

用门延迟法提高超声波流量计的测量精度

王加祥,曹闹昌,王 瑛

(空军工程大学 航空航天工程学院,西安 710038)

摘要:提出一种精确测量时隙间隔的新方法。通过CPLD内部门电路的传播延迟来进行高精度时间间隔测量,从而实现了小管径、低流速情况下的高精度流量测量。通过测量不同放电回路的放电时间,从而实现了温度的高精度测量。实验证明其测时隙的精度可达300 ps。该方法比现在常用测量法具有更高的测量精度,更小的测量误差。由于该方法的特点,所以保证了对低功耗的要求。

关键词:热量表;超声波流量计;门延迟;低功耗

中图分类号:TH814 **文献标志码:**B

Gate-delay Method to Achieve Accurate Measurement of Ultra-sonic Flow Gauge

WANG Jia-xiang, CAO Nao-chang, WANG Ying

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A New method was presented to achieve accurate time-interval. Through measuring the transmission delay gate circuit of CPLD in internal, an accurate flow measurement in small size pipeline and low flow occasion was realized. The accurate measurement of temperature was reached by measuring the discharge time of circuit. The experiment has proved that its accuracy can reach 300ps. This method has more accuracy and less error calculation than the common one. This method also meets the requirement of low consumption.

Key words: thermal meter; super sonic flow meter; gate delay; low consumption

随着流量测量范围的扩大,被测流体种类的多变性,对流量计的适应性提出了较高要求,超声波流量计得到了广泛地应用。而超声波流量计的测量精度取决于对时间差的准确测量,怎样在不提高测量成本的前提下提高时间差的测量精度成为较难解决的问题。本文介绍了一种门延迟法来提高超声波流量计的测量精度,使其在不提高系统成本的前提下满足国标要求。

1 超声波流量计工作原理

超声波流量计示意图如图1所示,换能器TR1和TR2均是收发两用换能器,距离为 L ,管内液体

的流速为 V ,首先由TR1发射超声波,TR2接收超声波,传播时间为 t_1 ;控制切换电路将TR1与TR2功能互换,TR2发射,TR1接收,传播时间为 t_2 ;如设超声波在静止液体中的传播速度为 C ;根据公式 $t_1 = \frac{L}{C+V}$ 、 $t_2 = \frac{L}{C-V}$,求出时间差 Δt 为 $\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2VL}{C^2 - V^2}$,

顺逆流传播平均时间 t_L 为 $t_L = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{CL}{C^2 - V^2}$,由于

$C \gg V$,因此得 $\Delta t \cong \frac{2VL}{C^2}$, $t_L = \frac{t_1 + t_2}{2} \cong \frac{L}{C}$,所以 $C =$

$\frac{L}{t_L}$,导出 $\Delta t = \frac{2Vt_L^2}{L}$,则 $V = \frac{L\Delta t}{2t_L^2}$ 。

收稿日期:2012-07-13;修订日期:2012-10-09

作者简介:王加祥(1980—),男,讲师,研究方向为信号与信息处理。

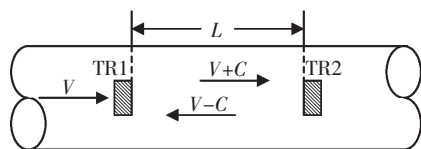


图1 超声波流量计示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultra-sonic flow gauge

在固定式超声流量计中, 由于 L 为常数, 而 C 不是一个固定参数, 它受温度压力的影响而变化, 因此推导时消去 C , 进一步提高了精度。流量为

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \bar{\mu} = \frac{\pi D^2}{4k} \bar{\mu}_D = \frac{\pi D^2 L}{2k} \cdot \frac{\Delta t}{t_L} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

式中: D 为管道直径; $\bar{\mu}$ 为管内平均流速; k 为修正系数。

由上式可以看出流量 Q 的测量准确度取决于时间差 Δt , 因此, 为了得到高准确度的 Q , 必须提高时间的测量精度。例如设 $D=2 \text{ cm}$, $L=10 \text{ cm}$, 要求每小时能够测量出 20 L 的流量, 则 $\Delta t \approx 1.23 \text{ ns}$, 可看出, 时间分辨率高低, 直接决定了测量的准确度。

2 时间间隔测量方法

超声波流量计的计量精度取决于对时差的测量精度, 因此, 高精度的时差测量系统是流量计的核心部件。传统的精密时间测量技术大致有以下四种方法: 直接计数法、扩展法、时间幅度转换法、游标法。最近论文中研究的有专用进位连线实现时间内插法^[3]、抽头延迟线法。本文使用一种在扩展法的基础上发展出的门振荡延迟法。

