

缸内直喷天然气低速船机压力振荡抑制方法数值研究

袁成威¹, 刘 博², 江泉泉¹, 周 磊¹, 陈 锐^{1,3}, 卫海桥¹

(1. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中船动力研究院有限公司, 上海 201206;
3. 拉夫堡大学 航空与汽车工程系, 拉夫堡 LE11 3TU, 英国)

Numerical Study on Pressure Oscillation Suppression of Low-Speed Marine Engine with In-Cylinder Direct Injection of Natural Gas

YUAN Chengwei¹, LIU Bo², JIANG Xiaoxiao¹, ZHOU Lei¹, CHEN Rui^{1,3}, WEI Haiqiao¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 201206, China;
3. Department of Aeronautical and Automotive Engineering, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, United Kingdom)

Abstract: Based on the computational fluid dynamics(CFD) software(CONVERGE), the simulation model of a large low-speed two-stroke marine engine in which pilot diesel and natural gas are injected directly in cylinder was established. Validated by the experimental data from the literature, the model was then applied to studying the suppression effect of the Miller cycle and natural gas two-stage injection strategy on the pressure oscillation in high pressure direct injection mode. The calculation results indicated that when the exhaust valve was closed later, the overall combustion pressure was lower, both the combustion phase and the moment of severe pressure oscillation were delayed. The intensity of pressure oscillation was reduced with smaller delay of exhaust valve closing, while it was increased instead with an excessive delay. This was primarily attributed to the competitive relation between in-cylinder thermodynamic state and auto-ignition characteristics of fuel. Adjusting the pre-injection quantity of natural gas would reduce the formation of premixed combustible mixture before combustion, thus reducing the proportion of premixed combustion in the combustion phase, which could effectively suppress pressure oscillation, but could also reduce the output power and increase the fuel consumption. Compared with the pre-injection quantity, varying injection interval has less effect on the pressure oscillation, but the excessive injection interval would affect the combustion phase, resulting in considerable power loss. A reasonable injection strategy can ensure the power output while suppressing intense pressure oscillation.

摘要: 基于计算流体力学(CFD)软件 CONVERGE 建立了大型低速 2 冲程柴油引燃缸内直喷天然气船用发动机燃烧仿真模型。首先通过试验结果对模型进行了验证,进而开展了天然气高压喷射模式(high pressure direct injection, HPDI)下米勒循环和天然气两次喷射策略对发动机压力振荡的抑制效果研究。结果表明,推迟排气门关闭时刻,整体燃烧压力降低,燃烧相位推迟,发生剧烈压力振荡的时刻也推迟。排气门关闭时刻推迟较小时压力振荡强度降低,但过度推迟反而提高缸内压力振荡的强度,这主要是缸内热力学状态变化和燃料自燃特性

收稿日期: 2019-04-22

修回日期: 2019-06-12

基金项目: 船用低速机工程(一期)研制项目(CDGC01-KT0308)

Fund Project: Marine Low-Speed Engine Project Phase I (CDGC01-KT0308)

作者简介: 袁成威(1993—),男,硕士生,主要研究方向为船用双燃料发动机燃烧技术,E-mail:yuanchengwei@tju.edu.cn;

周 磊(通信作者),E-mail:lei.zhou@tju.edu.cn。

相互作用的结果。通过调整预喷射量,可以降低燃烧前形成的可燃混合气量,从而影响燃烧过程中预混合燃烧比例,可以有效抑制压力振荡,但会导致输出功率降低及能耗增大。相比预喷射量,喷射间隔对缸内压力振荡的影响较小,但过大喷射间隔会影响燃烧相位,导致功率损失严重。合理的喷射策略可以在抑制压力振荡的同时保证功率输出。

关键词: 低速船用发动机;双燃料;压力振荡;米勒循环;喷射策略;计算流体力学

Key words: low-speed marine engine; dual fuel; pressure oscillation; Miller cycle; injection strategy; CFD

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2019.06.009

中图分类号: TK432

文献标识码: A

0 概述

天然气作为清洁的替代燃料,储量大且分布广泛,在交通运输领域具有广泛的应用前景。因为天然气具有辛烷值高、不易自燃的特点,在低速船机上应用时主要采用柴油-天然气双燃料燃烧方式,选用高十六烷值的柴油作为引燃源^[1-2]。根据天然气喷入时刻及压力不同,燃烧模式可以分为低压喷射预混合燃烧和高压喷射扩散燃烧两种^[3-5]。低压喷射双燃料模式天然气喷入缸内的时间较早,混合时间长。该类型发动机的燃烧模式以预混燃烧为主,压缩比受爆震限制,在高负荷下稳定燃烧的过量空气系数窗口较小,非正常燃烧问题较严重,输出转矩和热效率均达不到柴油机水平;在高负荷下,引燃柴油的着火滞燃期受替代燃料的影响而延长,可能会导致燃烧粗暴现象的发生;同时,由于天然气是在排气门尚未完全关闭的情况下喷入,部分天然气可能在扫气阶段泄露,导致甲烷排放较高^[6-8]。高压直喷模式下的双燃料发动机可以获得与柴油机相当的热效率和功率,但在高负荷时由于燃烧放热率过高容易造成发动机出现剧烈的压力振荡,一旦发生将导致发动机燃烧及排放恶化,甚至可能损坏发动机结构。因此,抑制发动机压力振荡是双燃料发动机燃烧优化的关键之一。

