

# 超声波热量表信号转换器性能校验装置的设计

王佳 姚骏 王磊 张露露

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

**摘要:** 研究了一种可以模拟超声波时差法流量测量原理和热电阻温度测量原理的超声波热量表性能校验装置。该校验装置属于干校验装置,由流量模拟模块、温差模拟模块、微处理器单元和上位机组成。详细叙述了流量模拟模块与温度模拟模块的实现方法及微处理器的设计。最后热量表的实流标定数据与本文校验装置的校验数据对比结果表明超声波热量表校验装置可以有效地实现超声波热量表功能测试。

**关键词:** 超声波热量表;干校验装置;时差法

**中图分类号:** TP216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Design of calibration device for transducer of ultrasonic heat meter

Wang Jia Yao Jun Wang Lei Zhang Lulu

(School of Electrical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Based on the principle of time difference method for flow rate measurement and the principle of thermal resistance for temperature measurement, a kind of calibration device for transducer of ultrasonic heat meter is studied in the paper. The dry calibration device consists of the flow simulation module, temperature simulation module, a microprocessor unit and host computer. The implementation of flow simulation module and temperature difference simulation module is described in detail, as well as the function of the microprocessor. Finally, the comparison result between actual flow calibration data and the dry calibration data from the calibration device in this paper show that the calibration device for transducer of ultrasonic heat meter can effectively implement the function test of ultrasonic heat meter.

**Keywords:** ultrasonic heater meter; dry calibration device; time difference method

## 1 引言

超声波热量表是测量水历经热交换系统所释放或吸收热能量的仪表<sup>[1]</sup>。超声波热量表由热量测量部件按照超声波时差法原理测量水流流速以及通过热电阻测量入口和出口温度,由信号转换器实现测量过程控制及热量计算<sup>[2]</sup>。超声波热量表作为一种计量结算仪表,在生产制造完成后必须满足CJ128-2007《热量表》行业标准和JJG225-2001《热能表》检定规程进行检定<sup>[3-5]</sup>。出厂检定时,待检定的超声波热量表被安装在实流检定装置上,在不同流速和出入口温度下使带一定的热量的流体流过该热量表来检定热量表的准确度<sup>[3]</sup>。目前,公开的文献、专利和标准<sup>[6-8]</sup>都给出的都是对超声波热量表整机性能进行实流校验方法和装置。实流检定方法所用标准容器一经制造完成便决定了它的计量范围,很难改变最大计量值<sup>[9]</sup>。作为超声波热量表的重要部件,超声波热量表信号转换器与热量测量部件配合完

成了热量计量。信号转换器的性能是决定超声波热量表整机性能的重要因素之一。根据超声波时差法流量测量原理和热电阻温度测量原理,本文设计了一种对超声波热量表信号转换器性能进行干校验的装置,模拟了热量测量部件的工作过程,可在仪表的实流检定前对信号转换器的性能进行校验,也可用于热量表信号转换器缺陷的快速检验和测试。

## 2 校验装置的工作原理

超声波热量表信号转换器的校验装置通过模拟超声波时差法流量测量原理和热电阻温度测量原理对超声波热量表信号转换器的性能校验。超声波热量表流量与热量计算公式如下所示<sup>[10-11]</sup>。

$$t_u = \frac{L}{c + v \cos \theta} + \tau \quad (1)$$

$$t_d = \frac{L}{c - v \cos \theta} + \tau \quad (2)$$

$$\Delta t = t_d - t_u \quad (3)$$

$$v = \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{\Delta t}{(t_u - \tau)(t_d - \tau)} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为一对换能器相对与管道线的安装角,  $t_u$  为超声波顺流传播时间,  $t_d$  为超声波逆流传播时间,  $c$  为超声波在管内流体中的声速,  $L$  为超声波传播距离,  $v$  为液体沿管道轴向的速度,  $\Delta t$  为飞行时间差,  $\tau$  为超声波在换能器中的传播时间以及电路延时的总和。

