

电力设备局部放电 检测技术及应用

王科 彭晶 陈宇民 谭向宇 等编著

非
外
借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力设备局部放电 检测技术及应用

王 科 彭 晶 陈宇民 谭向宇
张 斌 钱国超 周徐 荣 邹德旭
程 志 刘 红 文 肖 伟 项恩新
彭 非 马 书 明 光 棋 冰
彭 庆 郭 晨 璿 何 顺 杨明昆
李 昊 李 振 超 侯 亚 非 金 皓
翟 兵 钟 剑 明

编著

机械工业出版社

本书以电力设备局部放电检测技术及应用为主线,全面系统地阐述了局部放电检测技术与局放仪测评技术两方面的内容,并结合工程实际详细介绍了典型电力设备局部放电检测应用和局放仪测评实例。全书共5章。第1章绪论对局部放电检测技术和局放仪测评技术的发展进行了概述;第2章阐述了四种典型局部放电的产生机理与局部放电的危害;第3章对五种局部放电检测原理与谱图进行了介绍并给出了检测应用实例;第4章介绍了当前几种主流的局放仪;第5章详细介绍了局放仪的功能检查、缺陷测评和平台测评三个方面测评技术和测评应用实例。

本书可供电力工程以及电气自动化等专业的工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力设备局部放电检测技术及应用/王科等编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-111-57509-2

I. ①电… II. ①王… III. ①电力设备—局部放电试验 IV. ①TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第177950号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:闫洪庆

责任校对:王延 封面设计:路恩中

责任印制:常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2017年11月第1版第1次印刷

145mm×210mm·5印张·141千字

标准书号:ISBN 978-7-111-57509-2

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

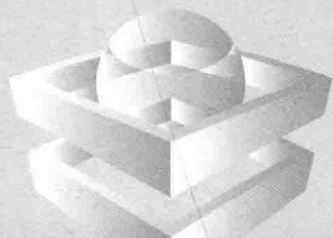
机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

自序

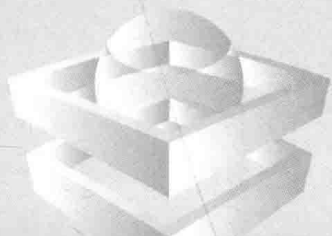


局部放电是指导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电，这种放电可以在导体附近发生也可以不在导体附近发生。绝缘介质中局部放电现象的研究已经有了近 80 年的历史，Г. С. 库钦斯基著的《高压电气设备局部放电》（1984 版）是国内引入的首部有关局部放电方面的著作。同时期，参照采用 IEC 270《局部放电测量》的 GB/T 7354—1987（侧重脉冲电流法）发布。邱昌容、王乃庆主编的《电工设备局部放电及其测试技术》（1994 版），总结了国内电力设备局部放电测试方面的经验。进入 21 世纪，随着电力工业的加速发展，有关局部放电的研究更加深入，同时期等同采用 IEC 60270: 2000《局部放电测量》的 GB/T 7354—2003 发布，较前版增加了脉冲重复率 N 、局放脉冲相角 ϕ_1 、校准器及检定、校准器性能校核附录等。对应的行业标准 DL/T 846. 4—2004（针对脉冲电流法技术条件）也同期发布。2010 年以后，针对局部放电的瞬时电磁场及声音的非传统测试法有了长足的进展，并以 IEC 62478（草案）的快速推进为代表。此类方法在行业标准上也体现出了逐步成熟状态：如 DL/T 1416—2015（针对超声波法技术条件）、DL/T 846. 10—2016（针对暂态对地电压法技术条件）、DL/T 846. 11—2016（针对特高频法技术条件）；以及各型局放测量法的针对性应用标准，如 DL/T 1250—2013（超声法在 GIS 上的带电应用）、DL/T 1534—2016（油变的特高频检测法）；而针对各型局放测量法的校准或测评标准，除 DL/T 356—2010（针对脉冲电流法校准）之外，超声法、暂态对地电压法、特高频法的测评已是近期的一个研究热点。

