

超声水表长期工作可靠性问题的解决方案综述

金传恩

(北京汇川力行科技有限公司 北京 100097)

摘 要: 本文针对当前超声水表普遍存在的长期工作稳定性与可靠性问题,首次从测量原理角度分析造成该问题的可能原因,并从测量原理、可测性设计及测试设备三方面提出新的技术方案。具体包括:首次提出基于回波衰减检测的声波飞渡时间测量原理,从测量原理层面彻底规避了现有基于第一回波检测的超声波渡越时间测量原理中,因水表硬件性能衰减和各类噪声导致第一回波检测错误而带来的长期工作稳定性与可靠性问题,并验证了基于回波衰减检测的测量原理的可行性;提出可测性增强的超声波流体流量测量仪表的设计方法和仪表装置;提出适用于超声波流体流量仪表的测试系统和装置,解决超声水表当前型评测试和出厂检测中“测不出、测不全、测不准”的问题。本文旨在为当前超能水表存在的长期工作稳定性与可靠性问题提供系统性技术解决方案,为以高精度为优势的超声水表进入大规模商用奠定基础。本文的问题探析、测量原理和方法、仪表可测性设计及仪表测试设备的创新技术方案同样适用于超声燃气表和超声油表等超声波流体流量计量仪表。

关键词: 声波飞渡时间测量;超声水表;长期工作稳定性与可靠性;回波衰减检测;测量精度

中图分类号: TH814;TN7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Review of solutions of the long-term reliability problem for ultrasonic water meters

Jin Chuanen

(Beijing Huichuan Lixing Technology Co., Ltd., Beijing 100097, China)

Abstract: Aimed at the long-term stability and reliability problem for ultrasonic water meters, this paper first analyzes the possible reasons caused the problem from measurement principle, and proposes new technology programs from measurement principle, measurability design, and measurement equipment. Firstly, it proposes a measurement principle of ultrasonic flight time based on echo attenuation detection. It avoids the first echo detection error caused by hardware attenuation or noise, which exists in the measurement principle of ultrasonic flight time based on first echo detection. It also proves the feasibility of the echo attenuation detection-based measurement principle. Secondly, it proposes the design method and equipment of ultrasonic liquid flow instrument with improved measurability. Thirdly, it proposes a test system suitable for ultrasonic liquid flow instrument, to resolve the problems in current ultrasonic water meter measurement. By providing systematic technology programs for the long-term stability and reliability problem, this paper lays a good foundation for the commercial application of ultrasonic water meters. The present analysis, principle and method can also be applied to other ultrasonic liquid flow meters such as ultrasonic gas meters and ultrasonic oil meters.

Keywords: acoustic wave transit time measurement; ultrasonic water meter; long-term stability and reliability; echo attenuation detection; measurement accuracy

0 引 言

智能水表在智慧城市、水资源管理、工业生产精密过程控制及高效节能等领域应用广泛。随着物联网、大数据及云计算技术的融合,基于超声波测量技术的超声水表凭借

其全电子化、高精度、无磁化、低成本等优势,有望逐步替代现有以机械转子计量技术为基础的智能水表 1.0 产品^[1-4]。然而,目前超声水表存在的长期工作稳定性与可靠性问题,是制约其大规模商用的主要原因^[5-6]。《我国水表行业“十四五”发展规划纲要》中明确定义了超声水表是智能水表 2.0

的代表产品,同时指出智能水表 2.0 产品的长期工作稳定性与可靠性亟需提高。2024 年 10 月 31 日,在全国水表行业第十届技术交流会上,计量协会水表工作委员会高级顾问姚灵教授分享了《超声水表若干重要问题的分析与讨论》的主题报告,报告指出:如要替代智能水表 1.0 产品,超声水表应发挥“比较优势”、克服存在的“主要问题”,并明确指出“提高超声水表长期工作稳定性与工作可靠性”是超声波水表成为主流产品的关键点。

近年来,针对超声水表的研究大都集中在如何实现精确的流量计量方面,所涉及到的方法包括阈值法^[7-11]、互相关法^[12-17]、回波信号拟合法^[18-20]以及其他方法^[21-23],或者通过分析影响计量精度的因素来实现精确测量^[24-28]。然而,针对超声水表长期工作稳定性与可靠性问题的研究不多,且研究效果不理想,其原因主要有两个方面:一是目前对该问题成因的研究以及提出的改进措施大都是基于孤立的影响因素,而超声波水表在长期工作过程中,影响其稳定性与可靠性的因素往往是多方面的;二是对该问题的研究是建立在当前超声波渡越时间测量原理正确的基础之上。利用超声波对流体流量进行计量的基础是超声波飞渡时间(或渡越时间)测量技术^[29-34],目前超声水表采用的主流技术是德国阿凯姆-测量电器有限责任公司(ACAM messelectronic GMBH, ACAM)主导的时间数字转换(time-to-digital converter, TDC)技术和其提出的基于第一回波检测的超声波渡越时间测量原理(以下简称“第一回波测量原理”)^[35-38]。现有 3.6 V 电池供电的小口径户用超声水表中,超声波的第一回波幅度通常只有 60 mV 左右,考虑到系统噪声和检测比较器的精度问题,第一回波实际可检测的电压窗口范围仅约 35 mV 左右。但随着超声水表长期工作运行,水表电池电压和换能器振幅等硬件性能发生衰减,或不同工作环境中的各类噪声,都有引发第一回波检测出错的可能,使得基于第一回波测量原理的超声波飞渡时间测量出错,从而导致超声水表的计量精度出现下降或出现计量出错,进而可使得基于第一回波测量原理的超声水表出现长期工作稳定性与可靠性问题^[39-43]。

