

# 高电压技术

屠幼萍

 +80795842, 13691145432

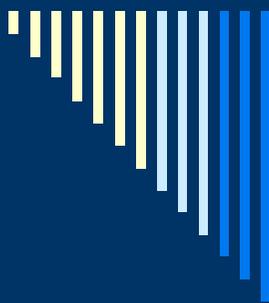
 [typ@ncepu.edu.cn](mailto:typ@ncepu.edu.cn)



华北电力大学  
North China Electric Power University

高电压与电磁兼容技术研究所  
High Voltage & Electromagnetic Compatibility Laboratory

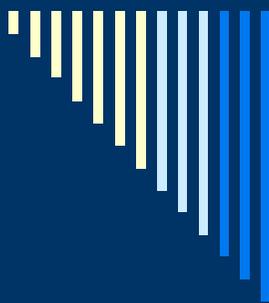




---

# 第15讲 防雷装置

- 避雷针、避雷线
  - 避雷器
  - 接地装置
-



## 第一节 避雷针、避雷线

- 避雷针（线）的保护原理
  - 避雷针（线）的保护范围
-

# 第一节 避雷针、避雷线

---

## ■ 避雷针（线）的保护原理

当雷云放电接近地面时它使地面电场发生畸变。在避雷针（线）的顶端，形成局部电场集中的空间，以影响雷电先导放电的发展方向，引导雷电向避雷针（线）放电，再通过接地引下线和接地装置将雷电流引入大地，从而使被保护物体免遭雷击

# 第一节 避雷针、避雷线

## ■ 避雷针（线）的保护范围

当先导放电向地面发展到某一高度 $H$ （称为定向高度）以后，才会在一定范围内受到避雷针（线）的影响，对避雷针（线）放电

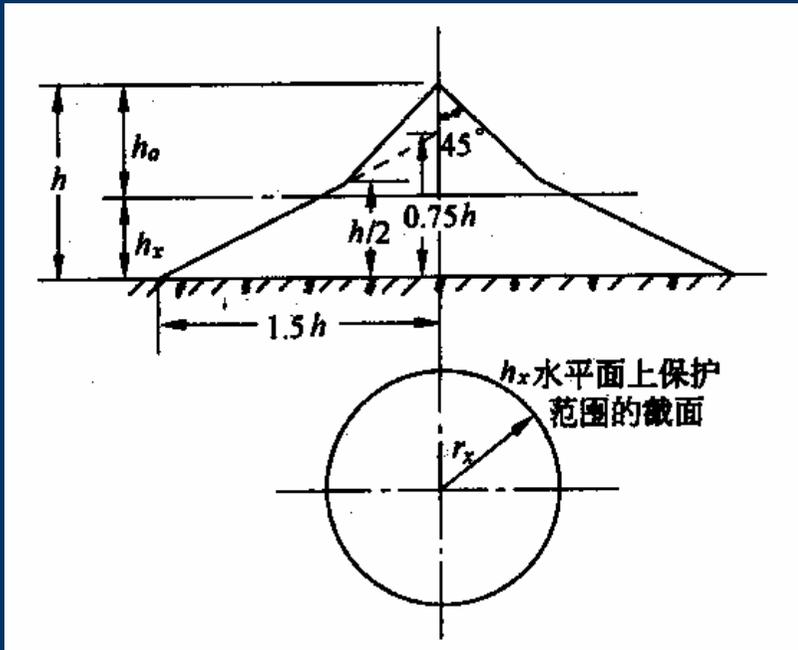
$$h \leq 30\text{m时}, H \approx 20h$$

$h$ 为避雷针的高度

$$h > 30\text{m时}, H \approx 600\text{m}$$

避雷针的保护范围（具有0.1%左右雷击概率的空间范围）

# 单只避雷针



$h$ 为避雷针高度

$h_x$ 为被保护物体高度

在高度 $h_x$ 水平面上的保护范围的半径 $r_x$ ：

$$\text{当 } h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = (h - h_x)p$$

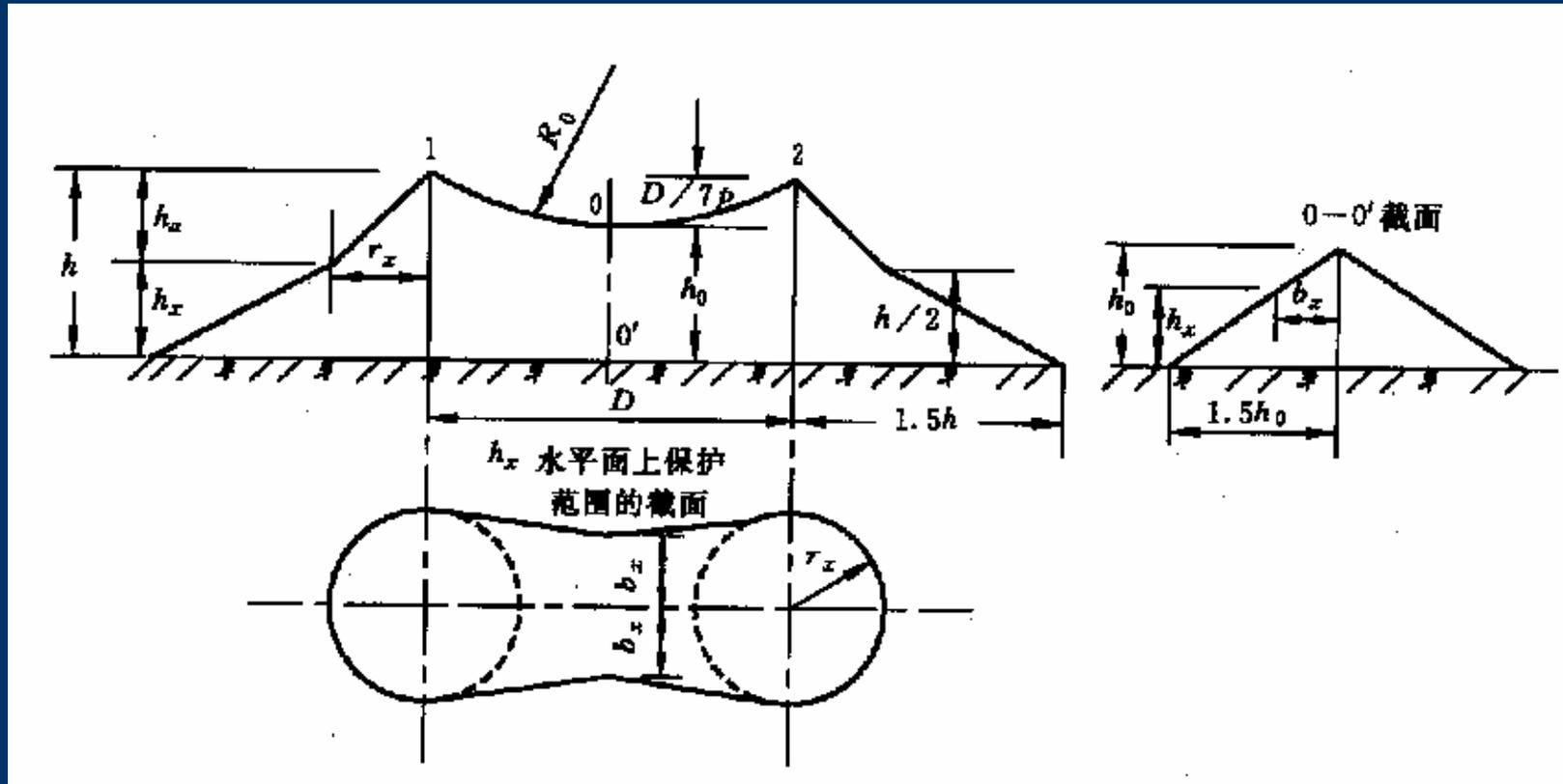
$$\text{当 } h_x < \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = (1.5h - 2h_x)p$$

