

总 65066

电 0 0 9

中国电机工程学会高电压测量及試驗技术年会論文报告

利用长冲击波进行雷閃繞击导綫的試驗研究

清 華 大 学 电 工 研 究 室

1965.9.

利用长冲击波进行雷閃繞击导线的试验研究
1965年9月出版

騰印者：清華大學印刷廠

印数：220

利用長冲击波进行雷閃繞击导线的試驗研究

研223

清华大学电工研究室

摘 要

雷閃繞击导线是由其預放电阶段中的发展过程所决定。因此本文根据雷閃先导放电的基本特点，利用負极性长冲击波电压作用下空气間隙放电特性的試驗来研究雷閃繞击线路导线的问题。

本文試驗所用的冲击电压发生机最高输出电压为1兆伏，长冲击波电压波形为2/6000微秒。試驗内容可分为三部分：1. 試驗間隙条件的确定。其中着重試驗了电极导线表面电暈放电对間隙击穿的影响。2. 长冲击波作用下空气間隙的放电特性。其中包括尖对多根导线——平板間隙、头对导线——平板間隙和尖对板間隙的放电电压和伏秒特性的量测。3. 长冲击波與短冲击波放电試驗的比较。所得的試驗結果與以往发表的长空气間隙的直流和冲击放电电压也作了对比。

本文还根据空气間隙长冲击波放电特性的試驗結果用图解法計算了110千伏、220千伏及330千伏不同高度、不同保护角的线路的繞击率以作比较。

試驗結果的分析和計算表明，空气間隙在长冲击波电压和短冲击波电压作用下的放电特性是不同的，繞击試驗利用长冲击波电压进行比较合适。此外还看到输电线路跳闸率和塔高关系，

利用长冲击波进行雷闪绕击导线的试验研究 戚庆成

超高压输电线路，特别是杆塔很高的线路，在实际运行中雷击跳闸率远远超过原设计指标。例如，我国220千伏线路实际运行雷击跳闸率统计结果为0.3~1.37次/百公里年，比它们的设计指标0.007~0.03次/百公里年约超过40多倍；某些线路实际运行雷击跳闸率还有比上述统计数字更大的〔文献1,2〕。国外超高压线路同样也有类似的运行经验〔文献3,4〕。由于超高压线路多半是电力系统中很重要的线路，运行指标必须改善。因此，分析超高压输电线路雷击跳闸率过高的主要原因以便采取有效的防雷措施的问题成为超高压线路当前需要解决的问题之一。

目前国内外对于这问题的分析大致可分两类：一类认为超高压线路雷击跳闸率过高的主要原因在于反闪，而防雷措施的改善应从减少反闪事故着手，如采用了耦合地线等〔文献5〕；另一类认为超高压线路雷击跳闸率过高的主要原因在于绕击，因而采用更小的保护角等为减少绕击事故的防雷措施更为有效〔文献4〕。

根据观测，雷闪时在线路或地面上通常将会产生迎面流注〔文献6〕。它的产生和发展情况很大程度上决定了雷闪最终将击于何处。超高压线路一般杆塔高度较高，容易发生迎面流注，因而绕击率有所增加是很有可能的。

关于雷闪绕击导线的试验研究以往大多采用1.5/40微秒标准冲击波来进行的〔文献7,8〕。它实际上是雷闪主放电阶段中雷电流的波形。但是，雷闪绕击导线是其预放电阶段中发生的过程。因此，利用长冲击波来进行试验研究。试验研究的方法是先用负极性长冲击波电压作用于空气间隙进行放电特性的试验，然后结合图解法计算了线路的绕击率。

一. 試驗方法介紹

I. 雷內放電的特點和有類試驗的一些考慮

雷內放電發展的機構雖然目前尚未被人們徹底認識，但是它的基本特點是大气狀況下長間隙的放電過程。因此，我們在實驗室中盡量以符合實際雷內放電的基本特點為原則來考慮試驗的方法。

1. 從對於雷閃的實測結果知道，內放電是一複雜而變化多的現象。雷內放電常常是分級的，主放電又常是多次重複的。在主放電之前，亦即在雲與地之間被放電通道貫穿之前，從雲有先導向地發展。當它到達地面，或和由地向上發展的迎面流注相遇時，形成貫穿通道，成為主放電。形成主放電之前的過程才對於貫穿起主要作用。而主放電在研究反擊時主要的。在主放電之前，由於雷雲中的電荷的存在，在雲面上也已有電場存在，它的时间很长〔24〕。此外，主放電之前，某些塔上測得迎面流注的電流，它的时间也很長，從零點幾秒到幾分鐘〔22〕。這說明，在主放電之前，作用在地面上或地面上物體的電場已經存在很長的时间。在多次重複閃擊的情形，兩次主放電之間相隔幾毫秒到幾十毫秒，在這時間電場並未消失。〔23〕。由此種種現象看來，內在對地或輸電綫擊之前，已早有電場作用在這些物體之上。為了探討內擊輸電綫的規律，採用波沖擊波比較更符合實際情況。從後面的試驗結果來看，鬆弛導綫，容易發生電暈的情況下，擊穿的時間也是比較長的，可以到1毫秒以上。而實際情況，輸電綫的導綫在雷流電暈作用下也是很容易產生電暈或迎面流注的。因此，我們採用了 $2/6000$ 〔微秒〕的長波來進行試驗。因為在試驗中沒有發現比6000微秒更長的擊穿時間，所以它已經足夠長了。

