

运河船舶机舱机电系统集成设计与优化研究

何关明

绍兴市松陵造船有限责任公司 浙江 绍兴 312000

【摘要】：在绿色航运与智能船舶快速发展的时代背景下，内河运河船舶作为我国水运体系的重要组成部分，其机舱机电系统的集成化、智能化与能效优化已成为提升船舶综合性能的关键路径。本文立足于系统工程理论，结合信息物理融合系统（CPS）与数字孪生理念，构建面向运河船舶的机舱机电系统集成设计框架。通过分析机舱内多子系统的功能耦合关系与信息交互机制，提出“感知—融合—决策—执行”四层协同架构，并在此基础上建立以能效最优、运行可靠、维护便捷为核心的多目标优化理论模型。文章进一步探讨了基于边缘智能的动态优化策略、异构数据融合方法及系统可靠性评估机制，为内河船舶机电系统从“分散控制”向“集成智能”转型提供理论支撑。本研究不仅丰富了船舶系统集成理论体系，也为内河绿色智能船舶的标准制定与工程实践奠定方法论基础。

【关键词】：运河船舶；机舱机电系统；系统集成；信息物理融合；多目标优化；数字孪生；边缘智能

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.025

1 引言

内河航运是我国综合交通运输体系重要组成，京杭大运河等区域的运河船舶，承担大宗物资、建材及集装箱中短途运输。相较于远洋船舶，其航程短、工况多变、启停频繁且吃水受限，运行效率与能耗对区域物流成本及碳排放影响显著。

传统运河船舶机舱机电系统采用“子系统独立设计、功能单一控制”模式，主推进、发电等系统缺乏信息互通与协同控制，导致能效低、运维复杂、故障响应滞后。随着相关纲要及“双碳”战略推进，提升内河船舶智能化与绿色化水平成行业共识，机舱机电系统集成设计与优化是核心。

信息物理融合系统等技术为系统集成提供新范式，但现有研究多集中于远洋船舶或军用舰艇，针对运河船舶适用性理论不足，需契合其轻量化、低功耗、高鲁棒性需求的集成理论。本文从系统工程视角，构建运河船舶机舱机电系统集成设计理论框架，提出多目标优化方法论，为后续工程实现提供理论基础。

2 相关理论与技术基础

2.1 系统工程理论

系统工程理论以“整体最优”为核心目标，通过分解、协调、综合的方法处理复杂系统问题，其核心思想与运河船舶机舱机电系统的集成需求高度契合。该理论强调对系统内各要素的关联性分析，而非孤立看待单个子系统，这为破解传统机电系统“分散设计、独立控制”的弊端提供了方法论支撑。在机舱机电系统集成中，系统工程理论可指导主推进、发电、冷却等子系统的功能重组，通过梳理各系统间的能量流、物质流与信息流，实现“局部服从整体”的设计逻辑，避免因子系统优化而导致的整体性能内耗。

2.2 信息物理融合系统（CPS）

信息物理融合系统（CPS）通过构建物理实体与虚拟信息

的深度交互通道，实现“感知-计算-控制”的闭环，是机电系统从“自动化”向“智能化”转型的核心技术载体。对于运河船舶而言，CPS的价值体现在其能打破机舱内物理设备与控制信息的壁垒：一方面，通过传感器实时采集柴油机转速、发电机负载、冷却水温等物理数据；另一方面，利用计算单元对数据进行分析处理，生成适配运河工况的控制指令，反作用于物理设备。这种“物理世界-信息世界”的双向映射，可解决传统系统中信息滞后、控制僵化的问题，为动态工况下的协同控制提供可能。

2.3 数字孪生技术

数字孪生技术通过构建与物理系统1:1映射的虚拟模型，实现对系统全生命周期的模拟、监测与优化，其核心优势在于“虚实交互、实时同步”。在运河船舶机舱机电系统中，数字孪生模型可整合设计阶段的三维图纸、运行阶段的实时数据及维护阶段的故障记录，形成动态更新的“虚拟机舱”。基于该模型，设计人员可提前模拟不同工况下的系统运行状态，预判主推进系统与发电系统的功率匹配问题；运维人员则可通过虚拟模型定位物理设备的潜在故障，避免传统“拆解检测”带来的停航损失，这对航程短、作业频次高的运河船舶尤为重要。

2.4 边缘智能技术

边缘智能技术将数据处理与决策功能从云端下沉至设备端，或是靠近设备的边缘节点，凭借低延迟、高可靠的特性满足实时控制需求，完美适配运河船舶的运行场景。运河船舶常面临航道信号弱、网络不稳定的问题，若依赖云端计算进行决策，很容易因为数据传输延迟导致控制失准，比如在突发工况下调整推进功率时就可能出现这类问题。边缘智能节点可部署于机舱本地，直接对接传感器与执行器，快速处理柴油机燃油喷射量、冷却系统流量等关键数据，实现毫秒级的优化决策。同时，边缘节点还可对长期能效统计这类非实时数据进行预处理

