

船舶机械声学系统的互易测量理论与应用综述

彭涛 徐荣武 张家瑞 姚震宇

Review of reciprocity measurement theory and applications for ship mechanical-acoustic systems

PENG Tao, XU Rongwu, ZHANG Jiarui, YAO Zhenyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04439>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

桨叶振动对螺旋桨垂向激励下潜艇结构振动与声辐射的影响

The effect on the vibration and acoustic radiation of the whole submarine due to the vibration of propeller blades under vertical excitation

中国舰船研究. 2020, 15(5): 161-166 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01610>

声激励下圆柱壳敷设多孔吸声材料声辐射特性及计算方法

Characteristics and calculation method of sound radiation of cylindrical shell with porous sound-absorbing material under acoustic excitation

中国舰船研究. 2023, 18(2): 97-106 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02518>

平面叶栅非定常响应函数及声辐射分析

Unsteady response function and acoustic radiation analysis of Cascade

中国舰船研究. 2024, 19(3): 234-240 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03274>

声隐身超材料发展综述

Prospects of acoustic metamaterials for acoustic stealth

中国舰船研究. 2020, 15(4): 19-27, 35 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01624>

液舱一体化浮筏隔振系统声学性能理论分析

Analysis on acoustic performance of floating raft vibration isolation system with liquid tank

中国舰船研究. 2022, 17(5): 220-227 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02574>

舰船舷间双层声桥声振传递特性研究

Study on vibro-acoustic transmission characteristics of ship's double-layer acoustic bridge

中国舰船研究. 2024, 19(3): 292-301 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03269>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04439>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 彭涛, 徐荣武, 张家瑞, 等. 船舶机械-声学系统的互易测量理论与应用综述 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(5): 1-16.

PENG T, XU R W, ZHANG J R, et al. Review of reciprocity measurement theory and applications for ship mechanical-acoustic systems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(5): 1-16 (in Chinese).

船舶机械-声学系统的互易测量 理论与应用综述



扫码阅读全文

彭涛^{1,2}, 徐荣武^{*1,2}, 张家瑞^{1,2}, 姚震宇^{1,2}

1 海军工程大学 振动与噪声研究所, 湖北 武汉 430033

2 船舶振动噪声重点实验室, 湖北 武汉 430033

摘要: 随着船舶隐身性能与舒适性要求的不断提升, 精准量化复杂船舶系统的声振特性对于优化船舶结构声学设计、降低辐射噪声具有至关重要的意义。传统的声振特性测量方法受限于船舶空间限制与耦合干扰, 基于互易原理的间接测试方法为解决上述挑战提供了新的思路。为此, 系统综述船舶机械-声学系统互易测试方法的理论进展与工程实践: 首先, 介绍互易测试理论发展历程和工程应用研究现状; 其次, 分别从互易测试误差影响因素和低频大功率声源两个方面分析总结制约当前互易测试工程化应用的关键技术难题; 然后, 以船舶辐射噪声指向性测试为例介绍“相对精度”互易测试理念; 最后, 对船舶机械-声学系统互易测试在工程应用中一些亟待解决的关键问题进行展望。

关键词: 机械-声学系统; 互易原理; 声振特性; 传递函数; 辐射噪声; 声学测量

中图分类号: U661.44; U668.5

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04439

0 引言

船舶工业作为全球经济与国防安全的重要支柱, 始终面临降低噪声与振动、提升隐身性能及航行舒适性的核心需求^[1]。随着国际海事组织(IMO)《船舶噪声等级规则》的颁布实施, 以及各国海军对水下航行器声隐身性能要求的不断提高, 如何精准地量化复杂船舶系统的声振特性已成为工程界与学术界的共同难题^[2-3]。

使用理论建模方法对实船复杂结构振声传递特性研究不具备可行性, 而仅依靠数值仿真计算的精度有限, 也不能满足实际需求, 所以船舶振动与辐射噪声传递研究时采用直接试验一直是最可靠的方法^[4-5]。传统声学与振动测量方法(如激振器激励法、声强扫描)在船舶这一特殊应用场景中暴露出一些固有缺陷, 例如布点密集^[6]、环境干扰敏感^[7]、水下实施困难^[8]等。作为一种基于系统对称性的间接测量理论, 互易原理自20世纪70年代起逐步被 Ten Wolde 等^[9]引入船舶工程领

域, 为解决上述挑战提供了一种颠覆性思路。

互易性原理起源于19世纪的电磁学研究, 由 Rayleigh 首次将其系统表述为线性动力学的普适定理。对于无源线性系统, 激励点A到响应点B的传递函数等于激励点B到响应点A的传递函数。这一原理首先被成功应用于电声换能器校准^[10], 然后逐步拓展到了汽车、飞机、船舶等复杂机械-声学耦合系统^[11-12]。与传统方法相比, 互易测试在船舶复杂机械-声学系统中展现出独特优势:

1) 降低试验复杂度的优势。通过互换激励与响应角色, 将多输入单输出测试转化为单输入多输出问题。例如, 船舶推进轴系振动测试中, 传统激振器需定制夹具固定于旋转部件, 而互易法仅需在轴系两端布置加速度计, 安装更便捷。

2) 提高测试效率的优势。互易测试通过单次激励获取全局响应的特性, 大幅压缩了测试时间与经济成本。例如, 在船舶多设备源传递路径分析中, 采用传统方法需逐点激励不同路径, 而互易法仅需一次激励就能得到全部传递路径下的

收稿日期: 2025-04-01 修回日期: 2025-04-19 网络首发时间: 2025-07-08 09:12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52301393); 国家部委基金资助项目(70203)

作者简介: 彭涛, 男, 1997年生, 博士生。研究方向: 水下航行器减振降噪。E-mail: pt0314@126.com

徐荣武, 男, 1980年生, 博士, 研究员。研究方向: 水下航行器减振降噪。E-mail: rongwu_xu@126.com

*通信作者: 徐荣武

传递函数,测试时间大幅缩短。

船舶机械-声学系统的互易测试先后经历了基础理论研究、工程创新应用等发展阶段。尽管已取得一些显著进展,但工程应用仍面临理论完善与技术落地的双重挑战。本文将对互易测试在船舶工程中的理论基础、典型应用与关键技术进行系统阐述。第1章阐述互易测试理论及其发展历程;第2章梳理国内外学者在机械设备辐射噪声评估、壳体辐射贡献识别等方面的研究现状和研究思路;第3章讨论船舶噪声互易测试的误差影响因素和低频大功率声源等关键技术;第4章介绍“相对精度”互易测试理念;第5章对船舶机械-声学系统互易测试在工程中一些亟待解决的关键问题进行展望。

1 互易测试理论发展

1.1 互易原理基本形式

Helmholtz 最先提出了声学互易原理,而 Rayleigh 将声学互易原理推广至一般线性动力学系统^[13],即在系统中某一点 A 处施加的激励,与该激励在系统中另一点 B 产生的响应之比,等于 B 处施加的激励与其在 A 处的响应之比。

互易原理可以采用动力学方程^[14]和电学网络系统^[15]两种方式进行描述。具体而言,采用动力学方程进行理论推导,与声学物理背景结合紧密,系统中各个参量变化带来的影响清晰可见;基于电网络系统理论的方式更具一般性,且与电学、力学等其他学科联系紧密^[16-17]。因此,在考虑互易理论问题时,通常倾向于使用电网络系统理论方法进行阐述:将系统视为一个有许多端子的黑箱,黑箱内部的系统是无源、线性的,它们的乘积表示的就是通过该端子输入到系统中的功率。对于一个简单声学系统来讲,可以表示为四端口网络系统(图1所示)。图中,方框代表系统, P 代表声压, Q 表示声源体积速度。

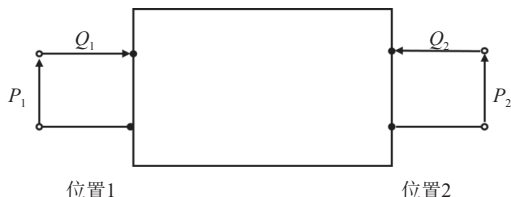


图1 以四端网络形式表示的声学系统^[9]

Fig. 1 Four-pole representation of an acoustic system^[9]

若该系统是互易的,则其表现形式如下式^[9]:

$$\left(\frac{P_2}{Q_1} \right) \bigg|_{Q_2=0} = \left(\frac{P_1}{Q_2} \right) \bigg|_{Q_1=0} \quad (1)$$

式中,左边代表传递函数的直接测量,右边代表互易测量结果。

对于船舶这种复杂的机械-声学系统而言,需用一个十四端模型来表示^[9],即一个具有六个机械端子对和一个声学端子的黑箱(图2所示),机械位置对应其中的十二端子:3个力-平移速度端子对($F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}$)和3个力偶-角速度端子对($M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}, a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}$),以及声学端子处的声压 P 和声源体积速度 Q 。

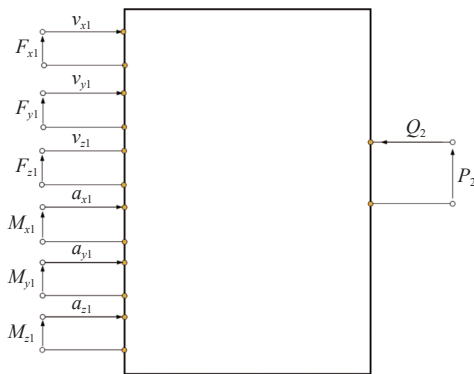


图2 以十四端网络形式表示的机械-声学系统^[9]

Fig. 2 Fourteen-pole representation of a mechanical-acoustic system^[9]

假设只考虑 x 方向的平动,可以推导出机械-声学系统中经典的力-声互易关系式^[18-19]:

$$\left(\frac{P_2}{F_{x1}} \right) \bigg|_{\substack{\text{位置1处仅} F_{x1} \neq 0 \\ \text{位置2处} Q_2 = 0}} = - \left(\frac{v_{x1}}{Q_2} \right) \bigg|_{\substack{\text{位置1处力和力偶均为0} \\ \text{位置2处} Q_2 \neq 0}} \quad (2)$$