2. 雷內80%以上為負極性雷〔文獻9〕。因此試驗是用負極性長沖擊波電壓進行的。限于時間，未能以正極性電壓做一些試驗進行比較。

3. 雷內先導槽道具有長綫的特性，其波阻抗平均為1500歐〔文獻10〕。為此在試驗間隙上串聯一數值為1500歐的制動

电阻。

4. 光导槽道导芯直径是很细的，仅为几毫米；导芯周围和槽道头部的电晕半径却很大，可达数米以上〔文献5,6〕。为模仿光导头部的电晕，采用尖棒、金属刷和圆球作为电极进行试验比较，以便考虑用那种上电极更为合适。

5. 雷击线路时，线路导线将发生强烈的电晕放电，并进而转化为迎面流注。为了模仿导线周围电晕放电等情况，采用了不同直径的导线进行试验比较，以便选择合适的导线作下电极。

6. 实际雷闪各有大小，实际线路也各有高低。因此，将头极与导线置于不同的相对高度下进行了试验，以便在不同的雷闪大小和线路高度情况下分析绕击的问题。

7. 雷闪绕击导线，还是击中避雷线或落入大地，实际上取决于最后一级光导槽道对导线、避雷线和大地等所构成的各个空气间隙的放电特性。因此，试验分别以头对导线—平板间隙和头对板间隙进行放电特性的量测，然后根据试验结果用图解法计算线路的绕击率。关于图解法的说明详见第三段第一节。

根据上面的考虑，试验的主要任务是确定空气间隙在负极性长冲击波电压作用下的放电特性。但是在此之前，还需要通过试验来确定合适的上下电极等试验间隙所采用的条件。

此外，为比较长短冲击波的试验结果，本试验也以 $2/60$ 微秒短冲击波电压选择某些条件相同的情况进行了试验。

II. 试验设备。

试验所用的冲击电压发生器最高输出电压为1兆伏，总冲击电容量为 0.025 微法，它的接线方式见图1。

试验波形有二种：

1. 长冲击波： $2/6000$ 微秒。波形图见图2。（此时总放电电阻约 330 欧姆）。

2. 短冲击波： $2/60$ 微秒。波形图见图3。（此时放电电阻为 2100 欧姆）。

发生器第一级点火球隙 S_1 ，为可控引燃球隙，试验时冲击

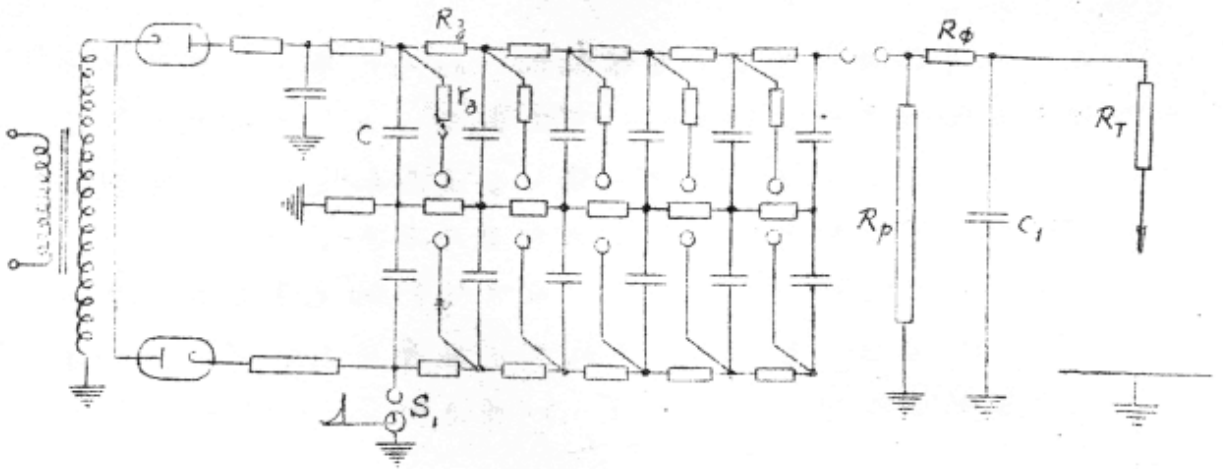


图1. 冲击电压发生器接线图

各级冲击电容 $C = 0.3$ 微法，负荷电容 $C_1 = 1440$ 微微法，阻尼电阻总和 $\Sigma R_0 = 150$ 欧，波头电阻 $R_\phi = 460$ 欧，放电电阻 $R_p = 2100$ 欧。