理，之后再上传云端，以此平衡实时控制需求与数据存储效率。

3 运河船舶机舱机电系统功能与结构分析

3.1 系统组成与核心功能界定

运河船舶机舱机电系统由6大核心子系统构成，各子系统功能独立又关联，共同支撑船舶运行。主推进系统以柴油机、推进轴系为核心提供航行动力，需按航道阻力、载货量动态调整输出功率；发电系统通过主、应急发电机满足全船用电，适配导航设备、机舱辅机等不同负载特性；冷却系统分淡水、海水冷却，控制柴油机、发电机温度以防过热损坏；润滑系统借润滑油路为运动部件润滑，减少机械磨损；通风系统负责机舱空气流通，兼具设备散热与保障人员作业安全作用；控制系统通过PLC、变频器实现子系统启停与参数调节，是传统系统的“控制中枢”。

3.2 子系统间功能耦合关系

各子系统间存在强耦合关系，主要体现在能量、物质与控制三个维度，这种耦合关系是集成设计的核心依据。从能量维度看，主推进系统与发电系统共享燃油供给，当船舶启停频繁时，柴油机需在“推进动力”与“发电动力”间动态分配功率，若两者缺乏协同，易导致燃油消耗激增；从物质维度看，冷却系统与润滑系统存在关联——润滑油的冷却依赖淡水冷却系统，若淡水温度过高，会直接影响润滑油的散热效果，进而加剧主推进系统的机械磨损；从控制维度看，控制系统需同步接收各子系统的状态数据，若数据交互中断，会导致控制指令“片面化”，例如仅根据柴油机转速调整推进功率，而忽略冷却系统的散热能力，可能引发设备故障。

3.3 传统系统信息交互瓶颈

传统运河船舶机舱机电系统的信息交互存在三大瓶颈，制约了整体性能提升。一是交互方式单一，多采用点对点的硬线连接，例如柴油机与变频器之间仅传输转速信号，无法共享燃油消耗、故障代码等多维度数据，导致子系统“信息孤岛”；二是交互实时性差，数据传输依赖人工巡检记录或定时上传，例如冷却水温数据每5分钟更新一次，无法满足突发工况下的快速响应需求；三是交互标准不统一，不同厂家的设备采用不同的数据通信协议，缺乏统一的信息接口，导致控制系统无法直接解析多源数据，需额外加装协议转换模块，增加了系统复杂度与故障风险。

4 运河船舶机舱机电系统集成设计框架

4.1 整体设计原则

基于前文分析，集成设计框架需遵循三大原则以适配运河船舶运行特性。一是轻量化适配原则，因运河船舶机舱空间、载重有限，集成系统需简化硬件架构，避免设备过度堆砌，例如用一体化传感器替代多个独立传感器，减少安装空间与重

量；二是工况自适应原则，针对船舶启停频繁、航道多变特点，系统需具备动态调整能力，例如根据船闸通行需求自动切换“推进-发电”功率分配模式；三是多目标平衡原则，在能效、可靠性、维护性间寻求平衡，避免单一目标优化顾此失彼，例如追求能效最优时，需保障润滑系统最低油压以防设备磨损加剧。

4.2 “感知—融合—决策—执行”四层协同架构

(1) 感知层：全维度数据采集

感知层是集成系统的“数据入口”，核心是实现“全维度、高精度、低功耗”采集。针对运河船舶工况，采用“分布式+高精度”传感器布局：主推进系统柴油机缸体装温度、压力传感器监测燃烧；发电系统发电机输出端装电流、电压传感器记录负载；冷却系统管路装流量、温度传感器跟踪介质流动；机舱布置温湿度、有害气体传感器保障安全。传感器均带数据预处理功能，输出标准化数据，减少后续处理压力。

(2) 融合层：多源异构数据处理

融合层是“数据中枢”，采用“边缘预处理+云端协同”架构：边缘节点整合柴油机转速、发电机负载等实时数据，判断系统状态是否匹配航道工况；云端平台整合历史运行数据、维护记录等非实时数据，构建性能预测模型。同时引入标准化数据接口，将不同协议转为统一MQTT协议，实现数据“一次解析、全系统复用”；并通过数据清洗算法保障数据质量。

(3) 决策层：智能优化与控制

决策层是系统“大脑”，分两个子模块：工况识别模块通过边缘智能算法，结合推进轴系转速与航道信号识别船闸启停需求；多目标优化模块以“能效最优、运行可靠、维护便捷”建模，分别通过最小化燃油消耗率、保障参数安全、预测设备寿命实现目标。采用粒子群优化算法求解模型，生成控制指令，同步反馈至数字孪生模型验证，避免失误。

(4) 执行层：指令落地与状态反馈

执行层是系统“手脚”，用智能执行器替代传统机构：电动调节阀控制冷却系统流量，响应时间 ≤ 0.5 秒；变频控制器调整发电机功率适配负载。同时具备状态反馈功能，将结果回传感知层与决策层，形成“决策-执行-反馈”闭环，若结果与指令有偏差，决策层可及时调整。

