

消声水池中弹性球回声的测量与标定

唐 俊, 王同庆, 徐百坤

(北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 在消声水池中对直径范围为 2cm~5cm 的钢球进行了回声测量。对长脉冲和短脉冲入射声信号的回声信号进行了分析比较。研究了目标的弹性作用在这两种情况下对回声的影响。通过对标准钢球回声测量结果与解析计算结果的比较, 检验了消声水池目标回声测量的精度, 并为其他非标准目标回声测量提供对比标定的依据。

关键词: 消声水池; 弹性球; 回声; 脉冲

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-03-0367-04

Acoustic reflection measurements and calibration of elastic spheres in an anechoic tank

TANG Jun, WANG Tong-qing, XU Bai-kun

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Acoustic reflection measurements of steel spheres between 2 and 5 centimeter in diameter have been made in an anechoic tank. Reflected acoustic signals from the targets, using long and short pulses respectively, are analyzed and compared. The influence of the acoustic reflection on the elastic factor of the targets under the two conditions is studied. Accuracy of the target reflection measurement in the anechoic tank has been verified by comparing the measured values of standard steel spheres with theoretically calculated values. Calibration reference is supplied for acoustic reflection measurement of the nonstandard targets.

Key words: anechoic tank; elastic sphere; acoustic reflection; pulse

1 引 言

水声学中, 水下声目标如潜艇、鱼雷、水雷、礁石等是声波的反射体或散射体, 或者两者兼而有之。主动声纳发射的声信号在传播过程中如遇障碍, 将产生散射波。散射波的强度是我们了解被探测目标外形和构造的重要信息, 也是决定声纳有效作用距离的重要因素之一。度量目标对入射波的反射和散射能力的量是目标强度。目标强度可以在海洋中用比较法或者应答器法进行测量, 但是费时费力且背景噪声影响无法消除。如果对小目标采用高频率的入射信号, 同样可以得到目标反射和散射能力的一般

规律, 这种方法称为“缩尺法”, 北京航空航天大学建立的消声水槽可以提供缩比试验的环境^[1]。

水下声目标的散射测量工作早在 40 年代就开始了, 40 年代末 Wiener 研究了刚性物体在水下的声散射问题。50 年代 Faran 开始研究水下弹性金属圆柱体和球体的声散射问题, 指出目标弹性对回声的影响。80 年代 Dragonette 的研究表明, 即使是使用碳钨钢材材料做的高硬度金属球在水下仍然不能看作是刚性的, 弹性作用对目标回声依然有着非常大的影响, 这种弹性影响在稳态条件^[2]下可以使测量的目标强度的变化达到 30dB, 因此对目标弹性散射问题的研究变得越来越重要。直至今日, 水下声目标的弹性散射问题已经成为水声学的一个重要方向, 其研究成果已经广泛应用军用和民用领域。如在潜艇的低频回声特性研究中一个重要内容就是水下弹性壳体声散射特征的研究。本文介绍了在消声水

收稿日期: 2005-12-23; 修回日期: 2006-03-06

作者单位: 唐俊(1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事水声实验研究、水下目标探测、水声信号处理以及主动控制消声技术。

通信作者: 唐俊, E-mail: buaatj@126.com

池中进行的实心钢球声散射的实验研究,在实验室中利用宽带技术测得的标准金属球回声特性可以作为水下目标测量的标定参考,这也是实验室水声目标测量的一项基本而又重要的工作。

2 实验系统安排

试验在一个全尺寸为 $3\text{m} \times 2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$, 净空间为 $2.7\text{m} \times 2.3\text{m} \times 2.3\text{m}$ 的消声水池中进行,经检测在消声水池中心正对池壁方向 0.81m 以上,频率 $31.5\text{kHz} \sim 150\text{kHz}$ 范围内;对角线方向 0.92m 以上,频率 $16\text{kHz} \sim 250\text{kHz}$ 范围内,符合自由场条件^[3]。实验使用直径为 2cm 、 3cm 、 4cm 和 5cm 的四个钢球,频率为 $170\text{kHz} \sim 230\text{kHz}$, 测量 ka 值 $7.12 \sim 24.09$ 的钢球弹性散射形态函数值。

