

分类号\_\_\_\_\_

密 级\_\_\_\_\_

UDC\_\_\_\_\_

学 号\_\_\_\_\_

# 重慶大學

## 硕士学位论文

论文题目：三相电能计量系统防窃电技术研究

论文作者：孙洪波

指导教师姓名、  
职称、工作单位：唐治德 教授 重庆大学

申请学位级别：硕士 专业名称：电气工程

论文提交日期：2003年4月27日 答辩日期：2003年5月28日

学位授予单位：重庆大学 授位日期：2003年 月 日

答辩委员会主席：牟道槐 教授

论文评阅人：牟道槐 教授 杨治国 高工

2003 年 4 月 27 日

## 摘 要

在我国,不法企业为追求高额利润使窃电现象日趋严重。如何完善防窃电技术,有效地遏制窃电行为,推动市场经济健康发展一直是供电企业十分关心的问题。针对这种情况,本论文作者针对三相供电系统中窃电及其检测技术进行了详细研究并研制了三相四线和三相三线计量防窃电装置。理论分析和模拟试验均表明防窃电装置能可靠、准确、迅速地对三相供电系统中各种窃电现象做出判断,而且对每次窃电都有详细的窃电记录。

论文从电能计量原理和准确计量方法入手,简要介绍了电能计量的发展历史,单相电路和三相电路的各种计量方式。其中重点介绍了三相三线经电流互感器和电压互感器接入式和三相四线只经电流互感器接入式这两种计量方式。对常见的窃电现象进行了分析,把窃电方法归并为五类:电压法窃电、电流法窃电、移相法窃电、扩差法窃电、分流法窃电。从理论上分析了各类窃电方法引起的电压、电流和功率因素变化,从而提出了检测窃电方法和窃电判据,为迅速准确判断窃电行为和电量追算提供了理论保证。

为了检验这些方案,作者研制出两种防窃电监测装置。装置选用 PIC16F877 作为控制核心,辅以 CPLD 芯片、存储芯片等外围芯片,构成一个实时监测的电子装置。设计时对各功能模块电路进行了仿真验证,软件采用模块化的设计方法,对各个子程序模块进行设计和调试,实现窃电的检测和记录。装置通过实验检测,证实能够有效发现各种窃电行为,达到了预期效果。该类产品通过在内江电力局挂网运行,取得良好效果,得到用户高度评价。

这种防窃电产品能够检测出包括电流法窃电等几乎所有窃电方式,具备故障存储功能,同时自动追算损失电量,具有强大的防窃电能力。但要满足防窃电实时性要求,还必须组建防窃电网络。为此,文中提出了各种网络化防窃电方案:既可结合现有电力网络平台,实现网络化防窃电方案,也可单独组建防窃电网络。最后,针对目前电力计量部门存在的防窃电问题,提出了如何从管理和技术角度防止窃电现象发生。

总之,论文从国民经济的现实需要出发,结合电力计量系统实际情况,有针对性地进行防窃电研究,取得了较好实际成果。论文本身也具有较高理论和工程应用价值。

关键词:防窃电技术,复杂可编程逻辑器件,开路,短路

## Abstract

In our country, power theft becomes more and more seriously in some enterprise. How to perfect the technology of preventing power theft to restrict this deed is a problem which most of power supply corporations are caring in a long time. To resolve this problem, this dissertation author researches deeply and makes two preventing power theft devices which be used in three-phase power supply system including three-phase three-line system and three-phase three-line system. Theories analyzing and tests show that the devices not only can do credible and quick judgment, but also have particular record to every time of stealing power energy.

At first, the dissertation author analyzes the measure method characteristic of three-phase three-line system and three-phase three-line system by power measure principle, and analyzes all kinds of power theft way, then concluding them to five styles: voltage style, current style, change phase style, enlarge error style, shunt style. How to calculate the loss energy exactly after acknowledging the deed of power theft is one of problems that the author tries to solve. At last, adding the preventing power theft technology into the existing electric power network is a good way to prevent power theft more effectively.

The dissertation concludes all kinds of main character in the state of power theft through these stealing power means, puts forwards all kinds of countermeasure against power theft, at the same time, calculates the loss electric energy. The author develops two kinds of devices for the big power clients. This devices use Microchip high performance MCU PIC16F877 and other chips including XC9572, PCF8583, 6264 etc. This dissertation simulates function circuits to verify design. The software of this device is designed according to module. First it drafts the main block flow chart, then programs subroutine to reach the aim of detecting power theft. This devices' debugging results in lab and the production applied on-site by NeiJiang electric power bureau indicate that they can work as we desired and satisfied the design requirements.

This dissertation realizes the development of preventing power theft device. At the same time, it makes the advantages of the preventing power theft device in full, connects the existed electrical network platform, and takes up the theory of setting up a preventing power theft system with network. This dissertation gives the suggestions of preventing

---

power theft that contains two ways, one is strict management, and another is adopting new technology. In a word, the device should have a bright market selling and applied value; the dissertation has a good value of theory and project applying.

**Key Words:** Preventing Power Theft, CPLD, Open Circuit, Short Circuit

## 1. 绪 论

### 1.1 目前国内外电力系统窃电现状

电力资源的出现,使它成为人类社会生存和发展进步所不可缺少的一种重要能源并受到广泛利用,人类的所有活动几乎都与电有着密切的关系。电的发现和利用给人类带入了一个崭新的飞速发展的时代,它作为一种能源不仅给人类带来光明,更重要的是酝酿并推动了现代化大生产和现代科技,为人类创造了辉煌的物质文明和精神文明,使人类进入了现代化时代。

我国自改革开放以来,经济发展和社会进步都取得了举世瞩目的成就。随着经济的发展,对电的需求量不断扩大,电力销售市场的扩大又刺激了整个电力生产的发展。但是随着经济的发展和用电量的增大,尤其伴随着市场经济体系的建立,窃电问题变得越来越突出,国家为此蒙受了巨大的经济损失。窃电问题不仅困扰电力企业的发展,也严重影响了国家的经济建设和社会的稳定。

窃电给国家造成的损失是巨大的。目前,国内因窃电造成的经济损失成每年递增的态势。以吉林省年售电量 230 亿千瓦时为例,窃电造成的线损如果为一个百分点,就丢失电量 2 亿多千瓦时,折合人民币几千万元<sup>[1]</sup>。

据大洋网 2000 年 12 月 5 日的《湖南每年被窃电超过 2 亿度》新闻报道,湖南省电力局副局长何兆成介绍,近年来湖南省每年被窃电量超过 2 亿千瓦时,相当于一个中等规模县的全年用电量。近几年湖南每年省电网销售的电量为 300 亿千瓦时左右,实际线损率为 8.8%,除去线路传输及设备损耗的 5%,其余部分都属于管理损耗即偷、漏掉的电量。根据各市州供电部门不完全统计,其中被窃电量超过 2 亿千瓦时。按照发、供电的最低成本每千瓦时 0.24 元计算,电力部门每年因窃电造成的损失在 4800 万元以上。调查发现,窃电现象中以法人窃电造成的损失居多。近两年湖南省每年都查出三、四千起窃电案件,其中法人盗窃的电量占 3/4,而这里面“五小”企业占了相当比重。据中国电力新闻网 2001 年 11 月 13 日的一篇报道,上海市电力公司 2001 年上半年共检查各类客户 20 多万户,补收电费、违约金 4193 万元。

在发达国家,也存在窃电现象,据中国电力新闻网报道,美国加利福尼亚州最大的电力公司太平洋煤气和电力公司 2001 年 6 月 11 日宣称,由于面临严重的电力

危机，加州窃电现象十分惊人，该公司每年被窃取的电力价值超过 1 亿美元。

据这家电力公司原负责反窃电人员霍华德·迪安向新闻界表示，该公司每年因为窃电而遭受的经济损失在 1 亿到 4 亿美元之间。居民偷电手段多种多样，包括私拉电线、人为降低电表走速等。迪安还表示，美国全国都存在窃电现象，每年因窃电而造成的经济损失高达 40 亿美元<sup>[8]</sup>。

## 1.2 窃电现象分析

窃电是社会诸多矛盾的综合反映。严重的窃电现象是与用户的法制观念、道德观念、社会经济发展水平、电价及用户承受能力、电能计量设备的防盗可靠性、用电营销管理水平、营销人员素质、对窃电行为的处理方式等密切相关的，是诸多因素聚焦一起而形成的。

由于现阶段我国法制建设水平还不高，群众的法律意识还不强，《中华人民共和国电力法》出台的又比较晚，很多用户对电的商品属性和窃电的违法性认识不明确，加上多年来对窃电行为重罚轻打的处理方式，是导致窃电多发的主要原因。

用电管理上存在漏洞，营销各环节间制约监督作用没有有效发挥，为窃电尤其是内外勾结窃电提供了机会。供电企业内部个别职工与用户勾结窃电和对窃电行为视而不见的渎职行为对窃电起到了推波助澜的作用。

对很多用户来说，电费是其生产经营的一大成本，尤其是一些耗能高，经济效益不好的用户，支付电费是一大难题。于是，一些用户就用窃电来降低成本和解决经费不足的问题，甚至完全靠窃电给工人开工资。而特定的供电方式和供电设施的落后又为窃电大开了方便之门。

窃电行为具有多发、主体多元、手段隐蔽的特点。窃电行为发生的比例远远高于其它危害社会的行为，呈现出普遍性的特点。居民窃电现象严重，平户区和供暖条件差的住宅小区尤为突出；个体工商户、私营企业中窃电比例相当高，是反窃电工作的重点目标；国有企业、事业单位窃电率上升迅速，而且窃取量大，造成的损失惊人，应引起重视。过去窃电行为主体基本局限于居民，而近年来这种违法犯罪行为的主体已变得多元化，居民、个体和私营经济组织、集体和国有企业、事业单位、甚至政府机关和部队也窃电。窃电手段日趋隐蔽并向高科技发展。过去查获的窃电多使用简单的容易操作也比较暴露的手段，如利用 U 型导线分流、别卡表盘、开封拨表、表外接线等，这些方法都比较容易查获，但近几年利用上述手段窃电的已不多见。改变电流互感器变比、电压线虚接或反接或压皮接线、隐蔽处安装过流开关或双头刀闸控制表外线、利用营销工作人员工作上的疏忽或与营销人员相勾结

积攒电量后事故换表消除表上电量等成为近几年主要的窃电方法。

### 1.3 国内外防窃电技术现状

防窃电技术随着时代的进步在不断的发展。同时窃电手段也在不断翻新,有些地区甚至发现采用专用窃电器进行窃电的情况。如何有效防止窃电,是摆在科技人员面前的一个重要课题。

当前市场上出现的防窃电产品种类繁多,没有一种产品能有效地防止所有窃电方式,究其原因,一是以偏概全,将防部分窃电的产品夸大成多功能防窃电产品,并且这类产品漏防了若干种主要的窃电方式,自然难以推广。二是性能价格比差,采用网络化进行防窃电,防窃电效果比较好,但操作不便,价格昂贵,而且这类产品也存在无法解决电流法窃电的问题。

对于大用户而言,计量装置还包括电流互感器和电压互感器。电流互感器的二次侧开路和短路检测技术是防窃电的一项关键技术。目前,此种技术在实际应用中几乎是空白。现存的检测方法也存在较大缺陷。如何改进这一技术,奠定防窃电技术的一个坚实的基础,具有较大的学术和现实意义。

随着电力系统各种功能的不断提升,电子技术的不断发展,防窃电技术实用化也逐渐成为可能。研究新的防窃电技术,更彻底完善地防止窃电现象的发生,尽可能地减少窃电造成的损失,具有较强的现实意义。如何在防窃电原理上作到进一步突破,克服目前技术固有的缺陷,使防窃电技术进一步完善,做到实用化,市场化,最终能在电力部门内大面积推广使用这项新技术。

因为计量方式的不同,国内外防窃电技术方法也不一样。但基本原理是相通的。本论文将从国内外防窃电技术发展现状出发,进一步研究防窃电技术。

在欧美发达国家,窃电现象也大量存在,它们的防窃电技术也在不断地发展。

从目前来看,美国的UPC公司可以代表发达国家当前防窃电技术的水平。UPC公司(寰宇保护公司)是美国一家专门从事防窃电产品开发、生产和销售的高科技公司。它生产的用于减少非技术性损耗和防止窃电的产品已被美国和加拿大的各主要电力部门所采用,同时,该产品还大量应用于巴西、中美州、哥伦比亚、厄瓜多尔、秘鲁、委内瑞拉等国家。

早期人们为了防窃电,对计量装置的紧固螺丝采用漆封和腊封,这样当紧固螺丝被取下时,封就会被破坏,从而发现窃电行为。这样的封很容易受环境、气候等方面的影响而自然脱落,给判断带来了困难,目前已不再使用。

现在最普遍的防窃电技术措施是铅封,铅封就是将电能表或计量柜的关键部位

的紧固螺丝用丝线、钢丝或铅钉穿上后，再用带有印模的专用封钳将铅球或铅钉压上印模。长期以来，铅封对防止计量装置被人有意开启进行窃电起着十分重要的作用。它有效地防止了简单窃电行为的发生，但是也经常发现有伪造或开启后复原的情况。铅封仍是目前普遍采样的防窃电技术措施。

对小容量用户来讲，计量装置可能仅是一只电能表。但对较大容量的用户来讲，计量装置包括电压、电流互感器及二次回路和电能表。这样的计量装置可以进行窃电的地方较多，防窃电必须从整套装置来考虑。这样在八十年代，我国又研制开发了计量专用配电柜，把与计量有关的设备全部集中安装在此柜中。目前计量柜已有的部颁标准。计量柜的出现和改进在一定时期、一定程度上防止了窃电行为的发生。

随着防窃电技术的发展，窃电手段也变换花样。针对计量柜的出现，接踵而来的是短接进出线、外加强磁场、倾斜计量柜等窃电方法。与此针锋相对，九十年代，人们应用电子、无线电技术，开发出了能防止计量柜人为倾斜、人为开启和防磁场的“无线电防窃电报警装置”。这一技术，目前仍属于大力推广的防窃电技术。

目前人们已开发出各种防窃电的电能表，并已申请多项技术专利。有的在机械方面作了改进，有在电磁方面考虑防窃电，更多的应用了现代电子技术。目前实际投入应用的有几十种。

市场上先后出现的“掉电计时仪”、“失压欠流积时仪”、“低压计量装置故障诊断仪”、“防窃电电脑监测系统”、“智能型高压电能表错接线判定仪”等产品。由于装置自身原因，使用并不广泛。如“掉电计时仪”、“失压欠流积时仪”两种产品试图解决电流型窃电的问题，但生产厂将电流监察值规定为 0 或  $3\%I_B$ 、 $30\%I_B$ ，均欠科学性，不尽合理，故难以推广。比如规定电流监察值为 0 的情况，当电度表输入电流为零时，计时仪便判为偷电而予以计时。这样在用户不用电时也被判为窃电，用户当然不能接受<sup>[28]</sup>。后几种仪器基本上是属于装置或系统，其体积大、价格高，只适用于电力部门检查和抽测，而不宜于长期在线监察量大面广的各种电度表工作状态。加之这些仪器大多数又缺乏自身防护能力，无人值守时杜绝不了窃电者在其本体上动手脚。

防窃电电能表也很多。1997 年 8 月份，电力部门有关领导，曾对中国机械行业名牌产品评定委员会仪器仪表评审组发出相同的急切呼吁：“你们机械工业部能不能组织攻关，解决电能表的防窃电问题”<sup>[28]</sup>。不是没有相关的产品，近几年国内先后推出了一些防窃电的单相电能表，多功能三相电能表，也取得了一些很好的效果。但这些产品的防窃电功能都存在着共同的缺陷。难以监测所有的窃电行为，尤其是对电流互感器的开路短路无法准确判断。同时，一旦有窃电行为发生，也难以准确追算损失电量。相应也导致了这些产品的性能价格比的下降。



这些防窃电装置和措施，确实对有些窃电行为起到了有效的防止作用。然而对于愈演愈烈的窃电之风和花样繁多的窃电手段来说，仍显得苍白无力。分析原因主要是：

① 局限性大。这些防窃电装置和措施往往都是针对某一种或几种窃电手段来考虑问题的，对多数窃电方法仍无能为力。同时窃电并非都是针对计量装置本身的，而现有的防窃电装置和措施几乎全部都是围绕着计量装置来考虑问题的。

② 及时性差。现有的防窃电装置不能对窃电行为做出及时反应。

③ 被动性。现有的防窃电装置不能主动对窃电者的窃电行为做出积极的回应。

④ 可靠性仍不够强。现有的很多防窃电装置之所以没有大规模应用，原因之一是可靠性差，为了实现防窃电的目的而加入额外部件会影响电能表的正常工作，甚至会使电能表计量不准。

⑤ 准确度不够。现有的防窃电装置只能对简单的窃电方式做出判断，而对较为复杂的窃电手段却无法断定，更不用说统计窃电量的大小。

对于目前仍存在的而且危害严重的破坏计量装置、绕越计量装置和倒拨电能表数据的各种窃电行为，依靠现有的防窃电技术和措施仍不能准确、及时地发现。因此，现实工作中迫切需要有更全面的、系统的、完善的防窃电技术和装置。上述产品大多有共同的缺陷：难以对电流型窃电做出准确判断；不能准确地追算出损失电量；分不清窃电方式；实时监控能力差。

## 1.4 本论文的主要工作

本论文包括以下研究内容：

- ① 研究电流法窃电检测方法：电流法窃电手段隐蔽，在窃电者人为短路或开路电流互感器二次绕组情况下，现有防窃电装置无法准确判别。本课题要研究的内容之一就是如何准确判断电流互感器的工作状况。
- ② 探讨损失电量的追算方法：损失电量追算通常由人工手工计算。如果能实时测量出电压、电流、相角、累计窃电时间等参数，则可以通过防窃电装置或防窃电电能表的内置软件自动追算出来。采用何种追算方法，如何作到准确，也是要研究的内容之一。
- ③ 提供窃电方式的判断标准：现有防窃电方法中，存在一个普遍问题，就是窃电判据存在漏洞或不完善的地方，有时容易导致电力部门与电力用户之间的纠纷。完善防窃电判据，是要解决的问题之一。
- ④ 结合理论分析，以 PIC16F877 芯片为核心，结合 CPLD 器件，制作出能够

---

实现上述功能的防窃电装置样机。

- ⑤ 针对不同计量方式，结合现有电力通讯网络，提出各种防窃电方案。计量方式不同，防窃电方案也不同，如何结合现有的电力网络，将防窃电技术融入网络中。目前，已有多种网络通讯平台在电力系统投入运行，分析各种平台对防窃电功能的适应性，能否有效利用这些平台进行防窃电功能扩展，也是本文要重点探讨的问题之一。

通过对上述问题的研究，希望能找到一种科学合理且经济的防窃电方案，为我国电力行业的防窃电领域做出应有的贡献。

## 2. 电能计量原理和计量方式

### 2.1 电能表的发展历程<sup>[6]</sup>

电能表作为一种计量电能的仪表，出现在世界上已有 100 多年的历史。1881 年他们利用电解原理研制成功最早的电能表，尽管这种电能表每只重达几十千克，十分笨重，又无精度的保证，但是，这在当时仍然被作为科技界的一项重大发明，受到人们的重视和赞扬，并很快地在工程上得到了采用。1888 年，三项交流电的出现和应用，又对电能的计量仪表提出了新的课题，从而推动了电能表的进一步发展。经过科学家们的努力，1890 年诞生了感应式电能表。在以后的几十年中，主要对感应式电能表的结构和性能不断使其合理、完善。由于感应式电能表具有结构简单、操作安全、维修方便、造价低廉、耐用等一系列优点，所以发展很快。现在每只电能表有的还不到 1kg 重，品种规格已发展至几十种。

随着电子元器件的发展和应用，目前国内外均已研制生产了电子式电能表。它具有以下优点：（1）科学技术含量高、技术性能优越、计量准确、稳定性能好；（2）节约能源、能耗小，自身能耗仅为机械表的二分之一；（3）体积小、耗材低，安装方便、快捷；（4）扩展功能，通过加装一些辅助设备就能实现分时计费功能和采用计算机实现远方自动抄表功能。因具有优越的技术特性和多种功能而被广泛采用。

我国电能表的生产始于 50 年代初，至今已有 30 多年历史。从产品品种和性能的发展来看，大致分为四个阶段：第一阶段是 50 年代产品，主要参照苏联标准，生产属仿苏产品，仿制生产的电能表以单相为主。第二阶段是 60 年代中期，国内一些生产厂按照 JB793-66《交流电度表》标准，自行设计和制造了一些各种不同型号的 2.0 级单相和三相有功电能表；到 70 年代初，全国电能表行业组织联合统一设计 DD28 型单相电能表，在这阶段，我国电能表制造、生产已具备了相当水平和规模。第三阶段是 80 年代初，根据国家对标准化工作的要求，为进一步提高我国电能表设计、制造工艺水平，加快产品升级和更新，适应出口的需要，积极参照采用国际标准（IEC）生产。到 80 年代中期，我国以能生产 0.5 级和 1.0 级三相有功电能表和 2.0 级三相无功电能表，电能表的质量和品种接近或达到国际水平。1987 年由哈尔滨电工仪表研究所组织联合设计 86 系列单相和三相电能表，该系列电能表在性能结构上又有了改进。第四阶段是 90 年代初期，国内一些厂家在引进与借鉴的基础上，

开发生产电子式电能表，随着设计制造技术的成熟，在 90 年代后期，国产电子式电能表在性能与质量上已较为成熟，已被电力部门广泛采用。

## 2.2 正确的电能计量方式<sup>[7]</sup>

电能表可按如下方式分类：

- 1) 按照结构原理来分，有感应式（机械式）、电子式（静止式）和感应电子式（机电式）三种；
- 2) 按所测的电源来分，有直流式和交流式两种；
- 3) 按所测的电能来分，有有功和无功两种；
- 4) 按接入线路的方式来分，有直接接入式、经互感器接入式；
- 5) 按用途来分，有单相、三相和特殊用途电能表（包括标准电能表、复费率电能表、预付费电能表及多功能电能表等）；
- 6) 按等级指数来分，有安装式（3.0、2.0、1.0、0.5、0.2 级）；携带式（0.2、0.1、0.05、0.02、0.01 级）。

