

◇ 李启虎院士八十华诞学术论文 ◇

散射条件下声源分离及参数获取的平行障板方法*

莫喜平†

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 声呐系统或水声设备湿端不可避免存在某些散射体,克服散射体干扰对声源本身辐射特性进行测量目前还缺乏简捷有效的方法。依据刚性圆盘散射规律,通过有限元建模分析了与观察方向平行布置的刚性圆盘对声源辐射特性的影响规律,结果表明:在满足远场条件时,在较小的允许误差范围内观察轴线上声压幅值分布与引入平行障板无关。并在此基础上尝试提出一种简捷有效的平行障板方法,实现散射条件下声源分离与参数获取。通过有限元仿真分析,在 1 kHz ~ 20 kHz 频率范围内,半径 0.4 m、厚 8 mm 的钢板对脉动圆管声源级分离测量引入误差在 ± 0.6 dB 以内。

关键词 散射, 参数获取, 远场条件, 平行障板, 声源

中图法分类号: TB565

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)04-0525-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.008

Parallel-baffle method for separateness and parameters acquisition of a sound source under scattering condition

MO Xiping

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In underwater part of sonar system and sound device some scattering objects exist ineluctably, it is empty of a simple and efficient method for measurement radiation parameters of a sound source without disturbance from scattering objects. Based on the sound scattering theory of rigid disk, have been analyzed the effect of a parallel baffle to observed direction on radiation parameters of a sound source. The results are shown that: on the far-field condition, pressure amplitude distribution in observed direction is independent of the parallel baffle with a smaller admissible error. On that basis, we have attempted to develop a simple and efficient parallel-baffle method to separateness and parameters acquisition of a sound source under scattering condition. Radiation performances of a pulsating tube transducer and with a parallel baffle are comparatively simulation analyzed by finite element method with ANSYS software, which gives the results that the calculated error of source level of the pulsating tube transducer by using a parallel baffle (steel plant with thickness of 8 mm and radius of 0.4 m) in a frequency range from 1 kHz to 20 kHz was not exceed ± 0.6 dB.

Key words Scattering, Parameters acquisition, Far-field condition, Parallel baffle, Sound source

2019-02-15 收稿; 2019-05-07 定稿

*中国科学院声学研究所率先计划项目

作者简介: 莫喜平 (1966-), 男, 辽宁人, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 水声换能器。

† 通讯作者 E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn

0 引言

声源的测量是声学系统设计、应用、评价、考核等过程中的重要环节,在换能器设计制造过程中一般通过自由场条件进行测试计量。但在换能器安装到设备系统中以后,由于安装结构中存在复杂的散射体,对换能器的发射特性进行在线测量一直是工程应用中未能很好解决的一项技术难题。在声呐系统或水声设备中使声源完全没有散射体几乎不太可能,一般尽量设计在半空间内并且散射面尽可能小以减少对发射声场造成的影响。目前关于解决复杂声源测量的方法需要通过较大规模接收基阵来完成^[1],处理算法上包括声全息技术^[2-5]、波束形成技术^[5-6]、声强处理技术^[7]等。上述方法一般应用于未知声源或分布结构噪声的检测与识别,在处理存在散射体影响下声源标定测试问题时应用这些方法显得设备复杂、处理繁琐,并且精度又未必能够有效保证。针对现今尚无有效方法实现散射条件下声源的简便测量问题,设想可以介入加设专门的障板,“隔离”结构散射体的散射贡献,通过理论分析或实验技术使散射场已知或者可以分离。本文将依据刚性圆盘散射规律通过分析其对声源辐射特性的影响,尝试探索一种简捷的声源分离与参数获取的技术途径。

1 刚性圆盘散射作用对声源辐射声场的影响

1.1 理论分析

分析模型描述如下:考虑一个球形声源S与复杂散射体O共处同一空间,O的散射场与声源S的直接辐射声场无法通过脉冲技术进行分离,在S与O之间放置一半径为R的圆形障板U,隔离O的散射作用。假定S位于U的对称轴上,距U的反射面距离为 $D = d/2$,如图1所示,该模型将复杂散射体(可以是多个)散射问题转化成平行障板的散射问题。设声源S在关于U的对称位置形成一个虚源 S_1 ,观察点P与S的距离为r, S_1 至观察点P的连线与 SS_1 连线夹角为 θ 。

