

蛙人回波建模与实验研究*

张 波[†] 刘文章

(大连测控技术研究所 大连 116013)

摘要 选用蛙人回波的简化模型,结合实验获得各主要因素对蛙人目标强度贡献的量值。分别选用简化的胸腔、躯干、大腿骨等人体器官和开式呼吸气泡群、干式潜水服、呼吸气瓶等的声散射模型。通过码头实验测量了蛙人的目标强度,频率为75kHz。在所有影响蛙人目标强度的因素中,开式呼吸气泡群对目标总强度贡献最大,其目标强度大于-16.9dB;其次是干式潜水服,约-17dB;再次是开式呼吸气瓶,约为-24dB;蛙人身体目标强度约-27.2dB;另外实验测量了肺部组织的目标强度,约-25.9dB,频率125kHz。理论模型和实验均表明,开式呼吸气泡群和潜水装备对蛙人回波的贡献远大于蛙人身体。

关键词 蛙人, 回波, 目标强度, 肺

Modeling and experimental study of echo from a diver

ZHANG Bo LIU Wen-Zhang

(Dalian Scientific Test and Control Technology Institute, Dalian 116013)

Abstract Models of sound scattering from a diver are chosen, to get the target strength (TS) of key scattering factors of a diver. Simple scattering models of human organs, including thorax, trunk, femur, and open-circuit bubble cloud, dry diving suit, scuba bottle are selected. The TS of the diver is measured in a wharf at 75kHz. Of all factors which effect the TS of a diver, open-circuit cloud are the most important, up to -16.9dB, dry diving suit the second at about -17dB, while open-circuit scuba bottle the third at -24dB, and the diver's body is the fourth at -27.2dB. Besides, the TS of lung tissues is measured to be about -25.9dB at 125kHz. The models and the experiments indicate that the open-circuit clouds and the diving setups are more important than diver's body in effecting the TS of a diver.

Key words Diver, Echo, Target strength, Lung

1 引言

近年来水下近程防御逐渐成为我国国防和国民经济建设的重要内容。水下侵入和袭击的主要实施者是蛙人,主动声纳是探测蛙

人的有效手段。目前,各国投入大量的力量研究针对蛙人、水下机器人等小目标的探测专用声纳技术^[1,2],进行了一系列浅海探测实验。文献^[3]建立了蛙人散射模型,仿真分析目标强度。文献^[4]海上实验测量了蛙人目标

2009-07-14 收稿; 2009-11-09 定稿

*船舶工业国防科技预研基金项目(06J3.1.7)

作者简介:张波(1982-),男,大连市人,硕士,工程师,研究方向:水下目标声散射特性。 刘文章(1980-),工程师。

(通信作者:张波 E-mail: zhangbo189@163.com)

Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Ltd. *Journal of Acoustics*, Vol. 29, No. 4, 313–318 (2010)
© 2010 The Authors. Journal compilation © 2010 John Wiley & Sons, Ltd.
All rights reserved. <http://www.cnki.net>

强度,测试频率为 100kHz,闭式呼吸器蛙人目标强度为-20~-25dB,开式呼吸所产生气泡群的目标强度约为-15dB。国内相关单位也已开展蛙人探测声纳的研究工作,大连测控技术研究所配套的港口检测系统已成功探测到 600m 远的蛙人,并实现自动探测和报警;山东省科学院和乌克兰共同研制的 TRONKA 蛙人探测声纳系统在青岛奥帆赛的水下安保中得到了成功应用^[5]。

但是各国大都从声纳设计或者浅海声传播的角度进行研究,而不是从被探测目标的角度进行研究,对蛙人回波机理的研究甚少,限制了蛙人探测、识别、报警技术的发展,成为制约蛙人探测声纳技术进一步发展的瓶颈。本文首先研究人体组织在声纳频段内的声学特性,然后通过理论建模和实验测量研究了蛙人身体和各种潜水装备的回波机理,获得了各主要因素对蛙人目标强度贡献的量值。现有的大多数蛙人探测声纳选择了 60kHz~100kHz 的声纳频段^[7],本文中实验频率选择在 75kHz 和 125kHz。

