

喷油器结构和喷射压力对柴油机性能的影响

郑昊鹏¹, 赵培山^{2*}, 杨加成², 韩方翠², 孙成磊², 唐长明², 陆士程²

1. 中国船舶集团有限公司第七〇八研究所舰船综合保障事业部, 山东 青岛 266000;

2. 中国石油集团济柴动力有限公司, 山东 济南 250306

摘要:为实现喷油系统与柴油机的最佳匹配,提高柴油机的排放性、经济性和动力性,基于某柴油机喷油器的定型试验,通过改变喷油器的喷射压力和喷孔结构,试验研究喷油器的喷射压力和喷孔结构对柴油机性能的影响。结果表明:喷油器的喷油压力和喷孔结构对燃油的喷射方式和雾化特性具有决定性影响;在柴油机高转速区间,提高喷油器的喷射压力可以细化并改善燃油的雾化形态,从而提高燃烧效率并有效降低柴油机的燃油消耗率;在低转速区间,相同喷射压力下,使用喷孔直径较小的喷油器时,柴油机燃油消耗率相对较低,说明该工况喷油器的结构参数对燃油消耗率的影响更大。

关键词:船用增压柴油机;喷油器;喷射压力;结构参数;选型试验

中图分类号:TK421.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)06-0043-06

引用格式:郑昊鹏,赵培山,杨加成,等. 喷油器结构和喷射压力对柴油机性能的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(6):43-48.

ZHENG Haopeng, ZHAO Peishan, YANG Jiacheng, et al. Influence of injector configuration and injection pressure on a diesel engine performance [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(6):43-48.

0 引言

目前船舶动力市场中绝大多数主机采用柴油机作为动力来源,这对柴油机的动力性、经济性和可靠性提出了较高要求。柴油机是精密且复杂的多系统设备,涵盖增压系统、燃油系统、进排气系统等多个子系统,各系统间良好的协同工作是提高柴油机综合运行性能、实现其最大能效的关键。作为柴油机动力能量的供给系统,燃油系统各零部件的结构和性能对柴油机的可靠性、经济性具有重要影响^[1-2]。

喷油器是柴油机燃油系统的重要总成件之一,其结构对柴油机的排放性、经济性和动力性尤为重要^[3-5]。喷油器喷孔的直径和数量影响燃油喷雾质量和油气混合质量,从而影响柴油机的燃油消耗率、颗粒物和 NO_x 排放^[6-7]。Hu 等^[8]、楚家旺等^[9]通过数值模型方法,探究了喷油器油道的空化现象,发现喷油器内部发生空化现象时,流体的流动加强,加速燃烧的裂化,可以改善燃油的雾化质量。朱海超^[10]对喷油器的喷射压力、喷孔入口圆角半径、喷孔直径进行了研究,结果表明:喷射压力和喷雾锥角增大,有利于缸内混合气的形成;增大喷孔入口圆角半径,喷雾锥角随之减小,喷孔直径影响喷孔喷雾液滴的细度。郁晓健^[11]通过 MATLAB 程序计算了喷油器的宏观特性参数,认为增大喷油压力可以增大燃油喷射速率,单次燃油喷射量随之增大,增加单直孔喷孔直径对增大单次喷射量亦有促进作用。马天师等^[12]在研究柴油机冒黑烟和性能指标恶化的问题时发现,喷油器针阀体结构的改进对喷油器喷雾特性、喷油流量和发动机性能优化具有重要作用。罗福强等^[13]通过自行搭建的多孔喷油规律测试系统,探究了喷油

收稿日期:2025-10-01

第一作者简介:郑昊鹏(2000—),男,山东青岛人,主要研究方向为舰船保障, E-mail:1368767280@163.com。

* 通信作者简介:赵培山(1980—),男,山东邹城人,工程硕士,高级工程师,主要研究方向为发动机性能优化及设计, E-mail:peishan_zhao@cnpc.com.cn。