借用声压反射系数的定义,设声源S沿 θ 角方向的声压反射系数为 $\alpha(\theta)$,讨论声源S在与U平行的轴线上所建立的声场分布,P点的声压可以用下

式描述:

$$p(r) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} + \alpha(\theta) \frac{A}{\sqrt{d^2 + r^2}} e^{j(\omega t - k\sqrt{d^2 + r^2})}$$

声压幅值平方可以表述为

$$|p(r)|^2 = \frac{A^2}{r^2} \left\{ 1 + [\alpha(\theta)]^2 \sin^2 \theta + 2\alpha(\theta) \sin \theta \cdot \cos(k\sqrt{d^2 + r^2} - kr) \right\}, \quad (1)$$

其中, $\sin \theta = \frac{r}{\sqrt{d^2 + r^2}}$ 。

公式(1)描述声压的幅值在r较小的近场区间将呈现振荡分布,并且随着r的增大,声程差引入的相位差小于 $\pi/2$ 以后,声压的幅值逐渐平缓过渡至远场区,呈随r反比衰减规律。由图1可知 $\theta \leq \pi/2$,因此近场振荡分布主要贡献来源于S虚源 S_1 的声程差因子。

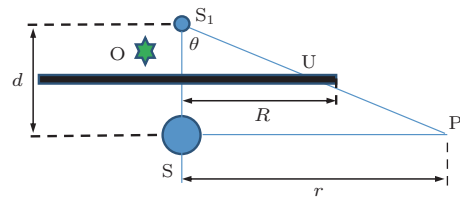


图1 刚性圆盘散射模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model for sound scattering of rigid disk

声压反射系数 $\alpha(\theta)$ 实际上是一个关于 θ 的分布函数,它代表刚性圆形障板U在 θ 角观察方向的散射本领,在讨论目标散射问题时,已经给出了圆盘散射声场分布的描述^[8-9], $\alpha(\theta)$ 分布函数包含 $\cos\theta$ 比例因子,因此在 $\theta \rightarrow \pi/2$ 的远场区域, $\alpha(\theta) \rightarrow 0$ 。于是公式(1)可以简化为

$$|p(r)|^2 = \frac{A^2}{r^2}. \quad (2)$$

公式(2)的含义是声源S在与观察轴线平行的圆形刚性障板散射作用下,在满足远场条件时,该轴线上声压幅值分布与引入的障板无关。

1.2 有限元建模分析

上述理论分析中,虽然假设S为球形声源,讨论的是某一观察方向上声压幅值随r的分布变化,所得结论应用将不限于球形声源,因为到达远场范围,有限尺度声源都具有随r反比衰减的球面扩散规律。在此不失一般性,选择圆管发射声源为研究对象,通过有限元建模分析加以验证。

声源为 $\phi 10 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ 的脉动圆管,以 y 为对称轴,几何中心与坐标原点重合,在其上方与 Ox 轴平行、距圆管几何中心 0.5 m 处放置直径为 0.8 m 的刚性薄板,圆管外表面径向脉动位移幅值为 $10 \mu\text{m}$,运用ANSYS有限元软件建模计算^[10],采用二维轴对称模型,分析 Ox 轴上声压幅值分布情况。由于模型比较简单,有限元模型图及建模过程在此从略,以下直接给出计算分析结果。

利用ANSYS软件的通用后处理的路径操作功能,取 Ox 轴上距坐标原点 $0.1 \sim 10 \text{ m}$ 范围内定义分析路径。由公式(2)可知,声源在远场区域声压幅值与距离 r 的乘积 $|p(r)r|$ 应该为一固定值(此处不考虑介质吸收衰减,数值上与距声中心 1 m 处等效声压值相等),因此为了清晰描述由近场至远场的声场变化规律,将场点声压幅值与距离 r 的乘积作为函数变量,研究 $|p(r)r| \sim r$ 的变化规律。图2分别给出 5000 Hz 、 8000 Hz 、 10000 Hz 频率下 $|p(r)r| \sim r$ 曲线。由图2给出的曲线可以看出,在近场区域呈现了明显的振荡行为,与公式(1)描述的规律相符合,并且随着频率增大,在距声源较近的区域振荡的周期数增多,近场区间范围变大,这也与声辐射基本规律相一致;随着 r 增大,所分析三个频率的 $|p(r)r| \sim r$ 曲线分别趋近于各自的定值,表明已经过渡到远场区域。