2 蛙人身体回波建模

2.1 人体组织的声学参数

声波在人体组织中的传播是非常复杂的。首先,对于声波,各种动物组织是非均匀的、各向异性的媒质,声速不仅跟频率和温度有关,而且随动物组织中各组份所占百

分比的不同而不同;其次,就声波散射来说,人体外形是不规则形体,而且人体内的各个器官以及骨骼组织也都是不规则形体。这些因素使得人体的回波机理非常复杂。另外,现有的关于动物组织声学特性的研究大都是以狗、羊、猪、牛、鼠、鱼等为研究对象^[7-13]。为了简化问题,作如下假设:

(1) 忽略人体组织与其他哺乳动物(如狗、羊、牛等)组织在声学参数上的差别,即认为人体组织与其他动物组织具有相同的声学参数,以借用现有文献中的数据。

(2) 动物组织(主要是肌肉和骨骼)是均匀的、各向同性的介质。并且仅考虑纵波,忽略横波。

(3) 在所考虑的频率和温度范围内,动物组织声速、密度为常量(肺部组织除外,其声速随频率变化明显),衰减系数随频率指数变化。肺部组织声速随频率作指数变化。

于是,可根据参考文献^[7-13]中的实验数据获得声纳频段动物组织的声学参数,见表 1。

脂肪、皮肤等组织的声学参数跟肌肉相当,本文中将其视为肌肉组织。

根据表 1,肌肉组织和水的特性阻抗比仅为 1.095(水中声速、密度分别取 1500m/s、1.0g/cm³),可见肌肉组织对水中声波的散射能力很弱,相比之下肺和骨骼具有更强的散射能力。据此可以初步推断,蛙人身体的回波主要来自肺部组织和骨骼。

表 1 人体组织的声学参数

组织名称	声速 (m/s)	密度 (g/cm ³)	衰减系数 (dB/cm)	备注
肌肉	1550 ^[8]	1.06 ^[7]	$\alpha = 0.14 f^{0.93} \times 8.686$ ^[9] , f 为频率,单位 MHz	
骨骼	3200 ^[10]	1.96 ^[10]	$\alpha = 8.0617 f^2 + 1.8888 f + 0.6566$ ^[11] , f 为频率,单位 MHz	根据文献中 数据曲线拟
肺	$v = 43.1 f^{0.39} - 20$ ^[12-13] , f 为频率,单位 kHz	0.4	$\alpha = 0.07 f^{0.84} + 7$ ^[12-13] , f 为频率,单位 kHz	合得到 α 、 v 的计算公式

2.2 胸腔(肺)模型

作者在文献^[14]中建立了海豚的球壳声散射模型,在此将该模型应用于人体胸腔建模。将人体胸腔简化为图1所示的球壳。介质1为水,密度 ρ_1 ,声速 c_1 ;介质2为肌肉组织,外半径 a ,内半径 b ,密度 ρ_2 ,声速 c_2^* ;介质3为肺部组织,密度 ρ_3 ,声速 c_3^* 。考虑到介质中声波衰减, c_2^* 、 c_3^* 为复数,其虚部根据衰减系数 α 获得。

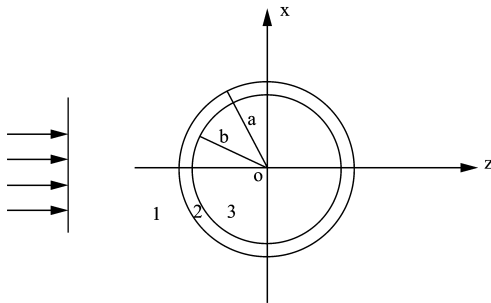


图1 胸腔的球壳散射模型

成年男子平均肺容量约为 $5L$ ^[15]。肺部组织的比重约为 0.4 g/cm^3 ^[16]。假设肺由密度与肌肉相同(1.06 g/cm^3)的软组织和空气组成,且当肺比重为 0.4 g/cm^3 时肺内气体量为 $5L$ 。设肺软组织体积为 L_0 ,则根据质量守恒有