压力、喷油脉宽以及喷孔直径对喷油规律的影响,发现随着喷油脉宽增加,喷油速率和流量系数在喷油初期发展趋势保持一致,喷油始点不变,喷油持续期增加;随着喷油压力增大,喷油速率和流量系数增大;随着喷孔直径增大,喷孔的喷油速率与流量系数增大。周苗^[14]利用三维计算流体动力学软件 AVL Fire8.5 对缸内的气流运动过程、喷雾过程和燃烧过程进行了数值模拟,仿真结果表明:在喷孔总流通面积基本相等的条件下,增加喷孔数可以改善燃油的雾化质量,但喷孔数过多,容易导致缸内温度偏高,增加 NO_x 和碳烟排放。

借鉴喷油器相关研究结论,结合某船用柴油机喷油器选型试验,对该机型的喷油器部件结构和特性进行优化调整,使燃油系统的特性更匹配柴油机各系统,从而优化缸内燃烧,提高柴油机的动力性、可靠性和经济性,进而提高船用柴油机的工况适应性。

1 试验准备

1.1 试验样机及常用工况

某船用 8 缸、直列、四冲程、直喷、增压中冷柴油机主要技术参数如表 1 所示。在保持其他系统不变的基础上,对该机型的燃油系统在船用主机常用工况下的特性进行优化。

表 1 发动机主要技术参数

排量/L	额定转速 $n_e/(r \cdot \min^{-1})$	额定功率 P_e/kW	平均有效压力/MPa	燃油消耗率 ^① /[g·(kW·h) ⁻¹]
69	1 200	1 400	2.0	198

①为发动机常用工况下的燃油消耗率,其他工况下可上浮 5%。

为确定船用主机常用工况,对船用主机市场用户进行走访调研,统计船用主机的各个运行工况及其需求,如表 2 所示。

表 2 船用主机工况及其需求

船机工况	工况需求		备注
	功率	转速	
普通航行	(60%~70%) P_e	$\approx 85\%n_e$	无需求航行
目标航行	(80%~90%) P_e	$\approx (95\% \sim 100\%)n_e$	满载货物、遇风浪或追击目标等
捕捞起网	(90%~100%) P_e	$\approx 50\%n_e$	大转矩

1.2 喷油器试验配置方案

研究的主要目标为:优化船用柴油机在常用工况下的缸内燃烧状况,进而降低柴油机的燃油消耗率,减少排放。研究工作基于燃油系统的特性进行优化,选取燃油系统的核心部件喷油器进行结构和性能改进^[15]。

喷油器技术参数优化从两个方面着手:一是喷油器喷孔结构相同,采用不同的喷射压力;二是喷射压力相同,在喷油量相同的条件下,设计不同喷孔结构。

喷油器喷孔结构参数的设计基于两项假设条件:一是忽略液力延迟对喷油时刻的影响,二是不考虑油束发散角的变化。依据上述假设,完成试验用喷油器的喷孔设计与选型。

活塞压缩行程中,燃料通过喷油器喷入燃烧室,喷射角度为 135°~150°时不同喷油时刻燃烧室燃料喷射状态如图 1 所示。喷油提前角过大或过小都影响燃料在缸内的燃烧状态,进而影响柴油机的性能,应选择合适的喷油器喷射角度,保证喷射的大部分燃料喷射到燃烧室内。同时通过调整喷油器的喷射压力,控制燃油的雾化。