瞬时体积流量  $q_v$  和瞬时热量  $Q$  公式如下:

$$q_v = K \frac{\pi D^2 v}{4} \quad (5)$$

$$Q = C_p p (T_{in} - T_{out}) q_v \quad (6)$$

式中:  $K$  为仪表系数,  $D$  为管道直径,  $p$  为水的密度,  $C_p$  为定压比热容,  $T_{in}$  为进水口温度,  $T_{out}$  为出水口温度。由上式可知,若要求得热量表的流量与热量,所设计的校验装置需要能够模拟出  $t_u$ 、 $t_d$ 、 $T_{in}$ 、 $T_{out}$  这几个物理量,然后通过电信号传送到超声波热量表信号转换器,转换器计算出 4 个物理量对应的具体流量和热量。

顺流飞行时间  $t_u$  和逆流飞行时间  $t_d$  可以通过定时器延时来实现。通过调节  $t_u$  和  $t_d$  可以模拟不同口径、不同流速超声热表的实现。流量模拟顺逆流波形时序图如图 1 所示。

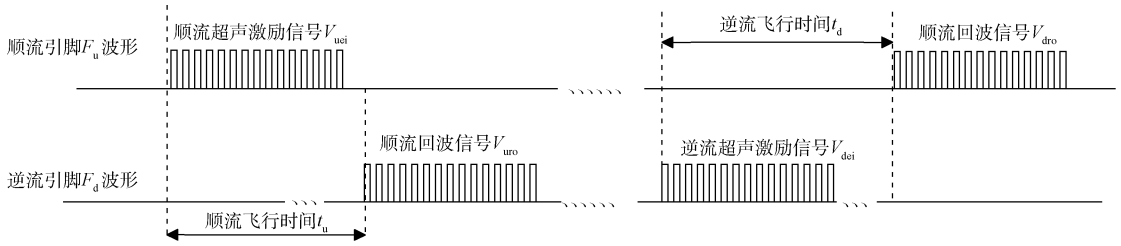


图 1 流量模拟顺逆流波形模拟时序图

模拟过程中,转换器顺流引脚  $F_u$  发出顺流激励信号  $V_{uei}$  到校验装置,校验装置接收到顺流激励信号  $V_{uei}$  后,启动定时器并延时顺流飞行时间  $t_u$ ,发出顺流回波信号  $V_{uuo}$  到转换器逆流引脚  $F_d$ ;经过一定时间后转换器逆流引脚  $F_d$  发出逆流激励信号  $V_{dei}$  到校验装置,校验装置接收到逆流激励信号  $V_{dei}$  后,启动定时器延时逆流飞行时间  $t_d$  后,发出逆流回波信号  $V_{duo}$  到转换器顺流引脚  $F_u$ ,如此就完成了顺流飞行时间  $t_u$  和逆流飞行时间  $t_d$  的模拟。

超声波热量表信号转换器一般采用 PT1000 热电阻测量供热回路的入口水温与出口水温,并由水温差和焓值差积分计算出热量损耗。因此进水口温度  $T_{in}$ 、出水口温度  $T_{out}$  的模拟,可以利用 1 k $\Omega$  的固定电阻与可编程的数字电位器串联来模拟 PT1000 在不同温度下的阻值来实现。

### 3 校验装置的设计

超声波热量表信号转换器的校验装置由流量模拟模块、温差模拟模块、微处理器和上位机组成,其设计框图如图 2 所示。

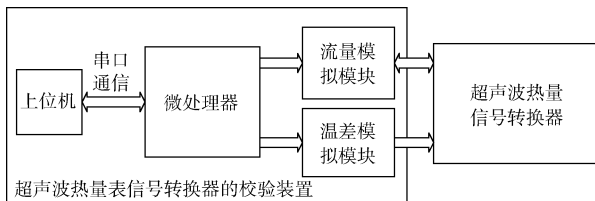


图 2 校验装置原理

流量模拟模块用于模拟顺流飞行时间  $t_u$ 、逆流飞行时间  $t_d$ ;温差模拟模块模拟进口水温  $T_{in}$ 、出口水温  $T_{out}$ ;微处理器通过通信接口对流量模拟模块与温度模拟模块控制;上位机实现标定人员与校验装置的交互操作。

