

# 声纳方程的瞬态形式讨论

方恒忠

鲍连承

(青岛海洋大学 青岛 266003) (海军潜艇学院 青岛 266042)

2001年7月16日收到

**摘要** 本文提出用瞬态信号的能谱级代替稳态信号的声强级来定义声纳参数,并以短柱声散射为例,运用数值模拟方法,验证用能谱级定义声纳参数,声纳方程是比较有效的,这为应用声纳方程处理瞬态声信号从而获得目标的目标强度提供了一种有效可行的方法。

**关键词** 声纳方程, 目标强度, 瞬态信号, 能谱级

## Discussions on the transient-state sonar equation

FANG Hengzhong

(Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

BAO Liancheng

(Submarine college of Qingdao, Qingdao, 266042)

**Abstract** This article suggests defining the sonar parameters by the energy spectrum levels of the transient signals instead of the strength levels of the steady-state signals, On taking the sound scattering of a short cylinder as an illustration, it proves that the sonar equation is still effective. This paper thus provides an effective method to treat the use of a transient signal to obtain the target's scattering character.

**Key words** Sonar equation, Target strength, Transient-state signal, Energy spectrum level

## 1 引言

声波在介质中传播时,会遇到各种各样的障碍物,这些障碍物会引起声波的散射,从而影响声波的传播。不同形状、结构和材料的目标对声波的散射是不一样的。对于主动声纳来说,它是根据来自目标的回波信号实现目标检测和识别的,被测目标的声学特性决定了

回声信号的强弱和其它特性。目标强度是反映目标声散射特性的重要物理量,确定物体的目标强度是进行目标探测和识别的前提。

实验测量水下目标目标强度的理论依据是声纳方程。声纳方程的各个参数是用稳态信号的声强度来定义的,但是实验测量和工程应用中发射的信号多为瞬态短脉冲信号。对此,传统的处理方式是乌立克提出的用时间扩展因

子来修正声纳方程, 但误差较大, 本文提出用信号的能谱级来定义声纳参数, 并以短柱声散射为例, 验证这一方法是有效的, 而且和传统方法相比, 这一方法更为精确。

## 2 声纳方程与声纳参数

声纳工作时的信息流程由三个基本环节组成, 这就是声信号赖以传播的介质、被探测的目标和声纳设备本身。上述三个基本环节中的每一个, 又都包含了若干个影响声纳设备工作的因素, 工程上把这些因素称为声纳参数。下面先介绍有关目标强度测量的几个声纳参数。

### 2.1 声纳参数<sup>[1]</sup>

声源级  $SL$ , 用来描述主动声纳所发射的声信号的强弱, 定义为:

$$SL = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right) \quad (1)$$

回波级  $EL$ , 表示接收到的回波信号的强弱, 定义为:

$$EL = 10 \log \left( \frac{I_e}{I_0} \right) \quad (2)$$

传输损失  $TL$ , 定量描述声波传播一定距离后声强度的衰减变化, 定义为:

$$TL = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_r} \right) \quad (3)$$

目标强度  $TS$ , 用来定量描述目标反射本领的大小, 定义为:

$$TS = 10 \log \left( \frac{I_{e1}}{I_i} \right) \quad (4)$$

公式中:  $I_1$  是距声源中心 1m 处的声强度;  $I_0 = 0.76 \times 10^{-22} \text{W/cm}^2$ , 为参考声强;  $I_e$  是回波声强度;  $I_r$  是距声源距离  $r$  处的声强度;  $I_{e1}$  是距目标声中心 1m 处的散射波的声强度;  $I_i$  是目标表面处入射波的声强度。

### 2.2 声纳方程

利用声信息进行探测的系统称为声纳系统, 简称声纳。如图 1 所示, 对于收发合

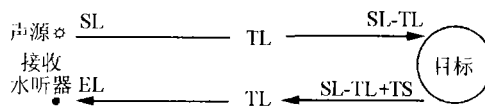


图 1 主动声纳信号强度变化示意图

置主动声纳, 设其辐射声源级为  $SL$ , 由于声传播损失, 信号到达目标时, 其声级降为  $SL-TL$ , 由目标强度  $TS$  的定义可知, 在与入射波相反方向离目标声中心 1m 处的声级为  $SL-2TL+TS$ , 此回声到达接收阵时的声级为  $SL-2TL+TS$ ,  $SL-2TL+TS$  通常称为回声信号级, 用  $EL$  表示。

