

基于超声波相位差的气体浓度测量方法^①

丁喜波^{②*} 陈 晨* 张 任^{③**} 鲍 龙* 高 双*

(* 哈尔滨理工大学测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室 哈尔滨 150080)

(** 塔里木大学信息工程学院 阿拉尔 843300)

摘 要 进行了将超声波用于气体浓度测量的研究,依据超声波在不同浓度的气体中有不同声速的特性,提出了一种基于超声波的相位差测量气体浓度的方法。该方法采用检相式气体浓度测量原理,通过把超声波的速度变化转换成相位差变化,用测得的相位差变化来反映气体浓度的变化。完成了用超声波检测气体浓度的系统的设计,分析了影响超声波相位差法测量精度的主要因素——温度因素并提出了补偿方法。采用甲烷进行了浓度测量实验,实验结果表明该方法具有精度高、测量方便、成本低等许多常用检测方法不具备的优点,具有较好的应用前景。

关键词 超声波,气体浓度,相位差,温度补偿

0 引 言

气体浓度检测在矿业、化工、医药、轻工业等领域中有广泛应用,因而气体浓度检测技术研究一直受到重视。本文研究了用超声波方法测量气体浓度的技术,提出了一种基于超声波相位差的气体浓度检测方法。超声波在气体中传播时,由于气体成分及浓度的不同,其声学性能(如声速)在一定程度上会有所改变,所以通过测量声学参数可以得到被检测气体的浓度。利用超声波测量气体浓度的基础实验就是基于声学特性的测量,利用声学特性的常用方法有共振干涉法、临界角法、脉冲时差法^[1,2]。共振干涉法很早以前就被用来测量声速,但是其机械装置很复杂,测量时间长。临界角法用于声速的测量精度较差。脉冲时差法是用来测量声速最常用的方法,它通过测量声波在媒质中传播的时间来测量声速,这种测量方法的缺点是时差测量精度不够高,不能满足检测气体微量浓度的要求。本文提出的基于超声波相位差法进行气体浓度测量的方法,是一种间接时差法,它通过检测相同声程的两路接收信号的相位差来反映气体浓度,将得到的相位差利用

单片机处理运算从而实现气体浓度的精确测量,它具有精度高,测量方便,成本低等优点。

1 用超声波测量气体浓度的方法的总体设计

本文提出的基于相位差测量气体浓度的方法与其他超声波方法相比,主要的不同是增加了一对收发超声波传感器。这对收发超声波传感器放置在纯净空气中,传感器的间距(声程 L)与另一对置于待测气体中的收发传感器的间距完全相同。两个发射超声波探头在同一正弦波驱动信号激励下发射超声波信号,声波分别经两条相等的路径到达接收超声波探头。测量系统总体框架见图1。

由于待测气体与纯净空气的声速差随着待测气体浓度变化,因而可以观察到两个接收超声波探头的接收信号间相位差随着发生变化。对这两路接收信号进行滤波放大和过零比较,采用检相模块得到两路信号的相位差,再将该相位差信号经过占空比/电压转换电路转换为电压信号后送入MSP430F2274单片机,经过单片机数据处理得到待测气体的浓度,再经显示模块进行浓度显示,并通过

① 国家自然科学基金(61179023)资助项目。

② 男,1963年生,博士,教授;研究方向:安全检测技术,危化品监测技术等;E-mail:dingxibo2002@sina.com

③ 通讯作者,E-mail:292734576@qq.com

(收稿日期:2013-04-25)

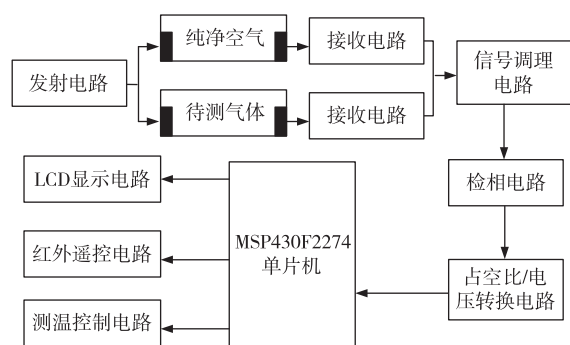


图 1 系统总体框架图

测温电路进行数字温度补偿^[3,4]。

2 检相式超声波测量理论分析

检相式超声波测量法是一种间接时差测量法,它通过把声速变化转换成相位差变化,用测量出的相位差变化来反映气体浓度变化。因此需要分析造成声速变化的各种影响因素,建立声速、温度、相位差、气体浓度关系的数学模型。

检相式测量采用两对声程间距 L 完全相同的超声波发射探头和接收探头,但是声程 L 由于机械结构尺寸和安装问题可能带来定位误差 ΔL ,因为超声波传感器配置形式对于后续信号处理的影响很大,所以不能忽略此误差。图 2 是超声波气体浓度的测量原理示意图。

