DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.06.018

船舶动力与传动装置振动控制技术发展研究

谢溪凌[1,2]，董广明[1,2]，林枫[3]，张志谊[1,2*]，闻雪友[3]

（1. 上海交通大学机械与动力工程学院，上海 200240；2. 机械系统与振动国家重点实验室，上海 200240；
3. 中国船舶集团有限公司第 703 研究所，哈尔滨 150078）

摘要：动力与传动装置的振动经支承基座传递至船体，是引起船舶振动与辐射噪声的重要因素之一，也直接影响了船舶声学性能与海洋声学环境。本文阐述了船舶动力与传动装置振动控制技术理论研究及工程应用的基本背景，从动力学优化设计、振源控制、被动控制、主动控制等方面梳理了国内外动力与传动装置振动控制技术的发展现状；着重从面向功率流控制的低频主被动隔振、自适应系统与宽频带振动控制、基于超材料 / 超结构的振动噪声控制、面向声辐射的振动智能感知与控制等角度凝练了相关振动控制技术的发展趋势。结合我国动力与传动装置振动控制技术面临的应用挑战提出了发展建议：加强动力与传动装置振动基础理论研究，加快关键技术攻关与转化应用；鼓励开发系列化振动主动控制装置产品，建立完善的行业技术标准体系；强化国家级研究平台以及人才培养基地，加快推进“产学研”深度融合。

关键词：动力与传动装置；振动声辐射；低噪声推进；振动控制

中图分类号：U661.44　　**文献标识码：**A

Development of Vibration Control Technologies for Marine Power and Gearing Systems

Xie Xiling[1,2], Dong Guangming[1,2], Lin Feng[3], Zhang Zhiyi[1,2*], Wen Xueyou[3]

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Systems and Vibration, Shanghai 200240, China; 3. No.703 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Harbin 150078, China)

Abstract: The vibration waves induced by marine power and gearing systems travel to the hull structure through various supporting bases, which is one of the important factors that cause ship vibration and underwater sound radiation and also directly affects the acoustic performance of ships and ocean acoustic environment. First, a comprehensive review on the theoretical research and engineering application of the vibration control technologies for marine power and gearing systems is presented, and the state of the art of the vibration control technologies is introduced from the perspectives of dynamic optimal design, vibration source control, passive and active control. Next, the technologies that need to be developed, such as the low-frequency active/passive vibration isolation for power flow control, adaptive system and broadband vibration control, metamaterial/metastructure-based vibration and noise control, and intelligent vibration sensing and control for sound radiation, are proposed. The challenges of vibration control technologies for marine power and gearing systems are analyzed subsequently, and countermeasures are further proposed. To promote the vibration control technologies for marine power and gearing systems in China, research on the vibration control theories need to be strengthened and

收稿日期：2022-09-07；**修回日期：**2022-11-01

通讯作者：*张志谊，上海交通大学机械与动力工程学院研究员，研究方向为船舶振动分析与控制、主动控制方法与器件；
E-mail: chychang@sjtu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目(2021-XZ-36)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

the research and application of key technologies needs to be accelerated. Furthermore, the development of various active vibration control devices and the related technical standards system should be encouraged and established. National research platforms and talent training bases should be consolidated and the integration of industry, research institutes, universities and customers should be promoted.
Keywords: power and gearing systems; vibration and sound radiation; low-noise propulsion; vibration control

一、前言

21世纪是人类开发海洋各类资源、利用海洋战略空间的新阶段，海洋在促进经济社会发展、保障国家总体安全等方面的地位更加突出。在加快建设海洋强国的背景下，推进海洋运载装备高技术发展迫在眉睫 [1,2]；其中，船舶水下辐射噪声直接关系到船舶声学性能、海洋环境保护、绿色船舶发展水平，相应的船舶低噪声推进技术一直是重点需求和难点问题 [3,4]。提升船舶低噪声推进技术，对海洋运载装备发展起到重要的推动作用。

船舶推进系统在运转过程中不可避免地产生振动，如船舶主机运转产生的激励力、螺旋桨在艉部伴流场中运转产生的脉动力等。这些激励通过安装基座、轴承及其支承等传递至船体结构，进而诱发船体结构振动，引起水下低频辐射噪声 [5,6]。例如，在振动声辐射方面，船舶动力与传动装置是直接驱动主轴和螺旋桨的动力来源，运转过程中产生的振动通过基座传递至船体，激发船体产生振动并向水下辐射噪声。一直以来，船舶水下辐射噪声中由动力与传动装置运转引起的船体振动声辐射不可忽略，对于大型水面船舶而言更显突出。因此，研究船舶动力与传动装置高性能减振降噪技术方案显得重要而迫切。

已有的船舶动力与传动装置振动控制技术研究，集中在动力装置或传动装置功能性总体制造技术层面 [7~13]，而未就船舶装备中的动力与传动装置振动控制技术发展课题开展系统性探讨。目前，我国虽然在船舶动力与传动装置振动控制方向的基础与应用研究方面取得了一定进展，但在船舶推进系统振动噪声机理、振动传递路径控制等方面仍处于探索阶段，未能实现完全掌握与全面应用，整体技术水平距离世界先进尚有差距；船舶动力与传动装置振动控制技术发展规划、产业发展研究等也有待深化开展。

针对于此，本文以船舶动力与传动装置引起的振动声辐射控制为重点，阐述相关振动控制技术的理论研究及工程应用背景，系统梳理技术发展与应用现状并凝练技术发展趋势，进而从基础理论、装置产品、科研能力等方面提出发展建议，以期为船舶动力与传动装置振动控制技术发展提供基础性和先导性参考。

