

上海交通大学

硕士学位论文

超声波法检测GIS局部放电的研究

姓名：陈宏福

申请学位级别：硕士

专业：高电压与绝缘技术

指导教师：曾奕

20080101

摘要

局部放电测量是监测大型电力设备绝缘状态,提高供电可靠性的重要手段。针对气体绝缘开关设备(Gas Insulated Switchgear, GIS),本论文研究了基于超声的局部放电在线检测系统。

在研究基于超声的GIS局部放电在线检测系统的过程中,本论文主要做了如下几方面的工作:

- 1、综述了GIS中局部放电检测的研究现状;
- 2、提出了基于超声的GIS局部放电检测系统的整体方案;
- 3、设计并实现了基于超声的GIS局部放电检测系统的硬件部分,具体包括超声传感器的选择、前置放大器的制作和数据采集系统的开发等。
- 4、设计了基于超声的GIS局部放电检测系统的软件部分,具体包括软件架构、数据处理流程和数据的诊断规则等;
- 5、构建了实验室GIS局部放电测量系统,具体包括GIS模型的设计、局部放电模型的设置和常规局部放电测量设备的选取等。

文中最后对上述研究成果进行总结,并指出了基于超声的GIS局部放电在线检测系统中还有待于进一步研究的问题。

关键词:GIS,局部放电,超声波,故障识别

ABSTRACT

Measurement of partial discharge (PD) is an important means of monitoring the insulation condition and improving the reliability of power equipments. With regard to Gas Insulated Switchgear (GIS), investigation of acoustic based PD detection system was carried out.

In the dissertation, following research in the PD on-line detection system was covered.

1. Present status of PD detection in GIS was reviewed;
2. Acoustic based PD detection scheme was proposed;
3. Design and realization of the hardware of acoustic based PD detection system, including acoustic emission sensor, pre-amplifier, data acquisition system, etc;
4. Design of the software of acoustic based PD detection system, including the frame of the software, flowchart of signal processing, PD evaluation rules, etc;
5. Construction of PD detection set-up in the laboratory, including GIS experiment model, artificial defect, testing equipments, etc.

At the end of this dissertation, a systematical summary is given. Further work to the research is pointed out.

KEY WORDS: GIS, Partial discharge, Ultrasonic, Pattern recognition

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：陈宏福

日期：2008年4月8日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ，在___年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 。

(请在以上方框内打“ ”)

学位论文作者签名：陈宏福

指导教师签名：曾奕

日期：2008年4月8日

日期：2008年4月8日

第一章 绪论

1.1 GIS 局部放电在线监测研究的目的和意义

气体绝缘的全封闭组合电器或气体绝缘变电站 (GIS) 是把变电站里除变压器外各种电气设备全部组装在一个封闭的金属外壳里, 充以 SF₆ 气体或 SF₆ 混合气体, 以实现导体对外壳, 相间以及端口间的可靠绝缘^[1]。GIS 体积小、技术性能优良, 与常规电器相比, 具有占地面积小、基本不受外界气象因素的影响, 无火灾危险、检修周期长、运行安全可靠等特点。它使高压变电所的结构和运行发生了巨大的变化, 其显著特点是集成化、小型化、美观和安装方便。GIS 的故障率比传统的敞开式设备低一个数量级, 而且设备检修周期大大延长, 因此 GIS 近年来在许多大型重要电站得到普遍应用。

GIS 将诸多高压元件既组合又封闭, 利用了绝缘性能优异的 SF₆ 气体作为灭弧和绝缘介质, 大大节省了变电站面积, 提高了供电可靠性, 带来了巨大的综合效益, 而且随着电压升高, 这种综合效益更为显著。此外, GIS 全部电气设备封闭于外壳之中, 减少了自然环境条件对设备的影响, 因而其运行可靠性高、维护工作量少、检修周期长, 一般故障率只有常规设备的 20%~40%^[2]。但 GIS 也有其固有的缺点, 由于 GIS 是全封闭组合电力设备, 不能依靠人的感官发现早期故障, 且 GIS 体积小, 各设备安排非常紧凑, 一个设备的故障容易波及临近设备, 使故障扩大。GIS 发生故障修复尤为复杂, 有时候需要两星期甚至更长的时间才能修复^[3]。因此, GIS 的运行检测十分重要, 不仅需要认真进行常规预防性试验, 而且应该发展 GIS 的在线监测技术, 及时发现各种可能的异常或故障预兆, 及时进行处理。

为诊断 GIS 的早期故障, 近年来国内外均致力于在线诊断技术的研究, 主要有开关动作和局部放电在线监测两个方面。开关动作监测是对操作机构的动作时间及行程进行微机记录, 目的在于早期发现操作机构的机械故障。局部放电的在线监测是测量 GIS 运行中的绝缘状态, 是非破坏性的监测, 它通过连续检测, 确切地了解运

行状况,可以通过趋势分析,识别存在的故障,从而采取必要的措施,改以往的“定期检修”为“状态检修”,从而提高设备的利用率和节省检修费用。

1.2 GIS 局部放电检测方法

GIS 的局部放电在线监测方法大致可以分为两大类型:电测法和非电测法,其具体主要可分为以下五种方法^[4]:

一、非电测法:

1、光学检测法

在诊断技术中,检测放电产生的光可能是最灵敏的方法。因为光电倍增器可以检测到甚至一个光子的发射。光辐射主要在紫外(UV)带。由于玻璃和SF₆对光都有很强的吸收能力,检测时需要采用石英透镜,并且要选择适当短的路径^[5]。对于检测已知点的放电,光学法很有效。但是对于GIS中诸多未知的放电源,光学法的灵敏度就大受影响,由于光学检测法需要把传感器放到GIS里面,而且只能离线测试,所以不适合用于在线监测。

2、化学检测法

化学检测法通过检测SF₆被击穿分解后的生成物来间接检测局放。最常用的分析气体有SO₂F₂和SO₂F₂两种,通过用气相色谱仪和质谱分析可以检测出,灵敏度可达1ppm^[5]。

化学检测方法不受电气干扰的影响,但从发生局放到由分析气体检测出来所需要的时间太长,往往几小时甚至几天也得不到结果^[3],这严重限制了化学方法在局放检测中的使用。

3、声学检测法

GIS中局放激发的声音信号有比较宽的带宽(20~250kHz),可在GIS外部用加速度或声发射(AE)传感器检测到。

声学方法是非侵入式的,可对局放源进行定位(<10cm)且不受GIS外部噪声源影响,但是信号通过气体和绝缘子时衰减很严重,所以声学检测法仅能检测到有限的几种放电,而且在线检测时需要的传感器太多,因而限制了声学检测法的应用。目

前声学检测法一般仅用于现场测试，由操作人员持传感器在GIS表面移动检测局放信号，一个GIS站的检测往往需要花费数天时间，限制了该技术的推广。现在上海交通大学在尝试用声学方法做成在线检测系统，取得了不错效果。

二、电气检测法

4、常规电测法

常规电测法又称脉冲电流法（IEC60270），它是IEC于1981年正式提出并被广泛采用的局放检测方法。对外部电路而言，GIS是一个有电荷损耗的集中电容，通过在外部并列安装一个耦合电容传感器，可以测得发生局放时的电量（检测局放的频率范围为40kHz~1MHz）。

常规电测法可以通过调节传感器和GIS等值电容的比值获得最佳的灵敏度，并可对测量系统进行标度，但是易于受到外部的电磁干扰，为了获得最高的测量灵敏度，需要将测试装置完全屏蔽，这对于测试整个GIS通常是不可行的。此外，常规电测法无法对局放源进行定位，因而不能用于运行中GIS局放的在线检测^[5]。

5、超高频法

超高频（UHF）法于20世纪80年代初期由英国中央电力局（CEGB）实验室提出。UHF法通过安置在GIS中的传感器检测局放电磁波的UHF（300MHz~3GHz）部分。UHF法有较强的抗干扰（通常的噪声干扰频率都在500MHz以下）及局放源定位能力（理论上可以小于10cm），但随着与局放源距离的增大，信号衰减很大（约2dB/m），导致传感器间的距离较小（5~10m），因而在线检测也需要为数不少的传感器。

对于GIS中局放的各种检测方法，CIGRE得出的普遍结论是：

- 1、声学检测法、常规电测法和UHF法都有良好的灵敏度。
- 2、声学和UHF法可对局放源进行定位，而常规电测法不可以。
- 3、常规电测法需要一个外部耦合电容，不能用于运行中的GIS^[5]。

目前声学检测法适宜于现场检测，而UHF法可用于局放的连续在线监测，化学和光学检测法的灵敏度较低，一般不用于在线检测。

表1-1为GIS中局部放电监测方法的性能一览表。

表 1-1 GIS 中局部放电监测方法的性能一览表

监测方法	常规电测法	超高频法	超声波法	化学法	光学法
优点	简单；灵敏度较高	灵敏度高；可用于运行中设备	灵敏度高；抗电磁干扰能力强	不受电磁干扰	不受电磁干扰
缺点	运行设备不能使用；信噪比低	造价高	结构复杂；要求丰富经验的人操作	灵敏度差；不能长期监测	灵敏度差；需多个传感器
可达精度	5pC	0.5~0.8pC	<2pC	很差	差
适用监测的放电源	固定微粒；悬浮物；气隙和裂纹	各种缺陷类型都适用	自由移动的微粒；悬浮物	放电情况严重时的缺陷	固定微粒；针状突出物
能否故障定位	不能	精确度较高： $\pm 0.1m$	适用，但条件苛刻，需多个传感器	仅能判断哪个气室发生放电	不能
能否判别故障类型	能	能	能	不能	不能
是否已应用	早期应用较多	应用较多	应用较多	极少应用	极少应用

1.3 GIS 局部放电在线监测国内外发展现状

目前，国内和国际上GIS的局部放电在线监测技术正在蓬勃发展，不论从硬件的监测装置，还是软件的监测方法，都有很多专家和学者们做出了很好的成绩，例如：

清华大学1995-1997年相继研制和开发出基于UHF法的便携式局部放电检测仪和330kV GIS局部放电在线检测系统，均采用外部传感器监测，具有较强的实用性，且便于放电源的定位。但是该设备对于采集到信号的分析处理不够完善，目前还正在进一步的完善过程中。

西安交通大学的电力设备电气绝缘国家重点实验室于1998年研制一种超宽频带局部放电传感器，并经网络分析仪（HP8720C，扫频带宽20GHz）对其频率响应特性进行测量证实效果较好^[6]。

英国Strathclyde大学与NGC和Scottish Power plc联合开发了一套UHF监测系统。为防止断路器工作时产生快速暂态过电压（VFTO），对监测系统应采取相应的保护，在耦合器输出处和在UHF信号调节处安装钳位二极管。该系统采取3种工作模式：在线、事故和历史模式，便于日常的监测和出现事故之后的情况分析。该系统不是采用UHF局部放电信号进行分析，因此监测系统的精度不能加以保证。

瑞士Zurich大学的Neuhold开发出一种结合宽带和窄带的多通道、实时响应的GIS局部放电测量系统。每个测量通道包括一个低噪声宽带传感器，带有自动高压暂态保护。适宜于开发过程中的实验室测试和GIS的长期监测，装置能初步实现对故障源的监测、定位和识别，但是精度不能得到保证，需要进一步的研究。

挪威TransiNor As公司的Schei研制出一种超声波绝缘分析器。针对自由移动微粒、固定微粒和突出物以及漂浮物引起的局部放电，该设备能够对其进行监测、定位和模式识别，它特别适用于普通的检修人员而非超声波方面的专家使用^[7]。错误！未找到引用源。。但是该装置只能识别某些绝缘缺陷的类型，不具有广泛性。

2001年日本名古屋大学的Toshihiro Hoshino提出一种新的GIS中由局部放电引起的电磁场的监测技术——相位门极控制法。它是通过分析在SF₆气体中的局部放电信号和空气中的外部噪声所引起的电磁波的区别，根据在空气中和SF₆气体中局部放电和电压相位角之间关系的不同而作为判断依据^[8]，该方法目前还处于研究阶段。

俄罗斯科学家Arakelian于2000年提出一种新的物理—化学诊断方法，它的基本原理是：由于SF₆中包含一些杂质（O₂、N₂、CF₄等），因此当局部放电发生时，在温度和压力的作用下，密度、湿度和酸碱度的一些参数会发生变化。根据产生化合物的种类和密度，可以判断出局部放电的程度。化学检测法由于上面所提到的缺陷，比较适用于用作辅助分析绝缘故障时使用^[9]。

日本大阪大学的Kawada于2000年提出一种用于宽带电磁波(E-M)动态频谱分析的小波方法。这种非接触式监测故障征兆方法使用由高斯函数产生的Gabor函数的实部作为母小波，对电磁波信号进行小波变换。文中指出经小波变换后的局部放电信号能够与其它干扰波（例如FM广播信号）清晰地分辨出来，并得出以下结论：当放电量很低时，电磁波的主要部分在高频段(120: 200MHz)；当放电量增加时，主要部分转换到低频段(2080MHz)，并且低频段的耐压值上升^[10]。该方法在理论上研究较多，但是实际应用时遇到了一些问题。

2002年日本Kawada又提出一种用于监测局部放电源的超宽频带UHF的无线电抗干扰系统(UWB-VURIS)^[11]。该系统根据在不同频率下提取的两个经傅立叶变换后的E-M信号之间的相位差来判断局部放电程度，并计算从局部放电源发射出来的电磁波

的方向^[11]。这种方法是基于硬件条件完好和软件算法精确的基础上，目前还不能完全达到精度要求，需要进一步的研究工作。

2000年英国Strathclyde大学的Judd提出一种用于分析电磁场的有限时域差分(FDTD)方法。它将电场E和磁场H在空间和时间上都取离散表达形式，这样对任意位置的放电信号（即使是快速暂态量）都能确切地用数学变量表达。在整个结构非常复杂的电场模型下，放电信号的位置和特性都变化很大，在这种情况下用该方法分析问题是比较有效的^[12]。

1.4 超声波法研究局部放电及其进展

尽管电脉冲法是局部放电研究的基础但是电脉冲信号在现场中检测时会有很大的干扰通常在几千pC以上很难正确得到放电信号，另外在线标定的问题和在线结果与离线结果的等效性等问题，也是长期困扰电脉冲法在线检测GIS局部放电的问题。目前在现场中工程技术人员往往更关心运行GIS的局部放电检测问题，特别是当放电量较大时，通过检测局部放电以确定GIS绝缘的损坏程度，而这种情况适合超声波法检测。因此本文从GIS在线检测的角度出发选择超声波法进行变压器局部放电的研究。超声波法检测GIS局部放电具有以下特点：

1、易于实现在线检测

目前采用的超声波法检测GIS局部放电是利用超声波传感器贴在接地的GIS外壳上进行检测，对GIS的运行和操作没有任何影响。传感器与检测设备之间采用光纤来连接，光纤具有良好的绝缘性能检测设备与高电压设备之间有很好的隔离，使设备和测量人员的安全可以得到保证，同时不存在在线结果与离线结果的等效性问题，因此利用超声波法可以较容易的实现在线检测GIS局部放电^[13]。

2、便于空间定位

确定局部放电位置可以判断局部放电对GIS的危害程度，还可以减少检修时间。目前提出并采用的主要局部放电定位方法有：电脉冲电流电容分量定位法，利用电脉冲的电容分量从局部放电点传播到绕组两端的时间差来确定故障点的大概位置；X射线法利用外加X射线来加大局部放电从而进行定位^[14]；超声波定位法利用局部放电时

所产生的电信号和声信号之间的相对时间差或声信号和声信号之间的时间差对局部放电进行空间定位^[15]。这几种方法都能帮助人们寻找局部放电位置，前两种方法只能确定大致部位，而不是空间精确位置；X射线法需要外加X射线发生装置在线定位存在一定的困难；而超声波定位方法是根据卫星定位原理实现的，从理论上讲，可以做到精确定位，在线检测方便。所以很多学者都对此进行了大量的研究目前世界范围内的变压器局部放电定位系统多数采用电-声定位法和声-声定位法。

3、可望实现利用超声波法进行模式识别和定量分析

利用超声波法进行局部放电模式识别和定量分析，一直是超声波法检测局部放电研究中的重点。上世纪80年代，德国和日本科学家曾在此方面进行过研究^[16]，但并未得到理想的结果。近年来人们又对利用频谱识别局部放电模式提出了新的见解，随着非线性科学和非确定性科学的发展，为利用超声波对局部放电进行模式识别和定量提供了新的方法，其研究也取得了一些新的成果^[17]，因此在先进的传感器以及数学分析工具的支持下，有望利用超声波法实现变压器局部放电的模式识别和定量分析。

4、超声波法的进一步研究有望得到一些新的放电信息

当电脉冲通过试品时，会产生与电荷分布相关的超声波脉冲，且与空间电荷成比例，这样测量超声波就能获得电荷的组成部分及存在位置，因此利用超声波法可以对绝缘材料中的电荷分布进行测量，这是目前利用电流脉冲法所无法测量的。另外从局部放电产生超声波的机理考虑，辉光放电和亚辉光放电同样产生超声波^[18]，对这些超声波信号的测量将弥补电脉冲法在局部放电测量时的不足，对它的进一步研究将有可能产生新的局部放电测量标准^[19]。

综上所述，由于局部放电产生的超声波信号包含了局部放电测量的多种信息，但是对这些信息的分析却刚刚起步，因此对于局部放电超声波法测量的深入研究将可能得到令人鼓舞的结果，从而使局部放电的整体研究达到一个新的高度^[16]。

1.5 本文主要工作

国外一直致力于GIS局部放电检测的研究，并研制出应用于现场GIS局部放电检测

的装置，但价格非常昂贵，不宜推广。由于技术的复杂性和技术要求很高，使其目前还未达到成熟技术的程度，尚存在许多问题有待进一步研究解决。在对国内外的GIS局部放电检测研究分析基础上，针对实验室研究局部放电基础，本文进行了如下研究：

- 1、GIS局部放电机理的研究。
- 2、GIS超声特性、信号传播的研究。
- 3、在以上研究的基础上本文研制了一套GIS局部放电测量系统该系统由超声传感器、前置放大器、数据采集板和工控机组成。测量系统的软件可以方便的显示局部放电的位置模式以及大小信息以外，还可以给出声信号的统计规律等相关信息。

第二章 GIS 局部放电及超声信号

2.1 局部放电产生的原因

在电气设备的绝缘系统中，各部位的电场强度往往是不相等的，当局部区域的电场强度达到该区域的击穿场强时，该区域就会出现放电，但放电并没有贯穿施加电压的两导体之间，即整个绝缘系统尚未击穿，这种现象称之为局部放电。产生局部放电的条件取决于绝缘介质中的电场分布和绝缘的电气物理性能，通常局部放电是在高电场强度下，在绝缘体内电气强度较低的部位发生的^[20]。

