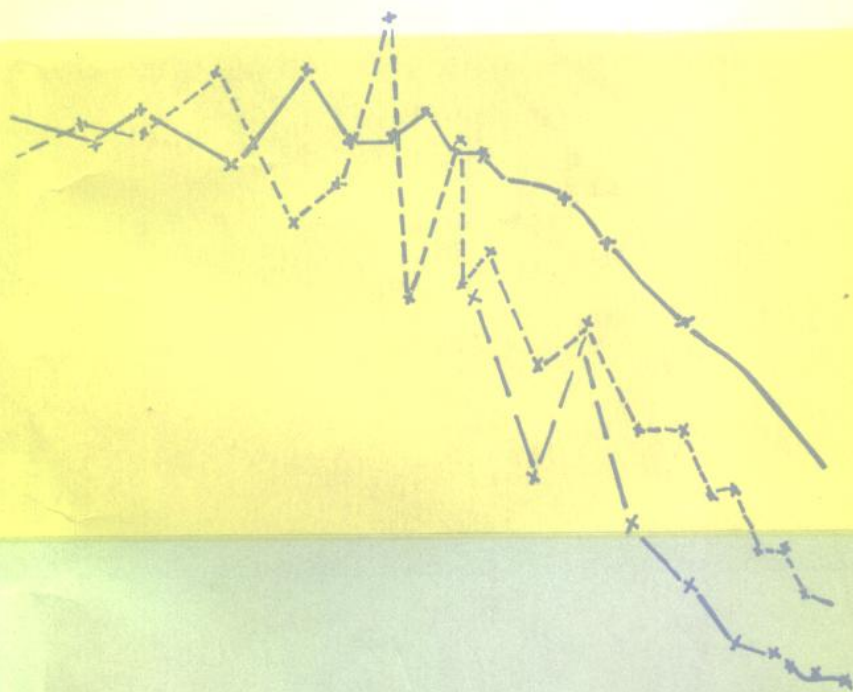


局部放电测量

葛景滂 邱昌容 谢恒堃 编



机械工业出版社

93.173
736

局 部 放 电 测 量

葛景滂 邱昌容 谢恒堃 编



机 械 工 业 出 版 社

1111681

本书根据国内外有关资料结合西安交大以及一些单位近年来在局部放电检测方面的科研成果编写而成。全书共分九章，分别对局部放电特性；局部放电的检测原理；脉冲电流法测试技术；局部放电测试中的干扰；典型测试线路；高压电容器、电机、电缆、变压器等的局部放电测试作了较详细的介绍。本书可供从事高压电器绝缘产品制造、运行、试验、研究工作的技术人员以及有关大专学生参考。

局部放电测量

葛景滂 邱昌容 谢恒堃 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 12·字数 265 千字

1984 年 6 月北京第一版·1984 年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,150·定价 1.50 元

*

科技新书目： 73-105

统一书号：15033·5534

前言

DS97/10

目前，人们对高压电气设备中存在局部放电而最终导致绝缘击穿的现象已愈来愈给予重视，因而对局部放电的发生过程、破坏绝缘体的机理以及局部放电的检测技术进行广泛的研究。为了促进我国在这一技术领域中发展的需要，本书收集了国内外有关资料百余篇，结合西安交大绝缘室和国内一些单位的科研成果，从局部放电的基本原理、测试方法和测试技术、例示性线路等各个方面系统地进行了介绍并附有实例分析和讨论。本书可供从事高压电气绝缘设备、产品的制造、运行、试验、研究工作的技术人员和有关大专学生参考。

