性能与排放

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2022.02.002

喷油正时对某电控柴油机性能的影响

郑春兵[1]，王君萍[2]，桑德全[2]，姜伟波[2]，韩贵阳[2]

(1. 海装驻青岛地区第一军事代表室,青岛 266001;
2. 中国石油集团济柴动力有限公司,济南 250306)

摘　要：基于某电控柴油机研究喷油正时对喷油规律、缸内燃烧放热规律及整机性能的影响。分析表明:喷油正时对油管压力影响较小,对喷油器启喷压力影响显著;在一定范围内喷油正时的变化对柴油机各项性能均有稳定、有限的影响,其中对碳烟、NO_x排放的影响最为明显。确定合理的喷油正时应兼顾整机的排放性能及常用工况的燃油经济性。

关键词：柴油机；喷油正时；燃烧；放热；性能

中图分类号:TK421+.4　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-4357(2022)02-0007-04

Influence of Injection Timing on Performance of Electronically Controlled Diesel Engine

ZHENG Chunbing[1], **WANG Junping**[2], **SANG Dequan**[2], **JIANG Weibo**[2], **HAN Guiyang**[2]

(1. Qingdao First Military Representative Office of Navy, Qingdao 266001, China;
2. CNPC Jichai Power Co., Ltd., Jinan 250306, China)

Abstract: Based on an electronically controlled diesel engine, the effects of fuel injection timing on fuel injection law, in-cylinder combustion heat release law and overall performance are studied. The analysis shows that: The injection timing has little effect on the oil pipe pressure and has a significant effect on the starting pressure of the injector; Within a certain range, the change of injection timing has a stable and limited impact on the performance of diesel engine, especially on soot and NO_x emission. Reasonable fuel injection timing should take into account the emission performance of the whole engine and the fuel economy under common working conditions.

Key words: diesel engine; injection timing; combustion; heat release; performance

0　引言

随着全球排放法规的日趋严苛，对柴油机的性能及排放要求越来越高。对电控柴油机而言喷油正时对燃油喷射规律及缸内燃烧放热规律有重要影响，本文结合某电控柴油机试验结果研究分析喷油正时对柴油机主要性能参数的影响规律。

1　试验样机

试验样机为某电控单体泵柴油机，其主要技术参数见表1。电控单体泵燃油喷射系统主要优点为具有较高的灵活性和响应性，电子控制单元

收稿日期：2021-10-21；修回日期:2021-11-11

(electronic control unit，ECU) 基于采集到的凸轮及飞轮信号对柴油机在不同工况下的喷油时刻及喷油持续期进行控制，再配合高速电磁阀开关，可准确方便地控制喷油过程，实现燃烧优化，使柴油机具有良好的排放性和经济性。

表1 试验样机主要技术参数

项目	参数
型式	四冲程、水冷、直喷、增压、中冷
缸数/排列	8缸/直列
标定转速/（r·min^{-1}）	1 200
标定功率/kW	1 100
排量/L	57.84
压缩比	14.5∶1
着火顺序	1-3-7-4-8-6-2-5

2 喷油正时对供油规律的影响

改变喷油正时不仅直接影响缸内燃烧过程，对高压油管中的燃油压力以及喷油器的喷射动作也有一定的影响。在额定工况下不同喷油正时：上止点前18°（-18° TDC，top dead center），-14° TDC，-10° TDC对供油规律的影响如图1所示。可以看出：随着喷油正时的推后，高压油管压力曲线逐渐向右平移，曲线形状也发生一定变化；由于供油时刻后移导致平均有效压力降低，则维持工况稳定需要较大的喷油持续期；喷油正时越推后，喷油持续期及油管最高压力的持续时间越长。

