



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》第十四讲

梁曦东

2024-6-7



## 第9章 雷电过电压及其防护

9.1 雷电参数

9.2 防雷保护的基本措施

9.3 架空输电线路的雷电过电压

9.4 发电厂、变电站的雷电过电压及其防护

掌握科学原理  
了解技术措施  
理解工程规范

科学问题：为什么？

技术问题：怎么办？

工程问题：多中选优？

### 本章核心概念：

雷电参数、雷电流、避雷针与避雷线、避雷器、接地装置、接地电阻、土壤电阻率、感应过电压、直击雷（雷击塔顶或雷击导线）过电压、耐雷水平、雷击跳闸率、雷电侵入波

2021-5-27河北金山岭长城落日雷闪





2021-5-27河北金山岭长城落日雷闪



2021-5-27河北金山岭长城落日雷闪







2021-5-27河北金山岭长城落日雷闪



现在从雷电防护的角度想一下，我们可以用哪方面的概念、或哪些参数，尽可能定量描述雷电？

## 第二章曾经学习过 2.3.1 雷电冲击电压的形成与波形

- ⚡ 云间闪、云内闪与云地闪，云中电荷的聚集与分布
- ⚡ 上行雷与下行雷
- ⚡ 先导的发展过程与速度，主放电过程与速度
- ⚡ 雷电发展的三个主要阶段。雷电的分量
- ⚡ 雷云对地的场强，对地电位。被击物的电位
- ⚡ 雷云对地的放电电流与放电量。雷击的破坏性
- ⚡ 雷电的极性
- ⚡ 雷电冲击电压的波形、标准波形

现在从雷电防护的角度想一下，我们可以用哪方面的概念、或哪些参数，尽可能定量描述雷电？



**雷电活动(雷暴强度):** 雷暴日、雷电小时、落雷密度  
**雷电流:** 极性、幅值、陡度、波形(波前、波长)



## 雷电参数



雷电活动(雷暴强度)：雷暴日、雷电小时、落雷密度  
雷电流：极性、幅值、陡度、波形（波前、波长）

## 9.1 雷电参数

### 9.1.1 雷电流的波形和极性（雷电流）

单极性的脉冲波。75% ~ 90%为负极性。

防雷保护与绝缘配合取负极性雷电冲击波进行分析。

如果世界各地都是负极性落地雷为主，地球上的负电荷会不会太多？

雷电流的幅值怎么确定的？

### 9.1.2 雷电流的幅值、陡度、波前、波长（雷电流）

国家标准GB/T 50064-2014 “交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范”推荐： $\log P = -I / 88$ ，即  $I \geq 88\text{kA}$  的概率为10%

对西北少雷地区取： $\log P = -I / 44$

其中  $I$  为雷电流幅值，单位kA； $P$  为雷电流幅值超过  $I$  的概率。

雷电主放电沿着先导通道传播，先导通道波阻抗一般计算中取  $Z = 300 \sim 3000\Omega$ 。

从接地阻抗很小的电流测量装置上测得的雷击点的电流即为上述公式中的雷电流



## 9.1 雷电参数

为什么雷电冲击  
电压的波形是  
 $1.2/50\mu s$ ?

### 9.1.2 雷电流的幅值、陡度、波前、波长（雷电流）

各国测得的雷电流幅值差别较大，波形却基本一致。

波前多在 $1\mu s \sim 5\mu s$ ，平均约为 $2\mu s \sim 2.5\mu s$ 。

我国防雷设计中**取雷电流波前时间为 $2.6\mu s$ ，波形采用 $2.6\mu s/50\mu s$ 。**

雷电流陡度的直接测量更为困难。

我国采用 $2.6\mu s$ 的固定波前时间，认为雷电流的平均陡度 $a(\text{kA}/\mu s)$ 和雷电流幅值 $I(\text{kA})$ 线性相关： **$a = I / 2.6$ 。**

经验公式： **$\log P_a = -a / 36$**

其中 $P_a$ 是出现等于或大于陡度 $a$ 的雷电流的概率

即  $a \geq 36\text{kA}/\mu s$  的概率为10%

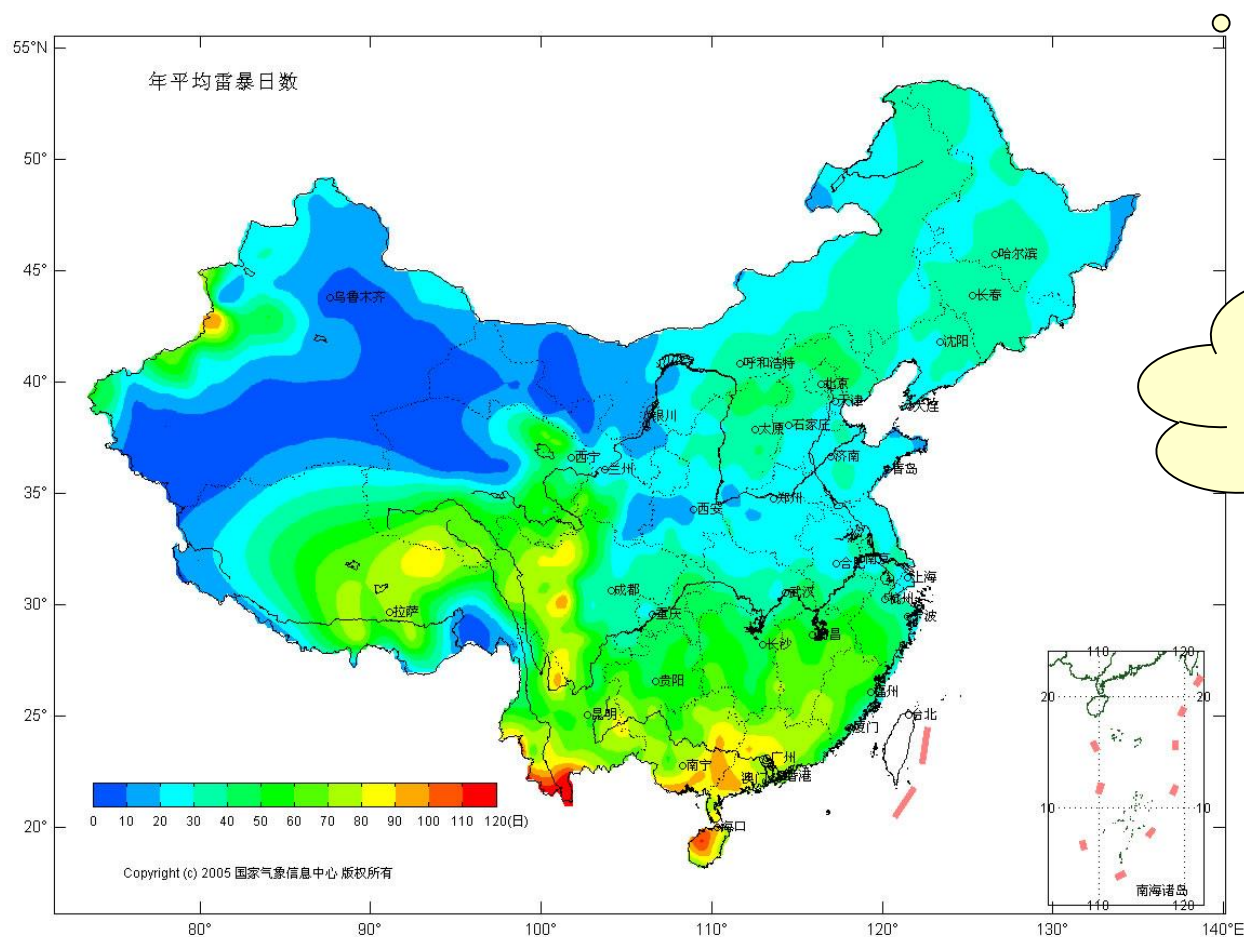


## 9.1 雷电参数

### 9.1.3 雷暴日、雷电小时及落雷密度（雷电活动）

**雷暴日 $T_d$** 是指某地区一年中听到有雷闪放电的天数（不论云间雷或落地雷）

全国按 $T_d$ 的大小分为强雷区、多雷区、中等雷电区、少雷区。



工程上为什么这样粗略划分雷电活动强度？  
需要更精确吗？

少于15日：少雷区；  
15-40日：中等雷电地区  
超过40日：多雷区；  
超过90日：强雷区



## 9.1 雷电参数

### 9.1.3 雷暴日、雷电小时及落雷密度（雷电活动）

**雷暴日 $T_d$** 是指某地区一年中听到有雷闪放电的天数（不论云间雷或落地雷），全国按 $T_d$ 的大小分为强雷区、多雷区、中等雷电区、少雷区。

**雷电小时**：一小时以内听到一次以上雷声的小时数（不论云间雷或落地雷），我国每个雷暴日平均约有3个雷电小时。

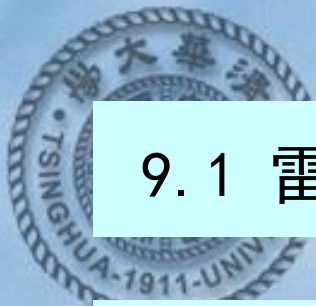
云间放电与云地放电之比，在温带约为1.5 ~ 3.0，在热带约为3 ~ 6。

**落雷密度 $\gamma$** ：每雷暴日中每平方公里地面内落雷的次数。

在DL/T620-1997中，我国取 $\gamma = 0.07$ 次/(雷日 $\text{km}^2$ )。对于 $T_d=40$ 雷日的地区，每百公里输电线路每年遭受雷击的次数  $N_L=0.28(b+4h)$ 。

