

海洋复杂工况下动力定位推力分配损耗抑制技术研究

刘凤盈

广东南油服务有限公司天津分公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22257

[摘要] 动力定位推力分配的核心在于将船体所需合力矩映射为各推进器的具体指令。这一映射依赖对推进器空间排布的精确建模,同时须计及物理约束与水动力耦合效应。效率损失来自推进器自身效率边界、矢量分解误差及尾流相互干扰。环境外力与船体运动持续改变分配过程,形成动态扰动。建模时需综合幅值与角度的联合可行域、功率损耗量化指标以及自适应更新机制。面对小推力或零推力工况,以及环境力方向频繁大幅变化的情形,组合偏置策略配合自适应调节能够有效降低损耗。

[关键词] 动力定位; 推力分配; 约束建模; 损耗抑制; 组合偏置策略

中图分类号: U674.1 **文献标识码:** A

Research on Loss Suppression Technology for Dynamic Positioning Thrust Allocation under Complex Marine Conditions

Fengying Liu

Tianjin Branch of Guangdong Nanyou Services Co., Ltd.

[Abstract] The core of dynamic positioning thrust allocation is to map the resultant force and moment required by the vessel into specific commands for individual thrusters. This mapping relies on accurate modeling of the spatial arrangement of the thrusters while accounting for physical constraints and hydrodynamic coupling effects. Efficiency losses arise from the inherent efficiency limits of the thrusters, vector decomposition errors, and wake interference. Environmental external forces and vessel motion continuously alter the allocation process, resulting in dynamic disturbances. Modeling should comprehensively consider the joint feasible region of thrust magnitude and angle, quantitative indicators of power loss, and adaptive updating mechanisms. Under low-thrust or zero-thrust conditions, as well as situations involving frequent and significant changes in the direction of environmental forces, a combined bias strategy with adaptive adjustment can effectively reduce losses.

[Key words] dynamic positioning; thrust allocation; constraint modeling; loss suppression; combined bias strategy

引言

动力定位推力分配将期望合力与力矩转换为各推进器的控制指令。分配精度和效率决定定位能力与油耗水平。物理边界、海洋环境变化、算法固有误差三者叠加,造成推力分配中的能量耗散。海流与波浪持续改变船体受力,分配过程须实时应对这种动态扰动。建模工作必须处理幅值与角度耦合的可行域,损耗随推力的定量变化,分配参数对工况的自适应调节。小推力或零推力要求出现时,环境力方向若频繁大幅摆动,常规分配往往产生额外功率开销。针对这类特殊情况,应当研究专门的抑制策略,通过调整推力分配来降低额外功率消耗。

1 动力定位推力分配系统基础性

1.1 推力分配数学模型构建

推力分配数学模型的基本任务,是将控制器给出的合力与力矩需求拆解为各推力器的推力大小和方位角指令。建模时首先确定推进器在船体坐标系中的安装位置与推力方向,进而构建推力矢量到船体受力的线性变换关系。推进器出力上限、方位角转动速度限制、推力变化速率约束,这些物理边界必须在模型内体现。推进器之间的水动力干扰会产生非线性耦合,船体航速变化同样改变推力特性,建模需要兼顾这些复杂因素。模型精细程度关系到优化求解的有效性,但过于复杂的模型会增加计算负担。如何在模型精度与在线计算效率之间找到合适平衡点,成为建模阶段必须处理的问题。

1.2 推力分配损耗形成机理

推力分配损耗可归结为四类物理机制。螺旋桨或喷水装置

的轴功率到推力功率的转换效率有限,输入能量中未能转化为有效推力份额的部分以热形式散失。横向力须借助推力器斜向工作获得,推力矢量沿船体横向与纵向分解后,横向有效推力等于总推力乘以偏转角的余弦值,偏转角越大横向利用率越低,大角度斜推时的几何损失相当可观。多台推力器运转时相互进入对方的诱导流场,进流速度和方向发生改变,单台推力系数低于孤立工作值,尾流干涉造成的推力折减不容忽视^[1]。转速和方位角频繁调节受制于机械惯性与执行机构响应带宽,实际推力跟踪指令存在滞后,动态偏差随调节频率升高而加大。上述损耗叠加后显著影响分配效率,建模时须逐一量化。

1.3 复杂工况对推力分配过程的扰动机制

复杂工况对推力分配形成多重扰动,输入条件和约束边界均被动态改变。海流流速与流向变化,船体所受水动力随即改变,系统被迫反复调整推力以维持目标位置。风速突增引入高频扰动,合力与力矩需求大幅波动,分配收敛过程受到明显干扰。水深变浅推进器水动力特性下降,浅水区船体水动力系数显著偏移,效率降低。船体纵摇横摇带动推力器入水深度变化,输出推力出现周期性脉动,这一运动耦合效应进一步叠加到分配过程。上述扰动来源各不相同,时间尺度与幅值差异较大,相互交织后对系统鲁棒性和自适应能力提出很高要求。