《电力设备局部放电检测技术及应用》一书仍然从实用角度出发，结合近期的研究热点和应用重点，以瞬时电磁场及声音的非传统测试法介绍为主，并侧重在不同局放检测方法的测评技术介绍上。在局部放电类型上，增加了对实际检测应用中较多出现的悬浮电位放电的机理介绍。在局放检测上，以现在应用较多、较为成熟、判定信息更丰富的 $n-q-\varphi$ 谱图介绍为主，并对现在应用很广的暂态对地电压和非接触超声、电缆振荡波局放进行了简介。针对当前各型主流的局放仪，如 PDCheck、OWTS M28、PDMG - P、AIA 系列、UltraTEV Plus、PDS - T90 等，进行了功能和技术参数简介。在局放仪的测评上，分初级的功能检查器、实体的缺陷布置测试以及现在发展更广的平台测评三类，进行了较为详细的介绍，从中可以看到功能检查器从简单到复杂、实体缺陷评价不全、平台测评由单一到多维至统一型的发展历程。全书还精选了一些典型测试案例，配合技术介绍，丰富了整篇内容，增加了可读性和易懂性，对于相关专业技术人员有积极的参考借鉴意义。

编著者

前言



随着我国智能电网建设规模的迅速扩大，对电力系统运行的安全性和可靠性提出了更高的要求。电力设备的绝缘劣化对电力系统的安全可靠运行带来隐患。局部放电是电力设备绝缘劣化重要征兆。对局部放电进行检测能够及时有效地发现电力设备绝缘的固有缺陷和因长期运行老化导致的隐患，能够判断绝缘劣化的程度，避免发生突发性绝缘故障，对电力设备的安全可靠运行具有十分重要的意义。

本书以电力设备局部放电检测技术与应用为主线，融系统性、理论性、实用性于一体，通过对现行的局部放电检测标准和局放仪校准标准进行系统的梳理和分析，对当前国内外最新局放检测技术与局放仪测评技术进行深入的研究，结合工程实例对局部放电检测技术与局放仪测评技术两部分展开叙述。

电气设备主绝缘结构主要由带电导体金属部分和不导电绝缘材料部分组成，电极放电形式中的极不均匀场结构能引起局部放电。因此，电气设备当中常见局部放电形式主要有气泡（气隙）型、交界面型（电极和绝缘材料交界面）、毛刺（尖刺）型、大曲率半径型（悬浮电位）四种类型。在实际生产和研究当中，人们为了更好地区分放电类型，将局部放电分为内部气隙放电、沿面放电、电晕放电、悬浮放电四种类型。本书第2章详细解释了四种放电类型的放电机理，并结合实际说明了局部放电对电力设备带来的危害。

局部放电发生时，总会伴随着光、电、热、化学以及磁效应的变化，而这些物理或化学的变化特征能够很好地反映出局部放电的情况。根据这些局部放电特征发展出多种局部放电检测方法。通过局放

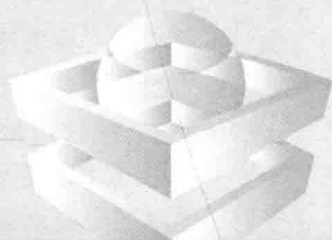
检测方法获取局部放电信号，可以获得视在放电量 (q)、放电相位 (φ)、放电频次 (n) 表征信息，从而生成多种局放谱图。目前各种局放检测方法多通过 PRPD、PRPS 等一系列图谱来进行局部放电的判断。本书第 3 章详细介绍了脉冲电流法、特高频法、超声波法、暂态对地电压法和振荡波法的局部放电检测原理、检测谱图、干扰及抑制措施。并给出了云南电科院实际工程中的局部放电检测案例。依据长期的局部放电检测工程实践，本书第 4 章选取了若干款现场应用较广、应用效果较好的局放仪进行了详细的介绍。

目前市场上的局放仪产品种类众多，价格差异明显，不同局放仪的测量原理和检测性能也存在很大的差异，为此测试评估一台局放仪的性能是否满足检测要求就很有必要。到目前为止，局放仪的测评技术主要有三种形式：功能检查，由局放仪厂商提供的功能检查装置对局放仪的可用性进行检查；缺陷测评，通过搭建局部放电缺陷环境来对局放仪进行测评；平台测评，应用测评平台或装置直接对局放仪进行测评。本书第 4 章结合北京电科院、广东电科院、浙江电科院、云南电科院和西湖电子公司等研究机构和厂商多年来进行的局放仪测评实验，详细地介绍了局放仪的功能检查、缺陷测评和平台测评三个方面的技术和测评装置，并结合工程实际详细介绍了多个局放仪测评应用实例。

