电子科技大学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

硕士学位论文

MASTER THESIS



论文题目 高压电缆放电监测系统软件设计与实现

学 科 专 业 控制科学与工程

学 号 201321070250

作 者 姓 名 任学龙 指 导 教 师 周秀云副教授

分类号 密级

UDC 注 1

学位论文

高压电缆放电监测系统软件设计与实现

（题名和副题名）

任学龙

（作者姓名）

指导教师 周秀云 副教授 电子科技大学 成都

（姓名、职称、单位名称）

申请学位级别 硕士 学科专业 控制科学与工程

提交论文日期 2016.04.28 论文答辩日期 2016.05.16

学位授予单位和日期 电子科技大学 2016 年 6 月

答辩委员会主席

评阅人

注 1：注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

**SOFTWAREDESIGN AND IMPLEMENTATION OF DISCHARGE MONITORING SYSTEM FOR HIGH VOLTAGE CABLE**

A Master Thesis Submitted to

University of Electronic Science and Technology of China

Major: **Control Science and Engineering** Author: **Ren Xuelong** Advisor: **Associate professor Zhou Xiuyun** School: **School of Automation Engineering**

**独创性声明**

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名： 日期： 年 月 日

**论文使用授权**

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文 的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘， 允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全 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、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

作者签名： 导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

摘 要

电能作为一种洁净能源，逐渐成为世界各国的主要能源来源。为了能长期稳定的进行供电，就必须确保输电线路的可靠性。当电压等级偏高时，电缆在输电过程中故障的发生率也变得相对较高。而电缆作为输电线路中最常用也是最重要的供电设备，一旦发生故障，将直接影响电力部门的正常供电和人们的日常生活和工作，甚至给工业生产造成巨大损失。如果能对输电线路的工作情况实时监测，将可以避免以上问题的发生。

本文正是针对上述应用需求，以设计220kV高压电缆输电线路局部放电监测系统为主要研究对象，在深入学习和分析了当前高压电缆放电监测的相关理论和技术的基础上，对高压电缆局部放电监测系统的设计和数据处理算法进行了详细的讨论和研究，主要内容有：

1. 研究了电缆的放电成因及原理、基于非线性数学算法的电缆局部放电监测研究，采用多相态谱图聚类分析的方法和典型缺陷统计分析的方法，对放电信号进行分析研究。

2.以电缆放电测试项目需求为研究核心，基于高频电流传感器法，采用电磁耦合原理，设计出局放信号的提取和定位方法。进而依据信号的提取，搭建了监测系统的硬件构成。在系统硬件构成的基础上，按照先系统结构，后技术路线的设计思路，设计出监测系统的整体结构，为下一步系统的分块设计奠定了基础。

3.依据监测系统结构设计，基于用户软件需求，采用模块化的设计方法，对

220kV电力电缆局放监测软件进行了研究和设计。该监测系统以软件为系统主体，通过对软件通信方式、数据处理模块、人机交互模块、数据库管理模块等模块的研究，完成了以计算机为监控主机，多节点监测，监测结果的实时存储，故障诊断和报警等功能设计，实现了监测系统的自动化和人机交互功能。

4.研究了MySQL数据库系统，基于本监测系统，对MySQL数据库采用嵌入式设计开发，实现了数据存储和调阅的自动化。为电缆监测提供了可靠的数据处理平台，并支持2年内的数据调阅和共享。

**关键词**：高压电缆； 局部放电； 监测系统

I

Abstract

In order to meet the growing demand of production and life, recently, the national grid transmission line is constantly upgrading. The occurrence rate of the cable in the transmission process goes higher with the rise of the voltage level. Meanwhile, as a transmission line, cable is the most commonly used and also the most important power supply equipment. Once fault occurs, the normal power supply of the power sector and people's daily life will be affected directly, even causing great loss to the industrial production. To keep such situation from happening, it is very important to carry out real-time monitoring of faults in the process of cable transmission.

Aiming at the application requirements above, this thesis is to design the partial discharge monitoring system of 220 kV high voltage cable transmission line as the main research object. Based on the in-depth study and analysis of the main content on the theories and technology of the high voltage cable discharge monitoring, this thesis finishes the design and data processing algorithms of the High Voltage Cable Partial Discharge Monitoring System. The main contents areas follows:

1. Analysing on the cause and principle of the electro-discharge, this thesis studies the monitoring system of the partial discharge of 220 kV high voltage cable on the basis of nonlinear mathematical algorithm. Through the methods of clustering analysis of multi phase spectrum and statistical analysis of typical defects, this thesis have a deep study on the discharge signal.

2. Concentrating on the demand of this project, this thesis designs a method for extracting and locating the partial signal based on the methods and principle of high frequency current sensor and electromagnetic coupling. According to the signal extracted, it forms the structure of this monitoring system. To lay the foundation for next step of the system block, this thesis, with the help of this structure, fulfills the overall structure of the monitoring system, in accordance with the principle that system structure goes first, and technical route goes second.

3. Basic on the requirement of user software, this thesis, according to the structure of this monitoring system, analyses and deigns the software ofthe monitoring system of the partial discharge of 220kV electric power cable with the method of modular design. Through the research of the modules such as software communication mode,

II

Data processing module, human-computer interaction module, database management module and so on, it sets the PC as monitor host computer and realizes the functions such as multi node monitoring, monitoring results of real-time storing, fault diagnosis and alarm and so on. At the same time, it realizes the function of the automation of monitoring system and human-computer interaction.

4. Through the research of the MySQL database system, based on this monitoring system, the thesis takes the method of embedded design and development on it, realizing the storage of data and the automation of access. This project provides a reliable data processing platform, with the authorization of the access and sharing of data for two years.

**Keywords**: high voltag: agecable; Partialdischarge; Monitoring system

III

目 录

[摘要](#_Toc686567103) 3

[摘 要](#_Toc686567104) 3

[Abstract](#_Toc686567105) 3

[第一章 绪论](#_Toc686567106) 6

[1.1 研究背景与意义](#_Toc686567107) 6

[1.2 国内外研究现状](#_Toc686567108) 6

[1.3 本论文研究内容](#_Toc686567109) 6

[1.4 本论文结构安排](#_Toc686567110) 7

[第二章 高压电缆放电监测系统](#_Toc686567111) 8

[2.1 监测系统基础理论](#_Toc686567112) 8

[2.1.1 监测系统相关概念](#_Toc686567113) 8

[2.1.2 高压电缆局部放电原理](#_Toc686567114) 8

[2.2 监测系统的硬件构成](#_Toc686567115) 9

[2.2.1 局放耦合传感器](#_Toc686567116) 9

[2.2.2 数据采集单元](#_Toc686567117) 10

[2.2.3 信号触发设备](#_Toc686567118) 10

[2.2.4 通讯模式](#_Toc686567119) 10

[2.3 局放监测系统设计](#_Toc686567120) 10

[2.3.1 硬件性能与监测信号分析](#_Toc686567121) 10

[2.3.2 局放监测系统硬件结构](#_Toc686567122) 10

[2.3.3 硬件架构特点](#_Toc686567123) 13

[2.4 本章小结](#_Toc686567124) 13

[第三章 监测系统软件设计](#_Toc686567125) 14

[3.1 监测系统需求设计](#_Toc686567126) 14

[3.2 软件需求分析及研究](#_Toc686567127) 15

[3.2.1 数据采集和处理分析](#_Toc686567128) 15

[3.2.2 放电类型识别与诊断分析](#_Toc686567129) 16

[3.2.3 软件其它需求功能分析](#_Toc686567130) 17

[3.3 监测系统软件设计](#_Toc686567131) 17

[3.3.1 软硬件通信方式](#_Toc686567132) 18

[3.3.2 数据处理模块](#_Toc686567133) 18

[3.3.3 人机交互模块](#_Toc686567134) 19

[3.3.4 历史数据回看模块](#_Toc686567135) 19

[3.3.5 数据库管理模块](#_Toc686567136) 19

[3.4 本章小结](#_Toc686567137) 20

[第四章 监测系统软件的实现](#_Toc686567138) 21

[4.1 系统软件各个模块的实现](#_Toc686567139) 21

[4.1.1 监测系统的登录](#_Toc686567140) 21

[4.1.2 人机交互模块的实现](#_Toc686567141) 21

[4.1.3 历史数据回看模块的实现](#_Toc686567142) 22

[4.1.4 系统设置模块的实现](#_Toc686567143) 23

[4.1.5 数据库管理的实现](#_Toc686567144) 24

[4.2 局放监测基本算法](#_Toc686567145) 25

[4.2.1 非线性狭义数学形态滤波器](#_Toc686567146) 25

[4.2.2 联合时频分析](#_Toc686567147) 25

[4.2.3 抗干扰仿真试验计算](#_Toc686567148) 26

[4.3 局放信号分析方法的研究](#_Toc686567149) 27

[4.3.1 多相态图谱聚类分析](#_Toc686567150) 27

[4.3.2 典型缺陷局放脉冲指纹](#_Toc686567151) 28

[4.4 本章小结](#_Toc686567152) 33

[第五章 监测系统的调试及结果分析](#_Toc686567153) 34

[5.1 系统调试](#_Toc686567154) 34

[5.1.1 硬件调试环境](#_Toc686567155) 34

[5.1.2 软件调试](#_Toc686567156) 34

[5.2 结果分析](#_Toc686567157) 35

[5.2.1 结果分析算法](#_Toc686567158) 35

[5.2.2 监测信号验证](#_Toc686567159) 36

[5.2.3 软件控制仪器采集数据验证](#_Toc686567160) 36

[5.2.4 数据和电缆状态诊断的验证](#_Toc686567161) 37

[5.3 本章小结](#_Toc686567162) 38

[第六章 总结](#_Toc686567163) 40

[6.1 本文的主要工作](#_Toc686567164) 40

[6.2 下一步工作展望](#_Toc686567165) 40

[参考文献](#_Toc686567166) 42

[附 录](#_Toc686567167) 44

V

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

自世界最大的三峡水电站于2009年全部建成以来，我国便成为了电能产出强国，对输电电缆的需求更是与日俱增。为了确保电力电缆出厂时的可靠性，需要对电缆的放电情况进行检测；当电缆在输电过程中，往往会在电缆接头或是端头位置发生放电现象，这种长期的放电现象，势必导致电缆绝缘性能下降甚至损坏。基于以上两点考虑，需开发出一款能够检测电缆放电的软件系统，既能为电缆出厂时检测提供需求，又能在电缆输电过程中提供实时监测。由于输电电缆产生局部放电现象和电缆绝缘体的绝缘状况有着直接的关系，所以当电缆的局部长期产生放电时，就出现了累积效应。这种效应的原理是：当电力设备的绝缘区域出现了劣化时，会导致介电性能降低。当劣化严重时，绝缘区域的某一部位就会被击穿，从而导致电缆故障的发生[15]。所以，为了能及时发现并排除输电电缆故障，就需要对高压电缆进行实时放电监测。

我国的输电电缆的绝缘材质大多数都是交联聚乙烯(XLPE)材质，由于这种材质的电缆具有很大的传输容量，非常好的耐热和电气性能以及简单方便的安装结构，使其在电力系统的应用较为广泛。根据电力部门的研究发现，这种材质的电缆还能够避免火灾等重大险情，这也为采用这种材质的电缆提供了更加充分的理由[68]。当这种交联聚乙烯电缆发生放电时，主要是由电缆的绝缘区域的缺陷引起的。如果绝缘缺陷很小，放电量也会不大，对电缆的正常供电不会造成什么影响。但当长期的局部放电作用时，绝缘层会慢慢损坏。当绝缘层损坏严重时，电缆就有可能产生爆炸。当前的输电网络XPLE电缆多数采用隧道、排管和直埋等方式在地下铺设，这样就很难判断出电缆的工作状况是否良好。如果能对XPLE电缆的绝缘性能进行提前监测，可以很直观地反映电缆的寿命，更对电缆故障的及时排除和防范安全事故起到决定作用。本文正是基于解决此类问题，依托已有的硬件设备，建立硬件设备的通信控制关系，依据硬件通信协议，设计开发相关的监测软件，达到快速有效地监测。

根据当前有关研究和资料叙述，国内外主要采用了差分法等多种不同的方法[915]，对电力设备的局部放电情况进行检测。依据项目需求，本文主要基于电磁偶合法，采用高频电流传感器，实现信号采集。对于这类电流传感器和信号耦合方法，将在后续章节逐一叙述。

1

## 1.2 国内外研究现状

#### 1. 国外研究现状

输电电缆的局部放电检测一直以来都是世界各国在检测项目上研究的重点之一。早在上个世纪的四十年代，就已经有不同国家的多个单位和个人就放电检测方面进行了研究，并取得了一些成果。比如，美国的威斯汀豪斯公司(Westinghouse Electric Corporation)，发明了放电检测电机的绝缘技术。随着电力的不断发展，世界各国的科学家们也相继在电力检测领域展开了研究。在1960年之前，国外采用宽频带放大检测器检测电缆。这种方法可以对电缆的绝缘状况进行检测，所以被较多的研究人员所采用。到了上世纪八十年代，原苏联科学家库钦斯基在研究高压电力设备局部放电原理和放电特征时，发现电缆局部放电受多种因素影响。制造电缆的材质、工艺手段以及绝缘缺陷产生的不同场强等，都会对电缆的绝缘性能产生不同程度的破坏[1620] 。

目前，对于供电设备的放电检测，世界上还没有形成一套完整的研究成果。在工程应用中，也只是针对具体供电设备，进行专项研究，研发出各种电力设备的检测设备。对于电力设备的检测，是一个长期且复杂的过程。如果只检测放电幅值，则很难判断绝缘损坏程度及位置。但德国、加拿大等国家在这方面也做了更加深入细致的研究。德国的研究机构开发出了关于放电检测的PC分析软件，加拿大IRIS公司也研发出了“便携式绝缘检测仪”，使得这个领域的研究又向前迈进了一步[ 21] 。

#### 2. 国内研究现状

我国的电力发展起步较晚，因此对供电设备的放电检测更是滞后于许多国家。关于电力设备放电检测，直到上世纪七十年代，我国才有一些科研人员展开研究。虽然有一些专家经过多年的研究，取得了一些成果，但因为局部放电过程相对复杂，国内在这个领域仍然没有形成系统、完整的理论，更是没有成熟的产品出现，导致这个研究领域的发展较为缓慢。

尽管起步晚，但我国的一些科研机构和专家在研发局部放电的监测仪器上，还是取得了一些成果。比如：在八十年代，我国葛景滂等专家总结出对电气设备局放的试验检测方法；国家质监部门随后也发布了《GBT7354-2003局部放电测量标准》[16]。随着研究的深入，我国于九十年代初期发布了《电力设备局部放电现场测量导则》。这个导则明确了关于局部放电测量的试验程序，并提供了试验对象外界干扰脉冲及内部放电的图谱和说明。清华大学等多所国内高校经过长期研究，也先后研制出局部放电检测设备。西安交通大学研制的检测装置，利用数字处理技术，测量局部放电的各个指标，实现自动识别放电类型。上海交通大学利用宽

2

带系统进行高速长时间采样，采用计算机和数字信号处理器（DSP）对数据进行处理，从而将得到的采样信号的特征值存于数据库中，实现对电机的实时监测。1997年，清华大学开发出330KV GIS局放检测系统和便携式局放检测仪，均采用外部传感器监测，除了对采集的信号的分析处理有欠缺外，该设备在工程应用中实用性较强，且能实现很好的定位。到了1998年，西安交大对新研制出的宽频带局部放电传感器进行了测量，验证了该装置有较好的实用效果。随后，张小勇等人在

2005年利用频谱仪，运用高频窄带的方法构建了GIS局部放电在线监测系统。孙曙光等人在2012年又构建GIS试验模型及在线监测系统，针对不同的放电类型分析和评估了该系统在不同放电电压下的相位特征和放电量[1621] 。

总结国内外关于电缆局部放电的研究，为确保供电线路的可靠性，未来对高压输电电缆进行的局部放电监测，将向实时的、智能的、网络化的方向发展。国内目前对电缆监测系统的研究虽然有较多的理论进行了实现，但还缺乏工程应用的检验。如果在高压电缆上安装传感器，利用高速数据采集设备对传感器上的放电信号进行实时采集，获取有关放电信号的数据，并利用计算机软件实现采样信号的数据分析、处理，就可完全实现高压电缆的放电监测。基于此，本文可采用现代测试技术、通信技术和计算机软件技术，实现局部放电检测的自动化。

## 1.3 本论文研究内容

由于本文所研究的电缆局部放电测试项目中，输电电缆主要敷设于地下隧道内，不便人工经常对电缆的运行情况进行检查。为了实现无人值守，达到对电缆运行状况的全时段检测，本文设计开发了对高压电缆局部放电情况实施全天候监测的测试软件。基于测试软件和测试设备构成了局放监测系统。该系统的硬件结构，采用上位机终端的监测软件控制模式，实现了对输电电缆全时段连续监测，不但采用了数据库管理技术，为工程人员提供实时的数据信息，而且实现了监测系统的自动化功能，即为工程人员提供实时故障诊断和告警，为故障点初步定位，便于工程人员对电力电缆及时维护，避免供电故障发生。本文研究的主要内容是：

一是对高压电缆监测系统结构进行了设计和搭建；二是对监测系统软件界面和需要实现的功能进行了分析，设计了系统的软件结构和工作流程，并提出了实现软件的模块和设计思想；三是依据系统软件的框架结构和流程，分模块对软件的各个部分进行了程序开发与实现；四是采用先实验室后现场的调试方式，对软件的各个功能模块进行了实验室调试和现场实测调试，具体调试过程参见附录，实现了用户对监测系统的软件要求。