二、动力与传动装置振动控制技术理论研究及工程应用的基本背景

（一）动力与传动装置功率不断增加，振动引起的辐射噪声不容忽视

船舶动力装置主要分为柴油机动力、燃气轮机动力、蒸汽轮机动力、电机动力、核动力等形式。对于目前的大、中型船舶而言，燃气轮机动力装置因其单机功率大、体积小、质量轻、启动加速快等优点获得广泛应用 [14]。船舶传动装置一般由齿轮箱、离合器、联轴器等传动部件按动力装置的不同配置组合而成，是船–机–桨匹配的纽带 [15]。传动装置将动力装置输出的功率传递至轴系并由螺旋桨实现推进，同时对动力涡轮输出进行减速以匹配动力装置与螺旋桨的扭矩–转速；对于主推力轴承置于齿轮箱内的布置方式，传动装置还需承受螺旋桨的推力。

随着大型船舶排水量的增加，动力与传动装置功率不断增大，单机功率为数万千瓦，振动量级超过110 dB，由此引起的船体振动和噪声愈发明显。近年来，随着燃气轮机、柴油机、齿轮箱等动力与传动装置制造技术的进步，振动和噪声水平已有降低；但未来主流应用的高航速、大功率船舶，其动力与传动装置振动引起的辐射噪声问题依然不容忽视。

（二）动力与传动装置激励特性及振动传递路径复杂，实施控制难度较大

船舶动力与传动装置的振源及传递路径极为复杂（见图1），激励源涉及固、流、声、热、电磁等多物理场，实施振动控制难度较大。以柴油机为主



图1　船舶动力与传动装置引起的水下辐射噪声示意图［16］

动力的系统振源主要包括：① 运动部件惯性力导致的不平衡力和力矩，其激励幅值和频率取决于转速、运动部件质量、缸数、发火顺序、冲程数、活塞行程等；② 气缸内油气燃烧后产生气体压力与往复惯性力合成后导致的倾覆力矩，其激励幅值和频率取决于转速、缸数、冲程数、活塞行程、缸径、工作压力等。由此导致的柴油机体振动，通过基座传递至船体结构。

以燃气轮机为主动力的系统，因回转机械属性而具有较小的振动水平，其振源主要包括：① 转子残余不平衡激励，由材料、结构、制造、装配方面的缺陷以及热变形导致，其激励频率表现为随转速变化的倍数轴频；② 气动激励，由高温高压气体与静子 / 转子叶片强烈作用引起，与结构振动相耦合，具有显著非线性特征，会引起结构动力学特性强烈变化；③ 声学激励，因转静干涉等效应产生的非定常压力脉动，具有宽频随机特性，通常与气动激励耦合共同作用。这些振源引起的燃气轮机转子、支承、箱体、基座的结构振动，亦会激励船体引起船体振动声辐射。

传动装置激励主要来源于传动齿轮的啮合激励。传动齿轮在啮合过程中存在时变刚度、啮合冲击、齿面误差等引起的动态激励，通过轴承、支承、齿轮箱体传递至船体，主要表现为与齿数、转速相关的啮合频率。

此外，在动力与传动装置的附属部件中，管道作为传输流体介质的关键环节，其振动亦可通过支承传递至船体。管道振动一部分由设备结构振动直接引起，另一部分则由管道内的介质流动引起，也可能伴随有热场效应。

三、国内外动力与传动装置振动控制技术发展与应用现状

以降低船舶艉部水下辐射噪声为目的，针对船舶动力与传动装置振动控制难题，设计阶段的结构动力学优化是基础与根本解决方法。然而，在目前以功能为主的设计规范约束下，很多部件结构优化的余地较小，难以通过结构动力学优化设计达到振动控制的目的，故振源控制、被动控制、主动控制等行之有效的方法逐渐成为研究重点。

（一）动力学优化设计

基于结构动力学原理对船舶动力与传动装置结构设计进行优化调整，可在不附加任何子系统的前提下，利用结构参数、形状及频率优化等手段降低结构振动传递与船体水下声辐射。船舶动力与传动装置结构动力学优化设计主要有以下途径。

1. 优化转子及其支承结构与参数

主要通过修改压气机、涡轮、泵等旋转设备转子及其支承结构进而改善其动力学特性，如优化轴承位置、轴承基座结构与布置形式、转子结构、机匣壁板厚度等参数 [17,18]，降低转子振动向支承、船体的传递。

2. 优化齿轮齿形与传动设计

主要通过三维修形技术进行齿廓修缘（齿高方向的齿顶修缘或齿根修缘）、齿向修形（鼓形修形、螺旋线修形、齿端修薄、展成对角修形），此外通过优化齿轮设计、齿轮箱体壁板厚度与肋板布置等参数 [19,20]，以降低啮合冲击、改善振动噪声性能，降低齿轮箱向船体的振动传递。

3. 优化管路排布与参数

主要通过优化管路长度、管道直径、弯管曲率等参数与管路支架结构及布置方式，改善管路固有振动特性、支架阻抗特性、管道内流体激励特性等 [21]，降低管路–船体间的耦合界面力，从而降低船体水下声辐射。

4. 优化气动匹配参数

主要通过优化叶片气动型面、展弦比、进气攻角、反动度等参数，改善叶片固有振动特性、气动弹性响应，达到降低气动激振力、削弱非定常气动

激励在转子–支承–箱体–船体系统中传递的目的，兼顾拓宽喘振裕度、提高疲劳寿命 [22,23]。

（二）振源控制

在动力学优化设计的基础上，对振源实施控制措施亦是改善系统结构动态特性的手段。船舶动力与传动装置振源控制主要有以下途径。

1. 转子动平衡修正

主要通过影响系数法和模态平衡法及其衍生优化方法对燃气轮机转子进行动平衡调整，以降低转子不平衡激振力。

2. 转子对中

主要通过调整燃气轮机输出轴、联轴器、齿轮箱输入轴的对中状态，改善转子动态特性，降低由平行与偏角不对中引起的线谱激励与摩擦磨损。此外，燃气轮机在长期运行过程中由于弹性减振器、限位器变形等因素会使燃气轮机输出轴对中情况发生改变，因此需要监测装置实时观察输出轴对中状态进行辅助 [24]。