本书读者既能获得实际检测与测评方法，也能以本书内容为基础更深入探索电力设备局部放电检测技术。本书在成书过程中得到西安交通大学李军浩、刘轩东等老师的技术支持，得到昆明理工大学张文斌、李天文等老师资料整理的帮助，在此表示感谢。同时需要指出的是，本书是集体智慧，详细作者名单如本书内封所列，这里就不再逐一列出所有作者的姓名和分工。

电力设备的局部放电检测技术仍在不断发展，由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正，将不胜感激。

目 录 >>



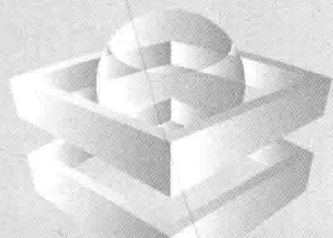
自 序

前 言

第①章 绪论	1
第②章 局部放电及危害	4
★2.1 局部放电类型	4
2.1.1 内部气隙局部放电	4
2.1.2 沿面局部放电	6
2.1.3 电晕局部放电	7
2.1.4 悬浮局部放电	8
★2.2 局部放电的危害	9
2.2.1 GIS局部放电的危害	10
2.2.2 开关柜局部放电的危害	11
2.2.3 变压器局部放电的危害	13
2.2.4 电缆局部放电的危害	15
第③章 局部放电检测方法	17
★3.1 脉冲电流法	17
3.1.1 检测原理	17
3.1.2 检测谱图	18
3.1.3 典型干扰及抑制措施	20
★3.2 特高频法	22
3.2.1 检测原理	22

3.2.2	检测谱图	23
3.2.3	典型干扰及抑制措施	25
★3.3	接触式超声波法	29
3.3.1	检测原理	29
3.3.2	检测谱图	30
3.3.3	典型干扰及抑制措施	36
★3.4	暂态对地电压法和非接触式超声法	38
3.4.1	检测原理	38
3.4.2	检测结果判断	40
3.4.3	典型干扰及抑制措施	43
★3.5	振荡波法	45
3.5.1	检测原理	45
3.5.2	定位原理	47
★3.6	应用案例	48
3.6.1	接触式超声波局部放电检测发现 GIS 支撑 绝缘子断裂	48
3.6.2	特高频局部放电检测发现 GIS 导电杆与支撑 绝缘子金属部件接触不良	51
3.6.3	暂态对地电压局部放电检测发现开关柜母排 对相间绝缘挡极放电	54
3.6.4	非接触式超声局部放电检测发现开关柜穿墙 套管电晕放电	55
3.6.5	非接触式超声局部放电检测发现开关柜 仪表室端子排松动	58
3.6.6	振荡波局部放电检测发现电缆接头受损	59
3.6.7	振荡波局部放电检测发现电缆截面不足	60
第 4 章	局部放电检测仪器	64
★4.1	PDCheck 型脉冲电流局放仪	64
4.1.1	功能概述	64
4.1.2	技术参数	67
★4.2	OWTS M28 型电缆振荡波局放仪	67

4.2.1	功能概述	67
4.2.2	技术参数	69
★4.3	PDMG-P 型特高频局放仪	70
4.3.1	功能概述	70
4.3.2	技术参数	72
★4.4	AIA-2 型接触式超声局放仪	72
4.4.1	功能概述	72
4.4.2	技术参数	74
★4.5	UltraTEV Plus 型暂态对地电压和非接触式超声局放仪	75
4.5.1	功能概述	75
4.5.2	技术参数	77
★4.6	PDS-T90 型综合局放仪	77
4.6.1	功能概述	77
4.6.2	技术参数	81
第 5 章	局部放电检测仪测评技术	82
★5.1	功能检查	82
5.1.1	特高频局放仪功能检查器	82
5.1.2	暂态对地电压和非接触式超声局放仪功能检查器	84
5.1.3	接触式超声局放仪功能检查器	85
★5.2	缺陷测评	85
5.2.1	模拟缺陷测评	85
5.2.2	典型电力设备的实体缺陷测评	89
★5.3	平台测评	113
5.3.1	特高频局放仪测评平台	113
5.3.2	暂态对地电压局放仪测评平台	120
5.3.3	非接触式超声局放仪测评平台	125
5.3.4	接触式超声局放仪测评平台	128
5.3.5	局放仪统一测评平台	133
参考文献	148