#### 3.1 微处理器选择

微处理器为集成在 Altera 公司的 CYLONEV 系列芯片中 ARM Cortex-A9 硬核处理器。它与一个 FPGA 器件集成在一个封装中。该 FPAG 芯片用于实现流量模拟功能。这种集成化的设计有利于整个校验装置的工作效率。

上位机通过一个 RS232 通信口与硬核处理器系统进行通信,把管道口径、声程长度、超声波换能器谐振频率、平均流量、入口出口的温度值和校验时间等检验参数设置到微处理器中。硬核处理器通过自定义通信接口控制 FPGA 器件产生顺逆流时间  $t_u$ 、 $t_d$  延时实现流量模拟。硬核处理器通过 SPI 通信控制数字电位计 AD8400,通过数字电位计阻值变化模拟进出口水的温度。

#### 3.2 流量模拟模块设计

流量模拟模块包括了 FPGA 器件、同相信号衰减器(激励信号电平转换模块)、信号跟随器(回波信号电平转换模块)、顺流信号切换开关、逆流信号切换开关。流量模拟模块的设计如图 3 所示。

FPGA 器件负责实现流量模拟功能,主要包括通过接收微处理器命令控制定时器延时顺逆流飞行时间;输出回波信号;根据超声波热量表信号转换器顺逆流时序,周期性地控制顺逆流信号切换开关。

同向信号衰减器和信号跟随器由高速运放 LMH6642

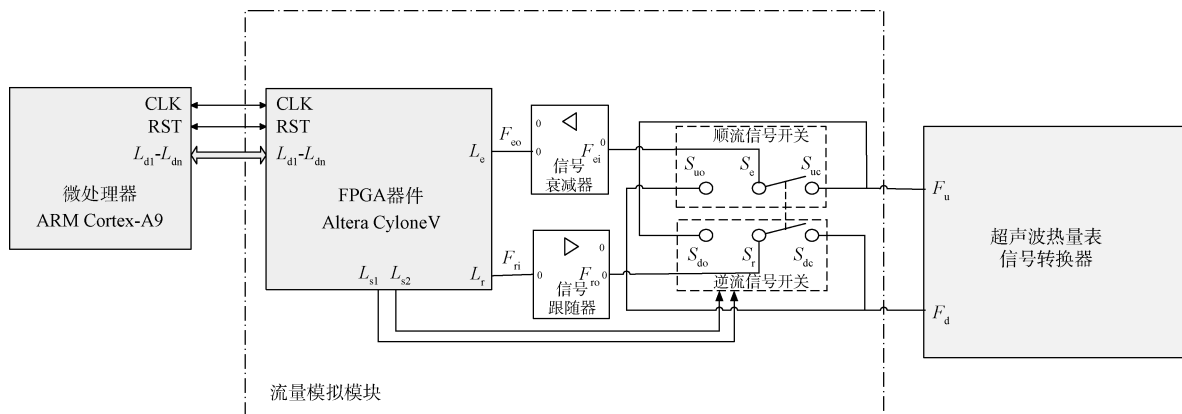


图 3 流量模拟模块内部结构

构成。超声波热量表信号转换器发出的激励脉冲通过信号衰减器将调节到 FPGA 部件的正常工作电压范围内。信号跟随器则将 FPGA 部件发出的回波脉冲稳定的输出到超声波热量表信号转换器。

顺流信号切换开关和逆流信号切换开关由 TS12A12511 高速双向单刀单掷模拟开关构成,受 FPGA 器件控制。

当模拟顺流飞行时间时,FPGA 器件控制顺逆流信号切换开关组使顺流引脚  $F_u$  与输入引脚  $F_{si}$  连接,逆流引脚  $F_d$  与输出引脚  $F_{so}$  相连。当模拟逆流飞行时间时,FPGA 器件控制顺逆流信号切换开关组使逆流引脚  $F_d$  与输入引脚  $F_{si}$  连接,顺流引脚  $F_u$  与输出引脚  $F_{so}$  相连。