3

## 1.4 本论文结构安排

本监测系统主要由软件和硬件两大部分组成。硬件部分又有五部分组成，它们分别是高频耦合传感器、同步脉冲触发模块、13组数据采集模块、网络交换机和计算机。基本原理是高频耦合传感器采集放电脉冲，由系统软件控制数据采集模块，完成数据调理，实现数据上传、统计分析和存储，实现用户所需的各种监测功能。

本文从以上硬件结构出发，基于“分析用户需求→搭建监测系统结构→监测系统软件设计开发→实验室调试→现场安装和运行验证”的设计思路，采用由浅入深的研究方法，实现了监测软件的模块化设计和开发，本文结构安排如下：

#### 第一章 绪论

叙述了国内外供电设备局部放电检测的发展历程及现状，重点分析了当前电力电缆接头或端头发生局部放电产生的危害。根据工程项目需求，提出了对电力电缆进行局部放电监测项目的系统设计思路，概括了各个章节的主要研究内容。

#### 第二章 高压电缆局部放电监测系统

本章首先从高压电缆局放监测的基本概念入手，根据相关理论，搞清了局放监测系统的基本原理。并根据监测系统项目硬件需求，对项目中各个硬件特性功能进行了具体分析，依据监测系统的硬件功能及通信模式，搭建了监测系统的硬件结构。

#### 第三章 监测系统软件设计

本章按照用户要求，首先设计了本文关联的项目需求。根据项目的设计需求，重点进行了有关监测系统软件部分的需求分析。依据上一章中硬件的通联方式及项目需求分析，采用模块化的设计思想，按照先整体框架，后分模块、分步骤实施的方法，对监测系统软件进行了研究和设计。

#### 第四章 监测系统软件的实现

该部分按照第三章的设计思路和方法，首先对监测系统软件的各个模块分别予以实现。在软件各个模块实现的基础上，采用了非线性狭义数学形态滤波器、联合时域分析对局放信号的提取进行了研究设计；应用典型缺陷放电指纹的统计方法，在软件中对监测数据进行了图谱分析和处理。

#### 第五章 监测系统的调试及结果分析

本章详细叙述了监测系统的调试过程，按照硬件连接、控制实现、软件功能调试、监测系统各部分验证的思路，逐一调试。并实时记录软件调试过程（参见附录），便于系统维护和升级。最后通过验证和监测数据分析与现场实测验证，得出监测系统达到了项目要求。

4

#### 第六章 总结

梳理了监测系统软件设计与开发的方法和收获，明确了系统的应用领域，总结了系统存在的不足。特别是对于工程项目应用的本软件测试系统，在多个模块程序可作拓展，可实现本软件的功能拓展，能进一步提高软件的自动化测试水平，实现软件的升级。

5

# 第二章 高压电缆放电监测系统

本章从高压电缆局部放电的基本理论开始，搞清了系统的相关概念，从而以相关理论和项目的相关硬件设备为基础，搭建了局放监测系统的硬件结构，并对系统结构作了进一步分析，为下一步系统软件的设计奠定了基础。

## 2.1 监测系统基础理论

深入研究高压电缆局部放电的基础理论，才能更好地理解局部放电原理，并对其局部放电监测做进一步研究。因此，本章首先从基本概念入手进行叙述。

### 2.1.1 监测系统相关概念

当传输的电压高于10kV而低于35kV时，承载这样电压的电缆都属于高压电缆。由于供电部门输电线路的不断加长，电缆间的接头处也会因各种因素产生放电现象。当输电电缆处于长期的工作状态时，极易发生故障，如果故障严重，可能会对人们的生产和生活造成重大损失。为了减小危害，降低损失，就必须对局部放电深入研究。当导体间无贯穿电压产生，但在绝缘体的局部区域产生了放电现象，这种现象叫做局部放电现象。若绝缘体表面有放电，就称为表面局部放电；若绝缘体内部放电，就称为内部放电。在局部放电的过程中，还有一种现象也需要引起注意。也就是如果导体附近发生放电，并在其附近包围有气体，这种现象被称为电晕[ 2230] 。

当电缆处于输电状态时，电缆内部的绝缘区域也存在有场强。如果该区域的场强被击穿了，那么该区域就会发生放电。在电网的输电线路中，绝缘体中的电场在各个区域所承受的强度因材质不同而不均匀。比如，由复合材料构成的绝缘体有：固体和气体、固体和液体等材料。对于这种由复合材料构成的绝缘系统，场强因材料不同也有所区别。这种差别也是导致场强被击穿的情况不一样。从而使得绝缘体的不同区域放电的先后顺序不同。绝缘系统如果是由单一材料构成的，则往往会因以下一些绝缘缺陷首先发生放电现象：一是由于工艺技术不够精细，导致存在有气泡或是杂质；二是长期使用导致老化而产生的气泡和裂纹等。当附近的环境为交流电场时，如果固体或液体材质的介电常数比气泡内的气体的介电常数大，那么场强就与介电常数成反比关系。由于气泡附近其它材质的场强小于气体的场强，作为击穿场强的介质，气体远低于固体或是液体，因而这些气泡导致绝缘体首先发生放电。上述现象也就是局部放电现象。

6

如果供电线路发生了放电，有一种监测系统能够及时发现并告知供电单位，那么就可以确保输电线路的可靠运行。如何设计这样一套监测系统，也正是本文研究和讨论的重点。由本文第一章可知，目前，许多电力部门采用放电检测仪，在输电电缆现场采用人工方法，定期检测，排查故障。但这种方式工作量大、并存在检测不及时、不全面的问题。本文正是从这个角度入手，通过设计开发计算机软件，基于LAN网线通信，搭建监测系统，实现控制检测设备监测输电电缆，为供电部门提供电缆运行状态信息。

### 2.1.2 高压电缆局部放电原理

#### 1. 电缆局放原理

对于交联聚乙烯绝缘电缆，由于技术和工艺精度等问题，其在制造生产过程中残留有少量气泡和其它杂质，导致局部放电。当局部放电发生时，往往会引起导体间的局部绝缘体短接，使得导体无法正常导电。实际输电过程中，绝缘介质也同时被每次的局部放电所影响着，导体的绝缘缺陷也会越来越严重。

#### 2. 电缆局放成因

通过研究，输电电缆在以下三种情况下就会发生放电现象。情况一：绝缘体内介质的场强被击穿；情况二：当导体结构较细并且场强集中在其附近时；情况三：浮动电位的金属体也会在一定程度上发生感应放电现象。

#### 3. 局放信号的主要参量

由前文关于高压电缆局部放电原理和原因可知，局部放电信号的物理现象比较复杂，监测这样的信号非常困难。为了能有效监测、分析局放信号，就需要引入一些既能表征电缆局部放电特征，又能反映出产生局放信号的绝缘缺陷受损程度的重要参量。为此，根据最终所需要的监测结果及可测参数，可确定出局放信号的关键参量。

为了获取可靠的局放信号，电缆上的传感器基于电磁感应原理，通过数据采集模块，将局放脉冲信号数据传入计算机监测系统。经PC端监测软件的数据处理，实现了对局放信号的原始时域波形的再现。针对这一时域信号波形，可以确定出3个重要参量。参量一：第i次放电的放电量*qi*；参量二：单位时间内的放电次数n，

即放电重复率；参量三：第i次放电信号的工频电压相位*i*。以上3个参数量是本

文讨论的监测系统软件中应用的主要参数。

采用工频信号的周期作为截取放电脉冲信号的周期，经过不断截取放电脉冲信号的波形，获取实时的放电信号幅值、放电相位以及累计的放电次数。依据获取的这些参量每次的监测数据，绘制局部放电图谱。本文围绕项目需求，主要研

7

究以下四种图谱。一是在二维坐标系中，构建时域范围内相位与放电量的函数关系，绘制热度图；二是在三维空间坐标系中，构建放电量、放电次数以及放电相位三者空间关系图谱；三是通过统计放电次数以及放电量大小，绘制出柱状图；四是实时显示一个工频周期内的参考信号和采样信号。因传感器采集得到的放电信号是脉冲信号，所以，通过分析这种脉冲信号波形，可进一步确定出放电频度及强度。

本文围绕上述放电量的测量、计算以及图谱绘制进行研究，因此，有必要对以下两个关键参数作具体分析研究。

①视在放电电荷q。当输电电缆接头或端头发生放电时，接头处的绝缘区域因外加电压而产生了放电电荷，称该电荷为视在放电电荷，单位为pC。由于放电量无法直接测得，但这一电荷值却与之有直接的关系，所以本文通过测量这个电荷值来研究局放情况。关于根据放电电荷向计算放电量的具体方法，本文会在后续章节中进行具体描述。

②放电重复率n：若电缆的绝缘区域有放电发生，则每秒内放电的次数称为放电重复率。由于单次的视在放电电荷不能准确的反映放电的严重程度，更不能反映出绝缘体的损坏程度，因此，需要完成多次测量，通过图谱绘制，分析放电数据，才能得出准确的放电信息。

#### 4. 局部放电检测方法

近年来，国内外有越来越多的研究人员致力于电缆局部放电检测的研究，检测方法也是层出不穷。比如局部放电法、损耗电流测量法等。由于可以在相对较宽的频带范围对绝缘区域存在的缺陷进行放电监测，所以本文主要采用局部放电法。上述章节中，针对绝缘体因制造工艺、长期使用而老化等因素作了分析。绝大多数电缆发生局部放电，也正是这些绝缘缺陷的出现引起的。输电电缆局部放电时，产生脉冲信号，这个过程非常短暂，一般为纳秒级。为了能提高局部放电监测的灵敏度，可结合数字信号处理技术，对监测信号做进一步分析处理。

对局放信号的检测，基于电磁偶合法，采用高频电流传感器（HFCT）。这类传感器是本文关于输电电缆局放信号检测的重要设备之一。因局放信号电流的存在而产生电磁场。对于这类给定的传感器，其结构采用的是Rogowski线圈，

Rogowski线圈通过耦合绝缘区域内通路附近的电磁场信号，产生感应电压。这样的感应电压正是监测所需要的，从而实现信号的采集。如图2-1所示，为本项目现

场调试时正在运行的高频电流传感器。这种类型的传感器主要用于带宽在100 kHz至20 MHz之间频段的电缆局放检测。由于被监测电缆有外屏蔽层接地线，并且这种高频电流传感器安装、拆卸方便，可根据信号调整带宽。

8



图2-1 高频电流传感器

5.220KV电缆局放监测系统通信模式

对于本测试系统，基于多台硬件设备，构建监测系统复杂的通信网络。通过实验条件和现场两种方式测试，需要将每个节点处采集的局放信号，采用数据采集模块，进行线性转换，将原局放信号转换为直流模拟信号。最后再由数据采集模块将这一直流模拟信号经LAN网线传入上位机系统。传感器依托端头装有BNC头的同轴电缆将局放感应信号传入数据采集单元，数据采集单元基于脉冲触发模块的光纤通信，实现信号采集控制，最后以网络交换机为多台数据采集单元构建局域网络，通过TCP/IP协议，实现采集单元的数据上传至上位机，由上位机的软件系统完成数据的存储。由于本文研究的重点是设计并开发整体监测系统的控制和数据分析、处理及管理，所以软件在设计时，需重点研究所有节点集中监测以及系统平台界面显示，能够实现实时查询采集的监测数据，随时了解掌握所有监测节点的放电情况，或系统自动完成监测，实现局放预警。

## 2.2 监测系统的硬件构成

根据项目应用需要，220KV电缆需要13个节点实施监测。所以，可选择多通道数字示波器采集高频耦合传感器提取的放电信号。本文采用多台4通道数字示波器作为数据采集单元，采集传感器提取的信号。为了能有效控制数字示波器按照设计要求采集信号，需引入脉冲触发信号，对数字示波器实现同步触发控制，而数字示波器和脉冲触发器可由计算机的软件实现控制。因此，总结上述仪器设备，系统所需的主要硬件设备有39个高频耦合传感器、13台数据采集模块、同步脉冲触发器及触发模块、大于14口的多端口网络交换机、计算机以及若干同轴电缆和网线等。其中，上述的主要测试设备的相关特性，在后续内容将逐一进行研究。

### 2.2.1 局放耦合传感器

9

为了能实现对工频信号中的低频信号和谐波中的低频信号的抑制，本文需对前文提到的高频耦合传感器的结构和特性作进一步研究。在线监测装置的高频耦合传感器由罗氏（Rogowski）线圈构成，线圈铁芯采用软磁材料——坡莫合金，线圈由直径为0.5 mm，采用铜线绕制而成。整体采用钳式结构设计，铝制材料，外表采用氧化工艺处理，接口是防水接头，安装时可将传感器自连接处分开。罗氏线圈是一种被广泛应用的技术，主要检测电缆本体或是接地线的信号。待测信号有局放（PD）信号和噪声干扰。PD信号的脉冲波形的波前较为陡峭，并且持续时间也较短，所以，这种脉冲信号的持续时间都是ns级。同时，这种脉冲信号又有较宽的频带，频谱可达到几百兆赫，如图2-2所示，为现场采用示波器测得的

PD信号波形。由于噪声干扰处于低频段，并且包含在局放信号中，所以通常将截止频率的范围设定为500kHz至1MHz ，便于有效抑制噪声干扰。



图2-2 PD信号脉冲波形

### 2.2.2 数据采集单元

数据采集单元选取由武汉柯泰公司提供的便携式数字示波器，采用USB数据通信、LAN网线通信以及WIFI三种通信模式，由于由上位机实现对13台数字示波器的控制，需要构建局域网络，并且需要稳定可靠的通信方式，所以本文选择

LAN网线通信模式。该示波器采用四通道同步输入，每个通道的采样率最高是200

10

MSa/s，存储深度10k至16M点，内置有快速傅里叶变换（FFT）函数，12位的模拟量输入分辨率，带宽为60 MHz，配有1 M Word/CH的SDRAM高速缓存，双极性模拟量的输入范围是±2 mV至±10V。通过实验研究，该型数字示波器采用应用软件开发，可实现5种模式的触发。分别是软件自动触发模式、延迟触发模式、

前置触发模式、中间触发模式和后置触发模式。另外，有3种触发源可供选择，分别是内部触发源、外部模拟触发源和外部数字触发源。这类示波器能实现多通道高速动态信号的实时记录，确保高频放电脉冲波形的细节特征不会丢失，本文在项目中拟计划采用其中的3个通道采集数据。

数据采集单元与信号调理单元共用复杂可编程逻辑器件来显示数据采集控制命令的发送接收。本文在监测软件的设计和开发中，数据采集单元也是软件的程序模块中最重要的部分之一。通过对数据采集单元的二次开发，实现上位机对数据采集单元的控制，使数据采集单元自动完成设备初始化、数据的采集、上传等功能。

### 2.2.3 信号触发设备

为了保证部置在不同位置的数据采集设备能同时采集数据，系统中添加了同步触发器来保证数据采集设备的。同步脉冲触发器为数字示波器提供脉冲信号，实现外部触发。为了保证在距离处理计算机不同距离的数据采集设备能同时对局放信号进行采集，同步脉冲触发器输出的多路信号可分别独立设置，并可结合项目需要，对其完成二次开发，实现程序控制。同步触发器最多可同时对20台数字示波器实现外部触发，并可提供单次和连续两种脉冲信号。该触发器设备，也是在后续系统软件的设计和实现中，需要二次开发的一部分。触发器发送脉冲信号，都是有软件按照一定的运行规则，完成对多组数据采集单元的信号触发和关闭功能。

### 2.2.4 通讯模式

在构建监测系统硬件通讯模式时，由于设备采用不同形式的连接方式和数据传输，所以在本监测系统中主要有同轴电缆、LAN网线、光纤通信和USB数据线四种连接和通讯方式。光纤通讯模式，结构上采用一种高速以太网光纤收发器，能实现将IEEE802.3u标准的10/100 Base-TX以太网电缆信号与10/100 Base-FX的光信号进行相互转换，并将信号的传输距离扩展到60 km（单模）。光接口特性主要

有：波长——单模双纤1300 nm（30km/40km/60km），链路损耗预算——典型29 dBm

（单模双纤1300 nm，60km），连接器——ST。

11

## 2.3 局放监测系统设计

### 2.3.1 硬件性能与监测信号分析

1.基于电缆线路敷设特点，在线监测装置总体架构上采用分布式测量与集中监控相结合模式，在电缆线路每组3相附件的接地箱外接地引线处安装3只高频宽带电磁耦合传感器，利用脉冲放电电流电磁耦合方法提取电缆附件及邻近电缆的放电信号，就近进入每组附件旁的前端采集处理模块，进行信号调理、高速采集、信号预处理，采用以太光纤网将所有前端采集处理模块与集中监控主机相链接，信号远距离传输至集中监控中心，通过主机上运行的程序实现线路各段局放变化动态显示、放电信号表征和特性分析、模式识别、阈值报警、绝缘诊断、历史数据管理等功能；

2.针对高压交联电缆本体和附件在敷设、施工、安装、运行等环节中产生的典型潜伏性绝缘缺陷，在各种噪声干扰较少的实验室条件下获取系统局放脉冲的特征量，主要内容有：（1）开展典型绝缘缺陷统计分析、典型缺陷仿真计算与典型缺陷构建复现；（2）在实验室内采用高频电磁耦合法进行典型缺陷以及缺陷在老化因素作用下的局放带电检测试验研究，获取缺陷的“干净的”局放原始信号及其各类图谱；（3）典型缺陷和缺陷劣化过程中的局放状态表征和局放特征提取；（4）统计分析各种典型缺陷的局放特性，形成综合特征指纹库。

