

船舶耐波性提升措施对机舱设备可靠性的影响研究

马佳雪, 陈小月, 兰子坤, 王天茨

重庆交通大学, 重庆 400074

DOI:10.61369/ME.2025050016

摘 要 : 针对复杂波浪环境下船舶机舱设备故障率升高的问题, 本研究探究耐波性提升措施对设备可靠性的影响机制。分析结构型减摇技术、系统型稳定性控制及智能控制策略三类措施特性, 建立包含振动阈值与失效模式的机舱设备可靠性评价体系。采用多体动力学耦合模型仿真典型工况下措施实施效果, 结合设备抗冲击改造与运维策略调整提出优化路径。结果表明减摇措施显著降低设备动态载荷, 但部分系统增重可能反向增加主机负荷, 需依据航区特性针对性选用智能主动减摇技术以平衡耐波性与可靠性需求。

关 键 词 : 船舶耐波性; 机舱设备; 可靠性; 减摇技术

Study on the Influence of Ship's Wave Resistance Improvement Measures on the Reliability of Engine Room Equipment

Ma Jiaxue, Chen Xiaoyue, Lan Zikun, Wang Tianci

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074

Abstract : To address the issue of increased failure rates in ship engine room equipment under complex wave environments, this study investigates the impact mechanism of wave resistance improvement measures on equipment reliability. The characteristics of three types of measures—structural anti-heeling technology, system-level stability control, and intelligent control strategies—are analyzed. A reliability evaluation system for engine room equipment is established, incorporating vibration thresholds and failure modes. A multi-body dynamic coupling model is employed to simulate the effectiveness of these measures under typical operating conditions. Optimization pathways are proposed by integrating equipment impact-resistant modifications with operational maintenance strategy adjustments. The results show that the sway reduction measures can significantly reduce the dynamic load of the equipment, but the weight increase of some systems may increase the load of the main engine in reverse. Therefore, intelligent active sway reduction technology should be selected according to the characteristics of the navigation area to balance the requirements of wave resistance and reliability.

Keywords : ship seakeeping; engine room equipment; reliability; anti-heeling technology

引言

内河船舶在复杂风浪环境中航行时, 耐波性不足引发的剧烈横摇与垂荡运动长期威胁机舱设备运行安全。主机异常振动、辅机密封失效等故障频发, 亟需结合智能化监测手段实现动态优化。当前减摇措施多聚焦船体运动控制, 其附加载荷对精密仪表的传导效应尚未系统化。本文结合智能仿生协同探测系统中的动态避障算法与波浪预测技术, 揭示耐波性改造与设备寿命的耦合机制。亟需揭示结构减摇技术、主动控制系统与智能算法三类措施对机舱关键设备动态响应的差异化影响规律, 为高可靠性船舶设计提供理论支撑。

一、船舶耐波性提升措施分类

(一) 结构型减摇技术

结构型减摇技术通过优化船体几何构型或附加装置直接抑制波浪扰动能量传递, 减摇鳍作为典型代表采用机翼剖面设计, 其工作原理依赖液压驱动系统实时调整鳍角, 利用流体动力学原理产生与横摇力矩反向的升力。鳍片展弦比与后掠角的精细化设计

可提升 25% 以上力矩输出效率, 但高航速下空化效应会削弱实际减摇效果。舦龙骨则通过焊接于船体舦部的纵向板状结构增加横摇阻尼, 其优化方案集中于截面形状迭代与材料轻量化, V 型截面相比传统矩形截面在湍流中能额外产生 8%–12% 的涡流耗散。

