

潜艇目标强度起伏统计模型

李建龙¹, 王新宁^{1,2}, 范 军¹

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 海军潜艇学院, 山东青岛 266071)

摘要: 研究潜艇目标强度动态起伏规律, 从统计意义上对目标强度进行分析, 建立合适的目标强度起伏统计预报模型, 并获得其统计参数。依据水下目标亮点理论, 从散射截面起伏统计模型推导出目标强度起伏统计模型(Ts 分布模型), 并通过单壳体和双壳体 Benchmark 潜艇模型进行实验验证。目标强度动态起伏规律实验结果与 Ts 分布模型吻合较好, 得出 Ts 分布模型能够准确地描述潜艇目标强度起伏特性。

关键词: 目标强度; Ts 分布; Benchmark 潜艇; 统计模型

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-01-0001-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.01.001

A statistical fluctuation model of submarine target strength

LI Jian-long¹, WANG Xin-ning^{1,2}, FAN Jun¹

(1. Shanghai Jiao Tong University School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai 200240, China;

2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: The fluctuation law of submarine target strength is studied and the target strength is analyzed statistically. An appropriate statistical fluctuation model of target strength has been developed, and the statistical parameters obtained. Target strength statistical fluctuation model (the Ts distribution model) is deduced from Cross Section statistical fluctuation model on the basis of target highlight theory and verified by the experiments of the single hull and the double hull submarine models respectively. The Ts distribution model accords well with the experimental results. It can be concluded that Ts distribution model can accurately describe the statistically characteristics of submarine target strength.

Key words: target strength; the Ts distribution; Benchmark submarine; statistical model

0 引言

水下的目标强度^[1]是描述水下目标回波特性的一个重要参数, 在主动声呐及目标主动声隐身设计、主动声呐信号处理等领域具有重要意义。实际主动声呐工作条件和海上实验测量中, 由于目标运动、声波入射方位角和测量平台运动等随机因素影响, 目标强度的测量结果是随机变量, 存在很大起伏。而目前较为成熟的目标强度预报模型都是确定性模型, 所预报结果不能反映目标强度起伏特征。因此在实际工程应用中, 经常不能反映目标强度的实际随机情况而存在较大误差。这样就必须从统计意义上对目标强度进行分析, 建立合适的起伏统计模型, 并获得其统计特征。

在雷达散射中已经对飞行器的雷达散射截面^[2]起伏特性建立了一系列的起伏统计模型, 从传统的瑞利模型、斯威林^[3](Swerling)I、II、III、IV 模型到

更为精确的赖斯(Rich)模型、对数正态模型(Log-normal)和 χ^2 (Chi-square)模型^[4]。这些模型适用于不同类型雷达目标, 基本涵盖了目前雷达目标散射截面的起伏特性, 并较为广泛应用于雷达设计和探测中。这些模型为研究声呐的目标强度起伏统计模型提供了参考依据。但是由于声呐与雷达各自目标在外形结构、运动方式和探测频段上有很大差异, 这些模型及模型中相关参数也存在一定差异, 因此必须对水中声呐目标强度起伏特性进行理论和实验研究, 以建立适合声呐工程使用的目标强度起伏统计模型。

依据水下目标亮点理论, 对目标强度起伏特性进行理论研究, 建立目标强度起伏统计模型。然后通过单壳体和双壳体 Benchmark 潜艇模型湖试实验, 来验证所建立的目标强度起伏统计模型的普适性和正确性, 并获取统计特征。

1 目标强度起伏统计模型

根据水下目标回波的亮点理论, 任何一个复杂目标都可以等效成若干个散射亮点的组合, 相干迭

收稿日期: 2012-10-05; 修回日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11104183)

作者简介: 李建龙(1988—), 男, 广东珠海人, 硕士, 研究方向为水下目标声散射。

通讯作者: 范军, E-mail: fanjun@sjtu.edu.cn

加的目标强度 TS 可以写成^[5]:

$$TS = 10 \lg \left| \sum_{m=1}^N H_m(\vec{r}, \omega) \right|^2 \quad (1)$$

其中, $H_m(\vec{r}, \omega)$ 为第 m 个散射亮点的传递函数。

在实际主动声呐探测中, 潜艇目标一般都处于运动状态, 各亮点参数随方位角、俯仰角和距离的随机变化呈现出随机起伏。考虑潜艇处于远场声呐探测, 俯仰角为零的情况, 测量周向回波特性, 进行统计分析。

