

燃料物性和喷油策略对船用柴油机性能和排放影响的模拟研究

邹 宪, 郑尊清, 王 浒, 张慧祥, 邹泽宇, 尧命发

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Numerical Study on Effects of Fuel Properties and Injection Strategies on Performance and Emissions of a Marine Diesel Engine

ZOU Xian, ZHENG Zunqing, WANG Hu, ZHANG Huixiang, ZOU Zeyu, YAO Mingfa

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The effects of fuel properties and different injection strategies on the performance and emissions of a marine diesel engine were investigated by using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The results show that no matter what kind of fuel is used, heavy or light diesel fuel, the sequential injection, pilot-injection and post-injection all have potential in reducing NO_x emission and fuel consumption simultaneously. The lowest fuel consumption can be obtained using the sequential injection strategy with Seq4 (the injection interval between two injectors being 4°). Lower fuel consumption and lower NO_x emission can be easily realized by using the pilot-injection of large proportion and small proportion respectively with proper injection interval between the main-injection and pre-injection. Fuel consumption cannot be significantly reduced using the post-injection strategy, and fuel consumption rises with the increases in the injection interval between the main-injection and post injection, and in post-injection quantity.

摘要: 采用多维数值模拟的方法系统研究了不同燃油性质和喷油策略对船用柴油机性能和排放的影响。研究表明: 无论使用重油还是轻油, 采用顺序喷射、预喷和后喷都能在降低燃油消耗率的同时降低 NO_x 排放; 顺序喷射方案能在两个喷油器的喷射间隔为 4° 时达到最低的燃油消耗率; 大比例预喷匹配合适的主预喷间隔容易获得较低的燃油消耗率, 小比例预喷匹配合适的主预喷间隔容易获得较低的 NO_x 排放; 后喷策略对燃油消耗率改善不明显, 随着主后喷间隔增大或者后喷油量的增加, 燃油消耗率均呈现增加的趋势。

关键词: 燃油性质; 船用柴油机; 喷油策略; 排放; 数值模拟

Key words: fuel property; marine diesel engine; injection strategy; emissions; numerical study

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.06.003

中图分类号: TK421

文献标识码: A

收稿日期: 2016-08-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAG16B00)

Fund Project: National Science and Technology Support Program of China(2015BAG16B00)

作者简介: 邹 宪(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为内燃机先进燃烧技术模拟, E-mail: zouxian@tju.edu.cn;

王 浒(联系人), 男, 博士, 副研究员, E-mail: wang_hu@tju.edu.cn.

0 概述

目前 90% 以上的海上航行船舶的动力装置为柴油机,其中远洋航行船舶中低速二冲程柴油机扮演着越来越重要的角色。大型船舶通常单日航行耗油量上百吨,因此燃油的价格及燃油消耗率是极为重要的考虑因素。因为重油(HFO)价格相对较低廉,目前船用柴油机大部分燃用重油,而在入港时通常切换成船用柴油。实践证明这两种燃油都可以很好的在低速二冲程柴油机上使用,但是由于低速机每循环工作时间长,增加了高温持续时间,使得排气成分中 NO_x 的含量很高^[1-2]。目前国际上对船用发动机排放的要求越来越严格:1997 年国际海事组织(IMO)通过了《国际防止船舶造成污染公约》,并作为 MARPOL 73/78 公约的附则 VI 颁布^[3]对船用柴油机的污染物(重点是 NO_x)排放进行限制;2008 年 10 月在国际海事组织(IMO)的海洋环境保护委员会(MEPC)会上通过了 MARPOL (Marine Pollution)协定附则 VI 的修正案,同意通过两阶段实现减排目标(图 1),2011 年达到 Tier II 限值,2016 年在排放控制区域 ECA 达到更严格的 Tier III 排放限值,其限值与第二阶段 NO_x 排放相比降低约 75%。

综上所述,未来船用柴油机技术的发展驱动力是应对不断严格的排放法规并进一步改善燃油经济性和提高热效率。

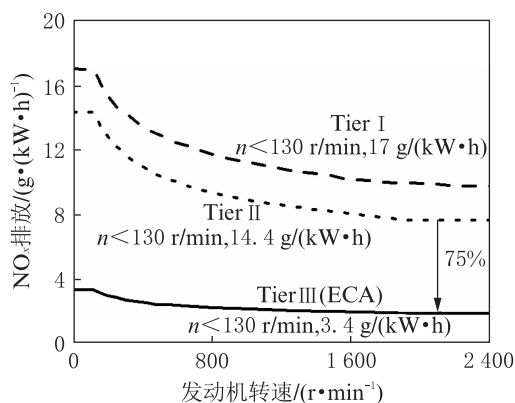


图 1 NO_x 排放法规发展

为了达到节能减排的目标,可以借鉴车用柴油机的相关技术;同时随着高压共轨技术在船用柴油机上的广泛应用,使通过喷油策略改善燃油消耗率并降低有害物排放成为可能。根据 MARPOL^[3]规定,为了防止污染,近海航行船舶不可以使用重油,所以进港船舶必须全部切换为低硫燃油(一般为轻油)。而重油的物理性质和轻油有很大的区别,燃