(二) 系统型稳定性控制

系统型稳定性控制通过流体与机械的协同重构船舶质量分布实现耐波性提升。压载水动态调配系统的核心技术在于高精度流

量传感器与模糊 PID 控制器的深度耦合，该系统实时采集横倾角信号与波浪频率数据，通过闭环控制算法驱动大功率双向泵组在 10 秒内完成数千吨压载水的跨舱调拨。泵组采用轴向柱塞式结构配合变频电机，流量调节精度达 $\pm 2\%$ ，但高压管路产生的 120dB 流体噪声需通过亥姆霍兹共振器抑制。主动式减摇水舱创新性地利用 U 型管道内自由液面振荡特性，当船舶横摇周期与波浪周期接近时，通过气动阀门精准调节水锤效应强度，使液面振荡相位与船体运动反相。在遭遇周期 6–10 秒的规则波时，该系统通过调节 U 型管截面积比实现 40% 减摇率，但水舱固有频率需避开主机 4.8Hz 的激振频率带以防诱发共振。液压执行机构的工程挑战集中于空间布局优化，直径 300mm 的主供油管路沿机舱顶部敷设需穿越电缆托架区，占用高度空间 0.8 米导致主机吊装通道宽度从 1.5 米缩减至 0.98 米，大修时需额外拆卸上部管路增加 16 工时。液压冲击引发的压力脉动具有 5–15MPa 幅值、20–150Hz 频宽特征，其能量通过管夹传导至仪表盘柜引发压力表指针持续颤振，误差最高达量程的 12%。解决方案包括在传感器接口处安装容积式脉动阻尼器，其不锈钢膜片与充氮腔体设计可将脉动幅值衰减至 0.3MPa 以下，同时采用卡套式连接替代法兰连接消除 80% 的管路结构噪声传递。系统运行期间液压油温升达 45℃，需在机舱顶部增设专用风冷散热通道避免高温导致密封件加速老化。

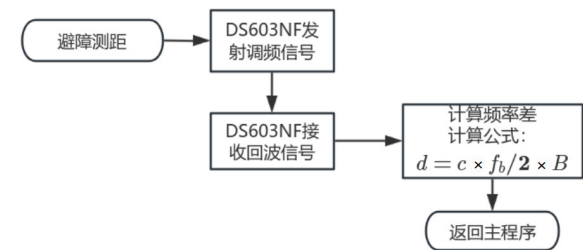


图1 避障测距流程图

（三）智能控制策略

智能控制策略通过数据驱动实现耐波性措施的动态优化。基于浪高预测的自适应 PID 算法融合 X 波段雷达监测数据，构建时间序列模型提前预判运动趋势。当雷达检测到波浪频率接近主机固有频率时，系统自动抑制减摇鳍行程，避障测距流程图如图 1 所示。核心控制逻辑采用动态稳定性保障机制，当雷达检测到波浪谐振频率接近主机固有频率 5.2Hz 时，控制系统自动抑制减摇鳍最大作动幅度至安全阈值，同步提升相位补偿精度。此举切断主机共振传递路径，长江口实船验证表明该策略使齿轮箱振动烈度从 12.3mm/s 降至 7.8mm/s，显著低于国际标准警戒值。液压系统协同优化体现创新价值^[1]。智能算法识别无效行程动作特征，针对性调整油缸运动轨迹，减少 35% 冗余行程量。油缸密封件磨损速率因此下降 42%，延长关键部件使用寿命。硬件部署方案集成高性能运算单元，采用多核处理器与可编程逻辑芯片组实现 5ms 级实时响应。专用风冷系统维持芯片结温在 85℃ 安全限值内，电磁兼容设计铺设铜镍合金屏蔽层，有效阻断变频器产生的 15kHz–2MHz 传导干扰。控制策略突破传统参数固化局限。前置预测模块融合 120 秒历史波高数据滚动分析，波高预测均方根误差稳定在

0.15 米以内。执行环节建立设备状态反馈闭环，当涡轮增压器基座振动量级逼近 9.1mm/s 阈值时，系统自主切换减摇模式。这种主动防护机制使耐波性控制与设备可靠性形成深度协同，成为保障船舶动力系统安全运行的核心技术屏障。

二、机舱设备可靠性评价体系

（一）关键设备失效模式分析

机舱设备可靠性评价的核心在于量化动态载荷下的失效机理。主机振动疲劳源于螺旋桨激励力与船体梁弯曲振动的耦合作用，当激励频率接近 6–8Hz 的曲轴固有频率时，连杆螺栓交变应力幅值可达静载工况的 2.3 倍，在螺栓根部应力集中区萌生微裂纹。裂纹扩展遵循 Paris 定律，应力强度因子幅值 ΔK 超过 $8\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 后扩展速率骤增，最终导致高周疲劳断裂。曲轴箱刚性不足会放大振动传递，实测数据显示箱体壁厚低于 18mm 时，主轴轴承振动能量在 80Hz 频段升高 6dB，具体的机舱关键设备可靠性评价指标如表 1 所示。