目前，国内采用的主要有如下几种计量方式。

- 1) 高供高计（10KV 以上）经 PT 和 CT 接入式：适用于接入中性点有效接地的高压线路的计量装置。
- 2) 高供高计（10KV 及以下）经 PT 和 CT 接入式：适用于接入中性点非有效接地的高压线路的计量装置。
- 3) 高供低计（380V）不经 PT 但经 CT 接入式：适用于其负荷电流为 80A 以上时，宜采用经电流互感器接入式的电能表。
- 4) 高供低计（380V）直接接入式：适用于三相低压供电线路，其负荷电流为 80A 及以下时，宜采用直接接入式电能表。
- 5) 单相直接接入式计量：适用于单相低压供电线路，负荷电流 80A 及以下。
- 6) 单相经 CT 接入式计量：适用于单相低压供电线路，其负荷电流为 80A 以上。

在实际应用中，应根据不同的被测电路（单相、三相三线、三相四线、高压和低压）、负荷情况以及测量对象来选定适当的电能表、互感器，是保证计量准确的又一关键环节。因为本论文的研究对象主要是针对有功计量电路的防窃电，以下重点讨论各种电路有功电能计量的各种计量方式。

### 2.2.1 直接接入计量方式

对三相四线制电路来讲,可以选用一只三相四线有功电能表,也可选用三只单相有功电能表。此种接线方式一般是在低压配电系统中,中性点直接接地的三相四

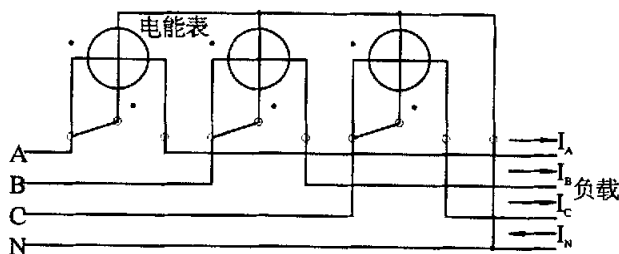


图 2.1 三相四线直接接入计量方式

Figure 2.1 Three-phase Four-line Meter

线制系统中应用,而且不论三相电压、电流是否对称都能正确计量。接线方式如图 2.1 所示。无论负载是否对称,电能表都能正确计量。

在农村配电系统中,宜采用三只单相电能表的接线方式,当一相发生故障时,就会有一只单相电能表的读数出现差异,比较容易判断出是否有异常计量状况。而用一只三相四线的电能表,当一相故障时,电能表圆盘转动虽然变慢,造成电量的少计,但很难判断出是负荷变化了还是有了故障。

家庭用户和小容量照明负荷大多数均采用单相直接接入式计量,其接线图如图 2-2 (a) 所示。

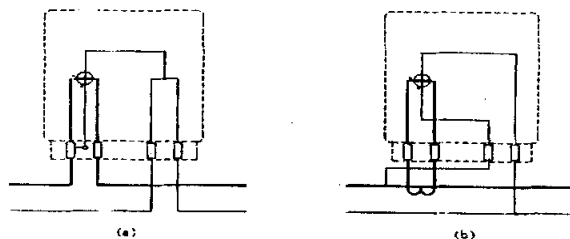


图 2.2 单相表计量方式

Figure 2.2 Single-phase meter Connection

### 2.2.2 经互感器接入计量方式

经互感器接入计量方式可分为只经电流互感器 (CT) 接入式和同时经电流互感器 (CT)、电压互感器 (PT) 接入式。对于计量单相大容量照明负荷 (负荷电流大

于 80A)，采用经 CT 接入式计量，其接线图如图 2.2 (b) 所示。对于三相四线制电路，有两种经互感器接入计量方式：电压直接接入，电流经 CT 接入式（完全星形接法），如图 2.3 所示。②电压经 PT 接入（完全星形接法），电流经 CT 接入式（完全星形接法），如图 2.5 所示。

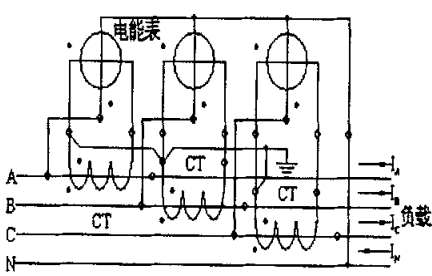


图 2.3 三相四线只经 CT 接入计量

Figure 2.3 Three-phase Four-line Meter  
Connection with CTS Only

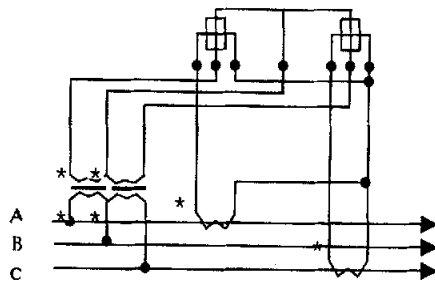


图 2.4 三相三线经 PT、CT 接入计量

Figure 2.4 Three-phase Three-line Meter  
Connection with CTS and PTS

三相三线制高压电路主要采用如下计量方式：电压经 PT 接入（不完全星形接法），电流经 CT 接入式（不完全星形接法），如图 2.4 所示。

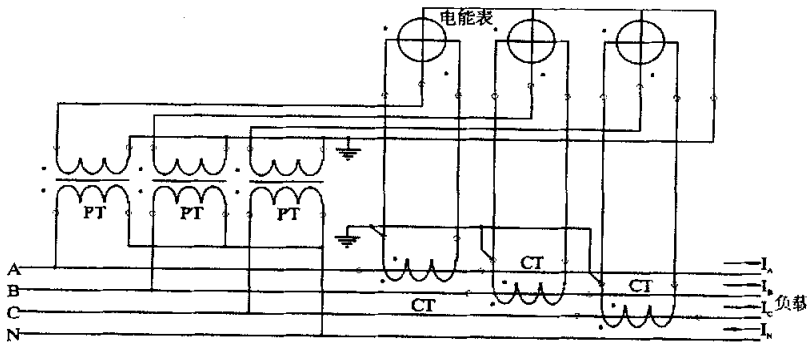


图 2.5 三相四线经 PT 和 CT 接入

Figure 2.5 Three-phase Four-line Meter Connection with CTS and PTS

2.3 本章小结

本章对电能表的工作原理和单相、三相电路正确计量方式作了简单的介绍。如果电能表的接线方式发生了变化，就会对电能计量带来影响，为窃电创造条件。我们将对各种窃电现象进行详细的分析和判断。

### 3. 三相电路防窃电及其检测技术研究

#### 3.1 概述

电能计量装置包括电能表、互感器以及与之相连的二次回路。窃电的手段虽然五花八门，但万变不离其宗，最常见的是从电能计量的基本原理入手。一个电能表计量电量的多少，取决于电压、电流、功率因数三要素和时间的乘积，因此，只要改变三要素和时间中任何一个，即可造成电能表慢转、停转甚至反转，从而达到窃电目的。另外，通过改变电表本身机械或电子性能的办法，扩大计量系统的测量误差，也可达到窃电的目的。至于各种私拉乱接、无表用电的行为，更属于明目张胆的窃电。针对各种有功电能表的窃电手段，不外乎以下五类方式<sup>[2]</sup>：

- 1) 电压法窃电：改变电压回路接线造成电压回路故障。如断开某相电压回路，引起失压；虚接某相电压端子，引起欠压。
- 2) 电流法窃电：改变电流回路接线造成电流回路故障。如短路或开路 CT 二次侧，使电流无法正常流入电能表；在电表接线端子处短接或断开电流回路，使电流无法正常流入电能表；虚接电流端子，使流入电能表的电流减少。
- 3) 移相法窃电：通过改变电能表正常接线，引起相位异常的窃电方式。如反接 PT 一次侧或二次侧接线，引起相位异常；反接 CT 二次侧接线，引起相位异常；接入同一相电压或电流，引起相位异常；在电压回路或电流回路接入其它负载，改变正常相位等。
- 4) 扩差法窃电：采用扩大电能计量装置误差的方法窃电。如通过私拆电表，改变电表内部机械结构性能；用外力损坏电表；改变电表安装条件；利用磁场或谐波干扰等手段来扩大电能计量系统误差等。
- 5) 分流法窃电：负载不经过或部分经过电能计量装置的窃电方式。如将负载接在电能表进线之前，空置电能表，完全不经电能表计量；在在电能表进线之前搭接其它负载，电能表仅计量部分负载等。

下面分别针对三相三线制高压计量和三相四线制地低压计量特点，对上述五类窃电方法中每一类具有代表性的窃电手段进行详细的理论分析，找出其电量特征或物理现象，从而推导窃电判据，找出相应的窃电检测方法。

损失电量追算是困扰电力计量部门的又一难题，由于用户窃电和计量部门发现窃电在时间上常常不一致，计量部门发现用户窃电后，通常是依据窃电现场发现的

窃电手段作为计算损失电量依据,但电力部门难以确定窃电时间长短,这种方法难以准确追算出实际损失的电量。通常用户采用不同方法窃电、窃电时间又不规律时,上述追算方法会有较大误差。如果采用本文提出的防窃电检测技术,由于它采集了电压、电流,具备实时监测计量状态的能力,即能够确定异常状态类型、故障起始时刻、故障结束时刻,因此,只要推算出故障时间段内假设没有故障时电能表应该记录的电量,即可对损失电量进行在线追算。下面我们也讨论电量追算方法。

### 3.2 三相三线制高压电能计量防窃电分析

35KV 及以下电压等级的三相三线制电能计量方式主要采用三相三线制经 CT 和 PT 接入式计量。以此种计量方式(三相三线制经 CT 和 PT 接入式,不完全星形接法如图 3.1 所示)为例,利用向量分析法,详细介绍此种计量方式下的防窃电技术。

为简化计算,现假设:

- 1) 正常情况下三相负载对称,令  $U_{AB}=U_{CB}=U_{CA}=U$ ,  $I_A=I_B=I_C=I$ ,  $\varphi_A=\varphi_B=\varphi_C=\varphi$ 。
- 2) 由于计量的电量与计量功率只相差一个时间变量  $T$ , 为公式简化,采用功率  $P$  算式。
- 3) 为了便于对各种故障进行理论分析,现假定在发生某类故障时,没有其它类故障同时发生。

如果将防窃电技术融入电能表,则电量追算可进一步简化。现以融入了防窃电技术的电能表作为分析对象,对各种类型防窃电方法进行具体分析。图 3.1 是正常情况下,三相三线制经 CT 和 PT 接入计量方式及其向量图,实测的功率计量公式为:

$$\begin{aligned}
 P &= U_{AB} I_A \cos(30^\circ + \varphi_A) + U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi_C) \\
 &= UI \cos(30^\circ + \varphi) + UI \cos(30^\circ - \varphi) \quad \dots\dots\dots (3-1) \\
 &= \sqrt{3}UI \cos \varphi
 \end{aligned}$$

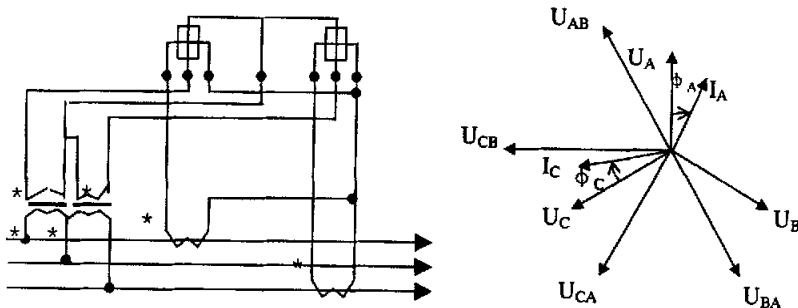


图 3.1 三相三线制经 CT 和 PT 接入式及其向量图

Figure 3.1 Three-phase Three-line Connection with CTS and PTS



### 3.2.1 断开或虚接电能表电压回路(电压法窃电)

#### 3.2.1.1 窃电手段

由电能表的接线可以看到, 只要将接入电能表的电压回路断开或松掉, 导致电能表电压回路失压或欠压, 电能表的计量就会不准, 常见的手段有:

- ① 虚接电能表电压线圈, 造成接线端子处压降增加。
- ② 在电压回路中串接电阻分压, 使加在电能表电压线圈上的电压减少。
- ③ 将经 PT 接入的电能计量装置的二次回路断开。
- ④ 松动经 PT 接入的电能计量装置的二次回路接线端子, 造成接线端子处压降增加。
- ⑤ 断开 PT 一次回路。

通过断开电能表的电压回路进行窃电, 在查获的各种窃电案件里屡见不鲜。下面通过向量图具体分析三种电压断相情况。

A 相断相时, 从向量图 3.2 可以看出,  $U_{AB}=0V$  (理想状况下为零。实际上, 根据负载的不同, AB 侧仍然有低于 30V 的残余电压)。C 相断相时, 从向量图 3.3 可以看出,  $U_{CB}=0V$  (理想状况下为零。实际上, 根据负载的不同, CB 侧仍然有低于 30V 的残余电压)。B 相断相时, 从向量图 3.4 可以看出,  $U_{AB}=-U_{CB}=0.5U_N$  ( $U_N=100V$ ), 即  $U_{AB}$  与  $U_{CB}$  大小相等, 方向相反, 幅值为正常值的一半, 约 50V。

A、B、C 三相任意相欠压, 均会导致  $U_{AB}$  和  $U_{CB}$  幅值降低, 通过设置相应欠压阈值, 可以对欠压窃电进行检测。

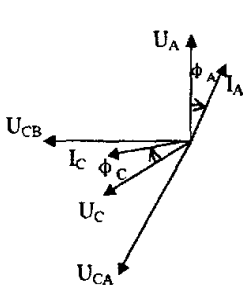


图 3.2 A 相电压断线

Figure 3.2 Voltage A open

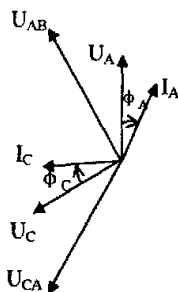


图 3.3 C 相电压断线

Figure 3.3 Voltage C open

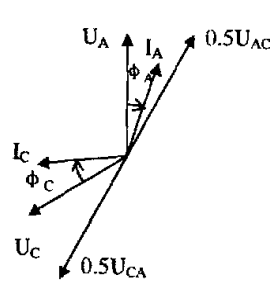


图 3.4 B 相电压断线

Figure 3.4 Voltage B open

#### 3.2.1.2 检测方法

判断电压法窃电, 需要检测以下参数: 线电压  $U_{AB}$ 、 $U_{CB}$  幅值和线电流  $I_A$ 、 $I_C$  幅值。失压和欠压时, 表现在参数上的变化不同, 检测判据可以由下述原则确定:

- ① A、B、C 相欠压，均可导致  $U_{AB}$ 、 $U_{CB}$  降低，由于各地电网质量不一样，欠压范围也不一致，通常整定为额定电压的 80%，这个阈值应该可调，由用户自行设定。也可将此功能设为报警或关闭此项功能，避免误判。
- ② A 相失压，会使  $U_{AB}$  电压小于 30V，但  $U_{CB}$ 、 $U_{AC}$  电压正常；C 相失压，会使  $U_{CB}$  电压小于 30V，但  $U_{AB}$ 、 $U_{AC}$  电压正常；B 相失压，会使  $U_{AC}$  电压正常，但  $U_{AB}$ 、 $U_{CB}$  电压为正常值一半，同时，它们相位相差  $180^\circ$ 。
- ③ 失压和欠压时，必须判断该相是否有 CT 开短路情况发生。如果有 CT 开短路，则不判断欠压和失压。
- ④ 停电和三相失压区别在于是否存在电流，有电流无电压为失压，无电压也无电流为停电。

3.2.2 短接或断开电能表电流回路(电流法窃电)

3.2.2.1 窃电手段

短接或断开 CT 二次侧的接线或直接从外部接线端子处对电能表的电流线圈进行短路、开路或分流，使流过电能表电流线圈的电流减少甚至为零，电能表停止计量短路相或开路相的电能或少计电能，从而达到窃电的目的。近年据报道，有的不法用户窃电手段越来越高，它们采用高科技手段，在电能表内安装执行机构，窃电人员采用遥控器控制执行机构动作，使电能表电流回路的一相或两相直接短路，导致电表内进入计量装置的电流大大减少，从而疯狂窃电。这种窃电方法手段隐蔽，性质恶劣，在全国部分省市

均有发现。如何检测这类窃电方式，是令电力部门十分头痛的一个难题。由于 CT 是外接的计量设备，电能表无法直接检测 CT 的工作状况（开路、短路、正常）。有些厂家的防窃电装置号称具有失压检测、失流检测功能，但仔细分析即可知道，当电压正常，外接 CT 回路不正常时（如开路、短路等），流入电能表的电流几乎为零，如

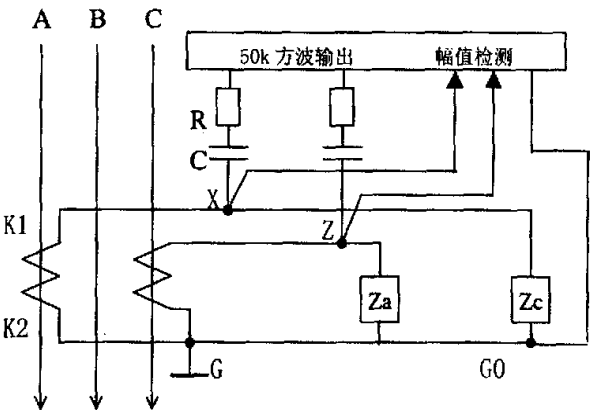


图 3.5 三相三线制经 CT 和 PT 接入式 CT 检测原理图  
Figure3.5 CT Detection Principle for Three-phase  
Three-line Connection with CTS and PTS

果防窃电装置没有 CT 开短路检测功能, 装置将会判断电能表处在有电压、无电流的正常状况, 事实上, 用户正在采用电流法窃电!

只要对进入电能表电流回路的任何地方实施了短路或开路, 都将造成流入电能表的电流减少, 使得电能表计量的电量比实际电量减少。常见的窃电手段有:

- ① 对 CT 二次端子进行短路。
- ② 对电能表电流线圈接线端子进行短接。
- ③ 开路 CT 二次侧 (高压计量方式下, 此种窃电方式很少)。
- ④ 虚接或断开电能表电流线圈接线。

这种窃电方法尤以短路电流回路最为普遍, 窃电的隐蔽性也较强, 操作起来十分方便。对电能表的电流回路插接短路环, 不会对电能表和电流互感器造成任何外部或内部的损伤。而且一旦发现有查窃电人员检查时, 立即取下短路环即可。

### 3.2.2.2 检测方法<sup>[30]</sup>

CT 线圈、电能表电流线圈短路和开路的检测一直以来都是防窃电装置难以解决的问题。为此, 本文专门提出了对 CT 回路进行短路和开路检测的专用电路, 实现了动态检测线圈的短路和开路故障的功能, 较好地解决了这个问题。

如图 3.5 所示, 防窃电装置的 50kHz 方波信号输出端串接电阻 R、电容 C 后接到电流互感器 K1 端, 电流互感器公共端 G 与 50kHz 高频方波信号回路 G0 端接在一起, X、Z 分别为 A、C 相 CT 方波信号幅值测试点,  $Z_a$ 、 $Z_c$  表示 CT 二次回路表计的负载阻抗。调节电阻 R 和电容 C 的值, 使高频回路谐振点在 50kHz 附近, 同时, R 应选取较大值, 以保证流入高频回路的工频电流极小。回路正常工作时, 从 X、Z 点上测试出来的方波幅值在正常允许范围之内, 防窃电装置不会判断为开、短路故障。

- ① 当 CT 二次侧回路的任意相出现开路或接触不良时, 因检测回路电气参数发生变化, 改变了检测回路原有工作状态, 从 X、Z 点上测试出来的方波幅值较原先正常值大, 依据一定阈值, 防窃电装置判断为 CT 开路, 并启动故障记录, 计算损失电量。
- ② 当 CT 二次侧回路的任意相出现短路时, 因检测回路电气参数发生变化, 改变了检测回路原有工作状态, 从 X、Z 点上测试出来的方波幅值变小, 依据一定阈值, 防窃电装置判断为 CT 短路, 并启动故障记录, 计算损失电量。

这种检测方法应用到实际产品上后, 发现它能有效检测出外接 CT 的工作状况, 工作稳定可靠。但由于不同 CT 的阻抗特性不同, 如果需要全面适应不同 CT, 还需要在辅助电路上作进一步改进。

3.2.3 改变电能表电压回路接线(移相法窃电之电压错相)

3.2.3.1 窃电手段

改变电能表电压回路的接线，就改变了电能表正确的电压相位关系，电压与电流间的相位关系也会随之而变，使电能计量不准，从而达到窃电的目的。三相三线制计量方式下，改变接线可在 PT 的一次侧、二次侧或电能表进线端子处进行。下面以 PT 二次侧 AB 相电压反接为例。其接线及向量图如图 3.6 所示。

