

# 基于嵌入式系统的智能电表设计与研究

静恩波

(中国民航机场建设集团公司, 北京 100101)

**摘 要:** MAXQ3180 计量芯片为例, 概述了智能电表的发展和研究现状, 以 ATmega64L 和 STM32F107 ARM 嵌入式控制器为主机的智能电表的软、硬件设计及低功耗设计方法, 并详述了智能电表的防窃电技术。

**关键词:** 智能电网; 智能电表; 低功耗; 计量芯片

**中图分类号:** TM 933.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-5531(2011)03-0026-05



静恩波 (1964—), 男, 高级工程师, 从事机场供电系统的规划设计和研究工作。

## Design and Research of Smart Meter Based on ARM System

JING Enbo

(Civil Aviation of China Airport Construction Group Corporation, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Take MAXQ3180 for example, the status and development of smart meters were expounded, The hardware and software design of smart meters and low-power design method were introduced, which took STM32F107 ARM embedded controller as the host. The anti-tamper technology of smart meters was expounded in detail.

**Key words:** smart grid; smart meter; low power; measurement chip

### 0 引言

智能电表是微控制器技术、专用集成电路技术、工业控制网络技术和软件等多种技术共同发展的结果。其应用领域十分广阔, 涉及电力系统, 工业生产控制、智能小区、网络化家电等各行各业, 具有良好的发展前景<sup>[1]</sup>。智能电表技术的发展与成熟将会给人们的生产生活带来深远的影响。

### 1 智能电表及其研究现状

智能电表是现代计算机技术和现代测量技术相结合的产物, 它具有自动校正、自动补偿、数据自动储存、运算、逻辑判断、自动操作以及远程网络传输等能力和功能, 能够完成一些需要人类的智慧才能完成的工作, 在现代企业中得到大规模的使用。

随着科学技术的不断发展进步, 仪表系统的应用要求也在不断提高, 复杂的工业化现场促使仪表朝着更高的要求发展, 如网络化、微型化、智能化等。随着大规模工业化装置对自动化控制水

平及安全运行要求的不断提高, 促使智能电表在电力自动化领域中得到了更为广泛和大规模的应用。首先, 电力用户对于能源及物耗成本的计量要求、控制精度的要求、减轻现场作业量(工艺操作和仪表维护)的要求无一例外的将扩大智能电表的应用市场。此外, 电力仪表行业的自身发展已经趋于智能化。这一点无论是中国还是全球, 仪表产品的高科技化、高智能化已经成为必然的发展趋势。相比之下, 国产智能化仪表无论是设计还是制造都明显弱于国际先进水平, 国内电力自动化用户在智能电表的使用经验方面也相对积累较晚、较少, 这些现状表明我国智能电表的应用还只是处于一个初级阶段, 而由此也带来了相对较多的应用问题。

智能电表在我国虽然起步较晚, 但发展非常迅速, 开发潜力巨大, 市场极其广阔。现在智能电表往往两种架构来进行设计:

其中一大类是使用通用芯片来架构。随着 MCU、ARM、DSP、CPLD、FPGA 等通用硬件以及硬件新用法的引入, 无论是在功能上还是在性能上均为系统设计获得了很大的灵活与选择余地, 使

得智能电表架构设计发生了很大的变化。Atmel、ST、NEC、Microchip、飞思卡尔、飞利浦、凌阳、瑞萨等生产的 8 bit、16 bit MCU 占据了大量的中低端电能表市场。Philips 公司的 2214、三星公司的 S3C2410 和 S3C2440、ST 公司的 STM32 等 32 bit 的 ARM 也被大量应用。为了提高处理速度, TI 的 C2000、C5000 和 C6000 系列, ADI 的 ADSP-21XX、SHARC、TigerSHARC、Blackfin 系列等 DSP, 甚至 CPLD 和 FPGA, 也被广泛应用到智能电表的设计中。

