

船舶水下噪声研究的基本进展

杜晓海,张敬成

(海军装备部,陕西 西安 710065)

摘要:随着现代声学技术的不断进步,船舶水下噪声控制研究在结构振动、低噪声设备、管路振动等多个方面取得了显著的突破,并逐渐探索出多种有效的控制策略。从船舶水下噪声的基本研究进展入手,聚焦于结构振动控制技术、低噪声设备优化、管路振动设计等领域的最新研究成果,重点分析了复杂结构的低频声辐射、浅海环境中的声传播特性等若干关键基础问题,并提出智能化噪声控制系统、全航速适应布局、多工况动态调节等噪声控制策略,为未来低噪声船舶设计提供了方向。

关键词:船舶水下噪声;研究进展;基础问题;低频噪声

中图分类号:U661

文献标志码:A

文章编号:2095-6835(2025)23-0178-03

船舶水下噪声指船体在运行过程中,由机械振动、推进系统振动和流体动力扰动等多种声源产生的噪声,在低频段表现出显著的长距离传播特性。近年来,船舶水下噪声研究从基础理论到应用实践逐步推进,涵盖结构振动控制、设备优化、低频噪声抑制等多个方面。相关研究通过对船体振动特性的深入分析,引入多层复合结构、主动降噪技术等一系列创新手段,逐步突破低频噪声控制的瓶颈。

基于以上进展,未来的噪声控制将逐步朝智能化、动态化、模块化方向发展,进一步提升船舶水下噪声的治理效果。

1 船舶水下噪声研究的基本进展

1.1 结构振动声学控制技术进展

在船舶水下噪声控制中,结构振动声学控制技术已成为低频噪声控制的核心研究方向之一。近年来,声学工程领域在船体耦合振动模型构建中,引入弹性板、加肋平板等结构模型,并广泛应用三维声弹性理论,对船体不同振动模式下的声辐射路径展开深入解析。据研究统计,船体结构声辐射主要集中在100~500 Hz频段,而三维声弹性理论的应用使耦合声辐射路径的细节逐步明晰,为研究不同结构模式在低频段的振动响应奠定了扎实的基础。

此外,有研究提出双层隔振与浮筏隔振等创新设计。双层隔振设计通过提高噪声传递途径的阻抗匹配,有效衰减低频振动向外部水域的辐射;浮筏隔振系统则能将振动能量分散并转化为热能,在不同频段下实现10~15 dB的降噪效果。以典型船体为例,在150

Hz频段时,振动辐射强度降低约23%,共振峰值得到有效平抑^[1]。

通过优化结构几何形状与材料特性,结合数字仿真与实验测试,相关研究逐步实现了船体结构在保持强度的同时,达到更高效的低频声学抑制效果,为未来低噪声船舶设计提供了科学依据。

1.2 管路振动系统设计优化思路

在船舶结构中,管路系统作为介质传输通道,易引发结构振动叠加,其设计优化的关键在于优化振动传递路径、降低结构共振频率,以此实现噪声抑制。现代管路振动控制设计逐步朝多层隔振方向发展,管道材料的选择、连接节点的配置及隔振系统的布置,均直接影响整体声学性能。

弹性支撑材料在不同频率下表现出较高的振动吸收能力,通过结合阻尼材料与隔振垫层,可有效削弱低频段(100~300 Hz)内的振动能量传递。数据显示,优化后的弹性支撑系统在这一频段能够实现5~10 dB的振动衰减效果^[2]。

此外,管路隔振系统可结合智能传感器,通过监测管道振动状态进行动态调节,从而适应不同航行环境与负载工况。管道内部的流体流速、温度变化等参数均会对噪声产生影响,因此,在流体流速控制、管径设计、减振垫层布置等方面开展一体化优化,可显著提升系统的降噪性能。

未来研究方向或将集中在智能隔振材料与主动振动控制技术的结合,使管路系统能在复杂工况下自动调节振动响应,实现更高效的动态噪声控制。

单层和双层隔振系统如图1所示。

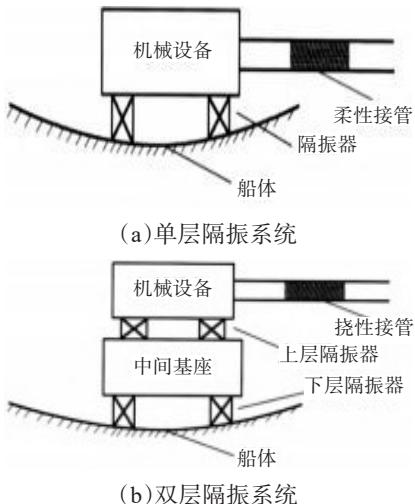


图1 单层和双层隔振系统示意图

2 船舶水下噪声研究的若干基础问题

2.1 复杂结构低频声辐射控制难题

多层加筋板、非均匀材料分布等船舶复杂结构中，低频声辐射具有长波长特性，声波能量在水中传播距离远、衰减效果差。采用增加阻尼材料、优化隔振设计等传统被动控制方法，虽能在一定程度上降低高频噪声，但对低频噪声的抑制效果有限。

