

引用格式: 孙俊东, 尚大晶, 孙小越. 混响场互易常数的测量方法[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(4): 128–131.
SUN J D, SHANG D J, SUN X Y. Measurement method of reverberation field reciprocity parameter[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(4): 128–131.

混响场互易常数的测量方法

孙俊东^{1,2}, 尚大晶^{1,2}, 孙小越^{1,2}

1 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001
2 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: [目的] 为了实现混响场互易常数的窄带准确测量, [方法] 利用相同的发射接收系统装置, 保持相同的参数设置, 在自由场中测量不同频率下的开路输出电压, 然后再在混响水池中的混响控制区采用空间平均方式测得空间内平均开路输出电压。[结果] 通过两者计算得到混响半径, 得到了互易常数。[结论] 此方法使用单频连续正弦信号, 利用空间平均测量技术, 测量简单方便且对测量仪器和软件程序要求不高, 适用性强。通过与基于混响时间的测量方法得到的混响场互易常数结果对比, 测量结果基本一致, 验证了此方法的有效性。
关键词: 混响场; 互易常数; 空间平均; 混响半径
中图分类号: U661.75 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.04.020

Measurement method of reverberation field reciprocity parameter

SUN Jundong^{1,2}, SHANG Dajing^{1,2}, SUN Xiaoyue^{1,2}

1 Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
2 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: This paper presents a method for measuring the reciprocity parameter based on the free field. It is able to achieve accurate measurement of the reverberation constant in a narrow band. The method uses the same transmitting and receiving system, and keeps the same set of parameters to measure the open circuit voltage output under different frequencies in a free field. The open circuit output voltage is measured through average technology in the reverberation control region, then the reverberation radius is calculated and the reciprocity constant obtained. This method uses a single frequency signal and the spatial averaging technique. It is simple, convenient and not suitable for complex measuring instruments. The validity of the method is verified by comparing the measured results with the reverberation time measurement.
Key words: reverberation field; reciprocity parameter; spatial average; reverberation radius

0 引言

混响场互易法校准最初是由 Diestel^[1]于 1961 年提出, 用于空气声学中混响室内传声器的校

准。利用非消声水池进行水声换能器的混响场互易校准已被验证是可行的^[2]。在混响场互易校准中, 互易常数是重要的参数。根据混响场互易常数公式, 需要测量水池的混响时间。混响时间是

收稿日期: 2017-03-24 网络出版时间: 2017-7-27 10:34
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11504065)
作者简介: 孙俊东, 男, 1990 年生, 硕士生。研究方向: 水下声辐射与减振降噪。
E-mail: sunjundong@hrbeu.edu.cn
尚大晶(通信作者), 男, 1968 年生, 研究员。研究方向: 水下结构振动噪声。
E-mail: shangdajing@hrbeu.edu.cn



指水池中的声源从停止发射的瞬间起直到混响声级衰减 60 dB 所需的时间。在空气声学混响室声学特性校准规范 (JJF 1143-2006) 中, 根据此定义, 在测量中一般采用中断声源法^[3]。

但在水声领域的非消声水池中, 由于非消声水池池壁的吸声特性以及对声场的干涉影响等因素, 声场声压空间分布不均, 因此存在测量的空间误差和重复误差, 这就需要采取多点多次测量取平均的方法, 由此增加了实验测量的工作量, 并且测量中需要采用宽带噪声测量的方法, 难以进行窄带精确测量。由于水池背景噪声的影响, 对换能器的声源级要求也比较高。另外, 混响时间测量需要仪器及程序的支持, 给测量工作带来了一定困难。

本文针对混响场互易常数测量中混响时间测量上遇到的问题, 提出利用混响半径的方法测量混响场互易常数。混响半径定义为直达声与混响声相等的距离^[4]。点源产生的直达声是由声源发射到达壁面之前的声波, 满足自由场球面波扩展, 可在消声水池中测得; 混响声是由许多无规则反射声叠加而成, 根据李琪等^[5]提出的利用空间移动平均技术测量声源声功率的方法, 可以克服边界对声场的干涉影响, 即在混响声控制区通过空间平均方法得到混响声平均声压。因此, 可以采用消声水池与混响水池结合的方法, 分别测量同一声源产生的直达声和混响声得到混响半径, 进而得到互易常数。此方法采用空间平均技术可以实现窄带准确测量, 且测量仪器要求较低, 操作步骤简单。

