

[苏]Г.С.库钦斯基著

高压电气设备 局部放电



徐永禧 胡维新译

水利电力出版社

内 容 简 介

本书全面系统地论述了高压电气设备局部放电的基本理论和测量方法, 具体分析了电力电容器、电缆、变压器、互感器、套管和旋转电机等绝缘中局部放电的机理和在工频、冲击、直流电压作用下的局部放电特性, 介绍了测量各种电气设备局部放电的接线和仪器设备以及苏联、英国、法国有关局部放电测量方法、程序等的有关规定。此外, 对电气设备许用工作场强的选择方法和相应的经验公式等也作了介绍。

本书可供从事电气设备的设计、制造、运行和试验的工程技术人员阅读, 也可供大专院校师生参考。

Г. С. Кучинский

Частичные разряды в высоковольтных конструкциях

«Энергия» 1979 Ленинград

高压电气设备局部放电

〔苏〕Г.С.库钦斯基著

徐永禧 胡维新译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 7.625印张 200千字

1984年6月第一版 1984年6月北京第一次印刷

印数 00001—11530册 定价 1.20元

书号 15143·5366

译 者 序

本书是苏联第一本系统论述局部放电的专著。书中系统论述了高压电气设备局部放电的基本理论和测量方法，并介绍了有关计算公式和实测数据，电气设备许用工作场强的选择方法和相应的经验公式，及估计各种绝缘使用寿命的方法。书中具体分析了电力电容器、电缆、变压器、互感器、套管和旋转电机绝缘中局部放电的机理和在工频、冲击及直流电压作用下局部放电的特性，还介绍了苏联及欧洲一些国家有关局部放电测量方法及程序等的一些规定。此外，对苏联及欧美的一些局部放电测量装置也作了简要介绍。近年，系统论述局部放电的专著出版不多。本书作者长期教授高电压绝缘专业课，同时进行了试验研究工作，书中包括作者在工作中积累的材料，并引用了不少欧美等国的资料。本书的特点是：（1）内容比较全面和系统。当前有关局部放电的文章甚多，其观点和试验结果不尽一致，国际上认为局部放电在理论上尚未完全成熟。本书作为一家之见，兼收他家的观点，自成系统全面论述，材料组织得比较有系统；（2）理论分析、计算公式和实测数据都比较多；（3）内容比较切合实际。在论述局部放电的各种实际问题时，按各种高压设备分别介绍，这样既考虑了绝缘材料的性质，又考虑了绝缘的结构，使理论与实际能更好地结合。

当前我国对高压电气设备局部放电的理论研究和实际测量工作正在积极进行，我们希望这本书的翻译出版对我国开展的这项工作有所裨益。本书适宜于从事电气设备的设计、制造、运行和试验的工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。书中的前言和第一、二、三、九章由徐永禧译，第四、五、六、七、八章由胡维新译。各章译文都经译者共同研究校核，并取得一致意见。译者水平有限，译文中不当之处，请读者批评指正。

前 言

局部放电是在高电场强度作用下，在绝缘体内电气强度较低的部位发生的。它可以表现为绝缘内气体掺入物的击穿、小范围内固体或液体介质的局部击穿或固体介质局部的沿面放电等。产生局部放电的条件取决于绝缘装置中的电场分布及绝缘的电气物理性能（包括电气强度）。

局部放电一般不会引起绝缘的穿透性击穿，但是可以导致电介质（特别是有机电介质）的局部损坏。若局部放电长期存在，则在一定条件下可能造成绝缘装置电气强度的破坏。

发生局部放电说明电介质在局部地点不够均匀。因此记录局部放电的特性，就可能评价各种绝缘装置的制造质量，并能揭示其局部缺陷。这些局部缺陷，实际上不可能用普通高压试验或测量绝缘的某种典型特性（如介质损失角正切、绝缘电阻等）来确定的。

局部放电的特性一般可与缺陷的大小很好地相互印证。即根据局部放电特性可以确定绝缘装置中缺陷的严重程度。在某些情况下，绝缘的质量可以按某一种最能说明问题的特性来判断，而对于不同的绝缘装置，这些特性可能各不相同。在多数情况下，综合测量各种局部放电特性就可能较客观地评价产品的质量。

