DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.01.006

船用中高速柴油机燃油喷射系统 自主研发现状与发展

涂天华^{1,2}, 肖朝南^{1,2}, 徐伟¹

(1. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402162;
2. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 重庆 402162)

摘要: 介绍国外船用中高速柴油机燃油喷射系统的发展历程。针对国内船用中高速柴油机燃油喷射系统技术, 分阶段展开详细介绍。展望未来船用中高速柴油机燃油喷射系统技术, 指出未来技术发展的重点主要聚焦提高喷射压力、优化喷油规律以及研发新燃料喷射系统。

关键词: 中高速柴油机; 燃油喷射系统; 自主研发

中图分类号: TK423.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)01-0031-04

Status and Development of Independent Research and Development of Fuel Injection System for Marine Medium and High Speed Diesel Engines

TU Tianhua^{1,2}, XIAO Chaonan^{1,2}, XU Wei¹

(1. Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing 402162, China; 2. National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Chongqing 402162, China)

Abstract: The development of fuel injection system for marine medium and high speed diesel engines abroad is introduced. The fuel injection system technology of domestic marine medium and high speed diesel engines is introduced in detail in stages. Looking ahead to the technologies of fuel injection systems of marine medium and high speed diesel engines in the future, it is pointed out that the focus of the future technology development is mainly on improving the injection pressure, optimizing the injection law and developing injection systems for new types of fuels.

Key words: medium and high speed diesel engine; fuel injection system; independent research and development

0 引言

柴油机具有良好的经济性、动力性和耐久性, 在车辆、电站、船舶等领域得到广泛的应用^[1]。随着科学技术的不断进步, 柴油机燃油喷射系统经历了多次技术变革: 早期的柴油机采用7 MPa的压缩空气将燃油吹入气缸; 20世纪20年代, 以德

国BOSCH为代表的机械式燃油系统迅速取代空气喷射系统; 20世纪70年代, 随着电子、传感器及自动控制技术的发展, 电控燃油系统逐渐兴起并发展起来^[2]。高压共轨系统已在欧洲知名品牌的中高速船用柴油机上得到广泛应用, 国内相关厂家也针对该系统开展了研发工作, 并成功实现应用。

收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心资助项目

1 国外中高速柴油机燃油喷射系统发展历程

与车用柴油机相比较,船用柴油机具有以下特点:功率大、转速低、循环喷油量大、安全性要求高、兼容轻油和重油^[3-5]等。船用中高速柴油机主要用于内河航运、近海航运、江海联运等领域的工程船舶以及各类舰船。中速柴油机生产厂家主要有Wärtsilä、MAN B&W、Caterpillar、SEMT、DAIHATSU、YANMAR等,其中Wärtsilä和MAN B&W两大公司占据75%以上的主机市场份额。高速机则以MTU、Caterpillar、Pielstick、Deutz等公司为主,特别是德国MTU公司开发的2000系列、4000系列以及8000系列产品具有较高的技术水平。

自20世纪20年代机械式燃油系统取代空气喷射系统以来,机械式燃油系统的结构和性能一直在不断优化提升。当前船用中高速柴油机机械式燃油系统的喷射压力已达到220 MPa,因其在成本及重油适应性等方面的优势仍在船用中高速柴油机配套方面占有一席之地。随着20世纪70年代电子与传感器技术的显著进步,以及能源危机和排放法规的日益严格,电控燃油系统逐渐发展起来并取得巨大进步,特别是电控高压共轨技术已逐渐成为21世纪船用中高速柴油机燃油系统的主流技术。世界知名的船用中高速机企业与燃油系统厂家纷纷推出船用中高速机高压共轨系统系列产品,并不断更新技术。MTU和L'orange合作研发,于1997年推出第一代120 MPa级船用中高速柴油机共轨系统,并应用于MTU 4000系列柴油机;随后又连续推出第二代140 MPa级船用中高速柴油机共轨系统和第三代180 MPa级船用中高速柴油机高压共轨系统。Wärtsilä和L'orange合作在2003年推出首套配备150 MPa级重油共轨系统的W32CR柴油机。MAN公司在2003年推出配备160 MPa级重油共轨系统的32/40CR柴油机。BOSCH公司则推出220 MPa级船用中高速柴油机共轨系统MCRS系列产品。近年来,采用高压共轨系统的船用中高速柴油机的品种、数量以及市场占有率快速增长。