已有研究表明:天然气高压喷射(high pressure direct injection, HPDI)模式下,双燃料发动机工作粗暴的机理不同于汽油机中末端自燃理论。产生剧烈压力振荡的原因主要是天然气预混合燃烧阶段能量快速释放,使缸内温度和压力迅速升高,从而引起缸内气体以第一横向模式声频振动。有利于提高预混合燃烧阶段能量快速释放的因素都可能会引起剧烈的压力振荡,导致粗暴燃烧^[9-10]。

文献[11]对柴油引燃缸内直喷天然气发动机的性能和放热率进行研究,发现采用更短的柴油喷射间

隔和柴油喷射脉宽及增加喷射压力会导致最高燃烧压力上升,燃烧恶化。文献[12]基于 CONVERGE 对柴油引燃缸内直喷天然气发动机爆震燃烧过程进行了仿真研究,研究了天然气喷射时刻、引燃柴油量和缸内初始温度对爆震燃烧的影响。但有关高负荷工况下双燃料低速船机中压力振荡抑制手段研究还很少。

米勒循环可以降低燃烧前的缸内温度,预喷策略可以减少点火前形成的预混合气量^[13],还会改变混合气的浓度梯度分布及燃气和引燃油的接触位置^[14],两者都会对燃烧过程的压力波动产生明显的影响。本文通过仿真分析的手段研究米勒循环和天然气两次喷射对压力振荡的抑制效果。

1 仿真模型介绍

1.1 发动机介绍

本文研究基于一台由低速 2 冲程柴油机改装而成的双燃料发动机^[15],其基本参数如表 1 所示。本文中,曲轴转角负值代表上止点前(BTDC),正值代表上止点后(ATDC)。

表 1 发动机基本参数(75%负荷)

项目	参数
型号	4T50ME-GI
缸径/mm×行程/mm	500×2 200
连杆长度/mm	2 885
压缩比	18.14
转速/(r·min ⁻¹)	112
功率/kW	5 331
油、气质量比/%	5.3
引燃油喷射始点/(°)	-2
天然气喷射始点/(°)	-1
天然气喷射持续期/(°)	17.6

结合天然气和柴油喷射正时的研究,将天然气的喷射始点调整为-6°,引燃柴油喷射始点保持为-2°不变,其他参数不变,作为基准算例。

1.2 数值模型设置

为了更加精确地模拟船用柴油机的燃烧过程, 本文的计算网格包括完整的进气口和排气道, 建立的三维计算模型如图 1 所示。模型中设置了两组共 4 个喷油器, 均匀地分布在气缸盖的边缘位置, 喷油器喷束方向与扫气口涡流同向, 这有利于燃料和空气的充分混合。另外每组喷油器包括一个柴油喷射和一个天然气喷射, 单个喷油器上均设有 4 个喷孔。喷油器布置和喷束方向示意图如图 2(a)所示。为了有效捕捉缸内的压力振荡情况, 本文在燃烧室的不同部位布置了两圈监测点, 如图 2(b)所示。



图 1 船用双燃料发动机模型的三维图和计算网格

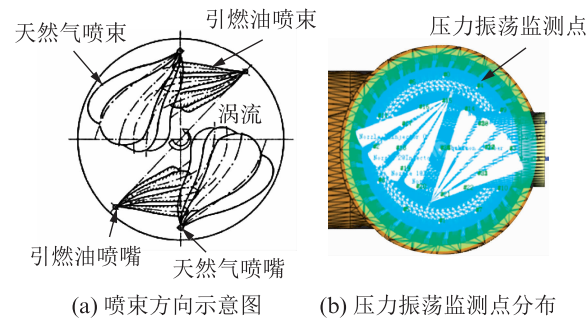


图 2 双燃料喷油器布置及喷束方向示意图及压力振荡监测点分布图

模拟过程中使用的流动、传热、喷雾、液滴碰撞、燃烧模型等子模型如表 2 所示。由于 CONVERGE 程序中不包括单独的气体喷射模型, 本文中采用 Inflow 边界条件来模拟高压气体喷射过程^[16]。边界条件的输入为气体的质量流量速率曲线。同时本模型综合了计算能力和工程应用的适用性, 本研究中采用了自适应网格技术(adaptive mesh refinement, AMR), 其中基础网格尺寸为 1.0 cm, 最小网格尺寸为 2.5 mm。

1.3 模型验证

选定网格尺寸方案后对模型进行了验证。模拟

表 2 主要计算的子模型

物理模型	名称
湍流模型	RNG $k-\epsilon$ 模型
喷雾破碎模型	KH-RT 模型
液滴撞壁模型	Rebound/slide 模型
液滴碰撞模型	NTC 模型
液滴蒸发模型	Frossling 模型
液滴湍流扩散模型	O'Rourke 模型
燃烧过程机理	SAGE(44 组分, 112 步反应)

