Restraining Zero Drift of Time-Difference Gas Ultrasonic Flowmeter by Impedance Matching

ZHENG Xiaoyu[1], *YANG Ming*[1*], *JIN Dingfei*[2], *NIE Xili*[3]

(1.*College of Information Science & Engineering, Ningbo University, Ningbo Zhejiang* 315212, *China*; 2.*Zhejiang Tianxin Ultrasonic Technology Co*,.*Ltd*, *Hangzhou* 310016, *China*; 3.*Jinka High Science & Technology Co.*, *Ltd*, *Hangzhou* 310016, *China*)

Abstract: In flow measurement the zero drift of time-difference ultrasonic gas flowmeter would be too high, decreasing measurement accuracy of the whole system. Aiming at this occurrence, a method that restrains zero drift by matching the input impedance of sensor in transmitting state and the output impedance of the same sensor in receiving state in the channel is proposed. Use chip capacitors to raise the impedance of signal stimulation port, disengaging it from virtual ground state. Therefore, preclude the same sensor from circuit structure variation with upstream and downstream swapping. Keep the resonance frequency of the sensor unchanged. So the inherent delay of transmitting-receiving circuit of ultrasonic sensors are equal in upstream and downstream measurement. Utilize cross-correlation method to make the inherent delay in upstream and downstream cancelled out. Practical measurement shows that impedance matching effectively restrains zero drift, and zero error is restrained below 0.000 48 m^3/h at 20 ℃, conforming with grade 1.5 Gas Flowmeter National Standard.

Key words: ultrasonic gas flowmeter; zero drift; zero error; impedance match

EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2019.01.007

阻抗匹配抑制时差式气体超声波流量计零漂

郑晓宇[1], 杨 鸣[1*], 金定飞[2], 聂西利[3]

(1.宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2.浙江天信超声技术有限公司, 杭州 310016;
3.金卡高科技股份有限公司, 杭州 310016)

摘 要: 时差式气体超声波流量计在测量时现会出现零漂过大的问题, 导致整体系统计量准确度不高。针对这种情况, 提出了一种通过匹配流道中同一探头在发射状态下的输入阻抗和接收状态下的输出阻抗来抑制零漂的方法。利用贴片电容抬高信号激励端的阻抗, 使之脱离与地虚短的状态, 避免同一探头在发、收状态切换时的电路结构变化。保持探头谐振频率不变, 使超声波探头发收电路固有延时在顺、逆流测量时相等。利用互相关法使顺逆流信号中固有延时相互抵消, 实验结果表明, 阻抗匹配有效抑制了零漂, 20 ℃时零点误差被抑制在 0.000 48 m^3/h 内, 符合 1.5 级气体流量计国家标准。

关键词: 气体超声波流量计; 零漂; 零点误差; 阻抗匹配

中图分类号: TP212.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2019)01-0036-07

随着天然气资源被越来越广泛地利用, 计量行业有必要提升测量如此大量输送的气体的计量准确度。气体超声波流量计技术有着传统气体流量计量技术(比如孔板流量计、涡轮流量计、涡街流量计)所没有的优点, 它没有移动部件, 不会产生额外压差, 适合任意组份气体情况, 而且双向都能测量[1]。不仅如此, 气体超声波流量计在运作时利用测量数据可以自诊断。它快速的响应可以测量突发的流体流量, 并且结构简单, 大大减少安装和维护成本[2], 特别适合大口径天然气测量[3]。

气体超声波流量计信号处理方法主要包括时间差法、频差法和多普勒法[4]。时差法被大量运用在流量测量上, 绝对传播时间和传播时间差是流体流速函数包含的两个关键量[5]。近几年国内一些公司在持续精进工业气体超声波流量计的同时, 也逐渐投入更多财力到家用气体超声波流量计的研发, 而家用与工业用的最大的区别就是流量小、流速低。在家用的情况下, 该方法最终落实到小到几纳秒的延时时间测量, 因为在低流速时传播时间差通常只有几纳秒, 一般的流量计零漂同样也在纳秒数量级[6], 严重影响到

收稿日期: 2018-06-01 **修改日期**: 2018-10-21

计量准确度。因此,零漂是衡量气体超声波流量计的一个重要指标。实际应用中一般用到干标法(dry calibration)消除零点误差,但是该方法可能随着环境改变而失效,比如环境温度的变化[7],由此换一角度提升顺、逆流两个回波信号的一致性,也就是提高流量计量系统的互易性,来抑制零漂。