3. 行星齿轮传动

行星齿轮传动具备传动比大、结构紧凑、传动效率高和承载能力强等优点，是船舶动力与传动装置减小体积、提高扭矩和改善振动噪声性能的主要措施之一 [25]。可通过双斜齿轮组成人字齿以提高传动平稳性，采用封闭差动结构提高传动比与扭矩，与单级或串联行星齿轮传动相比，其动力性能更具优势且占用空间更小，但其动力学特性也更为复杂。

4. 高弹性联轴器

燃气轮机、齿轮箱、推力轴承之间均需要通过联轴器相连接以传递动力，高弹性联轴器可依靠弹性元件的弹性变形来补偿两轴线在径向、轴向以及角向的相对位移，此外，高弹性联轴器亦可缓冲减振。针对高速转子的弹性联轴器种类繁多，常用的有波纹管联轴器、梅花联轴器、齿式联轴器、链条联轴器和膜片/膜盘联轴器等 [26]，针对不同连接对象选用不同类型与结构形式的高弹联轴器对动力与传动装置振动向船体的传递路径影响均有所不同，合理配置高弹联轴器选型与结构参数自然对降低动力与传动装置振动控制大有裨益。对于齿轮箱输出与推进主轴相连接的高弹联轴器通常采用橡胶组件作为主要承载扭转的弹性元件，橡胶组件可设计成单排或多排，各橡胶组件又有多种标准刚度可供选择。

5. 电磁轴承

对于动力与传动装置内部转子–轴承系统，采用电磁轴承替代转子–轴承系统中的机械轴承，实现无摩擦的磁悬浮转子支承，也可从源头改善转子系统的振动噪声水平 [27]。该技术目前已在核反应堆发电机、透平压缩机组等得到实际应用，针对船用动力装置转子系统的应用研究已在进行中。

（三）被动控制

船舶动力与传动装置激励具有宽频特性，而且实际系统振动模态丰富，试图仅依赖结构动力学优化设计和振源控制在宽频带内抑制船体艉部振动与声辐射几乎不可能，需要进一步对动力与传动装置的振动响应进行控制。目前研究主要集中在对传递路径的被动、主动控制，其中被动控制通过在转子、支承、箱体等处调节质量、阻尼、刚度等动力学参数来达到控制动力与传动装置–船体系统振动声辐射的目的，主要有以下途径。

1. 弹性支承与附加阻尼减振

采用橡胶隔振器、钢丝绳隔振器、气囊隔振器、金属橡胶隔振器等安装于动力传动装置与船体之间，以衰减装置振动向船体的传递。为进一步降低隔振频率，准零刚度隔振器通过将正刚度机构与负刚度机构组合，使系统在平衡位置附近刚度接近于零 [28]，但大多数准零刚度隔振器基于固定的承载质量设计，当承载质量发生变化时，隔振系统将无法达到最佳隔振效果。

采用弹性支承和挤压油膜阻尼是高速转子系统中常见的有效抑制转子振动尤其是过临界振动的措施。弹性支承可使转子的临界转速和过临界时的振动降低，将能引起转子剧烈振动的“弯曲临界”模态转移到工作转速以上，燃气轮机中常见的应用有鼠笼弹性支承等。挤压油膜阻尼器的使用可使系统阻尼增大，转子过临界振动明显降低，同时减小转子振动向机壳的传递，进而达到降低船体振动声辐射的目的。针对传统挤压油膜阻尼器存在的非线性油膜力影响，动静压、带浮动环式、弹性环式、可变间隙等多种形式的挤压油膜阻尼器相继被提出 [29]，以改善其动力学特性。

颗粒阻尼减振技术也被应用于转子叶片、管道

以及动力装置基座中，通过颗粒之间不断地碰撞和摩擦来消耗结构体的振动能量。叶林昌等采用基于粒子阻尼的设计方法对齿轮箱安装基座进行减振，试验获得了 10~10 000 Hz 频段内 7 dB 的振动衰减效果 [30]。此外，亦可在动力与传动装置箱体表面局部粘接或敷设阻尼材料，形成复合阻尼结构，通过阻尼内部的拉压及剪切变形消耗振动能量，进而减小装置振动向船体的传递。

2. 浮筏隔振

采用隔振器对燃气轮机、柴油机、齿轮箱、油泵等设备独立进行隔振处理，是阻断船舶动力与传动装置振动向船体传递的有效方式，包括单层隔振与双层隔振 [31]，后者隔振效果一般可达 30 dB 以上。由于动力设备输出轴和齿轮箱输入轴之间的对中精度要求较高，同时需要满足摇摆的工作环境，因此齿轮箱通常采用硬弹性隔振，其隔振频率通常在 30 Hz 以上。在此情况下，动力设备弹性安装并且与齿轮箱之间设置有高弹性联轴器以补偿径向与角向位移。