FPGA 器件工作流程图功能如下图 4 所示。

### 3.3 温度模拟模块的设计

超声波热量表信号转换器一般采用 PT1000 热电阻测量供热回路的入口水温与出口水温。因此采用数字电位器 AD8400 和入口固定 1 k $\Omega$  电阻串联,与待测信号转换器的入口温度测量引脚相连,模拟入口温度传感器 PT1000 的阻值。出口温度模拟同理,由数字电位器 AD8400 和固定 1 k $\Omega$  电阻串联构成。温度模拟模块内部结构图如图 5 所示。

## 4 实验结果

上位机向微处理器设置的校验参数包括管道口径  $D$  为 50 mm、夹角  $\theta$  为  $55^\circ$ 、体积流量  $q_v$  为  $0.56 \text{ m}^3/\text{h}$ 、修正系数  $K$  为 1.664、超声波换能器谐振频率为 1 MHz、入口温度为  $30^\circ\text{C}$ 、出口温度为  $20^\circ\text{C}$  和校验时间为 180 s。设置的温度量程为  $0\sim99^\circ\text{C}$ ,分辨率为  $1^\circ\text{C}$ 。通过 PT1000 温度阻值关系表得到,入口温度为  $30^\circ\text{C}$  对应的入口 PT1000 电阻值为  $1\ 116.729 \ \Omega$ ,则需要设置到入口数字电位器 AD8400 的控制字为 0x1EH;出口温度为  $20^\circ\text{C}$  对应的出口 PT1000 阻值为  $1\ 077.935 \ \Omega$ ,则要设置到出口数字电位器 AD8400 的控制字为 0x14H。按式(1)~(5)计算得到超声

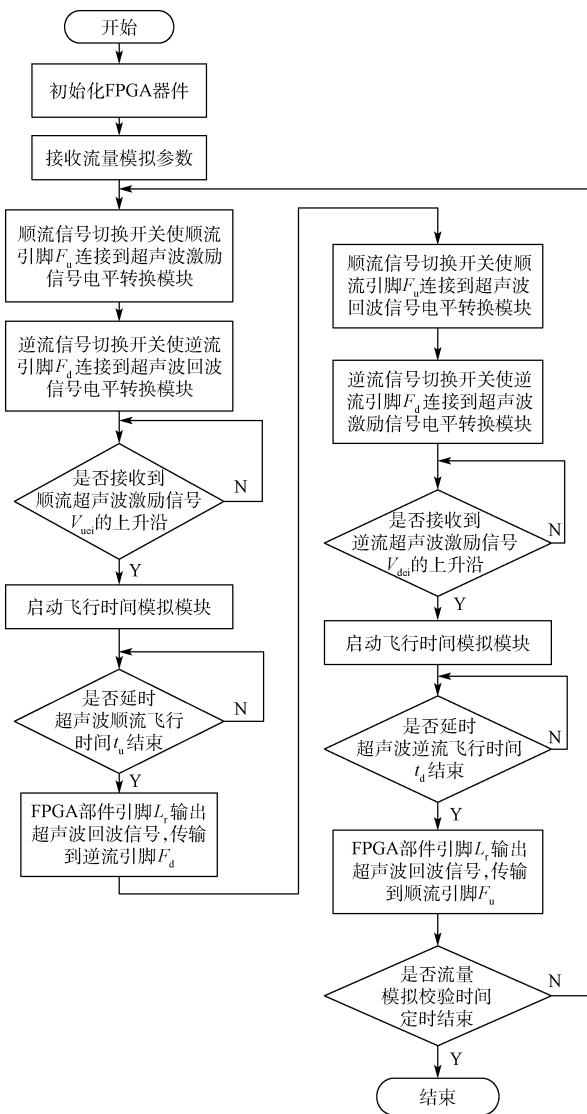


图 4 FPGA 工作流程

波顺流飞行时间为  $4.463\ 1 \ \mu\text{s}$ ,逆流飞行时间为  $4.470\ 1 \ \mu\text{s}$ ,飞行时间差为  $7.0 \ \text{ns}$ 。本文所述的超声波热量表信号转换器

