



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

第二章 气体击穿的理论分析 和气体中的击穿现象

汲胜昌 祝令瑜

2021年02-05月



关于棒板间隙的放电，下列说法正确的是

- ☒ A 棒电极为正极性时，起晕电压高
- ☐ B 棒电极为正极性时，击穿电压高
- ☐ C 棒电极为负极性时，起晕电压高
- ☒ D 击穿电压与起晕电压的极性效应相反

提交

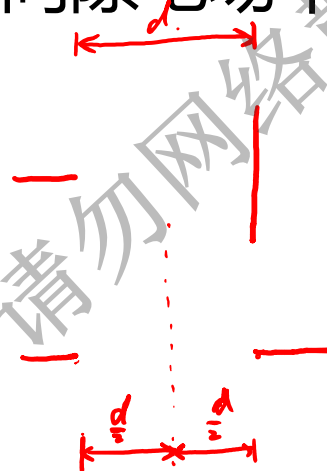
请根据所学知识和空间想象判断，同样的间距板板间隙，棒板间隙和棒棒间隙电场不均匀程度从高到低依次为。

A $f_{pp} > f_{rp} > f_{rr}$

B $f_{pp} > f_{rr} > f_{rp}$

C $f_{rr} > f_{rp} > f_{pp}$

D $f_{rp} > f_{rr} > f_{pp}$



pp: 板板
rr: 棒棒
rp: 棒板

提交

目 录

4

气体击穿强度

4.1

稳态电压下的击穿

4.2

雷电冲击电压下的击穿

4.3

操作冲击电压下的击穿

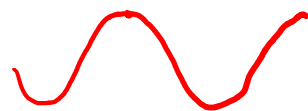
4.4

提高气体间隙击穿电压的措施





4.1 稳态电压下的击穿




基本概念

* 气体间隙**击穿电压**与**外施电压的种类**、**电场类型**有关。

其中，**稳态持续电压**：在放电发展所需的时间范围内，外施电压变化率很小。（如：直流、工频电压，作用时间持续的）

其余：雷电冲击电压和操作冲击电压作用时间很短，放电发展速度不能忽略不计，这时间隙的击穿特性具有新的特点。
分裂性

不同电场均匀度的空气间隙在**稳态电压**下的击穿特性。

- 
- 均匀电场
 - 稍不均匀电场
 - 极不均匀电场



4.1 稳态电压下的击穿

基本概念

气体状态 - 气温、气压、湿度等

标准大气条件: $t_0=20^{\circ}\text{C}$ 、 $P_0=760\text{mmHg}(101.3\text{kPa})$ 、 $h_0=11\text{g/m}^3$

在非标准大气条件下作试验

空气的密度 \uparrow

湿度 \uparrow

$U_b \uparrow$

密度 \uparrow

$\lambda_e \downarrow$

碰撞游离 \downarrow

$U_b \uparrow$

湿度 \uparrow

水分子

↑ 负极性的水分子易捕获 e^- — \ominus — e^- 数 $\downarrow \rightarrow U_b \uparrow$

电负性 SF_6

因此：要进行空气密度、湿度以及海拔高度的修正（自行查阅资料）



4.1 稳态电压下的击穿

一、均匀电场中的击穿

特点:

1. 击穿无极性效应。(电极对称)
2. 击穿时间短。(气隙各处电场强度等)
3. 击穿电压的**分散性**很小。
4. 直流击穿电压、工频击穿电压及50%冲击击穿电压相同。

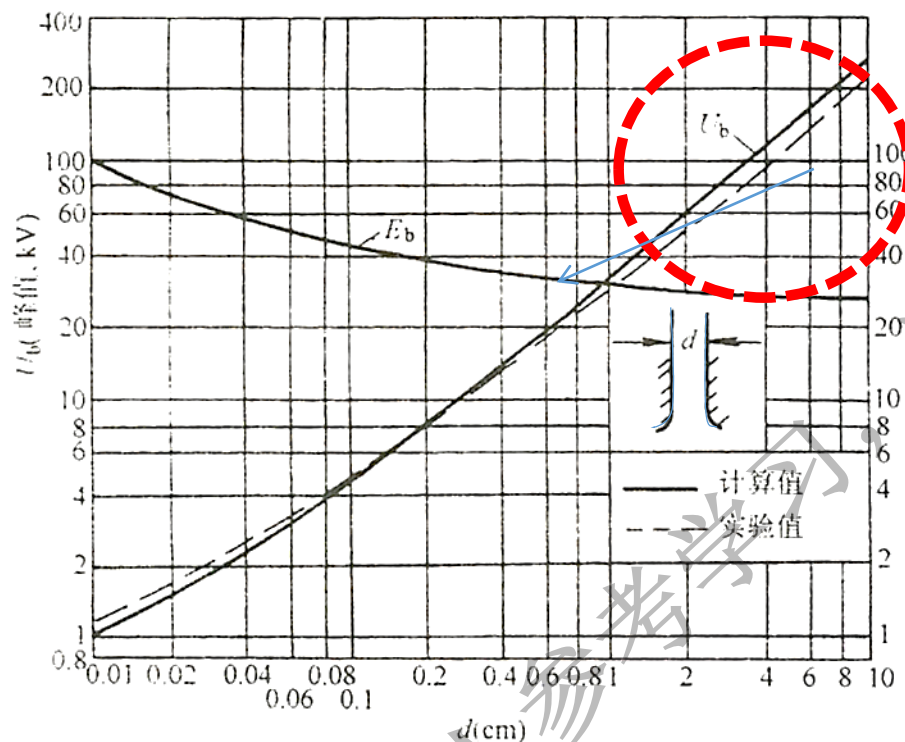
冲击系数:

50%冲击击穿电压和持续作用电压下击穿电压之比(均取峰值)称为**冲击系数**。

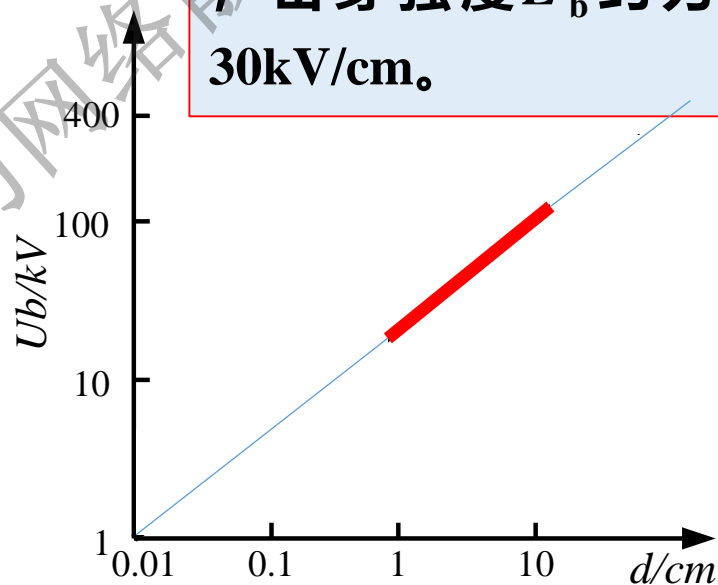


4.1 稳态电压下的击穿

一、均匀电场中的击穿



d 在1-10cm的范围内，击穿强度 E_b 约为30kV/cm。



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

$$U_b = 24.22\delta d + 6.08\sqrt{\delta d} \text{ kV} \quad (1\text{cm} \leq d \leq 10\text{cm})$$



4.1 稳态电压下的击穿

二、稍不均匀电场中的击穿

特点:

- 直流、工频 (峰值)以及50%冲击击穿电压基本一致
- 击穿电压的分散性不大
- 稍不均匀电场中击穿前不发生电晕 (也可认为电晕即击穿)
- 稍不均匀电场中也存在极性效应，击穿电压负低正高(电晕/击穿)
不对称、棒-棒、^{导线情况不}不存在相位交叉
- 电场不对称时，极性效应不很明显

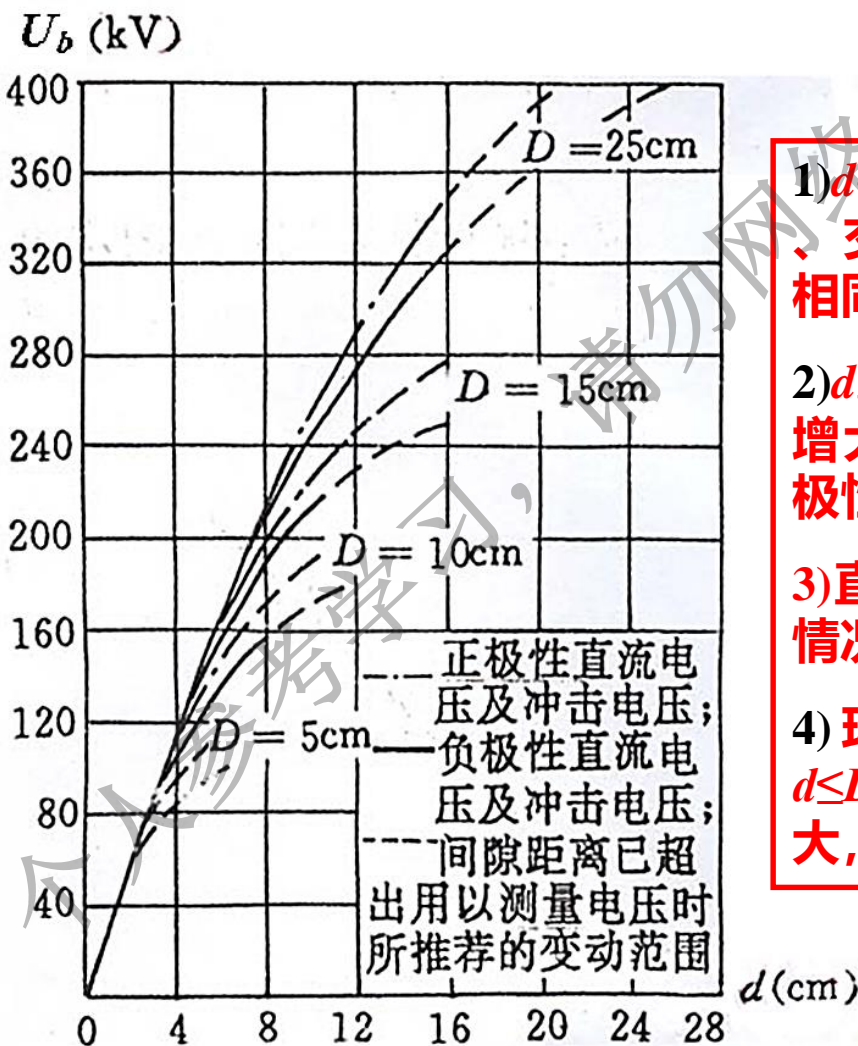
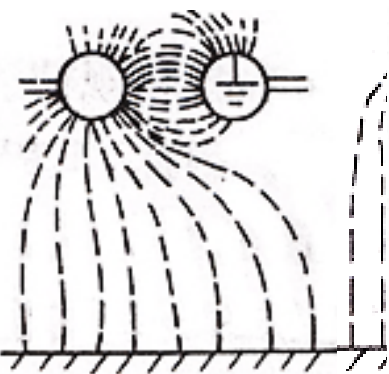


