

均匀活塞阵辐射声场研究

张彬, 童晖, 王佳麟, 张涛, 周博文, 赵欣

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815)

摘要: 主要研究了均匀活塞阵的近-远场的辐射声场。首先利用点源声波干涉原理建立均匀点源活塞阵的辐射声场理论, 进而推导均匀活塞阵的近-远场的辐射声场函数表达式, 并采用 Matlab 软件仿真了近-远场的辐射声场, 分析了近-远场的声场变化规律、声轴方向声压的变化规律和旁瓣级的变化规律。通过与实测的 80 kHz 均匀活塞阵换能器近-远场的辐射声场对比, 表明了实测结果与仿真结果基本一致, 验证了理论与测量方法的可行性, 能够为实际测量工作提供指导。

关键词: 均匀活塞阵; 声场分布; 近-远场; 换能器

中图分类号: TB525

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-01-0121-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.01.021

Research on radiation sound field of uniform piston transducer array

ZHANG Bin, TONG Hui, WANG Jialin, ZHANG Tao, ZHOU Bowen, ZHAO Xin

(Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustic, Chinese Academy of Science, Shanghai 201815, China)

Abstract: In this paper, the near-far radiation sound field of uniform piston transducer array is studied. Firstly the sound field theory of uniform cylindrical point source array is established according to the principle of point source acoustic interference, then the expression of the near-far radiation sound field of uniform piston transducer array is deduced, and the near-far field directivity is simulated by Matlab. The radiation sound field pattern of near-far field, the variation of sound pressure in the sound axis direction and the variation of side-lobe levels are analyzed. The near-far radiation sound field of the prepared uniform piston transducer array of 80 kHz is measured. By comparison, it is shown that the measured results are basically consistent with the simulation results. The theory and measurement method in this paper are proved to be feasible and can guide the actual measurement work.

Key words: uniform piston array; sound field distribution; near-far field; transducer

0 引言

换能器阵的指向性是换能器的重要指标之一, 是指发射响应或接收响应的幅值随方位角变化的一种特性^[1]。换能器阵的辐射声场包括近场声场分布、远场指向性。以发射阵为例, 远场指向性是各阵元发射的声波经过“等效无限远”距离到达远场区(夫琅禾费区)的声线近似视为一束平行线, 在远场观察点各声波以同频率、不同振幅、不同相位干涉叠加, 总声压的振幅是平行线在空间方位的函数。近场声场分布是指在近场区(菲涅尔区)各点以同频率、同振幅、不同相位在空间点的声波叠加合成的声压分布,

形成一种比较复杂的干涉图。远场指向性是固定的数学函数, 而近场区域观察点的振幅、相位均不同, 干涉图像比较复杂, 无简明的解析表达式。活塞式换能器是一种应用非常广泛的声源, 活塞阵指向性是声学研究的基本问题之一^[2]。长期以来, 各种换能器的远场指向性得到了深入的研究, 而未对近场辐射声场以及远场向近场过渡时的指向性进行充分研究。近场和远场的划分没有绝对的标准, 一般认为声源的距离远大于信号波长时为远场; 反之, 则为近场。距离小于 $r_g = a^2/\lambda$ 的声场为近场区(r_g 为夫琅禾费区临界点到活塞中心的距离, a 为活塞辐射面半径, λ 为波长); 距离大于 r_g 时, 声场逐渐进入夫琅禾费区, 为近远场过渡区。根据工程经验, 认为距离大于 $4r_g$ 时, 为远场区, 符合测试和计量条件。

本文根据声场理论^[3], 建立了多点源均匀活塞阵声压分布的通用数学函数公式, 仿真近、远场的辐射声场分布, 并实测活塞阵的近、远场辐射声场, 分析仿真和实测数据, 得出辐射声场的变化规律。

收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-07-17

基金项目: 中国科学院声学研究所青年英才计划资助项目(QNYC201826)

作者简介: 张彬(1989-), 男, 河北安国人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为水声换能器。

