

时差法超声波流量计中时间间隔测量及误差分析

杨 亚¹, 王让定^{1*}, 姚 灵², 左富强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: 在时差法超声波流量计计量原理的基础上, 分析了影响时差法超声波计量准确度的主要原因, 通过采用基于延迟线内插法的专用测时芯片 TDC-GP21 实现高分辨率时间间隔的测量, 并对影响时间间隔测量准确度的因素进行了充分分析, 提出了相应的解决方法. 最后, 设计了时间间隔测量系统, 利用该系统进行的实验结果表明, 系统达到了 ps 级的时间间隔测量标准差, 流量计的测量误差可保证在 $\pm 0.5\%$ 以内.

关键词: 超声波流量计; 时间间隔测量; 误差分析

中图分类号: TH814

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 04-0035-05

时差法超声波流量计以其工作原理简单、实时测量、对管径的适应性强、非接触流体、易于数字化管理等优点, 越来越广泛地应用于水、石油等液体计量领域^[1]. 时差法超声波流量计计量精度主要依赖于收发换能器的安装精度、流体状态和超声波飞行的时间间隔测量精度等, 其中时间间隔的测量精度对计量精度起决定作用^[2-3]. 目前, 时间间隔测量方法主要有脉冲计数法、模拟法、游标法、延迟线法^[4]. 脉冲计数法具有测量范围大、线性好等优点, 是时间间隔最简单、最有效的方法, 但是测时分分辨率较低^[5]. 模拟法理论上可以实现高精度的测量, 但测量过程耗时较长, 且易受系统噪声、温度和非线性影响^[6]. 游标法可以实现很高的分辨率, 但该方法非常难以获得 2 个高稳定度的时钟; Yu 等人^[7]基于游标法下设计了一款时间数字转换器, 测时分分辨率可达到 8 ps. 延迟线法是利用延时单元来实现时间间隔测量, Jansson 等人^[8]基于 0.35 μm COMS 工艺在 FPGA 内部构建了抽头延迟线, 实现 13 ps 的测量精度. Shimizu 等人^[9]采用差分延迟线法实现了 10 ps 的分辨率. 根据应用场合的不同, 这些时间测量方法通常都不会单独使用, 而是 2 种或者 2 种以上的方法结合使用.

笔者采用基于脉冲计数法和延迟线法结合起来的高精度时间间隔测量方法, 即延迟线内插法. 德国 ACAM 公司的 TDC-GP21^[10] (以下简称 GP21) 是基于延迟线内插法的专用测时芯片, 因此, 笔者以该芯片为核心设计时间间隔测量系统, 对其测量准确度的因素进行了详细的分析, 并提出了解决方法. 最后通过实验证明, 设计的时间间隔测量系统具有测量准确度高的优点.

1 时差超声波流量计测量原理

时差法超声流量计工作原理如图 1 所示, 它是根据介质流速与超声波在介质中顺、逆传播时产生的时间差存在一定的线性关系原理进行测量的, 只要准确测量顺逆流时间差, 再根据流速与其线性关系求出流速, 进而可以求出瞬时流量以及累积流量.

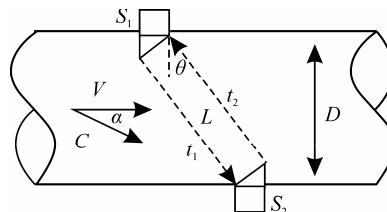


图 1 时差法超声流量计原理

收稿日期: 2012-05-31.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

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).

第一作者: 杨 亚 (1986—), 女, 贵州遵义人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统. E-mail: picture.cool@163.com

*通讯作者: 王让定 (1962—), 男, 甘肃天水人, 博导/教授, 主要研究方向: 嵌入式系统的开发与应用. E-mail: wangrangding@nbu.edu.cn

图1中, S_1, S_2 分别为2个超声波换能器, V 为液体流速, D 为管道直径, L 为超声波的声程, θ 为超声波进入液体的入射角. t_1 为换能器 S_1 发射、 S_2 接收时, 超声波在管道中传播时间, 即顺流时间; t_2 为换能器 S_2 发射、 S_1 接收时, 超声波在管道中传播时间, 即逆流时间.