4.1 稳态电压下的击穿

二、稍不均匀电场中的击穿

1. 球-球

一球接地时，
电场分布不对称



1) $d < D/4$ 时，电场均匀，直流、交流和冲击电压击穿电压相同

2) $d > D/4$ 时，电场不均匀程度增大，击穿场强下降，出现极性效应：负低正高；

3) 直径愈大(相同间隙距离的情况下)，击穿电压愈高

4) 球隙测压器的工作范围 $d \leq D/2$ ；否则因放电分散性增大，不能保证测量的精度。

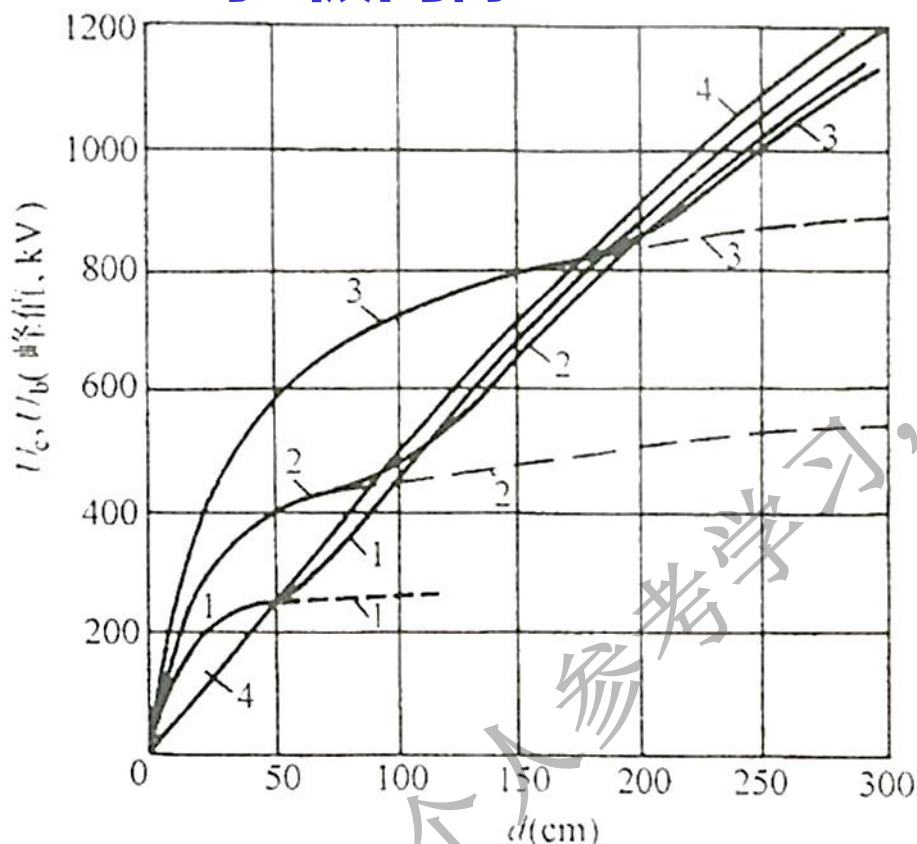
不可用于测量直流高压



4.1 稳态电压下的击穿

二、稍不均匀电场中的击穿

2. 球-板间隙



球-板空气间隙中电晕起始电压、击穿电压与间隙距离的关系

1: 球直径 $D=12.5\text{cm}$; 2: $D=25\text{cm}$; 3: $D=50\text{cm}$; 4: 尖-板间隙

---: 电晕起始电压; ——: 击穿电压

✓ 击穿电压和电晕起始电压的重合和分离：**原因是？**

✓ 在电场比较均匀的时候，球直径愈大，电晕起始电压愈高。？

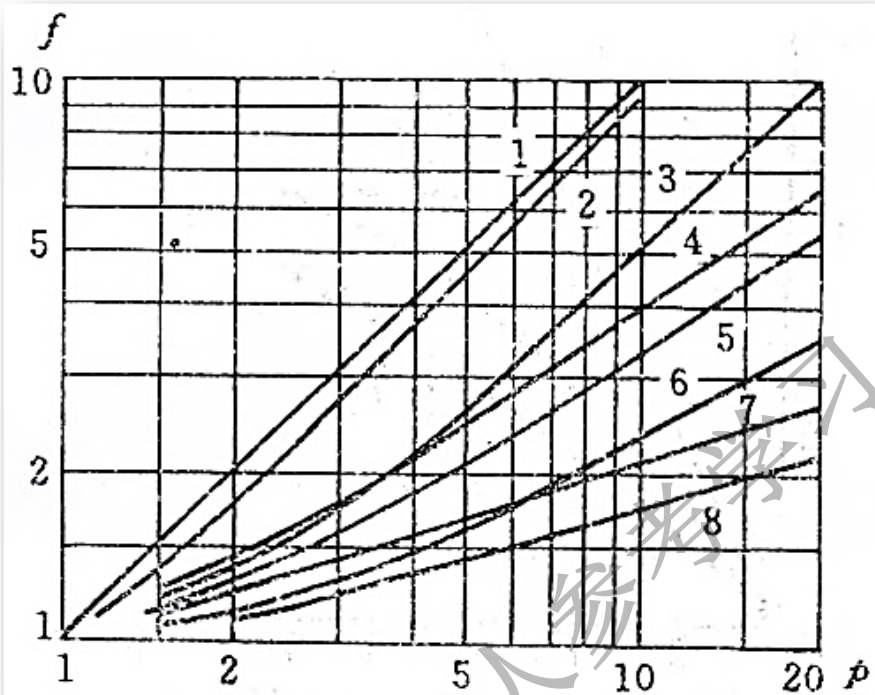
✓ 在电场已经不太均匀的情况下，球直径愈大，电晕起始电压愈高，击穿电压愈低（2,3）。



