

武汉理工大学

---

硕士学位论文

---

高电压线路绝缘子在线检测仪研究

---

姓名：汪奕

---

申请学位级别：硕士

---

专业：控制理论与控制工程

---

指导教师：李中年

---

20070501

## 摘 要

随着国民经济的迅速发展，电力系统的输电线路范围越来越大，而输电线路中的绝缘子长期处于复杂恶劣的自然环境中，并且绝缘子本身的质量问题都极易引发污秽闪络。为了预防闪络，实现绝缘子的在线检测，提高绝缘子污秽闪络的预警能力，使输电线路由计划检修向状态检修转变，是目前输电线路安全运行需迫切解决的问题。

在查阅了大量国内外相关文献并分析比较了各种检测方法的特点后，主要提供了基于声发射技术的绝缘子污秽放电检测方法。文中，通过分析绝缘子污秽放电过程以及伴随放电出现的声发射现象，研究了污秽放电发展过程中声信号的特点，揭示出污秽放电的严重程度和声信号之间存在的关系，从而论述了通过监测绝缘子污秽放电发出的声信号可以实现对绝缘子污秽的在线监测。

文中，为了能够捕捉污秽放电产生的声信号，设计了具有较高灵敏度的聚焦声传感器及试验用数据采集电路，聚焦声传感器是将压电传感器和聚焦抛物面组合在一起，可以接收到较远处放电产生的微弱声信号。在绝缘子的模拟试验中采集了不同污秽度和不同电压下绝缘子污秽放电的声发射信号，对比不同程度的污秽放电声发射信号的幅值，反映了随着污秽放电的增强，声信号幅值增大并且连续性更强。

为了实现所提出的声学检测法，文中设计了一套监测装置用于将聚焦声传感器输出的信号数据进行处理，同时考虑了其工作状态下可能出现的干扰因素并提供了相应的硬件抗干扰措施和软件抗干扰措施，使整个系统的数据采集更加准确有效。

通过对模糊推理的深入研究以及对高电压线路绝缘子污秽放电特点的细致分析，发现模糊推理的方法对绝缘子污秽试验数据分析和处理十分有效，通过声信号可以定量地判断出此时距离发生污闪的裕度大小，这说明文中提供的声学检测法不仅能够用来对绝缘子进行在线检测，而且还能正确判断绝缘子污秽程度。

**关键词：**绝缘子，声发射，在线监测，模糊控制

## ABSTRACT

With the fact that the national economy promptness develops, the electric system transmission line voltage grade improves also quickly, insulators in the transmission lines were located in very bad complicated natural environment for long time, so contamination flashover is always aroused. To guarding against contamination flashover, performing the real-time monitor of insulator is a crucial task to solve the safety of transmitting electricity wires. It could heighten the level of preventing contamination flashover, and enable the overhaul of insulators to changing from scheme to state overhaul.

After referring to a great deal of domestic and overseas literature and analyzing all kinds of the characteristic of detecting ways, we offer the detecting way of polluted insulator flashover based on acoustic emission technique. By analyzing the discharge process of polluted insulator and concomitant acoustic emission phenomenon, the characteristics of acoustic signal are studied, and the relationship between discharge and acoustic signal is revealed in this paper. A new method of insulator discharge monitoring based on the acoustic emission technique is put forward.

In order to catch the acoustic signal produced by contaminant discharge, a focused acoustic sensor with high sensitivity and data collecting circuit are designed. The focused acoustic sensor combined by discharge at a distance. The acoustic emission signal under different contamination level and different voltage grade are collected in the insulator's artificial pollution test by using this set of equipment. By comparing the acoustic emission signal during different phase of contaminant discharge, it proved that the amplitude and continuity of acoustic signal increase along with the boost up of contaminant discharge.

In order to make the detecting way come true, we design a kind of detecting instrument to change the analog signal of the focused acoustic sensor to the digital signal, and transfer the result to the monitor centre. Meanwhile, we think of the disturb factors and suggest interference protection measure. We offer the corresponding hardware and software anti-jamming measure to make data collection more exact.

At last, the data obtained in the experiments are analyzed using fuzzy mathematics tools, and results prove that the capacitance between discharge and flashover can be calculated by the acoustic signal and fuzzy discursion is very effectual. It indicated that we offered the detecting way not only being able to be used to carry out online detecting on the insulator, but also making correct judgement to the contamination level of insulator.

**Key Words:** insulator, acoustic emission, on-line monitoring, fuzzy control

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究的背景及意义

曝露于大气中的高压绝缘子，在其运行过程中长期工作在强电场、强机械应力、冷热骤变、日晒雨淋等恶劣环境中，绝缘子出现故障的机率很大，可能出现绝缘电阻降低、开裂甚至击穿等故障，对供电可靠性带来潜在威胁，严重威胁电力系统的安全运行。因此，绝缘子在线检测意义重大<sup>[1]</sup>。

线路绝缘子因其安装位置的特殊性以及分布区域的广泛性，一直都是在在线检测的一个难点。一般来说绝缘子故障主要有以下几个方面：绝缘子内部出现裂隙、绝缘子表面破损、绝缘阻抗降低、污闪等，绝缘子的种类繁多，出现故障时呈现的现象也不同。相应的高压绝缘子在线检测方法也多种多样。经过多年的研究，国内外一直在寻找有效的解决方法，至今已有以超声波检测法、激光多普勒振动法及红外热像仪法为代表的非电量测量法和以电压分布检测法、绝缘电阻法及脉冲电流法为代表的电量测量法，被尝试用于有效解决绝缘子在线检测的难题<sup>[2]</sup>。

#### 1.1.1 污闪的危害

高压电网运行故障多半是由于绝缘不良引起的，而高压电网绝缘子是高压电网绝缘的薄弱环节。绝缘子在运行中发生故障的类型很多。对电力系统影响较大，且比较频繁的事故是在运行电压下输变电设备绝缘子的污秽闪络事故，也叫污闪。污闪是由于绝缘子表面的污湿状态达到一定程度，致使绝缘子表面泄漏电流过大，导致线路闪络的，是发生在高压线路和变电站的一种常见故障<sup>[4]</sup>。

随着工业的发展，电网容量的增大和额定电压等级的升高，电力系统输变电设备外绝缘的污闪事故日益突出。

随着环境污染的加剧、电力系统规模的不断扩大以及对供电可靠性的要求越来越高，防止污闪事故的发生已经成为十分重要的课题。

我国跨省市的大面积污闪，引起了电力部门的高度重视，相关部门投入了大

量人力、物力解决输变电设备的污闪问题，绝缘子工况的诊断技术也因此得到发展。在线监测将愈来愈成为预防性试验中的一个重要组成部分，它将在很多方面弥补仅靠定期停电预试的不足。近年来，国内外由于绝缘原因引起的电力系统大规模停电事故充分证明了在线监测的重要性。

在电力系统中，绝缘子是将电位不同的导体在机械上相互连接的重要部件，其性能的优劣对整个输电系统的安全运行起着非常关键的作用。尤其是在户外运行的绝缘子，除了应具有一定的电气绝缘性能和一定强度的机械性能之外，还应具备耐受自然环境和污染等的侵袭以保证安全供电的条件。绝缘子由绝缘体和金属附件构成。绝缘子按用途一般可分为线路绝缘子、变电站支持绝缘子和套管三大类。依绝缘子的材料分，目前有瓷、玻璃和有机复合绝缘子<sup>[5]</sup>。

绝缘子在运行中发生故障的类型很多。当前，对电力系统影响较大，且比较频繁的事故是在运行电压下输变电设备绝缘子的污秽闪络事故；变电站户外高压套管和绝缘子的污闪事故以及线路悬式绝缘子的“零值”所引起的高压导线落地事故。常说的绝缘污秽放电是指输变电设备在工作电压下的污秽外绝缘闪络。这种闪络，不是由于作用电压的升高，而是由于绝缘子表面绝缘能力降低引起的结果。污闪有独特的放电机理，它与绝缘子表面积污、表面污层湿润以及绝缘子本身耐污特性诸因素有关。

### 1.1.2 课题研究的目的及意义

安装在输电线路上的高压绝缘子在运行过程中因长期经受机电负荷、日晒雨淋、冷热变化等作用，可能出现绝缘电阻降低、开裂甚至击穿等故障，对供电可靠性带来潜在威胁。因此，绝缘子在线检测意义重大。据统计国内 110kV 线路发生不明原因闪络所占的比例为故障率的 22%，造成很大的经济损失<sup>[6]</sup>。因此绝缘子出现故障的机率很大，严重威胁电力系统的安全运行。

高压直流输电由于具有线路造价低、无交流输电方式的同步运行稳定性问题、短路电流易控制、调节速度快、运行可靠、无电容充电电流及节省线路走廊等优势，在电力输送中取得了快速的发展，随之带来的线路可靠性问题也得到了广泛关注，根据相关研究结果，在相似的地理环境下，直流输电线路中绝缘子的金属端头的腐蚀、污秽程度都比交流输电线路中的严重，绝缘子的损坏率也更高。金属端头的腐蚀、污秽是绝缘子损坏的主要原因，而且由于极性效

应，直流输电线路中的瓷绝缘子还存在离子迁移引起绝缘子电气及机械性能的下降、老化问题。直流输电线路的绝缘子年老化、损坏率一般为 $10^{-4}$ 数量级，而交流输电线路绝缘子的年老化、损坏率为 $10^{-5}$ 数量级<sup>[7]</sup>。

## 1.2 相关技术研究动态与现状

线路绝缘子的在线检测因其安装位置的特殊及分布区域广泛性向来是绝缘在线监测的一个难点。一般来说绝缘子故障主要有以下几个方面：绝缘子内部出现裂隙、绝缘子表面破损、绝缘阻抗降低、污闪等，绝缘子种类不同，出现故障时所呈现的现象也不同。如绝缘子串中存在不良绝缘子时，不良半导体釉绝缘子温度变化可能较大，而玻璃绝缘子和普通釉绝缘子的温度变化较小。相应的高压绝缘子在线检测方法也多种多样，绝缘子分布的广泛性和安装点的特殊性更增加了绝缘子检测的难度。变电所高压设备绝缘状况在线监测技术在国内已有多年的研究与应用，并在保证电力系统安全供电，减少因设备绝缘状况引发事故方面取得了明显的成效。目前国内外已经出现了很多高压绝缘子在线检测方法。并取得了一定的效果，但不少方法存在着测量工作量大、危险性高、设备造价高、测量不准确、抗干扰能力差等问题。因此寻找一种经济、切实有效的高压绝缘子在线检测方法一直是国内外电力部门十分关注的问题。至今已有以超声波检测法、激光多普勒振动法及红外热象仪法为代表的非电量测量法和以电压分布检测法、绝缘电阻法及脉冲电流法为典型的电量测量法被尝试用于解决绝缘子在线检测问题<sup>[8]</sup>。

### 1. 非电量检测法

激光多普勒振动法利用已开裂的绝缘子的振动中心频率与正常时不同的特点，通过外力如敲击铁塔或将超声波发生器所产生的超声波用抛物型反射镜对准被测绝缘子或用激光源对准被测绝缘子以激起绝缘子的微小振动，然后将激光多普勒仪发出的激光对准被测绝缘子，根据对反射回来的信号的频谱的分析从而获得该绝缘子的振动中心频率值，据此判定该绝缘子的好坏。

超声波检测法是基于当超声在从一种介质进入到另一种介质的传播过程中会在两介质的交界面发生反射、折射和模式变换(纵、横波转换)的原理实现的。通过接收超声波发生器(称为换能器)发出的脉冲超声波在进入绝缘子介质和穿

出绝缘子介质时的反射波来限定绝缘子的位置区间。当绝缘子出现“开裂”时,则在接收到的反射波的时间轴上将出现该缺陷的反射波,由时间轴上的该缺陷波的大小及位置,即可判断出缺陷的绝缘子中的具体情况。

超声波检测法和激光多普勒振动仪法可准确检出开裂绝缘子,对于具有“零值自爆”的特性的玻璃绝缘子的在线检测确有高效。日本在这一领域研究较多,也取得了一定的进展;但超声波检测法存在的耦合和衰减及超声波换能器的性能问题在远距离遥测上目前未有大的突破,尚处于摸索阶段,该类设备目前主要用于企业生产的在线检测及实验室检定用途。激光多普勒振动仪体积庞大、笨重、使用及维修复杂、造价高等缺点及两种检测法对未开裂的劣值绝缘子检测无效的问题,限制了这两种检测法的适用范围。

利用绝缘子表面的热效应原理进行在线检测的红外热象仪法对于涂有半导体釉的防污绝缘子的遥测相当有效。因为此类绝缘子在线带电运行时,正常绝缘子的表面电流较大、温升较高,而劣质绝缘子的表面温度要比正常绝缘子低好几度,用红外热象仪易于识别;但对于玻璃绝缘子或普通釉的瓷绝缘子,其正常表面温度比劣值表面温度仅相差 $1^{\circ}\text{C}$ 左右,在复杂的现场环境下,测量极其困难,而红外热象仪高昂的造价亦令众多用户对其性能价格比难以接受。基于此,下面我们将重点讨论电量法绝缘子在线检测技术。

## 2. 电量检测法

(1) 电压分布检测法:电压分布检测是一种传统的绝缘在线检测方法。近年来随着传感器技术的发展,该法也被赋予了新的内容。基于泡克尔斯(Pockels)效应的光纤电压(场强)传感器能在基本上不改变绝缘子串电场强度分布的情况下准确测定各绝缘子的电压分布情况,克服了短路叉法、火花间隙法测量准确度低、读数分散性大的缺点,同时也消除了静电电压表法测量改变绝缘子串电压分布的不足。在信号处理方面,目前普通采用将测量结果经电光转换后通过绝缘杆内的光纤传输到低压端再转换成电信号读数或直接将测量结果转换成音频信号报出的方法。至于劣质绝缘子的判定,目前众多的理论研究及实验均已证明:正常绝缘子串电压分布呈不完全马鞍型,即在每串绝缘子靠近导线侧的绝缘子承受电压最高,约为靠近接地端绝缘子承受电压的 $1.7-3.0$ 倍,而以中间部分承受电压最低;但两相邻绝缘子之间承受电压之比则大致在 $1.1-1.3$ 之间,因此,用相邻比较法即能较好地判断出低劣值绝缘子。国内目前一般以相邻绝缘

子电压比低于 50%作为劣质绝缘子的判断标准,或采用纵向比较法即与该绝缘子串上次所测电压分布相比较的方法判别劣质绝缘子。

电压分布检测的特点在于直观、能准确的判断绝缘子性能的变化。光学测量方法消除了以前测量方法的准确度不高、读数困难等缺点,虽然已研制出自爬式绝缘子检测仪,相对减轻了现场操作人员的劳动强度,但每次测量必须登高才能完成,操作人员的劳动强度依然较大、工作安全性较差的缺点仍然令这种方法难以得到广泛应用。如何解决好这一问题将是该法今后应用研究的主要课题。

(2) 绝缘电阻法: 绝缘子在线检测中,绝缘电阻的测量是通过泄漏电流的测量得以实现的。

众所周知, 高电压输电线路绝缘子一般都采用结构简单、机械强度高、老化率低、串接成串后可在任意电压等级的输电线上使用的盘形悬式绝缘子组合而成。

正常时, 泄漏电流为毫安级, 当绝缘子串中有零值或低值绝缘子时, 其对地泄漏电流的值将产生较大的变化。该变化值依绝缘子劣化的程度及个数而异, 但通过检测灵敏度及准确度较高的电流传感器是完全可以准确判断的。

文献[8]介绍了一种输电线路绝缘子在线监测的方法。它将测量到的泄漏电流值以无线通讯的方式传送到生理中心进行信息处理, 实现了对线路绝缘子的遥测; 但该法存在的一个重大缺陷在于要在每个绝缘子串上安装一套检测装置, 成本过高, 在实际应用中推广是用户难以承受的, 且装置的维护、检修需停电才能进行。

目前已研制出多种适用于泄漏电流测量的实用的电流传感器。它们在泄漏电流的测量准确度方面毫无问题, 但绝缘电阻法存在的问题并非完全在于电流的准确测量, 它还取决于以下几个因素:

A、输电线路的电压变化直接影响到泄露电流的大小, 且电压的变化引起的电流改变值在理论上足与一至二个绝缘子劣化时的电压改变值相当。

B、绝缘子的泄漏电流与其表面的污秽程度密切相关。杆塔结构、绝缘子老化程度、绝缘子形状及天气状况如温度、湿度甚至风速风向对绝缘子泄漏电流的大小都有影响, 因而泄漏电流值在正常情况下亦是一个随时间变化的量, 存在一个如何正确判定绝缘子串是否存在劣质绝缘子, 即如何确立判断标准(判据)的问题。



通过横向或纵向比较的方法判断显然不足以令人信服,用模糊理论的隶属度函数的概念赋予使用年限、气候及污秽以不同的隶属度,通过对气象参数、污秽等量的综合测试然后结合各变电站电压互感器的测量值,用离线校正的方法消除这些因素的影响,达到检测绝缘子的目的应该是一个较好的解决问题的途径。但隶属度函数建立需要大量的运行经验作参考,这将是一个长期、艰苦的工作,而绝缘电阻法无须登高测量、原理简单、实用性强的优点使该法仍值得人们去探索。国外在这方面利用人工神经网络的特点已做了一些尝试,取得了一定程度的进展。

(3) 脉冲电流法:所谓脉冲电流法就是通过测量绝缘子电晕脉冲电流的方法来判断绝缘子的绝缘状况,其原理是:存在劣质绝缘子的绝缘子串中,由于劣化绝缘子的绝缘电阻很低,它在绝缘子串中承担的电压也较小,于是其它正常绝缘子在绝缘子串上的承受电压必然明显大于正常情况时的承受电压,而因回路阻抗变小,绝缘子电晕现象的加剧,电晕脉冲电流必将变大;根据线路上存在劣质绝缘子时电晕脉冲个数的增多、幅值的增大的现象,利用宽频带电晕脉冲电流传感器套入杆塔接地引线取出电晕脉冲电流信号,通过一定的信号处理手段,从而达到在低压端检出不良绝缘子的目的。

该法存在的主要问题在于传感器的选择、信号的提取及辨识、现场干扰的排除等。由于电晕脉冲电流在绝缘子正常时亦可能产生,且随着输电线路电压的波动其值也在变化,故如何消除这些因素的影响、建立绝缘子劣化判断标准也是该法能否成功的关键。近来不少研究者在这方面都做了很多有益的探索。

文献[9]在实验室通过对单相绝缘子脉冲电流的测量得出如下结论:不良绝缘子的阻值、不良绝缘子在串中的位置、绝缘子串的长度及正常绝缘子的电晕起始电压都对脉冲电流法检测不良绝缘子的分辨率产生影响。

文献[10]针对在实际检测中现场外界干扰很大且信号错综复杂的特点,提出了一种在线检测绝缘子电晕脉冲电流的数据处理方法:通过滤波电路抑制工频电磁场干扰,再采用适当的数据处理手段,即建立数学模型提取信号之特征量的方法实现对绝缘子劣化状况的辨识。