由于水下目标的亮点复杂性, 亮点间相干迭加形成目标强度的起伏特性。这里应用概率密度函数 (Probability Density Function, PDF)^[6] 来描述随机变量的随机特征。 χ^2 概率分布是具有通用性的新一代统计模型, 可以描述更多种类的散射目标, 它包含了传统的斯威林型 I、II、III、IV 型模型。 χ^2 分布模型适用的目标为大型的、起主导作用的散射体加上大量较小的随机散射体。声呐散射截面的概率密度函数与雷达散射截面的概率密度函数非常类似, 即符合 χ^2 分布模型^[7]:

$$p_\sigma(\sigma; k, \bar{\sigma}) = \frac{1}{\Gamma(k)} \frac{k \left(\frac{k\sigma}{\bar{\sigma}} \right)^{k-1}}{\bar{\sigma}^k} e^{-\frac{k\sigma}{\bar{\sigma}}} \quad (2)$$

式中: σ 为散射截面统计变量; $\bar{\sigma}$ 为 σ 的均值; 统计参数 k 为半自由度, 自由度 $n=2k$, 理论上 $k = \bar{\sigma}^2 / D(\sigma)$ 。 χ^2 分布模型的表达式比较简洁, 变参数只有一个 k , k 值可以不是整数, 因而拟合曲线精度高。

由于目标强度 $TS = 10 \lg(\sigma / 4\pi)$, 由式(2)推导得到目标强度的概率密度函数为

$$p(TS; k, \overline{TS}) = \frac{0.23}{\Gamma(k)} \left(\frac{10^{0.175}}{e^{0.2375 - \psi(k)}} \right)^k e^{-\frac{10^{0.175}}{e^{0.2375 - \psi(k)}}} \quad (3)$$

式中: \overline{TS} 为 TS 的均值; $\psi(k) = \Gamma'(k) / \Gamma(k)$ 。统计参数依然只有 k , k 值越小表征目标强度起伏越剧烈。为了方便描述, 拟定义符合式(3)的目标强度概率密度分布为 Ts 分布模型, 即 $TS \sim Ts(k, \overline{TS})$ 。

本文需要用所建立的 Ts 分布模型去拟合目标强度实验测量结果的概率密度函数, 用拟合误差来表征拟合程度的好坏, 百分比拟合误差定义为

$$e_f = \frac{\sum |p_i - \hat{p}|}{\sum p_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中: p_i 为测量数据的统计概率; \hat{p} 为统计模型拟合概率。拟合误差值越小, 拟合越精确, 说明目标强度起伏规律越符合 Ts 分布模型。

2 实验验证

以单壳体和双壳体 Benchmark 潜艇模型为实验

对象。单壳体潜艇为 1/20 缩比模型, 长为 3.1 m; 双壳体潜艇为 1/40 缩比模型, 长为 1.55 m, 非耐压壳与肋板的厚度为 0.8 mm, 耐压壳的厚度为 1 mm。因为 Benchmark 标准模型具有一般潜艇外形的基本特征, 所以实验的分析结果具有一定的普遍意义。实验在某湖实验站完成, 水深约 20 m, 发射阵 -3 dB 水平半开角为 5° , 垂直半开角为 10° 。单壳体潜艇模型实验中, 布放深度 $h=5$ m, 发射阵与目标几何中心之间距离 $d=10$ m; 双壳体潜艇模型实验中, 深度 $h=3$ m, 距离 $d=8$ m。实验吊放距离确保发射波束可以照全目标, 同时吊放深度避免了湖面和湖底的干扰。实验布放如图 1 所示, 发射阵和目标中心线在同一水平线上。实验中均采用单频信号 60 kHz, 测量潜艇目标周向旋转 360° 的目标强度, 测量方法采用对比法^[1]。

