

## 船舶降噪工程技术集成优化方法\*

程果<sup>1,2</sup>, 何琳<sup>1,2</sup>, 王迎春<sup>1,2</sup>, 崔立林<sup>1,2</sup>

(1. 海军工程大学 振动与噪声研究所, 湖北 武汉 430033;

2. 海军工程大学 船舶振动噪声重点实验室, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**在用船舶降噪工程受总体约束强、声学异常多等因素影响,传统新船建造的声学设计方法不能被直接应用。为此,提出了在用船舶降噪工程技术集成优化方法。根据需求设计顶层降噪指标,并通过四项标准进行检验;基于改装前测试数据和降噪技术储备情况,制定初步降噪技术集成方案;通过声学评估迭代,形成优化的指标分配体系和最终的降噪技术集成方案。模型试验验证结果表明,该方法能够有效实现在用船舶降噪工程的技术优化集成。

**关键词:**船舶;降噪;技术集成;声学指标

中图分类号:TB53 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2019)06-088-06

## Optimized composition method of the ships noise-control techniques

CHENG Guo<sup>1,2</sup>, HE Lin<sup>1,2</sup>, WANG Yingchun<sup>1,2</sup>, CUI Lilin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Vibration & Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. National Key Laboratory on Ship Vibration & Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** For the noise control of the ships, due to the rigid limit of the general conditions and the acoustical abnormality, the traditional acoustical design method of the new ships cannot be used directly. For the noise control of the in-service ships, the optimized integrating method of the techniques was proposed. Based on the tactical requirement, the top noise-control targets were designed, and the targets with four criteria were validated. Combining the noise data of the refit test and the existing techniques, the primary composition project of the noise-control techniques was established. With the acoustical evaluation and optimizing, the optimized distributive system of the targets and the final composition project of the noise-control techniques were obtained. The method was validated with a model experiment. The results showed that the method can achieve an optimized composition of the noise-control techniques in the refit of the in-service ships.

**Keywords:** ship; noise control; technique composition; acoustical target

在用船舶降噪改进,能够快速、批量提升船舶声隐身性能,适应新时期的海上对抗需求,具有重要意义。世界海军强国都在结合船舶的维修进行降噪改进工作<sup>[1]</sup>。我国过去由于技术水平等因素限制,船舶降噪改进工作仅局限于元件和设备级的换装升级,没有从总体上开展全面的降噪治理。随着国外探测能力的不断提升和我国减振降噪技术的快速发展<sup>[2]</sup>,逐步具备了开展在用船舶全面降噪工程的必要性和可行性。

与建造新船的声学设计相比,在用船舶外形结构等已经固化,降噪技术应用受到重量、空间等总体条件的制约,技术集成难度更大。而且在用船舶由于长期使用,异常噪声相对多发,降噪指标分配需要考虑实际状态,传统建造新船的声学设计方法不能直接应用于在用船舶降噪工程。

因此,必须提出适应在用船舶降噪工程的技术集成优化方法,以指导后续在用船舶降噪改进工作。

### 1 理论基础

在用船舶降噪技术集成优化方法,主要由三部分组成,具体操作流程如图1所示。

#### 1.1 制定顶层指标

一般而言,作为船舶的使用方,会根据船舶在执行任务过程中的定位和作用,提出相应的顶层噪声控制要求。当代船舶顶层降噪指标,除了总声级指标外,还将根据减小对抗中被发现、被定位和被识别的概率的需求,提出不同工况下宽带、窄带、线谱和瞬态噪声的控制指标。因此,在用船舶

\* 收稿日期:2018-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675529);湖北省自然科学基金资助项目(2019CFB247)

