

超声波甲烷浓度检测系统的设计

侯广平, 丁喜波, 王如月, 何 鑫

(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)

摘 要: 针对超声波甲烷气体检测精度的问题, 提出了一种超声波甲烷浓度检测系统的研究, 建立了声速与气体浓度的数学模型, 在超声波直接测量时间差法的基础上, 采用超高精度的时间数字转换芯片 TDC-GP21 完成时间的精密测量。完成了超声波甲烷浓度系统设计, 分析了测量精度的主要影响因素——时间测量并提出了解决方法。采用甲烷气体对系统进行测试和验证, 实验结果表明该检测方法的相对误差小于 2%, 具有精度高、测量方便、成本低等优点, 具有很好的应用前景。

关键词: 超声波; 甲烷; 声速; 时间测量; TDC-GP21

DOI: 10.15938/j.jhust.2020.01.018

中图分类号: TB559 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2020)01-0121-06

Design of Ultrasonic Methane Concentration Detection System

HOU Guang-ping, DING Xi-bo, WANG Ru-yue, HE Xin

(Higher Educational Key Laboratory for Measuring and Control Technology and Instrumentation of Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: For the problem of ultrasonic methane gas detection accuracy, a research on ultrasonic methane concentration detection system is proposed, established a mathematical model of sound velocity and gas concentration. Based on the ultrasonic direct measurement time difference method, the ultra-high precision time digital conversion chip TDC-GP21 is used to complete the precise measurement of time. The design of ultrasonic methane concentration system was completed, and the main influencing factors of measurement accuracy were analyzed. Time measurement and solution were proposed. The system was tested and verified by methane gas. The experimental results show that the relative error of the detection method is less than 2%. It has the advantages of high precision, convenient measurement and low cost, and has a good application prospect.

Keywords: ultrasonic; methane; sound velocity; time measurement; TDC-GP21

0 引 言

在工业生产、日常生活中甲烷浓度检测的需求

很广泛。传统的甲烷浓度检测方法有催化燃烧法、半导体气敏法、红外吸收法等^[1-3]。传统的测量方法面临测量范围小、成本高等问题, 超声波法是近年来随着测量技术的发展而出现的新的检测技术, 这

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(61179023)。

作者简介: 侯广平(1995—), 女, 硕士研究生;

王如月(1992—), 女, 硕士研究生。

通信作者: 丁喜波(1963—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: 747791338@qq.com。

种非接触式的测量方法受到极大的关注,测量范围宽,精度高,测试设备体积小,寿命长,稳定性好^[6]。近年来,超声波检测已被广泛应用在气体检测领域,国内外在超声波检测上的研究成果已十分丰富^[7-9]。

超声波检测方法主要有相位差法、脉冲法。相位差法的测量原理是超声波发射探头被持续的脉冲激励,通过检测相同声程的两路超声波接收信号的相位差来反映气体浓度^[10-11];脉冲法的测量原理是超声波发射探头被一组5~10个脉冲激励,以超声波在介质气体中传播时间来得到气体浓度^[12-14]。超声波相位差法是超声波在相同环境下的两个传输通道内分别在空气和甲烷中传播^[15],测量两路超声波的相位差,这种方法可以减小环境带来的干扰以及系统误差,但是持续发射的超声波会在两个探头之间形成反射,对信号造成很大的干扰,引起不可忽视的误差;常用的脉冲法的测量过程是这样:采用一对距离固定的超声波传感器,从发射探头向接收探头发射脉冲信号,发射的同时启动单片机计数器,当检测到接收信号的幅值超过参考阈值时停止计数,此时计数器的值乘以计数周期就是超声波传输时间,进而得到超声波速度。同时采集温度参数,测得气体浓度。脉冲法避免了回波反射造成的干扰问题,但是它的测量精度取决于处理器和温度传感器,超声波在待测介质中的传播时间是微秒级,假设要求的测量精度为0.1,则处理器需要纳秒级的计数周期,主频需要达到1GHz,普通的处理器很难达到要求,高速MPU成本太高。