通过将 PT 二次侧接线端反接，使电压、电流间的相位关系发生改变，导致电能表电能计量不准。

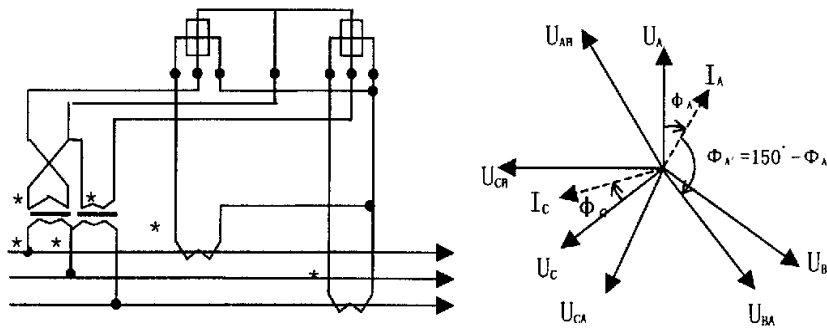


图 3.6 PT 二次侧 AB 相电压反接

Figure3.6 Phase AB Interchanging in PTS' Second Side

此时电能表计量功率为：

$$\begin{aligned} P &= U_{BA} I_A \cos(150 - \varphi_A) + U_{CB} I_C \cos(30 - \varphi_C) \\ &= -UI \cos(30 + \varphi) + UI \cos(30 - \varphi) \dots\dots\dots (3-2) \\ &= UI \sin \varphi \end{aligned}$$

可见电能表计的电量将根据功率因数大小变化，实际记录的电量可能为正，也可能为负。

3.2.3.1 检测方法

判断电压错相窃电，需要检测以下参数：线电压  $U_{AB}$ 、 $U_{CB}$ 、 $U_{CA}$  的幅值和相角。检测判据可以由下述原则确定：

- ① 正确的电压相序为  $U_{AB}$  滞后  $U_{CB}$   $60^\circ$ ， $U_{CB}$  滞后  $U_{CA}$   $60^\circ$ 。一旦有电压接线错误发生，线电压间的相序会发生变化，不满足正常的相序条件，即可判断为电压错相。
- ② 由于电网电压波动，三个线电压之间相角不可能严格满足滞后  $60^\circ$  条件，

因此,考虑了电压不平衡容许范围后,适当修正相角容许范围,可以避免误判。

③ 判断电压错相的前提是没有失压情况发生。否则会因为相位误差较大导致错判。

④ 对于三相电压依次换位的情况,完全满足正常相位条件,尽管它能够通过电压错相检测,但是电流相位的检测是以电压的相位为基准的,一旦对应相的电压电流间的相位关系发生了改变,它将无法通过电流错相检测。

### 3.2.4 改变电能表电流回路接线(移相法窃电之电流错相)

#### 3.2.4.1 窃电手段

改变电能表电流回路的接线,同样会改变电能表正确的电流相位关系,电压与电流间的相位关系也会随之而变,使电能计量不准,从而达到窃电的目的。三相电路中,改变电能表电流回路接线的方式有很多种,改变接线可在 CT 的二次侧进行,将电能表电流回路的极性反接为电流反相故障,将两相或三相电流接线交换为电流错相故障。以下以 CT 二次侧 A 相电流反相为例进行防窃电分析。如图 3.7。

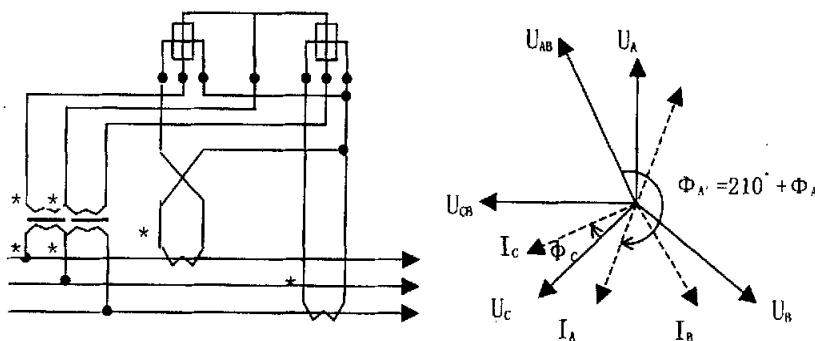


图 3.7 A 相 CT 反相时电压、电流向量图

Figure3.7 Current A in Reverse

此时电能表计量的功率为:

$$\begin{aligned}
 P &= U_{AB} I_A \cos(210^\circ + \varphi_A) + U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi_C) \\
 &= -UI \cos(30^\circ + \varphi) + UI \cos(30^\circ - \varphi) \quad \dots\dots\dots (3-3) \\
 &= UI \sin \varphi
 \end{aligned}$$

可见电能表计的电量将根据功率因数大小变化,实际记录的电量可能为正,也可能为负。

#### 3.2.4.2 检测方法

判断电流错相窃电，需要检测以下参数：线电压  $U_{AB}$ 、 $U_{CB}$ 、 $U_{CA}$  和相电流  $I_A$ 、 $I_C$  的幅值和相角。检测判据可以由下述原则确定：

- ① 考虑到极限情况，即电网是纯容性负载和纯感性负载时，电压电流相序应处在一个有限的范围，此时认为相序正常。这样，尽管有可能漏判极少数错相故障，但可以保证不误判。纯容性负载时， $U_{CB}$  滞后  $I_C$   $120^\circ$ ，纯感性负载时， $U_{CB}$  超前  $I_C$   $60^\circ$ ，因此， $U_{CB}$  与  $I_C$  正常相位关系为二者之间；同理，纯容性负载时， $U_{AB}$  滞后  $I_A$   $60^\circ$ ，纯感性负载时， $U_{AB}$  超前  $I_A$   $120^\circ$ ，因此， $U_{AB}$  与  $I_A$  正常相位关系为二者之间。
- ② 由于电网电压波动，考虑了电压不平衡容许范围后，适当修正相角容许范围，可以避免误判。
- ③ 判断电流错相的前提是没有失压、失流、CT 故障情况发生。

### 3.2.5 电量追算

在已知故障类型，且装置（电能表、防窃电专用监测装置等）能够实时记录各模拟量大小情况下，可以根据相关公式进行电量追算。现令在故障发生的时间段内，电能表实际测量的功率为  $P$ ，假设没有发生故障时，电能表本应该记录的追算功率为  $P'$ ，见式（3-4）。其它变量取值由下述原则确定：1、两个线电压幅值正常时，线电压取实测值；任一线电压幅值异常时（欠压或失压），两个线电压均取额定值（100V）。2、无 CT 开路或短路故障时，该相电流取实测值；有 CT 开路或短路时，该相电流取计量 CT 额定值。3、有错相故障时，每一相功率因数取额定值 1 计算，无错相故障时，取实测值计算。

$$P' = U_{AB} I_A \cos(30 + \varphi'_A) + U_{CB} I_C \cos(30 - \varphi'_C) \cdots \cdots (3-4)$$

利用对应算法，依 3-4 式计算出追算功率  $P'$ ，乘上对应的故障时间，得到相应追算电量，再将该电量减去电能表在故障时间段内记录的电量，即可得到损失电量。由于  $P$  在错相情况下可能为正也可能为负，此时要根据不同的电能表来追算损失电量  $W_{\text{损}}$ ：

#### ● 防止逆电能表

$$W_{\text{损}} = (P' - P) * T \quad (P \text{ 为正数时}) \cdots \cdots (3-5)$$

$$W_{\text{损}} = P' * T \quad (P \text{ 为负数时}) \cdots \cdots (3-6)$$

#### ● 有反相计量功能电能表

$$W_{\text{损}} = (P' - |P|) * T \quad (P \text{ 为有符号数}) \cdots \cdots (3-7)$$

- 无反相计量且无止逆功能电能表

$$W_{\text{窃}} = (P' - P) * T \quad (P \text{ 为有符号数}) \dots\dots\dots (3-8)$$

3.3 三相四线计量电路窃电现象及其检测技术分析

针对三相四线制低压计量方式有多种，在此，选取接线较复杂，使用最普遍，存在窃电可能性最大的一种计量方式——三相四线制经 CT 接入式为例，详细介绍此种计量方式下的防窃电技术。

为简化计算，设定：

- 1) 正常情况下三相负载对称，即令  $U_A=U_B=U_C=U$ ， $I_A=I_B=I_C=I$ ， $\varphi_A=\varphi_B=\varphi_C=\varphi$ 。
- 2) 由于计量的电量与计量功率只相差一个时间变量 T，为公式简化，采用功率 P 算式。
- 3) 为了便于对各种故障进行理论分析，现假定在发生某类故障时，没有其它类故障同时发生。

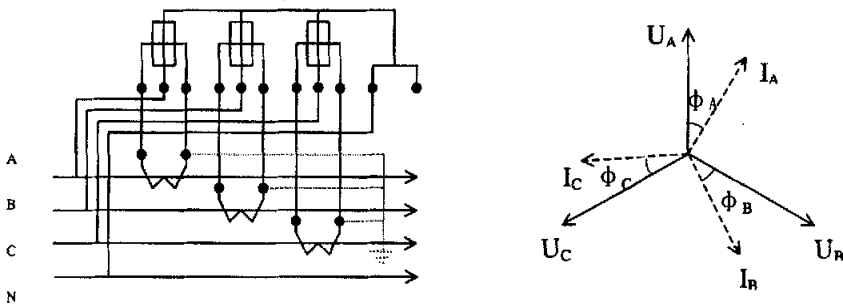


图 3.8 三相四线制经 CT 接入式及其向量图

Figure3.8 Three-phase Four-line Connection with CTS Only

图 3.8 是正常情况下，三相四线制经 CT 接入计量方式及其向量图。同时，实测的功率计量公式为：

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C \dots\dots\dots (3-9)$$
$$= 3UI \cos(\varphi)$$

如果将防窃电技术融入电能表，则电量追算可进一步简化。现以融入了防窃电技术的电能表作为分析对象，对各种类型防窃电方法进行具体分析。

### 3.3.1 断开或虚接电能表电压回路(电压法窃电)

#### 3.3.1.1 窃电手段

由图 4.1 可以看到, 只要将接入电能表电压回路接线断开或虚接, 导致电能表电压回路失压或欠压, 电能表的计量就会不准, 常见的手段有:

- ① 虚接电能表电压线圈, 造成接线端子处压降增加。
- ② 在电压回路中串接电阻, 使加在电能表电压线圈上的电压减少。
- ③ 将电压线线芯割断, 但电线外皮无明显划痕, 造成失压或欠压。

通过断开电能表的电压回路进行窃电, 各种用户均有, 特别是一些工业用户, 窃电造成的损失巨大。

#### 3.3.1.2 检测方法

判断电压法窃电, 需要检测以下参数: 线电压  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  幅值和相电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  幅值。检测判据可以由下述原则确定:

- ① 对电能表电压回路进行检测, 将检测到的电压有效值与欠压门限电压值和失压门限电压值相比较, 同时判断有无电流。
- ② 考虑到采样误差、环境干扰和电压波动等因素, 可设置失压门限电压为额定相电压的 10%。
- ③ 由于各地电网质量不一样, 欠压范围也不一致, 通常整定为额定电压的 80%, 这个阈值应该可调, 由用户自行设定。也可将此功能设为报警或关闭此项功能, 避免误判。
- ④ 失压和欠压时, 必须判断该相是否有 CT 开短路情况发生。如果有 CT 开短路, 则不判断欠压和失压。
- ⑤ 停电和三相失压区别在于是否存在电流, 有电流无电压为失压, 无电压也无电流为停电。

### 3.3.2 短接或断开电能表电流回路(电流法窃电)

#### 3.3.2.1 窃电手段

这种窃电手段较其它手段隐蔽, 具体窃电手法与针对三相三线制计量装置的窃电手法类似。

#### 3.3.2.2 检测方法

本章 3.2.2.2 节已经提出了一种幅值检测方法, 为了更精确地测出开短路还可以利用“幅值+相位”检测。这种检测方法已被成功地应用于样机中。



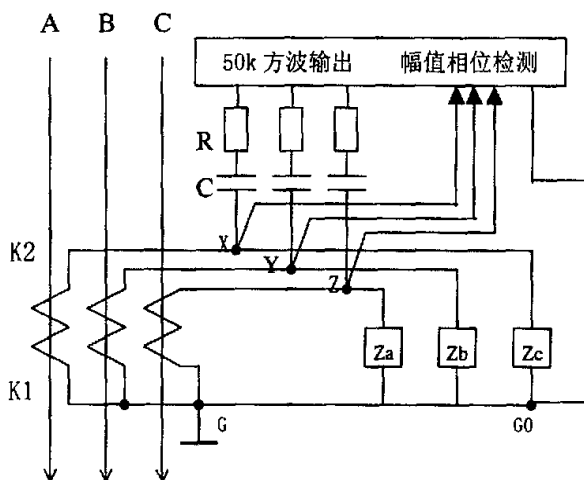


图 3.9 三相四线制经 CT 接入式 CT 检测原理图

Figure 3.9 CT Detection Principle for Three-phase Four-line  
Connection with CTS

如图 3.9 所示, 防窃电装置的 50kHz 方波信号输出端串接电阻  $R$ 、电容  $C$  后接到电流互感器  $K1$  端, 电流互感器公共端  $G$  与 50kHz 高频方波信号回路  $G0$  端接在一起,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别为 A、B、C 三相 CT 方波信号幅值测试点,  $Za$ 、 $Zb$ 、 $Zc$  表示 CT 二次回路表计的负载阻抗。调节电阻  $R$  和电容  $C$  的值, 使高频回路谐振点在 50kHz 附近, 同时,  $R$  应选取较大值, 以保证流入高频回路的工频电流极小。回路正常工作时, 从  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  点上测试出来的方波

幅值和相位在正常允许范围之内, 防窃电装置不会判断为开、短路故障。

- ① 当 CT 二次侧回路任意相出现开路或接触不良时, 因检测回路电气参数发生变化, 改变了检测回路原有工作状态, 从  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  点上测试出来的方波幅值较原先正常值大, 相位也有改变, 依据一定阈值, 装置判断为 CT 开路, 并启动故障记录, 计算损失电量。
- ② 当 CT 二次侧回路的任意相出现短路时, 因检测回路电气参数发生变化, 改变了检测回路原有工作状态, 从  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  点上测试出来的方波幅值变小, 相位也有改变, 依据一定阈值, 防窃电装置判断为 CT 短路, 并启动故障记录, 计算损失电量。

上述检测方法可以有效地检测出电流法窃电, 目前, 也有厂家推出智能电流互感器, 它能自动判断出 CT 自身是否开路或短路, 并给出报警标识。这也是一种较好的防止电流型窃电的方法。加强对 CT 的定时校验, 提高 CT 自身防窃电能力更是防范此类窃电的有效手段。

### 3.3.3 改变电能表电流回路接线(移相法之电流错相)

#### 3.3.3.1 窃电手段

通过将 CT 一次侧、二次侧或电能表电流线圈接线端反接, 使单相、两相或三相电流反相, 电压、电流间的相位关系发生改变, 导致电能表电能计量不准。

同对电压回路接线错的分析一样，当将 A 相电流反相时，相量图如图 3.10 所示，电能表计量的功率为：

$$\begin{aligned}
 P' &= U_A I_A' \cos \varphi_A' + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C \\
 &= -UI \cos \varphi + UI \cos \varphi + UI \cos \varphi \quad \dots \dots \dots (3-10) \\
 &= UI \cos \varphi
 \end{aligned}$$

可见电能表计的电量为实际值的三分之一。

### 3.3.3.2 检测方法

判断电流错相窃电，需要检测以下参数：相电压  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  和相电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  的幅值和相角。检测判据可以由下述原则确定：

- ① 考虑到极限情况，即电网是纯容性负载和纯感性负载时，电压电流相序应处在一个有限的范围，此时认为相序正常。这样，尽管

有可能漏判极少数错相故障，但可以保证不误判。纯容性负载时， $U_A$  滞后  $I_A$   $90^\circ$ ，纯感性负载时， $U_A$  超前  $I_A$   $90^\circ$ ，因此， $U_A$  与  $I_A$  正常相位关系为二者之间；同理，其它两相判据范围相同。

- ② 由于电网电压波动，考虑了电压不平衡容许范围后，适当修正相角容许范围，可以避免误判。
- ③ 判断电流错相的前提是没有失压、失流、CT 故障情况发生。

### 3.3.4 电量追算

同三相三线制电路电量追算方法。在故障发生的时间段内，电能表实际测量的功率为  $P$ ，现假设没有发生故障时，电能表本应该记录的追算功率为  $P'$ ，见式 (3-11)，式中各变量取值由下述原则确定：式中每一相电流、电压、相角值依下述准则而定：1、相电压幅值正常时，该相电压取实测值；相电压幅值异常时（欠压或失压），该相电压取额定值（220V）。2、无 CT 开路或短路故障时，该相电流取实测值；CT 开路或短路时，该相电流取计量 CT 额定值。

$$P' = U_A I_A \cos(\varphi_A) + U_B I_B \cos(\varphi_B) + U_C I_C \cos(\varphi_C) \quad \dots \dots \dots (3-11)$$

计算出追算功率  $P'$ ，乘上对应的故障时间，得到相应追算电量，再将该电量减去电能表在故障时间段内记录的电量，即可得到损失电量。由于  $P$  在错相情况下可能为正也可能为负，此时要根据不同的电能表来追算损失电量  $W_{\text{损}}$ ，具体算法公式与 (3-6)、(3-7)、(3-8)、(3-9) 相同。

3.3.5 扩差法窃电

扩差法窃电是采用扩大电能计量装置误差的窃电方法。由于电力部门对明显损坏电能计量装置的行为惩罚力度大，一般窃电者不敢明目张胆地破坏表计，在表计外观留下明显损坏痕迹。目前看来，隐蔽地采用技术手段改变表计正常工作条件，使电能表计量误差扩大，是扩差法窃电主流。

对各种三相计量电路而言，可以根据窃电时作用的对象不同，将扩差法分为两类：一类是表外扩差法窃电，一类是表内扩差法窃电。

所谓表外扩差法窃电是指扩大除电能表以外的其它计量辅助设备的误差，达到窃电目的。由于采用了 CT 和 PT 作为辅助计量设备，它们通常没有整体密封，裸露在外的部分就容易被人动手脚。在抓获的窃电案例中，就发现有的用户在 PT 的二次侧串接电阻，降低二次电压窃电；有的用户甚至整体更换了组合式高压互感器，改变 CT 参数窃电等等。

表内扩差法窃电是指采用各种方法，扩大电能表本身误差来窃电。如仿制铅封，私拆电表，改变电表内部机械结构性能；用外力损坏电表；改变电表安装条件；在电能表上加强磁场干扰；大谐波干扰；在电能表上钻孔，卡住表盘；取下电能表表

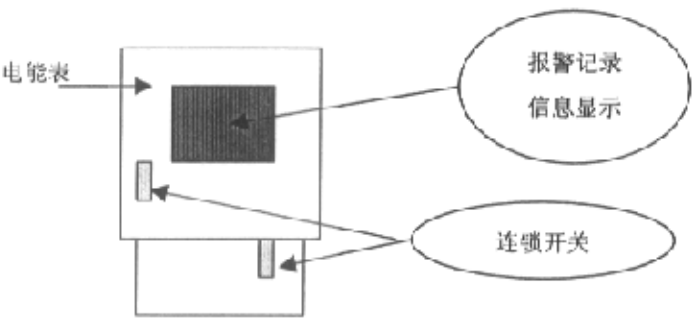


图 3.11 电表开启报警检测

Figure3.11 The Alarm Detection for Ammeter opened

盖内的电压小钩等手段来扩大电表计量误差。

对这种类窃电方式的检测可从多方面入手，首先是加强管理，由于辅助计量设备位置的特殊性，需要计量人员加强巡检，定时校验。从现

有防此类窃电方法的产品来看，防窃电计量箱是一个较好的选择。它将电能表、辅助计量设备全部封入计量箱内。同时采用先进的密码锁和无线报警装置防范此类窃

电。其次要从电能表本身考虑，表内扩差法窃电时，大部分情况下，需要开启防撬铅封，打开电能表表盖，现提出防范表内扩差法窃电的一种方案，如图 3.11,在电能表表盖处设置多个连动开关，当发现表盖被打开时，电能表立即记录下开启表盖发生的时刻，并存入历史记录，供用电人员查看。

### 3.3.6 电能表前分流

#### 3.3.6.1 窃电手段

在电能表前私自接线用电，这样就有一部分电流没有经过电能表，使电能表少计电量。这种窃电手段在三相三线制和三相四线制计量电路中同样存在。在此一并阐述。

#### 3.3.6.2 检测方法

在用户刀闸前加装一组表前 CT，将表前 CT 电流和计量 CT 电流进行比较，就能检测出分流故障。若检测到的两个电流值之差大于预先设定的阈值范围，就认为有表前分流窃电。显然，保证进入电能表前的电流不被分流是正确检测分流故障的前提条件。图 3.12 是检测表前分流的示意图。这种检测方法的实现可以在不同装置或系统内实现：在专用防窃电装置内可以实现这一功能；在电能表内可以内置这一功能；在负荷控制系统或配电自动化网络内，利用保护 CT 同样可以实现这一功能。

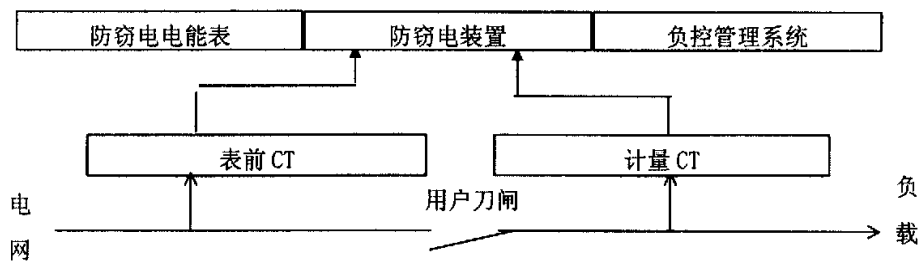


图 3.12 表前分流检测示意图

Figure3.12 The Shunt Detection before Ammeter

### 3.4 本章小结

本章对常见的窃电现象进行了分析，把窃电方法归并五类：电压法窃电、电流法窃电、移相法窃电、扩差法窃电、分流法窃电。从理论上分析了各类窃电方法引起的电压、电流和功率因素变化，从而提出了检测窃电方法和窃电判据，为准确判断窃电行为和电量追算提供了理论保证。