3.由于电缆运行场所的电磁场信号干扰较多，完全只依托各种硬件设备消噪具有很大困难，基于这类信号测试，本文采用计算机软件控制和监测技术，实现抗干扰的目的。即构建非线性的狭义数学形态滤波器对采集到的放电信号进行处理，这既能有效消除噪声并保留原始信号的必要形状特征，又能最大限度地降低现场干扰。

4.由于局部放电脉冲是随机产生的，属于非平稳信号，所以可采用基于信号多周期统计数据，采用多相态谱图聚类分析的方法，从多相态谱图中萃取放电特性，依据现场实测数据结合典型缺陷的局放脉冲特征参量，依托综合特征指纹库，应用时频空间转化、模式分类等有效算法建立计算机辅助诊断子系统，为现场局部放电在线监测提供有效的数据信息和直观的分析方法，实现现场测试效率提高和对放电类型的准确判断。

### 2.3.2 局放监测系统硬件结构

1.硬件结构分析。

12

按照上述硬件设备的工作特性和使用条件，不难看出，对于需要构建的硬件系统结构，首先必须满足各个硬件的适用条件，其次由于被监测电缆常年处于隧道内，并且属于我国南方的湿热环境，因此考虑到监测环境较为恶劣，当各个硬件设备与上位机构建起局域网络时，为了能确保系统硬件工作的稳定性，需将各个硬件所构建的整个系统的重要技术参数作以具体实验和分析，找到系统的各个技术参数的适用范围。经对各个硬件设备的实验研究，监测系统的重要技术参数如下表2-1所示：

表2-1 在线监测系统技术参数

| 重要参数 | 系统噪音 | <1pC |
| --- | --- | --- |
| 检测灵敏度 | 1pC |
| 信号检测范围 | 1～3000pC(10mV～20V) |
| 测试对象电压，频率 | 10～1000kV;20～300Hz |
| 测试信号频率范围 | 100KHz～100MHz |
| 测试通道数 | 3 通道同时检测 |
| 传感器 | 可配用 PD 传感器 | 高频 CT 传感器+铂膜电极传感器（0.1MHz～100MHz） |
| 配套装置 | 信号传送方式 | 光纤传送（5m～5km）/同轴电缆（<50m） |
| PC 界面 | 以太网连接 |
| 频率选择 | 测试信号带宽 | 3 种宽带 BPF 提供 4 种测试频率： 带宽 f±10MHz,0.1～100MHz 可选  3 种窄带 BPF 提供 4 种测试频率： 带宽 f±0.3～3MHz,2～30MHz 可选 |
| 工作特性 | 信号处理，显示和报警 | 3 种图谱：Φ-Q-n, Φ-Q-t, Q-n  3 通道实时显示  所有测试门值可现场设置声光报警显示  离线应用：Φ-Q-n, Φ-Q-t 图谱记录重放 |
| PD 判断 | 噪音分辨 | 同 步 噪 音 抑 制 n,q,φ,t 4 要素逻辑门宽频信号波形判别φ-q-n 图谱自动辨别 |
| 定位 | 初步定位 | 配合高速数字示波器(>500Ms)，定位相应测试段。 |
| 辅助用具 | 辅助设备 | 高速数字示波器(color; 4ch; >500Ms )  交流信号发生器 |

局放在线监测装置架构，采用的是分布式采集处理形式和集中查询/设置的分布集散型网络结构形式，整个系统采用四层拓扑结构，如图2-3所示。第一层是电缆线路上的宽频带局放耦合传感器和工频同步耦合传感器。第二层实现对信号采

13

集、通信、数字化预处理和控制功能的前端模块。第三层是上位机，现场的所有前端模块都通过局域网络就近接入监控主机（上位机），对数据进行实时存取和处理；第四层是集控中心的智能化实时监控平台，通过有线/无线方式将监控主机互联接入，实现电缆设备系统的监测数据汇总和集中显示、分析。其中，上述的第一、二、三层为本文的研究范围，也是本文所描述的监测系统。



图2-3 分布式监测装置结构图

具体的实现为：在电缆线路每组3相附件的接地箱外接地引线处安装3只高频宽带局放耦合传感器，利用脉冲放电电流电磁耦合原理提取电缆附件及邻近电缆的放电信号，并和电缆本体上安装的工频同步耦合传感器输出的参考相位信号一同就近进入每组附件旁的前端模组，进行信号调理、高速采集、信号预处理，采用以太光纤网将所有前端模组与监控主机相链接，信号远距离传输至集中监控中心，通过主机上运行的程序实现线路各段局放变化动态显示、放电信号表征和特性分析、模式识别、阈值报警、绝缘诊断、历史数据管理等功能。综上所述，本文需实现的硬件架构如图2-4所示。

14



图2-4 局放监测系统硬件架构

### 2.3.3 硬件架构特点

根据监测系统硬件结构和项目要求，系统需满足以下几点特点。

1.统计分析高压交联电缆本体和附件在敷设、施工、安装、运行等环节中产生的典型绝缘缺陷，并在真实高压交联电缆及附件试品上予以构建复现，在电磁屏蔽良好的实验室内获取其“纯净”的局放信号，统计分析出典型缺陷的特征参数，依据现场局放实测数据提取被测参量数据，建立综合特征指纹库；

2.在线监测装置总体架构上采用分布式测量与集中监控相结合模式，利用基于脉冲放电电流电磁耦合原理的高频宽带传感器提取高压、超高压电缆附件及邻近电缆的放电信号，就近进行信号调理、高速采集与预处理，通过高速以太光纤网远距离传输至集控主机；

3.采用基于非线性狭义数学形态滤波器的软件抗干扰方法，降低现场干扰，提取放电主要放电信息。

15

4.采用多相态谱图聚类分析的方法，从多相态谱图中萃取信号放电特性，结合典型缺陷局放特征参量和现场干扰实测数据，依托综合特征指纹库，应用时频空间转化、模式分类等相关算法，建立计算机软件辅助诊断系统。

## 2.4 本章小结

为本章围绕搭建监测系统的硬件结构，从系统的相关概念和理论入手，着重分析了系统的硬件组成、各个硬件及系统结构的特点，基于整个项目结构，分析构建了本文的研究领域的硬件结构，建立了高压电缆放电监测系统，并给出了系统硬件搭建的结构示意图，为下一章节开始对系统的软件设计奠定了基础。

16

# 第三章 监测系统软件设计

本章首先提出了用户关于整个监测项目的需求，并对项目需求采用多种分析手段，进行了梳理和详细分析，设计出软件的实现方法。依据项目需求分析，基于先整体框架结构，后分步实施的设计思想，采用模块化的设计方法，对监测系统的软件部分分别设计了系统软件架构、软件功能模块结构以及各个模块的具体功能。

## 3.1 监测系统需求设计

基于项目需求和硬件选择，需实现被监测电缆线路局部放电信号的采集、调理、A/D转换以及对数据的预处理，对监测信息实现数字化和缓存，并通过光纤传输至监测主机进行分析处理，监测数据可根据需要定期发至上一级控制主机，也可通过服务器本地存储。基于项目给定的硬件设备，重点研究设计出系统的软件需求。

在线监测装置软件系统的主要功能是需要通过网络对13套前端模组（每套前

端模组含3个局放采集通道，总共39个通道）所采集的数据进行获取并分析，在给出分析结果的同时将数据按采集的时间，自动存入上位机的MySQL数据库中。上位机中的监测软件设计框架图如图3-1所示，通过上位机运行监测软件，采

用明确的TCP/IP通讯协议循环采集39个通道的数据来进行分析和处理，然后显示39个通道的检测状态，并实时显示放电量Q随时间变化的曲线。数据处理完毕后再存储至MySQL数据库中。



图3-1 软件框架

17

如果用户希望查看某一个监测节点的图谱分析，可通过对上位机中软件的监控主界面操作，进入子界面（图谱分析显示界面），该子界面中有多个图谱的显示以及数据分析、处理等相关功能。此外，该子界面还增加了对数据库数据的管理操作，重点实现从数据库中读取选定时间和节点的历史数据。结合图3-1软件框架，系统需实现的主要功能如下：

#### 1. 多种局放信号的信息获取

对被控监测设备提供实时工作状态的信息显示；根据采样数据和数据的分析结果，监测界面显示放电数据；获取放电信号，依据信号数据获取热度图谱（φ-q-n）、基本统计三维图谱（φ-q-t）和风险度评估的二维谱图（q-n）显示；数据库系统的操作与管理，主要实现数据的存储、读取、显示和数据文件导出；局放信号的放电量幅值、相位以及放电次数等重要参数的存储和显示。

#### 2. 放电类型的识别与诊断分析

系统具有根据局放方面的传统经验，提供背景噪声、典型干扰和局部放电判定功能，能够基于局部放电信号特征和变化趋势进行缺陷诊断与电缆线路运行状态分析。

#### 3. 预警功能

系统可根据监测数据和设定的报警条件，在达到报警条件时，自动发出报警信号，报警信号可远传，报警功能限值可修改。报警方式要求：一是系统本地能显示报警信息，采用阈值报警等多种报警模式；报警类型分级设置；二是报警信息上报类型包括电子文本、GSM短信等形式（可根据实际需要增减）。

#### 4. 数据管理功能

系统需具备数据库管理功能，能按照设定周期实时保存采集和处理后的局放监测信号数据。对于监测数据的管理，提供数据查询、分析、处理和数据导出等功能，并使数据具备2年有效期。提供监测数据趋势分析并且数据趋势的显示时间段是可选择的。

#### 5. 节点定位功能

需实现一个完整周期的抽样工频参考信号和局放脉冲信号的波形实时显示，能很直观的观测到脉冲信号的强度。能对一个工频周期的局放脉冲信号进行图上分析，具备对脉冲波的分析运算功能，可依据设定波速等参数，自动完成实际距离的测算，实现故障节点的定位。

#### 6. 自恢复功能

因不可预知因素的存在，导致监测系统随机断点。因此，本监测系统需提供自恢复功能。当再次通电时，上位机重新启动，监测系统在上位机启动后，自动

18

启动运行，初始化监测设备，再次开始对所有节点的实时监测。

## 3.2 软件需求分析及研究

软件的需求分析主要完成对监测系统软件设计的基本分析，确定出软件的设计方向，为搭建软件架构奠定基础。根据本文的前文所述系统功能分析和硬件架构，由于用户对监测系统的操作和监测结果都是由上位机实现，所以监测系统所要实现的测试功能主要由本文开发的软件作为控制终端进行实现。对于电缆局部放电监测，软件部分主要围绕以下六大功能进行：局放信息的获取、放电类型识别与诊断分析、预警功能、数据管理功能、定位功能、自恢复功能。

### 3.2.1 数据采集和处理分析

#### 1. 数据采集

使用数字示波器采集数据，13台示波器采集13个监测节点，将示波器通过局域网络连接到服务器（软件运行在服务器上），共13台数字示波器。对于4通道

示波器的应用，除每台采用3个通道的信号输入端外，还需在1号示波器的4 通

道，输入工频信号，作为参考信号。因此，共需要13台数字示波器的40个通道采集信号。由于各示波器同时触发，但触发源与工频信号无关，为保证每次采集到的数据都能在工频上相位对齐（局放判断重要条件），每次需采集工频信号的两个半周期，并从这两个半周期中截取一个完整周期。如图3-2所示。

在采集数据时，数字示波器使用M的存储深度（设为N个数据），采集两个周期40ms的数据，每个周期N/2个数据。



图3-2 参考信号截取点

#### 2. 数据截取

从采集到的数据中找到图3-2中所示的点1，从点1开始截取一个周期20ms

的N/2个数据。

19

点1的查找，找到第一个所在曲线段斜率为正的过零点。难点在于，所采集到的工频信号并非严格的正弦，会有噪声叠加，可能会有抖动以致多次过零。

#### 3. 局放数据截取

根据“数据截取”中找到曲线段中各值的索引，对另外13（监测点）×3（A、

B、C三相）= 39个通道的数据进行截取，分别得到39组一个周期的数据。

#### 4. V-T到V-φ

将一个周期20ms的N/2个数据映射到360°上，得到各数据对应的相位。如图3-3所示。图中红色为一个完整的工频信号参考，蓝色为含有噪声干扰的局部放电信号波形。



图3-3 相位映射

#### 5. V-φ关系到Q-φ关系

依据电压值V与时间的关系，对于每个监测点的一相（A、B、C之一）每次按1°（相位）对拟合的放电曲线积分，即求图3-4中阴影部分的面积，因此一次刷新将得到360个放电值Q[360]，共有13×3 = 39个Q[360]放电值。



图3-4 求放电量 Q

20

#### 6. 数据的可视化(1)φ-q-n 图

以Q[360]做纵坐标，φ做横坐标在坐标系中画散点图，得到一张φ-q图，如图3-5所示，共13x3=39张。系统每5分钟刷新一次，新的数据在相应的图上（根据监测点号和工频电A、B、C相号编号）累积画散点图（不擦除前一次的），同时将坐标系分成若干方格，对落在每一个方格内的点进行计数N[360][q]，在画图时根据落在同一方格内的点数改变点的颜色，即得到φ-q-n热度图，共13x3=39张。



图3-5 φ-q-n散点图

（2）φ-q-t 图

以Q[360]做纵坐标，φ做横坐标在坐标系中画折线图，得到一张φ-q折线图，如图3-6所示，共13x3=39张。系统每5分钟刷新一次，新的φ-q折线图放在相应编号的图Z轴最前面，旧的φ-q折线图沿Z轴依次向后移动，得到三维φ-q-t图。共13x3=39张。

(3) q-n 图

根据程序中统计的N[360][q]，计算同一q值时的次数n，画出q-n柱状图，如图3-7所示。该柱状图主要作统计分析，纵坐标以放电量值q表示，横坐标以放电次数n表示，建立起q与n之间的关系。给出初步分析后，本文后续章节将依据此处分析，对软件关于q-n图的后台程序结构以及界面进行具体设计与实现。

21



图3-6 φ-q折线图



图3-7 q-n柱形图

### 3.2.2 放电类型识别与诊断分析

对单组放电类型的识别和诊断分析的流程如图3-9所示。同时计算39组。图中的相关逻辑流程采用如下方法进行。

1.计算并统计放电信号信息：放电量Q，放电相位Φ，以及放电次数N。在统计放电次数时，按放电量以5pC为区间，放电相位以1°为区间内的信号统计累加，即一次统计如图3-8中一红色方格的放电次数。

22



图3-8 放电次数统计示意

2.平均局放量的确定，对该时刻前所有检测到的放电量取平均值。

3.放电标准的确定，当有超过2倍平均放电量的值出现时，确定其为产生的放电信号。

4.如存在超过2倍平均放电量的放电信号，则认为有疑似预警情况，进一步判断，这些信号的统计区间中心值是否相差150°至210°。例如：统计出超过2倍平均放电量的放电信号的区间位于（30°至110°）与（250°至300°），则两区间中心值分别为70°和275°满足相差150°至210°的要求。

5.若局放信号没有上述的相位特征，则统计这类高放电量信号的出现频率。如果出现频度低于0.5，则认为是偶发干扰，不作预警，显示绿灯；若频度高于0.5, 则认为出现了频发的大信号干扰，存在淹没局放信号和外部损伤的可能，显示黄色预警。

关于频度计算，例如系统5分钟刷新一次，每次按1°（相位）对拟合的放电曲线积分，因此一次刷新将得到360个放电值，那么1小时，系统将刷新12次，

若12次都出现了这类高放电量信号即认为出现频度为1；若出现6次此类信号，则认为出现频度为0.5。

6.如果放电信号有第4步中所判断的相位特征，则统计其放电频度。如果出现频度低于0.6，则认为是偶发的疑似局放信号，本次显示黄色预警，下一周期计算频度时，频度值乘以1.2的风险系数；若频度高于0.6,则认为出现了频发的疑似局放信号，需立刻进行进一步的检修排查，显示红色预警。

23



图3-9 整体逻辑判断流程

### 3.2.3 软件其它需求功能分析

#### 1. 预警功能

（1）系统本地显示报警信息及报警类型分级设置见图3-9中判断逻辑流程说明。

（2）报警信息上报。信息上报以两种方式实现，一是以电子文本本地日志形式保存；二是GSM短信。采用串口通讯的方式，软件自动控制GSM模块相用户发送预警短信，需对GSM模块的开发资料以及AT命令集予以研究。关于GSM 短

24

信模块，考虑到项目投入成本，可增加或略去此功能。

#### 2. 数据管理功能

保存φ-q数据，即Q[360]保存到excel或dat文档或数据库中，每5分钟

13x3x360个数据，并且能以jpg或bmp等通用格式保存2中画出的三种图形。

#### 3. 定位功能

定位功能需对局放参考信号波形和高频电磁耦合信号波形实现再现，并能对采样信号波形进行量测，依据波速、V最大值、触发深度等参数的配置，可实现故障点定位。具体实现方法是：将“数据采集与处理分析”中截取的一个完整周期作为采样信号波形的截取周期，再在程序中采用D/A转换，将采样信号波形显示在定位功能界面中，通过设定采样信号的参数，实现自动获取定位数据，实现定位功能。