超声流量计顺流时间 t_1 和逆流时间 t_2 分别用下式计算, 即:

$$t_1 = \frac{L}{C + V \sin \theta}, \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{L}{C - V \sin \theta}, \quad (2)$$

式中, C 为超声波信号在水中的声速, 设 ΔT 为顺逆流时间差, 则:

$$\Delta T = t_2 - t_1 = \frac{L}{C - V \sin \theta} - \frac{L}{C + V \sin \theta} = \frac{2LV \sin \theta}{C^2 - V^2 \sin^2 \theta}. \quad (3)$$

由于超声波在流体中传播的速度 C 远远大于被测流体的实际流速 V , 即 $C^2 \gg V^2$, 所以(3)式可以简化为:

$$\Delta T = \frac{2L \sin \theta}{C^2} V, \quad (4)$$

$$V = \frac{C^2}{2L \sin \theta} \Delta T, \quad (5)$$

这里, 超声波流量计测得的 V 是沿声道上的流体的线平均流速, 而进行流量计算时需要的是截面平均流速, 所以我们要将线平均速度 V 乘以流体修正系数 k , 最后再乘以管道的截面积 S , 便可求出瞬时流量 Q , 其公式如下:

$$Q = S \cdot kV = (\pi D^2 / 4) kV. \quad (6)$$

2 时间间隔测量的误差分析

从时差法超声波流量计原理分析可知, 影响其准确度的因素主要有三个方面: (1)机械方面: 与管道几何尺寸有关; (2)物理方面: 与流体状态相关; (3)电子方面: 与传播时间间隔测量相关. 在这三个影响准确度因素中, 第一因素可以选择精确的安装方法将精度保证在允许误差以内; 第二因素可在测量现场进行修正; 第三因素则是影响流量测量准确度的最主要因素, 也是超声波流量计的核心技术. 实验是在液体流量实验装置 DN100 管道上进行, 流速范围为 $0.2 \sim 4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 超声波换能

器安装角度为 $\theta = 55^\circ$, $C = 1480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 代入(4)式可得:

当 $V = 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $\Delta T = 16.1204 \text{ ns}$;

当 $V = 4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $\Delta T = 403.0731 \text{ ns}$.

根据间接测量的误差理论, 若间接物理量 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为直接测量的物理量, 则物理量 y 的绝对误差 σ_y 为:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2}, \quad (7)$$

式中, σ_x 表示相应物理量 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的绝对误差. 对(5)式进行如(7)式的变换, 可得:

$$\begin{aligned} \sigma_V = & \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial \Delta T}\right)^2 \sigma_{\Delta T}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 +} \\ & \left(\frac{\partial V}{\partial \theta}\right)^2 \sigma_\theta^2}^{1/2} = \sqrt{\left(\frac{C^2}{2L \sin \theta}\right)^2 \sigma_{\Delta T}^2 + \left(\frac{C \Delta T}{L \sin \theta}\right)^2 \sigma_C^2 +} \\ & \left(-\frac{C^2 \Delta T}{2L^2 \sin \theta}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(-\frac{C^2 \Delta T \cos \theta}{2L \sin^2 \theta}\right)^2 \sigma_\theta^2}^{1/2}, \quad (8) \end{aligned}$$

式中, σ_x 表示变量 $\{\Delta T, C, L, \theta\}$ 的绝对误差, 将(8)式两边同时除以 V 并整理可得:

$$\sigma_{0V} = \sqrt{\sigma_{0\Delta T}^2 + 4 \cdot \sigma_{0C}^2 + \sigma_{0L}^2 + (\theta \cdot \text{ctg} \theta)^2 \sigma_{0\theta}^2}, \quad (9)$$

其中, σ_{0V} 表示变量 $\{\Delta T, C, L, \theta\}$ 的相对误差.

这里只考虑误差全部都由 ΔT 引起, 在低流速 ($0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 下, 由(4)式计算 $\Delta T = 16.1204 \text{ ns}$, 为使 σ_{0V} 的准确度优于 0.5% , 则顺逆流时间差的标准偏差至少为 80 ps ; 在较高流速 ($4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 下, $\Delta T = 403.0731 \text{ ns}$, 为保证准确度, ΔT 的标准偏差至少为 2015 ps . 通常大流速下准确度容易保证.

综上所述, 为了满足流量计准确度等级优于 0.5% 的要求, 设计的时间间隔测量系统的测量标准偏差至少为 80 ps .

