

船舶高压双燃料系统的设计与优化研究

董祥东

中国船级社实业有限公司南京分公司, 江苏 南京 210015

DOI:10.61369/ERA.2025090025

摘要：船舶高压双燃料系统在清洁能源船舶动力领域具有重要应用价值，通过合理设计与优化，能够在保证动力性能的同时有效降低污染物排放。构建以液化天然气（LNG）和柴油为主的双燃料系统，采用高压喷射和燃料混合控制技术，实现燃料供应的高效稳定。优化设计包括提高燃烧效率、降低氮氧化物及甲烷滑漏、提升系统稳定性和经济性，确保在多种运行工况下具备高能效和低排放特性。研究表明，该优化策略在船舶动力系统转型中具有显著优势和广泛应用前景。

关键词：高压双燃料系统；清洁能源；液化天然气；燃烧效率；排放控制

Design and Optimization Study of High-Pressure Dual-Fuel Systems for Ships

Dong Xiangdong

China Classification Society Co., Ltd. Nanjing Branch, Nanjing, Jiangsu 210015

Abstract： High-pressure dual-fuel systems for ships hold significant application value in the field of clean energy ship propulsion. Through reasonable design and optimisation, they can effectively reduce pollutant emissions while ensuring propulsion performance. A dual-fuel system primarily using liquefied natural gas (LNG) and diesel is constructed, employing high-pressure injection and fuel mixing control technology to achieve efficient and stable fuel supply. Optimisation design focuses on improving combustion efficiency, reducing nitrogen oxides and methane slip, enhancing system stability and economic performance, and ensuring high energy efficiency and low emissions under various operating conditions. Research indicates that this optimisation strategy offers significant advantages and broad application prospects in the transition of ship propulsion systems.

Keywords： high-pressure dual-fuel system; clean energy; liquefied natural gas; combustion efficiency; emission control

引言

随着全球航运业环保要求的不断提升，传统燃油动力系统逐渐面临淘汰压力。高压双燃料系统凭借其燃料多样性和高效低排放特性，成为船舶动力转型的重要选择。液化天然气（LNG）与柴油双燃料技术，通过高压喷射和精准控制，能够在提升燃烧效率的同时有效减少污染物排放。围绕高压双燃料系统的设计与优化，深入探讨能效提升和排放控制策略，对推动绿色船舶发展具有重要意义。

一、船舶高压双燃料系统的构成及工作原理

（一）双燃料系统构成分析

船舶高压双燃料系统主要由主燃料系统和辅助燃料系统组成。主燃料系统是整个双燃料系统的核心，通常以液化天然气（LNG）作为主要燃料来源。其关键组件包括 LNG 高压泵、燃料供给管路和喷射装置。LNG 经过高压泵增压后再经过加热系统气化成为高压气态天然气，通过双壁管后输送至主机喷射系统，最终以气态形式喷入发动机气缸内参与燃烧。

辅助燃料系统则以柴油作为辅助燃料来源，主要用于发动机启动、低负荷运行及应急工况时的燃料供应。辅助燃料系统由柴

油燃料供应管路、喷射泵及喷射器组成。在低负荷工况或 LNG 供给不足的情况下，辅助燃料系统能够迅速切换供油，维持船舶动力的连续性与稳定性。为保证双燃料系统的兼容性和灵活性，主燃料与辅助燃料系统之间应具备联动控制及切换机制，以满足船舶在不同工况下的燃料需求^[1]。

（二）高压燃料喷射原理

船舶高压双燃料系统的喷射原理是将高压 LNG 与柴油按特定比例进行混合喷射，以实现高效燃烧和低排放。高压燃料喷射系统通常采用共轨喷射技术，能够在较高压力下将 LNG 与柴油均匀混合，并通过喷嘴雾化后喷入燃烧室。喷射装置的核心在于雾化效果和喷射精度，其结构通常包括喷射控制阀、喷嘴和高压燃油

导轨。在正常工作状态下，高压泵将 LNG 加压至 20–30MPa，通过高压管路输送至喷射器，柴油作为辅助燃料在相对低压状态下与 LNG 同时喷射，实现双燃料混合燃烧^[2]。

