

# 燃油喷射参数对混动柴油机低温起动燃烧与性能影响研究

刘雨龙<sup>1</sup>, 任正敏<sup>1</sup>, 梁永森<sup>2</sup>, 程江华<sup>2</sup>, 石磊<sup>1</sup>, 邓康耀<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 中国北方发动机研究所, 天津 300300)

## Research on the Influences of Fuel Injection Parameters on Low Temperature Starting Combustion and Performance of Hybrid Diesel Engines

LIU Yulong<sup>1</sup>, REN Zhengmin<sup>1</sup>, LIANG Yongsen<sup>2</sup>, CHENG Jianghua<sup>2</sup>, SHI Lei<sup>1</sup>, DENG Kangyao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China North Engine Research Institute, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In response to the complex influencing factors of low-temperature cold start characteristics and high starting energy consumption in diesel electric hybrid mode, low-temperature cold start test research on hybrid diesel engines was constructed, a low-temperature environment test platform for hybrid diesel engines was built, and the laws of diesel engine fuel injection control parameters on combustion characteristics and starting transient characteristics were explored. The results show that as the cyclic fuel injection rate increases, the combustion starting point moves forward and the average indicated pressure increases, but the growth rate slows down. The total starting time decreases significantly, and the total starting energy consumption first decreases and then increases. At a cyclic fuel injection rate of 36 mg, better starting performance and energy efficiency are achieved. As the fuel injection timing is delayed, the ignition delay period gradually shortens, the combustion center moves backwards, and the maximum explosion pressure first increases and then decreases. When the fuel injection timing is  $-12^\circ$  after top dead center (ATDC) and  $-8^\circ$  ATDC, the heat release from combustion is more concentrated, and the fuel energy is effectively utilized. Based on the analysis of combustion characteristics and energy consumption balance during the comprehensive starting stage, when the cyclic fuel injection amount is 36 mg and the fuel injection timing is  $-8^\circ$  ATDC, the combustion becomes more concentrated, energy consumption is reduced by 8.4%, and the starting speed is increased by 7.7%.

**摘要:** 针对柴-电混合模式下低温冷起动特性影响因素复杂、起动总能耗高的问题,开展了混合动力柴油机低温冷起动试验研究,搭建了混合动力柴油机低温环境试验平台,探明柴油机喷油控制参数对燃烧特性和起动瞬态特性规律。结果表明,随着循环喷油量增大,燃烧始点前移,平均指示压力增大,但增速放缓,起动总时长下降明显,起动总能耗先降低后增加,在循环喷油量为 36 mg 时达到较优的起动性能和能耗经济性。随着喷油正时推迟,着火延迟期逐渐缩短,燃烧重心后移,最高燃烧压力先增大后减小,在喷油正时为压缩上止点后  $-12^\circ$  和上止点后  $-8^\circ$  时燃烧放热更集中,燃油能量得到有效利用。综合起动阶段燃烧特性分析和能耗平衡,循环喷油量为 36 mg、喷油正时为上止点后  $-8^\circ$  时,燃烧更加集中,起动过程的油耗和辅助电耗

收稿日期: 2024-07-04

修回日期: 2024-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51576129)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (51576129)

作者简介: 刘雨龙(2000—),男,硕士生,主要研究方向为发动机智能控制与性能优化, E-mail: liuyulong@sjtu.edu.cn;

石磊(通信作者), E-mail: shi\_lei@sjtu.edu.cn。

的总能耗降低 8.4 %, 起动时间缩短 7.7 %。

**关键词:** 混动; 柴油机; 低温冷起动; 喷油策略

**Key words:** hybrid; diesel engine; low temperature cold start; fuel injection strategy

**DOI:** 10.13949/j.cnki.nrjgc.2025.02.003

**中图分类号:** TK421

## 0 概述

混合动力系统具有动力性好、燃油效率高、可靠性高、排放低的特点<sup>[1-3]</sup>,但其起动过程受到低温环境的影响<sup>[4]</sup>,低温环境容易造成柴油机失火和不完全燃烧,导致起动时间延长<sup>[5]</sup>,性能恶化。柴油机低温条件下起动性能变差的主要原因有压缩温度低,气缸壁过冷,润滑油过于黏稠等,导致燃烧恶化且摩擦损失较高<sup>[6-7]</sup>。

文献[4]中研究表明在高寒条件下喷雾特性明显恶化,需要对喷射参数进行精确控制以提升冷起动性能。文献[8-9]中研究表明燃油喷射的时间和喷油量对于柴油机的冷起动性能非常重要。文献[10-11]中的研究结果表明柴油机起动过程各项性能指标受喷油量、喷油提前角的影响。文献[12]中研究表明喷油提前角过大会使燃油附壁严重,而喷油提前角过小会使混合气着火延迟,燃烧重心后移,做功能力恶化。文献[13-14]中对柴油机冷机起动过程中的喷油提前角和喷油持续期进行了匹配优化。文献[15]中研究表明混合动力系统的起动过程与传统柴油机的区别在于起始喷油转速较高,起始喷油量较低,起动轨压不同,起动终止转速更高,该研究中通过与电机的转矩匹配进行柴油机控制策略的优化。