## 4. 防窃电装置硬件设计

### 4.1 防窃电样机功能要求

通过前述对防窃电技术的研究,不难发现防窃电技术的重点和难点。首先是电流互感器开短路检测技术,文中提出的原理方法是否可以在实践中实现?CT开短路检测灵敏度和可靠性如何?其次,向量分析法是否可以通过在线检测可靠地判断窃电现象?故障判据是否合理可靠?为了从实践上解答这些疑问和对原理进行验证,有必要研制出相应的防窃电装置,验证关键技术。为此,防窃电装置需要实现以下功能:

① 电压法窃电检测

失压、欠压、缺相、停电监测。

② 电流法窃电检测

电流互感器短路或开路监测。

③ 移相法窃电检测

电流、电压错相监测。

上述功能要求可以通过论文第三章所论述的方法检测,作者研制了两种不同类型防窃电装置,一种适用于三相四线制,一种适用于三相三线制。这两种装置主要目的是求证CT开短路检测和故障判据的合理性,同时预留了部分扩展接口,并没有涉及完整的防窃电功能。论文将对三相四线制防窃电样机作重点阐述,同时简要介绍三相三线制防窃电样机。

### 4.2 系统原理设计

根据防窃电样机的功能要求,要求能对各种故障用电做出准确判断并采用相应方式报警,尤其要判断出CT开短路故障。因此,防窃电样机的主控芯片必须为一智能芯片。

为了对故障用电做出判断,系统必需读入相应的电压电流信息。模拟量信号采样是有效检测故障的关键。三相四线制样机有9个模拟量输入,三相三线制样机有7个模拟量输入,采样的同步性,A/D转换的精确度等要求都要纳入硬件电路设计的考虑范围。

对于电流互感器二次侧短路和开路故障，利用如第三章所述的电流互感器短路、开路检测电路——三相四线制样机采样如图 3.10 所示电路，三相三线制样机采用如图 3.5 所示电路。两者不同之处在于三相四线制样机还采用了相位比较技术，相位比较功能在复杂可编程逻辑器件（CPLD）内完成，检测可靠性进一步加强。

为了能记录故障起止时刻，需要有实时时钟电路；为了记录和长期可靠存贮故障信息，样机中需要有掉电不丢失数据的可读写的非易失存储器；为了进行故障查询和显示，需要有键盘和显示接口电路；为了联网监控，样机中还要有通讯接口。

由于本文重点研究的是防窃电判据的可行性以及 CT 开短路检测电路的可行性，故而研制了两种防窃电样机，三相三线制样机具有 CT 开短路检测能力和故障判断能力，它采用两个 LED 显示 18 种故障状态和停电状态，但没有对其进行进一步功能扩展，它的硬件结构框图如图 4-1 所示。

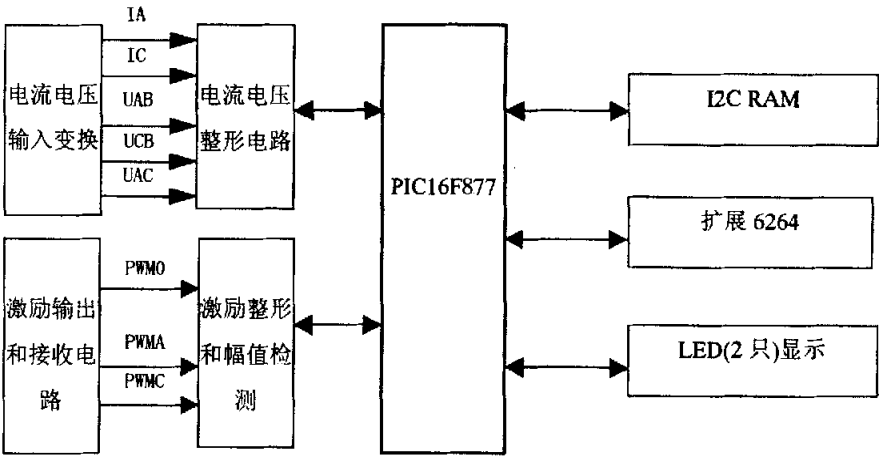


图 4.1 三相三线防窃电样机主体硬件框图

Figure 4.1 Main Hardware Functional Block Diagram for Three-phase Three-line

该装置由以下几部分构成：

模拟量输入变换电路：五个模拟量输入，由通道切换至 PIC16F877。用于向量检测，判断是否有参数异常。

- ① CT 开短路检测电路：采用幅值检测法检测 CT 工作状态，判断 CT 是否处于开路或短路状态。
- ② LED 显示接口：用于显示故障代码、参数整定。
- ③ 存储扩展：6264 存储器扩展用于实现 FFT 运算，I<sup>2</sup>C 芯片 24LC256 用于故障记录存储、整定参数和字库保存。

三相四线制样机除了具有 CT 开短路检测功能和故障判断能力, 还有实时时钟电路、故障存储电路、键盘、液晶显示和 RS232 通讯接口等。硬件结构框图如图 4.2。

该装置由以下几部分构成:

1. 模拟量输入变换电路: 六个模拟量输入, 由通道切换至 PIC16F877。用于向量检测, 判断是否有参数异常。
2. CT 开短路检测电路: 用于检测 CT 工作状态, 判断 CT 是否开路或短路。
3. 时钟电路: 由 PCF8583 构成计时电路, 提供故障纪录所需时间。
4. 键盘、显示接口: 按键输入, 用于参数整定, 故障查询, 通信设置。LCD 显示用于构成友好的人机界面。
5. 存储扩展: 6264 存储器扩展用于实现 FFT 运算, I<sup>2</sup>C 芯片 24LC256 用于故障记录存储、整定参数和字库保存。
6. 通信接口: RS232 通信接口, 实现联网功能。

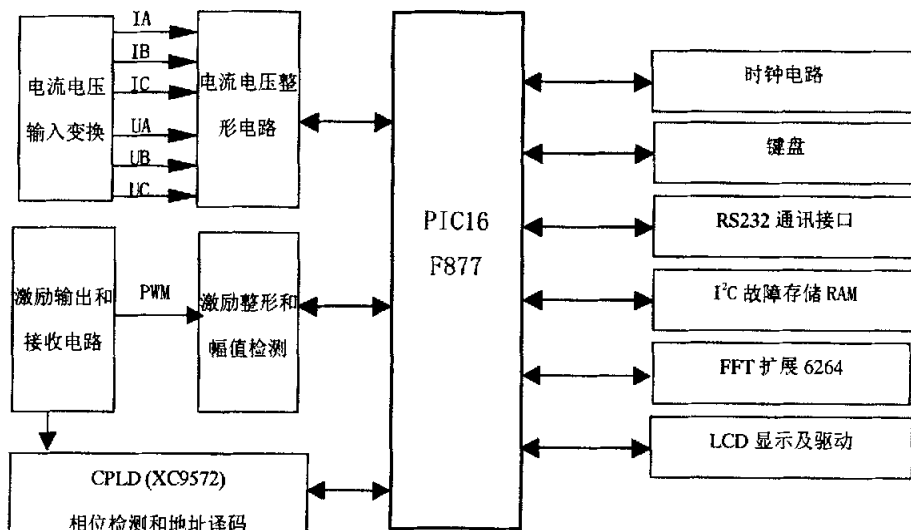


图 4.2 三相四线防窃电样机主体硬件框图

Figure 4.2 Main Hardware Functional Block Diagram for Three-phase Four-line

### 4.3 三相四线制防窃电样机单元电路设计

#### 4.3.1 模拟量输入通道电路设计

为了消除输入引线所带来的干扰和匹配 PIC16F877 的模拟量输入范围, 必须设

置模拟量输入信号调理电路。

### ① 模拟量的采样方法

模拟量的数据采集可分为常规的直流采样和交流离散采样两种方法。电力系统中传统的模拟式直流电量变送器的功能是将工频电压和电流信号转换成统一标准的直流参变量（一般为 0~5V 直流电压、0~10mA 或 4~20mA 的直流电流）供采样使用；而离散采样交流电量变送器则是直接对 PT、CT 输出的交流信号稍加处理后进行交流采样。

由于采样得到的电压电流不仅需要知道其幅值大小，还要知道它们的相位关系，采用直流采样是无法实现的这一要求的，因此必须采用交流采样。

### ② 信号调理电路设计

因为 PIC16F877 只能接受单极性的模拟量信号，其输入范围为 0~+5V，但是输入的交流信号却是双极性的且幅值范围为 -5V ~ +5V，所以需要对交流信号进行电平提升和限幅，并进行低通滤波以抑制高频干扰。为了完成以上两项工作，设计了前置信号调理电路，其具体指标如下：

- 1) 考虑到电网的谐波畸变，为尽可能使采样接近电网的真实情况，同时采用 32 点 FFT 算法可处理 15 次谐波，要求滤波器的截止频率在 1000Hz 以内即可，这样电网的低次谐波就可保留下来。在滤波的同时，通频带内信号的幅度不得变化。
- 2) 对输入信号实现从 -5V ~ +5V 到 0~+5V 的电位提升和减幅，即需要将交流信号加上 +5V 的直流偏置然后将其幅度减小一半。

为简化信号调理电路的设计和验证设计的可行性和确凿性，本论文利用了功能强大的仿真软件 PSpice 进行了该电路的设计和仿真，并从中寻找最佳匹配参数。具

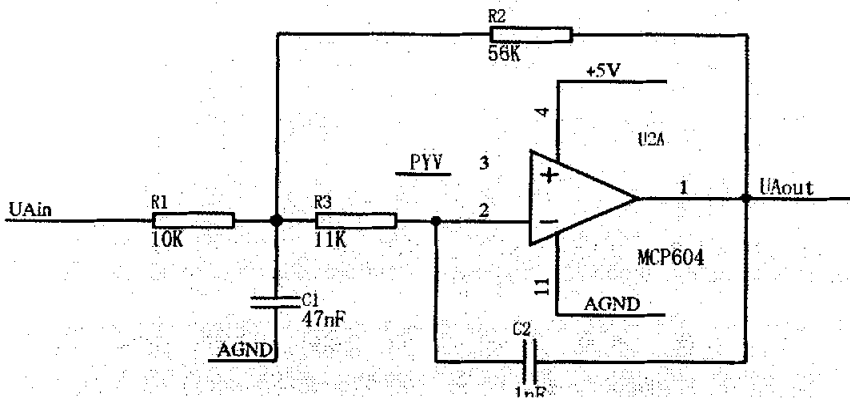


图 4.3 有源低通滤波及电位提升电路原理图

Figure 4.3 Low Pass Active Filter and Voltage Level Rise Schematics



体仿真设计过程如下。

根据要求,显然需要用有源滤波器来完成,电位提升可由运算放大器输入端设定阈值电平来实现。现选用二阶低通滤波器,这是应用比较广泛的一种电路来实现高频谐波滤除。鉴于以上考虑,初步得出电路原理图如图 4.3 所示。其中 UAout 为经过低通滤波且电压提升后的输出, PYV 是经过精密电阻分压后的偏置电压,大小为 0.379V,经过放大后,在输出端可得到直流偏置电压 2.5V。

图 4.3 所示的有源低通滤波器的传递函数为:

$$A(S) = \frac{-1/(R_1 R_3 C_1 C_2)}{s^2 + [(R_1 C_1)^{-1} + (R_3 C_1)^{-1} + (R_2 C_1)^{-1}]s + (R_1 R_2 C_2 C_3)^{-1}} \dots \dots (4-1)$$

于是可得滤波器的截止频率为:

$$f_0 = \frac{(R_2 R_3 C_1 C_2)^{-\frac{1}{2}}}{2\pi} \dots \dots \dots (4-2)$$

电路增益为:

$$A_0 = -\frac{R_2}{R_1} \dots \dots \dots (4-3)$$

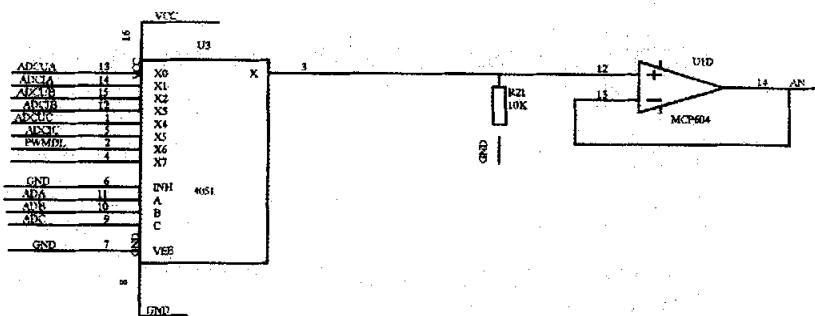


图 4.6 三相四线制模拟量输入切换电路

Figure4.6 Analog Signal Input and switch circuit

三相四线制防窃电装置需要采集的模拟量较多,需要通过切换电路实现采样。本装置采集了三相电流、三相电压、一个 CT 检测电压共计 7 个模拟量。故此采用 4051 切换即可。切换后,采用一级跟随器提高带负载能力。跟随器输出街道接到 PIC16F877 的 AN0 通道, PIC 的其余模拟量输入通道用作通用 I/O 口。

### 4.3.2 CT 开短路检测电路设计

CT 线圈、电能表电流线圈短路和开路的检测一直以来都是防窃电装置难以解决的问题。为此,本文专门提出了对 CT 回路进行短路和开路检测的专用电路,实现了动态检测线圈的短路和开路故障的功能,较好地解决了这个问题。

如本文 3.3.2.2 节所述,该检测单元电路由三部分组成:50kHz 方波发生器电路、反馈波幅值检测电路、反馈波相位检测电路。防窃电装置的 50kHz 方波信号输出端串接电阻 R、电容 C 后接到电流互感器一端,电流互感器另一端与 50kHz 高频方波信号回路公共端接在一起。调节电阻 R 和电容 C 的值,使高频回路谐振点在 50kHz 附近。回路正常工作时,从反馈波测试出来的方波幅值和相位偏移均在正常允许范围之内,防窃电装置不会判断为开、短路故障。回路异常时,从反馈波测试出来的方波幅值和相位偏移均不在正常允许范围之内,防窃电装置将会判断为开、短路故障。

50kHz 方波由 RC 正弦波发生器和施密特触发器整形后产生,它作为激励波,输入到每一个 CT 回路;反馈波幅值检测电路由反馈波幅值放大电路、带通滤波电路、整流电路构成,将反馈波变换成直流电平进行幅值检测;反馈波相位检测电路由 XLINX9572 构成,它通过将每一相 CT 的激励波和反馈波的相位进行比较判断异常。

下面以其中一相 CT 检测电路为例,描述 CT 检测硬件设计:

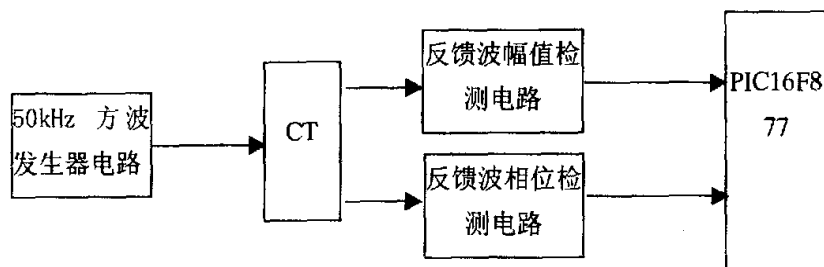


图 4.7 CT 检测框图

Figure 4.7 CT Detection Hardware Block Diagram

CT 开短路检测原理在前面已有阐述,这里主要论及如何具体实现。在三相三线制防窃电装置内,只采用了幅值检测,在三相四线制防窃电装置内,采用了幅值检测和相位检测,既判断 CT 二次回路返回的波形信号幅值大小,同时也判断返回波形相位变化。

#### 4.3.2.1 CT 开短路幅值检测

幅值检测原理简单, 将CT二次回路返回的交流波形信号进行放大、整流, 变成直流信号。再通过AD采样, 计算出幅值大小, 与预定的阈值比较即可。在实际应用中, 因为不同CT特性差异较大, 为了将返回的波形信号幅值调整到合适的范围, 还需设置放大倍数切换电路。

#### 4.3.2.2 CT 开短路相位检测

相位检测可以有不同方法实现, 利用PIC16F877引脚的捕获功能, 结合定时器, 可以计算出返回波的高电平信号宽度, 从而间接判断相移大小。另一种方法就是采用硬件实现, 本装置即采用这种方法。

##### 4.3.2.2.1 设计要求

原电路有一个频率50kHz, 占空比为50%的标准正弦波输入, 该正弦波由RC正弦波信号发生器产生。它作为激励波信号, 输入到CT二次回路, 经过传感器传输变换后, 得到三个频率为50kHz, 但占空比已变化的反馈波信号输出。为了便于比较相移

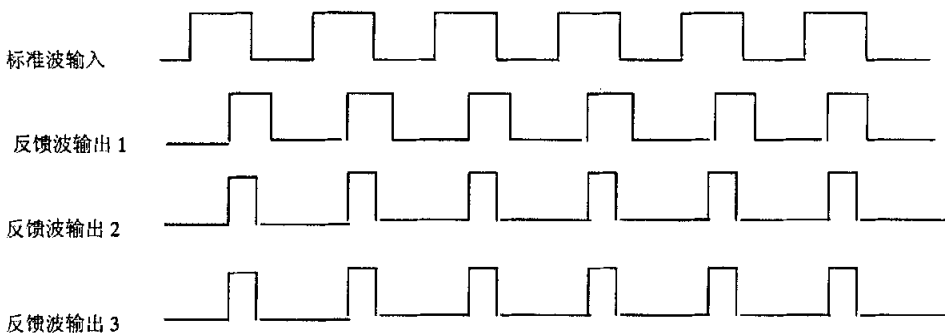


图 4.8 激励波与反馈波波形图

Figure 4.8 Input Wave and Feedback Wave Plot

大小, 分别将它们变换成方波, 引入到相位比较电路。下面分析如图4.8所示方波波形。

从图中可以看出, 三个反馈波波形已有较大改变, 其占空比不等于50%, 而是随着CT二次回路工作状态不同而改变。并且, 这三个反馈波波形也不完全一样。现要求比较每一个反馈波与激励波之间的相位差大小。

##### 4.3.2.2.2 实现方法

通过实验数据分析可以知道, 对于不同CT, 反馈波波形是不一样的, 对于同一CT, 其反馈波波形在不同状态下有变化, 尤其是极端情况 (CT开路和CT短路时) 下, 反馈波波形变化最为明显, 但激励波波形基本无任何变化。反馈波波形变化主要体现在它的占空比变化上, 而该占空比高电平部分可以间接反应二者相位差之大小, 因此, 在CPLD器件内可以用合适的计数器来给反馈波高电平计数, 间接反映标准波和反馈波之间相位差大小。

相位差大小的度量可以量化,即用二进制数D0、D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7表示出来。它可以表示0---256之间的十进制数。设计示意图如图4.9所示。

由于50kHz标准方波信号由信号发生器产生,它不会产生畸变,信号频率稳定,幅值也稳定。但反馈波信号是由标准波作为激励信号,经由特殊电路后,产生的反馈信号,它尽管仍为50kHz信号,但其相位、幅值、占空比均发生了变化,在反馈波进入XC9572之前,已需要通过幅值提升电路和波形整形电路将其幅值,波形上下沿的毛刺消除,另外,由于9572门数限制,不能在片内同时完成对三路波形的比较计数,需要外加波形通道切换电路,将三个反馈波中一个根据需要切换到9572中去。为了检测出反馈波每个周波内高电平宽度,需要采用高频源——20MHZ晶振产生的方波信号来对反馈波的高电平计数。

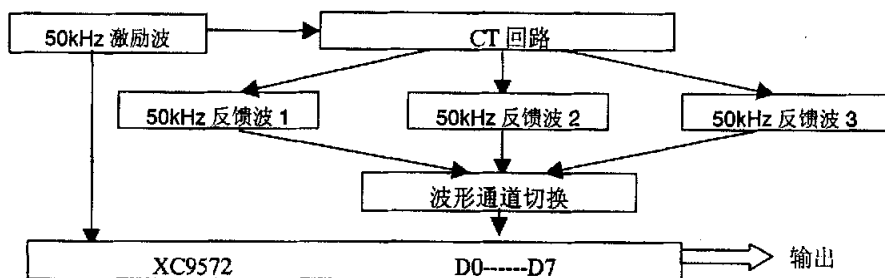


图 4.9 相位检测设计示意图

Figure4.9 Phase Detection Principle Diagram

XC9572的编程依靠原理图实现。整个电路分成三个部分。波形同步、分频计数、锁存输出。

#### ① 波形同步

为了得到两个波形重叠部分的高电平宽度,首先将激励波和反馈波进行同步。由FD触发器组成同步电路。标准波和反馈波可以看成是两个独立的50K时钟信号。此时,为了得到反馈波高电平宽度,本来只需要将反馈波高电平部分进行高频计数即可,但由于要同时考虑到激励波存在是反馈波存在的前提,为了滤除不必要的干扰信号,需要将标准波高电平与反馈波高电平同步处理,再将二者相“与”,保证取得的计数电平为有效电平。为了严格使两个波形在同步时开始计数,先将标准波二分频,同时电路附加一个触发器以防止出现不确定状态。波形同步电路如图4.10所示。图中“输出1”即为同步后的反馈波波形。