$P$ 是考虑避雷针高度影响的校正系数

$$h \leq 30m, \quad p = 1$$

$$30 < h \leq 120m \quad p = 5.5 / \sqrt{h}$$

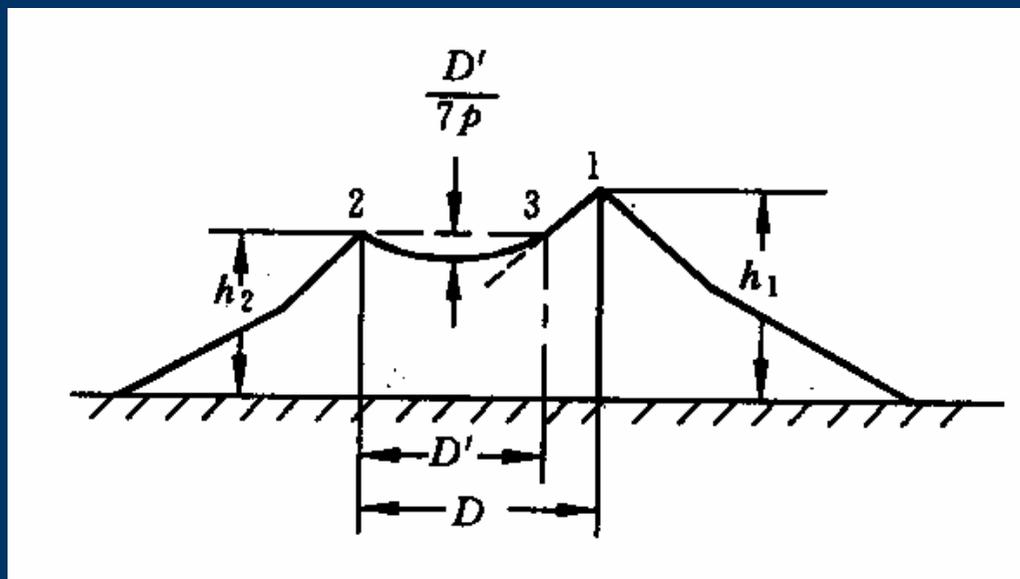
# 双只等高避雷针



上部边缘最低点 $O$ 点的高度  $h_0 = h - \frac{D}{7p}$

在 $0-0'$ 截面 $h_x$ 高度两侧的水平保护宽度  $b_x = 1.5(h_0 - h_x)$

## 双只不等高避雷针



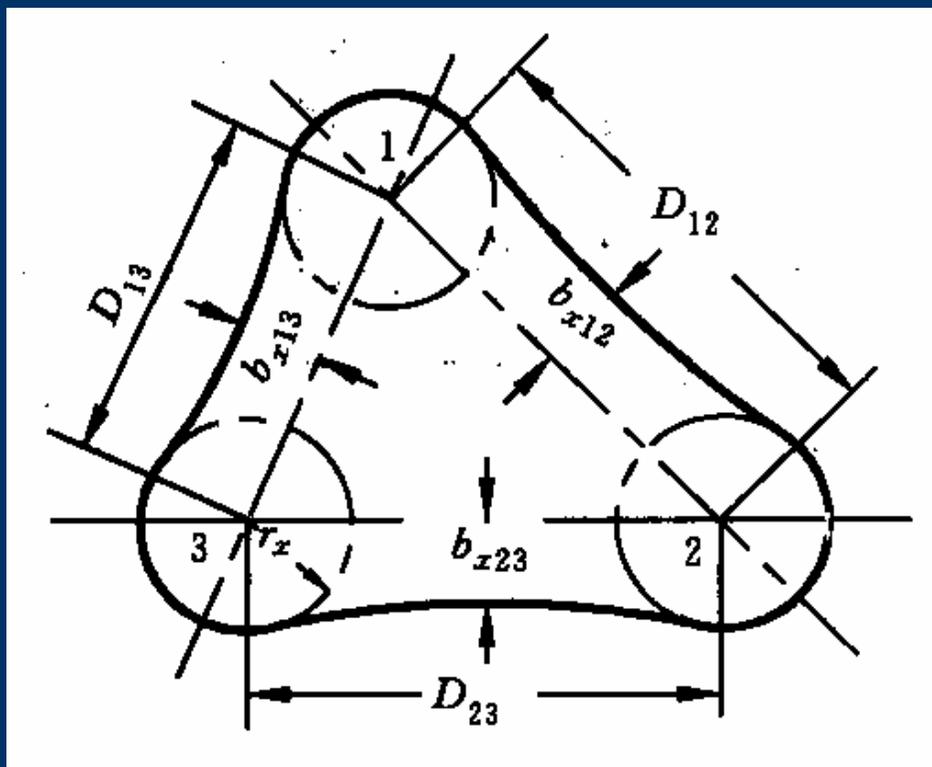
两针内侧保护范围：

按单针做出高针1的保护范围

过较低针2的顶点作水平线与上面的保护范围交于点3

设点3为一假想针的顶点，做出2和3两等高针的保护范围

## 多只等高避雷针

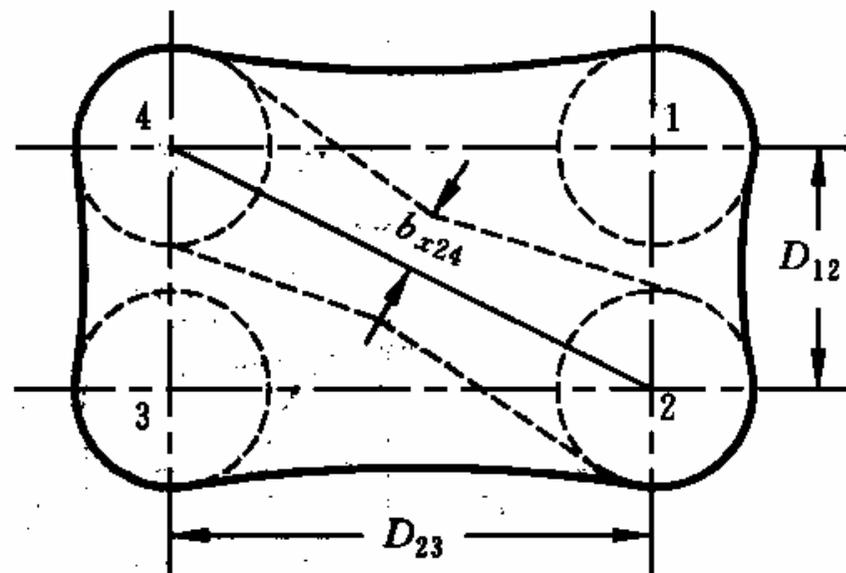


根据被保护物体的高度 $h_x$ 分别计算各相邻两针间的保护范围，如果内侧的最小宽度都满足

$$b_x \geq 0$$

认为曲线所围的平面得到保护

可以分割为多个三只避雷针组，然后按三只避雷针的方法进行计算



## 注意事项

- 被保护的物体有多种，其高度各不相同。应注意的是根据哪一种高度而得到的保护范围。以便使所设计的避雷针起到全面的保护作用
- 实际工程中大多是已知保护物体的高度、宽度和位置，例如户外变电站，要确定避雷针的根数、位置和高度。还要考虑到避雷针与被保护物体间的允许距离，提出多种设计方案，经反复试算得出最优方案。

## 避雷线（架空地线）

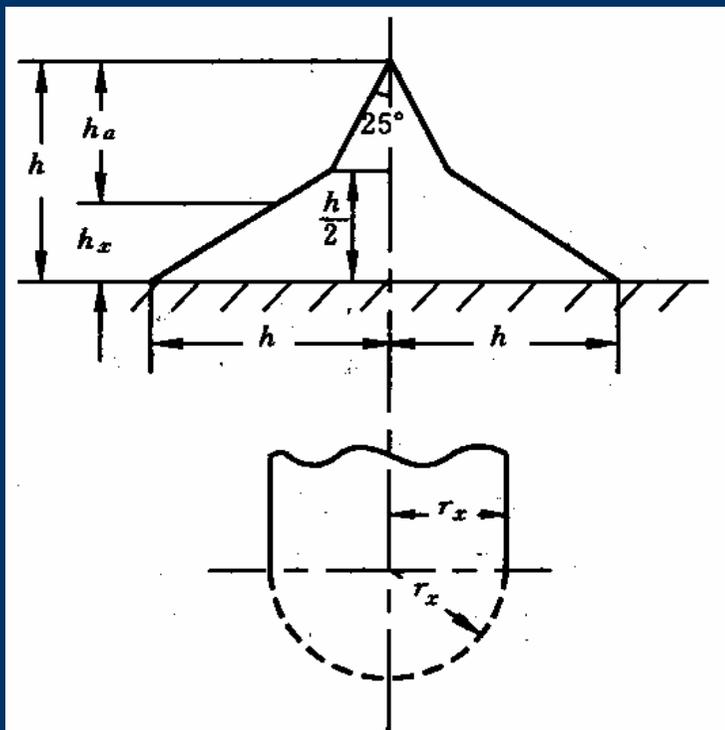
- 保护线路

我国一般110kV以上线路采用避雷线  
35kV线路的进线段

国外，如日本配电线路也用

- 保护500kV大型超高压发变电站

## 单根避雷线的保护范围

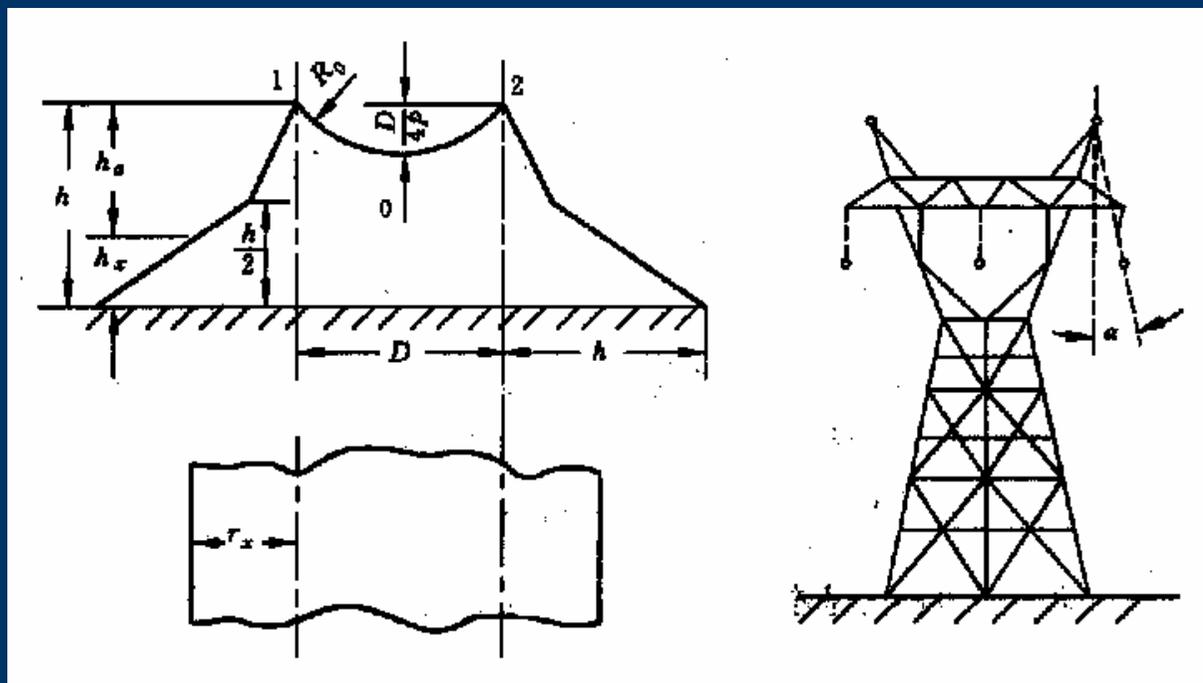


引雷作用和保护宽度比避雷针要小

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } h_x \geq \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = 0.47(h - h_x)p \\ \text{当 } h_x < \frac{h}{2} \text{ 时, } r_x = (h - 1.53h_x)p \end{array} \right\}$$

