

4190Z_LC-2型船用柴油机燃油喷射系统参数匹配

徐虎¹, 孙思远¹, 衡伟², 黄加亮^{1,3}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门海洋职业技术学院航海技术系, 福建 厦门 361012; 3. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 利用 AMESim 液压仿真软件建立电控柴油机喷油系统仿真模型, 在此基础上, 以喷油压力为优化目标, 喷油量为约束条件, 运用正交试验设计方法进行喷油系统参数仿真计算, 再通过方差分析方法分析各参数对喷油压力的影响规律。研究结果表明, 对喷油压力影响程度由强到弱依次为柱塞直径、油管直径、凸轮型线速度、喷孔数×喷孔直径(流通面积不变)、油管长度。通过方差分析得出最优参数组合方案为: 喷油器喷孔数×喷孔直径为 10×0.22 mm; 凸轮型线速度 0.46 mm/°A; 柱塞直径 15 mm; 高压油管长度 800 mm; 高压油管直径 1.5 mm。此参数组令方案可以将喷油压力提高到 154.3 MPa。

[关键词] 4190Z_LC-2 型船用柴油机; 电控喷油系统; 仿真; 正交试验; 方差分析

[中图分类号] U 664.121

Simulation Research on Parameter Matching for Fuel Injection System for 4190Z_LC-2 Type Marine Diesel Engine

XU Hu¹, SUN Siyuan¹, HENG Wei², HUANG Jialiang^{1,3}

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

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

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

Abstract: Based on the established simulation model of electronically-controlled fuel injection system by AMESim code, the orthogonal test design method was employed to simulate for matching fuel injection system parameters by taking the fuel injection pressure as the optimization objective and the fuel injection quantity as the constraint condition. The method of variance analysis was then introduced to analyze the influence of the parameters on the injection pressure. The simulation result shows that the influence on the injection pressure from strong to weak is in sequence of diameter of plunger, diameter of high pressure fuel pipe, cam velocity, number of orifice × diameter of orifice (circulation area is constant) and length of high pressure fuel pipe; Results also reveal that the injection pressure can be enhanced to 154.3 MPa based on the variance analysis when the fuel injection system parameters is 10 × 0.22 mm - 0.46 mm/°A - 15 mm - 800 mm - 1.5 mm (number of orifice × diameter of orifice - cam velocity - diameter of plunger - length of high pressure fuel pipe - diameter of high pressure fuel pipe).

Keywords: 4190Z_LC-2 marine diesel engine; electronically-controlled fuel injection system; simula-

[收稿日期] 2017-03-31

[修回日期] 2017-05-02

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2017J01486)

[作者简介] 徐虎(1989—), 男, 硕士生, 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。

tion; orthogonal experimental; variance analysis

0 引言

缸内直喷式柴油机的燃烧、动力和排放性能与缸内油气混合质量有着密切的关系, 而燃油与空气均匀混合效果主要取决于燃油喷射雾化质量^[1-2]。电控喷油系统具有控制精度高、电磁阀动态响应快、容易实现不同工况瞬态过程的最优控制等特点, 尤其是近年来神经网络和模糊控制等以现代控制理论为基础的智能控制技术的飞速发展, 采用现代电子控制技术的电控喷油系统受到柴油机制造商的青睐^[3-5]。机械泵式柴油机在进行电控化改造时, 由于系统尺寸参数匹配对燃油喷射雾化效果有较大影响, 所以有必要对燃油喷射系统参数匹配进行优化, 从而得到满足要求的参数组合^[6-7]。本文以 4190Z_{LC}-2 型柴油机电控化改造为研究对象, 利用 AMESim 仿真软件建立燃油喷射系统仿真模型, 将试验数据与仿真数据进行对比, 调节模型参数, 直至仿真与试验误差在允许范围内。在此基础上, 以喷油压力为优化目标, 喷油量为约束条件, 利用正交试验设计方法安排燃油系统参数匹配仿真计算, 并对仿真结果进行方差分析, 得出燃油喷射系统各参数对喷油压力的影响规律, 从而为燃油喷射系统参数匹配提供理论依据。

