

基于 STM32L152 的低功耗超声波热量表的设计

刘振凯¹ 姚骏¹ 张露露¹ 金裕坚² 楼承云²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072; 2. 浙江迪元仪表有限公司 义乌 320018)

摘要: 针对目前市场上的超声波热量表存在精度低、功耗高和运算时间长的问题,设计了一种基于 STM32L152 和 TDC-GP22 的低功耗超声波热量表,利用时差法超声波流量测量原理和电容充放电原理实现了流量、温度和热量的测量。设计的热量表包括了流量测量、温度测量、通信模块和人机交互模块,详细介绍了热量表的硬件电路设计和软件设计。最后的实验结果表明,流量测量误差在 1% 以内,并且在 19 000 mAh 的电池供电情况下,热量表可以连续工作 9 年,使超声波热量表具备了高精度、低功耗等优点,具有良好的应用前景。

关键词: 超声波热量表; STM32L152; TDC-GP22; 低功耗

中图分类号: TP216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Development of ultrasonic heat meter with low power consumption based on STM32L152

Liu Zhenkai¹ Yao Jun¹ Zhang Lulu¹ Jin Yujian² Lou Chengyun²

(1. School of Mechatronics and Automation, Shanghai University, Shanghai, China;

2. Zhejiang Diyuan Instrument Co. Ltd, Zhejiang, China)

Abstract: Some problems that low-precision, high power consumption and long operation time are still existed in ultrasonic heat meter on the current market. So the ultrasonic heat meter based on STM32L152 and TDC-GP22 is developed. Flow, temperature and heat are measured by ultrasonic time-difference method for flow measurement and capacitor's charge-discharge principle for temperature measurement. The designed heat meter includes flow measurement, temperature measurement, communication modules and interactive modules. Hardware circuit design and software design of the heat meter are described in detail in this paper. The experiment results show that the flow-measurement precision error is within 1% and it can work 9 years consistently with one 19 000 mAh battery supply. The ultrasonic heat meter with battery supply has the advantages of high-precision and low-power consumption. It has broad prospect of applications.

Keywords: ultrasonic heat meter; STM32L152; TDC-GP22; low-power consumption

1 引言

超声波热量表是一种具有非接触性、精度高、安装方便、使用寿命长等优点的新型热量表。我国热量表的发展起步于 20 世纪 90 年代,经过 20 多年的发展,逐步向标准化、规范化转变,并生产出适合我国国情的热量表^[1]。目前,国内市场上的热量表多以 TI 公司生产的 16 位单片机 MSP430 为主控芯片,但存在测量精度不高、运算时间长且功耗大的缺点^[2-4]。因此,针对热量表的上述问题,本文采用了 ST 公司的 32 位低功耗芯片 STM32L152 作为主控芯片,配合高精度计时芯片 TDC-GP22,设计了

一款由电池供电的超声波热量表,具备低功耗、高精度等特点。

2 超声波热量表的测量原理

2.1 超声波流量测量原理

超声波热量表的流量测量部分与超声波流量计一样,使用 1 对窄带超声换能器实现超声波的收发,即 1 个超声换能器发射超声波^[5]。热量表管道采用 Z 型管道,结构简化图以及流体流动方向如图 1 所示。

由于声速 c 是关于流体温度的函数,为了消除其影响,对顺逆流时间进行变式后^[6],最后得到瞬时流速 v 为:

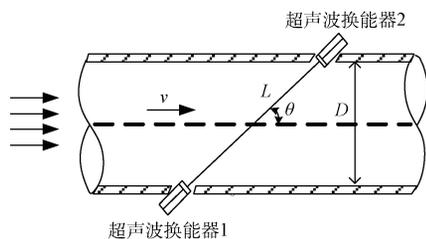


图 1 时差法超声波流量测量原理

$$v = \frac{L}{2\cos\theta} \cdot \frac{\Delta t}{(t_{\text{up}} - \tau)(t_{\text{down}} - \tau)} \quad (1)$$

