

基于 MSP430 电能表的设计研究与应用



论文作者签名: 卢映

指导教师签名: 吴国忠

论文评阅人 1: 周浩 教授 (浙江大学电气工程学院)

评阅人 2: 胡长生 副教授 (浙江大学电气工程学院)

评阅人 3: 俞成彪 高工 (浙江省电力公司)

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: 徐政 教授 (浙江大学电气工程学院)

委员 1: 陈隆道 教授 (浙江大学电气工程学院)

委员 2: 陈辉明 教授 (浙江大学电气工程学院)

委员 3: 陈升 高工 (浙江省电力设计院)

委员 4: 俞培祥 高工 (浙江省电力公司)

委员 5: _____

答辩日期: 2010 年 6 月 6 日



浙江大学研究生学位论文独创性声明

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

学位论文作者签名：

签字日期：

2010年6月6日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：2010年6月6日

签字日期：2010年6月6日

致谢

衷心感谢导师吴国忠教授的精心指导和鼓励！他渊博的知识、严谨的治学态度、宽广博大的胸襟、拼搏向上的精神等都使我受益终生。在课程进修和论文选题、编写期间，吴教授对我工作、学习和生活的关心让我非常地感动，值此论文完成之际，谨向导师表示衷心的感谢和诚挚的敬意！祝愿吴教授身体健康、心想事成！

回首硕士生活，体会更多的是快乐和充实。在这里的学习和科研工作经历将是我一生中最宝贵的财富和美好的回忆。在此特别感谢杭州利尔达科技有限公司陈贤兴董事长、梁源技术总监和赵振东等各位工程师在项目进行过程中付出的辛劳。在此向他们表示感谢，并祝他们鹏程万里！

深深感谢我的父母、哥哥和我的先生，感谢他们在我辛苦和疲倦的时候，对我莫大的鼓励、鞭策和支持，否则我将无法完成我的学业，感激之情难以言表，在此衷心地祝愿他们身体健康，幸福快乐！

衷心感谢所有帮助过我的人们！

摘要

电能的生产与其他产品的生产不同，其特点是发电厂发电、供电部门供电、用户用电，这三个部门连成一个电网系统不间断地工作，互相缺一不可。他们之间如何销售电能，如何经济结算，需要一个计量器具在三个部门之间进行测量，并计算出电能的数量。与生产生活密切相关的电能表是当前计量和经济结算电能的主要工具，它的性能和准确与否，直接关系到国家和用户的经济利益。而电子技术、计算机技术和自动控制技术的高速发展是电能表迅速进步、日益成熟的主要技术支撑。因此，电能表的设计研究与实践是一个长期的、不能间断的研究课题，特别是在努力建设节约型社会的今天，电能表技术的新发展必将为节约和有效利用电能资源做出巨大贡献。

未来电网建设是构建智能型电网，作为计量电能的主要工具电能表也正朝着全电子式、SOC (System On Chip)、多功能、智能型的方向发展，本文选用了MSP430系列单片机作为电能表的MCU (Microprocessor Control Unit)，MSP430系列单片机功耗低、片内外围模块丰富，它在目前智能化仪表的设计中应用非常广泛，部分芯片为电表、水表等计量表计的专用芯片。另外电能表的设计在保证精度、功能完整的基础上同时能实现防窃电测量，才能算得上是智能型的电表，才能更适应市场的要求。本文从窃电原理入手，总结了常见的窃电手段及防窃电措施，并针对电子式电能表进行了专门的防窃电功能研究，为设计防窃电式电能表做好铺垫。基于以上原理及结论，文章介绍了单相SOC、三相多功能、多费率、三相SOC电能表的设计方案，防窃电技术业内领先。并从硬、软件设计上重点介绍了一款新型单相防窃电SOC电能表，该表为业内第一块SOC电能表。

关键词: 电子式电能表; 单相电能表; 三相电能表; SOC 电能表; 单片机、MSP430;
防窃电;

Abstract

The energy production is different from the other products, its characteristics are power generation plants, electricity supply sector, the user of electricity, these three sectors together into a system without interruption to work, each dispensable. So how to sell power between them, how economic calculations, the need for a measuring apparatus to measure among the three sectors, and calculate the amount of electricity. The meter closely related with the production and life is the main tool of current metering and economic billing electricity, its performance and accuracy will have a direct bearing on the state and the user's economic interests. Electronic technology, computer technology and the rapid development of automatic control technology is the power meter rapid technological progress, the growing maturity of the main technical support. Therefore, the energy meter design research and practice is a long-term without interruption of the research topic, particularly in efforts to build a conservation-oriented society of today, new developments in meter technology is bound to saving and efficient use of energy resources to make a significant contribution.

In the future, the construction of power system is to build the intelligent power grid, so at present, the energy meter have the direction of development towards electronic, SOC, multifunction and intelligent. This paper use MSP430 as electronic energy meter' MCU, MSP430 have low power, rich-chip peripheral modules, it is widely used in the current design of intelligent instrumentation, part of them is the special-purpose chip for electronic energy meter, water meter, etc. Otherwise, the design of electrical energy meter not only ensuring the accuracy, functional integrity, but also achieving anti-theft measure, can be called smart meter, can also adapt to market requirements.

According to the principle of tampering actions, this paper summarizes the common means of tampering and tampering prevention means, and researches anti-theft function special for electronic energy meter, pave the way for the design of energy Meter. Based on these, this paper introduced the design of single-phase SOC electronic energy meter, three-phase multi-function electronic energy meter, three-phase multi-rate electronic energy meter, etc, anti-theft technology is leading in the same industry. And especially introduced a new design of anti-tamper single-phase electronic watt-hour meter from the hardware and software design, it is the first SOC meter in the same industry.

Key Words: Electronic Energy Meter ; Single-phase energy meter; three-phase energy meter; SOC energy meter; single-chip ;MSP430; anti-tamper. .

目 次

致谢	I
摘要	II
Abstract	III
1 绪论	1
1.1 课题来源	1
1.2 国内外技术现状与发展趋势	1
1.3 课题的提出和研究意义	3
1.4 论文主要研究内容	4
1.5 本章小结	5
2 电子式电能表	6
2.1 概述	6
2.2 电子式电能表的结构及工作原理	7
2.3 电子式电能表常用术语	12
2.4 本章小结	13
3 MSP430 系列单片机的结构原理	14
3.1 概述	14
3.2 MSP430 系列单片机的命名规则	14
3.3 MSP430 结构及其特点	15
3.4 MSP430 系列单片机内外围模块简介	17
3.5 本章小结	29
4 电能表防窃电技术	30
4.1 概述	30
4.2 常见窃电手段	30
4.3 防窃电技术措施	31
4.4 电子式电能表的防窃电功能研究	32
4.5 本章小结	37
5 设计与应用	38
5.1 概述	38
5.2 MSP430-TEST44X 开发试验板	38
5.3 MSP430 集成开发调试环境	39
5.4 单相防窃电式 SOC 电能表	40

5.5	三相多功能电能表	51
5.6	三相多费率电能表	52
5.7	三相 SOC 电能表	53
5.8	本章小结	58
6	总结与展望	59
6.1	总结	59
6.2	展望	59
	参考文献	61
	作者简介	64

1 绪论

1.1 课题来源

电能是一种特殊的商品,电能的生产与其他产品的生产不同,其特点是发电厂发电、供电部门供电、用户用电,这三个部门连成一个系统不间断地工作,互相缺一不可。他们之间如何销售电能,如何经济计算,需要一个计量器具在三个部门之间进行测量,并计算出电能的数量,这个装置就是电能计量装置。没有它,电能发、供、用电三方之间就无法进行销售,所以电能计量装置就是电力企业进行贸易结算的“秤”^[46]。

与生产生活密切相关的电能表是当前计量和经济结算的主要工具,它的性能和准确与否,直接关系到国家和用户的经济利益。电子技术、计算机技术和自动控制技术的高速发展是电能表迅速进步、日益成熟的主要技术支撑。因此,电能表的设计研究与实践是一个长期的、不能间断的研究课题,特别是在努力建设节约型社会的今天,电能表技术的新发展必将为节约和有效利用电能资源做出巨大贡献。

1.2 国内外技术现状与发展趋势

1.2.1 国外电能表技术的发展及趋势

1880年德国人爱迪生利用电解原理制成的直流电能表成为世界上最早的电流表;1889年,德国人布勒泰制作了无单独铁芯的感应式电能表;1890年,带电流铁芯的感应式电能表出现,其制动元件是一个铜环,制动力矩靠交流电磁铁产生;直到19世纪末,才逐步采用永久磁铁产生制动力矩,以降低转动元件旋转速度并增加转矩,铜制的圆转盘由铝转盘所代替,至此感应式电能表基本成型。

感应式电能表具有制造简单、可靠性好、寿命长和价格便宜等特点,经过100多年来与之配套的材料、技术、工艺的不断发展和制造技术已经成熟。但同时也暴露出了准确度低、使用频率范围窄和功能单一等缺点,为使电能计量仪表适应工业现代化和电能管理现代化飞速发展的要求,电子式电能表应运而生。

电子式电能表最早诞生于工业发达国家。1976年日本就研制出了电子式电能表,但由于现场使用暴露出抗干扰能力差等缺点,制约了其应用;20世纪80年代中期,随着电子电路设计与制造新技术的出现,电子式电能表在各种现场环

境下的工作可靠性问题被解决, 1.0、0.5、0.2级收费用电子式电能表相继商品化; 进入20世纪90年代, IC卡技术在国外广泛应用, 随着电能的商品化及进入市场流通, 智能型IC卡预付费电能表应运而生。

电子式电能表正向着多功能、智能型、SOC (System On Chip) 方向发展, 在编程、抄表技术方面由最初的手工操作发展到目前广泛应用的抄表器自动编程抄表, 并正由本地向远程抄表方面发展。同时, 电子式电能表由于线性度高、过载能力强、功耗低、抗高次谐波能力强、灵敏度高、具有防窃电能力、分时计费 and 测量最大需量等功能, 适应了现代电能管理的需求, 预计在不久的将来会全部取代感应式电能表。

1.2.2 国内电能表技术的发展、现状及趋势

解放前, 我国的电能计量表计生产是一片空白。20世纪50年代从仿制开始, 经过几十年的努力, 特别是随着我国计量技术水平的提高、大规模城市和农村电网改造、安居工程和一户一表后续工程、厂网分开以及加大两部制电价和分时计费的应用, 促进了电能表制造业的发展, 现在我国的电能计量仪表已具备了相当的水平 and 规模, 不仅供国内用户使用, 还远销国外, 电能表制造业也是国内仪器仪表界少数保持兴旺发展的行业之一。

我国感应式电能表的技术和质量比起刚起步的时候有了明显提高, 特别是根据国外先进的经验, 设计出了长寿命和亚长寿命的感应式电能表, 并制定了相关标准, 但与国外知名品牌相比, 还有一定的差距, 主要表现为性能一致性较差、材料质量问题和关键工艺技术得不到解决等^[2]。

电子式电能表在我国的发展历程基本可以概括为: 20世纪90年代的以机电一体为主的工业多费率电能表; 中期的电子式电能表; 中后期的IC卡电能表、电力载波仪等。

随着国家电力体制的改革, 现代电能计量管理水平的提高, 供用电政策不断科学化和市场化, 智能型电网概念的提出, 电能计量的自动抄收和管理将成为必然趋势, 电能表的模块化、网络化和系统化将成为电能表技术发展的趋势。

总体看来, 目前我国电能表正在向低功耗、防窃电、谐波计量、多用户一体表、自动远程抄收、负荷监控、高精度、多功能等方向发展。

1.3 课题的提出和研究意义

目前我国电子式电能表的发展非常迅猛,但同时产品本身及生产也存在着诸多问题,主要有:

1.3.1 软件可靠性

电子式电能表越来越多的功能是依靠软件编程来实现,软件是电能表的核心,因此软件的可靠性很大程度上决定了电表的可靠性,而软件的可靠性在最终产品上没有很好的手段可以很快地检查出来。

1.3.2 通信规约

由于各地方电力公司电能计量的实际应用情况有所区别,且从电网行政管理上分别归属于国家电网公司和南方电网公司两个独立的行政管理体系,所以各省电力公司在目前多功能电能表国家和行业标准的基础上分别制定了符合自己需求的多功能电能表的技术要求和通讯规约,电能表厂家不得不准备几十款多功能电能表来满足不同省电力公司的技术要求,不同厂家互不兼容,通信规约非常混乱,甚至即使采用完全相同的通信规约也不能互联互通的情况也有发生。

1.3.3 显示器

采用液晶显示器后,虽然提高了抗磁场干扰能力,但部分厂家采用的液晶显示器质量参差不齐,特别是在紫外线照射、高温高湿、低温情况下容易出现问题。

1.3.4 谐波计量

目前除了部分厂家采用 DSP 技术的自有电能计量算法可以对谐波下准确计量外,采用数字乘法器的大部分专用计量芯片无法对谐波用户进行准确计量,这在居民用户计量上通常没有问题,但在谐波产生比较大的工业用户上带来计量不公正。

1.3.5 多功能电能表在技术上的不足

电能表作为一种计量产品,其关键之处在于计量的准确性和产品长期稳定性。2004年,中国电科院电测量所抽取了7家国内电能表厂家、4家国外电能表厂家的0.2S级多功能电能表,从基本误差、标准偏差、功能等几方面进行了对比实验。通过实验结果我们发现,国产电能表在计量一致性、产品可靠性上与国外电能表还存在一定的差距,目前国内尚无一家企业的多功能电能表在技术上做得比较完美。

因此，我们应该在自主研发上投入更多的财力、物力，多下功夫，不断地吸引优秀技术人才投入到计量技术和产品可靠性的研究工作中来。电子式电能表是电能表的发展趋势，智能电表 SOC 是电子式电能表的发展趋势，即一片芯片能独立完成完整的计量功能，而不需要其他外围芯片的配合，至少应该包含计量部分和 MCU (Microprocessor Control Unit) 部分。未来，不仅单相电子电表，三相电子电表的芯片也一定都是单芯片的。目前市场上用于开发电子式电能表的常用芯片如炬力公司的 ATT7023、TI 公司的 MSP430 单片机、贝岭公司的 BL0936 和 BL0938 等。本课题是基于 MSP430 系列单片机的多费率电能表、SOC 电能表、多功能电能表的方案研究及实践。

1.4 本文主要研究内容

根据电子式电能表的结构及工作原理，及针对目前电子式电能表朝着 SOC 发展的趋势，本文选用 MSP430 系列单片机中适用于电能表设计的芯片作为电能表的 MCU。

MSP430 系列单片机是美国 TI 公司的一款超低功耗，16 位 RISC 结构的混合信号处理器，具有丰富的外围模块，灵活的时钟源，其中数字控制振荡器 DCO 可使器件从低功耗模式迅速唤醒，16 位计数器和常数发生器使 MSP430 系列微控制器能达到最高的代码效率。它的这些特性特别适合电池供电，可大大延长电池寿命。TI 公司从 1996 年推出 MSP430 系列开始，产品不断地更新换代，近几年来更是针对某些特殊应用领域，利用 MSP430 的超低功耗特性，推出了一些专用单片机，如专门用于电能计量的 MSP430FE42X。

另外电能表的设计在保证精度、功能完整的基础上同时能实现防窃电测量，才能算得上是智能型的电表，才能更满足市场的要求。本文从窃电原理入手，总结了常见的窃电手段及防窃电措施，并针对电子式电能表进行了专门的防窃电功能研究，为设计防窃电式电能表做好铺垫。

基于 MSP430 系列单片机中适用于电能表设计的芯片的功能研究及电子式电能表防窃电功能的研究，本文介绍了单相 SOC、三相多功能、多费率、三相 SOC 电能表的设计方案，并从硬、软件设计上重点介绍了一款新型单相防窃电 SOC 电能表。此款电能表是业内第一款 SOC 电能表，是在正常的单相多功能、多费率电能表的基础上从硬件、软件上增加防窃电功能，防窃电技术业内领先。

该表自投入市场以来，产生了巨大的经济效益和社会效益，特别是出口到东南亚地区，受到了极大的好评，同时也为电力管理部门打击窃电行为提供了更强有力的武器。

1.5 本章小结

在本章中，我们首先介绍了电能表国内外技术现状及发展趋势，分析了目前国内电子式电能表存在的一些问题及课题的提出和研究的意义，最后介绍了本文的主要研究内容。

2 电子式电能表

2.1 概述

电能表自诞生以来已有一百多年的历史了,作为测量电能的专用仪表,广泛应用于发电、输电、配电和用电等各个环节^[1],电能表的种类很多,其分类方法一般有以下几种:

1、按用途分类

电能表按用途分类可分为工业和民用电能表、标准电能表、特殊功能电能表三类。

2、按电源类别分类

电能表按电源类别分类可分为交流电能表和直流电能表,一般工作和生活中常见的是交流电能表。

3、按准确度等级分类

电能表按其准确度等级可分为普通安装式电能表(0.2、0.5、1.0、2.0、3.0级)和携带式精密电能表(0.01、0.02、0.05、0.1、0.2级)。

4、按使用相数分类

按使用相数分类可分为单相电能表和三相电能表。

5、按结构及原理分类

电能表按结构和原理可分为感应式电能表和电子式电能表。感应式电能表的特点是结构简单、工作可靠、维护方便、调整容易,但体积大,制造精度不容易提高。电子式电能表又可分为全电子式电能表和机电式电能表。全电子式电能表的特点是精度高、频带宽、体积小、适合遥控、遥测等,但结构复杂、价格昂贵。机电式电能表是感应式电能表与全电子式电能表之间的一种过度产品。目前市场上所指的电子式电能表一般都是指全电子式电能表,本文所描述的电子式电能表均指全电子式交流电能表。

近几十年来,大量新型电子元器件的相继出现,尤其微电子技术和计算机技术的高速发展是电子式电能表迅速进步、日益成熟的主要技术支撑^[1]。芯片的集成化程度越来越高,功能越来越齐全,芯片的成本也在不断降低,而且电子式电能表在使用寿命、准确度、稳定性等方面又有了显著改善,电子式电能表正逐步取代感应式电能表。因此,了解电子式电能表的结构及工作原理是研

究设计它的基础。

2.2 电子式电能表的结构及工作原理

电子式电能表采用乘法器来实现对电功率的测量，乘法器是用来完成两个电量（如电压和电流）相乘运算的器件，它是电子式电能表的核心，其准确度直接影响电能表的准确度。乘法器分为模拟乘法器和数字乘法器两大类，由不同乘法器构成的电能表的基本结构框图如图 2-1 所示。