2 海洋复杂工况推力分配损耗影响因素解析

2.1 推进器物理约束带来的损耗诱因

推进器自身机械特性往往直接转化为推力分配环节的损耗。转动惯量与响应带宽共同制约方位角调节速率,快速变化的推力指令难以被精确跟随,实际输出与指令间产生动态偏差。推力转速曲线低转速段非线性明显,推力分辨率偏低,微小推力指令的准确执行缺乏保障。机械止动装置和电缆缠绕约束划定了方位角可工作区间,最优方向越出该区间时,分配算法只能改用次优方向,直接形成推力折损。使用年限累积的磨损与间隙扩大会加重响应迟滞和精度衰减,物理约束引发的推力损耗随时间逐渐恶化。

2.2 环境扰动下推力指令畸变损耗特征

动力定位船舶受风浪流扰动时,推力分配系统接收的合力与力矩指令夹杂高频噪声与低频漂移。波浪反复拍击船体带来高频噪声,噪声频率远超推进器响应带宽,推进器在响应盲区中频繁动作,这部分能量未转化为有效定位推力,只能以热量形式耗散。风与流平均力的缓变部分形成低频漂移,跟踪漂移要求系统持续输出偏置推力,偏置状态下工作点离开设计最优工况,单位推力功耗显著上升^[2]。指令畸变还会让不同推力器的推力波动之间产生相位差,多台推力器分别响应不同频率成分时,各推力在船体处的叠加可能发生抵消,这种叠加抵消形成的隐性合力损耗难以从单台输出功率中识别。

2.3 推力分配算法固有缺陷引发的附加损耗

推力分配算法在数学求解层面带有固有缺陷,这些缺陷会成为附加损耗的来源。优化算法搜索非凸可行域时容易跌入局部最优解,输出的推力组合虽然满足约束条件,但并非全局能耗

最优方案,由此多出的功率消耗可归为算法缺陷型损耗。推力区间的离散化把连续量切成有限个控制步长,离散误差累积下来形成稳态静差,系统为消除静差不得不输出额外的校正推力,校正过程本身继续叠加能耗。算法的预测能力依赖于内置模型,模型与实际水动力特性一旦失配,算法认定的最优分配和真实最优之间便出现系统性偏差。实时性约束下,一些算法采取简化手段,例如省略部分耦合项或降低迭代精度,运算速度获得提升,分配精度却受损,损耗量级随工况复杂度上升而进一步扩大。

3 推力分配多约束条件建模

3.1 推进器幅值与角度约束表达

推力分配建模中,幅值与角度构成两类最基本的物理限制。幅值限制表现为推进器输出推力存在上限,这一上限由机械结构和驱动功率共同决定,越过该值会导致执行机构饱和乃至损坏。角度限制涵盖两个层面:回转角度的物理可达范围是第一个层面,全回转推进器名义上能完成360°回转,实际安装中艏部结构或相邻推进器布局常留下禁止回转区域;角度变化率的速率限制是第二个层面,即单位时间内内容许的方位角最大调整幅度,该幅度受回转机构动态特性制约。推进器回转角禁止域属于非凸约束,已有文献采用凸化处理把这类约束线性化,以降低优化求解复杂度^[3]。后续研究将推进器幅值约束与角度约束统一纳入凸二次规划框架,通过线性一阶不等式约束实现两类限制的协同表达。在以4个全回转推进器为对象的多约束推力分配数学模型中,推力幅值上下限与角度可行域通常被一并视作优化变量的边界条件加以处理。

3.2 功率损耗约束量化处理

推力分配优化中,功率损耗构成一项无法回避的经济性约束。推进器输出推力必然伴随能量耗散,耗散程度与推力幅值、转速及实时工况紧密相关。功率损耗约束的量化处理围绕两个环节展开。第一个环节是建立功率消耗与推力输出之间的函数映射关系,把功率损耗项直接纳入优化目标函数。第二个环节是把功率变化率引入约束条件,对单位时间内的功率波动幅度加以限制,避免能源系统因功率骤变发生超载。过驱动船舶的推力分配问题采用多目标优化模型,将功率消耗、推力误差与推进器磨损统筹为综合权衡目标。改进细菌觅食算法等策略在分配过程中能够压低推进器功率消耗,方位角波动幅度与推力误差也随之减小。量化功率损耗约束后,推力分配在满足定位需求的前提下兼顾了能源利用效率,实现推力资源的经济性配置。

3.3 动态工况下约束条件自适应更新方法

海洋环境工况时变特性显著,风浪流扰动的强度与方向持续变化,推力分配约束须随工况完成自适应调整。动态工况下约束条件自适应更新的关键,在于打通工况感知与约束调整之间的联动回路。环境载荷增大时,推进器推力幅值约束的有效作用范围应当动态收缩,防止推进器长期工作在饱和状态;海况变动引发船舶姿态偏移时,推进器角度可行域需要依据实际受力需求在线修正。粗糙海况条件下,改进的NSGA-II算法将推力禁止区域、输出角度、输出推力、角度变化率与推力变化率一并纳

