

基于 SC1D 单芯片的超声水表系统研究与实现

邹方卫，童曦，宋财华

(江西三川水表股份有限公司 技术中心研发部, 江西 鹰潭 邮政编码 335000)

摘要: 本文基于 SC1D 芯片应用于超声水表系统进行了研究与实现。为实现超低成本、低功耗和高可靠性的要求，颠覆传统的 MCU+TDC 双芯片的超声水表架构，本文使用了 MCU 与 TDC 一体化的 SC1D 芯片作为全新的架构形式，对水表的流量测量、温度测量、抄表通信、计量计费以及其他水表必要功能进行了可行性研究实验；测试数据表明该芯片应用于水表系统完全能够达到国家标准的计量精度要求以及其他水表国家标准。该芯片的应用成功突破了传统超声水表的成本价格底线，同时保证了机械水表无法比拟的优越性，为企业赢得更大的利益创造了契机。

关键词: 超声水表；SC1D；SoC 单芯片；低成本

0 引言

上世纪九十年代开始，水表逐步从纯机械式开始朝着机械电子混合式的智能水表发展。特别是 IC 卡水表的发展将水表产业带入了智能化时代。然而这样的智能化还是无法满足现代水表的高性能低成本等要求。超声水表的出现带来了水表行业的技术革新。它成就了第一款全电子式水表带给水表材料用量的超大节约，具有重大的经济利益。

目前市场上广泛使用的超声水表都采用时差法进行流量测量，结合测量供水的温度通过 MCU 来累积用户实际用水量。这类型的水表都采用 MCU+TDC 的模块方案。MUC 普遍采用 TI 的 MSP430 系列、ARM 的 Cortex M0 以及 Cortex M3 的低功耗处理器系列等；这些处理器的代表有 Energy Micro 的 Tiny Gecko, NuvoTon 的 Nano 系列以及飞思卡尔的低功耗 M0 芯片等。TDC 超声波时间测量芯片则主要为 Acam 的 GP21、GP22 和艾萨半导体的 UTA6902。这些方案的最大特点为成本太高，并且一个水表模块中存在两颗体积较大的芯片也增加了线路板的体积造成水表模块成本进一步升高，加上线路板元件数量的增多给水表系统带来的稳定性与可靠性进一步下降。为解决这一突出问题，江西三川水表股份有限公司率先推出了 SC1D 的水表、热表、燃气表 SoC 单芯片解决方案，该方案创造性的使用 MUC+TDC 一体化芯片解决超声水表乃至超声波热量表、超声波燃气表的成本高、系统复杂以及稳定性差等技术特点与难点。成为超声波测量仪器与仪表行业解决方案的首选。

本文通过分析 SC1D 芯片的结构特点和水表系统的具体需求，研究了使用该芯片实现流量、温度准确性和精度等的可行性并进行了相关实验。详细的描述了 SC1D 芯片的结构特点、外围电路的配置和软件驱动运行的通用方法等。并且从表计制造成本上做了详细分析。实验结果表明，使用 SC1D 芯片可以以超低的成本价格生产出质量好、稳定性高的水表；通过计算统计结果表明使用 SC1D 芯片可以使线路板面积减少 30%以上，硬件模块成本降低至 30 几元同时 MIPS32 位机为超声波水表流量测量高级算法提供了很高平台，使得高级流量累计算法的应用突破了硬件资源的局限性从而成为可能。也为低成本超声波热量表和低成本超声波燃气表应用提供了很好的借鉴方法。

1 硬件部分

SC1D 芯片为江西三川水表股份有限公司 2011 年开始研发，2014 年开始投入市场的一款是超声水表、热表和气表测量专用 SoC 芯片。该芯片采用 MIPS 架构设计，集成超声波时间测量、超声波脉冲发生器、温度测量单元、CPU、串口、红外收发器、段式 LCD 控制器、电压检测单元、空管检测单元、超声波换能器断线检测等功能部件，配合完善的编程、仿真、调

试环境，大大简化超声波水表测量系统的软硬件设计。芯片关键特性有：最小脉冲间隔为 20ns，最多接收 4 个脉冲的时间测量范围 1 测量方法。支持双精度为 20ps，四精度为 10ps；最小脉冲间隔为 250ns，最多接收 3 个脉冲；每个脉冲可精确设定精准的时间窗口，精度达到 4ns 的时间。包含 2 路具有斩波稳定低噪声比较器的模拟输入部分。能够产生频率、相位和脉冲个数都可调的 127 个脉冲系列，且能提供两路超声波换能器输出的脉冲发生器。温度测量支持 17.5 位有效精度的温度测量（对铂电阻来说 0.0015℃分辨率），同时功耗超低。支持空管检测、换能器检测、电池电压测量以及掉电检测功能。MIPS 架构的处理器支持 32 位数据指令执行，具有三级流水线结构和顺序执行数据处理放回，包括 4KB 的指令和数据 SRAM，1KB 数据 SRAM 且支持待机状态存储。片上包括 64KB 程序存储 FLASH，每个页面包含 128 字节，指令区域具有加密功能，掉电能够自动保存关键数据。片上包含具有 4 个公共端、24 个 seg、1/3 偏压的段式液晶驱动器，最大可驱动 96 段液晶显示屏。具有 2 个 SPI 控制器，支持外部 FLASH 启动和 FLASH 低功耗模式。具有 2 个通用串口控制器，集成了 38KHz 载波发生器支持红外通信并且极性可配置。片上的 I²C 控制器支持主从模式，最高可进行 100Kbps 的通信。此外含有 26 路的通用 I/O 口，每路 I/O 口最大可输出 16mA 电流，且包括 1 路按键输入 I/O 口，按键输入支持休眠唤醒和硬件去抖电路。

