

大型起重船海上吊装动力学特性与稳性控制研究

史耀东

(中国铁建港航局集团有限公司新能源分公司, 广东 珠海 519000)

摘要 大型起重船是海洋油气与风电工程的核心装备, 其海上吊装作业的安全性与效率直接决定工程成败。本文研究起重船在复杂海况下的动力学特性与稳性控制问题。首先分析了起重船—柔性吊索—大型组块耦合系统所受的海洋环境载荷; 其次介绍了基于多体系统动力学的耦合建模方法, 并探讨了系统在波浪激励下的运动响应规律, 揭示了吊重参数、波浪频率与船舶运动的共振机理。在此基础上, 综述了以动力定位 (DP) 系统、压载调载系统为核心的主动稳性控制策略, 以及吊重摆动减摇控制技术; 最后提出了基于作业窗口预报与多系统协同的动力学—稳性综合优化框架。本文旨在为显著提升大型起重船在极端海况下的作业安全边界与操作效能提供参考。

关键词 大型起重船; 海上吊装; 耦合动力学; 运动响应; 稳性控制

中图分类号: U653.92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.041

0 引言

海洋工程向深远海、大型化发展, 海上安装需求增加, 大型起重船因为起吊能力大、灵活性好成为关键装备。但是海上环境复杂, 风浪流等载荷使起重船产生六自由度运动, 通过吊索引发组块摆动, 形成船、缆、物耦合系统, 具有强非线性、多自由度。相互作用增大吊装难度, 改变船舶载荷和运动, 影响稳性, 由于估计不足或者控制失效而发生事故。因此, 对动力特性进行准确的预报, 并且找到有效的稳定控制策略是当前的主要课题^[1]。本文对其研究进展进行了梳理, 从动力学建模理论、参数对运动响应和稳性的影响、主动与被动控制技术、智能化作业优化方向四个方面进行总结, 为相关实践提供参考。

1 海上吊装作业动力学建模

海上吊装作业本质上是多体耦合动力学的过程。建立能真实反映系统本质特性并适合工程分析的数学模型, 是开展动力学特性研究和稳性控制设计的前提。

1.1 系统构成与载荷环境

典型的海上吊装系统由三个部分组成: 起重船本身作为承载平台, 连接船体和被吊物的吊索系统 (吊钩、滑轮组、钢丝绳), 以及被吊的组块或者结构物。该系统的作业环境为开放的海洋, 受以下三种载荷激励:

1. 环境载荷: 风产生的持续作用力与力矩, 波浪

引起的船舶一阶振荡运动和二阶慢漂力, 海流带来的定常力。波浪载荷是造成系统耦合振荡的主要激励源, 它的特性可以用波浪谱 (JONSWAP 谱) 与船舶运动响应幅值算子 (RAO) 结合来描述。

2. 操作载荷: 主要是指起重船作业过程中, 由动力定位系统或者锚泊系统产生的主动推力或者系泊力, 用来抵抗环境载荷, 并保持船位。

3. 惯性载荷: 由于船舶运动、吊重摆动而产生的动载荷, 是耦合效应的直接体现。尤其当吊索长度很长的时候, 被吊物可以看成是一个大摆锤, 它的摆动周期会和波浪周期或者船舶的横摇、纵摇周期相近, 从而产生动力放大的效应。

1.2 耦合动力学建模方法

为了分析上述复杂系统, 需建立集总参数动力学模型。主流方法将起重船和大型组块视为刚体, 吊索系统则作为具有刚度、阻尼和质量属性的柔性连接单元, 通常采用拉格朗日方程或牛顿—欧拉法推导运动方程^[2]。

对于简化的平面内 (二维) 模型, 系统自由度一般包括起重船的纵荡 (或横荡) 和纵摇 (或横摇), 以及吊重相对于船体的摆动角。其动力学方程的一般形式为:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K(q)q = F_{env} + F_{thr} + F_{cable} \quad (1)$$

作者简介: 史耀东 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 船舶工程、工程船施工。

式(1)中, q 为广义坐标向量; M 为系统质量矩阵(含附加质量); C 为科里奥利力与阻尼矩阵 K 为恢复力(矩)矩阵; F_{env} 为环境载荷向量; F_{thr} 为推力器控制力向量; F_{cable} 为吊索张力向量。该方程呈非线性, 主要源于质量矩阵与运动状态的耦合、阻尼的非线性特性, 以及吊索张力方向随摆角的变化。对于更精确的三维全耦合分析, 需考虑起重船六自由度运动与被吊物的三维空间摆动(面内、面外摆动)。此时常用耦合刚度法, 将船舶与吊物在吊点处视为铰接的两刚体, 建立九自由度(船舶六自由度加吊物相对摆动三自由度)耦合运动方程。此类模型能更真实地模拟横浪下船舶横摇与吊物横荡间的强烈共振。