$$1.06 \times L_0 \times 10^3 = 0.4 \times (5 + L_0) \times 10^3$$

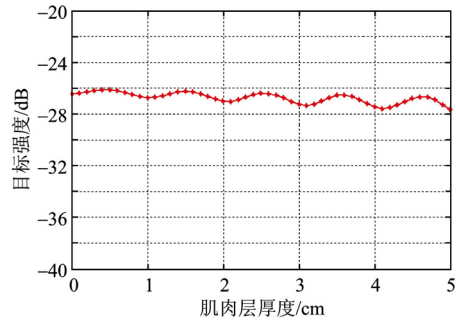
解得 $L_0 \approx 3L$,此时肺总体积为 $L_{\rho=0.4} = 8L$,则肺球半径为

$$b_{\rho=0.4} = \left(\frac{L_{\rho=0.4}}{\frac{4}{3}\pi} \right)^{\frac{1}{3}} = 12.4\text{ cm} \quad (1)$$

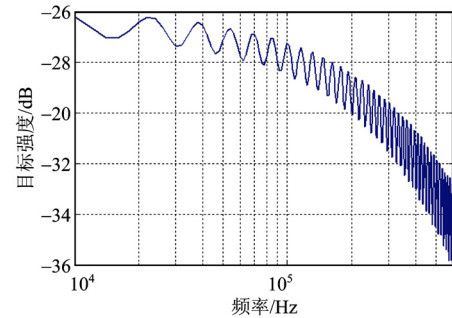
根据以上参数,利用文献^[14]中的方法计算人体胸腔模型在水中的目标强度,如图2所示。胸腔模型的目标强度随声波频率和球壳

(肌肉层)厚度的增加而减小,而且频率越

高,目标强度随球壳厚度增加衰减越快。当肌肉层厚度取 5 cm 时,对于 75 kHz 的声波,胸腔的目标强度约为 -28 dB 。



(a) 胸腔模型目标强度随肌肉层厚度的变化 $f=75\text{ kHz}$



(b) 胸腔模型目标强度随频率的变化 $a-b=5\text{ cm}$

图2 胸腔模型的目标强度

2.3 躯干、骨骼模型

如果忽略肺的存在,将人体简化为由均匀介质(肌肉)组成的有限长圆柱体,那么我们便可以利用图3所示有限长圆柱体模拟

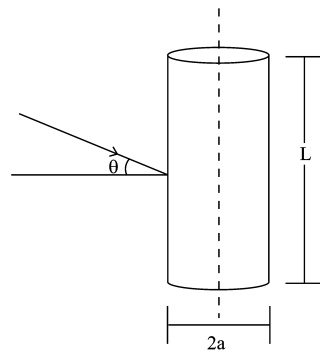


图3 有限长圆柱

人体。外部空间介质为海水,肌肉组织声学参数按表 1 选取。于是根据有限长圆柱散射声场理论^[17]计算人体的反向散射声场和目标强度。取有限长圆柱体长度为 $L=1\text{m}$, 截面半径为 $a=0.2\text{m}$ 。

目标强度可表示为^[17]:

$$\begin{aligned} TS &= 20\log\left(\left|\frac{p_s r}{p_i}\right|\right) \\ &= 20\log\left(\left|\frac{-iL \sin(\Delta)}{\pi \Delta} \sum_{m=0}^{\infty} B_m i^m\right|\right) \end{aligned} \quad (2)$$

上式中各符号的意义见附录。

同理,也可以利用有限长圆柱散射声场理论计算骨骼的反向散射声场和目标强度。骨骼组织的声学参数按表 1 选取。圆柱体长度 $L=0.4\text{m}$, 截面半径 $a=0.02\text{m}$ 。计算结果见图 4。

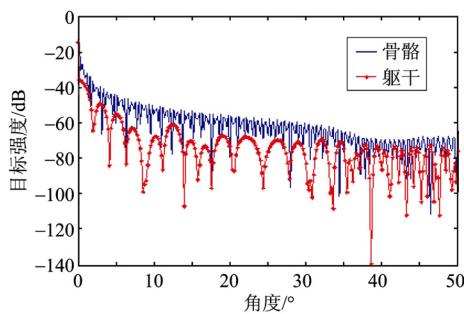


图 4 大腿骨和躯干目标强度随角度的变化, $f=75\text{kHz}$

根据以上分析可以得到以下结论:

- (1) 对于人体,肺部组织是最重要的声散射体, 75kHz 时,其目标强度约 -26.5dB ;
- (2) 除肺部组织以外,人体骨骼对人体回波起着非常重要的作用;
- (3) 人体骨骼对人体回波的奉献远大于肌肉组织;

- (4) 在人体结构上,颅骨、肋骨等骨骼组

织比肺脏等内脏器官更接近人体皮肤。随着频率增加,肌肉组织的“声屏蔽”作用愈来愈明显,肺部组织对人体回波的奉献愈来愈小,当频率增加到一定程度后,骨骼对人体回波的奉献将起主要作用。

3 蛙人潜水装备回波建模

3.1 气泡群模型

采用开式呼吸的蛙人,在水下呼吸时将产生大量气泡,气体来自气瓶。满容量时,气瓶内压缩空气重约 3.2kg 。正常潜水情况下,每瓶压缩空气可供蛙人呼吸约 40 分钟,以每分钟呼吸 30 次计算,每次呼出气体约 2 升 (1ATM)。设蛙人开式呼吸产生的气泡群由半径为 a 的气泡组成,忽略气泡间的二次及二次以上的散射,气泡群的目标强度为:

$$TS_{\text{气泡群}} = TS_{\text{气泡}} + 10\log_{10}(N) \quad (3)$$

式中 N 为气泡个数, $TS_{\text{气泡}}$ 为单个气泡的目标强度,其计算方法见文献^[18]。根据上式计算气泡群的目标强度 $TS_{\text{气泡群}}$, $TS_{\text{气泡群}}$ 随单个气泡半径 a 的变化曲线如图 5 所示。

更准确的计算气泡群的目标强度,需要测量气泡群中气泡半径的概率分布,并考虑气泡间的二次散射,但是不论如何,气泡群有着相当大的目标强度。

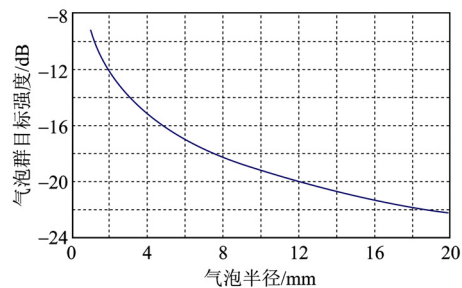


图 5 气泡群目标强度随气泡半径的变化

3.2 潜水服模型

蛙人着干式潜水服潜水时, 在蛙人皮肤和潜水服之间会有一空气层。空气相对于水可近似为绝对软的介质, 因此空气层的存在, 使得着干式潜水服蛙人的目标强度与人体内部结果无关, 仅与蛙人在水下的体积和表面几何形状有关。

我们用扁椭球体代替此时的蛙人。扁椭球体内部为空气, 三个半轴的长度分别为: $a=20\text{cm}$ 、 $b=30\text{cm}$ 、 $c=50\text{cm}$ 。利用板块元方法^[19]计算其目标强度, 结果如图6所示。图中“平行于 ab 平面”指入射声线平行于扁椭球 a 、 b 轴所界定的平面, 横轴角度为入射声线与 c 轴的夹角。其他两条曲线与此相类。

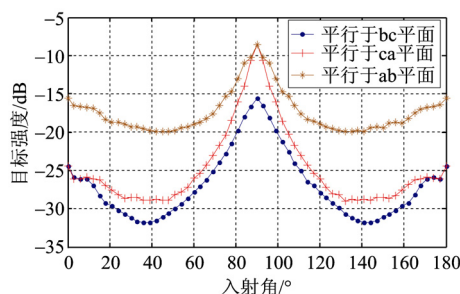


图6 扁椭球目标强度随角度的变化

3.3 呼吸气瓶模型

如图7所示, 蛙人呼吸器近似为有限长

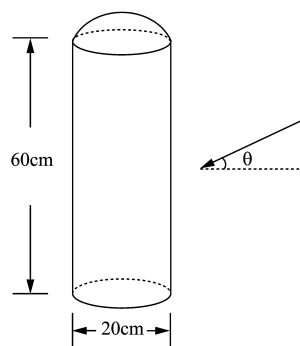


图7 蛙人呼吸气瓶模型

圆柱体, 底面为平面, 顶端近似为半球体。横截面半径 10cm , 高 60cm 。蛙人呼吸器瓶的材质大都为钢或者铝。假设呼吸器表面对声波是“绝对硬”的, 利用板块元方法^[19]计算蛙人呼吸器的目标强度, 结果如图8所示。