该芯片按内部结构可以分为测量模块、处理器子系统、电源管理模块和显示模块 4 大部分组成，其结构如图 1 所示：

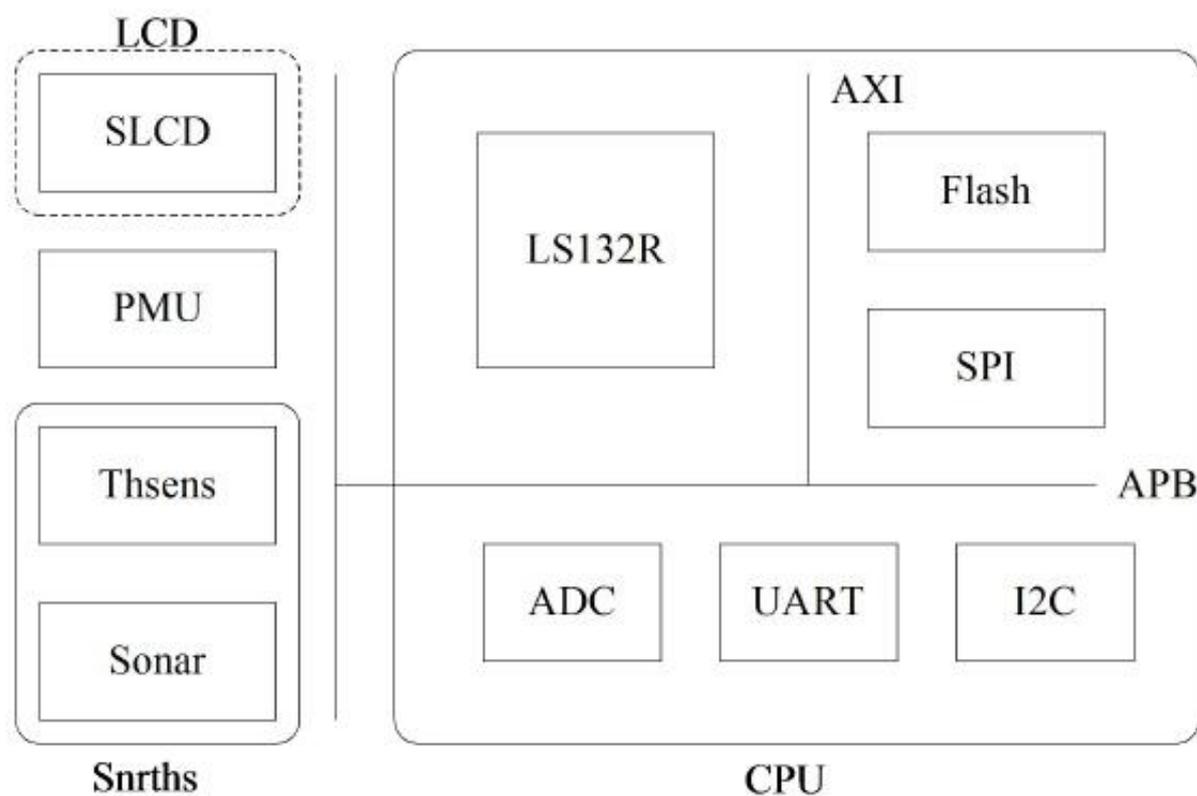


图 1 SC1D 芯片结构图

这些模块采用 AXI\APB 总线相连。处理器子系统是整个芯片的控制核心，它包含了处理器内核以及 FLASH、SPI、ADC、串口控制器以及 I²C 等外设模块，其电源可以单独关闭以节约系统功耗。测量模块包含脉冲发生器、模拟比较器和时间数字转换器等；该模块测量精度最高可以达到 10ps 测量精度；该模块也具有独立的电源控制模块用于非测量期间关闭电源来降低功耗。显示模块最大支持 96 段的 LCD 显示和独立的电源控制模块，芯片其他模块的电源可以由软件实现灵活的关断和开启以实现性能和功能的最优配置。

