



水中目标回声特性测试 3D 微视频虚拟仿真实验

张培珍, 莫晴舒, 周光波, 莫秉戈

(广东海洋大学 电子与信息工程学院, 湛江 524088)

摘要: 水声测量技术被广泛应用于海防、油气勘探、地貌成像、探寻沉船等领域, 同时是海洋技术、海洋测绘、海洋科学等方向学科人才培养的关键理论和实验教学内容之一。运用 SolidWorks 软件设计实验系统所需的接收和发射换能, 以及不同种类 3D 虚拟模型, 结合 V-Ray 虚拟仿真渲染、AI 配音等多媒体技术搭建虚拟实验场景, 以板块元算法和 COMSOL 声固耦合-频域有限元法理论为基础, 完成不同目标散射声场数值仿真计算, 模拟 3D 场景的水中目标声特性测试虚拟仿真实验。虚拟仿真实验通过 3D 微视频方式展示, 不仅可以用来辅助教学, 提高学生对水中目标测试技术的深度认知, 同时可对普通民众进行声呐技术的科普教育。系统集水声工程科学研究、培育人才和服务社会功能集于一体。研究成果为扩大水声技术影响力和覆盖面发挥作用, 为水下目标探测技术创新发展提供参考。

关键词: 虚拟仿真实验; SolidWorks; 3D 微视频; 数值仿真计算

中图分类号: O427.2; G420

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20210453](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20210453)

3D Micro-video Virtual Simulation Experiment for Echo Characteristics Testing of Underwater Target

ZHANG Peizhen, MO Qingshu, ZHOU Guangbo, MO Bingge

(College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Acoustic measurement technology is widely used in coastal defense, oil and gas exploration, landform imaging, and shipwreck exploration. At the same time, the course is one of the key theoretical and experimental teaching contents for nurture talent in the fields of marine technology, marine surveying and mapping, and marine science. The transducers (transmitter and receiver) and different types of 3D virtual models required by the experimental system are designed by SolidWorks. The virtual experiment scene is constructed by V-Ray, artificial intelligence, and other multimedia technology. Based on the theory of planar element method and finite element method of COMSOL acoustic-structure coupling model in frequency domain, the acoustic scattering field of different targets is simulated. The simulation system can help students to understand the system structure, basic principle of echo, characteristic analysis method, and application fields of underwater target acoustic testing. The virtual simulation experiment is demonstrated by 3D micro-video, which can be used not only to assist teaching and improve students' deep cognition of underwater target testing technology, but also to popularize science education of sonar technology for common people. The system integrated with the scientific research of underwater acoustic engineering, the cultivation of talents and the service of society. The research results play an important role in expanding the influence and coverage of underwater acoustic technology, and provide a reference for the innovation and development of target detection technology.

Key words: virtual simulation experiment; SolidWorks; 3D micro video; numerical simulation calculation

水声测量技术包含了系统设计开发技术、信号分析和处理技术、水下传感器设计及探测技术等方向, 是海洋技术专业开展本科及研究生人才培养的实践基础课程。其中水中目标探测是课程学习的主要环节之一, 是结合水下信号检测、目

标识别、水声成像、水声通信等技术探测水中目标存在、位置、类型^[1-3]。水声目标探测技术涉及知识点多覆盖面广, 涵盖了探测系统及其功能实现的各个环节, 包含其众多功能的实现方法, 内容呈现点多、面广的特点^[4]。探测系统各项功能实

收稿日期: 2021-09-12; 修回日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(11974084); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目(230419137); 广东海洋大学声呐信号处理专题与思政教育案例库建设项目(040205112101)。