作者简介:程果(1988—),男,湖北武汉人,助理研究员,博士,E-mail:stunicorn@126.com

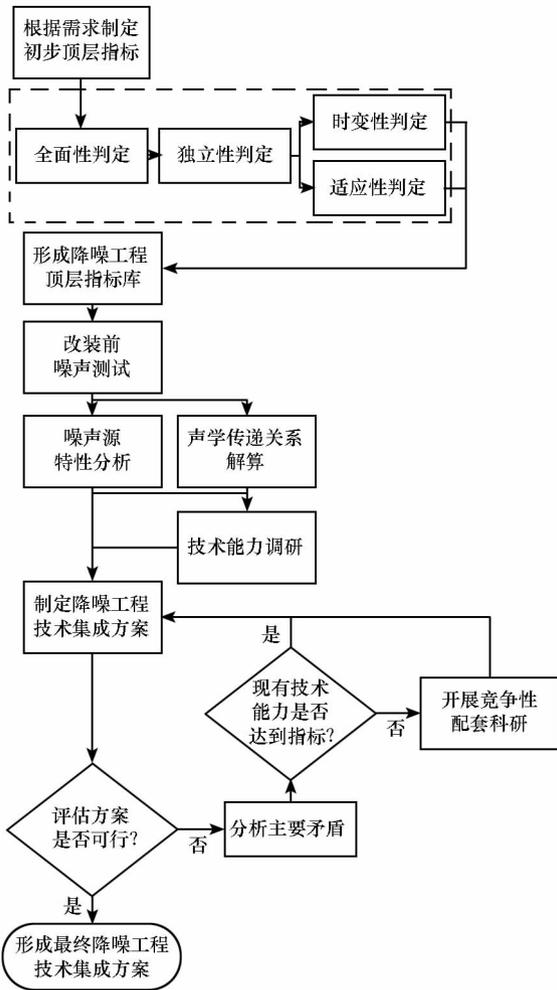


图1 在用船舶降噪工程技术集成优化流程

Fig. 1 Optimization flow of the noise-control techniques composition of the in-service ships

顶层降噪指标不是一个单纯的数,而是一个集合,包括总体声学性能、具体对抗需求和本船治理重点。

例如,某船舶A已使用10年,现需参加辐射噪声小于145 dB的船舶所组成的编队,完成8 kn巡航任务。但该船设计之初仅考虑了4 kn巡航任务下的隐身需求,且受当时技术水平限制,4 kn航速下噪声已超过145 dB。因此,需对该船进行降噪改装。

确定初步的降噪顶层指标集合。

1) 总声级指标。该船舶需要参加辐射噪声145 dB以下的船舶编队,为避免“短板效应”的出现,该船舶8 kn航速下噪声指标应在145 dB(10 Hz~50 kHz)以下。

2) 频带级指标。根据一般船舶声学模型计算,该船辐射噪声1/3倍频程谱源级指标限值在10~200 Hz频段内为119 dB,在200 Hz~50 kHz频段内按每倍频程6 dB衰减。

3) 线谱指标。在10~315 Hz频段内线谱数量低于3根,强度不超过对应宽带谱强度3 dB。

4) 临界航速指标。根据任务需求,推进器的临界航速不能小于8 kn。

5) 其他噪声指标,例如瞬态偶发噪声、声目标强度、自噪声强度等,均根据需要制定。

在初步取得顶层降噪指标集合后,这些指标间的关系还不明晰,部分指标可以通过其他指标表征。设计如下流程,可对各指标进行检验和判定。

1) 全面性判定:梳理船舶有哪些特征可能被敌方发现、定位或识别,检验指标中是否已经囊括。

2) 独立性判定:检验这些指标是否相互独立。

3) 时变性判定:检验各项独立指标是否是随时间变化的量,时变指标是否已经在船舶寿命范围内被充分评估。

4) 适应性判定:检验各指标是否能够反映各类对抗环境下的要求,环境影响是否得到充分评估。

还是以船舶A的降噪工程为例,初步降噪指标集合中,频带级和总声级相互之间是不独立的。上述示例中,如果船舶A满足“10~200 Hz频段内为119 dB,200 Hz~50 kHz频段内按每倍频程6 dB衰减”的频带级指标,根据船舶噪声一般规律计算,其总声级约为144.9 dB<sup>[3]</sup>,满足了145 dB的总声级指标。因此,总声级指标可以从指标集合中移除。