著名的电声互易原理是:对大多二端口线性电声网络,无论发生电声还是声电转换,两个端口之间的传输阻抗是不变的[8]。然而在超声流量计领域,除非加上特殊的电路,不然超声测量系统可能还是不能实现互易性原理,零漂也还是存在。过去十几年内,互易原理被研究者们多次提到。其中一种实现互易性原理的方法是找到两个完全一样的超声波探头。2002 年 Deventer 和 Deising[9]用 Leach[10]的方法在等效电路上仿真出了顺逆流两路的回波波形。研究者们对比了很多非系统的产生零漂的原因,指出当两个探头参数一样时能达到互易性的条件。但由于探头批量生产上达不到这一要求,是不可能从这个方向上实现互易操作的。因此现在研究者们把精力投入到从电路设计解决测量系统互易操作这方面。

本文首先论述时差法推出流速的计算概要,紧接着提出时差法超声波流量计存在零点误差的主要原因,通过分析超声波探头电路模型推导出同一探头在发、收状态下谐振频率的变化,拟定阻抗匹配方案维持谐振频率不变,设计出硬件电路作实验验证,将测量结果和国家标准进行分析比对。所有实验数据在宁波大学和杭州金卡公司测得。

1　时差法测流速原理

1.1　流量测量原理

气体超声波流量计测量流速的原理如图 1 所示。传输时间法导出平均线流速的公式如下

$$t_{up}=\frac{L}{c_f-V\cos\varphi} \tag{1}$$

$$t_{down}=\frac{L}{c_f+V\cos\varphi} \tag{2}$$

$$V=\frac{L}{2\cos\varphi}\frac{\Delta t}{t_{up}t_{down}} \tag{3}$$

式中:t_{up}为超声波从探头 B 到 A 的逆流传播时间;

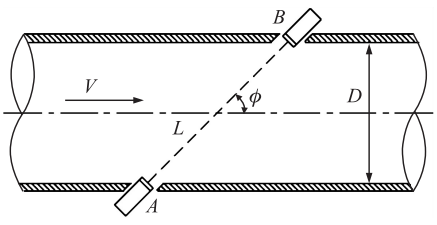


图 1　时差法测流速原理图

t_{down}为超声波从探头 A 到 B 的顺流传播时间;c_f 为超声波在流体介质中传播的速度;V 为流体的线平均速度;$\Delta t=t_{up}-t_{down}$。

超声波传输路径 L(或管径 D)和声道 Φ 的精度是由流量计管路结构决定的,数值固定不变。传播时间 t_{up}和 t_{down}一般是用阈值法和过零检测法结合来测量的[11]。

如图 2 所示,该方法是在程序里设置一个特定的阈值,回波信号经过滤波放大采样后,取信号越过阈值后的第一个过零点作为计时器结束信号[12],得出传播时间 t_{up}和 t_{down},接着由式(3)得出流体线平均流速 V[13]。瞬时体积流速 Q 由下式导出:

$$Q=AK(Re)V \tag{4}$$

式中:A 是管道横截面积,$K(Re)$表示和雷诺数有关的修正系数。

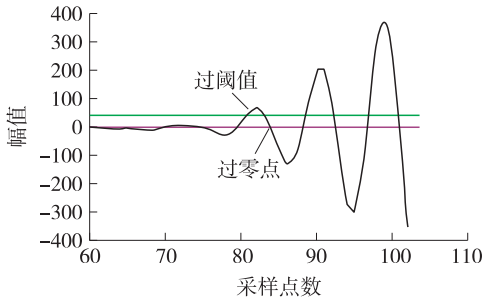


图 2　阈值法和过零检测法示意图

1.2　零流速下的误差

为保证流量测量结果的正确性,除了需要传播时间的结果准确,对于时差 Δt 的测量要求得更精确[14]。在零流速 $V=0$ 时,瞬时流量的计量往往存在比国标大的误差,将式(1)、式(2)改写为式(5)、式(6)。

$$t_{up}=\frac{L}{c_f}+\tau_{up} \tag{5}$$

$$t_{down}=\frac{L}{c_f}+\tau_{down} \tag{6}$$

式中:τ_{down}、τ_{up}分别为顺、逆流电路固有延时。接着式(3)改写为

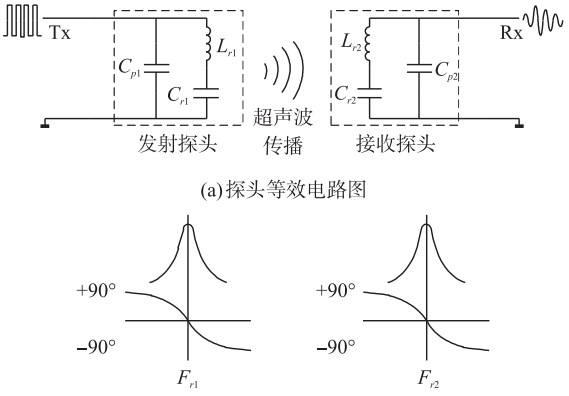
$$V=\frac{L}{2\cos\varphi}\frac{\Delta t}{(t_{up}-\tau_{up})\cdot(t_{down}-\tau_{down})} \tag{7}$$

