

# 浅海环境中应答器法测量水下平台声目标强度的理论分析\*

张 波<sup>1,2,3†</sup> 马忠成<sup>1</sup> 宋 曼<sup>1</sup>

(1 大连测控技术研究所水下测控技术重点实验室 大连 116013)

(2 中国科学院大学 北京 100190)

(3 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

**摘要** 应答器法是在浅海环境中测量水下运动平台声目标强度的常用方法。根据简正波理论分析浅海点源声场的空间特性,指出不同号简正波之间的相互干涉是导致声场空间起伏的主要原因。对基于应答器法的水平平均测量法(HAM法)进行了理论分析,并提出一种新的浅海环境中水下运动平台目标强度的测量方法,即垂直平均测量法(VAM法)。对比了HAM法和VAM法的有效性、物理意义、试验效率和技术难度,分析表明二者物理意义相同,VAM法比HAM法具有更高的有效性和试验效率,不过其技术难度更大。

**关键词** 应答器法,声目标强度,声场起伏,水平平均测量法,垂直平均测量法

**中图分类号**: O427

**文献标识码**: A

**文章编号**: 1000-310X(2013)02-0109-07

## Theoretical analyses of measurement of the acoustic target strength of underwater platform using the transponder method in shallow water

ZHANG Bo<sup>1,2,3</sup> MA Zhongcheng<sup>1</sup> SONG Man<sup>1</sup>

(1 Dalian Scientific Test and Control Technology Institute Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory, Dalian 116013, China)

(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

(3 State Key Laboratory of Acoustics; Institute of Acoustics; Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The transponder method is commonly used to measure the acoustic target strength of a underwater platform in shallow water. By utilizing the normal mode theory, the sound field spacial characteristics of a point source in shallow water are analyzed. It is shown clearly that the interaction between different normal modes is the main reason leading to sound field spacial fluctuations. The horizontal-average measurement (HAM) is analyzed theoretically, and a new method is put forward for measuring the acoustic target strength of a underwater platform, namely the vertical-average measurement (VAM). HAM and VAM are analyzed comparatively in terms of effectiveness, physical meaning, test efficiency and technical difficulties. It is indicated that they have the same physical significance, and the former has higher test

2012-06-05 收稿; 2013-01-08 定稿

\*装备预先研究项目(51303030408); 船舶工业国防科技预研基金(11J 3.1.6)

作者简介: 张波 (1982-), 男, 山东东营人, 工程师, 研究方向: 水下目标声散射特性及声场计算。

马忠成 (1966-), 男, 研究员。宋曼(1985-), 女, 研究生。

†通讯作者: 张波, E-mail: popo6189@163.com

efficiency and effectiveness, but higher technical difficulty.

**Key words** The transponder method, Acoustic target strength, Sound field fluctuation, Horizontal-average measurement, Vertical-average measurement

## 1 引言

浅海环境中大型水下平台的声目标强度测量问题涉及声传播和目标散射两个方面以及两者之间的耦合。与自由场中目标强度的测量问题不同,需要分析并消除声场的空间起伏对测量结果的影响,所以处理起来比较复杂,仍然存在很多未解决的问题。国内外学者对浅海环境中的目标声散射发展了多种解析和数值计算方法,如  $T$  矩阵法<sup>[1]</sup>、有限元方法<sup>[2]</sup>、边界元方法<sup>[3]</sup>、单散射体近似法<sup>[4]</sup>、简正波—Kirchhoff 近似混合方法<sup>[5]</sup>等。但是,关于浅海环境中声目标强度测量方法的研究相对较少。Sarkissian<sup>[6]</sup>研究了利用垂直阵激发低阶简正波测量浅海环境中水下目标散射响应的方法,然而该方法要求发射阵和接收阵均为包含大量阵元的垂直阵,不适用于采用点声源或水平阵的情况。

为了准确测量目标强度,必须设法消除声场空间起伏对测量结果的影响。通常采用的方法是,采用应答器法<sup>[7]</sup>的同时,在不同测试距离上进行多次测量,取平均值,简称“水平平均测量法”