当前,国外知名厂商已建立完善的船用中高速柴油机燃油系统设计开发技术体系(包括设计流程、设计规范、设计软件)和试验验证体系,并通过大量检测和试验验证,形成数据量丰富且有效的数据库,储备了大量先进的燃油系统设计、检测、制造及试验技术,研制的船用中高速柴油

机燃油系统产品技术成熟度高,已全面实现商品化应用。

2 国内船用中高速柴油机燃油喷射系统发展历程

我国对船用中高速机燃油喷射系统的研究起步较晚,从20世纪70年代才开始船用中高速机燃油系统研究研制。我国船用中高速机燃油系统经历了引进测绘、改进提升、再引进后消化吸收和自主创新的过程。

20世纪70—80年代,面对国内工业基础薄弱、门类不全、技术条件落后的国情,国内船用中高速柴油机燃油系统的研究工作从测绘引进的机械式燃油系统开始,经过近10年的研究与积累,基本掌握了70 MPa级船用中高速柴油机机械式燃油系统的关键设计方法,并成功研制了301、350等船用中高速柴油机机械式燃油系统。

20世纪80—90年代,早期引进的机械式燃油系统已渐渐不能满足船用中高速柴油机性能和可靠性提升的要求。为此,国内船用柴油机燃油系统企业基于前期逆向设计分析所掌握的设计方法开展了船用中高速柴油机燃油系统的改进设计。通过研究,成功将燃油系统喷射压力从原70 MPa级提升至100 MPa级,开发了C11、G300、320等系列产品,实现批量装船应用。与同期国外知名企业的船用中高速机燃油系统技术相比,国内船用中高速柴油机燃油系统虽然在设计和生产方面初具规模,但总体水平仍然不高。

20世纪90年代—20世纪末,随着国内经济的进一步开放,市场竞争愈加激烈。为了在世界范围内保持竞争力,国内船用中高速柴油机燃油系统厂商大规模引进技术水平更加先进的燃油系统产品,通过对引进技术进行消化吸收,掌握了国外先进技术,同时补充和更新了一批关键工艺装备,积累了大量先进柴油机燃油系统的制造经验。

进入21世纪以后,为了打破国外在船用中高速柴油机燃油系统的技术垄断,降低被国外“卡脖子”的风险,增强市场竞争中的话语权,国内燃油系统厂商开展了高性能机械式燃油系统和电控燃油系统的自主创新设计研究,并取得了显著的成效。

2.1 船用中高速柴油机机械式燃油系统

2000年—2005年,国内开始进行大功率柴油机机械式燃油系统自主设计,基本突破了燃油系统高压油泵和喷油器总体结构设计、关键参数匹

配设计等关键技术，初步掌握了大功率柴油机机械式燃油系统正向设计方法，在此基础上成功研制了140 MPa级HP2100、HP2200等燃油系统，并在济柴190等主机上实现应用。喷射压力的提升有效提升了柴油机的性能，降低了油耗。

2006年—2010年，国内船用大功率机械式燃油系统的设计研究进一步深化，突破了传动部件等核心零部件强化、喷射特性仿真分析、高压密封设计等关键技术，建立了完善的设计开发技术体系和试验体系，全面具备船用中高速柴油机机械式燃油系统的自主开发能力。应用建立的设计开发技术体系，有效提升大功率燃油系统产品的开发效率和质量，降低开发成本。应用研究成果，开发了喷射压力达160 MPa级的HP5200、HP7100、HP7300、HP7400等多个型号的机械式燃油系统产品，并在DN210、DN330、G26、G32等主机上全面应用。