第 1 章 >

绪 论

局部放电会对电气设备的绝缘会产生不同程度的影响，严重情况下会导致绝缘介质击穿、设备故障，局部放电量水平可以表征电气设备内部的绝缘状况，故局部放电检测是发现潜在绝缘故障的有效手段。因此，对电力设备进行局部放电测试是电力设备制造和运行中的一项重要预防性试验。我国国家标准和国际电工委员会都对此提出了相应规范。局部放电检测技术即是在这个背景下快速发展起来的。

标准 GB/T 7354—2003/IEC 60270：2000 对“局部放电（局放）”定义为：导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电，这种放电可以在导体附近发生也可以不在导体附近发生。对该定义注 1 指出：局放一般是由于绝缘体内部或绝缘表面局部电场特别集中而引起的，通常这种放电表现为持续时间小于 $1\mu\text{s}$ 的脉冲。注 2 指出：“电晕”是局放的一种形式，它常发生在远离固体或液体绝缘的导体周围的气体介质中。注 3 指出：局放通常伴随着声、光、热和化学反应等现象，由此类现场引出的非电检测法，这些方法一般不适用于局放的定量测量，主要用于局放的检测或定位。

绝缘介质中局放现象的研究已经有了近 80 年的历史。基于经典的三电容等效电路模型，在对单一绝缘介质的内部放电、复合介质的表面放电以及电晕放电三种电工和电子设备中最基本的放电进行机理解释的基础上，引出了局放的视在放电电荷、放电重复率、放电能量、平均放电电流、放电功率、起始放电电压、熄灭电压等表征参数，进而给出了局放的评定方法。逐步提出了分布谱图，如 $q-N$ 谱

图(放电量)、 $W-N$ 谱图(放电能量)、 $\varphi-N$ 谱图(放电相位)、PRPD谱图(局部放电相位分布)、PRPS谱图(脉冲序列相位分布)等作为评定指标。随着局部放电检测仪器性能的提升和功能的完善,基于谱图判定的方式,在提高分析诊断能力和适应检测要求的情况下,愈发成为一种较合适的应用分析方式,也是各类仪器制造商提升设备性能的关键点。

标准 GB/T 7354—2003/IEC 60270: 2000 描述的传统局放检测法必须在停电的情况下将耦合电容与待测物连接进行检测,所以局部放电检测大都在电力设备制造厂内完成。基于耦合电容和检测阻抗接入试验回路的离线式脉冲电流法,经过技术发展不断完善的同时,侧重在线及带电的现场局放测试的高频电测法(3MHz~3GHz),诸如电容、电感(罗戈夫斯基线圈)、电磁波耦合的原理,以及声测法,通过技术应用的不断发展,标准化工作已近完成(IEC 62478(草案))。草案规定了测试用传感器、测试频带、量测读值、灵敏度、性能检验、定位等技术方法,侧重在线或现场的局部放电检测,以补充 IEC 60270 离线测试的不足。目前第 1 版本只有大纲摘要和部分内容,虽然很不完整,但已经有大致的轮廓。这类高频电测法及声测法,与脉冲电流法相比,评定指标方式类似,但在最前端的耦合信号量纲统一性表达还存在疑义,以及特殊的谱图展现(如超声法的金属微粒飞行图)有差异。在整个的应用上,高频电测法(电容耦合式的地电波法、罗戈夫斯基线圈耦合式的高频法、空间传播的 TM/TE/TEM 波耦合式的特高频法)和超声法,相较传统的脉冲电流法,侧重在线和带电的现场应用场景,近年来发展极为迅速。上述标准,对局部放电、局部放电的类型(内部放电、表面放电、电晕放电、悬浮放电)、局放检测方法(脉冲电流法、超声波法、特高频法)有了基本规定。

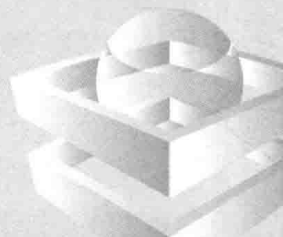
目前,运用不同的局放检测方法有多种局部放电检测仪,标准 DL/T 846.4—2016《高电压测试设备通用技术条件 第 4 部分:脉冲电流法局部放电测量仪》对脉冲电流法局放仪、标准 DL/T 1416—2015《超声波法局部放电测试仪通用技术条件》对接触式超声局放仪、标准 DL/T 846.10—2016《高电压测试设备通用技术条件 第 10 部分:暂态地电压局部放电检测仪》对暂态对地电压局放仪、标准