作者简介: 张培珍(1972-), 女, 博士, 教授, 主要从事水中目标声散射和信号处理方面的研究。E-mail: zhangpz@gdou.edu.cn

现方法的理论性比较强,而且许多结论是以公式推导形成,复杂的公式推导使得学生对课程的参与积极性削弱,特别是海试和湖试具有成本高、周期长的特点,难以在日常教学中随时随地展示。虚拟仿真技术通过综合软件技术,可便捷和直观重现真实场景,作为实践教学辅助手段得到关注。文献[5]认为虚拟实验室对于在校分析和学习技能以及对概念的理解水平提高有着高效性。最新的虚拟仿真实验室开发和设计大多采用 LabVIEW、全景技术或 LabVIEW 和 MATLAB 混编实现^[6-8]。对于水声工程类,还会加入数值仿真平台或 V-Realm Builder 虚拟现实技术创建^[9-10]。目前国内高校开发的水声工程虚拟实验室主要基于数值仿真模型,提供关于海洋环境、水动力学模型和结构模型的仿真实验^[11]。将拉格朗日法的 SPH 技术用于波浪特性虚拟仿真实验,可以再现海浪运动场景,在港航与海岸工程专业实验中采用^[12]。基于信号级海洋环境虚拟仿真,构造“人工海洋”教学研究平台,用于培养潜艇专业应用与实战化能力训练^[13]。以上研究在声学的理论基础和模拟仿真声场预报方面有较大突破,为虚拟实验室构建提出了较好思路。开发 3D 微视频虚拟仿真平台针对特定场景设计,以海豚水下目标追踪类比方式解释目标探测基本原理,对主动声呐技术进行释义,解释发射和接收换能器声能转换的基本原理,使得枯燥的公式推导带入故事性,增强学生在学习中的互动性和参与感。以主动声呐和换能器声能转换原理等理论知识、目标回波仿真实验相结合为主要内容,建立了具有高度直观性水中目标声特性测试虚拟仿真实验系统。通过目标测量过程、数值计算及回波仿真模块,结合编成程序实现目标声特性测试方法和技术学习。课堂教授辅以 3D 微视频虚拟实验教学,将水声目标探测知识性科普信息和虚拟仿真实验操作的专业性相结合,是将水声相关课程理论教学、实验内容与实际工程相结合的具体体现,可有效提升实验教学的效果、培养学生解决工程能力。

1 虚拟实验室架构设计

3D 微视频水中目标回声特性测试虚拟仿真实验室包括 5 个主要模块:公众号扫描登录模块、3D 模型展示模块、3D 视频播放模块、时域回波仿真和频域角度谱生成模块。3D 模型是通过 SolidWorks 软件制作;3D 微视频播放模块为平台提供

丰富的理论知识;数据处理模块可通过功能拓展方式,创新性开展目标回声信号处理的方法。

虚拟实验室操作流程如图 1 所示。另外虚拟实验平台可以通过搜索和关注公众号“水中目标声散射特性研究”,并在聊天框输入“3D 微视频科普与目标回声特性测试实验软件平台”,点击相关链接即可进入。

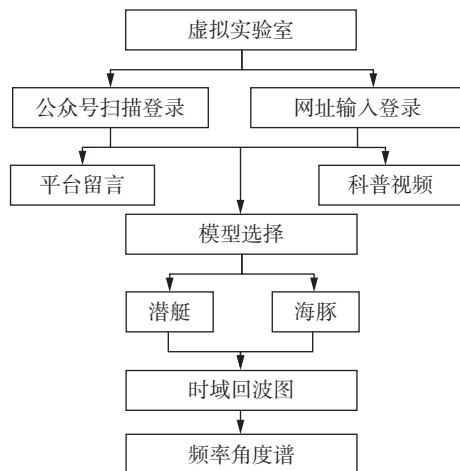


图 1 虚拟实验室操作流程图

2 虚拟实验室功能设计与实现

2.1 公众号登录模块

在此模块中,主要是展示自主设计的团队和公众号 logo。用户可以通过两种途径登录。

1) 在微信 App 主页面搜索框内搜索“水中目标声散射特性研究”。

2) 通过外部网站将微信推文链接转换成二维码,用户可通过微信扫描二维码转接到 3D 微视频高清版本播放界面,随时随地不受地方限制沉浸式学习。学习者对虚拟实验室操作或者图文有疑惑,可在公众号留言,团队会安排专人定期维护公众号,并在后台进行答疑,满足互动需要。

2.2 模型展示模块

运用 SolidWorks 软件构建系统所需的 3D 模型,主要包括:水中常见的典型目标如潜艇、海豚等 3D 模型,以及声信号发射和接收的水听器 and 发射换能器模型,部分模型如图 2 所示。在此模块中,用户可以通过切换视图方式从不同方位观测模型。