为进一步提高动力与传动装置隔振效果以降低船体振动声辐射，将主动力设备与齿轮箱置于同一个公共筏架上形成集中式浮筏隔振（见图 2）。主动力设备可选择弹性安装，齿轮箱硬弹性安装，筏架弹性安装于船体上，以实现动力与传动装置的双层隔振，整体系统一阶固有频率通常在 5 Hz 以下，利用两层弹性元件的刚度和附加质量可有效地控制并衰减高频弹性波的传播，从而取得超过 40 dB 的隔振效果。若动力设备刚性安装在筏架上，则与齿轮箱之间无需采用高弹性联轴器，以减少动力损失；若动力设备弹性安装在筏架上，则需采用高弹性联轴器与齿轮箱连接。此外，齿轮箱输出轴与主推进轴采用高弹性联轴器连接，主推进轴系设置有推力轴承，这样即形成推进系统振动解耦方案。值得注意的是，采用浮筏隔振后，由于整体固有频率较低，隔振器在高航速、恶劣海况等工况下需开启限位装置，此时浮筏与船体间近似刚性连接，隔振效果将大打折扣。

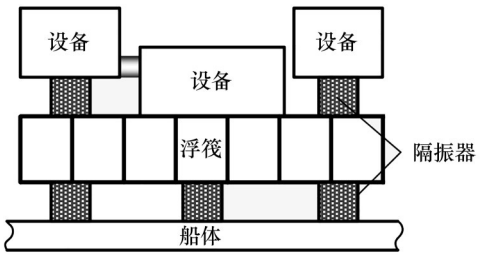


图 2　浮筏隔振系统示意图

3. 动力吸振

被动式动力吸振设计简单，易于安装，能够在窄带频率范围内有效降低受控对象的振动水平，适用于数量较少的线谱振动如旋转设备的轴频，或阻尼比较小的固有振动，可安装于动力与传动装置的机脚位置和管道支承位置等 [32]。由于传统的动力吸振效果和振子质量成正相关，而振子质量不宜过大，此外运行过程中频率波动会影响吸振效果，因此，拓宽动力吸振频带、减小吸振子质量均成为研究的目标。通过对吸振器参数进行优化设计，给出最优调谐比和阻尼比，此外采用分布式吸振器、调谐质量吸振器等均为行之有效的方法。

4. 超材料/超结构减振

超材料/超结构作为一种人工设计的材料/结构，可表现出天然材料所不具备的超常物理性质，如负刚度、负折射率、负泊松比等。超材料/超结构具有高孔隙率、低相对密度和高能量吸收及耗散等特性，已引起广泛研究并逐步应用于结构减振降噪领域。超材料减振基座作为一种特殊减振结构，尤其适用于动力与传动设备无法引入隔振系统、不能加装隔振器的情况。不同于传统隔振系统，超材料基座减振仅通过自身结构及材料的设计就可实现承载和减振的双重效果。但针对船舶低频振动声辐射控制，由于低频弹性波与超材料孔壁碰撞的次数较少而导致振动波能量损失相对高频弹性波较少，因此寻求低频段（200 Hz 以下）宽禁带局域共振型声子晶体，实现小尺度（厘米级）晶体控制大尺度（米级以上）弹性波波长是目前研究的重点和难点 [33]。

（四）主动控制

船舶动力与传动装置引起的低频段振动声辐射控制是困难问题。传统的被动控制技术难以在低频段取得令人满意的减振效果，抑或以牺牲空间、重量、稳定性等为代价换取低频减振效果，而主动控制技术以其优越的低频减振性能与环境适应性等优点愈发引起学术与工程界的重视。随着数字信号处理能力的大幅提升，越来越多的主动控制系统正逐渐应用于船舶减振降噪领域。此外，以磁流变、电

流变阻尼技术为代表的半主动隔振技术 [34]也在船舶设备隔振中得到了试验。图3给出了被动与主被动隔振传递率曲线示意图，在被动隔振下，系统会存在明显的共振放大区，同时由于弹性基础的影响在隔振区内仍有局部共振区和线谱存在；主被动隔振技术的引入可以消除共振放大区，拓宽隔振带宽，同时对低频段线谱振动也有明显的抑制效果。

20世纪90年代末期，美国将多通道振动主动控制技术与全艇振动噪声在线监测技术相结合，用于提升核潜艇的声隐身性能。同一时期的英国、瑞典、澳大利亚等国也相继在船舶动力与传动装置上研究并应用主动控制技术。目前，可提供成熟主动隔振产品的厂家有法国的哈金森（Hutchinson）公司、英国宇航系统公司（BAE）、荷兰国家应用科学研究院（TNO）等 [35]。国内对船舶动力与传动装置振动主动控制技术的研究起步较晚，但经过多年的不懈努力，已有部分技术取得实际应用，但核心器件仍依赖于进口。

1. 主动吸振

主动式吸振器可根据受控系统的振动状态，按一定规律自动改变吸振器结构参数，或通过作动器以一定规律驱动吸振器可动质量，从而实现宽频带吸振。主动式吸振器拓宽了吸振器的适用范围，同时提高了减振效果。

目前常用的主动元件包括液压式、电磁式、压电式、形状记忆合金、磁致伸缩材料等，一般而言需根据被控对象和应用环境的实际情况选择合适的作动方式。将主动吸振器安装于动力与传动装置机脚位置，可有效抑制装置振动向筏架/船体的传递。

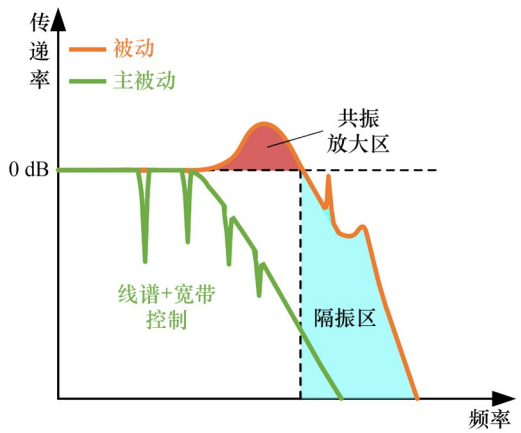


图3　被动与主被动隔振传递率示意图

此外可根据实际需要在不同方向布置，以满足多自由度主动吸振的需求。当然也可以采用分布式主动吸振对被控对象振动末端进行控制，如直接安装于壳体上以控制壳体表面法向振动，此种方式对于小尺度被控对象如管道等效果显著，但对于大尺度被控对象，需要消耗大量的主动吸振器和传感器，且会给控制算法带来巨大的计算负担。

