

船用座椅减振机构的应用研究

李 伟 王法昌 李文冉

新乡市新豪机电有限公司, 河南 新乡 453009

[摘要] 船用座椅的减振性能在舰艇乘员的舒适性与健康方面起着至关重要的作用。针对舰艇高速航行过程中振动冲击的挑战, 文章提出了一种基于 L 型悬架与油气混合型减震器的船用座椅减振装置。通过理论分析、仿真验证与实验测试, 优化了悬架设计及关键参数, 并对座椅的减振性能及应用效果进行了评估。研究结果表明, 所设计的减振座椅在提升乘员舒适性方面表现出显著优势, 具有较高的应用价值。

[关键词] 船用座椅; 减振装置; L 型悬架; 油气混合型减震器; 舒适性

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15375

中图分类号: TU85

文献标识码: A

Application Research on Vibration Reduction Mechanism of Marine Seats

LI Wei, WANG Fachang, LI Wenran

Xinxiang Xinhao Electromechanical Co., Ltd., Xinxiang, He'nan, 453009, China

Abstract: The vibration reduction performance of marine seats plays a crucial role in the comfort and health of ship occupants. In response to the challenge of vibration and impact during high-speed navigation of naval vessels, this article proposes a ship seat vibration reduction device based on L-shaped suspension and oil-gas hybrid shock absorbers. Through theoretical analysis, simulation verification, and experimental testing, the suspension design and key parameters were optimized, and the damping performance and application effect of the seat were evaluated. The research results indicate that the designed shock-absorbing seats have significant advantages in improving passenger comfort and have high application value.

Keywords: marine seats; vibration reduction device; L-shaped suspension; oil-gas hybrid shock absorber; comfortable

1 概述

1.1 研究背景与意义

随着现代海军任务日益复杂化, 舰艇需要在不同海况下长时间执行各类任务, 这对舰艇的设计提出了更高要求。尤其在高速航行时, 舰艇因波浪与船体运动引发的振动冲击, 成为影响舰员生理与心理健康的主要因素。研究表明, 低频振动 (4~8Hz) 对舰员健康构成了严重威胁, 长期暴露在这一频段内可能导致脊椎变形、胃肠道疾病等职业病, 且显著降低工作效率。作为舰艇内部振动隔离的核心设备之一, 减振座椅的设计直接决定了舰员的舒适度与健康状况。高性能的座椅减振系统应具备以下特性: 能够有效隔离低频振动, 尤其是人体敏感区间的振动; 具备足够的机械强度与稳定性, 以应对各种海况下的复杂环境; 并确保舒适性与可靠性, 以保持舰员长时间执行任务时的最佳状态。尽管减振座椅在陆地车辆与航空等领域已取得了一定的进展, 但针对船用减振座椅的研究仍面临许多技术挑战。如何在低频振动环境中保持良好的隔离效果, 如何在多负载条件下优化性能等问题, 仍待解决。

1.2 国内外研究现状

减振技术的研究在全球范围内已有较长的历史, 且取得了许多重要成果。国际上, 围绕全身振动的评估与减振优化, 主要集中在振动动力学模型的建立与实验验证。例

如, ISO 2631 标准提供了全身振动的评价框架, 明确了振动对人体健康、舒适性以及工作效率的影响机制。国外学者结合这一标准, 针对座椅系统进行了深入的建模与实验研究, 探讨了固有频率、阻尼比、运动传递率等参数对减振性能的影响。这些研究成果已广泛应用于车辆、航空及工业设备的减振设计中。

相比之下, 国内减振座椅的研究起步较晚, 然而近年来发展较为迅速。以清华大学为代表的研究机构, 基于国际标准对车辆座椅的减振性能进行了改进, 并提出了适合我国国情的振动评估方法。然而, 大部分研究仍集中在陆地车辆或航空领域, 针对船用减振座椅的研究较为稀缺, 尤其在舰艇振动环境的特殊性方面缺乏深入探讨。国内已有少数研究尝试将车辆减振技术引入船舶领域, 但由于海洋环境的复杂性与振动特性差异, 直接借鉴陆地技术往往无法满足舰艇的需求。

2 船用减振座椅设计方案

船用减振座椅的设计目的是有效减少舰艇在高速航行中, 波浪与机械冲击所引发的振动, 确保舰员能够在舒适、安全的环境中工作。本节将深入讨论减振悬架类型的选择及减振器的优化设计方案。