SC1D 芯片采用 80 管脚封装，其管脚分布如图 2 所示：

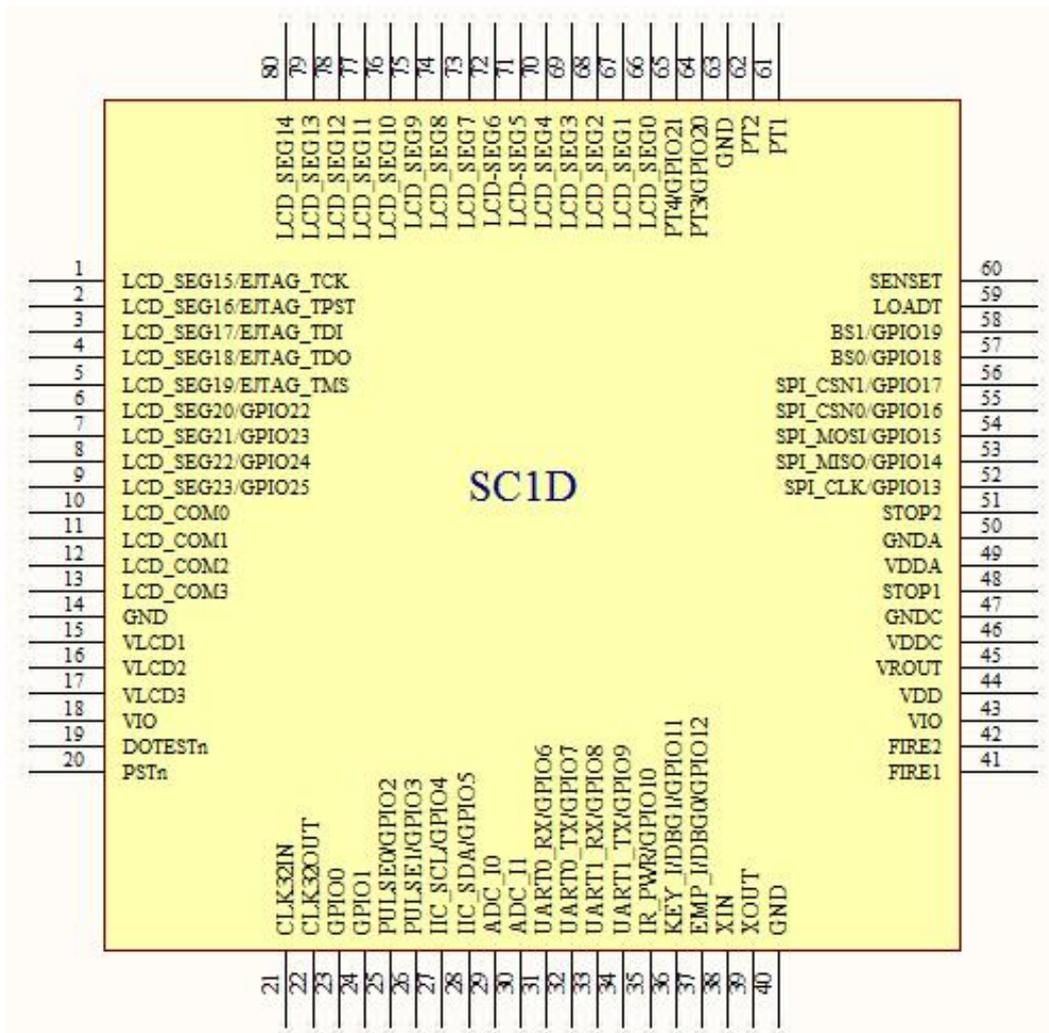


图 2 SC1D 管脚分布图

从管脚分布来看，该芯片采用了通用的管脚复用结构，这也是为了减少封装管脚的利用率和节约模块线路板布线密度。水表 LCD 显示部分、电源部分、按键、红外通信及 M-BUS 通信与现在通用的 MSP430 或 ARM + TDC 模式水表的电路类似，这里不做介绍。SC1D 单芯片水表的超声波流量测量部分和温度测量部分是整个水表模块的关键，它们的准确度直接影响到表的计量等级评定，所以在整个模块中显得比较关键。超声波流量测量外围电路如图 3 所示：

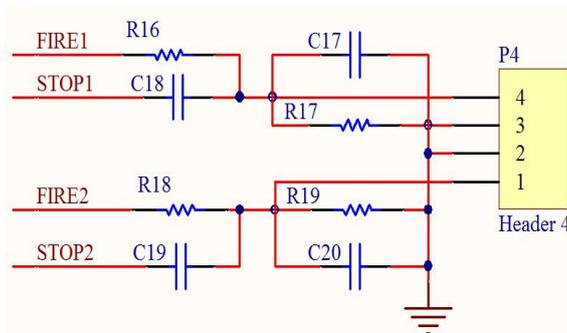


图 3 超声波流量测量部分外围电路图

图中的 P4 用于连接超声波换能器，不同厂家生产的换能器应选择不一样的阻容参数配型才能达到最佳测量效果。测量方法为先进行正程测量顺流时间然后逆程测量逆流时间然后根据正逆程时间差计算流体流速。流量的详细测量方法参见软件部分介绍。

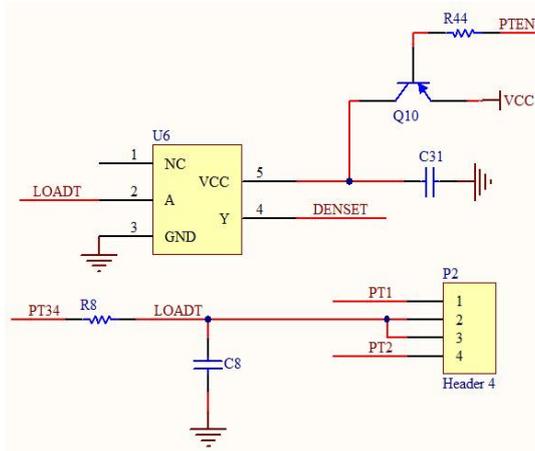


图 4 温度测量部分外围电路图

图 4 为温度测量的外围电路，P2 用于连接热电偶。不同温度在热电偶上表现为不同阻值，通过测量一定电荷存储在 C8 中然后在热电偶上放电时间的长短就能测量出热电偶实时阻值从而计算出当前温度。温度测量的详细方法参见软件部分温度测量介绍。SC1D 水表整体电路如图 5 所示。