因此,本研究提出了新的测量原理,以期从测量原理入手,彻底解决当前超声水表存在长期工作稳定性与可靠性问题。此外,本文还从超声流量仪表的可测性和超声流量仪表的测试设备两方面进行技术创新和改进,以期全面解决超声水表当前测试中的“测不出、测不全、测不准”问题,从而确保超声水表长期工作的稳定性与可靠性。

1 基于回波衰减检测的渡越时间测量原理

1.1 基于回波衰减检测的测量原理介绍

如图 1 所示,文献[44]提出了基于回波特征衰减检测的声波飞渡时间测量原理(以下简称“声波飞渡时间测量原理”)。

如图 2 所示,文献[44]给出了基于该原理的一种硬件

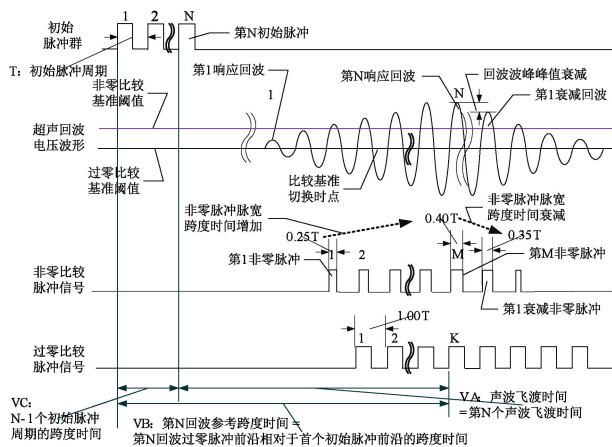


图 1 基于回波衰减检测的声波飞渡时间测量原理示意图
Fig. 1 Diagram of the ultrasonic flight time measurement principle based on echo attenuation detection

实现架构。具体工作过程如下:接收换能器接收到声波群并产生响应电压波群,随着声波群的持续激励,响应电压波群的波峰幅值逐渐增大,直至接收换能器达到与初始脉冲群的共振状态,响应电压波的波峰幅值也达到最大值,此时,一旦脉冲发生器停止产生初始脉冲群,发射换能器便立刻停止产生和发射声波群,接收换能器因不再受到声波的激励而开始衰减,接收换能器的响应电压波必然开始衰减,即响应电压波的波峰幅值或其他特征值开始衰减。当波峰特征检测单元检测到响应电压波的波峰开始衰减时,便向控制模块和飞渡时间测量模块发送衰减标志信号,飞渡时间测量模块立即停止测量计数采样以得到超声波飞渡的参考跨度时间计数值,同时上位机或控制模块基于参考跨度时间计数值和飞渡时间测量模块的计数分别率确定出声波飞渡时间。

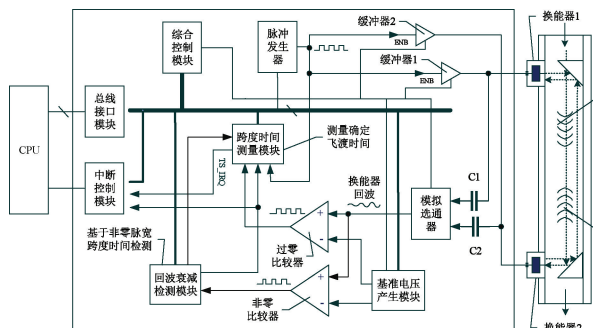


图 2 基于回波衰减检测的超声波飞渡时间测量装置
Fig.2 The measurement equipment of ultrasonic flight time
based on echo attenuation detection

由于响应电压波在初始脉冲群发射结束之后必然会衰减,且衰减的第一波可以被正确检测,因此飞渡时间测量模块可以准确确定声波飞渡的停止时间,而飞渡时间测量模块确定的起始时间是确定且准确的,因此该方法可以准确地确定出声波飞渡时间。

如图 1 所示,式(1)和(2)给出了声波飞渡时间测量原理的一种典型计算方法:

$$VA = VB - VC \tag{1}$$

$$VC = (N - 1) \cdot T \tag{2}$$

其中,声波飞渡时间 VA 是从某个初始脉冲激励发射换能器所发射的声波飞渡至接收换能器所用的时间,本文以第 N 个初始脉冲来举例说明;第 N 个初始脉冲所对应的响应回波(简称“第 N 个初始脉冲的响应回波”)的参考跨度时间 VB 是第 N 个初始脉冲的对应回波的过零脉冲(即图 1 中的“第 K 个过零脉冲”)前沿或后沿相对于首个初始脉冲前沿或后沿的跨度时间,本文以前沿来举例说明;VC 为 N-1 个初始脉冲周期的跨度时间;T 为初始脉冲群的脉冲周期。

1.2 基于回波衰减检测的测量原理的实验验证

表 1 为利用杭州瑞盟 TDC 芯片 MS1030 的演示板,依照德国 ACAM 第一回波测量原理所测得的超声波飞渡时间测量数据和计算值^[45-47]。表 1 实验条件:DN15 超声水表管段;VCC=3.6 V;水流状态:静止;激励脉冲:7 个;Wave_offs=40 mV;offset=0 mV。其中 offset 代表回波比较器比较基准值;Wave_offs 代表第一波检测时相对于 offset 的比较偏置值,且仅在第一波检测时有效。

表 1 基于第一波测量模式的参考跨度时间测量实验数据
Table 1 The measurement data of reference spanning time based on first wave detection mode