2.1 减振悬架类型比较

减振悬架作为座椅振动隔离系统的核心, 其结构设计

直接决定了座椅的减振效果以及适应不同环境的能力。常见的悬架类型包括 H 型、X 型和 L 型，以下将详细分析它们各自的特点和适用条件。

2.1.1 H 型悬架

H 型悬架通过平行四边形的连杆结构连接上下两个连接板，减震器的伸缩作用用于吸收振动能量，从而实现减振效果。该结构的主要优点是紧凑，适用于安装空间有限的情况，且上下平移的运动方式有效减少了横向晃动。然而，当面对高频振动时，H 型悬架的减振效果较差，尤其在复杂的长期航行环境中，其减振性能可能会减弱，难以满足需求。

2.1.2 X 型悬架

X 型悬架采用交叉的 X 型支架连接上下骨架，这种结构能够通过几何放大效应提供较大的竖直位移，尤其在垂直方向的冲击缓解方面表现优越^[1]。尽管如此，X 型悬架的复杂结构设计使其在制造上具有更高的难度，同时也对使用寿命和可靠性提出了更高的要求。因此，X 型悬架在一些要求高性价比的舰艇应用中受到了限制。

2.1.3 L 型悬架

L 型悬架通过 L 型支架与上下连接板构成，结构直观且简洁，能够提供有效的竖直减震器布置，基本消除了水平位移的问题。该悬架最显著的特点是具备较大的冲击行程，适应性较强，能够应对恶劣海况下的振动^[2]。相较于其他类型的悬架，L 型悬架在减振效果、稳定性及结构简化方面表现优异，因此成为舰艇座椅设计中的理想选择。

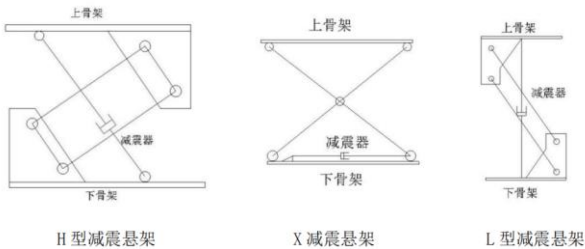


图1 三种减振悬架类型示意图

2.2 减震器选型与优化

减震器是减振座椅系统的重要组成部分，对整体性能起着决定性作用。现代舰艇座椅通常采用阻尼器与弹簧并联的方式，通过弹簧缓冲振动，阻尼器吸收振动能量，从而增强座椅的振动隔离效果。

2.2.1 油压减震

传统油压减震器通过液压油的流动来产生阻尼力，吸收振动能量。然而，这种类型的减震器在高频率、高振幅的冲击环境下存在充油不及时、液体气化等问题，导致减振性能衰退，甚至可能产生噪声，因此逐渐被淘汰。

2.2.2 油气混合型减震器

油气混合型减震器采用单筒设计，并在内部充入 2.0~2.5MPa 的高压氮气，通过浮动活塞将气体与液体分

隔。这种结构的优势在于其紧凑性、轻量化以及可调的阻尼性，能够适应不同海况下的多样振动特性^[3]。此外，这种减震器提供较大的工作行程，避免了油压减震器存在的液体乳化问题，广泛应用于现代舰艇座椅设计中。

2.2.3 氮气减震器

氮气减震器通过外置气罐分离气体与液体，增强了散热性能，有助于延长使用寿命。然而，氮气减震器的制造成本较高，同时对安装空间要求较大，这在紧凑型舰艇座椅的设计中很难满足实际需求。

基于上述分析，本设计选用了油气混合型减震器。该类型的减震器不仅具备较强的高频冲击缓解能力，还能提供初始力和阻尼调节功能，能够根据乘员的体重和负载需求进行灵活适配。

3 关键技术与仿真分析

3.1 靠背骨架强度分析

在舰艇高速航行过程中，座椅靠背需承受较大的向后倾覆力矩，因此其结构强度是确保乘员安全的关键因素。为此，本研究根据 GB 15803 标准，建立了靠背骨架的力学模型，并利用 SolidWorks 进行了静力学仿真分析。仿真过程中，按照标准要求加载 2120N 的力作用在靠背的 H 点。分析结果显示，靠背骨架的最大应力为 110MPa，位移为 0.5mm，均低于所选材料（5A06 铝合金）的屈服强度 155 MPa，表明该结构完全满足设计强度要求。同时，应力分布均匀，没有明显的应力集中现象，进一步证明了该结构的可靠性。

