

# 刚性曲面障板散射对多模球形水听器测向的影响

侯玉敏, 毛卫宁

(东南大学无线电工程系, 南京 210096)

**摘要:**文章将板块元法应用于收-发分置时近场散射声场的计算,讨论了存在刚性曲面障板时障板散射对多模球形水听器测向的影响。研究表明,刚性曲面障板会使水听器在某些方位出现较大的测向误差,此时目标信号频率和俯仰角变化也会对测向产生较大的影响。存在刚性曲面障板时,等效声中心不对称对测向误差的影响较小,而等效声中心不共面对测向误差的影响要比不对称时明显得多。

**关键词:**多模球形水听器;板块元法;曲面障板;散射;测向

中图分类号:TB559

文献标识码:A

文章编号:1000-3630(2005)02-0094-04

## Effect of acoustic scattering from curved rigid surfaces on direction-finding of multimode spherical hydrophone

HOU Yu-min, MAO Wei-ning

(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The near field of acoustic scattering from curved rigid surfaces can be calculated using the planar element method with the transmitter and receiver placed separately. The effect of scattering on direction-finding of multimode spherical hydrophones is discussed. The results indicate that scattering from curved rigid surfaces can cause large errors in some azimuths, meanwhile changes in frequency and elevation of the incident plane acoustic waves also have large influence on direction-finding. The influence of non-coplanarity of equivalent acoustic centers upon direction finding is greater than that due to asymmetry when curved rigid surfaces exist.

**Key words:** multimode spherical hydrophone; planar elements method; curved surfaces; scattering; direction-finding.

## 1 引 言

多模球形水听器<sup>[1]</sup>是一种体积小、工作频带宽的压差式矢量水听器,其四个等效基元的输出可构成两路差路信号,分别具有  $\sin\theta$  和  $\cos\theta$  的正交偶极子指向性,且其指向性在一定条件下与入射信号的频率无关,因此利用差路信号可实现对不同频率的目标信号的测向。实际应用中,安装多模水听器的测量平台作为障板会对入射声信号产生散射,影响多模水听器的测向性能。文献[2]研究了平面障板对多模水听器测向性能的影响,而对于曲面障板的研究更有实际意义。

研究障板散射对多模球形水听器测向性能的影响,关键是计算障板的散射声场,由于实际障板的形状和结构复杂,因而其散射对水听器测向的影响要比平面障板<sup>[2]</sup>复杂得多。散射声场的严格理论解有积分方程方法和分离变量法等,而实际应用中遇到的障板形状复杂,一般无法求得其散射声场的严格理论解,因此需从近似解法和数值解法中选择有效的方法,如有限元/边界元方法、T 矩阵方法<sup>[3]</sup>、Kirchhoff 近似方法等。其中 Kirchhoff 近似方法是最常用的方法:如果目标的尺寸比声波波长大很多,其曲率半径也比波长大很多,则可以认为在目标表面上声压和振动速度的比值近似象平面波一样为常数,这样 Helmholtz-Kirchhoff 积分方程被简化为一个面积分,使计算得到极大的简化,Kirchhoff 近似是一种高频近似,对复杂形状的障板可以利用数值积分方法得到散射声场解。实际应用中如果直

接用数值积分法计算散射声场的面积分,当障板较大、声波波长较小时,划分网格数目大,计算速度很慢。为了提高数值积分的计算速度,我们将用板块元法计算数值积分,用一组平面板块元近似障板曲面,把散射声场的积分运算转化为代数运算,可以大大提高计算速度。文献[4]用板块元法计算了收-发合置时椭圆锥台的目标强度,结果显示板块元法在具有较高精度的条件下具有更快的计算速度。

本文将板块元法应用于发射声源位于远场、水听器位于曲面障板附近时即收-发分置时的近场散射声场的计算,讨论了刚性曲面障板散射对多模球形水听器测向的影响,目标信号频率和俯仰角变化对测向的影响,以及水听器等效声中心不对称不共面对测向的影响。

## 2 基于板块元法的近场散射声场的计算

Kirchhoff 公式给出绝对硬物体表面散射声场<sup>[5]</sup>:

$$\phi_s = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[ \phi_s \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{ikr}}{r} \right) - \frac{e^{ikr}}{r} \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] dS \quad (1)$$