针对现有的技术问题,设计了一种基于时间数字转换芯片的超声波甲烷浓度检测装置,在超声波脉冲法的基础上使用了一个时间数字转换芯片TDC-GP21来测量超声波的传输时间,同时采集温度信息,可以完成高精度的测量。

1 测量原理及检测系统方案设计

1.1 测量原理

对于同一种理想气体,不论在什么状态下,气体常数的数值都是不变的^[16-17]。

$$v = \sqrt{kRT} \quad (1)$$

其中, v 表示声速, k 表示气体绝热系数, R 表示气体常数, T 表示开氏温度。由声速式(1)可以看出,在近似相等的绝热系数和同一开氏温度下,气体常数与声速呈正相关。甲烷的气体常数值远远高于其他气体,因此可以利用通过甲烷气体传播的声速与通过其他气体传播的声速显著不同检测出甲烷气体

的浓度值。

本设计对超声波在气体中传播时影响其传播速度的因素进行分析,确立了时间、声速、温度和气体浓度的数学关系式。

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 ,则有下列公式成立:

$$\left. \begin{aligned} C_{tx} &= C_t(1 + K_2x) \\ C_t &= C_0(1 + K_1T) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

公式中 C_0 为0度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 为待测气体的浓度比例系数,数值在0~1间。

在超声波时间测量中有下式成立:

$$t = \frac{L}{C_{tx}} \quad (3)$$

其中 t 为超声波在待测气体中传播距离 L 所用的时间; L 为发射探头与接收探头之间的距离。所以有

$$t = \frac{L}{C_{tx}} = \frac{L}{C_t(1 + K_2x)} = \frac{L}{C_0(1 + K_1T)(1 + K_2x)} \quad (4)$$

依据测量得到的时间差 t 计算出气体的浓度 x 。即推出气体浓度:

$$x = \frac{L}{C_0(1 + K_1T)K_2t} - \frac{1}{K_2} \quad (5)$$

绝热系数与气体常数要根据实验数据修正。

测量开始之前分别对 $x=0$ 和 $x=x_1$ 两点的气体浓度标定:

$x=0, T=T_0, t=t_0$ 时有

$$L = t_0 C_0(1 + K_1T_0) \quad (6)$$

$x=x_1, T=T_1, t=t_1$ 时有:

$$K_2 = \frac{t_0 L T_0}{t_1 x_1 (T_1 L - t_0 C_0 T_1 + t_0 C_0 T_0)} - \frac{1}{x_1} \quad (7)$$

将式(6)和式(7)整体代入到式(5)中可得到气体浓度 x 的计算公式:

$$x = \frac{x_1 t_1 (L T_1 - t_0 C_0 T_1 + t_0 C_0 T_0) [L T_0 - t (L T - t_0 C_0 T + t_0 C_0 T_0)]}{t (L T - t_0 C_0 T + t_0 C_0 T_0) [L T - t_1 (L T_1 - t_0 C_0 T_1 + t_0 C_0 T_0)]} \quad (8)$$

1.2 检测系统方案设计

在进行甲烷浓度检测时,检测装置测量超声波传播时间,再由处理器处理成浓度值。

检测装置包括单片机系统,超声波发射电路,气腔,超声波接收电路,测量电路,检测系统硬件结构如图1所示。检测仪将两个超声波探头安置在测量通道两端,测量通道与外界环境相通,发射探头由方波脉冲信号驱动。通道的长度确定,将发射信号与接收信号的时间差测出来即得到声波的速度。

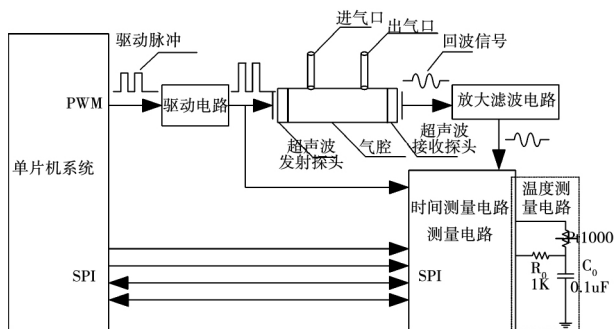


图 1 甲烷浓度检测硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure diagram of methane concentration detection