另一大类是 MCU 加专用集成芯片 (ASICs) 架构, MCU 负责控制并读取专用集成芯片采集和处理的数据结果。像 ADI、珠海炬力等许多国内外芯片制造商纷纷结合自己的技术优势定制出许多高性能的电能专用计量芯片模块, 如炬力的 ATT7021、ATT7022B、ATT7023 等三相多功能计量芯片; ADI 的 ADE7754、ADE7755、ADE7758 等; 上海贝岭的 BL0932、BL0932B、BL0932X 模拟式单相电能计量芯片, BL0952、BL0962 和 BL6511 数字式三相有功电能计量芯片; Cirrus Logic 的 CS5460、CS5460A、CS5463; 复旦微电子的 FM2032、FM7751、FM7755 以及 MAXIM 的 MAXQ3180 等。大量专用集成芯片的引入, 有利于智能电表的快速开发和生产降低的成本。

使用通用芯片架构, 在功能与精度上都能够较好的定制, 有着较好的适应性与竞争力。不过, 在硬件设计和软件设计时的工作量会相当大, 要考虑的因素较多, 而且硬件可靠性会经常受到影响, 影响仪表的精度, 在使用时还要考虑现场环境的影响。

### 3 智能电表的硬件总体结构设计

智能电表的硬件总体结构框图如图 1 所示。

从总的框架来看, 硬件结构可以分成 5 个部分: CPU 模块、输入模块、输出模块、开关电源模块和显示模块。其中计量芯片和主机的选择是关键。在智能电表的设计中, 专用计量芯片更便于电能和相关电力品质参数的计算, 所以将嵌入式控制器分离出来专门实现管理功能, 如通信、费率时段管理、实时电价、存储管理等。

(1) CPU 模块。该模块以 ATmega64L<sup>[2]</sup> 作为核心, 和 MAXQ3180 进行通信, 读取当前最新

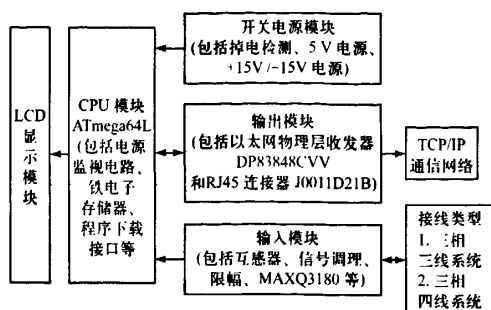


图1 硬件总体结构框图

的电力参数, 并根据一定的算法进行计算, 获得设计中需要显示的数据将其通过显示电路显示。电源监视电路用于监视电源电压是否正常, 并利用 MB3773 看门狗定时器来防止微控制器死机或者程序跑飞, 保证 CPU 的可靠工作。铁电存储器 FM25104 具有非易失性, 读写速度快, 无延迟, 读写寿命长, 数据保存时间可达 10 年的特点, 被用来保存仪表所设定的参数和测量数据, 如 CT 比、PT 比、报警值、通信地址、通信速率和电能等参数。按键扫描电路用于参数设定和循环显示。

(2) 输入模块。该模块主要有三相三线和三相四线两种接线方式。它由电压信号转换电路、电流信号转换电路、MAXQ3180 采样电路组成。电压和电流调理电路主要是采用电压或电流互感器, 其二次侧的输出信号经调理后变成峰-峰值为 AC 0~2 V 的电压信号, 送往 MAXQ3180 的电压和电流输入通道进行信号的变换。

(3) 输出模块。输出模块在设计中采用 TCP/IP 协议输出方式。输出模块采用 ST 公司的 32 bit AVR 微控制器 STM32F107<sup>[4]</sup> 通过 SPI 串行接口与 CPU 模块进行通信, 将 CPU 模块读取的电力品质参数传送到 STM32F107 微控制器。由于 STM32F107 只具有 10/100 Ethernet MAC, 故需外加 10/100 Mb/s 以太网物理层收发器 DP83848CVV 和 RJ45 连接器 J0011D21B。这样, 智能电表可提供一个以太网通信接口, 便于组成分布式通信网络。

(4) 开关电源模块。开关电源模块可以输出一组 +15 V, 两组 +5 V 直流电压, 向 CPU 模块、输入模块和输出模块和显示模块提供所需电源。

(5) 显示模块。显示模块在此作为一个独立的模块, 通过液晶显示模块 LCD 显示电力品质参

数及设定参数。

### 3 智能电表的软件设计

智能电表的软件主要由监控程序、键盘扫描程序、显示程序、设定程序、MAXQ3180 数据读取程序、量程自动校正与功率补偿程序、数字滤波程序、算法程序、实时时钟程序、分时电价程序、网络通信程序等组成,采用 C 语言编程,并进行模块化设计。