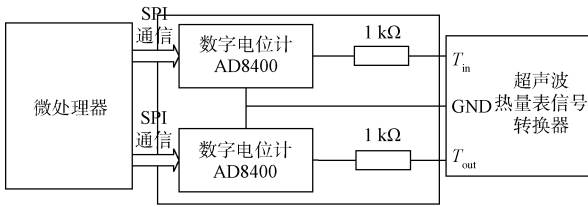


图 5 温度模拟模块内部结构

校验装置重复 5 次模拟校验,获得的结果如表 1 所示。作为对照,表 1 显示了相同参数下,在实流热量标定装置上实流标定结果。由表 1 可以看到,采用校验装置的模拟校验结果与实流校验结果非常接近,流量重复性也较高,表明了本发明设计的超声波热量表信号转换器的校验装置具有较好的实用价值,适合可以在仪表的实流检定前或在产品的定期维护和检修中进行信号转换器的性能校验。

表 1 实流标定数据与校验数据

	实流测量 数据	热量表信号转换 器测量数据
口径/mm	50	50
校验时间/s	180	180
流量值/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	0.56	N/A
入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	30.0	30.1
出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	20.0	20.1
第 1 次累计流量值/L	28.116	28.288
第 2 次累计流量值/L	28.150	28.291
第 3 次累计流量值/L	28.041	28.306
第 4 次累计流量值/L	28.192	28.152
第 5 次累计流量值/L	28.116	28.164
平均累积热量/kJ	1 181.2	1 188.2
累计流量重复性	0.055 5	0.075 5

## 5 结 论

本文提出并实现了一种基于时差法原理的超声波热量表的干校验装置,在超声波热量表生产阶段该校验装置

可初步完成超声波热量表的温度、流量基本测量功能的测试,可以当作测试工具来减少实流标定时间。在超声波热量表产品研发阶段,还可以进行长时间边界测试(例如超大、超小流量测试)。在实流标定下,再配合干校验装置进行校验,将大大节约标定时间,节省人力物力。

## 参考文献

- [1] 牛睿,梁雪,廖学文,等. 超声波热量表的系统原理与系统结构[J]. 科技情报开发与经济, 2012, 22(15):124-126.
- [2] 赵文明,邵仙鹤,王玲,等. 超声波流量测量影响因素的研究[J]. 自动化仪表, 2012, 33(9):80-82.
- [3] 高明,卜占成,刘辰魁,等. 热能表检定装置相关问题探讨[J]. 中国计量, 2010(3):68-70.
- [4] JJG225-2001中华人民共和国国家计量检定规程——热能表[S]. 2001.
- [5] CJ128-2007 中华人民共和国城建建设行业标准——热量表[S]. 2007.
- [6] 合肥天明专利事务所 34115. 一种流量计自动校验装置[P]. 中国专利:CN202350878 U, 2012-07-25.
- [7] 罗洪平. 热量表检定的现状和发展[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2011(4): 15-16.
- [8] 华长春,马立强. 热量表综合检测装置的设计[J]. 品牌与标准化, 2011(Z1): 96-97.
- [9] 易进平. 超声波流量计干标技术研究工程实现[D]. 杭州:浙江理工大学, 2012.
- [10] 陈建,孙晓颖,林琳,等. 一种高精度超声波到达时刻的检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2422-2428.
- [11] 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.

## 作者简介

王佳,在读硕士研究生,主要研究方向为超声波热量表、嵌入式智能仪表。

E-mail:wangjia1435@shu.edu.cn