这种情况下式(7)中的 $\Delta t=\tau_{up}-\tau_{down}$,电路固有延时时差直接影响到零点误差的大小;另一方面 t_{up}和 t_{down}在微秒级,τ_{up}和 τ_{down}在纳秒级,对式(3)来说是否将分母中的 τ 从 t 中剔除对计算结果的影响在 10^{-9}数量级,相对于国家标准的 10^{-5}数量级小太多,因此本文专注于研究导致零点误差的 τ_{up}和 τ_{down}的时间差 Δt。接下来对探头激励、接收电路建模,分析 τ_{up}和 τ_{down}产生的原因,以及提出解决方案。

2 零漂的分析与抑制

2.1 零漂问题建模

如图 3 所示,图 3(a)是探头电路模型[15]。C_{p1}、C_{p2}表示探头的静态电容,L_{r1}、C_{r1}和 L_{r2}、C_{r2}表示探头发生机械谐振时的等效电路[16]。3(*b*)是探头的幅频相频图,包含震动幅值随频率的变化曲线和相位随频率的变化曲线,可见当探头激励频率分别在发收探头的谐振频率 F_{r1}和 F_{r2}上时,幅值最大,且更为重要的相位偏移为零。对应的在式(5)和式(6)中的 τ_{up}和 τ_{down}为零,若此时流速为零,那么式(3)的计算结果也应该就是零。但实验测量零流速下流量计的流速测量结果始终不为零,其实是 F_{exc}跟 F_{r1}和 F_{r2}不完全吻合使 τ_{up}和 τ_{down}不为零才导致零点误差的。而且任意两个超声探头的热参数不尽相同,在温度变化时一对探头各自谐振频率变化也不完全一致,这是导致零漂的一个重要原因。



(a)探头等效电路图

(b)探头幅频相频图

图 3 发收探头电路模型

激励信号频率 F_{exc},与两探头谐振频率 F_{r1}和 F_{r2},实际应用中不能做到完全相等。如图 4 所示。

两个探头受激而发射出的信号都存在一定程度的相位偏移,并且它们不一定相等。上图中两个偏移都是正相,意味着两个探头都给信号加上了正相的偏移,如若一正一负的偏移,那么它们可以在某个顺流或者逆流测量时序内,在一定程度上抵消掉。这只是定性讨论,回到对这种不匹配影响最大的因素上:三个频率,F_{exc}、F_{r1}和 F_{r2}。每一度的偏移就会引起 1/360 周期的时移,当激励信号频率在 1 MHz 下,每度的偏移就会产生 2.8 ns 的时移,这个量是非常大的。对于品质 Q 越高的探头,在谐振频率周围的相位变化就越快。

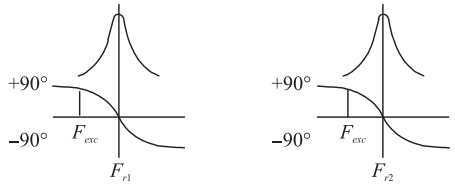
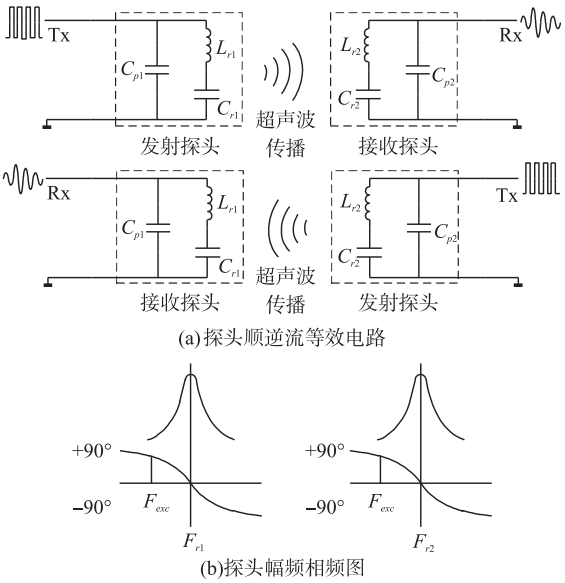