本书第一、二、三章由邱昌容同志执笔，第四、五章由葛景滂执笔，第六、七、八、九章由谢恒堃执笔，全书由葛景滂统编。

上海电缆所葛和林、徐丙生，上海交大李静一、韩惠宝等同志审阅了初稿，详细地提出了宝贵意见，在此谨致衷心的感谢。

由于水平有限，编写内容可能还有不妥和错误，请读者不吝指正。

目 录

第一章 局部放电的特性	1
§ 1-1 基本概念	1
一、局部放电的产生和放电过程	1
二、表征局部放电的参数	5
三、影响局部放电的因素	10
§ 1-2 各类局部放电的特点	13
一、内部局部放电	13
二、表面局部放电	25
三、电晕放电	29
§ 1-3 局部放电对绝缘的危害及其评定方法	31
一、局部放电造成绝缘材料破坏的机理	31
二、对电老化速度的影响因素	42
三、利用局部放电特性来评定绝缘的质量	48
§ 1-4 直流和脉冲电压下的局部放电	55
一、直流电压下的局部放电	56
二、脉冲电压下的局部放电	62
第二章 测量局部放电的基本方法	69
§ 2-1 脉冲电流法的测量原理	69
一、直测法的测试回路及其灵敏度	69
二、平衡法的测试回路及其灵敏度	85
§ 2-2 分布参数系统中局部放电测量	93
一、分布参数系统中局部放电产生的行波特性	93
二、行波检测法的原理	95
三、行波检测法的测量回路	96

IV

四、用行波检测法定位	100
§ 2-3 放电量的分度和测试方法	101
一、放电量的分度方法	101
二、方波的特性对分度的影响	102
三、方波注入部位和分布电容的影响	112
四、标准放电器	119
五、测量程序	121
第三章 局部放电的其他测量方法	124
§ 3-1 无线电干扰电压 (RIV) 检测法	124
§ 3-2 检测能量法	128
一、损耗角正切增量的检测法	130
二、每周波放电能量检测法	136
§ 3-3 脉冲计数及脉冲高度分析	139
一、脉冲计数	139
二、单通道脉冲高度分析	141
三、多通道脉冲分析	143
四、电子计算机用于局部放电的测量	147
§ 3-4 超声波检测法	152
一、声波的传播特性	152
二、局部放电产生的声波频谱	157
三、超声波检测的灵敏度	160
§ 3-5 低频 (0.1Hz) 下局部放电测试	167
第四章 实际测量中的干扰	173
§ 4-1 放电测试中的干扰源	173
§ 4-2 干扰的检测和水平	175
§ 4-3 抑制或减少干扰的方法	176
一、一般防干扰措施	176
二、用放电波形及 $q-u$ 、 $q-t$ 特性判别外来干扰	178
三、用平衡回路抑制干扰	182

四、用电子线路鉴别、选择放电信号	185
第五章 局部放电的测量装置	196
§ 5-1 测量装置的型式及特点	196
§ 5-2 局部放电测试装置的结构和技术指标	199
一、国外的几种局部放电测试装置	199
二、国内的局部放电测试装置	205
§ 5-3 具体线路举例	207
一、放大线路举例	207
二、输入单元	220
三、放电量表	222
四、其他专用线路	227
§ 5-4 无线电干扰电压测试仪举例	235
§ 5-5 脉冲鉴别系统	237
第六章 电力电容器的局部放电测量	242
§ 6-1 电力电容器中局部放电的产生和危害	242
§ 6-2 电力电容器局部放电测量中的特殊问题	244
一、测量大电容试品时的灵敏度问题	244
二、内部电感对电容器局部放电测量的影响	247
三、试验电源问题	256
四、定位问题	258
§ 6-3 电力电容器用的绝缘介质中的局部放电特性	259
§ 6-4 电力电容器局部放电测量程序和有关标准	264
第七章 高压电机绝缘的局部放电测量	274
§ 7-1 高压电机中局部放电类型及其破坏作用	274
一、电机绝缘内部放电	274
二、端部电晕	279
三、槽放电	281
§ 7-2 高压电机绝缘局部放电测量方法	282
一、一般测量方法	282

二、测定局部放电发生的位置	286
三、超低频测量	293
四、用第二电流急增点来评定定子线圈绝缘的质量	294
§ 7-3 高压电机绝缘局部放电试验的注意事项及有关 标准和规定	298
第八章 高压电缆局部放电测量	302
§ 8-1 电缆的局部放电	302
§ 8-2 电缆局部放电测量的特点	305
一、扫描法检测电缆的局部放电	305
二、长电缆中波反射和衰减的影响	306
三、短电缆的局部放电测量	316
四、电缆中局部放电的定位	320
§ 8-3 电缆附件的局部放电测量	331
§ 8-4 电缆局部放电试验程序及标准	334
第九章 高压变压器的局部放电测量	337
§ 9-1 变压器的局部放电	337
一、局部放电的产生和危害	337
二、测量局部放电的意义	338
三、各种油隙局部放电起始电压的计算	339
四、放电脉冲波沿绕组的传播	343
§ 9-2 放电量的测量	348
一、脉冲电流法	348
二、无线电干扰电压 (RIV) 法	352
三、放电量的分度	354
§ 9-3 局部放电位置的测定	358
一、电气定位法	358
二、超声波定位法	369
主要参考文献	375

