



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

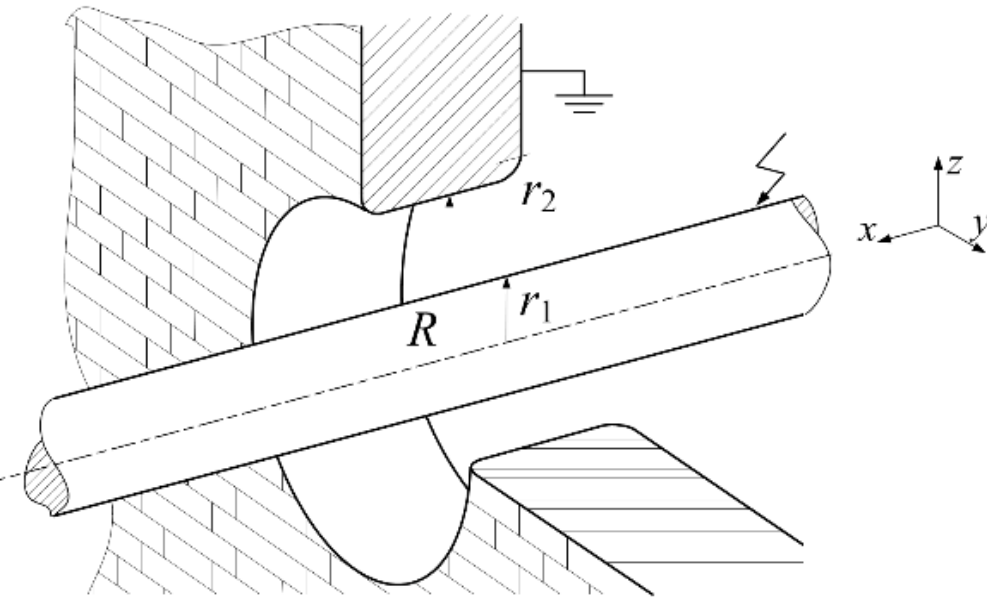
2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

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

2.1 电场分布的分析与电场调整

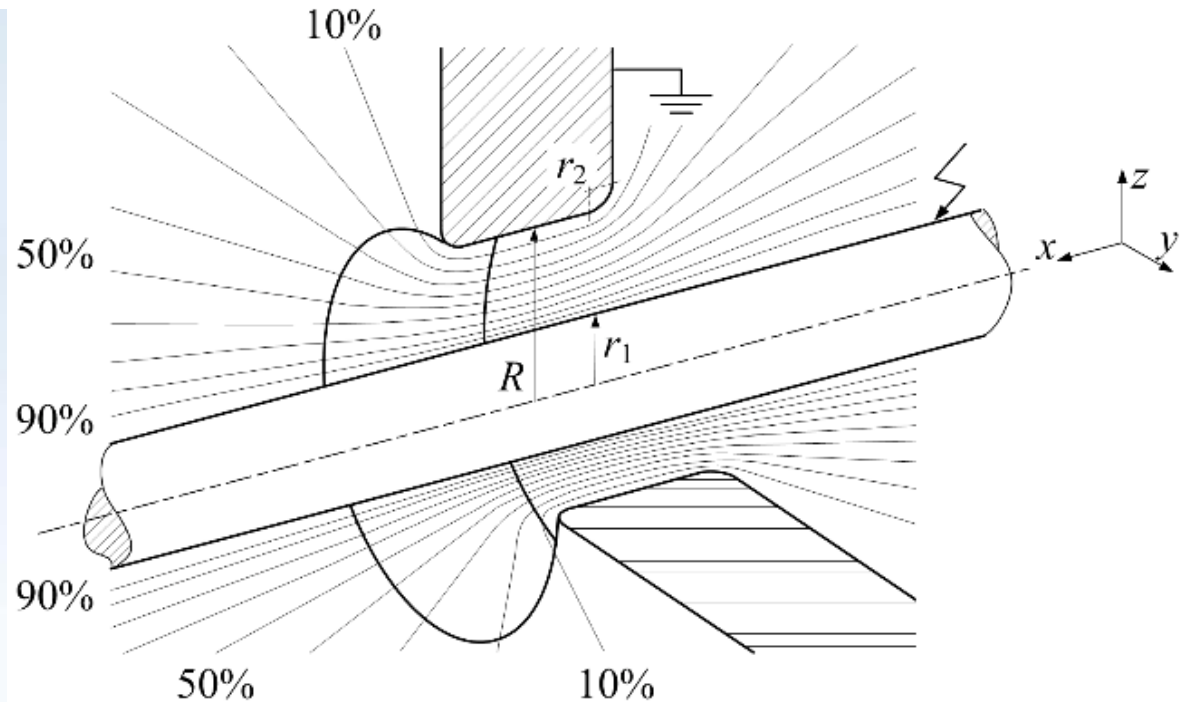
场强超过耐受值产生放电
但电场测量很困难
好在电场计算有可能
首先需对电场进行大体分析