#### 4. 自恢复功能

当整个系统断电重启时（软件运行的服务器重启），软件能在服务器操作系统重启后自动打开，实施监测。

## 3.3 监测系统软件设计

对于测控系统的软件设计与开发，由于有丰富的库函数和便捷的可视化控件界面，一般采用美国国家仪器（NI）有限公司的一款基于虚拟仪器测试技术及工程应用的LabWindows/CVI 9.0（以下简称CVI）进行总体开发，应用Windows API函数，实现获取计算机系统时间，依据系统时间访问数据库，并采用MySQL数据库实现数据存储和读取。

依据软件的整体设计思路和对功能的需求分析，接下来就可以构建出软件的体系结构。软件为控制数据采集模块和同步脉冲触发器的终端，同时实现对采集的数据进行分析、处理和存储等功能。为此，在软件第一层构建监测界面、数据浏览、系统设置和系统退出四部分。根据需求分析，在软件第二层中，监测界面应包含故障文本信息报警、数据处理后的多种形式显示和监测信号指示；数据浏览应基于MySQL数据库，对采样数据分析处理后，实施存储和调阅；系统设置包含有下位机设置和定位功能设置，实现对数据采集模块主要控制参数设置和对定位功能相关参数的设置；系统退出时，监测系统停止工作。进入软件第第三层，在信号指示中，包含有三种不同的监测结果图谱分析和对监测点的定位显示，这部分是本软件的核心，也是软件设计开发中的重点和技术难点，因为三种图谱不光要实现实时采集的数据图谱绘制功能，还承担着再现历史数据时的图谱还原；定位功能需根据实时采集的数据实时刷新定位信息，根据用户提供的定位参数，

25

及时刷新定位信息，为用户可以提供及时有效的监测点位置。软件的第四层，也是软件的最底层，由定位功能实现参考信号波形显示、采样信号波形显示、采样信号参数设置和定位数据显示。软件中各项功能间的关系，如图3-10所示。



图3-10 软件体系结构

### 3.3.1 软硬件通信方式

上位机和前端模组（软硬件）之间的通信形式采用技术成熟的主机从机方式

（简称主从式）进行通信。主从式指的是前端模组不主动给监控主机发送数据，而是将所有的前端模组连在同一个监控网络中，给每一台前端模组设定一个固定地址编号，监控主机按照制定好的协议格式以广播的形式向网络发送读数据命令，该命令中包含了前端模组的地址。命令发出后，所有的前端模组都能够接收到该命令，但是只有符合命令中的地址的前端模组才会回复采集的数据给上位机。在实验室实验阶段，对软件的设计采用了高效的多线程技术，极大的提高上位机的工作效率，提升软件监测速率，缩短每个监测周期内的数据采集时间。但在实验控制多台前端模组采集数据时，出现了多台前端模组不能采集数据的问题。经研究发现，出现这类问题的原因是采用多线程时，线程池的资源分配引起了前端模组信号的混乱，导致多台前端模组有时不能及时采集信号数据。因此，为了避免不能正常采集数据的问题，软件的设计思想由多线程技术改为单线程技术，通过上位机从第一台前端模组（也就是1号监测节点）开始起，依次向后续前端模组发送读数据命令，完成每台前端模组的依次数据读取，实现了每台前端模组数据的正常采集。但采用单线程技术后，上位机在获取多台数据采集模组数据时的速率降低较多。通信示意图如图3-11所示：

26



图3-11 上位机与前端模组通信示意图

该模组采用主从式的方法，实现了上位机与前端模组的通信。监控主机按照既定的巡检一次39个通道的时间，依次从第1个通道开始起，读取该通道的数据。如果该通道无法返回数据，则认为该通道断开。如果巡检时间还没有到，已经巡检39个通道完毕，则等待巡检时间计时器到时后，再开启新一轮的巡检。监控主

机与前端模组的通信流程图如图3-12所示：



图3-12 前端模组信号流程图

27

上位机读取前端模组的数据是通过调用该前端模组数据采集单元软件驱动程序的动态链接库，来实现对前端模组数据的读取。

### 3.3.2 数据处理模块

数据处理模块主要对从采集模块传上来的数据按照各种既定的算法进行处理，对于各个谱图的数据处理。流程图如下图3-13所示：



图3-13 数据处理流程框图

### 3.3.3 人机交互模块

#### 1. 谱图绘制与显示

当用户双击主程序界面上的对应信号灯时，软件会打开对应通道的详细谱图显示。而该谱图显示模块就是用于对上位机接收到原始数据进行进一步的处理，从而绘制不同的谱图，如N-Q-, N-Q-T图等。图谱显示模块相关功能图如图3-14所示：

28



图3-14 显示模块功能图

#### 2. 故障报警

告警模块主要实现在软件检测到局放信号超过设定阈值（报警数值）时，向用户给出告警信息。该模块有多种方式给出告警的信息。

当检测到局放信号时，软件主界面通过警示灯和文本提示给出局放的信息；每检测到超阈值局放信号一次，对应通道的状态灯会闪烁变红一次；此外，软件会通过系统给定的波速自动计算出放电位置，为用户提供定位功能。

### 3.3.4 历史数据回看模块



图3-15 历史回看程序流程

29

按照项目需求分析中提出的，为了能随时对系统以往的监测结果进行查询和回看，在软件中就必须有单独的历史数据回看模块。该模块需实现可查阅2年内的数据信息，并复原数据的图谱信息。因此，这里采用LabWindows\CVI在对软件进行开发时，可以很方便的借助于开发平台中的日历功能，通过选取日历控件中的指定年月日，实现对历史数据的调阅和图谱再现。按照这样的设计思路，历史回看的设计结构如下图3-15所示。

### 3.3.5 数据库管理模块

上位机（或服务器）中MySQL数据库需实现的功能有：

1.在上位机（或服务器）端安装MySQL数据库，针对监测点数据存储，开发数据表模板软件并安装，为数据库实现数据存取建立数据表模板；

2.实现上位机数据库对39个监测节点数据分析处理后的存储与读取。存储时，以年月日为表名，自动创建新表；读取数据时，自动按照赋予的日期时间进行查找读取，并将数据提供给软件绘图界面，实现历史数据的图谱再现。

3.可实现对数据库的直接访问，对数据表实现导出、共享和上传。本文所述系统为前三层级，如用户需要，可将数据文件上传至第四层级，为监控中心实时提供监测信息。

4.实现对数据库数据的定期备份。由于项目需求需实现数据存储能达到2年以

上，所以本数据库采用计算机硬盘存储的方式，以24小时制的0点00分为时间

节点，以年月日为表名，建立新表，存储数据。若当天时间节点已到24点00分，系统自动完成对当天表的备份，并重新建立新表，为下一轮数据存储做好准备。

#### （1）数据存储部分

数据库存储数据时，由于数据表按照以监测节点编号为行，以0至360度相位为列，逐一存储放电数据。不管是存储数据，还是读取数据，都可以通过设计开发的软件管理数据库和直接采用浏览器获取数据库中的数据信息实现，如下图3-16所示。



图3-16 数据存储框架

30

#### （2）历史数据查询

为了实时掌握被监测电缆节点的放电情况，在软件中只需选择对应的监测节点，查看对应的该监测节点的放电数据和数据分析，便可直观的观测到该节点的各种放电信息。本文所设计的软件，在历史数据查询功能中，主要提供日历功能，实现监测节点数据显示，数据的三种图谱再现绘制。特别是可根据电力部门供电监测的工程人员需求，根据给定的监测历史日期，导出日期范围内的数据表。为了对历史数据更易查看，软件设计中，增加了24小时制的时间轴功能，可以选择查看数据的开始时间和结束时间。基于MySQL数据库的相关管理和操作如图3-17所示，图中所示流程按照浏览器登录数据库的方式实现，可增加数据库的用户管理，增设密码管理功能；也可取消用户管理，实现数据库数据管理的自动化。本文在设计软件时，对本数据库采用了嵌入式设计，因此，简化了本图中的人工操作流程，对数据库实现了数据存储和读取的自动化，为工程人员提供了更加方便的操作界面。



图3-17 数据库管理流程图

31

## 3.4 本章小结

本章依据项目要求，提出了项目的具体需求，并根据项目需求对所要实现的监测系统软件需求及功能进行了详细分析。经过需求分析，得出了实现软件设计的思路，并按照软件各个功能要求和功能之间的关系，设计了软件的整体结构。参照整体结构，采用模块化的设计方法，基于软、硬件的通讯模式，对软件整体进行了模块化设计，并对每个软件模块进行了具体分析和设计，也为下一章节能够对监测系统软件的实现奠定了基础。

32

# 第四章 监测系统软件的实现

基于前一章中监测系统的软件设计整体框架和软件的各个模块设计，本章主要完成了对软件界面的整体开发实现和各个模块的界面及功能的开发和实现。并采用多种数学算法，对软件在信号处理和数据处理进行研究和实现，以验证软件的可行性。

## 4.1 系统软件各个模块的实现

### 4.1.1 监测系统的登录



图4-1 软件启动流程图



图4-2 系统登录界面

33

为用户登陆界面如图4-1所示，为了提高软件的运行速率，采用异步定时器技术，在监测软件启动的同时，完成下位机初始化。按照项目需求，软件采用动画效果启动后，自动进入监测界面，开始对电缆实施监测。根据下位机较多且初始化较慢的特点，登录界面采用动画效果时，采用延时的方法，为系统所有下位机初始化成功提供时间保障。下位机主要包括13台数据采集模组和同步脉冲触发器。当下位机初始化成功后，可看到数据采集单元上的信号指示灯闪烁。为了确保每台数据采集单元都能初始化成功，初始化程序部分采用单线程技术，对13台数据采集单元逐一进行初始化。由软件的登录界面图可直观的看到，为本项目在隧道中电缆的敷设图。

### 4.1.2 人机交互模块的实现



图4-3 监测主界面工作示意图

上位机监测软件主界面工作流程如图4-3所示，当系统开始监测时，为了能同时实现对各个节点的信号采集，软件中设计了两种对数据采集模块的触发方式。当系统设置为内部触发时，完成对13个节点采样设备的强制触发，实现数据采集；

当设置为外部触发时，软件控制同步触发器同时为13个节点采样设备提供脉冲触发信号，实现采样设备采集数据的同步性。根据系统设置，监测周期（采样周期）可在3至60分钟内设定，默认条件下，系统采用5分钟监测周期。当完成一个周期的数据采集时，软件将采集的数据显示在界面的同时完成数据录入数据库的工作。若监测设备或监测线路发生故障，系统将及时报警，相应故障节点的信号灯

34

亮起，并显示故障节点信息，实现故障点定位。对于存入数据库的监测数据，采用计算机硬盘存储技术，可实现监测数据的永久保存。若工程人员需要调取某一监测日期的某个节点数据时，只需在历史数据回看中，选择相应的日期和节点，即可完成历史数据调阅。在图4-3监测界面工作流程中，采用单线程的程序结构设计。由于前期设计的多线程对多节点实施监测时，往往不能同时采集到监测数据。因此，基于监测节点采集数据的可靠性，这里采用单线程技术予以实现。相关的界面如图4-4所示。



图4-4 在线监测主界面

主界面布局主要分为五个部分予以实现，分别为标题显示区、、提示报警区、数据显示区、信号图谱分析区以及按钮控制区。其中，信号图谱分析区包含有每个监测节点的三相图谱，每个信号指示灯内又含有信号图谱分析区，可实现打开观测。下面对主界面的每个区域的功能实现作以说明。

标题显示区：主要实现了两个功能，一是标注了相关测试项目的名称及单位；二是实现了与上位机系统时间的同步性，并实时予以显示。

文本提示报警区：主要实现了报警信号灯的可视化显示，监测点故障信息文本显示，以及系统自检故障提示等功能。当监测系统因监测设备或线路不通发生故障时，本工作区实现了故障信息显示，故障信息中包含有监测节点、故障发生的具体时间等，很好的为工程人员实现了时间和空间的双定位。

数据显示区：此工作区实现了局放信号测试完成后的数据动态显示。显示的数据信息包含两项内容，一是每个监测节点的三相监测数据信息，也就是放电量

35

值；二是每个监测节点的三相监测节点经过12次数据采集后的风险度系数显示，当风险度系数值过大时，就说明该处放电发生明显，需要工程人员进行维护。由于系统按照设定的监测周期实时测试，所以本区域内13个数据显示框每隔一个监测周期时，数据显示刷新一次。

典型绝缘缺陷图谱区：本工作区主要实现了三种指纹图谱的实时绘制、显示以及信号时域波形显示、故障定位等功能。绘制及显示的图谱包括二维热度图谱、三维关系图谱、放电统计图谱；时域波形显示、定位在下文作以详述。

1.φ-Q-n图：该图实现了在一个工频周期内，对连续采样信号离散化、离散化数据的放电量值运算以及数据上传、写入等功能。为了不影响系统监测的连续性，这里采用异步定时器技术，实现了数据的同步上传显示、图谱绘制和数据库写入。在φ-Q-n图中，每个数据对应于图谱中的一个点，当随着局放信号采集次数的增多时，φ-Q-n图中点的分布就越密集，工程人员正是根据这种点的分布的密集程度，观测分析放电的严重程度。上述的φ、Q、n三个参数的算法及实现的图谱在后续章节进行具体描述。

通过对图谱显示界面的设计，实现了A相、B相、C相3个热度图显示框，用于显示一台数据采集模组的3个通道的数据散点分布情况，并且当某一点在显示框中出现频率越高时，该位置上的点的颜色也会随之发生变化，颜色变化趋势在图的右下区域已做备注。由于局放信号中伴有噪声干扰，因此程序中计算出的局部放电量更多的是反映放电趋势和放电的程度。为了捕获更多的放电脉冲，数据采集模组采用1M数据的存储深度，在软件系统中，离散化的数据约有1048576个点。在φ-Q-n图中，对这1048576个数据点平均分为360等份，采用积分函数

Integrate对每一等份进行积分运算，对360个积分值取最大值，即为本图中绘制一次点的值。Integrate函数按下式(4-1)的运算公式进行计算：

*i*

*Yi*  

*j*0

(*X j*14*x j**x j*1 )

*dt*, i=0～n-1, j=0～n-1 (4-1)

6

其中，dt的值可根据需要调整，该值的设置在软件系统设置中的转换系数进行设置。式(4-1)在后续章节中，将结合图谱测试及调试，进行具体描述。

2.φ-Q-t图：为了更加直观的建立放电相位φ、放电量Q以及放电次数t三者之间的关系，在界面中实现了φ-Q-t图谱的绘制、显示。由于系统默认的测试周期为5分钟，所以在绘制φ-Q-t图时，t的坐标值取值为12。刚好实现了每一小时对放电量值统计分析一次，在本图中，每一小时绘制一张完整的φ-Q-t图谱。当软件在做统计分析时，会将放电次数做累积，在φ-Q-t图中，绘制连续12次的放电三维图。当12次放电图绘制完成时，会重新开始下一轮的12次φ-Q-t图绘制。以φ

36

-Q-t图谱形式显示放电信息，将放电信息以空间立体形式进行了描述。该图谱在显示的基础上，也实现了图谱的局部放大、角度变换等功能，为工程人员从某一量值或某一角度观测图谱信息提供了方便。一般情况下，当放电量的值很小时，可视为没有产生局部放电。根据前几章节的描述，系统的测试现场环境中有多种噪声干扰存在，软件在对信号进行处理时，不可能全部滤除，所以程序在对局放量进行运算时，会混入一定的噪声干扰。当这种噪声干扰的值较小时，其并不会对局放量的值产生大的影响，所以三维图中局放量的值小于10pC时，可不作为局放信号分析。

3. Q-n图：实现了局部放电量值的柱状图绘制显示。采用柱状图作统计显示时，建立了放电量Q与放电次数n的对应关系。当软件系统每采集一次放电信息时，在本图中自动绘制出一条柱状图。放电量值越大时，柱状图的高度也就越高，颜色也随之深。

4.定位功能操作：主要实现了参考信号一个工频期的波形显示，相应监测节点各个相位的局放采样信号波形显示，以及局放脉冲波的距离和时间参数数字显示等功能。为了可以更加精确的测算出放电信号的位置，在本工作去中，采用了游标功能和时域波形复原技术，通过滑动采样信号波形显示窗的游标截取脉冲波的传播时间，系统实时自动计算出相应的传感器距离上位机的实际距离。在计算实际距离时，需知道脉冲波的波速，并在系统设置界面予以设定。同时，本工作区也弥补了前三张图谱的不足，在采样信号波形显示窗中，实现了参考信号波形幅值和采样信号波形幅值的可读性功能，单位以mV计。

本文在研究局放脉冲信号的定位时，主要采用时域反射法(TDR). TDR法的基本思想是通过选定某一条放电脉冲，计算其第一次到达和反射到达电缆一端的时间差，再将这个时间差与脉冲的波速进行运算，得出运算结果为节点至上位机的粗略距离，最后通过这一距离，实现对信号源的定位。

### 4.1.3 历史数据回看模块的实现

根据前文中对历史回看模块程序流程及结构的设计，采用LabWindows\CVI支持多控件加载功能，实现了历史数据回看模块中日历控件的添加、系统日期的获取、节点历史数据的图谱再现以及与数据库系统建立连接等功能。如图4-5所示，当在日历控件中选择某一日期，在节点选择框中选择某一节点后，单击确定即实现了对数据库中历史数据的调取，并分别在数据显示框中显示历史数据和在图谱界面绘制历史数据图谱。