$P$ 是考虑避雷针高度影响的校正系数

## 两根避雷线的保护范围



定义线路保护角 $\alpha$ :

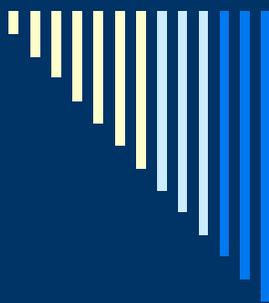
220~330kV:  $20^\circ$

500kV:  $<15^\circ$

避雷线外侧的保护范围与单根避雷线相同

上部边缘最低点0点的高度 
$$h_0 = h - \frac{D}{4p}$$

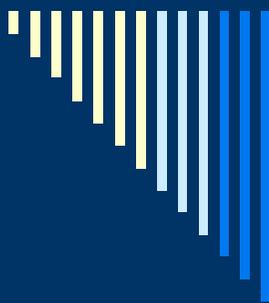
在0-0'截面 $h_x$ 高度两侧的水平保护宽度 
$$b_x = 1.5(h_0 - h_x)$$



---

# 第15讲 防雷装置

- 避雷针、避雷线
  - 避雷器
  - 接地装置
-



## 第二节 避雷器

- 避雷器的发展与类型
  - 避雷器作用与保护原理
  - 保护间隙和 管型避雷器
  - 阀型避雷器
  - 金属氧化物避雷器
-

## 避雷器发展经历：从放电间隙到氧化锌避雷器

开发年代	保护装置类型
19世纪70~80年代	棒型放电间隙和熔丝
19世纪末	角形保护间隙，防止雷击损坏设备绝缘而造成事故
20世纪20年代	铝避雷器，氧化膜避雷器
20世纪30年代	管式避雷器，主要用于发电厂、变电所进线和线路的保护
20世纪40年代	SiC避雷器，用于交直流系统发变电设备的保护，40年代至50年代迅速发展，并一直应用至今
20世纪50年代	SIC磁吹避雷器，复合式避雷器
20世纪60年代	ZnO压敏电阻，用于电子设备的保护
20世纪70年代	ZnO避雷器，用于交直流电力系统发、变电设备的保护，正逐渐取代SiC避雷器
20世纪80年代	合成绝缘ZnO避雷器，用于发、变电设备保护外，还包括线路防雷及深度限制操作过电压等

## ■ 避雷器的类型

- ◆ 保护间隙
- ◆ 管型（排气式）避雷器



- ◆ 阀型避雷器
- ◆ 氧化锌避雷器



有非线性电阻

## 第二节 避雷器

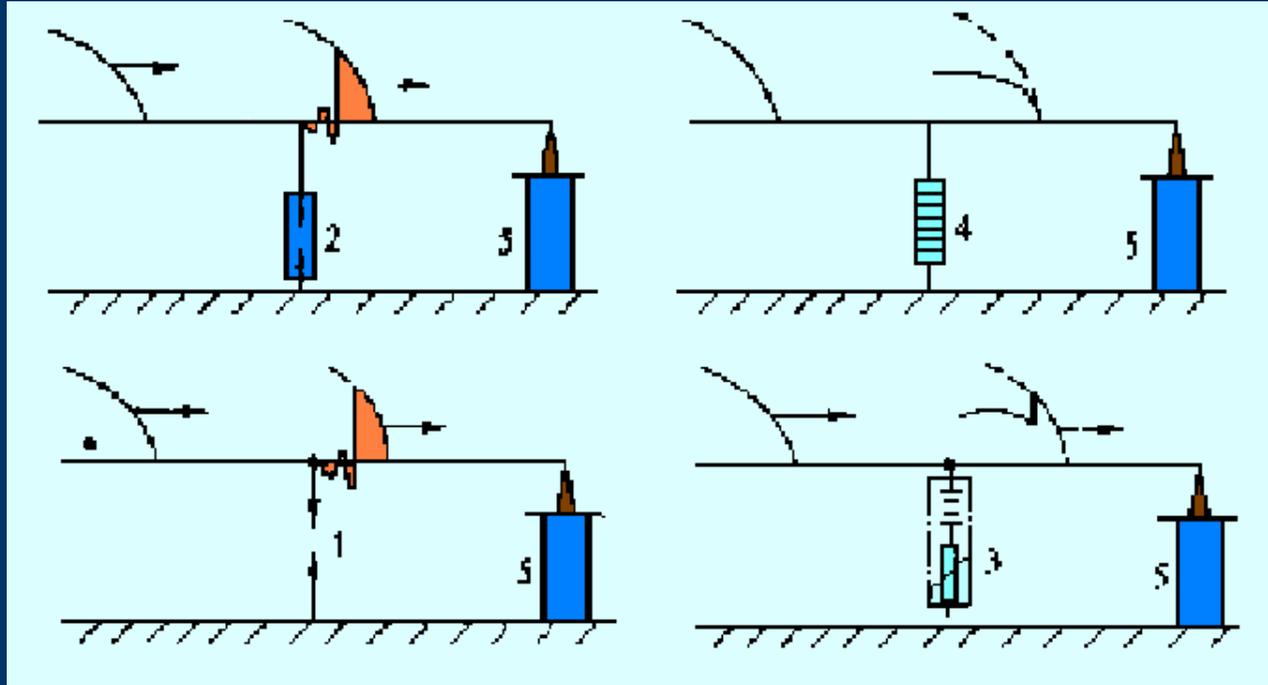
---

### ■ 避雷器作用与保护原理

**作用** 用以限制由线路传来的雷电过电压或由操作引起的内部过电压的一种电器设备

**原理** 并联连接在被保护设备附近，当作用电压超过避雷器的放电电压时，避雷器先放电，限制了过电压的发展，从而保护了其他电气设备免遭击穿损坏。它实质上是一种放电器

## 避雷器保护作用原理示意



1 — 保护间隙    2 — 排气式避雷器    3 — 阀型避雷器  
4 — 氧化锌避雷器    5 — 被保护电器设备

注意各类避雷器动作后的波形

## ■ 避雷器作用与保护原理

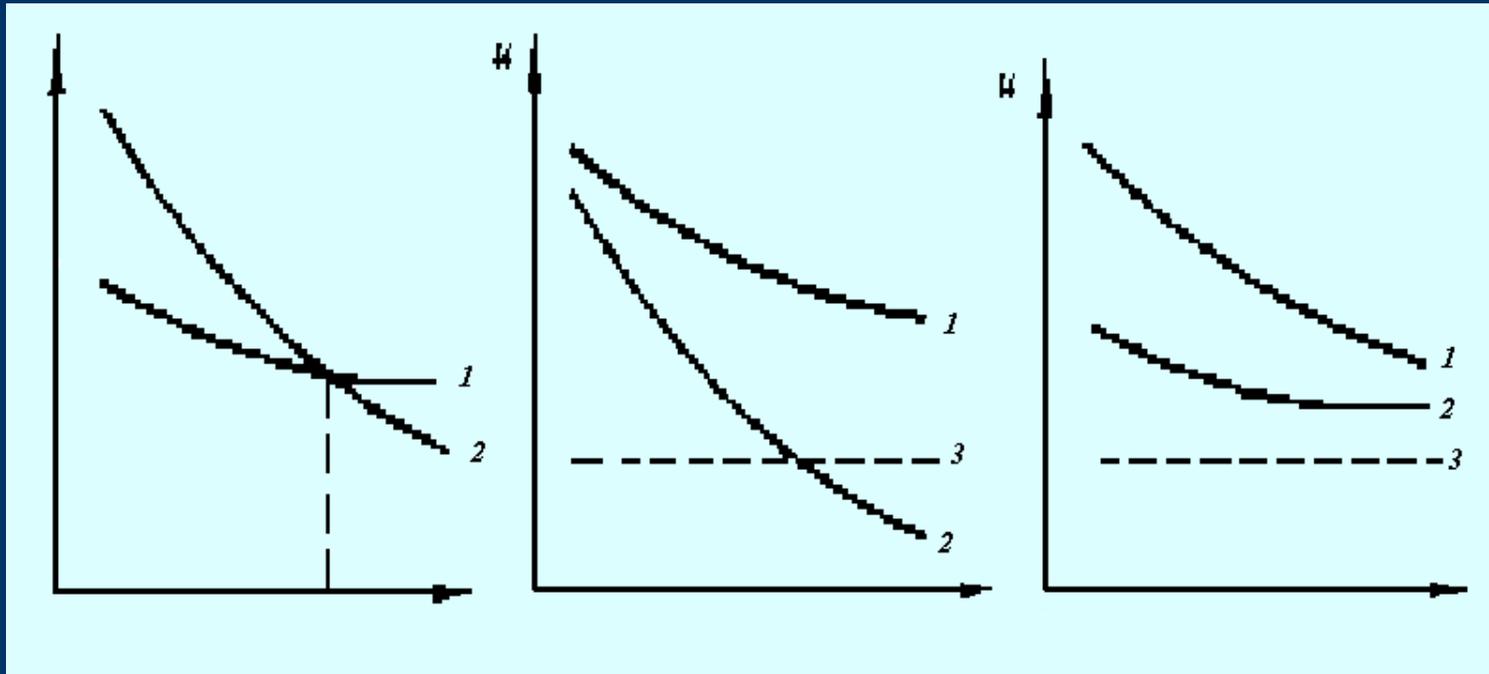
### 避雷器的基本要求

具有良好的**伏秒特性**，以易于实现合理的绝缘配合

应有较强的绝缘强度自恢复能力，以利于快速切断**工频续流**，使系统得以继续运行

**过电压消失后，间隙中仍有由工作电压所产生的工频电弧电流**

## 避雷器与电气设备的伏秒特性配合图



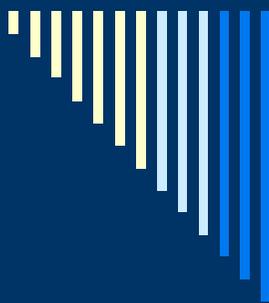
(a)

(b)

(c)