对一般220kV线路，避雷线间宽度 $b=11.6\text{m}$ ，避雷线对地平均高度 $h=24.5\text{m}$ ，则 $N_L=30.7$ 次/百公里年。

对一般500kV线路， $b=18.6\text{m}$ ， $h=27.25\text{m}$ ，则 $N_L=35.7$ 次/百公里年。



## 9.1 雷电参数

### 9.1.1 雷电流的波形和极性（雷电流）

### 9.1.2 雷电流的幅值、陡度、波前、波长（雷电流）

### 9.1.3 雷暴日、雷电小时及落雷密度（雷电活动）

### 9.1.4 雷电定位系统对雷电活动的测量 (Lightning Location System)

雷电参数中  
为什么没有电压  
这一项呢？

遭受雷电后，被击物体  
的电位有多高？  
怎么确定雷击物的电位？

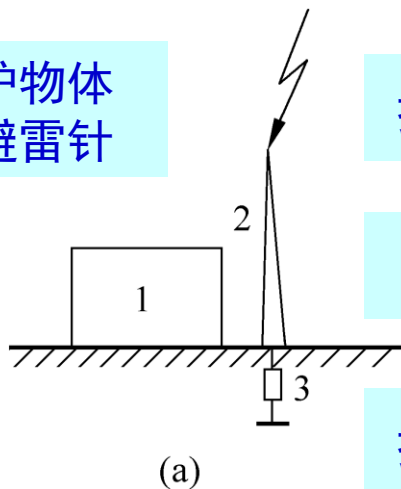


## 9.2 防雷保护的基本措施

雷闪放电是难以制止的。主要是设法去**躲避和削弱**它的破坏性，即采取防雷保护措施。 **防雷措施的正确使用至关重要！**

基本措施：**（避雷针、避雷线、避雷器）+ 接地装置**

在被保护物体附近的避雷针

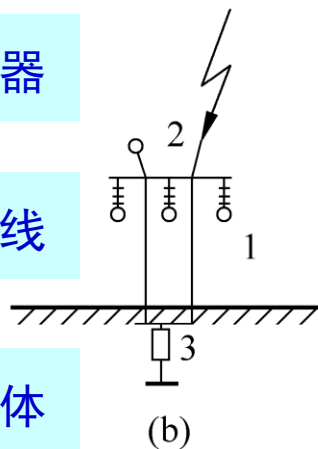


接闪器

引下线

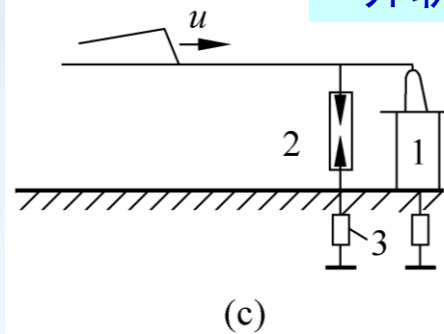
接地体

(a)



(b)

与被保护设备并联的避雷器



接地体

(c)

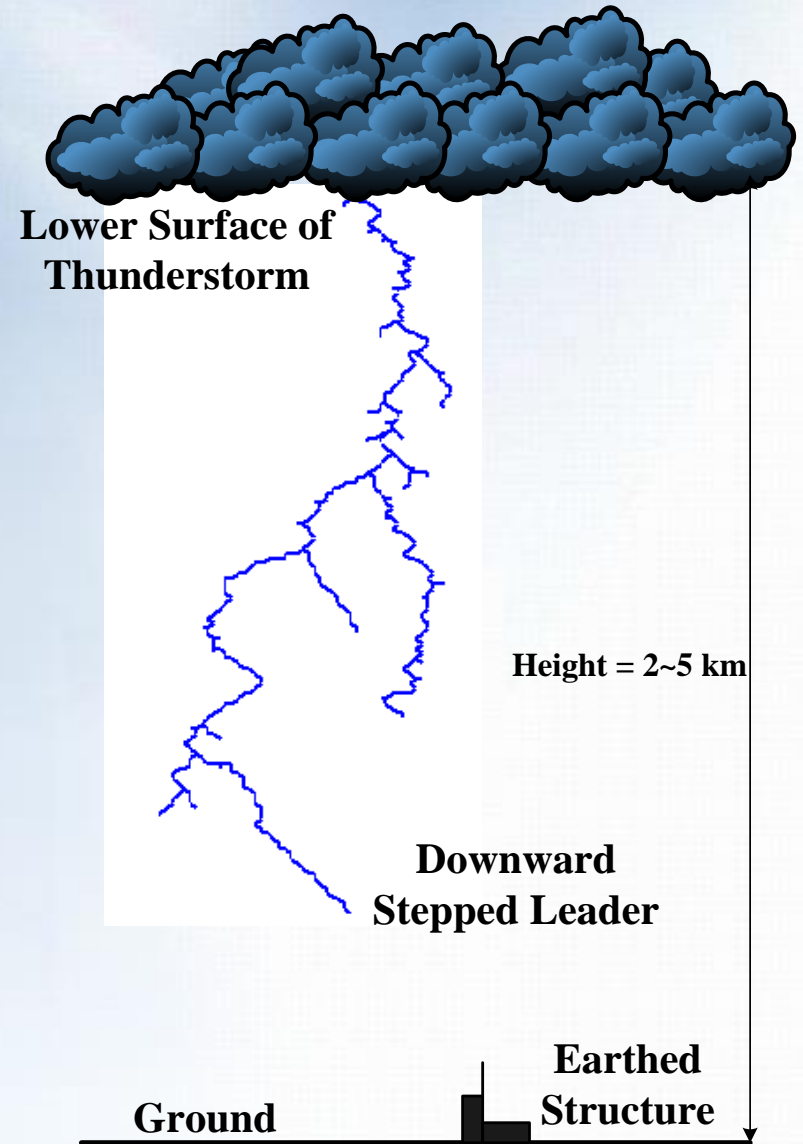
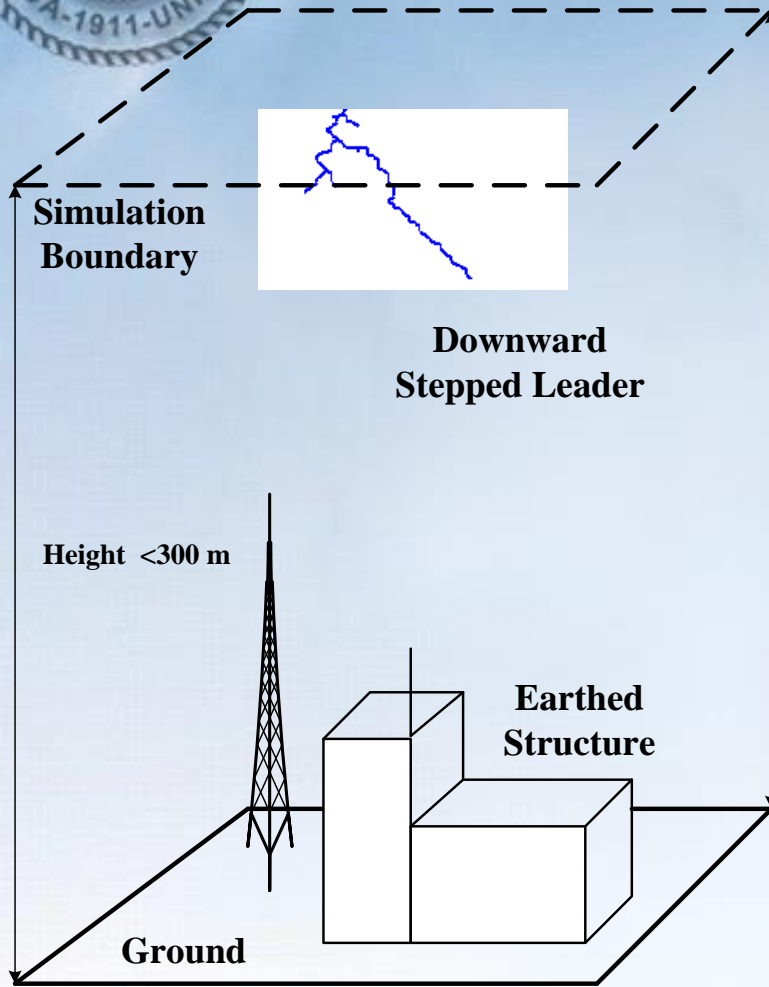
1—被保护物体  
2—**避雷针**  
3—接地装置