4.1 稳态电压下的击穿

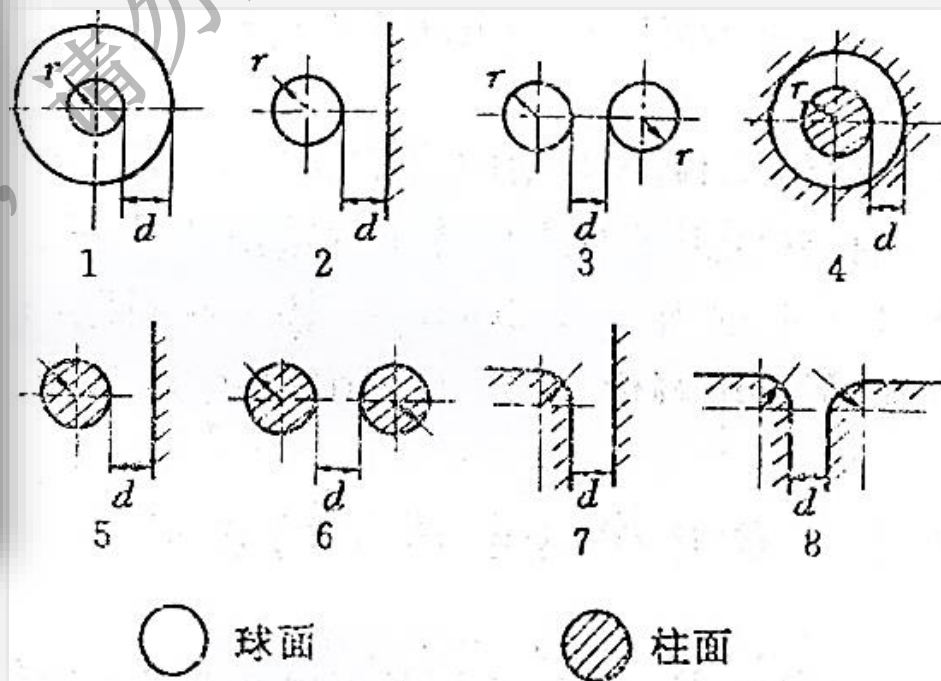
二、稍不均匀电场中的击穿

3. 其它电极布置方式的 f



1. 球状电极的电场不均匀系数大于相同半径的圆柱电极

2. 间隙距离增大时，电场不均匀系数也增大。



球电极，三倍场强。
柱电极，二倍场强。



4.1 稳态电压下的击穿

三、极不均匀电场中的击穿

特点：

- 在间隙距离很大时，极不均匀电场中，电极形状的影响不大。

极不均匀间隙中，影响击穿电压的主要因素是间隙距离。这是因为击穿前发生了电晕，此后放电就是在电晕空间电荷已经强烈畸变了外电场的情况下发展之故。

- 取棒-棒电极和棒-板电极作为典型电极。

电场分布不对称→参照棒-板电极

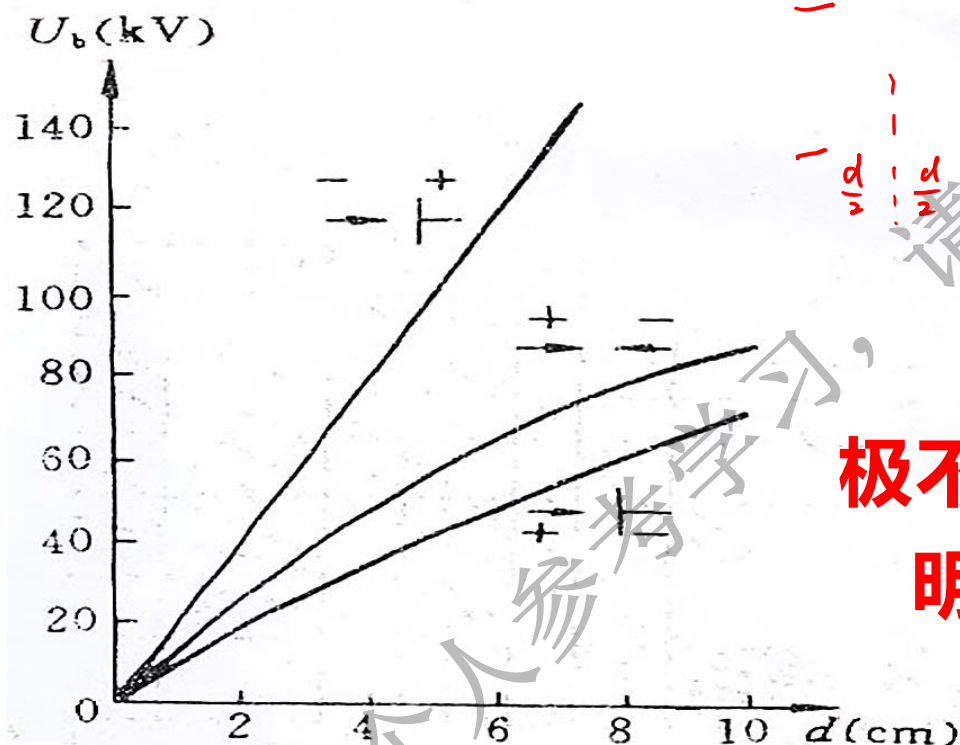
电场分布对称→参照棒-棒电极



4.1 稳态电压下的击穿

三、极不均匀电场中的击穿

直流电压下的击穿电压



• 正尖-板最低

• 尖-尖居中

• 负尖-板最高

极不均匀场间隙的极性效应
明显（稍不均匀反）。

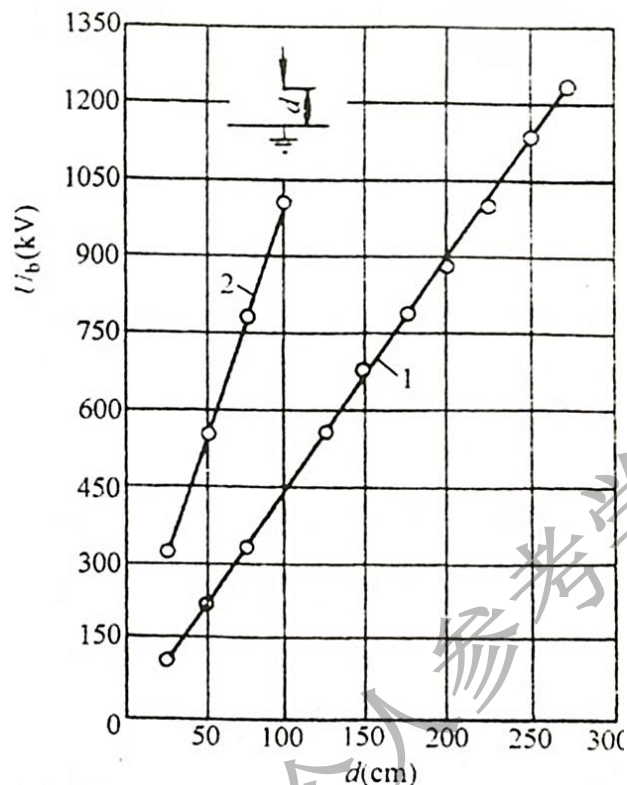
尖-板和尖-尖空气间隙的直流击穿电压



4.1 稳态电压下的击穿

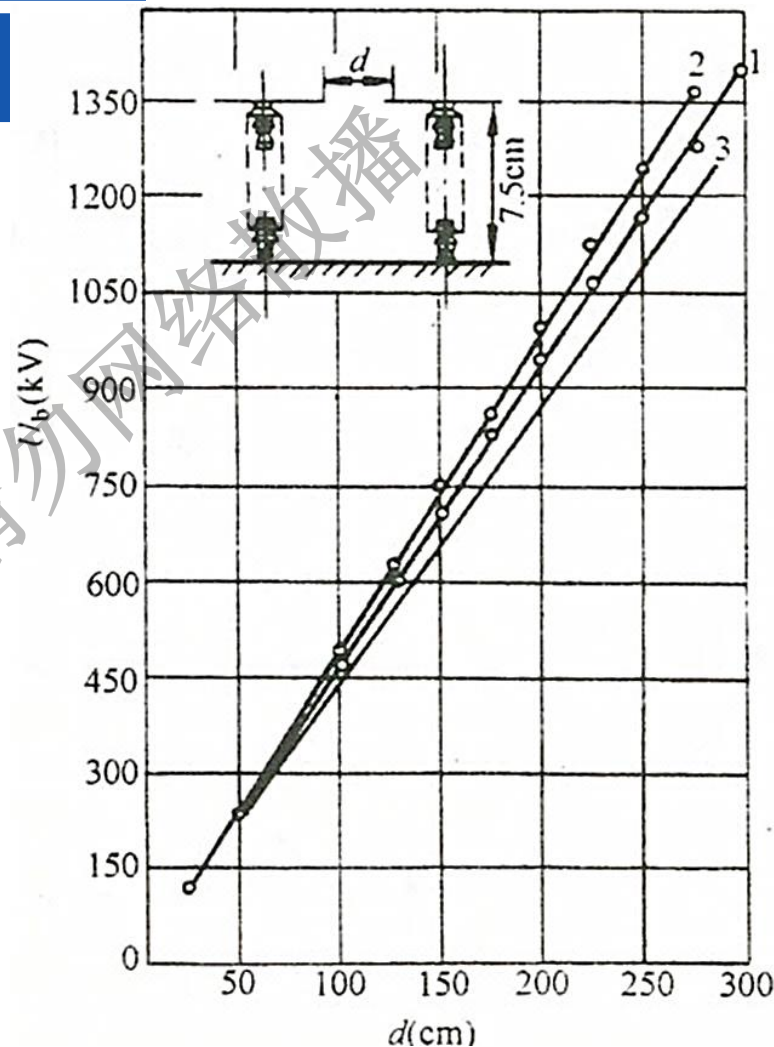
三、极不均匀电场中的击穿

直流电压下的击穿电压



棒板空气间隙击穿与距离关系

1: 正极性; 2: 负极性



棒棒空气间隙击穿与距离关系

1: 正极性; 2: 负极性; 3: 正棒-负板

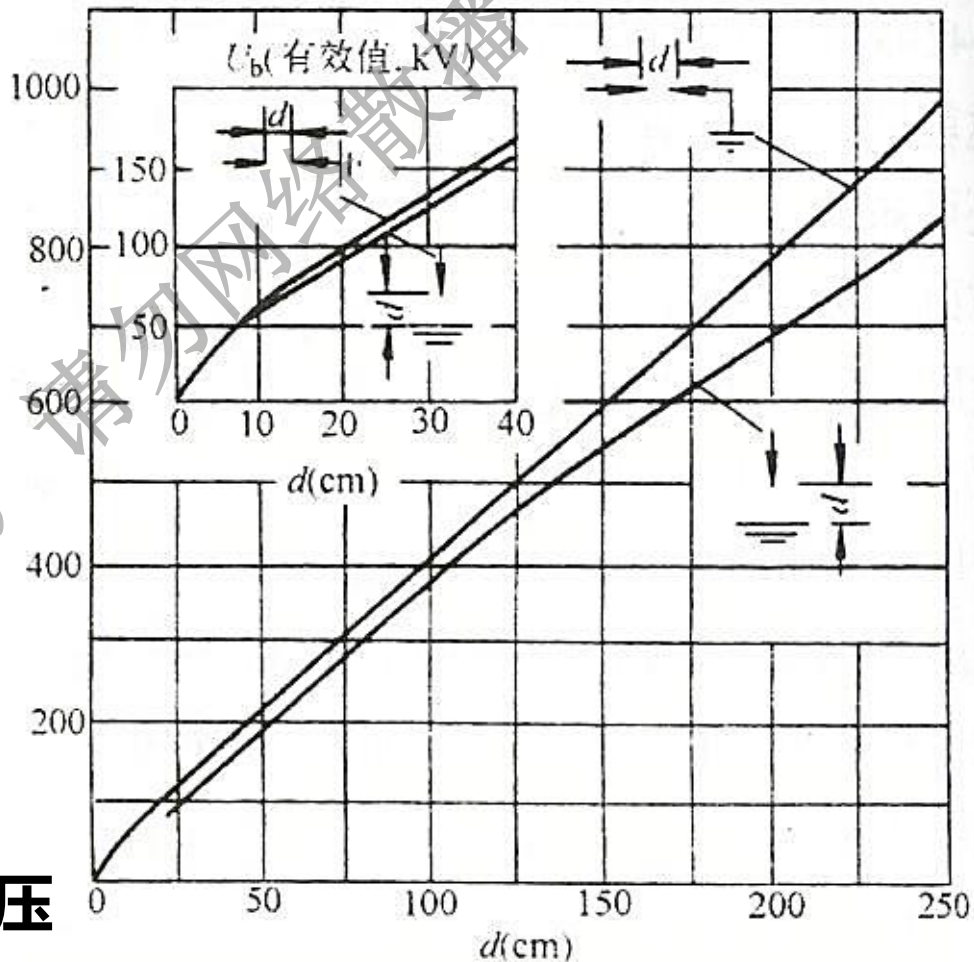
4.1 稳态电压下的击穿

三、极不均匀电场中的击穿

交流电压下的击穿电压

棒-板电极间施加工频电压时，击穿总是在棒的极性为**正**、电压达到**峰值**时发生，并且其击穿电压(峰值)和直流电压下正棒-负板的击穿电压相近。

除了起始部分外，击穿电压和图示距离近似成线性关系。

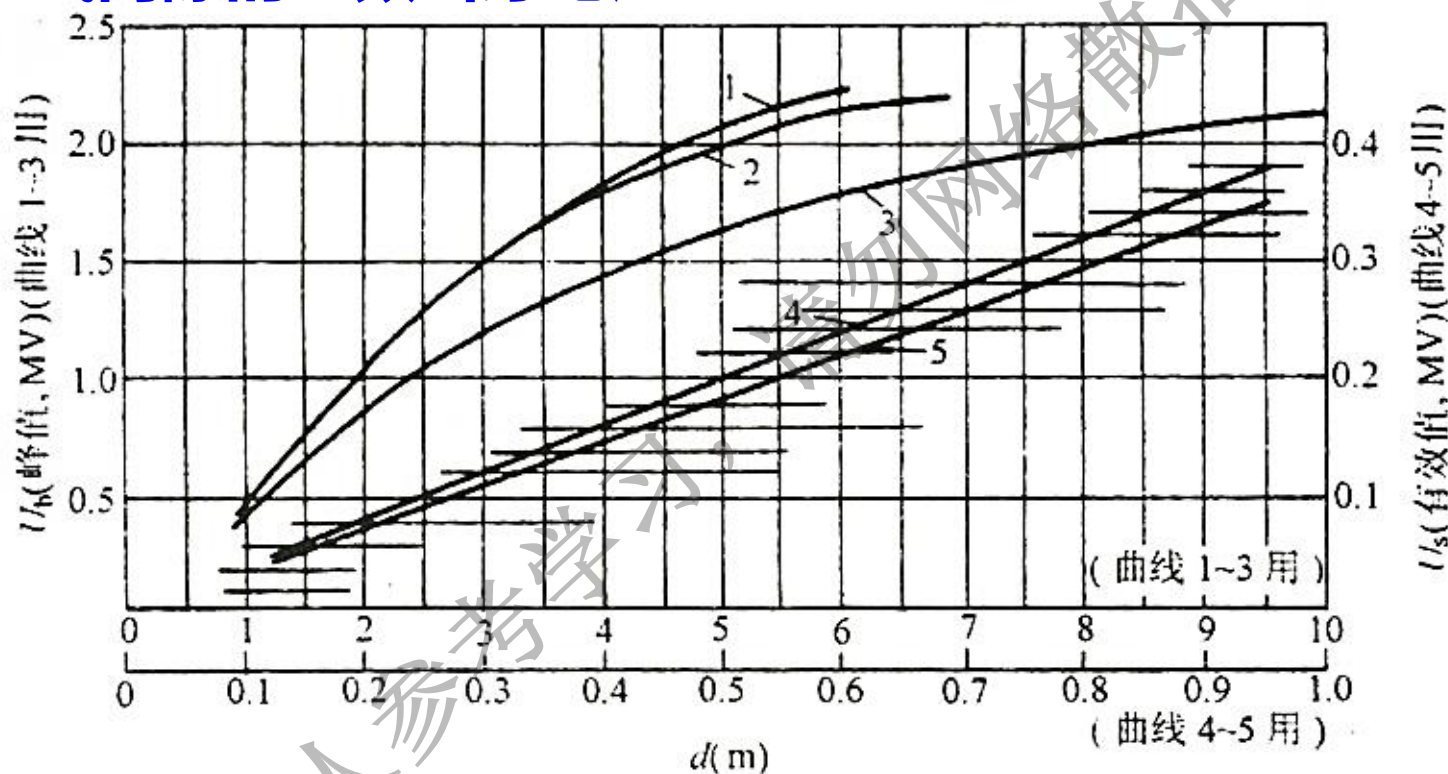
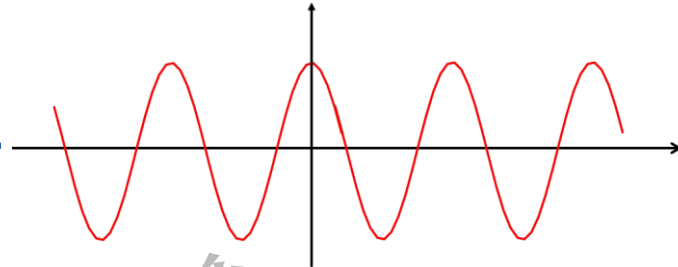