37



图4-5 数据浏览



图4-6 数据文件格式

由于本软件的开发环境具有良好的数据库接口函数，所以软件在应用数据库时，采用了大量的接口函数，在程序中将数据库命令参数嵌入函数中，予以实现。软件在对测试数据进行管理时，对数据库的访问、数据表的建立以及数据的存取均采用自动化的方式完成。对于数据库的访问，系统也支持浏览器单独访问手段，实现了历史数据查阅功能。根据项目需要，有时需要单独将数据库的数据表导出，实现数据共享功能，本数据库也提供了导出多种数据文件的格式。如图4-6所示，为数据库中可导出的数据文件的格式类型。此处也可作进一步设计开发，根据实

38

际工程需要，可进一步实现数据文件的自动上传和共享功能。对于数据库的实现流程，在下文进行描述。

### 4.1.4 系统设置模块的实现



图4-7 系统设置结构示意图

如图4-7所示系统设置结构示意图。本工作区主要实现了对下位机进行设置和对定位操作区参数设置。难点在于系统始终处于工作状态，对系统相关参数的设定，也是在动态状态下实现的。因此，对于多个参数的设定，程序中采用了异步定时器、同步定时器以及多线程等技术，当对处于工作状态的系统进行设定时，在不影响局放信号监测的前提下实现。根据4-7图中描述，下面对两部分参数设置功能实现如下：

#### 1. 下位机设置

转换系数：实现对前端数据采集模组输入计算机的数据信息进行积分运算时的转换参数，其值发生变化时，直接影响到放电量的计算精度，系统默认值为1。耦合方式：实现设置数据采集模组的耦合方式，对数据采集模块的耦合方式

可设置为AC耦合和DC耦合两种。

触发方式：实现对数据采集模组的触发方式进行设置，可采用内部触发和外部触发两种设置方式。当设置为内部触发时，数据采集模组将不依托触发模块，实现内部触发采集信号；当设置为外部触发时，数据采集模组需要触发模块触发脉冲信号，才能实现对传感器信号的采集。

39

采样周期：实现监测系统采集一次数据时的时间间隔，可设置范围为1分钟

至60分钟，也可设置更长时间。由于系统的数据采集模组数据量较大，且采用单

线程控制13台数据采集模组对数据进行采集和处理，数据采集模组的响应较慢，

所以完成一个周期的13个节点的监测，需要时间较长，一般采样周期最短科设置

为3分钟。考虑到前文的图谱绘制次数，默认情况下，采样周期设置为5分钟。

可实现对监测数据每1小时统计分析一次，每24小时完成一天的数据监测。

#### 2. 定位功能参数设置

局放脉冲信号波速：实现对采样信号的波速输入，为测算局放监测节点的实际距离提供参数值。



图4-8 系统设置

V最大值：实现图4-8中采样信号图谱显示框的Y轴最大坐标值的设置。触发深度：实现图4-8中采样信号图谱显示框的X轴最大坐标值的设置。

#### 3. 系统退出按钮

当单击“系统退出”按钮时，实现监测系统中的各个硬件设备停止工作，完成数据库的备份保存，退出数据库系统，监测软件退出上位机系统功能。

### 4.1.5 数据库管理的实现

基于数据存储格式和自动存取模式，监测系统存储数据时，需按照明确的数据表模板建表和写入数据。在对数据库开发时，LabWindows\CVI系统提供有SQL

Toolkit数据库系统应用软件工具包，并且这种LabWindows\CVI SQL Toolkit支持

40

主流的数据库驱动，由于ODBC编译方式支持标准的数据库开发，所以本文在涉及数据库开发时，采用MySQL数据库系统。该数据库采用LabWindows\CVI接口函数实现数据写入与读取。本文在开发数据表模板和软件在运行中实时对数据进行数据库管时，程序结构采用如下五步予以实现。

（1）创建一个新的数据库连接。采用LabWindows\CVI SQL Toolkit接口函数包，实现创建一个数据库连接，并生成数据库连接句柄。

(2)激活MySQL数据库命令，生成激活连接句柄。采用sprintf函数和LabWindows\CVI SQL Toolkit工具包中的DBActivateSQL函数，实现SELECT和CREATE TABLE命令的可读性。

(3) MySQL语句的执行。一般情况下，直接在程序中写MySQL的SELECT语句，开发环境是不能直接读取的。须采用上一步中的sprintf函数，将SELECT和CREATE TABLE命令以DBActivateSQL函数的参数形式执行，采用此方法，可实现SQL的常用命令的执行。

（4）释放MySQL句柄。当执行完SQL语句或需要退出系统时，需要将占用的资源进行释放，否则如果程序长时间运行，会导致内存资源占用过多而死机现象。

（5）断开数据库连接。当软件需要退出系统时，需采用DBDeactivateSQL函数释放SQL资源。

按照上述步骤，完成了对数据库嵌入软件监测系统的开发，所开发的数据库表模板如下表4-1所示。

表4-1 数据库表模板

| 监测点 | 采集时间 | 相位 1 | 相位 2 | 相位 3 | ….. |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| NAME | TIME | Q000 | Q001 | Q002 | ….. |
| LS01\_A | 16:56:34 | 0.44389 | 1.22283 | 1.05378 | ….. |
| ….. | ….. | ….. | ….. | ….. | ….. |

## 4.2 局放监测基本算法

在工程测量中，传感器周围存在有干扰信号，当采集到放电信号时，该信号也比较弱。往往多种噪声幅值都高于局放信号，达到2个以上数量级，局放信号被淹没。因此有效地抑制和识别干扰，有效提取局放信号，直接影响到在线检测的准确度和灵敏度，在本项目的实现过程中，可采用两种方法予以实现对噪声的抑制。一是在下位机端增加放大器，再进行滤波处理；二是现场测试环境中安装电磁屏蔽箱，屏蔽外界噪声干扰。

41

对于220kV输电电缆，经工程人员测试可知，现场主要有三种干扰。分别是窄带周期干扰、白噪声和脉冲性干扰。在电力系统中，频率在30kHz至500kHz之间的高频保护信号、频率范围大于500kHz的无线电广播信号以及载波通信的信号，都属于窄带干扰。这类干扰的时域波形为高频正弦波。在频域范围内，以一定的频率作为中心，形成离散带状分布，又称离散谱干扰，干扰越严重，窄带数越多。当系统出现背景噪声或是在检测中自身出现的离散噪声，这类噪声干扰则属于白噪声干扰。当局放信号的频谱与白噪声干扰的功率谱发生重叠时，局放信号就很难提取了。由于干扰源不同，产生的脉冲类型也各有不同。例如，输电线路发生的电晕放电、电弧放电等。

深入分析现场测试环境，对于电缆运行现场有诸多强电磁场干扰，仅仅采用硬件方法，降低外界的各种干扰具有很大的难度。但如果采用计算机软件应用技术，依托信号处理的数学算法和分析方法，就可实现对现场信号的有效采集。根据文献资料描述，非线性狭义数学形态滤波器和联合时频分析，能较好的实现上述信号提取面临的问题[40]。这种数学方法能处理来自数据采集模块的信号数据，便能最大限度地降低噪声干扰，甚至还可以将原始信号关键特征实现完好的保存。对于非平稳的局放信号是随机的，所以就不能确定两次放电的时间间隔。为了得到准确可靠的测试结果，需对被测信号进行多个周期的数据统计。采用多相态谱图聚类分析的方法，从多相态谱图中萃取放电特性，结合典型缺陷局放特征参量和现场干扰实测数据，依托综合特征指纹库，应用时频空间转化、模式分类等相关算法构建局放监测的专家诊断系统，为监测系统在现场观测提供相关依据和有效分析手段，以达到测试精度和速度要求。

为了能实现上述的信号测试，确保局放信号不失真，配合对上位机软件，对局放监测系统按照以下三个步骤进行。第一步是在前端模组接入放大器，对信号采用带通滤波的方法。第二步采用非线性的狭义数学形态滤波器和联合时频分析。由于全部时域范围内都分布有窄带干扰，并且具有较大的幅值，采用这种分析方法能够对中波广播窄带干扰和白噪声进行有效抑制，使得脉冲信号可以被分离出来。第三步通过同组附件的不同信号极性不同的放电脉冲进行区分，提取出属于本组检测点的局放脉冲信号。第四步采用多相态谱图聚类分析的方法，从多相态谱图中萃取放电特性，结合典型缺陷局放特征参量和现场干扰实测数据，依托综合特征指纹库，判断放电类型，并对多组测试数据进行统计分析，完成风险评估，上述联合抗干扰处理方案如图4-9所示。

42



图4-9 软件信号提取及处理流程图

### 4.2.1 非线性狭义数学形态滤波器

采用非线性狭义数学形态对局放信号进行分析处理，也就是应用数学形态学中的有关理论，实现对信号实时处理。目前，这种分析和处理方法已经在信号、图象分析和处理等工程领域得到广泛应用。其具体做法是将被测信号定义为集合，通过设定的移动“探针”，获取信号的重要信息，进行进一步分析。在采用算法研究时，对一个较为复杂的信号进行分解，使被分解的各个部分都具有一定的物理意义，并使得各个部分能保持主要特征，这种形式就称为形态变换。

形态变换主要有二值、灰度值两种变换形式。由于本文研究的局放采样信号是一维的，并经上位机端软件获取后，已转换为离散信号。对于这种离散的一维信号，采用灰度值变换。

假设采样信号经软件获取后，得到离散时间序列x(n)，n=0, 1, 2…N。定义序列结构元素y(n)，n=0, 1, 2…M，且N≥M。则x（n）关于y（n）的腐蚀和膨胀分别定义为：

(*X**y*)(*n*)min[*x*(*n**m*)*y*(*m*)], *m*0,1, *M*

(*X**y*)(*n*)max[*x*(*n**m*)*y*(*m*)], *m*0,1, *M*

(4-2)

(4-3)

式(4-2)为x（n）关于y（n）的开运算，式（4-3）为x（n）关于y（n）的闭运算。

(4-4)



*x**y*(*n*)(*x**y**y*)(*n*) (4-5)

形态的开和闭运算能够将信号波形处理的更加平滑。开运算的主要作用是将信号x（n）中的孤立斑点和边缘毛刺进行消除，抑制正脉冲噪声；闭运算的主要作用是填充信号漏洞和裂缝，抑制负脉冲噪声。

43

### 4.2.2 联合时频分析

一般情况下，在信号处理过程中，为了找到信号的时域与频域之间的关系，往往采用傅里叶变换和反变换的方法。这种方法可以实现对平稳信号的处理，但对本文所讨论的局部放电信号，这种方法就难以实现了。这是由于本文讨论的局放信号是非平稳信号，这类信号具有其自身的特点，频谱是时间的函数，并且信号也只能持续有限的时间。当这种信号随时间的变化规律无法获取到，而只获取到这种信号的频域或时域信息时，是无法实现测量的。

在信号处理中，在不同时间和频率范围内，分布有待测信号时，采用时频分析方法对其进行描述。它是基于构造时间和频率的联合分布的思想，改进了傅立叶变换只能针对时域或者频域的分析。通过分析时、频域的联合分布信息，获取被测信号的频率随时间变化的规律。时频分布主要分为两种类型。一是线性时频，通过傅氏谱变换实现，如短时傅氏变换、小波变换等。二是二次型时频表示。例如，魏格纳-威尔分布和它的改进形式，由于信号能量的表示是信号的二次型，所以上述形式的时频分布的二次型，具有明显的优点。

时频域分析方法，作为一种常用方法，被称为短时傅里叶变换。短时傅里叶变换的具体方法是将时间信号与一个窗函数相乘。如果该窗函数有非常窄的时宽，当把取出的信号近似为平稳信号时，再对其进行傅里叶变换，就可以得到该信号在这个窄的时宽内的频谱变化规律。当对窗函数随时间作移动时，就能获取到信号频谱的变化规律。

对于离散信号序列x（n），在某一时刻n，较短时间段数如下式，

*Xn* (*m*)*x*(*m*)**(*n**m*)

在(4-6)式中，参数**（*n*）表示窗函数，n表示长度。离散信号x（n）的傅里叶变换公式如下：

*STFT* (*n*,)*x*(*m*)**(*n**m*) exp(*jm*) *xn* (*m*) exp(*jm*)

*m* m

(4-6)

(4-7)

关于离散傅里叶变换公式，也就是STFT变换。时域范围内，为获取时频谱，可采用中心对称的滑动窗函数截取观测信号。将每个短时段的信号进行傅里叶变换，也就是离散傅里叶变换。式(4-6)和(4-7)中关于信号的窗函数的说明如下：

1.根据信号处理的有关理论，对窗函数**（*n*）沿时间轴n移动所截取的各段信号进行傅氏变换，就可得到式（4-7）中的*STFT* (*n*,)。式(4-7)也就是信号序列x（n）的联合时频分布。

2.对于本文所讨论的信号，是经数据采集模组输入计算机软件终端。所以软件接收到的信号往往是非平稳的离散信号序列。对于这种离散信号序列x（n），采用分

44

成多个小段的方法进行研究。可将各个小段信号近似为平稳信号，并对它们进行谱估计，就可获取到x（n）的谱图。

### 4.2.3 抗干扰仿真试验计算

窄带周期干扰信号，主要由广播信号和载波信号构成。这种信号在进行图谱分析时，它的振幅往往是一些独立的谱线，并且每条谱线对应着一种频率的表现形式。窄带周期干扰包含调幅、调相两种波。这两种形式的波形表达式如下式(4-8)和(4-9)两式所示：

*S*(*t*)*A*sin(**1*t*) sin(**2*t*) *s*(*t*)*A*sin[**1*t*sin(**2*t*)]

(4-8)

(4-9)

因为调制的信号频率较低，所以无线电干扰和载波通讯可近似为具有多个频率的正弦波信号的叠加。仿真窄带周期干扰为：

5

*DSI**A*sin(2*fi t*)

*i*1

(4-10)

（4-10）式中，*A*为信号幅值，*fi*为频率，*fi*的取值分别为140 kHz、520 kHz、680 kHz、830 kHz、1120kHz。当对上述频率值进行叠加，则形成窄带干扰。局放

信号叠加窄带干扰后的波形，经仿真实验可得，如图4-10所示。



图4-10 局放信号叠加窄带干扰后的波形

通过非线性的狭义数学形态滤波器滤波后的波形经仿真实验如图4-11所示，可见窄带干扰已得到有效抑制。再经过时频分析算法的提取，彻底将局放信号提取了出来，经仿真（非本软件实现的界面）实验如图4-12、4-13所示。上述算法的准确性和可靠性得到了进一步验证。

45



图4-11 非线性狭义数学形态学算法处理后的波形



图4-12 局放信号的时频分析提取



图4-13 提取的局放脉冲信号

46

## 4.3 局放信号分析方法的研究

### 4.3.1 多相态图谱聚类分析

为了能更加清楚地描述监测系统的信号图谱，这里引入数值聚类分析。由于这种聚类分析属于探索性的数据分析方法，是将看似没有关联的多个元素进行归类或分组，以实现理解研究对象的目的。通过这种方法，可实现将信号图谱中的特征点划分为具有内在联系的点，使得信号特征更趋于明显。这种算法的基本思想是将数据的集合按某种确定的规则划分为多个子集，也就是聚类要实现的目标。聚类主要有硬聚类和软（模糊）聚类两种方法。

本监测系统采用创新的多相态谱图聚类分析，为获得隶属度矩阵*U* [*ij*] *c**N* 和

聚类中心*V*

[*v*1, *v*2

,*v*] T，需通过求取目标函数来实现。

聚类多相态的协方差矩阵表示如下式(4-11)：

*c*

() *m* ( *z* *v* )( *z* *v* ) *T*

*N*

*ij* j i j i

*F*  *j*1

(4-11)

*i* *N*

(** )

*m*

*ij*

*j*1

多相态谱图聚类分析主要按照以下算法步骤实现：

（1）选取聚类数量和模糊指数；

（2）更新聚类中心；

（3）对聚类多相态协方差矩阵进行计算。

（4）计算距离范数；

（5）对多相态协方差矩阵进行更新；

（6）聚类数目达到要求后停止。



图4-14 工频周期信号经过多相态谱图聚类分析后结果

47

按照上述步骤，经分析所得结果仿真图如图4-14所示。对聚类结果中的局放

信号的特征图谱进行提取，得到局放信号的热度图如图4-15所示。此处的图谱，在项目中主要依托软件实现。



图4-15 多相态聚类分析提取的局放图谱

### 4.3.2 典型缺陷局放脉冲指纹

由于对局放信号检测的现场环境复杂，有多种噪声存在，所以检测局部放电的关键是电缆有没有放电？利用相应的技术手段和设备检测到的信号，是不是局部放电产生的信号？分析、设计缺陷，决定了能否判断出局部有无放电，指纹识别确定“是不是局部放电”。然而，设计和验证电缆绝缘缺陷是一项繁琐、枯燥，耗费大量人力物力的工作。缺陷优化设计的目的是一方面必须做到具有代表性，能够基本覆盖已知主要缺陷种类；另一方面必须满足电压在工作状态下发生局部放电的条件。根据国内外的相关文献资料描述，有许多研究成果也都是在实验室搭建的模型，模拟绝缘缺陷放电，完成局放检测。但高压电缆运行现场远复杂于实验室的模型，所以需要进一步进行研究。

通过从电力研究机构获取的统计资料，可以看到最近十年来电缆线路运行故障统计分析结果，采取有限元计算、理论分析和试验研究的方法，优化设计、制作典型缺陷。如下表4-2所示，对5种220 KV电缆试品的典型缺陷类型进行了统计。

表4-2 220kV电缆试品典型缺陷

| 序列号 | 中间接头缺陷类型 |
| --- | --- |
| 1号 | 新，主绝缘区域表面的金属悬浮颗粒 |
| 2号 | 新，主绝缘区域切向气隙 |
| 3号 | 新，外部半导电层断口处半导电尖端 |
| 4号 | 新，预制件安装错位 |
| 5号 | 新，主绝缘区域回缩和高电位金属尖端 |