1 混响场互易常数

一个线性、无源、可逆的换能器在用作水听器时的灵敏度 M 与用作发射器时的发送电流响应 S 之比即为互易常数, 它表示声场中两点之间的转移声导纳, 与换能器本身的结构无关, 只与声场有关。自由场互易常数表达式为

$$J = Q/p_r \tag{1}$$

式中: Q 为声源强度; p_r 为声源等效声中心距离 r 为处的声压^[6]。Diestel 给出的混响场互易常数 J_r 为

$$J_r = \frac{1}{2\rho_0 f} \sqrt{\frac{R}{\pi}} = \frac{2r_c}{\rho_0 f} \tag{2}$$

式中: ρ_0 为介质密度; f 为声波频率; R 为非消声水池的房间常数; r_c 为混响半径。可以看出, 混响场互易常数与自由场互易常数非常相似, 只是用混响场混响半径代换了自由场中的测量距

离。因此, 对于混响场互易常数的计算只需求得混响半径或房间常数即可^[7]。

房间常数反映水池壁面对声波能量的吸收能力, 可以通过测量混响时间得到。因此, 混响场互易常数的混响时间表达形式为

$$J_r = \left(\frac{2.1}{\rho f}\right) \sqrt{\frac{V}{cT_{60}}} \tag{3}$$

式中: V 为水池内水的体积; T_{60} 为混响时间; c 为水中声速。房间常数采用赛宾公式, 若为提高计算精度, 可采用艾润公式。因此, 混响场互易常数的研究主要集中在混响时间的测量方法上。

点源产生的直达声符合球面波扩展规律, 可在自由场中测得。而混响声通过混响控制区内的空间平均方法可以得到混响声平均声压。因此可以将混响半径理解为: 混响场中混响声平均声压值 $\langle p_{rev} \rangle$ 等于自由场中距离声源 r_c 位置处的声压值。虽然 r_c 位置处的声压 p_{rc} 是未知的, 但在自由场远场中测量距离声源声中心 r 处的声压 p_r 满足 $r_c \cdot p_{rc} = r \cdot p_r$ 。由于水听器的开路输出电压与水听器所在位置处声压成正比, 因此混响半径可以表示为

$$r_c = r \cdot p_r / \langle p_{rev} \rangle = r \cdot e_r / \langle e_{rev} \rangle \tag{4}$$

式中: e_r 为水听器测量自由场中间距离为 r 处的开路输出电压; $\langle e_{rev} \rangle$ 为在混响控制区经空间平均得到的开路输出电压的均方根值。所以混响场互易场数可以写作

$$J_r = \frac{2r}{\rho f} \frac{e_r}{\langle e_{rev} \rangle} \tag{5}$$

因此, 在测量操作中只需保持同一组发射一接收装置的各项参数设置相同, 在自由场和混响场分别测量水听器的开路电压值, 即可得到混响场互易常数。同样, 在不同的介质中也可以采用此方法得到互易常数。

2 实验测量

实验在哈尔滨工程大学水声技术重点实验室的混响水箱 (9 m×3 m×1.8 m) 中进行。首先, 采用中断声源法测量混响时间; 然后, 采用本文提出的方法, 利用同一套收发系统在消声水池和混响水箱中分别测量得到混响半径。考虑到混响水箱内声波的截止频率和信噪比, 以及消声水池的消声下限频率, 选定测量的频率范围为 2~20 kHz。

2.1 混响时间的测量

中断声源法是一种常用且方便的混响时间测量方法^[8]。采用无指向性声源发射白噪声信号,

在水池中建立一个稳定的声场,中断声源信号后声场声压按指数衰减,通过信号分析仪记录并计算 1/3 倍频程内的混响时间。装置连接如图 1 所示,其中,信号分析仪使用 B&K PULSE3560E。

