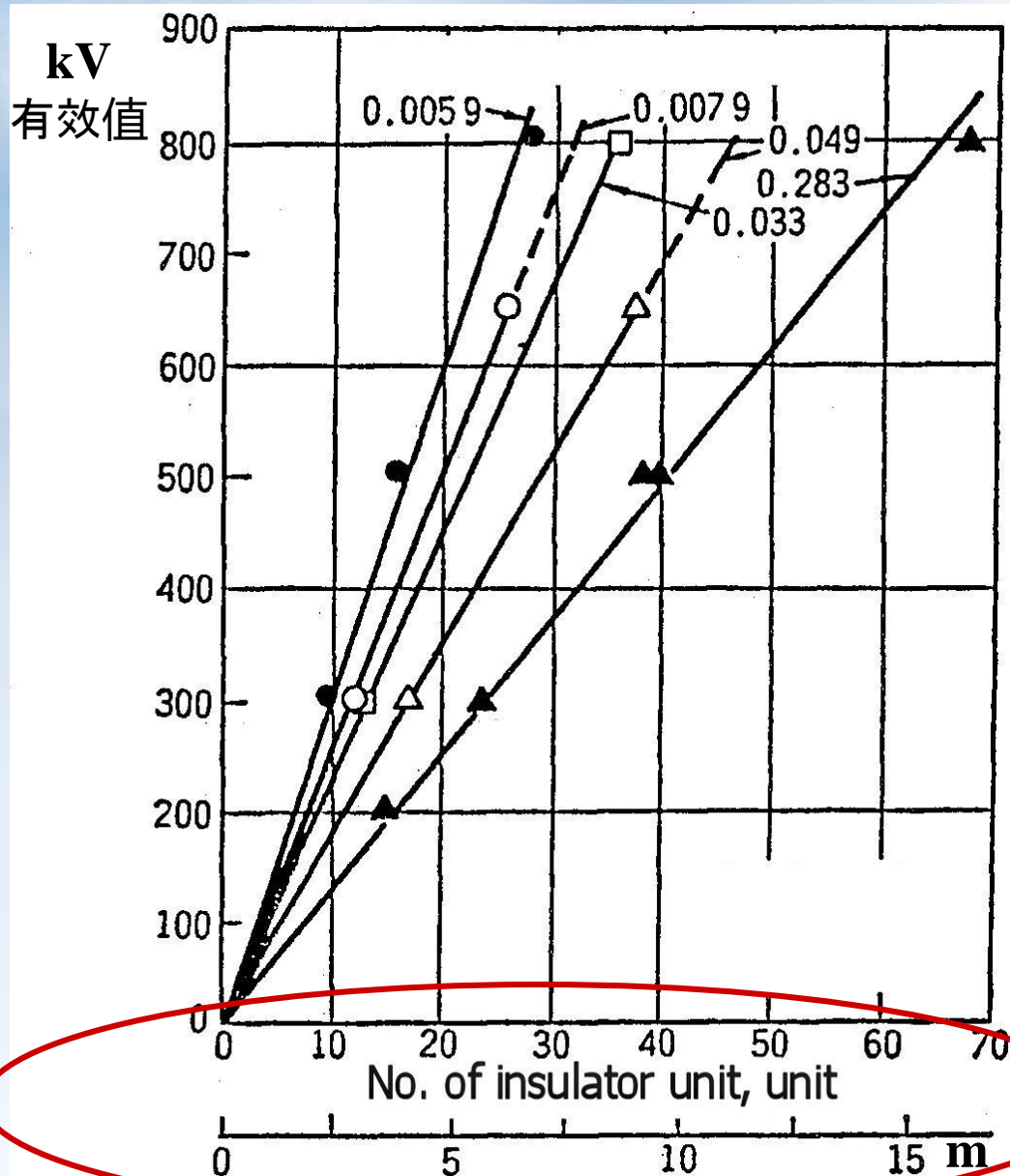


## 人工污秽试验获得的 绝缘子污闪特性曲线

盘形悬式瓷绝缘子的人工污秽  
耐受电压与绝缘子串长的关系

污闪电压/污耐受电压与  
沿面距离/串长/绝缘子片数  
呈线性关系