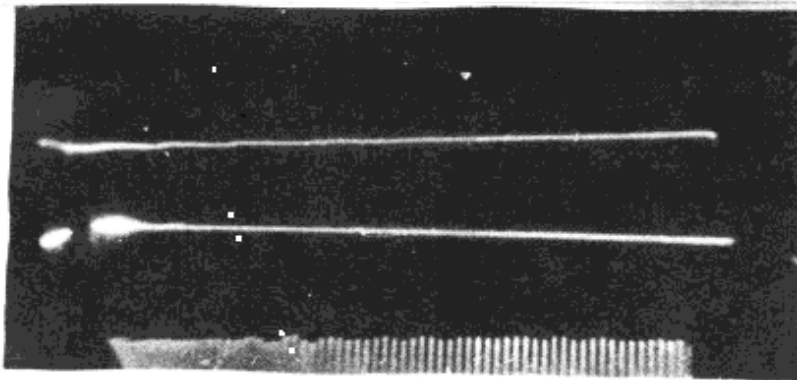


图2. $2/6000$ 微秒长冲击波波形图。
(时间刻度振荡周期为 50 微秒)。

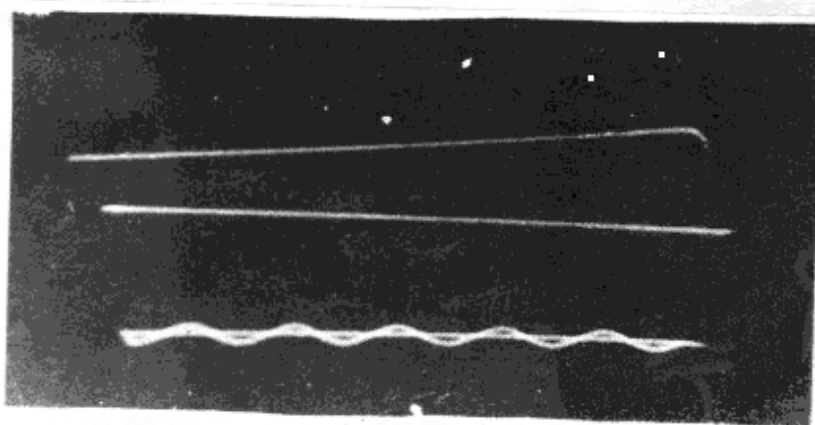


图3. $2/60$ 微秒短冲击波波形图。
(时间刻度振荡周期为 10 微秒)。

电压发生器每次充电 1 分钟后用高压脉冲触发启动。

试验间隙上电极为一铜制尖棒，直径1.8厘米，长50厘米。此外，还用50根铜线组成的直径5厘米的半球状金属刷和直径5厘米的铜球作上电极。上电极用铜线经制动电阻($R_T = 1500$ 欧)垂直悬挂到离板极约4.5高的绝缘键上，然后再通过引线接冲击电压发生器输出端。

试验间隙下电极为一块钢板，宽2米，长3米。导线沿宽度方向架设在钢板之上，长2米，直径有0.22~1.35毫米等等。

试验间隙上下电极位置以 S 、 a 、 h 来表示(见图4)。 S 为上电极离板极的距离； a 为导线与上电极的水平距离； h 为导线离板极的高度。图中还以 l 表示上电极与导线之间的距离。

III. 量测设备及方法。

冲击波的量测采用电容分压电路，其接线与参数见图5。电容分压器高压臂电容 C_1 ，同时用作冲击电压发生器的负荷电容。所用的示波器是OK-17M型双线脉冲示波器。

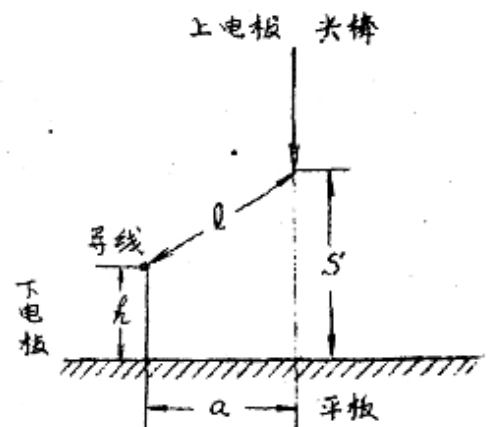


图4. 试验间隙电极位置。

冲击电压幅值是用直径1米的铜球球隙校正的。例如，冲

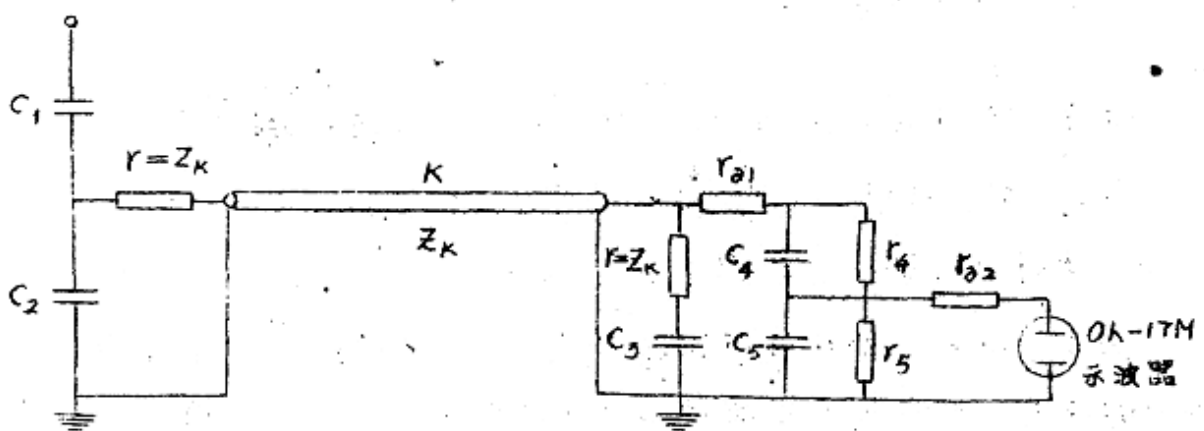


图5. 冲击波量测电路接线图

电容分压器高压臂电容 $C_1 = 1440$ 微微法，低压臂电容 $C_2 = 1.07$ 微微法， $C_3 = 1.07$ 微微法；电键 K 长约10米，型号为PK-3，波阻抗 $Z_k = 80$ 欧；电键始末端电阻 $r = Z_k = 80$ 欧；示波器入口电容分压器电容 $C_4 = 100$ 微微法， $C_5 = 320$ 微微法，电阻 $r_4 = 300$ 欧姆， $r_5 = 100$ 欧姆；示波器为OK-17M型双线脉冲示波器。