上式物理含义可表示为:在保持周围环境不变的条件,当船舶内部结构在某激励力作用时,远场某点产生的声压(P_2)与该点 x 方向激励力(F_{x1})的比值,等于远场某一点声源在结构上该点 x 方向振速(v_{x1})与体积速度(Q_2)的比值。

1.2 机械-声学系统互易理论的发展历程

1.2.1 基础理论框架的建立

1860年, Helmholtz^[20]在研究末端开口管的声学特性中提出了声学互易原理。Rayleigh 则进一步证明了该原理可推广至所有非保守(耗散)的振动系统谐波振动问题,只要系统中的耗散力与系统元件的速度或相对速度呈线性依赖关系^[16]。Rayleigh 曾断言:“即使系统中存在线性阻尼作用(例如弦、膜片、音叉等元件), (声学)互易性也不会受到干扰”。由此,有学者建立了单一介质中线性时不变系统的一般互易框架^[21]。

1959年, Lyamshev^[22]对流固耦合系统的互易理论(图3)进行了严格的公式证明。从单一介质(结构或流体)进一步扩展到多物理场耦合系统,

为互易性原理在振动声学问题中的诸多现代应用铺平了道路^[23-24]。

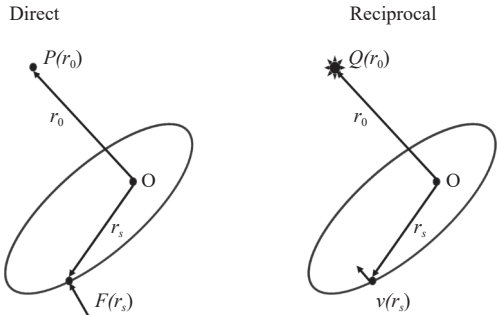


图 3 Lyamshev 互易原理示意图^[23]

Fig. 3 Schematic diagram of Lyamshev's reciprocity principle^[23]

然而,前期理论推导是基于自由场或确定边界条件下完成的。1962 年,Smith^[25]和 Diestel^[26]首次建立了结构模态在扩散声场中的激励力与其辐射阻抗之间的关系,揭示了扩散场激励与声学系统响应之间的互易性原理。Shaw^[27]进一步阐释了扩散场互易关系的物理意义,着重强调其在声学系统响应与阻抗匹配中的重要应用。早期研究仅适用于单自由度系统(如单一结构模态或刚性振子),无法处理复杂多自由度连接问题。Shorter 等^[28]提出通过随机边界条件的系综平均,将扩散场互易关系推广到多自由度系统,为统计能量分析、有限元建模以及不确定性分析提供了新的理论工具。

1983 年,Bojarski^[29]突破稳态激励假设,提出了时域互易定理,适用于均匀、各向同性、无耗散介质。De Hoop^[30]在全时域框架下进一步推导了适用于非均匀、各向异性且具有惯性/压缩率松弛效应的流体的互易定理。相比于频域互易定理,时域互易定理可处理非稳态瞬态信号和复杂介质,更适合瞬态响应等非稳态场景。

1.2.2 理论修正与拓展

然而,互易定理一经问世便受到质疑,尤其是对机械-声学系统中不同场景下互易定理的有效性存在疑问。诸多学者针对不同影响因素对互易理论进行了完善。

1) 多孔材料介质。

多孔材料作为一种由固相骨架与连通孔隙组成的复合介质^[31],被广泛应用于声学降噪、隔振等领域。水下航行器上的声学覆盖层也可看作是一种多孔材料。然而,多孔材料的复杂动力学特性使其声学互易性(即声源与接收器互换后的响应不变性)成为长期争议的焦点。Pierce^[32]曾认为当介质包含 Zwicker-Kosten 模型描述的多孔材料时,声学互易性将被破坏。但 Allard 仔细分析后

发现,Zwicker-Kosten 原方程存在错误,互易性失效是模型缺陷而非物理必然^[33]。Iesan^[34]、Boschi^[35]等先后针对各向同性、各向异性多孔介质准静态互易定理进行了研究。在均匀各向同性介质且低频激励条件下,其行为可近似满足互易性^[36];而在高频、强耗散或人工设计的非对称孔隙结构中,互易性可能显著偏离甚至失效^[37]。

2) 非保守系统。

在保守系统中,互易定理的成立依赖于系统阻抗矩阵的对称性。然而,当系统引入阻尼或辐射损耗时,阻抗矩阵的实部与虚部均可能失去对称性^[38]。Rayleigh^[39]认为,如果系统中存在比例阻尼条件下阻尼力与质量或刚度成比例、阻尼矩阵对称的情况则不会影响系统的互易性。然而,随着复合材料等非均匀材料的广泛应用,例如船舶上大量应用的橡胶隔振器和气囊隔振器,其实际阻尼矩阵 C 可能无法表示为质量 M 和刚度 K 的线性组合。Fahy^[40]提出了非比例阻尼系统也许存在违反互易性的情况,Woodhouse^[41]通过悬臂梁实验验证了这一理论。结构阻尼对互易性的影响取决于阻尼的线性、对称性及频率依赖性^[42]。

3) 运动介质。

理论上,现有的互易测试研究中都假设声场为静止环境,若介质处于运动状态,可能会导致互易性失效。例如,在船舶互易测试过程中,往往也会存在海流的影响。Ten Wolde 和 De Bruijn^[43]认为,当空气中存在气流时会造成各个方向上声速的差异,从而对空气中的互易试验造成很大干扰。当介质存在运动时(如流体流动),传统互易性被打破。为修正运动介质引起的互易测试误差,Lyamshev^[44]和 Godin^[45]进一步提出了流场反向定理(FRT),该定理的核心思想是:在交换源与接收器位置的同时反转流场方向,可以使特定声量保持对称。该定理可被视为传统互易原理在运动介质中的推广。

2 船舶噪声互易测试的应用发展

随着互易理论体系的逐步完善,其工程适用性边界得以清晰界定。从 Rayleigh 建立线性系统普适框架到 Lyamshev 突破流固耦合的限制,理论层面的突破不断拓宽着互易测试的应用维度,为船舶复杂机械-声学系统的互易测试应用提供了理论支撑。下面主要介绍几个典型应用场景。

2.1 机械设备辐射噪声评估

通过互易原理可测量力-声传递函数(P/F),

同样也可以方便地计算在机械设备激励力以及激励力力偶作用下结构产生的辐射噪声 P 。具体公式如下^[46]:

$$P = \sum_{i=x,y,z} \frac{v_i}{Q} F_i + \sum_{j=x,y,z} \frac{\alpha_j}{Q} M_j$$

(3)

式中, Q 为反向激励力声源的声源体积速度; F_i 和 v_i 分别为 x,y,z 方向激励力和反向激励下的振速; M_j , α_j 分别为 x,y,z 方向力偶和反向激励下的角速度。

20 世纪 60 年代, Ten Wolde 率先看到了互易原理应用于船舶噪声测试中巨大的应用潜力, 并针对船舶结构的力-声传递函数进行了互易性测量(图 4), 首次通过水箱试验完整测量六自由度的传递函数^[47], 比较不同隔振器下传递函数的差异, 为隔振器的选型提供了数据支撑。另一个应用是湍流流经水面舰艇或水下航行器表面时引发的声呐导流罩振动, 这会在传感器上产生干扰声压, 并导致声呐信号中出现流激噪声的现象^[48-49]。对于外部湍流压力与传感器单元所受压力之间的传递函数, 可以通过水下声源激励并测量声呐导流罩表面多点振动加速度来予以近似评估^[50]。

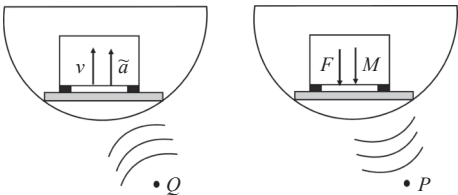


图 4 六自由度传递函数测试示意图^[9]

Fig. 4 Schematic diagram of six-degree-of-freedom transfer function testing^[9]

此外, Ten Wolde^[18] 对激振器单点激励下的环形加筋圆柱壳模型的水下辐射噪声进行直接和互易测量, 发现频率在某些频段的互易测试结果与理论结果基本一致, 说明互易试验可以在某些频段作为直接试验的独立检验, 也可以代替直接实试验。更进一步地, Ten Wolde 进行了实船测试, 对实船上的 60 kW 发动机到水下位置的不同声音路径进行研究, 进一步证明了互易测试方法的实用性^[46]。但是, 低频段的互易测试结果比直接测试结果相差约 10 dB, Ten Wolde 怀疑这是系统误差所造成的, 但未进一步探究造成此误差的深层次原因。总体而言, Ten Wolde 开展了大量试验来证明互易原理的有效性, 极大地推动了互易测量技术在船舶领域噪声测试中的实际应用。

在国内, 胡志宽等^[51] 开展了基于互易原理的小水线面双体船传递函数的试验研究, 通过缩比模型和实船试验验证了互易原理在双体船振动与噪声测试中的适用性, 进而为该型船水下噪声预

报提供输入数据; 孙国仓等^[21] 也开展了水下结构声振互易试验研究, 研究表明, 采用声-振互易研究水下结构声辐射是可行的。前苏联科学家利用互易测试方法开展了水下航行器辐射噪声估计的相关研究^[24]。可见, 互易测试方法在水下航行器辐射噪声测试方面应用前景是巨大的。

事实上, 对于式 (3) 而言, 除传递函数外, 作用在船体上的激励力 F 或力偶 M 同样不可或缺, 但如何测量机械设备作用在壳体上的激励力却成为阻碍互易测试的一个难题。船舶大型设备(如发电机组、推进电机等), 由于已经调试安装完毕, 难以按照常规方法将设备拆卸后在机脚与基座间布置力传感器, 使得直接测量难度较大。为此, Janssens 和 Verheij 等^[52] 提出了一种船舶机械虚拟力的间接方法来表征机械设备激励特性。虚拟力方法是通过测量多个结构点处的响应, 并结合结构频响函数矩阵逆向求解设备对结构的激励力^[53], 其关键点在于虚拟力点、结构响应点的选择以及病态矩阵求逆的优化问题^[54]。其中测点选择原则描述如下^[55]:

虚拟力点一般选取结构表面或连接结构上易于施加激励的位置, 且要求具有较大的刚度, 以免影响激励效果; 虚拟力点应尽量施加在不同方向上, 点的位置要尽量分散, 避免结构传递矩阵的相关性过大; 结构响应点一般选取在机脚处, 因为机脚较基座的响应更强, 且不易受到其它运行设备的影响, 这一点在设备密集安装的环境下尤为重要; 结构响应点数量需大于等于虚拟力点数量, 以满足结构传递矩阵求逆的要求。

虚拟力法中一个关键问题是结构矩阵求解, 因结构传递特性的相关性较强, 导致结构矩阵往往是病态的。因此, 必须对病态矩阵求逆进行优化。目前的优化方法主要分为奇异值分解^[56-57]、吉洪诺夫正则化^[58]、贝叶斯推断^[59]、深度学习^[60]、迭代正则化^[61]等方法, 具体特点汇总于表 1。鉴于计算简单和稳定性较强, 工程应用中使用最多的方法为奇异值分解和吉洪诺夫正则化方法。

表 1 不同正则化方法的特点			
Table 1 Features of different regularization methods			
正则化方法	计算量	稳定性	特点
奇异值分解	中	较强	线性系统
吉洪诺夫正则化	低	强	中小规模问题
贝叶斯推断	高	较强	融合物理先验知识
深度学习	较高	强	复杂非线性关系
迭代正则化	中	弱	大规模稀疏矩阵

Verheij^[62] 在实际的船舶传动轴和充液管道系统模型试验验证了虚拟力法的有效性。这一方法也被后来在研究者广泛借鉴, 例如 Leclère^[63] 利用虚拟力法实现间接测量柴油机运行中的内部载荷; Liu 和 Shepard^[64] 在虚拟力法基础上引入正则化以更高精度重建空间分布的外力; Korotin^[65] 基于该方法提出了一种计算-实验的方法来确定各个机构对复杂结构振动和声场的贡献; 吴为^[66] 利用互易性原理开展机械设备传递路径分析, 通过水下舱段试验对比正反向传递函数的误差。Ma 等^[67] 利用加速度测量值反演船舶受到冰碰撞下的激励载荷。Shi 等^[68] 基于正则化数据驱动方法计算轮胎跌落冲击载荷。

卢丁丁等^[69] 进一步结合虚拟力和互易测试方法, 提出一种船舶水下辐射噪声实时评估方法(图 5), 并在消声水池对缩比舱段模型内电机引起的水下辐射噪声和互易评估值进行实验验证, 利用分部正则化方法对虚拟力进行求解, 结果证明, 绝大部分 1/3 倍频程频带保持了较好的趋势一致性, 但部分幅值较高的线谱处出现了约 5 dB 的误差。Peng 等^[70] 利用上述方法对某实船往复泵水下辐射噪声评估效果进行验证, 结果表明, 绝不部分 1/3 倍频程频段内误差为 3 dB 左右, 从而进一步验证了船舶水下辐射噪声实时评估方法对于实船机械设备辐射噪声评估的准确性。

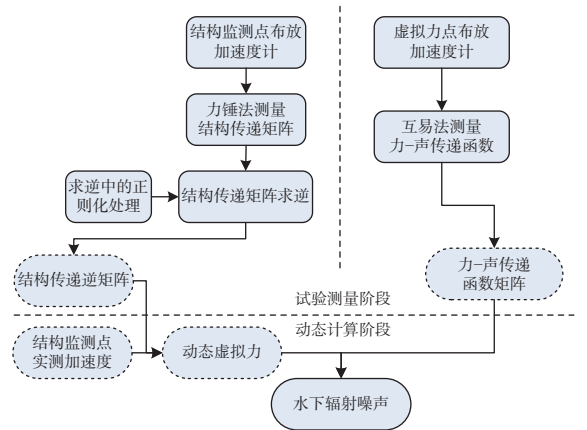


图 5 水下辐射噪声实时评估计算流程图^[70]

Fig. 5 Calculation flow chart of real-time evaluation of underwater radiation noise^[70]

目前, 现有研究的主要内容集中在路径单一的设备, 即设备机脚-基座路径的辐射噪声, 但随着传统减振降噪措施的应用, 通海系统对辐射噪声的影响变得不可忽视^[71-72]。然而, 如何利用互易测试评估通海管路的振动传递及其内部流噪声对辐射噪声的影响还未开展相关研究。后续针对通海管路系统的辐射噪声评估, 可以分为 3 条路径进行求解: 一是机脚-基座-壳体-辐射, 二是管路

流噪声-辐射, 三是管路-壳体-辐射。不同于机脚传递路径, 管路通过法兰直接与壳体相连接, 采用直接方式测量激励力显然不现实, 而基于虚拟力的方法如何选择虚拟力点才能精准重构管路振动对壳体激励效果还需要进一步研究; 此外, 管路内流噪声辐射噪声情况可以通过式 (1) 表示的声-声互易进行求解, 但评估管路内部流噪声的等效声源体积速度、等效点与通海管口的相对位置等难题都需进一步研究。

2.2 壳体辐射贡献识别

为了降低机械系统振动表面的噪声辐射, 了解振动表面的声辐射热点区域极为重要。然而, 由于大型系统结构复杂, 很难直接对壳体表面振-声传递函数或辐射噪声的贡献程度进行评估^[73]。

Musha 和 Kikuchi^[74] 以水面舰艇为研究对象, 开展了船舶结构对周围水域的声辐射效率研究, 并基于互易方法进行力学-声学传递函数的测量, 并专门设计了水下试验台架, 通过对船舶结构的海上试验, 得到了船舶结构的声辐射效率, 从而确定船体板减振处理的无效区域。但该方法要求传统形状规则, 且试验过程较为繁琐^[75]。

Mason 等^[76-77] 和 Fahy^[40] 提出了一种描述机器作为空气声源和相关传递函数的互易测量方法。该方法使用声音辐射表面上的速度分布作为声源强度描述符, 机器或机器各部分引起的总声压可通过各部分声压贡献进行叠加计算。进一步地, 该方法可推广至飞机、船舶壳体和机械设备表面不同区域对辐射声压的贡献量计算^[78]。如图 6 所示, 具体原理可表述为: 将结构表面均匀划分 n 个面积为 ΔS 的区域, 每个区域振速为 v_n ; 当这些区域的尺寸与机器中的结构波长和介质中的声波波长相比较小时, 则可认为其近似为位于机器表面的单极子源, 体积加速度写为 $Q_n = v_n \Delta S$; 取消结构内部激励力, 在外部辐射噪声测量位置施加声源激励, 测量每个区域表面阻塞声压 P_n , 获得各区域到辐射噪声测量点的传递函数 (P/Q)。根据线性叠加原理, 总辐射噪声 P 可以表示为^[79]

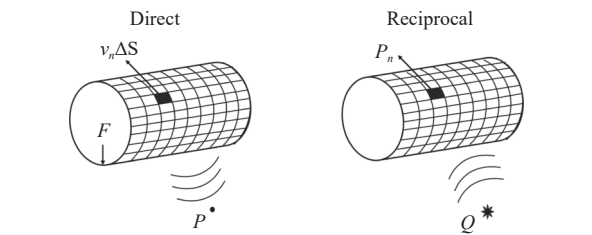


图 6 壳体不同区域辐射噪声贡献识别示意图^[23]

Fig. 6 Schematic diagram of radiated noise contribution identification in different regions of the shell^[23]

$$P = \sum_n \frac{P_n}{Q} v_n \Delta S \quad (4)$$

式中, Q 为外部激励声源体积速度。

上述方法适用于低频和简单振动模式。然而, 对于频率较高、结构形状和振动场复杂的情况, 需要的数据量较大, 使得这种方法显得不切实际^[80]。对于非稳态源, 因无法确定部分速度之间的相位关系, 所以无法处理^[81]。鉴此, Verheij^[82] 提出并验证了一种利用振动结构表面的不相关单极子对声源进行建模的方法。这种方法的优点是比相关单极子方法需要更少点的测量, 且相位可以忽略, 评估结果的精度在更高频率和复杂的振动结构中得到提高, 但不适于紧凑(与声波长相比, 尺寸很小)的辐射结构^[83]。Verheij 采用该方法还研究了护卫舰^[84]、卡车发动机柴油发电机^[85] 的噪声传递, 研究表明, 该方法能够有效区分引擎底部和顶部的噪声来源。

金广文^[86] 进一步将上述方法应用到水下航行器壳体表面不同区域的辐射噪声贡献分析, 利用双层圆柱壳体开展水下结构不同区域辐射噪声贡献识别研究, 并通过湖上试验, 验证了该方法的有效性。而试验结果还表明, 不同于空气介质中的飞机或设备表面辐射噪声贡献分离, 海水阻抗远大于空气, 导致试验测量壳体区域表面声压无法作为阻塞声压, 使得评估结果较实测值偏大。

总体而言, 壳体辐射贡献识别更侧重于空间域解耦, 通过分区阻塞声压测量实现辐射热点定位。但该方法受限于近场声压测量精度, 对水下航行器敷设声学覆盖层等复杂边界条件下的辐射贡献评估可能产生较大误差。

2.3 噪声源强度测量

测量复杂声源的声源强度一直是一个测试难题。例如水声换能器、船舶推进器等, 尤其在低频频段难以满足自由声场测试条件, 采用基于混响场的方法测量复杂声源会受到混响水池截止频率的限制^[87], 而利用互易原理测量适用于复杂声源的声源强度, 特别是低频源强的原位测量, 且不受环境限制^[88]。如图 7 所示, 假设存在一个可用的互易换能器, 并安装在任一位置(位置 2), 且处于未知声源附近空间中的某一位置。第 1 步, 进行“直接”试验, 驱动未知声源激励, 并测量换能器的开路电压 e_2 ; 第 2 步, 进行“反向”试验, 关闭未知声源, 然后用经过校准的全向水听器替换未知声源, 由电流 i_2 驱动位置 2 处的换能器, 从而在位置 1 处产生 P_1 。则有^[89]