频带级指标、线谱指标都是时变参数,即随着船舶的使用,噪声量级会略有上升,线谱数量也会略有增加。因此在制定指标的过程中,应当预留一定余量,确保船舶后续服役期内能够满足指标要求。根据船舶声学状态变化规律(20~30年内增大5 dB左右)和剩余的服役期判断,噪声量级预留2~3 dB余量是比较合适的。

外界环境可对船舶辐射噪声、临界航速产生影响。以水深为例,不同水深条件下,临界航速、噪声辐射效率均不同。据此估计,辐射噪声应预留1 dB余量,以适应环境的影响。而该船临界航速远大于8 kn,该指标无须考虑。

最后,可形成完整的指标集合。

1) 辐射噪声1/3倍频程谱源级指标限值线在10~200 Hz频段内为115 dB,在200 Hz~50 kHz频段内按每倍频程6 dB衰减。

2) 10~315 Hz频段内线谱数量低于3根,强

度不超过对应宽带谱强度 3 dB。

## 1.2 实船噪声测试

在用船舶降噪工程能够参考本船当前的声学状态,并以此发现主要噪声源,找准薄弱环节,实现精准降噪,提高降噪改装效果。而掌握本船声学状态最有效的方法,就是实船噪声测试。

美、俄等海军强国均重视实船噪声测试工作,并为此建立了专门的测试场地,如图 2 所示。事实上,在船舶使用期间内,都会经历不少于一次的噪声测试,例如,船舶由生产单位交付至使用单位前就有“噪声验收测试”。

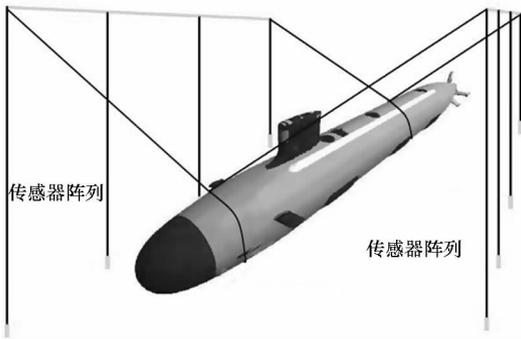


图 2 外国船舶测试场(船舶两侧布置传感器阵列)

Fig. 2 Test field of the foreign ships  
(the ship is in a sensor array)

但为了能够更准确地掌握本船当前的声学状态,发现噪声问题,仍然需要在降噪工程前开展专项测试。主要原因包括以下两个方面:

一是由于在用船舶在使用过程中,其声学状态可能发生变化。国外资料表明,正常使用的船舶在全寿期里,辐射噪声会有 5 dB 的增加。此外,一些意外故障也可能导致船舶辐射噪声发生变化。例如 20 世纪 90 年代,美海军“迈阿密号”核船舶在和北约盟国常规船舶的对抗演习中,由于发生了“声短路”的情况,被探测距离增大了 6.7 倍<sup>[4]</sup>。

二是交船噪声测试、摸底噪声测试等测试工作,由于任务目标与噪声控制无关,其工况、测点等设置仅能满足相应验收要求,而不能满足降噪工程对噪声源、传递路径分析的需要。例如,某船舶的交船验收测试,由于不要求对部分主要噪声源进行分离,因此没有设置相应航速下不同的对比工况和滑行工况。而降噪工程要求掌握主要噪声源特征,因此,需要在降噪改装前的噪声测试中增加这类工况。

## 1.3 降噪改装技术集成

### 1.3.1 “振动-噪声”传递解算

机械噪声源是船舶低航速下的主要噪声源。

通常,机械噪声源的声学指标包括设备机脚振动、基座振动、管口法兰振动等。由于船舶降噪考核指标大多是辐射噪声,因此必须将辐射噪声指标转化为振动控制指标。其关键技术之一,是掌握噪声源振动和预期辐射噪声之间的传递关系。

“振动-噪声”传递关系解算方法很多,主要可以分为数值计算和实船测试两类。船舶结构相对复杂,振动耦合较强,现有数值计算结果往往误差较大,无法完全达到工程应用的要求。在用船舶降噪改进的优势之一就是能够利用实测结果辅助声学设计。因此,实船测试类的方法较为适用。而在实船测试类的各种方法中,结合测试结果进行经验评估,是在用船舶“振动-噪声”传递关系解算的优选方法之一。本文仅以单层隔振设备机脚低频振动与辐射噪声之间的关系为例,简单介绍结合测试结果进行振动传递效率经验评估的过程。