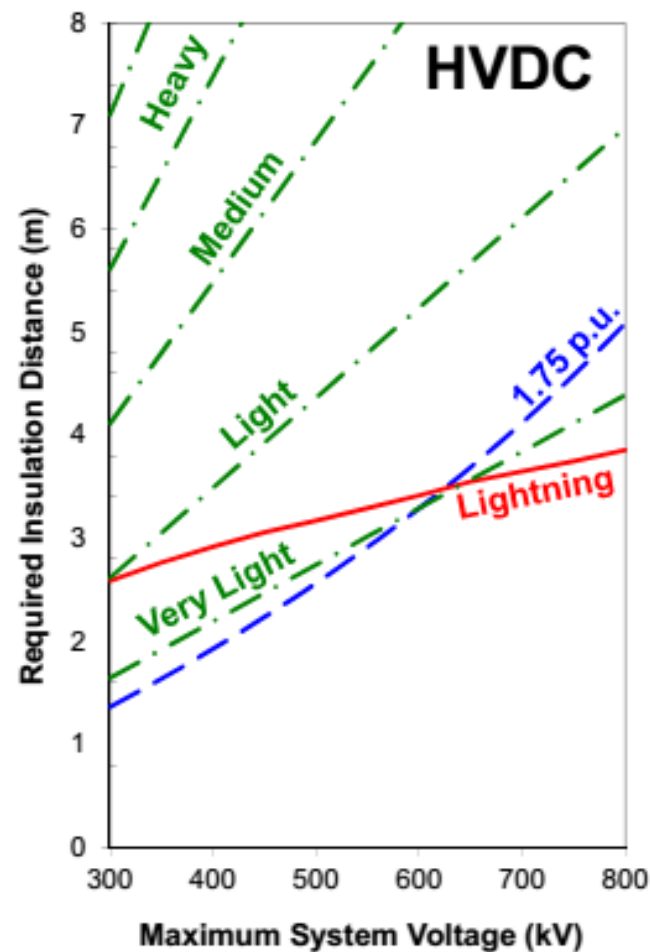
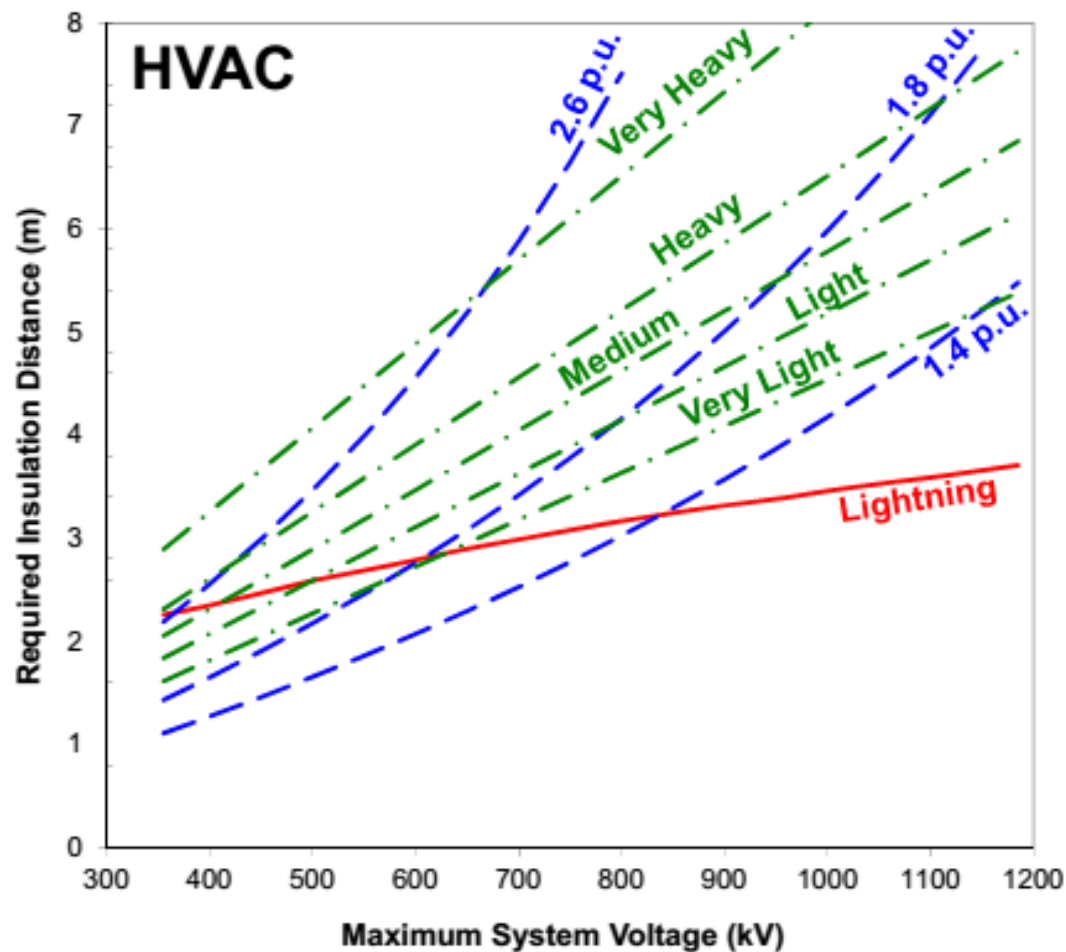
污闪电压与绝缘子爬电距离  
成正比的关系成为  
污秽地区绝缘子配置  
爬电比距的工程依据







