

船舶变频驱动技术在机电系统中的应用探讨

王永亮

中交海洋建设开发有限公司 天津 300457

摘要：随着全球航运业对节能减排、智能化和绿色船舶发展的日益重视，船舶机电系统的能效优化与控制精度成为关键技术研究方向。变频驱动（VariableFrequencyDrive，VFD）技术作为现代电力电子与自动控制技术融合的产物，凭借其在调速性能、节能潜力和系统集成方面的显著优势，已在船舶机电系统中得到广泛应用。本文系统梳理了船舶变频驱动技术的基本原理与核心构成，深入分析其在船舶推进系统、辅助动力系统、甲板机械及舱室环境控制系统等关键机电子系统中的具体应用模式与技术优势。同时，针对当前应用中存在的电磁干扰、谐波污染、系统可靠性及维护复杂性等挑战，提出了相应的优化策略与发展方向。研究表明，变频驱动技术不仅显著提升了船舶机电系统的运行效率与自动化水平，也为实现船舶智能化、绿色化转型提供了坚实的技术支撑。

关键词：船舶；变频驱动；机电系统；节能；谐波抑制；智能控制

引言

船舶作为国际贸易与海洋开发的重要载体，其运行效率、安全性和环保性能直接关系到国家海洋战略与可持续发展目标。传统船舶机电系统多采用定速电机配合机械调速或阀门节流的方式进行控制，存在能耗高、响应慢、控制精度低、维护成本高等问题。随着国际海事组织（IMO）不断强化船舶能效设计指数（EEDI）和碳强度指标（CII）等环保法规，以及船东对运营经济性的持续追求，船舶机电系统的高效化、智能化升级迫在眉睫。变频驱动技术通过调节供电电源的频率与电压，实现对交流电动机转速的无级平滑控制，从根本上解决了传统调速方式的能量浪费问题^[1]。自20世纪80年代以来，随着电力电子器件（如IGBT、SiCMOSFET）、微处理器控制算法及数字通信技术的飞速发展，变频器的性能不断提升、体积不断缩小、成本持续降低，使其在船舶这一特殊应用场景中展现出强大的生命力。本文旨在系统探讨变频驱动技术在船舶机电系统中的应用现状、技术优势、面临挑战及未来发展趋势，为船舶设计、建造与运营提供理论参考与实践指导。

1 船舶变频驱动技术概述

1.1 基本原理

变频驱动技术的核心在于改变供给异步电动机（或同步电动机）的电源频率，从而改变其同步转速。根据电机转速公式：

$$n = \frac{60f(1-s)}{p}$$

其中，n为电机转速（r/min），f为电源频率（Hz），s为转差率，p为电机极对数。可见，通过调节

f，即可实现对n的连续控制。

典型的船舶变频器采用“交-直-交”结构，主要包括整流单元、直流母线（含滤波电容/电感）和逆变单元三部分。输入的三相交流电经整流后变为直流，再通过逆变器中的功率开关器件（如IGBT）按特定PWM（脉宽调制）策略转换为频率、电压可调的三相交流电输出至电机。

1.2 核心构成与关键技术

（1）整流单元：传统多采用二极管不控整流，但会产生大量谐波。现代高端船舶变频器多采用有源前端（AFE，ActiveFrontEnd）或PWM整流技术，可实现单位功率因数运行及能量双向流动。（2）逆变单元：采用高频PWM技术，通过空间矢量调制（SVPWM）等先进算法，提高输出电压利用率，减小转矩脉动。（3）控制单元：基于DSP或FPGA的嵌入式系统，实现V/f控制、矢量控制（VC）或直接转矩控制（DTC），满足不同负载对动态响应与控制精度的要求。（4）保护与通信模块：集成过流、过压、过热、短路等多重保护功能，并支持CAN、Modbus、Profibus等工业总线协议，便于与船舶综合自动化系统（IAS）集成。

2 变频驱动技术在船舶机电系统中的应用

2.1 船舶电力推进系统

电力推进是现代船舶（尤其是邮轮、科考船、LNG船、军舰）的重要发展方向。变频驱动在此系统中扮演核心角色。（1）永磁同步电机（PMSM）或异步电机驱动：变频器精确控制推进电机转速与转矩，实现船舶的无级调速、动态定位（DP）及低速大扭矩运行。（2）柴电混合推进：多台柴油发电机组通过变频器驱动推进电

机,可根据航速需求灵活启停发电机组,使柴油机始终运行在高效区间,燃油消耗可降低10%~20%。(3)吊舱式推进器(POD):变频器集成于水下吊舱内,直接驱动螺旋桨,省去传统轴系与舵机,大幅提升操纵性与空间利用率^[2]。某大型邮轮采用全电力推进系统,配备6台变频驱动的推进电机,总功率超60MW,通过智能能量管理系统优化发电与推进负载分配,年节省燃油超万吨。