绝缘子的起晕电压虽然与绝缘子的污秽程度无关,但电晕电流的大小与测量时的气候条件及气候的历史条件有关,故在信号处理过程中亦应注意消除这些因素对测量结果的影响。

## 1.3 主要研究成果

### 1.3.1 特点

#### 1. 污闪关键技术参数的检测方法

污秽绝缘子放电有关理论至今尚未成熟,但是许多理论分析与实践表明,绝缘子表面放电不是单纯的空气间隙放电,而是与绝缘子周边电气环境等因素均有密切的关系,并且这是一个复杂的污秽表面空气电离并伴随着局部弧络发生和发展的热动力平衡过程。污闪发生的过程分析与研究涉及到多门学科,而且污闪的发生是随机事件,很难准确的度量。国际大电网会议第 33 学术委员会(过电压及绝缘配合委员会)04 污秽工作组认为研究泄漏电流的关键技术参数为:在线电压泄漏电流的最大脉冲幅值  $I_k$ ; 超过特定幅值的泄漏电流脉冲数; 临闪前最大泄漏电流值  $I_m$  等<sup>[11]</sup>。在如此多的技术参数,不但理论分析与计算十分困难,而且实际检测这些参数也很困难,所以,至今为止还没有得到能够对污秽绝缘子放电综合考虑,全面评定的准确有效的方法,这也是当前该领域研究的热门前沿课题,该文对此课题研究也亦很感兴趣,并且运用模糊理论结合声发射技术,提供比较有效的研究污闪关键技术参数的检测方法,这是该文研究的一个特点。

#### 2. 污闪关键技术参数的检测设施

该文不仅提供了如上所述的有关污闪关键技术参数的检测方法,而且还提供了采用聚焦声传感器和利用抛物面特性以及对球面波聚焦效应,构建了污闪关键技术参数的检测装置,试验结果表明,该装置能有效的对这些参数进行检测,这也是该文研究的一个特点。

### 1.3.2 主要研究工作

文中所作的主要研究工作如下:

1. 能够准确判断出高电压线路典型绝缘子是否损坏,可以在线检测如表面有裂痕、内部存在气泡、因长时间工作绝缘子烧坏或材料变质、表面上有污秽物造成污染等。

2. 进行污秽放电试验。通过试验证明:随着绝缘子污秽放电强度的增加,声发射信号发生变化;揭示其中的变化规律,并证明文中所提出的理论观点。

3. 进行不同污秽度和电压条件下的污秽放电试验,采集放电过程中的声信号,并转换为数字信号进行处理。通过对试验数据进行分析,找出放电过程中声信号的特征量,并对特征量用模糊推理的方法进行处理,得出在试验条件下判断绝缘子污秽放电强度的判据。

4. 运用模糊推理的方法对污秽试验取得的数据进行分析,分析结果证明了方法的可行性。

## 第 2 章 绝缘子声发射污秽放电检测方法

### 2.1 绝缘子污秽放电过程中的现象

在绝缘子污秽放电的发展过程中，一直伴随有热、声、光等物理现象，本文中所关注的是声信号，包括放电是如何产生声信号以及声信号的特征。

#### 2.1.1 污秽放电声发射机理

在污秽放电的起始阶段，在绝缘子的钢脚等泄漏电流分布密集的地方产生干区，电压集中分布在干区上产生放电现象，此时首先从绝缘子钢脚根部沿瓷表面发出一些淡紫色细丝状放电，并伴有轻微的电晕声，接着铁帽边缘与瓷件连接处出现淡紫色短小电弧，钢脚处的放电演变为紫色刷状放电，夹杂有黄色或白色的小火星，同时放电声响增大；随着干区的继续扩大，帽缘和下伞面钢脚处出现桔黄色短电弧放电，电弧密集，放电持续发生，声响很大；随着受潮程度的加深，原来钢脚处密集的短电弧被频率较低但强度明显加大的桔黄色电弧代替，最后出现红色的主电弧贯穿整个泄距，发生闪络。

在污秽放电发展的整个过程中，放电的出现是间歇的、时强时弱的，但它总的趋势是确定的，即由微弱的辉光放电到强烈的局部电弧，在这个过程中的声信号由弱到强，从开始的轻微的电晕声，到后面嗡嗡的电弧声，都是污秽放电发出在 20Hz—20kHz 频段内的声信号被人的耳朵接收到产生的效果<sup>[12]</sup>。有经验的试验人员通过这种放电声就可以判断出绝缘子是否即将闪络，所以用声传感器代替人耳，用模糊推理代替试验人员的丰富的经验，来判断绝缘子的工作状态，就是本文的研究所要达到的目的。

模糊逻辑方法具有多因素综合分析的特点，因而适合于对受多种因素影响的不确定性结论的事物或现象做出总的评价。即对被评判事物或现象，通过赋予每个影响它的因素一个评判指标，再根据所给条件计算分析得出其总体的带一定倾向性的结论。文中的对绝缘子进行在线检测，即包括绝缘子本身的内部绝缘强度的劣化和因严重污秽引起的绝缘性能的劣化，因此，文中选取了

反映高电压下运行的绝缘子绝缘性能的状况参数如声信号的最大幅值、最大面积、连续周期数作为模糊特征量，运用模糊逻辑方法对其进行分析从而判断出绝缘子的好坏状况。

在放电过程中，带电质点由于电场的作用而获得加速，同时由于电弧产生的高温，空气分子剧烈的热运动，都会使空气分子发生碰撞，从宏观上看，对与放电通道相邻的空气产生了压力，使之向外运动，而由于空气的弹性作用，产生了阻力，使这部分空气达到最大位移后又开始向平衡位置运动，这样就在平衡位置附近产生振动，这种振动通过相邻的空气媒质会一直传播下去。这种媒质质点的机械振动由近及远的传播就是声振动的传播，称为声波。这时声振动的传播方向与质点振动方向一致，称为纵波。

从能量的角度来看，放电是能量的一个瞬时的爆发，是电能以声能、光能、热能、电磁能等形式释放出去的一个过程。由于每次放电的时间是非常短，因此它产生的声波的频谱很宽，可以从几十 Hz 到几 MHz。其中频率低于 20kHz 的信号能够被人听到，而高于这一频率的超声波信号必须用声传感器才能接收。放电及其产生的声信号都有一定程度的随机性，使得每次放电测得的声发射信号的频谱都不同，即频谱峰值对应的频率是变化的<sup>[13]</sup>。

上面所介绍的是污秽放电声发射的机理，给出了放电产生声信号的原因。要实现污秽放电的监测，还必须了解放电与声信号之间的具体关系，为此，下面先介绍需要使用的声学基本概念。

声能量：在声场中取一个足够小的体积元，其原先的体积为  $V_0$ ，压强为  $P_0$ ，密度为  $\rho_0$  由于声扰动使该体积得到动能<sup>[14]</sup>为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}(\rho_0 V_0) v^2 \quad (2-1)$$

此外，由于声扰动，该体积元压强从  $P_0$  升高为  $P_0+p$ ，于是该体积元具有位能为

$$\Delta E_p = - \int_0^p p dV \quad (2-2)$$

所以，体积元里总的声能量为动能与位能之和即：

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{V_0}{2} \rho_0 \left( v^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2 \right) \quad (2-3)$$

## 2.1.2 声发射技术基本概念

下面介绍在本文中将要使用的声学的一些基本概念。

声压: 设体积元受声扰动后压强由  $P_0$  改变为  $P_1$ , 则由声扰动产生的逾量压强 (简称为逾压) 为:

$$P = P_1 - P_0 \quad (2-4)$$

即为声压。

声强: 单位时间内通过与波的传播方向垂直的单位面积上的声能, 用  $I$  表示, 单位为  $W/cm^2$ 。

声能量密度: 单位体积里的声能量称为声能量密度  $\varepsilon$ , 即式:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{V_0} = \frac{1}{2} \rho_0 \left( v^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2 \right) \quad (2-5)$$

## 2.2 绝缘子污秽放电声发射检测法

### 2.2.1 声发射信号监测污秽放电的基本原理

从放电是电能的释放这一角度来看, 声能、热能、电磁能、光能都是放电所释放的能量的一部分, 文献[15]认为声能与放电释放的能量之间是成比例的, 文献[16]也以试验证明了这一点。虽然在实际中, 由于放电受各种因素影响使得这个比例是不确定的, 但从统计的角度来看, 二者之间的比例关系是确定的。

从污秽放电的机理可知, 污秽放电的初期是微弱的辉光放电, 此时泄漏电流很小, 放电释放的能量也很小, 放电的后期出现强烈的电弧放电, 此时泄漏电流很大, 释放的能量也很大, 可见污秽放电的发展过程中放电所释放的能量是从小到大变化的, 所以声能也是从小到大变化的。下面对声能的表示方法进行分析。

将球面波的声压和声速方程取实部代入声能量方程(2-3), 可得:

$$\Delta E = \frac{V_0}{2} \rho_0 \left[ \frac{p_1^2}{r^2} \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right)^2 \cos^2(\omega t - kr) + \frac{p_1^2}{r^2} \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} \cos^2(\omega t - kr) \right]$$

$$= \frac{V_0 p_1^2}{2 r^2 \rho_0 c_0^2} \left[ \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right)^2 + 1 \right] \cos^2(\omega t - kr) \quad (2-6)$$

式中  $k=\omega/c_0$ ，对于 40kHz 的超声波信号，在常温下，如  $t=20^\circ\text{C}$  时，有  
 $k = 2\pi f / (331.6 + 0.6 \times t) = 731.08$  (2-7)

再考虑到应用中  $r$  不小于 1，所以有

$$\Delta E \approx V_0 \frac{p_1^2}{r^2} \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \cos^2(\omega t - kr) \quad (2-8)$$

从上式可以看出，在不考虑空气密度  $\rho_0$  和声速  $c_0$  的变化时，声能量与声压  $p_1$  的平方成正比<sup>[17]</sup>。根据放电释放的能量与声能之间的关系，用声发射信号声压的变化代表污秽放电所释放能量的变化，通过测量声发射信号的声压，可以推测出放电的强弱，这就是声发射信号监测污秽放电的基本原理。

## 2.2.2 声信号在传播过程中的衰减及解决方法

放电产生的声信号要在空气中的传播一段距离才能被传感器接收，声信号在这段传播过程中发生的变化会影响监测的结果，因此研究声信号在空气中如何传播以及传播过程会对声信号产生什么样的影响是非常重要的。

### 1. 声波传播的方程

要严格确定放电产生的声场是十分困难的，因此在本文中把它理想化，把声源看作是脉动点声源，产生的超声波信号是以球面波的形式向远处传播的。现在求与绝缘子距离为  $r$  处  $a$  点的声压  $p$ 。

已知在声波的波阵面形状不变条件下的波动方程式为：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial \ln S}{\partial r} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-9)$$

式中  $S$  为波阵面的面积， $c_0$  为声速。由球面波的性质可知在点  $a$  处有  $S = 4\pi r^2$ ，代入上式后，作变量变换  $Y=pr$ ，得式：

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial r^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (2-10)$$

解以上方程可得  $Y = Ae^{j(\omega t - kr)} + Be^{j(\omega t + kr)}$ ，其中  $A, B$  为待定常数， $\omega$  为声波角频率，

$k=\omega/c_0$  称为波数。所以此方程的一般解为：

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} + \frac{B}{r} e^{j(\omega t + kr)} \quad (2-11)$$

其中第一项代表向外辐射的球面波，第二项代表向球心反射的球面波，因为这里考虑的是向外界空间辐射的自由行波，没有反射波，所以  $B=0$ ，有：

$$p = \frac{P_1}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2-12)$$

上式中  $p_1$  为  $r=1$  处声压的幅值。表示在理想的媒质中，处于球面声场中任一点的声压与这一点至声源的距离  $r$  成反比，所以在实际应用中，传感器与绝缘子的距离会影响到测量的结果<sup>[18]</sup>。

## 2. 声波的衰减

上面结论是在理想的条件下得出的，而在实际大气环境中，声波随距离而逐渐衰减，产生了将声能转变为热能的耗散过程，即声波的能量被媒质吸收了，这就称为媒质中的声衰减<sup>[19]</sup>。

引起媒质对声波吸收的原因有很多，总的来说可以分成两大类：

### (1) 纯媒质中产生的声吸收

在纯媒质中产生的声吸收包括三个分量：

① 粘滞吸收：在粘滞媒质中相邻质点之间产生相对运动时会产生内摩擦力，也称粘滞力，粘滞引起的吸收系数为：

$$\alpha_{粘滞} = \frac{2\omega^2}{3\rho_0 c^3} \eta \quad (2-13)$$

式(2-13)中  $\eta$  为媒介质的切变粘滞系数，从式中可以看出粘滞吸收系数  $\alpha_{粘滞}$  与频率的平方成正比，与声速的三次方成反比；

② 热传导吸收：声波过程是绝热的，当媒质中有声波通过时媒质产生压缩和膨胀，压缩区体积变小，温度升高，膨胀区体积变大，温度降低。因为非理想媒质中存在热传导，导致一部分热量从温度高的部分流向温度低的部分，这个过程是不可逆的，即一部分机械能转变成了热能。理论计算表明，媒介质的热传导吸收系数为：

$$\alpha_{热传导} = \frac{\omega^2 \chi}{2\rho_0 c^3} \left( \frac{1}{C_r} - \frac{1}{C_p} \right) \quad (2-14)$$



式(2-14)中  $\chi$  为热传导系数,  $C_v$  和  $C_p$  为定容比热容和定压比热容, 由此可知媒质的热传导吸收系数也与频率的平方成正比, 与声速的三次方成反比;

③ 分子驰豫吸收。当媒质中有声波通过时, 媒质中发生了压缩和膨胀的过程, 媒质的物理参数及其相应的平衡状态也将随着声波过程的而发生简谐的变化, 而任何状态的变化都伴随有内外自由度能量的重新分配, 并向着一个具有新的能量平衡的状态过渡, 这样一个过程称为驰豫过程, 在驰豫过程中产生了有规则声振动转变为无规则热运动的附加能量损耗, 就是驰豫吸收也称反常吸收。驰豫吸收系数为:

$$\alpha_{\text{驰豫}} = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \frac{\eta_0}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2-15)$$

从式(2-15)中可见, 驰豫吸收系数与频率的平方约为正比<sup>[20]</sup>。

综合考虑上述媒质的粘滞吸收、热传导吸收和分子驰豫吸收的作用后, 媒质对声波的吸收系数的普遍表达式为:

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{粘滞}} + \alpha_{\text{热传导}} + \alpha_{\text{驰豫}} = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left[ \frac{4}{3} \eta + \chi \left( \frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) + \frac{\eta_0}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] \quad (2-16)$$

实际测量发现, 空气对声波的吸收不仅与频率有关, 而且和空气的温度、相对湿度有较复杂的关系。

## (2) 在非纯媒质中产生的声吸收

在非纯媒质, 如空气中有灰尘粒子、雾滴等悬浮微粒, 形成了声波传播路径上的障碍物或介质的不均匀性, 造成一部分声波偏离原来的路径而在不同方向上产生次强波, 产生了散射, 引起能量衰减。散射衰减既与散射粒子的形状尺寸和多少有关, 又与介质的性质和散射粒子的性质有关。一般来说, 散射衰减系数  $\alpha_2$  与声波频率  $f$  的四次方成正比。

当考虑到上述声吸收现象产生的声波衰减时, 放电声发射信号在空气中的传播方程是:

$$p = \frac{P_1}{r} e^{j(\omega t - kr)} \times e^{-\alpha r} \quad (2-17)$$

式(2-17)中  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ 。

由上述声波的传播与衰减可以看出, 观察点, 即声传感器放置的位置, 与绝缘子之间的距离会影响接收信号的大小, 也就会影响到对污秽放电强度判断

的结果，因此在应用中必须消除距离对监测结果的影响。

## 第 3 章 检测绝缘子污秽放电的声传感器设计

文中提出的声学检测法是根据污秽放电机理和放电的声发射现象推出的，其可行性还需要用试验来证明。为了接收污秽试验的放电声发射信号，文中设计了灵敏度较高的聚焦声传感器，将声传感器与聚焦抛物面结合使用，使声能在焦点处集中，对声传感器产生较大的压力，达到放大信号的目的。

### 3.1 概论

声传感器的作用是接收在空气传播的声信号，将声信号转换为电信号，它实现了一种形式的能量转换为另一种形式的能量，所以又称为换能器。声传感器一般可以分为以下几类：

(1) 压电式传感器，它是利用压电晶体的压电效应而工作的，是可逆的。它的工作频率从 20kHz 至 10GHz；

(2) 磁致伸缩式传感器，它是利用磁致伸缩现象而工作的，也是可逆的，大多数情况下磁致伸缩换能器均工作在 40kHz 以下的频率上。但若欲将其工作范围向高频方向扩展，则可容易地扩展至 100kHz；

(3) 电磁换能器，有时用于低频高强度的应用场合，通常是用在可闻声范围的，偶尔也用于频率至 50kHz 的低强度应用场合，极少的情况下，也用它作为兆频段内的超声波接收器。这类换能器也是可逆的；

(4) 静电换能器，可用来做低强度超声波发生器，亦可用做高频接收，这类换能器是可逆的。做接收器用时，其工作频率可高达 100MHz；

(5) 其他种类的换能器，包括热声换能器、化学声换能器及光声换能器等。其中采用压电陶瓷作为敏感元件的压电型声传感器具有体积小、性能好、成本低等优点，所以在本文中采用了压电型声传感器<sup>[21]</sup>。

## 3.2 声传感器所用压电材料及压电效应

### 3.2.1 压电材料

常用的压电材料有石英、压电陶瓷以及罗息盐(又名酒石酸钾钠盐)、泥酸锂等。

自然界中存在自然生长的石英晶体, 所以它最早为人们所认识, 是最早使用的压电材料。石英是透明而又非常坚硬的晶体, 比起其它单晶材料, 石英有很高的机械耐用性。它的缺点是机电耦合系数较小, 所以它的接收效果比压电陶瓷差。

1942年 Wainer 和 Salomon 等人经大量研究后终于制出了强电体  $\text{BaTiO}_3$ , 将二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )和碳酸钡( $\text{BaCO}_3$ )按 1 比 1 的克分子比混合后, 通过预烧使碳酸钡分解并和二氧化钛反应生成  $\text{BaTiO}_3$  晶体, 然后将其碾碎, 将所得粉末按照所需形状成形后再次烧结, 可获得致密陶瓷。此时陶瓷体是各向同性的, 其中各晶胞或微晶体的极轴取任意方向。在陶瓷体上加强直流电场( $\geq 30\text{kV/cm}$ ), 使全部极化轴平行于电场方向, 经过相当长的极化时间, 极化完成, 此时会有剩余电极化, 铁电陶瓷就变成了压电陶瓷。

