



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》第四讲

梁曦东

2024-3-22



## 第2章 不同电压形式下空气的绝缘特性

- 2.1 电场分布的分析与电场调整
- 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性
- 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.4 操作冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

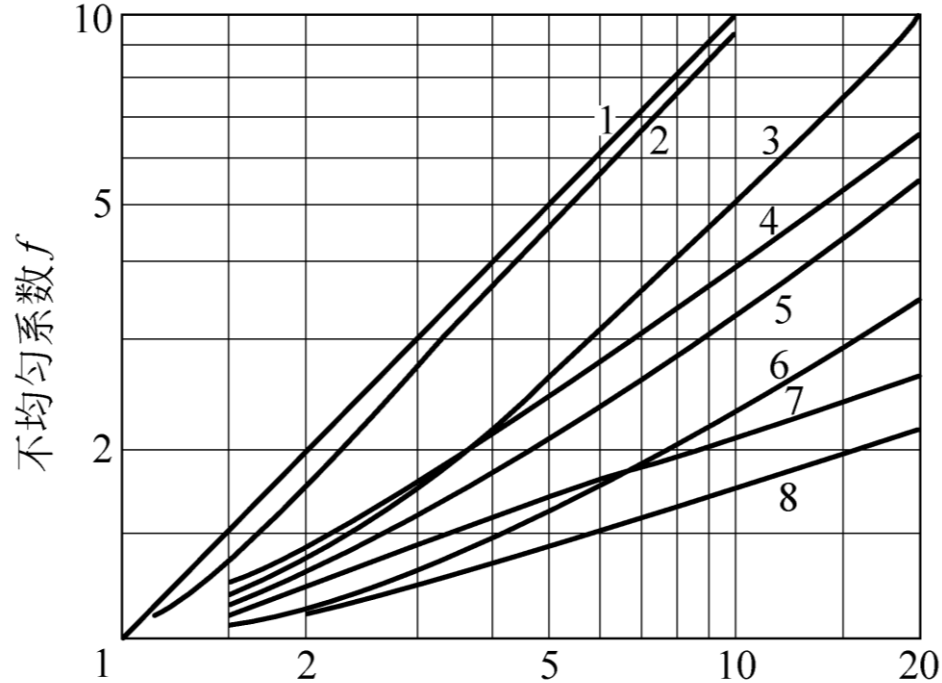
### 本章核心概念：

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

第一章和第二章关注的重点有什么不同？  
第二章关心什么？

内部过程、放电机理，  
为什么会放电？什么条件下会放电？放电如何发展？受哪些因素影响

第二章要将这些原理用于实际场景，指导设计，分析、预测可能结果



几何特性系数  $p = \frac{r+d}{r}$

## 几种典型电极结构示意图 及其不均匀系数

同样尺寸下，柱面比球面更均匀

同样尺寸下，对称比不对称更均匀

## 2.1 电场分布的分析与电场调整

1—同心球

2—球-平板

3—球-球

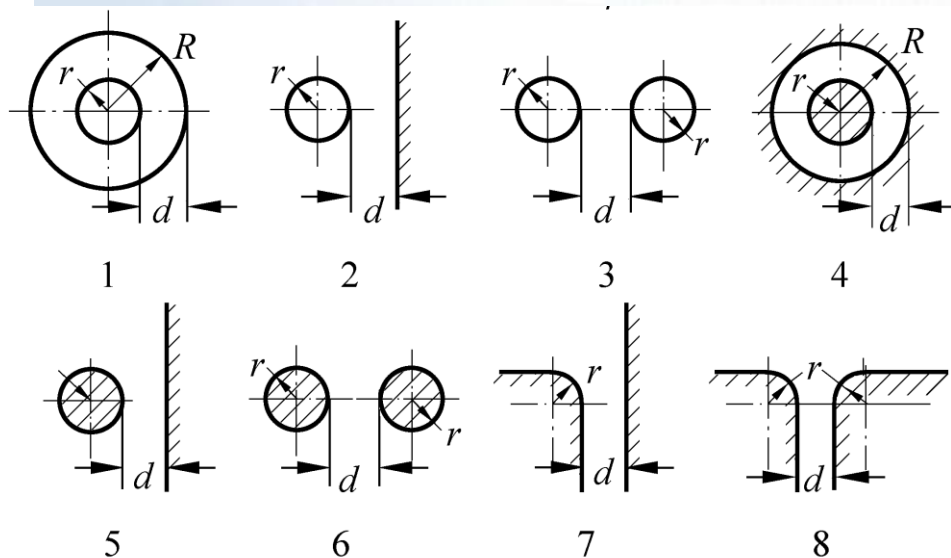
4—同轴圆柱

5—圆柱-平板

6—平行圆柱

7—曲面-平面

8—曲面-曲面



## 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性

### 2.2.1 均匀电场中空气间隙的绝缘特性

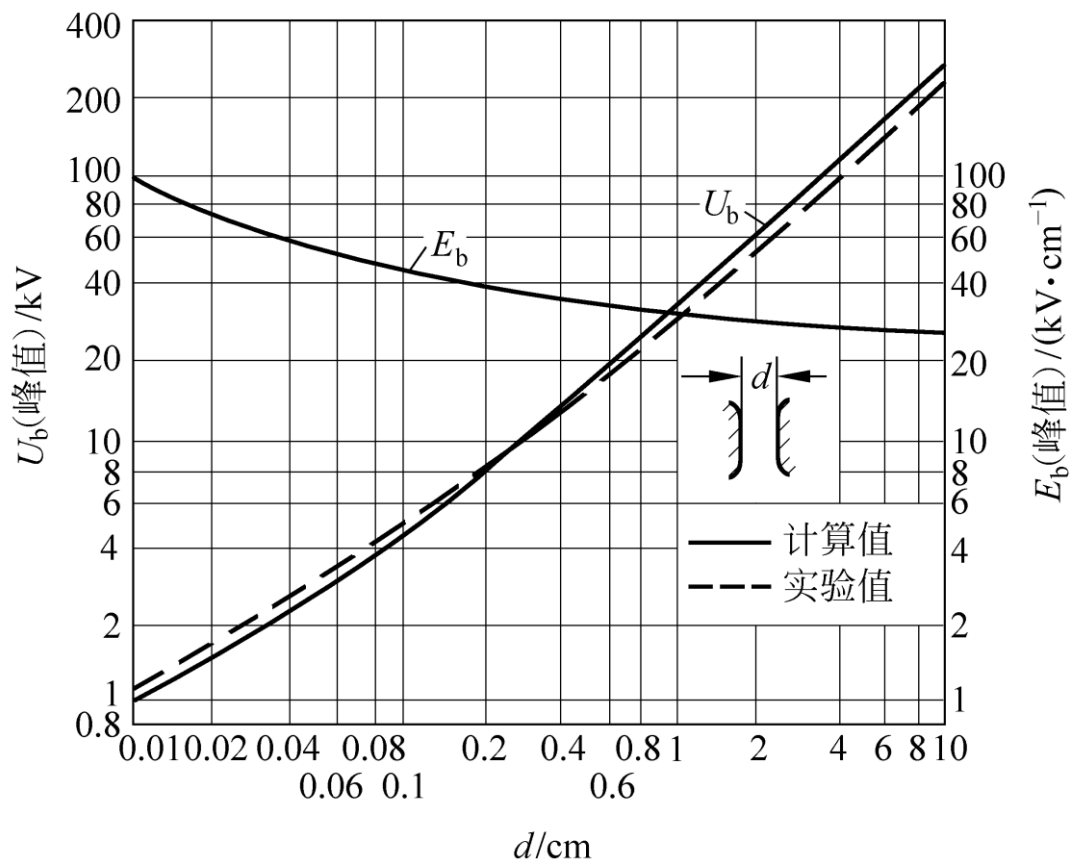
$$U_b = 24.22\delta d + 6.08\sqrt{\delta d}$$

均匀电场中各种电压下  
空气的电气强度几乎相同  
大致等于30kV/cm(峰值)

大尺寸的均匀电场在工程中  
很难实现  
在电气设备中, 均匀电场的  
距离都不大

图2-11

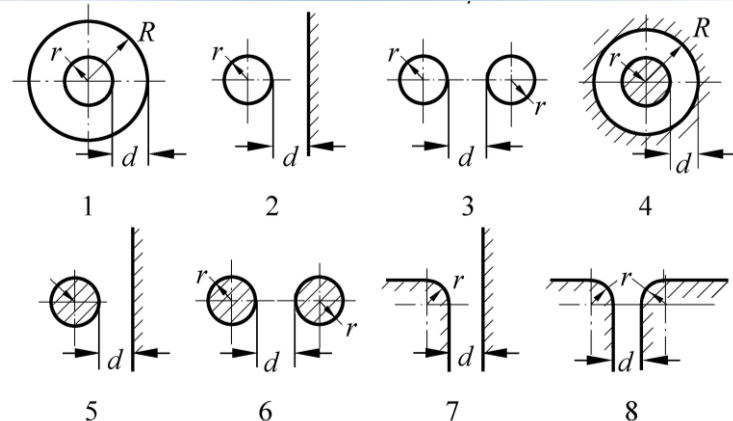
均匀电场中空气间隙的  
击穿电压 $U_b$ 及击穿场强 $E_b$   
和间隙距离 $d$ 的关系



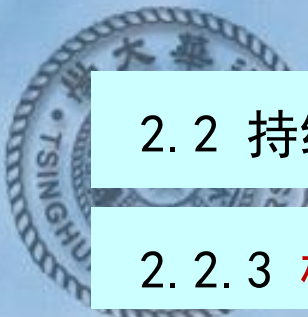
## 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性

### 2.2.2 稍不均匀电场中空气间隙的绝缘特性

$$U = E_{\max} \frac{d}{f} \quad U_b = U_c = E_0 \frac{d}{f}$$



- 按照间隙击穿之前是否发生电晕，可将不均匀电场分为稍不均匀场和极不均匀场。稍不均匀电场击穿之前没有明显的电晕现象。当最高场强 $E_{\max}$ 达电晕起始场强 $E_0$ 时，外施电压 $U$ 即为电晕起始电压 $U_c$ ，也即达击穿电压 $U_b$ 。
- 对稍不均匀场，电场不均匀程度对放电电压的影响很大
- 稍不均匀电场往往用简化后的典型电极，由表2-1的经验公式进行估算
- 表2-1中给出了几种典型电极电晕起始场强的比克公式
- 表2-1中 $E_0$ 、 $U_c$ 的估算公式，也适用于极不均匀场。但间隙击穿电压 $U_b$ 的估算只适用于稍不均匀场



## 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性

### 2.2.3 极不均匀电场中空气间隙的绝缘特性

对极不均匀场，电场不均匀程度对放电电压影响不大，电晕形成的空间电荷对电场的畸变会显著影响放电的发展。

击穿之前有明显的电晕现象，电晕起始电压与击穿电压相差很大。

表2-1的经验公式也可估算极不均匀场的电晕起始场强和起始电压，但不能估算间隙击穿电压！

极不均匀电场的间隙击穿电压主要依靠实验（而且是1:1的实验）来获取，或参考相近条件下的实验曲线。 击穿电压无法计算！

对极不均匀电场的分析，主要看电场是否对称：棒-棒、棒-板  
以及看电压极性：正极性、负极性



## 第2章 不同电压形式下空气的绝缘特性

- 2.1 电场分布的分析与电场调整
- 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性
- 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.4 操作冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 本章核心概念：