环境污秽将极大增加外绝缘代价、且仍不安全  
特高压下问题更突出！ 直流下问题更突出！





### 3.5.5 绝缘子的覆冰闪络

### 冰闪过程、特性、方法

人工气候室内，零下的环境温度中喷淋；覆冰到一定程度后升温；融冰闪络

绝缘子若表面有污秽、再覆冰，闪络电压更低！



用一定导电率的水？  
绝缘子先覆污层再覆冰？  
覆冰过程中带电/不带电？

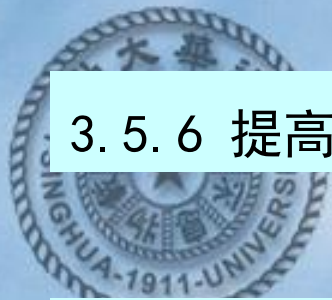
覆冰试验尚无国际标准







绝缘子覆冰覆雪



### 3.5.6 提高瓷绝缘子污闪电压的方法

提高污闪电压、  
降低污闪事故的措施

- 减少积污  
选择开放式伞形、带电污秽清扫、停电污秽清扫；
- 降低绝缘子受潮  
选择防雾型伞形、采用半导体釉
- 增加绝缘子串爬电距离  
采用大爬距绝缘子、增加绝缘子片数
- 采用憎水性涂料  
硅油、硅脂、（长效）地腊、RTV涂料。（沥青）





