

超声波流量计换能器参数的选择

Selection of the Parameters for Transducer of Ultrasonic Flow Meter

江杰 罗长海

(内蒙古科技大学信息工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要: 超声波换能器是超声波流量计的重要组成部分,它是利用超声波技术进行流量测量的关键,其参数选择直接影响到整个检测系统的性能和可靠度。针对外夹式超声波流量计不能准确地选取换能器的问题,基于时差法测量原理,分析了超声波在管道中的传播过程;进而通过分析计算获取换能器的发射频率、发射角度以及发射强度。根据计算得到的技术参数可以更加准确地选取超声波换能器。

关键词: 超声波流量计 换能器 振荡频率 发射角度 发射强度 TDC-GP2

中图分类号: TP212+.9 **文献标志码:** A

Abstract: Ultrasonic transducer is the major component of the ultrasonic flow meter, it is the key of flow measurement using ultrasonic technology, and its parameters selection affects the performance and reliability of the whole detecting system. Due to transducer cannot be accurately selected for the clamp-on ultrasonic flow meter, on the basis of the measurement principle of time difference measurement, the spread process of the ultrasonic wave in the pipeline is analyzed, and further more, the emission frequency, angle and intensity are obtained by calculation and analysis. In accordance with the calculated technical parameters, the ultrasonic transducer can be selected more accurately.

Keywords: Ultrasonic flow meter Transducer Oscillation frequency Emission angle Emission intensity TDC-GP2

0 引言

超声波流量计凭借其运行稳定、计量精度高、非接触测量、安装方便、电子线路集成程度高、易于数字化管理等优点,已经在电力、石油、化工,特别是供水系统的大管径流量测量中得到了广泛应用,但是在小管径、低流速的测量中还没有成熟的产品^[1]。

基于超声波的时差法测量原理,对高炉冷却水流量测量中的换能器参数选取进行了研究。高炉冷却循环系统的水管管径为 30~70 mm、流量为 0.5~4.0 m/s (属于小管径、低流速),测量对象属于纯净单向水流量^[2]。本文将从超声波换能器的发射频率、发射角度和发射强度三个方面来进行分析,最终实现换能器的准确选取。

1 换能器的发射频率

超声波的发射频率在很大程度上影响着超声波的传播。超声波的频率越高,声束扩散角越小,能量越集中,方向性越好,分辨力也越好^[3]。但是在传播过程中超声波频率越高其衰减越快,而且会增加电路的设计

难度。因此,需要选择频率合适的换能器。

声波在介质中传播时,由于分子的吸收、粘滞性和热传导,会造成声波在传播过程中的衰减^[4]。按照 Kirchoff 理论,衰减系数 α 如式(1)所示。

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2c^3} \left(\frac{4}{3} \times \frac{\mu}{\rho} + \frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{k}{\rho c_v} \right) \quad (1)$$

式中: μ 为粘滞系数; k 为热传导数; γ 为比热容比; c_v 为比定容热容; ω 为 $2\pi f$; ρ 为液体密度; c 为声速。

根据实际的测量环境,高炉冷却水的进出水温差值要保证在允许的范围内,在高炉的软水闭路循环系统中循环水的温度一般要低于 30℃。以水温为 30℃ 时来分析超声波在冷却水中的传播。

在 30℃ 时的冷却水中,衰减系数 α 为:

$$\alpha \approx 7.58 \times 10^{-15} f^2 \quad (2)$$

衰减系数 α 的倒数 $\frac{1}{\alpha}$ 表示位移幅度衰减到 $\frac{1}{e}$ (e 为自然对数的底)。用 S 表示传播距离,则声波在水中的传播距离为:

$$S = \frac{1}{\alpha} \approx \frac{10^{15}}{7.58 f^2} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,在水中低频率时的传播衰减低,但是换能器的指向性会比较差,分辨力也很差,测量精度也会大大降低,所以一般测量液体的超声波换能器中心频率选择为 1~5 MHz。因此,针对小管径的

