

# **The Remote Monitoring System for Zinc Oxide Arrester based on GPRS**

## **Abstract**

The arrester is over voltage protection device for the power equipment, and its performance has great influence on the safe operation of power equipments. But some of MOA will deteriorate gradually under operating voltage and some of them will be moistened because of structure problems. The two faults can lead to increasing of leakage current of the arresters, MOA may turn to thermal run away and even explosion when overvoltage appears.

To solve the above problem, a method of remote monitoring system for MOA is brought out in this paper. Data of on-spot collection is transmitted through GPRS module. A MOA's reasonable online monitoring model is established to eliminating the effect of the two interference sources. The system diagnoses the operating MOA status with the method of harmonic current Analysis.

A new method of remote monitoring for MOA based on GPRS was presented. The system diagnoses the operating MOA status with the method of harmonic current analysis. The monitoring system consists of on-spot collection module, GPRS transparent transmission module, remote monitoring center. C8051F020 is on-spot collection module's microprocessor, the resistive first-harmonic current of MOA is detected through this module. The software of information management system was developed with Visual Basic and SQL Server based on the research of GPRS wireless communication technology. Data of on-spot collection is transmitted through GPRS module. Data report based on data of on-spot collection can be formed in this system. The state of MOA can be detected conveniently and accurately, and the historical data can be inquired and analysed through remote monitoring center. The actual measuring results indicate that the monitoring system has the high accuracy, and can be used to realize the remote monitoring for MOA.

**Keywords** MOA, online monitor, remote transmission, harmonic current analysis

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于 GPRS 的氧化锌避雷器远程监测系统》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：李喜平 日期：2009年4月8日

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《基于 GPRS 的氧化锌避雷器远程监测系统》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保密 ☐，在 年解密后适用授权书。

不保密 ☒。

（请在以上相应方框内打√）

作者签名：李喜平 日期：2009年4月8日

导师签名：陈树刚 日期：2009年4月8日

## 第1章 绪论

### 1.1 课题研究背景、目的及意义

本项目研究的目的是根据氧化锌避雷器(Metal Oxide Arrestor, 简称 MOA)的基波阻性电流及三次谐波阻性电流变化与避雷器的阀片受潮及老化之间的关系, 研究一套基于 GPRS 的氧化锌避雷器远程在线监测系统, 通过实测数据及变化趋势对 MOA 避雷器的状态做出判断, 以保障氧化锌避雷器在系统中的安全性。

随着经济的发展, 各行业对电能的需求量日益增加, 电力系统的安全供电、经济送电是各行业安全生产, 减少故障造成的经济损失的重要保证。电气设备是组成电力系统的基本元件, 是保证供电可靠性的基础, 无论是大型关键设备如发电机、变压器, 还是小型设备如电力电容器、绝缘子等, 一旦发生失效必将引起局部以致全部地区的停电, 电力设备特别是大型电力设备故障所造成的经济损失是非常巨大的, 有些非大型设备虽自身价值并不昂贵, 但故障后果严重, 例如互感器、电容器、避雷器等常因绝缘故障发生爆炸和起火, 不仅会波及邻近设备, 且由于故障的突发性会因爆炸而造成人员伤亡。大量资料表明导致设备失效的主要原因是其绝缘性能的劣化, 所以运行中电气设备的绝缘状态对电力系统的安全运行至关重要。

随着输电网络的不断扩展, 由于雷击线路而引起的事故量也日益增多。据电网故障分类统计表明, 在我国跳闸率比较高的地区, 输电线路总的跳闸次数中, 由雷击引起的次数占 40%~70%<sup>[1]</sup>, 尤其在多雷、土壤电阻率高, 地形复杂的地区, 雷击输电线路引起的事故率更高, 这给社会带来了巨大的经济损失。

为防止电力设备发生故障, 传统的做法是定期对各设备停电, 进行预防性测试, 停电测试具有很大的局限性。预防性试验时必须停电, 试验周期长, 导致经济损失大、劳动效益低、经常不能正确地判断出设备存在的故障。弥补这一缺陷的途径之一就是实现绝缘状态的在线检测。因此, 在线监测具有十分重要的意义。

避雷器作为电气设备的过电压保护装置, 其性能的优劣对电气设备安全运行起着很大的作用。在电网发展的初级阶段, 几乎没有任何过电压保护装置, 电力设备的事故率很高。后来电网逐步开始使用保护间隙和管型避雷器等过电压保护装置。1929 年, 美国通用电气公司首先研制出碳化硅(SiC)普通阀型避雷器<sup>[2]</sup>。在普通阀型避雷器的基础上, 1950 年又出现了磁吹间隙的阀型避雷器

(简称磁吹避雷器),它具有更高的灭弧能力和通流能力。虽然碳化硅避雷器的发展越来越成熟,但结构也越来越复杂。其根本原因就在于碳化硅阀片的非线性程度不高,必须借助于串联间隙来隔离工作电压,而由于串联间隙的存在,就始终摆脱不了放电间隙所带来的如工频续流等的一系列问题<sup>[3]</sup>。

1972年,日本制成配电用无间隙氧化锌避雷器。氧化锌避雷器以其非线性程度高、通流容量大等优异的性能被一致公认为保护电气设备的发展方向。随后,国际电工委员会(IEC)研制委员会负责制定了交流无间隙金属氧化物避雷器的技术规范。从此,避雷器经历了保护间隙、管型避雷器、阀式避雷器而进入以金属氧化物避雷器为标志的新时代。

MOA是一种新型的保护器,它具有非常好的非线性。在长期的工作电压作用下,流过MOA的电流仅为微安级。对于无串联间隙MOA,因长期承受工频电压时电阻片上有不间断的泄漏电流流过,易引起电阻片非线性特性的劣化和泄漏电流的增加。此外,在恶劣的工作环境下,当MOA存在着结构不良、密封不严等问题时,避雷器内部构件和电阻片容易受潮,引起MOA泄漏电流增大,泄漏电流中的阻性电流会在电阻片上产生热量,正常情况下发热量较小,在一个较低的温度下MOA的散热与发热能保持平衡而不影响避雷器的正常工作。但随着工作时间的延长,温度的升高会使避雷器的电阻阀片老化,同时,由于环境条件的影响,避雷器的阀片会受潮劣化,从而使正常工作条件下通过电阻片的阻性泄漏电流增加,一旦系统中有过电压产生,通过MOA内阀片的电流迅速增大,而损坏的阀片热容量承受能力有限,将会使避雷器产生热崩溃,甚至使避雷器爆炸,从而使避雷器失去保护作用。如1998年龙羊峡水电站4台330kV的MOA事故,葛洲坝500kV日立MOA1991、1993、1994年的三次事故以及1994年乌溪江水电厂220V的MOA发现严重受潮,已经引起了运行、制造等部门的关注<sup>[4,5]</sup>。据统计,我国电力系统自八十年代中期应用氧化锌避雷器以来,电压等级在110kV以上的国产氧化锌避雷器发生事故率为0.68%,退出运行率为1.3%。为了及时发现缺陷从根本上解决MOA的安全可靠问题,避免因事故造成的巨大经济损失,确保避雷器正常发挥作用,需要对避雷器进行实时在线监测。为了实时在线监测避雷器性能状态,需要把检测数据传输到数据管理中心,基于GPRS监测避雷器的方法是通过GPRS网络实时监测氧化锌避雷器的状态,以便及时排除故障。随着无线网络的发展,网络化的远程避雷器在线监测将成为重要的一种方法。

## 1.2 氧化锌避雷器在线监测的国内外现状

早在 1951 年美国西屋公司的约翰逊(S.Johnson)<sup>[6]</sup>针对运行中的发电机故障而提出并研究了在运行条件下进行监测,这可能是最早提出的在线监测思想。美国从 60 年代起开始发展在线监测技术,日本从 70 年代开始发展。经过几十年的发展研究,国外成功地研制了不少在线监测装置,80 年代以来我国的在线监测技术也得到了迅速发展,如安徽、吉林、河北、内蒙等地都研制了电容性设备的监测装置,电力科学研究院、西安交通大学还结合油中气体分析开展了用于绝缘诊断的专家系统的研究工作。

MOA 避雷器在线检测是电力设备在线检测的重要内容之一,目前国内外对 MOA 的检测技术进行了大量的研究,并提出了多种在线检测方法。国内外专家和专门机构,一直在研究 MOA 运行在工况条件下的在线监测。MOA 运行工况的监测方法以泄漏电流监测为基础,围绕如何正确反映阀片热老化程度为目的,以便监测人员掌握和使用的客观要求而进行研究。总体趋势以离线监测装置仪器的技术方法逐渐应用于在线监测系统。

目前国内的氧化锌避雷器在线检测主要有泄漏电流法、补偿法、三次谐波法(零序电流法)、基波阻性电流法。国外对氧化锌避雷器在线检测也有很多研究。采用双“CT”法<sup>[7]</sup>和基于温度的测量法。实现 MOA 的总泄漏电流监测技术已问世。日本已生产 LCD-4 型泄漏电流检测仪,该仪器是采用补偿法测量泄漏电流主要测量氧化锌避雷器总泄漏电流、阻性泄漏电流及功耗。

在我国,九十年代初期,许多学者开展了对 MOA 在线测试的研究工作,曾于 1992 年 4 月在武汉召开 MOA 在线测试技术交流会,进行 MOA 在线测试学术交流和在线测试仪(系统)的演示。但后来这些工作进展的比较缓慢。挪威 National Gril 公司生产的 LCM 型泄漏电流测试仪基于三次谐波法为原理,测出三次谐波电流,利用三次谐波电流和阻性全电流的函数关系,得到阻性泄漏电流<sup>[8]</sup>,它的现场测试结果与 LCD-4 基本一致。MOA-RCD 阻性电流测量仪是由东北电力科学院研制的,采用基波法原理,对两边相进行补偿,测量结果优于 LCD-4 的测量结果,三相的测量结果基本相同。但电网谐波对阻性电流峰值有影响,引起测量结果不稳定,这时只能给出阻性电流基波值,造成测量结果较大的误差。

目前,国内外已有一些 MOA 监测装置及监测方法,但都有不足之处。在 MOA 老化或劣化的过程中阻性电流  $i_R$  变化明显,而容性电流  $i_C$  基本不变化,由于流过氧化锌阀片的全电流主要是容性电流  $i_C$ ,阻性电流  $i_R$  所占的比

例较小,一般其幅值只占全电流  $i_x$  的 10 %~20%,因此很难从全电流的变化来判断阻性电流的变化,当氧化锌阀片因受潮发生劣化时,基波分量  $i_{1r}$  的增长较快,而当阀片发生老化时,三次谐波  $i_{3r}$  增长较快,所以用  $i_{1r}$ 、 $i_{3r}$  的变化来判断 MOA 避雷器的状态是合理的,它可以准确地分析氧化锌阀片的老化或是劣化现象。

综上,在设计的系统中选用改进阻性电流法,对电压和电流信号进行 FFT 变换,分离出阻性电流基波分量  $i_{1r}$ ,三次谐波分量  $i_{3r}$ ,通过其变化来判断 MOA 避雷器的状态。

远程监控技术随着 Internet 网络的不断发展而得到广泛应用。借助移动公网(GPRS/CDMA)作为传输方式的远程监控系统广泛应用于工矿企业、电力系统等具有无人职守远传控制特点的场所。GPRS 是通用分组无线业务 (General Packet Radio Service)的英文简称,是在现有的 GSM 系统上发展出来的一种新的分组数据承载业务。GPRS 与现有的 GSM 语音系统最根本的区别是:GSM 是一种电路交换系统,GPRS 是一种分组交换系统<sup>[9-11]</sup>。GPRS 是在现有的 GSM 网络基础上增加一些硬件设备和软件升级,形成一个新的网络逻辑实体。它以分组交换技术为基础,采用 IP 数据网络协议,提高了现有的 GSM 网的数据业务传输速率,最高可达 170kb/s。GPRS 把分组交换技术引入现有 GSM 系统,使得移动通信和数据网络合二为一,具有“极速传送”、“永远在线”、“价格实惠”等特点。利用 GPRS 实现远程监控可靠性高、信号传播距离远、覆盖面积广,并且可以节省建网初期的巨额投资,运营期间无需维护网络,运行费用低廉。由于监控设备具有分布比较广泛的特点,因此要求移动通信网进行传输数据的流量较大,通讯速度较快,GPRS 的推出是推动移动通信网上数据业务发展的重要环节,GPRS 也将会推动移动数据网络化的发展。

现阶段 GPRS 服务主要提供点对点的传输服务,即指 GPRS 无线数据终端(DTU)把数据传输到一个固定的数据处理中心。GPRS 的基础是以 IP 包的形式进行数据的传输,当 GPRS 无线终端进入 GPRS 网络时,就自动附在 INTERNET 上。

采用先进的 GPRS 技术的无线监控管理系统,集计算机、通信、机电、自动控制等多种先进技术于一体,可以实现对无线分布式系统的实时监控管理和灵活部署,解决传统控制由于没有通讯功能,无法实现集中监控的问题。从而可以节省大量人力物力,并且可以提高无线系统的运行质量,增强无线的可靠性和可控性,能及时发现定位无线系统故障,大大减少了系统停用带来的不良影响。可以看出 GPRS 技术广泛应用。目前,全世界已有近百个运营商开通了

GPRS 商用系统。如英国 BTCellNET, 德国 T-Mobile、荷兰 Telfort、香港 SMATONE 以及法国、西班牙、意大利、俄罗斯、澳大利亚、新加坡、菲律宾等国家和地区以及中国的移动通信。世界各地的 GSM 运营商都在忙着将其网络升级到 GPRS, GPRS 技术在全球的 GSM 网中已开始广泛部署。随着移动通信技术的迅猛发展, 基于 GPRS 的远程监控系统将广泛应用于国民经济的诸多领域, 也将成为一个崭新的研究热点。

正是基于以上考虑, 本文提出一种基于 GPRS 的远程无线监控系统, 远程通讯核心采用德国 SIEMENS 公司生产的 MC55 数据通信模块。该模块体积小, 运行稳定。GPRS 数据通信的实现使用串口 AT 指令。

### 1.3 氧化锌避雷器的基本特性

#### 1.3.1 氧化锌避雷器的结构

金属氧化物避雷器是从 20 世纪 70 年代出现的新型避雷器, 主要由 ZnO 为基体, 掺加少量  $\text{Co}_2\text{O}_2$ 、 $\text{Sb}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  等金属氧化物作为掺杂剂, 用特定工艺制成的避雷器, 因此又叫氧化锌避雷器。它与阀式避雷器相比, 氧化锌电阻片的非线性特征极其优异, 而且通流能力增加了 3 倍左右, 可以做成无间隙避雷器, 具有更优越的性能。所以近年来, 氧化锌避雷器以其很好的电气性能逐渐取代了其它类型的避雷器, 成为电力系统的换代保护设备。

按额定电压值进行分类, 可分为三类: 高压类、中压类、低压类。高压类指 66kV 及以上等级, 大致可划分为 750、500、330、220、110、66kV 六个电压等级; 中压类指 3kV~66kV 等级, 大致可划分为 3、6、10、20、35kV 四个电压等级; 低压类指 3kV 以下, 大致可划分为 1、0.5、0.38、0.22kV 四个电压等级。



图1-1 220kV避雷器外型图

Fig.1-1 220kV Arrester appearance drawing

MOA根据电压等级由多节组成, 35kV~110kV氧化锌避雷器是单节的, 220kV氧化锌避雷器由两节组成, 220kV避雷器外型图如图1-1所示。500kV氧化锌避雷器由三节组成, 750kV氧化锌避雷器由四节组成。500kV MOA一般分三节, 下节不并联均压电容器, 中节并联一柱均压电容器, 上节并联两柱均压电容器。图1-2为500kV避雷器截面图。

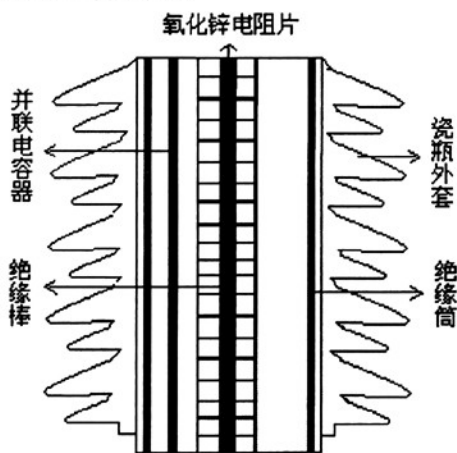


图1-2 500kV避雷器截面图  
Fig.1-2 500kV Arrester section

MOA主要由避雷元件、绝缘底座组成。避雷器元件由氧化锌电阻片、绝缘支架、密封垫、压力释放装置等组成, 内部一般充氮气或 $\text{SF}_6$ 气体。若用显微镜观察氧化锌电阻片, 它是由氧化锌晶粒、尖晶石晶粒、晶界层和孔隙组成。氧化锌电阻片结构图如图1-3所示。

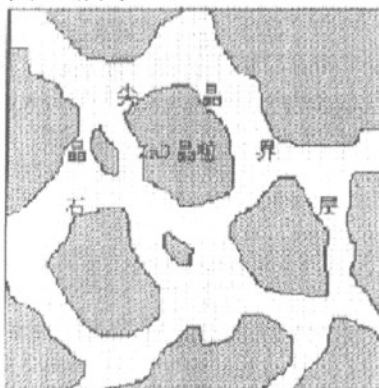


图1-3 氧化锌电阻片的显微镜结构图  
Fig.1-3 Structure drawing of Zinc Oxide Varistors under microscope

1. 氧化锌 ( $\text{ZnO}$ ) 晶粒, 固溶有微量的钴 ( $\text{Co}$ ), 锰 ( $\text{Mn}$ ) 等元素, 粒径约为 $10\mu\text{m}$ 左右, 电阻率 $1\sim 10\Omega\cdot\text{cm}$ 。



2. 包围着氧化锌晶粒的氧化铋 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 晶界层，也固溶有微量的锌、锑等元素。晶界层厚约 $0.1\mu\text{m}$ 左右，其电阻率大于 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 。氧化锌电阻片的非线性特性主要取决于晶界层。

3. 零散分布于晶界层中的尖晶石。

### 1.3.2 氧化锌避雷器的等值电路

研究氧化锌避雷器的性能，必须对其关键元件-氧化锌阀片的特性进行研究。本文涉及的主要是氧化锌阀片对外部的电气特性。

由于 MOA 芯片柱是由若干非线性的阀片串联而成的，通过 MOA 的总泄漏电流是非正弦的，因此不能用线性电路原理来求总泄漏电流。为此，用阻容并联电路来近似等效模拟 MOA 非线性阀片元件。等值电路简化如图 1-4。本文研究的避雷器在小电流领域内的特征，将采用图 1-4 的简化电路。

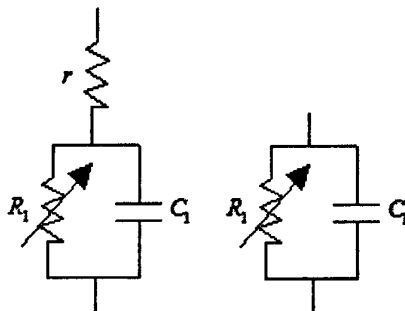


图1-4 MOA等值电路及简化电路

Fig.1-4 MOA's simplifie and equivalent circuit diagram

在图1-4中， $r$ 为氧化锌晶粒本体的固有电阻； $R$ 为非线性晶界层电阻，随外加电压大小而变化； $C_1$ 是晶介层的固有电容。由于 $R \gg r$ ，在小电流领域， $r$ 相对 $R$ 可忽略不计，这时电阻片可看成晶界层电容和晶界层电阻并联。由等效电路可知，氧化锌避雷器的泄漏电流 $I_L$ 为一合成电流，它由流过阻性元件的阻性泄漏电流 $I_r$ 和容性泄漏电流 $I_c$ 组成。

其工作过程为：在工频电压下， $\text{ZnO}$ 阀片的等值电路如图所示，当系统的额定电压作用在氧化锌阀片上时，它具有极大的电阻，只有微安数量级的电流流过，而一旦出现过压，氧化锌阀片的电阻就会变的很小，强大的雷电流可以顺利的通过，而不产生很高的残压。这样就限制了过电压的幅值，保护了电气设备的绝缘，当电压恢复正常时，氧化锌阀片又恢复到高阻状态，相当于一绝缘体。

因MOA无串联间隙，在持续运行电压作用下，由氧化锌阀片组成的芯片

柱就要长期通过工作电流，即总泄漏电流（总泄漏电流主要有瓷套外表面电流及内部电流。内部电流包括瓷套内壁、绝缘支架电流、电阻片电流和均压电容电流）。严格说来，总泄漏电流是指流过MOA内部阀片柱的泄漏电流，但测得的MOA总泄漏电流包括瓷套泄漏电流、绝缘杆泄漏电流及阀片柱泄漏电流三部分<sup>[12]</sup>，一般而言，阀片柱泄漏电流不会发生突变，而由污秽或内部受潮引起的瓷套泄漏电流或绝缘杆泄漏电流比流过MOA内部阀片柱的泄漏电流小得多。因此，在天气好的条件下，测得的MOA总泄漏电流一般都视为流过MOA阀片柱的泄漏电流。

在正常运行电压作用下，MOA 的阻性电流一般约为数十微安的微小电流，而电容电流可在几百微安以上：所以在正常运行情况下，阻性电流仅占全电流的 5%~20%，当 MOA 劣化或受潮时，全电流  $I$  将增大，此时，阻性电流  $I_R$  反映最灵敏。当阻性电流从  $I_R$  增大到  $I_{R1}$  时，全电流  $I$  也将增大到  $I_1$ ，容性电流  $I_C$  也将增大到  $I_{C1}$ ，但阻性电流  $I_R$  的增加量远大于容性电流  $I_C$  的增加量，此时，电流电压夹角  $\varphi$  将减小到  $\varphi_1$ ，其变化关系如图 1-5 所示。

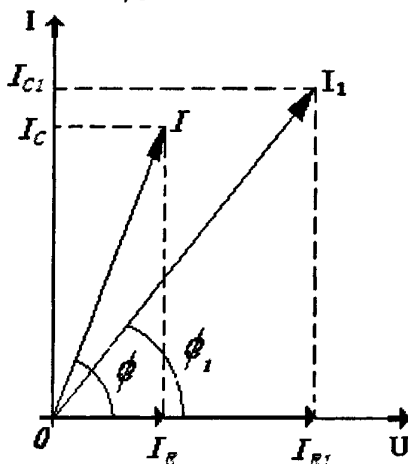


图1-5 MOA全电流相量图

Fig.1-5 MOA's total current phasor diagram

当运行中的MOA受潮或劣化时，阻性电流将增大，全电流、容性电流也将增大，电压和电流夹角将减小<sup>[13]</sup>。

### 1.3.3 氧化锌避雷器的伏-安特性

对MOA的运行监测主要是监测小电流特性的变化，在研究MOA小电流区域的交流伏安特性时会发现，不同规格的MOA阀片伏安特性曲线在不同的电压水平下，均不同程度的存在滞回特性<sup>[14~16]</sup>。这是由等值电路中电容的存在与

电阻的非线性决定的。带滞回特性的伏安曲线见图1-6。

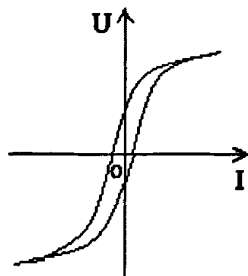


图1-6 带滞回特性的伏安曲线

Fig.1-6 The volt-ampere characteristic curve with hysteresis loop

直接用带滞回特性的伏安特性曲线分析不方便，本文使用“平均伏安曲线”，即将不同电压下阻性电流峰值连接起来构成的伏安曲线。用平均伏安曲线分析得到的数值与实际测量的误差很小<sup>[17]</sup>。

