



声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《UHF 检测 GIS 局部放电过程中的典型干扰模式》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：吕张忠 日期：2010.6.17

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名：吕张忠

导师签名：李xx 授

日期：2010.6.17

日期：2010.6.17



摘 要

为了建立基于UHF检测法的GIS设备局部放电干扰信号的模式库, 最终实现GIS设备局部放电检测过程中放电信号与干扰信号的有效分离, 本文在实验室建设了一套GIS设备局部放电典型干扰信号的研究平台, 分别采用外置式UHF传感器和介质窗口式UHF传感器对手机信号干扰(含GSM制式和CDMA制式)、电晕放电干扰、悬浮放电干扰、沿面放电干扰以及灯具干扰等五种典型的干扰类型进行了大量的试验研究。

利用散点图、柱状图、三维图、灰度图以及时频分析图等多种统计谱图分析了不同放电干扰信号的特征, 获得了五种典型放电干扰信号的模式。研究结果表明: 1) 五种典型放电干扰信号的模式互不相同, 可以以此作为识别不同干扰类型的判别依据; 2) 同样的外部条件下, 两种UHF传感器获得典型干扰的模式有所不同; 3) 介质窗口式UHF传感器的抗干扰效果优于外置式UHF传感器; 4) UHF检测法对空气中电晕放电的检测灵敏度不高。

关键词: GIS, 局部放电, 特高频, 干扰, 模式

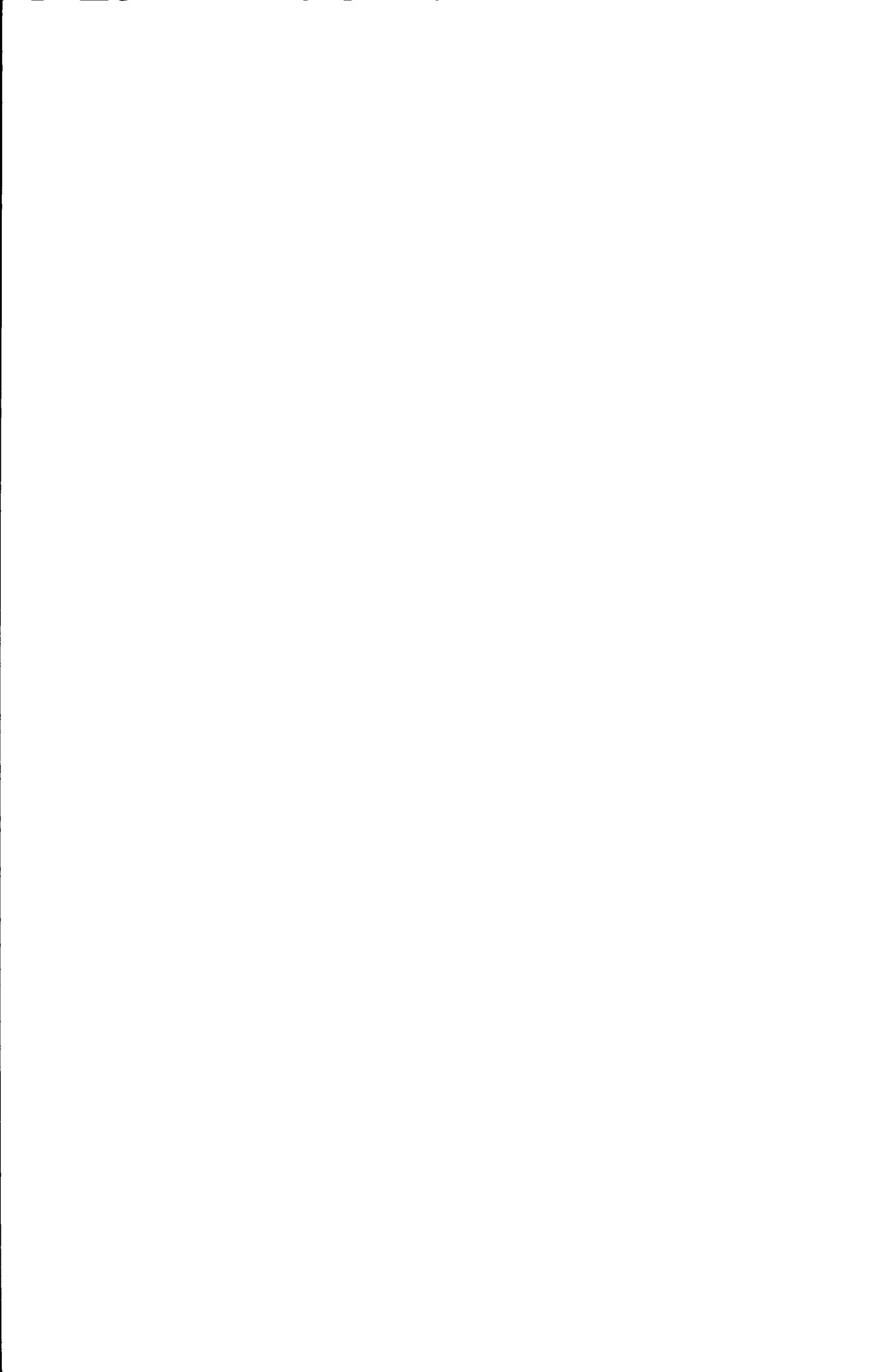
ABSTRACT

The present research aims to establish a pattern base of interference signals for UHF-based detection of GIS partial discharge so that discharge signals can be effectively distinguished from interference signals during GIS partial discharge detection. To this end, an experimental platform was established for the study of interference patterns of GIS partial discharge, where both external UHF sensor and dielectric-windowed UHF sensor were applied to assess the five types of typical interferences from mobile phone signals (both GSM and CDMA), corona discharge, suspensor discharge, surface discharge and light signals respectively. Experimental results were analyzed and presented through scatter plot, histogram, three-dimensional plot, gray scale and Time-Frequency plot to illustrate the five kinds of typical interference patterns. The research findings conclude that: 1) Five typical interference patterns differ from one another, which could be utilized as criteria in identifying the inference pattern; 2) the two different UHF sensors identify different patterns of interference given the same external conditions; 3) dielectric-windowed UHF sensor outperforms external UHF sensor in terms of anti-interference capability; 4) UHF methods show little sensitivity in detecting corona discharge signals.

KEY WORDS: GIS, Partial Discharge, UHF, Interference, Pattern

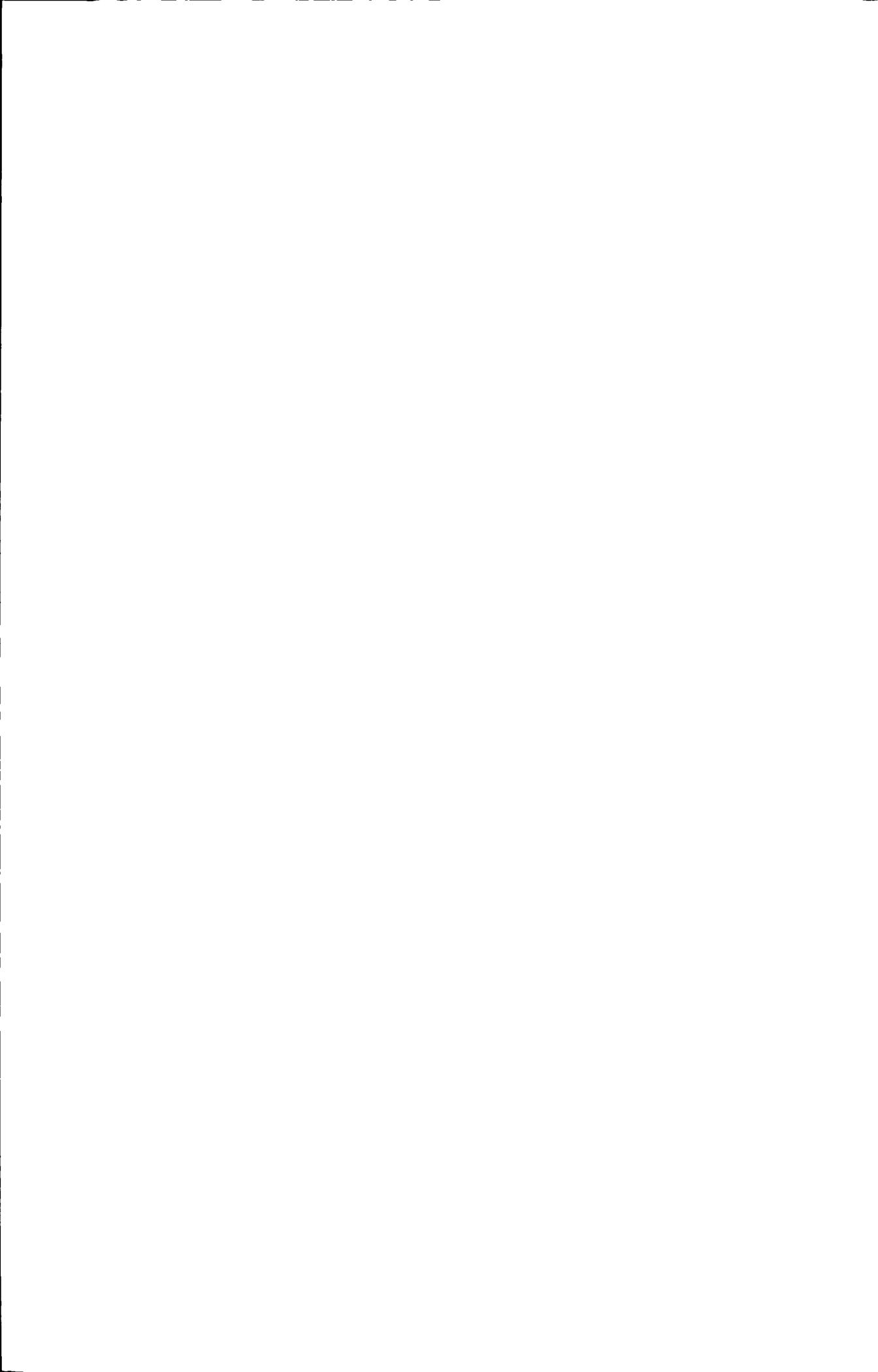
Wu Zhangjian(High Voltage and Insulation Technique)

Directed by prof. Li Cheng Rong

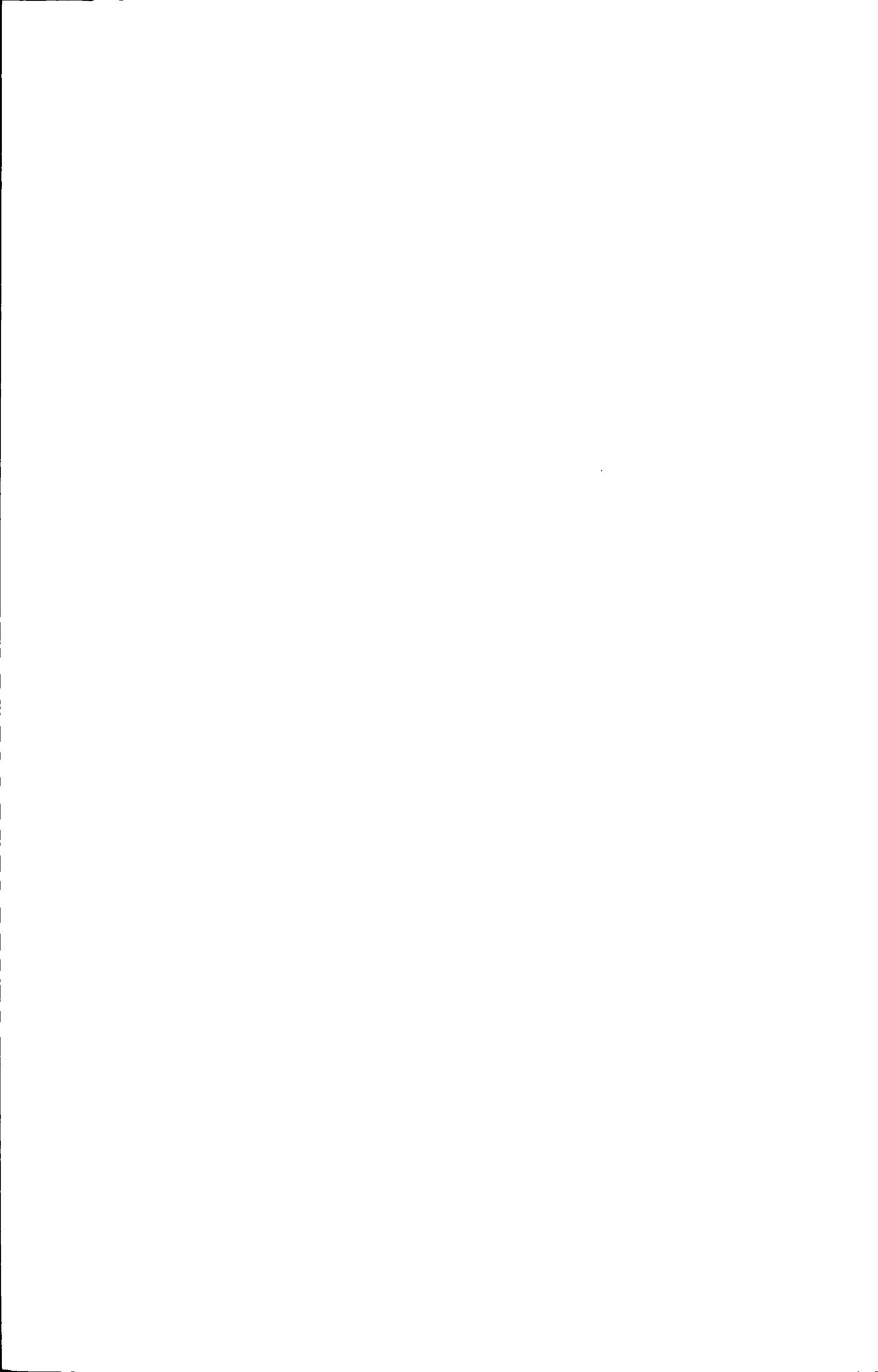


目 录

摘 要.....	1
第一章 引 言.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 抗干扰措施的研究.....	2
1.2.2 干扰模式库的建立.....	5
1.2.3 局部放电模式识别的研究.....	5
1.3 目前存在的问题.....	6
1.4 本文的主要工作.....	9
第二章 GIS 设备局部放电典型干扰信号的研究平台及分析方法.....	10
2.1 研究平台.....	10
2.1.1 GIS 腔体.....	10
2.1.2 电源装置.....	11
2.1.3 放电干扰模型.....	11
2.1.4 检测装置.....	12
2.1.5 数据采集装置.....	13
2.1.6 数据分析软件.....	14
2.1.7 试验回路.....	15
2.2 数据分析方法.....	16
2.2.1 散点图.....	16
2.2.2 二维柱状图.....	17
2.2.3 三维谱图.....	18
2.2.4 灰度图.....	19
2.2.5 等效时频分析.....	20
第三章 外置式 UHF 传感器获得的典型干扰信号的模式.....	22
3.1 手机干扰信号的模式研究.....	22
3.1.1 GSM 与 CDMA.....	22
3.1.2 GSM 制式手机干扰信号的模式研究.....	23
3.1.3 CDMA 制式手机干扰信号的模式研究.....	27
3.2 电晕放电干扰信号的模式研究.....	29
3.2.1 干扰模型.....	29
3.2.2 电晕放电干扰信号的模式.....	31



3.3 悬浮放电干扰信号的模式研究.....	34
3.3.1 干扰模型.....	34
3.3.2 悬浮放电干扰信号的模式.....	36
3.4 沿面放电干扰信号的模式研究.....	39
3.4.1 干扰模型.....	39
3.4.2 沿面放电干扰信号的模式.....	40
3.5 灯具干扰信号的模式研究.....	43
3.5.1 高压汞灯的工作原理.....	43
3.5.2 灯具干扰信号的模式.....	46
第四章 介质窗口式 UHF 传感器获得的典型干扰信号的模式	50
4.1 手机干扰信号的模式研究.....	50
4.1.1 GSM 制式手机干扰信号的模式研究.....	50
4.1.2 CDMA 制式手机干扰信号的模式研究.....	54
4.2 电晕放电干扰信号的模式研究.....	55
4.2.1 干扰模型.....	55
4.2.2 时频分析图.....	55
4.3 悬浮放电干扰信号的模式研究.....	56
4.3.1 干扰模型.....	56
4.3.2 悬浮放电干扰信号的模式.....	57
4.4 沿面放电干扰信号的模式研究.....	60
4.4.1 干扰模型.....	60
4.4.2 时频分析图.....	61
4.5 灯具干扰信号的模式研究.....	62
第五章 结 论	63
5.1 论文的主要结论.....	63
5.2 进一步研究工作的展望.....	65
参 考 文 献	66
在学期间发表的学术论文情况	71
致 谢	72



第一章 引言

1.1 研究背景及意义

气体绝缘金属封闭组合电器 (Gas Insulated Substation, 简称 GIS) 是以 SF₆ 作绝缘介质的金属封闭组合设备, 也称为气体绝缘变电站^[1]。它是把变电站里除变压器外的各种电气设备, 包括断路器、隔离开关、接地开关、电压互感器、电流互感器、母线 (三相或单相)、连接管和过渡元件 (SF₆-电缆头、SF₆-空气套管、SF₆-油套管) 等全部组装在一个金属外壳内, 并充以 0.4~0.5Mpa 的 SF₆ 气体以实现高压导体对外壳、相间以及断口间的可靠绝缘^[2]。与常规敞开式变电站相比, GIS 具有占地面积小、维护工作量少、绝缘性能优良、可靠性高等优点, 因而被广泛应用于高压输电领域^[3-6]。随着电网电压等级和系统容量的不断增加, GIS 设备的内部故障率也随之升高^[7], 因此寻找能够有效的评估 GIS 内部绝缘状态的方法尤为重要。目前国际上主要通过局部放电的检测得以实现^[8]。局部放电不仅是 GIS 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 GIS 的电气绝缘性能降低, 最终导致绝缘击穿或沿面闪络^[9-14]。

常见的 GIS 设备局部放电的检测方法有: 常规脉冲电流法^[15-17]、特高频 (UHF) 法^[18-23]、超声波法^[24-28]等。常规脉冲电流法的应用时间较长, 有国际标准 IEC 60270^[15]和国家标准 GB/T7354^[29]来规范其检测回路、标定方法和试验程序等, 可以获得局部放电的视在放电量, 但是信噪比低, 抗干扰性较差, 而且难以实现在线监测。UHF 法利用 GIS 中局部放电辐射出的特高频电磁波信号进行检测, 有效的避开了实际应用中常见的电磁干扰, 抗干扰能力较强, 检测效率较高, 并且可以实现在线监测、故障点定位以及放电模式识别等, 但是放电量难以标定。超声波法是利用安装在 GIS 设备外壳上的超声波传感器接收局部放电产生的振动信号以达到检测内部局部放电的目的, 传感器与待测设备的电气回路无任何联系, 抗电磁干扰能力较强, 并且可以实现局部放电故障点的定位, 但是也存在放电量难以标定, 信噪比低, 抗振动干扰性较差以及检测效率较低的不足。

其中, UHF 法由于良好的抗干扰性以及出色的信噪比, 近年来已经在 GIS 设备局部放电的检测或监测中得到了广泛的应用。然而, 在利用 UHF 检测法进行 GIS 设备局部放电检测的实践中, 特别是在设备运行现场进行局部放电检测时, 周围环境中仍然存在着少量的高频干扰信号, 可能会对利用 UHF 信号进行 GIS 设备局部放电的检测与诊断产生不良的影响。因此, 在 GIS 设备局部放电的在线检测和故障诊断中, 能否有效的区分放电信号和干扰信号是实现局部放电可靠评估的前提所

在。本文对 GIS 设备局部放电检测过程中典型的干扰信号进行研究, 获得基于 UHF 检测法的 GIS 设备中常见干扰信号的模式, 可以为实现 GIS 设备局部放电检测中放电信号和干扰信号的可靠区分, 以及利用特高频检测法实现 GIS 设备内部局部放电的诊断与评估奠定一定的技术基础。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 抗干扰措施的研究

在局部放电在线监测中, 干扰源分为两类, 一类是由监测系统本身造成的干扰; 另一类是系统之外的来自变电站的干扰。这些干扰进入监测系统的途径有空间耦合, 地线, 电源以及通过系统各测量点四种。前三种可采用硬件电路将干扰抑制到足够小的水平; 而与局部放电信号一起通过监测系统各测量点进入监测系统的干扰以及监测系统本身的干扰只能通过后处理的方法抑制。这类干扰信号按照频域特征可分为窄带干扰和宽带干扰。按照时域信号特征可分为连续的周期型干扰, 脉冲型干扰和白噪声三类, 而脉冲型干扰又可以进一步分为周期型脉冲干扰和随机脉冲干扰^[30]。

连续的周期型干扰包括: ①电力系统载波通信和高压保护信号引起的干扰; ②无线电干扰。此类干扰的类型通常是高频正弦波, 有固定的谐振频率和频带宽度。

脉冲型干扰信号包括: ①供电线路或高压端的电晕放电; ②电网中的开关, 晶闸管整流设备闭合或开断引起的脉冲干扰; ③电力系统中其他非检测设备放电引起的干扰; ④试验线路或邻近处的接地不良引起的干扰; ⑤浮动电位物体放电引起的干扰; ⑥设备的本机噪音和其他的随机干扰。此类干扰在时域上是持续时间很短的脉冲信号, 而在频域上是包含多种频率成分的宽带信号, 具有与局部放电信号相似的时域和频域特征。

白噪声包括: 各种随机噪声, 如变压器绕组的热噪声、配电线路及变压器继电保护信号线路中由于耦合进入的各种噪声以及监测线路中的半导体器件的散粒噪声等。理论上, 白噪声干扰的功率谱为恒定常数, 分布在整个频段上; 而在实际应用中, 若其频谱在较宽频段上为连续平缓的即可认为是白噪声^[31]。

根据噪声的不同, 可以有不同的抑制干扰的方法:

(1) 连续的周期型干扰 (窄带干扰)

连续的周期性干扰也称之为窄带干扰, 它在各类干扰中占有很大的比重。干扰的抑制和消除也应首先由此入手^[32]。软件上一般采用各种数字滤波方法, 如 FFT 阈值滤波器, 自适应滤波器, 非自适应滤波器, 固定系数滤波器, 多通带滤波器等。印度的 V. Nagesh 等人从干扰的抑制比, 波形畸变等方面对各种数字滤波方法作了

评估^[33],认为在各种方法中,使用级联的二阶 IIR 点阵陷波固定系数滤波器是最佳的方法,该滤波器具有对周期性干扰抑制比高,对局放脉冲波形畸变最小,对脉冲干扰稳定性好以及处理时间少等优点。

窄带干扰抑制的算法较多,也较成熟。从应用效果来看,固定系数滤波器和多带通滤波器(MDF)较理想。由于MDF在处理数据时需进行多次FFT和IFFT,将花费大量计算时间,不利于实时处理。但根据MDF找到的最佳监测频带,可以形成固定系数的有限冲激响应(FIR)数字滤波器直接在时域处理,简化了操作,加快了处理速度。具体应用在文献^[34-35]中有详尽的论述。

重庆大学的毕为民等人^[36]研究利用小波包变换的频域分割特性,将信号信息测度的香农熵作为局部放电信号的小波包变换树节点存在周期性窄带干扰与否的判据,首次提出了用于抑制局部放电在线监测中周期性窄带干扰的小波包变换熵阈值法。并对局部放电信号的采样率、脉冲波形、衰减时间常数、时间间隔、基小波的选取、干扰的中心频率和数目、熵阈值以及信噪比等对小波包变换抑制窄带干扰处理效果的影响进行了仿真研究及实例分析,其结果表明小波包变换熵阈值法抑制周期性窄带干扰能力强,无需事先确定干扰的分布,能够准确检测局部放电信号的相位信息。

清华大学的高盛友、朱德恒等人研究了基于FFT和Chebyshev滤波算法的滤波器,并将二者结合对由法国电力公司(EDF)研制的局部放电监测系统所采集到的现场监测数据进行干扰抑制处理,结果证明该方法可有效地抑制局部放电在线监测信号中的周期性窄带干扰,将局部放电信号提取出来,信噪比可提高约15~20dB^[37]。

哈尔滨工业大学的王哲、蔡惟铮等人在局部放电在线监测中抑制载波通讯干扰研究中,引入竞争学习网络的“自激励,邻抑制”作用,提出了一种基于FFT和ANN的新数字滤波方法。仿真实验和现场数据的分析结果表明:该方法快速有效,能很好地满足局部放电在线监测的需要^[38]。

重庆大学的唐炬等人采用复小波方法抑制窄带干扰和白噪声,并成功地构建出了db系列复小波,并给出了db3和db4复小波滤波器组系数;同时,首次提出用于复小波变换的有效小波阈值法,对染噪后的PD仿真混合信号进行了去噪,经分解和重构分析表明,所构建的复小波及其算法用有效小波阈值法,具有较高的准确性^[39]。

(2) 周期脉冲型干扰

对于周期脉冲型干扰的数字处理方法,V. Nagesh和B. I. Gururaj^[40]等人提出了一种较好的消除周期脉冲型干扰的方法,其基本原理是从局部放电信号与周期型脉冲干扰信号具有不同的形状出发,首先进行数据分段,把脉冲从波形信号中分离出来,形成单个脉冲序列,利用FFT算法在频域对各脉冲进行互相关计算,判断其相似度

并按照一定的标准进行分组, 根据这些组脉冲求取类信号模板, 然后对每一类的信号在时域进行合成。利用局部放电信号出现的相位较分散, 而干扰信号的相位则较固定、集中这一特点来剔除周期型脉冲干扰。该算法还可用来研究脉冲时间间隔分布以及识别变压器中不同放电点引起的局部放电脉冲, 有可能成为在线检测局部放电数字处理的一种通用算法。

G. KONIG 和 U. KOPF 提出一种方法^[41], 首先记录多个周期的信号, 然后对每个周期同相位上的数据进行平均, 以此构成模板同原始信号相减, 从而消除周期型的干扰信号。此种方法当局放信号较少并且分布特点比较明确的时候去除干扰的效果很好, 当局放信号多且强的时候效果不好。

(3) 随机型脉冲干扰

随着计算机技术和数字信号处理技术的发展, 利用脉冲信号特征进行逻辑判断也可抑制干扰。它的前提是脉冲识别, 即判断脉冲是否存在、脉冲持续时间和相应的起点和终点, 以便较准确地确定放电相位和声波时延。

目前脉冲识别多采用阈值识别法。而现场测量的脉冲多是衰减震荡波, 该法很易误判且无法确定脉冲持续时间。B. A Fruth 和 D. W. Gross 等人^[42]提出一种结合脉冲幅值阈值和波形特征来识别振荡脉冲的方法, 并在实用中得到了较好效果。

(4) 白噪声

白噪声在时域中表现为无规律的随机运动, 在频域中则表现为在整个频带上均匀分布, 因而单从频域或时域都不能有效地抑制白噪声。在小波去噪算法提出之前, 往往采用时域平均的方法来抑制包括白噪声在内的随机型干扰, 但效果并不理想。小波去噪算法的出现较有效地解决了这一难题。目前小波去噪算法主要有两类: 模极大值法和阈值法。模极大值法是由 Mallat 首先提出的^[43], 他通过理论分析发现, 白噪声和信号的小波变换系数的模极大值沿尺度具有不同的传递特性, 因而可根据这种差别来滤除白噪声。然而这种方法在具体的实现过程中需要进行十几次交错投影, 不仅计算速度慢, 而且算法也不够稳定。另外, 模极大值点的确定具有很大的主观性和随机型, 因而实际应用并不多。Donoho 和他的同事在统计估计理论研究的基础上, 提出了一种基于小波变换门限值的去噪方法-阈值法^[44], 并对此进行了一系列深入的研究^[45]。该方法对去除白噪声和载波干扰都比较有效, 而且容易实现, 运算量小。然而在这一算法的具体应用过程中, 需要考虑小波分解和重构算法、小波函数、分解尺度以及门限值的选择等问题, 选择不当将极大地影响去噪的效果。西安交通大学的王晓蓉等人^[46]在对局部放电信号和白噪声的小波分解特性进行分析的基础上, 从尽可能减小去噪对局部放电脉冲畸变的角度出发, 对阈值法做了改进。改进算法更有效地提取局部放电的脉冲波形, 而且干扰越强, 其优势越明显。