修改稿收到日期:2011-11-23。

第一作者江杰(1958-),男,1988年毕业于包头钢铁学院自动化专业,获学士学位,教授级高级工程师;主要从事现场总线、智能仪器仪表以及智能机器人的研究。

测量换能器的频率选为 1 MHz。为了使其能工作在最佳状态,发射的脉冲频率要和探头的中心频率一致,只有这样才能使换能器输出能量最大,灵敏度达到最高。

2 换能器的发射角度

当超声波由一种介质斜入射至异质界面时,会发生反射、折射和波形转换等现象,而由于气体和液体中不能传播横波,所以不是任何介质下的传播都有波形的转换。为提高换能器接收信号的选择性,选取入射角大于第一临界角而小于第二临界角,以保证仅一束波被换能器接收^[3]。由于高炉冷却水传输管道的材料是钢,所以换能器采用有机玻璃作为声导。

2.1 超声波的反射和折射

当超声波由一种介质斜入射至异质界面时,会产生反射和折射,并且会发生波形的转换,如图 1 所示。

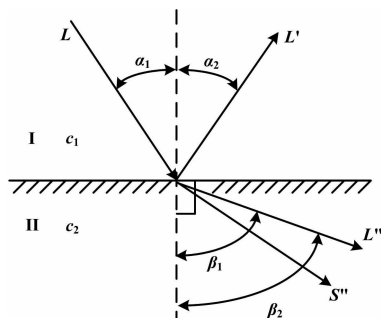


图 1 超声波的反射与折射

Fig. 1 The reflection and refraction of ultrasonic wave

图 1 中, c_1 、 c_2 分别为第 I、II 介质中超声波的速度,超声波的入射角为 α_1 ,反射角为 α_2 ,纵波折射角为 β_1 ,横波的折射角为 β_2 。由反射和折射定律可得出以下关系式:

$$\frac{\sin\alpha_1}{c_1} = \frac{\sin\alpha_2}{c_1} = \frac{\sin\beta_1}{c_2} = \frac{\sin\beta_2}{c_2} \quad (4)$$

由式(4)可以得出 $\alpha_1 = \alpha_2$,即入射角等于反射角,而 $c_1 < c_2$,所以 $\alpha_1 < \beta$,即入射角小于折射角。

2.2 超声波在管道中的传播

超声波在冷却水管道中的传播过程,可分为三个传播阶段,第一个传播阶段是由有机玻璃入射至钢中,第二传播阶段是从钢中入射至水中,第三个阶段是从水中入射至钢中。通过分析这三个传播阶段得出换能器的发射角度。

超声波在高炉冷却水管道中的实际传播过程如图 2 所示。超声波在水、钢和有机玻璃中的传播速度分别为:(水) $c_1 = 1.43 \times 10^3$ m/s、(钢)纵波 $c_2 = 5.81 \times 10^3$ m/s、(钢)横波 $c_3 = 3.23 \times 10^3$ m/s 和(有机玻璃)纵波 $c_4 =$

2.73×10^3 m/s。

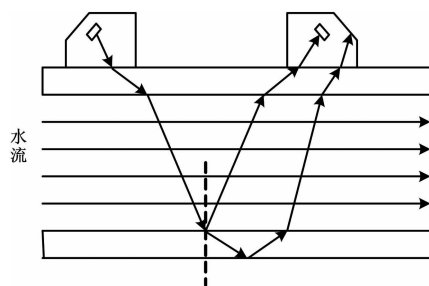


图 2 超声波的传播过程

Fig. 2 The propagation process of ultrasonic wave

① 超声波斜入射至有机玻璃和钢界面

换能器发射超声波是以纵波的形式传播的,当超声波从有机玻璃斜入射至钢界面时,发生波形转换,产生折射横波与纵波,传播过程与图 1 所示类同。

超声波的传播方向符合折射定律,即:

$$\frac{\sin\alpha}{c_4} = \frac{\sin\beta_1}{c_2} = \frac{\sin\beta_2}{c_3} \quad (5)$$

由于同一介质中纵波波速大于横波,因此 $\beta_2 < \beta_1$ 、 $c_4 < c_2$ 、 $c_4 < c_3$,且折射角随着入射角的增大而增大。当 $\beta_1 = 90^\circ$ 时,纵波的入射角称为第 I 临界角,用符号 A_1 表示;当 $\beta_2 = 90^\circ$ 时,横波的入射角称为第 II 临界角,用符号 A_2 表示。