1——电气设备的伏秒特性      2——避雷器的伏秒特性

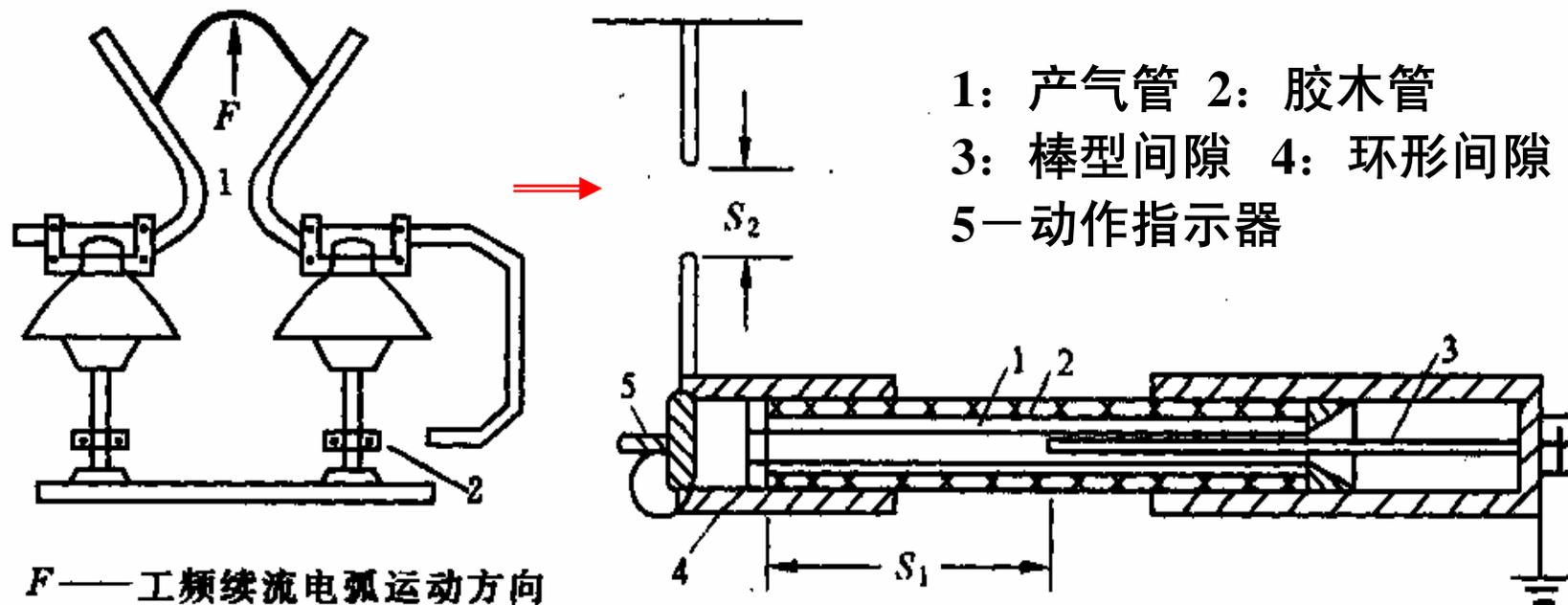
3—— 电器设备上可能出现的最高工频电压



---

## 第二节 避雷器

- 避雷器的发展与类型
  - 避雷器作用与保护原理
  - 保护间隙和管型避雷器
  - 阀型避雷器
  - 金属氧化物避雷器
-



## ■ 结构简单

工频续流电弧的高温使管内产气材料分解大量的气体，由环形电极的开口喷出，形成强烈的纵吹

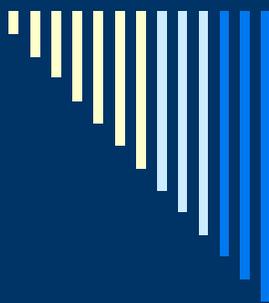
角间隙没有专门的灭弧装置，可以和自动重合闸配合使用

管型限压装置带有产气式灭弧管，可以熄灭更大的工频电弧

## ■ 主要的缺陷:

- 间隙放电的伏秒特性太陡，难于实现绝缘配合
- 放电间隙动作后，工作导线直接接地，形成幅值很高的冲击波（截波），危及变压器的绝缘
- 运行维护麻烦

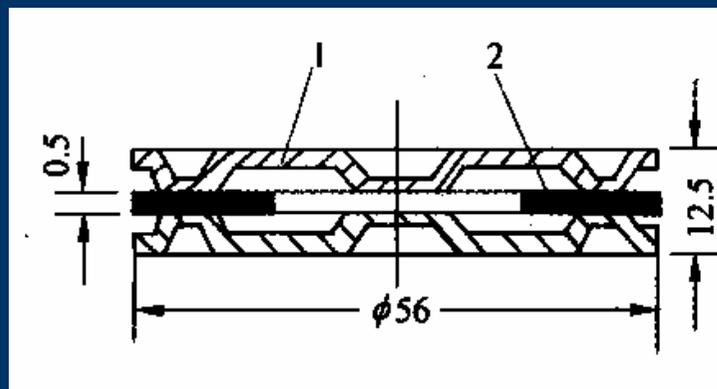
用于个别地段的保护：变电站进线段，大跨距和交叉档距处



## 第二节 避雷器

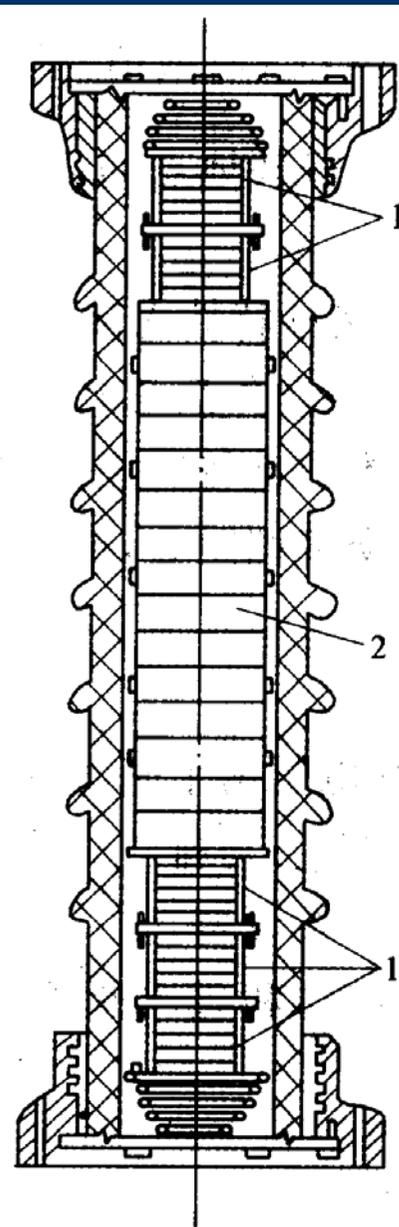
- 避雷器的发展与类型
  - 避雷器作用与保护原理
  - 保护间隙和 管型避雷器
  - 阀型避雷器
  - 金属氧化物避雷器
-

## ■ 主要结构



**火花间隙：**由多个单个火花间隙组成，易于切断工频续流及防止电弧重燃

**电阻阀片：**由SiC（金刚砂）加结合剂（水玻璃等）在 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ 烧结而成。一支避雷器采用多个阀片串联



1—火花间隙组； 2—阀片

## ■ 火化间隙的作用

- **正常工作时**，将电阻阀片与工作母线隔离，以免母线的工作电压在电阻阀片中产生的电流使阀片烧坏
- **出现过电压且其幅值超过间隙放电电压时**，间隙击穿，冲击电流通过阀片和接地装置流入大地，在阀片上的压降称为**残压**，其值应低于设备的冲击耐压值

## ■ 阀片电阻的作用

- 电阻值与流过的电流有关，应具有非线性特性

**冲击电流阶段** 电阻值小，相应电阻阀片上的残压低

**工频续流阶段** 电阻值大，使间隙能在续流第一次过零时熄弧

- 伏安特性

$$U = CI^\alpha$$

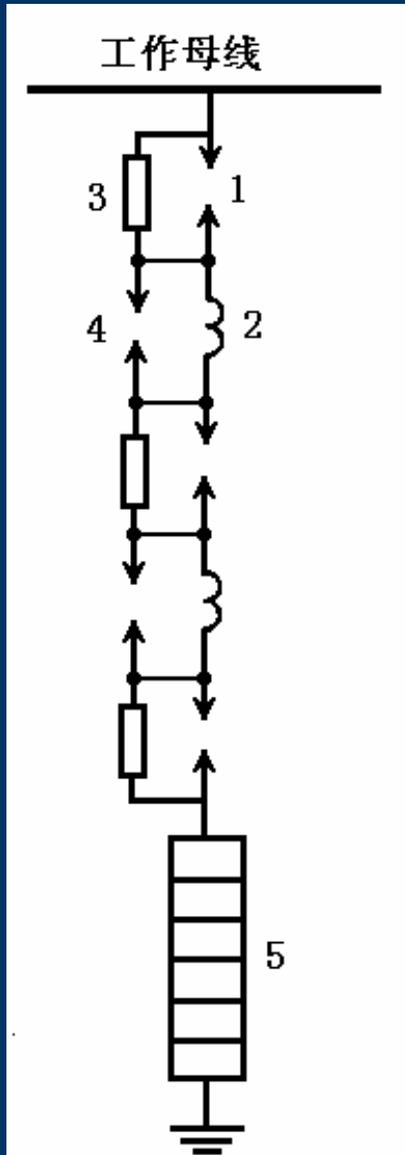
$C$ ：常数

$\alpha$ ：非线性系数（0.2左右）

取决材料

- 带有串联火花间隙和SiC非线性电阻的阀型限压装置的出现克服了上述缺陷：
  - 采取有效措施使放电间隙的伏秒特性比较平坦
  - 由于电阻非线性，避免动作时出现很陡的截波
- SiC避雷器经历了两种类型
  - 磁吹避雷器，灭弧能力提高
  - 复合式避雷器，冲击残压降低

