

附件：撰稿论文格式

# 甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机多参数优化研究

礼博<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 张佃浩<sup>1</sup>, 毛运涛<sup>1</sup>, 范立云<sup>1</sup>, 隆武强<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 大连理工大学, 能源与动力学院, 大连 116024)

## Research on the multiple-parameter optimization of methanol/diesel JCCI engine with dual-direct injection

LI Bo<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, ZHANG Tianhao<sup>1</sup>, MAO Yuntao<sup>1</sup>, FAN Liyun<sup>1</sup>, LONG Wuqiang<sup>2</sup>

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The methanol/diesel jet controlled compression ignition (JCCI) mode with dual-direct injection has been demonstrated to have good economy and emission performance. The dual-direct injection system has higher flexibility and more complex parameter effects, the three-dimensional numerical simulation combined with optimization algorithm and sensitivity analysis were used in this study to investigate the influence of multiple-parameter on the performance of 186FA engine at 75% engine load. The optimization results show that the initial temperature is between 421.8~431.1 K, the methanol substitution ratio (MSR) is 78.9%~80.8 %, and the diesel jet-injection timing is between -26.64 ~ -22.77 °CA ATDC, which can achieve high economy and emission performance simultaneously. The comparative analysis results of three typical cases show that case2 with late methanol pre-injection timing and diesel jet-injection timing has the best performance, and it presents a typical two-stage high-temperature rapid heat release characteristics. The sensitivity analysis results show that the MSR, initial temperature and diesel jet-injection timing have the most significant effects on the economy performance of methanol/diesel JCCI engine with dual direct injection, while the initial pressure has a weak effect on the engine performance, and soot emission shows a lower level overall.

**摘 要:** 甲醇/柴油双直喷型射流控制压缩着火模式已经被证明具有较好的经济性和排放性。双直喷系统的灵活性更高、参数影响更复杂, 本文采用三维数值模拟结合优化算法与敏感性分析, 在 75% 负荷条件下开展了多参数对 186FA 发动机性能的影响研究。优化结果表明, 初始温度在 421.8~431.1 K 之间, 甲醇替代率在 78.9%~80.8%, 柴油射流正时位于 -26.64 ~ -22.77 °CA ATDC 之间, 可以同时实现较高的经济性和排放性。三个典型算例的对比分析结果表明, 甲醇预喷射正时和柴油射流正时均较晚的算例 2 性能最佳, 且呈现典型的两阶段高温快速放热特征。敏感性分析结果表明, 甲醇替代率、初始温度和柴油射流正时对甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机经济性影响最显著, 初始压力对发动机性能影响较弱, soot 排放整体呈现较低水平。

**关键词:** 甲醇/柴油双直喷; 射流控制压缩着火; 多参数优化; 柴油射流正时; 甲醇替代率

**Key words:** methanol/diesel dual-direct injection; jet controlled compression ignition; multiple-parameter optimization; diesel jet-injection timing; methanol substitution ratio

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 中央高校基本科研项目 (3072023CFJ0301, 3072022QBZ0303)

作者简介: 礼博 (1990-), 男, 讲师, 主要研究方向为发动机燃料喷射技术, E-mail: libo2022@hrbeu.edu.cn;

手机号码: 15040512455

## 0 概述

零碳、碳中和替代燃料的使用,是发动机满足“双碳”目标的最直接技术手段之一<sup>[1]</sup>。其中,利用可再生能源,合成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  制备的绿色甲醇是一种典型的碳中和燃料,被称为“液态阳光”<sup>[2]</sup>。在常温常压下,甲醇为液态,储存运输等基础设施完备,因此,甲醇被认为是发动机最具潜力的替代燃料之一。并且,甲醇分子中含有氧元素,不含碳-碳键,抗爆性好,与烷烃类燃料相比,在降低排放、提高热效率方面具有一定优势。

压燃式发动机具有较高的压缩比,因此其热效率高于点燃式发动机,但是受到扩散燃烧模式的限制,其  $\text{NO}_x$  和 soot 排放较高。相比之下,预混合压燃模式通过燃料的预混合降低局部当量比,形成快速的多点同时稀薄燃烧,可以提高压燃式发动机的经济性和排放性<sup>[3]</sup>。因此,将绿色甲醇燃料应用到预混合压燃模式发动机中,不仅能够实现降碳目标,并且可以有效提升发动机性能。

由于甲醇燃料的着火温度较高,早期研究者通过辅助电热塞<sup>[4]</sup>、添加着火剂<sup>[5]</sup>等实现甲醇预混合气的压燃,但是运行效果不佳。相比之下,通过在甲醇预混合气中混合柴油燃料,提高混合气的反应活性并实现点火,可以有效改善甲醇预混合气的燃烧过程。由于甲醇具有易挥发性,Wei 等人<sup>[6]</sup>通过进气道喷射甲醇,缸内晚喷柴油引燃的形式实现了二元燃料燃烧模式,在 A50 工况下的最大甲醇替代率为 52.7%。Dempsey 等人<sup>[7]</sup>同样采用进气道喷射甲醇的方式,同时缸内早喷柴油形成具有浓度和活性分层的混合气,实现 RCCI 模式,发动机实验结果表明,

在保证进气温度的条件下,甲醇/柴油 RCCI 模式可以有效提升热效率。Li 等人<sup>[8]</sup>利用三维数值模拟结合优化算法,进一步改善了甲醇/柴油 RCCI 模式的燃烧性能,结果表明,最佳的甲醇替代率为 66.5%,可以同时获得高热效率和低排放的稳定燃烧。但是,由于甲醇采用进气道喷射,缸内甲醇混合气近似为均质,因此狭缝效应加剧,且低温区域以及高活性柴油分布较少的低活性区域导致燃烧不充分,THC 和 CO 排放增加,发动机经济性下降。

相比之下,甲醇采用缸内直喷,在气缸内有效控制甲醇与空气的混合过程,结合直喷柴油形成双直喷策略,可以灵活控制缸内当量比、反应活性的分布特性。Ning 等人<sup>[9]</sup>通过汽油缸内直喷喷嘴喷射甲醇燃料,通过直喷柴油引燃,发动机实验结果表明其热效率高于进气道喷射甲醇,且 THC 和 CO 排放显著降低。Jia 等人<sup>[10]</sup>通过柴油喷射器喷射甲醇,同样实现了双直喷策略,但是实验结果表明,高压直喷甲醇导致燃烧相位滞后,燃烧效率降低,主要是因为甲醇的汽化潜热较高,其喷射策略是影响性能的关键因素。

