

不同喷射策略对甲醇稀燃直喷发动机性能的影响

徐扬帆¹, 雷军^{1,2}, 段浩¹, 王锡斌¹, 尹晓军¹, 胡二江¹, 曾科¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 洛阳拖拉机研究所有限公司, 471039, 河南洛阳)

摘要: 为了深入研究单缸直喷式火花点火稀薄燃烧甲醇发动机多因素耦合作用下的性能, 探究了多次喷射策略对甲醇发动机性能的影响。研究选取了3种喷射策略的3个试验组共22个工况, 探究了不同喷射次数、喷射时刻和各次喷射燃料的占比对其动力性、经济性和排放性能的影响。研究表明: 与单次喷射相比, 多次喷射可有效优化甲醇发动机缸内燃烧过程, 使最大缸内压力及其对应的曲轴转角分布更集中, 显著减少劣化循环数量, 减少数量最多达85%, 显著降低循环变动, 最多达65%; 与单次喷射相比, 多次喷射会导致CO、HC排放量上升, 但喷射和点火参数的系统优化可以降低NO_x排放量; 本试验条件下, 3次喷射时刻分别为上止点前270°、180°和90°, 3次喷射比例分别为0.38、0.42和0.20时, 发动机可获得最佳的综合性能。发动机在3次喷射策略下综合性能整体高于1次喷射和2次喷射, 3次喷射策略在优化发动机综合性能方面拥有更高的潜力。

关键词: 甲醇; 稀薄燃烧; 多次喷射; 热效率; 排放特性

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202504005 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0050-10

Influence of Different Injection Strategies on the Performance of Methanol Lean-Burn Direct-Injection Engines

XU Yangfan¹, LEI Jun^{1,2}, DUAN Hao¹, WANG Xibin¹, YIN Xiaojun¹,

HU Erjiang¹, ZENG Ke¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Luoyang Tractor Research Institute Co., Ltd., Luoyang, Henan 471039, China)

Abstract: For a single-cylinder direct-injection spark-ignition lean-burn methanol engine, the influence of multiple injection strategies on engine performance is investigated. Three experimental groups with three different injection strategies are selected for a total of 22 operating conditions to explore the impact of varying injection frequencies, timing, and fuel proportions on the engine's power, economy, and emissions performance. The research results show that compared to single injection, multiple injections can effectively optimize the in-cylinder combustion process of methanol engines, concentrating the maximum in-cylinder pressure and its corresponding crank angle distribution, significantly reducing the number of degradation cycles by up to 85% and cycle-to-cycle variations by up to 65%. While multiple injections may lead to increased CO and HC emissions compared to single injection, systematic optimization of injection

收稿日期: 2024-11-22。 作者简介: 徐扬帆(2002—), 男, 硕士生; 尹晓军(通信作者), 男, 博士, 助理教授。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176131)。

网络出版时间: 2024-12-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241230.1720.004>

and ignition parameters can reduce NO_x emissions. Under the conditions of this study, the optimal performance is achieved with injection timings of 270° , 180° , and 90° before top dead center for the three injections, with fuel proportions of 0.38, 0.42, and 0.20, respectively. The engine achieves the best comprehensive performance with these settings. Overall, the engine's comprehensive performance under the three injection strategy surpasses that of one or two injections, indicating that the three-injection strategy has higher potential for optimizing the engine's comprehensive performance.

Keywords: methanol; lean burn; multiple-injection; thermal efficiency; emissions characteristics

在我国积极推动节能减排、全力冲刺双碳目标的重要历史背景下,鉴于国内石油产量未达预期增长水平且柴汽比偏大的现状^[1],探寻柴油的低碳替代燃料已成为当务之急。甲醇因具备出色的抗爆性、较高的火焰传播速度以及清洁可再生^[2-4]等优良特性,被视作最具发展潜力的内燃机替代燃料之一^[5-7]。然而,甲醇同样有强金属腐蚀性、较大毒性和高甲醛排放量^[8]的缺点。

稀薄燃烧是一种可燃燃气在高过量空气系数条件下的先进燃烧模式,该模式下,混合气中空气量远高于理论上燃料完全燃烧所需的空气量,有利于促进可燃气的完全燃烧,进而显著降低 CO 、 CH 和 NO_x 的排放,并有效提升燃烧效率^[9-10]。然而,由于稀燃模式下混合气浓度较低且燃烧速度缓慢,容易引发缸内燃烧不稳定的问题^[11]。甲醇具有辛烷值高^[12]、汽化潜热大和着火温度高的特点,应用于稀薄燃烧发动机时面临冷启动困难和燃烧恶化等挑战^[13]。

优化喷射策略是改善发动机缸内燃烧过程、提高燃烧效率和减少排放的有效措施。Jiang 等^[14]研究表明,多次喷射能够有效降低 NO_x 的排放;Liu 等^[15]研究了多次喷射对废气再循环(EGR)发动机性能的影响,结果显示在优化喷射策略后,发动机的排放特性、热效率和爆震强度均得到了改善;文献^[16]通过对柴油机在不同负载工况下应用多次喷射策略,发现多次喷射可有效减少颗粒物排放;Huang 等^[17]研究了多次喷射对天然气-柴油双燃料发动机经济性的影响,结果发现适当的二次喷射策略可有效提高发动机指示热效率,最高可达 41.2%。

