

冰区航行船舶管路系统研究综述与展望

Review and Outlook on Pipeline Systems for Ships Navigating in Ice-Covered Areas

朱洪波^{1,2}, 冯献华², 韩旭^{1,2}, 张浩¹, 解忠良^{2*}

ZHU Hongbo^{1,2}, FENG Xianhua², HAN Xu^{1,2}, ZHANG Hao¹, XIE Zhongliang^{2*}

1. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

2. 西北工业大学工程力学系, 西安 710072

Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

摘要

Abstract

【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2025.11.Z1

[目的] 为解决冰区船舶管路系统在极地低温、破冰冲击与严苛噪声限制, 面临复杂环境载荷时流固耦合响应预测不精确、极端条件系统性分析不足、主动控制技术实际应用成本高与可靠性低等问题, [方法] 从振动、减振降噪、安全评估等方面进行系统性评述, 并深入剖析其在复杂工况下的关键技术挑战。[结果] 冰区船舶管路系统技术正从传统静态分析向流固耦合动态预报、基于全生命周期的安全评估及智能感知与自适应控制演进。[结论] 研究结论为冰区船舶管路系统指明未来发展方向, 可为我国极地船舶的研发提供支撑。

[Purpose] In order to solve the problems of inaccurate prediction of fluid-structure interaction responses under complex environmental loads, insufficient systematic analysis under extreme conditions, high practical application costs and low reliability of active control technologies for the piping systems of ice-going vessels in polar regions with extremely low temperatures, ice-breaking impacts and strict noise restrictions, [Method] a systematic review is conducted from the aspects of vibration, vibration reduction and noise reduction, and safety assessment, and the key technical challenges under complex working conditions are deeply analyzed. [Result] Ice-zone vessel piping system technology is evolving from traditional static analysis toward fluid-structure interaction dynamic forecasting, full-lifecycle safety assessment, and intelligent sensing with adaptive control. [Conclusion] The research results point out the future development direction of the piping systems of ice-going vessels and can provide support for the research and development of China's polar vessels.

关键词

Key words

船舶管路系统; 流激激励; 振动特性分析; 减振降噪; 安全评估; 优化布局

ship piping system; flow-induced vibration; vibration characteristic analysis; vibration and noise reduction; safety assessment; optimized layout

0

引言

随着全球对极地战略意义和资源潜力的认识不断深入，破冰船作为关键装备，其技术发展备受关注。破冰作业时（见图1），船体会承受巨大且随机的冰载荷冲击，同时伴随极低的环境温度，对全船系统的可靠性提出了极致要求。管路系统（见图2）遍布全船，承担着输运燃油、润滑油等重要功能。与常规船舶相比，破冰船管路系统面临多重极端耦合激励：1）低频大变形，即破冰时船体梁的总体弯曲与扭转；2）高频强冲击，即冰层挤压、碎裂产生的剧烈瞬态振动；3）极端低温，易导致材料性能劣化、介质冻结；



图1 雪龙2号在冰区航行

Fig. 1 Xue Long 2 Navigating Through Ice-Covered Waters

4）复杂流激，即内部流体脉动与船体运动的相互耦合。这些因素极易引发管路系统共振、疲劳破坏、接头泄漏乃至功能失效，严重威胁航行安全。

目前，针对常规船舶管路系统的研究已较为成熟，但仍缺乏专门面向破冰船特殊性的综述性文章。本文旨在梳理该领域的最新研究进展，从设计、振动、减振降噪、流激激励、安全评估及优化布局方面进行全面评述，并剖析当前面临的关键挑战与未来发展方向，为我国高性能极地船舶研发提供理论支撑与技术参考。



图2 船舶机舱内管路系统

Fig. 2 Piping System in the Ship's Engine Room

1

管路系统流体动力学与流激激励

冰区航行时，船体承受高强度冰载冲击，与管内低温流体相互作用，形成复杂的多物理场激励，引发管路剧烈振动、疲劳甚至破裂，威胁航行安全。管路内部流体流动与结构振动相

互影响，构成复杂的流固耦合（Fluid-Structure Coupling, FSI）问题。因此，研究冰区船舶管路的流体动力学特性与流激振动机理，对保障极地环境下船舶安全可靠运行具有重要意义。

1.1 流体动力学

船舶管路流体动力学作为船舶工程系统的核心分支，直接关系到动力传输效率、能源损耗控制及航行安全性。管路系统的流体动力学特性是研究其振动与稳定性的基础，主要通过理论建模

与数值模拟方法进行深入研究。

PAIDOUSSIS^[1] 系统性建立了输流管路的线性与非线性动力学理论框架，揭示了流速、边界条件对系统稳定性的决定性影响，其提出的梁模

型已成为该领域的基准模型；WANG 等^[2]针对气液两相流的复杂性，对传统漂移流模型进行改进（见图 3），引入了分布参数和广义积分变换技术。该改进模型有效克服了传统方法在流型转换处的非连续性缺陷，能够精确预测全流型域内管路的振动响应^[3]。

在数值模拟方面，早期研究主要采用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）方法独立分析管内流场特性。马粤^[4]对横向流管

路仿真，结果表明当来流速度超过临界值时，管路会产生涡激振动，导致振幅急剧增大。余思骞等^[5]分析了排气管 90° 弯头及排气消声器管系中的压力分布和速度分布，证实 CFD 方法具有可靠的预测性。葛士权等^[6]通过等效弹性模量法与层状结构法构建海洋立管模型，将模拟所得流场结果进行交互，实现二者耦合，进而对比不同建模方式及不同种类立管在涡激振动作用下的位移和应力响应差异。

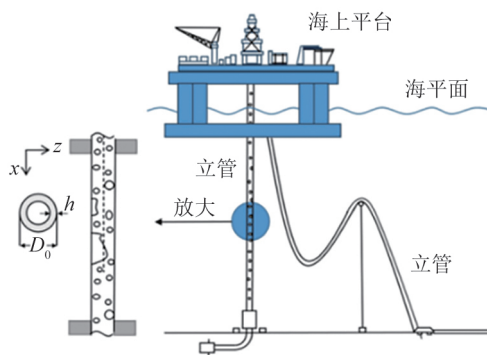


图 3 垂直管路输送两相流示意

Fig. 3 Schematic Diagram of Two-Phase Flow in Vertical Pipelines

1.2 流激激励机理

管路系统流激激励是流体与管路结构动态相互作用的结果，其核心在于流动能量通过特定途径传递至管壁，从而诱发管路振动。

针对单相流激励，蔡标华等^[7]以管路壁面流体压力脉动为激励源，发现流致振动（Flow-Induced Vibration, FIV）噪声沿管路传播基本无衰减，为特定工况下的振动控制提供了依据。王莉等^[8]结合 FSI 方法分析了管路外部绕流作用下的振动响应。曹宏博^[9]建立了离心泵及其出口弯管的 FSI 动力学模型，系统研究了弯管几何参数对流场激励及系统振动特性的影响规律。

针对复杂的多相流激励，学者们针对固液混合相建立了控制方程，并引入主动形状模型描

述相间滑移特性^[10-13]。但建模过程中引入了大量假设，导致动量传递与浓度场分布与实际存在偏差。为此，李琳依等^[14]对水平 U 型管在气液两相段塞流工况下的振动进行数值仿真，明确了气液相折算速度对段塞特性及振动响应的影响。张宇祥等^[15]研究了竖直弯管在不同转弯角度下气液两相流的振动特性，发现随角度增大，流型转化加快，弯头冲击增强，振动呈先增后减趋势。徐立等^[16]对换热管路内海水 - 冰晶两相流体的换热特性进行数值仿真，表明流速是关键因素。陈海文等^[17]采用欧拉 - 欧拉双流体模型研究振动对水平直管内海水 - 冰晶两相流的影响，揭示了振幅与频率对冰晶分布和压降的规律。

1.3 FSI 效应

流体脉动压力会导致管壁产生变形，而管路变形又会反向改变流场，这种相互作用可能放大或抑制振动；加之破冰船的横摇、纵摇运动会使管路内流体产生滑晃，进一步加剧了流动不稳定

性。

目前，FSI 作用的研究主要聚焦于泊松耦合。泊松耦合是局部压力和管壁应力相互作用引发的沿管线耦合，主要与泊松比相关^[18]。张鹏^[19]、滕

振超等^[20]建立了考虑泊松耦合的 FSI 求解模型。王晖晖^[21]通过双向 FSI 分析,探讨了压力与流量脉动参数对 FIV 及声辐射的影响。刘桂祥^[22]分别计算直管、弯管、吊架及连接模拟设备 4 种管段的流场特性。柯兵^[23]对不同结构参数弯管湍流作用下的 FIV 展开研究,得到弯管流速下流体脉动压强、结构振动响应的影响规律。

在数值方法方面, TIJSELING^[24-25]采用一维计算方法分析输液管路的动力学响应,发现四方程模型求解速度快且计算精度较高。ROGERIO 等^[26]结合格列姆法对八方程进行仿真并验证其准确性。SANTOS^[27]提出两相流耦合振动预测的试验方法,并对不同材料的管系进行试验验证。ZANGANEH^[28]通过特征线法结合时域有限元

法,研究水锤作用下弹性支撑管路的振动响应。MESSAHEL 等^[29]基于均相平衡模型和任意拉格朗日方法,指出气泡破裂引起的瞬时冲击可能会导致局部共振,进而破坏管路结构。

第 1 节阐述了 29 篇关于船舶管路系统的文献,主要研究内容分类信息和时间统计分别见表 1 和图 4。分析可知,学者普遍认为管路系统流激励多为多相流激励,而非简单的单向流激励;在 FSI 效应方面,单向 FSI 与双向 FSI 均需进行进一步研究探索。从时间统计数据来看,2015 年后相关研究呈上升趋势,2021 年前后尤为明显,表明管路系统流体动力学领域的研究将持续深入。

表 1 文献分类信息
Tab. 1 Document Classification Information

研究内容	对应参考文献	数量 / 篇
CFD	[1], [4], [5], [6], [8], [16], [17], [23]	8
单相流激励	[7], [8], [9]	3
多相流激励	[2], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]	9
泊松耦合	[18], [19], [20]	3
单相 FSI	[6], [8], [9], [23], [24], [25], [26]	7
双相 FSI	[4], [21], [22], [27], [28], [29]	6