中以正庚烷(C_7H_{16})作为柴油替代燃料, 以甲烷(CH_4)作为天然气的替代燃料。本文模拟工况转速为 112 r/min, 每循环喷油量为 1.391 16 g, 喷气量为 26.6 g, 相当于该转速下 75% 负荷工况。75% 负荷是船机最常用的负荷, 也是船机 ISO8178E3 测试循环中权重最大的负荷, 占比 50%^[17]。试验和模拟的缸压、放热率(HRR)曲线对比如图 3 所示。表 3 列出了最高燃烧压力、最高燃烧压力角度、总放热量的试验值和模拟值对比, 由表 3 可知其误差分别为 0.41%、0.44%、2.61%。结果表明, 本文建立的三维模型能较好地预测试验中缸内的燃烧过程, 基本能捕捉燃烧中的缸压、瞬时放热率变化趋势, 可用来对燃烧及燃烧压力振荡过程开展进一步分析。

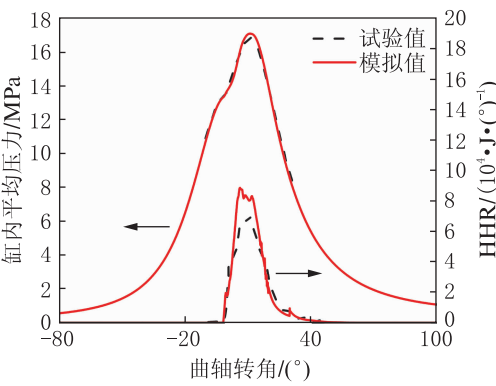


图 3 试验和模拟缸压、放热率曲线对比

表 3 主要参数试验值和模拟值对比

项目	参数	
	试验值	模拟值
最高燃烧压力值/MPa	16.99	17.06
最高燃烧压力角度/(°)	11.29	11.24
总放热量/J	1 425 382	1 388 195

2 计算结果讨论与分析

2.1 米勒循环对 HPDI 双燃料发动机压力振荡抑制效果的研究

为了研究米勒循环对 HPDI 天然气双燃料船机剧烈燃烧过程的影响, 按照排气门升程型线设置了

不同的排气门关闭时刻。通过改变排气门的型线对比研究排气门晚关 -2° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 、 12° 、 14° 对双燃料发动机性能的影响及对压力振荡的抑制效果。不同的排气门升程如图4所示。

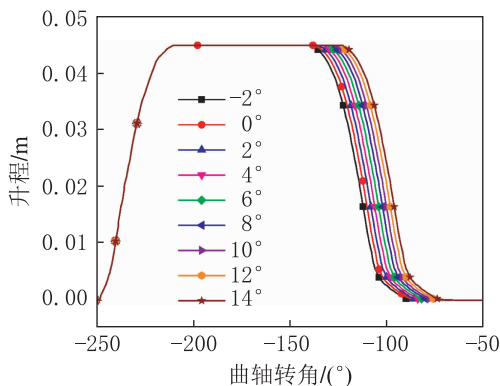


图4 不同排气门晚关时刻的排气门升程曲线

图5比较了不同排气门关闭时刻下的缸内平均温度曲线。随着排气门关闭时刻的推迟，缸内平均温度降低。主要是因为排气门晚关推迟了有效压缩时刻，降低了排气门关闭时刻的气缸总容积，使得开始压缩时的气体温度低于其他工况同一时刻已经压缩了的气体温度(图5)，导致燃油燃烧反应的临界条件延时，从而会对燃烧始点造成影响，使整体燃烧推迟。图6比较了不同排气门关闭时刻下的平均缸压曲线和放热率曲线。随着排气门关闭时刻的推迟，平均缸压降低，做功能力降低。这是因为排气门晚关后，扫气过程排出的新鲜空气量增多，使得进入缸内的空气量减少，导致压缩压力明显降低，整体燃烧压力降低。

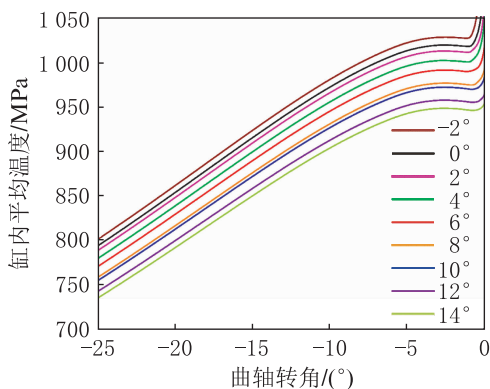


图5 不同排气门关闭时刻下缸内温度的比较

图7比较了不同排气门关闭时刻对缸内瞬时压力振荡的影响，图中压力振荡是通过压力进行傅里叶变换处理所得。从图中可以看出，排气门关闭时刻推迟造成整体燃烧压力下降，燃烧相位推迟，从而使出现剧烈压力振荡的时刻推迟。但排气门关闭