实验使用 PC 机、数据采集卡和位移控制设备构成的虚拟仪器测控系统,如图 1 所示。声源距目标的距离为 1.1m ,声源、水听器和目标处在同一条直线上,距水面的高度为 1.15m 。

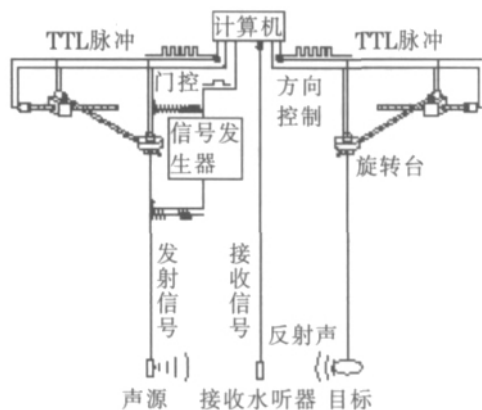


图1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental system

测量时,信号发生器产生符合要求的正弦信号。该正弦信号经门控调制器进行调制后,分为两路,一路直接发送至 PC 机作为时基参考信号;一路作为正弦脉冲信号,经过功率放大器放大后激励发射换能器,接收水听器接收直达信号声和目标反射声信号,并发送至 PC 机。

直达声和目标回声的接收使用了同一个水听器,电压灵敏度是相同的,因此避免了水听器的绝对标定工作。

3 回波的测量及分析

一般情况下弹性球的回波由多种成分构成,它

包含了来自物体表面的散射波、透入物体内部后在传播过程中经内表面反射、透射而达到接收点的波,以及在入射波激励下物体振动时的再辐射波等。当窄脉冲入射时,这些波不会在同一时刻到达接收点,所以接收到的是一个脉冲串,其中第一个脉冲来自物体表面最接近声源的那部分表面的镜反射,随后是内表面反射、透射波、目标被激振动后的再辐射波等。在窄脉冲入射条件下弹性球的第一列回声基本不随频率的变化而变化。图 2 给出了直径 5cm 的钢球在频率为 200kHz 宽度为 $20\mu\text{s}$ 的脉冲声入射情况下的回声脉冲串。

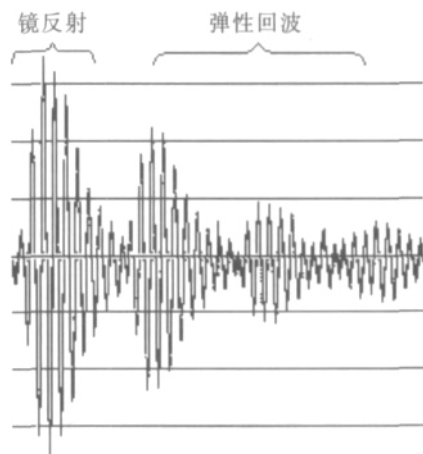


图2 直径 5cm 的钢球在窄脉冲入射情况下的回声脉冲串

Fig.2 The backscattered pulse from a 5cm in diameter steel sphere in short pulse

随着入射声脉冲宽度的增加,水听器可以在同一时刻接收到弹性球回波成分越多,总的回波由它们迭加而成,但是这些经由不同途径到达接收点的波具有各自不同的相位,它们迭加的结果使得回波波形相对与入射波产生畸变,图 3 给出了直径 3cm 的钢球在不同宽度的脉冲入射声作用下的回声脉冲。分析图 3 可知,随着入射声脉冲宽度的增加,弹性回波对整个弹性球的回声影响越多。当入射声达到稳态时,弹性球回声也达到稳定状态,并且在不同的频率条件下弹性回波对回声可以达到增益和衰减两种不同的效果,这种差异在物体目标强度测量中可以达到 30dB 。

图 4 显示了在入射声达到稳态条件下直径 5cm 钢球随频率参数的变化而变化的回声波形。可以看出弹性球的散射强度随频率做极大、极小急剧变化,而且声波频率稍有变化,回声强度可能回发生显著的改变,并且回声波形会发生严重畸变。