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？

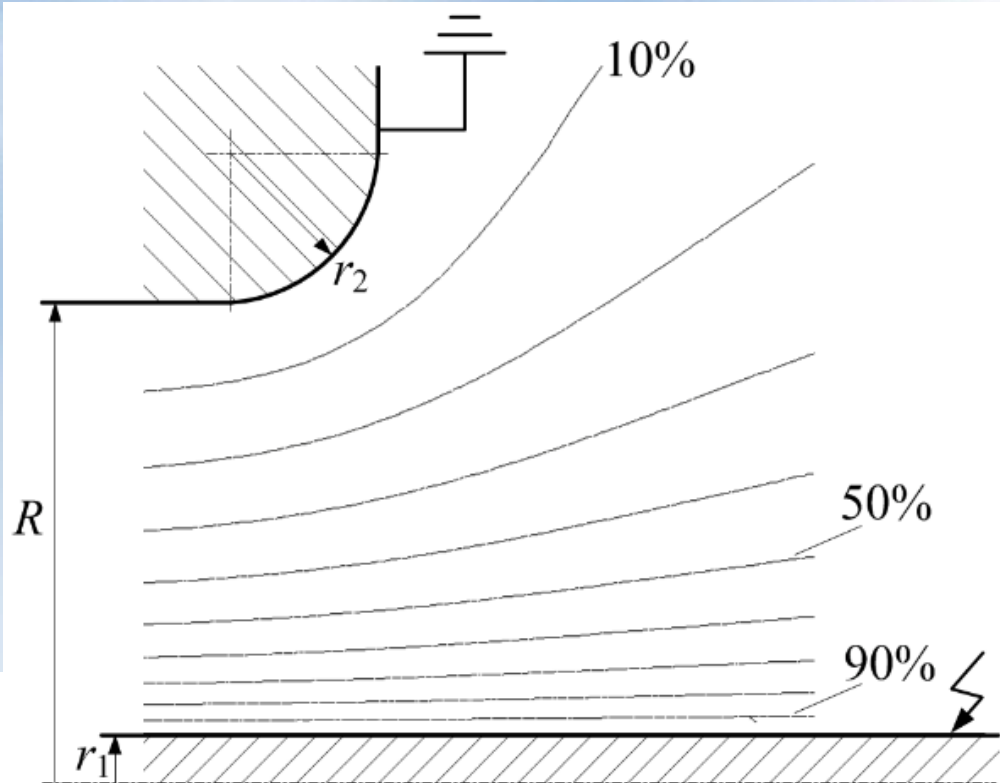
x - y 平面和 x - z 平面上的
电场分布示意图



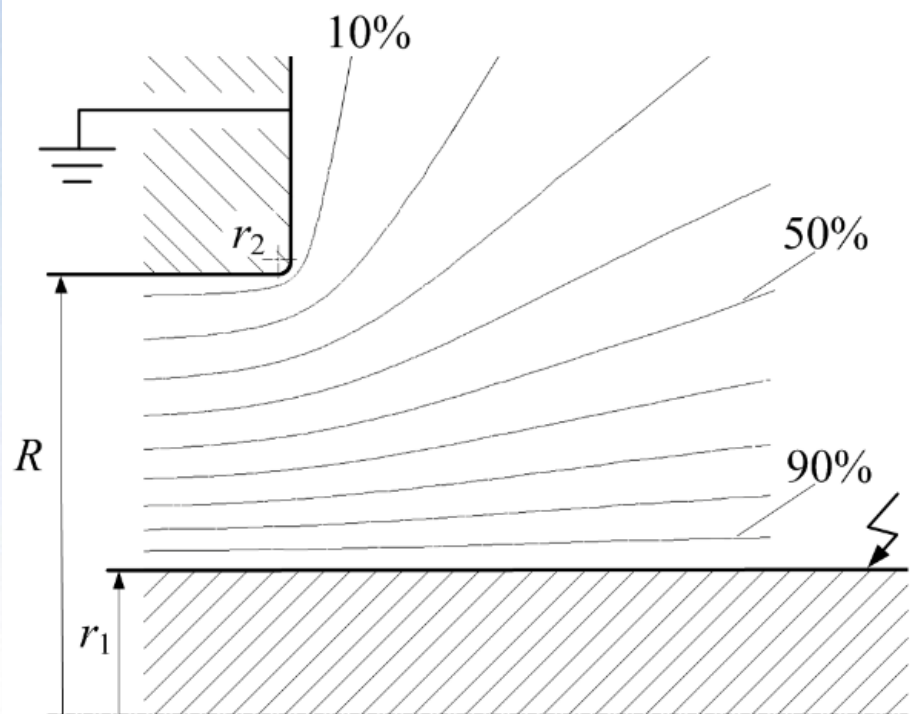
2.1 电场分布的分析与电场调整

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



扩大高场强电极的曲率半径



中国电科院±1800kV/2A
串级直流发生器及分压器



中国电科院1500kV/2A
工频试验变压器及分压器



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

南方电网
特高压国家工程实验室



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



Fig. 9• Installation of low-noise conductors in an actual 1,000-kV

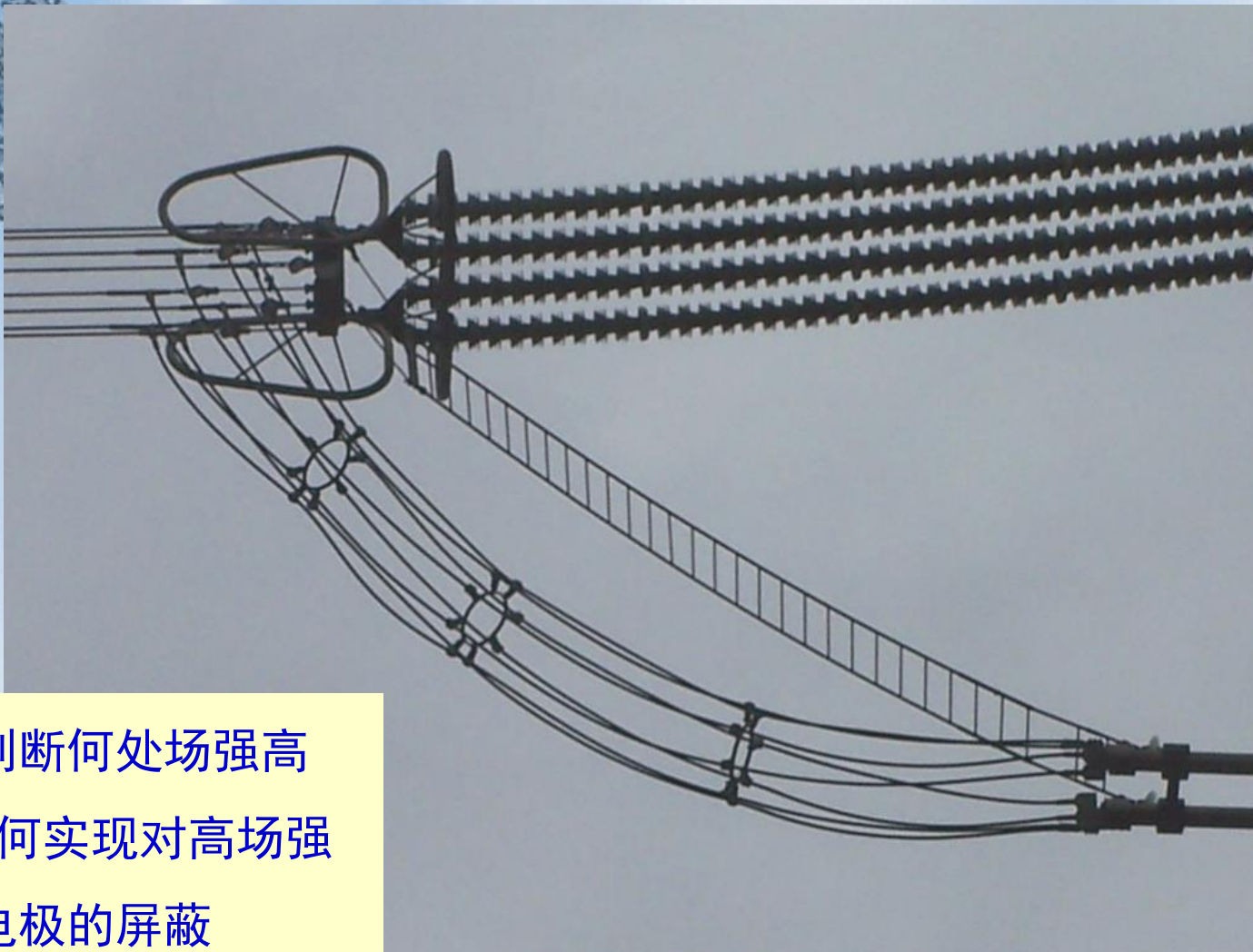
1000kV架空线路
我国通常采用
八分裂导线

学会判断何处场强高
理解如何实现对高场强
电极的屏蔽



扩大高场强电极的等效曲率半径

“串珠式” 高压引线



学会判断何处场强高
理解如何实现对高场强
电极的屏蔽