荷兰TNO在2010年采用六个主动吸振器，在三个位置按两个方向布置，以控制舰用齿轮箱振动 [35]。国内的哈尔滨工程大学将惯性式电磁作动器安装在某型拖船柴油发电机组的隔振器上方，获得了0~100 Hz频段内总声压级下降7 dB的衰减效果 [36]。中国船舶集团第704研究所、第711研究所分别采用主动吸振技术以抑制大型船用动力与传动装置如汽轮发电机组、柴油机组、齿轮箱等产生的强线谱振动向船体的传递。

2. 主动隔振

为进一步集成被动与主动元件，在节省空间的同时可自主设计作动位置与方向，多种主被动一体化隔振器相继被提出用于主动隔离动力与传动装置产生的振动向船体传递（见图4）。

日本神户大学在20世纪80年代提出将液压作动器应用于柴油机的主动隔振，通过实验取得了基频线谱振动20 dB的衰减效果 [37]。美国BBN科技公司设计了由橡胶隔振器与电磁作动器集成的主被动隔振器，建立了柴油机主被动隔振装置，在20~200 Hz频段传递到基座的线谱力衰减了15~25 dB [38]。国内的海军工程大学在船用柴油发电机组与基础结构之间安装磁悬浮–气囊式主被动复合隔振器，对200 Hz内11根线谱控制效果达10~30 dB [39]。哈尔滨工程大学采用液压式作动器与橡胶隔振器并联安装于浮筏与弹性舱段基础之间，并通过试验验证获得了10 dB以上的控制效果 [40]。一种传感–作动一体化主被动隔振装置用于柴油发电机组减振，可同时控制0~200 Hz内多达20根特征线谱的振动，主动减振效果为10~20 dB [41]。上海交通大学采用惯性式电磁作动器结合橡胶隔振器构成主被动复合隔振器，通过试验验证了主被动隔振器的振动传递控制性能，获得了5~300 Hz内负载振动总级衰减30 dB以上的主动控制效果 [42]。此外，针对动力与传动装置运转产生的振动传递路径复杂，且单一路径控制后易产生其他路径振动能量

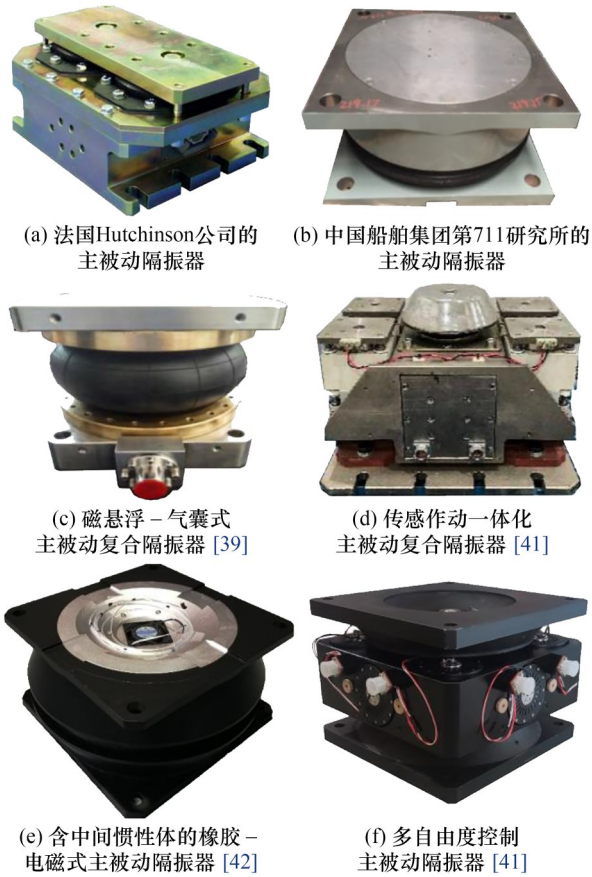


图4 主被动隔振器

泄露，开发了多自由度主被动隔振器，实验结果表明多自由度主被动隔振器可有效抑制动力设备多线谱振动向壳体的传递，300 Hz内的壳体振动总级可衰减20 dB以上 [43]。

四、动力与传动装置振动控制技术发展趋势

近年来，通过对船舶动力与传动装置激励源和振动传递机理以及控制方法的深入研究，初步建立了部件级振动分析与试验能力，在动力与传动装置振动主被动控制技术方面也取得了一定突破，部分技术已实船应用。尽管如此，值得注意的是，传统被动方法需牺牲空间和重量，将严重影响总体性能；目前主动方法中传递路径振动控制目标与功率流或船体声辐射控制目标并不完全一致，船体低频声辐射衰减效果不理想；宽频带特征振动有源振动难以控制；此外，面向未来的智能化振动控制技术亟待开发。因此，为进一步降低船舶动力与传动装置运转引起的振动和辐射噪声，不断提高海洋运载装备的绿色化和智能化水平，振动控制关键技术仍有瓶颈亟待突破。

（一）面向功率流控制的低频主被动隔振

船舶动力与传动装置复杂的激励特性和隔振系统复杂的振动传递路径，需要从界面功率流控制入手才能全面抑制振源振动向船体传递，通常的主通道控制理念不再适用；同时，动力与传动装置的振动控制耦合严重，控制复杂度高，对实时控制系统带来挑战；此外，主动控制元件的工作频带需要向5~10 Hz以下拓展，以适应低频振动控制需求。因此，突破面向界面功率流控制的低频主被动隔振技术，仍是动力与传动装置振动控制技术面临的挑战之一。