作者前期基于一台两气门单缸风冷 186FA 四冲程发动机,实现甲醇/柴油双直喷型 JCCI 模式<sup>[11]</sup>。即甲醇喷射器喷射可以通过早喷实现预混合燃烧,或通过晚喷实现扩散燃烧,其着火相位受柴油射流的主动控制,具有较高的灵活性和可靠性。发动机实验表明,在中高负荷下,柴油射流引燃甲醇预混合燃烧模式具有更高的热效率,但是受到燃烧速率的限制,为了进一步提升甲醇替代率和发动机负荷范围,需要采用柴油射流引燃甲醇扩散燃烧模式。

其中，双直喷的喷射策略是影响发动机性能的关键，但相关的研究仍然不足，其主要控制参数的影响规律和敏感性仍不明确。因此，本文利用三维数值模拟，结合优化算法（非支配遗传算法 NSGA-II）和敏感性分析，对甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机（甲醇预混合燃烧模式）进行全面优化研究。

1 研究方法

1.1 甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机计算模型

以双直喷型 186FA 发动机台架为原型，建立了包括余隙在内的等比例燃烧室几何模型，其燃烧室采用几何压缩比为 15.5 的扁平形燃烧室。本文的计算从进气门关闭时刻开始，至排气门开启时刻结束，不考虑进、排气过程。台架试验发动机的缸内构造及双直喷喷雾示意图如图 1 所示，图中左侧为预喷喷雾的剖面图，其安装倾角为 10°，右侧所示为射流喷雾的剖面图，其安装倾角为 30°。几何模型的参数设置完全参考试验中的实际参数值，如表 1 所示。

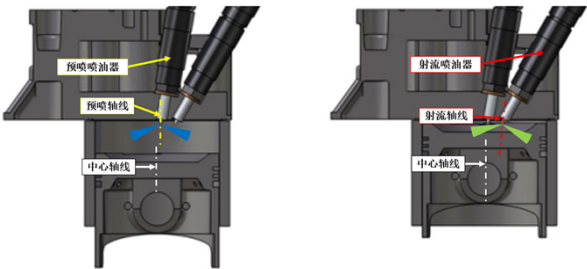


图 1 发动机缸内构造及双直喷喷雾示意图

表 1 几何模型的参数设置

| 项目                          | 参数         |
|-----------------------------|------------|
| 发动机型式                       | 双直喷型 186FA |
| 缸径/mm×行程/mm                 | 86×72      |
| 几何压缩比                       | 15.5:1     |
| 额定功率/kW                     | 5.68       |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 3000       |
| 进气门关闭时刻/°CA ATDC            | -135.5     |
| 排气门开启时刻/°CA ATDC            | 124.5      |
| 甲醇预喷射喷嘴/(孔数×喷孔直径/mm×喷孔夹角/°) | 6×0.18×150 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 柴油射流喷嘴/(孔数×喷孔直径/mm×喷孔夹角/°) | 3×0.12×146 |
|----------------------------|------------|

本文研究涉及多目标分析，对计算时间有较高要求。为了提高计算效率，采用与 Lim 等人<sup>[12]</sup>相同的三维模型简化方法，即假设两个喷油器的喷孔数量相同，均为 6 孔。两个喷油器都配置在气缸的中心，两种燃料（预喷射甲醇和射流柴油）从相同位置的喷孔喷射，喷雾锥角分别与试验参数保持一致。最后采用六分之一燃烧室模型进行计算，图 2 所示为曲轴转角处于 -60 °CA ATDC 时六分之一简化模型及预喷射喷雾与射流喷雾的位置示意图。

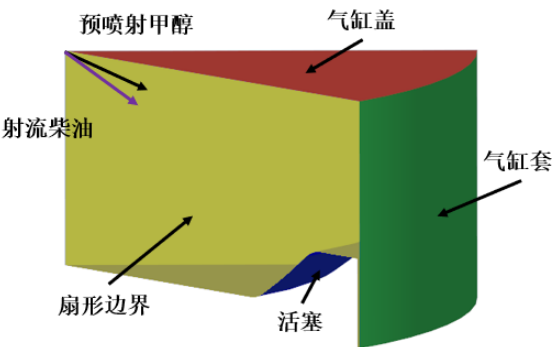


图 2 简化计算模型及喷雾方向示意图

通过 RNG  $k-\varepsilon$  模型预测缸内湍流运动过程，使用 KH-RT 模型预测双直喷喷雾的液滴破碎过程，采用 Chang 等人的简化化学反应机理<sup>[13]</sup>，包含 49 个组分和 163 个反应。该机理使用正庚烷( $nC_7H_{16}$ )代替柴油的化学反应过程，并且还包括甲醇( $CH_3OH$ )的化学反应过程。THC 与 CO 排放结果直接使用简化化学反应机理的计算结果，即使用计算结束时刻缸内的全部碳氢化合物质量作为 THC 排放，使用计算结束时刻计算得到的 CO 的生成量作为 CO 排放。NO<sub>x</sub> 和 soot 分别采用 Extended Zeldovich NO<sub>x</sub> model 和 Hiroyasu soot model 模型进行预测，详细的模型选择与设置可以参考作者前期的工作<sup>[14]</sup>。

1.2 网格设置与计算模型验证

本文的基础网格设置为 2 mm，利用 CONVERGE 软件的自适应网格加密功能对计算过程中的三处固定网格进行自适应加密，包括：甲醇预喷射喷雾发

展过程的加密，柴油射流喷雾发展过程的加密，化学反应过程的加密。为了在保证计算精度的前提下尽可能提高计算效率，本文对比了相同基础网格尺寸下不同自适应加密等级对计算结果以及计算时间的影响，如图 3 所示。可以看出，当加密等级为 1 级时，计算结果与试验值相差较大 当加密等级为 2 级和 3 级时，计算结果与试验值基本吻合。但是当加密等级为 3 级时，计算过程中的最大网格数量超过 60 万，计算时长超过 16 h。因此，为了综合考虑计算精度和计算效率，本文采用 2 级的网格自适应加密。

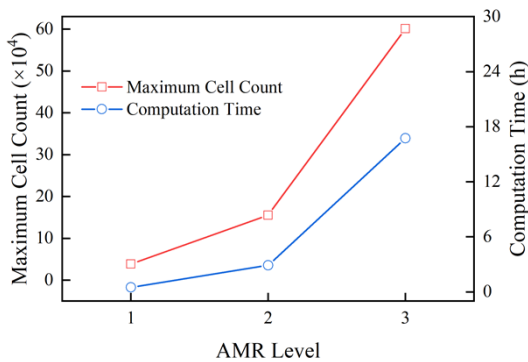
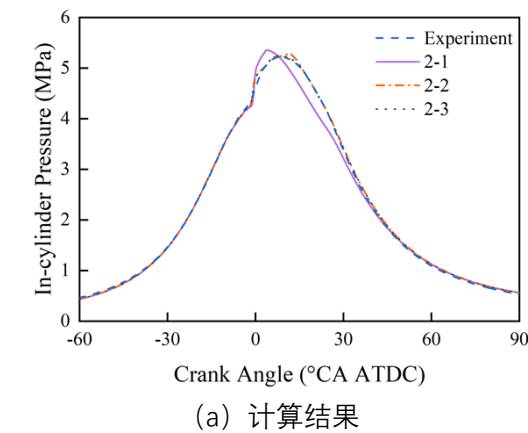


