



## 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

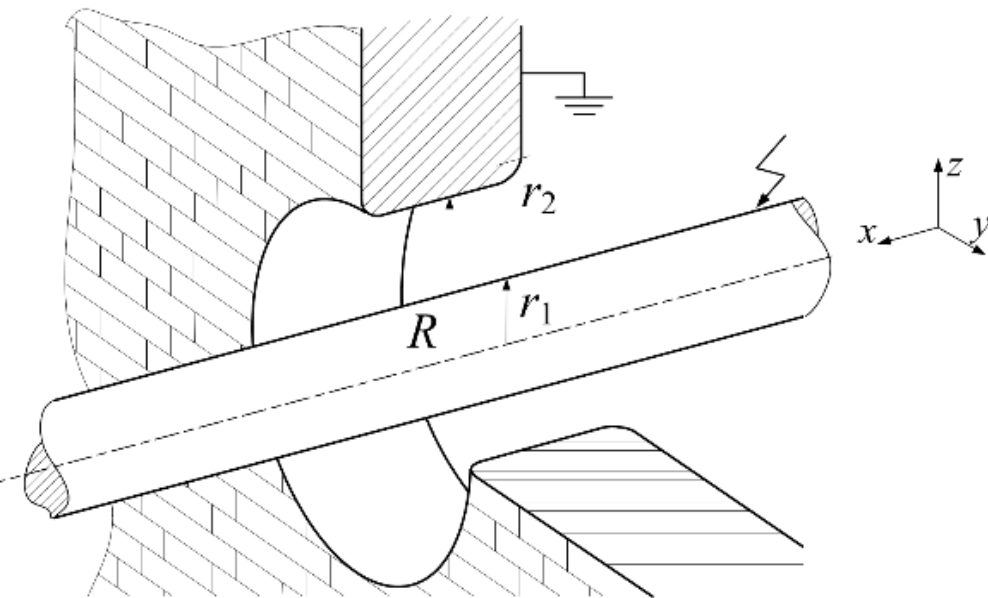
### 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 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

## 2.1 电场分布的分析与电场调整

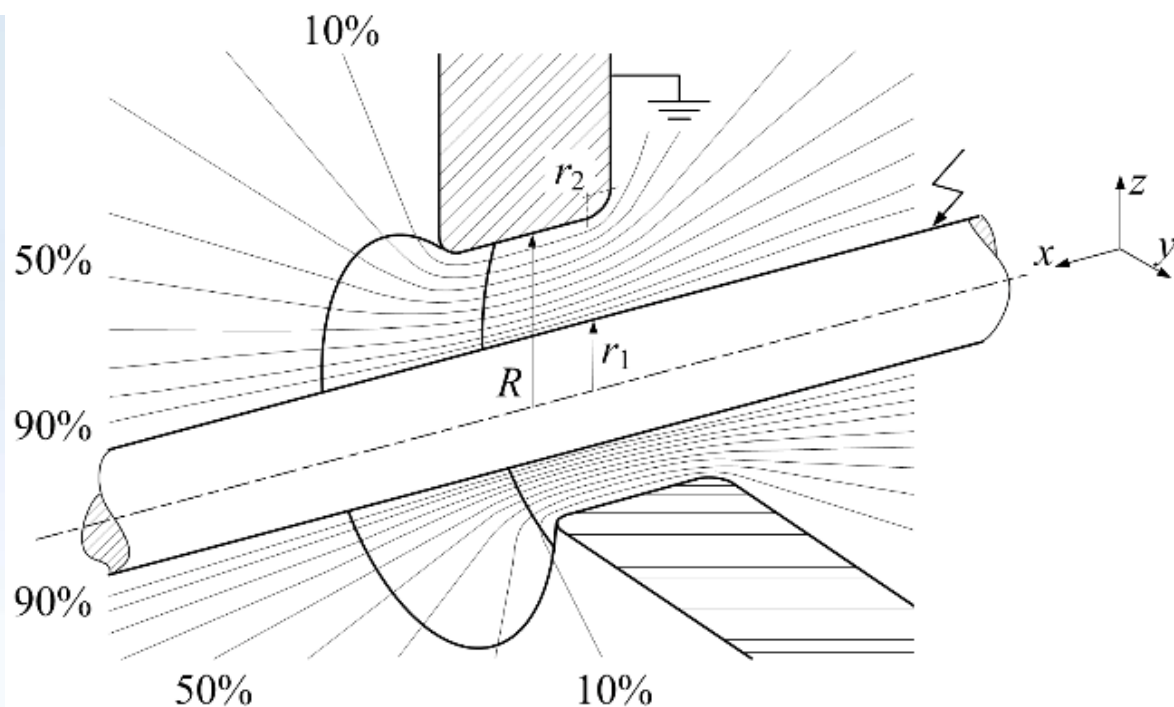
场强超过耐受值产生放电  
但电场测量很困难  
好在电场计算有可能  
首先需对电场进行大体分析