重庆大学的毕为民^[36]将基于小波包变换的非平稳信号消噪算法应用于局部放

电在线监测抑制白噪声干扰,通过研究其对不同局部放电波形、采样率、噪声水平下的处理效果,首次提出了理想白噪声条件下提取局部放电信号的曲线,分析了各种因素对该算法下信号失真的影响。分析表明:小波包变换使用于去除白噪声干扰。有效,准确,稳定。

重庆大学的孙才新、李新等人提出一种从已消除周期型干扰和脉冲型干扰的白噪声中提取局部放电信号的自相关函数小波变换和从小波反变换后的自相关函数中提取局部放电信息的方法,不仅可以显著提高信噪比,而且可以重构局部放电信号^[47]。

1.2.2 干扰模式库的建立

国内的无线电专业学科对此研究较多,但是局限于其专业领域内,主要针对无线电的监测方法和干扰识别方法有很多的成果,但如何结合到 GIS 设备局部放电检测中干扰信号的模式库尚未见报道。华北电力大学的赵清姣^[48]等人曾对电晕干扰、悬浮电位、沿面闪络、金属颗粒对、手机信号等干扰的波形特征做过初步的探索,但较为简单,深度和广度有待于进一步提高;华北电力大学的卢启付等人^[49]为进行变压器局部放电检测中 UHF 传感器检测频带的选择,曾经进行过移动通讯干扰、电火花干扰、空气电晕放电干扰、空气悬浮放电干扰、继电器干扰等五种典型干扰信号的时域波形分析和频谱分析等相关研究工作,虽然其研究初衷是为变压器局部放电的检测选择合适的 UHF 传感器的检测带宽,但是对于本研究工作有一定的参考性和可借鉴性。

在目前国外的研究工作主要集中于局部放电抗干扰的硬件、软件技术研究,关于局部放电的干扰以及干扰模式库的研究较少见报道。对于局部放电的干扰模式进行过研究的是英国的 DMS 公司。DMS 在其开发的便携式 GIS 局部放电检测仪器的软件 (PortSUB)^[50]中,包含了 LightsNoise、MobileNoise、MotorNoise、RadarNoise 等四种以 $n-v-\phi$ 三维谱图为基础形成的干扰模式库。

1.2.3 局部放电模式识别的研究

重庆大学的孙才新、许高峰等人研制了 5 种典型的 GIS 人工模拟缺陷模型及其局部放电检测系统,通过实验获取了大量局部放电样本数据,构造出了 GIS 局部放电灰度图象,提出了有效估计图象盒维数的最少盒计数法,提取了 GIS 局部放电灰度图象的分形特征--盒维数和信息维数,并且利用以局部放电灰度图象的盒维数和信息维数作为识别特征量,径向基函数神经网络为识别分类器的 GIS 局部放电模式识别方法,取得了良好的识别效果^[51]。唐炬、谢颜斌等人采用复小波变换对特高频局部放电信号进行了分解,利用均值、方差、偏斜度、陡峭度、能量共 5 个统

计参量对复小波变换的各尺度系数进行量化,构造出能够描述特高频局部放电信号特征的候选特征子集,引入衡量特征分类能力的分离度指标 J 作为特征量降维的评判指标,从60个特征量中选取了5个具有较高分类能力的最佳特征量,作为径向基神经网络识别放电类型的输入有效向量,实现了GIS设备中不同绝缘缺陷产生局部放电数据和波形的准确识别^[52]。张晓星、唐炬等人提出将主分量分析—线性鉴别方法应用于局部放电模式识别,即首先进行主分量分析,将数据从超高维空间降至低维空间,再提取统计不相关的最优鉴别矢量集,最后采用最小距离分类器进行模式识别,识别结果表明该方法对GIS各类模拟缺陷的正确识别率高,效果良好^[53]。稍后,他们还提出了一种基于多重分形特征的GIS局部放电图谱特征提取方法,对局部放电图像求取了相应的差盒维数、多重分形维数及放电重心特征,给出了基于差盒维数的多重分形计算方法,最后将提取的特征量通过RBF神经网络进行分类,识别结果显示该方法有效地提高了4种GIS局部放电缺陷的识别率^[54]。最近,张晓星、唐炬等人针对线性Fisher鉴别分析用于局部放电故障诊断时存在的问题,提出了一种基于核的统计不相关鉴别矢量集算法(KSUODV),用以解决高维特征空间内的非线性特征提取问题,并且消除了变换后样本特征之间的统计相关性,在对实验室获取的7种缺陷PD三维谱图模式识别试验表明,KSUODV算法的识别性能优于SUODV算法性能,效果良好^[55]。西安交通大学的印华、方志等人综合了自适应遗传算法和BP算法各自的优点,构造了基于两者混合训练的神经网络,应用到GIS局部放电超高频的模式识别,分别用基于自适应遗传算法的神经网络、基于BP算法的神经网络,以及基于自适应遗传算法和BP算法混合训练的神经网络对GIS中多种模式的局部放电进行了识别,他们认为基于自适应遗传算法和BP算法混合训练的神经网络提高了神经网络训练的收敛速度,保证了收敛的可靠性,具有较高的识别率和较强的泛化能力^[56]。

1.3 目前存在的问题

针对GIS设备局部放电的干扰问题的研究现状,目前主要存在以下几个方面的问题:

- 1、尚未对GIS设备局部放电检测中典型的干扰进行全面的研究所。

目前的研究仅从典型干扰的波形信息以及频谱分布特征^[48-49]进行研究,并没有利用灰度图、散点图、柱状图、时频分析(T-F)等统计谱图对干扰信号包含的信息以及特征进行研究,所获得的干扰的特征较少,不能全面的反映GIS设备局部放电检测中典型干扰信号的特征。

- 2、尚没有建立GIS设备局部放电检测中典型干扰的模式库。

模式识别法则是根据不同的脉冲具有不同的特征,通过各种识别方法,区分脉

冲的类型，然后进行放电信号和干扰信号的有效分离。从目前的趋势来看，模式识别法将可能成为抑制随机脉冲干扰的有效方法。但模式识别的实现依赖于指纹库的建立，这就需要对各种放电类型和干扰情况进行系统的分析和总结，同时特征参数的选择是否合适、识别方法是否有效也将直接影响最终的结果。目前，为进行 GIS 设备中局部放电的模式识别，许多科研单位已经在实验室试验的基础上对典型局部放电的特征以及模式进行了大量的研究，获得了大量 GIS 设备典型局部放电的模式库，并提出了诸多模式识别的方法^[51-56]，但是针对典型干扰模式的研究鲜见于报道，尚未建立有效的进行 GIS 设备局部放电检测中干扰信号识别的模式指纹库。

3、尚未对介质窗口式 UHF 传感器的抗干扰能力进行试验研究及验证。

目前，应用较为广泛的特高频传感器按照安装方式的不同可以分为两种：外置式 UHF 传感器和介质窗口式^[57]UHF 传感器。

外置式 UHF 传感器将传感器贴在 GIS 设备盆式或盘式绝缘子的外表面，如图 1.1 所示，依靠绝缘子表面电磁波的泄露进行 UHF 信号的检测，此方法可带电将传感器安装到 GIS 设备需要检测的任意部位，其操作简便，检测灵活，并能够对局部放电源实现快速定位。

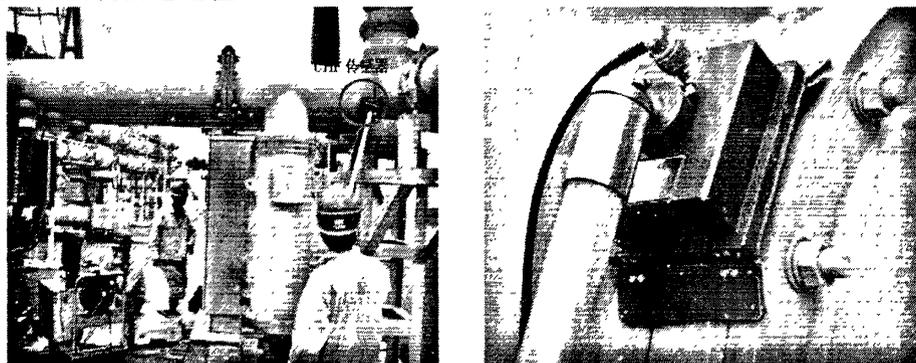


图 1.1 外置式 UHF 传感器

但外置式 UHF 传感器也存在一些问题，第一，生产年份较早的 GIS 设备绝缘子的外缘一般没有金属护套，比较利于局部放电产生的 UHF 信号的传播，但是近几年生产的新设备尤其是 220kV 以上的 GIS 设备，其盆式绝缘子的外缘上一般加装有金属护套，如图 1.2 所示，UHF 信号只能通过金属护套与安装法兰的空隙传出，衰减非常严重，若仍采用外置式 UHF 传感器，其检测灵敏度较低；第二，由于传感器在设备外部，对局部放电进行长期固定式监测时，易受到外界信号的干扰；第三，从 GIS 绝缘子辐射出的电磁波在空间的衰减较大，外部接收到的信号幅值相对于内部信号低，为了达到一定的测量灵敏度，传感器需要配置放大倍数高的 UHF 放大器，导致背景噪声很高；第四，安装于设备外部，易使传感器损坏。

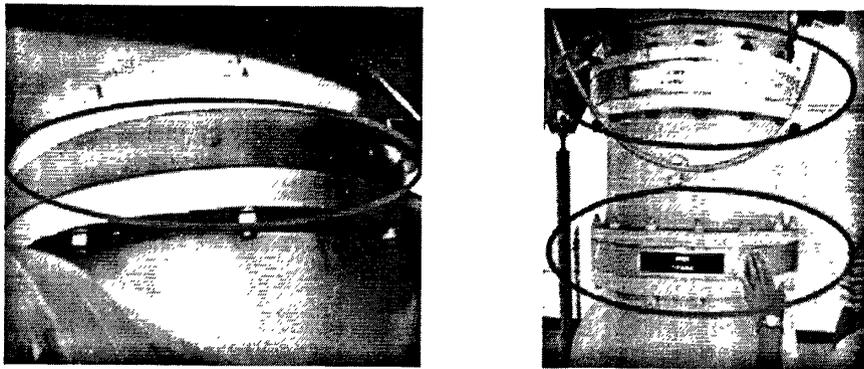


图 1.2 带有金属护套的盆式绝缘子

因此，为克服外置式UHF传感器的缺点，华北电力大学高电压与绝缘技术研究提出了介质窗口式传感器^[58]，如图1.3所示。它是将传感器安装在检修手孔或CT端子箱处，此方法需停电安装或在设备出厂时安装。介质窗口式UHF传感器特别适用于绝缘子带有金属护套的GIS设备局部放电的检测，并且由于GIS设备的金属屏蔽以及同轴波导的结构，其抗干扰性较好，信噪比较高。

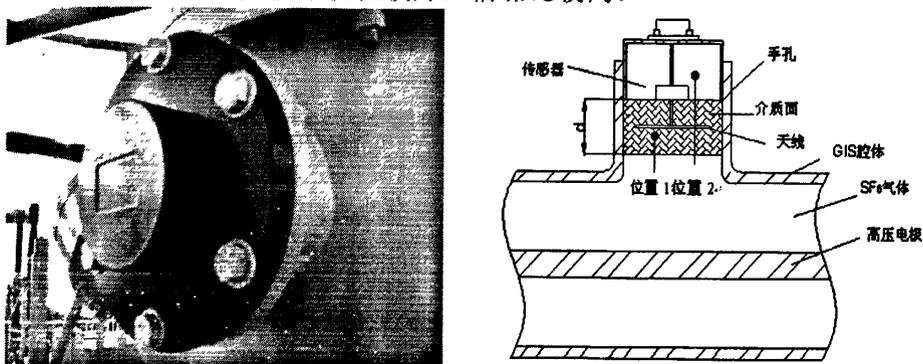


图 1.3 介质窗口式 UHF 传感器

鉴于介质窗口式UHF传感器的优点以及随着电压等级的升高，GIS设备优势更加突出，加之目前220kV以上的GIS设备盆式绝缘子的外缘普遍安装有金属护套，可以看出介质窗口式UHF传感器的应用前景十分广阔。但是目前对于介质窗口式传感器抗干扰能力的研究较少，尚未开展介质窗口式UHF传感器的抗干扰能力的试验研究及验证，更没有建立以介质窗口式UHF传感器为基础的GIS设备局部放电典型干扰的模式库，不利于介质式窗口传感器的推广及应用。

鉴于UHF检测法在GIS设备局部放电检测设备中的广泛应用，本文对基于UHF检测法的GIS局部放电典型干扰模式进行研究，期望通过大量的试验室试验，对GIS设备局部放电检测中典型的干扰进行全面的分析，建立基于UHF检测法的GIS设备局部放电检测中常见干扰信号的模式库，并对介质窗口式UHF传感器的抗干扰能力进行相应的试验研究及验证，进而获得以介质窗口式UHF传感器为基础的GIS设备局部放电典型干扰的模式，从而为实现GIS设备局部放电检测中放电信号和干扰信号的可靠区分，以及利用UHF检测法实现GIS设备内部局部放电的诊断与评

估提供基本的试验依据。

1.4 本文的主要工作

为了研究基于 UHF 检测法的 GIS 局部放电典型干扰的模式，本文主要开展以下几方面的研究工作：

1) 构建 GIS 设备局部放电典型干扰信号的研究平台，其中主要包括试验装置、电源装置、放电干扰模型、检测装置、数据采集装置以及数据分析软件等六部分；

2) 建立 GIS 设备局部放电检测中典型的干扰模型；

3) 对典型干扰模型进行试验研究，对获得的干扰信号采用多种手段进行分析，获得基于 UHF 检测法的 GIS 设备局部放电检测中常见干扰信号的模式库。

4) 对介质窗口式 UHF 传感器的抗干扰能力进行相应的试验研究及验证，进而获得以介质窗口式 UHF 传感器为基础的 GIS 设备局部放电典型干扰的模式。

第二章 GIS 设备局部放电典型干扰信号的研究平台及分析方法

本文构建的GIS设备局部放电典型干扰信号的研究平台主要包括GIS腔体、电源装置、放电干扰模型、检测装置、数据采集装置以及分析软件等六部分，如图2.1所示。本章将详细介绍整套试验平台的各个组成部分以及数据的分析方法。

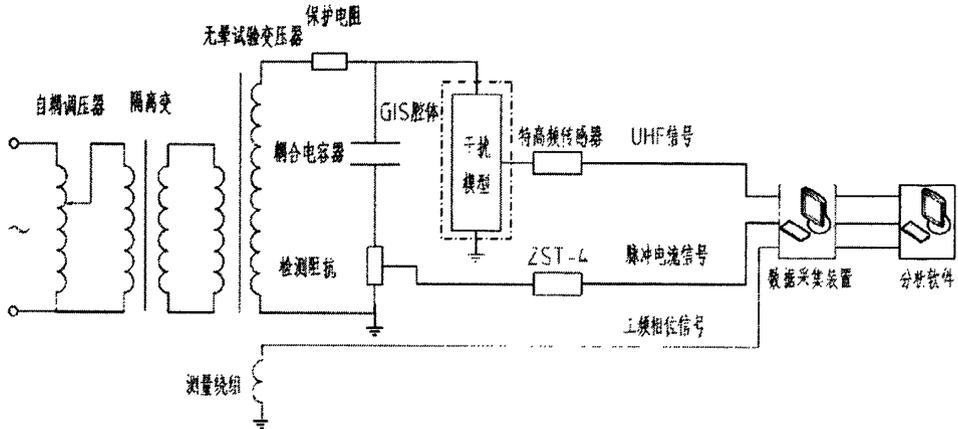


图 2.1 GIS 设备局部放电典型干扰信号的研究平台

2.1 研究平台

2.1.1 GIS 腔体

GIS设备局部放电典型干扰信号模式的研究不能脱离实际设备的运行情况。如果简单的以同轴圆柱体进行模拟，则试验结果与实际情况可能会有较大的差别，因此本文以实际的252kV GIS设备的母线腔作为试验腔体，整体结构如图2.2所示。

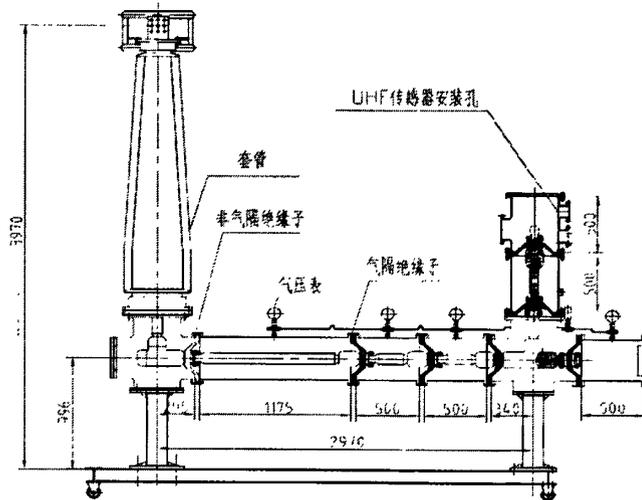


图 2.2 GIS 腔体示意图

试验腔体整体呈L型结构，三相分筒式设计，包含一个高压套管、一个非气绝缘子和六个气绝缘子，构成八个大小不等的气室。每个气室都装设有独立的止逆阀和充气口，供充放气时使用。试验时，各气室中充以0.4MPa的SF₆气体作为绝缘介质，以保证试验条件与实际运行情况相同。当进行介质式UHF传感器抗干扰能力的试验研究时，将介质窗口式传感器安装于GIS腔体的UHF传感器安装孔处。

2.1.2 电源装置

电源装置主要由控制台、调压器、试验变压器、保护电阻以及耦合电容器等五部分组成。试验变压器为YDTW-15/150型工频无晕试验变压器，额定电压150/0.2kV，额定电流0.1/68.2A，额定功率15kVA。保护电阻串联在试验变压器的输出端与试验设备之间，阻值为10k Ω ，用以限制闪络或SF₆击穿时试验变压器高压侧的输出电流，以免电流过大损坏试验变压器。耦合电容器为150kV、300pF高压电容器，与试验腔体并联，以耦合放电模型发生局部放电时产生的脉冲电流信号。电源装置150kV下放电量不大于3pC。输出电压 ≤ 110 kV时，该电源装置可连续运行，以便进行长期试验。

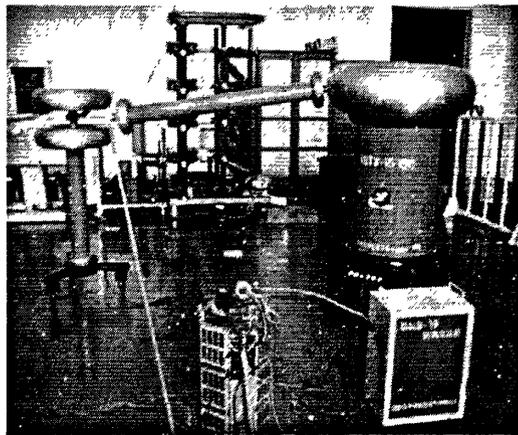


图 2.3 电源装置实物图

2.1.3 放电干扰模型

放电干扰一直是GIS设备局部放电检测中的难题，由于GIS设备运行现场电气条件复杂，因此有必要对各种比较典型的电气干扰进行试验研究，考察不同干扰信号的模式，并且对比研究介质窗口式UHF传感器对不同电气干扰信号的抗干扰性能。本文将现场常见的干扰信号具体化，并且考虑到实验室模拟的难度，建立了五种典型的放电干扰模型，分别为手机信号干扰（含GSM和CDMA制式）、电晕放电干扰、悬浮放电干扰、沿面放电干扰以及灯具干扰，如图2.4所示。

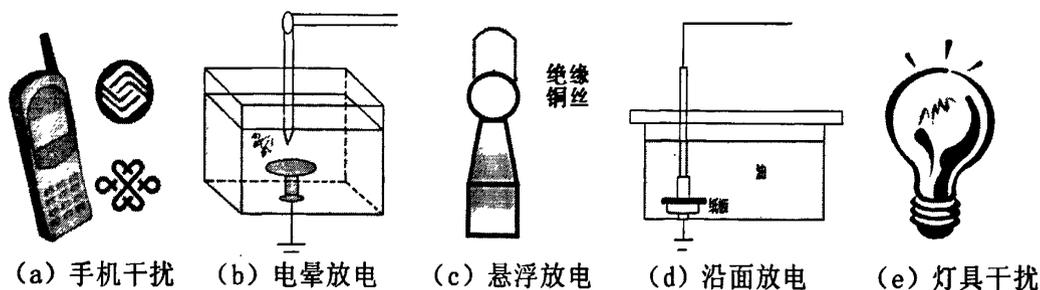


图 2.4 典型干扰模型

典型干扰模型的说明如下：

(a) 手机干扰：移动电话产生的干扰信号，主要对GSM和CDMA两种制式的手机进行研究，分别通过拨打GSM制式和CDMA制式的手机进行模拟；

(b) 电晕放电：模拟输电线路或变电站内套管内部产生的电晕放电所可能形成的干扰信号，通过油中施加工频电压的针—板放电模型进行模拟；

(c) 悬浮放电：模拟变电站内悬浮电位产生的悬浮放电所可能形成的干扰信号，通过空气中施加工频电压的环形绝缘铜丝进行模拟；

(d) 沿面放电：模拟电气设备内部的沿面放电所可能形成的干扰信号，通过油中施加工频电压的柱—板沿面放电模型进行模拟；

(e) 灯具干扰：模拟设备安装场所附近的灯具所可能产生的干扰信号，通过目前现场使用较为广泛的GYZ250型自镇流荧光高压汞灯进行模拟。

2.1.4 检测装置

在试验过程中，本文分别对于干扰信号产生的常规脉冲电流信号以及特高频信号进行检测与记录，以获得视在放电量以及放电幅值、放电相位等信息。

(1) 常规脉冲电流信号的检测

常规脉冲电流法是人们研究最多也是最成熟的技术，可以通过此方法获得干扰信号的视在放电量^[59]。常规脉冲电流信号的检测采用DST-4型局部放电检测仪，如图2.5所示，检测频带为40kHz~80kHz，含检测阻抗一只、校正方波发生器一只，分别用于进行放电脉冲电流信号的耦合和视在放电量的标定^[60]。为确保试验过程中测量设备的安全，常规脉冲电流信号的检测采用并联测试回路^[61]，即将检测阻抗通过耦合电容器进行放电脉冲电流信号的检测，经过试验测试，本文所采用局部放电检测仪的最小可检测的局放量为4pC。

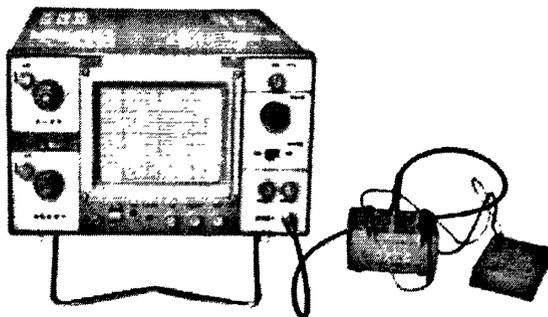
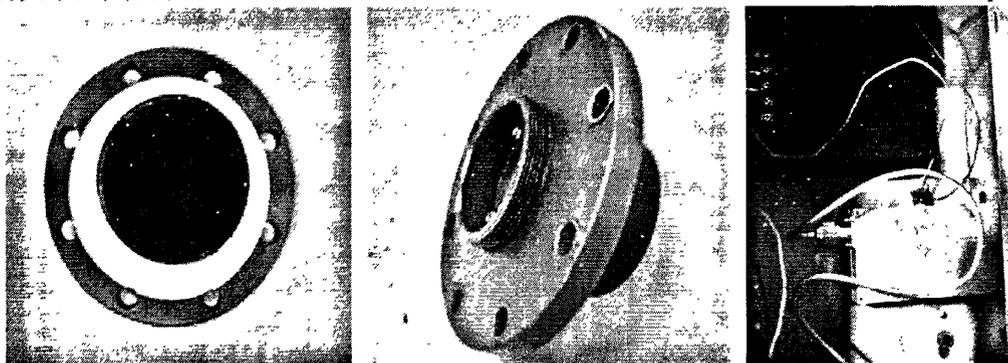


图 2.5 常规脉冲电流检测系统

(2) 特高频信号的检测

特高频传感器主要由宽带天线与特高频放大器组成，如图2.6所示。宽带天线采用平面等角螺旋天线，天线接收面敞开用于接收UHF放电信号，其余面均采用金属屏蔽，以提高天线的抗干扰性能，天线用环氧树脂密封，并加工相应的金属结构以便于进行安装。特高频放大器由放大器、高通滤波器、检波器、耦合器和屏蔽外壳组成，放大器的工作带宽为300MHz~1500MHz，增益为40dB，噪声系数 $NF \leq 3\text{dB}$ 。检波器将放大器的输出信号进行调制，仅保留信号的幅值和相位信息，大大降低了对数据采集设备采样率的要求，同时减少了数据量，便于进行后续的信号处理工作，因此本文采用特高频放大器输出的检波信号进行特高频信号的数据分析。另外由于特高频信号经过检波处理后只保留了放电脉冲信号相位和幅值信息，丧失了局部放电特高频原始信号的时域和频域上的特征信息，因此本文除对特高频的检波信号进行采集与分析外，还对局部放电的特高频原始射频信号进行采集和分析。由于UHF信号目前无法实现视在放电量的标定，因此用检波信号的幅值来等效的描述放电量的大小，单位为V。通过实际测试，本文所采用特高频放大器的最小检测局放量 $< 3\text{pC}$ 。



(a) 宽带天线接收面

(b) 天线连接法兰

(c) 特高频放大器

图 2.6 特高频传感器

2.1.5 数据采集装置

为实现试验过程中干扰信号产生的常规脉冲电流信号、UHF的检波信号以及相

应的工频相位等试验数据实时采集和记录,本文基于LabVIEW和DAQ2010数据采集卡开发了一套3通道同步数据采集装置,采样率2MS/s,存储深度 4×10^4 Samples,采用外触发工作方式实现各通道之间数据的同步性,同时为保证数据采集系统的可靠性和抗干扰性,数据采集系统的所有硬件和软件安装在一台工业控制计算机中,以实现试验数据的自动采集和存储。数据采集装置的实物照片和主要采集界面如图2.7(a)、(b)所示。

UHF的原始射频信号由LeCroy Wavemaster 8620示波器采集,如图2.7(c)所示,采用的采样率为20GS/s。由于单次局部放电特高频信号的持续时间一般不超过100ns,为了满足本文对局部放电特高频信号波形的要求,采样时间设为100ns,从而保证能够采集一个完整的局部放电的原始射频信号。

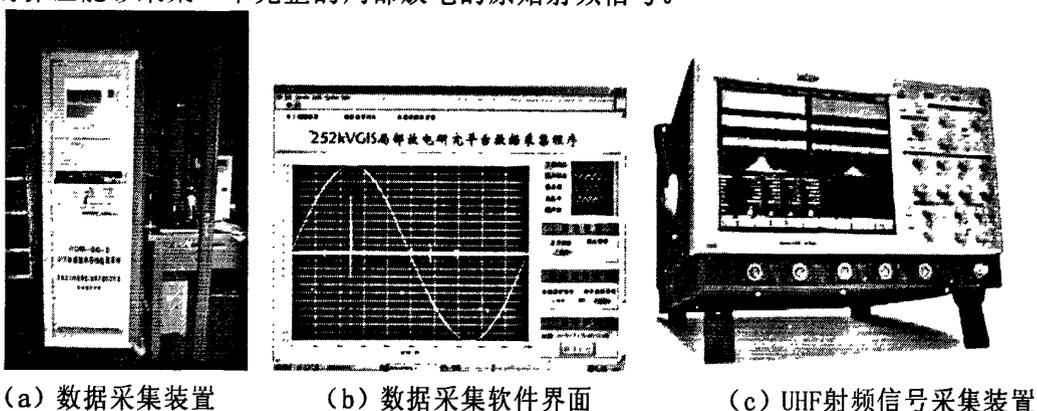


图 2.7 数据采集记录装置

2.1.6 数据分析软件

GIS设备局部放电典型干扰信号的试验研究会产生大量的原始数据,如果这些数据仅仅靠人工进行分析,无疑将耗费大量的时间,并且分析结果的客观性和科学性也难以得到保证。考虑到LabVIEW程序开发的便捷性和高效性,本文利用LabVIEW为开发平台进行了数据分析软件的编写和调试。