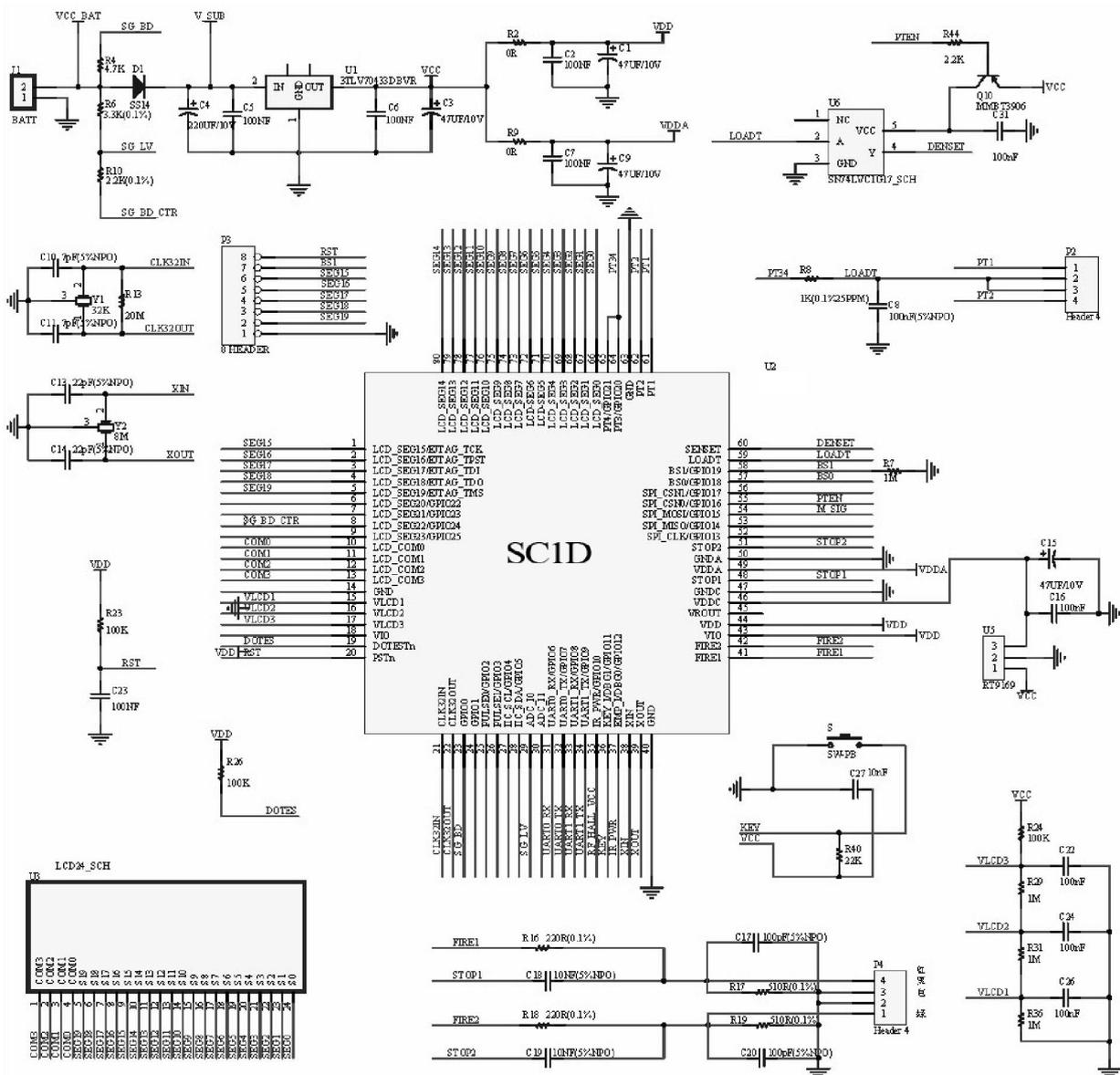


图 5 SC1D 水表系统整体电路图

从 SC1D 水表的整体电路图可以看出，该水表系统只使用了一颗集成了 MCU 和 TDC 的控制芯片。外围电路极其简洁，包含了液晶显示外围电路、电源供电电路、按键识别、超声波测量匹配电路和 MCU 外围基本电路等，实际应用中可以根据需要加入红外和远传通信电路等。使用该芯片后整个线路板模块成本降低到三十几元，为超声波水表制造企业赢得了非常大的竞争空间。

2 软件部分

一个完整的水表是由硬件系统和软件系统组成，设计的时候应该追求系统结构的最简化、软硬件资源应用的最优化以及可靠性和成本的最优化；同时满足测量模块的准确性和稳定性（见水表国标）和超低的功耗设计（电池供电 8~10 年使用寿命）。为了满足水表的各项功能和性能指标这里采用了分层的软件结构设计。层次结构如图 6 所示：

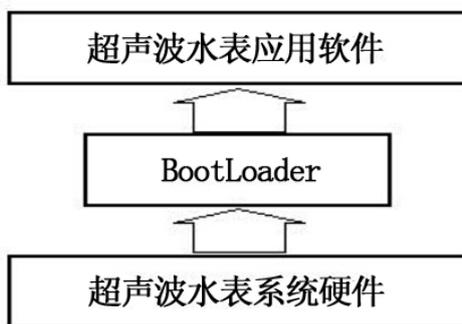


图 6 超声水表软件系统层次

2.1 BootLoader

BootLoader 是一个引导加载程序，是系统上电后运行的第一段代码；它主要用来初始化硬件设备、建立内存空间映射从而使得系统的软硬件处于合适的工作状态。SC1D 芯片内部配置的资源较少，所以初始化工作相对简单。同时考虑到用户编程的灵活了应尽可能的将更多的初始化工作放到 C 环境下执行，只保留最基本的工作放到 BootLoader。SC1D 芯片无论是系统重启还是系统休眠唤醒操作 CPU 都会从 0xBFC00000 取址执行，因此程序要区分重启和唤醒。根据上述特性将 BootLoader 功能定义为初始化 CPU 内核、判断系统是唤醒还是重启、初始化 C 环境（堆栈和全局变量初始化）和中断/异常处理。中断/异常处理过程中如果是 NMI 则代表系统在执行过程中发生了对非法地址的访问，这时候将执行 NMI 错误处理程序；如果是其他类型中断则跳转到通用异常入口 0xBFC00000 执行中断处理程序。图 7 为 BootLoader 地址空间分配。



图 7 BootLoader 地址空间分配图

SC1D 芯片处理器内核为 LS132R，兼容 MIPS32 架构。系统复位后 CPU 从 0xBFC00000 开始执行代码，所以程序的第一条指令必须放到 0xBFC00000；而中断则被当作例外来处理，中断程序的入口为 0xBFC0380，因此正常程序段不可以放到 0xBFC0380 位置。BootLoader 软件流程如图 8 所示。