图 3 网格自适应加密等级的影响

使用前期 75% 负荷条件下的甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机台架试验结果对计算模型进行标定<sup>[11]</sup>，图 4 所示为试验结果与计算结果的对比。可以看出计算模型可以准确预测甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机的缸内工作过程。

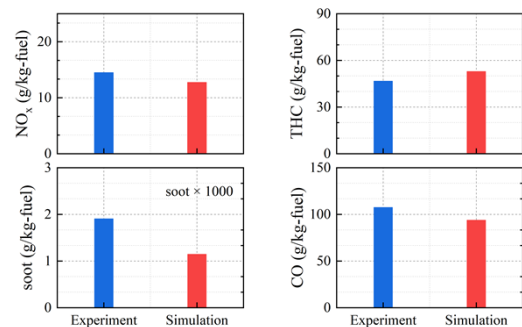
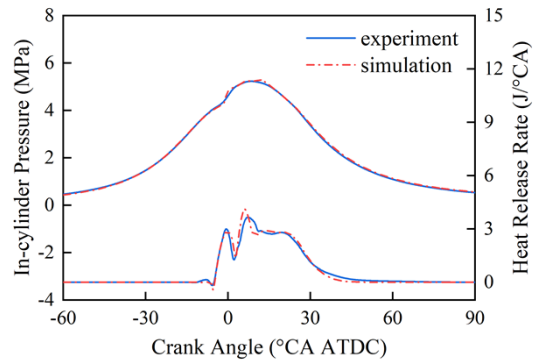


图 4 试验结果与计算结果对比

### 1.3 多参数优化平台

为了实现多参数、多目标的优化，本章将非支配遗传算法：NSGA- II 与 CONVERGE 软件相耦合，通过 Python 脚本搭建三维数值计算和优化算法二者的数据接口，实现双向调用，建立了基于多目标优化算法的三维数值模拟平台，用以协调多参数对发动机性能的影响，全面提升甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机的性能。计算平台的运行流程如图 5 所示。

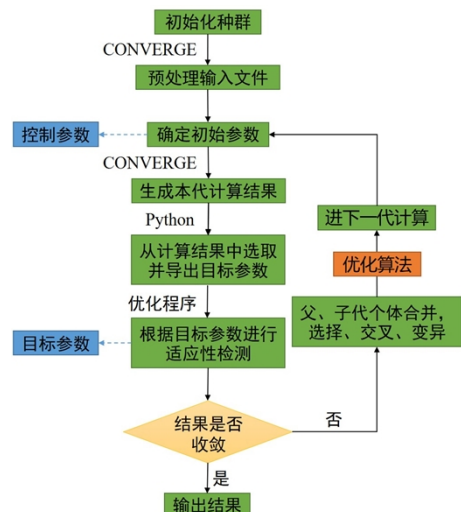


图 5 多参数优化平台运行流程

#### 1.4 参数定义及优化计算设置

前期实验结果表明甲醇预喷射正时、柴油射流正时和甲醇替代率对控制 JCCI 模式燃烧过程、优化发动机性能和降低污染物排放等方面有重要作用。此外, 进气门关闭时刻的缸内初始压力与初始温度对控制缸内的整体当量比有重要作用, 并且能够辅助控制缸内的燃烧过程。因此, 在转速 3000 r·min<sup>-1</sup>, 75% 负荷工况下, 选取以上五个参数作为优化参数, 各个参数的范围如表 2 所示。

表 2 优化参数名称及取值范围

| 参数名称           | 取值范围     |
|----------------|----------|
| 预喷射正时/°CA ATDC | -100~-35 |
| 射流正时/°CA ATDC  | -30~0    |
| 甲醇替代率/%        | 50~100   |
| 初始压力/bar       | 1.2~2.0  |
| 初始温度/K         | 343~433  |

文中  $SOI_{pre}$  表示甲醇预喷射正时,  $SOI_{jet}$  表示柴油射流正时,  $T_{in}$  和  $P_{in}$  表示缸内初始温度和压力。单循环内甲醇的能量与燃料的总能量比值定义为甲醇替代率 MSR, 如公式 (1) 所示:

$$MSR = \frac{M_m \times LHV_m}{M_m \times LHV_m + M_d \times LHV_d} \quad (1)$$

其中,  $M_m$  和  $M_d$  分别表示预喷甲醇与射流柴油的质量,  $LHV_m$  和  $LHV_d$  分别表示甲醇与柴油的低热值。在本文的计算分析中, 无论甲醇替代率如何变化, 甲醇与柴油的燃料总能量保持不变。

由于本文所述发动机使用柴油和甲醇两种燃料, 因此采用当量燃料消耗率 (Equivalent Indicated Specific Fuel Consumption, EISFC) 来评价燃料经济性, 其计算过程如公式 (2) 与公式 (3) 所示:

$$EISFC = \frac{M_d \cdot LHV_d + M_m \cdot LHV_m}{W_i \cdot LHV_d} = \frac{E_{fuel}}{LHV_d \cdot \phi_{pdV}} \quad (2)$$

$$E_{fuel} = M_d \times LHV_d + M_m \times LHV_m \quad (3)$$

式中,  $E_{fuel}$  为燃料总能量,  $\phi_{pdV}$  为发动机运转的指示功率。

声响强度 (Ringing Intensity, RI) 是用来量化压缩点火燃烧中发动机噪声水平的参数, 其计算过程如公式 (4) 所示:

$$RI = \frac{1}{2\gamma} \frac{(\beta(dp/dt)_{max})^2}{p_{max}} \sqrt{\gamma R T_{max}} \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  为气体热容之比 ( $C_p/C_v$ ),  $(dp/dt)_{max}$  为最大压力升高率,  $p_{max}$  为缸内最高压力,  $R$  为气体常数,  $T_{max}$  为缸内气体的最大平均温度。