2011年—2016年，国内在零部件综合性能优化、零部件可靠性优化以及高压密封技术等领域再度实现突破，掌握了180 MPa级燃油系统研发技术，开发了喷射压力达到180 MPa级的燃油系统产品，并应用于M25、M20等国内外船用中高速柴油机。从整体上看，通过持续创新，国内大功率柴油机机械式燃油系统的关键性能指标和技术成熟度基本达到国外先进水平，并在国内外大功率船用柴油机上得到了广泛应用。

2.2 船用中高速机电控燃油系统

虽然国内船用中高速柴油机电控燃油系统的研发始于21世纪初，但由于在技术成熟度、产品一次性成本和维护成本等方面与机械式燃油系统相比存在竞争劣势，因此国内船用中高速柴油机市场几乎没有电控燃油系统应用的需求，船用中高速柴油机电控燃油系统产品研发进展缓慢，直至近几年由于来自排放法规的压力才有所改善。国内船用中高速柴油机电控燃油系统的研发主要有电控单体泵系统和高压共轨系统两种技术路线。

(1) 电控单体泵系统

2006年—2010年，基本突破了电控单体泵总体设计技术、旁通阀设计技术、高速电磁阀设计技术等关键技术，并建立了电控单体泵系统设计开发技术体系，初步形成了电控单体泵自主设计开发能力，研发了160 MPa级电控单体泵样件，并通过平台和配机试验验证。

2011年—2016年，国内电控单体泵的性能和

可靠性得到进一步提升，突破了超高压旁通阀设计技术、偶件超精密加工技术等关键技术。在随后的几年，应用该技术陆续研发了180 MPa级ZC200、CW200、CW250、280等多个型号，并在潍柴、淄柴等厂家的船用、机车等柴油机上得到应用。到目前为止，国内电控单体泵系统已在船舶柴油机上得到小批量应用，并正在进一步推广。

(2) 高压共轨系统

2006年—2010年，初步突破单体式电控高压油泵总体设计、进油计量阀设计、电控喷油器设计等关键技术，初步形成船用中高速柴油机高压共轨系统设计体系，研制了160 MPa级单体式高压共轨系统样件，并在190柴油机上进行试验验证。

2011年—2016年，国内高压共轨系统得到进一步提升，相继突破了组合式电控高压油泵设计、进油比例阀设计、无泄漏电控喷油器设计等多项关键技术，研制了180 MPa级高压共轨系统产品，并在620、1624柴油机上进行了试验验证。在随后的几年，陆续研发了多型高压共轨系统产品，并在270、175、340、280等船用中高速柴油机上实现应用。目前，国内自主研发的船用大功率柴油机高压共轨系统正在推广应用。

3 船用中高速柴油机燃油喷射系统发展趋势

燃油喷射系统电控化以及新燃料喷射系统是未来船用中高速柴油机燃油喷射系统技术发展的方向。未来船用中高速柴油机燃油喷射系统发展主要集中在以下几方面。

3.1 提高喷射压力

高喷射压力是柴油机的强化指标之一。提高喷射压力不仅可以改善燃油雾化特性^[6-7]，还可以缩短燃油喷射持续期，在有限的时间内喷入更多的燃油，提高船用中高速柴油机的输出功率。喷射压力提高后，喷射能量的提高可使油粒破碎得更加均匀、更加细小，从而增加与空气的接触面积，有利于混合气的形成，实现更加清洁和高效的燃烧。当然，喷射压力的提高也会带来诸如密封可靠性、机械负荷增加、冲击磨损加剧等技术问题，这些均须在未来加以解决。世界领先水平的船用中高速柴油机燃油喷射系统最高喷射压力已达到250~300 MPa^[8-9]，与之相比我国尚存在一定的差距。目前，我国正在研究喷射压力为220~250 MPa的中高速柴油机燃油系统。