在各种门电路结构中, 非门是工艺结构最简单的一种门电路, 在不考虑工艺差别的情况下, 电流通过一个门电路所用的时间应为最短。本文选择非门电路作为传输线的延迟, 结构如图2所示。

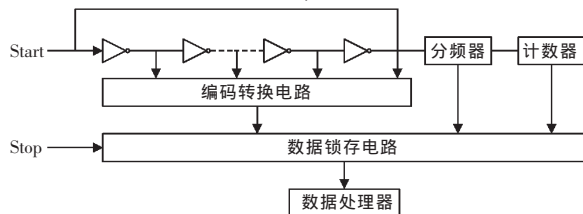


图2 非门延迟微时间测量原理图

Fig.2 Principle diagram of micro-time measurement of not-gate delay

为了减少延迟线长度, 降低设计复杂度, 利用数字电路中奇数个非门通过自身延迟则可组成一个闭环振荡器的结论, 本文在该振荡器的基础上设计扩展出一个时间测量电路^[4]。

Start 信号高电平触发启动非门振荡器振荡输出高频频率信号, 该信号经过多次分频后进入频率计数器。当 Stop 信号进入触发停止振荡器并锁存振荡器、分频器、计数器结果信号。该振荡器、分频器、计数器结果信号进行合成计算后即可得到时间值。

由于 CMOS 门延时振荡器与工艺参数、供电电压和温度高度相关, 因此这样的振荡器需要经常校准以减小误差。该电路中设计了校准电路, 测量以精确的 32.768 kHz 时钟为基准。将 32.768 kHz 的时钟引出 Start/Stop 脉冲, 启动测量基准时钟两上升沿之间的时差。结果存储在结果寄存器中, 则单个门延迟的平均时间 τ 为

$$\tau = \frac{30517578.125}{M_1 \cdot X_1 \cdot 2 \cdot X_2 + M_2 \cdot 2 \cdot X_2 + M_3} \quad (\text{ps})$$

式中: M_1 为频率计数器值; M_2 为分频值; M_3 为振荡环所计值; X_1 为分频次数; X_2 为振荡环非门数。通过内部运算即可得到单个门延迟的平均时间。

实验发现, 在不同温度环境下单非门延迟时间不同, 图3为分别在 25°C 、 50°C 、 75°C 环境下的单非门延时。

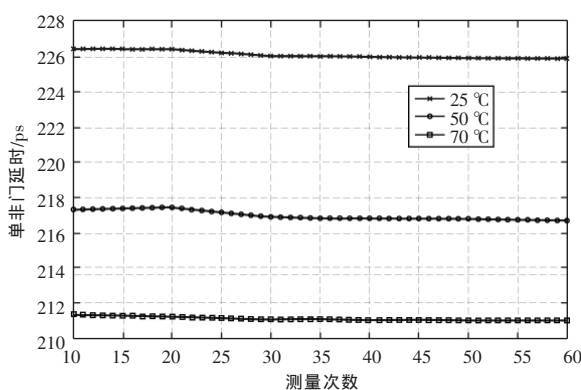


图3 不同温度下的单非门延时

Fig.3 Single not-gate delay in different temperature

理论上温度越高, 电子的活跃程度越大, 非门延迟时间变短, 由图3可以看出, 温度越高非门延迟时间越短, 实验结果与理论一致。不同温度时非门延迟时间不同, 故为了得到稳定精确的测量结果, 不能使用固定的非门延迟, 因此每次测量待测信号时先测量 32.768 kHz 的基准时钟, 通过基准时钟计算出单个非门的延迟时间, 再测量待测信号, 这样则可消除温度对测量精度的影响, 得到精确的测量结果。图4为在不同温度下, 先测基准时钟, 再测待测信号, 测得的待测信号时间, 由图4可以看出, 通过此

方法可以消除温度对测量精度的影响。实验计算得出该时间间隔测量方法的分辨率优于 250 ps, 考虑到干扰、温度影响和器件差别, 其测量分辨率应优于 300 ps。在大测量范围应用中只要增加频率计数器的计数长度则可, 且不影响频率分辨率。