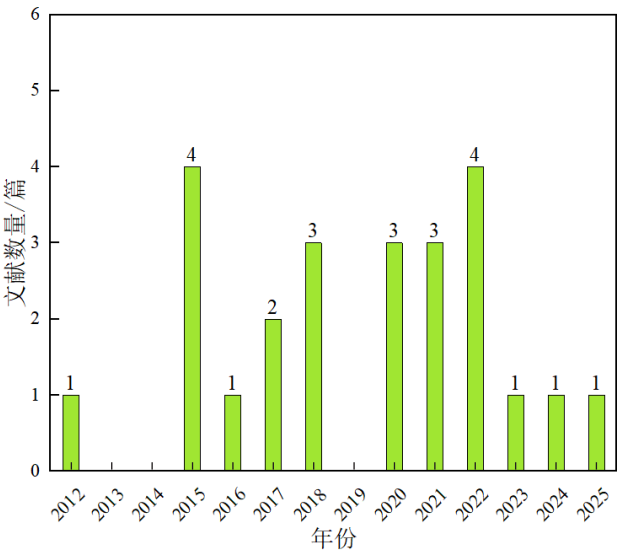


图 4 研究文献统计数据
Fig. 4 Research Literature Statistics

当前研究已通过 CFD 方法明确了阀门、弯头等关键部件是 FIV 的主要激励源^[30-31]。在 FSI 方面, 现有方法多采用单向或局部双向耦合, 虽能反映充液管路振动特性的变化, 但尚难以完整解释流体与复杂管路系统的动态相互作用。例如, 忽略支架整体性会影响水锤压力计算的准确性^[32]。同时, 针对复杂管路系统仍缺乏一体化、

多物理场的全频域耦合求解技术^[33-34]; 局部涡流与压力脉动等机理及其向结构振动的传递路径也有待明晰。未来应发展高精度双向 FSI 数值方法与系统级集成模型^[35]; 推动多物理场联合仿真, 并深入探究局部流动与振动噪声的关联机制, 为低噪声管路设计提供更精确的理论支撑。

2 管路系统振动方面

船舶振动是影响安全运行的关键问题, 过度振动易导致管路、支架等部件疲劳损坏和介质泄漏, 并干扰设备正常工作。破冰船管路系统振源复杂, 控制振动需首先识别其主要激励源与传递

路径, 进而分析振动响应及其引发的疲劳破坏与设备失效风险。结合核动力破冰船等特殊工况, 还需进一步明确管路系统的振动特性与相应防护需求。

2.1 激励源特性分析

在冰区船舶管路系统振动研究领域, 国内外学者主要从冰载荷激励特性、管路系统动态响应及 FSI 作用等角度展开研究, 揭示其独特的振动机理。

在冰载荷激励特性研究方面, 因其高度随机和非线性, 成为分析的难点和起点。何文心^[36]模拟了破冰船连续式和冲撞式破冰模式下的冰载荷及结构响应。HE^[37]提出基于格林函数法的新型动态冰载荷识别方法, 证实冰载荷对结构响应影响显著。HAN^[38]通过模型试验研究了螺旋桨在不同

进速、转速和切削深度下的冰载荷特性。WU^[39]基于雪龙号全尺度实测数据, 采用最小二乘法进行冰荷载识别, 建立了冰荷载上下限估计公式。夏劲松^[40]研究了极地船舶挤压破冰下冰体压溃载荷特性。徐义刚^[41]对典型破冰工况下破冰冲击载荷进行预报, 结果表明冰激振动载荷主要包含低频振动和中高频局部振动。王健伟^[42]基于雪龙 2 号实船测量数据, 发现冰载荷在船体结构上具有时空演变特征 (见图 5)。

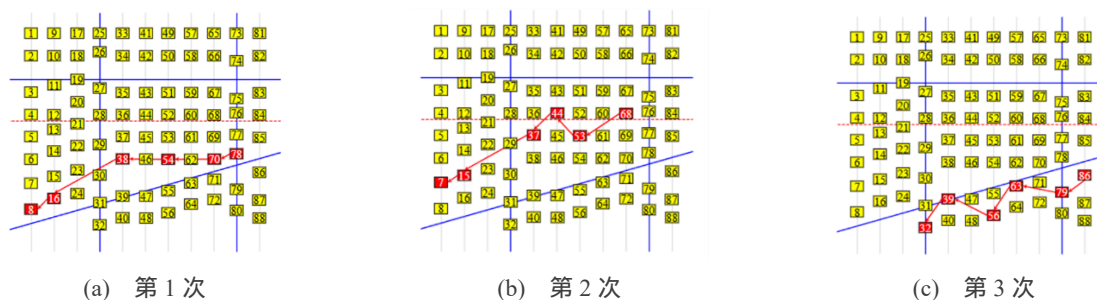


图 5 3 次冲撞式破冰过程中冰载荷的整体时空分布

Fig. 5 Overall Spatiotemporal Distribution of Ice Loads During the Three-Stage Impact Icebreaking Process

在管路系统动态响应分析中, 重点在于建立有效的耦合动力学模型。周维星^[43]建立了船体 -

支架 - 管路耦合模型, 得到了典型冰载荷作用下管路振动位移和应力分布。张啸涵^[44]采用频响函

数子结构综合法建立管路系统的动力学模型，分析了支撑耦合关系及动态应力。孙帅^[45]、徐佩^[46]通过实船测试发现，冰区航行时管路振动总级较常规水域平均高 10 dB ~ 15 dB，且中高频成分显著增加。

在流体作用方面，PAÏDOUSSIS^[47]建立了管路 FSI 振动的理论框架，揭示涡激振动、颤振失稳等物理现象的本质。LU^[48]建立罐内气 - 液 - 固

多相流数值模型，模拟了两相流体和固体颗粒的相互作用耦合过程。刘寒秋^[49]研究了冰水两相流在直管和弯管内的流动、冲蚀和积聚特性（见图 6），揭示了流速、粒径等因素的影响规律。DU^[50]从内部激励分析了低温流体对管壁的激励作用。冰区船舶管路振动是宽频带外部冰激振动通过结构路径传递，与内部复杂流态引发的 FIV 相互耦合的复杂动力学问题。

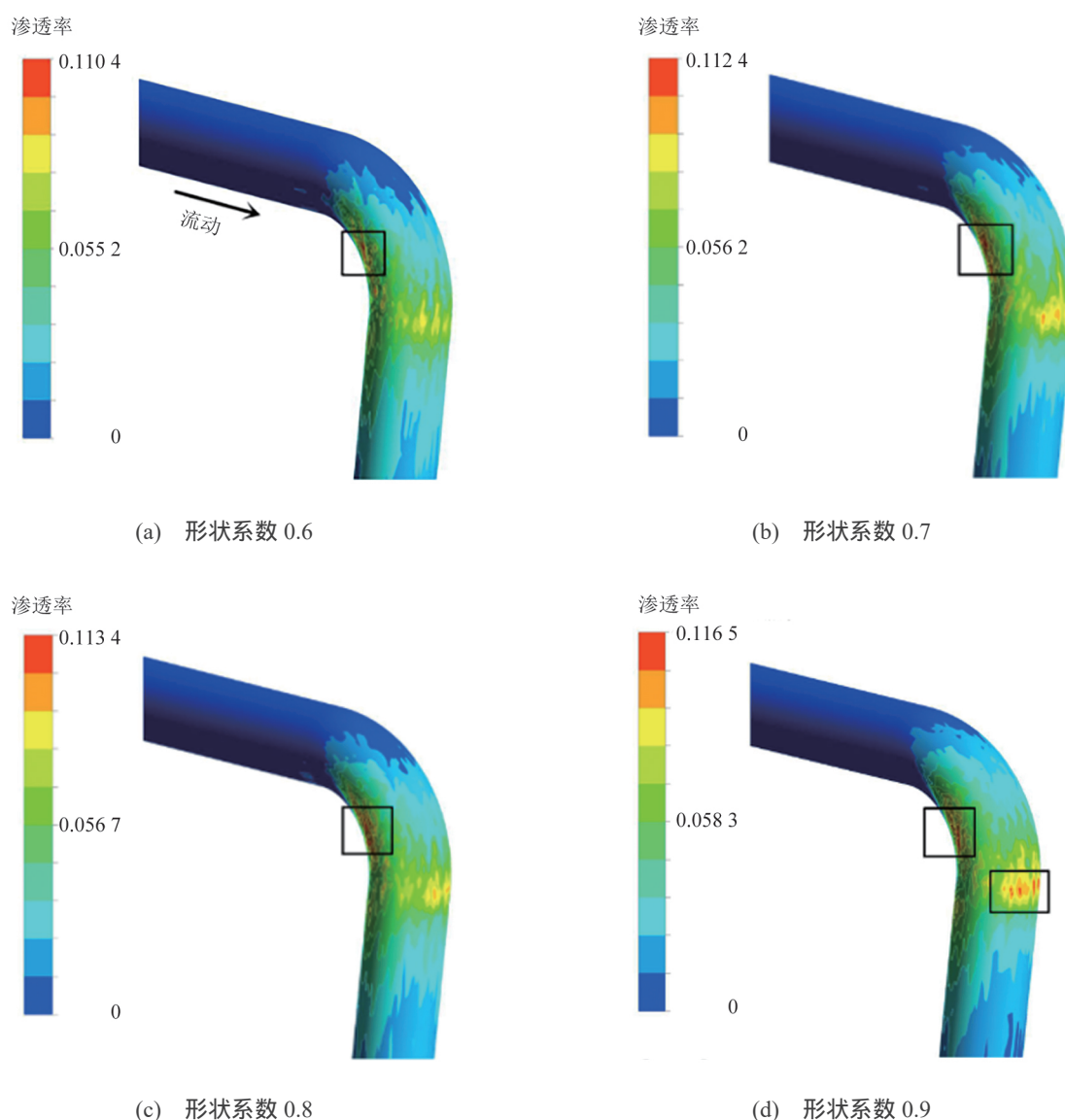


图 6 冰水形状系数对冲蚀磨损的影响

Fig. 6 Effect of Ice-Water Shape Coefficient on Erosion Wear

2.2 振动响应与危害

激励会激发管路各阶固有模态，当激励频率与管路某阶固有频率重合时，将引发共振，导致应力幅值急剧增大，显著加速疲劳损伤^[51-52]。

EWINS^[53]阐述了模态测试的完整流程，并指出频率响应函数是连接激励与响应的桥梁。IBRAHIM^[54-55]总结了线性/非线性动力学、内流/外流引起的失稳、参数共振等关键问题。WANG^[56]通过研究非线性振动、参数共振、功能梯度材料管路及弹性地基效应等，深化了对复杂边界条件和材料属性影响管路稳定性的理解。TANG^[57]建立了精确的输流管路动力学方程，为复杂阻尼机制的建模提供了新思路。LI^[58]对管路系统中FSI的研究进行了全面回顾，涵盖水锤、柱分离、振动等瞬态与稳态现象（见图7），强调了多物理场耦合的复杂性；同时，基于振动疲劳试验数据，结合Miner线性累积损伤法则和S-N曲线，提出了针对振动管路的疲劳寿命预测方