目前,国内对甲醇发动机的研究大多局限于单个或少数几个参数对甲醇发动机性能的影响。孙晓东等^[18]研究了不同工况下的不同喷射时刻对发动机性能的影响;黄震等^[19]研究了甲醇与汽油的双燃料发动机的燃烧和排放特性;牡丹丰等^[20]研究了结构参数对甲醇发动机性能的影响。针对多因素耦合

作用下甲醇发动机的性能研究缺乏的问题,应深入研究喷射策略参数间的交互作用,构建综合性能优化的喷射策略模型,系统优化喷射参数以实现发动机综合性能的最优化。

本文针对一台甲醇稀燃发动机,深入探究了不同喷射策略对发动机燃烧及排放特性的影响机制,旨在突破现有研究局限,通过探寻合适的喷射策略,为提升甲醇发动机的综合性能提供参考。

1 试验系统及研究方案

1.1 试验台架与设备

试验用甲醇稀燃直喷(DI)发动机是由一台单缸四冲程、自然吸气柴油机改造而来,改造后发动机的主要参数如表 1 所示。为降低发动机爆震倾向,对活塞顶部进行了部分切削处理,使压缩比从 19 降至 15。为实现发动机的火花点火,在气缸盖中心额外安装了一个火花塞用于混合气的点燃。试验采用的甲醇为无水甲醇 CH_3OH ,其主要理化特性参数如表 2 所示。

表 1 发动机主要参数	
Table 1 Specification of the test engine	
参数	数值
排量/L	0.498
缸径/mm	92
行程/mm	75
压缩比	15

表 2 试验燃料的理化特性参数 ^[21]	
Table 2 Physical and chemical properties of test fuel ^[21]	
参数	数值
十六烷值	<5
辛烷值	111
低热值/($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	20.1
汽化潜热/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1 100

甲醇发动机台架测试系统如图 1 所示,其中发动机转速和扭矩通过电力测功机(CAC37)监测,缸内压力采用压电传感器(Kistler 6058A)和电荷放大器(Kistler 5064)进行测算。利用带有 36-2 齿的信号盘与磁电传感器产生曲轴转速脉冲信号,并经曲轴转角适配器(Kistler 2619A11)处理后,获得分辨率为 0.1° 的曲轴转角信号。燃烧分析仪(Kistler

Ki-box)用于同步记录缸内压力和曲轴转角数据,以此得到 200 个连续循环的缸内压力数据。过量空气系数通过空气燃料比分析仪(Horiba MEXA-730 λ)和排气氧传感器联合测定。发动机常见污染物排放由排气分析仪(AVL 4000 L)测量,采用本课题组自主研发的电子控制单元(ECU)对点火正时(ST)和喷射参数进行实时、精确的控制。

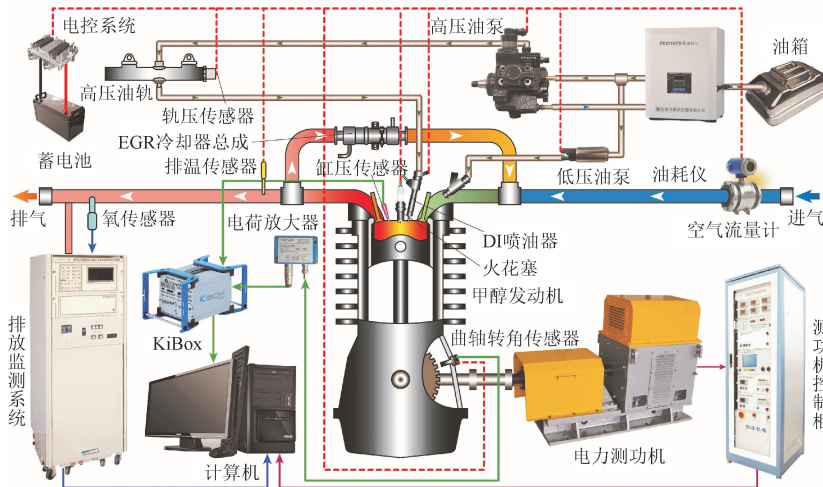


图 1 发动机台架测试系统

Fig. 1 Engine set-up and instrumentation layout

1.2 试验方案

所有试验均在发动机转速为 $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、高过量空气系数 λ 为 1.35 的条件下进行。甲醇喷射压力固定为 18 MPa,每循环甲醇喷射量固定为 41.15 mg。在各个工况下,点火正时均选取各自的最佳扭矩最小提前角(MBT)。以单次喷射预混稀薄燃烧模式作为基准组,其喷射时刻设置为压缩上止点前 270° 。随后,设定 A 组试验在第 1 次喷射燃料占比 r_1 为 0.80、第 2 次喷射燃料占比 r_2 为 0.20 以及第 1 次喷射时刻 θ_1 为上止点前 270° 保持不变的情况下,改变第 2 次喷射时刻 θ_2 ,详细工况参数如表 3 所示。设定 B 组试验在 θ_1 为上止点前 270° 、 θ_2 为上止点前 100° 保持不变的情况下,改变 r_1 、 r_2 ,详细工况参数如表 4 所示。设定 C 组试验在 θ_1 为上止点前 270° 、 θ_2 为上止点前 180° 和第 3 次喷射时刻 θ_3 为上止点前 90° 保持不变的情况下,改变 r_1 、 r_2 和第 3 次喷射燃料占比 r_3 ,详细工况参数如表 5 所示。

