

基于 MSP430FR6047 的一款超声波水表

陈敏杰¹, 李建英¹, 谭章生¹, 梅玲玲², 匡伟¹, 彭家美¹

¹湖南文理学院, 湖南省 常德市

²湖南文理学院芙蓉学院, 湖南省 常德市

摘 要

本文采用 TI 专用液体测量芯片 MSP430FR6047 为核心, 设计了基于 ToF(Time of Flight)测量原理的一款超声波水表, 完成了液体测量系统中水表部分的硬件和软件的设计, 制作了实物, 并完成了测试。在水流工况下, 通过检测超声波声束在水中上下行时速度变化引起的 ToF 差值, 对其进行分析处理, 得到水流速度, 进而计算水流量, 这些信息被存储在内部 FRAM 中并显示在定制液晶屏上。它具有优异的小流量检测能力, 解决了许多传统机械水表存在的问题, 适用于水资源的节约和合理利用。与机械式水表相比, 有精度更高, 可靠性更好, 使用寿命更长, 无任何活动部件等特点。

关键词

超声波水表, MSP430FR6047, 时差法

An ultrasonic water meter based on MSP430FR6047

Chen minjie¹, Li jianying¹, Tan zhangsheng¹, Mei lingling², Kuang wei¹, Peng jiamei¹

¹ Hunan University of Arts and Sciences, Chang De, Hunan Province, China

²Furong College, Hunan University of Arts and Sciences, Chang De, Hunan Province, China

Abstract

This paper uses TI special liquid measurement chip MSP430FR6047 as the core, designs an ultrasonic water meter based on the principle of time difference method (ToF) measurement, completes the design of the hardware and software of the water meter part of the liquid measurement system, makes the real object, and completes the test. In water flow condition, ToF difference caused by velocity change of ultrasonic beam moving up and down in water is analyzed and processed to obtain water flow velocity and then calculate water flow. These information is stored in internal FRAM and displayed on a customized LCD screen. It has excellent small-flow detection ability, solves many problems existing in traditional mechanical water meters, and is suitable for saving and rational utilization of water resources. Compared with mechanical water meter, it has the characteristics of high precision, good reliability, wide range ratio, long service life, no moving parts, arbitrary Angle installation and so on.

Keywords

Ultrasonic water meter, MSP430FR6047, ToF

1.引言

中国的水资源匮乏，且人均淡水资源仅占世界平均水平的 1/4，位于全球人均水资源匮乏的国家前列。伴随着国家经济的发展，我国各行各业对水资源的需求量也越来越大。因此对水资源的精确计量也越来越重要，对流量计的精确度和可靠性的要求越加严格。随着新型测量传感技术的进步，超声波水表作为一种通过检测超声波束在水中顺流逆流传播时因速度发生变化而产生的时差，分析处理得出水的流速从而进一步计算出水的流量的一种新式水表，因其小流量检测能力，更加适合水资源的节约和合理利用，具有广阔的市场和使用前景。从 80 年代开始国内外专家就基于超声波开发了流量计，但测量精度不高；本世纪初，出现了将小波变换原理应用在超声波信号滤波上，产品性能得到了大大提高；2018 年初步出现了高准确度确定超声波流量计中超声波飞行时间的 ToF 算法，使得超声波计量精度达到了工业计量的要求，推动了超声波水表的快速发展。

本文采用 TI 专用液体测量芯片 MSP430FR6047，基于时差法(ToF)测量原理，采用低功耗设计技术，研制了一款超声波水表，解决了传统机械水表存在的问题，适用于水资源的节约和合理利用。

2. 系统总体设计方案

超声波水表系统总体设计方案框图如图 1 所示。

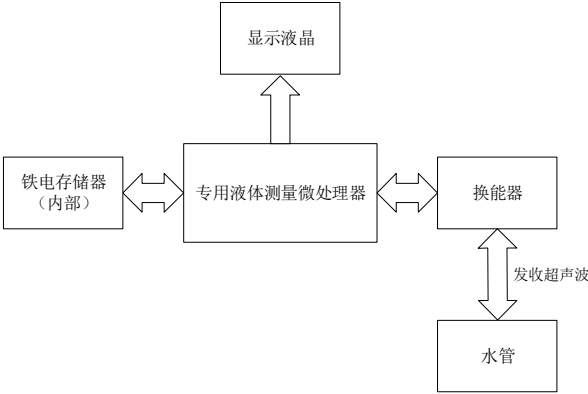


图 1. 系统总体设计方案图

该系统利用 TI 液体专用流量计芯片 MSP430FR6047，通过时差法计量原理收发超声波获取水体流速进而将信息显示在定制的液晶上供用户读取。该控制器采用集成式低功耗加速器，内部集成了模拟前端能够直接与标准超声波传感器连接，需要的外部组件少，可实现基于高速 ADC 的信号采集以及后续优化数字信号处理，可在多种流速条件下提供高精度，为电池供电型计量应用提供了一款理想的超低功耗、高精度计量解决方案。