(Horizontal-Average Measurement, HAM)。本文首先在第2、3节根据简正波理论<sup>[8]</sup>分析浅海点源声场,指明引起声场空间起伏的原因,并分析应答器法的前提条件——等传播损失条件。第4节对HAM法进行详细分析。由于HAM法效率较低,第5节提出一种新方法,称为“垂直平均测量法”(Vertical-Average Measurement, VAM)。第6节对比分析HAM法和VAM法的有效性、物理意义、试验方式、试验效率和技术难度。

## 2 浅海点源声场

考虑有两层流体介质的情况,  $z=0$  为海表面,  $z=H$  为海底,采用柱坐标系,如图1所示。上层介质声速  $c=c_1(z)$ , 密度  $\rho_1$ , 厚度  $H$ ; 海底介质声速  $c_2(z)$ , 密度  $\rho_2(z)$ , 衰减系数  $\alpha_b$ 。点源位于  $(0, z_s)$ ,

辐射谐和声波, 时间因子为  $e^{-j\omega t}$ ; 接收点位置为  $(r, z)$ ,  $r$  为水平距离。海面为绝对软界面, 其上声压为零。

忽略侧面波, 仅考虑简正波成分, 水层中点源声压场可表示为<sup>[8]</sup>

$$p(r, z) = \sum_{m=1}^M A_m \psi_m(z_s) \psi_m(z) \frac{e^{jk_{rm}r}}{\sqrt{k_{rm}r}}, \quad (1.1)$$

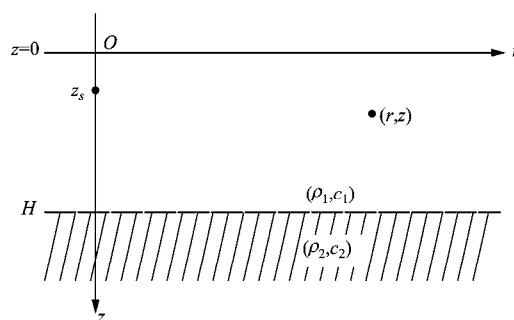


图1 浅海波导示意图

式中  $\psi_m(z)$  为第  $m$  阶简正波的本征函数,  $k_{rm}$  为水平波数。声强可表示为

$$\begin{aligned} I(r, z) &= p(r, z) p^*(r, z) \\ &= AA^* \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \psi_m(z_s) \psi_n^*(z_s) \\ &\quad \times \psi_m(z) \psi_n^*(z) \frac{e^{j(k_{rm}-k_{rn})r}}{r \sqrt{k_{rm}k_{rn}}}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$I(r, z) = \frac{\chi_{inc}}{r} + \frac{\chi_{coh}}{r}. \quad (1.3)$$

$$\text{非相干项 } \chi_{inc} = AA^* \sum_{m=1}^M |\psi_m(z_s)|^2 |\psi_m(z)|^2 \frac{1}{k_{rm}},$$

相干项

$$\chi_{coh} = AA^* \sum_{m \neq n}^M \sum_{n=1}^M \psi_m(z_s) \psi_n^*(z_s) \psi_m(z) \psi_n^*(z) \frac{e^{j(k_{rm}-k_{rn})r}}{\sqrt{k_{rm}k_{rn}}}.$$

$\chi_{inc}$  与  $r$  无关, 且容易证明除了在海面和海底附近,  $\chi_{inc}$  随  $z$  变化较小。受  $e^{j(k_{rm}-k_{rn})r}$  项影响,  $\chi_{coh}$  随  $r$  变化有大的起伏, 导致  $I(r, z)$  随  $r$  的起伏, 如图2中实线所示(虚线含义见第5节); 受  $\psi_m(z) \psi_n^*(z)$