2.3 3D 微视频科普模块

描述声呐系统如何利用声波在水下的传播特性,完成目标探测和通信任务。如图 3 所示利用 3Dmax 软件完成 3D 虚拟实验场景设计,通过海豚类比方式对主动与被动声呐释义,阐述声呐系统

中发射器、水听器等重要声能转换装置的工作原理。视频内容在传播声呐技术前沿性科学成果的同时, 注重水声工程基础科学知识的挖掘。作品将科普性、专业性与趣味性相结合, 为观看学习者提供体验技术知识性和趣味性的专业科普知识。

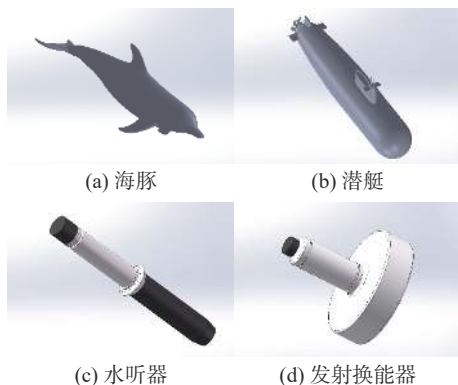


图2 3D模型展示



图3 虚拟实验室场景设计

视频时长约为 3 min, 主要包括以下 3 个环节。

1) 片头设计

通过身处大洋深处的动物们身上的“声呐”本领, 引出现代声呐技术的研究谜题。说明声波是唯一可以在水下远距离传播的波动形式, 阐述人们如何根据海豚的仿生原理制造了潜艇和声呐系统。如图 4 所示。

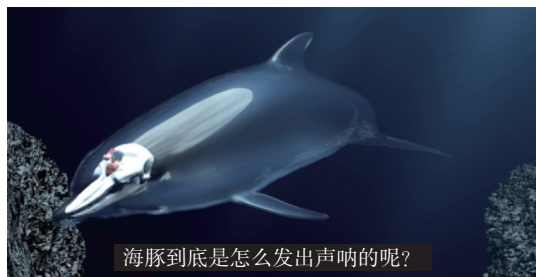


图4 微视频片头画面展示

2) 阐述主动声呐系统原理

解释海豚通过高频振动产生高频声波到达目标后, 用特殊的接收装置, 根据回波特性, 确定目标类型或躲避障碍。同时在视频中通过三维展

示方式, 给出换能器声能转换的基本原理。导入潜艇目标仿真探测回波特性实例, 说明声呐技术在海洋安全、海洋管理、资源开发等军事和民用领域的意义。如图 5 所示。

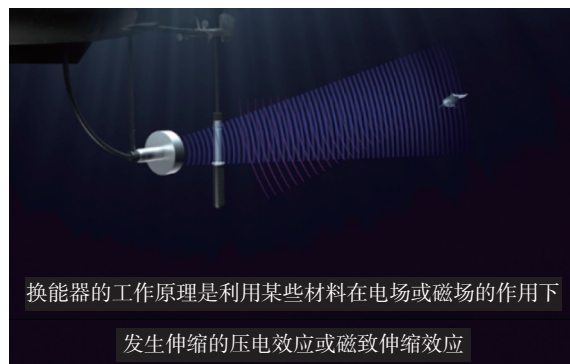


图5 换能器工作原理画面展示

3) 场景渲染和视频加工

为了视频更具真实性的 3D 场景, 对导入的潜艇、海豚等经典 3D 模型以及场景建模运用 V-Ray 渲染器进行场景渲染, 同时对生成的视频运动 AI 技术配音使视频更具可观性和专业性。

3 数据分析和处理模块

真实的水中目标回声测试应用工程大多是对海豚和潜艇等大型复杂目标探测, 但由于人力、物力以及财力的限制, 目前绝大多数高校声呐技术课程实验大多针对球体、圆柱体等常规目标完成相关水声实验, 不利于学生对声呐技术工程应用的理解。本系统对潜艇模型和海豚模型为例进行散射频谱特性数值计算, 利用板块元法或有限元法得到目标频率-角度谱, 并在数据分析和处理模块中, 采用时域回波仿真软件编程得到的距离-角度时域回波, 进行时域回波和频域特性虚拟仿真。