在智能电表中,除能够测量电度(kWh)和无功电度(kvarh)外,还可以测量的电力品质参数有电流、电压、功率、无功功率、功率因数、频率和谐波含量。无论对于单相两线系统、三相三线系统还是三相四线系统,采用的方法是将一次电压和电流信号经过一次电压和电流互感器变成标准的电压信号(如 AC100 V、AC220 V/AC380 V、AC100/ $\sqrt{3}$  V)和电流信号(如 5 A、1 A),然后经过二次电压和电流互感器变成几~几十 mA 的电流信号,经过取样电阻获得幅度为 AC 0~2 V 的电压信号,送往计量芯片 MAXQ3180,由 ATmega64L 嵌入式控制器通过 SPI 总线读取所需电能和电力品质参数。由于二次电压和电流互感器的输入信号和输出信号之间存在相移,将产生一个角差,当角差不为零时,则大大影响功率、电度、无功功率、无功电度、功率因数的测量精度。市场上的产品采用的方法是在二次电压和电流互感器的副边增加硬件电路补偿相移。因二次电压和电流互感器及元器件的离散性比较大,实现起来十分困难,特别不适应于工厂批量化生产的产品。同时,市场上的产品采用运算放大器对二次电压和电流互感器的输出信号进行放大处理后再送往微控制器进行交流采样,并且采用电位器进行零点与满量程的调节,当仪表受到振动或温度变化时,将产生零点与满量程漂移,降低了测量精度。计量芯片 MAXQ3180 直接对滤波和限幅处理后的电流和电压信号进行采样,通过相角补偿,去掉了硬件补偿电路及信号放大电路,也不需要电位器进行零点及满量程的调节,不会产生零点及满量程漂移,大大提高了测量精度。

MAXQ3180 几乎可以提供所有的电力品质参数,而且这些参数只需做简单处理就可以进行存储、显示和数据传输。

MAXQ3180 还能够提供基波电能(功率)和谐波电能(功率),以及分相电流、电压的各次谐波均方根值,其中谐波测量对于电力质量监控是非常重要的,谐波的测量是基于数字峰值滤波器的。

### 4 降低系统功耗的设计方法

主机作为智能电表的核心之一,对整个系统的电源管理负有重要的作用。由于专用计量芯片 MAXQ3180 的使用,主机只进行管理和通信工作,选用低功耗产品 ATmega64L 嵌入式控制器可以满足要求。

降低计量部分的功耗,可以采用已下 5 种方法:

(1) 采用 3.3 V 供电电压。在电能表的设计中,5 V 电源系统是主流,计量芯片为了和主机以及其它芯片进行电源匹配都选择 5 V 供电。随着半导体技术的发展,3.3 V 供电逐渐成为主流,5 V 供电的计量芯片由于必须进行电平转换反而成为系统低功耗设计的障碍。MAXQ3180 采用 3.3 V 供电,使其可以和主流 3.3 V 供电的微控制器接口,从而有效地降低了系统的功耗。

(2) 采用低功耗模式。MAXQ3180 能够在微控制器的控制下降低工作频率,进入低功耗测量模式,其功耗可低到正常工作模式的 25%~30% 而保持功能基本不变。

(3) 采用休眠模式和快速唤醒。在电池供电的模式下,计量芯片不能连续全速工作,这是由当前工艺技术水平所决定的,MAXQ3180 也是如此。但是使用间歇工作模式进行模拟是一种很好的解决方法。使用间歇工作模式,一个很重要的方面就是平均电流,而平均电流又取决于工作电流和占空比。MAXQ3180 使用低功耗模式使得工作电流大大降低,而休眠模式和快速唤醒可以使得实际工作的时间缩短,从而减小占空比,并最终降低平均电流。

(4) 降低动态功耗。在计量芯片工作过程中,有很多部分采用间歇性工作方式,使得暂时不使用的部分处于关断状态,这样可以有效地降低系统平均功耗。在需要工作时,快速启动也是非常重要的,这就需要在计量芯片设计过程中很好地分配时钟和时序。MAXQ3180 采用了这一先进