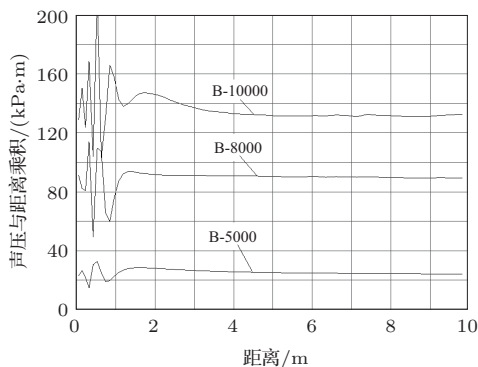


图2 加设平行障板的脉动圆管换能器 $|p(r)r| \sim r$ 曲线

Fig. 2 The curves of $|p(r)r| \sim r$ for a pulsating tube transducer with a parallel baffle

为了分析平行障板对声源远场辐射的影响,对比分析了上述模型圆管声源在不存在障板条件下的辐射声场情况,设置同样激发条件,分析的声场区间也是 Ox 轴上距坐标原点 $0.1 \sim 10 \text{ m}$ 范围,同样给出三个频率有障板和无障板条件下 $|p(r)r| \sim r$

曲线(如图3所示),曲线标识说明如下: B-8000代表障板条件下 8000 Hz 频率声源的 $|p(r)r| \sim r$ 曲线, N-8000代表无障板条件下 8000 Hz 频率声源的 $|p(r)r| \sim r$ 曲线。

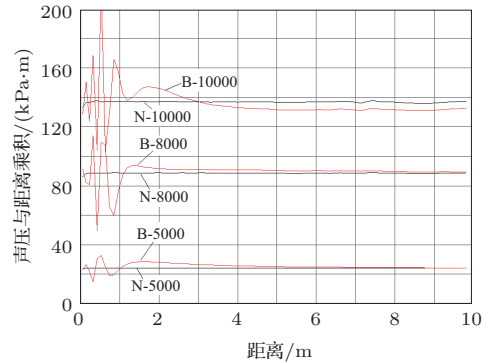


图3 脉动圆管换能器及加设平行障板情况的 $|p(r)r| \sim r$ 曲线

Fig. 3 The curves of $|p(r)r| \sim r$ for a pulsating tube transducer and with a parallel baffle

由图3结果可以看出, 10000 Hz 以下频率, $\phi 10 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ 的脉动圆管声源在距几何中心 0.5 m 处已经是远场范围了,增加平行障板后,远场临界点 r_d 处在较远的位置,并且随频率升高,远场临界点 r_d 将更远。图3曲线中, 10000 Hz 频率下圆管声源与平行障板条件下远场曲线存在一定差异性,这个偏差在 0.3 dB 以下,在声学测量中这样误差是允许的。因此上述结果表明:在满足远场条件时,声源平行障板条件下测得声压幅值与其独立发射时该场点声压幅值在误差允许范围内是相等的。

结合图1模型和上述分析结果,根据文献[8]的基本声学理论,给出以下远场基本条件:

$$r_d \geq R + 4 \frac{(D + L)^2}{\lambda}, \quad (3)$$

其中, R 为平行障板半径, D 为声源中心距障板反射面的垂直距离, L 为声源沿着与障板垂线方向的最大几何尺寸, λ 为声波波长。公式(3)给出的远场临界点,考虑了平行障板的横向尺度和系统的垂直孔径,既要求测试点位于障板外围区域,同时需要满足远场基本条件。

2 平行障板方法的设计与仿真研究

针对本文开始时提出的问题,假定某个声源上半空间处于复杂散射环境中,无法分离测量该声源

独立工作的发射性能,依据前面的分析结果,在此考虑设计一个圆形障板与观察方向平行放置,该障板的作用在于“隔离”上半空间的散射体,使散射声场均来自平行障板的贡献,于是可以通过确定远场区间,在远场范围直接测量获得声源独立工作的发射特性。