项目	数值			
超声波示波器回波序号	5	6	7	8
回波测量采样序号	2	3	4	5
过零前沿参考跨度时间/ μs	58.540	59.531	60.521	61.510
超声波飞渡时间计算值/ μs	54.540	54.531	54.521	57.510

通过该实验可知:对于 DN15 超声水表,当供电电压 VCC 为 3.6 V,第一回波检测的非零比较基准电压设置为 40 mV 时,第七个超声波回波的过零前沿参考跨度时间为 60.521 μs ,依据式(1)和(2)可计算得到此时超声波飞渡时间为 54.521 μs ,以此作为后续同样实验条件下(DN15 超声水表管段相同,水流状态相同)的超声波飞渡时间的标准值。

本研究提出的基于回波特征衰减检测的声波飞渡时间测量原理中,回波特征可以是回波波峰的幅值、回波的非零比较脉冲宽度跨度时间(简称“非零脉冲跨度时间”)等。接下来以非零脉冲跨度时间的衰减检测为例,以验证基于回波特征衰减检测原理的有效性、稳定性和可靠性。

如图 3(a)和(b)所示,首先产生并发射初始脉冲群,初始脉冲群的脉冲数量为 7 个,初始脉冲周期为 1 MHz。发射换能器接收到初始脉冲群后产生 7 个幅值接近 3 V 的激励电压波群和一组幅值很低的余振电压波群。其中,由于

余振幅值很低,余振电压波群所激励的超声波在水中快速衰减而无法到达接收换能器,接收换能器由于超声波群的声压激励而产生响应电压波群,响应电压波群中的有效响应电压波的数量为 7 个,其后是一组接收换能器衰减余振波群。如图 3(c)所示,第一回波至第七回波的波峰幅值逐步增大,相应回波的非零比较脉冲跨度时间也逐步增大的;其后由于发射换能器停止发射,接收换能器进入衰减余振状态,因此图 3(c)中第 8 个回波的波峰幅值开始衰减,第 8 个回波的非零比较脉冲跨度时间也开始衰减。

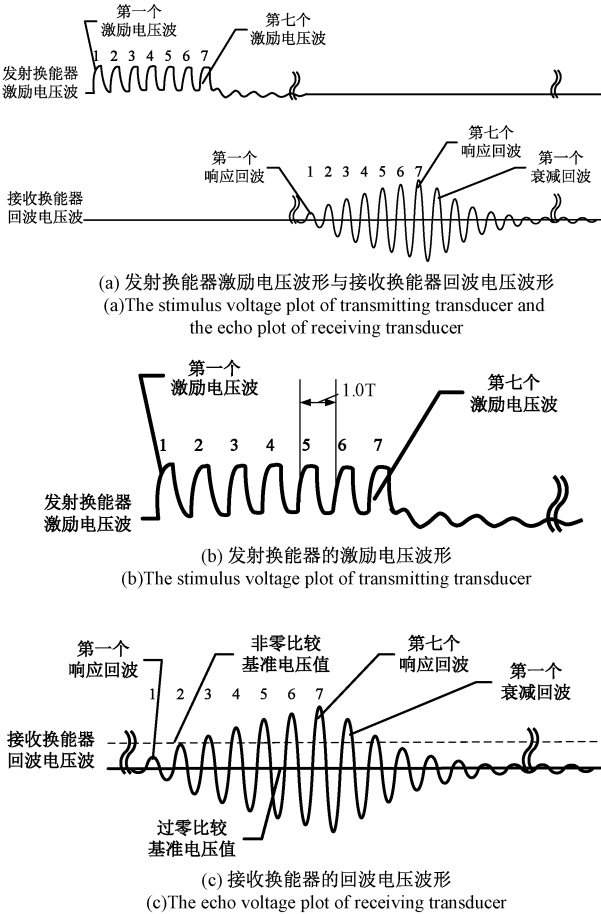


图 3 基于回波非零脉冲跨度时间衰减检测的实验波形

Fig. 3 The measured plots of attenuation detection based on non-zero pulse spanning time in echo

表 2 和 3 是利用 MS1030 演示板,基于非零检测模式所进行的回波非零脉冲跨度时间衰减检测的两组实验数据。表 2 实验条件:DN15 超声水表管段;水流状态:静止;VCC=3.6 V;offset=80 mV;激励脉冲:7 个。表 3 实验条件:DN15 超声水表管段;水流状态:静止;VCC=2.7 V;offset=80 mV;激励脉冲:7 个。两组实验的 offset 均设置为 80 mV,此时 Wave_offs 无效;MS1030 演示板的供电电压在第 1 组实验中被设置为 3.6 V,在第 2 组实验中被设置为 2.7 V;由于比较基准电压抬升至 80 mV,高于示波器第一回波峰值,示波器第一回波被略过,此时 MS1030 可检测

采样到 6 个振荡回波和两个衰减回波,从而可确定,第 6 采样回波对应于示波器的第 7 回波,依照文献[48]给出的方法,可根据测量得到的非零后沿参考跨度时间和非零前沿参考跨度时间,结合初始脉冲周期,可计算出过零前沿参考跨度时间,进而可推算得到两组实验的超声波飞渡时间值分别约为 54.521 μs 和 54.508 μs ,与前述标准值 54.521 μs 基本相等。

表 2 基于回波衰减检测的测量原理的实验数据-1

Table 2 The results of measurement principle based on echo characteristic attenuation detection-1

