

超声水流量检测换能器使用特性及评价指标研究

姚灵^{1,2} 王让定² 左富强¹ 王欣欣¹

(1. 宁波水表股份有限公司, 浙江 宁波 315032 2. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 超声水流量检测换能器的评价指标是反映其使用特性的一个重要方面。对换能器评价指标、评价指标试验方法及试验装置等进行了系统研究; 采用自主研发的全性能试验装置对超声水流量检测换能器进行了性能和影响量试验, 为换能器的筛选、配对和质量控制提供了有效的方法和手段。

关键词: 计量学; 超声时差测量法; 超声水流量检测换能器; 检测换能器特性; 检测换能器性能试验装置

中图分类号: TH814. 92

文献标识码: A

Ultrasonic water flow detection transducer operational performance and evaluation index research

Yao Ling^{1, 2} Wang Rangding² Zuo Fuqiang¹ Wang Xinxin¹

(1. Ningbo Water Meter Co.LTD, Ningbo 315032, China 2. Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The evaluation index of ultrasonic water flow detection transducer is reflecting the transducer operational performance's an important aspect. This paper describes the research details about the transducer evaluation index, evaluation index's test method and performance test device. The performance and influence quantity test of the transducer has be done using a self-restraint transducer performance test device. The effective ways and means has be provided about ultrasonic water flow detection transducer's screening, matching and quality control by this paper.

Key Words: Metrology; Ultrasonic transit-time difference measurement method; Ultrasonic Water flow detection transducer; Detection transducer performance; Detection transducer performance test device

0 引言

超声水流量检测换能器是超声水表、超声热量表及超声流量计等产品的关键核心部件, 也是超声水流量传感器的重要组成部分, 它决定着超声流量仪表的测量准确性与长期工作的可靠性, 因此其在这类仪表中的重要性是不言而喻的^[1]。

随着超声流量仪表应用面的拓展及普及率的上升, 超声水流量检测换能器特性评价与试验方法无据可依或依据不充分的矛盾日见突出^{[2][3]}。因此系统开展超声水流量换能器使用特性、评价指标及试验方法等的研究与实践, 是确保超声流量仪表产品准确、稳定、可靠工作的基本保证, 也是该类产品能否健康持续发展的关键。

1 换能器结构及原理

超声水流量检测换能器通常采用圆薄片厚度振动模式工作, 见图 1; 其结构通常被设计

成图 2 所示形式^[4]。由于大多数超声流量传感器均工作于时差法测量原理，因此一个换能器需同时兼备发射和接收功能，其工作原理见图 3^[5]。超声时差法流量仪表的正、逆向传播时间 t_{1-2} 、 t_{2-1} 及时间差 Δt 与被测管道内平均流速之间的关系如下，

$$v = \frac{D}{2 \sin \varphi \cos \varphi} \left(\frac{\Delta t}{t_{1-2} \cdot t_{2-1}} \right) \quad (1)$$

式中 D —测量管直径； v —测量管内被测流体平均速度； φ —换能器连线（即超声波传播方向）与测量管轴线之间夹角； t_{1-2} —超声波正向传播时间； t_{2-1} —超声波逆向传播时间； Δt —超声波正、逆向传播时间差。