高压电气设备的绝缘在运行中长时期（整个使用期）承受工频电压的作用，并且多次承受内过电压及大气过电压的作用。内过电压发生在切合电网元件或电气装置时，也在事故或非正常运行方式时产生。当雷电击中电网元件或落在其附近时，在与架空输电线相连的装置中将发生雷电过电压。同时，绝缘还要承受温度、机械及振动等作用，经常还可能受潮，使绝缘的电气性能和机械性能恶化。

当绝缘的电气强度不够时，短时间的过电压就可能使绝缘当

场击穿或闪络。

长时间工频电压及多次过电压的作用与温度、机械及潮湿的作用结合在一起,会使绝缘的电气强度由于老化(包括局部放电作用下的绝缘损坏)而降低,继之绝缘就完全破坏。

高压电气设备的绝缘若遵循以下条件,则安全运行就会有保障:

- 1.绝缘应能以实际需要的可靠性耐受运行中可能遇到的过电压。确定过电压水平时要考虑现有的过电压保护措施、过电压及绝缘电气强度的统计特性以及在过电压作用下与绝缘局部损伤有关的积累过程等因素。

- 2.绝缘应能以实际需要的可靠性耐受长时期(整个使用期)作用的工作电压,并考虑工作电压在允许范围内可能发生的变动。

过电压下的电场强度许用值,在很多情况下取决于绝缘短时间的电气强度。但在不少情况下(特别是过电压持续百分之几秒及以上时)许用电场强度可能取决于绝缘在过电压下不发生局部损坏这一要求,其数值由局部放电特性决定。对于许多类型的绝缘装置,其许用工作场强都取决于绝缘的局部放电特性。

因此研究这些局部放电特性,对于在交流、直流、脉动及冲击电压下工作的电缆、电容器、电流互感器及引线套管等,就具有头等重要的意义。

研究工作还表明,这一问题对于电力变压器,尤其是最高电压级的变压器绝缘更是异常重要。

旋转电机绝缘中的局部放电过程也同样重要,虽然此时允许的工作电场强度并不直接由局部放电特性决定。

在对绝缘结构进行监督及预防性试验时,也需要测量局部放电特性。

由于局部放电特性对于保障绝缘结构的安全运行如此重要,国际电工委员会因此制定了有关测量绝缘局部放电问题的推荐文件^[59]。在苏联制定了测量局部放电特性的国家标准^[14]。在经互会国家中也有类似的文件(有关标准化的推荐文件)。

目前在苏联尚无综述高压电气设备中绝缘局部放电的原理及其基本试验数据的书籍。

在文献[7]中叙述了一些个别的问题。在文献[40]中研究的绝缘局部放电测量方法仅适用于运行中的设备。

文献[3,25]研究聚合电介质及无机电介质电气老化的规律,但未分析电力工业中应用最广、含有液体介质的复合绝缘的老化过程,也未研究各种具体设备(电容器、电缆、电器、变压器及电机等)的绝缘老化过程。这两部著作阐述局部放电的理论不够完整,也未研究局部放电基本特性的测量方法。

有关局部放电及其测量方法的最系统的资料是在弗·克莱格尔的《高电压设备中的放电记录》一书中(伦敦,1964年)^[52]。但此书出版至今已有15年,现在有必要系统地整理最近一时期发表的大量新的著作。有大量专家在研究各种绝缘装置的局部放电特性,研究如何利用这些特性估计绝缘质量,预测使用年限及选择许用工作场强等。因此需要有一本专著,能系统地综述有关局部放电特性及其记录方法,以及实际应用其测量结果等问题,以保障绝缘装置能在工作电压的长期作用下安全运行。

本书系作者进行编写本国专著的第一次尝试。它系统地阐述有关高压电气设备绝缘局部放电特性的研究以及其基本规律的实际应用等问题。

本书介绍绝缘局部放电的理论,研究必须测量的局部放电基本特性,阐述测量局部放电特性的方法、对测量装置的基本要求以及测量装置的性能等。本书还研究局部放电在电力电容器、电缆、电力变压器、高压电器及电机等各种高压设备绝缘中发展的特点。以局部放电特性为基础,研究各种高压电气设备中导致电气强度降低及其它特性恶化的电气老化过程。提出了根据局部放电特性选择许用工作场强及试验场强的建议。分析了测量各种绝缘装置局部放电特性的特点。