DL/T 846.11—2016《高电压测试设备通用技术条件 第11部分：特高频局部放电检测仪》对特高频局放仪的试验方法及检验规则，进行了规定。

从Г. С. 库钦斯基著的《高压电气设备局部放电》(1984版)中2.6节“局部放电特性测量装置的校验及标定”，邱昌容、王乃庆主编的《电工设备局部放电及其测试技术》(1994版)中4.4节“局部放电测试仪的主要性能检验”，GB/T 7354—2003较GB/T 7354—1987版本增加了校准器、校准器检定、校准器的性能校核，唐炬等所著的《组合电器设备局部放电特高频检测与故障诊断》(2016版)中13.2节“特高频局部放电定量检测”及13.3节“特高频局部放电现场标定技术”中可以看出，针对局放测试仪的性能测评是个不可忽视的问题。

目前的局部放电检测方法对应的最前端的耦合信号量纲统一性表达存在疑义，宣称模式识别能力的无法考核，导致了各型局放仪的性能偏差与不可比较性，此方面的研究比较热门。在经历了最开始的仪器自带简易式功能检验型的校准器后，有关研究和认识各型电力设备局部放电以及对局放仪性能校核的典型缩微缺陷模型被提出，并针对性开展了较多的测试工作，然后发展到实体电力设备的实体缺陷布设及其测试研究。同步进行针对局放仪前置传感器及整机的频带、线性度等性能参数的测评。随着技术的进步，出现了利用专业的测评平台直接对局放仪的各项性能指标进行测评的平台测评方法，比如针对特高频局放仪的GTEM室测评方法，针对暂态对地电压法的脉冲信号测评方法，针对超声法的接触式标定以及非接触式方向和距离性测评，能测评多种类型局放仪的统一测评平台，等等。平台测评不需要布置局部放电缺陷，利用平台产生标准化的信号直接对局放仪进行测评。

本书对近年来在局放检测实用化方面推进较快的局放检测方法和典型判断谱图进行了精简总结，归纳了现今使用较多的几款局放仪，较系统地总结了各阶段局放仪测评技术，着重分析了近年来新提出的一些实用测评技术。



第2章 >>

局部放电及危害

局部放电（简称“局放”）是造成高压电气设备最终发生绝缘击穿的重要原因，也是绝缘劣化的重要表征，主要由于电气设备带电后，绝缘局部缺陷导致局部区域电场集中，区域内未形成整个绝缘结构贯穿性放电现象所致。电气设备主绝缘结构主要由带电导体金属部分和不导电绝缘材料部分组成，根据电极曲率半径及其放电发展形式不同，可以将电极绝缘结构分为均匀场结构、稍不均匀场结构和极不均匀场结构三种类型；而其中能引起局部放电的电极结构只有极不均匀场结构；因而电气设备当中常见局部放电形式主要有气泡（气隙）型、交界面型（电极和绝缘材料交界面）、毛刺（尖刺）型和大曲率半径型（悬浮电位）四种类型。根据以上分类，在实际生产和研究当中，人们为了更好地区分放电类型，进一步通俗地将局部放电分为内部气隙放电、沿面放电、电晕放电和悬浮放电四种类型。

局部放电的危害主要是体现在热效应、带电粒子（离子）轰击、化学生成物、机械冲击波应力和辐射作用。局部放电单次能量很小，短时间内不影响电气设备的整体绝缘强度，其对绝缘的危害是逐渐加大增强的，它的发展需要一定时间，累计效应，缺陷扩大，会加剧整体绝缘强度下降，最终影响绝缘性能，导致击穿。

各种局部放电的放电机理各不相同，以下将分别讨论。

2.1 局部放电类型

2.1.1 内部气隙局部放电

★★★

在绝缘介质内部或介质与电极之间的气隙放电，都属于内部局部



放电，这种放电的特性与介质的特性和气隙的形状、大小、位置以及气隙中气体的性质有关，是局部放电中常见的类型。内部存在的局部缺陷，引起局部位置的场强畸变且气隙、气泡内的场强达到一定数值时，就会发生局部放电。这种放电并不立即形成贯穿性通道，但长期的局部放电使绝缘的劣化损伤逐步扩大，甚至可使整个绝缘击穿。