高压导杆穿过接地墙洞的  
剖面示意图

何处电场最强？  
有哪些调整电场的措施？

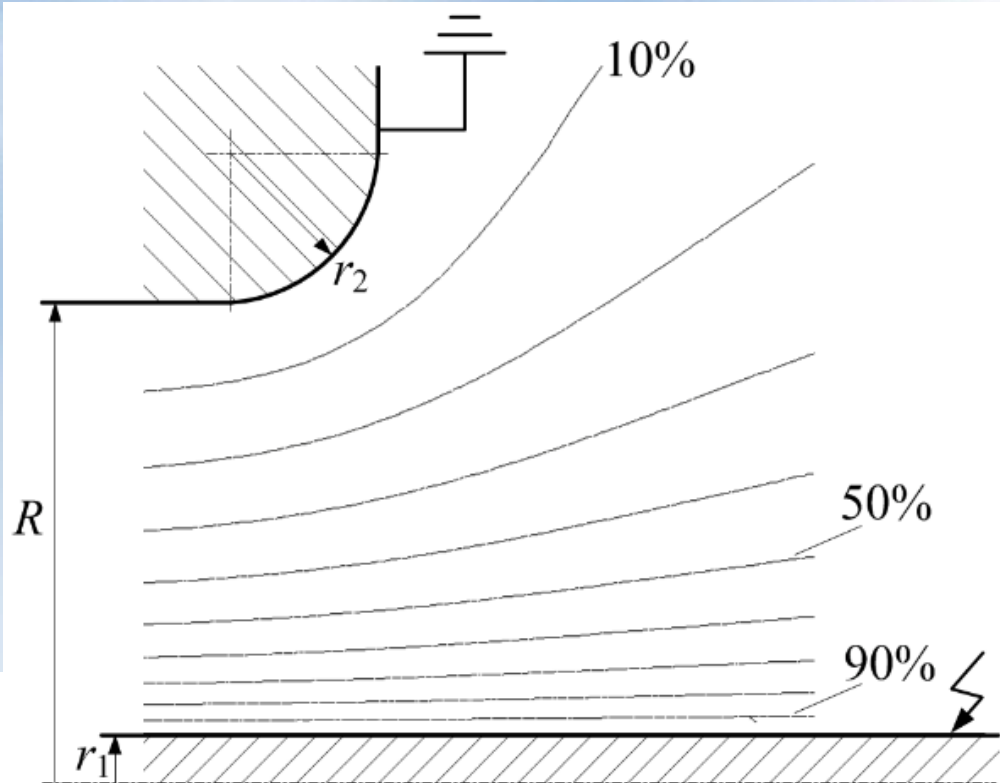
$x$ - $y$ 平面和 $x$ - $z$ 平面上的  
电场分布示意图



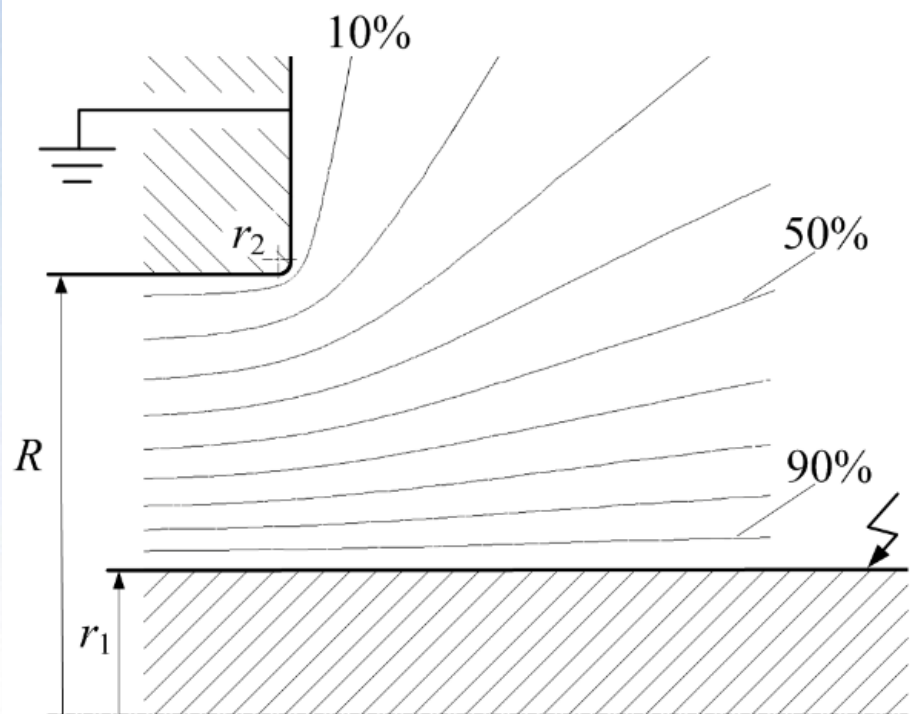
## 2.1 电场分布的分析与电场调整

高场强电极可以是高电位电极  
也可以是低电位或地电位电极

什么因素影响了电场分布？  
电压对电场有什么影响？



$r_1$ 较小、 $r_2$ 较大，最高场强在导杆表面



$r_1$ 较大、 $r_2$ 较小，最高场强在墙洞倒角处

## 2.1 电场分布的分析与电场调整

扩大高场强电极的  
曲率半径

以降低电极表面的场强

学会判断何处场强高  
理解如何实现对高场强  
电极的屏蔽

中国电科院  
7200kV/480kJ  
户外冲击电压发生器  
及分压器





学会判断何处场强高

理解如何实现对高场强电极的屏蔽