1 电控喷油系统模型建立及验证

1.1 电控组合泵

4190Z_{LC}-2 型柴油机电控化改造就是将传统的机械式喷油泵改造为基于时间控制的集机械、液力和电磁于一体的新型脉动柴油电控喷射系统, 改造后的电控组合泵如图 1 所示。直列式电控组合泵仍然采用凸轮驱动, 主要分为机械部分和电子控制部分, 二者通过油泵出口处的高速电磁阀衔接, 中央处理单元 (ECU, electronic control unit) 接受传感器测量的诸如柴油机速度、凸轮相位、进气温度和进气压力等模拟量信号后, 根据操作者给出的信号和相关控制策略 MAP 图来启闭电磁阀, 从而实现喷油定时及喷油量的数字化控制。

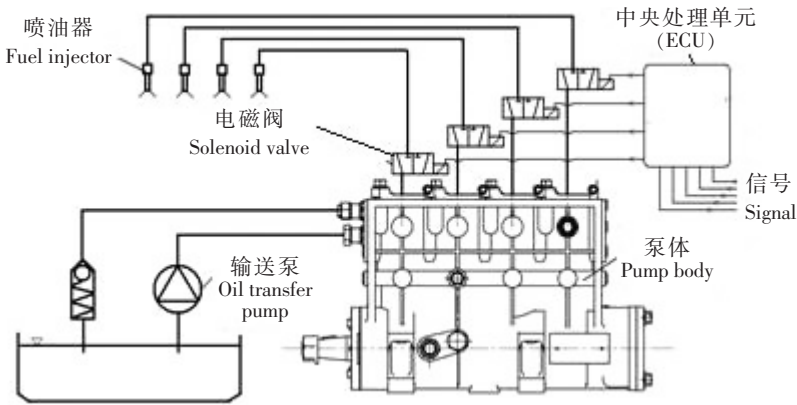


图 1 电控组合泵示意图

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

1.2 电控喷油系统建模

电控组合泵是由四个单体泵组成, 它们之间互不影响, 考虑到篇幅有限和节省仿真时间, 本文选择其中一个单体泵作为研究对象来建立燃油喷射系统模型。根据电控单体泵的结构和各部分的功能, 将电控单体泵模型分为三部分: 凸轮柱塞机构、电磁阀控制机构和喷油器机构, 三个部分通过液压管路连接成为一个整体, 如图 2 所示。模型主要是通过电磁耦合方程、机械运动方程、流体力学方程、高压油管压力波动方程和喷孔流量系数方程联合求解, 得到喷油特性 (喷油压力、喷油速率等)。根据柴油机运行参数和喷油系统的相关结构参数, 模型的初始条件设置如下: 电机驱动凸轮转速为

500 r/min；柱塞直径为 14 mm；凸轮型线速度为 0.43 mm/°CA；电磁阀阀杆升程和直径分别为 0.18 mm 和 6.98 mm；衔铁残余气隙为 0.12 mm；高压油管直径和长度分别为 2.0 mm 和 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 0.2 6mm；喷孔数为 8；运动件质量为 14.5 g。