发动机相邻循环间可能因气缸震动、充量系数变化等因素产生燃烧循环变动^[22],从而对燃料利用率、输出功率以及排放等产生影响^[23]。文献[24]指出,优化循环变动可使输出功率增加 10%。本文采

用指示平均有效压力(IMEP)的循环变动系数 S 来表征循环变动的大小,计算公式^[25]如下

$$p_i = \frac{\int_{-360}^{360} p dv}{V_d} \quad (1)$$

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$S = \frac{\sigma}{\bar{p}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: p 为瞬时缸内压力; V_d 为发动机排量; i 为循环编号,表示第 i 个循环; p_i 为第 i 个循环的平均有效压力; σ 为 p_i 的标准差; $\bar{p}$ 为 p_i 的平均值; $n=200$ 为循环总数。

定义多属性决策函数 W ,用于对不同试验组 5 个维度的多重属性进行综合评价,计算公式如下

$$W = \sum_j w_j A_j \frac{x_j - x_0}{x_0} \quad (5)$$

式中: j 为维度编号,表示第 j 个维度; x_j 为 5 个维度

的参数,分别为指示热效率(ITE)、S、CO 排放、HC 排放、NO_x 排放; x_0 为 5 项指标的基准值; A_j 为对 5 项指标的符号修正,对于有益指标取正数,有害指标取负数,分别取为 1、-1、-1、-1 和 -1; W_j 为 5 个指标的价值权重,利用层次分析法得到 W_j 分别为 0.363、0.198、0.115、0.109、0.215。

表 3 A 组详细工况参数

Table 3 Detailed operating parameters of Group A

组别	$\theta_2/(^{\circ})$
A1	180
A2	160
A3	140
A4	120
A5	100
A6	80
A7	60

表 4 B 组详细工况参数

Table 4 Detailed operating parameters of Group B

组别	r_1	r_2
B1	0.88	0.12
B2	0.80	0.20
B3	0.72	0.28
B4	0.64	0.36
B5	0.56	0.44
B6	0.48	0.52
B7	0.40	0.60

表 5 C 组详细工况参数

Table 5 Detailed operating parameters of Group C

组别	r_1	r_2	r_3
C1	0.44	0.44	0.12
C2	0.44	0.38	0.18
C3	0.44	0.32	0.24
C4	0.44	0.26	0.30
C5	0.50	0.30	0.20
C6	0.44	0.36	0.20
C7	0.38	0.42	0.20
C8	0.32	0.48	0.20

2 试验结果与讨论

2.1 A 组试验结果分析

受循环变动影响,循环间的最大缸内压力 $p_{\max}$

及其对应的曲轴转角 $\beta_{\max}$ 存在明显差异。依据 $p_{\max}$ 、 $\beta_{\max}$ 的分布位置与关系,整个二维坐标平面可划分为钩背区、线性区和回归区 3 个区域^[26-28]。线性区中 $p_{\max}$ 、 $\beta_{\max}$ 呈线性变化,该区域表征燃烧良好;钩背区中 $\beta_{\max}$ 变化不明显,但 $p_{\max}$ 变化显著,该区域燃烧速率较低,循环变动较大,表征燃烧不良;回归区中 $p_{\max}$ 、 $\beta_{\max}$ 均较低,该区域燃烧速率过低、燃烧不充分,燃烧产生的压力升高不足以弥补体积膨胀导致的压力降低, $\beta_{\max}$ 推迟至上止点附近,表征燃烧较差。本文定义位于钩背区或回归区的循环为劣化循环。

A 组循环分布情况如表 6 所示,基准组燃烧效果最差,有 13%的循环位于钩背区,2%的循环位于回归区。这是因为在单次喷射时,循环间随机性较大,混合气混合不均匀的可能性较高,从而对火核的形成和发展产生阻碍,降低了燃烧速率。而在引入二次喷射策略后,A 组平均劣化循环数为 8.57,相较于基准组的 30 减少了 71.43%。对于工况 A1~A5,随着 θ_2 的减小,线性区循环数量所占比例增加,直至 A5 工况时,所有循环都位于线性区内;对于工况 A5~A7,随着 θ_2 进一步减小,循环逐渐脱离线性区。这是因为在 θ_2 较大时,随着第 2 次喷射的推迟,第 1 次喷射的甲醇燃料液滴有更充足的时间蒸发扩散并与空气混合,燃烧更充分,所以线性区循环占比上升,直到 θ_2 为上止点前 100°(A5)时达到最佳状态;随着第 2 次喷射的进一步推迟,由于喷射时刻过晚,第 2 次喷射的甲醇燃料液滴没有足够的时间蒸发扩散,致使燃烧质量下降,线性区循环数量占比再次降低。

表 6 A 组循环分布表

Table 6 Distribution table of cycle situation in Group A

组别	循环数		
	线性区	钩背区	回归区
基准组	170	26	4
A1	183	15	2
A2	190	9	1
A3	191	9	0
A4	199	1	0
A5	200	0	0
A6	191	9	0
A7	186	14	0