本文的数据分析软件采用逐步分析的方法,按照软件工程的规范要求进行设计,实现结构层次化、功能模块化,大大增强了软件的可读性、可扩展性和可靠性。软件的主要功能模块包括:原始放电脉冲提取、放电特征值生成、散点图生成、柱状图生成、灰度图生成、三维图生成、时频分析TF图生成、波形回放等多个功能模块,部分数据分析软件的界面如图2.8所示。

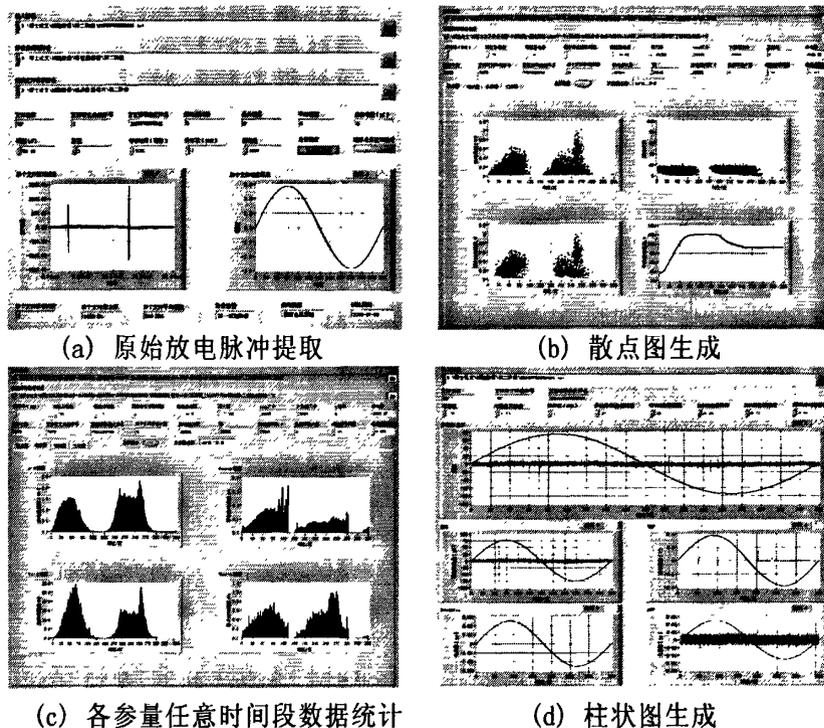


图 2.8 数据分析软件的部分程序界面

2.1.7 试验回路

试验回路示意图如图2.9所示。

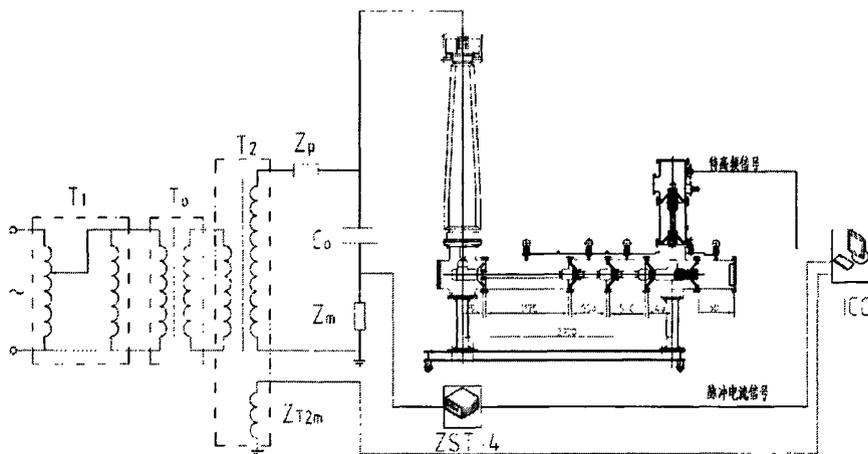


图 2.9 试验回路示意图

试验电源经自耦调压器T1调压输出后接入隔离变压器T0，以实现高压试验回路和低压电源回路的电气隔离，防止从低压电源侧引入干扰，然后由隔离变压器T0输出到工频无晕试验变压器T2上。 Z_p 为保护电阻， C_x 为相应的干扰放电模型， C_o 为耦合电容器， Z_m 为ZST-4型局部放电检测仪的检测阻抗。ICC为局部放电数据采集装置，工频相位信号、脉冲电流信号、UHF信号通过ICC同步采集并保存，以便进行后期的数据分析，UHF信号的射频信号通过高速示波器进行采集与记录。试验设

备布置的实物照片如图2.10所示。

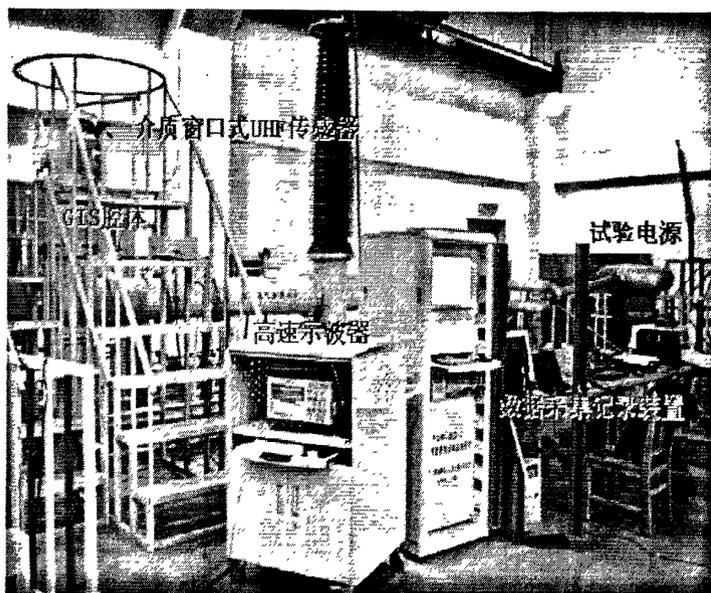


图 2.10 试验设备布置的实物照片

2.2 数据分析方法

统计脉冲次数 N 、视在放电量 Q (或脉冲幅值 V , 以下均以视在放电量 Q 代表) 及其所在相位, 可以得到多种放电干扰的谱图。考虑到放电干扰信号的基本参数具有较强的统计分散性, 通常将多工频周期检测所得到的放电干扰参数折算到一个工频周期内, 以突出它们的统计规律性。本文采用的放电干扰信号特征的分析方法如下。

2.2.1 散点图

将放电干扰信号的幅值相位幅值序列 (φ_i, q_i) 以打点的方式绘制在二维 $q-\varphi$ 坐标系内, 即可得到 $q-\varphi$ 二维散点图。虽然散点图中各点的分布看似杂乱无章, 不能用简单的函数关系表示, 但是由于图中的数据未经任何统计处理, 故能充分反映放电干扰的分散性, 并且隐含放电干扰的幅值 q 与脉冲相位 φ 的密切程度。因此 $q-\varphi$ 散点图可以清晰的在 $q-\varphi$ 平面显示放电干扰的集中区和散布区, 不仅能反映单次放电干扰的情况, 而且也在一定程度上揭示了其统计规律性。

为挖掘这种隐含的规律性, 本文进行了两种 $q-\varphi$ 散点图的绘制, 即 $q-\varphi$ 散点图和 $q_{max}-\varphi$ 散点图。 $q-\varphi$ 散点图是将所研究时间段内所有放电干扰脉冲的相位幅值序列 (φ_i, q_i) 均以打点的方式显示出来, 而 $q_{max}-\varphi$ 散点图仅将所研究时间段内每个工频周期中的最大脉冲幅值及其对应的相位 $(\varphi_{maxi}, q_{maxi})$ 以打点的方式显示出来, 因此 $q_{max}-\varphi$ 散点图是 $q-\varphi$ 散点图的子集, 但由于 $q_{max}-\varphi$ 散点图仅仅包含一个工频周期内放电干

扰脉冲最大值的幅值和相位信息，因而更能清晰的展现出放电干扰的幅值随相位变化的规律。如无特别描述，本论文中相位零参考点均选择为工频正弦相位的过零点。

2.2.2 二维柱状图

(1) $N-\varphi$ 柱状图

将一个工频周期 (360°) 等分为若干个相位窗，每个相位窗 φ_j 内的放电干扰的次数 N_j 为

$$N_j = \sum_{s=1}^M n_{js} \quad (2-1)$$

其中， M 为检测的工频周期总数， n_{js} 为第 s 个周期在相位窗 φ_j 内的放电干扰的次数，将 N 视为 φ 的函数，并以柱状图表示，可以做出 $N-\varphi$ 柱状图。 $N-\varphi$ 柱状图可以反映放电干扰的次数随相位的分布规律，即反映放电干扰的次数对相位的分布情况。

(2) $n-\varphi$ 柱状图

从 $N-\varphi$ 柱状图的绘制方法可以看出，虽然从 $N-\varphi$ 柱状图中可以看出放电干扰的次数与相位的分布关系，但是放电干扰的次数 N 与检测周期总数 M (在一定程度上也代表了检测时间) 直接相关，因此不利于描述检测周期总数不同时放电干扰的次数与脉冲相位的关系，为解决此问题，本文可以引入脉冲重复频率 n ，脉冲重复频率 n 是单位时间内放电干扰的脉冲次数，通常是以每秒中放电干扰的平均脉冲个数来表示。因此对公式 (2-1) 进行修正，可以得到每个相位窗 φ_j 内的脉冲重复频率 n_j 为

$$n_j = \sum_{s=1}^M n_{js} \cdot \frac{50}{M} \quad (2-2)$$

其中， M 为检测的工频周期总数， n_{js} 为第 s 个周期在相位窗 φ_j 内的放电干扰的次数，将 n 视为 φ 的函数，并以柱状图表示，可以做出 $n-\varphi$ 柱状图。 $n-\varphi$ 柱状图反映的是放电干扰的脉冲重复频率随相位的分布规律，即反映脉冲重复率对相位的分布情况。

(3) $q_{max}-\varphi$ 柱状图

将一个工频周期 (360°) 等分为若干个相位窗，每个相位窗 φ_j 内的最大放电干扰的幅值 q_{jmax} 为

$$q_{jmax} = \text{MAX}_{s=1}^M [\text{MAX}_{i=1}^{n_s} (q_{jsi})] \quad (2-3)$$

其中， M 为检测的工频周期总数， n_{js} 为第 s 个周期在相位窗 φ_j 内的放电干扰脉冲的次数， q_{jsi} 为第 s 个检测周期在相位窗 φ_j 内第 i 次放电干扰脉冲的幅值。将 q_{max} 视为 φ 的函数，并以柱状图表示，可以做出 $q_{max}-\varphi$ 柱状图。 $q_{max}-\varphi$ 柱状图反映的是最

大放电干扰的幅值随相位的分布。

(4) $q_{total}-\varphi$ 柱状图

将一个工频周期 (360°) 等分为若干个相位窗, 每个相位窗 φ_j 内的总放电干扰的幅值 q_{jtotal} 为

$$q_{jtotal} = \sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^{n_{js}} q_{jsi} \quad (2-4)$$

其中, M 为检测的工频周期总数, n_{js} 为第 s 个周期在相位窗 φ_j 内的放电干扰的脉冲次数, q_{jsi} 为第 s 个检测周期在相位窗 φ_j 内第 i 次放电干扰的幅值。将 q_{total} 视为 φ 的函数, 并以柱状图表示, 可以做出 $q_{total}-\varphi$ 柱状图。 $q_{total}-\varphi$ 柱状图反映的是总放电干扰的幅值随相位的分布规律。

(5) $q_{ave}-\varphi$ 柱状图

将一个工频周期 (360°) 等分为若干个相位窗, 每个相位窗 φ_j 内的平均放电干扰的幅值 q_{jave} 为

$$q_{jave} = \frac{\sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^{n_{js}} q_{jsi}}{\sum_{s=1}^M n_{js}} \quad (2-5)$$

其中, M 为检测的工频周期总数, n_{js} 为第 s 个周期在相位窗 φ_j 内的放电干扰的脉冲次数, q_{jsi} 为第 s 个检测周期在相位窗 φ_j 内第 i 次放电干扰的幅值。将 q_{ave} 视为 φ 的函数, 并以柱状图表示, 可以做出 $q_{ave}-\varphi$ 柱状图。 $q_{ave}-\varphi$ 柱状图反映的是平均放电干扰幅值随相位的分布规律。

2.2.3 三维谱图

放电干扰信号的 $n-q-\varphi$ 三维谱图可以看成是 $n-q$ 谱图和 $n-\varphi$ 谱图的合成, 它反映了单位时间内, 发生在一定相位窗内具有一定幅值的放电干扰的脉冲数目, 即脉冲重复频率随相位和脉冲幅值的分布特性。 $n-q-\varphi$ 三维谱图可以比较的全面反映局部放电干扰脉冲的统计特性, 是最为常见的放电干扰模式的描述方式。脉冲重复频率可以视为干扰脉冲的幅值和脉冲相位的函数, 将 $q-\varphi$ 平面划分为 $N_\varphi \times N_q$ 个小格, 每个小格的中心为 (φ_i, q_j) , 统计在该小格中的单位时间内放电干扰脉冲的个数即可得出脉冲重复频率

$$n(\varphi_i, q_j) = \frac{\sum_{s=1}^M n_s(\varphi_i, q_j)}{M} \times 50 \quad (2-6)$$

其中, $n(\varphi_i, q_j)$ 是发生在以 (φ_i, q_j) 为中心的小格中放电干扰的脉冲重复频率, M 为对局放信号进行检测的工频周期数, $n_s(\varphi_i, q_j)$ 是第 s 个检测周期内在小格 (φ_i, q_j) 内放电干扰脉冲的个数, $s=1, 2, \dots, M$ 。因此, $n-q-\varphi$ 三维谱图反映了放电干扰的幅值在一定范围内的脉冲重复率对相位窗的分布情况。

本文中,为全面的表现放电干扰的统计特性,取 $N_\varphi=360$, $N_q=100$,将 φ - q 平面划分为 $360 \times 100=36000$ 个小格,即相位分辨率为 1° ,幅值分辨率为 1% 。

2.2.4 灰度图

q - φ 灰度图是将干扰脉冲重复频率 n 随脉冲幅值 q 与脉冲相位 φ 的分布情况以二维图像的方式表示出来,可以看成是 n - q - φ 三维谱图向 q - φ 平面的投影,并且将脉冲重复频率 n 值的大小转化为灰度值 (n 值越大,灰度值越大) 而得到的,是 n - q - φ 三维谱图的平面化描述,也反映的是放电干扰幅值在一定范围内的放电干扰的脉冲重复率对相位窗的分布情况。

因此放电干扰 q - φ 灰度图像的构造方法与 n - q - φ 三维谱图的构造方法类似,首先将工频相位划分为 N_φ 个小区间,将视在脉冲幅值划分成 N_q 个小区间,因而 q - φ 平面被划分成 $N_\varphi \times N_q$ 个小格,依次统计各小格内的脉冲重复频率,脉冲重复频率的不同反映在灰度图像上就是图像的颜色不同,定义脉冲重复频率与图像颜色的映射关系后,然后根据小格内脉冲重复频率的最小值和最大值分别对应于最小灰度级和最大灰度级的原则,就可以构造出局部放电干扰信号的灰度图像,因此 q - φ 平面上每一个小格代表灰度图中的一个像素,该小格内的脉冲重复频率正比于像素的灰度值。由于在计算机图像处理中,每一个像素用一个字节来表示,每个字节的变化范围为 $0 \sim 255$,因此灰度图中灰度级的变化范围为 $0 \sim 255$,各像素点的灰度级为:

$$m_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_{max}} \times 255 \quad (2-7)$$

其中 m_{ij} 为图像像素点灰度; n_{ij} 为各小格内的脉冲重复频率; n_{max} 为各小格内的最大脉冲重复频率。考虑灰度图的计算机实现方法, N_φ 、 N_q 通常取 2 的整数次幂,为全面的表现局部放电干扰的脉冲统计特性并实现与 n - q - φ 三维谱图的比较,本文取 $N_\varphi=256$, $N_q=128$,即将 φ - q 平面划分为 $256 \times 128=32768$ 个小格,即灰度图的分辨率为 256×128 。

对于局部放电的检测来说,由于传感器的频带宽度、检测频率、安放位置、灵敏度等多种因素的影响,同一放电脉冲干扰信号的幅值在不同的检测条件下也会有所波动。因此本文采用数据极差归一化^[62]的方法对放电干扰信号的脉冲幅值进行数据预处理,使其在 $0 \sim 1$ 之间,具体处理过程如下:

针对局部放电的干扰数据,其脉冲点由脉冲相位 φ 和脉冲幅值 q 的值来表示,首先计算该试验阶段的幅值序列的均值和方差:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \quad (2-8)$$

然后按下列公式求各数据的标准化值 q'_i :

$$q_i' = \frac{q_i - \bar{q}}{S} \quad (2-9)$$

这样得到的标准化数据 q_i' 还不一定在 $[0,1]$ 闭区间。为了把标准化数据压缩到 $[0,1]$ 闭区间，再采用极差标准化公式：

$$q_i'' = \frac{q_i' - q_{i\min}'}{q_{i\max}' - q_{i\min}'} \quad (2-10)$$

这里， $q_{i\max}'$ ， $q_{i\min}'$ 分别指 q_{i1}' ， q_{i2}' ， \dots ， q_{in}' 中的最大值和最小值。

2.2.5 等效时频分析

本文建立的 UHF 原始射频信号检测系统获取的局部放电干扰信号的特征样本（脉冲波形—时间序列）数量较多，处于一个高维特征空间中，因此，建立了基于等效时频法的特征提取器将其压缩到二维特征空间中。同时考虑到在局部放电在线监测中的应用，基于等效时频法的局部放电典型干扰信号的特征提取方法还具有下列特性：计算的实时快速性，时间记录点无关，幅值、极性无关。

时频分析（TF 分析）是利用时间和频率的联合函数来表示信号，并对其进行分析和处理。在传统的信号分析处理中时域和频域构成了表征信号的两种主要方式。傅立叶变换是最为常见的分析工具，将时域信号进行傅立叶变换即可完成时域向频域的转换，将频域信号进行反傅立叶变换也可实现频域向时域的转换，但是傅立叶变换的不足在于它是在整体上将信号分解为不同的频率分量，从而缺失时域的信息，即对信号的表征要么完全在时域，要么完全在频域，它不能揭示某种频率分量出现在什么时候以及随时间的变化情况。时频分析就是克服傅立叶变换的局限性，用时间和频率的联合函数来表示信号。

采用等效时频分析方法对局部放电干扰脉冲信号进行分离和识别的基础是：假设在一次数据采集过程中，局部放电干扰模型激发的放电干扰信号脉冲波形在不同的时间段内有各自独特的形态特征^[64]。实际上，放电干扰信号的波形特征取决于产生干扰信号的缺陷以及干扰源到达检测传播途径的传递函数。有相同形态的放电干扰脉冲应属于同一类型的干扰源，或来自于相同的干扰点。通常在大多数情况下，局部放电脉冲波形都与干扰信号波形有明显的区别。使用信号处理中的等效时频法对局部放电干扰信号的脉冲波形 $s(t)$ 进行处理的过程如下：首先将信号 $s(t)$ 按照公式 (2-13) 进行标准化处理：

$$\tilde{s}(t) = s(t) / \sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt} \quad (2-13)$$

之后，按照公式 (2-14) 计算标准化信号的时间“重心” t_0 ：

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (2-14)$$

最后，分别根据公式 (2-15) 和公式 (2-16) 计算单个波形的时域等效时间长

度 σ_T 和频域等效带宽 σ_F :

$$\sigma_T = \sqrt{\int_b^f (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2-15)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_b^f (f - f_N)^2 |\tilde{s}(f)|^2 df} \quad (2-16)$$

式中 f 为采样率, $\tilde{s}(f)$ 为对标准化信号 $\tilde{s}(t)$ 的傅里叶变换。

单个放电干扰脉冲的波形—时间序列按照公式 (2-13) ~ 公式 (2-16) 的等效时频法进行计算后将对应一个向量 (σ_T, σ_F) 。按照此方法将一次采集到的多个局部放电的干扰信号投影到等效时间和等效带宽组成的二维平面上, 即形成干扰信号的时频分析图。

第三章 外置式 UHF 传感器获得的典型干扰信号的模式

本章利用所建立起来的 GIS 设备局部放电典型干扰信号的研究平台对外置式 UHF 传感器获得手机信号干扰(含 GSM 和 CDMA 制式)、电晕放电干扰、悬浮放电干扰、沿面放电干扰以及灯具干扰等五种典型放电干扰信号进行了一系列的研究,研究了不同放电干扰信号的散点图、柱状图、三维图、灰度图以及时频分析图等多种统计谱图,获得了使用外置式 UHF 传感器的情况下上述五种典型的放电干扰信号的模式。测量过程中, UHF 传感器位于 GIS 腔体的外部,与干扰模型的直线距离均为 2.31 米,如图 3.1 所示,其中图 3.1 (b) 中试验场地的场地实物图是以油中电晕放电干扰为例。

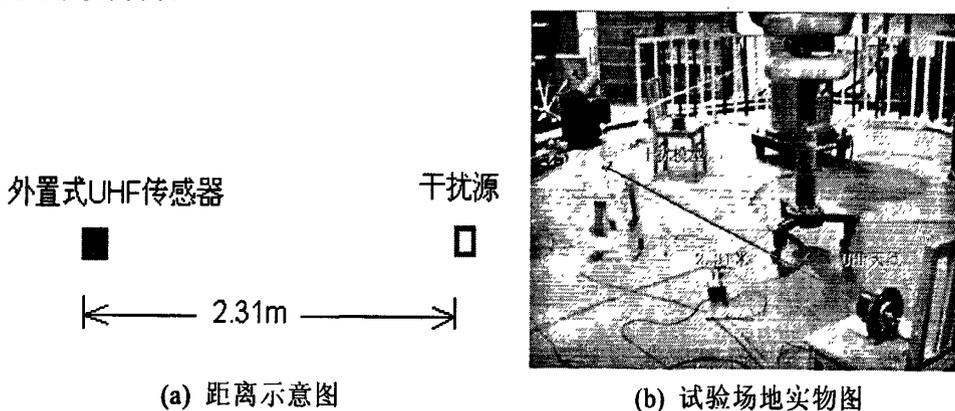


图 3.1 试验场地布置

3.1 手机干扰信号的模式研究

随着手机的普及程度提高,其信号辐射干扰也越来越突出。对于中国大陆来说,目前最常见的手机制式为 GSM、CDMA。虽然现在 3G(包含 TD-SCDMA、WCDMA、CDMA2000 三种制式)已经从 2009 年开始正式进入商用阶段,但是由于起步较晚,目前 3G 手机的占有率与 GSM 或 CDMA 相比仍然较低。因此为使研究具有典型性,本文选择 GSM 制式以及 CDMA 制式的手机信号作为 GIS 设备局部放电检测中典型干扰模式的研究对象。

3.1.1 GSM 与 CDMA

CDMA和GSM是2G通信的主流制式,从技术上来说,它们之间的区别就在于无线发送接收的制式不同,调制解调的方法不同。

GSM (Global System for Mobile Communications, 全球移动通讯系统),由欧洲

开发的数字移动电话网络标准，它的开发目的是让全球各地共同使用一个移动电话网络标准，让用户使用一部手机就能行遍全球。目前包括900MHz、1800 MHz、850MHz以及1900 MHz等四个频段。现有的GSM系统占有频带主要有850MHz、900MHz、1800MHz和1900MHz，即其具有窄带的干扰频谱。研究表明^[65]，在手机与网络接通瞬间时，辐射能量较大，正常通话状态时，辐射能量较小。

CDMA (Code Division Multiple Access, 又称码分多址)，它原理是基于扩频技术，即将需传送的具有一定信号带宽信息数据，用一个带宽远大于信号带宽的高速伪随机码进行调制，使原数据信号的带宽被扩展，再经载波调制并发送出去；接收端使用完全相同的伪随机码，与接收的带宽信号作相关处理，把宽带信号换成原信息数据的窄带信号即解扩，以实现信息通信。CDMA允许所有的使用者同时使用全部频带，并且把其他使用者发出的讯号视为噪声，完全不必考虑到讯号碰撞的问题。它与GSM制式手机的最大不同在于输出的不是脉冲信号而是连续信号。

3.1.2 GSM 制式手机干扰信号的模式研究

试验过程中，被试GSM手机一直处于正常通话状态，并保持60分钟。不论被试的GSM手机处于呼叫未接通或者正常通话状态，外置式UHF传感器的检波输出端均可以检测到较为明显的脉冲信号，如图3.2所示。

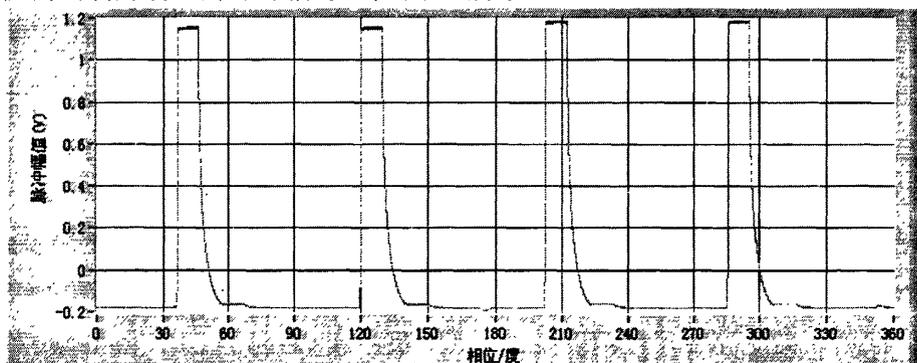
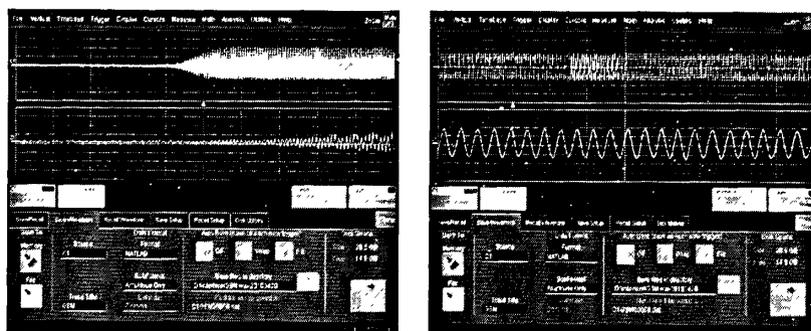


图 3.2 经过外置式 UHF 传感器检波处理的 GSM 制式手机干扰信号

由图3.2可以看出，GSM制式的手机干扰信号经过检波处理后，变为方波信号，其宽度约为1.1ms左右。一个工频检测周期（20ms）内，通常可以检测到4~5个方波信号，并且沿相位均匀分布，无明显的相位特征。整个试验过程中，外置式UHF传感器检波输出的最大幅值为1.425V，平均幅值为0.885V。外置式UHF传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的经过调制的正弦信号，如图3.3所示，可以看出，正常工作状态下，GSM制式手机干扰的原始射频信号的幅值约为300mV左右。



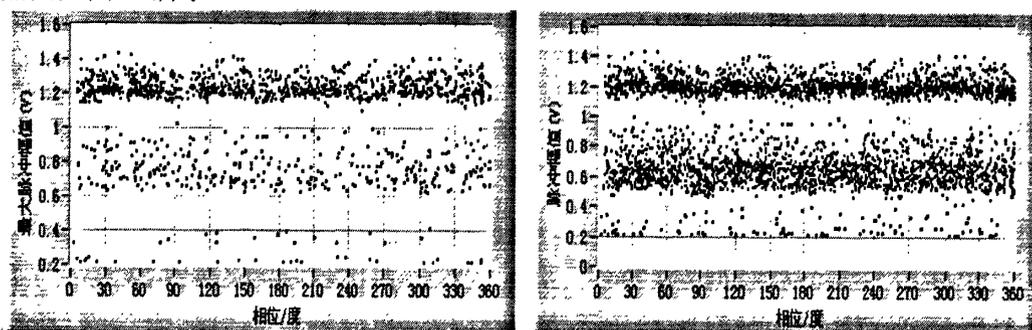
(a) 检测时长为 50us

(b) 检测时长为 100ns

图 3.3 外置式 UHF 传感器检测到的 GSM 制式手机干扰的原始射频信号

3.1.2.1 散点图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的GSM制式手机干扰信号的幅值与相位的散点图以及最大幅值与相位的散点图，即 $v_{max}-\phi$ 散点图和 $v-\phi$ 散点图如图3.4所示。