本书还介绍了在苏联国内外制成的测量局部放电特性的专用设备。

目 录

译者序

前 言

第一章	局部放电发展的物理基础	1
1-1	局部放电的概念	1
1-2	局部放电的基本特性	4
1-3	交流电压下的局部放电	11
1-4	局部放电存在时的介质损失	18
1-5	局部放电强度与介质厚度的关系	19
1-6	直流电压下的局部放电	24
1-7	冲击电压下的局部放电	31
第二章	局部放电特性的测量	36
2-1	测量局部放电特性的目的及其测量内容	36
2-2	局部放电特性的测量方法及测量回路	37
2-3	对局部放电特性测量装置的要求	44
2-4	局部放电特性测量装置中元件需有的特性	45
2-5	测量局部放电功率的电路	52
2-6	局部放电特性测量装置的校验及标定	54
2-7	记录电路的极限灵敏度及其与试件电容值的关系	62
2-8	利用无线电干扰测量仪测量局部放电强度	65
2-9	关于干扰水平及局部放电特性测量方法的总的意见	70
第三章	绝缘在局部放电作用下的电气老化	73
3-1	绝缘受局部放电破坏的基本过程	73
3-2	对绝缘材料破坏有决定意义的局部放电特性	79
3-3	绝缘材料破坏的能量特性	80
3-4	温度对绝缘电气老化的影响	81
3-5	老化过程中电气强度的变化	82
3-6	局部放电作用下绝缘老化的统计规律	90
3-7	许用场强的确定	95

第四章	电力电容器绝缘中的局部放电	98
4-1	电容器绝缘中局部放电发展的特点	98
4-2	局部放电场强与介质厚度的关系	106
4-3	各种因素对局部放电特性的影响	107
4-4	电容器绝缘电气老化的特点及其寿命与场强的关系	115
4-5	许用工作场强的选择	120
4-6	测量电容器绝缘中局部放电特性的特点	122
第五章	电缆绝缘中的局部放电	126
5-1	电缆绝缘中局部放电的特点	126
5-2	粘性浸渍电缆中的局部放电	130
5-3	充油电缆中的局部放电	131
5-4	塑料绝缘电缆中的局部放电	134
5-5	电缆绝缘的电气强度与电压作用时间的关系	138
5-6	许用工作场强的选择	141
5-7	电缆局部放电特性测量的一些特点	142
第六章	电力变压器中的局部放电	153
6-1	变压器中局部放电的基本类型	153
6-2	局部放电特性与场强的关系	158
6-3	冲击电压下油-屏障绝缘中的局部放电	169
6-4	局部放电对油-屏障绝缘的损坏	172
6-5	油-屏障绝缘的长时间强度和许用场强	176
6-6	电力变压器局部放电特性测量的特点	178
第七章	高压电器油纸绝缘中的局部放电	191
7-1	高压电器中油纸绝缘结构的特点	191
7-2	交流电压下的局部放电	192
7-3	局部放电场强与绝缘厚度的关系	194
7-4	湿度对电器油纸绝缘中局部放电的影响	195
7-5	冲击电压下的局部放电	196
7-6	直流电压和脉动电压下的局部放电	198
7-7	许用径向场强的选择	202
7-8	测量电器绝缘中局部放电特性的特点	204
第八章	电机绝缘中的局部放电	206

8-1	电机绝缘中局部放电的特点	206
8-2	电机绝缘中产生局部放电的条件	206
8-3	在长时间电压作用下局部放电特性的测量	210
8-4	测量电机绝缘中局部放电特性的特点	215
第九章	局部放电特性的测量装置	216
9-1	测量装置的种类	216
9-2	全苏列宁电工研究院研制的装置	217
9-3	《电晕》型装置	219
9-4	TuR公司的测量装置MUT-8	222
9-5	FCR公司的ERA III型测量装置	226
9-6	HIPOTRONICS 公司的装置	227
9-7	列宁格勒加里宁工学院研制的局部放电自动记录装置	228
参考文献		232