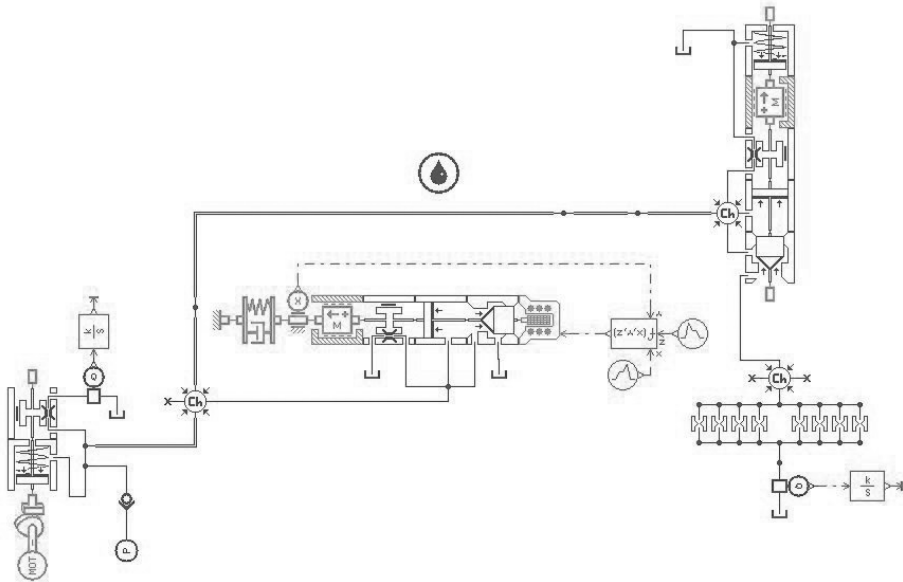


图 2 电控组合泵仿真模型

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

1.3 电控喷油系统模型验证

通过仿真值与实验值对比，误差在允许范围内，仿真模型才能准确预测电控喷油系统的性能。本文用来验证模型准确性的试验数据是通过实验室油泵试验台测取的，嘴端喷油压力曲线和喷油规律曲线实验和仿真对比结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，嘴端压力曲线和喷油规律曲线的实验值与仿真值趋势基本上一致，相同曲轴转角对应的误差值不超过 5%，造成误差的主要原因是仿真模型是建立在简化的数学模型上的，且模型运行忽略了燃油泄漏、感应涡流等，同时实验设备测量时也存在误差。总体来看，误差在允许范围内，模型可以用于电控喷油系统的仿真研究。

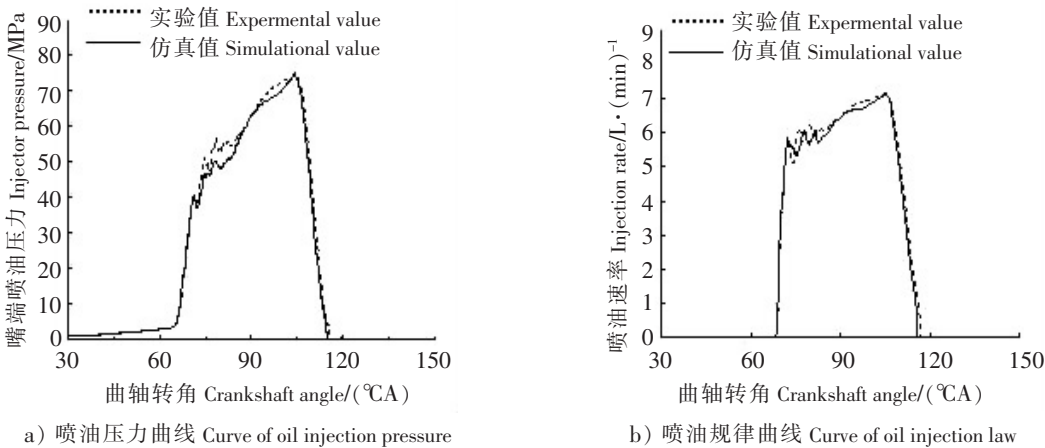


图 3 仿真与试验结果对比

Fig.3 Comparison of the results from simulation and experimental

2 电控喷油系统参数优化匹配

燃油喷射系统各结构参数对燃油系统的喷油压力和喷油规律的影响是综合性的, 而且各参数对性能的影响是交互的, 所以需要 对喷油系统参数进行多参数匹配。

本文选取影响燃油喷射特性的喷油系统参数作为因素, 给每个因素安排 3 个水平, 根据正交试验设计安排仿真计算, 得到以喷油压力为优化目标的水平组合, 同时运用方差分析法分析各因素对喷油压力影响的显著程度^[8-9]。

2.1 仿真因素和水平的确定

4190Z_LC-2 型柴油机电控化改造允许调整影响喷射特性的参数, 在改造之初, 系统采用的基本参数为: 凸轮型线速度为 0.43 mm/℃A; 柱塞直径 13 mm; 高压油管长度为 900 mm, 直径为 2.0 mm; 喷孔数 8; 喷孔直径为 0.26 mm。经油泵试验台测出的嘴端喷油压力为 79.76 MPa, 远低于电控泵设计压力 105 MPa, 且喷油量也低于设计值的下限值 630 mm³, 所以需要参数匹配来优化喷油系统性能。根据厂家提供的参数, 在初始参数 8×0.26 mm (喷孔数×喷孔直径) 的基础上, 保证通流面积不变, 设计了喷孔数×喷孔直径为 6×0.30 mm 和 10×0.22 mm 两种喷油器。本文选取用于仿真的因素水平如表 1 所示。