通讯作者: 张彬, E-mail: bin_zhang2016@126.com

1 理论仿真

辐射声场归一化函数是描述换能器声场空间分布的函数,圆形活塞阵换能器声场分布是轴对称的,多阵元均匀活塞阵的辐射声场可以利用乘积定理、加法定理,将复杂结构阵的辐射声场简化为简单结构阵的辐射声场归一化函数的组合。

1.1 点源均匀活塞阵理论

根据声波的干涉原理, N 列声波的合成声场的声压等于每列声波的声压之和^[4]。均匀活塞阵示意图如图 1 所示。由 N 个点源组成均匀活塞阵,相邻点源的间距为 d ,在某位置处的声压等于 N 个点源在该位置产生的声压之和。 N 个阵元任意分布的离散阵的声场分布归一化函数为^[5]

$$D(\alpha, \theta, \omega) = \left| \frac{\sum_{i=1}^N A_i e^{-j\Delta\varphi_i}}{\sum_{i=1}^N A_i} \right| \quad (1)$$

式中: A_i 为离散阵中第 i 个阵元的响应幅值; $\Delta\varphi_i$ 为离散阵中第 i 个阵元在方向 (α, θ) 与主极大方向声波对应的相位差。

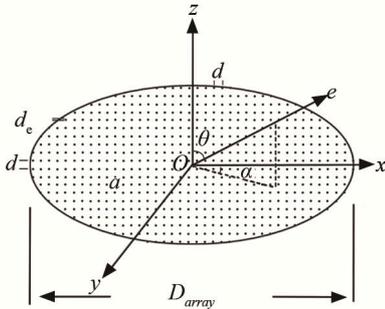


图 1 均匀活塞阵示意图

Fig.1 The figure of uniform piston transducer array

因分布密集的多阵元均匀圆形活塞阵的指向性呈轴对称,故只计算声轴方向的 xOy 切面声压值随距离的变化规律。设 1-3 型活塞阵以中心原点 O 为参考点,以中心原点向左列定义为 $v_m = -1, -2 \dots -m/2$ 列,向右列定义为 $v_m = 1, 2 \dots m/2$ 列,向前行定义为 $h_n = 1, 2 \dots n/2$ 行,向后行定义为 $h_n = -1, -2 \dots -n/2$ 。空间任意方向角 θ 入射的声线,阵元 i_{h_n, v_m} 位于 h_n 行 v_m 列,声线方向的单位矢量 $e = [\cos \alpha \sin \theta \quad \sin \alpha \sin \theta \quad \cos \alpha]$,声线方向与活塞阵法线的夹角为 θ ,某位置距离活塞阵中心原点 O 的距离为 R ,该位置的声压值为每个点源辐射声压的叠加,声压函数 p 表达式为

$$p = \left| \sum_{h_n = -\frac{n}{2}, 1}^{-\frac{n}{2}} \sum_{v_m = -\frac{m}{2}, 1}^{-\frac{m}{2}} \frac{A_{h_n, v_m}}{r_{h_n, v_m}} e^{-j\Delta\varphi_{h_n, v_m}} \right| \quad (2)$$

式中, r_{h_n, v_m} 为阵元 i_{h_n, v_m} 至空间某位置的距离,表达式为

$$r_{h_n, v_m} = [R^2 + (v_m - 1/2)^2 d^2 + (|v_m| - 1/2)^2 d^2 - 2R(|v_m| - 1/2)d \cos(\alpha) \sin(\theta)]^{1/2} \quad (3)$$

若定向面在 xOy 上,即 $\alpha = 0$,空间 xOy 平面任意位置的声压为 $p_{\alpha=0}$,声压函数 $p_{\alpha=0}$ 表达式为

$$p_{\alpha=0} = \left| \sum_{h_n = -\frac{n}{2}, 1}^{-\frac{n}{2}} \sum_{v_m = -\frac{m}{2}, 1}^{-\frac{m}{2}} \frac{A_{h_n, v_m}}{r_{h_n, v_m}} e^{-j\Delta\varphi_{h_n, v_m}} \right| \quad (4)$$