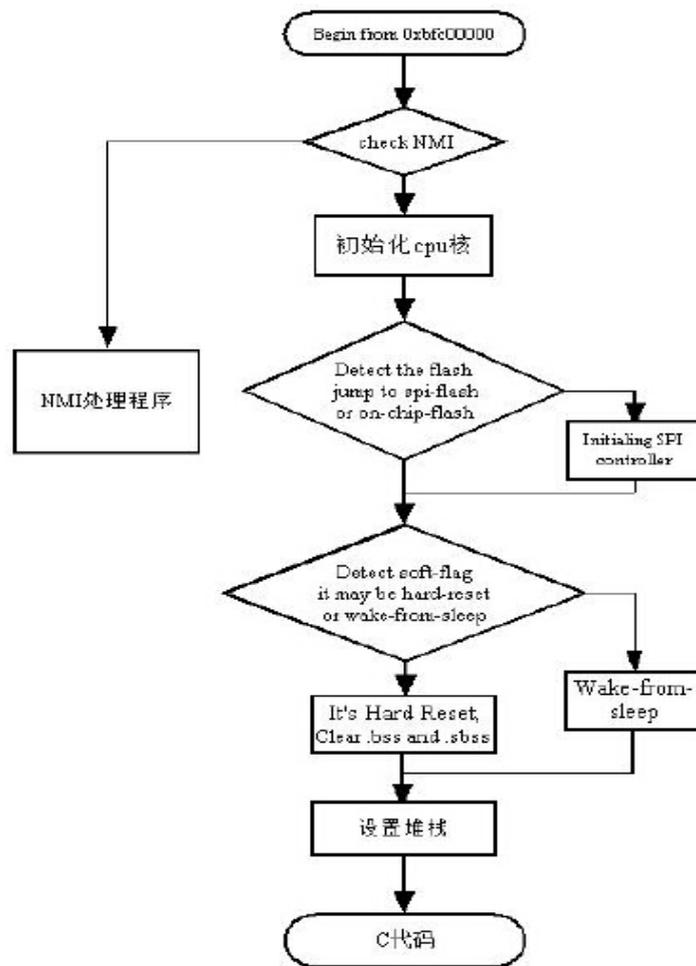


图 8 BootLoader 软件流程图

2.2 电源管理

SC1D 芯片结构如图 1 所示。LCD 显示模块的电源由 ChipCtrl.lcd_pd 位控制；该模块的电源控制位只能由软件进行控制，关断后必须重新配置相关寄存器才能正常工作。SNRTHS 模块的电源则由测量状态机自动控制。当有新的测量操作需要进行时电源将自动打开，测量结束测量结果被软件读取完成后电源将自动关断；该模块的配置寄存器不会因为电源关断而丢失，因此该模块的配置寄存器不需要反复配置。但同时应注意到的是当电源处于关闭状态时模块内的所有寄存器将无法访问，所有的读寄存器操作只会返回全 0 写操作会不忽略。将 ChipCtrl.sonar_pd 位控制写 0 可以强行将该模块电源打开，模块强行打开后需要 8 个时钟周期才能正常访问。

CPU 模块的只能由软件关断，并且只能通过 PMU 终端唤醒后自动打开电源。CPU 模块的关断由 Command.Sleep 控制，软件写 1 后进入关断状态；软件要保证在关断前所有的模块（包括 CPU 内核和相关外设）都已经完成任务，否则关断操作将强制关闭电源造成异常。当 PMU 有中断时，CPU 模块将被唤醒并自动打开电源。唤醒后的 CPU 模块所有内部寄存器都会复位成默认值，因此软件需要重新进行初始化操作。软件需要判断是系统复位还是待机唤醒，待机唤醒不需要重新初始化 PMU 相关寄存器。实现方法为使用 PMU 模块中的 ChipCtrl.soft_flag 寄存器存储状态信息从而判断究竟是复位还是唤醒，然后进行相关操作。CPU 在关断或者打开时还会控制外部 SPI Flash 进行相应的电源状态转换，如果系统不包含外部 SPI Flash 则应关闭此功能来加速 CPU 模块的电源状态转换以进一步降低功耗。

根据 CPU 模块的电源开关情况将芯片划分为运行和休眠两个状态。当系统正在执行任务时，CPU 模块电源打开，进行数据运算或者控制操作，此时芯片处于运行状态。当时同处理完所有当前任务后将处于一个等待状态，等待下一个为处理任务。这段时间 CPU 处于无效工作状态，在系统轻负载情况下大部分时间系统处于无效状态，这期间关闭 CPU 电源可以有效