# 磁吹避雷器

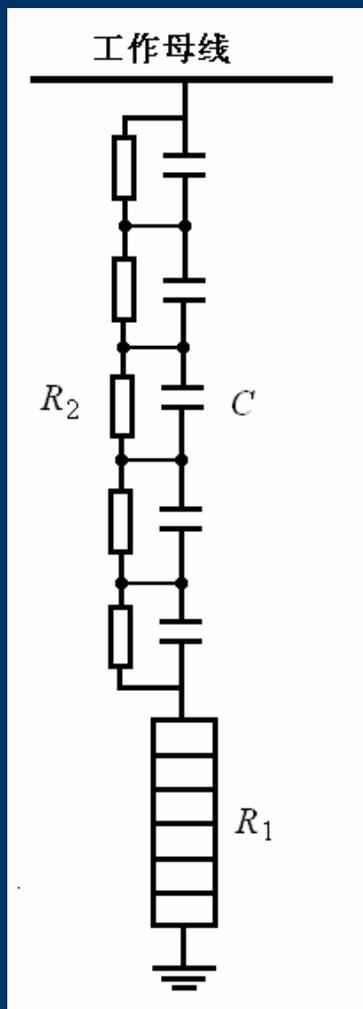


**磁吹式火花间隙：** 利用磁场对电弧的电动  
力，迫使间隙中的电弧加快运动（旋转  
或延伸），使间隙的去游离作用增强，  
从而提高灭弧能力

电弧旋转式和电弧拉长式

**高温SiC阀片电阻：** 阀片为1350~1390°C  
高温下烧结而成，为高温阀片，通流容  
量较大，非线性系数较高，0.24

# 复合避雷器



由基本元件1， 并联阀片2和并联间隙3组成

雷电过电压下并联间隙3动作而操作过电压下并联间隙3不动作

**大幅度降低冲击残压**

## ■ 阀型避雷器的电气参数

**额定电压** 正常工作时加在避雷器之上的工频工作电压

**灭弧电压** 为了确保避雷器在工频续流第一次过零时灭弧所允许施加的最低工频电压。灭弧电压应大于避雷线工作母线上可能出现的最大工频电压，否则避雷器可能因为不能熄弧而爆炸

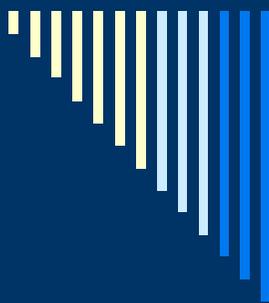
## ■ 阀型避雷器的电气参数

**工频放电电压** 避雷器发生放电的工频电压值，是衡量避雷器火花间隙绝缘强度的指标，避雷器工频放电电压的上限值

**冲击放电电压** 冲击电压作用下避雷器的放电电压幅值。通常给出的是上限值(不大于)

**残压** 雷电流流过避雷器时在阀片上产生的电压降

**保护比** 残压与灭弧电压之比，保护比越小，保护性能越好



---

## 第二节 避雷器

- 避雷器的发展与类型
  - 避雷器作用与保护原理
  - 保护间隙和 管型避雷器
  - 阀型避雷器
  - 金属氧化物避雷器
-

## 金属氧化物避雷器（又称氧化锌避雷器）

---

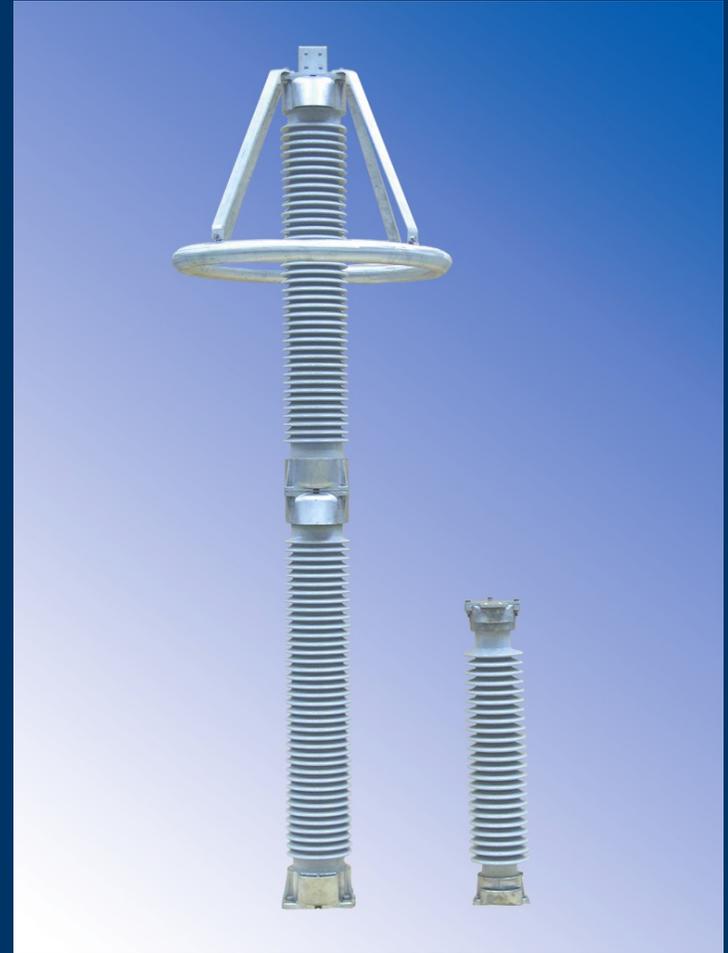
金属氧化物避雷器（Metal Oxide Surge Arresters, 简称为MOA）

MOA 的主要元件是金属氧化物非线性电阻片（Metal Oxide Varistors—简称为MOV）

MOV的主要成份是氧化锌（ZnO），因此，俗称MOV为氧化锌阀片，MOA为氧化锌避雷器

金属氧化物避雷器（MOA）  
是将相应数量的氧化锌  
电阻片（MOV）密封在  
瓷套或其他绝缘体内而  
组成

可做成无间隙MOA



# 金属氧化物避雷器

---

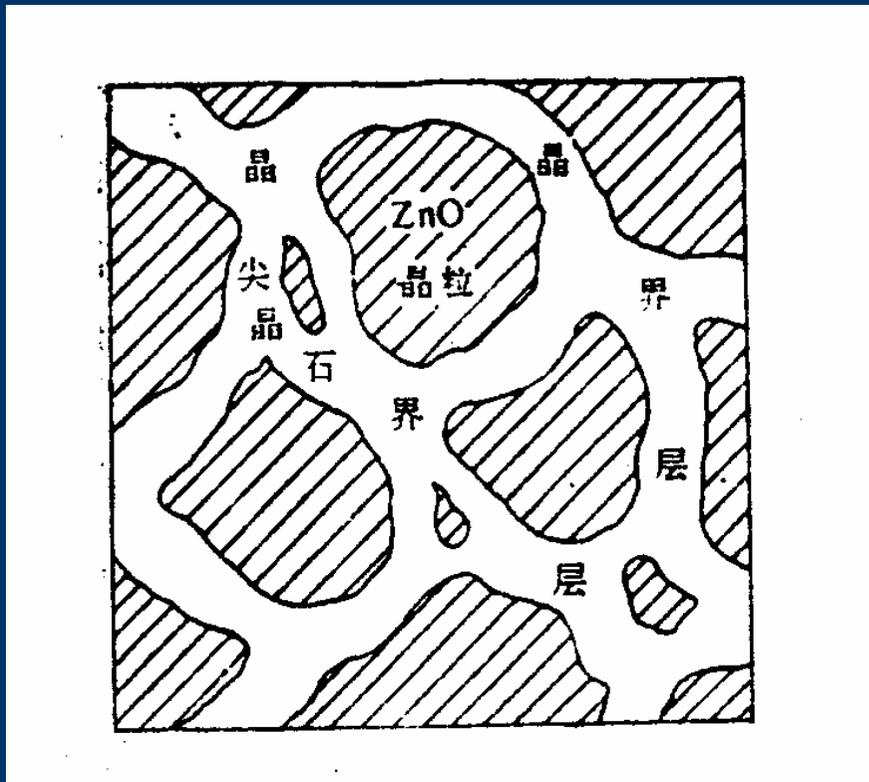
ZnO电阻具有优异的非线性，不仅残压大大降低，而且有可能取消火化间隙，避免放电间隙带来的一系列问题，替代传统的碳化硅避雷器

## ■ ZnO非线性电阻阀片（MOV）的基本构成

---

- MOV以ZnO材料为主体（占总摩尔数的90%以上），添加 $\text{Co}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sb}_2\text{O}_3$ 等金属氧化物，在 $1250^\circ\text{C}$ 的高温下烧结而成
- 不同厂家及研究机构的添加物成分不完全相同，当添加物含量超过 $0.001\text{mol}$ 时开始呈现非线性

## ■ ZnO非线性电阻阀片的微观结构



ZnO晶粒

晶界层

尖晶石

## ZnO晶粒

---

ZnO晶粒是结构的主体，晶粒中固溶有微量的Co、Mn等元素，晶粒直径由数微米至 $100\mu\text{m}$ ，晶粒的电阻率较低，约为 $0.5\sim 2.7\Omega\cdot\text{cm}$