近年来, 随着计算能力提升, 基于三维势流理论的水动力分析(AQWA、WAMIT)与有限元方法(ANSYS)的联合仿真成为研究热点。前者可精确计算船舶水动力系数与波浪载荷, 后者能细致分析吊臂、A型架等局部结构的柔性变形及其对整体动力学的影响, 从而提升动态性能预报的准确性。

2 耦合系统运动响应特性与稳性影响分析

根据建立的动力学模型, 采用数值仿真或者模型试验的方法, 可以深入研究吊装系统在不同海况和作业参数下的响应规律, 定量评价其对船舶稳性的影响。

2.1 关键参数敏感性分析

研究表明, 起重船一吊物耦合系统的运动响应幅值对多个作业与环境参数极为敏感。在特定参数组合下, 系统可能发生强烈的非线性耦合共振, 严重威胁作业安全^[3]。

1. 波浪激励频率: 当波浪的主频率接近船舶横摇固有频率时, 船舶会发生大幅横摇共振。更严重的是, 如果波浪频率接近吊物一吊索系统的摆动固有频率, 将引起船舶运动和吊物摆动的双重耦合共振, 使吊物产生剧烈的水平运动(横荡或纵荡), 吊缆动张力急剧增大。数值研究表明, 除了主共振(波浪周期与吊物摆动周期之比为1:1)外, 当吊物摆动周期与波浪周期之比达到2:1时, 系统还会出现显著的亚谐共振现象, 同样会导致吊物摆幅大幅增加。在实际海况中, 当有效波高达到1~1.5 m时, 吊物可能出现无法预测的大幅摆动, 通常迫使作业中断。据统计, 全球大部分海域适合吊装作业的时间窗口普遍低于正常作业时间的50%, 在中国东海水域这一比例仅为34%。

2. 吊索长度: 这是决定吊物摆动频率的主要参数。根据单摆原理, 吊物摆动周期为:

$$T=2\pi\sqrt{L/g} \quad (2)$$

式(2)中, L 为吊索长度, g 为重力加速度。吊

索越长, 固有周期越大。在涌浪等长周期波浪海域作业时, 当吊索长度超过25 m时, 其摆动周期将进入典型涌浪周期范围(约10~15 s), 与波浪发生共振的风险显著增加。吊索长度同时影响系统的阻尼特性, 进而影响摆动衰减速率。

3. 吊重质量: 吊重质量影响系统的惯性。质量越大, 船舶在起吊和回转过程中产生的横倾力矩就越大, 对初稳性高度(GM值)的瞬态削减效应也越明显。工程实践中, 当装卸重大件货物产生的横倾角可能超过3°时, 必须通过侧翼压载水舱进行调整以保证作业安全。此外, 大质量吊物的摆动动能很大(与质量成正比), 一旦失控, 对船舶和人员安全的破坏力也会更大。

4. 浪向角: 浪向角对系统响应应具有决定性影响。相比顶浪或随浪工况, 横浪(浪向角接近90°)是吊装作业的最不利工况之一。横浪直接激励船舶的横摇运动, 而横摇是与吊物摆动耦合最强烈的船舶运动模态。频域分析表明, 横荡幅值响应算子(RAO)的峰值随浪向角的增大而增大, 在横浪时达到最大; 而纵荡RAO峰值则随浪向角的增大而减小。横浪条件下, 船舶横摇与吊物摆动的耦合最容易引发系统的不稳定响应, 应尽可能避免在此浪向下进行大型吊装作业^[4]。

2.2 对船舶稳性的动态影响机制

吊装作业对船舶稳性的影响是动态且复杂的, 主要体现在两个方面:

1. 重心变化和横倾力矩。在起吊离地瞬间, 重量由外部支撑完全转移到船舶吊钩上, 造成船舶重心瞬间升高, 初稳性高度GM值减小。吊臂做回转动作时, 由于吊重水平移动所产生的一组连续的静态横倾力矩会使船体产生一个固定的横倾角。稳性损失在起吊超大件货物的时候更加明显^[5]。

2. 动力倾覆力矩。在波浪环境下, 船舶的摇荡运动与吊重的摆动相结合, 就会产生周期性的动力倾覆力矩。尤其在发生共振的时候, 动力力矩的幅值会比静态力矩大得多。动力效应会大大消耗船舶的稳性储备, 使它在动态情况下有效复原力矩减小, 增大倾覆的风险。国际海事组织(IMO)第二代完整稳性平衡中有关瘫船稳性等问题, 在起重船作业时需要特别评估。

因此, 吊装作业稳性评价要由静态计算扩展到动态稳性评价, 考虑时变环境载荷和耦合动力响应, 才能真实反映作业期间安全裕度。

3 稳性控制策略与技术

为了保证吊装作业的安全, 必须采取综合性的稳性控制措施, 这些措施主要是围绕船舶运动与位置控制、抑制负载摆动这两个目标进行的。

3.1 船舶运动与位置控制

动力定位 (DP) 系统, 对于没有锚泊限制的起重船来说, DP 系统就是保持其预定船位和艏向的关键。现代 DP 控制系统采用分层结构, 上层控制器根据位置、艏向偏差来计算所需要的总控制力和力矩, 下层推力分配器把指令优化分配给各个推进器^[6]。为了克服吊装耦合动力学的复杂性, 先进的控制算法被引入, 模糊 PID 控制器可以依据运动误差以及变化率来在线调节控制参数, 提高鲁棒性, 结合遗传算法等优化算法进行推力分配, 可以提高效率, 减少能耗。DP 系统通过抑制船舶低频漂移运动给吊装作业提供一个相对稳定的平台。

3.2 吊重摆动抑制技术

抑制吊重摆动可提升作业精度与安全性。除优化船舶运动减少激励外, 直接控制负载的技术也迅速发展。

1. 被动减摇: 在吊钩与负载间安装机械减摇框架或液压阻尼装置, 通过增大阻尼以消耗摆动能量。该方法简单可靠, 但对大幅值、低频摆动效果有限。

2. 主动减摇。输入整形技术通过预处理卷扬或变幅指令, 生成抵消摆动的运动轨迹。更先进的并联绳索驱动稳定装置, 采用多根独立收放的辅助缆绳, 既可提供阻尼, 又能主动施加控制力, 使负载在波浪扰动下保持相对空间静止。有研究设计的并联绳索驱动吊重限位机构, 配合自适应抗摆张力控制方法, 经仿真与试验验证, 在模拟 5 级海况、吊重 20 吨条件下, 负载摆幅降低 80% 以上, 显著提升了高海况作业能力^[7]。

4 动力学与稳性综合优化及展望

未来大型起重船吊装作业的发展趋向于智能化、自主化、极限化。这就要求动力学分析、稳性控制和作业决策三者更深层次的融合。

4.1 基于数字孪生的作业窗口动态预报

创建高保真动力学模型、实时环境感知数据 (气象预报、船载传感器)、船舶控制系统三者组成的数字孪生平台。在实际作业前和作业过程中, 该平台可以进行快速、高精度的实时或者准实时的仿真, 可以动态预测未来几个小时特定海况下船舶运动、吊重摆动、吊缆张力和稳性指标的变化。根据预测结果可以科学地决定作业窗口, 判断目前和近期是否满足安全作业条件, 并提前预警潜在的风险。

4.2 多系统智能协同控制

未来的控制核心将会是各个子系统 (DP、压载、起重机) 的各自为政, 转变为全局的协同优化控制。

智能化的协同控制器会接到统一的目标 (安全、精准、节能), 并调配所有执行机构。当预测出大浪将产生不利耦合运动的时候, 控制器可以协同控制 DP 推进器产生一个补偿力矩, 并微调压载水的分布, 命令起重主动减摇装置做好准备, 实现多系统联动的前馈—反馈复合控制, 最大程度上发挥整体性能。

4.3 面向第二代完整稳性衡准的评估与控制集成

IMO 第二代完整稳性衡准发展之后, 恶劣海况下动力失稳模式 (参数横摇、瘫船稳性失效等) 的评价将会成为强制性要求。研究起重船在吊装作业的特殊装载工况下遇到极端动力现象的风险, 把评价模型直接嵌入控制系统中, 实现稳性风险的在线实时评估与预防性控制, 将会是保证未来超大型起重船深远海安全作业的重要课题。

5 结束语

大型起重船海上吊装作业复杂, 需深入认识耦合动力学特性和精准控制船舶稳性。研究显示, 起重船—吊索—重物系统在波浪中呈现非线性和共振特性, 受波浪频率、吊索长度和浪向影响。吊装作业动态影响稳性, 包括静态损失和动力倾覆风险, 需动态评估。现代稳性控制集成 DP 系统、智能压载和主动减摇技术, 自适应抗摆控制等新技术有应用潜力。未来, 依托数字孪生、智能协同和集成控制, 可实现主动预判和全局优化, 提升恶劣海况作业能力。随着技术的进步, 海上吊装作业的安全性、经济性和适应性将不断提升, 为海洋资源开发提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 骆寒冰, 黄一峰, 姚光启, 等. 动力定位起重船尾吊上部组块耦合运动响应研究 [J]. 中国造船, 2024, 65(05): 1-13.
- [2] 付玉平. 重吊船双吊联动规划与稳性研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- [3] 张志敏, 陈雷. 大型船舶装载和风浪条件下的稳性校核与分析 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(18): 65-68.
- [4] 杨薛亮, 陈光俊, 崔峰浩, 等. 3600 t 全回转浮式起重船海上吊装作业运动响应 [J]. 造船技术, 2025, 53(01): 7-11.
- [5] 骆寒冰, 龙禹, 屈湛博, 等. 动力定位起重船吊装海洋平台组块耦合运动响应模拟 [J]. 中国造船, 2022, 63(06): 88-100.
- [6] 龙禹. 波浪中动力定位起重船吊装海洋平台组块作业耦合运动响应研究 [D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [7] 任昭鹏, 黄哲, 魏一, 等. 绳驱动限位式吊重稳定装置动力学及试验研究 [J]. 振动与冲击, 2025, 44(05): 26-37.