第一章

局部放电发展的物理基础

1-1 局部放电的概念

绝缘中的局部放电概念，一般包含以电晕形式出现的绝缘表面或绝缘内部的局部放电，滑闪放电或在不同电位电极间的绝缘中有个别部位击穿造成部分短路等内容。

绝缘中的局部放电发生在电气强度降低的地点（例如，液体浸渍绝缘的夹层或厚层电介质中的气泡）。以下将电气强度较低、并发生局部放电的介质元件称为“掺入物”。

研究局部放电时介质电容 C_x 的等效电路可以用三个电容表示(图1-1)： C_e ——发生局部放电的介质元件的电容（即掺入物电容）； C_d ——与掺入物电容串联的介质元件的电容； C_a ——电介质（不带掺入物）其它部分的电容。此时，

$$C_x = C_a + \frac{C_e C_d}{C_e + C_d} \quad (1-1)$$

当掺入物上的电压达到击穿值 $U_{e,}$ 时即发生局部放电。 $U_{e,}$ 代表掺入物的局部放电引燃电压（或称局部放电燃弧电压）。

这样，如掺入物具有夹层的形状，并且与电场的电力线垂直时，则掺入物中的场强 E_e 与介质其它部分的场强的关系为：

$$E_e/E_d = \varepsilon_d/\varepsilon_e \quad (1-2)$$

式中 ε_e ——掺入物的介电常数； ε_d ——电介质的介电常数。

当掺入物为气泡时，则在气泡中的场强将超过介质中的场强，其原因是 $\varepsilon_d > \varepsilon_e$ ，所以 $E_e > E_d$ 。

掺入物中的场强与平均场强之间的关系取决于介质厚度与掺

入物厚度之比。若引入以下符号： d_δ ——与掺入物串联的电介质厚度（图 1-1）； d_ϵ ——掺入物厚度； U ——试件电极间的电压，则由图1-1的等效电路可得下式：

$$\begin{aligned} E_\epsilon &= \frac{UC_\delta}{d_\epsilon(C_\delta+C_\epsilon)} = \frac{U\epsilon_\delta/d_\delta}{d_\epsilon\left(\frac{\epsilon_\delta}{d_\delta}+\frac{\epsilon_\epsilon}{d_\epsilon}\right)} \\ &= \frac{U\epsilon_\delta}{\epsilon_\epsilon d_\delta + \epsilon_\delta d_\epsilon} \end{aligned} \tag{1-3}$$

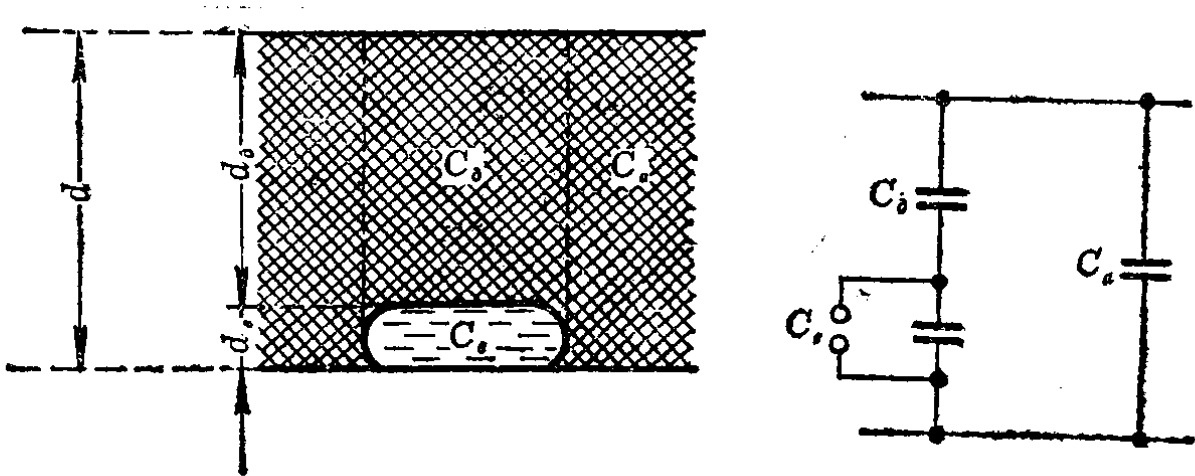


图 1-1 研究电介质中局部放电的等效电路
 C_ϵ —电介质中发生局部放电部分的电容（掺入物电容）， C_δ —电介质中与掺入物串联部分的电容， C_0 —电介质其它部分的电容