(a) $v_{max}-\phi$ 散点图

(b) $v-\phi$ 散点图

图 3.4 GSM 制式手机干扰的 $v_{max}-\phi$ 散点图和 $v-\phi$ 散点图

由图3.4 (a)可以看出，每个工频检测周期内，外置式UHF传感器检测到的GSM制式手机干扰信号的最大幅值主要集中在1.1V~1.4V的区间内，其余幅值区间内的分布较为稀疏，而根据图3.4 (b)可以看出，在每个工频检测周期内，外置式UHF传感器获得的GSM制式手机干扰信号随幅值呈现较为明显的分层分布，主要集中在1.1V~1.4V和0.5V~1.0V两个幅值区间内，并且各层的分布密度大致相当，0.2V~0.4V区间内也存在少量的信号，但与前两个幅值区间相比，分布较为稀疏。结合图3.4 (a)和图3.4 (b)，可以看出GSM制式的手机干扰信号随相位均匀分布，没有明显相位相关性。

3.1.2.2 二维柱状图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的GSM制式手机干扰信号的脉冲重复率与脉冲相位的二维柱状图、最大脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图、总脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图以及平均脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图，即 $n-\phi$ 二维柱状图、 $v_{max}-\phi$ 二维柱状图、 $v_{total}-\phi$ 二维柱状图和 $v_{ave}-\phi$ 二维柱状图，

如图3.5所示。

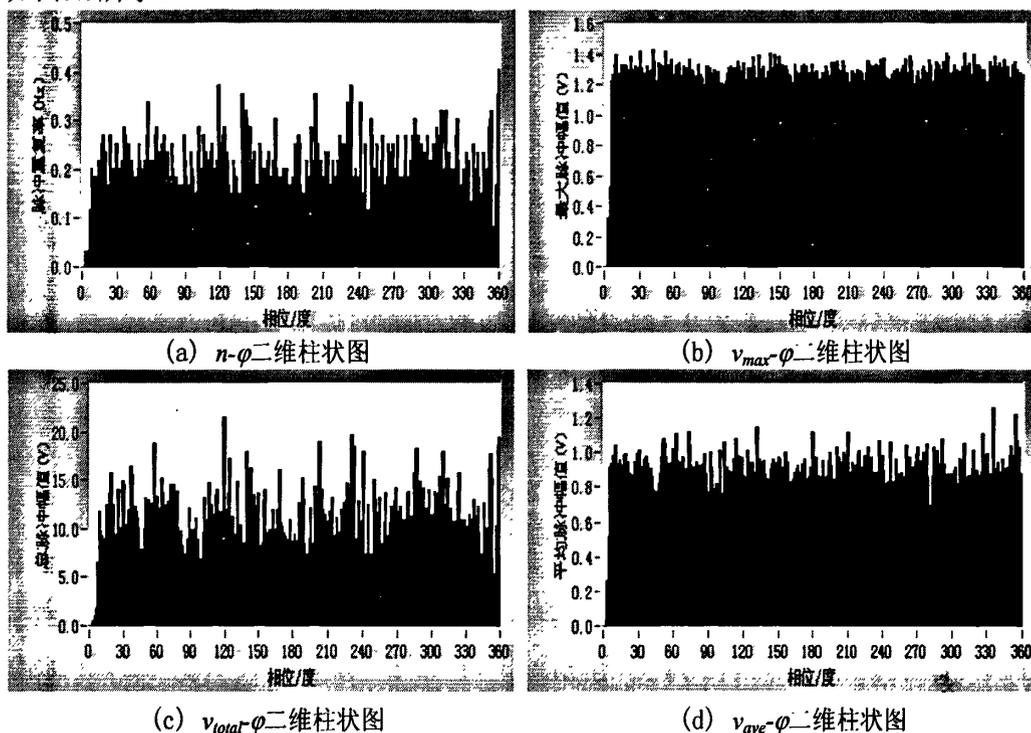


图 3.5 GSM 制式手机干扰的二维柱状图

由图3.5 (a) 可以看出, GSM制式手机干扰信号的脉冲重复率随相位的分布较为均匀, 没有明显的相位相关性。由图3.5 (b) ~图3.5 (d) 可以看出, GSM制式手机干扰信号的幅值随相位的分布, 尤其是每个检测周期内的最大脉冲幅值和平均脉冲幅值随相位的分布比较均匀, 没有明显的相位相关性。

3.1.2.3 三维谱图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的GSM制式手机干扰信号的脉冲重复率、脉冲幅值、脉冲相位的三维谱图及其向脉冲重复率-脉冲幅值平面上的投影, 即 $n-v-\varphi$ 三维谱图及 $n-v-\varphi$ 三维谱图向 $n-v$ 平面的投影, 如图3.6所示。

由图3.6 (a) 可以看出, GSM制式手机干扰信号的 $n-v-\varphi$ 三维谱图随相位和幅值的分布呈现明显的两个平行峰状, 这说明该类型的干扰信号随相位的分布较为均匀, 且干扰脉冲幅值的幅值主要集中在两个幅值区间内。图3.6 (b) 呈现的是脉冲重复率随脉冲幅值的规律, 可以看出干扰脉冲分布相对集中的两个幅值区间的脉冲重复率大致相当。

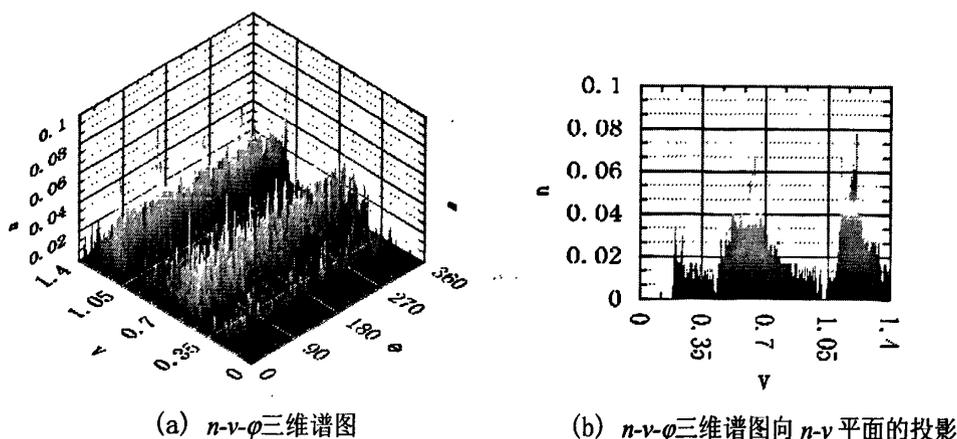


图 3.6 GSM 制式手机干扰的三维谱图

3.1.2.4 灰度图

本文根据外置式UHF传感器输出的检波信号绘制了GSM制式手机干扰的灰度图，如图3.7所示。

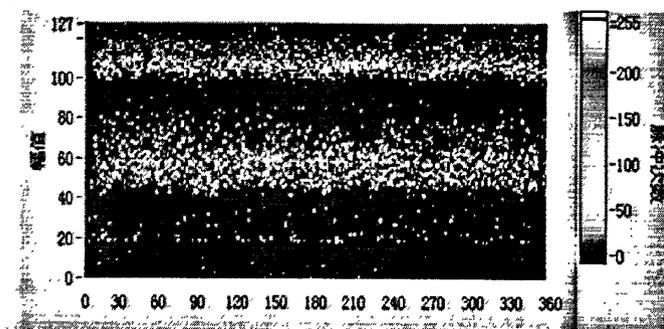


图 3.7 GSM 制式手机干扰的灰度图

由图3.7可以看出，GSM制式手机干扰信号的灰度图呈现明显的双层分布，高脉冲幅值和中脉冲幅值的脉冲密度大致相当，低幅值脉冲较为稀疏，但是高幅值脉冲相对比较集中，另外，方波脉冲随相位的分布较为均匀。

3.1.2.5 时频分析图

UHF传感器为了降低硬件采样率，采用检波技术对局部放电UHF信号进行了处理，信号经过检波处理后丧失了原始干扰信号的时域和频域上的特征信息，只保留了干扰脉冲信号相位和幅值信息，因此无法采用时频分析法进行局部放电干扰信号的特征分析。而UHF传感器检测到的原始射频信号包含了较为完整的UHF信号的时域和频域上的特征信息，可以通过时频分析提取原始信号中的丰富的时域、频域特征信息。本文根据试验过程中外置式UHF传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的GSM制式手机干扰信号的时频分析图，即T-F谱图如图3.8所示，时频分析的统计结果如表3.1所示。

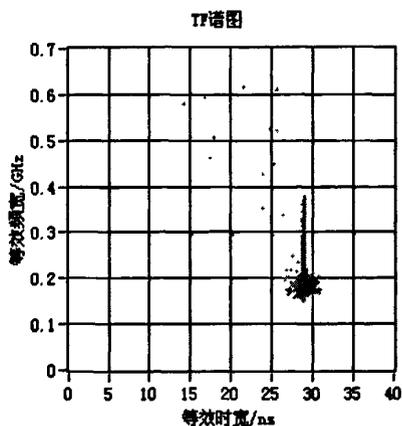


图 3.8 GSM 制式手机干扰的时频分析图

表 3.1 GSM 制式手机干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
28.9102	0.180229

由图 3.8 和表 3.1 可以看出，GSM 制式手机干扰的等效频宽主要分布在 0.15GHz~0.4GHz 之间，等效时长主要分布在 25ns~32ns 之间，并且等效频宽越窄，等效时长越大，时频分析图整体上呈现“倒 T”状分布。

3.1.3 CDMA 制式手机干扰信号的模式研究

试验过程中，被试 CDMA 手机一直处于正常通话状态，并保持 60 分钟。不论被试的 CDMA 手机处于呼叫未接通或者正常通话状态，外置式 UHF 传感器的检波输出端均可以检测到明显的信号，如图 3.9 所示。

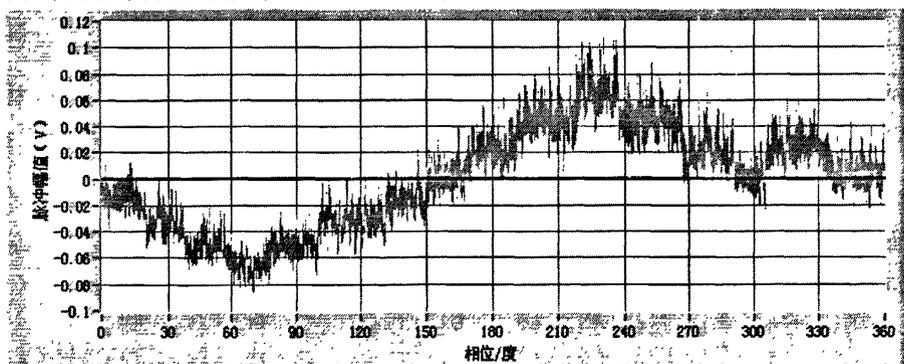
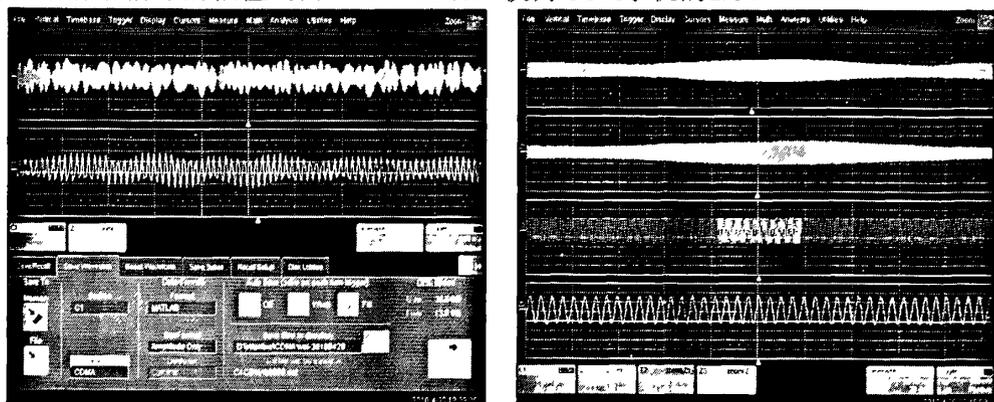


图 3.9 经过外置式 UHF 传感器检波处理的 CDMA 制式手机干扰信号

对比图 3.2 和图 3.9 可以看出，CDMA 制式的手机干扰信号经过检波处理后，并没有像 GSM 制式手机一样转变为方波信号，而是检波成按照一定频率摆动的载波信号，并且沿相位杂乱分布，无明显的相位特征。外置式 UHF 传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的经过调制的正弦信号，如图 3.10 所示，这是由于 CDMA 制式的手机发射和接受是连续信号，而 GSM 制式的手机发射和接受是脉冲信号。并

且对比图3.9和图3.10还可以看出，在正常通话的工作状态下，CDMA制式手机干扰的原始射频信号的幅值约为200mV左右，仅为GSM手机的2/3。



(a) 检测时长为 50us

(b) 检测时长为 2000ns

图 3.10 UHF 传感器检测到的 CDMA 制式手机干扰的原始射频信号

综合图3.9和图3.10，考虑到CDMA制式的工作原理，由于外置式UHF传感器获得的CDMA制式手机干扰信号并没有检波成脉冲信号，因此无法采用脉冲相位分布（PRPD）模式进行分析，不能进行干扰信号的散点图、二维柱状图、三维柱状图以及灰度图的绘制。但等效时频分析不受PRPD模式的影响，本文根据试验过程中外置式UHF传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的CDMA制式手机干扰信号的时频分析图如图3.11所示，时频分析的统计结果如表3.2所示。

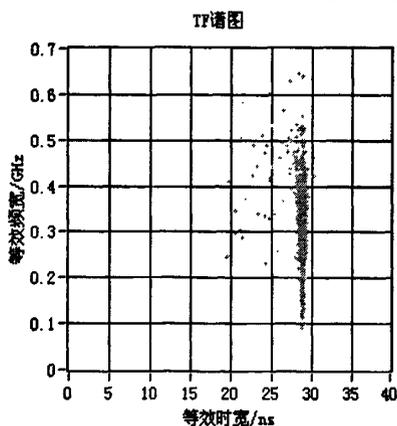


图 3.11 CDMA 制式手机干扰的时频分析图

表 3.2 CDMA 制式手机干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
28.8524	0.286406

由图3.11和表3.2可以看出，CDMA制式手机干扰的等效频宽主要分布在0.1GHz~0.5GHz之间，等效时长主要分布在26ns~30ns之间，时频分析图整体上呈现“火炬”状分布，与GSM制式手机的干扰信号相比，等效频宽的分布较宽，等效时长的分布略微变窄，并且时频分析图的整体形状也有所不同。

3.2 电晕放电干扰信号的模式研究

电晕放电是变电站普遍存在的放电干扰形式，通常发生在高压导线和线路部件的表面或者是油纸绝缘系统的内部，是 GIS 设备局部放电脉冲电流法测量的主要干扰源。电晕放电是由于在导体表面电位梯度过大，使其表面的电场强度超过空气的击穿强度，使周围的气体局部电离，气体分子分解成为带正电荷的离子与带负电荷的电子。当场强进一步增大时出现电子倍增现象，形成电晕放电。伴随着产生较弱的发光，可闻的噪声，机械的振动，产生臭氧和其它生成物^[66]。

3.2.1 干扰模型

本文首先对空气中的电晕放电进行了研究，通过在试验变压器的高压输出端连接一段长短不一金属尖刺来模拟空气中电晕放电，放电模型如图3.12所示。

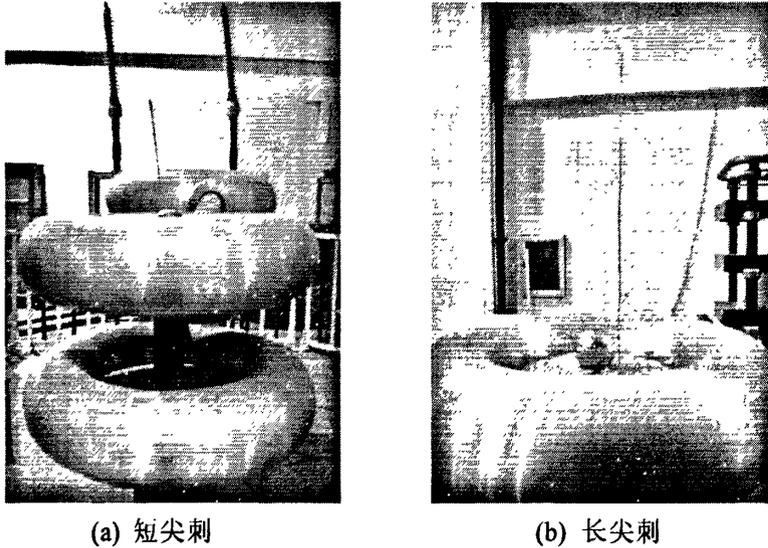
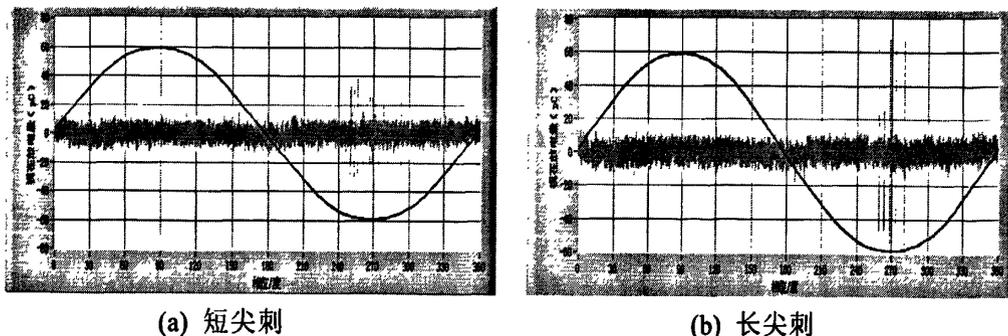


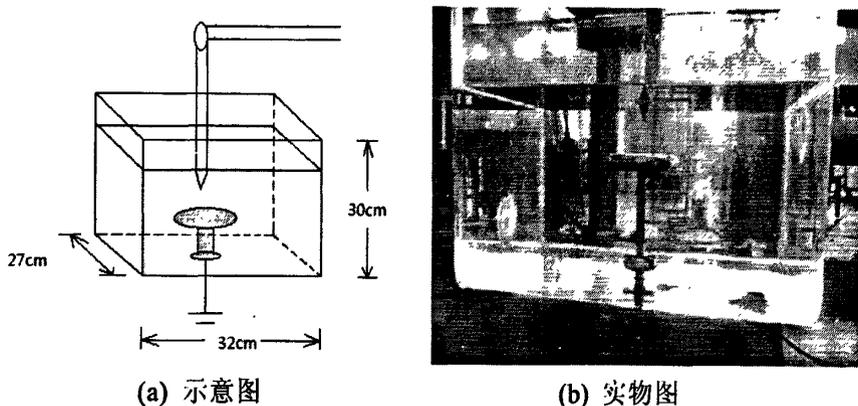
图 3.12 空气中电晕放电干扰的放电模型

金属尖刺引起空气中电晕放电的常规脉冲电流信号的时域波形如图3.13所示，可以看出，在同样的外施工频电压（13.5kV）下，短金属尖刺导致放电的视在放电量比长金属尖刺要小，但放电次数较多，两种金属尖刺在工频电压作用下的放电均集中在 270° 附近，且随着外施电压的升高，视在放电量变化不大，呈现明显的空气中电晕放电的特征。虽然两种金属尖刺在外施电压的作用下都产生了比较明显的空气中电晕放电，但外置式UHF传感器没有检测到明显的放电信号，这与文献[48]、[49]以及文献[67]取得的结论一致，这是由于空气的绝缘强度较低，其中的电晕放电脉冲的持续时间较长，波头的上升时间也较长，不能激发起较高频率的电磁波，并且电晕放电产生电磁波信号在空气中传播时，随频率的增长衰减很快，其频率一般在150MHz以下，而通常的UHF传感器的检测频段为300MHz以上，因此UHF检测法可以有效避开空气中的电晕干扰。



(a) 短尖刺 (b) 长尖刺
图 3.13 空气中电晕放电所产生的常规脉冲电流信号的时域波形

因此，鉴于空气中的电晕放电不能激发明显的UHF信号，本文采用油中针-板放电模型对油中电晕放电进行了模拟，使用的放电模型的示意图和实物照片如图 3.14所示。



(a) 示意图 (b) 实物图
图 3.14 油中电晕放电干扰的放电模型

试验开始时，逐渐升高外施电压，直至发生较为稳定的放电，此时保持电压不变（44.9kV），开始试验数据的采集与记录，60分钟后加压终止。试验过程中，外置式UHF传感器检波信号的输出端可以检测到较为明显的放电信号，其时域波形如图 3.15所示。

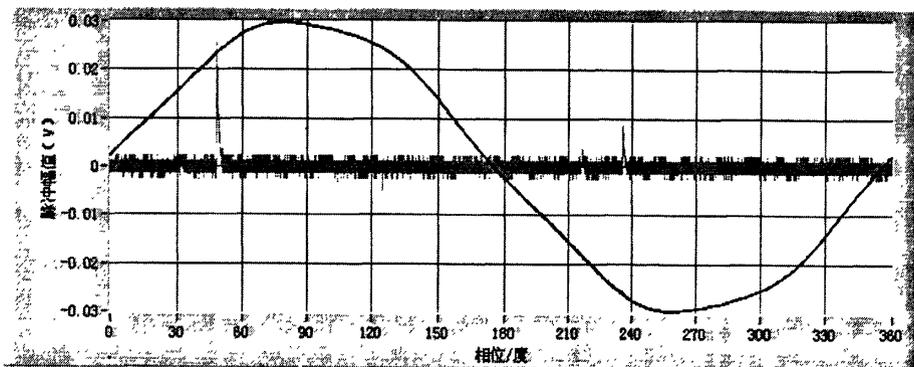


图 3.15 经过外置式 UHF 传感器检波处理的油中电晕放电干扰信号

试验过程中，DST-4型局部放电检测仪检测到的油中电晕放电过程中的最大视在放电量为1890.16pC，平均视在放电量为211.89pC，这说明在外施工频电压作用下，油中针-板电极已经产生了非常明显的放电现象，但是根据图3.15，可以看出经过外

置式UHF传感器检波处理的油中电晕放电干扰信号的幅值较小，整个试验过程中，经过检波处理后输出的最大幅值为0.281V，平均幅值为0.021V。这说明虽然针-板电极已经产生了较为明显的放电现象，但是伴随放电产生的电磁波信号的强度依然较小或者UHF电磁波透过变压器油以及有机玻璃时衰减较大。外置式UHF传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的放电信号，如图3.16所示，可以看出，油中针-板电极产生电晕放电的原始射频信号的幅值约为30mV左右，时域波形的长度约为20.0ns左右。

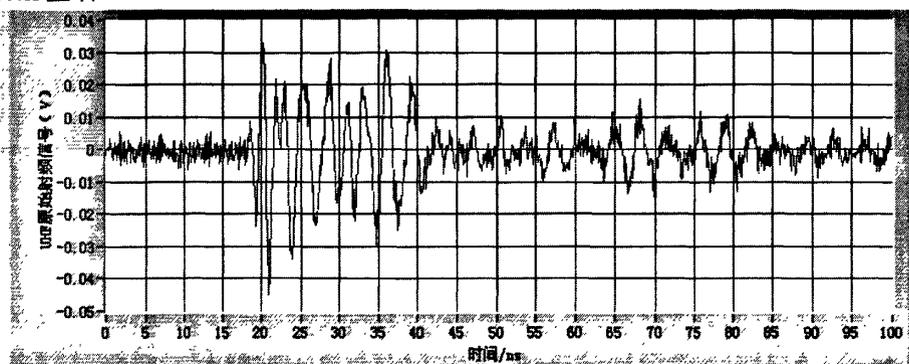
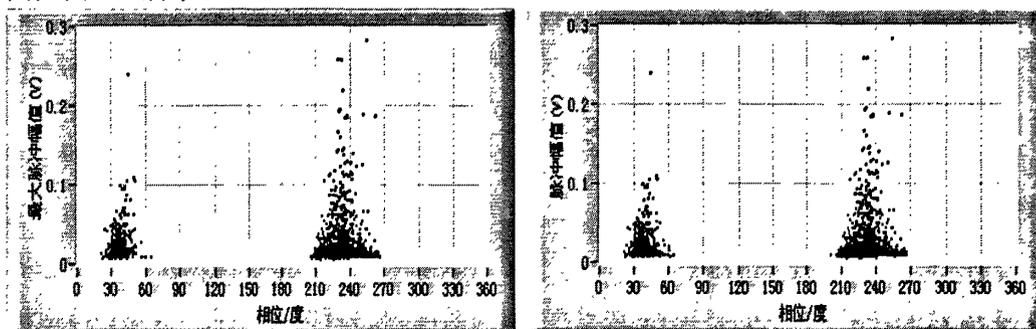


图 3.16 外置式 UHF 传感器检测到的油中电晕放电干扰的原始射频信号

3.2.2 电晕放电干扰信号的模式

3.2.2.1 散点图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的油中电晕放电干扰信号的幅值与相位的散点图以及最大幅值与相位的散点图，即 $v_{max}-\phi$ 散点图和 $v-\phi$ 散点图如图3.17所示。



(a) $v_{max}-\phi$ 散点图

(b) $v-\phi$ 散点图

图 3.17 油中电晕放电干扰的 $v_{max}-\phi$ 散点图和 $v-\phi$ 散点图

由图3.17可以看出，在每个工频检测周期内，油中电晕放电干扰信号主要散布在相位为 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 、高度为0.1V和相位为 $200^{\circ} \sim 240^{\circ}$ 、高度为0.2V的两个三角形区域内，负半周三角形区域的高度比正半周高一些， 40° 和 230° 附近的脉冲幅值较大。

3.2.2.2 二维柱状图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的油中电晕放电干扰信号的脉冲重复率与脉冲相位的二维柱状图、最大脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图、总脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图以及平均脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图，即 $n-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{max}-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{total}-\varphi$ 二维柱状图和 $v_{ave}-\varphi$ 二维柱状图，如图3.18所示。

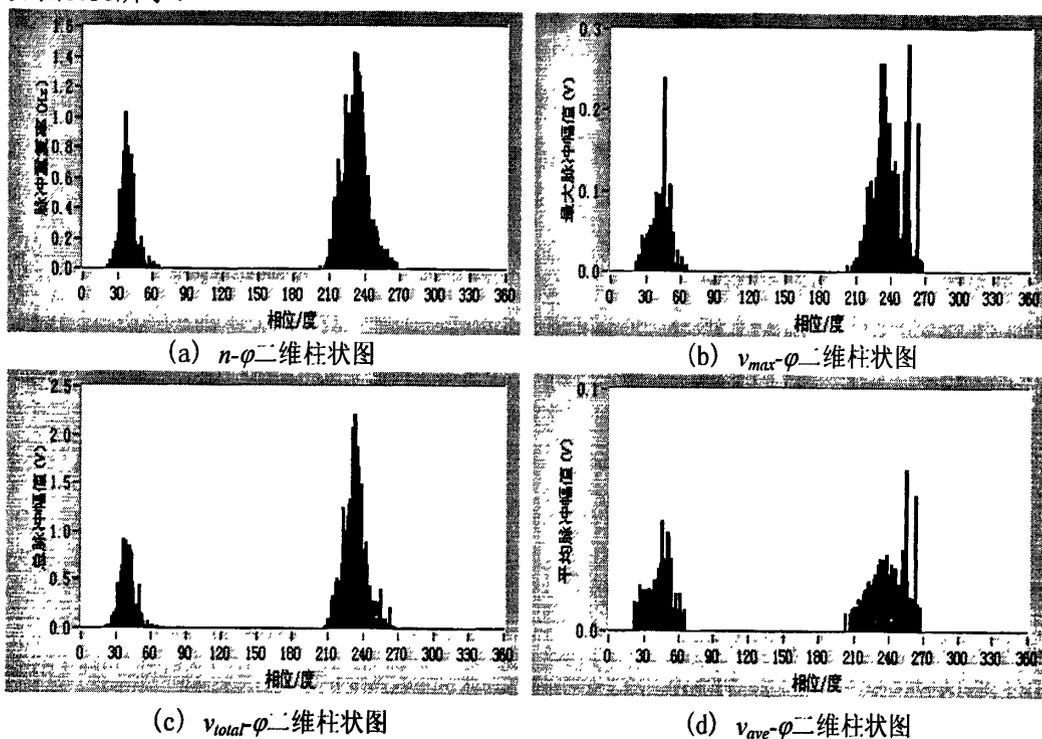


图 3.18 油中电晕放电干扰的二维柱状图

由图3.18 (a) 可以看出，负半周的脉冲重复率大于正半周，且正负半周均为单峰结构，分别以 40° 和 230° 为对称中心。由图3.18 (b) ~图3.18 (d) 可以看出，负半周脉冲幅值的最大值与正半周大致相当，但从平均脉冲幅值来看，正半周略大于负半周，因此本文所采用的油中针-板放电模型在工频电压下的放电呈现较为明显的电晕放电特征。

