

TDC-GP21 在时差法超声波流量计中的应用

杨 亚¹, 王让定¹, 姚 灵²

(1 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

2 宁波水表股份有限公司, 浙江 宁波 315041)

摘 要: 为了实现高精度的流量测量, 设计了一种基于 TDC-GP21 的时差法超声波流量计. 系统以 MSP430 单片机为核心, 选用高精度时间间隔测量芯片 TDC-GP21, 有效的解决了时差法超声波流量计中高精度时差测量的问题. 文中详细介绍了时间间隔测量芯片 TDC-GP21 的功能模块及工作流程, 设计了一种超声波回波信号处理电路, 并对超声波流量计系统硬件电路与软件方案进行了阐述. 实验表明, 系统的最大测量误差在 $\pm 1\%$ 以内, 达到了准确度等级为 1 级的要求.

关键词: TDC-GP21; MSP430; 超声波流量计; 时间间隔测量

中图分类号: TH814. 92

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)03-0118-04

Application of TDC-GP21 in the Transit-time Ultrasonic Flowmeter

YANG Ya¹, WANG Rang-ding¹, YAO Ling²

(1 School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2 Ningbo Water Meter CO. LTD, Ningbo 315041, China)

Abstract: In order to achieve high-precision flow measurement, a transit-time ultrasonic flowmeter based on TDC-GP21 was designed. The MCU of MSP430 is applied as the core of system, a high-precision time interval measuring chip TDC-GP21 which can efficiently solve high-precision measurement of the time interval problem in the transit-time ultrasonic flowmeter measurements. The functional modules and working flow of TDC-GP21 is introduced detailed. Besides, an ultrasonic echo signal processing circuit is designed. The hardware circuit and software solutions of ultrasonic flowmeter is interpreted. It is proved by experiment that the maximum measurement error of the system in less than $\pm 1\%$, reaching the requirements of one level accuracy.

Key words: TDC-GP21; MSP430; ultrasonic flowmeter; time interval measurement

1 引言

流量测量作为工农业生产的眼睛, 与我国的社会经济、国防建设、科学研究有着密不可分的关系^[1]. 精确可靠的流量测量对于提高生产效率、保证产品质量以及促进科技发展都有着十分重要的作用. 因此, 时差法超声波流量计作为一种流量测量仪器便应运而生, 它在工业界应用已有几十年历史, 以其工作原理简单、计量精度高、对管径的适应性强、

非接触流体、易于数字化管理等优点得到越来越广泛的应用^[2-3].

由时差法超声波流量计的原理^[4]可知, 流体的流速可以通过测量超声波在流体中的逆向传播与顺向传播的时间差来间接测得, 流体流量的测量就转换为时间间隔的测量. 那么, 要提高时差法超声波流量计的计量准确度, 关键就在于对时间间隔测量问题的解决. 所以, 本系统采用高精度时间间隔测量芯片 TDC-GP21 对时间间隔进行测量, 大大提高了超

收稿日期: 2012-06-20; 修回日期: 2012-07-26

基金项目: 浙江省优先主题重点工业项目(2010C11025); 浙江省教育厅重大科技攻关项目(ZD2009012); 宁波市重大科技攻关项目(2009B10003); 浙江省新苗人才计划(2011R405056)

声波流量计的计量准确度。

2 TDC-GP21 主要功能描述

TDC-GP21(以下简称 GP21)是德国 ACAM 公司推出的继 TDC-GP2 后的新一代时间数字转化器件^[5]。它具有更高精度更低功耗的特点,尤其适合于低成本的工业应用领域^[6]。GP21 内部主要集成有脉冲发生器、时间测量单元、校准单元、ALU 单元、4 线 SPI 通信接口等,且具有两种测量方式,可以使时间的测量精度达到 ps 级。GP21 是 QFN32 脚封装。可通过配置内部寄存器设置 GP21 的测量方式、信号触发方式等,使用户能够对该芯片进行灵活应用。

2.1 测量方式

(1)测量方式 1

测量方式 1 的特点:两个 Stop 通道共用一个 Start 通道,每个通道的典型分辨率 45ps,间隔脉冲对的分辨能力 20ns,每个 Stop 通道都可以进行 4 次采样,测量范围 3.5ns~2.4μs。Enable 引脚提供强大的 Stop 信号使能功能,可测量任意两个信号之间的时差。

(2)测量方式 2

测量方式 2 的特点:只有一个 Stop 通道对应 Start 通道,典型分辨率 22 ps/45 ps/90ps,间隔脉冲对的分辨能力 $2 \times T_{ref}$,有 3 次采样能力,测量范围是 $2 \times T_{ref} \sim 4ms$ 。每个单独的 Stop 信号都有一个精度为 10ns 的可调窗口,可提供准确的 Stop 使能。