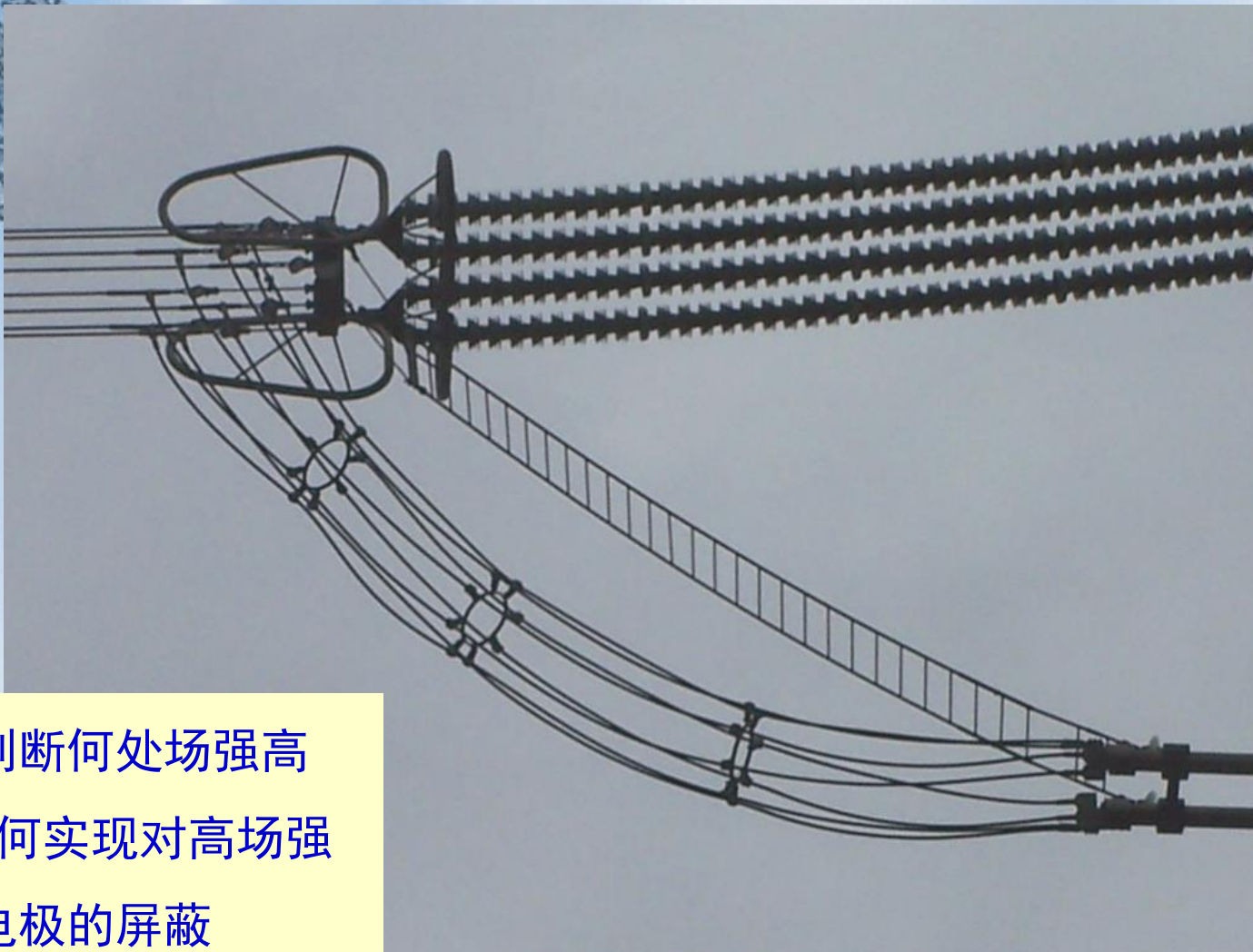


500kV交流输电线路  
导线四分裂，分裂直径64cm



1000kV交流输电线路  
导线八分裂，分裂直径102cm

分裂导线，扩大高场强电极的等效曲率半径  
以降低每根导线表面的场强



学会判断何处场强高  
理解如何实现对高场强  
电极的屏蔽

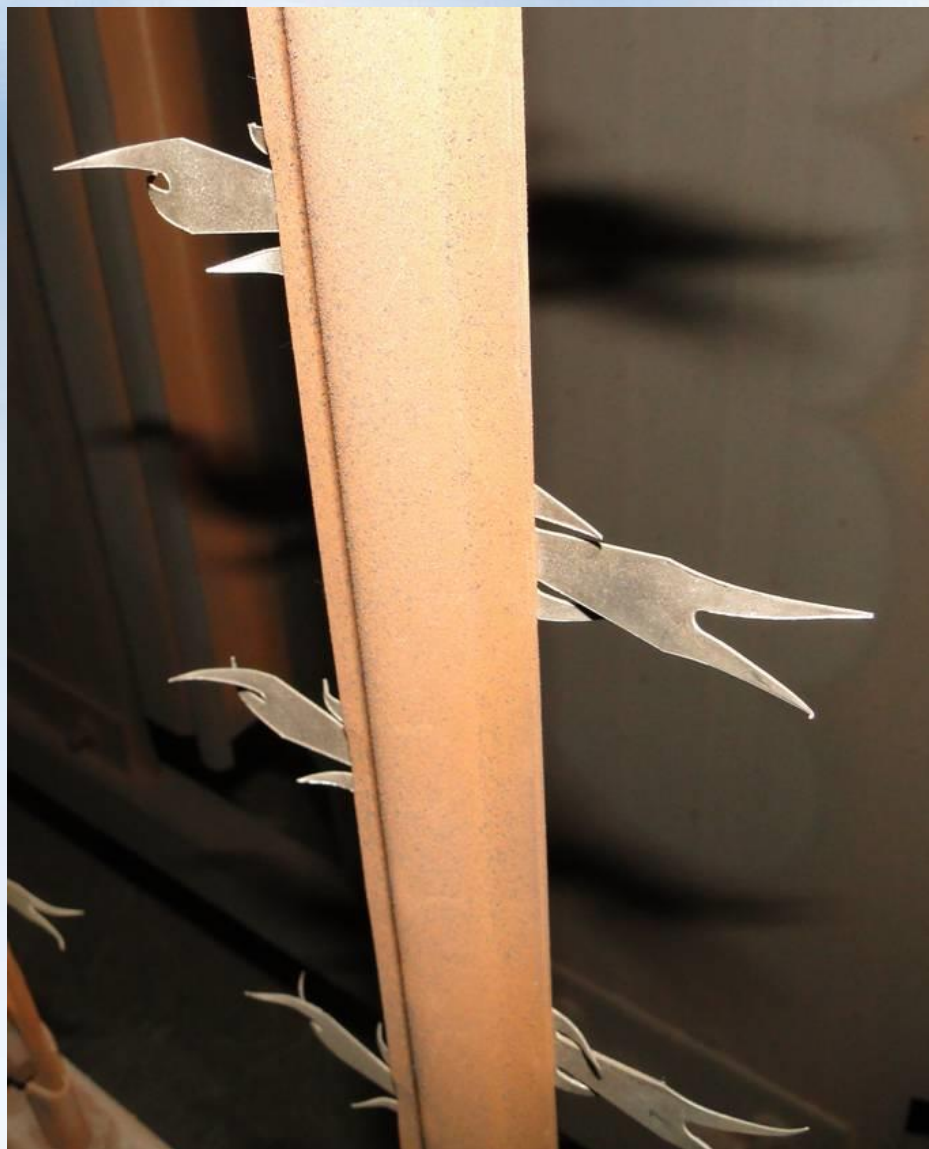
绝缘子串悬挂导线处的屏蔽环

外加屏蔽环，屏蔽局部的高场强



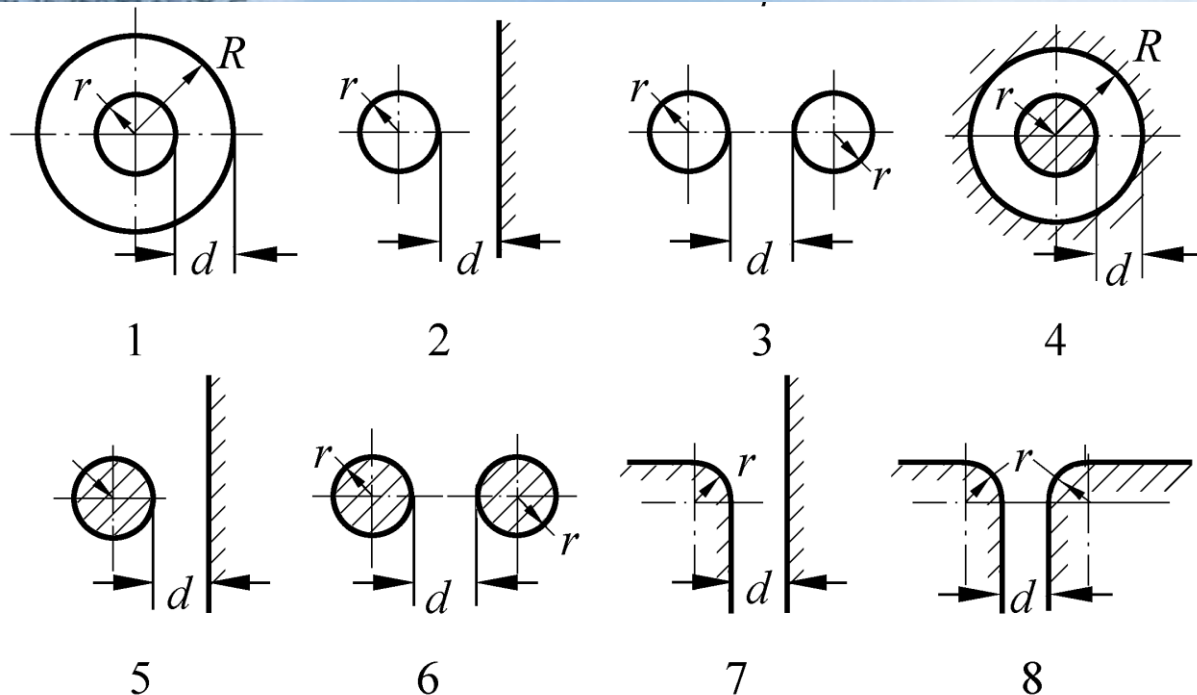
学会判断何处场强高  
理解何谓屏蔽

减小高场强电极的  
曲率半径，增强局部电场  
电除尘器的高压电极线





## 2.1 电场分布的分析与电场调整



几种典型

电极结构示意图



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