GIS 中有可能出现的主要绝缘缺陷如图 2-1 所示，可以总结为以下几个方面^[21]：

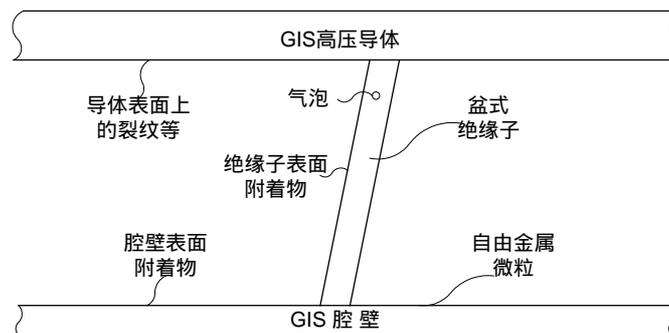


图 2-1 GIS 中几种绝缘缺陷的示意图

Fig.2-1 Several insulation defects inside GIS

- 1、固定缺陷。其中包括导体和外壳内表面上的金属突起，以及固体绝缘表面上的微粒。金属突起通常是在制造不良和安装损坏擦划时造成的，导致毛刺且较尖。在稳定的工频状态下不引起击穿，但在快速电压如冲击、快速暂态过电压(VFTO)条件下则很危险；
- 2、GIS腔体内可以移动的自由金属微粒。金属微粒是最普遍的微粒，在制造、装配和运行中均有可能产生，它有积累电荷的能力。在交流电压场的影响下能够移动，在很大程度上运动与放电的可能性是随机的。当靠近高压导体且并未接触时，放电最可能发生，且放电可能性比同样微粒但为导体上固定物时高10倍左右；
- 3、传导部分的接触不良。例如静电屏蔽和其它浮动部件。由松动或浮动部件产生的

放电可能大得多，通常易于检测，放电趋向于反复；

- 4、绝缘子制造时造成的内部空隙和实验闪络引起的表面痕迹，还包括或是因电极的表面粗糙或是来自制造时嵌入的金属微粒。此外因环氧树脂与金属电极的收缩系数不同，也会形成气泡和空隙。

这些 GIS 的绝缘缺陷类型极有可能会在 GIS 中产生局部放电现象^{错误！未找到引用源。}，在绝缘体中的局部放电甚至会腐蚀绝缘材料，进一步发展成电树枝，并最终导致绝缘击穿^{错误！未找到引用源。}。

2.2 局部放电的等效电路

经典的局部放电理论是基于电子雪崩或流柱理论的。这种理论可以很好的解释微秒级单脉冲现象，在电脉冲法检测中也取得了很大的成功，但是大量的研究表明局部放电是纳秒级放电过程，其时域波形是包含多个连续的、振幅衰减的脉冲。此时采用碰撞电离或流柱无法解释振荡衰减特性，需要进一步对局部放电的产生过程进行研究。

2.2.1 放电的等效回路

一般来讲放电的等效回路可以采用二阶回路来表示^[22]，如图2-2所示图中电容C和电感L是不随时间变化的常数，电弧电阻对时间来讲是非线性的，三者都是集总参数。放电的特性取决于电弧电阻和放电回路的固有特性其中将电阻等效为线性电阻是一种经典的研究方法，至今仍被广泛的应用于计算具有电弧电阻的放电脉冲回路

[23]。

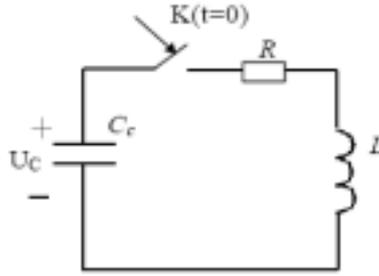


图2-2 局部放电等效电路

Fig.2-2 PD equivalent circuit

由电路知识可知对于图2-2所示等效电路其放电电流为

$$i = i_{0+} e^{-\delta t} \cos \omega t \quad (2-1)$$

由于放电瞬间为电子雪崩或流柱理论产生认为其电流的初始值 i_{0+} 等于 i_{\max} ，则上述各参数分别为

$$\begin{cases} i_{0+} = \frac{u_0}{\omega L} \\ \delta = \frac{R}{2L} \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \end{cases} \quad (2-2)$$

电路中参数与放电回路自身有关。

2.2.2 局部放电的等效电路

局放等效电路可采用三电容模型^[24]，再考虑外界电路对绝缘的充电电路，电源在瞬间可以等效为电容充电回路等效为电感和电阻的串联，则等效电路如图2-3所示。在局部放电检测中的测量量即充电电流*i*在测量阻抗上的电压响应。

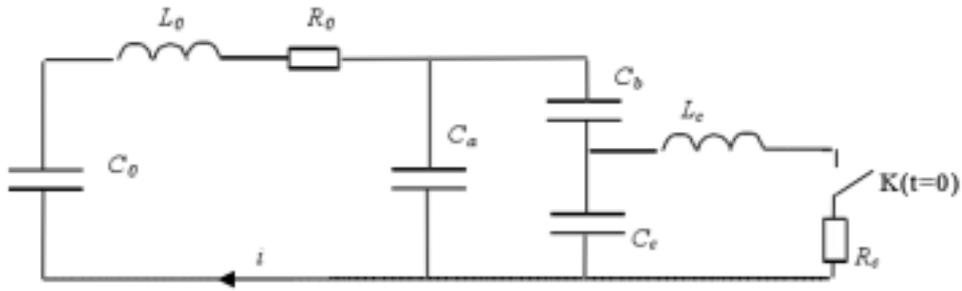


图2-3 放电等效测试电路

Fig.2-3 Discharge equivalent test circuit

图中 C_a, C_b, C_c 为局部放电三电容模型中的等效电容， C_c 为绝缘介质内部的发生局部放电部分等效电容， C_b 为与局部放电部分串联的绝缘等效电容， C_a 为绝缘介质其他部分的等效电容， L_c 为局部放电部分放电时回路的等效电感， R_c 为局部放电部分放电时回路的等效电阻， C_0 为耦合电容， L_0 为充电回路的等效电感， R_0 为充电回路的等效电阻。为计算和分析方便以及过程应用的需要，上述各参数均采用线性集中参数，考虑到局部放电的过程为纳秒级的过程工频电压变化可以忽略不及，因此上图可以转化成图2-4所示的S域等效电路。

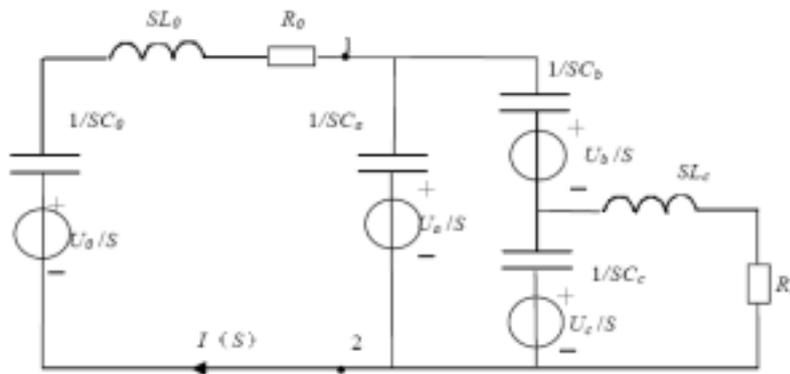


图2-4 局部放电S域测试等效电路

Fig.2-4 PD S-domain test equivalent circuit

对1、2端点右侧电路进行戴维南等效，由于存在

$$U_a - U_b = U_c, C_a ? C_c ? C_b \tag{2-3}$$

则其开口电压等于

$$\begin{aligned}
 U(s) &= \frac{U_a}{S} + \frac{U_c / S}{SC_c \left(\frac{1}{SC_c + \frac{SC_a C_b}{C_a C_b}} + SL_c + R_c \right)} \times \frac{C_b}{C_a} \\
 &\cong \frac{U_a}{S} + \frac{U_c / S}{SC_c \left(\frac{1}{SC_c} + SL_c + R_c \right)} \times \frac{C_b}{C_a}
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

等效阻抗为

$$Z(S) = \frac{\frac{1}{SC_a} \times \left[\frac{1}{SC_b} + \frac{\frac{1}{SC_c} \times (SL_c + R)}{\frac{1}{SC_c} \times (SL_c + R)} \right]}{\frac{1}{SC_a} + \left[\frac{1}{SC_b} + \frac{\frac{1}{SC_c} \times (SL_c + R)}{\frac{1}{SC_c} \times (SL_c + R)} \right]} \cong \frac{1}{SC_a} \tag{2-5}$$

在发生局部放电前，存在 $U_0 = U_a$ 可解得测量电流 $I(S)$ 等于：

$$\begin{aligned}
 I(S) &= \frac{U_0 / S - U(S)}{\frac{1}{SC_0} + SL_0 + R_0 + \frac{1}{SC_a}} \\
 &= \frac{U_c \times C_b}{SC_c \times \left(\frac{1}{SC_c} + SL_c + R_c \right) \times SC_a \times \left(\frac{1}{SC_0} + SL_0 + R_0 + \frac{1}{SC_a} \right)} \\
 &= \frac{U_c \times C_b}{(1 + S^2 L_c C_c + SR_c C_c) \times \left(1 + \frac{C_a}{C_0} + S^2 L_0 C_a + SR_0 C_a \right)}
 \end{aligned} \tag{2-6}$$

由于 U_c , C_b 都是常数且 $U_a \times C_b$ 等于视在放电量 q_a , 因此获得在S域内的局部放电电流与视在放电量的关系：

$$I(S) = \frac{q_a}{(1 + S^2 L_c C_c + SR_c C_c) \times \left(1 + \frac{C_a}{C_0} + S^2 L_0 C_a + SR_0 C_a \right)} \tag{2-7}$$

对于电流 $I(S)$, 其S域有四个极点：

$$\begin{aligned}
 p_{12} &= -\frac{R_c}{2L_c} \pm \sqrt{\left(\frac{R_c}{2L_c}\right)^2 - \frac{1}{L_c C_c}} \\
 p_{34} &= -\frac{R_0}{2L_0} \pm \sqrt{\left(\frac{R_0}{2L_0}\right)^2 - \frac{C_0 + C_a}{L_0 C_a C_0}}
 \end{aligned} \tag{2-8}$$

把此复杂函数分解为部分分式之和，在进行反变换即可求解时域波形，得到电流的时域表达式为：

$$i(t) = \frac{q_a}{L_c C_c L_0 C_0} (k_1 e^{p_1 t} + k_2 e^{p_2 t} + k_3 e^{p_3 t} + k_4 e^{p_4 t}) \tag{2-9}$$

对参数进行分析，当这四个根均为实根时，电流在零时刻达到峰值其峰值与视在放电量成正比，然后可分成四部分按不同的指数规律衰减，其时域波形可分解为四个直流指数衰减波形。当这四个根存在两个实根和两个复根时，电流的峰值将不会出现在零时刻，且峰值后会出现振荡的衰减形式。其时域波形可分解为两个直流指数衰减波形与一个振荡衰减波形。当这四个根存在四个复根时电流的波形可分解为两个振荡衰减的波形。在实际的局部放电电路中，等值电路中的放电回路的等效电阻 R_c 与充电回路的等效电阻 R_0 通常较小即满足下式：

$$\begin{cases} R_c < 2\sqrt{\frac{L_c}{C_c}} \\ R_0 < 2\sqrt{\frac{L_0(C_0 + C_a)}{C_0 C_a}} \end{cases} \tag{2-10}$$

则上述四个根均为复根，电流 $i(t)$ 为两个振荡衰减的波形，在时域的表达式为：

$$i(t) = \frac{q_a}{L_c C_c L_0 C_0} \left[|k_1| e^{-\delta_1 t} \cos(\omega_1 t + \theta_1) + |k_3| e^{-\delta_2 t} \cos(\omega_2 t + \theta_2) \right] \tag{2-11}$$

式中

$$\left\{ \begin{array}{l} |k_1| = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{(\delta_1^2 + \omega_1^2)^2 + 4\delta_1^2 \omega_1^2}} \\ \delta_1 = \frac{R_c}{2L_c} \\ \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_c C_c} - \left(\frac{R_c}{2L_c}\right)^2} \\ \theta_1 = \arctg \frac{\delta_1^2 + \omega_1^2}{2\delta_1 \omega_1} \\ |k_3| = \frac{1}{\omega_2 \sqrt{(\delta_2^2 + \omega_2^2 - 2\delta_1 \delta_2 + \delta_1^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta_1^2 \omega_2^2}} \\ \delta_2 = \frac{R_0}{2L_0} \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{C_0 + C_a}{L_c C_a C_c} - \left(\frac{R_0}{2L_0}\right)^2} \\ \theta_2 = \arctg \frac{\delta_2^2 + \omega_2^2 - 2\delta_1 \delta_2 + \delta_1^2 - \omega_1^2}{2\delta_1 \omega_2} \end{array} \right. \quad (2-12)$$

由此可知，当局部放电发生时，由于绝缘介质内部存在放电回路，因而会在产生具有放电回路固有频率的振荡衰减电流，在绝缘介质上产生具有放电回路固有频率的振荡衰减电压，该振荡衰减电压将会在充电回路中产生含有具有放电回路和充电回路两个固有频率的振荡电流，一般来讲充电回路和放电回路的参数相差较多，因此从局部放电的测量电流波形上可以看到两个不同频率的振荡衰减波形。

2.3 局部放电的真实放电量估计

由局部放电的三电容等效模型可知视在放电量等于 C_b 与 $\ddot{A}u_c$ 的乘积考虑到产生局部放电时存在

$$\dot{V}u_c = \frac{C_b}{C_c} \dot{V}u_a \quad (2-13)$$

式中， $\ddot{A}u_c$ 为气隙放电电压， $\ddot{A}u_a$ 为外加电压在半个周期中两次放电时刻之间的电压差，将上式带入视在放电量的表达式可以得到 C_b 的值：

$$C_b = \sqrt{\frac{q_a C_c}{V u_a}} \quad (2-14)$$

因此得到真实放电量：

$$q \cong \frac{C_c}{C_b} q_a = \sqrt{\frac{V u_a}{q_a C_c}} q_a C_c = \sqrt{q_a C_c V u_a} \quad (2-15)$$

即真实放电量可以由视在放电量 q_a ，放电部分等效电容 C_c 以及两次局部放电时刻之间的电压差 Δu_a 来共同确定。

由式X可以得到：

$$C_c = \frac{1}{L_c (\delta_1^2 + \omega_1^2)} \quad (2-16)$$

式中， L_c 单位采用 μH ， ω_1 单位采用 MHz ，则计算得到电容的单位为 pF ，由前面对放电等值电路的分析可知，其放电回路的电感并不随放电间隙大小与放电电容的变化而变化，其值总是在 $10\mu\text{H}$ 左右，同时考虑到一般情况下局部放电回路中存在 $\delta_1 < \omega_1$ ，为便于工程实际应用计算中忽略 δ_1 ， ω_1 单位采用 MHz ，因此放电部分等效电容 C_c 可由下式进行估算：

$$C_c = \frac{1000000}{10\omega_1^2} = \frac{100000}{\omega_1^2} \quad (2-17)$$

式中， ω_1 单位采用 MHz ，将上式带入式2-15得到真实放电量的估算公式

$$q = \frac{316\sqrt{q_a V u_a}}{\omega_1} \quad (2-18)$$

其中视在放电量 q_a 以及两次局部放电时刻之间的电压差 Δu_a 可以直接测量得到。而 ω_1 可由局部放电的电流波形经过FFT得到。式中 q_a 单位为 pC ， Δu_a 单位为 V ， ω_1 单位采用 MHz ，则得到的真实放电量的单位为 pC 。

2.4 局部放电的表征参数

局部放电可以通过多种表征参数来描绘其状态，局部放电表征参数主要有视在放

电电荷 q 、放电相位 φ 、放电重复率、起始放电电压 u_i 、放电熄灭电压 u_e 等。

1、视在放电电荷(q) 在绝缘体中发生局部放电时，绝缘体上施加电压的两端出现的脉动电荷称为视在放电电荷，其单位为皮库(pC)，视在放电电荷为局部放电的基本表征参数之一。

2、放电相位 φ 在外加电压作用下，放电发生的外加电压相位即为局部放电的相位 φ 。在工频正弦电压下，放电相位与放电时刻的电压瞬时值密切相关，放电相位也是局部放电的基本表征参数之一。

3、放电重复率 在放电测试时间内，每秒钟出现放电次数的平均值称为放电重复率，其单位为次/s。当外施电压升高时，局部放电次数增加，放电重复率也随之增加，放电重复率属于局部放电的累计表征参数。

4、起始放电电压 u_i 当试品上外加电压逐渐上升，达到能观察到出现局部放电时的最低电压，即为起始放电电压，其单位为 kV。实际上，起始放电电压 u_i 是局部放电量等于或超过某一规定低值的最低电压。

5、放电熄灭电压 u_e 当加于试品上的电压从已测到局部放电的较高值逐渐降低时，直至观察不到局部放电时，外加电压的最高值就是放电熄灭电压。实际上放电熄灭电压 u_e 是局部放电量值等于或小于某一规定值时的最高电压。对于油纸绝缘，往往是 $u_i > u_e$ ，而对于固体绝缘结构， u_i 与 u_e 相差不大，固体绝缘内部的放电还可能出现。

2.5 GIS 局部放电产生超声波原理

众所周知，局部放电的原因有多方面的，局部放电形式多种多样，局部放电过程是一个比较复杂的物理过程。我们以气泡为例分析局部放电产生超声波过程^[25]。

从物理角度分析，当局部放电发生时，气泡将会受到一个脉冲电场力的作用，为了直观的分析局部放电产生超声波过程，本文采用电-力-声类比的方法对局部放电产生超声波过程进行分析。

2.5.1 电-力-声类比

电磁振荡、力学振动和声振动作为不同的物理现象，一方面都有他们各自的研究对象构成了他们的特殊性；另一方面，他们虽然属于不同的领域，表面上似乎互不关联，但仔细研究他们的规律时，在数学上往往都归结为相同形式的微分方程。集中参数用常微分方程，分布参数系统用偏微分方程。由于数学是从具体物理过程中抽象出来的“空间的形式和数量的关系”，因此数学形式上的相似性必然在一定程度上反映了物理本质上存在着某些共同的规律性^[26]。

在研究局部放电产生超声波的机理问题时，由于同时要考虑到电、力、声的振动问题，运用电-力-声类比方法分析具有明显的优越性，通常情况下，局部放电的空间很小，因此采用集中参数系统，这样系统的唯一变量是时间，为研究方便，首先对力学和声学的一些相关概念进行介绍。

质量 M_m ：一种描述问题惯性的量度，对于一个物体来讲，由牛顿第二定律可知：

$$F = M_m \frac{dv}{dt} \quad (2-19)$$

其中 F 为作用在物体上的力， v 为物体的运动速度，则称 M_m 为该物体的质量。

力顺 C_m ：一种描述系统物理结构的参数，它表征了一个系统具有弹性性质，当受力作用时，它的位移与力成正比按照虎克定律有

$$F = \frac{1}{C_m} \xi \quad (2-20)$$

其中 F 为作用在系统中的力， ξ 为物体的位移。则称 C_m 为该系统的力顺。

力阻 R_m ：一种描述系统物理结构的参数它表征了一个系统具有摩擦损耗，当系统运动时，将受到力的作用，且相对运动速度与力方向相反，当物体运动较小时按阻力定律有：

$$F = R_m v \quad (2-21)$$

表2-1 电-力-声类比表

电学	力学	声学
电压	力	声压
电流	速度	体速度
电感	质量	声质量
电容	力顺	声容
电阻	力阻	声阻

其中 F 为作用在系统中的力， v 为物体的运动速度，则称 R_m 为该系统的力阻。同样的道理，在声学系统中，也存在类似的声质量、声容以及声阻。分别对应其惯性与衰减，电学、力学、声学中各参数的类比情况如表2-1所示。