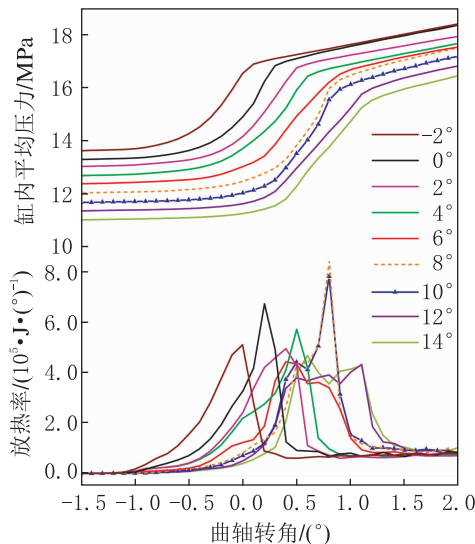


图6 不同排气门关闭时刻下缸压和放热率曲线比较

时刻推迟对压力振荡强度的影响并不单调：当关闭时刻推迟较小(6° 以内)时，压力振荡逐渐降低；推迟到 8° 、 10° 时，压力振荡反而增强；进一步推迟排气门关闭时刻，振荡强度又逐渐减弱。排气门推迟 4° 、 6° 及 14° 时，压力振荡幅值最低。结合图5、图6分析发现：排气门关闭时刻推迟较小，燃烧前缸内的压力和温度降低，燃烧后放热速率放缓，有利于降低压力振荡强度；排气门进一步推迟，燃料滞燃期进一步延长，前期放热率较低，但可燃混合气逐渐积累，大量混合气同时自燃，导致放热率快速升高，压力震荡强度增加；排气门推迟到 12° 、 14° 时，初始压力温度降低使燃烧进一步变缓，更多燃料进入膨胀行程，而膨胀行程缸内热力学状态恶化导致可燃混合气达不到自燃条件，压力振荡强度再次降低。

图8~图10比较了排气门关闭时刻对缸内压力差的影响。可见，当剧烈压力振荡发生时，缸内压力分布很不均匀，且压力差值大的区域都是位于燃烧室边缘空间较小的区域。压力差值大的区域出现时刻随着排气关闭时刻的推迟而逐渐推迟。图7分析中压力振荡强度较大的工况(即当排气门推迟 8° 、 10° 时)，燃烧室边缘区域出现很明显的压力梯度，相对于其他工况压力分布更不均匀，且压差较大。同时，压力幅值最低的工况(即排气门关闭推迟 4° 时)，缸内压力分布也最为均匀，压差较大的区域基本不存在。综合考虑缸压损失及振荡强度抑制效果，实际工程应用中应适度推迟排气门关闭时刻。本研究中排气门关闭时刻推迟 4° 的工况缸压损失较小，做功能力相对更强；推迟时刻小于 4° 时，压力振荡抑制效果不显著；推迟时刻过大(8° 、 10°)，缸压恶化的同时，压力振荡反而增强。

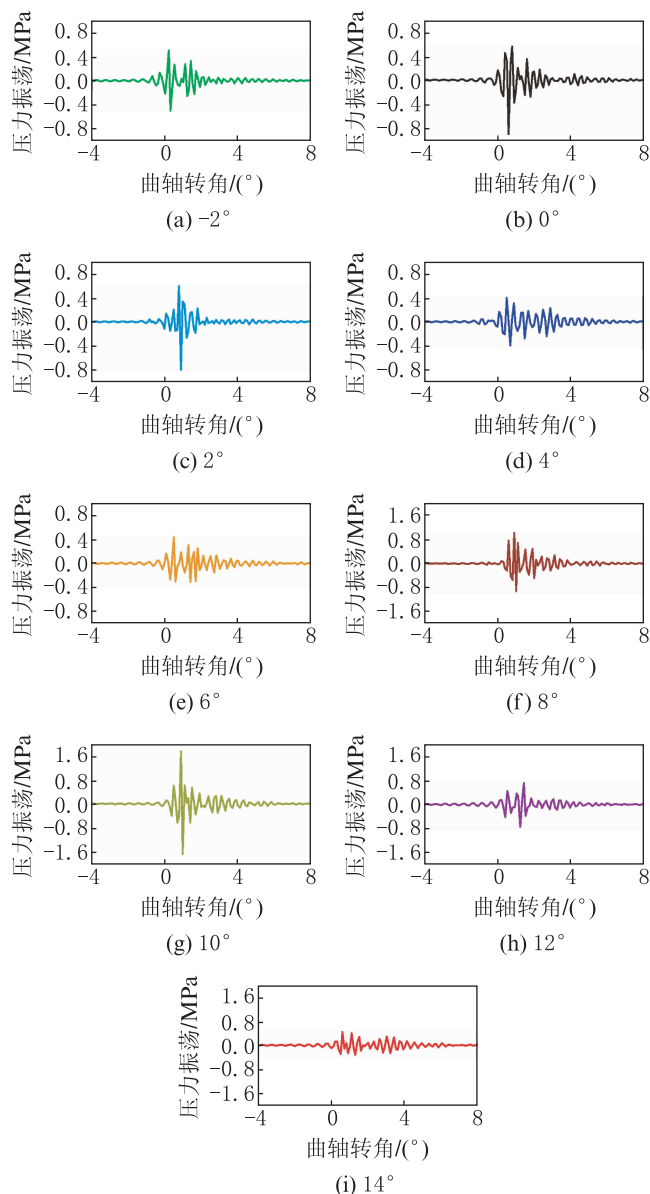


图 7 不同排气门关闭时刻对缸内瞬时压力振荡的影响

2.2 天然气两次喷射对 HPDI 双燃料发动机压力振荡抑制效果的研究

为了研究天然气两次喷射对 HPDI 天然气双燃料船机压力振荡的影响,设置了不同天然气预喷比例及不同喷射间隔。其中预喷天然气占总天然气质量的 10%、20%、30%,预喷结束时刻与第二次喷射开始的间隔分别为 5°、10°,同时天然气开始喷射的时刻、天然气总喷射量和引燃油的喷射参数保持不变。图 11 为天然气两次喷射策略示意图。以下图文中如未特别说明,PI5-10 表示天然气两次喷射的间隔为 5°、预喷量占比 10%,依此类推。