氧化锌阀片的伏安特性  $U-I$ ，如图 1-7 所示，分为四个区域：

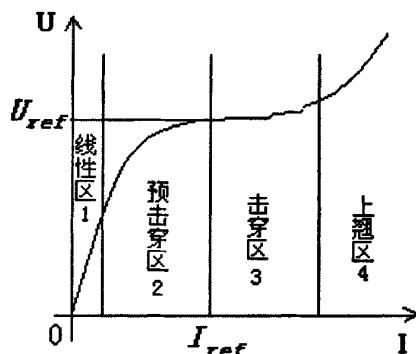


图 1-7 氧化锌阀片的伏安特性曲线

Fig.1-7 Voltammetric characteristic curve of Zinc oxide valve

区域1：伏安特性近似于线性关系，称为线性区。

区域2：伏安特性为弱非线性关系，称为预击穿区，其特性可以用  $U=CI^\beta$  表示， $\beta$  为非线性系数，约为0.1， $C$  为常数，与氧化锌阀片特性及尺寸有关。

区域3：伏安特性呈极强非线性。 $\beta$  值在0.02~0.04之间，称为击穿区。

区域4：伏安特性上翘，非线性减弱， $\beta$  值为0.1。

在区域 1 和区域 2，氧化锌阀片呈现高阻态，在运行电压作用下流过的电流很小，为小电流区；区域 3 和区域 4，氧化锌阀片呈现小电阻，在电压作用下流过很大电流，为大电流区。由小电流区域过渡到大电流区，氧化锌阀片性质起了剧烈变化。在电压变化很小的范围内，氧化锌阀片的阻值由高电阻到低电阻变化，这个过渡带以参考电流  $I_{ref}$  流过氧化锌阀片而其上呈现的电压  $U_{ref}$

表示，一般参考电流为 1 毫安。同时在氧化锌阀片在小电流区域，其伏安特性受到温度的影响，随温度的上升而右移。

## 1.4 氧化锌避雷器在线监测方法

目前国内外对MOA的检测技术进行了大量的研究，并提出了多种在线检测方法。主要有全泄漏电流法、三相接地电流法、基波阻性电流法、红外带电检测法、双CT法以及温度传感器法等。

### 1.4.1 全泄漏电流法

全电流法就是通过微安表来监测运行中氧化锌避雷器的全泄漏电流，它对反映避雷器整体受潮和阀片严重老化等缺陷效果较好。全电流法检测原理如图 1-8 所示：

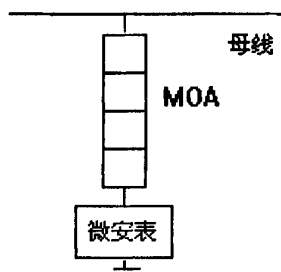


图 1-8 全电流法检测原理图

Fig.1-8 Detecting theory diagram of total current method

当MOA受潮或发生劣化时，其全电流中阻性电流分量发生变化，从而引起全电流发生变化，因此可以根据全电流的大小变化对MOA运行情况进行判断。但是，阻性电流在全电流中所占的比例较小，常常出现阻性电流已经发生很大变化，而全电流仍变化较小的情况。另外这种方法受环境温度影响较大，有时给判断带来困难。因此用全电流对MOA的运行情况进行判断准确度很低。该方法原理简单、易于实现，可以用于那些不是很重要的MOA检测或用于MOA运行情况的初判。

### 1.4.2 三次谐波法

三次谐波法（又称零序电流法）是基于氧化锌避雷器阀片电阻的非线性，基波电压也会引起阻性三次谐波电流而研究设计的。该方法的依据是：阻性全电流  $I_r$  与三次谐波阻性电流  $I_{r3}$  存在一定的比例关系，通过测量三次谐波阻性电流的大小，即可得到总的阻性电流值，在母线电压不存在谐波电压时，这个方法可以正确检出阻性三次谐波电流变化，再根据阻性全电流  $I_r=f(I_{r3})$  关系推

得阻性全电流。三次谐波法检测接线图如图 1-9 所示。

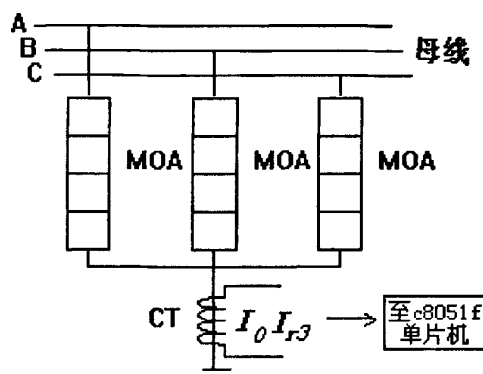


图 1-9 零序电流法检测原理图

Fig.1-9 Detecting theory diagram of zero-sequence current method

从图1-9可知，零序电流 $I_0$ 通过三相接地线上的小CT测得。当系统电压不含谐波分量时，三相电流中的基波容性电流 $I_C$ 互相抵消，基波阻性电流 $I_{r1}$ 也互相抵消，接地线中只剩下三次谐波零序电流 $I_0$ ，它等于各相三次谐波阻性电流之和，即 $I_0=3I_{r3}$ ，三次谐波阻性电流随阻性电流的增加而增加，并且总的阻性电流与三次谐波分量之间成一定的比例关系。当一组或三相避雷器出现问题时，三相电流不平衡， $I_0$ 增大，且含有基波成分 $I_{r1}$ ，因此能发现故障。

此方法实施简便，但当 $I_0$ 有变化时，不宜判断出哪一相出现故障。另外，系统电压中若含有谐波分量，则电容电流也将含有三次谐波，与 $I_{r3}$ 叠加后将使测量到的 $I_0$ 比实际阻性电流的三次谐波分量增大很多，产生误差。

### 1.4.3 基波阻性电流法

基波阻性电流法是利用测量阻性基波电流的变化来判断氧化锌避雷器的运行状况的。该方法是近年来使用较广泛、检测效果较好的一种方法。基波阻性电流法具有很多优点：

1. 基波的功耗反映了金属氧化物避雷器的健康状况，在正弦波电压作用下，MOA的阻性电流中有基波，也有高次谐波。但是MOA阀片的发热功率主要是基波电流做功产生的，当电网电压中不含谐波时，谐波电流不做功，不产生发热功率，电网中存在高次谐波分量时，高次谐波阻性电流分量所产生的功耗较小。MOA的电热老化主要是由阻性电流的基波分量造成的。

2. 有效抑制了电网电压中的谐波干扰。金属氧化物避雷器的总泄漏电流中的谐波分量有两个来源：一个是MOA的非线性特性对电网基波电压的响

应，另一个是电网谐波电压造成的阻性谐波电流。因此电网电压谐波含量不同，总阻性电流的测量结果就不同。但无论电网中的谐波含量如何，阻性电流的基波值是一定的，可以认为 $I_{r1}$ 仅取决于ZnO阀片的绝缘状况，阀片劣化时， $R$ 下降， $I_{r1}$ 增大。因此认为 $I_{r1}$ 值的大小对判断氧化锌避雷器运行状况比较可靠，不受电网谐波电压的干扰。

3. 易于排除相间干扰对于测量值的影响。为了消除这种相间干扰对于测量值所引起的误差，可以测出总电流因相间干扰产生的相移角。在测量某一相避雷器泄漏电流的时候，需要进行校正，通过数字波形分析，可以计算出被测相电网基波电压和基波总泄漏电流的相角差，以及被测相和另一边相的基波总电流相角差，计算出校正角。基波阻性电流法检测原理图如图 1-10 所示。

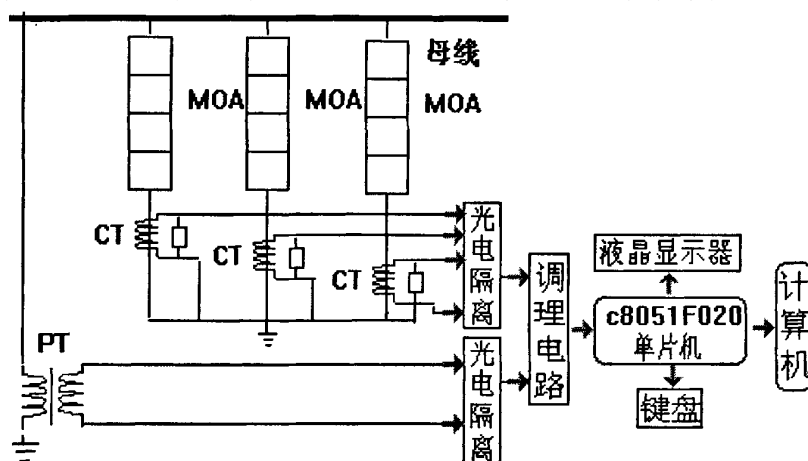


图 1-10 基波阻性电流法检测原理图

Fig.1-10 Detecting theory diagram of fundamental resistive current 基波阻性电流法

基波阻性电流法的主要原理是取得各相MOA全泄漏电流的同时取得PT上的电压信号，然后将电压信号和电流信号分别进行FFT运算，取得基波电流和基波电压的幅值和相角，将基波电流在基波电压上投影就可以求出基波阻性电流。基波阻性电流是MOA的一个重要的特征参数，虽然阻性基波电流在总泄漏电流中所占的比重很小，但是却跟MOA的绝缘性能及运行情况有着密切的关系，无论是阀片老化还是内部受潮，都会引起阻性基波电流的变化。

该方法具有受电网谐波影响小、测量精确度相对较高以及易排除相间干扰等优点。但该方法从PT上取电压存在相角差的问题，影响基波电流和基波电压之间夹角的测量准确度，从而影响基波阻性电流测量的准确度；如果采用一些有效的补偿措施，可以有效地减小PT相角差对测量的影响。

该方法需要对电压和电流信号进行 FFT 运算、这就需要保证信号能够整周期采样或对 FFT 运算后的结果进行修正，这都大大增加了数据处理量；因此该方法的数据处理对处理器的要求较高，但随着计算机技术的发展，高速数据处理器的广泛应用，上述问题可以得到解决。

#### 1.4.4 双 CT 法

双“CT”法主要是监测 MOA 的阻性泄漏电流，是国外兴起的一种新的 MOA 在线检测方法<sup>[18]</sup>。该检测法的检测原理图如图 1-11 所示。

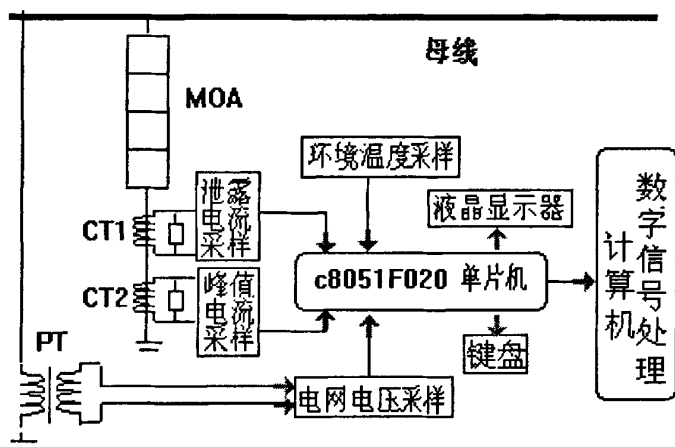


图 1-11 双 CT 法检测原理图

Fig.1-11 Detecting theory diagram of Dual-CT method

该方法的原理是利用一个 CT 采集 MOA 正常工作时的泄漏电流，另一个 CT 测量在过电压情况下冲击大电流的峰值以记录 MOA 的动作次数，并以 2.5kA 和 20kA 为基准来区分 MOA 动作原因(如区分雷击或操作过电压等)，信号经 A/D 转换后进入计算机进行数字信号处理，电压信号用来判断电网谐波对测量泄漏电流阻性分量的影响。温度也可以引起泄漏电流的增大，因此设置了一个温度传感器测取 MOA 周围环境温度。

双 CT 检测法依靠软件来实现在线检测功能，同时考虑来自电网的谐波和温度的影响，功能较强大，比目前已有的 MOA 在线检测系统完善。但该方法的经济性不够好。

#### 1.4.5 补偿法

三相交流电的电压是对称的，其相位角互为  $120^\circ$ ，这就使其中任何一相的相电压与另外两相的线电压自然地互为正交关系，在运作电压作用下的任何一相氧化锌避雷器中泄漏电流的容性分量必然与另外两相的线电压成同相或反相

关系<sup>[19]</sup>。因此，直接利用电流与电压的相位关系来实现对氧化锌避雷器中容性电流分量的补偿，即可达到测试避雷器泄露电流阻性分量的目的。补偿法的检测原理图如图1-12所示。

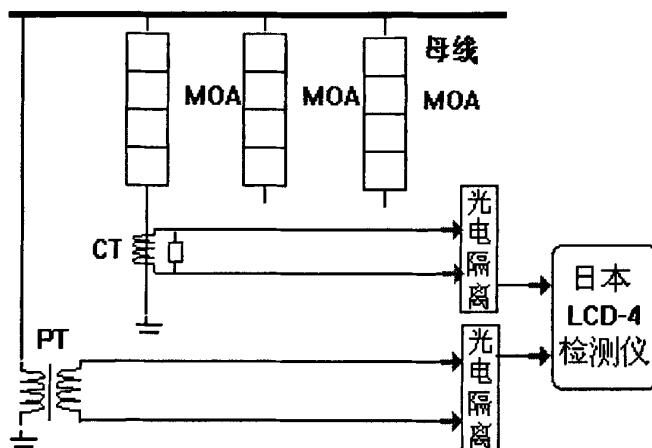


图 1-12 补偿检测原理图

Fig.1-12 Detecting theory diagram of compensation method

氧化锌避雷器劣化主要反映为阻性电流增大，因此，将流经避雷器的总电流中的容性电流平衡掉，直接检测其阻性电流的变化从而反映 MOA 的劣化。其基本原理是在监测设备中对监测到的全电流中采用硬件电路补偿去除容性电流，以得到阻性电流  $I_{R1}$ 。该法的代表仪器是日本的 LCD-4 型泄漏电流检测仪。其原理是抽取系统电压信号  $U$  然后将  $U$  旋转  $90^\circ$ ，通过仪器的增益自动调节使  $kU = I_c$ ，这样从总泄漏电流中减去  $I_c$  即可得  $I_R$ ，该方法简单，可以直接求取阻性电流，但是测量时必须借用 PT 二次绕组引入电网电压信号，而电网电压含有谐波成份，谐波电压与基波电压初相不同时，加上相间及周围环境的干扰使得  $U$  与  $I_c$  之间的夹角不一定为  $90^\circ$ ，这样计算阻性电流势必产生偏差。

## 1.5 本论文完成的主要内容

本论文完成的主要内容是：

1. 研究谐波电压对阻性电流监测的影响，对阻性电流提取方法进行了改进，谐波电压下 MOA 阻性电流的提取分离。
2. 研究 MOA 全电流的取样方法，对微弱信号的提取方式进行研究，设计 MOA 全电流取样单元。
3. 研制基于 GPRS 的 MOA 远程在线监测系统前置及通讯单元，其主要完成数据采集、存储和通信。



## 第2章 氧化锌避雷器在线监测的原理及数学模型

建立MOA在线监测数学模型的最终目的在于分离出能准确反应MOA运行状况的真实阻性电流和三次谐波电流。从而判断金属氧化物避雷器的故障原因。氧化锌避雷器损坏原因很多：

(1) 受潮是由硅橡胶套封壳采用的密封材料抗老化性能不稳定，造成其密封不良，使潮气或水分浸入，造成内部绝缘损坏。

(2) 额定电压和持续运行电压取值偏低。

(3) 电网电压波动。

(4) 老化问题。避雷器阀片的均一性差，使电位分布不均匀，运行一段时间后，部分阀片首先劣化，造成避雷器参考电压下降，阻性电流和功率损耗增加。由于电网电压不变，则金属氧化物避雷器内其余正常的阀片因荷电率增高，负担加重，导致老化速度加快，并形成恶性循环，最终导致该金属氧化物避雷器发热崩溃。

(5) 谐波。在高次谐波作用下，加速阀片的劣化速度。

(6) 抗冲击能力差。

(7) 金属氧化物避雷器的自身过电压防护能力差。

(8) 接地电阻不合格造成反击。

金属氧化物避雷器损坏的原因有雷电、系统暂态过电压、受潮、本身故障等。但主要原因归结两点：受潮与老化。

实践证明：当 MOA 电阻片发生老化时，其非线性往往也发生变化。这样由于电阻片非线性所产生的三次谐波也将发生变化。因此，可以通过检测全电流中三次谐波的变化情况来对 MOA 的老化情况进行简单的判断。主要原理：在从全电流中提取基波分量的同时，提取三次谐波分量，根据三次谐波电流大小变化对 MOA 电阻片老化情况进行判断。

一般情况下，三次谐波电流会随着电网中三次谐波电压的变化而发生变化，因此电网电压的谐波分量对全电流中三次谐波分量的测量准确度有一定的影响，从而影响电阻片老化判断的准确度<sup>[20]</sup>。因此在从PT上提取基波电压的同时提取电网的三次谐波，因为MOA电阻片老化是一个渐进的过程，因此可以通过三次谐波电流随时间变化的趋势以及三次谐波电压随时间变化的情况来综合比较判断MOA的老化情况。

## 2.1 基于 $\tan\delta$ 的氧化锌避雷器监测原理

介损是绝缘试验中的一个重要参数，它是判断绝缘较为有效的方法，是电容器等电容设备重要的灵敏度很高的试验方法。它可以发现氧化锌避雷器受潮、劣化以及设备贯穿或未贯穿的局部缺陷。

MOA 在低电压下几乎呈绝缘状态。这时电阻片可看成品界层电容和晶界层电阻并联。在小电流区域内，其等值电路如图 2-1 所示。

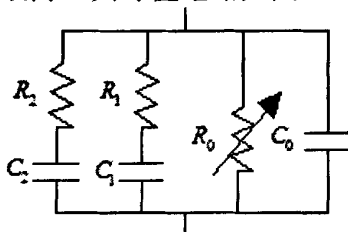


图 2-1 用  $\tan\delta$  方法监测时 MOA 等值电路

Fig.2-1 MOA equivalent circuit base on  $\tan\delta$  method

其中  $R_1$ 、 $C_1$  为快速极化支路的等值电阻和等值电容； $R_2$ 、 $C_2$  为缓慢极化支路的等值电阻和等值电容； $R_0$ 、 $C_0$  为 MOA 电阻片的等值电阻和等值电容。

设电路的总导纳为  $Y$ ：

$$Y = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}$$

$$\text{令：} \tan \delta_0 = \frac{1}{\omega C_0 R_0} \quad \tan \delta_1 = \omega C_1 R_1 \quad \tan \delta_2 = \omega C_2 R_2$$

$\tan \delta_0$  表示晶界层电阻引起的损耗角正切， $\tan \delta_1$  表示快速极化支路电阻引起的损耗角正切， $\tan \delta_2$  表示缓慢极化支路电阻引起的损耗角正切。则：

$$Y = \frac{(1 + \frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_2})(1 + \tan^2 \delta_1 \cdot \tan^2 \delta_2) + (1 + \frac{R_0}{R_1}) \tan^2 \delta_1 + (1 + \frac{R_0}{R_1}) \tan^2 \delta_2}{R_0(1 + \tan^2 \delta_1)(1 + \tan^2 \delta_2)} + j \frac{\frac{R_0}{R_1} \tan^2 \delta_1 (1 + \tan^2 \delta_2) + \frac{R_0}{R_1} \tan^2 \delta_2 (1 + \tan^2 \delta_1) + \frac{1}{\tan \delta_0} (1 + \tan^2 \delta_1)(1 + \tan^2 \delta_2)}{R_0(1 + \tan^2 \delta_1)(1 + \tan^2 \delta_2)}$$

令上式实部为  $a$ ，虚部为  $b$ ，则：

$$Y = a + jb$$

$$I = I_R + I_C = YU = (a + jb)U$$

因而： $I_R = aU$ ； $I_C = jbU$  则：

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{(1 + \frac{R_0}{R_1} + \frac{R_0}{R_2})(1 + \tan^2 \delta_1 \cdot \tan^2 \delta_2) + (1 + \frac{R_0}{R_1}) \tan^2 \delta_1 + (1 + \frac{R_0}{R_1}) \tan^2 \delta_2}{\frac{R_0}{R_1} \tan^2 \delta_1 (1 + \tan^2 \delta_2) + \frac{R_0}{R_1} \tan^2 \delta_2 (1 + \tan^2 \delta_1) + \frac{1}{\tan \delta_0} (1 + \tan^2 \delta_1)(1 + \tan^2 \delta_2)}$$

在正常情况下,  $R_0/R_1$ 与 $R_0/R_2$ 较大, 当避雷器受潮、劣化时, 比值 $R_0/R_1$ 与 $R_0/R_2$ 会下降, 使 $\tan \delta$ 会明显上升, 因此,  $\tan \delta$ 可以较显著地反映氧化锌阀片的状态。可以通过测量高电压下的 $\tan \delta$ 和电容量反映MOA是否受潮。同时可以通过间接测量MOA的三次谐波反映MOA是否老化。

## 2.2 基于谐波分析法的氧化锌避雷器监测原理

在监测系统中, 谐波分析法显得尤为重要, 这种方法能将稳态或暂态的波形信号转换成离散化的数字量, 输入计算机进行快速傅立叶变换(FFT), 将采集到的MOA的系统电压、泄漏电流信号由时域变换到频域, 分离出各次谐波电压和电流, 通过在线监测模型计算出MOA的真实阻性泄漏电流。

MOA简化的并联等效电路见图2-2, 电力系统的电压、电流均满足狄里赫利条件, 因此 $U$ 、 $I_x$ 均可分解为傅立叶级数<sup>[21]</sup>。

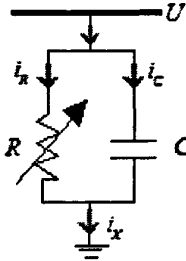


图2-2 MOA简化并联等效电路

Fig.2-2 MOA simplified equivalent circuit in parallel

$$u = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (2-1)$$

$$i_x = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \beta_k) \quad (2-2)$$

其中:  $U_0$ -电网电压的直流分量;  $I_0$ -电流的直流分量;  $U_{km}$ -电压的各次谐波幅值;  $I_{km}$ -电流的各次谐波幅值;  $\alpha_k$ -电压的各次谐波相位;  $\beta_k$ -电流的各次谐波相位;  $k=1, 2, 3, \dots$ 。

泄露电流的容性分量为:

$$i_c = C \frac{du}{dt} = \sum_{k=1}^{\infty} k\omega C U_{ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (2-3)$$

其中：  $I_{ck} = k\omega CU_{ck}$  令  $I_{ck}$  为第  $k$  次谐波阻性电流幅值，由于第  $k$  次谐波电压与第  $k$  次谐波阻性电流同相，所以，阻性电流：

$$i_R = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{Rk} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (2-4)$$

又总泄露电流：  $i_x = i_R + i_c$

$$i_x = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \beta_k) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{Rk} \cos(k\omega t + \alpha_k) + \sum_{k=1}^{\infty} I_{ck} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (2-5)$$

根据三角函数的正交性，将式(2-5)两边同乘以  $\sin(k\omega t + \alpha_k)$ ，并对两边在一周期内取定积分，有：

$$\begin{aligned} \int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \beta_k) \sin(k\omega t + \alpha_k) dt &= \int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} I_{Rk} \sin(k\omega t + \alpha_k) \sin(k\omega t + \alpha_k) dt + \\ &\int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} I_{CK} \cos(k\omega t + \alpha_k) \sin(k\omega t + \alpha_k) dt \end{aligned} \quad (2-6)$$