图 4 频率与相位偏移示意图

由以上可知,谐振频率和激励频率的不相等会给传播时间引入零点误差,并且谐振频率会随时间而变化,比如探头表面的来自流体沉积的残渣,此外还会随温度而改变,长时间使用下来谐振频率和激励频率的偏差会越来越大,引起零漂问题。

2.2 电路角度分析零漂

现在切换两个探头的发收状态,结合顺、逆流两种情况讨论。如图 5 所示。



(a)探头顺逆流等效电路

(b)探头幅频相频图

图 5 顺逆流测量下频率偏移示意图

图 5(a)是同一对探头的顺、逆流两种测量电路。保留激励频率不变,加上谐振频率不变(两个探头没变),因此顺逆流两种情况下两个探头各自的相位偏移保持不变,如图 5(b),使得无论顺流、逆流传播时间中都包含了相等的相位偏移,有 $\tau_{up}=\tau_{down}$。既然如此,那么所测得的相对传播时间差 $\Delta t=0$,不存在流量零点误差,然而实际中的测量还是有不小的零点误差存在,说明 τ_{up}和 τ_{down}不相等,接下来从电路具体参数角度分析。

一般激励端 T_x 输出阻抗非常小,以至于 C_{p1}被短路,如图 6 发射探头红色网络所示。探头接入激励端前后的谐振频率变化表示为

$$F_{r1}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r1}\dfrac{C_{r1}C_{p1}}{C_{r1}+C_{p1}}}}\Rightarrow F_{r1}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r1}C_{r1}}}$$

而接收端 R_x 的输出阻抗极高相当于开路,如图 6 右侧红色网络所示。探头接入接收端前后无变化,C_{p2}和 C_{r2}成串联形式,谐振频率表示为

$$F_{r2}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r2}\dfrac{C_{r2}C_{p2}}{C_{r2}+C_{p2}}}}$$

由以上可知,当探头接到激励端时,谐振频率发生变化;当探头接到接收端时,谐振频率不变。

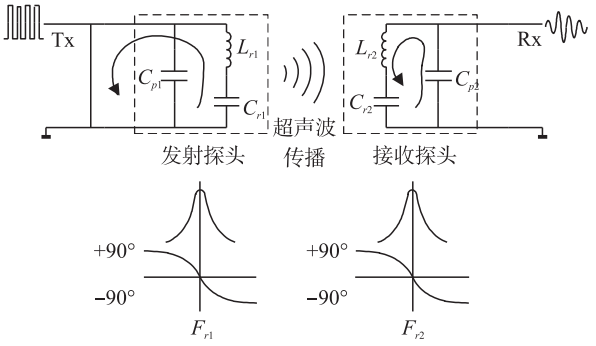


图 6　收发两种情况下探头电路参数变化图

根据图 1,逆流(upstream)测量时探头 B 接到激励端 T_x,A 接到接收端 R_x,引入的逆流相位偏移可列为

$$\varphi_{\text{upstream}}=\varphi(B,T_x)+\varphi(A,R_x) \tag{8}$$

$\varphi(B,T_x)$ 表示探头 B 连接激励 T_x 时引入的相位偏移,以下这类表示都为这个含义。

顺流(downstream)测量时,探头 B 连接 R_x,A 连接 T_x,此时相位偏移写作

$$\varphi_{\text{downstream}}=\varphi(B,R_x)+\varphi(A,T_x) \tag{9}$$

式(8)、式(9)两式中右侧的四个相位偏移都不相同,无法保证顺逆流相位偏移 $\varphi_{\text{upstream}}$ 和 $\varphi_{\text{downstream}}$ 是一致的,这也就导致 τ_{up} 和 τ_{down} 不相等的原因。

为了专注于研究电路匹配与相位偏移的关系,因此先假设两个超声波探头完全一样,那么这一对超声波探头的电路参数一模一样,顺逆流相位偏移公式变为

$$\varphi_{\text{upstream}}=\varphi(X,T_x)+\varphi(X,R_x)$$
$$\varphi_{\text{downstream}}=\varphi(X,R_x)+\varphi(X,T_x)$$

这里 φ 的变量 X 表示任意探头 A 或 B。也就是说当两个探头完全一样时,考虑进探头发收状态谐振频率变化,顺逆流相位偏移依然是相等的,不存在零点误差,也不会产生零漂。

接着假设两个探头不一样,只是它们接到激励端 T_x 时阻抗不发生变化,电路结构参数不变,由图 5 和谐振频率公式可知此时发收探头的谐振频率一样,所以相位偏移公式改写为

$$\varphi_{\text{upstream}}=\varphi(B,X)+\varphi(A,X)$$
$$\varphi_{\text{downstream}}=\varphi(B,X)+\varphi(A,X) \tag{10}$$