4 弹性球散射的实验标定

不同于刚性球在弹性球的声散射中入射声能透

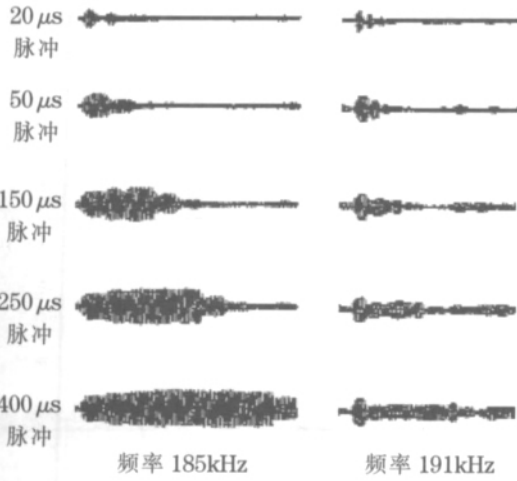


图3 直径3cm 钢球回声脉冲

Fig.3 The backscattered pulse from a 5-cm in diameter steel sphere

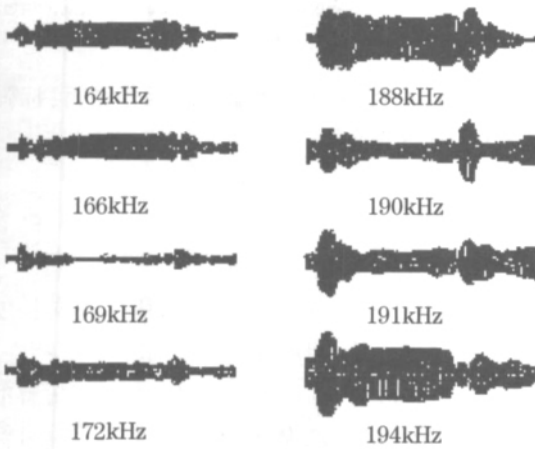


图4 直径5cm 钢球稳态回声脉冲

Fig.4 The backscattered pulse from a 5cm in diameter steel sphere at steady-state

入物体内部,并激发起内部声场,特别是当物体内部声波的波长小于球半径时,内部波动过程开始变得重要,此时将建立起内部的驻波场,并引出简正振动频率,因此散射波强度会随着频率的变化出现极大、极小的变化。这是个早已被解决经典理论问题,可以用解析解来对弹性球实验进行标定。60年代Hickling给出弹性球散射声场公式

$$p_s = (P_0 a / 2r_0^2) f_\infty(x, x_1, x_2) e^{i(2kr_0^2 \omega t)} \quad (1)$$

其中 f_∞ 称为形态函数, 对各向同性材料的弹性球, 它与材料的密度 ρ_s 杨氏模量 E 和泊松比 δ 有关, 本次实验采用的钢球材料的密度、杨氏模量和泊松比分别为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $20.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 和 0.28。

试验中在给定 $400 \mu\text{s}$ 宽度脉冲入射声条件下, 分别测量了 170kHz~230kHz 频率范围内直径为 2cm、3cm、4cm 和 5cm 四种标准钢球的回波。通过水听

器接收入射声和反射声的时间间隔计算水听器距声源和目标的距离 L_1 和 L_2 。实验测量的形态函数为

$$|f_\infty| = (2r/a) (|p_s|/p_0) \quad (2)$$

式中 r 为目标声中心距远场点距离, p_s 和 p_0 分别为目标入射声压和远场点处的散射声压。由此可以推出适用于本实验系统的形态函数计算公式为

$$|f_\infty| = \frac{2}{a} \left(\frac{E_s \chi_{L_2}}{E_i \chi_{L_1} / (L_1 + L_2)} \right) \quad (3)$$

式中 E_i 和 E_s 分别为直达声和目标反射声激起的水听器的开路电压。图5给出了在不同 ka 值条件下钢球的形态函数的实验值与理论计算值的对比, 理论计算值用黑色的实线表示, 实验值用黑色点表示。经过对比可以得出, 在稳态条件下标准弹性球的回波测量与理论值基本吻合。