项影响,  $\chi_{coh}$  随  $z$  变化有大的起伏, 导致  $I(r; z)$  随  $z$  的起伏, 如图3所示。传播损失定义为

$$TL(r, z) = -10 \lg \left( I(r, z) / |p_0(r=1)|^2 \right), \quad (1.4)$$

其中  $p_0(r)$  是自由场中点源声压。

图3中相对传播损失为

$$\delta TL(z) = TL|_{r=700m, z} - TL|_{r=700m, z=30m}. \quad (1.5)$$

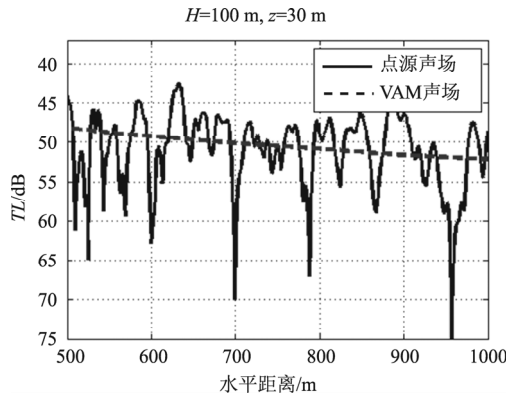


图2 传播损失水平变化曲线,  $f=1$  kHz

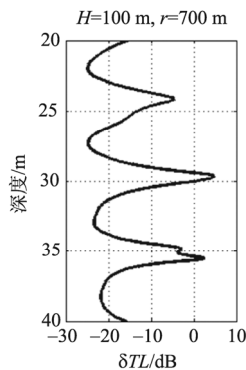


图3 相对传播损失垂直变化曲线,  $f=1$  kHz

图2、3是简正波程序 Krakenc<sup>[9]</sup>的计算结果, 仿真条件为:

Ex1 点源辐射单频谐和声波, 声源深度  $z_s = 10$  m, 水层厚度  $H = 100$  m, 声速  $c_1 = 1500$  m/s, 密度  $\rho_1 = 1$  g/cm<sup>3</sup>, 海底介质声速  $c_2 = 1600$  m/s, 其密度  $\rho_2 = 1.8$  g/cm<sup>3</sup>, 海底衰减系数  $\alpha_b = 0.37f^{1.8}$  dB/m ( $f$ 单位 kHz)<sup>[10]</sup>。

根据上述分析, 正是由于各简正波间的相干项  $\chi_{coh}$  在水平方向和垂直方向的剧烈变化, 导致了  $I(r; z)$  的剧烈空间起伏, 从而引起目标回波随水平距离和测试深度的剧烈变化。

### 3 等传播损失条件

应答器法<sup>[7]</sup>声目标强度表达式为

$$TS = A + K + (TL_{1T} - TL_{1K}) + (TL_{2T} - TL_{2K}), \quad (2.1)$$

其中  $A = EL_T - EL_K$ 。

各符号含义为:

$SL$ , 声源级;  $TS$ , 目标强度;

$EL_T$ , 目标回声级;  $EL_K$ , 应答器脉冲声级;

$K$ , 被测目标上记录的应答脉冲和入射脉冲的

相对级;

$TL$ , 传播损失, 下标“1T”、“2T”对应从声源(水听器)到被测目标的“去程”和“回程”, 下标“1K”、“2K”对应从声源(水听器)到应答器的“去程”和“回程”。

如果被测目标和应答器对应的传播损失相等, 即

$$TL_{1T} - TL_{1K} = 0, \quad TL_{2T} - TL_{2K} = 0, \quad (2.2)$$

则

$$TS = A + K. \quad (2.3)$$

我们将(2.2)式简称为应答器法的“等传播损失条件”。

设从声源到目标上任意表面区域  $s$  的传播损失为  $TL_{1s}$  ( $\forall s \in S$ ), 则根据(2.2)式表示的“等传播损失条件”有

$$TL_{1K} = TL_{1s} (\forall s \in S), \quad (2.4)$$

$S$  为被入射声波“照亮”的被测目标表面。必然有

$$TL_{1s_1} (\forall s_1 \in S) = TL_{1s_2} (\forall s_2 \in S). \quad (2.5)$$

(2.4)式和(2.5)式表明, “等传播损失条件”成立的前提是: 目标被“照亮”表面上任意一点处的传播损失均与应答器处的传播损失相等。通常情况下, 该条件不能满足, 传播损失随水平距离  $r$  和深度  $z$  剧烈变化, 如图2、3所示。