$$EL = TS + SL - 2TL \quad (5)$$

或

$$TS = EL + 2TL - SL \quad (6)$$

公式 (5)、(6) 被称为声纳方程。

## 3 声纳方程的局限性与传统的克服方法

由公式 (1)、(2)、(3)、(4) 可以看出, 上述声纳方程的各个参数都是用稳态信号的声强度来定义的, 但是在实际应用中, 很多情况下入射声信号为持续时间较短的瞬态脉冲信号。由于海洋信道的多路传播效应和目标几何形状的影响, 与入射信号相比, 接收到的回波信号的波形会发生严重畸变, 回波持续时间和入射脉冲时间往往会相差较大, 而且回波持续时间难以确定。为此, 乌立克研究了短脉冲信号下声纳方程是否适用的问题, 指出声纳方程的强度形式仍然适用, 但要对声纳参数作以下修正<sup>[2]</sup>:

用平均声强度  $I = \frac{E}{T}$  来代替公式 (1)、(2)、(3)、(4) 中的稳态声强。其中能流密度  $E$  定义为 [3]:  $E = \int_0^{\infty} p u dt$ ,  $p$ ,  $u$  分别是介质中的声压和介质质点振动速度。对于长脉冲的主动声纳,  $T$  为发射脉冲的宽度  $\tau_0$ , 并且近似等于回声的宽度; 对于短的瞬变脉冲声纳,  $T$  为回声的宽度  $\tau_e$ 。并且定义:

$$EL = 10 \log \left( \frac{E_e}{\tau_e} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} SL &= 10 \log \left( \frac{E_1}{\tau_e} \right) \\ &= 10 \log \left( \frac{E_1}{\tau_0} \right) - 10 \log \left( \frac{\tau_e}{\tau_0} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $E_1$  是距声源中心 1m 处的能流密度;  $E_e$  是回波声能流密度; 公式 (8) 中出现的  $10 \log(\frac{\tau_e}{\tau_0})$  被称为时间宽展因子。在海洋中, 对于收发合置主动式短脉冲声纳, 回声宽度  $\tau_e$  主要由三部分组成: 声源信号的发射脉宽  $\tau_0$ 、由于在海中多路传播引起的展宽  $\tau_m$ 、由目标几何线度引起的展宽  $\tau_i$ , 回声宽度  $\tau_e$  是这三部分之和 [3]。乌立克认为, 按公式 (7)、(8) 定义 SL、TL 后, 声纳方程仍然是有效的, 我

们把这一方法称为修正声纳方程法。

#### 4 传统克服方法的误差

为了清楚地显示入射信号经目标散射后波形的变化和扩展, 选取一个长 4m, 半径 1m 的刚性短柱作为散射体, 研究当一瞬态声信号从与声轴方向成  $45^\circ$  角入射时的情况。

对于刚性短柱这一外型规则的几何体, 其目标强度值可以由下面公式近似给出 [3]:

$$TS = 10 \log \left[ \frac{aL^2}{2\lambda} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \vartheta \right] \quad (9)$$

对于上式, 在  $a = 1\text{m}$ 、 $L = 4\text{m}$ 、 $\vartheta = 45^\circ$  时柱的目标强度与频率的关系, 如图 2 所示。

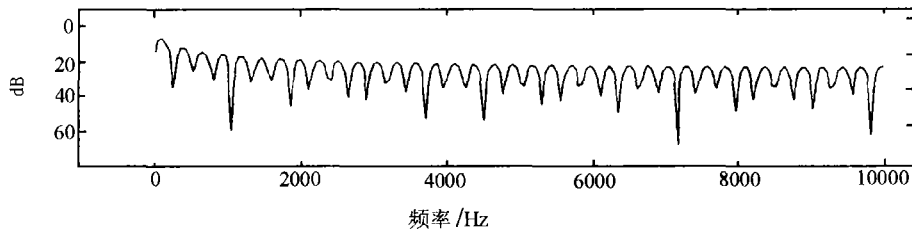


图 2 用公式 (9) 计算得到刚性短柱的目标强度

另一方面, 根据格林函数理论, 在空间中任意一点  $r_0$  处的散射声势函数  $\varphi_s(r_0)$  可用 Kirchhoff 积分公式表示 [4],

$$\begin{aligned} \varphi_s(r_0) &= \frac{1}{4\pi} \oint \oint \left[ \varphi_s(r) \frac{\partial G(r_0, r)}{\partial n} \right. \\ &\quad \left. - G(r_0, r) \frac{\partial \varphi_s(r)}{\partial n} \right] ds \end{aligned} \quad (10)$$

