

变压器油纸绝缘局部放电

王辉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

变压器油纸绝缘局部放电

王辉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书内容主要包括：变压器油纸绝缘典型缺陷放电发展的研究平台、油纸绝缘绕组匝间局部放电发展的过程及特征、油纸绝缘柱板结构局部放电发展的过程及特征、油纸绝缘针板结构局部放电发展的过程及特征等。

本书可供电力企业相关技术人员阅读，也可供高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目 (C I P) 数据

变压器油纸绝缘局部放电 / 王辉著. — 北京：中国水利水电出版社，2013. 11
ISBN 978-7-5170-1427-0

I. ①变… II. ①王… III. ①变压器—局部放电
IV. ①TM401

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第277737号

书 名	变压器油纸绝缘局部放电
作 者	王辉 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	145mm×210mm 32开本 7印张 188千字
版 次	2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

变压器作为电网的核心设备之一，它的运行状况直接关系到整个电网的运行安全，因此寻找有效的途径和方法对变压器的内部早期故障状态进行评估显得尤为重要。利用局部放电研究油纸绝缘变压器内部绝缘放电的发展过程，并对放电严重程度进行状态评估，意义重大，故作者对油纸绝缘变压器典型局部放电的发展过程和特征进行了研究。

为了研究变压器油纸绝缘典型局部放电的发展过程和特征，作者建立了一套能够模拟变压器运行环境试验平台，用五种典型的电极结构，采用恒压法对绕组匝间模型进行了长期试验，采用升压法对针板垂直结构模型、针板平行结构模型、圆柱平板模型、油楔模型进行了长期试验，观测了各模型放电发生、发展、闪络击穿的过程。在试验过程中对模型纸板进行了拍照，记录纸板表面的放电痕迹，获得了不同典型局部放电模型的常规脉冲电流信号、特高频信号、宽带脉冲电流信号随时间发展的趋势图以及散点图、柱状图、灰度图、时频分析图等多种统计谱图，提出了可以利用放电相位分布特点以及各种统计谱图的形貌特征作为变压器设备放电严重程度划分的依据。

根据五类典型局部放电模型的试验现象和相应的统计特征，本书将放电严重程度划分为三个阶段，即放电起始阶段、放电发展阶段、放电危险阶段。放电初始阶段一般放电次数较少，放电能量小，放电相位的分布也较窄，在 360° 附近一般不会有放电出现；放电发展阶段放电次数开始增多，放电能量增强幅值变大，所观测到的纸板表面痕迹更加明显，在 360° 附近开始出现大量放电；放电危险阶段放电相位几乎布满整个周期，放电能量增加。

根据试验情况和所观测到的试验现象，可以认为在模型放电发展过程中主要存在三种类型的放电，即油中电晕放电、纸板表面放电、纸板内部放电；这三种放电类型在不同的模型、不同的放电发展阶段有不同的体现。

在研究过程中，对匝间模型除了进行正常油温和微水的研究外，还进行了异常油温、异常微水的研究，对柱板结构放电模型进行了正常油温和异常油温的对比研究。通过不同油温及不同油中微水含量的研究发现，这两个因素对放电发展过程的影响较大，温度升高和微水含量增加，将会降低起始局放电压，加速放电的发展过程，缩短从出现局放到最后闪络击穿的时间。这表明微水含量的升高可能会降低绝缘强度，加速放电的发展；温度升高会使电子自身的固有动能加大，活性增强，加速放电的发展。

本书得到了国家重点基础研究发展计划项目（973计划）（2009CB724508）、北京市教育委员会共建项目设计计划的资助。

本书前期的研究工作是在李成榕教授的悉心指导下完成的，在此，谨向他致以诚挚的敬意和深深的感谢。另

外，在研究过程中，得到了阿联酋 Petroleum 研究院苏琦教授，华北电力大学崔翔教授、王景春高工、全玉生教授、屠幼萍教授、王伟教授、程养春副教授、詹花茂副教授、郑重副教授等老师的热心指导和无私帮助，在此向他们表示谢意。还要感谢齐波、唐志国、赵林杰、郑书生、王伟、王璁等各位好友对我研究工作的帮助和支持。最后更要感谢中国水利水电研究院的凌永玉女士在专著出版过程中所给予的帮助和支持。