3.1 板块元法数值计算散射声场

对于复杂的声呐目标强度计算本实验室主要采用板块元法^[14], 其基本思想是将 3D 目标表面划分许多小曲面, 海豚和潜艇模型面元划分如图 6 所示。根据构造出的板块元近似面单元, 求出板块元散射声场矢量之和作为散射声场的近似值。

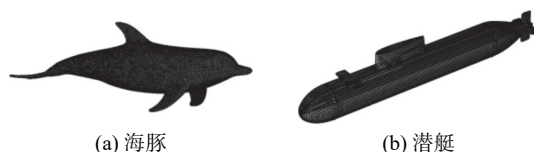


图6 模型面元划分示意图

将其壳体表面划分为 $M \times N$ 个三角形网格, 得到一系列面元, 计算每个面元的散射声场:

$$I_{\Delta s} = \int_{\Delta s} \exp[2ik_0(ux + vy)] V(\alpha) \cos(\alpha) dx dy =$$

$$V(\alpha) w \sum_{n=1}^K \frac{\exp[2ik_0(ux + vy)] (p_{n-1} - p_n)}{(2k_0 u + 2k_0 p_{n-1} v)(2k_0 u + 2k_0 p_n v)} \quad (1)$$

式中: i 为虚数单位; k_0 表示入射波的波数; (u, v, w) 是空间观测点的坐标; $V(\alpha)$ 为面元表面的反射系数; K 为面元顶点数, 本文是将目标模型表面划分为三角形网格, 此处的 $K=3$; (x_n, y_n) 是面元的第 n 个顶点坐标; $p_n = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$, 其中 $p_0 = \frac{y_1 - y_n}{x_1 - x_n}$ 。

将所有板块元的散射声场叠加得到潜艇散射声场的近似值:

$$I = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^M \int_{S_{a,b}} e^{2ik_0 \Delta r} \cos \alpha_{ab} V(\alpha_{ab}) dS \quad (2)$$

将取向不同的板块元经过坐标变换至同一平面后, 得到散射声场的近似解:

$$I = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^M \left[V(\alpha'_{ab}) w' \sum_{n=1}^K \frac{\exp[2ik_0(x'_n u'_{ab} + y'_n v'_{ab})] (p_{n-1} - p_n)}{(u'_{ab} + p_{n-1} v'_{ab})(u'_{ab} + p_n v'_{ab})} \right] \Big|_{S_{ab}} \quad (3)$$

3.2 COMSOL 多物理场

系统中构建的海洋哺乳生物海豚模型, 肺部是海豚的主要散射体^[15], 无法忽视肺部等复杂结构对海豚整体的散射作用。为最大程度还原肺部对海豚整体散射的作用, 系统利用 COMSOL 多物理场海豚不同部位设置不同材料的特性, 完成海豚的散射远场数值计算, 得到频率-角度谱。具体建模流程如图 7 所示。将 SolidWorks 软件建立海豚 3D 模型导入 COMSOL 多物理场仿真软件。模型构建过程引入 Berenger 提出的完美匹配层, 在目标周围构建一个无反射边, 避免目标受模型边界的反射、透射、吸收影响, 影响空间内的散射声场^[16]。在几何参数、材料属性设置完成后, 利用压力声学物理场对模型背景压力场和外场计算进行预设, 完成求解器设置和数据导出。

为保证远场条件, 计算的目标强度是距离目标中心 100 m 处。最后通过后处理得到海豚相关频率-角度谱如图 8(a)所示, 潜艇的相关频率角度谱如图 8(b)所示。