其中,  $S$  是物体的外表面,  $n$  是外法线,  $r$  是接收点到面元  $dS$  的距离。

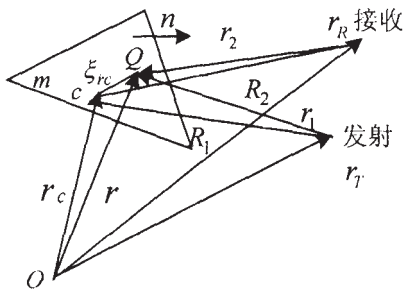


图 1 板块散射示意图  
Fig.1 Scattering of planar

对于近场问题,可以这样处理<sup>[6]</sup>:虽然对于物体整体而言,发射和接收换能器处于近场,但若把物体表面划分为足够小的小板块,则相对于每一个小板块,发射和接收换能器处在远场,总的散射声场是这些小板块散射声场之和。图 1 为板块散射示意图,  $O$  点是坐标原点,一般取为目标中心,  $m$  是小板块的序号,  $n$  是小板块的单位外法线矢量,  $c$  是在小板块上选取的参考点,矢径为  $r_c$ ,  $Q$  点是小板块上任意点,矢径为  $r$ ,  $\xi_{rc} = r - r_c$ , 发射、接收换能器的矢径分别为  $r_T, r_R, R_1 = r_T - r_c, R_2 = r_R - r_c, R_{10}, R_{20}$  为  $R_1, R_2$  的

矢量。这样收-发分置时绝对硬物体表面散射声场的 Kirchhoff 近似公式可以简化为:

$$\phi_{sm} = -\frac{A}{4\pi} \frac{e^{ik(R_1+R_2)}}{R_1 R_2} \int_S \left\{ \frac{ikR_1-1}{R_1} n \cdot R_{10} + \frac{ikR_2-1}{R_2} n \cdot R_{20} \right\} e^{ik(R_{10}+R_{20}) \cdot \xi_{rc}} dS \quad (2)$$

公式(2)可以用板块元法<sup>[4]</sup>来计算。

将各个板块元的散射声场叠加合成整个物体表面的散射场:

$$\phi_s = \sum_{m=1}^N \phi_{sm} \quad (3)$$

其中,  $N$  是物体表面能够被入射声线和散射声线同时照射到的板块数,它们满足:

$$n \cdot R_{10} \geq 0, n \cdot R_{20} \geq 0 \quad (4)$$

## 3 算法验证

收-发合置时刚性球近场散射的 Kirchhoff 近似解析解公式为<sup>[6]</sup>:

$$\phi_s = -\int_0^{\theta_m} e^{2ikr} \left( \frac{ikr-1}{r^3} \right) \cos\Theta a^2 \sin\theta d\theta$$

$$\cos\Theta = \frac{r_0 \cos\theta - a}{\sqrt{r_0^2 + a^2 - 2ar_0 \cos\theta}}$$

$$\theta_m = \cos^{-1}(a/r_0) \quad (5)$$

其中  $a$  为球的半径,  $r_0$  为发射接收点  $S$  到球心的距离,  $r$  是  $S$  点与球面上面元间的距离,  $\theta$  是球坐标系的极角,  $\Theta$  是面元的法线与入射声线的夹角,  $a=1\text{m}, r_0=20\text{m}$ 。用数值积分法和板块元法计算刚性球散射声场随声波频率的变化,结果见图 2。

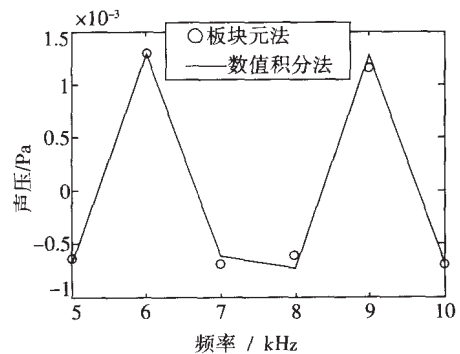


图 2 刚性球的散射声场。

Fig.2 Scattering field of a rigid sphere

再计算收-发分置时  $2\text{m} \times 2\text{m}$  刚性平面的近场散射,发射器处于远场,接收器与障板距离为  $1\text{m}$ ,声波频率为  $20\text{kHz}$ 。计算结果见图 3,从图中可以看出板块元法和数值积分法的计算结果很吻合,板块元法的计算时间约为数值积分法的  $1/10$ 。