目前的研究主要针对混动系统在常温条件下的起动问题。文献[16-17]中研究表明混动发动机的起动性能和起动燃油经济性的优劣取决于燃油喷射与电机的匹配优化。文献[18-20]中研究表明通过动态协调控制混合动力系统可实现较优的起动性能和油耗特性。文献[21]中单轴并联混合动力电动汽车发动机起动控制策略进行设计与分析,优化了发动机点火转速和最大起动转矩。文献[22]中使用多参数优化方法对混合动力汽车汽油直喷发动机在起动工况下的点火正时、燃油喷射压力等燃油喷射参数进行优化,以降低排放。

综上所述,已有文献多集中于传统柴油机及混合动力发动机常温起动过程燃油喷射控制优化,而对于混动柴油机低温冷起动过程研究较少。在混合动力柴油机低温起动过程中,缸内燃烧特性受低温影响较大,燃烧恶化,起动特性变化更加复杂,容易起动失败,而电机的转矩补偿与柴油机的燃烧控制

存在耦合关系,在保证顺利起动的前提下,喷油策略需要与电机补偿策略相互适应,这对于达到较优的起动效果和较高的燃油经济性具有重要意义。因此,本文中开展了混合动力柴油机喷油控制参数影响规律及优化研究,通过混合动力柴油机起动试验台架开展试验研究,讨论了喷油参数影响下混合动力柴油机起动特性变化规律,以期制定混合动力柴油机低温冷起动策略提供参考。

## 1 试验系统

混合动力柴油机起动试验台架主要包括混合动力柴油机及其运行参数监控系统、起动发电一体化电机(integrated starter generator, ISG)及其测控系统、燃油喷射系统、辅助预热温度监控系统及数据采集分析系统。低温环境工况采用 AZWT17L-SP 型恒温恒湿舱模拟,可调温度范围为  $-45\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,恒温时温度波动小于  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,升温及降温速率分别大于  $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  和  $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,可实现快速升、降温及精确稳定的恒温控制。

本文研究所用混合动力柴油机详细参数如表 1 所示。柴油机类型为 V 型两缸四冲程,进气方式为增压中冷进气,排量 1 L,标定功率 30 kW。该柴油机集成了大功率 ISG,电机位于柴油机曲轴的输出端,取消了柴油机原有的飞轮盘。本试验台架采用博世 CR3 高压共轨喷油系统,通过 NI-9751 柴油机喷油器驱动模块驱动喷油器。混合动力柴油机试验装置实物图如图 1 所示。

测量采集的主要信号有柴油机转速、电机转矩、油耗率、喷油参数及相位、进排气温度和压力、缸内压力等,以及动力装置和辅助设备的运行参数,包括电机的动态转矩、柴油机和电机冷却水温度和压力、电机及辅助加热装置的工作电流和电压等。表 2 给出了试验主要设备的型号及精度。

## 2 试验方法

将柴油机润滑系统、冷却系统和燃油供给系统等设备与柴油机一起置于试验要求的  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  工作环境 24 h,以保证各测点温度与环境温度相差不超过  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。开展起动过程喷油参数对混合动力起动性能的影响试验研究,试验方案设计见表 3。定义压缩上

表 1 混合动力柴油机动力装置主要参数

Table 1 Main parameters of hybrid diesel power device

项目	参数
柴油机类型	V 型两缸四冲程
进气方式	增压中冷
排量/L	1
缸径/mm	86
行程/mm	86
压缩比	16.2
连杆长度/mm	144
标定功率/kW	30(3 200 r/min)
燃烧室形状	ω 形
电机类型	ISG
最大扭矩/(N·m)	90
起动转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 100
起动电压/V	320

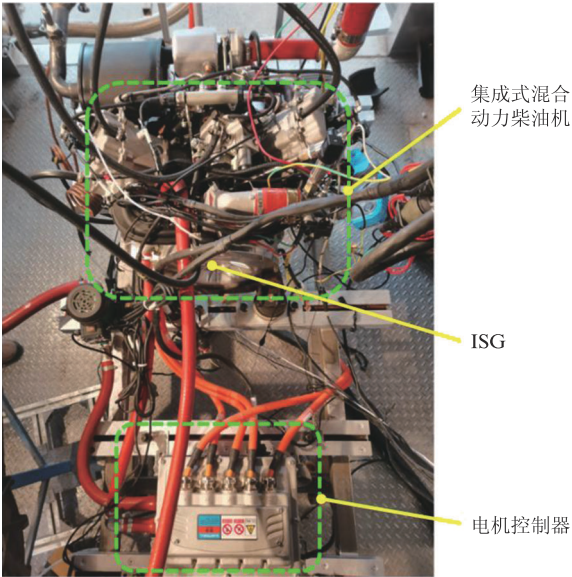


图 1 混合动力柴油机装置实物图

Figure 1 Schematic diagram of the hybrid diesel engine device

表 2 试验设备及精度

Table 2 Test equipment and accuracy

仪器设备名称	型号	精度
气缸压力传感器	KISTLER 6056A	满量程的 0.1%
曲轴转角传感器	KISTLER 2614C/720°	±0.5°
进排气压力传感器	HM90-H3	满量程的 ±0.5%
热电阻温度传感器	Pt100	±0.15℃
油耗测量仪	湘仪 FC2210	满量程的 ±0.5%

止点对应的曲轴转角为 0°,上止点前为负数,上止点后为正数。

如图 2 所示为起动阶段示意图,起动过程包括 4 个阶段。其中预准备阶段是利用辅助加热装置对柴油机进气、冷却水等进行预加热的过程。起动稳定

表 3 喷油参数对起动性能影响研究试验方案

Table 3 Experimental setup for studying the impact of fuel injection parameters on starting performance