近年来，主动控制技术的发展为低频噪声控制提供了新思路，主被动混合技术展现出广阔应用前景。基于实时监测与反馈调节，主动控制系统可有效抑制特定频段的振动和声辐射。然而，主动控制系统的复杂性与高成本，限制了其在实际船舶中的广泛应用。

此外，数值模拟技术的进步，使得对复杂结构的低频声辐射特性进行精确预测成为可能，但仍需大量实验数据进行验证与校准。因此，如何在保证船体结构强度与性能的前提下，采用经济有效的手段实现低频声辐射控制，仍是当前研究的难点之一^[3]。主被动混合控制技术应用示例如图2所示。

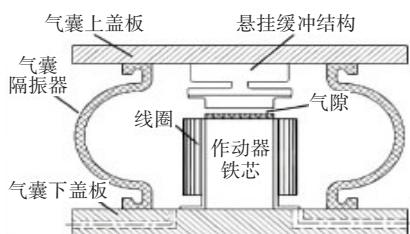


图2 主被动混合控制技术应用示例

2.2 浅海声传播特性关键问题探究

浅海环境中的声传播特性复杂多变，主要受水深、海底地形、声速剖面等因素影响。浅海水深通常在200 m以内，声波在传播过程中会与海面、海底多次反射，形成高效的长距离传播模式。研究显示，在浅海水深小于50 m的区域，低于200 Hz的声波在波导效应作用下，传播距离可达数十千米。在浅海环境中，低频声波的传播损失相对较小，但易受海洋生物活动、船舶航行等环境噪声干扰。

浅海声传播特性研究依赖于构建精细化声传播模型，结合水温、盐度和底质特性等多种物理参数，对不同水层的声速变化进行量化。基于此，浅海声传播模型逐步从二维拓展至三维多层次模型，能够更准确地预测声波的反射、折射与散射行为。为增强浅海声传播模型的适应性，研究者引入超材料构建的声屏障，通过声波调控减少浅海环境中的噪声干扰。因此，发展更精确的声传播模型，结合高分辨率的环境参数测量，是当前研究的重点方向。

2.3 多声源特性识别技术与创新方向

船舶噪声来源复杂，各类声源的频率、振幅和相位特性各不相同，且在声场中相互叠加，使得单一频谱分析难以有效分离各声源特性。传统声源识别方法主要依赖频率谱特征分析，但在复杂声场中，声源的多频干扰与背景噪声混合，导致单一的频谱或空间信息难以实现准确声源识别。研究表明，采用相干解调技术与时频分析法结合的多维特征提取模型，可在100~500 Hz频段内实现声源有效识别，将主要声源信号的识别准确率提升至85%以上。

近年来，机器学习与深度学习算法的应用为多声源识别提供了新技术路径。在算法层面，卷积神经网络(CNN)与递归神经网络(RNN)已逐步被应用于声源识别的模式分类与特征提取，研究指出，在复杂背景噪声下，结合多声道声源信息的深度学习算法，识别准确率可达到90%以上。未来研究或将致力于将声源识别技术与声场重构方法结合，通过实时数据处理实现动态声场的重构与声源定位，进而为水下噪声控制提供高效的声源管理手段。

3 船舶水下噪声控制策略展望

3.1 智能化噪声控制系统构建

现代船舶声学研究中，智能化控制系统以自适应算法和预测性维护技术为支撑，依托大规模噪声数据库开展噪声源数据训练，进而实现对噪声源类型、频率、位置的精准识别。

综合大数据平台与深度学习技术，智能化控制系统需进行多频谱分析，识别不同噪声源特征，快速匹配优化方案。例如，在低频段(100~300 Hz)，系统应具备识别特定频率段并进行针对性降噪的能力，通过算法实时调整隔振、吸声装置参数，实现15~20 dB的降噪效果。智能化噪声控制的核心在于其自适应特性，依托精确的噪声反馈机制，系统能够动态调整隔声材