2.2 脉冲发生器

脉冲发生器可产生频率、相位和脉冲个数都可以调节的脉冲序列,该脉冲序列经过电匹配就可以作为超声驱动信号。外部高速晶振频率可以作为基本频率,这个频率可以进行分频,可以自由产生 1~127 个脉冲序列。如果最多发送 15 个脉冲的话,那么每个脉冲序列都可通过设置寄存器来调节其相位。通过发送指令 Start_Cycle 来激活触发脉冲发生器工作,最终可以产生 Fire_up 和 Fire_down 两个脉冲序列,最终脉冲串输出频率如下:

$$f_{fireclk2} = f_{fireclk1} \times \frac{2}{DIV_FIRE + 1} \quad (1)$$

$$f_{Fire_up/Fire_down} = \frac{1}{2} \times f_{fireclk2} \quad (2)$$

2.3 时间测量及校准单元

图 1 为 TDC 核心测量单元,主要由门电路(延时单元)及其构成的环形振荡器,粗值计数器与编码

电路组成。TDC 测量是由 Start 信号触发而开始的,接收到 Stop 信号停止。由环形振荡器的位置和粗值计数器的计数值计算出 Start 信号和 Stop 信号之间时间间隔,测量范围可达 20 位。

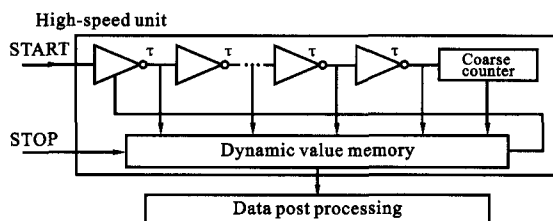


图 1 TDC-GP21 核心测量单元

由于 TDC 核心测量单元是对电信号通过的门电路个数进行计数,因此受计数器容量的限制它的时间测量范围是有限的,最多可测到 2.4μs,对于被测时间超过这个范围的应用,GP21 则采取参考时钟测量和 TDC 核心测量单元相结合的方式来完成。如图 1 所示,TDC 核心测量单元只测量 T_{FC1} 和 T_{FC2} ,而 T_{CC} 则通过数参考时钟的周期数来完成测量。但由于门电路的时间延迟会随供电电压和温度而变化,每次测量完成后 GP21 可以自动对门电路的延时做校准测量,如图 2 中的 Cal1 和 Cal2, TDC 核心测量单元对参考时钟的周期进行测量,而参考时钟的周期是已知的,因此由测量结果可反推出来精确的门电路延时。以上的计算、校正都是 GP21 自动完成的,最终经过校正的测量结果将以参考时钟的周期为单位给出。最终待测时间 T_x 可通过如下计算获得:

$$RES_X = Cc + (Fc1 - Fc2)/(Cal2 - Cal1) \quad (3)$$

$$T_x = RES_X \times T_{ref} \times 2^{ClkHSDiv} \quad (4)$$

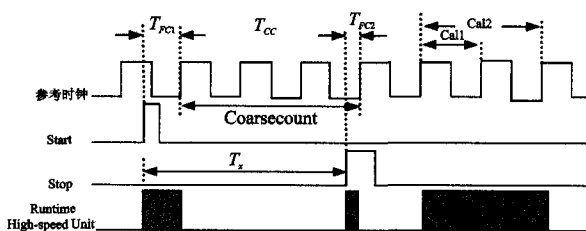


图 2 时间测量和校准

3 时差法超声波流量计的实现方案

3.1 硬件部分设计

本系统使用 MSP430 系列的单片机作为微控制器,该系列单片机是 TI 公司推出的一种超低功耗的 16 位工业级微处理器,主要应用在低功耗仪器仪表方面,具有超低功耗,处理能力强大,丰富的外

设资源和系统比较稳定等优点, 时间测量模块采用德国 ACAM 公司的通用时间间隔测量芯片 GP21. 系统硬件原理框图如图 3 所示.

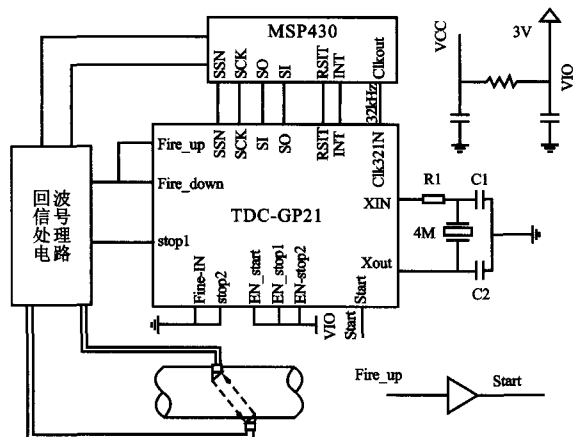


图 3 系统硬件原理框图

MSP430 单片机控制 GP21 片内的脉冲发生器发出脉冲信号, 用窗函数电路产生出 Start 信号, 在回波信号处理电路中产生 Stop 信号, 通过测量 Start 与 Stop 信号之间的时间间隔确定出顺流传播时间和逆流传播时间, 进而计算流体流量.