研究对象	喷油策略	
	变量设置	其他参数设置
循环油量	循环油量 24、28、32、36、40 mg	喷油正时 -8°
喷油正时	喷油正时 -12、-8、-4、0°	循环油量 36 mg

阶段是在电机倒拖作用下,转速迅速升高,直至柴油机转速超过电机退出转速或是电机达到切断时间的过程。加速阶段是在电机切断之后,柴油机依靠燃烧做功维持转速持续上升至目标怠速的过程。本文重点关注起动稳定阶段和加速阶段的燃烧特性和起动性能,包括燃烧始点、平均指示压力、最高燃烧压力和瞬时转速、各阶段时长、能耗等。试验中,各个工况下的进气辅助加热和电机转矩补偿策略均保持一致,进气格栅预热 30 s,电机最大辅助转矩  $T_{\max}=85\text{ N}\cdot\text{m}$ ,电机撤扭转速  $n_{\text{end}}=900\text{ r/min}$ ,电机最长转矩补偿时间  $t_s=30\text{ s}$ 。

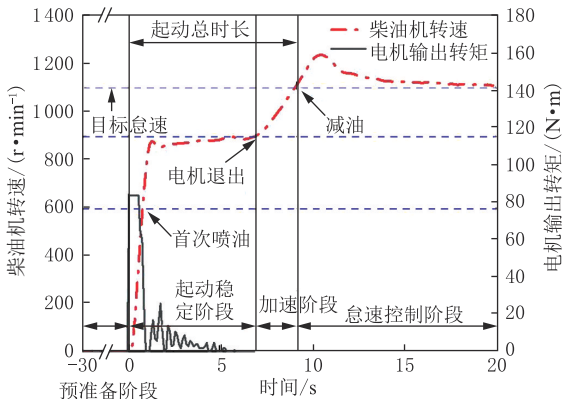


图 2 起动阶段示意图

Figure 2 Schematic diagram of the start-up phase

3 结果与讨论

针对低温冷起动压缩温度低、燃烧恶化、起动困难的问题,通过调整循环喷油量和喷油正时,使之与电机的辅助转矩控制相适应,以优化低温冷起动性能为目标,研究了喷油参数对混合动力柴油机起动过程中的燃烧特性、起动速度、综合能耗的影响规律。

3.1 喷油量对起动阶段燃烧性能的影响

对不同循环喷油量下混合动力柴油机起动过程燃烧特性变化规律进行了分析,对比起动过程燃烧始点、平均指示压力和最高燃烧压力的变化,如图 3~图 5 所示。图中 SOC 为燃烧始点 (start of combustion), COV 为循环波动 (coefficient of variation), IMEP 为平均指示压力 (indicated mean effective pressure),  $p_{\max}$  为最高燃烧压力。

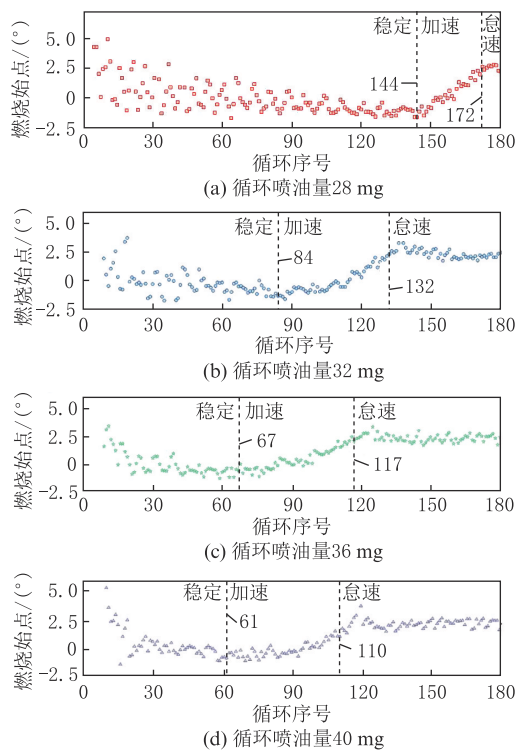


图3 喷油量对混合动力柴油机起动阶段燃烧始点的影响

Figure 3 The influence of fuel injection quantity on the starting point of combustion in the hybrid diesel engine during the start-up phase

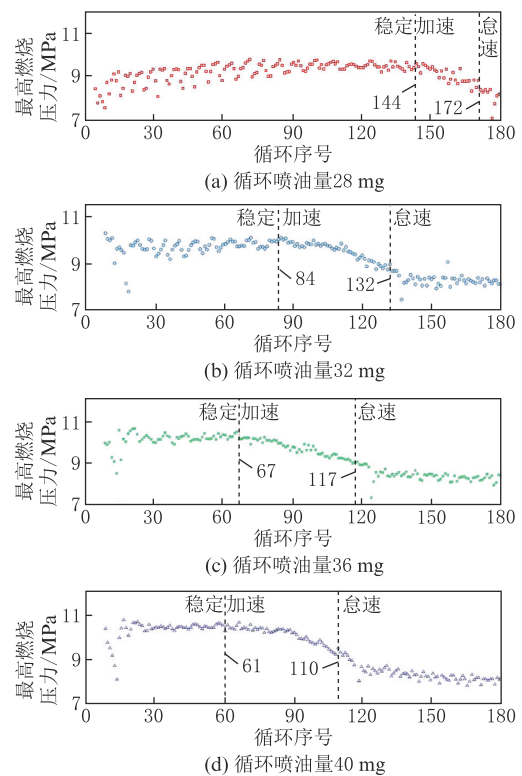


图5 喷油量对混合动力柴油机起动阶段最高燃烧压力的影响

Figure 5 The influence of fuel injection quantity on the maximum burst pressure during the starting stage of the hybrid diesel engine