入约束集合,使多约束在动态工况中实现协同寻优。基于分层优化的推力分配方法则把约束更新拆成两层处理,顶层借助改进角度约束的向量合成法获取满足旋转范围与角度调整速率限制的推力,底层承接顶层结果,进一步计入功率幅值与功率变化频率约束。

4 基于特殊工况的推力分配损耗抑制策略

4.1 小推力工况下的截断重分配组合偏置推力分配算法

小推力工况中,推进器需要给出幅度极低乃至趋近于零的推力指令,方位角随之出现的高频微调会明显加重机械磨损与能量消耗。截断重分配组合偏置推力分配算法针对这类运行条件,从组合偏置推力分配框架出发引入截断重分配策略。原始分配结果中一旦出现小推力指令,该策略先将其截除,再转交给出力条件更为合适的推进器承担,组合偏置机制则维持推进器处于非零推力状态连续运转^[4]。算法在保证控制力分配精度的前提下调整各推进器推力方向,避免了方位角落入禁区角区域,也抑制了小角度频繁变动引发的推力损失。工程应用结果验证了机械磨损与能量消耗可得到实际降低。

4.2 组合偏置策略在零推力需求工况下的损耗抑制机制

零推力需求工况下推进器输出指令归零,方位角缺乏明确指向依据,后续工况切换时容易引发大幅度角度跳变与响应滞后,机械损耗随之加剧。组合偏置策略主动施加成对或成组的偏置推力,推进器在合力与力矩净输出为零的前提下维持非零运转状态。偏置推力组合经过优化设计,合力与力矩的净输出保持为零,各推进器方位角也落在合理工作区间内。该策略消除了频繁启停和零位悬停带来的角度不确定性,缩短了从零推力状态向正常推力状态切换的响应时间,抑制了附加能耗。《华中科技大学学报(自然科学版)》2025年刊载的研究以海洋石油278船为对象,建立了过驱动矢量推进系统数学模型,将非凸的回转角度禁止域做凸化处理,线性化约束条件并优化推进器回转方向策略^[5]。

4.3 环境力方向大角度频繁变化工况下的推力分配策略

环境力方向发生大角度频繁变动时,推力分配系统需要持续调整各推进器的出力方向与幅值,才能跟踪期望合力与力矩。方位角大范围往复转动不仅加剧机械磨损,频繁穿越禁区角区域还会直接造成推力损失。能量最优组合偏置推力分配算法在组合偏置框架内统筹偏置推进器数量、组合形式与偏置量,将功

耗最小作为优化目标。偏置组合经合理配置后,推进器方位角变化更趋平稳,不必要的大幅度调整受到抑制。

4.4 基于偏置量自适应调整的损耗抑制方法

偏置量取值直接左右组合偏置策略的功耗水平与分配质量。损耗抑制方法依靠对环境载荷、推进器运行状态及船舶定位误差的实时感知,在线求取最优偏置量数值。环境扰动偏弱时,偏置量维持在较低区间,压低附加功率开销;环境力方向骤变或推进器逼近约束边界时,偏置量相应上调,为角度调节留出更充裕的余量。自适应调节环节还兼顾多台推进器的磨损均衡,避免单台设备长期承受偏置负荷而加速性能退化。

5 结束语

动力定位作业的定位精度与运行经济性,很大程度上取决于推力分配系统的实际表现。对数学模型、损耗成因、环境扰动作用方式及多约束建模过程加以梳理,能够厘清推力分配环节的关键矛盾。围绕小推力、零推力需求以及环境力方向大幅频繁变动等特殊工况发展出的损耗抑制策略,切实改善了分配质量。仿真验证平台为策略效果评估提供可量化的依据,不同控制方案之间的横向比较由此具备统一基准。约束处理效率、算法鲁棒性以及实时性能方面的改进,仍值得后续工作继续推进。

[参考文献]

- [1]林文锦,张亚东,安志辰.海洋石油支持船动力定位模块推力分配策略[J].集美大学学报(自然科学版),2022,27(4):353-358.
- [2]张翰林.动力定位船舶神经网络预测控制与推力分配融合研究[D].青岛:青岛科技大学,2024.
- [3]尚书萌.VSP推进船舶动力定位控制及推力分配研究[D].大连:大连海事大学,2024.
- [4]李文娟,徐海祥,谷家扬,等.突变海况下船舶动力定位系统推力优化分配算法研究[J].船舶力学,2022,26(12):1762-1771.
- [5]李新飞,崔志彬,蔡浩泽,等.考虑桨舵组合与桨桨干扰的推力分配算法研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2025,53(004):65-71.

作者简介:

刘凤盈(1986--),女,汉族,天津人,本科,中级工程师,研究方向:船舶轮机设计与制造。