棒 - 棒和棒 - 板空气间隙的工频
击穿电压 (有效值)



三、极不均匀电场中的击穿

长空气间隙的工频击穿电压



棒棒和棒板长空气间隙工频击穿电压与间隙距离的关系

1、2、4：棒棒；3、5：棒板

随着距离加大，平均击穿场强明显降低，棒板间隙尤为严重，即具有所谓“饱和现象”。——先导

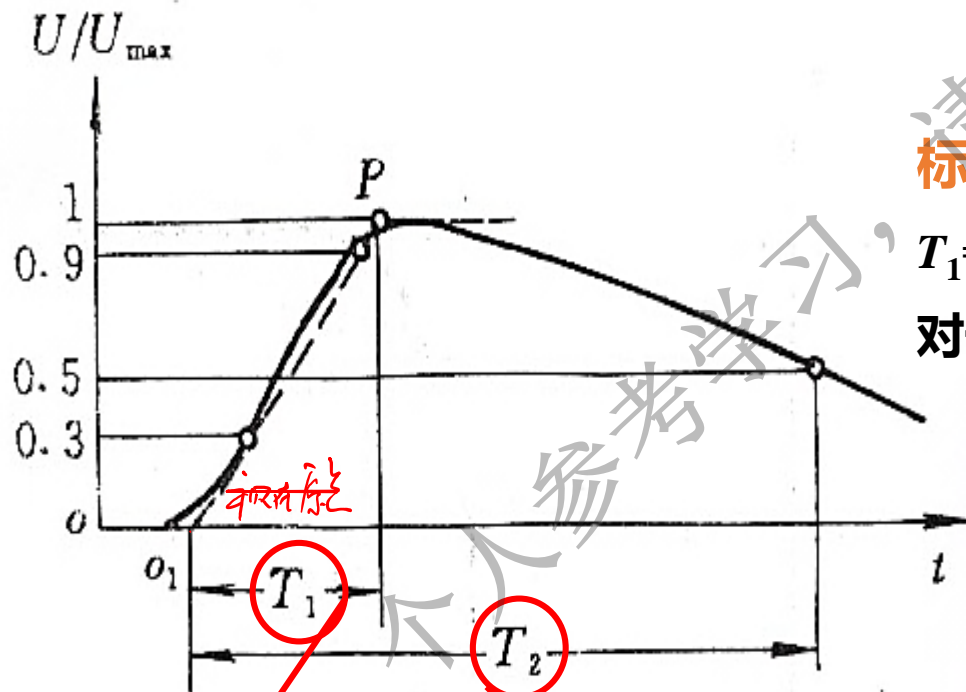


4.2 雷电冲击电压下的击穿

一、雷电的标准波形

雷电过电压是持续时间**极短**的脉冲电压。

用**冲击电压发生器**产生的冲击电压须采用**标准波形**。



标准雷电波的波形:

$$T_1 = 1.2\mu\text{s} \pm 30\%, \quad T_2 = 50\mu\text{s} \pm 20\%$$

对于不同极性: $+1.2/50\mu\text{s}$ 或 $-1.2/50\mu\text{s}$

波前时间

半峰值时间



4.2 雷电冲击电压下的击穿

二、放电时延

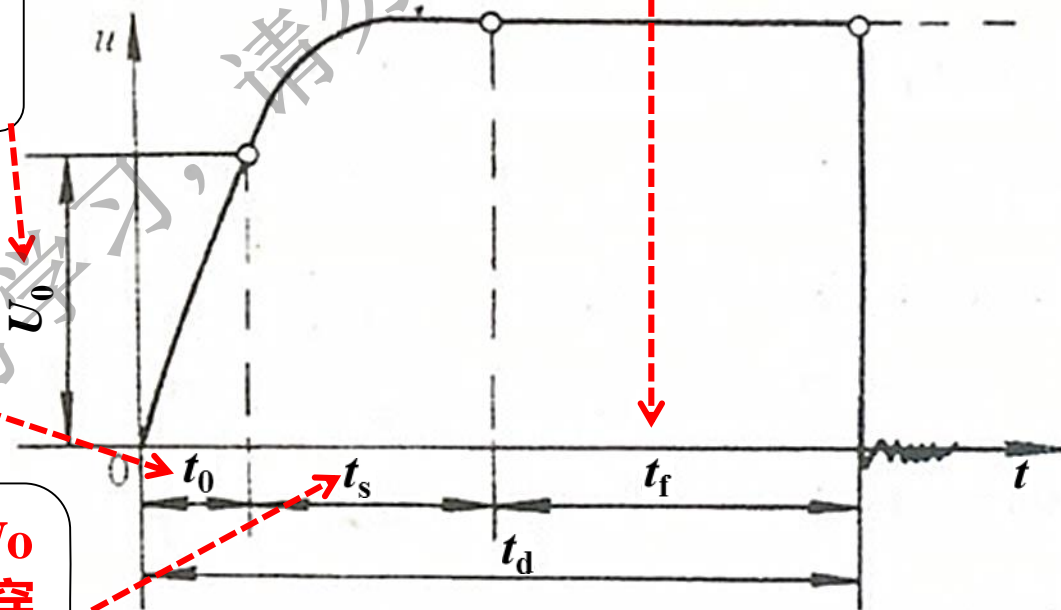
在冲击电压的作用下，要造成击穿，不仅需要**足够的电压**，而且还必须有**充分的电压作用时间**。

放电形成时延 t_f ：从出现第一个有效自由电子时起，到放电过程完成所需时间，即电子崩的形成和发展到流注等所需的时间

临界
击穿电压

升压时间 t_0 ：电压升高到持续作用电压下的击穿电压 U_0 的时间

统计时延 t_s ：从外施电压达 U_0 时起，到出现一个能引起击穿的初始电子崩所需的第一个有效电子所需时间



$$t_d = t_0 + t_s + t_f$$



4.2 雷电冲击电压下的击穿

二、放电时延

t_s 统计时延:

平均统计时延随间隙外施电压增加、紫外线等高能射线照射间隙而减少。

阴极材料不同时, 平均统计时延也相异。

在极不均匀电场内, 平均统计时延较小, 并且和外电离因素的关系也较小了。

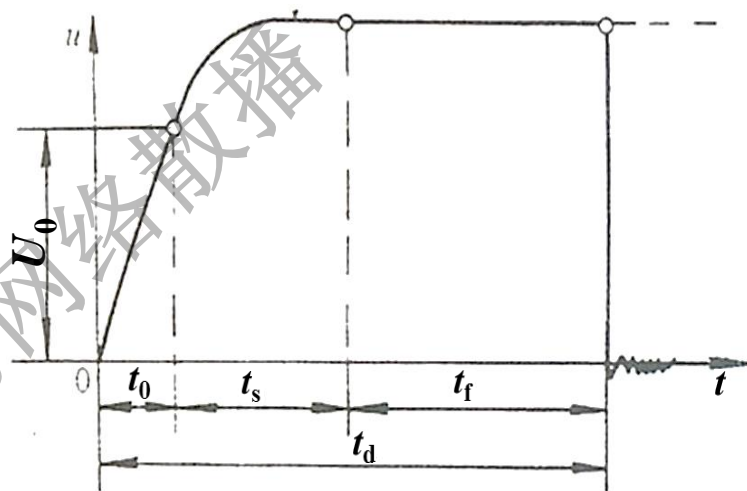
t_f 放电形成时延:

在比较均匀电场中, 放电形成时延较短。在极不均匀电场则放电时延较长。

间隙上外施电压增加, 放电形成时延也会减小。

放电时延: $t_1 = t_s + t_f$

➤短间隙、电场比较均匀时, 放电形成时延甚小, 这时统计时延实际上就等于全部放电时延。而较长的间隙中, 放电时延主要决定于放电形成时延。



	统计时延 t_s	放电形成时延 t_f
均匀场	较长	较短
不均匀场	较短	较长



4.2 雷电冲击电压下的击穿

三、50%击穿电压及冲击系数

50%击穿电压：多次施加电压时有半数会导致击穿的电压值 U_{b50} 。

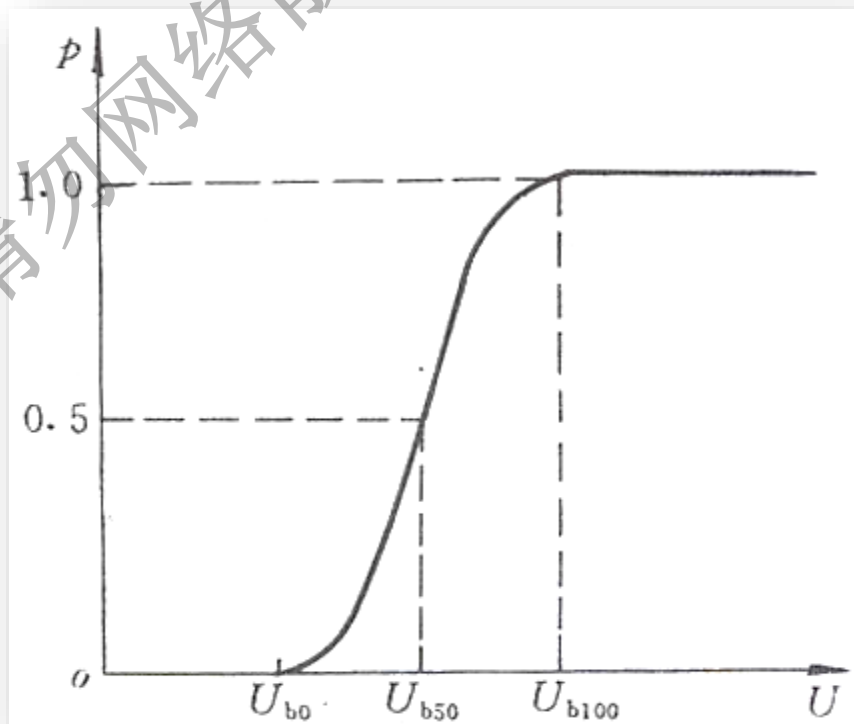
$$U_{b0} = U_{b50} - 3\delta$$

极小概率

在实验中决定冲击击穿电压时，施加电压次数越多越准确。施加多次冲击的方法有多级法、升降法等。

最简单的方法是：调整电压至施加10次电压中有4-6次击穿，这个电压值就可作为50%冲击击穿电压。这对于工程上近似估算雷电冲击强度，基本上可以满足要求。采用50%冲击击穿电压决定绝缘距离时，显然应根据分散性的大小，保持一定的裕度。