1—导线  
2—**避雷线**  
3—接地装置

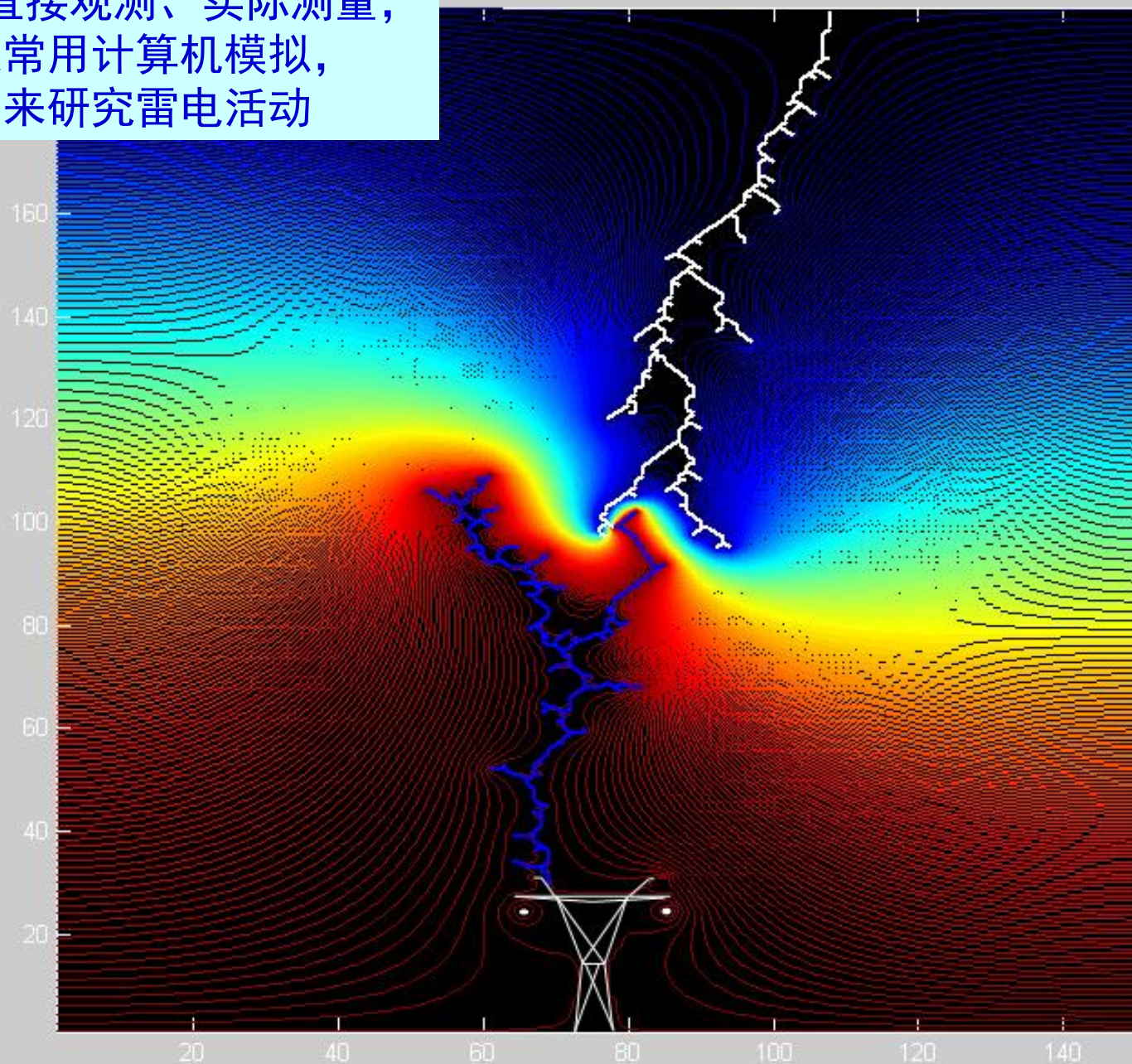
1—电气设备  
2—**避雷器**  
3—接地装置

防雷保护基本措施示意图

除了直接观测、实际测量，  
还常用计算机模拟，  
来研究雷电活动



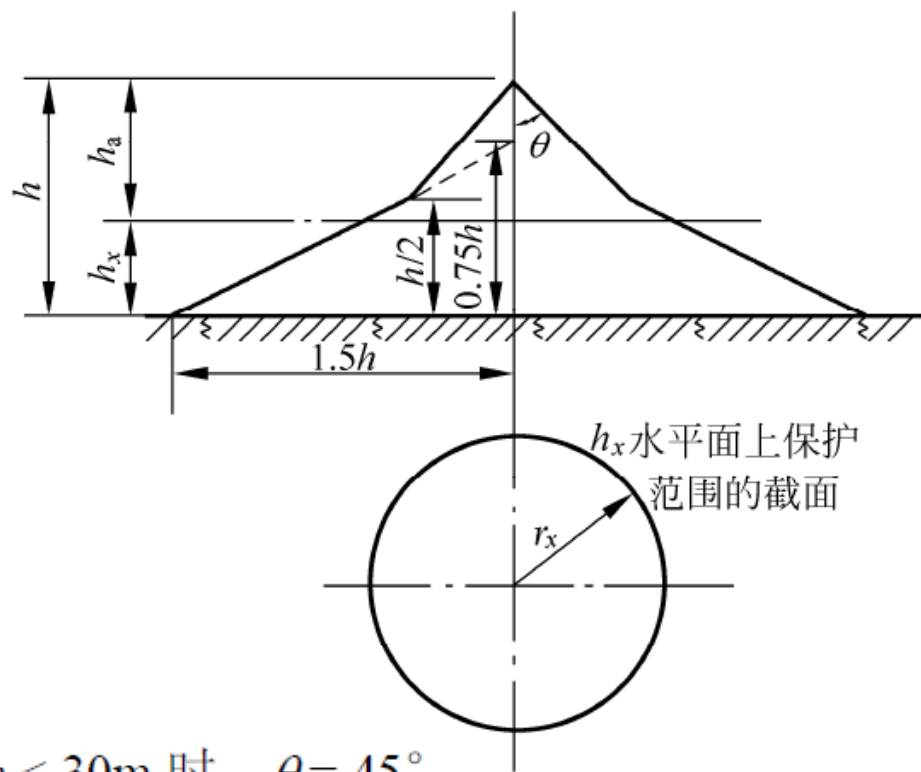
除了直接观测、实际测量，  
还常用计算机模拟，  
来研究雷电活动





## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.1 避雷针 定向高度、保护范围（99.9%保护概率）



#### 单根避雷针的保护范围

$$\left. \begin{aligned} r_x &= (h - h_x)p = h_a p, & h_x &\geq h/2 \\ r_x &= (1.5h - 2h_x)p, & h_x &< h/2 \end{aligned} \right\}$$

式中  $h$ 、 $h_x$ 、 $h_a$ 、 $r_x$  的单位均为 m

$p$  是避雷针的高度影响系数,

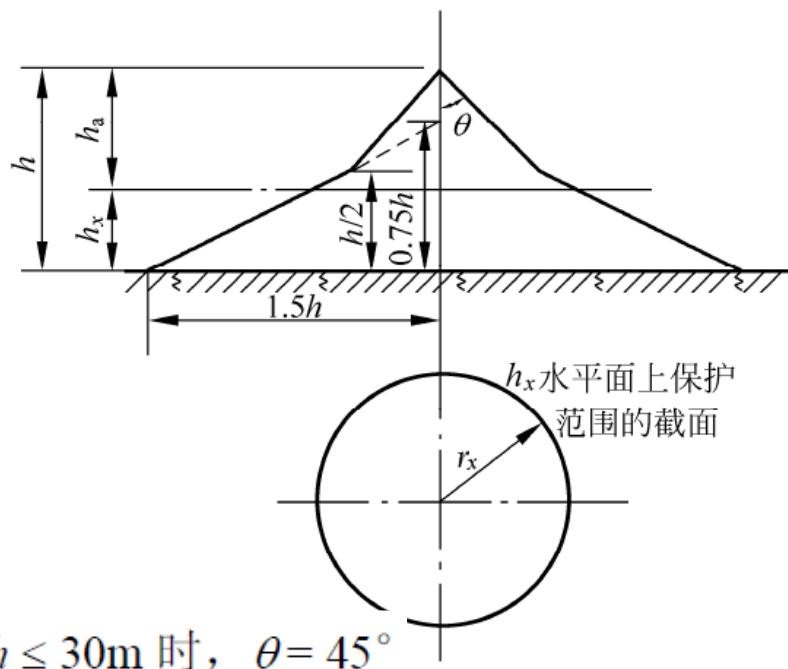
$h \leq 30\text{m}$  时,  $\dots\dots\dots p = 1$

$30\text{m} < h \leq 120\text{m}$  时,  $p = 5.5 / \sqrt{h}$

$h > 120\text{m}$  时,  $p$  按照 120m 时计算

## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.1 避雷针 定向高度、保护范围（99.9%保护概率）