图 8(a)中, 0° 、 180° 、 360° 对应的是海豚的宽边, 90° 和 270° 分别对应海豚的头部和尾部, 模型

展示模块可以切换视角进行查看。图 8(b)中的 90° 和 270° 对应潜艇的宽边壳体, 180° 对应螺旋桨尾部, 0° 和 360° 对应半圆头部。

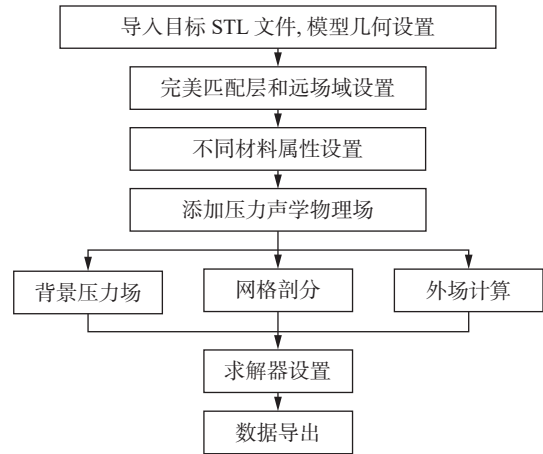


图 7 基于 COMSOL 的目标数值模型建模流程

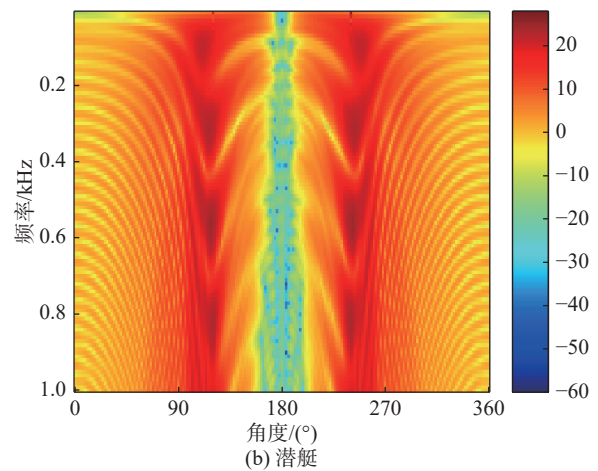
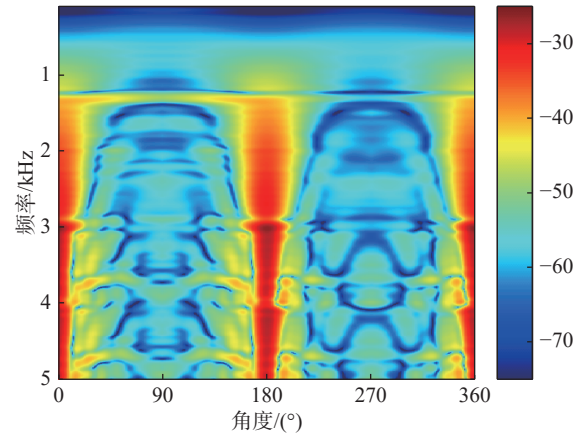


图 8 频率-角度谱

3.3 回波仿真

入射方向为 θ 的调频信号作为系统输入信号 $s(x, \theta)$, 其频谱表示为 $S(\omega, \theta)$ 。数值计算得到的频率-角度频谱作为系统函数 $H(\omega, \theta)$, 若将信号通

过线性系统输出为仿真时域回波 $y(x, t)$, 根据时域卷积定理, 计算距离-角度时域回波如下:

$$\begin{aligned} y(x, \theta) &= h(x, \theta) * s(x, \theta) \\ \Leftrightarrow Y(\omega, \theta) &= H(\omega, \theta) S(\omega, \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