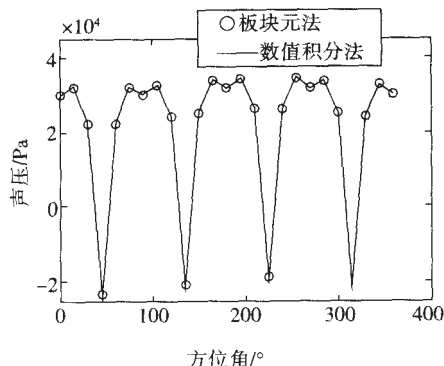


图3 刚性平面的散射声场  
Fig.3 Scattering field of a rigid plane

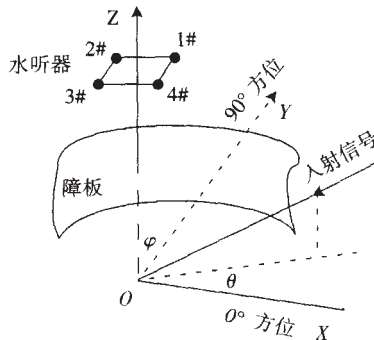


图4 曲面障板示意图  
Fig.4 Curved baffle

### 4 刚性曲面障板散射对多模球形水听器测向的影响

多模球形水听器的球表面被分成若干个扇区，每个扇区相当于一个独立的水听器基元，有一个等效声中心，两相邻等效声中心间的距离  $2d$  很小，满足  $kd \ll 1$  的条件， $k$  为波数。每个基元有一个输出，可以将四个输出组合成两路差路信号，实现对目标信号的测向<sup>[1,2]</sup>。存在障板后，水听器的输出是入射声压和散射声压的合成。

应用板块元法计算曲面障板的散射声场前，首先需对整个障板曲面建模，然后在曲面上划分小板块，得到各小板块的顶点坐标。在划分小板块时，既要考虑到板块要划分得足够小以满足近场计算条件，同时也要考虑到板块数的增多会增加计算量。目前对小板块尺寸的确定尚无成熟的判据，本文采用在给定参数下取不同的板块数进行计算，当得到的数值解不再随板块数的增加而明显变化时，认为此时所取的板块数可以保证数值解收敛于真实值附近。

图4为曲面障板示意图，1#~4#是水听器的四个等效声中心，假设它们严格对称且位于同一平面。入射信号俯仰角为  $\varphi$ ，方位角为  $\theta$ 。考虑到曲面障板的对称性，本文只计算了  $0^\circ \sim 180^\circ$  内的测向误差变化。

图5、图6是入射信号俯仰角为  $89.5^\circ$ ，入射信号频率分别为中、高频时刚性曲面障板散射对水听器测向的影响。从图中可看出，在  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  方位处几乎没有测向误差，在正前方  $0^\circ$  方位附近测向误差比较小，在其它方位，特别是  $90^\circ$  方位附近则有明显的测向误差，图5、图6中最大误差值分别达到了  $6^\circ$  和

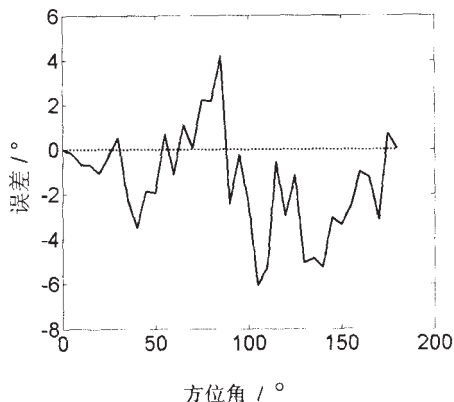


图5 中频时刚性曲面障板散射对测向的影响  
Fig.5 Influence of a curved rigid baffle on direction finding, with the frequency of incident wave being intermediate

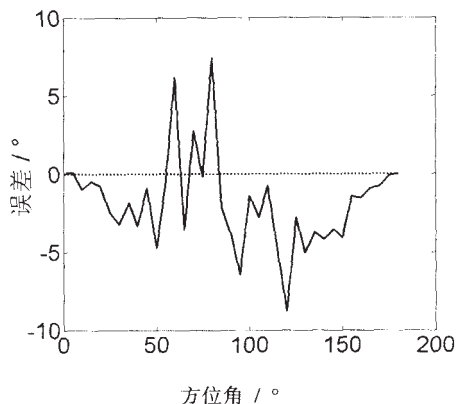


图6 高频时刚性曲面障板散射对测向的影响  
Fig.6 Influence of a curved rigid baffle on direction finding, with the frequency of incident wave being high.