上述分析是针对“去程”传播损失的, 由于声场具有互易性, 分析过程也适用于“回程”传播损失。

为了使(2.4)式和(2.5)式成立, 满足或近似满足“等传播损失条件”, 通常采用的方法是, 采用应答器法的同时, 在不同测试距离上进行多次测量,

取平均值, 简称“水平平均测量法”(HAM)。第4节将对该方法的有效性进行理论分析。

#### 4 水平平均测量法 (HAM)

(1.3)式中 $\chi_{coh}$ 的每一项都是 $r$ 的周期函数, 周期为 $R_{mn} = 2\pi/(k_m - k_n)$ ,  $m \neq n$ 。称 $R_{mn}$ 为简正波模式 $m$ 、 $n$ 的水平干涉周期。容易证明 $\max(R_{mn}) = R_{12} = R_{21}$ , 则在跨度为 $R_{12}$ 的水平距离内求 $\chi_{coh}$ 的平均值, 有

$$\frac{1}{R_{12}} \int_{r=r_{mid}-\frac{R_{12}}{2}}^{r_{mid}+\frac{R_{12}}{2}} \frac{\chi_{coh}}{r} dr \approx 0, \quad (3.1)$$

定义

$$\langle f(r, z) \rangle_{r, r_{mid}, R} = \frac{1}{R} \int_{r=r_{mid}-\frac{R}{2}}^{r_{mid}+\frac{R}{2}} f(r, z) dr, \quad (3.2)$$

则(3.1)式可写为

$$\left\langle \frac{\chi_{coh}}{r} \right\rangle_{r, r_{mid}, R_{12}} \approx 0, \quad (3.3)$$

于是, 用 $\langle \cdot \rangle_{r, r_{mid}, R}$ 作用于(1.3)式两边得

$$\langle I(r, z) \rangle_{r, r_{mid}, R_{12}} = \left\langle \frac{\chi_{inc}}{r} \right\rangle_{r, r_{mid}, R_{12}}. \quad (3.4)$$

$\chi_{inc}$ 随 $z$ 变化很小, 于是上式表明,  $I(r, z)$ 在跨度为 $R_{12}$ 的水平距离内的平均值随 $z$ 变化很小, 此时(2.4)式和(2.5)式表示的“等传播损失条件”近似成立。

对于仿真条件 Ex1, 1kHz 时各模式间的水平干涉距离见图4。通常情况下 $R_{12}$ 非常大, 图4中 $R_{12} = 18 \text{ km}$ , 在进行目标强度测量试验时, 不可能使被测目标与测量船间距遍历如此大的水平距离范围。实际试验中, 可取 $R_{mn}$ 的算术平均值 $R_{mean}$ 作为目标水平机动范围的近似值。图4中各阶传播模式水平干涉距离的算术平均值为277 m。则(3.4)式改为

$$\langle I(r, z) \rangle_{r, r_{mid}, R_{mean}} \approx \left\langle \frac{\chi_{inc}}{r} \right\rangle_{r, r_{mid}, R_{mean}}. \quad (3.5)$$

图5为 $R$ 取0 m、100 m、400 m时点源声场相对平均传播损失 $\delta TL_m$ 随深度的变化曲线。相对平均传播损失定义为

$$\delta TL_m = -10 \lg \left( \langle I(r, z) \rangle_{r, r_{mid}, R} / \langle I(r, 30) \rangle_{r, r_{mid}, R} \right). \quad (3.6)$$