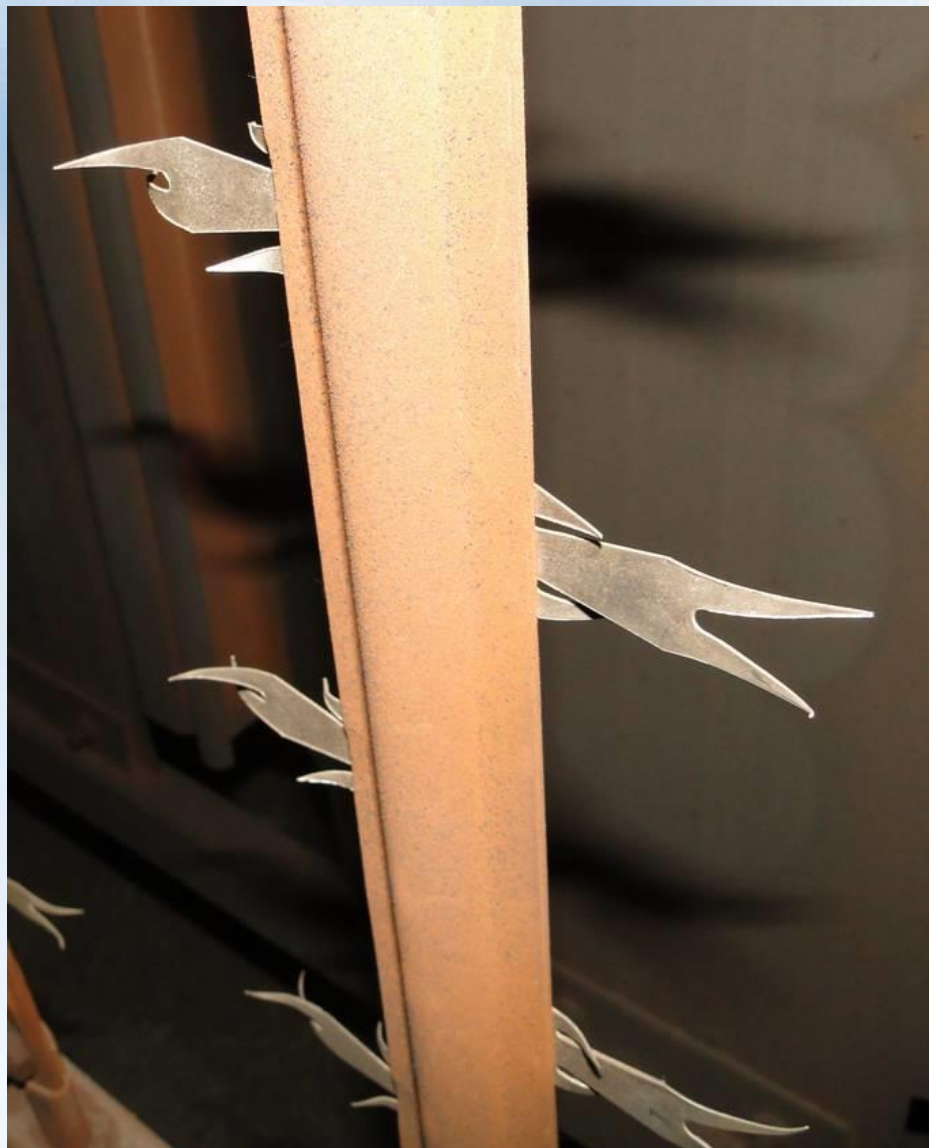
绝缘子串悬挂导线处的屏蔽环

外加屏蔽环，屏蔽局部的高场强

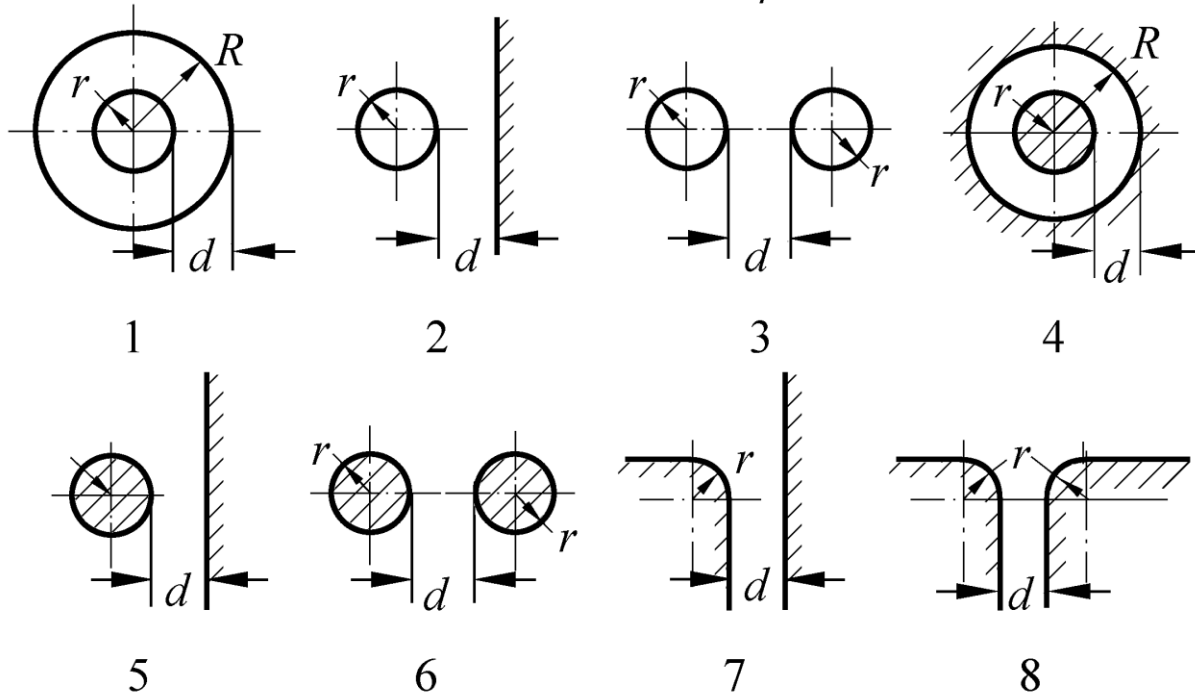


学会判断何处场强高
理解何谓屏蔽

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

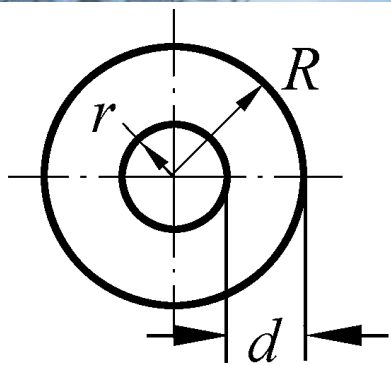
7—曲面-平面

8—曲面-曲面

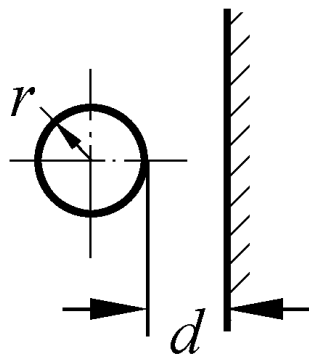
2.1 电场分布的分析与电场调整

○ 球面

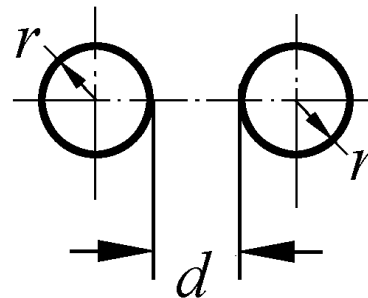
⊗ 柱面



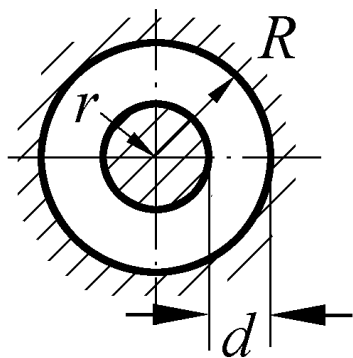
1



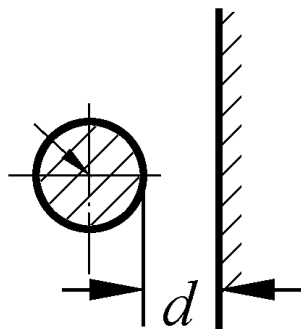
2



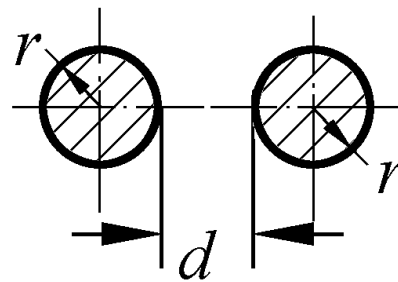
3



4



5



6

1—同心球

2—球-平板

3—球-球

4—同轴圆柱

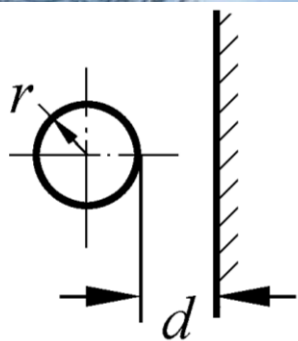
5—圆柱-平板

6—平行圆柱

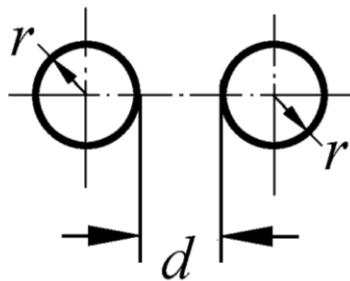
1与4,
2与5,
3与6相比

同样尺寸,
谁更均匀?