油性质的差异必然会对性能和排放产生很大的影响;因此研究不同燃油性质的喷油策略优化很有必要,但是目前关于这方面的研究还比较少见。考虑到船用柴油机试验开发周期长、成本高等缺点,采用多维数值模拟的方法能够有效降低开发成本,缩短研究周期,因而已经被广泛应用于船用柴油机的研究和开发过程中。本文采用多维数值模拟的方法研究不同性质的燃油采用顺序喷射、预喷及后喷这三种喷油策略对船用柴油机性能和排放的影响。特别说明的是,仅通过喷油策略的优化不能达到排放法规的要求,还需匹配其他技术措施,如废气再循环(EGR)等,本文的喷油策略仅在原机基础上进行优化。

1 重油和轻油相关物理性质

本文在研究过程中采用重油和轻油(轻油一般为船用柴油,其燃油性质采用国际上通用 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ 代替^[4-5])开展不同燃料特性和喷油策略对船用柴油机性能和排放影响的模拟研究。重油临界温度 T_c 的计算通常用式(1)计算^[6-9]。

$$T_c = 189.8 + 450.6s + T_b \times (0.4244 + 0.1174s) + (14410 - 100688s)/T_b \quad (1)$$

式中, s 为比密度, $s = 0.9537$; T_b 为重质成分的沸点,约为 771.8 K。计算得到 $T_c = 928$ K,即为 HFO 的临界温度。

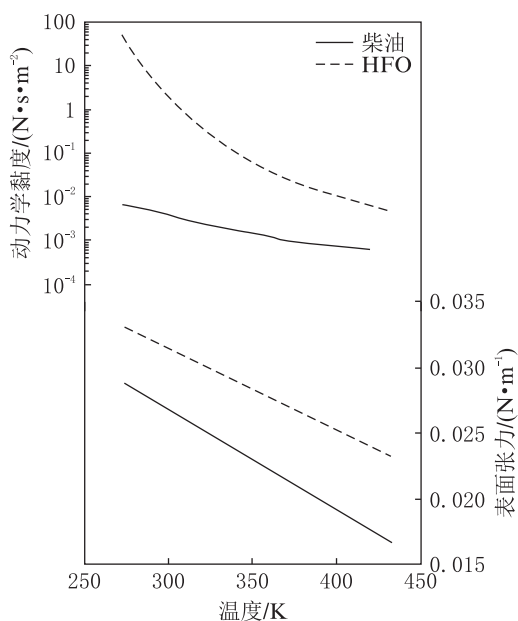
HFO 和柴油的主要物理性质随温度的变化见图 2。由图 2 可以看出 HFO 和柴油的物理性质有很大差异,而这势必会对相应的燃油喷雾雾化、破碎和油气混合过程产生影响,进而进一步影响性能和排放。除此之外,计算过程中 HFO 的热导性与柴油保持一致^[7]。必须说明的是,尽管实际上 HFO 的密度随着温度的升高而降低,但在本计算过程中假设其密度为定值,为 953.7 kg/m^3 ,因而会对计算结果产生一定影响,但不会影响整体趋势。

重油和轻油燃料性质的不同会造成燃油的破碎、雾化、蒸发的差异。从图 3 中 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ 和 HFO 的当量比分布对比可以看出 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ 蒸发雾化能力更强,而 HFO 的贯穿距更大。这会对柴油机性能和排放产生很大的影响,下文将研究燃料特性的差异和喷油策略对船用柴油机性能和排放影响。