的技术,取得了非常好的节能效果。

(5) 采用开关电源。在智能电表的设计中采用开关电源,这可以大大提高电源效率。除了上面所述的注意事项外,还包括电磁兼容方面的设计,这是因为开关电源的高频变压器是高通滤波器,对于电瞬变脉冲群(EFT)所导致的传导干扰没有很好的抑制作用,这样对系统的电磁兼容设计就提出了更高的要求。

## 5 防窃电技术的设计

MAXQ3180 具备了低功耗模式和休眠模式<sup>[5]</sup>,其中一个重要的应用就是在防失(欠)压窃电方面。当发生失(欠)压情况时,智能电表内的电子单元失去了电压线圈的主供电方式,就必须使用电池供电的方式。

### 5.1 传统模式

传统的要求是能够在电流线圈内电流值大到一定阈值时开始计时,作为追补电能的依据,传统模式电源接线图如图2所示。

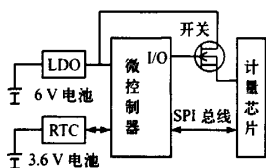


图2 传统模式电源接线图

由于传统的计量芯片没有电源管理模式,因此,不能直接用于电池供电的场合。通常方法是微控制器休眠唤醒,再将计量芯片的电源用MOS-FET电子开关控制,利用间歇工作模式来实现。

传统模式全失压安培小时累计模式时序图如图3所示。

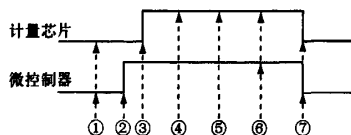


图3 传统模式全失压安培小时累计模式时序图

在图3中,微控制器和计量芯片的工作时序如下:①微控制器休眠,计量芯片关断;②微控制器唤醒;③计量芯片上电;④计量芯片预热,第③到第④步需几十ms;⑤等待计量芯片输出稳定

数据,第④步到⑤需几ms;⑥微控制器从计量芯片读数据;⑦微控制器将计量芯片关断并回到休眠状态。

普通的计量芯片没有低功耗模式,在微控制器用电子开关将其上电后必须进行长时间的预热和系统初始化后才能开始工作,这样使得每次测量的时间都比较长,再加上工作时间的电流比较大,其结果就是平均电流比较高,对电池的消耗比较大。

新的技术需求是希望能够在全部电压输入均为0(全失压)的情况下能够比较连续地记录电流值,从而进行安培小时累计来作为向用户追补电量的依据。实际情况是一般通过间歇工作来实现,这就要求计量芯片在电池供电的情况下依然能够工作。

### 5.2 MAXQ3180 模式

MAXQ3180 具有低功耗模式和休眠模式,更便于全失压情况下的安培小时累计。MAXQ3180 模式电源接线图如图4所示。

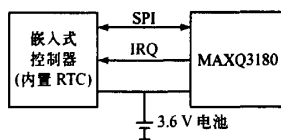


图4 MAXQ3180 模式电源接线图

MAXQ3180 可以使用和嵌入式控制器同样的电池供电方式,这样减少了电平转换和电源管理芯片的成本。它可以在不需要时处于休眠模式,仅消耗少于1  $\mu\text{A}$  的电流,而在需要时由嵌入式控制器通过片选瞬间唤醒,进入低功耗测量模式运行。由于在休眠模式下所有的参数设置均保留,因此,在唤醒后不需要进行初始化就可直接工作,从而大大减少了工作时间,而且低功耗测量模式下不需要嵌入式控制器参与工作,嵌入式控制器可再次进入休眠,直到MAXQ3180使用中断或者使用嵌入式控制器自身资源再次唤醒,并将测量结果读到嵌入式控制器中进行存储、处理、显示和传输。

MAX3180 全失压安培小时累计模式时序图如图5所示。

在图5中,嵌入式控制器和MAXQ3180的工

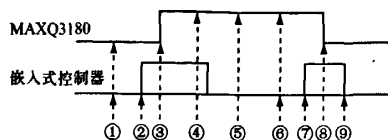


图5 MAXQ3180 全失压安培小时累计模式时序图

作时序如下:①嵌入式控制器和 MAXQ3180 休眠;②嵌入式控制器唤醒;③MAXQ3180 上电;④MAXQ3180 预热,只需几个  $\mu\text{s}$ ;⑤MAXQ3180 测量只需 0.5 ~ 1 个周期;⑥MAXQ3180 运行,嵌入式控制器休眠;⑦MAXQ3180 测量结束,发送 IRQ,将嵌入式控制器唤醒;⑧嵌入式控制器读取数据结束,MAXQ3180 回到休眠状态;⑨嵌入式控制器回到休眠状态。