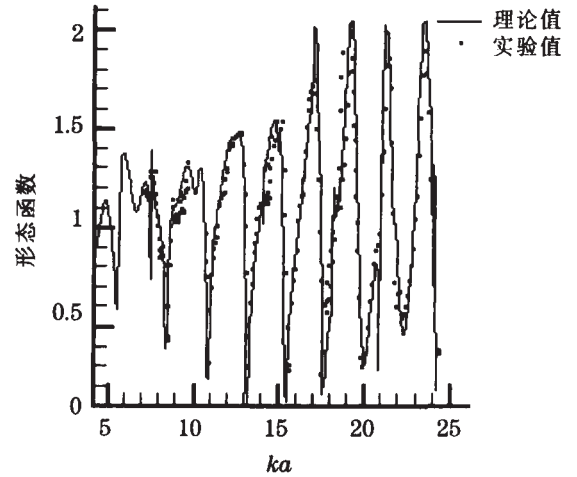


图5 钢球形态函数实验值与理论值的对比

Fig.5 Comparison between the exact theoretical calculation, of the form function vs. ka (solid curve) for steel sphere, and experimental measurement (point).

在水下声目标的测量的实际应用中,除了关心目标的弹性影响外,瞬态条件下水下目标的目标强度也是很重要的关注内容。因此在消声水池中进行水下目标回声特性研究时,不但要测量稳态状态下目标的弹性散射,而且还需要测量瞬态条件下的目标强度。

一般定义的目标强度是指稳态条件下的值,其计算公式(dB)为:

$$TS = 10 \lg \frac{I_r}{I_{i0}} \Big|_{r=lm} = 20 \lg \frac{p_r}{p_{i0}} \Big|_{r=lm} \quad (4)$$

式中 I_r 为距离目标 r 处的目标反射波声强; I_{i0} 为目标入射波声强; p_r 为距离目标 r 处的目标反射声压; p_{i0} 为目标入射声压。根据 Unick 提出的瞬态短脉冲信号条件下,使用时间扩展因子修正的声纳方程中的目标强度中用平均声强 $I = E/T$ 来代替公式(4)中

的稳态声强。其中能流密度 E 定义为 $E = \int_0^{\infty} p u dt$, 式中 p 和 u 分别是介质中的声压和介质质点振动速度。对于长脉冲的主动声纳, T 为发射脉冲的宽度, 并且近似等于回声的宽度 τ_0 ; 对于短的瞬变脉冲声纳, T 为回声的镜反射脉冲宽度 $\tau_{e\infty}$ 。并且定义:

$$\text{声源级 } EL = 10 \lg \frac{E_e}{\tau_e} \quad (5)$$

$$\text{回波级 } SL = 10 \lg \frac{E_1}{\tau_e} = 10 \lg \frac{E_e}{\tau_0} - 10 \lg \frac{\tau_e}{\tau_0} \quad (6)$$

式中 E_1 是距声源中心 1m 处的能流密度; E_e 是回波声能流密度。根据修正后的声源级和回波级定义, 即可根据声纳方程得到瞬态短脉冲条件下水下目标的目标强度^[4]。

图 6 和图 7 分别给出了使用脉冲宽度为 20 μs 的入射声, 仅测量直径 4cm 和直径 5cm 钢球的回声脉冲串中的镜反射脉冲段作为目标的反射声压, 得到的目标强度值与理想刚性大球的理论目标强度值比较图。理论目标强度值用黑色的实线表示, 实验值用黑色虚线表示。经过对比可以得出, 使用这种方法测量得到的目标强度值在较宽的 ka 范围内是一致平缓的, 但是实验值比理论值要略小。

设有两种均延伸到无限远的理想介质, 其特性阻抗分别为 $\rho_1 c_1$ 和 $\rho_2 c_2$, 当一列平面声波从一种介质垂直入射至分界面时, 反射系数为:

$$r = \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

式中 $R_1 = \rho_1 c_1$, $R_2 = \rho_2 c_2$ 。从钢球的弹性效应来看, 钢球在水中并不是完全刚性的, 即 $r \neq 1$ 且 $r < 1$, 因此当入射声波到达钢球表面时, 一部分声能透射过钢球表面而没有直接被反射, 使得镜反射的实际声能比