降低芯片功耗。需要注意的是在系统进入休眠之前需要对芯片引脚进行配置防止漏电。芯片电源状态转换如图 9 所示。

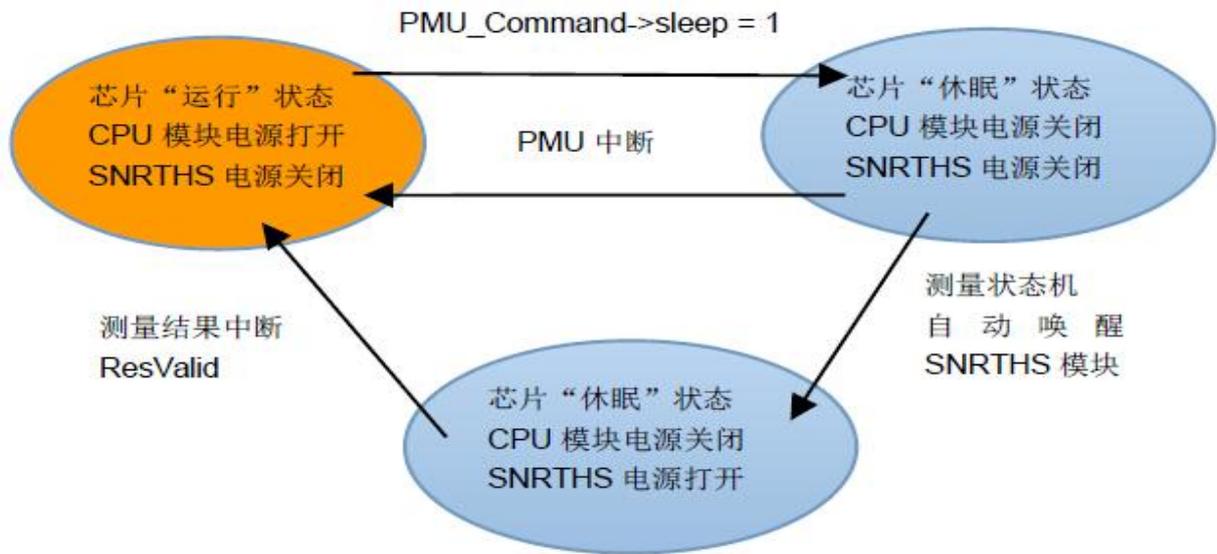


图 9 电源状态转换图

2.3 流量测量

SC1D 芯片模块主要由脉冲发生器、模拟比较器、通道控制逻辑和 TDC 构成。模块结构如图 10 所示。

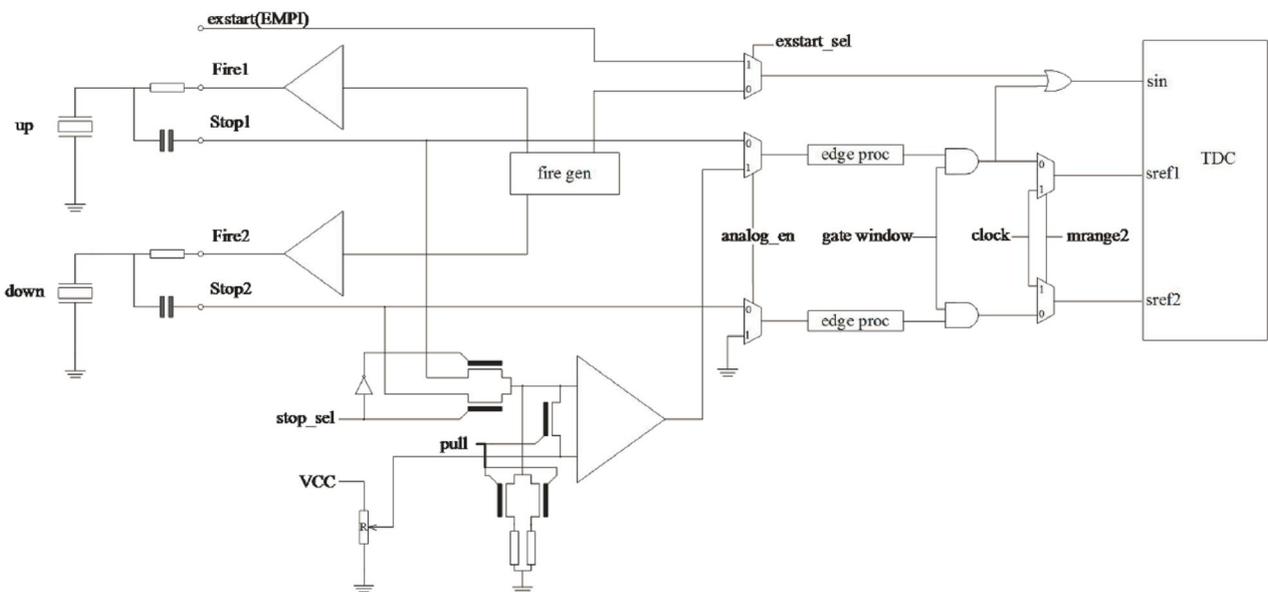


图 10 SC1D 测量模块结构图

流量测量即时差测量的主要步骤依次为：测量事件触发，ClkHS 开启；等待 StartClkHS 指定的时间后时差测量相关模块开启；脉冲发生器产生超声波驱动脉冲并从所选的 FIRE 通道输出，用示波器观察到的超时波发送波形如图 10 所示；如果打开了回波计数则在指定的时间段内计数与 FIRE 同侧的 STOP 通道的上升沿；回波计数后，所选 STOP 通道被选通，经过窗口使能后送到 TDC 进行测量。时差测量过程如图 11 所示。

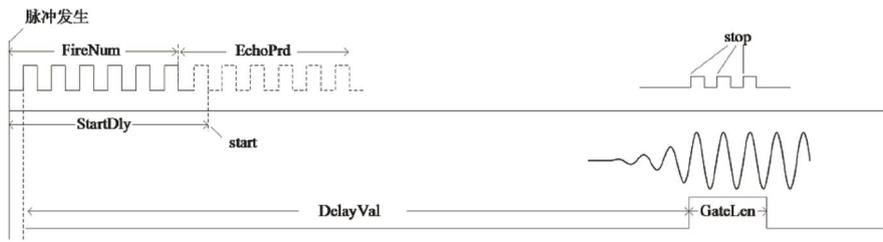


图 11 时差测量过程

图中 FireNum 为发送的超声波脉冲个数；EchoPrd 为回波测量的时间长度；StartDky 指脉冲发生器开始工作到产生 start 信号的时间间隔；DelayVal 指脉冲信号产生到 stop 通道采样窗口打开的时间间隔，stop 信号指在打开的采样窗口中对模拟信号进行采样后得到的数字信号。

为了方便第一个回波的定位，SC1D 芯片实现了首波模式。其测量过程与普通模式存在的主要差异包括窗口 1 用于定位首波，此时比较器的偏移与普通模式相同；首波发现后，窗口 1 结束，比较器偏移归零；窗口 2、3 在检测到首波 的下降沿后，参考时钟一个下降沿后的上升沿开始计数，TDC 测量在窗口使能区间的 STOP 信号。首波模式的时差测量如图 12 所示。

