

水中目标声特性建模标准的编制与应用

范军^{1,2}, 龚志雄^{1,2*}, 张阳⁴, 贾兵⁴, 李桂娟⁴

(1. 上海交通大学海洋智能装备与系统教育部实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

3. 海洋工程全国重点实验室 上海 200240;

4. 大连测控技术研究所, 大连 116013)

摘要: 水中目标声特性建模(简称“水声目标建模”)在典型军用目标隐身设计、主被动探测、目标识别等国防应用领域具有重要意义。国内众多科研院所科研生产与应用环节需要对水中目标声特性进行建模,但缺乏统一的参考标准和规范,导致大量重复性工作和不可迁移性浪费。基于此,有关部门组织开展相关标准编制工作,目前已发布3项水声目标建模标准。本文旨在介绍一个辐射噪声(《水中目标辐射噪声特性理论建模与验证通用要求》)和两个声散射(《水中目标声散射计算用几何模型通用要求》《水中目标声散射特性理论建模与验证通用要求》)的建模标准,指导行业相关科研单位规范建模流程和提升建模成效,并以刚性球目标为例,分析已发布标准的应用情况。

关键词: 水声目标建模; 建模标准; 辐射噪声; 声散射

0 引言

自两次世界大战以来,声呐技术得到了突飞猛进的发展。目前,国外声呐技术处于稳定发展时期,而我国由于起步较晚和基础薄弱等原因,仍处于快速发展时期。水中目标声特性研究属于声呐技术发展最为关键的环节之一,可为目标隐身设计、主被动探测、目标识别提供关键特征和信息。因此,各科研院所等对水声目标建模的需求十分强烈和迫切。

水中目标声特性主要包括潜艇、无人潜航器等典型目标在工作状态下的辐射噪声特性^[1-2]和声散射特性^[3-5]。辐射噪声一般包括目标的机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声,可为我方目标的隐身设计和非合作水中目标的被动探测服务。声散射是指目标在声场激励下的再辐射声波,可为主动探测声呐提供可识别特征,服务于主动声呐应用相关的隐身与探测。随着我国水声行业快速发展,已形成多种结构、多类材料、多量级尺寸的复杂目标体系,对其声学特性建模和验证给众多用户单位提出巨大挑战。随着水中目标新型号、

新材料、新体系的增加,且各单位建模流程和模型检验方法不统一,造成模型验证和协作难以有效开展;因此,建立水中目标声特性建模标准和规范显得十分迫切和必要。

本文将系统介绍水中目标声特性建模标准的核心内容及参考选用原则。以刚性球目标的声特性仿真为典型案例,展示如何具体执行标准化的建模流程。结合刚性球目标建模的应用案例,展开标准实施的结果分析及讨论。最后,对三个水声建模标准规定要求和潜在应用价值进行了总结,以及对标准的使用和宣贯进行了展望。

1 水声目标建模标准化现状

针对水下一般目标的水声目标建模,已有大量学术论文发表,但涉及水声目标建模的标准罕有公开发布。通过文献检索,作者并未发现水声目标建模的国际标准,仅有一些水声通用信息和测量方面的标准,如美国声学学会(Acoustical Society of America, ASA)关于声学术语^[6]、声与振动参考值^[7],国际标准化组织(the International Organization for Standardization, ISO)关于浅水环境

* 通信作者: 龚志雄 zhixiong.gong@sjtu.edu.cn

船舶水声测量标准^[8]，和国际拖曳水池会议（International Towing Tank Conference, ITTC）关于实船水下噪声测量^[9]的相关标准和手册。国内也发布了部分水声测量的标准，如国防科学技术工业委员会发布了《舰船噪声限值和测量方法、潜艇艇体振动噪声测量》国家军用标准^[10]，中国人民解放军总装备部发布了《舰艇缩比模型回声特性测试方法》等国家军用标准。

由于水声目标建模是服务水下目标主被动探测、目标识别等重要国防应用的重要前提，科研院所等开展了大量的建模和仿真研究。针对工程复杂目标声特性建模和仿真问题，目前关于辐射噪声预报功能的商业软件包括 Comsol、Fluent、MSC Actran、VAOne 等，以及 OpenFOAM 开源平台；声散射预报代表性的商业软件包括 Comsol, LMS VirtualLab 等，以及基于高频几何近似方法的用户自编板块元程序^[11]。针对高效三维几何建模的计算机辅助工程软件（Computer Aided Engineering, CAE），代表性的商业软件包括 Hypemesh 和 Solidworks，且与各种计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）软件具有良好的集成性。但国内并没有关于水声目标建模和仿真计算的行业标准，导致复杂目标建模标准不统一，耗费大量人力的数值模型继承性较差。为了解决行业建模标准缺少问题，亟需集聚优势力量共同建立水声目标建模的行业标准和规范。