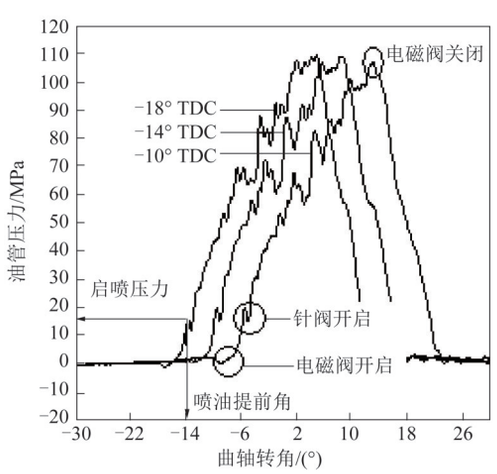


图1 喷油正时与油管压力的关系

受机械供油部件的影响，喷油正时的改变同时影响喷油器的喷油雾化性能以及相应的燃烧特性。从图1可以看出整个喷油过程大约持续30°曲轴转角，泄压过程约占总过程的1/3。在喷射过程中受电控单体泵内部油路结构的影响，在电磁阀开启瞬间油管压力稍有下降，在电磁阀完全开启后，燃油在高压油泵的作用下直接进入高压油管，在油管压力达到喷油器启喷压力后开始喷油，针阀打开后迅速泄油，使高压油管压力略有下降。

图1还在一定程度上反映了喷油正时对液力延迟和油管压力的影响，喷油正时对液力延迟影响较小，对喷油器启喷压力影响显著，喷油正时越靠前启喷压力越低，最高喷射压力越高。这是因为喷油正时的改变实际上改变了喷油凸轮型线对喷油速率的影响，所以选择合理的电磁阀开启时刻应结合考虑凸轮升程结构，以保证整个燃油喷射期油气混合所需的喷射压力。特别是在考虑改善NO_x排放时应尽可能降低初期和后期的喷油率，控制主喷射段喷油率，并保证泄压停油干脆利索。

3 喷油正时对缸内燃烧放热规律的影响

3.1 额定工况缸内燃烧放热规律

在理想燃烧状态下，同一燃料的燃烧与放热量成正比，燃料已燃质量分数（mass burned fraction，MBF）与燃料燃烧的放热率可以同时用来描述不同工况的燃烧过程。通常以MBF 5%相位点作为燃烧始点，MBF 90%相位点作为燃烧终点，以最高燃烧压力P_{max}点或MBF 50%相位点作为燃烧过程的关键相位点[1]，结合喷油规律分析不同燃烧阶段的放热规律。

图2为在额定工况-18° TDC时的缸内压力及通过热力学计算得到的放热量、放热率等参数[2]。其中，P_{max}点位于上止点后约12°，MBF 50%点位于上止点后约11°。可以看出：在喷油完成后约7°缸内压力升高率未发生明显变化，放热规律基本不受影响，此时喷入缸内的燃料在接触到高温空气后发生裂解、氧化等化学反应；在随后的4°过程中燃烧化学反应逐渐开始，但由于可燃混合气较少，燃烧放热量不足以引起缸内压力的明显变化；在上止点前4°时进入预混燃烧阶段，化学反应速度激增，持续时间约为6°，这一阶段由于混合气较充足，燃烧反应迅速，并且燃烧位置处于活塞上止点附近，所以缸内压力升高也较快。压力升高率过大会增大柴油机的冲击负荷、振动及噪声，甚至会影响柴油机的寿命。通常平均压力升高率不应超过0.6 MPa/（°），在性能开发过程中应合理设定喷油正时，避免这一现象发生，并保证柴油机具有良好的热效率。

3.2 喷油正时对缸内燃烧放热规律的影响

基于试验分别研究在-18°、-14°和-10°喷油正

时下缸内的燃烧情况，各燃烧参数对比曲线见图3，主要相位点参数见表2。从表2可以看出：随着喷油提前角的推后各燃烧参数相应推迟，燃烧持续期逐渐增大；P_{max}及MBF 50%相位角延迟稍小于喷油正时的推后，在一定程度上反映了转速与燃烧速度的关系。