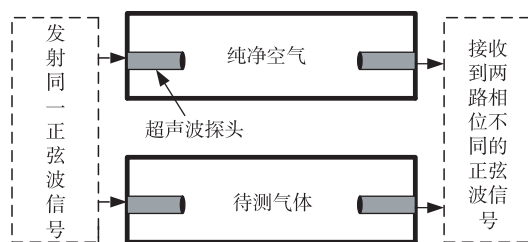


图 2 超声波气体浓度的测量原理图

设环境温度为 T , 超声波在空气中传播速度为 C_t , 在待测气体中的传播速度为 C_{tx} , 待测气体的浓度为 x , 则有下列式成立^[5]:

$$\begin{cases} C_{tx} = C_t(1 + K_2x) \\ C_t = C_0(1 + K_1T) \end{cases} \quad (1)$$

其中, C_0 为 0°C 时超声波在空气中的传播速度; K_1 为超声波在空气中的温度系数; K_2 为与待测气体和背景气体(通常为空气)间声特性差异系数。且有下式成立:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{1}{C_{tx}} \\ t_2 = \frac{L + \Delta L}{C_t} \end{cases} \quad (2)$$

其中 t_1 和 t_2 分别为超声波在待测气体和空气中传播距离 L 所用的时间; L 为发射探头与接收探头之间的距离; ΔL 为声程间距偏差。

所以有

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_1 - t_2 = \frac{L}{C_{tx}} - \frac{L + \Delta L}{C_t} \\ &= \frac{L}{C_t(1 + K_2x)} - \frac{L + \Delta L}{C_t} \end{aligned} \quad (3)$$

在待测气体浓度较低或待测气体和背景气体间声特性差异系数较小时, 由于 $K_2x < 1$, 式(3)可近似表达为

$$\Delta t \approx \frac{1}{C_t}(-K_2Lx - \Delta L) \quad (4)$$

根据 $\Delta\varphi = 2\pi f\Delta t$, 其中 $\Delta\varphi$ 为两路接收信号的相位差; f 为超声波发射频率。可根据测得的相位差 $\Delta\varphi$ 计算出气体的浓度 x 。

$$\text{令 } \theta = \Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$$

则有

$$\theta = \frac{1}{C_t}(-K_2Lx - \Delta L) \quad (5)$$

结合式(1)可得

$$x = -\frac{\theta C_0(1 + K_1T) + \Delta L}{K_2L} \quad (6)$$

气体浓度进行标定时, 若标定 0 点浓度, 即 $x = 0$, $T = T_0$, $\theta = \theta_0$, 则

$$\Delta L = -\theta_0 C_0(1 + K_1T_0) \quad (7)$$

若标定浓度为 x_1 点, 即 $x = x_1$, $T = T_1$, $\theta = \theta_1$, 则

$$K_2L = -\frac{\theta_1 C_0(1 + K_1T_1) - \theta_0 C_0(1 + K_1T_0)}{x_1} \quad (8)$$

将式(7)和式(8)整体代入到式(6)中即可得到

$$x = \frac{x_1[\theta(1 + K_1T) - \theta_0(1 + K_1T_0)]}{\theta_1(1 + K_1T_1) - \theta_0(1 + K_1T_0)} \quad (9)$$

式中 K_1 、 T_0 、 T_1 、 x_1 、 θ_1 、 θ_0 均为已知量, 则可以看出气体浓度 x 和相位差 $\Delta\varphi$ 和环境温度 T 有关, 即只要知道当前环境温度 T , 在通过设计的检相电路获得相位差 $\Delta\varphi$, 即可代入式(9)计算出当前待测气体浓度值 x 。

式(9)充分考虑了实验室标定与实际应用环境温度的差异, 进行数据处理简便易行, 算法设计及软

件编程容易,不需要对时间差进行直接测量,提高了测量精度。

3 影响测量精度的因素及解决方法

3.1 超声波发射探头中心频率的选择

超声波在气体中的声速与超声波发射探头的中心频率没有关系,但是从测量声速的精确度的角度看,发射探头中心频率的提高可以提高后续检测电路对信号处理能力以及接收信号的稳定性。从超声波声学中声衰减的角度看,它的衰减特性曲线说明随着中心频率的升高,较高的声波频率对检测气体浓度敏感程度较高^[6]。但是随着频率的升高,后续检测电路对于高频信号的处理就很困难,另一方面造成接收探头的信号幅度非常微弱,增加了接收信号的处理难度。所以,选择合适的超声波发射探头的中心频率,才能得到稳定的接收信号,提高后续检测信号的精度,后续处理才能顺利进行,这样对信号处理才有意义。经理论与实验分析,本文选用200kHz作为发射探头中心频率。