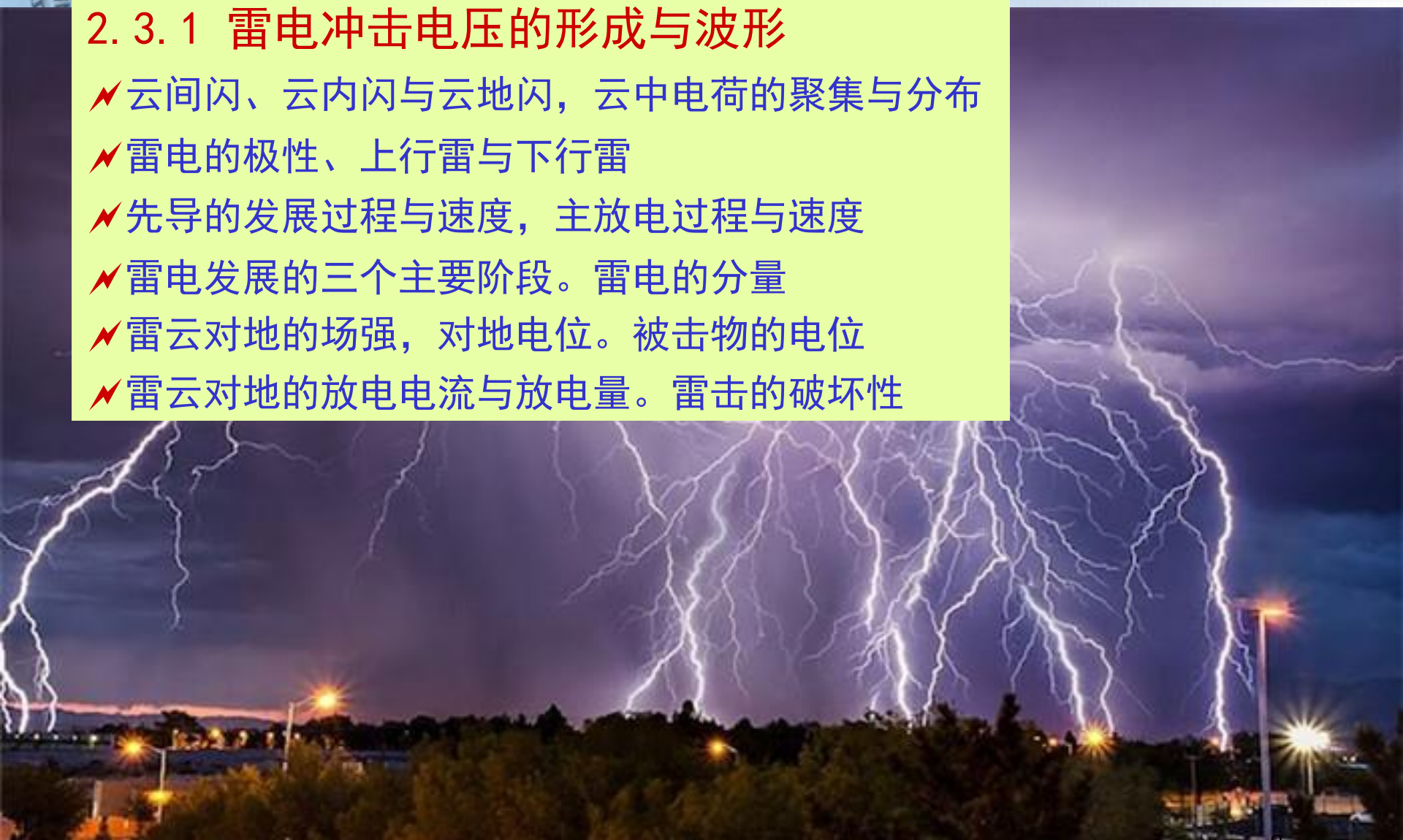
高场强与高电压、非均匀场、电场分布的调整、  
雷电与操作冲击电压、50%放电电压、伏秒特性、空气的电气强度、  
高真空绝缘、SF<sub>6</sub>绝缘



## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

### 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
- ⚡ 雷电的极性、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





## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

### 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
- ✓ 雷电的极性、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
- ✓ 雷电冲击电压的波形、标准波形

本章从哪个角度介绍  
雷电冲击

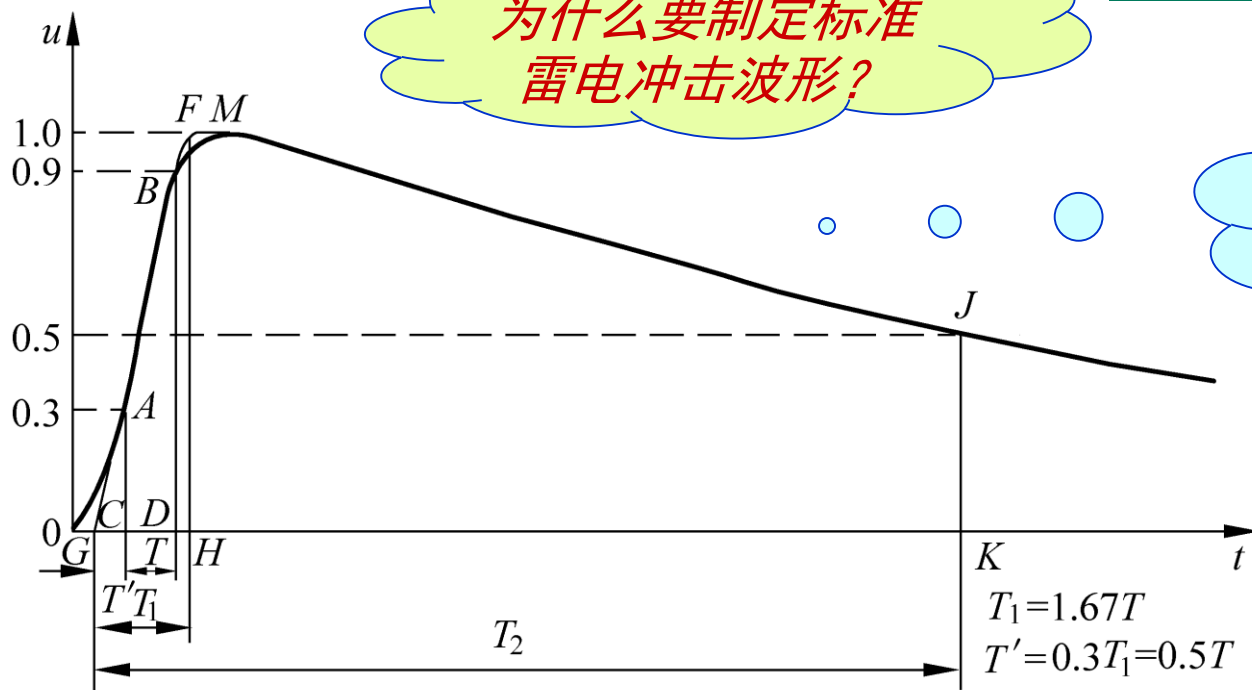
## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

- (1) 标准波形
- (2) 放电时延
- (3) 50%放电电压
- (4) 伏秒特性

为什么要制定标准  
雷电冲击波形？

实验室标准雷电  
冲击与自然界雷击  
有什么关系？

请体会“模拟”与  
“复现”的异同



雷电冲击电压全波波形示意图

标准波形  $1.2/50\mu s$   
( $1.2 \pm 30\%$ ,  $50 \pm 20\%$ )

实验室“标准”雷电  
冲击是“标准幅值”  
的电压吗？

实验室如何产生  
模拟雷电冲击电压？  
见第6章

# 人工模拟 雷电冲击下 空气间隙的 击穿

请体会“模拟”与  
“复现”的异同







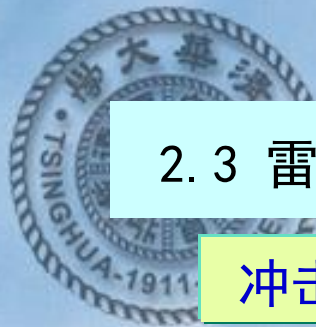
对模拟导线施加雷  
电冲击电压，塔头  
各间隙会怎么样？

2005/08/29

模拟塔头及模拟导线



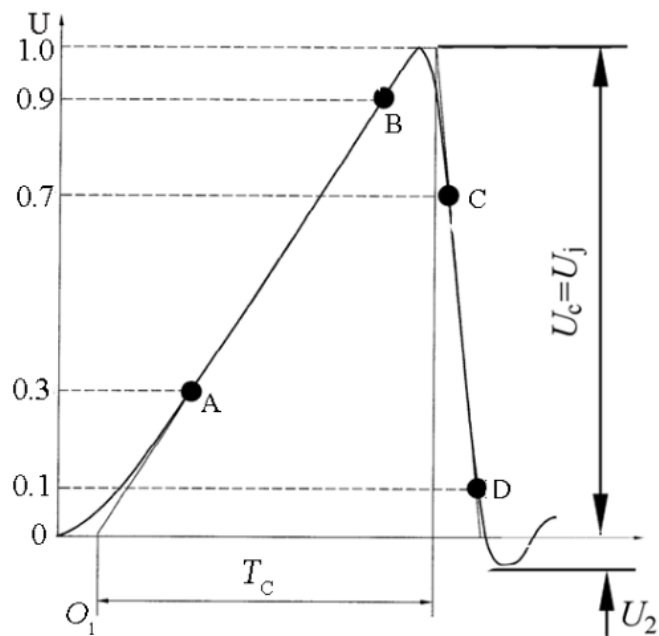
典型雷电冲击放电路径



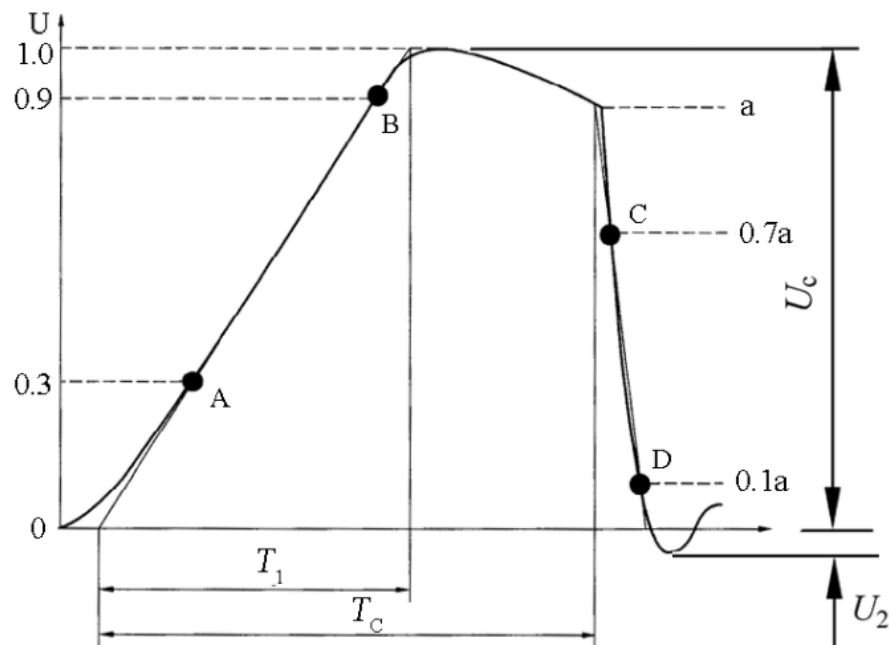
## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

### 冲击截波标准波形

电气设备有些内绝缘如变压器和电机绕组更怕截波，需进行截波试验



(a)