内部气隙局部放电的机理常用三电容模型来解释，如图 2-1 所示。 C_g 代表气隙的电容； C_b （是 C_{b1} 和 C_{b2} 的串联）代表与 C_g 串联部分的介质的电容； C_a 代表其余部分绝缘的电容。若在电极间加上交流电压 u_1 ，则出现在 C_g 上的电压为 u_g ，即

$$u_g = [C_b / (C_b + C_g)] u_1 = [C_b / (C_b + C_g)] U_{\max} \sin \omega t \quad (2-1)$$

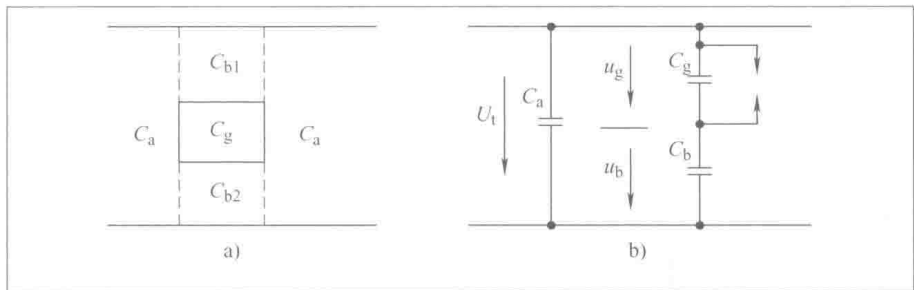


图 2-1 气隙放电的三电容模型

a) 具有气隙的绝缘介质 b) 图 a 的等效回路

因气隙很小， C_g 比 C_b 大很多，故 u_g 比 u_1 小很多。局部放电时气隙中的电压和电流变化如图 2-2 所示。 u_g 随 u_1 升高，当 u_1 上升到 u_s （起始放电电压）， u_g 达到 C_g 的放电电压 U_g 时， C_g 气隙放电，于是 C_g 上的电压很快从 U_g 降到 U_r ，放电熄灭，则

$$U_r = [C_b / (C_b + C_g)] u_c \quad (2-2)$$

式中， U_r 为 C_g 上的残余电压 ($0 \leq U_r < U_g$)； u_c 为相应的外施电压值。放电后在 C_g 上重建的电压将不同于 u_g ，只是随着外施电压的上升趋势类似于 u_g 的上升趋势，从 U_r 上升，当升到 U_g 也即外施电压差上升了 $(u_s - u_c)$ 时， C_g 再次放电，放电再次熄灭，电压再次降到 U_r 。 C_g 上的电压变动在 U_g 至 U_r 间的时间，也即产生局部放电脉冲的时间，此时通过 C_g 在外回路有一脉冲电流 i ，如图 2-2 所示，它是检测局

部放电的主要依据。以上只分析了试样存在一个气隙且这个气隙的放电电压不变，且和极性无关的情况，实际试验中气隙往往多于1个，两种极性的放电电压也不同，分析起来要复杂得多，重复率也会高得多。