在系统整个工作过程中,工作电流很小,而且工作时间很短,最终使得平均电流相对于传统方案大幅降低。这样,在同等电池容量和运行时间的要求下,MAXQ3180 可以使用更高的频率来进行间歇性的安培小时累计,当频率高到一定的程度,可以近似认为这样的累计是连续的。

零线电流检测使用内部的数字温度传感器,可对实时时钟和计量系统本身的温度漂移进行补偿。

## 6 结 语

本文分析了智能电表系统的体系结构,介绍了采用的硬件电路和软件流程等关键技术。在保证系统可靠性的基础上,充分利用了主从微控制器的主要特点,采用电力计量芯片,设计了系统的主体框架。以 MAXQ3180 计量芯片为例,采用 ATmega64L 和 STM32F107 ARM 嵌入式控制器为主机,介绍了智能电表的软硬件设计和降低功耗的设计方法,同时介绍了防窃电技术,为智能电表的开发提供了一个详细的案例,通过以太网接口可以很容易组成通信网络。

### 【参考文献】

- [1] 静恩波. 智能电网发展技术综述[J]. 低压电器, 2010(6): 14-18.
- [2] 侯鑫. AVR 单片机中断应用设计要点[J]. 电子报, 2008(11): 34-46.
- [3] 袁野. 电能计量领域的多功能低功耗设计[J]. 电子技术应用, 2008(11): 27-29.
- [4] ST Microelectronics Group of Companies. STM32F105 \_107. pdf [D]. Datasheet, 2009.
- [5] Max im Integrated Products, Inc. MAXQ3180. pdf [D]. Datasheet, 2009.
- [6] 徐爱钧. 智能化测量控制仪表原理与设计[M]. 北京航空航天大学出版社, 2003.

收稿日期: 2007-08-10

(上接第 25 页)

## 4 结 语

通过选取主要的谐波数据和功率数据进行分析,该低压测控装置在功能和要求上满足公路、桥梁、隧道应用的要求。

### 【参考文献】

- [1] 杨松科,何卫锋,陈文洁. DSP 在电力谐波测试中的

应用[J]. 电工技术杂志, 2002(9): 45-49.

- [2] 杨丽娟,张白桦,叶旭桢. 快速傅立叶变换 FFT 及其应用[J]. 光电工程, 2004(12): 35-403
- [3] 肖宛昂. 嵌入式系统中 FFT 算法研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2003(1): 55-59.
- [4] 陈怀忠. 基于单片机(AT89C52)无功补偿复合开关的研制[J]. 广西电力, 2006(5): 18-24.

收稿日期: 2010-03-09

您的需求 我们的追求

交流先进技术平台

传播电工信息先锋

作者: [静恩波](#), [JING Enbo](#)  
作者单位: [中国民航机场建设集团公司, 北京, 100101](#)  
刊名: [低压电器](#) [ISTIC](#) [PKU](#)  
英文刊名: [LOW VOLTAGE APPARATUS](#)  
年, 卷(期): 2011(3)  
被引用次数: 11次

## 参考文献(6条)

1. [静恩波](#) [智能电网发展技术综述](#)[期刊论文]-[低压电器](#) 2010(06)
2. [侯鑫](#) [AVR单片机中断应用设计要点](#) 2008(11)
3. [袁野](#) [电能计量领域的多功能低功耗设计](#)[期刊论文]-[电子技术应用](#) 2008(11)
4. [ST Microelectronics Group of Companies](#) [STM32F105\\_107.pdf](#) 2009
5. [Max im Integrated Products, Inc](#) [MAXQ3180.pdf](#) 2009
6. [徐爱钧](#) [智能化测量控制仪表原理与设计](#) 2003