## 停电人工清扫污秽







## 带电水冲洗





带电水冲洗

### 3.5.6 提高瓷绝缘子污闪电压的方法

提高污闪电压、  
降低污闪事故的措施

#### ➤ 减少积污

选择开放式伞形、带电污秽清扫、停电污秽清扫；

#### ➤ 降低绝缘子受潮

选择防雾型伞形、采用半导体釉

#### ➤ 增加绝缘子串爬电距离

采用大爬距绝缘子、增加绝缘子片数

#### ➤ 采用憎水性涂料

硅油、硅脂、（长效）地腊、RTV涂料。（沥青）

#### ● 传统的防污闪措施：

调爬（增加爬电距离）、涂料（憎水性涂料）、清扫

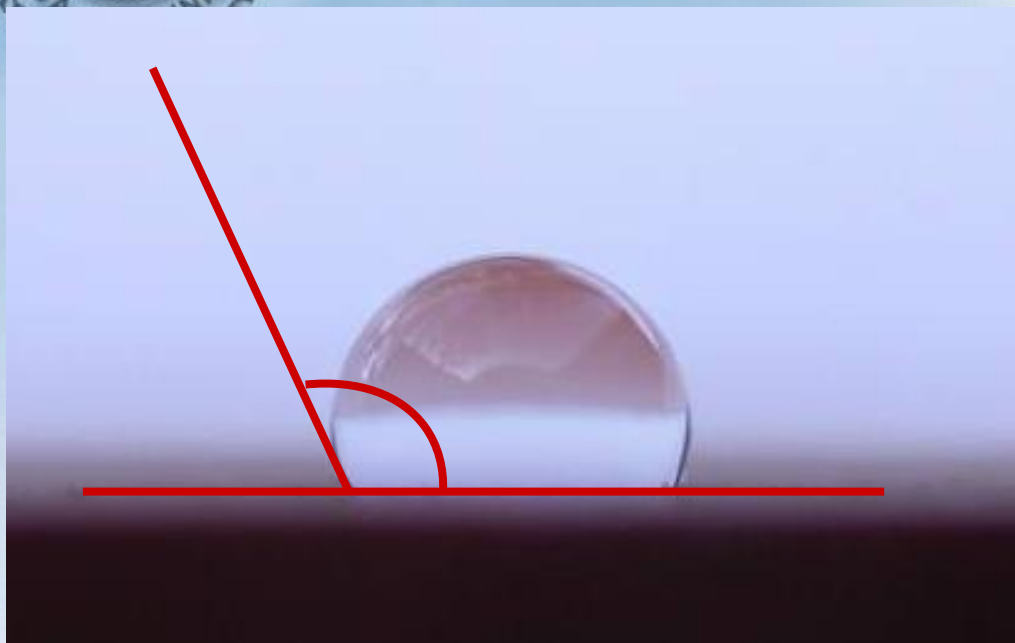
#### ● 新一代有机外绝缘：

采用硅橡胶绝缘子

解决我国电网  
大面积污闪  
最有效的措施



### 3.5.7 硅橡胶复合绝缘子及有机外绝缘



憎水性表面：  
水滴与固体表面静态接触角大于 $90^\circ$

憎水性表面是否还会积污？  
憎水性表面被污层覆盖又会怎样？





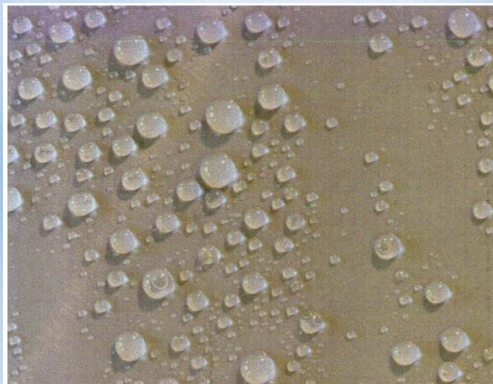
# 憎水性表面另一种评定方法： 喷水分级法 (HC1 - HC7)

IEC TS 62073-2026

| HC值 | 试品表面水滴状态描述  |
|-----|---|
| HC1 | 只有分离的水珠，大部分水珠的后退角 $\theta_r \geq 60^\circ$  |
| HC2 | 只有分离的水珠，大部分水珠的后退角 $40^\circ < \theta_r < 60^\circ$  |
| HC3 | 只有分离的水珠，水珠一般不再是圆的，大部分水珠的后退角 $10^\circ < \theta_r < 40^\circ$                              |
| HC4 | 同时存在分离的水珠与水带。完全湿润的水带面积小于 $2\text{cm}^2$ ，总面积小于被测区域面积的90%， $0^\circ < \theta_r < 10^\circ$ |
| HC5 | 一些完全湿润的水带面积大于 $2\text{cm}^2$ ，总面积小于被测区域面积的90%， $0^\circ < \theta_r < 10^\circ$            |
| HC6 | 完全湿润总面积大于90%，仍存在少量干燥区域（点或带）， $0^\circ < \theta_r < 5^\circ$                               |
| HC7 | 整个被试区域形成连续的水膜 $\theta_r = 0^\circ$  |