混合喷射工况的调节策略包括燃料流量控制、喷射时序调整及压力匹配优化。在正常燃气模式下，LNG 的使用比例通常可达 95% 以上，仅有约 5% 的柴油用于压缩末期的点火作用。尽管各发动机厂商对燃气模式的判定标准有所差异，但一旦进入燃气模式，该比例基本固定。控制系统主要根据负荷变化实时调节 LNG 和柴油的供给量及速度，而非燃料配比。当主机负荷处于较高或正常水平时，持续使用燃气模式；若负荷过低，无法满足燃气模式运行条件，则系统切换至纯柴油模式，此时 LNG 不参与燃烧过程。

（三）系统运行模式分析

目前船舶高压双燃料系统的单模式运行指的是柴油模式，即发动机完全以柴油为唯一燃料，主要应用于启动、低负荷及紧急情况下的动力供给。柴油模式具有点火可靠、响应迅速和燃烧稳定的优势。由于天然气在常温下需压缩至 1:600 的体积方可液化，且本身不具备自燃特性，单独使用 LNG 无法完成压缩点火，因此 LNG 不能作为独立燃料使用。双燃料模式则是在正常运行状态下，以 LNG 为主燃料，并以少量柴油辅助点火与稳定燃烧，实现协同喷射，从而兼顾燃料经济性与环保效益。

二、双燃料系统设计中的关键技术

（一）燃料供应及调压系统设计

LNG 燃料的储存通常采用双壁绝热罐体，以保持燃料的低温特性。在储存过程中，为避免气化引起的压力变化，罐体内部配备压力控制装置，如减压阀和蒸发气回收系统，确保 LNG 在低温状态下储存的稳定性。在燃料供给过程中，高压泵将日用柜中的液态 LNG 加压至高压缓冲罐，随后通过加热系统完成气化，并将压力调整至主机厂家推荐的工作压力，再经高压双壁管路输送至发动机喷射系统。供给压力控制的核心是保持燃料压力恒定，防止因泵速波动或燃料流量变化导致的喷射不稳定^[3]。

为保证燃料供应的安全性，高压供燃系统需配置多级泄压保护装置。包括主泵泄压阀、供燃管路超压排放阀以及安全断流装置。泄压保护装置在燃料压力异常时能够自动开启，迅速泄放过高压，防止管路破裂或设备损坏。同时，采用冗余设计以增强系统可靠性，如在高压泵后设置双重压力监测系统，实现压力异常时的自动停机保护。泄压保护策略的合理性直接关系到系统运行的安全性和持久性。

（二）燃烧稳定性及能效提升策略

船舶双燃料系统的燃烧稳定性是确保发动机高效运转的关键。影响双燃料燃烧效率的主要因素包括燃料混合比例、喷射压力、点火时序及燃烧室结构。LNG 和柴油混合燃烧时，由于天然气具有较高的燃烧温度和自燃延迟特性，混合比例的调整至关重要。在发动机高负荷工况下，适当增加 LNG 比例能够提高燃烧热值，减少柴油消耗，而在低负荷和启动阶段，则应以柴油为主，

以保证燃烧稳定。混合喷射控制算法需实时监测发动机负荷、燃料流量及温度变化，动态调节喷射参数，防止混合气过稀或过浓导致的熄火或爆震^[4]。

能效提升策略的核心在于燃烧控制算法的优化。采用先进控制算法，如模糊控制或神经网络算法，根据不同工况对喷射时序和燃料配比进行实时调整。通过优化喷射相位和燃料供给压力，使得燃烧室内的燃料雾化更加均匀，有效缩短燃烧时间，提升热效率。在优化过程中，需综合考虑燃烧室形状、气缸压力及气流组织等因素，使燃料得以充分燃烧，减少未燃物质的排放量。

（三）排放控制技术

船舶高压双燃料系统在运行过程中，氮氧化物（NO_x）及甲烷滑漏是主要排放污染源之一。LNG 具有较低的碳含量和较高的氢碳比，在燃烧过程中能有效减少二氧化碳排放，但由于燃烧温度较高，容易产生氮氧化物。为控制 NO_x 的生成，采用废气再循环（EGR）技术，通过引入部分废气降低燃烧温度，减少 NO_x 生成量。同时，优化燃烧时序和喷射压力，避免过量空气参与燃烧，抑制 NO_x 的生成。甲烷滑漏控制则主要依赖于密封结构的改进和喷射控制优化，防止未燃 LNG 排入大气^[5]。

