

基于 AMESim 建模的船舶开式舵机故障仿真分析

周子童, 张志远, 孙鹏

大连海洋大学, 辽宁 大连 116000

DOI:10.61369/ME.2026070024

摘 要 : 针对船舶开式液压舵机系统故障特征难以准确获取的问题, 基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真方法建立了船舶开式液压舵机机液耦合动态模型。其中, AMESim 用于构建液压系统模型, Simulink 用于实现舵机控制系统建模, 从而实现液压系统与控制系统联合动态仿真。在此基础上, 对液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、三位四通换向阀内泄漏3种典型故障进行了故障注入仿真, 分析了不同故障状态下系统压力、流量及舵角响应变化规律。结果表明, 泄漏类故障会导致系统压力下降与舵角响应迟滞, 卡滞类故障会引起系统压力波动增大。可为船舶液压舵机故障诊断与健康监测研究提供理论依据。

关 键 词 : 船舶开式液压舵机; AMESim; Simulink; 故障分析; 液压系统

Fault Simulation Analysis of Open-Type Ship Rudder Mechanism Based on AMESim Modeling

Zhou Zitong, Zhang Zhiyuan, Sun Peng

Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116000

Abstract : To address the issue of difficult and inaccurate acquisition of fault characteristics in the open hydraulic steering gear system of ships, a coupled dynamic model of the hydraulic system and the steering gear control system was established based on the joint simulation method of AMESim and Simulink. AMESim was used to construct the hydraulic system model, while Simulink was employed to implement the modeling of the steering gear control system, thereby achieving the joint dynamic simulation of the hydraulic system and the control system. On this basis, fault injection simulations were conducted for three typical faults: internal leakage of the hydraulic pump, jamming of the relief valve, and internal leakage of the three-position four-way directional valve. The variation laws of system pressure, flow rate, and steering angle responses under different fault conditions were analyzed. The results show that leakage-type faults will cause a decrease in system pressure and a delay in the steering angle response, while jamming-type faults will lead to an increase in system pressure fluctuations. This can provide a theoretical basis for the research on fault diagnosis and health monitoring of ship hydraulic steering gears.

Keywords : open hydraulic steering gear of ships; AMESim; Simulink; fault analysis; hydraulic system

引言

船舶舵机作为船舶操纵系统中的关键执行机构, 其运行性能直接关系到船舶航向控制精度与航行安全。液压舵机系统通常由液压泵、液压阀、液压缸以及控制系统等部分组成, 具有典型的机液耦合非线性特性。在长期高压、频繁换向以及复杂海况条件下, 舵机系统容易出现液压泄漏、阀芯卡滞、压力波动及响应迟滞等故障问题, 严重时甚至会导致舵机失效, 影响船舶安全运行。因此, 对船舶液压舵机故障机理及动态响应特性开展研究具有重要工程意义^[1-3]。

张肖江等^[4]基于 BP 神经网络 PID 设计了水下无人航行器舵机驱动智能控制系统, 有效提升了舵机控制精度与动态响应性能。李婷等^[5]提出基于未建模动态估计与补偿的电液舵机自适应容错控制方法, 提高了系统在故障工况下的稳定性与鲁棒性。

随着液压系统仿真技术的发展, AMESim 因具备良好的液压系统动态建模能力, 在液压元件性能分析及故障仿真领域得到了广泛应用。黄德民等^[6]基于 AMESim 研究了液压缸抖动爬行影响因素, 分析了液压执行元件动态特性变化规律; 周密愉^[7]利用 AMESim 对轴

作者简介:

周子童 (2003-), 男, 硕士研究生, 主要从事船舶故障诊断。

张志远 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事机电系统建模及故障诊断。

孙鹏 (1977-), 男, 副教授, 主要从事轮机故障诊断和渔船安全。

向柱塞泵压力脉动进行了研究,揭示了液压泵动态压力变化特征;吴学江等^[8]基于 AMESim 对闭式柱塞泵补油阀特性进行了分析,验证了 AMESim 在液压系统动态特性研究中的有效性。Li 等^[9]将 AMESim 与优化控制算法相结合,对液压测试系统流量控制进行了研究,提高了系统控制性能。Chen 等^[10]基于 AMESim 对某船舶升船机油缸工作回路泄漏故障进行了仿真分析,研究了泄漏故障状态下系统动态响应变化规律。