式中： t_{up} 为超声波顺流传播时间， t_{down} 为逆流传播时间， L 为超声波的传播距离， D 为管道直径， c 为超声波在管内流体中的声速， θ 为管道与传播方向的夹角， τ 为超声波在换能器中的传播时间以及电路延时的总和。

于是，得到瞬时体积流量 q_v 为：

$$q_v = \frac{\pi D^2 L}{8\cos\theta} \cdot \frac{\Delta t}{(t_{\text{up}} - \tau)(t_{\text{down}} - \tau)} \quad (2)$$

上述公式的优点是消除了与温度有关联的变量声速 c ，但存在一定的非线性，需采用 k 系数法以减小非线性带来的影响^[6]。

2.2 进出口水温测量原理

通过选用严格配对的 PT1000 温度传感器来实现对进出口水温的测量，利用测量电容充放电时间的原理测出相应的 PT1000 阻值，再通过查找温度-阻值表，得到相应的温度值，即可得到进出口温度值。

2.3 热量计算

由热量计算式(3)，可得到超声波热量表的热量计算值。

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} \rho q_v \Delta h dt$$

式中： Q 为释放或吸收的热量，单位为 J 或 $W \cdot h$ ； q_v 为流经热量表的水的体积流量，单位为 m^3/h ； ρ 为水的密度，单位为 kg/m^3 ； Δh 为进出口焓值差，单位为 J/kg ； t 为时间，单位为 h ^[3]。

焓值差 Δh 为 $h_{\text{up}} - h_{\text{down}}$ ， h_{up} 与 h_{down} 分别为进口处水的焓值与出口处水的焓值，可以通过查询温度-焓值表^[7]得到。

3 超声波热量表的硬件设计

3.1 硬件设计框架

热量表由主控芯片、测量模块、通信模块、液晶显示模块和按键组成，其硬件框图如图 2 所示。流量测量采用中心频率为 1 MHz 压电超声波换能器实现超声波的收发。温度传感器为 PT1000 铂电阻。热量表硬件电路设计以低功耗、高精度为原则，采用超低功耗单片机 STM32L152 作为主控芯片以及 ACAM 公司的 TDC-GP22 芯片作为高精度计时芯片。

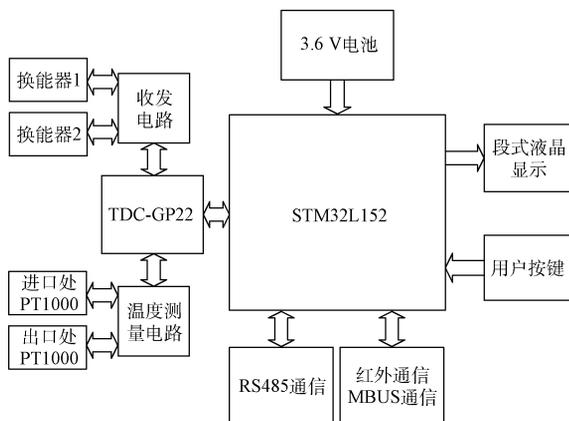


图 2 超声波热量表硬件框图

STM32L152 为 32 位单片机，工作电压为 1.6~3.6 V，有 7 种低功耗模式，并自带唤醒功能，支持段式液晶驱动，拥有低功耗的日历 RTC 等多种外设。在仅带 RTC 的情况下，最低功耗也只有 1.5 μA ，非常符合低功耗产品的设计。

TDC-GP22 是新一代高精度计时芯片，可测量超声波的飞行时间，并可测量电容放电时间，实现温度测量。TDC-GP22 的测量模式为测量范围 2，采用四精度模式的最高测量分辨率可达到 22 ps。在时钟关闭状态下，TDC-GP22 的静态电流仅为 0.1 μA 。

3.2 流量测量及温度测量电路

根据时差法超声波流量测量原理，超声波热量表采用 TDC-GP22 设计了超声波发射和接收电路。

发射电路如图 3 所示。TDC-GP22 内部集成了 1 个可以发送驱动超声波换能器的脉冲发生器。通过寄存器的配置可以对这个脉冲发生器产生频率为 1 MHz 的超声波激励脉冲。该脉冲发生器的两个输出口 FIRE_UP 和 FIRE_DOWN，分别连接驱动顺流和逆流超声波换能器，具有 48 mA 的电流驱动能力。