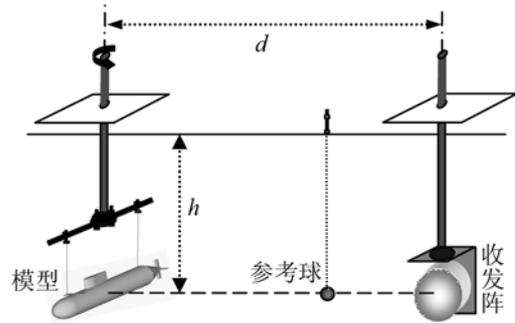


图1 实验布放示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental layout

潜艇方位角定义如图 2 所示, 声波从艏部入射时方位角定义为 0° , 艉部入射时为 180° , 以此类推。实验过程中, 潜艇模型俯仰角保持 0° 。

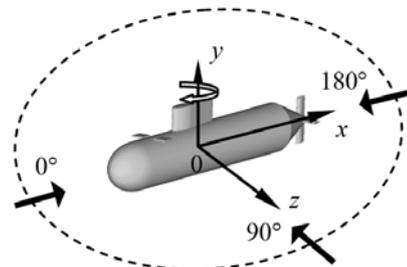


图2 方位角示意图

Fig.2 Definition of azimuth

2.1 单壳体潜艇

下面以单壳体 Benchmark 潜艇模型的实验结果来初步证明 Ts 分布起伏模型的正确性。实验的时域回波结构如图 3 所示, 呈现典型的“蝴蝶型”, 并可以清晰地分辨目标外壳各部位产生的几何亮点回波。因为模型较大, 需要使用较粗的绳子进行吊放, 所以能够从图中看到绳子的回波, 在提取目

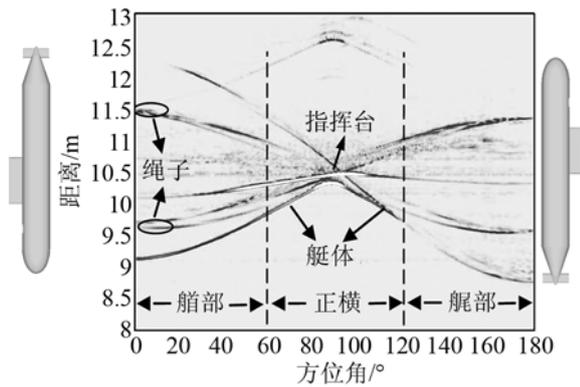


图 3 单壳体潜艇模型时域回波结构

Fig.3 The distance-angle spectrum of single hull submarine model

标强度时需要剔除绳子的影响。

结合亮点理论，对于单壳体潜艇，在艏部 0°~60°范围内，对潜艇回波起主导作用的强散射亮点有艇艏外壳(类球体)；在正横 60°~120°范围，强散射亮点有艇身外壳(类圆柱体)和指挥台围壳；在舰部 120°~180°，强散射亮点有艇艉外壳(类圆锥体)、螺旋桨和舵。潜艇周向目标强度实验结果和板块元理论预报^[8]对比如图 4 所示，两者吻合很好。

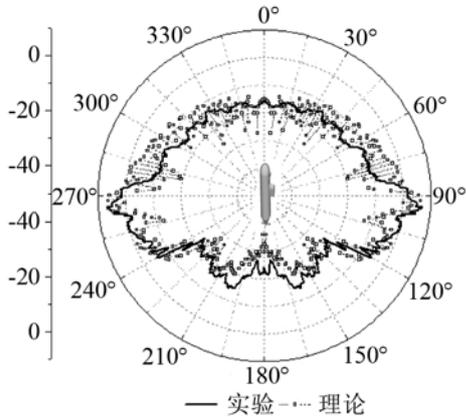
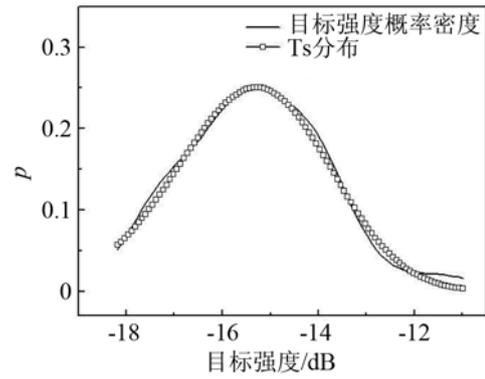


图 4 单壳体潜艇模型目标强度实验与理论对比

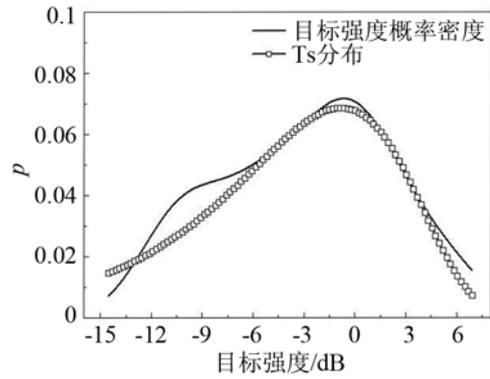
Fig.4 Target Strength of single hull submarine model (experiment versus theory)

根据单壳体潜艇的亮点结构特征，把全方位视向范围划分为艏部、正横和舰部。对三个典型方位视向的目标强度进行统计分析，分别应用 Ts 分布模型拟合其概率密度函数，拟合结果如图 5 所示，表 1 为拟合参数。