该超声波水表的系统状态运行模型图如图 2 所示。

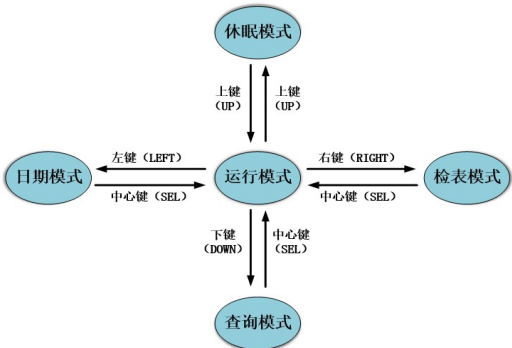


图 2. 系统运行状态模型图

该超声波水表具有正常运行模式、检表模式、日期模式和查询模式四种。在正常运行模式下，液晶屏显示当前的瞬时流速、累计流量（两位小数）和电量，按下 UP 键唤醒液晶显示屏，按下 SEL 键即可进入运行模式。在检表模式下，液晶屏显示当前的瞬时流速、进入检表后积累的流量（五位小数）和电量。在保证液晶屏亮起的情况下（如果液晶屏处于熄灭状态，可按下 UP 键进行唤醒）按下 SEL 键进入运行模式（如果正处于运行模式，可忽略此步骤），按下 RIGHT 键即可进入检表模式。在日期模式下，液晶屏显示年月日时分秒，可通过按键校准时间并显示电量。在保证液晶屏亮起的情况下，按下 SEL 键进入运行模式，按下 LEFT 键即可进入日期模式，按下 DOWN 键可选择所要修改参数，然后按下 LEFT 键可减小此参数的值，按下 RIGHT 键可加大此参数的值。查询模式下，液晶屏显示当前月份的用水量，可以通过按键查询上月用水量，并显示电量。

3. 超声波流量计测量原理

当管道中有水流时，首先对超声波换能器进行激励，使超声波信号沿水流的前后方向在管道中传播；然后进入信号处理阶段，通过计算超声信号的正反向传播时间得到 ToF 差，如图 3 所示。图中在换能器下方的横向管为水管；橘黄色柱子为超声波反射柱；图中 c 为声音在水中传播的速度； l 为两根反射柱中心的间隔距离，也即是超声波横向通过的距离； h 为超声波从换能器口发射出到反射柱中心的距离； d 为水管截面圆直径。