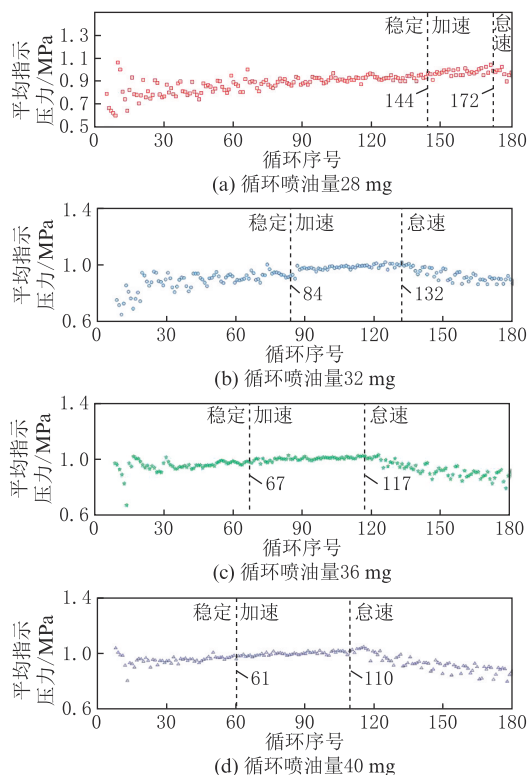


图4 喷油量对混合动力柴油机起动阶段平均指示压力的影响

Figure 4 The influence of fuel injection quantity on the indicated mean effective pressure during the starting phase of the hybrid diesel engine

由图3可知,在起动稳定阶段,前5个循环的平均SOC位于上止点后;随着循环次数增加,燃烧始点会逐渐前移;进入起动加速阶段后,燃烧始点会随转速升高再次后移。随着循环喷油量增大,稳定阶段着火延迟期会随循环喷油量的增加呈先减小后增大的趋势,燃烧始点的COV先减小后增大。在循环喷油量为28 mg时,前5个循环着火延迟期平均为 $10.6^\circ$ ,燃烧始点位于上止点后 $2.6^\circ$ ;循环喷油量增加至32 mg时,前5个循环的平均着火延迟期最短,燃烧始点位于上止点后 $0.9^\circ$ ;继续增大循环喷油量,着火延迟期变长,这是由于燃油雾化蒸发的吸热量增大。在图4中,起动过程IMEP会随燃烧循环的进行而不断增大,IMEP波动逐渐减小,且循环喷油量越大,起动稳定阶段的IMEP整体水平越高,IMEP波动率越小,但当循环喷油量大于36 mg后,IMEP增大的效果不明显。在图5中,随着起动循环的进行,最高燃烧压力( $p_{\max}$ )先减小后增大。随着循环喷油量增加,起动稳定阶段的 $p_{\max}$ 逐渐增大,波动率先减小后增大,当喷油量大于36 mg后, $p_{\max}$ 增大不明显。IMEP和 $p_{\max}$ 随循环喷油量的变化规律表明,随着循环喷油量增大,柴油机做功能力逐渐增强,但增强的效果逐渐减弱。这是因为喷油量增大后,燃烧放热

增强使得燃烧室环境温度快速升高,更有利于燃烧的进行,因此混合动力柴油机可以更快进入加速阶段,但喷油量大于一定值后,由于进气量和燃烧速率的限制,导致一定的燃油无法高效燃烧,做功能力改善不明显。