图 2 展示了 A 组甲醇发动机 IMEP 的循环变

动系数及指示热效率。从不同工况的 S 分布情况来看,随着 θ_2 的推迟, S 逐渐降低, θ_2 为上止点前 100° (A5) 时达到最低值;随着 θ_2 的进一步推迟, S 又逐渐增加。在采用单次喷射策略时,因为混合气整体偏稀,且缸内气流随机性较大,火花塞附近的局部空燃比会随机偏离平均空燃比,导致单次喷射的循环一致性较差。对于 A1~A5 工况,随着 θ_2 的推迟,混合气有更充裕的时间混合均匀,随机性降低,循环间的差异也随之减小。而 A6、A7 工况下 S 再次升高,这是因为当第 2 次喷射发生在上止点前 80° 之后,后期喷入的甲醇几乎没有足够时间蒸发,使得火花塞周围的混合气混合效果不佳。此外,甲醇液滴的集中分布还会使局部温度较低,不利于火核的形成和火焰的发展。

由图 2 可知,甲醇发动机指示热效率随着 θ_2 的延迟展示出先增加后减小的趋势,并在喷射时刻为上止点前 120° (A4) 时达到最大值 31.13%。这是由于随着 θ_2 的推迟,火花塞附近的局部浓区增多,燃烧时间得以缩短,燃烧稳定性得到改善,进而使指示热效率提高。随着 θ_2 进一步推迟,指示热效率迅速下降。这是因为气缸内部空间减小,部分燃料撞击壁面和活塞形成液膜,其蒸发和扩散受到抑制,导致缸内燃烧不充分,从而造成热效率降低。

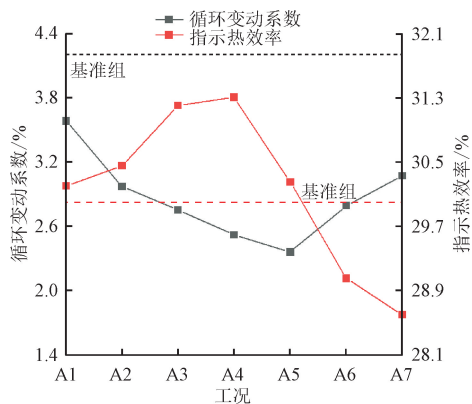


图 2 A 组循环变动系数 S 及指示热效率

Fig. 2 S and indicating thermal efficiency of Group A

图 3 展示了 A 组甲醇发动机的各污染物排放情况。在本试验中,HC 排放来源与传统内燃机有所不同,主要源于狭隙效应和局部过稀淬熄^[29]。对于 A1~A4 工况,HC 排放均低于单次喷射基准组。这是因为在压缩行程早期进行低比例的第 2 次喷射能够形成分层混合气,这种分层混合气可促进火焰的形成与发展,同时降低火焰淬熄的可能性。然而,当 θ_2 晚于上止点前 120° 时,HC 排放量会随着 θ_2 的

进一步推迟而急剧上升。当 θ_2 为上止点前 60° (A7) 时,HC 排放增加到 6.6×10^{-4} ,达到基准组 HC 排放量 3.7×10^{-4} 的 1.78 倍。这是因为部分甲醇液滴附着在活塞顶部,在压缩过程中被挤入活塞和气缸壁之间的缝隙里,其蒸发、扩散和燃烧速度大幅降低,甚至无法参与燃烧。

在内燃机中,几乎所有的 NO_x 都是由氮气在高温富氧环境下生成的,而燃烧温度取决于燃料的反应速率、燃烧均匀程度和着火延迟期^[30-32]。本试验中,因为试验组的 λ 相同,所以在不同工况下,燃烧速率和燃烧均匀性的差异是造成 NO_x 排放差异的关键因素。由图 3 可知,当第 2 次喷射时刻较早时,混合气质量较好,火焰传播速度快,缸内温度较高,有利于 NO_x 的形成,因此 A1、A2、A4 工况下的 NO_x 排放水平较高。随着 θ_2 进一步推迟,混合气质量变差,局部浓区域增加,燃烧温度降低,进而导致 NO_x 排放减少。

对于一般发动机而言,CO 的产生主要取决于运行负载、空燃比^[33]和燃料黏度^[34],本试验中,各个试验组的负载和燃料黏度均保持相同,因此 CO 排放主要受空燃比的影响。从图 3 可以看出,CO 排放量随着第 2 次喷射角度的推迟而上升,特别是当 θ_2 推迟超过上止点前 120° (A4) 时,CO 排放会迅速增加,这是因为随着第 2 次喷射的推迟,部分新加入的燃料不容易混合均匀,形成局部浓区,进而恶化燃烧。

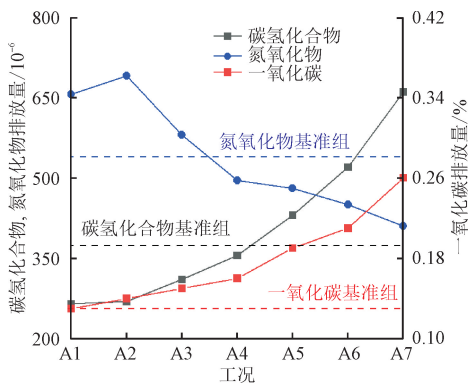


图 3 A 组各污染物排放情况

Fig. 3 Emissions of Group A

2.2 B 组试验结果分析

表 7 展示了 B 组各工况下的循环分布情况, B 组平均劣化循环数为 4.57,相较于基准组 (30) 减少了 84.77%,且随着 r_2 的提高,线性区循环占比展示上升趋势。这是因为增加第 2 次喷射的燃料量有利

于混合气的混合,使得 $p_{\max}、\beta_{\max}$ 的分布更加集中。对于 B6、B7 工况而言,由于火花塞附近的燃料浓度更高,能够稳定地形成均匀混合气,所有循环均位于线性区。