蛙人呼吸气瓶目标强度均值为 -24dB 。

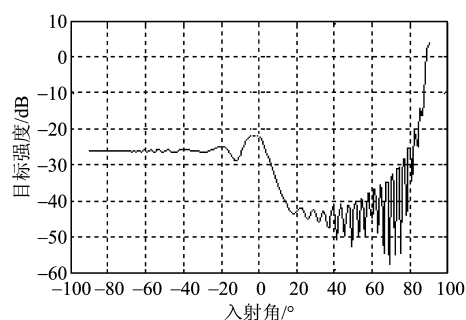


图8 蛙人呼吸气瓶目标强度随角度的变化

4 实验测量及数据分析

分别对肺部组织回波和蛙人回波进行了实验测量, 设备连接框图见图9。

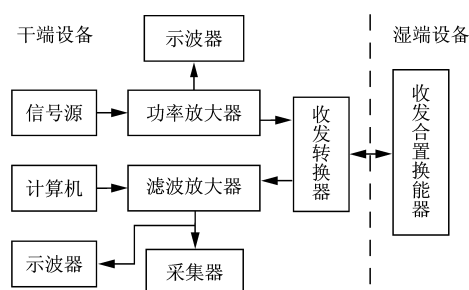


图9 实验设备连接框图

4.1 肺部组织回波测量

测量了肺部组织(猪肺)的侧向目标强度, 均值 -25.9dB , 频率 125Hz 。跟利用理论模型(即 $h=0$ 的胸腔模型)计算的结果相当, 理论值为 -27.5dB 。实验示意图见图10。测量过程中, 肺内气体量约占肺总容量的 $2/3$ 。