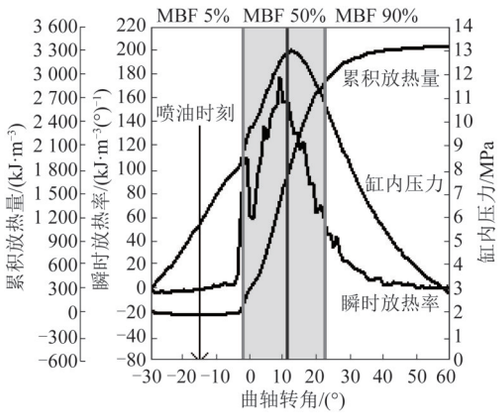
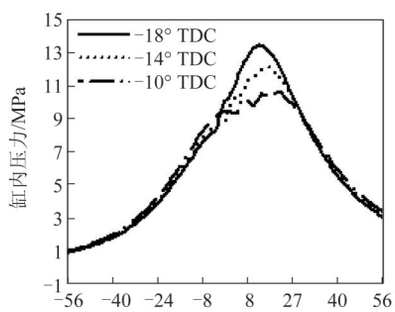
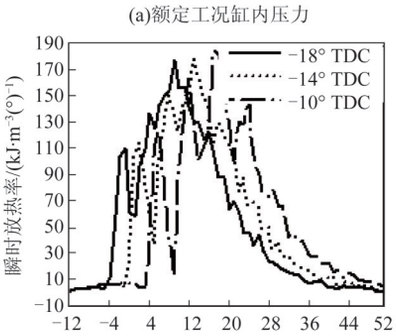


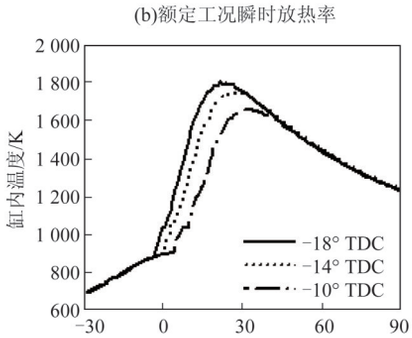
图2　额定工况放热规律



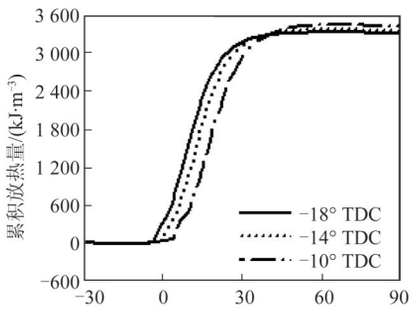
(a)额定工况缸内压力



(b)额定工况瞬时放热率



(c)额定工况缸内温度



(d)额定工况累积放热量

图3　喷油正时对缸内燃烧的影响

表2　燃烧过程主要参数相位角

单位：(°)

项目	参数		
曲轴转角	−18	−14	−10
燃烧始点	−14. 25	−14. 35	−14. 15
燃烧持续期	25. 95	26. 35	28. 40
MBF 5%	−1. 45	1. 70	5. 35
MBF 50%	10. 65	14. 30	18. 90
MBF 90%	24. 50	28. 05	33. 75
P_{max}	12. 28	15. 00	18. 88

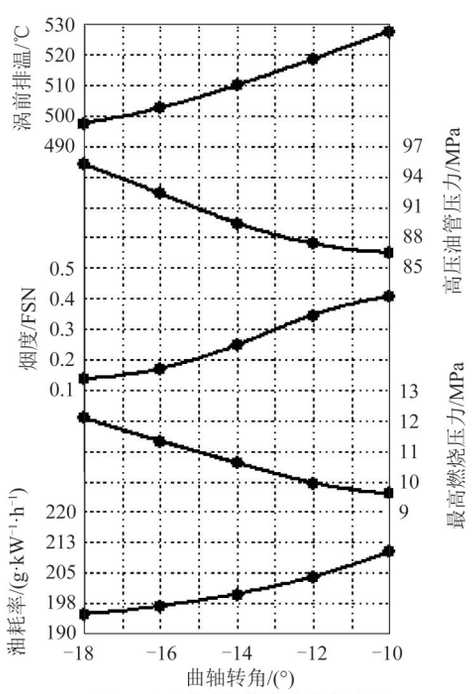
图3（a）显示了在不同喷油正时下缸内压力的变化趋势，可见：喷油正时越靠前，着火前的缸内压缩压力越低，最高燃烧压力越大。主要原因是更早的喷油使得滞燃期燃油量增多，柴油气化吸热大，降低了缸内初始燃烧温度，同时喷油提前降低了排气温度和排气压力，使增压压力降低；更早的喷油使得主要燃烧过程更接近上止点，提高了燃烧等容度和循环热效率，柴油机可以获得较好的燃油经济性[3]。