2 水声目标建模标准编制基本设想

2.1 标准内容简述

根据行业对水声目标建模标准的迫切需求，现已新编三个标准，其中一个是关于辐射噪声建模与验证的标准，两个是关于声散射几何模型、建模和验证的标准。

《水中目标辐射噪声特性理论建模与验证通用要求》标准，由上海交通大学联合相关科研单位编制。该标准规定了水中目标声辐射特性理论建模方法及模型验证流程等要求，适用于潜艇等水中复杂目标辐射噪声特性理论模型的建立、校验与使用，对空气中辐射噪声建模与验证也具有借鉴意义。

《水中目标声散射计算用几何模型通用要求》标准，由上海交通大学联合相关科研单位编制。该标准规定了水中目标声散射特性计算用几何模

型构建流程和典型目标的实体模型、网格模型的构建方法与评价要求，适用于水面舰船、潜艇、无人潜航器、鱼雷等水中目标声散射特性计算用几何模型的建立、校验和使用，其他水中目标声散射特性分析等相关工作可参照执行。

《水中目标声散射特性理论建模与验证通用要求》标准，由上海交通大学联合相关科研单位编制。该标准规定了水中目标声散射特性理论建模与验证的组织、程序及方法等要求，适用于自由场条件下典型水中目标声散射特性理论建模与验证，水中目标光学散射模型、水中目标电/磁模型可参照使用。

2.2 关键条款与规范

水声目标建模标准的关键条款包括几何建模、水声目标声特性建模和模型检验等通用要求。

(1) 几何建模通用要求

几何模型特指通过计算机建立的、用于辐射噪声和声散射仿真的数据模型，描述目标形状和大小信息，包括实体模型和网格模型。几何模型构建流程一般包括：需求分析、信息收集、几何造型、几何校核、模型清理、网格划分、模型诊断、附加属性定义等环节。以声散射为例，代表性构建流程见图1，具体要求详见标准《水中目标声散射计算用几何模型通用要求》。由于三大噪声源计算用几何模型差异大、规范难，辐射噪声计算用几何模型通用要求的标准暂未开展，仅在《水中目标辐射噪声特性理论建模与验证通用要求》6.4.2节中指出几何模型评估方法。需要注意：水下目标声散射计算用几何模型仅考虑水线以下的结构模型，辐射噪声计算模型需考虑目标整体结构模型及周围流体介质模型。

(2) 水中目标声特性建模通用要求

根据辐射噪声建模任务需求，分析、确定水中目标机械振动噪声、螺旋桨噪声、水动力噪声辐射特性理论建模的模型输入、输出参数。受限于发展水平，标准中螺旋桨噪声考虑不空化、无唱音情况下的螺旋桨直接辐射噪声，水动力噪声考虑外部湍流激励目标振动辐射噪声。由于三类噪声的产生机理不同，不能在同一框架下实现三类噪声源的统一建模，标准对三类噪声源分别进行声辐射特性理论建模，再采用分频段声源级叠加法将三类噪声合成总噪声。