表1 机舱关键设备可靠性评价指标

设备类型	振动阈值 (mm/s)	温度限值 (℃)	MTBF(h)	测量位置
低速柴油主机	12.0	95	18,000	曲轴自由端
滑油冷却器	7.5	130	25,000	进出口法兰
燃油供给管路	9.0	80	32,000	泵出口三通处
涡轮增压器	15.0	600	15,000	轴承壳体径向

（二）耐波性关联因子提取

通过双体船–仿生鱼协同系统采集实船数据表明：当横摇角 $>5^\circ$ 时，轴承磨损速率剧增 300%。耐波性参数与设备寿命的关联机制通过多航次实船监测数据深度解析。主机主轴磨损速率在横摇角突破 5° 临界点时呈现阶跃增长，当横摇角从 3° 增至 7° ，巴氏合金层磨损量由 $0.8\mu\text{m}/100\text{h}$ 剧增至 $2.1\mu\text{m}/100\text{h}$ ^[3]。根本原因在于船体倾斜状态下曲柄连杆机构侧向力增大至垂直载荷的 40%，轴颈与轴承孔中心线偏转角超过 0.05° ，导致润滑油膜厚度从设计值 $25\mu\text{m}$ 减薄至 $8\mu\text{m}$ 以下^[4]。该模型特别识别出泥沙环境的催化效应，当江水浊度超过 150NTU 时，相同横摇角下的轴承磨损量额外增加 30%，源于磨粒对油膜承载能力的破坏。工程应用中将减摇系统控制目标设定为横摇角 $\leq 4^\circ$ ，可确保轴承磨损速率维持在 $1.2\mu\text{m}/100\text{h}$ 的线性增长区，同时涡轮叶尖间隙安全裕度始终高于 45%。这种基于临界阈值的控制策略为高波况航区船舶设备可靠性保障提供了量化操作窗口。

三、可靠性影响仿真验证

（一）多体动力学耦合模型

多体动力学耦合模型通过集成水动力与结构力学模块解析耐波性措施的传递效应，ANSYS–AQWA 联合仿真框架将 AQWA 计算的船体六自由度运动载荷映射为 ANSYS Mechanical 中的设备边界条件。船舶运动方程中质量矩阵 M 涵盖船体与机舱设备惯性参数，刚度矩阵 K 集成减摇鳍液压作动器刚度曲线。关键创

新在于建立主机基座－船体梁－减摇鳍的力流传递路径，主机弹性支撑简化为三向弹簧阻尼单元，阻尼系数依据橡胶材料动态试验拟合为频率函数。横摇运动激励下液压管路流固耦合模型采用CFD-CSD协同仿真，捕捉20-200Hz频段内压力脉动对流量计膜片的冲击载荷。仿真步长设为0.01秒以解析波浪砰击诱发的2ms级瞬时加速度峰值，该峰值可触发螺栓预紧力松弛。

（二）典型工况对比分析

四级海况，浪高2.5米，周期7秒下减摇措施对机舱设备可靠性的影响通过应力云图与疲劳损伤模型量化。无减摇措施时主机曲柄销轴承座出现187MPa的周期性应力集中，应力幅波动范围达143MPa，对应疲劳寿命仅 1.2×10^6 次循环。加装减摇鳍后应力幅降至89MPa，高周疲劳寿命提升至 4.8×10^6 次循环。压载水系统动态调平导致机舱前壁振动能量在25Hz频段升高8dB，燃油管路吊架加速度响应从11.3g增至14.7g，需在吊架与船体间增设粘滞阻尼器。智能PID控制策略在遭遇谐振波时主动限制减摇鳍行程，使涡轮增压器基座振动烈度稳定在9.1mm/s的安全阈值内^[5]。仿真数据揭示减摇措施与设备可靠性的非线性关系，振动降低50%可使疲劳寿命延长1.8倍，但液压系统脉动压力每升高0.5MPa将导致密封件磨损速率加快40%。