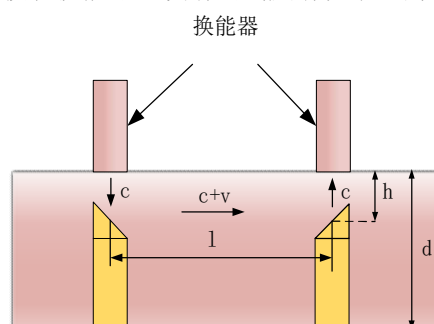


图 3. 超声流量法原理图

当左端换能器发出超声波经过两次反射后被右端换能器接收（顺流），这其中所用的时间 t_{l-r} ：

$$t_{l-r} = \frac{2h}{c} + \frac{l}{c+v}$$

同样当右端换能器发出超声波经过两次反射后被左端换能器接收（逆流），这其中所用的时间 t_{r-l} ：

$$t_{r-l} = \frac{2h}{c} + \frac{l}{c-v}$$

两次反方向发送的超声波所经过的时间的时间差为：

$$\Delta t = t_{r-l} - t_{l-r} = \frac{2lv}{c^2 - v^2} \approx \frac{2lv}{c^2}$$

故水流速度可表示为：

$$v = \frac{c^2 \Delta t}{2l}$$

水流量可表示为：

$$q = \frac{\pi d^2}{4} \int_0^t \frac{c^2 \Delta t}{2l} dt$$

因此，ToF 差的求取对水流量的测量至关重要。本文使用的芯片在时间差的测量上能精确到皮秒级别。

4. 系统硬件设计

4.1 液晶显示布局

液晶屏能够显示五种运行模式，分别可以显示电量、温度、日期时间以及水流量和水流速。



图 4. 液晶显示布局图

4.2 电源模块设计

采用 TPS78001DRVR 低压差、低功耗电源转换芯片构成供电电源电路，将输入电压转换成系统可接收的电压范围。

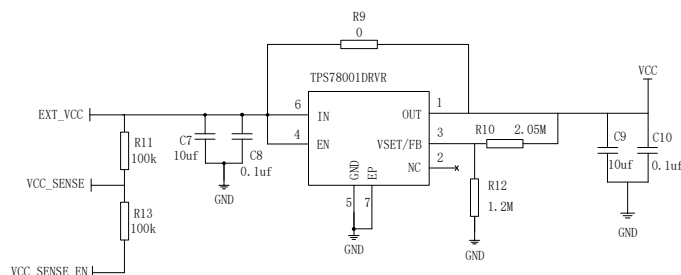


图 5. 电源模块电路图

5. 系统软件设计

系统首先读 FRAM 中的数据，如果 FRAM 中已经有数据则把 FRAM 中的数据更新显示到液晶上，然后将相关的值更新到相关变量上，随后进行测量。测量完相关指标后，若发现前 20s 内唤醒按键没有按下过，断定此时系统处于低功耗模式，数据不更新到显示屏上，显示屏也不会亮起。具体如图 6 系统软件流程图所示。

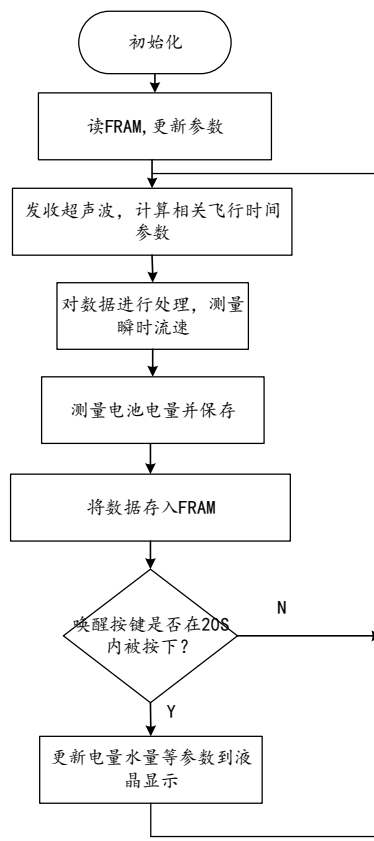
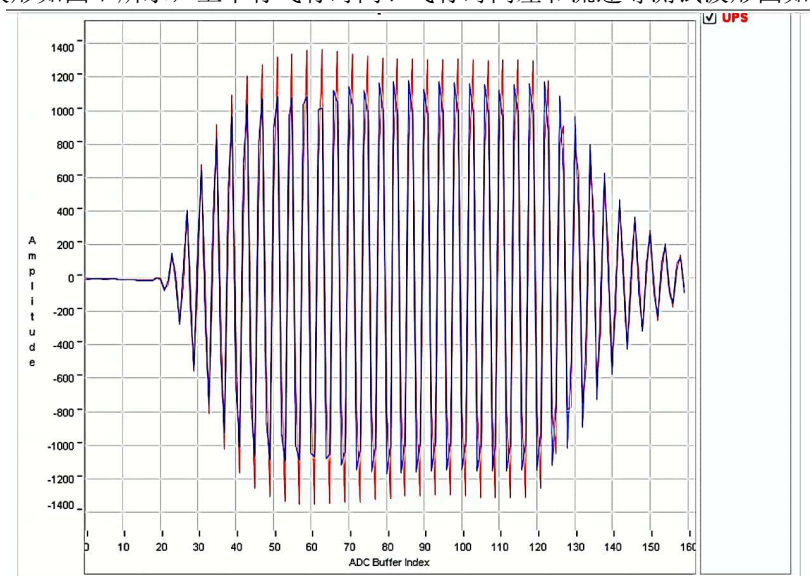