单片机系统定时器控制 PWM 为超声波发射探头提供驱动信号, 测量电路主要由时间数字转换芯

片 TDC-GP21 完成, 时间测量电路与单片机和超声波接收电路相连, 由激励脉冲和回波信号触发; 用于补偿功能的温度测量电路是时间数字转换芯片 TDC-GP21 外围连接一个铂电阻和电容自动完成温度测量; 单片机系统与测量电路通过四线制 SPI 接口连接, 控制时间数字转换芯片的工作以及接收处理数据。

2 系统硬件设计

2.1 单片机系统设计

单片机控制电路采用 PIC16F883 型号单片机作为处理芯片, 如图 2 所示, 包括单片机工作的最小系统、PWM 输出、TDC 控制电路、红外检测。

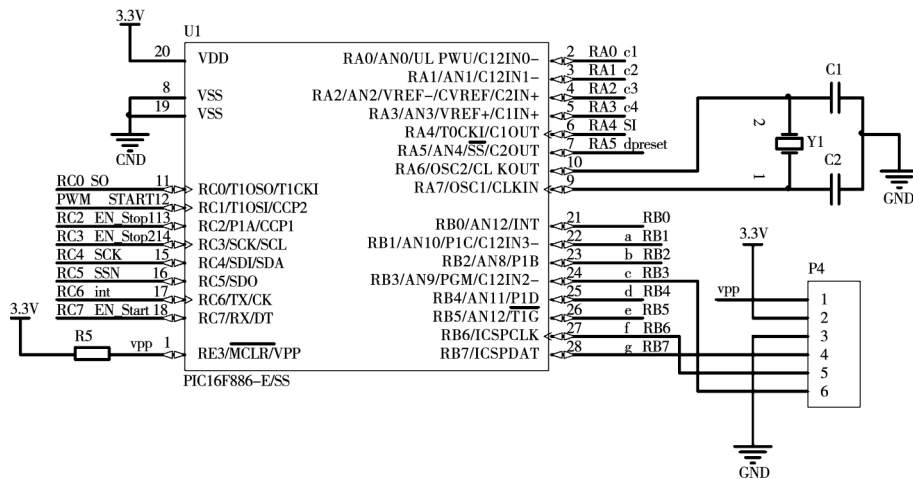


图 2 单片机控制电路图

Fig. 2 SCM control circuit diagram

对于超声波发射探头可以采取方波信号或正弦波信号方式驱动, 考虑到方波脉冲容易实现, 采用方波驱动。超声波的驱动脉冲由 PWM 模块输出的。单片机内部的比较/捕获模块的 PWM 模式可产生频率和占空比都可变化的脉宽调制信号。由单片机定时器 TMR2 的 PWM 方式输出 200 kHz, 0 ~ 3.3 V 的方波信号, 由单片机 RC1 口输出, 经过驱动电路放大后激励超声波探头。

用于时间测量的时间数字转换芯片由单片机控制, 配置工作方式、上电、开启/关断测量工作。硬件电路部分由四线制 SPI 通信接口相连进行数据的写入和读出。时间测量的使能、复位、中断也由单片机 I/O 口控制。

红外检测通过外部中断引脚 RB0 接收红外遥控器的信号, 用于甲烷浓度的标定。

2.2 超声波驱动电路设计

由于单片机输出的方波脉冲驱动能力不够, 导

致超声波接收装置得到的回波信号幅值太小, 无法采集, 因此需要驱动电路放大后激励超声波探头工作。方波驱动电路如图 3 所示, 经过 N 沟道 MOS 管两级驱动获得与单片机输出频率相位相同的高能量方波, 输出电压 0 ~ 12 V, 电流 120 mA, 这样的激励信号可以使超声波的回波振幅达到 200 mV 左右。