定义达到总放热量的 10% 时的曲轴转角为 CA10, 表征燃烧起始时刻, 类似地, CA50 表征燃烧相位, CA90 表征燃烧结束时刻。

本文使用的 NSGA-II 算法中, 设计了 30 代, 每一代包含 28 个子代, 因此共包含 840 个设计算例。设计算例限制条件的设定如下: 为了避免发动机敲缸以及降低发动机噪声, 缸内最高压力限制在 12 MPa 以下, 同时因此控制声响强度在 5 MW/m<sup>2</sup> 以下; 为了避免失火, 缸内最高温度的最低值限制在 1100 K 以上; 为了模拟 EGR, 缸内初始 O<sub>2</sub> 质量分数设置为 18%; 此外, 等效燃料消耗率上限设置在 230 g/kWh 以消除热效率过低的算例。在优化过程中, 超过任何一个限制值的个体的都会被舍弃。为了优化发动机的综合性能, 本次优化中以 EISFC、NO<sub>x</sub> 和 soot 为优化目标对设计算例进行优化以得出可以进一步分析的有效解。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 甲醇/柴油双直喷型 JCCI 模式的优化结果

设计算例中所有个体的计算结果分布情况如图 6 所示。可以看出, 随着种群的逐代进化, 三个目标值都逐渐得到了改善, 并且优化过程最终也得到了收敛。经过设定限制条件的筛选, 得到了包含 534 个算例的有效解集, 如图中实心点所示, 初步实现了发动机的性能优化。从二维投影图可以看出, 在优化过程中有效解的 EISFC 与 NO<sub>x</sub> 排放表现出了明显的 trade-off 关系, 在有效解集中, soot 排放值均保持较低水平。

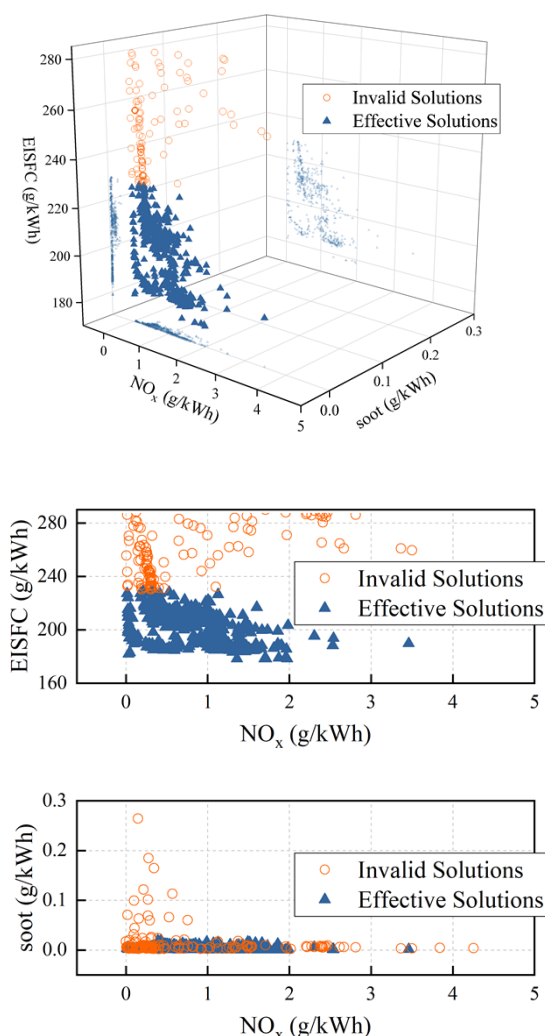


图6 设计算例中所有个体的计算结果

### 2.1.1 优化算例的参数与结果分布

在图6所示的有效解的基础上,根据国VI排放法规,对算例进行进一步的筛选,过滤掉不满足国VI排放标准( $\text{NO}_x$ 和soot)的算例,剩余的算例则构成优化解。图7所示为优化解的EISFC与THC+CO的关系,可以看出,该集合的EISFC与THC+CO的总体排放量成线性正相关关系,这是由于预混合模式发动机运行过程中,燃料的损失主要来源于未完全反应的燃料THC和不充分氧化产生的CO,因此对THC+CO的约束可以近似转化为对燃料消耗率的限制。将EISFC小于200 g/kWh的算例定义为经济性较好的算例,即为高效优化解,如图中实心图标所示,图中空心图标表示算例属于优化解,但EISFC大于200 g/kWh的低效优化解算例。

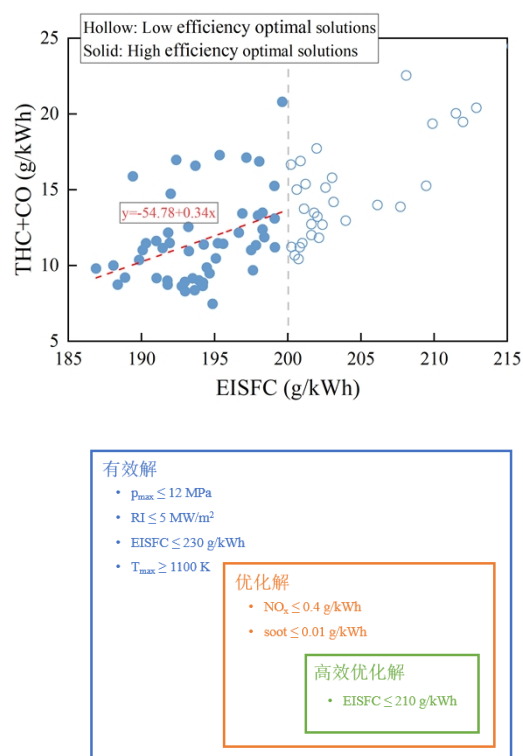


图7 优化解筛选原则及EISFC与THC+CO的关系

图8所示为优化解的初始参数分布情况,可以看出,当射流正时位于 $-26.64 \sim -22.77^\circ\text{CA ATDC}$ 区间时,能实现较高的燃料经济性,即图中存在高效优化解。这主要是因为一方面,射流正时过晚导致滞后的燃烧相位,活塞下行速度加快,燃烧做功能力下降。另一方面,当射流正时过早,充足的油气混合时间导致部分预混合气在缸内扩散至活塞与缸壁间的细小缝隙中,无法参与缸内燃烧过程,未燃燃料会随着废气排出气缸,从而导致燃料损失以及排放物中THC的增加。同时,优化解的初始压力分布较为分散,在1.35~1.88 bar之间,但初始温度和甲醇替代率的变化范围较小,分别为 $421.8 \sim 431.1\text{ K}$ ,  $78.9\% \sim 80.8\%$ 之间,说明该温度范围和甲醇替代率区间是在当前工况下JCCI模式的最佳选择。