2.1 电场分布的分析与电场调整



2



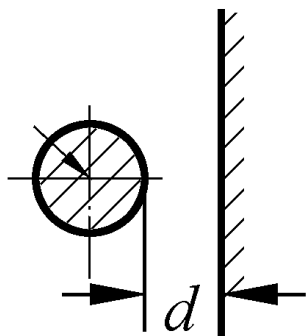
3

2—球-平板

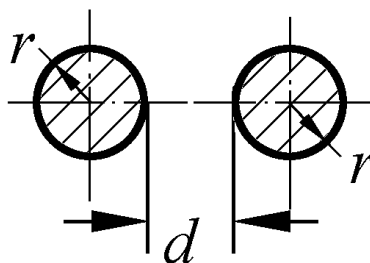
3—球-球

同样尺寸的2与3，哪个更均匀？

同样尺寸的5与6，哪个更均匀？



5

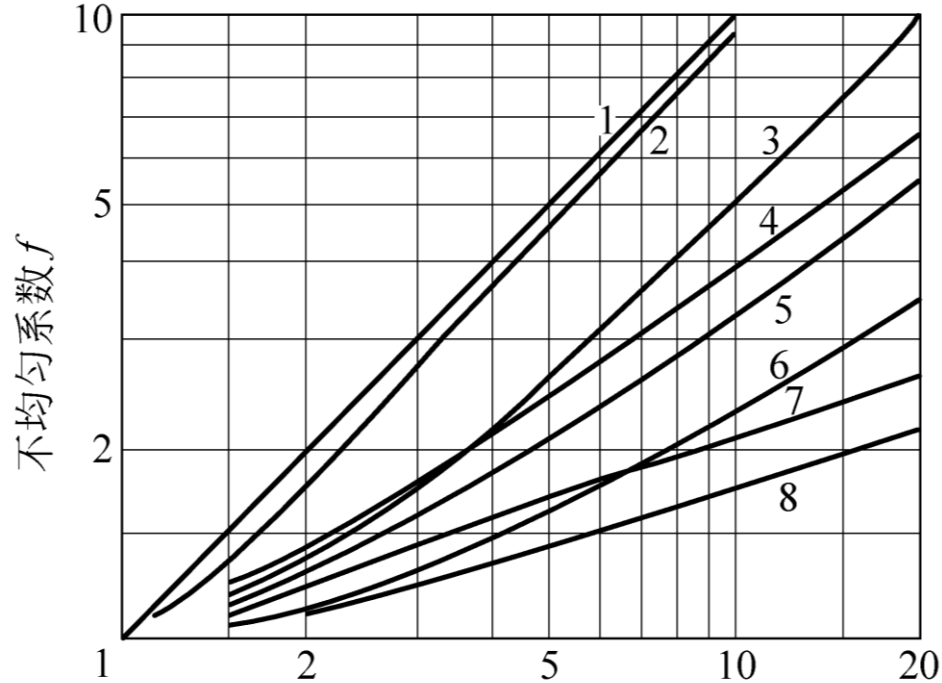


6

5—圆柱-平板

6—平行圆柱





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

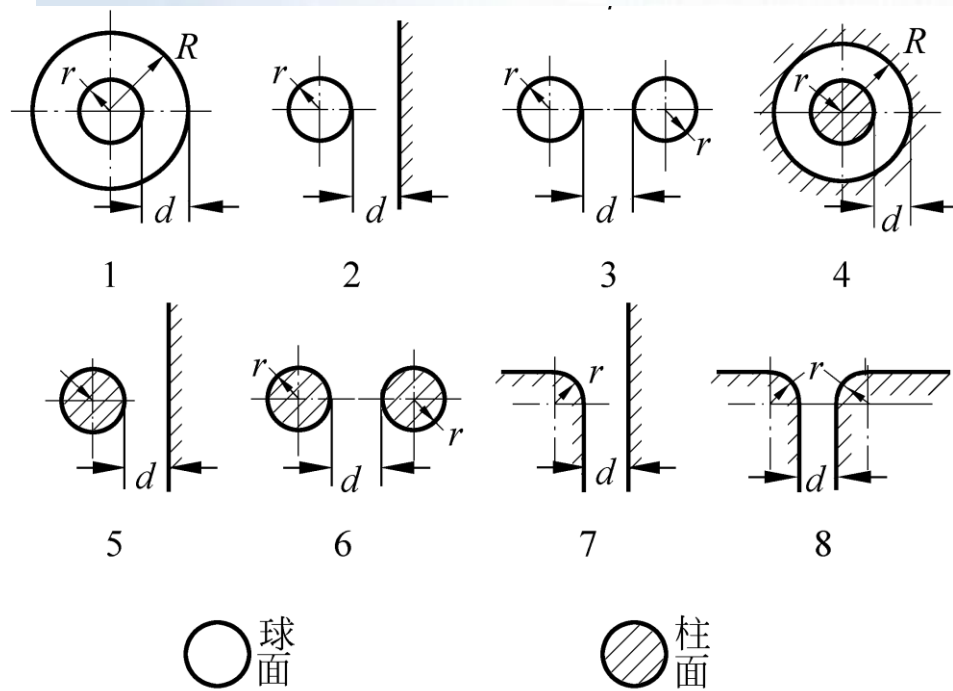
7—曲面-平面

8—曲面-曲面

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





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

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

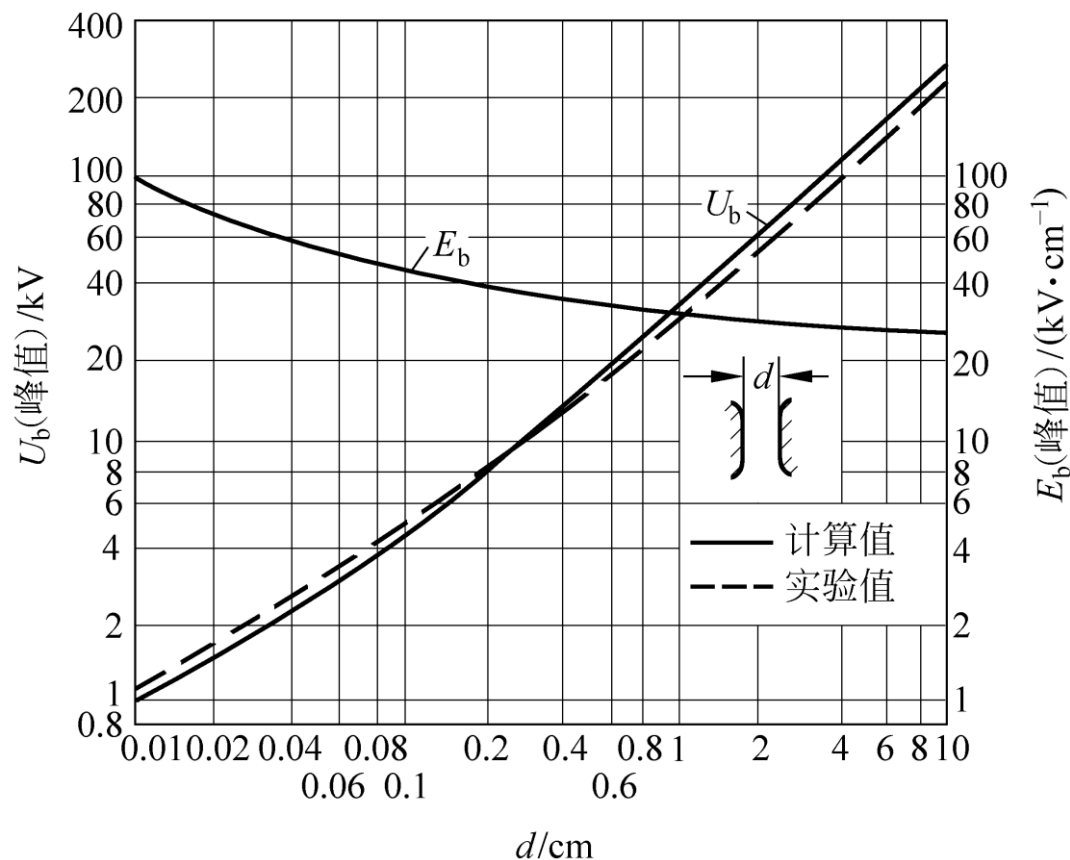