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·(℃A) ⁻¹)	柱塞直径(C) Diameter of plunger /mm	油管长度(D) Length of fuel pipe /mm	油管直径(E) Diameter of fuel pipe /mm
1	0.26	0.40	13	800	1.5
2	0.22	0.43	14	900	2.0
3	0.30	0.46	15	1000	2.5

2.2 仿真方案及计算结果

仿真的目的是在满足循环喷油量的下限 630 mm³的前提下, 通过喷油系统参数的匹配使得喷油压力≥105 MPa, 则仿真以喷油压力为评价指标, 循环喷油量为约束条件, 且喷油脉宽固定为 14。但是单参数对实验指标的影响不是孤立的, 不同的单参数存在交叉影响现象, 所以本文在单参数中选取了两组交互作用: 喷孔直径与油管半径 $A \times E$; 喷孔直径与油管长度 $A \times D$ 。

本文选取了 5 个因素和 2 对交互作用, 则各因素自由度之和为 $5 \times 2 + 2 \times 2 \times 2 = 18$, 所以需要选择自由度高于 18 的正交表 L₂₇ (3¹³), 其表头设计如表 2 所示。

表 2 正交表头设计
Tab. 2 Orthogonal design of table headers

列号 Column number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
表头设计 Table header design	$A \times E$	$A \times D$	B	e	A	E	$A \times E$	D	C	e	$A \times D$	e	e

注 Notes: e - 误差 error。

根据表 1 的各因素水平和表 2 的表头设计, 仿真计算的方案及计算结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 各因素水平安排基本上满足“均匀分散、齐整可比”的要求。

2.3 仿真结果方差分析

方差分析是处理实验数据的一种高效实用的统计检验方法, 不仅能够检验各因素对实验结果的显著性, 还能够精确地估算各因素对实验指标的影响程度。利用方差分析的基本步骤为: 计算各因素和误差的离差平方和, 然后除以各自的自由度, 得出各因素的均方差, 最后各因素的均方差除以误差的

均方差得到 F 值，经过 F 值的显著性检验，得出因素对实验指标的影响是否显著^[9]。

由表 3 仿真计算结果，可以得出各因素、交互作用和空列对实验结果的影响，如表 4 所示。

表 3 正交试验设计方案及计算结果

Tab.3 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·(°CA) ⁻¹)	柱塞直径 Diameter of plunger/mm	油管长度 Length of fuel pipe /mm	油管直径 Diameter of fuel pipe/mm	嘴端喷油 压力 Injector pressure/MPa	喷油量 Fuel injection quantity/mm ³
1	0.26	0.40	13	800	1.5	70.3	434.4
2	0.22	0.40	14	900	2.0	79.1	464.3
3	0.30	0.40	15	1000	2.5	81.4	536.3
4	0.26	0.43	14	900	1.5	101.3	539.8
5	0.22	0.43	15	1000	2.0	109.1	615.8
6	0.30	0.43	13	800	2.5	63.6	446.7
7	0.26	0.46	15	1000	1.5	148.9	846.2
8	0.22	0.46	13	800	2.0	86.9	483.1
9	0.30	0.46	14	900	2.5	73.4	485.8
10	0.26	0.43	14	800	2.0	87.0	539.1
11	0.22	0.43	15	900	2.5	99.8	627.2
12	0.30	0.43	13	1000	1.5	81.9	461.3
13	0.26	0.46	15	900	2.0	124.2	758.5
14	0.22	0.46	13	1000	2.5	77.2	459.2
15	0.30	0.46	14	800	1.5	117.4	629.0
16	0.26	0.40	13	1000	2.0	59.6	432.2
17	0.22	0.40	14	800	2.5	73.8	447.1
18	0.30	0.40	15	900	1.5	108.3	571.4
19	0.26	0.46	15	800	2.5	111.4	765.7
20	0.22	0.46	13	900	1.5	100.2	488.4
21	0.30	0.46	14	1000	2.0	98.1	584.3
22	0.26	0.40	13	900	2.5	54.2	411.9
23	0.22	0.40	14	1000	1.5	93.0	465.8
24	0.30	0.40	15	800	2.0	93.8	570.3
25	0.26	0.43	14	1000	2.5	53.8	411.9
26	0.22	0.43	15	800	1.5	129.2	714.8
27	0.30	0.43	13	900	2.0	67.3	463.6