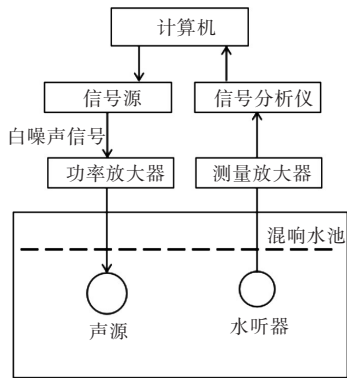


图1 中断声源法测量混响时间测量装置示意图
Fig.1 The measuring device of reverberation time by interrupted source method

当中断激励信号后,声场内声压衰减,信号触发动态信号分析仪记录声压级衰减曲线。考虑到测量信噪比,在测量信号下降 5 dB 时触发系统开始记录,仅计算 T_{20} ,进而推导出混响时间 $T_{60} = 3T_{20}$ 。

由于声场中声压存在空间起伏和时间变化,每次测量中声场模式不同,因而会引入测量偏差。测量中,在混响区域内选择 6 个不同的位置,每个位置间距大于声波波长的 1/2,并在每个位置处测量 6 次,对测量结果取平均值。测量混响时间如图 2 所示。

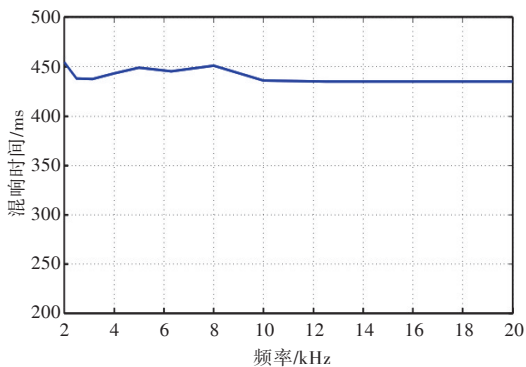


图2 采用中断声源法测得混响时间
Fig.2 The result of reverberation time by interrupted source method

2.2 自由场比较法测量

采用一组发射—接收系统,包含如图 1 所示的相同的测量装置,测量操作过程中,只需在两种不同声场中保持相同的参数设置。

采用本文提出的测量方法需要考虑构建自由场,通常是在消声水池中进行。在消声水池中,将

声源和水听器放置于消声水池 5 m 深处,二者等效声中心间距 2 m。采用连续正弦信号,记录信号频率和幅值,以及功率放大器增益档位,测量记录水听器的开路输出电压。

将声源和水听器放置于混响水箱中。采用与消声水池测量相同的信号设置和增益档位,水听器置于声源的混响控制区并避免距离壁面太近,采用 S 型路径扫描方式,扫描速度小于 0.5 m/s,在混响声控制区内混响声平均声压测量结果稳定。用信号动态分析仪测量水听器开路输出电压的均方根值 $<e_{rev}>$ 。

根据消声水池测量得到的开路输出电压 e_f 和混响水池中测得的开路输出电压均方根 $<e_{rev}>$,由式(4)计算得到混响半径。根据以上两种方法计算得到的混响半径如图 3 所示。由图可见两种方法的计算结果基本一致,相对误差小于 0.7%,验证了该方法的准确性。

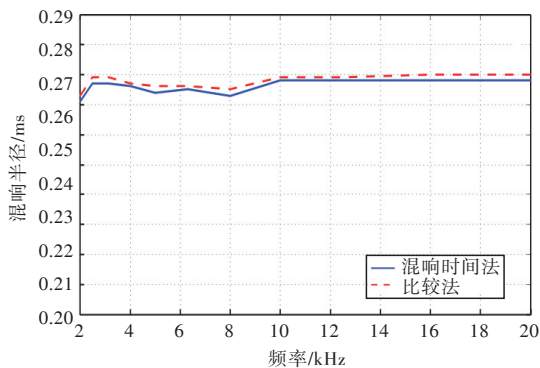


图3 采用两种方法求得的混响半径
Fig.3 The results of reverberation radius

从图中可以看到,在混响水箱内,声源的混响半径很小,不超过 0.3 m,且在频段内变化幅度很小。这说明直达声控制区空间尺寸很小,绝大多数区域处于混响声控制区域范围。