2.2 辅助动力系统

船舶辅助系统(如泵、风机、压缩机)长期运行,是能耗大户。变频驱动在此类系统中节能效果尤为显著。(1)海水/淡水冷却泵:根据主机负荷或环境温度自动调节流量,避免阀门节流损失。实测节能率可达30%~50%。(2)舱底泵与压载泵:变频控制可实现平稳启停,减少水锤效应,延长管路寿命;同时根据液位自动调节排量,避免空转。(3)空压机与制冷压缩机:采用变频控制维持恒定压力或温度,避免频繁启停造成的机械冲击与电能浪费。其优势是除节能外,软启动特性大幅降低启动电流(仅为额定电流1.5~2倍),减轻对船舶电网的冲击,提高供电稳定性。

2.3 甲板机械系统

甲板机械系统对控制精度和安全性要求极高,变频驱动在此类场景中展现出独特优势。以起货机、锚机和绞缆机为例,传统电磁制动或机械离合器控制方式难以实现平稳启停,易造成货物晃动或缆绳断裂。而变频驱动通过精确的转矩和速度闭环控制,可实现提升、回转和变幅机构的平滑加速与减速,显著提升作业安全性和定位精度。在恶劣海况下,绞缆机还可启用恒张力控制模式,自动调节电机输出以维持缆绳张力恒定,有效防止因船舶横摇导致的系泊失效^[3]。此外,侧推器作为靠离码头和低速操纵的关键设备,其推力大小和方向需快速响应,变频器提供的毫秒级动态响应能力,使船舶在狭窄水域的机动性大幅提升。

2.4 舱室环境控制系统

舱室环境控制系统虽不直接参与船舶推进或作业,但对船员舒适度和设备运行环境至关重要。传统的暖通空调(HVAC)系统采用定频风机和水泵,通过调节风阀或水阀开度来控制温湿度,不仅控制精度低,且能耗巨大。引入变频驱动后,系统可根据舱内温度、湿度、二氧化碳浓度等传感器反馈,实时调节风机转速和水泵流量,维持恒定舒适的环境参数,同时大幅降低电能消耗。类似地,机舱和货舱的通风系统也可根据设备发热量或货物特性(如冷藏货、危险品)动态调整风量,避免过度通风造成的能源浪费,实现按需供风的智能化管理。

3 应用优势分析

3.1 节能降耗

这是变频驱动最突出的优势。根据流体机械的相似定律,泵与风机的功率与转速的三次方成正比。当负载需求降低20%,转速降至80%,功率消耗可降至约51%,节能效果极为显著。全船多系统协同变频控制,可实现整体能效提升15%以上。

3.2 提升自动化与智能化水平

变频驱动极大地提升了船舶机电系统的自动化与智能化水平。作为底层执行单元,变频器可通过标准工业通信协议与船舶综合自动化系统(IAS)或能源管理系统(EMS)无缝集成,实现远程参数设定、运行状态监控、故障预警与能效分析。这种深度集成不仅减少了人工干预,提高了操作效率,还为构建数字孪生、实现预测性维护和全局能量优化调度奠定了基础,是迈向智能船舶的关键一步。

3.3 改善运行性能与可靠性

变频驱动显著改善了设备的运行性能与系统可靠性。其软启动和软停止功能有效降低了机械冲击和水锤效应,延长了电机、轴承、管路及阀门等关键部件的使用寿命。精确的速度与转矩控制能力,则提升了作业精度与安全性,尤其在起吊、系泊等高风险操作中意义重大^[4]。多重内置保护机制也增强了系统在复杂海况下的容错能力,降低了突发故障导致停航的风险。

3.4 优化空间布局与减振降噪

变频驱动还有助于优化船舶的空间布局与声学环境。由于省去了传统机械变速装置、离合器和部分阀门,传动系统得以简化,节省了宝贵的机舱空间。同时,电机在低速运行时噪声显著降低,不仅改善了船员的工作与生活环境,对于军用舰艇而言,还具有降低水下辐射噪声、提升隐蔽性的战略价值。

4 面临的挑战与对策

尽管优势显著,变频驱动在船舶应用中仍面临若干技术挑战:

4.1 电磁干扰(EMI)与谐波污染

首要问题在于电磁干扰(EMI)与谐波污染。变频器内部高频功率开关器件的快速通断会产生丰富的电磁噪声,可能干扰船舶导航雷达、通信设备乃至控制系统,威胁航行安全。同时,非线性整流环节向船舶电网注入大量谐波电流,导致电压波形畸变,可能引发发电机过热、保护装置误动作,甚至影响其他敏感电子设备的正常工作。为应对上述问题,工程实践中需采取系统性措施。在硬件层面,应采用屏蔽性能良好的动力电缆,并

