

水声材料宽带隔声测试方法研究

刘彦森, 盛美萍, 王敏庆

(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘要: 水声材料声学测试主要包括吸声测试和隔声测试等, 在水声工程中, 水声材料声学测试具有非常重要的地位。为解决传统自由场方法测试频率下限过高而无法完全满足实际工程应用和研究需要的难题, 基于 B&K3560C 数据采集分析系统和大型消声水池, 提出了一种以脉冲调制的宽带白噪声为测试信号、以组合宽带换能器为发射系统、以虚拟仪器测试技术为基础的新的水声材料宽带隔声测试方法, 并用于钢板的水下隔声测试。实测结果表明: 在测试频段 500Hz~20kHz 范围内, 平均偏差仅为 0.25dB, 低频限达到 2kHz 左右。与常规测试方法相比, 该方法在测试效率、测试精度和低频限等方面改善效果明显, 且易实现, 值得推广。

关键词: 水声材料; 宽带; 隔声测试

中图分类号: O427

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-02-0184-05

Broadband measurement of sound insulation for underwater acoustical materials

LIU Yan-sen, SHENG Mei-ping, WANG Min-qing

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

Abstract: Measurements of underwater acoustical materials mainly include sound absorption and sound insulation, which is important in underwater acoustical engineering. In order to overcome drawbacks of the traditional free-field method, a new broadband method of sound insulation measurement for underwater acoustical material is investigated. With a B&K3560C data acquisition and analysis system and in a large anechoic tank, white noise, combined broadband projectors, and a virtual instrument platform are used. In underwater sound insulation measurement of steel plates, a broadband method is used. The results show that the average deviation is only 0.25dB and the lowest effective frequency is 2kHz in the range of 500Hz~20kHz. Compared with the traditional testing, the measurement efficiency, precision, and the low frequency bound are all remarkably improved.

Key words: underwater acoustical material; broadband; sound insulation measurement

1 引 言

在水声工程中, 水声材料声学测试具有非常重

要的地位, 在科研、生产及应用等方面一直都发挥着十分关键的保障和指导作用^[1]。自由场脉冲法是水声材料声学测试中常用的测试方法类型, 应用范围越来越广泛, 这类方法也是当前世界各国水声测试界的重点和热点研究领域之一。

鉴于低频声波在水下具有的低衰减性和传播距离远, 当今各海军强国的声呐技术和水声对抗技术的工作频段越来越低, 频带宽度越来越宽, 相应的水

收稿日期: 2005-12-13; 修回日期: 2006-02-09

基金项目: 全国优秀博士学位论文基金(200049, 200147)和西北工业大学研究生创业种子基金(Z200509)。

作者简介: 刘彦森(1979-)男, 黑龙江省尚志人, 博士生, 主要从事噪声与振动控制、水声材料声学测试研究。

通信作者: 刘彦森, E-mail: liuyansen0724@sina.com

声材料的工作频段也不断向低频扩展, 带宽也不断扩大, 这为水声材料声学性能的测试评估带来了非常大的挑战。传统自由场法只能进行单频或窄带测试, 测试效率低, 低频截止频率很高^[2], 尚无法完全满足当前水声材料声学测试评估的现实需要。为此, 人们对传统自由场单频测试方法的改进革新进行了多种尝试^[3-4], 在带宽和低频限等方面虽都有一定程度改善, 但效果并不理想。由此, 开发高效可靠的宽带测试方法便成为必然。

众所周知, 足够高的信噪比是开展宽带声学测试必须满足的基本条件之一。一般地, 在测试水池容量一定的前提下, 为分离边界反射而获得自由场条件, 测试脉冲信号的宽度(即脉冲持续时间)都很短, 基本在毫秒级, 甚至更低。在实际测试中, 为保证测试系统线性无失真, 功放增益不可能很大。这样, 在功放增益有限的条件下, 由于测试脉宽过短, 能量有限, 加之单个换能器发射系统又无法做到全频段响应均衡, 因而造成某些频段内测试信噪比过低, 尤其是低频段, 无法满足宽带测试要求, 这也一直是困扰包括隔声测试在内的宽带声学测试的主要难题。现有的半正弦方法、窄方波方法及新近引入近代信号处理技术改进后的 BCPS 方法等^[6]都不同程度的存在上述问题, 低频限拓展有限。