单根避雷针的保护范围

变电站等设备集中的场所，往往在四周布置(为何不在中间布置?)若干个独立避雷针，防止直击雷



## 9.2 防雷保护的基本措施

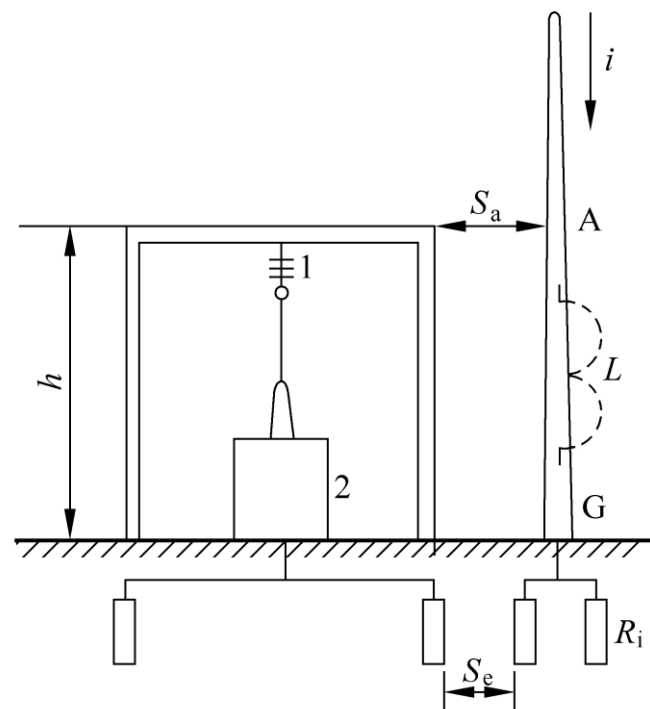
### 9.2.1 避雷针 定向高度、保护范围（99.9%保护概率）

避雷针与被保护物体之间，  
必须保持足够的安全距离！

避雷针的接地装置与被保护物体的接地装  
置在地下，也必须保持足够的距离！

一旦避雷针上有雷电流流下，则避雷针不再  
是地电位，避雷针各处电位也不再相等！

一旦发生“反击”，弱电设备的接地网将出现大幅电位抬升！危害极大！





## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.1 避雷针 定向高度、保护范围（99.9%保护概率）

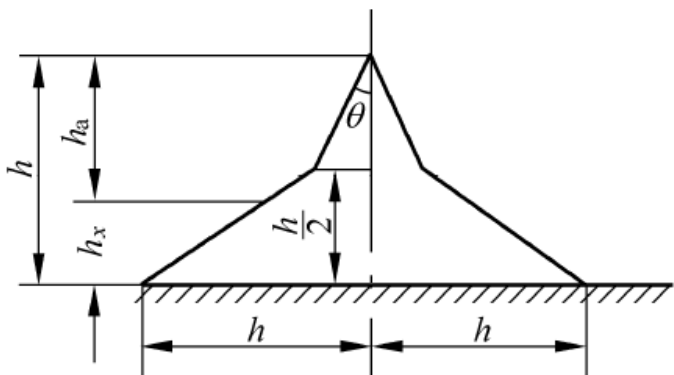
变电站大了，四周  
避雷针保护范围够吗？



变电站等设备集中的场所，往往在  
四周布置避雷针，防止直击雷

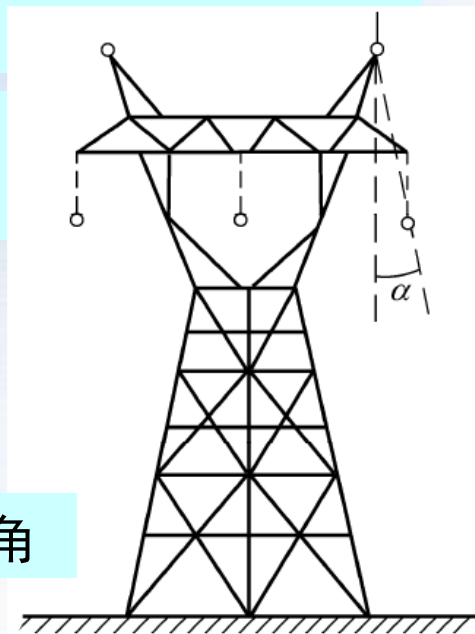
## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.2 避雷线 保护角、保护范围



$h \leq 30\text{m}$  时,  $\theta = 25^\circ$

高电压等级线路, 往往  
全线布置避雷线



避雷线的保护角

高压输电线路, 一般取保护角  $\alpha = 20^\circ \sim 30^\circ$   
对 220kV~330kV 的线路, 一般取  $\alpha = 20^\circ$  左右  
对 500kV 线路, 一般取  $\alpha$  不大于  $15^\circ$   
山区宜采用较小的保护角  
线路防雷要求很高时, 还可采用负保护角

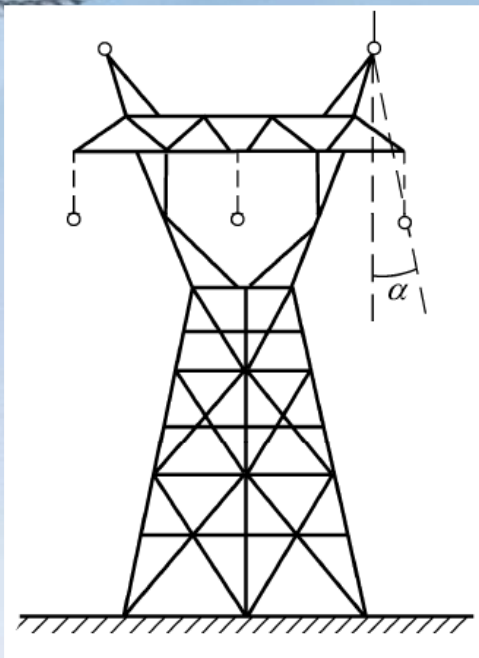
单根避雷线的保护范围

$$\left. \begin{aligned} r_x &= 0.47(h - h_x)p, & h_x &\geq h/2 \\ r_x &= (h - 1.53h_x)p, & h_x &< h/2 \end{aligned} \right\}$$

## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.2 避雷线 保护角、保护范围

所有避雷线都永远  
在输电线的上方吗？



避雷线的保护角

高电压等级线路，往往全线布置避雷线  
线路防雷要求很高时，还可采用负保护角





## 9.2 防雷保护的基本措施

### 建筑物的屋顶避雷带及引下线、接地装置



## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.3 避雷器

### 非线性伏安特性、避雷器残压、工频续流

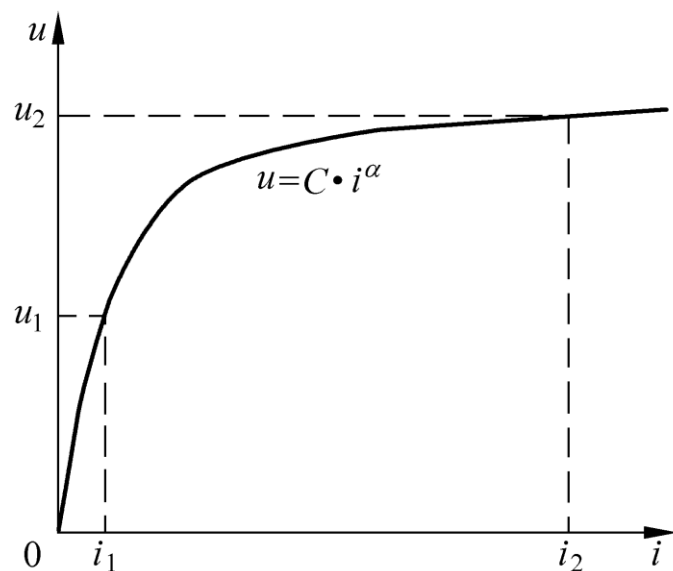
阀型避雷器(SiC)（有串联间隙）、金属氧化物避雷器(ZnO)（无间隙）工作原理