而且 E_ϵ 与平均场强 $E_{cp}=U/(d_\delta+d_\epsilon)$ 之比等于：

$$\frac{E_\epsilon}{E_{cp}} = \frac{1+d_\epsilon/d_\delta}{(\epsilon_\epsilon/\epsilon_\delta) + (d_\epsilon/d_\delta)} \tag{1-4}$$

因此，比值 E_ϵ/E_{cp} 与比值 d_ϵ/d_δ 有关。若 $d_\epsilon/d_\delta \ll 1$ ，则 $E_\epsilon/E_{cp} = \epsilon_\delta/\epsilon_\epsilon$ 。

对于球形或椭球形掺入物

$$E_\epsilon/E_\delta = 3\epsilon_\delta/(\epsilon_\epsilon + 2\epsilon_\delta) \tag{1-5}$$

气体掺入物的电气强度与金属电极间气体的电气强度无甚差别。若掺入物中的电场是均匀的（与电力线垂直的平面形掺入物，或球形掺入物），则击穿电压与掺入物的尺寸（厚度）及掺入物中的气压（遵循巴申定律）有关。图1-2表示掺入物为空气及氢气时，其击穿电压 U_{np} 与气体压力 p 及掺入物厚度 d_ϵ 的关

系。当掺入物的尺寸为几十微米及压力接近大气压时，击穿电压接近巴申曲线的最低点，并且受掺入物尺寸变化的影响很小，其值约为250~300伏。

当掺入物为液态层状电介质时，上述（1-2）至（1-5）关系式对确定掺入物中的场强仍有效。液体电介质的击穿场强也随掺入物的厚度减小而显著增大。图1-3作为一个实例，介绍矿物绝缘油的击穿场强与间隙距离 d_n 的关系。

在掺入物（电容 C_e ）击穿时，放电过程中产生的离子使掺入物表面充电并产生电场，其方向与基本电场的方向相反。当掺入物的电容 C_e 放电后，一般不再发生维持稳定放电所需的很大的电流密度，于是放电即告结束。在掺入物表面形成的半导体层，由于掺入物电容比较小，也不能维持放电。掺入物被击穿时，其电压并不降到零值，只降低到放电停止的固定数值 $U_{e.n}$ 。对于厚度为10~100微米的气体掺入物或油层，其熄弧电压 $U_{e.n}$ 小于相应的击穿电压 $U_{e.s}$ ，两者的关系为