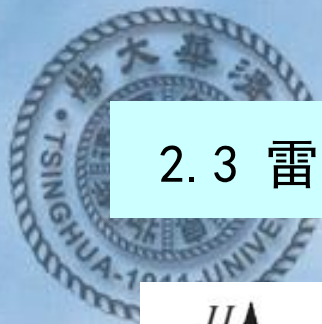
(b)

雷电冲击电压截波波形示意图

(a) 波前截断

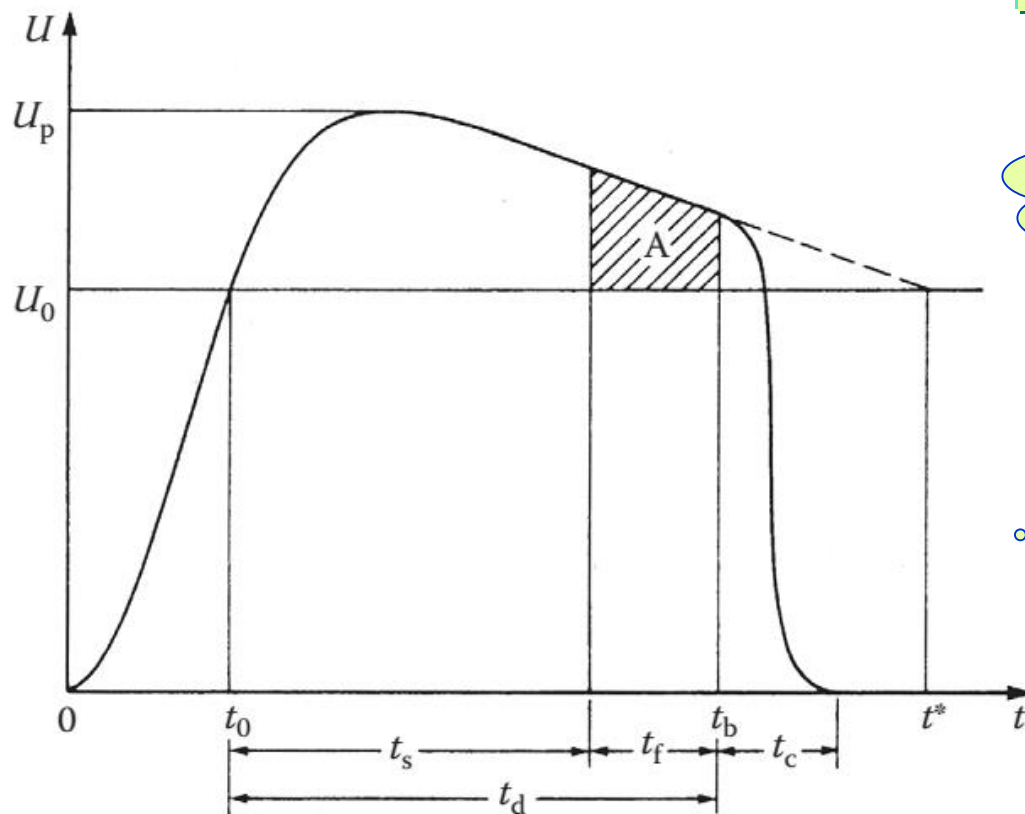
(b) 波尾截断





## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

- (1) 标准波形
- (2) 放电时延
- (3) 50%放电电压
- (4) 伏秒特性



冲击电压为什么会有放电时延?

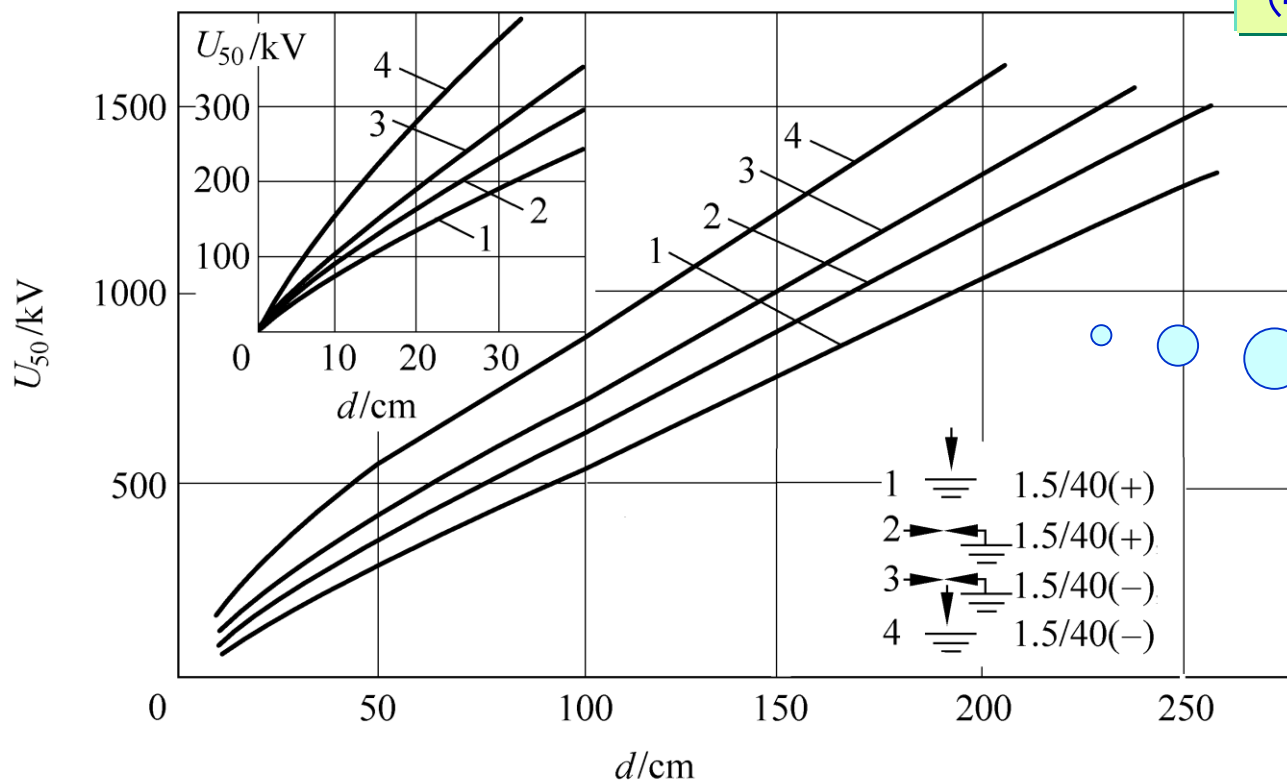
电场对放电时延有何影响?  
放电时延对放电电压有何影响?

放电时延  $t_d = \text{统计时延 } t_s + \text{形成时延 } t_f$

均匀/稍不均匀电场以  $t_s$  为主、时延短，极不均匀电场以  $t_f$  为主，时延较长

## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

- (1) 标准波形
- (2) 放电时延
- (3) 50%放电电压
- (4) 伏秒特性



何谓  $U_{50}$  ?  
为何用  $U_{50}$  ?  
如何获取  $U_{50}$  ?

图2-22 棒-棒及棒-板空气间隙的雷电冲击50%击穿电压和间隙距离的关系

1-1.5/40(+),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 40 + 5d$ ; 2-1.5/40(+),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 75 + 5.56d$   
3-1.5/40(-),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 110 + 6d$ ; 4-1.5/40(-),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 215 + 6.7d$

## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

- 对冲击电压，一般采用50%放电电压 $U_{50}$ 来衡量间隙的绝缘特性
- 确定某间隙  $U_{50}$  最简单的方法；保持标准波形不变，逐级升高电压幅值，每级电压值加10次，直至每10次中有4-6次击穿，则此电压可作为该间隙大致的 $U_{50}$
- 每级加压次数越多，则所得 $U_{50}$ 越准确
- 另一种实验获取 $U_{50}$ 的方法是“升降法”（第7章）

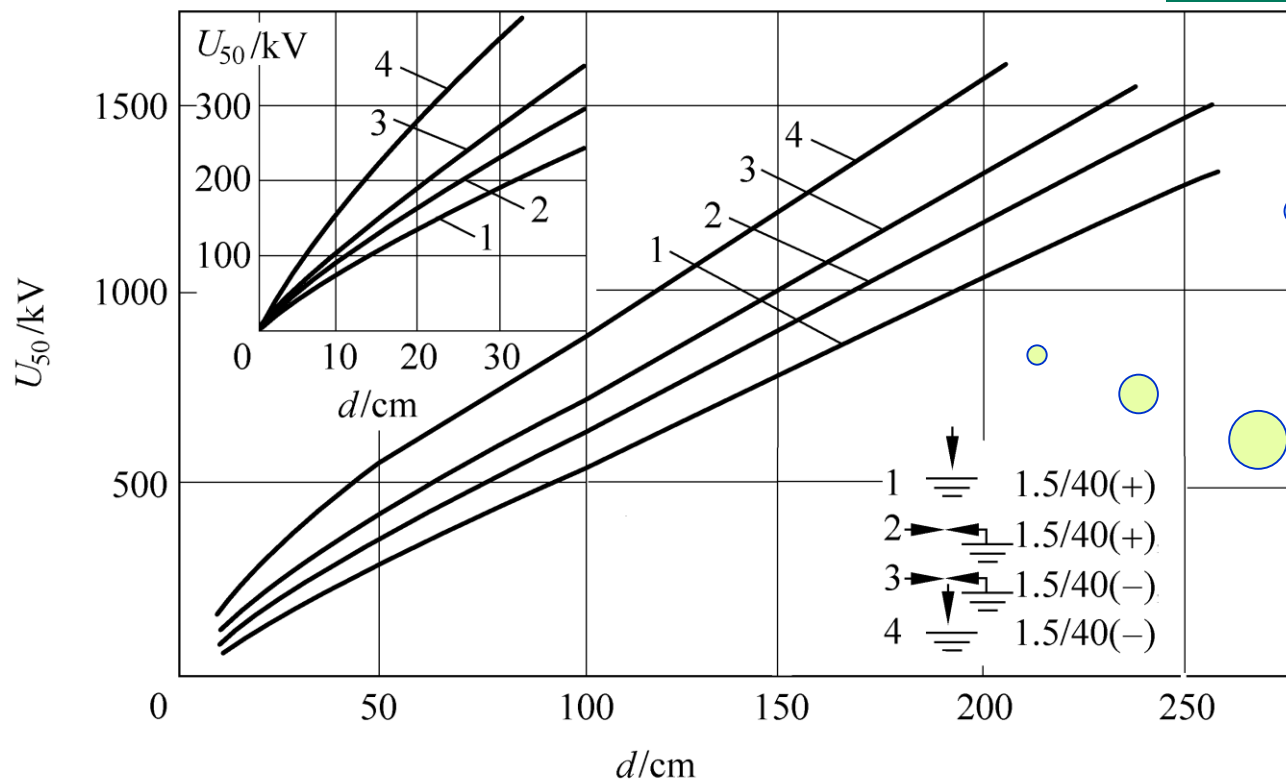
气体绝缘可  
快速自恢复！

- 采用 $U_{50}$ 决定绝缘距离时，需留出必要的裕度
- 冲击放电电压的放电概率一般认为服从高斯分布，雷电冲击电压一般取相对标准偏差 $\sigma$ 为3%
- 对可自恢复的外绝缘间隙常用 $U_{50}(1-1.3\sigma) = 0.96U_{50}$ 作为耐受电压，其耐受的的概率为90%。对安全要求高的场合可取 $U_{50}(1-3\sigma) = 0.91U_{50}$ 作为间隙的耐受电压，其耐受概率为99.85%。

## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

50%放电电压  $U_{50}$   
(一般认为服从高斯分布)

$$U_{\text{耐受}} = U_{50}(1 - n\sigma)$$



雷电冲击电压  
 $\sigma \approx 3\%$

冲击电压的击穿  
电压特性曲线，  
是一条带状区域

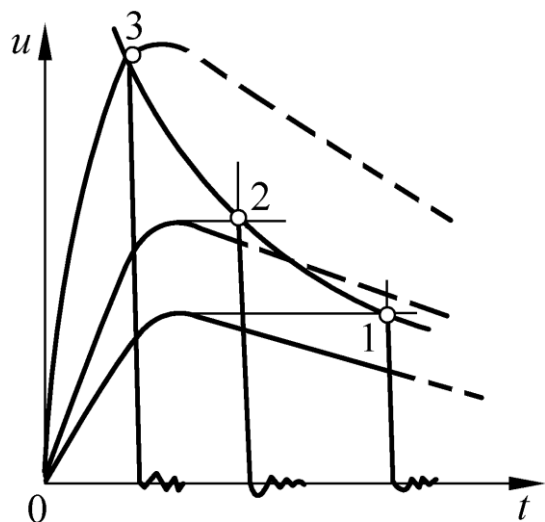
图2-22 棒-棒及棒-板空气间隙的雷电冲击50%击穿电压和间隙距离的关系

1-1.5/40(+),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 40 + 5d$ ; 2-1.5/40(+),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 75 + 5.56d$   
3-1.5/40(-),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 110 + 6d$ ; 4-1.5/40(-),  $d > 40\text{cm}$ 时  $U_b = 215 + 6.7d$

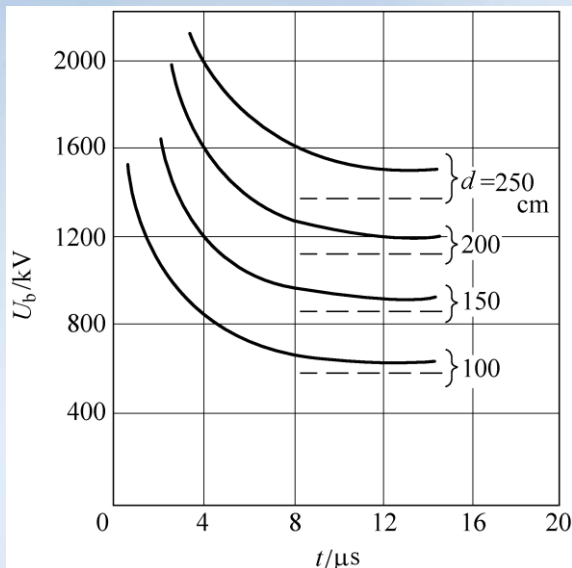
## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

由于放电时延的影响，均匀电场 $v$ - $t$ 特性比较平坦  
极不均匀场的 $v$ - $t$ 特性则随时间缩短而明显上翘

- (1) 标准波形
- (2) 放电时延
- (3) 50%放电电压
- (4) 伏秒特性

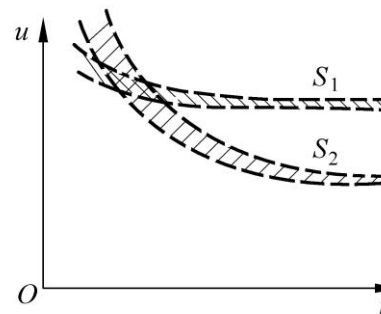
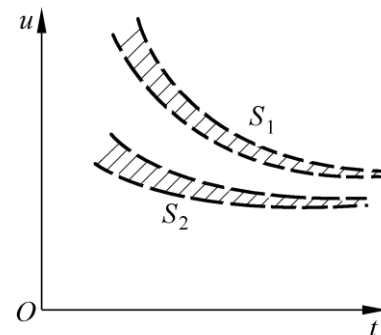


伏秒特性曲线的获取



棒-棒空气间隙的  
伏秒特性曲线

(虚线为该间隙在工频下的击穿电压)



两并联间隙的  
伏秒特性曲线示意

对雷电冲击电压的防护见第9章



## 第2章 不同电压形式下空气的绝缘特性

- 2.1 电场分布的分析与电场调整
- 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性
- 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.4 操作冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 本章核心概念：

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



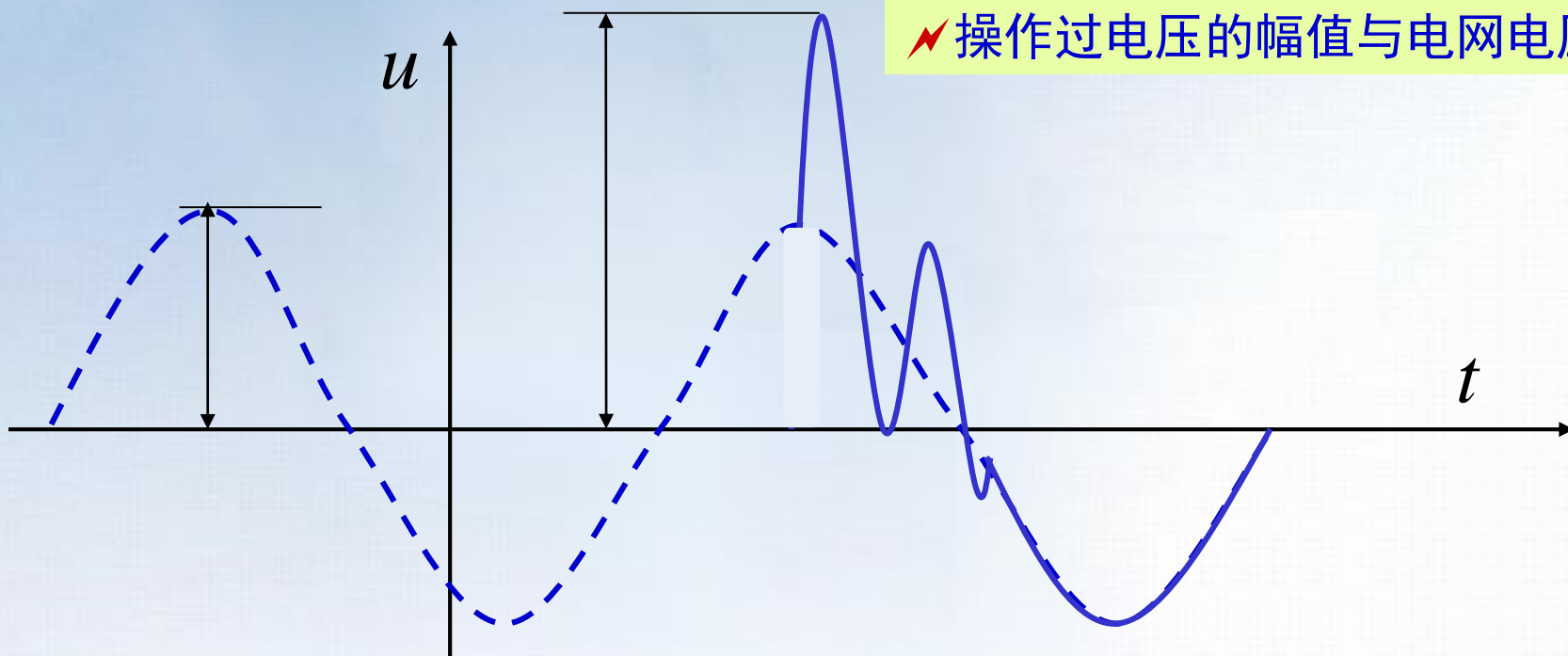
## 2.4 操作冲击电压下空气的绝缘特性

### 2.4.1 操作冲击电压的形成与波形

⚡ 电力系统过渡过程与操作过电压

⚡ 操作过电压的波形

⚡ 操作过电压的幅值与电网电压等级



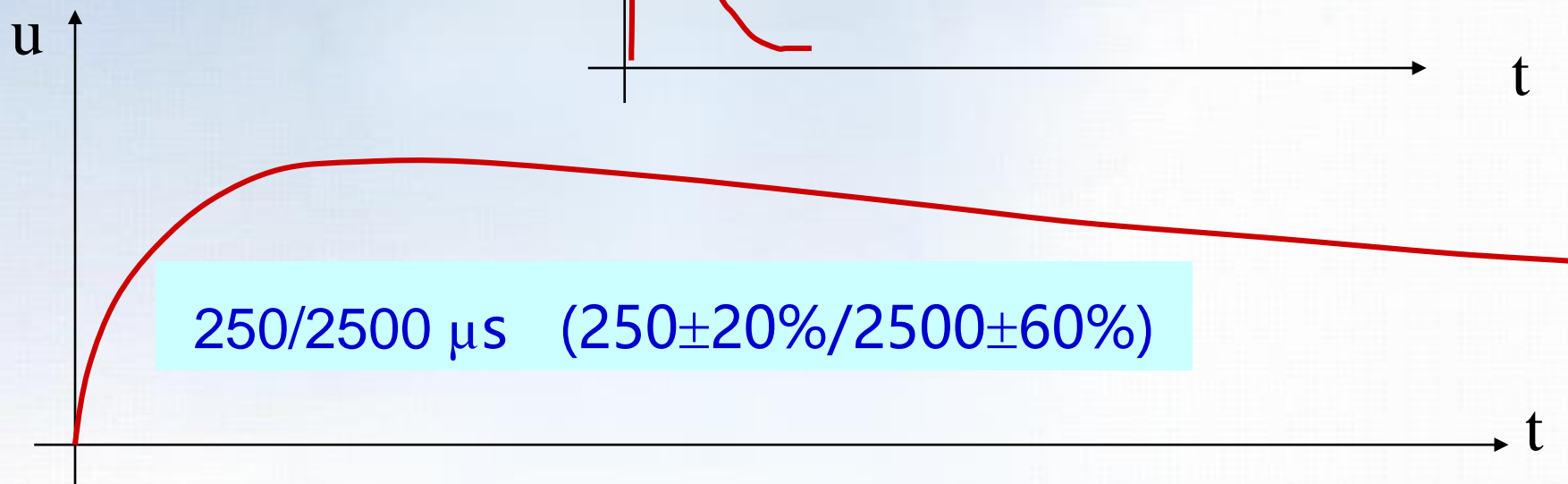
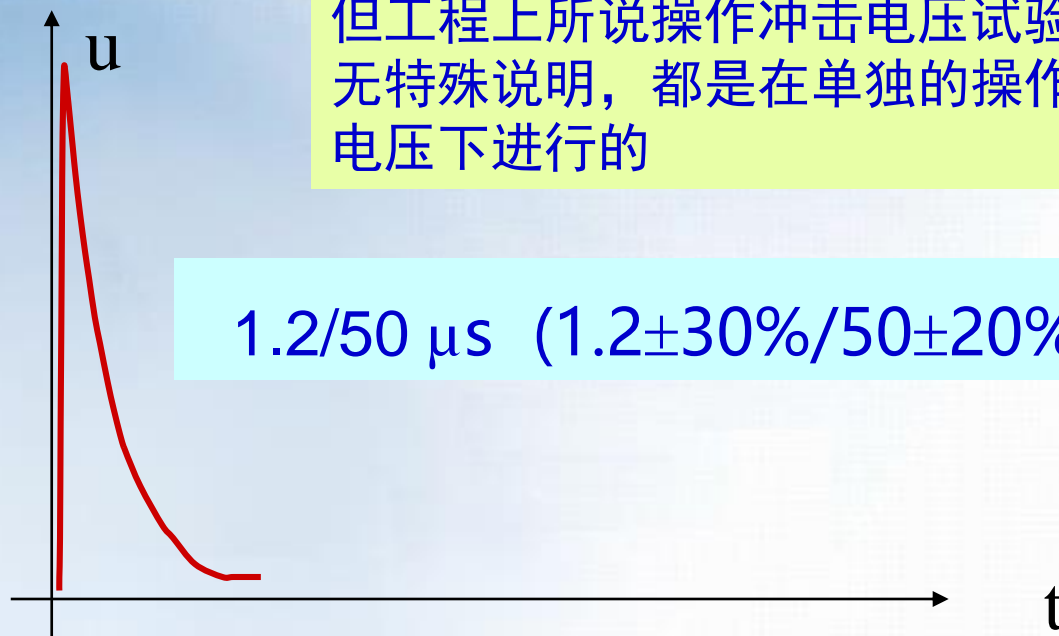
本部分考虑的是用什么试验能够模拟操作冲击电压？  
以及在模拟的操作冲击电压下空气间隙的绝缘特性。  
操作冲击过电压的防护在第10章。