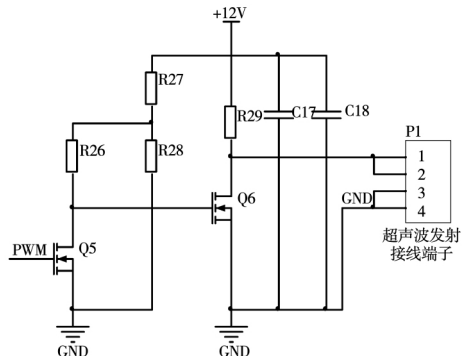


图 3 方波驱动电路图

Fig. 3 Square wave drive circuit diagram

2.3 回波处理电路设计

回波信号是一个振幅为 200 mV 左右的正弦震荡信号,为了降低干扰,测量准确,需要将回波信号进行必要的放大和滤波。超声波探头作为回波信号的信号源阻抗较大,在测量时必须进行阻抗匹配。如图 4 所示,回波处理电路共分三级,选择输入电阻较大输出阻抗很小的运放 OP184 设计一级跟随器;根据信号的压摆率选择超精密运放 OPA4197 设计

二级放大电路,放大倍数 10 倍,将回波信号放大到幅值 0 ~ 2 V 左右;三级电路设计一个无限增益带通滤波器,通频带 10 ~ 400 kHz。电路由单电源供电,一级跟随电路在回波信号上增加一个 2.5 V 的直流信号以保证回波信号在轨到轨的放大器作用下不会失真。在处理电路的输出端加入滤波电容将直流分量滤掉。

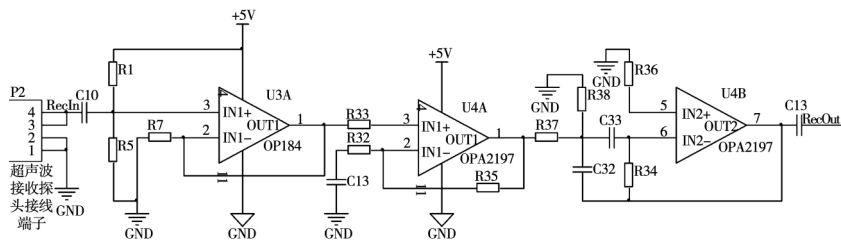


图 4 回波处理电路图

Fig. 4 Echo processing circuit diagram

2.4 时间测量电路设计

测量系统中时间的测量由德国 ACAM 公司的时间数字转换芯片 TDC-GP21 完成。时间数字转换芯片 TDC-GP21 应用内部的逻辑门延迟来以高精度测量时间间隔^[18-20],测量时由芯片的 START 引脚接收到脉冲信号触发测量,STOP 引脚接收到一个数字信号结束测量。TDC 的内部测量方法是测量从 START 或 STOP 信号到相邻的基准时钟上升沿之间的间隔时间 (fine-counts),在两次精密测量之间,TDC 记下基准时钟的周期数 (coarse-count)。时间数字转换芯片 TDC-GP21 内部集成了一个额外的模拟电路输入部分,经过回波处理电路处理之后的模

拟信号可以直接输入到 TDC 测量。

TDC 的测量电路如图 5 所示,Start 引脚接收单片机产生的脉冲信号触发时间测量,脉冲信号经过驱动电路激励超声波探头,超声波接收探头接收到的回波信号经处理电路处理后输入到 TDC-GP21 的 STOP 引脚,回波信号作为时间测量终止的信号,TDC-GP21 自动计算时间。温度的采集也由 TDC-GP21 完成。TDC-GP21 对温度的测量是通过测量铂电阻对电容的放电时间进行的,温度测量自动完成,查询温度传感器的温度表格以获得传感器测得的当前温度值。