表 7 B 组循环分布情况

Table 7 Distribution table of cycle situation in Group B

组别	循环数		
	线性区	钩背区	回归区
基准组	170	26	4
B1	189	10	1
B2	193	7	0
B3	193	6	1
B4	194	6	0
B5	199	1	0
B6	200	0	0
B7	200	0	0

图 4 展示了 B 组甲醇发动机 IMEP 的循环变动系数及指示热效率。从 S 的分布情况来看,随着 r_2 的提高,S 先减小后增大,当 r_2 为 0.44(B5)时达到最优。这是因为较大的 r_2 有利于在火花塞周围形成良好的分层混合气。然而,随着 r_2 进一步增大,甲醇蒸发速度减慢,火花塞周围混合气的温度显著降低,不利于着火,从而导致 S 增大。

此外,与 A 组的原因相似,随着 r_2 的增大,火花塞附近的局部浓区增多,燃烧时间得以缩短,改善了燃烧稳定性,从而提高了指示热效率。随着 r_2 进一步增大,由于部分燃料撞击壁面和活塞,蒸发和扩散受到抑制,导致缸内燃烧不充分,燃烧效率下降。

图 5 展示了 B 组甲醇发动机的各污染物排放情况,HC 排放随 r_2 的增大而增加。这是因为 r_2 增大时,相应的喷射时间延长,在喷射后期,气缸内气流运动强度减弱,增加了形成局部浓区和燃料液膜的可能性,使得部分甲醇在燃烧起始阶段仍呈液滴或液膜状态,难以完全燃烧。

由图 5 可知,当 r_2 较小时,第 2 次喷射的甲醇能够在火花塞周围充分混合,从而使火焰传播加速,缸内燃烧温度提高,促进了 NO_x 的形成,B1 工况下的 NO_x 排放较高。然而,随着 r_2 增大,混合气质量逐渐变差,局部浓区和液膜增多,燃烧温度降低,进而导致 NO_x 排放减少。对于 B1~B7 工况,CO 排放随 r_2 的增大呈单调增加趋势。当 r_2 增大至 0.60

(B7)时,CO 排放达到最大值 0.29%,相较于基准值 0.13%高出了 1.23 倍。这是因为 r_2 的增加致使第 2 次喷射的甲醇液滴的蒸发、扩散和混合形成均质混合气的难度升高,局部浓区增多。

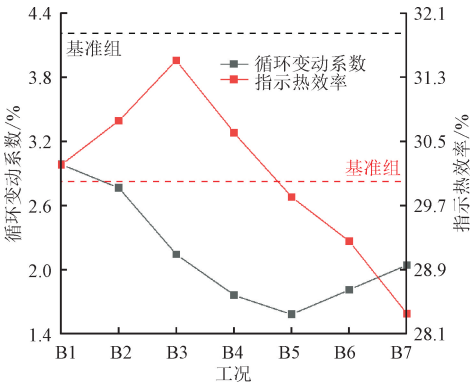


图 4 B 组循环变动系数及指示热效率

Fig. 4 S and indicating thermal efficiency of Group B

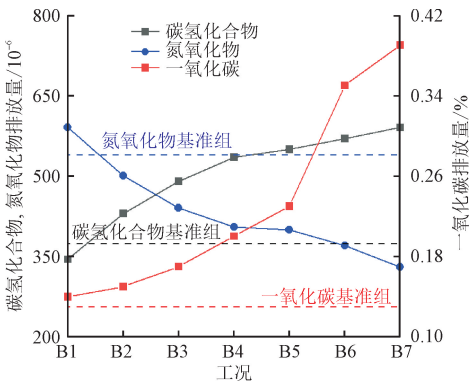


图 5 B 组各污染物排放情况

Fig. 5 Pollutant emissions of Group B

2.3 C 组试验结果分析

C1~C8 工况属于 3 次喷射策略下的试验组,其中 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 固定,通过改变 3 次喷射燃料占比 $r_1、r_2、r_3$ 来开展试验,各个试验组均展现出优于基准组的循环特征,表 8 展示了各工况的循环情况。分析 C1~C4 和 C6 工况可知,随着 r_3 的增加,燃烧逐渐增强,这表明第 3 次喷射对 $p_{\max}、\beta_{\max}$ 的分布影响更为显著。为有效改善 $p_{\max}、\beta_{\max}$ 的分布状况,第 3 次喷射燃料占比应不低于 20%。与 2 次喷射策略相比,C 组的 $p_{\max}、\beta_{\max}$ 分布更集中于线性区,且平均劣化循环数为 4.5,相较于基准组的 30 减少了 85%,这是因为 3 次喷射所形成混合气的浓度梯度更有利于火焰的发展与传播。

表 8 C 组循环分布情况

Table 8 Distribution table of cycle situation in Group C

组别	循环数量		
	线性区	钩背区	回归区
基准组	170	26	4
C1	190	10	0
C2	196	4	0
C3	195	5	0
C4	197	3	0
C5	193	7	0
C6	196	4	0
C7	198	2	0
C8	199	1	0