这里 X 表示无论发、收状态。由此可知,只要让探头在接到激励端时阻抗不发生变化,那么就能使顺逆流相位偏移相等,也就使电路顺逆流固有延时相等,消除零点误差;并且当探头谐振频率 F_{r1}(或 F_{r2})发生漂移时,保证 F_{r1}(或 F_{r2})和激励信号频率 F_{exc} 偏差变化在一定范围内,要求探头发射信号幅值不至于过低而使得接收到的信号被噪声淹没影响测量,在此前提下只要使同一探头收发状态的谐振频率一致,依然可以消除零点误差,抑制零漂。

2.3　阻抗匹配

以上先提出超声波探头的电路模型,然后分析零点误差产生的一个主要原因是探头收发状态下谐振频率不一致,谐振频率存在差别使探头在收、发两个状态下电路参数的变化,现提出两种解决电路参数不一致的方法:①确保两个探头完全匹配;②确保激励端 T_x 的输出阻抗和接收端 R_x 的输入阻抗完全匹配。第一种显然是不可行的,目前还没有批量生产工艺能达到要求。那么从第二种方法入手。这一对探头是会不停切换发收状态的,因此实际电路连接上都会有连接到激励端 T_x 和接收端 R_x 的电路。如图 7 所示。

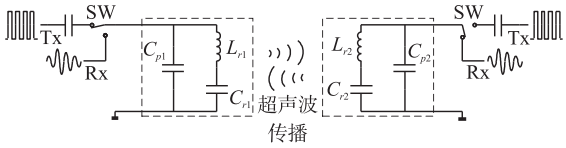


图 7　探头阻抗匹配电路

解决方法是分别在两个 T_x 激励端和两个探头之间串联一对匹配好的电容,当顺流或者逆流测量且 T_x 端处于休眠状态没有产生激励时,从此探头看过去的输出阻抗就是未加电阻前的输出阻抗和电容的串联,此时就不会发生 C_{p1} 被短路的情况。

设在某个测量时序中,如图 7,左发射右接收,此时探头谐振频率为:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r1}\dfrac{C_{r1}C_{p1}}{C_{r1}+C_{p1}}}}$$

而 R_x 端始终是和探头直接相连,电路参数与之前保持一致,其谐振频率为:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r2}\dfrac{C_{r2}C_{p2}}{C_{r2}+C_{p2}}}}$$

在紧接着的测量时序中,两个探头交换发、收状态,但由于阻抗匹配影响,它们的谐振频率各自不变,也就是相对于激励信号频率 F_{exc} 不变,使得式(10)成立,消除零点误差;当温度或其他原因导致两个探头谐振频率变化时,经由阻抗匹配依然能使探头在当前条件下保持发收状态下谐振频率一致,式(10)依然成立,消除零点误差,抑制了零漂。

3 硬件电路设计

整个系统由微控制单元(MCU),电荷放大器(AMP),模拟开关(SW)和超声波传感器(T)四个方面构成,如图 8 所示。

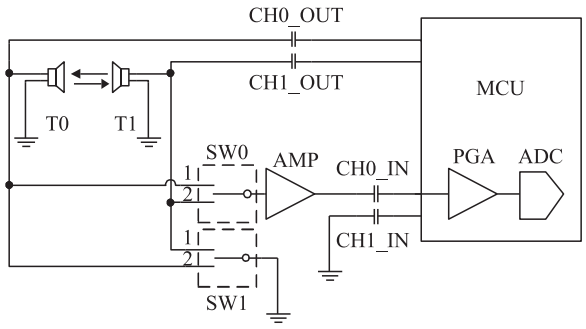


图 8 电路模块示意图

3.1 传感器阻抗匹配电路

CH0_OUT、CH1_OUT 是单片机引出的两个激励引脚,对应于第 3 节里提到的激励端 T_x,分别在顺逆流测量中产生脉冲,来激励对应连接的传感器 T_0、T_1。

如图 9,作为阻抗匹配的电容和探头实质上是串联关系,激励信号会在电容上产生分压,削弱探头受到的激励,导致接收信号幅值相应减小。考虑到探头上激励信号衰减程度和 MCU 激励引脚与地之间的隔离效果,本设计选取 3.3 nF 的电容作为阻抗匹配器件,其实验结果较好。电容在激励频率为 400 kHz 时阻抗为 758 Ω,用于抬高激励端输出阻抗,使得探头静态电容不被短路掉,保证同一探头在发、收状态下谐振频率不变,保持顺逆流电路固有延时一致,消除零漂。图中两个虚线框里分别加了一条连接大电阻接地的通路,是探头的高阻泄放电路[17]。由于超声探头具有感性和容性,受到激励后会有电荷残留,将探头和加入的匹配电容看作整体,此时接到并联的大电阻能够将残留电荷泄放掉,以免影响探头信号接收。