避雷器与被保护设备就近并联安装，正常情况下不导通，当入侵过电压达到避雷器动作电压时，导通大电流入地。

**对避雷器的两条基本要求：** (1)具有**良好的伏秒特性和较低的冲击电流残压**，从而易于实现合理的绝缘配合； (2)具有**较强的快速切断工频续流**，快速自动恢复绝缘强度的能力。

通常要求避雷器在第一次电流过零时即应切断工频续流，从而使电力系统在开关尚未跳闸时即能够继续正常工作。

SiC避雷器串联间隙的作用之一，ZnO不必。



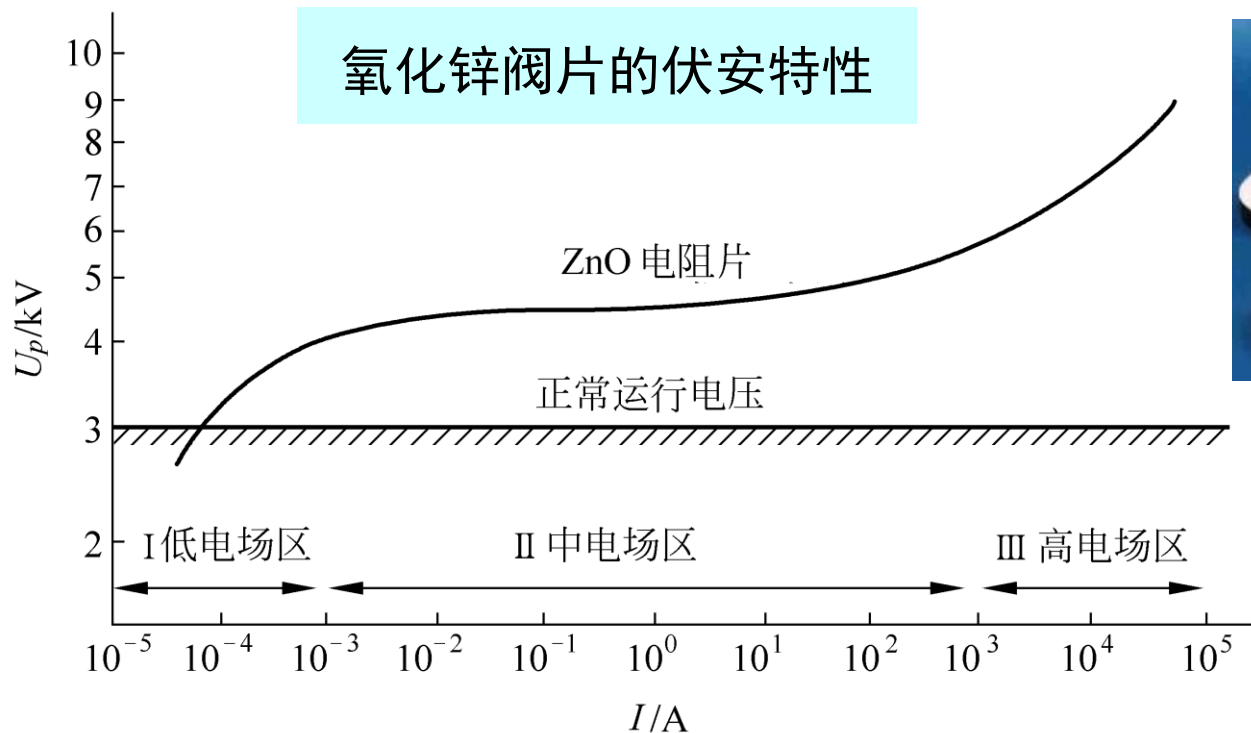
避雷器阀片的静态伏安特性  
 $i_1$ —工频续流； $u_1$ —工频电压；  
 $i_2$ —雷电流； $u_2$ —避雷器残压

SiC和ZnO的非线性伏安特性：  
大电流下低电阻、小电流下高电阻

## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.3 避雷器 ZnO无间隙避雷器工作原理

氧化锌阀片的伏安特性



氧化锌阀片

氧化锌阀片的伏安特性，比碳化硅阀片要好很多，非线性系数  $\alpha \approx 0.015-0.05$  左右。因此可以省去串联间隙

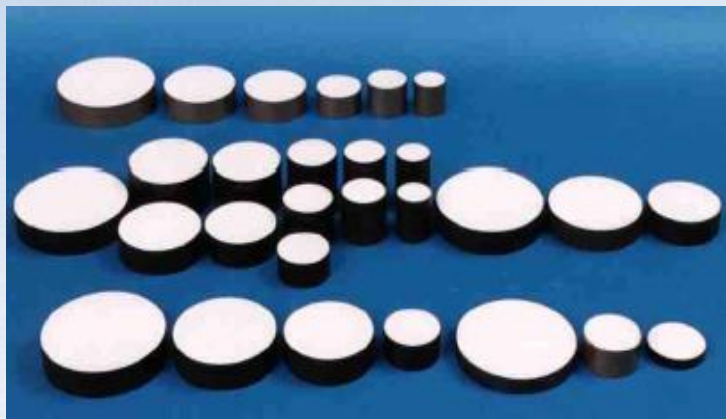


## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.3 避雷器 ZnO无间隙避雷器工作原理

金属氧化物避雷器的  
主要性能参数：

持续运行电压、  
额定电压、参考电压、  
保护水平、吸收能量

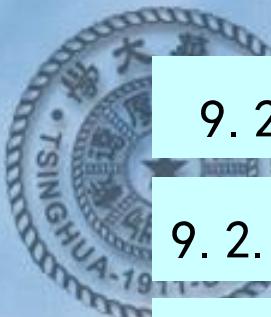


例如：某种类型 500kV 瓷外套氧化锌避雷器的技术参数如下，持续运行电压 375kV（有效值）  
额定电压 468kV（有效值），参考电压 655kV，操作冲击保护水平 950kV。





变压器、避雷器  
与电压互感器



## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.4 接地装置

埋入地中的金属接地体称接地装置，其作用是降低接地电阻。接地装置按工作特点可分为：

**工作接地**（如中性点接地）， $0.5 \sim 5\Omega$

**保护接地**（如设备外壳接地），

高压设备 $1 \sim 10\Omega$ ；低压设备 $10 \sim 100\Omega$

**防雷接地**（如避雷针、避雷线的接地），

平原地区冲击接地电阻小于 $7\Omega$ ，山区小于 $15\Omega$

以及**防静电接地**

接地系统的电气参数：接地电阻、接触电位差、跨步电位差。

**接地电阻（接地阻抗）**：接地点的电位与接地电流的比值。

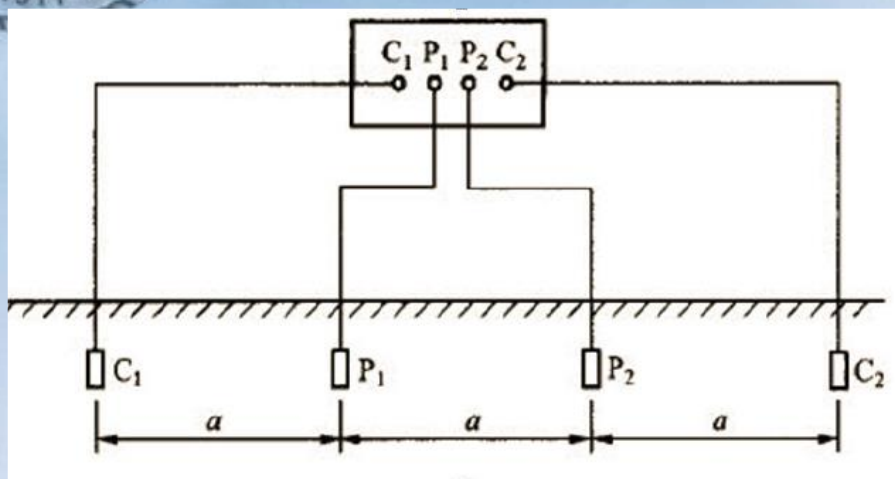
**土壤电阻率**



## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.4 接地装置

### 土壤电阻率及其测量



$$\rho = 2\pi aR$$

测量土壤电阻率的  
等距四极法

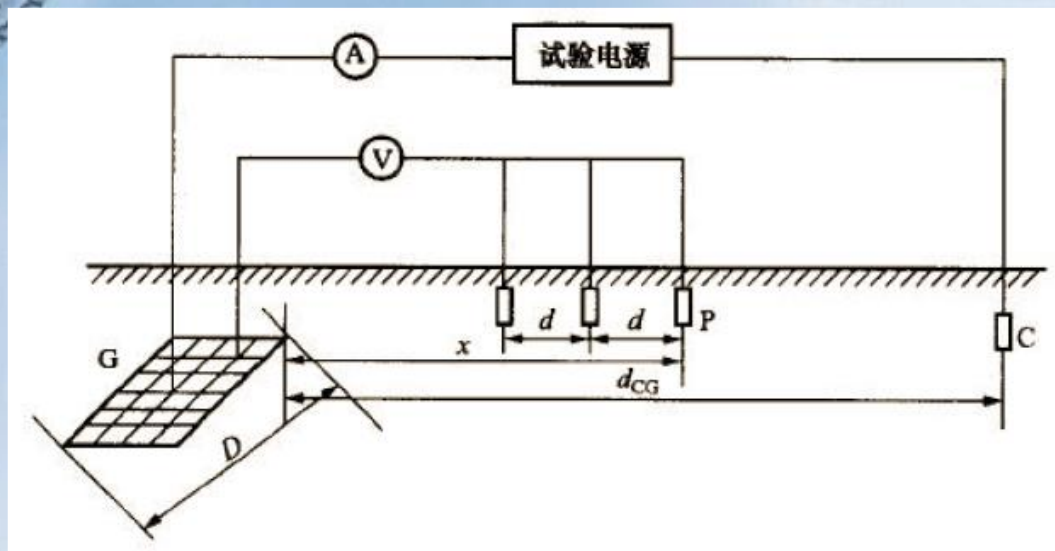
### 几种典型土壤的电阻率

土壤类别	电阻率 $\rho / \Omega \cdot \text{m}$	土壤类别	电阻率 $\rho / \Omega \cdot \text{m}$
沼泽地	5 ~ 40	砂砾土	2000 ~ 3000
泥土、粘土、腐植土	20 ~ 200	山地	500 ~ 3000
沙土	200 ~ 2500		