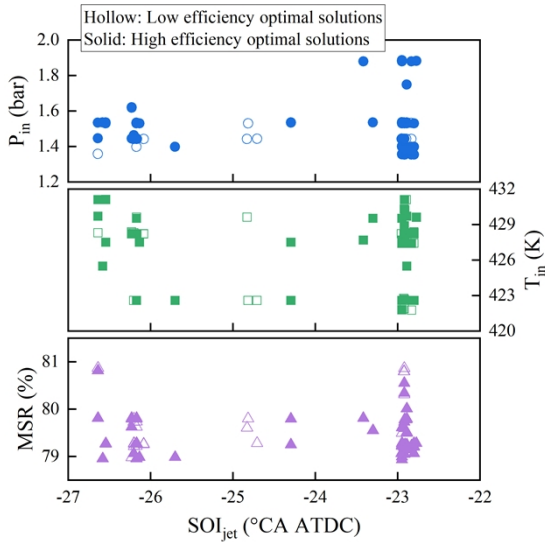


图8 有效解的初始参数分布情况

图9所示为优化解的EISFC、NO<sub>x</sub>、soot与柴油射流正时的关系，其中趋势线表示的是高效优化解随柴油射流正时的变化趋势。可以看出所有优化解的soot排放整体处于较低水平，其变化区间仅为0.0005~0.0016 g/kWh，远低于国VI标准中的0.01 g/kWh，说明应用缸内直喷甲醇制备预混合气的方式与进气道喷射相当，可以有效改善局部当量比，从而降低发动机soot排放。此外，由于甲醇分子中仅有一个碳原子，不存在键能较高的碳-碳键，并且甲醇分子中含有一个自带的氧原子，有利于燃料的充分氧化，这也是soot降低的有效影响因素。随着柴油射流正时的推迟，NO<sub>x</sub>排放逐渐升高，主要是由于射流正时推迟后柴油与空气的混合时间缩短，产生的柴油相对浓区燃烧导致缸内的局部温度上升，进而增加了NO<sub>x</sub>的产生。相比之下，随着柴油射流正时的推迟，EISFC与soot均表现为降低的趋势，这也是因为局部产生的高温有利于促进燃烧过程，从而有效降低soot排放，提高燃料经济性。

图10所示为优化解的柴油射流正时与甲醇预喷射正时的关系。可以看出，为了提升甲醇/柴油双直喷型JCCI模式的燃烧和排放性能，预喷射正时通常设置在-55.24~-51.92°CA ATDC范围内。根据预喷射正时与射流正时的分布情况和性能表现，将高效优化解分为三组。其中Group A具有较早的射流正时，该组内的算例均表现为较低的NO<sub>x</sub>排放；Group B具有较晚的射流正时与较晚的预喷射正时，该组内的算例均表现为较低的soot排放和较低的EISFC；Group C具有较晚的射流正时和相对较早的预喷射正时，该组内的算例则具有较高的THC与CO排放。当预喷射正时接近-60°CA ATDC时，无论射流正时如何变化均只存在经济性较差的优化解，说明预喷射正时过于提前时，预喷射雾的湿壁问题加剧，并且过早的预喷射会延长缸内预混合气的扩散时间，导致部分预喷甲醇逸散到缸内的细小空间内，产生狭缝效应，未燃燃料损失增加，进而使经济性降低。为了更进一步的对比研究，分别从A、B、C三组中各选取一个算例作为典型算例，即为图中的1、2、3点。

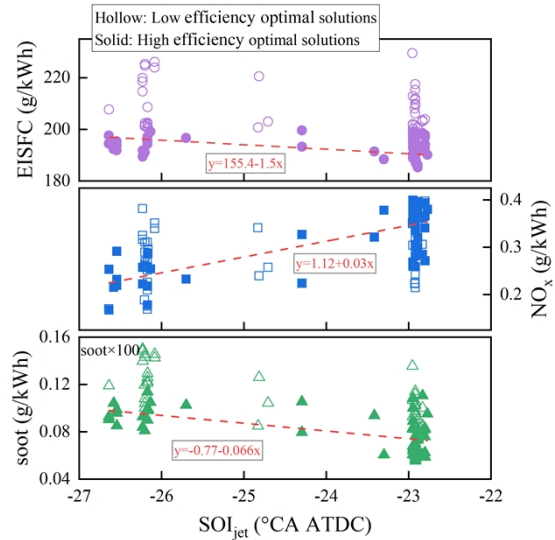


图9 有效解的柴油射流正时与EISFC、NO<sub>x</sub>和soot的关系

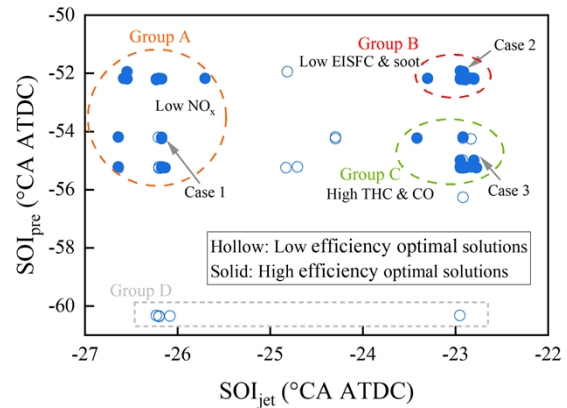


图10 有效解的射流正时与预喷射正时的关系

## 2.1.2 典型算例对比

典型算例 1、算例 2 和算例 3 均可以满足国 VI 标准，并且具有较高的燃料经济性。图 11 所示为典型算例的初始参数和计算结果的对比。从图 11 (a) 可以看出，三个算例的甲醇替代率和初始温度较为接近，算例 3 的初始压力较高，约为 1.88 bar，且算例 3 的预喷射正时最早，约为 -55.22 °CA ATDC。如图 11 (b) 所示，算例 2 的燃烧相位最早，经济性最好但是 NO<sub>x</sub> 排放最高，算例 1 和算例 2 的 EISFC 与 NO<sub>x</sub> 排放表现出了明显的 trade-off 关系，相比之下，由于采用预混燃烧方式，soot 和 NO<sub>x</sub> 之间的 trade-off 关系得到了明显削弱。值得注意的是，在缸内初始温度和甲醇替代率几乎相同的条件下，有着较高缸内初始压力、较早预喷射正时与较晚射流正时的算例 3 的整体仿真结果均较差。