图 12 比较了不同天然气两次喷射策略的平均缸压曲线和瞬时放热率曲线。从图中可以看出,天然气两次喷射有利于降低压力升高率,避免过高的

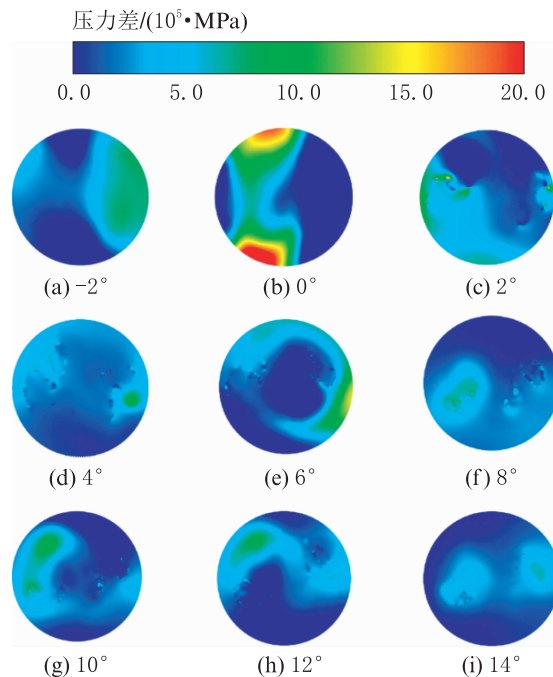


图 8 上止点后 0.4° 不同排气门关闭时刻缸内压差分布图

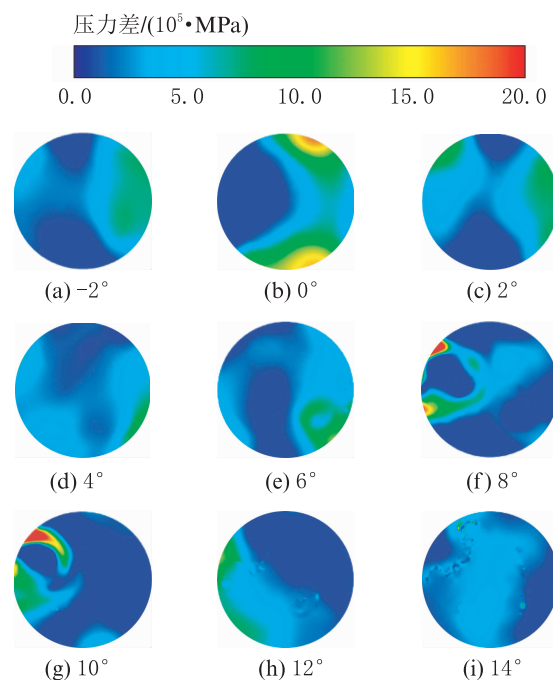


图 9 上止点后 0.8° 不同排气门关闭时刻缸内压差分布图

瞬时放热率,缓解整体的燃烧剧烈程度。同时,在不同喷射间隔下,增大预喷比例,燃料初始放热更加剧烈,燃烧中点(CA50)更接近上止点,最高燃烧压力也相应增大。这是因为预喷的天然气进入缸内与空气迅速形成了可燃混合气,冷却缸内工质的同时也降低了柴油喷束附近的氧浓度,且随预喷比例的增大,影响更加明显。当引燃油喷入时,受已存在的天然气混合气的影响,滞燃期延长,天然气被引燃时已