## 9.2 防雷保护的基本措施

### 9.2.4 接地装置

### 接地装置接地电阻的测量



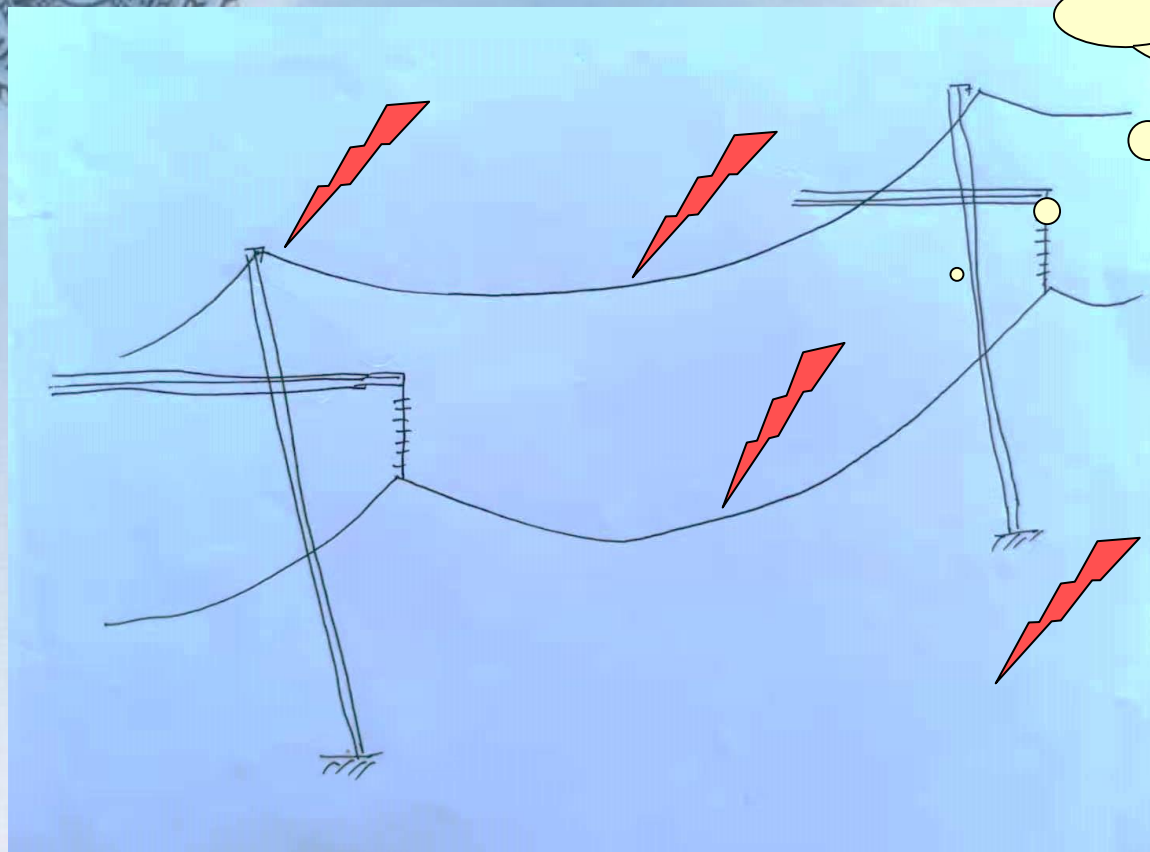
测试接地装置  
接地电阻的  
电位降法

- 试验电源产生的电流  $I$  使地面电位变化。
- 电位极P从G的边缘开始向外移动，测试P与G之间的电位差  $U$ ，绘出  $U$  与  $x$  的变化曲线，曲线平坦处为电位零点，与曲线起点间的电位差即为  $U_m$ 。
- 接地装置的接地电阻  $R = U_m / I$