即：

$$\begin{aligned} \int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} (\sin^2 k\omega t \cos \alpha_k \cos \beta_k) + \cos^2 k\omega t \sin \alpha_k \sin \beta_k + \sin k\omega t \cos k\omega t \sin \alpha_k \cos \beta_k \\ + \sin k\omega t \cos k\omega t \cos \alpha_k \sin \beta_k dt &= \int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} I_{RK} [\sin(k\omega t + \alpha_k)]^2 dt \end{aligned} \quad (2-7)$$

即：

$$\frac{T}{2} I_{km} (\cos \alpha_k \cos \beta_k + \sin \alpha_k \sin \beta_k) = \frac{T}{2} I_{RK} \quad (2-8)$$

所以：

$$I_{RK} = I_{km} (\cos \alpha_k \cos \beta_k + \sin \alpha_k \sin \beta_k) \quad (2-9)$$

$$\text{同理可求 } I_{CK} = I_{km} (\cos \alpha_k \sin \beta_k - \sin \alpha_k \cos \beta_k) \quad (2-10)$$

因此将展开成傅立叶级数，并按式：(2-4)(2-9) 计算，就可求得MOA的总阻性电流  $i_R$ 。

## 2.3 MOA 在线监测的数学模型

实际运行中，由于场地和布置方式的限制，三相避雷器靠的比较近，相间杂散电容较大，各相避雷器除受本相电压作用外，还通过杂散电容受到邻相电压的作用。所以每相MOA都不可避免的受到其它两相MOA的影响，由相间电容耦合所形成的干扰电流在被测相电压矢量上的投影作为“阻性分量”混入真实的阻性电流中。由于真实的阻性电流本身较小，相间干扰电流的分量可能在真实阻性电流中占有较大比例，造成测量结果误差，以致无法正确判断MOA阀

片劣化状况<sup>[22~26]</sup>。相间干扰等值电路如图2-3所示。

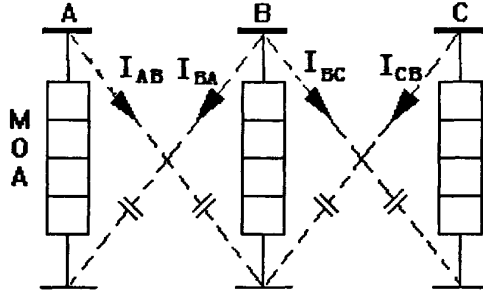


图 2-3 相间干扰等值电路  
Fig.2-3 Interference phase equivalent circuit

对于 A 相，很显然，在  $I_{BA}$  的影响下，测量值明显比真实值大，这是因为总泄漏电流的相位向后移动了  $\theta$  角度，C 相氧化锌避雷器受相间干扰的情况与此类似，只是电流相角向前移动  $\theta$  角度，测得的阻性分量比真实值小。由于 A、C 相的对称作用，B 相值的变化忽略不计。

### 2.3.1 理想条件下的数学模型

理想条件指的是：（1）MOA 是单相运行，相间不存在干扰；（2）施加在 MOA 上的系统电压是标准的正弦电压。泄漏电流基波分量见相量图 2-4。

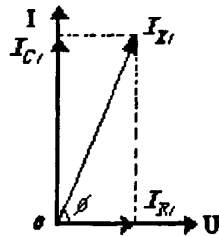


图 2-4 理想条件下泄漏电流基波分量相量图  
Fig.2-4 Fundamental component phasor diagram leakage current under ideal condition

由图 2-4 得到下列公式：

$$\begin{aligned} I_{X1} \cos \varphi &= I_{R1} \\ I_{X1} \sin \varphi &= I_{C1} \end{aligned}$$

这种条件下运行的 MOA 在实际中是不存在的，但这是建立 MOA 数学模型的基础。

### 2.3.2 电网电压无谐波下的数学模型

无谐波条件指的是：（1）规格相同的三相 MOA 为一字形排列运行；（2）施加在 MOA 上的系统电压是标准的正弦电压；（3）考虑相间干扰的影

响。如果电网电压中无谐波，那么容性电流、耦合电流中均没有谐波电流， $i_X$  中的谐波电流只来源于电阻阀片的非线性，而这种谐波电流很小，可以忽略不计<sup>[26]</sup>。泄漏电流基波分量见相量图2-5。

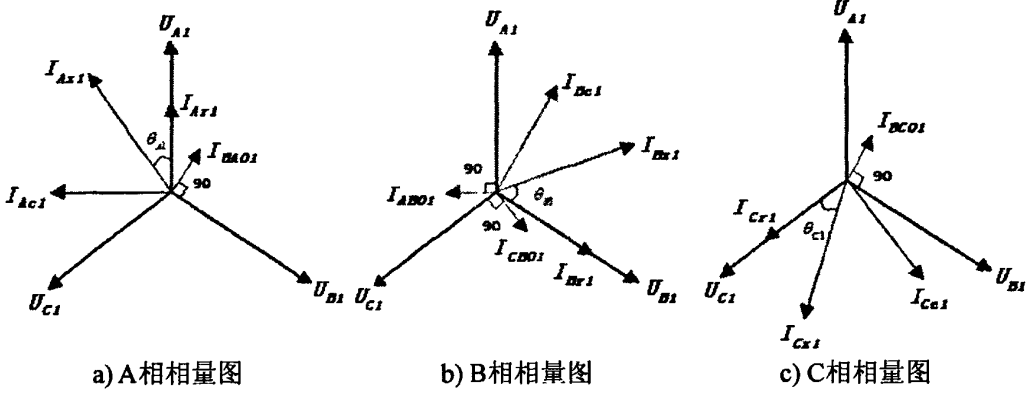


图 2-5 电网电压无谐波下泄漏电流相量图

Fig.2-5 Leakage current phasor diagram under no harmonic current of power grid voltage

上图中， $I_{AX1}$ 、 $I_{BX1}$ 、 $I_{CX1}$  为三相MOA基波全电流相量； $I_{Ar1}$ 、 $I_{Br1}$ 、 $I_{Cr1}$  为三相MOA阻性基波电流相量； $I_{BA01}$ 、 $I_{BC01}$ 、 $I_{CB01}$ 、 $I_{AB01}$  为三相高压线对邻相MOA接地线的耦合基波电流相量； $I_{Ac1}$ 、 $I_{Bc1}$ 、 $I_{Cc1}$  为三相MOA容性基波电流相量。

由图 2-5 得到下列公式：

$$\begin{aligned} I_{AX1} \cos \theta_{A1} &= I_{Ar1} + I_{BA01} \cos 30^\circ \\ I_{AX1} \sin \theta_{A1} &= I_{Ac1} - I_{BA01} \sin 30^\circ \\ I_{BX1} \cos \theta_{B1} &= I_{Br1} + I_{CB01} \cos 30^\circ - I_{AB01} \cos 30^\circ \\ I_{BX1} \sin \theta_{B1} &= I_{Bc1} - I_{CB01} \sin 30^\circ - I_{AB01} \sin 30^\circ \\ I_{CX1} \cos \theta_{C1} &= I_{Cr1} - I_{BC01} \cos 30^\circ \\ I_{CX1} \sin \theta_{C1} &= I_{Cc1} - I_{BC01} \sin 30^\circ \end{aligned}$$

方程左边  $I_{AX1}$ 、 $I_{BX1}$ 、 $I_{CX1}$  和  $\theta_{A1}$ 、 $\theta_{B1}$ 、 $\theta_{C1}$  均可通过数字分析得到。方程右边未知量为  $I_{Ar1}$ 、 $I_{Br1}$ 、 $I_{Cr1}$ 。由于一字形排列的MOA具有对称性，可认为  $C_{AB} = C_{BC}$ 、 $C_{BA} = C_{CB}$ 。  $I_{AB01} = I_{CB01}$ 、 $I_{BA01} = I_{BC01}$ 。又由MOA规格相同，可认为  $I_{Ac1} = I_{Bc1} = I_{Cc1}$  由上述三相基波方程式，可求出三相阻性基波电流、三相容性基波电流和耦合基波电流。

### 2.3.3 K 次间谐波（K 不是整数）下的数学模型

前提条件指的是：(1) 规格相同的三相MOA为一字形排列运行；(2) 施加

在MOA上的电压是频率接近基波和三次分量的间谐波；(3) 考虑间谐波相间干扰的影响。对于k次间谐波电压，B相落后A相角度 $\alpha=120^\circ k$ ，C相超前A相角度 $\alpha=120^\circ k$ ，k次间谐波相量图见图2-6。

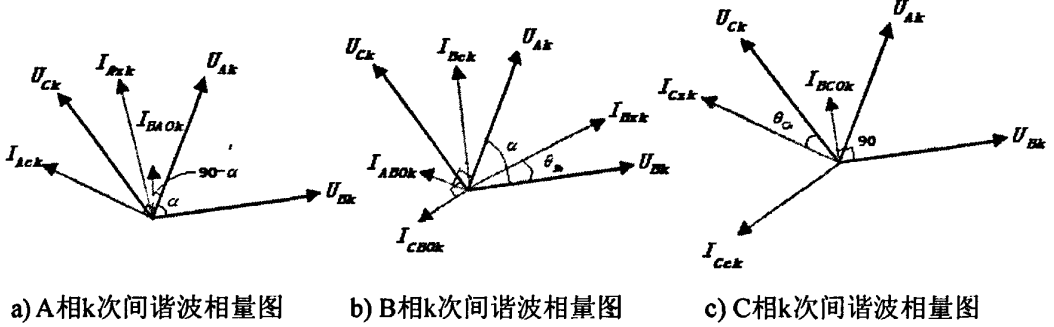


图 2-6 k 次间谐波下泄漏电流相量图

Fig.2-6 Leakage current phasor diagram under k times inter-harmonic current

上图中， $I_{AXk}$ 、 $I_{BXk}$ 、 $I_{CXk}$  为各相MOA泄露电流间谐波相量幅值； $\theta_{Ak}$ 、 $\theta_{Bk}$ 、 $\theta_{Ck}$  为相角。 $I_{Ark}$ 、 $I_{Brk}$ 、 $I_{Crk}$  为三相MOA间谐波阻性基波电流相量； $I_{BA0k}$ 、 $I_{BC0k}$ 、 $I_{CB0k}$ 、 $I_{AB0k}$  为间谐波相间干扰； $I_{Ack}$ 、 $I_{Bck}$ 、 $I_{Cck}$  为三相MOA间谐波容性基波电流相量。

由图 2-6 得到下列公式：

$$\begin{aligned}
 I_{AXk} \cos \theta_{Ak} &= I_{Ark} + I_{BA0k} \cos(90^\circ - \alpha) \\
 I_{AXk} \sin \theta_{Ak} &= I_{Ack} + I_{BA0k} \sin(90^\circ - \alpha) \\
 I_{BXk} \cos \theta_{Bk} &= I_{Brk} - I_{AB0k} \cos(90^\circ - \alpha) - I_{CB0k} \cos(2\alpha - 90^\circ) \\
 I_{BXk} \sin \theta_{Bk} &= I_{Bck} + I_{AB0k} \sin(90^\circ - \alpha) - I_{CB0k} \sin(2\alpha - 90^\circ) \\
 I_{CXk} \cos \theta_{Ck} &= I_{Crk} + I_{BC0k} \cos(2\alpha - 90^\circ) \\
 I_{CXk} \sin \theta_{Ck} &= I_{Cck} - I_{BC0k} \sin(2\alpha - 90^\circ)
 \end{aligned}$$

方程左边  $I_{AXk}$ 、 $I_{BXk}$ 、 $I_{CXk}$  和  $\theta_{Ak}$ 、 $\theta_{Bk}$ 、 $\theta_{Ck}$  均可通过数字分析得到。方程右边未知量为  $I_{Ark}$ 、 $I_{Brk}$ 、 $I_{Crk}$ 。由于一字形排列的MOA具有对称性，可认为  $I_{AB0k} = I_{CB0k}$ 、 $I_{BA0k} = I_{BC0k}$ 。由MOA规格相同，可认为  $I_{Ark} = I_{Brk} = I_{Crk}$ 。式中共有  $I_{Ark}$ 、 $I_{Brk}$ 、 $I_{Crk}$ 、 $I_{Ack}$ 、 $I_{BA0k}$ 、 $I_{AB0k}$  6个变量，可求解。

### 2.3.4 三次谐波下的数学模型

前提条件是：(1) 规格相同的三相MOA为一字形排列运行；(2) 施加在MOA上的电压是三次谐波；(3) 考虑三次谐波相间干扰的影响。对于三次谐波电压，A相、B相、C相同相，三次谐波相量图见图2-7。

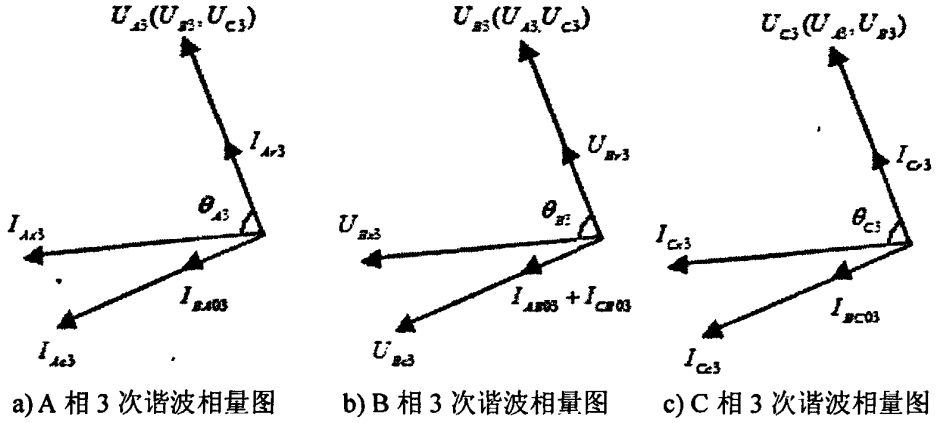


图 2-7 三次谐波下泄漏电流相量图

Fig.2-7 Leakage current phase diagram under third harmonic current

由图 2-7 得到下列公式：

$$\begin{aligned}
 I_{AX3} \cos \theta_{A3} &= I_{Ar3} \\
 I_{AX3} \sin \theta_{A3} &= I_{Ac3} + I_{BA03} \\
 I_{BX3} \cos \theta_{B3} &= I_{Br3} \\
 I_{BX3} \sin \theta_{B3} &= I_{Bc3} + I_{AB03} + I_{CB03} \\
 I_{CX3} \cos \theta_{C3} &= I_{Cr3} \\
 I_{CX3} \sin \theta_{C3} &= I_{Cc3} + I_{BC03}
 \end{aligned}$$

方程左边  $I_{AX3}$ 、 $I_{BX3}$ 、 $I_{CX3}$  和  $\theta_{A3}$ 、 $\theta_{B3}$ 、 $\theta_{C3}$  均可通过数字分析得到。方程右边未知量为  $I_{Ar3}$ 、 $I_{Br3}$ 、 $I_{Cr3}$ 。由于一字形排列的 MOA 具有对称性，可认为  $I_{AB03} = I_{CB03}$ 、 $I_{BA03} = I_{BC03}$ 。由 MOA 规格相同，可认为  $I_{Ac3} = I_{Bc3} = I_{Cc3}$ 。式中共有  $I_{Ar3}$ 、 $I_{Br3}$ 、 $I_{Cr3}$ 、 $I_{Ac3}$ 、 $I_{BA03}$ 、 $I_{AB03}$  6 个变量，可求解。

## 2.4 MOA 泄露电流的 matlab 仿真

对 MOA 的运行监测主要是监测小电流特性变化，在研究 MOA 小电流区域的交流伏安特性时发现，不同规格 MOA 阀片伏安特性曲线在不同的电压水平下，均不同程度的存在滞回特性，直接用带滞回特性的伏安特性曲线分析不方便，本仿真使用“平均伏安曲线”作为非线性 MOA 阀片。用函数  $U_f = \arctan(kI)$  模拟 MOA 电阻阀片的非线性特征，平均伏安曲线分析得到的数值与实际测量的误差很小。仿真中改变参数  $k$ ，取不同数值代表不同性质的劣化情况。

设某一 MOA 模型，其额定电压  $U_r = 110\text{kV}$ ，持续运行电压  $U_c = 88\text{kV}$ 。系统电压由混合信号组成，含基波、高次谐波和  $k$  次间谐波。其中，频率接近基频的 1/2 次间谐波占基波幅值的 3%，3 次谐波占 5%，3.5 次间谐波占 2%，5 次谐波



占2%，则用下面函数来模拟电网电压。

$$U = 0.024 \sin(\omega t / 2 + 0.8) + 0.8 \sin(\omega t + 0.45) + 0.04 \sin(3\omega t + 1.25) + 0.016 \sin(3.5\omega t + 0.2) + 0.016 \sin(5\omega t + 1.46)$$

利用matlab仿真电网电压波形如图2-8，由图可知电网电压波形为畸变波。

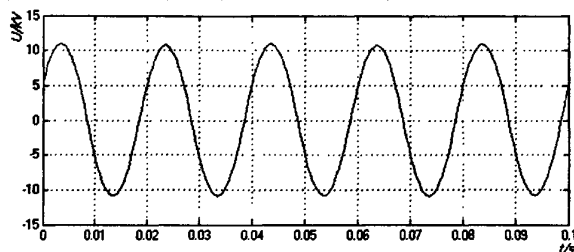
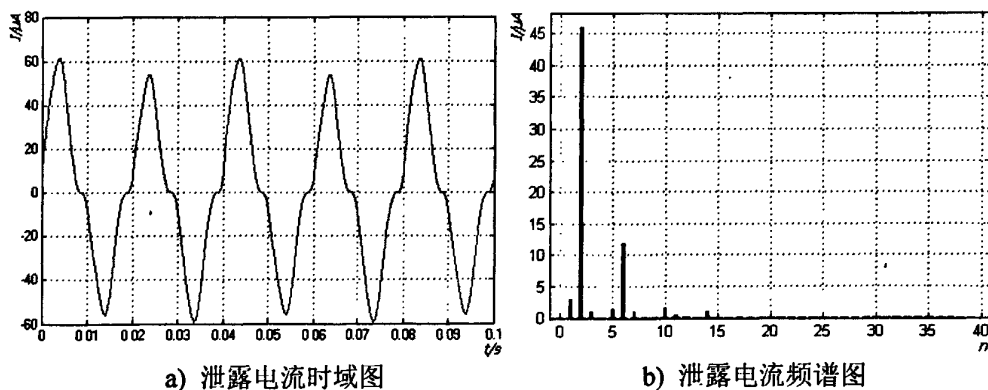


图2-8 电网电压波形图

Fig. 2-8 Voltage waveforms of power grid

为了测量谐波，必须选择适当的采样时间窗宽度。常用的时域谐波分析仪一般对工频一个周波(20ms)值作离散采样，用FFT求出各次谐波大小，这样结果只能是工频整数倍的谐波。如要分析出间谐波必须加长采样周期，例如取2个周波(40ms)。采样周期越长，分析出的间谐波就越多，但计算量和计算时间也相应增加。因此应合理选择采样周期以便和需分析的间谐波频率相适应<sup>[27]</sup>。经FFT运算后，得到阻性泄露电流如图2-9至图2-11所示。

当 MOA 电阻片发生老化时，其非线性往往也发生变化。这样由于电阻片非线性所产生的三次谐波也将发生变化。因此，可以通过检测全电流中三次谐波的变化情况来对 MOA 的老化情况进行判断。由图 2-9、2-10 可知，当 MOA 内部阀片老化时，其故障特征是在系统正常电压下，MOA 的阻性电流高次谐波分量显著增大。



a) 泄露电流时域图

b) 泄露电流频谱图

图 2-9 MOA 正常工作时的泄露电流图

Fig.2-9 MOA leakage current map under normal working

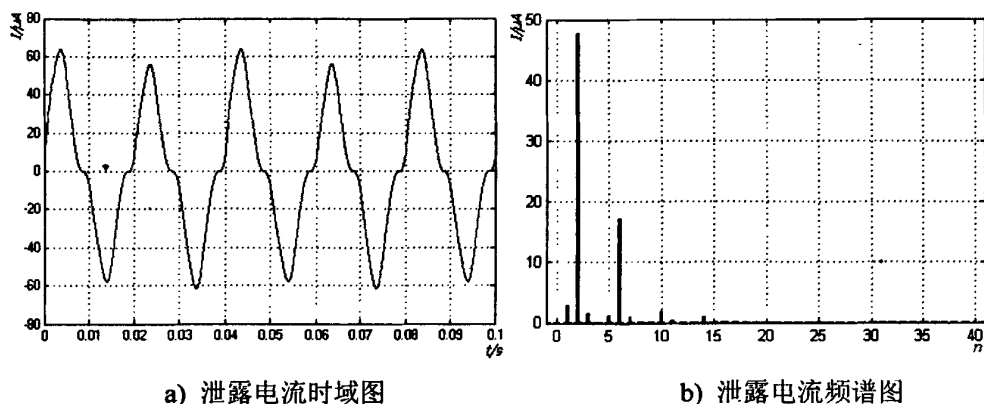


图 2-10 劣化时的泄露电流图

Fig.2-10 MOA leakage current map under deteriorating

当 MOA 结构不良或者密封不严时，遇到雷雨天时避雷器内部电阻片容易受潮，引起 MOA 泄漏电流增大，在正常运行电压作用下，其泄露电流主要是全电流  $I$ 。由图 2-9、2-11 可知，当 MOA 劣化或受潮时，全电流  $I$  将增大，此时，阻性电流  $I_R$  反映最灵敏。当阻性电流  $I_R$  增大时，全电流  $I$  也将增大，容性电流  $I_c$  也将增大，但阻性电流  $I_R$  的增加量远大于容性电流的增加量，此时，电流电压夹角将减小，所以，当运行中的 MOA 受潮时，阻性电流将增大，全电流、容性电流也将增大。

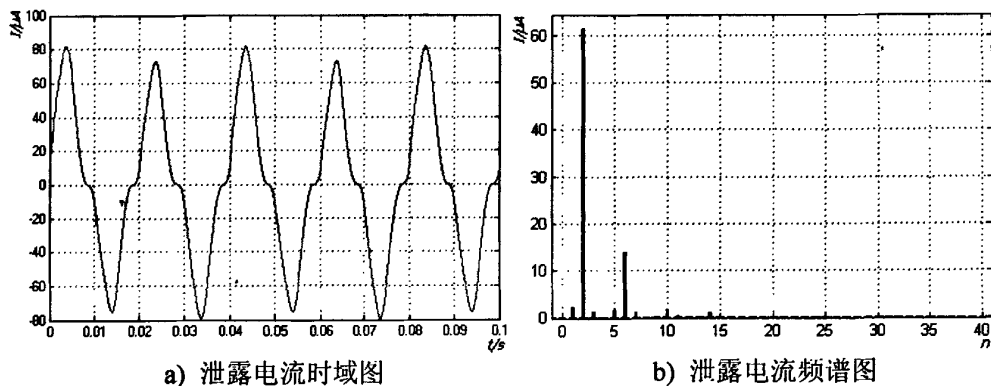


图 2-11 受潮时的泄露电流图

Fig.2-11 MOA leakage current map under damping

## 2.5 本章小结

本章建立了运行状态下三相不对称排列的氧化锌避雷器数学模型。数学模型从非线性电阻电流的特性出发，对容性电流与阻性电流进行分解，通过相间干扰电流以及电压谐波产生的干扰电流与 MOA 真实泄漏电流之间的相量关系，建立各谐波分量的相量图，从而建立 MOA 在线监测的数学模型，该模型