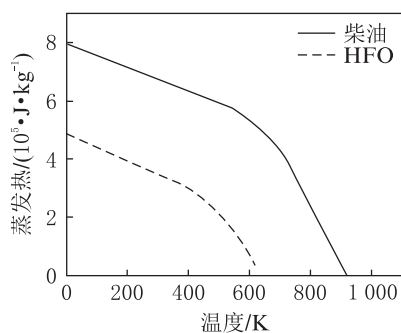
2 模拟平台的建立及验证

2.1 发动机具体参数

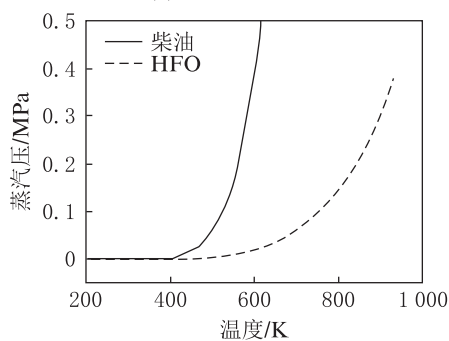
本文研究工作基于一台典型的 4 缸商用低速二



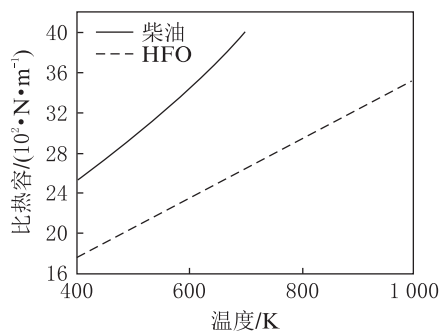
(a) 动力学黏度和表面张力随温度变化



(b) 蒸发热随温度变化

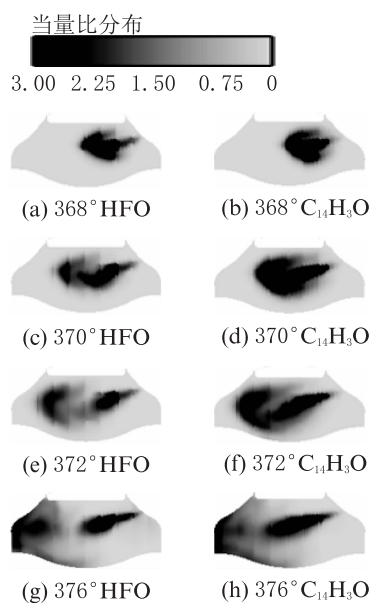


(c) 蒸汽压随温度变化



(d) 比热容随温度的变化

图 2 HFO 物理性质和船用柴油的对比

图 3 $C_{14}H_{30}$ 和 HFO 当量比分布对比

冲程船用柴油机,其缸径为 500 mm,并配备高压共轨燃油喷射系统,可灵活控制燃油喷射策略。作为轮船的主推进装置,低速二冲程船用柴油机主要工作在 60%~90% 负荷工况下,极少达到 100% 负荷^[10]。本文研究将集中在 75% 负荷,比较具有代表性,其运行在 75% 负荷下的基本参数如表 1 所示。

表 1 柴油机运行在 75% 负荷的基本参数

参数名称	参数
缸径/mm×行程/mm	500×2 200
连杆长度/mm	2 885
压缩比	18.2
转速/(r·min ⁻¹)	112
功率/kW	5 331
最大缸压/MPa	19
扫气口数量	30
扫气口角度/(°)	20

2.2 模型及验证

本文采用商业计算流体力学软件 Converge 进行船用柴油机的模拟。Converge 可以在运行时自动生成高质量的正交网格,提高研究开发的效率,目前已经在全世界范围广泛应用于内燃机的模拟。国内外已有使用 Converge 对船用柴油机燃烧、性能和排放模拟的成功案例^[11-13],本文将 Converge 应用到船用柴油机喷油策略的模拟研究是可靠的,并可以节省大量的模拟计算时间。为了更加精确地模拟船用柴油机的性能和排放,本文的计算网格包括完整的进气口和排气道,如图 4 所示。模拟选用的子模型如表 2 所示。基于上述设置,得到的模拟结果和试

验数据的对比如图 5 所示。可以看出,模拟得到的缸压、瞬时放热率和累计放热量与试验值非常接近,说明所建立的计算模型能够较好地再现试验结果,具有较高的可信度。

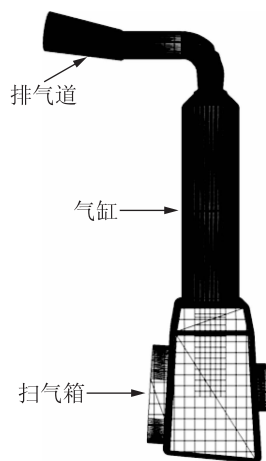


图 4 Converge 计算网格

表 2 主要计算的子模型

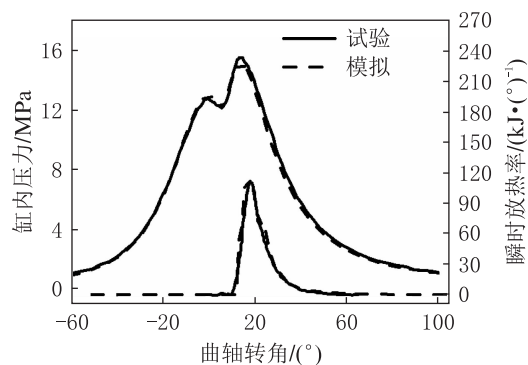
项目	参数
湍流模型	RNG $k-\epsilon$ 模型
喷雾破碎模型	KH-RT 模型
燃油蒸发模型	Frossling 模型
液滴碰撞模型	O'Rourke 碰撞模型
燃烧模型	CTC 特征时间燃烧模型
点火模型	Shell 自点火模型
NO _x 模型	Extended Zeldovich 排放模型