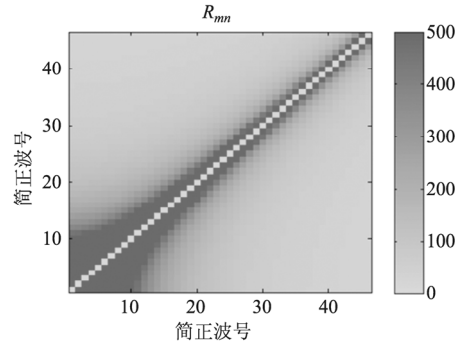


图4 简正波水平干涉周期,  $f = 1 \text{ kHz}$

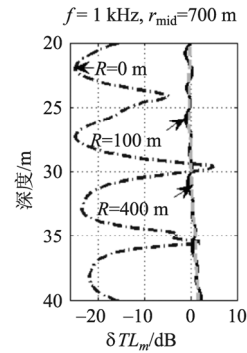


图5 相对平均传播损失深度变化曲线

上述仿真分析表明, 对于等声速层中的点源声场, 在水平方向的平均处理, 大大减小了传播损失随目标深度的起伏。

根据(3.5)式及互易定理, 有

$$\begin{aligned} 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{AT}}{10}} \right\rangle_{r, r_{mid}, R} - 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{AK}}{10}} \right\rangle_{r, r_{mid}, R} &= 0, \\ 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{2T}}{10}} \right\rangle_{r, r_{mid}, R} - 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{2K}}{10}} \right\rangle_{r, r_{mid}, R} &= 0, \end{aligned} \quad (3.7)$$

则

$$TS = A' + K, \quad (3.8)$$

其中

$$A' = 10 \lg \left\langle 10^{\frac{EL_T}{10}} \right\rangle_{r, r_{mid}, R} - 10 \lg \left\langle 10^{\frac{EL_K}{10}} \right\rangle_{r, r_{mid}, R}.$$

(3.7)、(3.8)式表明, 利用水平平均测量法, “校除”了声源与被测目标之间传播损失。需要说明的是, 此处的“平均”是对声强在水平距离上的平均, 而不是对声压的平均, 更不是对不同水平距离处目标强度测量值的直接平均。

另外, (3.2)式表示的“水平平均”过程, 要求已知  $f(r, z)$  在区间  $[r_{mid}-R_{mean}/2, r_{mid}+R_{mean}/2]$  内所有点的取值, 这在实际试验中是无法实现的。其实, 水平方向的空间采样频率  $(1/\Delta r)$  满足奈奎斯特定律即可, 即

$$1/\Delta r \geq 2/R_{1M}, \quad (3.9)$$

$\Delta r$  为水平采样间距;  $R_{1M}$  为简正波模式 1、 $M$  的水平干涉周期, 对于仿真条件 Ex1, 1kHz 时,  $R_{1M} = 24$  m。所以, 水平采样间距  $\Delta r$  须满足的条件是

$$\Delta r \leq R_{1M}/2. \quad (3.10)$$

实际试验中采用 HAM 法时, 测量船锚泊 (或自由漂浮), 被测目标在距测量船一定距离范围内的固定深度上机动, 以获得不同水平距离上的测试数据。被测目标的目标强度通常与声线入射角有关, 例如潜艇的目标强度表现为复杂的蝴蝶型图案<sup>[7]</sup>。要获得相同入射角度  $\varphi$  不同距离  $r$  上的测试数据, 需要进行大量的测试, 况且我们需要测量不同入射角的目标强度, 因此总测量时间非常大。由于试验过程中,  $\varphi$ 、 $r$  不易控制, 使得最终的测量数据在  $(\varphi, r)$  平面上分布非常不均匀, 导致数据浪费。

总之, HAM 法可以“校除”声源与被测目标之间传播损失, 但是效率不高。为此, 我们提出“垂直平均测量法”。

## 5 垂直平均测量法 (VAM)

垂直平均测量法 (VAM), 顾名思义, 指对被测量在深度  $z$  方向取平均。用  $\langle \cdot \rangle_{z, H/2, H}$  作用于 (2.3) 式两边, 考虑到特征函数  $\psi_m(z)$  的正交性, 有

$$\left\langle \frac{\chi_{coh}}{r} \right\rangle_{z, H/2, H} \approx 0, \quad (4.1)$$

所以

$$\langle I(r, z) \rangle_{z, H/2, H} \approx \left\langle \frac{\chi_{inc}}{r} \right\rangle_{z, H/2, H}, \quad (4.2)$$