“振动-噪声”传递与频率有关,如果考虑的噪声源设备振动频率在船体最低共振频率  $f_1$  以下,那么噪声源“振动-噪声”传递关系可以近似为简单的弹簧振子。辐射噪声  $L_{p_1}$  与设备机脚振动  $L_{v_1}$  的关系为:

$$L_{p_1} = L_{v_1} + H_1 \quad (1)$$

式中,

$$H_1 = 20\lg M + 40\lg f_0 + C_1 \quad (2)$$

其中,  $M$  为设备质量,  $f_0$  为设备隔振一阶固有频率,  $C_1$  是一个与激励频率、共振频率、船体辐射特性等因素有关的修正量。

例如,假设某设备只有第一声通道,且主要振动频率较低,在船体最低共振频率以下。改装前,该设备辐射噪声为  $P^{(1)}$ , 质量为  $M^{(1)}$ , 机脚振动为  $V^{(1)}$ , 采用的隔振器一阶固有频率为  $f^{(1)}$ 。改装后,将换装低噪声设备,机脚振动降低到  $V^{(2)}$ , 质量为  $M^{(2)}$ , 采用的隔振器一阶固有频率为  $f^{(2)}$ 。那么,设备机脚振动与辐射噪声之间的传递关系可以表示为:

$$P^{(2)} = V^{(2)} + H \quad (3)$$

式中,

$$H = P^{(1)} - V^{(1)} + 20\lg \frac{M^{(2)}}{M^{(1)}} + 40\lg \frac{f^{(2)}}{f^{(1)}} \quad (4)$$

随着频率升高,或采用更复杂的双层隔振系统,计算方式有所不同。这方面文献研究很多<sup>[5-12]</sup>,由于不是本文重点,在此不再详述。

### 1.3.2 降噪指标分解和技术集成

目前国内的降噪指标设计通常是从顶层降噪指标开始,逐步向系统、设备分解<sup>[13-14]</sup>。但实际

上,每项噪声源的辐射噪声都与噪声源振动、质量、体积、位置和结构等各方面因素有关,难以一次性提前确定。

在用船舶则可以通过测试和计算,掌握必要的声学参数,采用先评估各单独噪声源降噪后的预期噪声,再逐步迭代完善的指标分解方法。

首先,根据实船噪声测试结果,找出船舶主要噪声源,并提出初步的降噪措施。

提出降噪措施的一项主要依据是技术能力调研情况。在用船舶降噪工作开始时,就可以组织降噪技术能力调研。该项工作可以分为三个阶段:①制定调研方案;②组织实施调研;③总结调研成果。其中,组织实施调研有多种形式,包括实地考察、传真函调、会议座谈等。

然后,按照制定的降噪措施制定初步的降噪方案,通过声学计算判断是否满足顶层指标要求,同时通过总体评估,判断方案是否满足总体条件限制。

顶层指标要求可通过式(5)予以检验。

$$P_e = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^N 10^{P_i^{(2)/10}} \right) \quad (5)$$

式中, $P_i$ 为不同噪声源或不同传递路径的辐射噪声贡献, $N$ 为噪声源(传递路径)的总数, $P_e$ 为评估得到的船舶总噪声。如果 $P_e$ 不大于顶层指标要求,则声学性能达标。

总体条件限制主要包括备重、空间等资源。我国早期船舶设计为了确保安全性,通常放弃了超重、超大的降噪措施。现在,随着隐身性能重要性的不断凸显,通过总体资源的合理调配,部分备重、空间消耗较大,但降噪效果好的措施也得到了应用。