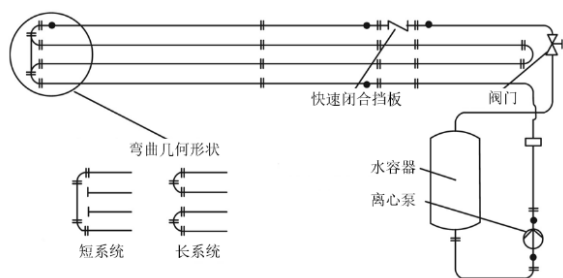


图7 水锤测试

Fig. 7 Water Hammer Test

法，探讨了平均应力修正的影响。

在动力系统中，由于船舶主机等重要装置的安装要求十分严格，且船舶空间位置有限，因此典型船舶管路系统在结构上往往呈现管路布置空间大、管路种类多和约束条件弱等特征^[59]，这些结构特征极易引发管路结构的振动疲劳问题。由图8可知，近年来管路振动疲劳导致的事故占管路事故总数的21%，可见其已成为影响船舶动力系统安全运行的重要因素^[60]。

船舶管路系统的振动危害主要包括结构损伤、设备故障及共振风险^[61]。从结构损伤来看，振动会导致管路及接头发生疲劳、松动或开裂，造成介质泄漏；从设备故障来看，管路振动会干扰介质流动的稳定性，降低输送效率，同时会加速管路及连接部件损坏，增加维护频率与成本；从共振风险来看，当振动频率接近船体固有频率时，会加剧振动噪声，威胁船舶安全。

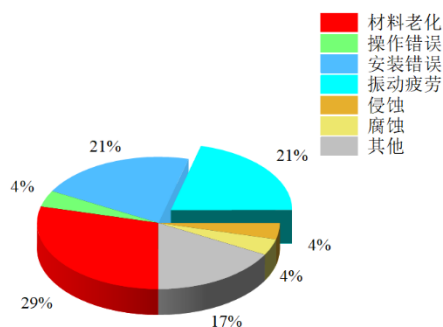


图8 管路系统事故原因

Fig. 8 Causes of Pipeline System Accidents

2.3 管路系统安全评估

船舶管路系统作为船舶的“生命线”，其安全性直接关系到船舶的正常运行、人员生命财产及海洋环境。近年来，国内外学者围绕该系统的安全评估开展了广泛且深入的研究，主要集中于定量风险评估、智能算法应用及韧性工程理念引入等方面。

在定量风险评估与故障模式研究方面，针对船舶燃油管路系统，综合应用故障模式与影响分

析（Failure Mode and Effects Analysis, FMEA）及故障树分析方法，构建了从部件失效到系统顶事件的逻辑模型^[62]。由图9可知，燃油泄漏是风险等级最高的顶事件。CEYLAN^[63]将模糊集理论与传统FMEA相结合，以解决评估过程中专家判断存在的模糊性和不确定性。

随着人工智能技术的发展，基于数据驱动的安全评估已成为新的研究热点。王语嘉^[64]提出

了融合贝叶斯网络（Bayesian Network, BN）和剩余寿命的设备状态评估模型，显著提升了设备健康状态判断准确度（见图 10）。LI^[65] 针对北极液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG）运输船构建动态贝叶斯网络风险评估模型，并建立了基于

过程风险的支撑航线规划决策方法。YEO^[66] 利用 BN 构建了 LNG 运输船低温管路的动态安全评估模型，该模型可随新证据的输入动态更新失效概率，展现了 BN 在复杂系统动态风险评估和实时诊断方面的强大能力。

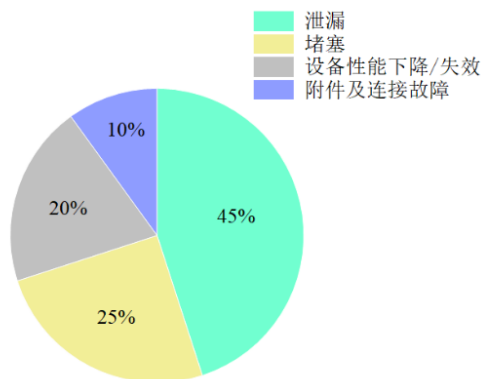


图 9 近 10 年燃油管路系统故障模式占比

Fig. 9 Percentage Distribution of Fuel Pipeline System Failure Modes Over the Past Decade

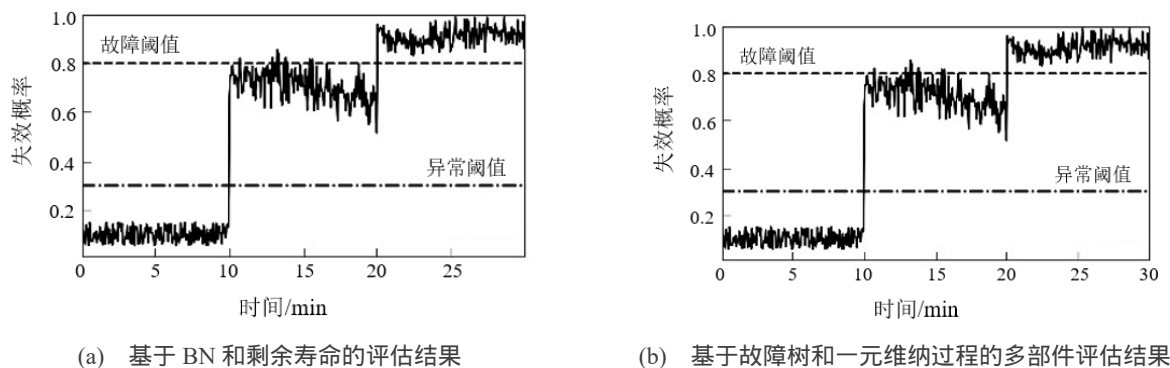


图 10 剩余寿命评估方法对比

Fig. 10 Comparison of Remaining Life Assessment Methods

传统风险评估侧重故障预防，而韧性工程则关注系统在故障发生后的承受与恢复能力。HOLLNAGEL^[67] 首次将韧性工程引入船舶管路系统安全领域，构建了包含鲁棒性、冗余性、资源性和快速响应性的四维韧性框架。实践表明，通过在关键管段增设隔离阀、互连管路及便携式应急泵，可使系统在单点失效后的服务能力恢复时间缩短 50% 以上，显著提升安全裕度。

在核动力船舶管路系统分析方面，支文静^[68]

结合数值模拟与神经网络分析了一回路系统的抗冲击可靠性与灵敏度；汪宏伟^[69] 通过数值模拟与试验揭示了管路在外部爆炸冲击载荷下的应力分布与变形机理。张杨伟^[70] 建立了二回路系统两相流通用仿真软件模型（见图 11），拓展了当前核动力装置通用安全分析程序的研究范围。冯雪凯^[71] 通过二回路系统实时仿真模型对蒸汽发生器水位和乏汽母管压力控制策略进行了验证与优化。

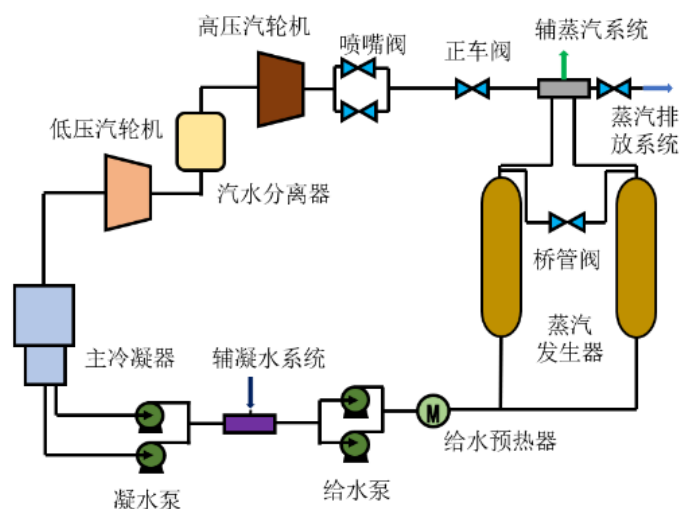


图 11 船舶二回路仿真示意

Fig. 11 Schematic of Ship's Secondary Circuit Simulation

近年来，船舶管路系统振动研究呈现出多场耦合与智能调控的发展趋势。本章围绕船舶管路系统振动问题，从 5 个方面梳理了研究现状，见表 2。管路系统振动方向文献统计见图 12，可见近年来冰区船舶管路系统振动相关文献数量呈现稳步增长的趋势，表明该问题在能源、化工、船舶、航空航天等工业领域持续受到关注，尤其在 2019 年前后，相关文献数量较多，说明当时学界对管路系统振动研究较为重视，为后续管路减振降噪工作奠定了坚实的理论基础。

当前研究已建立系统分析框架，明确了主要激励源及相应危害，并形成安全评估准则，但仍存在不足：对多源耦合激励机理认识不深，极端工况下振动预测模型缺乏充分试验验证；设计初期对振动抑制的综合考虑不足，智能运维水平有待提高。因此，未来需发展多物理场耦合仿真技术，结合数字孪生与智能监测，实现全生命周期振动管理，为提升船舶管路系统安全性提供支撑。

表 2 管路系统振动分类信息

Tab. 2 Pipeline System Vibration Classification Information

研究内容	对应参考文献
外部激励源特性分析	[36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46]
内部激励源特性分析	[47], [48], [49], [50]
振动响应与危害	[51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61]
管路系统安全评估	[62], [63], [64], [65], [66], [67]
核动力船舶管路系统分析	[68], [69], [70], [71]