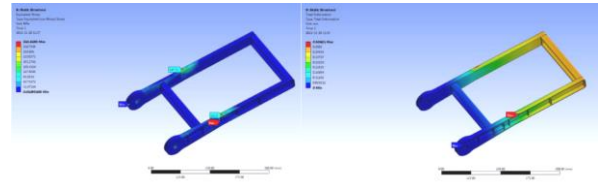


图2 靠背骨架应力与位移仿真云图

3.2 悬架强度分析

减振悬架承载座椅的主要负载，因此其强度对振动隔离性能至关重要。为了确保悬架在实际工况下的可靠性，本研究对 L 型悬架进行了非线性静力学仿真分析。仿真设置中，四个安装孔处施加固定约束，同时在悬架上表面均匀施加 200kg 的压力，模拟乘员及装备的实际重量。仿真结果表明，悬架的最大应力为 105MPa，满足所选材料的屈服强度要求。在仿真过程中，悬架未发生显著的变形或局部失效，验证了其结构稳定性和强度储备。

3.3 振动性能分析

减振座椅的性能依赖于其对外界振动的有效隔离能力。为分析座椅的振动特性，本研究建立了单自由度振动模型，并推导了其动力学方程：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

其中， x 为座椅与乘员的总质量， c 为阻尼系数， k 为

弹簧刚度, $F(t)$ 为外部激励力。

根据推导出的运动传递率公式:

$$\eta_M = \frac{x}{x_b} = \frac{1}{1 + (2\zeta v)^2 (1 - v^2)^2 + (2\zeta v)^2} \quad (2)$$

其中, $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ 为系统的阻尼比, $v = \frac{\omega}{\omega_n}$ 为频率比。

振动分析结果表明:

在低频激励下 ($v \rightarrow 0$), 系统的运动传递率接近 1, 减振效果不明显;

当激励频率接近固有频率 ($v \approx 1$) 时, 系统可能出现共振, 减振效果最差;

在高频激励下 ($v > 2$), 系统能够有效隔离高频振动, 运动传递率显著降低。

为了优化减振性能, 选择了固有频率为 24Hz, 阻尼比 ζ 在 0.25~0.35 之间控制, 以确保系统避开共振区并实现优异的高频振动隔离效果。

4 减振性能优化与实验验证

4.1 参数优化

4.1.1 固有频率优化

人体对振动的敏感频率通常集中在 48 Hz 左右。为了避免人体与座椅发生共振并引起不适或损伤, 设计时需避开这一敏感频段。为了有效减少低频振动的影响, 同时保持座椅结构的稳定性, 减振座椅的固有频率通常设定在 24Hz。

4.1.2 弹簧刚度的计算

弹簧刚度是影响座椅固有频率的关键因素。固有频率与弹簧刚度之间的关系可由以下公式表示:

$$k = m\omega_n^2 \quad (3)$$

m 表示座椅及乘员的总质量, 本设计中取 $m=90\text{kg}$, ω_n 为固有角频率, $\omega_n = 2\pi f_n$ 。假设目标固有频率为 2.9Hz, 根据上述公式计算, 得到:

$$k = 90 \times (2\pi \times 2.9)^2 \approx 2200\text{N/m} \quad (4)$$

这意味着弹簧刚度需要设计为 2200N/m, 以确保座椅的固有频率符合要求, 同时提供适当的减振行程。

4.1.3 阻尼比优化

阻尼比是决定减振系统能量衰减速率的重要参数。如果阻尼过大, 可能导致座椅响应迟缓, 降低舒适度; 而如果阻尼过小, 则可能出现共振现象。通过动力学分析, 减振座椅的阻尼比应设置在 0.25~0.35 之间, 这一范围可以有效避免高频振动的衰减不足, 同时确保减振效果。综合分析后, 确定减振座椅的关键设计参数: 固有频率设为 24Hz, 弹簧刚度为 2200N/m, 阻尼比范围为 0.25~0.35。这些参数为后续的实验验证及实际应用提供了设计依据。

4.2 实验验证

4.2.1 实验设备与设置

本次实验采用高精度振动台, 该设备能够模拟舰艇在海况下的复杂振动环境, 测试频率范围为 5~80Hz。负载质

量分别设定为 60kg、100kg 和 150kg, 代表不同体重的乘员以及装备负载。减振座椅被安装在振动台上, 使用多轴传感器记录座椅输入与输出加速度信号, 并计算运动传递率。

4.2.2 实验方法

实验通过扫频方式逐步调整振动频率, 记录不同频率下的振动传递特性。测试覆盖了人体振动敏感区间 (48Hz) 及舰艇航行过程中常见的 10~50Hz 频段。减振座椅的运动传递率按照以下公式计算:

$$\eta_M = \frac{x}{x_b} \quad (5)$$

其中, x 为座椅的响应位移, x_b 为激励位移。

实验结果表明, 减振座椅在 5~80Hz 频段内的运动传递率普遍低于 0.4, 具体分析如下: 在 4~8Hz 的敏感区间, 座椅的运动传递率平均值为 0.38, 成功避免了人体共振区; 在 10~50Hz 的常见振动频段, 运动传递率降至 0.25, 表明座椅有效隔离了舰艇航行中的主要振动冲击; 在 50Hz 以上的高频段, 运动传递率维持在 0.2 以下, 进一步提升了乘员的舒适性。由此可以得出结论, 本文设计的 L 型悬架减振座椅在复杂振动环境下表现出优异的减振性能, 显著提升了舰艇乘员的工作环境质量。