1955年发现了锆钛酸铅 $[\text{Pb}(\text{Zr.Ti})\text{O}_3]$ (即 PZT), 它的压电性和铁电性有了重大提高, 压电性对温度的依赖性得到克服或者改善, 从此, 锆钛酸铅成为从低频到数兆赫及以上频率范围内制作超声换能器的理想材料。其中 PZT-5 在压力低于  $7 \times 10^7 \text{N/m}^2$  时滞后现象很少, 压电常数的变化都很小, 适用于接收器<sup>[22]</sup>。

### 3.2.2 压电效应

1880年法国物理学家居里兄弟发现了晶体的压电效应, 当压电晶体在应力(压力或张力)作用下产生应变时, 晶体中就产生极化或电场, 这种效应称为正压电效应。相反地, 当晶体处于电场之中时, 由于极化作用, 在晶体中就产生了应变或应力, 这种效应称为逆压电效应。接收声信号是将声波的压力转换为电信号的过程, 与之对应的是正向压电效应, 所以下面重点介绍压电材料的正向压电效应。

压电效应的产生是因为具有非对称性的压电晶体, 当受到外力作用时, 离子间产生不对称的相对移动, 从而引起新的电偶极矩, 使得晶体表面电荷积累,

表现为正向压电效应<sup>[23]</sup>。

### 3.3 声传感器的压电振动模式

压电材料的机械能和电能的相互转换，是通过某一尺寸和形状的晶体，在某特定条件下产生振动而实现的。压电陶瓷的振动模式可以分为伸缩振动、切变振动和弯曲振动三种，文中所设计的传感器使用了弯曲振动模式。一般传感器为了实现低频段的良好相应，往往需要以增加传感器的尺度为代价，例如厚度振动传感器需要增加厚度，而弯曲振动传感器可以在不增加传感器尺寸的条件下达到低频段的良好响应。

如图 3-1 所示有两片几何形状、尺寸和材料特性相同的压电陶瓷薄片，电极方向垂直于厚度，在保持极化轴沿相同方向的条件下叠在一起，相接触的镀银面以导电胶连接后作为一个电极，两个外侧面以导线相连成为另一个电极。如果在这两个电极之间施加交变电压，陶瓷片就会作弯曲振动。

由于两压电薄片极化轴沿同一方向，加电以后，在上一片中电场与极化轴方向相同，则在下一片中就必然相反。因此在加电过程中，如果上一片是伸张，则下一片就必然是收缩，夹在两压电片之间的中间面可以认为没有伸缩。这样就形成了弯曲运动<sup>[24]</sup>。

如果在压电薄片上沿厚度方向，即垂直于镀银面方向施加力，若上面压电片作横向收缩，则下面压电片必然作横向伸张。因此，若上面压电片之下侧面产生正电荷，上侧面产生负电荷；则下面压电片必然在上侧面产生正电荷，在其下侧面产生负电荷。

当施加在压电薄片上的  $P$  是声信号的声压时，在压电薄片的两电极上就出现交变电压信号，利用此特性，即可制成声传感器。

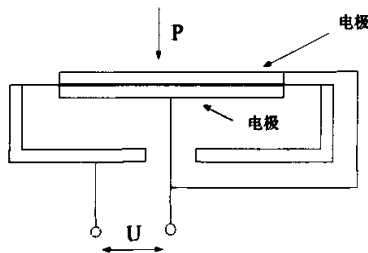


图 3-1 弯曲振动原理

### 3.4 声传感器的基本结构

压电晶体的振动模式采用了弯曲振动，因为弯曲振动压电换能器的结构简单、尺寸小、重量轻，机电耦合系数高，Q 值高，易于与空气匹配。

压电晶体边界的处理一般有三种形式，如图 3-2 所示：(a) 夹支边，边界作刚性固定；(b) 简支边，设计如图所示，边界用刀刃夹住；(c) 自由边，边界不受任何约束。夹支边的机电耦合极低，会降低传感器的灵敏度，因此不予采用；自由边结构安装不方便，也不能采用；简支边结构轻便、结实，而且装置的损耗降低到最低程度，是被使用最多的边界支撑。在本文中采用的也是简支边结构<sup>[25]</sup>。

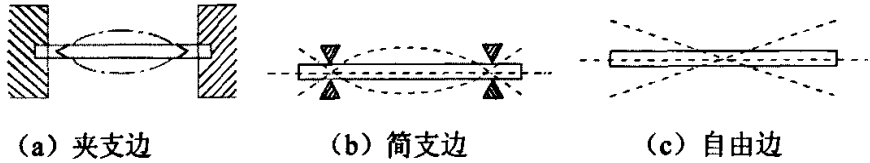


图 3-2 边界处理方式

在确定了压电晶体和压电晶体的边界后，还需要设计传感器的总体结构。对于接收用的传感器，总期望有较低的阻抗值，以便接收到较弱的声信号和输出较大的电压信号。传感器的总体结构形式对接收性能影响很大，经过多次试验和对比，设计了如图 3-3 所示的传感器。传感器结构为敞开式，具有灵敏度高、体积小、易于制作等优点。

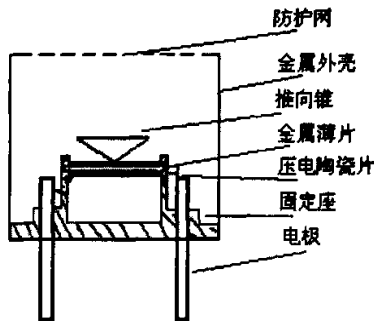


图 3-3 传感器结构

为了改善传感器的机械性能和机电耦合，以及结构安装的方便，在两陶瓷片之间胶合一片金属薄片，为了便于支撑和进行电连接，把金属片延伸到了压电陶瓷片的外面。一旦压电陶瓷和金属片的层与层之间出现任何滑动，将会显著降低传感器的性能，因此胶合层要非常薄、坚固和稳定。金属与陶瓷之间的胶合，使用低温环氧树脂，由于胶合层的厚度对传感器的频率会有影响，在环氧树脂固化过程中必须施加以适当的压力，使胶合层均匀、结合紧密。压电陶瓷的表面镀有一层金属导体，也就是电极。当声压作用在压电陶瓷上时，在压电陶瓷表面产生的电荷是束缚电荷，不能被电路读出，电极的作用将束缚电荷转变为自由电荷，从而被电路读出。金属电极必须与压电陶瓷紧密结合在一起，所以采用了表面蒸发镀膜的方法。表面电极经导线与输出电极连接。压电组件以简支边的形式固定在基座上，在压电组件的中央部分用结合轴与圆锥状的推向锥连成一体，推向锥可以将声压有效地集中在压电晶体的中心，提高传感器的接收灵敏度。上述的部件都被安放在金属外壳内，金属外壳的前端用金属丝组成的防护网代替，使声波能够入射到压电陶瓷上。

压电传感器的等效电路模型如图 3-4 所示，试验测得传感器的频率特性如图 3-5 所示，中心频率为 40kHz，灵敏度约为 -69dB，阻抗为 1500Ω，电容 2000pF。

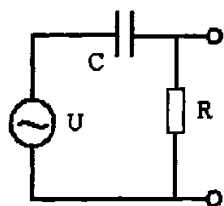


图 3-4 传感器的等效电路图

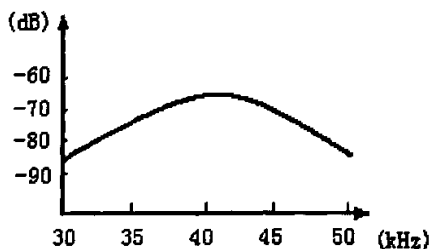


图 3-5 传感器的频率特性

### 3.5 声传感器的聚焦抛物面

聚焦声传感器是一个弯曲振动式压电传感器和一个聚焦抛物面的组合。因为现有的技术手段无法使声传感器达到较理想的灵敏度，所以想到使用聚焦抛物

面反射声波，使声能集中，在焦点产生较大的压力，达到放大信号的目的。

### 3.5.1 声学波动理论

由声学的波动理论可知<sup>[26]</sup>，当声波由空气入射到抛物面表面时，在分界面处应有声压连续及法向质点速度连续，即必须满足 Kirchhoff 近似如：

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial n} + \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right) = 0 \\ \phi_s|_s = \phi_i|_s = \frac{A}{l} e^{-jk l} \end{cases} \quad (3-1)$$

式中  $\phi_i$  为入射波产生的速度势， $\phi_s$  为抛物面产生的速度势， $n$  为面元  $dS$  上的法向， $l$  为点源至面元  $dS$  的距离。又因为速度势函数  $\phi_s$  必须满足 Helmholtz 波动方程：

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (3-2)$$

于是可以求得速度势函数  $\phi_s$  为：

$$\phi_s = \frac{A}{4\pi} \iint_s \left[ \frac{1}{l} e^{-jk l} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{e^{-jk \rho}}{\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial n} + \frac{e^{-jk \rho}}{\rho} \frac{\partial}{\partial l} \left( \frac{e^{-jk l}}{l} \right) \frac{\partial l}{\partial n} \right] dS \quad (3-3)$$

### 3.5.2 球面波在抛物面上的聚焦

抛物面坐标关系如图 3-6 所示，抛物面的方程为： $y^2 + z^2 = 4Fx$

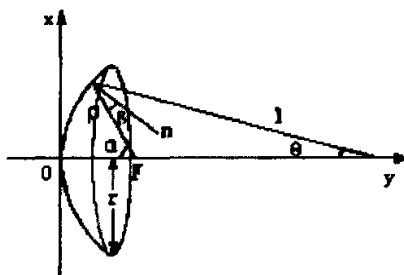


图 3-6 抛物面坐标关系

它的极坐标形式为：



$$\rho = \frac{2F}{1 + \cos \alpha} = F \sec^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (3-4)$$

F 是抛物面的焦距,  $\rho$  是从焦点到抛物面的面元  $dS$  之间的距离,  $\alpha$  是  $\rho$  与  $ox$  轴之间的夹角,  $\beta$  是  $\rho$  与面元  $dS$  的法线  $n$  之间的夹角。取  $F=0.1\text{m}$ , 抛物面的口半径为  $0.2\text{m}$ , 点源至焦点的距离为  $d=10\text{m}$ , 点源与面元  $dS$  之间的距离为  $l$ , 线段  $l$  与  $x$  轴之间的夹角为  $\theta$ 。所以在焦点处有:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{e^{-jk\rho}}{\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial n} = - \left( \frac{1}{\rho} + jk \right) \frac{1}{\rho} e^{-jk\rho} \cos \beta \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial l} \left( \frac{e^{-jkl}}{l} \right) \frac{\partial l}{\partial n} = - \left( \frac{1}{l} + jk \right) \frac{1}{l} e^{-jkl} \cos \beta \quad (3-6)$$

$$\text{又因为: } k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi \times 40 \times 10^3}{343.6} = 731 \quad k\rho \gg 1, \quad kl \gg 1$$

所以, 可得:

$$\phi_s(P) = - \frac{A}{4\pi} \cdot 2jk \iint_s \frac{e^{-jk(l+\rho)}}{l\rho} \cos \beta dS \quad (3-7)$$

$$\text{从图 3-6 可知: } l = \sqrt{(d + \rho \cos \alpha)^2 + (\rho \sin \alpha)^2}, \quad \cos \beta = \cos \frac{\alpha - \theta}{2}$$

所以:

$$\phi_s(P) = - \frac{A}{2\pi} \cdot jk \iint_s \frac{e^{-jk(\sqrt{(d + \rho \cos \alpha)^2 + (\rho \sin \alpha)^2} + \rho)}}{\sqrt{(d + \rho \cos \alpha)^2 + (\rho \sin \alpha)^2} \rho} \cos \frac{\alpha - \theta}{2} dS \quad (3-8)$$

为了便于积分, 对式(3-8)进行简化得:

$$l = \sqrt{(d + \rho \cos \alpha)^2 + (\rho \sin \alpha)^2} \approx d + \rho \cos \alpha \quad (3-9)$$

这种简化所产生的误差为

$$\begin{aligned} \Delta l &= \sqrt{(d + \rho \cos \alpha)^2 + (\rho \sin \alpha)^2} - (d + \rho \cos \alpha) \\ &= \frac{(\rho \sin \alpha)^2}{\sqrt{(d + \rho \cos \alpha)^2 + (\rho \sin \alpha)^2} + d + \rho \cos \alpha} \\ &\leq \frac{h^2}{2d} = 5 \times 10^{-4} \text{m} \end{aligned} \quad (3-10)$$

此误差与声波波长相比较也很小, 所以可以简化处理。还有  $l$  与  $x$  轴的夹角

为:  $\theta = \arcsin \frac{\rho \sin \alpha}{l} \leq 0.537^\circ$ 。

将  $\theta$  角忽略, 对  $l$  采用近似, 可得:

$$\phi_s(P) = -\frac{A}{2\pi} \cdot jk \iint_S \frac{e^{-jk(d+\rho \cos \alpha + \rho)}}{(d+\rho \cos \alpha)\rho} \cos \frac{\alpha}{2} dS \quad (3-11)$$

$$S \text{ 上的面积元: } dS = (\rho \sin \alpha d\varphi) \left( \frac{\rho d\alpha}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) = \rho^2 \sin \alpha \sec \frac{\alpha}{2} d\alpha d\varphi$$

于是, 焦点声场的积分为:

$$\begin{aligned} \phi_s(P) &= -\frac{Ae^{-jk(d+2F)}}{2\pi} \cdot jk \int_0^{\alpha_m} \int_0^{2\pi} \frac{\rho}{d+\rho \cos \alpha} \sin \alpha d\alpha d\varphi \\ &= -\frac{Ae^{-jk(d+2F)}}{2\pi} \cdot jk \cdot 2\pi \int_0^{\alpha_m} \frac{2F}{d+d \cos \alpha + 2F \cos \alpha} \sin \alpha d\alpha \\ &= \frac{2FjkAe^{-jk(d+2F)}}{d+2F} \ln(d+d \cos \alpha + 2F \cos \alpha) \Big|_0^{\alpha_m} \end{aligned} \quad (3-12)$$

所以, 采用抛物面聚焦所获得的增益为:

$$\begin{aligned} |P_s|/|P_i| &= |\phi_s(P)|/|\phi_i(P)| = \left| \frac{2kF}{d+2F} \cdot \ln(d+d \cos \alpha + 2F \cos \alpha) \Big|_0^{\alpha_m} \right| \\ &= \frac{2kF}{d+2F} \left[ \ln(2d+2F) - \ln(d+d \cos \alpha_m + 2F \cos \alpha_m) \right] \end{aligned} \quad (3-13)$$

因为  $\cos \alpha_m = \frac{F-r^2/4F}{F+r^2/4F}$ , 所以

$$|P_s|/|P_i| = \frac{2kF}{d+2F} \left\{ \ln(2d+2F) - \ln \left[ d+(d+2F) \frac{4-(r/F)^2}{4+(r/F)^2} \right] \right\} \quad (3-14)$$

从式(3-14)可以看出, 抛物面聚焦的效果与抛物面的焦距  $F$ 、抛物面的口径  $r$  和入射波的波数  $k$  有关。入射波的波数  $k$  越高, 聚焦效果越好; 当  $F/r$  一定时, 焦距越大, 即抛物面的尺寸越大, 效果越好。但是, 上式是在近似的条件下推出的, 即与声源距离  $d$  在 10m 以上且抛物面尺寸较小, 并非普遍适用的<sup>[27]</sup>。

考虑到使用的方便和实用性, 以及波阵面在焦点的相位差的问题, 本系统考虑设计一个尺寸较小的旋转抛物面。抛物面的焦距为 0.1m, 口径为 0.1m, 此抛物面理论上放大倍数为 33 倍, 约为 30dB。

聚焦抛物面与声传感器结合使用就构成了聚焦声传感器。当声源与观察点的距离小于 10m 时，单独使用声传感器就可以满足灵敏度的要求；当距离大于 10m 时，就使用聚焦声传感器，将声传感器放在抛物面的焦点上，使抛物面的轴线对准声源。远处的微弱信号经抛物面反射后，在抛物面的焦点，即在声传感器上产生一个被放大的信号，达到提高灵敏度的效果<sup>[28]</sup>。

## 第 4 章 污秽放电声发射在线检测系统的设计

要实现文中提出的声学监测法，就必须对污秽放电的声发射信号进行定量分析，因此文中设计了一套监测装置用于将聚焦声传感器输出的模拟信号转换数字信号进行处理，并将处理结果传输至地面系统，使工作人员能及时了解绝缘子的工作状态。

### 4.1 系统的组成原理

声发射信号在空气中长距离传播过程中会产生很大衰减，导致传感器无法有效接收，为解决这一问题，必须缩短传感器与绝缘子之间的距离，将传感器安装在杆塔上是一个有效的解决方法，在此情况下监测装置也必须安装在杆塔上，因此监测装置必须能够将传感器输出的模拟信号转换为数字信号进行处理并将处理结果传输至远处的地面系统，使工作人员能够及时了解绝缘子的工作情况。根据这种要求，文中模拟设计了监测装置，下面介绍的是监测装置原理框图及其各部分的功能。

#### 4.1.1 系统的总体结构

已有的试验结果表明，声发射信号的能量主要集中在 30—50 kHz 之间，但高频段声信号在空气中长距离传播过程中会产生极大的衰减，因此为了传感器能有效接收这些信号，必须缩短传感器与绝缘子之间的距离，将传感器安装在杆塔上是一个有效的解决方法。

安装于杆塔上的传感器可以捕捉到放电产生的声信号并转换为电信号送到监测装置进行处理，在此情况下监测装置也将安装在杆塔上，监测装置具有信号放大、补偿信号随距离的衰减、滤波环节、A/D 转换、信号处理和通信等功能。其监测装置原理图如图 4-1 所示。

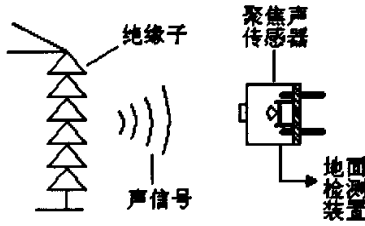


图 4-1 放电监测原理

### 4.1.2 系统的工作原理

监测系统的原理如图 4-2 所示。其功能是将传感器输出的模拟信号转换为数字信号由单片机进行处理，并通过 RS-485 接口实现与地面系统的数据通信。其中前置放大的功能是实现与声传感器的阻抗匹配，使信号能够有效传输；补偿放大的功能是补偿声信号在空气中传播时发生的衰减，消除距离对信号的影响；滤波环节的功能是降低噪声，去除干扰信号，如工频干扰等；采样保持和 A/D 转换将模拟信号转换为数字信号送入单片机进行处理；通信环节实现测量装置与地面系统的联系，使工作人员能够及时掌握绝缘子的工作状态。