接收电路如图 4 所示。顺流和逆流超声波换能器的接收时序控制由模拟开关 TS5A3160 来实现。受传输介质的密度、温度、流动等因素的影响，管道中的超声波信号衰减较大^[8]。为了使接收信号幅值足够大，模拟开关输出的超声波接收信号输入到 1 个单电源低功耗放大器 OPA835 进行信号放大。该芯片的增益带宽为 30 MHz，满足 1 MHz 超声波换能器的频率响应要求。OPA835 和 TS5A3160 在低功耗状态下的静态电流分别为 0.5 μA 和 0.1 μA ，可以保证整机的低功耗性能。

但由于 TDC-GP22 内部集成的比较器不能够以模拟地电平作为比较的阈值，设计时，经放大器 OPA835 放大输出的超声波信号通过电容 C18 将会使信号直流电平提升到 $V_{cc}/3$ 后，送入 TDC-GP22 的 STOP1 和 STOP2 通道进行飞行时间测量。TDC-GP22 内部集成的低噪声比较器将会根据回波序列产生相应的方波信号，并由时间测量单

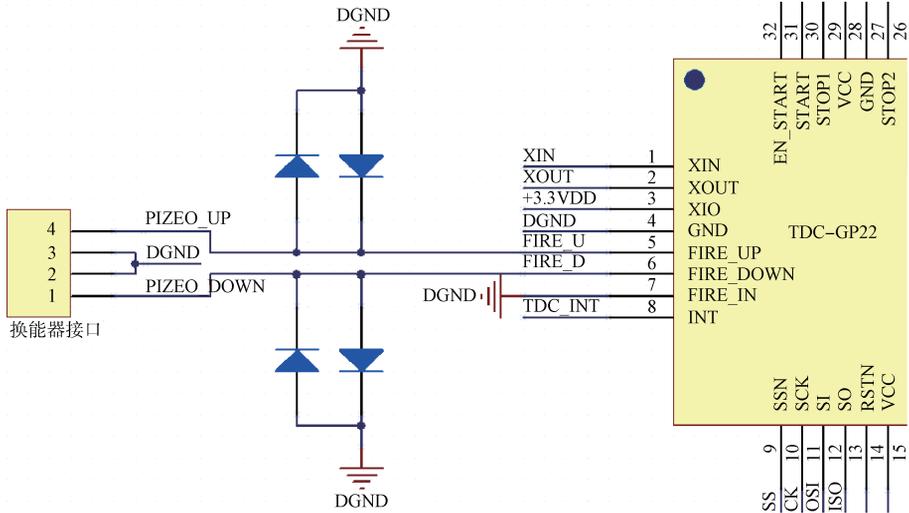


图 3 TDC-GP22 外部电路

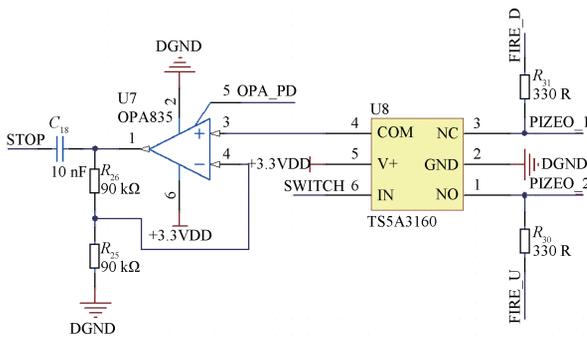


图 4 超声波热量表接收电路

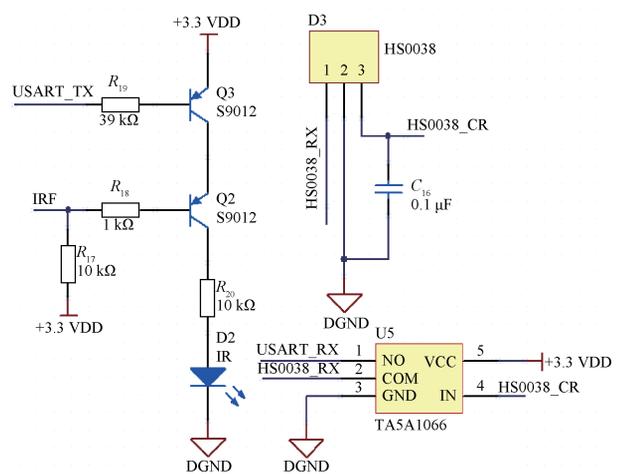


图 5 红外通信电路

元测量出超声波的飞行时间。

对于温度测量电路,由于 TDC-GP22 的内部温度测量电路的集成度较高,热量表的硬件部分只需外接 1 个精准 $1\text{ k}\Omega$ 电阻 R_{27} 和 2 个 100 nF 的电容 C_{20} 和 C_{21} 即可。

3.3 通信模块电路