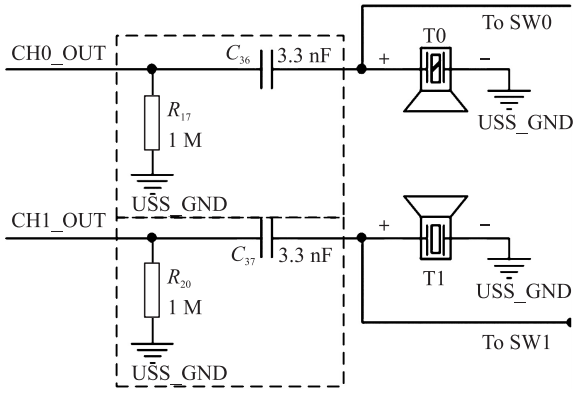


图 9 探头阻抗匹配电阻

3.2 模拟开关电路

系统模拟开关电路设计如图 10 所示。

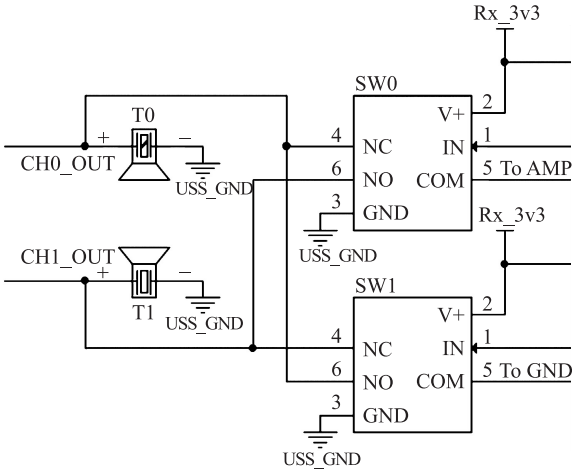


图 10 模拟开关电路

由图 8,本设计里 SW0 的 COM 脚连接放大器输入端和匹配电路,SW1 的 COM 脚通过另一匹配电路接地。

T_0 和 T_1 轮流作为超声信号发收传感器,随着两个模拟开关芯片切换选通状态,只让当前接收传感器的信号送入放大器,接着送入单片机做进一步放大和采样。

两个模拟开关的工作方式如表 1 所示。

表 1 模拟开关芯片工作方式

	IN(选择引脚)	
	L	H
COM to NO	OFF	ON
COM to NC	ON	OFF

当 T_0 作为发射传感器,T_1 作为接收传感器时,SW_0 和 SW_1 的 IN 脚给高,NO 和 COM 脚连通。那么在该信号采集时序内,发射传感器 T_0 的正极通过匹配电路接地,接收传感器 T_1 的正极接入放大器输入脚。接下来的时序内 T_0、T_1 切换收发状态,IN 脚给低,如此循环测量。

在某个顺流(或逆流,视两个探头安装顺序而定,这里只作为说明)测量时序内,依据图 8,系统先将模拟开 SW0 的 1 脚选通,与放大器的输入端和阻抗匹配电路连通;SW1 的 1 脚选通,与另一匹配电路连接后接入地。激励信号从引脚 CH0_OUT 发出,传感器 T_0 受到激励将电能转换为机械能,也就是声波,同时该信号经 SW1 输出脚匹配电路接地。和 T_0 相对的传感器 T_1 收到声波后将机械能转化为电能,电信号经 SW_0 输出给放大器,进而送入 MCU 的片上放大 PGA(程序控制增益)和 ADC 采样模

块。采集后的数据经片上运算资源计算出流速,体积流量等结果,也可以从串口传输给上位机分析。

3.3　放大器匹配电路

接收传感器产生的电信号从 SW0 出来后经过滤波输入给运放,而该运放正脚接 3.3 V 电源,负脚接地,因此给输入信号加上 1.5 V 偏置电压避免放大失真。引入电压偏置电路后为了匹配放大器输入阻抗,在另一个模拟开关 SW1 输出脚接上匹配电路,保证信号放大效果。