5 应用效果与改进建议

5.1 实际应用效果

L 型悬架减振座椅经过在多个舰艇上的实地测试, 其表现出色, 尤其在恶劣海况下, 能够显著减少舰艇振动对乘员的影响。测试结果表明, 这种座椅在高振动环境中有效改善了乘员的工作体验, 具体体现为振动加速度的显著降低、乘员舒适性的显著提升以及任务执行能力的增强。在高海况条件下, 配备 L 型减振座椅的舰艇其乘员位置的垂直振动加速度峰值降低了超过 35%。这一改进有效减缓了海浪和机械激励引起的震动冲击, 减少了振动对乘员身体的负面影响。此项技术的应用不仅优化了舰艇在复杂海况中的稳定性, 还在一定程度上提升了舰艇的航行性能, 增强了其对不稳定环境的适应能力^[4]。此外, 舒适性方面的改善同样得到了乘员的广泛认可。在长时间任务中, 使用减振座椅后的乘员反映疲劳感明显减轻, 特别是在长时间的连续作业中, 腰部及背部的不适感得到了有效缓解。减振座椅通过有效隔离外界振动, 减少了由于振动带来的生理负担, 从而使得舰员能够在较长时间内保持较高的工作效率和集中度。大多数乘员反映, 座椅的使用不仅提高了工作效率, 还降低了因疲劳所引发的健康问题, 延长了舰员的作业时间。减振座椅的优异性能还延长了乘员的工作时长, 同时降低了由振动引发的身体损伤风险, 确保了舰艇任务的顺利完成。减振座椅为舰员提供了更为稳定、舒适的工作环境, 使其能够在高强度的任务中保持较长时间的集中精力, 最终提高了任务的执行效率与质量。

5.2 改进方向

尽管减振座椅已展现出良好的性能, 但随着舰艇任务

复杂性的增加,未来可引入形状记忆合金或电磁阻尼器等智能材料,这些材料能够自动调整刚度,适应不同振动频率,从而提升减振性能。当前减振座椅主要聚焦垂直振动的隔离,但实际环境中的振动通常是多维复合的。未来应研究多自由度振动模型的减振系统,以同时应对舰艇在横向、纵向及垂直方向的复杂振动。结合现代控制技术,研发主动减振系统,通过传感器与智能控制器的集成,实时调整座椅的阻尼与刚度参数,进一步提升减振效果。在增强减振性能的同时,还应进一步优化座椅的形状与支撑结构,提升乘员在极端环境下长时间使用时的操作便利性与舒适度。

6 结论

本研究深入探讨了船用减振座椅的设计、关键参数优化与实验验证过程。通过精确调整固有频率、弹簧刚度与阻尼比等关键设计参数,成功实现了座椅在复杂振动环境下的有效减振。这不仅提升了乘员的舒适性,还增强了工作效率。实验结果表明,L型悬架减振座椅在多负载条件下的运动传递率均显著低于0.4,充分验证了其在恶劣海况下有效隔离振动的性能。尽管当前设计已达到预期效果,

但考虑到未来舰艇任务的多样性与复杂性,减振座椅仍存在进一步优化的空间。未来研究可以探索智能材料的应用、多自由度振动模型的优化与主动控制系统的集成,从而提升座椅在复杂环境中的适应性与减振效果。采用形状记忆合金与智能控制技术,将有助于提升减振性能和乘员的舒适体验。

【参考文献】

- [1]乐晶晶.基于磁流变阻尼器的半主动座椅悬架减振策略研究[D].江苏:盐城工学院,2024.
- [2]王英健.纤维增强型可变位阻旋转磁流变阻尼器座椅悬架减振特性研究[D].山东:烟台大学,2024.
- [3]吴倩雯.基于功率键合图理论的仿生馈能减振座椅设计[D].江苏:扬州大学,2024.
- [4]朱松松.车船用并联机构多维减振座椅的设计与研究[D].山东:山东理工大学,2013.

作者简介:李伟(1986.12—),男,毕业院校:安阳工学院,学历:本科,所学专业:机械设计制造及其自动化,单位:新乡市新豪机电有限公司,职务:总经理助理,所在职务年限:14年,职称:工程师。