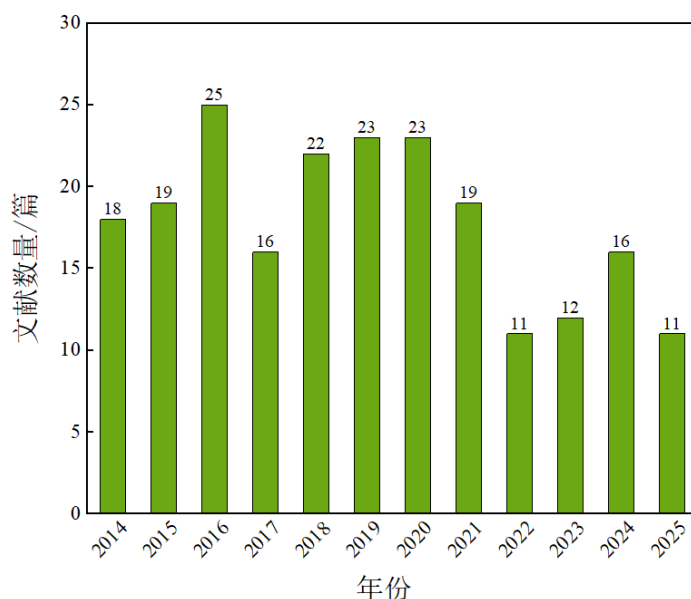


图 12 管路系统振动方向文献统计

Fig. 12 Statistical Distribution of Vibration Directions in Pipeline Systems

3

管路系统减振降噪

船舶管路系统的振动与噪声是影响船舶舒适性、安全性和隐蔽性的关键问题。强烈振动会加速管路疲劳损坏导致泄漏，其辐射噪声也是舱室

主要噪声源。因此，建立有效的减振降噪技术体系，是实现船舶低振动噪声设计、提升综合竞争力的核心支撑与必然路径。

3.1 传统被动控制技术

隔振与减振技术是控制船舶管路系统振动的关键途径。隔振通过降低振源与受护对象间的动态耦合以阻断传递，减振则依赖阻尼机制耗散振动能量。近年来，该领域取得显著进展，将概述当前已取得的成就与持续推进的研究方向。

在结构隔振方面，WANG 等^[72]证实卡箍支架对航空液压管路系统具有良好的减振作用。ZHANG 等^[73]对卡箍支架布置进一步优化，提升了在管路系统中的减振效果。魏振东等^[74]基于声子晶体理论设计了新型船舶管路减振装置，为船舶管路系统减振提供了新思路。刘亚龙等^[75]提出相应减振装置，并试验验证了装置的减振效果。王永胜^[76]通过两自由度模型指出支架刚度、阻尼、基座弹性及固定位置影响，其中刚度为关键因素。杜平^[77]通过有限元分析和试验验证，评估

并优化了支架配置。

在阻尼材料应用方面，王剑等^[78]设计了一种具备减振降噪性能的船舶管路橡胶减振器，胥祺等^[79]提出了多种船舶管路振动噪声控制的可选方案。江国和等^[80]采用高阻尼锰铜合金作为机座构建测试系统，有效抑制了高频船体振动。沈顺根^[81]系统研究了黏弹性筏架结构参数对浮筏隔振系统传递特性的影响。

在质量阻尼器方面，曾胜^[82]设计了环形质量阻尼器，并通过试验验证其效果。周笛^[83]研发出可控频率的管路吸振器，实现了不同频域内的减振。JIANG 等^[84]设计了一种适用于水下管路系统的质量阻振装置，并通过试验验证了其减振效果。

3.2 主动控制技术

在主动控制方面，主被动混合吸 / 隔振装置通过在被动隔振结构中引入作动器，实时监测并抵消机脚、筏架等关键位置的线谱振动，从而有效抑制机械振动沿结构路径的传递^[85-86]。

冯钰琦^[87]基于管路振动试验平台，研发了可用于管路的磁流变阻尼器，通过调节电流实现自适应的减振。张忠义^[88]提出了基于压电陶瓷复合黏弹性阻尼材料的主动约束层振动控制方法，有效抑制了多源激励下的管路振动，史德祥^[89]建立了周期管路系统的动力学模型，分析了FSI模型中的减振效果。PENG^[90]探讨了管路应力对减振支架的影响，给出了有效减小这些摩擦力的方法。KOJIMA^[91]通过对检测信号进行反馈控制，实现了液压管路系统压力脉动的主动减振。LIN^[92-93]研究了压电陶瓷的贴片位置对管路减振效果的影响，张锴锋^[94-95]开发了不同类型的

控制器，并验证了控制器对脉动激励的有效性；魏辰^[96]设计了基于广义坐标的主动控制器，实现了管路结构变形的主动控制。朱明刚^[97]、张攀^[98]将电磁惯性吸振作动器安装于设备机脚，有效衰减了振动。惯性作动器安装方式灵活，通过优化电磁路与惯性系统可获得较大的中低频输出力^[99]。

当前，冰区船舶管路系统减振降噪研究已形成较丰富成果。本章重点围绕传统被动控制与主动控制2个方面展开综述。由表3可见，现有研究以传统被动控制为主，其中隔振技术因相对成熟、应用广泛而文献最多；主动控制则更多聚焦于减振技术，反映出其当前比吸振技术更具实用性和成熟度。由图13所示的发表趋势来看，相关研究数量整体呈上升态势，并在2022年左右出现显著增长。

表 3 减振降噪研究分类
Tab. 3 Classification of Vibration Damping and Noise Reduction Research

传统被动控制技术			主动控制技术	
隔振技术	阻尼技术	阻振技术	减振技术	吸振技术
[72], [73], [74], [75], [76], [77]	[78], [79], [80], [81]	[82], [84]	[85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96]	[83], [97], [98], [99]

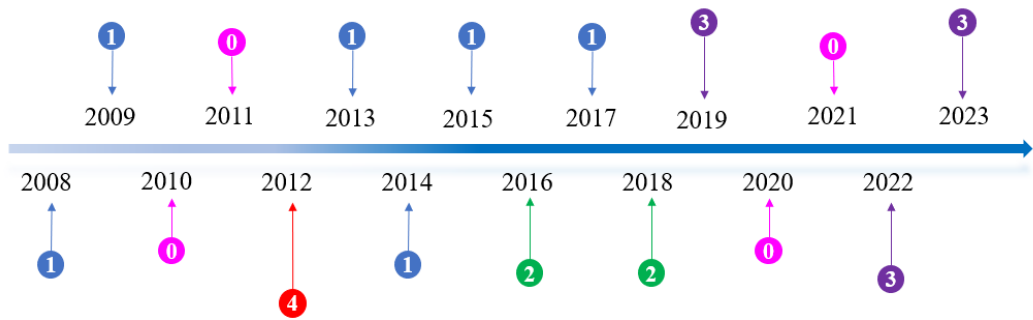


图 13 减振降噪文献数目统计
Fig. 13 Statistics on the Number of Publications on Vibration Damping and Noise Reduction

本文揭示了冰浆 - 船体 - 管路耦合系统的振动噪声传递路径，明确了破冰作业中非平稳、强冲击性的冰载荷为该系统的主要激励源。当前研究聚焦于3个方向：1）采用高性能隔振装置隔离中高频振动；2）利用智能材料实现主动吸振；3）构建主被动混合控制系统以应对时变冰况。

然而，现有研究仍面临挑战：智能控制技术实船验证不足，碎冰 - 流体 - 管路相互作用机理不清导致仿真精度低，且隔振设计与轻量化等要求存在矛盾。未来需研发高可靠性智能材料，构建系统数字孪生，推进一体化声振设计与试验验证，以加速技术工程应用。

4 管路系统设计与优化布局

船舶管路系统的设计是环境载荷分析、材料布局、支撑细节协同优化的综合过程。对破冰船而言，设计首先必须以极地环境载荷与规范为基石；其次，通过合理布局从源头规避共振与流动

阻力；最后，精准的支撑与柔性设计直接决定了振动能量的传递与耗散效率，是实现系统安全可靠的关键。

4.1 环境载荷与设计规范

破冰船的环境载荷是由船舶外部自然环境引发、作用于船体并最终传递至管路系统的各种力和力矩，以及船体变形对管路造成的二次应

力。破冰船的环境载荷常以耦合形式作用（见图14）。其中，冰载荷是破冰船区别于其他船舶的核心载荷，特性极为复杂。

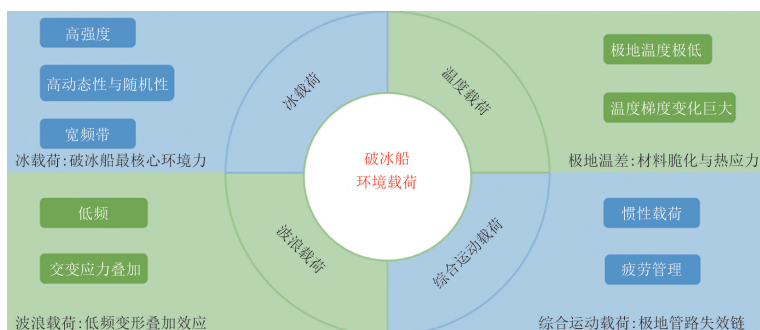


图14 破冰船环境载荷分类

Fig. 14 Classification of Environmental Loads on Icebreakers

相关文献统计显示（见图15），2016—2025年，冰区船舶环境载荷研究文献数量整体呈现稳步增长态势，2021年后增速尤为明显，表明冰载荷作为破冰船设计与安全核心课题的重要性日益凸显，已成为当前研究热点。从研究占比来看

（见图16），冰载荷占比最大，是环境载荷研究的重点方向，尤其在寒区海洋工程和极地开发领域备受关。目前，环境载荷研究呈现从单一载荷分析向多载荷耦合分析、从确定性方法向概率性及可靠性评估发展的趋势。

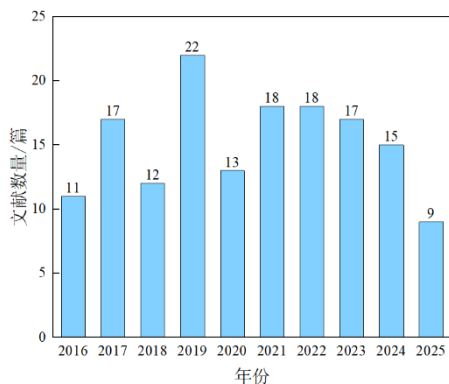


图15 冰区船舶环境载荷统计数据

Fig. 15 Statistical Data on Environmental Loads for Ships in Ice-Covered Areas

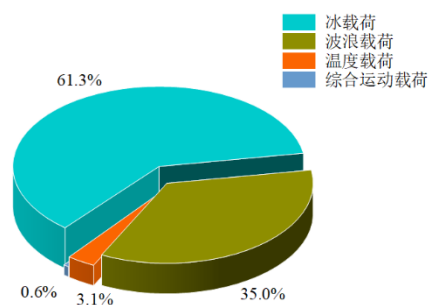


图16 关于环境载荷的不同研究主题饼状图

Fig. 16 Pie Chart of Research Topics Related to Environmental Loads

孔帅^[100]采用 Voronoi 算法生成碎冰域,发现浮式平台冰载荷受冰厚影响显著,白雪寒^[101]基于光滑粒子流体动力学方法-有限单元法算法的方法,实现了对冰载荷的精准预报;徐张^[102]构建了船-水-冰全耦合模型,模拟了船舶与规则/不规则层冰的碰撞过程。为应对极低温对材