48

针对典型绝缘缺陷，通过取出放电量、测试电压、局放相位以及时间刻度的集合等局部放电信号基本检测数据，进行二次分析处理，分别生成二维和三维局部放电信号谱图以及指纹特征函数。信号提取原理如图4-16所示。



图4-16 局放信号的提取过程

通过研究表4-1中几种类型的典型缺陷，分别对其进行局放信号测试，得到的

不同三维特征图谱，分别如图4-17至图4-21所示。



图4-17 绝缘切痕缺陷三维局放图谱



图4-18 半导体尖端缺陷三维局放图谱

49



图4-19 高压悬浮电位缺陷三维局放图谱



图4-20 高电位金属尖端缺陷三维局放图谱



图4-21 中间接头轴向位移缺陷三维局放图谱

50

虽然局部放电是比较复杂的物理现象，容易受到外界因素干扰，随机性较大，通过图谱识别判别缺陷程度非常困难。但是，就像人类的指纹一样，局部放电信号也具有相互差异的特征参数，完全相同的特征参数的情况非常小。当用特殊标记把典型缺陷对应的局放特征参数进行标记时，作为信号识别、提取和比对的图谱指纹，描述由绝缘缺陷产生的局部放电的类型，所取得的效果也会更加准确。采用灰度计算、统计算子等数学方法建立局部放电信号特征参数识别、提取的数学模型，和与之对应的图谱指纹数据库。因此，对局放信号的提取可按照如下图4-22的设计思路进行。



图4-22 典型缺陷局放信号处理流程

软件中采用多种图谱对局放指纹特征予以分析和描述。本文根据项目需求，主要有时域内的二维热度图谱、三维局放图谱以及作统计分析的二维柱状图谱。为了更加准确的获取图谱信息和局放信号的特征，本文在软件分析数据的基础上，引入了数据库技术。数据库的引入，很好的解决了信号数据量大的问题。对于图谱的指纹识别以及监测数据比对，具有实际意义。为了使软件对图谱显示更加准确，局放监测系统还引入了模糊数学、人工神经网络等方法技术[37]。在提取局放

信号的重要特征时，也采用了波形特征参数和统计特征参数等方法[37] 。由于软件中三维图谱具有更加直观的代表性，所以对于n—q—ψ三维模式的谱图，为了能更加直观的描述局放信号的三个重要参数间的关系，通过绘制n—q—ψ图，建立了放电量的幅值q、工频相位ψ以及放电次数n三者间的关系。因被测信号是随机产生的放电脉冲信号，并且在复杂的测试现场，伴有多种噪声干扰。为了能对这一随机信号进行分析，本文采用引入参考信号法进行处理。首先由软件获取2.5个工频周期信号，并从中截取一个完整工频周期信号，以此作为局放脉冲信号的参考信号，软件只需对每个采样信号做统计分析即可。因此，局放脉冲的分析结果，决定了系统的监测结果。为了对局放脉冲信号便于分析，引入局部峰点数*Pe* 、峭度*Ku* 、

不对称度*Asy*以及偏斜度*Sk*等参数。

1.峭度*Ku*：反映了随机变量的概率分布集中于均值的程度，将这一参量称之为分布函数的峭度[34]。这个参数也更直观的反映了随机变量的增加速度，假设随机变量X的概率分布函数为f（x），均值为μ，方差为σ2，则[34]

51

*N* N

*K* (*x*) 4 *f* (*x*) / [**4*f* (*x*)] 3

*u i i i*

(4-12)

*i*1 *i*1

*qi*为局放信号在各采样时刻的采样值，*pi*为该采样值在该次脉冲信号中出现的概率。当用*qi*和*pi*分别代替*xi*和*f* (*xi*)时，则式(4-12)可表示为式(4-13)：

*N* N

*K* (*q*) 4 *p* / (**4*p*) 3

*u i i i*

(4-13)

*i*1 *i*1

2.偏斜度*Sk*：将随机变量概率分布的对称性定义为偏斜度，用变量*Sk*表示。与*Ku*类似，对于测得的脉冲信号，将每个工频周期内波形中的采样值作为一个随机变量，由式(4-13)可得[35] ：

*N* N

*S* (*x*) 3 *f* (*x*) / [**3*f* (*x*)]

*k i i i*

(4-14)

*i*1 *i*1

在式(4-14)中*Sk*为基于其中一次脉冲信号中的参量均值的对称程度。当*Sk*  0

时，表示分布函数的均值反不对称；当*Sk* 0时，表示分布函数均值完全对称；当

*S* 0时，表示分布函数的均值正不对称[35] 。

*k*

3.不对称度*Asy*：局放脉冲在正负半轴中幅值分布的比值，称之为不对称度，

用变量*Asy*表示，其表达式如(4-15)式：

*N*2 *N*1

*A* *N* *q* / *N* *q* 

(4-15)

*sy* 2

*i*

*i*1

1 *i*

*i*1

式中参数说明：*N* 、*N* 表示正、负半轴局放脉冲次数；*q*、*q*表示正、负

1 2 *i* i

半轴局放脉冲幅值。如果以相位窗为单位计，则*N*1和*N* 2分别为正、负半轴相位窗数，*q*和*q*分别表示正、负半轴第i个相位窗中的最大放电量。

*i* i

三种典型缺陷局部放电试验结果归一化处理后获得n—q—ψ三维谱图。若将n—q—ψ三维图谱的曲面投影到q—ψ二维平面上，则形成了n—q—ψ的灰度图像。其q—ψ平面被划分成100×360个网格，即图像中有100×360个像素点。在实验室

阶段，局放脉冲信号的几种缺陷图如图4-23至4-27所示。

这里特别说明，图4-23至图4-27的缺陷图谱均是由实验室仿真相关测试数据所绘制的图谱，并非本论文软件功能生成的图谱。由于在实验室条件下噪声干扰信号较少，并且干扰信号强度并不大，所以在仿真数据的图谱时，往往图谱较为理想。但在电缆工作现场的测试中，由于测试环境复杂，噪声种类较多，会降低数据采集的精度，所以在本文后续章节软件采集的数据绘制的图谱信息与仿真有一定的误差。

52



图4-23 高压悬浮电位缺陷图



图4-24 切向断口缺陷图

53



图4-25 导电端头缺陷图



图4-26 中间接头轴向位移缺陷图

54



图4-27 高电位金属尖端缺陷图

时域范围内，对于捕获的局放脉冲波形，采用如下九个重要特征参量进行统计分析，具体计算结果如下表4-3所示。

表4-3 220KV电缆典型缺陷的统计算子

| 特征参数 | | 220 kV 等级人工缺陷 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 高电位金属  尖端 | 半导体尖  端 | 主绝缘切  向气隙 | 悬浮电位 | 错位 |
| 偏斜度 | Sk+ | 1.859 | 0.9 | 0.503 | 0.555 | 0.259 |
| Sk- | 5.353 | -0.043 | 0.697 | 0.872 | -0.39 |
| 陡峭度 | Ku+ | 2.016 | -0.869 | -1.337 | -1.646 | 0.367 |
| Ku- | 26.84 | -1.956 | -0.636 | 0.392 | -0.748 |
| 峰值数 | Pe+ | 33 | 61 | 65 | 63 | 118 |
| Pe- | 7 | 78 | 62 | 54 | 118 |
| 不对称度 | Asy | 0.012 | 1.516 | 1.045 | 1.025 | 0.648 |
| 修正互相关系数 | mcc | -0.0003 | 0.857 | 0.825 | 0.799 | 0.361 |
| 相位系数 | ph | 1.131 | 2.3 | 1 | 0.78 | 4 |
| 相位系数 | ph | 1.131 | 2.3 | 1 | 0.78 | 4 |

55

## 4.4 本章小结

本章基于监测系统结构设计和项目的需求分析，以LabWindows/CVI 9.0为开发环境，采用MySQL数据库数据管理技术，基于软件的结构设计和模块化设计，分步骤实现了软件的各个模块的功能。分别采用了非线性狭义数学形态滤波器算法和多相态谱图聚类分析方法，对软件获取的信号进行了分析和处理，对数据图谱进行了聚类分析，为软件实现监测系统对监测数据的图谱分析和数据的结果分析，提供了可靠的理论依据。

56

# 第五章 监测系统的调试及结果分析

## 5.1 系统调试

系统调试工作，主要是完成对220kV电缆局部放电监测系统的硬件调试、软件调试以及系统联测调试。由于本监测系统连接控制的仪器设备较多，为确保监测系统的可靠性，需分步实施调试，主要完成硬件连接调试、功能控制实现、软件界面调试、功能实现调试以及数据库安装和运行调试等。

### 5.1.1 硬件调试环境

#### （1）设备连接

本监测系统硬件设备的连接，主要是以计算机作为终端，通过LAN以太网和

USB数据线连接计算机，实现计算机与数据采集模块、脉冲触发模块的信息交互。利用LAN以太网线连接计算机与网络交换机，再将网络交换机的每个网络端

口连接一台数据采集模块的网络端口，通过运行本文描述的监测系统软件，实现对13处电缆线路节点的监测；计算机的USB接口通过USB线连接脉冲触发器，也通过监测系统的软件实现对其控制。而每台数据采集模块的信号触发通道连接脉冲触发模块的一个触发通道，实现由触发器触发数据采集模块。

在对监测系统的硬件设备进行连接调试中，易出现以下两种故障。一是上位机与前端数据采集模组无法连通；二是连通后前端数据采集模组不能正常采集信号。对于情况一，先检查设备线路是否连通，若线路连通，再须检查计算机IP设置和数据采集模块的IP设置是否正确若IP设置良好；若IP正常，须对数据采集模块进行参数设置和校正。对于情况二，不能采集信号时，原因是信号未输入或是数据采集模块的参数设置不正确。

#### （2）仪器驱动

驱动程序是实现上位机完成监测任务，实现与外部设备正常通信的桥梁。本监测系统的驱动安装调试主要有两部分组成，第一部分是通过调用前端数据采集模组的专用函数，实现与数字示波器的通信；第二部分是在不同的计算机操作系统环境下，安装不同的脉冲触发模块驱动，通过调用脉冲触发器函数，实现控制脉冲触发器。

在对第一部分进行研究时发现，项目没有提供针对数据采集模块作二次开发的专用函数相关资料，因此需要在数据采集模块的安装包中的程序文件找寻控制数据采集模块的驱动函数，采用实验的方法，对仪器驱动函数逐一进行实验和测

57

试，实现对驱动函数以及函数的各个参数功能的解析。相关的驱动函数及参数解析内容参见附录——驱动函数解析。

对第二部分的脉冲触发器驱动进行调试时发现，计算机不同操作系统，需要不同的触发器驱动。因此，在李力老师的具体指导下，由实验室开发驱动的同学，重新对脉冲触发器在不同计算机系统环境下的驱动进行了开发，通过现场测试，脉冲触发模块目前已有3个计算机系统环境下的驱动版本，分别是Windows XP、Windows server2008、Windows 7系统。本项目所用版本是Windows 7环境下的驱动。

#### （3）数据库的安装

前文已对本监测系统所需数据库进行了描述，在上位机或服务器终端安装

MySQL数据库时，需先完成mysql-5.0.18-win32及以上版本的安装，并对操作系统的ODBC数据源进行配置，实现13个数据源以及每台数据采集模块3个通道的数据存储源的添加。

在安装数据库系统时，易出现以下两种情况。一是ODBC数据源安装不全，导致软件不能正常存储数据；二是因计算机操作系统不同，ODBC数据源安装位置也有所不同。数据库的安装调试在用户使用手册中进行了专门描述，这里不作重复说明。

#### （4）数据表模板的安装和创建

前文已提到，若实现对监测数据的实时存储，需在安装的MySQL数据库系统的基础上，安装单独开发的数据表模板软件。单击数据表模板中的按钮，即完成了数据表模板的安装和数据库中数据样表的创建，如图5-1所示。



图5-1 数据表模板

58

### 5.1.2 软件调试

接下来重点完成本文所述的软件调试，主要完成以下五个部分的调试。分别是界面控件切换运行调试、参数设置调试、硬件设备功能实现的程序控制、MySQL数据库功能的程序控制和软件功能实现的调试。

#### （1）界面控件执行调试

仪器设备连接完毕，并提供数据采集所需的信号源，然后运行监测软件。验证软件的所有控件是否按设计要求正常工作，通过单击不同触发控件，实现软件不同界面间的切换，并在操作不当时，能够弹出错误提示窗口。

#### （2）参数设置调试

参数设置功能能否实现，决定了软件功能能否拓展，更是确保能准确测量的关键，本监测系统的参数设置全部集中在系统设置中。系统设置中的参数设置主要分两部分，一是对数据采集模块所用参数的设置，有“转换系数”设置、“耦合方式”设置、“触发方式”设置、“采样周期”设置；二是对软件功能中的定位功能参数设置，有“波速”设置、V最大值设置、“触发深度”设置。通过改变以上参数设置，实现软件在监测高压电缆放电时的多种功能。

因监测系统启动后，软件处于动态运行中，参数能否在监测系统正在采集数据时进行设置，并且设置的参数是否在当次采集数据时生效还是在下次采集时生效？通过软件程序的调试，并经实验测得，参数可以在任何条件下设置，且当信号灯亮起时设置，参数在当次生效，若在信号灯熄灭状态下设置，则在下次采集数据时，设置的参数生效。

#### （3）程控外设功能实现

软件主要在程序中应用外部设备的专用函数，实现了与外部设备的通信。上位机基于软件通信时，获取的数据往往是离散的连续信号数据。所以，软件需对这些离散化的数据进行运算处理，而后进行D/A转换，输出到软件界面和数据库中。软件的这部分程序是实现电缆监测的关键和核心，更是对监测数据做分析处理的依据。因此，利用实验室多次实验数据分析和现场调试时的数据，推导出应用于程序中的各种计算公式。

#### （4) MySQL数据库功能的程序控制

根据用户需求，对监测系统采集的数据进行分析处理后要进行存储，并且能实现存储和调阅2年内的数据量。鉴于此，本监测系统设计了采用MySQL数据库作为存储和读取数据的数据存取单元。在实现软件对数据库数据的存储和读取时，先按照存储监测数据的数据表格式要求，安装数据表模板，以此模板为表格格式，将监测数据按照确定表格式存入数据库。如果数据库安装成功，并且数据表模板

59

也安装成功，则通过浏览器打开数据库，可看到相应的数据表模板，数据库表格式模板如图5-2所示。本数据库可实现远程访问和数据共享，为用户提供了多种途径的数据调阅功能。



图5-2 数据库表格

#### （5）软件功能实现

通过编写程序代码，赋予软件对数据的预处理、分析和存储等功能，但在工程项目中，具体实现了以下功能。

一是预警功能，系统本地显示报警信息及报警类型，为用户提供仪器连接状态信息。二是数据管理功能，保存φ-q数据，即Q[360]保存到excel或dat文档或数据库中，每5分钟13x3x360个数据。并且能以jpg或bmp等通用格式保存三种图谱。三是便捷的人机交互功能。在监测界面为用户提供每次的监测结果显示和监测进程信号显示；在数据浏览界面采用日历模式，为用户随机按日期调阅历史数据提供支持；在系统设置界面，提供有外部设备的参数设置和系统功能参数设置。四是监测主界面，信号灯后台提供有监测数据的多种图谱显示，分别是φ-Q-n，φ-Q-t, Q-n和定位功能四种图谱。这是本监测软件的技术核心和关键，通过观测图谱，可以很直观的看到高压电缆的工作状态。五是自恢复功能，当整个系统断电重启时（软件运行的服务器重启），软件能在服务器操作系统重启后自动打开。

在本阶段调试中，出现了多种不确定因素。一是根据用户需求，需要满足在何种情况下进行预警？预警信息的刷新时机？二是同时存储13x3x360的数据量，能否确保软件运行良好，并且数据不遗漏？三是在调阅历史数据时，只能调阅当天之前的某一天的数据，对于当天的数据只能进入数据库观测；四是监测系统正在采集数据时，不能正常观察图谱，需要数据采集完成，才能正常观察图谱。针对这些问题，对软件的后台程序采用单步调试的方法，逐一排查解决问题，通过调整程序结构，已全部解决上述问题。程序调试中的问题及解决方案见本文附表。

60

## 5.2 结果分析

### 5.2.1 结果分析算法

由于在计算机软件系统中获取到的数据往往是一些经A/D转换了的离散的信号序列，如图5-3所示，所以为了得到模拟电压值，需采用标度变换公式予以实现。

图5-3中，纵坐标表示信号序列的数字量，横坐标表示信号序列的序号。关于标度变换公式的获取，本文主要采用两种方法予以实现。一是LabWindow/CVI的相关教材中对其进行过专门的描述，可直接引用；二是为了验证教材中的标度公式的适用性，采用大量的实验数据，对标度公式推导得到。由于本文是工程项目的应用性开发，因此采用第二种方法，经实验数据推导得到。相关的标度公式如下式，

*Ax* *A*0 (*Am* *A*0)*Nx* / *Nm*

(5-1)

在上式(5-1)中，*Ax*表示经计算后的电压值的模拟量；*A*0表示一次电压模拟量的测量值下限；*Am*表示一次电压模拟量的测量值上限；*Nx*表示模拟电压值所对应的数字量，也就是经A/D转换后的离散信号序列的某个数据；*Nm*表示被测信号的上限值对应的数字量。例如，图5-3中纵坐标的序列任意抽取一个值，使得*Nx* =160，这个信号中的最大值（可在程序中观测到）为168，使得*Nm* =168，电压下限值为