项目	数值或状态值			
超声波示波器回波序号	6	7	8	9
回波测量采样序号	5	6	7	8
接收换能器响应波状态	震荡	震荡	衰减	衰减
非零后沿参考跨度时间/ μs	59.972	60.960	61.940	62.914
非零前沿参考跨度时间/ μs	59.595	60.582	61.577	62.570
脉冲中位参考跨度时间/ μs	59.784	60.771	61.759	62.742
过零前沿参考跨度时间/ μs	59.534	60.521	61.509	62.492
非零脉冲脉宽跨度时间/ns	377	378	363	344
非零脉冲脉宽时间差值/ns	13	1	-15	-19
超声波飞渡时间计算值/ μs	54.534	54.521	—	—

表 3 基于回波特征衰减检测的测量原理的实验数据-2

Table 3 The results of measurement principle based on echo characteristic attenuation detection-2

项目	数值或状态值			
超声波示波器回波序号	6	7	8	9
回波测量采样序号	5	6	7	8
接收换能器响应波状态	震荡	震荡	衰减	衰减
非零后沿参考跨度时间/ μs	59.960	60.948	61.927	62.900
非零前沿参考跨度时间/ μs	59.580	60.567	61.560	62.553
脉冲中位参考跨度时间/ μs	59.770	60.758	61.744	62.727
过零前沿参考跨度时间/ μs	59.520	60.508	61.494	62.477
非零脉冲脉宽跨度时间/ns	380	381	367	347
非零脉冲脉宽时间差值/ns	13	1	-14	-20
超声波飞渡时间计算值/ μs	54.520	54.508	—	—

对比两组实验数据表明:在供电电压从 3.6 V 衰减至 2.7 V 时,回波特征衰减检测的测量原理依旧能够实现准确检测,而不受供电电压衰减的影响。

如表 4 所示为基于回波非零脉冲跨度时间衰减检测的第 3 组实验数据。表 4 实验条件:DN15 超声水表管段;水流状态:静止;VCC=3.6 V;offset=120 mV;激励脉冲:7 个。当设置 offset=120 mV 时,比较基准电压进一步抬升,高于示波器第二回波峰值,示波器第一回波和第二回波均被略过,此时 MS1030 可检测采样到 5 个振荡回波和 3

个衰减回波,从而可确定,第 5 采样回波对应于示波器的第 7 回波,从而根据测量得到的非零后沿参考跨度时间和非零前沿参考跨度时间,结合初始脉冲周期,可以计算出过零前沿参考跨度时间,进而可推算得到第 3 组实验的超声波飞渡时间为 54.521 μs ,与前述标准值 54.521 μs 相等。

表 4 基于回波特征衰减检测的测量原理的实验数据-3

Table 4 The results of measurement principle based on echo characteristic attenuation detection-3

项目	数值或状态值			
超声波示波器回波序号	7	8	9	10
回波测量采样序号	5	6	7	8
接收换能器响应波状态	震荡	衰减	衰减	衰减
非零后沿参考跨度时间/ μs	60.929	61.906	62.874	63.831
非零前沿参考跨度时间/ μs	60.611	61.608	62.609	63.621
脉冲中位参考跨度时间/ μs	60.770	61.757	62.742	63.726
过零前沿参考跨度时间/ μs	60.520	61.507	62.492	63.476
非零脉冲脉宽跨度时间/ns	318	298	265	210
非零脉冲脉宽时间差值/ns	2	-20	-33	-55
超声波飞渡时间计算值/ μs	54.520	—	—	—

对比表 2 和 4 两组实验数据可知:在不同的非零比较基准电压下,回波特征衰减检测的测量原理依旧能够实现准确检测,而不受非零比较基准电压变化的影响。

由于 MS1030 芯片内置比较器的非零比较模式下 offset 的最大可配置值约为 120 mV。利用 MS1030 演示板,针对常规小口径水表工作电压范围的最高值 3.6 V 和最低值 2.7 V 两种情况,将 offset 分别设置为 40、80、120 mV 时,进行了系统的实验测试,得到了与表 2~4 实验相一致的结论,从而系统证明了回波特征衰减检测测量原理的稳定性和可靠性,简省起见,不再罗列更多数据。

2 超声流量仪表可测性设计增强

根据现行的水表型评实验标准要求,对于电池供电的水表,厂家须单独提供一块未安装电池的水表,由计量院进行水表标称工作电压范围的实验和测试,以确认是否符合其标称电压范围。然而,由于相关水表标准的实验方法中并未规定供电电压的具体实验方法和实验标准流程,导致该项实验和测试实际上无法实施。此外,现有电池供电的超声水表均不具备外部供电功能,而是直接由内部电池供电且电池不可拆卸,因此无法直接对超声水表进行与电池供电相关的超声波流量仪表固有特性方面的实验和测试,如超声波水表对电源噪声、电源衰减的容忍度的相关试验和测试。因此,以超声水表为例,需要增强超声流量仪表可测性设计,以方便在超声水表研制、计量院型评批准、生产出厂批量检验、水司安装前抽检等各阶段,进行涉及电源的各项实验和测试。

如图 4 所示,文献[49]提出了可测性增强的超声波流体流量测量仪表的设计方法和仪表装置,其中换能器设置于测量管中,换能器与总电路模块连接,因此换能器在总电路模块的控制下可定时地进行超声波的发送和接收,测量管中的流体流动时,总电路模块便可以基于对换能器的超声波发送和接收事件的测量,来计算顺流和逆流的超声波飞渡时间的时间差,进而利用测量管、换能器的规格和流体的类型来确定测量管中流体的流速和流量。由于电源接口与开关模块连接,电池与开关模块连接,开关模块与可断续供电的电路单元连接,因此,在需要对超声波流体流量测量仪表进行各种测试时,便可以在电源接口接入外部电源,从而使得外部电源通过开关模块对可断续供电的电路单元提供不同特性的电源供电,以便对超声波流体流量测量仪表进行测试。在不需进行测试时,电池对可断续供电的电路单元供电。