限于作者水平，本书内容定有不妥之处，还望读者批评指正。

作者

2013 年 10 月

目录

前言

第1章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 变压器内部局部放电检测方法的研究现状	2
1.3 变压器内部局部放电严重程度的评估及研究现状	9
1.4 目前研究存在的问题.....	10
1.5 本书研究的主要内容.....	11
第2章 变压器油纸绝缘典型缺陷放电发展的研究平台	13
2.1 局部放电模拟系统.....	13
2.2 局部放电检测系统.....	17
2.3 局部放电信号采集系统.....	18
2.4 放电信号特征分析方法.....	18
第3章 油纸绝缘绕组匝间局部放电发展的过程及特征	24
3.1 试验模型.....	24
3.2 试验参数选择.....	25
3.3 80℃正常油温的试验过程及分析.....	26
3.4 120℃异常油温正常微水的试验过程及分析	52
3.5 异常微水正常油温的试验过程及分析.....	67
3.6 匝间放电影响因素的对比分析.....	81

第 4 章 油纸绝缘柱板结构局部放电发展的过程及特征	87
4.1 圆柱平板模型沿面局部放电发展过程和特征.....	87
4.2 油楔模型局部放电发展过程和特征	133
第 5 章 油纸绝缘针板结构局部放电发展的过程及特征.....	153
5.1 垂直结构针板局部放电发展的过程及特征	153
5.2 平行结构针板模型局部放电发展的过程和特征	178
参考文献	207

第1章 绪 论

1.1 问题的提出

电力的生产和分配是国民经济赖以生存和发展的重要基础，随着国民经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高，社会对电能的需求越来越大，电网容量不断扩大，电压等级逐步提高，对电力系统的稳定性和可靠性提出了更高的要求。而电力变压器是电力系统输变电的枢纽性设备，其安全运行直接关系着电力系统的可靠性水平，一旦失效必将引起局部以至全部地区的停电，造成巨大的经济损失。

大量故障统计分析表明，绝缘故障是影响变压器正常运行的主要原因。目前，大型电力变压器多为油浸式电力变压器，其绝缘结构主要由油、纸、纸板和其他固体绝缘等构成的固体—油绝缘结构。虽然在设计上具有足够的电气强度和优良的机械性能，但是在制造过程中的偶然因素会造成一些先天性局部缺陷，如气泡、裂缝、悬浮导电质点和电极毛刺等。正是这些缺陷会造成绝缘体内部或表面出现某些区域电场强度高于平均电场强度，当这些区域的击穿场强低于平均击穿场强时，将会首先发生放电、而其他区域仍保持绝缘特性，从而形成局部放电。

对于电力变压器等高压设备的绝缘，由于绝缘内部或表面发生局部放电而造成的放电电老化是不容忽视的。局部放电引起介质劣化和损伤的机理是多方面的，主要包括三种效应：①带电质点（电子和正、负离子）对介质表面的撞击，切断分子构造；②由于带电质点撞击介质，在放电点引起介质局部温度上升，使介质加速氧化，导致材料的机械、电气性能下降；③局部放电产生的活性生成物对介质的氧化作用使介质逐渐劣化。局部放电使电介质长时间击

穿电压常常不到短时击穿电压的几分之一，已经成为电力变压器绝缘劣化的重要原因。

局部放电不仅是变压器设备绝缘劣化的先兆和表现形式，而且能够引起绝缘的进一步劣化，致使变压器内部油纸绝缘的电气绝缘性能逐渐降低，最终导致绝缘击穿或沿面闪络，因此局部放电信号的幅度大小、放电次数、相位分布以及其他统计特征可能隐含着变压器的绝缘状态和放电严重程度等综合信息。如果能够在变压器设备发生绝缘事故之前，及时的检测出局部放电并且准确地进行局部放电严重程度的评估与辨识，就可以提前有针对性的采取检修措施，避免变压器发生突发性绝缘故障。但是到目前为止，变压器油纸绝缘局部放电严重程度的评估与辨识仍然是一个长久以来令人困惑的难题，是油纸绝缘变压器内部状态评估亟待解决的问题。本书对油纸绝缘变压器典型局部放电发展的过程进行研究，探索不同放电发展阶段的特征，建立局部放电发展阶段和放电严重程度与各个观测量之间的内在联系，并对油纸绝缘变压器中不同缺陷局部放电发展的可能的物理过程进行阐述和分析，从而为利用局部放电进行油纸绝缘变压器绝缘状态和放电严重程度的评估与诊断提供一定的技术和理论支持。

