

船舶振动主动控制技术研究

李忠杰

(海军装备部装备项目管理中心 北京 100071)

摘要: 低频线谱噪声是船舶的“声指纹”特征,一旦存在将会严重影响船舶的隐蔽性和安全性,而主动控制技术是抑制船舶低频线谱振动噪声的重要技术,也是为船舶运输安全保驾护航的关键。文中对目前船舶振动的危害进行了梳理,研究了在船舶运行过程中有效降噪的主动控制技术,然后进一步阐述了在船舶运输振动时主动控制的策略及应用方法,旨在为我国船舶振动主动控制技术应用水平的快速提升提供经验参考。

关键词: 船舶; 振动; 主动控制技术; 应用

0 引言

近年来,随着我国船舶制造产业的不断发展和船舶运输行业的进步,船舶企业获得了良好的发展机遇,我国逐步成为世界第一造船大国,在提升船舶运输安全性和舒适度上提出了全新要求。在船舶运输过程中,噪声污染不仅会影响船上员工的身心健康,更会对随船设备尤其是高精度设备产生不良影响,造成船舶运输航程错误等,严重者甚至会造成人身安全等事故。因此,解决船舶运输过程中的振动问题,是近年来船舶专家和制造企业关注的重中之重。本文对船舶振动主动控制技术的探讨和研究具有重要的理论意义和现实价值。

1 船舶振动危害

船舶的动力结构系统是一种较为复杂的组合型的弹性体结构,该结构在实际运行过程中的各项振动原理较为复杂,可以按照实际振动范围将其划分为总体振动与局部振动,也可以按照船只的受力大小划分为自由振动与强迫振动。不同类型的船舶形态千差万别,因此对应的振动受力特征存在明显差异。但就船舶的振动危害而言,首先,不论哪种类型的振动,都会对船舶结构体产生较大的影响,导致船舶处于疲劳状态,船舶机构或者其他重要零部件出现较大的损伤和破坏,进而缩短船舶的使用寿命^[1]。其次,船舶振动的强弱,还将进一步影响船舶上仪器、仪表和控制系统的性能,使船舶在航行过程中难以快速校准,进而产生较大的航行安全隐患。最后,船舶振动还会进一步影响船上工作人员的工作效率及生活舒适性,从而影响船舶的航行效果^[2]。

2 船舶降噪的主动控制技术

船舶振动导致的噪声污染中,被动控制技术对船舶

中高频声波有较好的降噪效果,但是对船舶运行时出现的低频声波,其降噪效果不够理想。对于船舶振动降噪的被动控制技术而言,该技术应用的是声衰减性能大幅下降的材料,因此会导致船舶降噪效果差、降噪效率低,还会造成大量材料浪费。因此,伴随着基于声波叠加原理的反噪声消除噪声理论逐步完善,在既有噪声存在的前提下,添加与原噪声声波频率、幅值参数等相同但是声波相位相差 180° 的人为声波,能够达到干涉并抵消噪声的目的。这种根据原有噪声参数性质添加外来能源,进而控制噪声的方法叫做主动控制技术^[3]。其原理如图 1 所示。该技术主要是借助设定完整的控制规律来动态调节船舶降噪系统的结构,进而达到消除噪声的目的,一般常见的主动技术方法包括可调频式和非可调频式两类。

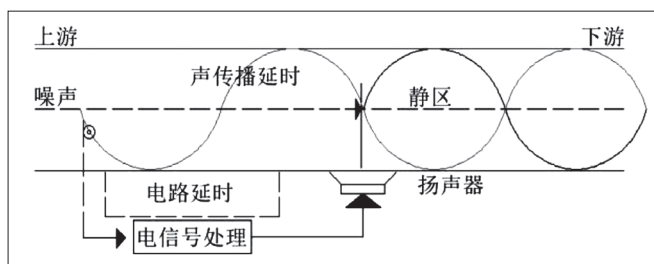


图 1 主动控制技术原理示意图

以电磁作动器为例。电磁作动器是利用内部线圈结构在接通电流时,电流能量在衔铁和铁芯之间形成的气隙中的磁场和产生的磁作用力为核心技术实现主动控制噪声的,能够借助控制输入电流获得更强的交变磁悬浮力,将该磁悬浮力作为基础能量主动抵消船舶振动目标。图 2 即为船舶噪声主动控制试验台架简图,其中激振器设备安装在上层板中心位置,将其作为船舶受到的外在振动力的振源,在上下两层金属板质量既定为 100kg 的基础上,低频段可视为刚体结构,整