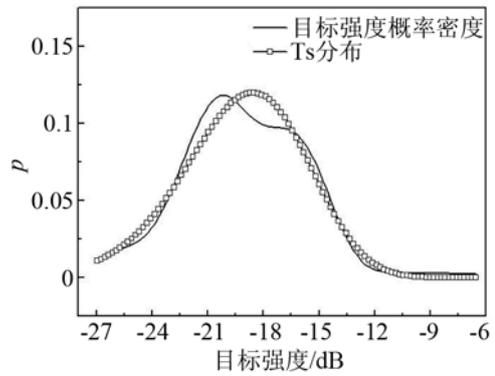
从表 1 可得，正横平均目标强度最大，艏部次之，舰部最小；正横的统计参数 k 最小，说明起伏最剧烈，艏部起伏相对较平缓。由于在正横，艇身外壳和指挥台围壳两个亮点散射作用最强，而且随着方位角的改变相干叠加效果不断变化，所以导致正横平均目标强度最大，起伏剧烈。从拟合误差上看，正横最大，舰部次之，艏部最小。总体而言，



(a) 艏部



(b) 正横



(c) 舰部

图 5 单壳体潜艇模型Ts分布模型拟合结果

Fig.5 Ts distribution model fitting of single hull submarine model

表 1 单壳体潜艇拟合参数

Table 1 The simulation result of single hull submarine

方位视向	\overline{TS}/dB	k	e_f
艏部	-15.51	2.51	5.66
正横	-4.59	0.70	17.26
舰部	-19.40	1.80	14.26

初步证明 Ts 分布模型能够准确地描述单壳体潜艇目标强度起伏特征。

2.2 双壳体潜艇

目前潜艇壳体结构分为单壳体和双壳体，为了从广度上说明 Ts 分布起伏模型的适用性，下面以

Benchmark 双壳体潜艇模型的湖试实验来进一步验证。时域回波结构实验结果如图 6 所示,从图中可以清晰地分辨目标各部位产生的几何亮点回波。与单壳体潜艇相比,双壳体潜艇最大的区别在于多了肋板贡献作用。潜艇周向目标强度实验结果和板块元理论预报对比如图 7 所示,两者一致性很好。

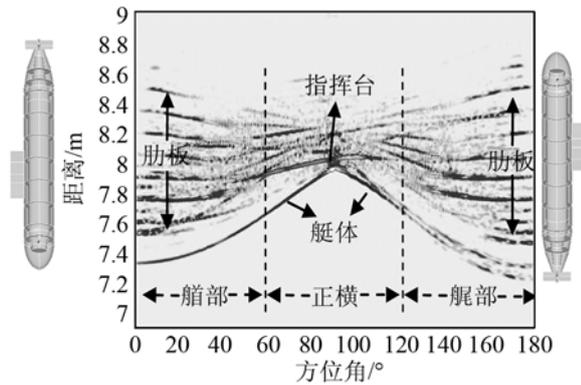


图 6 双壳体潜艇模型时域回波结构

Fig.6 The distance-angle spectrum of double hull submarine model

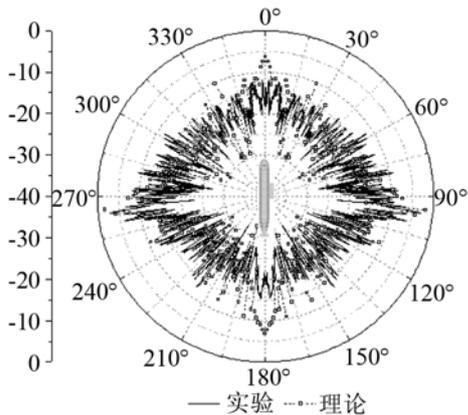


图 7 双壳体潜艇模型目标强度实验与理论对比

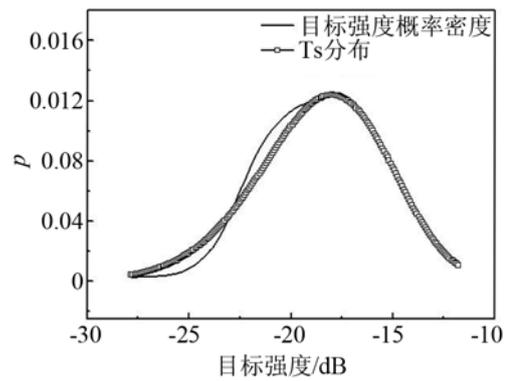
Fig.7 Target Strength of double hull submarine model (experiment versus theory)

根据时域回波结构,可以看出肋板在正横的散射作用较弱,而在艏艉部较强,所以同样把全方位视向范围划分为艏部、正横和艉部,对三个典型方位视向的拟合结果如图 8 所示,表 2 为拟合参数。