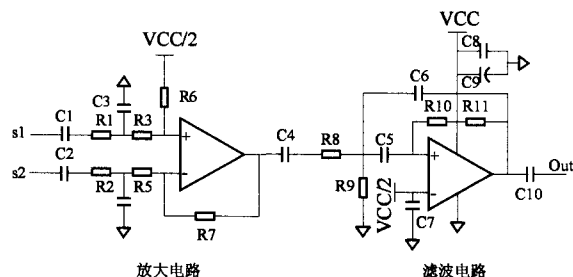
(1) 时间测量模块

本系统采用 GP21 作为时间测量模块的核心, 根据本系统的要求选择测量方式 2 对时间间隔进行测量, 其测量范围为 500ns~4ms. 在 GP21 的应用中需要 2 个晶振, 4 MHz 和 32.768 kHz, 其中 4M 晶振如图 3 中所示的方式接入电路中, 32.768K 的低速晶振由微处理器 MSP430 提供. 由于门电路的延时受到温度和电压的影响, 因此, 4MHz 晶振是为了校准而设置的一个基准. 当使用陶瓷晶振时, 由于其频率误差大, 所以需要在测量时用 32.768 kHz 的晶振, 对高速晶振进行校准. 此外, 在 GP21 的测量方式 2 中, 高速时钟信号还作为时间间隔测量单元的一部分. 图 2 为测量方式 2 的测时原理图.

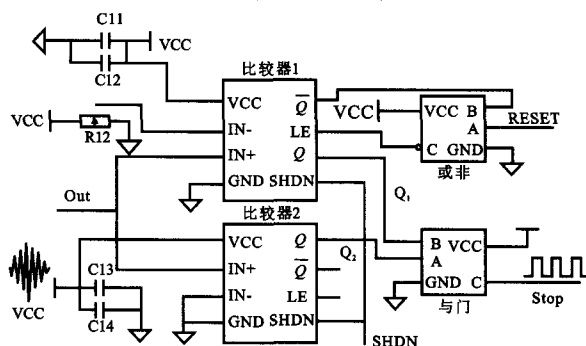
(2) 回波信号处理电路

为了能获得准确的 Stop 脉冲信号, 设计了一种回波信号处理电路. 当时间测量模块产生脉冲驱动换能器发射超声波后, 超声波首先要传播通过管道流体, 然后驱动接收换能器将声波信号转换成电信号, 输入到回波信号处理模块, 最后才送 Stop 信号到时间测量模块. 这个模块包括: 放大滤波电路和过零阈值比较电路, 如图 4 所示.

由于超声回波信号的幅值非常小, 只有几十毫伏, 而且还混有杂波信号, 所以本系统设计了放大滤波电路对回波信号进行放大、滤波, 此时出来的超声



(a) 放大滤波电路



(b) 过零阈值比较电路

图 4 回波信号处理电路

波信号为频率恒定(1MHz)而幅度变化的交流信号, 如果直接连接到计时芯片上会造成超声波到达时刻判断的不准确, 主要是因为时间测量芯片 GP21 只能识别高电平信号. 同时在环境复杂的工业现场, 噪声也比较大, 所以通常采用过零阈值比较器来解决该问题, 如图 4(b) 所示, 能有效的判断 Stop 信号到达的准确时刻.

3.2 软件部分设计

系统的软件流程如图 5 所示.

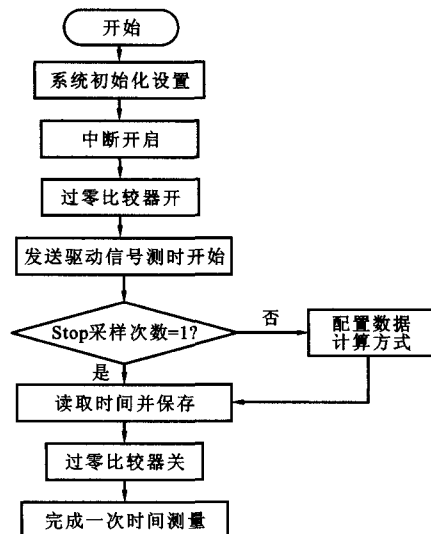


图 5 系统测量流程图

Step1: 对单片机 I/O 口及 GP21 初始化配置, 完成对测量方式、驱动脉冲方式、接收通道边沿触发

方式、校准方式、采样次数和和 ALU 数据处理等的配置; Step2: MSP430 开启系统的总中断,并向 GP21 发送 Start 脉冲驱动信号,GP21 根据初始化的配置方式发射脉冲驱动换能器发射超声波并启动计时模块部分开始计时,同时 GP21 开始等待接收 Stop 脉冲信号; Step3: 超声波信号通过放大滤波处理,并经过如图 4(b)所示的过零阈值比较器得到 Stop 信号,作为接收换能器接收到超声波信号的标志,即触发计时芯片 GP21 停止计时. Step4: MSP430 单片机从结果寄存器中读取测量数据,完成一次顺流(T_{up})或者逆流(T_{down})时间的测量.

