水声材料透声性能测量技术的改进

李 水 缪荣兴

(国防水声计量一级站 浙江富阳 311400) 1998 年 10 月 23 日收到

摘要 本文对传统的水声无源材料透声性能测量技术提出了几点改进,以便在小型消声水池中测量 有限尺寸的大面积材料的插入损失(透射系数)随频率的变化规律。材料样品的典型尺寸为 1×1m² 左右,测量频率范围为 2-20 kHz。文中对标准样品进行了声学性能测量,测量结果和平面波理论模 型计算值有较好的吻合。

关键词 水声材料,插入损失,声学测量,信号处理

Improvement of technique for measuring transmission properties of underwater acoustic materials

Li Shui Miao Rongxing

(National Defence Underwater Acoustic Meterlogy Center, Fuyang Zhejiang 311400)

Abstract The conventional technique for measuring of transmission properties of underwater acoustic passive materials is improved to measure insertion loss(transmission coefficient) of large materials of definite size as the function of frequencies in a small-sized anechoic tank. The typical size of sample is about $1 \times 1m^2$, and the range of measuring frequency is 2-20kHz. The properties of a standard sample have been measured, and the results are in good agreement with the values calculated according to the plane-wave model.

Key words Underwater acoustic materials, Insertion loss, Acoustic measurement, Signal processing

1 引言

水声材料的声学性能一般可以通过对其标 准样品的声学测量获得。插入损失(或透射系 数)是其中的重要参量之一,用来描述透声窗的 透声性能或声障板的隔声性能等,测量可以在 脉冲声管和开阔水域(包括消声水池)中进行。 脉冲声管测量装置的测量频率一般在十几千赫 兹以下,可以加一定的静水压,但被测材料样 品尺寸受声管口径(一般为 φ57mm 或 φ37mm) 的限制,不适合带有不均匀结构的材料或构件 样品的测量。要知道上述材料或构件的性能必 须进行大面积样品的自由场测量。理想的被测 水声材料样品要求其横向尺寸远大于水中声波

18卷6期(1999)

 $\cdot 24$ \cdot

波长、就如同样品是无限大一样、然而在实际 的自由场测量中大面积材料通常都是尺寸有限 的, 经典的尺寸为 1×1m² 左右。传统的方法一 般使用水平无方向性声源、在远场用球形水听 器接收声波,测量时为了减少受到样品板边缘 声衍射的干扰, 对测量频率必须有一定要求: 例如要正确测量反射系数、样品尺寸至少为水 中声波波长的5倍左右^[1]。为适应现代声呐技 术的发展、有必要降低声学测量的频率。若用 增大样品尺寸的办法来降低测量频率下限,不 仅会增加样品制作的难度和成本, 而且因其笨 重而不便测量操作。我们利用压力罐和 PVDF 薄膜平面型水听器、平板型发射换能器阵建立 了一套在静水压下准确测量材料在声波垂直入 射时的反射系数、透射系数等声学参数的自动 **测量装置^[2],样**品尺寸只需 30×30cm²,工作 频率从以前的 25kHz 左右降低到了 10kHz 左 右。文献 ^[3] 将平面 PVDF 水听器和由圆柱棒 组成的加权基阵用到了自由场材料样品透声性 能的测量中,与应用点状水听器相比,测量能 力得到了提高。

近来,应用 PVDF 薄膜平面型水听器,同 时采用宽带平面换能器基阵和宽带脉冲信号, 外加现代信号处理技术,我们在小型消声水池 中对尺寸为 1×1m² 左右的大面积水声材料的 插入损失(透射系数)进行测量,使测量低频限 可下降至 2kHz。本文给出对标准材料样品铝 板的测量结果,并与理论计算值进行了比较分 析。

2 测量方法

2.1 基本原理

在水声测量中,首先应该建立平面波声 场。自由场水池中发射换能器辐射声场的远 场可看成近似的平面波声场,所以必须将被测 材料样品安置在离发射换能器足够远的声场 中;其次测量结果必须正确反映材料本身的声 学特性,就好象被测材料样品的尺寸是无限大 一样, 故测量中要尽量减少样品边缘衍射的干扰。为了能同时满足上述两项基本要求, 我们首先应用宽带平面换能器基阵作为发射器(如图1所示)。它在测量频率范围内的辐射远场形成一定的方向性, 旁瓣级低, 可减少样品边缘的衍射效应和水面的反射影响。图2是其当频率为5kHz 时的方向性图。此外, 信号接收时应尽量减少来自法向以外其它方向声波的影响, 这样有利于降低来自材料板边缘衍射和水面反射的干扰, 所以希望接收用水听器能也具有比较尖锐的指向性, 为此我们利用 PVDF 薄膜研制了一种具有较好接收指向性的尺寸为 20×30cm²的平面型水听器^[4]。