有效地去除了相间干扰电流和系统谐波对 MOA 阻性泄漏电流的影响。模型的提出，为充分利用新技术和新方法，精确地求解阻性泄漏电流提供了条件。

为获取 MOA 的运行监测数据，其途径主要是通过现场数据采集和软件仿真两方面得到。本章通过对 MOA 泄漏电流的 MATLAB 仿真，可以判断避雷器的运行状态。

## 第3章 GPRS 网络结构及其原理

### 3.1 GPRS 的通信特点

GPRS(General Packet Radio Service)是一项高速数据处理的技术,方法是以“分组”的形式传送资料到用户手上<sup>[28,29]</sup>。GPRS是在GSM 系统的基础上构建起来的。GPRS通信特点如下:

1. 资源利用率高: GPRS 引入了分组交换的传输模式,用户只有在发送或接收数据期间才占用资源,这意味着多个用户可高效率地共享同一无线通信,从而提高了资源的利用率,而 GSM 传输数据方式为电路交换模式,在整个连接期内,用户无论是否传送数据都将独自占用无线信道。GPRS 用户的计费按通信的数据流量为计费标准。

2. 传输速度快: GPRS 数据传输速度可达 57.6KB/s,最高可达到 115 KB/s~117.2 KB/s,而 GSM 网为 9.6 KB/s,完全可以满足用户应用的需求。

3. 支持 IP 协议和 X.25 协议: GPRS 支持 Internet 上应用最广泛的 IP 协议和 X.25 协议,而且由于 GSM 网络覆盖面广,使得 GPRS 能提供 Internet 和其他分组网络的全球性无线接入。

### 3.2 GPRS 的总体结构与工作原理

#### 3.2.1 GPRS 拓扑结构

GPRS的分组数据网络重叠在GSM网络上,然而它的分组数据信道、分组数据交换和传输网络是不同于GSM的<sup>[30]</sup>。GPRS的网络结构如图3-1所示。

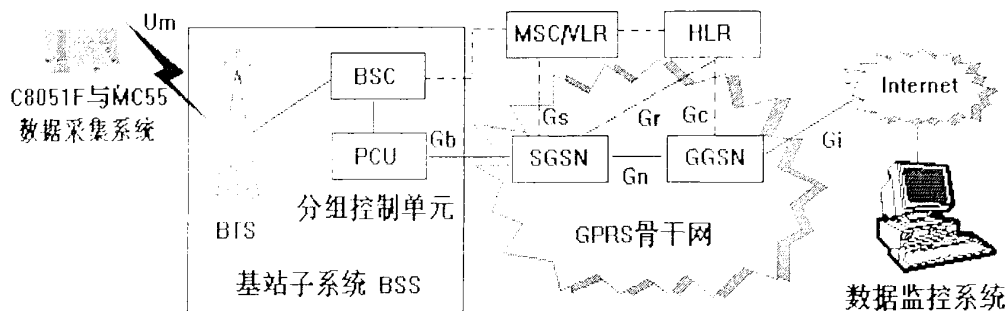


图 3-1 GPRS 的网络结构图

Fig.3-1 GPRS network structure diagram

GPRS在传统的GSM网络中引入了3个新的组件: PCU (Packet Control Unit, 分组控制单元)、SGSN (Serving GPRS Support Node, GPRS服务支持

节点)和GGSN (Gateway GPRS Support Node, GPRS网关支持节点)。

PCU: 通过对基站子系统 (BSS) 进行软件升级, 被称为分组控制单元 (Package Control Unit, PCU) 的新型 GPRS 实体, PCU 将被用来处理数据业务量, 并将数据业务量从 GSM 话音业务量中分离出来。PCU 增加了分组功能, 可控制无线链路, 并允许用户接入同一无线资源。

SGSN: GPRS 业务支持节点 (Serving GPRS Support Node, SGSN) 为用户和 GGSN 提供分组路由和隧道等功能。GPRS 分组从基站直接发送到 SGSN 节点, 而不是通过移动交换中心 MSC 连接到语音网络上。

GGSN: GPRS 网关支持节点 (Gateway GPRS Support Node), GGSN 是 GPRS 网络连接其他网络 (如 Internet) 的关键设备; GGSN 对接收自 SGSN 的分组数据进行相应的处理后, 发送到目的网络中, 如 Internet 或 X.25 网络; 而来自 Internet 的标识有移动终端地址的 IP 包, 由 GGSN 接收再转发到 SGSN, 继而传送到移动终端上。

### 3.2.2 GPRS 网络主要的网络接口

1. Um 接口: Um 接口是 GPRS 的 MS 与 GPRS 网络间的接口, 通过 MS 完成与 GPRS 网络的通信, 完成分组数据传送、移动性管理、会话管理、无线资源管理等多方面的功能。

2. Gb 接口 Gb 接口是 SGSN 和 BSS 间接口, 通过该接口 SGSN 完成同 BSS 系统、MS 之间的通信, 以完成分组数据传送、移动性管理、会话管理方面的功能。该接口是 GPRS 组网的必选接口。在目前的 GPRS 标准协议中, 指定 Gb 接口采用帧中继作为底层的传输协议, SGSN 同 BSS 之间可以采用帧中继网进行通信, 也可以采用点到点的帧中继连接进行通信。

3. Gi 接口 Gi 接口是 GPRS 与外部分组数据网之间的接口。GPRS 通过 Gi 接口和各种公众分组网 (如 Internet 或 ISDN 网) 实现互联, 在 Gi 接口上需要进行协议的封装/解封装、地址转换 (如私有网 IP 地址转换为公网 IP 地址)、用户接入时的鉴权和认证等操作。

4. Gn 接口 Gn 接口是 GPRS 支持节点间接口, 即同一个 PLMN 内部 SGSN 间、SGSN 和 GGSN 间接口, 该接口采用在 TCP/UDP 协议之上承载 GTP (GPRS 隧道协议) 的方式进行通信。

5. Gs 接口 Gs 接口是 SGSN 与 MSC/VLR 间接口, Gs 接口采用 No.7 信令上承载 BSSAP+ 协议。SGSN 通过 Gs 接口和 MSC 配合完成对 MS 的移动性管理功能, 包括联合的 Attach/Detach、联合的路由区/位置区更新等操作。

SGSN 还将接收从 MSC 来的电路型寻呼信息, 并通过 PCU 下发到 MS。如果不提供 Gs 接口, 则无法进行寻呼协调, 不利于提高系统接通率和无线资源利用率, 并且无法进行联合位置区/路由区更新, 不利于减轻系统信令负荷。

6. Gr 接口 Gr 接口是 SGSN 与 HLR 之间的接口, Gr 接口采用 7 号信令上承载 MAP+协议的方式。SGSN 通过 Gr 接口从 HLR 取得关于 MS 的数据, HLR 保存 GPRS 用户数据和路由信息。当发生 SGSN 间的路由区更新时, SGSN 将更新 HLR 中相应的位置信息; 当 HLR 中数据有变动时, 也将通知 SGSN, SGSN 会进行相关的处理。

7. Gc 接口 Gc 接口是 GGSN 与 HLR 之间的接口, 当网络侧主动发起对 MS 的业务请求时, 由 GGSN 用 IMSI 向 HLR 请求用户当前 SGSN 地址信息。由于移动数据业务中很少会有网络侧主动向 MS 发起业务请求的情况, 因此 Gc 接口目前作用不大。

### 3.2.3 GPRS 的工作原理

图 3-1 中单片机数据采集系统通过串行或无线方式连接到 GPRS 蜂窝电话上<sup>[31]</sup>。GPRS 蜂窝电话与 GSM 基站通信, 但与电路交换式数据呼叫不同, GPRS 分组是从基站发送到 GPRS 服务支持节点(SGSN), 而不是通过移动交换中心(MSC)连接到语音网络上。SGSN 与 GPRS 网关支持节点 GGSN 进行通信; GGSN 对分组数据进行相应的处理, 再发送到目的网络, 如因特网或 X.25 网络。来自因特网标识有移动台地址的 IP 包, 由 GGSN 接收, 再转发到 SGSN, 继而传送到移动台上。SGSN 是 GSM 网络结构中的一个节点, 它与 MSC 处于网络体系的同一层。SGSN 通过帧中继与 BTS 相连, SGSN 的主要作用是记录移动台的当前位置信息, 并且在移动台和 GGSN 之间完成移动分组数据的发送和接收。GGSN 主要是起网关作用, 也有将 GGSN 称为 GPRS 路由器。GGSN 可以把 GSM 网中的 GPRS 分组数据包进行协议转换, 从而可以把这些分组数据包传送到远端的 TCP/IP 或 X.25 网络。SGSN 和 GGSN 利用 GPRS 隧道协议(GTP)对 IP 或 X.25 分组进行封装, 实现二者之间的数据传输。

### 3.3 MOA 数据采集终端通过 GPRS 发送数据过程分析

本系统采用的数据传输方式是: 由 MOA 数据采集终端(相当于移动台, MS)主动向 GPRS 网络发起连接, 而后 MOA 数据采集终端主动发起至远程监控中心服务器的数据传输, 传输完毕终端主动发起终止连接信号。我们可以把此 GPRS 数据传输过程看成以下几个过程<sup>[32]</sup>: MOA 数据采集终端发起的连接过程、采集终端发起数据传输过程、采集终端终止的数据传输过程。

1. MOA 数据采集终端发起的连接过程 MOA 数据采集终端在与远程监控中心服务器进行通讯前, 首先必须连接到 GPRS 网络, 即与 SGSN 建立连接。此刻终端虽然已经登陆上 GPRS 网络, 但从外部网络还不能看到它。要能够收发数据, 终端还必须激活一个 PDP 场景, 在获得 PDP 地址后, 才能够实现与外部网络上的主机进行通讯<sup>[33]</sup>。具体连接过程分两个部分:

(1) 当终端向GPRS网络发起连接请求时, 其首先向SGSN发送附带自身识别码的连接请求, 该信息同时也包含一个网络服务区域点标识(NSAPI)。SGSN通过查询终端的用户归属寄存器(HLR)数据以验证用户是否被授权使用该业务。授权验证通过后, SGSN向MS发送一个带专用临时逻辑链路标志(TLLI)的回复信息。终端发起连接后, SGSN将创建终端和SGSN的关系映射表。

(2) 终端需要激活PDP场景, 建立起与GGSN之间的对应关系后, 才能够实现与外部网络间的通讯。终端首先向SGSN发送一个PDP场景激活请求, SGSN根据终端提供的信息选择相应的GGSN, 请求该GGSN为终端创建PDP场景。GGSN与SGSN之间建立通讯隧道, 并分配有隧道标识TID。在保存了TID、SGSN 的IP地址和MS之间的映射关系后, GGSN向SGSN发送确认消息, 其中包括TID信息和分配给MS的PDP地址。SGSN向终端发送消息, 通知其PDP场景已经激活。同时SGSN更新自身保存的映射关系表。

在GPRS系统中, 终端在PDP场景激活时获得的PDP地址为非法IP地址, 其在GPRS网络之外不可寻址。GGSN网关节点处采用了NAT网络翻译技术, 将终端的IP地址与该GGSN的IP地址和通讯端口号建立映射关系, 终端发送数据时, 在GGSN处将数据报的源IP地址和源端口号置换为映射表中的IP地址和端口号发送出去。

2. MOA数据采集终端发起的数据传输过程 当终端产生IP分组时, 发送过程分成以下3个步骤进行:

(1) 终端根据TLLI和NSAPI信息, 选择SGSN。在原始IP分组中加入包含TLLI和NSAPI的头信息后, 发送给SGSN。

(2) SGSN查询映射关系表, 将TLLI和NSAPI对替换为TID和GGSN IP地址对, 发送IP分组给GGSN。

(3) GGSN接收到IP分组后, 去除分组头信息, 得到原始的IP分组数据报。在进行地址映射后, 将该数据报发送给外部数据网络。

3. MOA数据采集终端发起的终止过程 要将PDP场景去激活, 终端首先向SGSN发送一条去激活PDP场景的请求。SGSN向GGSN发送一个删除PDP场景的请求消息; 其中包含有TID信息, GGSN删除PDP场景后向SGSN回复删除

确认消息，其中包含TID信息。此时GGSN释放MS正在使用的PDP地址。SGSN再向MS返回一条包含了NSAPI信息的确认消息。

### 3.4 TCP/IP 协议族的分析及 PPP 简介

#### 3.4.1 TCP/IP 协议族模型

网络中的通信是指在不同系统中的实体之间的通信。所谓实体，是指能发送和接收信息的终端、应用软件、通信进程等。实体之间通信需要一些规则和约定，如传送的信息块采用编码和格式，传送过程中出现错误的处理等，就是通信双方在通信时需要遵循的协议。两个系统中的实体间的通信是一个十分复杂的过程，为了减少协议设计和调试过程的复杂性，大多数网络的实现都按层次的方式来组织，每一层完成一定的功能，每一层又都建立在它的下层之上。不同的网络，其层的数量、各层的名称、内容和功能不尽相同。然而在所有的网络中，每一层都是通过层接口向上一层提供一定的服务，而把这种服务是如何实现的细节对上层加以屏蔽。对于结构化的网络协议体系，一般将层和协议的集合称为网络体系结构。制定通信协议的主要目的是保证两个通信实体能够发送、接收并解释它们想要交换的信息。体系结构对于减少存在与端点到端点通信任务中固有的概念复杂性很有价值。现今大多数的体系结构都是基于层次的概念，在这种体系中，一个端到端的通信任务是通过逐次地在每个协议层中不断增加“确切含义”来完成的。为了制定网络通信协议的标准，ISO (International Standardization Organization 国际标准组织)发表了OSI模型(Open System Interconnection Model)，以此作为网络设计、连接的标准及准则<sup>[34, 35]</sup>。OSI模型共分为7层，物理层(Physical Layer)、数据链路层(Data Link Layer)、网络层(Network Layer)、传输层(Transportation Layer)、会话层(Session Layer)、表示层(Presentation Layer)、应用层(Application Layer)。而每一层均包括不同的网络设备(Device)或通信协议。

国际标准化组织(Internet Standard Organization, ISO)提出的七层网络通信模型——开发系统互连参考模型OSI (Open System Interconnection Reference Model)，在实际的应用中并没有获得广泛的应用，而目前应用最广泛最成功的通信协议是TCP/IP协议族。网络通信协议通常分不同层次进行开发，每一层分别负责不同的通信功能。

TCP/IP 协议族是一组不同层次上的不同协议组合在一起构成的协议族。TCP/IP协议族通常被认为是一个四层协议系统，如表3-1所示。尽管通常称该协议族为TCP/IP，但TCP和IP只是其中的两种协议而已。



表3-1 TCP/IP协议族的四个层次  
Tab.3-1 TCP/IP protocol family of four levels

TCP/IP分层	协议	OSI分层
应用层	文件传输, 电子邮件, 文件服务, 虚拟终端 TFTP, HTTP, SNMP, FTP, SMTP, DNS, TELNET	7, 6, 5
传输层	提供端对端的接口 TCP, UDP	4
网络层	为数据包选择路由 IP, ICMP, RIP, OSPF, BGP, IGMP	3
链路层	传输有地址的帧以及错误检测功能 SLIP, CSLIP, PPP, ARP, RARP, MTU 以二进制数据形式在物理媒体上传输数据 ISO2110, IEEE802, IEEE802.2	2, 1

链路层也称作数据链路层或网络接口层, 包括操作系统中的设备驱动程序和计算机中对应的网络接口卡, 它们一起处理与电缆的物理接口细节。其功能相当于 OSI 的物理层和链路层的功能, 完成网络数据底层帧的形成和收发。

网络层主要负责在互联网上传输数据分组, 是TCP/IP参考模型中最重要的一层, 主要完成的功能是: 从底层来的数据包要由它来选择继续传给其他网络结点或是直接交给传输层; 对从传输层来的数据包, 要负责按照数据分组的格式填充报头, 选择发送路径, 并交由相应的线路发送出去。网络层协议主要定义了网际协议(IP)以及数据分组的格式, 它的主要功能是路由选择和拥塞控制。本层还包括ICMP协议(Internet Control Message Protocol, 网际控制报文协议)和IGMP协议(Internet Group Management Protocol, 网际群组管理协议)。

传输层的主要功能是负责端到端的对等实体之间进行通信。它与OSI参考模型的传输层功能类似, 也对高层屏蔽了底层网络的实现细节, 同时它真正实现了源主机到目的主机的端到端的通信。在TCP/IP协议族中, 有两个互不相同的传输协议: TCP(Transfer Control Protocol, 传输控制协议)和UDP(User Datagram Protocol, 用户数据报协议)。TCP为两台主机提供高可靠性的数据通信。它所做的工作包括把应用程序交给它的数据分成合适的小块交给下面的网络层; 确认接收到的分组, 设置发送最后确认分组的超时时钟等。由于运输层提供了高可靠性的端到端的通信, 因此应用层可以忽略所有这些细节。而UDP则为应用层提供一种非常简单的服务。它只是把称作数据报的分组从一台主机发送到另一台主机, 但并不保证该数据报能到达另一端。任何必需的可靠性必须由应用层来提供。

应用层是TCP/IP协议族的最高层, 它包含了所有OSI参考模型中会话层、表示层和应用层这些高层的协议的功能。

3.4.2 TCP/IP 协议的工作流程及其数据帧格式

一般主机收到一个以太网数据帧时，数据就开始从协议栈中由底向上升，同时去掉各层协议加上的报文首部。每层协议都要去检查报文首部中的协议标识，以确定接收数据的上层协议。具体流程如下：

- 1. 在源主机上，应用层将一串应用数据流传递给传输层。
- 2. 传输层将应用层的数据流截成分组，并加上 TCP 报头形成 TCP 段，送交网络层。TCP 数据包格式见图 3-2。

00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
源端口号 source port																目标端口号 destination port															
顺序号 sequence munber																															
确认号 Acknowledgment munber																															
头部长度		保留 reserved				U	A	P	R	S	F	窗口大小 window																			
						R	C	S	S	Y	I																				
						G	K	H	T	N	N																				
						校验和 checksum																									
可选项 options																															
数据 data																															

图 3-2 TCP 数据包格式  
Fig.3-2 TCP packet format

报头基本长度是 20 字节。TCP 数据包是包含在一个 IP 数据报文中的<sup>[36]</sup>。

3. 在网络层给 TCP 段加上包括源、目的主机 IP 地址的 IP 报头，生成一个 IP 数据包，并将 IP 数据包送交链路层。IP 数据包格式见图 3-3。

00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
版本 version		报头长度 IHL		服务类型 type of service				总长度 Total length																							
标识 identification												标志 flags				段偏移量 fragment offset															
生存期 time to live		协议 protocol				头部校验和 header checksum																									
源地址 source address																															
目标地址 destination address																															
可选项 options																															
数据 data																															

图 3-3 IP 数据包格式  
Fig.3-3 IP packet format

IP数据包由一个头部和一个正文部分构成<sup>[37]</sup>。正文主要是传输的数据，我们主要来理解头部数据，可以从其理解到IP协议。IP头部由20字节的固定长度

和一个可选任意长度部分构成，IP数据包格式如图3-3所示，以大段点机次序传送，从左到右。

4. 链路层在其 MAC 帧的数据部分装上 IP 数据包，再加上源、目的主机的 MAC 地址和帧头，并根据其目的 MAC 地址，将 MAC 帧发往目的主机或 IP 路由器。

5. 在目的主机，链路层将 MAC 帧的帧头去掉，并将 IP 数据包送交网络层。

6. 网络层检查 IP 报头，如果报头中校验和与计算结果不一致，则丢弃 IP 数据包；若校验和与计算结果一致，则去掉 IP 报头，将 TCP 段送交传输层。

7. 传输层检查顺序号，判断是否是正确的 TCP 分组，然后检查 TCP 报头数据。若正确，则向源主机发确认信息；若不正确或丢包，则向源主机要求重发信息。

8. 在目的主机，传输层去掉 TCP 报头，将排好顺序的分组组成应用数据流送给应用程序。这样目的主机接收到的来自源主机的字节流，就像是直接接收来自源主机的字节流一样。

### 3.4.3 链路层 PPP 协议

因为在透传模块的设计中，GPRS拨号后，使用的是PPP协议与ISP进行链路层的连接，这里我们必须了解PPP协议。TCP/IP协议族中，链路层主要目的是为IP模块发送和接收IP数据报以及为ARP模块发送ARP请求和接收ARP应答等。PPP是适用于串行接口的链路层协议。

PPP (Point-To-Point Protocol)即点到点协议<sup>[38]</sup>。PPP规范由RFC1661定义，是为同等单元之间传输数据包这样的简单链路而设计的。这种链路提供全双工操作，并按照顺序传递数据包。PPP为基于各种主机、网桥和路由器的简单连接提供一种共通的解决方案。

PPP主要由3大部分构成：（1）在串行线路中对上层数据包的封装；（2）用于建立、配置和检测数据链路连接的控制协议(LCP)；（3）用于建立和配置不同网络层协议的网络控制协议（NCP）协议族。

PPP封装提供了不同网络层协议，同时通过统一链路的多路技术。通过精心设计PPP封装，使其保持对常用支持硬件的兼容性。为了支持高速的执行，默认的封装只使用简单的字段，多路分解只需要对其中的一个字段进行检验。默认的头和信息字段落在32位边界上，尾字节可以被填补到任意的边界。

为了增加协议的灵活性，PPP提供了链路控制协议(Link Control Protocol)，

缩写为LCP。LCP用于就封装格式选项自动的达成一致、处理数据包大小的变化、探测回路反馈链路、其他普通的配置错误以及终止链路。分配和管理IP地址是一个棘手的问题，即使在LAN环境中，也非常困难。在PPP中，这些问题由一族网络控制协议(Net Control Protocol)，缩写为NCP的协议来处理，每一个协议管理着各自的网络层协议的特殊需求。

为了通过点对点链路建立通信，PPP链路的每一端，必须首先发送LCP包以便设定和测试数据链路。在链路建立之后，对方才可以被认证。然后，PPP必须发送NCP包以便选择和设定一个或更多的网络层协议。一旦每个被选择的网络层协议都被设定好了，来自每个网络层协议的数据报就能在链路上发送了，链路将保持通信设定不变，直到外在的LCP和NCP关闭链路或者是发生一些外部事件。

PPP协议规定了针对每一种网络层协议都有相应的网络控制协议，并用它们来管理各个协议不同的需求。

PPP协议为串行链路上传输的数据报定义了一种封装方法，它基于高层数据链路控制(HDLC)标准。PPP数据帧的格式如表4—2所示。

表 3-2 PPP 数据帧格式  
Tab.3-2 Format of PPP datagram

标志 7E	地址 FF	控制 03	协议	数据(<1500字节)	CRC	标志 7E
----------	----------	----------	----	-------------	-----	----------

PPP帧以标志字符 01111110 开始和结束。地址字段长度为 1 字节，内容为标准广播地址 11111111。控制字段为 00000011。协议字段长度为 2 个字节，其值代表其后的数据字段所属的网络层协议，如：0x0021 代表 IP 协议，0xC021 代表 LCP 数据，0x8021 代表 NCP 数据等。数据字段包含协议字段中指定的协议的数据报，长度为 0~1500 字节。CRC 字段为两个字节，是整个帧的循环冗余校验码，用来检测传输中可能出现的数据错误。即使使用所有的帧头字段，PPP 协议帧也只需要 8 个字节就可以形成封装。如果在低速链路上或者带宽需要付费的情况下，PPP 协议允许只使用最基本的字段，将帧头的开销压缩到 2 个或 4 个字节的长度，这就是所谓的 PPP 帧头压缩。