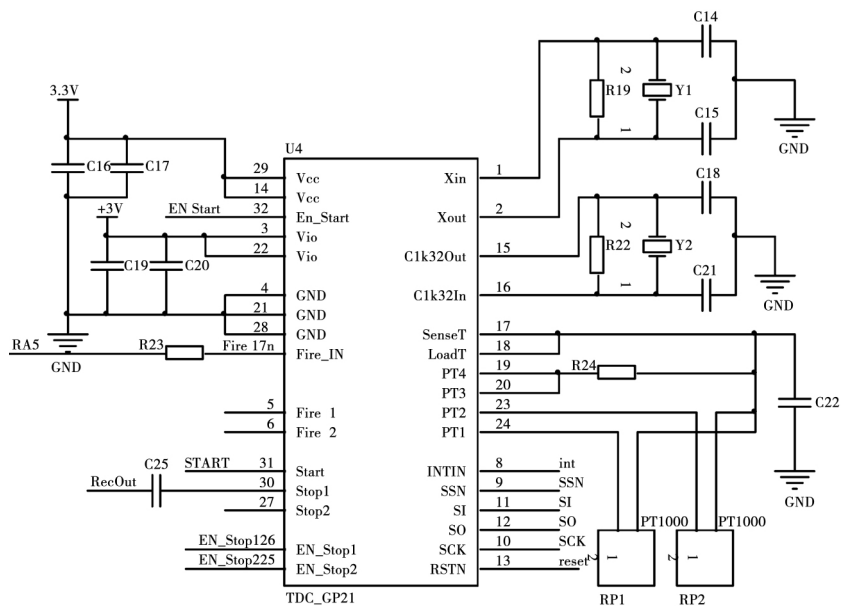


图 5 TDC-GP21 测量电路图

Fig. 5 TDC-GP21 measurement circuit diagram

TDC-GP21 的配置及使能都由单片机来控制, 单片机通过 SPI 接口对时间数字转换芯片写入操作码, 配置其工作方式, 通过单片机 I/O 口的电平设置测量的使能和禁止。时间测量结果传回给单片机通过算法进行甲烷浓度的精确计算, 最后进行显示。

3 系统软件设计

甲烷检测系统的软件部分主要包括脉冲发生程序、TDC 控制测量程序、数据处理程序、标定程序。整个软件设计、开发、调试过程都是在 MPLAB 集成开发平台上完成的。MPLAB 是适用于使用 Microchip 的 PIC micro & reg 系列单片机进行嵌入式设计的应用开发, 通过使用内置模拟器观察程序流程调试可执行逻辑。软件设计以单片机工作流程为主, 完成产生脉冲、命令的发送和接收, 数据处理功能。TDC 的工作流程设置也由单片机来完成, 使用 TDC 识别的指令码在上电之后对 TDC 进行初始化的配置, TDC 就能自动完成测量功能, 测量结果自动从 SPI 接口发送出去, 单片机读取数据, 处理成浓度值显示。主程序流程如图 6 所示。

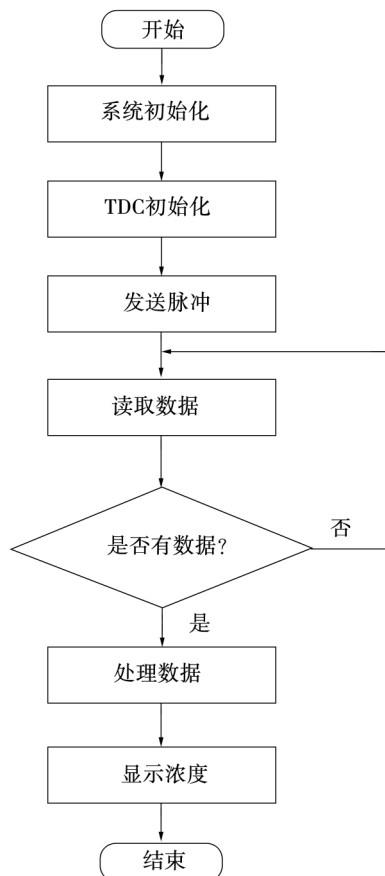


图 6 主程序流程图

Fig. 6 Main program flow chart

检测系统软件程序将执行下列功能: 首先, 进行初始化程序, 系统初始化将会对内部存储的数据进行校验工作和各个寄存器设置; 然后配置 TDC 进行信号采集和测量; 初始化完成之后定时器时间到达自动发送脉冲信号。等待测量时间后向 TDC 发送操作码读回测量值, 最终经计算处理得到的甲烷浓度值, 显示输出。