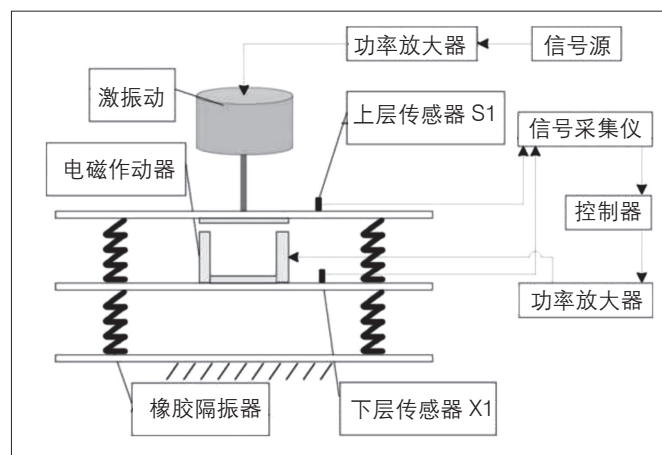


图2 船舶噪声主动控制试验台架简图

个装置的上层板和下层板、下层板和支架之间则分别用四个橡胶隔振器连接，以此最大限度地隔绝两两之间的不良影响^[4]。电磁作动器放置于上下层板的中心位置，从而借助该板结构让传递到下层板的噪声振动得到一定的衰减，以确保降噪过程的顺利进行。

对主动控制技术进行分析，通过激振器对上层面板发出的低频率振动过程的研究，可以记录获得下层面板进行主动控制前的各项振动情况，再进一步利用前馈理论体系下的算法模型，通过对电磁作动器的全过程的控制，实现下层控制面板振动情况与振动前的各项参数数据的对比分析。在激振频率21Hz的条件下，试验结果对比图如图3所示。图中50Hz处的线谱为电源干扰。由图中两大类的图形对比分析可以看出，在船舶振动过程中，当受到较低频的外界声音荷载激励时，下层面板在该参数频率值下的峰值反应较为明显，在对电磁作动器进行主动控制并实施相关参数后，整个振动频率的基频振动峰值得到了有效降低，效果约为30dB。也就是说，在对电磁作动器进行主动控制后，在电磁作动器的基础

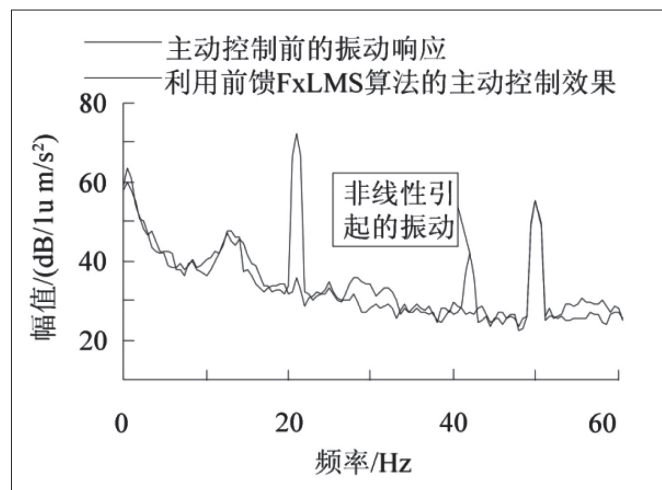


图3 试验结果对比图

频率的2倍频率处，直接出现了大于主动控制技术使用前约为15dB的振动作用，这证明了主动控制在船舶降噪过程中的重要价值^[5]。

3 控制策略与方法

3.1 模态控制

模态控制作为船舶振动降噪过程中的主要措施之一，是将船舶系统或结构的振动装置放置于模态空间中进行全方位地观察，以实现船舶降噪的目标。一般而言，在船舶运行的自由度空间内，时间区域中的振动均可以采取更低阶的自由度的模态空间进行近似模拟，得到该参数更加详细的资料。上述类型的无限的自由度空间系统，主要借助模态空间内部振动情况参数的转换，时间控制模态目的，也就是人们常说的控制模态，主要是以模态耦合控制与独立模态控制两种途径实现对船舶振动情况的完全控制，且独立模态控制途径具备设计兼容性高、灵活多变等优势。

3.2 极点配置

极点配置法，也被叫做特征结构配置法，主要是借助被控制的系统对变化过程中的动态管控的要求，确定待控制系统的特征值和特征向量之间的关系，通过数学关系的对比分布，以状态反馈参数或者输出反馈参数为评判指标，将被控制的系统的动态变化过程以闭环管理和控制，进而将其放置于已构建的复平面预设位置，满足对被控制的系统的预设要求^[6]。

3.3 最优控制

最优控制方法是以现代控制理论中的状态空间理论为基础进行最优解的计算，在利用极值原理和动态规划等方法的前提下，得到船舶运输系统结构振动过程中的最优化控制输入的方法。该方法是基于船舶振动系统所普遍利用的控制器设计方法，能够对船舶控制系统中的结构参数和模型等进行较为精确地测试和确定，从而将极点配置方法和最优化控制方法相结合，得到全新的低阶控制器设计方法，为更好地应对船舶控制系统中的噪声干扰提供更多思路。

3.4 自适应控制

在船舶振动损伤应对过程中，为了更好地应对船舶振动系统的线性模型和实际模型之间的差别，忽视非线性模型外在环境变化时的不适用性，可采取自适应控制方法。该方法主要是利用船舶控制系统的结构和参数具备较强的不确定性这一基本特征，将其分为自适应前馈和模型参考等类别。其中，自适应前馈是在假定干扰可以被探测到的前提下，对其相关额外能量