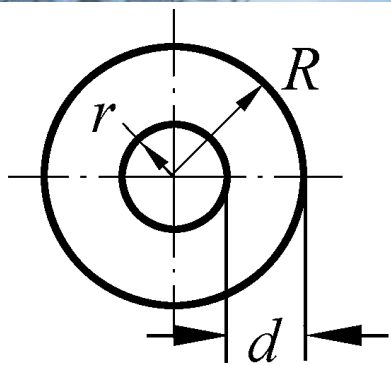
8—曲面-曲面



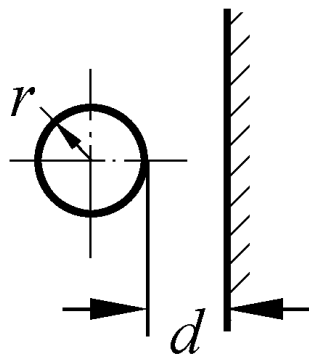
## 2.1 电场分布的分析与电场调整

○ 球面

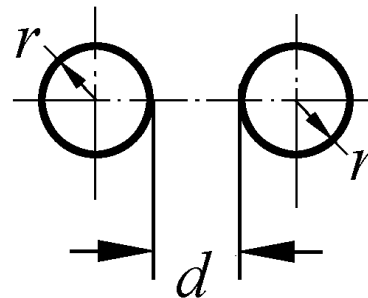
⊗ 柱面



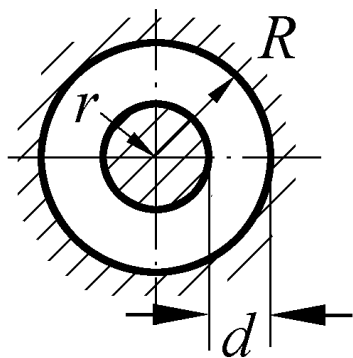
1



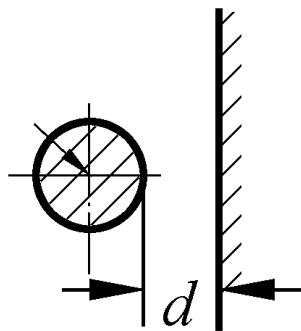
2



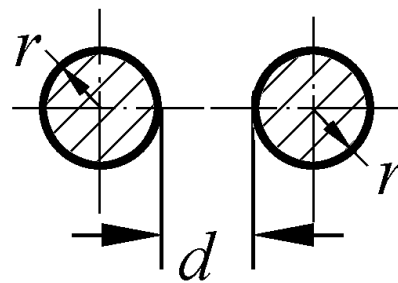
3



4



5



6

1—同心球

4—同轴圆柱

2—球-平板

5—圆柱-平板

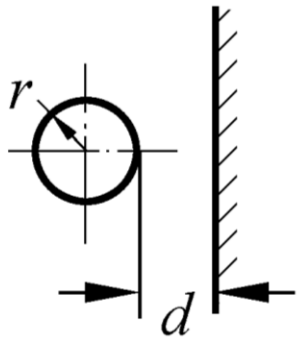
3—球-球

6—平行圆柱

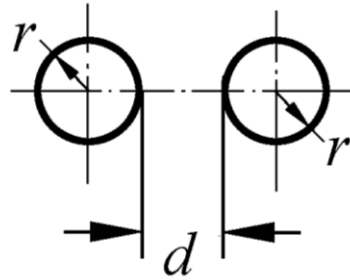
1与4,  
2与5,  
3与6相比

同样尺寸,  
谁更均匀?