式(4)中, r_{h_n, v_m} 为阵元 i_{h_n, v_m} 至某位置的距离,表达式为

$$r_{h_n, v_m, \alpha=0} = [R^2 + (v_m - 1/2)^2 d^2 + (|v_m| - 1/2)^2 d^2 - 2R(|v_m| - 1/2)d \sin(\theta)]^{1/2} \quad (5)$$

式(2)、(4)中 $\Delta\varphi_{h_n, v_m}$ 为阵元 i_{h_n, v_m} 与活塞原点 O 的相位差,表达式为

$$\Delta\varphi_{h_n, v_m} = [\omega(r_{h_n, v_m} - R)]/c \quad (6)$$

实际情况中,所有阵元施加相同相位、相同幅度的电压,即 A 相同,球面波远场区声压与距离成反比,文中讨论的距离满足阵元的远场条件。

若不考虑距离衰减的影响,下文中空间点阵元声压值为该阵元声压值与距离的乘积,声场分布归一化函数表达式 $D(0, \theta, \omega)$,如式(7)所示:

$$D(0, \theta, \omega) = \left| \left(\sum_{h_n = -\frac{n}{2}, 1}^{-\frac{n}{2}} \sum_{v_m = -\frac{m}{2}, 1}^{-\frac{m}{2}} e^{-j\Delta\varphi_{h_n, v_m}} \right) / N \right| \quad (7)$$

在上述表达式中考虑的都是理想点源,具有全空间指向性,而实际中换能器阵元为圆柱型振子,阵元直径 d_e ,具有一定的指向性,换能器阵元的指向性函数 D_e 为

$$D_e(0, \theta, \omega) = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad (8)$$

式(8)是置于无限大刚性障板中圆形活塞换能器的指向性函数,式中 $Z = k(d_e/2) \sin \theta$, $J_1(Z)$ 为一阶柱贝塞尔函数。

为了更接近实际,对式(7)进行优化,利用 Bridge 乘积定理,复合阵的声场分布归一化函数等于子阵的指向性函数 D_e 与 N 个子阵等效中心组成的阵的声场分布归一化函数 $D(0, \theta, \omega)$ 的乘积,优化后的均匀活塞阵声场分布归一化函数为

$$D(0, \theta, \omega) = \left| \left(\sum_{h_n = -\frac{n}{2}, 1}^{-\frac{n}{2}} \sum_{v_m = -\frac{m}{2}, 1}^{-\frac{m}{2}} \frac{2J_1(Z)}{Z} |e^{-j\Delta\varphi_{h_n, v_m}}| \right) / N \right| \quad (9)$$

1.2 仿真计算

根据式(9)中推导的声场分布归一化函数表达, 建立 Matlab 仿真模型, 计算多阵元均匀活塞换能器阵的近-远场声场分布, 换能器为圆形活塞阵, 直径 D_{array} 为 203 mm, 工作频率 f 为 80 kHz, 阵元数 N 为 316, 相邻两个阵元间隔 d 为 9.375 mm, 阵元具有指向性 D_e 。

考虑圆形活塞阵换能器声场分布轴对称特点, 为重点突出、提高运算速度, 此仿真计算空间 xOy 平面声压主极大方向 $\pm 30^\circ$ 、距离 $0 \sim 7 \text{ m}$ ($0 \sim 12.76 r_g$) 的归一化声压值。近-远场声场分布归一化仿真结果如图 2 所示。声轴($\theta=0^\circ$)方向的声压归一化仿真结果如图 3 所示。最大旁瓣级仿真变化结果如图 4 所示。

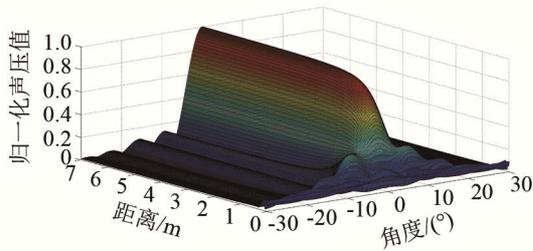


图 2 近-远场声压分布归一化仿真图
Fig.2 The simulation map of near-far field directivity

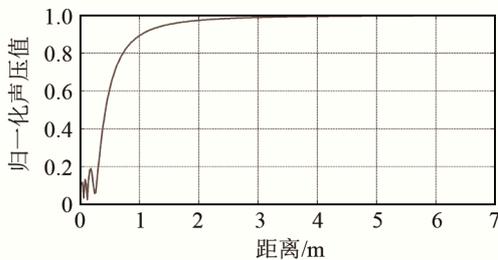


图 3 声轴方向($\theta=0^\circ$)的声压归一化值仿真图
Fig.3 The simulation graph of sound pressure in the acoustic axis direction ($\theta=0^\circ$)