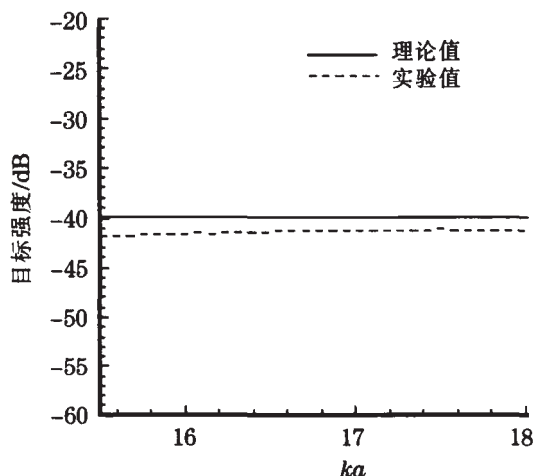


图 6 直径 4cm 钢球目标强度实验值与理论值比较

FIG.6 Comparison between the exact theoretical calculation, of the target strength vs. ka (solid curve) for a 4cm in diameter steel sphere, and experimental measurement (dashed)

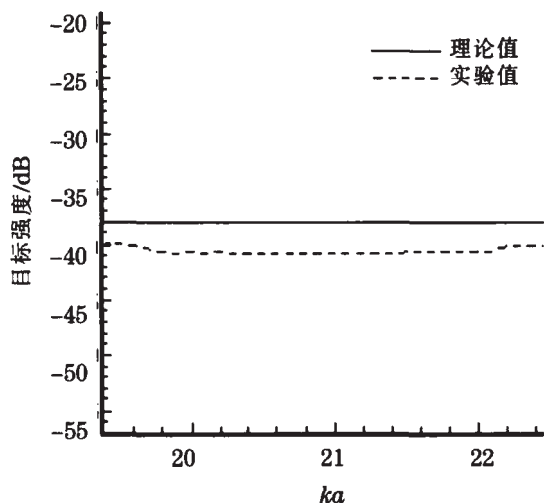


图 7 直径 5cm 钢球目标强度实验值与理论值比较

Fig.7 Comparison between the exact theoretical calculation, of the target strength vs. ka (solid curve) for a 5cm in diameter steel sphere, and experimental measurement (dashed)

理论值要小, 这可以定性解释导致测得的目标强度值小于理论值的原因。

5 结 论

本文研究了在全消声水池中采用了不同长度的脉冲入射声信号时不同尺寸的金属球的回声特性, 分析了弹性对目标回声的影响。实验结果与解析解的对比表明现有消声水池可以准确地测量水下声目标散射, 测到的标准钢球回声可以作为水下目标声散射测量的参照标准。使用宽脉冲测量可以得到弹性球稳态目标强度, 使用窄脉冲测量技术可以有效地将目标的镜反射回波和弹性回波分离, 只考虑镜反射回波的大弹性球目标强度与刚性大球的理论解相近。

参 考 文 献

- [1] 鲍国良, 王同庆, 消声水池的设计及其自由场测量实验[J]. 电声技术, 2005, 35(1): 18-21.
BAO Guoliang, WANG Tongqing. Design of an anechoic-water-tank and its free field measurement[J]. Udio Engineering, 2005, 35(1): 18-21.
- [2] Werner G Neubauer. Acoustic reflection from elastic spheres. I. Steady-state signals[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1974, 55(6): 1123-1129.
- [3] 鲍国良. 消声水池的建设及水声实验研究[D]. 北京航空航天大学硕士学位论文, 2004. 3.
BAO Guoliang. The Construction of Anechoic-water-tank and Experimental Research on Hydro-acoustics[D]. Beihang University, 2004. 3.
- [4] 方恒忠, 鲍连承, 声纳方程的瞬态形式讨论[J]. 应用声学, 2002, 21(4): 16-20.
FANG Hengzhong, BAO Liancheng. Discussions on the transient-state sonar equation[J]. Applied Acoustics, 2002, 21(4): 16-20.