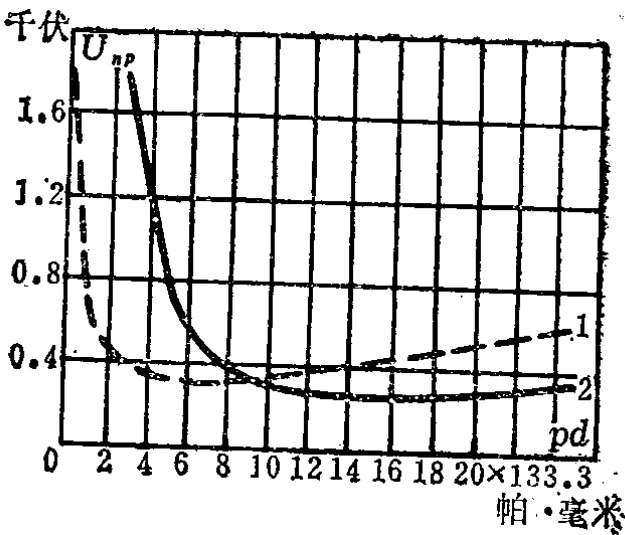


图 1-2 在均匀电场中气体的击穿电压与气压及极间距离的关系
曲线1—空气；曲线2—氢气

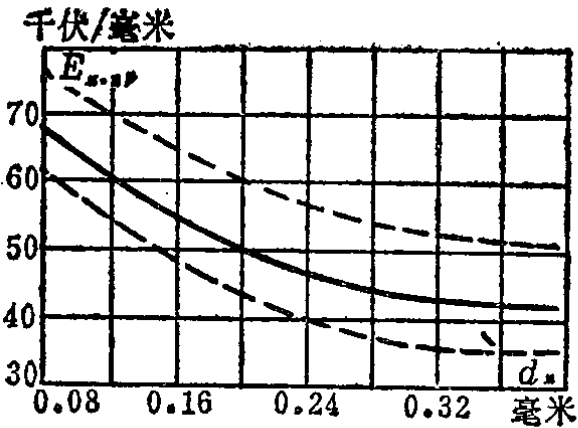


图 1-3 油夹层的击穿场强与厚度的关系。间隙两侧为电极，其间为均匀电场，虚线表示击穿场强的分散范围

$$U_{e.n} \approx (0.1 \sim 0.9) U_{e.s} \tag{1-6}$$

将物体发生局部放电的电压简称为局部放电电压 $U_{u.p}$ ，由图1-1中的等效电路可推导出 $U_{u.p}$ 与 $U_{e.s}$ 之间的关系：

$$U_{u.p} = U_{e.s} \frac{C_d + C_e}{C_d} \quad (1-7)$$

掺入物击穿过程的持续时间（局部放电持续时间）多数是很短的——为 $(3 \sim 10) \times 10^{-9}$ 秒。仅在强烈的临界局部放电（本身是多分枝的滑闪放电）或厚层（厚度1厘米及以上）液体介质击穿时，局部放电持续时间才可能大一些（达 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 秒）。

1-2 局部放电的基本特性

每一次局部放电都伴有一定数量的电荷 q 通过掺入物，并使试件外部电极上的电压变化 ΔU_x 。

若 $C_a \gg C_e$ 及 $C_a \gg C_d$ ，则在局部放电瞬间通过掺入物的电荷 q 等于：

$$q = (C_e + C_d)(U_{e.s} - U_{e.n}) = (C_e + C_d) \Delta U_e \quad (1-8)$$

实际上，电荷 q 不能直接测量，原因是 q 的流通与试件介质内部的过程有关。

可以认为，在发生局部放电的瞬间，试件电极上的电荷值不变，原因是试件的电容与电路中的其它电容被连接导线（汇流线）的电感所隔开。因此电压变化 ΔU_x 是由于试件发生局部放电使其电容增大而产生的（图1-1的等效回路中电容 C_e 被短路）。

但是为了以后便于讨论，可以设想试件上发生电压变化不是由于电容 C_x 变化，而是由于 C_x 的电极上的电荷 $q_{u.p}$ 发生虚拟的变化，并且 $\Delta U_x = q_{u.p} / C_x$ 。

$q_{u.p}$ 称为局部放电的视在电荷。因此，局部放电的视在电荷的含意是这样的，一旦将其瞬时引入被试对象的引线之间，就能象实际局部放电一样引起引线之间的电压变化。^[14.59] 视在电荷的计量单位为库。

为了确定 $q_{u.p}$ 及 q 之间的关系，应注意以下事实：当发生局

部放电而且电容 C_e 上的电压减少 $\Delta U_e = U_{e.s} - U_{e.n}$ 时,有一些电荷脱离电容 C_e ,并对电容 C_d 充电,使试件上的电压减少 ΔU_x 。这些电荷与局部放电的视在电荷相等。再利用式(1-8)即可得

$$q_{u.p} = \Delta U_x C_x = \Delta U_e C_d = q \frac{C_d}{C_d + C_e} \quad (1-9)$$

不难证明,式(1-9)在 C_a 、 C_e 及 C_d 之间的关系为任意值时都成立。

应该指出,试件上的电压变化十分微小。例如, $q_{u.p} = 10^{-12}$ 库(此电荷应该记录)及 $C_x = 1000$ 微微法时 $\Delta U_x = 10^{-3}$ 伏。电容大时 ΔU_x 可能更小。还由于施加的电压可能达几百千伏,所以直接测量 ΔU_x 十分困难。

若掺入物具有夹层形状,并且与电力线垂直,则将 C_d 及 C_e 换算成掺入物表面单位面积的电容比较方便。此时式(1-9)可表达如下:

$$\begin{aligned} q_{u.p} &= q \frac{\frac{\varepsilon_d}{d-d_e}}{\frac{\varepsilon_d}{d-d_e} + \frac{\varepsilon_e}{d_e}} \\ &= \frac{q}{1 + \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_d} \left(\frac{d}{d_e} - 1 \right)} \end{aligned} \quad (1-10)$$