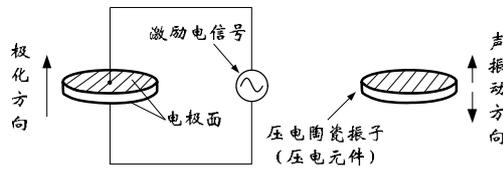


图 1 换能器压电元件振动模式

Fig.1 Transducer piezoelectric element mode of vibration

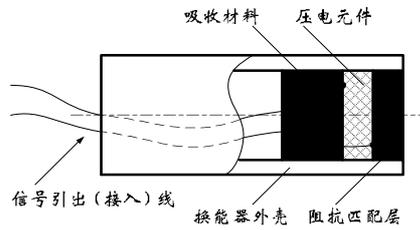


图 2 换能器结构图

Fig.2 Transducer structure

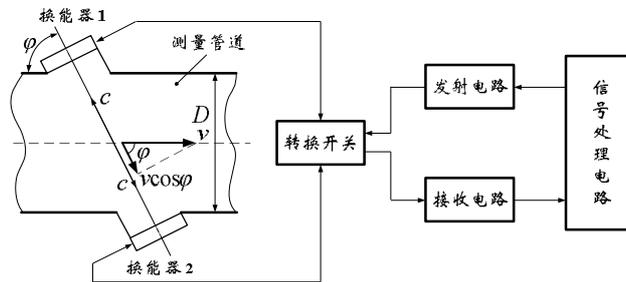


图 3 时差法超声流量仪表工作原理图

Fig.3 Ultrasonic transit-time difference measurement method flow meter schematic diagram

当发射电路对换能器 1 实施一定频率的脉冲波激励时，换能器 1 就会向换能器 2 发射超声波束，同时在时点 start 处打开高精度计时器进行计时；换能器 2 接收到超声波信号后在

规定的信号时点 stop 处关闭计时器；超声波从激励至接收的这段传播时间称为正向传播时间，反之则称为逆向传播时间。换能器超声发射至接收的时间序列见图 4 示意图^[6]。

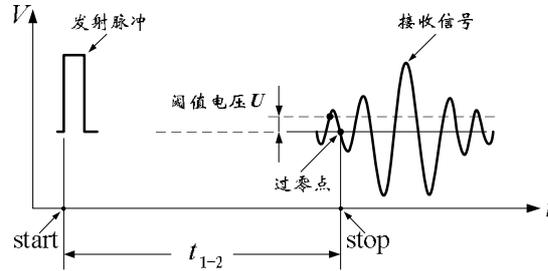


图 4 超声换能器发射接收时序示意图

Fig.4 Ultrasonic transducer launch and receive sequence diagram

由于超声换能器中的电声转换元件大多采用 PZT（铅钛酸铅压电陶瓷）材料，它的声特性阻抗与被测介质水的阻抗特性相差悬殊，因此大部分超声波进入水的界面时就会被反射，不能传送至接收换能器。阻抗匹配层的作用就是通过声特性阻抗的匹配，使大部分超声波能顺利通过被测介质。单层阻抗匹配层常用计算公式见下式

$$z_p = \sqrt{z_0 z_1} \quad (2)$$

式中 z_p —匹配层的特性阻抗； z_0 、 z_1 —分别为压电元件及被测介质水的特性阻抗。

为了及时吸收发射超声波的余振信号，在压电元件后通常设置有吸收材料，以确保后一次发射的超声波不受前一次的影响。

2 换能器使用特性

超声换能器的基本特性是要保证发射换能器在发射脉冲信号激励下能够长期稳定发送超声波，并在阻抗匹配层的配合下，使超声波能以最大能量通过被测介质抵达接收换能器；接收换能器应将接收到的超声波转化成稳定的电信号送至信号处理电路。简言之，超声换能器的主要作用是起到“电-声”和“声-电”转换，并保证每次转换过程的一致和稳定。从实际使用情况看，更应关注换能器的某些综合性能^[7]。

2.1 传播时间及时间差的稳定性

传播时间 t_{1-2} 及 t_{2-1} 可参考图 3 获得

$$t_{1-2} = \frac{D/\sin\varphi}{c+v\cos\varphi}; \quad t_{2-1} = \frac{D/\sin\varphi}{c-v\cos\varphi} \quad (3)$$

式中 c —超声波在被测介质中的传播速度。

正向与逆向传播时间差由下式获得

$$\Delta t = t_{1-2} - t_{2-1} = \frac{2Dv \cos \varphi}{\sin \varphi (c^2 - v^2 \cos^2 \varphi)} \quad (4)$$