由式(5)可以给出如下定义。

第一临界角 A_1 : $\beta_1 = 90^\circ, A_1 = \alpha = \arcsin \frac{c_2}{c_4}, A_1 = 27.6^\circ$ 。

第二临界角 A_2 : $\beta_2 = 90^\circ, A_2 = \alpha = \arcsin \frac{c_3}{c_4}, A_2 = 57.7^\circ$ 。

由以上 A_1 和 A_2 的定义可知超声波的三种传播形式如下。

当 $\alpha < A_1$ 时,第二介质中既有折射纵波 L'' ,又有折射横波 S'' 。

当 $A_1 < \alpha < A_2$ 时,第二介质中只有折射横波 S'' ,没有折射纵波 L'' 。

当 $A_2 < \alpha$ 时,在第二介质中既无折射纵波 L'' ,又无折射横波 S'' 。

由以上计算得出入射角在 $27.6^\circ \sim 57.7^\circ$ 的范围内,即在大于第一临界角而小于第二临界这个范围内,只有一束声波在介质钢中传播。

② 超声波从水中入射至钢中的传播过程

在第三个传播阶段,同样要求超声波在大于第一临界角而小于第二临界角的范围内传播,声波的传播过程与图 1 所示类同。

由声波的折射定律可以得出:

$$\frac{\sin\alpha}{c_1} = \frac{\sin\beta_1}{c_3} = \frac{\sin\beta_2}{c_2} \quad (6)$$

根据式(6)可以得出超声波在第三个阶段传播的第一临界角和第二临界角如下。

$$\text{第一临界角 } B_1: \beta_1 = 90^\circ, B_1 = \alpha = \arcsin \frac{c_2}{c_1}, B_1 = 14.3^\circ.$$

$$\text{第二临界角 } B_2: \beta_2 = 90^\circ, B_2 = \alpha = \arcsin \frac{c_3}{c_1}, B_2 = 26.5^\circ.$$

当 $\alpha < B_1$ 时,第二介质中既有折射纵波 L'' ,又有折射横波 S'' 。

当 $B_1 < \alpha < B_2$ 时,第二介质中只有折射横波 S'' ,没有折射纵波 L'' 。

当 $B_2 < \alpha$ 时,在第二介质中既无折射纵波 L'' ,又无折射横波 S'' 。

③ 超声波从钢中入射到水中的传播过程

在第三个传播阶段的基础上计算超声波在第二个阶段的传播角度。超声波从钢中入射至水中,其中折射角为第三阶段所求得入射角的角度,即折射角分别等于 14.3° 和 26.5° 。

当折射角为 14.2° 时,入射波为纵波时的超声波的入射角为 θ_1 ,由折射定律可得:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_4} \times \sin\alpha_1\right) = \arcsin\left(\frac{5.81 \times 10^3 \text{ m/s}}{1.48 \times 10^3 \text{ m/s}} \times \sin 14.2^\circ\right) = 74.4^\circ \quad (7)$$

当入射波为横波时,超声波的入射角为 θ_2 ,由折射定律可得:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{c_3}{c_1} \times \sin\beta_3\right) = \arcsin\left(\frac{3.23 \times 10^3 \text{ m/s}}{1.48 \times 10^3 \text{ m/s}} \times \sin 14.2^\circ\right) = 32.4^\circ \quad (8)$$

当折射角为 26.5° 时,入射波为纵波时超声波的入射角为 θ_3 ,由折射定律可得:

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_1} \times \sin\beta_4\right) = \arcsin\left(\frac{5.81 \times 10^3 \text{ m/s}}{1.48 \times 10^3 \text{ m/s}} \times \sin 26.3^\circ\right) \quad (9)$$