图 6 展示了 C 组甲醇发动机 IMEP 的循环变动系数及指示热效率。相较于 2 次喷射,3 次喷射的循环稳定性更佳,在 3 次喷射策略下,各工况 S 的平均值小于 2%,比基准组降低了 50% 以上。对于 C1~C4 工况,S 随着 r_2 的降低和 r_3 的增加而减小,这是因为第 3 次喷射能够对甲醇在气缸中的分布产生直接影响。当 r_3 增加时,3 次喷射使得在火花塞附近更易于形成均匀混合气,降低了燃烧不确定性,提高了循环一致性。对于 C5~C8 工况,在 r_3 固定为 0.20 的情况下,随着 r_2 的增加,S 进一步降低。在试验组的 23 个工况中,C8 工况的 S 最低,为 1.49%,表明将 r_3 维持在 0.20,同时增加第 2 次喷油比例,能够在确保混合气有效分层的前提下,避免产生更多的局部浓区,从而显著提高循环一致性。此外,由于第 1、2 次喷射时刻较早,甲醇有充足的时间进行蒸发、混合和扩散,所以两次喷射对应的燃料比例变化对点火时燃油分布的影响减弱,导致 S 变化较小。

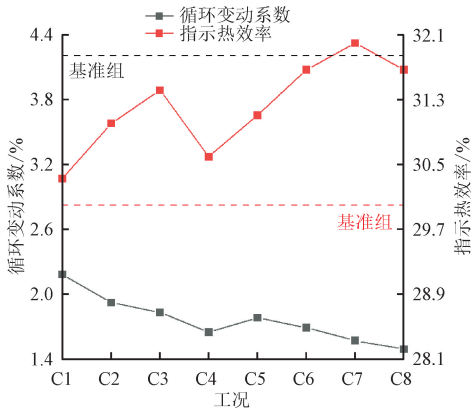


图 6 C 组循环变动系数 S 及指示热效率

Fig. 6 S and indicating thermal efficiency of Group C

由图 6 可知,C 组各工况的指示热效率均处于较高水平。这是因为 3 次喷射策略能够缩短每次喷射的持续时间,降低喷雾动能,进而减小燃料对壁面的冲击可能性,使得燃料浓区和油膜明显减少,混合气的均匀性提高。

图 7 展示了 C 组甲醇发动机的各污染物排放情况,在 3 次喷射策略下,HC 排放量相较于 2 次喷射策略显著降低,但仍高于基准值。对于 C1~C4 工况,HC 排放量随着 r_3 的增加而上升,这主要是因为局部浓区和不完全燃烧比例的增加;对于 C5~C8 工况,随着 r_2 的增加,HC 排放量呈下降趋势,这可能是由于着火推迟使排气温度升高,从而有利于 HC 成分的进一步氧化。

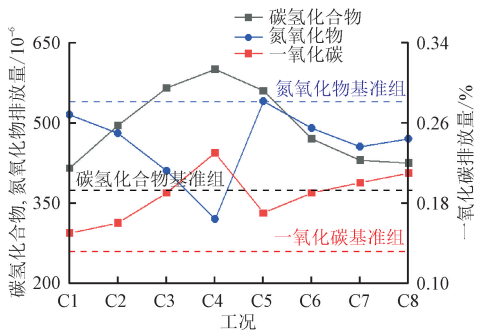


图 7 C 组各污染物排放情况

Fig. 7 Pollutant emissions of Group C

由图 7 可知,在 3 次喷射策略下,各个工况下的 NO_x 排放均优于基准值,尤其是 C1~C4 工况, NO_x 排放下降明显,这主要是因为第 3 次喷射燃料占比增加导致燃烧温度降低。C5~C8 工况中 NO_x 排放略有下降,主要是由于点火正时推迟,使得缸内温度下降,从而 NO_x 排放相应减少。

对比图 7、图 5 可知,3 次喷射策略对 CO 排放有明显的改善作用。这是因为增加喷射次数有利于提升缸内混合气的均匀性。对于 C5~C8 工况,CO 排放的增加相对缓慢,这是由于第 2 次喷射时刻较早(上止点前 180°),甲醇液滴有较为充足的时间进行蒸发和扩散,缸内燃料浓区并未过度增加。

2.4 发动机综合性能评价

图 8 展示了不同工况下的多属性决策函数,随着 θ_2 的延迟以及 r_2 的增加,A 组、B 组的多属性决策函数值均展示出先升高后降低的变化趋势。其中,最佳的 θ_2 、 r_2 分别为上止点前 120° 和 0.28,其对应工况下的发动机性能均大幅优于基准组。当 θ_2 晚于上止点前 120° 或者 r_2 大于 0.28 时,W 迅速下降,发动机整体性能恶化。在 A6、A7、B6 和 B7 工

况下,发动机性能甚至不及基准组。3 次喷射的 W 值总体上高于 2 次喷射试验组,并且 C 组所有工况均高于基准组,这说明 3 次喷射策略总体优于 2 次喷射策略,且 3 次喷射策略在优化发动机性能方面有更大的潜力。在所有工况中,最大 W 值出现在 C7 工况,达到了 0.103,高于其他工况。本试验中,3 次喷射时刻分别为上止点前 270°、180°和 90°,且 3 次喷射比例分别为 0.38、0.42 和 0.20 时,发动机可获得最佳的综合性能。