目前,针对船舶液压舵机系统的研究主要集中于故障检测、控制策略优化以及局部液压元件特性分析,而基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真的船舶开式液压舵机典型故障动态响应研究相对较少。尤其对于液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、换向阀内泄漏及油缸内泄漏等典型故障状态下系统压力、流量与舵角响应特性的定量分析仍有待进一步研究。

因此,本文基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真平台建立船舶开式液压舵机机液联合模型,通过 AMESim 建立液压系统模型,利用 Simulink 构建控制系统,实现舵机系统联合动态仿真。在此基础上,对液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、三位四通换向阀内泄漏、舵机油缸内泄漏以及复合故障等 3 种典型故障进行故障注入分析,研究不同故障状态下系统压力、流量及舵角响应变化规律,为船舶液压舵机故障诊断与状态监测提供理论参考。

一、船舶开式舵机结构与 AMESim 模型建立

(一) 船舶舵机液压系统工作原理及原理图

船舶液压舵机是船舶操纵系统的重要执行机构,其主要作用是驱动舵叶偏转,实现船舶航向控制。开式液压舵机因结构简单、运行稳定及维护方便等特点,在中小型船舶液压操舵系统中得到广泛应用。本文研究对象为船舶开式液压舵机系统,其主要由液压泵、油箱、溢流阀、三位四通换向阀、液压油缸及负载机构等部分组成。

当系统接收到操舵指令时,液压泵向系统提供压力油,三位四通换向阀控制液压油流动方向,高压油进入液压油缸对应工作腔,推动活塞杆运动,从而带动舵叶偏转,实现船舶转向控制。当系统达到目标舵角后,换向阀回到中位,液压油缸停止运动,系统进入稳定状态。溢流阀用于限制系统最高压力,保证液压系统安全稳定运行。

(二) AMESim 模型建立

基于 AMESim 和 Matlab 软件建立船舶开式液压舵机联合仿真模型,主要包括液压泵模块、换向阀模块、液压油缸模块及负载模块等。其中,液压泵模块用于为系统提供稳定压力油;换向阀模块用于控制液压油流向;液压油缸模块用于模拟舵机执行机构运动;负载模块用于模拟实际舵叶负载。建立的船舶开式液压舵机 AMESim 整体模型如图 1 所示。

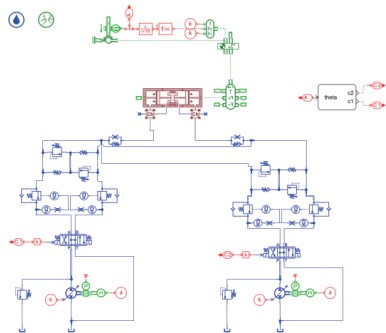


图 1 AMESim 整体模型

(三) Simulink 控制系统模型建立

为实现舵机控制过程动态仿真,本文采用 Simulink 建立舵机

控制系统模型。Simulink 主要用于实现舵角输入信号、控制器及反馈控制模块建模。控制系统通过输入目标舵角信号,对换向阀控制信号进行调节,从而实现液压缸运动控制。在控制过程中,系统通过舵角反馈信号实时调整控制输入,使实际舵角能够跟踪目标舵角,提高系统动态响应性能。建立的 Simulink 控制系统模型如图 2 所示。