一次完整的 PPP 回话过程包括四个阶段：链路建立阶段、确定链路质量阶段、网络层控制协议阶段和链路终止阶段。

链路建立阶段：PPP 通信双方用链路控制协议交换配置信息，一旦配置信息交换成功，链路即宣告建立。配置信息通常都使用默认值，只有不依赖于网络控制协议的配置选项才在此时由链路控制协议配置。值得注意的是，在链路

建立的过程中，任何非链路控制协议的包都会被没有任何通告地丢弃。

**链路质量确定阶段：**这个阶段在某些文献中也称为链路认证阶段。链路控制协议负责测试链路的质量是否能承载网络层的协议。在这个阶段中，链路质量测试是 PPP 协议提供的一个可选项，也可不执行。同时，如果用户选择了验证协议，验证的过程将在这个阶段完成。PPP 支持两种验证协议：PAP (Password Authentication Protocol，密码验证协议) 和 CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol，握手鉴权协议)。

**网络层控制协议阶段：**PPP 会话双方完成上述两个阶段的操作后，开始使用相应的网络层控制协议配置网络层的协议，如：IP、IPX 等。

**链路终止阶段：**链路控制协议用交换链路终止包的方法终止链路。引起链路终止的原因很多，如载波丢失、认证失败、链路质量失败、空闲周期定时器期满或管理员关闭链路等。

两种验证机制共同的特点就是简单，但简单的协议通常都有其他方面的不足，最突出的便是安全性较差。一方面：口令验证协议的用户名/验证过程在 PPP 协议中为可选项。在连接建立后进行连接者身份验证的目的是为了防止有人在未经授权的情况下成功连接，从而导致泄密。PPP 协议支持两种验证协议：PAP 和 CHAP。PAP 的原理是由发起连接的一端反复向认证端发送用户名/口令对，直到认证端响应以验证确认信息或者拒绝信息。CHAP 是用三次握手的方法周期性地检验对端的节点。其原理是：认证端向对端发送“挑战”信息，对端接到“挑战”信息后用指定的算法计算出应答信息然后发送给认证端，认证端比较应答信息是否正确从而判断验证的过程是否成功。如果使用 CHAP 协议，认证端在连接的过程中每隔一段时间就会发出一个新的“挑战”信息，以确认对端连接是否经过授权。这口令以明文传送，很容易被窃取。另一方面：如果一次验证没有通过，PAP 并不能阻止对端不断地发送验证信息，因此容易遭到强制攻击。

CHAP 的优点在于密钥不在网络中传送，不会被窃听。由于使用三次握手的方法，发起连接的一方如果没有收到“挑战信息”就不能进行验证，因此在某种程度上挑战握手协议不容易被强制攻击。但是，CHAP 中的密钥必须以明文形式存在，不允许被加密，安全性无法得到保障。密钥的保管和分发也是 CHAP 的一个难点，在大型网络中通常需要专门的服务器来管理密钥。

由于移动梦网的 GGSN 与 GPRS 模块通信时遵循 PPP 协议。所以要在终端系统中也实现一部分 PPP 协议才能与之对话。GPRS 模块在拨号后首先要与 GPRS 网关进行通信链路的协商，即协商点到点的各种链路参数配置。协商过

程遵守 LCP(Link Control Protocol, 链路控制协议)、PAP 和 IPCP 协议。

### 3.4.4 PPP 协议的实现

由于移动梦网的 GGSN 与 GPRS 模块通信时遵循 PPP 协议, 所以要在单片机中也实现一部分 PPP 协议才能与之对话。GPRS 模块在拨号后首先要与 GPRS 网关进行通信链路的协商, 即协商点到点的各种链路参数配置。协商过程遵守 LCP (Link Control Protocol)、PAP (Password Authentication Protocol) 和 IPCP (Internet Protocol Control Protocol) 等协议<sup>[39]</sup>。其中 LCP 协议用于建立、构造、测试链路连接; PAP 协议用于处理密码验证部分; IPCP 协议用于设置网络协议环境, 并分配 IP 地址。协商机制用有限状态机的模型来实现。一旦协商完成, 链路已经创建, IP 地址已经分配就可以按照协商的标准进行 IP 报文的传输了。根据应用的不同, IP 报文中可以携带 UDP 报文, 也可以是 TCP 或 ICMP 报文。数据传输完成之后, 单片机会向 GGSN 发送 LCP 的断开连接报文, 以终止网络连接。

单片机的串口中断接收程序首先以包起始和结束符来判断是否有完整的 PPP 包, 并对 PPP 包的内容进行校验, 以确定数据包的完整性和正确性。然后, 在主循环中进入 PPP 报文解析模块。

登录 GGSN 的过程: 系统的一个难点是单片机登陆 GPRS 网关 (GGSN) 并与网关通过 LCP、PAP、IPCP 协议进行协商的过程。LCP、PAP 与 IPCP 协议的帧结构大同小异, 最常用的为请求 (REQ)、同意 (ACK) 和拒绝 (NAK) 三种帧。单片机与 GGSN 各为一方进行协商, 任何一方都可以发送 REQ 帧请求某方面的配制, 另一方觉得配置不能接受会回应 NAK 帧, 如果可以则回应 ACK 帧。为了节省资源, 我们只处理这三种数据帧, 其它链路问题都由单片机在程序控制下自己重新拨号解决。

协商过程大致描述如下: 在拨号成功连接后, GGSN 首先会返回一个 PAP REQ 数据帧。我们发送一个空 LCP REQ 帧, 以强迫进行协议协商阶段。随后, GGSN 发送 LCP 设置帧, 我们拒绝所有的设置并请求验证模式。GGSN 选择 CHAP 或 PAP 方式验证, 我们只接受 PAP 方式。然后, 进行 PAP 验证用户名和密码过程, 在 GPRS 中用户名与密码都为空, 如果成功, GGSN 会返回 IPCP 报文分配动态 IP 地址。此时, 就完成了与 GGSN 的协商过程。

协商完成后进入 IP 数据报通信阶段。此时, 单片机向 GGSN 发送的所有包含 IP 报文的 PPP 报文都会被传送给 Internet 网中相应的 IP 地址; 而远端所有向单片机 IP 地址发送的报文也都会经 GPRS 网传送到单片机上, 从而完成

单片机与远程主机通过互联网的数据传输。

### 3.5 GPRS 无线透传模块 MC55

目前,用于工业系统的 GPRS 数据传输模块有很多,比如西门子的 TC35i、MC55,索尼-爱立信的 GR47、GR64 等。市场上关于 GPRS 的应用主要使用的是索尼-爱立信的 GR47 与西门子的 MC55 模块。西门子 MC55 无线模块重量轻,仅 5.5 克。尺寸小,仅为  $35 \times 32.5 \times 2.95 \text{mm}$ 。该模块结合语音、数据传输、短信服务及 FAX 功能,覆盖了当今全球所有 GSM/GPRS 网络的三频模块 (900 MHz、1800MHz 和 1900MHz)。最大传输速率可以达到 85.6Kbps,特别适用于数据的监测和传输。根据系统要求及性能价格比,在本系统中 GPRS 模块选用 MC55 作为 GPRS 通讯模块,来达到通过 GPRS 承载业务传送数据的目的。

#### 3.5.1 透传模块 mc55 的结构

MC55 模块主要由 GSM 基带处理器、GSM 射频部分、电源 ASIC 电路、FLASH 存储器、SRAM 以及 ZIF 连接器和天线接口组成<sup>[40]</sup>。MC55 模块的结构如图 3-4 所示。

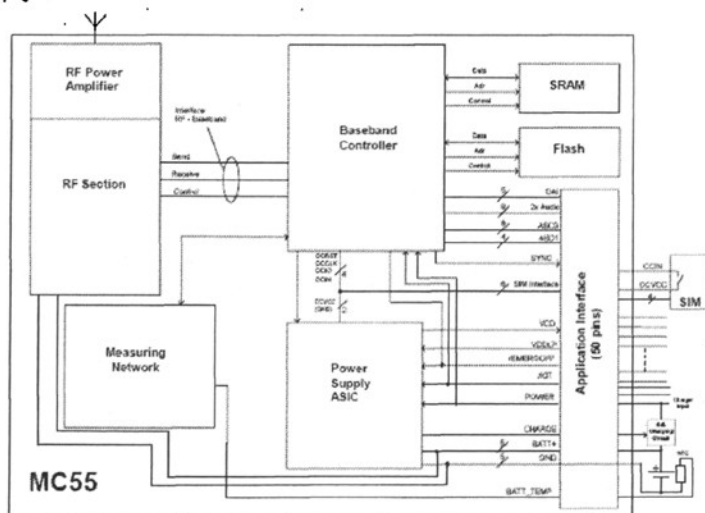


图 3-4 MC55 模块结构图

Fig.3-4 Structure diagram of MC55 module

MC55 有 50 个引脚作为应用接口之用,这些接口包括:电源接口、串行接口、音频接口、SIM 卡接口、控制信号接口等。本系统在对 MC55 进行配置时使用了 MC55 的串行接口。MC55 具有两个异步串行接口 ASC0 和 ASC1,

MC55 的串行接口如图 3-5 所示。

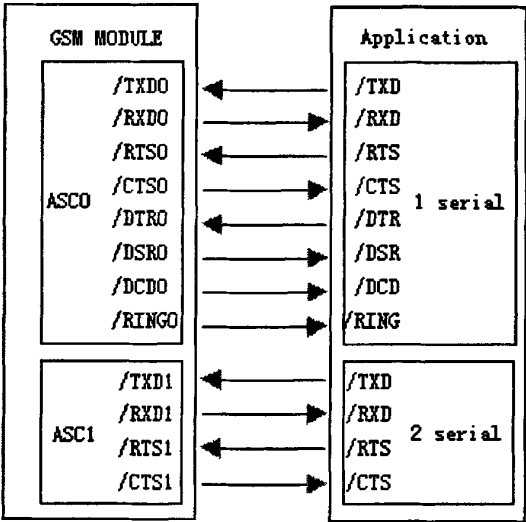


图 3-5 MC55 串行接口图  
Fig.3-5 MC55 serial interface figure

1. ASC0: 8 线串行接口，包括数据线/TXD0 和/RXD0、状态线/RTS0、/CTS0 和控制线/DTR0、/DSR0、/DCD0、/RING0。其中比较重要的一根线是 /RING0，它用来显示呼入信号以及结果代码 URC，它还提供脉冲给上位机。ASC0 主要用于语音呼叫、CSD 呼叫、传真等，还可以通过 AT 指令控制 MC55。

2. ASC1: 4 线串行接口，包括数据线/TXD1 和/RXD1、用于硬件握手的 /RTS1/CTS1。ASC1 用于语音叫、对 MC55 进行 AT 指令控制，不适用于 CSD 呼叫、传真等。当 ASC0 处于复用模式时，ASC1 不可用。

MC55 的 SIM 接口是标准的接口。有 6 个引脚。如表 4-3 所示。

表 3-3 MC55 的 SIM 接口  
Tab.3-3 SIM interface of MC55

管脚	说明
CCGND	SIM 卡独立的地，用来提高 EMC 性能
CCIO	串行数据线，输入\输出
CCCLK	卡的时钟，可以设置不同的时钟频率
CCVCC	MC55 内部电源模块为 SIM 卡提供的电源
CCRST	卡的重启信号
CCIN	输入，用来判别是否有 SIM 卡插入，CCIN 输入是 GSM11.11 强制要求的。为了保障运行中移除 SIM 卡时的安全性。



### 3.5.2 选用 mc55 的优点

MC55 内嵌的 TCP/IP 协议栈, 编程简单, 通过了 GSM Phase 2+标准。与 Internet 的连接方便无比。MC55 应用范围非常广, 无线抄表、无线监控、GPS 车载终端、无线公话、无线 POS 机、无线 PDA、无线数传等等。

本系统选择 mc55 作为 GPRS 模块, 因为它与目前被广泛使用的索尼-爱立信 GR47 模块相比, 具有自身的优点。

1. MC55 可以支持 TCP、UDP、HTTP、FTP、SMTP、POP3; GR47 只支持 TCP 和 UDP。

2. MC55 可以同时开 3 个 TCP 或者 UDP 连接, GR47 只支持开 1 个 TCP 或 UDP 传输通道。

3. MC55 可以做为 TCP 的服务器使用, 可以支持三个以上的客户端同时连接。

4. MC55 有 5K 的 Buffer 用于 GPRS 数据传输, 最大数据包长度为 1.5k。GR47 的 Buffer 大概有 2K, 最大包长只有 1K。在信号差时, MC55 可以缓存更多的数据。

5. GR47 通过 AT 指令建立 TCP 传输通道后, 以透明方式实现数据传输。需要用 DTR 管脚在数据传输模式和 AT 命令控制模式之间切换。MC55 以 AT 命令方式实现数据传输, 每次传输都会有结果状态返回, 用户无需切换状态。

6. GR47 实际只有一个全双工的串口可以使用, 而 MC55 有两个串口: GR47 有三个串口, 但是用户可以使用的全双工的串口只有一个, 因为其中有一个是作为 GPRS 信号输入的, 另外一个做嵌入式开发调试信息输出。

MC55 提供两个全双工串口, 可以实现两个 TCP 通道的同时传输, GPRS 与短信或语音状态自动切换, 而 GR47 需要硬件管脚 DTR 和 AT 命令组合使用来切换状态。

## 3.6 本章小结

为了完成基于 GPRS 的氧化锌避雷器远程在线监测系统的研制, 首先需要对 GPRS 总体结构与工作原理有所理解。GPRS 网络主要是重叠在 GSM 网上, 引入了 3 个新的组件 PCU、SGSN 和 GGSN, 通过分组进行数据交换的网络。为了编写软件, 使数据通信得以实现, 本章对 TCP/IP 协议族及 PPP 协议进行了研究。包括数据包格式及数据通信的过程。

最后, 本章对实现通信的具体器件 MC55 的结构进行了研究, MC55 的优点就是功能强大, 内嵌 TCP/IP 协议栈, 编程简单, 应用范围广。

## 第4章 MOA 数据采集系统硬件及软件的设计

### 4.1 数据采集系统总体构成

现场采集部分主要完成氧化锌避雷器泄漏电流大小的检测，首先通过信号取样单元将氧化锌避雷器全泄漏电流信号、参考电压信号(PT 二次侧电压)、计雷击次数的信号送到系统检测单元(C8051F020 为核心)，而系统检测单元完成信号的采样、计算、结果传送等功能。数据采集系统结构图如图 4-1 所示。

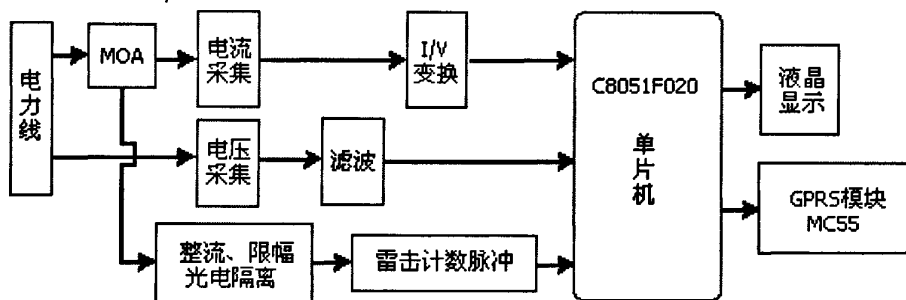


图 4-1 数据采集系统结构图

Fig.4-1 Data collecting system structure diagram

由图 4-1 可以看出，MOA 的全泄漏电流信号经过小电流传感器的采集，经过滤波、放大和 I/V 转换，电流值送给 A/D 转换器，将连续的电信号离散化。

从 PT 二次侧采集的电压信号经滤波等变换后和电流信号送入 C8051F 进行 A/D 转换，A/D 转换值送入微处理器参与运算处理，处理的过程中考虑到相间干扰的影响需进行程序上的修正，通过计算得出阻性泄漏电流的大小。

雷击计数电路把过压脉冲信号送给微处理器进行采集，进行累加计算。

将阻性泄漏电流的大小和雷击数计算结果由液晶模块显示出来，最后将结果通过 GPRS 透传模块 MC55 进行远程传输。

### 4.2 现场采集部分各功能电路的设计

#### 4.2.1 微处理器的选择

微处理器的特点在于其经常要处理大量的输入和输出信号，而且要实现高精度和实时控制，因此必须能够同时进行多种独立的操作。为了满足这些要求，微处理器必须具有高速运算，高速实时输入和输出以及多中断响应等特性。本监测系统选用 100 引脚的主处理器 C8051F020 为核心单片机的监测系

统。同传统 AT89C51 相比, C8051F 具备多项优势, 包括采用 CIP-51 内核大力提升 CISC 结构运行速度、I/O 从固定方式到交叉开关配置、从引脚复位到多源复位, 以及低功耗(采用 3V 而非 5V 供电)等。C8051F 单片机被称为智能产品高速路上微处理器中的奔驰。其应用领域涵盖三相电表、电力系统监控、智能仪器仪表和医疗仪器等多种应用。C8051F020 单片机引脚结构图如图 4-2 所示。

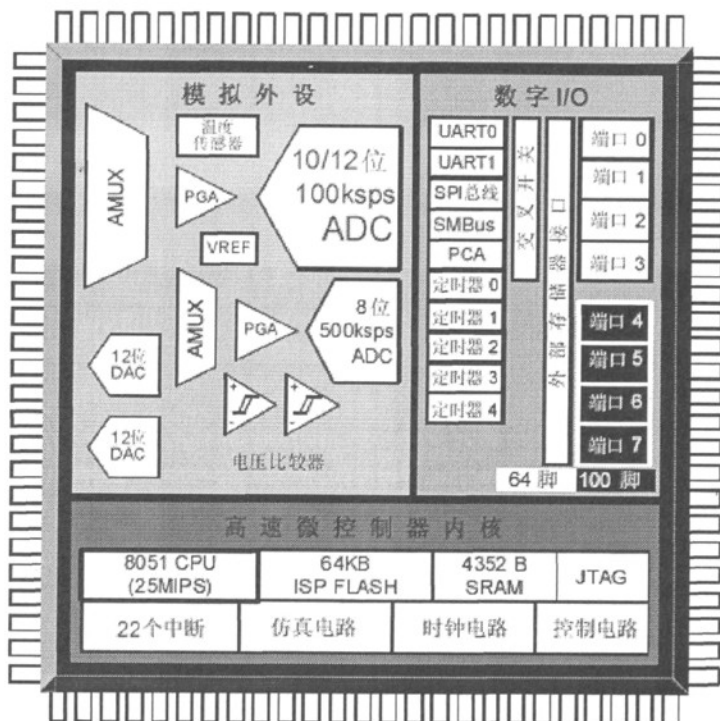


图 4-2 C8051F020 引脚结构图

Fig.4-2 C8051F020 pin structure

C8051F020 的内部电路包括 CIP-51 微控制器内核及 RAM、ROM、I/O 口、定时/计数器、ADC、DAC、PCA、SPI 和 SMBus 等部件, 即把计算机的基本组成单元以及模拟和数字外设集成在一个芯片上, 构成一个完整的片上系统(SOC)<sup>[41, 42]</sup>。

C8051F020 单片机废除了机器周期的概念, 指令以时钟周期为运行单位。大大提高了指令运行速度。与 8051 相比, 在相同时钟下指令信平均运行速度为原来的 9.5 倍。

I/O 端口的配置方式: C8051F020 拥有 8 个 8 位的 I/O 端口, 其中低 4 个 I/O 端口除可作为一般的通用 I/O 端口外, 还可作为其他功能模块的输入或输

出引脚，它是通过交叉开关配置寄存器 XBR0、XBR1、XBR2 选择并控制的，可将片内的计数器/定时器、串行总线、硬件中断、比较器输出及其它的数字信号配置为在端口 I/O 引脚出现，这样用户可以根据自己的特定需要选择所需的数字资源和通用 I/O 口。数字交叉开关是一个比较大的数字开关网路，P1MDIN 用于选择 P1 的输入方式是模拟输入还是数字输入。

内部功能：C8051F020 内部带有数据采集所需的 ADC 和 DAC，其中 ADC 有两个，一个是 8 路 12 位逐次逼近型 ADC，可编程转换速率，最大为 100 KS/s。可通过多通道选择器配置为单端输入或差分输入。内有可编程增益放大器 PGA 用于将输入的信号放大，提高 A/D 的转换精度。另一个是 8 路 8 位 ADC，可编程转换速率最大为 500KS/s，另外还有 2 个 12 位的 DAC，用于将 12 位的数字量转换为电压量，可产生连续变化的波形，两路信号可同步输出。

此外，C8051F020 外设还增添了三个串行口。可同时与外界进行串行数据通信，SMBus 兼容于 I<sup>2</sup>C 串行扩展总线，SPI 串行扩展接口，两个增强型 UART 串口。C8051F020 具有基于 JTAG 接口的在系统调试功能，片内的调试电路通过 JTAG 接口可提供高速、方便的在系统调试。根据上述特点，我们采用 C8051F020 为核心单片机的监测系统。

## 4.2.2 电流传感器与电压传感器的选择

### 1. 电流传感器的选择

在数据采集领域中，中信号与大信号的采集方法及处理方法已经比较成熟，只有小信号的采集与数据处理并无一种固定的模式，因其信号本身微弱，常常会淹没在外界干扰及自身产生的噪声之中，因此，它的采集与分离十分困难。而氧化锌避雷器的泄漏电流在正常情况下仅 0.2mA~2mA<sup>[43]</sup>，是一种小电流，要准确的采集必须进行细致的选材和精心的设计，才能够符合要求。目前，电流传感器有多种类型，如霍尔传感器、无磁芯电流传感器、高导磁非晶合金多谐振荡电流传感器、电子自旋共振电流传感器等。本文在设计中采用一匝穿芯式的小电流互感器进行电流取值。

小电流传感器采用零磁通电流传感器，这种传感器的特点是一次侧单匝穿心。由于采集的是避雷器的泄漏电流，要串联在避雷器接地回路中，所以一次侧不能采取多匝的电流传感器，否则来雷电时会产生很大的阻抗，使雷电不能很好的释放到大地，造成危险。零磁通传感器自身损耗非常小，精度一般可做到 0.05%，线性度可达 0.02%，相差只有 1°。这种传感器还有一个特点是二次侧

提供的电流很小，这么小的电流要进行放大，需要选择低失调电流、低温漂的高性能运算放大器，电路可以采用跨阻放大电路。

由于空间电磁场干扰，提高信号的提取精度时，对CT的制作要求和参数选择要求很高，相应的制作工艺复杂，成本较高。采用最新的超微晶材料作环形铁芯，优化磁路设计，选择合适的铁芯截面积和环形窗口尺寸。设计为环形铁芯穿心式结构，传感器的接入不改变被测设备原有的接线方式，同时测量电路与一次电路用高绝缘材料隔离，两者之间没有电的直接联系。电流传感器连接图如图4-3所示。

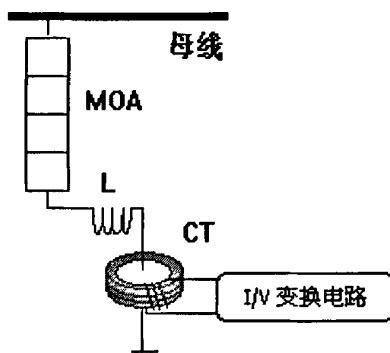


图 4-3 电流传感器接线图

Fig.4-3 Wiring diagram of current sensor

泄漏电流经小电流传感器原边(即避雷器接地下引线)入地，避雷器受雷击或操作过电压动作时，放电电流很大但无工频续流，尽管动作电流上百安，但持续时间不超过毫秒级<sup>[44]</sup>。虽然这么大的电流通过小电流传感器后会使其铁心饱和而不至于使二次侧出现很高的电压，但为避免过大电流流过传感器，同时使放电动作时计数器记数，采用在小电流互感器的一次回路中串入一个感抗，当避雷器动作时，由于电感的作用阻止瞬时大电流流过互感器回路。感抗量的大小选择十分重要，如果接入的感抗过大，虽然能阻止雷击电流，但在避雷器正常运行时分流效果差，感抗量的选择根据相应的计数器的阻值相匹配，重点考虑不影响取样的分流效果，感抗量尽可能小。一般避雷器放电计数器的等效阻抗在100欧姆以下。