2.5.2 局部放电产生超声波机理

设GIS绝缘介质中含有一半径为 r 的气泡 q ，气泡的质量为 M_m ，气泡处于一定的电场中，由于局部放电的原因，气泡携带一定的电荷，因此气泡收到一定的外加的电场力 F_e ，气泡内部将有一定的弹性作用力 F_q ，气泡维持平衡状态如图2-17a所示。由于局部放电过程（ns级），相对于超声波的产生过程（us级）来讲，局部放电过程很快，因此可以忽略局部放电的震荡过程，认为局部放电过程为单个脉冲。当发生局部放电时刻，气泡所受的外在电场力突然消失，气泡平衡状态被打破，气泡在弹性力的作用下，产生振动。此时气泡在受到三条力线一条为弹性力，穿过力顺元件 C_m ，终止于气泡壁；另一条为摩擦力，穿过力阻元件 R_m ，终止于气泡壁；一条为惯性力穿过质量元件 M_m ，终止于气泡壁；这三条力线都汇合于气泡壁，如图2-17b所示。从物理上看质量 M_m 、力顺 C_m 、力阻 R_m 三个元件的速度都相同，因此其在阻抗型类比线路图中应当是串联的。因此得到的电-力类比电路图，如图2-18所示。其中气泡的质量 M_m 等于气泡的体积乘以气泡的密度，力顺 C_m 、力阻 R_m 与气泡中的气体成分有关^[27]。

气泡局部放电的力学过程类似于电路中的二阶电路的零输入响应因此气泡中弹性力的受力满足下式的二阶方程：

$$L_m C_m \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_m C_m \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (2-22)$$

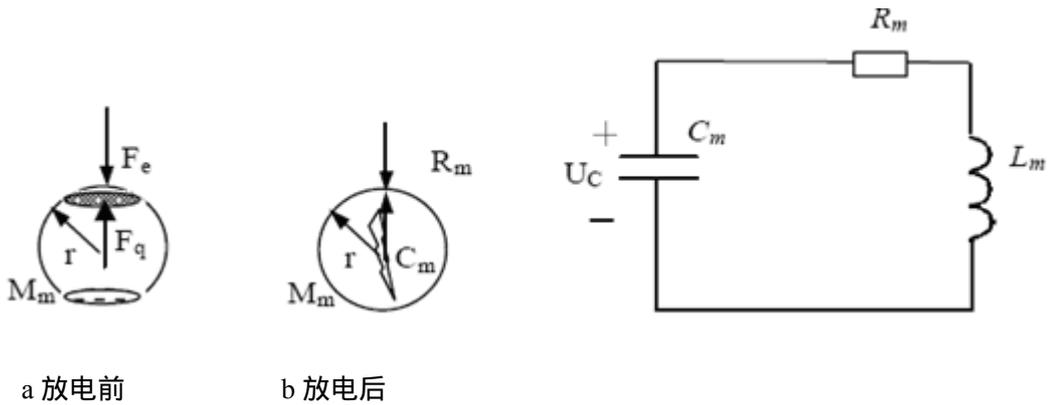


图 2-17 气泡受力分析

图 2-18 力学等效电路

Fig.2-17 Bubble force analysis Fig2-18. Mechanical equivalent circuit
 一般情况下，对于油介质来讲，其力阻较小，式中存在：

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-23)$$

说明气泡中的局部放电力学过程为振荡过程。

等效电路中的电压 u_c 表示气泡壁的的对外作用力，其值乘上气泡的表面积即超声波的声压。忽略局部放电的振荡过程以及气泡的体积变化，则 u_c 正比于超声波的声压，得到：

$$u_c = \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \quad (2-24)$$

式中， $\delta = \frac{R_m}{2L_m}$ ， $\omega = \sqrt{\frac{1}{L_m C_m} - (\frac{R_m}{2L_m})^2}$ ， $\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2}$ ， $\beta = \arctg \frac{\omega}{\delta}$

可以看出当气泡内发生局部放电时，气泡在脉冲电场力的作用下将产生为衰减的振荡运动，在气泡振动的作用下周围的介质中将产生超声波。则设气泡上真实放电量为 q ，气泡的击穿电场为 E ，则力顺 C_m 的初始值 U_0 即等于击穿前施加在气泡上的电场力。得到：

$$U_0 = U_e = qE \quad (2-25)$$

忽略局部放电的振荡过程时，由式2-24、2-25可知，超声波幅值与真实放电量成正比。

2.6 局部放电超声信号在 GIS 中的传播特性

2.6.1 超声信号路径

以跳动粒子和局部放电作为两个声波发射源。这一声信号有很宽的频带,且可达几百千赫。从GIS内部的声源和到外部声传感器的路径见图2-4所示。从图中可以看到,对于两个声源的传播路径有很大的区别^[28]。从粒子发出的声信号直接到达金属壳,然后通过金属到达传感器。另一方面,放电产生的声信号,同样也是在到达传感器之前通过SF₆气体和金属壳体。由传感器测得的声信号幅值和形状,不但是发射源的函数,而且与路径有很大关系^[29]。所以,对于传播中的声波形状特征要根据当时的GIS结构特征而定,尤其用超声定位,就更应考虑声的传播路径。

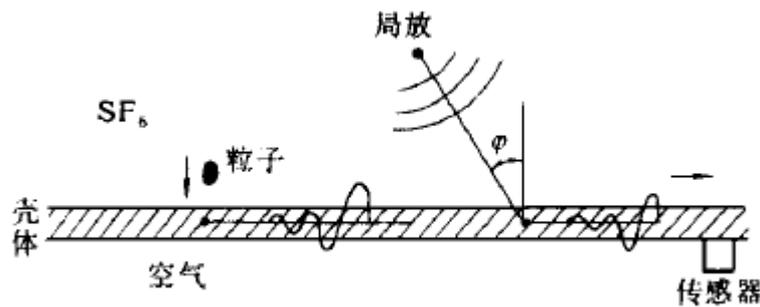


图2-4 声的传播路径

Fig.2-4 Sound transmission path

2.6.2 声波传播中的衰减

声波的幅值与声能的平方根成正比。当声波在均匀且无限的介质中传播时,声波的衰减与距发射源的距离的增加而减小。声波衰减是由于介质对声能的吸收和空间衰减而来。吸收是声波在气体介质的损耗,而在金属中的损耗较小,可在较短距离内忽略不计。在SF₆气体中,声能的吸收基本不变,可谓一常数。若声能为100dBm,在40kHz时SF₆吸收为26dBm^[30]。空间衰减只简单受空间几何形状的影响,在点声源发射情况下,球形声波的波强与距声源的距离的平方成反比。对于柱形声波强的衰减正比于距离。

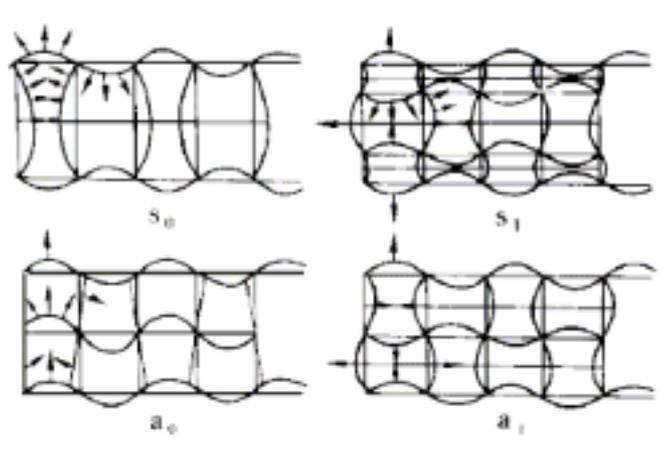
一维直线波没有空间衰减。以上关系在一个波长内是无效的^[31]。

2.6.3 声波传播形式

在无限大的固体中,压力波和剪力波是共存的,而且两种波的传播速度并不相同,剪力波速大约为压力波速的60%。它们的频率可认为是相互独立的频率,在气体中只有压力波存在,声速在一个大气压SF₆气体中的传播速度为156m/s^[30]。

在复杂的结构中,如GIS中,声波形式变得更复杂。大量的附加波掺杂在其中。这些复杂的声波可分解为压力波和剪力波,而且依靠结构的几何形状、边界条件、材料等。一般情况下,每种形式都有其自己的相速度和波群速度,相速度和群速度都由频率决定。

对于声波特性来说,当GIS密封的管壁厚度和平板厚度相同时,GIS管壁与平板具有相同的特性。在管壁内存在零次和一次两种基本波^[30],如图2-5所示。零次波一般为弯曲波和半纵向波。相速度和波群速度随频率变化的关系见图2-6所示。如图中所示,速度取决于平板厚度和频率的乘积,如果乘积小于2mmMHz,则只产生了零次波。



a_n : n阶非对称波 b_n : n阶对称波

图2-5 平板内的波形

Fig.2-5 Wave modes in plates

相速度 C_{ph} 决定波长 λ , 可用以下公式描述:

$$\lambda = C_{ph} / f \tag{2-26}$$

其中f为频率。声信号沿壁的传播速度由波群速度决定,波群速度亦可称信息传播

速度。当研究平板中的局部放电时，搞清声波在SF₆气体和壳体之间界面的传播情况是非常重要的。在气体中，平板中激发的平面波受一定的约束：平行于平板的成份，其波长λ必等于实际频率的波长，即为：

$$\lambda_{\text{平板}} = \lambda / \sin \varphi \tag{2-27}$$

相应的，入射角度φ取决于频率和气体中信号相速度。对于最重要的平面波而言，最低频率成份以最倾斜角度入射到管壁，而高频成份则以稍小的角度φ入射。如果声信号的频率不满足图2-7中所示的关系式，则不会入射到管壁^[32]。

此外，两种媒介的声阻抗是非常不同的，能够穿过两种媒介的很少。目前来说，提高气体压力可以提高穿透率^[29]。

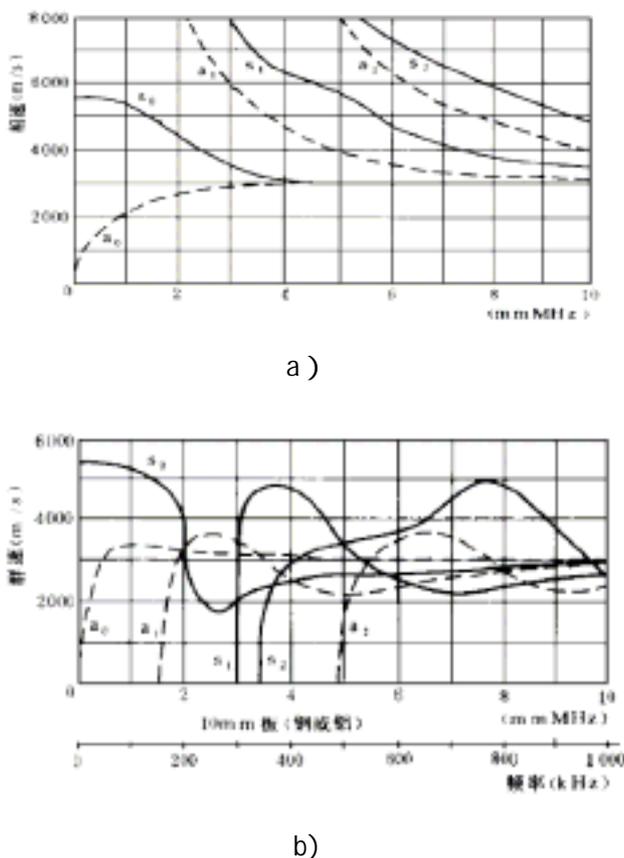


图2-6 相速度和波群速度与频率的关系

图中：S0、S1、S2——剪力波；

a0、a1、a2——压力波

Fig.2-6 The relationship between Phase velocity, wave group velocity and the frequency

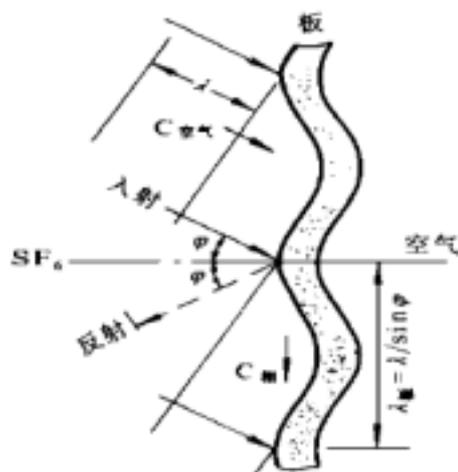


图2-7 管壁中平面波激发弯曲波

Fig.2-7 Plane wave excitation of a flexural wave in a plate

第三章 基于超声的局部放电检测系统硬件设计

3.1 硬件系统结构

系统采用超声传感器、前置放大器、DSP 高速数据采集系统、基于 ARM 的高性能嵌入式控制平台和后台具有强大数据分析能力的服务器等,组成系统硬件配置(见图 3-1)。

将超声传感器贴在 GIS 外壁上,用 50 欧姆同轴电缆直接将信号引入前置放大电路。GIS 附近环境比较恶劣,传统的工控机数据采集系统必须放置在距 GIS 有一定距离的场所内,在模拟信号传送过程中会引入大量干扰。而采用如图 3-1 方式,基于 ARM 及 DSP 的局放监测前端装置,由于采用了嵌入式平台,系统可靠性高,抗干扰性能高,可以直接放置在 GIS 附近的恶劣环境中,传感器和前端集成监测平台距离不是很长,使得系统耦合的外部干扰大大降低。

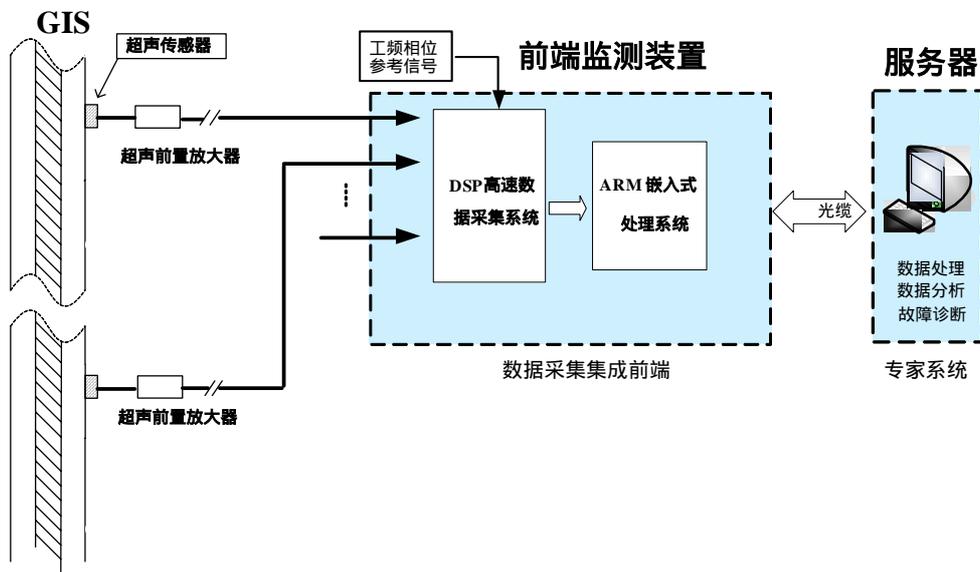


图3-1 局部放电在线监测系统结构图

Figure 3-1 Structure of PD monitoring system

超声信号经过前置放大器放大后送往 DSP 信号数据采集模块。经前期数字信号预处理后最终通过网络传送给远程服务器,对信号进行抗干扰处理和提取特征参数

后存入局放信号特征数据库，专家系统根据特征数据库中的历史数据作出 GIS 绝缘状态的诊断。

DSP 高速数据采集系统采用 TI 公司的 DSP TMS320C6713 为核心设计，主要完成超声信号和工频相位参考信号的采集，同时实现幅度变换、周期校正等功能。传感器检测的模拟信号通过信号调理电路接入系统，使用射频耦合器隔离，经高速 A/D 采样，由 DSP 读取并存储在 SDRAM 中。A/D 转换器采用 12bit，105M 转换速率的 AD 转换器。设计系统性能可达到最高采样频率 105MHz，最高连续采样频率 20MHz，一次可连续高速采集 20 个工频周期以上，最大限度捕捉故障放电信号的时域和频域特征。由于放电脉冲频带宽，采样速率越高其包含的局放信息越丰富且干扰信号的总体趋势是频率越高幅度越低，所以提高采样速率也能在一定程度上提高信噪比。

(ARM 平台暂未实现)

3.2 超声传感器

3.2.1 声发射(超声)传感器的原理

传感器将声发源在被探测物体表面产生的机械振动转换为电信号，它的输出电压 $V(t, x)$ 是表面位移波 $U(x, t)$ 和它的响应函数 $T(t)$ 的卷积^[33]。

理想的传感器应该能同时测量样品表面位移(或速度)的纵向和横向分量，在整个频谱范围内(0 ~ 100MHz 或更大)能将机械振动线性地转变为电信号，并具有足够的灵敏度以探测很小的位移(通常要求 $\leq 10 \sim 14\mu\text{m}$)^[34]。

目前人们还无法制造上述这种理想的传感器，现在应用的传感器大部分由压电元件组成，压电元件通常采用锆钛酸铅、钛酸铅、钛酸钡等多晶体和铌酸锂、碘酸锂等单晶体，其中，锆钛酸铅(PZT-5)接收灵敏度高，是声发射传感器常用压电材料。铌酸锂晶体居里点高达 1200℃，常用作高温传感器。

传感器的特性包括：频响宽度、谐振频率、幅度灵敏度，这些特性受许多因素的影响，包括：晶片的形状、尺寸及其弹性和压电常数；晶片的阻尼块及壳体中安装方式；传感器的耦合、安装及试件的声学特性。压电晶片的谐振频率(f)与

其厚度 (t) 的乘积为常数, 约等于 0.5 倍波速 (V), 即 $f \cdot t = 0.5V$, 可见, 晶片的谐振频率与其厚度成反比。

3.2.2 声发射传感器的分类

人们根据不同的检测目的和环境制造了不同性能和不同结构的传感器。

- 1、高灵敏度谐振式传感器：谐振式高灵敏度传感器是声发射检测中使用最普遍的一种, 这种传感器具有很高的灵敏度, 可探测的最小位移可达到 $10^{-14}m$, 但它们的响应频率范围很窄, 且共振频率一般都位于 50 至 1000KHz 之间。
- 2、宽频带传感器：传感器的幅频特性与其压电元件的厚度有关, 宽频带传感器一般是由多个不同厚度的压电元件组成, 这种传感器的操作频率一般为几十 KHz 到几 MHz, 适合探测声发射源频率很丰富的材料, 但其缺点是灵敏度比谐振式的要低。但其频响曲线非常平坦, 很适合做波形分析用。典型产品有日本富士的 AE1045S 宽带传感器。
- 3、切变波传感器：目前声发射检测所普遍使用的基本上都是纵波传感器, 它们只能接收厚度方向的振动分量。切变波传感器是专门用来探测材料表面水平方向的切变振动分量的传感器, 而且具有一定的方向性。
- 4、二分量传感器：在材料表面一点上能同时获得一个纵向振动分量和一个切变振动分量, 或是两个相互垂直的切变振动分量的传感器。
- 5、三分量传感器：在材料表面一点上能同时获得一个纵向振动和两个相互垂直的切变振动的传感器。
- 6、差动传感器: 由两个正负极差接的压电元件组成, 输出相应变化的差动信号。其抗共模干扰能力强, 适合噪声来源复杂的现场使用。
- 7、电容传感器：这是一种直流偏置的静电式传感器, 用它可以测量试件表面的垂直位移, 所以也是一种位移传感器。由于它在很宽的频率范围内具有平坦的响应特性, 因此可用于声发射信号的频谱分析和传感器标定。缺点是灵敏度不够高。
- 8、锥形传感器：这种传感器采用 NBS 型的锥形探头, 灵敏度很高, 频谱相应也很宽。
- 9、低频拟制传感器：它具有低频拟制能力, 但对于表面波声发射信号有接近一般传