### 3.2 喷油量对起动特性的影响

对不同循环油量下起动过程各阶段时长、加速特性及能耗特性进行分析,如图6所示。

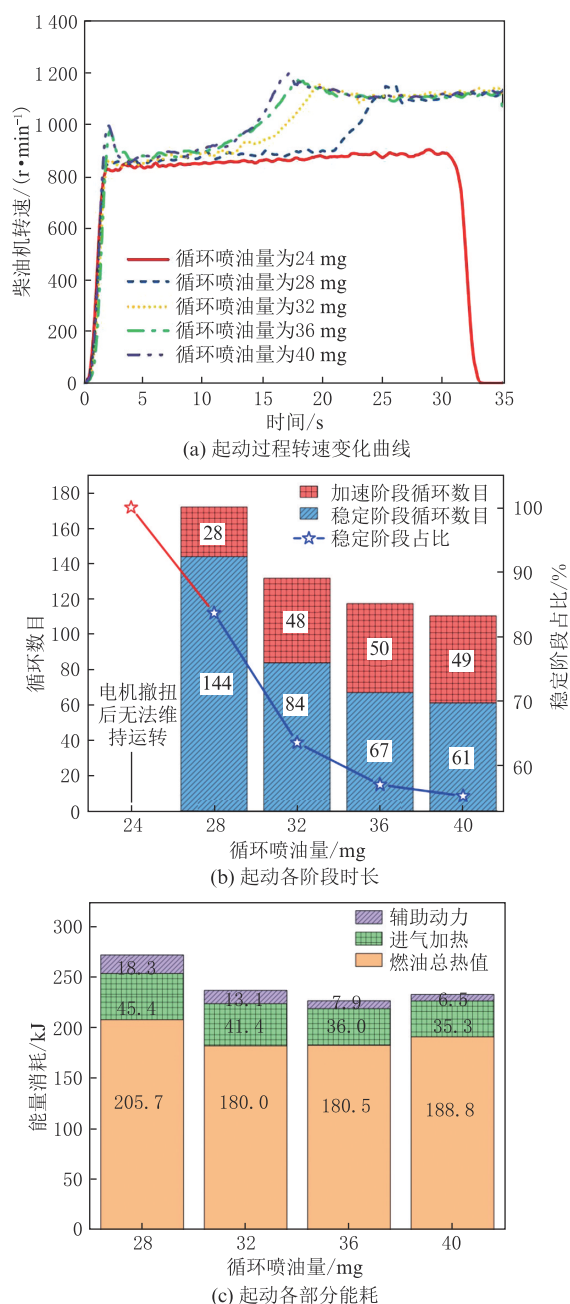


图6 喷油量对混合动力柴油机起动瞬态特性的影响

Figure 6 The effect of fuel injection quantity on the transient starting characteristics of the hybrid diesel engine

在图6(a)中,循环喷油量24 mg时,当电机达到30 s切断时间之后,由于柴油机燃烧输出功率过低,无法克服摩擦阻力,最终起动失败。随着喷油量增大,电机的撤扭时刻逐渐提前,柴油机能够更快达到怠速控制阶段,且加速阶段的转速上升率先减小后增大,但影响幅度较小,当循环油量为32 mg时,加速阶段转速上升率最小,为8.3 r/(min·循环);当循环油量为40 mg时,加速阶段转速上升率最大,为9.4 r/(min·循环)。因此,提高循环喷油量对混合动力柴油机起动加速能力改善效果不明显,对起动速度影响明显。

由图6(b)可知,随着循环喷油量增加,起动稳定阶段时长及其占比及起动总时长均呈下降趋势。循环喷油量28 mg时起动总时长为172个循环,稳定阶段时间较长,占起动总时长的83.7%;当循环喷油量增加至36 mg以上时,稳定阶段时长和起动总时长的下降幅度很小,循环喷油量40 mg时的起动总时长为110个循环,相较循环喷油量36 mg时仅减少了7个循环。综上,提高起动循环喷油量对混合动力柴油机起动稳定阶段有明显改善效果。

对不同循环喷油量下混动柴油机起动过程各部分的能耗进行计算,结果如图6(c)所示。随着循环喷油量增大,起动总能耗先降低后增加,在循环喷油量为36 mg时最低,为224.4 kJ,此时燃油消耗、进气加热和辅助动力的能耗均较低,综合总能耗最低。这是由于适当增大循环喷油量后,混合动力柴油机起动燃烧特性得到改善,尤其是稳定阶段的燃烧放热增加,虽然喷油量增大,但起动所需的总循环数量变少,从而使起动过程总油耗降低,同时辅助起动过程消耗的总电能减少,混合动力系统起动的燃油经济性和总能耗得到改善,起动效率提高。

### 3.3 喷油正时对起动阶段燃烧性能的影响

对不同喷油正时下起动过程的燃烧特性进行分析。

图7为不同喷油正时下起动过程着火延迟期(ignition delay, ID)逐循环的变化。随着喷油提前角减小,起动稳定阶段着火延迟期的波动率COV呈先减小后增大的趋势,在喷油正时为 $-8^\circ$ 时,着火延迟期的波动率最小,为0.12。当喷油正时为 $0^\circ$ 时,着火延迟期的波动率最大,为0.37。这是由于在低温冷起动初期,燃油蒸发雾化的速率较低,且在混合气形成过程中容易受缸壁传热损失影响,导致混合气形成不均匀。随着喷油正时的推迟,喷油时刻缸内压力温度升高,燃油与空气的混合效果变好,油气混合物反应速率加快,有利于提升可燃混合气浓度,

并缩短着火延迟期;但喷油正时过于靠近压缩终点后,会导致活塞在很短的时间内开始下行,缸内压力迅速降低,同样不利于燃油的蒸发混合过程,导致缸内形成混合气不均匀,从而造成起动初期循环之间的着火延迟期波动变大。

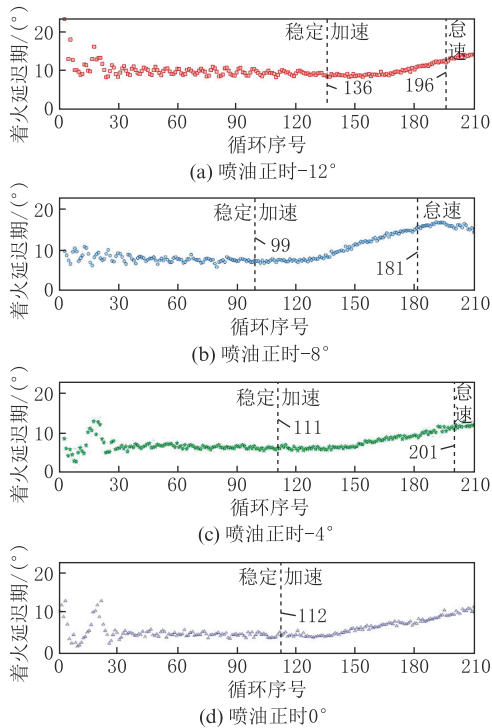


图7 喷油正时对混合动力柴油机起动过程着火延迟期的影响

Figure 7 The influence of fuel injection timing on the ignition delay period during the starting process of hybrid diesel engine

