

# 不平整水面的镜向声反射

威 诒 让 路 德 明 徐 烈 忠  
卫 孝 泉 李 江 吉 王 梅 芬  
(山东海洋学院, 青岛)

**提要** 研究了在室内风动水槽内, 声波在不平整水面上的镜向反射。不平整水面的波面坐标概率分布不同程度地偏离于高斯分布。测量结果与用高斯概率密度函数及 Gram-Charlier 级数所得的结果进行了比较。

不平整水面对声波的反射特征, 决定于表面起伏的概率分布。Eckart<sup>[1,4]</sup> 用不平整表面的概率密度函数计算了平均反射声压, 他假设概率密度函数是高斯型的。但高斯型概率密度函数对风动水面仅为近似描述<sup>[6]</sup>。Clay, Medwin 及 Wright<sup>[3]</sup> 在水槽中进行了模拟海面的实验。他们用塑料布在水面上做成一个高约 15.2cm 的风道, 并用风扇驱动, 产生波浪。他们的工作表明, 平均反射声压对概率密度函数很敏感, 概率密度函数的形式对高斯函数的微小偏离, 将明显影响反射声压。

我们就风动水面对声波的反射问题进行了研究, 并据实验测得的平均反射声压, 预测了水面起伏的标准差。

## 一、实验方法

实验是在本院动力实验室风动水槽内进行的。水槽长 120m, 宽 2m。改变风机转速, 可产生不同风速, 从而获得不同的水面状况。为消除水槽两端的反射波浪, 在两端安放了消波材料。在进行声测量的区域内, 槽两侧及底部均覆盖橡胶尖劈吸声材料。测量区总长约 5m, 用高为 0.5m 的挡板把该区域横隔成声发射区与接收区两部分。挡板上也覆盖橡胶尖劈, 从而有效地消除了直达声波的干扰。测量时, 水深保持在 0.75m 左右, 挡板顶部离水面约 0.25m。水面声照射区位于挡板上方测量区中间。图 1 为测量区的照片。

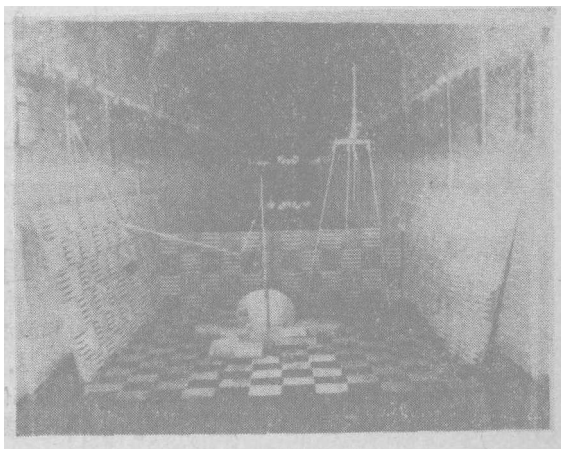


图 1 测量区域

注: 本工作是在杨有樊教授的支持下进行的。在测量波浪时, 本院物理海洋系高慎月同志给予热情帮助, 谨致深切谢意。

收稿日期: 1984 年 4 月 28 日。

声发射器由发射换能器和反射罩两部分组成。换能元件是一个用 PZT-5 材料制成的圆环,其外径 20mm,内径为 10mm。把圆环放在有机玻璃外壳中,内充有机硅油。直角锥式双层反射罩是用 2mm 厚的铝板制成,两层铝板间是空气,开口直径 250mm,换能器置于直角锥的对称轴上。声发射器的方向特性锐度角约为  $12^\circ$ 。电激励信号为单频填充脉冲信号,脉冲宽度为 0.5ms,重复频率为 20Hz,填充信号频率变化范围为 30—170kHz。

声接收器是一个外径为 10mm 的空心球形水听器。测量时,应调整水听器位置,使其能接收到的平整水面反射信号最大。当掠角为  $30^\circ$  及  $45^\circ$  时,水听器与发射器之间的距离分别为 2.4m 和 1.5m。接收信号用示波器直接观察,并用照相记录。平整水面和不平整水面声反射信号的一个例子示于图 2。

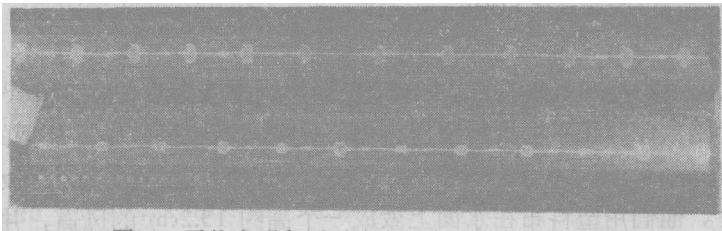


图 2 平整水面和不平整水面声反射信号照片  
掠角  $30^\circ$ , 填充信号频率 100kHz。上方为平整水面的反射信号;下方为不平整水面的反射信号(水面起伏标准差  $\sigma = 5\text{mm}$ )