燃料转换过程中，由于两种燃料特性差异较大，切换时容易出现燃烧不充分和排放波动问题。优化燃料转换过程，需在切换前提前调整喷射参数，使柴油和 LNG 在切换时混合比例逐步过渡。同时，通过燃烧实时监测系统，对排放成分进行连续监测，根据排放趋势及时调整燃料配比，避免转换过程中的瞬时排放超标。采用精准排放控制策略，能够在不同工况下稳定实现低排放运行，提升船舶环保性能^[6]。

三、双燃料系统优化设计及应用分析

（一）能效优化策略

双燃料系统能效优化的关键在于燃料成分和热值的合理配比。由于 LNG 和柴油的物理化学特性差异较大，混合燃烧时需根据船舶负荷和运行工况合理调整燃料比例。在高速航行阶段，LNG 的能量密度较高，适合作为主要燃料，而在低速巡航或靠港作业时，柴油具有更稳定的点火特性，宜作为主要燃料。基于热值分析和燃烧效率计算，构建双燃料比例优化模型，通过实时监测发动机工况和燃料流量，自动调整混合比例，确保在不同航行状态下均能实现最高燃烧效率^[7]。

控制方法方面，采用闭环控制系统，实时检测发动机缸内压力、排气温度及燃烧速度等参数，优化燃料喷射时序和流量控制。通过高压喷射控制技术和自适应调节算法，精确控制 LNG 和柴油的燃烧比例，减少爆震和积碳现象。在双燃料切换时，控制系统根据燃料供给压力及燃烧温度进行渐进式调节，避免因燃料性质差异引起的燃烧不稳定，确保燃料转换过程平稳高效。

（二）经济性分析

LNG 与柴油的经济性比较直接影响双燃料系统的推广与应用。LNG 价格相对较低，且具有较高的氢碳比，燃烧后二氧化碳排放较少，因此在长途航运中具有成本优势。柴油由于其较高密

度和稳定燃烧特性，适用于短程和低速航行。通过建立运行费用计算模型，对 LNG 和柴油的成本构成进行综合分析，计算包括燃料采购成本、储存费用及燃烧效率带来的经济收益。如表 1 所示。

表 1 LNG 与柴油在典型航行条件下的成本对比

燃料类型	单位成本 (元 /kg)	能量密度 (MJ/kg)	每小时燃料消耗 (kg)	单位时间成本 (元 / 小时)
LNG	3.5	50	20	70
柴油	7.0	42	15	105

（三）实际工程案例分析

在某型双燃料船舶应用中，通过对比优化前后燃料消耗和排放数据，验证优化设计的有效性。测试中选取连续航行 60 小时的工况，记录 LNG 和柴油混合比例、燃料消耗量及排放水平^[9]。如表 2 所示。

表 2 优化前后的能效和排放对比结果

项目	优化前	优化后	提升率
LNG 消耗量 (kg/h)	25	20	20%
柴油消耗量 (kg/h)	18	15	16.7%
NOx 排放量 (g/kWh)	4.5	3.0	33.3%
甲烷滑漏量 (g/kWh)	0.8	0.5	37.5%

分析结果表明，采用优化后的高压双燃料系统，LNG 和柴油混合比例更加合理，燃料消耗量显著减少。优化措施有效提升了船舶运行的经济性和环保性能，具有较高的推广价值。

四、船舶高压双燃料系统优化设计前景及挑战

（一）前景展望

基于液化天然气（LNG）和柴油双燃料技术的船舶，能够在降低二氧化碳和氮氧化物排放的同时，保证动力输出的高效性。未来，随着 LNG 供应链的不断完善和双燃料发动机技术的成熟，更多大型商船和远洋船舶将逐步采用高压双燃料系统，进一步提升航运业的绿色化水平。在政策和市场的推动下，双燃料船舶将在远洋运输、沿海航运和港口物流中得到广泛应用。