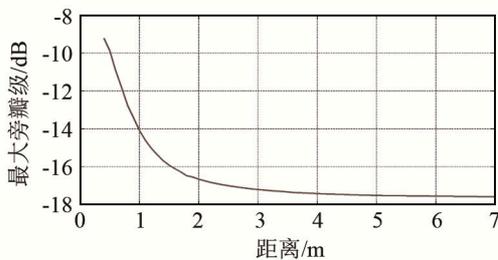


图 4 最大旁瓣级变化仿真图
Fig.4 The simulation graph of maximum side-lobe level variation

从图 2 中可以看出, 在远场处声压归一化值稳定, 在近场处声场分布复杂。从图 3 中可以看出, 看出声轴方向上声压的变化规律, 在远场处声压变化小,

在近场处声压急剧减小, 随着距离的进一步减小, 声压值变化复杂, 起伏交替变化。从图 4 可以看出, 旁瓣级的变化规律, 从远场到近场最大旁瓣级逐渐增大, 且在近场急剧增大, 小于 0.4 m ($0.73 r_g$) 处的主瓣、旁瓣变化复杂, 无法清晰区别, 故在图中无统计显示。

2 实测换能器近-远场声场分布

为验证上述仿真实论, 在前人的研究基础上^[6-7], 制备了 80 kHz 多阵元均匀圆形活塞阵换能器, 换能器实物如图 5 所示, 实测其近-远场声场分布归一化结果。

换能器的测量是按照 GB/T 7965-2002 《声学 水声换能器测量》^[8] 在消声水池内进行的, 使用 BK8104 水听器, 水听器与活塞阵换能器置于同一深度, 移动水听器不断靠近活塞阵换能器, 测得不同距离处的接收数据, 数据进行归一化处理。实测活塞阵换能器近-远场声场分布归一化图如图 6 所示, 声轴($\theta=0^\circ$)方向的声压归一化值实测结果如图 7 所示, 旁瓣级实测变化如图 8 所示。在远场处实测距离间隔约为 2 m, 在 2 m 以内距离间隔为 0.1~0.05 m。选取 3 个特征距离测得的归一化声场分布如图 9 所示。

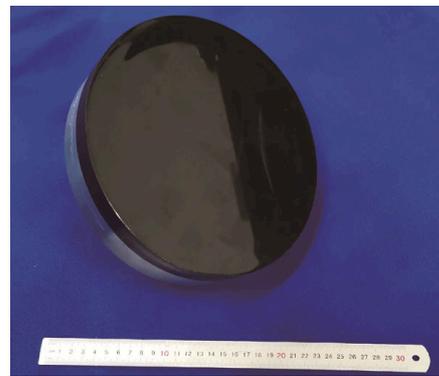


图 5 80 kHz 换能器样机图
Fig.5 The prototype of 80 kHz transducer

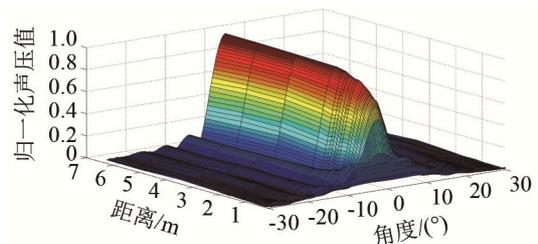


图 6 研制的 80 kHz 换能器近-远场指向性实测图
Fig.6 The measured map of near-far field directivity of the prepared 80 kHz transducer