用钽电容波高仪测量水面起伏,测量精度可达  $\pm 0.3\text{mm}$ ,测量探头位于水面声照射区附近 20cm 处。用改变水面高度逐步浸没探头的方法,对测量系统进行校正。声信号和水波信号同时记录,每次记录时间约 1 分钟。在水波记录曲线上,以 0.025 秒的间隔取样,读出波面坐标值,然后用计算机进行处理。图 3 为测量系统框图。

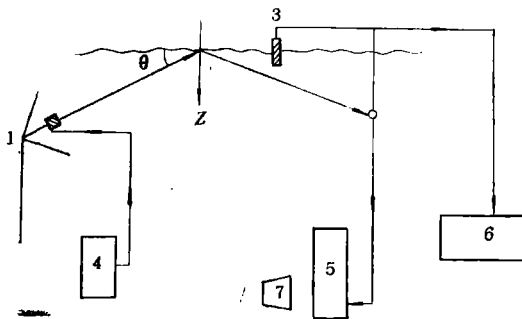


图 3 声信号和波浪测量系统框图  
1. 声发射器; 2. 水听器; 3. 波高仪探头; 4. 发射机;  
5. 示波器; 6. 波高仪; 7. 照相系统  
(图中○为 2)

## 二、测量结果与讨论

### 1. 波浪测量

根据波面坐标数据,计算了标准差  $\sigma$ 、偏倚系数  $C_s$  和峰凸系数  $C_E^{[2]}$ 。

$$\sigma = N^{-\frac{1}{2}} \left[ \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$C_S = N^{\frac{1}{2}} \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^3}{\left[ \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2 \right]^{3/2}} \quad (2)$$

$$C_E = N \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^4}{\left[ \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2 \right]^2} \quad (3)$$

其中  $N$  为数据量, 且  $N > 1600$ ;  $Z_i$  为波面坐标读数,  $Z_i$  向下为正 (见图 3)。 $\bar{Z}$  为平均水面位置。图 4a 为波浪记录曲线的例子, 图 4b 为相应的波面坐标概率分布, 实验点是波高仪测得的结果, 图中还画出了高斯概率分布曲线。由图可见, 实际的波面坐标概率分布对高斯曲线有明显差别。前者的峰值在  $Z/\sigma = 0.5$  附近。

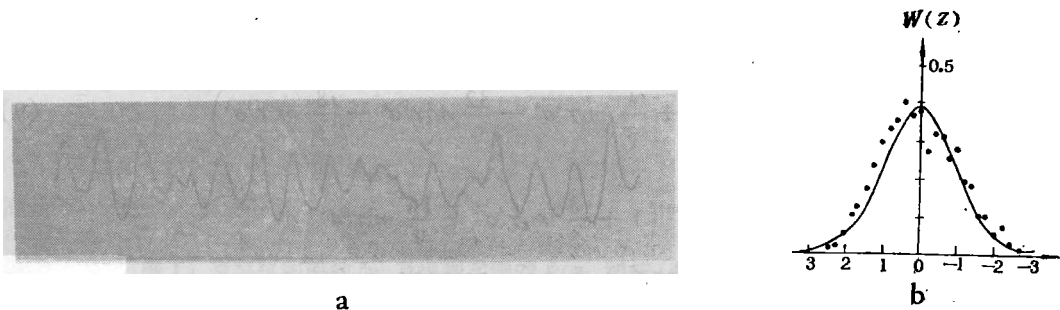


图 4 波浪记录曲线例子及其相应的波面坐标概率分布

a. 波浪记录曲线; b. 波面坐标概率分布。

...为波高仪测量结果, 测量条件:  $\sigma = 0.44\text{cm}$ ,  $C_S = 0.24$ ,  $C_E = 2.6$ ; ——高斯概率分布曲线, 对高斯分布:  $C_S = 0$ ,  $C_E = 3$

## 2. 声信号测量

根据相同条件下不平整水面和平整水面声反射信号的示波器照片, 计算了不平整水面平均反射声压幅值  $\bar{p}$  和平整水面反射声压幅值  $p_0$  之比。  $\ln(\bar{p}/p_0)$  和  $2(r\sigma)^2$  的关系如图 5 和图 6 所示, 其中  $r = k \sin \theta$ ;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\theta$  为掠射角;  $\lambda$  为声波波长, 并取声速为  $1500\text{m/s}$ 。在不同频率下进行测量时, 由于很难把水面状况控制得完全相同, 因此对每一种频率均记录相应的波浪曲线, 求得相应的  $\sigma$  值。在  $r\sigma < 1$  的范围内, 实验结果可近似地用直线段表示:

$$\ln(\bar{p}/p_0) = -2A(r\sigma)^2 \quad (4)$$

其中  $A = 0.34$ 。

根据 Eckart 理论<sup>[4]</sup>

$$\bar{p} = p_0 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2irZ) W(Z) dZ \quad (5)$$