$\theta_r$  为水滴在倾斜固体表面的后退角

憎水性表面是否还会积污？  
憎水性表面被污层覆盖又会怎样？



HC1



HC2



HC3



HC4



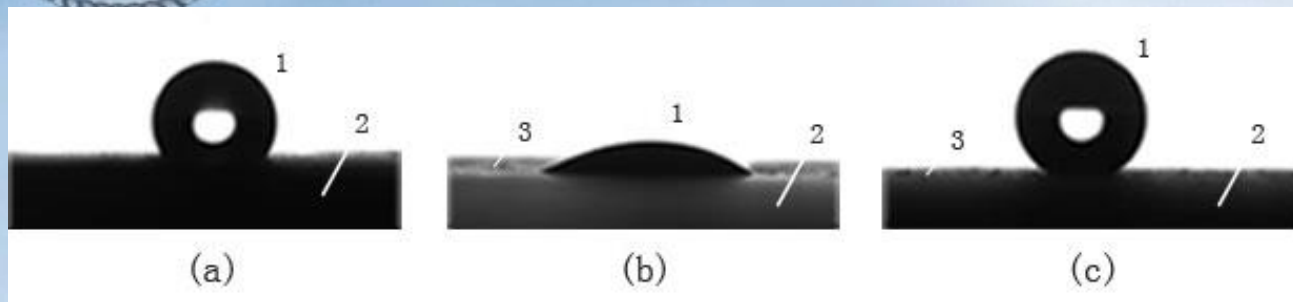
HC5



HC6

### 3.5.7 硅橡胶复合绝缘子及有机外绝缘

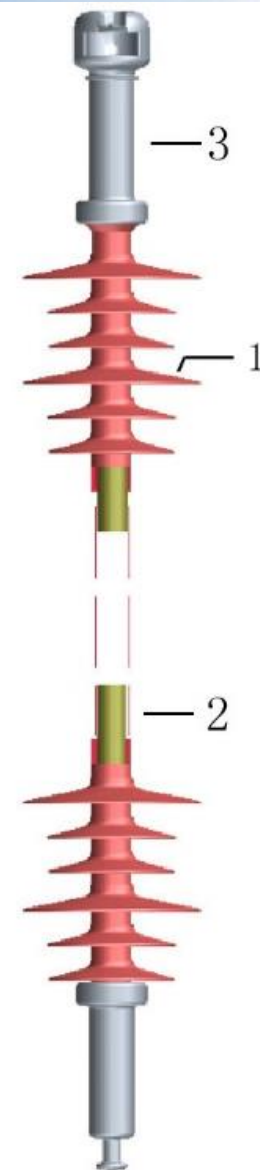
硅橡胶是目前唯一发现具有憎水性迁移性能的材料！  
表面积污后污层也有憎水性！



硅橡胶材料表面的憎水性迁移效果示意图

(a) 清洁表面；(b) 染污后变亲水性；(c) 憎水性迁移后

清华高压馆屋顶  
自然老化30年、  
22年仍然憎水性  
迁移优异



硅橡胶复合绝缘子





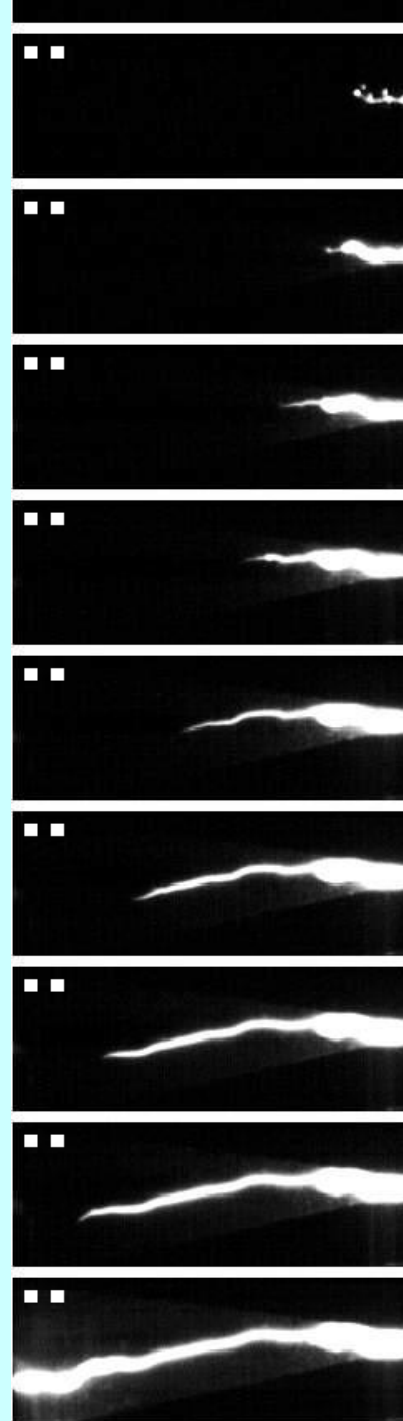
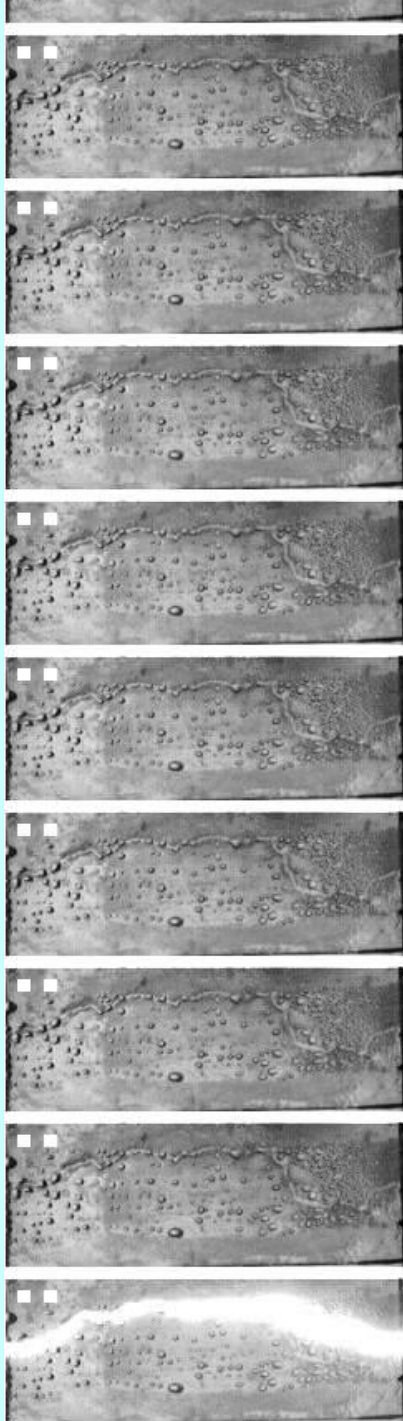
憎水性表面  
污闪电压高