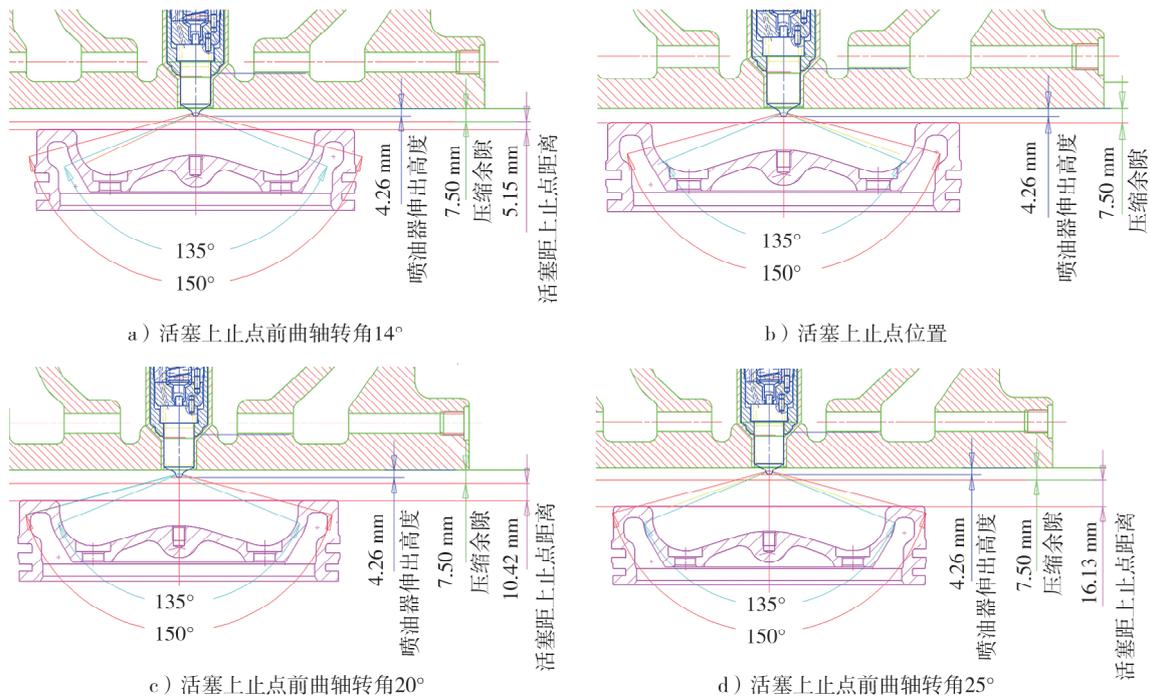


图1 喷油器喷孔角度为 135°~150°时不同喷油时刻的燃烧室燃料喷射状态

该柴油机采用机械单体燃油泵,单体泵柱塞直径为 20 mm;增压器的转速限值为 54 000 r/min,设计 4 种喷油器方案,各方案下的喷油器规格参数如表 3 所示。由表 3 可知:方案 1、2 的喷孔数和喷孔直径相同,但喷射压力不同;方案 3、4 的喷射压力相同,喷孔数和喷孔直径不同,方案 3 的喷孔总面积为 1.020 7 mm²,方案 4 的喷孔总面积为 1.005 3 mm²。

表 3 不同配置方案下喷油器规格参数

方案	喷射夹角/(°)	喷孔数	喷孔直径/mm	喷射压力/MPa
1	150	8	0.35	28
2	150	8	0.35	32
3	150	9	0.38	30
4	150	8	0.40	30

1.3 试验工况

该柴油机主要用作船舶的动力推进装置,试验过程采用船用主机的推进特性试验方案,试验工况如表 4 所示。

表 4 试验工况

工况	转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW	工况	转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW
1	756	350	4	1 159	1 260
2	952	700	5	1 200	1 400
3	1 090	1 050	6	1 238	1 540

2 试验结果及分析

柴油机的动力性、经济性和可靠性是船机用户的主要需求。试验过程中,通过对比反映柴油机主要

技术性能的燃油消耗率、爆发压力、排温 3 个参数,以此评价和确定该型柴油机喷油器的技术规格。4 种方案喷油器在不同工况下柴油机燃油消耗率、最大爆发压力、排温试验结果如表 5 所示。

