

# 收发合置水声管中使用宽带脉冲的吸声测量方案

赵渊博, 侯宏, 孙亮

(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

**摘要:** 水声管是水声材料吸声测量的重要实验平台。对于收发合置换能器水声管系统, 目前常用的吸声测量信号是调制正弦信号。为了实现宽带测试, 提出了水声管中宽带声脉冲的产生方法, 并设计了电子开关延时控制电路。给出了基于收发合置型换能器水声管中宽带吸声测量结果。

**关键词:** 收发合置换能器; 脉冲声; 宽带测试

中图分类号: TU112.2<sup>+2</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-03-0213-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.03.006

## An improvement scheme of broadband sound absorption measurement in water-filled impedance tube with monostatic transducer

ZHAO Yuan-bo, HOU Hong, SUN Liang

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** Water-filled impedance tube is an important platform for sound absorption measurement. For the test system with monostatic transducer, the common used signal is the pulse modulated sine-wave, which is essentially a single frequency measurement. In order to implement broadband sound absorption measurement, an impulsive sound is generated in water-filled impedance tube, and a time sequence control system is designed for the monostatic transducer generating the impulsive sound and picking up the echo-signal. The principle of sound absorption measurement is explained and a test example is shown.

**Key words:** monostatic transducer; impulsive sound; measurement in broadband frequency range

## 0 引言

水声管是水声材料吸声测量的重要实验平台。目前常用的方法是 CW 脉冲法和传递函数法<sup>[1]</sup>。用 CW 脉冲法测量时, 声管顶部放置待测样本, 声管底部是收发两用型换能器。利用回波信号与入射信号幅度比计算吸声系数。根据声管内径的不同, CW 脉冲高频可到 15 kHz, 但低频大约在 500 Hz 左右。传递函数法测量使用宽带信号, 具有简便、快捷的优点, 但水听器之间的相位失配对测试结果, 特别是对低频测试结果影响很大。当前, 国内已有利用传递函数方法的测试水声管, 频率范围大约为 400~4000 Hz<sup>[1]</sup>。

脉冲声具有时间空间延续短暂、频率成份丰富的特点, 在吸声与隔声测量中有显著的优势。孙亮

等对空气中可控脉冲声的产生及其用于吸声与隔声的测试方法进行了深入的研究<sup>[2-6]</sup>。另外, 在消声水池中, 也得到了长度为 0.5 ms 的巴特沃斯脉冲, 并用于隔声测量<sup>[6]</sup>。

在空气声中进行吸声与(或)隔声测量时, 声源与传声器是分离的。然而, 水声管测量时采用的是“收发合置”换能器, 基于脉冲声的吸声测试方案与空气声不同。本文提出了收发合置换能器中宽带脉冲声的产生方法及吸声测量方案, 并给出了一组测量结果。

## 1 水声管中宽带脉冲声的产生

声脉冲产生装置如图 1 所示, 包括换能器、B&K8103 水听器、B&K2716 功率放大器、B&K2692 信号调理器、Agilent3320A 信号源与计算机。其中, 水声管材质为不锈钢, 管长为 6 m、内径为 120 mm。水声管垂直放置, 水听器置于管中, 用于产生声脉冲。通过多次实验发现, 水听器

收稿日期: 2012-11-19; 修回日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11204242)。

作者简介: 赵渊博(1987-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 研究方向为水声测量。

通讯作者: 赵渊博, E-mail: windin9th@sina.com

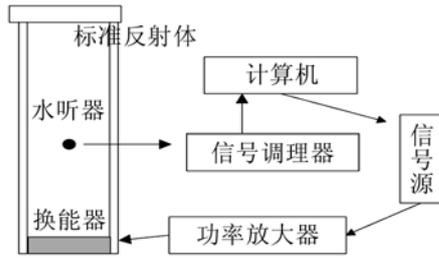


图1 声脉冲产生装置  
Fig.1 Acoustic pulse generation device

距离换能器过近或过远，产生的脉冲效果都不太好。本文实验中，水听器距换能器为 4 m。

声脉冲产生的原理在文献[6]中已详细描述，本文不再赘述。

由于实验用换能器的中心频率在 7 kHz 附近。设计一种宽带脉冲信号如图 2 所示：其中心频率为 7 kHz，3 dB 带宽在 3~9 kHz 范围，时间长度约为 0.5 ms。该信号频率范围与换能器对应。时域波形光滑、振荡无突变，便于换能器发射。该脉冲信号时间短暂，用于吸声测量时可以将各类波分离开。而且信号的重复性好，可通过多次测量平均以消除背景噪声的影响，提高测量信噪比。