憎水性表面  
突然闪络

2000 pfs拍摄

间隔0.5ms

每幅曝光25us



亲水性表面  
污闪电压低

亲水性表面  
逐渐爬电

2000 pfs拍摄

间隔0.5ms

每幅曝光25us

我国成为第一个以有机外绝缘为主的国家, 目前挂网1000多万支硅橡胶绝缘子

硅橡胶绝缘子用量最大, 占比近半, 特高压交、直流使用比例更高

● 四十年来我国复合绝缘子发展的主要机遇

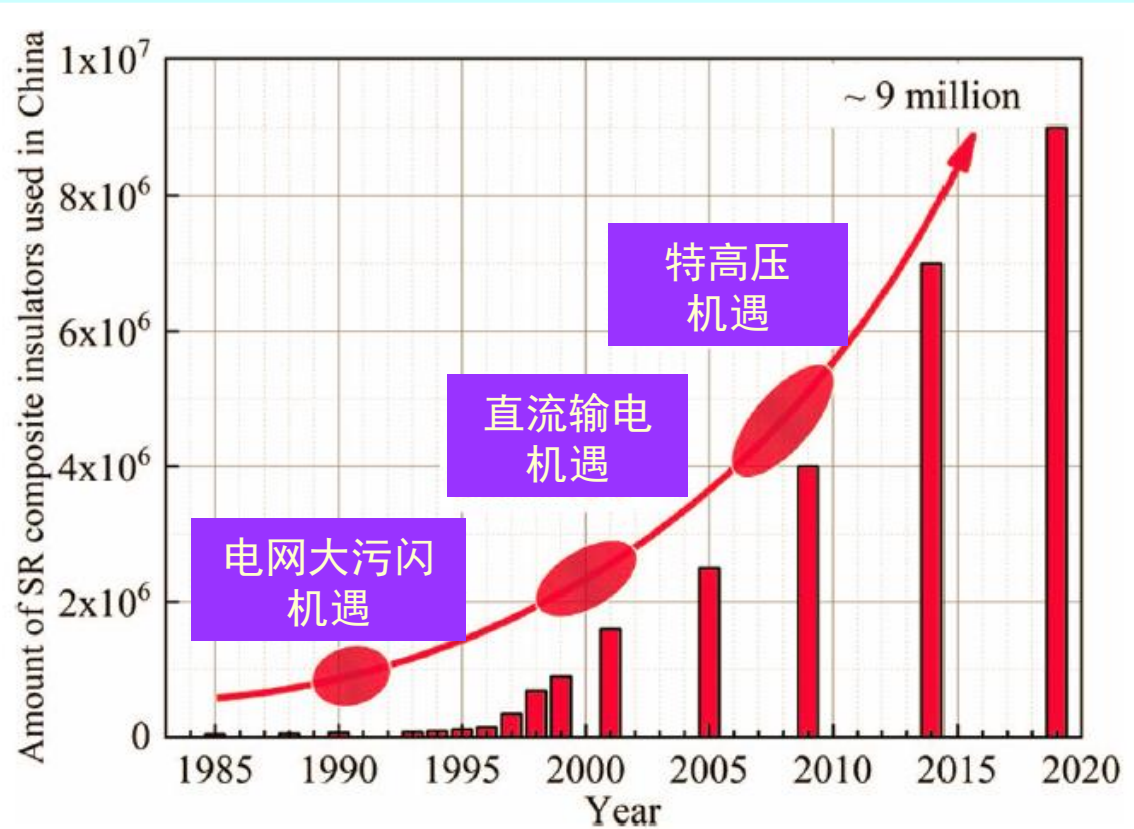


Figure 15. Amount of SR composite insulators used in China for OHLs of 110 kV to 1000 kV AC and ± 400 kV to ± 1100 kV DC.