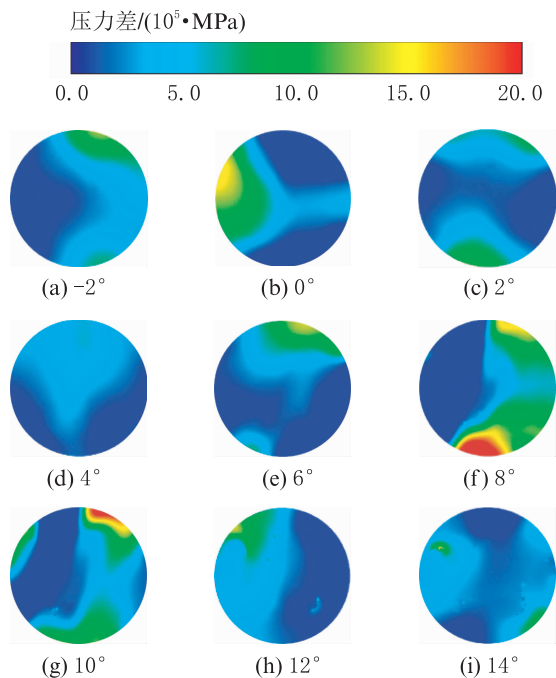


图 10 上止点后 1.2°不同排气门关闭时刻缸内压差分布图

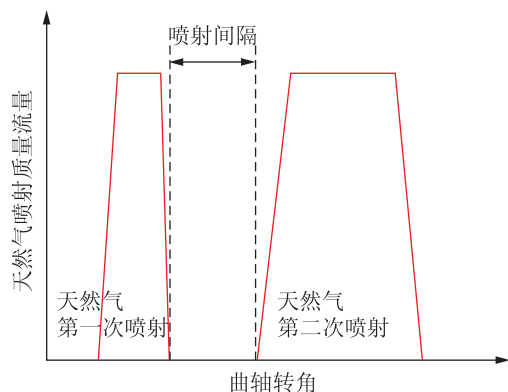


图 11 两次喷射天然气示意图

存在的预混气体量更多,在缸内分布的范围也更广。同时,相较于基础算例,采用两次喷射策略算例时缸压明显下降,发动机输出功率降低,能耗增大。天然气两次喷射的间隔越大,缸压下降得越快,功率损失越严重。但增加预喷比例会改善缸压的恶化,提高功率输出,降低能耗。另外,结合瞬时放热率曲线发现,采用两次喷射的工况相对于单次喷射的工况来说,燃烧相位更加提前。这是因为预喷的天然气相对较少,引燃柴油喷入时,由于缸内气体运动及天然气喷射本身的惯性,使得这部分天然气距离柴油喷孔的距离较远,对引燃柴油滞燃期的影响相对较小,因此燃烧相位提前。

图 13 为天然气两次喷射策略对缸内瞬时压力的影响。从图中可以看出,相对于单次喷射天然气,天然气两次喷射策略下缸内瞬时压力振荡明显

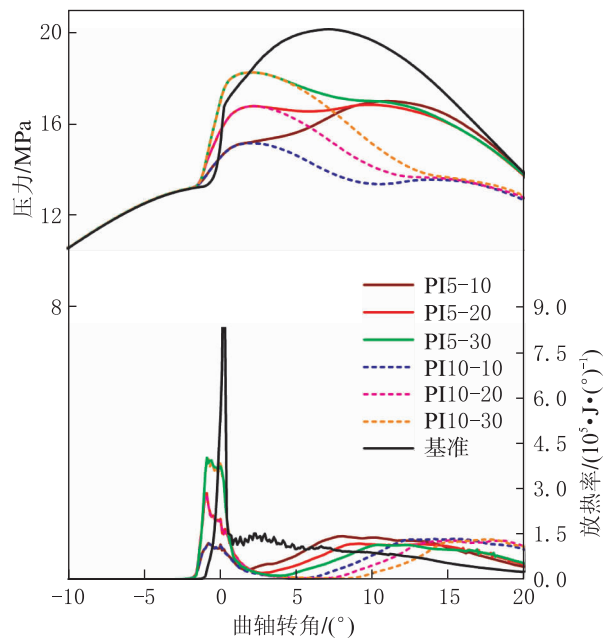


图 12 不同两次喷射策略下缸压和瞬时放热率曲线

降低。相同喷射间隔不同预喷量下,随着预喷比例增大,在引燃油喷射前进入缸内的天然气增多,从而使燃烧初期预混合燃烧比例增大。引燃柴油喷入缸内后,受天然气的冷却作用及其对局部氧浓度稀释的影响,滞燃期延长,使更多的引燃油经历了雾化、蒸发过程,柴油混合气在空间分布上也更广泛,多点着火后对天然气混合气的引燃效果也更强,燃烧放热更迅速,燃烧剧烈程度增加。但由于船机燃烧室空间体积较大,从压力振荡强度来看,预喷天然气量在 30% 以内,压力振荡强度均不会剧烈恶化。结合图 12 的分析,预喷量过低的算例缸压下降较大,燃烧相位恶化,功率损失严重,因此不宜采用过低的预喷量。相同天然气预喷比例不同喷射间隔情况下,缸内压力振荡强度相似,可见喷射间隔对缸内压力振荡的影响并不显著。

图 14、图 15 为不同两次喷射策略对缸内压力差的影响。图中截取了压力波动较明显的时刻进行对比分析。从图中可以发现,天然气两次喷射造成的预混量的改变对压力振荡的抑制效果十分明显。相较于单次喷射天然气来说,两次喷射的工况减少了天然气引燃之前的预混气体量,天然气多点着火时燃烧更为平缓,从而缸内压力差很小,缸内压力分布十分均匀,压力振荡基本消失。增大天然气预喷量,缸内压力差在燃烧室附近有轻微的增大,但总体影响不明显,这和图 13 的分析相符合。综合以上分析,为了尽可能避免缸压下降过快导致功率损失过大,应选取间隔角较小且第一次喷射量较大的工况,如 PI5-30 工况。