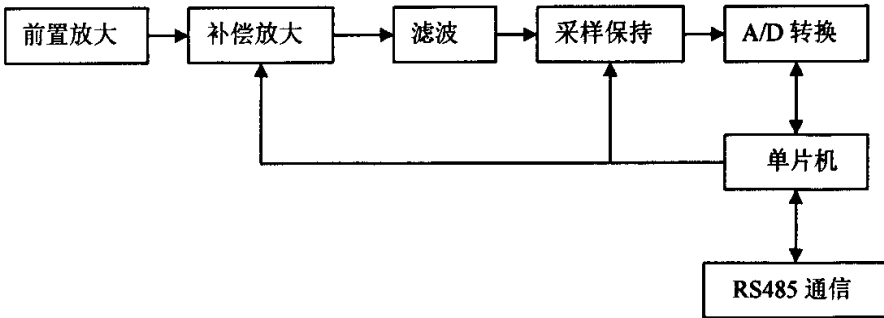


图 4-2 监测系统原理

## 4.2 系统的主要模块

### 4.2.1 前置放大

前置放大模块是声传感器与监测装置之间的接口电路，由于聚焦传感器是采用压电晶体作为敏感元件，它具有很高的输出阻抗，为了使信号能够有效传输，前置放大电路的输入阻抗要足够大；而且前置放大的精度对测量误差的影响很大，因此前置放大的精度要高，所以系统设计中选用了精密仪表放大器 AD524 作为前置放大器。

AD524 具有一对差分输入和一个单端输出，它与运算放大器相比不同点是，运算放大器的闭环增益是由其反相输入端与输出端之间连接的外部电阻决定，而仪表放大器 AD524 的放大倍数则是与输入隔离的内部反馈电阻决定。如果在它的两个差分输入端输入信号时，则增益既可以由内部预置，也可以由用户通过引脚内部设置或通过与输入信号隔离的外部增益电阻设置。AD524 两个输入端的阻抗完全匹配，而且数值很高，典型值为  $10^9\Omega$ 。

AD524 具有共模抑制比高、线形误差低、输入阻抗高、噪声低、失调电压和失调电压漂移低、稳定性好和使用方便等特点，它采用双电源供电，具有极低的增益误差，当增益为 1 时，则最大增益误差为  $\pm 0.05\%$ ；当增益为 1000 时，则最大增益误差为  $\pm 1\%$ ；线形误差在  $\pm 0.003\%$  之内；共模抑制比为 115dB。

### 4.2.2 补偿放大

由前面对声信号在空气中传播过程的分析可知，声信号在从声源传播到观察点的过程会发生衰减，包括扩散衰减和吸收衰减，二者都与传播距离有关，即监测装置接收到的信号的大小与传感器和绝缘子的距离有关。为了消除距离的影响，文中设计了补偿放大模块，基本原理就是针对不同的距离，采用相应的放大倍数，补偿衰减带来的损耗。

具体实现方法是：采用可编程放大器 AD625 和数字电位器 X9221，由单片机改变控制 X9221 的阻值来控制放大倍数。在测量的过程中，聚焦传感器与绝缘子之间的距离是确定的，再结合当时的温度、湿度等参数可以确定在传播中产生的衰减倍数，因此，只要输入距离、温度和湿度，由单片机计算后输出控制信号改变数字电位器的大小，使 AD625 的放大倍数等于衰减倍数的倒数，达

到补偿的目的。

### 4.2.3 滤波

由于前置放大部分采用了具有很高输入阻抗的 AD524, 干扰易于通过电场耦合的形式进入电路, 尤其是工频干扰非常严重。为了使电路能正常工作, 消除工频干扰, 提高信噪比, 本文设计了带通滤波电路。

根据信号的频谱特性尽量压缩信号带宽是有效降噪的一种途径, 考虑到声传感器输出的信号频率为 40kHz, 干扰信号频率主要是 50kHz, 文中选取了 40kHz 为带通滤波器的中心频率, 通带范围 20kHz~60kHz。MAXIM 公司的 max274 是具有 4 组二阶带通滤波器组成的集成块, 利用它可以构成 2—8 阶带通滤波器, 通过改变外接电阻方便地设置滤波器的中心频率和通带范围, 本文中选用 3 组二阶带通滤波器串联构成 6 阶契比雪夫带通滤波器, 基本消除了工频干扰。

### 4.2.4 模数转换

为了对声发射信号进行数字处理, 要先把滤波后的模拟信号变为数字量, 由采样保持和 A/D 转换组成的模数转换环节完成这一功能。采样保持环节使用了 HA5351 芯片, 它是一种快速拾取, 宽带采样保持器, 具有快速采样时间、高精度、低电源失真等特点。它的控制端 5 接程序控制器, 当 CPU 收到启动器的中断后, 打开晶振开关, 在硬件时钟的作用下, HA5351 不断地采样和保持输入信号。在时钟的低电平期间, 完成数据采样; 在时钟的高电平期间, 进行数据保持。

A/D 转换模块由集成芯片 AD9048 构成, 它是一个 8 位快速转换器, 具有采样速度快、功耗低等优点, 而且输入电容小, 仅为 15pF, 降低了输入缓冲放大器的驱动要求, 使输入信号的相移减小。

### 4.2.5 通信

文中选择了 RS-485 协议作为通信方式。由于监测装置安装在户外的杆塔上, 与高压设备距离很近, 受到的干扰较强, 而且信号传输距离远, RS-485 通信方式具有传输速率高、抗干扰能力强、传输距离远等优点, 能够满足要求。

设计中采用 MAX485 作为通信收发器, 将单片机输出的 TTL 信号转换为

RS485 的差动信号。MAX485 工作在半双工模式，具有发送使能端和接收使能端，发送和接收时输出高阻抗，在平衡连接电缆两端挂终端电阻，数据发送和接收速率可以达到 2.5Mbps。不需要单独引入 12V 电压，它的电源电压范围为 4.75V~5.25V。

### 4.3 系统的抗干扰设施

在实际应用中，由于现场的情况比较复杂，不仅有弱电设备，而且有更多的强电设备；不仅有数字电路，而且有许多模拟电路，形成一个强电与弱电、数字与模拟共存的局面。高速变化的数字信号有可能形成对模拟信号的干扰；此外，在强电设备中往往有电感、电容等储能元件，当电压、电流发生剧烈变化时就会形成很大的瞬变噪声干扰，而且这些瞬变噪声频谱宽、能量大、对电子器件的干扰性和危害性非常大，也是导致设备运行异常、故障死机的主要原因。

由于对单片机整个系统的结构又要求简单轻便，这就要求单片机应用系统既有较强的抗干扰能力，且所使用的硬件资源又要求尽量少的。所以有许多问题要加以考虑如下：

#### (1) 精心选择元器件

元器件是构成部件或系统的基础。要选择那些集成化程度高，抗干扰能力强，功耗小的电子器件。

#### (2) 元部件的精密度与布局调整

元器件的精度与位置布局是保证系统完成既定功能和电磁兼容性能的重要保证，因此在系统实验阶段，都应对元器件及部件进行精密校正与布局的优化。

#### (3) 采用硬件抗干扰技术

硬件抗干扰技术是设计系统时首选的抗干扰措施，它能够有效抑制干扰源，阻断干扰传输通道。只要合理地布置与选择有关参数，硬件抗干扰措施就能抑制系统的绝大部分干扰。

常用的硬件抗干扰技术措施有：滤波技术、去耦技术、屏蔽技术、隔离技术及接地技术等等。

#### (4) 采用软件抗干扰技术

尽管我们采取了硬件抗干扰措施，但由于干扰信号产生的原因很复杂，且具有很大的随机性，难免保证系统完全不受干扰。因此，往往在硬件抗干扰措



施的基础上,采取软件抗干扰技术加以补充,作为硬件措施的辅助手段。软件抗干扰方法具有简单、灵活方便、耗费硬件资源少的特点,在微机测控系统中获得广泛的应用。

常用的软件抗干扰技术有:数字滤波、信息传送过程的自动检验、系统运行状态监视与发生故障时的自我恢复等等。

下面对监测装置在实际使用中需要解决的几个问题进行探讨并提出解决方案。

### 4.3.1 系统的安装方式

#### 1. 距离的影响

在第二章中介绍了声信号在空气中传播时产生的衰减,证明传感器与绝缘子的距离会影响输入监测装置信号的大小,如果不解决这一问题,就无法用统一的标准对声发射信号进行分析和判断。

文中使用了补偿放大的方法对信号的衰减进行补偿,消除了距离对声发射信号的影响,具体实现方法在装置的补偿放大环节设计中已经介绍了,此处不再重复。

#### 2. 安装地点对监测装置通信方式的影响

在实际情况中,需要对绝缘子进行监测的地点不仅有变电站和电厂这种监测点分布密集的场所,还有输电线路这种监测点分布稀疏的场所,在这两种不同的工作条件下,监测装置的通信方式也应不同。

在监测点分布密集的情况下,监测装置与地面系统之间的距离不会很远,可以采用有线通信方式,监测装置自动将数据通过电缆传输至地面装置进行处理。

在监测点分布稀疏的情况下,监测装置与地面系统之间距离遥远,采用有线通信的方式是不现实的,这种情况下可以通过无线传输的方式进行通信,此时通信的数据量不能大,不能将数据传输到地面系统进行处理,而是在本地由单片机进行处理,得出的结果以报警信号的方式输出,当巡线人员来到杆塔下,用手持终端发出请求,然后监测装置将已存储的报警信息发送至手持终端。

### 3. 环境的影响

监测装置安装在杆塔上，它直接受到外界气候条件的影响。首先是温度的影响，考虑到四季的变化和昼夜温差，温度的变化范围很大，必须保证监测装置各个温度下都能正常工作；其次是湿度的影响，污闪是在潮湿的气候条件下发生的，这正是监测装置发挥作用的时候，如果潮湿的气候会影响监测装置的工作，那么监测装置就完全失去了作用，因此必须保证监测装置不受湿度的影响。

针对温度和湿度的影响，在监测装置外壳的设计中采用了整体密封防水结构，有效地防止水分入侵，同时在装置内部设置加热电路，采用 PTC 陶瓷恒温加热元件和温控开关组成温控模块，对装置的各电路板进行加热除潮，并将装置内部的温度控制在要求的范围之内。

#### 4.3.2 系统电磁兼容性

电磁兼容是指设备或系统在所处的电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何其他事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。电磁兼容的主要内容包括抗干扰和电磁发射控制两个方面，抗干扰是指设备和系统抵抗电磁干扰的能力，电磁发射控制指设备和系统发射的电磁能量的控制。

由于监测装置的工作地点是高压输电线路的杆塔上，与输电线路距离较近，因此极易受到工频干扰，而且污秽放电时还会产生放电干扰，如果没有可靠的抗干扰措施，装置可能无法正常工作。

电磁干扰主要有三条途径，即空间感应干扰、通道干扰和电源干扰，本文中监测装置使用太阳能电池供电，可以不考虑电源干扰。空间感应干扰主要来源于电磁场在空间的传播，一般采用良好的屏蔽和正确的接地方法加以解决。通道干扰主要是由于干扰信号串入进出监测装置的引线而引起，如传感器与监测装置之间的引线，按干扰的作用它分为差模干扰和共模干扰，对差模干扰采用带屏蔽的信号线和良好的接地，以及信号滤波可以解决，对共模干扰采用高共模抑制比的差动放大器，并对进出测控装置的测量和控制信号加以隔离等方式来减少共模干扰的影响。

### 4.3.3 抗干扰的硬件设施

#### 1. 无源滤波器

滤波是为了抑制噪声干扰，滤波器按结构分为无源滤波器和有源滤波器。此外，还有用软件实现的数字滤波器。在此，本系统采用了无源滤波器<sup>[29]</sup>。

滤波器最重要的是其频率特性，可用对数幅频特性  $20\lg A$  来表示。在抗干扰技术中又称为衰减系数，即：

$$\text{衰减系数} = 20\lg \left| \frac{U_o(j\omega)}{U_i(j\omega)} \right| \quad (4-1)$$

式中：

$U_o$ ——滤波器的输出信号；

$U_i$ ——滤波器的输入信号；

$\omega$ ——信号的角频率。

衰减系数的单位是 dB。本节应用自动控制原理知识，在考虑输入、输出效应的情况下，通过求滤波器传递函数的方法求地衰减系数。

信号通过滤波器，被滤除（或称为被衰减）的信号频率称为阻带，被传输的信号频带称为通带。根据阻带和通带的频谱，滤波器可分为：

- ① 低通滤波器：阻高频信号通低频信号；
- ② 高通滤波器：阻低频信号通高频信号；
- ③ 带通滤波器：允许规定的某频段信号通过，阻止此频段之外的信号；
- ④ 带阻滤波器：只阻止规定频段内的信号，允许其他信号通过。

在抗干扰技术中，使用最多的是低通滤波器，其主要元件是电容和电感。本系统采用 L 型的 RC 低通滤波器，如图 4-3 所示。

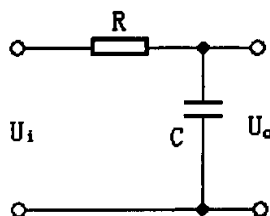


图 4-3 L 型 RC 低通滤波器

其传递函数为：

$$A(S) = \frac{\frac{1}{SC}}{R + \frac{1}{SC}} = \frac{1}{1 + SRC} \quad (4-2)$$

其频率特性为： $A(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$ ； $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$ 。

## 2. 去耦电路

数字电路信号电平转换过程中会产生很大的冲击电流，并在传输线和供电源内阻上产生较大的压降，形成严重的干扰。为了抑制这种干扰，在电路中适当配置去耦电容，即去耦电路。

由于微处理器或单片机三总线上的信息变化几乎是在同一时刻发生的，所产生的尖峰电流对系统的影响是不可忽视的。

尖峰电流的存在给数字系统带来不良影响，它将在电源内阻抗上产生压降，在公共传输导线阻抗上产生压降，是供电电压跳动，从而形成一个干扰源。

欲降低尖峰电流的影响，一种办法就是在步线上采取措施，是杂散电容降至最小。另一种方法是设法降低供电电源的内阻，是尖峰电流不致引起过大的电源电压波动。但本节用的办法是在门电路的电源线端与地线端加接电容  $C_1$  和  $C_2$ （如图 4-4），称为去耦电容。电容  $C_1$  和  $C_2$  的典型值可做如下估算。

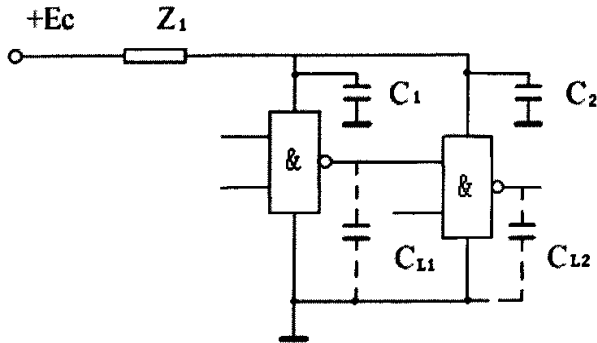


图 4-4 抑制尖峰电流影响的措施

实验表明，电源尖峰电流可达 40~50mA。假定尖峰电流的变化为  $\Delta i = 50\text{mA}$ ，持续时间  $\Delta t = 20\text{ns}$ ，要求电源端电压的跳动  $\Delta e_c \leq 0.1\text{V}$ ，则有式(4-3)

$$C = \frac{\Delta i}{\Delta e_c / \Delta t} = \frac{50 \times 10^{-3} \times 20 \times 10^{-9}}{0.1} = 0.01 \mu F \quad (4-3)$$

如前面所述, 数字电路的开关动作很快, 如 TTL 的动作时间为 5~10ns, 这样便会产生瞬变电流, 在电源内阻抗和公共阻抗作用下, 产生所谓开关噪声。开关噪声使电源电压产生振荡。因线路板的噪声容限很低, 导致数字电路产生误动作。因此, 在印制电路板的各个集成电路配置去耦电容, 应视为印制电路设计的一项常规做法。去耦电容一方面提供和吸收该集成电路开门关门瞬间的充放电能量, 另一方面旁路掉该器件的高频噪声。去耦电容的使用并不严格, 可按  $C=1/F$  选用, 其中  $F$  为电路频率, 即 10MHz 取  $0.1 \mu F$ , 100MHz 取  $0.01 \mu F$ 。对微机控制系统, 取  $0.1 \sim 0.01 \mu F$  之间都可以<sup>[30]</sup>。

### 3. 屏蔽隔离技术与双绞线传输

(1) 屏蔽通常是用低电阻材料形成屏蔽体, 把需要隔离的部分包围起来。这个被隔离的部分既可以是干扰源, 也可以是易受干扰的部分。这样既屏蔽了被隔离部分向外施加干扰, 也屏蔽了被隔离部分接受外来的干扰。

根据干扰的耦合通道性质, 屏蔽可分为电场屏蔽、电磁屏蔽和磁场屏蔽三种。在此, 绝缘子在线检测仪处于高压电场中, 电场干扰是一种主要的干扰形式, 因此我们采用静电屏蔽技术。

静电屏蔽是将任意形状的空心导体置于任意电场中, 电力线将垂直地终止于导体的表面, 而不能穿过导体进入空腔, 因此放在导体空腔内的物体将不受外界电场的影响。利用这一性质, 可以屏蔽一些电子设备和信号传输导线, 使其不受外界干扰。但是, 注意当导体空腔不接地时, 尽管腔内仍是等电势, 但这个等电势的电势值随外电场而变化, 如图 4-5 所示。若将导体接地, 则腔内电势值不变, 内部电子设备产生的电场不会影响外界, 如图 4-6 所示。

静电屏蔽的方法一般是在电容耦合通道上插入一个接地的金属屏蔽导体。由于金属屏蔽导体接地, 其中的干扰电压为零, 从而隔断了电场干扰的原来耦合通道<sup>[31]</sup>。

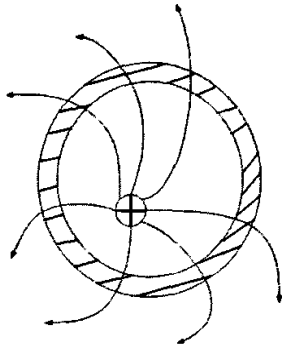


图 4-5 导体不接地

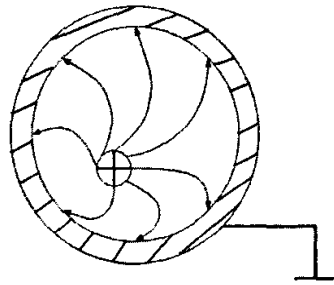


图 4-6 导体接地

(2) 双绞线和金属屏蔽线的使用。由于平行线间分布电容较大，抗干扰能力差，不仅静电感应容易通过分布电容耦合，而且磁场干扰也会在信号线上感应出干扰电流。因此在干扰严重的场所，一般将信号线加以屏蔽，以提高抗干扰能力。

在此，本节采用金属网状编织的屏蔽线，金属编织网作为屏蔽外层，芯线用来传输信号。一般的原则是：抑制静电感应干扰采用金属网的屏蔽线，抑制电磁感应干扰应该用双绞线。

屏蔽层起静电作用，屏蔽层必须正确接地。如果屏蔽层不接地，于是屏蔽层上的干扰电压为：
$$V_s = \frac{C_{1s}}{C_{1s} + C_{2g}} \times V_1$$