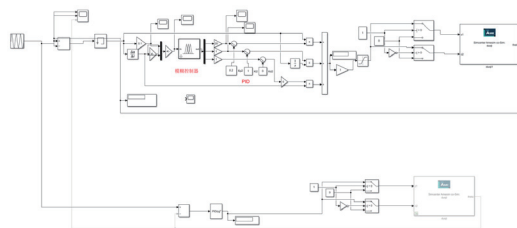


图 2 Simulink 控制系统模型

(四) 模型参数设置与验证

表 1 模型主要参数设置

部件名称	参数	数值
液压泵	工作压力 /MPa	31.5
	排量 /(mL/r)	18.0
电机	转速 /(r/min)	1450.0
	调节压力 /MPa	16.4
溢流阀	质量 /kg	50.0
	活塞直径 /mm	125.0
液压油缸	杆直径 /mm	80.0

为验证所建立模型的正确性,对系统正常工况进行仿真分析。结果表明,系统压力能够稳定建立,舵角响应平稳,符合船舶开式液压舵机实际工作特性,说明所建立模型具有一定有效性。

二、典型故障建模与仿真分析

(一) 故障注入方法

为研究不同故障对船舶开式液压舵机系统性能的影响,本文采用 AMESim 参数修改的方法进行故障注入仿真。通过改变液压元件内部泄漏系数、阀芯摩擦系数等参数,模拟不同故障状态下系统动态响应特性。三种故障注入方式为:液压泵内泄漏故障通过增大液压泵内部泄漏系数实现;溢流阀卡滞故障通过增大阀芯

摩擦阻尼实现；三位四通换向阀内泄漏故障通过增加阀芯间隙泄漏实现。

在故障仿真过程中，分别对系统压力、流量及舵角响应变化进行分析，以研究不同故障对船舶开式液压舵机动态性能的影响。

（二）液压泵内泄漏故障分析

故障机理：液压泵作为液压系统动力源，其内部泄漏会导致高压油液回流，从而降低系统供油压力与流量，影响舵机正常工作性能。

仿真结果对比：对液压泵内泄漏故障进行仿真后得到系统舵角，压力响应。

结果分析：由仿真结果可知，液压泵发生内泄漏后，系统压力明显下降，压力建立时间延长，稳态压力比正常低2~4MPa。，舵角响应速度减慢，系统存在一定迟滞现象，上升变慢，响应滞后，到达35°时间延长（如5~6s）。这是由于液压泵内部泄漏导致部分压力油损失，使系统供油能力下降。同时，由于部分液压油在泵内部泄漏，系统输出流量减小，导致液压缸驱动力下降。流量明显衰减，小于正常流量

故障特征总结：液压泵内泄漏故障主要表现为：系统压力下降；输出流量减小；舵角响应迟缓。

（三）溢流阀卡滞故障分析

故障机理：溢流阀主要用于稳定系统压力。当阀芯发生卡滞时，溢流阀无法及时完成开启或关闭动作，从而引起系统压力异常波动。

仿真结果对比：对溢流阀卡滞故障进行仿真后得到系统舵角，压力响应。

结果分析：由图可知，溢流阀发生卡滞时，系统压力波动明显增大，局部区域出现振荡现象，系统稳定性下降，无法达到额定压力，提前溢流。同时，由于系统压力调节能力下降，流量输出也存在一定波动，使液压缸运动不稳定，压力泄压时流量出现小幅波动。在舵角响应过程中，舵角变化存在抖动现象，系统达到稳定状态所需时间增加。这是由于溢流阀阀芯运动受阻，导致系统无法及时完成压力调节，从而引起系统动态性能下降

故障特征总结：溢流阀卡滞故障主要表现为：系统压力波动增大；输出流量不稳定；舵角响应存在振荡。

（四）三位四通换向阀内泄漏分析

故障机理：三位四通换向阀用于控制液压油流动方向。当阀芯发生内泄漏时，部分高压油液会通过阀芯间隙泄漏，导致系统控制能力下降。

仿真结果：对三位四通换向阀内泄漏故障进行仿真后得到系统舵角，压力响应。

结果分析：由仿真结果可知，换向阀发生内泄漏后，换向时刻出现压力跌落，保压时压力缓慢下降。由于液压缸有效驱动力降低，左右转舵速度不一致，舵角跟踪误差增大。因为阀内泄导致流量损耗，输出流量不稳定。此外，舵角稳定值与正常工况相比存在较大偏差，说明系统控制精度下降。这是由于换向阀内部泄漏导致部分液压油损失，使系统执行能力减弱。