料性能的影响,管路系统需采用有效伴热防冻技术,见图 17。电伴热需综合考量伴热带选型、铺设方式及保温设计^[103];蒸汽伴热则利用热流体在伴热管内循环,如:雪龙 2 号采用乙二醇不冻液,可在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下有效防冻。

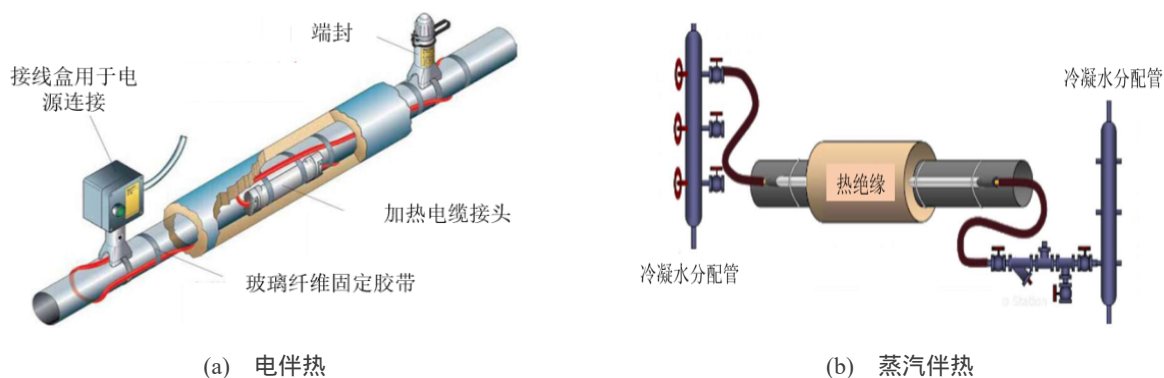


图 17 电伴热与蒸汽伴热示意

Fig. 17 Schematic Diagram of Electric Trace Heating and Steam Trace Heating

破冰船在无冰水域或冰缘区航行时仍会受到波浪载荷作用。此类载荷能量集中于低频段,会引发船体垂荡、纵摇等运动,并作为循环动力载荷激起管路系统振动。与此同时,破冰船自身的动力装置、流体脉动及破冰作业产生的振动^[104],会与波浪载荷叠加耦合,加剧管路的疲劳损伤风险。综合运动载荷是一种惯性载荷,由冰、波浪载荷引发的船体六自由度运动直接产生。此外,由冰、浪引起的船体六自由度刚体运动还会产生惯性载荷(见图 18),直接作用于管路系统及其内部介质。

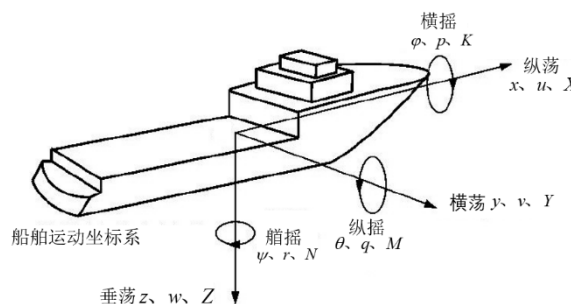


图 18 船舶运动状态

Fig. 18 Ship Motion State

破冰船管路设计需严格遵循《国际极地水域营运船舶规则》及挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV)、美国船级社(American Bureau of Shipping, ABS)等船级社的极地冰级规范,这些规范对管材低温韧性、壁厚、焊接工艺及支撑间距提出了更严苛的要求。设计输入必须考虑破

冰工况下船体梁极限弯矩与扭矩引起的变形对管路产生的二次应力。此外,各船级社规范对管路材料选择、隔热伴热、系统布置及防冻保护均提出具体要求,尤其强调了露天甲板等位置管路的防冰撞措施,并对接触冰区的管系在材料选用、壁厚和支撑方面提供了具体指导。

4.2 优化与布局设计

在极地船舶管路系统的优化与布局设计方面,已形成较为系统的技术体系。材料研究上,陈海文等^[105]研究了高锰奥氏体低温钢的极低温韧性,为冰区管路材料的选取提供了重要依据;CHEN 等^[106]对聚氨酯基涂料的抗冰冲击性能展

开研究,推动了复合材料在低温管路防护中的应用^[107]。孙雨薇等^[108]及多项研究^[108-109]指出,极地海域船舶材料需应对超低温、冰雪磨蚀等多重挑战。李鹏程等^[110]通过梳理防寒规范,总结了全船各区域相应的主要防冻措施。

在布局设计方面,杨宇超^[111]开发了参数化管路标准件库,为船舶管路的通用化设计奠定基础。王燕舞^[112]以某PC3级极地科考船,阐明了此类船型结构规范设计要点与冰级等参数对外板尺度的影响。张立翔^[113-114]、杨柯^[115-116]、LI^[117]利用拉普拉斯变换将四方程模型转换至频域,求解了自由直管路的频域响应和模态特性。YANG^[118]对水箱-管路-阀门系统计算了管路在3种跨度支撑下的响应和模态。李公法^[119]建立了直管结构垂直水平面方向弹性支撑的传递矩阵。桑勇^[120]通过有限元法分析了管路壁厚和支撑间距对管路振动特性的影响;汪宏伟^[121]与刘恩斌^[122]通过增加弹性支撑与优化布置有效避免了共振。在管

路柔性设计方面,韩旭^[123]通过增设自然补偿装置、优化支吊架布局,平衡了管路系统的柔性和刚度^[123-125],为其他类型管路系统优化设计提供参考。

冰区船舶管路系统的设计以极寒环境下的超高可靠性与安全为核心,需选用特殊低温材料确保管路在低温下仍具备良好韧性,并配备严密的防冻伴热与绝缘保护防止介质冻结。设计中应优化管路布置^[126],采用柔性连接与加强支撑以抵御冰载和船体变形^[127],关键系统还需设置冗余与隔离阀^[128],保障极地恶劣条件下动力与核心功能的持续稳定。

5 结论

本文综述了冰区船舶管路系统的研究现状,当前研究已在流体动力学、振动特性、减振技术及系统设计等方面取得系列成果,为船舶管路系统的安全性及可靠性奠定了基础。

虽然现有研究已形成体系,但仍存在以下不足:

- 1) 对极地环境特殊性认识不足,冰载与低温对管路性能的影响机理尚不明确。
- 2) 主动减振技术在实船应用中的可靠性与

精度有待提升。

3) 有设计体系对多物理场耦合作用考虑不充分,缺乏面向全生命周期的系统性优化方法。

为此,未来研究应重点深化极地环境耦合机理研究,开发新型耐低温材料;同时推动基于数字孪生与自适应算法的智能振动控制技术应用,并构建多学科协同设计框架,实现从设计到运维的全生命周期优化与可靠性提升。

参考文献:

- [1] PAIDOUSSIS M P. Fluid-Structure Interactions: Volume 2: Slender Structures and Axial Flow[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 2016.
- [2] WANG B, FU G, WANG X, et al. Vibration Analysis of a Pipe Conveying Two-Phase Flow with Improved Drift-Flow Model[C]//International Ocean and Polar Engineering Conference. 2024.
- [3] FU G M, WANG B Y, ZHANG A X, et al. Vibration Analysis of a Pipe Conveying Two-Phase Flow with an Improved Drift-Flow Model[J]. Applied Ocean Research, 2025, 161: 104647.
- [4] 马粤. 细长圆柱结构扰流及涡激振动双向流固耦合数值模拟[J]. 科技展望, 2015, 25(5): 109-110.
MA Y. Numerical Simulation of Two-Way Fluid-Structure Coupling for Disturbance and Vortex-Induced Vibration of Slender Cylindrical Structures[J]. Science and Technology, 2015, 25(5): 109-110.
- [5] 余思骞, 郭幼丹, 郭雷, 等. 基于CFD的船舶排气管系流场分析[J]. 船海工程, 2015, 44(2): 67-70.
YU S Q, GUO Y D, GUO L, et al. Flow Field Analysis of Ship Exhaust System Based on CFD[J]. Ship & Ocean Engineering, 2015, 44(2): 67-70.
- [6] 葛士权, 王春光, 孙明钰, 等. 基于流固耦合作用的纤维增强复合材料海洋立管涡激振动的三维计算流体力学模拟[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2020, 34(1): 1-9.