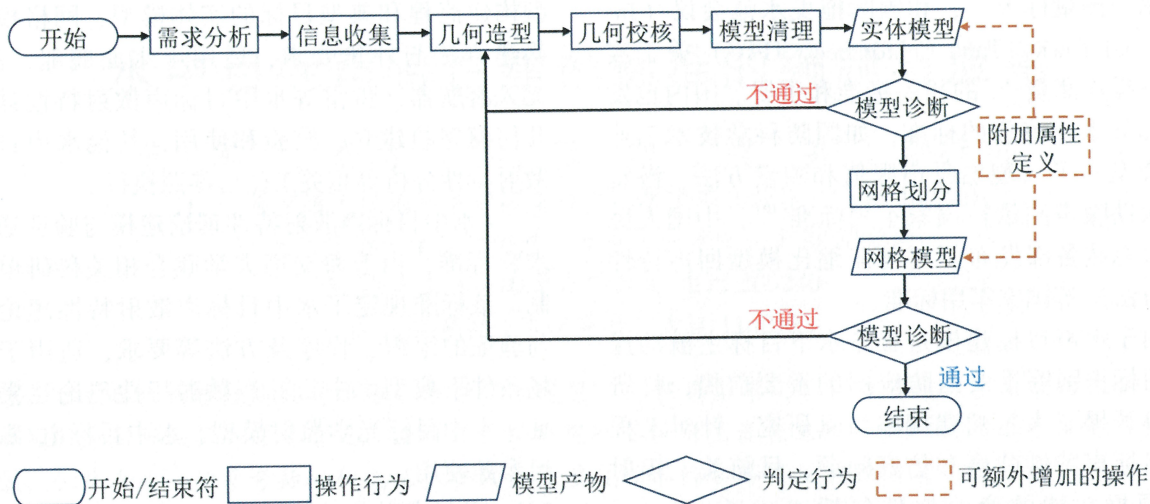


图 1 水中目标声散射建模用几何模型构建流程

根据声散射建模任务需求，分析、确定声散射特性理论建模的模型输入参数和输出参数。其中输入参数包括目标几何参数、目标材料参数、场景参数、发射信号形式参数、声源/接收阵指标参数、边界参数等六类，输出参数包括声散射特性数据和特征数据两类。辐射噪声和声散射具体建模通用要求包括模型计算和数据处理两方面，典型工作程序见图 2。

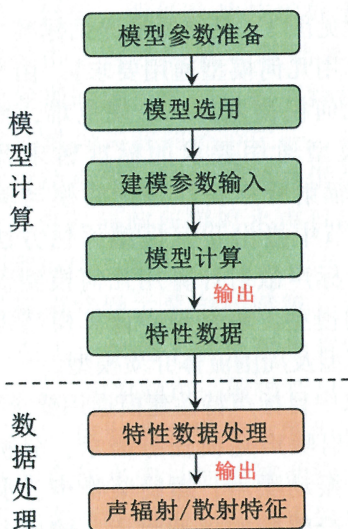


图 2 水下目标声特性模型计算和数据处理流程图

(3) 模型检验通用要求

水中目标声特性验模的工作程序主要包括需求分析、信息搜集、计算过程评估、数据验证与分析、验模结论撰写等，如图 3 所示。其中，计算过程评估主要包括建模方法、几何模型和计算流程的评估；数据误差分析包含几何模型误差、近

似模型误差和基于专家知识和信息来源的重新审核分析。最终，得出水声特性的验证结论和审核意见。

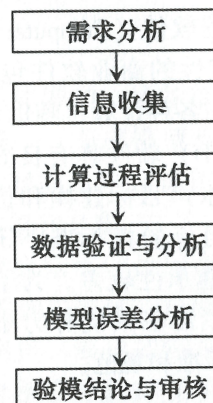


图 3 水中目标声特性模型验证工作程序示意图

3 水声目标建模模型选用原则

3.1 辐射噪声建模标准参考选用原则

目标辐射噪声特性数据和特征是水声目标被动探测的重要输入。《水中目标辐射噪声特性理论建模与验证通用要求》标准根据辐射噪声类型和特点，选择适合具体工程问题的理论模型和对应的仿真计算软件。首先明确水中目标噪声源主成分，如机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声中一类或几类组合。其次，根据水下目标辐射噪声关注频段，筛选出主要建模方法，可为相关行业的建模仿真提供相对权威的建模依据。表 1 给出了辐射噪声建模的选用推荐表，包含三大噪声源的建模方法、特点及适用频段。其中，环频率定

义为纵波波长等于圆柱壳周长时对应的频率。基于推荐方法，结合几何模型、材料参数和边界条件等信息，可仿真计算特定类型目标声辐射特性

数据。在获取特性数据后，进行下一步数据处理工作，从声辐射特性数据中提取水中目标声辐射特征。

表 1 辐射噪声模型选用推荐表

噪声类别	建模方法	方法特点	适用频段
机械噪声	水弹性方法、艇体梁模型	在舱段首阶谐振频率以下的频段内，艇体横截面形状保持不变的总体振动模态对其水下辐射噪声起主要作用，可采用艇体梁模型进行辐射噪声特性计算	低频
	水弹性方法，舱段—等效梁模型	在舱段首阶谐振频率至环频率频段内，舱段局部振动模态对水下辐射噪声起主要作用，可采用“舱段-艇体梁”组合模型进行辐射噪声特性计算	低频
	有限元方法	适用于艇体环频率以下的中低频段。在该频段内，艇体结构的模态特征最为明显，容易形成水下辐射噪声的线谱特征	中低频
	解析/数值混合法	适用于艇体环频率以下的中频段声特性计算	中低频
	统计能量法	在艇体环频率以上的频段内，艇体模态较为密集，结构的共振和反共振特点已不十分显著，可采用统计能量法等方法进行辐射噪声特性计算	高频
螺旋桨噪声	直接数值模拟	同时解出流场和声辐射特性，求解精度高，适用于在低、中雷诺数湍流噪声模拟，要求极大的计算资源	全频段声辐射计算
	流体力学模型与声类比模型的混合模型	分步求解流场脉动力源信息及声辐射特性，等效流动声源物理意义明确，体积分计算量较大，不考虑边界反射效应	低频声辐射计算，可应用非稳态雷诺平均模型、分离涡模型、大涡模拟模型及面元法、涡格法等与声类比模型（FW-H 模型等）的混合模型
			中高频辐射计算，推荐使用大涡模拟模型与声类比模型（FW-H 模型等）的混合模型
			低频声辐射计算，可应用非稳态雷诺平均模型、分离涡模型、大涡模拟模型及面元法、涡格法等与直接边界元模型的混合模型
流体力学模型与边界元模型的混合模型	分步求解流场脉动力源信息及声辐射特性，边界积分计算速度较快，可考虑边界反射效应	中高频辐射计算，推荐使用大涡模拟模型与直接边界元模型的混合模型	