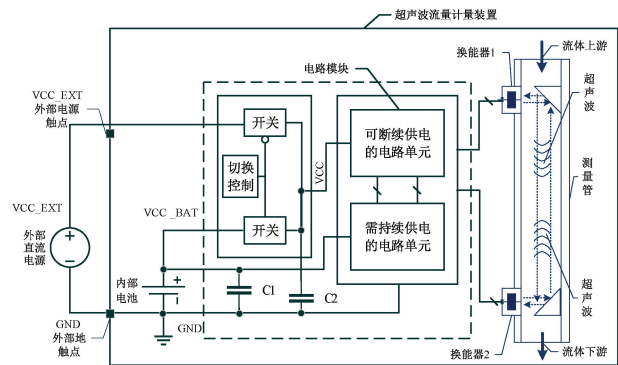


图 4 电源可测性设计的超声波流量计量装置原理图

Fig. 4 Diagram of the ultrasonic liquid flow instrument with supply measurable design

基于文献[49]内容,进一步研制可测性增强的超声水表,进而可以进行超声流量仪表一些与超声波固有特性相关的试验和测试。

3 超声流量仪表测试设备的升级

除了前文提到的现有测量原理方面的可能原因,造成超声水表长期工作稳定性与工作可靠性问题的另外一个原因是现有超声水表出厂测试所用的检测设备测试功能不完整,导致潜在问题无法在型评检测阶段和出厂检测阶段被检出。例如,当前《GB/T 778.2-2018 饮用冷水水表和热水水表》(以下简称“水表国标”)中,尽管规定水表寿命方面的要求,但并未规定电源和电池寿命和工作电压范围实验的具体方法,这导致超声水表在型评阶段的检测不完备,存在潜在问题的超声水表不能被有效检出而被批准生产和使用,而超声水表长期工作稳定性与可靠性问题通常在工作 2~3 年以后才会随着水表的电池衰减、水表结垢、换能器衰减等因素而逐步暴露出来,这导致存在问题的超声水表长期带病运行,从而造成计量结果不准确。

以户用小口径超声波水表为例,通常由内置电池供电如 ER26500 型锂电池,全新的 ER26500 型锂电池开路电压可达 3.6 V 以上,但随着超声水表的长期运行,电池不断放电,电池的开路电压随之下降。接下来分别对直流电源供电、满电的 ER26500 型电池供电和放电后的 ER26500 型电池供电 3 种情况进行测试,其中以 9.87 kΩ 电阻来模拟待机状态下超声水表的等效电阻,以 31 Ω 电阻来模拟主动测量状态下超声水表的等效内阻。实验数据如表 5 所示。

以 9.87 kΩ 电阻模拟超声水表待机状态,分析实验数

表 5 直流电源与电池供电能力实验数据

Table 5 The measurement results of DC supply and battery power supply capability

参数	直流电源		ER26500 型锂电池			
	最大输出电流 2 A		电池满电		电池放电	
负载电阻/Ω	9.87 K	31	9.87 K	31	9.87 K	31
电池电压/V	3.65	3.65	3.64	2.07	3.02	0.63
负载电流/mA	0.37	117.58	0.37	66.81	0.31	20.32
输出功率/mW	1.35	428.58	1.34	138.36	0.92	12.80

据可知:用直流电源模拟满电电池在水表待机状态的供电量,两者结果基本一致;而用直流电源模拟放电后电池在水表待机状态的供电量,两者结果有偏差,此时直流电源输出功率与电池供电输出功率的偏差约 0.4 倍。以 31 Ω 电阻模拟超声水表主动测量时状态,分析实验数据可知:用直流电源模拟满电电池在超声水表主动测量状态的供电量,两者结果偏差较大,直流电源输出功率与电池供电输出功率的偏差约 2.1 倍;而用直流电源模拟放电后电池在超声水表主动测量状态的供电量,两者结果偏差巨大,

此时直流电源输出功率是电池供输出功率的 32.5 倍。

实验数据表明,采用现有的供电设备和当前实验方法得到的测量数据与超声波水表的实际运行情况存在显著区别,实验方法不科学,以其作为超声水表型评批准实验和出厂检测实验的实验标准和参照并不妥当。

文献[50]提出了适用于超声波流体流量仪表和电磁流体流量仪表测试的电源模拟装置、检测系统及检测方法,用于完成相应的测试和实验。

如图 5 所示,电源模拟模块包括可调直流电源以及参

数模拟器,直流电源的电流能够通过第一控制开关到达目标受电装置,且参数模拟器可以模拟目标电源的各项参数,使得提供至目标受电装置的电压/电流与目标受电装置自身电池提供的电压/电流接近。因此,利用电源模拟装置对目标受电装置供电所做测试的结果会较为准确,其结果较为接近目标受电装置内置电池时的实际工作状态。