★ 电网大污闪机遇

在污闪严重地区得到应用, 尽管价格贵、长期性能有顾虑。防污闪效果显著, 但出现脆断、机械强度下降、伞裙老化、憎水性下降等问题。

★ 直流输电机遇

第二代复合绝缘子解决了脆断、突破了压接结构。在直流线路得以高比例使用。

★ 特高压机遇

对使用寿命有基本信心, 交直流特高压线路以复合为主。



我国成为第一个以有机外绝缘为主的国家, 目前挂网1000多万支硅橡胶绝缘子

硅橡胶绝缘子用量最大, 占比近半, 特高压交、直流使用比例更高



我国成为第一个以有机外绝缘为主的国家, 目前挂网1000多万支硅橡胶绝缘子

硅橡胶绝缘子用量最大, 占比近半, 特高压交、直流使用比例更高



到2019年底共有 450, 000支硅橡胶绝缘子  
用于35000km特高压交、直流线路



### 3.5.7 硅橡胶复合绝缘子及有机外绝缘

电网大面积污闪事故15年未再发生！

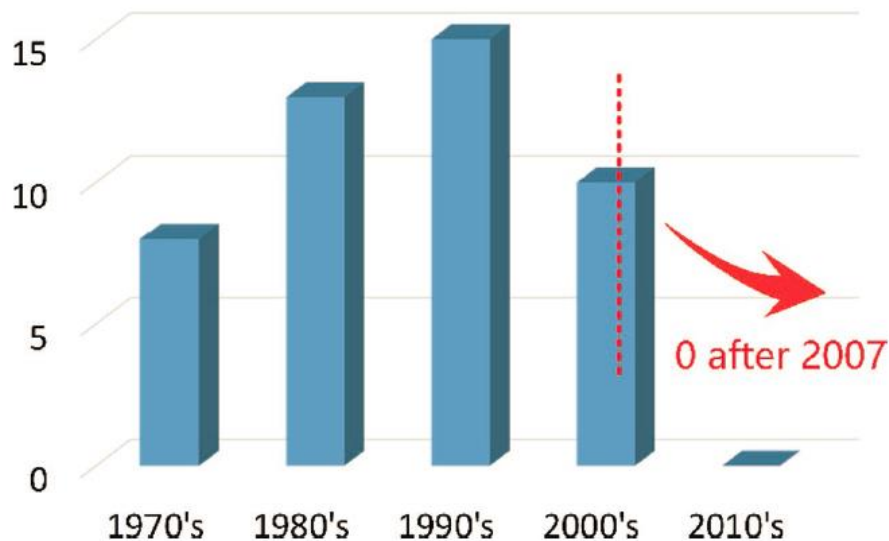
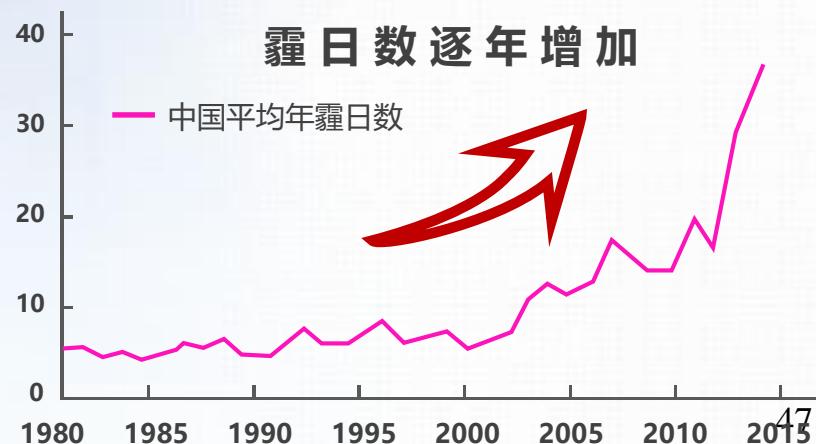
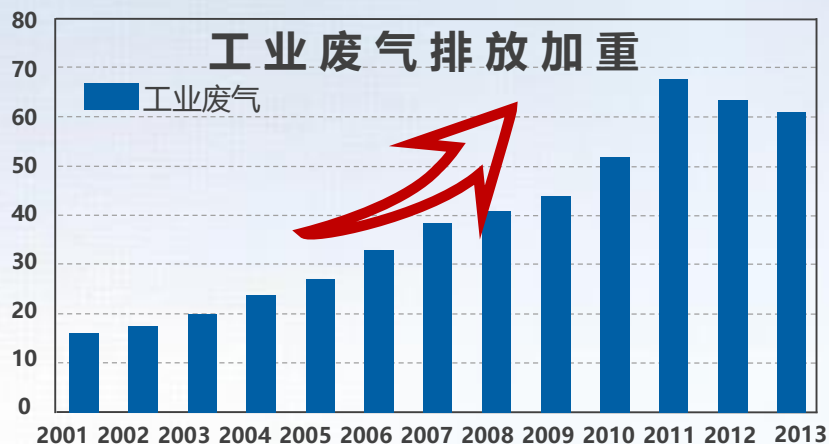


Figure 1. Number of the large area pollution flashover accidents in China from 1970s to 2010s.

在大气污染明显增加，输电线路长度5-10倍增长，污闪跳闸率（次/百公里年）从2001年的0.12下降到2012年以来年均0.00068，下降两个数量级！