表 4 各因素水平作用于实验指标的影响

Tab.4 The effect of every level of various factors on the test results

结果 Results	1 $A \times E$	2 $A \times D$	3 B	5 A	6 E	7 $A \times E$	8 D	9 C	11 $A \times D$
k_1	814.0	809.2	713.5	810.7	950.5	830.5	833.4	661.2	797.0
k_2	829.2	833.8	789.4	848.3	805.1	790.9	807.8	776.9	816.2
k_3	801.0	801.2	939.5	785.2	688.6	822.8	803.0	1006.1	831.0

注： k_1 、 k_2 、 k_3 为各因素所在列对应喷油压力的平均数

Notes: k_1 , k_2 and k_3 are the average values of injection pressure at the same level for each columa.

根据方差分析步骤可以计算出各因素相应的 F 值。计算均方 MS (mean square) 时发现, $MS_D = 29.6$, $MS_{A \times D} = 32.1$, $MS_{A \times E} = 35.5$, 均小于误差均方 $MS_e = 96$, 这说明因素 D 、交互作用 $A \times E$ 、 $A \times D$ 对实验结果的影响较小, 可以将它们归于误差, 得出:

新的误差离差平方和: $SS_e^{\Delta} = SS_e + SS_D + SS_{A \times D} + SS_{A \times E} = 1077.6$;

新的误差自由度: $df_e^{\Delta} = df_e + df_D + df_{A \times D} + df_{A \times E} = 18$;

新误差均方为: $MS_e^{\Delta} = SS_e^{\Delta} / df_e^{\Delta} = 59.8$ 。

通过查 F 分布表, 得到的临界值为 $F_{0.01}(2, 18) = 6.01$, $F_{0.05}(2, 18) = 3.55$ 。对于给定的显著性水平 $\alpha = 0.05$, 因素 B 、 C 、 D 的 F 值均高于临界值 6.01, 所以对实验结果影响非常显著。因素 A 的 F 值低于 3.55, 故对实验结果影响不显著。具体因素方差分析如表 5 所示。

表 5 方差分析表
Tab.5 Table of variance analysis

差异源 Difference source	SS	df	MS	F	显著性 Significance level
e_A	223.9	2	111.9	1.87	
e_B	2613.7	2	1306.8	21.82	* *
e_C	6847.2	2	3423.6	57.18	* *
e_E	3826.1	2	1913.0	31.95	* *
$\left. \begin{matrix} D & A \times D \\ A \times E & e \end{matrix} \right\}$	1077.6	18	59.8		
总和 Total	14 588.5	26			

根据表 5 的结果可以得出如下结论:

- 1) F 值的大小决定了因素对实验指标的影响程度, F 值越大, 说明对实验指标的影响越显著。从结果看, 影响程度由强到弱依次为: 柱塞直径、油管直径、凸轮型线速度、喷孔数 \times 喷孔直径 (流通面积不变)、油管长度。
- 2) 三种喷油器 8×0.26 mm、 10×0.22 mm 和 6×0.30 mm 对试验指标无显著性影响, 因为三种喷油器的流通面积基本保持不变, 根据伯努利方程: $P_0 + 0.5\rho v = c$ (c 为常数; P_0 为压强; ρ 为燃油密度; v 为流速), 假设高压油管内燃油流动是稳定流动, 喷油量和流通面积不变, 那么 v 也不变, 从而嘴端喷油压力几乎不变。
- 3) 从对实验指标影响最弱的油管长度来看, 无论增加或缩短油管长度对喷油压力的影响都比较弱; 而前面方差分析中, 把交互作用喷孔直径与油管半径、喷孔直径与油管长度对实验指标的影响归类为误差的影响, 说明影响可以忽略不计, 即在保持流通面积不变的基础上, 改变油管长度或者直径对喷油压力影响不明显。
- 4) 不考虑因素的交互作用, 根据表 4 各因素水平对应的最大 k 值, 确定的优方案为 $A_2B_3C_3D_1E_1$, 其参数组合为: 喷油器喷孔数 10; 喷孔直径 22 mm; 凸轮型线速度 0.46 mm/℃ A; 柱塞直径 15 mm; 高压油管长度 800 mm; 高压油管直径 1.5 mm。代入燃油喷射系统模型仿真计算后, 得出: 喷油压力为 154.3 MPa, 喷油量为 860 mm³, 满足约束条件。除此之外, 表 3 满足条件的还有序号为 7、13、19、26 参数组合, 它们的喷油压力和喷油规律曲线如图 4 所示, 从图 4 可以看出, 喷油初期喷油规律曲线平缓上升, 喷油后期曲线上升较快, 基本上满足“先缓后急”趋势要求。