$$U_b = 24.22\delta d + 6.08\sqrt{\delta d}$$

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

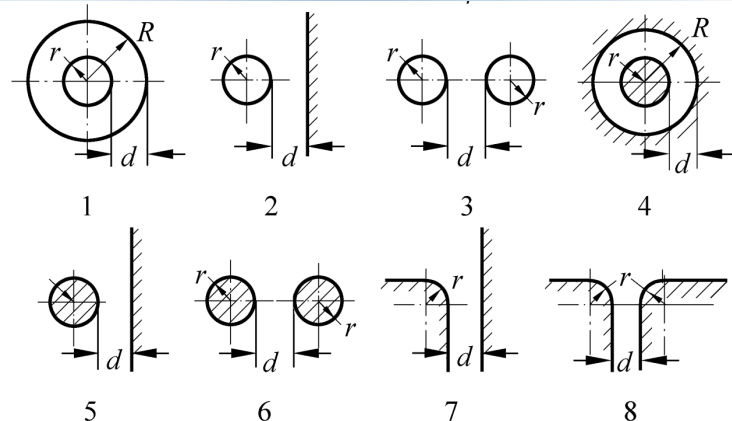
均匀电场中空气间隙的
击穿电压 U_b 及击穿场强 E_b
和间隙距离 d 的关系



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

可估算稍不

均匀场的间

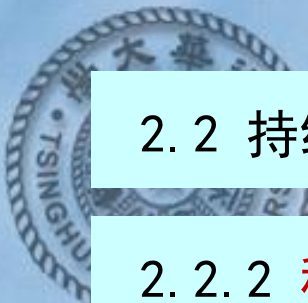
隙击穿电压

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

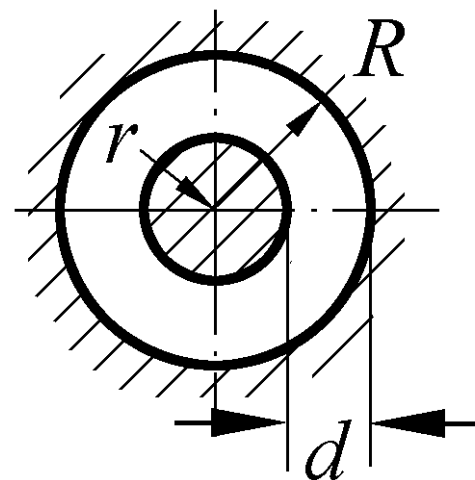
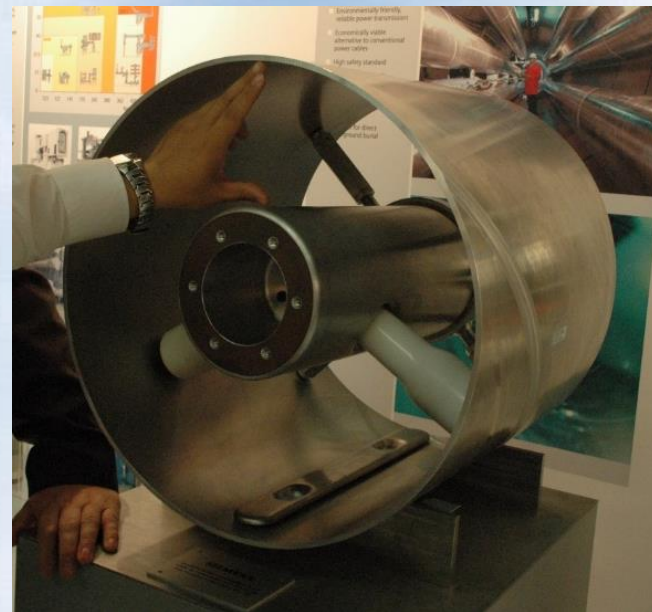
2.2.2 稍不均匀电场中空气间隙的绝缘特性

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

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)

