

船用柴油机性能提升与燃烧优化技术探讨

路岩青

交通运输部烟台打捞局拖轮船队 山东 烟台 264000

摘要: 随着全球航运业的快速发展以及环保法规的日益严苛,船用柴油机作为船舶的核心动力装置,其性能提升与燃烧优化已成为行业研究的核心课题。本文通过分析当前船用柴油机在动力性能、燃油经济性和排放控制方面存在的主要问题,从燃油喷射系统优化、进气系统改进、燃烧过程数值模拟与控制、废气涡轮增压技术升级以及替代燃料应用五个关键方向,深入探讨性能提升与燃烧优化的具体技术路径,研究表明,多技术协同应用是实现船用柴油机综合性能突破的关键,可为船舶动力系统的升级改造提供理论参考与技术支撑。

关键词: 船用柴油机;性能提升;燃烧优化;燃油喷射;涡轮增压;排放控制

1 引言

船用柴油机凭借其高功率密度、高可靠性和良好的燃油经济性,长期以来一直是商船、特种船舶等各类船舶的主要动力来源,在全球航运产业链中占据着不可替代的地位。然而,近年来随着国际海事组织(IMO)对船舶排放限值的不断加严,如IMO Tier III排放标准对氮氧化物(NO_x)排放的要求较Tier II降低了80%以上,同时航运企业对运营成本控制(尤其是燃油成本)的需求日益迫切,传统船用柴油机在动力输出稳定性、燃油消耗率以及污染物排放控制方面逐渐显现出不足。当前,我国航运业正处于向绿色智能转型的关键阶段,船用柴油机作为船舶动力的核心,其性能水平直接影响船舶的运营效率、环保水平和市场竞争力。因此,深入研究船用柴油机的性能提升与燃烧优化技术,不仅能够满足日益严格的环保法规要求,降低船舶运营成本,还能推动我国船舶动力装备制造的技术升级,提升在全球船舶动力市场的话语权。基于此,本文对船用柴油机性能提升与燃烧优化的相关技术进行系统探讨,旨在为相关研究与工程应用提供参考。

2 当前船用柴油机性能与燃烧面临的主要问题

2.1 动力性能与燃油经济性的矛盾

船用柴油机在实际运行中,需同时满足船舶在不同工况(如启航、巡航、重载加速)下的动力需求,以及降低燃油消耗的经济性需求。然而,传统柴油机的燃烧系统设计往往难以兼顾两者:若为追求高动力输出,需增加燃油喷射量并提高燃烧温度,这会导致燃油消耗率上升;若为降低燃油消耗,减少燃油喷射量,则可能导致动力不足,尤其在船舶重载或恶劣海况下,难以满足航行需求。此外,船舶在长期运行过程中,柴油机零部件的磨损(如气缸套磨损、喷油器磨损)会进一步加剧

动力性能下降与燃油消耗增加的问题。

2.2 污染物排放控制难度大

船用柴油机燃烧过程中产生的污染物主要包括NO_x、颗粒物(PM)、碳氢化合物(HC)和二氧化碳(CO₂)。其中,NO_x的生成与燃烧温度密切相关,高温富氧环境会促进NO_x的大量生成;而PM则主要来源于燃油不完全燃烧产生的碳烟颗粒。传统柴油机通过调整燃油喷射timing或增加EGR(废气再循环)率来降低NO_x排放时,往往会导致PM排放升高,形成“NO_x-PM trade-off”矛盾,难以同时满足IMO Tier III及以上排放标准。此外,CO₂作为温室气体,其排放量与燃油消耗直接相关,如何在降低燃油消耗的同时控制CO₂排放,也是船用柴油机面临的重要挑战。

2.3 燃烧过程稳定性差

船舶在航行过程中,会受到海浪、海风等复杂海况的影响,导致柴油机的负载频繁波动。负载波动会引起柴油机进气压力、燃油喷射压力等参数的不稳定,进而影响燃烧过程的均匀性和稳定性。当负载突然增加时,若燃油喷射量未能及时调整,会导致燃烧不完全,产生大量PM;若负载突然降低,燃烧温度下降,可能出现失火或燃烧延迟现象,不仅影响动力输出,还会加剧零部件的冲击磨损,降低柴油机的使用寿命。

3 船用柴油机性能提升与燃烧优化的关键技术

3.1 燃油喷射系统优化

燃油喷射系统是影响船用柴油机燃烧过程的核心部件,其喷射压力、喷射timing、喷射速率和喷雾质量直接决定了燃油与空气的混合效果和燃烧效率。近年来,高压共轨燃油喷射系统凭借其灵活的喷射控制能力,成为船用柴油机燃油系统优化的主要方向。