3.2.2.3 三维谱图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的油中电晕放电干扰信号的脉冲重复率、脉冲幅值、脉冲相位的三维谱图及其向脉冲重复率-脉冲幅值平面上的投影，即 $n-v-\varphi$ 三维谱图及 $n-v-\varphi$ 三维谱图向 $n-v$ 平面的投影，如图3.19所示。

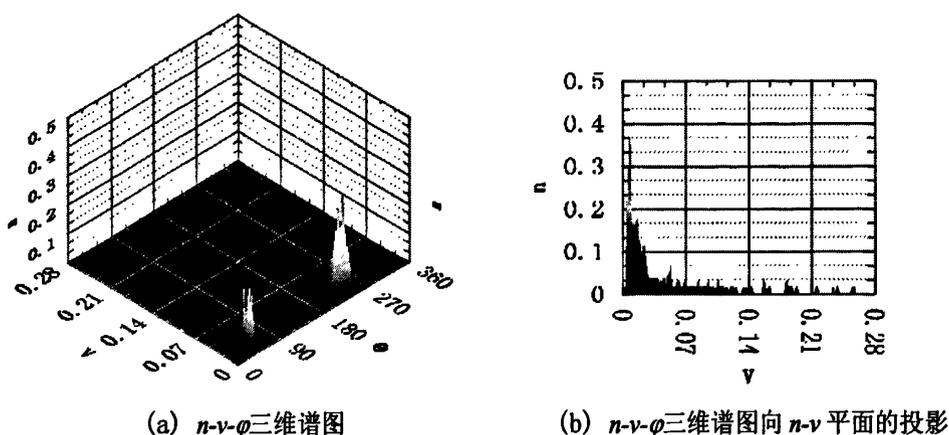


图 3.19 油中电晕放电干扰的三维谱图

由图3.19 (a) 可以看出，油中电晕放电干扰信号的 $n-v-\phi$ 三维谱图随相位和幅值的分布呈现明显的两个峰状结构，负半峰的高度大于正半峰。图3.19 (b) 呈现的是脉冲重复率随脉冲幅值的规律，可以看出油中电晕放电干扰信号多数为低幅值脉冲信号，并且脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈单调递减状。

3.2.2.4 灰度图

本文根据外置式UHF传感器输出的检波信号绘制了油中电晕放电干扰的灰度图，如图3.20所示。

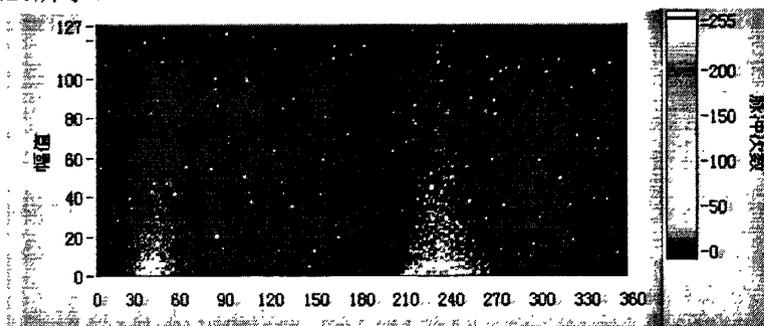


图 3.20 油中电晕放电干扰的灰度图

由图3.20可以看出，油中电晕放电干扰信号的灰度图有两个大的非零灰度区，分别对应正负半周的脉冲。正半周高幅值脉冲的亮度较高，这说明正半周高幅值脉冲的次数较多，但是负半周低幅值脉冲区域的亮度明显大于正半周，因此对于油中针一板电极产生电晕放电来说，正半周大而稀，负半周小而密的幅值和相位特点依然存在。

3.2.2.5 时频分析图

本文根据试验过程中外置式UHF传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的油中电晕放电干扰信号的时频分析图，即T-F谱图如图3.21所示，时频分析的统计结果如表3.3所示。

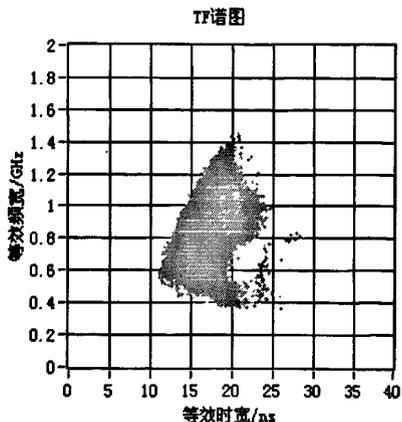


图 3.21 油中电晕放电干扰的时频分析图

表 3.3 油中电晕放电干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
17.9325	0.869747

由图3.21和表3.3可以看出，油中电晕放电干扰的等效频宽主要分布在0.4GHz~1.4GHz之间，等效时长主要分布在12ns~25ns之间，时频分析图整体上呈现“帆”状分布。

3.3 悬浮放电干扰信号的模式研究

悬浮放电是指导体既未良好接地也未接高压，随着周围电场的变化而自身的对地电位也发生变化，并对地或高压部分在电场最强的尖端放电，该类放电可能贯穿悬浮体与某一高压电极或与接地体之间。变压器高压引线附近以及母线附近的金属部件（比如高压套管上的均压帽）松动等引起的放电属于此类放电。悬浮放电也是GIS设备局部放电测量的主要干扰形式。

3.3.1 干扰模型

经过诸多的探索性试验，本文通过在试验变压器高压输出端设置一尺寸适中的环形绝缘铜丝来模拟空气中的悬浮放电，环形放电模型的直径为13cm，高度为15cm，其实物照片如图3.22所示。

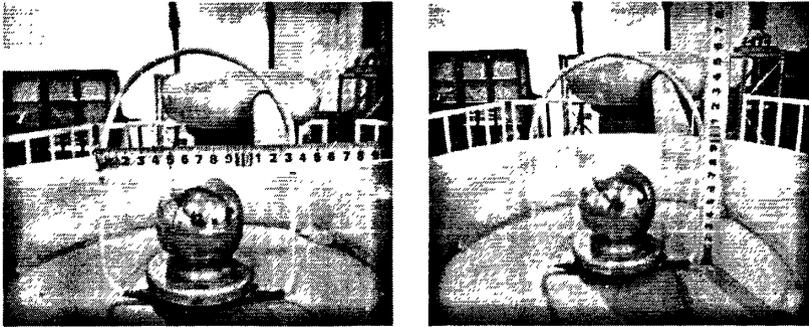


图 3.22 空气中悬浮放电干扰的放电模型

试验开始时，逐渐升高外施电压，直至发生较为稳定的放电，此时保持电压（66.1kV）不变，开始试验数据的采集与记录，60分钟后加压终止。试验过程中，外置式UHF传感器检波信号的输出端可以检测到非常明显的放电信号，其时域波形如图3.23所示。

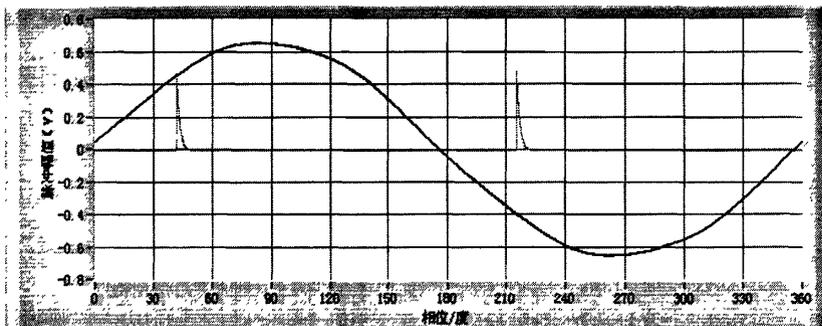


图 3.23 经过外置式 UHF 传感器检波处理的空气中悬浮放电干扰信号

试验过程中，DST-4型局部放电检测仪检测到的空气中悬浮放电过程中的最大视在放电量为1744.2pC，平均视在放电量为1470.99pC，这说明在外施工频电压作用下，空气中悬浮放电干扰的放电模型已经产生了非常明显的放电现象。结合图3.15，可以看出，在每个工频检测周期中，外置式UHF传感器检波输出的空气中悬浮放电干扰信号的个数一般为1~2个，整个试验过程中，经过检波处理后输出的最大幅值为1.147V，平均幅值为0.662V。外置式UHF传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的放电信号，如图3.24所示，可以看出，空气中悬浮放电干扰的原始射频信号的幅值约为0.7V左右，时域波形的长度较长（约为160ns）。

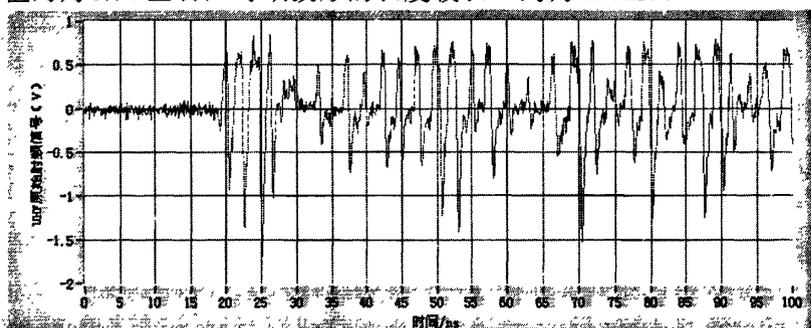
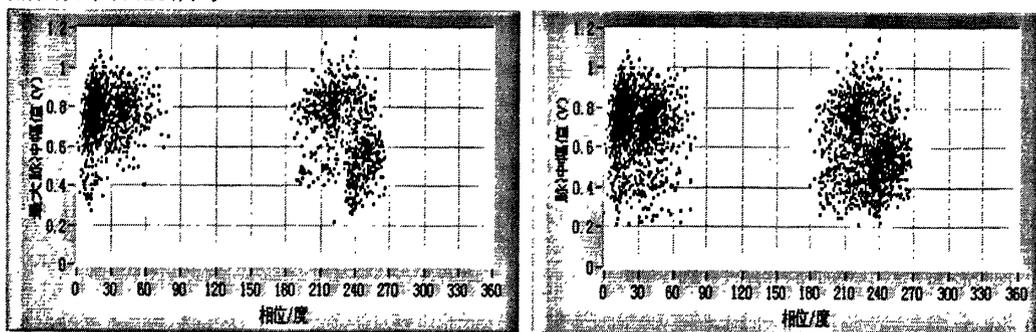


图 3.24 外置式 UHF 传感器检测到的空气中悬浮放电干扰的原始射频信号

3.3.2 悬浮放电干扰信号的模式

3.3.2.1 散点图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的空气中悬浮放电干扰信号的幅值与相位的散点图以及最大幅值与相位的散点图，即 $v_{max}-\phi$ 散点图和 $v-\phi$ 散点图如图3.25所示。



(a) $v_{max}-\phi$ 散点图

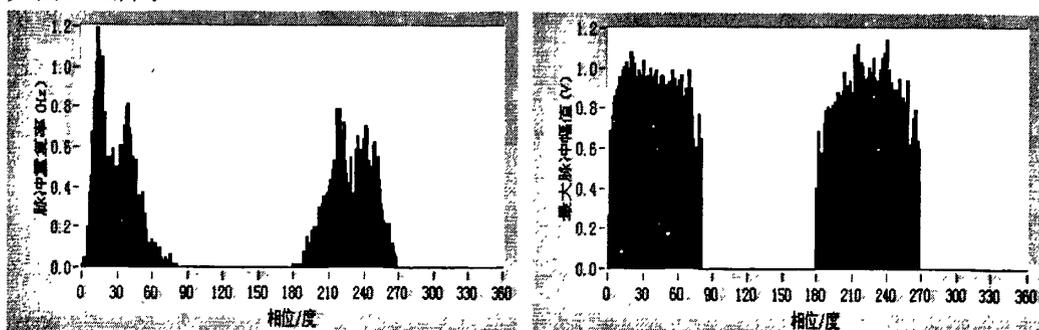
(b) $v-\phi$ 散点图

图 3.25 空气中悬浮放电干扰的 $v_{max}-\phi$ 散点图和 $v-\phi$ 散点图

由图3.25可以看出，在每个工频检测周期内，空气中悬浮放电干扰信号主要散布在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 和 $180^\circ \sim 260^\circ$ 两个相位区间内， $80^\circ \sim 90^\circ$ 和 $265^\circ \sim 270^\circ$ 之间的相位区间内没有放电出现，检波信号的幅值较大，分布在 $0.2V \sim 1.1V$ 的区间内，并且分布比较均匀，比较符合空气中电晕放电的特点。

3.3.2.2 二维柱状图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的空气中悬浮放电干扰信号的脉冲重复率与脉冲相位的二维柱状图、最大脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图、总脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图以及平均脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图，即 $n-\phi$ 二维柱状图、 $v_{max}-\phi$ 二维柱状图、 $v_{total}-\phi$ 二维柱状图和 $v_{ave}-\phi$ 二维柱状图，如图3.26所示。



(a) $n-\phi$ 二维柱状图

(b) $v_{max}-\phi$ 二维柱状图

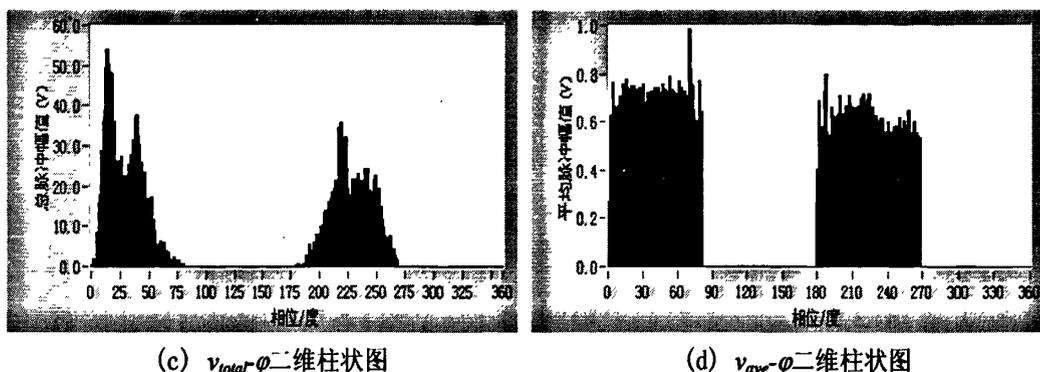


图 3.26 空气中悬浮放电干扰的二维柱状图

由图3.26 (a) 可以看出，负半周的脉冲重复率小于正半周，且正负半周均呈现双峰结构。由图3.26 (b) ~图3.26 (d) 可以看出，负半周脉冲幅值的最大值与正半周大致相当，但从平均脉冲幅值来看，正半周略大于负半周，并且正负半周的脉冲幅值均较大 (0.6V~0.8V之间)，因此本文所采用的环形绝缘导线模型在工频电压下的放电呈现较为明显的空气中悬浮放电特征。

3.3.2.3 三维谱图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的空气中悬浮放电干扰信号的脉冲重复率、脉冲幅值、脉冲相位的三维谱图及其向脉冲重复率-脉冲幅值平面上的投影，即 $n-v-\phi$ 三维谱图及 $n-v-\phi$ 三维谱图向 $n-v$ 平面的投影，如图3.27所示。

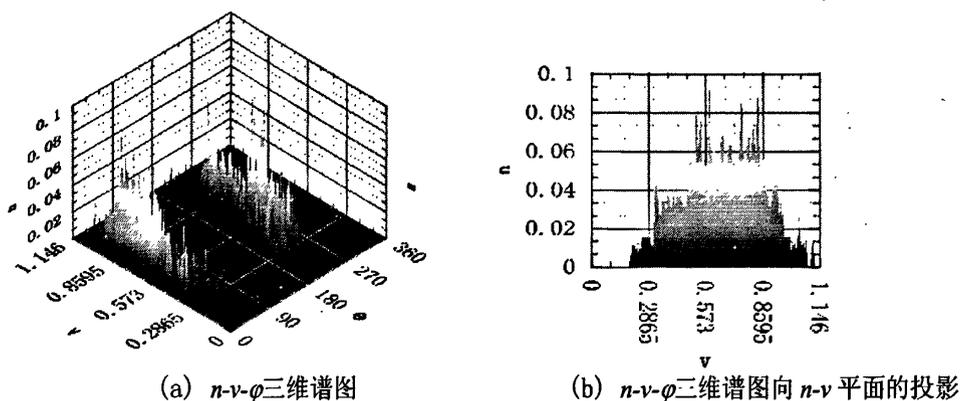


图 3.27 空气中悬浮放电干扰的三维谱图

由图3.27 (a) 可以看出，空气中悬浮放电干扰信号的 $n-v-\phi$ 三维谱图随相位和幅值的分布呈现明显的两个峰状结构，正半峰的高度略大于负半峰。图3.27 (b) 呈现的是脉冲重复率随脉冲幅值的规律，可以看出空气中悬浮放电干扰信号多数为分布在0.25V~1.1V之间，并且脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现增加后减少的趋势，幅值分布在0.57V~0.86V之间的脉冲最为集中。

3.3.2.4 灰度图

本文根据外置式UHF传感器输出的检波信号绘制了空气中悬浮放电干扰的灰度

图，如图3.28所示。

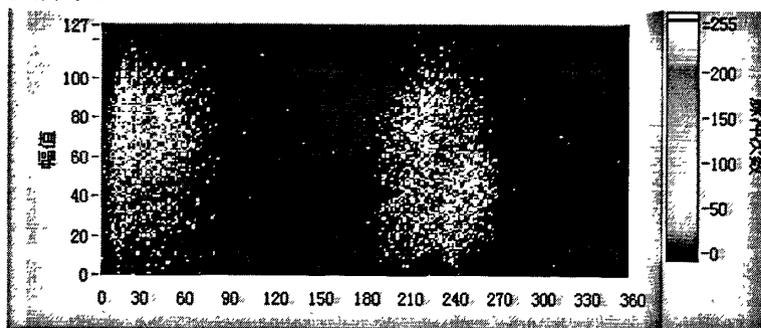


图 3.28 空气中悬浮放电干扰的灰度图

由图3.28可以看出，空气中悬浮放电干扰信号的灰度图有两个大的非零灰度区，分别对应正负半周的脉冲。正半周高幅值脉冲的亮度较高，这说明正半周高幅值脉冲的次数较多，脉冲沿幅值的分布相对较为集中，而负半周的脉冲沿相位的分布较为分散，并且呈现高幅值脉冲和低幅值脉冲相分离的趋势。

3.3.2.5 时频分析图

本文根据试验过程中外置式UHF传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的空气中悬浮放电干扰信号的时频分析图，即T-F谱图如图3.29所示，时频分析的统计结果如表3.4所示。

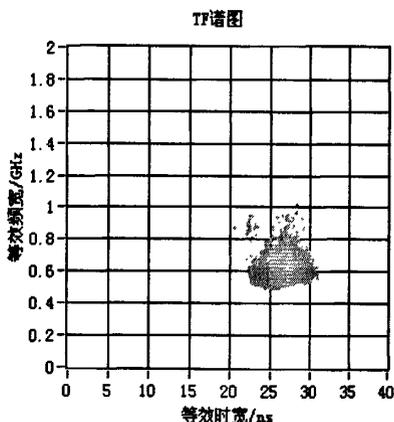


图 3.29 空气中悬浮放电干扰的时频分析图

表 3.4 空气中悬浮放电干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
25.5358	0.574965

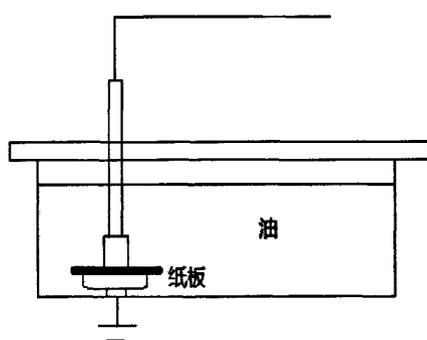
由图3.29和表3.4可以看出，空气中悬浮放电干扰的等效频宽主要分布在0.5GHz~1.0GHz之间，等效时长主要分布在22ns~30ns之间，时频分析图整体上呈现“三角”状分布。

3.4 沿面放电干扰信号的模式研究

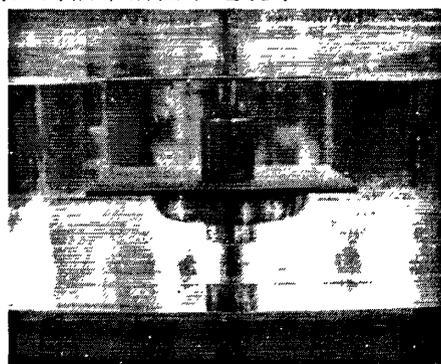
沿面放电是指电场中固体（或液体）与气体（或液体）等不同介质分界面上所出现的放电现象。实用中的电力设备，由于介质交界面上的电压分布不均匀，沿面闪络电压比介质单独存在时的击穿电压低。闪络电压还受介质种类、绝缘结构的电场分布和表面状态，如污秽、潮湿等因素的影响。油纸绝缘系统中的表面爬电以及空气中绝缘子表面的放电都属于此类放电。沿面放电也是 GIS 设备局部放电测量的主要干扰形式。

3.4.1 干扰模型

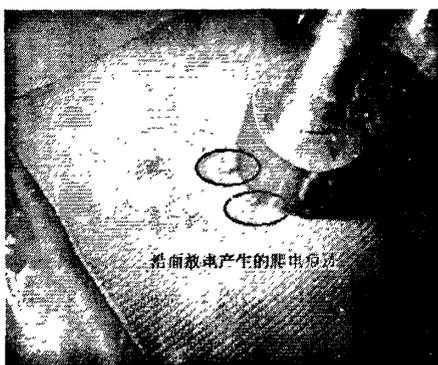
经过大量的探索性试验，本文采用油中柱—板沿面放电模型对油中的沿面放电进行了模拟，所使用的柱—板放电模型的示意图和实物照片，以及沿面放电在绝缘纸板表面形成的爬电痕迹如图3.30所示，可以看出，本文所使用的柱-板电极放电模型在外施工频电压的作用下可以导致较为明显的油中沿面放电现象。



(a) 示意图



(b) 实物图



(c) 绝缘纸板表面的爬电痕迹

图 3.30 油中沿面放电干扰的放电模型

试验开始时，逐渐升高外施电压，直至发生较为稳定的放电，此时保持电压（21.4kV）不变，开始试验数据的采集与记录，60分钟后加压终止。试验过程中，外置式UHF传感器检波信号的输出端可以检测到较为明显的放电信号，其时域波形

如图3.31所示。

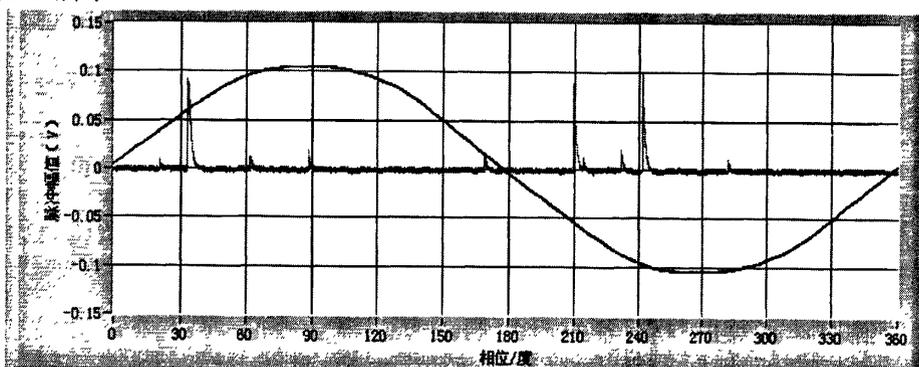


图 3.31 经过外置式 UHF 传感器检波处理的油中沿面放电干扰信号

试验过程中，DST-4型局部放电检测仪检测到的油中沿面放电过程中的最大视在放电量为41817.43pC，平均视在放电量为5232.172pC，这说明在外施工频电压作用下，油中沿面放电干扰的放电模型已经产生了非常明显的放电现象。结合图3.31，可以看出，在每个工频检测周期中，外置式UHF传感器检波输出的油中沿面放电干扰信号的个数一般为1~9个，整个试验过程中，经过检波处理后输出的最大幅值为0.477V，平均幅值为0.060V。外置式UHF传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的放电信号，如图3.32所示，可以看出，油中沿面放电干扰的原始射频信号的幅值约为0.06V左右，时域波形的长度约为40ns。

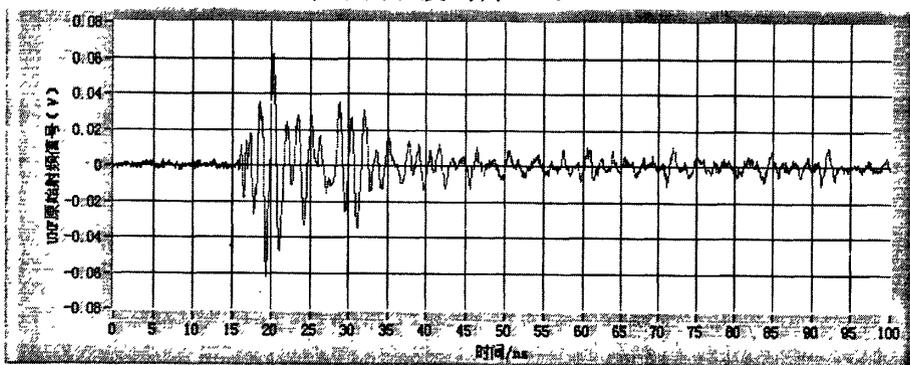
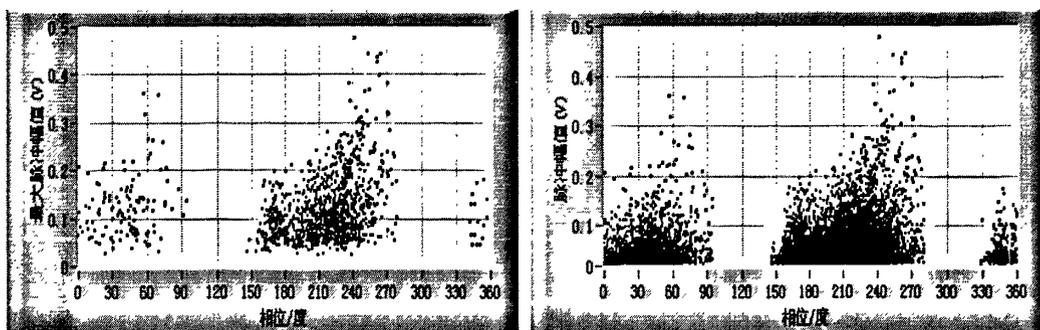


图 3.32 外置式 UHF 传感器检测到的油中沿面放电干扰的原始射频信号

3.4.2 沿面放电干扰信号的模式

3.4.2.1 散点图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的油中沿面放电干扰信号的幅值与相位的散点图以及最大幅值与相位的散点图，即 $v_{max}-\varphi$ 散点图和 $v-\varphi$ 散点图如图3.33所示。