假定需要分离测量的仍然是 $\phi 10\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ 的脉动圆管声源,圆形障板采用厚度 8 mm 的钢板实现,半径 $R = 0.4\text{ m}$,声源距反射面距离 $D = 0.5\text{ m}$ 。障板边界条件采用两种处理方法:其一是在声源一侧的表面上施加法向位移为零的边界条件,此时障板的厚度已无意义,代表刚性障板,下文称这种情况为刚性障板;其二是障板边缘处设钳定边界条件,圆形平面内不施加任何位移边界约束,对应实际状况的边缘固定安装的弹性板散射情况,下文称这种情况为弹性障板。分析的频率范围为 $1\text{ kHz} \sim 20\text{ kHz}$,根据公式(3)计算得 $r_d \geq 9.5\text{ m}$,据此建立有限元模型,在 9.5 m 处提取声压值,用 $|p(r)r|$ 代替等效 1 m 处的声压值,并用声压级表示。图4给出有限元仿真分析结果曲线,PL-0代表脉动圆管声源独立工作时声压级曲线,PL-R代表脉动圆管声源加刚性平行障板工作时声压级曲线,PL-E代表脉动圆管声源加弹性平行障板工作时声压级曲线。

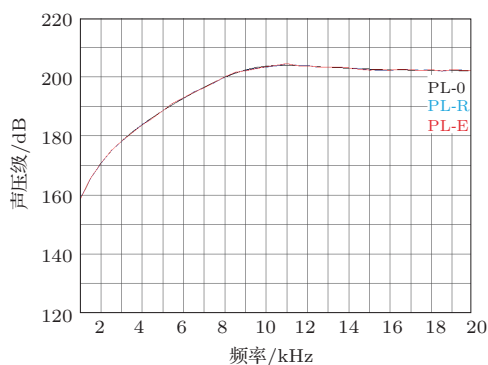


图4 脉动圆管换能器及加设刚性或弹性障板情况的声源级曲线

Fig. 4 The source level curves of a pulsating tube transducer and with a rigid or elastic baffle

图4中得到的三条曲线几乎重合。为了进一步讨论误差情况,通过与脉动圆管声源独立工作时声压级相比较,分别计算了两种障板条件下给出的声压级的偏差情况,计算结果见图5,其中DPL-R代表刚性平行障板应用时获取脉动圆管声源声压级

的误差频率分布曲线,DPL-E代表弹性平行障板应用时获取脉动圆管声源声压级的误差频率分布曲线。结果表明,在 $1\text{ kHz} \sim 20\text{ kHz}$ 频率范围内平行障板引入的误差不超过 $\pm 0.6\text{ dB}$ 。上述结果证明所设计的圆形平行障板在远场区域范围可以给出声源独立工作的辐射特性,仿真结果验证了弹性钢板与严格刚性约束条件下障板取得了相同的效果,这一结论对实际应用具有指导意义。

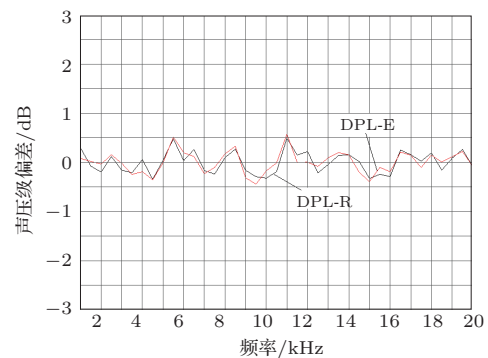


图5 脉动圆管换能器加设刚性或弹性障板情况的声源级计算误差

Fig. 5 The calculated error of source level of a pulsating tube transducer with a rigid or elastic baffle