图8和图9分别为不同喷油正时对起动过程燃烧重心(总放热量50%对应的曲轴转角,记为CA50)和最高燃烧压力的影响规律。由图8可知,随着喷油推迟,CA50整体先提前再延后,CA50波动率逐渐减小。当喷油正时在 $-12^{\circ} \sim -8^{\circ}$ 范围内时,稳定阶段的CA50在上止点附近;进入加速阶段后,CA50逐渐上升,处于上止点后 $5^{\circ}$ 范围内,这是由于低温冷起动初期转速较低,燃油喷射的间隔时间较长,混合气的形成不够充分,导致燃烧过程不稳定,燃烧重心偏离理想位置;进入怠速控制阶段后CA50即处于 $10^{\circ}$ 以内的较优区间。而当喷油正时在 $-4^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 时,起动过程的CA50均出现在上止点后,且随起动时间延长、转速上升后,快速向远离压缩终点方向移动,偏离上止点较远,不利于膨胀做功。

由图9知,当喷油正时在 $-12^{\circ}$ 和 $-8^{\circ}$ 时,起动稳定阶段和加速阶段的 $p_{\max}$ 可以保持在 $8 \text{ MPa} \sim$

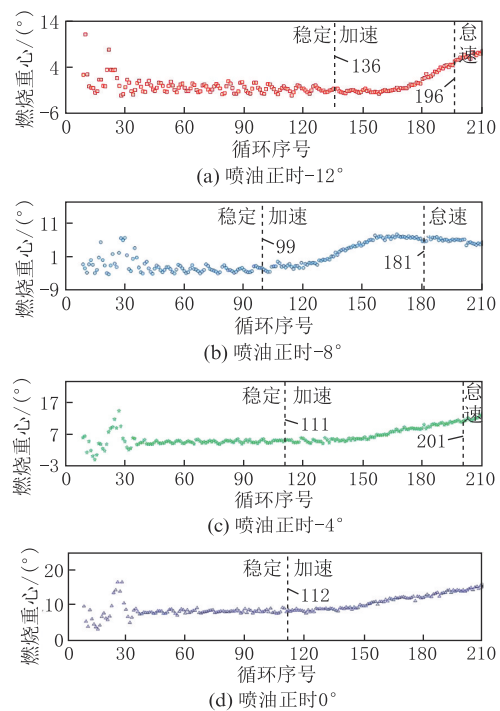


图8 喷油正时对混合动力柴油机起动阶段燃烧重心的影响

Figure 8 The influence of fuel injection timing on the combustion center of gravity during the starting phase of hybrid diesel engine

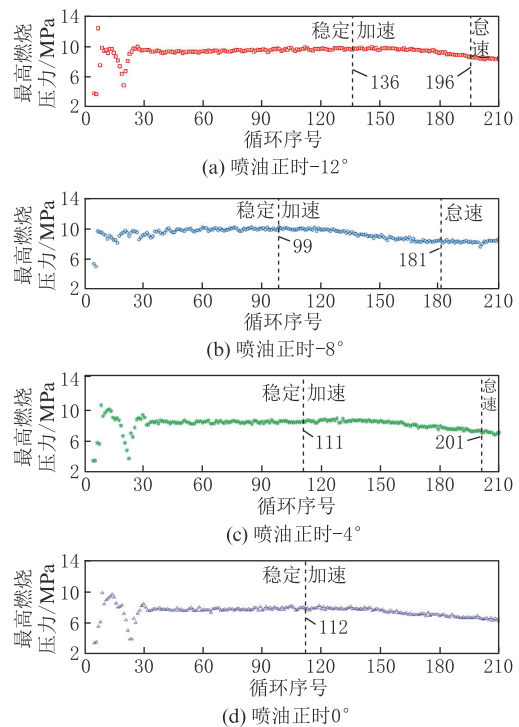


图9 喷油正时对混合动力柴油机起动阶段最高燃烧压力的影响

Figure 9 The influence of fuel injection timing on the maximum burst pressure during the starting phase of hybrid diesel engine

10 MPa 之间,且  $p_{\max}$  波动率变小。而喷油正时推迟至  $-8^\circ$  后,  $p_{\max}$  偏低,逐渐降至 8 MPa 以下,且  $p_{\max}$  波动率增大。这是由于随着喷油推迟,燃烧相位过于靠后,CA50 后移,燃烧放热过程与膨胀做功过程不够匹配,使得燃油能量无法被有效利用。