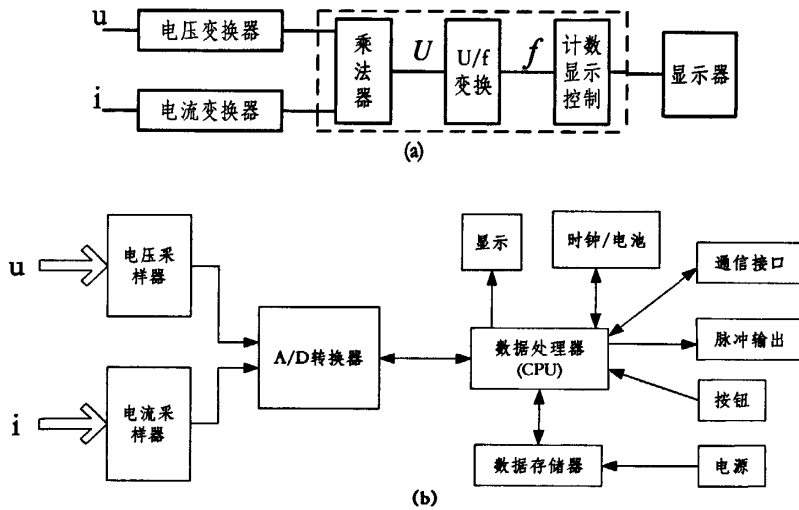


图 2-1 电子式电能表基本结构框图

(a) 模拟乘法器电能表的基本结构框图 (b) 数字乘法器电能表的基本结构框图

(a) 图的工作原理为：被测量的高电压 u 、大电流 i 经电压变换器和电流变换器转换成小信号后送至乘法器，乘法器完成电压和电流瞬时值相乘，输出一个与一段时间内平均功率成正比的直流电压 U ，然后再利用电压/频率转换器，将 U 转换成相应的脉冲频率 f ，并将该频率分频，通过一段时间内计数器的计数，显示出相应的电能。

(b) 图整个工作过程可以概述如下：在数据处理器（CPU）的控制下，高速的 A/D 转换器将来自电压、电流采样电路的瞬时模拟信号转换为数字信号，并对其进行数字积分运算和误差补偿，以便精确地获得有功电量和无功电量，并依据相应的费率和需量等要求对数据进行实时处理，其结果保存在存储器中，并进行显示和随时向外部提供信息及进行数据交换。

2.2.1 输入变换电路

无论采用何种类型乘法器的电子式电能计量仪表中都必须要有电压和电

流的输入变换电路。输入变换电路的作用是一方面将被测电网的高电压、大电流转换为低电压、小电流输入到乘法器中；另一方面使乘法器和电网隔离，减小干扰。

2.2.1.1 电流输入变换电路

一般负载电流都是经电流互感器将一次侧大电流（几安培甚至几十安培）转换成二次侧小电流（10~100mA）。直接接入式电子式电能表还采用锰铜分流片，利用电阻分流的原理来减小电流。

(1) 锰铜片分流器

以锰铜片作为分流电阻 R_s ，当大电流 $i(t)$ 流过时会产生相应成正比的微弱电压 $u_i(t)$ ，其数学表达式为：

$$u_i(t) = i(t) R_s \quad (2.1)$$

该小信号 $u_i(t)$ 送入乘法器，作为测量流过电能表的电流 $i(t)$ 。其原理图如图 2-2 所示。

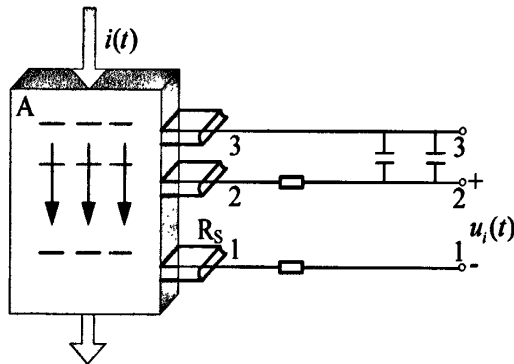


图 2-2 锰铜分流器测量电路原理

锰铜分流器和普通电流互感器相比，具有线性好和温度系数小等优点。

(2) 电流互感器

在电子式电能表中，电流互感器的准确度一般要求在 0.05% 以上，一般采用高磁导率磁性材料。实际应用中，为满足电流互感器小型化的要求，常常采用电子补偿式互感器。

普通的电流互感器由于激磁阻抗的存在，会漏掉一部分激磁电流，造成负载电流越大，误差越大的缺点。电子补偿式互感器由两个互感器和一个随动放大器构成，相当于在电流互感器的激磁回路中引入一个反向磁通势来补偿激磁电流，当达到完全补偿时，误差为 0。

2.2.1.2 电压输入变换电路

和被测电流一样，被测电网电压必须转换为小电压方可送入乘法器，最简单的方法是电阻分压，另一种方法是采用电压互感器隔离输入。

(1) 电阻网络

采用电阻网络的最大优点是线性好、成本低，缺点是不能实现电气隔离。

实用中，一般采用多级(如3级)分压，以便提高耐压和方便补偿与调试。典型接线如图2-3所示。

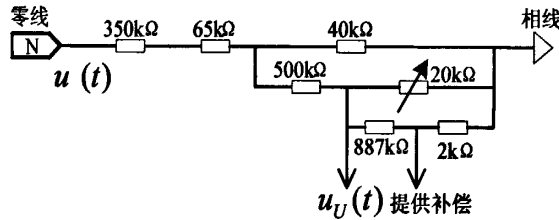
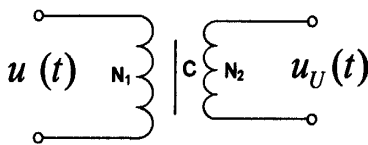


图 2-3 典型电阻网络线路图

(2) 电压互感器



采用互感器的最大优点是可以实现一次侧和二次侧的电气隔离，并可提高电能表的抗干扰能力，缺点是成本高。其电路如图2-4所示。

图 2-4 电压互感器路图

图 2-4 所示。

被测电压计算式为：

$$u(t) = K_U u_U(t) \tag{2.2}$$

式中 $u(t)$ —— 被测电压；

$u_U(t)$ —— 送到乘法器的等效电压。

2.2.2 乘法器

乘法器是一种完成两个互不相干的模拟信号(如输入电能表内连续变化的电压和电流)进行相乘作用的电子电路，它分为模拟乘法器和数字乘法器两大类。模拟乘法器又有霍尔效应模拟乘法器、时分割模拟乘法器、双斜积分乘法器等多种。数字乘法器则以 CPU 为核心，采用 A/D 转换将电压和电流进行数字化相乘。由于模拟乘法器频响范围较宽、响应速率较快，初期的电子式电能表以模拟乘法器居多，但其线路复杂、功耗大、稳定性较差，目前电子式电能表以数字乘法器为主。

理想乘法器的输出特性方程为：

$$U_z(t) = KU_1(t)U_2(t) \quad (2.3)$$

式中 K ——乘法器的增益。

从乘法的代数概念出发，乘法器具有四个工作区域，由它的两个输入信号极性来确定。根据两个输入信号的不同极性，乘积输出的极性有四种组合，可以用图 2-5 中 XY 平面的四个象限来具体说明。

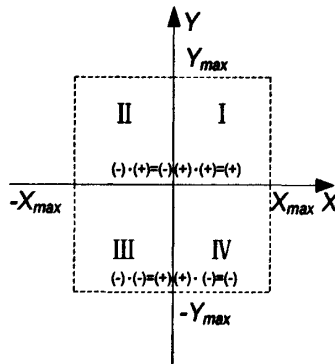


图 2-5 模拟乘法器的工作象限图

凡是能够适应两个输入信号极性的四种组合的乘法器，称为四象限乘法器。若一个输入端能够适应正、负两极性信号，而另一个输入端只能适应单一极性信号的乘法器，则称为二象限乘法器。若乘法器在两个输入端分别限定为某一种极性的信号能正常工作，它就是单象限乘法器。

下面着重介绍一下数字乘法器：

数字乘法器型的电子式电能表由于近几年来芯片速度的提高和外围接口电路的成熟，微处理器的性价比越来越高而得到广泛应用，应用数字乘法器来完成功率/电能测量的前景十分广阔。采用数字乘法器，由计算机软件来完成乘法运算，可在功率因数为 0~1 的全范围内保证电能表测量的准确度，并可以很容易地实现四象限无功计量、失压报警等功能，这是多种模拟乘法器和普通电能表难以胜任的。

微处理器控制 A/D 转换，同时对电压、电流进行采样，由微处理器完成相乘功能并累计电能。平均功率的计算公式为：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (2.4)$$

式中 T ——交流电压、电流的周期。

由于用户负荷是不断变化的，所以无法利用式 (2.4) 快速而精确地测量

每个周期的平均功率和测量的电量,采用的方法是以 Δt 为时间间隔将上式中的积分作离散化处理,即在每个 Δt 时间间隔内对电压、电流同时进行采样,求出采样点的功率,然后将一个周期内各采样点的功率求和并取平均值,则可得如下式:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^N u(k) \times i(k), \quad T = N \Delta t \quad (2.5)$$

这就是用软件计算被测对象平均功率即有功功率的数学模型。从上式可以看出,平均功率的计算与功率求解过程与功率因数无关,因此可以得出采用数字乘法器的全电子式电能表的电能测量与功率因数无关的结论,这是这类电能表的一个重要特点。

A/D转换器的准确度一般较高,其转换误差可以忽略。通过软件来完成采样及乘法计算的准确度与 Δt 的选取有关。 Δt 取得足够小,计算误差就会足够小,式(2.5)就会无限接近式(2.4)。但计算量将大大增加,虽然数字乘法器中的CPU可以完成大量的计算量,但也会使实时性变差。由采样理论可知,连续信号离散后得到的时间序列不丢失原信号的信息,不仅采样频率要满足奈奎斯特定律,而且必须等分连续的信号周期,否则会产生测量误差。为此采样软件锁相技术将采样频率自动地锁定在输入信号频率的N倍上,这样可以在输入频率发生变化时自动调整采样间隔,使时钟的漂移变化不会给测量带来误差。

使用微处理器技术制造全电子式电能表的前景十分看好,其功能强大、性能优越,随着电路集成化程度和芯片技术的不断提高,芯片价格的不断降低,目前已开始广泛应用。

2.2.3 显示器

目前常见的电子式电能表显示器件有三种:液晶(LCD)、发光二极管(LED)、荧光管(FIP)。

液晶显示器(LCD)是利用液晶在一定电场下发生光学偏振而产生不同透光率来实现显示功能。它根据光学原理可分为透射式、反射式和半透半反射式;根据视角大小可分为TN型(视角为 90°)和STN型(视角可达 160°)两种;根据工作温度范围可分为普通型($0 \sim 65^\circ\text{C}$)和宽温型($-30 \sim 85^\circ\text{C}$)。液晶显示器在静态直流电场下的寿命很短(一般为几千小时),而在动态交变电场下则寿

命可以很长(可达20万小时);除具有长寿命的优点之外,还具有功耗小(小于 $10\mu\text{A}$),在有一定采光度时显示对比强等优点。

发光二极管(LED)是利用特殊结构和材质制作成的二极管,在施加正向工作电压、具有一定工作电流时,发出某一特定波长的可见光来实现显示功能。根据同一正向工作电流下的发光强度可将其分为普亮、高亮和超高亮3种。发光二极管颜色有红、绿、黄等多种,具有温度范围宽($-40\sim 85^{\circ}\text{C}$)、在弱光背景下显示醒目和低成本等优点;缺点是它更适用于户外大屏幕显示,分辨率比较低。

荧光显示板(FIP)是利用特种荧光物质在一定红外线热能下产生一定亮度的可见荧光来实现显示功能。优点和发光二极管基本相同,缺点是成本比较高、寿命短、功耗大等。

2.3 电子式电能表常用术语

电子式电能表的种类很多,如单相电子式复费率电能表、单相预付费电能表、三相三线多功能电能表等等,下面对电子式电能表的常用术语做一些简单的解释。

- 1、复费率电能表:有多个计度器分别在规定的不同费率时段内记录交流有功或无功电能的电能表。
- 2、费率计度器:由储存器(用作储存信息)和显示器(用作显示信息)二者构成的电-机械装置或电子装置,能记录不同费率的有功或无功电能。
- 3、电能测量单元:由被测量输入回路、测量等部分构成,进行有功或无功电能计量的单元。
- 4、峰、平、谷电量:电力系统日负荷曲线高峰时段的电量称峰电量,低谷时段的电能量称谷电量,计量峰、谷时段以外的电能量称平电量,三者之和为总电量。
- 5、数据处理单元:对输入信息进行数据处理的电能表部件。
- 6、多功能电能表:由测量单元和数据处理单元等组成,除计量有功(无功)电能外,还具有分时、测量需量等两种以上功能,并能显示、存储和输出数据的电能表。
- 7、显示器:显示存储器内容的装置。

- 8、需量周期：测量平均功率的连续相等的时间间隔。
- 9、最大需量：在指定的时间区间内，需量周期中测得的平均功率的最大值。
- 10、滑差（窗）时间：依次递推来测量最大需量的小于需量周期的时间间隔。
- 11、额定最大脉冲频率：多功能电能表在额定电压、额定频率、额定最大电流及 $\cos \phi = 1$ 条件下，单位时间发出的脉冲数。

2.4 本章小结

本章主要介绍了电量计量装置的基本概念及几种电子式电能表的结构及工作原理，解释了与电子式电能表有关的一些常用术语。

3 MSP430 系列单片机的结构原理

3.1 概述

单片机 (Signal Chip Microcomputer) 自问世以后很快成为微型计算机的一个重要分支, 发展极为迅速。它将中央处理器、存储器、I/O 接口电路以及连接它们的总线都集成在一块芯片上, 单片机在设计上主要突出了控制功能, 调整了接口配置, 在单一芯片上制成了结构完整的计算机, 因此, 单片机也称为微控制器 (MCU)。它在智能化仪器仪表、电讯设备、自动控制设备、汽车乃至家用电器等方面有着广泛的应用, 其体积小、成本低、功耗低等特点就显得尤为突出。

MSP430 系列单片机是美国德州仪器 (TI) 1996 年开始推向市场的一种 16 位超低功耗的混合信号处理器 (Mixed Signal Processor), 称之为混合信号处理器, 主要是由于针对实际应用需求, 把许多模拟电路、数字电路和微处理器集成在一个芯片上, 以提供“单片”解决方案^[42]。具有超低功耗、强大的数据处理能力、高性能模拟技术及丰富的片上外围模块、系统工作稳定、方便高效的开发环境等特点, 近几年来更是不断有新的产品问世。

3.2 MSP430 系列单片机的命名规则

MSP430 系列单片机种类繁多, 在选型之前, 最好要先了解它的命名规则, 以方便选择自己需要的芯片, 其命名规则如图 3-1 所示:

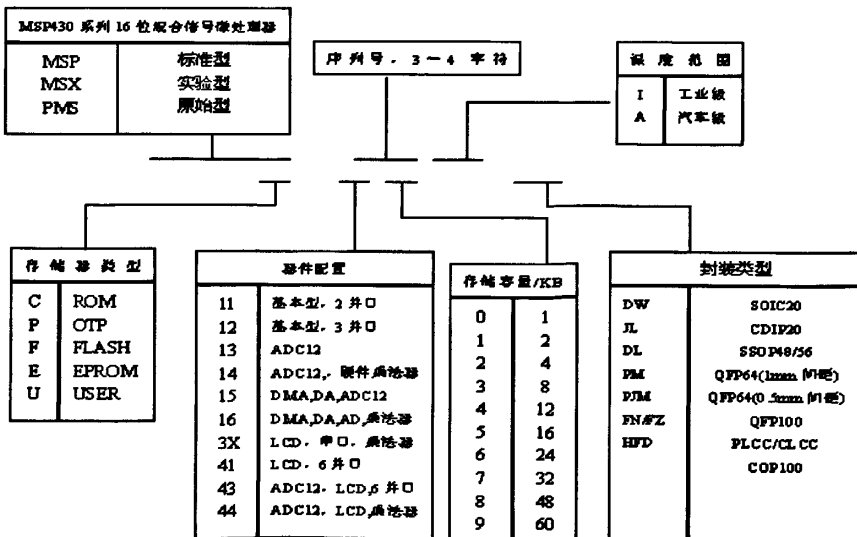


图 3-1 MSP430 系列单片机的命名规则

以 MSP430F449 为例，其中 F 代表 FLASH 型（主要优点是结构简单、集成密度大、电可擦写、成本低等），44 代表片内具有 ADC12、LCD 和硬件乘法器等外围部件，9 代表存储容量为 60KB。

3.3 MSP430 结构及其特点

MSP430 系列单片机的结构如图 3-2 所示：

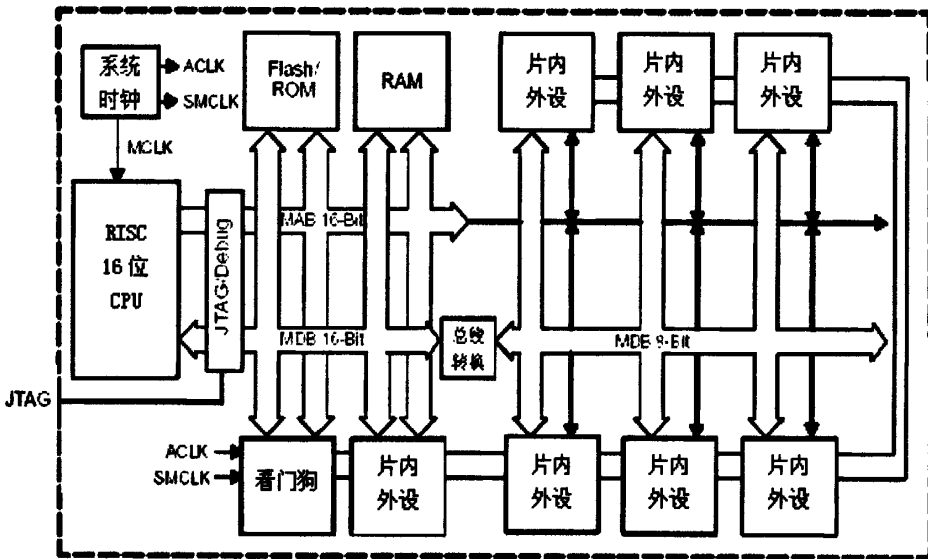


图 3-2 MSP430 系列单片机结构

从图 3-2 中可以看出，MSP430 系列单片机的结构具有 16 位 CPU 通过总线连接到存储器和外围模块，16 位数据宽度，数据处理更为有效直接嵌入仿真处理，具有 JTAG 接口、能够降低功耗，降低噪声对存储器存取的影响等明显特征。