3.2 优化喷油规律

当前,国内船用中高速机燃油系统均采用单次喷射,其喷油规律几乎不可变。不同的喷油规律如靴形^[10]、斜坡形、三角形^[10]、分段形等和喷射次数会对柴油机的燃烧特性和排放特性产生重要影响。应根据船用中高速柴油机不同的运行工况,匹配最理想的喷射规律和喷油次数。据此,须在现有基础上进一步研究船用中高速柴油机燃油系统的可变喷油技术、多次喷射技术^[5,8]等。

3.3 研发新燃料喷射系统

随着国内外的排放法规日益严格,减碳已成为船用中高速机未来的技术发展方向,因此有必要掌握低碳零碳燃料喷射系统关键技术。根据甲醇、液氨及液氢的化学成分、理化性能等与传统柴油的差异,未来几年将重点研究以下4个方面:

(1) 甲醇、液氨、液氢燃料的纯度及温度对喷射系统典型材料的腐蚀、磨损的机理和演化规律。

(2) 关键运动件在腐蚀、低黏度特性条件下的运动特性及摩擦磨损特性。

(3) 低黏度新燃料在高压(预计60~160 MPa)喷射条件下的喷射规律及雾化特性。

(4) 新型燃料喷射系统总体及安全性设计、零部件制造以及试验验证技术。

通过研究,掌握甲醇、液氨、液氢高压喷射系统自主设计开发技术,研制甲醇、液氨及液氢燃料喷射系统产品,满足未来低碳零碳船用中高速机的使用需求。

4 结论

纵观船用中高速柴油机燃油喷射系统的技术发展历程,机械式燃油喷射系统已渐渐不能满足未来船用中高速柴油机的发展需要,电控燃油喷射系统已成为船用中高速柴油机燃油喷射系统的发展方向。

针对国内外中远期“双碳”排放目标,结合

未来船用中高速机低碳零碳的发展趋势,有必要研发甲醇、液氨及液氢等燃料喷射技术,掌握船用中高速机甲醇、液氨及液氢等燃料喷射系统关键技术,开发具有自主知识产权的低碳零碳燃料喷射系统产品,以提高我国船用中高速机喷射系统的自主开发能力和市场竞争力。

参考文献

- [1] 周磊,杨昆,聂涛,等.面向可调喷油速率的超高压共轨系统建模及仿真分析[J].国防科技大学学报,2022,44(2):179-187.
- [2] 陈亮,高献坤,王导南.柴油机电子燃油喷射系统的发展及研究现状[J].内燃机,2008(2):1-4,46.
- [3] BANCK A, SIXEL E, RICKERT C. Dual fuel engine optimized for marine applications [C]//CIMAC Congress 2016. Helsinki: CIMAC, 2016: Paper No. 47.
- [4] ROGERS B, KRATKY M, HRACH J, et al. Introducing a completely new medium speed engine [J]//CIMAC Congress 2016. Helsinki: CIMAC, 2016: Paper No. 112.
- [5] STENGEL B, NAJAR I, PINKERT F, et al. Potential of pilot and post injection strategies in large diesel engines using maritime fuels [C]//CIMAC Congress 2019. Vancouver: CIMAC, 2019: Paper No. 296.
- [6] 常远,欧阳光耀,杨昆.超高压共轨系统燃油喷射控制[J].海军工程大学学报,2015(5):39-43.
- [7] 袁志远,崔明利,李雪松,等.缸内直喷发动机燃油喷射压力对闪沸喷雾特性的影响研究[J].车用发动机,2020(5):11-14.
- [8] 安士杰,常汉宝,徐洪军.共轨系统多次喷射对船用柴油机性能改进的试验研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011,35(5):1005-1009.
- [9] WANG Y J, WANG Q P, YANG J G, et al. Simulation characteristics analysis of ultra-high-pressure common rail fuel injection system for marine medium speed diesel engine [C]//CIMAC Congress 2019. Vancouver: CIMAC, 2019: Paper No. 289.
- [10] 高朝辉.高压共轨柴油机二次预喷射的应用[J].内燃机,2013(3):28-30.