如果声学性能达标,且总体评估没有发现矛盾和问题,可以认为初步的降噪方案已经基本满足要求,后续无须大量修改。

如果声学性能无法达标,则应找到引起该问题的主要噪声源。重新结合技术能力调研结果进行分析。一方面考察是否存在针对该噪声源降噪效果更好的技术,加强其噪声治理,以满足要求;另一方面考察是否存在针对其他噪声源降噪效果更好的技术,可通过加强其他噪声源治理力度,以满足顶层指标。若上述两项措施应用后仍无法达到指标,则结合技术发展趋势,拟定配套科研项目,向国内技术研究单位发布,开展竞争性研究,以期尽快达到相应技术水平。

如果是总体条件不能满足可行性等要求,则应通过采用集中布置、换装复合材料等技术手段,

减少降噪措施对空间、备重的需求。如果仍不能满足要求,则在不影响顶层指标实现的情况下,减少部分次要噪声源的治理措施。

降噪方案修改完成后,按照该方案,重新进行声学计算和总体评估,开始新一轮迭代,直到全部问题得到解决。

## 2 试验验证

现通过陆上模型试验,验证上述优化方法的可行性和有效性。

### 2.1 试验条件

#### 2.1.1 硬件条件

试验场地为空旷厂房,长48 m,宽13 m,高21 m。试验结构为双层圆柱壳体模型,两端封闭。模型长2.05 m,外壳直径1.78 m、厚2 mm,内壳直径1.46 m、厚8 mm。模型内部安装有激振器。激振器直接激励固定质量的平板,用于模拟船内设备。

平板隔振采用定制的橡胶隔振器、双层隔振装置等。橡胶隔振器隔振效果由厂家提供,双层隔振装置隔振效果可预先通过测试获取。

在激振器激振头、隔振器和隔振装置、内层壳体表面均安装有加速度计。距模型5 m处布置有传声器列阵,用于对测量得到的辐射声压数据进行空间平均,以求得较为准确的声源级。

#### 2.1.2 改装前工况模拟

采用质量分别为45 kg和135 kg的平板,安装质量约为14 kg的激振器,模拟船内机械设备1#和2#,以下以1#设备和2#设备指代。激振器激振力可调,范围为0~200 N,用电压控制,激励频率定为50~1250 Hz。采用6个橡胶隔振器分别对两种平板进行隔振。

开启1#和2#设备(激振器),激振器功率放大器的输入电压固定。扫频信号波形为实际设备测量得到的激励力。测量振动和辐射噪声。结果表明,两台设备共同开启,辐射噪声总级为70.7 dB,如图3所示。其中,两条虚线分别为单独开启一台设备时的辐射噪声测量值。

### 2.2 技术集成

现对改装后的模型提出如下顶层指标要求:

1) 总级至少降低7 dB,即总辐射噪声总级小于63.7 dB;

2) 1/3倍频程声压谱级不超过25 dB(50~1600 Hz);

3) 总体质量至少降低20 kg。

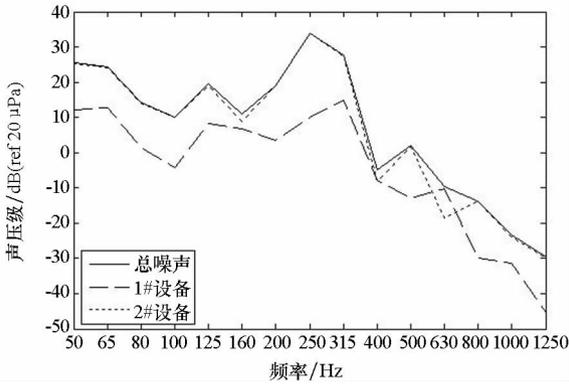


图 3 改装前总辐射噪声和单机辐射噪声

Fig. 3 Total radiated noise and individual radiated noise before the retrofit

调研显示,有如下降噪方案可以选取:

1) 采用双层隔振装置(上下层分别使用聚氨酯隔振器和橡胶隔振器),隔振效果较原有单层隔振提高约 10 dB,但质量需增加 20 kg。

2) 采用低噪声设备。1#设备质量不变,振动降低 3 dB(输入电压减小 30%);2#设备质量降低 55 kg,振动降低 3 dB(输入电压减小 45%)。

如果对两台设备均采用低噪声设备,质量降低 55 kg,达到总体指标。但根据经验公式进行声学计算发现,预期总辐射噪声总级约为 64.3 dB,频带声压级如图 4 所示。显然,无论是总级指标还是频带级指标都没有达到指标要求。

