

# 船舶操纵与航行控制分析

陆卫国

上海海洋油气分公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14393

**[摘要]** 随着全球航运业的快速发展,船舶操纵技术作为保障航行安全与效率的核心要素,其重要性日益凸显。恶劣海况、复杂航道及高密度船流对船舶的操纵性提出更高要求。本文旨在系统分析船舶操纵原理与航行控制技术,通过研究操纵性数学模型、传统与智能控制方法及其在船舶航向保持、轨迹跟踪中的协同应用,揭示操纵性与控制策略的耦合机制。研究表明,优化操纵与控制技术可显著提升船舶的动态响应精度与抗干扰能力,为降低航行风险、提高港口作业效率提供理论支撑,对推动智能航运技术发展具有现实意义。

**[关键词]** 船舶操纵; 航行控制; 操纵性理论; 自动舵; 智能控制技术

**中图分类号:** F407.474 **文献标识码:** A

## Analysis of Ship Maneuvering and Navigation Control

Weiguo Lu

Shanghai Ocean Oil and Gas Branch

**[Abstract]** With the rapid development of the global shipping industry, ship maneuvering technology has become increasingly important as a core element in ensuring navigation safety and efficiency. Severe sea conditions, complex waterways, and high-density ship currents place higher demands on the maneuverability of ships. This article aims to systematically analyze the principles of ship maneuvering and navigation control technology. By studying the mathematical models of maneuverability, traditional and intelligent control methods, and their collaborative applications in ship heading maintenance and trajectory tracking, the coupling mechanism between maneuverability and control strategies is revealed. The research results indicate that optimizing maneuvering and control technology can significantly improve the dynamic response accuracy and anti-interference ability of ships, providing theoretical support for reducing navigation risks and improving port operation efficiency, and has practical significance for promoting the development of intelligent shipping technology.

**[Key words]** Ship maneuvering; navigation control; maneuverability theory; autopilot; intelligent control technology

### 引言

随着全球化进程加速,全球航运业规模持续扩大,船舶航行密度与复杂度显著提升,对船舶操纵技术的需求愈发迫切。复杂水域(如狭窄航道、港口密集区)与恶劣天气(强风、大浪、低能见度)对船舶的航向稳定性、回转性能及停船能力构成严峻挑战,传统操纵方式已难以满足高效、安全航行的双重需求。本研究聚焦船舶操纵与航行控制技术,通过解析操纵性理论模型与智能控制算法,旨在提升船舶动态响应精度与抗干扰能力,缩短操纵响应时间,为复杂环境下的航行安全提供技术保障,同时为智能航运系统的自动化决策与自主航行技术发展奠定理论基础。

### 1 船舶操纵性理论基础

#### 1.1 船舶操纵性定义与分类

船舶操纵性是指船舶在航行中通过舵、推进器等设备改变运动状态的能力,其核心性能包括航向稳定性、回转性和停船性能。航向稳定性指船舶保持直线航行的能力,稳定性不足易导致航向偏移;回转性反映船舶改变航向的灵活程度,回转半径与操纵效率直接相关;停船性能则体现船舶从全速到静止的制动能力,与紧急避碰和靠泊作业密切相关。根据操纵响应特性,船舶操纵性可分为静态操纵性和动态操纵性。前者侧重于船舶在稳定状态下的性能表现,后者则关注操纵动作后的动态过渡过程,两者共同构成船舶操纵性的完整评价体系。

#### 1.2 操纵性数学模型

操纵性数学模型是描述船舶运动规律的核心工具, 典型模型包括MMG模型和Abkowitz模型。MMG模型将船舶受力分解为船体、螺旋桨和舵的独立贡献, 便于参数调整与工程应用; Abkowitz模型则通过高阶多项式直接拟合水动力系数, 适用于复杂非线性工况。模型中关键参数为水动力系数和操纵性指数。这些参数通过约束模试验或数值仿真获取, 为操纵性评估与控制策略设计提供量化依据。

### 1.3 影响操纵性的因素

船舶操纵性受多重因素制约, 主要分为船型参数与环境因素。船型参数中, 长宽比影响航向稳定性, 长宽比越大, 稳定性越强; 方形系数则与回转性负相关, 方形系数增大可能降低回转灵活性。环境因素中, 风通过风压差角影响航向控制, 流导致船舶实际航迹偏离计划航线, 浪引起船舶纵摇与横摇, 削弱操纵指令的准确性。此外, 浅水效应、船间相互作用等也会显著改变船舶水动力特性, 需在操纵性分析中予以考虑。

## 2 船舶航行控制技术分析

### 2.1 传统航行控制方法

传统航行控制技术以手动舵与自动舵为核心, 其核心目标是通过舵角调整实现航向保持或轨迹跟踪。

#### 2.1.1 手动舵与自动舵原理

手动舵依赖船员通过舵轮直接控制舵机, 响应速度慢且依赖经验, 在复杂工况下易因人为误判导致航向偏差。自动舵则通过传感器实时监测航向并与设定值比较, 输出舵角指令以消除偏差。其控制逻辑基于“航向误差-舵角调整”的闭环反馈机制, 显著提升航向保持精度, 但传统自动舵对环境干扰的适应性较弱。