由于 $c^2 \gg v^2 \cos^2 \varphi$, 所以

$$\Delta t \approx \frac{2Dv}{\tan \varphi c^2} \quad (5)$$

在声速恒定（即温度不变）、测量管几何尺寸不变条件下，传播时间和时间差均为管道内流体平均流速 v 的函数，它们能间接反映出管内流速乃至流量、累计流量的数值。因此在规定时间段内测量一组换能器的传播时间及时间差的变化量就能综合判别出超声换能器实际工作的稳定性及可靠性。

2.2 频率与幅值的稳定性

任何由压电元件构成的超声换能器均有自身谐振频率，当换能器工作于谐振频率时，可以取得最好的发射及接收效果，谐振频率由下式给出

$$f = \frac{k_d}{d} \quad (6)$$

式中 f — 压电元件中心频率（即谐振频率）； k_d — 压电元件材料的频率常数； d — 压电元件厚度。

当压电元件的几何尺寸和材料确定后，其中心频率就基本恒定；当换能器和测量管的几何尺寸、阻抗匹配材料特性、发射激励信号强度及频率、以及工作环境温、湿度等均不变时，接收换能器的输出幅值也会基本保持不变。

频率与幅值特性指标不能随时间发生变化，即换能器的“时漂”要足够小。这些指标是决定超声波传播时间一致与稳定的决定因素。

2.3 耐环境影响特性

换能器工作时会受到环境条件的影响，如气候环境的温度、湿度等变化影响；机械环境的振动、冲击等影响；电磁环境的静电放电、电脉冲群、静磁场、电磁场等影响。尤其是温度和湿度变化非常容易引起被测介质、压电元件材料、阻抗匹配材料以及金属材料等的特性变化，产生所谓的“温漂”与“湿漂”。因此换能器能否承受环境条件变化的影响，是决定换能器长期工作可靠性的重要指标。

2.4 阻抗匹配特性

根据超声波发射和透射理论表明，当平面声波垂直进入到两种介质的平面分界面上时，

超声波声压的反射系数 r 和透射系数 m 可由下式给出

$$r = \frac{z_1 - z_0}{z_1 + z_0}; m = \frac{2z_1}{z_1 + z_0} \quad (7)$$

当 $z_0 = z_1$ 时，即压电元件和被测介质特性阻抗近似相等时， $r = 0$ ， $m = 1$ ，超声波几乎形成全透射，无反射。阻抗特性决定了接收换能器输出幅值的大小。

4 换能器评价指标

为保证换能器装入整机后能正常工作，必须对换能器的使用特性规定相应技术指标进行评价。

4.1 工作频率

换能器工作频率是其固有谐振频率。通常收发换能器工作在串联谐振状态，因此其工作频率就是它的串联谐振频率。串联谐振频率见下式

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (8)$$

式中 F_s —串联谐振频率； L_1 —压电元件的动态电感； C_1 —压电元件的动态电容。

加工组装后的换能器中心频率会发生偏移，因此实际使用时可以允许其有一定的公差 Δf ，即在 $F_s \pm \Delta f$ 范围内工作。

4.2 输出幅值

输出幅值指的是超声接收换能器电负载上所测得的接收信号电压值，用 $U_{p-p}(F)$ 表示，当工作频率 F 恒定时，幅值也相对恒定。换能器工作时会受到各种因素影响（如阻抗匹配、安装位置等），使接收到的电压幅值发生一定变化，但在允许范围 $\pm \Delta U$ 内变化，即在 $U_{p-p}(F) \pm \Delta U$ 时，换能器应能正常工作。

4.3 传播时间的重复性

传播时间（或传播时间差）的重复性可以用来反映被测介质处于静止状态时，两个换能器之间超声波多次传播时间的一致性，也是较短时间内传播时间离散性的一种定量评定。

传播时间重复性评定公式如下

$$\sigma = \frac{1}{\bar{t}_{1 \rightarrow 2 \text{ or } 2 \rightarrow 1}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{(1 \rightarrow 2 \text{ or } 2 \rightarrow 1)_i} + \bar{t}_{1 \rightarrow 2 \text{ or } 2 \rightarrow 1})^2}{n-1}} \quad (9)$$