升降法 标准法 → 正态拟合





4.2 雷电冲击电压下的击穿

三、50%击穿电压及冲击系数

冲击系数：同一间隙的50%冲击击穿电压与稳态击穿电压之比

均匀电场及稍不均匀电场的雷电冲击50%击穿电压

均匀电场和稍不均匀电场中的击穿电压：冲击系数等于1。

由于放电时延短，50%击穿电压下，击穿通常发生在波头峰值附近。

棒-板及棒-棒空气间隙的雷电冲击50%击穿电压



极不均匀电场中的击穿电压：在极不均匀电场中，由于放电时延较长，通常冲击系数大于1。

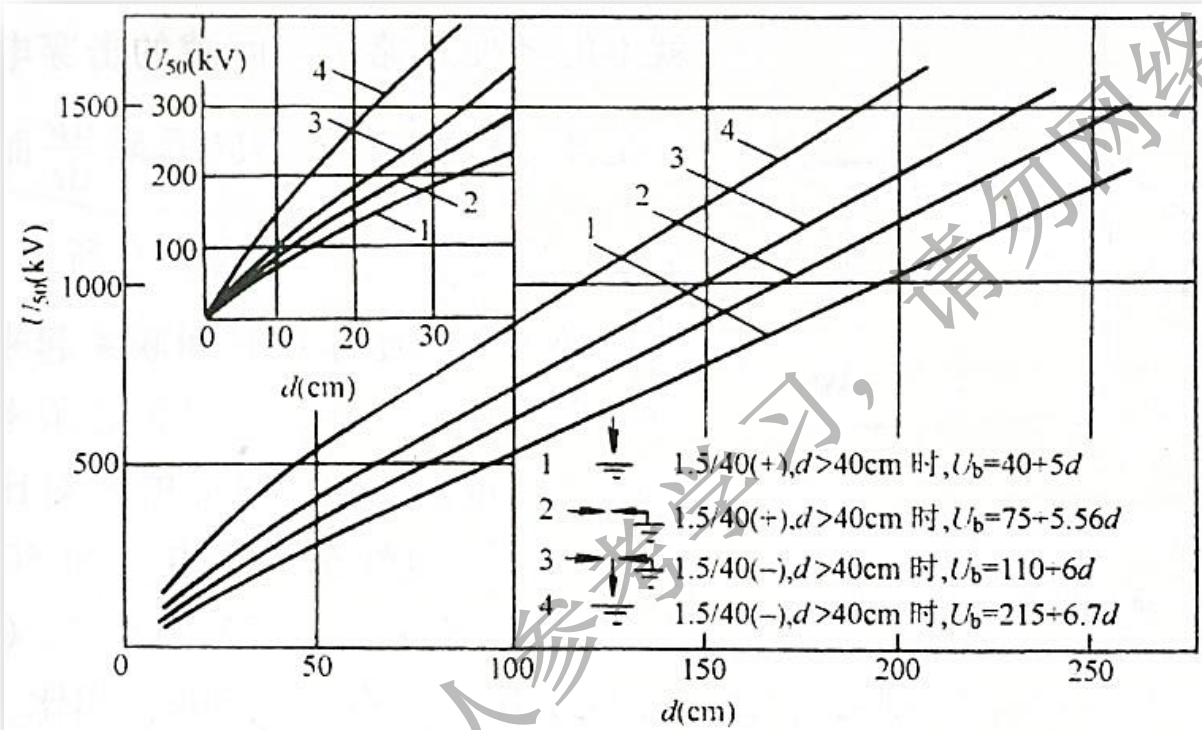
在50%击穿电压下，当间隙较长时，击穿通常发生在波尾。



4.2 雷电冲击电压下的击穿

三、50%击穿电压及冲击系数

棒-板及棒-棒空气间隙的雷电冲击50%击穿电压



负极性击穿电压
高于正极性击穿
电压

棒-板电极的极性
效应较棒-棒电极
更为明显

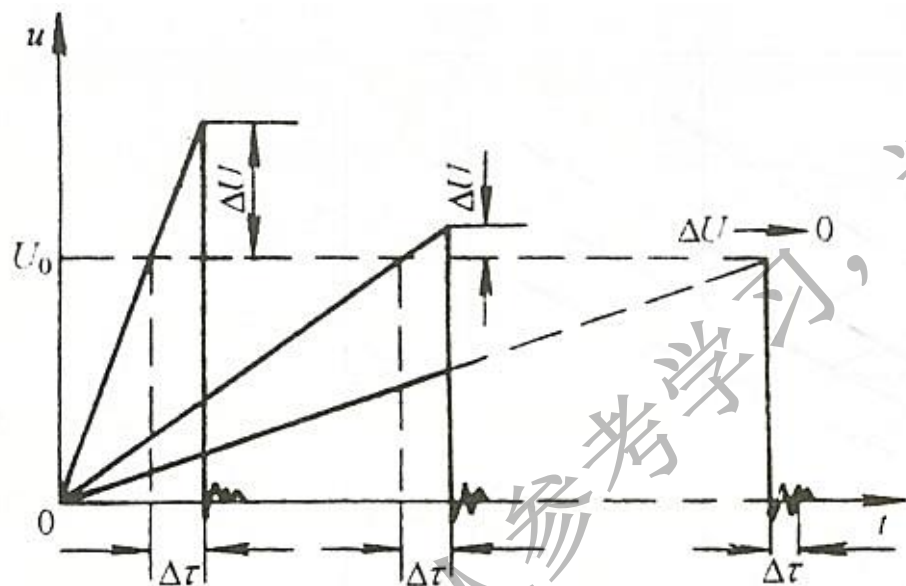
棒棒及棒板空气间隙的雷电冲击50%击穿电压和
间隙距离的关系



4.2 雷电冲击电压下的击穿

四、伏—秒特性

伏 - 秒特性： 在同一冲击电压波形下，击穿电压值与放电时延（或电压作用时间）有关的特性。即：反映了放电时延对间隙击穿的影响



击穿电压和电压陡度的关系
(时间坐标轴上虚线前后比例尺不同)

➤ 两个间隙并联，在不同峰值的冲击电压作用下，就不一定是击穿电压低的那个间隙击穿。
50%

➤ 同一个间隙，在不同陡度的冲击电压作用下，表现出的击穿电压不一样。



4.2 雷电冲击电压下的击穿

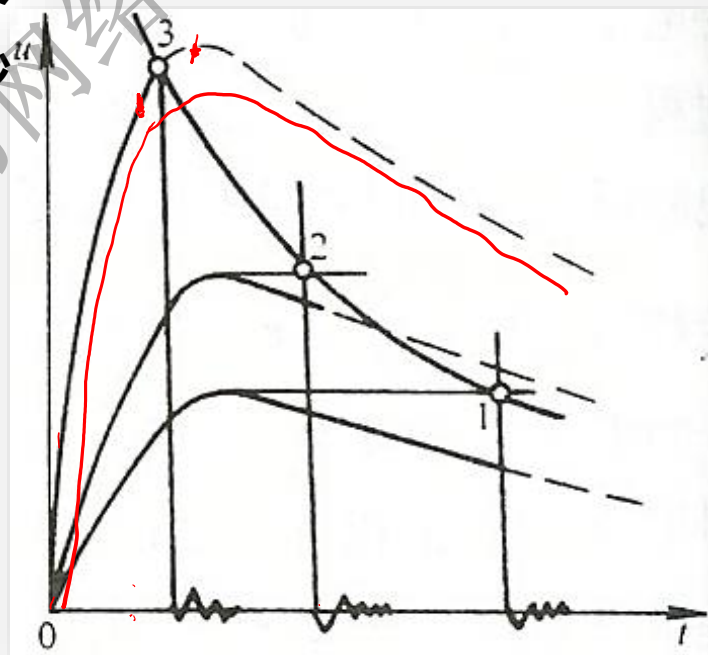
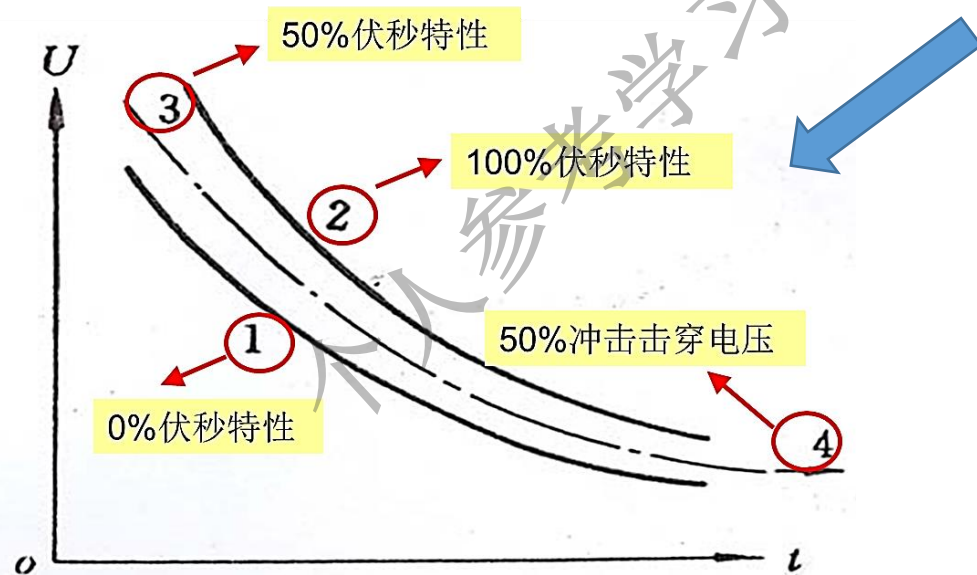
四、伏—秒特性

伏秒特性的制定方法

工程上用间隙上出现的**电压最大值**和**放电时间**的关系来表征间隙在冲击电压下的击穿特性，称为伏秒特性。

波尾击穿：击穿点时间——冲击电压峰值

波头击穿：击穿点时间——击穿电压值



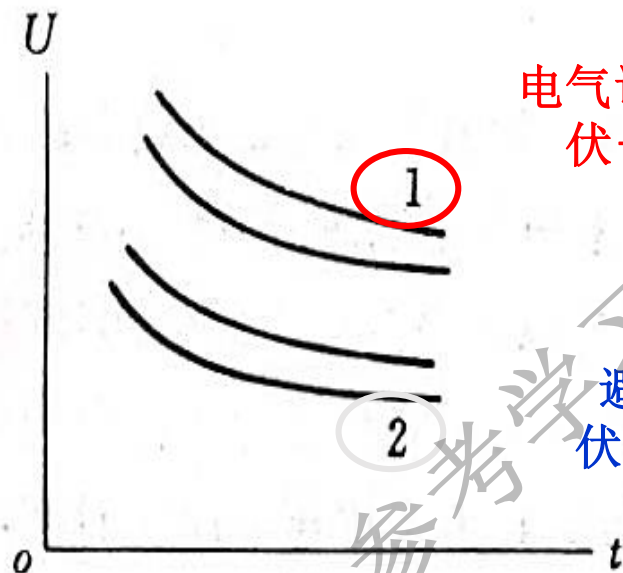
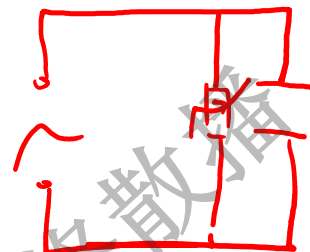
伏秒特性绘制方法示意图
(虚线表示没有击穿时的电压)
1、2—波尾击穿；3—波头击穿