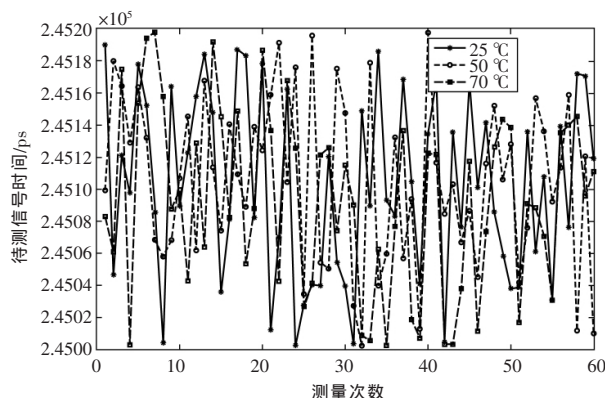


图 4 不同温度下待测信号测量值
Fig.4 Signals in different temperature

校准测量时需注意, 虽然 32.768 kHz 时钟的频率非常精确, 误差只是百万分之几。然而峰-峰值之间的相位抖动大约有 3~5 ns。因此校准测量本身就具有误差。所以当测量结果乘以校准结果时, 测量结果就会产生抖动。测量结果的抖动幅度是校准时抖动幅度乘以校准测量时间与被测时间的比值。如果不间断地进行校准, 校准值就会使测量结果产生大的抖动。因此对校准测量时刻的选择有一定要求, 如在超声波流量计中, 测量结果由超声波在流体中顺流传播和逆流传播这两次单程的传播时间测量组成。根据逆流传播和顺流传播的时差, 可计算出流体的流量。为避免校准时钟抖动对测量结果的影响, 在测量顺流传播时间和逆流传播时间时必须使用同一校准值。这样超声波顺、逆流传播的时差才会不受校准时钟抖动的影响。时钟校准必须在顺流和逆流之间进行, 而且在它们没有相减之前。

在超声波测量中, 为了保证检测信号的有效性, 对测量的传播时间进行范围控制。预期到达信号的范围门是根据每一声路的长度和流经测量断面的流量范围预期信号最早和最晚到达的时间确定的。该最早和最晚到达时间用来定义三个门: 噪声门、范围门及溢出门, 如图 5 所示。在最早到达时间的 0.6 倍处打开接收信号通道, 这样可防止发射脉冲给接收信号带来的干扰及其它干扰。在最早到达时间的 0.8 倍处开始等待接收信号, 在这之间为

噪声门, 它可排除开关动作带来的干扰。在最晚到达时间的 1.5 倍处关掉接收通道, 此处为溢出门。噪声门与溢出门之间为范围门。确定信号接收范围在一定程度上有效抑制了噪声的干扰。同时, 在设计中加入自动增益调节电路, 调节顺逆流信号的大小, 使两信号大小一致, 保证触发的一致性。

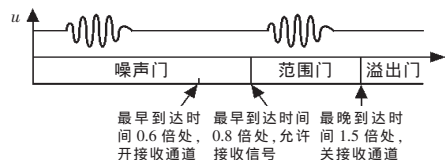


图 5 信号检测范围

Fig.5 Signal detection range

将范围门内的信号经过一个中心频率为 1 MHz 左右的高 Q 值的 3 节滤波器^[6], 它主要滤除换能器接收回来的超声波中的干扰噪声, 使触发器更容易对信号进行准确触发, 触发产生的脉冲信号送入 CPLD, 进而使 CPLD 能更加准确地测量出超声传播的时差。

3 流量的测量和低功耗的实现

将流量计接入标准校验台, 通过实验得出一组测量数据如表 1 所示。

表 1 流量标准值与测量值

Tab.1 Standard value and measured value of flow

标准值/(m ³ ·h ⁻¹)	测量值/(m ³ ·h ⁻¹)	标准值/(m ³ ·h ⁻¹)	测量值/(m ³ ·h ⁻¹)
4.9826	2.6482	0.8890	0.8770
3.9399	2.2982	0.4158	0.5236
3.1012	1.9806	0.2302	0.3581
2.2203	1.6034	0.1354	0.2656
1.5479	1.2734	0.0072	0.1158

根据上两组数据比较发现, 标准值与测量值之间存在差值, 通过应用数学上的最小二乘法的理论^[1]来加以分析, 两组数据都可以看作是一个 $y=f(t)$ 的函数, 所以可设 $f(t)=at^2+bt+c$, 应用 MATLAB 的 polyfit 拟合模块对两组数据进行运算可求得 $a=0.4612$ 、 $b=0.6914$ 、 $c=-0.0781$ 将修正参数 a 、 b 、 c 输入设计样表, 再次测量, 结果如表 2 所示。

表 2 拟合校准后流量标准值与测量值

Tab.2 Fitting flow standard value and measured value

标准值/(m ³ ·h ⁻¹)	测量值/(m ³ ·h ⁻¹)	标准值/(m ³ ·h ⁻¹)	测量值/(m ³ ·h ⁻¹)
5.0325	4.9468	0.9638	0.9723
4.1235	4.1547	0.5045	0.5095
3.2143	3.2435	0.2126	0.2147
2.0532	2.0421	0.1235	0.1251
1.4785	1.4673	0.0043	0.0044