3.1.1 高压化与多次喷射技术

提高燃油喷射压力可增强燃油的雾化效果,减小油滴直径,促进燃油与空气的快速混合,从而提高燃烧效率,降低PM排放。当前,船用柴油机高压共轨系统的喷射压力已从传统的160MPa提升至250-300MPa,部分高端机型甚至达到350MPa。同时,多次喷射技术(如预喷射、主喷射、后喷射)的应用,可有效改善燃烧过程:预喷射可提前形成少量可燃混合气,降低主喷射时的燃烧速率,减少燃烧冲击和NO_x生成;后喷射则可在主燃烧结束后补充少量燃油,促进缸内未完全燃烧物质的二次燃烧,降低PM和HC排放^[2]。

3.1.2 喷油器结构优化

喷油器的喷孔数量、喷孔直径、喷雾锥角等结构参数对喷雾分布和空气混合效果具有重要影响。通过数值模拟与试验验证相结合的方法,优化喷油器结构,可实现喷雾在缸内的均匀分布,避免局部富油或贫油区域的形成。例如,采用多孔喷油器(如8-12孔)替代传统的4-6孔喷油器,可增加喷雾与空气的接触面积,缩短混合时间;减小喷孔直径(从0.3mm减小至0.2mm以下)可进一步增强雾化效果,但需同时提高喷射压力以避免喷孔堵塞。此外,采用可变喷雾锥角喷油器,可根据柴油机不同工况调整喷雾锥角,在低负载时增大锥角以扩大喷雾覆盖范围,在高负载时减小锥角以保证喷雾穿透深度,从而实现全工况下的燃烧优化^[1]。

3.2 进气系统改进

进气系统的性能直接影响柴油机缸内的空气量和空气流动状态,充足的空气量和合理的气流运动是实现高效燃烧的前提。船用柴油机进气系统的优化主要包括进气道结构改进、增压技术升级以及进气预热控制三个方面。

3.2.1 进气道结构优化

传统船用柴油机的进气道多采用螺旋气道或切向气道,其主要作用是在进气过程中产生涡流,促进燃油与空气的混合。然而,传统气道的涡流强度难以根据工况进行调整,在高负载时可能因涡流过强导致进气阻力增加,影响进气量;在低负载时则可能因涡流过弱导致混合不均。近年来,可变涡流进气道技术的发展为进气系统优化提供了新的方向。该技术通过在进气道内设置可调节的导流板或阀门,根据柴油机负载变化调整涡流强度:在低负载时增大涡流强度,增强燃油与空气的混合;在高负载时减小涡流强度,降低进气阻力,增加进气量。试验表明,采用可变涡流进气道的船用柴油机,在全工况范围内的燃油消耗率降低了3%-5%,NO_x排放降低了15%-20%^[3]。

3.2.2 废气涡轮增压技术升级

废气涡轮增压技术通过利用柴油机排气的能量驱动涡轮旋转,带动压气机压缩进气,提高缸内进气压力和空气密度,从而增加进气量,提升柴油机的功率输出和燃烧效率。当前,船用柴油机涡轮增压技术正朝着高压比、高效率、智能化方向发展。一方面,高效涡轮增压器的研发与应用成为重点。通过优化涡轮和压气机的叶片型线(如采用前倾后弯叶片)、提高涡轮进口温度耐受能力(采用耐高温合金材料),可显著提升增压器的绝热效率。例如,某船用柴油机采用高效径流式涡轮增压器后,增压器绝热效率从70%提升至85%,柴油机功率输出增加了15%,燃油消耗率降低了4%。另一方面,两级涡轮增压技术和可变截面涡轮增压器(VGT)的应用,进一步拓展了增压器的高效工作范围。两级涡轮增压技术通过低压级和高压级涡轮的串联,实现更高的增压比,满足高功率柴油机的进气需求;VGT则通过调整涡轮喷嘴环的截面积,根据柴油机工况变化实时调整增压压力,在低负载时提高增压压力,避免燃烧不完全,在高负载时降低增压压力,防止缸内压力过高。

3.3 燃烧过程数值模拟与控制

随着计算机技术和计算流体力学(CFD)的发展,燃烧过程数值模拟已成为船用柴油机燃烧优化的重要工具。通过建立柴油机缸内三维CFD模型,可对燃烧过程中的流场、温度场、浓度场进行动态模拟,分析不同参数(如燃油喷射timing、进气涡流强度、压缩比)对燃烧性能的影响,从而为燃烧系统优化提供理论依据,减少试验成本和周期。

3.3.1 燃烧模型的优化

当前,船用柴油机燃烧数值模拟常用的模型包括涡破碎模型(EBU)、简化化学反应机理模型和详细化学反应机理模型。其中,简化化学反应机理模型(如Skeletal机理)在计算精度和计算效率之间取得了较好的平衡,成为工程应用中的主流模型。通过对简化化学反应机理的修正,可提高模型对NO_x、PM生成过程的预测精度。例如,某研究团队基于CHEMKIN软件,建立了适用于船用柴油机的简化化学反应机理(包含58种物质和325个反应),并通过试验验证,该模型对NO_x排放的预测误差控制在10%以内,为燃烧优化提供了可靠的模拟工具。