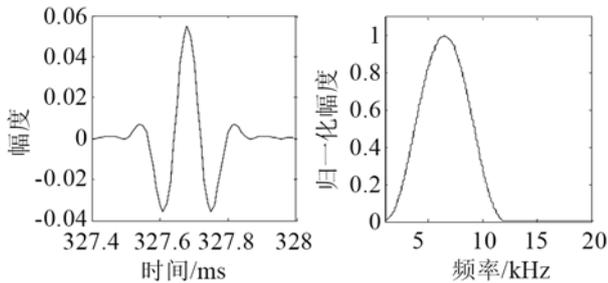


图2 信号的时域波形与频谱  
Fig.2 Waveform and spectrum of the signal

首先用该信号测量声发射系统的传递特征。

将水听器置于距换能器 4 m 处，管长 6 m 充满水，标准反射体固定于管口。水中声速约为 1480 m/s，水听器接收到入射波与反射波的时间应该分别为 2.7、5.4 ms。设计信号的起始时间约为 237.4 ms，因此实际到达时间为 330.1、332.8 ms。

图 3 是水听器接收的响应信号的一部分。从水

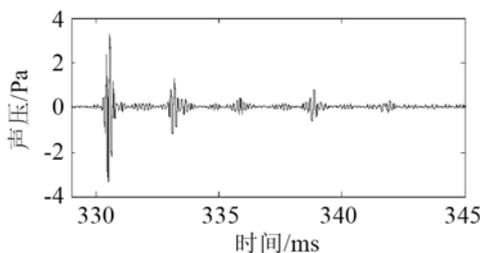


图3 响应信号波形图  
Fig.3 Waveform of the response signal

听器采集到的波形图来看，第一个波是入射波，大约在 330 ms 处，第二个波是反射波，大约在 333 ms 处，与上述分析的时间对应。后续还有声音在换能器与标准反射体间的多次反射波，幅值很小可以忽略。

系统的输入信号部分波形如图 2 所示，输出信号部分波形如图 3 所示，根据脉冲产生的方法，利用图 2 与图 3 的信号，可以确定系统的传递函数；再选择图 2 的输入信号作为测量用入射声脉冲，结合声发射系统的传递函数，可以解算出所需的驱动信号，图 4 为驱动信号中非零的 2900 个点。

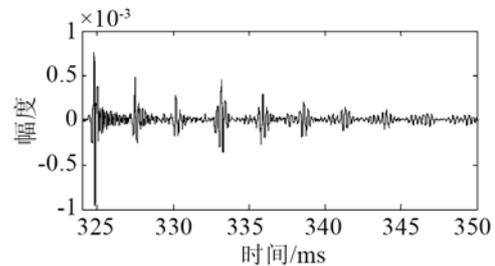


图4 驱动信号图  
Fig.4 Diagram of the driving signal

由图 4 可以看到，驱动信号具有周期性，这主要来源于管口反射，它抵消了这一部分信号，故能得到完整的脉冲信号。

用此驱动信号重新激励换能器，水听器采集的声脉冲如图 5 所示。可见，最终得到的声脉冲波形与设计信号图 2 基本符合，周围出现了少量杂波。

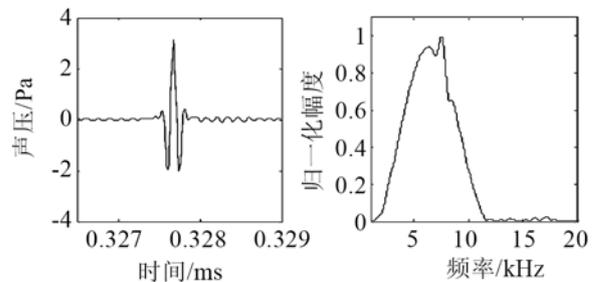


图5 脉冲波形与频谱图  
Fig.5 Waveform and spectrum of the acoustic pulse

## 2 基于收发合置换能器的吸声测量原理

使用收发合置换能器测量时，测量系统与信号流程如图 6 所示。其中，信号发射系统包括信号源、功率放大器与换能器；信号接收系统包括换能器、信号调理器与示波器。为了控制换能器在发射状态与接收状态之间的转换，设计了一个控制电路并开发了控制软件。

### 2.1 测量原理

测量中信号流程如下：由计算机产生数字信号  $x_1$ ，经过发射系统得到模拟信号  $x_2$ ，激励换能器，在水声管里产生入射声波信号  $x_3$ ； $x_3$  经由标准反射体或待测样本反射后的回波声信号为  $y_3$ ，换能器接收后转换为信号  $y_2$ ，经接收系统由计算机采集得到数字信号  $y_1$ 。