波形比较示意：  
标准雷电波与  
标准操作冲击波

虽然电力系统实际的操作过电压都是  
叠加在交流电压不同相位上的，

但工程上所说操作冲击电压试验，如  
无特殊说明，都是在单独的操作冲击  
电压下进行的



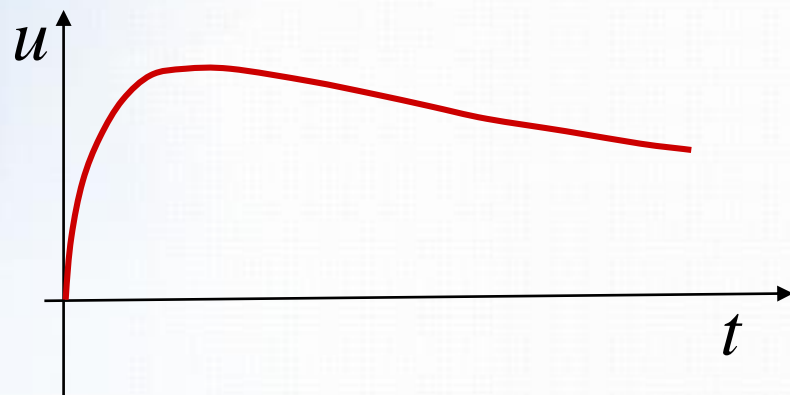
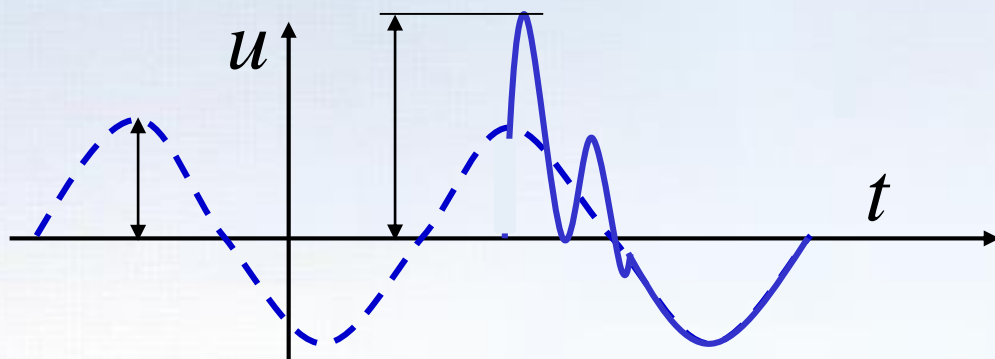
## 2.4.2 操作冲击放电电压的特点

- (1) U形曲线
- (2) 不对称电场的极性效应
- (3) 长间隙的饱和现象
- (4) 50%放电电压及分散性
- (5) 周围接地体的邻近效应
- (6) 最小间隙击穿电压的经验公式

虽然电力系统实际的操作过电压都是叠加在交流电压不同相位上的，

但工程上所说操作冲击电压试验，如无特殊说明，都是在单独的操作冲击电压下进行的

请体会“模拟”与“复现”的异同



## 2.4.2 操作冲击 放电电压的特点

### 正极性棒-板间隙 操作冲击放电电压

临界波前时间随间隙  
距离的增大而增大  
对不超过7m的间隙，临界  
波前时间在100-300 $\mu$ s

因此长间隙需要进行  
长波头操作冲击试验，仅  
用250/2500的标准波不行

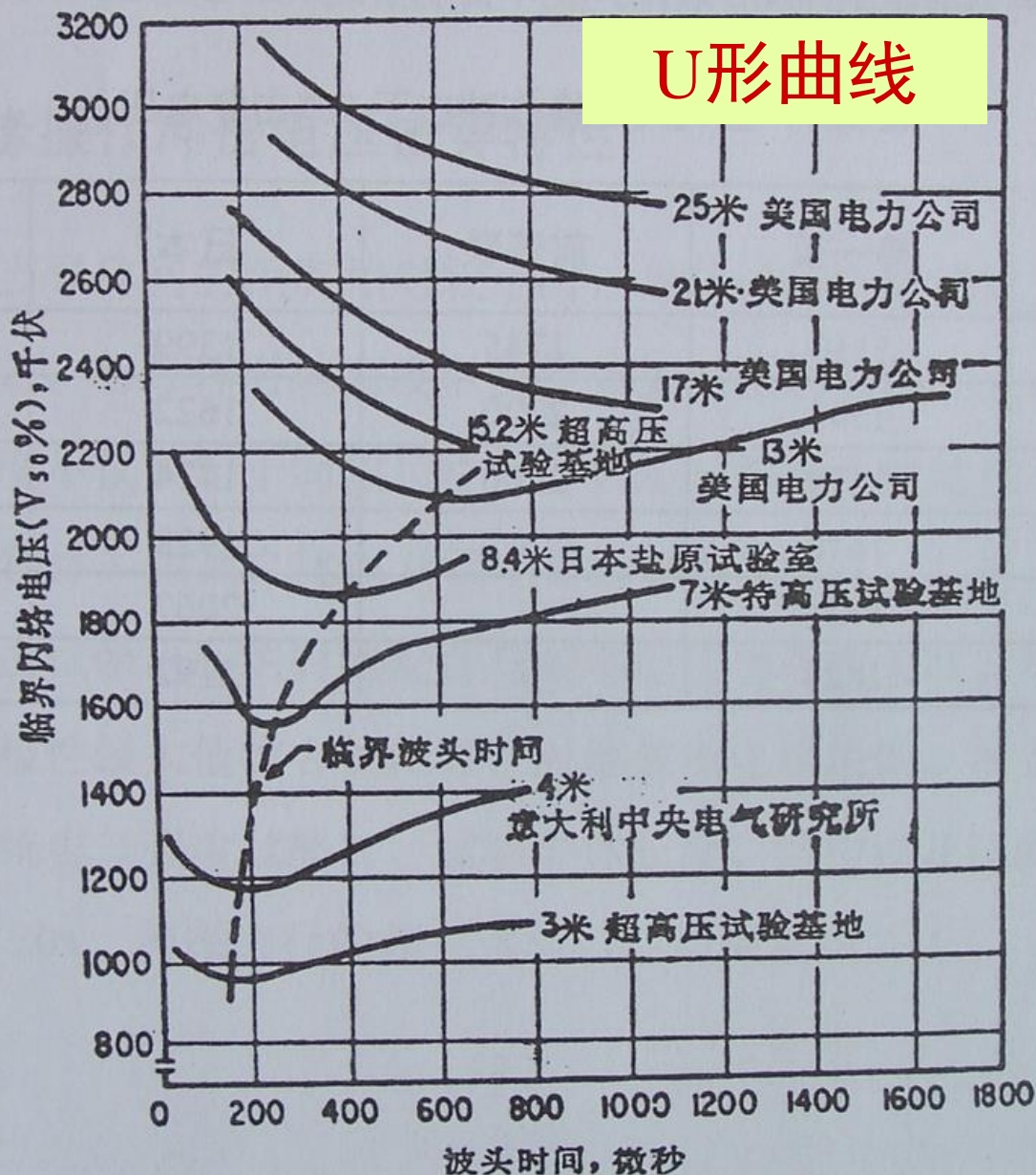
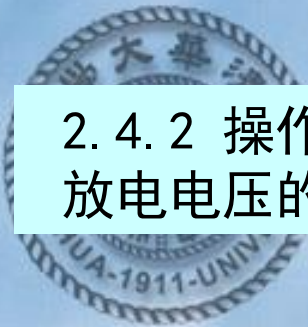


图 2-2 棒—板间隙临界闪络电压





## 2.4.2 操作冲击 放电电压的特点

正极性棒-板间隙  
操作冲击放电电压

长间隙需要进行  
长波头操作冲击  
试验，仅用  
250/2500不行

棒板间隙在操作  
冲击下的击穿电  
压有时比工频击  
穿电压峰值还低

## U形曲线

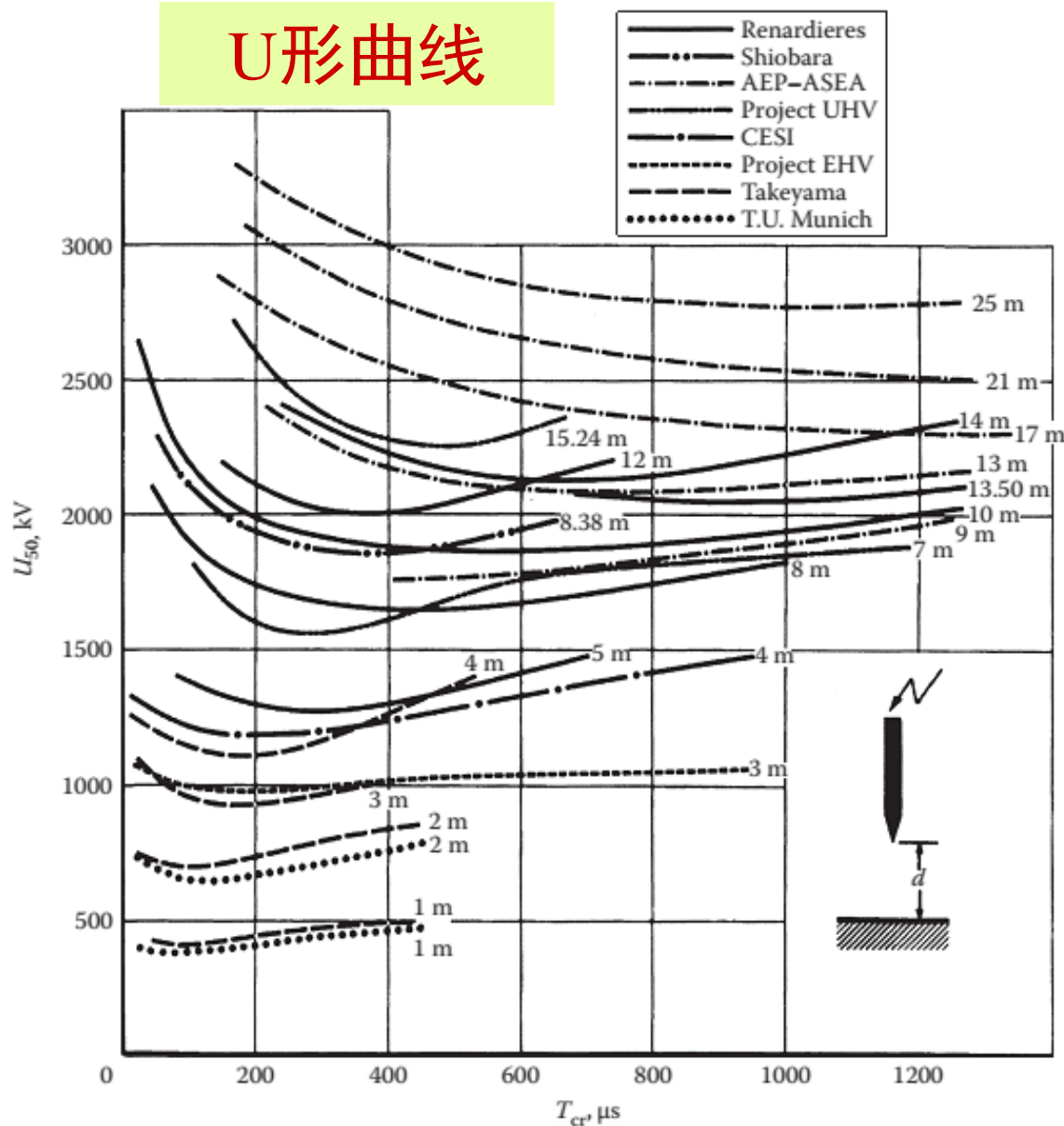


FIGURE 5.6 Data collection of 50% positive switching impulse breakdown voltage as a function of time to crest of rod-plane configuration for different spacings. (From Leroy, G., Recent developments in the physics and engineering of high voltage breakdown, in: *IEE Gas Discharge Conference* (Review Lecture, Opening Session), London, U.K., September 1974.)