图3（b）显示了在不同喷油正时下缸内放热率的变化趋势，可以看出：平均滞燃期约为14°；喷油正时推迟预混燃烧期变长，放热率高低差值及最高放热率增大，“双峰”现象的波谷更低，在扩散燃烧阶段波峰较高，即喷油正时越靠后“峰高谷低”现象越显著；喷油正时提前，缸内压力和温度相对较低，火焰形成期长，在达到上止点附近时缸内可燃混合气混合度非常高，使得主燃期缩短。结合图3（c）、图3（d）可以看出：缸内温度与缸内最高燃烧压力成正比关系。喷油越靠前滞燃期内油气混合越均匀，热效率越高，主要燃烧期越靠近上止点，等容状态压力越大，缸内温度越高，累积放热量越小。

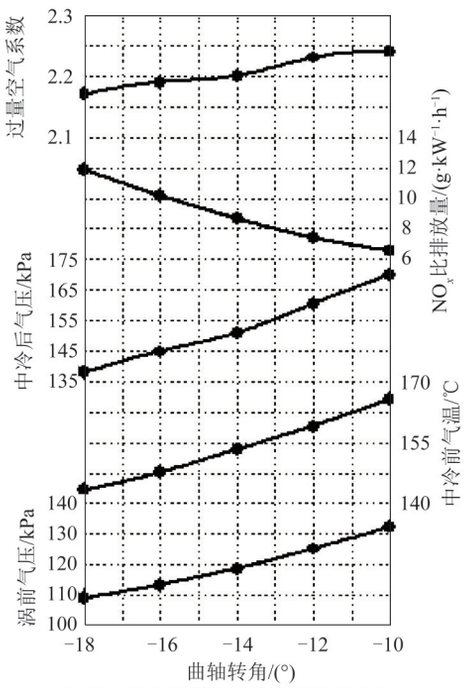
4　喷油正时对整机性能的影响

喷油正时决定了可燃混合气的燃烧始点和初始燃烧状态，影响整个燃烧过程。通常过早喷油将延长滞燃期，缩短预混燃烧和扩散燃烧过程，而预混燃烧过程对缸内最高燃烧压力、最大压升率、最大放热率及NO_x排放等影响较大；扩散燃烧过程则对柴油机的经济性和颗粒排放至关重要。

图4为在额定工况下喷油正时对柴油机性能参数的影响。在额定工况下随着喷油正时的推迟，高压油管最高瞬时油压逐渐降低，缸内最高燃烧压力点推后，最高燃烧压力降低，而油耗率、排温和烟度则增大。喷油延后使滞燃期缩短，滞燃期内形成的可燃混合气减少，最高燃烧压力和温度降低，减弱了NO_x生成的条件，但随着喷油时刻延后NO_x减少变缓，主要原因是喷油持续期变长，燃烧反应时间变长，加剧了NO_x生成。喷油推后还会导致排温升高，涡轮前气压升高，从而使增压压力和温度升高，在进气量增加与燃烧恶化同时影响下，缸内氧气的体积分数未发生明显变化，过量空气系数略有增加。



(a)喷油正时对柴油机性能参数的影响(一)



(b)喷油正时对柴油机性能参数的影响(二)

图4　喷油正时对柴油机性能参数的影响

从参数变化曲线可以明显看出，在一定范围内喷油正时对柴油机各项性能均有稳定、有限的影响，其中对碳烟、NO_x排放的影响最为显著。因此，在柴油机整机排放性能的优化过程中，改变喷油正时可以作为一种最简单有效的手段，但在降低NO_x排放的同时须兼顾碳烟、颗粒和油耗升高的问题。

5　结论

（1）通过研究喷油正时对供油规律及缸内燃烧状态的影响，可量化评价燃烧过程的优劣，并可进一步研究喷油正时的极限边界，为优化柴油机性能提供依据。

（2）喷油正时直接影响各燃烧阶段油气混合程度及放热过程，进而影响整机性能参数变化，合理的喷油正时应兼顾整机的排放性能和常用工况的燃油经济性。

参考文献

[1] 刘圣华，周龙保. 内燃机学[M]. 4版. 北京：机械工业出版社，2017.

[2] 于超，王建昕，王志，等. 均质混合气引燃发动机的燃烧与排放特性[J]. 汽车安全与节能学报，2011，2(3)：263-270.

[3] 杨晓，李岩. AVL Indicom热力学计算及燃烧放热分析[J]. 内燃机，2014，4(2)：16-18.