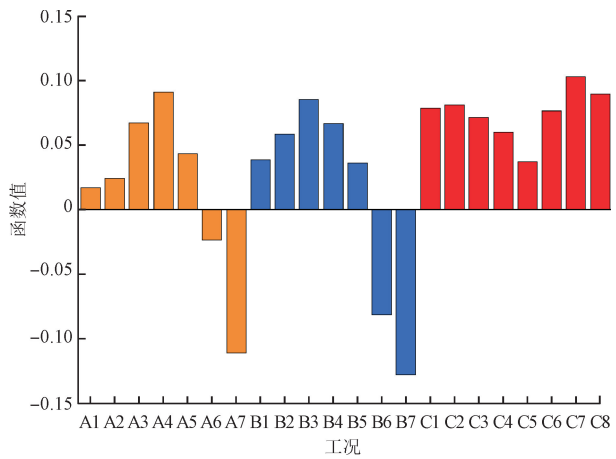


图 8 不同工况下的多属性决策函数
Fig. 8 Multi attribute decision function

3 结论

本研究对甲醇稀燃发动机的不同喷射策略进行了试验研究,得到如下主要结论。

(1)多次喷射策略对甲醇发动机燃烧过程优化效果显著,其中 3 次喷射策略使劣化循环数较基准组平均降低 85%。同时,多次喷射能有效抑制循环变动,在 C8 工况下,循环变动系数低至 1.49%,相比基准组降低 65%,显著增强了发动机工作过程的稳定性。

(2)随着喷射次数增多、喷射时刻推迟以及第 2、3 次喷射量占比上升,NO_x 排放量呈下降态势,但 CO 和 HC 排放有所增加。

(3)C7 工况下,当 3 次喷射时刻依次设定为上止点前 270°、180°和 90°,且喷射比例分别为 0.38、0.42 和 0.20 时,发动机可达成最佳综合性能,相比基准组提升了 10.3%,为甲醇稀燃发动机喷射策略的优化提供了精准的参数组合范例。

参考文献:

[1] 姚春德. 甲醇在柴油机上应用的技术进展 [J]. 中外

能源, 2009, 14(11): 38-44.
YAO Chunde. Advances in technologies for using methanol in diesel [J]. Sino-Global Energy, 2009, 14 (11): 38-44.
[2] YUAN Bo, WANG Zhaowen, CAO Junhui, et al. Mixture formation characteristics and feasibility of methanol as an alternative fuel for gasoline in port fuel injection engines: droplet evaporation and spray visualization [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 283: 116956.
[3] WEI Jiangjun, HE Chengjun, FAN Chenyang, et al. Comparison in the effects of alumina, ceria and silica nanoparticle additives on the combustion and emission characteristics of a modern methanol-diesel dual-fuel CI engine [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 238: 114121.
[4] 李敏达. 新能源汽车甲醇燃料分析与研究 [J]. 中国设备工程, 2020(20): 252-253.
LI Minda. Analysis and research on methanol fuel for new energy vehicles [J]. China Plant Engineering, 2020(20): 252-253.
[5] 龚世华, 张雨生, 刘丰年, 等. 预燃室参数对射流点火甲醇发动机起动着火性能的影响 [J]. 车用发动机, 2022(6): 15-21.
GONG Shihua, ZHANG Yusheng, LIU Fengnian, et al. Effect of pre-chamber parameters on start performance of jet ignition engine fueled with methanol [J]. Vehicle Engine, 2022(6): 15-21.
[6] PAN Wang, YAO Chunde, HAN Guopeng, et al. The impact of intake air temperature on performance and exhaust emissions of a diesel methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2015, 162: 101-110.
[7] WEI Lijiang, YAO Chunde, HAN Guopeng, et al. Effects of methanol to diesel ratio and diesel injection timing on combustion, performance and emissions of a methanol port premixed diesel engine [J]. Energy, 2016, 95: 223-232.
[8] 任继文, 吴建全, 李建新, 等. 发展我国车用甲醇发动机的实践与思考 [J]. 车用发动机, 2003(3): 1-5.
REN Jiwen, WU Jianquan, LI Jianxin, et al. Practice and consideration on development of methanol-fueled engine for vehicle in China [J]. Vehicle Engine, 2003 (3): 1-5.
[9] 孟雨航, 孙楠楠, 张明泽, 等. EGR 和稀燃对甲醇发动机燃烧及排放特性的影响 [J]. 车用发动机, 2023 (6): 10-18.
MENG Yuhang, SUN Nannan, ZHANG Mingze, et al. Effects of EGR and lean-burn on combustion and