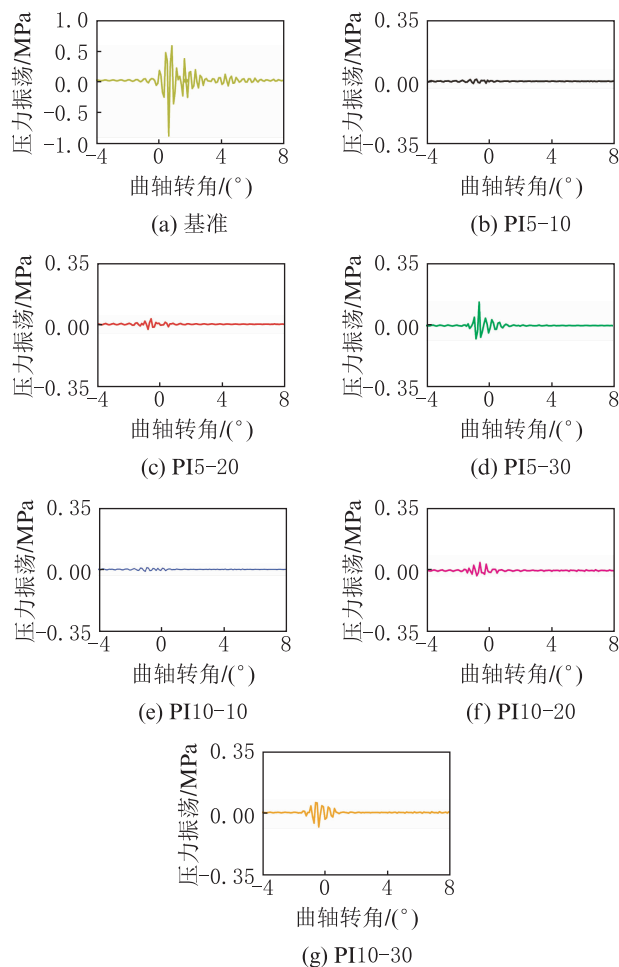


图 13 不同两次喷射策略对缸内瞬时压力的影响

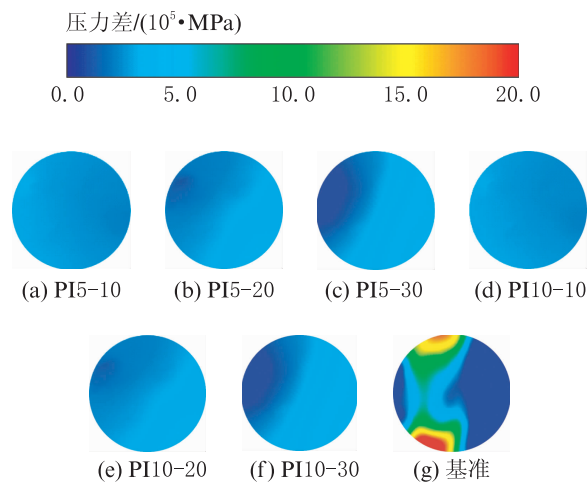


图 14 上止点后 0.4° 时刻不同喷油策略缸内压差分布

3 结论

(1) 随排气门关闭时刻推迟, 剧烈压力振荡的时刻相应推迟, 但从降低振荡强度角度来分析, 影响规律不是单调变化。过度推迟排气门关闭时刻, 压力振荡强度反而增强, 这主要是因为缸内残余压力

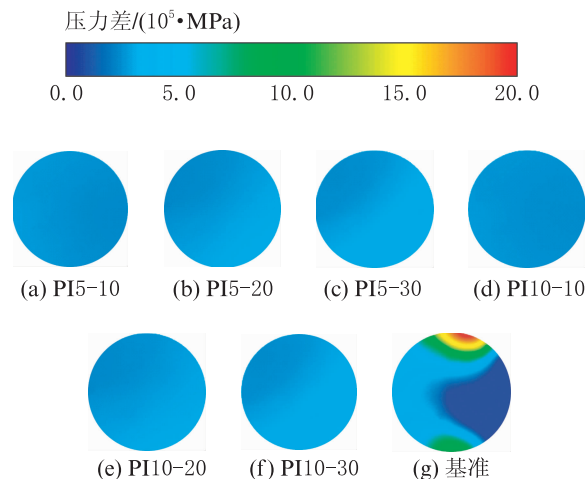


图 15 上止点后 1.2° 时刻不同喷油策略缸内压差分布

下降, 扫气时进气量增多, 燃烧放热增强促进压力振荡。实际工程应用中应适度推迟排气门关闭时刻, 降低压力振荡强度的同时, 避免过度的压力损失。

(2) 相较于单次喷射, 天然气两次喷射有利于降低压力升高率和压力振荡强度。两次喷射策略对压力振荡的影响主要体现在通过减少天然气引燃前的预混合量, 使天然气多点着火时燃烧更为平缓, 缸内压力分布均匀, 从而有效改善了缸内的压力振荡。

(3) 两次喷射策略中, 预喷比例增大会改变燃烧前形成的预混气量, 增强压力振荡强度, 但影响程度并不大。而预喷量过小时, 发动机输出功率损失严重。喷射间隔对缸内压力振荡的影响并不显著, 但过大的喷射间隔会恶化燃烧, 导致功率损失。因此应选取间隔角较小且第一次喷射量较大的工况, 抑制压力振荡的同时避免燃烧恶化, 获得尽可能高的功率输出。

参考文献:

- [1] KARIM G, BURN K. The combustion of gaseous fuels in a dual fuel engine of the compression ignition type with particular reference to cold intake temperature conditions[C/OL]. SAE Paper, 1980, 800263. (1980-02-01). <https://doi.org/10.4271/800263>.
- [2] KORAKIANITIS T, NAMASIVAYAM A M, CROOKES R J. Diesel and rapeseed methyl ester (RME) pilot fuels for hydrogen and natural gas dual-fuel combustion in compression-ignition engines[J]. Fuel, 2011, 90:2384-2395.
- [3] WEI L, GENG P. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 142:264-278.
- [4] MCTAGGART-COWAN G, BUSHE W, HILL P, et al. NO_x reduction from a heavy-duty diesel engine with direct injection of natural gas and cooled exhaust gas recirculation [J]. International Journal of Engine Research, 2004, 5(2):175-191.