为此, 本文以隔声测试研究为切入点, 基于 B&K 3560C 数据采集分析系统和大型消声水池, 并引入虚拟仪器测试技术, 从改进测试信号和发射系统两个方面入手, 提出了一种以脉冲调制的宽带白噪声为测试信号、以组合宽带换能器为发射系统、以虚拟仪器测试技术为基础的新的水声材料宽带隔声测试方法。

2 测试方法简介

本文所提出的宽带测试方法以虚拟仪器测试技术为基础, 在测试信号类型的选取和发射系统的构建方面对传统方法进行改进。

2.1 评价参数

本文采用的评价参数为插入损失(IL-Insertion Loss), 它是评价水声材料隔声性能优劣的经典参数之一。其定义为:

$$IL=10 \cdot \lg \frac{W_i}{W_t} \quad (1)$$

其中:

W_i 、 W_t 给定测点样品插入前后的直达声功率和透射声功率。

由平面波的声功率与声压间的关系, 得

$$W_i = \frac{p_i^2}{\rho c} S \quad (2)$$

$$W_t = \frac{p_t^2}{\rho c} S \quad (3)$$

其中:

p_i 、 p_t 为给定测点的直达声压和透射声压的幅值。

由上述关系, 可得

$$IL=20 \cdot \lg \frac{p_i}{p_t} \quad (4)$$

2.2 基本原理

本文隔声测试采用的是经典的自由场单水听器布设方案^[2], 如图 1 所示, 测定在插入被测样品前后给定测点的声压幅值自谱的分贝数差值, 即可得样品的插入损失值。

由上述原理可得, 隔声评价参数即插入损失为:

$$IL=L_i - L_t \quad (5)$$

其中:

L_i 为插入样品板之前, 给定测点直达波声压幅值的自谱分贝数;

L_t 为插入样品板之后, 同一给定测点透射波声压幅值的自谱分贝数。

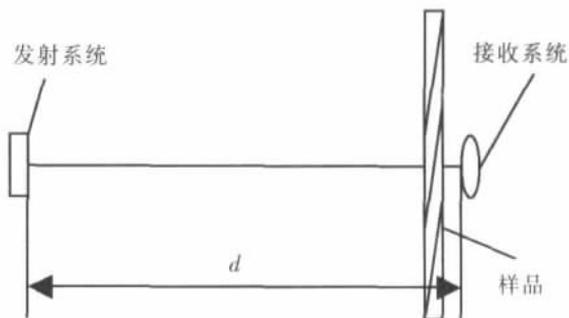


图 1 自由场单水听器法原理简图

Fig.1 The theory of single hydrophone method in free field

2.3 测试信号

采用脉冲调制的宽带白噪声作为测试信号是本文对传统方法的改进措施之一。其主要优点在于在功放增益一定的前提下, 脉宽长短不影响其本身带宽, 只影响其能量水平。这样, 在满足边界反射干扰分离的条件下, 可以尽可能地增大分析脉宽, 使发射系统达到稳定工作状态, 从而提高宽带测试结果的可靠性。这是采用窄脉冲信号作为宽带测试信号所

无法相比的。在测试中,为了减小和消除随机误差,包括测试信号本身的随机变化,提高测试精度,需要对测试结果进行多次平均。与其他脉冲测试方法一样,在测试中,宽带白噪声脉冲的各种参数,如分析脉宽、脉冲重复周期和脉冲重复个数等同样要受到严格限制。各参数受限条件及原因如下表所示,即:

表 1 脉冲参数选取原则详表
Table 1 The parameters of pulse signal

脉冲参数	限制条件	主要原因
有效分析脉宽 $\tau_{分析}$	发射脉宽	保证分析信号为有用信号
	回波时间	分离水池的边界反射干扰
	$t_{回波}$ $\tau_{分析}$	降低水池混响的不利影响
脉冲重复个数 n	T_{∞} 1.5T	减少或消除随机干扰的影响
脉冲重复周期 T	$n \ge 16$ 即平均次数应足够多	

2.4 测试系统

本文采用的测试系统以虚拟仪器为基础,基于 B&K3560C 数据采集前端和计算机,并结合配套的声学测试分析软件 PULSE 平台等来实现的。该系统能够独立完成信号的发射与采集接收、以及测试数据的高精度的实时 FFT 分析等功能,内置多种类型的滤波器可供选择,操作简便,自动化程度高,可以满足实际测试的需要。系统示意框图如图 2 所示。