雷电冲击大电流下接地装置表现出来的**接地阻抗**与  
工频电流下测得的**接地电阻**是有差别的，习惯上仍称接地电阻

### 9.3 架空输电线路的雷电过电压

这些雷电过电压  
是怎么产生的？



雷击输电线路过电压：

雷击塔顶过电压

雷击导线过电压

感应过电压

线路防雷指标：

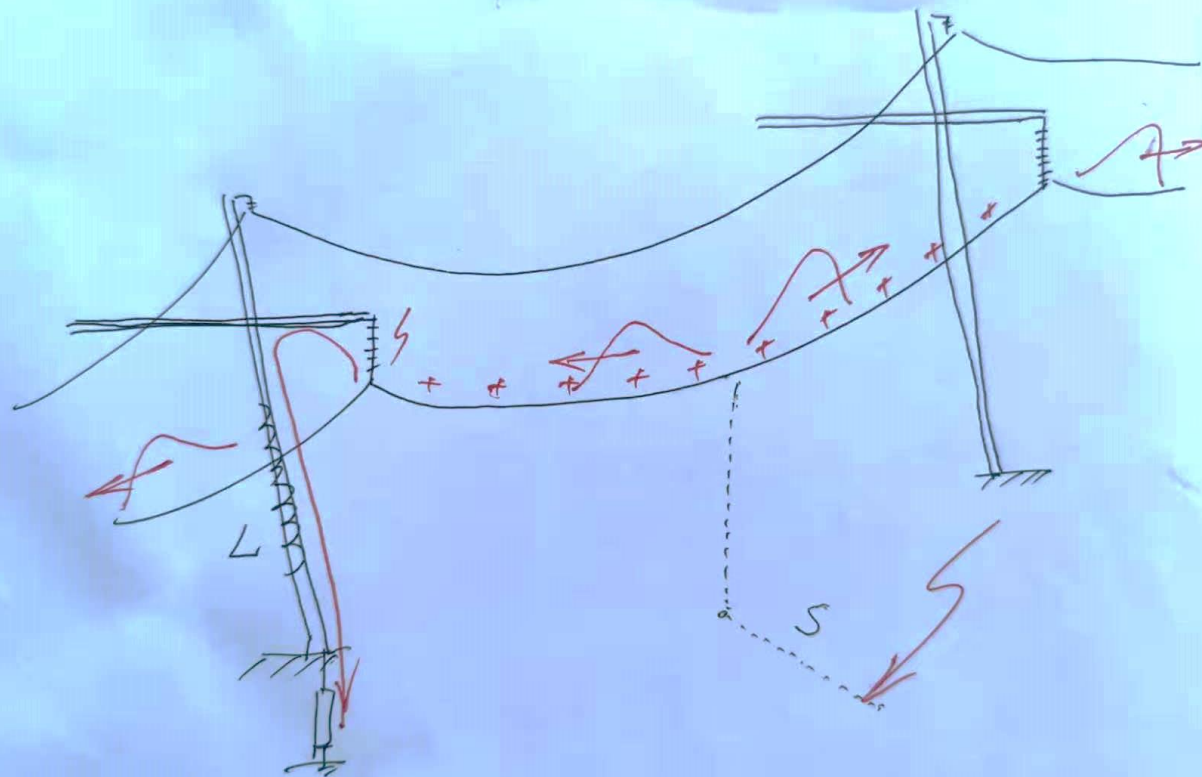
耐雷水平

雷击跳闸率

雷击输电线路不同部位引发不同的雷电过电压示意图



### 9.3 架空输电线路的雷电过电压



雷击输电线路附近地面引发感应过电压示意图

感应过电压通常仅对110kV以下等级的线路才有威胁

#### 雷击地面：

雷击距离导线弧垂最低处 $S$ 米远的地面时，在导线上产生的感应过电压幅值

$$U \approx 25 I h / S \quad \text{kV}$$

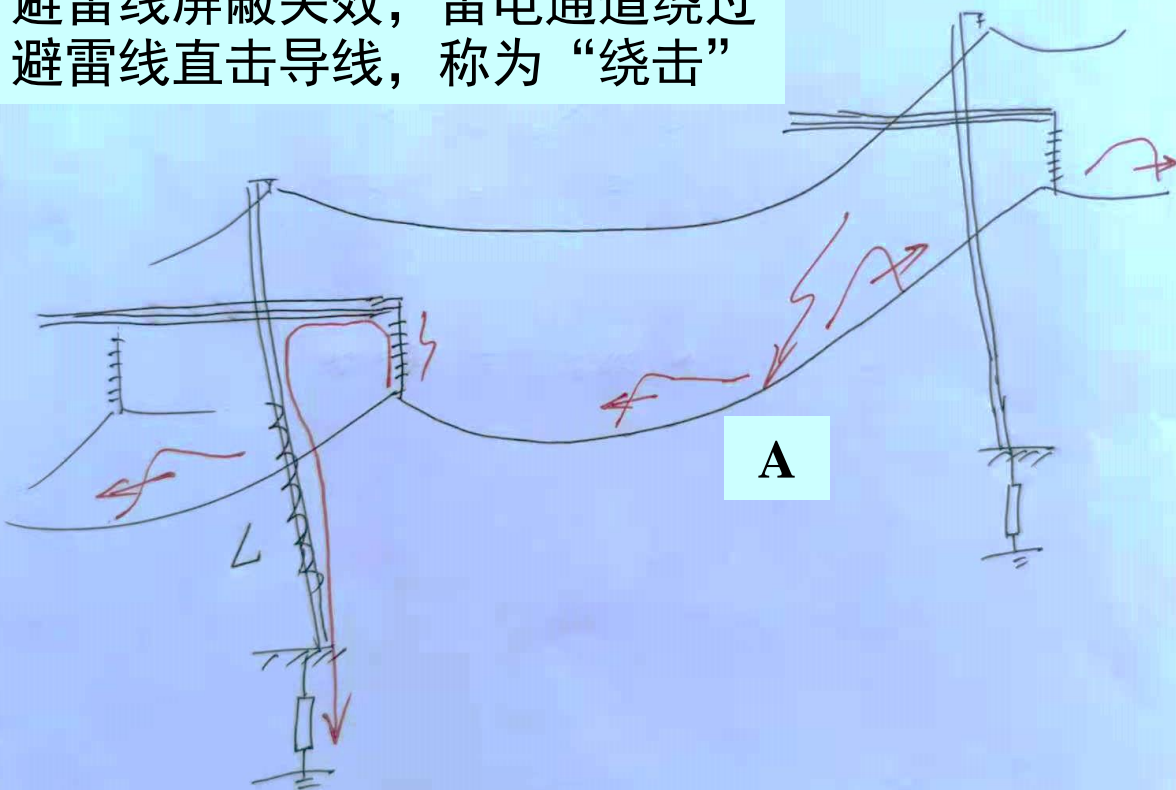
耐雷水平  $I \approx U_{50(+)} S / 25h$

当感应过电压超过绝缘子串 $U_{50}$ 时，绝缘子闪络，部分雷电流入地。

导线对地短路，形成工频续流，继电保护跳闸。部分雷电波继续向两侧变电站传播。

### 9.3 架空输电线路的雷电过电压

避雷线屏蔽失效，雷电通道绕过避雷线直击导线，称为“绕击”



雷击输电线路导线引发的直击雷过电压示意图

雷击导线的耐雷水平太低，对所有电压等级的线路都是大威胁！一定要降低绕击率！

雷电绕击导线时，雷击点A处的过电压幅值

$$U_A \approx IZ/4 \quad \text{kV}$$

线路耐雷水平

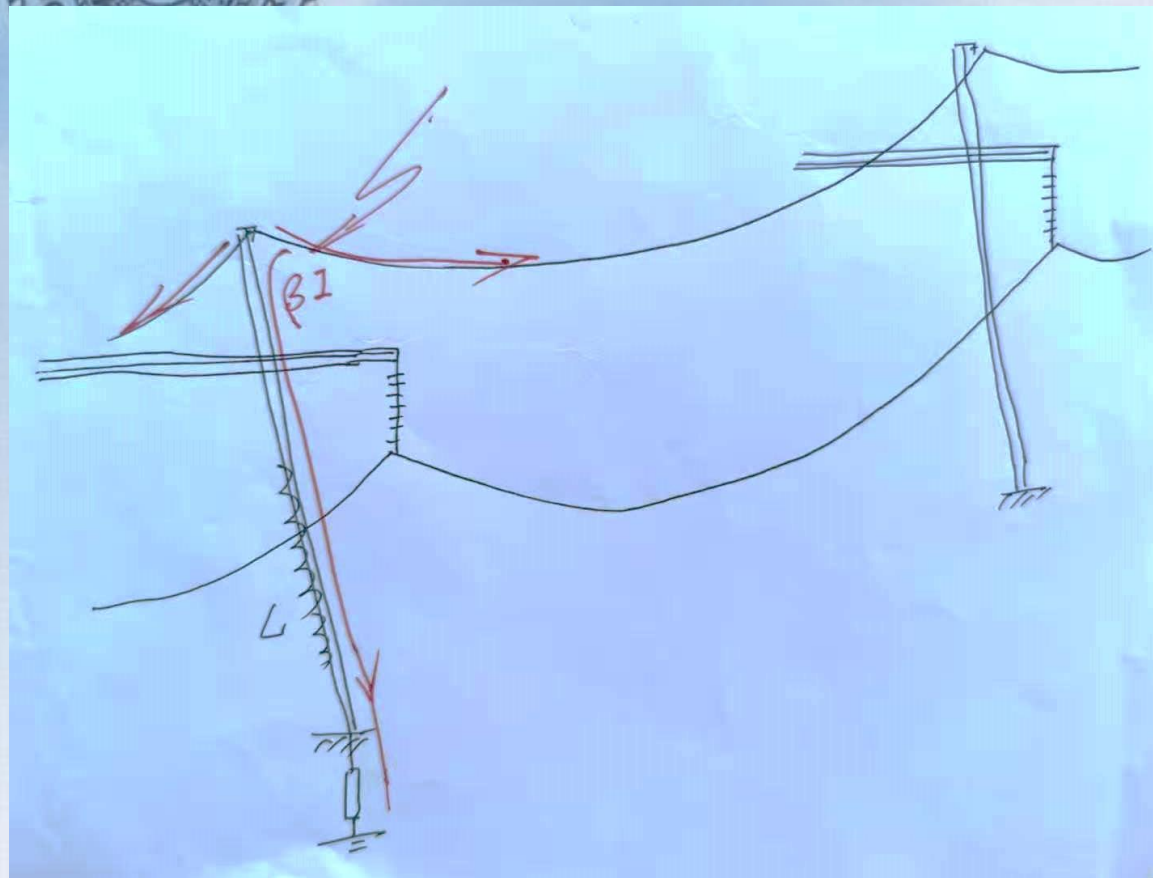
$$I_{\text{耐}} = 4U_{50}(-)/Z \\ \approx U_{50}(-)/100 \quad \text{kA}$$

当雷击导线过电压超过绝缘子串 $U_{50}$ ，绝缘子闪络，部分雷电流入地。

导线对地短路，形成工频续流，继电保护跳闸。

部分雷电波继续向两侧变电站传播。

### 9.3 架空输电线路的雷电过电压

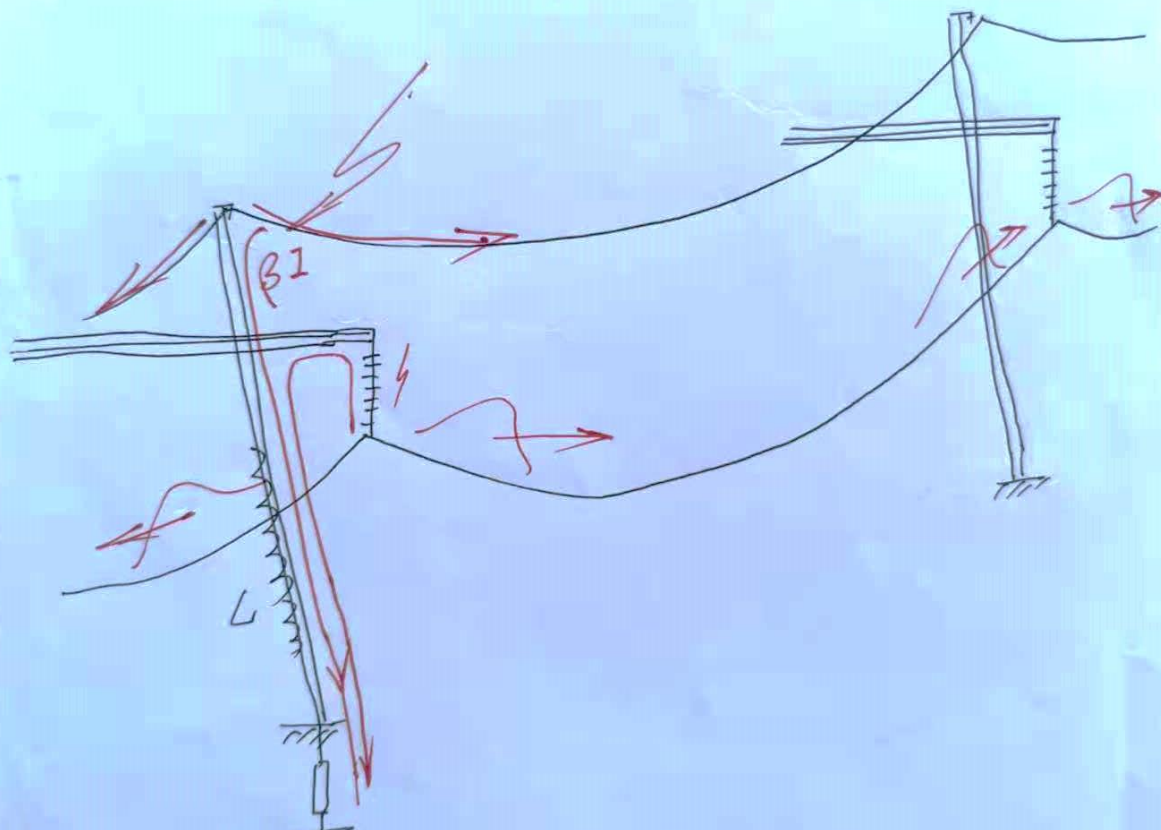


当雷击塔顶时，除避雷线分流外，大部分雷电流  $\beta I$  沿杆塔入地，在接地电阻和杆塔接地引下线电感上形成电压降，横担电压升高，称为“反击”