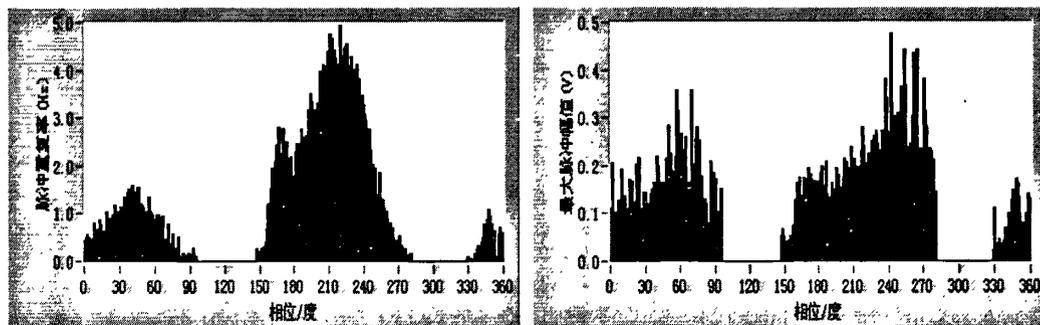
(a) $v_{max}-\phi$ 散点图 (b) $v-\phi$ 散点图

图 3.33 油中沿面放电干扰的 $v_{max}-\phi$ 散点图和 $v-\phi$ 散点图

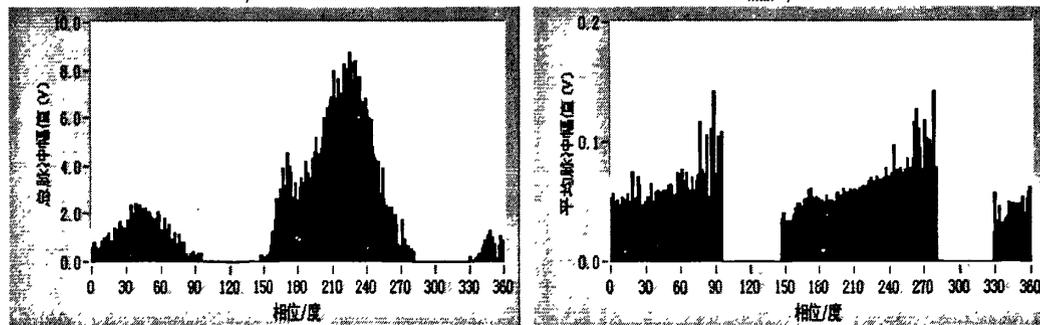
由图3.33可以看出，在每个工频检测周期内，油中沿面放电干扰信号主要散布在 $0^\circ \sim 100^\circ$ 、 $140^\circ \sim 280^\circ$ 以及 $330^\circ \sim 360^\circ$ 的三个相位区间内，检波信号的幅值分布在 $0V \sim 0.3V$ 的区间内。

3.4.2.2 二维柱状图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的油中沿面放电干扰信号的脉冲重复率与脉冲相位的二维柱状图、最大脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图、总脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图以及平均脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图，即 $n-\phi$ 二维柱状图、 $v_{max}-\phi$ 二维柱状图、 $v_{total}-\phi$ 二维柱状图和 $v_{ave}-\phi$ 二维柱状图，如图3.34所示。



(a) $n-\phi$ 二维柱状图 (b) $v_{max}-\phi$ 二维柱状图



(c) $v_{total}-\phi$ 二维柱状图 (d) $v_{ave}-\phi$ 二维柱状图

图 3.34 油中沿面放电干扰的二维柱状图

由于 $330^\circ \sim 360^\circ$ 可以认为是正半周的扩展，因此由图3.34 (a)可以看出，负

半周的脉冲重复率大于正半周，且正负半周均呈现双峰结构。由图3.34 (b)~图3.34 (d)可以看出，负半周脉冲幅值的最大值大于正半周，但从平均脉冲幅值来看，正半周的平均脉冲幅值与负半周大致相当。

3.4.2.3 三维谱图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的油中沿面放电干扰信号的脉冲重复率、脉冲幅值、脉冲相位的三维谱图及其向脉冲重复率-脉冲幅值平面上的投影，即 $n-v-\varphi$ 三维谱图及 $n-v-\varphi$ 三维谱图向 $n-v$ 平面的投影，如图3.35所示。

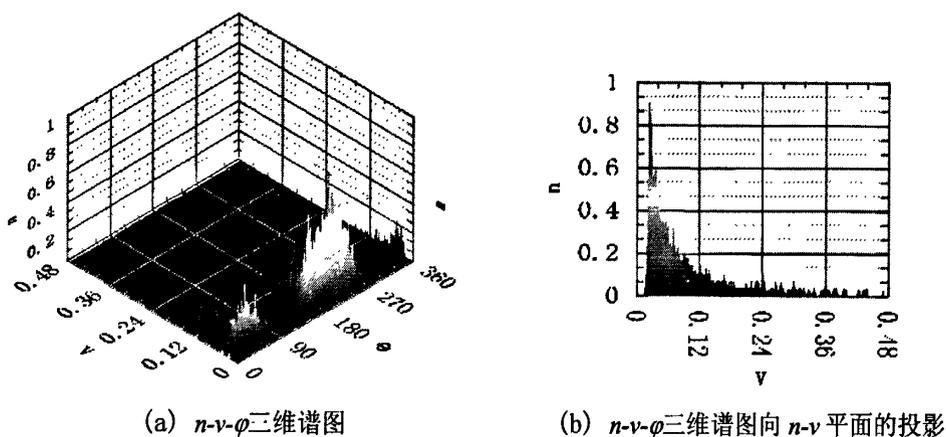


图 3.35 油中沿面放电干扰的三维谱图

由图3.35 (a)可以看出，油中沿面放电干扰信号的 $n-v-\varphi$ 三维谱图随相位和幅值的分布呈现明显的三个峰状结构，负半峰的高度大于正半峰。图3.35 (b)呈现的是脉冲重复率随脉冲幅值的规律，可以看出油中沿面放电干扰信号多数为分布在 $0V\sim 0.36V$ 之间，并且脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现指数递减的趋势，幅值分布在 $0V\sim 0.10V$ 之间的脉冲最为集中。

3.4.2.4 灰度图

本文根据外置式UHF传感器输出的检波信号绘制了油中沿面放电干扰的灰度图，如图3.36所示。

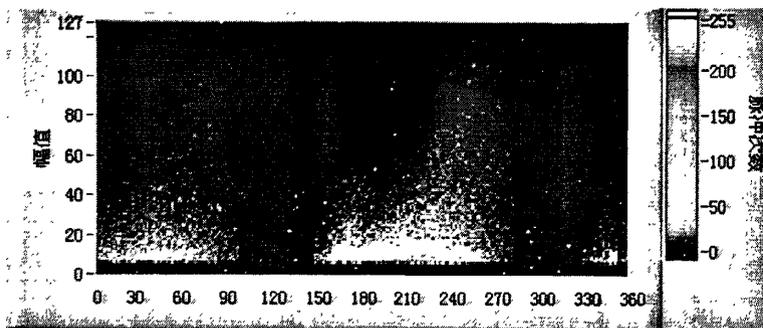


图 3.36 油中沿面放电干扰的灰度图

由图3.36可以看出，油中沿面放电干扰信号的灰度图两个大的非零灰度区，分

别对应正负半周的脉冲（ $330^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间的区域可以认为是正半周的扩展）。负半周低幅值脉冲的亮度较高，这说明负半周相对幅值较低的脉冲居多，并且脉冲次数远大于正半周。

3.4.2.5 时频分析图

本文根据试验过程中外置式UHF传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的油中沿面放电干扰信号的时频分析图，即T-F谱图如图3.37所示，时频分析的统计结果如表3.5所示。

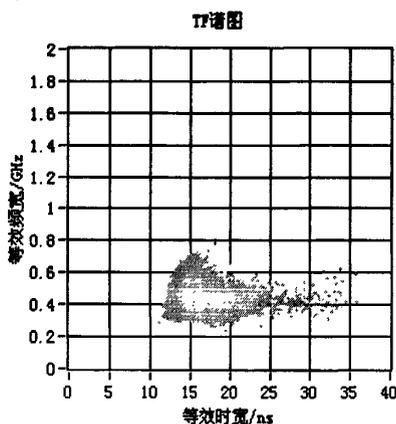


图 3.37 油中沿面放电干扰的时频分析图

表 3.5 油中沿面放电干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
15.20464	0.436386

由图3.37和表3.5可以看出，空气中沿面放电干扰的等效频宽主要分布在0.3GHz~0.7GHz之间，等效时长主要分布在12ns~25ns之间，时频分析图整体上呈现“扁L”状分布。

3.5 灯具干扰信号的模式研究

灯具干扰是指设备安装位置附近的荧光灯起动器、镇流器以及碘钨灯、荧光灯、高压汞灯等常见灯具产生的干扰信号等。本文在进行前边所述研究的过程中，发现经常有未知的干扰信号出现，经过排查，最终发现试验大厅所使用的自镇流荧光汞灯在启动的过程中会激发 UHF 信号，因此本文以 GYZ250 型自镇流荧光高压汞灯为例，对灯具干扰开展了相应的研究工作。

3.5.1 高压汞灯的工作原理

高压汞灯主要由荧光外壳和放电管两部分组成。放电管内充有启动用的氙气和

放电用的汞。通电后，高压汞灯内辅助电极和相邻的主电极之间的气体被击穿而产生辉光放电，从而导致两主电极放电。主电极和相邻辅助电极之间的辉光放电产生了大量的电子和离子，这些带电粒子向两主电极间扩散，使主电极之间产生放电，并很快过渡到两主电极之间的弧光放电。放电初始阶段是由氩气和低气压的汞蒸气放电，所产生的热量使得管壁温度升高，汞蒸发气化，逐步过渡到向高压放电，当汞全部蒸发后开始进入稳定的高压汞蒸气放电。在放电过程中，受激的汞原子不断地从激发态向基态或低能态跃进，将多余的能量以光的形式辐射出来，因此高压汞灯的光谱能量分布和发光效率主要由汞蒸气的压力来决定。当汞蒸气的压力较低时，放射短波紫外线强，可见光较弱，当汞蒸气的气压增高时，可见光变强，光效率也随之提高。因此，高压汞灯从启动到正常工作需要一段时间，通常为4~10分钟。高压汞灯熄灭以后，不能立即重新点燃，这是因为灯熄灭后，内部还保持着较高的汞蒸气压，此时电子的自由程很短，在原来的电压下，电子不能积累足够的能量来电离气体。高压汞灯冷却过程一般需要3~10分钟。

本文在试验研究过程中也验证了高压汞灯的上述工作特性，如图3.38所示。通电伊始时，如图3.38(a)所示，并没有激发强烈的UHF信号；当高压汞灯开始进入启动闪烁阶段时，如图3.38(b)~(d)，开始辐射电磁波信号，特高频传感器的检波输出端可以检测到明显的放电信号，但有逐渐减弱的趋势，此阶段一般的持续时间为90秒~200秒之间；当高压汞灯完成启动后正常发光时，如图3.38(e)~(f)所示，并不对外辐射电磁波信号。

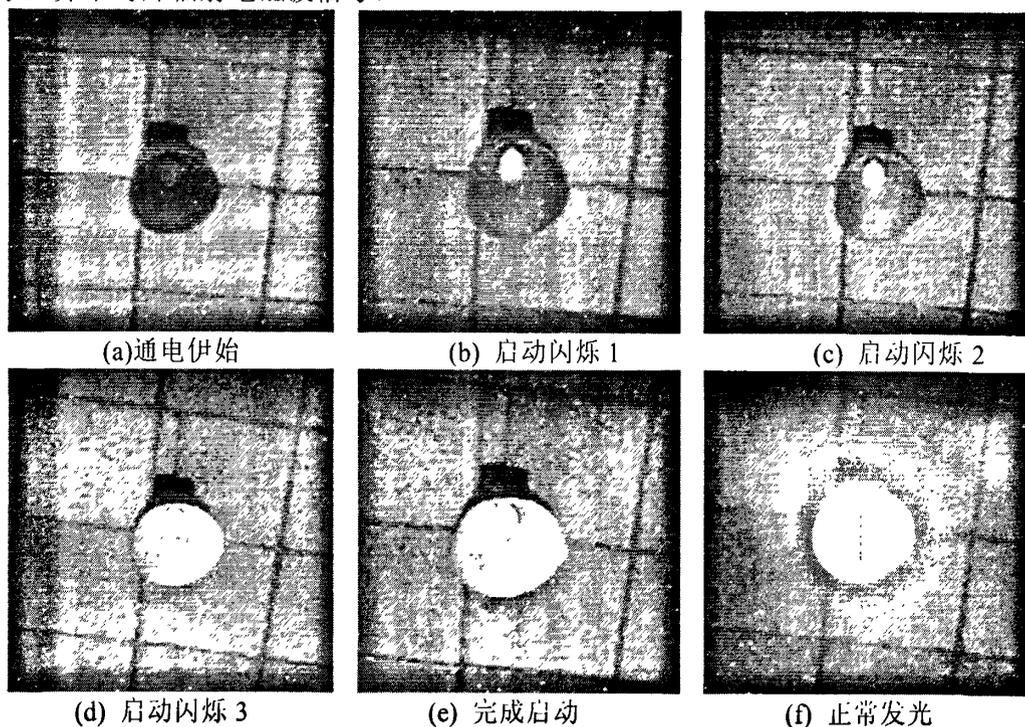


图 3.38 高压汞灯的启动过程

本文以华北电力大学高压试验大厅内10号GYZ250型自镇流荧光高压汞灯为研究对象，对其启动过程中所辐射的UHF干扰信号进行研究，共计将高压汞灯启动20次，总计的持续时间为150min，所研究灯具的实物照片以及试验布置如图3.39所示。

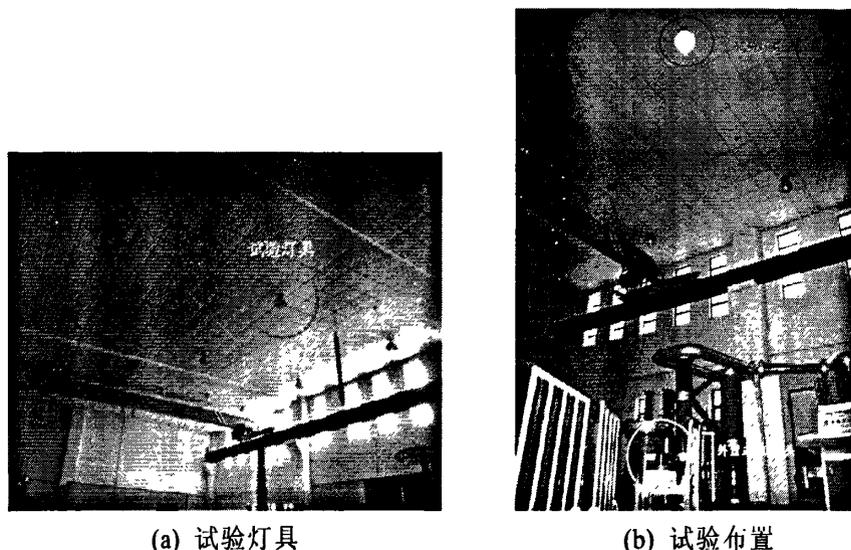


图 3.39 灯具干扰研究中试验灯具的实物照片以及试验布置

试验过程中，外置式UHF传感器检波信号的输出端可以检测到较为明显的脉冲信号，其时域波形如图3.40所示。

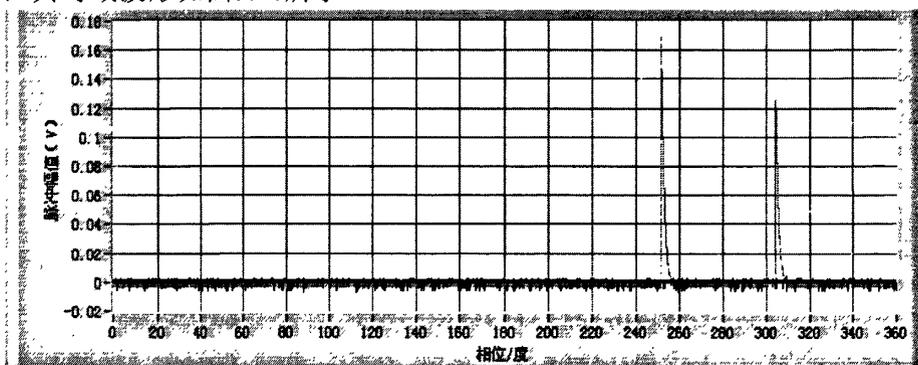


图 3.40 经过外置式 UHF 传感器检波处理的灯具干扰信号

由图3.40可以看出，在每个工频检测周期中，外置式UHF传感器检波输出的灯具干扰信号的个数一般为1~2个，并且相位非常固定，均在 250° 和 305° 附近，整个试验过程中，经过检波处理后输出的最大幅值为1.01V，平均幅值为0.164V。外置式UHF传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的脉冲信号，如图3.41所示，可以看出，灯具干扰的原始射频信号的幅值约为0.06V左右，时域波形的长度约为40ns。

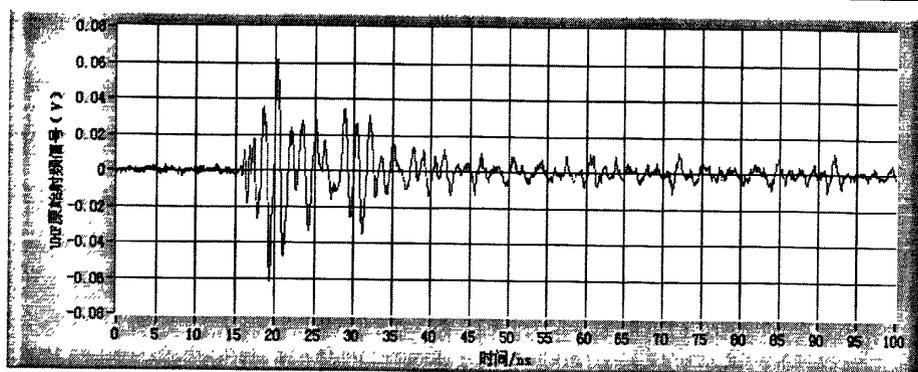


图 3.41 外置式 UHF 传感器检测到的灯具干扰的原始射频信号

3.5.2 灯具干扰信号的模式

3.5.2.1 散点图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的灯具干扰信号的幅值与相位的散点图以及最大幅值与相位的散点图，即 $v_{max}-\varphi$ 散点图和 $v-\varphi$ 散点图如图3.42所示。

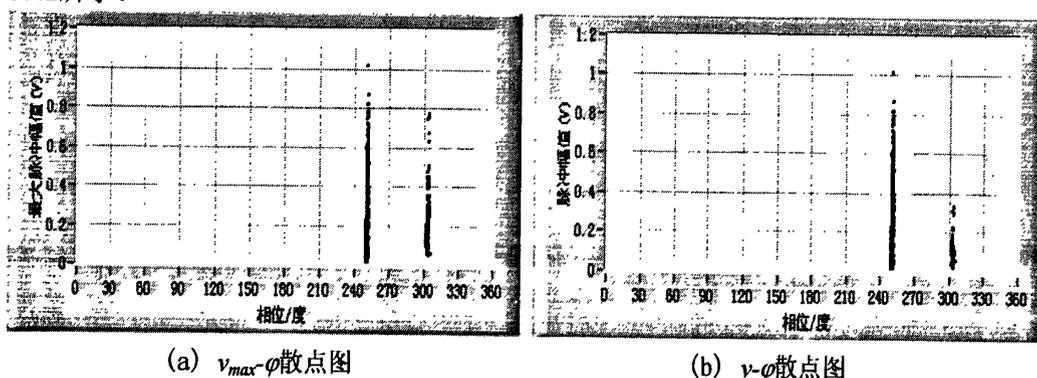


图 3.42 灯具干扰的 $v_{max}-\varphi$ 散点图和 $v-\varphi$ 散点图

由图3.42可以看出，在每个工频检测周期内，灯具干扰信号主要散布在 250° 、和 305° 附近，相位相关性非常强，检波信号的幅值分布在 $0V\sim 0.8V$ (250°) 和 $0V\sim 0.2V$ (305°) 的区间内。

3.5.2.2 二维柱状图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的灯具干扰信号的脉冲重复率与脉冲相位的二维柱状图、最大脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图、总脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图以及平均脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图，即 $n-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{max}-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{total}-\varphi$ 二维柱状图和 $v_{ave}-\varphi$ 二维柱状图，如图3.43所示。

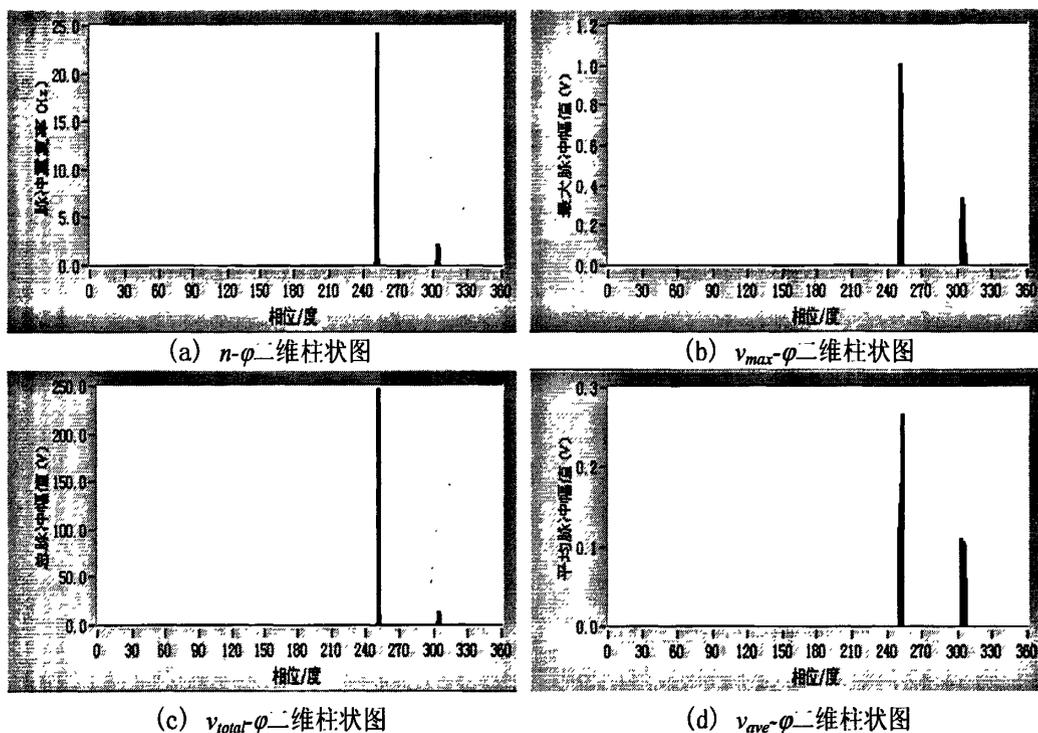


图 3.43 灯具干扰的二维柱状图

由图3.43 (a) 可以看出, 对于高压汞灯产生的灯具干扰, 主要集中于 250° 和 305° 附近, 其它相位上不会出现干扰信号, 并且 250° 相位附近的脉冲重复率远大于 305° 附近的脉冲重复率。由图3.43 (b) ~图3.43 (d) 可以看出, 无论总脉冲幅值、最大脉冲幅值以及平均脉冲幅值, 250° 相位附近的脉冲均大于 305° 附近的脉冲幅值。

3.5.2.3 三维谱图

根据试验过程中外置式UHF传感器输出的检波信号获得的灯具干扰信号的脉冲重复率、脉冲幅值、脉冲相位的三维谱图及其向脉冲重复率-脉冲幅值平面上的投影, 即 $n-v-\varphi$ 三维谱图及 $n-v-\varphi$ 三维谱图向 $n-v$ 平面的投影, 如图3.44所示。

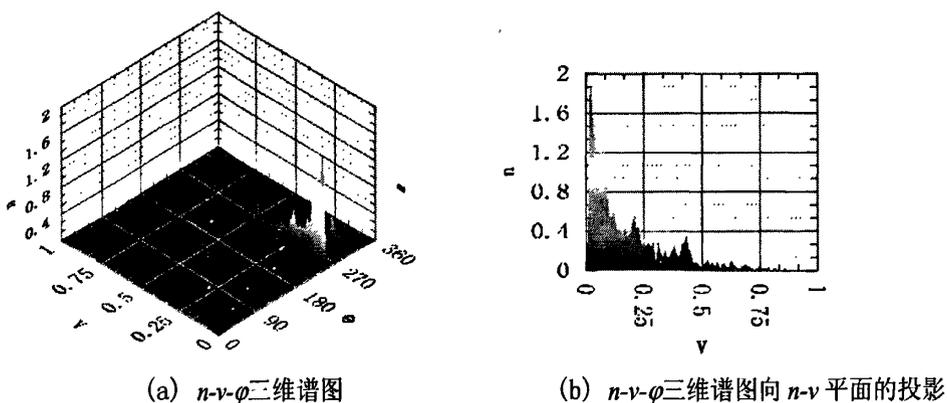


图 3.44 灯具干扰的三维谱图

由图3.44 (a) 可以看出, 灯具干扰信号的 $n-v-\phi$ 三维谱图随相位和幅值的分布呈现明显的两个峰状结构, 250° 附近的波峰的高度大于 305° 附近的波峰。图3.44 (b) 呈现的是脉冲重复率随脉冲幅值的规律, 可以看出灯具干扰信号多数为分布在 $0V\sim 0.75V$ 之间, 并且脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现单调递减的趋势, 幅值分布在 $0V\sim 0.25V$ 之间的脉冲尤为集中。

3.5.2.4 灰度图

本文根据外置式UHF传感器输出的检波信号绘制了灯具干扰的灰度图, 如图3.45所示。

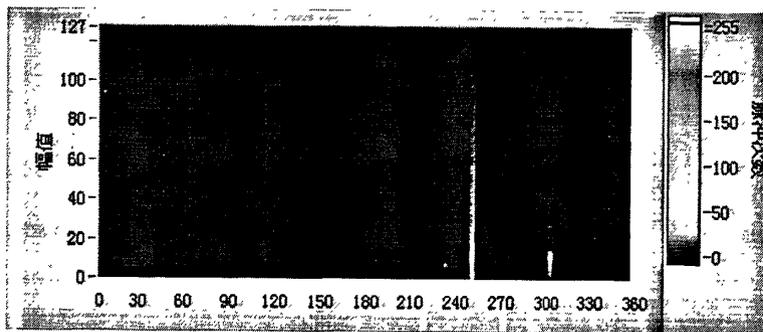


图 3.45 灯具干扰的灰度图

由图3.45可以看出, 灯具干扰信号的灰度图两个大的非零灰度区, 分别对应 250° 和 305° 附近的脉冲。 250° 相位附近低幅值脉冲的亮度较高, 这说明相对幅值较低的脉冲居多, 并且脉冲次数远大于 305° 附近。

3.5.2.5 时频分析图

本文根据试验过程中外置式UHF传感器输出的原始射频信号, 经过等效时频变换后, 获得的灯具干扰信号的时频分析图, 即T-F谱图如图3.46所示, 时频分析的统计结果如表3.6所示。

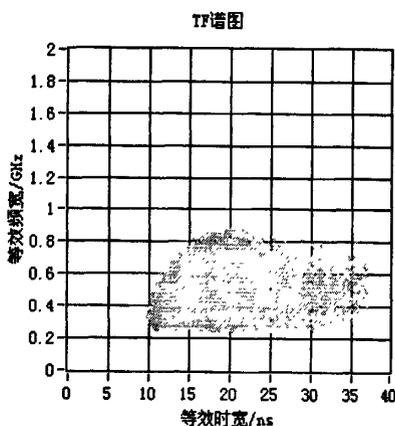


图 3.46 灯具干扰的时频分析图

表 3.6 灯具干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
16.5645	0.471488

由图3.46和表3.6可以看出, 高压汞灯产生干扰信号的频率重心位于0.74GHz附近, 等效频宽主要分布在0.3GHz~0.9GHz之间, 等效时长主要分布在10ns~35ns之间, 时频分析图整体上呈现“四边形”分布。