1.2 变压器内部局部放电检测方法与研究现状

国内外的研究表明，变压器内部的局部放电会产生一系列理化现象，如脉冲电流、电磁辐射、超声波、光信号以及绝缘油中气体组分的变化等。根据局部放电所表现的特征，人们研究出各种局部放电的检测方法，其中主要包括：IEC 60270 常规脉冲电流法、宽频带脉冲电流法、超声波检测法、气相色谱法和特高频法等。

1.2.1 常规脉冲电流法

常规脉冲电流检测法通过检测阻抗或电流传感器，检测变压器套管末屏接地线、外壳接地线、中性点接地线、铁芯接地线以及绕组中由于局部放电引起的脉冲电流，获得视在放电量。常规脉冲电

流法是研究最早、应用最广泛的一种检测方法, IEC 60270 为 IEC 正式公布的局部放电测量标准。该方法通过测量放电时回路电荷变化所引起的脉冲电流来实现对高压电力设备局部放电的检测。脉冲电流法采用的传感器为耦合电容(如变压器套管末屏)或电流传感器, 其测量频带一般为脉冲电流信号的低频段部分, 通常为数千 Hz 至数百 kHz (至多为数 MHz)。目前, 脉冲电流法广泛用于变压器型式试验、预防和交接试验、变压器局部放电实验研究以及在线检测等, 其特点是测量灵敏度高、放电量可以标定等。

常规脉冲电流法的缺点在于: ①由于运行现场干扰严重, 导致脉冲电流法无法有效应用于在线监测; ②对于变压器这类具有绕组结构的设备, 由于局部放电在绕组内的传播导致脉冲电流法在标定时产生很大的误差; ③当试样的电容量较大时, 受耦合电容的影响, 测试仪器的测量灵敏度随着试品电容增加而下降; ④测量频率低, 频带窄, 包含的信息量少。

1.2.2 超声波检测法

超声波是通过检测变压器局部放电产生的超声波信号来测量局部放电的大小和位置。在实际检测中, 超声传感器主要是通过贴在电气设备外壳上以体外检测的方式进行的。国际上较早的对超声波检测技术进行研究的是美国的 E. Howells 等人, 他们对变压器绝缘局部放电的声发射信号进行了频谱分析, 得出声发射频谱主要集中在 $100\sim 150\text{kHz}$ 左右, 并且可以实现对在线运行的电力变压器内部局部放电点进行定位。日本的 H. Kawada 等人则给出用声发射法对变压器在线监测局部放电的监测频带为 $180\sim 230\text{kHz}$ 。澳大利亚新南威尔士大学的 B. T. Phung 和 T. R. Blackburn 等人利用谐振超声波传感器和宽带超声波传感器对局部放电的超声检测进行了详细的研究, 并提出用小波方法分析超声波信号。美国物理声学公司 (PAC) 研制有一套成熟的基于声发射的局部放电在线监测装置 Power PAC, 目标是为检测在役变压器的局部放电、放电源定位及安全性评估, 并有广泛的应用。