第一章 局部放电的特性

§1-1 基本概念

一、局部放电的产生和放电过程

采用固体绝缘的电工产品，如塑料电缆、电机、胶纸套管以及浇注变压器等，都难免在绝缘结构中含有气隙。产生气隙的原因很多，有的是在产品制造中就残留在绝缘结构中；有的是在使用中有机材料进一步固化或裂解而放出气体形成的；有的是在使用中承受机械应力如震动、热胀冷缩等造成的局部开裂。这些气隙在电场作用下就会产生局部放电。

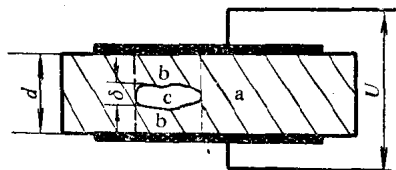


图1-1 含有单气隙的绝缘结构

δ —气隙厚度(m) d —整个介质的厚度(m)

最简单的情况是在介质内部含有一个气隙，如图1-1所示。图中c代表气隙，b是与气隙串联部分的介质，a是除了b之外其他部分的介质。假定这一介质是处在平行板电极之中，在交流电场作用下

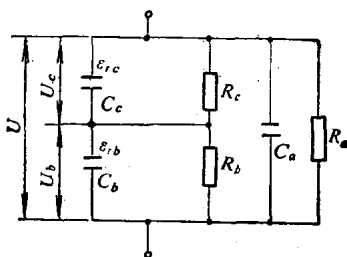


图1-2 介质中含有一个气隙的等效电路图

C_c —气泡的电容(F) C_b —与气泡串联部分介质的电容 C_a —其余部分介质的电容
 R_c —气泡的电阻(Ω) R_b —与气泡串联部分介质的电阻 R_a —其余部分介质的电容

气隙和介质中的电过程可以用图1-2所示的等效电路来分析。

假定在介质中的气隙是扁平状而且是与电场方向相垂直(如图1-1所示),则按电流连续性原理可得

$$U_c Y_c = U_b Y_b$$

$$\frac{U_c}{U_b} = \frac{\sqrt{\gamma_b^2 + (\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{rb})^2}}{\sqrt{\gamma_c^2 + (\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{rc})^2}} \frac{\delta}{d - \delta} \quad (1-1)$$

在工频电场中若 γ_c 和 γ_b 均小于 $10^{-11} (\Omega \cdot m)^{-1}$ 则上式可简化为

$$\frac{E_c}{E_b} = \frac{U_c / \delta}{U_b / (d - \delta)} = \frac{\varepsilon_{rb}}{\varepsilon_{rc}} \quad (1-2)$$

在直流电场中

$$\frac{E_c}{E_b} = \frac{\gamma_b}{\gamma_c} \quad (1-3)$$

式中 E_c, E_b ——气隙和介质中的电场强度 (V/m);

U_c, U_b ——气隙和介质上的电压 (V);

Y_c, Y_b ——气隙和介质的导纳 ($1/\Omega$);

$\varepsilon_{rc}, \varepsilon_{rb}$ ——气隙和介质的相对介电常数;

γ_c, γ_b ——气隙和介质的等效电导率 ($\Omega \cdot m)^{-1}$;

δ, d ——气隙和介质的厚度 (m)。

由此可见,在工频电场中气隙中的电场强度是介质中电场强度的 $\frac{\varepsilon_{rb}}{\varepsilon_{rc}}$ 倍。通常情况下 $\varepsilon_{rc} \approx 1$, $\varepsilon_{rb} > 2$, 即气隙中的场强要比介质中的高,而另一方面气体的击穿场强即气隙发生击穿时的电场强度一般都比固体的击穿场强低。因此,在外加电压足够高时,气隙首先被击穿,而周围的介质仍然保持其绝缘特性,电极之间并没有形成贯穿性的通道,这种

现象就称之为局部放电。

在液体和固体的组合绝缘结构中,如油纸电缆、油纸电容器、油纸套管等,由于在制造中采取了真空干燥浸渍等工艺,可以使绝缘体中基本上不含有气隙。但却不可避免地存在着充满绝缘油的间隙。