第四章 介质窗口式 UHF 传感器获得的典型干扰信号的模式

鉴于前述的介质窗口式 UHF 传感器的优点以及 GIS 设备的现状, 介质窗口式 UHF 传感器的应用前景十分广阔。因此, 本章利用所建立起来的 GIS 设备局部放电典型干扰信号的研究平台对介质窗口式 UHF 传感器获得手机信号干扰(含 GSM 和 CDMA 制式)、电晕放电干扰、悬浮放电干扰、沿面放电干扰以及灯具干扰等五种典型放电干扰信号进行了一系列的研究, 研究了不同放电干扰信号的散点图、柱状图、三维图、灰度图以及时频分析图等多种统计谱图, 获得了使用介质窗口式 UHF 传感器的情况下上述五种典型的放电干扰信号的模式。测量过程中, 介质窗口式 UHF 传感器位于 GIS 腔体的上安装孔处, 与干扰模型的直线距离均为 5.1 米, 如图 4.1 所示, 其中图 4.1 (b) 中试验场地的场地实物图是以油中电晕放电干扰为例。

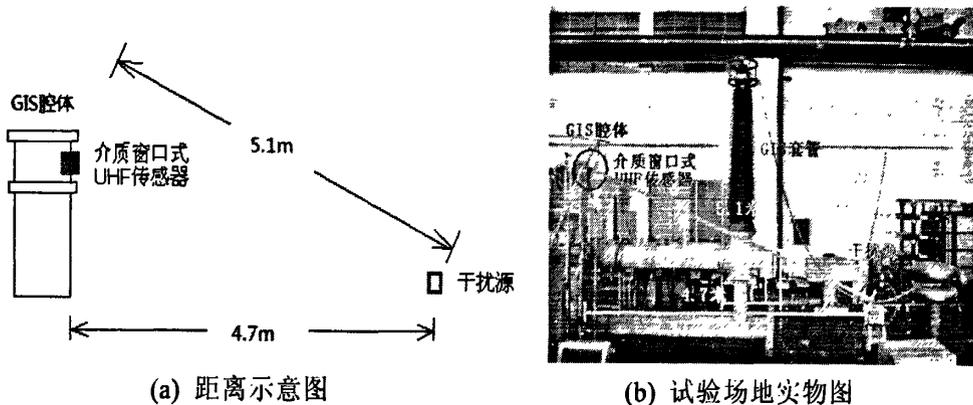


图 4.1 试验场地布置

4.1 手机干扰信号的模式研究

4.1.1 GSM 制式手机干扰信号的模式研究

试验过程中, 被试 GSM 手机一直处于正常通话状态, 并保持 60 分钟。不论被试的 GSM 手机处于呼叫未接通或者正常通话状态, 介质窗口式 UHF 传感器的检波输出端均可以检测到较为明显的脉冲信号, 如图 4.2 所示。

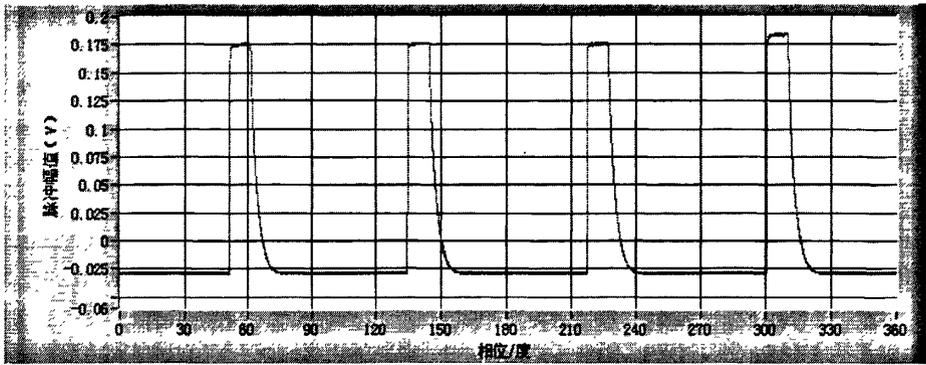
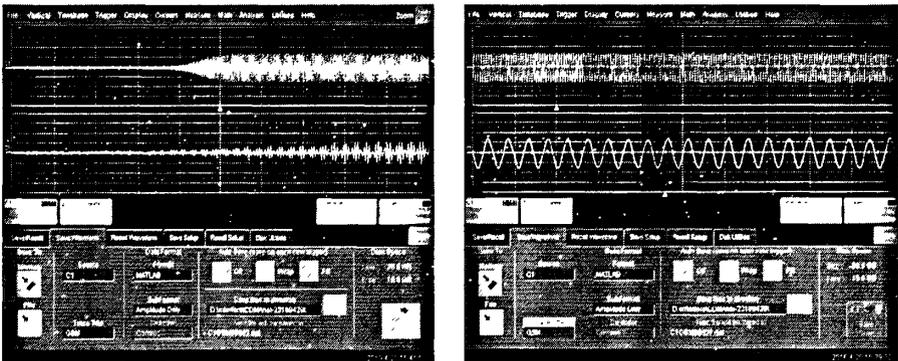


图 4.2 经过介质窗口式 UHF 传感器检波处理的 GSM 制式手机干扰信号

由图4.2可以看出，GSM制式的手机干扰信号经过介质窗口式UHF传感器检波处理后，变为方波信号。一个工频检测周期内，通常可以检测到2~5个方波信号，并且沿相位均匀分布，这与外置式UHF传感器大致相当。整个试验过程中，介质窗口式UHF传感器检波输出的最大幅值为0.296V，平均幅值为0.107V，与外置式UHF传感器相比较小。介质窗口式UHF传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的经过调制的正弦信号，如图4.3所示，可以看出，正常工作状态下，介质窗口式UHF传感器检测到得GSM制式手机干扰的原始射频信号的幅值约为100mV左右，也小于外置式UHF传感器检测到的原始射频信号的幅值。



(a) 检测时长为 50us

(b) 检测时长为 100ns

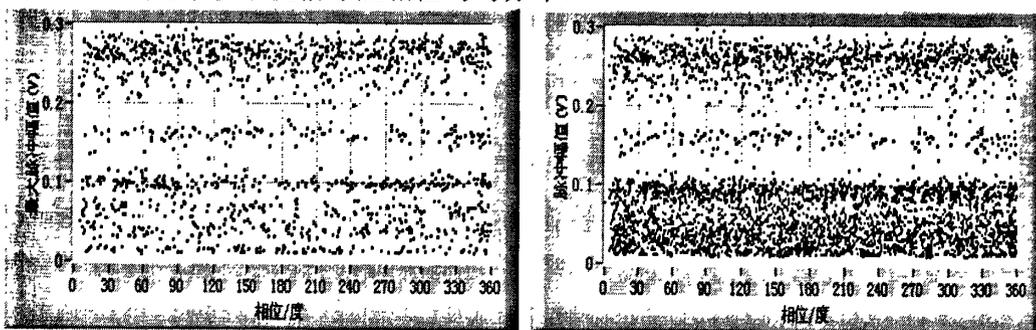
图 4.3 介质窗口式 UHF 传感器检测到的 GSM 制式手机干扰的原始射频信号

4.1.2.1 散点图

根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的检波信号获得的GSM制式手机干扰信号的幅值与相位的散点图以及最大幅值与相位的散点图，即 $v_{max}-\varphi$ 散点图和 $v-\varphi$ 散点图如图4.4所示。

由图4.4 (a) 可以看出，每个工频检测周期内，介质窗口式UHF传感器检测到的GSM制式手机干扰信号的最大幅值分布较为稀疏，而根据图4.4 (b) 可以看出，在每个工频检测周期内，介质窗口式UHF传感器检测到的GSM制式手机干扰信号随幅值也呈现较为明显的分层分布，主要集中在0.2V~0.3V和0V~0.1V两个幅值区间内，并且0V~0.1V区间内的放电点较为集中。结合图4.4 (a) 和图4.4 (b)，可以看

出GSM制式的手机干扰信号随相位均匀分布。



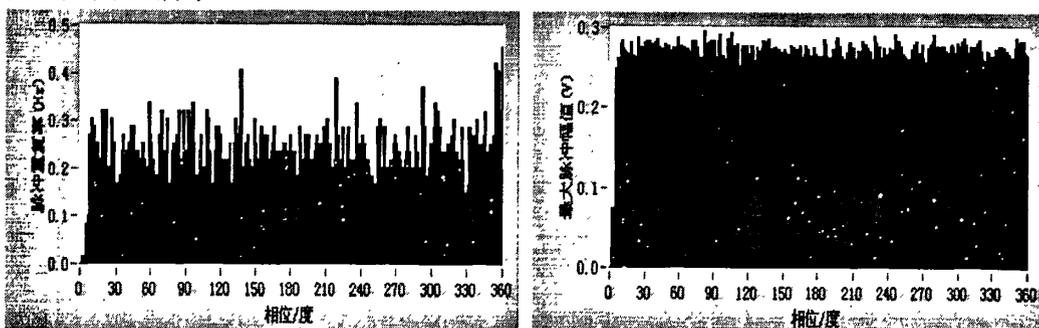
(a) $v_{max}-\varphi$ 散点图

(b) $v-\varphi$ 散点图

图 4.4 GSM 制式手机干扰的 $v_{max}-\varphi$ 散点图和 $v-\varphi$ 散点图

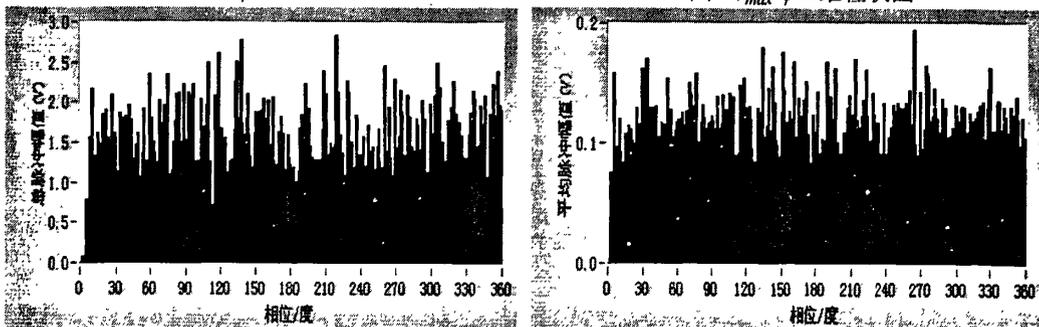
4.1.2.2 二维柱状图

根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的检波信号获得的GSM制式手机干扰信号的脉冲重复率与脉冲相位的二维柱状图、最大脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图、总脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图以及平均脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图，即 $n-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{max}-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{total}-\varphi$ 二维柱状图和 $v_{ave}-\varphi$ 二维柱状图，如图4.5所示。



(a) $n-\varphi$ 二维柱状图

(b) $v_{max}-\varphi$ 二维柱状图



(c) $v_{total}-\varphi$ 二维柱状图

(d) $v_{ave}-\varphi$ 二维柱状图

图 4.5 GSM 制式手机干扰的二维柱状图

由图4.5 (a)可以看出，介质窗口式UHF传感器检测到的GSM制式手机干扰信号的脉冲重复率随相位的分布较为均匀，没有明显的相位相关性。由图4.5 (b)~图4.5 (d)可以看出，介质窗口式UHF传感器检测到的GSM制式手机干扰信号的幅

值随相位的分布，尤其是每个检测周期内的最大脉冲幅值和平均脉冲幅值随相位的分布比较均匀，没有明显的相位相关性，这与外置式UHF传感器基本一致。

4.1.2.3 三维谱图

根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的检波信号获得的GSM制式手机干扰信号的脉冲重复率、脉冲幅值、脉冲相位的三维谱图及其向脉冲重复率-脉冲幅值平面上的投影，即 $n-v-\phi$ 三维谱图及 $n-v-\phi$ 三维谱图向 $n-v$ 平面的投影，如图4.6所示。

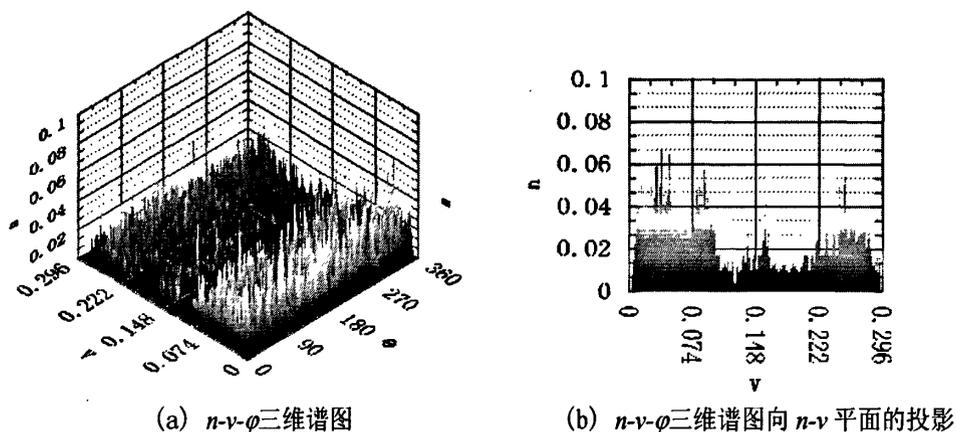


图 4.6 GSM 制式手机干扰的三维谱图

由图4.6 (a) 可以看出，介质窗口式UHF传感器检测到的GSM制式手机干扰信号的 $n-v-\phi$ 三维谱图随相位和幅值的分布呈现明显的两个平行峰状，这说明该类型的干扰信号随相位的分布较为均匀，且干扰脉冲幅值的幅值主要集中在两个幅值区间内。图4.6 (b) 呈现的是脉冲重复率随脉冲幅值的规律，可以看出干扰脉冲分布相对集中的两个幅值区间的脉冲重复率大致相当，这与外置式UHF传感器也基本一致。

4.1.2.4 灰度图

本文根据介质窗口式UHF传感器输出的检波信号绘制了GSM制式手机干扰的灰度图，如图4.7所示。

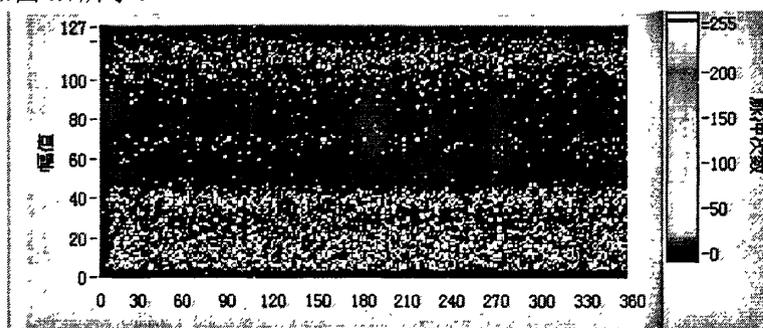


图 4.7 GSM 制式手机干扰的灰度图

由图4.7可以看出，GSM制式手机干扰信号的灰度图呈现明显的双层分布，低幅值脉冲相对比较集中，另外，方波脉冲随相位的分布较为均匀。

4.1.2.5 时频分析图

本文根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的GSM制式手机干扰信号的时频分析图，即T-F谱图如图4.8所示，时频分析的统计结果如表4.1所示。

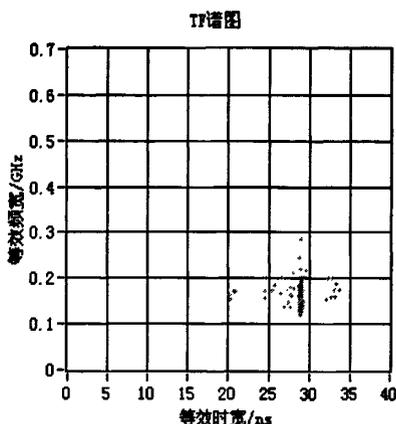


图 4.8 GSM 制式手机干扰的时频分析图

表 4.1 GSM 制式手机干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
28.9141	0.142051

由图4.8和表4.1可以看出，介质窗口式UHF传感器检测到的GSM制式手机干扰的等效频宽主要分布在0.12GHz~0.2GHz之间，等效时长主要分布在28ns~29ns之间，且基本保持不变。与外置式UHF传感器的图3.8和表3.1相比，介质窗口式UHF传感器输出的原始射频信号经过等效时频变换后，等效时长和等效频宽的分布变窄，并且等效时长略微增大，等效频宽明显减小。

4.1.2 CDMA 制式手机干扰信号的模式研究

试验过程中，被试CDMA手机一直处于正常通话状态，并保持60分钟。不论被试的CDMA手机处于等待呼叫、正常通话或者待机状态，介质窗口式UHF传感器的检波输出端和原始射频信号输出端均未检测到明显的信号，这说明CDMA制式的手机干扰信号无法通过GIS设备的外壳或者是套管进入到GIS腔体内部，这可能与CDMA制式的手机信号为连续的信号，耦合性能较差，以及CDMA制式手机的辐射相对较小有关，因此介质窗口式UHF传感器无法检测到GIS设备外部CDMA制式的手机干扰信号。

4.2 电晕放电干扰信号的模式研究

4.2.1 干扰模型

在介质窗口式 UHF 传感器下电晕放电干扰模式的研究中，放电干扰仍然采用第 3.2.1 节所描述的油中针-板放电模型在 44.9kV 工频电压作用下产生电晕放电来模拟，60 分钟后加压终止。试验过程中，DST-4 型局部放电检测仪检测到的油中电晕放电过程中的最大视在放电量为 1793.19pC，平均视在放电量为 209.0pC，与第 3.2.1 节的放电强度大致相当。此时介质窗口式 UHF 传感器检波信号的输出端检测不到明显的信号，但是介质窗口式 UHF 传感器射频信号的输出端可以检测到较为明显的放电信号，如图 4.9 所示。可以看出，介质窗口式 UHF 传感器获得的原始射频信号的幅值约为 3mV 左右，时域波形的长度>40ns。这说明对于本文所采用的 UHF 传感器来说，原始射频信号输出的灵敏度要高于检波输出的灵敏度。

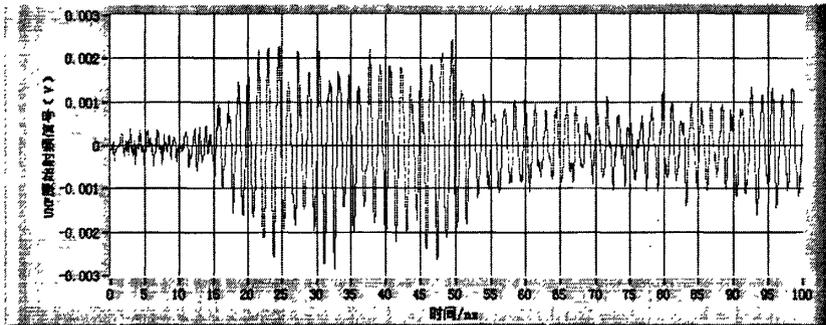


图 4.9 介质窗口式 UHF 传感器检测到的油中电晕放电干扰的原始射频信号

4.2.2 时频分析图

本文根据试验过程中介质窗口式 UHF 传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的油中电晕放电干扰信号的时频分析图，即 T-F 谱图如图 4.10 所示，时频分析的统计结果如表 4.2 所示。

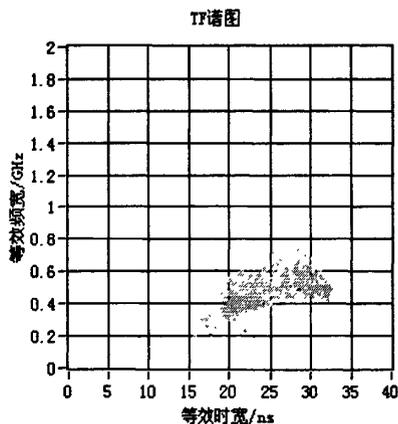


图 4.10 油中电晕放电干扰的时频分析图

表 4.2 油中电晕放电干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
27.4195	0.46901

由图4.10和表4.2可以看出, 介质窗口式UHF传感器检测到的油中电晕放电干扰的等效频宽主要分布在0.3GHz~0.7GHz之间, 等效时长主要分布在18ns~32ns之间。与外置式UHF传感器的图3.21和表3.3相比, 介质窗口式UHF传感器输出的原始射频信号经过等效时频变换后, 等效频宽的分布明显变窄, 并且等效时长稍微变长, 等效频宽显著减小。

4.3 悬浮放电干扰信号的模式研究

4.3.1 干扰模型

在介质窗口式UHF传感器下电晕放电干扰模式的研究中, 放电干扰仍然采用第3.3.1节所描述的环形绝缘导线模型在66.1kV工频电压作用下产生悬浮放电来模拟, 60分钟后加压终止。试验过程中, DST-4型局部放电检测仪检测到的空气中电晕放电过程中的最大视在放电量为1501.68pC, 平均视在放电量为1311.18pC, 与第3.3.1节的放电强度大致相当。试验过程中, 介质窗口式UHF传感器检波信号的输出端可以检测到非常明显的放电信号, 其时域波形如图4.11所示。

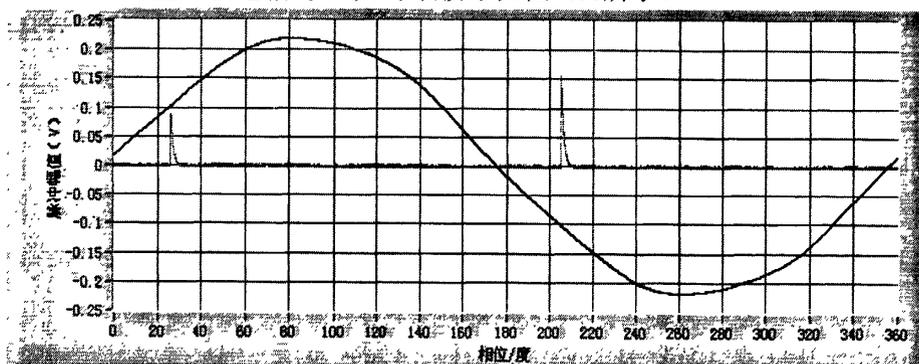
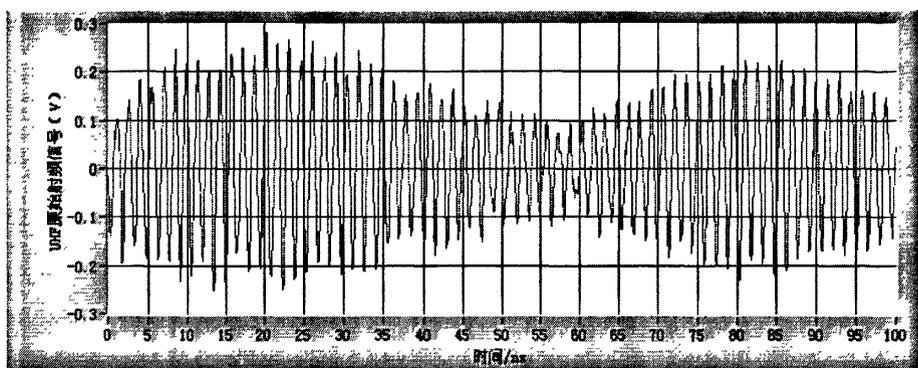
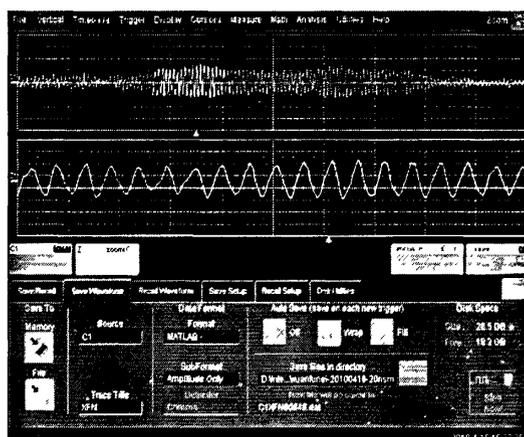


图 4.11 经过介质窗口式 UHF 传感器检波处理的空气中悬浮放电干扰信号

由图4.11可以看出, 在每个工频检测周期中, 介质窗口式UHF传感器检波输出的空气中悬浮放电干扰信号的个数一般为1~2个, 整个试验过程中, 经过检波处理后输出的最大幅值为0.503V, 平均幅值为0.116V, 与外置式UHF传感器相比较小。介质窗口式UHF传感器射频信号的输出端也可以检测到较为明显的放电信号, 如图4.12所示, 可以看出, 介质窗口式UHF传感器检测的原始射频信号的幅值约为0.27V左右, 时域波形的长度约为120ns。



(a) 检测时长为 100ns



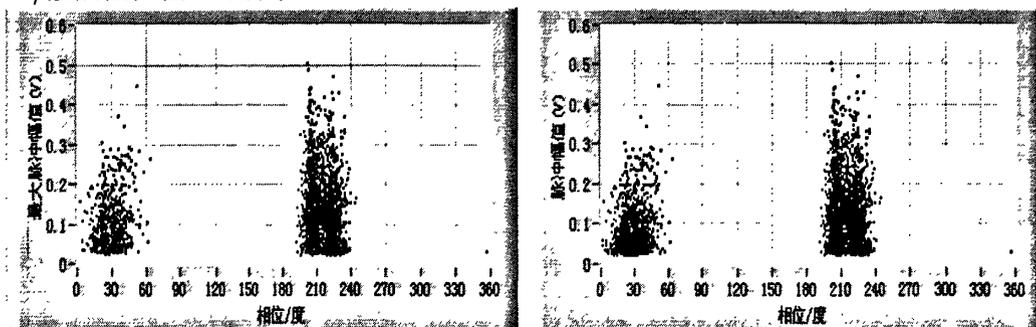
(b) 检测时长为 200ns

图 4.12 介质窗口式 UHF 传感器检测到的空气中悬浮放电干扰的原始射频信号

4.3.2 悬浮放电干扰信号的模式

4.3.2.1 散点图

根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的检波信号获得的空气中悬浮放电干扰信号的幅值与相位的散点图以及最大幅值与相位的散点图，即 $v_{max}-\varphi$ 散点图和 $v-\varphi$ 散点图如图4.13所示。



(a) $v_{max}-\varphi$ 散点图

(b) $v-\varphi$ 散点图

图 4.13 空气中悬浮放电干扰的 $v_{max}-\varphi$ 散点图和 $v-\varphi$ 散点图

由图4.13可以看出，在每个工频检测周期内，空气中悬浮放电干扰信号主要散

布在 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 和 $190^{\circ} \sim 240^{\circ}$ 两个相位区间内, $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 和 $240^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间的相位区间内没有放电出现, 检波信号的分布在 $0.02\text{V} \sim 0.5\text{V}$ 的区间内。

4.3.2.2 二维柱状图

根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的检波信号获得的空气中悬浮放电干扰信号的脉冲重复率与脉冲相位的二维柱状图、最大脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图、总脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图以及平均脉冲幅值与脉冲相位的二维柱状图, 即 $n-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{max}-\varphi$ 二维柱状图、 $v_{total}-\varphi$ 二维柱状图和 $v_{ave}-\varphi$ 二维柱状图, 如图4.14所示。

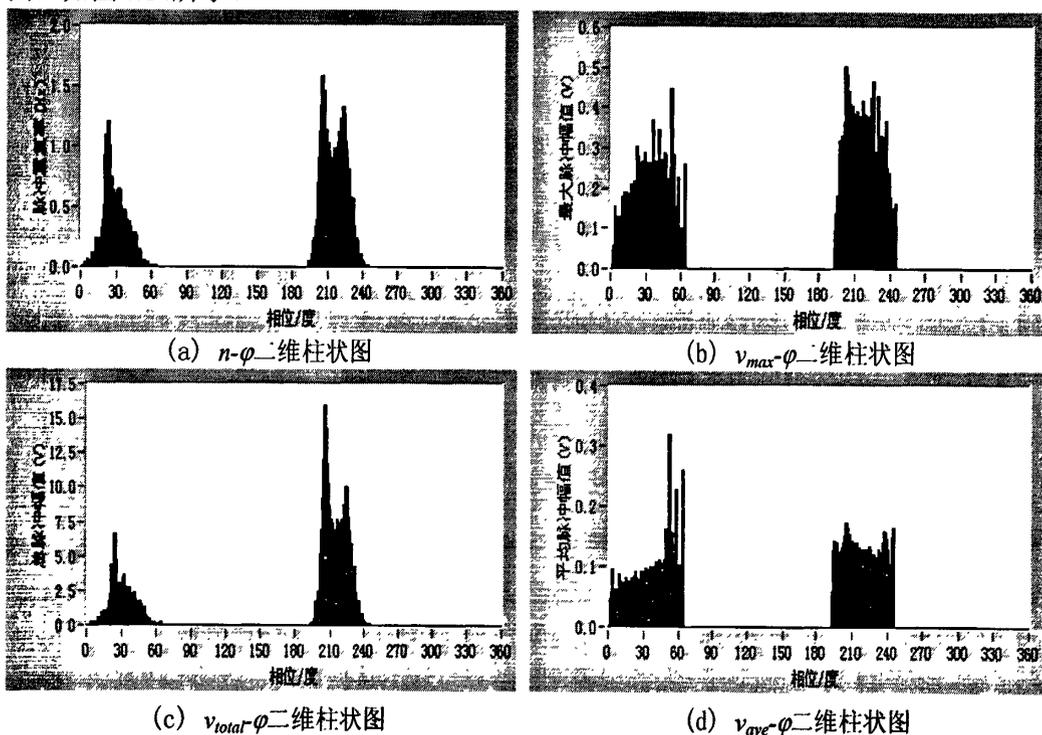


图 4.14 空气中悬浮放电干扰的二维柱状图

由图4.14 (a) 可以看出, 负半周的脉冲重复率小于正半周, 且正负半周均呈现双峰结构。由图4.14 (b) ~图4.14 (d) 可以看出, 负半周脉冲幅值的最大值与正半周大致相当, 但从平均脉冲幅值来看, 正半周略大于负半周, 并且正负半周的均幅值较大, 分布在 $0.08\text{V} \sim 0.33\text{V}$ 的区间内。