## 2.1 电场分布的分析与电场调整



2

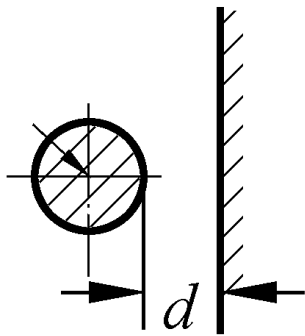


3

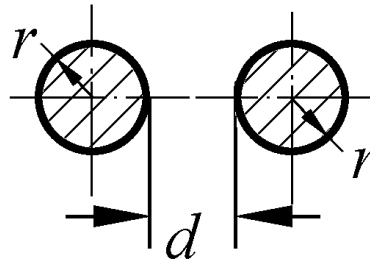
2—球-平板

3—球-球

同样尺寸的2与3，哪个更均匀？



5



6

同样尺寸的5与6，哪个更均匀？

5—圆柱-平板

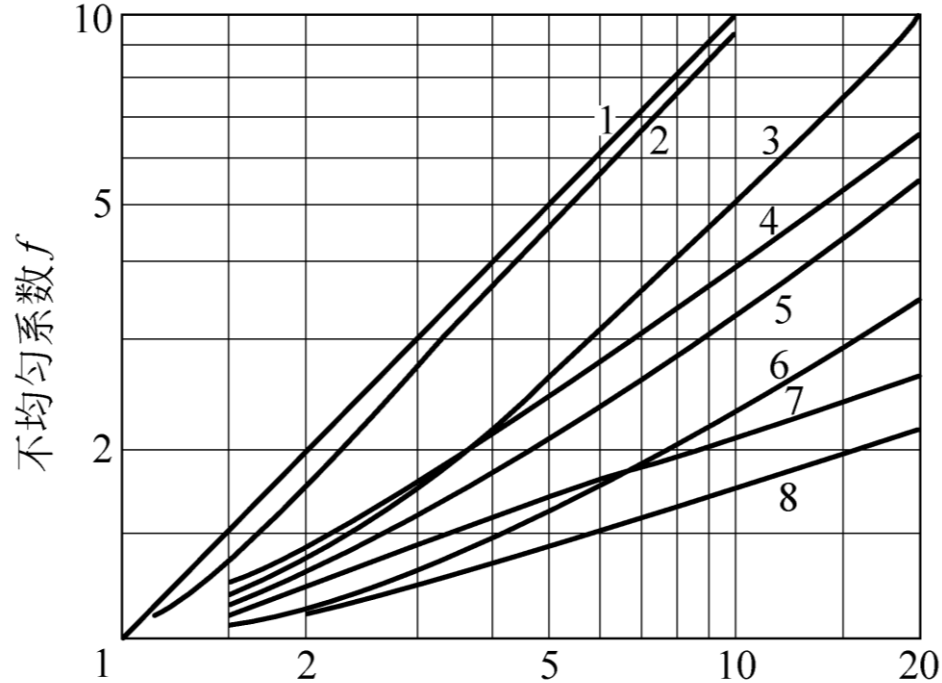
6—平行圆柱



球面



柱面



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

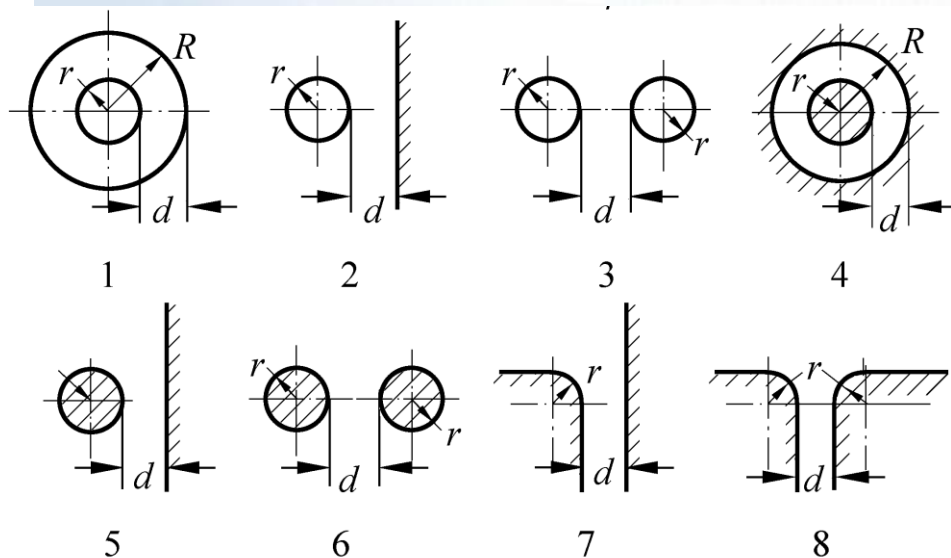
4—同轴圆柱

5—圆柱-平板

6—平行圆柱

7—曲面-平面

8—曲面-曲面



球面



柱面



## 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



## 2.2 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

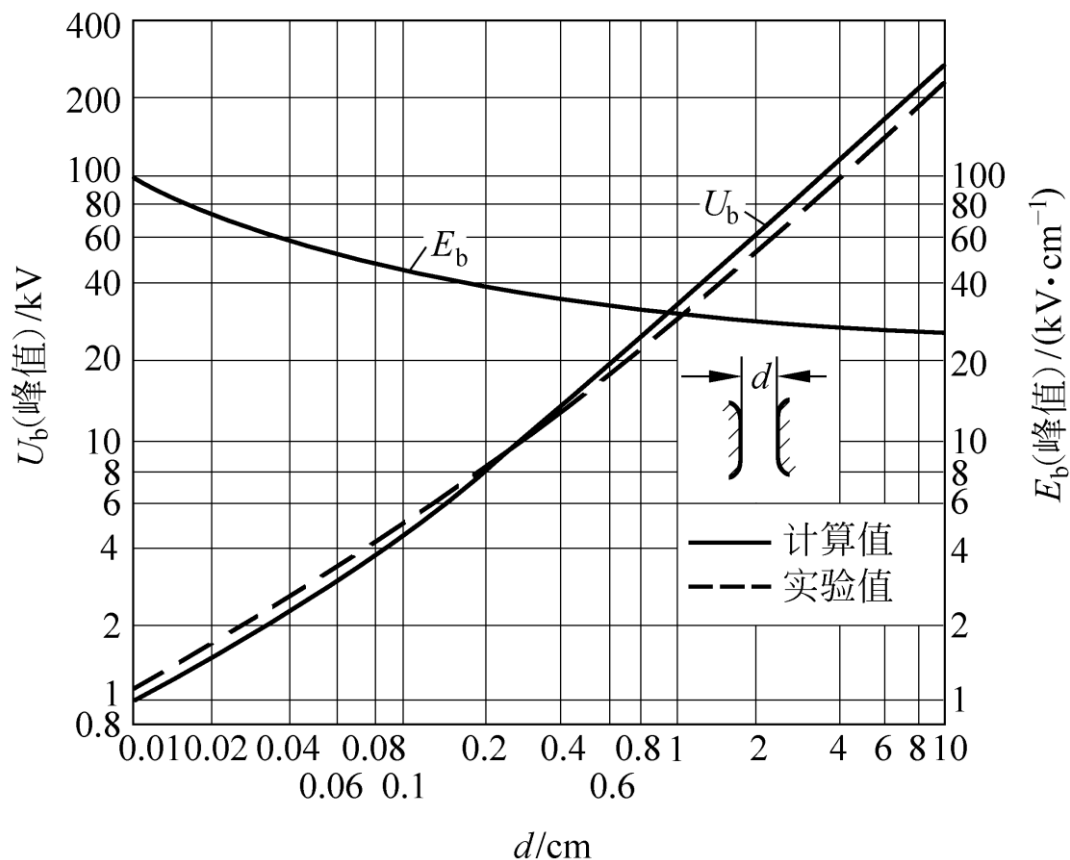
$$U_b = 24.22\delta d + 6.08\sqrt{\delta d}$$

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

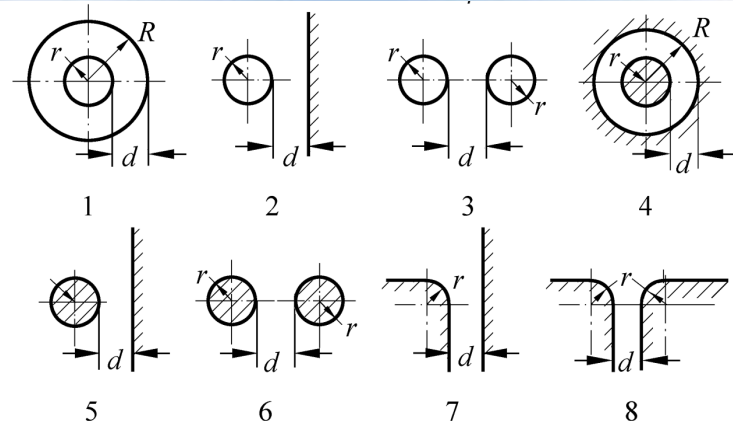
均匀电场中空气间隙的  
击穿电压 $U_b$ 及击穿场强 $E_b$   
和间隙距离 $d$ 的关系