2.3 混响场互易常数

采用本文提出的方法计算得到的混响场互易常数如图 4 所示。互易常数主要与介质密度和声波频率有关。尽管采用混响时间法计算的混响半径误差主要来自于信号的随机和声场模式的不同,比较法测量的混响半径误差主要来自于混响场中声场分布的均匀性和自由场条件,但在量级上,混响半径的误差对互易常数影响很小,可以忽略不计。

3 结 语

本文根据混响半径的定义提出了一种应用自由场和混响场比较的方法测量得到混响场互易常

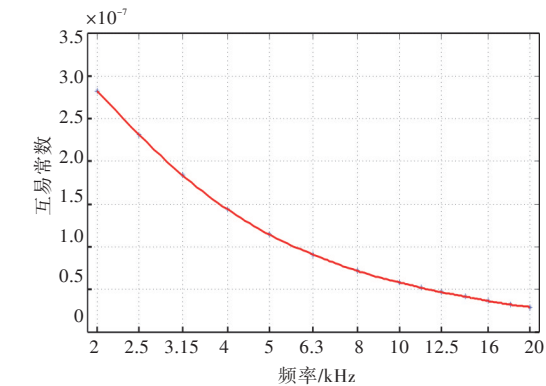


图4 混响水箱中互易常数随频率的变化曲线
Fig.4 Reciprocity constant in reverberation tank

数的方法。测量中,采用空间平均技术可以消除简正波带来的声压分布不均,得到精确的测量结果。此方法操作简单,不需要特别的程序支持,且测量效率高、测量结果准确;可以进行窄带测量;此方法不仅适用于水声混响水池,也可用于空气中的混响室互易常数测量。另外,采用此方法还可以更加方便地确定混响半径,划分测量的混响声控制区。

参考文献:

[1] LYAMSHEV L M. Reciprocity principle and its applications in underwater acoustics[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Acoustics. Beijing, China: [s.n.], 1992: 4.

[16] MAILLARD J, LAGÖ T, WINBERG M, et al. Active control of pressure pulsations in piping systems[M]. Fuller Chris, 1998.

[17] SUN H L, AN F Y, WU M, et al. Experiments on performances of active-passive hybrid mufflers[C]//Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration. Florence: ICSV, 2015.

[18] RAO D B, KUNG S Y. Adaptive notch filtering for the retrieval of sinusoids in noise[J]. IEEE Transac-

[2] 孙俊东, 尚大晶, 张骏铭. 水听器的混响场互易法测量[C]//2016年全国声学学术会议论文集. 武汉: 中国声学学会, 2016: 703-708.

SUN J D, SHANG D J, ZHANG J M. Reciprocity calibration of hydrophone in a reverberation pool[C]. Wuhan: Acoustical society of China, 2016: 703-708 (in Chinese).

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混响室声学特性校准规范: JJF 1143-2006[S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.

[4] 张海澜. 理论声学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 362-380.

[5] 李琪, 唐锐, 尚大晶, 等. 一种利用单水听器测量非消声水池混响时间的反演方法: CN201410659236.6 [P]. 2014-11-19.

[6] 郑士杰, 袁文俊, 缪荣兴, 等. 水声计量测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995: 1-72.

[7] DIESTEL H G. Reciprocity calibration of microphones in a diffuse sound field[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1961, 33(4): 514-518.

[8] 尚大晶. 水下复杂声源辐射声功率的混响法测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

SHAGN D J. Research on the reverberation measuring technique of underwater complex sound sources [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012 (in Chinese).



(上接第 127 页)

[19] WANG H, SUN H L, SUN Y P, et al. A line-spectrum active noise control system with multi-frequency estimation based on parallel adaptive notch filter[C]//Proceedings of ICSV24. London, 2017.

[19] HINAMOTO Y, SAKAI H. A filtered-X LMS algorithm for sinusoidal reference signals—effects of frequency mismatch [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(4): 259-262.