（二）自适应系统与宽频带振动控制

随着建造工艺水平的不断提升和减振降噪技术的广泛应用，在船舶动力与传动装置引起的线谱振动被有效抑制的条件下，宽频带振动的影响便逐渐凸显；同时，随着运行工况与环境的不断变化，宽带激励引起的振动响应特征也不尽相同。因此，寻求具备自适应能力的高效宽频带振动控制系统，是亟待突破的船舶动力与传动装置振动控制技术之一。

（三）基于超材料/超结构的振动噪声控制

基于超材料/超结构的振动噪声控制技术在工程中的应用尚处于探索阶段，包括被动与主动型超材料/超结构。目前已发现谐振分流力电耦合超材料在不引入过多附加质量的前提下能够有效抑制振动噪声 [44]，然而，对于船舶动力与传动装置振动声辐射控制领域，如何拓宽低频禁带获得宽低频（200 Hz以下）振动噪声控制效果仍需进一步探索。

（四）面向声辐射的振动智能感知与控制

随着装备向智能化不断发展，结合分布传感器在线监测技术实时感知船舶动力与传动装置的振动与辐射噪声状态，通过智能决策制定振动控制策略，进而实施振动控制以降低船舶动力与传动装置引起的船体振动和声辐射。振动噪声智能感知与控制技术可根据船舶运行工况与环境实时调节其振动和声辐射状态，是支撑海洋运载装备绿色化与智能化的未来技术之一。

五、我国动力与传动装置振动控制技术发展建议

作为绿色智能海洋运载装备发展中的重要组成部分，船舶动力与传动装置振动控制是一门多学科交叉融合的关键技术，既具备重大应用价值又富有前沿基础理论，随着国民经济的稳步增长和创新能力的不断提升，领域发展前景广阔，同时机遇与挑战并存。着眼于动力与传动装置振动控制领域的稳步发展，持续性加强基础研究，聚焦核心关键产品研发，积极培育创新人才队伍，走出一条符合国情、实现价值的中国海洋运载装备高技术发展之路。

（一）加强动力与传动装置振动基础理论研究，加快关键技术攻关与转化应用

整体来看，我国在船舶动力与传动装置振动控制技术领域尚处于对传统被动控制技术加以改进和融合的发展阶段，综合能力仍然落后于传统海洋强国。提升船舶低噪声设计水平和深入理解动力与传动装置的振动噪声机理密不可分。目前，在以动力与传动装置性能为优化设计目标的框架下，仍需突破动力与传动装置关键部件和整机振动机理的认识局限，加强顶层声学设计的理论支撑。此外，在样机向实船应用转化方面，符合实际环境的试验条件尚不完善，对实船环境下动力与传动装置的振动品质控制能力需进一步加强。

建议加强船舶动力与传动装置关键部件和整机系统振动理论研究，至少包括：多物理场耦合激励源特性、振动传递机理、振动声辐射预报、振动传递控制方法等方面；同时注重动力与传动装置振动控制技术基础理论与试验研究的结合，加快关键技术攻关与转化应用，为我国船舶低噪声推进系统设计提供坚实的支撑。

（二）鼓励开发系列化振动主动控制装置产品，建立完善的行业技术标准体系

现有的被动控制装置已经成系列化产品，品种已覆盖不同类型的环境应用需求，如橡胶隔振器、钢丝绳隔振器、空气弹簧隔振器等，但振动主动控制装置均根据特定动力与传动装置定制而成，未形成产品系列，无法满足不同环境、不同应用需求。此外，国内在船舶领域并无针对动力与传动装置振动主动控制的技术标准体系，不同生产单位对振动主动控制装置应用的技术要求也不尽相同。

建议鼓励振动主动控制装置系列化产品研发，以适应不同环境和应用需求；优先支持国家重点研究平台，研究和建立统一的行业技术标准，构建动力与传动装置振动主动控制装置产品的基础性、通用性数据库，提升用户使用的便捷性，为充分发挥振动主动控制技术的优势奠定基础。

（三）壮大国家级研究平台以及人才培养基地，加快推进“产学研”深度融合

船舶动力与传动装置振动控制的科学与工程问题是典型的跨学科问题，涉及到机械、船舶、力学、声学、控制等学科，目前我国在本领域内的专业复合型人才队伍还不够强大，而且船舶动力与传动装置振动控制技术的研究、开发和生产联系不紧密，“产学研”多方联合与合作需进一步加强。

建议国内高校与技术力量雄厚的研究开发单位合作，建立跨学科的船舶动力与传动装置振动控制技术研究平台，并在多学科交叉方向优先布局，加快船舶减振降噪领域专业复合型人才队伍培养。同时，突破船舶动力与传动装置振动控制关键技术的过程必然是困难的，国家层面应制定积极正确的政策导向，推进构建“产学研”深度融合发展体系，为未来船舶动力与传动装置振动控制技术的应用与发展提供坚强后盾。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 7, 2022; **Revised date:** November 1, 2022

Corresponding author: Zhang Zhiyi is a research fellow from the School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University. His major research fields include ship vibration analysis and control, active control method and devices. E-mail: chychang@sjtu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project (2021-XZ-36)

参考文献

[1] “中国工程科技2035发展战略研究”海洋领域课题组. 中国海洋工程科技2035发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 108–117.
Task Force for the Research on China’s Engineering Science and Technology Development Strategy 2035 Marine Research Group. Development strategy for China’s marine engineering science and technology to 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1):

108–117.

