

4190Z_LC-2 柴油机燃油喷射系统参数匹配试验

徐 虎¹, 孙思远¹, 黄加亮^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 基于4190Z_LC-2船用中速柴油机电控化改造燃烧与性能测试平台, 测取在额定工况下不同供油提前角柴油机的性能参数, 分析供油提前角对柴油机运行性能的影响规律, 并根据不同凸轮作用段在最佳供油提前角的对比选型, 发现“14.6℃A”凸轮作用段具有较好的喷油特性。在柱塞直径、喷油提前角和凸轮作用段分别为14 mm、26℃A和14.6℃A时, 测试与分析了喷孔直径变化对负荷特性和推进特性的影响。结果表明: 综合性能最佳的喷孔直径为0.26 mm, 其在满足经济性前提下的NO_x排放较优, 可为燃油喷射系统参数匹配提供理论依据和试验依据。

[关键词] 柴油机; 燃油系统; 燃烧性能; NO_x排放

[中图分类号] U 664.121

Experimental Research on Parameter Matching of Fuel Injection System of 4190Z_LC-2 Diesel Engine

XU Hu¹, SUN Si-yuan¹, HUANG Jia-liang^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the combustion and performance test platform, the working parameters of the diesel engine were measured by changing the fuel supply advance angle under the rated condition to analyze the influence of the fuel supply advance angle on the operational performance of the engine. Comparisons were made for determination of the best fuel supply advance angle by the experimental results from different cam action segments. It was found that the 14.6℃A cam action segment has better fuel injection characteristics, and the matching between plunger diameter, injection advance angle and cam action segment should respectively be 14 mm, 26℃A and 14.6℃A under the working conditions. It was also noted that orifice diameter about 0.26 mm can bring about the optimal performance of better NO_x emission. Conclusions were drawn that the results from the research can be a reference for the fuel injection system matching for further researches.

Keywords: marine diesel engine; fuel system; combustion performance; NO_x emission

0 引言

发动机的燃烧性能和排放水平主要取决于燃油喷射系统、进气系统与燃烧室的合理配合, 其中燃油喷射系统是柴油机的重要组成部分, 其性能好坏一定程度上影响着燃油雾化质量, 并最终决定柴油

[收稿日期] 2016-04-28

[修回日期] 2016-07-03

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目(2012J01230); 福建省属高校专项基金资助项目(JK2013025)

[作者简介] 徐虎(1989—), 男, 硕士生, 研究方向为柴油机性能优化与排气测试分析。通信作者: 黄加亮(1963—), 男, 教授, 硕导, 从事现代轮机管理工程研究。

机的燃烧和排放性能^[1-2]。由电控单体泵替换原机的机械式喷油泵, 燃油喷射压力得到提高, 且改造后的电控泵具有较好的喷油规律和雾化特性, 从而改善了柴油机的经济性和排放性^[3]。本文以 4190Z_LC-2 型柴油机燃油喷射系统电控化改造为研究对象, 由标定系统实现在线监控和更改调控参数, 通过改变喷油系统参数, 得出不同参数下柴油机燃烧和排放性能的变化趋势, 在此基础上得出单参数影响下的最优燃油系统参数组合, 为实现燃油系统参数优化匹配提供理论指导和依据。

1 试验平台与方案

1.1 柴油机参数和试验平台设备

4190Z_LC-2 柴油机为增压中冷四冲程机型, 电控燃油喷射系统由机械液力系统和电子控制系统组成, 通过电磁阀衔接, 取代了传统高压油泵齿条套筒油量控制机构, 实现了喷油时间柔性可控^[4]。4190Z_LC-2 型柴油机重要参数: 缸径×行程=190 mm×210 mm; 额定功率为 220 kW; 标定转速为 1000 r/min; 燃烧室形状为 ω 型; 压缩比为 14.5:1。

试验平台设备包括: MEXA-1600DSERG 型气体分析仪, 主要测试的尾气有 NO_x、O₂、CO、CO₂、THC 等; DEWE-2010CA 燃烧分析仪; SG880 水涡流测功器; FC2210 智能油耗仪; FC2000 发动机测控仪; WITA1.0.6 在线标定系统。

1.2 参数匹配试验方案

为提高燃油喷射压力, 在额定工况下选用直径 13、14 mm 的两种柱塞进行试验对比。经油泵试验台测得数据显示, 直径为 13、14 mm 两种柱塞的高压油泵出口压力分别为 80.9、88.0 MPa。可以看出柱塞直径为 14 mm 时具有较高的油泵出口压力, 而且 14 mm 柱塞断油迅速, 具有较好的喷油规律。故选择直径为 14 mm 的柱塞, 并以此为基础进行试验, 试验步骤如下:

1) 选取额定工况点, 供油提前角以 24°CA 为基点, 增幅为 1°CA, 增加到 29°CA, 利用试验平台测取相关参数, 分析供油提前角对试验机动力性、经济性和排放性的影响规律, 为下面参数匹配作参考。

2) 然后选用型线速度为 0.46 mm/(°CA) 的凸轮, 并沿着发动机倒车方向分别将凸轮转动 10.6°CA、14.6°CA 和 16.7°CA, 给这三段凸轮作用段匹配不同供油提前角, 经试验对比发现, 14.6°CA 凸轮段在提前角为 26°CA 时油耗率最低。

3) 在柱塞直径为 14 mm、喷油提前角为 26°CA 和凸轮作用段为 14.6°CA 基础上匹配不同的喷孔直径 (0.30、0.28、0.26 mm), 在负荷特性下研究参数组合对燃烧特性的影响, 在推进特性下研究参数组合对经济性和 NO_x 排放的影响。

1.3 缸压数据的处理

柴油机运行过程中, 由于不确定因素的影响, 同工况下的每循环示功图总是在一定范围内上下浮动, 处于动平衡之中, 且无章可循, 因此需要通过多次测量并对数据进行处理, 才能使示功图曲线变得光滑, 而且测取示功图的循环数越多, 经过处理的结果越接近真实值, 一般需要 50 个工作循环。

本文通过最小二乘法对所测试的试验数据作平滑处理, 同一工况下不同循环的相同曲轴相位角对

应点压力算术平均值计算公式为 $p_{\varphi} = \sum_{i=1}^n p_{\varphi}^i / n, (i = 1, 2, \dots, n)$ 。式中: p_{φ}^i 为在同一位置 φ (曲轴转角) 不同循环的压力值; n 为示功图的个数。误差计算公式为 $\gamma_{\varphi} = 0.6745 \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{\varphi}^i - p_{\varphi})^2 / (n - 1)}$, 绝对误差公式为 $\delta = |(p_{\varphi}^i - p_{\varphi}) / \gamma_{\varphi}|$ 。若 p_{φ}^i 的 δ 过大则剔除, 剔除可疑数据后, 剩余点的平均值按式: $p_{\varphi} = \sum_{i=1}^{n'} p_{\varphi}^i / n'$ 计算, 式中: n' 为剔除可疑数据后剩余的示功图的个数。

运用 MATLAB 编制程序^[5], 将示功图导出的数据输入到 MATLAB 程序中, 经过均匀化处理后示功图曲线显得更加光滑, 对比图 1 和图 2 的示功图, 光滑性得到一定程度的提高, 尤其在上止点之

前，曲线的光滑性得到一定程度改善。

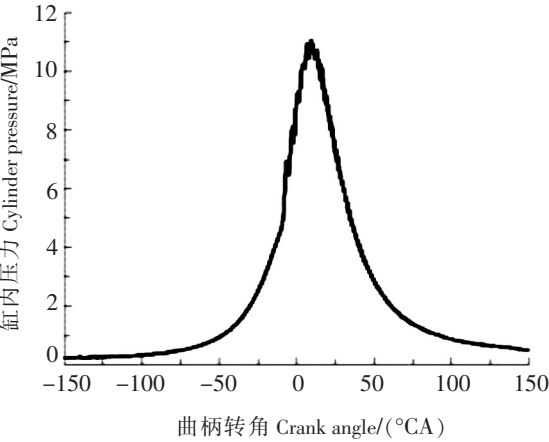


图 1 单循环示功图曲线

Fig.1 Indicator diagram of a single cycle

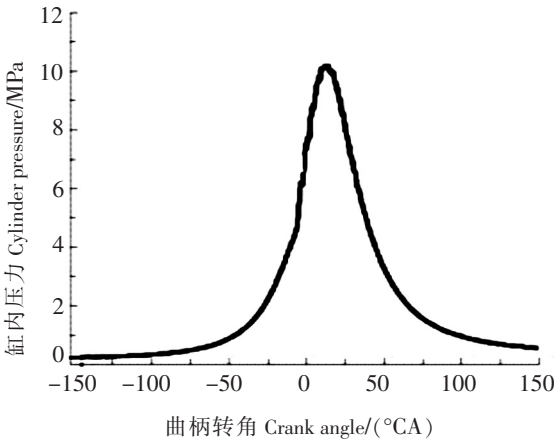


图 2 均匀化处理后的示功图曲线

Fig.2 Indicator diagram determined by smoothing treatment

2 喷油系统结构参数优化匹配试验分析

2.1 供油提前角对燃烧和排放性能的影响

供油提前角影响柴油机的滞燃期长短及燃烧稳定性，不论过大过小都将影响柴油机的运行^[6]。本文结合试验，选取供油提前角 24°CA ~ 29°CA 进行试验，选取具有代表性的示功图、油耗率和 NO_x 排放作为分析对象，为下面试验提供参考。

2.1.1 供油提前角对缸内压力的影响

图 3 是由燃烧分析仪测得并经过均匀化处理得出的，从中可以看出随着供油提前角的增大，缸内压力整体呈现上升趋势，最高爆发压力升高明显且向上止点偏移。在提前角 24°CA 时，爆压为 9.24 MPa，提前角 28°CA 时，爆压为 10.52 MPa，相比升高 13.8%，从整体趋势看，都在合理的范围内。造成以上变化的原因是：供油提前角增大，滞燃期变长，缸内积聚了相对较多的柴油，在燃烧室内燃油和空气得到充分混合，所以初期燃烧强烈，导致爆压增大且前移。

2.1.2 供油提前角对经济性能及排放的影响

通过改变供油提前角，由试验平台测取不同供油提前角下的油耗率和 NO_x 比排放，如图 4 所示。

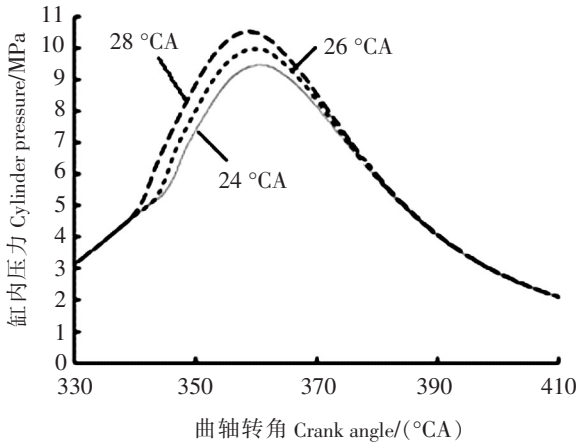


图 3 缸内压力曲线

Fig.3 Pressure curve within the cylinder

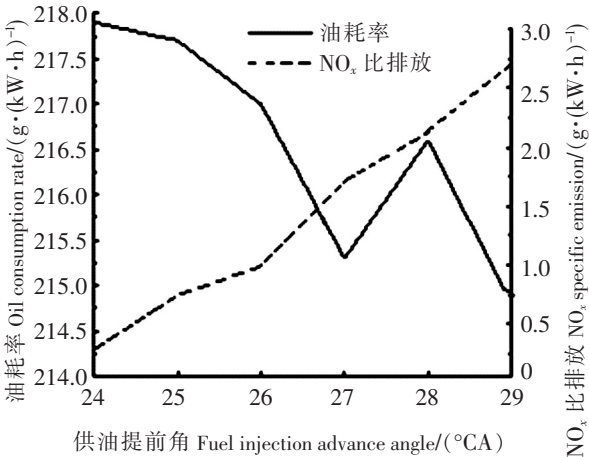


图 4 不同供油提前角下油耗率和 NO_x 比排放

Fig.4 Fuel consumption rates and specific NO_x emission rates under different fuel supply advance angles

从图4可以看出,随着提前角的增大,油耗呈现整体降低的趋势,在27°CA~29°CA之间油耗先增大后减小。提前角为24°CA时,额定工况点的油耗为217.9 g/(kW·h),当提前角29°CA时,油耗为214.9 g/(kW·h),相比降低1.38%。而NO_x比排放随着供油提前角增大而增大,这是因为喷油提前角增大,滞燃期变长,缸内油气混合充分,气缸做功能力增强,平均有效压力变大,所以经济性变好,但是同时剧烈燃烧会使缸内温度急剧升高,在燃烧初期相对富氧的条件下,促进NO_x排放增加^[7-8]。

2.2 不同凸轮作用段试验分析

试验选取的凸轮型线速度为0.46 mm/(°CA),此型线设计可以实现等速供油,优点是改变供油提前角时,不影响喷油压力和速率^[9]。三个凸轮作用段角度分别为:10.6°CA、14.6°CA、16.7°CA,在额定工况点测得不同供油提前角的油耗率如图5所示。由图5可见:14.6°CA凸轮段在供油提前角为26°CA时油耗最低,其值为215.1 g/(kW·h),且由燃烧分析仪测量的喷油规律曲线得出,该凸轮工作段喷油压力高,喷油规律好,故选用此凸轮段匹配不同的喷孔直径。

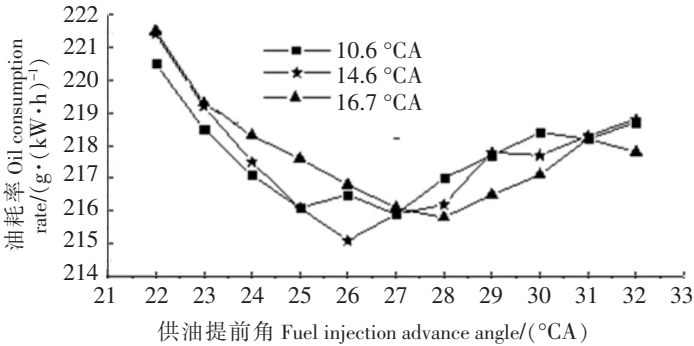


图5 不同凸轮作用段对油耗率的影响

Fig.5 Influence of different cam action sections on oil consumption rates

2.3 喷孔直径匹配试验

2.3.1 喷油器孔径对缸内压力的影响

在D2模式下选取具有代表性的两个工况点:额定功率(P_b)和50%(P_b)额定功率,利用测得的示功图分析缸内燃烧情况,分别如图6和图7所示。从图6和图7中可以看出,在高负荷时,0.30 mm孔径喷油器爆压高于其他两个孔径喷油器,可见直径0.30 mm喷油器平均指示压力高,动力性好;而在中低负荷工况下,直径0.26 mm的爆压较高,做功能力强。由此可见,在低负荷时,进气压力低使得缸内空气涡流小,而0.26 mm喷孔直径燃油雾化好,与缸内空气充分混合,更有利于燃烧的进行;在高负荷时,进气压力大,缸内气体湍动能较高,而0.30 mm孔径喷油器在滞燃期喷入的燃油较多,使得燃烧迅速,缸内压力较高。

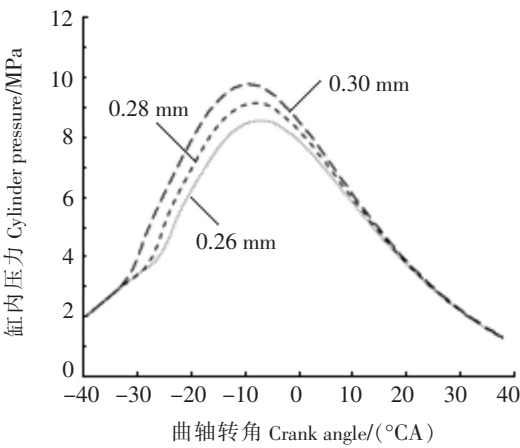


图6 100% P_b 下不同孔径对缸内压力的影响

Fig.6 Influence of different orifice diameters on cylinder pressure under 100% P_b

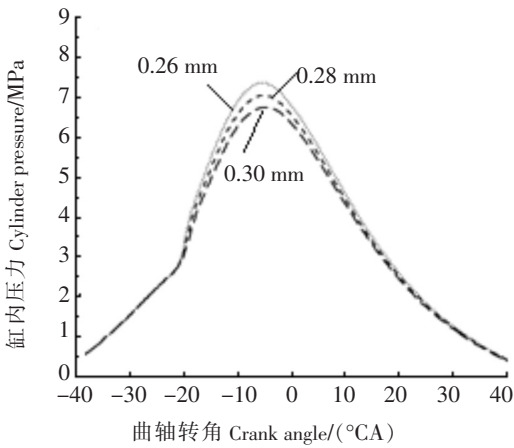


图7 50% P_b 下不同孔径对缸内压力的影响

Fig.7 Influence of different orifice diameters on cylinder pressure under 50% P_b

2.3.2 喷孔直径对经济性能及排放性能的影响

在E3模式下,由测试平台测得三种喷孔直径对应的油耗率和NO_x排放体积分数分别如图8和图9所示。从图8和图9可以看出:总体变化趋势是随着转速增加油耗率下降,在高负荷区,喷孔直径

0.30 mm 的油耗率相对要低,但是 NO_x 体积分数相对较高;在中低负荷区,小孔径喷油器油耗率较低,但是 NO_x 体积分数相对较高。分析原因如前所述:在高负荷与高速时,进气压力大,涡流比较高,弥补了大孔径喷油器雾化略差的缺陷,由于在滞燃期喷入较多燃油,与空气充分混合后,在稳燃期燃烧迅速,使得平均指示压力较高,动力性好,故油耗低,但同时放热量较大,温度升高,高温使得 NO_x 生成量变大;相反,在中低负荷区,进气压力低,气流强度相对较弱,0.26 mm 孔径的喷油器雾化好,使得燃烧性能提高,但是同时 NO_x 体积分数变高。综合分析喷油器孔径选择 0.26 mm 为宜。

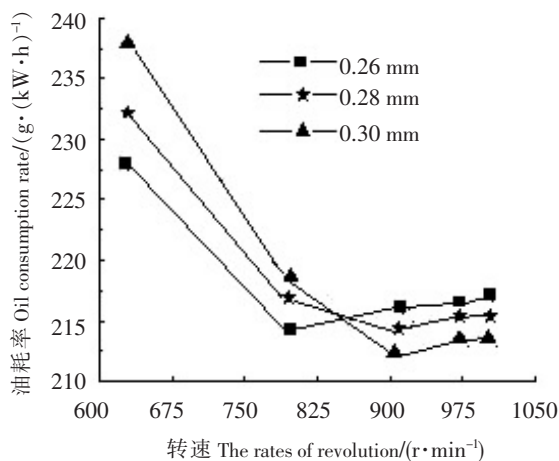
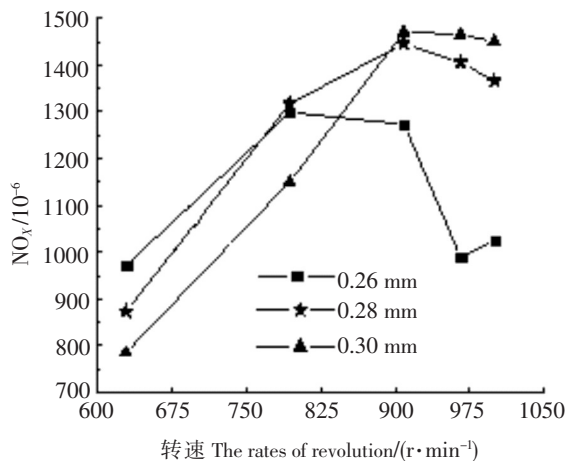


图 8 E3 模式下的油耗率

Fig.8 Fuel oil consumption rates at E3 mode

图 9 E3 模式下的 NO_x 体积分数Fig.9 NO_x emission concentrations

3 结论

1) 随着供油提前角从 24°CA 增加到 29°CA ,缸内最高压力升高了 7.95%,平均指示压力升高,油耗从 $217.9 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$ 降低到 $214.9 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$,相比降低 1.38%,但是相对应的 NO_x 比排放增加 23.5%,可见提高经济性的同时, NO_x 排放恶化。2) 通过负荷特性试验可以看出,在高负荷 ($100\% P_b$) 时缸内气体的湍动能对缸内燃烧压力的影响要高于燃油雾化质量;而在低负荷 ($50\% P_b$) 时雾化质量对燃烧的影响强于气体湍动能。3) 从推进特性试验得出,随着转速的增加,油耗率降低,但是 NO_x 体积分数整体上呈现上升趋势;随着喷孔直径的增大,在低负荷时油耗增加, NO_x 体积分数降低;而在高负荷时油耗率降低, NO_x 体积分数增加。这与低负荷时雾化质量对燃烧影响大和高负荷时涡流强度对燃烧影响大的分析一致。最后通过单参数对柴油机性能的影响分析得出:柱塞直径为 14 mm、供油提前角为 26°CA 、凸轮作用段为 14.6°CA 、喷孔直径为 0.26 mm 的参数组合在满足经济性的前提下排放较优。

[参考文献]

- [1] 刘兵. 电控单体泵柴油机达国Ⅲ排放燃烧系统优化匹配及标定试验研究. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] 黄佐华, 蒋德明, 无锡斌. 内燃机燃烧研究及面临的挑战. 内燃机学报, 2008(10): 101-103.
- [3] 刘贵林. 某船柴油机电控化改造过程中的燃烧测试分析. 厦门: 集美大学, 2014.
- [4] 黄加亮, 蔡振熊, 张天野. 电控共轨低速船用柴油机燃油系统特点和管理. 航海技术, 2005(1): 41-43.
- [5] 乔英志. 4190 型柴油机工作过程仿真与性能优化. 厦门: 集美大学, 2013.
- [6] 毛宏雨. 基于示功图的船用柴油机燃烧过程的研究. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [7] 邹任玲. 供油提前角对 C6121ZLG04 型柴油机排放特性影响. 农机化研究, 2008, 8: 194-195.
- [8] 冯星, 王铁. 供油提前角对 M15 甲醇柴油机燃烧和排放特性影响分析. 农机化研究, 2011(5): 214-217.
- [9] 吴长水, 龚元明. 电控组合泵燃油喷射特性仿真与试验. 车用发动机, 2011(2): 65-67.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)