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

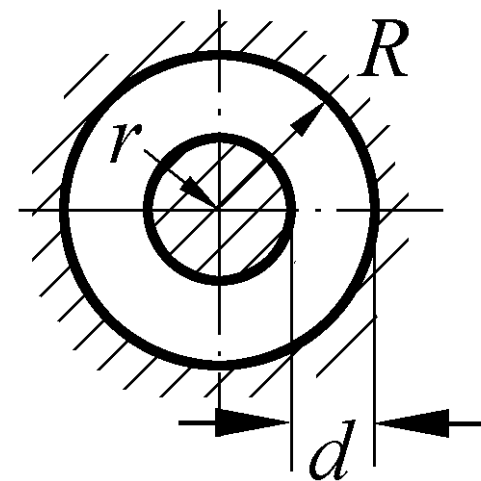
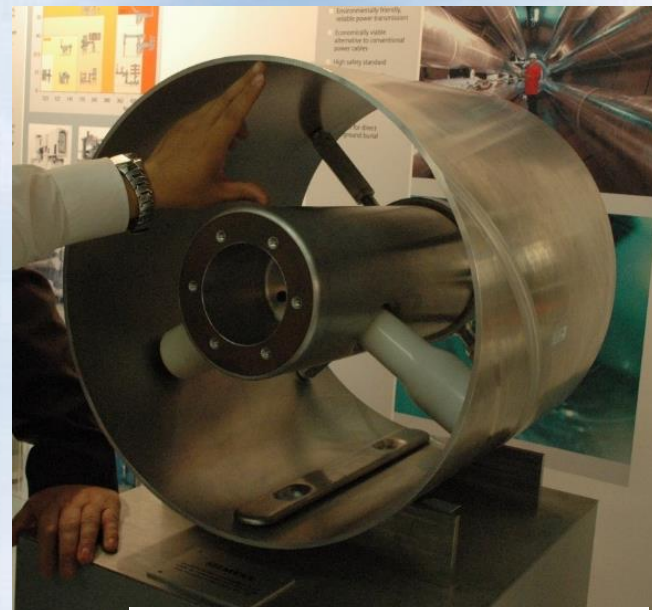
式(2-14)

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

式(2-15)

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

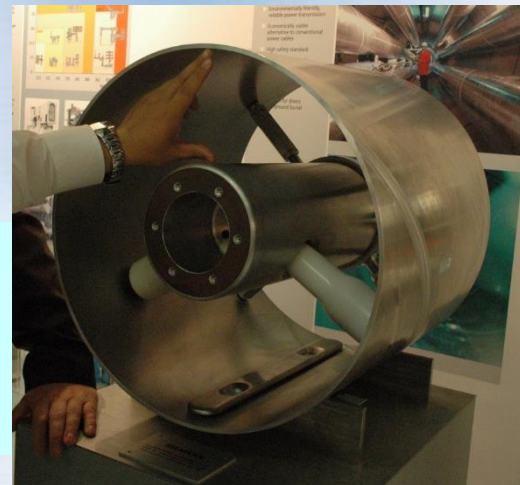
式(2-16)



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。

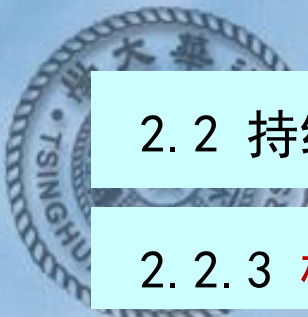
当 $R=20\text{cm}$ ， $r_1=6\text{cm}$ ， $d_1=14\text{cm}$ 时，可求得 $f_1=1.94$ ， $U_{c1}=256\text{kV}$ ；

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: $E_b \approx 10 \text{ kV/cm}$

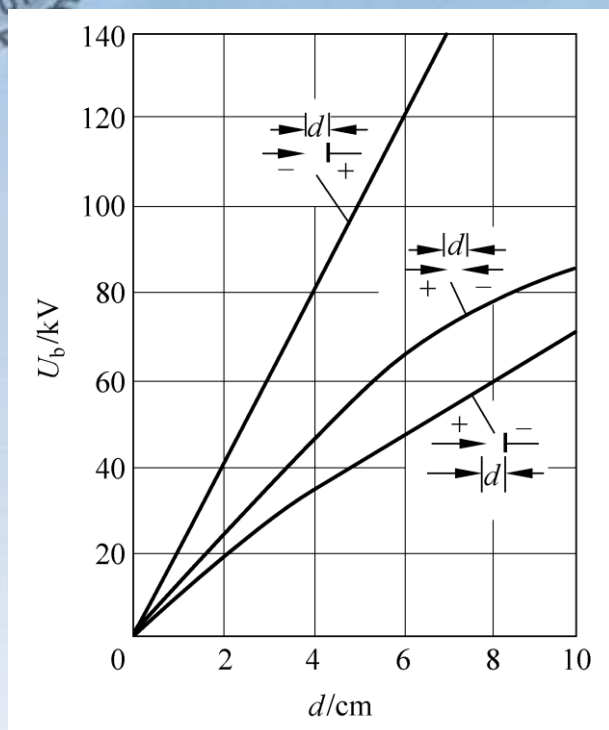


图2-12 尖-板及尖-尖空气间隙的直流击穿电压和间隙距离的关系

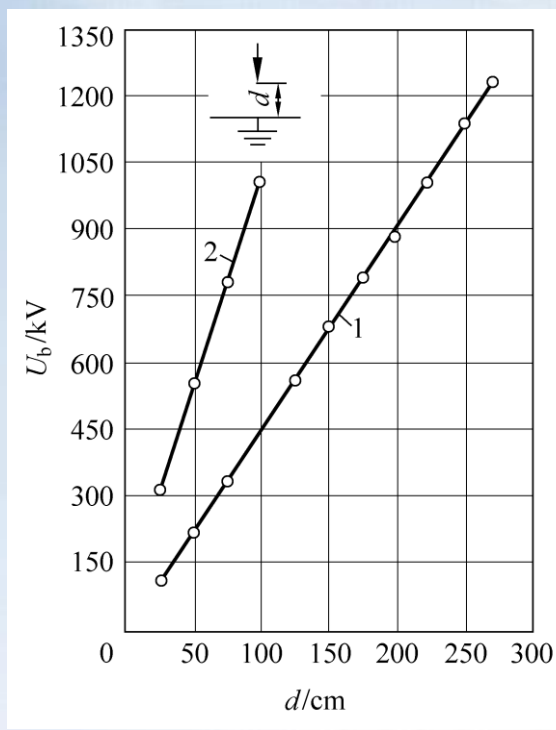


图2-13 棒-板空气间隙的直流击穿电压和间隙距离的关系 1—正极性；2—负极性

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)