击电压发生器原边压47伏，在输出端用球隙量得的冲击电压幅值为616千伏，用示波器同时量得的波形幅度为21毫米，由此确定示波图上每毫米波形幅度代表29.4千伏。经球隙校正之后，冲击电压幅值均可按示波图直接量得。

空气间隙的放电电压采用50%放电法测定。每次测量时，均在该放电电压下试满20次以上才确定的。并且，每当重复原有试验条件时，仍然测得相同的放电电压值。试验中，在放电电压附近将冲击电压增减3%，间隙的去穿次数与不去穿次数之比亦随之有明显的增或减，因此间隙放电电压的测量误差在3%以内。

试验过程中气象条件为：气压759~771毫米汞柱，气温9~15℃，湿度4.7~6.9克/立方米。试验结果均折换为标准气象条件下的放电电压值。

空气间隙的伏秒特性是四个电压值（50%放电电压及以上三个电压值），每个电压值下加压10次来测定的。试验时记录间隙电压的示波图，根据此40张示波图的电压幅值及放电时间绘制间隙的伏秒特性曲线（如图8）。

二. 长冲击波放电试验及结果分析

I. 试验间隙条件的确定。

1. 试验间隙的制动电阻。

表1.

长冲击波放电电压 U_p (千伏)	间隙串联 R_T	间隙不串联 R_T
尖对导线-平板间隙 $S=100$ 厘米 $a=0$ $h=30$ 厘米	435	420
尖对板间隙 $S=70$ 厘米	750	720

从表1可知，间隙串联制动电阻（ $R_T = 1500$ 欧）时的放电电压比不串联此电阻时的放电电压约高4%，为了抵消光导槽道波阻的影响及保护电容器C，在间隙放电时不直接短路，试验时应将制动电阻 R_T 串联入回路中。

2. 上电极。

表2.

下电极	长冲击波放电电压 U_p (伏)		上电极		
	电极位置		尖棒	金属刷	圆球
导线—平板	$S=100$ 厘米	$a=0$ $R=30$ 厘米	435	415	420
平板	$S=70$ 厘米		750	740	735

从表2可知，在负极性长冲击波电压作用下，尖棒、金属刷和圆球等三种上电极的间隙放电电压相差仅在5%以内。由此可见，上电极对间隙放电电压的影响不很大，因此试验採用尖棒作上电极即可。

3. 下电极(导线)。

採用不同直径的裸铜线作下电极时，间隙放电特性的试验结果如表3。从表3中可以看到，裸铜线直径愈细，间隙放电电压愈低，放电时间愈长。

表3.

电极位置		$S=100$ 厘米, $a=0$ 厘米, $R=30$ 厘米			
裸铜线直径	d (毫米)	1.35	1.15	0.44	0.22
长冲击波放电电压	U_p (伏)	580	550	460	450
放电时间	t_p (微秒)	6.3~8.1	7.0~7.9	260~460	250~430
导线表面场强	E_n (伏/厘米)	71	77	149	267
导线临界场强	E_k (伏/厘米)	68	71	96	122
E_n/E_k 比值		1.04	1.08	1.55	2.18

为了分析导线直径改变时，导线表面电晕放电对间隙放电特性的影响，表3中还计算了在放电电压 U_p 作用下的导线表面场强 E_n 与它的临界场强 E_k 之比值。其中导线临界场强 E_k 是根据导线发生电晕放电的皮克经验公式(1)计算的。

$$E_k = 31.08 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \text{ 伏/厘米} \quad (1)$$

式中 δ 为空气的相对密度，此处按标准气象条件计算， $\delta=1$ ； r 为导线半径，单位为厘米。导线表面场强 E_n 是按式(2)(3)计算的。

$$\varphi_n \approx \frac{U_p}{R_0} \ln \sqrt{\frac{S-h}{S+h}} \quad (2)$$

$$E_n \approx \frac{\varphi_c}{r \ln \frac{2h}{r}} = - \frac{\varphi_n}{r \ln \frac{2h}{r}} \quad (3)$$

试验时导线与板板直接相联，因此在头对板间隙中导线所在处的电位 φ_n 应被导线上束缚电荷所造成的电位 φ_c 所平衡，即

$\varphi_n + \varphi_c = 0$ 。式(2)右边为头对板间隙的轴线上离板高度为 h 的空间点的电位表示式(参见附录一)，当 h 较小时，该点所在的等位面较平坦，因此通过该点的导线电位也可按该式近似。试验所用的头板端点的曲率半径 $\rho_0 = 0.61 \times 10^{-2}$ 厘米，头板离板板的距离 $S = 100$ 厘米，故式(2)中常数 $R_0 \approx \ln \frac{\sqrt{S\rho_0}}{2S} = -25$ 。导线表面场强 E_n 应为头对板间隙中导线所在处的场强和束缚电荷所造成的场强之和。由于前者太小，所以式(3)中仅列了后者这一项。必须指出，这里计算的导线表面场强 E_n 是在不考虑间隙中空间电荷的条件下得到的。实际上，在达到放电电压之前，间隙中已发生电晕放电，不可能没有空间电荷存在。因此，计算只是为了求得 E_n/E_K 的比值，以表微间隙放电电压超过导线发生电晕所需电压的倍数。