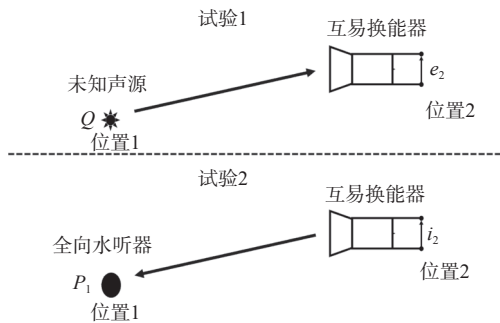


图 7 互易法测定声源强度计算示意图^[9]

Fig. 7 Schematic diagram of sound source strength calculation using the reciprocity method^[9]

$$Q = \frac{e_2}{P_1} i_2 \quad (5)$$

上述方法仅需测量电学量和全向水听器的校准数据, 就可提供原位的声源强度。Ten Wolde 曾采用互易法和混响法测量了水下扬声器的体积声速^[47]。在测量精度范围内, 二者的测量结果几乎一致, 且互易法适用于远低于混响法的频率范围。余文晶等^[90] 提出一种基于互易评估的水下声源强度测量方法, 通过双层圆柱壳体模型在消声水池中试验验证表明, 互易评估结果和常规测试结果趋势一致。Harvie 等^[91] 使用体积源简化测试来测量传递函数, 然后再预测驾驶员耳旁的声级。

此外, Ten Wolde 还进一步将互易测试方法用于测试螺旋桨空化噪声强度^[92]。以螺旋桨叶梢部位单极子源来表征螺旋桨空化, 试验结果表明, 互易测试可以用于部分空间的螺旋桨噪声预测。Leehey 和 Gedney^[93] 提出运用互易测量法确定变压水洞中船舶尾流环境下航行时空化螺旋桨体积速度, 并推断出该体积速度随响应测点距螺旋桨距离的增加而减小。孙陆阳等^[94] 基于互易原理开展了水下声源体积速度校准的研究。Bosschers 等^[95] 应用互易测量, 将空化螺旋桨的辐射噪声水平与船体加速度联系起来。并通过“佩拉贾”号科考船进行了评估, 结果显示与水听器测试结果相当一致, 表明了该方法的有效性。

综上, 基于互易测试在船舶噪声测试领域极具吸引力且应用前景广阔。然而, 从学者针对船舶机械-声学系统开展声互易测试研究及应用来看, 最主要的问题是其准确性和实用性。不同于室内水池或湖试, 码头或海试环境更复杂, 且船舶减振降噪技术重点逐渐朝低频发展, 基于互易性的船舶噪声测试研究已进入深水区, 很多因素都会导致互易测试误差增大, 大量问题亟待解决。

3 船舶噪声互易测试关键技术

互易原理本身并不复杂, 然而对于船舶这类

大型复杂结构而言,一方面其特点导致动力学特性极为复杂,另一方面,由于很难在如消声水池这种可控环境下进行测量,而只能在满足一定条件的实际海洋环境下进行试验,因此在工程实践中船舶机械声学系统的噪声测量和分析难度很大。下面主要针对船舶实际测试环境下可能存在的几类影响因素和关键技术进行分析。

3.1 互易测试影响因素分析

3.1.1 声学覆盖层的影响

在互易测试中,当流体边界条件不是完全的刚性边界,而是实际结构(如水下航行器壳体)时,其互易性质将变得十分复杂^[96]。对于水下航行器壳体这种板壳类弹性边界条件并不适用,而且水下航行器表面水声覆盖层的广泛应用使得边界的动力学行为更复杂。迄今,尚未有公开文献专门讨论了声学覆盖层对互易测试误差的影响。

本文作者利用 COMSOL 软件对单层圆柱壳在敷设喇叭腔型声学覆盖层条件下的互易性进行了验证(图 8)。通过激励力与辐射声压之比和结构振速与声源体积速度之比的对比分析,发现二者的数值曲线吻合较好。这说明结构在单层圆柱壳在敷设喇叭腔型声学覆盖层条件下仍满足互易性,即在互易测试中,激励力与响应间的关系保持一致,表明覆盖层内部结构并不会破坏互易性。

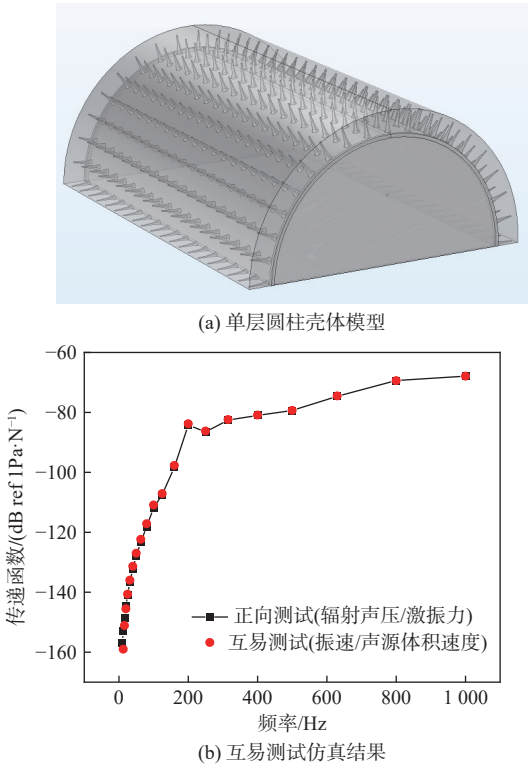


图 8 敷设声学覆盖层圆柱壳体互易测试仿真结果

Fig. 8 Simulation results of reciprocity testing for a cylindrical shell with acoustic cladding

然而,上述仿真结果并未考虑声学覆盖层的非线性。若覆盖层所施加的激振力过大,会导致声学覆盖层应变变大,此时材料的损耗因子将随着激振力的增大而改变,使得应力-应变关系进入非线性区域,导致最终验证的互易性不成立。图 9 展示了不同激励力及覆盖层损耗因子变化时的互易测试仿真结果。由图可见,在改变材料的损耗因子后,会造成互易性不成立的情况,且频率越高,产生的差异越大。这是因为损耗因子是与频率相关的参数,频率越高,产生的损耗就越大,正向测试得到的值越小。后续还需进一步通过声学覆盖层不同结构下的互易测试试验来进行验证。

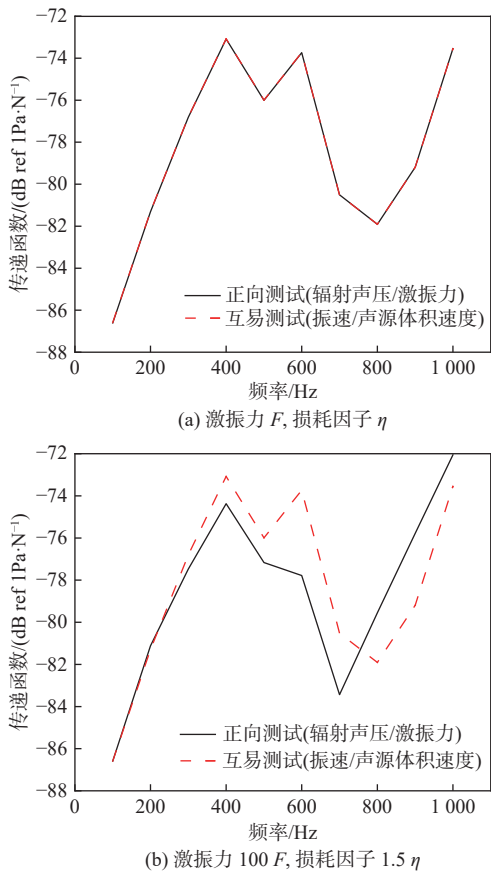


图 9 不同激励下互易测试仿真结果

Fig. 9 Simulation results of reciprocity testing under different excitation conditions

3.1.2 机械设备“陀螺效应”的影响

对于船舶机械系统,由回转机械设备的“陀螺效应”(GE)所导致的干扰会破坏互易性^[97-98]。船舶推进轴系以及各种泵均会不同程度地产生此类影响。Ten Wolde 基于四端网络理论,证明了系统中回转设备与其他元件并联时,互易性将不再成立。进一步地,可通过旋转系统的动力学方程进行验证。系统频域传递函数可表示为

$$\boldsymbol{H}(\omega)=\frac{1}{-\omega^2\boldsymbol{M}+\mathrm{j}\omega(\boldsymbol{C}+\boldsymbol{G})+(\boldsymbol{K}-\boldsymbol{K}_c)}$$

(6)

式中： $\boldsymbol{M}$ 、 $\boldsymbol{C}$ 、 $\boldsymbol{K}$ 分别表示系统质量、阻尼、刚度矩阵，均为对称矩阵； $\boldsymbol{G}$ 为陀螺矩阵，是一个反对称矩阵， $\boldsymbol{G}=\boldsymbol{2}\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{J}(\boldsymbol{G}^T=-\boldsymbol{G})$ ， $\boldsymbol{J}$ 为极转动惯量矩阵， $\boldsymbol{\Omega}$ 为转速)； $\boldsymbol{K}_c$ 为离心刚度矩阵， $\boldsymbol{K}_c=\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{M}$ ，也是对称矩阵。由于 $\boldsymbol{G}$ 反对称，传递函数矩阵 $\boldsymbol{H}(\omega)\neq\boldsymbol{H}^T(\omega)$ ，也就是说陀螺效应通过引入反对称项 $\boldsymbol{G}$ ，破坏了传递函数矩阵的对称性，导致振声互易性失效。

陀螺矩阵 $\boldsymbol{G}$ 与转速、质量密切相关。机械噪声产生及传递的一个重要组成部分就是包括螺旋桨及推进轴系(包括螺旋桨艉轴承、推力轴及推力轴承、支撑轴承等)在内的桨-轴系统^[99-101]。考虑到推进设备及轴系质量大、激励强，其陀螺效应更加明显，对互易测试的影响不容忽视。

3.1.3 声源体积速度的影响

声源体积速度的测量在互易测试是至关重要的^[102]，但该体积速度不是直接测量的物理量，而是通过声压计算。式(7)为在自由场和远场测量条件下对点声源的声源体积速度 Q 的计算式^[9]：

$$Q(f)=\frac{2r}{\rho f}P$$

(7)