3.3.2 闭环燃烧控制技术

传统船用柴油机的燃烧控制多采用开环控制方式,即根据预设的工况参数(如转速、负载)确定燃油喷射量和喷射timing,难以适应工况波动和零部件磨损带来的参数变化。闭环燃烧控制技术通过在柴油机缸内安装压力传感器,实时监测缸内燃烧压力,计算燃烧放热率、

最高燃烧压力和燃烧重心 (CA50) 等关键燃烧参数, 并与目标参数进行对比, 通过电控单元 (ECU) 实时调整燃油喷射量、喷射timing和进气参数, 实现燃烧过程的精准控制。例如, 某船用柴油机采用闭环燃烧控制技术后, 在负载波动 $\pm 20\%$ 的范围内, CA50的波动范围从 $\pm 3^\circ\text{CA}$ 减小至 $\pm 1^\circ\text{CA}$, 燃烧稳定性显著提升, NO_x排放波动控制在5%以内^[5]。

3.4 替代燃料应用

替代燃料的应用不仅可以降低船用柴油机对传统化石燃料的依赖, 还能有效减少污染物排放, 是实现船舶绿色动力的重要途径。当前, 适用于船用柴油机的替代燃料主要包括液化天然气 (LNG)、生物柴油、甲醇和氨燃料等。

3.4.1 LNG燃料

LNG具有低碳、清洁的特点, 其燃烧过程中NO_x排放比传统柴油降低80%以上, PM排放降低90%以上, CO₂排放降低20%-30%, 是目前船用柴油机替代燃料中应用最成熟的品种。LNG船用柴油机的燃烧优化主要通过调整燃料喷射系统和燃烧系统实现: 由于LNG的挥发性强、自燃温度高, 需采用高压直喷技术或引燃柴油喷射技术 (即通过少量柴油引燃LNG), 确保燃烧稳定。例如, 某船用LNG柴油机采用高压直喷技术, 喷射压力达到20MPa, 结合优化的燃烧室结构, 实现了与传统柴油机相当的动力性能, 同时满足IMO Tier III排放标准^[4]。

3.4.2 氨燃料

氨燃料作为一种零碳燃料 (燃烧产物仅为N₂和H₂O), 近年来受到广泛关注。然而, 氨的自燃温度高 (约650°C)、燃烧速度慢, 直接在传统柴油机中燃烧易出现燃烧延迟和燃烧不完全的问题。为解决这一问题, 研究人员通过采用预混燃烧、高温点火 (如采用等离子点火或电热塞点火) 以及与柴油混合燃烧等方式, 优化氨燃料的燃烧过程。例如, 某研究团队开发的氨-柴油混

合燃烧船用柴油机, 氨的替代率达到70%, 通过优化混合比例和点火timing, 实现了稳定燃烧, NO_x排放控制在IMO Tier III限值以下, CO₂排放降低60%以上。

4 结束语

船用柴油机的性能提升与燃烧优化是一项系统工程, 涉及燃油喷射、进气、燃烧控制、替代燃料等多个技术领域。当前, 随着环保法规的日益严苛和航运业绿色转型的加速, 单一技术已难以满足柴油机综合性能提升的需求, 多技术协同应用 (如高压共轨+VGT+闭环燃烧控制+LNG燃料) 成为未来发展的必然趋势。同时, 智能化技术 (如基于大数据的故障诊断与性能优化、自适应燃烧控制) 和新型材料 (如耐高温陶瓷材料、耐磨涂层材料) 的应用, 将进一步推动船用柴油机向高效化、低排放化、长寿命化方向发展。未来的研究应重点关注以下方向: 一是进一步优化燃烧过程数值模拟模型, 提高对复杂燃烧现象 (如氨燃料燃烧、多燃料混合燃烧) 的预测精度; 二是开发适应多燃料燃烧的柔性动力系统, 实现不同燃料之间的无缝切换; 三是加强柴油机与船舶动力系统的整体匹配优化, 提升船舶的综合能效。通过持续的技术创新与突破, 船用柴油机将为全球航运业的绿色可持续发展提供更加强有力的动力支撑。

参考文献

- [1] 王建国, 张卫正。船用柴油机燃烧优化技术研究进展[J]. 内燃机学报, 2022, 40(3): 279-288.
- [2] 刘忠长, 韩永强, 张雷。高压共轨燃油系统对船用柴油机性能影响的试验研究[J]. 船舶工程, 2021, 43(8): 102-107.
- [3] 李明, 王福军, 赵军。船用柴油机可变涡流进气道的数值模拟与优化[J]. 热能动力工程, 2020, 35(11): 56-62.
- [4] 张宏亮, 陈林根, 孙丰瑞。船用LNG柴油机燃烧特性与排放控制技术[J]. 中国航海, 2019, 42(2): 1-6.
- [5] 王忠, 李瑞娜, 许广举。船用柴油机闭环燃烧控制技术的发展与应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 1-10.