计算结果表明(见表3)，在放电电压下 E_n/E_K 的比值均大于1，可见间隙均在导线发生电晕之后才击穿的。另外，导线直径愈细， E_n/E_K 比值愈大，这说明导线周围的电晕放电愈强烈，而此时间隙的放电电压也就愈低。所以，在负极性长冲击波电压下，下电极导线表面电晕放电对间隙的放电特性有很大影响。根据它影响放电的不同情况还可分为二类间隙：一种是 $E_n/E_K \gg 1$ 的间隙，它的放电电压较低，放电时间可达几百微秒，导线直径改变的影响较小，如导线直径为0.5毫米以下的间隙；另一种是 E_n/E_K 稍大于1的间隙，它的放电电压较高，放电时间仅为数微秒，导线直径改变的影响很大，如导线直径为1.0毫米以上的间隙；两者之间有显著差别。

实际线路遭受雷击时，在光导槽道电场作用下的导线表面场强 E_n 和导线临界场强 E_K 的计算结果列于表4。其中导线所

界场强 E_K 仍按式 (1) 计算。导线表面场强 E_n 按式 (3) 计算，但导线所在处的电位 φ_n 根据式 (附-7) (见附录二) 进行计算。计算条件为：雷电流 $I_0 = 10$ 千安，平均击穿场强 $E_{cp} = 5^{14k}$ 厘米。考虑到在更大的雷闪时，导线所在处的电位将会更高，因此导线表面场强将比表 4 中的计算值为大，而 E_n/E_K 比值也就不会再比表 4 中的数值低。

表 4

输电线路额定电压 U_H (千伏)	110	220	330
导线悬挂高度 h_n (米)	15	25	30
导线半径 r_n (厘米)	0.9	1.5	2.0
导线表面场强 E_n (千伏/厘米)	430	378	325
导线临界场强 E_K (千伏/厘米)	41	38.8	37.7
E_n/E_K 比值	10.5	9.75	8.6

从表 4 可以看出，实际线路遭受雷击时 E_n/E_K 的比值都远远大于 1，而且比表 3 中最细导线的 E_n/E_K 比值还大。可见在雷闪光导槽道的电场作用下，线路导线将发生很强烈的电晕放电。

由试验看来，导线表面电晕放电的强弱程度对间隙放电特性是有很大的影响的， E_n/E_K 愈大，放电电压愈低。因此为了模仿实际线路导线在雷闪作用下的电晕放电情况；按 E_n/E_K 相同的条件来选择试验所用的导线直径最为恰当。但是，直径为 0.22 毫米的细裸铜线在间隙放电时已被打断，换用再细的导线做试验更有困难。根据以往经验 [文献 11]，在直流电压作用下，正极性电晕导线的表面若附有高电阻率物质层时，它将使间隙的放电电压大为降低，因此特选用比包线以代替细裸铜线进行了试验。两者的试验结果比较如表 5。

表 5.

电极位置	$S = 100$ 厘米, $a = 0$ 厘米, $h = 30$ 厘米.		
下电极导线	直径 0.44 毫米 裸铜线	直径 0.22 毫米 裸铜线	直径 1.24 毫米* 比包线
长冲击波放电电压 U_p (千伏)	460	450	435
放电时间 t_p (微秒)	260 ~ 460	250 ~ 430	250 ~ 940

* 比包线直径为包括比包厚度的外径。

由表5可知，比色线与细裸铜线作下电极时，间隙的放电特性属同一类型，而且前者放电电压还稍低于后者，放电时间也稍长一些。所以从间隙的放电特性来看，比色线可以用来代替直径0.22毫米更细的裸铜线。另外，用比色线进行试验时，间隙放电的分散性也较小，试验起来很方便。根据以上这些情况，确定以比色线（直径1.24毫米）为下电极导线进行以下试验。

II. 长冲击波作用下空气间隙的放电特性。

1. 多根导线对头对导线—平板间隙放电电压的影响。

实际线路有三相导线和避雷线等多根导线。无导线槽道与各导线所构成的各个间隙的放电电压是否受相邻导线影响的问题拟通过试验来明确。试验采用了二种导线高度，并以实际线路导线与避雷线的相对位置按比例设置它们的位置。试验结果如表6-1，表6-2。

表6-1.

头对导线—平板间隙	单根导线	双根导线				
头极位置(厘米)	$S=80$	$S=80$				
导线1位置(厘米)	$a_1=30, h_1=40$	$a_1=30, h_1=40$				
导线2位置(厘米)	/	$a_2=32.5$ $h_2=40$	$a_2=32.5$ $h_2=41$	$a_2=32.5$ $h_2=41.25$	$a_2=32.5$ $h_2=41.5$	$a_2=32.5$ $h_2=42$
长冲击波放电电压(kV)	295	305	300	295	300	310
放电情况	击中导线1	击中导线1	击中导线1	击中导线1,2 各占一半	击中导线1	击中导线2

表6-2

头对导线—平板间隙	单根导线	双根导线				
头极位置(厘米)	$S=50$	$S=50$				
导线1位置(厘米)	$a_1=30, h_1=10$	$a_1=30, h_1=10$				
导线2位置(厘米)	/	$a_2=32.5$ $h_2=10$	$a_2=32.5$ $h_2=11$	$a_2=32.5$ $h_2=11.25$	$a_2=32.5$ $h_2=11.5$	$a_2=32.5$ $h_2=12$
长冲击波放电电压(kV)	300	300	305	305	310	305
放电情况	击中导线1	击中导线1	击中导线1	击中导线1,2 各占一半	击中导线2	击中导线2

从试验结果可以看出，当二根导线按实际线路相对位置设置时，间隙的放电电压与单根导线时间隙的放电电压并无多大改变。因此，多根导线情况下共对每根导线所构成间隙的放电电压可以用该导线单独存在时的放电电压来考虑。因此，雷击线路时可按此原则根据各间隙的放电电压通过图解法来分析线路的绕击率。为此，以下试验分别以共对(单根)导线—平板间隙和共对板间隙进行了放电特性的量测。

2. 共对导线—平板间隙的放电电压及伏秒特性。

改变导线高度 h 及水平位置 a 时，共对导线—平板间隙放电电压的试验结果见表7。表中 U_p 为长冲击波放电电压， l 为共极与导线间的距离， $E_{cp} = \frac{U_p}{l}$ 它是间隙的平均击穿场强。根据表7数据绘制的曲线见图6、7。

由图表可知，对于导线高度相同的间隙，它的放电电压与间隙距离的关系为一直线，直线的斜率即其平均击穿场强。导线高度改变时，间隙的平均击穿场强随导线高度增加而降低，其数值在6.6~5.4伏/厘米范围内。

表7

S (厘米)		100							
U_p (伏)	l (厘米)	E_{cp} (伏/厘米)	h (厘米)	10	20	30	40	60	70
a (厘米)									
0		$\frac{575}{90}$ 6.4		$\frac{530}{80}$ 6.6	$\frac{435}{70}$ 6.2	$\frac{360}{60}$ 6.0	$\frac{220}{40}$ 5.5	—	—
30		$\frac{625}{95}$ 6.6		—	$\frac{465}{76}$ 6.1	$\frac{400}{67}$ 6.0	$\frac{280}{50}$ 5.6	—	—
60		$\frac{725}{108}$ 6.7		—	—	$\frac{520}{85}$ 6.1	$\frac{420}{72}$ 5.8	—	—
100		—		$\frac{850}{128}$ 6.6	—	$\frac{715}{117}$ 6.1	—	—	$\frac{580}{105}$ 5.5
E_{cp} 平均值 (伏/厘米)		6.6	—	6.2	6.0	5.6	—	—	—

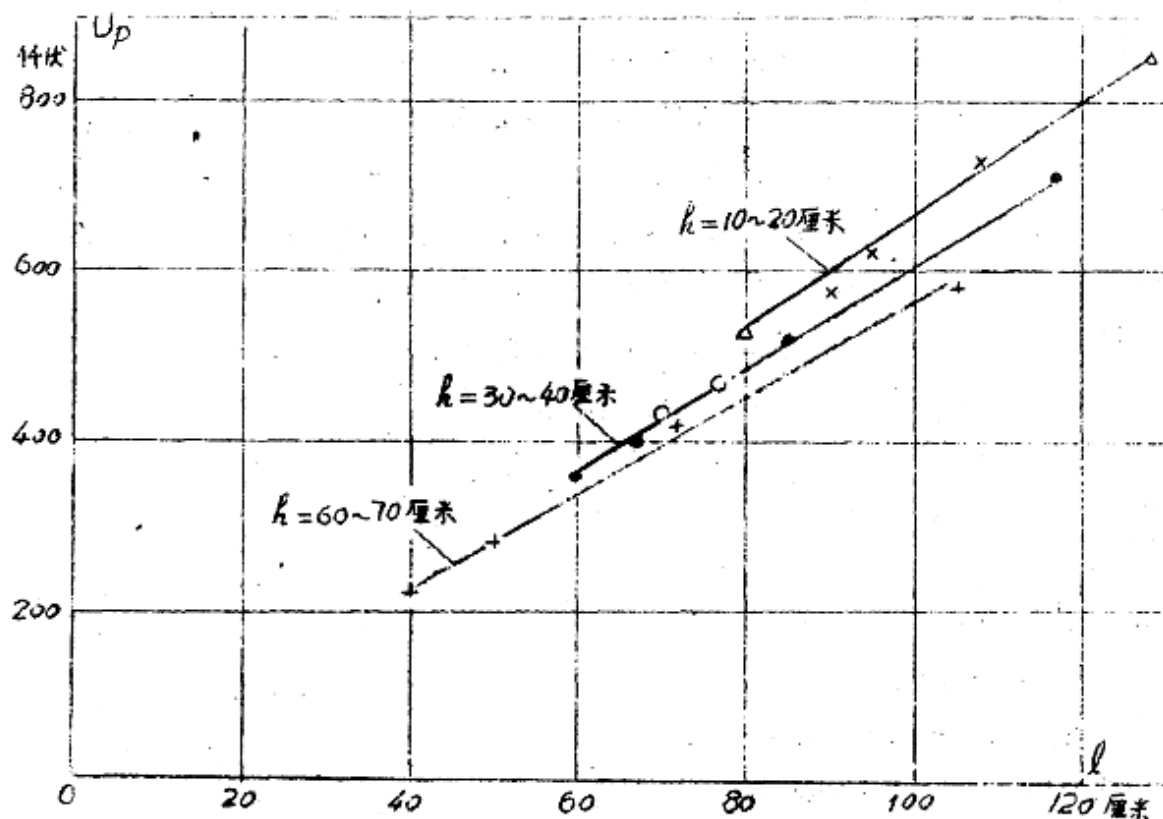


图6. 尖对导线-平板间隙长冲击波放电电压 U_p 与间隙距离 l 的关系曲线。 $\times h = 10$ 厘米, $\circ h = 30$ 厘米, $\bullet h = 40$ 厘米, $+ h = 60 \sim 70$ 厘米。

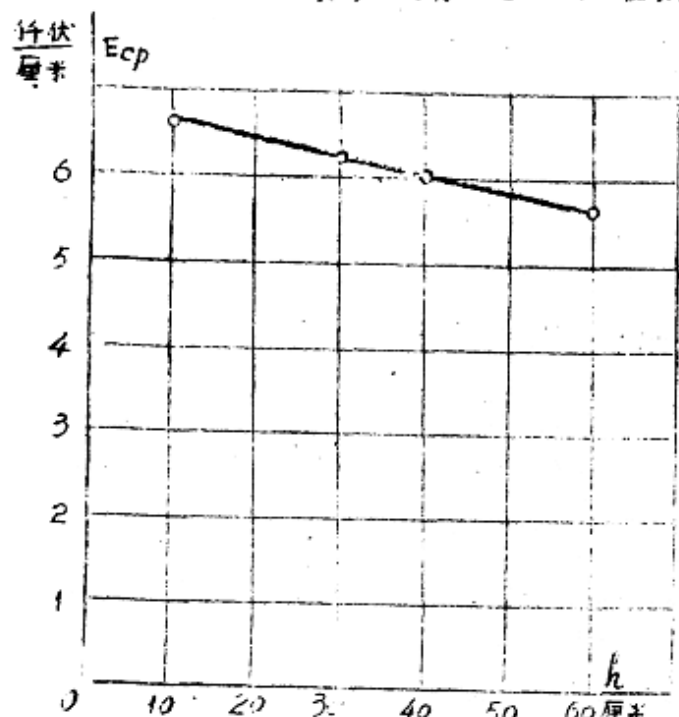


图7. 尖对导线-平板间隙长冲击波电压下平均击穿场强 E_{cp} 随导线高度 h 变化的曲线。

尖对导线-平板间隙的伏秒特性如图8。由图8可知, 在50%放电电压下, 间隙放电时间可达几百微秒, 甚至上千微秒。

尖对板间隙的放电电压及伏秒特性。

改变间隙距离 S 时, 尖对板间隙放电电压的试验结果见表8。表中平均击穿

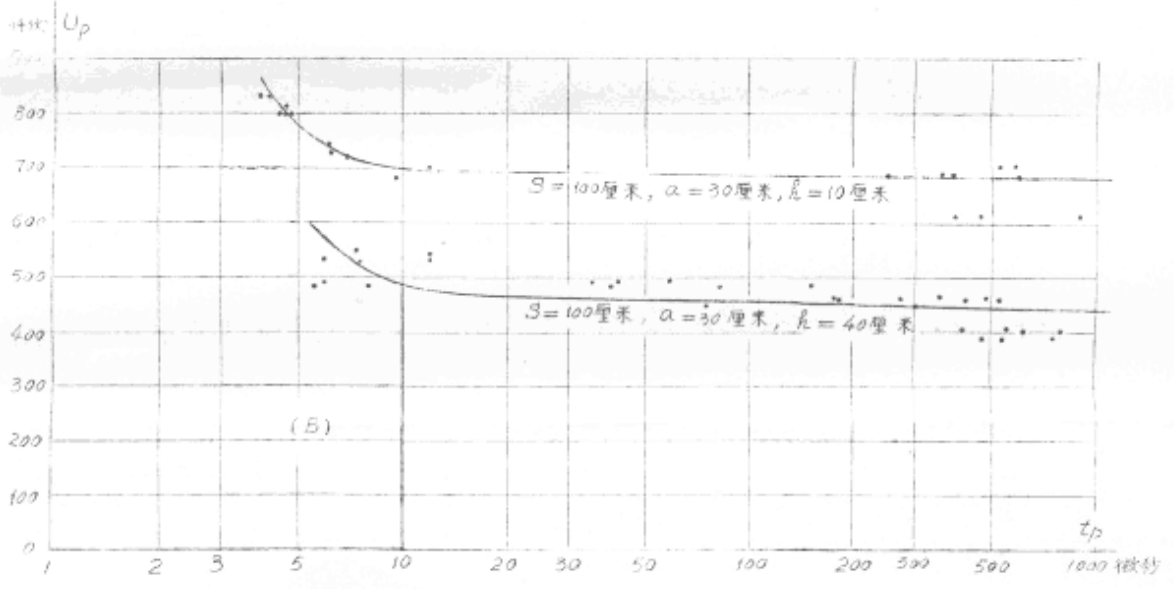
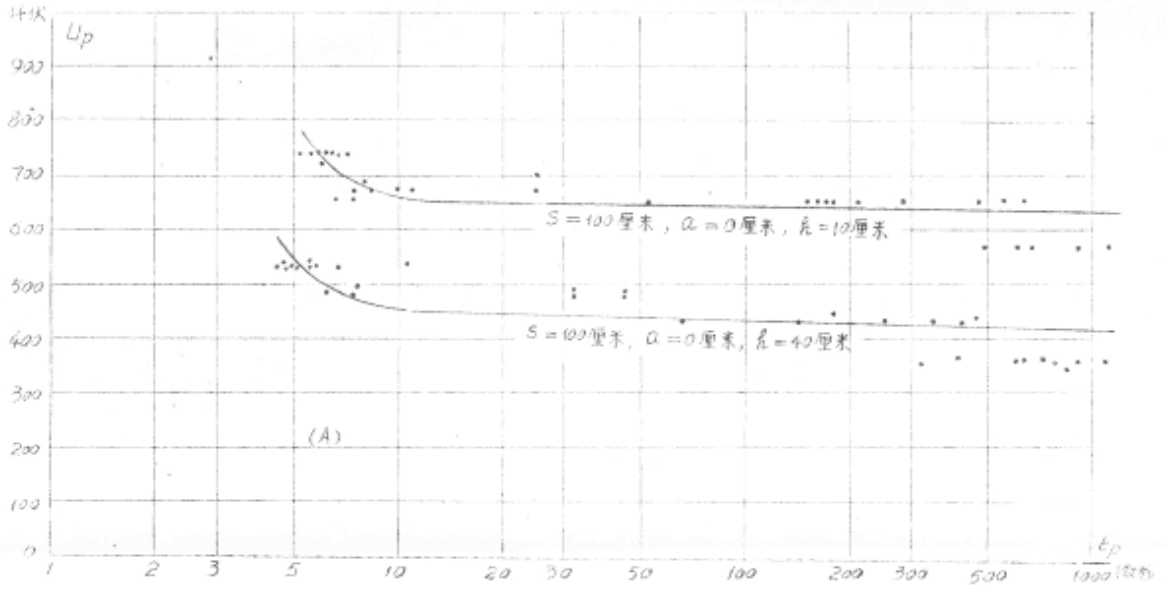