为了能够准确的反映被测 MOA 的泄漏电流，对小电流传感器的基本要求如下：

- (1) 能够适应测量小电流(mA 级)的要求，灵敏度高，同时二次信号应尽可能的大。
- (2) 在测量范围内线性度好，输出波形不畸变，输出信号与被测信号间的

比值差、角差小，并且其差值稳定，不随其他因素的变化而变化。

(3) 工作稳定性好，温度系数小且稳定，结构简单，体积较小，具有电磁屏蔽功能，抗干扰能力强，电磁兼容性好。

## 2. 电压传感器的选择

根据监测原理需要取样 MOA 运行的相电压，相电压的取样可以采用常规的方式从 PT 的二次侧提取。这里选用了西安高压研究所的 YXY 电流型精密微型电压互感器，在零负载时其比值差为 $\pm 0.1\%$ ，相位差为 $\pm 5^\circ$ ，额定一次电流 3 毫安，二次电流 1 毫安，隔离耐压 4000V，工作温度为 $-50^\circ\text{C} \sim +65^\circ\text{C}$ 。所设计的电压传感器接线图如图 4-4 所示。

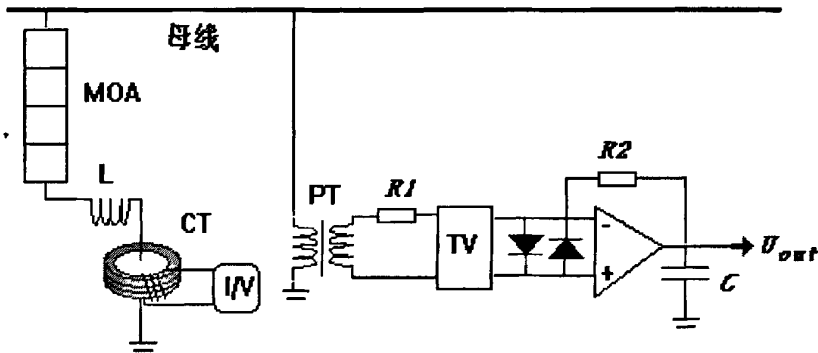


图 4-4 电压传感器接线图

Fig.4-4 Wiring diagram of voltage sensor

被测电压  $U_m$ （二次侧电压通常为 100V）通过限流电阻  $R_1(50k)$  的限流，产生的范围在  $0\text{mA} \sim 2\text{mA}$  电流通过微型电压互感器，互感器感应输出相同的  $0\text{mA} \sim 2\text{mA}$  电流，通过前置有源放大器，可以调节反馈电阻  $R_2$  值在输出端得到所要求的电压输出， $R_2$  等于  $1.5k$  时输出电压  $U$  为 $\pm 3\text{V}$ 。电路中二极管采用  $1N4148$  起保护作用，电容  $C=1000\text{pF}$  为抗干扰滤波电容。

### 4.2.3 泄漏电流信号 I/V 变换电路的设计

这里需要将微弱电流转换成对应比例的电压信号，实际测试电流在  $0 \sim 20\text{mA}$  之间。由于输出信号十分微弱，在传输过程中可能会被噪声淹没，因此需要将电信号适当的放大。放大电路的主要作用包括<sup>[45]</sup>：

- (1) 将微弱的信号进行放大，增强功率；
- (2) 抑制干扰和降低噪声；
- (3) 采样信号有足够的电平，及时并且不失真。

本文设计的放大电路采用运算放大器进行组合，实现信号的线性放大。



片机的 P0.4 口，当计数输入脉冲发生高到低的负跳变时，计数器加 1；计数值送至单片机进行在原来基础上的累加，结果送至 GPRS 模块。

4.2.5 无线通信透传模块 MC55 外围电路的设计

MC55是一个50芯接口的GPRS模块<sup>[47]</sup>，接线如图4-8所示，其引脚为：

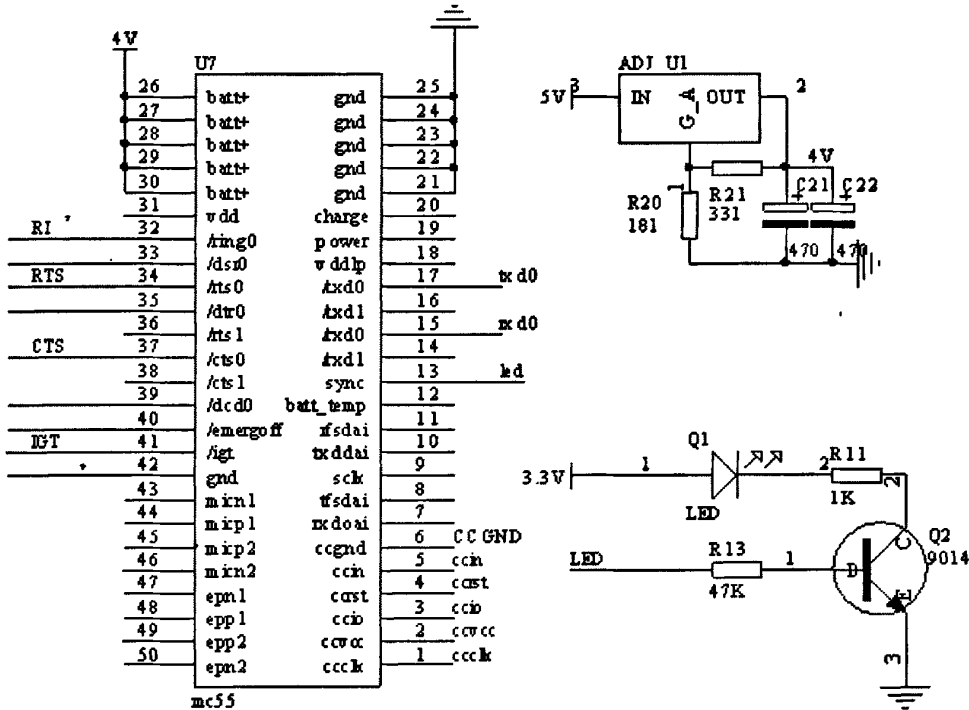


图 4-8 MC55 外围电路原理图  
Fig.4-8 MC55's peripheral circuits

1. EMERG OFF 输入：一般不用，要用的话给其提供一个小于 3.2 秒的周期信号。
  2. IGT 输入：这个为启动信号，一定要连。发送相应的启动时序时，首先 IGT 引脚保持高阻态，通过 4V 直流电压给 MC55 加电，然后，当 BATT 引脚上的电压超过 3.0V 后，将 IGT 引脚拉低至少 100ms 的时间，同时应保持 BATT 引脚的电压不低于 3.0V，才能正确激活模块。
  3. TXD0 输入、RXD0 输出：注意串口的这两个引脚，是比较特殊的，因为他与通常所见的引脚方向是相反的；也就是 TXD0 对应模块是输入；RXD0 对应的时输出；所以布线时不能布反。
- GPRS 模块 MC55 和单片机之间的数据通信主要是通过端口 TXD0 与 TXD 之间，RXD0 与 RXD 之间的数据传输来完成。其中 GPRS 模块上的 TXD0 口



是用于接收从单片机传来的数据，而单片机上的 TXD 端口是用于向 GPRS 模块传送数据的。GPRS 模块上的 RXD0 口是用于向单片机发送数据，单片机的 RXD 口则是用于接收从 GPRS 模块传输来的数据。

4. SYNC 输出：接个 LED，知道状态。

5. BATT+与 GND 分别接电源与地。由于该模块电源引脚有 5 个，且电压都是 3.3 V~4.8 V，因此这里将 5 个引脚连在一起，直接接到外部电源上。

#### 4.2.6 SIM 卡电路的设计

在 MC55 的基带处理器上有一个综合 SIM 接口，直接接线到主机接口(端到端连接器)，用于连接到外部的 SIM 卡座。这里接的 SIM 卡有 6 个引脚，SIM 卡接线图如图 4-9 所示。

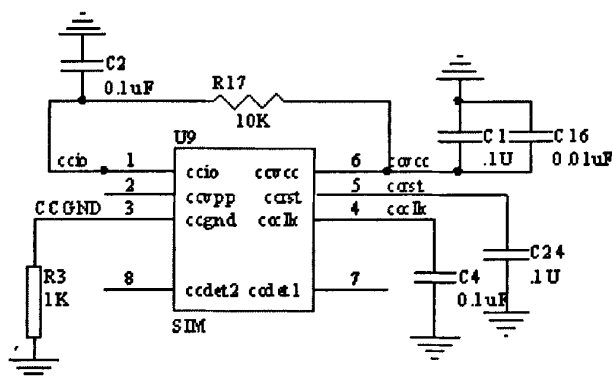


图 4-9 SIM 卡接口电路

Fig.4-9 Interface circuits of SIM card

CCCLK、CCVCC、CCIO、CCRST、CCIN 以及 CCGND 分别对应接在 MC55 的第 1 到第 6 个引脚上。模块的连接器和 SIM 卡座的引脚之间的距离不要超过 20cm。为了达到最佳的效果，在 SIM 支架下敷设一层铜隔离网，该层敷铜与 SIM 卡的 CCGND 引脚相连。CCVCC 和 CCGND 之间的两个电容要离引脚尽量近，并且走线尽量阻抗低，以满足规范要求。

SIM 卡实际上是一张内含大规模集成电路的智能卡片，用来登记用户的重要数据和信息<sup>[48]</sup>。用户全部资料几乎都存储在 SIM 卡内，因此 SIM 卡又称为“用户资料识别卡”。SIM 卡有大卡和小卡之分，小卡称为“插入式 SIM 卡”，就是大卡上带的那一块芯片。

#### 4.2.7 电源电路的设计

电源系统为整个系统提供能量，是整个系统工作的基础，具有极其重要的

地位，但却往往被忽略。如果电源系统处理得好，整个系统的故障往往减少了一大半。设计电源系统的过程实质是一个权衡的过程，主要考虑如下因素：电源电压、功率、电磁兼容、体积和成本。电源电路的设计如图4-7所示。

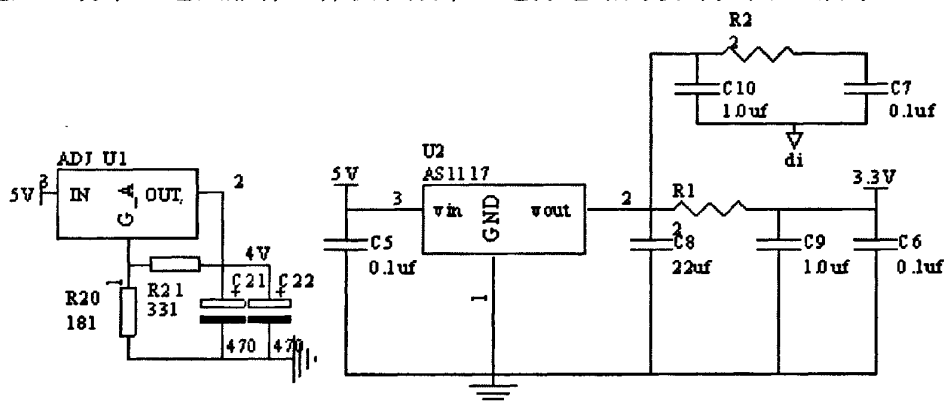


图4-7 供电电源原理图

Fig.4-7 power supply schematic diagram

本设计单片机系统的电源输入为：数字3.3V、模拟3.3V。另外，MC55的供电范围是3.3V~4.8V，按模块硬件描述要求我们取4V供电。单片机系统在3.3V上消耗的电流与外部条件有很大的关系，这里估算电流不超过200mA，这样，电源系统3.3V能够提供700mA电流。

因为系统对这两组电压的要求比较高，其功耗不是很大，系统对功耗的要求也不是很高，反倒对噪声很敏感。所以不适合用开关电源，AS1117为一个低功耗正向电压调节器，有很低的静态电流，在满负载时其压差仅为1.1V。当电流减少时，静态电流随负载变化，并提高效率。因此，系统中的3.3V电源，采用了AS1117进行设计。

前面提到过，系统中的3.3V电源有数字电源和模拟电源之分，取决于系统对模拟应用要求的高低。如果没有模拟资源的使用，那么就不用区分数字电源和模拟电源了。从硬件系统框图上可以看到，在电路设计上有相应的考虑。但要求不是很高，因此，采用了一个比较折中的处理方法：没有设计单独的数字和模拟电源，而是通过磁环吸收数字系统的噪声得到模拟电源。同样的，电力参数测量的电路系统中，同样模拟和数字的混合电路，也做了同样的处理。

为了减少数字噪声对模拟电路的影响，在印制板布线时数字电路和模拟电路最好分开，能不互相交叉就最好了，电源线和地线在各自的主滤波电容输出点点点分离，在就近的地方连接。当然，作为一个现场工作的终端设备，需要一定的交互功能，指示系统工作状态，电源指示是必不可少的。

4.3 数据采集系统的软件设计

硬件的各个模块是整个系统的基础，软件是整个系统的核心，是联系各个硬件功能模块使之正常工作的纽带。软件是否完善直接影响系统能否正常工作以及监测效果的好坏。软件设计应该满足：(1) 实时性：系统的程序设计应具有执行效率高、占用空间小、实时性好等特点。(2) 针对性：要保证监测系统工作在最佳状态，具有较好的控制效果。(3)灵活性和通用性：当以后的具有结构相同或相类似的监测系统时，程序可以移植。

4.3.1 采集系统主程序的设计

MOA数据采集系统采用模块化结构设计并采用C语言编制。采集系统主程序流程图如图4-10所示。

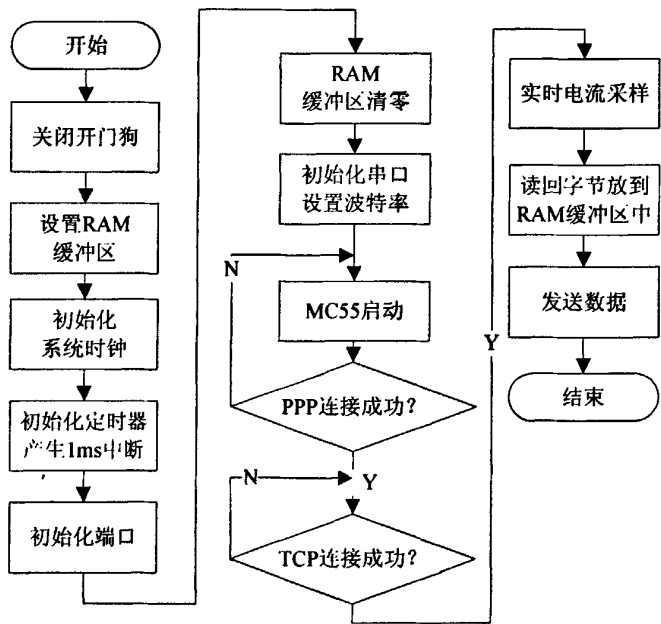


图4-10 系统主程序流程图  
Fig.4-10 Flow chart of System main program

C8051F020编程不能离开初始化设置。一般都要对I/O口、中断、串口、晶振等初始化<sup>[49]</sup>。本文监控主程序首先对各接口器件进行初始化，分别调用其子程序模块，然后进行远程连接，待连接成功后，进行数据采集，并将采集的数据通过透传模块发送出去。

4.3.2 初始化系统时钟子程序

C8051F020有内部晶振，内部晶振精度不高，一般电路都使用外部晶振。

外部振荡器需要一个外部谐振器、并行方式的晶体、电容或RC网络连接到XTAL1、XTAL2引脚。必须在OSCXCN寄存器中为这些振荡源中的某一个配置振荡器电路。初始化晶振主要是OSCXCN和OSCICN两个寄存器的设置。初始化系统时钟程序流程图如图4-11所示。

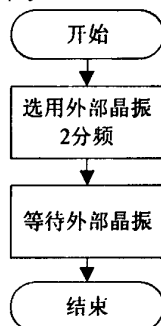


图 4-11 初始化系统时钟子程序流程图

Fig.4-11 Subroutine flow chart of initialization system clock

### 4.3.3 初始化定时器子程序

C8051F020 内部有 5 个计数器/定时器：其中三个 16 位计数器/定时器，还有两个 16 位自动重载定时器可用于 ADC、SMBus、UART1 或作为通用定时器使用。这些计数器/定时器可以用于测量时间间隔，对外部事件计数或产生周期性的中断请求。初始化定时器程序流程图如图 4-12 所示。

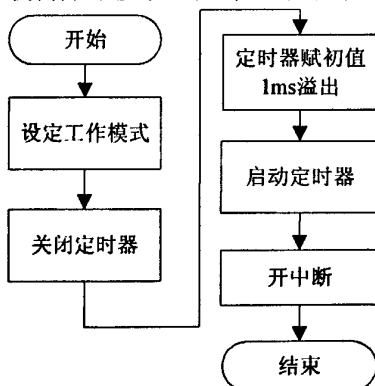


图4-12 初始化定时器子程序流程图

Fig.4-12 Subroutine flowchart of timer initialization

### 4.3.4 初始化端口子程序

在初始化C8051F020的端口时，有的配置成（上拉）推挽模式输出，有配置成漏极开路，还有的为高阻值。一般对于准双向I/O，高电平驱动功能很弱，输出低电平时，电流的吸收能力较强。对于开漏输出：其实就是只提供低

电平。当输出1时，引脚呈现高阻态，一般需要加上拉电阻才能得到高电平。对于推挽输出：当引脚输出1时，相当于引脚直接与电源相连，所以能提供很强的驱动能力。若仅为输入时：当输出0时，引脚完全高阻态，更有效降低电流消耗。本程序采用上拉模式输出。初始化端口程序流程图如图4-13所示。

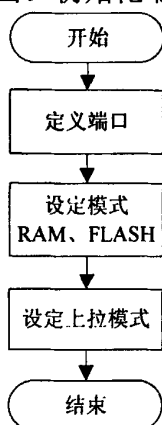


图4-13 初始化端口子程序流程图

Fig.4-13 Subroutine flowchart of port initialization

所谓推挽结构一般是指两个三极管分别受两互补信号的控制，总是在一个三极管导通的时候另一个截止。要实现线与需要用OC门电路。如果输出级有两个三极管，始终处于一个导通、一个截止的状态，也就是两个三极管推挽相连，这样的电路结构称为推拉式电路或图腾柱（Totem-pole）输出电路。推拉式输出级既提高电路的负载能力，又提高开关速度。

#### 4.3.5 初始化串口子程序

C8051F020 内部有二个增强型全双工 UART，具有硬件地址识别和错误检测功能。还有 SPI 总线、SMBus/I<sup>2</sup>C 总线。每种串行总线都完全用硬件实现，都能向 CIP-51 产生中断，因此很少需要 CPU 的干预。这些串行总线不“共享”定时器、中断或端口 I/O，所以可以使用任何一个或全部同时使用。初始化串口程序流程图如图 4-14 所示。

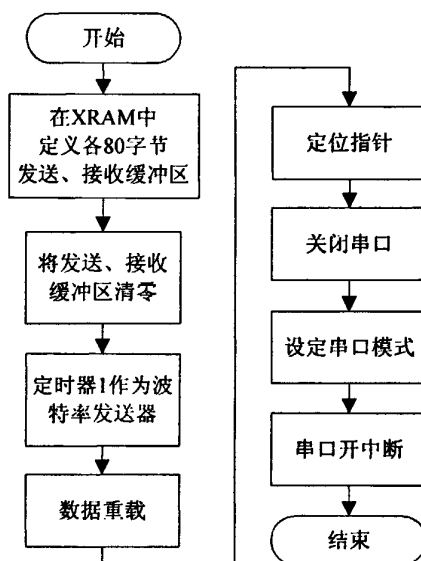


图4-14 初始化串口子程序流程图

Fig.4-14 Subroutine flowchart of serial port initialization

#### 4.3.6 连接 GPRS 网络子程序的设计

GPRS通讯模块MC55在使用时，需要进行通讯模块的初始化设置，校验用户名和密码，设置TCP/IP的地址与端口等。初始化时，需要MCU通过串行口按顺序给模块发送AT指令，设置模块及网络工作参数<sup>[50]</sup>。连接GPRS网络程序流程图如图4-15所示。

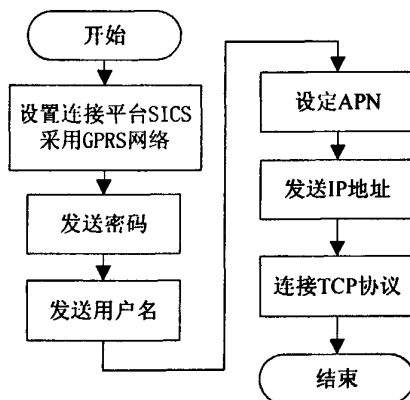


图 4-15 连接 GPRS 网络子程序流程图

Fig.4-15 Subroutine flowchart of connect GPRS network

所谓AT指令，即Attention，AT指令集是从终端设备(Terminal Equipment, TE)或数据终端设备(Data Terminal Equipment, DTE)向终端适配器(Terminal Adapter, TA)或数据电路终端设备(Data Circuit Terminal Equipment, DCE)发送

的。通过TA、TE发送AT指令来控制移动台(Mobile Station, MS)的功能,与GPRS网络业务进行交互。用户可以通过AT指令进行呼叫、短信、电话本、数据业务、传真等方面的控制。给模块发送AT指令顺序如下:

设置GPRS工作模式: `at^sics=0, conType, GPRS0`

设置用户名称: `at^sics=0, user, cms`

设置密码: `at^sics=0, passwd, gprs`

设置网络运营商: `at^sics=0, apn, cmnet`。公网默认值为cmnet, 专网由电信运营商分配

设置服务器地址及端口: `at^siss=1, address, "socktcp: IP地址: 端口号"`

打开端口, 连接TCP: `at^siso=1`

当模块收到以上AT指令后, 都返回“ok”, 初始化完成, 可进行数据收发。

#### 4.3.7 数据采样与数据读入子程序的设计

A/D转换可以有4种启动方式: 软件命令、定时器2溢出、定时器3溢出或外部信号输入。这种灵活性允许用软件事件、硬件信号触发转换或进行连续转换。一次转换完成后可以产生一个中断, 或者用软件查询一个状态位来判断转换结束。在转换完成后, 转换结果数据字被锁存到特殊功能寄存器中。ADC数据比较寄存器可被配置为当ADC数据位于一个规定的窗口之内时向控制器申请中断。ADC可以用后台方式监视一个关键电压, 当转换数据位于规定的窗口之内时才向控制器申请中断。数据采样与读入子程序如图4-16所示。