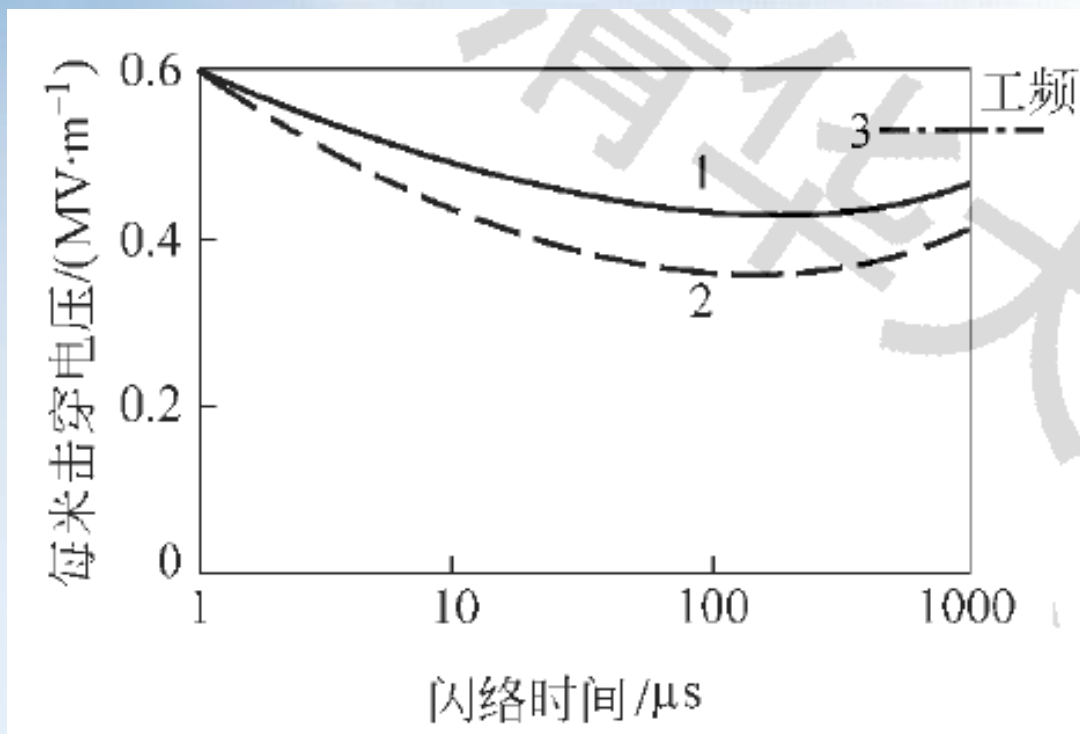
## 2.4.2 操作冲击 放电电压的特点

### 正极性棒-板间隙 操作冲击放电电压

棒板间隙在某些波前时间的  
操作冲击下，击穿电压  
比工频击穿电压峰值还低

如何理解空气间隙在操作  
冲击电压下的U形曲线？  
如何理解操作冲击比工频  
击穿电压还低？

## U形曲线



棒-板间隙操作冲击击穿电压与波前时间的关系

1—棒-棒间隙；2—导线-平板间隙；3—工频击穿电压



## 2.4.2 操作冲击放电电压的特点

$U_{50}$ 、极性效应、饱和现象

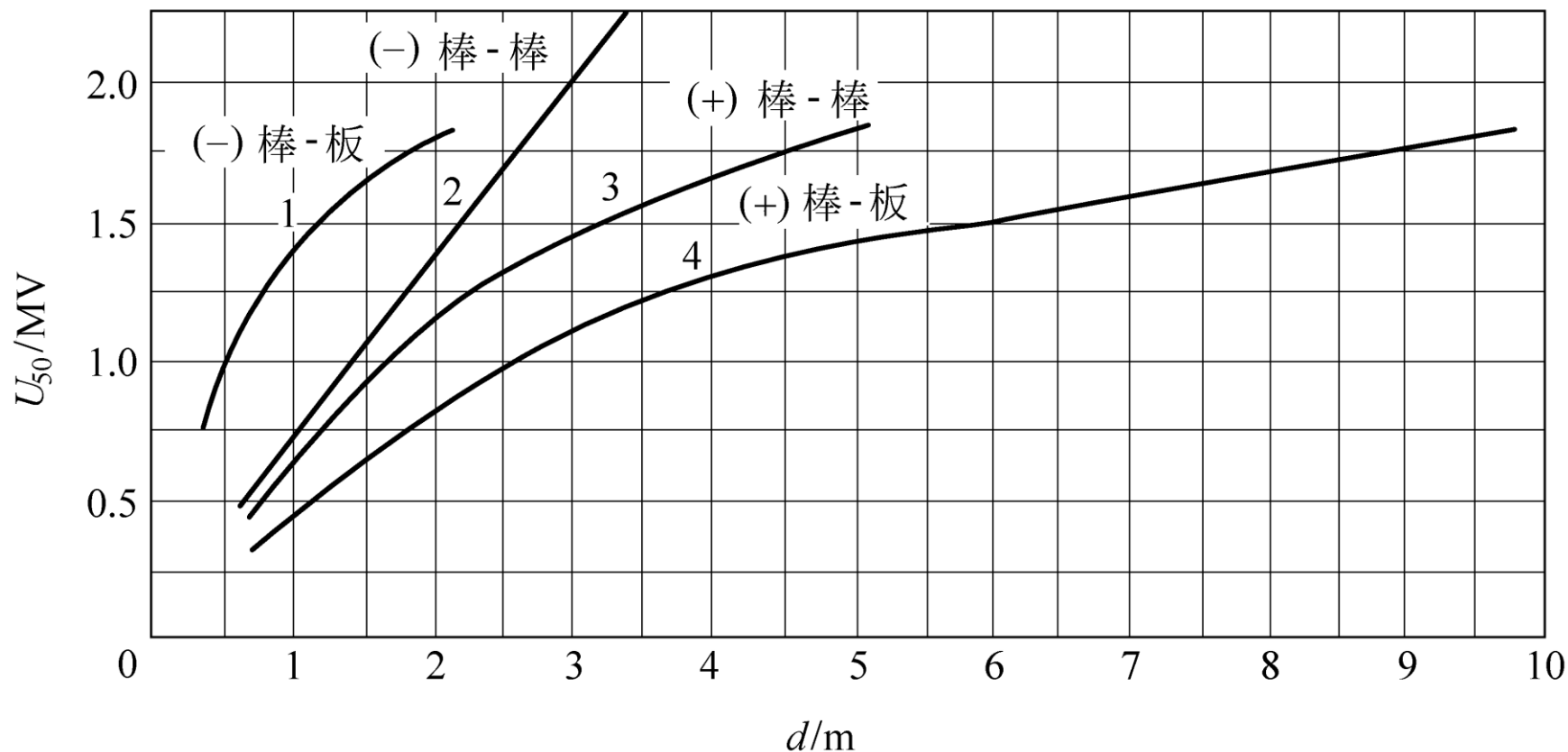


图2-33 操作冲击电压 ( $500\mu s / 5000 \mu s$ ) 作用下棒-板及棒-棒空气间隙的50%击穿电压和间隙距离的关系

1—棒-板，负极性；2—棒-棒，负极性；3—棒-棒，正极性；4—棒-板，正极性

## 2.4.2 操作冲击放电电压的特点

### 极性效应、饱和现象

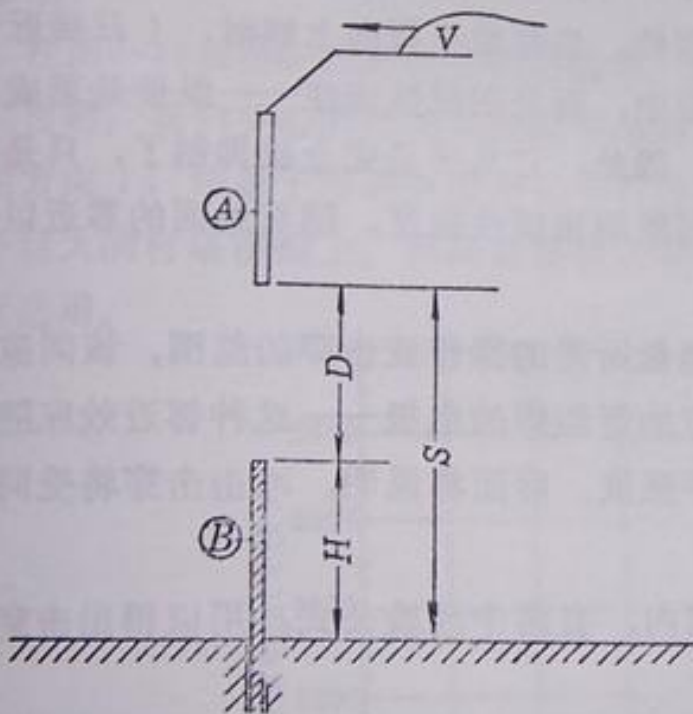


图 6-9 垂直棒对棒间隙和棒对板间隙  
( $H = 0$ ) 的基本间隙几何

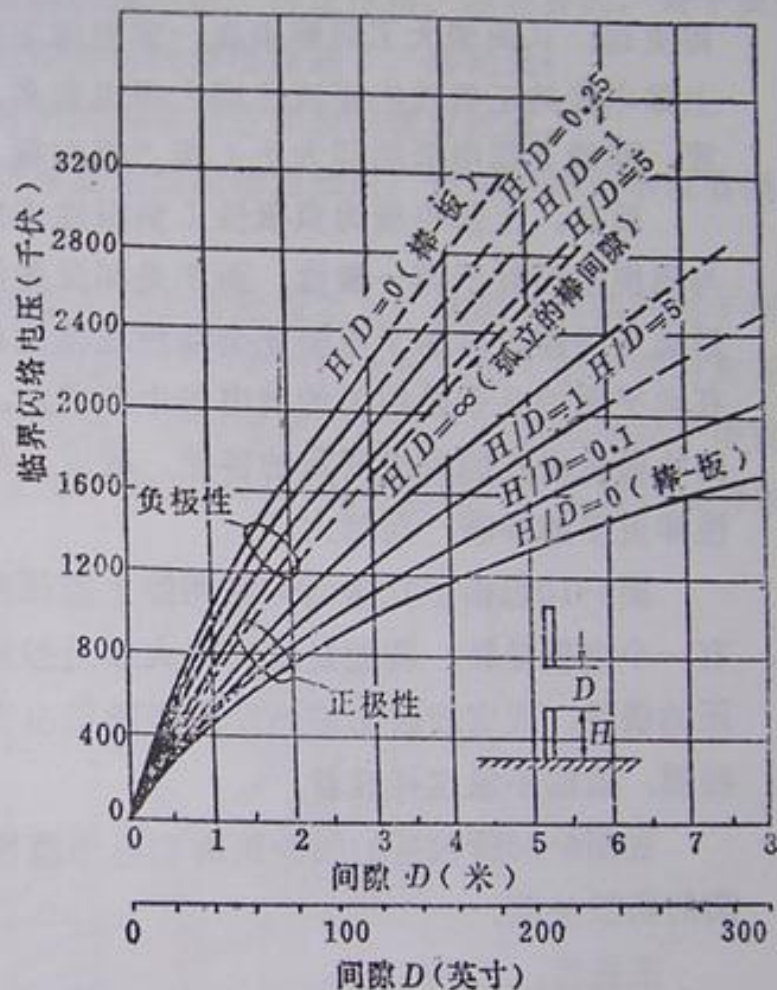


图 6-10 棒对棒和棒对板间隙的  
操作波闪络强度

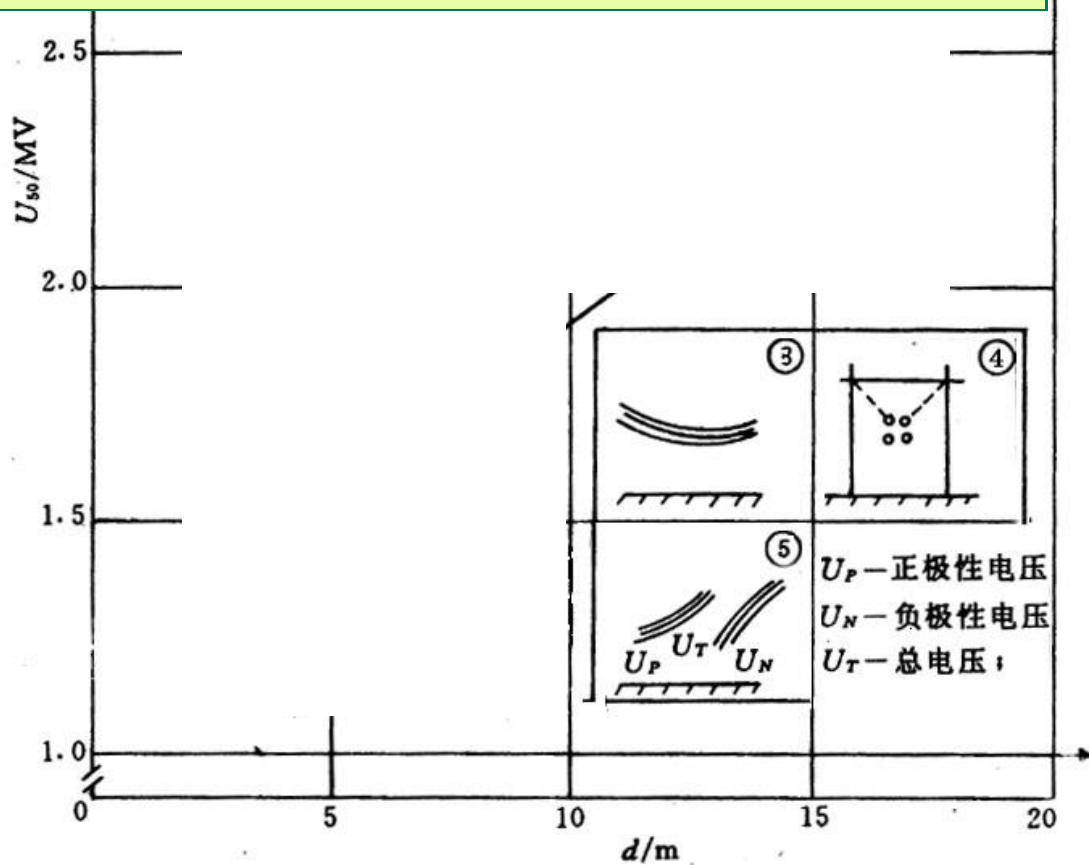
(波头100~200微秒; 蒸汽压力 $\approx 0.5$ 英寸水银柱)