表 5 试验结果

工况	燃油消耗率/[g·(kW·h) ⁻¹]				最大爆发压力/MPa				排温/°C			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1	205.5	208.5	211.6	209.7	8.6	8.5	8.4	8.3	454	455	470	464
2	200.0	200.3	203.1	201.5	11.6	11.6	11.9	12.0	515	515	519	511
3	198.0	199.3	198.7	199.1	14.4	14.4	15.0	15.1	528	524	533	521
4	204.0	202.0	201.9	202.0	15.5	15.5	16.2	16.2	561	559	562	551
5	209.0	207.1	206.7	206.0	15.6	15.6	16.4	16.6	610	608	606	593
6	214.0	213.4	212.1	213.8	15.8	16.0	16.7	16.7	669	663	665	663

2.1 燃油消耗率对比分析

不同方案下燃油消耗率随转速的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知:1) 工况 4~6, 方案 2 柴油机的燃油消耗率低于方案 1, 说明当转速较高时, 结构相同的喷油器喷射压力越大, 喷油器雾化性能更好, 燃料燃烧更充分, 此时缸内燃烧状态更优, 燃油消耗率降低; 工况 1~3, 方案 2 柴油机的燃油消耗率高于方案 1, 表明在低转速工况, 提高喷射压力不能与柴油机运行工况较好地匹配, 或因喷射压力升高导致机械效率降低。2) 相同喷射压力时, 工况 1、2, 方案 4 的燃油消耗率低于方案 3; 工况 3、4, 燃油喷油孔总面积大的喷油器, 燃油消耗率相对较高, 柴油机高转速区域, 多孔且单位孔径小的喷油器略显优势, 但不明显, 两者的燃油消耗率差别不大。

柴油机在整个运行工况中, 当转速约为 1 090 r/min 时, 燃油消耗率最小, 约为 198 g/(kW·h); 柴油机低转速区间, 方案 1 的燃油消耗率最小, 更适合船用主机实际使用工况; 柴油机高转速区间, 方案 3 性能更优, 说明柴油机在高转速运行时, 燃油需求量同时增大, 面积小、喷孔多的喷油器结构燃油雾化性能更好, 缸内燃烧更充分, 更适合于柴油机的高转速运行。

2.2 缸内燃烧爆发压力

不同方案下爆发压力随功率的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知:1) 柴油机缸内爆发压力随柴油机功率增大而升高;2) 柴油机在整个工况的运行过程中, 方案 1、2 的气缸爆发压力明显小于方案 3、4, 这是因为喷油器喷油压力升高, 喷孔结构细化, 燃油雾化性能增强, 燃烧更充分, 柴油机爆发压力更大;3) 柴油机满负荷到超负荷过程中, 方案 2 爆压有所提升, 说明相同喷油器喷嘴结构, 增大喷油器压力能更好地满足高负荷喷射需要, 燃烧状态较好。

2.3 柴油机排温

不同方案下排温随功率的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知:1) 随柴油机功率负荷增大, 排温不断升高;2) 在柴油机功率小于 50%P_e 时, 提高喷