国内方面,清华大学、西安交通大学、东南大学、武汉大学、华北电力大学以及中国电力科学研究院、国网电力科学研究院(武汉高压研究所)等很多科研院所都对超声波检测技术进行了广泛地研究和探索。清华大学的金显赫、朱德恒等人对电力变压器绝缘局部放电的声发射频谱进行了研究,得出放电的声发射频谱峰值频率分布在 $70\sim 150\text{kHz}$ 之间,并推荐在线监测变压器局部放电声发射的监测频带为 $70\sim 180\text{kHz}$ 。清华大学的张蕾、高胜友等人对油中局部放电超声信号的模式识别进行了研究,主要是基于超声信号的时域、频域特征和时域压缩波形数据等特征提取方法,采用人工神经网络进行了局部放电的模式识别,获得了较好的模式识别效果。东南大学的袁易全等人研制了带光纤的变压器局部放超声波检测PZT传感器,并对局部放电超声特性进行了实验研究,论述了局部放电超声发射强度、频谱、等值声速、层介质衰减和透射以及声速与温度、杂质的关系等。利用超声波检测的原理研制了很多局部放电检测仪,其中国网电力科学研究院(武汉高压研究所)就研制了JFD—2型局部放电超声波自动测量定位系统,能对放电点所发出的信号进行处理,并对定位算法进行了详细的探讨。华北电力大学的李燕青等人研究了局部放电超声信号在变压器模型中的传播,利用非线性和非平稳的方法对超声波信号进行了分析处理,研制了一套变压器局部放电测量系统。

超声波法的优点在于可以有效避免现场的电磁干扰,但目前的超声传感器灵敏度较低,无法在现场有效地测到信号,因此超声检测主要用于定性地判断局放信号的有无,并结合脉冲电流法或直接利用超声信号对局部放电源进行物理定位。在电力变压器的离线和在线检测中,它是主要的辅助测量手段。

1.2.3 气相色谱法

气相色谱法英文简称为DGA(Dissolved Gas Analysis)。当设备内部发生热故障、放电性故障或者油、纸老化时,会产生多种气体。这些气体会溶解于油中,不同类型的气体及其浓度可以反映不

同类型的故障，对油中溶解气体的监测和分析是充油电气设备绝缘诊断的重要内容。DGA 法是通过检测变压器油分解产生的各种气体的组成和浓度来确定故障（局放、过热等）状态。在大量实践的基础上，GB 7252—2001 规定了不同故障类型产生的气体成分，分析了油过热、油和纸过热、油纸绝缘中的局部放电、油中火花放电、油中电弧以及油和纸中电弧等故障的主要产气成分和次要产气成分。不同性质的故障所产生的油中溶解气体的组分是不同的，据此可以判断故障的类型，国际电工委员会和中国国家标准推荐用 C_2H_2/C_2H_4 ， CH_4/H_2 ， C_2H_4/C_2H_6 三个比值来判断故障的性质。该方法目前已广泛应用于变压器的在线故障诊断中，并且建立起故障诊断的专家系统，是当前在变压器局部放电检测领域非常有效的方法。DGA 方法的优点是不受外界电磁干扰的影响，数据较为可靠，对渐变性绝缘缺陷的判断技术相对较为成熟，从定性到定量分析都积累了相当的经验，这些都是其他监测和诊断技术所不具备的优点；缺点在于很难捕捉到突发性故障的征迹，实时性较差。

1.2.4 特高频法

特高频法（以下简称 UHF 法）是目前局部放电检测的一种新方法，研究认为，每一次局部放电过程都伴随着正负电荷的中和，并出现陡度很大的电流脉冲，同时向周围辐射电磁波。局部放电所辐射的电磁波的频谱特性与局部放电源的几何形状以及放电间隙的绝缘强度有关。当放电间隙比较小、放电间隙的绝缘强度比较高时，放电过程的时间比较短、电流脉冲的陡度比较大，辐射的电磁波信号的特高频分量比较丰富。目前实验已经证明，变压器、GIS 内部局部放电能够激发出很高频率的电磁波，最高可达数 GHz，可通过天线传感器接收局部放电过程辐射的 UHF 电磁波，实现局部放电的检测。

在 20 世纪 80 年代末，UHF 法测量局部放电首先应用在 GIS 设备中。该技术的特点在于：检测频段较高，可以有效地避开常规局部放电测量中的电晕、开关操作等多种电气干扰；检测频带宽，

所以其检测灵敏度很高，而且可识别故障类型和进行定位。

特高频局部放电检测技术在最近几年得到了较快的发展，在以 GIS 为代表的电力设备中得到了成功的应用。对变压器而言，局部放电通常发生在变压器内的油—纸绝缘中，由于绝缘结构的复杂性，电磁波在其中传播会发生多次折反射及衰减。因此，变压器特高频局部放电检测技术的研究还处于探索和试用阶段。