由于 $\left(\frac{c_2}{c_1} \times \sin\beta_4\right)$ 的值大于 1,所以这种情况不存在。

当入射波为横波时,超声波的入射角为 θ_4 ,由折射定律可得:

$$\theta_4 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_1} \times \sin\beta_4\right) = \arcsin\left(\frac{3.23 \times 10^3 \text{ m/s}}{1.48 \times 10^3 \text{ m/s}} \times \sin 26.3^\circ\right) = 75.3^\circ \quad (10)$$

在第二个传播阶段的基础上计算超声波在第一个阶段的传播过程。超声波从有机玻璃射入钢中,其中折射角为第二阶段所求得入射角的角度。

当 $B_1 = 14.3^\circ$ 、折射角为 74.4° 、折射波形为纵波时,由折射定律可得:

$$\theta_5 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_4} \times \sin\alpha_1\right) = \arcsin\left(\frac{2.73 \times 10^3 \text{ m/s}}{5.81 \times 10^3 \text{ m/s}} \times \sin 74.4^\circ\right) = 26.9^\circ \quad (11)$$

即超声波从有机玻璃中入射到钢中的入射角度为 26.9° 。

当 $B_1 = 14.3^\circ$ 、折射角为 32.4° 、折射波形为横波时,由折射定律可得:

$$\theta_6 = \arcsin\left(\frac{c_3}{c_4} \times \sin\alpha_2\right) = \arcsin\left(\frac{2.73 \times 10^3 \text{ m/s}}{3.23 \times 10^3 \text{ m/s}} \times \sin 32.4^\circ\right) = 26.92^\circ \quad (12)$$

即超声波从有机玻璃中入射至钢中的入射角度为 26.92° 。

当 $B_2 = 26.3^\circ$ 、折射角为 75.3° 、折射波形为横波时,由折射定律可得:

$$\theta_7 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_4} \times \sin\alpha_4\right) = \arcsin\left(\frac{2.73 \times 10^3 \text{ m/s}}{3.23 \times 10^3 \text{ m/s}} \times \sin 75.3^\circ\right) = 54.84^\circ \quad (13)$$

即超声波从有机玻璃中入射到钢中的入射角度为 54.84° 。

通过以上的论述和计算可知,超声波在三个阶段的传播过程中,当入射角在大于第一临界角而小于第二临界角的范围内时,求得超声波的发射角度的范围为 $27.6^\circ \sim 54.84^\circ$ 。

2.3 超声波的反射率和透射率

在超声波的实际传播过程中,特别是在产生波形转换的情况下,不仅要考虑超声波在遇到界面时折射波的方向问题,还应该考虑入射波和折射波的声压与声强问题。通过分析不同的两介质界面处声压的透射率和反射率,从而得出超声波在介质中更准确的传播路径。

当超声波斜入射至不同的两介质的界面时,反射波声压(P_r)与入射波声压(P_o)的比值表示声压反射率 $R^{[5-6]}$,且有如下关系式:

$$R = \frac{P_r}{P_o} = \frac{Z_2 \cos\beta - Z_1 \cos\alpha}{Z_2 \cos\beta + Z_1 \cos\alpha} \quad (14)$$

用折射波声压(P_i)与入射波声压(P_o)的比值来表示声压的透射率 $T^{[3]}$,且有如下关系式:

$$T = \frac{P_1}{P_0} = \frac{2Z_1 \cos \alpha}{Z_2 \cos \beta + Z_1 \cos \alpha} \quad (15)$$

式中： Z_1 、 Z_2 分别为介质 I 和 II 的声阻抗； α 、 β 分别为超声波的入射角和折射角； $Z = \rho c$ （其中 ρ 为介质的密度， c 为超声波在介质中的传播速率）。由能量守恒定律可以得出 $R + T = 1$ ，即反射率与透射率之和等于 1。

当超声波以纵波的形式斜入射至有机玻璃和钢界面时，由式(15)可以得出声压透射率与入射角的关系曲线如图 3 所示。图 3 中， T_L 为折射纵波透射率曲线， T_S 为折射横波透射率曲线。