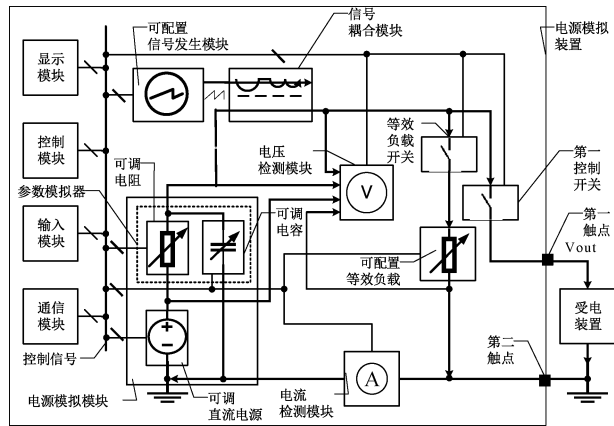


图 5 电源模拟装置及其测试系统原理图

Fig. 5 Diagram of the simulated supply instrument and its test system

文献[50]和文献[51]提出了适用于超声波流体流量仪表的创新测试系统架构,基于所述文献提出的系统架构,进一步研制相应的流体流量仪表测试设备,以实现超声波水表在研发阶段、计量院型评实验阶段、以及出厂检定测试阶段对系统噪声、电源衰减的容忍度、及换能器性能衰减进行全面等效测试,确保超声波水表的检测结果尽可能与超声波水表运行的全生命周期情况相符合,一方面避免存在长期工作稳定性与可靠性潜在设计问题的流量仪表被型评批准而投入生产,另一方面,避免存在潜在问题的超声波水表被过检出厂,从型评批准和出厂检测两个环节确保流量仪表的长期工作稳定性与可靠性。

4 结 论

本文从测量原理的层面,探寻超声水表长期工作稳定性与可靠性问题的可能原因,即基于第一回波检测的超声波渡越时间测量存在检测出错的趋势和概率,并可以导致计量精度下降或计量出错。提出了基于特征衰减检测的声波渡越时间测量原理,该原理因其检测的对象是超声回波特征和特征衰减,并且特征衰减是必然发生的确定性事件,故该测量原理对于环境变化和仪表的衰减具有天然免疫力,同时,如作者在文献[44]中所述,该测量原理和检测方法具备检测错误的自我识别和自适应调整能力。结合《我国水表行业“十四五”发展规划纲要》和《超声水表若干重要问题的分析与讨论》内容可以看到,超声水表的长期工作稳定性与可靠性问题是制约超声水表进入大规模商业应用的主要因素,因此,需要加快基于创新测量原理的

超声水表的研制和试验,同时还需要加快与测量原理相配套的超声水表测试仪器设备的研制和试验,使得超声水表在生产阶段就能够进行长期工作稳定性和可靠性的必要模拟测试,从而使得基于创新原理的超声水表可以尽快实现大规模商用。本文的问题探析、测量原理方法、测试设备及可测性设计的创新技术方案同样适用于超声燃气表和超声油表等其他超声波流体流量计量仪表。

参考文献

- [1] 姚灵. 超声水表原理与技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
YAO L. Principle and technology of ultrasonic water meters[M]. Beijing: China Standard Press, 2022.
- [2] 姚灵, 王欣欣, 钱景笙. 超声水表新技术的研究与探索[J]. 仪表技术, 2024(3): 42-46.
YAO L, WANG X X, QIAN J SH. Research and exploration of new technologies for ultrasonic water meters[J]. Instrumentation Technology, 2024(3): 42-46.
- [3] 高科, 赵伟国. 超声水表流量标准装置系统设计[J]. 中国计量学院学报, 2015, 26(3): 258-262.
GAO K, ZHAO W G. Design of a calibration facility system for ultrasonic water meters[J]. Journal of China University of Metrology, 2015, 26(3): 258-262.
- [4] 刘伟, 秦会斌. 基于时差法的双声道超声波水流量计[J]. 测控技术与仪器仪表, 2023, 49(1): 58-62.
LIU W, QIN H B. Two-channel ultrasonic water flowmeter based on time difference method [J]. Measurement Control Technology and Instruments, 2023, 49(1): 58-62.
- [5] 姚灵. 我国水表行业“十四五”发展规划纲要[R]. 中国计量协会水表工作委员会, 2021.
YAO L. 14th Five-Year Plan for Water meter industry of China [R]. The Water Meter China Measurement Association Working Committee, 2021.
- [6] 姚灵. 超声水表若干重要问题的分析与讨论[R]. 2024 年水表行业第十届技术交流会议报告, 2024.
YAO L. Analysis and discuss of some important problems for ultrasonic water meters[R]. Report in 2024 10th Water Meter Industry Seminar, 2024.
- [7] 余洪祥, 王成李, 赵伟国, 等. 基于双阈值的超声水表回波特征峰搜索方法研究[J]. 声学技术, 2025, 44(4): 1-7.
YU H X, WANG CH L, ZHAO W G, et al. Research on echo characteristic peaks search method based on the dual-threshold measurement of ultrasonic water meter[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(4): 1-7.