由于  $C_{2s}$  中无电流流过，芯线的干扰电压为： $V_n = V_s$

可见屏蔽不接地，对电容性耦合的静电干扰没有屏蔽作用。如果屏蔽层接地，且由于  $R=0$ ，使得芯线的干扰电压  $V_n$  也为零。

实际上，中心导线的两端总有一些伸出屏蔽层外，加之屏蔽编织网的覆盖率也不是 100%，因而，屏蔽导线的干扰电压也就不能完全为零。实际结果是大大减少了屏蔽线与传输导线之间的电容，从而极大地削弱了静电干扰。由于屏蔽层与中心导线之间存在着分布电容，屏蔽体层必须接地，否则会通过屏蔽层、分布电容将干扰引入中心导线内。屏蔽层的接地方法一般在屏蔽层的一端接地，以避免两端地时电阻压降所造成的干扰耦合<sup>[32]</sup>。

假设干扰线的干扰电流为  $i$ ，屏蔽线电阻为  $r_s$ ，电感为  $L_s$ ，屏蔽线对地分布电容为  $C_{2g}$ ，干扰线与屏蔽线的互感为  $M$ ，芯线与屏蔽层的分布电容为  $C_{2s}$ ，如图 4-7 所示。

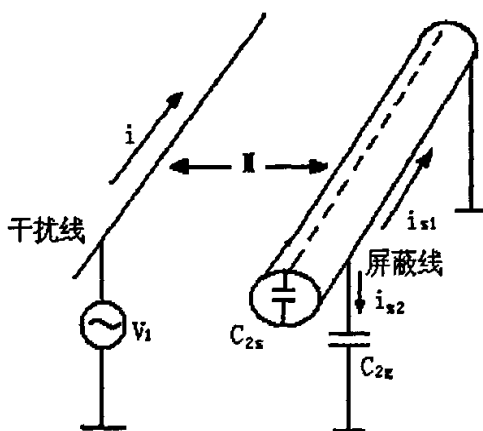


图 4-7 屏蔽线使用方法

通过互感  $M$ , 屏蔽线回路感应的干扰电压  $V_S$  为:  $V_S = \frac{d}{dt}(Mi) = M \frac{di}{dt} = j\omega Mi$

电压  $V_S$  形成的电流方程式为:

$$i_S = i_{s1} + i_{s2} = \frac{V_S}{r_S \parallel 1/j\omega C_{2g}} = \frac{V_S}{Z_S} \quad (4-4)$$

由于  $C_{2S}$  中无电流流过, 芯线上的干扰电压  $V_n = V_S$ 。

但是, 屏蔽线对外界交变磁场产生的感应干扰的抑制能力较差, 故在工程实践中, 可以综合双绞线和屏蔽线两者的优点, 将双绞线穿在钢管或金属蛇皮管中, 并将钢管和金属蛇皮管牢固地接地, 可收到较好的抗干扰效果。

#### 4. 接地技术

电气设备中的“接地”, 通常有两种含义: 一种是“接大地”, 接大地可以保证设备和人身安全, 提供静电屏蔽通路, 降低电磁感应噪声; 另一种是“接工作基准地(系统地)”, 这种接地是为个部分提供稳定的基准电位。对这种接地的要求是尽量减少接地回路中的公共阻抗压降, 以减少系统中干扰信号公共阻抗耦合。

在本系统探讨中, 主要研究工作接地的情况。控制系统中的基准电位是各回路工作的参考电位, 基准电位的连线称为工作地(系统地), 通常是控制回路直流电源的零伏导线<sup>[33]</sup>。微机测控系统都不用大地作为信号返回路径。在本测控系统中, 把数字电子装置和模拟电子装置的工作基准地浮空, 而设备外壳采

用屏蔽接地。浮地方式可使微机系统不受大地电流的影响，提高了系统的抗干扰性能。由于强电设备大部分采用保护接地，浮空技术切断了强电与弱电的联系，系统运行安全可靠。微机系统设备外壳采用屏蔽接地，从防止静电干扰和电磁感应干扰的角度和人身设备安全的角度来看，是非常必要的。

本系统采用“浮空+保护屏蔽层”的接地方案，如图 4-8 所示。这种方案的特点是将电子部件外围附加保护屏蔽层，且与机壳浮空；信号采用三线传输方式，即屏蔽电缆中的两根芯线和电缆屏蔽外皮线；机壳接地。

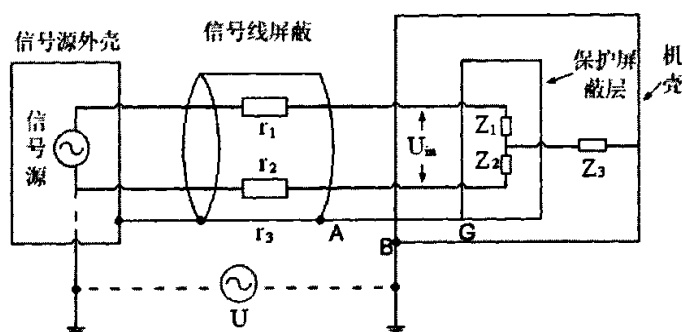


图 4-8 浮空+保护屏蔽层+机壳接地方案

图 4-8 中信号线的屏蔽外皮 A 点接附加保护屏蔽层的 G 点，但不接机壳 B。假设系统采用差动测量放大器，信号源信号采用双芯信号屏蔽线传送， $r_3$  为电缆屏蔽外皮的电阻， $Z_3$  为附加保护屏蔽层相对机壳的绝缘电阻， $Z_1$ 、 $Z_2$  为二信号线对保护层的阻抗，则有：
$$U_m = \frac{r_3}{Z_3} \left[ \frac{r_1 Z_2 - r_2 Z_1}{(r_1 + Z_1)(r_2 + Z_2)} \right] \cdot U。$$

显然，只要增大附加保护屏蔽层对机壳的绝缘电阻，减少相应的分布电容，则有  $r_3/Z_3 \ll 1$ 。从物理意义上讲，共模噪声电压  $U$  经  $r_3$  与  $Z_3$  分压，再由  $r_1$ 、 $r_2$  对  $Z_1$ 、 $Z_2$  分压，然后加到系统输入端，即浮空屏蔽从阻抗上截断了共模噪声电压  $U$  对信号回路的影响。信号传输线屏蔽层不仅起一般静电屏蔽作用，而且构成对共模噪声的短路。



### 4.3.4 抗干扰的软件设施

#### 1. NOP 的使用

可在双字节指令和 3 字节指令之后插入两个单字节 NOP 指令，这可保证其后的指令不被拆散。因为“乱飞”的程序即使落到操作数上，由于两个空操作指令 NOP 的存在，不会将其后的指令当操作数执行，从而使程序纳入正轨。

对程序流向起决定作用的指令（如 RET、RETI、ACALL、LCALL、LJMP、JZ、JNZ、JC、JNC、DJNZ 等）和某些对系统工作状态起重要作用的指令（如 SETB、EA 等）之前插入两条 NOP 指令，可保证乱飞程序迅速纳入轨道，确保这些指令正确执行。

#### 2. 重要指令冗余

对于程序流向起决定作用的指令（如 RET、RETI、ACALL、LCALL、LJMP、JZ、JNZ、JC、JNC 等）和某些对系统工作状态起重要作用的指令（如 SETB、EA 等）的后面，可重复写上这些指令，以确保这些指令的正确执行。

由以上可看出，采用冗余技术使单片机纳入正确轨道的条件是：跑飞的单片机必须指向程序运行区，并且必须执行到冗余指令<sup>[34]</sup>。

#### 3. 软件陷阱技术

软件陷阱就是用引导指令强行将捕获到的乱飞程序引向复位入口地址 0000H，在此处将程序转向专门对程序出错进行处理的程序，使程序纳入正轨。软件陷阱可采用两种形式，如表 4-1 所示。

表 4-1 软件陷阱

程序形式	软件陷阱形式	对应入口形式
形式之一	NOP NOP LJMP 0000H	0000H: LJMP MAIN; 运行程序 : :
形式之二	LJMP 0202H LJMP 0000H	0000H: LJMP MAIN; 运行主程序 : 0202H: LJMP 0000H :

根据乱飞程序落入陷阱区的位置不同,可选择执行空操作、转到 0000H 和直转 0202H 单元的形式之一,使程序纳入正轨,指定运行到预定位置。以下是软件陷阱的几种安排:

#### (1) 未使用的中断区

当未使用的中断因干扰而开放时,在对应的中断服务程序中设置软件陷阱,就能及时捕捉到错误的中断。在中断服务程序中要注意:返回指令用 RETI,也可用 LJMP。

#### (2) 未使用的 EPROM 空间

在单片机使用的 EPROM 中,很少全部用完,这些非程序用区可用 00000200000 或 020202020000 数据填满。注意,最后一条填入数据应为 020000。当乱飞程序进入此区后,变会迅速自动转入正轨。

#### (3) 运行程序区

前面曾指出,乱飞的程序在用户程序内部跳转时可用指令冗余技术加以解决,也可以设置一些软件陷阱,更有效地抑制程序乱飞,使程序运行更加可靠。程序设计时常采用模块化设计,按照程序的要求一个模块,一个模块地执行。可以将陷阱指令组分散放置在用户程序各模块之间空余的单元里。在正常程序中不执行这些陷阱指令,保证用户程序正常运行。但当程序乱飞一旦落入这些陷阱区,马上将乱飞的程序拉到正确轨道。

#### (4) 中断服务程序区

假设主程序运行区间为 ADD1~ADD2,并设定定时器 T0 产生 10ms 定时中断。当程序乱飞落入 ADD1~ADD2 区间外,若在此用户程序区外发生了定时中断,可在中断服务程序中判定中断断点地址为 ADDX。若  $ADDX < ADD1$  或  $ADDX > ADD2$ ,说明发生了程序乱飞,则应使程序返回到复位入口地址 0000H,使乱飞程序纳入正轨。

#### (5) RAM 数据保护的陷阱

单片机外的 RAM 保存大量数据,这些数据的写入使用“MOVX@DPTR, A”指令来完成。当 CPU 受到干扰而非法执行该指令时,就会改写 RAM 中的数据,导致 RAM 中数据丢失。为了减少 RAM 中数据丢失的可能性,可在 RAM 写操作之前假如条件陷阱,不满足条件时不允许协作,并进入陷阱,形成死循环。具体程序如下:

```

MOV    A, #NNH
MOV    DPTR, #XXXXH
MOV    6EH, #55H
MOV    6FH, #0AAH
LCALL  WPDP
RET
WRDP:  NOP
      NOP
      NOP
      CJNE 6EH, #55H, XJ ; 6EH 中不为 55H 则落入软件陷阱
      CJNE 6FH, #0AAH, XJ ; 6EH 中不为 AAH 则落入软件陷阱
      MOV  @DPTR, A ; A 中数据写入 RAM 的 XXXXH 中
      NOP
      :
      :
XJ:    NOP ; 死循环
      NOP
      LJMP XJ

```

落入死循环之后，可以通过后面讲述的“看门狗”技术使其摆脱困境。

#### 4. 软硬件结合的“看门狗”技术

硬件“看门狗”技术能有效监视程序陷入死循环故障，但对中断关闭故障无能为力；软件“看门狗”技术对高级中断服务程序陷入死循环无能为力，但能监视全部中断关闭的故障。故将硬件“看门狗”与软件“看门狗”结合起来，获得优良的抗干扰效果<sup>[35]</sup>。图 4-9 为软硬件“看门狗”主程序流程图。

图中的 A0、A1 为 T0、T1 中断运行状态观测器。每当 T0、T1 中断一次，A0、A1 分别加 1。E0、E1 为 A0、A1 的暂存单元，在主程序测控功能模块的入口处暂存 A0、A1 于 E0、E1 单元。由于测控模块程序一般很长，执行一次测控模块程序时间内，T0、T1 必发生定时中断。在测控功能模块的出口处，将 A0、

A1 分别同 E0、E1 暂存值比较，以判断 A0、A1 是否变化，从而也就观测出 T0、T1 的中断是否正常执行。若中断因干扰而关闭，A0、A1 值不会变化，与暂存单元 E0、E1 中的值完全相同，这时程序转向 0000H，进行出错处理。T0、T1 中断服务程序流程图如图 4-10 所示。

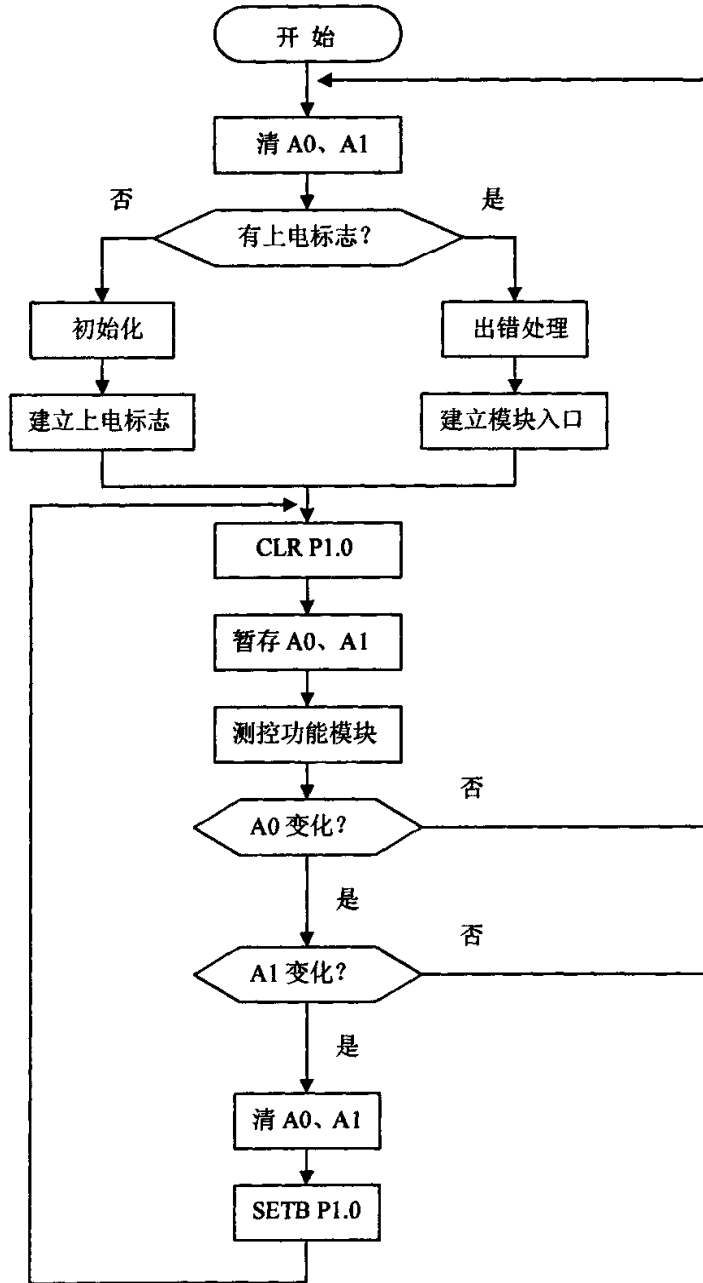


图 4-9 主程序流程图

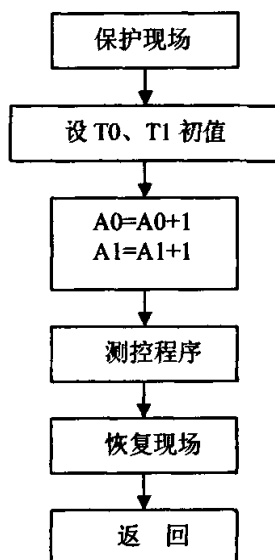


图 4-10 T0 和 T1 中断服务程序流程图

### 5. 软件复位与中断激活标志

所谓软件复位，是指系统失控后由软件陷阱捕捉到乱飞程序，将其直接引向 0000H 单元，或者由软件“看门狗”技术将程序脱离死循环而引向 0000H 单元。系统受到干扰后，很可能是在执行中断服务过程中而导致程序乱飞。MCS-51 系统响应中断后会自动把相应的中断激活标志置位，阻止同级中断响应。清除中断激活标志的方法有两个，其一是系统硬件复位，其二是执行 RETI 指令。当系统在执行中断服务时，来不及执行 RETI 指令因干扰而跳出中断服务程序，程序乱飞过程中由软件陷阱而将程序引向 0000H，显然这时便不可能清除该中断的激活标志。这样就会使系统热启动时，不管中断允许标志是否置位，都不予响应同级中断的请求。由软件陷阱捕获来的程序一定要先完成清除 MCS-51 系列中两个中断激活标志，才能消除系统热启动后不响应中断的隐患。消除中断激活标志程序如下：

```

ERR:    CLR     EA           ; 关中断
        MOV    DPTR, #ERR1   ; 返回 ERR1 地址
        PUSH  DPL
    
```

```

        PUSH      DPH
        RETI                               ; 清除高级中断激活标志
EER1:  MOV      DPDR, #ERR2              ; 返回出错处理程序入口地址
        PUSH      DPL
        PUSH      DPH
        RETI                               ; 清除低级中断激活标志
    
```

### 6. 数字滤波器

数字滤波器是将一组数字序列进行一定的运算而转换成另一组输出数字序列的装置<sup>[36]</sup>。测量信号的数字滤波器处理流程如图 4-11 所示。

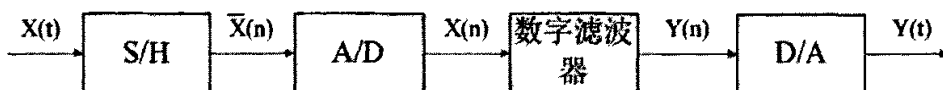


图 4-11 模拟信号的数字滤波

设数字滤波器的输入  $X(n)$ ，输出为  $Y(n)$ ，则输入序列和输出序列之间的关系可用差分方程式表示为

$$Y(n) = \sum_{k=0}^N a_k X(n-k) - \sum_{k=1}^N b_k Y(n-k) \quad (4-5)$$

式中，输入信号  $X(n)$  可以是模拟信号经采样和 A/D 变换后得到的数字序列，也可以是计算机的输出信号。

参数  $a_k$ 、 $b_k$  的选择不同，可以实现低通、高通、带通、带阻等不同的数字滤波器。通常，在单片机上用汇编语言可以实现各种滤波。包括程序判断滤波法、中位值滤波法、算术平均滤波法、递推平均滤波法、防脉冲干扰平均值滤波法、一阶滞后滤波法，文中运用了防脉冲干扰平均值滤波法，并介绍了其常用的数字滤波子程序。在脉冲干扰比较严重的场合，如果采用一般的平均值法，则干扰将会“平均”到结果中去，故平均值法不易消除由于脉冲干扰而引起的误差。为此，可先去掉  $N$  个数据中的最大值和最小值，然后计算  $N-2$  个数据的算术平均值。为了加快测量速度，一般  $N$  取 4。以下写出一个防脉冲干扰平均值滤波法的例子。本程序调用 A/D 测量输入子程序 RDAD，它将测量的一个数据送到寄存器 B 和累加器 A 中，输入数据的字长小于等于 13 位二进制数，即小于等于 1FFFH。使 R0 作为计数器，R2、R3 中存放最大值，R4、R5 中存放最小值，