-250mV（实验仪器设定），则*A*0 =-250mV，电压上限值为250mV，则*Am* =250mV，那么根据公式(5-1)，可得*Am* =226.19mV。根据以上运算过程，在程序中只需获取信号序列，即可实现相对应的模拟电压序列。



图5-3 采集的离散信号序列

61

根据ESD国际标准，软件对采集的原始数据实现D/A转换后，对模拟数据量再进行360等份的分割，并将每一等份对时间积分，所得积分值为放电量，相应算法公式如下式(5-2)所示：

*Q*1t1 *Udt*

(5-2)

*R t*0

上述算法公式中，R表示传感器端电阻，工程项目中，1/R=1.2；U表示传感器通过电磁感应产生的感应电压，也就是式(5-1)中的*Ax*；*t*0表示传感器采集信号时的起始时刻，在图谱分析中，也就是参考信号的起始点时刻；*t*1表示传感器采集信号结束时刻，在图谱中也就是参考信号的终止点时刻；Q表示对应*t*0至*t*1时段的放电量。

如图5-4至图5-6所示，结合软件中实现的相关图谱功能，当数据采集模块获取传感器电压信号，并将这一电压信号转换为离散的数字信号，传入上位机的软件系统中时，软件并不能实现项目需求的放电量和放电图谱分析。在LabWindows/CVI开发环境中，提供有专门的微分和积分函数，这里只对积分函数作以分析。积分函数原型为：

Int status = Integrate(double x[], int n, double dt, double xInit, double xFinal, double y[]);

上述函数在计算积分的公式时，按照如下公式进行计算。

*I* *x j*1 4*x j* *x j*1 

*Yi*  

*j*0

*dt* ，i=0～n-1, j=0～n-1 (5-3)

6

式(5-3)中，*x*1*xInit*，*xn* *xFinal*；x为输入数组；xInit为初始值；xFinal为最终值；dt为采样间隔，在软件的系统设置功能中，将其定义为转换系数；n为元素个数；y为积分结果数组。经式(5-3)算法公式计算后，得到的数据值为相应的放电量。但监测界面需显示一个放电量数据值，而计算出的放电量值有360个，

因此，在这里采用选择取最大值的方法，实现监测界面的数据显示。这里同时定义360个数据点表示360度相位，即每个点对应的1度相位。在每组360个放电量数据值中选出一个最大值作为该次测得的放电量值。为了确保电缆的运行可靠性，一般对于电缆监测采用取最大值的方法。为了便于作统计分析，系统的测试周期为5分钟，在1小时内实现12次局放信号测试。这12次中的每一次也就是图谱分析中的N的值，同时N的值是依据监测周期给定，也间接的反映了信号随时间的变化规律。

因此，需采用上述相关算法公式，将离散的数字电压值换算为对应的放电量，而这个放电量正是做局部放电分析的关键参数之一。软件的程序中，需采用此公式，实现一个工频信号周期时段的放电量计算，并将这一量值实时传入数据库系

62

统和监测界面。软件在后续的风险度评估中，也需此放电量作为参考依据。



图5-4 φ-Q-n 图



图5-5 φ-Q-t 图

63



图5-6 Q-n 图

程序中按照上述算法进行计算，在软件界面端显示相关数据计算后的图谱。图5-4中，横坐标表示360度相位，纵坐标表示放电量。针对每5分钟测试一次并经上述算法得出一个数据点，经φ-Q-n图以一个点的形式显示，当1小时测试完成时，就在该图中显示12次的测试点。这些点的分布以及颜色变化直观的反映

了放电程度和频度。图5-5中，以三维形式，将放电量值在12次内（1小时）统计显示，更加直观的反映了放电情况随时间的变化趋势。对于图5-6，对测试数据作统计分析时，每测试一次放电量值，就将该值绘制于Q-n图中，随着测试次数的增加，Q-n图可直观地的统计显示出放电量与信号采集次数间的关系。

### 5.2.2 监测信号验证

采用数字示波器，对放电脉冲信号进行观测和研究，如图5-7所示。放电脉冲为一负脉冲信号，实验条件下测试采用的传感器与本文所采用的数据采集传感器一致。这种类型的传感器主要参数如下：

传感器主要对脉冲源流经75Ω电阻的电流进行检测，检测带宽为25MHz，由传感器输入数据采集模组的是电压信号，信号转换比为5mV/mA。由于本文采用的高频传感器属于二阶电路，且由于传感器的制造工艺等问题，在工程应用中这种传感器输出的波形尾端会存在*t*2至*t*4区间内的衰减震荡。相关的脉冲幅值如图

64

中所示，为200mV。在应用数据采集模组进行测试时，其检测信号的带宽为100MHz，特征阻抗为1MΩ。通过放电量值的计算和分析，发现放电量与脉冲幅值保持了线性关系。时域范围内，脉冲波形的特征，如上升沿、脉宽等，在20pC-1000pC的脉冲源基本一致，具体为：*t*1 - *t*2时间为10nS左右；*t*2 - *t*3时间为110nS左右；*t*2 - *t*4

时间为1.7us左右。



图5-7 放电脉冲

### 5.2.3 软件控制仪器采集数据验证

因用户对项目需求的调整和修改，软件需增加内部触发，并能根据用户需要，可随机设定触发方式。外部触发时，须脉冲触发模块提供脉冲触发信号，在需要采集信号时，自动对数据采集模块实现外部触发。经连接仪器和软件运行测试，验证结果如下图5-8所示。图中很直观地反映了参考信号和采集信号的波形，在经数据显示界面的数据显示，验证结果符合工程需求。

软件功能的实现，可通过数据显示界面和图谱显示界面直观地反映。另外，软件的各个控件功能的实现，可通过操作完成验证。具体软件功能实现的图，在前面已有叙述，在此不做重述。

65

对于前文提到的现场测试环境复杂，特别是伴有多种噪声干扰。当噪声干扰过大时，往往采集到的局放信号数据会被淹没。为了能有效消除噪声对测试数据的影响，可通过两种方法予以实现。一是在测试端接入放大器，再进行滤波，即可实现提取测试信号的目的；二是通过在数据采集设备的外围加装信号屏蔽箱，实现对噪声的有效屏蔽。考虑到工程中的经济问题，本课题在现场测试中采用了第二种方法，实现了对噪声的有效屏蔽。如图5-8所示，图中参考信号的噪声可直接观测到，采集信号的噪声很小，与脉冲幅值相差较大，在作计算分析时，不会对测试结果产生影响。



图5-8 信号波形

### 5.2.4 数据和电缆状态诊断的验证

运行软件，观测数据显示界面和图谱分析界面，待监测系统运行1小时后，通过在浏览器中输入“localhost”，进入数据库系统，调阅数据库相关时间，可看到

66

数据库存储的具体数据，如图5-9所示，数据库数据与图谱的波形显示相对应，第一列表示监测点及数据采集模块的通道号，第二列显示数据采集的时间，从Q000列至Q359列分别存储360度相位数据。此处数据库的数据存储采用现代计算机存储技术，可实现数据的永久保存。同时，系统中的数据文件也可实现共享和单独上传至集控中心，为工程人员作数据分析提供依据，也为电缆的运行状态的监测结果进一步验证可靠性。



图5-9 数据库数据

本文根据放电类型模式识别结论、放电指纹信息以及放电信号波形，诊断系统可依据基于局放在线监测数据，对电缆绝缘状态进行自动诊断。为了提高工作效率，解决工程人员难以到达的测试现场，系统在定位功能中，对电缆故障点实现了距离测算定位，达到了监测系统的自动监测、自动定位以及实时预警。此处的定位功能也是本文的难点和创新点之一。该功能不但实现了参考信号和局放信号的波形再现，而且在局放信号波形框中实现了游标功能，实现了在局放信号波形框中任意时刻截取时间段，依据设定波速，自动测算出故障点距上位机距离，为工程检修提供了定位信息。局放信号的诊断结果如下表5-1所示。表中所列的三种情况，一是因电缆缺陷产生的较为明显的放电情况；二是因电缆工作异常时出现的轻微放电；三是电缆工作正常时，软件没有检测到放电信号。相应的各类放电数据只有极小的噪声产生，并且数据值很小，多个图谱显示因噪声出现的微小放电信息，工程中视这种微小的放电信息为电缆工作正常。

67

表5-1 电缆状态表

|  | 局部放电测试结果 | 图谱特征 | 放电幅值 | 说明 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 缺陷 | 具有典型局 部放电的检 测图谱且放 电幅值较大。 | 放电相位图谱具有明显 180 度特征，且与典型图谱库相似度高。 | 大于 150pC 并参考发生频度与信噪 比。 | 缺陷应密切监视，观察其发展趋势，必要时停电检修，通常频率越 低，缺陷越严重。 |
| 异常 | 具有局部放电特征且放电幅值较小 | 放电相位图谱 180 度分布特征不明显，且与典型图谱库相似度极低。 | 小于 150pC 大于  30pC，并参考发生频度与信噪比。 | 异常情况缩短检测周期。 |
| 正常 | 无典型放电图谱。 | 没有放电特征。 | 没有放电波形。 | 按正常检测周期进行。 |

## 5.3 本章小结

本章阐述了高压电缆局部放电监测系统的硬件连接方式及可实现的具体功能，针对调试中出现的问题和解决方法；对于软件部分的调试，采用分步骤、分块调试的方法，逐一进行调试，并对软件调试中出现的问题提出了解决方法，应用数据库管理技术，对存储的测试数据随机抽检，对软件图谱的可靠性进行了进一步验证。

68

69

# 第六章 总结

本文根据高压电缆局部放电监测系统项目需求，基于非线性的狭义数学形态滤波器和多相态谱图聚类分析方法，研究设计了高压电缆局部放电监测系统。采用现代通信技术和手段，通过对多台测试设备和计算机系统构建局域网络，实现了高压电缆局部放电监测系统的软件开发和调试。

## 6.1 本文的主要工作

（1）对高压电缆局部放电监测系统依据项目要求，完成了项目需求文档的梳理和分析，并对所开发的软件进行了可靠性评估。

（2）针对项目提供的仪器设备和需求，分析各个仪器设备在监测系统的作用，设计搭建硬件平台。

（3）结合项目需求和《IEC标准》，研究具体算法。

（4）设计开发了程控多种硬件设备的软件，在软件控制下，对高压电缆自动监测。

（5）软件的设计中多次用到多线程技术，提高了软件的运行效率，实现了软件的多操作功能。

（6）实现了软件的自动化，软件运行后，自动控制监测系统实施监测，并对监测结果实施自动存储、自动报警等。

（7）软件系统采用MySQL数据库技术，对监测结果实时保存和调阅，为上一级主机系统提供2年内的数据资料。

（8）人机交互界面更直观地为用户提供了数据分析的结果，根据需求，绘制了多种图谱，对信号波形进行显示，故障定位，为用户提供故障信息。

通过上述设计，使得高压电缆局部放电监测系统能够在系统软件控制下自动、精确、高效的进行24小时不间断监测，能及时为用户提供监测信息，实现了监测系统的完全自动化，填补了监测时段的空白和为用户节省了大量的人工的工作量。

## 6.2 下一步工作展望

本监测系统只是达到了用户需求的功能，监测系统的精度和功能还可以作进一步提升，比如对信号的去噪，还可以采用小波理论做进一步研究验证，若可行，则可以进一步提高采样数据的精度。另外，如果在监测系统中加入短信收发模块，则可以实现监测系统的无人化操作，在监测系统监测到故障信息时，利用短信收

70

发模块，可以及时将故障信息发送给用户，便于用户及时排除故障。监测系统的数据库部分也可作进一步开发研究，可实现数据信息的远程传送和共享，无需用户登录监测主机。因此，在下一步升级监测系统时，以上部分可作为监测系统进一步研究和升级的主要内容。

71

致 谢

本课题从开题到系统设计开发直至论文撰写，首先衷心感谢我的研究生导师周秀云老师，周老师渊博的学识和一丝不苟的治学精神，时刻激励我认真学习，不放过每一个学习的机会。尤其是周老师总是在百忙之中，及时帮助我解决学习和生活上的各种困难。周老师的这种责任心和关心，让我对研究生阶段的生活充满了感激和怀念。

同时向我的实验室指导老师李力老师表示衷心的谢意。教研室两年的学习生活时间里，李老师不管我有多差的基础，对我始终充满信心和宽容心，并在同届中第一个给我项目学习和锻炼；不管我学的有多慢，李老师都始终给予我鼓励和支持；正是有了李老师这样很强责任心的老师，才让我能从基础差一步步走向科研的队伍，让我能将理论知识联系到实际应用中。感谢教研组的黄建国老师，及时根据我基础差的特点，安排我有针对性的学习。还要感谢教研室胡老师，在李老师出国期间，我遇有难题，胡老师始终给予我耐心讲解。感谢张老师为我排忧解难，当我没有实验仪器时，张老师总能为我找到仪器，为我提供方便。

另外，还要感谢教研室已经毕业的师兄丁高ft师兄、陈振师兄以及陈宵、寇春燕、王诗舒、贾宇、于点、杨怡、王泽浩等同学，不管我有什么不懂的基础知识请教他们时，他们总是很热心地为我解答。在他们的帮助下，我所参与的项目研究以及论文撰写才能顺利完成。还要感谢教研室其他学弟、学妹们，在我学习出现疏漏时，他们也及时给予我提醒和帮助。

最后，还要感谢我的父母和妻子，感谢他们对我学习、生活的大力支持，在我没有信心时鼓励我，在我放松时提醒我，让我的研究生生活始终平安顺利圆满。

72

参考文献

[1] 罗俊华等. 交联聚乙烯电缆局部放电高频检测技术的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 42-45

[2] 曹利强等. 换流变压器空间电荷分布及快速释放方法的研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(5): 38-42

[3] 李洪涛, 吴晓文. 基于小波变换和数学形态的局部放电信号降噪算法的研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(6): 1-5

[4] 江秀臣等． 110 kV 及以上电压等级交联电缆在线监测技术[J]． 电力自动化设备, 2005, 25(8): 13-17

[5] 段乃欣等． XLPE 电缆中局部放电脉冲传播特性的实验研究[J]． 高压电器, 2002, 38(4): 16-18

[6] 杜伯学等． 电力电缆技术的发展与研究动向[J]． 高压电器, 2010, 46(7): 100-104

[7] 赵中原等． 交联聚乙烯电缆局部放电在线监测系统研制[J]． 电力系统自动化, 2004, 28(5): 59-62

[8] 陈巧勇等． 交联聚乙烯电力电缆的绝缘在线检测[J]． 高压电器, 2003, 39(1): 60-62

[9] POMMERENKE D, STREHL T, HEINRICH R, et al. Discrimination between internal PD andotherpulsesusingdirectionalcouplingsensors onHV cable systems[J]. IEEETransactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(6): 814-824

[10] TIAN Y, LEWIN P L, POMMERENKE D, et al. Partialdischarge on-line monitoring for HV cable systems usingelectro-optic modulators[J]. IEEE Transactions on Dielectricsand Electrical Insulation, 2004, 11(5): 861-869

[11] 韦斌等． VHF 钳型传感器在线检测110 kV XLPE 电缆局放[J]． 高电压技术, 2004, 30(7): 37-39

[12] 柯钜金. 220 kV 电缆及终端头局部放电测试技术的应用研究[J]. 电力建设, 2005, 26(11): 62-64

[13] TOZZI M, BURBUI G, CAVALLINI A, et al. Coupling mechanismsfor PD in MV cables[C] //Annual Report Conferenceon Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Quebec: IEEE, 2008: 413-416

[14] 石磊． 高压电缆终端头在线局放测试方法探讨[J]． 变压器, 2007, 44(10): 33-35

[15] 马翠姣等． XLPE 电力电缆局放的电磁耦合检测法的研究[J]． 华东电力, 2001, 29(6): 1-3

[16] 商哲. 深圳110kV及以上变电站GIS局部放电在线监测系统的应用研究. 华南理工大学,

73

2013

[17] 戴仁德. 基于超高频法的 GIS 局放在线监测软件的设计与研发. 湖南大学, 2013

[18] 卞佳音. 高压电力电缆故障监测技术的研究. 华南理工大学, 2012

[19] 胡凯. 高压电缆附件局部放电在线监测方法研究与系统设计. 湖南大学, 2010

[20] 刘明军. 基于虚拟仪器技术的 GIS 局部放电超高频在线监测系统的研究. 重庆大学, 2006

[21] 尹旭晔. 发电机局部放电在线监测系统的研究与开发. 中国石油大学, 2010

[22] 江秀臣等． 110kV及以上电压等级交联电缆在线监测技术. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 13—17

[23] 董小兵等． 10～35 kV XLPE电缆在线监测技术[J]． 电力自动化设备, 2005, 25(9): 20—24

[24] 罗俊华等. 交联聚乙烯电缆绝缘的在线监测[J]． 高压电器, 1999, 35(6): 44—46

[25] IEEE Guide for Partial DischargeTesting of Shielded Power Cable Systems in a Field Environ—ment[S]． IEEE Std 400．3—2006．2007

[26] PracticalAspects of the Detection and Location of PD in Power CablesLEMKE E． GUI5KL E, HAUSCHLIO W, et a1． [C1] //CIGRE WG D1．33, Paris, 2006: 63—69