$\langle I(r, z) \rangle_{z, H/2, H}$  是  $r$  的缓变函数, 见图 2 中虚线。同第 4 节类似, 我们可得到以下结果

$$\begin{aligned} 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{1T}}{10}} \right\rangle_{z, H/2, H} - 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{1K}}{10}} \right\rangle_{z, H/2, H} &= 0, \\ 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{2T}}{10}} \right\rangle_{z, H/2, H} - 10 \lg \left\langle 10^{\frac{TL_{2K}}{10}} \right\rangle_{z, H/2, H} &= 0, \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$TS = A'' + K, \quad (4.4)$$

$$A'' = 10 \lg \left\langle 10^{\frac{EL_T}{10}} \right\rangle_{z, H/2, H} - 10 \lg \left\langle 10^{\frac{EL_K}{10}} \right\rangle_{z, H/2, H}.$$

VAM 法对应的试验过程是, 声源深度  $z_s$ 、水平间距  $r$  和声线入射角  $\varphi$  固定, 改变被测目标深度  $z$  进行多次试验, 然后对  $EL_T$  和  $EL_K$  沿  $z$  取平均, 获得声线入射角为  $\varphi$  时的目标强度  $TS(\varphi)$ 。由于  $\chi_{inc}$ 、 $\chi_{coh}$  关于  $z$  和  $z_s$  是对称的, 见 (2.3) 式, 所以 (4.1)-(4.4) 式中将  $\langle \cdot \rangle_{z, H/2, H}$  改为  $\langle \cdot \rangle_{z_s, H/2, H}$  不影响推导过程。此时, 对应的试验过程变为, 被测目标深度  $z$  固定, 改变声源深度进行多次  $z_s$  试验, 然后对  $EL_T$  和  $EL_K$  沿  $z_s$  取平均, 获得  $TS(\varphi)$ 。

对于 VAM 法, 垂直方向的空间采样频率  $(1/\Delta z_s)$  须在垂直方向满足奈奎斯特定律, 即

$$1/\Delta z_s \geq 2/\lambda_{zM}, \quad (4.5)$$

$\Delta z_s$  为声源深度变化步长,  $\lambda_{zM}$  为最高阶传播简正波在  $z$  方向的波长, 且

$$\lambda_{zM} = 2\pi/\gamma_M > 2\pi/k = \lambda, \quad (4.6)$$

$\gamma_M$  为垂直波数。所以,  $\Delta z_s$  须满足的条件是

$$\Delta z_s \leq \lambda/2. \quad (4.7)$$

## 6 HAM 法与 VAM 法对比分析

### 6.1 声速剖面的影响

前文均是针对等声速层情况的分析, 而实际浅

海环境中,海水声速通常是不均匀的。本小节分析声速垂直分布对 HAM 法和 VAM 法有效性的影响,分负梯度和存在温跃层两种情况进行讨论。

Ex2 两种声速分布剖面如图 6 所示。负梯度分布:  $z = 0$  m 处声速 1500 m/s,  $z = 100$  m 处声速 1485 m/s; 存在温跃层:  $z = 0$  m 处声速 1510 m/s, 在  $z = 20$  m 处声速 1510 m/s,  $z = 25$  m 处声速 1490 m/s,  $z = 100$  m 处声速 1490 m/s。其余计算条件与 Ex1 相同。

首先分析采用 HAM 法的情况。图 7 是用 Krakenc 程序计算的相对平均传播损失  $\delta TL_m$  随深度变化的仿真结果,  $\delta TL_m$  的定义见(3.6)式。图 5 所示