传感器的灵敏度。

- 10、 光学传感器：它应用Michelson干涉仪的原理,以相干长度十分大的激光的干涉来测量弹性波引起样品表面的垂直位移,它不与样品直接接触,因此具有很宽的通频带,并且可以绝对标定,但由于受波长所限,且本底噪音不易消除,其探测灵敏度不高。
- 11、 微型传感器:微型传感器具有小巧的外形结构,适合探测小型试件的声发射。但由于压电元件小,灵敏度较低。
- 12、 高温传感器:这种传感器适合在高温环境下长时间工作,要求压电元件具有高温稳定性能,它的Curie温度远高于使用温度。目前商品高温传感器的使用温度范围为-200~+540。
- 13、 磁吸附传感器:它可以直接吸附在铁磁材料的检测对象上,达到充分接触耦合的目的。由于切变波传感器不能采用油耦合,所以它常采用磁吸附传感器的结构。
- 14、 前放内置式传感器:这种传感器将声发射信号的前置放大器与压电元件一起置入探头的不锈钢外壳中,因此具有最好的抗电磁干扰能力,而且传感器的灵敏度不受影响。这种传感器在现场检测中使用十分方便。
- 15、 潜水传感器:这种传感器仍采用前放内置式结构,但经过密封防水处理,可以在水中对构件进行声发射检测。
- 16、 可转动传感器:这种传感器采用干耦合旋转式结构,在生产过程中,在传感器位置固定的情况下对移动的工件进行连续监测。
- 17、 单向传感器:这种传感器只对一个方向传播的声发射波敏感,而对与之垂直的另一个方向传播的声发射信号抑制。因此适合桥梁的声发射检验并排除道路上噪音的干扰。
- 18、 空气耦合传感器:这种传感器以空气为耦合剂,中心频率一般为20kHz,最适合在非接触情况下进行在用压力容器的泄漏监测。

3.2.3 压电型声发射传感器的结构

常用的压电型谐振传感器的结构形式见下图^[35]，a 为单端输出式，b 为差动输出式。

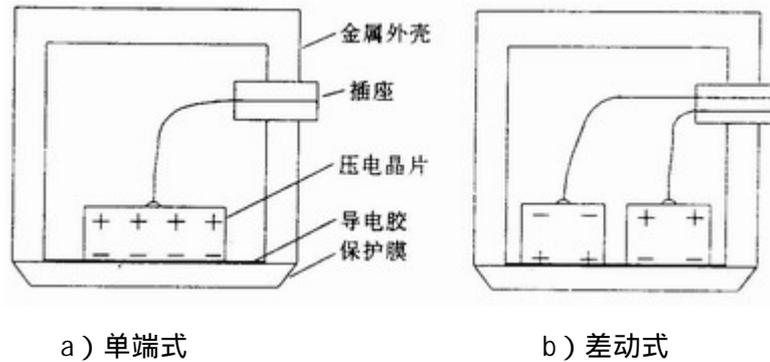


图 3-2 压电型谐振传感器的结构形式

Fig.3-2 Piezoelectric resonant sensors structure

压电元件多采用锆钛酸铅陶瓷晶片(PZT-5),起着声电转换作用。两表面镀上5~19 μm 厚的银膜,起着电极作用。陶瓷保护膜,起着保护晶片及传感器与被检体之间的电绝缘作用。金属外壳对电磁干扰起着屏蔽作用。导电胶,起着固定晶片与导电的作用。在差动式传感器中,正负极差接而成的两个晶片,可输出差动信号,起着抑制共模电噪声的作用。传感器材料选择,还应考虑诸如温度、腐蚀、核辐射、压力等检测环境因素。

3.2.4 传感器选型对比

美国PAC压电传感器

PAC公司成为世界上最大的声发射技术研发公司和公认的世界声发射技术的领导者。PAC公司的声发射产品和技术服务占全球市场份额的85%以上。目前美国PAC的声发射系统在国内已有一些应用,该系统传感器仍然是采用压电传感器,前置放大器分为20dB, 40dB, 60dB三档可调,系统自带分析软件系统。下面是采用沿面放电模型,应用PAC的声发射系统包括其自带超声传感器进行局部放电超声法检测(与电测法联合检测,当从电测法观察到明显放电时),经40dB前置放大和20~300kHz的带通滤波后的结果如图3-3所示。

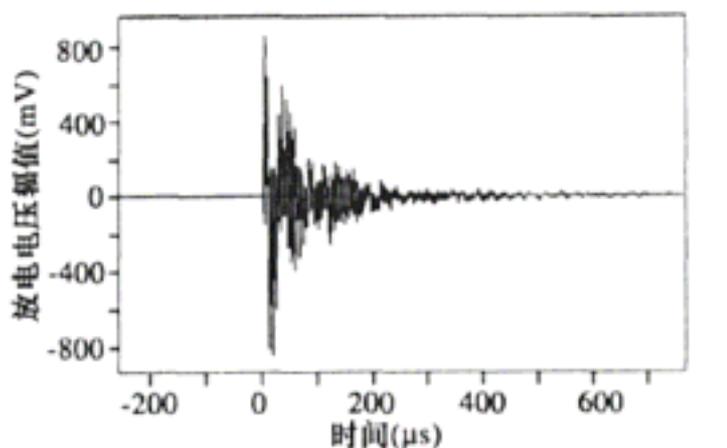


图3-3 PAC超声传感器检测局部放电波形图

Fig.3-3 PAC ultrasonic sensors detected partial discharge waveforms

通过系统自带的分析软件对采集到的超声信号进行频谱分析，由图3-4可知，沿面放电模型的局部放电超声信号频谱中心频率在150kHz左右。对大量试验数据的进一步分析表明，传感器能否检测到信号与放电发生时产生超声波的能量密切相关，振动的撞击强度对传感器接收信号至关重要。测量时，当着重于灵敏度时，宜选用窄频带的传感器，因其有以共振频率为中心的带通滤波作用，可望提高信噪比S/N，此时如果选用宽频带传感器，就有可能因波形混叠在一起很难辨别每次放电的各参数。当分析局部放电的频率响应特性时，宜选用宽频带的传感器，它有着比较平坦频率响应，包含着比较丰富的局部放电的信息。

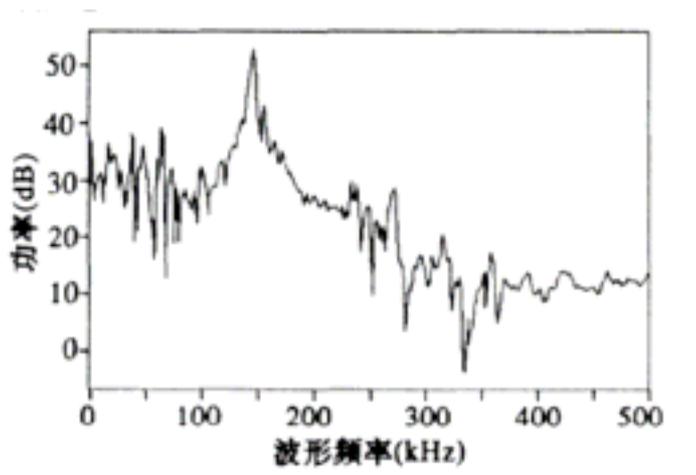


图3-4 局部放电频谱图

Fig.3-4 PD Spectrum

超声传感器是选择超声法局部放电在线监测中的关键技术，在实际选用中应结合

工作频带，灵敏度，分辨率以及现场的安装难易程度和经济效益问题等进行综合衡量。

- 1、在灵敏度要求不高的场合,可选用谐振式压电传感器；光纤传感器作为一种新发展起来的技术，有着很好的发展前景,但应用有一定困难。
- 2、对于现场状况比较复杂的场合，在安装方式可实现的条件下可以考虑不同的传感器进行组合安装，这种组合可以是不同传感器对同一种安装方式的组合，同一种传感器不同频带宽度的组合，这样一方面可提高检测灵敏度，另一方面可排除干扰减少误判，获取更为丰富的局部放电的信息。

针对GIS的局部放电的超声法检测中,目前应用最为广泛的是以压电陶瓷为材料的谐振式传感器^[36]，它利用压电陶瓷的正压电效应,在局部放电产生的机械应力波作用下发生形变产生交变电场。在传感器选择中，工作频带和灵敏度是两个最为重要的指标。虽然局部放电及所产生的声发射信号具有一定的随机性,每次局部放电的声波信号频谱不同，但整个局部放电声波信号的频率分布范围却变化不大，基本处于20~110kHz频段，传感器谐振频率一般选择在30kHz^[37]。大量研究表明，局部放电产生的声波信号的频谱大都集中在30kHz左右。目前商用声发射检测仪器发展比较成熟的有美国PAC公司、日本富士公司,德国Valien公司，中国北京鹏翔科技和中国广州声华等。

表3-1为各个公司的超声传感器型号及频率范围

表3-1 超声传感器型号及频率范围

公司	型号	频率范围 (kHz)	谐振频率	灵敏度 V/(m/s) [V/ubar](dB)
PAC	D9241A	20-180	30	80[-70]
	S9208	20 - 1000	500[500]	45[-85]
	R15 α	50-200	70[150]	69[-63]
	R3 α	25-530	29[140]	80[-63]
	CH15I	50-200	75[150]	109[-22]
	CH30I	125-450	300[350]	97[-23]
鹏翔	PXR03	20-110	30	75
	PXR04	30-140	40	80
富士	AE303S	30 \pm 20%		75 \pm 3
	AE503S	50 \pm 20%		75 \pm 3
	1045S	100-1300		51 \pm 3
声华	SR50	20-110	50	75
	SR150	70-400	150	65
VALLEN	VS75-SI-40dB	30-120		
	VS45-H	20-450		
	VS1000-H	10-400		

综合以上因素，本文选用美国PAC公司制作的D9241A型高灵敏超声波传感器，图3-5所示：

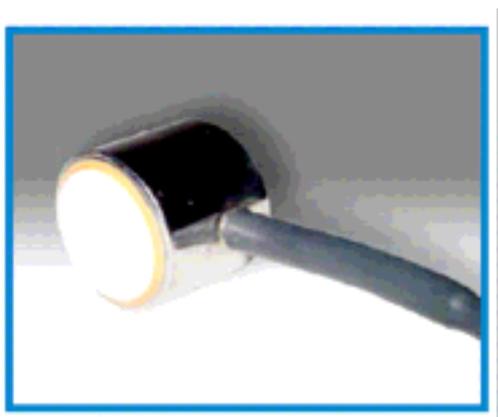


图 3-5 美国 PAC 的 D9241A 超声传感器

Fig.3-5 PAC D9241A ultrasonic sensor

该传感器频带最大宽度为20 ~ 180kHz ,谐振频率为30kHz ,灵敏度为85[-75] V/(m/s) [V/ubar](dB) ,输出信号为差分信号 ,远距离传输时抗干扰性较高。灵敏度标定曲线图3-6所示 :

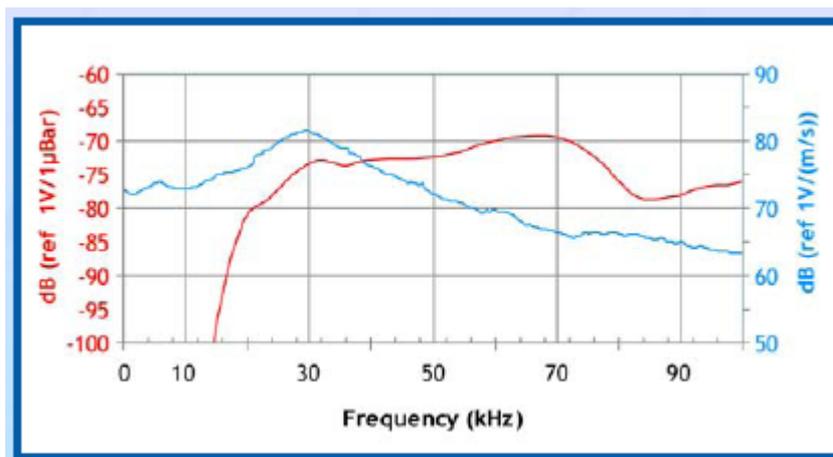


图3-6 D9241A灵敏度标定曲线

Fig.3-6 D9241A sensitivity calibration curve

为了更好的取得超声波信号 ,传感器与箱壁之间采用优质黄油来耦合。

3.3 超声前置放大器

压电式传感器是基于某些物质的压电效应 ,当其表面承受压力时 ,发生变形 ,表面产生电荷。若外加的机械力为 F ,它所产生的电荷 Q :

$$Q = d_g F \quad (3-1)$$

为了把电荷引出,多在二表面放置两个极板,二板间的电容为 C_t ,绝缘电阻为 R_t ,则压电传感器可用图 3-7 所示的等效图来表示^[38]。

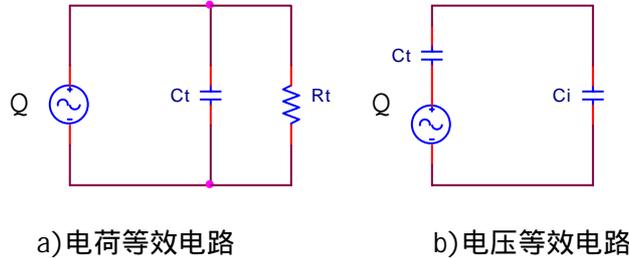


图 3-7 压电传感器等效电路

Fig.4-7 Equivalent circuit of piezoelectric sensor

电容 C_t 一般在 100pF : 200pF 之间,绝缘电阻 R_t 一般为 $10^9 : 10^{14}$ 欧姆之间,可认为是开路的,所以电荷 Q 对电容 C_t 充电,充电电压为 V_t

$$V_t = Q / C_t \quad (3-2)$$

可用图 3-7a 等效线路来表示,这种等效电路称为电荷等效电路,有时也用图 3-7b 的电压等效电路,二电路是等效的。

由于压电式传感器既可以看成电荷源也可以看成电压源,因而相应的其前置放大器也有两种设计方案:电荷放大器和电压型放大器。

一、电荷放大器

由于压电传感器是一个高内阻的电荷源,多用具有高输入阻抗的放大器来测量。电荷放大器能够把高内阻的电荷转换成低内阻的电压源^[38]。

电荷放大器实质上是一个由运算放大器带电容负反馈的放大器。应用于压电传感器时,在满足一定条件时,它能做到:

- 1、输出电压 U_o 和输入电荷 Q 成正比;
- 2、能使压电传感器得到比用高阻电压放大器更低的频率下限;
- 3、能最大限度减少放大器输入回路中如引线电缆等参数的影响,而这些参数是很容易引入随机因素的;
- 4、有效的消除在压电体上因电荷积累而造成的逆电压效应,而这有利于提高稳定性和传感器的。

图 3-8 中，电容 C_f 是反馈电容，将输出信号 U_o 反馈到反响输入端。当 A 为理想放大器是，根据虚地原则，反向端接地，所以， $U_i=0$ 。有 $Q = (0 - U_o)C_f$ ，即 $U_o = -\frac{Q}{C_f}$ 。因而，输出电压和电荷成正比，比例决定于反馈电容，理论上与信号的频率特性没有关系。

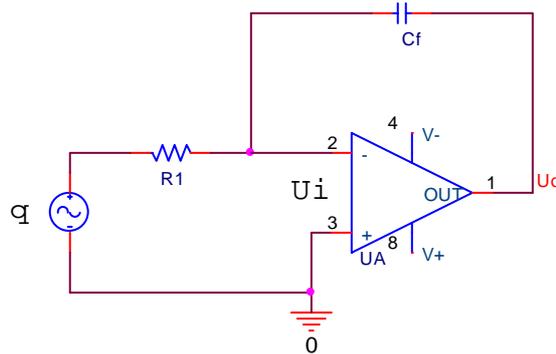


图 3-8 电荷放大器示意图

Fig.3-8 Schematic diagram of the charge amplifier

反馈电阻 R_f 是保证运放直流负反馈稳定运放工作点所必备的。为保证良好的直流负反馈、必须选择高输入阻抗运放，同时要求具有很低的偏置电流，低的输入噪声，特别要求具有低的输入噪声电流。一般运放选择 FET 输入级的运算放大器，这里打算选用 AD8620。

电荷放大器是交流信号放大电路，它与下一级的耦合一般采用隔直电容，所以对远放的直流零位输出及漂移要求不高。

由于电荷放大器的运放反相端与传感器、电缆和反馈网络连接，它们的内阻抗以及运放输入阻抗均是高阻抗，因而极易受外部电场的干扰。当后级放大电路增益很高时，空间电容的寄生电容也有可能使测量放大系统振荡。在弱信号检测时，来自工频电场的干扰使测量难以进行。为此必须对反相输入端进行严格的静电屏蔽防护。为避免来自线路板其它部分的漏电，需要对反相输入端采用提高绝缘和外加接地保护环等防护措施，提高绝缘采取的措施如下：电容采用聚苯乙烯电容（绝缘阻抗高，具有漏电小，损耗小，吸附效应小的优点），电路板采用铁氟龙基础板的电路板。

为了避免电线绝缘电阻直接与运放输入电阻相并联，而降低直流反馈系数，破坏

直流工作点的稳定性,可在反相输入端串联一个较大的耦合电容 C_1 ,如取 $C_1=0.1\mu\text{F}$ 。相应将反馈电容 C_f 原接在反相端的一端向外接到 C_1 另一端。为了避免电缆电容引起附加相移而造成自激,同时在输入端串接几欧姆的低值电阻,这样就构成图 3-9 所示的实用电荷放大器电路。

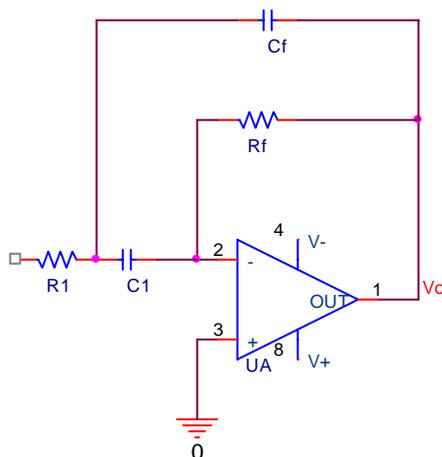


图 3-9 实用电荷放大电路

Fig.3-9 Practical charge amplifier

电荷放大器的灵敏度与 C_f 成反比,为提高灵敏度,就要求减小 C_f 。然而 C_f 的取值受到输入端各电容的限制,取值不能太小,一般取 $10\text{pF}:0.1\mu\text{F}$ 。当 C_f 值选定后,下限额就由反馈电阻 R_f 决定,但 R_f 的取值还应考虑放大器工作的稳定性和频率特性。 C_f 和 R_f 构成高通滤波器,取 $C_f=1000\text{pF}$,由 $\frac{1}{2\pi C_f R_f} \leq 300\text{kHz}$ 得, $R_f \geq 500$ 。