MSP430 系列单片机包含的主要功能部件有：

- 1、CPU：MSP430 系列单片机的 CPU 和通用微处理器基本相同，只是在设计上采用了面向控制的结构和指令系统。MSP430 的内核 CPU 结构是按照精简指令集和高透明的宗旨设计而成的，使用的指令有硬件执行的内核指令和基于现有硬件结构的仿真指令。这样可以提高指令执行速度和效率，增强了 MSP430 的实时处理能力。寄存器资源丰富，采用 16 位地址总线。
- 2、存储器：存储程序、数据以及外围模块的运行控制信息，包括程序存储器和数据存储器。对程序存储器访问总是以字形式取得代码，而对数据可以用字或字节方式访问。其中 MSP430 各系列单片机的程序存储器有 ROM、EPROM、OTP

和 FLASH 型。可以直接地存储器到存储器访问。

MSP430 系列单片机存储器采用的是统一结构，物理上完全分离的存储区域如 ROM/FLASH、RAM、外围模块、特殊功能寄存器 SFR 等，被安排在同一地址空间，这样就可以使用一组地址、数据总线、相同的指令对它们进行字节或字形进行访问。MSP430 系列单片机的这种组织方式和 CPU 采用精简指令相互协调，对外围模块的访问不需要单独的指令。该结构为软件的开发和调试提供了便利。MSP430 存储容量为 64KB 的存储空间分配如图 3-3 所示：



图 3-3 MSP430 存储空间分配 (64KB)

但是由于器件所属型号不同，存储空间的分布也存在一些差异：程序存储器容量不一样，所以其始地址也不一样；仅 FLASH 型就有信息存储器和引导存储器，而且不同器件它们的地址不同；数据存储器的末地址不一样，中断向量和 8 位、16 位外围模块的内容不同等。使用时可参见相关手册。

3、外围模块：经过 MAB、MDB、中断服务及请求线与 CPU 相连。MSP430 不同系列产品所包含外围模块的种类及数目可能不同。它们分别是以下一些外围模块的组合：时钟模块、定时器 A、定时器 B、看门狗、比较器 A、串口 0 和 1、基本定时器、液晶驱动器、硬件乘法器、模数和数模转换、端口、DMA 控制器等。

3.4 MSP430 单片机内外围模块简介

MSP430 系列单片机功能强大, 片内资源极其丰富, 包含时钟模块、定时器、比较器、串行通信模块、模数、数模转换部件、DMA 控制器、硬件乘法器、FLASH 存储模块、液晶驱动模块、端口等。它们经由数据总线、地址总线和控制总线与 CPU 相连, 可以通过所有内存操作指令对它们进行控制。对于一般的简单应用, 只需要一片 MSP430 单片机即可。而对于复杂的系统, MSP430 进行外部电路的扩展也很方便。MSP430 系列具有的众多型号就是由这些基本片内外设置按不同应用目标组合而成的, 从而使 MSP430 系列产品的使用更加多元化^[42]。

处理器与 A/D 转换器是构建电子式电能表的关键器件, 同时它们的成本也是影响电子式电能表的重要因素。针对与电能表相关的内外围模块, 以下做一些简单的介绍。

3.4.1 时钟模块

MSP430 系列单片机时钟模块由高速晶体振荡器、低速晶体振荡器、数字控制振荡器 DCO、锁频环 FLL、增强版本 FLL+ 等部件构成。不同系列器件包含的时钟模块可能不一样, 详细可参见相关手册。

3.4.1.1 设计要求

单片机各部件能有条不紊地自动工作, 实际上是在其系统时钟作用下, 由控制器指挥芯片内各个部件自动协调工作, 使内部逻辑硬件产生各种操作所需的脉冲信号而实现的。这里时钟信号是定时操作的基本信号。

MSP430 所有器件都有时钟模块, 都能产生三种不同频率的时钟: MCLK (主系统时钟)、ACLK (辅助时钟)、SMCLK (子系统时钟) 送给不同需求的模块, 都能实现超低功耗应用。振荡器和系统时钟发生器的主要设计目标是廉价和低功耗。为了达到系统廉价, 外接器件缩减到只有一个普通晶振。在数字系统中, 系统功耗与频率成正比, 所以使用低频晶体和含有倍频器的振荡器可满足时钟系统速度与低功耗这两个要求。通常, 低功耗设备会增加各种工作模式来强制实现一些功能, 例如启动时序, 长时间相对于电压、温度、时间的频率稳定性, 高度稳定的时钟时基等。

在实时应用中为了响应外部事件或定时要求, 必须要求快速。理论上, 一

一个能快速启动并允许用于各种不同功耗模式的处理机时钟发生器可以解决这一矛盾；但是，快速启动通常伴随着不可接受的低频率稳定性。所以需要设计多个时钟源或为时钟设计各种不同工作模式，才能解决某些外围部件实时应用的时钟要求，如低频通信、LCD 显示、定时器、计数器等。因此，小电流的实时应用其实有两个互相矛盾的要求：满足节能要求的低频系统时钟和为了快速响应事件请求的高频系统时钟，尤其对于电池供电应用系统，特别关注电流消耗。

为适应系统和具体应用需求，MSP430 系列单片机的系统时钟必须满足以下不同要求：

- (1) 稳定的频率，以满足定时应用，如实时时钟 RTC。
- (2) 低频率，用于降低电流消耗。
- (3) 高频率，用于对系统硬件需求和外部事件快速反应。
- (4) 低 Q 值振荡器，用于保证开始及停止操作最小时间延迟。

上面所提到的基本要求是互相抵触的，或者用高 Q 值高频晶体振荡器，或者用低 Q 值 RC 振荡器，MSP430 的折中办法就是用一个低频晶体振荡器，并将其倍频至标称的工作频率范围，即：

$$F_{\text{system}} = N \times f_{\text{crystal}}$$

实际中，MSP430 采用锁频环增强版本 FLL+ 等部件能将晶振频率倍频至系统频率。数字控制振荡器 DCO 和锁频环 FLL 技术结合可以实现快速启动。在晶体振荡器失效时，DCO 可自动用于系统时钟。

3.4.1.2 MSP430F4XX 系列时钟模块

MSP430F4XX 系列单片机基础时钟模块结构如图 3-4 所示，从图中可以看出，MSP430F4XX 基础时钟模块有低频 (LFXT1CLK)、高频 (XT2CLK) 和片内数字控制 RC 振荡器 (DCOCLK) 三个时钟输入源，基础时钟模块可提供四种时钟信号：

- (1) MCLK 系统主时钟：MCLK 可由软件选择来自低频、高频和数字控制 RC 振荡器三者之一的信号，经 1/2/4/8 分频后得到。MCLK 主要用于 CPU 和系统。
- (2) SMCLK 子系统时钟：SMCLK 可由软件选择来自高频和数字控制 RC 振荡器的信号。SMCLK 主要用于高速外围模块。
- (3) ACLK 辅助时钟：来自低频时钟源，ACLK 可由软件选作各个外围模块的

器时基，并且廉价。

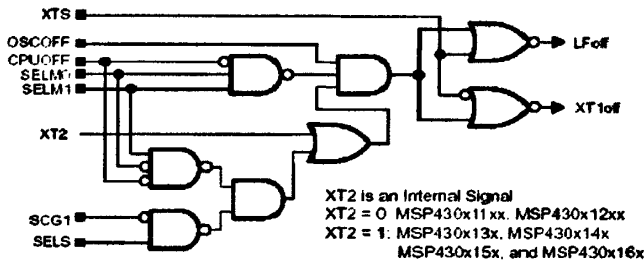


图 3-5 LFXT1 的控制逻辑

(2) 高速晶体振荡器

高速晶体振荡器主要存在于 X13X, X14X, X15X, X16X, X43X, X44X 等器件中，一般称之为第二振荡器 XT2，它产生时钟信号 XT2CLK，它的工作特性与 LFXT1 振荡器工作在高频模式时类似。如果 CLK 信号没有用作 MCLK 和 SMCLK 时钟信号，可用控制位 XT2OFF 关闭 XT2。XT2 的控制逻辑如图 3-6 所示：

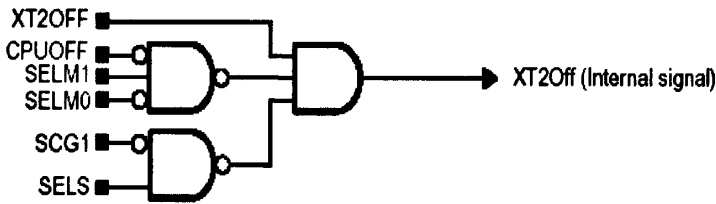


图 3-6 XT2 的控制逻辑

3.4.1.4 DC0 振荡器

MSP430 两个外部振荡器产生的时钟信号都可以经 1、2、4、8 分频后用作系统主时钟 MCLK。当振荡器失效时，DC0 振荡器会自动被选作 MCLK 的时钟源，因此由振荡器失效引起的 NMI 中断请求在低功耗模式下得到服务，甚至在 LPM4 模式下（所有振荡器停止工作，CPU、MCLK、SMCLK、ACLK 处于禁止状态）。MCLK 在中断服务时自动有效。

DC0 振荡器是一个数字可控制的 RC 振荡器，它的频率随供电电压、环境温度变化而具有一定的不稳定性。MSP430 可以通过操作寄存器软件调节来增强振荡频率的稳定性。当 DC0 信号没有用作 SMCLK 和 MCLK 时钟信号时，可以用控制位 SCG0 关闭直流发生器，直流发生器消耗的电流定义了 DC0CLK 的基本频率。DC0 的控制逻辑图如图 3-7 所示：

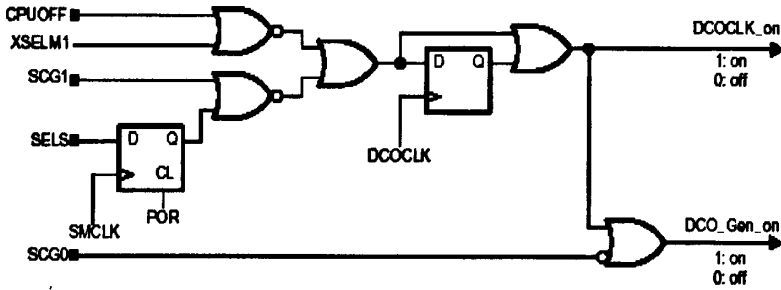


图 3-7 DCO 的控制逻辑

3.4.2 低功耗结构

MSP430 时钟系统提供了丰富的软硬件组合形式，它的所有外围模块都可以在主 CPU 休眠的情况下完全独立运行的，当需要 CPU 工作时，任何一个模块都可以通过中断唤醒 CPU 从而使系统以最低功耗运行。另外还可以根据实际情况关闭各个模块本身所使用的时钟，从而关闭该模块，能够达到最低功耗并发挥最优系统性能，给硬件设计和软件编程带来了极大的方便，具体有：

- (1) 使用内部时钟发生器 (DCO) 无需外接任何元件；
- (2) 采用外部时钟信号源；
- (3) 选择外接晶体或陶瓷谐振器，可以获得最低频率和功耗；
- (4) MSP430 瞬间响应特性是系统超低功耗事件驱动方式的重要保证，瞬间响应特性图如图 3-8 所示：

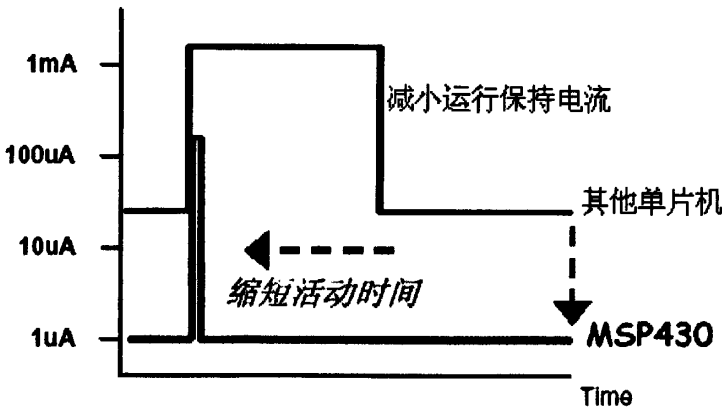


图 3-8 瞬间响应特性

MSP430 工作模式通过模块的智能化运行管理和 CPU 的状态组合以先进的方式支持超低功耗的各种要求。为了充分利用 CPU 低功耗性能，可以让 CPU 工作于突发状态。在通常情况下，根据需要使用软件将 CPU 设定到某一种低功耗

耗工作模式下,在需要使用中断将 CPU 从休眠状态中唤醒,完成工作之后又可以进入相应的休眠状态。通过控制位设置及时钟的活动状态, MSP430 的工作模式可分为活动模式 (AM) 和 5 种低功耗模式 (LPM_x)。

为充分达到低功耗的目标,应用时,应满足的一般原则有:

- (1) 用 32KHz 晶振作为 ACLK 时钟, DCO 用于 CPU 激活后的突发短暂运行;
- (2) 用中断控制程序运行;
- (3) 用接口模块代替软件驱动功能;
- (4) 用快速查表代替冗长的软件计算;
- (5) 用可计算的分支代替标志位测试产生的分支;
- (6) 在冗长的软件计算中使用单周期的 CPU 寄存器;
- (7) 避免频繁的子程序和函数调用 ;
- (8) 尽可能直接用电池供电。

另外,在设计外设时,还有一些常规原则:

- (1) JTAG 端口 TMS、TCK 和 TDI 不要连接到 VSS
- (2) 将不用的 FETI 输入端连接到 VSS
- (3) CMOS 输入端不能有浮空节点,将所有输入端接适当的电平
- (4) 不论对于内核还是对于各外围模块,选择尽可能低的运行频率,如果不影响功能应设计自动关机。

3.4.3 MSP430 各种端口

端口是 MSP430 极其重要的资源,由于目前 MSP430 所有系列总线不对外开放,端口不但直接用于输入/输出,还可以为 MSP430 系统扩展等应用提供必要的逻辑控制信号。主要特点有:

1、类型丰富

在目前产品中有端口 P1, P2, P3, P4, P5, P6, S 和 COM。产品因型号不同包含有上述部分或全部端口。例如 MSP430X11X 含 P1、P2 口, MSP430X12X 含 P1、P2、P3 口, MSP430X4XX 包含所有端口,详细的设计时可查相应手册或直接登陆 <http://www.ti.com> 查询。

2、功能丰富

各端口功能如表 3-1 所示:

表 3-1 MSP430 的端口功能

端 口	功 能
P1、P2	I/O、中断能力、其他片内外设功能
P3、P4、P5、P6	I/O、其他片内外设功能
S、COM	I/O、驱动液晶

3、寄存器丰富

MSP430 各种端口有大量的控制寄存器供用户操作，最大限度地提供了输入/输出的灵活性，其中 P1 与 P2 各有 7 个寄存器，P3、P4、P5、P6 各有四个寄存器。通过设置寄存器：

- (1) 每个 I/O 位都可以独立编程；
- (2) P1 和 P2 所有 8 个位全部可以做外部中断处理；
- (3) 允许任意组合输入、输出和中断；
- (4) 可以按字节输入、输出，也可按位进行操作；
- (5) 可以使用所有指令对寄存器操作。

微处理器输入端口的漏电流对系统的耗电影响很大。MSP430 输入端口的漏电流最大为 50nA，远低于其他系列单片机（一般为 $1\sim 10\mu\text{A}$ ）。

不管是灌电流还是拉电流，每个端口的输出晶体管都能够限制输出电流（最大为 6mA），保证系统安全。

3.4.4 定时器

定时功能模块是 MSP430 应用系统中经常用到的重要部分，其工作方式的灵活应用对提高编程技巧、减轻 CPU 负担和简化外围电路有很大的好处，它用来实现定时控制、频率测量、脉宽测量、延迟和信号产生、信号检测等。此外还可以作为串行接口的可编程波特率发生器，在多任务的系统中用来作为中断信号实现程序的切换。比如在 MSP430 实时控制和处理系统中，需要每隔一定的时间就对处理对象进行采样，再对获得的数据进行处理，这就要用到定时信号。

一般来说，MSP430 所需的定时信号可以通过硬件和软件两种方法来获得。

(1) 硬件定时

这种方法是利用专门的定时器件作为主要实现器件，在简单的软件控制

下,产生准确的时间延迟。其主要思想是根据需要的定时时间,用指令对定时器设置定时常数,并用指令启动定时器,于是定时器开始计数,计数到确定值时,就自动产生一个定时输出。定时器开始工作后,CPU就不必去管它,而可以去做别的工作。这种方法最突出的优点是计数时不占用CPU的时间,并且如果利用定时器产生中断请求,就可以建立多作业的环境,所以硬件定时可以大大提高CPU的利用率。而且计数器定时器本身的开销并不很大,因此,这种方法得到广泛应用。

MSP430系列具有丰富的定时器资源:看门狗定时器(WDT)、基本定时器(Basic Timer1)、定时器A(Timer-A)、定时器B(Timer-B)等,器件因系列不同可能包含这些模块的全部或部分。这些模块除了都具有定时功能外,各自还有一些特定用途,在应用中应根据需求选择多种定时器模块。MSP430系列定时器部件功能如表3-2所示:

表 3-2 各种定时器功能

定 时 器	功 能
看门狗定时器	基本定时,当程序发生错误时执行一个受控的系统重启动
基本定时器	基本定时,支持软件和各种外围模块工作在低频率、低功耗条件下
定时器 A	基本定时,支持同时进行的多种时序控制、多个捕获、比较功能和多种输出波形(PWM),可以以硬件方式支持串行通信
定时器 B	基本定时,功能基本同定时器 A,但比定时器 A 灵活,功能更强大

(2) 软件定时

通常根据所需要的时间常数来设计一个延迟子程序,延迟子程序包含一定的指令,设计者要对这些指令的执行进行严密的计算或精确的测量,以确定延迟时间是否符合要求。当时间常数比较大时,常常将延迟子程序设计成为一个循环程序,通过循环常数和循环体内的指令来确定延迟时间。这样每当延迟子程序结束后,可以直接转入下面的操作,也可以用输出指令作为定时输出。这种方法的优点是节省硬件,所需时间可以灵活调整。主要缺点是执行延迟程序期间,CPU一直被占用,所以降低了CPU的利用率,也不容易提供多作业环境;另外,设计延迟子程序时,要用指令执行的时间来拼凑延时时间,显得比较麻烦。不过,这种方法在实际中还是经常使用的,尤其是在已有系统上做软件开