## 本文读者也读过(10条)

1. [姚钢](#) [智能电网从智能电表起步](#)[期刊论文]-[电子设计技术](#)2010(4)
2. [静恩波](#), [JING En-bo](#) [智能电网AMI中的智能电表系统设计](#)[期刊论文]-[电测与仪表](#)2010, 47(Z1)
3. [任子真](#), [王洋](#), [李琳](#), [REN ZIZHEN](#), [WANG YANG](#), [LI LIN](#) [基于GPRS的智能电表的设计](#)[期刊论文]-[微计算机信息](#) 2007, 23(10)
4. [董力通](#), [周原冰](#), [李蒙](#), [DONG Li-tong](#), [ZHOU Yuan-bing](#), [LI Meng](#) [智能电网对智能电表的要求及产业发展建议](#)[期刊论文]-[能源技术经济](#)2010, 22(1)
5. [王斯特](#), [凌朝东](#) [基于MSP430的一级三相费控智能电表的设计](#)[期刊论文]-[福建电脑](#)2011, 27(1)
6. [郑欣](#), [ZHENG Xin](#) [基于AMI系统的智能电表的设计](#)[期刊论文]-[湖北电力](#)2011, 35(1)
7. [吴文忠](#), [WU Wen-zhong](#) [基于LonWorks技术的智能电表的研制](#)[期刊论文]-[电测与仪表](#)2011, 48(3)
8. [孙杰](#) [智能电表在智能电网中的应用分析](#)[期刊论文]-[中国新技术新产品](#)2010(21)
9. [陈晓龙](#), [裘友凤](#), [CHEN Xiao-long](#), [QIU You-feng](#) [基于MSP430F149单片机的智能远传三相电表设计](#)[期刊论文]-[制造业自动化](#)2011, 33(2)
10. [周军](#), [史兴才](#), [徐超](#), [ZHOU Jun](#), [SHI Xing-cai](#), [XU Chao](#) [基于ZigBee的多用户智能电表设计](#)[期刊论文]-[电测与仪表](#)2010, 47(1)

## 引证文献(11条)

1. [陈虹](#), [朱菲菲](#), [朱建](#), [朱平](#) [基于工业以太网的双向智能电表设计](#)[期刊论文]-[低压电器](#) 2012(1)
2. [彭宇](#), [朱青](#), [孙猛](#) [基于R5F2L38A的电动汽车直流电能表设计](#)[期刊论文]-[电子技术应用](#) 2012(5)
3. [唐文亮](#), [全惠敏](#), [夏清文](#) [基于71M6542F的高精度智能电表的设计](#)[期刊论文]-[电子技术应用](#) 2011(12)
4. [牟向阳](#), [吴国强](#), [陈新春](#), [侯彦](#), [郭飞](#) [基于智能电表通信电路的研究与设计](#)[期刊论文]-[现代科学仪器](#) 2013(5)
5. [朱向阳](#), [余小毛](#) [基于智能电网的电力设计工作研究](#)[期刊论文]-[机电信息](#) 2013(18)
6. [兰佳](#), [徐浩](#), [伍仪曙](#) [基于智能电网的电力设计工作研究](#)[期刊论文]-[电器工业](#) 2013(10)
7. [张建文](#), [杨艳](#), [申磊](#), [黄倩菁](#) [基于MSP430电能参数测量装置设计](#)[期刊论文]-[青岛大学学报\(工程技术版\)](#) 2013(3)
8. [陈东红](#) [以人为本, 智慧校园规划——学生公寓智能化规划研究](#)[期刊论文]-[安徽建筑](#) 2011(3)

9. [王静哲](#), [李秀玲](#) [高级计量体系\(AMI\)中的智能电能表设计](#)[期刊论文]-[现代电子技术](#) 2011(23)
10. [张平川](#), [侯丽敏](#) [基于 ARM 及 ATT7022的无线智能电表设计与实现](#)[期刊论文]-[信阳师范学院学报（自然科学版）](#) 2013(4)
11. [高强](#), [张保航](#), [谷海青](#) [用户端电能管理系统的研究现状与发展趋势](#)[期刊论文]-[电力系统保护与控制](#) 2012(7)

引用本文格式: [静恩波](#), [JING Enbo](#) [基于嵌入式系统的智能电表设计与研究](#)[期刊论文]-[低压电器](#) 2011(3)