对图 3-9 进行 Pspice 仿真 ($R_1=50$, $C_1=0.1\mu\text{F}$, $C_f=1000\text{pF}$, $R_f=500$) 结果如下:

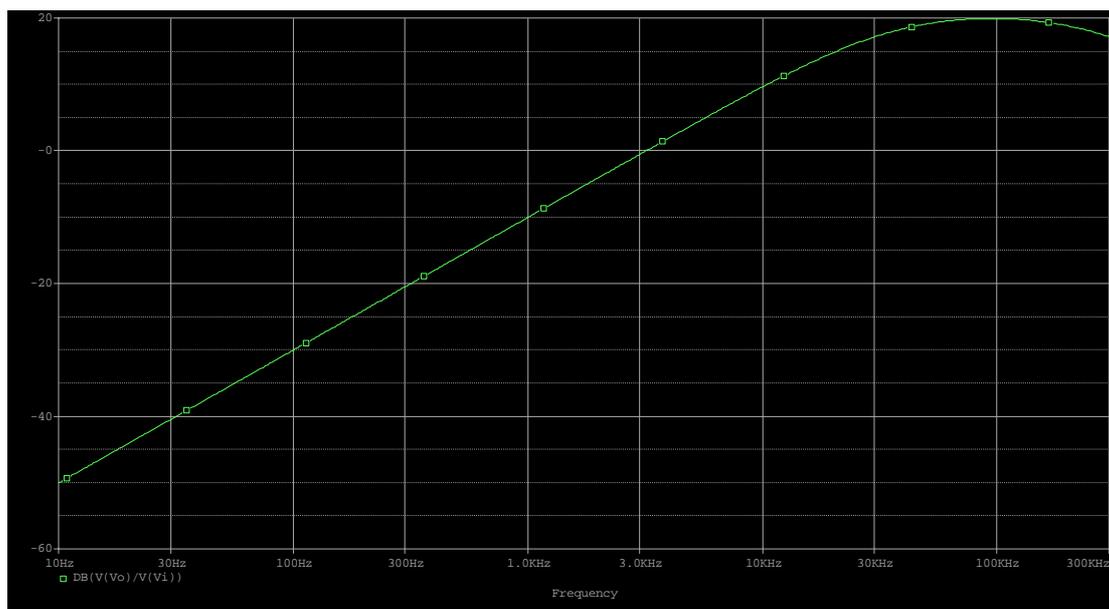


图 3-10 电荷放大器仿真结果

Fig.3-10 Simulation results of the charge amplifier

从 1Hz 到 10kHz (10 倍频程) 衰减大约 20dB (对于工频干扰抑制的作用比较强), 频率从 30kHz 到 300kHz 时增益变化不大。

实际制作电路板测试效果不佳, 分析原因如下:

- 1、电荷放大器的工作机理还需要仔细研究, 特别是反馈电容和反馈电阻的参数选择。
- 2、电路板没有选用铁氟龙基础板, 输入端的接地保护环没有做好, 造成绝缘不够。

二、电压型放大器

超声放大电压型电路如图 3-11 所示, 由两级放大和 4 阶高通滤波组成, 第一级为同相比例放大, 放大 10 倍 (放大倍数由可调电阻可调), 第二级为反向比例放大, 放大 10 倍, 中间为 4 阶高通滤波器, 截止频率为 30K。

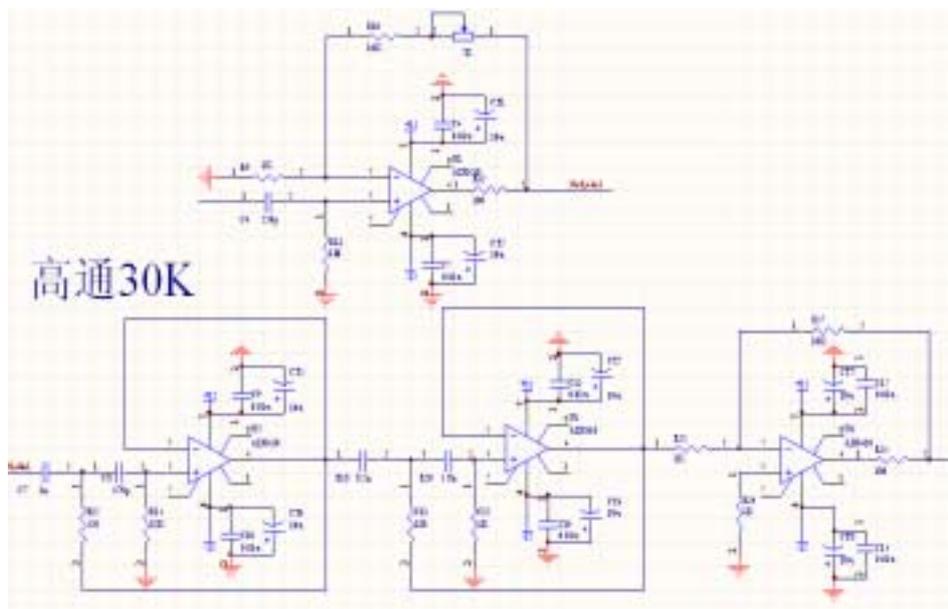


图 3-11 电压型前置放大器电路图

Fig.3-11 Voltage preamplifier circuit

由于被测信号很微弱,有时仅为微伏数量级甚至更小,因此必须经过几级放大,才能得到足够大的信号用于数据采集和处理。在有用信号被放大的同时,前置级的噪声也被放大。前置放大器的噪声特性几乎都由初级电路决定,因而初级电路的选用的OP放大器和反馈形式非常重要。

低频前置放大器要求能够无损失的获取传感器中发生的信号,并且尽量提高该信号与前置放大器中产生的噪声的比值。因此需要提高前置放大器的输入阻抗,使它比信号源的阻抗高的多。由于超声传感器的输出阻抗很高(兆级),所以前置放大器的输入阻抗必须更高。同向放大器的输入阻抗由于负反馈的作用能够比反向放大器的输入阻抗高的多。因而第一级采用同向放大。

为使前置放大器获得最佳的噪声性能,必须根据噪声匹配的要求,选用合适的OP放大器。超声传感器的源电阻阻抗很高,应该选用高输入阻抗的FET输入的OP放大器。双极晶体管OP放大器虽然噪声电压能做的更低,但由于输入阻抗较低因而不宜选用作为前置放大器的初级。

电路中的运放为AD8610,为JFET输入形式,其输入阻抗很高,电压噪声比较低,电压噪声密度: $6\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,低电流噪声密度: $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,低偏置电压:100uV Max,

低输入偏置电流：10pA Max。增益带宽积GBP：25MHz

下图为OP放大器的频率特性：

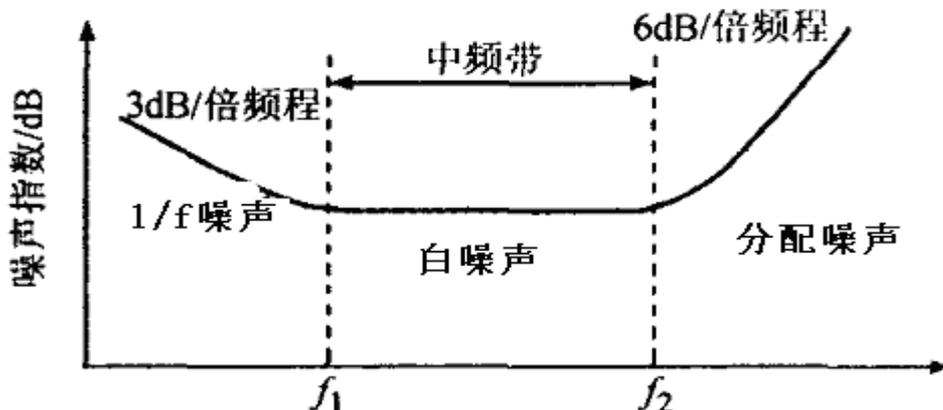


图3-12 噪声电压密度频率特性

Fig.3-12. Frequency character of noise voltage density

1/f噪声与频率有关，频率越低它的值越大。白噪声几乎占据整个频率范围，不过在高频范围由于带宽变宽对总的噪声电压有较大影响，因此低噪声前置放大器中过分的扩展频率范围，将会导致噪声的增大。通过插入低通滤波器，将频率限制在必要的频带最低限内对降低噪声有帮助分配噪声随着频率的提高，噪声也变大。

现在电路中只有4阶高通滤波器，根据上面的理论若加入低通滤波器有可能降低噪声。

用multisim仿真软件做仿真，下图为仿真所得到的波特图

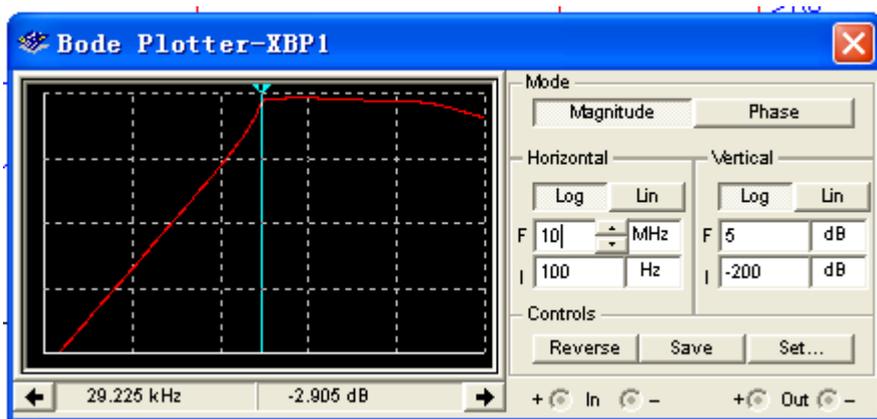


图3-13 4阶高通仿真结果

Fig.3-13 4 Bands high pass simulation results

第二级放大采用反向比例放大形式，放大倍数为 10 倍。

存在的问题：

局部放电产生的信号十分微弱，有时仅为微伏数量级，因而要求前置放大器的输出端噪声尽可能小，否则很难检测到局放产生的信号。

用现在的电路放在铝制密封盒子中，在输入短路的情况下输出端的噪声为 8mV 左右，噪声较大。

下面分析可能的噪声来源（输入短路）：

* $R_{f1} // R_{f2}$ （反馈电阻）产生的热噪声 = $\sqrt{4kT(R_{f1} // R_{f2})}$

* 输入换算噪声电压： e_n ，输入换算噪声电流： i_n

* 输入换算噪声电流与反馈电阻产生的噪声 = $i_n \times (R_{f1} // R_{f2})$

采用分立元件搭成的电路有可能噪声更小。现在用分立元件作阻抗匹配，用运放做放大的一个实验电路原理图如下：

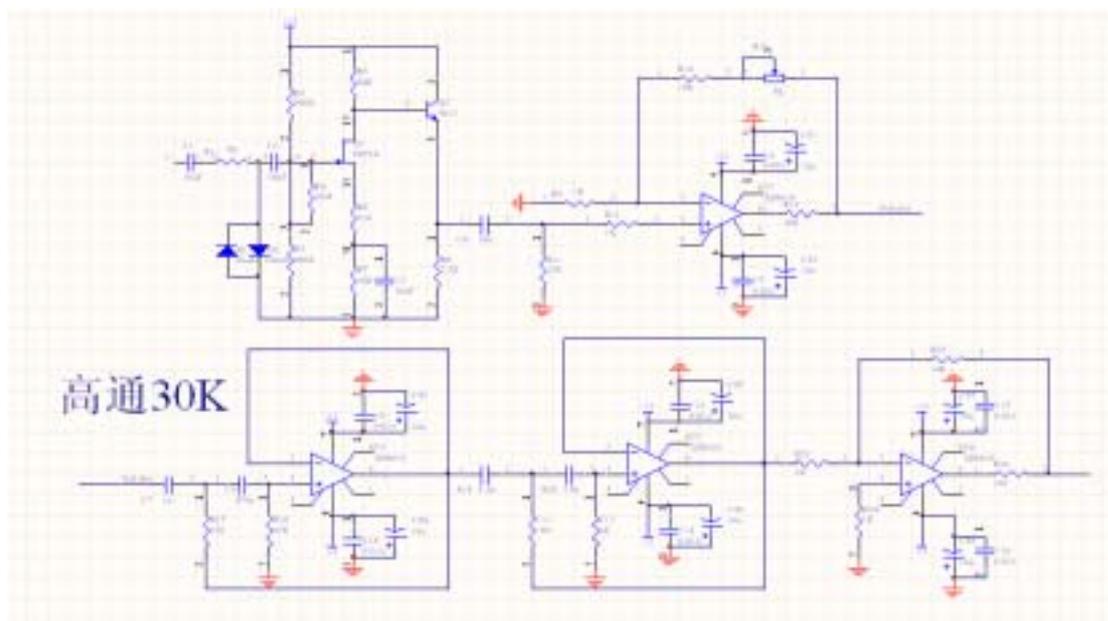


图 3-14 分立元件前置放大器

Fig.3-14 Discrete components preamplifier

用此电路性能需要实际做电路板进行验证。

电压型放大器实际测试效果还比较不错，但是存在的问题是噪声还比较大，需要改进滤波效果，改善布线布局。

3.4 数据采集系统

为了适应 GIS 局部放电信号的特点，实现对多个传感器通道的数据采集，而开发研制的基于 DSP 和 CPLD 的多通道分布式高速数据采集系统。系统包括前端的模拟信号调理电路，高速采样、数据处理电路，另外还有实现大数据量稳定传输的基于 DSP 的 TCP/IP 网络接口设计。

根据 GIS 局部放电在线检测的特点，我们需要设计一个能实现 18 个通道同步采样的高速数据采集系统，该系统的最高采样频率是 50MHz。

我们要设计的系统是 18 个通道同步采样的高速数据采集系统，系统通道数量较多，采样频率较高，需缓存的数据量也比较大，因此需要设计一个最合理的结构和数据缓存方式，这关系到系统能否正常、稳定地工作。

将 18 个通道的信号调理电路和数据采集电路做在一块板子上显然是不现实的，这样设计出来的板子会非常大，成本高而且不利于安装。分布式结构或者称为插卡式结构可以解决这个问题，可以将各个模拟通道的信号调理电路独立出来，做成信号调理子板，在通过总线将调理好的信号传到主板上，在主板上完成采样和信号处理工作。但这样做还不能使主板的大小合适，因为，我们的采样系统有一定的分辨率要求，因此选用的 AD 采样芯片应是 14 位的，对高采样频率的 AD 采样芯片而言，一般都是转换位数比较少的，多数 AD 芯片的转换位数小于 10 位，而且这样的 AD 采样芯片的通道数大多是 1 个到 2 个。这就是说，如果采样电路也放在主板上的话，18 路信号至少需要 9 片 AD 芯片，加上外围元器件，主板的面积还是很大，因此应该把信号采集部分也从主板上移开。但是，这样又有一个问题，每块 AD 芯片的采样速率都在 10MHz 以上，18 个通道就是上 100MByte 的数据量，依靠一个 CPU 的数据通道是完全处理不来的，因此需要在每块子板上添加本地缓存，这样的话每块子板已是一个自成系统的数据采集卡了。这时候主板上因该还包括与各子板的接口，必要的供电电路，还有信号处理电路了，为了进一步合理化主板的尺寸，同时增强系统的组合性能，可以再把信号处理部分电路独立出来，再设计一块基于 DSP 的信

号处理板。

通过上面的分析，我们已构建出一个分布式的高速数据采集系统，它由三部分组成：

1、AD 采样板

AD 采样板负责接收传感器信号，对其进行必要的信号调理，然后由 AD 采样芯片对其进行采集，同时将所得的采样数据存储到本地存储器中，这个过程由 FPGA 或是 CPLD 控制。同时 AD 采样板中应该还有一个用于数据传输的总线。

2、主板

在本系统中主板的主要功能是连接各 AD 采样板和 DSP 信号处理板的作用，同时各个插在主板上的 AD 采样板和 DSP 信号处理板供电也是由主板来提供的。

3、DSP 信号处理板

AD 采样板上采集的数据需要被及时取走，18 个通道采集的数据量是很大的，需要采样数据传输和处理能力很强的 DSP 芯片。同时这些数据需要通过可靠的方式传输到后台服务器中，因此，还需要扩展一个 TCP/IP 接口。同样，要与各 AD 采样板连接在一起，DSP 信号处理板也有一个总线接口。

4.4.1 AD 采样板

AD 采样板的系统框图如图 3-15 所示，其核心是 CPLD，由它来产生 AD 芯片的各种控制信号、SRAM 的写入时序、对采样信号的预处理、自定义总线接口时序等。输入的两路差分模拟信号经由放大器转为单端信号，而后经由低通滤波器进行滤波，接着滤波后的信号经信号变压器隔离后送入 AD 芯片，此时 AD 芯片已在 CPLD 的控制下开始信号采样工作。

同时，AD 芯片的数据总线与 CPLD、SRAM 存储阵列的数据总线是连在一起的，这样 CPLD 可以灵活的处理 AD 芯片的采样输出数据。既可以将数据读入 CPLD 中进行一些滤波处理，再将数据存入本地缓存中，或是直接给出 SRAM 的写控制信号，将采样数据写入本地缓存。正如前面所述，采用 CPLD 代替 CPU，可以很好的提高系统的运转性能。而由 SRAM 组成的存储器阵列充当大容量的本地存储器，对采样

数据进行缓存，等待后端的 CPU 将采样数据取走。

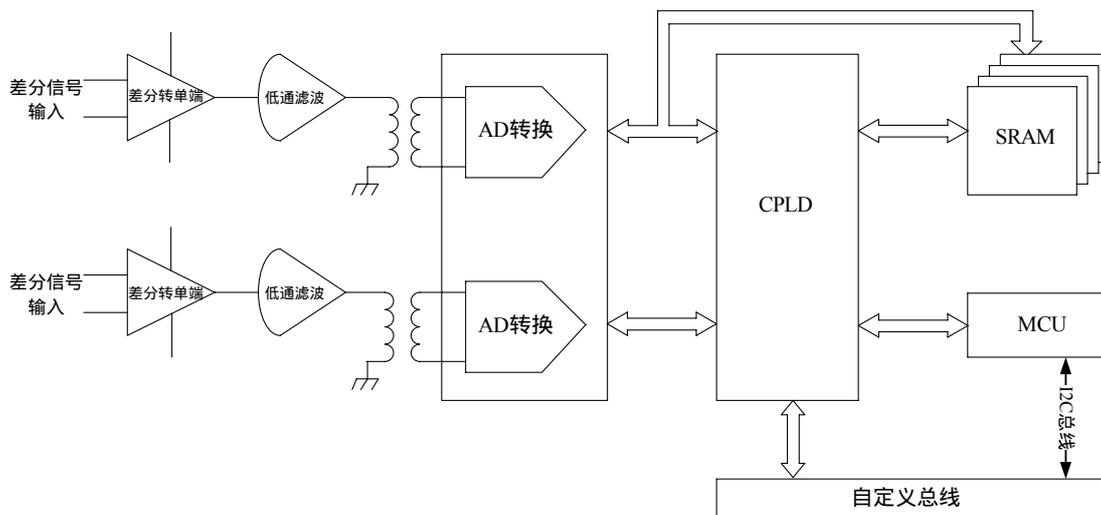


图 3-15 采样板系统框图

Fig.3-15 Sample acquisition system diagram

4.4.2 DSP 采样板

DSP 信号板的系统框图如图 4-16 所示，连接在自定义总线上的各块 AD 采集板的数据由 DSP 读取并存储在 SDRAM 中；HPI 口提供了主机与 DSP 的通讯，目前使用数据选择器，分别连接主机接口与 USB 接口；FLASH 存储程序；看门狗监控系统运行；LED 提供当前程序运行状态；采集数据在 DSP 中进行去噪、取样分析，由 W3100 和 RTL8201 组成的网络接口将采样原始数据传送到上位机中。