- GE S Q, WANG C G, SUN M Y, et al. Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation of Vortex Induced Vibration for Fibre Reinforced Polymer Composite Marine Riser with Fluid-Structure Interaction[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2020, 34(1): 1-9.
- [7] 蔡标华, 方超, 马士虎, 等. 流固耦合作用下的注水管路流激振动噪声数值模拟 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(7): 118-122.
- CAI B H, FANG C, MA S H, et al. Numerical Simulation Study on Flow Induced Vibration Noise of Ship Water Injection Pipeline Based on Fluid Structure Interaction[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(7): 118-122.
- [8] 王莉, 张素萍. 船舶载流管路流激振动数值模拟方法 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(13): 53-56.
- WANG L, ZHANG S P. Numerical Simulation of Vortex-Induced Vibration in Ship Current-Carrying Pipelines[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(13): 53-56.
- [9] 曹宏博. 考虑流固耦合效应的典型船舶管路系统动力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- CAO H B. Study on Dynamic Characteristics of Typical Ship Pipeline System Considering Fluid-Solid Coupling Effect[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [10] LING J, SKUDARNOV P V, LIN C X, et al. Numerical Investigations of Liquid-Solid Slurry Flows in a Fully Developed Turbulent Flow Region[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(3): 389-398.
- [11] LIN C X, EBADIAN M A. A Numerical Study of Developing Slurry Flow in the Entrance Region of a Horizontal Pipe[J]. Computers & Fluids, 2008, 37(8): 965-974.
- [12] SKUDARNOV P V, LIN C X, EBADIAN M A. Double-Species Slurry Flow in a Horizontal Pipeline[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(1): 125-132.
- [13] ZHANG H L, CHEN L L, XIE R H, et al. Numerical Simulation of Solid-Liquid Two-Phase Steady Flow in Horizontal Pipe[J]. CIESC Journal, 2009, 60(5): 1162-1168.
- [14] 李琳依, 夏利娟, 张宇祥. 段塞流诱导水平 U 型管振动数值仿真研究 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(21): 54-59.
- LI L Y, XIA L J, ZHANG Y X. Numerical Simulation of Horizontal U-Tube Vibration Induced by Slug Flow[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(21): 54-59.
- [15] 张宇祥, 夏利娟, 李琳依. 基于流固耦合的气液两相流竖直弯管振动特性数值仿真 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(17): 17-22.
- ZHANG Y X, XIA L J, LI L Y. Fluid-Solid Coupling Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flow Induced Vibration in the Vertical Elbows[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(17): 17-22.
- [16] 徐立, 江焕宝, 黄振飞, 等. 极地船海水管路海水-冰晶两相流的换热特性分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(6): 887-891.
- XU L, JIANG H B, HUANG Z F, et al. Heat Transfer Characteristics Analysis of Seawater and Ice Two-Phase Flow in the Polar Vessel Seawater Pipeline[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(6): 887-891.
- [17] 陈海文, 李捷, 徐立, 等. 振动工况下船舶管路中冰晶流动特性 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(1): 61-67.
- CHEN H W, LI J, XU L, et al. Flow Characteristics of Ice Crystals in Ship Pipelines under Vibration[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(1): 61-67.
- [18] 曹亮. 输流管路流固耦合振动特性分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- CAO L. Analysis of Fluid-Solid Coupling Vibration Characteristics of Fluid Pipeline[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004.
- [19] 张鹏, 姚正学, 刘思铭. 双弯头天然气管路流固耦合振动特性分析 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 115-122.
- ZHANG P, YAO Z X, LIU S M. Vibration Characteristic Analysis of Double-Elbow Natural Gas Pipeline with Fluid-Solid Interaction[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 115-122.
- [20] 滕振超, 刘凯琪, 滕云超, 等. 基于热流固多场耦合的埋地输油管路地震响应 [J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(3): 99-110.
- TENG Z C, LIU K Q, TENG Y C, et al. Seismic Response of Buried Oil Pipeline Based on Heat Fluid-Solid Multi-

- Fields Coupling[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(3): 99-110.
- [21] 王晖晖. 管路系统流动特性及噪声研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
WANG H H. Study on Flow Characteristics and Noise of Pipeline System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [22] 刘桂祥, 张鲲, 林松. 基于 CFD 和结构有限元双向耦合方法的载流管路流致振动特性研究 [J]. 核动力工程, 2016, 37(增刊 2): 24-27.
LIU G X, ZHANG K, LIN S. Study on Flow-Induced Vibration Characteristics of Current-Carrying Pipeline Based on CFD and Structural Finite Element Two-Way Coupling Method[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(Suppl. 2): 24-27.
- [23] 柯兵. 管路弯头流致振动的影响因素分析 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(2): 70-75.
KE B. Influence Factors Analysis of Flow-Induced Vibration of Elbow in Piping System[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(2): 70-75.
- [24] TIJSELING A S. Water Hammer with Fluid-Structure Interaction in Thick-Walled Pipes[J]. Computers & Structures, 2007, 85(11/12/13/14): 844-851.
- [25] TIJSELING A S. Exact Solution of Linear Hyperbolic Four-Equation System in Axial Liquid-Pipe Vibration[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 18(2): 179-196.
- [26] ROGERIO G D R, RACHID F B D F. Numerical Solution of Fluid-Structure Interaction in Piping Systems by Glimm's Method[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 28: 392-415.
- [27] SANTOS H R, TINOCO E B, PFEIL M S, et al. Development of a Simplified Methodology for Evaluation of Piping Vibration Due to Multi-Phase Flow[C]//ASME Pressure Vessels and Piping Conference. 2015.
- [28] ZANGANEH R, AHMADI A, KERAMAT A. Fluid-Structure Interaction with Viscoelastic Supports during Water hammer in a Pipeline[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 54: 215-234.
- [29] MESSAHEL R, REGAN C, SOULI M, et al. Numerical Investigation of Homogeneous Equilibrium Model and Fluid-Structure Interaction for Multiphase Water Flows in Pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 98: 56-66.
- [30] 杨元龙, 李坚波, 孙宝芝, 等. 船舶典型充汽管路水动力特性数值预测 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(4): 132-136.
YANG Y L, LI J B, SUN B Z, et al. Numerical Prediction on the Hydrodynamic Characteristics for Typical Ship Charging Pipes[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(4): 132-136.
- [31] YANG Q, ZHANG Z G, LIU M Y, et al. Numerical Simulation of Fluid Flow Inside the Valve[J]. Procedia Engineering, 2011, 23: 543-550.
- [32] 李秀, 窦培林, 赵世发, 等. 基于 FPSO 压载水系统管路支架整体水锤效应分析 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(22): 105-109.
LI X, DOU P L, ZHAO S F, et al. Analysis of Integral Water Hammer Effect of Pipeline Support in Ballast Water System Based on FPSO[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(22): 105-109.
- [33] 蒋亚礼, 杨德庆, 林新志, 等. 船舶通液管路振动噪声分析简易方法 [J]. 中国造船, 2012, 53(4): 46-58.
JIANG Y L, YANG D Q, LIN X Z, et al. A Simplified Method of Vibroacoustics Analysis for Liquid-Filled Pipeline in Ship[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(4): 46-58.
- [34] 李艳华. 考虑流固耦合的管路系统振动噪声及特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
LI Y H. Study on Vibration Noise and Characteristics of Pipeline System Considering Fluid-Solid Coupling[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [35] 丁宁, 董国朝. 多支座激励下舰艇管路系统冲击载荷的加载方法 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(2): 127-129.
DING N, DONG G C. Loading Method for Impact Load of Naval Piping System under Excitation of Multiple Supports[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(2): 127-129.
- [36] 何文心. 破冰船舶部冰载荷计算及结构强度研究 [D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2017.
HE W X. Calculation of Bow Ice load and Study on Structural Strength of Icebreaker[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu

- University of Science and Technology, 2017.
- [37] HE S K, GUO X X, CHEN X D, et al. Identification of Dynamic Ice Load and Full-Scale Data Analysis for Ship Structures Based on Green's Function Method[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 340: 122333.
 - [38] HAN K, ZHANG Y, YE L Y, et al. Experimental Research on Propeller-Ice Contact Process and Prediction of Extreme Ice Load[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115912.
 - [39] WU G, KONG S, TANG W Y, et al. Statistical Analysis of Ice Loads on Ship Hull Measured during Arctic Navigations[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 223: 108642.
 - [40] 夏劲松, 刘俊杰, 赵南, 等. 冰体准静态压溃破坏模式下的载荷特性研究 [J]. *舰船科学技术*, 2025, 47(14): 41-46.
 - XIA J S, LIU J J, ZHAO N, et al. Study on Load Characteristics of Ice Body under Quasi-Static Crushing Failure Mode[J]. *Ship Science and Technology*, 2025, 47(14): 41-46.
 - [41] 徐义刚, 高处, 顾向彦, 等. 破冰冲击载荷下船体振动响应分析 [J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(13): 9-13.
 - XU Y G, GAO C, GU X Y, et al. Analysis of Hull Vibration Response under Ice Breaking Impact Load[J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(13): 9-13.
 - [42] 王键伟, 袁奎霖, 季顺迎. 船舶结构冰载荷的监测识别方法及时空特性分析 [J]. *中国造船*, 2023, 64(4): 41-56.
 - WANG J W, YUAN K L, JI S Y. Method of Monitoring and Identifying Ice Load on Ship Structures and Analysis of Its Spatial-Temporal Characteristics[J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(4): 41-56.
 - [43] 周维星, 姚熊亮, 傅晓军, 等. 舰艇管路抗冲击分析的传递矩阵法 [J]. *船舶力学*, 2014, 18(10): 1244-1253.
 - ZHOU W X, YAO X L, FU X J, et al. Application of Transfer Matrix Methods in Shock Analysis of Warship Piping System[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, 18(10): 1244-1253.
 - [44] 张啸涵, 黄修长, 曾庆娜, 等. 基于传递矩阵的管路-壳体耦合系统动力学建模 [J]. *噪声与振动控制*, 2024, 44(5): 21-26.
 - ZHANG X H, HUANG X C, ZENG Q N, et al. Dynamic Modeling of Pipeline-Support-Shell Coupling Systems Based on Riccati Transfer Matrix and Frequency Response Function Synthesis[J]. *Noise and Vibration Control*, 2024, 44(5): 21-26.
 - [45] 孙帅, 常欣, 王超, 等. 浅水效应对螺旋桨轴承力的影响分析 [J]. *船舶力学*, 2020, 24(2): 161-169.
 - SUN S, CHANG X, WANG C, et al. Analysis of Propeller Bearing Force Characteristics in Shallow Water[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(2): 161-169.
 - [46] 徐佩, 郭春雨, 王超, 等. 二维振荡翼型俯仰和升沉耦合运动的水动力性能分析 [J]. *船舶力学*, 2020, 24(3): 271-281.
 - XU P, GUO C Y, WANG C, et al. Hydrodynamic Performance Analysis of Pitching and Heaving Coupling Motion for Two Dimensional Oscillating Airfoil[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(3): 271-281.
 - [47] PAÏDOUSSIS M P, PRICE S J, DE LANGRE E. Fluid-Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
 - [48] LU L L, ZHU R Q, JI C Y, et al. Influence of Solid Particles in Liquid Tank on Sloshing Behaviour Based on CFD-DEM Coupling Method[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 312: 119068.
 - [49] 刘寒秋. 冰水两相流流动及磨损特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
 - LIU H Q. Study on Flow and Wear Characteristics of Ice-Water Two-Phase Flow[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
 - [50] DU Q, CHEN M B, SONG W J, et al. Investigation on the Evolution of Ice Particles and Ice Slurry Flow Characteristics during Subcooling Release[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 209: 124008.
 - [51] BLEVINS R D. Flow-Induced Vibration in Nuclear Reactors: A Review[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 1979, 4(1): 25-49.
 - [52] CRAIG J R R, KURDILA A J. Fundamentals of Structural Dynamics[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
 - [53] EWINS D J. Modal Testing: Theory, Practice and Application[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