$9^\circ$ 左右。可见，刚性曲面障板的散射对水听器测向有较大影响。

### 5 入射信号频率和俯仰角变化对测向的影响

从图5、图6中知  $90^\circ$  方位附近有明显的测向误差，所以计算时目标方位取  $130^\circ$ ，俯仰角为  $88^\circ$ ，

频率变化对多模球形水听器测向的影响见图 7。从图中可看出,此时频率变化对测向精度有很大影响,最大误差达到  $11^\circ$  左右。入射信号俯仰角变化对系统测向的影响见图 8,俯仰角变化范围为  $60^\circ \sim 90^\circ$ ,从图中可看出,此时俯仰角变化对测向精度的影响也很大,最大误差在  $12^\circ$  左右。

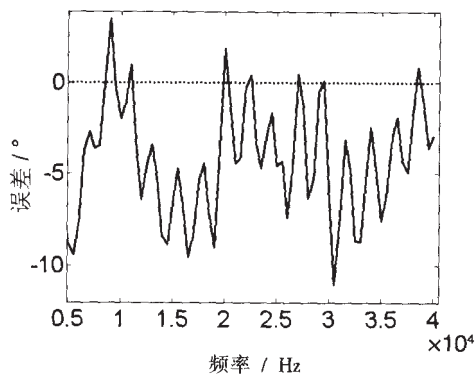


图 7 信号频率变化对测向的影响

Fig.7 Influence of frequency change on direction finding

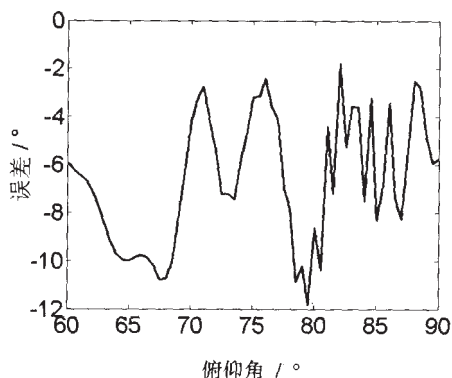


图 8 信号俯仰角变化对测向的影响

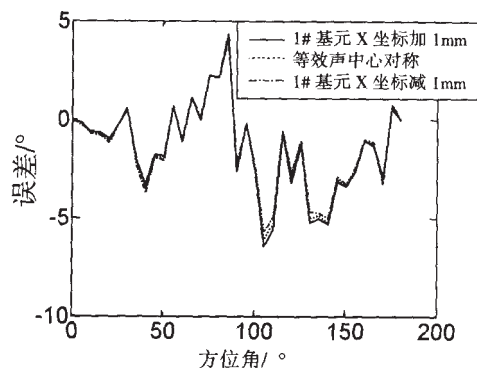
Fig.8 Influence of elevation angle on direction finding

### 6 等效声中心不对称不共面对测向的影响

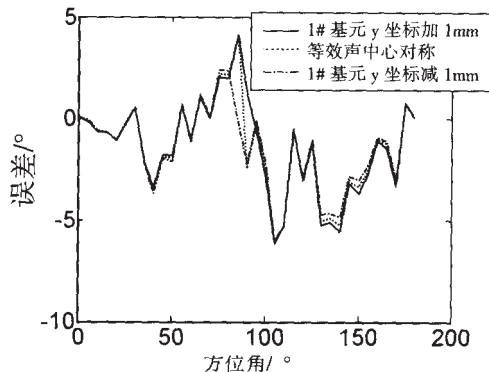
如图 4 所示,等效声中心在曲面障板的长和宽方向(即  $x, y$  方向)产生偏移时,将不对称;在水听器与曲面障板的距离方向(即  $z$  方向)产生偏移时,等效声中心将不共面。存在曲面障板时,等效声中心不对称对测向误差的影响较小,见图 9(a)、(b);而不共面时,同样大小的偏移可对测向产生明显影响,见图 9(c)。图中主要讨论 1# 基元等效声中心偏移所产生的影响,其它三个基元的影响类似。因此等效声中心不共面对水听器测向的影响要比等效声中心不对称时大得多。

### 7 结论

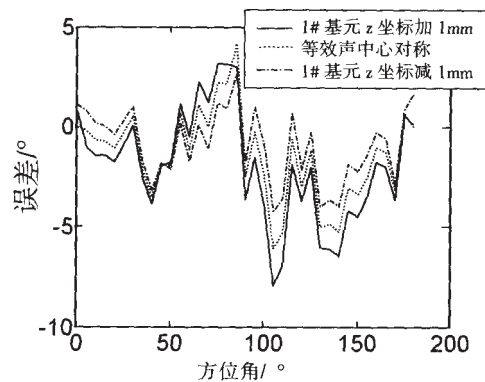
刚性曲面障板散射会使多模球形水听器在某些方位出现较大的测向误差,此时目标信号频率和俯仰角变化对测向也会产生较大影响,等效声中心不对称对测向误差的影响较小,而等效声中心不共面时的影响较大。因此,为减小因不共面而引起的测向误差,在制造和安装多模球形水听器时,要尽量使四个等效声中心处于同一平面高度。