4.2 雷电冲击电压下的击穿

四、伏—秒特性

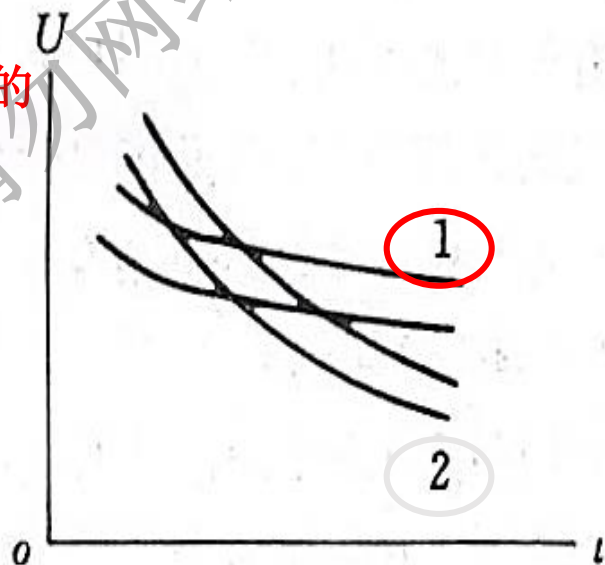
伏秒特性的用途：绝缘配合



电气设备绝缘的
伏—秒特性

避雷器的
伏—秒特性

(a)



(b)

电气设备绝缘伏 - 秒特性和避雷器的伏 - 秒特性

(a) 正确配合

(b) 不正确配合





4.3 操作冲击电压下的击穿

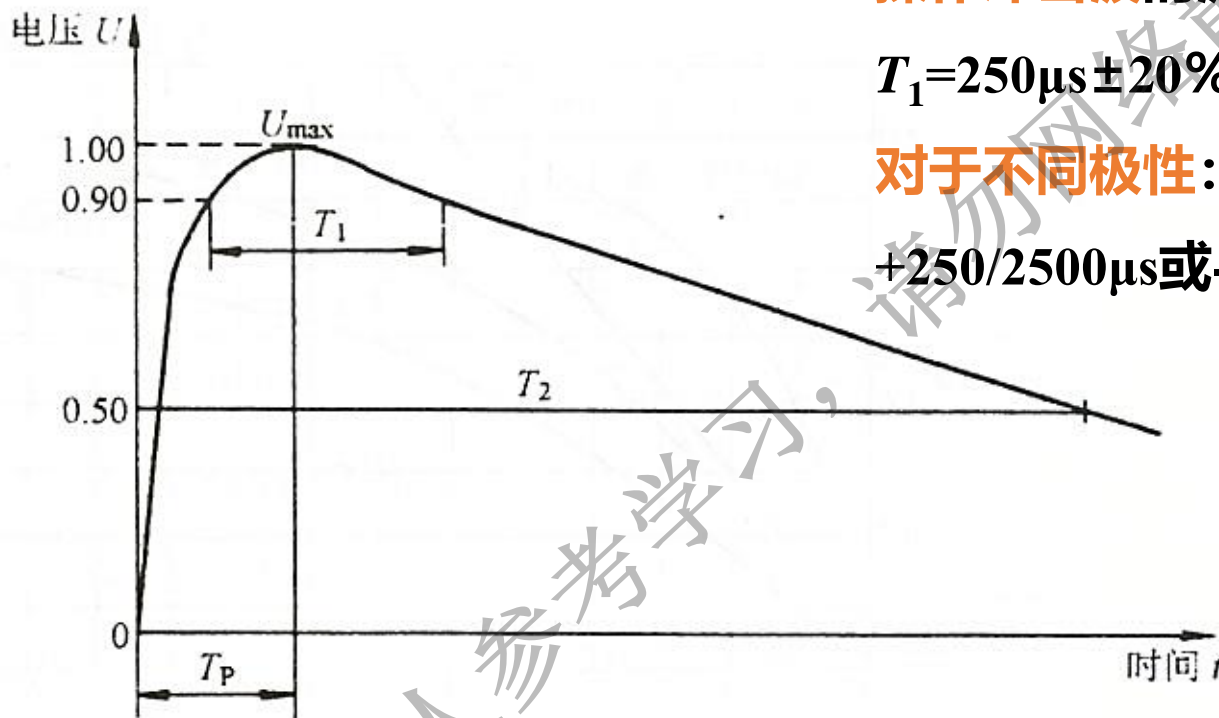
一、操作冲击标准波形

操作冲击波的波形:

$$T_1 = 250\mu\text{s} \pm 20\%, \quad T_2 = 2500\mu\text{s} \pm 60\%$$

对于不同极性:

$$+250/2500\mu\text{s} \text{ 或 } -250/2500\mu\text{s}$$



操作冲击试验电压波形

T_p ——波前时间; T_2 ——半峰值时间;

U_{\max} ——冲击电压峰值; T_1 ——超过90%峰值以上的时间



4.3操作冲击电压下的击穿

二、操作冲击50%击穿电压

操作冲击电压下气体绝缘的击穿电压也具有分散性，也采用50%击穿电压反映间隙的介电强度。考虑绝缘配合时，也应采用伏秒特性。

均匀电场和稍不均匀电场中的击穿电压

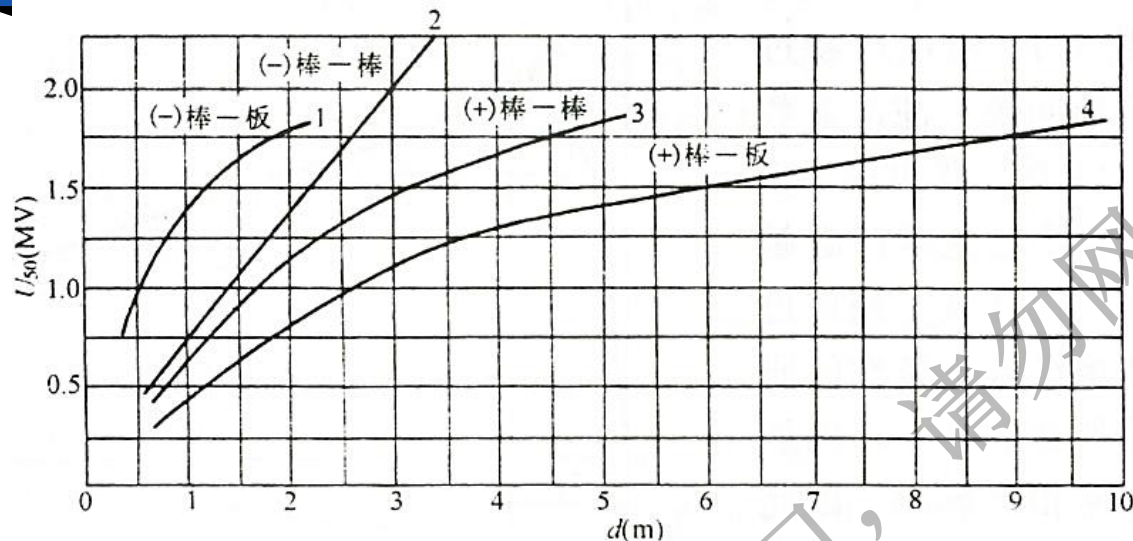
冲击系数

均匀电场及稍不均匀电场中，气体间隙的操作冲击50%击穿电压和雷电冲击50%击穿电压以及工频击穿电压(峰值)差不多，击穿电压的分散性也较小，击穿同样发生在峰值。



4.3 操作冲击电压下的击穿

三、极不均匀电场的50%冲击击穿电压



操作冲击电压 (500/5000 μ 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、4—10×10mm²钢棒，地面铺7×7m²钢板；2、3— ϕ 50mm钢管，上棒长5m，下棒长6m

电场分布情况对操作冲击击穿电压影响很大。

接地物体靠近放电间隙会显著降低其正极性击穿电压，但能多少提高一些负极性击穿电压，即存在显著的“邻近效应”。电极形状对间隙的击穿电压也有很大影响。

和工频电压下类似，极不均匀电场中操作冲击击穿电压和间隙距离的关系具有明显的“饱和”特征。这也是因为形成先导后，放电易于发展之故。

但对于雷电冲击电压，则由于作用时间太短，间隙距离加大后，需要提高先导发展速度，才能完成放电，因而导致击穿电压提高，所以雷电冲击击穿电压和距离大致呈线性关系。

一、电场形式及电压波形对放电电压的影响

✓ 均匀场与稍不均匀场类似：

直流、工频和冲击电压作用下的击穿电压实际上都相同

当 $d > 1\text{cm}$ 时 $E_b \approx 30\text{kV/cm}$

$$U_b = 24.22\delta d + 6.08\sqrt{\delta d}\text{kV} \quad (1\text{cm} \leq d \leq 10\text{cm})$$

✓ 不均匀电场气隙的击穿电压

1) 直流电压作用下

特点：a. E 越不均匀，越不对称——极性效应越明显

b. $U_b \xrightarrow{+} \text{最低}$

当 $S < 10\text{cm}$ 约 7.5kV/cm , 当 $S > 50\text{cm}$ 约 4.5kV/cm

$U_b \xrightarrow{+} \text{最高}$

当 $S < 10\text{cm}$ 约 20kV/cm , 当 $S > 50\text{cm}$ 约 10kV/cm

$U_b \rightarrow \leftarrow \text{居中}$

约 5.4kV/cm

电场形式及电压波形对放电电压的影响

✓ 不均匀电场气隙的击穿电压

2) 工频电压作用下

工频交流和 $U_b \xrightarrow{+} \mid$ 相近, 并且击穿总是发生在针为正半波时

$\rightarrow \sim \leftarrow$ 平均 U_b 3.8kV(有效值)/cm 5.4kV(幅值)/cm

$\rightarrow \sim \mid$ 平均 U_b 3.4kV(有效值)/cm 4.8kV(幅值)/cm

当 $d > 2m$, U_b 和 d 的关系出现饱和趋势, 故在估计安全距离时一般以 500kV/m 再加安全裕度来考虑

电场形式及电压波形对放电电压的影响

3) 雷电冲击电压作用下 一般波尾击穿

$$\begin{aligned}
 &U_b = f(d) \text{ 线性, 无饱和现象} \\
 &U_{50\%} + - \text{ 针相近} \\
 &\left. \begin{aligned} &\text{线 - 板} \approx \text{针 - 板} \\ &\text{线 - 线} > \text{针 - 针} \end{aligned} \right\} U_{50\%}
 \end{aligned}$$

$U_{50\%} \approx 547d$
 $d \leq 9\text{m}$

4) 操作冲击电压作用下 一般波头部分击穿

- a) 长间隙, 特别是 \rightarrow 呈现饱和现象
- b) 分散性比雷电冲击大, 雷电3%, 操作4%~8%
- c) $\begin{array}{c} + \quad - \\ \rightarrow \quad | \quad \rightarrow \end{array}$ 小于 $\begin{array}{c} - \quad + \\ \rightarrow \quad | \quad \rightarrow \end{array}$
- $U_{50\%}$ $U_{50\%}$