- [54] IBRAHIM R A. Overview of Mechanics of Pipes Conveying Fluids: Part I: Fundamental Studies[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(3): 034001.
- [55] IBRAHIM R A. Mechanics of Pipes Conveying Fluids: Part II: Applications and Fluidelastic Problems[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2011, 133(2): 024001.
- [56] WANG L, DAI H L, QIAN Q. Dynamics of Simply Supported Fluid-Conveying Pipes with Geometric Imperfections[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 29: 97-106.
- [57] TANG Y, ZHEN Y X, FANG B. Nonlinear Vibration Analysis of a Fractional Dynamic Model for the Viscoelastic Pipe Conveying Fluid[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 56: 123-136.
- [58] LI S J, KARNEY B W, LIU G M. FSI Research in Pipeline Systems-A Review of the Literature[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 57: 277-297.
- [59] 黄文威, 于富强, 黄翌宇. 大型深水铺管船淡水冷却系统的管路布置 [J]. 船舶工程, 2021, 43(增刊 1): 315-319.
HUANG W W, YU F Q, HUANG Z Y. Piping Layout of Fresh Water Cooling System in Large Deep-Water Pipe-Laying Vessel[J]. Ship Engineering, 2021, 43(suppl. 1): 315-319.
- [60] 马亚成. 基于流固耦合的多相流作用下水下管路流致振动特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
MA Y C. Study on Flow-Induced Vibration Characteristics of Underwater Pipeline under Multiphase Flow Based on Fluid-Solid Coupling[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [61] 赵福健. 船舶管路系统振动特性研究及减振设计 [D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2024.
ZHAO F J. Study on Vibration Characteristics and Vibration Reduction Design of Ship Pipeline System[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2024.
- [62] 柯赞, 宋恩哲, 姚崇, 等. 船舶柴油机故障预测与健康管理工作综述 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(1): 125-131.
KE Y, SONG E Z, YAO C, et al. A Review: Ship Diesel Engine Prognostics and Health Management Technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(1): 125-131.
- [63] CEYLAN B O, ALI AKYAR D, CELIK M S. A Novel FMEA Approach for Risk Assessment of Air Pollution from Ships[J]. Marine Policy, 2023, 150: 105536.
- [64] 王语嘉, 周宏宽, 贺怡伟, 等. 基于贝叶斯网络和剩余寿命的船舶典型动力设备状态评估 [J]. 热能动力工程, 2025, 40(6): 181-186.
WANG Y J, ZHOU H K, HE Y W, et al. State Assessment of Typical Marine Power Equipment Based on Bayesian Networks and Remaining Useful Life[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 181-186.
- [65] LI Z, HU S P, GAO G P, et al. Decision-Making on Process Risk of Arctic Route for LNG Carrier via Dynamic Bayesian Network Modeling[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 71: 104473.
- [66] YEO C, BHANDARI J, ABBASSI R, et al. Dynamic Risk Analysis of Offloading Process in Floating Liquefied Natural Gas (FLNG) Platform Using Bayesian Network[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41: 259-269.
- [67] HOLLNAGEL E, WOODS D D, LEVESON N. Resilience Engineering: Concepts and Precepts[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [68] 支文静. 基于主动学习代理模型的一回路抗冲击可靠性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
ZHI W J. Research on Primary Circuit Anti-Impact Reliability Based on Active Learning Agent Model[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [69] 汪宏伟, 汪玉, 赵建华. 舰船管路系统冲击响应时域仿真及试验研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2010, 34(4): 746-748.
WANG H W, WANG Y, ZHAO J H. Time Tomain Simulation and Test of the Shock Response of Shipboard Piping System[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, 34(4): 746-748.
- [70] 张杨伟, 蔡琦, 蔡章生. 船用核动力二回路热力系统动态仿真 [J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊 1): 176-181.

- ZHANG Y W, CAI Q, CAI Z S. Simulation on Secondary Loop of Marine Nuclear Power[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(Supplement 1): 176-181.
- [71] 冯雪凯. 核动力二回路系统建模与控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
FENG X K. Research on Modeling and Control Strategy of Nuclear Power Secondary Circuit System[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [72] WANG J, CHEN G, ZHENG Q H. Effect of Clamp on Aircraft Hydraulic Pipeline Dynamic Stress[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(1): 64-67.
- [73] ZHANG Z, ZHOU C C, WANG W X, et al. Optimization Design of Aeronautical Hydraulic Pipeline System Based on Non-Probabilistic Sensitivity Analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2019, 233(5): 815-825.
- [74] 魏振东, 李宝仁, 杜经民, 等. 基于声子晶体理论的舰船液压管路支承用隔振器轴向振动带隙特性研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 91-98.
WEI Z D, LI B R, DU J M, et al. Research on the Longitudinal Vibration Band Gaps of Isolator Applied to Ship Hydraulic Pipe-Support Based on the Theory of Phononic Crystals[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 91-98.
- [75] 刘亚龙, 段鑫, 樊祥钊, 等. 主动控制型船舶管路减振器的设计与研究 [J]. 自动化与仪表, 2018, 33(6): 78-81.
LIU Y L, DUAN X, FAN X Z, et al. Design and Research of Active Control Type Ship Pipeline Vibration Reduction Equipment[J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(6): 78-81.
- [76] 王永胜. 管路支架的动力学研究 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2012.
WANG Y S. Study on Dynamics of Pipeline Support[D]. Beijing: China Ship Research Institute, 2012.
- [77] 杜平. 船用液压管路系统的振动特性分析 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
DU P. Vibration Characteristics Analysis of Marine Hydraulic Pipeline System[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [78] 王剑, 姬燕飞, 原晓城, 等. 船舶管路 EPDM 橡胶减振器胶管弯头生产过程中遇到的问题及解决措施 [J]. 橡塑资源利用, 2022(4): 7-12.
WANG J, JI Y F, YUAN X C, et al. Problems and Solutions in the Production of Rubber Hose Elbow of EPDM Rubber Shock Absorber for Ship Pipeline[J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2022(4): 7-12.
- [79] 胥祺, 孟铨博, 严明. 海事测量船舶管路减振降噪控制分析 [J]. 航海, 2022(6): 25-29.
XU Q, MENG X B, YAN M. Control Analysis of Vibration Reduction and Noise Reduction of Marine Survey Ship Pipeline[J]. Navigation, 2022(6): 25-29.
- [80] 江国和, 周新一, 孙培林. 阻尼合金在船舶机械振动隔离中的应用研究 [J]. 华东船舶工业学院学报, 1997,(3): 1-6.
JIANG G H, ZHOU X Y, SUN P L. Research on the Application of Damping Alloys to Vibration Isolation of Ship Machine[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition), 1997(3): 1-6.
- [81] 沈顺根, 冷文浩, 程贯一. 带有复合结构的多层隔振系统振动传递及声辐射研究 [J]. 中国造船, 1997, 38(3): 49-59.
SHEN S G, LENG W H, CHENG G Y. Research on Vibration and Sound Radiation of Multilayer Isolation System with Composite Structure[J]. Shipbuilding of China, 1997, 38(3): 49-59.
- [82] 曾胜, 任意, 程涛涛, 等. 利用调谐质量阻尼器进行管路系统减振 [J]. 振动测试与诊断, 2012, 32(5): 823-826.
ZENG S, REN Y, CHENG T T, et al. Vibration Suppression of Pipe System with Tuned Mass Damper[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 823-826.
- [83] 周笛, 陈果, 刘明华, 等. 一种可调频式的管路动力吸振器研究与实验验证 [J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(2): 217-221.
ZHOU D, CHEN G, LIU M H, et al. Study and Experimental Verification on a Dynamic Vibration Absorber with Frequency Adjustable[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(2): 217-221.
- [84] JIANG J W, ZHANG P, PATIL D, et al. Experimental Studies on the Effectiveness and Robustness of a Pounding Tuned

- Mass Damper for Vibration Suppression of a Submerged Cylindrical Pipe[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(12): e2027.
- [85] YIN W D, WEI Y H, LIU T Y, et al. A Novel Orthogonalized Fractional Order Filtered-X Normalized Least Mean Squares Algorithm for Feedforward Vibration Rejection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 119: 138-154.
- [86] FANG Y B, ZHU X J, GAO Z Y, et al. New Feedforward Filtered-x Least Mean Square Algorithm with Variable Step Size for Active Vibration Control[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2019, 38(1): 187-198.
- [87] 冯钰琦, 赵杰, 姚冉, 等. 基于磁流变阻尼器的往复压缩机管系减振技术研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(15): 101-107.
- FENG Y Q, ZHAO J, YAO R, et al. Vibration Reduction Technique for Reciprocating Compressor Pipeline Based on MR Damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(15): 101-107.
- [88] 张忠义. 航空发动机管路流固耦合振动特性分析及主动控制技术研究 [D]. 山东烟台: 烟台大学, 2023.
- ZHANG Z Y. Analysis of Fluid-Structure Coupling Vibration Characteristics of Aeroengine Pipeline and Research on Active Control Technology[D]. Yantai, Shandong: Yantai University, 2023.
- [89] 史德祥. 基于周期结构的通海管路系统带隙及减振性能研究 [D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2023.
- SHI D X. Study on Band Gap and Vibration Reduction Performance of Sea-Crossing Pipeline System Based on Periodic Structure[D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [90] PENG L C, PENG T L. Pipe Stress Engineering[M]. New York: ASME Press, 2009.
- [91] KOJIMA E, SHINADA M. Development of an Active Attenuator for Pressure Pulsation in Liquid Piping Systems: A Real Time-Measuring Method of Progressive Wave in a Pipe[J]. JSME International Journal Ser 2, Fluids Engineering, Heat Transfer, Power, Combustion, Thermophysical Properties, 1991, 34(4): 466-473.
- [92] LIN Y H, CHU C L. Active Flutter Control of a Cantilever Tube Conveying Fluid Using Piezoelectric Actuators[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 196(1): 97-105.
- [93] LIN Y H, TSAI Y K. Non-Linear Active Vibration Control of a Cantilever Pipe Conveying Fluid[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 202(4): 477-490.
- [94] 张锴锋. 两端固定脉动流管路振动的自适应控制 [J]. 机械设计与制造, 2008(12): 149-151.
- ZHANG K F. Adaptive Control of Vibration of a Clamped-Clamped Pipe Conveying Pulsating Fluid[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(12): 149-151.
- [95] 张锴锋, 林士龙. 两端铰支输流管路振动的独立模态空间控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2007(4): 130-132.
- ZHANG K F, LIN S L. The Study of the Independent Modal Space Control of Vibration in a Pinned-Pinned Pipe[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(4): 130-132.
- [96] 魏辰, 郑水英, 吴价. 基于梁模型的管路振动主动控制器设计 [J]. 轻工机械, 2018, 36(2): 31-35.
- WEI C, ZHENG S Y, WU J. Design of Active Controller for Pipe System Vibration Based on Beam Model[J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(2): 31-35.
- [97] 朱明刚. 船用柴油发电机组振动主动控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- ZHU M G. Study on Active Vibration Control of Marine Diesel Generator Set[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [98] 张攀. 船用往复机械的振动主动控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- ZHANG P. Research on Active Vibration Control Technology of Marine Reciprocating Machinery[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [99] 刘军, 何铁平, 罗石, 等. 新型高效电磁驱动反力作动器的设计及特性研究 [J]. 噪声与振动控制, 2006, 26(6): 69-72.
- LIU J, HE T P, LUO S, et al. Design and Performance Research of New-Style and High-Powered Counter-Force Actuator of Electromagnetic Drive[J]. Noise and Vibration Control, 2006, 26(6): 69-72.