由表 2 可以看出经过拟合后的测量值都在 2% 之内,达到国标要求^[2]。

功耗是流量计的一个重要指标,流量计的国标规定电池的使用寿命最短为 5 年。对于整个系统功耗的测算主要是对电路器件耗电电流的估算。该流量计的数据采集间隔为 0.5 s,工作 250 μ s,那么在一个 1 min 采样周期内,将进行 120 次超声测量。时差测量是流量计系统最耗电的部分,除此之外的其它活动耗电很少,甚至大部分时间处于休眠状态,因此将与开启传感器有关的工作过程定为热量表的有效工作过程。由于在一个采集周期 1 min 内,120 次超声测量所占用的时间不超过 30 ms,及每小时工作 1.8 s。CPLD、单片机^[5]、滤波电路全部工作测量电流约为 70 mA。本系统采用了一节 3.6 V 的 2.75 Ah 的锂电池供电,对于 2.75 Ah 的电池容量,如果系统供电为 3.6 V、电流为 2.75 A,则锂电池可以连续供电 1 h;对于本系统连续不间断工作时间为:2.75 A/70 mA=39 h,即该系统可工作 78000 h,约 3250 天,一年中约供暖 5 个月 150 天,不供暖时按一半耗能计算,那么该表可工作 12.7 年。

4 系统可实现性和性能分析

流量计的各关键部分都已有比较成熟的器件,系统实现并不困难。影响测量精度的几个关键地方是,从超声回波信号中提取触发信号的精度、时钟的稳定度、恒压源的稳定度、顺逆流信号的一致性。准确地从回波信号中提取触发信号非常重要,尤其是回波顺逆流信号不一致,且脉冲在经过水内紊流、层流、水的粘度改变等作用后,脉冲波形产生了

变化,这就使触发信号的提取增加了难度,利用高 Q 值的滤波器进行前级滤波,提高提取触发计时信号的精度。高稳定度的时钟、恒压源都比较容易得到,门延迟测量与温度、CPLD 速度相关,CPLD 选定后速度一定,温度的影响可以通过不间断校准消除,通过实验得到系统精度优于 300 ps,测量误差小于 0.01 m³/h,系统采用低功耗器件,使用时间超过国标规定。

5 结语

笔者针对超声波流量计系统的时间间隔测量,提出了采用 CPLD 门延迟测量的新方法。并对其原理、实现方法、可靠性、性能指标进行了探讨。经过理论分析、计算仿真、产品测试表明,这种方法可以显著地提高了超声波流量计系统的时间分辨率,有效地提高了测量精度。

参考文献:

- [1] 同济大学数学教研室.高等数学[M].4 版.上海:同济大学出版社,2003.
- [2] 建设部城市建设研究院.CJ 128-2000 热量表[S].北京:中国标准出版社,2001.
- [3] 宋健.基于 FPGA 的精密时间-数字转换电路研究[D].中国科技大学博士论文,2006.
- [4] 王加祥,相征,琚翔,等.基于 CPLD 的时间间隔测量系统的设计[J].电子技术应用,2010,36(11):62-65.
- [5] TEXAS INSTRUMENT.MSP430x4xx Family User's Guide[Z],2003.
- [6] TEXAS INSTRUMENT.More Filter Design on a Budget Application Report[Z],2001.

促进楼宇自动化控制在中国的发展——BACnet 技术研讨会举行

2012 年 12 月 19 日由 BACnet 大中华及亚洲协会(BIG-CA)主办,机械工业仪器仪表综合技术经济研究所(ITEI)协办的“BACnet 让城市涌动绿色能量——促进楼宇自动化控制在中国的发展 BACnet 技术研讨会”在北京首都大酒店成功召开。

众所周知全球环境变暖,不可再生资源趋于匮乏。中国正在积极地提高能源的利用效率,走可持续发展道路。刚刚闭幕的十八大也把健康发展和建设美丽中国作为未来的发展目标。对于城市来讲,建筑能耗占全球总能耗比重的 40%,有效地减少建筑能耗,让城市涌动“绿色能源”成为城市建造者所考虑的问题。而 BACnet 协议自 2004 年成为 ISO16484-5 国际标准以来,以其良好的技术为可持续发展建筑物的自动控制在生态层面更是提供了发展平台,为实现绿色城市提供了解决方案。因此,BACnet 大中华及亚洲协会借此契机,联合机械工业仪器仪表综合技术经济研究所举办了“BACnet 让城市涌动绿色能量——促进楼宇自动化控制在中国的发展 BACnet 技术研讨会”。同时,此次研讨会也获得了 BACnet 国际协会(BI)、BACnet 欧洲协会(BIG-EU)、美国暖通空调和制冷工程师协会(ASHRAE)BACnet 标准设计委员会(SSPC135)中国建筑业协会智能建筑分会专家工作委员会、全国智能建筑及居住区数字化标准化技术委员会(SAC/TC426)的大力支持。

转自中国仪器仪表信息网