# 晶界层

---

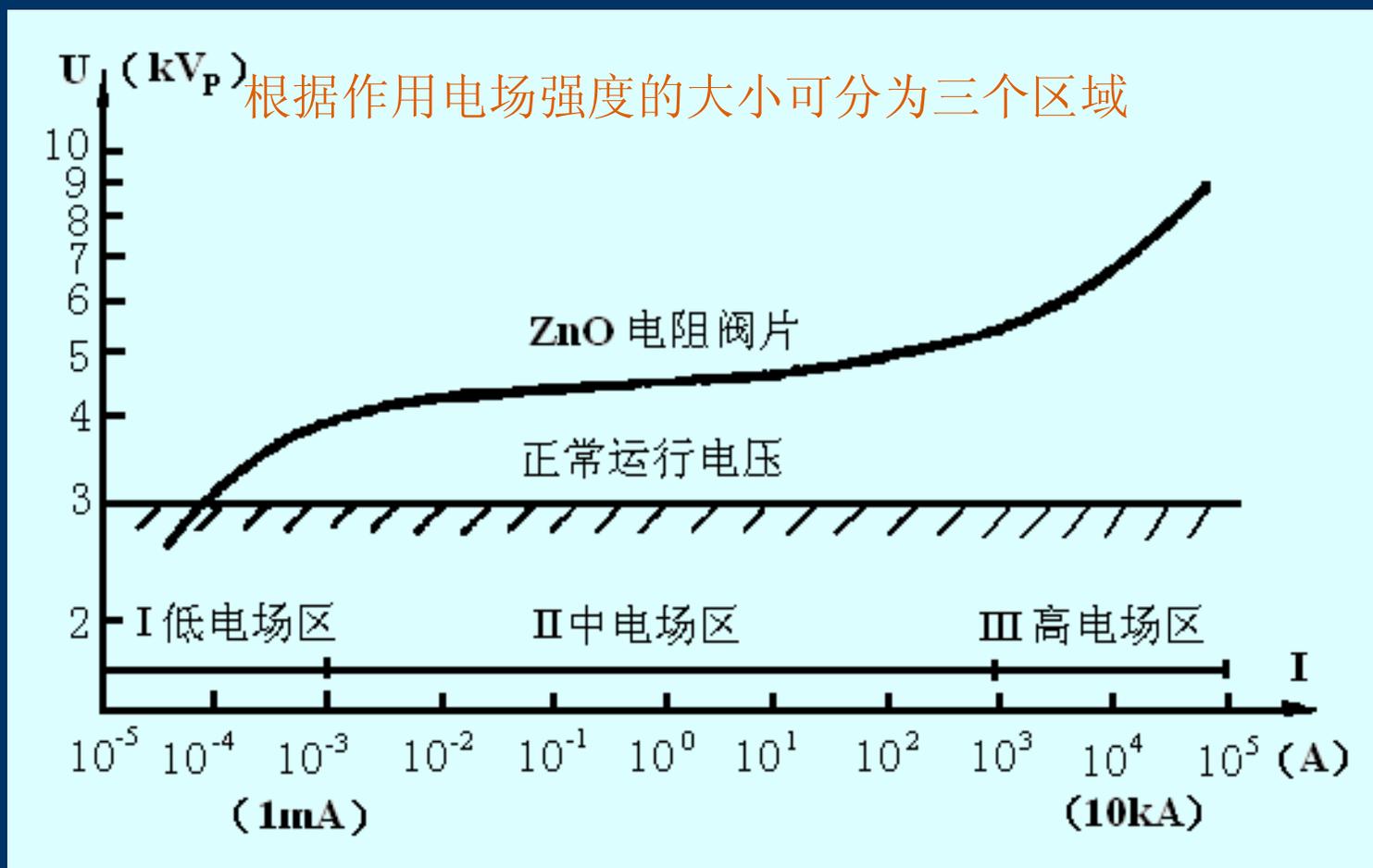
- 晶界层包围在ZnO晶粒外，将各晶粒隔开，其厚度为20~2000埃
- 由多种添加物组成，主要成分是 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ，也包含有微量的锌和其他金属氧化物
- 电阻片具有明显的压敏特征，其电阻率在低电场下约为 $10^{10}\sim 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ 。当层间电位梯度达 $10^4\sim 10^5\text{V}/\text{cm}$ 时，其电阻骤然下降，此时，由晶界层所决定的高阻状态过渡至由晶粒电阻决定的低阻状态
- 具有电介质的特性，其相对介电常数为1000~2000，因此氧化锌电阻片具有较大的固有电容

# 尖晶石

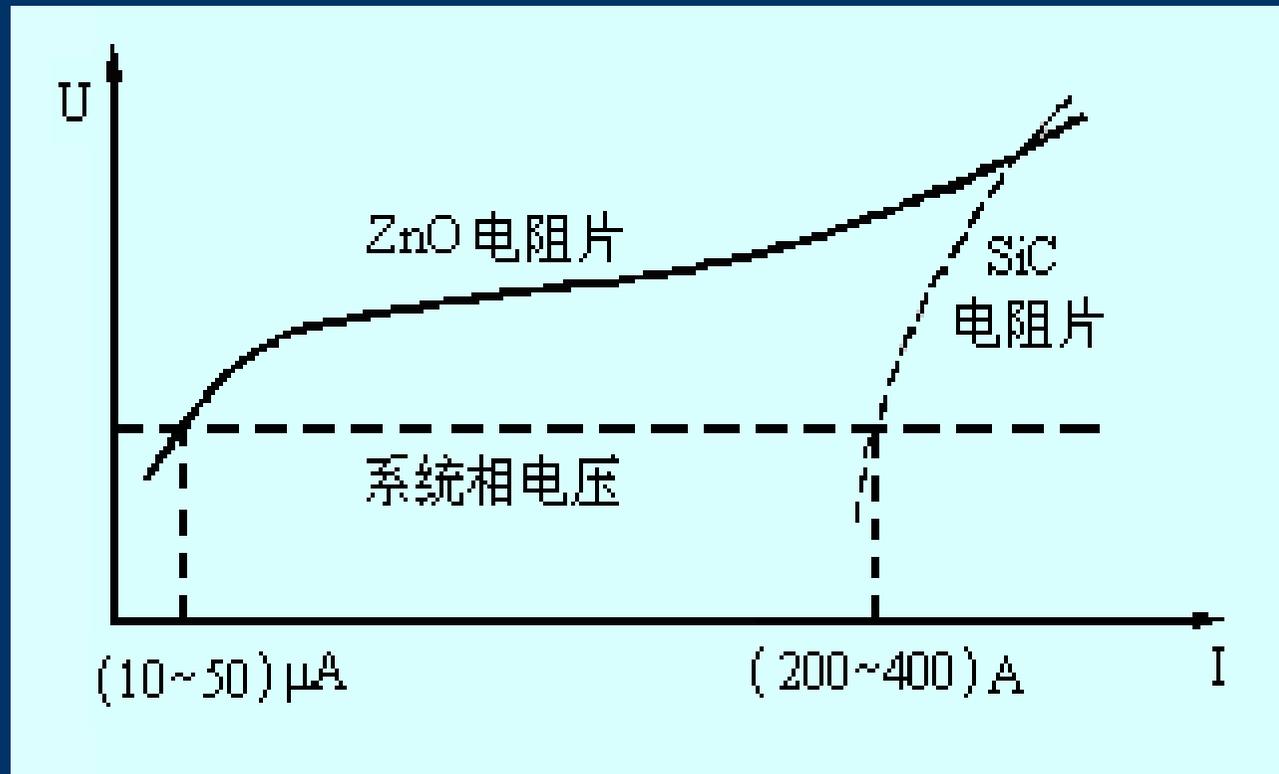
---

- 尖晶石晶粒，零星分散在氧化锌晶粒之间，其粒径约为 $3\mu\text{m}$ ，是氧化锌和氧化锑为主组成的复合氧化物（ $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$ ）
- 其作用是在烧结过程中，抑制 $\text{ZnO}$ 晶粒的过分长大，以免晶界层减少，非线性特性变差

## ■ ZnO 阀片的非线性 $U—I$ 特性



## ZnO和SiC非线性电阻片的 $U-I$ 特性的比较



## 非线性系数

---

对于整个  $U-I$  特性,  $\alpha$  并不是一个常数, 它随电流变化而变化, 且与测量时的环境温度有着密切关系:

- ◆ 低电场区 (小电流区)  $\alpha \approx 0.1 \sim 0.2$
- ◆ 中电场区 (非线性区)  $\alpha \approx 0.015 \sim 0.05$
- ◆ 高场强区 (饱和区)  $\alpha \approx 0.1$

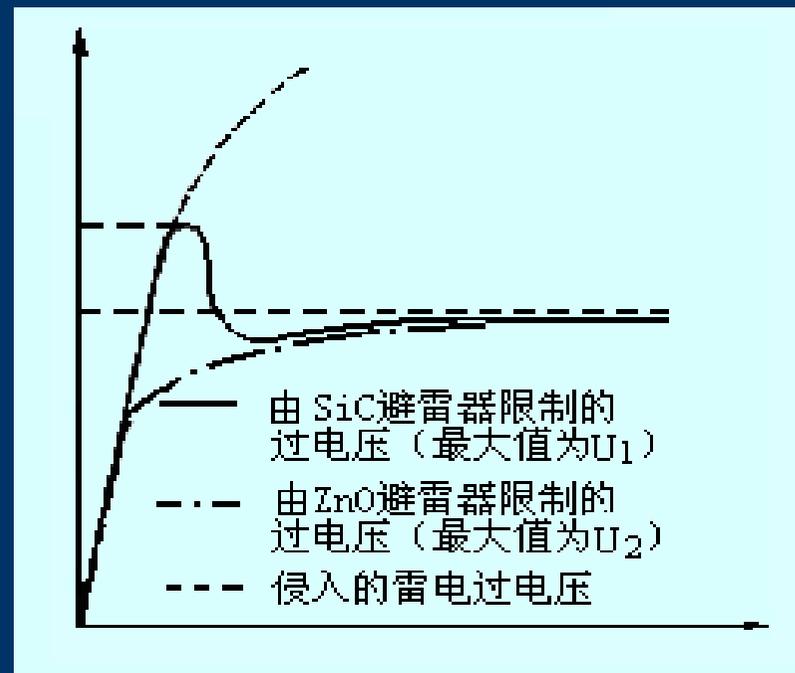
## ■ 氧化锌无间隙避雷器的优良性能

---

- 残压低，具有优异的保护性能保护性能优越
- 无续流，结构简单，耐重复动作能力强
- 通流容量大，吸收过电压能量的能力强
- 性能稳定，抗老化能力强
- 适应多种特殊需要
- 适宜于大批量生产，造价低