- [100]孔帅,季顺迎,季少鹏,等.基于高性能离散元方法的极区浮式平台冰载荷数值分析[J].中国舰船研究,2021,16(5):64-70.
KONG S,JI S Y,JI S P,et al. Numerical Analysis of Ice Load on Floating Platform in Polar Region Based on High-Performance Discrete Element Method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 64-70.
- [101]白雪寒.基于 SPH-FEM 算法的极地船舶冰载荷预报方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
BAI X H. Research on Ice Load Prediction Method of Polar Ships Based on SPH-FEM Algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [102]徐张,李锐,丁琦.不同类型层冰载荷作用下船首结构响应研究[J].舰船科学技术,2021,43(19):10-15.
XU Z,LI R,DING Q. Research on Bow Structure Response under Different Ice Loads[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(19): 10-15.
- [103]张晨.低温甲板及管路电伴热数值分析及试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
ZHANG C. Numerical Analysis and Experimental Study on Electric Heat Tracing of Low Temperature Deck and Pipeline[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [104]滕晓青,顾永宁.单壳双底货船船段结构瞬态温度场和热应力[J].船舶力学,2003,7(2):51-60.
TENG X Q, GU Y N. Transit Temperature Field and Thermal Stresses of Hold Structures of Single Side Shell and Double Bottom Vessels[J]. Journal of Ship Mechanics, 2003, 7(2): 51-60.
- [105]陈海文,李捷,陈迪林,等.海水-冰晶两相流非等温流动及传热[J].船舶工程,2020,42(9):30-35.
CHEN H W, LI J, CHEN D L, et al. Non-Isothermal Flow and Heat Transfer of Seawater Ice Crystal Two-Phase Flow[J]. Ship Engineering, 2020, 42(9): 30-35.
- [106]CHEN Y, ZHANG X M, CAI Z H, et al. Hot Deformation Behavior of a High-Mn Austenitic Steel for Cryogenic Liquefied Natural Gas Applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(8): 5503-5514.
- [107]ROSHAN S, JAFARI R, MOMEN G. Multifunctional Polyurethane-Based Coating with Corrosion Resistance and Anti-Icing Performance for AA2024-T3 Alloy Protection[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 698: 134581.
- [108]孙雨薇,李哲,崔高伟,等.低温环境下典型船体结构的反复碰撞损伤[J].船舶工程,2022,44(6):22-27+.
SUN Y W, LI Z, CUI G W, et al. Repeated Collision Damage of Hull Structure at Low-Temperature Environment[J]. Ship Engineering, 2022, 44(6): 22-27.
- [109]ZHU Y F, LIU Z Y, XIE D, et al. Advancements of the Core Fundamental Technologies and Strategies of China Regarding the Research and Development on Polar Ships[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2015, 29(3): 178-186.
- [110]李鹏程,刘志兵,濮骏,等.极地船舶锚绞机外场低温性能试验[J].船舶工程,2024,46(11):22-34.
LI P C, LIU Z B, PU J, et al. Low Temperature Performance Test of Polar Ship Windlass in the Field[J]. Ship Engineering, 2024, 46(11): 22-34.
- [111]杨宇超.基于 CATIA 的船舶管路布置系统开发[D].大连:大连理工大学,2022.
YANG Y C. Development of Ship Pipeline Layout System Based on CATIA[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [112]王燕舞,徐义刚,吴俊,等.极地船型结构规范设计研究[J].舰船科学技术,2020,42(3):43-50.
WANG Y W, XU Y G, WU J, et al. Research on the Structural Members Design of Polar Vessel[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(3): 43-50.
- [113]张立翔,黄文虎,TIJSELING A S.水锤诱发约束管路流固耦合振动频谱分析[J].工程力学,2000,17(1):1-12.
ZHANG L X, HUANG W H, TIJSELING A S. Frequency Spectrum Analysis of Liquid-Filled Pipes under Water hammer-Induced FSI[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(1): 1-12.
- [114]张立翔,杨柯,黄文虎. FSI 效应对管路水击运动特性的影响分析[J].水电能源科学,2001,19(4):43-47.
ZHANG L X, YANG K, HUANG W H. Analysis of FSI Effects on Waterhammer Characteristics in Piping Flows[J]. Hydroelectric Energy, 2001, 19(4): 43-47.

- [115] 杨柯. 充液管路流固耦合对称方程的振型分解法 [J]. 温州大学学报 (自然科学版), 2007, 28(1): 49-54.
YANG K. The Model Analysis Technique of the Symmetry Model for a Liquid Filled Piping System Considering Fluid-Solid Interaction[J]. Journal of Wenzhou University (Natural Sciences), 2007, 28(1): 49-54.
- [116] 杨柯, 张立翔, 王冰笛. 充液管路流固耦合轴向振动的对称模型 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2005, 20(1): 8-13.
YANG K, ZHANG L X, WANG B D. A Symmetric Model of Liquid Filled Pipe in Axial Vibration[J]. Journal of Hydrodynamics (Series A), 2005, 20(1): 8-13.
- [117] LI Q S, YANG K, ZHANG L X, et al. Frequency Domain Analysis of Fluid-Structure Interaction in Liquid-Filled Pipe Systems by Transfer Matrix Method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(10): 2067-2087.
- [118] YANG K, LI Q S, ZHANG L X. Longitudinal Vibration Analysis of Multi-Span Liquid-Filled Pipelines with Rigid Constraints[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(1/2): 125-147.
- [119] 李公法, 孔建益, 幸福堂, 等. 考虑固液耦合的充液管路系统振动能量流研究 [J]. 湖北工业大学学报, 2005, 20(3): 74-77.
LI G F, KONG J Y, XING F T, et al. Research of Vibrational Energy Flow in Fluid-Filled Pipe System Considering Solid Liquid Coupling[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2005, 20(3): 74-77.
- [120] 桑勇, 邵利来, 王旭东. 基于 ANSYS 大流量管路流固耦合振动分析 [J]. 液压气动与密封, 2018, 38(7): 1-5.
SANG Y, SHAO L L, WANG X D. Vibration Analysis of Fluid-Structure Interaction for Large Flow Pipeline with ANSYS[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 38(7): 1-5.
- [121] 汪宏伟, 汪玉. 管路系统结构及其参数对冲击响应的影响分析 [J]. 船舶工程, 2009, 31(5): 58-61.
WANG H W, WANG Y. Analysis of the Influence of Shock Response of Piping System to Its Structure and Parameter[J]. Ship Engineering, 2009, 31(5): 58-61.
- [122] 刘恩斌, 廉殿鹏, 王兴杰, 等. 某压气站管路减振措施研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2023, 45(6): 175-184.
LIU E B, LIAN D P, WANG X J, et al. Study on Vibration Reduction Measures of Pipeline in a Compressor Station[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(6): 175-184.
- [123] 韩旭, 杨铭, 张浩, 等. 冰区航行船舶蒸汽管路应力分析及柔性设计 [J]. 船舶工程, 2025, 47(6): 69-76.
HAN X, YANG M, ZHANG H, et al. Stress Analysis and Flexible Design of Steam Pipeline for Ships Sailing in Ice Area[J]. Ship Engineering, 2025, 47(6): 69-76.
- [124] 王际达, 曾鸿, 魏钰博, 等. 虚拟机舱管路布局算法优化设计 [J]. 船舶工程, 2019, 41(9): 7-11.
WANG J D, ZENG H, WEI Y B, et al. Optimization Design of Virtual Engine Room Pipeline Layout Algorithm[J]. Ship Engineering, 2019, 41(9): 7-11.
- [125] 彭建华, 王岳, 吕峰, 等. 基于 SLP 和遗传算法的船舶管加工车间设备布局设计 [J]. 船舶工程, 2022, 44(10): 15-21.
PENG J H, WANG Y, LYU F, et al. Equipment Layout Design of Ship Processing Workshop Based on SLP and Genetic Algorithm[J]. Ship Engineering, 2022, 44(10): 15-21.
- [126] 王长振, 徐岸南, 王德禹. π 形弯补偿器在 LNG 船低温管路中的应用分析 [J]. 船舶工程, 2011, 33(4): 40-43.
WANG C Z, XU A N, WANG D Y. Application Analysis on π -Shaped Deformation Compensator of Cryogenic Pipeline of LNG Carrier[J]. Ship Engineering, 2011, 33(4): 40-43.
- [127] 于雯, 嵇春艳, 李曙生. 基于 ANSYS 的高精度管路系统抗冲击仿真方法及试验验证 [J]. 船舶工程, 2017, 39(1): 73-76.
YU W, JI C Y, LI S S, et al. Anti-Shock Simulation Method and Test Verification of High Precision Pipeline System Based on ANSYS[J]. Ship Engineering, 2017, 39(1): 73-76.
- [128] 艾佳, 蔡一庆, 王臻楠, 等. 基于 CFD 数值仿真的延迟型高度阀稳态性能 [J]. 船舶工程, 2025, 47(5): 48-54.
AI J, CAI Y Q, WANG L N, et al. Steady State Performance of Delayed-Type Height Valve Based on CFD Numerical Simulation[J]. Ship Engineering, 2025, 47(5): 48-54.