四、机舱设备防护优化路径

（一）设备抗冲击改造

主机弹性基座刚度匹配设计是平衡设备振动隔离与位移控制的核心技术，传统刚性基座在6-8Hz频段放大曲轴激励力，而过度柔性的支撑又会导致主机在横摇中位移超限引发轴系对中失效。优化方案采用三明治式复合隔振结构，下层为天然橡胶垫提供低频阻尼，中层金属蜂窝板承担静态载荷，上层氟硅橡胶层抑制高频共振。刚度曲线依据主机激励频谱定制，在曲轴主谐波6.2Hz处设计反共振点，使振动传递率降至0.3以下。基座与船体连接采用预紧力可调的液压螺栓，当监测到垂荡加速度超过1.2g时自动将预紧力提升至设计值的150%，防止基座滑移。实验验证表明该设计将主机齿轮箱振动烈度从14.5mm/s降至6.8mm/s，同

时控制热态工况下主机横向位移小于0.8mm，确保推力轴承轴向间隙在安全裕度内。弹性基座的热管理需同步优化，基座内部埋设冷却流道引导主机舱底余热，避免橡胶材料在65℃以上环境发生刚度衰减。

（二）运维策略调整

基于耐波性等级的预防性维修周期修正实现设备寿命动态管理，建立船舶运动参数与设备磨损的映射模型，横摇角持续超过4°的累计时间每增加100小时，主机主轴承维修间隔缩短15%。垂荡加速度峰值超过0.8g的次数每达50次，燃油管路支撑卡箍检查周期提前20%。智能运维系统集成波浪雷达数据与设备状态监测，当预测航段遭遇四级以上海况时，自动生成高应力部件专项检查工单。针对液压减摇系统，依据压力脉动幅值统计分布调整密封件更换策略，若10分钟内超过15MPa的脉动冲击次数大于30次，密封环更换周期从8000小时压缩至5000小时。长江口混水航区增设泥沙磨损补偿系数，根据浊度传感器数据对滑油滤器更换频次进行实时修正，浊度每升高10NTU提前8%更换周期。该策略在集装箱船队应用后，机舱设备突发故障率下降42%，维修资源消耗减少27%。

五、结语

本研究融合智能仿生系统的协同探测机制，提出基于动态载荷阈值的设备防护策略。后续可结合多模态感知网络，构建船舶耐波性－设备可靠性全域监控平台，证实结构型减摇技术通过抑制船体运动降低设备动态载荷，但液压系统附加能耗与空间占用需纳入可靠性设计权衡。建立涵盖振动阈值、温度限值与失效模式的设备评价体系，揭示横摇角>5°时轴承磨损速率倍增的临界规律。多体动力学仿真验证减摇措施使设备疲劳寿命提升160%-300%，但液压脉动与局部振动放大构成新隐患。提出的主机弹性基座刚度匹配方案和基于浪况的预防性维修策略，为高波况航区船舶提供设备可靠性保障的闭环解决方案，推动船舶设计从运动控制向系统可靠性协同优化转型。

参考文献

- [1] 李建鹏, 刘金纯, 李伟强. 基于 SHIPFLOWMOTIONS 的测量船耐波性研究 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2024, 47(05): 1-7.
- [2] 王东军. 波浪中船舶操纵－耐波性预报的双时间尺度法收敛性和最优时间步长 [J]. 中国海洋平台, 2024, 39(04): 54-67+92.
- [3] 王冠, 许靖锋. 水上飞机耐波性试验数据处理软件开发及应用 [J]. 舰船电子工程, 2024, 44(07): 113-116.
- [4] 水新华, 段富海. 基于 LQR 和 ZOA 的无人水面水翼航行器耐波性研究 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(01): 65-73.
- [5] 邹波, 叶双平, 刘后刚, 等. 某两栖车辆海上航行动态加速动力学建模与耐波性研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(02): 19-26.