根据式(4)求解 $Y(\omega, \theta)$ 傅里叶反变换, 即可得到距离-角度时域回波, 两种类型目标结果如图9所示。

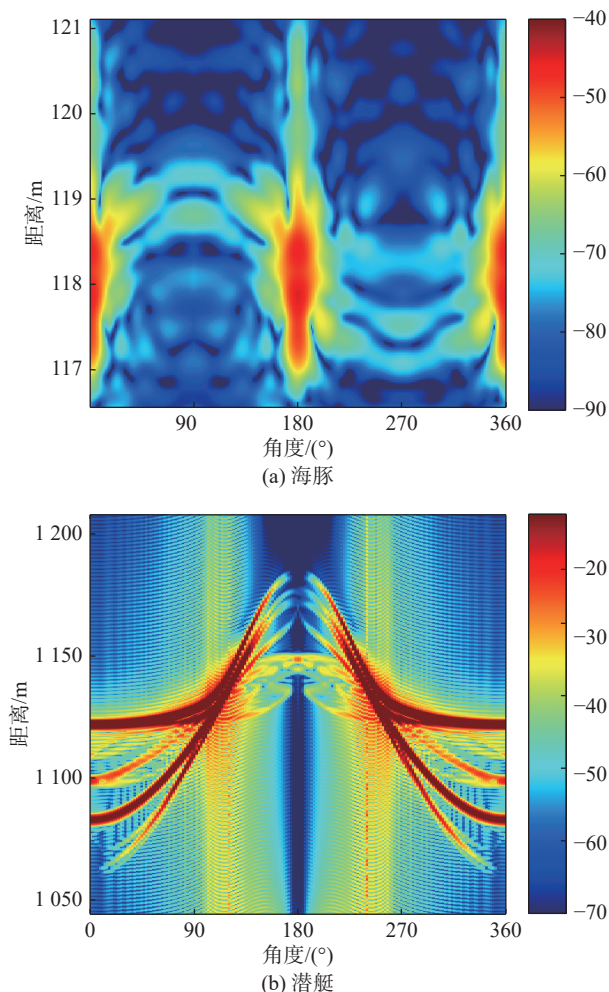


图9 距离-角度时域回波

4 结束语

传统教学技术向现代信息教学技术发展已成为大势所趋。3D微视频科普与目标回声特性测试实验软件平台将“公众号登录板块”“3D模型展示板块”“3D科普微视频板块和数据处理分析板块”结合, 通过虚拟现实平台架构技术, 弥补实际复杂海洋环境设备操作的不足, 创造良好的水中目标回声特性测试的虚拟学习空间。虚拟学习平台可以提供不同探测目标的左视、俯视和斜视等多方位视角图向用户简单展示仿真目标。为进一步提高学习用户的专业知识储备和编程工程应

用技能, 平台利用COMSOL多物理场有限元法和板块元法分别完成海豚和潜艇的频率-角度谱的数值计算及回波仿真。利用具有趣味性和专业性的3D微视频科普声呐系统工作原理, 本虚拟仿真实验平台不仅注重水声工程基础科学知识的阐述, 提供满足互动性和体验感的声呐技术科普资源, 辅助高校对水下目标探测技术的教学, 还能激发广大公众对现代声呐技术的兴趣, 开展对海洋安全、海洋管理、资源开发等知识普及。

参考文献

- [1] 塞耶·马汉. 海权对历史的影响: 1660—1783[M]. 范利鸿, 译. 西安: 陕西师范大学出版社, 2007.
- [2] HORTON J W. 声呐原理[M]. 冯秉铃, 译. 北京: 国防工业出版社, 1965.
- [3] URICK R J. 水声原理[M]. 洪申, 译. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [4] 李启虎. 不忘初心, 再创辉煌: 声呐技术助推海洋强国梦[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 253-263.
- [5] LAVANYA R, RAMACHANDRAN V. A study on the effectiveness of virtual lab in E-learning[J]. International Journal on Computer Science and Engineering, 2010, 2(6): 2173.
- [6] 陈玉明. 基于WEB的网络工程虚拟实验室的实现[J]. 电子测试, 2017(z1): 71-72.
- [7] 陈润静, 邓健, 何原荣, 等. 基于全景技术的测绘虚拟实验室展示与实现[J]. 科教导刊, 2021(11): 178-180.
- [8] 赵莉华, 张亚超, 金阳, 等. 基于LabVIEW和MATLAB虚拟实验室的实现[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(4): 62-64.
- [9] 于福建, 王斌, 张培珍. 起伏海底掩埋目标声散射特性数值仿真[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(6): 533-536.
- [10] 陈万紫, 张培珍, 黄健儿, 等. 动态海面方船舶六自由度运动仿真[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(1): 40-45.
- [11] 吴浩, 王永学, 孙毅超. 海洋工程虚拟仿真实验室建设与实践[J]. 实验室科学, 2020, 23(2): 172-174.
- [12] 付小莉, 张斌, 李卫超, 等. SPH技术在波浪运动特性虚拟仿真实验中的应用[J]. 实验技术与管理, 2021(5): 140-144.
- [13] 唐帅, 笪良龙, 张弛. 海洋环境效应虚拟仿真实验研究型教学模式探究[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(7): 214-218.
- [14] 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. [S.l.]: [s.n.], 1999.
- [15] WHITLOW W L A. The sonar of dolphins[M]. New York: Springer Verlag, 1993.
- [16] VERDONK E D, WICKLINE S A, MILLER J G. Anisotropy of ultrasonic velocity and elastic properties in normal human myocardium[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92(6): 3039-3050.