## 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

表 2-1 几种典型电极的简化估算公式

电极形状	电极表面最大场强 $E_{\max}$	电场不均匀系数 $f$	电晕起始场强 $E_0$	电晕起始电压 $U_c$
同心球	$E_{\max} = \frac{RU}{r(R-r)}$ 式(2-1)	$f = R/r$ 式(2-2)	$E_0 = 24\delta (1 + 1/\sqrt{r\delta})$ 式(2-3)	$U_c = E_0 \frac{(R-r)r}{R}$ 式(2-4)
球-平板	$E_{\max} = 0.9 \frac{U}{d} \left(1 + \frac{d}{r}\right)$ 式(2-5)	$f = 0.9 \left(1 + \frac{d}{r}\right)$ 式(2-6)	$E_0 = 27.7\delta (1 + 0.337/\sqrt{r\delta})$ 式(2-7)	$U_c = E_0 \frac{dr}{0.9(d+r)}$ 式(2-8)
球-球	$E_{\max} = 0.9 \frac{U}{d} \left(1 + \frac{d}{2r}\right)$ 式(2-9)	$f = 0.9 \left(1 + \frac{d}{2r}\right)$ 式(2-10)	$E_0 = 27.7\delta (1 + 0.337/\sqrt{r\delta})$ 式(2-11)	$U_c = E_0 \frac{d}{0.9 \left(1 + \frac{d}{2r}\right)}$ 式(2-12)
同轴圆柱	$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}$ 式(2-13)	$f = \frac{R-r}{r \ln \frac{R}{r}}$ 式(2-14)	$E_0 = 31.5\delta (1 + 0.305/\sqrt{r\delta})$ 式(2-15)	$U_c = E_0 r \ln \frac{R}{r}$ 式(2-16)
圆柱-平板	$E_{\max} = \frac{0.9 U}{r \ln \frac{d+r}{r}}$ 式(2-17)	$f = \frac{0.9 d}{r \ln \frac{d+r}{r}}$ 式(2-18)	$E_0 = 30.3\delta (1 + 0.298/\sqrt{r\delta})$ 式(2-19)	$U_c = E_0 \frac{r \ln \frac{d+r}{r}}{0.9}$ 式(2-20)
平行圆柱	$E_{\max} = \frac{0.9 U}{2r \ln \frac{d+2r}{2r}}$ 式(2-21)	$f = \frac{0.9 d}{2r \ln \frac{d+2r}{2r}}$ 式(2-22)	$E_0 = 30.3\delta (1 + 0.298/\sqrt{r\delta})$ 式(2-23)	$U_c = E_0 \frac{2r \ln \frac{d+2r}{2r}}{0.9}$ 式(2-24)

注：表中  $E_0$ 、 $E_{\max}$  的单位为 kV/cm (峰值)， $U_c$  的单位为 kV (峰值)， $r$ 、 $R$ 、 $d$  的含义见图 2-2，其单位均为 cm。

可估算

稍不均匀和

极不均匀场

的电晕起始

场强和电晕

起始电压

以及稍不均

匀场的间隙

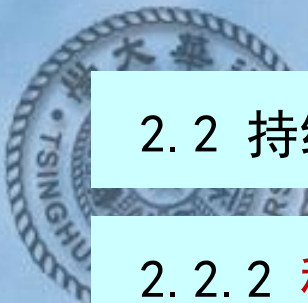
击穿电压

不能估算

极不均匀场

的间隙击穿

电压



## 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

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

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 $U_b$

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



## 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性

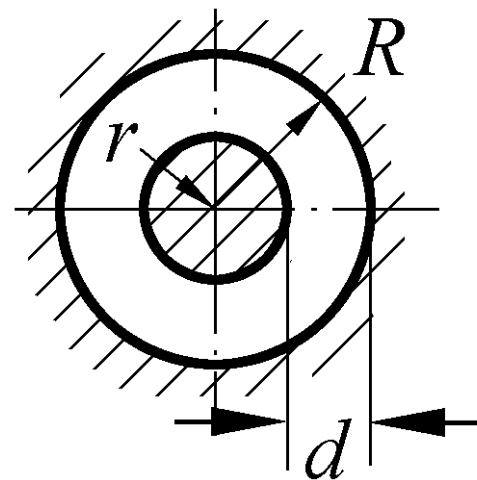
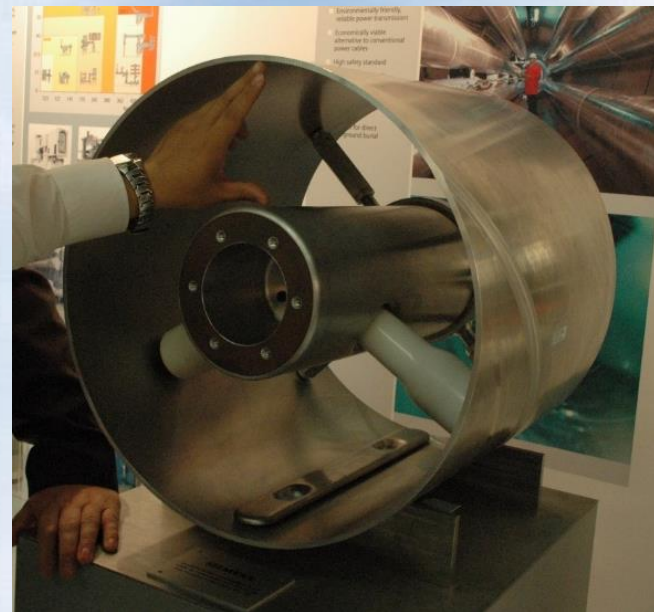
### 2.2.2 稍不均匀电场中空气间隙的绝缘特性

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

**例：**某同轴圆柱空气间隙，内电极接负极性直流高压，半径为 $r$ ，外筒接地，半径为 $R$ 。

当 $R=20\text{cm}$ 保持不变，而 $r$ 从 $r_1=6\text{cm}$ 增加到 $r_2=10\text{cm}$ ，即电极间距离 $d$ 从 $d_1=14\text{cm}$ 减小到 $d_2=10\text{cm}$ 时，

请计算该同轴圆柱电极间隙击穿电压的变化情况。



## 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

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

**解：** 对同轴圆柱电极

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}$$

式(2-13)

$$f = \frac{R-r}{r \ln \frac{R}{r}}$$

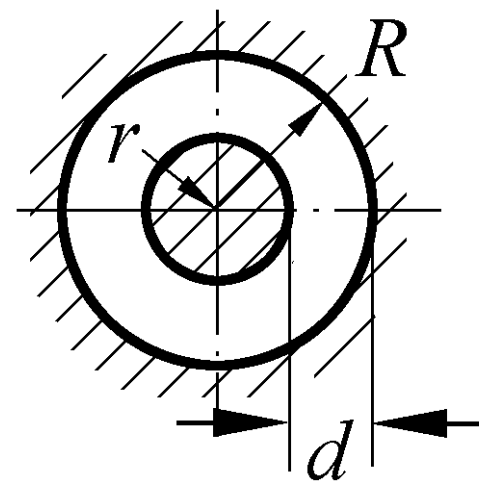
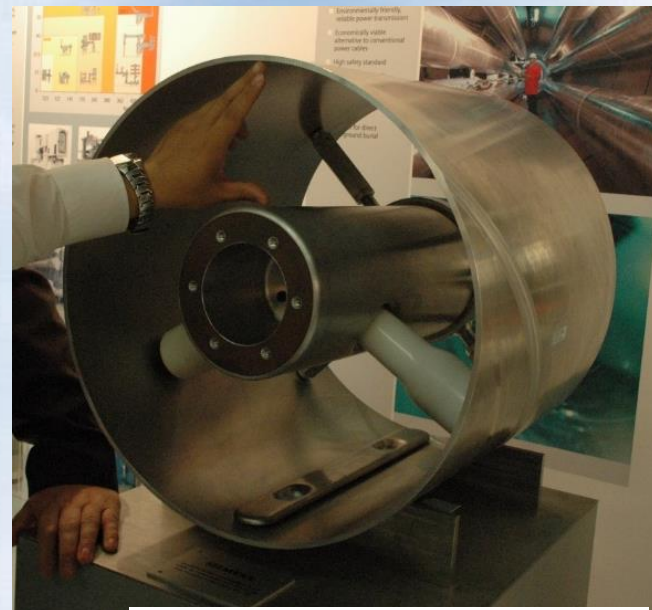
式(2-14)