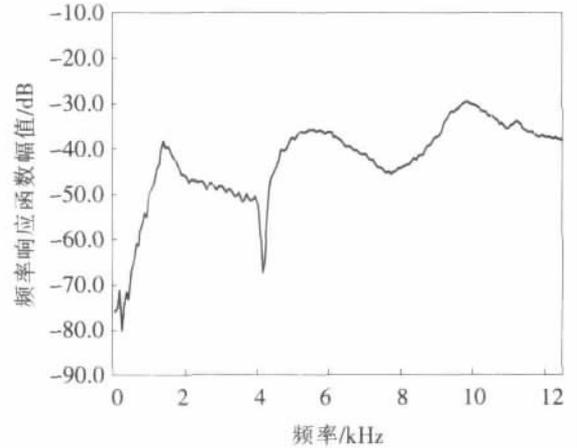
(1-前端输出信号端口 2-前端输入信号端口)

图 2 测试系统示意框图

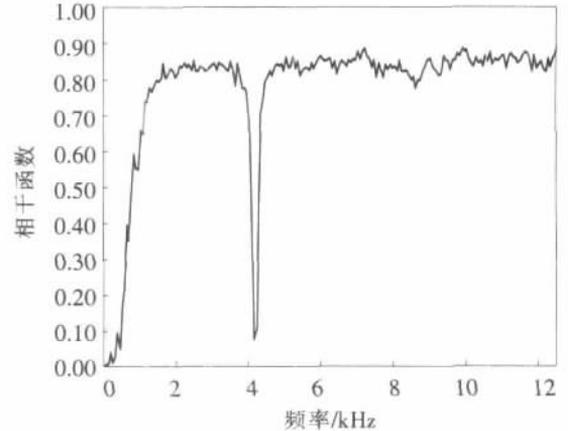
Fig.2 The schematic figure of measurement system

本文所构建的宽带发射系统由两个换能器组合而成。如图 3(a)和图 3(b)所示,1# 换能器在中低频段内,虽在 4.2kHz 处存在反共振点,但总体上频响相对较为平坦,响应级亦较高;而由 2# 换能器的频响曲线和相干分析图可知,其中高频段的频响均

较好,很平坦且响应水平高,如图 4(a)和图 4(b)所示。从频响上看,二者可以互补,可满足宽带测试要求。



(a)1# 换能器频率响应曲线



(b)1# 换能器相干函数分析曲线

Fig.3 Frequency response spectrum and coherence function spectrum of projector No.1

3 实验研究

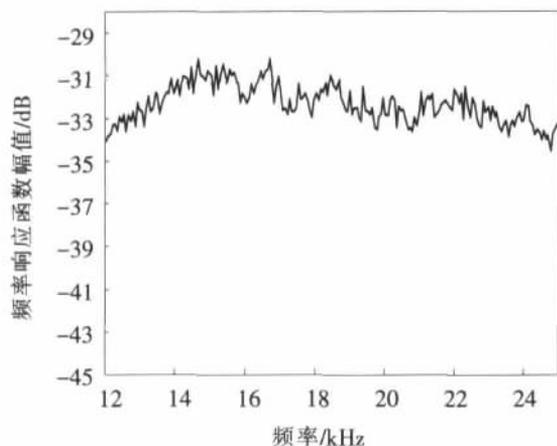
基于上述原理和系统,本文针对钢板大样在大容量消声水池内进行了水下隔声测试实验。在测试过程中,样品布放、操作规程等均按照国家标准^[2]来进行。测试信号的相关参数如发射脉宽、分析脉宽、脉冲重复周期和平均次数等分别如下表设定。即:

表 2 测试信号参数设定详表

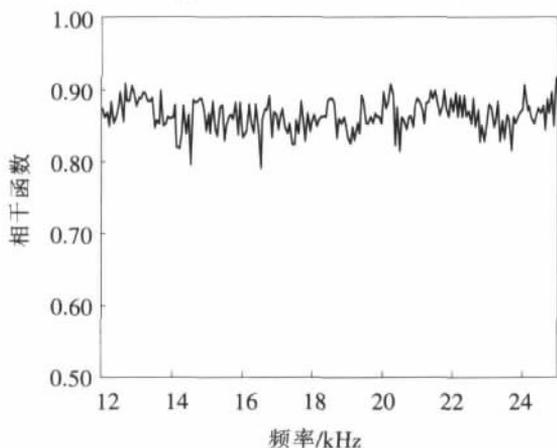
Table 2 The parameters of measurement signal