这些油的介电常数通常也比固体介质为小,而击穿场强又比固体介质为低,因此,在油隙中也会发生局部放电,不过与气隙相比要在高得多的电场强度下才会发生。

还应当注意的是,即使在介质中不含有气隙或油隙,只要是介质中的电场分布是极不均匀的,也就可能发生局部放电。例如埋在介质中的针尖电极或电极表面上的毛刺,或其他金属屑等异物附近的电场强度要比介质中其他部位的电场强度高得多。当此局部的电场强度达到介质的本征击穿场强时,介质局部击穿而形成了局部放电。

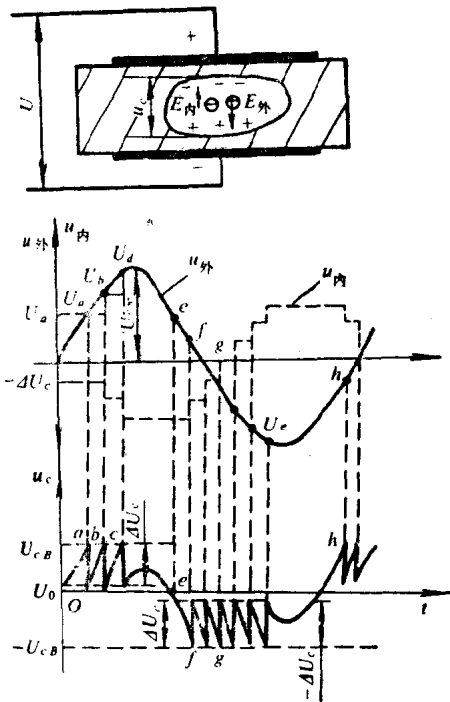


图1-3 单气隙放电次序示意图

$U_{外}$ —外施电压在气隙上的分压 $U_{内}$ —放电电荷在气隙内建立的电压 U_c —气隙中的实际电压 ΔU_c —每次放电中由于空间电荷形成的电压

在气隙发生放电时，气隙中的气体产生游离，使中性分子分离为带电的质点，在外加电场作用下，正离子沿电场方向移动，电子（或负离子）沿相反方向移动，于是这些空间电荷建立了与外施电场 E_H 方向相反的电场 E_n （如图 1-3 所示），这时气隙内的实际场强为

$$E_c = E_H - E_n \quad (1-4)$$

即气隙上的电场强度下降了 E_n ，或者说气隙上的电压降低了 ΔU_c 。于是气隙中的实际场强低于该气体的击穿场强，气隙中的放电就暂停。在气隙中发生这样一次放电过程的时间很短，约为 10^{-8} s 数量级；在油隙中发生这样一次放电过程的时间比较长，可达 10^{-6} s 数量级。

如果外施电压是正弦交流电压，当电压瞬时值上升使得气隙上的电压 U_c 达到气隙的击穿电压 U_{c_b} 时，气隙发生放电。由于放电的时间极短，可以看做气隙上的电压由于放电而在瞬间下降了 ΔU_c ，于是气隙上的实际电压低于气隙的击穿电压，放电暂停（这相应于图 1-3 中的 a 点）。此后气隙上的电压又随外加电压瞬时值的上升而上升，直到气隙上的电压又回升到气隙的击穿电压 U_{c_b} 时，气隙又发生放电，在此瞬间气隙上的电压又下降 ΔU_c 。于是放电又暂停。假定气隙表面电阻很高，前一次放电产生的空间电荷没有泄漏掉，则这时气隙中放电电荷建立的反向电压为 $-2\Delta U_c$ 。依此类推如果在外加电压的瞬时值达到峰值之前发生了 n 次放电，每次放电产生的电荷都是相等的，则在气隙中放电电荷建立的电压为 $-n\Delta U_c$ 。在外加电压过峰值后，气隙上的外加电压分量 U_H 逐渐减小，当 $U_H = |-n\Delta U_c|$ 时，气隙上的实际电压为零。（图 1-3 c 点）。

外施电压的瞬时值继续下降，当 $|U_H - n\Delta U_c| = U_{c_b}$ 时，

即气隙上实际的电压达到击穿电压时, 气隙又发生放电, 不过放电电荷移动的方向决定于在此以前放电电荷所建立的电场 E_n , 于是减少了原来放电所积累的电荷, 使气隙上的实际电压为 $|U_n - (n-1)\Delta U_c| < U_{cB}$ 于是放电暂停(相应图 1-3 中的 f 点)。此后随外施电压继续下降到负半周, 当重新达到 $|-U_n - (n-1)\Delta U_c| = U_{cB}$ 时, 气隙又发生放电, 放电后气隙上的电压为 $|U_n - (n-2)\Delta U_c| < U_{cB}$ 于是放电又停止。依此类推直到外加电压达到负峰值, 这时气隙中放电电荷建立的电压为 $n\Delta U_c$ 。