的等声速层情况,改变横轴比例后重新显示在图 7 中,以作对比。

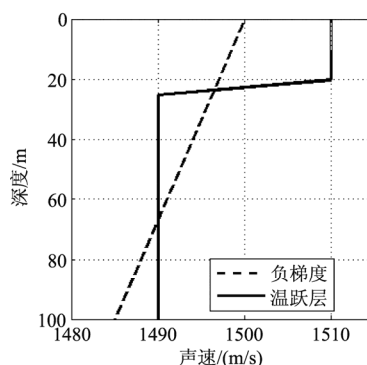


图 6 声速剖面图

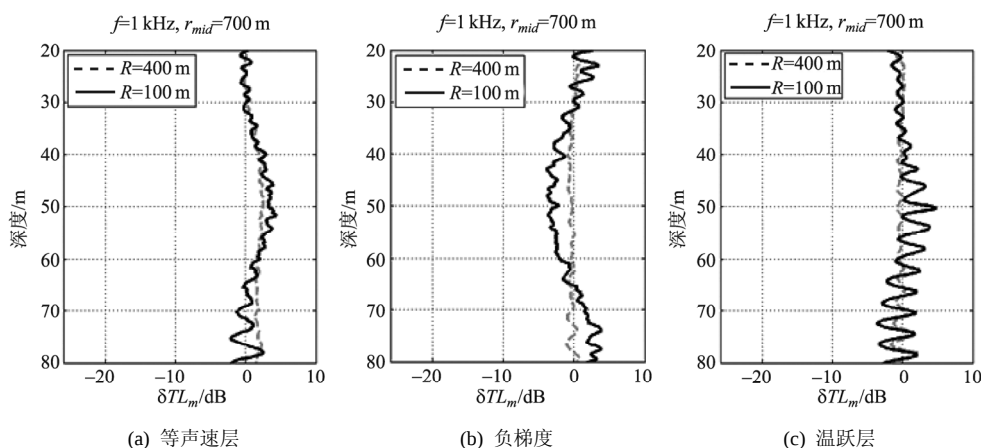


图 7 相对平均传播损失深度变化曲线

对于点声源的情况,当  $R = 100$  m 时,等声速层和存在温跃层的情形 HAM 法效果较好,在 20 m~40 m 深度范围内,  $\delta TL_m$  起伏小于 3 dB,负梯度情形效果稍差,  $\delta TL_m$  起伏约为 6 dB; 当  $R = 400$  m 时, HAM 法对三种声速剖面情形均有很好的效果,在 20 m~40 m 深度范围内,  $\delta TL_m$  起伏约 2 dB。总之,不论哪种声速剖面, HAM 法均能大大减小  $\delta TL_m$  在深度方向的起伏,从而使“等传播损失条件”近似成立。

下面分析采用 VAM 法的情况。图 8 是采用 VAM 法后平均传播损失  $TL_m$  随水平距离的变化曲线,接收点深度 30 m。假设被测目标长度为  $L$ ,在声线水平入射方向上的投影长度  $L_p$ ,必有  $L_p \leq L$ 。若  $L = 100$  m,那么根据图 8,三种声速剖面情形下,在任意  $L_p$  距离区间内,  $TL_m$  起伏不超过 1 dB,也就是说 VAM 法可以极大地“校除”声场起伏,满足“等传播损失条件”。

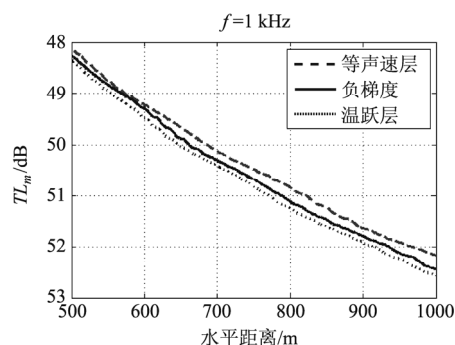


图 8 VAM 法平均传播损失随水平距离变化曲线

比较而言, VAM 法比 HAM 法有效性更高。直观看来,原因有二: (1) VAM 法是对声强在深度方向取平均,所以声速的垂直分布对它基本没有影响; (2) 浅海中,点源声场的局部垂直起伏大于局部水平起伏。可以预见, VAM 法适用于所有声速垂直分布的情形。