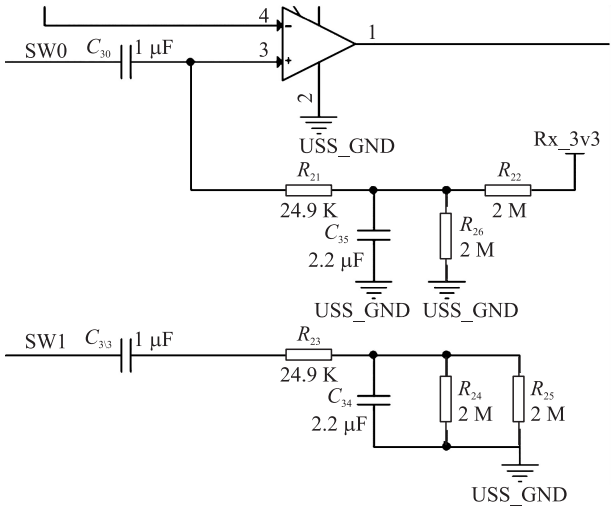


图 11　放大器与匹配电路图

3.4　电路零漂测试

经过片外运放放大的顺逆流的超声波接收信号经过单片机片内程控放大(PGA)和采样(ADC)后存储在单片机存储上,给板载显示模块显示。本文将数据从单片机上下载出来,用 MATLAB 软件进行相关法验算。

实验激励信号频率为 400 kHz、3.3 V 的方波信号,每次激励持续 30 个周期,所用探头中心(谐振)频率在 400 kHz 左右,单片机采样频率为 4 MHz。

流量实验用流道为长 25 mm 宽 9 mm 的矩形流道,这样的流道下测量流量计流速比圆形流道好。超声传播信号的流道在同样的一个最大尺寸下(直接影响到超声波传播时间测量),矩形流道的横截面积比圆形流道小,比如圆形流道直径也是 25 mm 时,矩形流道横截面积要小一半以上。由理论公式

$$V=Q/A$$

可以看出,在相同流速下,横截面积越小流量越小,因此矩形流道能感知到更小的流量。两个超声波传感器安插在流道的窄边,与流道轴线呈 40°角对射,即图 1 中的 $D=25$ mm,式(3)中 $L=D/\sin 40°$。

顺逆流传播时间测量用到第 2 节提到的阈值法和过零检测法,传播时间差的计算用到相关法,能有效的消除顺逆流测量电路固有延时带来的误差,流速由式(7)计算得出,瞬时流量由式(4)计算得出。本次实验取温度为变量,数据从-10 ℃到 40 ℃范围间隔 10 ℃检验,一共 6 组,每组测得 100 次零点误差数据,取算术平均值和计算出均方差,如表 2 所示。

表 2　零漂测试数据

温度/℃	阻抗匹配前时差/ns	阻抗匹配前标准差/ns	阻抗匹配后时差/ns	阻抗匹配后标准差/ns
-10	11.791 009 576	2.881 796 357	-2.190 402 366	0.314 376 338
0	13.209 474 445	3.266 027 437	-1.199 793 213	0.454 988 429
10	18.653 353 192	2.458 208 821	-0.577 620 863	0.394 924 295
20	28.973 753 145	2.333 085 878	0.034 857 103	0.273 051 412
30	36.929 254 131	2.594 739 721	1.196 796 103	0.322 396 668
40	49.458 085 263	2.433 663 218	1.953 519 267	0.375 592 994

从表 2 可以看出,虽然阻抗匹配电路使得式(10)成立,理论上消除零点误差并抑制了零漂,但由于实际电路中的非理想成分,使得测量系统的零点误差不为零,并且零点随着温度变化而有一定程度的漂移。尽管如此,使用阻抗匹配后的电路,相较于匹配之前的电路的零点误差和零漂有明显的改善。

阻抗匹配之前测量的常温下 20 ℃的时差均值为 29 ns 左右,同温度下加入阻抗匹配电路之后时差均值降低为 0.3 ns 左右,可见阻抗匹配消除了很大一部分的零点误差。加入阻抗匹配电路之前,温度在-10 ℃到 40 ℃内变化时,零点误差相应的在 10 ns 到 50 ns 左右的范围内变化,零漂的范围有 40 ns。加入阻抗匹配电路之后零漂的范围被抑制到 4 ns 左右,约在-2 ns 到 2 ns 内,相较于加入阻抗匹配电路之前有明显的抑制零漂的效果。

此次实验零点误差消除效果最好的是温度为 20 ℃的一组。根据 JJG(浙)30-2014 标准[18],流量计最小检测流量 q_{min} 为 0.016 m^3/h,在分界流量 $q_{min}=0.25$ m^3/h 以下。依照 1.5 级燃气表最大允许误差标准,零流速下的误差不能超过最小检测流量的±3%,也就是 0.016×±3% = ±0.000 48 m^3/h。在本实验条件下,根据式(4)、式(7),流量误差的限制等价为时间差误差的限制,时差允许变化范围±0.357 447 746 ns。本实验中 20 ℃的零点误差均值为 0.034 857 103 ns,标准差为 0.273 051 412 ns,符合最小流量 1.5 级燃气表国家标准。在其他温度下虽然阻抗匹配起到一定抑制零漂的效果,但是由于周围电路的热参数变化,零点还是存在一定程度的漂移,将在后期作温度补偿以稳定零点。