- emission characteristics of methanol engine [J]. *Vehicle Engine*, 2023(6): 10-18.
- [10] 陈文浩. 发动机稀薄燃烧技术对排放的影响 [J]. *时代汽车*, 2018(1): 101-102.
- CHEN Wenhao. The impact of lean combustion technology on emissions in engines [J]. *Auto Time*, 2018 (1): 101-102.
- [11] NARUKE M, MORIE K, KOUUDA R, et al. Investigation of fuel effects on the knock under lean burn conditions in a spark ignition engine [J]. *Fuel*, 2020, 282: 118785.
- [12] HUANG Yuhan, SURAWSKI N C, ZHUANG Yuan, et al. Dual injection: an effective and efficient technology to use renewable fuels in spark ignition engines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 143: 110921.
- [13] 王志刚, 刘宗宽, 车胜楠, 等. 预燃室湍流射流点火甲醇发动机稀薄燃烧和排放特性试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2024, 45(2): 1-7.
- WANG Zhigang, LIU Zongkuan, CHE Shengnan, et al. Experimental investigation on the lean combustion and emission characteristics of the methanol engine by pre-chamber turbulent jet ignition [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2024, 45(2): 1-7.
- [14] JIANG Longlong, XIAO Ge, LONG Wuqiang, et al. Effects of split injection strategy on combustion characteristics and NO_x emissions performance in dual-fuel marine engine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248, Part A: 123153.
- [15] LIU Yiqiang, MENG Yufei, LIU Qiyuan, et al. Effect of multiple injection optimization on combustion characteristics of low-pressure EGR system engine [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2805(1): 012012.
- [16] ZERAATI-REZAEI S, AL-QAHTANI Y, HERRE-ROS J M, et al. Investigation of the effects of split-injection on particle emissions from a Dieseline CI engine [J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114470.
- [17] HUANG Haozhong, ZHU Zhaojun, CHEN Yingjie, et al. Experimental and numerical study of multiple injection effects on combustion and emission characteristics of natural gas-diesel dual-fuel engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 183: 84-96.
- [18] 孙晓东, 任全水, 李红洲, 等. 喷射控制对燃油汽油与甲醇发动机全负荷性能研究 [J]. *内燃机*, 2024, 40(5): 38-42.
- SUN Xiaodong, REN Quanshui, LI Hongzhou, et al. Study on the full load performance of gasoline and methanol engines with injection control [J]. *Internal Combustion Engines*, 2024, 40(5): 38-42.
- [19] 黄震, 金兆辉, 姜北平, 等. 稀燃条件下甲醇汽油发动机燃烧和排放特性的试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2018, 39(2): 48-52.
- HUANG Zhen, JIN Zhaohui, JIANG Beiping, et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of a lean burn engine fueled with methanol/gasoline [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2018, 39(2): 48-52.
- [20] 杜丹丰, 高富新. 车用甲醇燃料发动机性能优化研究 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(4): 1-8.
- DU Danfeng, GAO Fuxin. Research on performance optimization of vehicle methanol fuel engine [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2022, 36(4): 1-8.
- [21] CHEN Zhanming, WANG Long, ZHANG Qingang, et al. Effects of spark timing and methanol addition on combustion characteristics and emissions of dual-fuel engine fuelled with natural gas and methanol under lean-burn condition [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181: 519-527.
- [22] KYRTATOS P, BRÜCKNER C, BOULOCHOS K. Cycle-to-cycle variations in diesel engines [J]. *Applied Energy*, 2016, 171: 120-132.
- [23] MARTÍNEZ-BOGGIO S D, CURTO-RISSO P L, MEDINA A, et al. Simulation of cycle-to-cycle variations on spark ignition engines fueled with gasoline-hydrogen blends [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(21): 9087-9099.
- [24] ZHANG Miaomiao, HONG Wei, XIE Fangxi, et al. Effects of diluents on cycle-by-cycle variations in a spark ignition engine fueled with methanol [J]. *Energy*, 2019, 182: 1132-1140.
- [25] YU Xiumin, WU Haiming, DU Yaodong, et al. Research on cycle-by-cycle variations of an SI engine with hydrogen direct injection under lean burn conditions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109 (Part A): 569-581.
- [26] GRANET V, VERMOREL O, LACOUR C, et al. Large-eddy simulation and experimental study of cycle-to-cycle variations of stable and unstable operating points in a spark ignition engine [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1562-1575.
- [27] DUAN Xiongbo, DENG Banglin, LIU Yiqun, et al. An experimental study the impact of the hydrogen en-

richment on cycle-to-cycle variations of the large bore and lean burn natural gas spark-ignition engine [J]. Fuel, 2020, 282: 118868.

[28] CHEN Zhanming, HE Jingjing, CHEN Hao, et al. Experimental study on cycle-to-cycle variations in natural gas/methanol bi-fueled engine under excess air/fuel ratio at 1.6 [J]. Energy, 2021, 224: 120233.

[29] WANG Long, CHEN Zhanming, ZHANG Tiancong, et al. Effect of excess air/fuel ratio and methanol addition on the performance, emissions, and combustion characteristics of a natural gas/methanol dual-fuel engine [J]. Fuel, 2019, 255: 115799.

[30] INDUDHAR M R, BANAPURMATH N R, RAJULU K G, et al. Effects of single and split injection on the performance, emission and combustion attributes of a CRDI engine powered with diesel and honge biodiesel [J]. Sustainable Energy & Fuels, 2019, 3(9): 2275-2286.

[31] KHANDAL S V, BANAPURMATH N R, GAITONDE V N. Performance studies on homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine powered with alternative fuels [J]. Renewable Energy, 2019, 132: 683-693.

[32] HALEWADIMATH S S, YALIWAL V S, BANAPURMATH N R, et al. Influence of hydrogen enriched producer gas (HPG) on the combustion characteristics of a CRDI diesel engine operated on dual-fuel mode using renewable and sustainable fuels [J]. Fuel, 2020, 270: 117575.

[33] SONACHALAM M, MANIENIYAN V, SENTHILKUMAR R, et al. Experimental investigation of performance, emission, and combustion characteristics of a diesel engine using blends of waste cooking oil-ethanol biodiesel with MWCNT nanoparticles [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 61: 105094.

[34] JAYAPRABAKAR J, ANISH M, BEEMKUMAR N, et al. Effect of diethyl ether blended with neem oil methyl esters in CI engine [J]. International Journal of Ambient Energy, 2019, 40(2): 116-118.

(编辑 赵炜)