随着电压回升, 在一段时间内 $-U_n + n\Delta U_c < U_{cB}$ 不会出现放电, 直到 $U_n + n\Delta U_c = U_{cB}$ 时气隙又发生放电。放电后气隙上的电压为 $U_n + (n-1)\Delta U_c < U_{cB}$ 于是放电又暂停(相应图 1-3 中 h 点)。此后随着外加电压升高放电又继续出现。

由此可见, 在正弦交流电压下, 局部放电是出现在外加电压的一定相位上, 当外加电压足够高时在一个周期内可能出现多次放电, 每次放电有一定间隔时间。电压越高放电次数就越多。在外施电压一个周期内的放电次序如图 1-3 所示。

二、表征局部放电的参数

在气隙中产生局部放电时, 气隙中的气体分子被游离而形成正负带电质点, 在一次放电中这些质点所带的正(或负)电荷总和称为实际放电量 q_r 。

根据图 1-2 所示的等效电路可以推算出, 由于 C_e 上电荷改变了 q_r 所引起的 C_e 上的电压变化 ΔU_e 。

$$\Delta U_e = \frac{q_r}{C_e + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}} \quad (\text{符号见图1-2})$$

通常气隙总是很小的, 即 $C_a \gg C_b$, 因此上式可写作

$$\Delta U_c = \frac{q_r}{C_c + C_b} \quad (1-5)$$

由于气隙经常是处于介质内部, 因而无法直接测得 q_r 或 ΔU_c 。但根据图 1-2 所示的等效电路当 C_c 上有电荷变化时, 必然会反映到 C_a 上电荷和电压的变化, 即试样两端出现电荷和电压的变化。因此可以根据这种变化来表征局部放电。目前用以表征局部放电的参数有:

(一) 视在放电电荷

视在放电电荷是指局部放电时, 一次放电在试样两端出现的瞬变电荷。

根据图 1-2 所示的等效电路, 并考虑到电导 G_c (等于 $\frac{1}{R_c}$)、 G_b 、 G_c 都很小, 而局部放电的放电时间又极短, 可以假定在放电过程中, 一方面电源来不及供给补充电荷, 另一方面各个电容上的电荷也没有泄漏掉。因此当气隙放电而造成 C_c 上电压下降 ΔU_c 时, 各电容上的电荷重新分配, 因此 C_a 上的电压也下降了 ΔU_a 。

$$\Delta U_a = \Delta U_c \frac{C_b}{C_c + C_a} \simeq \Delta U_c \frac{C_b}{C_a} \quad (1-6)$$

这时 C_a 上的电荷变化为

$$q_a = \Delta U_a \left(C_a + \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \right) \simeq \Delta U_a C_a \quad (1-7)$$

将式 (1-6) 代入上式可得

$$q_a = C_b \Delta U_c \quad (1-8)$$

将式 (1-5) 代入上式得

$$q_a = q_r \frac{C_b}{C_c + C_b} \quad (1-9)$$

q_0 就是视在放电电荷, 式 (1-9) 表明视在放电电荷与实际放电电荷的关系。通常气隙是很薄的, 即 $C_e \gg C_b$ 因此 q_0 往往比 q_r 小得多。应当注意, 真正代表放电大小的是 q_r , 只有在 $\frac{C_b}{C_b + C_e}$ 相同时才能通过 q_0 的大小来表明实际放电

的大小。二个视在放电量 q_0 相同的产品, 如果 $\frac{C_b}{C_b + C_e}$ 差别很大, 则 q_r 的差别也很大, 因此, 对材料的破坏作用也就可能大不相同。这点在局部放电的实际测试中要做具体分析。

在实际测量中是用一规定的标准瞬变电荷注入试样两端, 使得在局部放电检测器上的读数与试样局部放电时在同一检测器上 (灵敏度不变) 测得最大的读数相等, 这个注入的电荷量就是试样的视在放电电荷。即通常所称的放电量。放电量的单位为库仑 C 或微微库 pC。