4.3.2.3 三维谱图

根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的检波信号获得的空气中悬浮放电干扰信号的脉冲重复率、脉冲幅值、脉冲相位的三维谱图及其向脉冲重复率-脉冲幅值平面上的投影, 即 $n-v-\varphi$ 三维谱图及 $n-v-\varphi$ 三维谱图向 $n-v$ 平面的投影, 如图4.15所示。

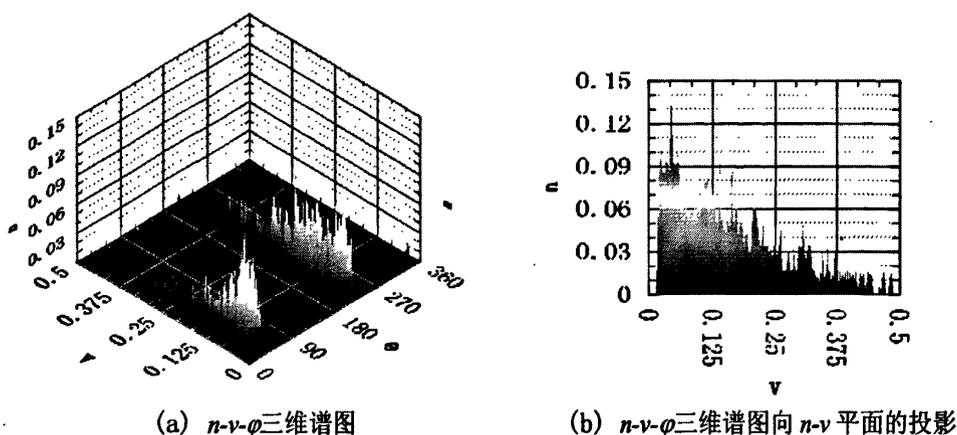


图 4.15 空气中悬浮放电干扰的三维谱图

由图4.15 (a) 可以看出, 空气中悬浮放电干扰信号的 $n-v-\phi$ 三维谱图随相位和幅值的分布呈现明显的两个峰状结构, 正半峰的高度略大于负半峰。图4.15 (b) 呈现的是脉冲重复率随脉冲幅值的规律, 可以看出空气中悬浮放电干扰信号多数为分布在 $0.25V \sim 0.5V$ 之间, 并且脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现指数减少的趋势, 幅值分布在 $0V \sim 0.25V$ 之间的脉冲最为集中。

4.3.2.4 灰度图

本文根据介质窗口式UHF传感器输出的检波信号绘制了空气中悬浮放电干扰的灰度图, 如图4.16所示。

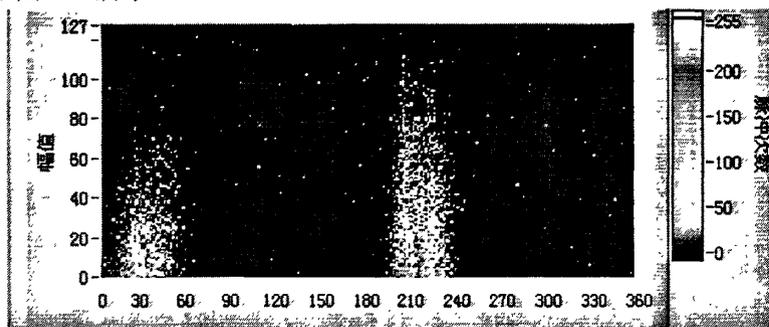


图 4.16 空气中悬浮放电干扰的灰度图

由图4.16可以看出, 空气中悬浮放电干扰信号的灰度图有两个大的非零灰度区, 分别对应正负半周的脉冲。正半周低幅值脉冲的亮度较高, 这说明正半周低幅值脉冲的次数较多, 并且脉冲沿幅值的分布相对较为集中, 而负半周的脉冲沿相位的分布相对来说较为分散。

4.3.2.5 时频分析图

本文根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的原始射频信号, 经过等效时频变换后, 获得的空气中悬浮放电干扰信号的时频分析图, 即T-F谱图如图4.17所示, 时频分析的统计结果如表4.3所示。

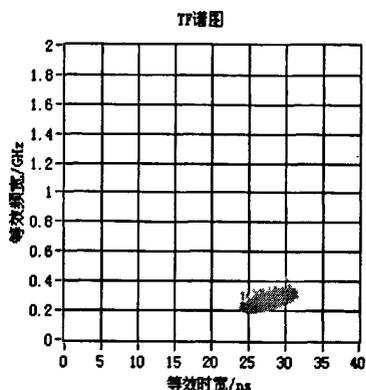


图 4.17 空气中悬浮放电干扰的时频分析图

表 4.3 空气中悬浮放电干扰的时频分析图的时频特征量

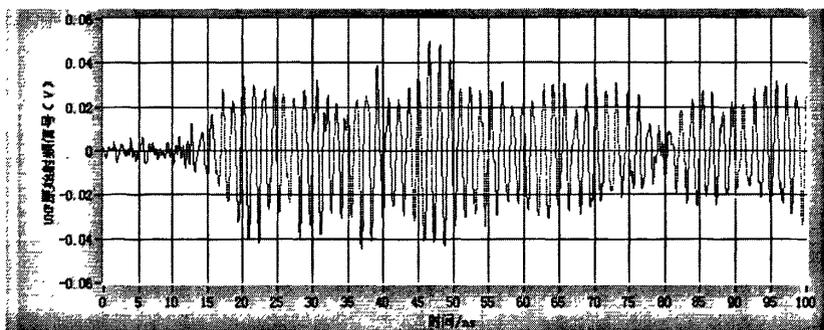
等效时长, ns	等效带宽, GHz
28.0919	0.262033

由图4.17和表4.3可以看出，介质窗口式UHF传感器检测到的空气中电晕放电干扰的等效频宽主要分布在0.2GHz~0.4GHz之间，等效时长主要分布在23ns~32ns之间。与外置式UHF传感器的图3.29和表3.4相比，介质窗口式UHF传感器输出的原始射频信号经过等效时频变换后，等效频宽的分布明显变窄，并且等效时长稍微变长，等效频宽明显减小。

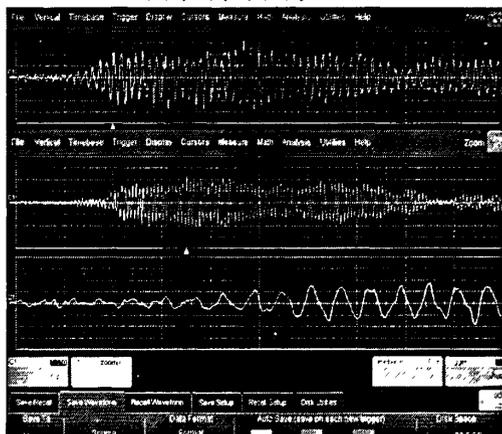
4.4 沿面放电干扰信号的模式研究

4.4.1 干扰模型

在介质窗口式 UHF 传感器下电晕放电干扰模式的研究中，放电干扰依然采用第 3.4.1 节所描述的油中柱—板放电模型在 21.4kV 工频电压作用下产生沿面放电来模拟，60 分钟后加压终止。试验过程中，DST-4 型局部放电检测仪检测到的空气中电晕放电过程中的最大视在放电量为 40316.7pC，平均视在放电量为 4947.05pC，与第 3.4.1 节的放电强度大致相当。此时介质窗口式 UHF 传感器检波信号的输出端检测不到明显的信号，但是介质窗口式 UHF 传感器射频信号的输出端可以检测到较为明显的放电信号，如图 4.18 所示。可以看出，介质窗口式 UHF 传感器获得的原始射频信号的幅值约为 50mV 左右，时域波形的长度约为 130ns 左右。这也说明对于本文所采用的 UHF 传感器来说，原始射频信号输出的灵敏度要高于检波输出的灵敏度。



(a) 检测时长为100ns



(b) 检测时长为200ns

图 4.18 介质窗口式 UHF 传感器检测到的油中沿面放电干扰的原始射频信号

4.4.2 时频分析图

本文根据试验过程中介质窗口式UHF传感器输出的原始射频信号，经过等效时频变换后，获得的油中沿面放电干扰信号的时频分析图，即T-F谱图如图4.19所示，时频分析的统计结果如表4.4所示。

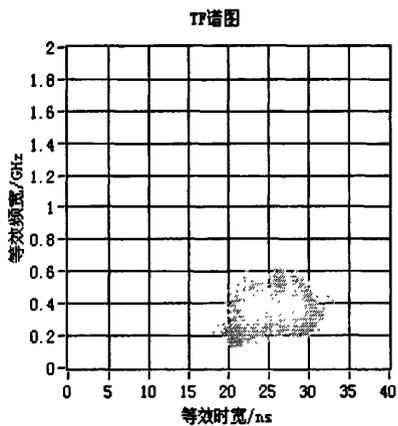


图 4.19 油中沿面放电干扰的时频分析图

表 4.4 油中沿面放电干扰的时频分析图的时频特征量

等效时长, ns	等效带宽, GHz
26.4723	0.341348

4.5 灯具干扰信号的模式研究

在介质窗口式UHF传感器下电晕放电干扰模式的研究中, 放电干扰仍然采用第3.5.1节所描述的10号GYZ250型自镇流荧光高压汞灯为研究对象, 对其启动过程中所辐射的UHF干扰信号进行研究, 共计将高压汞灯启动10次, 在此过程中介质窗口式UHF传感器的检波输出端和原始射频信号输出端均未检测到明显的信号, 这说明高压汞灯启动过程中产生的干扰信号无法通过GIS设备的外壳或者是套管进入到GIS腔体内部, 因此介质窗口式UHF传感器无法检测到GIS设备外部高压汞灯启动过程中产生的干扰信号。

第五章 结 论

本文以GIS设备局部放电检测中典型的干扰信号为研究对象,以获取基于UHF检测法的GIS设备局放检测中典型干扰信号的模式为研究目标,开展了大量试验及探索性工作,现将论文的结论以及对下一步研究的展望归纳如下:

5.1 论文的主要结论

1. 本文在实验室建设了一套GIS设备局部放电典型干扰信号的研究平台,分别采用外置式UHF传感器和介质窗口式UHF传感器对手机信号干扰(含GSM制式和CDMA制式)、电晕放电干扰、悬浮放电干扰、沿面放电干扰以及灯具干扰等五种典型的干扰类型进行了大量的试验研究,并且利用散点图、柱状图、三维图、灰度图以及时频分析图等多种统计谱图分析了不同放电干扰信号的特征,获得了五种典型放电干扰信号的模式。研究表明:上述五种典型放电干扰信号的模式互不相同,可以以此作为识别不同干扰类型的判别依据。

2. 采用外置式UHF传感器时,基于UHF检测法的GIS局部放电典型干扰的模式如下:

(1) GSM制式手机干扰:检波后成为方波信号;干扰脉冲随幅值的分布呈现分层现象,分布较为集中的幅值区间内的脉冲重复率大致相当;脉冲重复率随相位的分布较为均匀,没有明显的相位相关性;等效频宽分布在0.15GHz~0.4GHz之间,等效时长分布在25ns~32ns之间,时频分析图整体上呈现“倒T”状;

(2) CDMA制式手机干扰:检波后成为按照一定频率摆动的载波信号,并且沿相位杂乱分布,无明显的相位特征;等效频宽分布在0.1GHz~0.5GHz之间,等效时长分布在26ns~30ns之间,时频分析图整体上呈现“火炬”状;

(3) 油中电晕放电干扰:正半周检波信号的幅值比负半周较大,但是正半周的放电次数小于负半周;放电的次数较少,放电多发生在工频电压的上升阶段,多数为低幅值脉冲信号,并且脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈单调递减状;等效频宽分布在0.4GHz~1.4GHz之间,等效时长分布在12ns~25ns之间,时频分析图整体上呈现“帆”状;

(4) 空气中悬浮放电干扰:正负半周检波信号的幅值大致相当,并且数值均较大;工频电压的峰值处不会出现放电;正半周低幅值脉冲的次数较多,并且脉冲沿幅值的分布较为集中;脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现增加后减少的趋势;等效频宽分布在0.5GHz~1.0GHz之间,等效时长分布在22ns~30ns之间,时频分析图整

体上呈现“三角”状；

(5) 油中沿面放电干扰：放电的次数较多；正半周的放电扩展到 330° ，工频相位过零点处仍然有大量的放电，并且负半周容易出现幅值较大的放电，但相对幅值较低的脉冲也居多；脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现指数递减的趋势，等效频宽分布在 $0.3\text{GHz}\sim 0.7\text{GHz}$ 之间，等效时长分布在 $12\text{ns}\sim 25\text{ns}$ 之间，时频分析图整体上呈现“扁L”状；

(6) 灯具干扰：干扰脉冲多出现的相位非常固定，相位相关性非常强，多出现在 250° 和 305° 附近； 250° 相位附近的脉冲重复率和脉冲幅值远大于 305° 附近的脉冲重复率和脉冲幅值；脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现单调递减的趋势；等效频宽分布在 $0.3\text{GHz}\sim 0.9\text{GHz}$ 之间，等效时长分布在 $10\text{ns}\sim 35\text{ns}$ 之间，时频分析图整体上呈现“四边形”状。

3. 采用介质窗口式UHF传感器时，基于UHF检测法的GIS局部放电典型干扰的模式如下：

(1) GSM制式手机干扰：检波后仍成为方波信号；干扰脉冲随幅值的分布呈现分层现象，分布较为集中的幅值区间内的脉冲重复率大致相当；脉冲重复率随相位的分布较为均匀，没有明显的相位相关性；等效频宽分布在 $0.12\text{GHz}\sim 0.2\text{GHz}$ 之间，等效时长分布在 $28\text{ns}\sim 29\text{ns}$ 之间；

(2) CDMA制式手机干扰：介质窗口式UHF传感器无法检测到GIS设备外部CDMA制式的手机干扰信号；

(3) 油中电晕放电干扰：无检波输出；等效频宽分布在 $0.3\text{GHz}\sim 0.7\text{GHz}$ 之间，等效时长分布在 $18\text{ns}\sim 32\text{ns}$ 之间；

(4) 空气中悬浮放电干扰：正负半周检波信号的幅值大致相当；工频电压的峰值处不会出现放电；正半周低幅值脉冲的次数较多，并且脉冲沿幅值的分布较为集中；脉冲重复率随脉冲幅值的增加呈现指数减少的趋势；等效频宽分布在 $0.2\text{GHz}\sim 0.4\text{GHz}$ 之间，等效时长分布在 $23\text{ns}\sim 32\text{ns}$ 之间；

(5) 油中沿面放电干扰：无检波输出，等效频宽分布在 $0.18\text{GHz}\sim 0.6\text{GHz}$ 之间，等效时长分布在 $16\text{ns}\sim 32\text{ns}$ 之间；

(6) 灯具干扰：介质窗口式UHF传感器无法检测到GIS设备外部高压汞灯启动过程中产生的干扰信号。

4. 外置式UHF传感器与介质窗口式UHF传感器的对比如下：

(1) 对同样的外部干扰信号，介质窗口式UHF传感器检测到的干扰幅值小于外置式UHF传感器，其抗干扰效果优于外置式UHF传感器；

(2) 经过同样的等效时频变换后，介质窗口式UHF传感器输出的原始射频信号的等效频宽数值显著减小，并且其分布也明显变窄，等效时长稍微变长，但不显著。

5. UHF检测法对空气中电晕放电的检测灵敏度不高。

5.2 进一步研究工作的展望

1. 本文所获得的基于UHF检测法的GIS局部放电典型干扰的模式目前基于人工目测判断,识别的准确性和客观性难以保证,因此在后续的研究工作中,建议开展典型干扰模式计算机数字化的研究工作,开发相应的识别软件,则可以进一步提高技术水平。

2. 本文所获得的基于UHF检测法的GIS局部放电典型干扰的模式尚未应用于GIS设备局部放电抗干扰的现场实践,因此建议开展GIS设备基于典型干扰模式的局部放电抗干扰的应用研究,积累经验,不断优化,使研究成果真正的服务于工程实践。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家技术监督局. GB 2900.20-1994. 中华人民共和国国家标准-电
工术语: 高压开关设备.北京: 中国标准出版社, 1994.4.1
- [2] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断. 北京: 清华大学出版
社, 2006.3
- [3] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术. 北京: 水利电力出版社, 1994. 6
- [4] Phil Bolin, Hermann Koch. Introduction and applications of gas insulated substation
(GIS). IEEE Power Engineering Society General Meeting 2005. San Francisco,
California, United States: IEEE, 2005. 920~926
- [5] 小崎正光. 高电压与绝缘技术. 北京: 科学出版社, 2001.7
- [6] 罗学琛. 变电所使用 GIS 设备与常规设备的综合比较. 中国电力, 1996, 29(4):
24~26
- [7] CIGRE Working Group 33/32-12. Insulation Co-ordination of GIS: Return of
Experience, on Site Tests and Diagnostic techniques. Electra, 1998, 176(2): 67-95.
- [8] Kim.J.B, Kim.M.S, Park.K.S, Song.W.P, Kim.D.S, Kil.G.S. Development of monitoring
and diagnostic system for SF₆ gas insulated switchgear[C]. Conference Record of the
2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, Massachusetts,
United States: IEEE, 2002: 453-456.
- [9] 邱昌荣, 王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术.北京: 机械工业出版社, 1994:
30-45
- [10] IEEE Substations Committee Working Group K4. Partial Discharge Testing of Gas
Insulated Substations . IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 499-506.
- [11] R. Baumgartner, B. Fruth, W. Lonz and K. Pettersson, Partial discharge Part X. PD in
Gas-Insulated Substations-measurement and practical considerations. IEEE Electrical
Insulation, 1992, 8(1): 16-27.
- [12] J.S.Pearson, O.Farish, B.F.Hampton, M.D.Judd, D.Templeton. Partial Discharge
Diagnostics for Gas Insulated Substations. IEEE Transactions on Dielectrics and
Electrical Insulation, 1995, 2(5): 893-905.
- [13] B.Fruth and L.Niemeyer. The Importance of Statistical Characteristics of Partial

- Discharge Data. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(1): 60-69.
- [14] IEEE Substations Committee Working Group K4. Partial Discharge Testing of Gas Insulated Substations. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 499-506.
- [15] International Electrotechnical Commission. IEC60270. High voltage test techniques- Partial discharge measurements. Switzerland. IEC Publication, 2000.12.1
- [16] A.Pedersen, G.C.Crichton and I.W.Mcallister. Partial Discharge Detection: Theoretical and Practical Aspects. IEE Proceedings of Science, Measurement & Technology, 1995, 142(1): 29-36
- [17] M. Oyama, E. Hanai, H. Aoyagi., et al. Development of detection and diagnostic techniques for partial discharges in GIS. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 811-818
- [18] 印华, 邱毓昌. GIS 中局部放电测量用超高频方法的研究[J]. 高电压技术. 2004,30(10): 19-20.
- [19] Li Z.M., Feng Y.P, Chen J.Q, et al. UHF partial discharge monitoring in GIS and signal processing. Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan: IEEE, 1998. 67-70
- [20] 金立军, 张明锐, 刘卫东. GIS 局部放电缺陷诊断试验研究. 电工技术学报, 2005, 20(11): 88-92
- [21] R. Bell, C. Charlson, S. Hulliday. High-voltage onsite commissioning tests for gas-insulated substations using UHF partial discharge detection. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1187-1192
- [22] M. D. Judd, O. Farish, B.F. Hampton. The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 213-228
- [23] 唐炬, 魏钢, 侍海军. 气体绝缘组合电器局部放电的超高频检测. 重庆大学学报, 2004, 27(4): 1-5
- [24] A. Schei, S. Kyrkjeide, V Larsen. Acoustic Insulation Analyzer for Periodic Condition Assessment of Gas Insulated Substations. Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Yokohama, Japan: IEEE, 2002. 919-924
- [25] L.E.Lundgaard, G.Tangen, B.Skyberg, et al. Acoustic diagnoses of GIS: Field experience and development of expert system. IEEE Transactions on Power

- Delivery,1992, 7(1): 287-294
- [26] 黎大健, 梁基重, 李彦明, 等. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测. 高压电器, 2009, 45(1): 72-75
- [27] 李德军, 沈威, 郭志强. GIS 局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较. 高压电器, 2009, 45(3): 99-103
- [28] 何健康, 杨景岗, 黎大健, 等. 运行中 GIS 局部放电超高频-超声波的联合检测. 电力设备, 2008, 9(2): 68-71
- [29] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 7354. 局部放电测量. 北京. 中国标准出版社, 2004.5.1
- [30] 杨永明. 电力变压器局部放电在线监测中干扰识别和抑制方法的研究: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 1999
- [31] 王晓蓉, 杨敏中. 电力设备局部放电测量中抗干扰研究的现状和展望, 电网技术, 2000.6, Vol.24, No.6: p42-45
- [32] 高宁, 朱德恒, 谈克雄. 变压器局部放电在线监测信号中的电磁干扰及抑制
- [33] Nagesh V. Gururaj B I. Evaluation of digital filters for rejecting discrets spectral interference in on-site PD measurements[J]. IEEE Trans. Elec. Insul, 1993, 28(1): 73-85
- [34] 张士宝. 变压器局部放电在线监测中的干扰及抑制: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997
- [35] 董旭柱. 变压器放电监测系统及放电脉冲在变电站传播的仿真研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1998
- [36] 毕为民. 变压器局部放电监测中以小波包去噪和统计量识别放电模式的研究: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2003
- [37] 高胜友, 朱德恒, 谈克雄, 谢良聘. 变压器局部放电在线监测信号处理技术的研究
- [38] 王哲, 蔡惟铮. 阈值曲线法在 PD 在线监测中的应用.
- [39] 唐炬. 组合电器局放在线监测外置传感器和复小波抑制干扰的研究: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2004
- [40] Nagesh V, Gururaj B I. Automatic detection and elimination of periodic pulse shaped interferences in partial discharge measurement. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol, 1994, 141(5): 335-342.
- [41] KONIG G, FESER. K and FESER. K. Methods to improve on-site partial discharge measuring instrument. Proceedings of 7th ISH, Dresden, 1991, 73 (2)

- [42] B.A.Fruth, D.W.Gross. Partial discharge signal generation transmission and acquisition. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, Jan 1995,142(1):22~28
- [43] Mallat S, Huang W L. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE. Trans. Inform. Theory, 1992, 38(2):617-643.
- [44] Donoho D, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. Technical report, department of statistics, Stanford university,1992
- [45] Donoho D,Johnstone I M.Wavelet shrinkage: Asymptopisa. Journal of the Royal Statical Society. 1995,57(2),301-369
- [46] 王晓蓉. 变压器油纸绝缘局部放电脉冲的提取电特性研究: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2001
- [47] 孙才新, 李新, 杨永明. 从白噪声中提取局部放电信号的小波变换方法研究. 电工技术学报, 1999, 14(3): 48-50
- [48] 赵清娇. 新型 GIS 局放超高频传感器抑制干扰的研究: [学士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2003
- [49] 卢启付. 电力变压器局部放电信号特高频特性的试验研究: [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2005
- [50] 北京深蓝华岳防范技术有限公司. 英国 DMS 公司 DMS 超高频局部放电测试仪操作手册. 北京: 北京深蓝华岳防范技术有限公司, 2008.3
- [51] 孙才新, 许高峰, 唐炬, 等. 以盒维数和信息维数为识别特征量的 GIS 局部放电模式识别方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 100~104
- [52] 唐炬, 谢颜斌, 周倩. GIS 局部放电超高频信号复小波的模式识别. 重庆大学学报, 2009, 32(9): 1059~1064
- [53] 张晓星, 唐炬, 孙才新, 等. 基于统计不相关最优鉴别矢量集的 GIS 局部放电模式识别. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 59~62
- [54] 张晓星, 唐炬, 孙才新, 等. 基于多重分形维数的 GIS 局部放电模式识别. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 597~601
- [55] 张晓星, 唐炬, 孙才新, 等. 基于核统计不相关最优鉴别矢量集的 GIS 局部放电模式识别. 电工技术学报, 2008, 23(9):111~117
- [56] 印华, 方志, 张小勇. 根据 UHF 信号特征的 GIS 局部放电模式识别. 高压电器, 2005, 41(1): 19~23
- [57] 李信. GIS 局部放电特高频检测技术的研究: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学,

2005

- [58] 李成榕, 齐波, 王伟. 测量气体绝缘组合电器局部放电特高频信号的电介质窗口. 中华人民共和国国家知识产权局发明专利公报, 2009, 36: 587
- [59] 葛景滂, 邱昌容, 谢恒堃. 局部放电测量. 北京: 机械工业出版社, 1984.6
- [60] 北京伏安电气公司. DST-4 型局部放电检测仪使用说明书. 北京: 北京伏安电气公司, 2004.5
- [61] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术(第二版). 北京: 清华大学出版社, 2003. 5
- [62] 王彩雄. 局部放电特高频检测抗干扰与诊断技术的研究: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2009
- [63] I. J. Rivera, A. B. Ramirez, and D. Rodriguez. A Time-Frequency Signal Analysis System for Power Quality Assessment. Proceedings of 48th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 2, 1677-1680, 2005
- [64] A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, A. Contin. A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: Properties and applications. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 203-215
- [65] 李永卿. 北京地区典型地域电磁辐射环境分析: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2004
- [66] 陈水明、王磊、何金良. 多回高压输电线路产生的无线电干扰分析. 电波科学学报, 2002, 17 (6): 677~681
- [67] 唐炬, 魏钢, 侍海军. 气体绝缘组合电器局部放电的超高频检测. 重庆大学学报, 2004, 27(4): 1~5

在学期间发表的学术论文情况

- [1] 吴张建, 李成榕, 齐 波, 等. GIS 局部放电检测中特高频法与超声波法灵敏度的对比研究. 现代电力 (已录用, 拟于 2010 年 6 月份发表)
- [2] QI Bo, LI Cheng-rong, WU Zhang-jian, et al. Experimental Study on the Relationship between Partial Discharge and Gas Decomposition Products in SF6 Insulated Electrical Equipments. Proceedings of 2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia, United States: IEEE, Oct.18-21, 2009. 392~ 395 (ISTP 收录源; EI 收录)

致 谢

本篇论文是在导师李成榕教授悉心指导下完成的。从论文的选题、方案制定、工作实施以及实际应用的整个过程中，李成榕教授都给予了详细的指导和帮助。他渊博的知识、开阔的思路、严谨的治学态度、踏实的工作作风激励着我，这将使我终身收益。

在此对于齐波老师和王景春高级工程师给予衷心的感谢，感谢他们对我试验研究中的帮助和支持。我还要感谢华北电网公司的领导在我的硕士学习期间给予的帮助。

感谢我的家人，正是他们的大力支持才使我能潜心于本课题的研究，对我完成学业起了重大的推动作用。

再次向所有关心和帮助我的朋友们表示感谢！对在百忙之中抽出时间评阅本论文的各位专家学者表示诚挚的谢意！