

# 喷油策略对低压缩比柴油机不同海拔 起动性能的影响

楼狄明<sup>1</sup>, 阚泽超<sup>1</sup>, 胡志远<sup>1</sup>, 曹志义<sup>2</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 北方发动机研究所, 山西 大同 037036)

**摘要:** 基于高原环境模拟试验台,以一台压缩比为 14.25 的增压柴油机为试验对象,进行了平原 0 m、模拟海拔高度 1 000,2 000,3 000,3 750,4 500 m 处的起动性能试验,并研究了供油提前角和循环供油量对低压缩比增压柴油机在不同模拟海拔时的起动性能影响。结果表明,随着海拔升高,低压缩比柴油机起动过程初始期延长,升速期转速升高率降低,下冲转速增大,过渡期时间延长,起动性能恶化。且在海拔条件下,海拔高度的上升对低压缩比柴油机起动性能的影响更加显著。在海拔高度 2 000 m 及以下,海拔高度每升高 1 000 m,升速期及过渡期平均延长 1.10 s 和 1.47 s;在海拔高度 3 000 m 及以上,海拔高度每升高 1 000 m,起动过程中升速期及过渡期平均延长 18.48,2.75 s。在平原时,增大供油提前角使起动性能恶化;起动阶段初始期延长,升速阶段转速升高率降低,升速期和过渡期时间延长;不同循环供油量策略对平原起动过程影响较小。当海拔为 4 500 m 时,适当增大供油提前角和适当减少喷油可改善低压缩比柴油机高原起动性能,循环喷油量过大会导致升速期内滞速现象的出现,起动稳定性变差,循环喷油量过小会导致初始期和升速期延长。

**关键词:** 柴油机; 低压缩比; 变海拔; 起动; 供油提前角; 循环供油量

**中图分类号:** TK421

**文献标志码:** A

## Effects of the Fuel Injection Strategy on Low Compression Ratio Diesel Engine During Cold Start at Different Altitudes

LOU Diming<sup>1</sup>, KAN Zechao<sup>1</sup>, HU Zhiyuan<sup>1</sup>, CAO Zhiyi<sup>2</sup>

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China North Engine Research Institute, Datong 037036, China)

**Abstract:** An experimental study on the fuel injection strategy for low compression ratio diesel engine at different

altitudes was conducted. Tests were conducted on a mid-speed heavy-duty intercooled-turbocharged diesel 14.25:1 CR (compression ratio) engine whose intake and exhaust pressure was controlled by the Plateau simulation test system to stimulate the altitude conditions including 0, 1 000, 2 000, 3 000, 3 750 and 4 500 m. The results indicate that the time of cranking period is increased with the altitude, the rising ratio of speed of start-up period is reduced, the time and undershoot speed of after start period is increased, and the starting performance is deteriorated. Besides, under the conditions of high altitude, the starting performance is more significantly effected by altitude, at an altitude of 2 000 m and below, the time of start-up period and after start period is reduced by an average of 1.10 and 1.47 s for every increase in altitude of 1 000 m. At an altitude of 3 000 m and above, the time of start-up period and after start period is reduced by an average of 18.48 s, 2.75 s for every increase in altitude of 1 000 m. On the plain, the increase of fuel advance angle, the starting performance is deteriorated, the time of cranking period is increased and the rising ratio of the speed of start-up period is reduced, and the time of start-up period and after start period is increased. Different total fuel mass injection strategies has little influence on the cold start process on the plain. At an altitude of 4 500 m, the appropriate increase of the fuel supply advance angle and the appropriate reduction of the total fuel mass injection could improve the starting performance. Too large an amount of total fuel mass may lead to the fluctuation in start-up period, and the starting stability is deteriorated, however, too small amount of total fuel mass may prolong the time of cranking period and start-up period.

**Key words:** diesel engine; low compression ratio; variable altitude; start; advance angle of fuel supply; total fuel mass

柴油机设计时压缩比是一个重要参数。压缩比

收稿日期: 2016-04-19

第一作者: 楼狄明(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为发动机结构与性能优化。E-mail:loudiming@tongji.edu.cn

通讯作者: 阚泽超(1989—),男,博士生,主要研究方向为柴油机高原起动。E-mail:kanzechao@163.com

升高,缸内压缩上止点压力和温度增加,热效率升高.传统柴油机压缩比一般在16~18之间,但根据等容/等压加热理论循环,压缩比增大到一定程度,热效率的提高幅度有限<sup>[1]</sup>,且随着压缩比升高,柴油机最大爆发压力升高,机械摩擦损失增大.目前高增压大功率柴油机中,为了限制发动机的最高爆压,多采用降低压缩比的方式<sup>[2]</sup>,同时近年柴油机排放标准更加严苛,要求在颗粒物(PM),HC和CO很低的情况下,大幅减少NO<sub>x</sub>的排放,降低压缩比是达到排放标准的一个最具前景的技术路线<sup>[3]</sup>.LTC(低温燃烧)等新型燃烧技术的柴油机,也通常采用低压缩比来抑制火焰温度的快速升高<sup>[4-5]</sup>.

而这类低压缩比柴油机面临的关键问题之一是起动困难,尤其在恶劣环境下(低温、高海拔)<sup>[6]</sup>.Phatak等<sup>[7]</sup>研究压缩比分别为14,16和18的柴油机的起动性能,结果表明,随着压缩比降低,柴油机起动性能变差,缸内爆发压力和烟度降低.Tsunemoto等<sup>[8]</sup>的研究也表明,较低的压缩比时,起动过程缸内压力和温度降低,混合气的滞燃期增长,燃油的附壁量增加,起动性能差.

目前,对于改善柴油机起动性能措施的研究包括喷油参数、倒拖转速、进排气正时等柴油机设计参数的改进<sup>[9-12]</sup>,其中喷油参数由于无需增加额外附件,且对发动机正常运行工况影响较小受到广泛关注.Han等<sup>[13]</sup>在修正后的Arrhenius型滞燃期计算公式基础上,通过试验及计算,分析了不同喷油提前角对低温起动性能的影响,结果表明,在压缩行程的活塞运动将使得滞燃期减小,而在膨胀行程则使得滞燃期迅速增大;研究结果还表明,在一定的环境温度及转速下,喷油提前角存在一个能保证顺利着火燃烧的区域,当喷油提前角落在此区域外时,燃烧将会严重恶化,甚至出现失火现象.Bielaczyc等<sup>[14]</sup>在一台直喷柴油机上通过采用在起动过程的前5s切断燃油供给的方法,使得冷起动过程的CO,HC,PM排放与正常起动方式相比,分别降低了62%,41%,58%.英国伯明翰大学的Sakunthalai等<sup>[15]</sup>研究了不同的环境温度下柴油机低温起动喷油策略和性能,结果发现,随着环境温度的降低,柴油机需增加起油量,可达正常环境温度的10~15倍.然而,上述研究均针对柴油机平原低温起动工况,有关喷油参数对低压缩比柴油机在不同海拔高度处的起动性能的变化规律的研究未见报道.

本文利用高原模拟试验系统,在不同海拔条件下,对一台压缩比为14.25的增压柴油机进行了0,

1 000,2 000,3 000,3 750,4 500 m海拔条件下的起动性能试验研究,重点分析了不同喷油策略(供油提前角、循环喷油量)对平原0 m和海拔4 500 m条件下低压缩比柴油机起动过程的变化规律,探索改善低压缩比柴油机高原起动性能的方法.

## 1 试验系统及方案

### 1.1 试验系统

图1所示为高原环境模拟试验台.试验装置包括德国Imtech公司的发动机高原环境进、排气模拟试验系统,大气压力控制范围57.6~101.3 kPa,可模拟0~4 500 m海拔条件.采用DEWETRON 5000燃烧分析仪,用于存储和处理霍尔式转速传感器、Kistler 6061B高精度水冷式缸压传感器、Kistler 601CAA压油管压力传感器所采集到的数据,其中转速、缸压、油管压力的采样频率为0.1°.

试验样机为某型直喷四冲程增压柴油机,其技术参数如表1所示.

表1 试验样机技术参数

Tab.1 Specification of the engine	
参数	数值
缸径/mm	150
行程/mm	160
气缸夹角/(°)	60
气缸数/个	6
压缩比	14.25
喷油器类型	电控直列泵

### 1.2 试验方案

依据GB/T 20969.1—2007,按照表2所示的环境条件模拟0,1 000,2 000,3 000,3 750,4 500 m海拔高度处,环境温度25℃、进气温度25℃、相对湿度25%条件下的柴油机起动性能试验研究.

表2 不同海拔高度处环境参数

Tab.2 Ambient conditions at various altitudes	
进、排气压力/kPa	模拟海拔高度/m
101.3	0
90.1	1 000
79.2	2 000
70.1	3 000
63.5	3 750
57.6	4 500

## 2 试验结果与分析

本文分析过程中,起动过程主要由初始期、升速期、过渡期3部分组成,如图2所示.对试验样机起

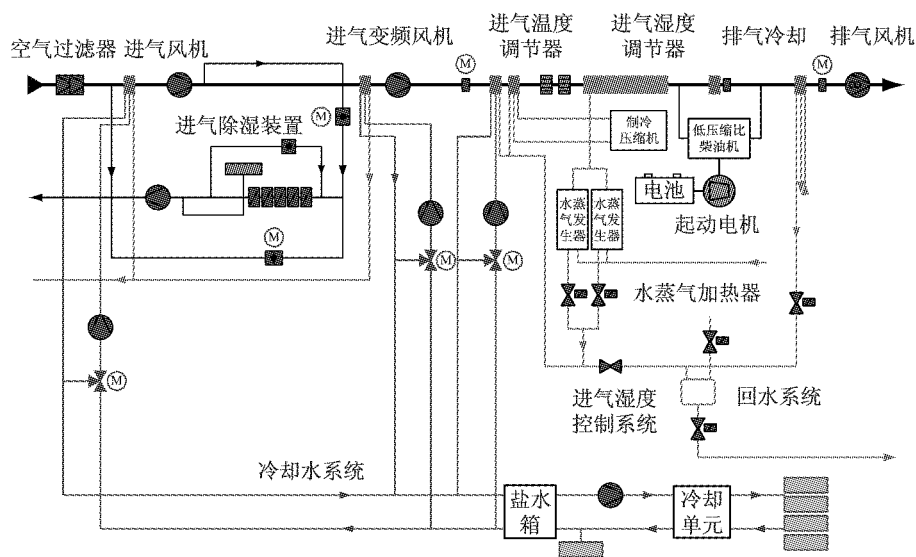


图 1 高原环境模拟试验台  
Fig.1 Plateau simulation test system

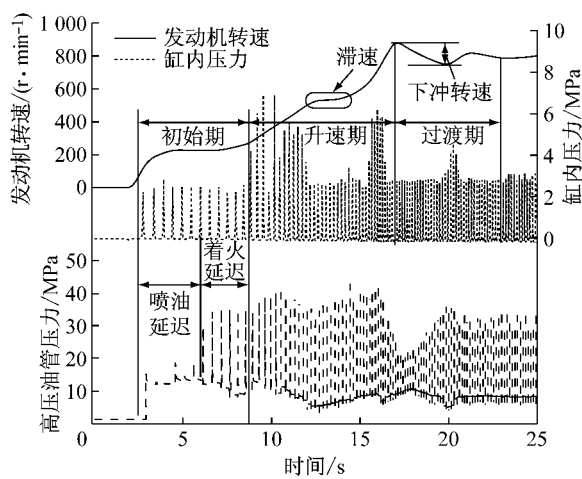


图 2 起动过程阶段划分  
Fig.2 Start sequence of diesel engine

动过程不同阶段做如下定义:

初始期为柴油机靠外力拖动曲轴开始转动,至柴油机自行运转的阶段. 初始期由喷油延迟和着火延迟两部分构成. 喷油延迟为柴油机机靠外力拖动曲轴开始转动,直至油压达到喷嘴达到起喷压力,喷油器开始正常喷油的阶段. 着火延迟为喷油器开始正常喷油,直至缸内混合气出现着火,柴油机自行运转的阶段.

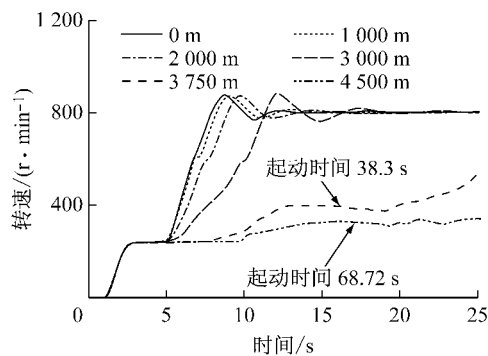
升速期为转速开始稳定上升后,至转速到达最高转速的阶段. 滞速现象指在升速期内出现转速升高率小于  $0.1 \text{ r} \cdot \text{s}^{-2}$  的阶段. 柴油机起动过程中喷油策略与转速不匹配是出现滞速的主要原因<sup>[16-17]</sup>.

过渡期为转速到达最高转速后,至转速稳定在怠速转速时所经历的阶段. 过渡时间和下冲转速用于评价过渡工况,下冲转速指升速期到达最高转速

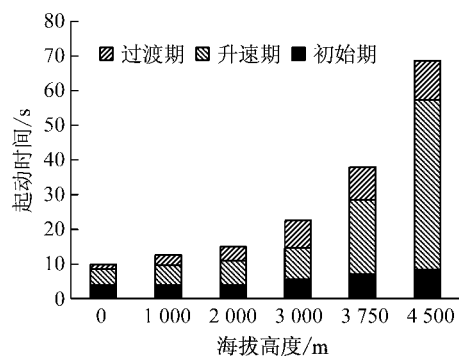
后回落到的最低转速的过程.

## 2.1 海拔高度对起动性能的影响

图 3 为平原 0 m,海拔高度 1 000,2 000,3 000,3 750,4 500 m 处低压缩比柴油机起动性能随海拔的变化规律. 不同海拔高度处供油策略均为原机策略,供油提前角为  $28^\circ$ .



a 海拔高度对转速的影响



b 海拔高度对起动时间的影响

图 3 海拔高度对低压缩比柴油机起动性能的影响

Fig.3 Effect of altitude on start performance of low compression ratio diesel engine

由图3可见,在海拔高度2 000 m及以下时,随着海拔升高,低压缩比柴油机起动过程初始期变化较小,在海拔高度3 000 m及以上初始期出现喷油未着火循环,初始期时间延长.在平原0 m,海拔高度1 000,2 000,3 000,3 750,4 500 m处,初始期中着火延迟时间分别为0,0,0,1.70,3.13,4.40 s.

随着海拔升高,发动机升速期转速升高率下降,升速时间增加;在海拔高度2 000 m及以下时,海拔高度每升高1 000 m,转速升高率平均降低17.77%,升速期延长1.1 s;海拔3 000 m及以上时,海拔高度每升高1 000 m,转速升高率平均降低58.69%,升速期延长18.48 s,且在升速期出现滞速现象,海拔高度3 000,3 750,4 500 m时出现滞速,转速分别为500.21,407.48,372.21  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,滞速时间分别为2.05,11.30,23.56 s.

由图4可见,随着海拔升高,柴油机起动过程过渡期下冲转速增大,过渡期延长;在海拔高度2 000 m及以下时,海拔高度每升高1 000 m,下冲转速增大5.47%,过渡期延长1.47 s;海拔3 000 m及以上时,海拔高度每升高1 000 m,转速下冲转速增大6.97%,过渡期延长2.75 s.

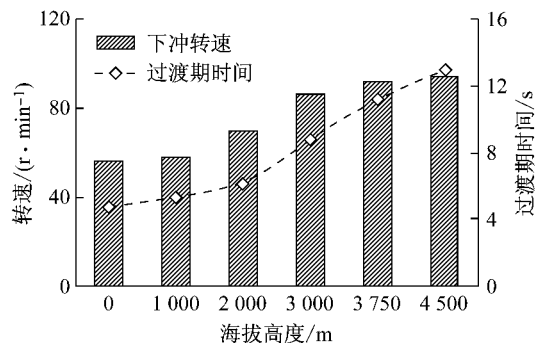


图4 海拔高度对低压缩比柴油机起动过渡期的影响

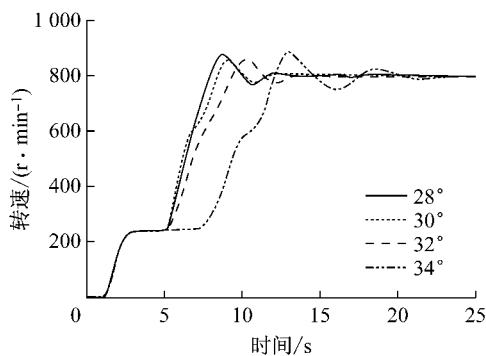
Fig.4 Effect of altitude on after start period of low compression ratio diesel engine

## 2.2 喷油策略对起动性能的影响

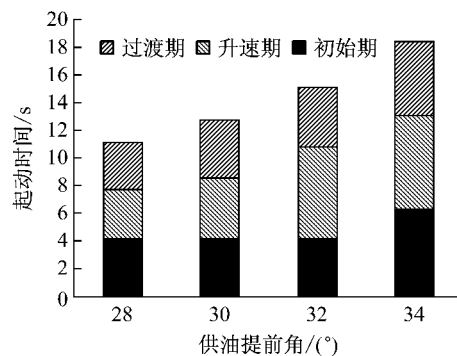
### 2.2.1 供油提前角对起动性能的影响

图5和图6所示分别为平原0 m和海拔高度4 500 m下,试验样机起动转速和起动时间随供油提前角的变化规律.不同供油提前角下供油策略均为原机策略.由图6,7可见,不同供油提前角下,柴油机均能起动,但在平原0 m和高原4 500 m时供油提前角对起动性能的影响有较大差异.

由图5可知,在平原0 m处,增大供油提前角,低压缩比柴油机起动过程初始期延长,升速阶段转速升高率降低,升速时间增加,下冲转速减少,过渡



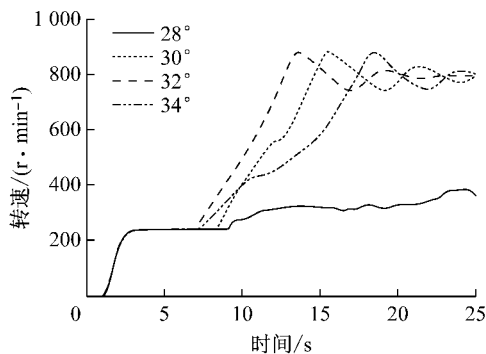
a 供油提前角对转速的影响



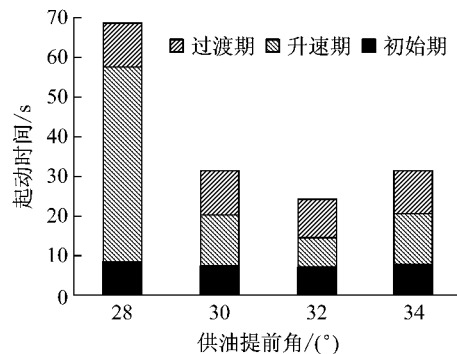
b 供油提前角对起动时间的影响

图5 平原0 m时供油提前角对柴油机起动性能的影响

Fig.5 Injection timing versus start performance of low compression ratio diesel engine at an altitude of 0 m



a 供油提前角对转速的影响



b 供油提前角对起动时间的影响

图6 海拔4 500 m时供油提前角对柴油机起动性能的影响

Fig.6 Injection timing versus start performance of low compression ratio diesel engine at an altitude of 4 500 m

期延长,起动性能恶化.相比供油提前角  $28^\circ$ ,供油提前角  $34^\circ$ 条件下起动过程初始期延长 2.20 s,升速阶段转速升高率降低 37.55%,升速期延长 3.17 s,过渡期延长 1.88 s.而随着海拔升高,适当增大喷油提前角可改善高原起动性能.

由图 6 可知,在海拔 4 500 m 条件下,供油提前角从  $28^\circ$ 增大到  $32^\circ$ 时,起动过程初始期缩短,升速阶段转速升高率增加,升速期缩短,下冲转速减小,过渡期时间减少,起动性能改善.与供油提前角  $28^\circ$ 相比,供油提前角  $32^\circ$ 条件下,低压缩比柴油机起动过程初始期和升速期分别缩短 1.60, 41.60 s,下冲转速减少 29.67%,过渡期缩短 1.52 s,这是由于适当地增大供油提前角有利于燃油的雾化蒸发,避免着火延迟至膨胀行程中,有助于改善高原条件下起动过程缸内燃烧.但供油提前角过度增大,起动性能恶化.相比供油提前角  $32^\circ$ ,供油提前角  $34^\circ$ 条件下,起动过程升速阶段转速升高率降低 42.35%,升速期延长 5.60 s,下冲转速增大 16.10%,过渡期延长 1.18 s.

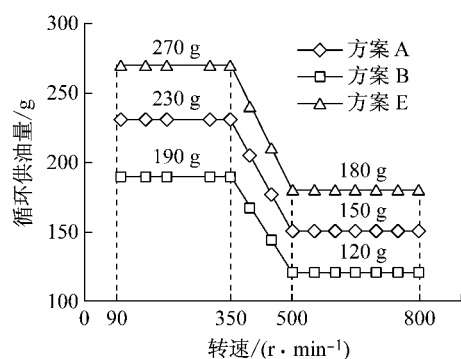
### 2.2.2 循环喷油量对起动性能的影响

为探索循环喷油量对低压缩比柴油机不同海拔条件下起动过程的影响,在供油提前角  $32^\circ$ 条件下,针对循环喷油量设计了 5 种试验方案,如图 7 所示.方案 A 为原机起动策略,相较于原机起动策略,方案 B, C, D 为减少循环供油的策略,方案 E 为增加循环供油的策略;其中方案 A, B, E 为梯台型循环喷油策略,方案 C, D 为凸台型循环喷油策略.

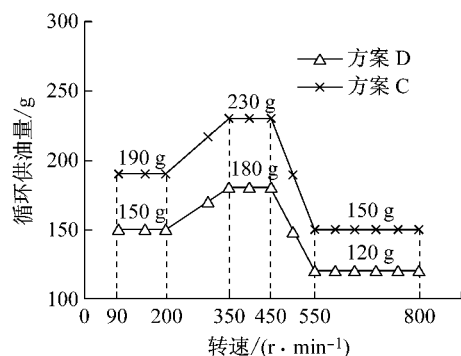
图 8 和图 9 所示分别为平原 0 m、海拔高度 4 500 m 条件下,不同循环喷油量对试验样机起动过程转速及起动期间的影响规律.由图 9 和图 10 可见,不同循环供油量下,在平原 0 m 和海拔 4 500 m 时起动性能的影响有较大差异.

由图 8 可知,在平原 0 m 下,增加循环喷油量的方案 E 与原机起动策略(方案 A)相比,升速阶段转速升高率增加 10.57%,升速期缩短 0.47 s,下冲转速增加 4.21%,过渡期延长 0.25 s.减少喷油量的方案 B 与原机相比,升速阶段转速升高率减少 6.37%,升速时间延长 0.27 s,过渡期缩短 0.42 s.凸台型供油策略方案 C, D 相比原机,升速期延长 0.09, 1.28 s,过渡期缩短 1.07, 1.78 s.在平原 0 m 时,几种循环喷油策略差异较小,其中凸台型供油策略 C 和适当增大喷油量供油策略 E 相对原机起动性能稍有改善.

由图 9 可知,在海拔 4 500 m 条件下,适度降低



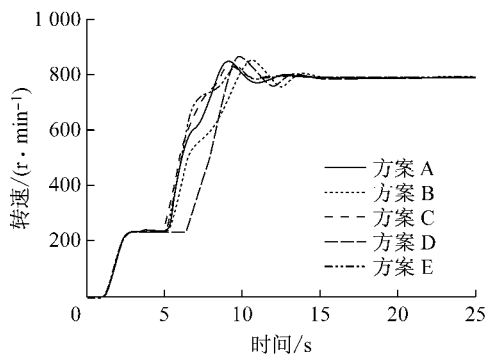
a 梯台型循环喷油量试验方案



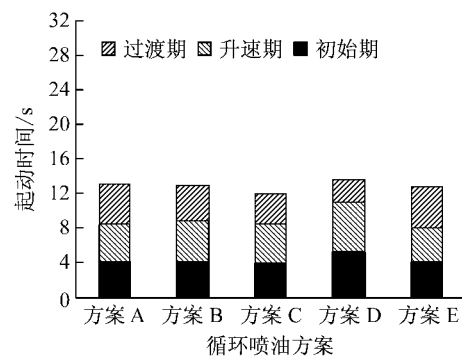
b 凸台型循环喷油量试验方案

图 7 不同循环喷油量试验方案

Fig.7 Total fuel mass injecting strategy



a 循环喷油量对转速的影响



b 循环喷油量对起动时间的影响

图 8 平原 0 m 时循环喷油量对柴油机起动性能的影响  
Fig.8 Total fuel mass injecting strategy versus start performance of low compression ratio diesel engine at an altitude of 0 m

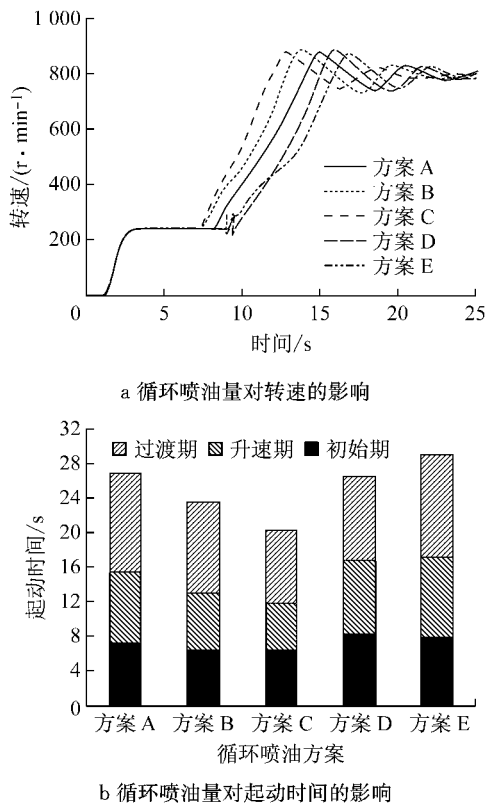


图9 海拔4500 m时循环喷油量对柴油机起动性能的影响  
Fig. 9 Total fuel mass injecting strategy versus start performance of low compression ratio diesel engine at an altitude of 4500 m

喷油量的方案B和方案C与原机起动策略相比,起动过程初始期缩短,升速期转速升高率增大,升速期和过渡期缩短,起动性能改善,其中以凸台型喷油策略(方案C)改善高原起动性能最明显,方案C相比原机初始期缩短0.80 s,升速阶段转速升高率增大37.60%,升速期缩短2.80 s,下冲转速减少11.93%,过渡期缩短2.88 s。这是由于在高原条件下,适当地减少喷油可减少起动过程撞壁燃油量,改善燃烧稳定性,同时凸台型供油策略有助于抑制起动过程着火不稳定及失火的现象,升速期和过渡期缩短,起动性能改善。方案D相比原机起动策略,初始期和升速期时间分别增加1.10,0.34 s,过渡期缩短1.80 s。这是由于过小的循环供油量,导致缸内可燃混合气减少,燃烧恶化,缸内平均有效压力降低,转速升高率降低,升速期时间延长。方案E时在升速期出现滞速,相比原机起动策略,起动过程初始期、升速期和过渡期分别延长0.70,1.03,0.50 s,起动性能恶化。

### 3 结论

(1) 高海拔使得低压缩比柴油机起动性能恶

化,表现为初始期延长,升速期转速升高率降低,下冲转速增大。且海拔越高起动性能恶化越显著。具体而言,2000 m以下海拔对起动性能影响不明显;海拔高度每升高1000 m,初始期无显著变化,升速期平均延长1.10 s,过渡期平均延长1.47 s;3000 m及以上海拔对起动性能影响明显,在初始期出现着火延迟循环,升速期出现滞速现象,海拔高度每升高1000 m,初始期平均延长1.74 s,升速期平均延长18.48 s,过渡期平均延长2.75 s。

(2) 平原条件下,增大供油提前角使起动性能恶化,初始期延长,升速阶段转速升高率降低,升速期延长,下冲转速增大,过渡期延长。在高海拔时,适当增大供油提前角可改善起动性能:与供油提前角为 $28^\circ$ 相比, $32^\circ$ 使得初始期缩短1.60 s,升速期缩短41.60 s,下冲转速减少29.67%,过渡期缩短1.52 s。但增大供油提前角具有限度,与供油提前角为 $32^\circ$ 相比, $34^\circ$ 使得起动性能恶化。

(3) 适当减少高原起动时的喷油量可改善高原起动性能,这是因为循环喷油量过大会导致升速阶段出现滞速现象,同时起动稳定性变差。在海拔4500 m时,与方案A相比,采用方案B,C的起动性能具有一定改善,且凸台型方案C改善更为显著。与方案A相比,采用方案C时的初始期减少11.11%,升速阶段转速升高率增大37.60%,升速时间减少34.43%,下冲转速减少11.93%,过渡期时间减少25.43%。但减小循环供油量具有限度,过小循环供油量会导致初始期和升速期时间增长。

### 参考文献:

- [1] 王建昕, 帅石金. 汽车发动机原理[M]. 北京:清华大学, 2011.  
WANG Jianxin, SHUAI Shijin. Automotive engine fundamentals[M]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [2] 彭海勇. EGR对柴油机起动过程燃烧排放性能影响的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.  
PENG Haiyong. Study on combustion and emissions of DI diesel engine during starting with EGR[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [3] OGAWA H, MIYAMOTO N, KAWABE T, et al. Characteristics of unburned hydrocarbons in a low compression ratio diesel engine (characteristics under transient operation and reduction with low distillation temperature fuels)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part B), 2008, 74(739):731.
- [4] YAO M, ZHENG Z, LIU H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2009, 35(5):398.

- [5] SU W, LU Y, YU W. Effect of charge density and oxygen concentration on emissions in a high density-LTC diesel engine by retarding intake valve timing and raising boost pressure[J]. SAE Technical Papers, 2010, 13(3):233.
- [6] ZAHDEH A, HENEIN N, BRYZIK W. Diesel cold starting: actual cycle analysis under border-line conditions[C/CD]//SAE 1992 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 1992: 920005.
- [7] PHATAK R, NAKAMURA T. Cold startability of open-chamber direct-injection diesel engines-part I: measurement technique and effects of compression ratio [C/CD]//SAE 1983 International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition. Milwaukee: SAE International, 1983: 831335.
- [8] TSUNEMOTO H, YAMADA T, ISHITANI H. Behavior of adhering fuel on cold combustion chamber wall in direct injection diesel engines[C/CD]//SAE 1986 International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition. Milwaukee: SAE International, 1986: 861235.
- [9] ROCCA A L, MACMILLAN D, SHAYLER P, *et al.* CFD investigation on the influence of in-cylinder mixture distribution from multiple pilot injections on cold idle behaviour of a light duty diesel engine[C/CD]// SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting. Birmingham: SAE International, 2014: 2014-01-2708.
- [10] CUI Y, PENG H, DENG K, *et al.* The effects of unburned hydrocarbon recirculation on ignition and combustion during diesel engine cold starts[J]. Energy, 2014, 64(18): 323.
- [11] BIELACZYK P, MERKISZ J, PIELECHA J. Investigation of exhaust emissions from DI diesel engine during cold and warm start[C/CD]//SAE 2001 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2001: 2001-01-1260.
- [12] BROATCH A, RUIZ S, MARGOT X, *et al.* Methodology to estimate the threshold in-cylinder temperature for self-ignition of fuel during cold start of diesel engines[J]. Energy, 2010, 35(5): 2251.
- [13] HAN Z, HENEIN N A, BRYZIK W. A new ignition delay formulation applied to predict misfiring during cold starting of diesel engines [C/CD]//SAE 2000 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2000: 2000-01-1184.
- [14] BIELACZYK P, MERKISZ J, PIELECHA J. A method of reducing the exhaust emissions from DI diesel engines by the introduction of a fuel cut off system during cold start[C/CD]// Automotive and Transportation Technology Congress and Exposition. Barcelona: SAE International, 2001: 2001-01-3283.
- [15] SAKUNTHALAI R A, XU H, LIU D, *et al.* Impact of cold ambient conditions on cold start and idle emissions from diesel engines[C/CD]//SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting. Birmingham: SAE International, 2014: 2014-01-2715.
- [16] HAN Z, HENEIN N, NITU B, *et al.* Diesel engine cold start combustion instability and control strategy [C/CD]//SAE 2001 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2001: 2001-01-12374.
- [17] HAN Z, HENEIN N A, BRYZIK W. A new ignition delay formulation applied to predict misfiring during cold starting of diesel engines [C/CD]//SAE 2000 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2000: 2000-01-1184.