### 3.4 喷油正时对起动瞬态特性的影响规律

喷油正时对起动过程各阶段时长、加速阶段转速特性及能耗特性的影响如图 10 所示。

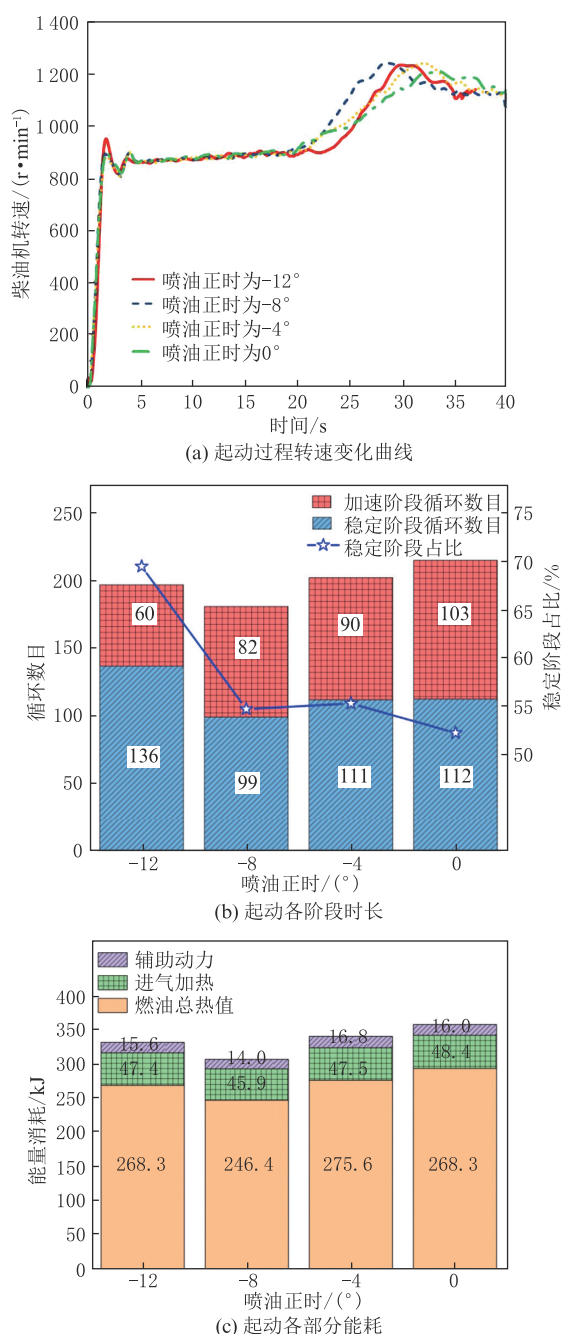


图 10 喷油正时对混合动力柴油机起动瞬态特性的影响

Figure 10 The influences of fuel injection timings on the transient starting characteristics of the hybrid diesel engine

由图 10(a)可知,随着喷油正时的推迟,加速阶段的转速上升率逐渐减小,进入怠速控制阶段所需时间先缩短再延长,在喷油正时为  $-8^\circ$  时,电机拖动时间最短,最早进入怠速控制。

由图 10(b)可知,随着喷油正时推迟,起动所需总时长先减小后增大,在喷油正时为  $-8^\circ$  时达到最小值,起动时间缩短 7.7%,此时稳定阶段时长也最短,仅有 99 个循环;加速阶段所需时长随喷油正时推迟而增加,当喷油正时由  $-12^\circ$  推迟至  $0^\circ$  时,加速阶段的时长增加 103 个循环,增幅为 70.7%,这是由于随着喷油正时推迟,燃烧重心后移,最高燃烧压力降低,循环热效率降低,导致柴油机动力输出下降,转速上升率降低。

如图 10(c)所示,随着喷油正时推迟,起动总能耗先降低再升高,喷油正时为  $-8^\circ$  时起动所需总油耗及辅助电耗均最低,和喷油正时  $-12^\circ$  相比,油耗降低 8.2%,总电耗降低 4.9%,起动总能耗降低 7.5%。这是由于喷油正时  $-8^\circ$  时的起动初期不完全燃烧比例较小,做功能力更强,燃烧输出功率及其稳定性更高,且起动耗时更短,动力需求降低。综合混合动力柴油机低温起动过程燃烧特性及瞬态特性变化规律可知,喷油正时对燃烧放热过程有重要影响,在喷油正时  $-8^\circ$  条件下的能耗经济性最佳。

## 4 结论

(1) 在混合动力柴油机低温冷起动过程中,随着循环喷油量增大,着火延迟期先减小后增大,IMEP 和  $p_{\max}$  逐渐增大,循环喷油量为 36 mg 时,IMEP、 $p_{\max}$  均较高,做功能力较强。随着循环喷油量增大,起动稳定阶段时长及其占比下降明显,起动总时长下降明显,起动能耗先降低后增加,在 36 mg 时总能耗最低,起动速度最快。

(2) 随着喷油提前角减小,着火延迟期逐渐减小,燃烧重心逐渐后移,最高燃烧压力先增大后减小,在喷油正时为  $-8^\circ$  时,燃烧放热更加集中,燃烧重心处于合理区间,最高燃烧压力保持在 8 MPa~10 MPa 之间。随着喷油提前角减小,稳定阶段循环数量占比减小,起动时间和起动总能耗先减小后增大,在喷油正时为  $-8^\circ$  时均最小,此时起动性能和能耗经济性最佳。

(3) 综上所述,在环境温度为  $-25^\circ\text{C}$  时,通过辅助进气加热 30 s,采用循环喷油量为 36 mg 及喷油正时为  $-8^\circ$  的喷油策略可以使混合动力柴油机的起动速度更快,燃烧放热更为集中,起动过程的油耗和辅助电耗的总能耗降低 7.5%,起动时间缩短 7.7%。在不同环境温度下,还需结合辅助加热措施

及电机对起动过程瞬态特性的影响,对喷油策略进行优化。

### 参考文献:

- [1] HE L Q, YOU Y, ZHENG X, et al. The impacts from cold start and road grade on real-world emissions and fuel consumption of gasoline, diesel and hybrid-electric light-duty passenger vehicles[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158045(2022-12-10)[2024-06-20]. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.158045.
- [2] ZHANG X W, HUANG X, NI P Y, et al. Strategies to reduce emissions from diesel engines under cold start conditions: a review[J/OL]. *Energies (Basel)*, 2023, 16(13): 5192(2023-07-06)[2024-06-20]. DOI:10.3390/en16135192.
- [3] TANG D, ZHANG Z, HUA L, et al. Prediction of cold start emissions for hybrid electric vehicles based on genetic algorithms and neural networks[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 420: 138403(2023-09-25)[2024-06-20]. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.138403.
- [4] FANG L, LOU D M, HU Z Y, et al. Study on the first-firing-cycle combustion characteristics of high-altitude and low-temperature environments during diesel engine cold start[J/OL]. *Fuel*, 2022, 322: 124186(2022-08-15)[2024-06-20]. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124186.
- [5] CELIK A, YILMAZ M, YILDIZ O F. Improvement of diesel engine startability under low temperatures by vortex tubes[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 17 - 27.
- [6] LODI F, ZARE A, ARORA P, et al. Engine performance and emissions analysis in a cold, intermediate and hot start diesel engine[J/OL]. *Applied Sciences*, 2020, 10(11): 3839(2020-05-31)[2024-06-20]. DOI:10.3390/app10113839.
- [7] ROBERTS A, BROOKS R, SHIPWAY P. Internal combustion engine cold-start efficiency: a review of the problem, causes and potential solutions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 82: 327 - 350.
- [8] ARUMUGAM R, XU H M, LIU D, et al. Key factors affecting the cold start of diesel engines[J/OL]. *International Journal of Green Energy*, 2015: 1273694101(2015-01-06)[2024-06-20]. DOI:10.1080/15435075.2014.938748.
- [9] 钟祥麟,于秀敏,张斌,等. 高压共轨柴油机起动过程喷射控制参数的匹配研究[J]. *内燃机工程*, 2008, 29(4): 6 - 10.
- ZHONG X L, YU X M, ZHANG B, et al. Matching research on injection control parameters during starting of CRS diesel engine[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2008, 29(4): 6 - 10.
- [10] HAN Z, HENEIN N A, BRYZIK W. A new ignition delay formulation applied to predict misfiring during cold starting of diesel engines[J]. *SAE Transactions*, 2000, 109: 1317 - 1326.
- [11] LIN X D, HAN X M, LI D G. Design and evaluation for target indicated torque based engine starting control strategy in a high pressure common rail diesel engine[J/OL]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016: 8216746(2016-03-15)[2024-06-20]. DOI:10.1155/2016/8216746.
- [12] LIU H, HENEIN N A, BRYZIK W. Simulation of diesel engines cold-start[J]. *SAE transactions*, 2003, 112: 352 - 372.
- [13] 郁建明,王波,徐剑飞,等. CA6DL1-32柴油机冷起动性能试验研究[J]. *现代车用动力*, 2012(1): 58 - 60.
- YU J M, WANG B, XU J F, et al. Experimental study for cold starting performance with 6DL1-32 diesel engine[J]. *Modern Vehicle Power*, 2012(1): 58 - 60.
- [14] ZHANG Z, LIU F S, DU W, et al. Research on fuel injection strategy of start process for the electronic diesel engine[C/OL]//2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014(2014-11-03)[2024-06-20]. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940734.
- [15] 李铁栓,张文学,张幽彤,等. 混合动力柴油机起动过程扭矩匹配策略研究[J]. *内燃机*, 2015(1): 42 - 46.
- LI T S, ZHANG W X, ZHANG Y T, et al. Research on torque management strategy in hybrid start process[J]. *Internal Combustion Engines*, 2015(1): 42 - 46.
- [16] YU S, LI L G, DONG G Y, et al. A study of control strategies of PFI engine during cranking and start for HEVs[C]//2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. New York:IEEE, 2006: 68 - 72.
- [17] 于水,董光宇,吴志军,等. 混合动力汽车发动机快速起动瞬态燃烧和碳氢排放[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2008, 38(5): 1034 - 1039.
- YU S, DONG G Y, WU Z J, et al. Transient combustion and hydrocarbon emissions from a hybrid electric vehicle engine under high-speed rapid start conditions[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(5): 1034 - 1039.
- [18] 谭丕强,黄震宇,胡志远,等. 混合动力系统发动机工况切换特性研究[J]. *内燃机工程*, 2019, 40(4): 33 - 41.
- TAN P Q, HUANG Z Y, HU Z Y, et al. Research on dynamic characteristics of hybrid engine during mode transition phase[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2019, 40(4): 33 - 41.
- [19] 卓建科,杜爱民. ISG电机在冷起动中的策略仿真[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(4): 304 - 308.
- ZHUO J K, DU A M. Simulation on ISG motor in the process of cold start on a HEV[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(4): 304 - 308.
- [20] 陈汉玉,袁银南,张彤. 轻度混合动力轿车 ISG 电机特性试验研究[J]. *汽车工程*, 2009, 31(8): 715 - 719.
- CHEN H Y, YUAN Y N, ZHANG T. An experimental study on ISG motor characteristics of mild electric car[J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(8): 715 - 719.
- [21] ZHAO C, ZU B F, XU Y L, et al. Design and analysis of an engine-start control strategy for a single-shaft parallel hybrid electric vehicle[J/OL]. *Energy*, 2020, 202: 117621(2020-07-01)[2024-06-20]. DOI:10.1016/j.energy.2020.117621.
- [22] KHAMENEIAN A, DICE P, DUNCAN J, et al. Dynamic individual-cylinder analysis of a gasoline direct injection engine emissions for cold crank-start at elevated cranking speed conditions of a hybrid electric vehicle[J/OL]. *Control Engineering Practice*, 2022, 129: 105349(2022-09-28)[2024-06-20]. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105349.