发时，以及延时时间较小而重复次数有限时，常用软件方法实现定时。

3.4.5 MSP430 液晶驱动模块

为了尽可能地缩小仪器的体积和功耗，对选择芯片和显示系统的要求变得更高。原来经常使用的 LED 由于体积大和功耗方面的原因已经不能满足人们特定的需要，而越来越多地使用 LCD。LCD 的原理是利用液晶的物理特性，通电时导通，排列变得有秩序，使光线容易通过；不通电时排列混乱，阻止光线通过。光线通过和不通过的组合就可以在屏幕上显示出图象来。由于液晶是通过环境光来显示信息的，液晶本身不主动发光，所以液晶功耗很低，更加适用于单片机低功耗应用系统。液晶有很多种类，常见的有段式液晶、字符式液晶、图形式液晶等。其中段式液晶价格低廉，使用简单。

在 MSP430 系列单片机中，MSPX1XX 系列没有段式液晶驱动模块，MSPF4XX 系列片内具有段式液晶驱动模块。不同型号的液晶段驱动能力不同。在液晶驱动电路中，液晶等效为电容。两个电极板分别为公共极和段极。公共极由 COMn 信号驱动，段极由 SEGn 信号驱动。MSP430 液晶驱动模块具有显示缓存器、COM、SEG 信号自动产生、段输出端口可以切换为通常输出端口等特点。

3.4.6 硬件乘法器

硬件乘法器是一个通过内部总线与 CPU 相连的 16 位外围模块，如图 3-9 所示。

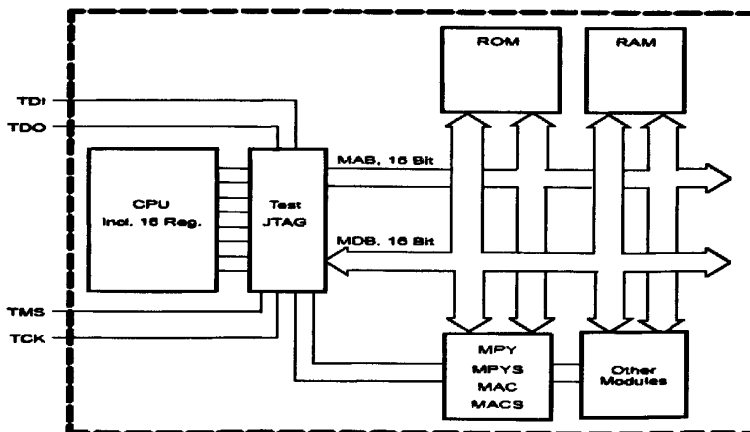


图 3-9 硬件乘法器通过内部总线与 CPU 相连

MSP430 可以在不改变 CPU 结构和指令的情况下增加功能。这种结构特别适用于对运算速度要求很严格的情况。硬件乘法器大大加强了 MSP430 的功能

并提供了软硬件相兼容的范围,提高了数据处理能力。

硬件乘法器支持的运算有无符号乘法 (MPY)、有符号乘法 (MPYS)、无符号乘加 (MAC)、有符号乘加 (MACS)。

3.4.7 FLASH 存储器模块

嵌入式 FLASH 存储器获得的技术进步在从根本上促进了微控制器 (MCU) 的应用,显著地改变了微控制器市场。Flash 技术结合了 OTP 存储器的成本优势和 E²PROM 的可再编程性能,可以使用尽可能小的开销来发挥 E²PROM 的最大灵活性。MSP430 嵌入式 FLASH 存储器同 E²PROM 一样是电可擦除并且可编程的存储器,掉电后数据不丢失、存储速度快、容量大、价格低廉,高可靠性,基本可以取代 E²PROM,它的主要特点有:

- 1、可以通过 JTAG、BSL 和 ISP 进行编程;
- 2、编程可以使用位、字节和字操作;
- 3、1.8~3.6V 工作电压,2.7~3.6V 编程电压;
- 4、数据保持时间从 10 年到 100 年不等;
- 5、擦除/编程次数可达 100000 次;
- 6、60KB 空间编程时间<5 秒;
- 7、FLASH 编程/擦除时间由内部硬件控制,无需任何软件干预;
- 8、保密熔丝烧断后不可恢复,不能再对 JTAG 进行任何访问。

3.4.8 比较器 A

MSP430F11X1、MSP430XF12X、MSP430F13/14/15/16X、MSP430F4XX 都含有比较器 A (Comparator-A),它是为精确的比较测量而设计的,如电池电压监测、产生外部模拟信号、测量电流、电容和电阻,结合其他模块还可实现精确的 A/D 模数转换功能。比较器 A 是工业仪表、手持式仪表等产品设计中的理想选择。比较器 A 的结构如图 3-10 所示。它包括模拟输入端 (CA0 和 CA1)、比较器、参考电压发生器和输出电路四部分构成,还有一些控制单元。比较器 A 的主要功能是指出两个输入电压 CA0 和 CA1 的大小关系,然后设置输出信号 CAOUT 的值。如果 CA0>CA1 则 CAOUT=1,否则 CAOUT=0。参与比较的两个电压 CA0 和 CA1 可以是外部或内部基准电压。任何组合都是可能的,例如两个外部输入比较、每个外部输入与 0.5VCC 或 0.25VCC 比较、每个外部输入与内

部基准电压比较。比较器具有中断能力。

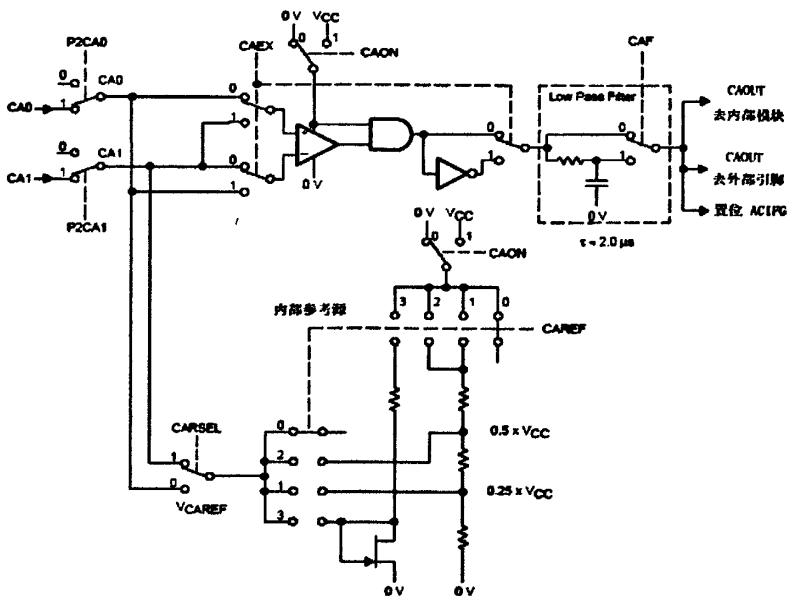


图 3-10 模拟比较器的结构原理

3.4.9 MSP430 串行通信

串口是系统与外界联系的重要手段，在嵌入式系统开发和应用中，经常需要使用上位机实现系统调试及现场数据的采集和控制。一般是通过上位机本身配置串行口，通过串行通信技术，和嵌入式系统进行连接通信。

MSP430 系列的每一种型号都可以通过 USART 硬件直接实现或通过定时器软件来实现串行通信功能。

片内具有硬件 USART 模块的 MSP430 系列单片机，由于系列不同片内可以包含一个 USART 模块 (USART0)，还可以包含两个模块 (USART0 和 USART1)。USART 模块可以自动从任一低功耗模式 LPM_x 开始自动工作。所有 USART0 和 USART1 都可以实现两种通信方式：USART 异步通信和 SPI 同步通信。部分系列单片机的 USART0 还可以实现 I²C 通信。其中，USART 异步通信和 SPI 同步通信的硬件是通用的，经过适当的软件设计，这两种通信方式可以交替使用。

在现代电子系统中，有为数众多的 IC 需要进行相互之间以及与外界的通信。为了提高硬件效率和简化电路设计而广泛使用 Inter-IC (I²C)。I²C 总线是一种用于内部 IC 控制的具有多端控制能力的双线双向串行数据总线系统。能够用于替代标准的并行总线，连接各种集成电路和功能模块。I²C 器件的应用能够减少电路间连线，减小电路板尺寸，降低硬件成本，并提高系统可靠性。

MSP430 系列 I²C 模块的主要特征如下:

- 1、符合 I²C 规范;
- 2、可编程时钟发生器;
- 3、读写采取先进先出缓冲结构;
- 4、自动数据字节计算;
- 5、16 位数据访问可达到总线的最大吞吐率;
- 6、两个 DMA 触发源;
- 7、从接收根据检测到开始信号自动将 MSP430 从 LPMx 模式唤醒;
- 8、支持低功耗模式;
- 9、只能用 USART0 实现 I²C 操作;
- 10、中断功能丰富;

3.4.10 MSP430 模数转换模块

在 MSP430 的实时控制和智能仪表等应用系统中, 控制或测量对象的有关变量, 往往是一些连续变化的模拟量, 如电压、电流、温度、流量、速度等物理量。利用传感器把各种模拟量测量出来, 转换为电信号, 经过模数转换(ADC)变成数字量, 这样模拟量才能被 MSP430 处理和控制在。

在设计和应用时, 会涉及到 ADC 的有关性能指标的术语, 弄清这些术语对理解和应用 ADC 模块是很重要的。常用的有:

- 1、分辨率: 分辨率表示输出数字量变化一个相邻数码所需输入模拟电压的变化量, 它定义为转换器的满刻度电压与 2^n 的比值, 其中 n 为 ADC 的位数, 因而分辨率与 ADC 的位数有关, 模块位数越多, 数据采集精度就越高。
- 2、量化误差: 量化误差和分辨率是统一的, 量化误差是由于有限数字对模拟数值进行离散取值(量化)而引起的误差, 因此, 量化误差理论上为一个单位分辨率。提高分辨率可以减少量化误差。
- 3、转换精度: ADC 模块的转换精度反映了一个实际 ADC 模块在量化上与一个理想 ADC 模块进行模/数转换的差值, 可表示成绝对误差或相对误差, 与一般测量仪表的定义相似。
- 4、转换时间: 指 ADC 模块完成一次模拟数字转换所需要的时间, 转换时间越短越能适应输入信号的变化, 转换时间与 ADC 模块的结构、位数有关。

此外还应考虑所使用的电压范围、工作温度、接口特性、输出形式等性能。

MSP430 系列单片机在设计应用时可以直接利用内嵌模数转换模块，若无此模块的，也可以利用内嵌的模拟比较器来构建模数转换电路，成本降低。

MSP430 系列单片机的很多系列都具有模数转换模块，转换精度主要为 10 位、12 位及 14 位。其中 MSP430X1XX2 内部具有 ADC10 高速 10 位模数转换器；MSP430F13X、MSP430F14X、MSP430F43X、MSP430F44X 等系列器件中含有 ADC12 模块。MSP430X32X 系列中含有 ADC14 模块，它是 12+2 位精度模数转换器。

3.5 本章小结

MSP430 系列单片机是真正单片化的微机，低功耗是它最显著的特性，片内包含大量的外围模块。其他系列单片机或多或少需要外部扩展器件才能实现的功能，如 RAM、ROM、A/D 转换、D/A 转换、数字量 I/O、液晶显示驱动等功能，MSP430 系列单片机内部就可以完成。这样省去了大量的开发调试工作，提高了工作效率，系统的可靠性、抗干扰能力也得到了显著改善，并且可使系统体积进一步小型化。

本章结合电能表设计应用，简要阐述了 MSP430 的一些外围模块的功能、设计原则、结构原理等。

4 电能表防窃电技术

4.1 概述

长期以来,窃电问题一直是供电企业非常棘手的问题,虽然供电企业已从多个方面加强了防窃电措施,但由于窃电手段层出不穷,给反窃电工作带来了很大的难度。一些单位,特别是私营企业,将盗窃电能作为获利手段,采取各种方法不计或少计电量,以达到不交或少交电费的目的,造成国家电能大量流失,损失惊人。这种做法严重损坏了供电企业的合法权益,扰乱了正常的供用电秩序,严重影响了电力事业的发展,而且给安全用电带来严重威胁^[3]。随着窃电技术智能化的不断升级,窃电手段越来越高明,方法越来越隐蔽,窃电主体也由原来的居民用户向企业、由生活向经营、由供电企业外部向内外勾结的方向发展,甚至还出现了一批专门研究如何窃电的“能人”,给查处带来了很大的难度,也使得窃电现象得不到有效的遏制。因此,如何防窃电也是一项长远的任务。

4.2 常见窃电手段

窃电的手法虽然五花八门,但万变不离其宗,最常见的就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、功率因数三要数和时间的乘积,因此只要改变三要素中的任何一个,就会造成电能表少计量或不计量,从而达到窃电的目的。另外,通过改变电表本身机械或电子性能的办法,也可以达到窃电的目的。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。常见的窃电手段主要有:

1、欠(失)流法窃电

改变电流回路接线,造成电流回路故障,引起电流幅值异常。例如使电流回路开路、短接电流回路、改变电流互感器变比、改变电流回路接法等。

2、欠(失)压法窃电

改变电压回路接线,造成电压回路故障,引起电压幅值异常。例如使电压回路开路、造成电压回路接触不良、在电压回路串入电阻降压、改变电压回路接法等。

3、扩大误差法窃电

通过私拆电表,改变电表内部结构性能,用外力损坏电表,改变电表安装条

件等手段来扩大电表计量误差。

4、移相法窃电

改变电能表正常接线，或利用其他方式改变了电能表中电流、电压间正常相位关系。例如改变电流回路接线、改变电压回路接线、用变流器或变压器附加电流、用外部电源使电能表倒转、用电感或电容移相等。

5、绕越计量装置法窃电（无表法）

未经报装接电，私自在供电部门的线路上接线用电，或绕越电能计量装置用电。

6、高科技窃电

通过电能表通讯接口，改变电能表内部参数、数据，从而达到窃电的目的。例如有人在电子式电能表的中央处理单元与计数器之间加装无线遥控电子开关，通过遥控器可以控制电子开关上的继电器通断，从而可以将中央处理单元和计数器之间的信号切断，使计数器不能正常对电能脉冲进行计数。

4.3 防窃电技术措施

通过对上述几种窃电方式的分析，可以看出，所有窃电方法，几乎都要绕越、直接接触或者改变电能计量装置才能达到窃电的目的。所以加强电能计量装置的技术改造，使互感器、计量二次回路、电能表、联合接线盒及表箱等由以前的敞开式计量更改为全封闭式计量，使电能表外壳及接线盒在封闭后只能破坏性开启，是防止窃电的最有效的方法，另外，随着电子式电能表的不断发展，如何在窃电状态下还能实现计量，也使得防窃电技术有了进一步地提高。总的来说，防窃电技术措施可以归纳为以下几条：

1、更换原有的机电式电能表

使用新一代全电子式多功能电能表。因为全电子式多功能电能表具有不能倒装、不可更改常数、失压、失流记录及电流不平衡记录、逆相序记录、设表等事件记录，可以防止很多窃电行为，即使有窃电现象也会进行防窃电测量或留有窃电痕迹，便于供电部门查处。

2、对低供低计带 CT 的用户措施

改造时将电能计量装置用计量箱或计量柜进行一次侧全封闭，有效地防止窃电行为的发生。

4、对居民用户措施

采用集中装表箱或全封闭表箱，即采用线进管、管进箱、箱加锁和封印的办法，使人、表分离，让用户无法接触到电能表和二次线。

5、对高压用户措施

电能计量装置的改造方案可以采取加装干式组合互感器（高压计量箱），并在组合互感器一次侧用热缩管（或冷缩护套）进行封闭，以防止在一次接线端子人为短路进行窃电，二次回路可使用铠装导线、电能表、联合接线盒安装在设有密码和防撬锁的全封闭式表箱内等方法，使整个电能计量装置处在一个全封闭的状态。

6、对用电量且具有窃电嫌疑的用户

对用电量且具有窃电嫌疑的用户最好能随时和定时采集用户用电负荷情况，可以在表箱中加装“电能计量装置异常运行测录仪”，这种测录仪可以利用移动通信网络直接报警计量回路的各种故障（如失压、欠压、电流开路和短路、相序错误、接线错误等），达到对用户的用电情况进行实时监测和科学管理。

7、加装设置编程器密码程序

对原有的编程器加装设置密码程序，可以很方便和快捷地为电能表加装了一道密码保护，如果输入密码不正确，任何编程器都无法对电能表进行操作，这是解决通过编程器窃电最为简单和有效的办法。

8、采用先进的高科技手段，加快科技管理步伐

采用在线监测、实时监控或负荷控制等手段，是防止窃电的最为有效的手段，但目前这样做成本较高，普遍推广尚有难度。

4.4 电子式电能表的防窃电功能研究

4.4.1 表壳和电表箱的防窃电技术

（1）表壳是对付窃电的第一道防线。例如单相电子式电能表（或低压三相电子式电能表）的检定目前的要求是不开盖、不进行调整，只选用合格的电能表使用，因此，可采用聚碳酸酯的表壳或金属表壳，电表有出厂铅封，要打开电能表就必须损坏它。国外很多对单相表均采用透明表盖（外壳），并且被超声波一次性焊接。对于低压表箱也可探索使用全透明表箱，并规范电能表箱或低压计量箱柜的设计。

(2) 对于多功能电能表, 因需要开盖进行编程、修改及校表等, 除了加强软件编程的规范性外, 还应加强电能表事件记录功能, 电能表内部设置和数据的修改必须存有记录, 并能回读。在设计电能表时, 可以增加一个小开关, 当打开表壳时, 开关触点闭合, 计量芯片记录打开表壳的时间, 可为查处窃电提供依据。如有必要, 还可以在电表箱内添加检测设备, 以检测窃电者对电表箱箱门的非法打开。

4.4.2 防磁场干扰窃电

静态和动态的磁场都会影响电能表的正常计量, 特别是电子式电能表。如图 4-1 所示, 窃电者在电能表附近放置强磁磁铁或大线圈都能干扰电能表的正确计量, 以达到窃电的目的。强磁磁铁还能使电源变换变压器铁心饱和, 导致电能表的工作直流电压降低或消失。当强磁磁铁靠近表壳将减小功率的测量值, 甚至能将功率减小到 0。足够强的变化磁场可以影响大多数的元件。例如锰铜电阻、电流互感器、Rogowski coils (洛氏线圈, 非常敏感)、核心电子器件等。