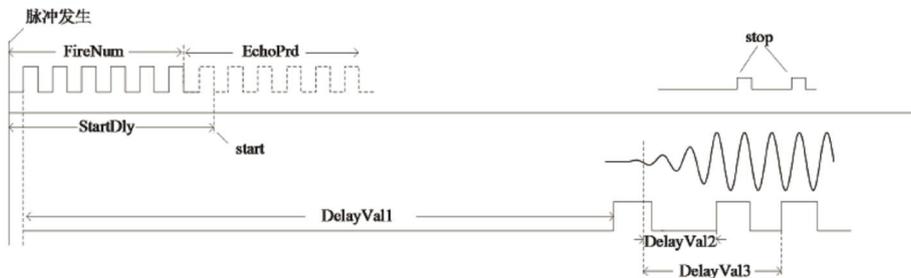


图 12 首波模式的时差测量过程

流量测量模块在工作过程中无需软件干预。软件只需要对结果寄存器的值进行处理即可得到精准测量的时间间隔软件处理流程如图 13 所示。

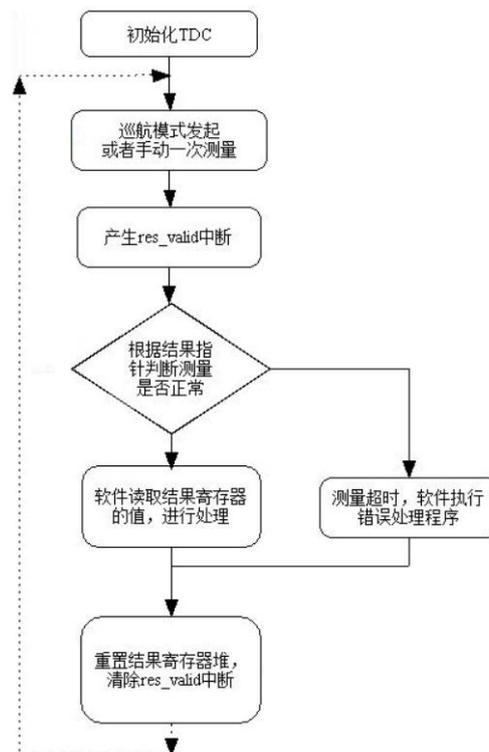


图 13 时间测量软件处理流程

2.4 温度测量

温度测量原理与通用的 GP21/UTA6902 测温原理一致，都是通过测量指定电容在充电到指定电压后经过热电偶放电的放电时间来计算对应的温度值。测量过程中为了得到精准的温度值都会使用一个温度系数稳定的参考电阻来测量温度自动校准数据用于修正热电偶测得的温度数据。温度测量包含了若干个充放电周期。每个周期由充电、放电两部分组成。温度测量电容上的充放电过程如图 14 所示。

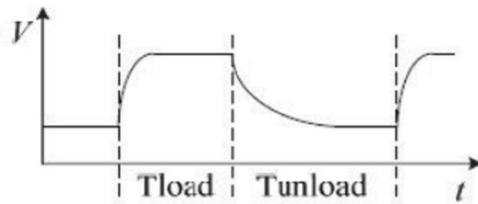


图 14 温度测量电容充放电过程

当执行一个温度检测任务时电路要经过预热处理，即经过指定次数的电容充放电操作。电容充放电依次为 PT1、PT2、PT3、PT4。其测量过程如下：测量前，LOADT 引脚会设置成高电平输出，会给电容充电，这时 SENSET 引脚应为高阻状态，同时四个 PT 引脚也为高阻状态；开始测量后，LOADT 引脚置成高阻状态，SENSET 引脚置成输入，PT1 引脚设置成低电平，其他三个 PT 引脚置成高阻状态，电容会对 PT1 引脚放电，完成一次测量，得到放电时间 T1；同理依次开启 PT2~PT4 进行放电操作，同时其他引脚都设置为高阻态，这样就能得到相应放电时间 T2~T4。经过相关运算转换和修正算法后就可以依次得到不同传感器上的精准温度。

2.5 实验数据

实验过程中采用示波器分别捕捉到的超声波流量测量的发波信号如图 15 所示。前半部分为芯片驱动换能器电压波形图，后半部分为换能器停止电压激励后的能量残留振荡产生的电压信号。