$$E_0 = 31.5\delta (1 + 0.305 / \sqrt{r\delta})$$

式(2-15)

$$U_c = E_0 r \ln \frac{R}{r}$$

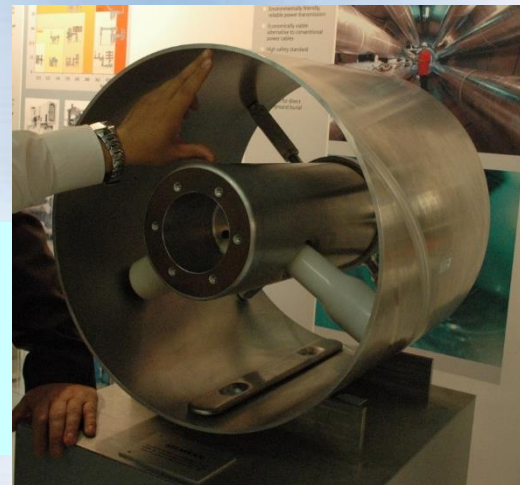
式(2-16)



## 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

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



**例：**某同轴圆柱空气间隙，内电极接负极性直流高压，半径为 $r$ ，外筒接地，半径为 $R$ 。当 $R=20\text{cm}$ 保持不变，而 $r$ 从 $r_1=6\text{cm}$ 增加到 $r_2=10\text{cm}$ ，即电极间距离 $d$ 从 $d_1=14\text{cm}$ 减小到 $d_2=10\text{cm}$ 时，请计算该同轴圆柱电极间隙击穿电压的变化情况。

**解：**同轴圆柱空气间隙的电场不均匀系数 $f$ 及间隙击穿电压 $U_c$ 的计算公式见表2-1。

当 $R=20\text{cm}$ ， $r_1=6\text{cm}$ ， $d_1=14\text{cm}$ 时，可求得 $f_1=1.94$ ， $U_{c1}=256\text{kV}$ ；

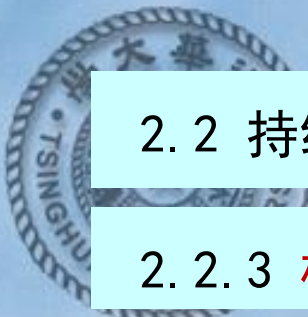
当 $R=20\text{cm}$ ， $r_2=10\text{cm}$ ， $d_2=10\text{cm}$ 时，可求得 $f_2=1.44$ ， $U_{c2}=239\text{kV}$ 。

**思考：**间隙距离减小近30%，但击穿电压仅减小了不到7%。

电场均匀程度的增加导致间隙击穿场强有了大幅度提高。

$$U_{c1}/d_1 = 18.3\text{kV/cm}, \text{ 而 } U_{c2}/d_2 = 23.9\text{kV/cm}.$$

**在稍不均匀场中，电场均匀程度对间隙击穿电压影响很大！**



## 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



## 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

正棒-板:  $E_b \approx 4.5 \text{ kV/cm}$   
负棒-板:  $E_b \approx 10 \text{ kV/cm}$

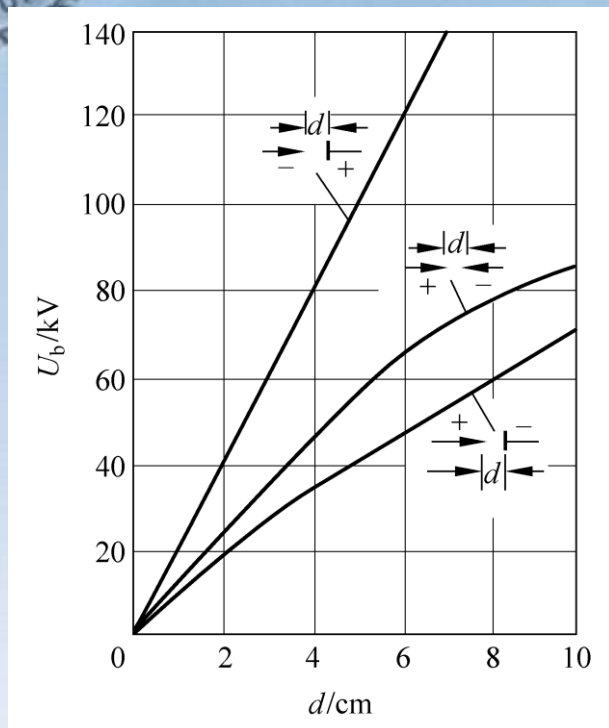


图2-12 尖-板及尖-尖空气间隙的直流击穿电压和间隙距离的关系

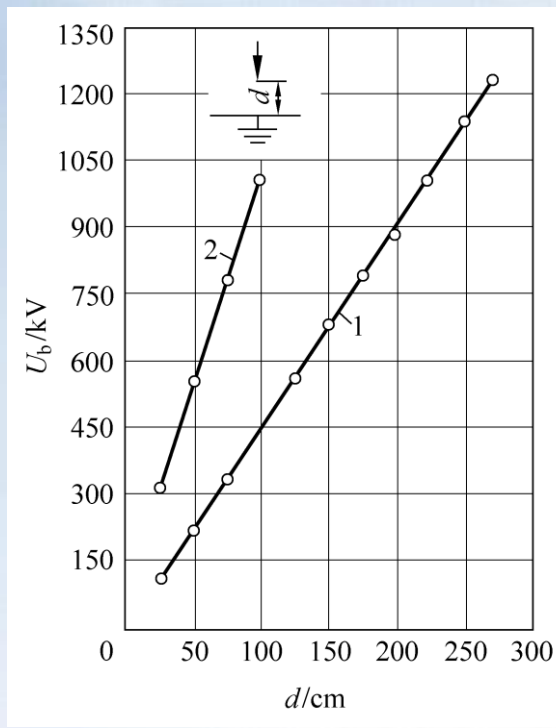


图2-13 棒-板空气间隙的直流击穿电压和间隙距离的关系 1—正极性；2—负极性

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

## 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性

交流电压下的间隙  
击穿发生在正半波

### 2.2.3 极不均匀电场中空气间隙的绝缘特性

棒-棒:  $E_b \approx 4.0 \text{ kV/cm}$  (有效值)

$\approx 5.66 \text{ kV/cm}$  (峰值)

棒-板:  $E_b \approx 3.7 \text{ kV/cm}$  (有效值)

$\approx 5.23 \text{ kV/cm}$  (峰值)