式中， P 为测量声压； r 为水听器与声源间距离； ρ 为海水密度； f 为分析频率。利用全指向声源激励，通过测量远处声源辐射声压，根据计算式计算得到声源体积速度 Q 。

在实际测试环境中很难满足点声源和自由场的条件。例如，码头或狭小区域测试时，所在环境其实是一个混响环境。卢丁丁等^[69]通过水下互易试验，分析了双层圆柱壳体结构中力-声传递函数反向测量与正向测量之间的差异，发现正向测量和反向测量的力-声传递函数在频谱趋势上是一致的，但在幅值上存在约 5 dB 的差异。程果等^[103]针对正反向测试幅值差异问题，从理论上分析了造成幅值差异的原因，并最终证明其为测试环境中混响效应对声源体积速度计算的影响。进一步地，程果利用互易测试方法，提出了一种可以在不均匀的混响空间中获取自由声场中辐射噪声传递函数的方法——脉冲互易同步平均法。湖试结果表明，该方法混响场中评估的传递函数接近自由场的值^[104]。

3.2 水下低频声源的选取

互易测试结果的准确性在很大程度上依赖水下声源激励下结构响应的信噪比。而结构响应的强度则直接取决于水下声源的性能。目前，无论

是军用舰船还是民用船舶的噪声控制都在向低频发展，因此在互易测试应用过程中需要一种低频大功率声源。

国内外低频声源可根据发声机理分为 5 类^[105]，如表 2 所示。其中，电动/电磁式声源体积小、工作频率范围宽，但低频段功率较小。爆炸式、气枪式、激光式、等离子体声源都属于脉冲式声源，这些声源具有高功率、宽频带、无指向性的特点。然而，爆炸声源不具可控性，单次爆炸的结果不具有重复性，且操作中有一定风险^[106]；气枪声源声发射功率大，能量主要集中在低频段，但一般成阵使用，操作不方便^[107]；等离子体甚低频声源主要是利用了液电效应，即通过高储能电容在水中瞬间放电产生巨大的脉冲电流，从而将电能直接变为爆炸能形成超声速的激波向外传播，然后衰减为声脉冲^[108]。该声源具有低频能量强、源级高、重复性好的特性，目前广泛用于海洋勘探、水声等领域^[109-110]。本文前期文献调研过程中也发现，前苏联也曾推崇使用等离子体声源进行互易声学测试，该声源非常适合于互易测试的低频声源。

表 2 各种水下声源的特性^[105]

Table 2 Characteristics of various sound sources^[105]

声源类型	声源级/dB	工作频率/Hz
炸药爆炸式	>240	几到几万
电动/电磁式	150~200	几十到几千
气枪式	165~205	几十到几千
激光式	>220	几到几十万
等离子体式	>260	几到几十万

本文作者在千岛湖水域利用一种 5 kJ 等离子体声源进行了试验验证，如图 10 所示。该声源由充电模块、传输电缆、发射阵组成，最大输出能量为 5 kJ，最大瞬时声压可达 5.5×10^4 Pa。将该等离子体声源和传统的 UW350 声源对某缩比舱段模型进行互易测试，图 11 展示了两种声源反向传递函数测试结果基本一致。但相较于 UW350 声源扫频激励，等离子体声源耗时较短，单次激励能够获取全频段传递函数，且布放相对简单，对于船舶互易测试而言更加实用。

4 “相对精度”互易测试体系

互易测试要想在实际工程中发挥作用，最重要的是针对不同的典型应用场景开展深入研究，并提出行之有效的测试体系。目前，所有关于互易研究的文献资料，对互易问题的分类都是基于互易系统输入和输出两端的物理量类型^[111]。但这

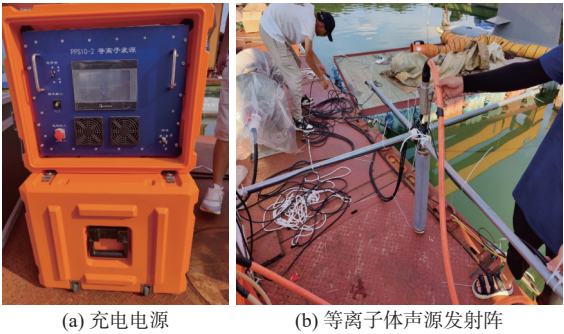


图 10 等离子体声源实物图

Fig. 10 Physical diagram of a plasma acoustic source

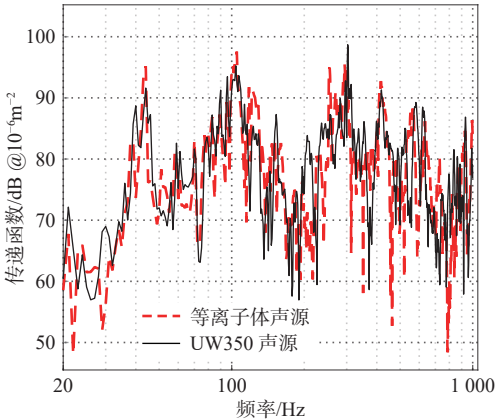


图 11 不同声源互易测试传递函数对比图

Fig. 11 Comparison of transfer functions for reciprocity testing of different acoustic sources

种分类体系在实际应用中往往难以精准捕捉不同实际问题的本质区别。事实上,在船舶声学设计过程中,部分声学参量其实不需要掌握绝对值,而只需要获取相对值即可有针对性地设计设备的安装位置、减振方式等,所以工程上更关心的是互易方法测得的传递函数之间的“相对精度”,即能量贡献比大小,且很多不同因素引起的误差在“相对”比较中会相互抵消。

下文将以船舶辐射噪声指向性测试为例,介绍“相对精度”互易测试理念。水下目标噪声空间指向特性体现了水下目标辐射噪声强度随距离和角度变化的分布特征,但船舶是一个形状极其复杂的空间声源,要想从数学上严格求解形状不规则声源产生的声场是十分困难的,而实船测试是获得其指向性的最有效方法。以水下航行器指向性测试为例,国内目前已开展过基于单水听器进行水下目标航行状态下辐射噪声指向性测量的研究^[112-113],其水下系统布放如图 12 所示。在航行测试过程中,确定被测目标某一工况航行状态的等效声中心,将其作为测量同一工况辐射噪声水平指向性的参考点。被测目标按照与测量装置指向成一定角度方向对准导航换能器正下方,并匀速直线通过。

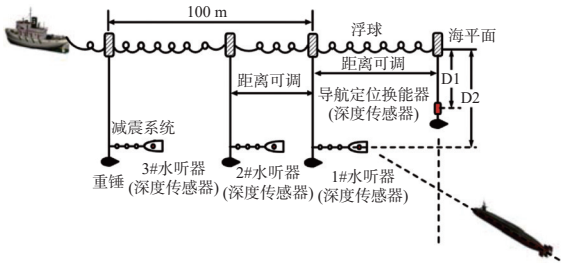


图 12 辐射噪声指向性测量系统布放示意图^[113]

Fig. 12 Schematic diagram of a radiation noise directivity measurement system deployment^[113]

然而,由于海洋环境背景噪声较高、水下声辐射测量系统复杂且布放难度大,舰船辐射噪声远处指向性难以测量^[114]。而互易原理通过反向的声激励则能够较好解决这一问题。如图 13 所示,水下目标沿着导航换能器方向定深匀速直线航行,通过水下低频大功率等离子体声源进行激励,通过调节声源激励间隔,同步测量水下目标与声源之间的距离和内部激励位置处的速度响应。

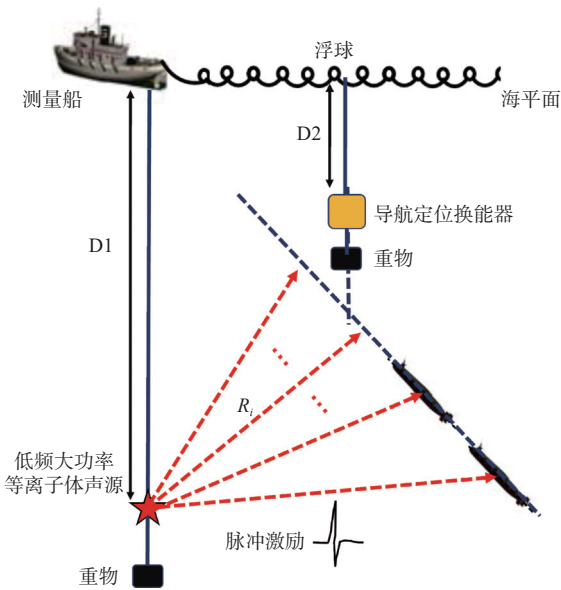


图 13 辐射噪声指向性互易测试示意图

Fig. 13 Schematic diagram of radiation noise directivity reciprocity testing

根据互易原理可以计算第 j 次激励下,水下航行器的辐射噪声声压(归算到声中心 1 m 处):

$$P_j = \frac{1}{R_j} \sum_{i=1}^k \frac{v_{ij} F_{ij}}{Q} \quad (8)$$

式中: F_{ij} , v_{ij} 分别为第 j 次激励下的第 i 个位置激励力及反向激励响应; k 为激励力数量; P_j , R_j 分别为第 j 次激励下的辐射噪声和相对距离。

假设辐射噪声最大值为 P_0 , 此时声源与水下航行器相对距离为 R_0 , 则进一步可以推导第 j 次激励下水下航行器辐射噪声指向性的计算式为

$$\varepsilon_j = \frac{P_j}{P_0} = \frac{\sum_{i=1}^k v_{ij} F_{ij}}{\sum_{i=1}^k v_{i0} F_{i0}} \cdot \frac{R_0}{R_j} \tag{9}$$

综上，基于互易原理的指向性测试方法忽略了声源体积速度 Q 带来的影响，即忽略了测试环境对 Q 的影响。类似场景还有很多，例如设备不同路径的辐射噪声贡献比、船舶结构辐射表面不同位置的传递函数等，基于互易测试方法均可以实现路径耦合分离，完成路径间贡献比的计算。