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

提高气体击穿电压的途径

The way to improve the gas breakdown voltage

➤ **改善电场分布，使之尽量均匀。**

改进电极形状；

30 kV/cm

消除电极表面毛刺；

改善电极的对称性；

利用气体放电本身的空间电荷畸变电场；

⑥

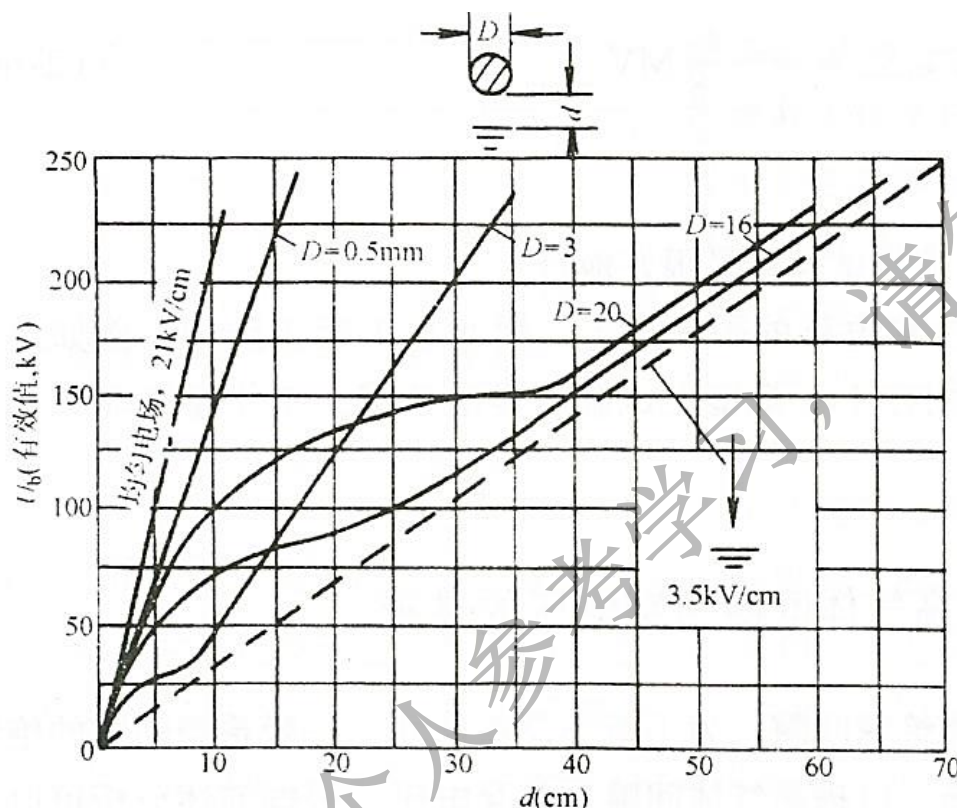
➤ **利用其他方法（高气压/真空、电负性气体）来削弱气体中的电离过程。**





4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

1) 利用空间电荷对电场的畸变作用： 细线效应 (Thin line effect)



导线——板空气间隙的工频击穿电压和
间隙距离的关系

• 直线部分

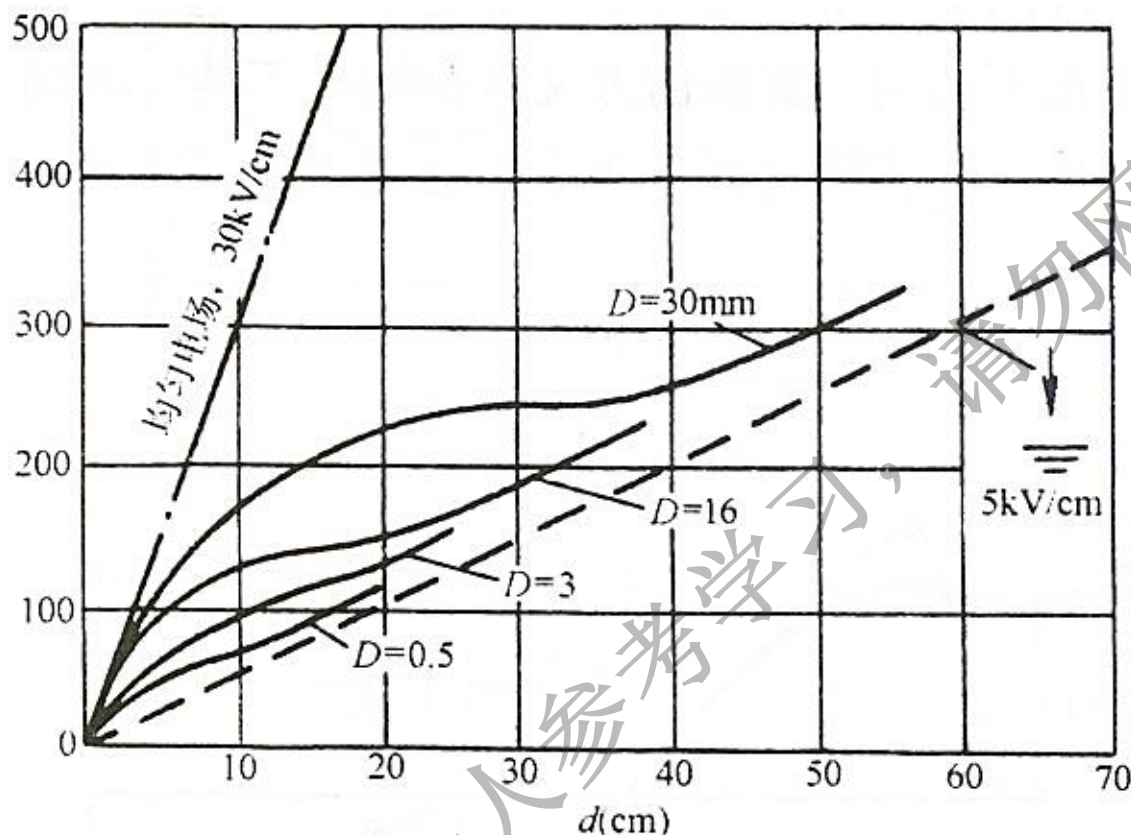
• 导线的直径减小, 击穿电压的直线部分的陡度却大大增加。

• 细线效应的存在范围



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

雷电冲击电压下无细线效应



导线—板空气间隙的正极性雷电冲击
击穿电压和间隙距离的关系

原因:

这主要是因为雷电冲击电压作用时间太短, 来不及形成充分的空间电荷层的缘故。



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

2) 极不均匀电场中屏障的作用

什么是屏障效应? Barrier effect

在电场极不均匀的空气间隙中, 放入薄片固体绝缘材料(称为屏障,例如纸或纸板), 在一定条件下, 可以显著提高间隙的击穿电压。

出现屏障效应的原因?

屏障效应不是由于屏障分担电压的作用而造成的。屏障本身的击穿电压没有重要意义。屏障的作用和电压种类(直流、交流、冲击)有关。



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

3) 高气压的采用 High atmospheric pressure

优点：提高绝缘能力

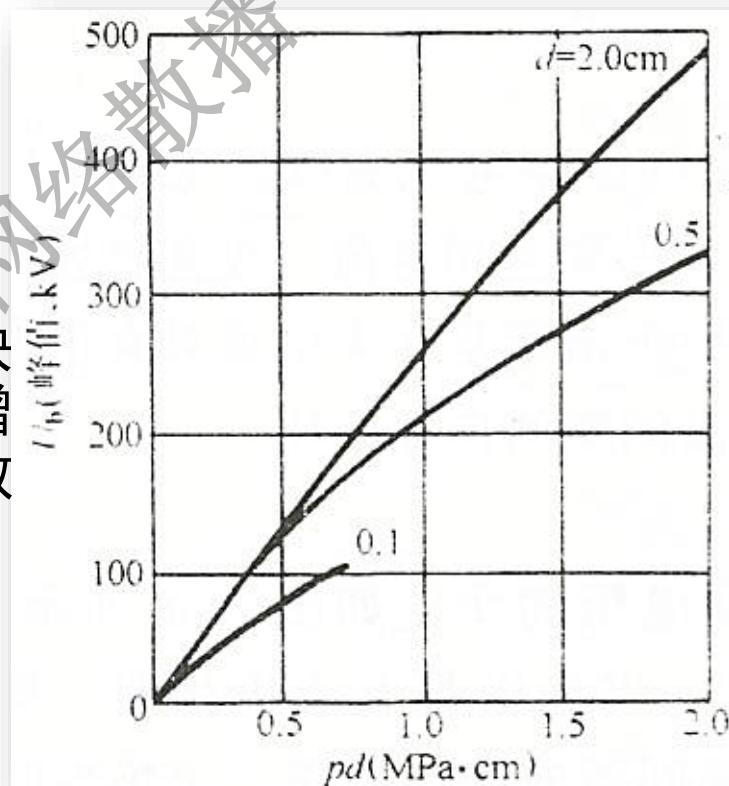
缺点：对机械强度提出了要求

均匀电场

当间隙距离不变时，击穿电压随压力提高而很快增加，但当压力增加到一定程度后，击穿电压增加的陡度逐渐减小，说明此后继续增加压力的效果就逐渐下降了。

不均匀电场

- 提高气压后，也能提高间隙击穿电压
- 在高气压，电场不均匀程度对击穿电压的影响比在大气压下显著得多，不均匀程度增加，击穿电压将剧烈降低。



均匀电场中不同间隙距离下
空气的击穿电压和 pd 的关系



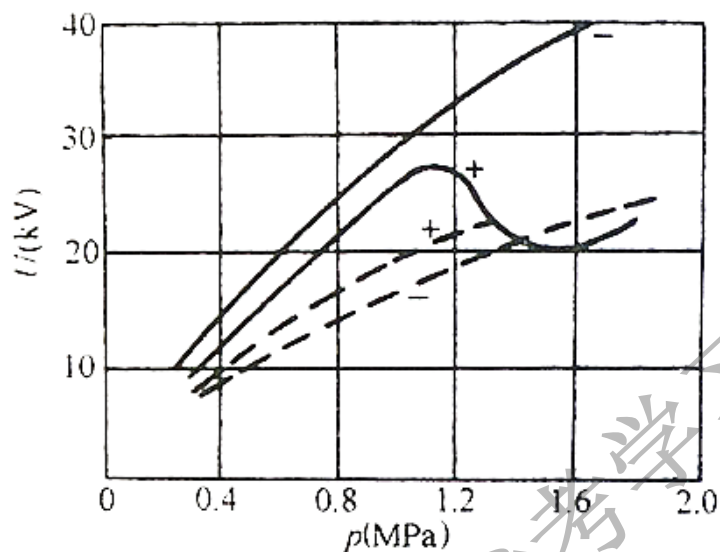
4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