掌握科学原理  
了解技术措施  
理解工程规范

往届同学的难点：  
从简化的理论模型  
到复杂的工程实际

雷电冲击

操作冲击

交流

直流

## 电压形式

极性效应、 $U_{50}$ 、放  
电时延、伏秒特性、  
操作冲击及交流的长  
间隙饱和.....

影响间隙放电  
的三类因素

均匀场

稍不  
均匀场

极不  
均匀场

流注与先导、电晕、  
稍不均匀场的典型电  
极、极不均匀场的对  
称与不对称.....

## 电场均匀性

介质  
状态

大气条件与海拔修正

气体间隙：  
压力、温度、湿度

沿面放电：  
干燥清洁表面、染污表面

弱垂直与强垂直分量  
污闪、雨闪、冰闪

“材料+结构”+承担的电压，  
决定了绝缘性能、放电特点。  
气体固体液体及沿面放电都可以据此  
分析（高电压高场强下的特殊问题）





## 第1章（气体放电过程的分析）

碰撞电离、自持放电、汤逊放电、巴申定律、电晕放电、电子崩、流注、先导、极性效应、长间隙放电

## 第2章（不同电压形式下空气的绝缘特性）

高场强与高电压、非均匀场、电场分布的调整、雷电与操作冲击电压、50%放电电压、伏秒特性、空气的电气强度、高真空绝缘、SF<sub>6</sub>绝缘

## 第3章（高压外绝缘及沿面放电）

大气条件修正、高压绝缘子、外绝缘、沿面放电、滑闪放电、污秽放电、憎水性迁移、硅橡胶有机外绝缘

秋季学期探索式学习：6个专题

从气体放电、高压套管、电树枝、绝缘储能薄膜、油纸绝缘、波过程延伸下去