5 结论与展望

与正向测试相比，互易测试方法在船舶等大型装备噪声控制中有着无可比拟的优势，为船舶复杂系统的振动-噪声特性提取提供了高效的解决方案。本文梳理了互易理论和典型应用场景的发展历程，针对声学覆盖层等影响因素和低频大功率声源进行了初步分析，并提出了船舶辐射噪声指向性“相对精度”测试理论。总体而言，互易测试方法已经在船舶振动-噪声系统测试中显示出巨大应用潜力，但工程应用仍存在一些亟待解决的关键理论和技术难题。

1) 互易性是所有只包含双边(可逆)元素的稳定、线性、被动系统的一个特性。尽管互易原理的有效性已被广泛接受，然而，目前对于船舶这类复杂系统试验测试结果仍不尽如人意，极大地限制了在实际测量中的推广应用。互易测试中的声学覆盖层、旋转设备的“陀螺效应”以及复杂声场环境的影响，均可能会对船舶互易测试的结果产生影响。因此，后续需要对每一类影响因素单独建立修正模型，采用“理论建模-缩比试验-实船验证”的三阶段研究路径，并提出相应的修正方法。

2) 当前互易测试的标准体系不完善。互易测试要想在实际工程中发挥作用，最重要的是针对不同的典型应用场景开展深入研究，并提出行之有效的测试体系。现阶段最好的解决办法是从需求出发，通过试验探索来建立一套行之有效的互易测试流程，包括硬件选取、试验布置和数据处理计算方法等，力争形成一套互易测试的规范和标准。例如，对设备不同路径的辐射噪声贡献比、船舶辐射噪声指向性测试等，这些学者们关心的部分声学参量只需获取相对值，即在互易测试中，关注传递函数之间的相对误差，而非绝对误差。这可以为设备的安装位置、减振方式及基座、壳体结构形式等提供有针对性的设计依据。

参考文献：

[1] 黄珂. 完善船舶噪声污染防治立法的建议 [J]. 水运管理, 2025, 47(1): 34-36.
HUANG K. Legislative recommendations for improving the prevention and control of ship noise pollution [J]. Water Transport Management, 2025, 47(1): 34-36 (in Chinese).

[2] 吴崇建, 陈志刚. 结构噪声核心价值与理论逻辑解读第一部分: 释义、价值及认知颠覆 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 1-6.
WU C J, CHEN Z G. Core value and theoretical logic of structure-borne noise. Part 1: summary, value and cognitive subversion[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(1): 1-6 (in Chinese).

[3] 李威, 杨德庆, 刘西安, 等. 船舶水下辐射噪声抑制的声振相关性方法 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(15): 1-7,22.
LI W, YANG D Q, LIU X A, et al. Acoustic-vibration correlation method for suppressing underwater radiated noise from ships[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(15): 1-7,22 (in Chinese).

[4] PANG F Z, QIN Y X, TANG Y, et al. Experimental study on impact response of seaborne rocket launch platform[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114623.

[5] FRAGASSO J, HELAL K M, MORO L. Transfer-path analysis to estimate underwater radiated noise from on-board structure-borne sources[J]. Applied Ocean Research, 2024, 147: 103979.

[6] 吴萌, 李琼玥, 唐君超杰, 等. 水下航行器辐射噪声仿真及试验研究 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(5): 571-577.
WU M, LI Q Y, TANG J C J, et al. Simulation and experimental study on radiation noise of underwater vehicles[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2024, 7(5): 571-577 (in Chinese).

[7] 黄欣, 徐荣武, 李瑞彪. 基于神经网络的船舶辐射噪声预报方法 [J]. 船舶力学, 2025, 29(3): 486-496.
HUANG X, XU R W, LI R B. Ship radiation noise prediction method based on neural network[J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29(3): 486-496 (in Chinese).

[8] 刘子豪, 周富霖, 李兵, 等. 舰船舷间双层声桥声振传递特性研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 292-301.
LIU Z H, ZHOU F L, LI B, et al. Study on vibro-acoustic transmission characteristics of ship's double-layer acoustic bridge[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(3): 292-301 (in Chinese).

[9] TEN WOLDE T. Reciprocity experiments on the transmission of sound in ships[D]. Delft: Delft University of Technology, 1973.

[10] GERRETSEN E, DITTRICH M. Acoustics research at TPD-TNO in the 20th Century[C]//Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association

tion Forum Acusticum 2023. Turin, Italy: European Acoustics Association, 2024: 3569–3574.

[11] 张逸豪, 王斌, 范军, 等. 一种基于冲激响应的瞬态噪声近似预报方法 [J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(7): 57–64.

ZHANG Y H, WANG B, FAN J, et al. An approximate prediction method of transient noise based on impulse response[J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(7): 57–64 (in Chinese).

[12] GIRDHAR S, BARNARD A R, BLOUGH J R, et al. Exploring reciprocity method to measure radiated sound during a standard impact test[J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2022, 46(1): 040001.

[13] 卢铃. 互易原理在低频声源测试中的应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

LU L. Application of reciprocity principle in low-frequency sound source testing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016 (in Chinese).

[14] YOUSEFZADEH B. Computation of nonreciprocal dynamics in nonlinear materials[J]. *Journal of Computational Dynamics*, 2022, 9(3): 451–464.

[15] FAHY F, GARDONIO P. Sound and structural vibration: radiation, transmission and response[M]. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2007: 633.

[16] FAHY F J. The reciprocity principle and applications in vibro-acoustics[C]//Recent Developments in Air- and Structure-Borne Sound and Vibration: Vol. 2. Amsterdam: Elsevier, 1992: 611–618.

[17] LYAMSHEV L M. A question in connection with the principle of reciprocity in acoustics[J]. *Soviet Physics Doklady*, 1959, 4: 406.

[18] TEN WOLDE T. Reciprocity measurements in acoustical and mechano-acoustical systems. Review of theory and applications[J]. *Acta Acustica*, 2010, 96(1): 1–13.

[19] SAMARASINGHE P, ABHAYAPALA T D, KELLERMANN W. Acoustic reciprocity: an extension to spherical harmonics domain[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 142(4): EL337–EL343.

[20] BUITEN J. Review on the results of ten years of ship acoustic research in the Netherlands[M]//BUITEN J. Proceedings of the 2nd International Symposium on Shipboard Acoustics ISSA’86. Shipboard Acoustics. Hague, Netherlands: Springer, 1986: 461–481.

[21] 孙国仓, 陈明, 吴书有, 等. 水下结构声振互易实验研究 [J]. *隐身技术*, 2012(4): 52–56.

SUN G C, CHEN M, WU S Y, et al. Experimental study on acoustic-vibration reciprocity of underwater structures [J]. *Stealth Technology*, 2012(4): 52–56 (in Chinese).

[22] LYAMSHEV L M. On certain integral relations in the acoustics of a moving medium[C]//Proceedings of the 1961 International Symposium on Acoustics. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1961.

[23] FAHY F J. Some applications of the reciprocity principle in experimental vibroacoustics[J]. *Acoustical Physics*, 2003, 49(2): 217–229.

[24] 伏尔杜耶夫 B B. 互易定理 [M]. 李祥, 译. 北京: 科学出版社, 1959.

XYPJIYEB B B. Reciprocity theorem[M]. LI X, trans. Beijing: Science Press, 1959 (in Chinese).

[25] SMITH P W Jr. Response and radiation of structural modes excited by sound[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34(5): 640–647.

[26] DIESTEL H G. Reciprocity calibration of microphones in a diffuse sound field[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1961, 33(4): 514–518.

[27] SHAW E A G. Diffuse field response, receiver impedance, and the acoustical reciprocity principle[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, 84(6): 2284–2287.

[28] SHORTER P J, LANGLEY R S. On the reciprocity relationship between direct field radiation and diffuse reverberant loading[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(1): 85–95.

[29] BOJARSKI N N. Generalized reaction principles and reciprocity theorems for the wave equations, and the relationship between the time-advanced and time-retarded fields[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1983, 74(1): 281–285.

[30] DE HOOP A T. Time-domain reciprocity theorems for acoustic wave fields in fluids with relaxation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, 84(5): 1877–1882.

[31] 李中云, 王继承. 多孔吸声材料吸声性能优化及工程应用 [J]. *计量与测试技术*, 2024, 51(3): 85–88,92.

LI Z Y, WANG J C. Optimization and application of sound absorption performance of porous sound-absorbing material[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2024, 51(3): 85–88,92 (in Chinese).

[32] PIERCE A D. Reciprocity theorems and perception of non-reciprocal behavior in vibrating systems, metamaterials, acoustic devices, and electroacoustic devices[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(3S): 1946.

[33] ALLARD J F. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials[M]. 2nd ed. Dordrecht: Springer, 1993.

[34] IESAN D. Revue roumaine de mathématiques pures et appliquées[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1970, 15: 1181.

[35] BOSCHI E. The reciprocity theorem for porous anisotropic media[J]. *Annals of Geophysics*, 2011, 25(4): 607–613.