21 世纪初，荷兰 KEMA 实验室的 Rutgers 等人在实验室中对变压器特高频局部放电检测技术进行了初步研究。研究表明，油中放电上升沿很陡，脉冲宽度多为纳秒级，能激起 1GHz 以上的特高频电磁波；通过 300~1200MHz 的天线在一台充油变压器上实验证实了 UHF 方法进行局部放电检测和放电分类的可行性，其灵敏度不大于 20pC。英国 Strathclyde 大学的 Judd 等人在 GIS 的特高频局部放电检测技术研究的基础上，也对变压器进行了实验研究，并在现场进行了初步实验。国外的研究一般将传感器制成盘式耦合器，在变压器顶部靠近高压侧的箱体上开一窗口，传感器通过介质窗提取局部放电信号，并将通过频谱分析仪进行分析。此外，还采用最小路径法对变压器局部放电的定位以及 UHF 天线的标定计算方法进行了探讨。此外，法国 ALSTOM 输配电研究中心的 K. Raja 等人在实验室内研究了各种典型局部放电模型的特高频特性，提出了选择干扰最小的频段进行检测的方式，并据此建立了模式识别方法。

近年来，国内有关研究机构对特高频局部放电检测技术进行了广泛的研究。西安交通大学等建立了检测频带可调的实验室检测系统及局部放电系统，思路和方法与国外几家基本相同；清华大学则试图通过在变压器内部引出线的附近安置特高频天线的方法来测量变压器的内部放电，并在实验室进行了一些实验研究；华北电力大学建立了实体变压器放电模型，开发出基于油阀和人孔手孔的放电监测系统，研制出了变压器局部放电在线检测装置，并多次在现场安装测试且捕获到了放电故障。

现场实验表明变电站现场噪声水平通常低于 200MHz，UHF 检测技术的检测频率范围一般为 500~1500MHz，可最大限度避开干扰信号。同时，由于特高频法实施中，传感器安置在变压器箱体内部，变压器壳体的屏蔽作用，使这一方法的抗干扰能力大大优于目前传统局部放电监测方法，这对于实现变压器局部放电的在线监测是非常有利的。

UHF 作为一种局部放电检测的新兴方法，以其检测频带高、抗干扰能力卓著以及灵敏度高等优点而得到迅速发展和广泛的应用。此外，特高频方法采取天线空间耦合射频信号的方式使监测系统与被监测对象之间没有电气连接，对操作人员及监测设备而言都具有更高的安全性。特高频检测方法已在国外的 GIS 在线监测中得到成功的应用和推广。

目前，特高频方法的研究也面临着一些问题，由于测量机理与脉冲电流法不同，因此无法进行视在放电量的标定，而且前大多数工程人员已经习惯于通过视在放电量来反映局部放电的严重程度，IEC 规定有关局部放电的变压器产品出厂标准中，其指标也是通过局放量的阈值来规定的。目前的研究表明，即使在局部放电源到传感器之间的传播路径不变的情况下，脉冲电流法的视在局放量与特高频方法所测得的脉冲信号幅值之间也没有确定的对应关系，这就加大了应用该方法进行局部放电量标定的难度；再者，由于变压器内部绝缘结构的复杂性，局部放电产生的电磁波在内部的传播将存在大量的散射、折反射以及衰减，因而传播特性研究工作将注定是难度很大而且充满挑战的。

1.2.5 宽频带脉冲电流检测法

宽频带脉冲电流检测技术是在足够宽的检测频带范围内检测局部放电产生的脉冲电流信号，局部放电信号一般通过安装在被测设备接地线上的穿芯式电流传感器或钳型电流传感器来获得，在实验室条件下也可在放电模型接地回路中串入无感电阻来获得真实的局部放电信号，一般检测频带为 1kHz~70MHz。