6.2 物理意义

HAM 法和 VAM 法的物理意义相同，都是通过  
在某一空间维上对(2.3)式求平均，消除相干项  $\chi_{coh}$   
引起的声场空间起伏。

需要特别指出的是，HAM 与 VAM 的“平均”  
均是对声强在某一空间维上的平均，而不是对声压  
幅值的平均，更不是对目标强度测量值的直接平均。

6.3 试验方式与效率

HAM 与 VAM 的海上试验方式不同，HAM 法  
需要测量船锚泊（或自由漂浮），被测目标在一定  
距离范围内的固定深度上机动；VAM 法要求被测

目标固定，测量船在固定距离上改变声源深度进行  
试验。与 HAM 法相比，VAM 法的技术难度大，需  
要辅助设施将目标固定在水下，但是 VAM 法的效  
率更高。英国进行潜艇目标强度测量试验时，便是  
用水鼓将潜艇固定在水下进行测试。

表 1 为 HAM 法与 VAM 法对比列表。

本文均假设声源是点声源，但是 HAM 法和  
VAM 法对水平阵也是适用的，只要保证被测目标在  
水平阵的主波束内即可。如果声源是垂直阵，需要  
根据水文环境和测试距离合理设置被测目标的深  
度，HAM 法也是适用的。VAM 法不适用于垂直阵。

表 1 HAM 法与 VAM 法对比列表

|     | 物理意义                                | 有效性               | 试验效率         | 技术难度                   |
|-----|-------------------------------------|-------------------|--------------|------------------------|
| HAM | 在 $r$ 方向取平均，减小相干项<br>引起的在垂直方向的声场起伏。 | 对文中所述三种声速剖面情形均有效。 | 较低，浪费部分试验数据。 | 小                      |
| VAM | 在 $z$ 方向取平均，减小相干项<br>引起的在水平方向的声场起伏。 | 对文中所述三种声速剖面情形均有效。 | 高            | 较大，需要辅助设施<br>将目标固定在水下。 |

7 结论

本文从简正波的角度讨论了浅海点源声场空  
间起伏的原因，给出了应答器法适用的前提条件，  
即“等传播损失条件”。对基于应答器法的水平平  
均测量法（HAM 法）进行了理论分析，并提出一  
种新的浅海环境中大型水下运动平台声目标强度  
的测量方法——垂直平均测量法（VAM 法）。对比  
分析了 HAM 法和 VAM 法的有效性、物理意义、  
试验效率和技术难度，指出 VAM 法比 HAM 法具  
有更高的有效性和试验效率，不过 VAM 法比 HAM  
法技术难度更高。

不论是 HAM 法还是 VAM 法，“平均”是对声  
强在某一空间维度上的平均，而不是对声压的平  
均，更不是对目标强度测量值的直接平均。否则，  
将不能满足等传播损失条件。

参 考 文 献

[1] HACKMAN R H, SAMMELMANN G S. Multiple-scattering analysis

for a target in an oceanic waveguide[J]. J.Acoust.Soc.Am, 1988, 84(5): 1813-1825.

[2] GIDDINGS T E, SHIRRON J J. A model for sonar interrogation of complex bottom and surface targets in shallow-water waveguides[J]. J.Acoust.Soc.Am, 2008, 123(4): 2024-2034.

[3] WU T W. On computational aspects of the boundary element method for acoustic radiation and scattering in a perfect waveguide[J]. J.Acoust.Soc.Am, 1994, 96: 3733-3743.

[4] INGENITO F. Scattering from an object in a stratified medium[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1987, 82: 2051-2059.

[5] 范威, 范军, 陈燕. 浅海波导中目标散射的简正波-Kirchhoff 近似混合方法[J]. 声学学报, 2012, 37(5): 475-483.

[6] SARKISSIAN A. Extraction of a target scattering response from measurements made over long ranges in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1996, 102(2): 825-832.

[7] URICK R J. Principles of Underwater Sound[M]. NewYork: McGraw-Hill, 1983.

[8] JENSEN F, KUPERMAN W, PORTER M, et al. Computational Ocean Acoustics[M]. Second Edition, NewYork: Springer 2011.

[9] PORTER M. The normal mode program-KRAKENC, 2009.

[10] ZHOU J X. Low-frequency geoacoustic model for the effective properties of sandy seabottoms[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2009, 125(5): 2847-2866.