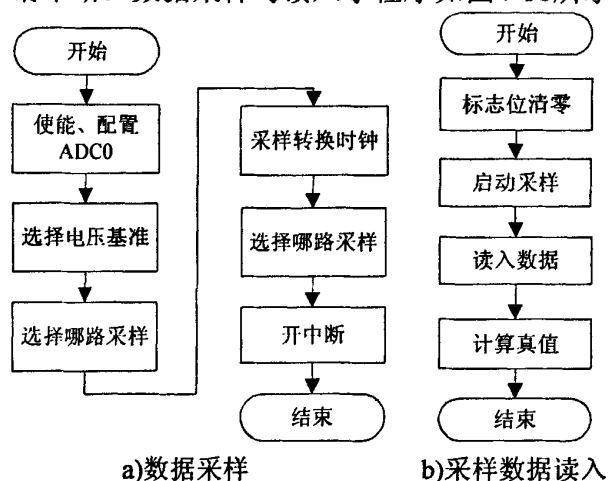


图 4-16 数据采样与读入子程序流程图

Fig.4-16 Subroutine flow chart of sampling and read data

### 4.3.8 数据接收与数据发送子程序的设计

通过 GPRS 收发数据，都是调用其相应的 AT 指令。

#### 1. 通过GPRS发送数据

通过GPRS发送数据，实际上是通过串行口把数据写入到GPRS通讯模块，然后由GPRS模块发送到指定的IP端口。发送时需要按照以下顺序进行操作：

写串口：at<sup>^</sup>sisw=1, 20 // 使用通道1，发送20字节的数据。

写串口：\*\*\*\*\*// 发送数据。

返回：<sup>^</sup>sisw: 1, 20, 20。

返回：ok// 发送成功。

#### 2. 通过GPRS接收数据

接收GPRS的数据，即接收已经连接上的服务器发来的数据，可以通过串行口从GPRS模块中读取，按以下顺序进行操作：

读串口：at<sup>^</sup>sisr=1, 10 //返回10字节的数据长度。

返回：ok//接收成功。

## 4.4 本章小结

下位机数据采集系统是整个基于GPRS的氧化锌避雷器远程在线监测系统的重要组成部分，也是设计的重点和难点。该采集系统的设计包括两个方面：硬件电路的设计与软件程序的设计。本章首先对该采集系统的硬件电路进行了设计，硬件电路依次的设计步骤为：微处理器的选择、传感器的选择、I/V变换电路、电流与电压信号采集电路、雷击电路、电源电路、MC55的外围电路、SIM卡接口电路、液晶显示电路。其次，本章对支持该硬件的相应软件进行了设计。程序设计的步骤依次为：看门狗设置、系统时钟初始化、定时器初始化、端口初始化、串口初始化、连接GPRS、采样、读取数据、发送数据、包含的头文件、项目说明。



## 第5章 远程监测中心系统的设计

整个远程在线监控系统分为下位机客户端数据采集系统和上位机端监控中心服务器。客户端软件主要是运行 C8051F020 单片机程序,采集避雷器的状态信息和控制 GPRS Modem 与监控中心建立连接和数据传输等功能。与监控中心通讯,是通过发送 AT 指令,与监控中心通信模块的 SOCKET 建立一条数据传输链路。前面已经介绍,这里不再重复。

监控中心服务器端由具有固定 IP 地址的计算机组成,实现计算机的 SOCKET 接口及现场终端通信功能,接收客户端发送来的数据包,并保存在数据库中;本章主要介绍监控中心服务器端的软件实现。

监控中心的软件设计主要包括远程的网络接入,数据的收发与数据库安全性管理。此外,针对不同的用户对象,还要有一些应用层次的设计。

监控中心软件的最主要功能是实现接收来自设备终端发送TCP协议的IP包,以实现与GPRS终端的IP协议通信,实现通信后,中心软件预留接口,针对不同类型的应用数据格式与协议,实现远程数据监控。中心软件的设计语言采用Microsoft公司的Visual Basic 6.0编程语言,VB6.0语言应用灵活功能强大,并对网络编程有强大的支持,VB6.0语言有着对底层操作的明显优越性。

Visual Basic 6.0是面向对象的可视化编程平台,提供了所有需要的用于设计、开发、试验、调试和发布应用程序的工具,可以实现用最少的代码开销编写出高效率的Windows应用程序<sup>[51]</sup>。Visual Basic 6.0具有强大的类封装能力,使得编程时完全不必像传统的Windows编程那样处理繁琐而复杂的Windows消息循环,只需编写相应的消息处理函数即可。在网络编程控件选项中提供了大量的用于网络编程的控件。利用其中的ServerSocket和ClientSocket控件可以很容易的在网络应用程序中和其他机器建立连接,并且允许从连接中读写信息。和这些组件关联的都是一个Socket对象,可以用来表示一个实际的Socket连接端点。Socket组件使用Socket对象来封装Socket服务器调用,这样就使得应用程序在不需要了解连接的细节或者Socket消息的管理的情况下能够建立连接。你可以使用Socket组件的属性、方法和事件句柄,来编写自己所需要的连接过程。

### 5.1 WinSock 编程技术

#### 5.1.1 套接字 Socket 的特点

套接字(Socket)最初是由加利福尼亚大学 Berkeley 分校为 UNIX 操作系统

开发的网络通信接口，随着 UNIX 操作系统的广泛使用，套接字成为当前最流行的网络通信应用程序接口之一。90 年代初，由 Sun Microsystems、JSBCorporation、FTP software 和 Microsoft 等几家公司共同制定了一套标准，即 Windows Sockets 规范<sup>[52]</sup>。Windows Sockets API 是 Microsoft Windows 的网络程序设计接口，它在继承了 Berkeley Sockets 主要特征的基础上，又对它进行了重要扩充。这些扩充主要是提供了一些异步函数，并增加了符合 Windows 消息驱动特性的网络事件异步选择机制。这些扩充有利于应用程序开发者编制符合 Windows 编程模式的软件，它使在 Windows 下开发高性能的网络通信程序成为可能。Socket 不是一种网络协议，而是一套开放的支持多种协议的 Windows 下的网络编程接口，现在的 Winsock 已经基本上实现了与协议无关，你可以使用 Winsock 来调用多种协议的功能，但较常使用的是 TCP/IP 协议。Socket 实际在计算机中提供了一个通信端口，可以通过这个端口与任何一个具有 Socket 接口的计算机通信。应用程序在网络上传输，接收的信息都通过这个 Socket 接口来实现。

利用 Socket 进行通信，有两种主要的方式：

(1) 面向连接的流方式。在这种方式下，两个通信的应用程序之间先要建立一种连接链路，只有确定了这条通路之后，数据才能被正确接收和发送，这种方式对应的是 TCP 协议。

(2) 无连接的数据报文方式。这时通信双方就像是把数据放在一封封信里通过网络寄给对方，信在传送的过程中有可能会残缺不全，而且后发出的可能会先收到，它对应的是 UDP 协议。流方式的特点是，通信可靠，对数据有校验和重发的机制，通常用来做文件的传输，如 FTP, telnet 等；数据报文方式由于取消了重发校验机制，能够达到较高的通信速率，可以用作一些数据可靠性不是很高的通信，如图像传送等。

### 5.1.2 Socket 开发的注意要点

1. 同常规编程一样，无论服务器方还是客户方应用程序都要进行所谓的初始化处理。

2. 一般情况下，网络通信程序是某应用程序中的一个模块。在单独调试网络通信程序时，要尽量与采用该通信模块的其它应用程序开发者约定好，统一采用一种界面形式，即单文档界面 SDI、多文档界面 MDI 和基于对话框界面中的一种，尽管这并非必须，但可使通信模块在移植到所需的应用程序时省时省力。当然，也可将通信模块函数化，并形成动态连接库文件(DLL 文

件), 供主程序调用。

3. 以通信程序作为其中一个模块的应用程序往往不是在等待数据发送或接收完之后再作其它工作, 因而在主程序中要采用多线程(Multithreaded)技术。即将数据的发或收, 放在一个具有一定优先级(一般宜取较高优先级)的辅助线程中, 在数据发或收期间, 主程序仍可进行其它工作, 譬如利用上一个周期收到的数据绘制曲线。VB6.0 中提供了许多有关启动线程、管理线程、同步化线程、终止线程等功能函数。

4. 在许多情况下, 要求通信模块应实时地收、发数据。譬如调用它的主程序以 0.5 秒为一周期, 在这段时间内, 要进行如下工作: 接收数据, 利用收到的数据进行运算, 将运算结果发送到其它计算机节点, 周而复始。我们在充分利用 Windows Socket 的基于消息的网络事件异步选择机制, 用消息来驱动数据的发送和接收的基础上, 结合使用其他措施, 如将数据的收和发放在高优先级线程, 在软件设计上, 安排好时序, 尽量避免在同一时间内, 双方都在向对方发送大量数据的情况发生, 保证网络要有足够的带宽等, 成功地实现了数据传输的实时性。

### 5.1.3 Winsock 编程方法

Microsoft的Windows Sockets API是Windows下的网络应用程序接口, 为了适用于Windows下的消息机制和异步的I/O选择操作, Windows Sockets API在功能上扩充了将近20个函数, 充分体现了Windows的优越性。

Microsoft Visual Basic6.0提供了用于Windows Sockets编程的可用控件——Winsock控件。该控件为用户提供了访问TCP和UDP网络的极其方便的途径。并且适用于Microsoft Access、Visual Basic、Visual C++和Visual FoxPro等多种可视化环境。通过Winsock控件编制C/S程序, 程序员无须了解TCP或低级Winsock API调用实现的细节, 如用户无须考虑网络字节顺序与本机字节顺序便可直接进行数据的传送。用该控件实现网间进程通信极其方便。

在TCP应用中, 为了建立一个网络连接的服务器端, 只需设置本地服务端口号, 然后服务器调用方法Listen进入阻塞状态, 等待来自客户的连接请求。与此对应的客户端不但要将Winsock的属性RemoteHost置为服务器的名称(IP地址或网络代号), 还应设置服务器所监听的相应服务的端口号(Remote Port), 然后调用方法Winsock.Connect向服务器发出请求。服务器接收到客户请求时, 事件ConnectionRequest将被触发。如服务器愿意提供服务, 则可调用Accept方法接受连接。一旦连接建立, 两端均可使用SendData或GetData进行数

据的发送或接收。事件DataArrival将在另一端数据准备就绪时被触发。

## 5.2 MOA 远程监控中心服务器端软件的设计

### 5.2.1 监控中心服务系统总体设计

监控中心的软件设计主要包括远程的网络接入模块、数据的采集模块、泄漏电流计算模块、曲线显示模块、数据库安全管理模块。此外，针对不同的用户对象，还要有一些应用层次的设计。经大量和仔细的研究分析，本系统具有如下主要功能：

(1) 远程数据采集。当监控中心的计算机运行程序时，主控计算机自动同远程监控点建立连接，进行数据交互传输。这样不必向过去那样到监控现场进行人工观测收集数据、报告运行情况。在监控中心就可以即时采集所有远程监控点的数据，并存入中心数据库。

(2) 实时监控。监控中心的工作人员可以通过系统传来的数据、图形实时进行监控，实时监控某一远程监控点的运行情况。

(3) 数据管理。可以将每个监控点的数据存入数据库，可以信息查询某一监控点某个时间段的数据，调用历史记录。远程监控中心界面如图5-1所示。

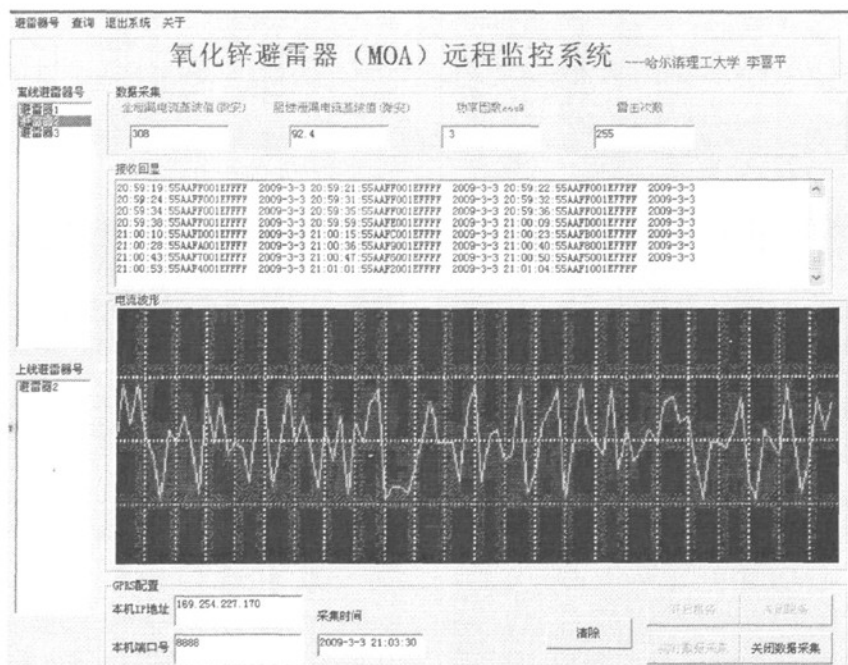


图5-1 远程监控中心主界面

Fig.5-1 The main interface of remote monitor and control center

本系统设计主要有以下特点：

(1) 用户界面友好。为了让各种层次的用户都可以很好的使用本系统，一个友好的界面必不可少，点击操作界面上的按钮便可完成全部操作，操作无需了解系统的运行状况，一切皆在后台运行。

(2) 系统的智能化程度高。主控计算机可以对采集的数据进行判断，当数据超出预先设置的范围，可以提示操作员注意，减少了险情发生的可能性。

(3) 系统的可扩充性好。系统采用模块化、结构化、标准化，便于系统规模、功能的扩充、系统的互联和移植。

(4) 系统可靠性较好。系统具有自检的能力，软硬件设计也考虑了可靠性的问题。

### 5.2.2 MOA 远程监控中心软件的主设计

远程监控中心软件的主程序主要是将各个子模块进行初始化，等待客户请求，若有客户请求连接后，响应连接事件，接受客户连接。然后等待数据的到达，接受数据并显示出来。最后将数据保存到数据库中，以便查阅当前记录和历史记录。这里所谓的 ID 是 IDentity 的缩写，ID 是身份标识号码的意思，就是一个序列号，一个编码，而且是唯一的。用来标识事物的身份，在同一系统中，ID 号是不变的，至于到底用哪个数字来标识该事物，由制定的一套规则来确定。MOA 远程监控中心软件的主程序基本流程如图 5-2 所示。

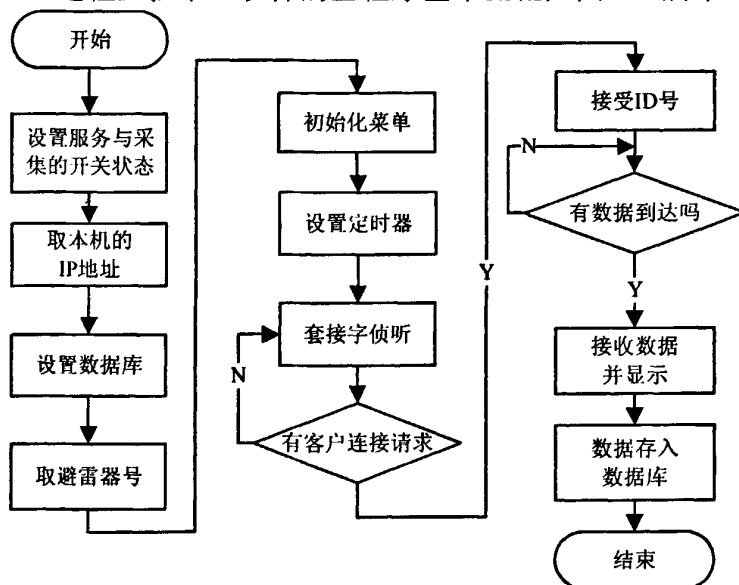


图5-2 主程序流程图

Fig.5-2 The main program flow chart

当有客户请求连接后，响应连接事件，产生ConnectionRequest连接，接受客户连接。程序如下：

```
Private Sub Winsock1_ConnectionRequest(ByVal requestID As Long)
    Winsock1.Close
    Winsock1.Accept (requestID)
End Sub
```

当客户向服务器发送数据到达后，产生 DataArrival 事件，在事件中接收数据，用 GetData 方法接收数据。

```
Private Sub Winsock1_DataArrival(ByVal bytesTotal As Long)
    If Not blnGetData Or bytesTotal < 8 Then
        Exit Sub
    End If
    Winsock1.GetData datas
End Sub
```

### 5.2.3 远程侦听与数据采集模块的设计

在服务器端，首先创建一个服务端口号，并开始侦听是否有客户请求连接。此过程称为开启服务过程。只有开启了该服务，才可进行数据采集。数据采集模块将远方终端设备的运行状态量、模拟量采集上来，存放到数据库中，以供查询与统计使用。开启服务程序流程图如图 5-3 所示。

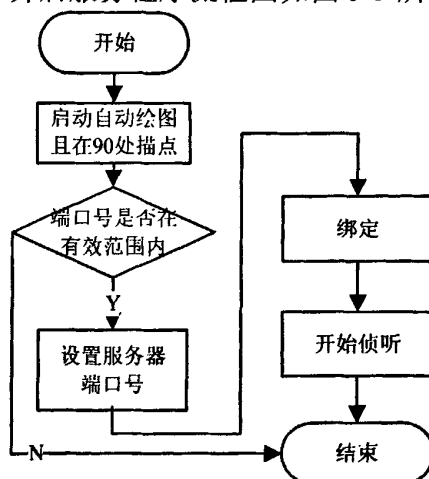


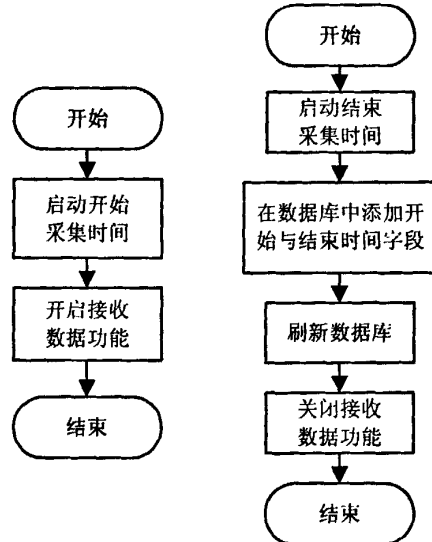
图 5-3 开启服务子程序流程图  
Fig.5-3 Subroutine flow chart opening service

用 Winsock1.LocalPort 方法进行服务器端口号的设置，用 Winsock1.Listen

方法进行侦听。程序如下：

```
Private Sub Command1_Click()
    Dim temp As Integer
    If Not IsNumeric(Text10.Text) Then
        temp = MsgBox("端口号必须是数字", vbOKOnly, "提示")
        Exit Sub
    End If
    If Text10.Text < 1 Or Text10.Text > 99999 Then
        temp = MsgBox("端口号必须在 1~99999 之内", vbOKOnly, "提示")
        Exit Sub
    End If
    Winsock1.LocalPort = Text10.Text
    Winsock1.Bind
    Winsock1.Listen
End Sub
```

开启与关闭数据采集程序流程图如图 5-4 所示。



a) 开启数据采集

b) 关闭数据采集

图 5-4 开启与关闭数据采集子程序流程图

Fig.5-4 Subroutine flowchart of opening and turning off data collection

```
Private Sub Command3_Click()
    startTime = Now
```

```
blnGetData = True
```

```
End Sub
```

当关闭数据采集后，将采集来的数据存入数据库。程序如下：

```
Private Sub Command4_Click()
```

```
    endTime = Now
```

```
    With Data2.Recordset
```

```
        .AddNew
```

```
        .Fields("start") = startTime
```

```
        .Fields("end") = endTime
```

```
    End With
```

```
    Data2.UpdateRecord
```

```
    blnGetData = False
```

```
End Sub
```

#### 5.2.4 数据处理模块的设计

数据处理模块主要是对采集来的数据进行计算并显示。包括基波阻性泄露电流、相位差、功率因数、雷击次数等的计算。计算方法主要通过 FFT 法、定点数与浮点数运算、10 进制与 16 进制数制转换等。流程图如图 5-5 所示。

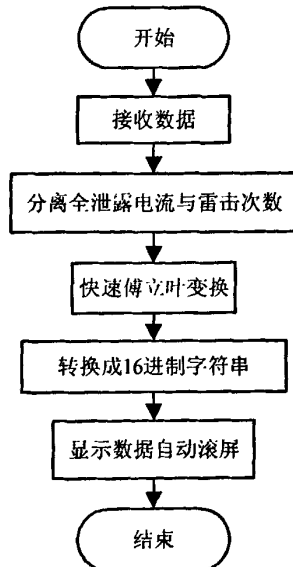


图 5-5 数据处理子程序流程图

Fig.5-5 Subroutine flow chart of data-processing



### 5.2.5 图形显示模块的设计

图形显示为 MOA 总泄露电流基波数据实时曲线显示。在 VB 中绘制实时曲线是比较难的，一般要应用 Windows API 函数来完成<sup>[53]</sup>。实时曲线的绘制一般借助于 Timer 控件来完成，使用 Timer 控件，定期将采集到的数据送往 Picture1，而曲线的绘制一般画成折线图，采用 Picture1 的 Line 方法绘制。其程序流程图如图 5-6 所示。

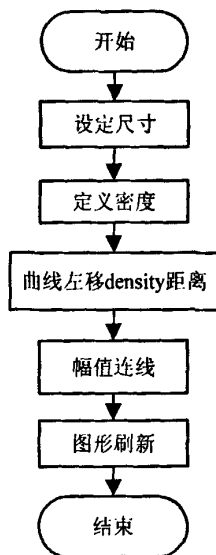


图 5-6 图形显示子程序流程图

Fig.5-6 Subroutine flow chart of graphical display

### 5.3 VB ADO 数据库软件的设计

在 Visual Basic 中，可用的数据访问接口有三种<sup>[54]</sup>：ActiveX 数据对象 (ADO)、远程数据对象 (RDO) 和数据访问对象 (DAO)。数据访问接口是一个对象模型，它代表了访问数据的各个方面。这三种接口代表了数据访问的不同发展阶段。ADO 是比 RDO 和 DAO 更加简单而又更加灵活的数据模型 OLEDB，即一组“组建对象模型 (COM) 接口，是 Microsoft 提供的以统一的方式访问存储在不同信息源中的数据的解决方案。但 OLEDB 应用程序编程接口的目的是为各种应用程序提供最佳的功能，但它并不符合简单化的要求。ActiveX Data Objects (ADO) 是符合简单化而又灵活性要求的 API，是一座连接应用程序和 OLEDB 的桥梁。ADO 提供执行以下操作的方式：

- (1) 连接到数据源，可以确定对数据源所有更改是否成功或没有发生。
- (2) 指定访问数据源的命令，同时可带变量参数，或优化执行。通常涉

及ADO的Command对象。提供常规方法检测错误(通常由建立连接或执行命令造成), 涉及ADO的Error对象。

(3) 如果这个命令是用数据表中的行的形式返回, 则将这些行存储在易于检查、操作或更改的缓存中。适当情况下, 可使用缓存行的更改内容来更新数据源。

由于ADO有很强的灵活性, 所以最后只需执行部分模块就能满足功能要求。在使用时, 也不用从对象模型的顶层开始一步步的创建子对象。

服务器支持多个客户端访问, 利用ADO数据库访问技术实现对数据库中记录的查询。查询的信息主要是阻性泄露电流值、雷击次数值等数据。在远程监测时, 服务器与客户端之间也需要建立TCP连接。如有多个客户端需要同时操作时, 仅支持一个客户端实施远程监测。当某一客户端与服务器建立TCP连接后, 就可执行访问操作了。

### 5.3.1 数据存储模块的设计

存储过程是服务器上的预先定义好的List.AddItem str语句, 它可以存储参数值, 还可以嵌套调用。使用存储过程能够改变存储语句的运行性能, 提高机器的执行效率。设计时, 在对要添加的数据进行合法性检查以后, 先添加一条记录, 然后对新纪录的各个字段值进行设置, 将新添加的记录写入数据库, 最后刷新数据库, 显示更新后的记录。数据存储流程图如图5-7所示。