R6、R7 中存放累加值和最后结果。程序清单如下：

```

DAVG:  CLR      A
        MOV     R2, A      ; 最大值初态
        MOV     R3, A
        MOV     R6, A      ; 累加和初态
        MOV     R7, A
        MOV     R4, #1FH   ; 最小值初态
        MOV     R5, #0FFH
        MOV     R0, #04H   ; N=4
DAV1:  LCALL   RDAD      ; A/D 输入送 B, A 中
        MOV     R1, A      ; 暂存输入低字节
        ADD    A, R7      ; 累加输入值
        MOV     R7, A
        MOV     A, B
        ADDC   A, R6
        MOV     R6, A
        CLR    C
        MOV     A, R3      ; 输入值与最大值比较
        SUBB   A, R1
        MOV     A, R2
        SUBB   A, B
        JNC    DAV2
        MOV     A, R1      ; 输入值大于最大值
        MOV     R3, A
        MOV     R2, B
DAV2:  CLR    C
        MOV     A, R1      ; 输入值与最小值比较
        SUBB   A, R5
        MOV     A, B
        SUBB   A, R4
        JNC    DAV3
    
```



```

MOV      A, R1
MOV      R5, A      ; 输入值小于最小值
MOV      R4, B
DAV3:    DIJZ      R0, DAV1
        CLR      C
MOV      A, R6      ; 累加和中减去最大值
SUBB     A, R2
MOV      R6, A
MOV      A, R7
SUBB     A, R3
MOV      R7, A
MOV      A, R6      ; 累加和中减去最小值
SUBB     A, R4
MOV      R6, A
MOV      A, R7
SUBB     A, R5
CLR      C
RRC      A          ; 除以 2
MOV      R7, A
MOV      A, R6
RRC      A
MOV      R6, A
RET
    
```

## 7. 编写软件的其他注意事项

提高微机测控系统运行的可靠性，除了采取指令冗余、软件陷阱、“看门狗”技术之外，编写程序时还应注意以下几点：

(1) 尽量采用单字节指令，以减少因干扰而程序乱飞的机率。

(2) 慎用堆栈。程序运行中经常与堆栈打交道，但堆栈操作因干扰而出错的机率教大，堆栈操作次数越多，出错机率也越大。因此，在使用堆栈操作指令时，一次不能使用太多，减少子程序的个数，特别注意不要使子程序嵌套层次

太多。

从抗干扰的角度，栈区的设置应远离程序区、数据区，最好单独设置，避免影响程序的其他部分。

(3) 屏蔽中断是受 CPU 内部中断允许控制寄存器控制的中断。不可屏蔽中断不受 CPU 内部中断允许控制寄存器控制。系统受干扰时，很有可能使中断允许控制寄存器失效，从而使中断关闭。因此，“看门狗”发出的故障信号应接入 CPU 的不可屏蔽中断输入端 NMI。MCS-51 单片机没有不可屏蔽中断控制方式，“看门狗”电路输出的故障信号应接复位信号 RESET 端。

(4) 硬件“看门狗”电路，定时输出清除脉冲最好不用 T0、T1 等内部定时器的中断方式，因为 CPU 因干扰有可能使主程序陷入死循环，但定时器中断仍然发生，继续发出清除脉冲信号，使“看门狗”电路失效。

(5) 硬件“看门狗”电路的输出信号，最好不要接在  $\overline{INT0}$  或  $\overline{INT1}$  脚，而要与 RESET 脚连接。因为 CPU 因干扰有可能破坏系统的中断允许、控制寄存器，或者非法执行了关中断指令，这将使“看门狗”电路失去监视功能。

(6) 微机系统所采用的可编程 I/O 芯片，如 8255、8251 等，原则上在上电启动后初始化一次即可，但工作模式控制字可能因噪声干扰等原因受到破坏，使系统输入/输出状态发生混乱。因此，在应用过程中，每次用到这种接口时，都要对有关功能重新设定一次，确保接口的可靠工作<sup>[37]</sup>。

## 第 5 章 系统所用的智能技术

### 5.1 概论

由于受到电极形状、温度、湿度等外界条件的影响，污秽放电产生的声发射信号是无法用精确的函数来预测的，这一点在污秽试验中也反映出来了，在相同的电压、相同的污秽度的条件下进行的污秽试验，所得到的数据也会有一定的区别，因此，采用传统的数学方法对数据进行处理会有很大的困难，而模糊推理的方法可以较好地完成这个任务。

模糊逻辑方法具有多因素综合分析的特点，因而适合于对受多种因素影响的不确定性结论的事物或现象作出总的评价。即对被评判事物或现象，通过赋予每个影响它的因素一个评判指标，再根据所给条件计算分析得出其总体的带一定倾向性的结论<sup>[38]</sup>。

模糊逻辑方法的应用，包括模糊集合的建立，即模糊输出集、模糊关系集和模糊数据输入集等；模糊运算规则的确定，即通过何种方法实现模糊量之间的运算、模糊判据的建立，它包括输入数据的模糊化关系即模糊隶属度函数的建立、模糊输出量的判定等。

在现实中存在大量的模糊现象，需要人们根据模糊的前提得出合乎逻辑的结论，这时就要采取模糊推理的方法。

经典的二值逻辑只是理想世界的模型，而不是现实世界的模型。模糊逻辑则不同，它摒弃了二值逻辑简单的肯定或否定，把客观逻辑世界看出是具有连续灰度等级变化的，它允许一个命题亦此亦彼，存在着部分肯定和部分否定，更加符合人类的思维方式，并且为计算机处理普遍存在的语言信息提供了可能。

用传统的二值逻辑进行演绎推理和归纳推理时，只要大前提或者推理规则是正确的，小前提是肯定的，那么就一定会得到正确的结论。然而在现实生活中，我们获得的信息往往是不准确的、不完全的；或者事实本身就是模糊二不完全确定的，但又必须利用且只能利用这些信息进行判断和决策。此时，传统的形式逻辑和近代的数理逻辑均无法解决这类问题，解决模糊问题就需要模糊推理。

模糊逻辑推理是一种不确定性的推理方法，其基础是模糊逻辑，它是在二值逻辑三段论的基础上发展起来的。由于它缺乏现代形式逻辑中的性质以及理论上的不完善，这种推理方法尚未得到一致的公认。但是，这种逻辑方法所得到的结论与人的思维一致或者相近，在实践中证明是有用的。模糊推理是一种以模糊判断为前提，运用模糊语言规则，推出一个新的近似的模糊判断结论的方法<sup>[39]</sup>。

在文中，要解决的问题是如何根据声发射信号判断污秽放电的强弱，而由于放电具有随机性，即使在条件完全相同的情况下，每一次放电所产生的声信号都是不同的，因此，如果用传统的数学方法，给出一个或几个阈值，认为大于阈值的就是放电强，会对系统产生威胁，那么对相同条件下的放电也会得出不同的结果，这显然是不科学的，不能正确地反映绝缘子的工作状态，采用模糊推理的方法就可以避免这一问题。

根据前面的试验可以看出，试验条件，即试验电压和污秽度是确定的，而试验结果，即声信号是不确定的，而且二者之间的关系也是不确定的，只能从声信号的“大”、“小”来判断污秽放电的“强”、“弱”，这些概念都是模糊的，因此无法建立精确的数学模型。而模糊推理的方法可以在所获得的模糊信息前提下进行有效的判断，也不依赖于精确的数学模型，因此在文中特别适用。

通过对模糊推理的了解，结合对污秽放电的特点和对试验数据的分析，认为模糊推理的方法可以较好地处理这一问题，所以决定采用模糊推理的方法，下面就介绍所涉及的一些模糊数学和模糊推理基本知识。

## 5.2 系统中的模糊逻辑测试方法

在自动控制领域，模糊控制理论及其应用的研究取得了很大的进展，美国 NeuraLogix 公司推出的 NLX230 型单片模糊控制器是一种可编程的超大规模集成模糊逻辑微处理器 FMC (Fuzzy Micro Controller)，根据模糊逻辑原理对输入条件进行模糊逻辑运算，得到最优的动作，通过执行并行操作控制输出，处理速度高达 30M/s，可广泛应用于过程嵌入式控制、模式匹配、人工智能、机器人及专家系统等。

模糊逻辑在控制领域的应用原理是利用模糊逻辑器件通过“项”和“规则”去构造任意复杂的线性和非线性函数，再根据输入状态经过模糊推理，找到最佳的

输出动作值并应用于控制过程，从而使模糊逻辑获得类似于人类专家似然推理的能力。

NLX230 基于条件用模糊逻辑规则计算出优化的输出操作。输入值在用户定义的隶属函数中按适合的程度排序。为了实施有效的数字化，采用 1 个线性对称隶属函数或最简单的最大/最小模糊参考方法，规则决定了在输入时所需的的状态集，每一规则至多包含 16 个项，每 1 个项与 1 个“清晰”输入/模糊隶属函数配对。1 个当前值是对用户在某一规则下的输出值合计的修改。对于所有的输入和输出，输入排序与规则处理是并行的。单片式 24 位宽的规则存储器最多可存 64 个规则，所有输入都可共享这些规则。根据需要每个输出可以被编程为最多用 64 个规则，任一个输出所用的规则个数是其他规则所用的规则的剩余数。模糊逻辑原理的高效数字化实现使 NLX230 在低价格下获得高处理速度（30M/s）。

在相似判决模糊逻辑单元内求取隶属值的电路结构如图 5-1 所示。模糊逻辑单元内被选定的隶属函数中心点值和确值输入送进减法器计算出差值  $ac$ ，该差值与隶属函数宽度值相比较，只有当差值在宽度范围内时，隶属值计算器才输出结果，否则，隶属值计算器输出将被置零或置最小值。隶属值实际上是 1 个模糊逻辑量，用  $\mu$ （或  $d$ ）表示。

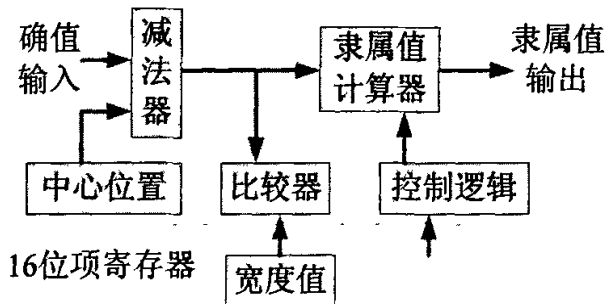


图 5-1 模糊逻辑单元

NLX230 型模糊控制器的内部结构如图 5-2 所示，它由模糊输入选择器，16 个模糊单元、最小和最大比较器、规则寄存器、输出寄存器和定时控制等部分组成，完成模糊推理运算并做出控制决策。

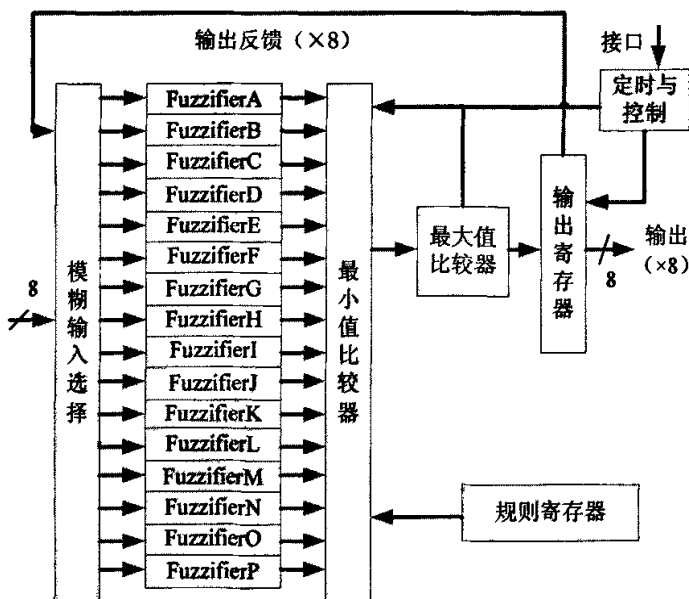


图 5-2 NLX230 型模糊控制器的内部结构

模糊数学是处理模糊信息的工具，是一种描述和加工模糊信息的方法，它用数学的科学方法描述模糊现象，揭示其本质和规律。模糊运算规则决定了模糊决策的方式。一般模糊运算规则有确定性规则、渐进规则、可能性规则、反渐进规则等多种不同的形式，但这些运算都是基于集合运算的法则进行的，即都属于  $\max\text{-min}$  关系运算形式。具体到绝缘子绝缘性能的模糊决策，考虑到各种因素的作用结果都必须在输出结果中有所体现，所以设计采用基于代数矩阵的运算规则以充分反映各种因素对分析结果的影响。

模糊推理是一种以模糊判断为前提，运用模糊语言规则，推出一个新的近似的模糊判断结论的方法。

模糊推理的定义: 设  $A$ ,  $A^*$  和  $B$  分别是  $X$ ,  $X^*$  和  $Y$  上的模糊集合，模糊蕴含  $A \rightarrow B$  表示为  $X \times Y$  上的模糊关系  $R$ 。则由“ $x$  是  $A$ ”和模糊规则“如果  $x$  是  $A$  则  $Y$  是  $B$ ”导出的模糊集合  $B$  定义为:

$$\mu_{B^*}(y) = \max_x \min[\mu_{A^*}(x), \mu_R(x, y)] \quad (5-1)$$

或等价于:  $B^* = A^* \cdot R = A^* \cdot (A \rightarrow B)$ 。

在模糊逻辑推理中有两种重要的推理方法，即所一谓的广义肯定前件式和

广义否定后件式<sup>[40]</sup>。

广义肯定前件式有如下推理过程：

小前提(特殊证据): $x$  为  $A^*$

大前提(一般规则):如果  $x$  为  $A$ , 则  $y$  为  $B$

结论: $y$  为  $B^*$

广义否定后件式具有如下推理过程：

小前提: $Y$  不是  $B^*$

大前提:如果  $x$  为  $A$ , 则  $Y$  为  $B$

结论: $x$  不是  $A^*$

其中  $A, B, A^*, B^*$  均为模糊集合,  $x$  和  $y$  为语言变量。

模糊推理中肯定前件式是一种前向模糊匹配的推理, 将  $A^*$  与  $A$  匹配以激活规则, 而后导出结论  $B^*$ , 它与前向数据驱动的推理有关。否定后件式则是一种后向推理, 与后向目标驱动的推理有关<sup>[41]</sup>。

上面给出的是模糊推理的基本形式, 要得到推理的具体规则和公式, 还必须对上面的逻辑结构形式用模糊数学的语言表达出来, 包括以下几个方面:

① 推理形式中的小前提是由“ $x$  为  $A^*$ ”、“ $y$  不是  $B^*$ ”这种称为模糊判断句的形式组成, 需要对它进行数学描述;

② 大前提是由两个模糊判断句组成的蕴涵式, 称为模糊推理句, 需要用模糊数学方法进一步描述;

③ 对由大、小前提组成的推理过程, 用模糊数学的方法进行描述, 即模糊推理的合成规则。

模糊判断句:

在推理形式中, 小前提“ $x$  为  $a$ ”中的  $a$  是一个模糊概念,  $a \in A$ , “ $x$  为  $a$ ”则称为模糊判断句。模糊判断句不存在对  $x$  为真或为假的问题, 而是对  $x$  为真的程度由多大的问题。“ $x$  是  $a$ ”简记为  $(a(x))$ , 它的真值记为  $T(a(x))$ , 表示模糊判断句对  $x$  为真的程度。模糊判断句“ $x$  为  $a$ ”包含一个模糊概念  $a$ , 它对应一个模糊集合  $A$ 。显然对某一个  $x \in X$ , 模糊判断句对  $x$  为真的程度与  $x$  符合模糊概念的程度  $\mu_A(x)$  是一样的, 因此:  $T(a(x)) = \mu_A(x)$ 。

模糊判断句 $(a)$ 的集合表示为  $A$ , 称  $A$  为模糊判断句 $(a)$ 的真域, 它的隶属函数  $\mu_A(x)$  表示了 $(a)$ 对  $x$  为真的程度。

## 5.3 系统中模糊推理规则库的制订

### 5.3.1 库的数据收集与分析

模糊决策的关键在于模糊集合及模糊隶属度函数的确立，它直接关系到模糊判断的正确与否。

集合是数学的一个基本概念，是现代数学中最重要的工具之一，相对的，模糊集合是模糊数学中一个重要的基本概念，它表示的是元素属于集合的程度。

定义：模糊集合与隶属函数

设  $x$  是对象  $x$  的集合， $r$  是  $x$  的任一元素。 $x$  上的模糊集合  $A$  定义为—组有序对：

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (5-2)$$

式(5-2)中， $\mu_A(x)$ 被称为模糊集合  $A$  的隶属函数(MF)。通常，称  $X$  为论域，或简单地称为域，它或者是离散的对象集，或者是连续空间<sup>[42]</sup>。

模糊集合的建立取决于两个因素：找到适当的论域和定义合适的隶属函数。隶属函数的定义是主观的，即同一个概念由不同的人所定义的隶属函数可能会由很大的不同。但是只要反映同一模糊概念，尽管形式不同，在解决和处理模糊信息问题中效果仍然是相似的，只是有优劣之分。校验隶属函数建立得是否合适的标准是看它是否符合实际。

在实际应用中，通常选用一些典型函数作为隶属函数，再根据实际情况调整它的参数，达到最好的效果。常用的隶属函数有高斯隶属函数、梯形函数等。

### 5.3.2 库的制订

#### 1. 模糊推理句：

模糊推理的大前提是“如果  $x$  为  $A$ ，则  $Y$  为  $B$ ”这种由两个判断句构成的蕴涵式，这种句型称为模糊推理句。更一般的，句型“如果  $x$  为  $a$ ，则  $Y$  为  $b$ ”称为推理句，记为  $(a) \rightarrow (b)$ ，如果  $a$  与  $b$  均为模糊概念，则称为模糊推理句<sup>[43]</sup>。

设模糊判断句  $(a)$  和  $(b)$  的真域分别为模糊集合  $A$  和  $B$ ， $A \in F(X)$ ， $B \in F(Y)$ ，定义  $(a) \rightarrow (b)$  的真域为模糊集合  $R$ ， $R \in F(X \times Y)$  约， $R$  的隶属函数  $\mu_R(x, y)$  就代表了  $(a) \rightarrow (b)$  对元素  $(x, y)$  为真的程度。



对任意 $(x, y) \in X \times Y$ , 由模糊命题 $(a(x))$ 和 $(b(y))$ 组成的蕴涵式 $(a(x)) \rightarrow (b(y))$ , 其真值为:

$$\begin{aligned} T((a(x)) \rightarrow (b(y))) &= (T(a(x)) \wedge T(b(y))) \vee (1 - T(a(x))) \\ &= (\mu_A(x) \vee \mu_B(y)) \wedge (1 - \mu_A(x)) \end{aligned} \quad (5-3)$$

它对应的是 $(a) \rightarrow (b)$ 对元素 $(x, y)$ 为真的程度, 即 $\mu_R(x, y)$ , 得:

$$\mu_R(x, y) = (\mu_A(x) \vee \mu_B(y)) \wedge (1 - \mu_A(x)) \quad (5-4)$$

对应的集合形式为:  $R = (A \times B) \cup (\bar{A} \times Y)$  .