意大利的 Montanari 等人在超宽带的局部放电检测方面的研究就取得了显著效果,他们通过研究宽带局部放电信号的波形特征,将采集到的时域波形进行等效时频变换,成功地进行了信号与噪声的分离,在此基础上对不同特征的脉冲信号进行分类统计,得到了变压器、电缆和旋转电机等高压电气设备内部不同放电类型各自的放电特征,并实现了现场抗干扰和多放电模式的区分。国内的清华大学在这方面也进行了有益的探索,通过在实验室建立数字化实时高速局部放电波形测量系统,由简单实验室模型和工业仿真模型取得了不同类型局部放电的脉冲电流波形,用分段的时域数据压缩法提取了脉冲波形特征,并采用分级的人工神经网络进行放电模式识别,取得较好效果。西安交通大学的司文荣等人利用获取的宽带脉冲波形时间序列,提出分别使用幅值参数法、等效时频法和时频熵法对局放脉冲波形的特征参数进行提取。在对人工设置的多局放源产生的脉冲群数据进行波形特征提取后,使用模糊聚类对脉冲群波形特征提取结果进行了对比,分析结果表明三种波形特征提取方法均能在一定程度上很好地分离干扰源而提取出局放数据。西安交通大学的李彦明等人还研究了模糊 C 均值聚类算法的特性及其在局部放电脉冲波形特征向量参数处理中的应用,使用等效时频法提取了局部放电脉冲群的波形特征参数;研究结果表明,由等效时频特征提取和模糊 C 均值聚类分析组成的局部放电脉冲群快速分类技术可以对多个局部放电源构成的脉冲群进行准确分类。

目前普遍采用的脉冲电流法是用耦合电容和检测阻抗采集放电信号,分析其起始放电电压、视在放电量、放电相位、放电能量等特征量,测量信号的响应频率一般不超过 1MHz。由于电力设备绝缘系统的局部放电,其放电持续时间很短,脉冲宽度多为纳秒级,因而相应的频域十分宽广,可达到 1GHz,甚至更高。如果仅测量和分析 1MHz 以下的放电信号,就会损失大量的局部放电信息,因此传统的检测方法不能全面反映放电的本质特征,有必要在更宽频带范围内采集原始放电信号,分析相应的波形特征。

从本质上讲, 宽带脉冲电流法检测方法是常规脉冲电流法(多为 40~200kHz, 至多不超过 1MHz) 在频率范围上的展宽。这就使其具有测量频带宽包含的局部放电信息量大等优点, 既保留了常规脉冲电流法可以测量放电量的优点, 同时可以更加真实地反映局部放电的原始脉冲电流特征, 为采用脉冲电流波形分析的方法进行信号与噪声分离提供了可能, 配合局部放电信号其他统计谱图可以实现不同放电模式的模式识别。

1.3 变压器内部局部放电严重程度的评估及研究现状

以局部放电为特征量来反映绝缘状态的研究主要开展于 20 世纪 90 年代初。局部放电越严重, 说明绝缘系统故障的风险越大, 其绝缘寿命也越短。

国内外许多学者对以局部放电为特征量反映绝缘老化状态及电树枝的发展进行了大量研究。美国 Nelson 的实验室老化研究结果表明, 很多非破坏性试验参数都不能很好地反映绝缘状态, 只有局部放电或与局部放电有关的参量才能指示老化状态。R. Bozzo 于 1998 年研究了绝缘电树枝老化, 从统计学的观点出发, 应用 Weibull 模型分析了空气隙局部放电的形状参数和尺度参数, 提出在不同电压下 Weibull 分布参数与有机固体绝缘老化过程中电树枝的生成和发展存在较好的相关性。1995 年意大利的 G. C. Montanari 提出了 XLPE 电缆和发电机定子线棒的绝缘老化模型, 认为绝缘的老化特性与树枝放电的长度或局部放电的密度满足一定的函数关系。Contin 在 PE 材料和环氧树脂绝缘子在长期电压作用下的局部放电特性研究中得到了与 R. Bozzo 较为相似的结论, 同时证实了最大放电量用于绝缘诊断的不可靠性。我国的西安交通大学对电机定子线棒的绝缘老化特征进行了广泛、深入的研究, 得出了一些反映老化程度的局部放电特征参量。上海交通大学的黄成军等人在系统提取局放统计参数的基础上, 将金融领域的趋势分析方法引入局部放电的研究, 提出了放电量放电次数趋势