(a) 等效声中心在曲面长度方向不对称



(b) 等效声中心在曲面宽度方向不对称



(c) 等效声中心不共面

图 9 等效声中心不对称不共面对测向的影响

Fig.9 Influence of asymmetry and non-coplanarity upon direction finding

有助于结构声源的简化描述的研究。作者将会在后续的文章中陈述。

值得一提的是即便一个严格服从正态分布的随机量,用公式(2)和(3)计算得到的 $\hat{\sigma}_x$ 和 $\hat{\sigma}_x'$ 也是有区别的,这是因为它们本身都是估计值。

虽然本文只是考虑振动方向是一维的情况,但处理方法同样可以推广到三维的情况,不过这时对四个点而言,导纳矩阵是一个 $12 \times 12$ 的矩阵,考虑到互易性矩阵是对称的,即有78个元素是独立的。因此公式(3)也不能直接使用,而先要进行分组,关于这方面的细节可参见文献[7]。

### 参 考 文 献

- [1] Petersson BAT, Plunt J. On effective mobilities in the prediction of structure-borne sound transmission between a source structure and a receiving structure. Part1: theoretical background and basic experimental studies[J]. J Sound and Vib, 1982, **82**(4):531-540.
- [2] Pinnington RJ, Pearce DCR. Multipole expansion of the

vibration transmission between a source and a receiver [J]. J. Sound and Vib.,1990,**142**(3):461-479.

- [3] Pinnington R.J. Fulford RA, Terry M. The use of polar mobilities for predicting the coupled response of machine mounting systems[C]. Inter-Noise96, 1996.1587-1592.
- [4] Moorhouse AT. On the Characteristic power of structure-borne sound source [J]. J Sound and Vib, 2001, **248**(3):441-459.
- [5] Fulford RA., Gibbs BM. Structure-borne sound power and source characterisation in multi-point connected systems. Part 3: Force ratio estimates [J]. J Sound and Vib, 1999, **225**(2):239-282.
- [6] Squires GL. Practical Physics [M].Cambridge University, 1985.1-50.
- [7] 浙江大学数学系高等数学教研室编. 概率论与数理统计. 高等教育出版社,1979. 228-256.
- Advanced Mathematics Unit Department of Mathematics Zhejiang University, Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. Higher Education Press ,1979. 228-256.

(上接第 97 页)

### 参 考 文 献

- [1] Sung-Hwan Ko, Brigham G A, Butler J L. Multimode spherical hydrophone [J]. J Acoust Soc Am, 1974, **56**(6): 1890-1898.
- [2] 毛卫宁. 平面障板对多模水听器测向性能的影响[J]. 声学技术, 2001, **20**(增刊): 180-182.
- MAO Weining. The effect of acoustic scattering from plane baffle on direction-finding of the multimode hydrophone [J]. Technical Acoustics, 2001, **20**(suppl.): 180-182.
- [3] Waterman PC. New formulation of acoustic scattering [J]. J Acoust Soc Am, 1969, **45**(4): 1417-1429.
- [4] 范军, 汤渭霖. 声呐目标强度(TS)计算的板块元方法[J]. 声学技术, 1999, **18**(增刊): 31-32.
- FAN Jun, TANG Weilin. The planar element method for computing target strength(TS) of sonar [J]. Technical Acoustics, 1999, **18**(suppl.): 31-32.
- [5] 沈杰罗夫著, 何祚镛, 赵晋英译. 水声学波动问题[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981. 12-56.
- N3 II aTEπbcTBO, translated by He zuo-yony and Zhao

ji ying. The Underwater Acoustic Wave [M]. Beijing: National Defense and Technology Press, 1981. 12-56.

- [6] 李建鲁, 范军, 汤渭霖. 水下简单形状目标回声的近远场过渡特性[J]. 上海交通大学学报, 2001, **35**(12):1846-1850.
- LI Jianlu, FAN Jun, TANG Weilin. Transition from near field to far field of echoes from underwater target with simple shape [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, **35**(12):1846-1850.
- [7] 范军, 李建鲁, 刘涛, 汤渭霖. 水下复杂形状目标回声的过渡特性[J]. 上海交通大学学报, 2002, **36**(2): 161-164.
- FAN Jun, LI Jianlu, LIU Tao, TANG Weilin. Transition Characteristics of echoes from complex shape underwater target [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, **36**(2):161-164.
- [8] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.50-85.
- HE Zuoyong, ZHAO Yufang. Foundation of Acoustic Theory [M]. Beijing: National Defense and Technology Press, 1981. 50-85.