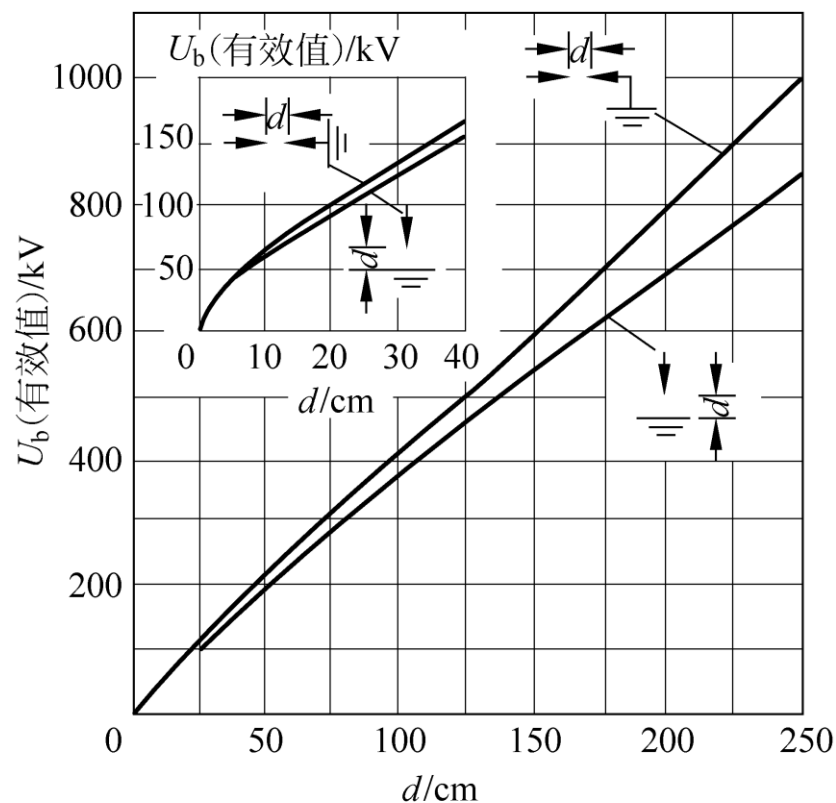


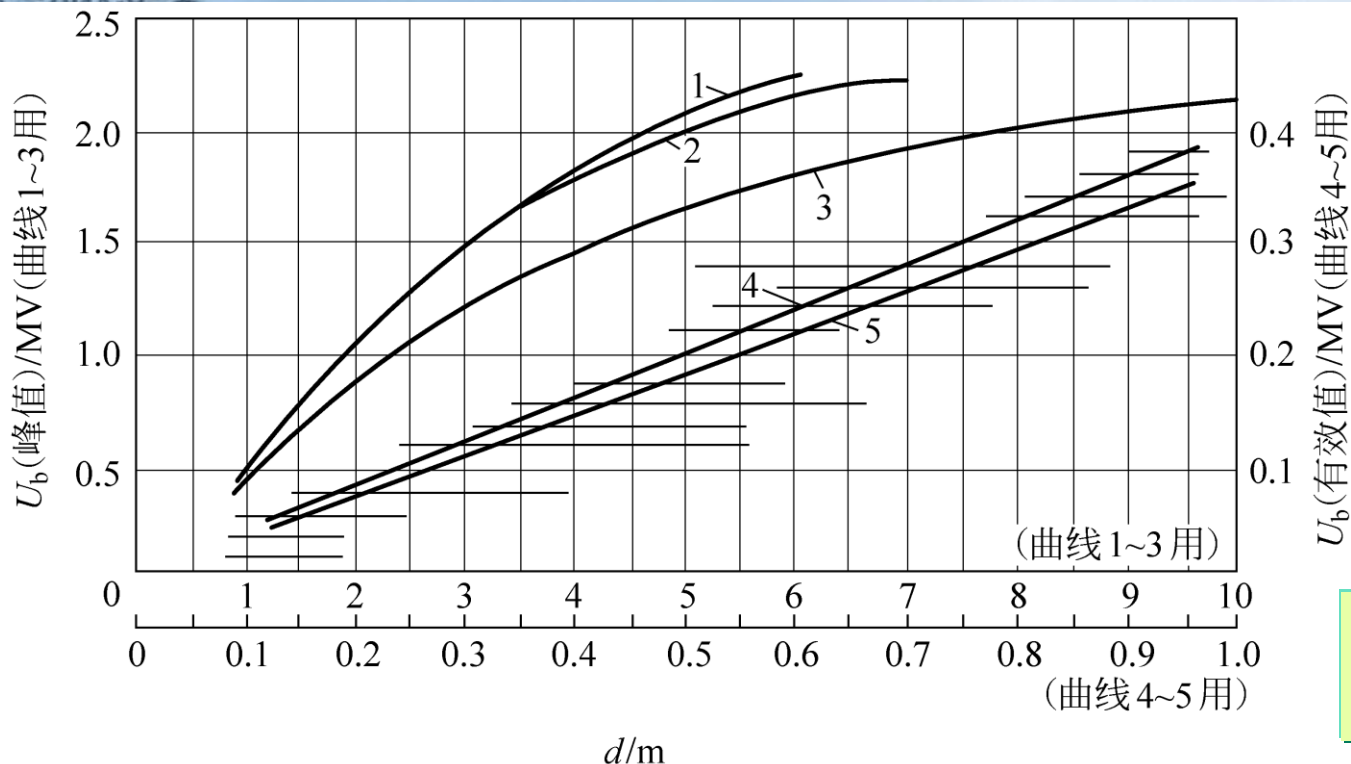
图2-14 棒-棒及棒-板空气间隙的工频击穿电压和间隙距离的关系

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

## 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

长间隙棒板： $d = 10\text{m}$ 时  
 $E_b \approx 210 \text{ kV/m}$  (峰值)  
 $= 150 \text{ kV/m}$  (有效值)



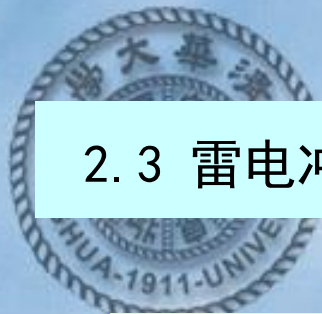
间隙击穿电压  
随间隙距离增  
长的饱和现象  
是交流电压下  
长间隙击穿的  
显著特点之一

查找试验曲线时  
注意试验条件

图2-15 棒-棒及棒-板空气间隙的工频击穿电压和间隙距离的关系

1、2、4—棒-棒；3、5—棒-板

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



## 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

惊蛰！

大地回春

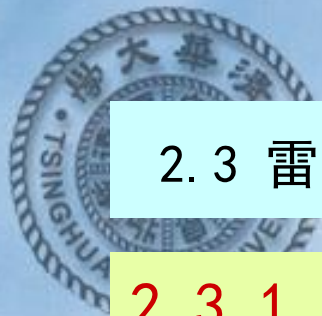
万象更新



萬物出乎震







## 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
- ✓ 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