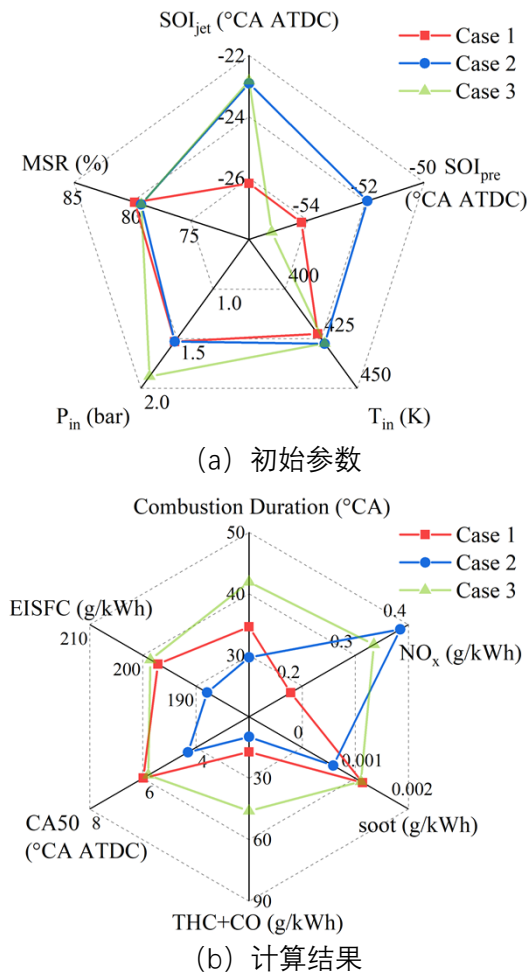
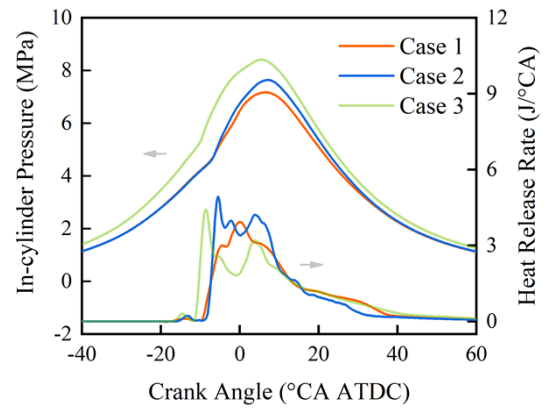


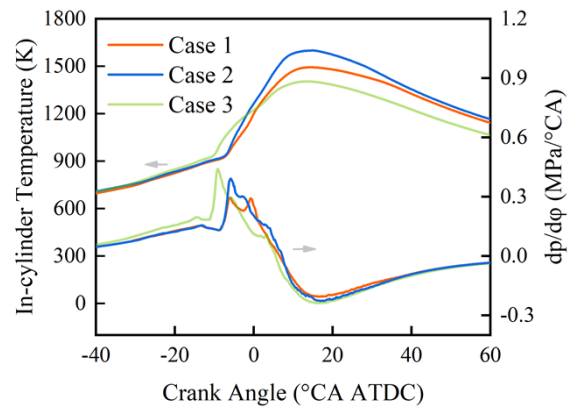
图 11 三个典型算例运行参数与性能参数对比

图 12 所示为三个典型算例的缸压和放热率、缸内平均温度和压升率对比。由图 12 (a) 可以看出，初始压力较高的算例 3，其压缩阶段的缸内压力明显

高于其他算例，过高的压力使缸内的可燃混合气提前达到自燃条件，因此算例 3 的着火时刻明显早于其他两个算例，且初始压力升高率最大，如图 12 (b) 所示。射流正时较早的算例 1 表现为单阶段高温放热，而射流正时较晚的算例 2 和算例 3 则表现出了两阶段高温放热的特性，并且算例 2 的初始放热速率和最高放热速率均高于算例 1，说明其燃烧速率更快，燃烧持续期也更短，因此算例 2 的 EISFC 相比于算例 1 降低了 10.28 g/kWh。值得注意的是，同样体现出了两阶段高温放热特性的算例 3 虽然也具有较高的初始放热率，但是由于算例 3 的甲醇预喷射正时与柴油射流正时的间隔较大，高活性柴油没有充分扩散到甲醇混合气氛内，因此甲醇预喷射主导的后期燃烧速度明显降低，燃烧持续期延长，燃料难以充分燃烧，缸内平均温度下降，最终导致算例 3 的 EISFC 相比于算例 2 增大了 8.69 g/kWh。



(a) 缸内压力和放热率



(b) 缸内平均温度和压力升高率

图 12 典型算例的缸内计算结果对比

图 13 所示为典型算例在 CA50 时刻下缸内当量

比与温度分布。由图 11 可知射流正时较早的算例 1 与预喷射正时和射流正时均较晚的算例 2 的两次燃料喷射间隔相近, 约为  $28 \sim 29^\circ\text{CA}$ , 并且由图 12 可知二者的着火时刻也较为接近, 说明两个算例的双燃料在缸内的相对扩散程度相近。但是算例 2 的 CA50 时刻更为提前, 由图 13 中的温度分布可以看出, 在 CA50 时刻下, 算例 2 的缸内高温区域更加广泛, 说明算例 2 的前期缸内反应更加剧烈, 燃烧速率更快。主要原因在于算例 2 的预喷射与射流正时均较晚, 甲醇/柴油与空气的混合时间明显缩短, 导致缸内出现局部相对浓区, 如图 13 中的当量比分布所示, 浓区内的富燃会产生大范围的高温区域。同时可以看出, 双直喷喷射间隔最大的算例 3 在 CA50 时刻的当量比最小, 即此时缸内的可燃混合物稀薄, 导致算例 3 的缸内平均温度最低。

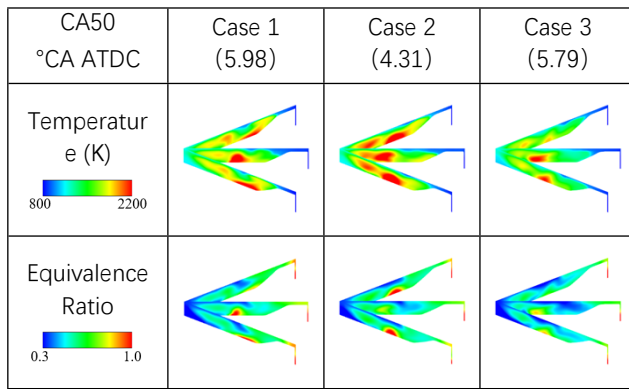


图 13 典型算例在 CA50 时刻下缸内当量比与温度分布

## 2.2 多参数对发动机经济性和排放的影响

根据上文对比三个典型算例的经济性能与排放性能可以发现, 算例 2 具有最好的燃料经济性。此外, 算例 2 的 soot、THC+CO 排放均低于其他两个算例, 并且相对较高的 NOx 排放也能够满足国 VI 标准, 说明其排放性能也相对较好。此外, 对比三个典型算例的缸压和放热率曲线后发现, 算例 2 也表现出了双直喷 JCCI 模式典型的两阶段高温放热特性。因此, 本节以算例 2 为基准算例, 分别改变五个初始参数的数值, 讨论每个参数对双直喷型甲醇/柴油 JCCI 模式发动机性能的影响权重。其中, 五个初始参数的变化率的定义如公式 (5) 所示:

$$\text{Variation}^n = \frac{X^n - X_{base}^n}{X_{max}^n - X_{min}^n} \quad (5)$$