或

$$\sigma = \frac{1}{\bar{t}_{1 \leftrightarrow 2}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{(1 \leftrightarrow 2)i} + \bar{t}_{1 \leftrightarrow 2})^2}{n-1}} \quad (10)$$

式中 σ —传播时间重复性; $t_{(1 \rightarrow 2 \text{ or } 2 \rightarrow 1)i}$ —换能器 1 至 2 或 2 至 1 任一次的传播时间(指单向传播); $\bar{t}_{1 \rightarrow 2 \text{ or } 2 \rightarrow 1}$ —换能器 1 至 2 或 2 至 1 连续多次传播时间的平均值; $t_{(1 \leftrightarrow 2)i}$ —换能器 1 至 2 及 2 至 1 的循环传播时间(指双向传播); $\bar{t}_{1 \leftrightarrow 2}$ —换能器 1 至 2 及 2 至 1 连续多次传播时间的平均值。

4.4 传播时间的稳定性

稳定性指标反映了一对换能器在较长时间工作中的变化特性,它通常由换能器的零点稳定性和稳定流动条件下的稳定性所组成。零点稳定性指的是被测介质处于静止状态时,换能器传播时间差长时间工作的变化量。通常情况静止状态下换能器的传播时间差应趋近于零,并在零点附近作小范围变化。稳定流动条件下的稳定性指的是在被测介质处于某一恒定流量流动状态时,换能器传播时间差长时间工作的变化量。

根据式(5),当 D 、 φ 、 c 恒定不变,即测量管几何形状、换能器安装位置及被测介质温度不变时,如 $v=0$,则 $\Delta t=0$;或 $v=C_1$,则 $\Delta t=C_2$ (C_1 、 C_2 为某一常数)。由于环境条件和机械结构件的应力变化等因素,实际情况下的传播时间差并不为零或为某一常数,而是随时间发生一定的漂移,即在零点或某一工作点处产生所谓的“时漂”。

传播时间差的时漂可以用 δt 表示,因此实际允许的传播时间差应被限制在 $\Delta t \pm \delta t$ 范围内,否则将会影响换能器的正常工作。

4.5 环境与介质影响量

换能器工作时其特性易受环境温度、湿度、振动等影响,也会受到被测介质温度及压力等改变影响。因此传播时间差 Δt 可以表述为

$$\Delta t = f(\Delta T, \Delta H, \Delta Z, \Delta T', \Delta P') \quad (11)$$

式中 ΔT —环境温度影响量; ΔH —环境湿度影响量; ΔZ —环境振动影响量; $\Delta T'$ —被测介质温度影响量; $\Delta P'$ —被测介质压力影响量。

上述各种影响量均会影响换能器的正常工作状态,造成其特性发生偏移。因此需要根据超声流量仪表测量准确度要求分别设置相应的允许偏移量予以规定。

5 试验装置及方法

5.1 试验装置

试验装置主要由实流模拟单元、环境模拟单元、性能测量单元及保温封闭管路等组成。其中，实流模拟单元由水流体驱动部件、消振部件、流量稳定部件、流量测控部件、水温测控及压力测控部件等组成；环境模拟单元由环境影响量控制部件、环境及时间参数测量部件、环境试验箱体、环境试验程序等组成；性能测量单元由测量台架、角度调整机构、换能器综合特性测量部件等组成。试验装置结构见图 5^[8]。