由式(1-10)可见,当穿过掺入物的电荷 q 为一定值及掺入物的厚度 d_e 不变时,局部放电的视在电荷随介质厚度 d 增加而减小。

由于来自电源和连接试件的回路中其它电容的电荷流至试件,使其端电压恢复,因此在电路发生高频振荡。用专门测量装置记录这些振荡后就可以研究绝缘中局部放电的特性。

在研究局部放电对介质表面的腐蚀过程中,通过掺入物单位面积的电荷有重要意义。现以垂直于电力线的夹层形掺入物为例。若参与局部放电的掺入物表面积为 S_e ,则根据式(1-8),通过掺入物表面单位面积的电荷率为

$$q_{y\partial} = \frac{q}{S_s} = \left(\frac{\varepsilon_s}{d_s} + \frac{\varepsilon_\partial}{d-d_s} \right) \Delta U_s \quad (1-11)$$

在文献[3]中已表明,若 $U_{s,n} \ll U_{s,s}$,并考虑到式(1-7)及(1-8),则可得

$$\begin{aligned} q &= (C_s + C_\partial)(U_{s,s} - U_{s,n}) \approx (C_s + C_\partial)U_{s,s} \\ &= C_\partial U_{u,p} = S_s \frac{\varepsilon_\partial}{d-d_s} U_{u,p} \end{aligned} \quad (1-12)$$

而当 $d_s \ll d$ 时,根据式(1-12)

$$q_{y\partial} = \varepsilon_\partial \frac{U_{u,p}}{d} = \varepsilon_\partial E_{u,p} \quad (1-13)$$

式中 $E_{u,p} = U_{u,p}/d$ ——发生局部放电的场强或简称局部放电场强。

每发生一次局部放电就在试件介质中释放能量 $W_{u,p}$ 。此能量的一部分消耗于试件的发热,另一部分使试件的介质破坏。若电容 $C_s \gg C_\partial$ (在绝大多数情况下此式成立),则单个局部放电的能量可以根据等效电路中各电容在初始与结束时储蓄的能量之差确定:

$$W_{u,p} = W_\kappa - W_\kappa = \frac{C_\partial + C_s}{2} (U_{s,s}^2 - U_{s,n}^2) \quad (1-14)$$

若 $U_{s,s} \approx U_{s,n}$,则考虑到式(1-8)①,可得

$$W_{u,p} = \frac{C_\partial + C_s}{2} (U_{s,s} + U_{s,n}) \Delta U_s \approx q U_{s,s} \quad (1-15)$$

利用式(1-8)与(1-9)可得

$$W_{u,p} = q_{u,p} U_{u,p} \quad (1-16)$$

若 $U_{s,n} \ll U_{s,s}$,则根据式(1-14)可得

$$W_{u,p} = q U_{s,s} / 2 = q_{u,p} U_{u,p} / 2 \quad (1-17)$$

除了应用能定量地确定单个局部放电强度的特性外,还应用能确定一段时间内(大于两次局部放电的时间间隔)局部放电的累计数量特性。这些局部放电的累计数量特性是:重复频率

① 原书为式(1-7),实际似应为式(1-8)。——译者注

$n_{u.p}$ ，平均电流 $I_{u.p}$ ，平均功率 $P_{u.p}$ 及乘方参数 $D_{u.p}$ [14, 59]。

重复频率 $n_{u.p}$ 为单位时间（秒）内局部放电脉冲的平均数。实际上可由上文规定的视在电荷计算局部放电次数，或按一定时间内的视在电荷计算。

平均电流 $I_{u.p}$ 为 1 秒钟内所通过的视在电荷绝对值总和，单位为库/秒，用字母 A 表示。若测量出时间间隔 t_1 内的各电荷总数，则

$$I_{u.p} = \frac{1}{t_1} (|q_{u.p1}| + |q_{u.p2}| + \cdots + |q_{u.pm}|) \quad (1-18)$$