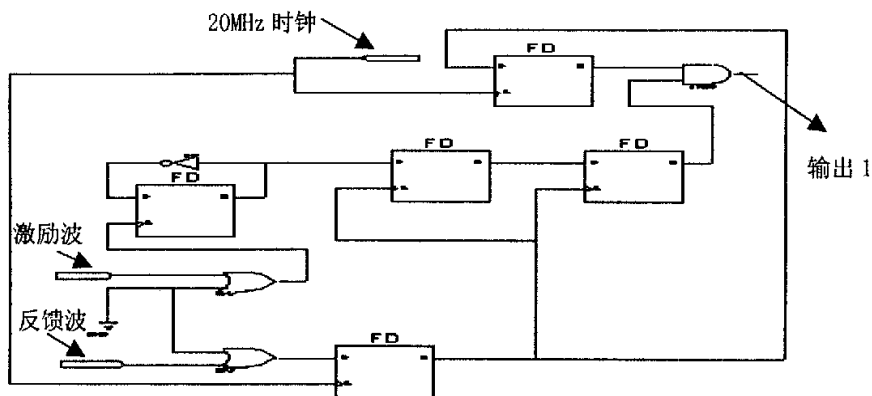


图 4.10 波形同步电路

Figure4.10 Wave Synchronization Circuit

② 分频计数

由CR8CE计数器电路组成。CR8CE是8位二进制计数器，它可以表示0--256之间的十进制数。20MHz晶振对占空比为50%，频率为50kHz方波信号的高电平计数时，最多可计200个数，因此采用CR8CE来计数是合理的选择——它不会溢出。另外要考虑好计数起始端与计数清零端之间的时间配合问题。否则会导致时序仿真和功能仿真时出错。分频计数电路如图4.11所示。“计数输出”则是CR8CE的输出的8位二进制数，用于表示高电平宽度。反相缓冲器用于设置延时，保证X74\_273先读数，CR8CE后清零。

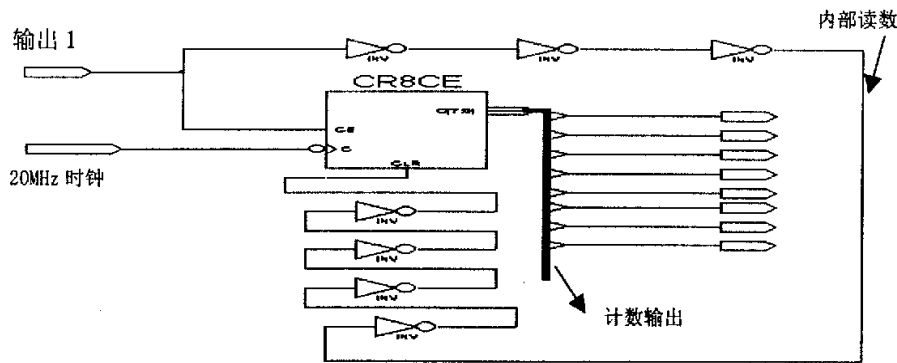


图 4.11 计数电路

Figure4.11 Count Circuit

③ 锁存输出

由X74\_273和三态门组成。锁存输出电路如图4.12所示。图中输入端“计数输出”

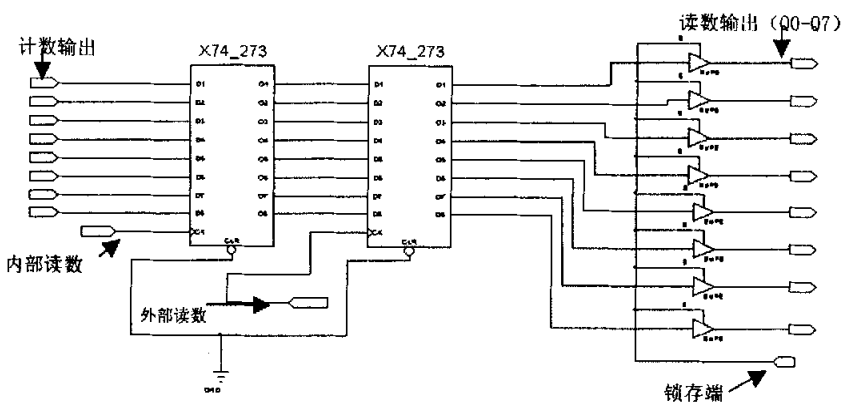


图 4.12 锁存输出

Figure4.12 Lock Output

即为分频计数电路的输出端“计数输出”；输入端“内部读数”即为分频计数电路的输出端“内部读数”；输入端“外部读数”为XC9572的实际I/O脚，它与PIC16F877的一个I/O脚相连，“锁存端”也与PIC16F877的一个I/O脚相连，这两个控制端是由PIC控制，根据需要读取计数值；“读数输出（Q0-Q7）”则与PIC16F877的8位数据线相连。则是CR8CE的输出的8位二进制数，用于表示高电平宽度。反相缓冲器用于设置延时，保证X74\_273先读数，CR8CE后清零。

4.3.2.2.3 仿真输出

为了检验设计的原理图是否符合设计要求，还需要通过仿真检验。Xilinx

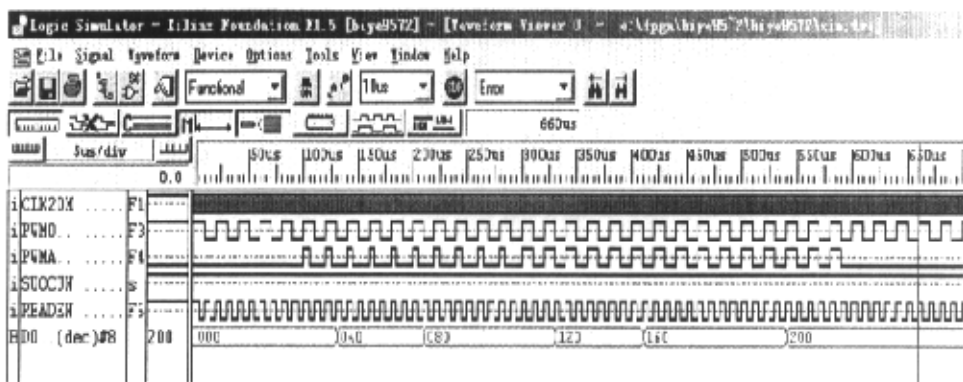


图 4.13 功能仿真输出

Figure 4.13 Functional Simulation Output

Foundation Project Manager软件可以提供仿真功能。功能仿真输出如图4.13所示，

从图中可以看出, D0—D7输出为00, 40, 80, 120, 160, 200。此时它们分别对应幅宽  $0\mu\text{S}$ ,  $2\mu\text{S}$ ,  $4\mu\text{S}$ ,  $6\mu\text{S}$ ,  $8\mu\text{S}$ ,  $10\mu\text{S}$ , 与理论分析相吻合。该电路也能顺利通过时序仿真。时序仿真输出如图4.14所示, D0—D7输出为02, 42, 82, 122, 162, 200。此时它们分别对应幅宽  $0.1\mu\text{S}$ ,  $2.1\mu\text{S}$ ,  $4.1\mu\text{S}$ ,  $6.1\mu\text{S}$ ,  $8.1\mu\text{S}$ ,  $10\mu\text{S}$ , 与理论

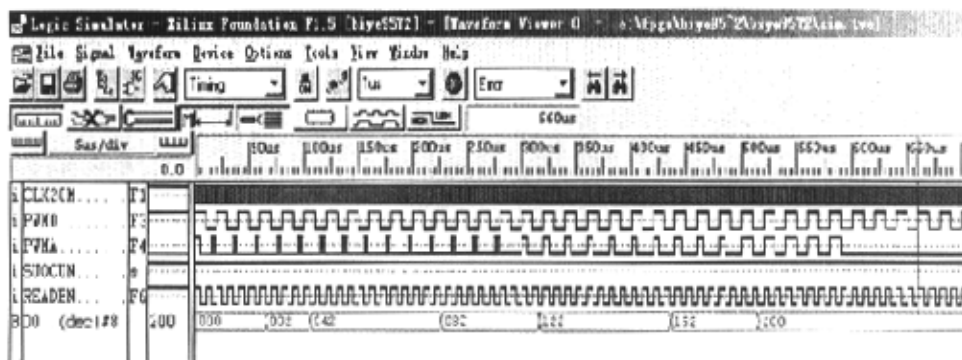


图 4.14 时序仿真输出

Figure4.14 Timing Simulation Output

分析相吻合。改变反馈波高电平宽度, 输出值也相应改变, 并且可以相当精确。对 50kHz 方波而言, 变化范围在 0—200 之间 (十进制)。

### 4.3.3 主控芯片介绍和外围电路选型设计

#### 4.3.3.1 主控芯片介绍<sup>[25]</sup>

系统的主控芯片既可选用价格较高, 性能较好的单片机, 也可选用高性能低价格的芯片。考虑到本系统中尽管涉及的数据量大、算法较为复杂、运算量很大, 但由于是样机设计, 无须过多考虑程序空间可扩展性要求, 另外, 装置对实时性要求也并不高。综合上述因素, 认为菲利普公司生产的八位单片机 PIC16F877 能满足样机设计要求。同时, 该单片机指令简单, 总共只有 35 条, 易于学习和短时间内掌握。

从性能上看, PIC16F877 有以下特点:

- ① 高性能 RISC 结构 CPU 精简指令集, 仅 35 条单字指令: 除地址分支指令外, 其余全为单周期指令; 执行速度快, DC-200ns; 14 位 FLASE 型程序存储器, 电可重擦写; 最大有  $8\text{K} \times 14$  的 FLASH 程序存储器; 带 8 位 FLASH 型数据寄存器; 擦写次数达 100 万次, 数据保存时间大于 40 年; 八级硬件堆栈; 多种硬件中断; 直接/间接/相对三种寻址方式。
- ② 功能部件特性: 带 10 位 A/D 转换输入; 高驱动电流 I/O 脚, 可直接驱动 LED

显示；每根 I/O 口线最大拉电流 25mA；每根 I/O 口线最大灌电流 25mA；双向可独立编程设置 I/O 引脚；8 位定时器/计数器 TMR0，可带 8 位预分频器；16 位定时器/计数器 TMR1，睡眠中仍可计数；8 位定时器/计数器 TMR2，带有 8 位的周期寄存器及预分频器和后分频器；1 路或 2 路 CCP 模块(捕捉输入，比较输出，PWM 输出)；同步、串行口 I<sup>2</sup>C/SPI 总线操作；同步、异步通讯接口 USART/SCI 总线操作；8 位并行口操作。

- ③ 微控制器特性:上电复位；上电延时器保障 VDD 稳定建立；振荡定时器保障振荡稳定建立；自振式看门狗；掉电复位锁定,即当芯片电源电压下降到某一值以下时,使芯片保持复位,当电源电压恢复正常后,芯片恢复运行；全静态设计；在线串行编程功能(ISCP,通过两脚,单 5V 电源)；在线调试(通过两脚)；处理器可进入程序存储区进行读写操作；低功耗睡眠模式；四种可选择振荡方式。

4.3.3.2 外围电路选型设计

其它外围电路包括时钟、键盘、译码、存储、显示等电路，下面将对各电路器件选择，原理设计作系统描述。图 4.15 是部分外围电路图。

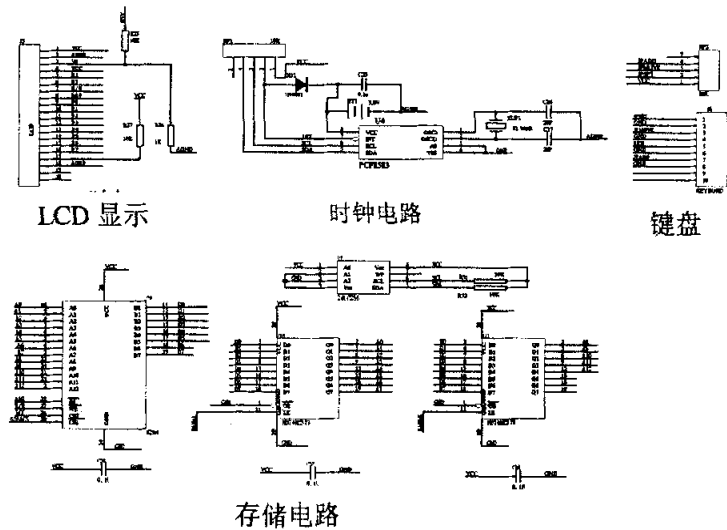


图 4.15 部分外围电路原理图  
Figure4.15 Some Circuit Schematics

① 时钟电路设计<sup>[24]</sup>



因为防窃电装置需要记录故障开始和结束的日期和时间, 所以系统必须要有实时时钟芯片。由于 PIC16F877 具有 I<sup>2</sup>C 总线接口, 采用带有 I<sup>2</sup>C 总线接口的时钟芯片是一个不错的选择。PCF8583 就是这样一种芯片。PCF8583 是一款带有 256 个字节的时钟/日历芯片。地址和数据通过 I<sup>2</sup>C 总线传输。在每次对数据字节的读或写操作后, 内建的字地址寄存器自动增加。地址管脚 A0 用于编程硬件地址, 这样在不增加

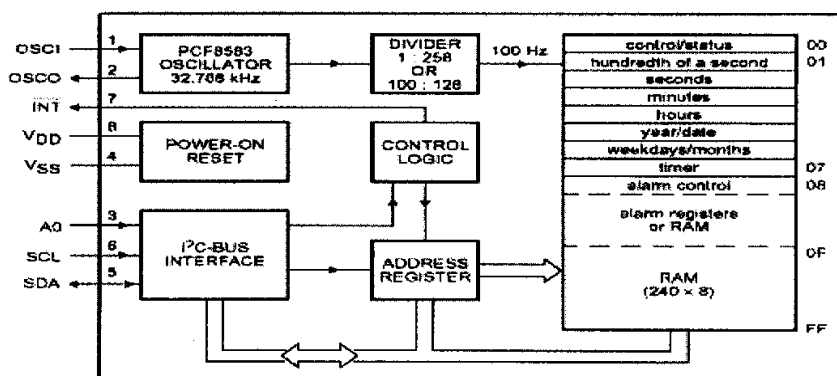


图 4.16 PCF8583 功能块图

Figure 4.16 PCF8583 Functional Block Diagram

硬件的情况下允许将两个器件连接到总线上。

内置的 32.768KHz 振荡器和 RAM 的前 8 个字节用于时钟/日历和计数器功能。接下来的 8 个字节可作为报警寄存器或当作 RAM 来使用。剩下的 240 个字节都作为 RAM 由用户自由支配。该芯片具有以下特性: I<sup>2</sup>C 总线接口操作电压和时钟操作电压宽; 片内有 240×8 位低电压 RAM; 数据保持电压: 1.0~6.0V; 操作电流最大 50mA; 带 4 年日历; 通用定时器带有报警和溢出指示; 24 或 12 小时格式; 32.768KHz 或 50Hz 时间基准; 串行输入/输出总线 (I<sup>2</sup>C); 字地址自动增加; 可编程报警、定时、中断功能; 从地址读写方便。

## ② 显示芯片

显示一般可用发光数码管 (LED) 和液晶显示器 (LCD) 进行显示。但 LED 能显示的信息很有限, 而且功耗也较大, 优点是价格较为便宜; LCD 能显示的信息量与显示屏的大小有关, 同等显示面积下比 LED 能显示的信息量要多, 同时功耗也很小, 缺点是价格较贵。因防窃电装置要求显示的信息较多且要求用汉字显示, 所以只能选用 LCD 进行显示。为了简化液晶的控制电路和编程, 本系统中选用了集成式的液晶控制器 SED1520。SED1520 是一种点阵图形形式的液晶显示驱动器, 它可直接与 8 位微处理器相连, 它集行、列驱动和控制器于一体, 使用起来十分方便, 作为内藏式控制器被广泛应用于中小规模液晶显示模块中。

### ③ 存储器电路

由于 PIC16F877 只有 8K 存储空间,它无法满足故障存储时需要较大存储空间存储大量故障信息的要求,因此需要扩展存储空间。同样,可采用具有 I<sup>2</sup>C 总线的 EEPROM 存储芯片,本系统选用 24LC256,它是八管脚 MSOP 封装,高密度串行 EEPROM 芯片,是目前市场上支持该密度的最小标准封装。该微型器件与 24LCXX 系列其它密度器件一样,均采用 Microchip 公司的先进 PMOS 电擦除单元(PEEC)处理工艺。Microchip 串行 EEPROM 具有体积小、工作电压低和消耗电流低等特性。24LCXX EEPROM 系列的工作电压仅为 2.5 伏,24LCXX 的动态电流低于 1 毫安,待机电流低于 1 微安,是大多数电池驱动器件的理想方案。另外,由于需要采用 32 点 FFT 算法,而 PIC16F877 的数据寄存器数量有限,不能满足 FFT 运算的要求,因此需要外扩 RAM,在此,本方案选择 HY6264 作为动态存储芯片,在 6264 内完成 FFT 数据运算。

### ④ 地址译码器、逻辑控制芯片选择<sup>[29]</sup>

为了满足加密性的要求,装置采用 CPLD 器件,该器件内部逻辑全部由编程人员自定义,编程灵活,保密性强。同时,CPLD 器件可灵活组成多个逻辑器件,代替译码器、编码器和反相器等。另外,相位检测功能要在 CPLD 内实现,CPLD 容量需较大。经过选择,认为 XILINX 公司生产的 XC9572 芯片能满足这一要求。

XC9572 具备以下特点:7.5 ns 引脚到引脚逻辑延时;最高时钟频率 125MHz; 72 个宏单元, 1,600 可用逻辑门; 72 个可用 I/O 脚; 5 V I 系统可编程电压(ISP); 10,000 次可擦写;商业级温度范围; 增强型引脚锁定结构; 灵活的 36V18 功能块; 扩展的 IEEE Std 1149.1 边界扫描技术支持(JTAG); 每一个宏单元具有省电模式; 每一个输出脚可采用不同速率输出; 兼容用户可编程地引脚; 保密设置; 24mA 拉电流输出; 3.3 V or 5 V I/O 兼容; 先进的 CMOS 5V 快速 FLASH 技术; 支持同时对多个 XC9500 编程; 有 44-pin PLCC 封装, 84-pin PLCC 封装, 100-pin PQFP 封装和 100-pin TQFP 封装。

## 4.4 印制电路板设计和调试

实践证明,即使电路原理图设计正确,印制电路板设计不当,也会对电子设备的可靠性产生不利影响,有时甚至会影响设备的正常工作。如果设计方法不当,数字电路可能会带给模拟电路过多的电磁干扰。因此,在设计印制电路板的时候,应注意采用正确的方法,增强其可靠性、抗干扰能力<sup>[31]</sup>。

### ① 地线和电源设计

印刷电路板上,电源线和地线最重要。克服电磁干扰,最主要的手段就是接地。电源在向系统提供能源的同时,也将其噪声加到所供电的电源上。电路中微控制器

的复位线，中断线，以及其它一些控制线最容易受外界噪声的干扰。电网上的强干扰通过电源进入电路，即使电池供电的系统，电池本身也有高频噪声。模拟电路中的模拟信号更经受不住来自电源的干扰。

地线应尽量加粗。若接地线很细，接地电位则随电流的变化而变化，致使电子设备的定时信号电平不稳，抗噪声性能变坏。因此在布线时将接地线尽量加粗，使它能通过三倍于印制电路板的允许电流。

### ② 采用正确的布线策略

采用平行走线可以减少导线电感，但导线之间的互感和分布电容增加，在进行布线时，采用了井字形网状布线结构，具体做法是印制板的一面横向布线，另一面纵向布线，然后在交叉孔处用金属化孔相连。

为了抑制印制板导线之间的串扰，在设计布线时尽量避免长距离的平等走线，尽可能拉开线与线之间的距离，信号线与地线及电源线尽可能不交叉。在一些对于干扰十分敏感的信号线之间设置一根接地的印制线，能有效地抑制串扰。

为了避免高频信号通过印制导线时产生的电磁辐射，在印制电路板布线时，还应注意以下几点：

- 1) 尽量减少印制导线的不连续性，例如导线宽度不要突变，导线的拐角应大于90度禁止环状走线等。
- 2) 时钟信号引线最容易产生电磁辐射干扰，走线时应与地线回路相靠近，驱动器应紧挨着连接器。
- 3) 总线驱动器应紧挨其欲驱动的总线。对于那些离开印制电路板的引线，驱动器应紧紧挨着连接器。
- 4) 数据总线的布线应每两根信号线之间夹一根信号地线。最好是紧紧挨着最不重要的地址引线放置地回路，因为后者常载有高频电流。

### ③ 去耦电容配置

好的高频去耦电容可以去除高到1GHz的高频成份。陶瓷片电容或多层陶瓷电容的高频特性较好。设计印刷线路板时，每个集成电路的电源、地之间都加了一个去耦电容。去耦电容有两个作用：一方面是本集成电路的蓄能电容，提供和吸收该集成电路开门关门瞬间的充放电能；另一方面旁路掉该器件的高频噪声。

在直流电源回路中，负载的变化会引起电源噪声。例如在数字电路中，当电路从一个状态转换为另一种状态时，就会在电源线上产生一个很大的尖峰电流，形成瞬变的噪声电压。配置去耦电容可以抑制因负载变化而产生的噪声，是印制电路板的可靠性设计的一种常规做法，配置原则如下：

- 1) 电源输入端跨接一个10~100uF的电解电容器。
- 2) 为每个集成电路芯片配置一个0.01uF的陶瓷电容器。

3) 对于噪声能力弱、关断时电流变化大的器件和 ROM、RAM 等存储型器件，在芯片的电源线（V<sub>CC</sub>）和地线（GND）间直接接入去耦电容。

4) 去耦电容的引线不能过长，特别是高频旁路电容不能带引线。

5) 在消耗大电流器件的电源接线旁，同时并联一大容量的电解电容（如 470 $\mu$ F）和一小容量的高频特性好的无极性电容（如 0.1 $\mu$ F），分别起到抑制大电流冲击所造成的地线压降干扰和高频滤波的作用。

元件焊装完成后，对电路板进行了整体硬件调试。逐步检查了电源、模拟-数字转换通道、50kHz 方波发生器、滤波放大电路、CT 检测电路、时钟、键盘、LCD 显示、存储电路等。对发现的问题进行了处理，为下一步软件开发打下良好基础。