进行探测,从而获得较好的降噪效果。结合电磁作动器设备在二次谐频处将产生额外的能量这一基本特质,根据前馈控制算法的工作原理,可采用谐波发生器自适应补偿途径,以此实现降噪目的。图 4 为自适应降噪基本原理图,由图可知,在对船舶运行过程中的某一频率进行振动控制时,结合电磁作动器上层传感器获取到的振动频率,以该信号为参数进行信息传递,使控制器能够对船舶设备实施控制。图 5 为最终的自适应补偿效果图,由图可知,在某一确定的基础频率点,船舶设备的能量得到有效控制,能够通过自适应补偿方式,使得最终的噪声能量大幅度降低。

3.5 鲁棒控制

以模糊控制为例,对船舶运行过程中的振动降噪控制措施进行分析可知,模糊控制作为智能控制的重要分支,旨在通过对类似于人的思想行为和决策过程的模拟,制定在数据库经验支持和理论支持下得到的选择规则,从而确保模糊控制模型的准确运用。将该方法应用于船舶振动的危害防治过程中,并不需要针对船舶的运行过程建立精确度较高的振动系统数学模型,而仅仅是利用制定好的模糊控制规则去推测船舶振动控制过程,从而增强其鲁棒性。

3.6 智能控制

对于运输功能较为复杂且内含大量复杂元器件的船舶振动系统,由于该系统具备较强的非线性特征和不确定性特征,传统模式下的控制方法往往很难满足上述系统的控制要求。针对该类控制系统,模糊控制、神经网络控制等智能控制方法得到了广阔的应用空间。

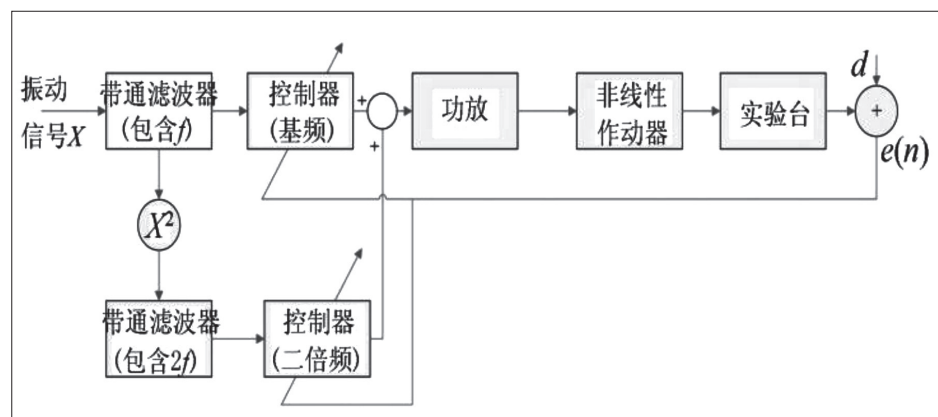


图 4 自适应降噪基本原理图

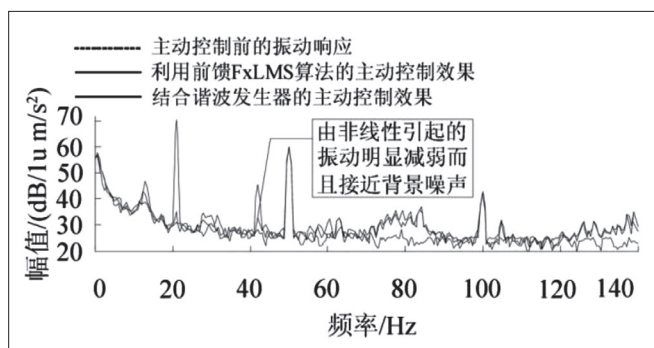


图 5 自适应补偿效果图

4 结语

本文在对船舶运输过程中的振动危害进行论述的基础上,深入研究了船舶降噪的主动控制技术,分析了控制技术中的模态控制措施、极点配置控制措施、最优控制技术、自适应控制方法、鲁棒控制技术和智能控制等内容,为最大限度减少船舶运输过程中的振动危害提供更多应用性较强的方案。

参考文献:

- [1] 谢强, 帅长庚, 李彦, 等. 主动控制中作动器非线性谐频的控制[J]. 噪声与振动控制, 2019(2):56-58.
 - [2] 杨铁军, 靳国永, 李玩幽, 等. 舰船动力装置振动主动控制技术研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 28(2):46-49.
 - [3] 姜海龙, 艾夏禹, 刘丽滨, 等. 潜艇振动控制技术研究进展[J]. 机电工程技术, 2021, 50(7):5-8.
 - [4] 孙国春, 史文库, 田彦涛, 等. 振动主动控制技术的发展[J]. 机床与液压, 2020(3):5-6.
 - [5] 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):56-59.
 - [6] 古龙, 闵捷. 船舶振动噪声控制技术的现状与发展[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(12):4-5.
- 作者简介:** 李忠杰(1978. 11-), 男, 汉族, 山东郓城人, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向: 机械动力。