若各电荷具有同一的值 $|q_{u.p}|$ ，则

$$I_{u.p} = n_{u.p} q_{u.p} \quad (1-19)$$

若各电荷值差别很大，则建议按以下公式计算平均电流 [14]：

$$I_{u.p} = \sum_{i=0}^k \frac{|q_{u.p(i+1)}| + |q_{u.p i}|}{2} (n_{i+1} - n_i) \quad (1-20)$$

式中 $q_{u.p i}$ ——第 i 级的视在电荷；

n_i ——视在电荷超过 i 级的局部放电重复频率（ $i = 0$ 与重复频率 $n = 0$ 相对应）。

依式（1-20）确定平均电流 $I_{u.p}$ 时，建议选用视在电荷的级数 k 不小于 4（其初始级应与 $i = 0$ 相对应），在调整各级时，每级不超过 20 分贝。

平均功率 $P_{u.p}$ 为引至试件端子的功率，用以补偿时间间隔 t_1 内由于局部放电在试件中释放的功率：

$$P_{u.p} = \frac{1}{t_1} (q_{u.p1} u_1 + q_{u.p2} u_2 + \cdots + q_{u.pm} u_m) \quad (1-21)$$

式中 $u_1, u_2, \cdots, u_m$ ——试件在放电时的瞬时电压值。

若局部放电基本上在所施电压的幅值附近发生，则 $P_{u.p}$ 可近似地按下式计算：

$$P_{u.p} = I_{u.p} U_m \quad (1-22)$$

由于引至试件端子的功率 $P_{u.p}$ 应等于试件因局部放电所释放的功率，则当各次放电的能量相同并等于 $W_{u.p}$ 时，功率 $P_{u.p}$ 可按下式计算：

$$P_{u,p} = n_{u,p} W_{u,p} \quad (1-23)$$

若各次放电的电荷在数值上差别很大, 则

$$P_{u,p} = \sum_{i=0}^k \frac{W_{u,p(i+1)} + W_{u,p i}}{2} (n_{i+1} - n_i) \quad (1-24)$$

式中 $W_{u,p i}$ —— i 级的能量; n_i ——能量超过 i 级的局部放电重复频率 ($i=0$ 与重复频率 $n=0$ 相对应)。

乘方参数 $D_{u,p}$ 等于 1 秒钟内局部放电引起的经过试件端子的电荷平方和。若测量时间间隔 t_1 内的电荷平方和, 则有

$$D_{u,p} = \frac{1}{t_1} (q_{u,p 1}^2 + q_{u,p 2}^2 + \cdots + q_{u,p m}^2) \quad (1-25)$$

若各次放电的电荷相等, 皆为 $|q_{u,p}|$, 则

$$D_{u,p} = n_{u,p} q_{u,p}^2 \quad (1-26)$$

若各次放电的电荷值 $|q_{u,p}|$ 差别很大, 则

$$D_{u,p} = \sum_{i=0}^k \frac{q_{u,p(i+1)}^2 + q_{u,p i}^2}{2} (n_{i+1} - n_i) \quad (1-27)$$

式中 $q_{u,p i}^2$ —— i 级放电的电荷平方; n_i ——能量超过 i 级的重复频率 ($i=0$ 与重复频率 $n=0$ 相对应)。

用光电转换器 (ЭОП) 研究气体夹层中的局部放电^[3]表明, 很多情况下由局部放电测量装置记录的每一个脉冲里包含几次微型放电。微型放电的时间间隔约 3×10^{-8} 秒, 并且每一个微型放电又表现为在时间和空间上都不连续的火花通道[参阅图1-4(a)]。

局部放电的照片图与夹层中气体的压力 p , 夹层厚度 d_s , 介质种类及气体种类等关系很大。当 pd_s 值小于某一临界值 $(pd_s)_{kp}$ 时, 局部放电发展为一系列微型放电[图1-4(a)], 而当 $pd_s > (pd_s)_{kp}$ 时, 局部放电表现为一个比较强烈的放电[图1-4(b)]。若在瞬时阳极处设置固体聚合物介质, 而在阴极处设置玻璃, 则各单个微型放电的通道具有圆锥体形状, 并且在阴极附近有一个弱辉光段, 在阳极附近有一个强辉光段。当阴极用聚合物覆盖而阳极是金属时, 放电的形式是一个火花通道[图1-4(b)]。有些情况下可看到伴随有介质沿面放电形式的微型放电。