[2] 吴有生, 曾晓光, 徐晓丽, 等. 海洋运载装备技术与产业发展研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 10–18.
Wu Y S, Zeng X G, Xu X L, et al. Technology and industry development of marine transportation equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 10–18.

[3] “中国海洋工程与科技发展战略研究”海洋运载课题组. 海洋运载工程发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 10–18.
Task Force for the Study on Development Strategy of China’s Marine Engineering and Technology Marine Transportation Research Group. Research on China’s development strategy for marine transportation engineering [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(2): 10–18.

[4] 宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 等. 海洋科学装备研究进展与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 76–83.
Song X C, Du J F, Wang S Q, et al. Research progress of marine scientific equipment and development recommendations in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 76–83.

[5] 华宏星, 俞强. 船舶艉部激励耦合振动噪声机理研究进展与展望 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12(4): 6–16.
Hua H X, Yu Q. Structural and acoustic response due to excitation from ship stern: overview and suggestions for future research [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(4): 6–16.

[6] 谢溪凌. 推进系统多通道耦合振动传递主动控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2020.
Xie X L. Investigation on active control of multi-channel coupled vibration transmission in marine propulsion systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(Doctoral dissertation), 2020.

[7] 闻雪友, 任兰学, 祁龙, 等. 舰船燃气轮机发展现状、方向及关键技术 [J]. 推进技术, 2020, 41(11): 2401–2407.
Wen X Y, Ren L X, Qi L, et al. Development and key technologies in marine gas turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(11): 2401–2407.

[8] 景国辉, 沈建平. 船用柴油机振动噪声控制技术研究现状及发展趋势 [J]. 柴油机, 2015, 37(4): 1–5.
Jing G H, Shen J P. The development and trend of vibration and noise control technology of marine diesel engines [J]. Diesel Engine, 2015, 37(4): 1–5.

[9] 袁光前, 李金库, 胡云波. 我国陆用燃气轮机齿轮箱发展及关键技术研究现状 [J]. 机械传动, 2020, 44(7): 163–170.
Yuan G Q, Li J K, Hu Y B. Development and research status of key technology of land gas turbine gearbox in China [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(7): 163–170.

[10] 陈兵, 孙建伟. 齿轮箱振动噪声的研究综述 [J]. 机电工程技术, 2020, 49(12): 61–65.
Chen B, Sun J W. A summary of researches on gearbox vibration and noise [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(12): 61–65.

[11] 常山. 船舶大功率齿轮传动装置的技术发展现状与展望 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32(7): 17–22.
Chang S. Progress and development trends in heavy duty marine propulsion gearing [J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(7): 17–22.

[12] 闫大海, 张晗. 船用燃气轮机发展趋势分析 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(19): 84–88.
Yan D H, Zhang H. Development trend analysis of marine gas turbine [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(19): 84–88.

[13] 伍赛特. 舰船联合动力装置技术特点研究及未来趋势展望 [J]. 传动技术, 2021, 35(2): 40–48.
Wu S. Technical characteristics research and future trend prospect of combined power plant used in warship [J]. Drive System Technique, 2021, 35(2): 40–48.

[14] 伍赛特. 舰艇主推进装置技术特点及应用前景 [J]. 机电技术, 2021 (2): 112–117.
Wu S. Technical characteristics and application prospect of the main propulsion plant used in warship [J]. Mechanical & Electrical Technology, 2021 (2): 112–117.

[15] 王晋鹏, 常山, 刘更, 等. 船舶齿轮传动装置箱体振动噪声分析与控制研究进展 [J]. 船舶力学, 2019, 23(8): 1007–1019.
Wang J P, Chang S, Liu G, et al. Review on the analysis and reduction of marine gearbox vibration and noise [J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(8): 1007–1019.

[16] VULKAN Kupplungs-und Getriebebau Bernhard Hackforth GmbH & Co. KG. Vibration & noise attenuation concepts [EB/OL]. (2014-09-30)[2022-04-23]. https:// www.vulkan.com.

[17] 孙远伟. 某燃气轮机低压压气机结构设计方案研究 [J]. 燃气轮机技术, 2021, 34(4): 25–29.
Sun Y W. Research on the design of a gas turbine low pressure compressor [J]. Gas Turbine Technology, 2021, 34(4): 25–29.

[18] 韩东江, 郝龙, 毕春晓, 等. 燃气轮机转子系统典型振动特性试验研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 87–93.
Han D J, Hao L, Bi C X, et al. An experimental study on typical vibration characteristics of a gas turbine rotor system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(4): 87–93.

[19] 杨欣茹. 船用齿轮箱振动特性分析及减振效果研究 [D]. 重庆: 重庆大学(硕士学位论文), 2016.
Yang X R. Vibration Characteristic analysis and vibration reduction effect research of marine gearbox [D]. Chongqing: Chongqing University(Master’s thesis), 2016.

[20] 李辉. 大功率舰船用齿轮箱箱体结构的减振降噪方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(硕士学位论文), 2020.
Li H. Research on vibration and noise reduction method for high power marine gearbox housing structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(Master’s thesis), 2020.

[21] 柴凯, 楼京俊, 朱石坚, 等. 船舶典型管路系统低噪声设计研究 [J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(2): 156–162.
Chai K, Lou J J, Zhu S J, et al. Study on the low noise design of typical pipeline systems of ships [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(2): 156–162.

[22] 陈鹏, 任兰学, 王琦, 等. 船用燃气轮机低压压气机气动布局规律研究 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(9): 10–17.
Chen P, Ren L X, Wang Q, et al. Research on aerodynamic layout rule of low pressure compressor of marine gas turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 10–17.