3 结论与讨论

本文依据刚性圆盘散射理论,通过有限元建模分析了与观察方向平行布设的刚性圆盘对声源辐射特性的影响规律,得出“在满足远场条件时,观察轴线上声压幅值分布与引入平行障板无关”的结论,并在此基础上提出一种简捷的声源分离与参数获取方法——平行障板方法。通过有限元仿真分析,在 $1\text{ kHz} \sim 20\text{ kHz}$ 频率范围内,平行障板(半径 0.4 m 、厚 8 mm 的钢板)对脉动圆管声源级分离测量引入误差在 $\pm 0.6\text{ dB}$ 以内。展示了平行障板方法可有效隔离半空间结构散射体对声源测量的影响,在声源分离测量方面具有应用前景。在此对全文结果进行如下总结和延伸讨论:

(1) 本文是以声源测量为目的而引入平行障板隔离半空间有限散射体散射作用,障板对声场的影响是客观存在的,仅是如此处理对观察轴线上远场声压幅值分布影响在误差允许范围内可以忽略不计;

(2) 本文结论是经有限元仿真计算得出的,分

析的对象是脉动圆管声源与平行钢板组成的声辐射系统,并未建立其他实际散射体模型,在所分析频率范围内,算例的障板尺寸未必能对具体散射体散射作用实现有效“隔离”,实际应用中需根据散射体具体情况设计障板尺寸;

(3) 实际应用中由于无法与没有散射作用的情况相比较,确立远场临界点十分重要,公式(3)提供操作上的参考,建议沿轴线布置线阵或移动标准水听器,在估计的远场范围测量 $|p(r)r| \sim r$ 分布曲线,通过误差分析加以确认;

(4) 本文针对水声问题和对水声换能器建模分析得出了系列结果,研究方法和结论对空气声应用同样具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 俞孟萨, 庞业珍. 舰船辐射声场及声源特性测量方法研究综述[J]. 船舶力学, 2017, 21(1): 107-126.
Yu Mengsa, Pang Yezhen. A review of measurement methods of radiation acoustic field and acoustic source characteristics for ships[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(1): 107-126.
- [2] 何祚镛, 何元安, 王曼. 近场声全息技术应用有关物理问题研究[J]. 声学学报, 2007, 32(2): 137-143.
He Zuoyong, He Yuanan, Wang Man. The investigation on the physical acoustics problems of the NAH technique and its application[J]. Acta Acustica, 2007, 32(2): 137-143.
- [3] 王健, 陈克安, 王岩. 基于近场声全息的圆柱壳体内部声场重构效果的影响因素[J]. 应用声学, 2009, 28(1): 66-70.
Wang Jian, Chen Kean, Wang Yan. Factors affecting sound field reconstruction within a cylindrical cavity based on nearfield acoustic holography[J]. Applied Acoustics, 2009, 28(1): 66-70.
- [4] 毕传兴, 张永斌, 徐亮, 等. 基于声压-振速测量的平面近场声全息实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(2): 1108-1115.
Bi Chuanxing, Zhang Yongbin, Xu Liang, et al. An experimental investigation of planar near field acoustic holography using pressure and particle velocity measurements[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 1108-1115.
- [5] 李加庆, 陈进, 杨超, 等. 基于波束形成和波叠加法的复合声全息技术[J]. 声学学报, 2008, 33(2): 152-158.
Li Jiaqing, Chen Jin, Yang Chao, et al. A hybrid acoustic holography technique based on beamforming and wave superposition algorithm[J]. Acta Acustica, 2008, 33(2): 152-158.
- [6] 惠娟, 胡丹, 惠俊英, 等. 聚焦波束形成声图测量原理研究[J]. 声学学报, 2007, 32(4): 356-361.
Hui Juan, Hu Dan, Hui Junying, et al. Researches on the measurement of distribution image of radiated noise using focused beamforming[J]. Acta Acustica, 2007, 32(4): 356-361.
- [7] 何元安, 何祚镛, 姜军. 基于声强测量的近场声全息及其在水下声源声辐射分析中的应用[J]. 声学学报, 1996, 21(4): 297-305.
He Yuanan, He Zuoyong, Jiang Jun. Nearfield acoustic holography based on intensity measurement and application in radiating analysis of underwater sound sources[J]. Acta Acustica, 1996, 21(4): 297-305.
- [8] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 315-328.
- [9] 汤渭霖, 范军, 马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 60-69.
- [10] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1279-1290.
Mo Xiping. Simulation and analysis of acoustics transducers using the ANSYS software[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1279-1290.