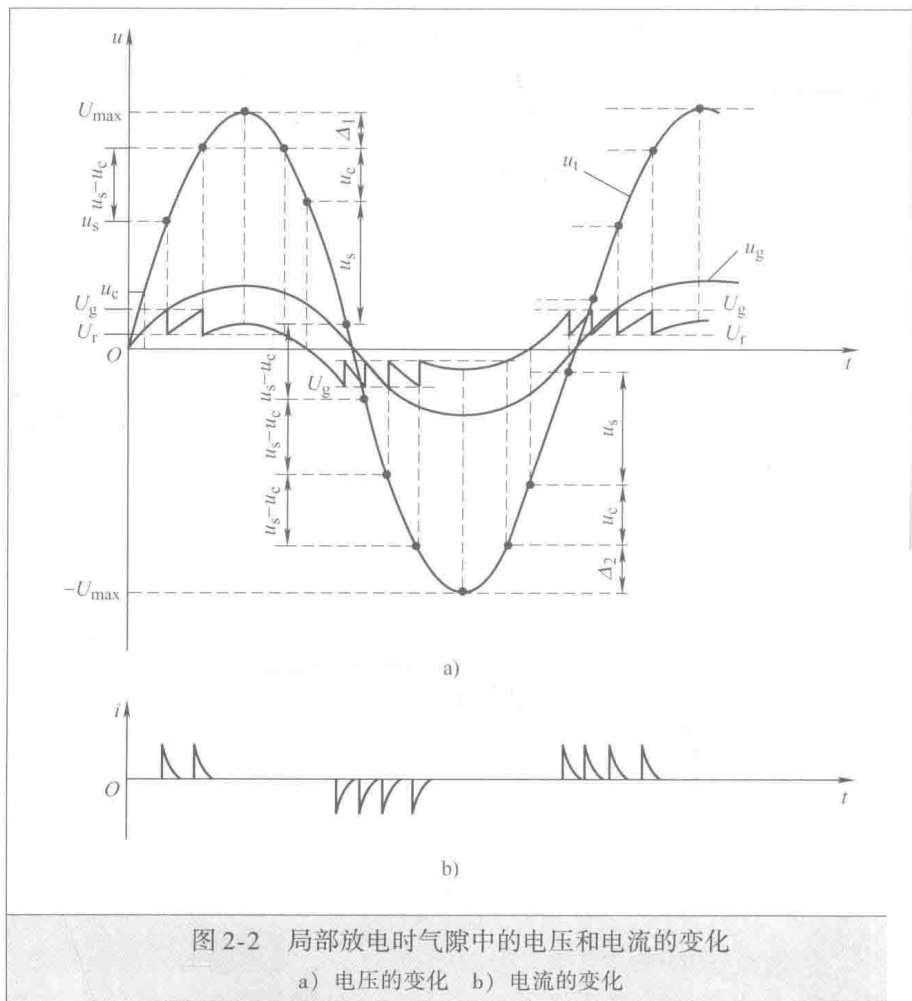


图 2-2 局部放电时气隙中的电压和电流的变化
a) 电压的变化 b) 电流的变化

2.1.2 沿面局部放电 ★★★

沿面局部放电过程与内部放电过程是基本相似的，如图 2-3 所

示。只要把电极与介质表面之间发生放电的区域所构成的电容记为 C_c ，与此放电区域串联部分介质的电容记为 C_b ，其他部分介质的电容记为 C_a ，则上述的等效电路及放电过程同样适用于表面局部放电。不同的是现在的气隙只有一边是介质，而另一边是导体，放电产生的电荷只能累积在介质的一边，因此累积的电荷少了，更不容易在外加电压绝对值的下降相位上出现放电。另外，如果电极系统是不对称的，放电只发生在其中一个电极的边缘，则出现的放电图形是不对称的。当放电的电极是接高压，不放电的电极是接地时，在施加电压的负半周出现的放电图是放电量少，放电次数多；而正半周是放电量多，而次数少，如图 2-3b 所示。这是因为导体在负极性时容易发射电子，同时正离子撞击阴极产生二次电子发射，使得电极周围气体的起始放电电压低，因而放电次数多而放电量小。如果将放电的电极接地，不放电的电极接高压，则放电的图形也反过来，即正半周放电脉冲是小而多，负半周放电脉冲是大而少。若电极是对称的，即两个电极边缘场强是一样的，那么放电的图形也是对称的，即正负两半周的放电基本上相同。

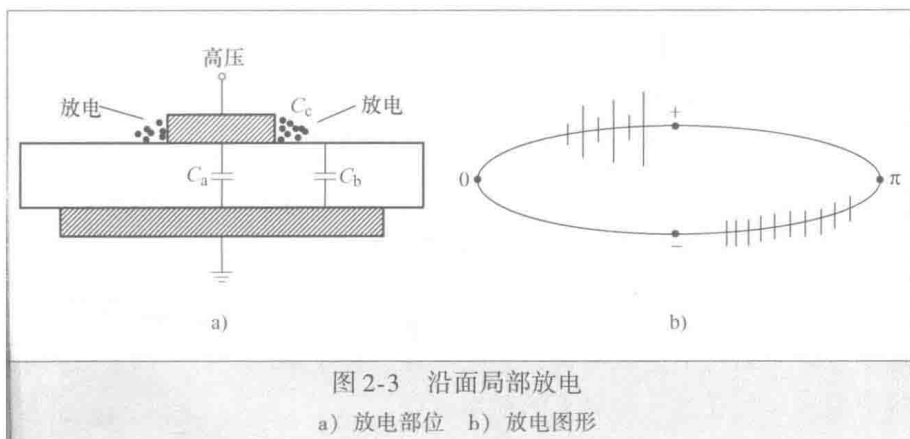


图 2-3 沿面局部放电

a) 放电部位 b) 放电图形

2.1.3 电晕局部放电 ★★★

电晕放电（即尖端放电）不存在于均匀电场和稍不均匀电场中，只存在于极不均匀电极结构中，是由于均匀电场和稍不均匀电