料的刚度与阻尼参数,从而有效吸收或隔离不同频段的噪声。此外,智能化噪声控制的自适应反馈功能可通过机器学习模型训练,逐步优化算法,提升噪声识别精度与降噪效率。同时,系统应支持动态分析不同航速下的噪声特性,高航速时集中抑制推进器和湍流边界层噪声,低速航行时针对设备振动进行降噪。

未来,研究方向可能聚焦智能材料的进一步开发,使智能控制系统在更广泛频段内保持稳定性,以应对水下复杂声场环境的动态变化。

3.2 全航速适应噪声控制布局

根据船舶在不同航速下的噪声分布特性,全航速适应噪声控制布局应体现多层次降噪设计,使船舶在不同航速下的噪声抑制效果均衡,适配低速、中速、高速各工况条件。

低速航行时,系统应集中抑制设备内部的机械噪声与推进系统噪声;中高速时,因湍流边界层噪声增大,系统需配备双层隔振与阻尼材料,实现对高频、中频噪声的精准控制。利用分层布局技术,可在特定噪声源部位选用黏弹性材料、复合阻尼材料及双层隔音板,逐步实现对不同航速下噪声源的适配控制,在50~500 Hz频段实现10~15 dB的噪声衰减。此外,噪声控制布局应具备自适应性,利用智能控制单元对各频段噪声源进行连续调节,在航速变化剧烈时实时降噪。系统内螺旋桨需配备阻尼层设计,同时在导管区域引入超材料吸声层,以减短流体动力噪声的传递路径。系统还需结合深度学习的动态识别功能,捕捉声学数据变化趋势,通过自动调整声学材料的密度与厚度,实现最优声学防护效果。

未来,研究将继续优化流体动力降噪设备与高效隔振材料,进一步适应不同航速对噪声控制的差异性需求。

3.3 多工况动态噪声控制方案

随着船体工况变化,声场特征在50~1 000 Hz频段内呈现显著差异,湍流噪声、推进器噪声和机械振动在不同频段的分布特性各不相同。在不同运行条件下,多工况动态噪声控制方案能够实现噪声的自适应控制,实时监测并自动调节各类降噪设备,确保船舶在复杂工况下的静音效果。系统需将声学传感器阵列与频谱分析模块结合,实时监测噪声频谱特征与传播方向,对低频、中频和高频段的噪声源进行分类处理,动态调整隔振与吸声参数。

低速工况下,系统应集中对机械振动区域进行降噪;中高速工况下则侧重抑制湍流噪声。数据表明,在70 dB的背景噪声环境下,动态控制方案可实现10~

15 dB的降噪幅度。依托高频采样率的传感器单元,系统的自适应反馈机制需根据噪声强度变化自动调整隔振参数,逐步提高对复杂声学环境的响应效率,减少调节延迟。

未来,研究应聚焦于更精细的声场数据处理技术及高响应速度的智能控制模块,进一步提升数据采集与分析的精确度,使多工况动态控制系统在各类复杂水域下均能实现最优噪声抑制效果。

3.4 分布式噪声抑制模块应用

与传统集中式控制相比,分布式噪声抑制模块具备更灵活的布局优势,可适应船体不同部位的噪声特征。每个模块应包含振动传感器、隔声材料和微型控制单元,能够基于区域声场特征进行自主调节。数据显示,分布式噪声抑制模块在低频200 Hz、中频500 Hz、高频1 000 Hz频段中均表现出良好的噪声衰减能力。根据噪声源的分布情况,分布式抑制模块可实现自适应布局,满足多频段噪声管理需求。上述模块应配备实时噪声监测传感器,实时反馈振动与噪声信息,经由中央控制系统分析噪声特性后对各模块进行调控,实现联动效果,提升分布式噪声控制的效率。此外,分布式模块还可彼此协同工作,共同组成智能化噪声屏障,实现对船体整体噪声的精准管理。

未来,分布式噪声抑制技术的发展方向将聚焦于模块的轻量化设计与集成度提升,在保持高效降噪效果的同时降低系统能耗,适应更复杂的噪声源与海洋环境条件,进一步提升船舶静音性能。

4 结束语

近年来,船舶水下噪声控制技术在结构振动、设备优化、管路设计等方面取得显著进展,逐步确立了多层次的噪声控制理论体系;与此同时,复杂结构的低频声辐射控制、浅海声传播模型及多声源识别技术的研究,将进一步拓宽船舶噪声控制的基础科学领域。未来,船舶噪声控制策略应逐步从静态隔振模式朝智能化、动态化方向转型,实现对水下噪声的精准管理。