根据上述的过程得到时间差 $\Delta T = T_{down} - T_{up}$, 由公式 $V \approx \frac{T_{down} - T_{up}}{T_{down} * T_{up}} \cdot \frac{L}{2\cos\theta}$ 便可求出流体的流速,然后乘上管道截面积就能算出流量,公式为:

$$Q = \frac{1}{K} \cdot S \cdot V = \frac{\pi D^2}{4K} \cdot V \approx K' \cdot V \quad (5)$$

式中, K 为流速分布修正系数, S 为管道截面积, V 为流体的流速, D 为管道直径, θ 为安装角度, L 为换能器安装距离.

4 实验结果分析

在测量过程中,几乎所有因素都将引起测量误差.由式(5)可以看出,最后得到流体的流量,其误差由 D 、 L 、 θ 、 K 和 ΔT 各部分的误差组成.其中管道内径 D 是在管道生产时就已经标定完毕的,其精度一般较高,可以将其引起的误差忽略;换能器安装距离 L 引起的误差 E_L 通常小于 0.1% ^[7];安装角度 θ 为 45° 引起的误差 $E_\theta = (1 - \frac{\cos 45^\circ}{\cos 45^\circ}) \times 100\% = 0.175\%$;修正系数 K 已经有比较成熟的理论,在动态雷诺数修正的情况下,其误差 E_K 一般在 0.1% 以内^[8];时间差 ΔT 是影响流量测量最主要的误差,例如,当流速为 0.0905m/s ,管道内径为 100mm ,流体声速为 1500m/s ,传播时差为 4014ps ,单次传播时间差得测量误差为 22ps ,则 $E_{\Delta T} = \frac{22}{4014} \times 100\% = 0.548\%$.由于系统的各项误差是不相关的,最终系统的总误差由各项误差的均方根得:

$$E = \sqrt{E_L^2 + E_\theta^2 + E_K^2 + E_{\Delta T}^2} = 0.592\% \quad (6)$$

从式(6)可知,理论上流量计的测量误差在 0.6% 左右,但在实际的测量现场由于受到管道震动、流体脉动及电磁干扰等因素的影响,计量准确度会有所降低.表 1 给出了几个流速点下累积流量的测量结果,可以看到测量误差在 $\pm 1\%$ 以内.

表 1 实验结果

Fluid velocity (m^3/h)	True value (L)	Measured value (L)	Error %
0.64	200	198.33	-0.84
		198.45	-0.77
		198.12	-0.94
8	200	198.87	-0.57
		198.27	-0.87
		198.23	-0.88
100	2000	1988.14	-0.59
		1989.34	-0.53
		1988.02	-0.60

5 结束语

超声波流量计的准确度主要由时间差测量的精度决定,本系统采用高精度的时间间隔测量芯片 GP21 为核心设计了时间差的测量模块. GP21 具有 ps 级的时间间隔测量精度,将其运用到超声波流量计时间测量模块中,大大提高了流量计的计量准确度.实验表明,测量的最大误差保证在 $\pm 1\%$ 以内.另外,在实际流量测量中,还存在管道气泡杂质和温度等影响,影响了流量计量的准确度,这些有待改进.

参考文献:

[1] 张学庆. 流量测量的意义及流量传感器的现状[J]. 石油化工自动化,2005,(5):99-101.

[2] 彦芳,王小平,宋万民,等. 时差法超声波流量计的高精度测量技术[J]. 微计算机信息,2006,22(6):198-199.

[3] 蔡武昌,孙淮清,纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[4] 段允. 一种抑制时差法超声流量计静态漂移的方法[J]. 微电子学与计算机,2010,27(8):205-209.

[5] ACAM Corporation. TDC-GP21 Datasheet[R]. Germany: ACAM Corporation,2010.

[6] 朱登科. TDC-GP21 完美适合超声波热量表的解决方案[J]. 供热制冷,2011(8):32-33.

[7] 陈静. 超声波流量计的研制[D]. 西安:西安科技大学,2004.

[8] 黄永峰. 时差式超声流量计新测量方法的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

作者简介:

杨 亚 女,(1986—),硕士研究生.研究方向为超声波流量计.

王让定 男,(1962—),教授,博士生导师.研究方向为嵌入式系统的开发与应用.

姚 灵 男,(1953—),研究员.研究方向为水计量技术.