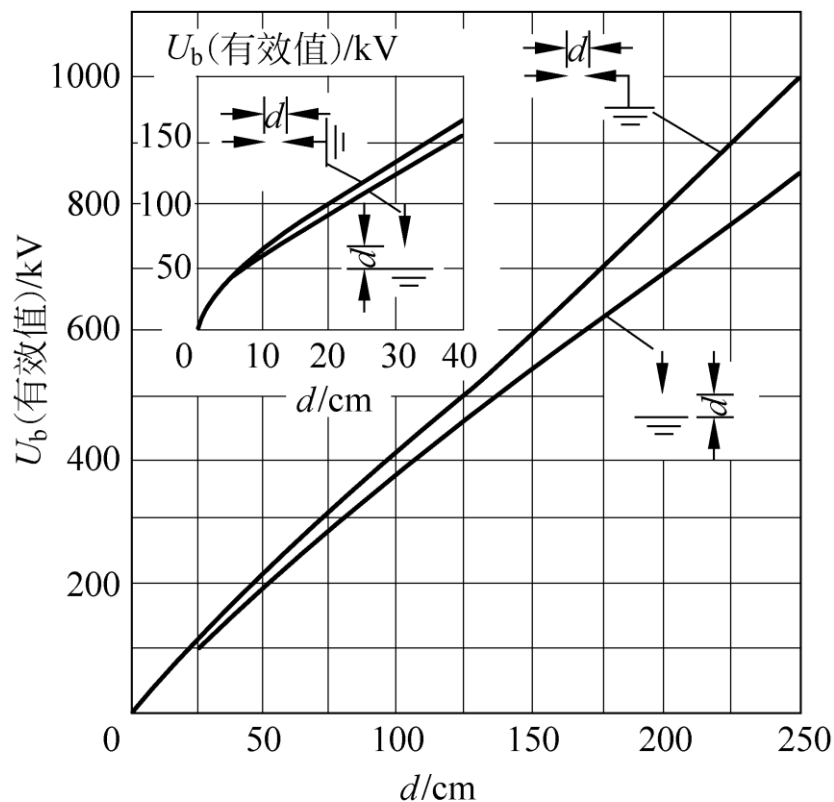


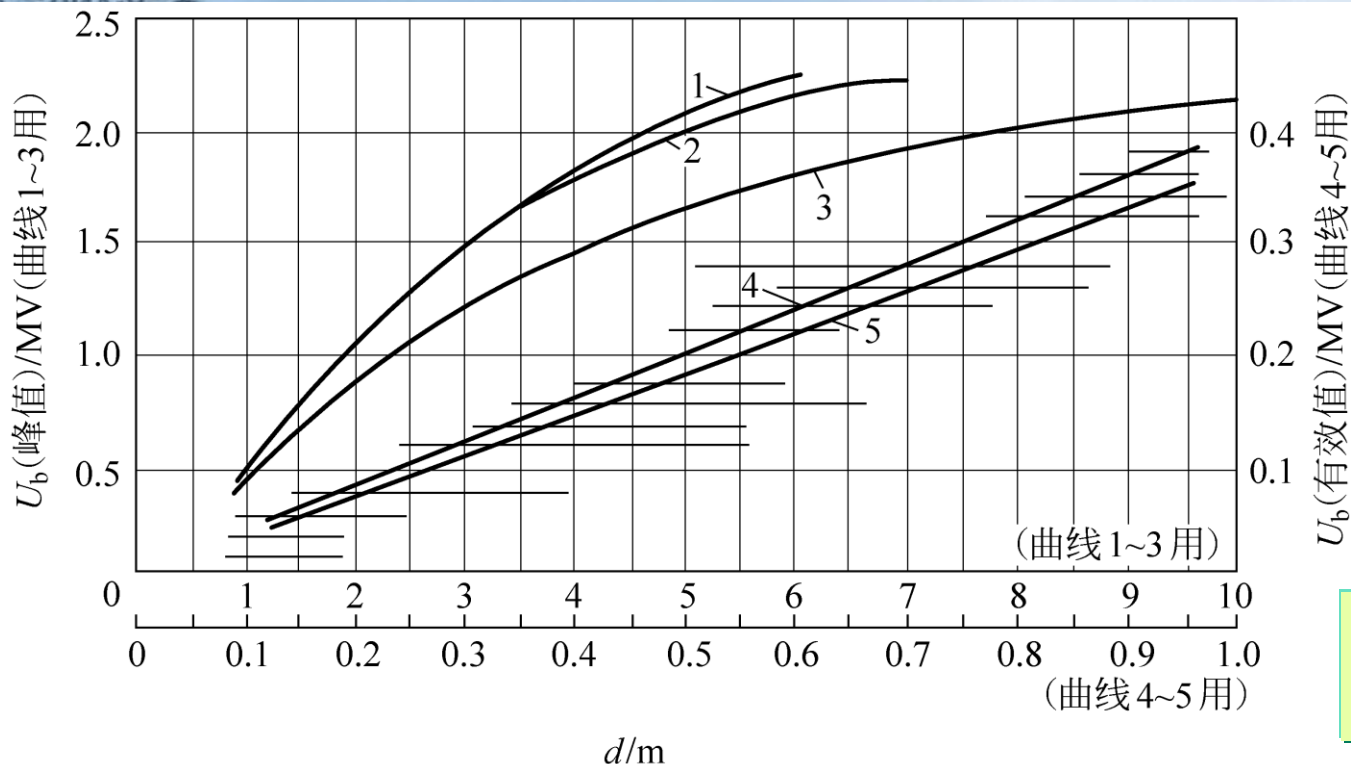
图2-14 棒-棒及棒-板空气间隙的工频击穿电压和间隙距离的关系

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)



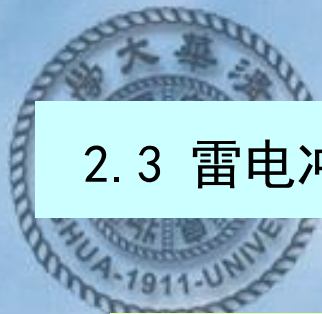
间隙击穿电压
随间隙距离增
长的饱和现象
是交流电压下
长间隙击穿的
显著特点之一