- [5] MCTAGGART-COWAN G, ROGAK S, HILL P, et al. Effect of operating condition on particulate matter and nitrogen oxides emissions from a heavy-duty direct injection natural gas engine using cooled exhaust gas recirculation[J]. *International Journal of Engine Research*, 2004,5(6):499-511.
- [6] NWAFOR O. Effect of choice of pilot fuel on the performance of natural gas in diesel engines[J]. *Renewable Energy*, 2000, 21(3/4):495-504.
- [7] KARIM G A. Combustion in gas fueled compression; ignition engines of the dual fuel type[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003,125(3):827-836.
- [8] 叶映,董晶瑾,王浒,等. 预燃室火焰射流对双燃料着火燃烧过程的模拟研究[J]. *内燃机工程*, 2018,39(2):22-28,34.
YE Y, DONG J J, WANG H, et al. Numerical simulation of the effect of pre-chamber flame Jet to combustion process on diesel-NG dual fuel engine[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2018,39(2):22-28,34.
- [9] HEYWOOD J B. *Internal combustion engine fundamentals* [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988:491-558.
- [10] TAYLOR C F. *The internal-combustion engine in theory and practice; combustion, fuels, materials, design* [M]. London: MIT Press, 1985:95-110.
- [11] LI M H, ZHANG Q, LI G X, et al. Experimental investigation on performance and heat release analysis of a pilot ignited direct injection natural gas engine[J]. *Energy*, 2015,90:1251-1260.
- [12] 李晓晓. 柴油引燃缸内直喷天然气发动机爆震燃烧过程的仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [13] IMPERATO M, KAARIO O, SARJOVAARA T, et al. Split fuel injection and miller cycle in a large-bore engine[J]. *Applied Energy*, 2016,162:289-297.
- [14] WHITE T R, MILTON B E. Visualization of the mixing of intermittent natural gas and liquid diesel fuel sprays from high-pressure nozzles[J]. *Journal of Flow Visualization & Image Processing*, 2011,18(1):45-73.
- [15] JULIUSSEN L, MAYER S, KRYGER M. The MAN ME-GI engine: from initial system considerations to implementation and performance optimization [C]. Shanghai: CIMAC Congress, 2013:424.
- [16] LE MOINE J, SENEAL P, KAISER S A, et al. A computational study of the mixture preparation in a direct-injection hydrogen engine[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015,137(11):111508.
- [17] 刘海峰,张慧祥,王浒,等. 进气组分对低速船机 NO_x 排放的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2017,23(4):313-319.
LIU H F, ZHANG H X, WANG H, et al. Impact of air intake components on NO_x emissions in low-speed marine diesel engine [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2017,23(4):313-319.

(上接第 55 页)

- [7] ZACCARDI J M, DUVAL L, PAGOT A. Development of specific tools for analysis and quantification of pre-ignition in a boosted SI engine[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2009,2(1):1587-1600.
- [8] WANG Z, LIU H, SONG T, et al. Relationship between super-knock and pre-ignition [J]. *International Journal of Engine Research*, 2015,16(2):166-180.
- [9] 肖欢,汪洋,刘宇,等. SI 燃烧过程优化途径的试验和仿真研究[J]. *内燃机工程*, 2017,38(6):9-14.
XIAO H, WANG Y, LIU Y, et al. Experimental and simulative study of optimization of spark ignition combustion process[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2017,38(6):9-14.
- [10] 王志,龙岩,王建昕. 增压汽油机中早燃和超级爆震的研究进展[J]. *汽车安全与节能学报*, 2015,6(1):17-29.
WANG Z, LONG Y, WANG J X. Research progress of pre-ignition and super-knock in boost gasoline engine[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2015,6(1):17-29.
- [11] DAHNZ C, HAN K M, SPICHER U, et al. Investigations on pre-ignition in highly supercharged SI engines [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2010,3(1):214-224.
- [12] ZACCARDI J M, ESCUDIE D. Overview of the main mechanisms triggering low-speed pre-ignition in spark-ignition engines[J]. *International Journal of Engine Research*, 2015,16(2):152-165.
- [13] WELLING O, COLLINGS N, WILLIAMS J, et al. Impact of lubricant composition on low-speed pre-ignition [C/OL]. *SAE Paper*, 2014, 2014-01-1213. (2014-04-01). <https://doi.org/10.4271/2014-01-1213>.
- [14] ZAHDEH A, ROTHENBERGER P, NGUYEN W, et al. Fundamental approach to investigate pre-ignition in boosted SI engines[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011,4(1):246-273.
- [15] PALAVEEV S, MAGAR M, KUBACH H, et al. Premature flame initiation in a turbocharged DISI engine-numerical and experimental investigations[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2013,6(1):54-66.
- [16] HAENEL P, SEYFRIED P, KLEEBOEG H, et al. Systematic approach to analyze and characterize pre-ignition events in turbocharged direct-injected gasoline engines [C/OL]. *SAE Paper*, 2011, 2011-01-0343. (2011-04-12). <https://doi.org/10.4271/2011-01-0343>.