

性能与排放

喷油提前角对非道路移动机械用柴油机性能的影响

邹强¹, 李旭聪², 姚春德²

(1. 广西玉柴机器股份有限公司试验室, 广西 玉林 537005;

2. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 以一台四缸非道路移动机械用柴油机为试验发动机, 在喷油提前角为 3°CA 、 1°CA 和 -1°CA 条件下, 对发动机的外特性、经济特性以及排放特性进行了研究。研究表明: 喷油提前角的推迟, 对发动机动力性影响不大; 但对柴油机的经济性影响比较大, 尤其是发动机运行在中高转速时; 喷油提前角对排放也有较大影响, 随着喷油提前角的推迟, CO 和 HC 排放增加, NO_x 排放得到一定程度的改善; 喷油提前角 3°CA 下的八工况点比排放得到大幅改善。因此, 通过调整喷油提前角可使该非道路用柴油机达到拟国3排放法规的要求。

关键词: 非道路用柴油机; 喷油提前角; 性能

中图分类号: TK421⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2012)03-0014-04

Effect of Fuel Injection Timing on the Performance of Diesel Engines Used by Off-Road Mobile Machinery

Zou Qiang¹, Li Xucong², Yao Chunde²

(1. Laboratory of Yuchai Machinery Co., Ltd., Guangxi Yulin 537005;

2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Based on one experimental diesel engine with four cylinders used by non-road mobile machinery, the external characteristics, economic performance and engine emission were studied deeply with different fuel injection timing of 3°CA , 1°CA and -1°CA . The results indicated: the delaying of fuel injection timing has not much effect on dynamic characteristic of diesel engine, while economic characteristic of engine closely relates to fuel injection timing, especially when running at medium and high speed. The emission characteristic of engine is also Influenced by fuel injection timing. CO and HC emission of engine increases with delaying of fuel injection timing, while the tendency of NO_x emission is different to that of CO and HC emission, improved to a certain extent. Emission quantity under eight operating modes with fuel injection timing 3°CA drops greatly. Moreover, diesel engine with poor emission performance used by off-road mobile machinery can meet requirement of emission regulation by technical means of changing fuel injection timing.

Keywords: off-road diesel engine; fuel injection timing; performance

0 引言

非道路移动机械用柴油机在我国使用面广, 主要应用于农业和工程机械, 但其使用领域限制了柴

油机的生产成本, 许多高新技术在非道路柴油机上得不到大力推广应用。随着人们节能减排意识的不断提高, 环境问题也成为全球化问题。非道路用柴油机的经济性和排放也已成为广泛关注的焦点, 为

收稿日期: 2011-11-01; 修回日期: 2012-03-08

基金项目: 国家863项目资助, 编号: 2009AA045104

作者简介: 邹强(1972-), 男, 工程师, 主要研究方向为发动机产品研发与试验, E-mail: zouqiang@yuchai.cn。

此，相关部门对于非道路用移动机械柴油机排放实行严格限制。目前对非道路内燃机的检测方法是八工况法，排放控制限值为拟国 3 标准。美国的八工况点循环试验方法对柴油机的有害排放，主要有 HC、CO、NO_x 以及颗粒 (PM) 等，进行检测。八工况点如表 1 所示。

表 1 排放法规八工况点

工况号	1	2	3	4	5	6	7	8
转速/ (r·min ⁻¹)	额定转速				中间转速			怠速
扭矩/%	100	75	50	10	100	75	50	0
加权系数	0.15	0.15	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15

不同排放有害物在柴油机工作过程中的排放特性不相同。CO 主要是在柴油机大负荷工况下排放较差；NO_x 在标定转速或中间转速大负荷时排放量大；而 HC 主要是在中小负荷排放较差，但是并不是十分突出。排放法规要求的八工况点在非道路移动机械用柴油机工作过程中具有典型代表性，即控制住法规中八工况的 HC、CO、NO_x 以及颗粒 (PM) 等主要有害物的排放量，就能够使非道路用柴油机有较好的排放特性。美国非道路排放限值 40 CFR Part 89 Tier3 的非道路用柴油机与拟国 3 相同，其比排放量限值如表 2。

表 2 非道路用柴油机比排放限值

单位: (g·(kW·h) ⁻¹)					
HC	NO _x	HC + NO _x	CO	PM	试验方法
-	-	4.7	5.0	0.5	八工况

在柴油机的诸多参数中，喷油提前角对柴油机油气混合和燃烧品质有较大的影响，其对柴油机经济性、动力性和排放性的影响已有较多的研究^[1-3]。本研究以一台立式、直列、四缸直喷式柴油机为原型机，通过调整发动机的喷油提前角，测试柴油机的动力性、经济性以及 HC、CO、NO_x 和 PM 的排放特性，并对试验结果进行了详细的分析，为柴油机的高效清洁燃烧提供良好的技术支持。

1 试验装置和试验内容

试验样机为一台直列 4 缸、水冷发动机，原机为车用，经过适当改装后为非道路内燃机用。发动机台架实物图如下图 1。发动机主要技术参数如表 3。

试验用主要测试设备有：AFA_ T490 测功机及 PUMA Open1. 2. 1 发动机测控系统，控制发动机扭矩和转速；湿度测量单元 HMD60U、温度测量单元 FEM-AI 和压力测量单元 FEM-P 分别测试试验时的

湿度、温度以及压力；TOCEIL 热式气体质量流量计测试发动机气体流量；利用发动机进气空调 ACS 2400F 和燃油恒温系统 AVL753CH 分别调节进气温度和燃油温度；AVL735 油耗仪检测发动机燃油消耗量；全流稀释颗粒取样系统 PSE-2000、415 烟度计、AMA4000 气体分析仪以及 M5P 电子天平测试发动机尾气中的 HC、CO、NO_x 以及 PM 的排放量。



图 1 发动机台架实物图

表 3 试验用柴油机主要参数

型号	YC4F65Z-T30
型式(布置、冷却、进气方式)	立式、直列、四冲程、水冷
缸数—缸径×行程/mm	4—92×100
额定功率/转速(kW/(r·min ⁻¹))	45/2 500
最大扭矩/转速/ ((N·m)/(r·min ⁻¹))	≥200/1 600~1 900
外特性最低比油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	≤220
最低空载稳定转速/(r·min ⁻¹)	≤750
压缩比	17.5:1
最大允许进气阻力/kPa	≤4.0
最大允许排气背压/kPa	≤10.0
排量/L	2.66

试验中，保持柴油机在全负荷工况下，在喷油提前角分别为 3 °CA、1 °CA 以及 -1 °CA 下进行了柴油机动力性以及经济性的测试。至于柴油机的排放性能，试验方案如下：首先，将样机的喷油提前角设置在 3 °CA，然后依照排放测试法规进行八工况循环试验^[4]，测取每一工况下 HC、CO、NO_x、PM 以及总的排放值；然后，调整喷油提前角为 1 °CA 和 -1 °CA，测试方法同上。

2 试验结果及分析

2.1 排放性

图 2 为柴油机在不同喷油提前角下的 CO 排放对比图。从图中可以看出，在三个不同喷油提前角下，CO 排放随工况的变化趋势极为相似。随着喷油提前角的推迟，柴油机的 CO 排放随着升高。第

4 个工况点为标定转速($2\,500\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$)和 10% 负荷($16.2\text{ (N}\cdot\text{m)}$), 此工况点负荷小, 空气过量系数大, 混合气过稀, 造成缸内燃烧温度低, 使得缸内燃料燃烧不充分, 柴油机尾气中 CO 的体积分数较大; 喷油提前角提前到 3°CA , 燃料与空气混合均匀, 燃料在缸内燃烧充分, CO 排放大幅降低。CO 是碳氢燃料在燃烧过程中生成的主要中间产物, 如果反应物的氧浓度、温度足够高, 反应时间足够长, CO 会氧化成 CO_2 。虽然, 柴油机总过量空气系数在大多数工况下都是富氧状态, 但是, 燃烧室中局部缺氧也会造成 CO 的生成。随着喷油提前角的推迟, 燃烧滞燃期缩短, 燃油和空气来不及混合均匀, 燃烧室内局部缺氧区域增加, CO 排放增加。

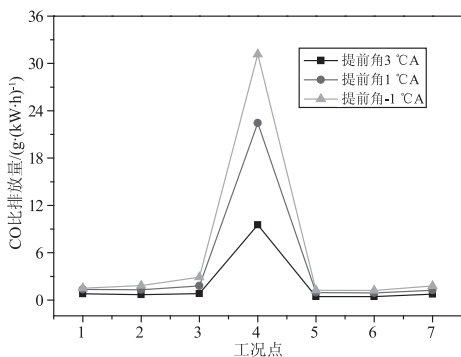


图 2 不同喷油提前角的 CO 排放浓度

不同喷油提前角下柴油机的 HC 排放浓度曲线如图 3 所示。总体上看, 三种不同喷油提前角下的 HC 排放浓度也呈相似趋势, 随着喷油提前角的推迟, HC 排放浓度呈现出上升的趋势, 这一现象与 CO 排放浓度曲线较为相似。HC 排放主要来自于燃烧过程中未来得及燃烧或未完全燃烧的 HC 燃料。柴油机的喷油系统力求把燃油均匀分布在燃烧室空间, 但是燃油喷注与燃烧室壁面的碰撞不可能完全避免, 由于喷油提前角的推迟, 喷射到壁面上的燃油来不及蒸发, 由此会引起 HC 增加; 同时, 喷油提前角的推迟会造成滞燃期缩短, 燃油和空气来不及混合均匀, 部分区域会形成过稀的燃油混合气, 造成部分区域失火, 燃油燃烧不完全或者始终不能燃烧, 成为未燃 HC 排放增加的主要来源。这一因素对在高转速, 低负荷工况点(第 4 工况点)下柴油机 HC 比排放的影响更加明显。在喷油提前角 3°CA 下, 燃油的滞燃期较长, 使得燃油在缸内混合时间较为充分, 从而获得了较均匀的混合气, 避免缸内局部失火或者燃烧不完全的现象出现, 从而获得更为良好的 HC 比排放。

图 4 所示为柴油机在不同喷油提前角下的 NO_x

排放浓度曲线。从图中可以看出, 三种提前角下的八工况点 NO_x 排放浓度的规律十分相似。对比图 2、3 可以看出, NO_x 排放浓度曲线随着喷油提前角的改变呈现出的趋势与 CO 和 HC 排放曲线的趋势不相同。柴油机的 NO_x 排放主要来源于参与燃烧的空气中的氮, 柴油机燃烧过程中产生 NO_x 的多少, 取决于三个条件: (1) 温度高, 包括局部温度高; (2) 氧气浓度大; (3) 保持高温下氧和氮反应的足够时间。在柴油机燃烧过程中, 气缸内达到的最高燃烧温度对 NO_x 排放起着重要的作用。第 4 工况点是在低负荷下运行, 喷入缸内的燃油很少, 混合气中氮气含量高, 改变喷油提前角也不会使缸内燃烧温度有较大的改变, 所以 NO_x 的比排放在不同提前角下并没有多大区别。但从八点工况整体来看, 降低缸内最高燃烧温度可以有效降低 NO_x 排放。柴油机喷油正时对柴油机燃烧过程有很大影响。推迟喷油使最高燃烧温度和压力下降, 燃烧变得柔和, NO_x 生成量减少。

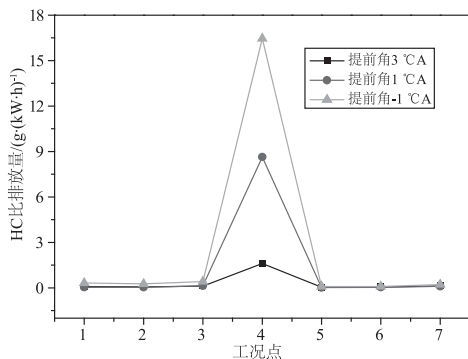


图 3 不同喷油提前角的 HC 排放浓度

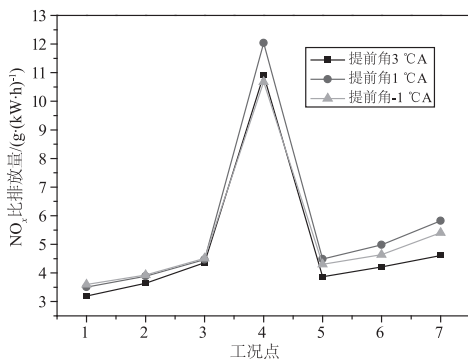


图 4 不同喷油提前角的 NO_x 排放浓度

从图 5 中可以看出, 随着喷油提前角的推迟, CO 和 HC 的总比排放值随之升高; 而 NO_x 总比排放值在喷油提前角 3°CA 下为最小, 在提前角 1°CA 时最大, 提前角 -1°CA 时居中。对于颗粒排放, 三种喷油提前角对柴油机颗粒物总比排放值影响不大。

改变喷油提前角对于改善非道路用柴油机的排

放性能是简单、有效、易行的方法。从图 6 中可以看出：相对于排放法规规定的排放量，喷油提前角 3 °CA 下的排放得到很大改善：CO 比排放量降低了 81.5%；NO_x + HC 的比排放量降低了 12.2%；PM 比排放量降低了 62.5%。

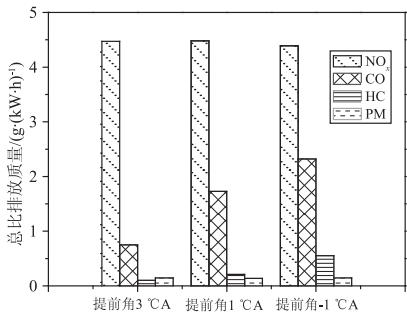


图 5 不同提前角的总排放量

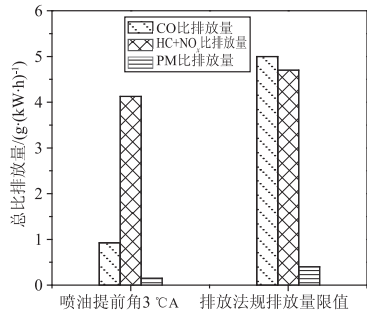


图 6 喷油提前角 3 °CA 排值放与排放法规限值对比

2.2 动力性

为了研究喷油提前角对柴油机动力性的影响，保持油门位置全开，在不同转速下测试发动机功率和扭矩。

图 7 为三种不同喷油提前角下柴油机的外特性曲线。从图中可以看出，喷油提前角对柴油机的外特性影响并不是很大。喷油提前角的推迟，使得柴油机的动力性稍微有所下降，如图中所示，提前角 3 °CA 的功率曲线稍微高于提前角 -1 °CA 的曲线，但是差别不大。喷油提前角对于燃料在气缸内燃烧是一个较为重要的参数，其主要影响滞燃期，当喷油提前角增加时，滞燃期变长，所以燃料和空气混合更为均匀，使得混合气在上止点着火时刻燃烧得更加充分和迅速，获得更高的缸内燃烧温度和压力，进而使发动机动力性更好。

2.3 燃油经济性

喷油提前角的改变对柴油机的经济性也有影响。为此，保持发动机扭矩不变，分别在不同转速下进行了发动机经济性的试验研究。

图 8 所示为柴油机在三种不同喷油提前角下的经济特性曲线。从图中可以看出，随着柴油机喷油提前

角的提前，柴油机的燃油消耗率得到有效地改善。不同喷油提前角下的柴油机燃油消耗率在发动机低转速运行时差别并不大，但随着转速的上升，喷油提前角对柴油机燃油消耗率的影响开始显现，差别变大。如图 8 所示，柴油机转速为 1 125 (r·min⁻¹)时，三种不同喷油提前角的柴油机燃油消耗率基本持平，转速上升至 1 300 (r·min⁻¹)时，喷油提前角大的运行工况的燃油消耗率优势开始显现，发动机转速继续上升，喷油提前角大的运行工况的燃油消耗率低的优势继续扩大。

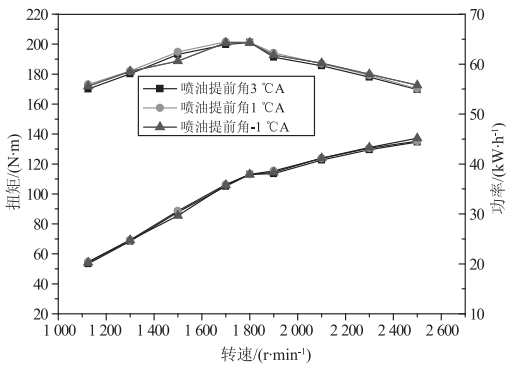


图 7 不同喷油提前角的外特性

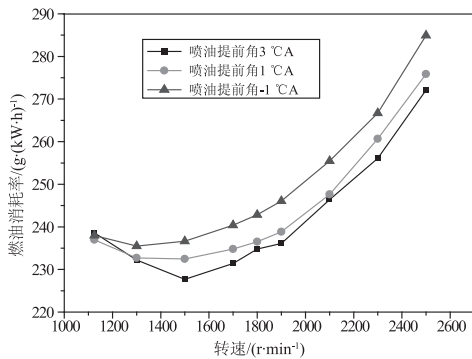


图 8 不同喷油提前角的经济特性

柴油喷入燃烧室内，并不能立即着火，要经历着火延迟过程，在这个过程喷入气缸的燃料经历一系列物理-化学变化过程，包括雾化、加热、蒸气、扩散与空气混合等物理准备阶段以及着火前的化学准备阶段^[5]。当喷油提前角增大时，这一阶段的柴油和空气混合得更加均匀，预混合燃烧放热峰值大，燃烧更接近上止点，定容度较高，能取得更加理想的经济性。

3 结 论

通过调整非道路移动机械用柴油机的喷油提前角，对柴油机在不同提前角下的动力性、经济性以及排放特性进行了试验研究。得出如下结论：

(下转第 21 页)

应用米勒定时技术,与之相匹配地必须同时采用提高压缩比和提高增压空气压力,才能获得既降低 NO_x 排放和燃油消耗率,又能保持柴油机其它性能指标不下降的效果。

试验时压缩比由 13.5 提高到 14.5,原配 TPS61-D01 增压器(压比 4.2)更换成高效的 TPS61-F33 增压器(压比 4.7)和 A145-M66 增压器(压比 5.8)。试验方案分别是:

- ① TPS61-F33 增压器 + 540 ℃ A 进气关;
- ② A145 增压器(TA55 喷嘴环) + 540 ℃ A 进气关;
- ③ A145 增压器(TA55 喷嘴环) + 530 ℃ A 进气关;
- ④ A145 增压器(TA53 喷嘴环) + 530 ℃ A 进气关。

按 E3 循环试验,试验结果如图 9 所示。

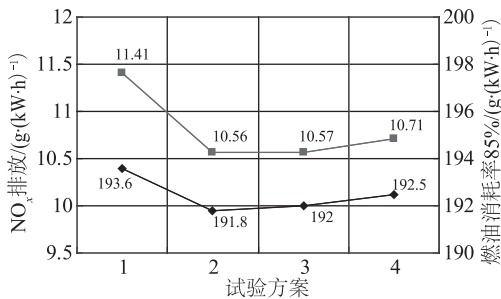


图 9 米勒定时、增压器与燃油耗和 NO_x 关系

试验表明:采用强米勒定时,柴油机 NO_x 排

放量显著下降,燃油消耗率也比之前有所降低,综合评估方案 2 效果较好,NO_x 排放和燃油消耗率都较低。

7 综合试验

综合分析以上试验结果,经过优化选择,最终确定 G32 柴油机满足 IMO-Tier II 排放要求所采用的技术是:

- (1) 540 ℃ A 米勒定时;
- (2) 压缩比由 13.5 提高到 14.5;
- (3) 匹配 TPS61-F33 增压器压;
- (4) 采用加长柱塞的进口高压油泵;
- (5) 加大中冷器冷却面积,加强冷却;
- (6) 优化供油定时。

经上海沪江排放检测公司按 E3、D2 循环测试,NO_x 排放值为 9.76 (g·(kW·h)⁻¹) (E3) 和 8.68 (g·(kW·h)⁻¹) (D2),满足 IMO-Tier II 排放法规要求的 10.10 (g·(kW·h)⁻¹),燃油消耗率为 193 (g·(kW·h)⁻¹)。

8 结束语

通过在 G32 柴油机上进行降低 NO_x 排放的各种试验,找到了一条适合高强化度中速柴油机满足 IMO-Tier II 法规 NO_x 排放要求的技术路线。这条技术路线既降低了 NO_x 排放,又能保持柴油机的其它性能指标的先进性,使柴油机品质不下降。

(上接第 17 页)

(1) 喷油提前角 3 ℃ A 下的比排放量相对于排放法规规定的排放量得到了很大改善:CO 比排放量降低了 81.5%;NO_x 和 HC 的比排放量降低了 12.2%;PM 比排放量降低了 62.5%。试验用柴油机可以达到拟国 3 排放要求。

(2) 不同喷油提前角对柴油机的动力性影响较小。

(3) 不同喷油提前角对柴油机的经济性有着较大的影响。随着喷油提前角提前,柴油机的经济性随之提高,喷油提前角 3 ℃ A 下的燃油消耗率较之喷油提前角 -1 ℃ A 降低了将近 5% 左右。

参考文献

[1] Yi Y, Hessel R, Zhu G S, et al. The influence of physical parameter uncertainties on multidimensional model predictions of diesel engine performance and emissions[C]. SAE 2000 - 01 - 1178.

[2] Desantes J M, Pastor J V, Arregle J, et al. Analysis of the combustion process in a EURO III heavy-duty direct injection diesel engine. Transaction of the ASME[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002; 636 - 644.

[3] Ishii Yoshinori, Zhang long. Simulating the effect of injection rate profile on emissions and combustion in a DI diesel engine[A]. Proceedings of the 15th Internal Combustion Engine Symposium (International) [C]. Seoul, Korea, 1999: 483 - 487.

[4] GB20891-2007, 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限制及测量方法(中国 I、II 阶段)[S].

[5] 周龙保等. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.