超声波热量表的通信方式主要有 MBUS 通信、红外通信和 RS485 通信 3 种通信方式。本文仅简单介绍 MBUS 通信和红外通信这 2 种通信方式。

MBUS 通信由美国德州仪器生产的 TSS721A 芯片^[9]来实现。为了降低仪表功耗, TSS721A 芯片采用了总线供电的方式。

热量表设计了红外通信模块,满足了人工红外抄表的需求,使用了 ARM 单片机内部定时器、红外发射二极管和红外接收芯片 HS0038 实现了 38 kHz 载波通信。红外通信模块电路如图 5 所示。

当芯片 HS0038 不工作时,其自身的静态电流为 $300\text{ }\mu\text{A}$ 左右,远远超过了其他模块的待机功耗。设计中采用了 1 个模拟开关 TS5A1066 在待机时切断 HS0038 的工作电源,以降低功耗。TS5A1066 在低功耗状态下电流为 $0.05\text{ }\mu\text{A}$,可以保证整机的低功耗性能。

4 超声波热量表的软件设计

超声波热量表的软件主要实现了流量、温度和热量的测量计算、数据通信、液晶显示和按键处理等功能。在主程序启动时首先完成内部模块和相关外设的配置,然后进入热量测量计算和显示的循环。由于热交换系统的稳定性,不需要连续测量,只需要定时检测,每次测量的定时时间为 5 s 。1 次测量完成后,系统转入低功耗模式。在该模式下,仅 RTC 和 LCD 正常工作,其余外设处于低功耗状态。如此,CPU 在大部分的时间里都处于低功耗状态,功耗也随之大大下降。系统主程序流程如图 6 所示。

在低功耗状态,有按键中断、通讯中断或者 RTC 定时中断唤醒后,则退出停止模式,开始执行相应动作。数据通信中的协议按照《户用计量仪表数据传输技术条件》的标准进行制定^[10]。