基于上述模型,系统地开展了两个喷油器的顺序喷射、预喷和后喷策略对性能和排放影响的研究,通过优化喷油策略来降低排放和燃油消耗率。由于船用柴油机排放法规主要关注 NO_x 和 SO_x^[3],而 SO_x 的限制可以通过燃油降低硫含量来实现,因此本文主要对 NO_x 排放进行研究。

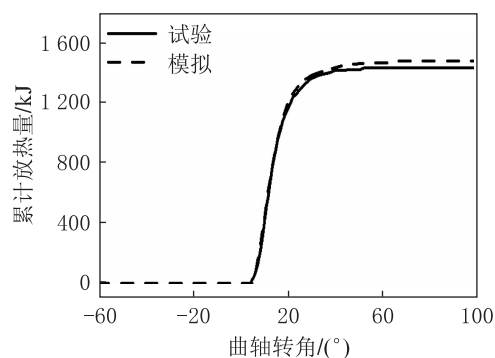
3 结果与讨论

3.1 喷油器顺序喷射对性能和排放的影响

大型船用柴油机缸内通常有多个喷油器,以保证充足的燃油供应和良好的空间分布。本文中使用两个喷油器,顺序喷射间隔定义为第一个喷油器(喷油器 1,喷射始点为 SOI1)和第二个喷油器(喷油器 2,喷射始点为 SOI2)的曲轴转角间隔,如果喷射间隔为 1°则记为 seq1,以此类推。图 6 为顺序喷射示意图,两个喷油器的顺序喷射间隔即为 SOI1 和 SOI2 的间隔,在改变喷射间隔时保持整个喷油结束时刻(EOI)及两个喷油器的喷油压力和喷油持续期一致^[10]。



(a) 缸压和放热率对比



(b) 累计放热量对比

图 5 模拟结果和试验值对比

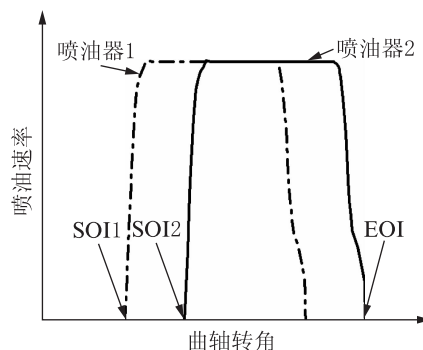


图 6 顺序喷射示意图

图 7 为指示燃油消耗(ISFC)和 NO_x 排放的折中关系。图 7 中虚线内的顺序喷射方案都可以在降低 NO_x 排放的同时减少燃油消耗率;采用轻油和重油(在研究重油和轻油时保证喷油压力一致,由于轻油的雾化蒸发能力比较强,所以轻油的 NO_x 排放更高而燃油消耗率更低)都能在 seq4 达到最低的燃油消耗率,并且随着两个喷油器喷射间隔增大或者减小,燃油消耗率都呈上升趋势;NO_x 排放随着喷射间隔增大呈减小趋势。

表 3 为顺序喷射各方案和原机的参数对比。当轮船航行在非排放控制区时,燃油消耗及燃油价格是主要的控制目标,因此通常以重油作为燃油,并在满足排放法规的基础上尽可能降低燃油消耗,以

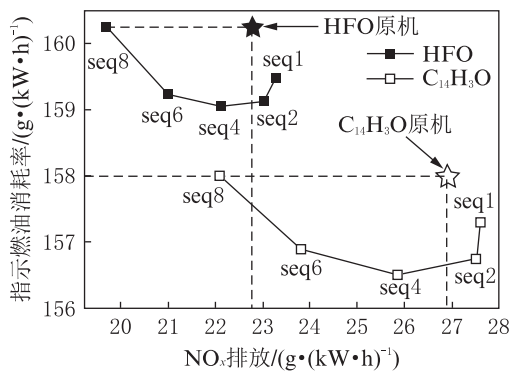


图7 指示燃油消耗率和NO_x的折中关系

低运行成本。此时可以选择 seq4 方案作为优化燃油喷射方案,相比于原机可在 NO_x 排放降低 2.85% 的同时,使燃油消耗降低 0.74%,这对于每天消耗上百吨燃油的大型轮船来说节能效果非常大。当船舶近海或排放控制区航行时,为了防止污染不可以使用重油,需要切换为轻油,此时对 NO_x 排放有很高的要求,需要把降低 NO_x 排放作为主要的优化目标。此时可以选择 seq8 方案作为优化燃油喷射方案,相比于原机可以保证在不增加油耗的同时使 NO_x 排放降低 17.96%。综上所述,非排放控制区的海域使用重油,燃油消耗率为主要控制目标,可选择 seq4 作为燃油喷射方案;近海航行或排放控制区使用轻油,NO_x 排放是主要控制目标,可选择 seq8 作为燃油喷射方案。