试验装置除了可实现对换能器工作频率，输出幅值，传播时间及时间差的重复性、时间稳定性，环境与介质影响量等的试验外，还可进行换能器指向性测量与换能器配对等工作。

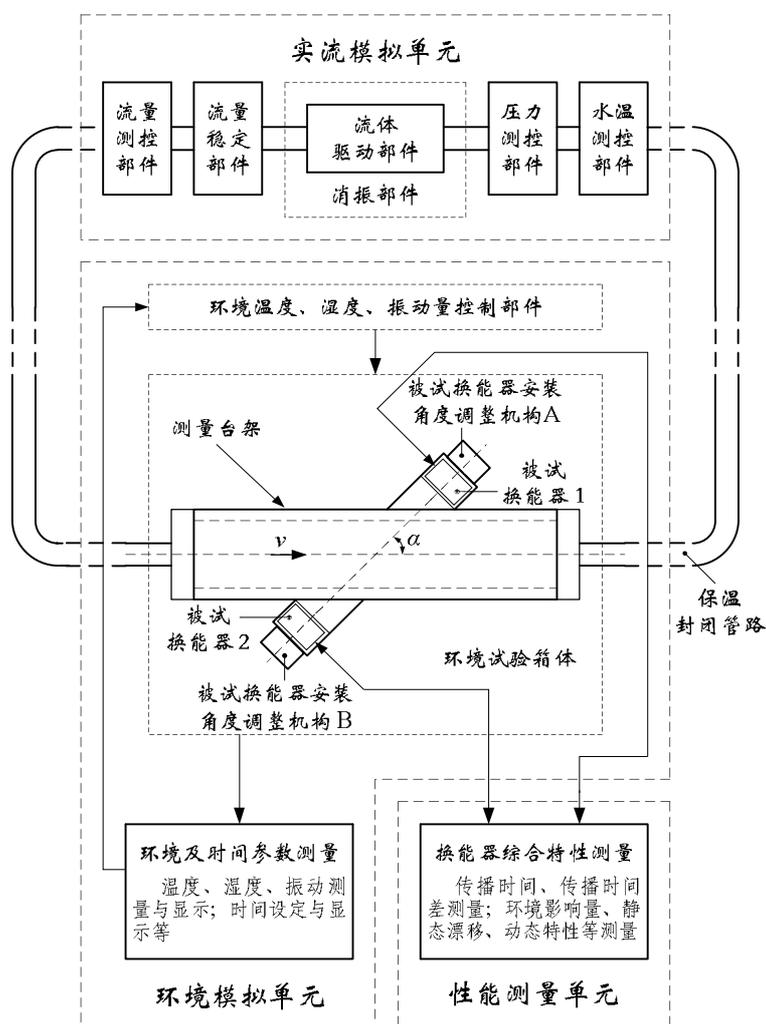


图 5 换能器性能试验装置示意图

Fig.5 Transducer performance test device schematic diagram

5.2 试验方法

将换能器安装于测量台架上，调整安装轴线使接受换能器信号为最强；关闭管路阀门使流量为零，对换能器在静态下的特性进行测量与试验；调整管路流量、水温、压力，并使其

稳定，测量换能器在稳态下的工作特性；改变环境温度、湿度、振动及介质温度和压力，对换能器特性进行各类组合测量与试验；在被测介质流量处于静态和稳态时，测量换能器的时间稳定性等。

当换能器批质量预期良好时（即换能器材料特性和工艺稳定），换能器 1 和 2 可以同为被测换能器，这样可以提高测量效率。此时，如换能器 1 和 2 符合技术指标要求，则配对同时成功；如果换能器批质量参差不齐，可以将其中一个换能器换成标准换能器（注：标准换能器须经老化处理和特性筛选），这样可以对每个换能器进行单独测量、挑选和分类，便于按不同性能分档配对。

6 试验结果

根据上述评价指标及方法，在自主研制的换能器性能试验装置上分别对 4 件超声水流量换能器处于静止流速时的基本性能进行试验，其主要试验结果列于表 1。（注：稳定性试验是在每隔 4 小时进行一次测量的条件下进行）