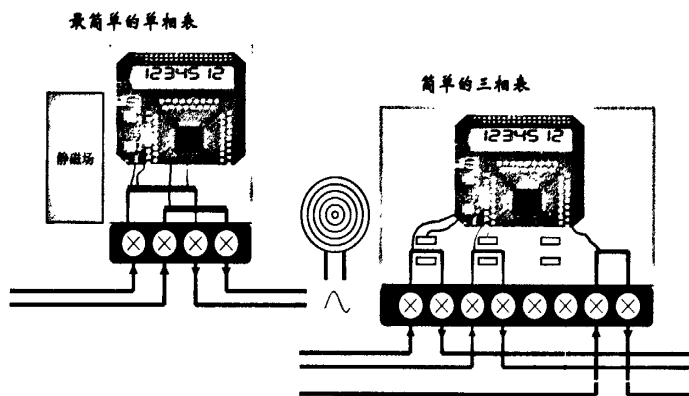


图 4-1 磁场干扰

为防止磁场干扰, 可采用以下防范手段:

(1) 磁铁的影响范围比较小, 所以电能表内部元器件的位置及其安装位置是非常重要的。应把易受磁场影响的敏感器件尽量放置在贴近电能表背面的地方, 因为通常窃电者很难从电能表背后干预电表的正确计量; 应保持易受磁场影响的敏感器件远离电能表的顶部和两边, 因为顶部和两边是容易粘附磁铁的地方, 而电流互感器 (CT) 在表壳内的位置对抵御磁铁的干扰是相当有帮助的。

(2) 磁屏蔽是一种非常有效的防止磁场干扰的做法, 首先可以使用金属外壳的 CT, 屏蔽磁场对它的影响; 其次可以在表壳内衬薄层金属, 以屏蔽整个电能表模块。但是, 这种做法将增大原材料、生产及安装的成本。

(3) 对强磁场使电源变换变压器铁心饱和导致电能表工作直流电源降低或者消失的情况, 可采用双电源变换模块安装在电能表内部不同位置并进行屏蔽的方法, 虽然增加了成本, 却非常有效。此外, 采用低功耗计量芯片或者电容降压供电方式, 也可以避免强磁场影响。在工作电源设计时, 应把负载分成两组, 一组供计量、存储部分, 另一组供显示、输出等部分的工作, 确保对计量、存储部分的供电, 不至于对计量造成影响。

(4) 如果确实不能排除磁场的干扰, 可以测量磁场, 并补偿由于相应的磁场干扰产生的测量误差。当磁场强度达到 0.5T 或更大时, 就很难有效地屏蔽它, 此时可以用低成本的磁场强度传感器(如干簧管、霍尔器件)来检测磁场, 并补偿由于强干扰而产生的计量误差, 或对磁场强度传感器的动作情况进行记录, 为用电检查人员追补电量提供依据。

4.4.3 防移除电压窃电

(1) 移除电压表现为移除电能表接线中的一路, 通常窃电者选择移除零线, 如图 4-2 所示, 使得电能表没有电网电压的进入而导致不能正常计量或不计量。对付这种窃电行为, 除采用电池供电外, 电能表的电源供给可由两部分组成, 一是火线和零线主电压提供电源, 另一部分是供电 CT 从电流上窃取提供电源, 如图 4-3 中的供电 CT。所以当移除电压时, 供电 CT 从电流上窃取的电源仍能保持电能表工作, 进行防窃电测量。然而, 选择从电流上取电的 CT 是受限制的, 因此能从电流上取电给电能表供电的电能也受限制, 当负载电流大于 1A~2A 时能实现电能表的防窃电测量, 而当负载电流很小时, 能从电流上窃取电能将不能胜任电能表供电, 当然如果选用更大的 CT, 能降低移除电压防窃电测量负载的最小电流极限值, 但是这一方面将增加供电 CT 的成本, 另一方面, 当负载电流很大时, 电源管理相关的元器件将承受很大的压力, 并有可能损坏, 所以选用大 CT 的方法是不可取的, 因此, 需要采用低功耗计量芯片。MSP430 的超低功耗技术及高性能 SD16 模块使得这个技术方便实现, 具体方案见第五章的设计与应用部分。采用移除电压 CT 供电进行防窃电测量时, 测量的精度已难以保证。由于没有电压信号存在, 功率因数和外部电压的测量已经不可能实现。一般可以使用额定电压, 功率因数 0.9~0.95 作为估计值进行计量。

(2) 窃电者还可能会附加电容、电感、电阻等器件及其组合来干扰对电压的正

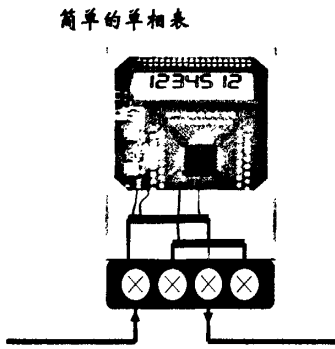


图 4-2 移除零线窃电

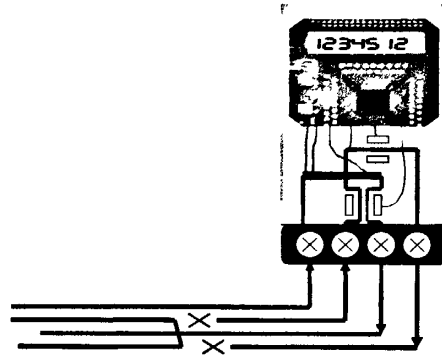


图 4-3 无零线窃电计量

常测量，如图 4-4 所示，此时体现为低电压、低功率因数，窃电者通过这些附加的元器件来改变电压的特性进行窃电。对于这种窃电行为，应设定低电压、低功率因数的门槛，越限给出报警，但要真正区分窃电行为造成的低电压、低功率因数还是正常的低电压、低功率因数是很难的。对于这种窃电方式，目前没有标准的预防措施，如果电源部分采用全波整流，则添加的元件很难被检测出；若采用的是半波整流，则在两个半周期内的电流是不一样的。外接元件时在电表接线端产生的电压值是不一样的，附加元件后导致相移的，可以通过检测视在直流电压值的变化来探测是否外接元件。

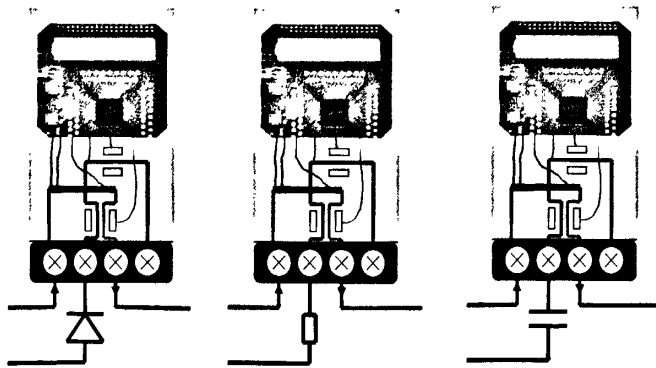


图 4-4 移除零线窃电衍生

4.4.4 防电流不平衡窃电

正常情况下由于漏电流比较小，电流应该是平衡的。电流不平衡窃电通常叫“地模式”（earthed mode），它包括任何火线和零线的测量所得到的负载电流不相等的情况，这是由于窃电者将部分电流旁路，导致电能表的读数小于实际值。如图 4-5 所示，窃电者甚至可以简单到只要向接线端插入一块铁片就能达到此种方式的窃电，俗称“简单不用学”，通常很难在物理上监测，检查人员巡视时窃电者可以在几秒内移除短路线，所以很难查处这种窃电。

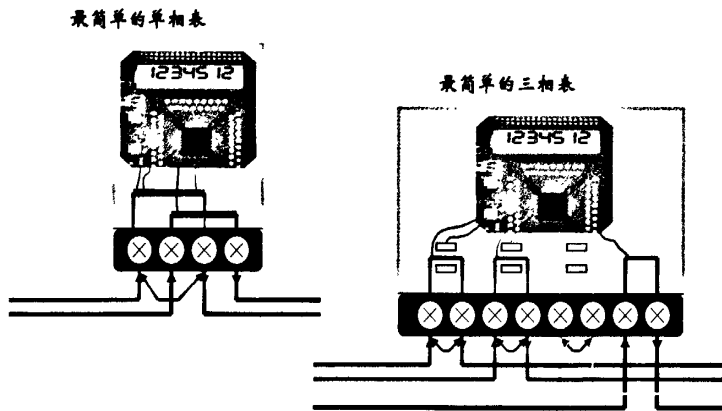


图 4-5 旁路电流窃电

要监测电流不平衡窃电就不可避免地增加电能表的成本，必须额外增加一个 CT，以实现零线的电流监测。由于隔离原因，可以在第一路的电流通道上选用低成本的锰铜电阻，但是另一路就必须使用成本相对较高的 CT。对于单相电能表，可以同时测量火线和零线的电流并进行比较的策略来判断是否平衡，此外，还要求电能表的计量芯片具有 2 个独立的 ADC 来进行两个电流通道（火线、零线）和 1 个电压通道的采样，并自动比较 2 个电流通道的电流大小，实现电流不平衡时的检测和防窃电测量。对于三相电能表可以通过监测中线电流来判断是否存在电流不平衡窃电。需要注意的是应提防 EMI（Electromagnetic Interference 电磁干扰）问题导致的假电流不平衡，这在负载小的时候问题尤为突出，另外，若窃电者同时旁路 2 个电流通道进行窃电时，也可能发生电流不平衡的错误检测，持续监测和精心设计的门限电流有助于解决该问题。可根据不同的应用给计量芯片预置相应的电流不平衡门限电流 I_{Tamp} ，只有当负载电流大于 I_{Tamp} 时，电流不平衡的监测才起作用。在大电流时使用更小的门限，小电流时使用大的门限比较好。

4.4.5 防电流反向窃电

电流反向窃电是指调换电表进出线或者利用变压器施加低压反向大电流的窃电行为。窃电者企图让电能表负计量或使计量值向后退，这种窃电行为比接地或旁路电流的窃电行为更具破坏性。而且电表通常装在狭窄的位置，很难看出走线方式，读表时检查人员很难发现。电流反向窃电模型如图 4-6 所示。

电流反接时的防窃电，要求计量模块有自动检测电流反向功能，不需要任何辅助元器件就能实现电流反向的检测。同时，可以给电能计量模块预置电流反向时的处理方式，如电流反向时取功率或电能的绝对值为测量值，电表能记录电流

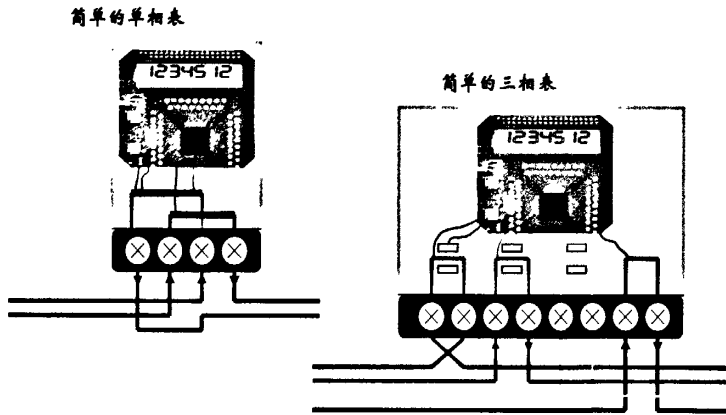


图 4-6 电流反向窃电

反向的起始时间和持续时间，以便供电部门查处。需要注意的是要提防 EMI 问题导致的假电流反向，持续监测和精心设计的门限电流有助于解决该问题，例如设定一个电流反向检测的最小电流门限，当小于这个最小电流门限时，关闭电流反向检测功能，防止错误的电流反向警告。

4.5 本章小结

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，反窃电工作是一项长期、复杂的系统工程，在电能表的设计应用中也是一个必须要考虑的问题。本章简要地介绍了窃电的原理、常见的窃电手段。最后对电子式电能表的窃电手段进行了分析，并给出相对应的反窃电措施。

5 设计与应用

5.1 概述

基于 MSP430 系列单片机的一些表计专用芯片，我们对单相多费率电能表、单相 SOC 电能表、三相多费率电能表、三相简单多功能电能表、三相多功能电能表、三相 SOC 电能表等进行了一系列的设计研究与应用，在不断地市场使用实践中，进一步地完善表计功能，取得了一定的成绩，防窃电技术业内领先。

5.2 MSP430-TEST44X 开发试验板

为了更好地开展 MSP430 系列单片机的教学、实验及设计，提高 MSP430 系列单片机的开发速度，TI 公司在中国的技术伙伴和 MSP430 单片机首家增值经销商——利尔达单片机技术有限公司设计了功能齐全的 MSP430-TEST44X 开发试验板，本章介绍的电能表先期都是在此试验板上调试成功的。

MSP430-TEST44X 试验板硬件平台以 MSP430F449 为核心，配合 IAR 仿真调试和编程工具，可方便地实现开发、在线调试和编程下载。该试验板集成了丰富的接口电路与模块，具体如下：

- 1、MSP430F449 一片；
- 2、点阵 LCD、字符 LCD 各一块；
- 3、LED 一组；
- 4、发光二极管二个；
- 5、扩展 Flash 一片；
- 6、EEPROM 一片；
- 7、行列式键盘、独立按键式键盘；
- 8、A/D 转换接口（12 位）；
- 9、RS-232、RS-485、M-Bus 接口。

其中 MSP430F449 芯片是 MSP430 芯片中功能较多的一款 MCU，其 100 只引脚全部用插座引出，并通过 DIP 开关选择是否与外部电路连接，方便使用时自行扩展模块与单片机相连。开关闭合，单片机与试验板上电路连接；开关断开，单片机与试验板上外围电路断开。试验板使用 9V 直流电源，JTAR 通过 14 芯扁平线与 MSP430 仿真工具相连，仿真工具再通过 25 芯并口线与 PC 机相连，试验板通

过 RS-232、RS-485、M-Bus 接口与外部通信，调试非常方便。

5.3 MSP430 集成开发调试环境

电能表外围硬件调试无误后，进入软件编程和调试阶段。IAR 嵌入式工作平台 Embedded Workbench(以下简称 Workbench)为开发不同的 MSP430 目标处理项目提供了强有力的开发环境，并为每一种目标处理器提供了工具选择。因此 Workbench 为开发和管理 MSP430 嵌入式应用程序提供了极大的便利。

Workbench 的工具主要包括：

- 1、基于标准 C 语言并带有 MSP430 特性的编译器；
- 2、具有语法表现能力的文本编辑器；
- 3、连接器；
- 4、汇编器；
- 5、函数库管理器；
- 6、调试器 C-SPY。

打开 IAR FOR MSP430，新建一个 workspace，可以将所有用于项目测试的工程都放在里面。需要注意的是，IAR 的 workspace 不是最终的执行工程，它只是存放在该 workspace 下所有工程的一个集合。例如建立一个名为 test 的 Workspace，下面有很多工程 (project)，例如 ADC-Debug、LCD-Debug 等，所有项目可以形成树状体系结构组织，但这些工程在调试的时候都是独立的。

C-SPY 选择硬件仿真方式是在目标硬件的真实环境中进行调试，除了验证程序，还可以检验目标系统的硬件设计性能。主机将代码通过 JTAG 仿真器下载到目标系统的 Flash 中运行。

C-SPY 选择软件模拟方式，目标系统的运行是在调试主机上以软件模拟实现的，用户可以利用软件模拟调试在目标硬件系统产生之前验证程序的设计思想和逻辑结构。由于 C-SPY 软件模拟调试完全使用软件模拟目标处理器的功能，不需要硬件，因此，对于许多应用者来说是一种高效而廉价的调试方法。IAR C-SPY 模拟调试器提供了如下功能：

- 1、精确模拟指令的执行；
- 2、中断的模拟；
- 3、程序的分析；

- 4、外围设备的模拟（使用 C-SPY 宏系统）；
- 5、立即断点设置和程序恢复运行；
- 6、在软件模拟调试时基本操作与硬件仿真基本相同。

下面对一些电能表的典型设计进行介绍。

5.4 单相防窃电式 SOC 电能表

5.4.1 概述

单相电子式电能表是市场应用量最大的电能计量表计，并且随着进入家庭的各类电器越来越多，民用电量剧增，受经济利益的驱使，窃电现象也日益严重，尤其是在一些发展中国家，而传统的电表无监测和预防窃电的能力，因此市场广泛需要防篡改的电能表，特别是具有防窃电功能的单相电能表，即使在窃电情况下还能进行另一种方式的计量，使损失降到最低。

我们利用 MSP430FE42X 系列设计研制出业内第一款 SOC 单相电能表，并已经过三年多时间国内外大量应用的考证，该表自投入市场以来，产生了巨大的经济效益和社会效益，也为电力管理部门打击窃电行为提供了更强有力的武器。其设计方案如图 5-1 所示。它在正常的单相多功能、多费率电能表上加防窃电功能，因此它可以是单相多功能表的形式，也可以是单相多费率的形式以及其他电能表形式。

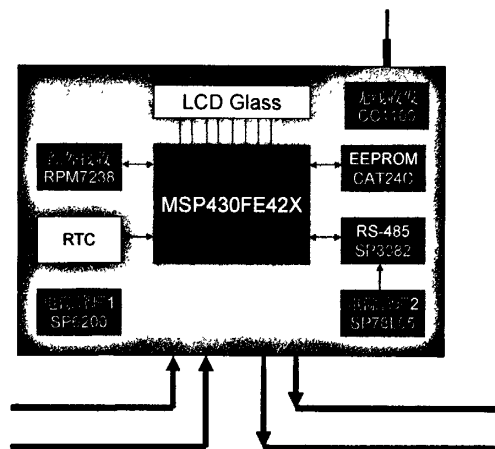


图 5-1 单相 SOC 电能表设计方案

我们把能实现电力参数的采样、计算，又能完成电能表功能设计的电表芯片算作 SOC。在单片机内内置合适的模拟前端，能用片内的模拟前端做电网数据的采样，并在单片机内部计算出相应的电网参数，也就是把计量和单片机功能集成

在一起，这样的方式能灵活地实现生产时的自动校表，提高批量生产的效率。

5.4.2 系统硬件设计

(1) 工作原理

前面已经介绍过了，MSP430 系列单片机是一款超低功耗的单片机，具有丰富的外围模块，灵活的时钟源，其中数字控制振荡器 DC0 可使器件从低功耗模式迅速唤醒，16 位计数器和常数发生器使 MSP430 系列微控制器能达到最高的代码效率。它的这些特性特别适合电池供电，可大大延长电池寿命。该表所使用的 MSP430FE42X 系列是专门针对单相电能表设计研制的，其构架及资源图如图 5-2 所示。