表3 各种方案参数对比

变量	顺序喷射方案基本参数			
	C ₁₄ H ₃ O 原机	HFO 原机	seq4 及 HFO	seq8 及 C ₁₄ H ₃ O
功率输出/kW	5 274.43	5 200.67	5 239.52	5 272.90
最大缸压/MPa	14.56	14.77	15.82	16.56
NO _x 排放/(g·(kW·h) ⁻¹)	26.90	22.79	22.14	22.07
ISFC/(g·(kW·h) ⁻¹)	157.99	160.23	159.04	157.99

3.2 预喷对性能和排放的影响

研究预喷对燃烧和排放影响时,保持两个喷油器的喷油规律一致,同时保持主喷时刻、喷油压力和原机一致。与原机相比,一部分燃油在主喷开始前预先喷入缸内,由于喷油压力一致,使得主喷燃油减少,主喷持续期缩短,如图8所示。主要研究内容包括预喷油量和主预喷间隔对燃烧和排放的影响,具体研究方案如表4所示。主预喷间隔定义为预喷开始时刻(SOPI)和主喷开始时刻(SOMI)之间的曲轴转角。

从图9指示燃油消耗率和NO_x排放的折中关系可以看出,不是所有的预喷方案都可以降低NO_x

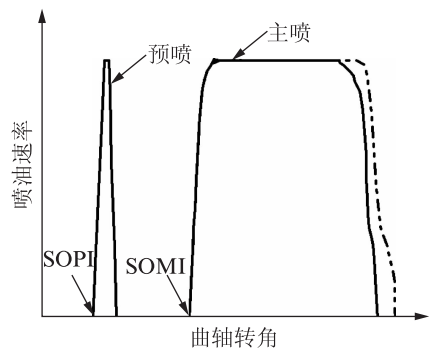
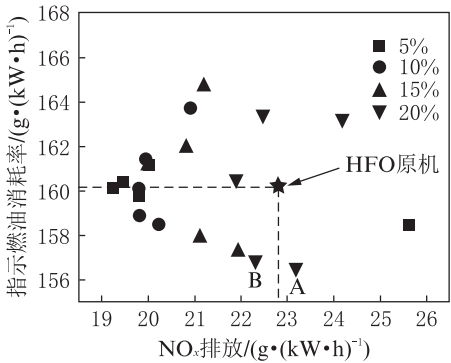


图8 预喷示意图

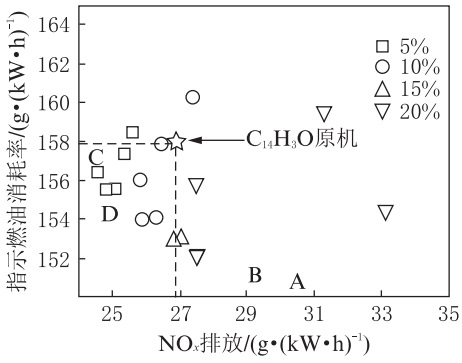
表4 预喷研究方案

预喷油量/%	主预喷间隔/(°)				
	5	10	20	30	40
5	5	10	20	30	40
10	5	10	20	30	40
15	5	10	20	30	40
20	5	10	20	30	40

排放和燃油消耗率,需要选择合理的预喷策略。图9中虚线内的预喷方案都可以在降低NO_x排放的同时减少燃油消耗率。从图9中可以看出,大比例预喷匹配合适的主预喷间隔容易获得较低的燃油消耗率,小比例预喷匹配合适的主预喷间隔容易获得较低的NO_x排放。



(a) HFO



(b) C₁₄H₃O

图9 指示燃油消耗率和NO_x排放的折中关系

将图9中采用HFO下20%预喷油量时,5°主预喷间隔及10°主预喷间隔方案分别记为方案A和方

案 B;将采用 $C_{14}H_{30}O$ 下 5% 预喷油量时, 20° 主预喷间隔及 10° 主预喷间隔方案分别记为方案 C 和方案 D。表 5 所示为 A、B、C 和 D 四种预喷方案 and 原机的参数对比。当轮船航行在非排放控制区时, 燃油消耗及燃油价格是主要的控制目标, 可以选择 B 方案作为优化预喷方案, 相比于原机可以使 NO_x 排放降低 2.1% 的同时降低 2.09% 的燃油消耗。这对于每天消耗上百吨燃油的大型轮船来说, 具有显著的经济效应。A 方案可以降低 2.31% 的燃油消耗, 但 NO_x 排放会增加 1.7%, 这种方案适用于依靠其他