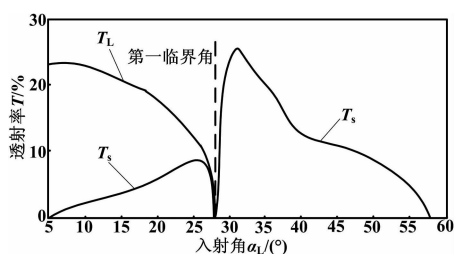


图 3 有机玻璃/钢界面的声压透射率曲线
Fig. 3 Curves of sound pressure transmissivity for organic glass/steel interface

由图 3 可以看出，当纵波入射角小于 27.6° （第一临界角）时，折射纵波透射率小于 25%，折射横波透射率小于 10%。当纵波入射角在 $27.6^\circ \sim 57.7^\circ$ （第二临界角）之间时，钢中没有折射纵波，只有折射横波，最高透射率时所对应的纵波入射角约为 30° ，横波折射角约为 37° 。折射角在 $35^\circ \sim 50^\circ$ 之间透射率比较高，而其他的折射角透射率相对较低^[7-8]。

当超声波斜入射至水和钢界面时，由式(15)可以得出声压透射率与入射角的关系曲线如图 4 所示。

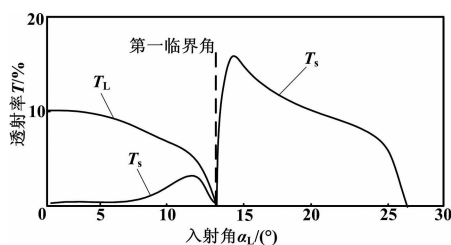


图 4 水/钢界面声压透射率曲线
Fig. 4 Curves of sound pressure transmissivity for water/steel interface

由图 4 可以看出，当纵波入射角小于 14.3° （第一临界角）时，折射纵波透射率不超过 13%，折射横波透射率小于 6%。当纵波入射角在 $14.3^\circ \sim 26.5^\circ$ （第二临界角）之间时，钢中没有折射纵波，只有折射横波，其折射横波的透射率最高不到 20%。

2.4 换能器的发射角度确定

通过对超声波在管道中的传播过程的分析可知，为了使超声波换能器只接收到一束回波，同时考虑到超声波的发射率和透射率，在本设计中选取 30° 作为超声波换能器的发射角度。

3 换能器的发射强度

由于换能器接收到的信号一般要求在几十毫伏以上，为了使接收换能器能够可靠地工作，换能器必须能够发射出足够的能量，以便换能器能够分辨处理超声波回波，提高测量精度。

由于所测管径属于小管径测量，超声波传播距离比较短，传播过程中的衰减比较小，所以采用低压驱动的换能器就可以满足测量的要求。换能器与 TDC-GP2 的脉冲发射端口相连，能够直接发射电流值为 48 mA、电压值为 5 V 的高速脉冲^[9-10]。

4 结束语

通过对超声波在管道中的传播过程以及衰减特性的分析，并且根据管径的大小，最终确定了超声波换能器中心频率为 1 MHz、发射角度为 30° ，并采用低压驱动的方式。实际的试验证明，超声波换能器的准确选取提高了流量计的精确性和稳定性，降低了流量计的能量损耗，并且证明了其具有一定的理论意义。

参考文献

- [1] 刘杰. 基于时差法的超声波流量计的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [2] 崔大福, 杨友松, 江杰. 一种新型的高炉冷却系统水温差及热流强度在线监测[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 3-4.
- [3] 张俊. 基于 DSP 的超声波流量计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [4] 闫菲. 多脉冲超声波流量计的设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [5] 李夏青. 超声波流量计探头参数的选择[J]. 石家庄铁道学院学报, 2000, 3(1): 12-16.
- [6] Jaafar W, Fischer A, Bekkour K. Velocity and turbulence measurements by ultrasound pulse Doppler velocimetry [J]. Measurement, 2009, 42(2): 175-182.
- [7] Zheng Yining. Denoising of quadrature ultrasound Doppler signal from bi-directional flow based on matching pursuit [J]. Ultrasonics, 2009, 49(1): 19-25.
- [8] 杨震. 基于超声波时差法管道流量计积分算法及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [9] 何群. 超声波流量测量系统的关键技术研究及实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [10] 吕国胜. 基于 ARM 的时差法超声波流量计设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.