与普通推理句类似, R 是 X 到 Y 的一个模糊关系, 它的隶属函数就给出了模糊推理句对元素 $(x, y)$ 为真的程度。

## 2. 模糊推理的合成规则:

对大、小前提组成的推理过程, 用模糊数学的方法进行描述, 这就是模糊推理的合成规则。

假定 A 是 X 上的一个模糊子集, 而 R 是从 X 到 Y 的一个模糊关系。构造一个底为 A 的柱状模糊集合  $A^*$ , 使之与模糊关系 R 相交, 就得到模糊集合  $A^* \cap R$ , 然后把这个集合投影到 Y 轴上, 就得到了 Y 上的模糊集合 B, 所以 B 可以表示为:  $B = A \circ R$ 。令  $\mu_A, \mu_{A^*}, \mu_B$  和  $\mu_R$  分别是 A,  $A^*$ , B 和 R 的隶属函数, 其中  $\mu_A$  与  $\mu_{A^*}$  有关, 即  $\mu_{A^*}(x, y) = \mu_A(x)$  .

于是  $A^*$  与 R 相交, 得:

$$\begin{aligned} \mu_{A^* \cap R}(x, y) &= \min[\mu_{A^*}(x, y), \mu_R(x, y)] \\ &= \min[\mu_A(x), \mu_R(x, y)] \end{aligned} \quad (5-5)$$

投影到 y 轴上, 有:  $\mu_B(y) = \max_x \min[\mu_A(x), \mu_R(x, y)]$  .

上式即为 B 的隶属函数, 也就是可以由模糊集合 A 和模糊关系 R 来求出 B。给出了判断句, 推理句的集合描述以及模糊推理的合成规则, 就可以进一步给出模糊推理的算法。

在本文中采用的是 Mamdani 的模糊推理算法。Mamdani 提出了一个称为最小运算规则的运算来定义模糊推理的大前提所表达的 X 到 Y 的模糊关系, 记为  $R_c$ :  $R_c = A \times B = \int_{x, y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) / (x, y)$  .

对于肯定前件式, 结论 B 可以由  $B = A^* \circ R$  求得, 对于合成运算“ $\circ$ ”本文中取为运算  $\vee - \wedge$ , 所以有:

$$B = A \circ R_c = \int \vee (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)) / y \quad (5-6)$$

确定了模糊推理的算法后,就可以对数据进行处理,下面介绍使用模糊推理进行处理的过程。

## 5.4 系统检测数据的智能处理

根据污秽试验获得的数据,找出了可以表征污秽放电强度的声发射信号的三个特征量:最大幅值、最大面积和连续周期数。下面使用模糊推理的方法对这三个量进行处理,首先是模糊处理:

定义输入的三个语言变量 A、B、C, A 是最大幅值, B 是最大面积, C 是连续周期数。其中:

A 的论域为  $X=(0, 4500)$ , 它的术语集合为:  $T(A)=T(\text{小}, \text{大})$ 。

隶属函数是高斯函数, 即:

$$\mu_{\text{小}}(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{x^2}{2 \times 1500^2}} \quad (5-7)$$

$$\mu_{\text{大}}(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{(x-4500)^2}{2 \times 1000^2}} \quad (5-8)$$

B 的论域是  $Y=(0, 60000)$ , 它的术语集合是:  $T(B)=T(\text{小}, \text{中}, \text{大})$ 。它的隶属函数是梯形隶属函数, 梯形隶属函数的定义为:

$$f(y, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & y \leq a \\ \frac{y-a}{b-a} & a \leq y \leq b \\ 1 & b \leq y \leq c \\ \frac{d-y}{d-c} & c \leq y \leq d \\ 0 & y \geq d \end{cases} \quad (5-9)$$

隶属函数为:

$$\mu_{\text{幅内}}(u) = \text{sigmf}(u, [100, 0.8]) \quad (5-10)$$

$$\mu_{\text{中}}(y) = f(y, 10000, 20000, 35000, 40000) \quad (5-11)$$

$$\mu_{\text{大}}(y) = f(y, 25000, 40000, 60000, 70000) \quad (5-12)$$

C 的论域是  $Z=(0, 50)$ , 术语集合是:  $T(C)=T(\text{少}, \text{中}, \text{多})$

它的隶属函数是： $\mu_b(z) = \text{sigmf}(z, [a, c]) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$ 。

对  $\mu_{\#}(z)$  采用了联合高斯型隶属函数，它是两个高斯函数的联合，函数形式为： $\mu_{\#}(z) = \text{gauss2mf}(z, [\text{sig1}, c1, \text{sig2}, c2])$ 。

它由参数为 (sig1, c1) 和 (sig2, c2) 的高斯函数分别指定左边和右边的形状，在文中参数取 [1, 4, 3, 5]。

输出的危险程度也是一个语言量，用 D 表示，它的论域是  $U = (0, 1)$ ，术语集合是： $T(U) = T(\text{安全}, \text{报警}, \text{危险}, \text{临闪})$ 。

隶属函数分别为：

$$\mu_{\text{安全}}(u) = \text{gaussmf}(u, [0.1, 0]) \quad (5-13)$$

$$\mu_{\text{报警}}(u) = \text{gaussmf}(u, [0.1, 0.4]) \quad (5-14)$$

$$\mu_{\text{危险}}(u) = \text{gaussmf}(u, [0.3, 0.6]) \quad (5-15)$$

$$\mu_{\text{临闪}}(u) = \text{sigmf}(u, [100, 0.8]) \quad (5-16)$$

在确定了语言量和隶属函数后，根据所得到的试验结论给出以下几条规则：

- ① 当 A 为小时，U 为安全；
- ② 当 A 为大且 B 为小时，U 为安全；
- ③ 当 A 为大且 B 为中且 C 为中时，U 为报警；
- ④ 当 A 为大且 B 为大且 C 为小时，U 为报警；
- ⑤ 当 A 为大且 B 为大且 C 为中时，U 为危险；
- ⑥ 当 C 为多时，U 为临闪。

对在一定的污秽、电压下获得的特征量数据计算出隶属度后，采用 Mamdani 模糊推理算法，由各条规则得出它对各种危险程度的隶属度，再对它进行去模糊化处理，得出了一个 0~1 之间的精确值，这个精确值代表着在此污秽度和高电压下绝缘子发生闪络的可能性，

本文将它定义为污闪可能性，作为污秽放电强度的评价标准：同时为了验证数据处理的正确性，本文定义了危险度这个概念为：

$$\text{危险度} = \text{试验电压} / \text{闪络电压} \quad (5-17)$$

每组特征量都是在一定的污秽度和高电压下获得，所对应的危险度是确定的，它表示试验电压越接近闪络电压(试验获得)，绝缘子越接近闪络，危险越大。将由声发射信号特征量推导得出的污闪可能性与试验中绝缘子接近闪络的危险

度进行比较，就可以验证模糊推理过程的正确性和可靠性。

盐密为 0.1 条件下两次试验的数据处理结果如图 5-3 所示，图中横坐标为试验电压，单位为千伏，虚线表示危险度，两条实线分别表示两次试验数据的处理结果。从图中可以看出，随着试验电压由零开始上升到闪络电压 45kV，危险度由 0 上升到 1，由两次试验数据推出的两条污闪可能性曲线也在升高，并且误差较小，证明采用本方法可以正确地判断绝缘子放电的情况，并定量地表示绝缘子离发生闪络还有多大的裕度。

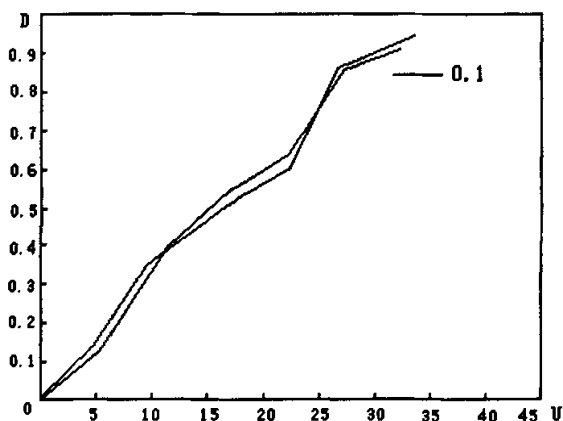


图 5-3 盐密为 0.1 条件下两次试验的数据处理结果

由数据处理结果可以得出以下结论：

- ① 在污秽度一定的条件下，随着电压的升高，污闪可能性增大；
- ② 在一定电压的条件下，随着污秽度的提高，由声信号的特征量推理得出的污闪可能性也随之提高，证明本方法可以正确反映绝缘子污秽度的变化情况；
- ③ 污闪可能性与危险度之间误差不大，可以认为污闪可能性能够表示绝缘子在此状态下的危险度；
- ④ 根据结论 1~3，污闪可能性可以正确表示绝缘子离污闪发生还有多少裕度，可以作为绝缘子运行状态的评价标准；
- ⑤ 以污闪可能性为绝缘子运行状态的评价标准，可以把污闪可能性为 0~0.2 的情次；定义为安全，此时绝缘子承受的电压约在闪络电压的 20%以下，因此绝缘子离闪络有很大的裕度，可以继续运行；0.2~0.5 定义为报警，此时放电

不强，只需要提起注意，日后安排清扫处理即可；0.5~0.7 定义为危险，此时虽然发生较强的放电，但是与闪络还有一定裕度，需要尽快安排清扫处理；0.7~1 定义为临闪，此时情况非常危险，应当立即停电进行清扫处理，否则就会发生污闪事故。

绝缘子污秽监测的目的是在污闪发生之前发出报警，由于绝缘子的电参数及其劣化过程具有较大的随机不确定性，绝缘子的绝缘性能因而存在较大的模糊性。因此只有能够正确判断出放电是弱，或者强，才能正确判断它对绝缘的威胁程度，就可以发出相应的报警信息，使工作人员能够及时采取措施防止污秽放电进一步发展下去，达到防止污闪发生的目的。基于发射技术的绝缘子污秽监测的方法所得到的结果虽然存在一定的误差，但是它能够正确反映放电的强弱，可以实现绝缘子污秽在线监测。

## 第 6 章 系统模拟试验与结果分析

为了找出污秽放电与声发射信号之间的定量关系，获得污秽放电报警的判据，进行了多组污秽放电试验。首先进行了原理性试验，证明本文提出的声学监测法是可行的，然后进行不同污秽度绝缘子的污秽试验，从而获得不同污秽度和电压下放电产生的声发射数据。

### 6.1 污秽放电模拟试验装置

为了研究绝缘子电晕放电与污秽放电声发射信号的特征及差异，进行了高压线路绝缘子电晕放电以及污秽放电试验。污秽试验采用固体层法，使用的试验装置主要有人工雾室、试验变压器、调压器，试验接线装置如图 6-1 所示。本试验将绝缘子悬挂在雾室中，通过电热炉给水加热产生水蒸气，并将水蒸气喷进雾室里，加热约 10 分钟后水蒸气便充满了整个喷雾室，产生了人工雾。待污层充分湿润后，匀速升压直至闪络，同时采集升压过程中的声发射信号。经过穿墙套管从室外的试验变压器引入，然后试验电压经电容分压器引出，用电压表观测。试验模拟了电晕放电和污秽放电，并通过声发射式污秽放电监测装置监测放电时所产生的声发射信号，对声发射信号进行了分析处理。以下是污秽放电声发射信号测试的具体试验方法和结果。

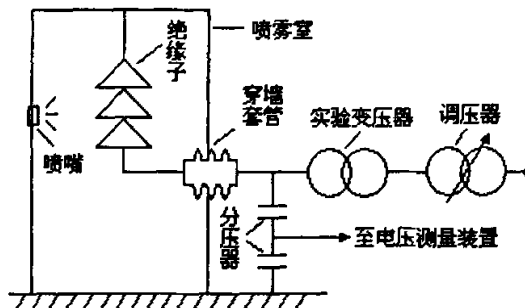


图 6-1 试验接线装置

## 6.2 试验方法

污秽放电的强弱主要受几个因素的影响:污秽度、电压、湿度和温度,由于试验条件的限制,无法控制温度和湿度,只能改变绝缘子的污秽度和承受的试验电压来控制放电的强弱。试验目的是为了获得声发射信号与污秽放电强度之间的关系,所以在试验中通过改变绝缘子的盐密和绝缘子承受的试验电压控制污秽放电的强度,对放电产生的声信号进行采集,这样就可以从数据中找出污秽放电和声信号之间的定量关系。

试验方法采用了固体层法,用氯化钠模拟导电物质,用硅藻土模拟不溶性物质。先将试品用清洁剂清除表面油剂和污秽物,然后用自来水冲洗干净,待干燥后进行染污。根据染污的盐密和灰密的要求及污秽绝缘子的表面积,计算出每只试品所需的盐和硅藻土的重量,用 1/1000 天平称取混合,加入适量的水调匀后,用毛笔均匀地涂刷在试品的绝缘表面上。待污层干燥后,就可以进行试验。

将试品放入雾室后,等待数分钟,使试品污层充分湿润,即污层电导达到稳定值,这时可以观察到绝缘子表面形成水膜,边缘将要滴水,就可以开始升压。如果等待时间太短,污层尚未充分湿润,如果时间太长,污层中的电解质就会流失,所以湿润时间必须掌握好。

为了使试验具有可比性,每次试验都是使用两片绝缘子,因为试验电压最高只能达到 50kV,无法进行更长绝缘子串的污秽试验。

### 6.2.1 试验方案

#### 1. 绝缘子电晕放电实验

图 6-2 为绝缘子在 30kV 电压下电晕放电的声发射信号波形。由于声传感器与高压线路的距离很短,而且电压传感器的快响应特性,声音电晕放电声发射信号与运行电压波形可以做到同步采集<sup>[8]</sup>。由图 6-2 可见,电晕放电时声发射信号的强度随着电压的升高而增大,而且电晕放电有一定的时段,并不是持续出现的,电晕的出现与运行电压的相位有一定的关系。电晕放电的声发射信号在电压峰值之前。

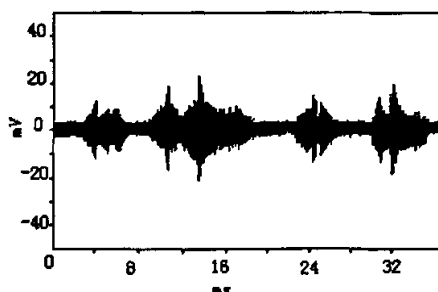


图 6-2 绝缘子电晕放电声发射信号波形

## 2. 绝缘子污秽放电实验

为获得污秽放电声发射信号与绝缘子运行电压相位之间的关系，进行了绝缘子污秽放电试验。试验结果如图 6-3 所示。图 6-3 给出了绝缘子污秽放电的声发射信号波形。由图可见，污秽放电时声发射信号的强度随着污闪放电强度的增大而增大，而且声信号最强烈的时刻出现在运行电压的峰值处。由于污秽层可以看作是电阻，所以观察发现如下趋势：当电压越大时，泄露电流越大，电弧放电越强，因此声发射信号也越强，所以在电压峰值附近声信号强度最大。

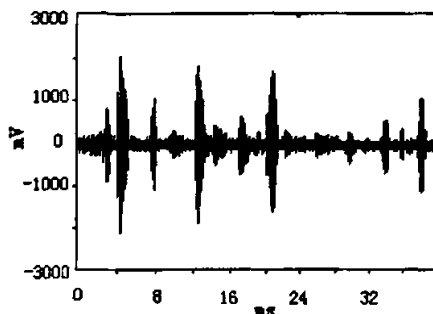


图 6-3 绝缘子污秽放电声发射信号波形

通过分析图 6-2 和图 6-3，可以得出污秽放电的声发射信号的强度要远远大于电晕放电的强度，且电晕放电发生在峰值之前，而污秽放电发生在峰值之后，由此可以通过进一步研究污秽放电和电晕放电所产生的声发射信号的强度以及与运行电压的相位来区分电晕放电和污秽放电。



声发射信号可以反映出污秽放电的强弱。放电不是持续出现的，声发射信号也是时断时续的，因此某一时刻的声信号无法代表放电的情况，必须取一段时间内声信号的统计值作为特征量。

上述试验结果是在试验室内进行模拟污秽试验获得的，只考虑了电压和污秽度对污秽放电的影响，实际情况要比它要复杂得多，影响污闪的主要因素不仅有污秽度，还有绝缘子串结构，大气环境条件，以及绝缘子剖面形状等，这些因素都还没有被考虑进来，所以还需要进行大量的试验，然后采用模糊推理的方法对试验数据进一步进行分析以获得污秽放电强弱的准确判据。

## 6.2.2 试验过程

### 1. 原理性实验

本监测系统提出的声学监测法的基本原理是：随着污秽放电的增强，声发射信号幅值越来越大，信号脉冲的密度也越来越高。为证明这一基本原理本文进行了原理性试验：本文选择了两片污秽度为 0.05 的绝缘子，将绝缘子挂在雾室中，待污层充分湿润后，匀速升压直至闪络，同时采集升压过程中的声发射信号。

图 6-4 是电压由 0V 升到 15kV 的过程中污秽放电发出的声信号波形，图中显示的是声发射信号的幅值随着试验电压变化的趋势，可以看出随着电压的升高，声发射信号的幅值是增大的，但是信号的增大并不是完全单调的，尤其是在信号较大时有几处出现了幅值下降的情况，这说明仅仅依靠用声发射信号的幅值来判断绝缘子污秽放电的强弱是不可靠的，必须找出更多的特征作为判据。

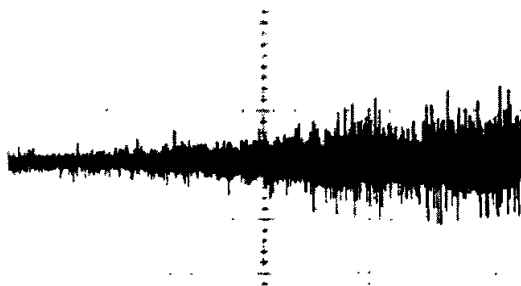


图 6-4 电压由 0V 升到 15kV 过程中声信号波形

经过多次试验都获得了相同的结论，证明了放电过程中声发射信号的幅值变化的总趋势是随着电压的升高(放电增强)信号幅值增大，但信号的增大并非完全单调的。

经过多次试验得到了相同的结果，由此可以得出以下结论：

(1) 声信号幅值的大小与试验电压有关，其变化的总趋势是随着试验电压的升高，声发射信号幅值增大；

(2) 在试验电压较低时，污秽放电不强，声信号幅值不大，而且有明显的过零点存在，周期规律明显；

(3) 当试验电压较高时，污秽放电很强，信号幅值很大，没有过零点，周期规律不明显；

(4) 根据结论(2)~(3)，可以认为由声信号的判断污秽放电的强弱是可行的。

## 2. 不同污秽度绝缘子的污秽试验

经过前面的试验，对污秽放电和声信号之间的关系进行定性分析，证明声信号可以反映出污秽放电的强弱。但这种定性分析还不能满足在线监测的要求，必须证明通过声信号可以定量地判断绝缘子的污秽程度和发生污闪的可能性，所以需要进行下一步试验。