排放控制措施能够满足法规要求的情况。当船舶在近海或排放控制区航行时, 需要把降低 NO_x 排放作为主要的优化目标, 可以选择 C 方案作为优化预喷方案, 相比于原机可以使 NO_x 排放降低 8.6% 的同时降低 1.02% 的燃油消耗。D 方案相比于原机可以使 NO_x 排放降低 7.7% 的同时降低 1.58% 的燃油消耗。综上所述, 非排放控制区的海域使用重油, 可采用大比例预喷匹配合适的主预喷间隔的燃油喷射方案; 近海或排放控制区航行使用轻油, 可采用小比例预喷匹配合适的主预喷间隔的燃油喷射方案。

表 5 各预喷策略参数对比

项目	各预喷策略基本参数					
	$C_{14}H_{30}O$ 原机	HFO 原机	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
功率输出/kW	5 274.43	5 200.67	5 212.21	5 223.55	5 228.49	5 257.75
最大缸压/MPa	14.56	14.77	16.55	15.99	14.98	14.96
NO_x 排放/($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	26.90	22.79	23.17	21.11	24.58	24.82
ISFC/($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	157.99	160.23	156.53	157.87	156.38	155.49

3.3 后喷对性能和排放的影响

在研究后喷策略对性能和排放的影响时, 保持两个喷油器的喷油规律一致, 同时保持主喷时刻、喷油压力与原机一致。相比于原机, 后喷策略下一部分燃油在主喷结束后喷入缸内, 由于要保持喷油压力一致, 使得主喷燃油减少, 主喷持续期缩短, 因此主喷结束时刻 (EOMD) 提前。为使主后喷间隔为某固定值, 需适当调整后喷开始时刻 (SOPOI), 如图 10 所示。主要研究内容包括后喷油量和主后喷间隔对燃烧和排放的影响, 具体研究方案如表 6 所示。主后喷间隔定义为后喷开始时刻和主喷结束时刻的时间间隔 (曲轴转角)。

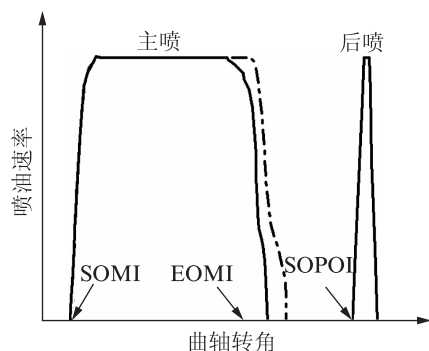


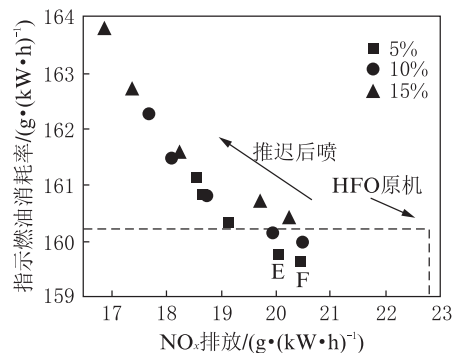
图 10 后喷示意图

表 6 后喷研究方案

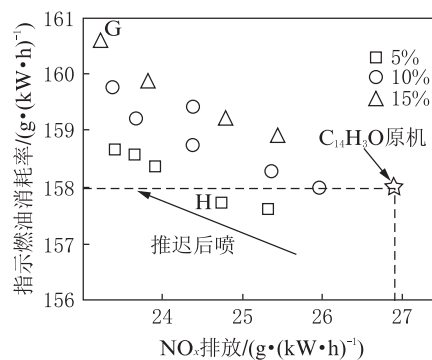
后喷油量/%	主后喷间隔/($^\circ$)				
5	1	2	4	6	8
10	1	2	4	6	8
15	1	2	4	6	8

从图 11 指示燃油消耗和 NO_x 排放的折中关系可以看出, 优化的后喷策略具有同时降低 NO_x 排放和燃

油消耗率的潜力, 如图中虚线内的后喷方案所示。同时也可以发现采用后喷策略对燃油消耗率的改善不明显, 随着主后喷间隔增大 (推迟后喷) 或者后喷油量增加, 燃油消耗率均呈现增加的趋势, 采用大比例后喷、增大主后喷间隔都有利于降低 NO_x 排放。