3.2 温度影响分析及补偿方法

温度对气体中的声学参数影响很大,通过实验观察,气体浓度不变,当改变气体温度时,超声波在气体中传播的声速变化很大,并且温度的变化与气体浓度的变化对声速的影响在同一量级,所以温度是影响测量精度重要因素。本文在硬件以及软件上同时采取补偿措施。硬件电路将采用18B20数字温度传感器,12位的分辨率可以满足数字温度补偿的要求^[7,8]。在标定0点和用标准气体标定灵敏度时,用18B20采集标定时环境温度 T_0 、 T_1 ,并存储到单片机内。进行浓度测量时,测出当前环境温度 T ,按照式(9)建立数学模型,利用单片机进行软件温度补偿,从而将温度对浓度测量的影响达到最低。

4 测量实验及结果分析

实验中将100%标准甲烷气体与纯空气配比成浓度分别为20%、40%、60%的混合气体作为实验标准待测气体。在环境温度为25℃的条件下,选用200kHz的超声波发射频率作为发射探头的中心频率,并用50%的标准甲烷气体作为实验标定气体对测量装置进行标定。将配制的混合气体分别进行测量,得到3组相位差值。由测量得到的相位差值根据式(9)处理得到混合气体的测量浓度,测量装置

的测量浓度与气体的配制气体浓度偏差反映测量的精度,测量结果对比见表1。

测量结果表明利用超声波相位差法测量甲烷气体浓度的误差不超过1%,说明利用此方法的测量的精度可以满足测量要求。实验和测量过程中如果环境温度发生了较大变化,进行温度补偿可以减少环境温度变化的影响,扩大应用范围。

表1 甲烷气体浓度实验数据

标准样品浓度 (%)	测得相位差 (rad)	浓度测试结果 (%)	浓度误差 (%)
0	0.51	0.0	0.0
20.0	1.55	20.6	+0.6
40.0	2.54	40.5	+0.5
60.0	3.47	59.2	-0.8

5 结论

本文在目前应用广泛的用超声波直接时差法测量气体浓度的基础上,提出了检相式超声波间接时差法,并采用甲烷气体进行了实测,测试效果表明利用相位差测量气体浓度方案可行。该测量方法克服了直接时差法的信号处理和测量电路复杂问题,提高了测量精度,简化了电路设计,在工业测量气体浓度领域将有广阔的发展前景。

参考文献

- [1] Vyas J C, Katti V R, Gupta S K, et al. A non-invasive ultrasonic gas sensor for binary gas mixtures. *Sensors and Actuators B*, 2006, 115(1): 28-32
- [2] 孟瑞锋, 刘振锋, 钟建军等. 基于超声多重反射法测量高衰减流体媒质声阻抗及浓度. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 156-159
- [3] 朱昌平, 单鸣雷, 刘永富. 基于CPLD的SF6微量气体浓度检测仪. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8): 448-449
- [4] Fukuoka H, Inoue M, Kato Y, et al. Gas concentration measurement using ultrasonic. In: 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics, Tokyo, Japan, 2012. 67-68
- [5] Vyas J C, Katti V R, Gupta S K, et al. A non-invasive ultrasonic gas sensor for binary gas mixtures. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2006, 115(1): 28-32
- [6] Zhao W J, Sun X K, Deng X N, et al. Cloud point extraction coupled with ultrasonic-assisted back-extraction for the determination of organophosphorus pesticides in con-

- centrated fruit juice by gas chromatography with flame photometric detection. *Food Chemistry*, 2011, 127 (2) : 683-688
- [7] Mauricio J M, Catunda Y C, Tanscheit R. Maximum-likelihood data fusion of phase-difference and threshold-detection techniques for wind-speed measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58 (7) :2189-2195
- [8] 江泽涛, 俞子荣, 万光逵. 微机化的超声液体浓度在线检测仪. *仪器仪表学报*, 2001, 22 (3) :240-243

A gas concentration measurement method based on ultrasonic phase difference

Ding Xibo^{*}, Chen Chen^{*}, Zhang Ren^{**}, Bao Long^{*}, Gao Shuang^{*}

(^{*} Higher Educational Key Laboratory for Measuring & Control Technology and Instrumentation of Heilongjiang Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

(^{**} College of Information Engineering, Tarim University, Alar 843300)

Abstract

Ultrasonic was applied to the measurement of gas concentration, and a new gas concentration measurement method based on ultrasonic phase difference was proposed according to ultrasonic's speed characteristic that the ultrasonic speed changes with the gas concentration. The method adopts the phase detected principle for gas concentration, and transfers the ultrasonic speed changes into the changes of phase difference, using the obtained changes of phase difference to indicate the changes of gas concentration. The design of an ultrasonic based gas concentration detecting system was also completed, and the main factors affecting the gas concentration measurement accuracy, such as the temperature factor, were analyzed and the solutions were given. The results of the methane concentration experiment show that the detecting method has many advantages compared with other methods in common use, and it will have a brightly application prospect.

Key words: ultrasonic, gas concentration, phase difference, temperature compensation