流量测量的精度基本决定了热量表的精度,因此对 TDC-GP22 进行测量得到的飞行时间需要作相关的信号处

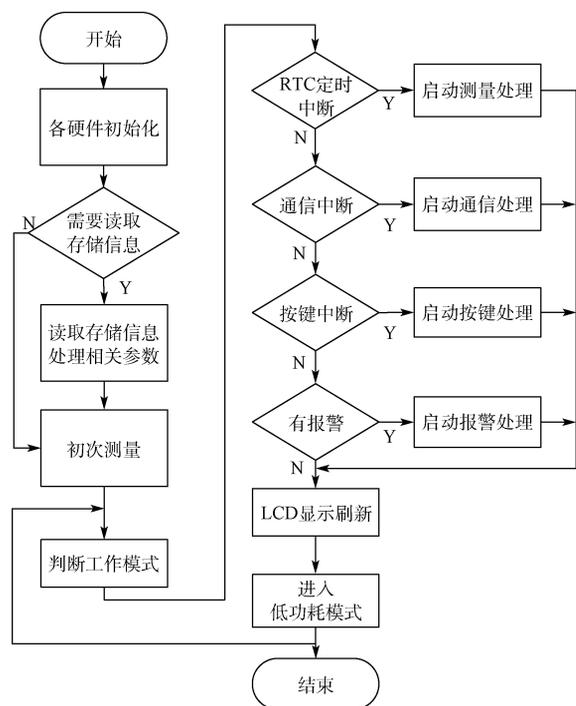


图 6 超声波热量表主程序流程

理以保证最终流量值的稳定性、准确性。图 7 为流量计算流程图。瞬时流量按照式(2)进行计算,采用一阶惯性滤波方法对流量值进行滤波减少随机噪声干扰。滤波后的流量值乘以由 3K 法得出的非线性修正系数得到最终输出显示的流量值。快速关断是为解决当阀门快速关断或者其他原因导致流量突变问题而将流量值快速归零的处理方法;突变处理是指当热量表长时间运行后管道壁生锈,锈迹附着在换能器表面而导致测量的飞行时间差突变,或者由于流

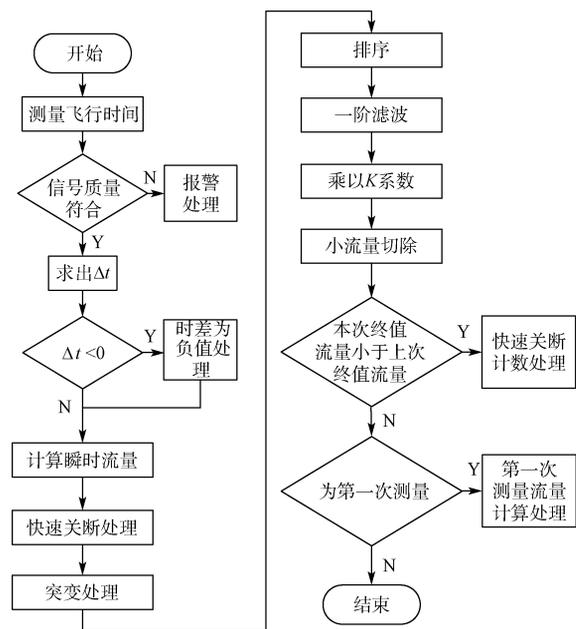


图 7 超声波热量表流量计算流程

场不稳定或流体内部气泡等因素导致飞行时间差突变。

5 实验结果

根据检定规程^[1],超声波热量表流量标定需要热量标定台来进行标定。标定管道直径为 DN50,在温度为 30 ℃、1.6 MP 的环境下,选取相关流量点进行标定。检定数据如表 1 所示。

表 1 标定点与实际测量值对比

标准流量/ (m ³ · h ⁻¹)	检定流量/ (m ³ · h ⁻¹)	误差/ (%)	重复性/ (%)
15.341 1	15.355 6	0.094 7	
15.194 1	15.228 0	0.223 1	0.409 7
15.197 8	15.274 5	0.504 4	
4.459 1	4.423 4	-0.117 7	
4.459 1	4.423 4	-0.799 9	0.117 7
4.459 1	4.428 7	-0.682 2	
1.462 5	1.464 2	0.117 5	
1.462 5	1.465 5	-0.205 1	0.356 8
1.462 5	1.459 0	-0.239 3	

从表 1 中可以看到,热量表的流量测量误差在 1% 以下,并且具有比较高的重复性,满足《CJ128-2007》规定的 2 级表标准。由于热量表由电池供电,为了保证正常使用年限,需要对各状态的功耗进行测量。测量数据如表 2 所示。

表 2 各状态下热量表功耗测量表

测试内容	实际测量所得负载电流
普通模式	10 μA
测量模式	7.6 mA
诊断模式	7.6 mA
MBUS 通信状态	6 mA
开启红外通信	350 μA

假设 1 台热量表用 19 000 mAh 的锂-亚硫酰氯电池进行供电,标定时用 1 h,诊断用时 20 min,MBUS 通信用时每月 5 min,红外通信每月 1 min,其余均为普通测量模式,且测量间隔为 5 s 一次,每次测量时间为 150 ms。经计算后可以得其使用年限约为 9 年,完全满足《CJ128-2007》规定的使用年限要求。