严格遵循动力线与信号线分离敷设的原则；在变频器输入端加装交流电抗器、 dv/dt 滤波器或正弦波滤波器，可有效抑制谐波电流和电压上升率；更优的方案是推广采用有源前端（AFE）技术，从源头上实现近似正弦的输入电流和单位功率因数运行。在系统层面，可配置有源电力滤波器（APF）对全船谐波进行综合治理，确保电网质量符合船级社规范。

4.2 系统可靠性与环境适应性

船舶运行环境的高温、高湿、高盐雾和强振动特性，对变频器元器件的长期可靠性构成严峻考验。海上维修条件有限，一旦关键变频器故障，可能导致系统瘫痪。因此，必须选用通过主流船级社（如DNV、ABS、CCS）认证的船用级产品，确保其具备IP23或更高的防护等级和宽温域工作能力。在系统设计上，可采用模块化结构和冗余配置（如N+1备份），便于快速更换故障模块；同时加强散热设计，如采用强制风冷或水冷方案，并结合状态监测技术实施预测性维护，防患于未然。

4.3 控制策略复杂性与系统集成

随着变频驱动系统规模扩大，其控制策略的复杂性显著增加。多台变频器与柴油发电机组之间的动态功率匹配、故障穿越能力、黑启动功能等，均对控制算法提出极高要求。对此，应积极引入基于模型预测控制（MPC）或人工智能的先进控制策略，并严格遵循IEC61162等船舶通信标准，确保各子系统间的互操作性与协同性。在项目实施前，应开展全船级的数字仿真与硬件在环测试，充分验证系统在各种工况下的稳定性与鲁棒性。

4.4 初期投资成本

高性能船用变频器的初期投资成本相对较高，可能影响部分船东的采纳意愿。对此，应通过全生命周期成本（LCC）分析，量化其在燃料节省、维护费用降低和碳排放交易收益等方面的长期经济价值。同时，随着宽禁带半导体器件的普及和规模化生产，变频器成本正持续下降，加之各国对绿色船舶的政策激励，其经济性障碍正在逐步消除。

5 未来发展趋势

5.1 高功率密度与集成化

采用碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）等宽禁带半导体器件，提升开关频率，减小滤波器体积，实现变频器

小型化、轻量化。

5.2 智能化与数字化

内置AI算法实现自适应参数整定、故障预测；支持数字孪生，实现虚拟调试与远程运维；与船舶能效管理系统深度耦合，实现全局优化。

5.3 多电/全电船舶架构深化

变频驱动作为核心执行单元，在综合电力系统（IPS）中承担能量转换与分配的关键角色，支撑未来船舶向“多电化”甚至“全电化”演进。

5.4 绿色电力兼容性

适应未来船舶使用岸电、燃料电池、储能电池等多元能源的需求，变频器需具备双向能量流动、多源协调控制能力。

6 结语

变频驱动技术作为船舶机电系统能效提升与智能化升级的关键使能技术，已在推进、辅机、甲板机械及环境控制等多个领域展现出不可替代的优势。其在节能降耗、提升控制精度、改善运行可靠性等方面的综合效益，完全契合当前绿色船舶与智能船舶的发展方向。尽管在电磁兼容、系统可靠性及成本等方面仍存在挑战，但随着电力电子技术、控制理论及船舶系统工程的持续进步，这些问题正逐步得到解决。未来，变频驱动技术将朝着更高效率、更高集成度、更强智能性和更好环境适应性的方向发展，深度融入船舶综合电力系统与智能运维体系，为构建安全、高效、绿色、智能的现代化船舶提供核心动力。可以预见，在IMO2050温室气体减排战略及全球航运业低碳转型的大背景下，变频驱动技术在船舶机电系统中的应用将更加广泛和深入，成为现代船舶不可或缺的“智慧心脏”。

参考文献

- [1]王亚庆,马红军,顾建飞.基于变频技术的船舶电气设备驱动方案[J].造船技术,2023,51(04):67-71.
- [2]王刚毅,印曦,庄加兴.变频电力推进驱动调距桨船舶的推进控制系统设计[J].机电设备,2020,37(03):73-77.
- [3]蔡佳慧.混合动力船舶直流组网变频控制配电系统测试流程分析[J].海峡科学,2023,(11):37-42.
- [4]李志喜,陈少勇.变频调速技术在船舶上的应用思考[J].珠江水运,2023,(12):24-26.