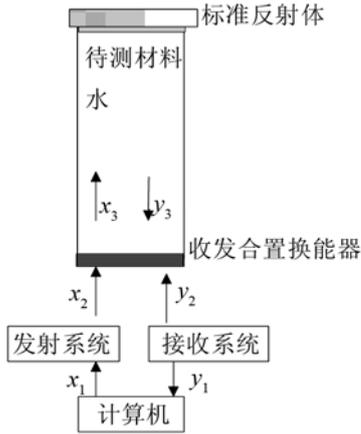


图 6 测量系统与流程图  
Fig.6 Measurement system and signal flow

待测样本的反射系数由入射波  $x_3$  (取幅值) 与反射波  $y_3$  (取幅值) 计算：

$$R(\omega) = \frac{y_3(\omega)}{x_3(\omega)} \quad (1)$$

吸声系数由反射系数计算得到：

$$A(\omega) = 1 - R^2(\omega) \quad (2)$$

从上述流程可以看出，发射系统的输入信号  $x_1$  与接收系统的输出信号  $y_1$  是可测量，而参与计算的信号为  $x_3$  与  $y_3$ ，经过了输入、输出系统与换能器，它们之间的关系说明如下：

假设由  $x_1$  到  $x_3$  的系统传递函数为  $H$ ，由  $y_3$  到  $y_1$  的系统传递函数为  $H_1$ ，整个传递系统可看做线性系统， $H$  与  $H_1$  的计算公式为

$$H(\omega) = \frac{x_3(\omega)}{x_2(\omega)} \cdot \frac{x_2(\omega)}{x_1(\omega)} = \frac{x_3(\omega)}{x_1(\omega)}$$

$$H_1(\omega) = \frac{y_1(\omega)}{y_2(\omega)} \cdot \frac{y_2(\omega)}{y_3(\omega)} = \frac{y_1(\omega)}{y_3(\omega)}$$

反射系数为

$$R(\omega) = \frac{y_3(\omega)}{x_3(\omega)} = \frac{y_1(\omega)}{x_1(\omega)} \cdot \frac{1}{H(\omega) \cdot H_1(\omega)} \quad (3)$$

在式(3)中， $H$  与  $H_1$  需要得到。

在待测材料为标准反射体条件下，设系统(图 6)的输入与输出信号分别为  $x_1'$ 、 $x_2'$ 、 $x_3'$  与  $y_3'$ 、 $y_2'$ 、 $y_1'$ 。对于刚性标准反射体， $y_3' = x_3'$ ；对于柔性标准反射体， $y_3' = -x_3'$ 。

标准反射体条件下，式(3)转化为

$$R'(\omega) = \frac{y_3'(\omega)}{x_3'(\omega)} = 1 = \frac{y_1'(\omega)}{x_1'(\omega)} \cdot \frac{1}{H(\omega) \cdot H_1(\omega)} \quad (4)$$

因此，

$$\frac{1}{H(\omega) \cdot H_1(\omega)} = \frac{x_1'(\omega)}{y_1'(\omega)} \quad (5)$$

式(5)说明，可以由标准反射体测量获得整个系统的传递特征。

联立式(3)和式(5)，可得待测样本的反射系数为

$$R(\omega) = \frac{y_1(\omega)}{x_1(\omega)} \cdot \frac{x_1'(\omega)}{y_1'(\omega)} \quad (6)$$

进一步由式(2)计算样本的吸声系数。

综上所述，实际测量时需要两个步骤：首先，由标准反射体测量获得整个系统的传递特征；然后，放置待测样本，由输入信号  $x_1$ 、输出信号  $y_1$  以及相同的传递函数，按照式(6)计算反射系数，进一步由式(2)计算吸声系数。数据处理在频域进行，只需要考虑幅度谱。

### 2.2 电子开关与延时控制

由于换能器是“收发合置”型，需要电子开关实现在发射与接收两个状态间的转换。以目前最长的 10 m 水声管计算，切换时间最大约 13 ms。为此，设计了一套时序控制电路与可编程测试仪器来实现开关与延时功能。

实验装置如图 7 所示，包括测量与时序控制两部分，换能器、功率放大器和信号调理器同上述，时序控制部分主要是 MP430 单片机、信号发生器 33521A、数字示波器 2024A；系统软件设计采用 NI 公司的 Labwindows/CVI 虚拟仪器技术，对仪器进行控制。