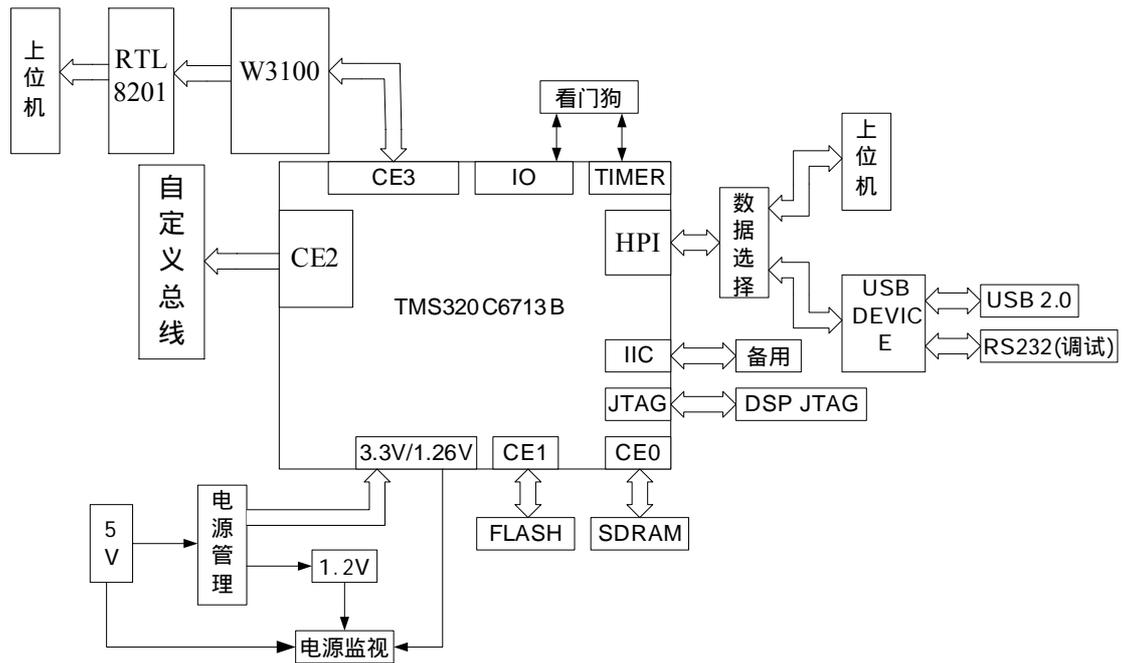


图 3-16 DSP 板系统框图

Fig.3-16 DSP system diagram

4.4.3 采集主板

采集主板主要包括三个部分：供 AD 采样板和 DSP 信号处理板信号连接的总线插槽、给 AD 采样板和 DSP 信号处理板供电的电源、同步采样控制信号产生电路。

第四章 基于超声的局部放电检测系统软件设计

4.1 软件系统架构

局放的检测只是 GIS 绝缘监测整个过程中的第一步。图 4-1 总结了 GIS 绝缘监测中从检测到风险评估各个不同的阶段。在当前情况下，局放监测系统能够实现检测、识别和部分定位功能，但最终的定位和风险评估结论必须由专家给出。

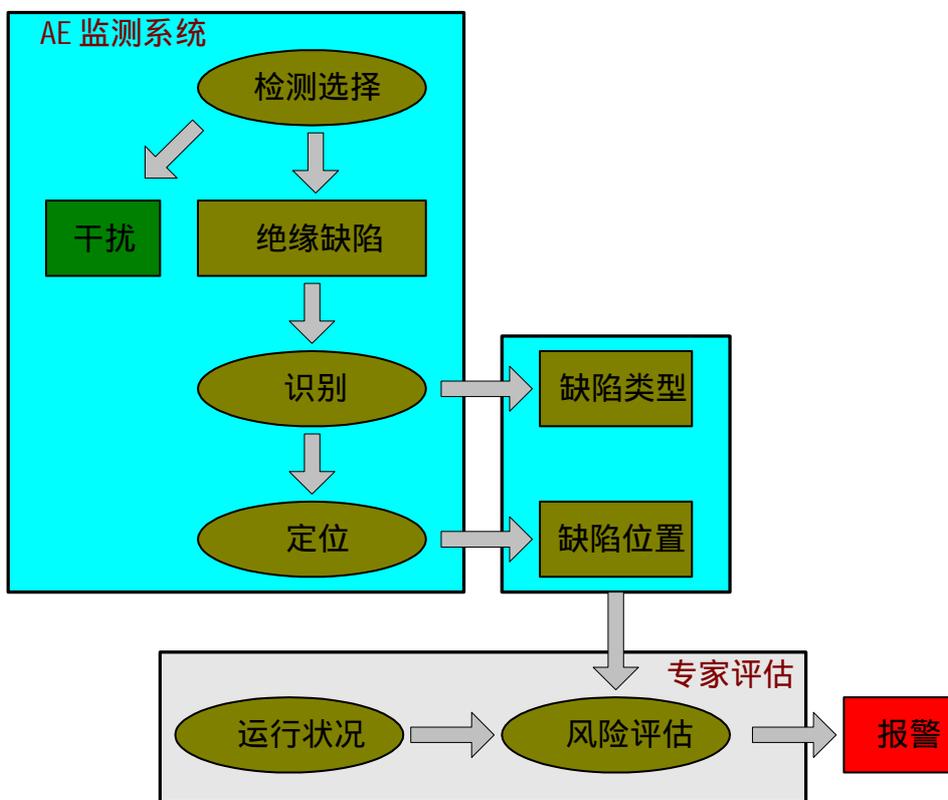


图 4-1 GIS 局放检测软件系统框图

Fig.4-1 GIS PD detection software diagram

如图 4-1 所示，AE 信号通过信号处理过程，识别出缺陷的类型并给出缺陷的大致位置，提交给专家评估系统，专家系统结合 GIS 的运行状态给出最终的诊断结论。

4.2 数据处理及特征提取

GIS 中的绝缘缺陷主要有如下的几种：1 高压导体上的突出物，2 外壳上的微粒，3 浮动微粒，4 自由微粒，5 绝缘子上的微粒，6 绝缘子中的裂缝，7 绝缘中的气泡，8 浮动电极。如图 4-2 所示，为 GIS 中几种典型的缺陷模型。

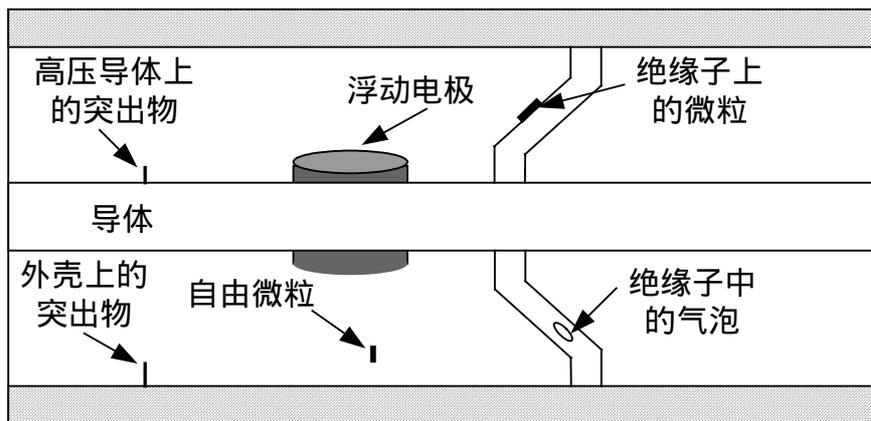


图 4-2 GIS 中几种典型的缺陷

Fig.4-2 Several classical faults in GIS

基于 AE 的局放类型是通过脉冲波形来识别的，针对超声脉冲波形提取如表 4-1 所示的特征参数。

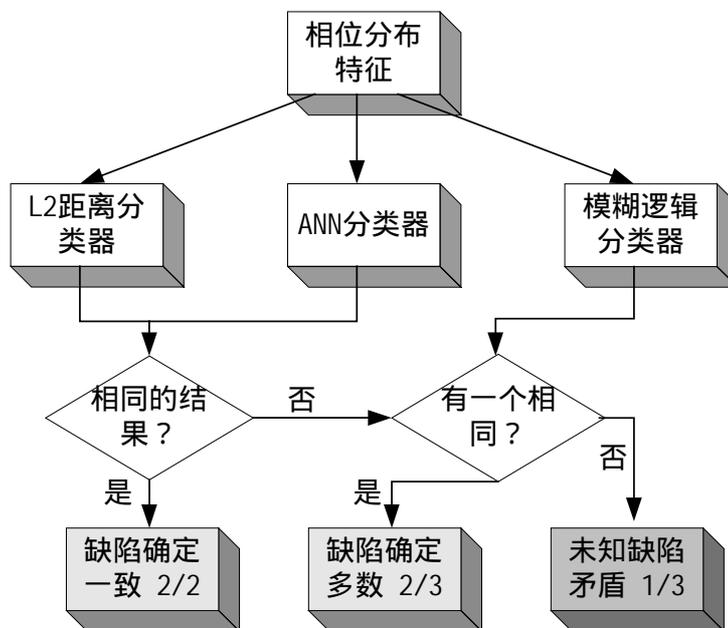


图 4-3 局放混合分类器

Fig.4-3 PD mix classifier

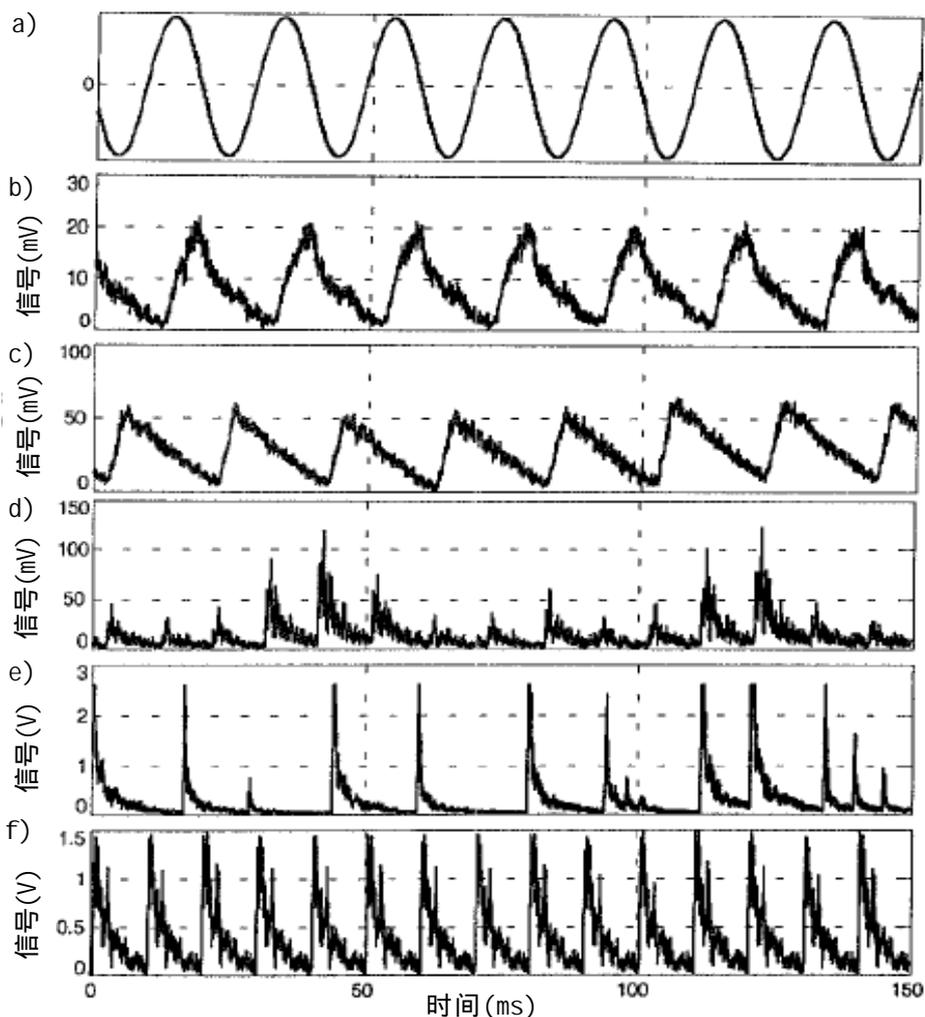


图 4-4 不同缺陷类型的典型信号：a)测试电压；b)高压导体上的突出物；c)外壳上的突出物；d)移动的微粒；e)跳动的微粒；f)松动的螺丝

Fig.4-4 Classical signals of different faults

表 4-1 基于 AE 的局放信号特征参数

序号	描述
1	脉冲的峰峰值
2	脉冲的上升时间
3	脉冲的下降时间
4	脉冲的带宽
5	脉冲的均值
6	脉冲的方差
7	脉冲的偏斜度
8	脉冲的突出度
9	超声信号 FFT 变换中 50Hz 的分量/100Hz 的分量
10	超声信号正负半周之间的相关性
11	正负半周的超声信号和作差
12	脉冲之间的时间间隔对模 10ms 取余

超声信号的识别可以利用统计分类器，也可以利用人工神经网络，识别过程中的标准如图 4-5 所示。

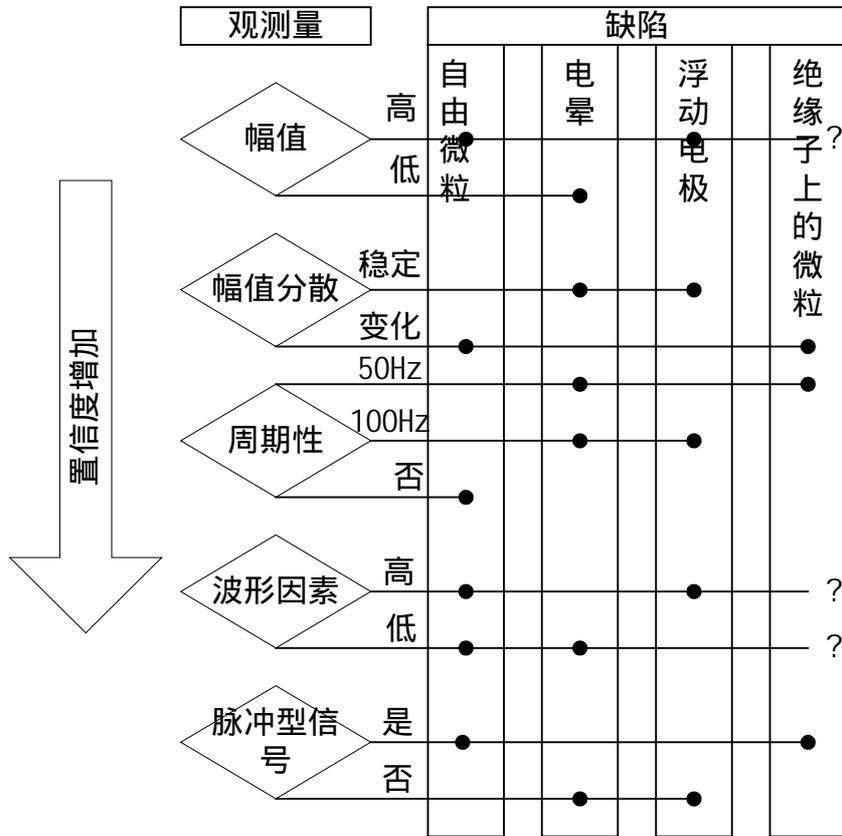


图 4-5 GIS 中缺陷类型的识别标准(基于 AE)
Fig.4-5 Recognition standard of faults in GIS(AE)

4.3 数据分析诊断

局放监测系统的软件数据分析框图如图 4-6 所示，根据实际的数据处理流程，程序可以分解为如下的 5 个层次：

- ◆ 预处理层：对检测数据中的干扰进行抑制，这一层是可选的，可根据不同的需要调整设置；
- ◆ 数据层：提取需要的各种特征参数；
- ◆ 解释层：运用各种解释技术对局放特征参数进行解释；
- ◆ 确证层：通过设备的运行工况、历史检修数据和其它的监测数据进行确证；

- ◆ 信息层：向相关人员提供诊断结果。

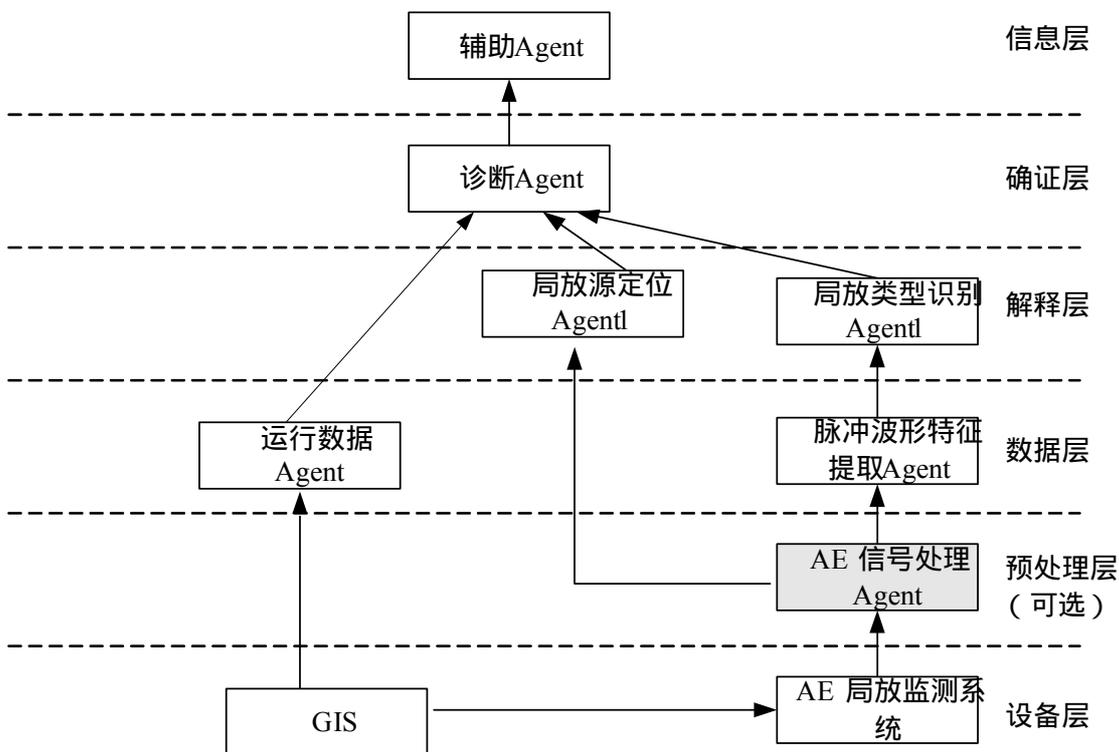


图 4-6 局放检测系统数据分析框图

Fig.4-6 Data analyze diagram of PD detection

整个软件系统用 Multi-Agent 技术构建，其中：

- ◆ 信号处理 Agent：集成有频谱分析和小波分析。
- ◆ 相位分布特征提取 Agent：提取 26 种相位分布特征参数。
- ◆ 脉冲波形特征提取 Agent：提取局放脉冲波形的 12 种特征参数。
- ◆ 局放类型识别 Agent：内置有 ANN 分类器和模糊逻辑分类器组成的混合分类器。
- ◆ 局放源定位 Agent：通过幅值比较法确定局放源的大致位置。
- ◆ 运行数据 Agent：获取 GIS 的运行数据及历史检修记录。
- ◆ 辅助 Agent：给出局放的类型和局放的大致位置，并给出短期和长期的维护建议。