其中  $W(Z)$  为随机表面的概率密度函数;  $\gamma = k \sin \theta$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\theta$  为掠射角,  $\lambda$  为声波波长。对高斯型表面,

$$W(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

把(6)式代入(5)式,得

$$\ln(\bar{p}/p_0) = -2(\gamma\sigma)^2$$

在图5和图6中,(7)式以虚线表示。

Huang 和 Long 指出<sup>[5]</sup>, 随机表面的概率密度函数可用 Gram-Charlier 级数的前四项表示:

$$W(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \left(1 + \frac{1}{3} m_3 H_3 + \frac{1}{12} m_4 H_4 + \frac{1}{18} m_3^2 H_6\right) \quad (8)$$

其中  $m_3 = C_s/2$ ;  $m_4 = (C_E - 3)/2$ 。而  $H_n$  为厄密多项式:

$$H_3 = t^3 - 3t; \quad H_4 = t^4 - 6t^2 + 3;$$

$$H_6 = t^6 - 15t^4 + 45t^2 - 15。$$

其中  $t = Z/\sigma$ 。

把(8)式代入(4)式,得

$$\frac{\bar{p}}{p_0} = e^{-2\gamma^2\sigma^2} \left(1 + \frac{4}{3} m_4 \gamma^4 \sigma^4 - \frac{32}{9} m_3^2 \gamma^6 \sigma^6 - \frac{8}{3} m_3 \gamma^3 \sigma^3\right) \quad (9)$$

其幅值比为

$$\begin{aligned} \frac{|\bar{p}|}{p_0} = e^{-2\gamma^2\sigma^2} & \left(1 + \frac{8}{3} m_4 \gamma^4 \sigma^4 + \frac{16}{9} m_4^2 \gamma^8 \sigma^8 \right. \\ & \left. - \frac{256}{27} m_4 m_3^2 \gamma^{10} \sigma^{10} + \frac{1024}{81} m_3^4 \gamma^{12} \sigma^{12}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

在图5和6中也给出了按(10)式计算的结果,其中  $\sigma$ ,  $C_s$  和  $C_E$  取自表1。

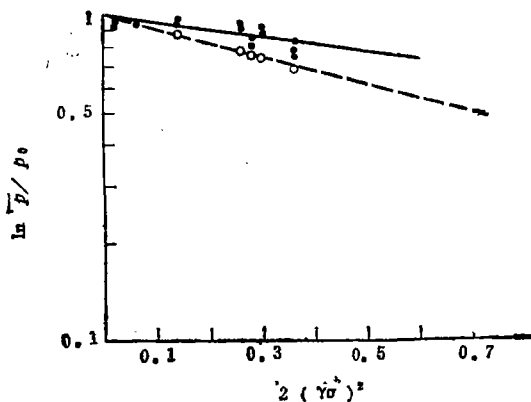


图5 掠角为  $30^\circ$  时,  $\ln(\bar{p}/p_0)$  和  $2(\gamma\sigma)^2$  的关系  
 .....为实验结果,每一实验点为约100个数据的平均值; ----代表(7)式;.....是按(10)式计算的结果;  $\gamma = k \sin \theta$  (其中  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\theta$  为掠射角;  $\lambda$  为声波波长)

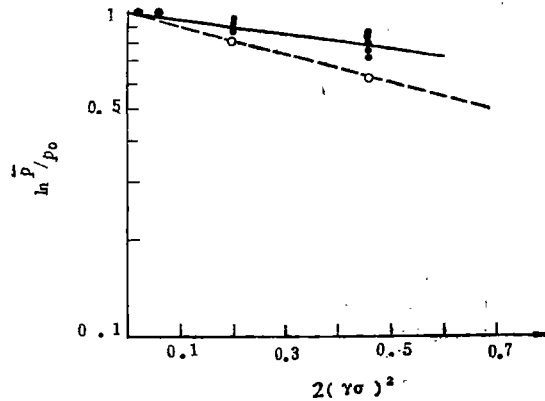


图6 掠角为  $45^\circ$  时,  $\ln(\bar{p}/p_0)$  和  $2(r\sigma)^2$  的关系  
(图例与图5相同)

由图5和6可见,不平整水面反射声压的理论值比实测值小。这主要是由于波面坐标概率分布偏离高斯分布。下面还可以看到,按高斯概率密度函数算得的  $\sigma_{高}$  小于波高仪测得的  $\sigma_{波}$ 。