4.3 数字孪生与物理系统的交互机制

设计实时交互机制，核心是“虚实同步、双向映射”。物理系统通过感知层将实时数据传输至数字孪生模型，更新虚拟设备状态，实现“物理状态→虚拟映射”；模型通过仿真生成优化方案，反馈至决策层指导物理系统调整，实现“虚拟优化→物理执行”。例如，模型预测柴油机轴承剩余寿命不足300小时，推送维护建议，决策层结合作业计划生成停机指令。

此外，模型存储物理系统全生命周期数据，为后续升级优化提供支撑。

5 系统可靠性评估与动态优化策略

5.1 基于故障树的可靠性评估模型

为保障集成系统运行可靠性，构建基于故障树（FTA）的评估模型，核心是识别薄弱环节并提前改进。以“机舱机电系统失效”为顶事件，向下分解中间事件（主推进、发电、冷却系统失效等）与底事件（传感器故障、执行器卡涩、柴油机缸体损坏等）。通过分析底事件发生概率，计算顶事件概率以评估系统整体可靠性。例如，传感器故障概率 0.001/小时、执行器卡涩概率 0.0005/小时，经故障树逻辑运算可算出冷却系统失效概率，进而评估其对顶事件的贡献度。针对贡献度高的底事件，采取增加冗余传感器等改进措施，提升系统可靠性。

5.2 基于边缘智能的动态优化策略

针对运河船舶工况多变特点，提出基于边缘智能的动态优化策略，核心是实现“工况变化→实时响应→参数调整”的动态适配。依托决策层工况识别模块，通过边缘节点实时采集的工况数据，触发三类优化模式：正常航行时以“能效最优”为核心，调整柴油机喷油量与发电机负载分配，如将发电机负载率控制在 70%-80% 高效区间，避免能效损耗；进入船闸区域时切换“可靠性优先”，降低柴油机功率至怠速，保持冷却、润滑系统稳定，停靠超 10 分钟则关闭非关键辅机降能耗；突发故障时切换“安全优先”，立即切断非关键负载，将功率分配给主推进与应急冷却系统，触发报警，故障无法缓解则启动应急停机，避免损坏扩大。

5.3 异构数据驱动的维护优化

为降运维成本、提效率，基于融合层多源数据构建维护优化机制，整合三类数据实现精准维护：设备实时状态数据判断健康状态，历史故障数据挖掘故障规律，作业计划数据匹配维护窗口期。例如，分析柴油机振动数据发现某缸振动超阈值，

结合历史数据判断为“活塞环磨损”，再根据未来 3 天作业计划，生成“2 天后停靠港口更换”的建议，避免非计划停机延误。同时，机制可根据维护记录优化故障判断模型，提升建议准确性。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文从系统工程视角出发，针对运河船舶机舱机电系统的集成设计与优化问题展开研究，主要结论如下：

传统运河船舶机舱机电系统的“分散控制”模式，因子系统信息孤岛、协同不足，难以适配绿色智能航运需求，而 CPS、数字孪生、边缘智能等技术的融合应用，为系统集成提供了可行路径。

构建的“感知—融合—决策—执行”四层协同架构，可有效打破子系统信息壁垒，实现数据全流程贯通与动态决策，其中轻量化设计与工况自适应原则，能精准匹配运河船舶的运行特性。

基于故障树的可靠性评估模型与边缘智能动态优化策略，可分别从“风险预判”与“实时适配”两个维度保障系统性能，而数字孪生的虚实交互机制，进一步提升了系统的可监测性与可维护性。

6.2 研究局限与展望

本研究聚焦于运河船舶机舱机电系统的集成设计理论与优化逻辑，尚未开展实物验证，后续可从三个方向深化：

开展工程试验验证，基于小型运河船舶搭建原型系统，测试集成架构在实际工况下的能效提升与可靠性表现，进一步修正优化策略。

拓展智能算法应用，将强化学习引入决策层，使系统能自主学习不同航道的工况特征，实现更精准的动态优化。

推动标准体系建设，结合研究成果梳理运河船舶机舱机电系统集成的技术规范，为行业绿色智能转型提供标准化支撑。

参考文献：

- [1] 林兴志,潘翔.内河 LNG 货运船舶智能化机舱气体数据监测与态势预警研究[J].微型电脑应用,2021,37(11):22-25.
- [2] 陈立.基于增强现实的船舶机电设备维修与改装技术研究[J].船舶物资与市场.2024,32(3).
- [3] 付秀杰.船舶电气安全管理体系构建与优化[J].船舶物资与市场.2024,32(12).
- [4] 朱九明.智能船舶主要机电应用技术研究[J].船舶物资与市场.2023,31(4).
- [5] 毕君磊.电气工程自动化技术在船舶机械设备方面的应用[J].船舶物资与市场.2023,31(4).