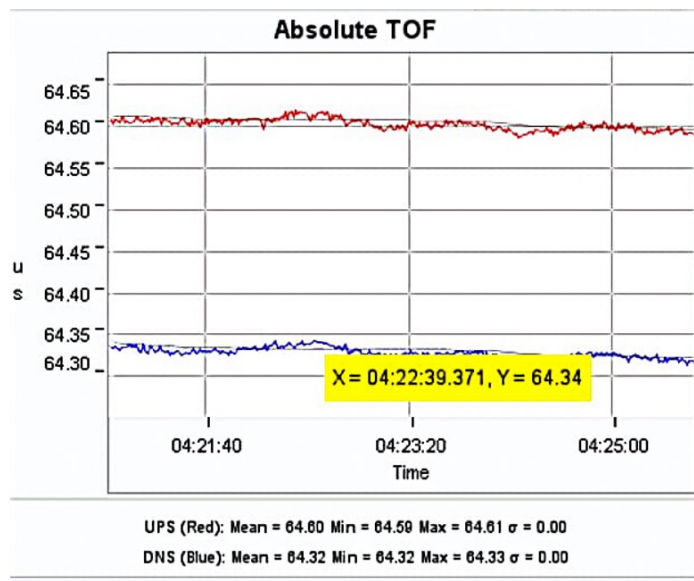
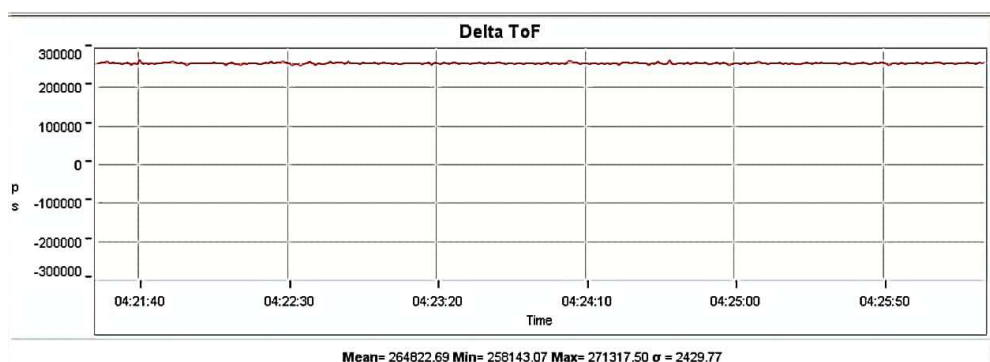
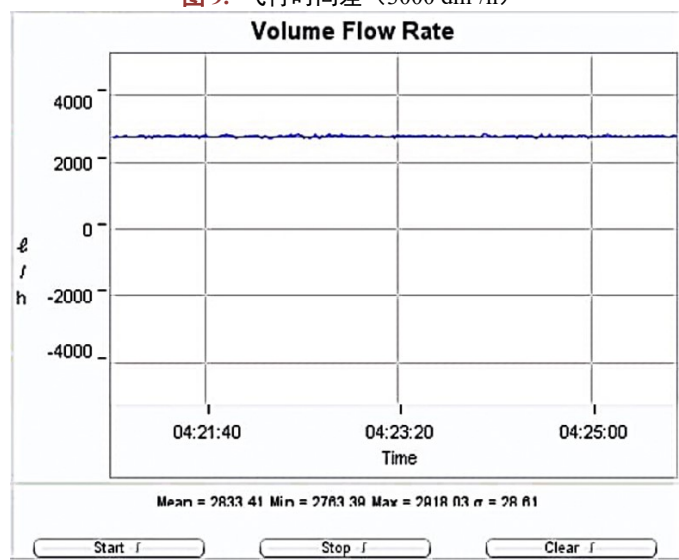
图 6. 系统控制流程图

6 系统测试

6.1 系统测试中的相关波形

利用上位机对超声波水表的参数进行更新配置, 两路超声波进行收发, 可得超声波水表在实际测量中包含插值的代表性捕获波形如图 7 所示, 上下行飞行时间、飞行时间差和流速等测试波形图如图 8、9、和 10 所示。

图 7. 捕获的超声波波形 (3000 dm³/h)

图 8. 上下行飞行时间 (3000 dm³/h)图 9. 飞行时间差 (3000 dm³/h)图 10. 流速 (3000dm³/h)

6.2 系统测试数据

制作并搭建了基于 MSP430FR6047 的水表样机测试系统,按照超声波水表测量标准进行测量,一号系统测试图、系统测试上位机图和测试样机图如图 11、12 和 13 所示。