图8. 长冲击波电压下对导线-平板间隙伏秒特性曲线。
 (A) $S = 100$ 厘米, $a = 0$ 厘米, $h = 10, 40$ 厘米。
 (B) $S = 100$ 厘米, $a = 30$ 厘米, $h = 10, 40$ 厘米。

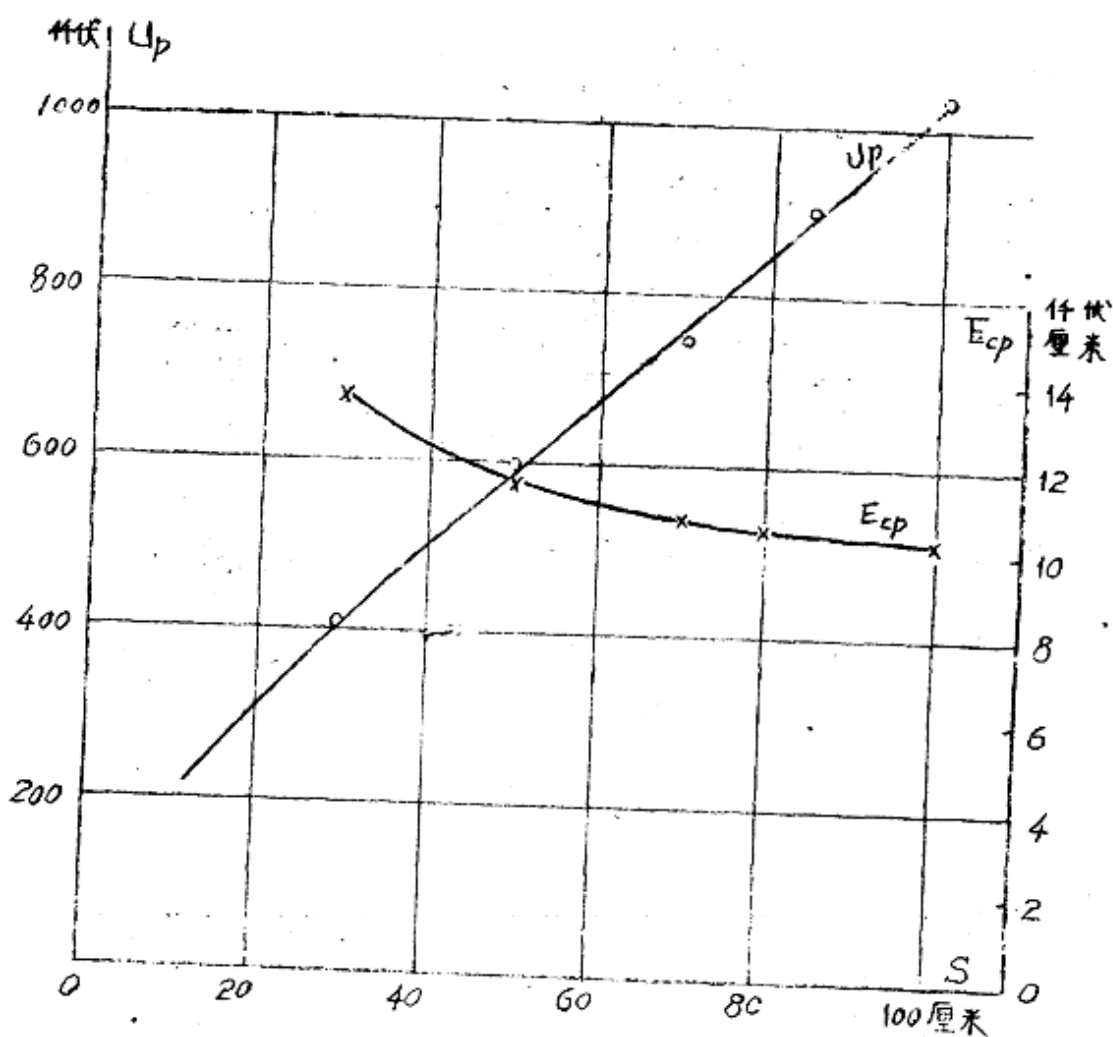


图9. 关于对板间隙长冲击波电压下放电电压 U_p 和平均击穿场强 E_{cp} 随间隙距离 S 变化的曲线。