图 1 发射换能器基阵



图 2 频率为 5kHz 时的方向性图

插入损失的测量比较直接,在发射换能器 和水听器之间插入待测的材料样品,再测量插 入前后水听器接收到的信号大小,根据公式(1)

 $\cdot 25 \cdot$

应用声学

计算可得插入损失(单位: dB)。

$$I_L = -20 \log\left(\frac{p_t}{p_i}\right) \tag{1}$$

其中 *pt* 为透射波的声压幅度, *pi* 为作为参考 的入射波的声压幅度。测量中透射声脉冲与样 品边缘衍射波必须分离,以减少由它引起的测 量误差。传统的办法之一是尽可能缩短水听器 与样品表面的距离,以加大透射声与衍射波的 声程差,但这样又引入了水听器与样品表面之 间的来回反射声,实际测量中应尽量消除这种 干扰;办法之二缩短正弦脉冲的宽度,但测量 信号至少也要有三个稳态的正弦波。所以我们 用定向的 PVDF 薄膜平面型水听器代替了无 方向性的球形水听器,同时发射信号采用了宽 带脉冲。脉冲狭窄有利于在时间上隔开透射信



号与边缘衍射信号或样品表面反射信号,避免 它们之间的信号叠加。对水听器接收到的宽带 脉冲经 FFT 处理后可以得到测量要求频带内 的所有数据,所以一次测量即可完成以往采用 正弦脉冲时必须测量每个频率点的繁重工作, 实现测量自动化,大大提高了测量工作的效 率。

在宽带窄脉冲信号的选择中,我们考虑了 脉冲本身的频谱对换能器发射电压响应曲线的 补偿,使入射声信号频谱曲线在测量频率范围 内基本平坦,起伏不超过 6dB。图 3 为小球形 水听器接收的入射声信号(图 3(a))和它的频 谱(图 3(b)),采样频率 fs 为 512kHz,采样点 数 N 为 512 点。这样解决了低频段声能少、测 量精度差的问题,使整个测量频段的测量精度 得以提高,实际上也就拓宽了测量的低频限。



图 3 小球水听器接收的直达声信号和它的频谱

2.2 测量系统

测量系统的基本框图如图 4 所示,它由 水下部分和电子部分组成。水下部分布放在 8m×5m×5m 的消声水池中,声中心位于水深 2m。发射换能器连到回转升降装置上,可调整 角度使波束垂直照射在材料样品表面上;样品 也被装到升降机构上,测量过程中可平稳上下 移动;样品离开发射器辐射面距离为 3m,以保 证远场条件;测量时水听器位于板后并偏离声 轴 5-10cm 以破坏衍射干扰的相干性。电子部分 中信号发射和数据采集由计算机通过 GPIB 总 线控制,并对采集到的信号进行时域和频域处 理,最终完成被测样品声学性能参数的计算、 显示、输出等功能。

透射测量过程和经典方法相似。参考信号 为没有样品时的直达信号,将采集的信号存入 计算机;放进样品,采集透过材料以后的声信号 并存入计算机;对它们进行频谱分析,将各自的 幅度谱代入式(1),计算得到测量频率范围内 的各点插入损失。在接收到的声信号采集过程 中,对每一种电信号经放大滤波后都做了128 次的时域平均,这样就大大提高了信噪比。

18卷6期(1999)



3 测量结果与讨论

我们根据上述的测量系统和方法,分别利 用两种小球形水听器 (RHS-3 型和 B&K8103 型)^[5] 以及尺寸为 20×30cm² 的 PVDF 薄膜平 面型水听器对均匀铝板的插入损失进行了测量 比较,铝板尺寸为 110cm×80cm,厚度 8mm, 结果如图 5(a-d) 所示,图中"一◆一"表示测 量值,"---◇---"表示根据公式 (2) 无衰减的 平板理论模型计算得到的理论值 (铝板的密度 取 2700kg/m3、纵波声速取 6260m/s^[6])。

$$I_L = 10 \log \left[\frac{(1-m^2)^2}{4m^2} (\sin^2 kd) + 1 \right]$$
 (2)