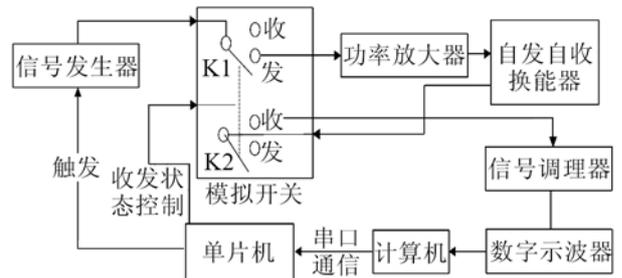


图 7 实验装置图  
Fig.7 Experimental setup

时序控制部分工作原理类似于一个单刀双掷开关；发射信号时，开关导通成发射状态，切断接收端；需要接收时，开关导通至接收状态，切断输入端。

此外，对系统使用的信号调理描述如下：系统一般都需要信号调理，用于将原始信号以及传感器

的输出接口到数据采集板或模块上。通过信号调理的各种功能，如信号的放大、隔离、滤波、多路转换等，使得数据采集系统的可靠性及性能得到极大改善。在电路设计中应该使用该硬件模块，本文使用了现成的仪器。

信号调理具有的功能在本文中为传感器即换能器提供低压输出的模拟信号及提高模拟信号转换成数字信号的精度，实现信号放大或衰减、采样同步、频率-电压的转换等功能。模拟信号在数字化前必须进行低通滤波，以消除噪声和防止混叠。同时也可以使用信号调理模块滤除 50Hz 的工频噪声，使其输入的模拟信号的最大值刚好等于 A/D 转换设备的输入范围，满足对信号放大与信噪比的要求。

### 3 实验结果分析

在常温常压下，对某材料进行吸声测量。将样品置于管口，紧贴标准反射体。使用第 1 节中生成的脉冲声(见图 5)，用其驱动信号激励换能器(如图 4，这里取其前 250 点，包含了能量最集中部分)，图 8 为换能器采集到信号的第一个反射波，后续波形幅值很小可忽略，由于电路影响带入低频干扰，对其作了滤波处理(见图 8(b))，从图中可以看出，滤波后效果较好。

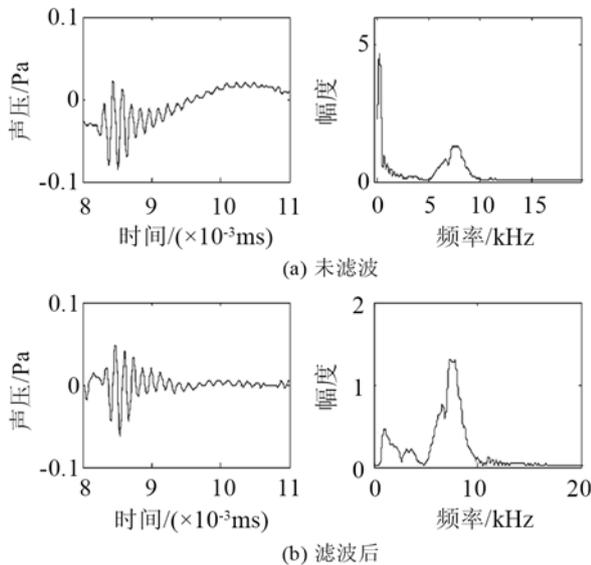


图 8 换能器采集信号  
Fig.8 Collected signal of the transducer

按照第 2 节的测量思路，去掉待测材料，换能器再次发射驱动并采集信号。经滤波处理后，从两次采集的信号中分离材料吸收声波前后的入射波与反射波，如图 9 所示。需要说明的是，由于是分两次采集入射波与反射波，两者起始时间是一致