雷击输电线路塔顶附近避雷线引发的雷击塔顶过电压示意图



### 9.3 架空输电线路的雷电过电压



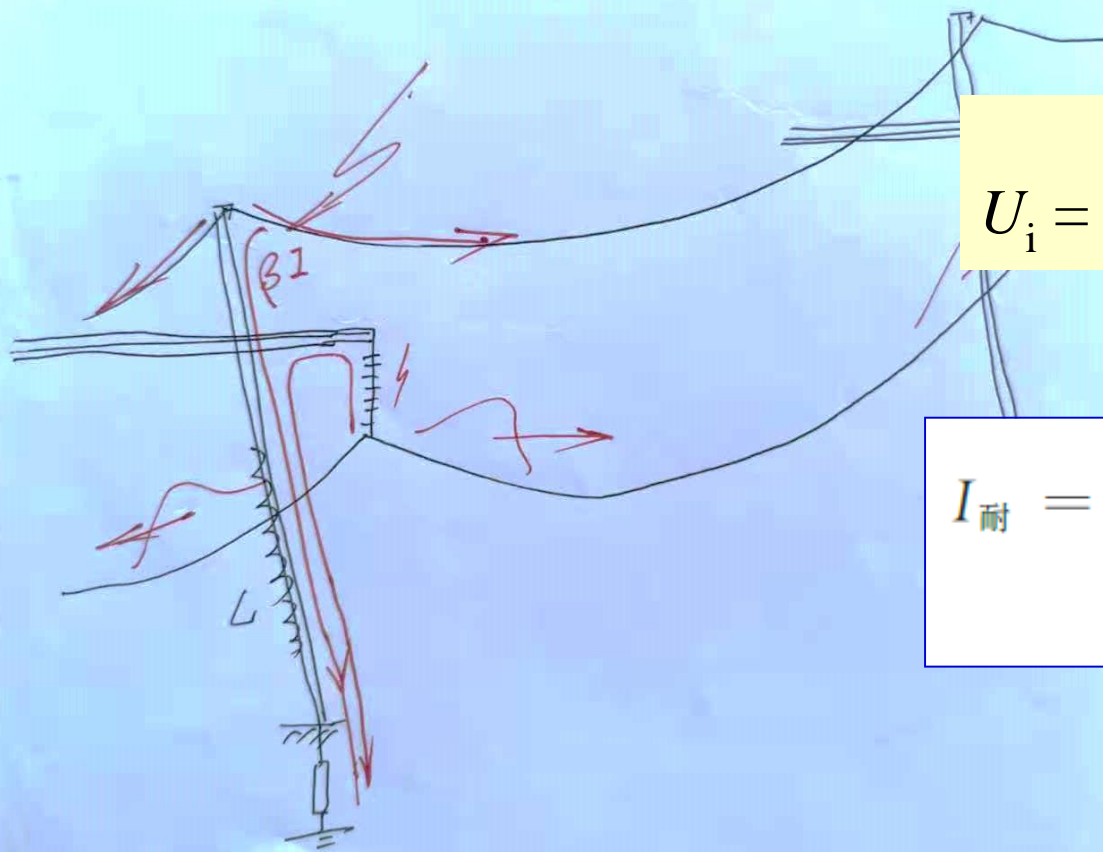
雷击输电线路塔顶附近避雷线引发的  
雷击塔顶过电压示意图

当雷击塔顶时，除避雷线分流外，大部分雷电流  $\beta I$  沿杆塔入地，在接地电阻和杆塔接地引下线电感上形成电压降，横担电压升高，称为“反击”

当横担电压超过绝缘子串  $U_{50}$  时，绝缘子闪络，导线对地短路，形成工频续流，  
继电保护跳闸。

部分雷电波继续沿导线向两侧变电站传播。

### 9.3 架空输电线路的雷电过电压



雷电塔顶时，绝缘子串上的过电压幅值

$$U_i = (1 - k) \left[ \beta \left( R_i + \frac{L_t}{\tau_f} \right) + \frac{h}{\tau_f} \right] \cdot I$$

线路耐雷水平

$$I_{\text{耐}} = \frac{U_{50}}{(1 - k) \left[ \beta \left( R_i + \frac{L_t}{\tau_f} \right) + \frac{h}{\tau_f} \right]}$$

雷击输电线路塔顶附近避雷线引发的雷击塔顶过电压示意图

## 9.3 架空输电线路的雷电过电压

雷击输电线路过电压：

雷击塔顶过电压  
雷击导线过电压  
感应过电压

线路防雷指标：

耐雷水平  
雷击跳闸率

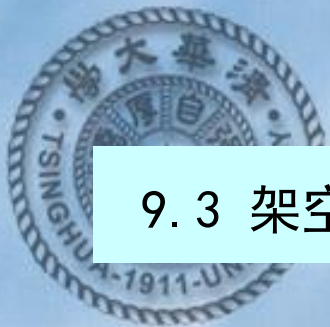
表9-2是DL/T 620-1997  
给出的线路典型杆塔的  
耐雷水平和雷击跳闸率

表 9-2 架空输电线路典型杆塔的耐雷水平及雷击跳闸率

电压等级 / kV	500	330	220	110	66	35
雷击杆塔时	125~175	100~150	75~110	40~75	30~60	20~30
耐雷水平 / kA						
平原跳闸率 (次/百公里·年)	0.081	0.12	0.25	0.83		
山区跳闸率 (次/百公里·年)	0.17~0.42	0.27~0.60	0.43~0.95	1.18~2.01		

注：跳闸率中，平原对应  $R_i=7\Omega$ ，山区两数据分别对应  $R_i$  为  $7\Omega$  和  $15\Omega$ 。





### 9.3 架空输电线路的雷电过电压

如此悬挂的避雷器为什么能防止绝缘子闪络？



线路避雷器

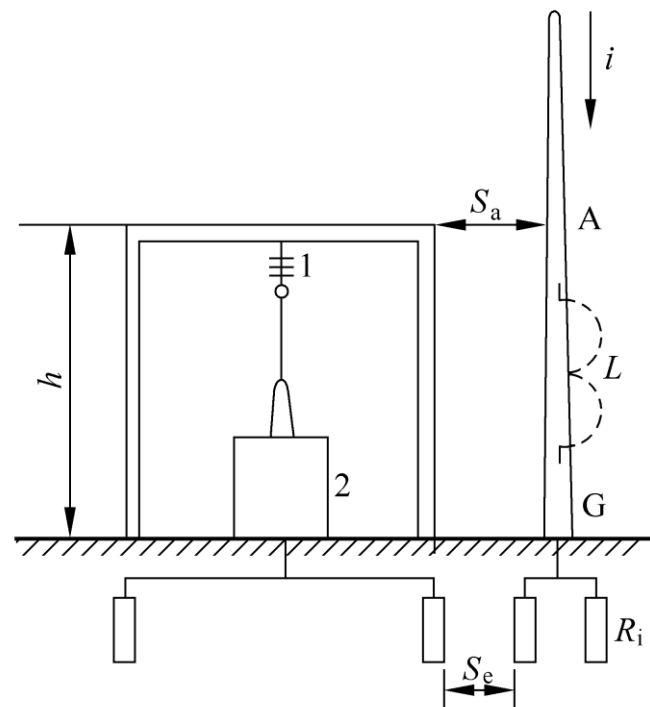
## 9.4 发电厂、变电站的雷电过电压及其防护

### 9.4.1 直击雷过电压防护

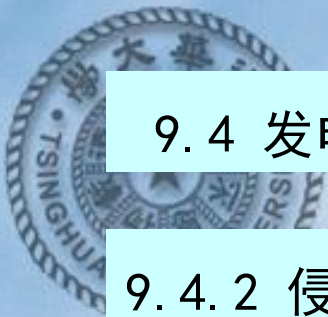
避雷针与被保护物体之间，  
必须保持足够的安全距离！

避雷针的接地装置与被保护物体的接地装  
置在地下，也必须保持足够的距离！

一旦避雷针上有雷电流流下，则避雷针不再  
是地电位，避雷针各处电位也不再相等！



一旦发生“反击”，“高压窜入二次回路”，  
弱电设备的接地网将出现大幅电位抬升！危害极大！



## 9.4 发电厂、变电站的雷电过电压及其防护

### 9.4.2 侵入波防护

发电厂变电站设备集中，采用避雷针后可以非常有效地防护直击雷。因此沿输电线的侵入波成为厂站防雷的主要对象。

侵入波事故50%是1km内落雷造成，75%是3km内落雷造成。

厂站防雷的主要措施是采用避雷器，同时在进线段上采取辅助措施限制雷电流幅值、降低侵入波陡度。

避雷器在冲击电流下的残压是发电厂、变电站内各类设备绝缘配合的基础。第十章将介绍绝缘配合。