为了证明声信号与绝缘子污秽度和承受电压之间存在定量的关系，进行了不同污秽度绝缘子的污秽试验。为了获得不同污秽度条件下的声信号，试验所取的盐密分别是 0.03、0.07、0.1、0.2 和 0.3，每种盐密的试验进行两次。每次试验的试验条件和试验方法都是相同的，便于对数据进行分析和比较。

每次试验采用同样的升压方法，待绝缘子充分湿润后，匀速升压至 5kV，采集一段时间的数据，再升压至 10kV，采集数据，这样每 5kV 一个点，得到一定的电压和盐密下污秽放电的声发射信号的数据。

根据对试验现象的观察和对试验数据的分析，可以发现由于放电是间歇的、不确定的，声发射信号的不确定性很强，即使在污秽度和电压不变的条件下，信号也是间歇的、忽大忽小的，因此，不能简单地根据某一时刻信号的大小判断放电的强弱，必须找出不同的放电强度下信号的特征，确定相应的特征量，用于进行定量分析。根据声学监测法的基本原理和对试验现象和数据的观察本文总结出污秽放电声发射信号的几个特征：

① 在放电较弱时(试验电压相对闪络电压较低)，信号幅值较小，信号包络

线围成的面积较小，即使在某个周期出现较大的信号，也会很快消失，不会出现持续几个周期的大信号；

② 当放电增强时(试验电压升高)，信号幅值增大，信号包络线围成的面积增大，大信号持续出现的工频周期数增大；

③ 当放电很强，即将发生闪络时(试验电压接近闪络电压)，信号幅值达到最大值，信号包络线围成的面积很大，大信号可以持续出现十个工频周期以上。

根据声信号的这几个特征，选择以下三个值作为特征量：

① 最大幅值，在一定的电压和污秽度下信号幅值的最大值；

② 最大面积，在一定电压和污秽度下一个工频周期内信号的包络线所围成面积的最大值；

③ 连续周期数，当某个周期面积较大，超过某个阈值，并且此现象连续几个周期出现，记取周期数。

按照上述特征量的定义对试验数据进行统计和处理，得出在一定的电压和污秽度下声发射信号的特征量，其中部分数据如表 6-1 和表 6-2 所示。

表 6-1 污秽度为 0.1 时不同电压下的声信号的特征量

电压 (kV)	5	10	15	20	25	30
最大幅值	495	1710	3820	4250	4550	4580
最大面积 (cm <sup>2</sup> )	5610	18345	36080	38150	45180	45350
连续周期数	0	0	4	27	30	45

表 6-2 10kV 电压下不同污秽度时声信号的特征量

盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	0.03	0.07	0.1	0.2	0.3
最大幅值	974	2245	1700	1740	2835
最大面积 (cm <sup>2</sup> )	6085	12110	18304	13815	34442
连续周期数	0	1	0	5	6

表 6-1 是污秽度为 0.1 时不同电压下的声发射信号的特征量，从表中可以看出随着电压的升高三个特征量都在增大；表 6-2 是电压为 10kV 时不同污秽度条件下的声发射信号特征量，可以看出随着污秽度的提高三个特征量在增大。

## 6.3 试验结果及分析

经过多次在不同的污秽条件下的污秽放电试验，得出以下结论：

- (1) 声发射信号可以反映出污秽放电的强弱；
- (2) 放电不是持续出现的，声发射信号也是时断时续的，因此某一时刻的声信号无法代表放电的情况，必须取一段时间内声信号的统计值作为特征量；
- (3) 通过对试验数据进行分析发现，最大幅值、最大面积和连续周期数随着放电的增强而提高，能够表征放电的强弱，以它们作为特征量可以判断出污秽放电的强弱和发生污闪的几率。

上述试验结果是在试验室内进行人工污秽试验获得的，只考虑了电压和污秽度对污秽放电的影响，实际情况比它要复杂得多，影响污闪的主要因素不仅有污秽度，还有绝缘子串结构，大气条件，爬电距离，以及绝缘子剖面形状等，这些因素都还没有被考虑进来，所以还需要进行大量的试验，包括自然污秽试验和现场试验对它进行验证。

## 第7章 总结与展望

### 7.1 总结

良好的绝缘水平是电力系统正常运行的基本条件之一，而所有的户外绝缘由于工作环境比较恶劣，都会在绝缘子表面积累污秽，在潮湿的气候条件下可能发生污秽放电，对绝缘造成破坏。随着大气质量的继续下降，这种威胁会越来越大。要减小污秽放电的威胁，除了日常维护之外，还应当对绝缘子进行在线监测，根据绝缘子的污秽程度有针对性地采取措施，提高工作效率，减小污秽闪事故发生的概率，提高电网可靠性。文中提供了基于污秽放电的声发射现象的声学监测法，是声发射技术在高压线路绝缘子检测中的一个应用。

放电必然伴随有声，通过接收声信号可以达到监测污秽放电的目的。在文中没有对放电发声的原因进行深入探讨，只是就污秽放电的声发射现象进行研究，并且得出结论，不同程度的污秽放电所发出的声信号是不同的，根据声信号的特征，可以判断污秽放电的强度和对绝缘的威胁程度。为了实现文中提出的检测方法，设计了聚焦声传感器和信号采集装置用于接收和存储放电发出的声信号，然后进行了模拟污秽试验，采集在不同的电压和污秽度条件下的污秽放电发出的声信号，进行比较和分析。从信号波形可以看出放电越强，则信号的幅值越大，连续性越强，与理论相符。为了获得声信号与污秽放电之间更准确的关系，本文采用模糊推理的方法对数据进行处理，模拟试验结果表明采用模糊推理方法可以从信号的特征量得出污秽放电对绝缘的威胁程度，因此证明污秽放电的声学监测法是可行的。

由于模拟试验资源不足，还有许多工作有待今后继续研究与完成，在以下方面还可以进行进一步的研究。

首先，对污秽放电的声信号频谱特性进行研究。文中为了提高灵敏度，采用了窄带的声信号传感器，因此未能进行声信号频谱特性的试验。如果采用宽带的超声波传感器，就可以通过试验对污秽放电的声发射信号进行频谱分析，进一步了解污秽放电的过程和声信号的特征。

其次，研究不同的温度、湿度条件对污秽放电声发射信号的影响。温度和湿

度不仅影响污秽放电的过程，而且影响声信号的传播，因此它们的作用是复杂的，不能完全靠理论分析，最后还需要进行试验，通过试验数据的分析和处理，建立不同的大气条件下放电与声信号之间的关系。

再次，还需要进行不同类型的长串绝缘子污秽试验和现场试验。文中的污秽试验都是以瓷绝缘子为试验对象，试验电压较低，这样得出的结论是否完全适用于高电压长串绝缘子的情形，以及瓷绝缘子与合成绝缘子的情况是否相同，这些问题最终还是要进行试验才能获得可靠的结论。只有通过不同类型的长串绝缘子污秽模拟试验的研证，声学监测法才能证明是实用的，并详细分析了这种高压线路绝缘子污秽检测的有效方法。

最后，对数据处理的方法可以进一步改善。本文所采用的模糊推理的方法只是对信号的三个特征量进行了较简单的处理，未能对信号的细节部分加以考虑，因此方法较粗糙。在获得了更多的数据之后，可以通过分析和比较找出信号更多的特征，并结合温度、湿度的数据，找出一种更精确、更实用的数据处理方法。

(1) 声波信号可以用于绝缘子的在线监测，研究不同的温度、湿度条件对污秽放电声发射信号的影响，根据声波信号的变化可以判断污秽放电的发展趋势，从而实现绝缘子污秽放电的监测和预警。

(2) 此方法目前还处于试验性阶段，还需要进行试验，通过试验数据的分析和处理，建立不同的大气条件下放电与声信号之间的关系，并结合温度、湿度的数据，采用的模糊推理的方法对采集来的数据进行更详细的分析建立完备的模糊数据库。监测装置的功能还有待进一步完善，实际的调试和安装问题还需进一步研究。

(3) 基于声发射技术的绝缘子在线监测方法是非接触测量，与绝缘子无直接接触，并且操作简单方便，适用于现场作业。

## 7.2 展望

声发射技术作为一种新型动态检测方法，文中将其运用于高压线路绝缘子的无损检测技术中，并且模拟实验结果表明，其在高压线路绝缘子在线检测中是较为有效的方法。因此，声发射技术在高压线路绝缘子的在线检测中具有广阔的应用前景。

虽然，声发射经过多年的发展，已经有了比较成熟的理论系统，并且在一些工程检测中得到了较为有效的应用，但是声发射技术在高电压线路绝缘子在线检测中仍处于探索阶段，还存在着许多需要进行深入研究的课题。声发射检测技术在很大程度上依赖于声发射信号的处理与分析，可以说它是随着信号分析处理理论的发展而发展的。寻求探索新的更完善、更有效的信号处理方法可有力的推动声发射检测技术的发展与进步，使其应用更加广泛。

采用声学监测法对绝缘子污秽放电进行监测，是声发射技术在电力系统中的又一个应用。目前在电力系统中使用最多也最成熟的是电量监测的方法，在大部分情况下它是最直观和可靠的监测方法，但是在某些情况下它也可能无能为力或者效果不好，如变压器绕组变形、电容器的局部放电等，因此引入某些非电量方法作为检测手段可以弥补它的不足，达到更好的效果。声发射技术在电力系统中的应用研究已经有几十年的历史，但到目前为止还没有获得应有的重视。文中为绝缘子污秽在线检测提供了一条有效途径，希望声发射技术在日后电力系统的应用和研究中得到更多的推动和发展。

## 参考文献

- [1] 焦尚彬, 刘丁, 郑岗, 李琦. 基于遥测技术的输电线路绝缘子污秽在线监测系统. 电力系统自动化, 2004 (15):71-75.
- [2] 黄兴泉, 李薇薇, 李成榕等. 不良绝缘子及其局部放电脉冲电流的检测. 电测与仪表, 1997, 34(5):60-63.
- [3] 陈耀高, 邓敏, 林力辉. 高压绝缘子在线监测系统简析. 电网技术, 2001, 25(11):83-85.
- [4] 刘涤尘. 自适应噪声对消应用于高压绝缘子泄漏电流检测的研究. 武汉大学学报, 2001, 34(8):96-99.
- [5] 江秀臣, 李锋, 付正才, 韩旭. 低零值绝缘子判断方法的研究. 高电压技术, 1995 (3):72-75
- [6] 江秀臣, 傅正财, 李锋, 韩振东. 直流绝缘子串电压分布的测量. 高压电器, 1996(2):33-36
- [7] 王占义, 赵峰. 劣化绝缘子测试仪在我局推广应用的可行性分析. 青海电力, 1998(3):46-50
- [8] 周文俊, 李君, 尹志德. 输电线路绝缘状况在线遥测新方法. 中国电力, 1998(6):15-17
- [9] 施倩, 程养春, 李成榕, 郭琳. 脉冲电流法检测不良绝缘子分辨率的研究. 高电压技术, 1998 (3):44-46
- [10] 蒋作谦, 徐守时, 殷国祥. 高压输电线路上绝缘子的电晕脉冲电流采集系统. 高电压技术, 1997 (2):56-58
- [11] 张维娜, 杜忠. 霍尔电流传感器在绝缘在线监测中的应用. 高电压技术, 1996 (2):30-31
- [12] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热象特征. 电网技术, 1997 (10):44-46
- [13] 甄洪沃, 尹项根, 杨经超. 一种改进的绝缘子红外检测装置的研制. 电瓷避雷器, 2002 (1):6-10
- [14] 聂一雄, 尹项根, 刘春, 文远芳. 悬式瓷绝缘子在线检测装置的研究. 高压电器, 2003 (01):53-59
- [15] 程养春, 李成榕, 郭琳, 黄兴泉. 地面检测线路不良绝缘子装置的研制. 高电压技术, 1999(3):30-32
- [16] 聂一雄, 尹项根. 绝缘子在线检测方法的探讨. 电瓷避雷器, 2000(2):27-30



- [17] 黄新波, 刘家兵, 王向利, 俞华玉.一种线路绝缘子污秽在线监测系统.电力设备,2004(4):74-76
- [18] 黄新波, 刘家兵, 章云, 王向利, 张杰.绝缘子污秽在线监测技术与系统构成.广东电力,2005(2):44-47
- [19] 杨奕, 陈以方, 洪玉萍, 戴建军.合成绝缘子的超声检测方法.无损检测,2003(7):337-340
- [20] 黄新波, 刘家兵, 王向利, 俞华玉.基于 GPRS 网络的输电线路绝缘子污秽在线监测系统.国际电力,2004(2):42-44
- [21] 程养春, 李成裕, 丁立健, 黄兴泉, 郭琳.电晕指纹法地面检测不良绝缘子串的研究.中国电机工程学报,2000(4):54-58
- [22] 王雪, 张冠军, 严璋.国内高压绝缘子在线检测方法综述.电瓷避雷器,2002(6):3-8
- [23] 任海鹏, 刘丁, 李琦, 郑岗.变电站绝缘子污秽闪络在线监测技术.电工技术学报,2002(3):77-81
- [24] 刘春, 聂一雄, 文远芳, 毛牧农.单个绝缘子起晕电压的统计特性.高电压技术,2002(8):19-21
- [25] 安玲, 江秀臣, 朱宇, 韩振东, 陈亚珠,程剑.检测劣质绝缘子的新方法——敏感绝缘子法.中国电机工程学报,2002, 22(9):108-112
- [26] 蔡宗远, 刘春.单个绝缘子电晕起始电压的统计特性.广东电力,2002(4):1-4
- [27] 陈学东.对运行中瓷绝缘子零值劣化若干问题的探讨.广东电力,1998(4):68-71
- [28] 张冠军, 王雪, 莫娟, 严璋.高压绝缘子远程在线检测诊断系统的初步研究.高电压技术,2003(7):7-9
- [29] 石永辉, 李德华, 蔡涛, 关景火.高压绝缘子在线监测及故障定位系统研究.高电压技术,2003(11):23-39
- [30] 聂一雄, 尹项根, 刘春, 文远芳.浅论绝缘子串电晕电流的统计特性.高压电器,2003(5):29-35
- [31] 王海跃, 李香龙, 汲胜昌, 李彦明.合成绝缘子在线检测方法的现状与发展.高电压技术,2005(4):37-42
- [32] 宋伟, 赵林杰, 李成裕, 黄兴泉, 姚继莎, 张书琦, 陈秀娟.复合绝缘子在线检测技术的发展.高电压技术,2005(5):28-30
- [33] 赵汉表, 林辉, 廖胜蓝, 高飞.基于 CAN 总线的绝缘子污秽在线监测系统.高电压技术,2005(6):29-31

- [34] 李小建.不同绝缘子绝缘性能的对比试验.云南电业,2005(04):37-38
- [35] Bennoch C J, Judd M D, Pearson J S. System for online monitoring of pollution levels on solid insulators [C]. 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, USA, 2002: 237-240
- [36] GROOM C G, CHAN K W, DUNN R W, et al. Real-times security assessment of electrical-power systems . IEEE Trans Power Sys, 1996, 11(2): 1112-1117
- [37] FISHER N E. Faraday current sensors and the significance of subtended angles . Sens Actua, 1997, A63(2):119-123
- [38] LI F Y. A study on photoelectronic type of electrical current transducer system [A]. Proc of SPIE: Auto Opt Insp For Indus [C]. Beijing: [s n ], 1996,85-95
- [39] Li Kaicheng, Ye Miaoyuan et al. New optical fiber high voltage electric field sensor . SPIE, 1998, 3541:231-235
- [40] Riquel G • et al. Review of “In-Service Diagnostic Testing” of Composite Insulators . Electra, 1996,12(169): 105-119
- [41] Vaillancourt G • H • et al. New Live Line Tester for Porcelain Suspension Insulators on High-Voltage Power Lines . IEEE Trans. On Power Delivery.1994, 9(1): 208-219
- [42] Yamashita H • et al. A Color Graphics Display of the Field Intensity around the Insulator on 13.2kv Distribution Lines . IEEE Trans. On Power Delivery.1993,8(4): 1696-1702
- [43] 聂一雄, 尹项根, 刘春, 文远芳.用模糊逻辑方法对绝缘子串在线检测结果的评定.中国电机工程学报,2003,2(3):131-136

## 作者在攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 汪奕. 基于声发射技术的绝缘子在线监测方法的研究. 机电工程技术, 2006, 12: 94-96, ISSN 1009-9492, CN44-1522/TH.
- [2] 《控制电器及应用》, 清华大学出版社, 2006 (参与该书编写).

## 致 谢

首先感谢我尊敬的导师李中年教授，本论文是在他的悉心指导和关怀下完成的。在这三年的研究生学习期间，李老师严谨的治学态度、渊博的专业知识以及忘我的工作热情对我的一生都有着非常深远的影响，激励我不断学习和工作，向着更高的人生目标奋斗！李老师在学术上给予我很多指导和帮助，为我们创造良好的学习氛围，正是在这种环境下我才能够顺利完成学位论文。此外，读书期间，使我们受益的不仅仅是李老师广博的知识，丰富的经验，更为重要的是李老师在为人，为师，以及科研中的态度。在为人方面，我懂得了做人要积极乐观，正直，乐于助人；为师方面，要不遗余力、无私奉献；科研中，要严谨认真、脚踏实地、勤于动脑、勤于动手。这些在我以后的工作和生活中将是我所要努力做到的。

在论文撰写期间，我要感谢许多让我分享他们宝贵经验和知识的老师、同学及朋友。他们为我论文的完成提出了许多宝贵建议及真知灼见。与此同时，我还要感谢帮助过我的师弟师妹们，他们给我提出了许多宝贵的意见，激发了我写作的灵感。在此表示最深的谢意。

感谢父母的养育之恩！感谢家人的理解与支持！感谢自动化学院 2004 级硕士研究生同学的帮助！

最后，对评审论文的各位专家、学者表示衷心的感谢！

汪奕

2007 年 5 月于武汉理工大学

# 高电压线路绝缘子在线检测仪研究

作者: [汪奕](#)  
学位授予单位: [武汉理工大学](#)

相似文献(0条)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y1120088.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1120088.aspx)

下载时间: 2010年5月27日