新能源及混合动力技术的发展也为高压双燃料系统的升级提供了新机遇。氢能、甲醇和生物燃料等新能源逐步进入航运领域，混合动力系统与双燃料技术的结合将进一步提升船舶的能效比和环保性能。在未来发展中，构建多能源互补的船舶动力系统，将使得船舶在长途航行和靠港作业时都能实现最低能耗和排

放。新能源与双燃料技术的融合，将在未来十年成为绿色航运的主流趋势^[8]。

（二）存在挑战

虽然高压双燃料系统在航运业中的应用前景广阔，但技术挑战依然严峻。首先，LNG 燃料储存和高压供给技术的复杂性较高，低温液化天然气的存储要求极为苛刻，储罐必须具备高强度、低温抗裂和良好保温性能。此外，LNG 加压输送过程中容易产生汽化，导致管路内压力波动，影响供燃稳定性^[9]。

多种燃料切换控制也是系统稳定性面临的难题之一。在实际操作中，由于 LNG 和柴油物性差异显著，燃烧特性和热值不同，直接切换容易引起燃烧不稳定和排放超标。尤其在高速航行状态下，切换过程中可能产生功率波动和扭矩不平衡，影响航速和操作安全^[10]。

（三）未来研究方向

未来研究应围绕提高燃料使用效率和降低系统复杂性展开。开发更加高效的燃烧控制算法，实现 LNG 和柴油在不同工况下的精准混合喷射，是进一步提升能效的重要方向。同时，研究新型燃烧室结构和喷嘴优化设计，减少甲烷滑漏和氮氧化物排放，使系统在高压状态下依然能够保持较低的污染水平。

此外，新型燃料在双燃料系统中的兼容性研究也将成为重点方向。在当前 LNG 与柴油混合模式基础上，逐步引入氢能、合成燃料及生物燃料，构建多元混合燃烧系统。研究多种燃料在同一动力系统内的协同利用及稳定性优化，使双燃料系统能够更灵活地适应未来能源结构变化。同时，开发具备多燃料识别和切换功能的智能控制模块，为船舶动力多元化和低碳化提供技术支撑。

五、结束语

船舶高压双燃料系统作为清洁能源动力的重要选择，凭借其高效低排放特性在航运业中展现出广阔应用前景。通过合理设计燃料供给与调压系统，优化燃烧控制策略，有效提升能效并降低污染物排放。然而，技术难点如 LNG 储存及燃料切换稳定性依然存在。未来需进一步研究多燃料融合及智能控制技术，推动双燃料系统在绿色航运中的深度应用，实现环保与经济效益的双赢。

参考文献

[1] 周艺航, 田镇. 船舶能效设计指数框架下的 LNG 燃料船碳捕集与封存系统模拟研究 [J]. 制冷与空调, 2024, 24(11): 75-83+92.
[2] 周廷若. 船舶电喷柴油低速发动机双燃料系统改造 [J]. 中国修船, 2021, 34(S1): 10-12+15.DOI: 10.13352/j.issn.1001-8328.2021.S1.004.
[3] 孙瑞. 基于 LPG 的船用双燃料供给系统设计 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(13): 82-87.
[4] 赵宏斌. 船舶双燃料发动机低压燃气供应系统的设计及动态研究 [D]. 江苏科技大学, 2024.
[5] 于瑶, 周清华, 黄智焱, 等. 甲醇双燃料动力系统在超大型集装箱船上的应用 [J]. 船舶与海洋工程, 2024, 40(05): 47-52+75.DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2024.05.009.
[6] 刘盖世, 刘剑. 船舶 LNG 燃料系统 HAZOP 应用及典型案例分析 [J]. 船舶工程, 2024, 46(01): 86-91.DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2024.01.12.
[7] 姜峰. 船舶双燃料发动机视情维修保障系统研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2023.000422.
[8] 崔锦泉, 周伟, 王智磊, 等. 船舶双燃料发动机 LNG 供气系统模拟仿真技术应用研究 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(18): 122-125.
[9] 鞠佳明. 船舶双燃料主机燃料模式切换过程的仿真研究 [D]. 大连海事大学, 2022.DOI: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2022.001507.
[10] 刘靖宇, 王正钧. 浅谈甲醇-柴油双燃料船舶燃料系统设计 [J]. 广东造船, 2023, 42(04): 92-95.