(a) HFO

(b) $C_{14}H_{30}O$ 图 11 指示燃油消耗率和 NO_x 的折中关系

将图 11 中采用 HFO 下 5% 后喷油量时, 2° 主后喷间隔和 1° 主后喷间隔方案分别记为方案 E 和方案 F; 将

采用 $C_{14}H_{30}O$ 下后喷油量 15% 时,主后喷间隔 6° 方案记为方案 G,后喷油量 5% 主后喷间隔 2° 方案记为方案 H。

表 7 为 E、F、G 和 H 四种后喷方案与原机性能和 NO_x 排放对比。当轮船航行在非排放控制区时,燃油消耗及燃油价格是主要的控制目标,可选择 F 方案作为优化的后喷策略,相比于原机可在 NO_x 排放降低 10.3% 的同时,降低 0.39% 的燃油消耗,这种节能效果也很可观。E 方案与原机相比可在 NO_x 排放降低 12.1% 的同时降低 0.29% 的燃油消耗。当船舶近海或排放控制区航行时,需要切换为轻油,排放是主要的优化目标,可以选择 G 方案作为优化后喷方案,相比于原机可以使 NO_x 排放降低 13.6%,但会增加 0.96% 的燃油消耗;而 H 方案可以在稍微降低燃油消耗率的情况下使 NO_x 排放降低 8.0%。

3.4 几种喷射方案综合影响

从上述分别对顺序喷射方案、预喷和后喷的研究发现:预喷中 A 方案可以降低最多的燃油消耗率,顺序喷射方案中 seq8 可以降低最多的 NO_x 排放。

为了进一步研究降低油耗和 NO_x 排放的燃油喷射方案,根据以上研究结果设计顺序喷射和预喷综合影响的研究方案,如表 8 所示。由于后喷方案改善燃油消耗率和 NO_x 排放能力有限,这里只研究顺序喷射和预喷的综合影响,如果使用后处理装置来降低排放,可以适当使用后喷来增加后处理的起燃温度,本文对这种情况不进行详细讨论。从图 12 可以看出,在非排放控制区,相比于 A 方案,采用 A 方案+顺序喷射方案可以继续降低燃油消耗率,如图中的方案 S1 和 S2 所示,但是会造成 NO_x 排放的升高;在排放控制区,相比于 seq8 方案,采用 seq8+小比例预喷同样可以继续降低 NO_x 排放,但会造成燃油消耗率明显上升,如 K 方案所示。以上研究结果表明,采用顺序喷射结合预喷的燃油喷射方案依然具备降低燃油消耗率和 NO_x 排放的能力,但降低幅度不明显,同时具有负面影响;因此考虑到喷油可靠性的要求,实际使用过程中采用单独的喷油策略优化方案即能更好地达到优化燃油消耗率和降低 NO_x 排放的要求。

表 7 各后喷策略参数对比

项目	各后喷策略基本参数					
	$C_{14}H_{30}O$ 原机	HFO 原机	方案 E	方案 F	方案 G	方案 H
功率输出/kW	5 274.43	5 200.67	5 088.50	5 093.49	5 172.15	5 207.81
最大缸压/MPa	14.56	14.77	14.65	14.65	14.71	14.50
NO_x 排放/($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	26.90	22.79	20.04	20.44	23.23	24.74
ISFC/($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	157.99	160.23	156.76	159.60	160.51	157.71

表 8 综合燃油喷射方案

序号	方案		简称
1	最低燃油消耗(HFO, A 方案+顺序喷射)	A 方案+seq1	S1
2		A 方案+seq2	S2
3		A 方案+seq4	S4
4		A 方案+seq8	S8
5	最低 NO_x 排放($C_{14}H_{30}O$, seq8+小比例预喷)	seq8+5% 预喷+ 5°	—
6		seq8+5% 预喷+ 10°	—
7		seq8+5% 预喷+ 20°	—
8		seq8+5% 预喷+ 30°	—

4 结论

(1) 无论使用轻油还是重油,选择合适的顺序喷射间隔、预喷油量和主预喷间隔及后喷油量和主后喷间隔都具有同时改善燃油经济性和 NO_x 排放的潜力。

(2) 无论使用轻油还是重油,顺序喷射方案都能在 seq4 达到最低的燃油消耗率;大比例预喷匹配合适的主预喷间隔容易获得较低的燃油消耗率,小比例预喷匹配合适的主预喷间隔容易获得较低的 NO_x 排放;后喷策略对燃油消耗率改善不太明显,随着主后喷间隔增大或者后喷油量的增加,燃油消耗率均呈现增加的趋势。

(3) 法规控制相对宽松的海域使用重油,燃油消耗率为主要控制目标,选择 A 方案为燃油喷射方案可以降低 2.31% 的燃油消耗;近海航行使用轻油, NO_x 排放是主要控制目标,选择 seq8 方案为燃油喷射方案,可以保证在不增加油耗的同时使 NO_x 排放降低 18.0%。使用顺序喷射结合预喷的燃油喷射方案能进一步降低燃油消耗率和 NO_x 排放,但降低幅度不明显,同时具有负面影响。