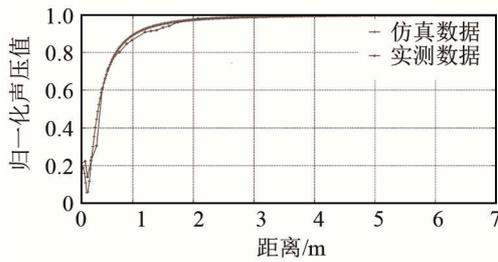


图7 声轴方向($\theta=0^\circ$)的声压归一化值仿真、实测对比图
Fig.7 Comparison between the simulated and measured graphs of the normalized sound pressure in the acoustic axis direction ($\theta=0^\circ$)

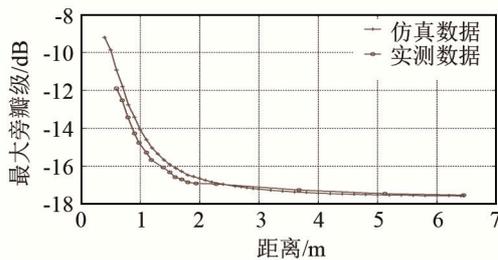


图8 近-远场指向性最大旁瓣级仿真、实测对比图
Fig.8 Comparison between the simulated and measured graphs of the maximum side-lobe level of near-far field directivity

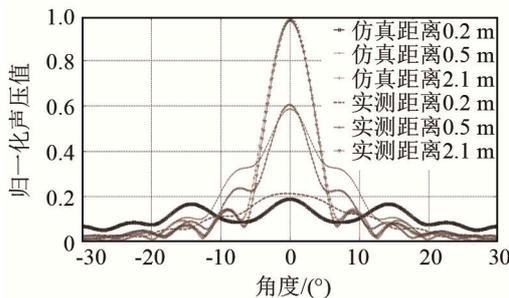


图9 特征距离处近-远场指向性仿真、实测对比图
Fig.9 Comparison between the simulated and measured graphs of the near-far field directivity at specified distances

3 数据分析

对比仿真数据图2、实测数据图6,从中可看出声场分布实测图与仿真图的趋势一致,在远场处归一化声压变化缓慢,随着距离减小,主轴归一化声压逐渐变小,旁瓣归一化声压逐渐增大,主瓣-3 dB开角逐渐增大,远-近场过渡区变化加剧,近场归一化声压变化复杂。

对比仿真和实测的声轴($\theta=0^\circ$)方向的声压(见图7)可知,远场区声轴方向的归一化声压趋于稳定,归一化声压值仅由1(距离 $12.7r_g$ 处)减小至0.978(距离 $4.0r_g$ 处)。在远-近场过渡区,归一化声压加速减小,由0.978(距离 $4.0r_g$ 处)减小至0.66(距离 $1.0r_g$

处)。在近场区归一化声压值急剧减小,归一化声压仿真值由0.66(距离 $1.0r_g$ 处)减小至0.058(距离 $0.45r_g$ 处),实测归一化声压值由0.66(距离 $1.0r_g$ 处)减小至0.14(距离 $0.45r_g$ 处)。距离2.2m($4.0r_g$)处声压较远场减小0.19 dB,距离0.55m($1.0r_g$)处声压较远场小3.60 dB。由图3可知,近场区内仿真归一化声压震荡减小,由于换能器阵、水听器均有一定的体积宽度、旋转半径,水池测试时两者无法无限接近,实测中最近处为0.15m(距离 $0.27r_g$),当距离继续减小,由0.25m(距离 $0.45r_g$)减小至0.15m($0.27r_g$)时,实测归一化声压稍有升高,与仿真结果吻合,趋势一致。

对比归一化声压分布最大旁瓣级仿真、实测结果如图8所示,实测与仿真结果变化趋势一致,远场区最大旁瓣级稳定,随着距离减小,最大旁瓣级缓慢增大,距离由6.45m($11.73r_g$)减至2.2m($4r_g$)时,仿真和实测的旁瓣级分别增大0.74、0.99 dB。