## 4.5 本章小结

本章对防窃电装置的硬件电路进行了方案论证、芯片选型、电路设计和仿真，并完成了印制电路板的设计和调试。

## 5. 三相四线制防窃电装置算法设计与挂网记录

### 5.1 软件设计整体要求

对防窃电装置的硬件做出合理的设计、明确的分工后,接下来的主要任务就是软件设计。为了满足系统的要求,编制软件必须符合以下基本要求<sup>[31]</sup>:

① 易理解性、易维护性。通常是指软件系统容易阅读和理解,容易发现和纠正错误,容易修改和补充。编制的软件容易理解和修改,要按照功能块、子程序方式编制,并多加注释。由于系统运行速度的提高,单纯追求软件占有最小存贮空间是片面的。有时为了便于理解,要采用模块化程序结构设计方案,使程序流程清晰明了,同时还要尽量减少循环嵌套、调用嵌套以及中断嵌套的次数。

② 实时性。实时性是智能系统的普遍要求,即要求系统及时响应外部事件的发生,并及时给出处理结果。近年来,由于硬件的集成度与速度的提高,配合相应的软件,实时性容易满足要求。在工程应用软件设计中,采用汇编语言比高级语言更具有实时性。

③ 可测试性。智能系统的可测试性具有两方面的含义:其一是比较容易地制定出测试准则,并根据这些准则对软件进行测定;其二是软件设计完成后,首先在模拟环境下运行,经过静态分析和动态仿真运行,证明准确无误后才可投入实际运行。

④ 准确性。准确性对智能系统具有重要意义。系统中要进行大量运算,算法的正确性与精确性问题对控制结果有重要影响,因此在算法选择、位数选择方面要适合要求。

⑤ 可靠性。可靠性是智能系统最重要的指标之一,它要求两方面的意义:第一是运行参数环境发生变化时(如温度漂移),软件都能够可靠运行并给出正确结果,也就是要求软件有自适应性;第二是工业环境极其恶劣,干扰严重,软件必须保证在严重干扰条件下也能可靠运行,这对测控系统尤为重要。

### 5.2 软件设计方案

由于设计本系统的主要目的是为了检测故障判据是否能够准确地判断出各种异常用电现象,因此,本章软件算法只是涉及 CT 开短路检测和向量法故障检测,

并且实现了 LCD 显示，但没有考虑分流检测和扩差法检测，也没有实现键盘输入功能、通信功能和故障存储功能。

为了及时准确的检测和记录窃电故障，故障检测算法是重中之重。三相电流、电压的幅值和相位是检测各故障类型的基础。因此，首先必须完成对模拟量的采集，再对数据进行处理，最后完成故障判断。软件采用模块化设计，每一部分相对独立，便于理解和调试。

PIC16F877 是一款性价比优良的 MCU，由于 32 点的 FFT 运算也能在芯片内完成，并且运算时间在 200 毫秒以内，因此它可以满足系统设计要求。为了进行各相

电压、电流的幅值和相位的比对，必须对与之相关的模拟量输入通道进行同步采样和转换，而 PIC16F877 不支持同步采样，达不到系统的要求，但可以用软件来解决这个问题。

采样后的数据通过特定算法进行处理，分解出需要的参数，提供给故障判据。对于工频交流量，采用 32 点 FFT 运算，对于用于 CT 开短路检测的直流量，进行算术平均值运算处理。

故障判据要能够判断出电压法窃电、电流法窃电和移相法窃电。

因此，根据上述情况，本章将按照模拟-数字转换、数据处理、故障判断三部分阐述各模块软件设计，软件主体流程框图如图 5.1。

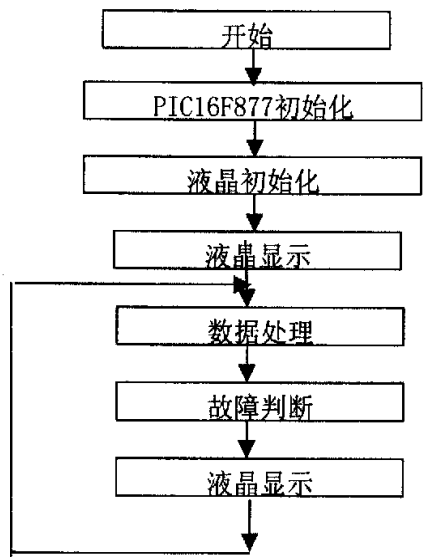


图 5.1 主程序流程图

Figure5.1 Main Program Flow

5.3 软件模块的算法实现

5.3.1 模拟—数字转换程序设计

为了准确的判断和分析窃电故障，防窃电装置需要检测的模拟量较多，三个相电压，三个相电流、一个 CT 检测电压（直流），其中要求对多个模拟量组合进行同步采样，而 PIC16F877 不能对通道进行同步采样，不能满足要求，只有用软件来解决同步问题。软件实现同步的基本思想是依次对需要同步的通道进行采样，即按照通道号循环采样，只要采样速度很高，每个通道的采样点数较多，各通道之间的延

迟就会减小。为便于对采样数据进行 FFT 变换、本系统选定在一周期内采样 32 点。

采用这种方案，当对两通道进行同步采样时，共采样 64 点，通道之间的延迟约为  $6^{\circ}$ ；当对三通道进行同步采样时，共采样 96 点，通道之间的延迟约为  $4^{\circ}$ 。而且，这种确定的延迟角还可以在软件中进行相角补偿，由此可以保证采样信号间相位不失真。通过以上分析，可见利用软件实现多通道同步采样不仅是可行的，而且也是可靠、准确的。

为了找出同相电压、电流的相位关系，比较同一时刻电压和电流大小，需要分别对 A、B、C 三相共三组一个电压量和一个电流量进行两通道同步采样；为了找出三相电压的相位关系，判断相序，也需要对三相电压进行三通道同步采样。因为采样的数据量较大，在 PIC16F877 内无法存储，故需要外加 6264 芯片保存采样数据，进行 FFT 运算。同时，由于 PIC16F877 进行 FFT 运算速度不快，故在所有采样完成之后，才进行相应 FFT 运算。交流采样程序处理流程如图 5.2。

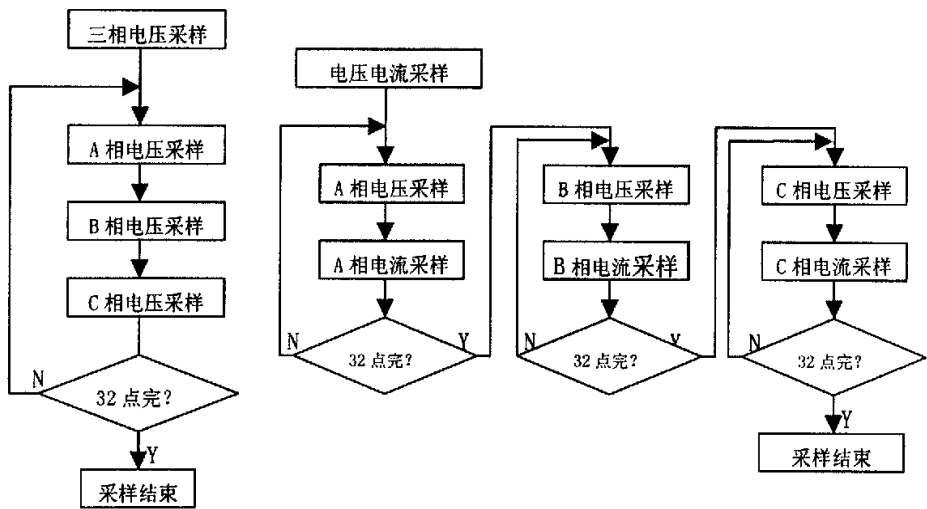


图 5.2 交流采样流程图

Figure5.2 AC Sampling Program Flow Chart

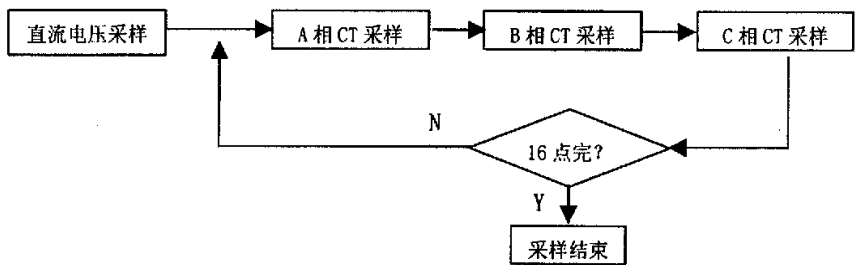


图 5.3 直流采样流程图

Figure5.3 DC Sampling Flow Chart

由于 CT 检测时, 需要采用 CT 反馈波幅值, 因此, 还需要采样 CT 反馈波的直流电平。采样前, 切换 CT 通道, 每一个通道采样 16 点。图 5.3 是其中三相 CT 通道采样流程图。

5.3.2 数据处理程序设计

数据处理程序的任务是利用采样值, 计算出电压、电流的幅值和相位, 以便给故障判断程序使用。

本系统交流采样每周期采样 32 点, 这样作的目的是为了便于使用 FFT 快速算法计算出电压、电流的相位和幅值。因为是每周期等时间间隔采样 32 点, 所以选用了基 2 按时间抽取的 FFT 算法。为方便编程, 将 FFT 算法编为一子程序, 入口为按时间顺序排列的 32 点采样值, 出口为从直流分量到 15 次谐波分量的复数表示形式, 即实部和虚部, 利用实部和虚部就能很容易求出基波幅值和相角, 然后, 基波幅值乘上相应系数, 得到实际幅值, 相角需要进行补偿, 尽量接近同步采样要求。

考虑到与防窃电装置故障检测有关的量主要为电压、电流的基波分量, 所以数据处理时只对 FFT 变换结果中基波的实部和虚部进行计算。由相量理论, 可知当复数  $A = a + bi$  时, 其幅值和相角分别为:

$|A| = \sqrt{a^2 + b^2} \dots\dots\dots(5-1)$

$\phi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \dots\dots\dots(5-2)$

于是, 可根据式(5-1)和(5-2)设计幅值、相位计算子程序。但是用式(5-2)计算出的

相角值范围为  $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ , 并不能反映相角分布在四个象限内的情况, 因此还需根据实部的值进行修正。当实部的值大于零时, 相角位于一、四象限, 与式(5-2)的计算结果吻合, 不用进行修正; 当实部的值小于零时, 相角位于二、三象限, 与式(5-2)的计算刚好相差  $180^{\circ}$ , 修正时即可以加  $180^{\circ}$  也可以减  $180^{\circ}$ 。为便于对相角进行比较, 本系统将所有相角都折算到 0

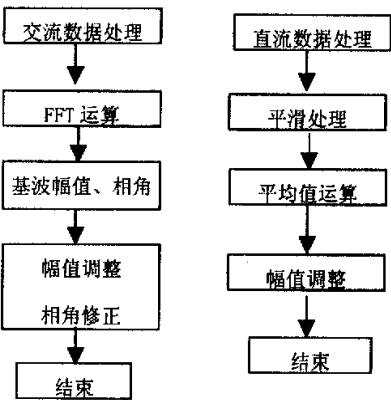


图 5.4 交直流数据处理流程图

Figure5.4 AC and DC Data Processing Flow Chart



° ~360° 的区间，所以在此选用加 180° 的相角修正方法。

直流数据处理较简单，只需要将采样的 16 点数据进行平均值运算即可，同时进行系数处理。图 5.4 是交直流数据处理程序流程图。

5.3.3 故障检测算法及程序设计

防窃电装置的主要任务是进行故障的检测与判断，因此故障检测算法的设计是软件设计的重点，能否快速、有效的对故障进行检测关键在于检测算法。而且防窃电装置的故障千变万化，如何从中找出方法，设计一条合理的故障检测程序，亦是检测算法设计的重点和难点。现设计如图 5.5 所示判据。

为了尽可能准确、尽可能完全地判别出各种窃电手段，就要求防窃电判据不能仅仅判断出一种窃电手段后就不去检测其它窃电手段。通常，用户可能采用不止一种窃电手法。这就要求整个判据具有严密的逻辑性。

① CT 开短路检测

它是本装置成功与否的关键，因为该装置研制的目的之一便是检验该检测原理是否能够成功应用在实践中。由于 CT 回路完好是正确判断其他故障的前提，因此判断故障时，要求将 CT 开短路检测判据放在最前面。

② 过压检测

过压检测是为了检测出用户将电压相线与中性线反接故障。这会造成相电压长期偏高（380V），危及电表安全，造成电量损失。通常多功能电能表由三相电源供电。如果一相电压长期偏高，会造成安全隐患。因此，有必要检测出这种错接线方式。

③ 失压（缺相）检测

失压检测是为了检测出用户断开电压回路的窃电手段。三相四线制计量时，电能表接入 A、B、C 三个相电压，每一个相电压都有被断开的可能。因此共计有 A 失压、B 失压、C 失压、AB 失压、AC 失压、BC 失压、ABC 失压六种情况。

缺相检测是为了检测出用户某一相或几相没有用电，（可能是系统原因，也可能是用户窃电引起）。每一相都有缺相的可能。因此共计有 A 缺相、B 缺相、C 缺相、AB 缺相、AC 缺相、

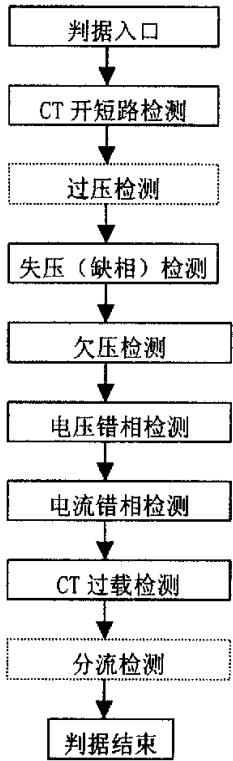


图 5.5 判据流程图  
Figure5.5 Criterion Program  
Flow Chart

BC 缺相、ABC 缺相六种情况。

在 CT 异常情况下,判断是否缺相是不合理的。因为 A 相缺相时, A 相是既无电压也无电流。如果 A 相 CT 被人为断开, A 相电压也被人为断开,就造成似乎是 A 相缺相的假象。一般情况下,缺相是不能判断为窃电的,除非能确认系统在该时间段内该相没有缺相。因此,在判断缺相故障时,要保证无 CT 异常。

#### ④ 欠压检测

欠压检测是为了检测出用户虚接电压回路的窃电手段。三个相电压,每一个相电压都有欠压的可能。因此共计有 A 欠压、B 欠压、C 欠压、AB 欠压、AC 欠压、BC 欠压、ABC 欠压六种情况。

#### ⑤ 电压错相检测

电压错相检测是为了检测出电压非正序接线的窃电手段。正常情况下, A 相电压超前 B 相电压  $120^\circ$  相位角, B 相电压超前 C 相电压  $120^\circ$  相位角, C 相电压超前 A 相电压  $120^\circ$  相位角,此时称为正序。当任意调换其中两相接线,就会导致电压相序错。

当有失压和缺相情况存在时,不能判断是否有电压错相情况发生。否则会因极大的相角误差导致误判。

#### ⑥ 电流错相检测

电流错相检测是为了检测出电压电流之间相角异常的故障。正常情况下,相电压与相电流之间相角应在  $\pm 90^\circ$  之间,否则判断为电流错相。为了符合现场实际运行情况,考虑到负载的不平衡,按规程规定的容许最大不平衡范围考虑,放宽相应角度限制即可。

当有失压、缺相、CT 异常、电流较小等情况存在时,不能判断是否有电流错相情况发生。应否则会因导致误判。

#### ⑦ CT 过载检测

CT 过载是为了检测出原有 CT 不能满足现有负载的要求,导致 CT 长时间过载运行,危及电网安全,同时也会导致电量损失。A、B、C 三相 CT,每一相都有过载的可能。因此共计有 A 相 CT 过载、B 相 CT 过载、C 相 CT 过载、AB 相 CT 过载、AC 相 CT 过载、BC 相 CT 过载、ABC 相 CT 过载六种情况。

#### ⑧ 分流检测

分流检测是针对表前用电和无表法用电等窃电手段的检测措施。为了实现分流检测,需要在计量 CT 前加装一组监视 CT,这组 CT 型号、变比、特性尽可能与计量 CT 一致。通过检测这两组 CT 的电流大小、电流幅值,可以判断在这两组 CT 间,是否有窃电现象发生。

同样,进行分流检测时,要求 CT 无异常情况。

5.4 整机调试结果

装置研制完成后,为了验证算法及故障判据的正确性,作者通过重庆龙源科技有限公司的实验台进行调试,模拟了各种典型故障,发现该装置能够准确地判断出如表 5.1 中所列各种窃电方式。从装置调试结果来看,它能够实现对各种典型窃电手段的检测,尤其是实现了对 CT 开短路检测,从而保证了窃电检测的准确性和可靠性。克服了同类装置在防范电流法窃电上的缺陷。作者认为通过该装置,验证了文中提出的 CT 开短路检测法和向量检测法,满足了设计要求。

表 5.1 调试结果

Table5.1 The Test Result

故障类型	故障相别	故障类型	故障相别
CT 短路 CT 开路 电流相序错 CT 过载 失压 欠压	A	缺相	A
	B		B
	C		C
	AB		AB
	BC		BC
	CA		CA
	ABC		
电压相序错	ABC	停电	ABC

5.5 内江挂网结果

从 2002 年 7 月 26 日至 8 月 29 日,内江供电局购入 12 套重庆龙源科技发展有限公司的防窃电测录仪,在下辖的 5 个供电分局陆续安装试用(见表 5.2)。选择安装对象的原则是:(1)仍然是敞开式计量装置的用户;(2)用电量异常且怀疑有窃电行为的用户。经过一个多月的现场使用,据不完全统计,已取得了如下效果:

1. 长江长大酒楼是敞开式的高压计量,自 2002 年 7 月 26 日安装测录仪到 8 月 20 日的 24 天里,用电量达 145860KWH,按此计算,月电量可达 182325 KWH。而该用户原最大月电量才 150882 KWH,大多数月份电量在 10 万 KWH 以下(见表 5.3)。
2. 东兴钢管厂是两套敞开式的低压计量。主变容量为 650kVA,月用电量在 6 万 KWH 左右,供电局一直怀疑用电异常。2002 年 8 月 12 日对该用户加装了两套测录仪。到 8 月 19 日现场检查时,发现经常使用的那台主变(250kVA)安装的那套测录仪有 27 条故障记录,另一台没用的主变(400kVA)所装测录仪无故障记录。根据测录仪故障记录,证明用户确有窃电嫌疑。东兴供电局当机立断,于 8 月 22 日对该用户加装了高压计量箱。该用户的两套测录仪也完成使命而退出运行。

3. 内江食品厂安装的是高压计量箱。正常月电量应达 8 万 KWH 左右，而每月实际用电量仅为 2 万 KWH 左右。市区供电局一直怀疑有窃电行为。但由于平时厂门紧闭，供电局多次用电检查都没有发现窃电证据。从 7 月 29 日安装测录仪到 8 月 7 日的几天里，测录仪就有故障记录 100 多条，且大多为电流开路，分析是二次电缆出了问题。现已要求市区供电局限期对计量装置进行整改。

4. 资中新华书店是敞开式的低压计量，8 月 5 日安装一套测录仪。在 8 月 28 日检查时发现，共有 57 条故障记录，主要集中在 23、24 日，大部分故障为电流开路。分析是用户松动各相 CT 的 K1K2 螺丝所致。也许用户发现了测录仪有故障记录而未继续实施窃电。该用户的月电量平时大多在 8000KWH 左右，自安装测录仪后月电量达 22914KWH，比原来增加了一倍多（见表 5.3）。

5. 隆昌瑞丰饲料公司是高压柜计量，2002 年 8 月 13 日安装测录仪一套。据用户 8 月 29 日电话反映，电能表几乎不转。后来到现场查阅测录仪记录，有数百条 CT 过载记录，且最后一条就在 8 月 29 日。之后作进一步检查发现，A、C 相 CT 因长期过载（800kVA 的容量，20/5A 的 CT）均已烧坏。该测录仪为这次计量故障的原因分析、故障时间的确认和电量的追补提供了重要证据。

事实证明，重庆龙源科技产业发展有限公司研制生产的电能计量装置异常运行测录仪较好地解决了监测用户在计量回路的各类窃电问题，为防窃电技术提供了新的思路，使防窃电产品在技术和功能上有了新的突破。随着异常运行测录仪的广泛应用，随着该项技术的进一步完善和产品质量的进一步提高，该产品在防窃电工作中将发挥它越来越大的作用。

表 5.2 电能计量装置异常运行测录仪安装记录 1

Table5.2 The Installing Records NO.1 of DJYL

序号	用户名称	安装日期	终端型号	有功表	CT 变比	有功表底	故障类型
1	长江长大酒楼	2002. 7. 26	DJYL-1/01	DSF99A	50/5	14. 94	用电量增加
2	内江食品厂	2002. 7. 29	DJYL-1/01	DSF99A	20/5	486. 55	电流开路
3	飘香火锅城	2002. 7. 29	DJYL-1/04	DTF99A	150/5	2248. 8	电流短路
4	资中新华书店	2002. 8. 5	DJYL-1/04	DTF99A	150/5	2868. 4	电流开路
5	资中石家庄水泥厂	2002. 8. 6	DJYL-1/01	DSF99A	75/5	1759. 9	无
6	东兴钢管厂 400KVA	2002. 8. 12	DJYL-1/04	DTSD341	750/5	24. 34	无
7	东兴钢管厂 250KVA	2002. 8. 12	DJYL-1/04	DTSD341	400/5	24. 28	电流接线错
8	隆昌瑞丰饲料公司	2002. 8. 13	DJYL-1/01	DSF99A	20/5	14. 7	CT 过载
9	威远县恒星纸业公司	2002. 8. 19	DJYL-1/01	DSF99A	50/5	8953. 5	欠压
10	威远县第二水泥厂	2002. 8. 20	DJYL-1/01	DSF99A	75/5	15073. 5	无
11	东兴柴油机配件厂	2002. 8. 23	DJYL-1/04	DTF99A	400/5	12928. 1	无
12	威远新和煤矿	2002. 8. 29	DJYL-1/04	DTF100A	400/6	2071. 7	无