[36] MACGILLIVRAY I, SKVORTSOV A. Acoustic radiation from multilayered materials using the reciprocity

- principle[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, 155(4): 2891–2902.
- [37] 柯李菊, 刘成洋, 方智. 基于 COMSOL 的组合空腔结构声学覆盖层的声学性能分析 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(5): 167–175, 182.
- KE L J, LIU C Y, FANG Z. COMSOL-based acoustic performance analysis of combined cavity anechoic layer[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(5): 167–175, 182 (in Chinese).
- [38] 成玉强, 蔡存光, 高华, 等. 基于精细传递矩阵法的气囊隔振器横向刚度特性分析 [J]. *振动与冲击*, 2024, 43(4): 61–68, 124.
- CHENG Y Q, CAI C G, GAO H, et al. Transverse stiffness characteristics analysis of air springs based on the precise transfer matrix method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(4): 61–68, 124 (in Chinese).
- [39] RAYLEIGH J W S. The theory of sound: volume I [M]. 2nd ed. New York: Dover Publications, 1945: 89–120.
- [40] FAHY F J. Reciprocity in structural acoustics[C]//Proceedings of the 19th International Congress on Acoustics. Edinburgh: Institute of Acoustics, 1999: 161–170.
- [41] WOODHOUSE F G, RONELLENFITSCH H, DUNKEL J. Autonomous actuation of zero modes in mechanical networks far from equilibrium[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(17): 178001.
- [42] 杨兆豪, 帅长庚, 李步云, 等. 一种新型高静低动刚度气囊隔振装置结构设计及其试验研究 [J]. *船舶力学*, 2022, 26(11): 1705–1713.
- YANG Z H, SHUAI C G, LI B Y, et al. A new structure design for high-static-low-dynamic-stiffness air spring vibration isolation device and its experimental research[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(11): 1705–1713 (in Chinese).
- [43] TEN WOLDE T, DE BRUIJN A. A new method for the measurement of the acoustical source strength of cavitating ship propellers[J]. *International Shipbuilding Progress*, 1975, 22(255): 385–396.
- [44] LYAMSHEV L M. Principle and its applications in underwater acoustics[J]. *Journal of Marine Acoustics*, 1961, 8(2): 45–58.
- [45] GODIN O A. Reciprocity and energy theorems for waves in a compressible inhomogeneous moving fluid[J]. *Wave Motion*, 1997, 25(2): 143–167.
- [46] TEN WOLDE T, VERHEIJ J W, STEENHOEK H F. Reciprocity method for the measurement of mechano-acoustical transfer functions[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, 42(1): 49–55.
- [47] TEN WOLDE T, VAN RUITTEN C J M. Sources and mechanisms of wheel/rail noise: state-of-the-art and recent research[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1983, 87(2): 147–160.
- [48] MAXIT L, GUASCH O, MEYER V, et al. Noise radiated from a periodically stiffened cylindrical shell excited by a turbulent boundary layer[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 466: 115016.
- [49] MAZZEO G, ICHCHOU M, PETRONE G, et al. Pseudo-equivalent deterministic excitation method application for experimental reproduction of a structural response to a turbulent boundary layer excitation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, 152(3): 1498–1514.
- [50] PLOUSEAU-GUÉDÉ X, BERRY A, MAXIT L, et al. Similitude laws for the vibroacoustic response of fluid-loaded plates under a turbulent boundary layer excitation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2025, 157(1): 595–605.
- [51] 胡志宽, 刘朋, 严斌, 等. 基于互易原理的小水线面双体船传递函数试验研究 [C]//第十六届船舶水下噪声学术会议论文集. 贵阳: 中国造船工程学会船舶振动噪声重点实验室, 2017: 314–317.
- HU Z K, LIU P, YAN B, et al. Experimental study on transfer function of small waterplane catamaran based on reciprocity principle[C]//Proceedings of the 16th Academic Conference on Underwater Noise of Ships. Guiyang: China Ship Scientific Research Center, 2017: 314–317 (in Chinese).
- [52] VERHEIJ J W. Inverse and reciprocity methods for machinery noise source characterization and sound path quantification part 1: sources[J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 1997, 2(1): 11–20.
- [53] JANSSENS M H A, VERHEIJ J W, THOMPSON D J. The use of an equivalent forces method for the experimental quantification of structural sound transmission in ships[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 226(2): 305–328.
- [54] VERHEIJ J W. Inverse and reciprocity methods for machinery noise source characterization and sound path quantification Part 2: transmission paths[J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 1997, 2(3): 103–112.
- [55] VERHEIJ J W. Measurements of structure-borne wave intensity on lightly damped pipes[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 1990, 35(2): 69–76.
- [56] JIN M X, ZUO S G, WU X D, et al. Multistage operation transfer path analysis of an electric vehicle based on the regularization of total least squares[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 225: 112250.
- [57] BAI B H. Fan noise radial mode detection based on $L_{1/2}$ regularization method[J]. *Applied Acoustics*, 2025, 228: 110340.
- [58] CHEN Y H, XIANG Y, SHI Z Y, et al. Tikhonov regularized penalty matrix construction method based on the magnitude of singular values and its application in near-field acoustic holography[J]. *Mechanical Systems*

and Signal Processing, 2022, 170: 108870.

[59] PANG F Z, TANG Y, LI C H, et al. Reconstructed source method for underwater noise prediction of a stiffened cylindrical shell[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 310: 118828.

[60] ZHAO Y L, LIU Z P, YANG Z W, et al. Machinery fault diagnosis-oriented regularization for nonlinear system identification: framework and applications[J]. *Applied Acoustics*, 2025, 231: 110537.

[61] LIN B C, SHI Q H, YANG C, et al. Probabilistic regularization load reconstruction method based on iterative strategy[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, 596: 118719.

[62] VERHEIJ J W. A comment on the relationship between reciprocal and symmetrical systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 170(4): 567–570.

[63] LECLÈRE Q, PEZERAT C, LAULAGNET B, et al. Indirect measurement of main bearing loads in an operating diesel engine[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 286(1/2): 341–361.

[64] LIU Y, SHEPARD W S Jr. An improved method for the reconstruction of a distributed force acting on a vibrating structure[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 291(1/2): 369–387.

[65] KOROTIN P I. On the applicability conditions of the reciprocity principle in vibroacoustics[J]. *Acoustical Physics*, 1997, 43(3): 357–359.

[66] 吴为. 舰船振动噪声传递路径分析方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.

WU W. Research on method of ship vibration noise transfer path analysis[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021 (in Chinese).

[67] MA Q, CUI M, LI F, et al. Towards automatic identification of ship-ice contact using acceleration measurement[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 306: 118038.

[68] SHI G J, WANG D Y, GAO D W, et al. Impact load identification of ship panels under tire drop action based on the data-driven regression with regularization[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 322: 120441.

[69] 卢丁丁, 何琳, 徐荣武. 水下结构力-声互易测量中的正、反向测试差异分析 [J]. *海军工程大学学报*, 2014, 26(1): 1–4.

LU D D, HE L, XU R W. Difference analysis of direct and reciprocal measurement results in underwater structure reciprocity experiment[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2014, 26(1): 1–4 (in Chinese).

[70] PENG T, CHENG G, XU R W, et al. Research on ship-radiated noise assessment method based on the force-sound reciprocity[C]//Proceedings of the 2024 OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin, China: IEEE, 2024: 1–5.

[71] 姜海勋, 张华栋, 阎慧东, 等. 船舶大口径通海系统管路声学性能检测方法试验研究 [J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(11): 36–39.

JIANG H X, ZHANG H D, YAN H D, et al. Research on pipeline vibration forecast method based on reference point calculation[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(11): 36–39 (in Chinese).

[72] YANG Y, PAN G, YIN S P, et al. Experiment investigate on the effectiveness of flexible pipes to isolate sea-water pump generated vibration[J]. *Coatings*, 2020, 10(1): 43.

[73] 林伟, 夏茂龙, 刘正浩, 等. 水中目标自由场声辐射特性还原及远场声辐射热区识别 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(1): 119–126.

LIN W, XIA M L, LIU Z H, et al. The recovery of underwater target's free field acoustic radiation characteristics and identification of far-field acoustic radiation hotspot[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(1): 119–126 (in Chinese).

[74] MUSHA T, KIKUCHI T. Validity of the vibro-acoustic reciprocity method for the measurement of the mechano-acoustical transfer function[J]. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 1998, 19(2): 151–153.

[75] MUSHA T, ABE I, SHINOHARA A, et al. Evaluation of acoustic radiation efficiency for hull plate using the reciprocity method[J]. *JSME International Journal Series C*, 1994, 37(3): 612–615.

[76] MASON J M, FAHY F J. Development of a reciprocity technique for the prediction of propeller noise transmission through aircraft fuselages[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 1990, 34(2): 43–50.

[77] MASON J M, FAHY F J. Application of a reciprocity technique for the determination of the contributions of various regions of a vibrating body to the sound pressure at a receiver point[C]//Proceedings of the Institute of Acoustics. Birmingham: Institute of Acoustics, 1990, 12: 469–476.

[78] DUMORTIER F, MEYER V, MAXIT L. A global decoupling technique for subtractive modelling on acoustic and vibration problems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 569: 117969.

[79] CHENG G, HERRIN D W, STENCEL J. Acoustic radiation prediction using panel contribution analysis combined with scale modeling[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 186: 108458.

[80] YAN X, HERRIN D W, GHASIAS N. Acoustic source reconstruction of a commercial generator set using inverse pellicular modes and inverse numerical panel contribution analysis[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2024, 72(6): 564–576.

[81] 耿宁烨, 黎胜, 孟春霞. 改进的非负声强和有用声强识别表面声辐射 [J]. *应用声学*, 2018, 37(3): 438–444.