### 3. 对 $\sigma$ 的预测

根据  $r\sigma < 1$  范围内  $\ln(\bar{p}/p_0)$  和  $2(r\sigma)$  的关系,可用声学方法测量水面起伏的标准差。表1中给出了用实验测得的反射声压和按(4)式和(7)式算得的  $\sigma$  和  $\sigma_{高}$ ,并与波高仪测得的  $\sigma_{波}$  进行了比较。

表1 波高仪测得的  $\sigma_{波}$  及根据实测的  $\bar{p}/p_0$  和按(4)、(7)式算得的  $\sigma$  和  $\sigma_{高}$

掠角 $\theta$	声波频率 $f(\text{KHz})$	$r$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\frac{\bar{p}}{p_0}$	$\sigma_{波}$ ( $\text{cm}$ )	$\sigma$ ( $\text{cm}$ )	$\sigma_{高}$ ( $\text{cm}$ )	$C_S$	$C_E$
$30^\circ$	133	2.9	0.59	0.41	0.30	0.18	0.32	2.9
	111	2.3	0.53	0.49	0.42	0.24	0.40	2.9
	100	3.1	0.51	0.49	0.47	0.28	0.41	2.9
	74	1.6	0.63	0.45	0.51	0.30	0.29	2.8
	50	1.1	0.89	0.44	0.38	0.22	0.24	2.6
	41	0.9	0.84	0.43	0.55	0.32	0.19	2.8
$45^\circ$	111	3.2	0.60	0.32	0.27	0.16	0.12	2.8
	100	3.0	0.67	0.29	0.26	0.15	0.06	2.9
	75	2.2	0.55	0.35	0.43	0.25	0.07	2.8
	38	1.1	0.92	0.37	0.31	0.18	0.04	2.6

由表1可见,在高斯型概率密度函数的假设下所算得的  $\sigma_{高}$  一般对  $\sigma_{波}$  的偏离较大,而用声学方法测得的  $\sigma$  与  $\sigma_{波}$  比较接近。

## 三、结 论

1. 不平整水面的波面坐标概率分布对反射声压有明显影响。在我们的实验中掠角较大,遮蔽效应不应起主要作用。由高斯概率密度函数所得到的  $\ln(\bar{p}/p_0) \sim 2(r\sigma)^2$  关系与

实验结果之间的差别,主要是由于实际的波面坐标概率分布偏离于高斯分布。

2. 用实测的反射声压和高斯概率密度函数所算得的波面起伏标准差明显小于波高仪测得的值,而按(4)式算得的 $\sigma$ 值与后者基本一致。用声学方法测量标准差时,应先找出与不同水面状况相对应的声反射特性。

### 参 考 文 献

- [1] 汪德昭, 尚尔昌, 1961. 水声学. 科学出版社, 426—430 页。
- [2] 林少官, 1978. 基础概率与数理统计. 人民教育出版社, 54 页。
- [3] Clay, C. S., H. Medwin and W. M. Wright, 1973. Specularly scattered sound and the probability density function of a rough surface. *J. Acoust. Soc. Amer.* 53: 1677.
- [4] Eckart, C., 1953. The scattering of sound from the sea surface. *J. Acoust. Soc. Amer.* 25: 566.
- [5] Huang, N. E. and S. R. Long, 1980. An experimental study of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves. *J. Fluid Mech.* 101: 179.
- [6] Longuet-Higgins, M. S., 1963, The effect of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves. *J. Fluid Mech.* 17: 459.

## THE SOUND REFLECTION IN SPECULAR DIRECTION ON A ROUGH SURFACE

Qi Yirang, Lu Deming, Xu Liezhong, Wei Xiaoquan,  
Li Jiangji and Wang Meifen  
(Shandong College of Oceanology, Qingdao)

### ABSTRACT

The reflected sound in specular direction on a rough surface was investigated in laboratory wind-driven tank. The probability density function (PDF) of the rough surface deviated from the Gaussian function to different extent. The measured results were compared with the results calculated by the aid of the Gaussian function and Gram-Charlier series. There is a linear relationship between  $\ln \frac{\bar{p}}{p_0}$  and  $2(\gamma\sigma)^2$  in the range of small value of  $\gamma\sigma$  ( $\gamma\sigma < 1$ ) where  $\bar{p}$  and  $p_0$  are the average amplitude of sound pressure reflected on rough surface and the amplitude of sound pressure reflected on smooth surface respectively and  $\gamma = \frac{\lambda}{2\pi} \sin\theta$  where  $\theta$  is the glancing angle and  $\lambda$  is the sound wave length. The slope of the linear relationship is smaller than that predicted by the Eckart theory. The standard deviation  $\sigma_w$  measured by wave-height meter is close to the value obtained from our experimental relationship but larger than that calculated by the aid of the Gaussian type PDF.