表 5.3 电能计量装置异常运行测录仪安装记录 2

Table5.2 The Installing Records NO.2 of DJYL

序号	用户名称	2002. 2	2002. 3	2002. 4	2002. 5	2002. 6	2002. 7	2002. 8
1	长江长大酒楼	83434	55825	57654	68926	93866	133215	182325
2	内江食品厂	14800	20000	17600	20200	17600	19600	24000
3	飘香火锅城	1680	2010	1680	1800	1800	2850	3780
4	资中新华书店	9810	9150	2490	13650	8760	8760	16680
5	资中石家庄水泥厂	186257	211772	235839	172955	114599	155588	219000
6	东兴钢管厂 00KVA	35762	57122	107567	70095	63676	57964	
7	东兴钢管厂 250KVA							
8	隆昌瑞丰饲料公司	168760	202688	198144	199800	212816	211092	175800
9	威远县恒星纸业公司	155740	244700	318100	295960	257230	253910	265050
10	威远县第二水泥厂	513360	529155	560190	498165	512745	546135	507150
11	东兴柴油机配件厂	3600	6480	16880	18160	15840	6560	6080
12	威远新和煤矿	15306	11641	24591	25244	21175	18879	23924

5.6 本章小结

本章对防窃电装置的故障检测算法和程序进行了设计，对关键的程序流程进行了详细的分析和设计，对 CT 开短路检测作了详细阐述，实现了对各种类型故障的检测和显示。整机调试表明该装置能达到设计要求，实际挂网结果得到了用户好评与认同。

## 6. 网络化防窃电技术探讨

### 6.1 防窃电概述

从已发现的窃电手段来看，真可谓五花八门，但从对窃电手段的分类来讲，仍然没有超出第三章所讲的五类窃电手法：电压法、电流法、移相法、扩差法、分流法。通过对大量窃电行为和非窃电行为导致的计量损失情况进行归纳分析，再结合电力计量科研人员的研究成果和电力计量一线工作人员的实际经验，笔者认为，想要完善地防止窃电或者最大限度地防止窃电现象的发生，需要从两个方面入手：一是加强自身计量管理，二是采用新技术，大幅提高计量装置本身防窃电能力。

### 6.2 加强计量管理防窃电

有人说，窃电手段“超前防窃电技术一个角度”，而防窃电管理工作总是“滞后窃电行为一个角度”。因此，首先应抓紧作好防窃电的管理工作，将防窃电管理工作落到实处，防微杜渐，把好防窃电的第一关<sup>[1]</sup>。

目前，电力部门在计量管理上作了许多工作，规定了不少硬性措施，制定了相关规则要求。从理论上讲，这些措施的施行可以在很大程度上防止绝大部分窃电现象的发生。从实际查处的窃电行为来看，许多窃电行为实际上是钻了计量管理上的漏洞。许多窃电者并没有采用复杂的窃电技术窃电，它们常采用简单的窃电办法，但由于各种管理上的原因，使窃电行为在相当长的一段时间内没有被发现，造成不应有的损失。

加强计量管理水平，落实管理制度，需要切实执行各种规章制度。在此，笔者借鉴电力计量部门提出的各种措施，再结合自己研究实际，提出如下管理要点，希望起到抛砖引玉的作用。

#### 1) 提高抄表人员素质

随着电力系统计量技术的不断进步，原有机机械表逐渐被电子表代替，自动抄表系统日益得到广泛应用。有些抄表人员素质不高，计量管理部门又没有重视再培训，导致不应有的电量误抄误计。同时他们对各种窃电方式现场查获能力不够，难以发现各种技术窃电手法。要加强对供电企业职工的教育，完善用电营销监督管理措施。

#### 2) 定期审核抄表记录制度

表卡负责人应定期审查抄表员抄录的表示数和算得的电量等数据是否正确，必要时到装表现场检查。

### 3) 初装建档制度

初装或换装的电能表及互感器，必须在写明表号，原电量计数、表倍率、互感器变比、日期、地址和经办人及审核人等数据和情况，以利有关的管理工作。实际工作中，曾发现因计错倍率导致电量长期少计的情况。

### 4) 电能计量装置的故障处理制度

高压计量装置出了故障，通常有两名以上专业人员就地解决问题，以规章为准绳，一般不易有偏差。撤回的事故电能表须经专业检定员，从表面外观到内部逐项检验。作出符合要求检验报告，为妥善处理所谓事故电能表提供依据。

### 5) 电能计量装置的保管和运输制度

电能表和互感器应在相应的条件下保存和运输（例如，表库的温度应在  $0\sim+40$  摄氏度以内，相对湿度不超过 85%，电能表应在其包装条件下运输）。

### 6) 电能表和互感器的抽检制度

用电中的高压电能计量装置，一般均由专业人员定检不误，并且每年各供电局之间互查两次，一般不会有问题，就是出现问题也能及时解决，用电中的低压电能表和互感器的数量大，并且安装地点不集中，人均分担定检任务较多，出了问题，有时拖到两到五年定检才能发现解决，为此，有条件的供电局可以针对低压电能表和互感器制订相应的抽检制度，能及时发现和处理有关问题，降低电能不明损耗，增加供电局的经济效益。

### 7) 电能计量装置的封印管理制度

管好用好电能计量装置的封印是防窃电的重要措施之一，但是，它的作用常常被忽视，因此就留下防窃电隐患。有的电能表端钮盖缺少封印或者用电工钳子卡一个印就算是有了封印，因此，个别人可能很顺利地端钮接线上作手脚窃电；有的计费用电流互感器的接线端子不加封印，于是个别人就私自更换电流互感器（变比改换大的），大量窃电；封印管理不善，导致封印流出，有些电力用户可以轻而易举搞到封印，造成防窃电漏洞。

封印管理并不难，一切按规章制度办事，是可以杜绝封印管理不善问题的。另外，采用技术含量高的封印，可以大大增加窃电难度。

### 8) 电能计量装置的图纸管理和审核制度

电力部门对电能计量用的表板、表箱和计量柜都有相应的标准图纸要求，并设专业人员管理审核图纸，因此新装和改装的电能计量装置一般都能达到标准要求，为准确计量电能创造了有利条件。供电部门在审核图纸时根据电能表、电流互感器和电压互感器的误差大小，优化组合它们，使它们的误差互相抵消到最小限度，收

到计量电能更准确和电能丢失减少的效果。

#### 9) 用电普查制度

用电普查是减少丢电和反窃电的重要措施之一，要定期普查或非定期抽查。

#### 10) 查窃电制度

认真彻底执行查窃电制度，是行之有效的反窃电重要措施之一，通常是每季度进行较大面积的查窃电，每月由查窃电的专业人员统一组织进行，在用电高峰期由营业用电管理专业部门组织查窃电能手，根据用电异常情况排队，重点突击检查，遵照《供电营业规则》的规定和要求，一查有无违章用电，二查有无窃电行为。

#### 11) 违法犯罪章用电和窃电的处理制度

根据供电企业组织的查窃电专业人员获得有违章用电或窃电行为的证据（如窃电用具，现场实况录像，窃电单位或个人签字确认证明等要求）按照《供电营业规则》的相应规定，适当处理。

### 6.3 采用先进技术措施防窃电

预防窃电的管理制度和技术措施好比左右手，双手配合得当，才能搞好防窃电工作，上述计量管理制度，若能彻底实行，则大部分的窃电现象都不会发生。但是随着技术的进步，窃电手法也由简到繁，由公开到隐蔽。

在实际抄表工作中，计量人员甚至明知道该用户在窃电，但就是长时间查不出其窃电手法的情况。另外，由于查获窃电需要由窃电现场证据，不能仅仅凭计量的电量不合理来判断窃电。如果窃电者采用易于恢复现场的窃电手段（如短路 CT 二次侧等），那么不通过在线监测装置是难以取证的。

#### 6.3.1 选用具有防窃电功能的多功能电能表

电压法窃电是肉眼难以察觉，又具有一定隐蔽性的窃电方式。当用户采用机械表计量三相电能时，机械表本身是无法判断欠压、失压的，它只能依靠外接失压计时仪来防止此类窃电。现在，还有部分计量系统仍采用机械表+失压计时仪计量方式来防止窃电。笔者认为，此种失压计时仪不应大力推广。失压计时仪只对电压法窃电有效，它不能检测其它类型窃电方式，性价比低，自身防护能力差，该产品正在逐渐退出市场。

目前市场上的多功能电子式电能表有较好的防窃电功能。选用合适的多功能表，可以极大提高计量装置防窃电能力。下面我们以两款多功能电能表为例，分析



其的优势。

- 1) DSSD331-3 和 DTSD341-3 是湖南长沙威胜公司出品的三相多功能电能表。除了电能表必备的电能计量功能外, 它还增加了以下辅助功能: 失流、失压记录功能、可选择全失压记录功能; 记录多种事件发生时间及当时状态, 如清零、清零量、设置参数、掉电、上电、欠压、过压、电流不平衡率超限等; 电压合格率记录功能; 自诊断功能, 故障报警功能。上述辅助功能是对电能表防窃电功能的有益补充, 尤其是失压、欠压、缺相记录功能, 有效地防止了用户采用电压法窃电的行为; 其次, 由于电能表具有自诊断报警功能, 它能较好地防止用户采用扩差法窃电。这些优点是机械表所无法比拟的。
- 2) EDM12000-04XX 全电子电能表是由澳大利亚 EDM1 公司(红相集团下属企业)设计生产的三相全电子多功能高精度电能表。防窃电功能有: 自我诊断及报警, 实时监控电能表的工作状态; 可记录事件发生或恢复的日期、时间, 事件原因, 正反向电量底度, 三相电压、电流、相位, 用于电量追补; 采用先进先出的方式记录 100 条事件, 记录电能表的工作状态。同理, 该款电子式电能表防范电压法窃电和扩差法窃电的能力也很强, 并且它还可以记录移相法窃电信息, 防范移相法窃电。

传统机械电能表与电子式电能表相比, 电子式电能表具有极大优势, 电子式电能表代替机械表是一个必然趋势。从上面两个例子可以看出, 电能表在防范电压法窃电、扩差法窃电、甚至部分移相法窃电上均有较大优势。选用防窃电多功能电能表, 可以大大增强计量系统防窃电功能。

### 6.3.2 采用具有全面防窃电功能的计量装置

对三相电力用户而言, 计量装置包括电能表、电流互感器、电压互感器、连接导线、计量箱或计量柜。要提高计量防窃电功能, 首先要加强计量装置自身防窃电能力。

#### 6.3.2.1 进一步加强电能表防窃电功能

采用现有多功能电能表计量是否就可以避免防窃电方面所有漏洞了呢? 显然不是。对现有多功能电能表防窃电功能进行详细分析后, 可以看出, 由于表内都没有防范电流法窃电功能——也就是无法判断电流回路(表内和表外)是处于正常工作状态还是异常工作状态, 这些电能表也就无法准确判断移相法窃电和电流法窃电, 这也是目前多功能电能表防窃电功能不完全的重要原因。

电流法窃电一直是困扰电力计量工作者的一道难题,但电流法窃电并不是没有办法检测的。它至少可以通过两种方式进行在线监测。一是检测 CT 导纳。通过检测 CT 导纳变化来判断是否有开路或短路情况发生,这种方法已被澳大利亚红相电力公司成功地应用于 501 型带电 CT 故障测试仪上,它是为检测带电 CT 而特别设计的专业仪器,测量结果不受 CT 是否带电的影响。该仪器可侦知 CT 的圈数不足、短路、CT 表现恶化、电表内磁芯质量问题、开关不良、回路电阻(阻抗)过高等各类故障和 CT 带载能力,并能承受高达 20A 的 CT 二次电流。另一种就是测量 CT 二次回路反馈波形的变化情况,检测原理如前面第三章所述。这种方法归根究底也是检测 CT 二次回路固有参数是否发生变化。目前,这种检测技术已经被重庆龙源科技产业发展有限公司成功应用到多功能电能表内,成功实现了对 CT 二次回路异常的在线监测。

成功实现了对电流法窃电的检测,即意味着成功解决了移相法窃电的检测问题。运用相量分析法,可准确对电压错相、电流错相等一系列异常用电情况进行判断,及时作出记录。

扩差法窃电的防范在现有多功能电能表中得到一定体现。由于电子式电表具有记忆优势,因此,完全可以将电能表表盖何时被开启,开启起止时刻等信息记录下来,作为查窃电参考。这种功能目前在电表内较少采纳,但笔者从计量一线人员了解到,他们很希望电表具有这一功能,因为铅封管理不尽完善,窃电者可以仿制或非法获取铅封。他们打开表盖后,在表内做手脚,再恢复铅封,此时单从外观上难以觉察。但如果有了此种记录功能,他们只要打开表盖,电表即自动产生非法开启记录,抄表人员从记录的时间信息上即可判断电表是否被异常开启,确认后,再作进一步检查,可收到事半功倍的防窃电效果。

分流法窃电问题的解决不能依靠电能表本身。当用户绕开电表用电或进行分流用电时,电表本身是无法探知的。分流法窃电检测还需要依赖其它防窃电技术。

现阶段,由于大量电力电子设备的应用,造成电力系统谐波超标,对电能计量也有较大影响。有些用户因为谐波严重导致电量少计,这个问题需要通过采用专用基波电能表计量电能来解决。

研制出新的具有全面防窃电功能的多功能电能表是完全可行的,这也是计量部门急需的产品。国内已有生产厂家和研发部门在进行这类产品研发,相信不久的将来,电能表防窃电能力上会有大幅度提升。

#### 6.3.2.2 强化辅助计量设备防窃电功能

除了电能表需要加强防窃电能力外,外接电流互感器、连接导线、计量箱均可以采用具有防窃电功能的相关产品提升其防窃电能力<sup>[40]</sup>。

针对绕越计费表用电的窃电户,采用如下技术措施:(1)在计量箱或变压器二次侧,加装封闭罩。(2)用绝缘绑带分相缠绕二次侧出线及接线柱。(3)三相四线制低压供电线路尽可能少跨用户,同时采用防老化绝缘线。针对改变电能表的工作状态的窃电户,可采用如下技术措施:(1)配电盘(箱)采取铅封与纸封并举,使表计在封闭的盘、箱内工作。(2)配电箱内加装网罩,网罩加封。(3)计量箱用户从接线盒到表箱之间的表线,要采用八芯电缆或加装套管,以防窃电者折断线芯。(4)严格要求表计的安装工艺,螺丝齐全,并紧固。

### 6.3.3 防窃电技术网络化

防窃电技术网络化是防窃电技术发展的必然趋势。随着电力系统各种远程抄表网络、负荷控制系统、配网自动化网络的应用,电力系统管理水平和生产效益大大提高。网络化防窃电,可以有两种选择,一是单独组网,形成功能单一的防窃电网络;二是将防窃电功能融入其它网络中。下面将分别介绍几种典型的防窃电网络。

#### 6.3.3.1 融入自动抄表系统的防窃电网络

现在许多地方已安装有自动抄表系统。按照采集数据方式的不同,自动抄表系统可以被大致划分为本地和远程两种。本地抄表系统由于实时性差,无法构建有效的防窃电网络。远程抄表系统则是很理想的搭建防窃电网络的平台——在该系统内加装智能防窃电装置(多功能电能表、专用防窃电监测仪器等),利用原有抄表系统通信网络传输信息,最后在上位机进行窃电信息处理。

##### 6.3.3.1.1 远程自动抄表系统简介<sup>[51]</sup>

自动抄表电能计费系统的发展,随着电能计量表由传统的机械式/电子式脉冲表发展到 90 年代新型固态智能多功能电子式电能表,自动抄表电量计费系统经历了一个由集中式系统转为分布式、网络式、开放型系统的发展过程,电表数据采集也同样由集中式脉冲处理方式发展成为分布式直接传送方式。

典型的远程自动抄表系统主要由前端采集子系统、通信子系统和中心处理子系统等三部分组成。抄表集中器是将多台电能表连接成本地网络,并将它们用电量等数据集中处理的装置,其本身含有特殊软件,且具有通信功能,中央信息处理机是利用职权公共电话网络等公用数据网,将抄表集中器集中的电表数据抄回并进行处理的计算机网络。

#### 1) 前端采集子系统

用于远程自动抄表系统的电能表有脉冲电能表和电子式电能表两大类。这里我们只讨论电子式电能表,它是通过串行口,以编码方式进行远方通信的。按电子式

电能表的输出接口通信方式的不同,这类表可分为 RS485 接口型和低压配电线载波接口型两类。RS485 智能电度表是在原有电能表内增加载波接口,使之能与采用 RS485 方式的抄表集中器交换数据。载波智能电能表是在原有电能表内增加载波接口,使之能通过 220V 低压配电线与抄表集中器交换数据。

## 2) 通信子系统

通信子系统是把数据传送到控制中心的信道。为了适应不同的环境条件以及成本要求,通信子系统的构成有多种方案。按照通信介质的不同通信子系统主要有:光纤传输、无线传输、电话线传输和低压电力线载波传输等四种。抄表集中器是通信子系统的枢纽。它负责中心计算机和采集终端之间的联系。一方面接收来自计算机的各种操作命令并下传采集终端;另一方面,将采集终端的各种信息回传管理中心计算机,同时还存储所辖表计的数据和有关参数,并具有定时和实时抄收采集终端(智能表)数据,实时监视采集终端(智能表)的工作状态等功能。

## 3) 中心处理子系统

中心处理子系统主要由中心处理工作站以及相应的软件构成,是整个自动抄表系统的最上层,所有用户的用电信息通过信道都汇集到这里,管理人员再利用软件对数据进行汇总和分析,以便做出相应的决策。如果硬件允许,还可直接向下级集中器或电度表发出指令,从而对用户的用电行为实施控制。

### 6.3.3.1.2 防窃电功能扩展

从远程自动抄表系统硬件组成和实现的功能来看。它与电能表防窃电技术关系密切。如果能够有效地利用现有自动抄表网络平台,将防窃电功能融入抄表系统中,将会进一步提高该系统实用性,取得良好的防窃电效果。

具有防窃电功能的多功能电能表和防窃电智能监测装置均具有多种数据通信能力,通过规约转换,可将它们作为基表接入远程抄表系统。为了扩展防窃电功能,它们需要提供相应窃电信息,定时或在事件发生时主动向上报告电能表本身的状态信息。

电能表需提供的窃电信息:

- 1) CT 开短路: 电流互感器中任意一相、两相或三相开路或短路。
- 2) 电流超限报警: 电流互感器二次电流长时间超过额定值。
- 3) 失压: 三相电压中任意一相、两相或三相失压。
- 4) 欠压: 三相电压中任意一相、两相或三相欠压。
- 5) 过压报警: 由于零线与火线互换,导致出现过压。
- 6) 缺相: 任意一相、两相同时缺相。
- 7) 停电: 停电时间段记录。

- 8) 电压错相：三相电压中任意两相错相。
- 9) 电流错相：一相、两相或三相电流反相；任意两相电流错相。
- 10) 电能表开启：电能表被非法开启，记录开启时刻。
- 11) 复合故障：上述各类故障的不同组合。

辅助计量装置提供的窃电信息：

- 1) CT 二次侧端子保护盖被打开。
- 2) 计量箱被开启。
- 3) 铅封被开启。

计量装置产生的窃电信息，通过通信网络传输到中央信息处理计算机，在计算机管理软件部分，嵌入相应防窃电管理软件模块。软件根据已有的 24 点历史数据、负荷曲线和用户具体用电趋势，编制出平均日负荷曲线模板，每日 24 点负荷曲线与之比较，正常的应以曲线模板为轴线上上下波动，反之则有窃电嫌疑，连续跟踪，设置报警上下限，并结合专职人员的经验综合分析，即可准确判断窃电。从而实现远程自动抄表和防窃电功能合二为一。

整合后，自动抄表网络结构示意图如图 6.2：

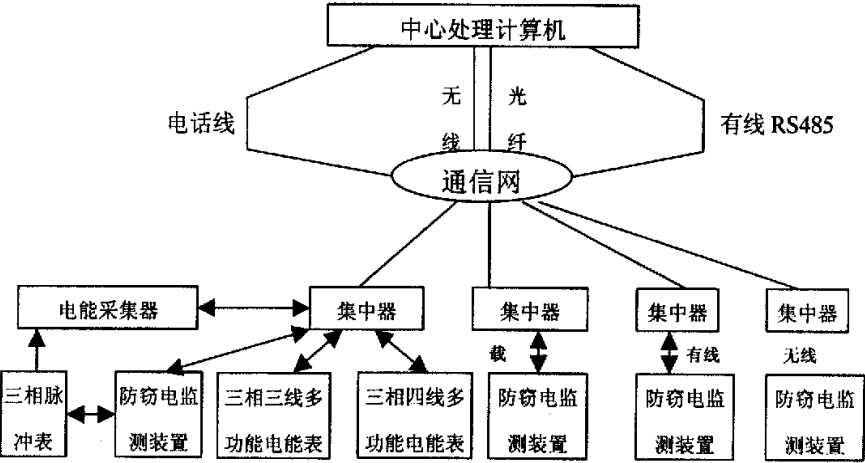


图 6.2 整合后远程自动抄表系统

Figure6.2 Integrated Remote Automatic Meter Reading System

这种利用自动抄表系统构建的防窃电网络，能够成功地解决绝大部分防窃电问题。它对于电压法、电流法、移相法、扩差法、无法法窃电均有良好的监测效果。这样，通过远程自动抄表通信网络，利用防窃电多功能电能表传送报警信息，由上位机防窃电管理软件进行全面分析处理，就组成了一个功能齐全，造价低廉，防窃

电效果显著的防窃电抄表网络。

6.3.3.2 融入负荷控制（管理）系统的防窃电网络

由于负荷控装置的安装量覆盖了社会总用电量的 70%及以上(用户装机容量在 500kVA 及以上的监控量应达 100%, 用户装机容量在 315~500kVA 的监控量应达 70%, 用户装机容量在 100~315kVA 的监控量应达 50%), 因此, 对已安装有负荷控制系统的