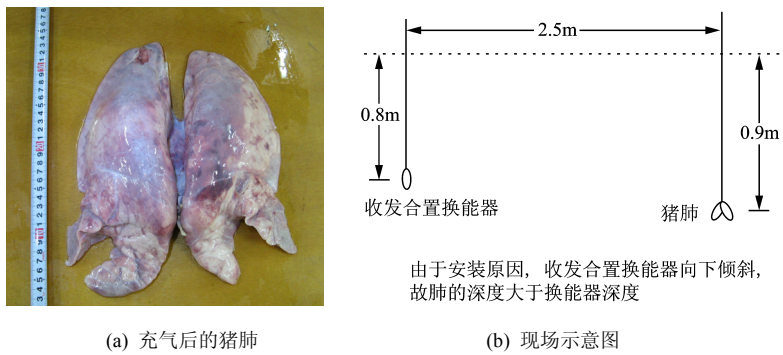


图 10 肺部组织回波测量实验

4.2 蛙人回波测量

通过码头实验，“比较法”测量了蛙人的目标强度，频率 75kHz，蛙人与换能器间距

22m，水深 10m。收发合置换能器-3dB 波束开角 7.7°（在蛙人位置波束截面圆直径约 3m）。测量结果见表 2、3。

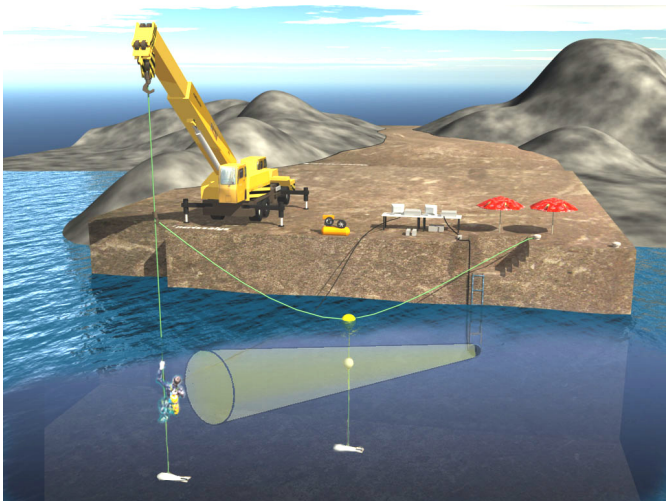


图 11 蛙人回波测试实验现场示意图

表 2 蛙人状态分类及目标强度（75kHz）

状态分类	呼吸方式	是否穿潜水服	潜水深度 (m)	主要目的	目标强度 (dB)	标准差 (dB)
a	呼吸气瓶	是	4	测量各影响因素的总回波	-16.1	2.3
b	空气压缩机	是	9	测量开式呼吸气泡群的回波	-16.9	1.92
c	空气压缩机	是	4	与 a 对比，分析呼吸气瓶的回波强度	-17.0	2.4
d	呼吸气瓶	否	4	与 a 对比，分析干式潜水服对回波的影响	-20.6	2.21
e	憋气	否	4	测量蛙人身体的回波	-27.2	2.4

表 3 蛙人目标强度测量值与理论值 (75kHz)

测量对象	目标强度 (dB)	理论模型	目标强度 (dB)
穿干式潜水服蛙人、呼吸气瓶、部分气泡	-16.1	穿干式潜水服蛙人	-21
穿干式潜水服蛙人、部分气泡	-17.0		
气泡群	-16.9	气泡群	-15
蛙人身体、呼吸气瓶、部分气泡	-20.6	呼吸气瓶	-24
蛙人身体	-27.2	胸腔	-28

下面对测量结果进行分析:

(1) a、b 两种状态, 目标强度测量值相差仅 0.8dB, 可见在所有因素中, 气泡群对蛙人回波贡献最大。直径约 3m 的圆形波束仅能覆盖蛙人身体和部分气泡, 从海面至水深 2.5m 范围内的气泡处在主波束以外的区域, 这使得 a、c、d 三种状态下, 气泡群对目标回波的影响减小了, 因此如果计及海面附近的气泡对回波的影响的话, a、c、d 三种状态蛙人的目标强度会比现的在测量结果更大。另外由于海流的影响, b 状态下, 发射换能器主波束也没有覆盖所有气泡, 所以气泡群目标强度测量值比实际值小。

(2) 将状态 c、d 与状态 a 比较。状态 a、c 差别不大, 仅 0.9dB, 而状态 a、d 差别较大, 为 4.5dB。由此可见, 干式潜水服比呼吸气瓶对目标强度的贡献更大。这是因为干式潜水服和蛙人皮肤间空气层的存在大大增加了潜水服的声波散射能力, 从而使得目标回波强度较大。

(3) 声波频率 75kHz, 蛙人身体的目标强度约为-27.2dB, 跟理论值 (-28dB) 相符。

5 结论

本文分别选用了简化的胸腔、躯干、大腿骨等人体器官和蛙人开式呼吸气泡群、干式潜水服、呼吸气瓶等的声散射模型, 并通

过实验测量了肺部组织和蛙人的目标强度。可获得如下结论:

(1) 在所有影响蛙人目标强度的因素中, 蛙人开式呼吸所产生的气泡群对目标回波贡献最大, 其目标强度大于-16.9dB; 其次是干式潜水服, 其目标强度测量值为-17dB, 考虑到气泡的影响, 干式潜水服目标强度稍小于-17dB; 再次是开式呼吸用呼吸气瓶, 其目标强度约为-24dB。

(2) 相对于潜水装备, 蛙人身体对回波贡献很小, 其目标强度仅为-27.2dB。在所考虑的频率范围内, 导致人体回波的最主要因素是肺部组织, 其次是骨骼。肌肉、脂肪、皮肤等人体组织的密度和声速跟水的密度和声速相当, 由它们引起的很小, 但是声波在这些组织中衰减较大, 一定程度上减小了蛙人身体的回波。

如果蛙人穿湿式潜水服, 采用闭式呼吸, 由于闭式呼吸气瓶的体积远小于开式呼吸气瓶的体积, 且穿湿式潜水服时潜水服跟蛙人皮肤间充水, 蛙人的目标强度会大大减小, 小于-25dB。此值较采用开式呼吸方式、穿干式潜水服蛙人的目标强度小约 10dB, 大大减小蛙人的可探测距离。