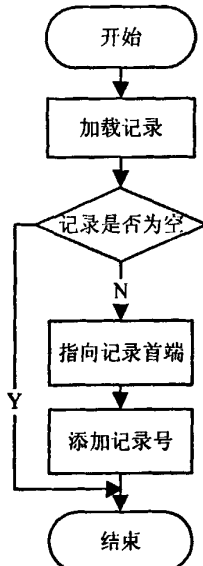


图 5-7 数据库存储记录程序流程图  
Fig.5-7 Program flow chart of record database

程序设计如下：

```
Private Sub Form_Load()
    With Form2.Data2
        .RecordSource = "select * from recordIndex"
        If .Recordset.EOF Then
            Exit Sub
        End If

        .Recordset.MoveFirst
        Index = 1
        Dim str As String
        Do While Not .Recordset.EOF
            str = "" & Index & " start:" & .Recordset.Fields("start") & " end:"
            & .Recordset.Fields("end")
            List1.AddItem str
            .Recordset.MoveNext
            Index = Index + 1
        Loop
        List1.ListIndex = 0
    End With
End Sub
```

### 5.3.2 查询与显示历史记录模块的设计

远程监测系统的查询功能是基本功能之一。其主要功能是对各类数据进行查询与相关的统计分析。MOA远程监测系统中需监测的数据非常庞大，如果没有快速的查询功能，远程监测系统的数据就会失去其价值。历史曲线的保存与显示是必要的，该监测系统应将有价值的历史数据连同曲线一起显示出来。

MOA 远程监测管理系统提供了直观、快速的查询功能，将图形信息系統和管理信息系統有机的結合，增强数据的可视化程度，特别是数据信息的虚拟化，提高数据的管理效率，并加强对远程监测的管理职能，由此而建立的管理信息系統才能适应 MOA 远程监测管理系统管理功能的要求。查询与显示历史记录程序流程图如图 5-8 所示。

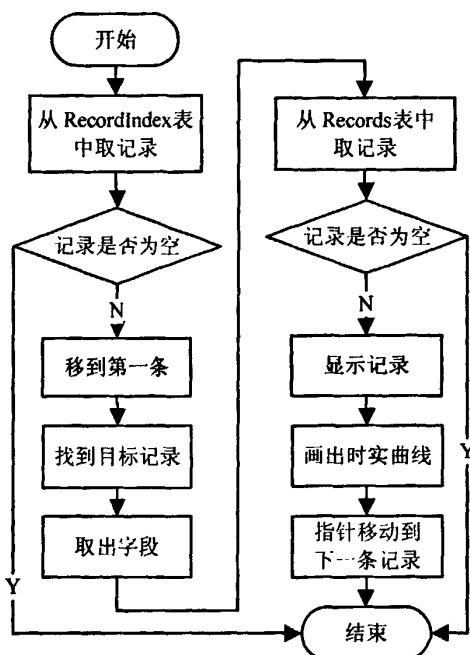


图 5-8 数据库存储显示记录程序流程图

Fig.5-8 Procedure flowchart of storing and showing record of database

程序设计如下：

```
Private Sub Command3_Click()
```

```
    Index = List1.ListIndex
```

```
    If Index = -1 Then
```

```
        .Exit Sub
```

```
    End If
```

```
With Form2.Data2
```

```
    .RecordSource = "select * from recordIndex"
```

```
    If .Recordset.EOF Then
```

```
        Exit Sub
```

```
    End If
```

```
    .Recordset.MoveFirst
```

```
    Do While Index <> 0
```

```
        .Recordset.MoveNext
```

```
        Index = Index - 1
    Loop

    startTime = .Recordset.Fields("start")
    endTime = .Recordset.Fields("end")
End With

With Form2.Data1
    .RecordSource = "select * from records where datetime >= #" & startTime
    & "# and datetime <= #" & endTime & "# ;"
    If .Recordset.EOF Then
        Exit Sub
        Text3.Text = "无记录"
    End If

    .Recordset.MoveFirst
    Do While Not .Recordset.EOF
        Text3.Text = Text3.Text & Trim(.Recordset.Fields("datetime")) &
        Trim(.Recordset.Fields("ivalue")) & " " & Trim(.Recordset.Fields("wangle")) &
        vbCrLf
        .Recordset.MoveNext
    Loop
End With
End Sub
```

## 5.4 本章小结

上位机监控中心服务器设计是整个基于 GPRS 的氧化锌避雷器远程在线监测系统的另一个重要组成部份，监控中心服务器主要作用是远程监测避雷器的运行状态、排除故障、存储查询历史记录等。本章首先对一个重要的控件 Winsock 进行介绍，研究其编程方法，之后进行监控程序的编制。程序的编制主要分为两大块，一块是采集、监控程序；一块是数据库程序。采集、监控程序编写步骤为：远程侦听、数据采集、数据处理、图形显示、数据存储。数据库程序编写步骤为：数据存储、数据查询、数据显示。

## 结论

避雷器作为电气设备的过电压保护装置，其性能的优劣对电气设备安全运行起着很大的作用。氧化锌避雷器阀片的老化或受潮，将导致避雷器发热甚至爆炸，为了保证系统安全运行需对避雷器进行在线监测。传统避雷器在线监测现场数据不能及时传输，故障不能及时的预测、报警和处理。本文针对上述避雷器存在的问题对避雷器的特性及监测方法进行了研究。本文结合高电压技术、GPRS 无线通信技术、电子技术、单片机技术、传感技术、C 语言与 Visual Basic 语言编程技术等研究了一套基于 GPRS 的氧化锌避雷器远程在线监测系统。

1、避雷器监测时由于相间干扰和谐波电压的影响，使得测量结果不能反映避雷器真实的运行状况，为去除干扰源本文建立了合理的 MOA 在线监测模型。

2、基于对 C8051F020 片上系统的功能及经济性考虑，结合了 GPRS 技术，设计了数据采集终端，完成数据的采集与传输。

3、基于对 VB6.0 语言应用灵活，功能强大，并有很强的网络编程功能的考虑，使用 Winsocket 技术编写了主站监控系统软件，完成远程侦听、数据采集处理、数据存储等功能。

由于本人水平有限，论文存在很多缺陷和不足，还有许多值得深入和改进的部分。如在硬件设计上，可以采用更高速的芯片替代单片机。可以对远程终端硬件进行升级，充分利用3G网络进行通信，这样就能够满足更多场合的需求和无线远程监控及数据采集系统的发展。

## 参考文献

- [1] 苏胜新, 何金良等, 线路用避雷器应用中的几个关键问题[J]. 电瓷避雷器, 2000,12(4): 23-28.
- [2] Furukawa S.et.al.Development and application of lightning arresters for transmission lines[J].IEEE Trans.on PWRD, 1999,4(1): 2121-2129.
- [3] Podporkin, G.V. Lightning Protection of Distribution lines by Long Flashover Arresters[J].IEEE Trans.on PWRD, 2004,13(5): 0885- 8977.
- [4] 郭洁, 高电压氧化锌避雷器运行情况分析[J], 电瓷避雷器, 2004,2(6): 3-6.
- [5] 鲍敏铎, 每相两节 MOA 中一节受潮的运行分析, 电瓷避雷器[J], 1996,7(4): 12-18.
- [6] John S. Johnson et.al.Detection of slot discharge in high-voltage stator windings during operation[J].AIEE Trans.Part2,1991,7(4):9-19.
- [7] 贾逸梅等, 在线监测氧化锌避雷泄漏电流的方法[J]. 高电压技术, 1992,17(3): 30.
- [8] Heinrich C, Hinrichsen V. Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks comparison of existing and newly developed procedures[J]. IEEE Trans PD, 2001,16(1): 138-143.
- [9] Xavier Lagrange 等著, 顾肇基译. GSM 网络与 GPRS[M], 北京: 电子工业出版社, 2002: 3-8.
- [10] 文志成, 通用分组无线业务一 GPRS[M], 北京,电子工业出版社, 2002: 1-6.
- [11] 钟章队等, GPRS 通用分组无线技术[M], 北京, 人民邮电出版社, 2006: 1-10.
- [12] 唐炬、孙才新等, 电气设备绝缘在线监测技术报告[M]. 重庆: 重庆大学, 1996: 1-7.
- [13] 李小建, 氧化锌避雷器阻性电流的精确测量[J]. 云南电力技术, 2001, 15(4): 19-20.
- [14] 钱家骊, 常越, 一种氧化锌阀片交流小电流等值电路及其应用[J]. 电瓷避雷器, 1994,12(3): 44-47.
- [15] Pinetti, P. Giannetoni M A simplified model for zinc oxide surge arrester[J]. IEEE Transactions on PD, 1999,14(2):393-397.

- [16] 周龙, 陈继东, 文远芳, 氧化锌避雷器动态伏安特性的分析[J], 电瓷避雷器, 1997,3(1): 40-42.
- [17] Hanxin Zhu and Raghuveer M R. Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics[J].IEEE Transactions on PD, 2001, 16(4) : 599-603.
- [18] Klein T, Kohler W, Feser K, Schmidt W, Bebensee R. A new monitoring system for metal oxide surge arresters.11th International Symposium on High- Voltage Engineering[C].London:UK,1999: 301-304.
- [19] 王永勇, 邵长盛用向量补偿法测试氧化锌避雷器泄漏电流及其有功分量[J]. 高电压技术, 1992,4(6): 31-33.
- [20] 车文俊, MOA 在线测试系统的数学模型. 电工陶瓷第七次学术年会暨学术交流会议论文集[C]. 西安: 西安电瓷研究所, 2001: 127-129.
- [21] 廖瑞金, 王忠毅, 孙才新, 基于谐波分析法的 MOA 阻性电流的数字化监测[J]. 高压电器, 1999,16(4): 12-15.
- [22] 陈继东, 周龙, MOA 老化与受潮特性的实验研究[J]. 电瓷避雷器, 1996,12(6): 30-32.
- [23] 王泽文, 陈继东, 周龙, MOA 在线监测中相间干扰的理论分析[J]. 电瓷避雷器, 1998,6(2): 46--48.
- [24] 张泽华, MOA 带电测试的现场干扰问题[J]. 高电压技术. 2001,27(104): 73-74.
- [25] 张仲秋, 现场氧化锌避雷器阻性电流侧试误差分析[J]. 青海电力, 1998,12(1): 10-13.
- [26] 胡道明, 潘文霞, 考虑两种干扰源下的 MOA 在线监测数学模型探讨[J]. 电力自动化设备, 2004,24(12): 67-69.
- [27] 林海雪, 电力系统中的间谐波问题[J]. 供用电, 2001,18(3): 6-9.
- [28] 韦在军, 夏汉青, 郭伟, 基于 GPRS 通信技术的船载远程视频监控系统[J]. 数据通信, 2004 1(12): 43-45.
- [29] 栗玉霞, 徐建政, 刘爱兵. GPRS 技术在自动抄表系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2003,12(4): 52-56.
- [30] Brasche, G Walke. B. Concepts, services, and protocols of the new GSM phrase 2+ General Packet Radio Service[J].IEEE Communications Magazine, 1997,35(8):94-104.
- [31] 李淘, 付永生, 基于 GPRS 的数据传输[J]. 移动通信, 2004,28(7): 76-80

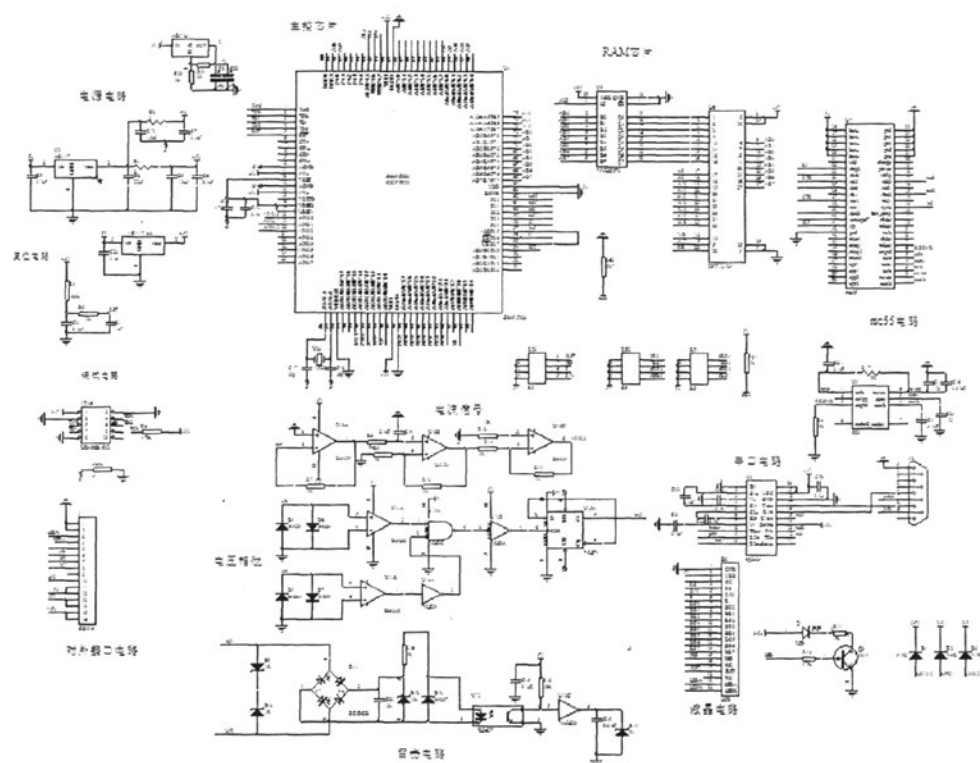


- [32] Bud Sates.R.J 著, 朱洪波等译, 通用分组无线业务(GPRS)技术与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社. 2004: 30-60.
- [33] 张勇, 基于 GPRS 的嵌入式 Internet 研究与实现[D]. 成都: 成都电子科技大学 2006: 48-62.
- [34] Meyer,D,Zobrist. "G.TCP/IP versus OSI"[J]. IEEE Potentials, 1990 ,9(1):16-19.
- [35] 姚光开, 于永堂, 柴乔林, 微型 TCP/IP 协议栈的设计与实现[J]. 计算机应用, 2003,23(9): 82-84.
- [36] 谢希仁, 计算机网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 180-280.
- [37] 吕捷, GPRS 技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001: 9-104.
- [38] W Simpson. The Point-to-Point Protocol (PPP)[S], RFC 1661 July,1994: 1-52.
- [39] 郭智渊, 高丽云, GPRS 在矿井救灾无线通信系统中的应用[J]. 山西煤炭, 2004,3(1): 54-56.
- [40] John Scoura. Wireless Modules MC55/56 Reduce the size and maximize the connectivity[J]. IEEE Communications Magazine, 1997 ,35(8): 94-104.
- [41] 潘琢金, 施国君. C8051Fxxx 高速 SOC 单片机原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 14-18.
- [42] 李刚, 林凌, 丁茹, 李晓霞, 与 8051 兼容的高性能、高速单片机 C8051Fxxx[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 113-128.
- [43] M.R.Raghuveer.Influnce of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics[J].IEEE Trans.on Power Delivery.2001, 6(4):599-603.
- [44] Grant I.s,Anderson J.G. Simplified method for estimating lightning performance of transmission lines[J].IEEE Transactions on power apparatus and systems, 1985,104(4):128-135.
- [45] 康华光. 电子技术基础(模拟部分)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 121-130.
- [46] Steven Boggs. Increased Energy Absorption in ZnO Arrester Element Through Control of Electrode Edge Margin[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2000,15(2): 562-568.
- [47] 韩冰, 李芬华, GPRS 技术在数据采集与监控系统中的应用[J]. 电子技术, 2003,29(8): 19-26.
- [48] 刘宗祥, GSM 系统中的用户识别模块-SIM 卡[J]. 移动通信, 2006,6(7): 23-30

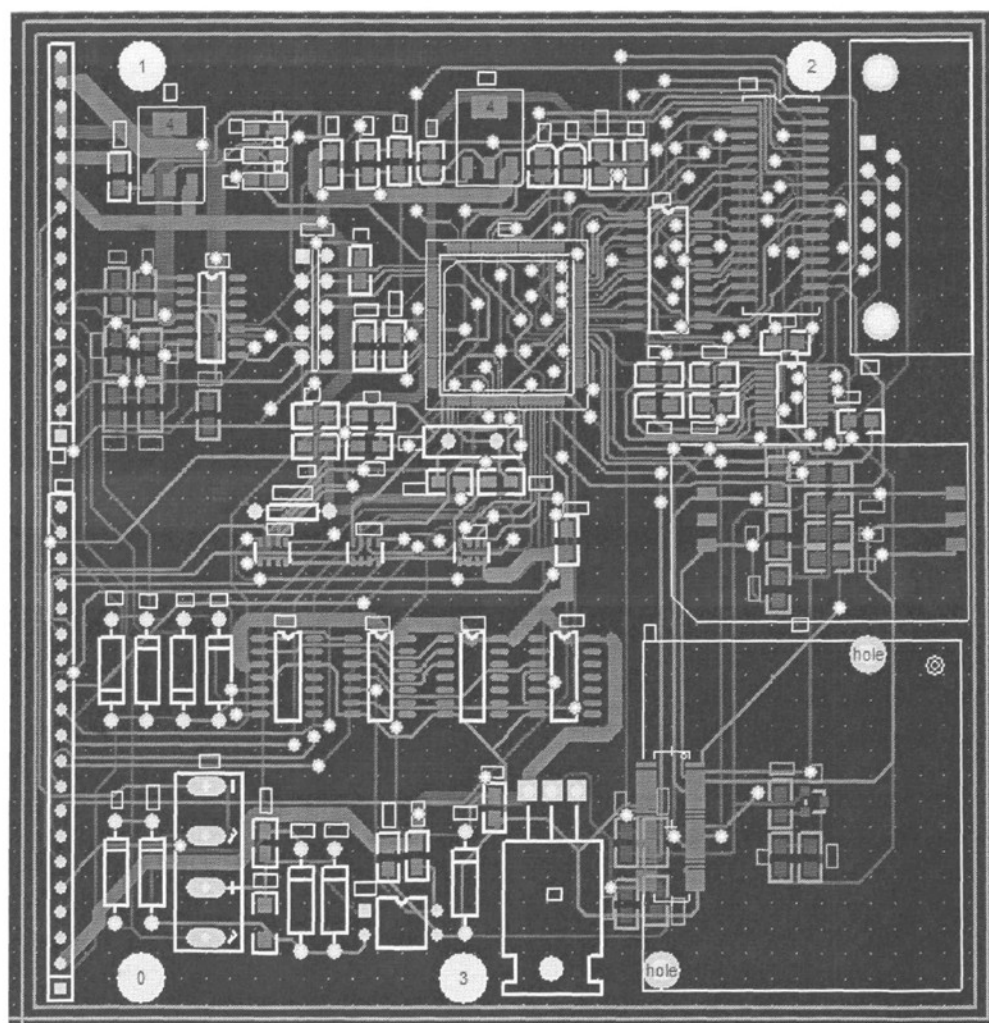
- [49] 马忠梅, 单片机的 C 语言程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 124-126.
- [50] Siemens AG. MC55 / MC56 AT Command Set[M]. Siemens Mobile. 2003:30-38.
- [51] 杨毓, 李明, Visual Basic 6.0 实用开发教程[M]. 成都: 大学出版社, 2001: 6-13.
- [52] 杨富国, Visual Basic 程序开发案例解析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 101-104.
- [53] 刘炳文, Visual Basic 图形与多媒体程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 134-148.
- [54] 李长林, Visual Basic 串口通信技术与典型实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 114-156.

## 附录

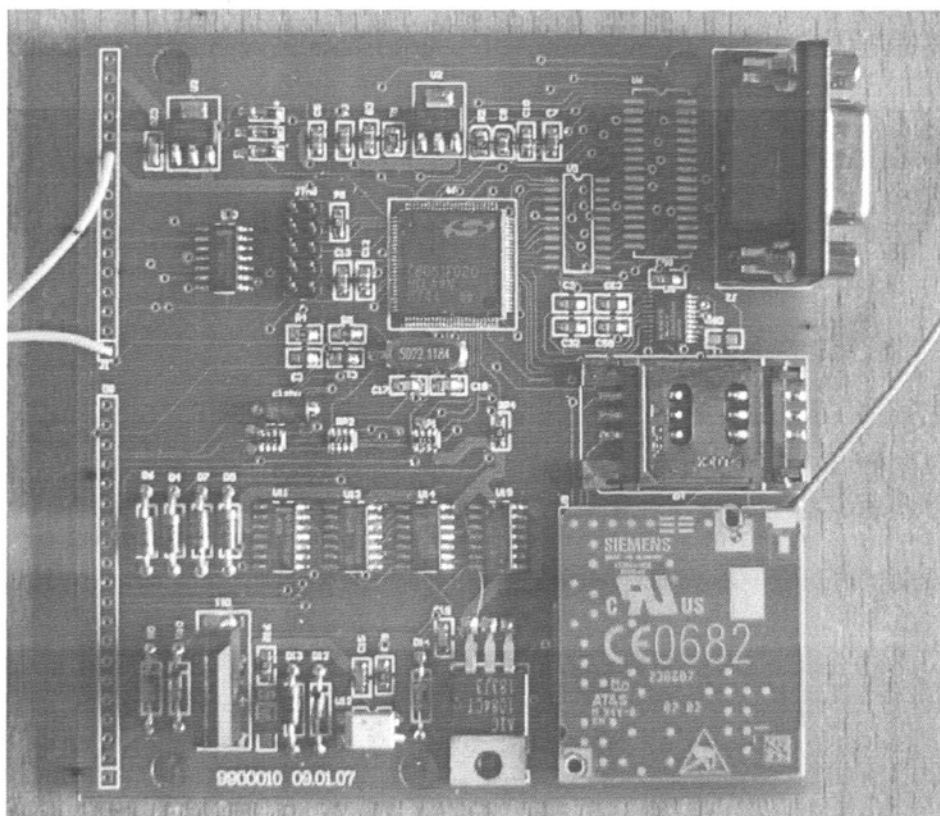
### 数据采集系统 SCH 图



## 数据采集系统 PCB 图



## 数据采集系统实物图



## 攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 陈庆国, 李喜平, 王吉涛. 基于 GPRS 的氧化锌避雷器状态监测系统. 电机与控制学报.
- [2] 李喜平, 陈庆国, 王吉涛. 氧化锌避雷器远程状态监测系统. 黑龙江科技信息(已录用).

## 致谢

首先，我要向我的导师陈庆国教授表达我最衷心的敬意和感激之情。三年来，陈庆国老师给了我无微不至的关怀和仔细的点拨，使得我在知识与科研方面得到较大的提高。虽然这点提高与老师的要求相距甚远，但老师那一丝不苟的敬业精神，融通博大的学术气度，诲人不倦的风范使我如沐春风，成为我人生永不磨灭的瑰宝。没有他的耐心教诲和严格要求，本论文难以顺利完成。陈老师渊博的学术素养、敏锐的学术洞察力、严谨的治学态度以及对事业、工作的高度热情，始终教育着我、鼓励着我，使我终身受益。在论文完成之际我对陈老师对我的培养和关怀表示衷心的感谢和诚挚的敬意！

在论文完成的过程中，得到了中国兵器集团D624厂军研所唐喜宝的大力帮助，同时得到了东北林业大学杨成虎的大力支持。他们对本文提出了许多宝贵的设计性意见，进一步丰富了课题的研究内容，在论文的修改过程中，得到了哈尔滨理工大学王吉涛老师的许多帮助，他们的合作精神和钻研精神给予了我极大的鼓舞和激励，使论文得以完成，在此向他们表示由衷的谢意。

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

再一次向所有帮助过我的人们表示最诚挚的谢意！对在百忙之中抽出时间评阅本论文的专家学者表示真诚的感谢。