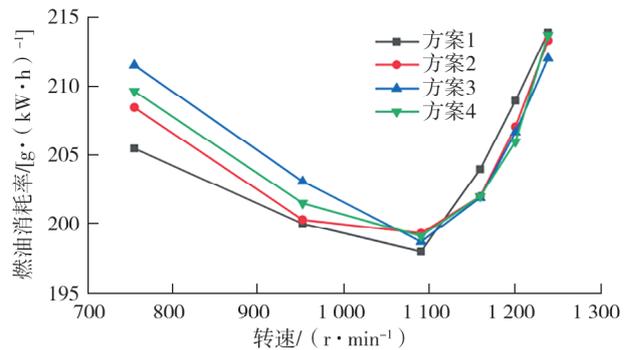


图 2 燃油消耗率随转速的变化曲线

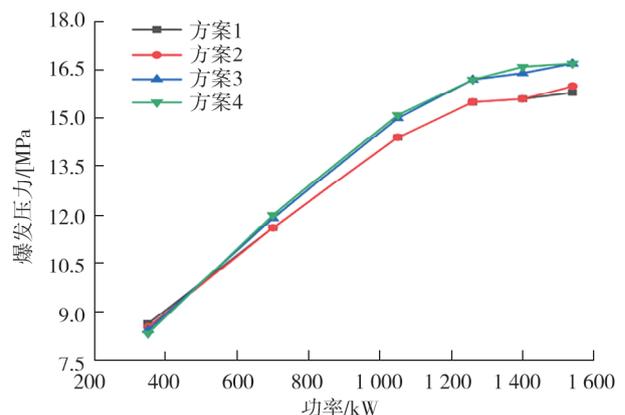


图 3 爆发压力随功率的变化曲线

油器的喷射压力,喷油器的雾化性能基本没有改善,未出现燃料充分燃烧、排温降低的优势;3)增大柴油机功率,转速逐步升高,方案4的排温低于其它3个配置方案,说明喷油压力与喷孔结构的合理匹配可以优化喷油器雾化性能,从而优化缸内燃烧过程,单个喷孔面积大的喷油器可较早地完成燃油喷射,主燃期内燃烧的燃料更多,缩短后燃期,降低排温,因此,方案4更适合柴油机高转速、高负荷工况。

2.4 喷油器定型

该型船用柴油机的主要工作转速为750~1000 r/min,通过对比不同喷油器方案下柴油机的各项性能,综合考虑柴油机的经济性和动力性,方案1的优势明显。在柴油机低转速区域,方案1燃油消耗率最低,经济性优势明显;在柴油机动力性方面,方案1在同等功率和转速的情况下,爆发压力最低,柴油机的安全性加强,提高了柴油机的运行可靠性。因此,对于该系列船用主机柴油机,喷油器配置方案1是最优方案。

3 结论

针对某船用柴油机的性能进行试验研究,优化喷油器结构和喷射压力参数,选择反映柴油机主要技术性能的燃油消耗率、爆发压力、排温3个参数进行试验和分析,研究喷油器结构参数对柴油机性能的影响。根据喷油器选型试验结果,选择最佳喷油器结构和喷射压力方案,提高柴油机性能。

1)提高喷油器的喷油压力可以细化并改善燃油的雾化形态,使燃料燃烧更充分。这种技术方案适用于高转速工况下工作的柴油机,可有效降低高转速工况时柴油机的燃油消耗率。

2)喷油器结构被限定时,提高燃油喷射压力虽然改善了燃料的雾化状态,使燃料在缸内燃烧更充分,但燃油消耗率在低转速工况反而升高。对于低转速工况下工作的柴油机,小喷孔结构的喷油器的燃油消耗率更低,喷射压力大的喷油器的燃油消耗率并没有优势,说明柴油机在低转速状态,喷孔结构对燃油消耗率的影响更大。

3)采用固定结构参数的喷油器仅适配柴油机的某特定工况,难以满足其全工况范围内的性能需求。因此,在喷油器设计与选型过程中,需依据柴油机的典型工况特征,有针对性地确定其结构参数,确保柴油机在常用工况下达到最佳燃油经济性。

参考文献:

- [1] 刘志华,张庆,陈希颖,等.单缸柴油机的非道路国三排放开发[J].现代车用动力,2016(2):39-43.
- [2] 金旭.喷油孔直径对机车柴油机排放的影响[J].铁道机车与动车,2024(6):22-24.
- [3] 史俊杰.微小孔喷嘴结构参数对柴油喷雾和燃烧特性的影响[D].天津:天津大学,2018.
- [4] WADEKAR S, YAMAGUCHI A, OEVERMANN M. Large-eddy simulation study of ultra-high fuel injection pressure on gasoline sprays[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2020, 107: 149-174.
- [5] 刘志远.椭圆喷孔柴油机缸内过程与性能研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [6] 隆武强,冷先银,董全,等.基于一种新型喷油系统的船用柴油机NO_x排放试验研究[J].大连理工大学学报,2011, 5(6):781-787.
- [7] 赵成微.柴油机新型喷嘴喷雾及燃烧特性研究[D].大连:大连理工大学,2021.
- [8] HU B H, HE Z X, LI C, et al. Study of the effect of cavitation flow patterns in diesel injector nozzles on near-field spray atomization characteristics using a LES-VOF method[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2024, 174: 104791.

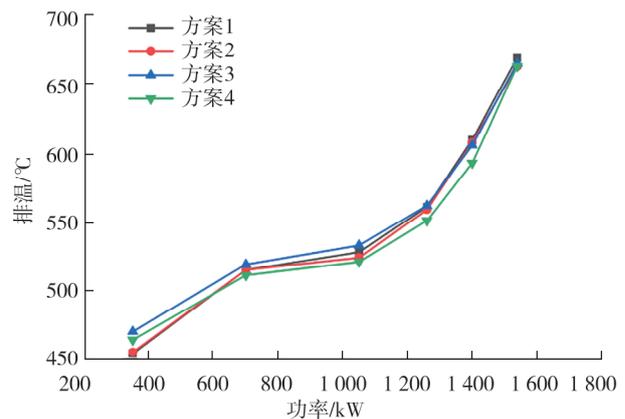


图4 排温随功率的变化曲线

- [9] 楚家旺. 柴油机喷油器的结构改进分析与空化现象研究[D]. 大连:大连交通大学, 2018.
- [10] 朱海超. 船用柴油机喷油器多维喷射参数对雾化特性的影响研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2024.
- [11] 郁晓健. 船用柴油机喷油器直孔和交叉孔喷嘴雾化特性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
- [12] 马天帅, 李京, 王东军. 某型柴油机喷油器结构设计改进的研究[J]. 柴油机, 2008(1):32-33.
- [13] 罗福强, 孙雨, 王楚翘, 等. 喷油参数对重型柴油机喷油器喷油规律的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(4):917-925.
- [14] 周苗. 直喷式柴油机喷油器参数对燃烧和排放影响的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [15] DU C J, ANDERSSON M, ANDERSSON S. Effects of nozzle geometry on the characteristics of an evaporating diesel spray [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2016, 9(3):493-513.

Influence of injector configuration and injection pressure on a diesel engine performance

ZHENG Haopeng¹, ZHAO Peishan^{2*}, YANG Jiacheng², HAN Fangcui²,
SUN Chenglei², TANG Changming², LU Shicheng²

1. Marine Comprehensive Support Division, No. 708 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Qingdao 266000, China;

2. CNPC Jichai Power Company Limited, Jinan 250306, China

Abstract: To achieve optimal matching between the fuel injection system and the diesel engine, and to improve the engine emissions, fuel economy, and performance, based on the design validation testing of a specific diesel engine injector, this study experimentally investigates the influence of injection pressure and nozzle orifice configuration on diesel engine performance by systematically varying these parameters. The results indicate that the injection pressure and nozzle geometry are decisive factors governing fuel spray pattern and atomization characteristics. Within the high-speed operating range of the engine, increasing the injection pressure improves fuel atomization, enhances combustion efficiency, and effectively reduces the brake-specific fuel consumption (BSFC). Conversely, in the low-speed range under identical injection pressure, injectors with smaller orifice diameters yield relatively lower BSFC, suggesting that the structural parameters of the injector exert a more pronounced influence on fuel consumption in this operational regime.

Keywords: marine turbocharged diesel engine; fuel injector; injection pressure; structural parameters of fuel injector; selection test

(责任编辑:刘丽君)