GENG N Y, LI S, MENG C X. Improved non-nega-

- tive intensity and useful intensity for identification of radiating regions on surfaces[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, 37(3): 438–444 (in Chinese).
- [82] VERHEIJ J W. Acoustic modelling of machinery excitation[C]//Proceedings International Symposium on Shipboard Acoustics. Amsterdam: Elsevier, 1977: 127–153.
- [83] 郑金焱. 基于非负声强和单点贡献理论的圆柱壳辐射热点识别及控制机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- ZHENG J Y. Research on radiation hotspots identification and control mechanism of cylindrical shell based on non-negative intensity and single point contribution theory[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024 (in Chinese).
- [84] VERHEIJ J W. On the characterization of the acoustical source strength of structural components[C]//Advanced Techniques in Applied and Numerical Acoustics, ISAAC 6, International Seminar on Applied Acoustics. Leuven: Katholieke Universiteit, Faculty of Engineering, 1995: III-1–III-24.
- [85] VERHEIJ J W. Quantifying sound transfer paths for a resiliently mounted 4000 kW medium speed shipboard diesel engine[C]//Proceedings of 1980 International Conference on Noise Control Engineering. Miami: British Maritime Technology, 1980: 407–412.
- [86] 金广文. 双层圆柱壳体水下噪声实时预报方法研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2010.
- JIN G W. Research on real-time prediction method of underwater noise of double-layered cylindrical shell[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2010 (in Chinese).
- [87] 孙俊东, 尚大晶, 孙小越. 混响场互易常数的测量方法 [J]. *中国舰船研究*, 2017, 12(4): 128–131.
- SUN J D, SHANG D J, SUN X Y. Measurement method of reverberation field reciprocity parameter[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2017, 12(4): 128–131 (in Chinese).
- [88] 程果, 徐荣武, 何琳, 等. 混响声场条件下水声互易传递函数的测量及应用 [J]. *声学学报*, 2014, 39(5): 577–581.
- CHENG G, XU R W, HE L, et al. Application and measurement of underwater acoustic reciprocity transfer functions in reverberant sound field[J]. *Acta Acustica*, 2014, 39(5): 577–581 (in Chinese).
- [89] TEN WOLDE T. Reciprocity measurement of acoustical source strength in an arbitrary surrounding[J]. *Noise Control Engineering*, 1976, 7(1): 16–23.
- [90] 余文晶, 何琳, 程果, 等. 力-声互易在水下声源强度测量中的应用 [J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(8): 118–121.
- YU W J, HE L, CHENG G, et al. The application of mechano-acoustical reciprocity in measurement of underwater acoustical source strength[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(8): 118–121 (in Chinese).
- [91] HARVIE J, DE KLERK D. Source characterization for automotive applications using innovative techniques[C]//Dynamic Substructures, Volume 4. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Cham: Springer, 2021: 117–125.
- [92] TEN WOLDE T. Measurement of structure-borne sound source strength with a reciprocal substitution method[C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Cambridge: Institute of Noise Control Engineering, 1986: 1033–1038.
- [93] LEEHEY P, GEDNEY C J. Application of reciprocity methods to the measurement of dynamic characteristics of a cavitating propeller in a water tunnel[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1979, 65(Supp 1): S90.
- [94] 孙陆阳, 孙红灵, 杨军. 基于力声互易方法的次级声源低频性能研究 [C]//第十八届船舶水下噪声学术讨论会论文集. 昆明: 中国造船工程学会, 2021: 9.
- SUN L Y, SUN H L, YANG J. Research on low frequency performance of underwater secondary sound source based on force acoustic reciprocity method[C]//Proceedings of the 18th Academic Symposium on Ship Underwater Noise. Kunming: Academic Committee of Ship Mechanics, 2021: 9 (in Chinese).
- [95] BOSSCHERS J, KONING J, SCHOUTEN R. Estimation of the underwater radiated noise by ship propeller cavitation using onboard sensors[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285(5): 115432.
- [96] 贾薪宇, 靳国永, 叶天贵. 静水压力下水下声学覆盖层技术研究现状 (英文)[J]. *哈尔滨工程大学学报 (英文版)*, 2025, 24(1): 137–151.
- JIA X Y, JIN G Y, YE T G. Research status of underwater acoustic coating technology under hydrostatic pressure (in English)[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2025, 24(1): 137–151 (in Chinese).
- [97] FANG L Z, MOJAHED A, DARABI A, et al. Passive nonreciprocity in a system of asymmetrical rotational oscillators[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(3): 034005.
- [98] 关庆华, 王文波, 张丰英, 等. 陀螺效应对高速旋转轮对弯曲模态的影响 [J]. *铁道学报*, 2025, 47(3): 54–63.
- GUAN Q H, WANG W B, ZHANG F Y, et al. Influence of gyroscopic effect on bending mode of high speed rotating wheelsets[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2025, 47(3): 54–63 (in Chinese).
- [99] 何琳, 帅长庚, 杨雪. 潜艇螺旋桨轴承降噪技术研究进展 [J]. *舰船科学技术*, 2011, 33(10): 3–8.
- HE L, SHUAI C G, YANG X. Research development of noise attenuation for submarine propeller bearing[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(10): 3–8 (in Chinese).

[100] 冯树才, 陈彦臻, 曲东旭, 等. 船舶推进轴系回旋振动研究综述 [J]. *船舶工程*, 2024, 46(3): Z21–Z37.
FENG S C, CHEN Y Z, QU D X, et al. Review of research on whirling vibration of ship propulsion shafting system[J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(3): Z21–Z37 (in Chinese).

[101] 古铮, 刘金林, 房诗雨. 轴段空心度对舰船复杂推进轴系回旋振动特性的影响研究 [J]. *船舶力学*, 2025, 29(2): 312–320.
GU Z, LIU J L, FANG S Y. Influence of shaft segment hollowness on the whirling vibration characteristics of ship complex propulsion shafting[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2025, 29(2): 312–320 (in Chinese).

[102] 程果. 在航潜艇水下辐射噪声实时评估理论及实践 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2016.
CHENG G. Theory and practice of real-time evaluation of underwater radiated noise for in-service submarines[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2016 (in Chinese).

[103] 程果, 陈景兵, 何琳. 基于互易原理和空间平均的水下传递函数测量 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(3): 151–155.
CHENG G, CHEN J B, HE L. Measurement of underwater transfer functions using spatial average and reciprocity principle[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(3): 151–155 (in Chinese).

[104] CHENG G, HE L, XU R W. Evaluation of free-field transfer functions in anomalous reverberant fields[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 386: 163–176.

[105] 李宁, 陈建峰, 黄建国, 等. 各种水下声源的发声机理及其特性 [J]. *应用声学*, 2009, 28(4): 241–248.
LI N, CHEN J F, HUANG J G, et al. Sounding mechanisms and characteristics of various underwater sound sources[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2009, 28(4): 241–248 (in Chinese).

[106] 郭锐, 俞旸晖. 水下爆炸声学效应研究现状与展望 [J]. *水下无人系统学报*, 2022, 30(3): 266–282.
GUO R, YU Y H. Progress and prospect of the acoustic effects of underwater explosions[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2022, 30(3): 266–282 (in Chinese).

[107] 程广利, 庞昕, 刘宝, 等. 气枪声源诱发的浅海海底地震波场建模与试验 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 49(12): 51–56.
CHENG G L, PANG X, LIU B, et al. Modeling and experiments of seismic wave field in the bottom of shallow water induced by air gun source[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(12): 51–56 (in Chinese).

[108] 吕皓男, 冯燕涛, 刘振, 等. 水下等离子体声源放电特性和声特性实测与分析 [J]. *声学技术*, 2024, 43(1): 1–10.
LÜ H N, FENG Y T, LIU Z, et al. Measurement and analysis of discharge and acoustic characteristics of underwater plasma sound source[J]. *Technical Acoustics*, 2024, 43(1): 1–10 (in Chinese).

[109] 孙庆鹏, 张晓兵, 颜冰. 小型等离子体声源脉冲信号特性及应用前景分析 [J]. *舰船电子工程*, 2021, 41(9): 178–181.
SUN Q P, ZHANG X B, YAN B. Analysis on the characteristics and application prospect of pulse acoustic signal from small plasma source[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(9): 178–181 (in Chinese).

[110] 孙庆鹏, 张晓兵, 颜冰, 等. 小型等离子体声源在水声领域的应用前景分析 [J]. *数字海洋与水下攻防*, 2020, 3(1): 24–29.
SUN Q P, ZHANG X B, YAN B, et al. Application prospect analysis on plasma source in field of underwater acoustics[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2020, 3(1): 24–29 (in Chinese).

[111] SOARES F, ANTUNES J, DEBUT V. A minimal model of the bar-resonator vibroacoustic interaction in mallet percussion instruments[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 199: 109049.

[112] 韩国文, 吴绍维. 潜艇结构水下低频声辐射特性分析 [J]. *船海工程*, 2023, 52(5): 121–125.
HAN G W, WU S W. Analysis of low frequency acoustic radiation characteristics of underwater submarine structure[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2023, 52(5): 121–125 (in Chinese).

[113] 代雪峰, 熊草根. 国内外水下目标辐射噪声指向性测试方法研究与分析 [C]//第十六届船舶水下噪声学术讨论会论文集. 贵阳: 中国造船工程学会船舶振动噪声重点实验室, 2017: 314–317.
DAI X F, XIONG C G. Research and analysis on directivity testing methods of underwater target radiated noise at home and abroad[C]//Proceedings of the 16th Academic Symposium on Ship Underwater Noise. Guiyang, China: Acoustical Society of China, 2017: 314–317 (in Chinese).

[114] 王文冠, 侯朋, 吴迪, 等. 船舶水下辐射噪声水平指向性测量及试验研究 [J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(21): 149–153.
WANG W G, HOU P, WU D, et al. Research on horizontal directivity measuring method of ship underwater radiated noise[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(21): 149–153 (in Chinese).

Review of reciprocity measurement theory and applications for ship mechanical-acoustic systems

PENG Tao^{1,2}, XU Rongwu^{*1,2}, ZHANG Jiarui^{1,2}, YAO Zhenyu^{1,2}

1 Institute of Noise and Vibration, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

2 National Key Laboratory on Ship Vibration and Noise, Wuhan 430033, China

Abstract: With the increasing demands for ship stealth performance and onboard comfort, the precise quantification of vibro-acoustic characteristics in complex ship systems is critical for optimizing structural acoustic design and reducing radiated noise. Traditional vibro-acoustic measurement methods are constrained by spatial limitations and coupling interference in ships, while indirect testing technology based on the reciprocity principle offers a novel approach to address these challenges. This paper systematically reviews the theoretical progress and engineering practices of reciprocity testing for ship mechanical-acoustic systems: First, it introduces the historical development of reciprocity testing theory and the current status of engineering applications. Next, it analyzes and summarizes the key technical challenges hindering the industrial application of reciprocity testing, focusing on error-influencing factors and low-frequency high-power acoustic sources. Then, the "relative accuracy" reciprocity testing concept is illustrated through a case study of ship radiated noise directivity testing. Finally, the paper provides an outlook on critical issues requiring urgent resolution in the engineering application of reciprocity testing for ship mechanical-acoustic systems.

Key words: mechanical-acoustic systems; reciprocity principle; vibro-acoustic characteristics; transfer function; radiated noise; acoustic measuring

相关论文

- [1] 张帆, 车驰东, 顾胜健, 等. 基于表面阻抗测量的声学覆盖层吸声系数测试及修正 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(5): 172–179. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03297>
- [2] 刘子豪, 周富霖, 李兵, 等. 舰船舷间双层声桥声振传递特性研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 292–301. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03269>
- [3] 李广生, 陈美霞, 原春晖. 基于陆上振动测试的水中圆柱壳结构声振响应计算方法 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 252–260. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02414>
- [4] 彭才赓, 张诗洋, 张冠军. 复杂加筋的锥-柱组合壳声振相似规律研究 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2): 165–172. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02232>