表 1 换能器性能试验结果

Tab.1 Transducer performance test results

试验项目	换能器编号及试验结果											
	1 号换能器			2 号换能器			3 号换能器			4 号换能器		
	测量次数			测量次数			测量次数			测量次数		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
工作频率 (MHz)	1.001	1.002	1.001	1.009	1.009	1.007	0.998	0.999	0.997	1.002	1.003	1.002
输出幅值 (V)	1.323	1.345	1.352	1.536	1.517	1.526	1.437	1.114	1.209	1.092	1.071	1.048
传播时间差的重复性 (ps)	41.14	43.23	42.60	35.39	36.67	35.35	55.07	61.83	51.46	48.62	50.92	49.58
	重复性 σ : 2.57%			重复性 σ : 1.86%			重复性 σ : 9.38%			重复性 σ : 2.32%		
传播时间差的稳定性 (ps/4h)	42.21	44.58	42.77	34.65	37.33	35.40	54.86	63.91	52.74	46.95	49.58	48.86
	最大变化量 δt : 2.37			最大变化量 δt : 2.68			最大变化量 δt : 11.17			最大变化量 δt : 2.63		

从上述换能器试验结果表明，3 号换能器传播时间差的重复性和稳定性均不符合要求，其重复性已超过 5%，稳定性的最大变化量也超过了 10ps，因此不能供给超声水流量仪表装机使用。1 号、2 号、4 号换能器能基本满足换能器的配对需要。

传播时间差的重复性是一项随机误差性质的指标，是超声水流量检测换能器测量结果分散性的定量标志。

将试验结果符合要求的超声换能器配对后装配成 DN50~250 超声电子水表整机，经浙江省计量测试技术研究院型式试验，其各项性能指标均符合国家标准的要求，测量准确度达到 1 级水平，测量范围 $Q_3/Q_1 \geq 250$ ，处于国内领先水平。

7 结语

建立和完善超声水流量检测换能器的评价指标和试验方法、研制相应的试验装置,对确保超声水流量传感器乃至超声电子水表、超声流量计等产品的技术性能和质量水平非常重要。由于目前国内缺乏换能器专用试验设施,导致许多出厂超声水流量测量仪表整机的使用可靠性和稳定性存在隐性质量风险,同时也不便于生产过程对关键部件产品的质量监控。

本项研究工作,在分析超声换能器基本性能和使用特性基础上,建立了换能器的综合评价指标、提出了相应的试验方法、研制了综合试验装置,为超声检测换能器的性能测量、试验及特性配对提供了有效的方法和工具。

在试验、筛选、配对基础上,今后还需加强对换能器选材、材料特性、换能器老化及稳定性处理工艺等的研究,同时应加强换能器可靠性与稳定性的试验与研究,进一步做好换能器的筛选与配对研究。

参考文献

- [1] 姚 灵编著. 电子水表传感与信号处理技术[M]. 北京:中国质检出版社, 2012,96 ~ 122
- [2] GB/T 778-2007.1~3, 封闭满管道中水流量的测量 饮用冷水水表和热水水表[S].
- [3] JJG1030-2007,超声流量计[S].
- [4] 林桂玉著. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社, 2006,207 ~ 258
- [5] BS ISO/TR 12765, Measurement of fluid flow in closed conduits — Methods using transit-time ultrasonic flowmeters, 1998[S].
- [6] DB_GP22-EVA_en V0.1, Time-to-Digital-Converter Datasheet, 30th May 2012, acam www.acam.de.
- [7] 栾桂冬、张金铎、王仁乾编著. 压电换能器和换能器阵(修订版)[M]. 北京:北京大学出版社, 2005,73~100
- [8] 姚灵、王让定、左富强, 等. 一种超声水流量换能器综合性能实验装置及其使用方法 [P]. 201210573562.6, 2012

本文资助: 浙江省优先主题重点工业项目(2010C11025); 宁波市重大科研攻关项目(2009B10003)

第一作者简介: 姚灵(1953~), 男(汉族), 浙江庆元人, 教授级高级工程师, 博士后合作导师, 宁波大学兼职教授, 主要研究方向: 流量/几何量传感与信号处理技术

作者联系方式: 宁波市 江北区 北海路 268 弄 99 号 宁波水表股份有限公司 邮编: 315032
电话: 0574-88195868; 邮箱地址: 13806630959@139.com

注: 该论文曾发表于《计量学报》2014 年第 2 期上