## ➤ 残压低，具有优异的保护性能保护性能优越

由于具有优异的非线性 $U-I$ 特性，使雷电和操作过电压作用下残压降低，易于实现与被保护设备之间合理的绝缘配合，增强安全裕度，或者可以降低设备绝缘水平和造价



没有间隙的放电时延（导通时间很短，约为数十纳秒），其优越的陡波响应特性对于具有平坦伏秒特性的 $\text{SF}_6$ 气体绝缘变电站（GIS）的保护尤为合适

## ➤ 无续流，结构简单，耐重复动作能力强

---

ZnO非线性电阻在工作电压作用下的泄漏电流只为 $\mu\text{A}$ 数量级，可以视为无续流，可以做成不带串联间隙的避雷器

去掉串联间隙使避雷器结构大大简化，体积和重量减小，而且在保护性能方面避免了间隙带来的放电分散性，时延以及受工作电压影响等缺点

但在另一方面，由于无间隙避雷器的ZnO非线性电阻直接承受工作电压的作用，因此提出了研究ZnO陶瓷材料的小电流特性，特别是在长期工作电压作用下的稳定性能等重要课题

➤ 通流容量大，吸收过电压能量的能力强

---

没有串联间隙烧伤的制约，仅与ZnO电阻片本身有关

与SiC电阻片相比，其单位面积的通流能力大4~4.5倍，而单位体积吸收的过电压能量，则可以大4倍左右

ZnO电阻片的残压特性分散性小，约为SiC的1/3，电流分布特性均匀，可以通过并联电阻片或整只避雷器的方法来提高通流能力

## ■ ZnO避雷器的基本电气参数

---

**额定电压：**允许施加的最大工频电压有效值，即要耐受短时工频过电压，对应SiC的灭弧电压

**最大持续运行电压：**允许长期连续施加的最大工频电压有效值，决定避雷器长期工作的老化性能

**起始动作电压：**从小电流区进入大电流区的电压，直流1mA参考电压

**残压：**包括三种放电电流波形下的残压：陡波( $1/5\mu\text{s}$ )、雷电冲击波( $8/20\mu\text{s}$ )、操作冲击波( $30/60\mu\text{s}$ )

**通流容量：**短时持续时间( $4/10\mu\text{s}$ )大电流(10~65kA)作用两次  
长持续时间(0.5~3.2ms)方波电流(150~1500A)多次

## ■ 评价ZnO避雷器性能优劣的指标

---

### 保护水平

**雷电保护水平** 雷电冲击残压和陡波冲击残压除以1.15中的较大者

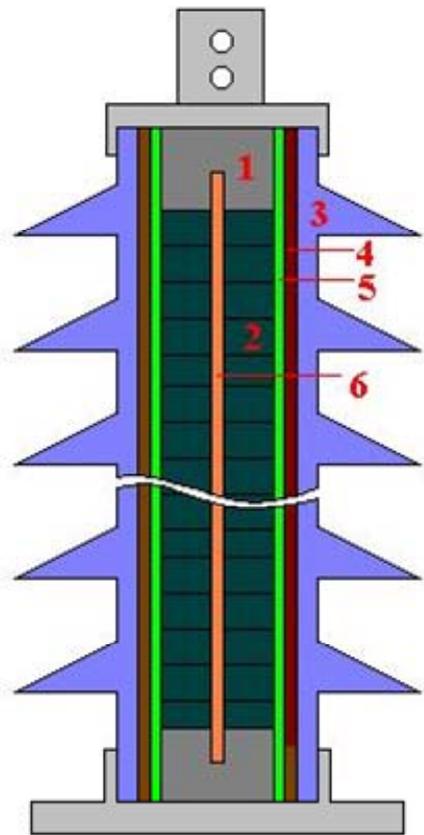
**操作保护水平** 操作冲击残压

**压比**  $U_{10\text{kA}} / U_{1\text{mA}}$

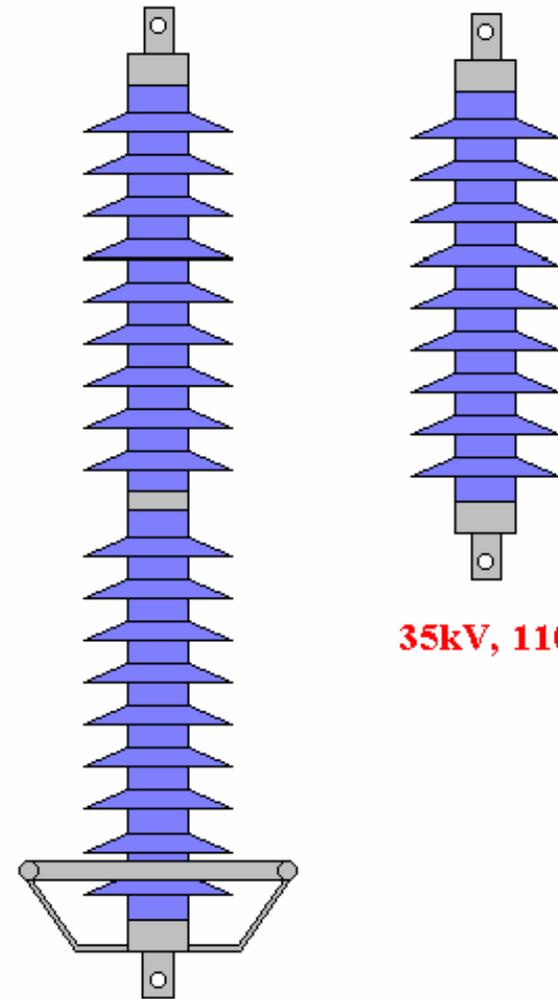
$U_{10\text{kA}}$  : 8/20s标称冲击放电电流下的残压

**荷电率** 最大持续运行电压峰值与起始动作

## 复合外套ZnO避雷器



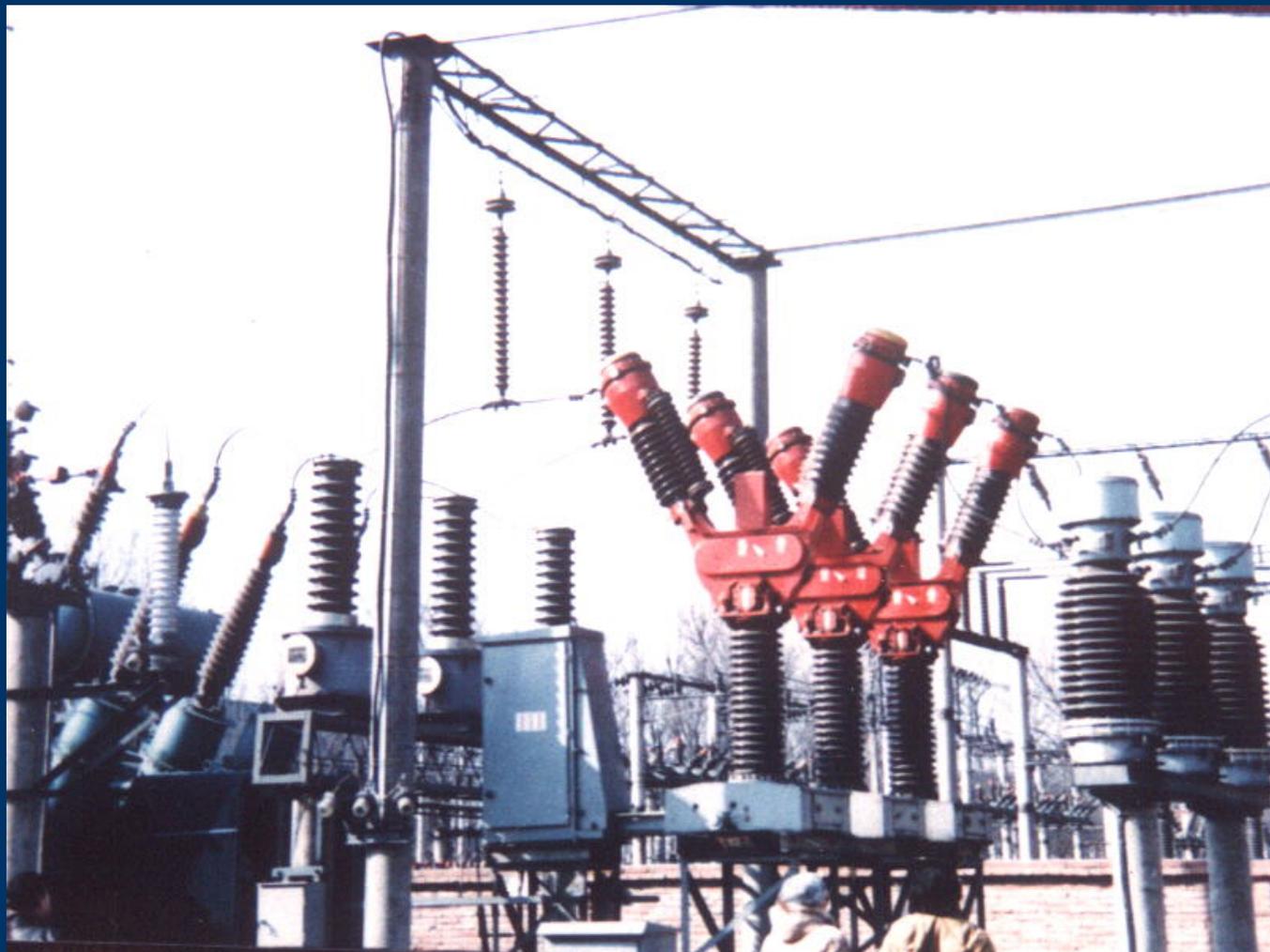
- 1: Metal Part**
- 2: ZnO Varistor**
- 3: Silicon Rubber**
- 4: FRP Cylinder**
- 5: Filled Material**
- 6: FRP Rod**