## 棒-板、棒-棒间隙操作冲击放电电压曲线

## 2.4.2 操作冲击放电电压的特点

### 不同电极结构的影响

对极不均匀电场的分析，主要看**电场是否对称**：棒-棒、棒-板  
以及看**电压极性**：正极性、负极性



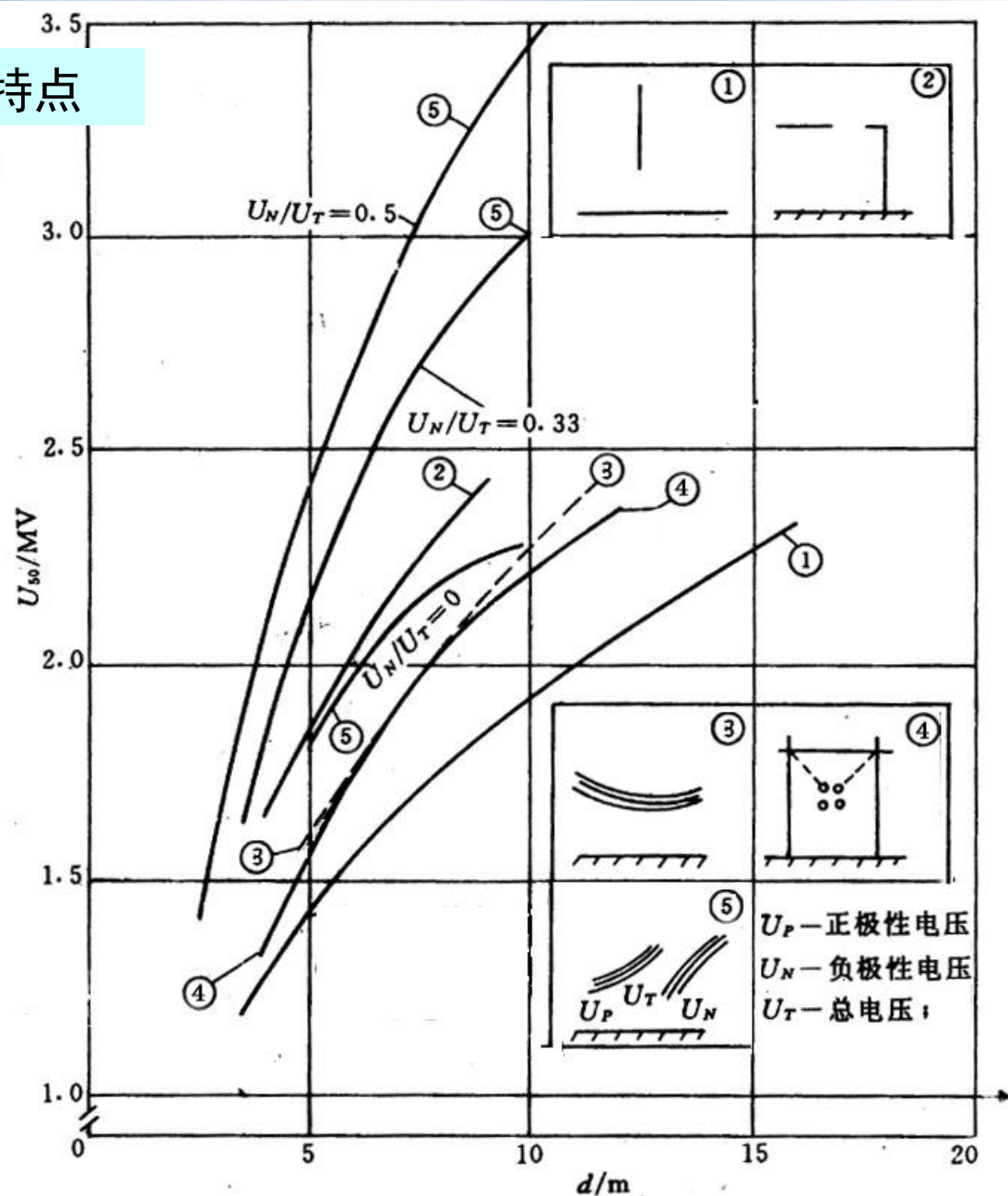
## 不同电极结构的影响

## 正棒板間隙

$$1280/5=256\text{kV/m}$$

$$1860/10=186\text{kV/m}$$

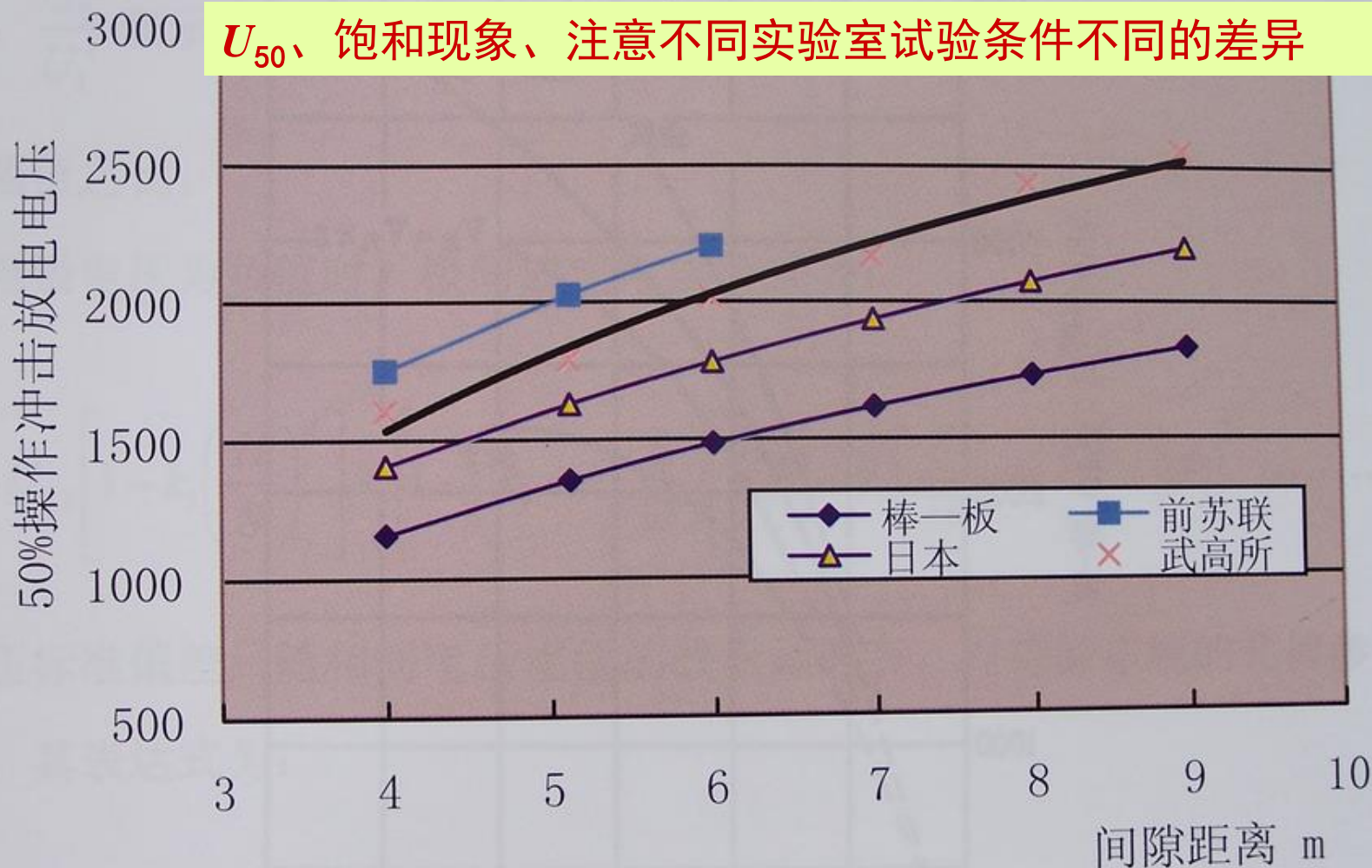
$$2220/15=148\text{kV/m}$$





## 2.4.2 操作冲击放电电压的特点

$U_{50}$ 、饱和现象、注意不同实验室试验条件不同的差异



导线杆塔正极性操作冲击放电电压曲线

$1200/4=300\text{kV/m}$ ,  $1500/6=250\text{kV/m}$ ,  $1800/9=200\text{kV/m}$

雷电冲击放电几乎都走最短空气距离的路径



典型雷电冲击放电路径



操作冲击则放电路径变化多,  $U_{50}$ 分散性大



典型操作冲击放电路径1

操作冲击则放电路径变化多， $U_{50}$ 分散性大



典型操作冲击放电路径2



操作冲击则放电路径变化多， $U_{50}$ 分散性大



典型操作冲击放电路径3



图 7-8 特高压酒杯塔边相 I 串间隙  
操作冲击电压试验

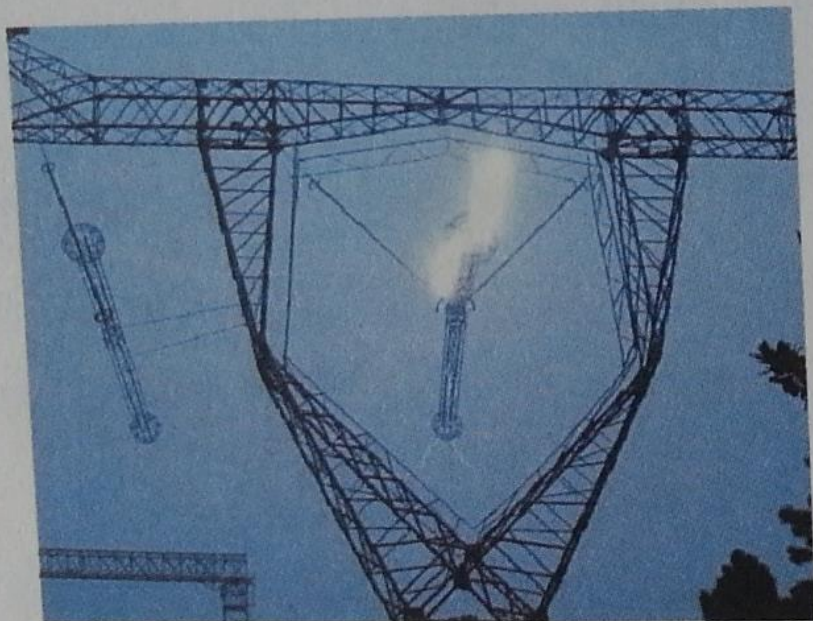


图 7-10 特高压酒杯塔中相塔窗操作  
冲击电压试验





## 4850kV操作冲击放电





对极不均匀电场的分析，主要看**电场是否对称：棒-棒、棒-板**  
以及看**电压极性：正极性、负极性**

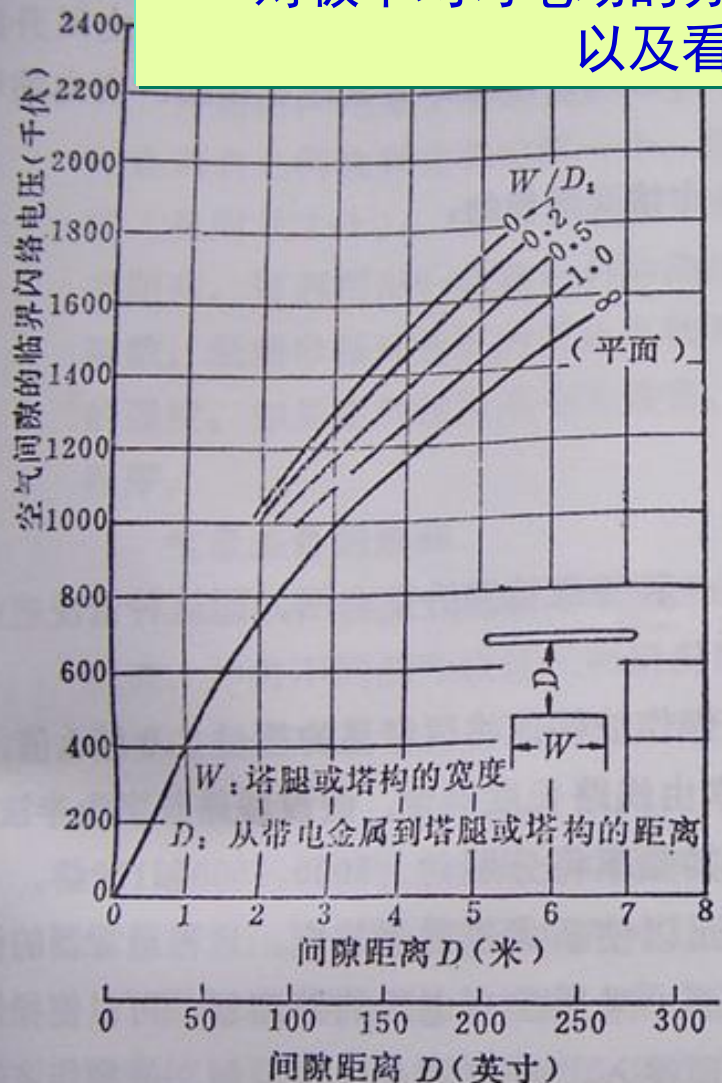
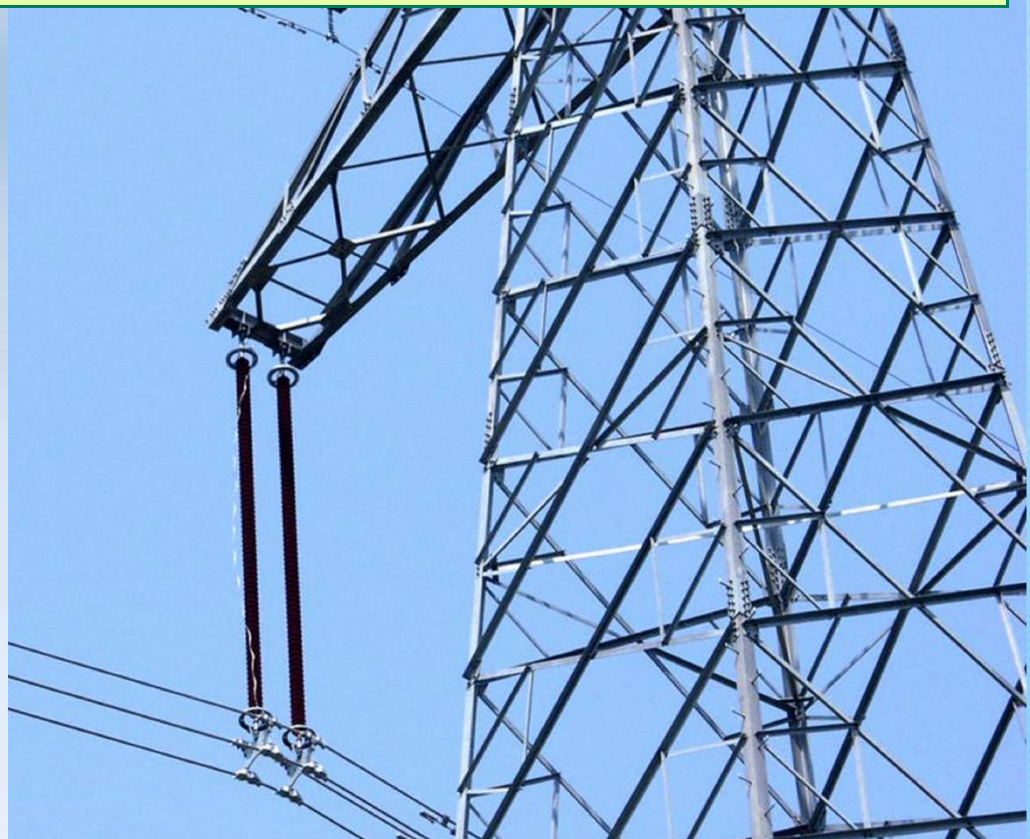


图 6-45 导线对塔腿（或塔构）空气间隙的干态正极性操作波强度



导线-塔身正极性操作冲击  
放电电压曲线

$$1000/3 = 333\text{kV/m}, 1480/6 = 247\text{kV/m}$$

## 2.4.2 操作冲击放电电压的特点

- (1) U形曲线
- (2) 不对称电场的极性效应