引起时间间隔测量误差的因素很多, 由超声波流量计时间差测量原理可知, 理想情况下, ΔT 是完全由流体顺逆流不同所引起的, 但实际中因为换能器和电路的因素, ΔT 不是完全由流体顺逆流不同所引起的, 而是有其他的一些额外时间差被引入的. 假定换能器 S_1 和 S_2 从接收到驱动电路电信号到发射出声波信号的转换过程中, 所引入的额外时间分别为 t_{TA} 和 t_{TB} , 从声波到达两通道换能器表面到两换能器传递出电信号给处理电路的

转换过程中引入的额外时间分别为 t_{RA} 和 t_{RB} ; 信号处理过程中电信号在两电路通道延时所引入的额外时间分别为 t_{CH1} 和 t_{CH2} . 考虑这些因素后, (1)式和(2)式分别变为:

$$t_1 = \frac{L}{C + V \sin \theta} + t_{TA} + t_{RB} + t_{CH1}, \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{L}{C - V \sin \theta} + t_{TB} + t_{RA} + t_{CH2}. \quad (11)$$

则由此得到时间差为:

$$\Delta T = \frac{2L \sin \theta}{C^2} V + (t_{TB} - t_{TA}) + (t_{RA} - t_{RB}) + (t_{CH1} - t_{CH2}). \quad (12)$$

由上述分析可知, 影响其测量准确度的因素主要有以下三方面:

(1) 时间间隔 t_1 和 t_2 的测量分辨率. 时间测量分辨率是影响测量准确度最重要的因素, 因为时间间隔测量系统的标准偏差至少为 80 ps, 那么顺逆流时间差 ΔT 的测时分辨率要优于 80 ps.

(2) 信号在换能器及处理电路中时间延迟的不一致性问题. 顺逆流信号在换能器和接收处理电路中传输延迟无法做到严格一致, 因此如(12)式所示, 会引入时间差 $t_{CH1} - t_{CH2}$.

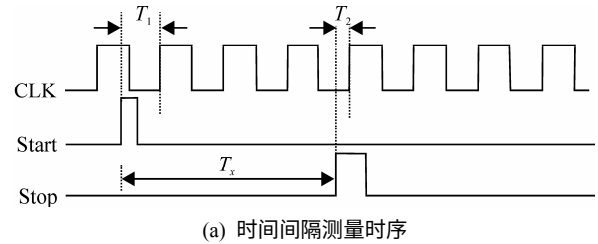
(3) 换能器性能的不对称性. 如图 1 所示, 激励信号传递给 2 个换能器 S_1 和 S_2 , 无论是从 S_1 到 S_2 或者从 S_2 到 S_1 的发射信号, 由于不同换能器性能无法绝对一致, 必然造成信号发射的时候就存在额外时间差 $(t_{TB} - t_{TA}) + (t_{RA} - t_{RB})$.

3 提高时间间隔测量准确度的方法

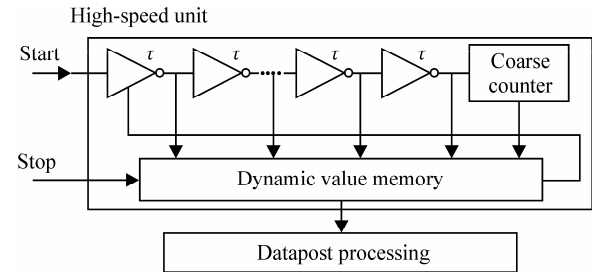
基于以上分析, 为了避免在测量过程中出现较大误差, 尽量消除各种因素对系统的影响, 提高测量准确度, 在设计过程中考虑采用以下一些方法来达到提高测量准确度的目的.

3.1 高分辨率的专用测时芯片

笔者选用基于延迟线内插法的高精度测时芯片 GP21, 它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, 测时分辨率达到了 22 ps. 方法采用了内插技术, 将被测时间间隔分为“粗时间(整周期时间)”和“细时间(不足整周期时间)”^[11]. “粗时间”通过粗计数器计基准时钟周期个数即可得到, “细时间”通过延迟线法来实现, 其测量原理如图 2 所示.



(a) 时间间隔测量时序



(b) 延迟线内插法测量结构

图 2 延迟线内插法测量原理

如图 2(b)所示, 延迟线内插法是通过脉冲信号经过的延迟单元 τ 个数进行计数的. 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 信号之间时间间隔为:

$$T_x = NT_0 + T_1 - T_2 = NT_0 + (N_1 - N_2) \cdot \tau. \quad (13)$$

可见, 精测单元实际上就是用量化步长为 τ 的延迟单元对不足一周期的时间 T_1 、 T_2 进行二次量化, 这里量化步长 τ 就是时间间隔测量的最小分辨率, 它限制了时间间隔测量的准确度. 笔者采用的 GP21 芯片测时分辨率最小为 22 ps, 远远优于 80 ps, 完全能满足系统的要求.