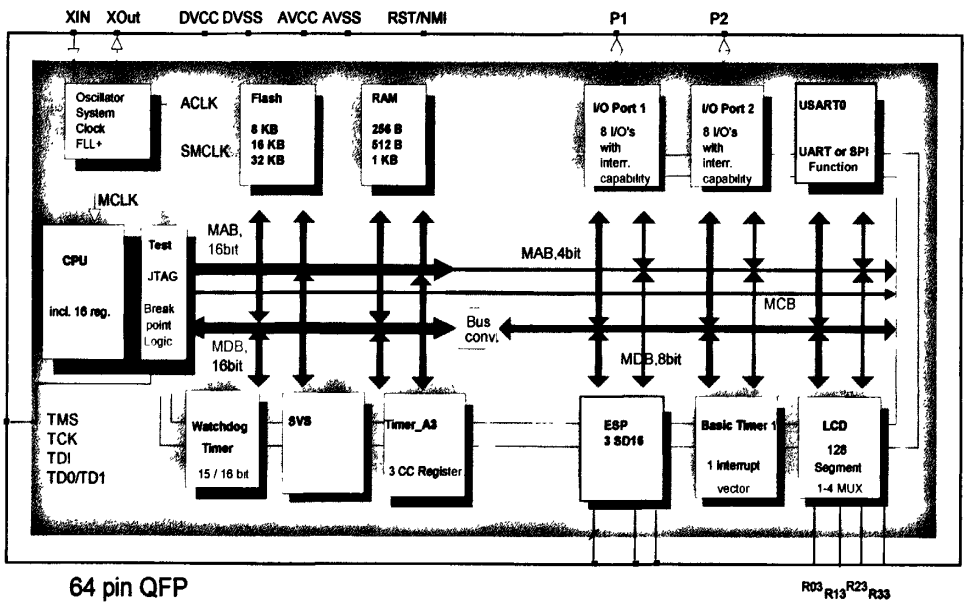


图 5-2 MSP430FE42X 构架及资源图

从图上可以看出，MSP430FE42X 带有一个嵌入式电能计量模块，无需外部计量芯片，内含三个独立的 16 位 Σ - Δ 模数转换器和信号处理器，是适用于测量和计算二线或三线制的单相电能表的微控制器，并集成了 128 段液晶驱动，温度传感器等；同时，它还具有带可编程电平检测的电源电压管理和监控，以及基本定时器支持实时时钟功能，从而简化了电表在电路上的设计，容易构成精度高、结构简单的全电子式电能表。内置计量模块除可实现有功计量外，还可实现无功、电流、电压、频率、相位等多功能的测量。MSP430FE42X 同样具备超低功耗的各种性能，并且凭借超低功耗及超强的模拟性能，可实现业内领先的防窃电功能，如双电流回路计量、无零线窃电计量等。

MSP430FE42X 构成的单相防窃电电子式电能表的功能框图如图 5-3 所示。

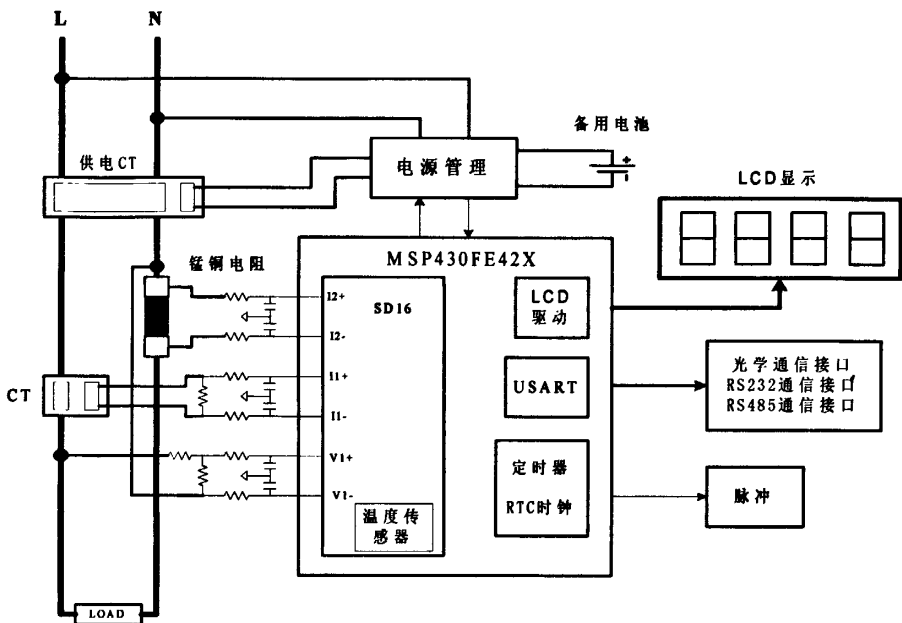


图 5-3 MSP430FE42X 单相防窃电电子式电能表功能框图

(2) 电能计量模块 SD16

SD16 相当于一个独立的具有 MCU 特征的模块，即相当于一处理器，该处理器内核带有模数转换器、硬件乘法器、4K 字节 ROM、256 字节 RAM、16 位 DP-RAM 用于返回值。该模块与 MSP430CPU 的数据交换是通过一个邮箱中断机制相互通信来完成的。就是用一个控制寄存器 MBCTL，两个输出邮件寄存器 MBOUTO、MBOUT1，两个输入邮件寄存器 MBINO、MBIN1 来进行信息的操作，用信息返回寄存器 RETX 来获取电能计量模块的运行结果，用一些带有命令的参数来调整电能计量模块运行的状态和修正由于硬件引起的某些运行偏差。

计量电路可以分为二个部分：两个电流通道和一个电压通道，它们分别对应于 SD16 中三个独立的 16 位 AD 差分输入。两个电流通道分别应用于火线和零线电流的测量，以实现防窃电功能。

(3) 电源管理

MSP430FE42X 单相防窃电电子式电能表功能框图中，除电池外，电源表的电源供给由两部分组成：一是火线和零线的主电压提供电源，另一部分是供电 CT 从电流上取得提供电源，当进行移除主电压窃电时，电能表仍进行正常计量，CT 的变比为 1000:1，最小电流可测到 1A。电源管理的电路图如图 5-4 所示。

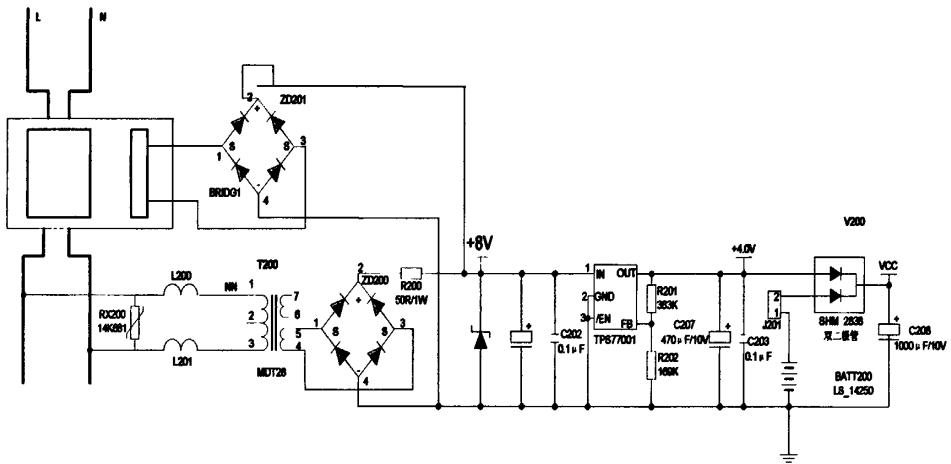


图 5-4 电源管理电路图

(4) LCD 显示

MSP430FE42X 内部具有 LCD 驱动器，最多可驱动显示 128 段码，能很好地完成 LCD 显示功能，无需再扩展 LCD 驱动器，只要直接将液晶的各个脚与 MSP430FE42X 对应的 LCD 驱动输出脚相连即可。

(5) 通信接口

通信电路如图 5-5 所示。MSP430FE42X 具有一个硬件通用异步/同步接收发送 (USART0) 外围模块，用于串行数据通信。MSP430FE42X 单相防窃电电子式电能表可选择光学通信接口、RS232/RS485 接口或者两者兼有。USART 支持同步 SPI 和异步 UART 串行通信协议，采用双缓冲的发送和接受通道。通信接口电路主要功能是接收上位机发送下来的命令字及控制字，并将有效值、时间等数据信息传递给上位机。MSP430FE42X 内部集成串行口，其串行口和其他标准串行接口芯片一样，输入输出均为 TTL 电平，本设计的通讯方式为红外和 RS485 接口，图 5-5 中 B300 为红外接收，B301 为红外发射，CON2 为 RS485 接口。红外通讯有效距离大于 5 米，红外通讯波特率为 1200。

(6) 脉冲输出

脉冲输出是用来校表、计量的，脉冲输出的电路由普通 I/O 口加光耦隔离实现，实现方式简洁。本设计中含有有功功率校验和无功功率校验脉冲输出。

(7) 带温度补偿的实时时钟 RTC

时间是电能表中的一个重要数据，实时时钟 RTC 可由单片机内部的定时器实现。内部的温度传感器可以方便地实现温度的测量，实现对实时时钟 RTC 的温度补偿。

(8) 存储芯片

系统由于需要储存大量的电参数数据，可采用片外 E²PROM。本设计采用了一片 E²PROM 作为外部数据存储电路。

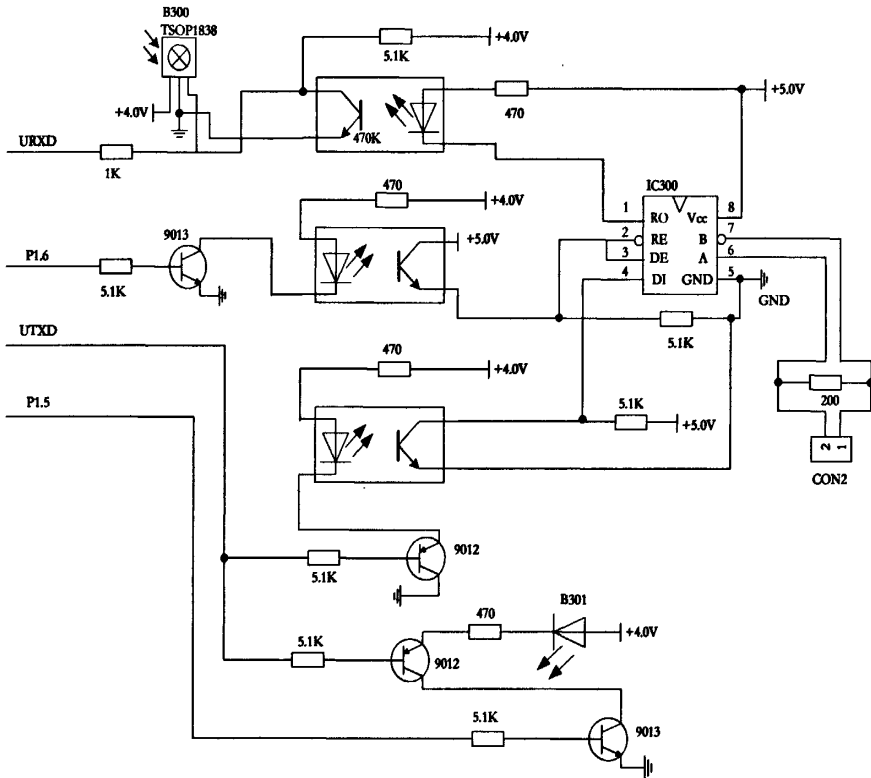


图 5-5 通信电路图

5.4.3 系统软件设计

软件是整个控制系统的灵魂，软件质量的好坏对系统功能、性能指标等会产生很大的影响。精良的软件设计往往能弥补硬件设计的不足。本设计软件采用模块化结构设计，每个模块被设计成只负责一项的功能，它们分别完成模块初始化、自检、SD16 计量模块数据读取、串行通讯、数据处理及显示等等。

(1) 主程序

电表进入到工作状态后，在主程序中，程序循环查询标志，主要进行各种判断，判断操作模式是否不等于正常模式，是否等于掉电模式，是否有新的能量产生标志，是否等于掉零线模式等，当有相应的标志置位，则进行对应的处理或进入中断程序。主程序流程图如图 5-6 所示。

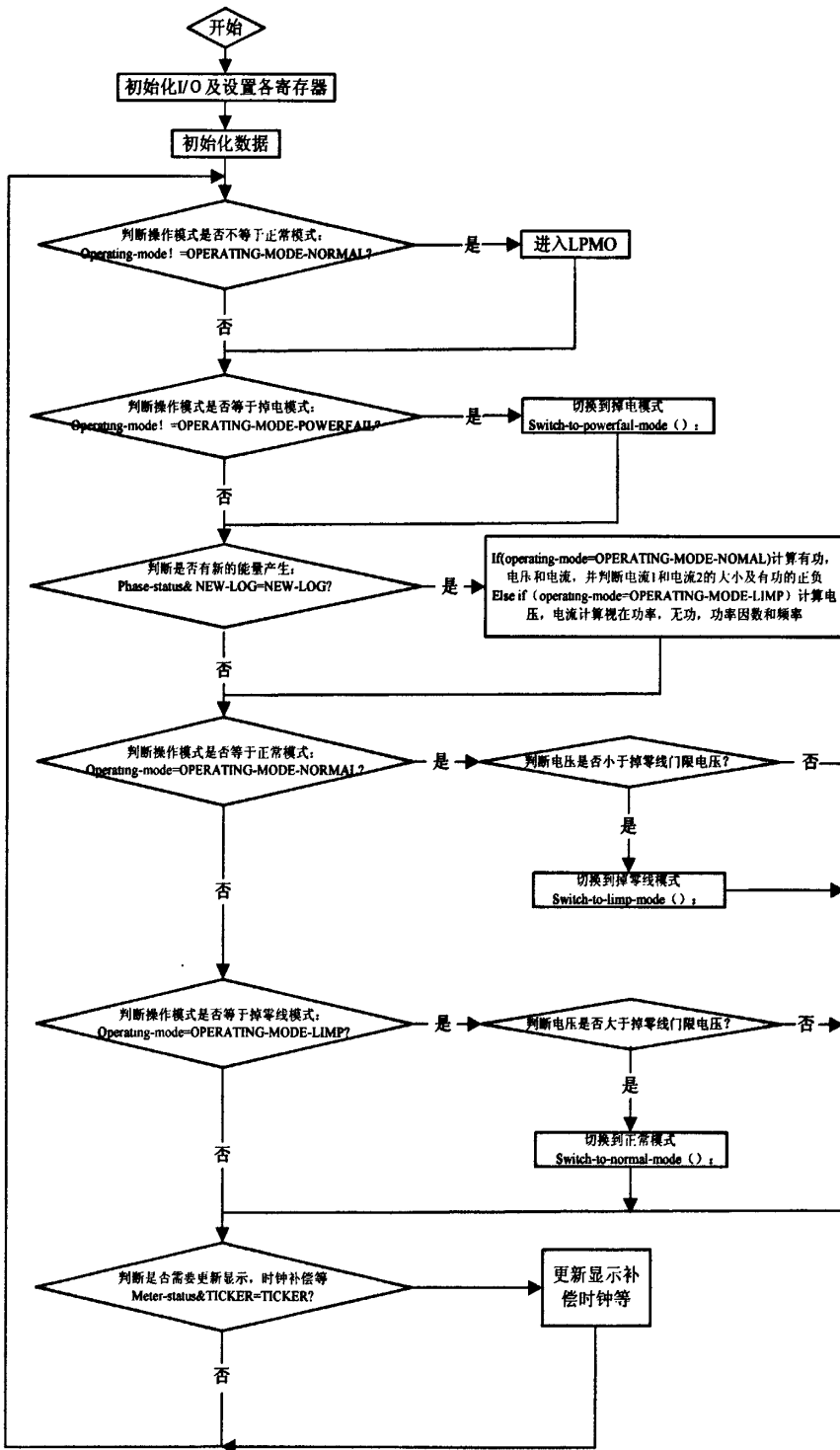


图 5-6 主程序流程图

(2) 中断子程序

中断服务子程序主要包括 SD16 中断服务程序、基本时钟中断服务程序和端口中断服务程序等，例如在 SD16 中断服务程序中，完成主要的电能计算工作，

首先判断是否有中断事件,若有事件中断,则进入中断服务程序,在中断服务程序中先将 SD16 转换后的结果保存,然后分别判断电压、电流 1、电流 2 的转换数据是否溢出,如果溢出,则去除直流分量,将结果平方并累加,分别计算出电流 1 和电流 2 的有功功率和无功功率等数据。

(3) 电路常数的计算

I、纯正弦信号作用下电参量计算算法

电压和电流的表达式如下:

$$U = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (5.1)$$

$$I = I_m \sin(\omega t + \gamma) \quad (5.2)$$

式中, U_m , θ 分别是电压峰值、电压初相角; I_m , γ 分别是电流峰值、电流初相角;

纯正弦信号下的电参量计算算法主要有最大值算法、单点算法、半周期积分法、两点采样法及均方根算法等。

II、有谐波信号作用下电参量计算算法

在含有谐波信号的情况下,电压和电流表达式如下:

$$u = \sum_{k=1}^M U_k \sin(k\omega t + \theta_k) \quad (5.3)$$

$$i = \sum_{k=1}^M I_k \sin(k\omega t + \gamma_k) \quad (5.4)$$

式中, U_k , θ_k 是第 k 次谐波电压的峰值和电压的初相角;

I_k , γ_k 是第 k 次谐波电流的峰值和电流的初相角;

M 是所含谐波的最高次;

含有谐波的信号算法在实域内,采用均方根算法。

III、均方根算法

在实域分析中根据有效值的定义:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt} \quad (5.5)$$

离散积分的有效值形式如下:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u^2(k)} \quad (5.6)$$

其中, N 为每周期等间隔采样次数, $u(k)$ 为第 k 次采样值。由采样定理可知, 此算法可计及 $N/2$ 次谐波。

同理:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i^2(k)} \quad (5.7)$$

对于有功功率, 其定义为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T uidt \quad (5.8)$$