电力网, 可充分利用负荷控制系统现有的通信平台搭建防窃电网络。

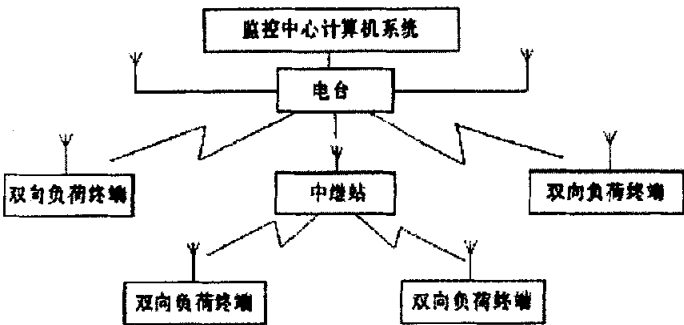


图 6.3 电力负荷控制系统示意图  
Figure6.3 Load Management Systems

6.3.3.2.1 负荷控制系统简介<sup>[38]</sup>

对用户的用电负荷进行控制的技术措施, 可简称为负荷控制。

原来的负荷控制系统是基于电力供需矛盾而产生的, 它在前些年严重缺电情况下保证正常供电和人民生活正常用电发挥了重要作用, 取得了显著经济效益和社会效益。现在, 随着电力供需矛盾的缓解, 电力负荷控制系统已由原先侧重控制转向侧重管理, 其系统功能也得到大力加强。图 6.3 是负荷控制系统典型结构框图。

现在主要采用的是无线电电力负荷控制系统。无线电电力负荷控制系统是利用无线电信道传输控制信号, 实现电力负荷控制技术的系统。它具有投资少、安装简便、控制覆盖面大等优点, 而且还具有双向通信的功能。其主要由监控中心站、数据传输信道和监控终端组成。

1) 负荷终端

用于负荷控制系统的负荷终端有单向终端和双向终端两大类。单向终端是只能接收电力负荷控制中心命令的电力负荷控制终端。双向终端是装设在用户端, 能与电力负荷控制中心进行双向数据传输和实现当地控制功能的设备。

2) 无线通信子系统

无线通信系统, 包括架在中心站的天线和用户处的小型天线、无线电台以及用于信号转发的中继站。

3) 监控中心计算机系统

监控中心站计算机系统一般由工作站、服务器、前置机和网络部件等组成。系统通过前置机实现通信的数据转换和对系统通信的控制; 网上的各个工作站以点对

点连接的方式与前置机通讯,前置机将工作站的指令按照负荷控制系统的规约发往无线电台,同时控制无线电台的工作状态;反之,终端的返回信息经前置机的数据转换返回该工作站。

#### 6.3.3.2.2 窃电功能扩展

从扩展后的负荷控制系统硬件组成和实现的功能来看,它同样可以成为窃电网络有效的通信平台。

与窃电功能融入远程抄表网络类似,需要在原有网络基础上加装部分设备。具有窃电功能的多功能电能表和窃电智能监测装置均具有多种数据通信能力,通过规约转换,可将它们作为基表接入负荷控制系统,由它们提供相应窃电信息,定时或在事件发生时主动向上报告计量装置本身的状态信息,这些状态信息如前所述,这里不再重复。

此外,由于负荷控制系统主要针对大中用户(负载在 100KVA 以上),一般而言,这些用户除了装设了计量 CT,同时也装设了保护回路和指示回路的 CT。因此,可充分利用这一有利条件,将保护或指示回路录得的电量(由中心计算机算出)与计量回路采集的电量比较,从而判定是否有窃电行为发生。

同理,计量装置产生的窃电信息,通过通信网络传输到中央信息处理计算机,在计算机管理软件部分,嵌入相应窃电管理软件模块。从而实现负荷控制功能和窃电功能合二为一。

#### 6.3.3.3 融入配电管理系统的窃电网络<sup>[50]</sup>

目前,配电管理系统在世界范围内得到越来越多的重视,它包含地理信息系统、网络设备文件、冗余部件管理、检修计划管理、运行规划及优化、运行及控制以及其它管理任务(故障电话管理、人员管理、计费管理等)。其中运行及控制部分功能的自动化由配电自动化系统实现,又可具体细分为数据采集系统、电压/无功控制、保护的协调管理及控制、馈线控制、故障处理(故障检测、定位,隔离后故障区供电)、自动抄表和负荷管理等。

近年来国内配电管理系统发展很迅速。配电管理系统是一个实时系统,在配电管理系统的用电管理功能模块中包含远方集中抄表功能。通过装设在配电变压器的变压器终端对低压用户进行远方集中抄表。在这个基础上开发窃电功能,比之窃电电能表侦察窃电,具有迅速、准确等优越性。具体窃电功能设置、网络组成,可参照负荷控制系统和远程抄表系统。在配电管理系统中开发窃电功能实现窃电,具有很多优点,实现起来也比较容易,几乎不需要额外硬件投资,只要开发相应的软件模块即可。

6.3.3.4 独立的 GSM 无线通讯防窃电网络

在不具备现有网络平台的地区，要想取得良好的防窃电效果，可以采取独立组网方式建成防窃电网络。其中，在国内广为普及的 GSM 网络是一个理想的通信平台，GSM 的短消息通信是一个理想的通信途径<sup>[50]</sup>。

GSM 短消息是移动通信部门利用 GSM 网络在提供电路交换的各种电信业务和承载业务之外提供的基于数据分组交换的一项增值业务。它使得一个移动用户可以向另一个移动用户发送消息，还可以从 GSM 网络外发送短消息给一个移动站。短消息的内容可以是字符或数字。短消息通过设在移动通信部门的短消息中心用 GSM 系统的信令信道传送，即使移动中端处在通话状态下也可进行传送。在整个传送过程中，没有呼叫连接建立和释放的过程；短消息中心具有短消息的存储功能，在终端设备关

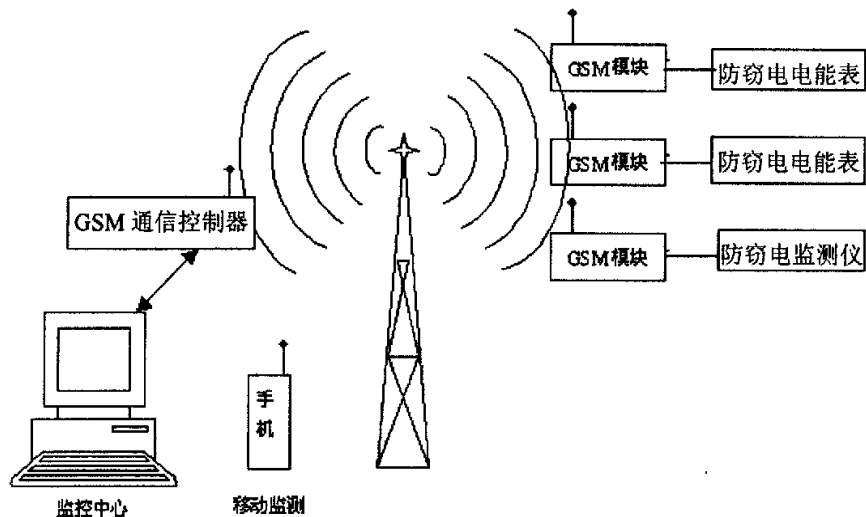


图 6.4 GSM 防窃电网络示意图

Figure6.4 GSM Preventing Power Theft Network

机时，可以保持消息不丢失，与寻呼业务相比，传输的可靠性大为提高。利用其双向传输的性能，可方便地实现对于各类电气设备的远程控制和信息采集，即实现遥控和遥测。许多通讯设备厂商为此用途开发生产了多种类型的 GSM 调制解调器模块，这些模块已被一些厂家成功集成到电能表和防窃电监测装置中。

6.3.3.4.1 GSM 防窃电网络构成和原理

GSM 防窃电网络由四部分组成：低层基表、GSM 通信网、监控中心、移动监测点。低层基表既可以是一台可收发 GSM 短信的防窃电电能表，也可以是可收发 GSM 短信的防窃电监测装置；GSM 通信网是我国目前覆盖面最广、支持数据、话音和广播、用户最多的数字移动通信系统；监控中心由 GSM 通信控制器、监测主机和相应



辅助设备组成；移动监测点则是为了及时查处窃电需要，由分散在不同地点的查窃电人员组成，他们持有的短消息接收设备可同步接收低层基表发送来的窃电信息。防窃电网络构成如图 6.4 所示。

#### 6.3.3.4.2 GSM 防窃电网络实现功能

GSM 防窃电网络可实现以下功能：

- 1) 自动抄表功能：将电能表内数据定时或接收到监控中心抄表命令时以短消息方式上传，实现自动抄表功能。
- 2) 通信回路巡回检测功能：巡回检测各个通信回路，判断通信通道是否完好。
- 3) 电压回路监测功能：失压监测、缺相监测、电压逆相序监测、电压反相监测等。
- 4) 电流回路监测功能：电流-电压错相监测、电流互感器一次或二次极性反相（反接）监测、表前用电（分流）监测等。
- 5) 实时在线显示报警功能：实时在线显示故障次数、故障类型、发生相别、起止时间、窃电电量（电度数）等。
- 6) 故障、事件及参数记录功能：将运行参数及每次窃电行为，包括起始时间、结束时间、丢失电量等记录，为用电管理部门查处窃电提供准确有效的窃电事实依据，同时具有停电、开启和变更计量装置元件、修改运行参数等事件记录功能。
- 7) 电流互感器短路、开路监测：监测电流互感器短路、开路，使电流互感器短路、开路监测完全不受电网电压高低、负荷电流大小及运行环境的影响。
- 8) 损失（窃电）电量追算：计算损失（窃电）电量，作为窃电惩罚的依据或重要参考。

#### 6.3.3.4.3 GSM 防窃电网络优点

- 1) 实现简单，无需单独建网。

低层基表、监控中心及移动监测点只要位于 GSM 网络（中国移动或中国联通）覆盖范围内，即可正常使用。无需建立造价高、使用成本高、建设周期长、误码率高、接口复杂、兼容性差的通信网络。且极大地扩展了监测范围，即使在偏远地区、海岛等架设通信线路困难或不经济的地方均可使用，具有其他通信方式无法比拟的优势。利用监测中心设备终端，还可方便地将故障信息转发至移动电话或其他移动终端，使用更加方便。

- 2) 及时性强，传输快捷、准确。

电能计量装置一旦发生故障（人为窃电），通过 GSM 网络可立即将故障信息传出去，以尽可能短的时间，通知监控中心和移动监测点，及时发现和迅速处理，制止计量故障或窃电行为，将电能计量损失降低到最低程度。

3) 高可靠性，绝无信息丢失。

GSM 防窃电网络采用双向通讯，现场监控点一旦发出信息，GSM 系统提供的短消息业务可以让网络端知道监测中心设备终端是否收到所发的消息。如果传送失败，监测中心设备终端没有回答确认消息，网络会保留所传的消息，一旦网络发现监测中心设备终端能够被叫通时，就可以重发消息以确保监测中心设备终端能够收到，而且现场监控点还能够知道发送是否成功，绝无信息丢失。

4) 通信成本低、系统容量大、保密性能好、抗干扰能力强

利用文字短消息方式传输故障信息，不用拨号建立连接，永远在线，可自动把要发的信息加上目的地址发送到短消息服务中心，由短消息服务中心再发给最终的信宿。该通信网络与其它通信系统相比，可大幅度降低设备使用维护费用，点对点传输，保密性能好、抗干扰能力强。

## 6.4 本章小结

本章对三相计量装置防窃电技术进行了详细探讨，提出如何通过加强计量管理和提高计量装置自身防窃电能力的建议和方案。随后对网络防窃电技术作了进一步探讨，提出如何将现有的远程抄表系统、负荷控制系统、配网管理系统融入防窃电技术以及如何单独组建 GSM 短消息防窃电网络。

## 7. 全文总结

本论文针对三相供电系统中的窃电问题,通过对三相四线和三相三相供电系统中电能的正确计量方式、常见的窃电手段的深入分析,将各种窃电手段进行归类,提出了对各类型窃电手段的检测方法,并利用 PIC16F877 实现了三相四线供电系统防窃电装置和三相三线供电系统防窃电装置的研制。为了对防窃电装置的功能进行全面的测试,在三相供电系统模拟试验台上,并对每种故障类型进行了模拟试验。试验表明,防窃电装置不仅能对各种故障作出准确的判断,而且对每次故障均有详细准确的记录,包括故障的故障类型、故障相别、故障起止日期、时间、持续时间和故障电量,防窃电装置达到了设计的目标。

本论文的主要工作和创新之处主要体现在如下几个方面:

- ① 对常见的窃电现象进行了分析,把窃电方法归并五类:电压法窃电、电流法窃电、移相法窃电、扩差法窃电、分流法窃电。从理论上分析了各类窃电方法引起的电压、电流和功率因素变化,从而提出了检测窃电方法和窃电判据,为迅速准确判断窃电行为和电量追算提供了理论保证。
- ② 为了检测 CT 开短路故障,提出了多种在线检测方法。并且将其中一种检测方法运用到防窃电检测装置上,成功实现了在线检测。为了更准确地检测出 CT 开短路故障,装置内采用了复杂可编程逻辑器件 XLINX9572,用于反馈波的幅宽检测。实际应用后,取得了较理想效果。
- ③ 利用硬件和软件相结合的方法实现多通道的同步 A/D 采样,即采用硬件对多个通道的分时采样,软件进行相角补偿的采样方法,不仅节省了硬件成本,而且提高了系统可靠性。
- ④ 利用 PIC16F877 实现 32 点 FFT 算法,对 A/D 采样的数据进行分析,分离出电压、电流中的基波和各次谐波分量,有利于对窃电故障的精确判断和实现复杂的相量分析算法。
- ⑤ 将防窃电工作从管理角度和技术角度均作了详细论述,认为二者并重,才能有效防止各种窃电现象发生。
- ⑥ 通过研制出的三相三线和三相四线防窃电装置,结合现有电力系统通信平台,提出了新的系统化网络防窃电方案——远程抄表系统防窃电、负荷控制系统防窃电、配网管理系统防窃电以及独立的 GSM 短消息防窃电网络。

## 致 谢

本论文是在导师唐治德教授的精心指导下完成的，倾注了唐老师极大的心血，在此成文之际，谨向唐老师致以最衷心的感谢和崇高的敬意！唐老师在学习和科研上严格要求、循循善诱、悉心指导，使我顺利完成硕士阶段的学习和科研工作，我所取得的每一份成就都是与恩师的指导和关怀分不开的。恩师渊博的学识、严谨踏实的治学态度、实事求是的科研作风、诲人不倦的育人精神和独到精辟的见解给我留下了深刻的印象，使我受益匪浅，也必将使我受益终生，在恩师门下学习的三年时间，将是我人生中不可多得的、难忘的、宝贵的一段经历。请允许我再次向唐老师致以深深的谢意！

在防窃电装置的研制期间，我还得到了重庆龙源科技产业发展有限公司的大力协助，在此一并致谢！

另外，我要向所有学习期间曾给我帮助的老师、同学和朋友们表示感谢！衷心地感谢在百忙中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

孙洪波

2003 年 4 月 于重庆

## 参考文献

- [1] 李强, 关于窃电与反窃电的思考, 吉林电力公司, 国家电力信息网 2002. 3. 7
- [2] 电能表互感器的应用和防丢电技术, 王学伟 王德聪, 哈尔滨工业大学出版社 2000. 3.
- [3] 周小军, 三相四线供电系统防窃电技术研究, 重庆大学硕士论文, 2001. 5. 1-55.
- [4] 贾世德等, 窃电监视装置的开发与研制, 东北电力技术, 2000. 1. 12-13.
- [5] 卢江 安锦凤, 电能计量二次回路失压、断流、短路的防范措施, 电测与仪表, 2000 年 3 月, 31-32.
- [6] 张有顺等, 电能计量基础, 北京 中国计量出版社, 1990.
- [7] 孙铁民, 电能计量, 北京 水利电力出版社, 1992.
- [8] 支林飞, 美国电力危机加剧, 滕州日报, 2001. 6. 12.
- [9] J.-C Montano and R.Salmeron, Identification of instantaneous current components in three-phase systems, IEE PROCEEDINGS SCIENCE, MEASUREMENT AND TECHNOLOGY. Vol146. No.5 1999(9).
- [10] S.Lloral, J.M.Queroand L.G.Franquelo. Reactive power and energy measurement in the frequency domain using random pulse arithmetic. IEE PROCEEDINGS SCIENCE, MEASUREMENT AND TECHNOLOGY. Vol148. No.2 2001(3).
- [11] N.D.R.Sarma V.Veera Raju, K.S.Prakasa Rao. Design of Telemeter Configuration for Energy Management Systems. IEEE Trans on Power Systems. February 1994. Vol. 9, No 1.
- [12] John Tweedy. The Evolution of an EMS. Trans & Distribution. October 1994.
- [13] N.Wakeman. A Problem-Solving SCADA System. Trans & Distribution. October 1994.
- [14] Barry Kennedy, PE, and Dsabin. Use the Internet for power quality reporting ELECTRICAL WORLD, 1999(10).
- [15] Ted York. The advantages of meter standards ELECTRICAL WORLD, 2000(10).
- [16] Wayne Hartman. Evolution: RTUs AND PLCs ELECTRICAL WORLD, 2001(6).
- [17] Rick Gaskey Power factor testing predicts costly equipment failure ELECTRICAL WORLD, 2000(10).
- [18] Erakovic I, Rakic D, Lapcevic V, Marjanovic S, Djonovic M A system for remote meter reading and load management NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING AND TARIFFS FOR ENERGY SUPPLY IEE CONFERENCE PUBLICATIONS, (462) 196-199, 1999.
- [19] Paracha ZJ, Doulai P Load management - Techniques and methods in electric power system

- IEEE CONFERENCE RECORD 213-217, 1998.
- [20] Obeloer W, Grewe C, Pals H Load management with mobile agents EUROMICRO CONFERENCE – PROCEEDINGS 1005-1012, 1998.
- [21] A.Carullo, F.Ferraris, M.Parvis, A.Vallan An automatic calibrator for wattmeters with harmonic analysis capability MEASUREMENT 26(1999).
- [22] Giovanni Betta, Consolatina Liguori, Antonio Pietrosanto Design of automatic measurement stations with fault accommodation capabilities MEASUREMENT 30(2001).
- [23] M.Catelani, S.Giraldi A measurement system for fault detection and fault isolation of analog circuits MEASUREMENT 25(1999).
- [24] PCF8583 DATA SHEET Philips Corporation. 1997.7.15.
- [25] PIC16F87X 数据手册, Microchip Technology Inc 著, 刘和平等编译.
- [26] 刘国刚等, 电力负荷管理系统中技术防窃电功能的开发, 电力情报, 2000. 1, 18-20.
- [27] 徐铭, 关于窃电监测问题的探讨, 电力情报, 2000. 1. 14-17.
- [28] 韩松林等, 对几种防窃电电路的功能分析, 电测与仪表, 1999. 7. 8-12.
- [29] XILINX 数字系统现场集成技术, 朱明程等编, 2001. 10.
- [30] 孙洪波 唐治德等 DJYL-1 型防窃电测录仪 电测与仪表 2002 年 2 月 第 39 卷 第 434 期 15-17.
- [31] 王辛之等, 单片机应用系统抗干扰技术, 北京, 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [32] 何循来, 日历时钟和 RAM 电路芯片 PCF8583 及应用, 半导体技术 1997, 3. 13-17.
- [33] 陶时澍主编, 电气测量技术, 北京, 中国计量出版社, 1991.
- [34] 韩松林, 三相电度表的错接线及其对电能计量的影响(上), 电测与仪表, 1999. 1. 19-22.
- [35] 韩松林, 三相电度表的错接线及其对电能计量的影响(下) 电测与仪表, 1999. 2. 15-19.
- [36] 王占国 李杏春等, 多功能电能表及其抄表技术 1998 年 12 月 第 22 卷 第 6 期 北方交通大学学报.
- [37] 吕勇军 张铁岩, 高精度三相电能计量装置, 电测与仪表, 总第 36 卷 第 401 期, 7-10.
- [38] 左群峰, 对三相电能计量专用二次回路中电能表与互感器不同连接方式的分析, 计量技术, 1998. No. 12.
- [39] 黄建华, 基于 SA9604 的多功能电度表, 电测与仪表, 2001 年第 2 期, 49-51.
- [40] 刘乾业, JDG4DL5 型三相电量监视器及应用, 电力需求侧管理 2000. 5, 32-33.
- [41] 丁辉, 电能表联合接线的向量分析法, 电测与仪表, 2001 年第 11 期, 29-32.
- [42] 王鹏 谭宝成, 基于 GSM/MODEM 无线通信的自动抄表系统实现, 西安工业学院学报 2002 年 3 月 第 22 卷 第 1 期 22-26.
- [43] 电力工业部综合管理司, 低压电力用户集中抄表系统技术条件, 北京, 中国电力出版社, 1977.

- 
- [44] 杨兰, 配电管理系统实现防窃电功能, 电力自动化设备, 第 22 卷第 1 期 2002 年 1 月, 84-85.
- [45] 邓文 赵伟, 电能自动抄表技术及相关思考, 电测与仪表 2001 年第 1 期, 5-8.

## 作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录

- [1] 唐治德 孙洪波 三相两元件有功电能表防窃电技术 重庆市电机工程学会 2002 年学术会议论文集 2002 年 10 月 14-18.
- [2] 孙洪波 唐治德等 DJYL-1 型防窃电测录仪 电测与仪表 2002 年 2 月 第 39 卷 第 434 期 15-17.
- [3] 孙洪波 唐治德等 三相三元件有功电能表防窃电技术 重庆大学学报 2002 年 12 月 第 25 卷第 12 期 87-90.