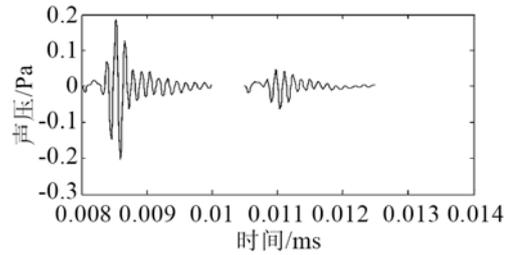


图 9 入射波与反射波  
Fig.9 Incident wave and reflected wave

的，只是为了区别，画在不同的区间。

根据式(6)与驱动信号和分离出的入射波和反射波数据，求解材料复反射系数，进而由式(2)计算吸声系数。如图 10 所示。频率范围在 3~9 kHz 间。

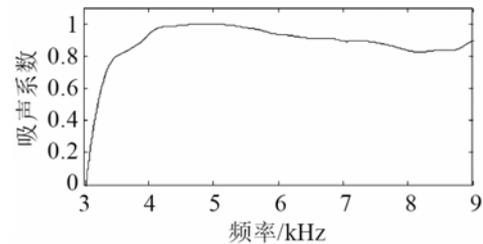


图 10 吸声系数  
Fig.10 Absorption coefficient

在相同条件下，用 CW 波法测量了此材料的吸声系数，与脉冲法作比较，结果如图 11 所示。

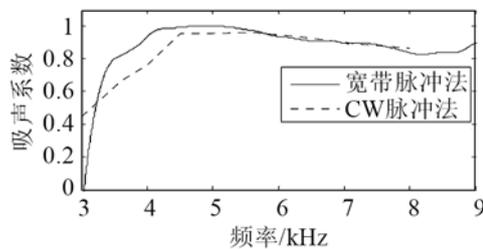


图 11 结果对比  
Fig.11 Comparison of the results

由图 11 可以看到：在 5 kHz 以上，两种方法获得的吸声系数偏差在 5% 以内，在 3~5 kHz 有一定差别。主要原因是换能器在该频段响应较小，数据处理时会引起较大的误差。总体上看，使用宽带脉冲测试结果是可信的。声管直径与换能器辐射响应限制、样品安装精度、入射波与反射波截取等都是影响测量结果的误差因素。

### 4 结论

本文介绍了水声管中宽带声脉冲产生方法，使用了电子开关延时控制电路，描述了基于收发合置型换能器水声管中样本吸声测量原理，给出了脉冲法与 CW 波法测量结果的对比。结果表明：脉冲法

只需一次测量可以获得宽频带范围的吸声系数,该方法利用现有水声管硬件设备,可实现吸声测量。

### 参 考 文 献

- [1] 李水,沈建新,唐海清,等.水声材料低频声性能的驻波管测量[J].计量学报,2003,24(3):221-224.  
LI Shui, SHEN Jianxin, TANG Haiqing, et al. Measurement for Low-frequency properties of underwater acoustic materials in a standing wave tube[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(3): 221-224.
- [2] 徐士化,侯宏.一种波形可控的脉冲声源研制[J].电声技术,2007,3(12):9-13.  
XU Shihua, HOU Hong. A method to develop a digital-controlled sound impulse generator[J]. Elementary Electroacoustics, 2007, 3(12): 9-13.
- [3] 任伟伟,侯宏,孙亮.窄脉冲声用于大样品的吸声测量[J].应用声学,2010,29(6):430-436.  
REN Weiwei, HOU Hong, SUN Liang. Sound absorption measurements of a large sample based on the short impulse method[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(6): 430-436.
- [4] 孙亮,侯宏,董利英,等.声管中隔声量测试的脉冲声法[J].西北工业大学学报,2010,28(6):840-843.  
SUN Liang, HOU Hong, DONG Liying, et al. Using the pulse sound to measurement sound insulation in the tube[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(6): 840-843.
- [5] 侯宏,董利英,孙亮,等.声管脉冲回波法吸声测量技术[J].计量学,2010,31(2):101-105.  
HOU Hong, DONG Liying, SUN Liang, et al. Sound absorption measurement in a circular pipe using echo-pulse method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2010, 32(2): 101-105.
- [6] 孙亮,万芳荣,董利英.基于逆滤波器原理的吸声系数测量研究[J].噪声与振动控制,2009,29(2):140-143.  
SUN Liang, WAN Fangrong, DONG Liying. Research on measurement of sound absorption coefficient based on inverse filter principle[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 29(2): 140-143.

### • 简 讯 •

## “向阳红09”搭载“蛟龙”号出征西北太平洋

我国远洋科考船“向阳红09”2014年6月21日从青岛起航,赴江苏省江阴市搭载“蛟龙”号载人潜水器,前往西北太平洋执行2014~2015年“蛟龙”号载人潜水器试验性应用航次。

国家海洋局北海分局介绍,2014~2015年“蛟龙”号载人潜水器试验性应用航次分为3个航段:第一航段是在西北太平洋富钴结壳勘探区开展环境、资源调查与评价,预计2014年8月初返回青岛,共计40天。

2014年11月下旬,“向阳红09”船将搭载“蛟龙”号前往西南印度洋多金属硫化物资源勘探区等海域执行本航次的第二和第三航段任务,开展资源、生物多样性和环境调查与评价,预计2015年3月中旬返回青岛,预计120天。