上式中 m 为材料的特性阻抗 pc 对水的特性阻 抗 ($\rho_w c_w \approx 1.5 \times 10^6$ 瑞利) 之比值, k 是波数, d 是板的厚度。图 5(a) 和图 5(b) 分别为 RHS-3 型、 B&K8103 型水听器置于板后 8cm 处测得 的曲线和理论值的比较、被测频段内测量平均 误差分别为 0.13dB 和 0.11dB。从图 5(a) 中 可以看出, 插入损失的测量曲线从 9kHz 开始 在高频段起伏较大,与之相比,图 5(b)中的测 量结果有较大改善,曲线起伏相对较小,和理 论值吻合得较好。在以上两组测量中所采集的 透射信号里叠加进了水听器与样品表面之间的 来回声反射干扰信号,由于 RHS-3 型水听器外 形尺寸比 B&K8103 型大,且在球部上端有金 属套筒、所以这种影响就更明显些。为了消除 水听器与样品表面之间的来回声反射干扰,须 增加它们的间距,将反射信号全部隔在数据采 集时间窗之外,但这样对于球形水听器测量必 应用声学

然会引入样品边缘衍射干扰。为了便于说明, 我们分别把 RHS-3 型球形水听器和 PVDF 薄 膜平面型定向水听器置于被测样品板后 60cm 处,测得结果如图 5(c)、(d) 所示,测量频段 内平均误差各为 0.08dB 和 0.06dB, 整个频段 内的测量精度都有所提高。 将图 5(c) 和图 5(a) 相比, 5kHz 以上频段的测量精度提高了, 但 5kHz 以下频段的测量明显受到样品板边缘衍 射的干扰。图 5(d) 中曲线表明, 用 PVDF 薄膜 平面型水听器代替 RHS-3 型水听器测量时, 低频段测量结果较前者有很大改善, 整个频段 内测量曲线的略微起伏估计是由于 PVDF 薄 膜水听器接收灵敏度低、测量中信噪比低的缘 故。实验中还发现虽然 PVDF 薄膜水听器本身 有良好的透声性,但当它靠近样品测量时(如 D=10 cm), 声信号在样品和水听器之间的来 回反射干扰比使用 RHS-3 型水听器还严重、 主要由于该水听器不可能完全透声,而且其反 射面很大,同时还可能存在边框的声波散射作 用,所以将它置于 D=60cm 处测量是比较合适 的,此时既能在声程上隔开样品和水听器之间 的来回声反射干扰,又能尽量避免接收到样品 边缘衍射波。

4 结束语

根据对上述实际测量结果的分析,说明本 文描述的对水声材料透声性能测量技术的几点 改进措施是相当有效的,在方法和手段上对传 统的测量技术有所突破,已经建成的测量实验 系统能够在小型消声水池中实现对大面积水声 材料及其构件(如声障板、消声结构、导流罩模 型等)的低频测量,并具有测量精度高、实现了 自动化测量等优点,解决了以往这类测量必须 在外场大水域中进行的问题,可以节省大量的 费用、时间和精力,同时测量样品尺寸也可缩 小。只要改进发射系统的低频宽带性能,解决 好 PVDF 薄膜平面型水听器的透声性和它本 身的边框散射问题,提高其接收灵敏度,还可

 \cdot 27 \cdot



致谢本站袁文俊教授对本项工作的关心和支持,并阅读了全文。测量实验得到了本站张晓 岚工程师和声材组全体同志的协助,在此谨致 谢意。

参考文献

 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.

- 2 李水,唐海清,缪荣兴.水声无源材料声性能压力罐法测量技术.全国计量测试学术大会论文集,北京,1998.11: 1010-1015.
- 3 Audoly C, Giangreco C. J.Acoustique. 1990, (3): 369–379.
- 4 栾桂东,张金铎,李水等. 声学与电子工程, 1998, (3): 1-5.
- 5 郑士杰,袁文俊,缪荣兴等编著.水声计量测试技术.哈 尔滨工程大学出版社, 1995,1,345-354.
- 6 王荣津等编著.水声材料手册.北京:科学出版社,1983, 7,85.

18 卷 6 期 (1999)