- [8] ZHENG D D, MEI J Q, MAO Y, et al. Signal processing method for flight time measurement of gas ultrasonic flowmeter [C]. 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC). Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [9] FANG Z H, HU L, MAO K, et al. Similarity judgment-based double-threshold method for time-of-flight determination in an ultrasonic gas flowmeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(1): 24-32.
- [10] ZHENG Z M, ZHENG D D, FAN H J, et al. Flight time measurement methodology for small-caliber clamp-on ultrasonic flowmeters [C]. 2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC). Piscataway: IEEE, 2024: 1-6.
- [11] 马勤勇. 基于 TDC-GP22 的超声波渡越时间测量方法研究[J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(2): 96-99.
MA Q Y. Research on ultrasonic transit time measurement method based on TDC-GP22 [J]. Computing Technology and Automation, 2023, 42(2): 96-99.
- [12] LIU H Z, WANG X Y, LIU C B, et al. A high-accuracy ultrasonic gas flowmeter based on scandium-doped aluminum nitride piezoelectric micromachined ultrasonic transducers [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73(4): 7510510.
- [13] ZHENG D D, ZHAI M X, HU J Y. Study on the measurement method of wet gas flow velocity by ultrasonic flow meter [C]. 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC). Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [14] HOU Z Y, ZHANG L, YANG L, et al. An airflow volumetric flowmeter using ScAlN-based piezoelectric micromachined ultrasonic transducers (PMUTs) in small-diameter pipelines [C]. 2024 The 9th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM). Piscataway: IEEE, 2024: 1-5.
- [15] MILLÁN-BLASCO O, SALAZAR J, CHÁVEZ J, et al. Linearity error in clamp-on ultrasonic flowmeters due to the installation on pipes made of dispersive materials [C]. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC). Piscataway: IEEE, 2017: 1-5.
- [16] 杨瑞峰, 朱义德, 郭晨霞, 等. 互相关渡越时间超声波流量计精度补偿[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 63-67.
- [17] 赵楠楠, 徐安察, 胡亮, 等. 基于声速追踪的超声波液体流量计量方法[J]. 仪表技术与传感器, 2022(9): 41-46.
ZHAO N N, XU AN CH, HU L, et al. Method based on tracking acoustic speed for ultrasonic liquid flow metering[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(9): 41-46.
- [18] WANG Z F, WEI N, ZHAI Z B, et al. Ultrasonic flowmeter fault early warning method based on Bayesian optimization XGBoost[C]. 2024 International Symposium on Artificial Intelligence and Intelligent Manufacturing (AIIM). Piscataway: IEEE, 2024: 251-257.
- [19] 马杰, 徐科军, 江圳, 等. 基于基于超声回波能量峰值点拟合的气体超声波流量计信号处理方法[J]. 计量学报, 2022, 43(5): 597-602.
MA J, XU K J, JIANG ZH, et al. A signal processing method of ultrasonic gas flowmeter based on peak point fitting of ultrasonic echo energy[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(5): 597-602.
- [20] 田雷, 徐科军, 沈子文, 等. 基于回波峰值拟合的气体超声流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1107-1114.
TIAN L, XU K J, SHEN Z W, et al. Signal processing for ultrasonic gas flowmeter based on peak fitting of echo[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1107-1114.
- [21] LI L, ZHENG X Y, GAO Y, et al. Experimental and numerical analysis of a novel flow conditioner for accuracy improvement of ultrasonic gas flowmeters [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5): 4197-4206.
- [22] CHEN G Y, LIU G X, ZHU B G, et al. 3D isosceles triangular ultrasonic path of transit-time ultrasonic flowmeter: Theoretical design and CFD simulations[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4733-4742.
- [23] BAO Y, WANG L G, DONG F, et al. Similarity-based AIC time-of-flight estimation algorithm for ultrasonic flowmeters [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74(1): 7503511.
- [24] MASSAAD J, VAN NEER P L M J, VAN WILLIGEN D M, et al. Design and proof-of-concept of a matrix transducer array for clamp-on ultrasonic flow measurements [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,

- 2022, 69(8): 2555-2568.
- [25] 王芳芳, 曾云, 张振凯, 等. 大管径超声波测流误差的影响因素及修正分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 146-153.
- WANG F F, ZENG Y, ZHANG ZH K, et al. Influencing factors and correction analysis of large diameter ultrasonic flow measurement error [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 146-153.
- [26] WANG S K, LYU H C, SAFARI A, et al. Industrial validation of the PMUT ultrasonic flowmeter based on CSOI[C]. 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium (UFFC-JS). Piscataway: IEEE, 2024: 1-4.
- [27] 贾惠芹, 王成云, 党瑞荣. 流体流速对超声波流量测量精度的影响及校准[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 1-8.
- JIA H Q, WANG CH Y, DANG R R. Influence of fluid velocity on ultrasonic wave flowrate measurement accuracy and its calibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 1-8.
- [28] 姚爽, 宿彬, 杨宗良, 等. 上游弯管对超声波流量计精度影响及整流设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 102-109.
- YAO SH, SU B, YANG Z L, et al. Influence of upstream elbow pipe on accuracy of ultrasonic flowmeter and design of rectification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 102-109.
- [29] JIANG Y Z, BAO Y, REN S J, et al. A time-of-flight estimation method based on central frequency matching for ultrasonic flowmeters[C]. 2023 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Piscataway: IEEE, 2023: 1-5.
- [30] ARELLANO Y, MOLLO N J, LØVSETH S W, et al. Characterization of an ultrasonic flowmeter for liquid and dense phase carbon dioxide under static conditions[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 14601-14609.
- [31] GAO Y F, WU Z P, CHEN M K, et al. A miniaturized transit-time ultrasonic flowmeter using PMUTs for low-flow measurement in small-diameter channels[C]. 2023 IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Piscataway: IEEE, 2023: 115-118.
- [32] RONKIN M, KALMYKOV A, ZEYDE K. Novel FMCW-interferometry method testing on an ultrasonic clamp-on flowmeter[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 6029-6037.
- [33] ZHU K, CHEN X Y, QU M J, et al. Non-contact ultrasonic flow measurement for small pipes based on AlN piezoelectric micromachined ultrasonic transducer arrays [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(3): 480-487.
- [34] 张丽稳, 杨喜良, 张兴, 等. 超声波流量计的压电换能器动态性能一致性研究[J]. 应用声学, 2025, 44(1): 140-147.
- ZHANG L W, YANG X L, ZHANG X, et al. Consistency research of ultrasonic transducer based on dynamic time warping algorithm [J]. Journal of Applied Acoustics, 2025, 44(1): 140-147.
- [35] ZHAO Y T, WEI Q, LI M, et al. Design and implementation of an external clamped ultrasonic flowmeter based on time difference method[C]. 2021 IEEE International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI). Piscataway: IEEE, 2021: 1-4.
- [36] 王安然, 蒋延付, 郑博文, 等. 一种基于电容积分的时差法超声波流量计飞行时间测量方法[J]. 中国测试, 2021, 47(8): 44-50.
- WANG AN R, JIANG Y F, ZHENG B W, et al. A transit-time measurement method for time difference ultrasonic flowmeter based on capacitance integration[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(8): 44-50.
- [37] 赵俊奎, 刘权, 王燕, 等. 基于超声波流量计的流速模拟器设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2023, 24(4): 294-297.
- ZHAO J K, LIU Q, WANG Y, et al. Study of self-gain control circuit of ultrasonic flow-meter [J]. Automation and Instruments, 2023, 24(4): 294-297.
- [38] 杨友良, 陈宇擎, 孟凡伟. 基于波形峰值检测的超声波流量计[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(4): 114-117.
- YANG Y L, CHEN Y Q, MENG F W. Ultrasonic wave flowmeter based on peak detection of waveform [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(4): 114-117.
- [39] 陈丽, 禹静, 樊丹丹, 等. 基于 CNN-Attention-GRU 的超声波燃气表时差预测方法研究[J/OL]. 中国测试, 1-9[2025-06-03]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1714.tb.20241112.1236.004>.
- CHEN L, YU J, FAN D D, et al. Research on time difference prediction of ultrasonic gas meter based on CNN-Attention-GRU[J/OL]. China Measurement & Test, 1-9[2025-06-03]. <https://link.cnki.net/urlid/>