[23] 侯亚欣, 徐宁, 朱青芳, 等. 展弦比对压气机跨音级性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2022, 43(3): 638–646.
Hou Y X, Xu N, Zhu Q F, et al. Influence of aspect ratio on performances of compressor transonic stage [J]. Journal of Engineer-

ing Thermophysics, 2022, 43(3): 638–646.

[24] 戴日辉, 宋子刚, 董辉, 等. 船用燃气轮机输出轴对中状态监测装置 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(3): 13–18.
Dai R H, Song Z G, Dong H, et al. Monitoring device for the alignment condition of marine gas turbine output shaft [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(3): 13–18.

[25] 莫文超. 船用汽轮机 – 行星齿轮减速器轴系动力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 2020.
Mo W C. Study on dynamic characteristics of marine steam turbine-planetary gear reducer shafting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(Doctoral dissertation), 2020.

[26] 毛杨军. LM航改型燃机发电机组联轴器的选型与安装 [J]. 华电技术, 2019, 41(8): 15–19.
Mao Y J. Model selection and installation of coupling for the LM series aero-derivative gas turbine generator [J]. Huadian Technology, 2019, 41(8): 15–19.

[27] Schweitzer G, Maslen E H. Magnetic bearings: Theory, design, and application to rotating machinery [R]. Berlin: Springer, 2009, 1–535.

[28] Li Y, Xu D. Vibration attenuation of high dimensional quasi-zero stiffness floating raft system [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 126: 186–195.

[29] 李典来, 姚垒, 余磊, 等. 挤压油膜阻尼器及其在船用汽轮机上的应用展望 [J]. 机电设备, 2019, 36(3): 1–5.
Li D L, Yao L, Yu L, et al. Squeeze film damper and its application prospects in marine steam turbine [J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2019, 36(3): 1–5.

[30] 叶林昌, 肖望强, 沈建平, 等. 基于粒子阻尼的动力装置基座减振优化设计研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 40–47.
Ye L C, Xiao W Q, Shen J P, et al. Vibration reduction optimization design of power plant installation base based on particle damping [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(3): 40–47.

[31] 沈建平, 孙少龙. 基于高速机的船舶低振动推进机组设计及试验 [J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1): 140–144.
Shen J P, Sun S L. Design and experiment for low vibration propulsion of the ship using high speed diesel engines [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 140–144.

[32] 黎昭文, 刘佳, 蔡龙奇, 等. 泵类设备减隔振及特征线谱控制技术研究 [J]. 科学技术创新, 2021 (5): 10–12.
Li Z W, Liu J, Cai L Q, et al. Research on vibration reduction and isolation and characteristic line spectrum control technology of pump equipment [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021 (5): 10–12.

[33] 秦浩星. 任意泊松比超材料及其船体减振设计理论与方法 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2019.
Qin H X. Design theory and methods of arbitrary poisson's ratio metamaterials and application in hull vibration reduction [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(Doctoral dissertation), 2019.

[34] 方媛媛, 夏兆旺, Waters T P, 等. 船舶辅机浮筏半主动非线性隔振系统振动特性分析 [J]. 船舶力学, 2019, 23(5): 583–590.
Fang Y Y, Xia Z W, Waters T P, et al. Vibration characteristic analysis of floating-raft semi-active isolation system based on MR damper [J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(5): 583–590.

[35] Tom B, Arthur B, Ruud V. Active vibration control for underwater signature reduction of a navy ship [C]. Cairo: The 17th International Congress on Sound & Vibration (ICSV17), 2010.

[36] 杨铁军, 李新辉, 朱明刚, 等. 船用柴油发电机组主动减振试验研究 [J]. 振动工程学报, 2013, 26(2): 160–168.
Yang T J, Li X H, Zhu M G, et al. Experimental investigation of active vibration control for diesel engine generators in marine applications [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(2): 160–168.

[37] Mitsuhashi K, Biwa T, Mizuhara S. Application of active vibration isolating system to diesel engine mounting [C]. Tianjin: International Congress on Combustion Engines (CIMAC), 1989.

[38] Berkman E F, Bender E K. Perspectives on active noise and vibration control [J]. Sound and Vibration, 1997, 31(1): 80–94.

[39] 王迎春, 马石, 李彦, 等. 主动控制技术在船舶振动噪声控制中的应用 [J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(4): 56–64.
Wang Y C, Ma S, Li Y, et al. Application of active control technology on ship vibration and noise [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2021, 33(4): 56–64.

[40] Yang T, Wu L, Li X, et al. Combining active control and synchrophasing for vibration isolation of a floating raft system: An experimental demonstration [J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2021, 40(2): 1105–1114.

[41] 吴磊. 船用柴油发电机组主被动复合隔振技术应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(博士学位论文), 2021.
Wu L. Application research of active and passive hybrid vibration isolation technology for marine diesel generator set [D]. Harbin: Harbin Engineering University(Doctoral dissertation), 2021.

[42] 任明可, 谢溪凌, 黄志伟, 等. 新型橡胶 – 电磁复合主被动隔振器研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(23): 32–37.
Ren M K, Xie X L, Huang Z W, et al. Novel rubber-electromagnetic composite active/passive vibration isolator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(23): 32–37.

[43] 任明可. 基于多轴控制的动力设备主被动隔振方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2022.
Ren M K. Investigation on active/passive vibration isolation for power machinery based on multi-axis control [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(Doctoral dissertation), 2022.

[44] 易凯军, 陈洋洋, 朱睿, 等. 力电耦合主动超材料及其弹性波调控 [J]. 科学通报, 2022, 67(12): 1290–1304.
Yi K J, Chen Y Y, Zhu R, et al. Electromechanical active metamaterials and their applications in controlling elastic wave propagation [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 67(12): 1290–1304.