6 结 论

本文基于低功耗芯片 STM32L152 和高精度计时芯片 TDC-GP22 设计了一款低功耗超声波热量表。经过实际标定和测量,热量表可以达到 2 级准确度的要求;采用多种低

功耗芯片使得整机功耗很低,在电池供电的情况下,可以工作9年左右。综上所述,本文设计的热量表达到了高精度、低功耗的要求,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 卢秋林. 中国热量表行业现状及思考[J]. 轻工标准与质量, 2015(1):62-63.
- [2] 赵飞,仇国富. 超声波热量表的设计研究[J]. 机械制造与自动化, 2013,41(2):14-16.
- [3] 高正中,谭冲,赵联成,等. 基于TDC-GP22高精度低功耗超声波热量表的设计[J]. 电子技术应用, 2015, 41(7):61-63,67.
- [4] 梅彦平,张明君,王延平,等. TDC-GP21在超声波热量表中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2012(2):37-39.
- [5] 陈洁,余诗诗,李斌,等. 基于双阈值比较法超声波流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11):1024-1033.

(上接第123页)

- [7] 杨振雷,王晓辉,苏弘,等. 一种Flash型FPGA单粒子效应测试方法设计及验证[J]. 核技术, 2015, 38(2):020404-1-020404-7.
- [8] 卜雷雷. 基于FPGA的星载RAM抗SEU的研究与设计[D]. 西安:电子科技大学, 2010.
- [9] 广州周立功单片机发展有限公司. ProASICL和IGLOO+系列——为特殊应用场合而设计的FPGA[J]. 电子产品世界, 2009(4):86-87.
- [10] 谢楠. 宇航用FPGA单粒子效应及监测方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [11] 张贵祥,金光. 星载光学遥感相机图像模拟源的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(7):1368-1370.

(上接第131页)

- [15] 杨成,邢聪聪,邵帅. 基于STC89C52单片机的多级控制系统[J]. 电子技术与软件工程, 2013(5):53-54.
- [16] 周永龙,雷金奎. 基于STM32的数字舵机控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2011(1):66-68.
- [17] 郑毅,朱纪洪. 用MSP430的舵机控制系统设计及实现[J]. 计算机测量与控制, 2014(10):3181-3182.

- [6] 刘宇杰,李斌,刘振凯,等. 基于TDC-GP22的超声波流量计设计[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(3):166-168.
- [7] CJ128-2007 中华人民共和国城建建设行业标准——热量表[S].
- [8] 陈建,孙晓颖,林琳,等. 一种高精度超声波到达时刻的检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11):2422-2428.
- [9] 罗永刚,邹志远. 基于MBUS的智集中器设计[J]. 测控技术与仪器仪表, 2013, 39(10):72-75,79.
- [10] CJ/T188-2004 户用计量仪表数据传输技术条件[S].
- [11] JJG 225-2001 中华人民共和国国家计量检定规程——热表[S].

作者简介

刘振凯, 硕士在读研究生, 主要研究方向为超声波热量表、嵌入式智能仪表。

E-mail: alexliu2360@126.com

- [12] 董建怀. 电流传感器ACS712的原理与应用[J]. 中国科技信息, 2010(5):92-96.
- [13] 黄锦杰. 抗单粒子翻转SRAM_based FPGA测试系统的研究与设计[D]. 上海:复旦大学, 2011.
- [14] 柳振华. 三模冗余容错计算机的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [15] Actel 推出以Flash为基础的FPGA适用于太空应用[J]. 电子与电脑, 2008(10):65.

作者简介

周美丽, 1986年出生, 硕士研究生, 主要从事卫星姿态控制系统执行机构控制的研究。

E-mail: zhoumeili2011@126.com

作者简介

唐海洋, 1990年出生, 硕士研究生. 主要研究方向电力电子与电力传动。

E-mail: 245862281@qq.com