续表

噪声类别	建模方法	方法特点	适用频段	
水动力 噪声	Corcos 模型	/	适用于迁移波数附近的高波数范围, 低波数区域的谱数值偏高, 连续谱函数	
	湍流脉动 压力频率 波数谱模型	Chase 模型	/	低波数范围扩展到声波数附近, 适用于低 Ma 数湍流激励下结构振动声辐射计算 (M 为马赫数, a 为目标最大尺度)
		Smol'yakov-Tkachenko 模型	/	适用于低 Ma 数湍流激励下结构振动声辐射计算, 波数谱较光滑, 分频段波数频率谱函数
		模态分析法	适用于湍流激励下结构振动	低频声辐射计算
	流激结构 振动声辐 射计算模型	结构离散法	忽略子单元振动和声场的相互耦合作用, 适用于表面曲率较大的航行体, 湍流激励下结构振动	中高频声辐射计算
		统计能量法	适用于湍流激励下结构振动	高频声辐射计算

3.2 声散射建模标准参考选用原则

简单、规则目标的声散射问题可基于分离变量法进行理论和数值建模。对典型水中复杂目标的声散射问题, 由于几何外形、材料组成、边界条件等较为复杂, 工程上一般采用数值建模方式。工程上常用的水中目标声散射特性理论模型包括: 有限元模型、板块元模型, 以及工程化亮点模型。在进行声散射特性建模和计算时, 需根据目标特点、计算频率、空间方位、距离、计算速度、坐标系要求等选择适合的模型。

《水中目标声散射特性理论建模与验证通用要求》、《水中目标声散射计算用几何模型通用要求》标准给出了水中目标声散射模型的选用推荐表, 如下表 2 所示。表中, k 为声场波数, 与声场频率 f 和声速 c 具有关系 $k = 2\pi f/c$; a 表示目标特征尺寸, 如潜艇的总长可作为特征尺寸。

表 2 声散射模型选用推荐表

	$ka < 2\pi$	$ka > 2\pi$
模型选择	有限元模型、 有限元-边界元模型	板块元模型、 工程化亮点模型
网格类型	体网格、体-面混合网格	面网格

4 水声目标建模标准应用示范

以水中目标刚性球声散射特性建模为例, 对

标准《水中目标声散射特性理论建模与验证通用要求》《水中目标声散射特性计算用几何模型通用要求》应用进行示例说明。

4.1 需求分析

针对以水中目标刚性球声散射特性建模需求, 确定声散射建模的输入输出参数。

(1) 模型输入参数

输入参数包括: 目标几何参数、目标材料参数、场景参数、发射信号参数、声源/接收阵指标参数、声源/接收阵指标参数、边界参数。模型输入参数表如表 3 所示。

表 3 模型输入参数类型

序号	参数类型	参数名
1	目标几何参数	面网格
2	目标材料参数	刚性
3	场景参数	收发合置
4	发射信号参数	频率
5	声源/接收阵 指标参数	距离
6	边界参数	自由场

(2) 模型输出参数

以目标强度 (Target Strength, TS) 作为模型输出参数, 进行声散射模型验证。

4.2 信息搜集

由于刚性球具有解析解，并且材质、尺寸等精确已知，因此前述模型输入参数精确可靠。

4.3 模型选用

根据目标特点、计算频率、空间方位、距离、计算速度等进行综合选取，其中以声散射建模无因次频率 kL (其中 k 为声波波数, L 为目标特征尺寸) 作为主要选用条件。