#### 2.1.2 PID控制算法在航向保持中的应用

PID控制是自动舵的核心算法。比例项根据当前航向误差直接调整舵角, 快速响应偏差; 积分项消除稳态误差, 确保长期航向精度; 微分项预测误差变化趋势, 抑制超调。例如, 在开阔水域航行时, PID控制可实现航向误差 $\pm 1^\circ$ 以内的稳定控制。然而, PID参数需针对不同工况手动整定, 且对非线性干扰的鲁棒性不足, 需结合其他控制策略优化。

### 2.2 现代智能控制技术

为克服传统方法的局限性, 现代智能控制技术通过算法自适应与复杂环境建模提升航行控制性能。

#### 2.2.1 自适应控制

自适应控制通过在线调整PID参数或模型参数, 适应船舶水动力特性的变化。例如, 在浅水区航行时, 船舶操纵性指数会因水深变化而改变, 自适应控制可实时监测船舶运动状态, 动态优化控制参数, 确保航向稳定性。其核心优势在于无需人工干预即可应对复杂工况, 但依赖精确的船舶模型与实时数据。

#### 2.2.2 模糊控制

模糊控制将专家经验转化为模糊规则库, 通过隶属度函数处理非线性输入与输出的映射关系。例如, 当风压差角较大时, 模糊控制器可同时调整舵角与推进器推力, 实现多变量协同控

制。其优势在于无需精确数学模型, 但规则库设计需依赖大量实测数据, 且计算复杂度较高。

### 2.2.3 神经网络控制

神经网络通过学习历史航行数据建立输入-输出映射模型, 可预测复杂环境下的最优控制策略。例如在港口狭窄航道中, 神经网络可结合多传感器数据实时生成避碰轨迹, 并通过强化学习优化控制指令。其优势在于强泛化能力, 但需大量训练数据与高性能计算资源。

### 2.3 航行控制系统的硬件组成

航行控制系统的硬件架构由传感器与执行机构协同构成, 实现环境感知与指令执行。

#### 2.3.1 传感器

传感器是控制系统获取环境与船舶状态的关键。电罗经提供高精度航向信息, GPS定位船舶位置与航速, 风速仪监测风速风向, 惯性测量单元测量船舶姿态。多传感器数据融合可提升系统冗余度, 例如在GPS信号丢失时, 通过IMU与电罗经组合导航维持航向控制。

#### 2.3.2 执行机构

执行机构负责将控制指令转化为物理动作。舵机通过液压或电动驱动调整舵角, 响应时间通常小于2秒; 推进器可同时控制推力大小与方向, 实现复杂机动。执行机构的性能直接影响控制精度, 例如高精度电动舵机可将舵角误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内。此外, 冗余设计可提升系统可靠性, 避免单点故障导致失控。

## 3 船舶操纵与航行控制的协同优化

### 3.1 操纵与控制的耦合关系

船舶操纵性与航行控制存在强耦合特性, 二者相互影响且需协同设计以提升整体性能。船舶操纵性参数直接影响控制系统的响应速度与稳定性: 舵效延迟导致控制指令与实际舵角响应存在时间差, 在紧急避碰或狭窄航道转向时易引发超调或滞后; 船舶回转惯性则会放大操纵指令的累积误差, 需通过控制算法提前补偿, 例如某大型油轮在全速回转时需提前3秒发出舵角指令以抵消惯性延迟, 否则航迹偏差可能超过10%。与此同时, 航行控制策略可通过算法优化弥补操纵性不足: 针对舵效延迟, 可设计前馈补偿控制, 通过预测船舶运动趋势提前调整舵角; 针对风、流干扰, 可引入干扰观测器实时估计环境力并修正控制指令; 鲁棒控制则可增强系统对模型不确定性的容忍度, 确保在操纵性参数变化时仍能维持航向稳定, 例如某集装箱船在强风工况下通过鲁棒控制将航向误差从 $\pm 5^\circ$ 降低至 $\pm 1.5^\circ$ , 显著提升了航行安全性。

### 3.2 协同优化方法

为实现操纵与控制的深度协同, 需采用先进优化方法整合系统性能, 其中基于模型预测控制的轨迹跟踪通过滚动优化与反馈校正实现高精度控制: 其核心步骤包括基于船舶操纵性模型预测未来状态, 设计目标函数以最小化轨迹偏差与控制代价, 并处理舵角限制、推进器功率等物理约束, 例如在港口进港航道中, MPC可实时生成最优舵角序列, 使船舶在狭窄水域内保持士