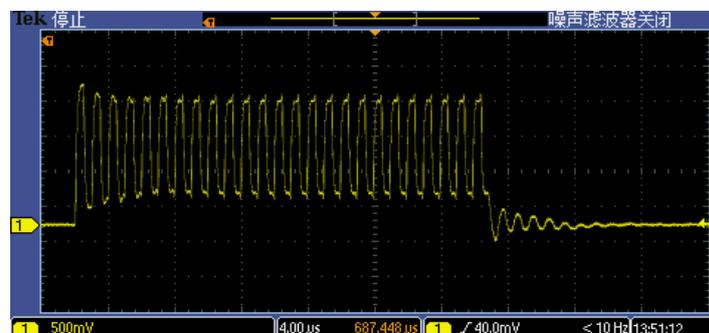


图 15 超声波发射波形图

超声波经过换能器发出后传播后到达接收换能器。在接收端观察接收到的换能器电压信号如图 16 所示。

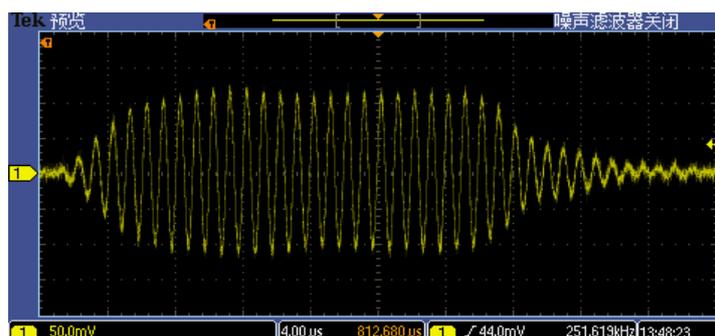


图 16 超声波接收波形图

模块获取顺流和逆流的时间差数据后即可根据特定算法计算出当前流体的流速。

SC1D芯片流量测试数据											
表号	流量 L/H	示值误差%									
		9-10-11-12		重复性	12-11-10-9		重复性	9-10-11-12		重复性	总重复性
		第1遍	第2遍		第1遍	第2遍		第1遍	第2遍		
1	5000	1	0.8	0.2	0.7	0.7	0	0.6	0.8	0.2	0.4
	4000	0.9	0.8	0.1	0.8	0.5	0.3	0.6	0.5	0.1	0.4
	2500	1.1	1	0.1	1.3	0.9	0.4	0.8	0.7	0.1	0.6
	250	1	0.9	0.1	0.9	0.7	0.2	0.8	0.8	0	0.3
	50	0.8	1	0.2	0.6	0.6	0	0.5	0.3	0.2	0.7
	32	2	1.7	0.3	1.8	1.9	0.1	1.7	1.6	0.1	0.4
	10	2.5	2.7	0.2	3.1	2.9	0.2	2.8	3.6	0.8	1.1
2	5000	1.1	1.1	0	0.7	0.9	0.2	0.8	1.1	0.3	0.4
	4000	1	0.8	0.2	1.1	1.1	0	0.8	0.9	0.1	0.3
	2500	0.8	0.8	0	0.6	0.8	0.2	0.8	0.7	0.1	0.2
	250	0.8	0.9	0.1	0.8	0.6	0.2	0.8	0.9	0.1	0.3
	50	0	0.2	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0	0.4
	32	-0.3	0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.5
	10	-1.1	-1.2	0.1	-0.3	-0.4	0.1	-0.5	-0.3	0.2	0.9
3	5000	1.5	1.2	0.3	1.4	1.2	0.2	1.1	1.6	0.5	0.5
	4000	1.1	1	0.1	1.5	1.7	0.2	1.2	1.1	0.1	0.7
	2500	1.4	1.3	0.1	1.2	1.1	0.1	1.4	1.1	0.3	0.3
	250	0.7	0.7	0	0.8	0.8	0	0.9	0.9	0	0.2
	50	-1.5	-0.9	0.6	-0.9	-1.1	0.2	-0.7	-0.9	0.2	0.8
	32	-2	-2.5	0.5	-1.9	-2.3	0.4	-2.6	-2.2	0.4	0.7
	10	-3	-3.3	0.3	-3.3	-3.1	0.2	-3.5	-3.4	0.1	0.5
4	5000	0.8	0.7	0.1	0.2	0.6	0.4	0.8	0.1	0.7	0.7
	4000	0.5	0.3	0.2	0.1	0.4	0.3	0.2	0.3	0.1	0.4
	2500	1.2	0.7	0.5	0.9	1.4	0.5	1.4	0.7	0.7	0.7
	250	2.6	2.6	0	2.3	2.4	0.1	1.8	2	0.2	0.8
	50	4.1	3.7	0.4	4.1	4.4	0.3	4.1	4.2	0.1	0.7
	32	4.5	4.1	0.4	4.4	4.5	0.1	4.2	4	0.2	0.5
	10	5.6	5.8	0.2	6.1	5.9	0.2	5.7	5.9	0.2	0.5
5	5000	-1.1	-1	0.1	-0.6	-0.8	0.2	-0.7	-0.6	0.1	0.5
	4000	-1.5	-1.4	0.1	-1.6	-2	0.4	-1.4	-1.3	0.1	0.7
	2500	-2	-2	0	-1.8	-1.7	0.1	-1.6	-1.9	0.3	0.4
	250	-2.5	-2.3	0.2	-1.9	-2	0.1	-2.6	-2.5	0.1	0.7
	50	-4.5	-4.3	0.2	-3.8	-3.9	0.1	-3.7	-3.5	0.2	1
	32	-5	-4.6	0.4	-4.3	-4.1	0.2	-4.2	-4.5	0.3	0.9
	10	-5.6	-6.5	0.9	-6.4	-6.8	0.4	-6.7	-6.4	0.3	1.2
6	5000	0.8	0.9	0.1	0.7	0.6	0.1	0.7	0.5	0.2	0.4
	4000	0.5	0.6	0.1	0.7	0.8	0.1	0.4	0.8	0.4	0.4
	2500	1.8	2	0.2	1.6	1.8	0.2	1.8	1.7	0.1	0.4
	250	3.1	3.2	0.1	2.8	3.1	0.3	2.5	2.9	0.4	0.7
	50	4.6	5	0.4	5.3	4.6	0.7	4.8	4.9	0.1	0.7
	32	5	4.9	0.1	5.3	5.2	0.1	5.1	5.5	0.4	0.6
	10	6.5	6.3	0.2	6.6	6	0.6	6.4	6.6	0.2	0.6

表1 流量实验数据

表1 所列为5个模块在水表校验检定装置上得到的流量测试数据。从数据上可以看出流量重复性基本能够满足水表国标流量部分准确性要求。

SC1D 芯片温度测试数据		
标准温度 (°C)	PT1 温度 (°C)	PT2 温度 (°C)
50	49.99	50
10	10.04	10.04
20	20.05	20.04
30	30.04	30.03
40	40.03	40.03
60	60.01	60.01
70	70.01	70.01
80	79.97	79.98
90	89.97	89.98

表 2 温度实验数据

表 2 所列数据为温度测量对比数据，从数据上分析可以得出在不同的标准温度下 SC1D 芯片测得的温度实际值基本标准温度一致。通过实验数据表明 SC1D 芯片从流量和温度这两方面来说都完全能够满足水表应用要求。将流量数据与水数据综合即可以计算出用户实际使用水量。

3 结束语

本文通过研究 SC1D 芯片的硬件特性、软件操作流程方法及相关实验读出相应数据，表明使用该芯片制作水表在温度、流量及水计量方面能够完全符合国标精度要求。同时该芯片为唯一一款超声水表单芯片模块解决方案，在保证性能的同时能够大幅度的降低水表企业的制造成本，为企业创造更大的利润空间，同时也为全数字化水表创造硬件条件。

收稿日期：2013-08-05；

作者简介：邹方卫(1985-),男(汉族),江西省宜春市铜鼓县人,硕士研究生,主要研究领域为物联网应用技术;童曦(1987-),男(汉族),江西省抚州市金溪县人,硕士研究生,主要研究领域为嵌入式系统应用技术;宋财华(1970-),男,江西鹰潭人,MBA,高级工程师,主要研究领域为光机电一体化.

联系电话：18507058028

E-mail: 275658467@qq.com