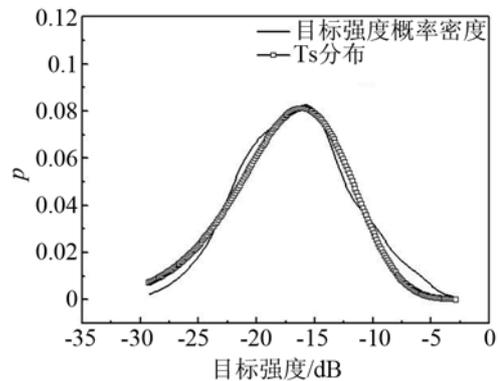
从表 2 可以看出,与单壳体潜艇类似,双壳体潜艇在正横平均目标强度最大,统计参数 k 最小。但是由于肋板的作用,艏艉部的平均目标强度更接近正横。从拟合误差上看,正横较大,艏艉部较小,进一步验证 Ts 分布同样能够描述双壳体潜艇目标强度起伏特征。

3 结论

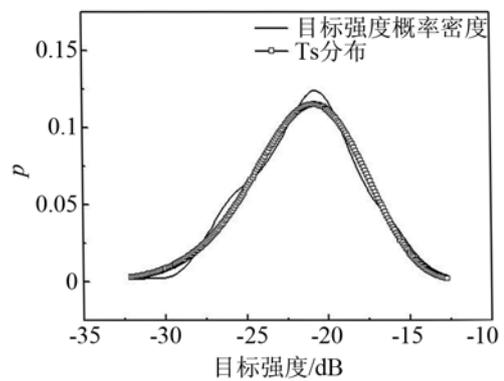
本文建立 Ts 分布模型来描述潜艇目标强度起



(a) 艏部



(b) 正横



(c) 艉部

图 8 双壳体潜艇模型的 Ts 分布模型拟合结果

Fig.8 Ts distribution model fitting of double hull submarine model

表 2 双壳体潜艇拟合参数

Table 2 The simulation result of double hull submarine

方位视向	\overline{TS}/dB	k	e_f
艏部	-18.82	2.08	11.50
正横	-16.61	0.95	17.04
艉部	-21.77	1.85	12.30

伏特征,并通过单壳体和双壳体 Benchmark 潜艇模型实验进行验证。

(1) 根据潜艇的亮点结构特征,需划分艏部、正横和艉部三个方位视向分别进行统计分析。

(2) 潜艇目标强度随方位角变化剧烈,通过 Ts 分布模型中的参数 \overline{TS} 可以直观地描述目标强度的

平均大小。经过对比分析, 正横的目标强度总体比艏艉部要大。

(3) Ts 分布模型统计参数 k 表征目标强度的起伏剧烈程度, 值越小, 起伏越剧烈。分析可得, 正横的统计参数较艏艉部小, 起伏更剧烈, 拟合误差也较大。

参 考 文 献

- [1] 尤立克. 水声原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990, 231-255.
Urick R J. Principles of underwater sound[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1990, 231-255.
- [2] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 10-132.
HUANG Kangpei, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Characteristics of radar target[M]. Beijing: Publishing house of Electronics industry, 2005, 10-132.
- [3] Peter Swerling. Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases[J]. IEEE Trans. AES, 1997, 33(2): 698-709.
- [4] 曾勇虎, 王国玉. 基于 χ^2 分布的目标 RCS 起伏特性分析[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(2): 115-118.
ZENG Yonghu, WANG Guoyu. Analysis of target RCS statistically characteristics basic on χ^2 distribution[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(2): 115-118.
- [5] 汤渭霖. 声呐目标回波的亮点模型[J]. 声学学报, 1994, 19(2): 93-100.
TANG Weilin. Highlight model of echoes from sonar targets[J]. Acta Acustica, 1994, 19(2): 93-100.
- [6] 盛骤. 概率论与数理统计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
SHENG Zhou. Probability and mathematical statistics[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1988.
- [7] 林刚, 许家栋. 飞机 RCS 动态数据的统计模型研究[J]. 航空电子技术, 2002, 33(4): 16-19.
LIN Gang, XU Jiadong. Statistical model research of a plane's RCS dynamic measurement data[J]. Avionics Technology, 2002, 33(4): 16-19.
- [8] 范军, 汤渭霖. 声呐目标强度(TS)计算的板块元方法[C]// 中国声学学会 1999 年青年学术会议论文集, 1999, 31-32.
FAN Jun, TANG Weilin. The planar element method for computing target strength (TS) of sonar[C]// Acoustical Society of China Youth Conference Proceedings 1999, 1999, 31-32.