为计算上述积分, 我们把目标网格化, 用大量的三角形面元拟合目标的表面几何形状, 如图 3 所示:

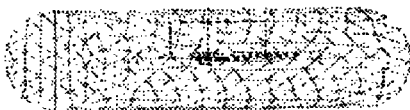


图 3 柱目标的网格化示意图 (沿入射方向看)

则上式积分变为对各个面元的求和。利用

上述面元积分法, 在自由空间中, 当一频率为 3000Hz、长度为两个周期的平面简谐声波斜入射到此柱的表面时, 得到在距声中心 1m 处的散射回波 (由无穷远处按球面衰减折算) 如图 4、5 所示 [5]。由图我们看出散射波和入射波相比, 不仅幅度减小, 而且在时间上被大大展宽, 波形已经发生严重变化。

根据图 4、5 所示入射声波和回波, 按修正声纳方程法分别计算信号的声源级和回波级, 从而得到短柱的目标强度值为  $TS = -17.2358\text{dB}$ 。而由图 2 知, 该短柱在 3000Hz 时的目标强度为  $TS = -15.49\text{dB}$ , 二者相差近 2dB。这说明对短脉冲信号, 用修正声纳方程法计算目标强度, 得到的结果误差很大, 而且信号越短, 误差越大。

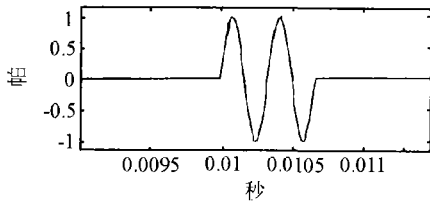


图4 入射信号波形

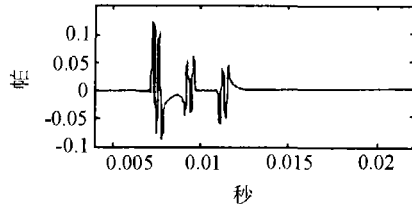


图5 散射波波形

## 5 能谱级声纳方程

在用瞬态短脉冲信号测量物体的目标强度时,不妨把瞬态信号看成是无穷多个频率不同的稳态平面简谐信号的迭加。因声纳系统为线性系统,各个平面波成分独立地完成传输及散射过程后合成为回波。每个平面波成分的声强正比于瞬态信号的能谱在该频率处的值。能谱的定义如下:假定声压信号为  $f(t)$ ,其频谱  $F(\omega) = \int_0^\infty f(t)e^{i\omega t}dt$ ,则其能谱为:  $S(\omega) = F(\omega) \times F^*(\omega)$ ,公式中省去了常数  $\frac{1}{\rho c}$ 。用能谱级表示声源级、回波级如下:

$$SL = 10 \log(S_i(\omega)) \quad (11)$$

$$EL = 10 \log(S_e(\omega)) \quad (12)$$

其中  $S_i(\omega)$ 、 $S_e(\omega)$  分别为声源和回波信号的

能谱,以  $J/m^2 \cdot Hz$  为单位。

下面我们证明,如用能谱级定义声源级、回波级时,利用声纳方程求物体目标强度是有效的。

对于目标强度,还有一种与公式(4)等效的定义形式<sup>[6]</sup>:

$$TS = 10 \log |f_\infty(\omega)|^2 \quad (13)$$

其中  $f_\infty(\omega)$  为目标散射函数(相当于传输系统的传输函数)。

假设目标表面处入射波频谱为  $F_i(\omega)$ ,则折算到目标声中心 1m 处的散射波的频谱为:

$$F_s(\omega) = F_i(\omega) \times f_\infty(\omega) \quad (14)$$

则根据公式(11)、(12),得到:

$$\begin{aligned} EL &= 10 \log(|F_i(\omega) \times f_\infty(\omega)|^2) \\ &= 10 \log |F_i(\omega)|^2 + 10 \log |f_\infty(\omega)|^2 \\ &= SL + 10 \log |f_\infty(\omega)|^2 \\ &= SL + TS \end{aligned} \quad (15)$$

这与公式(5)是一致的( $TL = 0$ )。说明用能谱级定义声纳参数,能够适用于声纳方程,也就是说这种定义是有效的。

下面我们仍以刚性短柱的声散射为例来验证用能谱级定义声纳参数的有效性。由图4、5所示的入射波和散射波,按照能谱级分别计算得到声源级和回波级,根据声纳方程得到柱的目标强度如图6所示,结果与图2数值及变化趋势基本一致。