发射脉宽	有效分析脉宽	脉冲重复周期	平均次数
3.00 ms	2.00 ms	1.00 s	64 次

由下图可知,对透射声信号而言,整个测试频带内的信噪比在 27dB~50dB 之间,完全满足水下隔声性能较差的钢板的水下隔声测试对信噪比的要求。当然,对于一般材料水下隔声性能的测试也已经足够。



(a) 2# 换能器频率响应曲线



(b) 2# 换能器相干函数分析曲线

Fig.4 Frequency response spectrum and coherence function spectrum of projector No.2

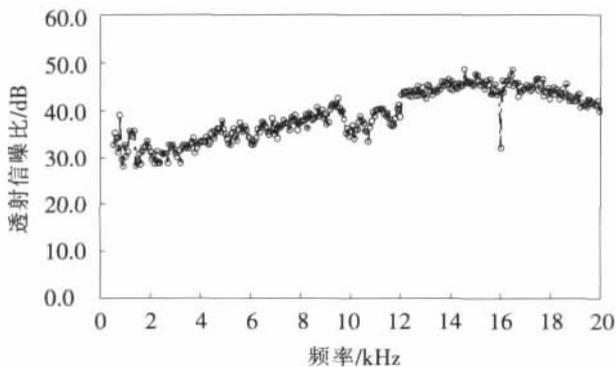


图 5 透射声测试的信噪比曲线

Fig.5 Signal to Noise Ratio Spectrum of transmission measurement

查表^[7]可取, 钢板密度 $\rho=7840\text{kg/m}^3$ 和纵波声速 $c_1=5941\text{m/s}$, 钢板水下插入损失理论值计算公式^[1]如下:

$$IL=10 \cdot \lg \left[\frac{(1-m^2)^2}{4m^2} (\sin^2 kd) + 1 \right] \quad (6)$$

其中:

d-钢板厚度;

k-钢板波数;

m-钢板的特性阻抗与水的特性阻抗的实数比。

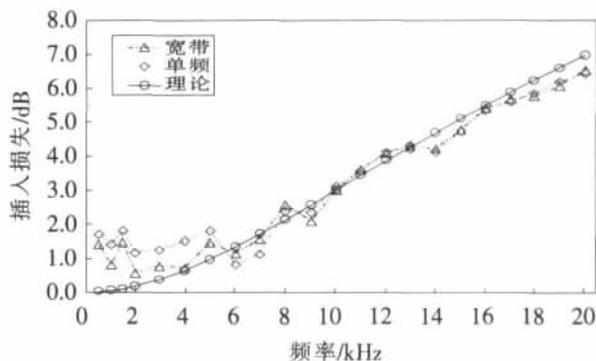


图 6 钢板水下插入损失宽带测试值、单频测试值与理论值的对比曲线

Fig.6 The comparison of broadband measurement, traditional measurement and theory on underwater sound insulation for 6mm steel panel

由图 6 可知, 在测试频带 500Hz~20kHz 范围内, 传统单频方法与本文改进方法在中高频段内的钢板水下插入损失测试值并无明显差异, 而低频下限却很高, 达到 8kHz 左右。这是由传统方法本身的固有缺陷所造成的。其主要原因有两点^[2]: 1) 为满足系统稳态测试条件和保证测试结果的可靠性和准确性, 减少测试系统瞬态响应特性的不利影响, 传统方法要求在各测试频点稳态波数至少 2~3 个; 2) 为抑制样品边缘衍射干扰, 国标要求被测样品横向尺寸至少要大于 5 个波长以上。显而易见, 测试频率越低, 上述两点越难以同时满足。因此, 对于一定尺寸的被测样品, 传统测试方法是存在低频下限的, 这一点已得到实验证明。与传统单频方法相比, 钢板的水下插入损失宽带测试值与理论计算值除低频段因衍射干扰引起一定波动外, 其余频段吻合均较好, 测试精度较高, 有效测试带宽为 2kHz~20kHz, 最大偏差为 0.54dB, 平均偏差为 0.25dB, 远小于国家标准^[2]的相关要求, 测试低频限达到 2kHz 左右。无论是测试精度还是测试带宽, 本文所提出的组合宽带测试方法都明显优于传统单频测试方法。这表明: 该方法是完全可行的。其原因分析如下:

第一、脉冲调制的宽带白噪声作为测试信号增大了系统分析的有效脉宽, 远远大于原有宽带方法的分析脉宽, 而信号本身带宽不变, 这突破了常规窄脉冲方法在测试信号脉宽大小与频带宽度互相制约方面的限制。测试脉宽的增大使信号本身的能量水平得到大幅度提高, 全频段信噪比得到改善, 特别是

低频段的信噪比改善明显;同时,这对抑制和减少换能器瞬态响应的不利影响也具有一定作用。

第二、改用组合宽带换能器取代传统的单换能器作为发射系统从根本上解决了发射系统全频段响应差,带宽有限,无法满足宽带测试要求的问题。所谓组合宽带发射系统是指两个或两个以上的频响互补且可以满足测试带宽需要的换能器所组成的发射系统。这种组合方式非常灵活,可以根据实际测试的需要和现有硬件条件来任意选取。

第三、大容量测试水池的使用也在一定程度上改善了宽带测试效果。因为大容量水池可以延长回波时间(即直达波与界面反射的第一个回波的间隔时间),这有利于有效分析脉宽的增大,提高测试信噪比。

4 结 论

本文提出了以脉冲调制的宽带白噪声为测试信号、以组合宽带换能器为发射系统、以虚拟仪器测试技术为基础的新的宽带隔声测试方法。在经过钢板水下隔声实验验证后,最终测试结果表明该方法完全可行。在有效测试带宽 2kHz~20kHz 范围内,最大偏差仅为 0.54dB,平均偏差为 0.25dB,低频限达到 2kHz 左右。在测试系统的构建上,本文方法还引入了虚拟仪器测试技术,突破了传统测试技术的局限,提高了测试的自动化水平,省时省力,可操作性强。与常规测试方法相比,该方法在测试效率、测试精度和测试带宽方面,改善效果明显,且容易实现,值得推广。

虽然测试样品为大样,并且测试过程中采取了偏轴向接收等技术,在抑制边缘衍射影响方面有一定的作用,但若能进一步解决好边缘衍射干扰的抑制与消除等问题,测试效果会更好。此外,限于实验条件所限,在实际测试中笔者没有采用强指向性发射系统(如宽带平面发射基阵)作为测试声源,如果实验条件

允许,最好使用强指向性声源,因为这对提高测试信噪比,抑制边缘衍射干扰,提高测试精度,作用也会很明显。上述方面的研究工作仍在进行之中。

参 考 文 献

- [1] 郑士杰,袁文俊,缪荣兴,等编著.水声计量测试技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社.1995.1:384-388,408.
ZHENG Shijie, YUAN Wenjun, MIAO Rongxing et al. The measurement techniques of underwater acoustical computation. Harbin: Harbin Engineering University Press. 1995. 1: 384-388, 408.
- [2] 中华人民共和国国家标准 GB/T 14369-93.声学:水声材料样品插入损失和回声降低的测量方法.1993.3.17
The national standard of China GB/T 14369-93. Acoustics: Measurement method of insertion loss and echo reduction for underwater acoustical material samples. 1993. 3. 17.
- [3] Piquette J C. Method for transducer transient suppression. I: Theory. J. A. S. A. 92(3): 1203-1213.
- [4] Piquette J C. Some new technique for panel measurements. J. A. S. A. 100(5): 3227-3236.
- [5] 李水,缪荣兴.水声材料性能的自由场宽带压缩脉冲叠加法测量.声学学报.2000.25(3):248-253.
LI Shui, MIAO Rongxing. Measurement for the properties of underwater acoustical materials by broadband compressed pulse superposition method. Acta Acustica. 2000. 25(3): 248-253.
- [6] 李水,唐海清,缪荣兴.一种新的水声无源材料声学性能测量装置.声学学报.1999.24(5):529-535.
LI Shui, TANG Haiqing, MIAO Rongxing. A new facility for measuring the acoustic properties of underwater acoustical passive materials. Acta Acustica. 1999. 24(5): 529-535.
- [7] 王荣津,等编著.水声材料手册.北京:科学出版社.1983.7:86-87.
WANG Rongjin. The handbook of underwater acoustical materials. Beijing: Science Publishing Press. 1983. 7: 86-87.