随着距离减小,距离由2.2m($4r_g$)减至1.1m($2r_g$),仿真和实测的最大旁瓣级快速增大2.23、1.26 dB。随着距离的进一步减小,最大旁瓣级急剧增大。距离由1.1m($2r_g$)减至0.4m($0.73r_g$)仿真最大旁瓣级急剧增大5.38 dB。距离由1.1m($2r_g$)减至0.6m($1.09r_g$),实测最大旁瓣级急剧增大3.39 dB。当仿真距离小于0.4m($0.73r_g$)、实测距离小于0.6m($1.09r_g$)时,声场分布复杂,无明显最大旁瓣级,故不进行数据对比。

由图7、8中的数据对比可以看出,实测和仿真数据趋势一致,但仍有上下波动。图7中仿真的最小归一化声压值为0.05,实测最小归一化声压值为0.14,距离小于0.32m($0.58r_g$)时,实测归一化声压大于仿真值。图8中距离小于2.6m($4.73r_g$)时实测最大旁瓣级略小于仿真值。

图9为特征距离指向性仿真与实测对比图,特征距离取2.1m($3.82r_g$)、0.5m($0.91r_g$)、0.2m($0.36r_g$),图中距离2.1m($3.82r_g$)处仿真和实测的指向性一致性较好。距离0.5m($0.91r_g$)较2.1m($3.82r_g$)处归一化声轴声压值小0.37 dB(仿真数据)、0.29 dB(实测数据),主瓣宽度增大、旁瓣增大,仿真和实测结果趋势一致。距离0.2m($0.36r_g$)处归一化声轴声压值进一步减小,无明显旁瓣,主瓣宽度进一步增大,仿真、实测结果的趋势一致。

实测与仿真出现差异的原因如下:

(1) 水池测试系统误差,系统存在时延,导致测试距离产生误差,随着距离减小,该误差影响愈明显;

(2) 仿真时考虑的为理想条件, 忽略阵元间的遮挡、互辐射以及障板效应, 与实际换能器有差异;

(3) 仿真时考虑每一个阵元到空间位置的距离, 而实测时将距离简化为换能器辐射面中心与空间位置间的距离, 两者存在差异。

4 结论

本文通过点源声波干涉原理, 推导多阵元均匀圆形活塞阵声压分布的归一化函数的表达式, 利用 Matlab 软件进行仿真分析, 并制备换能器进行水池声压分布测试, 对比分析仿真和实测数据, 数据趋势基本一致。因此, 通过本文中的理论推导和仿真分析, 验证了近远场声压分布的变化规律, 依此可指导实际测试工作。

参 考 文 献

- [1] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 326-331.
LUAN Guidong, ZHANG Jinduo, WANG Renqian. Piezoelectric transducer and transducer array[M]. Beijing: Peking University Press, 2005: 326-331.
- [2] 张明, 宋蕊, 江春雨. 典型活塞换能器声场分布及其指向性[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(5): 412-422.
ZHANG Ming, SONG Rui, JIANG Chunyu. Investigation on sound distribution and directivity of typical piston transducer[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 15(5): 412-422.
- [3] 周福洪. 水声换能器及基阵[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 235.
ZHOU Fuhong. Underwater acoustic transducer and array[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 235.
- [4] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2013: 148.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Acoustics foundation[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2013: 148.
- [5] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 372.
LUAN Guidong, ZHANG Jinduo, WANG Renqian. Piezoelectric transducer and transducer array[M]. Beijing: Peking University, 2005: 372.
- [6] 童晖, 张涛, 张彬, 等. 一款水声通信换能器研究[J]. 声学技术, 2017, 36(4): 390-393.
TONG Hui, ZHANG Tao, ZHANG Bin, et al. A study on underwater acoustic communication transducer[J]. Technical Acoustics, 2017, 36(4): 390-393.
- [7] 毕彦, 周益明, 童晖, 等. 准 1-3 复合型压电换能器的研制[J]. 声学技术, 2016, 31(3): 331-334.
BI Yan, ZHOU Yiming, TONG Hui, et al. The study of similitude 1-3 piezo-composites transducer[J]. Technical Acoustics, 2016, 31(3): 331-334.
- [8] 中华人民共和国国家标准. 声学水声换能器测量 GB/T7965-2002[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2002.
The People's Republic of China GB. Acoustics-measurement of underwater sound transducers[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2002.