4 测试实验及结果分析

测试实验通过可燃气体配制系统配制需要的标准气, 配气系统结构框图如图 7 所示。

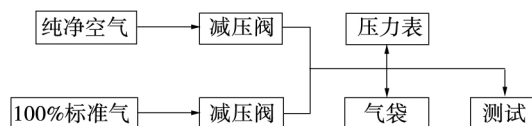


图 7 配气系统结构框图

Fig. 7 Air distribution system structure block diagram

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 200 kHz 中心频率的超声波发射探头, 并用 50% 的标准甲烷气体作为实验标定气体对测量装置标定。标定过程如下: 甲烷浓度检测系统上电后, 在气腔内通入纯净空气, 稳定 3~5 min, 按下红外遥控器的零点标定按键, 进行零点标定; 将配制的 50% 浓度的甲烷标准气通入气腔, 在示值稳定后按下红外遥控器的灵敏度标定按键。标定重复进行 2~3 次。

将配制的不同浓度混合气体分别重复测量 5 次, 得到实验结果如表 1 所示。

表 1 甲烷浓度检测装置测试数据

Tab. 1 Methane concentration detection device test data

序 号	甲烷浓度 /%	实测浓度					最大误差 /%
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	
1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	
2	20.0	20.3	20.1	19.7	19.9	20.1	1.5
3	40.0	39.8	40.1	40.2	39.5	40.1	1.25
4	60.0	60.1	60.3	60.7	60.5	59.3	1.16

计算实验过程中 5 组测量结果的最大相对误差, 由甲烷浓度测量实验数据得到的结果来看, 利用基于 TDC 的超声波甲烷浓度检测方法测量甲烷浓度的相对误差不超过 2%, 此方法的测量精度可以满足测量要求, 同时测量精度符合国家标准 GB16808-2008《可燃气体报警控制器》的要求。

5 结 论

将时间数字转换芯片 TDC 应用到了直接时间差超声波测量气体浓度的方法上,并采用甲烷标准气体进行了测量,实验结果表明利用 TDC 的超声波时间检测方法可行。此设计方法解决了传统检测方法测量范围不够问题,以及超声波相位差法测量过程中的反射干扰问题和普通的超声波脉冲技术中测量精度的问题。在此基础上设计的超声波甲烷浓度检测装置具有电路简单,成本低廉,测量精度高,使用方便的优点,在工业气体泄漏以及其他气体测量方面都有广阔的发展前景。

参 考 文 献:

- [1] 陈晓坤,蔡灿凡,肖旸. 2005-2014 年我国煤矿瓦斯事故统计分析[J]. 煤矿安全,2016,47(2):224.
CHEN Xiaokun, CAI Canfan, XIAO Yan. Statistical Analysis of Coal Mine Gas Accidents in China from 2005 to 2014[J]. Coal Mine Safety, 2016, 47(2): 224.
- [2] 赵国宇. 低瓦斯矿井瓦斯爆炸原因分析及防治措施[J]. 煤炭科技,2016(4):123.
ZHAO Guoyu. Cause Analysis and Prevention Measures of Gas Explosion in Low Gas Mine[J]. Coal Science & Technology, 2016(4): 123.
- [3] 金永飞,杨栋,岳宁芳,等. 近十年我国煤矿热动力灾害统计分析[J]. 煤矿安全,2016(11):47.
JIN Yongfei, YANG Dong, YUE Ningfang, et al. Statistical Analysis of Thermal Disasters in Coal Mines in China in Recent Ten Years[J]. Coal Mine Safety, 2016(11): 47.
- [4] 焦尚彬,宋丹,张青,等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿监测系统[J]. 电子测量与仪器学报,2013(5):436.
JIAO Shangbin, SONG Dan, ZHANG Qing, et al. Coal Mine Monitoring System Based on ZigBee Wireless Sensor Network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013(5): 436.
- [5] 柴大林,丁喜波,于洋. 抗中毒甲烷浓度检测仪研制[J]. 哈尔滨理工大学学报,2018(3):16.
CHAI Dalin, DING Xibo, YU Yang. Development of an Instrument for Detecting Methane Concentration in Poisoning[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018(3): 16.
- [6] 张胜峰. 矿用管道式超声波气体流量计设计[J]. 仪表技术与传感器,2017(3):54.
ZHANG Shengfeng. Design of Mine Pipeline Ultrasonic Gas Flowmeter[J]. Instrument Technology and Sensor, 2017(3): 54.
- [7] 丁欣,丁喜波,王丽杰,等. 基于超声波相位差的氢气检测方法及其研制[J]. 哈尔滨理工大学学报,2017,22(5):81.
DING Xin, DING Xibo, WANG Lijie, et al. Hydrogen Detection Method and Instrument Development Based on Ultrasonic Phase Difference[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(5): 81.
- [8] 王飞,吴国贵,和卫星. 基于超声检测的新型二元混合气体传感器[J]. 自动化仪表,2017,12(38):77.
WANG Fei, WU Guogui, HE Weixing. New Binary Mixed Gas Sensor Based on Ultrasonic Detection[J]. Automation Instrumentation, 2017, 12(38): 77.
- [9] 沈子文,徐科军,方敏等. 基于能量变化率的气体超声波流量计信号处理方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(9):2138.
SHEN Ziwen, XU Kejun, FANG Min, et al. Signal Processing Method of Gas Ultrasonic Flowmeter Based on Energy Change Rate[J]. Journal of Instrumentation, 2015, 36(9): 2138.
- [10] SIMON Rosenkranz, CAMERON Tropea, ABDELHAK M. Zoubir. Detection of Drops Measured by the Time Shift Technique for Spray Characterization[J]. Shanghai, China. 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing: 2214.
- [11] 曹伟伟. 基于 STM32 化工原料储罐液位超声检测系统[D]. 上海应用技术大学,2016.
- [12] 姚灵,左富强,王欣欣. 超声水表换能器综合性能指标的建立[J]. 测试技术学报,2016,30(3):260.
YAO Ling, ZUO Fuqiang, WANG Xinxin. Establishment of Comprehensive Performance Index of Ultrasonic Water Meter Transducer[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2016, 30(3): 260.
- [13] 丁喜波,王珊,邹一风. 基于超声波衰减的甲烷浓度测量方法[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26(3):672.
DING Xibo, WANG Shan, ZOU Yifeng. Measurement Method of Methane Concentration Based on Ultrasonic Acoustic Attenuation[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(3): 672.
- [14] PAOLO Stringari, MARCO Campestrini, CHRISTOPHE Coquelet, et al. An Equation of State for Solid-Liquid-vapor Equilibrium Applied to Gas Processing and Natural Gas Liquefaction[J]. Fluid Phase Equilibria, 2014, 362(25): 258.
- [15] HEMPERT F, BOBLEST S, ERTL T, et al. Simulation of Real Gas Effects in Supersonic Methane Jets Using a Tabulated Equation of State with a Discontinuous Galerkin Spectral Element Method[J]. Computers and Fluids, 2017, 145(2): 167.
- [16] 杨亚,王让定,姚灵. TDC-GP21 在时差法超声波流量计中的应用[J]. 微电子学与计算机,2013(3):118.
YANG Ya, WANG Rangding, YAO Ling. Application of TDC-GP21 in Ultrasonic Flowmeter with Time Difference Method[J]. Microelectronics & Computer, 2013(3): 118.
- [17] 汪伟,徐科军,方敏等. 一种气体超声波流量计信号处理方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(9):1365.
WANG Wei, XU Kejun, FANG Min, et al. Research on Signal Processing Method of Gas Ultrasonic Flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(9): 1365.
- [18] 李春玉,丁喜波,邹一风. 相位差法超声波三维风速测量方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(4):45.
LI Chunyu, DING Xibo, ZOU Yifeng. Study on Ultrasonic Three-dimensional Wind Speed Measurement Method by Phase Difference Method[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(4): 45.
- [19] 王雪峰,唐祯安. 基于自干涉驱动技术的超声波飞行时间测量系统优化设计[J]. 传感技术学报,2010,23(10):1439.
WANG Xuefeng, TANG Shuan. Optimal Design of Ultrasonic Time-of-flight Measurement System Based on Self-interference Drive Technology[J]. Journal of Transduction Technology, 2010, 23(10): 1439.
- [20] 马志浩. 基于自干涉技术的超声波氧气传感器设计[J]. 传感器世界,2014,20(1):24.
MA Zhihao. Design of Ultrasonic Oxygen Sensor Based on Self-interference Technology[J]. Sensor World, 2014, 20(1): 24.

(编辑:温泽宇)