3.2 通道切换技术

$t_{CH1} - t_{CH2}$ 表示信号在换能器及硬件电路中的时间延迟, 该部分是无法测量的, 要消除该部分电路延迟带来的误差, 就需采用通道切换技术. 图 3 即为通道切换示意图.

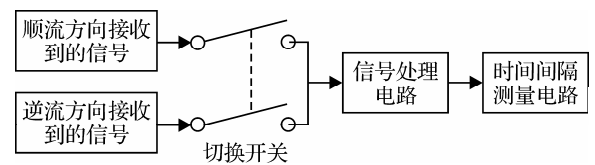


图 3 通道切换示意图

在图 3 中, 通过开关来实现换能器发射和接收的切换, 然后通过同一个信号处理电路, 这样就可以使得 t_{CH1} 与 t_{CH2} 基本一致, 将信号处理电路造成的延迟完全抵消掉. 则时差公式变为:

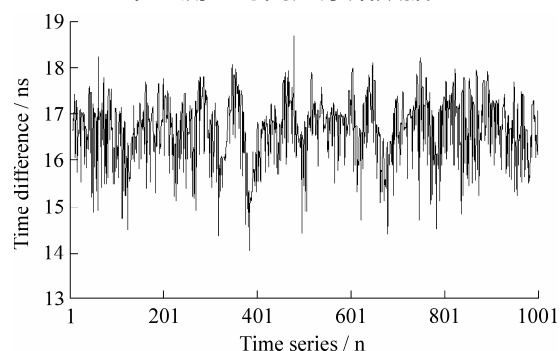
$$\Delta T = \frac{2L \sin \theta}{C^2} V + (t_{TB} - t_{TA}) + (t_{RA} - t_{RB}). \quad (14)$$

3.3 系统静态时差归零

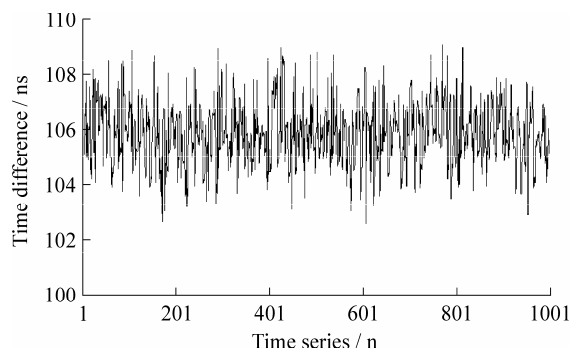
由(14)式可知, 通道切换技术可以抵消掉电路延迟引起的额外时间, 但是, 通道切换技术并不能抵消掉由于 2 个换能器性能不对称所带来的额外时间 $(t_{TB} - t_{TA}) + (t_{RA} - t_{RB})$. 在此, 可通过系统静态时差归零的方式解决此问题. 在换能器对夹装好后, 将管道内放满将要测量的流体, 使流体在管道内保持静止不动, 这时, 因为不存在顺逆流的流速差, 所以测得的时差理论上应该为零. 在切换通道电路抵消掉电路延迟的前提下, 此时测得的时差就应该是换能器性能不一致造成的时差, 在这种情况下, 将测得的时差归零. 那么, 无论是由于不同环境造成的时差变化或者互换, 2 个换能器造成的误差均可以抵消掉.

4 实验结果分析

在宁波水表股份有限公司的实验装置 DN100 管道平台上进行测试. 图 4 分别为流量点 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下的测量时间差原始数据.