通过实验数据验证了阻抗匹配消除零点误差和抑制零漂的效果,能够改善时差法气体超声波流量

计由于探头谐振频率不一致引起的测量误差,证明了其可行性。

4 结语

针对气体超声波流量计零点误差和零漂过大的问题,为了提升整体系统计量准确度,提出了一种新的通过匹配发射探头的输入阻抗和接收探头的输出阻抗方法,来对零流速下包含了零漂误差的信号进行处理。通过实验验证,该方法有效地提高了气体超声波流量计的计量准确度,具有可行性。

大量统计温漂数据以确定最佳温度补偿算法来稳定测量系统在经过阻抗匹配之后的零点,是本研究下一步的主要工作。

参考文献:

[1] Brassier P,Hosten B,Vulovic F. High-Frequency Transducers and Correlation Method to Enhance Ultrasonic Gas Flow Metering[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2001,(12):201-211.

[2] 张涛,蒲诚,赵宇洋. 传播时间法超声流量计信号处理技术进展述评[J]. 化工自动化及仪表,2009,36(4):1-7.

[3] Hauptmann P,Hoppe N,Puttmer A. Review Article:Application of Ultrasonic Sensors in the Process Industry [J]. Measurement Science & Technology,2002,13(8):R73-R83.

[4] 范思航,时文娟,黄艳芝,等. 超声波多普勒流量计换能器的研究与应用[J]. 国外电子测量技术,2014,33(2):84-88.

[5] Zhu W J,Xu K J,Fang M,et al. Mathematical Modeling of Ultrasonic Gas Flow Meter Based on Experimental Data in Three Steps [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement,2016,65(8):1-13.

[6] 郑丹丹,付星熠,杨志斌. 抑制气体超声波流量计零点漂移的互易性电路设计[J]. 传感器与微系统,2016,36(12):112-117.

[7] Yang B,Cao L. Luo Y P. Forced Oscillation to Reduce Zero Flow Error and Thermal Drift for Non-Reciprocal Operating Liquid Ultrasonic Flow Meters[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2011,22(4):257-264.

[8] Foldy L L,Primakoff H. A General Theory of Passive Linear Electroacoustic Transducers and the Electroacoustic Reciprocity Theorem[J]. Journal of the Acoustical Society of America 1945,17(2):109-120.

[9] van Deventer J,Delsing J. Apparent Transducer Non-Reciprocity in an Ultrasonic Flow Meter[J]. Ultrasonics 2002,40(1-8):403-405.

[10] Jr Leach W M. Controlled-Source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics,Ferroelectrics and Frequency Control 1994,41(1):60-66.

[11] 田雷,许科军,沈子文,等. 基于气体超声波流量计的间歇激励和信号处理[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(11):1774-1781.

[12] 田雷,徐科军,沈子文,等. 基于回波峰值拟合的气体超声波流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报,2017,33(7):1107-1114.

[13] 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.

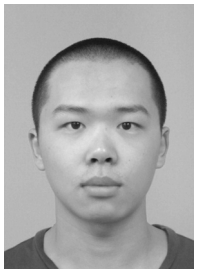
[14] Takamoto M,Ishikawa H,Shimizu K,et al New Measurement Method for Very Low Liquid Flow Rates Using Ultrasound.[J]Flow Measurement and Instrumentation 2001;12(4):267-273.

[15] 张沛霖,张仲渊. 压电测量[M]. 北京:国防工业出版社,1983:31-37.

[16] Yang B,Cao L. Electronic Circuit Design for Reciprocal Operation of Transit-Time Ultrasonic Flow Meters[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2013,32:5-13.

[17] Caliano G,Caronti A,Baruzzi M,et al. PSpice Modeling of Capacitive Microfabricated Ultrasonic Transducers[J]. Ultrasonics,2002,40:449-455.

[18] 金岚,陈超洋,陈赏顺. JJG(浙)130-2014 超声波燃气表检定规程[S]. 浙江:浙江省质量技术监督局,2014.



郑晓宇(1993-),男,在读研究生,主要研究方向为电子系统设计与开发,气体超声波流量计,281236317@qq.com;

杨 鸣(1963-),男,研究员,1987 年毕业于西北工业大学获硕士学位。主要研究方向为光机电一体化专业设备制造技术,显微镜数字成像及处理技术,气体超声波流量计,yangming@nbu.edu.cn。