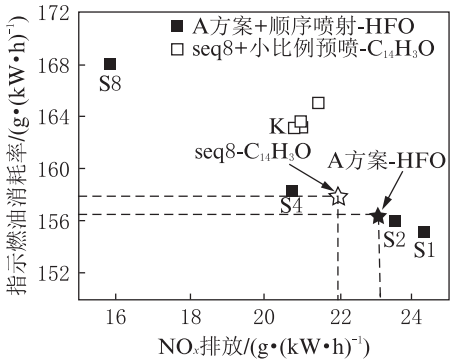


图 12 顺序喷射结合预喷的影响

参考文献:

- [1] 刘海强, 吕林, 王忠俊. 基于性能优化的小缸径二冲程低速船用柴油机喷油方式研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(3): 151-156.
LIU H Q, LÜ L, WANG Z J. Research on fuel injection of a small bore two-stroke low speed marine diesel engine based on performance optimization [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(3): 151-156.
- [2] FENG L, TIAN J, LONG W, et al. Decreasing NO_x of a low-speed two-stroke marine diesel engine by using in-cylinder emission control measures[J]. Energies, 2016, 9(4): 304.
- [3] CORBETT J J, FISCHBECK P. Emissions from ships[J]. Science, 1997, 278: 823-824.
- [4] ANDREADIS P, CHRYSSAKIS C, KAIKTSIS L. Optimization of injection characteristics in a large marine diesel engine using evolutionary algorithms[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2009, 2009-01-1448.
- [5] ANDREADIS P, ZOMPANAKIS A, CHRYSSAKIS C, et al. Effects of the fuel injection parameters on the performance and emissions formation in a large-bore marine diesel engine[J]. International Journal of Engine Research, 2011, 12(1): 14-29.
- [6] STAMOUDIS N, CHRYSSAKIS C, KAIKTSIS L. A two-component heavy fuel oil evaporation model for CFD studies in marine diesel engines[J]. Fuel, 2014, 115(1): 145-153.
- [7] KYRIAKIDES N, CHRYSSAKIS C, KAIKTSIS L. Influence of heavy fuel properties on spray atomization for marine diesel engine applications [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2009, 2009-01-1858.
- [8] SHYU R R, CHEN C S, GOUDIE G O, et al. Multi-component heavy fuel drop histories in a high-temperature flow field[J]. Fuel, 1972, 51(2): 135-145.
- [9] GARANIYA V, GOLDSWORTHY L. CFD modelling of heavy fuel oil spray combustion [C]//Launceston: 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2012.
- [10] 刘海强, 吕林. 船舶机桨匹配设计与分析计算平台研究[J]. 船海工程, 2008, 37(3): 56-58.
LIU H Q, LÜ L. Research on calculation platform for matching design of screw propeller and diesel engine [J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(3): 56-58.
- [11] 张俊军, 吴朝晖, 胡朝霞, 等. 船用低速二冲程柴油机燃烧与排放数值模拟研究[J]. 柴油机, 2012, 34(2): 20-25.
ZHANG J J, WU C H, HU Z X, et al. Simulation research on the combustion and emissions of marine low-speed two stroke diesel engine[J]. Diesel Engine, 2012, 34(2): 20-25.
- [12] 张冠科, 张玉银, 齐文元, 等. 柴油机缸内环境下碰壁喷雾的蒸发特性研究[J]. 内燃机工程, 2017, 38(5): 1-8.
ZHANG G K, ZHANG Y Y, QI W Y, et al. Investigation into evaporation characteristics of spray impinged on flat-wall in diesel-like ambient gas[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017, 38(5): 1-8.
- [13] BANDYOPADHYAY D. Optimization of injection strategies to reduce emission for 2-cycle engine [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2011, 2011-01-0839.

《内燃机工程》编辑部搬迁声明

致广大读者:

《内燃机工程》编辑部已于 2016 年 12 月 1 日随中国内燃机学会秘书处搬迁于新址办公, 搬迁后《内燃机工程》编辑部所有的业务性质不变。联系方式如下:

地 址: 上海市闵行区华宁路 3111 号

电 话: 021-31310107, 021-31310211, 021-31310951

网 址: www.cicee.com.cn

邮 箱: cicee@vip.163.com

汇款账户: 户 名 中国内燃机学会

开户银行 中国农业银行上海五角场支行/翔殷支行

银行帐号 033267-00881002247

给您带来不便, 敬请谅解!

中国内燃机学会

2016 年 12 月 1 日