同样考虑离散化的情况, 得到:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(k) \times i(k) \quad (5.9)$$

$$S=UI; Q = \sqrt{S^2 - P^2}; \cos\varphi = \frac{P}{S}$$

5.4.4 总体工作原理

MSP430FE42x 单相防窃电电子式电能表的工作原理有两个关节: 外部电压(电网电压、供电 CT 产生或者两者共同起作用)和电压有效值。当外部电压不存在时, 电表在睡眠状态, 仅保持 RTC 运行和 LCD 显示。在外部电压存在的情况下, 若电压有效值大于电网电压的最小极限值(如 80V), 则认为电网电压存在, 电能表在正常计量状态, 通过电流回路和电压回路的实际测量值计量; 若电压有效值小于电网电压的最小极限值(如 80V), 则认为电网电压不存在, 此时进入移除主电压防窃电测量状态, 电压以这个地区的额定电压为准, 电流以电流回路的实际测量值为准进行计量。

5.4.5 多功能防窃电计量

多功能计量体现在电能表能够实现有功、无功、视在功率、功率因数, 电流有效值、电压有效值、频率、相位等的测量。MSP430FE42x 单相防窃电电子式电能表很容易实现单相电能表的电流不平衡防窃电测量、电流反向防窃电测量及移除主电压防窃电测量。

(1) 电流不平衡时的防窃电测量

电流不平衡典型为零线接地或火线短接。为了检测电流的不平衡,除了检测火线的电流外,还要检测零线的电流,因此需要两个电流传感器;由于隔离的原因,可以在一路的电流通道上选用低成本的锰铜电阻,但是另一路就必须使用成本相对较高的电流互感器。图 5-3 即为以火线上使用电流互感器,接在 I1+, I1- 上,零线上使用锰铜电阻,接在 I2+, I2- 上的功能框图。内置三个独立 16 位 Σ - Δ ADC 的 MSP430FE42X 进行两个通道(火线、零线)和一个电压通道的采样,并在单片机内部处理、比较两个电流通道电流的大小,实现电流不平衡时的检测。两个电流通道的传感器分别选用了锰铜电阻和电流互感器,电压通道采用电阻分压实现。

(2) 电流反向时的防窃电测量

电流反向典型为火线的进出端口连接对换。通过在单片机内部判断测量的功率的正负来检测电流是否反向,不需要任何的辅助元件就能实现电流的反向的检测。同时可以预置电流反向时的处理方式,如电流反向时取功率或电能的绝对值为测量值等等,实现电流反向的防窃电测量。

(3) 移除主电压时的防窃电测量

移除主电压典型为拆除电表的零线或火线连接,使得无电压信号进入电表。对付这种窃电行为,我们可用一个低成本的电流互感器 CT(图 5-3 中的供电 CT)从剩下的连接电表的导线中流经的电流上获取很小的电能,经过电源管理模块处理,给电能表供电,使电能表实现防窃电测量。由于电能表成本、表壳的尺寸以及电子元器件能够承受的最大电流的影响,选择从电流上取电的 CT 是受限制的,因此能从电流上获取的给电能表供电的电能也是受限制的,特别当负载电流很小时,能从电流上取得的电能将不能胜任电能表的供电电源。供电部门通常希望当负载电流大于 1A 时就能实现电能表的防窃电测量,当然,他们希望这个值越小越好。基于以上要求,需要选择一个在移除主电压防窃电测量时功耗很小的方案以保证能顺利完成防窃电的测量。所以配合 MSP430FE42X 系列单片机的超低功耗特性和丰富的模拟前端可以较为容易地实现移除主电压时的防窃电测量。模拟前端的具体电路如图 5-7 所示。

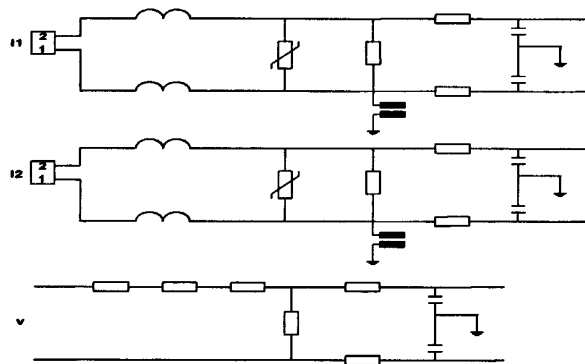


图 5-7 模拟前端电路图

5.4.6 电能表校准

电能表的校验在校表台上完成，本设计可采用通讯校表和按键校表两种方式。校准的原理是利用一部标准电能表作为基准，使其与被校准的电表并联，读取标准电表的一组脉冲，记录下所需时间，与被校电能表产生同样多脉冲所需时间作比较，比较的误差或校正因子保存在 Flash 中，在正常操作时可以用来调整读数。在实际的计算中，所有输入值都乘以一个倍数以得到更多有效数据位。已知大电流 I_H ，大电流处的误差 E_H ，小电流 I_L ，及小电流处的误差 E_L ，且 $N=I_H/I_L$ ，则 MSP430FE427 校表公式可表示为式 (5.10) 和 (5.11)：

$$Gain = \frac{N-1}{(1+E_H)N-(1+E_L)} Gain' \quad (5.10)$$

$$Offset = \frac{(E_H - E_L)N}{(1+E_H)N-(1+E_L)} C_Z VI_L \quad (5.11)$$

(1) 通讯校表

通讯校表通过 RS485 接口将校好的校表参数发送给电表，电表接收到数据后保存并重新初始化 SD16 模块。

校表的流程为：校表开始→校火线电压→校火线电流→校火线功率增益和偏置→校火线相位→校掉零线时火线的电流→校零线适应参数→校零线功率增益和偏置→校零线相位→校表结束。

例如校火线功率增益和功率偏置：将校表台调到 220V，20A，PF=1.0，等校表台误差稳定后，用串口调试助手发送读火线有功参数命令 68 00 00 00 00 00 00 68 20 02 11 13 16 16，电表返回命令 68 00 00 00 00 00 00 68 A0 0C 11

13 XX XX XX XX XX XX XX XX XX 16, 分别为有功功率 (4 个字节, BCD 码), 功率增益 (2 个字节, 十六进制), 功率偏置 (4 个字节, 十六进制)。将读出的有功增益值填入 PGAIN"列, 将校表台的误差填入“大电流误差”列。接着将校表台调到 220V, 0.25A, PF=1.0, 等校表台误差稳定后, 将校表台的误差填入“小电流误差”列, 则在 PGAIN 列和 POFSET 列中为校好的功率增益和功率偏置。接用串口调试助手发送写火线有功参数命令 68 00 00 00 00 00 68 20 08 12 13 XX XX XX XX XX XX CS 16, 6 个 XX 中前两个字节为功率增益参数, 后面四个字节为功率偏置参数, CS 为 CS 之前所有字节的累加和, 用 MBUS-TEST202 计算获得。串口调试助手发送写火线有功参数命令后, 电表返回同样的数据。例如得到表 5-1 的一组数据。

表 5-1 校表数据

倍数	小电流	大电流误差	小电流误差	C ₂	PGAIN"	PGAIN	POFFSET
200	0.25	-0.00288	-0.00413	6436.01493	17380	17430.0892	445.981148
50	0.5			6436.01493	17380	17380	0
80	0.5			6436.01493	17380	17380	0
120	0.5			6436.01493	17380	17380	0
100	0.5	-0.000222	0.001081	6436.01493	17270	17274.0622	-932.01111
80	0.5			6436.01493	16384	16384	0

(2) 按键校表

给电表加 220V 电压, 加 I₀ 电流, 长按按键 BT101, 直到进入到校表状态。

按键 BT101 短按和按键 BT100 短按的校表项各有 13 项, 一一对应, 例如 BT101 短按的项目 5 是两路电流同时校: 两路电流的大电流参数保存, 项目 6 是两路电流同时校: 两路电流的小电流参数保存及两路电流的功率增益, 项目 7 是两路电流同时校: 两路电流相位校正及电压电流及起动电流的校准; 按键 BT100 短按的项目 5 是两路电流同时校: 0 准备, 1 起动校表, 项目 6 是两路电流同时校: 0 准备, 1 起动校表, 项目 7 是两路电流同时校: 0 准备, 1 起动校表。

需要注意的是, 在校相位时, 必须将电压切换到 COS φ=0.5L 档; 不管是两路电流同时校还电流通道 1 和通道 2 单独校, 首先都要校两电流通道的适应因子。

当校完表后, 长按按键 BT101, 直到退出校表状态, 同时将校表数据保存在 INFO FLASH 中。

5.4.7 实际应用

该电能表的技术要求如下:

(1) 参比电压 U_n : 220V,

工作电压范围 : $0.7U_n-1.2U_n$.

(2) 基本电流 I_b : 10A,

最大电流 I_{max} 为基本电流 I_b 的 4 倍

脉冲常数: 1600imp/kWh

(3) 参比频率: 50Hz, 频率范围: $50\text{Hz} \pm 5\%$

(4) 准确度等级: 0.5 级

(5) 工作温度范围: $-25^\circ\text{C} - +60^\circ\text{C}$ (户外型)

极限工作温度范围: $-25^\circ\text{C} - +70^\circ\text{C}$ (户外型)

贮存与运输温度范围: $-25^\circ\text{C} - +70^\circ\text{C}$

(6) 功耗

电压线路功耗: $< 2.0\text{W}$ 10VA, 电流线路功耗: $< 2.5\text{VA}$ (I_b)

(7) 时钟准确度 (需用户定制):

在参比温度及电压工作范围内, 内部时钟准确度优于 0.5s/d ;

断电后备用电池供电时, 24 小时后计时准确度优于 1s/d , 内部时钟温度变化系数: $< 0.15\text{s/d} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

电表自投入市场以来, 因其成本低、功耗低得到了市场的认可, 另外, 因其防窃电功能显著更是在东南亚等发展中国家受到欢迎。

5.5 三相多功能电能表

三相多功能电能表的设计方案如图 5-8 所示。

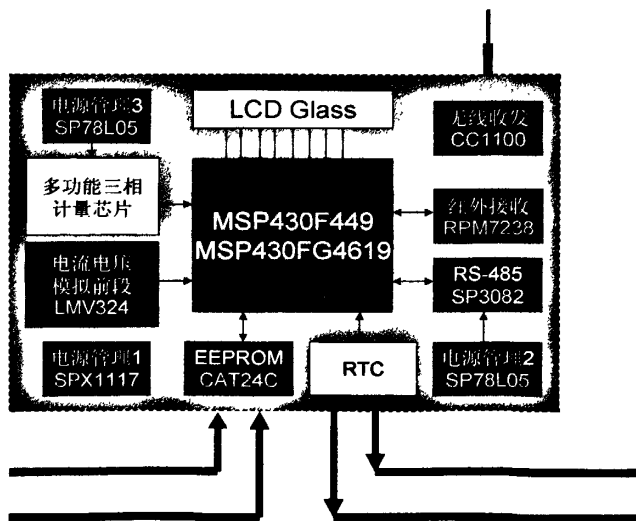


图 5-8 三相多功能电能表设计方案

对于三相多功能电表，防窃电的要求尤为重要，是必须有的功能，MSP430F449/FG461x 内部的高性能 ADC12 同样可方便实现失压下，电池供电间隙采样电流，平均电流小于 $10\mu A$ 。

MSP430 实现停电液晶常显、停电按键操作、所有定时器工作，看门狗工作、BOR 始终工作，所有的一起小于 $10\mu A$ 。如果需要，可以用 MSP430 实现精确的软时钟，省去外部时钟的成本，而不增加产品的功耗。

MSP430F449 集成 160 液晶驱动，60K Flash ROM，并可提供 120K Flash ROM 的器件，实现产品无缝升级。

LCD 常显，方便抄表，费率表显示的内容多，需要通过按键切换显示；一些地方，表被安装在表箱里，由于表箱的位置高或表箱光线暗等原因，人眼无法抄表，通过红外手掌机抄表是一个不错的方案，MSP430 的超低功耗，即使在停电时也能实现低功耗的红外抄表。

ROHM 的低功耗红外接收器，RPM7238，工作电流为 $300\mu A$ ，强力支持您实现低功耗停电红外抄表。

Chipcon 的 RF 芯片，提供低功耗的无线抄表方案。

5.6 三相复费率电能表

三相复费率电能表方案如图 5-9 所示。

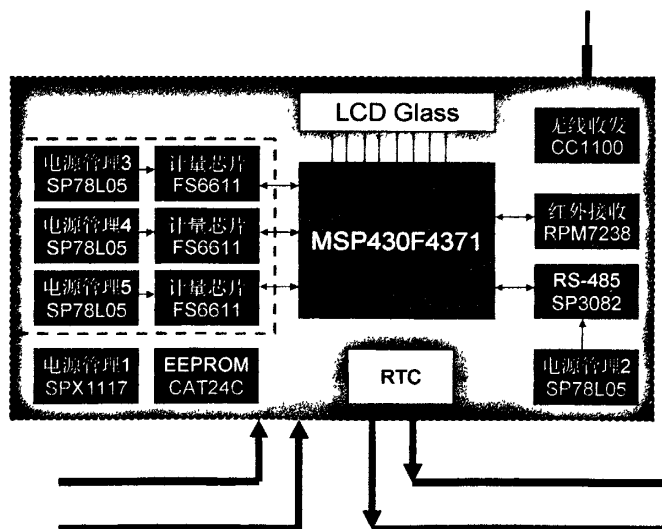


图 5-9 三相多费率电能表方案

MSP430F4371 是 TI 专门针对国内的三相复费率电表推出的 MCU，低功耗对于三相复费率表来说是非常重要的，LCD 常显，方便抄表，三相复费率表显示的内

容多，需要通过按键切换显示；一些地方，表被安装在表箱里，由于表箱的位置高或表箱光线暗等原因，人眼无法抄表，通过红外手掌机抄表是一个不错的方案，MSP430 的超低功耗，即使在停电时也能实现低功耗的红外抄表。

MSP430F4371 实现停电液晶常显、停电按键操作、所有定时器工作，看门狗工作、BOR 始终工作，所有的一起小于 10 μ A。如果您需要，您可以用 MSP430 实现精确的软时钟，省去外部时钟的成本，而不增加您产品的功耗。

MSP430F4371 集成 160 液晶驱动，32K Flash ROM，及模拟比较器等高性能片内资源。

ROHM 的低功耗红外接收器，RPM7238，工作电流为 300 μ A，强力支持您实现低功耗停电红外抄表。

Chipcon 的 RF 芯片，提供低功耗的无线抄表方案。

Fortune 的计量芯片 FS6611，高性能、一致性好、兼容 ADE7755，低成本。

5.7 三相 SOC 电能表

5.7.1 工作原理

三相 SOC 电能表方案如图 5-10 所示。可利用微控制器 MSP430F47197 的丰富外设和高性能特性，将模数转换、数字信号处理、电量费率管理、LCD 显示驱动、硬件 RTC 时钟和硬件 USCI 通讯模块集于内部，具有外围电路设计简单、成本低、精度高、校表方便等优点，是一款真正意义上的三相 SOC 电表方案。非常适合要求开发周期短、满足三相电表的大部分功能的客户。

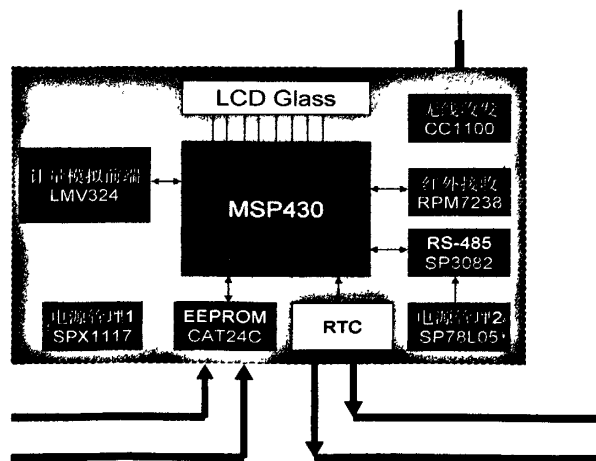


图 5-10 三相 SOC 电能表方案

它得益于 MSP430 的高性能 ADC12，以及 TI 取得专利技术的增益同步切换技

术，增益同步切换的硬件设计如图 5-11 所示，我们可以利用 ADC12 实现全部的电力测量，而省缺外部高昂的计量芯片，降低成本。

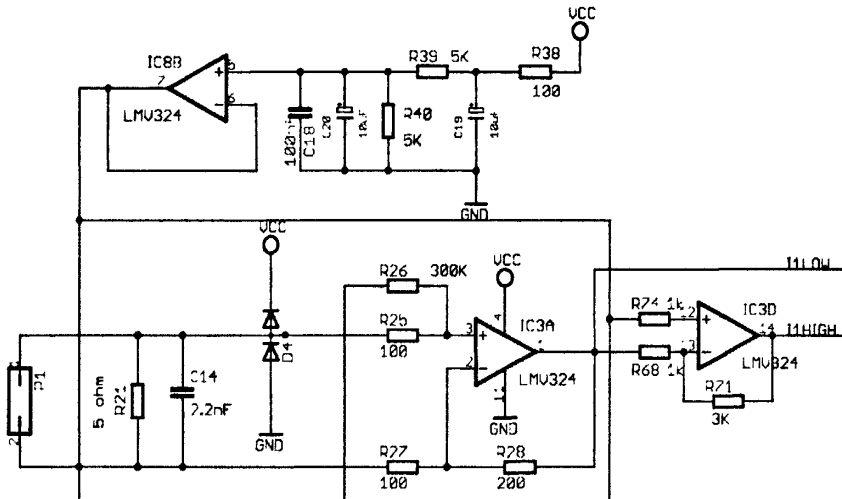


图 5-11 增益同步切换的硬件设计

由于 MSP430 良好的兼容性，我们可以把同样的采样和信号处理的软件在 F437、F449、FG461X 等不同的 MSP430 器件上移植，实现系列化的三相表平台。三相 SOC 电表可以测量的电参数主要是分相和总的有功功率、分相和总的无功功率、分相和总的视在功率、电压有效值、电流有效值、频率和温度。它支持多种防窃电功能，如电流反向检测、电流不平衡检测、掉零线检测，并且实时监测中性线的电流。

5.7.2 功能特点

5.7.2.1 计量功能

- (1) 具有计量总的正向、反向有功电能和无功电能(反向电能按正向电能累计)。
- (2) 具有测量和显示 A、B、C 三相的有功功率、无功功率和视在功率。
- (3) 具有计量四象限无功电能。
- (4) 实时测量 A、B、C 三相的电压、电流有效值。
- (5) 实时测量 A、B、C 三相的频率和功率因数。
- (6) 实时测量中性线的电流，监测负载的平衡状况。
- (7) 电表内能存储前 12 个月的冻结数据。电能量数据冻结转存日为每月 1-28 日中任意指定日的一个整点，缺省设置为每月末 24 时(月末冻结)。
- (8) 断电后，所有存储数据不丢失，并能保持 10 年以上。