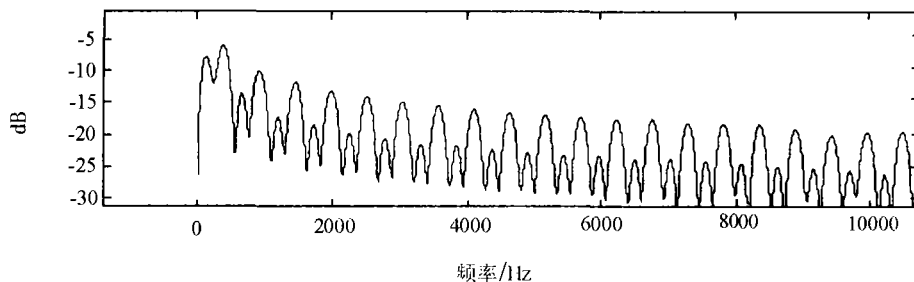


图6 用能谱级法计算得到的刚性柱的目标强度(45°入射)

## 6 讨论

由以上例子我们也可以看出,用能谱级来定义声源级和回波级,是利用声纳方程处理瞬态脉冲信号的散射问题的一种可行的方法。

值得一提的是,在工程上对瞬态信号处理时,往往采用滤波技术,其实滤波的目的也是为了把瞬态宽带信号分解为多个近似稳态信号,但是在计算滤波后信号的声级时,却往往仍然脱离不了求平均强度的方法,造成最后结果的较大误差。本文的特色之处在于通过对信号的傅立叶变换,得到信号的能谱级,运用声纳方程得到目标强度的值,从而避免了由于滤波以及

求平均强度所带来的误差,并能减少工作量,提高计算速度。

## 参 考 文 献

- 1 刘伯胜,雷家煜.水声学原理.哈尔滨工程大学出版社,1993.6-8.
- 2 Urick R J. *J.Acoust.Soc.Am.*, 1962, 34: 547.
- 3 R.J.乌立克著,洪申译.水声原理.哈尔滨船舶工程学院出版社,20-22.
- 4 [苏] E. И. 沈杰罗夫著,何祚镛,赵晋英译.水声学波动问题.国防工业出版社,13-17.
- 5 中国国防科学技术报告:目标回波场数值研究.中科院北海站,2000.12.
- 6 徐海亭.潜艇声散射特性数值模拟——潜艇的数值仿真建模.水声对抗,1996,(4).

## 评介《神秘的声音世界》

关定华教授编写的科普书《神秘的声音世界》已于2001年4月由济南山东教育出版社出版、山东省新华书店发行。本书是周光召院士主编的《21世纪学科发展丛书》中的声学篇。丛书的宗旨是“促进学科发展、推动科技进步和普及科学知识、提高全民科技文化素质”,而科学普及以“青少年群体”为重要对象,同时也求适合“其他不同的社会群体的干部与公众”阅读。这些宗旨决定了本书的学科性强和易懂。

过去出版的声学科普读物大多限于声学的某一个侧面,例如只涉及或超声、或水声、或可听声。关教授编写的本书则综合介绍了声学的整个领域,这从本书的目录便可看出:共14章的章名简要地分别是,1.什么是声;2.人们怎样逐步掌握声学规律的;3.环境声学;4.优美的厅堂音质;5.电声系统;6.语音声学;7.人是如何听到声音的;8.音乐之声;9.海洋声学和地声学;10.大气声学和次声学;11.超声;12.声波深入物质结构;13.动物和声音;14.声学展望。可见,本书介绍了声学的整个领域,实际上本书简要地介绍了声学各分支的发展情况、理论、

技术和应用。全书共约24万字。以这样的篇幅来叙述声学全面知识的科普书还是少见的。

本书深入浅出,以生动的语言,择要讲叙了声学各分支的近期成就和其应用,兼及一些在发展时的掌故,又注意到我国古代在声学发展中的作用,如三分损益法、十二平均律、管口修正等当时在世界上领先的贡献。因此,本书结合科学性、知识性、通俗性、趣味性,为高中以上文化程度的读者、包括青少年读者,提供了对声学认识整体、引发兴趣的途径。让社会群体都来了解与人类生活不可分割的声音,都来了解作为学科的声学。声学不仅阐明了声音的本质和规律,而且以丰富多彩的方式对声音加以利用,使声音的作用大大超越了口头交流信息、思想和情感的范围。

作者关定华教授近年来连续耕耘写作科普读物,同时努力促进我国声学界与国外同行的交流;祝愿他在保持健康的同时,对我国声学的发展继续作出新的贡献。

(中国科学院声学研究所 应崇福)