3) 高气压的采用 High atmospheric pressure

不均匀电场

➤ 随气压的变化

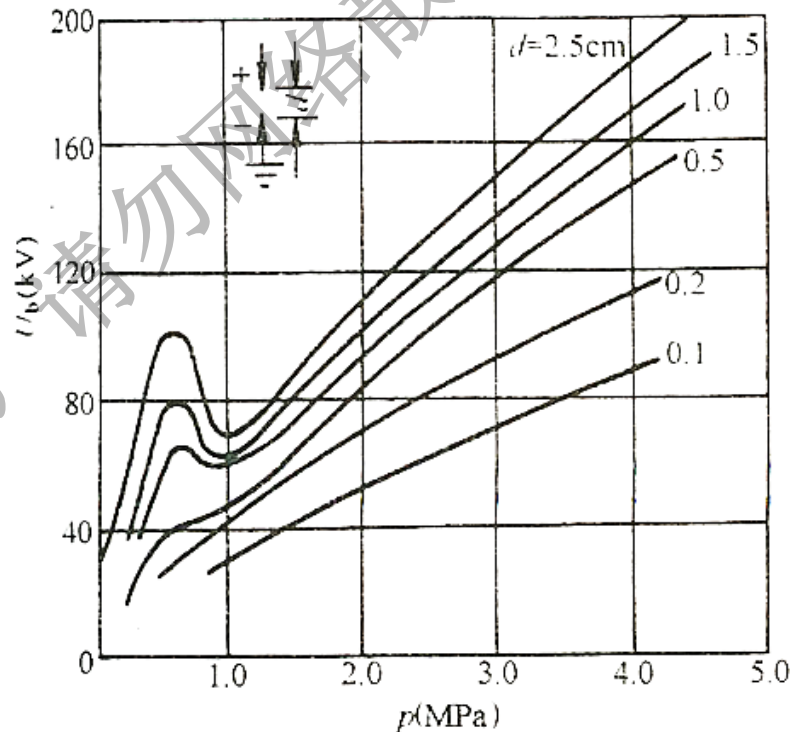
Hump phenomenon



尖板空气间隙中，不同极性直流电压下，

击穿电压及电晕起始电压和压力的关系

—：击穿电压；...：电晕起始电压



尖尖空气间隙中，直流电压下，

击穿电压和压力的关系



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

3) 高气压的采用 High atmospheric pressure

- 1、压力增加，碰撞电离不易发生，电晕起始电压不断上升。
- 2、压力提高后，电离区中的正离子越来越不易扩散，结果在正尖附近造成了密集的正空间电荷。当压力很高时，一爆发电离，正尖附近的极为密集的正空间电荷剧烈加强了前方电场，以致能立即导致击穿，所以这时击穿电压就和电晕起始电压一致了。
- 3、在正极性下一定压力范围内，随着压力上升，当空间电荷由较为弥散变得越来越集中时，击穿电压反而下降，因而击穿电压出现极大值。
- 4、负极性下，尖端不容易形成密集的空间电荷，因此单调增加。

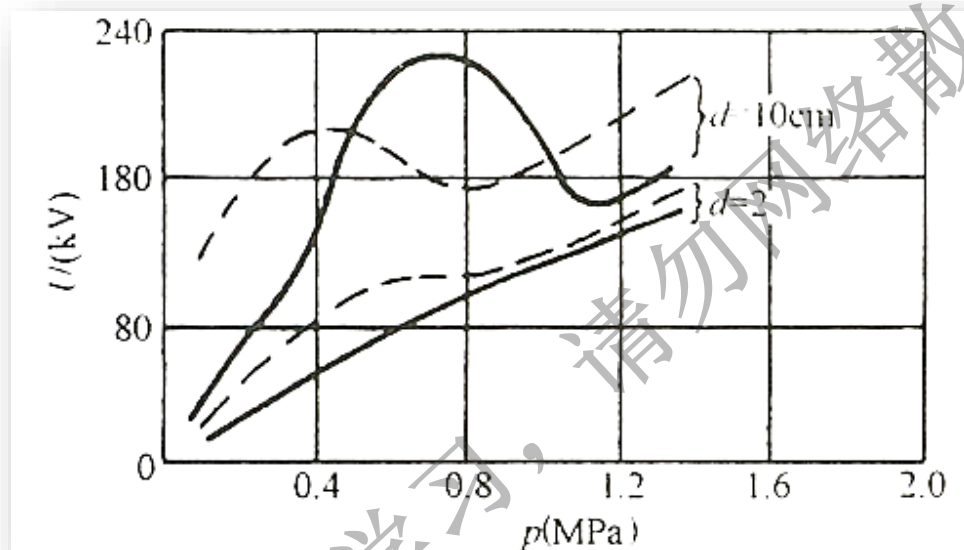
正极性下，开始是极不均匀场特性，后来变成均匀场特性



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

3) 高气压的采用 High atmospheric pressure

雷电冲击电压下 lightning impulse



棒棒间隙中,

氮气的击穿电压和压力的关系

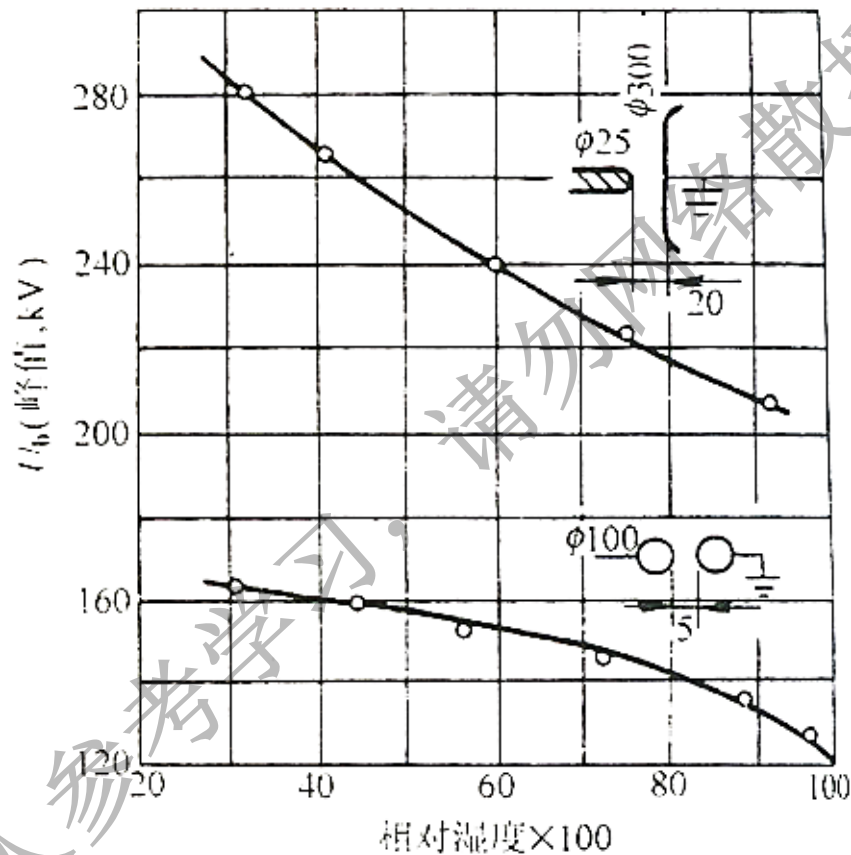
—: 击穿电压; ...: 电晕起始电压



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

3) 高气压的采用 High atmospheric pressure

湿度的影响 Humidity



压缩空气相对湿度

对球间隙及棒板间隙工频击穿电压的影响

($p=0.9\text{Mpa}$, $t=18^\circ\text{C}$)



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

4) 高介电强度气体的采用

表 2-8

几种气体的相对介电强度

气 体	化学组成	分子量	相对介电强度	液化温度 (℃)
氮	N_2	28	1.0	-195.8
二氧化碳	CO_2	44	0.9	-78.5
六氟化硫	SF_6	146	2.3~2.5	-63.8
氟利昂	CCl_2F_2	121	2.4~2.6	-28
四氯化碳	CCl_4	153.8	6.3	76

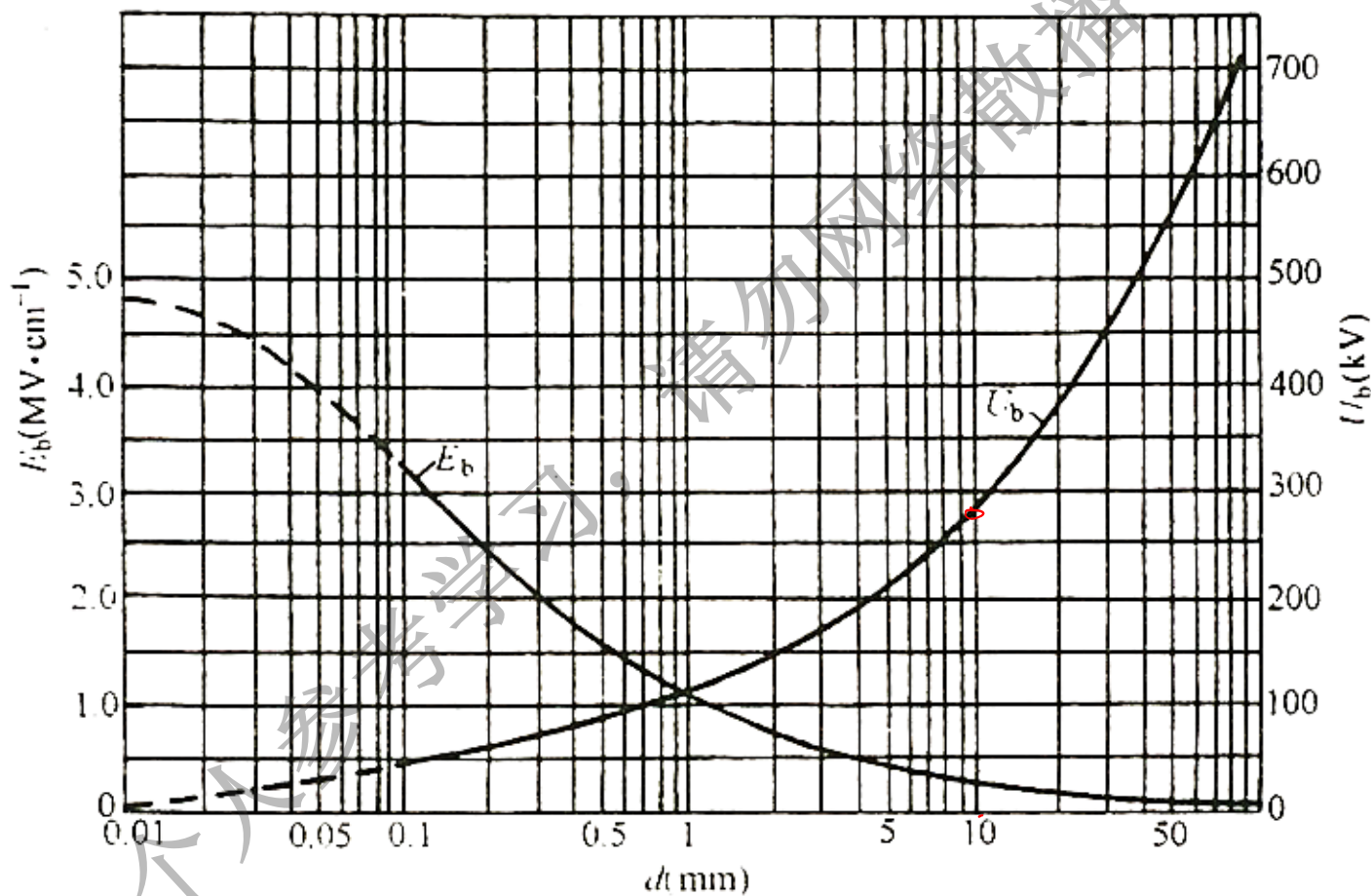
电负性



4.4 提高气体间隙击穿电压的措施

5) 高真空的采用

*真空放电机理请参阅其它教材



真空中直流电压下，球板间隙的击穿电压及击穿场强和间隙距离的关系

什么是伏秒特性？绝缘配合对电力设备和避雷器的伏秒特性有何要求？

个人参考学习，请勿网络散学

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

本部分内容结束！

西安 2021年03月