式中,  $X_{base}^n$  表示基准算例的初始参数  $n$  的数值

(如图 11 所示),  $X^n$  表示测试算例的初始参数  $n$  的数值,  $X_{max}^n$  和  $X_{min}^n$  分别表示初始参数  $n$  在多参数分析过程中所能取得的最大值与最小值, 如表 2 所示。Variation 的正负表示初始参数的变化趋势, 当 Variation 为正数时初始参数增大, 当 Variation 为负数时初始参数减小。此外, 当初始参数为预喷射正时与射流正时, Variation 的正值表示喷射时刻的推迟。

### 2.2.1 控制参数对燃料经济性、THC 和 CO 的影响

图 14 所示为控制参数对燃料经济性、THC 和 CO 的影响, 由图 7 所知, EISFC 与 THC 和 CO 的总排放量成正比, 因此 EISFC、THC 和 CO 随初始参数变化而变化的总体趋势相近。可以看出, 随着射流正时的推迟, EISFC、THC 与 CO 均表现出了先减小后增大的趋势, 说明射流正时存在最佳范围区间而使经济性最好。当射流正时提前时 (早于  $\text{Variation}^{SOI_{jet}} = -15\%$ ), 柴油混合时间增加, 高活性局部当量比降低, 燃烧速度下降。当射流正时相对与基准值发生延迟时 (晚于  $\text{Variation}^{SOI_{jet}} = 7.5\%$ ), 滞燃期减小, 导致射流柴油在缸内的扩散时间缩短, 高活性柴油无法充分扩散, 因此使分布在缸内偏远位置的预混甲醇无法被充分引燃。当预喷射正时提前, 过多的混合时间导致狭缝效应加剧, 因此 THC 和 CO 排放增加, 经济性下降。

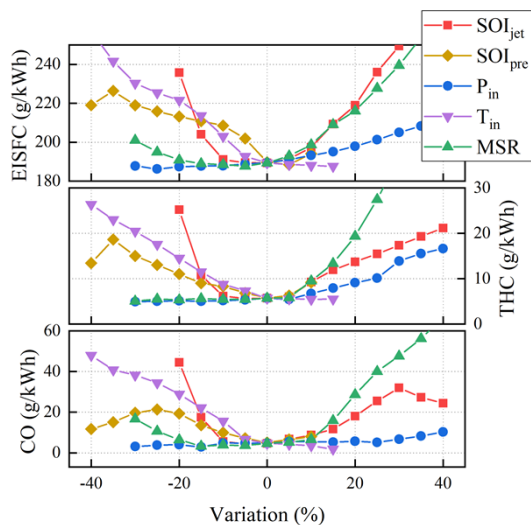


图 14 控制参数对 EISFC、THC 和 CO 的影响

当改变初始压力时，模拟算例的 EISFC、THC 和 CO 变化趋势均较小，尤其是在低初始压力条件下，说明双直喷型甲醇/柴油 JCCI 模式对缸内初始压力并不敏感。当缸内初始温度低于基准算例的取值时，模拟算例的 EISFC、THC 与 CO 数值会大幅增加，但是当进一步增加初始温度时，模拟算例的上述三个参数则无明显变化。因此，为了降低 JCCI 模式的 THC 与 CO 排放，提高其经济性，应满足较高的初始温度和恰当的初始压力。当甲醇替代率相对于基准算例增大时发动机的 EISFC 会出现增大的趋势，即燃料经济性降低。其主要原因在于，当预喷射的甲醇替代率增大时，缸内总体活性和局部当量比降低，导致 THC 与 CO 增大。当甲醇替代率减小时（低于  $\text{Variation}^{MSR} = -15\%$ ），THC 几乎不发生变化，但是 CO 排放增加，说明随着甲醇燃料的减少，柴油喷射量增加，缸内整体活性提高，因此 THC 排放变化不明显，但缸内氧元素降低，氧化反应不充分，因此 CO 排放和 EISFC 增加。

## 2.2.2 控制参数对缸内最大燃烧温度、NOx 和 soot 的影响

图 15 所示为控制参数对缸内燃烧最大平均温度、NOx 和 soot 排放的影响。NOx 与缸内最大燃烧温度近似成正比，soot 排放整体较低，在部分条件下，soot 与 NOx 呈现微弱的 trade-off 关系。对于双直喷型 JCCI 模式，发动机缸内的燃烧过程主要受到射流柴

油的控制，缸内的局部高活性富燃区域会率先着火，进一步引区域周围的预混甲醇，导致引燃区域最终发展成为局部高温区域，即 NOx 的主要生成位置，而局部高温区域的大小会受到射流柴油和预混甲醇在缸内分布情况的影响。因此，调整柴油射流正时和甲醇预喷射正时会对 NOx 有较为明显的影响。当射流正时提前于  $-27.41^\circ\text{CA ATDC}$  时，缸内最大燃烧温度出现了明显下降，这主要是因为当射流正时提前较大时，缸内高活性然后充分混合当量比降低，滞燃期增加，燃烧速度降低，从而导致缸内的燃烧温度降低，同时 soot 也略有增加。

同样地，初始压力对于缸内燃烧最大平均温度、NOx 和 soot 排放的影响很小。随着初始温度的升高，加速化学反应，进而燃烧温度增加，NOx 排放增加。但是，从图 15 可以发现，初始温度高于基准算例时，虽然能够使缸内最大平均温度明显增大，EISFC 并未得到明显改善，反而会导致 NOx 的增大。由于甲醇具有较高的汽化潜热，直喷甲醇吸收大量的热，并且甲醇活性低于柴油，因此随着甲醇替代率的增加，缸内的整体温度会下降，从而抑制 NOx 的产生。并且可以发现，甲醇替代率对 soot 的影响最为明显，当甲醇替代率高于  $83.75\%$  ( $\text{Variation}^{MSR} = 15\%$ ) 时，燃烧速度明显减缓，缸内温度不足，氧化反应减弱导致 soot 排放明显增加。