[27] 董一夫． 110kVXLPE电缆附件局部放电超高频检测及传输特性的研究. 哈尔滨理工大学, 2014

[28] 陈弋, 张丹, 曾宪乐, 李旭． 110kV高压电缆的局部放电在线监测. 广西电力2013, 36-6

[29] 林李波． GIS局部放电监测系统的应用研究. 华南理工大学, 2011

[30] 张正超． 电力电缆局部放电监测与绝缘故障诊断. 湖北工业大学, 2013

[31] 林相华． 高压电缆附件局部放电超高频检测与分析. 中国新技术产品, 2014NO. 05(下)

[32] 张红光, 李正明． 基于LabWindows\_CVI的虚拟示波器研究与设计. 现代电子技术, 2015 36-9

[33] 顾黄晶等． 局部放电在线监测系统在500kV电缆上的实用性研究. 华东电力, 2014 42-4

[34] 陈刚． 谱峭度及其在电力系统暂态信号处理中的应用研究. 西南交通大学, 2012

[35] 肖常纪． 一种有界随机变量的对称性分布及叠合正态分布分解的一个简化方法. 内蒙古大学学报（自然科学版）, 1983

[36] 张新峰, 沈兰荪． 模式识别及其在图像处理中的应用. 《测控技术》, 1000-8829（2004）05-0028-05

[37] 姜芸等． 高压交联电缆接头局部放电的电容耦合法检测及分析. 《高电压技术》（学术期刊）, 2010 ISTIC - PKU

[38] 刘安文等． 基于电桥平衡的差分法局部放电在线检测. 华北电力大学高电压与电磁兼容北

74

京市重点实验室, 北京102206

[39] 陈智勇等． 基于高频电磁电流偶合法的XLPE电缆局部放电测量分析. 广西电力, 2012 Vol.35 No. 4

[40] 徐晓刚, 麦晓明． 超高压交联电缆局部放电在线监测的干扰抑制技术研究. 全国电力电缆运行经验交流会, 广东电网公司电力科学研究院, 2012

75

附 录

软件调试记录

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序  号 | 存在问题 | 原因 | 解决方法 | 日期 |
| 1 | 打开软件，弹出没有安装控件提示框，询问是否保存。 | CVI 中缺少软件所需的 3 个控件，它们是：MSCHRT20.OCX（柱状图控件）、  MSCAL(日历控件).OCX、cw3dgrph（3 维图控件）.ocx | 从文件夹找到提供的 3 个控件，安装使用手册说明进行安装。 | 2015.05  .04 |
| 2 | 3 个控件安装后，运行时又出现了“ActiveX control is not licensed for this operation "或类似提示 | 计算机系统注册表没有授权 | 需要用“记事本”格式的文档将“ActiveX 控件添加指导”文档中内容复制并保存，且必须将此程序保存为 XXX.reg 格式（注册表格式），然后直接双击此 reg 格式的文件，就完成了许可  （授权）。 | 2015.05  .07 |
| 3 | 软件运行时间延长后，出现卡死。 | 可能原因：1、软件的程序中有未释放的内存资源；  2、软件界面没有及时刷新，累积的资源过多。 | 情况 1：程序中分配内存使用完后，需及时释放；  情况 2：需定时刷新文本框， 不能让文本框内容一直累  积。 | 2015.05  .20 |
| 4 | 示波器专用函数不能正常识别 | 4 通道数字示波器的函数文件  HTLANDLL.h 文件的每个函数声明前多了关于仪器的名称“DLL\_API"。 | 4 通道数字示波器的函数文件 HTLANDLL.h 文件的每个函数声明中的名称  "DLL\_API"需要去掉，否则  CVI 无法识别。 | 2015.05  .21 |
| 5 | 示波器不能正常采集数据 | 可能原因：  1、示波器参数初始化不正确；  2、示波器的专用函数  dsoLANReadCalibrationData 的 参数“WORD nLen"的校正长度不能太小，否则无法获取到校正值，则示 波器不能正常采集数据； 3、示波器专用函数  dsoSDLANGetData 的返回值决定了数据采集是否成功，当返回值为 1  时表示成功，为 0 时，表示采集不  成功。 | 针对原因 1，对示波器参数进行正确配置；针对原因 2，根据采集数据量的大小进行试验确定；针对原因  3，需在示波器的触发函数  dsoLANStartTrigger、  dsoLANForceTrigger 和 数据采集函数  dsoLANGetState、  dsoSDLANGetData 后面增加延时。 | 2015.06  .01 |

76

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 6 | 示波器专用函数：初始化失败dsoLANReadCalibrat ionData(WORD nDeviceIndex,WORD\*  PLevel,WORD nLen); | 此函数的第三个参数设置<256 时， 会出现 4 个通道无法采集到数据。 | 参数 nLen 的取值>=256. | 2015.06  .05 |
| 7 | 示波器专用函数： nState=dsoLANStart Trigger(DeviceNum) | 返回值 nstate 取值说明：  nState=7 时，表示示波器触发成功；  nState=1 时，表示示波器触发不成功；  nState=3 时，表示示波器触发不成功。 | 当 nState=1 时，需要给此函数加延时，最低 43 毫秒；若值继续是 1，则将垂直触发电平的值调整  为>=144;  当 nState=3 时，需将水平触发位置的值>=12. | 2015.06  .10 |
| 8 | 示波器数据采集函 数 ： getDataOK=dsoSDLAN GetData | getDataOK=0 时，数据采集失败，原因 是 dsoLANReadCalibrationData 函数初始化失败。  getDataOK=1 时，数据采集成功。 | 当 getDataOK=0 时，需修改示波器专用函数dsoLANReadCalibrationDat  a 的参数。 | 2015.06  .15 |
| 9 | 示波器与电脑连接不通问题 | 两种方式：  一是网线连接；二是 USB 数据线连接。 | 当网线连接时，主要用 于控制多台示波器。网线不 通时，需检查网线是否完好； 若完好需检查程序中的 IP 与示波器 IP 的设置是否正确；若是，需重启计算机和 示波器电源。  当采用 USB 连接时，主要完成单台示波器的 IP 地  址设置和示波器校正。 | 2015.06  .17 |
| 10 | 热度图 P-Q-N 绘点报错 | 原因：程序中的 counter[50][18] 数组空间分配不够，需将值 50 增大。 | 程序中的 counter[50][18] 改为 counter[2000][18] | 2015.06  .25 |
| 11 | 绘制的点需修改，CVI绘制点的函数为： PlotPoint | 需要修改绘制点的大小。 | 点的大小修改：由  VAL\_SOLID\_CIRCLE 改为VAL\_SIMPLE\_DOT | 2015.06  .29 |
| 12 | 放电量=电压对时间的积分 | 不需做复杂计算。 | 直接应用 CVI 积分函数Integrate | 2015..6  .30 |

77

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 法一：定时刷新热度图； |  |
| 13 | 热度图散点累积后死  机 | 热度图持续累积散点，造成内存占  用过多而死机。 | 法二：双击图表控件，找到  Data Mode,选择 Discard,进 | 2015.07  .03 |
|  |  |  | 行清除。 |  |
| 14 | 软件发布后并安装出现问题 | HTSoft.dll 文件不存在，发布时没有添加上此文件（因缺 lib 文件， 无法添加） | 直接将 HTSoft.dll 文件复制到安装目录下，存放 dll 文件的文件夹中可解决此问  题。 | 2015.07  .04 |
| 15 | 示波器没有采集到数据 | 因为控制示波器采用网线连接，应用计算机网卡实现控制示波器采集数据的功能。 | 控制示波器采集数据的计算机在监测系统运行时，不能再利用网卡登录互联网等。 | 2015.07  .14 |
|  | 程序文件 |  |  |  |
| 16 | “signalProcess”  193 行，70 列的专用函数参数pReadData[lsNum][C | 初始化仪器时，获取校对值函数  dsoLANReadCalibrationData 失败。 | 此函数中的第三个参数，数组存储数据的长度太小，需增大可解决。 | 2015.09  .02 |
|  | Hx]的值全为 0. |  |  |  |
| 17 | 示波器信号波形噪声过大 | 示波器附近放置了其他仪器设备， 产生了信号干扰，如触发模块的电磁干扰。 | 将触发模块接地，可解决此问题。 | 2015.09  .02 |
| 18 | 安装触发模块驱动 时，驱动无法正常安装。（现场调试） | 驱动程序只适用于 XP 系统，需对驱动升级。 | 由实验室李欣和王诗舒完成触发模块升级，可适用 XP、  WIN7、Server2008 三种系统。 | 2015.09  .10 |
|  |  |  | 第一步，在开始菜单下面输 |  |
|  |  |  | 入：命令提示符；第二步， |  |
|  |  |  | 在弹出的命令提示符栏单击 |  |
|  |  |  | 右键，以管理员身份运行； |  |
| 19 | 触发模块驱动还是无法正常安装 | 计算机系统的操作模式需要调整为测试模式 | 第三步，在弹出的  “windows\system32"对话框中，输入”bcdedit-set | 2015.09  .11 |
|  |  |  | testsigning on"，然后回 |  |
|  |  |  | 车，关闭，重启电脑，即完 |  |
|  |  |  | 成测试模式设置；第四步， |  |
|  |  |  | 再次安装驱动，成功！ |  |
|  | 二次需求文档中，波 |  |  |  |
| 20 | 形显示功能问题。被  测信号的脉冲波没有在定位功能页面中显 | 原因：“signalProcess.c"程序文件中，“P-Q-N"热度图中的变量  “Count"缺少条件判断语句。 | 在“Count"变量下面加入  if 条件判断语句，并赋值， 问题解决！ | 2015.09  .11 |
|  | 示。 |  |  |  |

78

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 21 | 用户需求修改：参考信号节点由 1 号示波  器的 4 通道改为 3 号  示波器的 4 通道。 | 原因：用户需求修改。 | 在“signalProcess.c"程序 文件中，第 233 行，第 8 列， 将 getDataOK[0]中的 0 改为  2，随之下面的程序中的对应参考信号通道号都改为 2. | 2015.09  .12 |
| 22 | 示波器初始参数：电压档需修改 | 需考虑示波器使用寿命，采用较低电压档；同时根据参考信号波形， 电压档不易过低。 | 电压档参数赋值由原值的  200mV 修改为 500mV。 | 2015.09  .17 |
|  |  |  | 在 GRAPH 图表 Y 轴放单位的 |  |
| 23 | 图谱显示页面中，  GRAPH 图表左侧的单位有时不显示。 | 显示界面有限，发布出的软件无法显示单位。 | 位置添加“TEXT"文本格式， 在”TEXT"属性设置中，偏  转角度设为 900 度，可将文 | 2015.09  .25 |
|  |  |  | 字变为竖排显示。 |  |
|  | 监测系统的安装和调 |  |  |  |
|  | 试问题： |  |  |  |
|  | 监测软件按照使用手 |  |  |  |
|  | 册安装时，会出现安 |  |  |  |
| 24 | 装运行“CMT"数据库表 model 运行出错， 出错提示框为：“一  个程序运行出错，程 | 原因：电脑操作系统安装不完整， 出现了操作系统的系统文件丢失或损坏的情况，需要修复系统。 | 安装 360 安全卫士，运行 360 安全卫士，选中“系统修复” 项，选择“常规修复”即可  解决此问题。 | 2015.10  .22 |
|  | 序停止工作 关闭“或 |  |  |  |
|  | 激活控件（用于激活 |  |  |  |
|  | CVI）也会遇到这种情 |  |  |  |
|  | 况。 |  |  |  |
| 25 | 程序文件“signalProcess"中  476 行，13 列的数据库函数建数据表时出错。 | 原因 1：计算机不能休眠，否则软件无法连续运行；  原因 2：在 MySQL 数据库中创建数据表时，在一张表中会出现跨越至第二天时间的情况，如从 23: 57 至 0:  02. | 1.计算机系统设置关闭休 眠；2.在程序中加入条件判断。 | 2016.01  .06 至  2016.01  .12 |

79

数据采集模组驱动函数解析表

**//** 初始化端口及 IP 地址。

WORD WINAPI dsoLANInitSocket(WORD nDeviceIndex,USHORT\* pIP,USHORT iPort);

// 关闭网络连接。

WORD WINAPI dsoLANClose(WORD nDeviceIndex);

// 当零电平（参考电平）发生变化时，调用此函数进行设置。设定某通道（CHX） 的参考电平。

// nDeviceIndex:索引值;pLevel:指向校对电平;nVoltDIV:电压档位索引值;

// nPos:零电平位置[0-255];nCH:通道[0-3]。

WORD WINAPI dsoLANSetCHPos(WORD nDeviceIndex,WORD\* pLevel,WORD nVoltDIV,WORD nPos,WORD nCH);

// 当需要设置触发电平时，调用此函数设置。

// nDeviceIndex:索引值;pLevel:指向校对电平;nPos:垂直触发电平位置[0-255] WORD WINAPI dsoLANSetVTriggerLevel(WORD nDeviceIndex,WORD\* pLevel,WORD nPos);

// 设置触发和预触发长度。

// nDeviceIndex:索引值;nBufferLen:内存长度;HTriggerPos:水平触发位置[0-100]

// nTimeDIV:时基索引值;nYTFormat:采样格式[0: Normal, 1: Scan, 2: Roll] WORD WINAPI dsoLANSetHTriggerLength(WORD nDeviceIndex,ULONG nBufferLen,WORD HTriggerPos,WORD nTimeDIV,WORD nYTFormat);

// 设置 CH 和 trigger

// nDeviceIndex:索引值;RelayControl:结构体

WORD WINAPI dsoLANSetCHAndTrigger(WORD nDeviceIndex,RELAYCONTROL RelayControl);

// 设置 Trigger 和同步输出

// nDeviceIndex:索引值;nTriggerMode:触发模式[0:边沿,1:脉冲];nTriggerSlope:触发

80

沿[0：上升沿，1：下降沿]；

// nPWCondition:脉冲触发下

/\*[+ Less 为0：当正脉宽小于nPW时进行触发。

+ Equal为1：当正脉宽等于nPW时进行触发。

+ More为2：当正脉宽大于nPW时进行触发。

- Less 为 3 ：当负脉宽小于 nPW 时进行触发。

- Equal 为 4 ：当负脉宽等于 nPW 时进行触发。

- More 为 5 ：当负脉宽大于 nPW 时进行触发。] \*/

// nPW 脉冲宽度设置。脉冲宽度时间范围为 10ns ~ 10s。nPW

// 的取值范围为 2 ~ 2000000000(10ns/5 ~ 10000000000ns/5)

// ......视频设置?作用?

WORD WINAPI dsoLANSetTriggerAndSyncOutput(WORD nDeviceIndex,WORD nTriggerMode,WORD nTriggerSlope,WORD nPWCondition,ULONG nPW,USHORT nVideoStandard,USHORT nVedioSyncSelect,USHORT nVideoHsyncNumOption,WORD nSync);

// 设置时基(采样率)

// nDeviceIndex:索引值;nTimeDIV:时基的索引值;nYTFormat:3 种采样格式

[0:Normal,1:Scan,2:Roll];

WORD WINAPI dsoLANSetSampleRate(WORD nDeviceIndex,WORD nTimeDIV,WORD nYTFormat);

//开始新的一轮数据采集。

WORD WINAPI dsoLANStartCollectData(WORD nDeviceIndex);

// 开始新的一轮触发,通知设备准备检测触发信号

// 采集状态下，调用函数 dsoHTStartCollectData 成功之后,调用本函数启动触发信号检测;

WORD WINAPI dsoLANStartTrigger(WORD nDeviceIndex);

// 强制触发。

WORD WINAPI dsoLANForceTrigger(WORD nDeviceIndex);

81

// 判断设备是否采集完数据[0x07 时,表示设备已经采集完数据]。

WORD WINAPI dsoLANGetState(WORD nDeviceIndex);

// 每次初始化设备，都要首先读取设备的校对值，以确保通道的零电平位置正确。WORD WINAPI dsoLANReadCalibrationData(WORD nDeviceIndex,WORD\* pLevel,WORD nLen);

//读取数据。

WORD WINAPI dsoSDLANGetData(WORD nDeviceIndex,WORD\* pCH1Data,WORD\* pCH2Data,WORD\* pCH3Data,WORD\* pCH4Data,PCONTROLDATA pControl,WORD nInsertMode);

//当设置为硬件频率计时，返回的是频率值，单位是 Hz, 当设置为计数器时，返回的是触发信号的个数。注意，当没有触发信号时，返回的值是不正确的。ULONG WINAPI dsoLANGetHardFC(WORD nDeviceIndex);

//硬件频率计和计数器同一时刻只能打开一个。nType 的值的意义是，0: 打开硬件频率计,1: 打开硬件计数器,2: 关闭

WORD WINAPI dsoLANSetHardFC(WORD nDeviceIndex,WORD nType);

//网络通讯模式下设置设备的 IP 地址。

WORD WINAPI dsoLANModeSetIPAddr(WORD DeviceIndex,ULONG nIP,ULONG nSubnetMask,ULONG nGateway,USHORT nPort,BYTE\* pMac);

//网络通讯模式下获取设备的 IP 地址。

WORD WINAPI dsoLANModeGetIPAddr(WORD DeviceIndex,ULONG\* pIP,ULONG\* pSubnetMask,ULONG\* pGateway,USHORT\* pPort,BYTE\* pMac);

//网络通讯模式下，获取重置的连接设备的状态。

WORD WINAPI dsoLANGetRestartLANStatus(WORD DeviceIndex);

//网络通讯模式下，打开设备连接。nMode=0 时，为 LAN 模式，nMode=1 时，为

WIFI模式。

82