- (3) 长间隙的饱和现象
- (4) 50%放电电压及分散性（棒板间隙 $\sigma$ 甚至可达8%）
- (5) 周围接地体的邻近效应
- (6) 最小间隙击穿电压的经验公式

$$U_{50,\min} = \frac{3400}{1 + \frac{8}{d}}$$

$(d < 20\text{m})$



## 极不均匀场空气间隙的电气强度

### ➤ 雷电冲击:

正棒-板:  $\approx 500\text{kV/m}$  负棒-板:  $\approx 750\text{kV/m}$

### ➤ 操作冲击:

正棒-板:  $\approx 400\text{kV/m}(2\text{m})$  负棒-板:  $\approx 900\text{kV/m}(2\text{m})$   
长间隙正棒板:  $\approx 195\text{kV/m}(8-10\text{m})$

### ➤ 直流电压:

正棒-板:  $\approx 4.5\text{kV/cm}$ , 负棒-板:  $\approx 10\text{kV/cm}$   
较长棒-棒间隙:  $\approx 4.8 \sim 5.0\text{kV/cm}$

### ➤ 交流电压:

棒-棒间隙:  $5.66\text{kV/cm}(\text{峰})$  棒-板:  $\approx 5.23\text{kV/cm}(\text{峰})$   
长间隙棒-板:  $\approx 210\text{kV/m}(\text{峰})$



## 第2章 不同电压形式下空气的绝缘特性

- 2.1 电场分布的分析与电场调整
- 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性
- 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.4 操作冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 本章核心概念：

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、SF6绝缘

第一章和第二章关注的  
重点有什么不同？  
第二章关心什么？

内部过程、放电机理，  
为什么会放电？什么条  
件下会放电？放电如何  
发展？受哪些因素影响

第二章要将这些原理用  
在实际场景下，要分析  
现象、指导设计