以刚性球为目标，刚性球半径 $a = 2\text{m}$ ，水中声速 $c = 1500\text{m/s}$ ，频率 $f = [2\text{kHz} \sim 6\text{kHz}]$ ，此时有

$$kL = \frac{2\pi f}{c}L = [16.8 \sim 50] > 2\pi$$

根据《水中目标声散射特性理论建模与验证通用要求》声散射模型的选用推荐表，此时适宜采用板块元模型，网格类型为面网格。

4.4 模型计算流程

水中目标声散射特性模型计算流程如图 3 所示。

(1) 模型参数准备

此时，模型输入参数表可确定如表 4，刚性球目标三维网格如图 4 所示。

表 4 模型输入参数类型

序号	参数类型	参数名	参数值
1	目标几何参数	面网格	波长 1/6
2	目标材料参数	刚性	刚性
3	场景参数	收发合置	收发合置
4	发射信号参数	频率	[16.8~50]
5	声源/接收阵 指标参数	距离	100m
6	边界参数	自由场	自由场

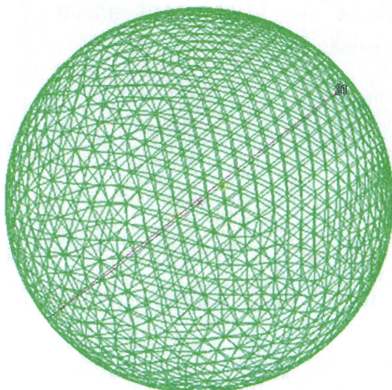


图 4 刚性球目标三维网格示意图

(2) 模型选用

由于声散射建模无因次频率 $kL > 2\pi$ ，适宜采用板块元模型。

4.5 数据处理

由于板块元模型能够直接输出计算对象的目标强度 TS ，因此，可以不用进一步处理即可获取需求参数——目标强度 TS 。

在 $kL > 10$ 时板块元模型计算结果与解析解误差小于 1dB，在 $kL > 20$ 时板块元模型计算结果与解析解误差小于 0.5dB。因此，该建模方法满足建模精度需求，如图 5 所示。

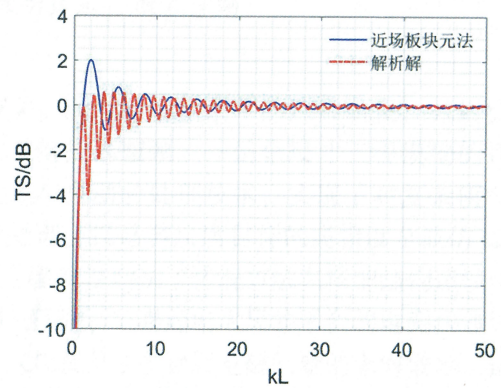


图 5 刚性球目标强度仿真与解析解对比

5 结论与展望

本文介绍了行业急需的三个水声目标建模标准，弥补了水声目标建模标准缺失的不足。水声目标建模标准的颁布，规范了水中目标声特性建模过程中的参数输入、几何模型、计算方法、过程评估、建模验证、误差分析等方法流程，将促进各科研院所在水声目标特性建模研究的协作攻坚和统一标准，具有巨大的潜在经济和应用效益。需注意，目标声学特性与所处环境息息相关，因此实际工程问题中需考虑入射和散射声场的传播建模与验证问题，可参考标准《水声传播特性理论建模与验证通用要求》。

参考文献

[1]何祚镛. 结构振动与声辐射[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.

[2]汤渭霖,俞孟萨,王斌. 水动力噪声理论[M]. 北京:科学出版社,2019.

[3]汤渭霖,范军,马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京:科学出版社,2018.

- [4] 范军. 水下复杂目标回声特性研究[D]. 上海交通大学, 2001.
- [5] 龚志雄. Bessel 波入射下目标声散射特性及声辐射力(矩)研究[D]. 华中科技大学, 2018.
- [6] ANSI/ASA S1.1-2013. Acoustical terminology[S]. New York: American National Standards Institute, Inc., 2013.
- [7] ANSI/ASA S1.8-2016. Reference values for levels used in acoustics and vibrations[S]. New York: American National Standards Institute, Inc., 2016.
- [8] ISO/FDIS 17208-3: 2025(en). Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 3: Requirements for measurements in shallow water[S]. Geneva: ISO, 2025.
- [9] Underwater noise from ships, full scale measurements[Z]. ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines, 2017.
- [10] GJB 763.7-89. 舰船噪声限值和测量方法 潜艇艇体振动噪声测量[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1989.
- [11] 范军, 杨阳. 潜艇目标回波特性预报国内外研究概况[J]. 散射辐射与传输学报, 2024, 2(1): 21-25.