- 51, 1714, tb, 20241112, 1236, 004.
- [40] MILLÁN-BLASCO O, SALAZAR J, CHÁVEZ J A, et al. Zero-flow offset variation in ultrasonic clamp-on flowmeters due to inhomogeneity and nonlinearity of pipe materials [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66 (11): 2845-2851.
- [41] GU X T, CEGLA F. Modeling surface roughness-related uncertainties of leaky lamb wave clamp-on ultrasonic flowmeters [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (9): 6843-6852.
- [42] NGUYEN T H L, PARK S. Intelligent ultrasonic flow measurement using linear array transducer with recurrent neural networks[J]. IEEE Access, 2020, 22(8): 137564.
- [43] YANG Z Z, GAN Q L, HE M L, et al. Research on the influence of sensor installation arrangement on online measurement of external clamp-on ultrasonic flowmeter [C]. 2024 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Piscataway: IEEE, 2024; 1547-1551.
- [44] 北京汇川力行科技有限公司. 声波飞渡时间的测量装置、测量方法及设备: CN202410532236. 3 [P]. 2025-04-05.
Beijing Huichuan Lixing Technology Co., Ltd.. Acoustic transit time measuring device, method and equipment; CN202410532236. 3 [P]. 2025-04-05.
- [45] 阿凯姆-测量电器有限责任公司. 用于在流体中测量超声波信号的渡越时间的方法和装置: CN201110277372. 5 [P]. 2012-10-24.
ACAM MESSELECTRONIC GMBH. Method and device for measuring the transit time of an ultrasonic signal in a fluid; CN201110277372. 5 [P]. 2012-10-24.
- [46] LIANG L H, ZHENG D D, WANG M S, et al. Research and implementation of automatic gain control method for time-difference ultrasonic gas meter [C]. 2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Piscataway: IEEE, 2024; 1-6.
- [47] 王伟生, 冯启航, 张孝远, 等. 流体在微小管径中的流量检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2024(7): 39-46.
WANG W SH, FENG Q H, ZHANG X Y, et al. Research on flow measurement method of fluid in micro-tube of diameter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(7): 39-46.
- [48] 北京汇川力行科技有限公司. 声波飞渡时间的测量装置、测量方法及设备: CN202510227659. 9 [P]. 2025-05-30.
Beijing Huichuan Lixing Technology Co., Ltd.. Acoustic transit time measuring device, method and equipment; CN202510227659. 9 [P]. 2025-05-30.
- [49] 北京汇川力行科技有限公司. 超声波流体流量测量仪表: CN202411078610. 3 [P]. 2024-11-01.
Beijing Huichuan Lixing Technology Co., Ltd.. Ultrasonic fluid flowmeter; CN202411078610. 3 [P]. 2024-11-01.
- [50] 北京汇川力行科技有限公司. 电源模拟装置、检测系统及检测方法: CN202510396407. 9 [P]. 2025-06-20.
Beijing Huichuan Lixing Technology Co., Ltd.. Power supply simulation device, testing system, and testing method; CN202510396407. 9 [P]. 2025-06-20.
- [51] 北京汇川力行科技有限公司. 流体流量仪表测试系统: CN202411213572. 8 [P]. 2024-12-31.
Beijing Huichuan Lixing Technology Co., Ltd.. Fluid flowmeter testing system; CN202411213572. 8 [P]. 2024-12-31.

作者简介

金传恩(通信作者), 硕士, 主要研究方向为电子科学与技术、超大规模集成电路设计、声波飞渡时间测量技术、超声波流体流量测量仪器仪表等。

E-mail: jinchuanen@126.com