监测系统的其它设置

- ◆ AE 数据以时域 2D 的形式显示。2D 常用的有两种， $\varphi-q$ 和 $\varphi-n$ ，其中， n 为放电次数。2D 形式则便于分析局放的长期发展趋势。

- ◆ 报警：超过阈值时报警，阈值可通过编程修改，出现新的局放时给出警示，局放幅值或增长率较大时报警。
- ◆ 数据存储：每天自动备份数据，存储局放的 2D 数据所有特征参数。
- ◆ 数据库：存储典型放电的指纹、设备的铭牌参数、运行参数、局放的特征图谱及特征参数。
- ◆ 采样设置：采样时间间隔为 30 分钟。AE 检测系统的采样率为 200kS/s。

4.4 软件显示界面

一、监控管理单元主界面

用户通过监控管理单元监测 GIS 绝缘状况、查看数据波形和特征图谱，因此设计一个美观、操作简便的用户界面对监控管理单元是非常重要的。本系统在 Visual Studio 2005 开发环境下，以 Windows Forms 方式开发的监控管理单元主界面如图 6 所示。界面的顶部是菜单与工具条，用户可以通过菜单和工具条执行所用的操作。上方的图表区可以显示采样 GIS 的原始波形。左下角的信息栏中显示采样 GIS 的名称，采样时间，采样序列号，插槽号和采集卡通道号。右下角的状态窗口显示数据采集单元的工作状态。底部的状态栏显示当前监控管理单元和数据采集处理单元之间的网络状态，传输进度，以及系统现在所处的状态。

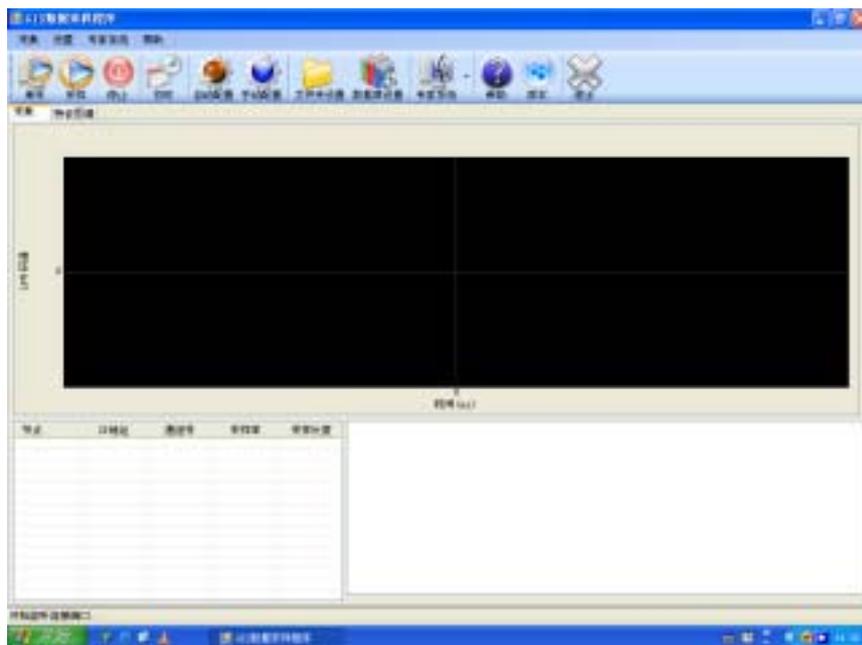


图4-7 监控管理单元主界面

Fig 4-7 The main frame of the administrating and controlling system

二、特征图谱

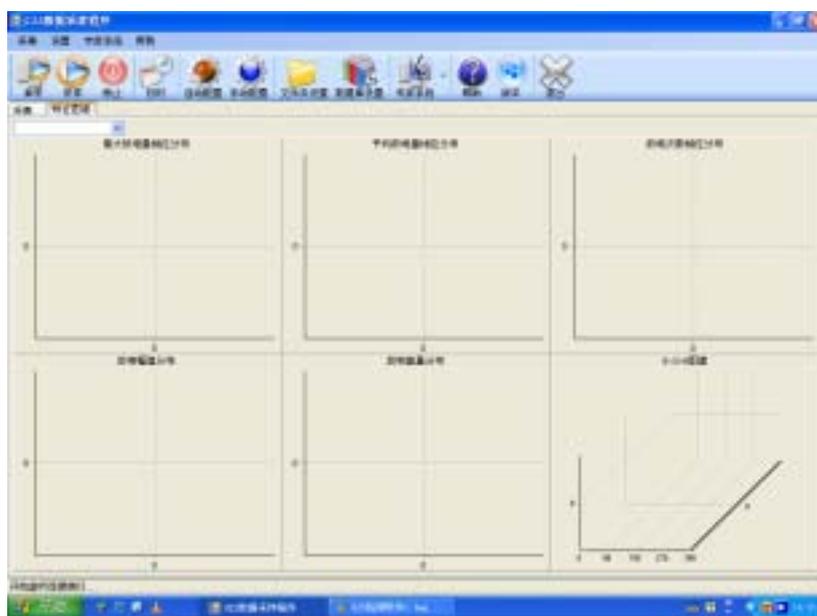


图 4-8 特征图谱

Fig.4-8. Characteristic spectrum

图 4-8 为单个传感器的特征图谱，单传感器的特征图谱显示了该传感器在某一时间段的特征参数的变化情况，选择起始时间与截止时间，可以查看不同时间段的电

缆特征图谱；选择其它的传感器，可以相应查看其余传感器获得的特征图谱；选择全部，或者月均线，周均线来显示数据库中全部，月，周数据表中的特征参数；

第五章 GIS 局部放电试验装置

为了研究 GIS 内不同绝缘缺陷类型局部放电的特征,必须获取大量不同局部放电类型的波形、频谱及放电相位等信号特征,然后进行分析,找出判别的依据。目前用于研究超高频法的有效方法是模拟试验,在 GIS 内人为设置局部放电源,模拟 GIS 中的实际缺陷,借此研究超高频检测系统的性能和局部放电信号的超高频特征。

为了得到尽量真实的有关 GIS 内局部放电的数据,对试验装置有以下的要求:

- 1、试验装置应包含真实的 GIS 模型,模型应有和真实的 GIS 一样的绝缘结构,并有和真实的 GIS 的一样 SF₆ 绝缘环境;
- 2、包含充气装置,以便于经常打开气室设置各种绝缘缺陷模拟各种局部放电;
- 3、有良好的高压试验环境,避免来自电晕放电和电源的干扰;
- 4、具有一套常规局部放电测量系统,以便于进行信号比较和放电量的测量;
- 5、具有一套超高频测量系统,超高频测量结果是在现场条件下希望用来进行放电类型判别和放电量估计的重要数据之一;
- 6、参考电压测量,提供作用电压的波形、相位等信息;
- 7、试验装置应有必要的保护措施,包括高电压保护和 SF₆ 排放,以保证人员及设备的安全。

通过上面的分析,本试验借助实验室已有的一套 GIS 试验模型,并建立了一套 GIS 局部放电测量系统,加上局部放电信号后续处理部分,展开对 GIS 模型内不同局部放电特征的研究。

5.1 GIS 试验模型

装置模型是可抽真空、充 SF₆ 气体、排气、可设置缺陷模型的 GIS 实体。为尽量真实地模拟 GIS 内部各种故障及进行定位故障的研究,采用了正泰有限公司制造的 126kV GIS 实物的一部分作为基本模型,模型的结构是一字型,外腔体为钢质结构,其中包括导电杆、腔体、盆式绝缘子和高压套管等部件,其形状和性能满足各种模

拟绝缘缺陷的实验要求。该 GIS 实物高度约 2500mm，具有四个盘式绝缘子和三个大小不等的气室，最大气室的长度为 900mm，最小气室为实验腔，长度为 550mm，每个气室都安装了自封阀门，可以方便地充气 and 排气。气体测量用的是德国 WIKA 密度计，其最高压力为 0.9MPa，最大输入功率为 30W/50VA。每个气室的侧面都有一个操作手孔，可以人为地设置局部放电缺陷模型。GIS 实体模型如图 5-1 所示。



图 5-1 126kV 三相共体 GIS 实体的照片

Fig. 5-1 the photo of co-integrated nomenclature of three phases GIS

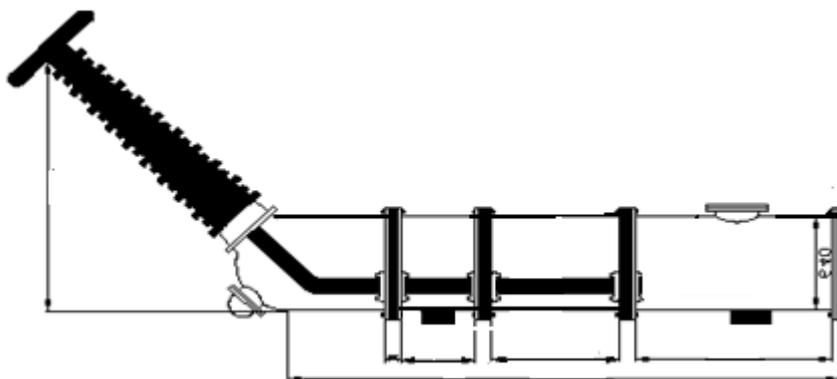


图 5-2 GIS 结构示意图

Fig. 5-2 schematic diagram of GIS structure

5.2 GIS 缺陷模型

◇ 高压导体的金属尖刺造成的放电

该类缺陷是尖对板放电类型，属极不均匀电场，是典型的电晕放电。高压导体上的尖刺长约 5cm，导体直径 0.3mm，距离 GIS 壁为 5cm，图 5-3 所示是针板放电模型。



图 5-3 高压导体上的金属尖刺

Fig.5-3 Metal needle on the high voltage conductor

◇ 高压导体接触不良

采用一个 M10 的螺母悬挂于高压母线上造成高压导体的接触不良，螺母距高压导线大约为 0.5mm，如图 5-4 所示。

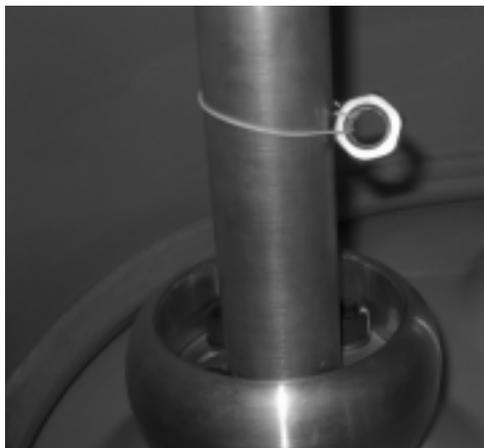


图 5-4 高压导体接触不良

Fig.5-4 Poor contact of high voltage conductor

◇ 地电位接触不良

采用一个 M10 的螺母靠近 GIS 外壁造成地电位接触不良，螺母距 GIS 外壁约为 0.5mm，如图 5-5 所示。



图 5-5 地电位接触不良

Fig.5-5 Poor contact of ground potential

◇ 绝缘子上的固定颗粒

采用两根固定在 GIS 绝缘子上的粗铜丝来模拟绝缘子上的固定颗粒,两根铜丝直径为 2mm,长度为 1cm,两根铜丝之间距离为约 0.5mm。如图 5-6 所示。



图 5-6 绝缘子上的固定颗粒

Fig.5-6 Fix granule on the insulator

◇ 自由金属微粒造成的放电

采用 6~7 根剪断的大头针来模拟自由金属微粒,每根长度约 0.3cm,这些微粒是聚集在一起堆放在盆式绝缘子表面上,靠近 GIS 外壁约 0.5cm,靠近高压导体约 1.5cm,如图 5-7 所示。



图 5-7 自由金属微粒
Fig.5-7 Free metal granule

5.3 高压试验电路

为便于传统脉冲电流法测量局放相对应,实验室同时搭建了一个传统局放测量回路。传统测量局部放电的基本回路有三种:a)测量阻抗与耦合电容器串联回路,b)测量阻抗与试品串联回路,c)平衡法测量回路^[39]。

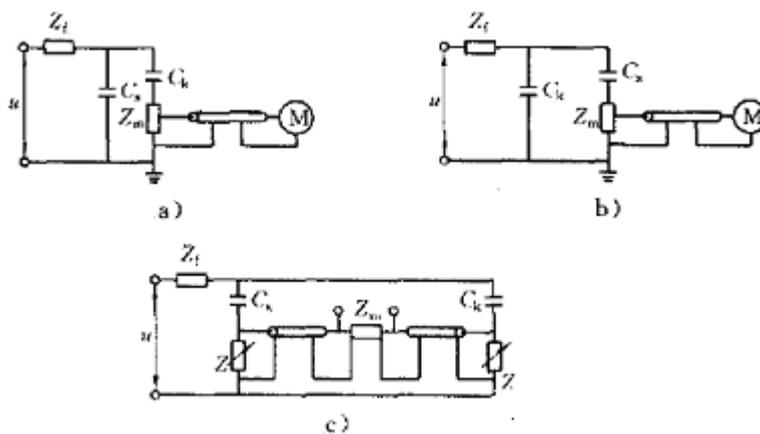


图 5-8 传统局放放电测量基本回路

Fig.5-8 Traditional partial discharge detection circuit

a)测量阻抗与耦合电容器串联回路 b)测量阻抗与试品串联回路 c)平衡回路

三种试验回路一般可按下面基本原则选择：

- 1、试验电压下，试品的工频电容电流超出测量阻抗 Z_m 的允许值，或试品的接地部位固定接地时，可采用图5-8a)所示的试验回路。

- 2、试验电压下，试品的工频电容电流符合测量阻抗 Z_m 允许值时，并且试品接地点可解开时，可采用图4-3b)所示的试验回路。
- 3、试验电压下，图5-8a)、b)所示的试验回路有过高的干扰信号是，可采用图4-3c)所示的试验回路。

由于试品 GIS 的接地部位固定接地，故实验室采用的接法为测量阻抗与耦合电容其串联回路。对于串联电路来说，在进行高压试验的过程中，一旦被试品被击穿，对检测阻抗等测量系统设备没有损坏的危险，相对于并联电路来说，它的灵敏度稍低一些。因为试验中不断的更换绝缘故障类型，被试品在何种电压会被击穿不能够确定，为了确保测量设备的安全采用了串联的测量方法。

图 5-9 所示是模拟试验的高压试验电路，最高试验电压为 164kV。

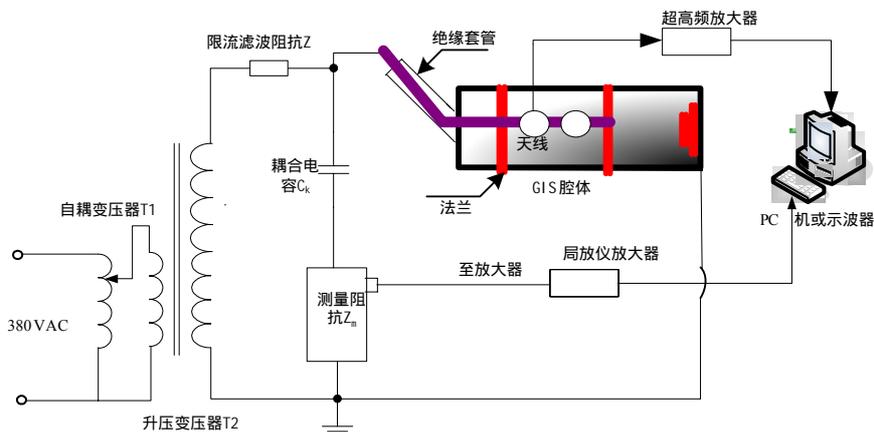


图 5-9 高压试验电路接线图

Fig.5-9 High voltage test circuit wiring diagram

其中：

T1-自耦变压器，额定电压为 220V，额定电流为 60A，输出电压为 0 ~ 250V；

T2-高压试验变压器(无晕变压器)，额定电压为 150/0.22kV，额定电流为 0.1/68.2A；

C_k -耦合电容(低电感电容)，在规定的试验电压下应具有足够低的局放水平(小于 1pC)，以便对规定的局放值进行测量。

Z-保护电阻，阻值为 $10k\Omega$ ，串联在试验变压器的输出端，限制变压器的击穿短路电流；

Z_m -常规局部放电检测阻抗,进行常规局部放电测量,确定局部放电的视在放电量 q ,以便和 UHF 法测得的局部放电信号进行比较。测量阻抗是一个四端网络的元件,它可以是电阻 R 或电感 L 的单一元件,也可以是电阻电容并联或电阻电感并联的 RC 和 RL 电路,也可以有电阻、电感、电容组成 RLC 调谐回路。调谐回路的频率特性应与测量仪器的工作频率相匹配。测量阻抗应具有阻止试验电源频率进入仪器的频率响应。连接测量阻抗和测量仪器中的放大单元的连线,为单屏蔽同轴电缆。

GIS 局放试验系统必须有良好的接地系统,为此在实验室外打了 18 米接地系统,接地电阻为 0.3Ω 。

为了消除电晕放电,所有高压引线均采用了均压处理,拐弯和接头部位安装了均压罩。均压罩的尺寸必须合适,购买的升压变压器和耦合电容均压罩尺寸过小,造成电晕放电严重,空载的情况下局放水平达到 $2pC$,加大均压罩的尺寸后,局放降到 $1pC$ 以下。为防止试验现场附近可能存在的浮电位体放电对试验造成的干扰,对试验场地周围的金属设备进行了接地处理。试验中电源的高频干扰十分严重,为此在电源输入端增加了 3 阶 $5K$ 低通滤波器,对电源高频干扰起到了显著的抑制作用。

5.4 传统局部放电测量系统

在局部放电检测中,脉冲电流法是研究最早、应用最广泛的一种局部放电检测方法,其检测原理是^[24]:局部放电产生电荷的转移,该移动电荷在外围测量回路产生脉冲电流,通过检测脉冲电流便可实现对局部放电的检测。脉冲电流法一般是检测脉冲电流信号的低频部分,通常为数 KHz 至数百 KHz 。

为获得 UHF 法检测的局部放电脉冲幅值所对应的视在放电量,需要在模拟试验中需建立常规的局部放电测量系统。为此实验室自制一套数字局放仪。数字局放仪框图如图 5-10 所示:

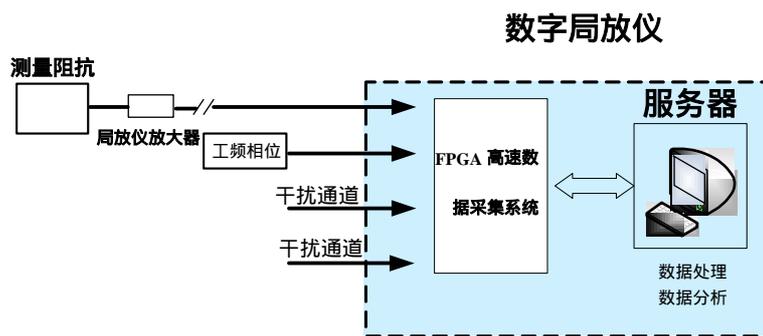


图 5-10 数字局放仪

Fig.5-10 Digital partial discharge detector

数字局放仪由测量阻抗、局放仪放大器、FPGA 数据采集卡、服务器组成（工频相位由局放仪放大器内的变压器提供）。

性能指标：

1、时间窗

时间窗是为防止大于局部放电的干扰信号进入峰值检波电路而设计的一种电路装置。因在实际试验时，尤其是在现场做试验时，不可避免地会引入一些干扰，所以，时间窗的使用更显得重要。

时间窗的工作原理是把椭圆扫描时基分成导通(加亮区域)和截止(未加亮区域)两部分,通过改变时间窗的位置和宽度将放电脉冲置于导通(加亮区域),干扰脉冲置于截止(未加亮区域),此时仪表读数即为放电脉冲数值,而干扰则不论大小,皆不会影响放电脉冲数值。若此时两个时间窗同时关闭,则仪表读数为整个椭圆上脉冲之峰值。

任意相位开窗,单窗、双窗任选,360度内自由开窗

2、椭圆扫描时基

- (1)频率：50、100、150、200、400Hz。
- (2)旋转：以 30 度为一档，可旋转 120 度。
- (3)高频时基椭圆的输入电压范围：13 ~ 275 V。

3、显示方式：

自由选择椭圆、直线、正弦，并具有放大显示功能。

4、放大器

(1)3dB 低频端频 f_L : 10kHz , 20kHz , 40kHz , 80kHz, OFF (9kHz) 任选。

(2)3dB 高频端频率 f_H : 100kHz , 200kHz , 300kHz , 400kHz , OFF (1MHz) 任选。

5、增益

(1)增益调节 : $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$, $\times 1000$

(2)细调范围 : > 10 倍。

6、脉冲峰值显示

线性指示 : 放电电压与放电量 4 位数字显示 (自动调整显示输出)

可同时测量放电电压 (μV) 和放电量 (pC)

7、放电重复率 n

定义 : 在选定的时间间隔内所记录到的局放脉冲的总数与该时间间隔的比值。

在面板上会有量程选择 : 分 2×10^3 Hz 与 2×10^4 两档。

8、输入阻抗: 50

9、测量通道 : 5 通道 (2 参考通道、1 局放信号输入通道、参考相位通道、工频电压通道 (侧高压值))。

10、 检测灵敏度 : 0.1pC

11、 采样精度 : 12Bit

12、 采样速率 : 25MHz

13、 测量范围 : 0.1pC ~ 10000nC

14、 测量频带 : 3dB 带宽 9kHz ~ 1MHz

15、 宽带前置放大器 : 频率范围 20kHz ~ 300kHz

16、 可测量量 : 视在放电量 q 、放电重复率 n 、平均放电电流 I 、平方率 D

17、 保存功能和打印功能

自动定时保存试验数据和波形 ;

手动随时保存或打印试验数据和波形 ;

可重新显示、分析过去已保存的试验记录 ;

(1)单独保存或打印椭圆画面功能。

(2)单独保存打印或显示数据功能。

(3)保存整个显示或显示画面（包括了椭圆和显示数据）。

采用常规局部放电测量时，要对放电量进行标定。利用方波发生器把电荷注入试品 C_x 的两端，通过局部放电检测仪观测脉冲信号的幅值，并把局部放电检测仪放大输出信号输入到示波器进行观测得到对应的电压幅值。

第六章 总结与展望

本文研究基于超声的 GIS 局部放电检测系统，主要工作内容小结如下：

- 1、介绍了 GIS 中局部放电的产生机理，对 GIS 中局部放电检测的研究现状进行了综述；
- 2、提出了基于超声的 GIS 局部放电检测系统的整体方案；
- 3、设计并实现了基于超声的 GIS 局部放电检测系统的硬件部分，具体包括超声传感器的选择、前置放大器的制作和超声数据采集系统的开发等。并完成了硬件系统的调试工作；
- 4、设计了基于超声的 GIS 局部放电检测系统的软件部分，具体包括软件的整体框架结构、超声数据的处理流程、超声数据的诊断规则和超声数据的显示模式等；
- 5、构建了实验室 GIS 局部放电测量系统，具体包括 GIS 模型的设计、局部放电模型的设置和常规局部放电测量设备的选取等。

基于超声的局部放电检测系统的研制是一项复杂的工作，文中虽然取得了一定的进展，但是还存在诸多的问题有待进一步研究解决：

- 1、文中只给出了软件系统的架构，如何去具体实现还需要后续大量的工作；
- 2、在局部放电测量的现场，外部环境复杂，存在大量的干扰，如何有效地抑制外部干扰，正确地分析局部放电数据将是今后面临的一个巨大的挑战；
- 3、GIS 中绝缘缺陷的类型很多，相应的局部放电信号的特征呈现出各种不同的形态，如何在实验室里构建出各种合理的局部放电模型，还需要接下来不断的努力；
- 4、从实验室试验到现场应用中间有一个很长的过程，需要对超声测试系统进行反复地测试、分析、总结和改进。

参考文献

- [1] 邱毓昌, GIS 装置及其绝缘技术. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [2] 苑舜, 高压开关设备状态监测与诊断技术. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] Anon, Partial discharge testing of gas insulated substations. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992. 7(3): 499-506.
- [4] 钱勇, GIS 中局部放电在线监测现状及发展. 高压电器, 2004. 40(6): 453-457.
- [5] Pearson, J.S, Partial discharge diagnostics for gas insulated substations. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995. 2(5): 893-905.
- [6] 成永红, 李伟, 谢恒堃, 超宽频带局部放电传感器的研究[J]. 高电压技术, 1998. 3: 9-11.
- [7] Schei, A., S. Kyrkjeide, V. Larsen. Acoustic insulation analyzer for periodic condition assessment of Gas Insulated Substations. 2002.
- [8] Hoshino, T., T. Hoshino, Kato, A novel technique for detecting electromagnetic wave caused by partial discharge in GIS. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001. 16(4): 545-551.
- [9] V., A., Toyada, M., Kobayashi, A, Operative physico-chemical diagnostics of SF6, in IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 2000, ISEI.
- [10] Kawada M., T. A., K. Z, Detection of wide-band E-M signals emitted from partial discharge occurring in GIS using wavelet transform. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000. 15(2): 467-471.
- [11] Kawada, M., Ultra wide band VHF/UHF radio interferometer system for detecting partial discharge source, in IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2002.
- [12] Judd M., D., O. Farish, Using Finite Difference Time Domain Techniques to Model Electrical Discharge Phenomena, in Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2000.
- [13] Paoletti, G., G. Paoletti, A. Golubev. Partial discharge theory and applications to electrical systems
Partial discharge theory and applications to electrical systems. in Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1999. Conference Record of 1999 Annual. 1999.
- [14] 黄兴泉, 郭琳, 李成榕, 基于 X 射线激励下的局部放电定位. 华北电力大学学报, 1999. 26(4): 1-5.
- [15] 秦文明, 变压器内部局部放电声发射模拟研究. 辽宁电机工程学报, 1996(1): 1-8.
- [16] 孙才新, 赵文麒, 变压器局部放电源的电-声和声-声定位法及其评判的研究. 电工技术学报, 1997. 12(5): 49-52, 60.
- [17] T. Boczar, Identification of specific type of PD from acoustic emission frequency spectra. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001. 8(4): 598-606.
- [18] T. Sakoda, T. Arita, Studies of elastic waves caused by corona discharge in oil. IEEE

- transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999. 6(6): 825-830.
- [19] Chai, M.L., M.L. Chai, Y.H.M. Thayoob, et al. Identification of Different Types of Partial Discharge Sources from Acoustic Emission Signals in the Time-Frequency Representation
Identification of Different Types of Partial Discharge Sources from Acoustic Emission Signals in the Time-Frequency Representation. in Power and Energy Conference, 2006. PECon '06. IEEE International. 2006.
- [20] Baumgartner, R.,e. al, Partial discharge--X: PD in gas-insulated substations--Measurement and practical considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992. 8(1): 16-27.
- [21] 肖燕, GIS 局部放电下监测和故障诊断技术的研究[学位论文]. 上海:上海交通大学, 2006.
- [22] 高树香,陈宗柱, 气体导电(上). 南京: 南京工学院出版社, 1988.
- [23] Cacciari, M., M. Cacciari, A. Contin, et al., An approach to partial-discharge investigation by height-distribution analysis
An approach to partial-discharge investigation by height-distribution analysis. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -, 1995. 142(1): 102-108.
- [24] 徐永禧,胡维新, 高压电气设备局部放电. 北京: 水利水电出版社, 1984.
- [25] 李燕青, 超声波法检测电力变压器局部放电的研究[学位论文]. 北京:华北电力大学, 2003.
- [26] 杜功焕, 朱哲民,龚秀芬, 声学基础: 南京南京大学出版社, 2001.
- [27] Kaindl, A., A. Kaindl, S. Nowak, et al. Practical application of partial discharge measurements at epoxy impregnated coils for analyzing signal noise in the radio frequency range
Practical application of partial discharge measurements at epoxy impregnated coils for analyzing signal noise in the radio frequency range. in Electrical Insulation, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on. 2000.
- [28] Ahmed, F., A.B. Darus, Z. Yusoff, et al. Characterisation of acoustic signal and pattern recognition of free moving metallic particle motion modes in GIS. 1997.
- [29] Lundgaard, L.E., M. Runde,B. Skyberg, Acoustic diagnosis of gas insulated substations: a theoretical and experimental basis. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1990. 5(4): 1751-1759.
- [30] Lundgaard, L.E., Partial discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 1992. 8(4): 25-31.
- [31] Oyama, M., M. Oyama, E. Hanai, et al., Development of detection and diagnostic techniques for partial discharges in GIS
Development of detection and diagnostic techniques for partial discharges in GIS. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1994. 9(2): 811-818.
- [32] Boczar, T.,D. Zmarzly, Analysis of the acoustic emission pulses generated by partial electrical discharges. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2003. 45(7): 488-492.
- [33] Haque, M.E., A.B. Darus, M.M. Yaacob, et al. Diagnosis of GIS based on acoustic sensing technique. 1997.

- [34] Haque, M.E., A.B. Darus, M.M. Yaacob, et al. Application of acoustic sensing and signal processing for PD detection in GIS. Singapore, Singapore. 1997.
- [35] Jones, S.L. The detection of partial discharges in power transformers using computer aided acoustic emission techniques. 1990.
- [36] Lundgaard, L.E., Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 1992. 8(5): 34-43.
- [37] IEEE Trial-Use Guide for the Detection of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers. IEEE Std C57.127-2000, 2000.
- [38] 罗勇芬, 孟凡凤, 李彦明, 局部放电超声波信号的检测及预处理. 西安交通大学学报, 2006. 40(8): 964-968.
- [39] GB/T7354-2003, 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会, Editor. 2003.

致谢

首先,感谢我的导师曾奕教授。曾老师严谨认真的治学态度对我影响颇深。每当我遇到难题,郁老师总是高屋建瓴地给我点拨,使我受益匪浅。在整个论文的撰写过程中,曾老师都给予了细心的指导。另外他严以律己,宽以待人,以身作则,风范,更是对我的一生都有指导意义。在此,我向他致以深深的敬意和衷心的感谢。

其次,我也同样感谢副导师黄成军教授。黄老师对我的整个论文工作也做了悉心的指导和亲切的关怀。从论文的选题到最后的完成过程,处处凝结着导师们的心血和智慧。他每次对我论文进行指导,都使我有豁然开朗的感觉。黄老师热忱的工作态度、为学生着想的精神以及渊博的知识给我留下了深刻的印象。

另外,在我两年半的生活学习期间,钱勇老师给予了我很大的帮助。学习上,我遇到问题,钱老师耐心帮忙解答,从不厌烦。生活上,遇到了困难,钱老师帮我出谋划策,给了我无微不至的关怀。

并且,在学习期间,我经常与GIS项目段大鹏博士、刘君华博士、郭灿新博士、姚林鹏博士一起探讨问题,学到了很多知识,开阔了视野,得到很多收获和借鉴。王江、罗林根、罗雨声和王友佳给了我很多支持,在此一并致以真诚的谢意!

最后,感谢我的家人和许多亲友多年来对我的关心和鼓励,在漫长的求学生涯中,他们始终在精神和物质上给予我莫大的支持,正是他们诚挚的爱,才使我的学业能够得以顺利完成。

攻读硕士学位期间已发表的学术论文

- (1) 陈宏福, 黄成军, 钱勇等. 发电机局部放电评估方法. 高电压技术, 2007,33(8):155-159

作者: [陈宏福](#)
学位授予单位: [上海交通大学](#)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [谢红玲](#) [基于小波理论的局部放电超声波信号分析](#) -[电力情报](#)2002(1)
变压器局部放电超声波信号在变压器内部中传播复杂,探头所接受到的超声波信号是一种时频有限的非平稳信号,所以运用小波分析处理超声波信号十分有效.通过实验得到处理超声波信号最合适的小波,同时给出合适的小波参数,最后对实际得到的超声波信号进行处理,结果表明利用小波分析处理超声波信号效果令人满意.
2. 期刊论文 [王国辉](#) [利用超声波局部放电原理测试变压器性能技术的应用](#) -[科技信息](#)2009(8)
依据超声波测量变压器局部放电的机理.结合目前国内设备容量、电压等级不断增大的情况,本文阐述了超声波局部放电测试技术的必要性及应用情况.
3. 会议论文 [杨承河](#).[汪泉弟](#).[杨永明](#).[魏欣](#) [LabVIEW在局部放电中超声波仿真的应用](#) 2008
电气设备在电力系统中的安全运行,绝缘状态至关重要.局部放电是电气设备绝缘劣化的重要原因,也是反映电力设备绝缘状况的重要征兆.对运行中的电气设备的绝缘状态实施监测最有效的方法是实时提取使绝缘损坏的局部放电信号.但实时监测的难题是如何消除现场的各种噪声的干扰,提取出我们需要的放电信号.本文采用虚拟仪器技术构建电气设备局部放电产生的信号,通过LabVIEW调用MATLAB应用程序实现小波分析的方法.重点研究和分析了局部放电信号处理,利用小波技术从噪声中提取出局部放电信号,从而达到对绝缘劣化的程度进行判断.
4. 期刊论文 [陈志勇](#).[阎春雨](#).[陈志敏](#).[谢津波](#) [变压器超声波局部放电测试在电网的应用](#) -[河北电力技术](#)2004, 23(3)
阐述了超声波测量变压器局部放电的机理,介绍了在目前国内设备容量、电压等级不断增大的情况下,超声波局部放电测试技术的必要性及应用情况.
5. 期刊论文 [何健康](#).[杨景岗](#).[黎大健](#).[梁永春](#).[HE Jian-kang](#).[YANG Jing-gang](#).[LI Da-jian](#).[LIANG Yong-chun](#) [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)
介绍了运行中GIS局部放电检测所常用的两种方法:超高频和超声波法.对两种方法的检测原理、使用范围、抗干扰能力等各自的优缺点进行了阐述.联合使用两种方法同时对运行中的GIS进行了局部放电的现场检测,对现场使用中需要注意的问题及联合检测的优越性进行了论述.对使用超高频-超声波联合诊断的结果判别方法进行了说明.
6. 会议论文 [杨圆](#).[李成榕](#).[郑书生](#) [GIS局部放电超声波信号特征的试验研究](#) 2007
GIS局部放电检测是诊断GIS绝缘故障的有效方法.本文利用超声波法对GIS中的各种典型局部放电进行了研究.建立了GIS局部放电模拟测试系统,包括局部放电模拟系统、超声波测量系统和常规局部放电测量系统.着重模拟研究了四种典型的局部放电信号,包括GIS内金属颗粒群、高电位接触不良、地电位接触不良、高压尖刺.并在试验基础上统计、分析不同类型局部放电的超声波信号和特高频信号发生发展规律,得出信号统计谱图.包括: N-Φ谱图和U_{max}-Φ谱图.试验结果表明低频超声波传感器可以监测到这四种局部放电信号,信号统计谱图显示不同模型的超声波信号表现出了不同特征,这些研究结果为实现局部放电的模式识别提供了试验数据.
7. 期刊论文 [顾文业](#).[王志敏](#).[顾晓安](#) [应用超声波测量法判断变压器内部局部放电的研究](#) -[噪声与振动控制](#)2003, 23(2)
介绍了国外应用超声波测量法判断变压器内部局部放电和确定局部放电电源位置的研究工作.
8. 期刊论文 [张江](#).[李朝晖](#).[王宏](#).[ZHANG Jiang](#).[LI Zhao-hui](#).[WANG Hong](#) [基于超声波法的变压器局部放电监测系统的设计](#) -[湖北电力](#) 2006, 30(1)
应用超声波法对主变压器局部放电进行监测,根据变压器绝缘结构,确定传感器布置方式,对数据进行频谱分析,并对放电电源进行定位.
9. 学位论文 [李燕青](#) [超声波法检测电力变压器局部放电的研究](#) 2003
该系统地研究了超声波法检测变压器局部放电的基础理论以及实际应用的关键技术,得到了典型放电模型的真实放电量估计方法;建立了局部放电产生超声波的等效电路;研究了超声波在变压器内部的传播规律;提出了一种基于广义互相关函数的变压器局部放电定位方法;采用了非线性方法对超声波信号进行了特征提取,利用神经网络实现了基于超声波信号的局部放电模式识别;提出一种利用超声波法估计变压器局部放电真实放电量的方法;研制了一套基于超声波法的变压器局部放电测量系统.
10. 期刊论文 [罗勇芬](#).[孟凡凤](#).[李彦明](#).[Luo Yongfen](#).[Meng Fanfeng](#).[Li Yanming](#) [局部放电超声波信号的检测及预处理](#) -[西安交通大学学报](#) 2006, 40(8)
研制了局部放电超声波检测系统,并对局部放电模型的放电特性进行了研究.比较了电荷放大器和电压放大器对局部放电超声波接收,设计了十阶高通、六阶低通滤波器构成的101~273 kHz带通滤波器,对经硬件滤波后的采集信号进行了小波包分解与重构.研究表明:电荷放大器比电压放大器能更好地接收小电容值的压电传感器耦合的超声波信号;带通滤波器能有效地抑制背景噪声和工频干扰;对小波包分解后的低频重构信号设定特征量及其容限,在小波包重构时能分离出电磁波.对超声波信号采用这种软硬件结合的预处理措施能达到满意的抑制各种噪声和干扰的效果.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_D057805.aspx

下载时间: 2010年4月9日