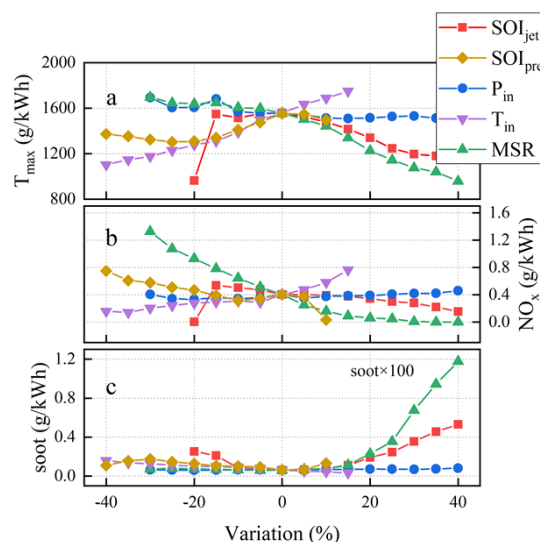


图 15 控制参数对缸内最大燃烧温度、NOx 和 soot 的影响

### 2.2.3 控制参数的影响权重

通过分析可以看出,柴油射流正时、甲醇预喷射正时、初始温度和甲醇替代率对发动机的性能均有较大的影响,但是这四个初始参数对经济性能和排放性能的影响分别有所不同。为了确定每个初始参数对双直喷型甲醇/柴油 JCCI 模式经济性和排放的影响权重,结合图 15 和图 16 所反映的各项信息,总结了各个目标值对五个初始参数的敏感性,结果如表 3 所示。其中,“+”表示初始参数对该目标值有一定的影响,并且“+”越多,代表该初始参数的影响越为突出;而“-”则表示该初始参数对目标值的影响较为微弱,可以忽略不计。初始温度对缸内的燃烧温度有着较为明显的作用,因此其对 EISFC、THC 与 CO 的影响最为明显;射流正时和预喷射正时对缸内的燃料分布有着显著的影响,因此其对经济性和 THC 与 CO 的影响紧随其后;此外,甲醇替代率能够同时影响缸内燃烧温度和燃料分布,因此其对经济性和排放均有显著影响,并且由于其对缸内燃烧温度的影响最为明显,能够有效控制 NO<sub>x</sub>。

表 3 每个目标值对五个初始参数的敏感性

|       | EISFC | THC | CO  | NO <sub>x</sub> | soot |
|-------|-------|-----|-----|-----------------|------|
| 射流正时  | +++   | ++  | ++  | ++              | +    |
| 预喷射正时 | ++    | +   | +   | ++              | -    |
| 初始压力  | +     | +   | -   | -               | -    |
| 初始温度  | +++   | ++  | +++ | ++              | -    |
| 甲醇替代率 | +++   | +++ | +++ | +++             | ++   |

“+”: 具有一定影响性,且“+”越多代表影响权重越大;“-”: 无明显影响

## 3 结论

本文利用三维数值模拟结合优化算法和敏感性分析,在 185FA 发动机的 75%负荷条件下,对甲醇/柴油双直喷型 JCCI 模式开展了多参数优化研究,得到如下结论:

(1) 高效优化解的初始条件应满足初始温度和初始压力在 421.8~431.1 K 和 1.35~1.88 bar 范围内,

甲醇替代率为 78.9%~80.8%,柴油射流正时和甲醇预喷射正时应分别位于 -26.64~-22.77 °CA ATDC 和 -55.24~-51.92 °CA ATDC 之间。甲醇/柴油双直喷型 JCCI 模式整体具有较低的 soot 排放。

(2) 受局部当量比和局部活性的影响,柴油射流正时和甲醇预喷射正时均较晚的算例 2 燃烧相位最早,呈现典型的两阶段高温快速放热特点。相比于算例 1 和算例 3,算例 2 的 EISFC 分别降低 10.28 g/kWh 和 8.69 g/kWh。

(3) 甲醇替代率、初始温度和柴油射流正时对甲醇/柴油双直喷型 JCCI 发动机经济性影响最显著,NO<sub>x</sub> 排放主要受到甲醇替代率的影响,初始压力对发动机性能影响较弱。

### 参考文献:

- [1] 帅石金,王志,马骁等.碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J].汽车安全与节能学报,2021,12(04):417-439.
- [2] 黄震,谢晓敏.碳中和愿景下的能源变革[J].中国科学院院刊,2021,36(09):1010-1018.
- [3] 礼博.柴油射流控制柴/汽油预混合气压燃相位研究[D].大连理工大学,2019.
- [4] Michael S, Timothy B, Ingemar D, et al. CI Methanol and Ethanol combustion using ignition improver[C]. SAE Technical Paper, 2019-01-2232, 2019.
- [5] 崔心存.柴油机使用甲醇燃料 M100 的试验研究[J].柴油机,2007(01):12-18+45.
- [6] Wei H, Yao C, Pan W, et al. To meet demand of Euro V emission legislation urea free for HD diesel engine with DMCC[J]. Fuel, 2017, 207: 33-46.
- [7] Dempsey A B, Walker N R, Reitz R. Effect of piston bowl geometry on dual fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) in a light-duty engine operated with gasoline/diesel and methanol/diesel[J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6(1): 78-100.
- [8] Li Y, Jia M, Chang Y, et al. Parametric study and optimization of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine fueled with methanol and diesel[J]. Energy, 2014, 65: 319-332.

- [9] Ning L, Duan Q, Kou H, et al. Parametric study on effects of methanol injection timing and methanol substitution percentage on combustion and emissions of methanol/diesel dual-fuel direct injection engine at full load[J]. Fuel, 2020, 279: 118424.
- [10] Jia Z, Denbratt I. Experimental investigation into the combustion characteristics of a methanol-Diesel heavy duty engine operated in RCCI mode[J]. Fuel, 2018, 226: 745-753.
- [11] Wang Y, Xiao G, Li B, et al. Study on the performance of diesel-methanol diffusion combustion with dual-direct injection system on a high-speed light-duty engine[J]. Fuel, 2022, 317: 123414.
- [12] Lim J H, Reitz R D. High load (21 bar IMEP) dual fuel RCCI combustion using dual direct injection[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(10).
- [13] Chang Y, Jia M, Li Y, et al. Application of the optimized decoupling methodology for the construction of a skeletal primary reference fuel mechanism focusing on engine-relevant conditions[J]. Frontiers in Mechanical Engineering, 2015, 1: 11.
- [14] Li B, Wang J, Zhang H, et al. Multiple-objective optimization of Jet Controlled Compression Ignition (JCCI) mode with dual-direct injection in a high-speed light-duty engine[J]. Fuel, 2023, 333: 126327.