(二) 放电重复率 (或放电次数)

放电重复率是指单位时间内局部放电的平均脉冲个数。通常是以每秒中放电的次数来表示。

从图 1-3 可以看出, 假定气隙中每次放电后残留的电压 U_0 可以忽略, 则在外施电压的 $1/4$ 周期内放电的次数约为

$$n = \frac{U_{cm}}{U_{cs}} = \frac{U_m}{U_{cs}} \frac{C_b}{C_b + C_e}$$

式中 U_{cm} ——气隙中不放电时电压的峰值 (V);

U_m ——外加电压的峰值 (V);

U_{cs} ——气隙的击穿电压 (V)。

如果外施电压的频率为 f , 则一秒钟内放电的次数为

$$N = 4fn = 4f \frac{U_m}{U_{cs}} \frac{C_b}{C_b + C_e} \quad (1-10)$$

在气隙中的放电次数与反映到试样两端电压脉冲的次数

是完全相等的，但要注意的是实际测量中脉冲计数器需要大于一定电平的信号才能触发计数，因此，测得的放电次数只是放电量大于一定值或在一定范围的放电次数。

(三) 放电的能量

放电能量是指在一次放电中所消耗的能量。单位用焦耳表示 (J)。

假定在气隙中发生放电时，气隙上的电压从 U_{c0} 下降到零，即 $\Delta U_c = U_{c0}$ 。则在这一次放电中消耗的能量为

$$\begin{aligned}\Delta W &= \frac{1}{2} q_r \Delta U_c = \frac{1}{2} \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \Delta U_c^2 \\ &\simeq \frac{1}{2} (C_c + C_b) \Delta U_c^2\end{aligned}\quad (1-11)$$

设当气隙上的电压达到 U_{c0} 时，施加在试样两端的电压峰值为 U_{im} (即起始放电电压的峰值)，则

$$\Delta U_c = U_{c0} = U_{im} \frac{C_b}{C_c + C_b} \quad (1-12)$$

将上式代入式 (1-11) 得

$$\Delta W \simeq \frac{1}{2} U_{im} C_b \Delta U_c = \frac{1}{2} U_{im} q_a \quad (1-13)$$

式中 $q_a = C_b \Delta U_c$ ——视在放电电荷。

上式表明放电能量为视在放电电荷与起始放电电压 (峰值) 乘积的一半。同时也是实际放电电荷和气隙的击穿电压乘积的一半。

(四) 放电的平均电流

平均电流是指在一定时间间隔 T 内视在放电电荷绝对值的总和除以时间间隔 T 。

$$I = \frac{1}{T} [|q_{a1}| + |q_{a2}| + \cdots + |q_{am}|] \quad (1-14)$$

当 q_0 为 C、 T 为 s 时，放电的平均电流 I 为安培。

(五) 放电的均方率

均方率是指在一定时间间隔 T 内视在放电电荷的平方之和除以时间间隔 T 。

$$D = \frac{1}{T} [q_{01}^2 + q_{02}^2 + \cdots + q_{0n}^2] \quad (1-15)$$

当 q_0 为 C、 T 为 s 时，均方率的单位为 C^2/s 。

(六) 放电功率

放电功率是指局部放电时，从试样两端输入的功率，也就是在一定时间内视在放电电荷与相应的试样两端电压的瞬时值 u 之乘积，除以时间间隔 T 。

$$P = \frac{1}{T} [q_{01}u_1 + q_{02}u_2 + \cdots + q_{0n}u_n] \quad (1-16)$$

当 q_0 为 C、 u 为 V 时，放电功率单位为 W。

(七) 局部放电起始电压 U_i

局部放电起始电压是指试样产生局部放电时，在试样两端施加的电压值。在交流电压下用有效值（伏）表示。

在实际测量中，施加电压必须从低于起始放电的电压开始，按一定速度上升。同时，为了能在灵敏度不同的测试装置上所测的起始电压进行比较，一般是以视在放电电荷超过某一规定值时的最小电压值为起始放电电压。

(八) 放电的熄灭电压 U_e

放电熄灭电压是指试样中局部放电消失时试样两端的电压值。在交流电压下是以有效值（伏）来表示。

在实际测量中电压应从稍高于起始放电电压值开始下降。为了能在不同灵敏度的测试装置上测得的放电熄灭电压进行比较，一般是以视在放电电荷低于某一规定值时的最高