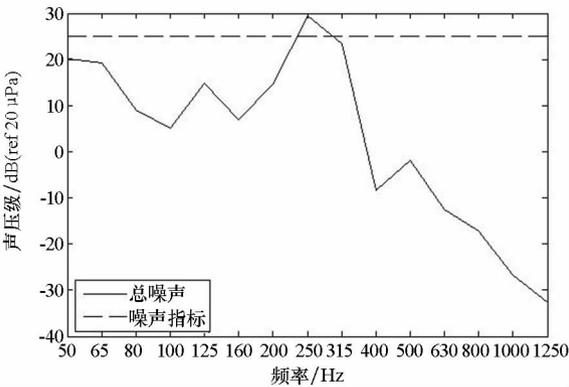


图 4 仅采用低噪声设备后预期总辐射噪声

Fig. 4 Evaluated total radiated noise with quiet devices

如果均同时采用低噪声设备和双层隔振两项降噪措施,则质量仅降低 15 kg,也没有达到指标要求。

考虑到 2#设备是试验模型的主要噪声源,如图 3 所示,2#设备的噪声曲线和模型总噪声曲线相近。因此,如果不能全部采用双层隔振,就应该优先对 2#设备进行双层隔振。经计算,如果在均采用低噪声设备的基础上,仅对主要噪声源 2#设备采用双层隔振,质量降低 35 kg,满足要求。预

期总辐射噪声如图 5 所示。

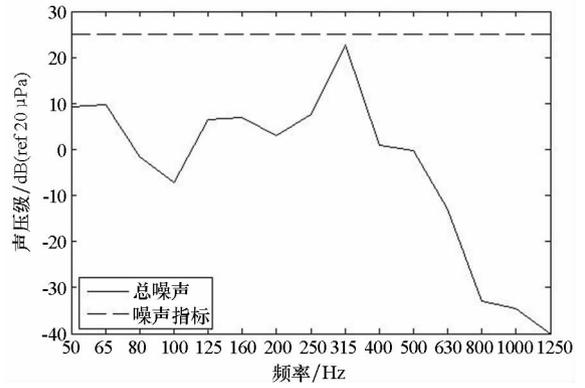


图 5 部分采用双层隔振后预期总辐射噪声

Fig. 5 Evaluated total radiated noise with double stage vibration-isolation

总级约为 62.7 dB,达到了指标要求。频带声压级也均未超过 25 dB 的限制线,满足指标要求。据此,制定降噪方案,见表 1。

表 1 试验模型降噪改装技术集成优化方案

Tab. 1 Project of the noise-control techniques composition of the experimental model

噪声源	降噪措施
1#设备	采用低噪声设备
2#设备	采用低噪声设备 采用双层隔振装置

### 2.3 试验结果

按照上述降噪改装技术集成方案,采用低噪声设备(2#设备换用 80 kg 平板),并对 2#设备采用双层隔振,对模型进行改装。

实测结果如图 6 所示,辐射噪声总级约为 63.5 dB,且频带声压级也均未超过 25 dB 的限制线,满足指标要求。

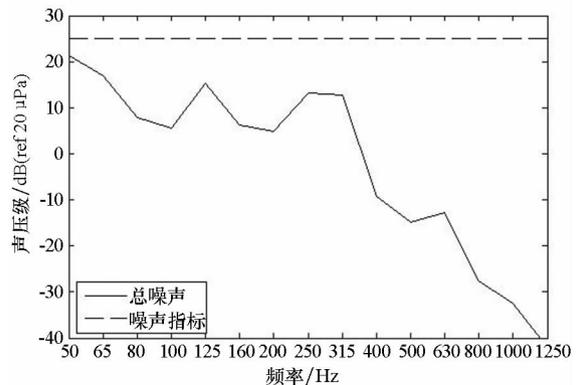


图 6 改装后实测总辐射噪声

Fig. 6 Measured total radiated noise after retrofit

### 3 结论

针对新造船舶声学设计方法不能直接应用于在用船舶降噪工程的问题,提出了在用船舶降噪技术集成优化方法,并通过模型试验,具体说明、验证了该方法。

该方法主要有以下特点:

1)以船舶任务需求为牵引设计顶层降噪指标,并通过全面性、独立性、时变性和适应性判定,检验顶层指标;

2)依靠改装前的实船噪声测试,制定初步降噪技术集成方案并开展最终降噪效果的声学计算,与顶层降噪指标、总体可行性要求相比对,迭代优化;

3)根据优化后能够满足顶层降噪指标的降噪技术集成初步方案,设计和提出各个设备、装置、结构的减振指标,并形成最终方案。

相关研究成果可应用于在用船舶减振降噪更换装工程,也可推广应用于其他大型航行器的减振降噪工作。

### 参考文献 (References)

- [1] Arendes A. USS Seawolf returns home from deployment [EB/OL]. (2014 - 01 - 21) [2018 - 01 - 21]. <http://www.navy.mil>.
- [2] 赵培聪. 国外声呐技术研究现状与发展趋势[J]. 现代雷达, 2016, 38(8): 20 - 24, 69.  
ZHAO Peicong. Study status and development trend of foreign sonar technology[J]. Modern Radar, 2016, 38(8): 20 - 24, 69. (in Chinese)
- [3] 孟春霞. 船舶辐射噪声源简化模型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.  
MENG Chunxia. Simplified model of radiated noise sources of ship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [4] Clancy T. Ship: a guided tour inside a nuclear warship[M]. USA: Harper Collins, 1993.
- [5] Tao M, Fan J, Tang W L. The characteristics of sound radiation from a cylindrical shell coated with multiple compliant layers[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2009, 28(1): 28 - 37.
- [6] Wang C, Lai J C S. The sound radiation efficiency of finite length acoustically circular cylindrical shells under mechanical excitation I: theoretical analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 232(2): 431 - 447.
- [7] Wang Z H, Xing J T, Price W G. A study of power flow in a coupled plate—cylindrical shell system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 271(3/4/5): 863 - 882.
- [8] Gérard F, Tournour M, Masri N E, et al. Acoustic transfer vectors for numerical modeling of engine noise[J]. Sound and Vibration, 2002, 36(7): 20 - 25.
- [9] Cho T. Vibro-acoustic characteristics of floating floor system: the influence of frequency-matched resonance on low frequency impact sound[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(1): 33 - 42.
- [10] 张树桢, 陈前. 柔性浮筏隔振系统的理论建模与仿真研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(10): 1187 - 1198.  
ZHANG Shuzhen, CHEN Qian. Modeling and simulation research on flexible floating raft isolation system[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10): 1187 - 1198. (in Chinese)
- [11] 时胜国, 杨德森, 何元安. 水下结构辐射噪声工程估算方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(1): 91 - 94.  
SHI Shengguo, YANG Desen, HE Yuanan. Engineering estimation of noises from submerged structures[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(1): 91 - 94. (in Chinese)
- [12] 段嘉希, 周其斗, 郑晗. 敷设气囊的充水圆柱壳的声辐射特性[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(2): 183 - 190.  
DUAN Jiashi, ZHOU Qidou, ZHENG Han. Acoustic radiation characteristics of gas-bag coated water-filled cylindrical shell[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(2): 183 - 190. (in Chinese)
- [13] 严斌. 基于辐射效率方法的水下结构振动指标分配[C]//第十四届船舶水下噪声学术讨论会, 2013: 237 - 241.  
YAN Bin. Vibration-target distribution of underwater structures based on the radiated efficiency method [C]// Proceedings of the 14th Congress on Underwater Noise of Ships, 2013: 237 - 241. (in Chinese)
- [14] 朱忠, 郁荣, 严斌, 等. 指标分配法在机械设备隔振设计中的应用[C]//第十四届船舶水下噪声学术讨论会, 2013: 357 - 360.  
ZHU Zhong, YU Rong, YAN Bin, et al. Application of target distribution method on the isolated design of the devices[C]// Proceedings of the 14th Congress on Underwater Noise of Ships, 2013: 357 - 360. (in Chinese)