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



你最想了解雷电哪方面的内容？

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



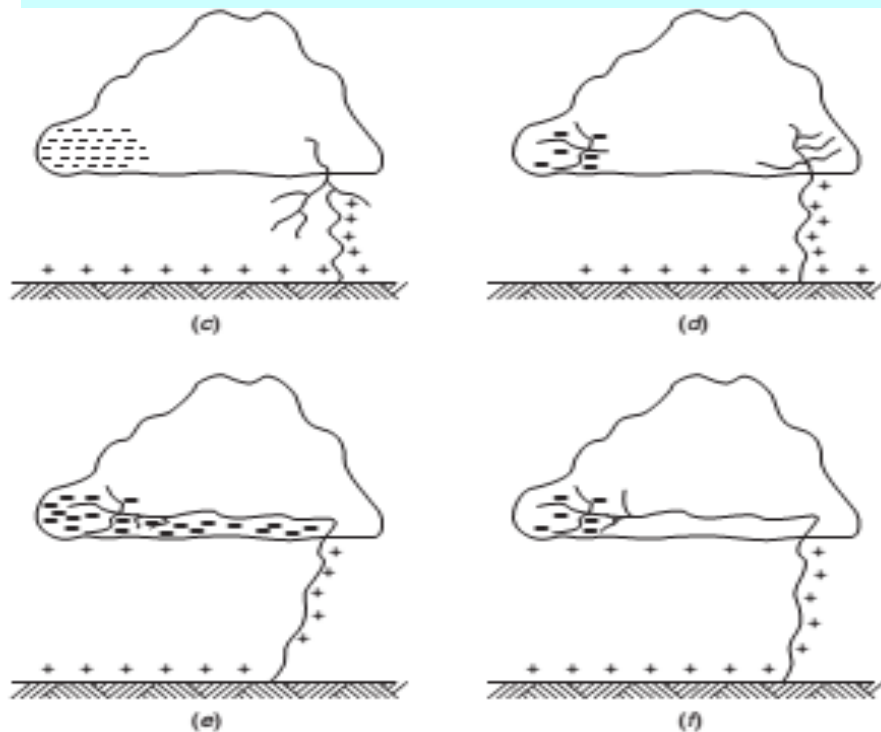


- ⚡ 雷电的极性；上行雷与下行雷；先导的发展过程与速度，主放电；
- ⚡ 雷击的三个主要阶段；雷电的分量；

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

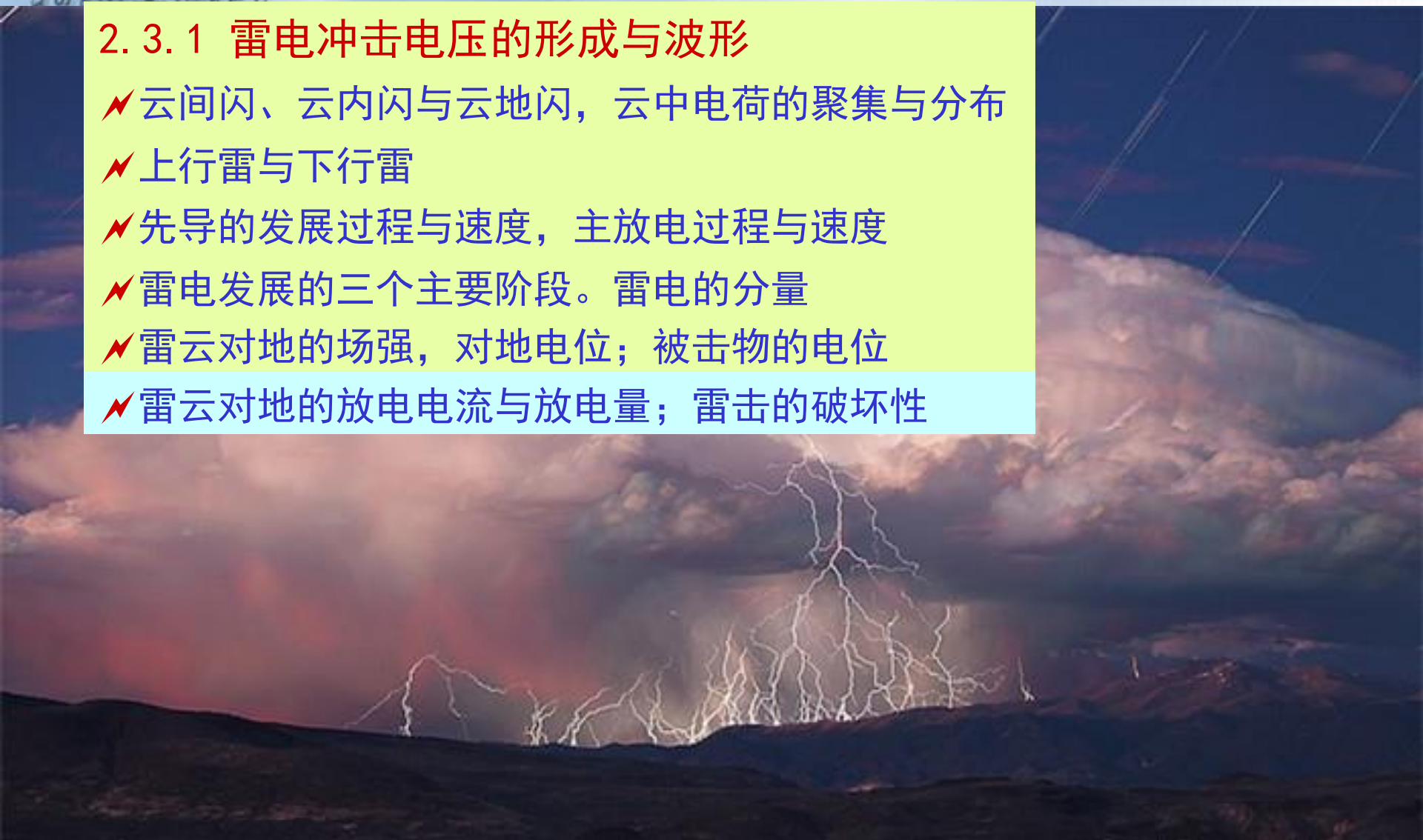
- ✓ 云间闪、云内闪与云地闪，云中电荷的聚集与分布
- ✓ 雷电的极性；上行雷与下行雷
- ✓ 先导的发展过程与速度，主放电过程与速度
- ✓ 雷电发展的三个主要阶段。雷电的分量
- ✓ 雷云对地的场强，对地电位。被击物的电位



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

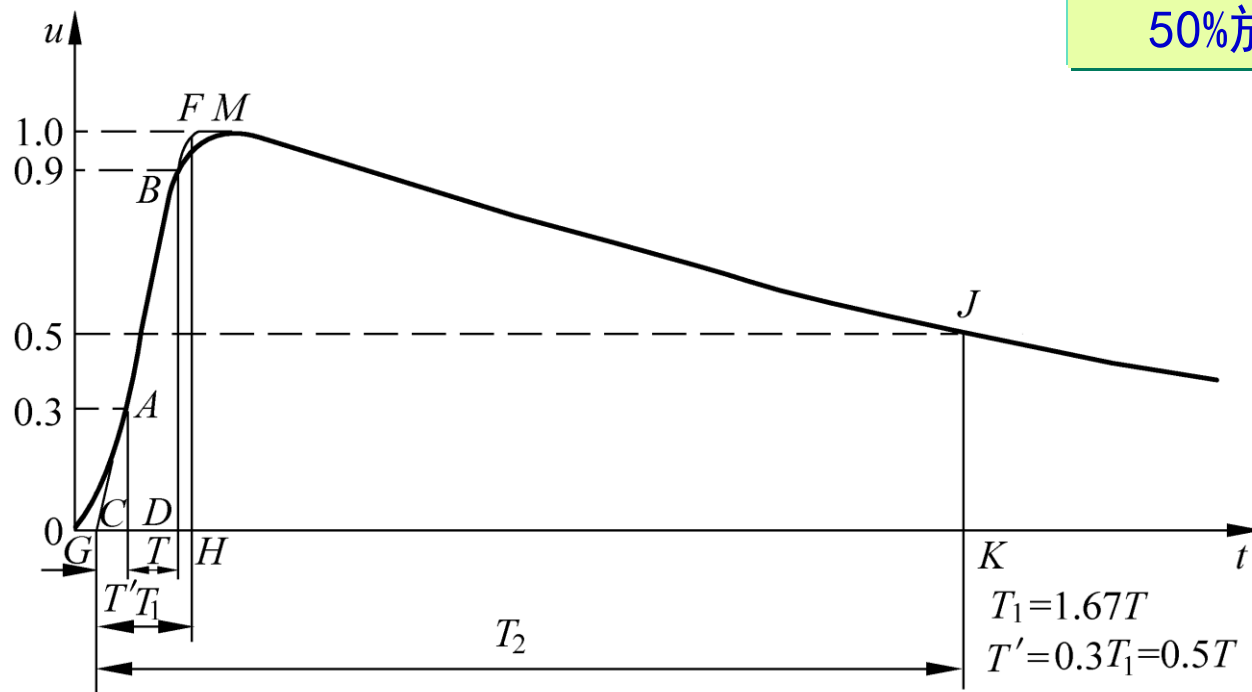
2.3.1 雷电冲击电压的形成与波形

- ✓ 云间闪、云内闪与云地闪，云中电荷的聚集与分布
- ✓ 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



2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性

标准波形
放电时延
50%放电电压



雷电冲击电压全波波形示意图

标准波形1.2/50 μ s



人工模拟 雷电冲击下 空气间隙的 击穿





50% 75% 100% 09:43

资料画面

飞机上的文件 食物等全在舱内乱飞

点击播放



00:27 / 01:01