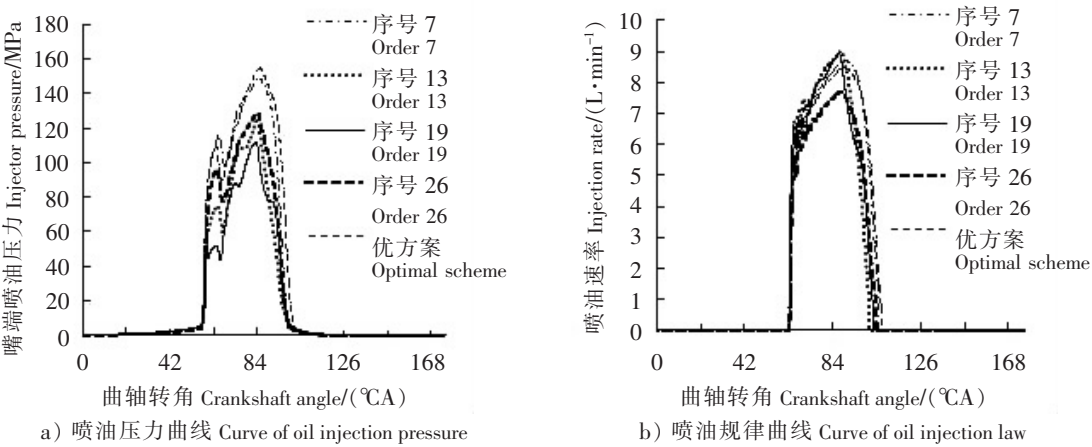


图 4 优化后参数组合对应的喷油压力和喷油规律曲线

Fig.4 The curves of injection pressure and injection law corresponding with the optimized parameter combination

3 结论

通过 AMESim 仿真软件建立了电控喷油系统仿真模型，并与实验数据进行比较，从而验证了模型的准确性。根据厂家资料确定了影响喷油特性参数的范围，在此基础上以喷油压力为优化目标，以喷油量为约束条件，运用正交试验设计方法安排仿真计算，通过方差分析得出对喷油压力影响程度由强到弱的参数依次为：柱塞直径、油管直径、凸轮型线速度、喷孔数×喷孔直径（流通面积不变）、油管长度；并确定了优方案组合：喷油器喷孔数 10；喷孔直径 22 mm；凸轮型线速度 0.46 mm/°CA；柱塞直径 15 mm；高压油管长度 800 mm；高压油管直径 1.5 mm。在此优化参数组合下的喷油压力相对于优化前提高了约 92.5%。

[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] 黄加亮, 蔡振雄, 张天野. 电控共轨低速船用柴油机燃油系统特点和管理 [J]. 航海技术, 2005(1): 41-43.

[3] 朱钰, 张天野, 尹志斌, 等. 船用中速柴油机电控燃油喷射系统匹配 [J]. 内燃机工程, 2015(2): 138-144.

[4] 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.

[5] 尹自斌, 朱钰, 马海涛, 等. 某柴油机电控组合泵系统喷射性能试验研究 [J]. 内燃机工程, 2013, 34(6): 76-80.

[6] 黄加亮, 乔英志, 王丹. 4190Z_LC 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.

[7] 黄少竹. 船舶柴油机 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2005.

[8] 孟昭听, 陶克苏. 用正交模拟法优化非直喷燃烧系统参数匹配 [J]. 内燃机工程, 2005, 26(4): 63-65.

[9] 王文萍. 四因素混合水平正交试验设计 [J]. 科技信息, 2010, 2(23): 659.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)