参 考 文 献

- [1] Colin M G E D, Beerens S P, Ainslie M A. Optimum sonar frequency for diver detection in harbors. International Conference on Detection and Classification of Underwater

- Targets 2007. Proceedings of the Institute of Acoustics, 2007, 29: 213-220.
- [2] Crawford A M, Vance C D. Observations from demonstrations of several commercial diver detection sonar systems. Oceans 2007, 1-3.
- [3] Sarangapani S, Miller J H, Potty G R, et al. Measurements and modeling of the target strength of diver. Oceans 2005: 952-956.
- [4] Hollett R.D., Kessel R.T., Pinto, M.. At-Sea Measurements of Diver Target Strengths at 100 kHz: Measurement Technique and First Results. UDT Conference Proceedings, 2006: 146-152.
- [5] 张颖, 孙继昌, 郭威. 蛙人探测声纳系统在奥帆赛中的应用. 气象水文海洋仪器, 2008, (3): 47-50.
- [6] 张波, 陈小泉. 蛙人探测及蛙人探测声纳. 中国科技信息, 2009, (367): 51-52.
- [7] Ludwig G.D. The Velocity of Sound Through Tissues and the Acoustic Impedence of Tissues. J.Acoust.Soc.Am., 1950, 23: 862-866.
- [8] Edward D. Verdonk, Samuel A. Wickline, and James G. Miller. Anisotropy of ultrasonic velocity and elastic properties in normal human myocardium. J.Acoust.Soc.Am., 1992, 92(8): 3093-3050.
- [9] Dunn F and Coss S A. Ultrasonic Differential Diagnosis of Tumors. New York: G Kossoff and M Fukuda, 1987.
- [10] Fre' de' ric Padilla, Francoise Peyrin, Pascal Laugier, Prediction of Backscatter Coefficient in Trabecular Bones Using a Numerical Model of Three-dimensional Microstructure. J.Acoust.Soc.Am., 2003, 113(2): 1122-1129.
- [11] S.A.Goss, R.L.Johnston, F.Dunn. Comprehensive Compilation of Empirical Ultrasonic Properties of Mammalian Tissues. J.Acoust.Soc.Am., 1978, 64(2): 423-457.
- [12] Dunn.F.. Attenuation and Speed of Ultrasound in Lung. J.Acoust.Soc.Am., 1974, 56(5): 1638-1639.
- [13] Philip J. Berger. Velocity and attenuation of sound in the isolated fetal lung as it is expanded with air. J Appl Physiol, 2005.
- [14] 张波, 马忠成, 刘文章. 海豚声散射特性的理论建模及实验研究. 应用声学, 2010, 29(2).
- [15] 冯克俭. 生理学. 北京: 人民教育出版社, 2005.
- [16] 张敏. 人体解剖学和组织胚胎学. 北京: 人民教育出版社, 2004.
- [17] Stanton.Sound scattering by cylinders of finite length.I.Fluid cylinders. J.Acoust.Soc.Am., 1988, 83(1): 64-67.
- [18] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1981: 315-318.
- [19] 范军, 汤渭霖. 声纳目标强度 (TS) 计算的板块元方法. 声学技术, 1999, 增刊: 31-32.

附录

$$\Delta = kL \sin \theta$$

$$B_m = -\varepsilon_m \frac{i^m}{1 + iC_m}, \quad (\varepsilon_0 = 1, \varepsilon_m = 2(m=1, 2, 3, \dots))$$

$$C_m \equiv \frac{[J'_m(k^*a)N_m(k_1a)]/[J_m(k^*a)J'_m(k_1a)] - gh[N'_m(k_1a)/J'_m(k_1a)]}{[J'_m(k^*a)J_m(k_1a)]/[J_m(k^*a)J'_m(k_1a)] - gh}, g = \frac{\rho^*}{\rho}, h = \frac{c^*}{c}$$

以上各式中

$J_n(x)$ 为第 n 阶柱贝赛尔函数, $N_n(x)$ 为第 n 阶柱纽曼函数

$$k = \frac{2\pi f}{c}, k_1 = \frac{2\pi f}{c \cos \theta}, k^* = \frac{2\pi f}{c^* \cos \theta}$$