故障特征总结：三位四通换向阀内泄漏故障主要表现为：系统出现压力跌落；流量输出不稳；舵角响应迟缓并存在偏差。

三、故障结果对比分析

液压泵内泄漏故障下，系统稳态压力下降约15%，流量减小约13%，舵角稳定时间由正常工况下的2.1s增加至2.9s。由于液压泵内部泄漏导致系统供油能力下降，系统在4.5s后出现轻微压力波动，但整体稳定性仍较好。

溢流阀卡滞故障对系统稳定性影响最为明显，系统压力波动标准差达到0.81 MPa，在2.3s时即出现明显振荡。这是由于阀芯卡滞使系统无法及时完成压力卸荷与调节，导致系统压力周期性振荡，同时流量波动明显增大，舵角响应出现抖动现象。

换向阀内泄漏故障下，系统压力与流量均出现小幅下降，但由于部分压力油经阀芯间隙泄漏，液压缸有效驱动力减弱，导致舵角响应迟滞，并在5.1s左右出现局部波动现象。

综合分析表明，泄漏类故障主要表现为系统压力下降、流量损失增加以及舵角响应迟滞；阀类卡滞故障主要表现为系统压力振荡与稳定性下降；复合故障则会进一步加剧系统动态性能退化，其故障特征较单一故障更加明显。

四、结语

本文基于AMESim建立了船舶开式液压舵机仿真模型，并对液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、换向阀内泄漏、油缸内泄漏及复合故障等3种典型故障进行了仿真分析。研究结果表明，不同故障会对系统压力及舵角响应产生不同影响。其中，泄漏类故障主要导致系统压力下降与响应迟滞，卡滞类故障主要导致系统压力波动增大，而复合故障对系统动态性能影响最为明显。本文研究结果可为船舶液压舵机故障诊断与状态监测提供参考依据。

参考文献

- [1] 杨瑞峰, 王伟丽, 郭晨霞, 等. 舵机异常检测模型的设计与研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(04): 1-6. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2208772.
- [2] 王娜, 李杨, 彭巍. 基于多角度特征提取的舵机故障诊断方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(09): 1240-1249.
- [3] 王文新, 刘上, 张国庆, 等. 考虑舵机故障的船舶鲁棒自适应航向保持控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(01): 116-123. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02525.
- [4] 张肖江, 周春桂, 王志军, 等. 基于BP神经网络PID的水下无人航行器舵机驱动智能控制系统[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(02): 109-114.
- [5] 李婷, 姚叶明, 张临海, 等. 基于多种未建模型估计与补偿的电液舵机自适应容错控制[J]. 西北工业大学报, 2023, 41(01): 18-27.
- [6] 黄德民, 秦立果, 曾朝晖, 等. 基于AMESim的液压缸抖动爬行影响因素分析[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(03): 105-111.
- [7] 周密愉. 基于AMESim的轴向柱塞泵压力脉动研究[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(03): 112-118.
- [8] 吴学江, 曹捷, 史进武, 等. 基于AMESim的闭式柱塞泵补油阀特性分析[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(10): 73-78.
- [9] Li Q, Bai X, Lu Y, et al. Flow control of tractor multi-channel hydraulic tester based on AMESim and PSO-optimized fuzzy-PID[J]. Agriculture, 2025, 15(11): 1190.
- [10] Chen L, Xiang H, Li D, et al. Simulation of leakage fault in the working circuit of the transverse guide oil cylinder of a certain ship lift based on AMESim[C]//2025 2nd International Conference on Intelligent Ships and Electromechanical System (ICISES). IEEE, 2025: 101-106.