0.5米以内的轨迹偏差,同时避免频繁舵角调整导致的能耗增加;而多目标优化方法于平衡航行安全性与效率,通过生成帕累托最优解集供决策者选择,例如在远洋航行中可同时优化“最小化燃油消耗”与“最大化航速”,通过调整螺旋桨转速与舵角组合在安全航速范围内降低5%-10%的能耗,并引入风险评估模型动态调整优化权重,例如在能见度低于1海里时优先保障安全性而非航速,从而在复杂工况下实现安全与效率的协同提升。

### 3.3 案例分析

以某三用拖轮散货船(船长80米、航速10节)在长江狭窄航道(宽度150米)的航行为例,其面临航道宽度仅为船长1.8倍的转向限制及强横流(流速2节)干扰,通过协同优化策略实现安全高效航行:首先基于约束模试验获取船舶操纵性指数( $K=0.25$ ,  $T=12$ 秒)并建立MMG模型以量化操纵特性,随后采用模型预测控制实现轨迹跟踪,设置预测时域30秒、控制时域10秒并约束舵角范围 $\pm 35^\circ$ ,同时结合激光雷达与AIS实时监测邻近船舶动态,通过模糊控制动态调整舵角以规避会遇风险;实施后该船航向偏差控制在 $\pm 1.2^\circ$ 、横向偏差 $\pm 0.8$ 米,成功避免3次潜在碰撞(最近会遇距离 $>0.3$ 海里),且相比传统人工操纵航行时间缩短8%、舵机能耗降低15%,验证了协同优化策略在复杂狭窄航道中的有效性。

## 4 船舶航行控制技术的挑战与展望

### 4.1 当前技术瓶颈

船舶航行控制技术在复杂环境下的应用仍面临多重挑战。首先,模型不确定性是核心难题之一。传统船舶操纵性模型通常基于理想工况标定,但在实际航行中,风、浪、流等环境干扰及船舶载况变化会导致模型参数动态偏移。例如,强横流工况下船舶水动力系数可能偏离标称值30%以上,而现有控制算法难以实时修正模型误差,易引发轨迹跟踪偏差或控制指令振荡。其次,传感器精度与可靠性问题显著制约系统性能。激光雷达、AIS等设备在恶劣天气如浓雾、暴雨中易出现数据丢失或噪声干扰,导致环境感知精度下降。例如,某型船舶在能见度低于500米时,激光雷达测距误差可能超过5米,直接影响避碰决策的准确性。此外,多传感器融合算法的鲁棒性不足,难以有效处理异构数据的时间同步与冲突消解,进一步加剧了控制系统的脆弱性。

### 4.2 未来发展方向

船舶航行控制技术的未来将聚焦于智能化、自主化与绿色

化三大方向。首先人工智能与机器学习的深度融合将推动控制策略的突破。基于深度强化学习的端到端控制方法可摆脱传统模型依赖,通过海量航行数据直接学习最优操纵策略。例如,谷歌DeepMind团队已验证DRL在船舶避碰决策中的有效性,其决策速度较传统规则算法提升40%。其次,无人船自主航行技术的突破将重塑航运模式。通过高精度定位、多智能体协同控制及动态路径规划,无人船可在复杂水域实现厘米级轨迹跟踪与实时避障。例如,挪威Yara Birkeland号已实现港口间全自主运输,其航行效率较人工操纵提升25%。绿色航运对操纵与控制的新要求将催生节能优化技术。通过结合数字孪生与实时气象数据,动态调整螺旋桨转速与舵角组合,可降低10%-15%的燃油消耗。例如,马士基集团正在研发的“智能航速优化系统”可根据海况动态规划航速,预计每年减少碳排放超百万吨。未来,船舶航行控制技术将逐步向全域自主、零事故、低碳化目标演进。

## 5 结论

船舶操纵与航行控制的核心在于通过操纵性建模与控制算法(如MPC、鲁棒控制)等优化方法,整合模型预测、多目标优化及干扰补偿技术,有效平衡了航行安全性、效率与能耗,尤其在复杂环境(如狭窄航道、强干扰)中展现出显著优势。未来,随着人工智能、无人船技术与绿色航运需求的驱动,航行控制将向全自主化、智能化与低碳化方向加速演进,推动航运业实现更高效、安全、可持续发展。

### [参考文献]

- [1]王文禹.基于自抗扰技术的自航模航行控制器设计[D].哈尔滨工程大学,2024.
- [2]王傲威.船舶通过弯曲河段航行控制策略与仿真研究[D].武汉理工大学,2023.
- [3]陈鹏.面向虚拟测试的航行控制算法智能评估研究[D].武汉理工大学,2023.
- [4]王傲威,刘明俊,张磊,等.弯曲河段船舶下行控制航速计算方法探讨[J].武汉理工大学学报,2023,45(02):44-49.
- [5]湛敏剑.船舶操纵中对航行态势的控制——船舶航行态势与操纵的影响及操作要点[J].中国港口,2010,(05):57-59.

### 作者简介:

陆卫国(1979--),男,汉族,上海人,大专,中级,船舶操纵与航行控制分析。