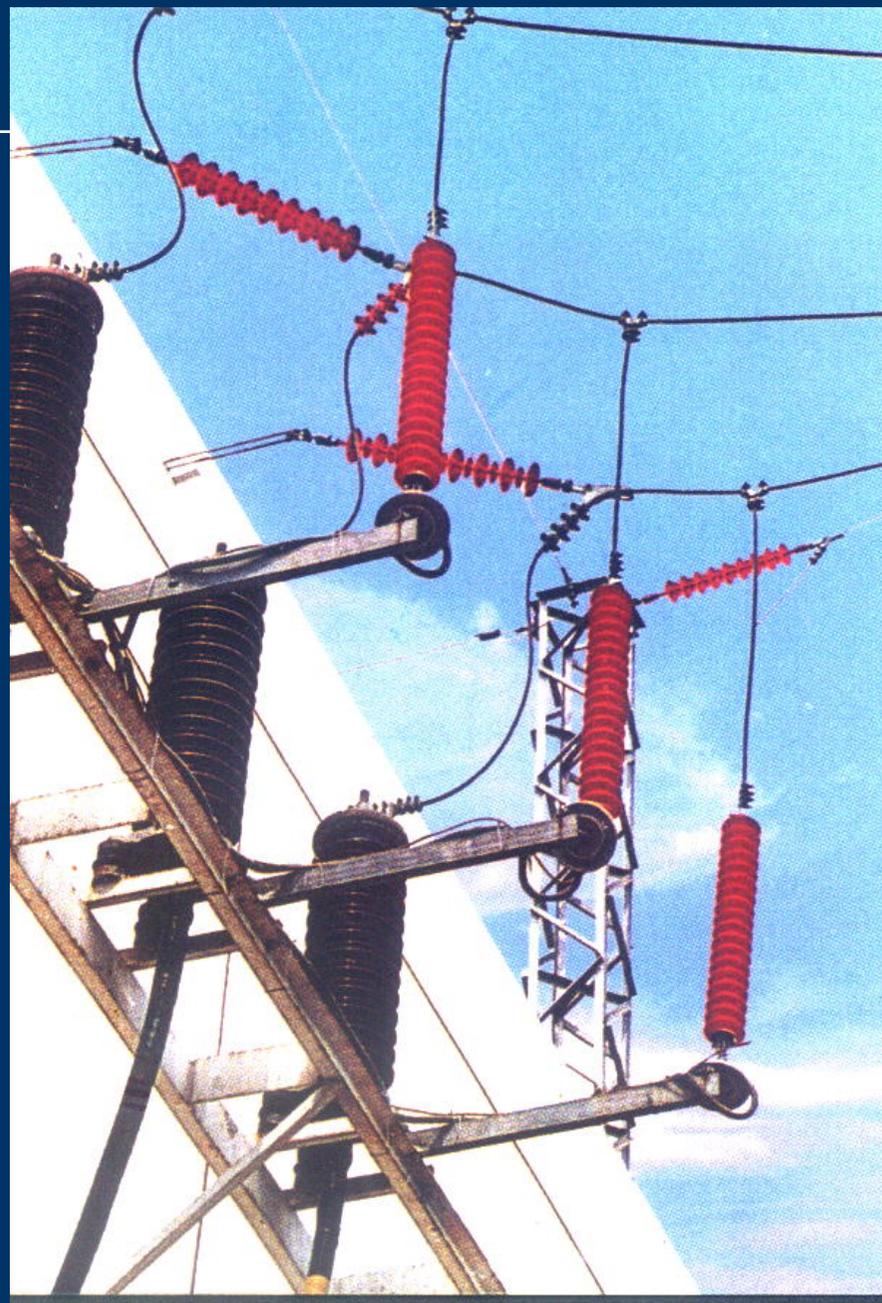
**35kV, 110kV**

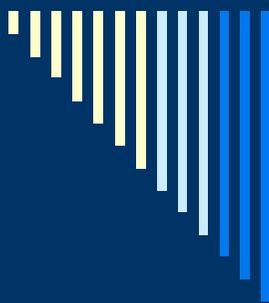
**220kV, 500kV**

# 悬挂式避雷器应用于变电站



## 避雷器应用于室内变电站入口处





---

# 第15讲 防雷装置

- 避雷针、避雷线
  - 避雷器
  - 接地装置
-



## 第三节 接地装置

- 接地、接地装置、接地电阻的定义
  - 接地电阻的特性
  - 典型接地体及其工频接地电阻的计算
  - 接地的分类
  - 冲击接地电阻
-

## 第三节 接地装置

- 接地

将地面上的金属物体或电气回路的某一节点通过导体与大地相连，使该物体或节点与大地经常保持等电位

- 接地装置

包括引线在内的埋设在地中的一个或一组金属体或由金属导体组成的金属网

- 接地电阻的定义

接地点的电位 $U$ (相对无穷远处零电位)与通过接地极流入地中电流 $I$ 的比值

## ■ 接地电阻的特性

- 接地电阻与土壤特性及接地体的几何尺寸有关
- 接地电阻包括接地引线的电阻、接地引线与接地装置的接触电阻、接地体本身的电阻、接地体和土壤间的接触电阻及土壤的散流电阻
- 土壤的散流电阻比其它四种电阻大得多，因此可以近似地认为接地电阻等于散流电阻

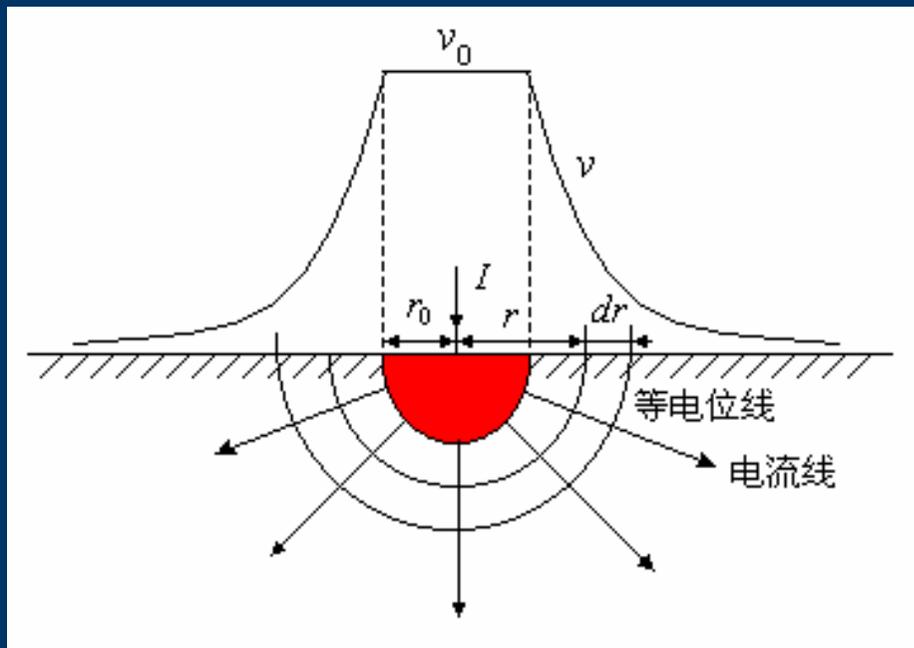
工频接地电阻

冲击接地电阻 时变暂态电阻，接地装置的冲击电压幅值与通过其流入地中的冲击电流的幅值的比值拉

## ■ 典型接地体及其工频接地电阻的计算

通过求解恒定电流场分析得到接地装置的电阻  
(土壤的散流电阻)

### 半球接地体



$$v = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

$$R = \frac{v_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

## 垂直接地体

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (\Omega)$$

## 水平接地体

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{dh} + A \right) \quad (\Omega)$$

## 接地网

$$R = \frac{\rho}{2\sqrt{S}} \quad (\Omega)$$

## 第三节 接地装置

---

- 接地的分类

工作接地

保护接地

防雷接地

## 工作接地

---

- 110kV及以上的电力系统中采用中性点接地的运行方式
- 目的：降低作用在设备绝缘上的电压，因此设备的绝缘水平也可以降低，即达到缩小设备绝缘尺寸、降低设备造价的目的
- 在正常情况下，流过接地装置的电流为系统的不平衡电流，而在系统发生短路故障时将有数十千安的短路电流流过接地装置，持续时间0.5s左右

## 保护接地

---

- 在电气设备发生故障时，电气设备的外壳将带电，如果这时人接触设备外壳，将产生危险。因此为了保证人身安全，所有电气设备的外壳必须接地
- 当电气设备的绝缘损坏而使外壳带电时，流过保护接地装置的故障电流应使相应的继电保护装置动作，切除故障设备
- 可以通过降低接地电阻保证外壳的电位在人体安全电压值之下，从而避免因电气设备外壳带电而造成的触电事故

## 防雷接地

---

- 为了防止雷电对电力系统及人身安全的危害，一般采用避雷针、避雷线及避雷器等雷电防护设备
- 雷电防护设备都必须与合适的接地装置相连，以将雷电流导入大地，这种接地称为防雷接地
- 流过防雷接地装置的雷电流幅值很大，可以达到数百千安，但持续的时间很短，一般只有数十微秒

## ■ 冲击接地电阻

---

时变暂态电阻，接地装置的冲击电压幅值与通过其流入地中的冲击电流的幅值的比值

### ➤ 火花放电

靠近接地体的土壤的电场强度超过土壤的临界击穿场强（一般为 $8.5\text{kV/cm}$ ），则在靠近接地导体区域的土壤中产生火花放电，土壤被击穿，使得靠近接地体的电压降大大减小，接地体的尺寸好象增加了

## ➤ 电感的阻碍作用

考虑电压与电流扩散过程的波动特性。在冲击电流作用过程中，接地极的固有电感将阻止电流由接地极的入口流向远端，于是远端就不能象近端那样有效地流散电流，结果使接地体得不到充分利用

- 如果知道接地装置的冲击接地电阻，就可以根据雷电流的大小估算出接地装置可能出现的最高暂态电位
- 同一接地装置在幅值很高的雷电冲击电流作用下，其冲击接地电阻要小于工频电流下的数值
- 长度较长的接地体在等值频率高的雷电流作用下，电感效应较显著，冲击接地电阻值大于工频接地电阻

# Q & A

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



+80798656, 13691145432



[typ@ncepubj.edu.cn](mailto:typ@ncepubj.edu.cn)