图 11. 一号系统测试图

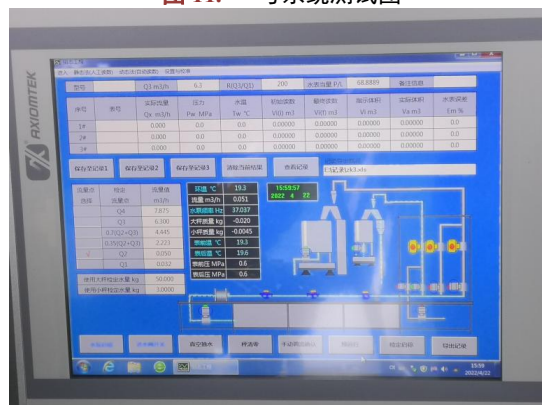


图 12. 系统测试上位机图

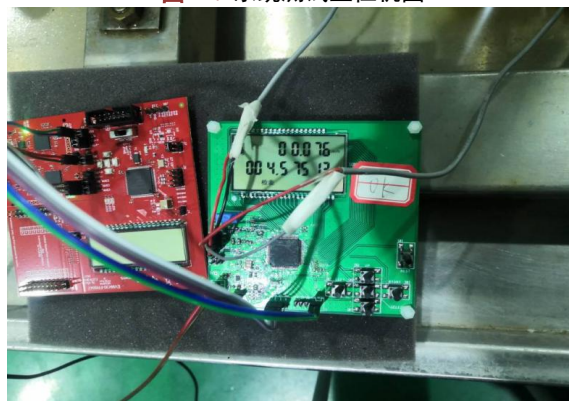


图 13. 测试样机图

通过对样机在各种环境下进行多次测试,其中测试超声波水表量程比为 R200 (Q_3/Q_1),标准测试点取值分别为 $Q_3=6300 \text{ dm}^3/\text{h}$, $Q_1=Q_3/R=31.5 \text{ dm}^3/\text{h}$, $Q_2=50 \text{ dm}^3/\text{h}$, $0.7(Q_2+Q_3)=4445 \text{ dm}^3/\text{h}$, $0.35(Q_2+Q_3)=2223 \text{ dm}^3/\text{h}$, $Q_4=7875 \text{ dm}^3/\text{h}$,根据标准测试点的范围选点测量,确保涵盖所有标准点,得到实际测量数据如表 1 所示。测试精度满足准确度等级 2 级及以上,符合 CJ/T 434-2013《超声波水表》的要求: $Q_1 \sim Q_2$ (不包括 Q_2)的低区: $\pm 5.0\%$, Q_2 (包括 Q_2) $\sim Q_4$ 的高区: $\pm 2.0\%$ 。

表 1. 流量数据测试结果

测试范围	测试流量 (dm ³)	实际流量 (dm ³)	实际流速 (dm ³ /h)	测量误差 (%)	测试温度 (°C)
Q1	5.13	5.03	31	2.00	21.85
Q1~Q2	5.15	5.06	40	1.77	21.37
Q2	10.13	10.02	50	1.10	21.65
Q2~Q4	102.25	101.44	447	0.79	21.24
0.35(Q2+Q3)	100.68	100.84	2218	-0.15	21.25
0.7(Q2+Q3)	100.31	100.20	4451	0.11	21.58
Q3	101.89	101.68	6414	0.20	21.73
Q4	101.73	101.55	7812	0.17	21.67

7 结论

论文针对传统机械水表的缺点,基于时差法(ToF)测量原理,应用了 TI 专用水体流量计芯片 MSP430FR6047 设计并制作了一款超低功耗的超声波水表,实现了更加精确的水体流速及流量测量,具有测量稳定性好,运行功耗低,掉电不丢失数据等优点,测试结果表明:Q1~Q2 的低区测量误差低于 $\pm 5.0\%$;Q2~Q4 的高区测量误差低于 $\pm 2.0\%$,符合 CJ/T 434-2013《超声波水表》的要求,测试精度满足准确度等级 2 级及以上。

参考文献

- [1] 姚灵.水表产品及相关技术的演进与发展[J].仪表技数术,2021(04):1-5.
- [2] 李富维.结合超声波水表远程监控系统的应用初探[J].科学之友,2011(07):25-26+29.
- [3] GB/T 778.1-2018. 饮用冷水水表和热水水表 第 1 部分: 计量要求和技术要求[S]. 2018
- [4] 胡海霞. 基于 TDC-GP22 的超声波流量计量模块设计与开发[D].浙江工业大学,2020.
- [5] 王贤妮,宋财华.超声波流量计的应用与前景[J].工业计量,2015,25(06):34-37
- [6] 于群,戴敏达,余书慧.基于二维双线性插值的流量计量温度补偿算法研究[J].自动化仪表,2020,41(11):28-32.
- [7] 王磊阳,陈建峰,刘明祥,张凯.一种高精度时差法超声波水表的设计与实现[J].传感技术学报,2019,32(08):1175-1181+1193.
- [8] 姚灵,王让定,左富强,等.超声水表流量测量特性分析及校准方法[J].上海计量测试,2012,39 (3): 2-6.
- [9] Yao Shuang,Yang Mingyue,Zhang Pengfei,Zhang Kai,Fang Jiong,Huang Jiayu,Chen Jianfeng,Zhao Yao. A Small Diameter Ultrasonic Water Meter With Self-Diagnosis Function and Self-Adaptive Technology[J]. IEEE ACCESS,2021,9: