

喷油压力对电控船用中速柴油机性能的影响

衡伟¹, 叶子梟², 黄加亮^{2,3}, 范金宇^{2,3}

(1. 厦门海洋职业技术学院航海技术系, 福建 厦门 330013; 2. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021;
3. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究船用4190型柴油机电控化改造后, 喷油压力对柴油机性能的影响, 利用AMESim软件, 建立电控燃油喷射系统仿真模型, 通过正交试验设计方法安排燃油系统参数仿真计算, 以实现燃油喷射特性的优化; 同时基于AMESim与AVL_FIRE软件耦合, 将优化结果导入柴油机缸内燃烧模型, 进行仿真计算, 以完成不同喷油压力对柴油机性能影响的综合分析。结果表明, 当参数组合为: 喷孔直径0.22 mm、凸轮型线速度0.46 mm/(°)、柱塞直径14 mm、高压油管长度1000 mm时, 喷油压力为125 MPa; 当参数组合为: 喷孔直径0.26 mm、凸轮型线速度0.43 mm/(°)、柱塞直径14 mm、高压油管长度800 mm时, 喷油压力为105 MPa。喷油压力提高, 改善了柴油机燃烧质量, 使得油耗率较原机降低约14.3%与7.2%, 但NO_x排放质量分数分别升高约50%和11%, 因此, 需要兼顾柴油机的经济性与动力性进一步优化排放。

[关键词] 电控船用柴油机; 燃油喷射系统; 喷油压力; 正交试验设计; 油耗率; NO_x排放

[中图分类号] U 664.121

Influence of Injection Pressure on the Performance of Electronically Controlled Marine Medium Speed Diesel Engine

HENG Wei¹, YE Zixiao², HUANG Jialiang^{2,3}, FAN Jinyu^{2,3}

(1. Department of Navigation Technology, Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361012, China;

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

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

Abstract: The simulation model of electronically controlled fuel injection system was established by using AMESim software based on the electronically-controlled modification of marine type 4190 diesel engine, then the orthogonal test design method was employed to simulate for matching the fuel injection system parameters based on the simulation by taking the fuel injection characteristics as the optimization objective. Finally, the optimized results were introduced into the model for the diesel engine cylinder combustion by coupling AMESim and AVL_FIRE software to complete the comprehensive analysis of the influence of different injection pressures on the performance of the diesel engine. The simulation results show that the injection pressure is 125 MPa when the diameter of orifice, cam velocity, diameter of plunger and length of high pressure fuel pipe is respectively 0.22 mm, 0.46 mm/(°), 14 mm and 1000 mm. Results also show that the diameter of orifice, cam velocity, diameter of plunger and length of high pressure fuel pipe will be respectively 0.22 mm, 0.46 mm/(°),

[收稿日期] 2018-05-18

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2017J01486); 福建省自然科学基金项目(2018J01499)

[作者简介] 衡伟(1982—), 男, 助教, 轮机长, 从事柴油机性能优化与排气测试分析研究。通信作者: 黄加亮(1963—), 男, 教授, 博士, 硕导, 从事现代轮机管理工程研究。E-mail:1073535007@qq.com

14 mm and 1000 mm when the injection pressure is 105 MPa. It reveals that increase in fuel injection pressure can improve the combustion of the diesel engine and bring about decrements in fuel consumption rate about 14.3% but increments in NO_x emissions about 50% and 11%. It suggests that the economy and power of the diesel engine should be taken into account for the optimization of emission control.

Keywords: electronically-controlled marine diesel engine; fuel injection system; injection pressure; orthogonal experimental design; fuel oil consumption rate; NO_x emissions

0 引言

柴油机燃油喷射系统承担着将定量高压燃油在预定时间点喷入气缸的工作, 其性能的好坏直接决定燃油雾化质量以及与空气混合效果, 进而影响柴油机燃烧、动力和排放性能^[1-3]。电控燃油喷射系统可以精确控制喷油量和喷油时间, 受到了国内外发动机研究者的广泛关注^[4-5]。由于目前仍然存在大量的机械泵式柴油机, 考虑到成本以及可行性因素, 柴油机燃油喷射系统电控化改造受到很多厂商的青睐^[6-7]。但电控化改造后, 根据燃油喷射系统零件尺寸参数改变以及对喷油特性产生的影响, 重新匹配燃油喷射系统参数是很有必要的^[8-9]。本文基于 4190 型柴油机电控化改造, 利用正交试验设计方法安排燃油喷射系统参数匹配, 使得喷油压力满足设计要求 (喷油压力 ≥ 100 MPa)。并将满足要求的结果代入柴油机燃烧模型中, 进行仿真计算, 系统地分析喷油压力提高后对燃油雾化、油气混合、燃烧特性、动力性和排放性产生的影响。

1 燃油喷射系统优化

1.1 燃油喷射系统组成

4190 型柴油机燃油系统电控化改造后的组合泵如图 1 所示。中央控制单元 (electronic control unit, ECU) 接受来自各传感器的柴油机运行参数信号 (如, 转速、凸轮相位、进气压力和进气温度等), 根据存储于 ECU 储存装置内的相关控制策略来控制高速电磁阀的通电和断电, 从而完成喷油量和喷油定时的精确控制。

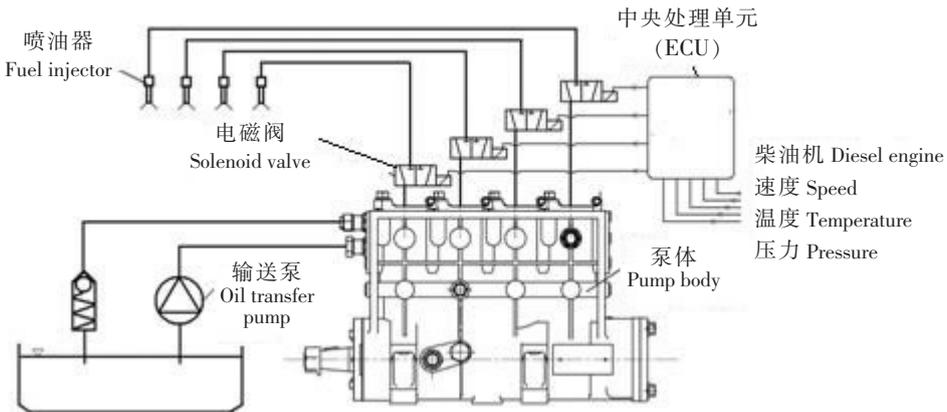


图 1 电控组合泵示意图

Fig.1 The schematic show of an electronic control fuel injection system

1.2 系统仿真模型的建立及验证

本文利用 AMESim 软件建立的燃油喷射仿真模型如图 2 所示。主要包括凸轮柱塞模块、电磁阀模块和喷油器模块, 各模块通过油管连接。其中, 电磁阀模块信号源模拟电磁阀启动电流的方式输入, 信号转换元件接受控制信号并转换为驱动矢量, 从而输出驱动力。

根据电控组合泵相关控制参数和尺寸参数, 设置各主要模块的初始参数, 包括: 喷油脉宽为 28° ; 柴油机曲轴转速为 1000 r/min; 柱塞直径为 14 mm; 凸轮型线速度为 $0.43\text{mm}/(^\circ)$; 电磁阀阀杆升程为 0.18 mm, 直径为 6.98 mm; 衔铁残余气隙为 0.12 mm; 高压油管直径为 2.0 mm, 长度为

900 mm; 喷油器启阀压力为 18.9 MPa; 针阀升程为 0.4 mm; 喷孔直径为 0.26 mm; 喷嘴喷孔数为 8 个; 运动件质量为 14.5 g; 燃油流量为 50 mL/s。

喷射特性实验数据通过 6PSDW300 油泵试验台测得, 在相同的运行参数和尺寸参数下, 通过比较喷油规律和嘴端压力曲线, 验证模型的准确性, 仿真值和实验值曲线对比如图 3 所示。从图 3 可以看出, 曲线拟合良好, 确定模型可以用于仿真运算。

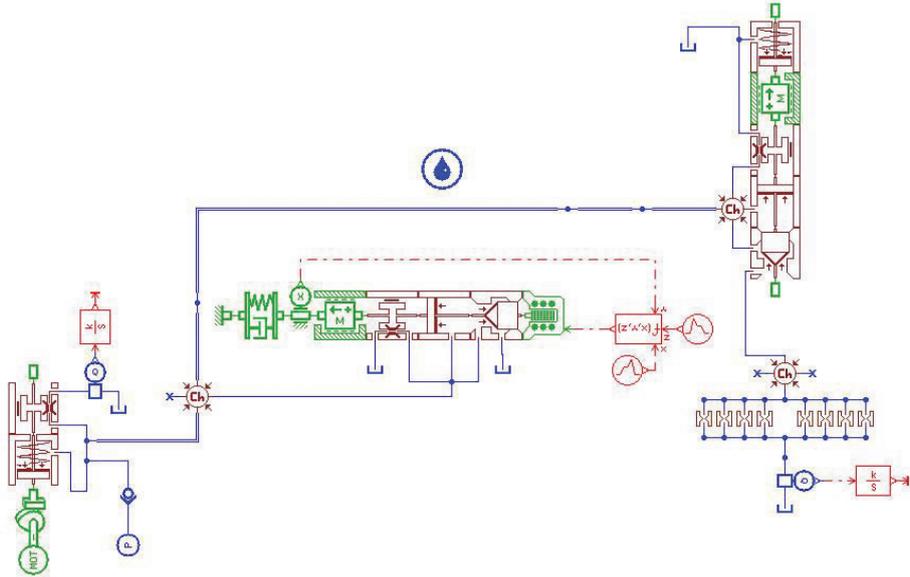


图 2 电控组合泵仿真模型

Fig.2 Simulation model of injection system of an electronic control assembly pump

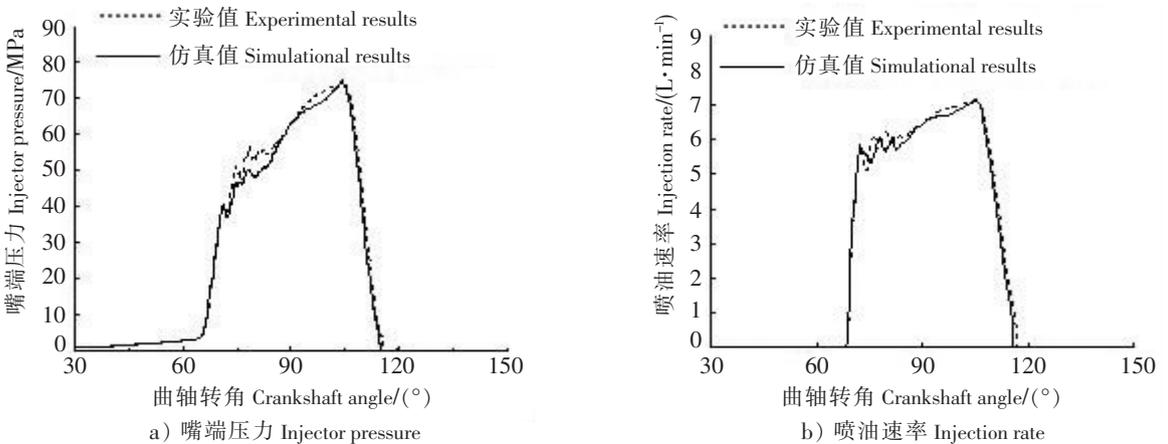


图 3 仿真与试验结果对比

Fig.3 Comparison of results from simulations and experiments

1.3 燃油喷射系统参数匹配优化

4190 型柴油机在电控化改造之初, 电控组合泵采用的参数为: 喷油器孔径为 0.26 mm; 凸轮型线速度为 0.43 mm/(°); 柱塞直径为 13 mm; 高压油管长度为 900 mm。通过油泵试验台测得的喷油压力为 79 MPa, 远低于设计值 (喷油压力 ≥ 100 MPa), 所以有必要通过匹配燃油喷射系统结构参数来提高喷油压力, 获得理想的喷油规律。

本文在原参数基础上, 根据厂家提供的参考资料, 拓展了几组参数作为仿真计算因素, 如表 1 所示。并以喷油量为约束条件, 以喷油压力为优化目标, 利用正交试验设计方法安排表 1 参数进行仿真计算, 研究各因素对喷油压力的影响规律, 并得出符合压力要求的参数组合。

表1 水平因素表
Tab.1 Levels of factors

因素水平 Factors	喷孔直径(A) Diameter of orifice/mm	凸轮型线速度(B) Cam velocity/(mm · (°) ⁻¹)	柱塞直径(C) Diameter of plunger/mm	油管长度(D) Length of fuel pipe/mm
1	0.22	0.40	12.5	800
2	0.26	0.43	13.0	900
3	0.30	0.46	14.0	1000

根据正交试验设计方法安排仿真计算^[11], 结果如表2所示。从表2可以看出, 正交试验序号3和序号5的参数组合所对应的喷油压力满足设计要求。表3极差分析结果表明, 对喷油压力的影响由强到弱依次为: 柱塞直径、凸轮型线速度、喷孔直径、高压油管长度。

表2 正交试验设计方案及计算结果
Tab.2 The arrangement for orthogonal design and results from calculation

序号 Number	喷孔直径 Diameter of orifice/mm	凸轮型线速度 Cam velocity/(mm · (°) ⁻¹)	柱塞直径 Diameter of plunger/mm	油管长度 Length of fuel pipe/mm	嘴端喷油压力 Injection pressure/MPa
1	0.22	0.40	12.5	800	70.5
2	0.22	0.43	13.0	900	85.2
3	0.22	0.46	14.0	1000	125.0
4	0.26	0.40	13.0	1000	74.5
5	0.26	0.43	14.0	800	105.0
6	0.26	0.46	12.5	900	73.5
7	0.30	0.40	14.0	900	90.5
8	0.30	0.43	12.5	1000	60.0
9	0.30	0.46	13.0	800	88.5

表3 各因素水平对试验指标的极差影响

Tab.3 The effect of level of various factors on the test results

结果 Results	A	B	C	D
K_1	93.5	76.5	76.0	88.0
K_2	84.3	83.4	82.7	80.5
K_3	79.6	97.6	106.8	86.5
极差 variance	42.0	63.3	90.0	25.0

注: k_1 、 k_2 、 k_3 为各因素所在列所对应喷油压力的平均值

Notes: k_1 、 k_2 and k_3 are the average values of injection pressure at the same level for each column

图4 为正交试验序号3和序号5对应的喷油压力和喷油规律曲线图。从图4中可以看出, 两组参数对应的喷油压力满足设计要求, 同时喷油规律曲线在喷油初期平缓、后期曲线变陡, 满足“先缓后急”的规律, 因此可以将喷油规律曲线导入燃烧模型进行仿真计算。

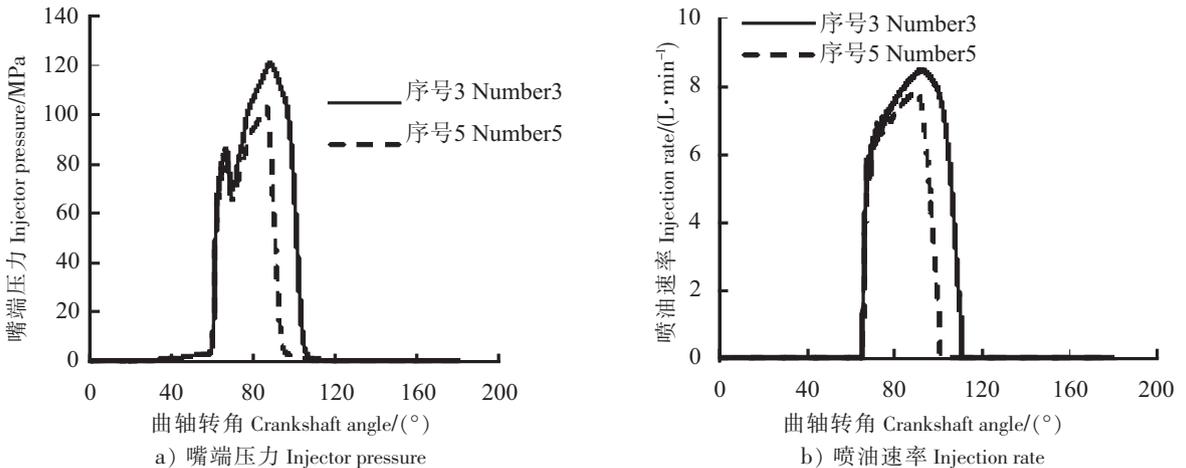


图4 优化后的参数组合所对应的喷油压力和喷油速率

Fig.4 The curves of injection pressure and injection rate in correspondence with the optimized parameter combination

2 喷油压力对柴油机燃烧和排放性能的影响

2.1 仿真模型的建立

4190 型柴油机的主要参数包括: 额定转速 1000 r/min; 缸径 190 mm, 冲程为 210 mm; 压缩比为 14:1; 气缸数为 4; 额定功率为 220 kW。将柴油机燃烧室内部中心截面二维模型导入到 AVL_FIRE 的 ESE 模块中, 利用 ESE 网格工具生成燃烧室刚性动网格, 图 5 为柴油机燃烧室的网格图。

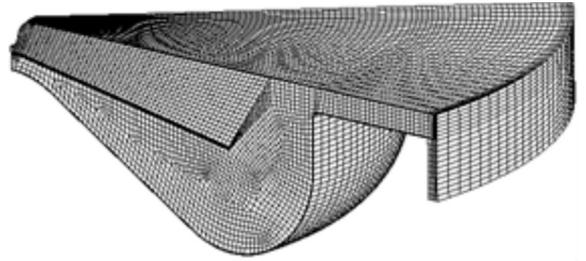


图 5 燃烧室网格划分剖面图

Fig.5 Sectional view of the grid model of the combustion chamber

燃烧模型主要选用 Spray 模块和 General gas phase reactions 模块。Species transport 模块自动激活; 湍流模型为 Turbulence interaction model specification 模型; 破碎模型采用 WAVE 模型; 蒸发模型采用 Multi-component 模型; 液滴碰壁模型为 Walljet1 模型; 壁面传热模型为 Han-reits-model 模型。模型仿真值与实验值的缸压曲线对比如图 6 所示, 数据吻合良好, 可以用于仿真研究。

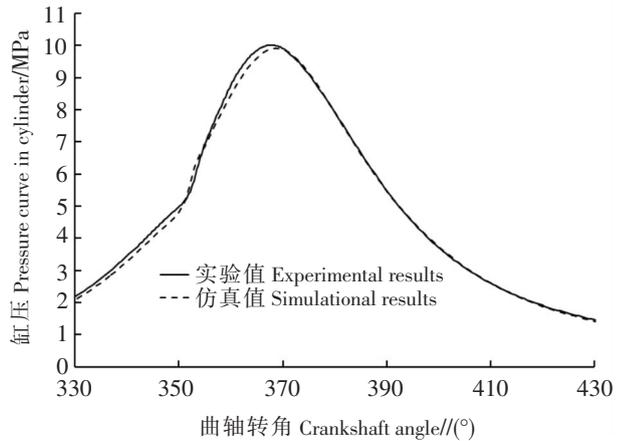


图 6 仿真与试验结果对比

Fig.6 Comparison of the results from simulation and experiment

将 AMESim 仿真模型得出的喷油规律曲线导入到 FIRE 软件求解器中, 以替换软件本身生成的喷油规律, 使得燃烧模型按照导入的喷油规律进行喷油燃烧。本文选用满足喷油压力要求的序号 3 和序号 5 所对应的喷油压力 (125 MPa、105 MPa) 与原机的喷油压力 (79 MPa) 进行对比, 研究喷油压力对柴油机性能的影响规律。

2.2 喷油压力对燃烧质量的影响

图 7 为不同喷油压力对缸内燃烧平均压力影响曲线图; 图 8 为缸内气体湍动功能变化趋势图。从图 7 可以得出, 缸内燃烧平均压力随着喷油压力的增大而显著增加, 且缸压峰值相位前移。随着喷油压力由 79 MPa 提高到 125 MPa, 缸内最高爆发压力由 10.0 MPa 升高到 11.02 MPa, 约升高了 10.2%。

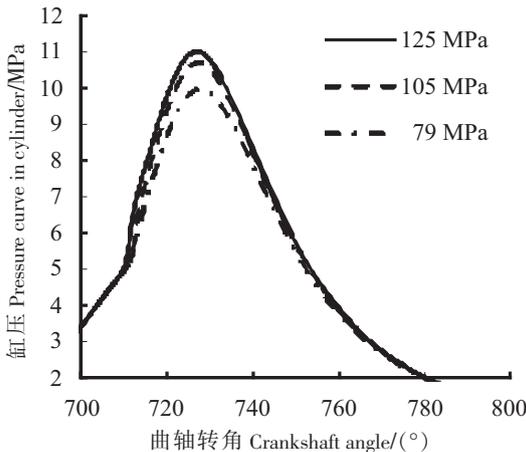


图 7 缸压曲线对比图

Fig.7 Diagram of cylinder pressure curve

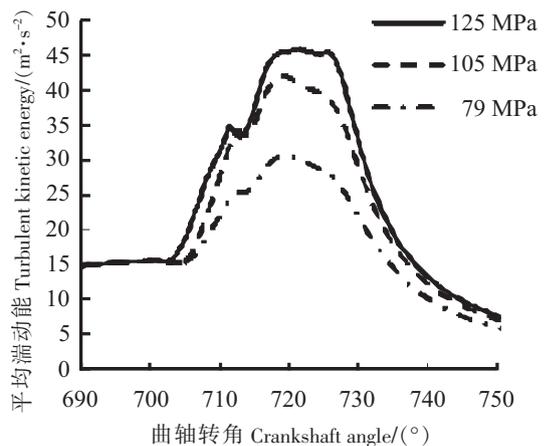


图 8 平均湍动能对比图

Fig.8 Diagram of average turbulent kinetic energy

造成这些变化趋势的原因: 一方面随着喷油压力的提高, 缸内混合气体的湍动能明显升高, 提高了的湍流流动改善了缸内油气混合的均匀度, 从而提高了油气混合的质量; 另一方面, 喷射压力的提高, 平均索特直径变小, 油滴直径越小, 雾化效果越好。燃油与空气混合效果如图 9 所示。在提前角为 710° 时上止点前 10° 燃油蒸发雾气没有碰壁, 油束随着喷油压力的提高而扩散, 喷油压力为 125 MPa 时油束最接近凹坑壁面; 当曲柄角度由 720° 到 730° 时, 随着喷油压力的提高, 燃油蒸发雾气撞壁并向两边扩散的面积增大, 进而促进了燃油在缸内分散的均匀度。

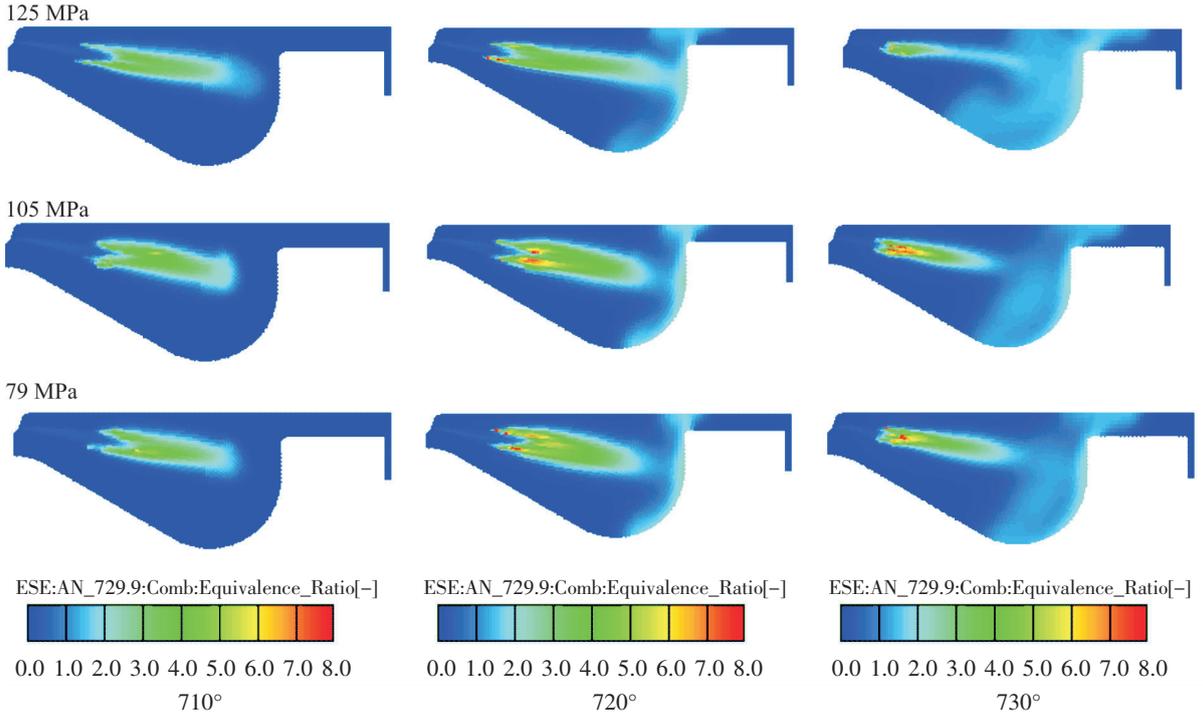


图 9 喷油压力对燃空当量比的影响

Fig.9 Effect of fuel injection pressure on the ratio of fuel air equivalent

2.3 喷油压力对动力性和经济性的影响

柴油机专业软件仿真研究方法使得柴油机运行处于理想状态, 往往忽略了运动件摩擦、热传递等引起的能量损失, 所以本文采用指示功率与指示油耗率量化表示柴油机动力性。图 10 为不同喷油压力对指示功率和指示油耗率的影响。从图 10 中可以看出, 喷油压力的提高使得柴油机做功能力增强, 喷油压力分别为 125 MPa 和 105 MPa 时相对于 79 MPa 时的指示功率分别提高了约 27.2% 和 14.5%, 而指示油耗率分别降低了约 14.3% 与 7.2%。究其原因是由于喷油压力的提高改善了燃油雾化效果, 提高了油气的混合质量, 使得缸内燃烧充分, 做功能力增强。

2.4 喷油压力对 NO_x 排放的影响

柴油机 NO_x 的排放主要成分为 NO 和 NO₂, 其中以 NO 为主要排放物, NO 的生成条件依赖于缸内燃烧高温、富氧环境和高温持续时间。NO₂ 占排出气体的质量分数非常小, 在燃烧过程中 NO₂ 主要是由 NO 氧化生成, 并在高温条件下发生化学反应转化为 NO, 所以考虑忽略不计。从图 11 可以看出, 随着喷油

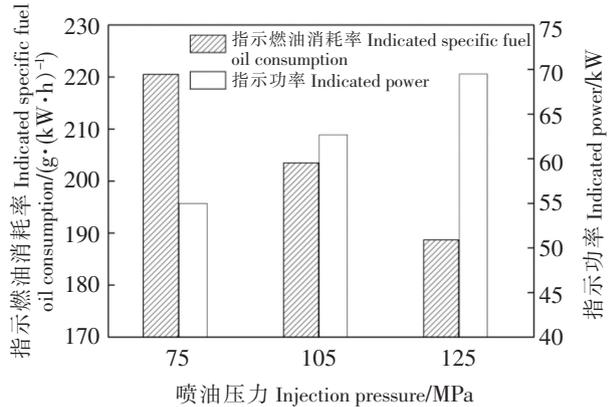


图 10 喷油压力对指示功率和指示油耗率的影响

Fig.10 The effect of injection pressure on indicated power and indicated specific fuel oil consumption

压力的增大, NO 排放量也随之增多, 喷油压力分别为 125 MPa 和 105 MPa 时所对应的 NO 排放质量分数比喷油压力为 79 MPa 时分别增大了约 50% 和 11%, 且 NO 开始生成时间也提前了。

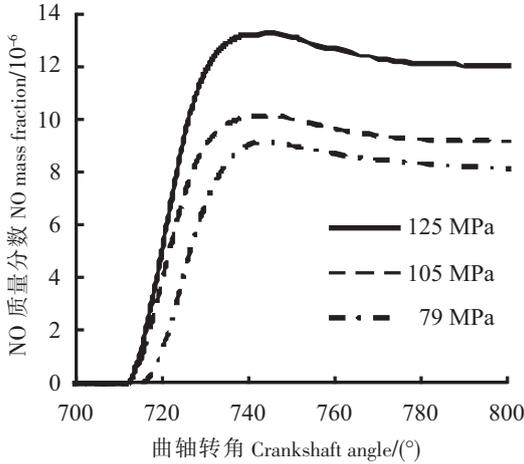


图 11 喷油压力对 NO 排放质量分数的影响

Fig.11 The effect of injection pressure on the mass fraction of NO emission

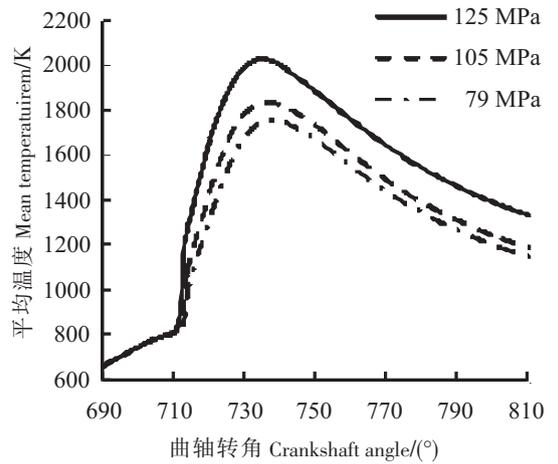


图 12 喷油压力对缸内平均温度的影响

Fig.12 The effect of injection pressure on the mean temperature within the cylinder

图 12 为缸内燃烧平均温度曲线图, 从图 12 可以看出, 缸内燃烧平均温度随着喷油压力的升高而上升, 且温度高于 1600 K 处于高温段的时间也得到延长, 喷油压力分别为 125、105、79 MPa 时所对应的平均温度超过 1600 K 的曲轴持续转角分别约为 57°、39°和 31°。图 13 为温度场三维切片图, 从图 13 可以看出, 在 710° (上止点前 10°) 时, 油束中心由于燃油蒸发吸热, 使得温度低于周围环境温度; 在上止点 720°及 730°时, 燃油燃烧, 使得温度急剧上升, 且燃烧高温面积随着喷油压力的提高而增加, 其中喷油压力为 79 MPa 时对应的高温面积最小。所以喷油压力提高后, 促进了油气混合, 缸内高温区域增大了, 且高温持续期延长, 满足了 NO 的生成条件。从而使得 NO 排放量增加。

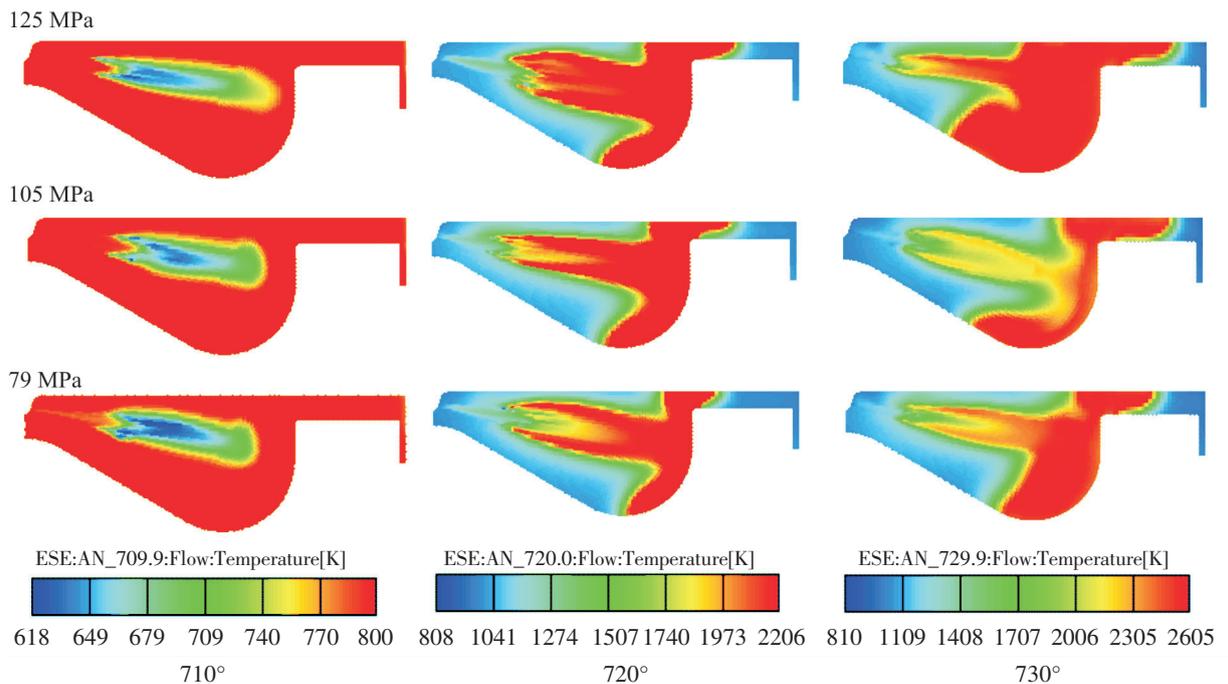


图 13 不同喷油压力对温度场的影响

Fig.13 The effect of injection pressure on temperature field

3 结论

1) 通过 AMESim 软件建立了 4190 型柴油机电控式燃油喷射系统仿真模型, 以喷油压力为优化目标, 运用正交试验设计方法安排系统参数匹配仿真计算, 得出: 参数组合为喷孔直径 0.22 mm、凸轮型线速度 0.46 mm/(°)、柱塞直径 14 mm、高压油管长度 1000 mm 时, 喷油压力为 125 MPa; 参数组合为喷孔直径 0.26 mm、凸轮型线速度 0.43 mm/(°)、柱塞直径 14 mm、高压油管长度 800 mm 时, 对应的喷油压力为 105 MPa, 满足电控组合泵设计压力要求。且得出的喷油规律符合“先缓后急”特性。根据仿真结果极差分析, 可以得出各因素对喷油压力影响程度由强到弱依次为: 柱塞直径、凸轮型线速度、喷孔直径、高压油管长度。

2) 喷油压力提高后, 改善了燃油雾化质量, 缩短了滞燃期, 使得缸内燃烧平均压力升高; 相对于原机的喷油压力 79 MPa, 喷油压力为 125 MPa 和 105 MPa 时, 所对应的指示功率分别提高了约 27.2% 和 14.5%, 指示油耗率分别降低了约 14.3% 与 7.2%; 但 NO 质量分数分别提高了约 50% 和 11%。

[参 考 文 献]

- [1] 徐虎, 孙思远, 黄加亮, 等. 柴油机燃油喷射系统参数优化匹配对 NO_x 排放的影响 [J]. 船舶工程, 2017, 39(1): 6-9.
- [2] 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.
- [3] 黄加亮, 乔英志, 王丹. 4190Z₁C 船用柴油机工作过程仿真与整机性能优化研究 [J]. 中国造船, 2012, 53(3): 199-207.
- [4] 徐虎, 孙思远, 黄加亮, 等. 燃油系统参数匹配优化对船用柴油机性能影响及试验研究 [J]. 中国造船, 2017, 58(2): 199-209.
- [5] 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.
- [6] 杨时威, 刘广军. 电控单体泵柴油机燃油喷射控制策略 [J]. 中国工程机械学报, 2010, 8(2): 244-247.
- [7] 赵长禄, 谭建伟, 张付军, 等. 电控单体泵式 (EUP) 柴油机喷油系统的研究 [J]. 内燃机工程, 2004, 25(2): 79-83.
- [8] 杨时威, 刘广军. 电控单体泵柴油机燃油喷射控制策略 [J]. 中国工程机械学报, 2010, 8(2): 244-247.
- [9] 范立云, 文李明, 姚崇, 等. 柴油机电控单体泵燃油系统的稳定性研究 [J]. 内燃机工程, 2012, 33(6): 58-65.
- [10] 范立云, 朱元宪, 隆武强, 等. 电控组合泵柴油机喷油系统的性能研究 [J]. 内燃机学报, 2007, 25(5): 451-456.
- [11] 王文萍. 四因素混合水平正交实验设计 [J]. 科技信息, 2010(23): 659.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)