5.7.2.2 时钟、时段及费率功能

(1) 电表内的时钟采用硬件 RTC 模块, 内置时钟具有日历、计时和闰年自动切换功能。

(2) 采用绿色环保锂电池, 引脚采用针焊式, 容量 $>1100\text{mAh}$, 断电后锂电池可连续提供内置时钟正常工作 3 年, 在产品寿命周期 (10 年) 内, 无须更换锂电池。

(3) 可以根据客户需求编程设置尖、峰、平、谷四种费率, 最多支持 8 个时段、三种日期制度, 时段设置最小为 30 分钟。

5.7.2.3 显示功能

(1) 显示器采用两行、每行 8 位的段码 LCD 显示屏。

(2) 根据需要编程设置循环显示的内容, 电能量显示数为 6 位整数, 2 位小数。

(3) 循环显示所需的电量信息, 每隔 2 秒显示下一页。

(4) 循环显示的内容包括: A、B、C 三相的电能、有功功率、电压有效值、电流有效值和频率; 总的电能和有功功率; 中线的电流有效值; 当前时间日期。

(5) 具有自检显示功能, 以检查显示笔段。

(6) 采用绿、黄、红色 LED 分别指示 A、B、C 三相的脉冲输出。

5.7.2.4 通讯功能

(1) 支持 RS485 串口校表通讯, 上位机通过此接口对电表误差进行校正。

(2) 支持红外通讯, 用于参数设置和抄表, 通讯符合 DL/T645-1997《多功能电能表通讯规约》。费率表显示的内容多, 需要通过按键切换显示; 一些地方, 表被安装在表箱里, 由于表箱的位置高或表箱光线暗等原因, 人眼无法抄表, 可通过红外手掌机抄表, 并且由于 MSP430 的超低功耗, 即使在停电时也能实现低功耗的红外抄表。

(3) 支持 SPI 接口的 RF 通讯, 结合上位机软件和 RF 无线模块, 可以组成 Mesh 无线网络, 实现远程自动抄表功能。

5.7.3 技术指标

(1) 参比电压 U_n : 220V

工作电压范围: $0.8U_n-1.15U_n$ 。

(2) 基本电流 I_b 为: $3 \times 5(60)\text{A}$

(3) 参比频率: 50Hz, 频率范围: $50\text{Hz} \pm 5\%$

- (4) 准确度等级: 有功 0.5S 级、无功 1.0 级
- (5) 脉冲常数: 1600imp/KWh
- (6) 基本工作温度范围: $-25^{\circ}\text{C} - +55^{\circ}\text{C}$ (户外型)
极限工作温度范围: $-25^{\circ}\text{C} - +70^{\circ}\text{C}$ (户外型)
贮存与运输温度范围: $-25^{\circ}\text{C} - +70^{\circ}\text{C}$
相对湿度: $< 85\%$
- (7) 功耗
电压线路功耗: $< 2.0\text{W}$ 10VA
流线路功耗: $< 1.0\text{VA}$
- (8) 时钟准确度: 在参比温度及电压工作范围内, 内部时钟准确度优于 0.5S/d ;
- (9) 启动电流: $< 0.004\text{Ib}$

5.7.4 校表

上位机通过 RS232 通讯接口与电表连接, 可以实时读取电表的各种电参数和状态, 利用上位机软件可以进行手工校表和自动校表。手工校表是根据电表的测量值与标准表比较, 算出误差, 通过调整相应的参数, 来校准电表的精度; 而自动校表则是设置好电表的各个参数, 根据校表装置的测量误差来自动修改参数的方法。

上位机校表软件与电表通讯时, 可以根据下面的显示界面 (图 5-12) 判断当前电表的通讯状况是否正确: 绿色表示已经建立通讯, 褐色表示未建立通讯。右边的 24 列表示可以与上位机连接的电表数量, 左边的两列是自动校表时需要设置的参考值和通讯状态。

通过点击上面界面中的各个表位, 即可进入单个电表的手工校表页面, 以下界面 (图 5-13) 是上位机读取当前被校电表的各个电参数, 包括 A、B、C 三相的电流电压有效值, 有功功率, 无功功率, 视在功率, 频率, 电流和电压的直流分量; 中性线的电流有效值, 有功功率, 无功功率, 视在功率, 频率, 电流直流分量。

各个参数的误差计算是按照下面的公式求得的:

$$\text{测量误差}(\%) = (\text{仪表测量值} - \text{实际值}) / \text{实际值}(\%)$$

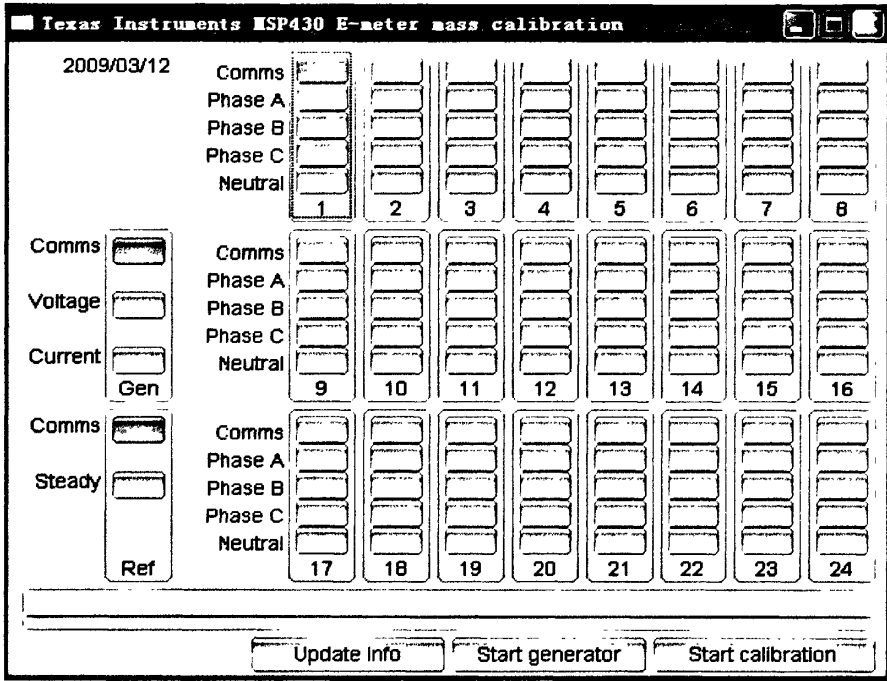


图 5-12 电表质量校准显示界面

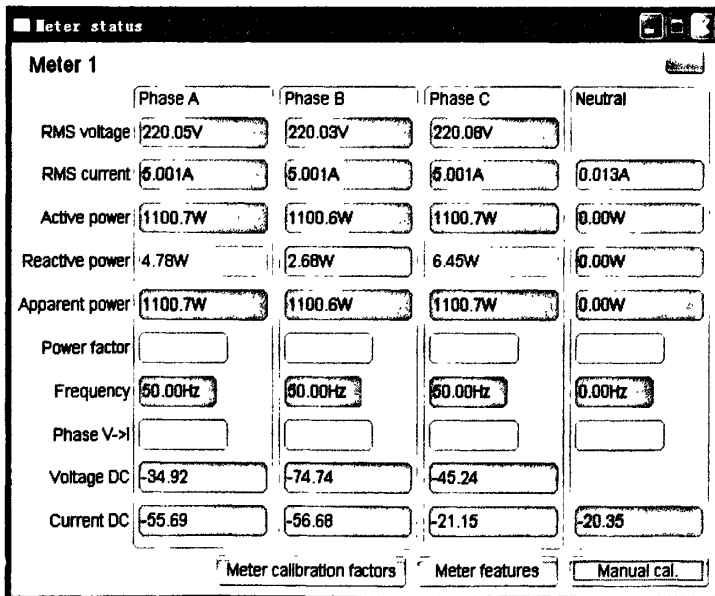


图 5-13 电表状态参数显示界面

如读取的数值与实际值不相符，则可以通过点击上面界面中的手工校表，进入图 5-14 页面，即可修改电表各参数。

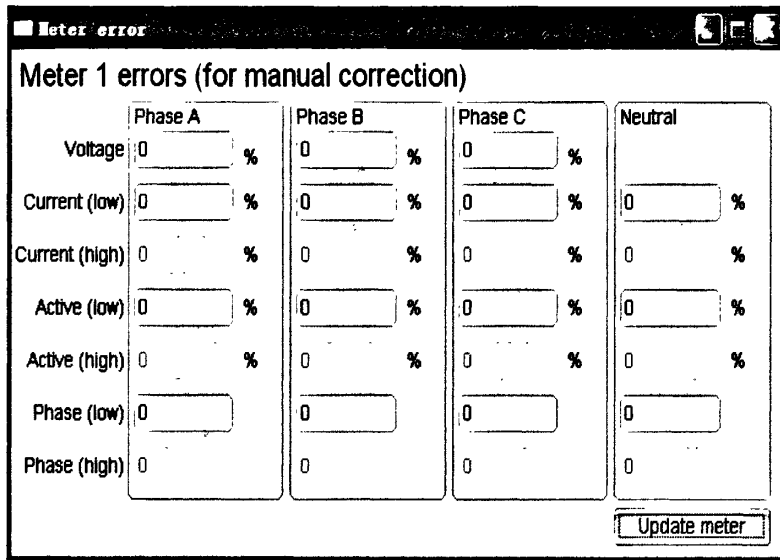


图 5-14 电表参数修正显示界面

5.8 本章小结

本章描述了基于 MSP430 开发电能表的平台及软件调试环境，并着重介绍了单相防窃电式 SOC 电能表的软硬设计方案、工作原理、防窃电计量原理等，同时介绍了几款三相电表的设计方案及工作特点。

6 结论与展望

6.1 结论

本硕士学位论文从电子式电能表的结构及原理出发,结合目前电表不断向着 SOC 方向发展的市场实际,选择了美国 TI 公司生产的超低功耗 MSP430 系列单片机作为开发芯片,研究开发了一系列的单相、三相多功能、多费率 SOC 电能表,并经过长期的市场实践,很多电表尽量实现防窃电计量,防窃电技术业内领先。

6.2 展望

随着国家电力体制的改革,现代电能计量管理水平的提高,供用电政策不断科学化和市场化,智能型电网概念的提出,以及现代智能化楼宇的不断建设,电能计量的自动抄收和管理将成为必然趋势,电能表的模块化、网络化和系统化将成为电能表技术发展的趋势。

模块化设计的优点有三:一是当计量政策发生变化时,只需通过更换部分模块就可以实现电能表的升级换代,而无需更换整个电能表,从而摆脱了传统电能表设计中那种因不可更改而导致的成批调换和淘汰,乃至整个系统需要重构的厄运;二是由于功能的模块化和结构的标准化,使得供用电管理部门在选购电能表时不必过分依赖某一厂家的产品,并为规范电能表的研制与开发提供可能;三是可以通过现场或非现场单独更换故障模块的方法,提高可维护性并节省维护费用。

网络化可以实现将各种场合的电能数据进行实时采样和存储,并经有线或无线网络实时或非实时地输送到计量管理系统中,通过数据共享和分析实现供用电管理部门对异地用电信息的实时或非实时地测取和监控,并为智能化电网的构建奠定基础。目前可利用的网络有:总线、电力线载波(PLC)网、光纤与同轴电缆(HFC)网、固定电话(PSTN)网、无线移动(GSM/GPRS/CDMA)网,并且已经出现了中国电信等六大运营商相互竞争的格局,这种竞争格局的出现为电能数据的传输提供了丰富多样和价格低廉的数据传输信道和网络,为电能表的网络化及其自动远程抄收的实现奠定了网络化基础。而且,由于网络化,我们在设计的电表能够防窃电的基础上,还可以在电能计量管理系统终端组建反窃电监测报警系统,实现窃电信息自动报警,负控主站或调度中心集中监视,稽查部门快速捕获。

系统化可以综合利用成熟的计算机技术和电力系统自动化技术，在数据控制管理平台实现海量用电数据的有效分析、处理和管理。在网络化和数据化的推动下，促进电能计量水平地提高。

我们可以想象一下，现在一个居民小区内实行一户一表，未来一定不需要装这么多电表，一幢楼或是整个小区可能只需要一块电表，具体到用户，可能只需要一个代码，即“一户一代码”，通过这个代码，可以进行实时电量的查询及费用交纳情况查询等等。这个电表通过网络与电能计量管理系统相连，将每个用户的用电量进行实时传送，使得供用电管理部门能够对异地用电信息进行实时、非实时地测取和监控。

参考文献

- [1] 范龙章 电能表的技术发展及其趋势, 上海计量测试, 2009.1
- [2] 陆寒熹 国内电能表的发展趋势[J], 电力设备, 2007.8
- [3] 唐国良, 田薇 电能表防窃电技术措施, 大众用电, 2009.1
- [4] 陆祖良 电能表计量现状和问题讨论, 中国计量, 2008.12
- [5] 朱中文, 周韶园 电能表历年国家质量监督抽查结果分析, 中国计量, 2009.1
- [6] 刘利成, 匡少龙 电子式电能表的防窃电功能研究, 安徽电力, 2009.3, 26(1)
- [7] 金云阁 浅谈全电子式电能表的特点及其选用, 科技信息, 2008.9
- [8] 刘军、高亮等 单相全电子式防窃电电能表的研制, 河北工业大学学报, 2003.26(2)
- [9] 沈鑫、张林山等 电子式电能表技术鉴定与防窃电分析, 云南电力技术, 2009.2
- [10] 唐学忠、胡智喜等 基于电能表的多路数据采集技术的研究[J], 计算机测量与控制, 2007.15(2)
- [11] Bandim CJ, etal. Identification of energy theft and tampered meters using a central observer meter; a mathematical approach [J]. IEEE PES. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003(1); 163-168
- [12] Toth E, France A M R, Debation R M. Power and energy reference system, applying dual-channel sampling [J]. IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, 2005, 54(1); 404-408.
- [13] 孙浩, 袁惠梅等 基于AD73360的多功能网络电能表的设计, 电子技术应用, 2009.3
- [14] 汤秋芳, 罗梅林等 基于ARM多用户智能电能表设计, 现代电子技术, 2009.6
- [15] 秦春兵, 张磊等 基于GSM技术的防分流窃电系统的设计, 自动化与仪表, 2009(2)
- [16] 房超群 三相多功能电子式电能表防窃电及窃电甄别, 供用电, 2007.10, 24(5)
- [17] DL/T 448—2000, 电能计量装置技术管理规程[S]

- [18] JJG 596—1999, 电子式电能表检定规程
- [19] DL/T 614—2007, 多功能电能表
- [20] Q/GDW 354—2009 智能电能表功能规范
- [21] 要培刚, 张隽 多功能电能表的多用途开发, 山西电力, 2008. 4
- [22] Power meter supports LAN measurements, Electronics Weekly, 2007 ,No.2296
- [23] Advanced Meter Deployments Slow Before Gaining Speed Again in 2010, Power Electronics Technology ,2008 ,No.8 ,Vol.34
- [24] MSP430 Ultra-Low Power Microcontrollers User' Guides,Texas Instruments , <http://www.ti.com>
- [25] ATT7023 User' Guides,
- [26] Clark,Graeme Single-chip power meter design, Electronics Weekly, 2008 , No.2365
- [27] Metering IC has digital calibration function on-chip,Electronics Weekly, 2004,No.2146
- [28]Conner,Margery, Chipset offers power-meter isolation, EDN,2009 ,No.7, Vol.54
- [29] Power meter SoCs address large-scale smart-metering apps, Electronic Engineering Times , 2008 , No.1530
- [30] Energy-meter IC touts highest functionality, lowest power usage, Electronic Engineering Times, 2008, No.1528
- [31] Morrison, David ICs Make Meter Designs Easier, Energy Theft Harder, Power Electronics Technology , 2007 ,No.10Special section ,Vol.33
- [32] John Clarke Control your power costs with the: ENERGY METER, Everyday Practical Electronics,2007, NO.5 , Vol.36
- [33] Tarik Al-Khateeb;Martin Blundell An electronic meter for measuring the saving in electrical power , Desalination , 2007 , NO.1, Vol.209

- [34] Electronic Utility Meters to Gain Majority Market Share in 2007, Power Electronics Technology , 2007, No.2 , Vol.33
- [35] METERS, Wireless Design & Development, 2007 ,No.6, Vol.15
- [36] 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, No.12, Vol.25
- [37] 李定柏 多功能电能表在反窃电中的应用, 农村电工, 2006.8
- [38] 电子电能表与电能测量技术讲座, 仪表技术, 2003.5
- [39] 刘阳力, 滕召胜等 基于单相电能表的防窃电新技术的研究, 计算机测量与控制, 2008.12
- [40] 姜莹 电能表防窃电新技术的应用, 云南电力技术, 2008.10
- [41] 李豫温 规范计量装置安装增强反窃电能力, 农村电工, 2007.5
- [42] 沈建华, 杨艳琴等 MSP430系列16位超低功耗单片机原理与应用, 清华大学出版社, 2004 (11)
- [43] 沈建华, 杨艳琴等 MSP430系列16位超低功耗单片机实践与系统设计, 清华大学出版社, 2004 (11)
- [44] 李静, 张娜 全电子式电能表常见故障及处理方法, 农村电工, 2009.9
- [45] 尚淑霞等 基于ATT7022A的多功能表设计, 《PLC&FA》, 2008.12
- [46] 王志月 《电能计量》, 中国电力出版社, 2006.11 第二版

作者简历

卢瑛，女，1975年生人，浙江永康人，实验师。

1992年至1996年就读杭州大学（现浙江大学西溪校区）电子工程专业，取得大学本科学历和工学学士学位。

1996年至今在浙江电力教育培训中心（2003成立浙江省电力职业技术学院）工作，主要从事实训基地建设工作，实验、实训等教学工作，2004年起先后担任院实训中心电气教研室主任和实训教学管理组教研室主任。工作期间，主要负责和参与建设了电子实验室、电气控制实训基地、电机实验室（PLC部分）、电工工艺实训室及精品课程等，多次被评为校、省电力公司先进工作者、优秀共产党员。

2005年5月进入浙江大学电气工程学院电气工程专业攻读工学硕士学位。2006年参加了全国同等学力英语和专业课的统考，成绩合格。2008年经导师推荐参与了“电气设备智能无线测温预警系统的应用与研究”和“基于MSP430电能表的设计研究与应用”，对自己的专业知识提高很大。