(a) 流量点 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时间差测量结果



(b) 流量点 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时间差测量结果

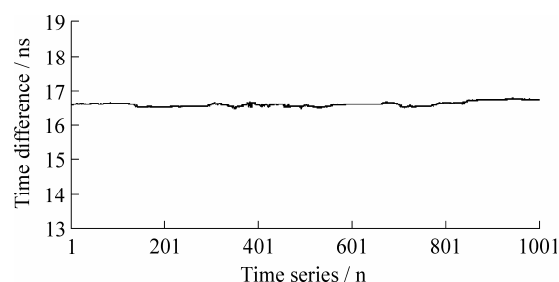
图 4 不同流量点下测量结果

由图 4 可知, 设计的时间间隔测量系统在流量

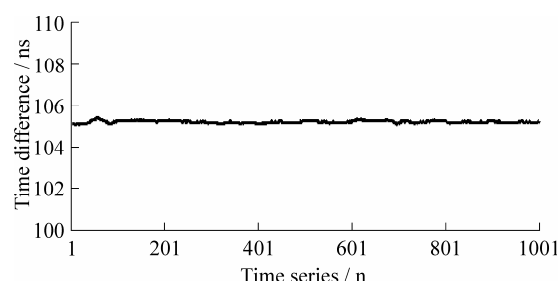
点 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下的测量标准偏差 700 ps 左右, 在流量点 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下的测量标准偏差 1 ns 左右, 不能满足流量计的准确度等级要求. 主要是因为复杂的工业现场环境噪声的干扰和各种随机因素都使测量结果准确度下降, 因此为解决此问题, 笔者引入了有效快速的滤波技术, 图 5 即为滤波后得到的测量数据.

由图 5 可以看出, 通过快速滤波技术后, 流量点 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下的测量标准偏差约为 70 ps, 流量点 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下为 33 ps, 比未作处理时准确度有很大的提高, 都在 80 ps 以内.

最后, 根据流量计检定的要求, 多次测量了几个检定流量点, 表 1 给出了在 3 个典型流量点下多



(a) 流量点 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时间差滤波后结果



(b) 流量点 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时间差滤波后结果

图 5 滤波后的测量结果

表 1 不同流量点下的测试结果

流速/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	实际值/L	测试值/L	误差/%
5	200	199.32	-0.34
		200.46	0.23
		199.12	-0.44
		200.86	0.43
8	200	199.26	-0.37
		199.24	-0.38
		1 993.86	-0.31
		1 994.32	-0.28
100	2 000	1 992.64	-0.37

次重复测量的结果,可以看到流量计的测量误差都在 $\pm 0.5\%$ 以内。

5 结语

时间间隔测量是时差法超声波流量计的核心部分,笔者将基于延迟线内插法的专用测时芯片 GP21 运用到时差法超声波流量计时间间隔测量中,对影响时间间隔测量准确度的因素进行了分析,并采用了相应的方法对这些产生误差的因素进行消除或减小。但是实验结果表明还是不能满足系统要求,通过分析导致实验结果不理想的原因主要是工业现场环境噪声(管道振动,流场扰动等)的干扰。通过采用笔者提出的快速滤波技术后,得到了较满意的效果,实验结果表明,流量计的测量误差在 $\pm 0.5\%$ 以内。

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] 王彦芳, 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] 刘强, 王让定, 姚灵, 等. 时差法超声流量计低功耗设计方法的研究[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2012, 25(2): 37-41.
- [4] 孙杰, 潘继飞. 高精度时间间隔测量方法综述[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(2):145-148.
- [5] 张廷, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. 天文学进展, 2006, 23(1):12-14.
- [6] Jansson J, Mäntyniemi A, Kostamovaara J. A CMOS time-to-digital converter with better than 10ps single-shot precision[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(6):1286-1296.
- [7] Yu Jianjun, Fosterdai F, Jaeger R C. A 12-Bit vernier ring time-to-digital converter in 0.13 μm CMOS technology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(4):830-842.
- [8] Jansson J, Mäntyniemi A, Kostamovaara J. A delay line based CMOS time digitizer IC with 13 ps single-shot precision[J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS, 2005(5):4269-4272.
- [9] Shimizu K, Kaneta M. A time-to-digital converter with small circuitry[C]. IEEE ASP-DAC 2009:1-10.
- [10] ACAM Corporation. TDC-GP21 datasheet[Z]. Germany: ACAM Corporation, 2010.
- [11] Kalisz J. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution[J]. Institute of Physics Publishing: Metrologia, 2004, 41:17-32.

Measurement on Time-interval in Transit-time Ultrasonic Flowmeter and Error Analysis

YANG Ya¹, WANG Rang-ding^{1*}, YAO Ling², ZUO Fu-qiang²

(1.Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Water Meter Co. Ltd, Ningbo 315041, China)

Abstract: On the basis of the time ultrasonic flowmeter mechanism, the main factor of affecting the transit-time ultrasonic measurement accuracy is addressed, that is, the time-interval measurement error. A special delay line-based time-interval measuring chip TDC-GP21 was used to develop a high-resolution time-interval measurement, so that the factors of influencing time-interval measurement accuracy can be fully analyzed with the corresponding countermeasure method developed. In the end, the time-interval measurement system is designed with measurement errors guaranteed to be within $\pm 0.5\%$.

Key words: ultrasonic flowmeter; time interval measurement; error analysis

(责任编辑 章践立)