

双燃料发动机运行参数匹配优化对油耗率的影响

杨柏枫¹, 黄朝霞², 刘 川¹, 叶子泉³, 黄加亮^{3,4}

(1. 泉州师范学院航海学院, 福建 泉州 362000; 2. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021;
3. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 4. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究天然气-柴油双燃料发动机运行参数匹配对综合油耗率的影响, 利用 AVL-FIRE 仿真软件建立双燃料发动机燃烧室高压循环模型, 运用一次回归正交试验设计方法安排系统运行参数进行仿真计算, 建立综合油耗率生成的回归方程, 并对其进行方差分析和失拟性检验, 运用该回归方程找出综合油耗率最小的参数组合。结果表明, 综合油耗率经过一次回归正交试验设计优化后相比正交试验设计的降低约 0.53%; 综合油耗率最小 (169.3 g/(kW·h)) 的参数组合为: 天然气替代率 40%; EGR 率 0; 进气温度 325.15 K; 进气压力 0.223 MPa; 喷油提前角 22.6°。

[关键词] 双燃料发动机; 运行参数; 综合油耗率; 一次回归正交; 匹配优化

[中图分类号] U 664.121; TK 421

Influence of Operation Parameters Matching Optimization on Fuel Consumption Rate of a Dual Fuel Engine

YANG Baifeng¹, HUANG Zhaoxia², LIU Chuan¹, YE Zixiao³, HUANG Jialiang^{3,4}

(1. College of Navigation, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;
2. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China, 3. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 4. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the influence of operating parameters matching on the comprehensive fuel consumption rate of a natural gas-diesel dual-fuel engine, a high-pressure cycle model of a dual-fuel engine combustor was established by using AVL-FIRE simulation software. The first-order regression orthogonal experimental design method was used to arrange the operation parameters matching simulation calculation for optimization and a regression equation was established based on the comprehensive fuel consumption rate. The regression equation was employed for variance analysis and dissimilarity test. The combination of parameters with minimum comprehensive fuel consumption was then determined by using the regression equation. The results show that the comprehensive fuel consumption rate optimized by one-time regression orthogonal experimental design is about 0.53% lower than that by the orthogonal experimental design, and the combination of the parameters of the minimum comprehensive fuel consumption rate (169.3 g/(kW·h)) is: natural gas substitution rate 40%; EGR rate 0; inlet temperature 325.15 K; inlet pressure 0.223 MPa; fuel injection advance angle 22.6°CA.

Keywords: dual fuel engine; operation parameters; comprehensive fuel consumption rate; first regression orthogonal; matching optimization

[收稿日期] 2018-01-09

[修回日期] 2018-07-10

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目 (2017J01486 2017J01486)

[作者简介] 杨柏枫 (1985—), 男, 助教, 硕士, 从事双燃料发动机性能优化与排气测试分析研究。通信作者: 黄朝霞 (1966—), 女, 副教授, 硕士, 从事模糊数学及工程应用研究。E-mail: zxhuang@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

天然气-柴油双燃料发动机具有高效率、低排放的优势^[1],受到人们的关注。天然气可以部分替代柴油,从而有效降低柴油机的 NO_x 和碳烟排放^[2]。天然气具有燃烧热值高、经济性好等特性^[3]。肖民等^[4]和于洪亮等^[5]分别研究了天然气分段喷射和扫气压力对双燃料发动机综合性能的影响;谭小强等^[6]运用 AVL-FIRE 软件模拟了缸内直喷天然气和柴油混合的过程,分析了燃油系统参数对雾化效果的影响。本文利用 AVL-FIRE 软件建立燃烧室高压循环模型,采用一次回归正交试验设计安排运行参数匹配仿真计算,建立以综合油耗率为目标函数的回归方程,分析各参数对综合油耗率的影响,对运行参数进行优化,从而达到降低油耗、提高经济性的目的。

1 高压循环模型建立

4190Z_LC-2 型船用增压四冲程柴油机的主要技术参数:直列 4 缸,总排量 23.82 L;缸径×行程=190 mm×210 mm;标定转速 1000 r/min;标定扭矩 2100 N·m;标定功率 220 kW;额定油耗率 206 g/(kW·h);最大爆发压力 12 MPa;发火顺序 1-3-4-2。

湍流流动模型采用 $k-\varepsilon$ 模型;液滴破碎采用了 WAVE 子模型;蒸发模型采用了 Dukowicz 模型;液滴碰壁模型选取了 Walljet1 模型;湍流扩散模型采用了 Enable 模型;燃烧模型选取了 Shell 生成模型; NO_x 排放模型采用了 Zeldovich 生成模型。

依据实测 4190Z_LC-2 型柴油机燃烧室的几何尺寸,应用 AVL-FIRE 软件画出燃烧室的二维几何模型图,将其转换成后缀为 DXF 的文件;然后导入到 FIRE 的 ESE 模块中^[7],ESE 模块可自动计算划分、检查网格,生成三维体网格。由于燃烧室的对称性且喷孔数为 8,为缩短计算时间,选择燃烧室的 1/8 作为计算区域,如图 1 所示^[8]。在额定工况下,将原机实验平台实测的示功图曲线与仿真计算得到的缸压曲线进行对比,如图 2 所示。二者变化趋势基本一致,误差在允许的 5% 以内,说明仿真模型准确,可用于仿真研究。

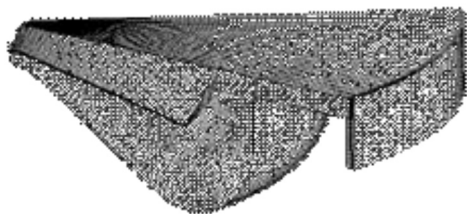


图 1 燃烧室部分区域网格划分剖面图

Fig.1 Cross section of the meshes within the partial section of the combustion chamber

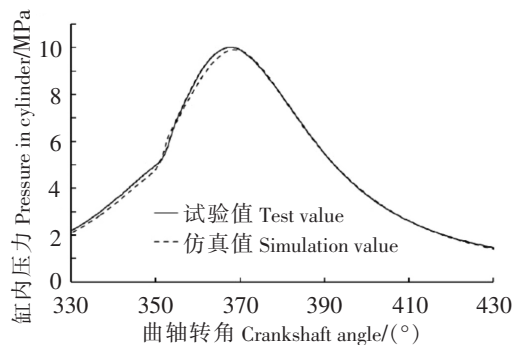


图 2 示功图实测值与仿真值对比

Fig.2 Comparison between values and simulation results from dynamometer card

2 运行参数优化方案

2.1 综合油耗率的计算

单纯的柴油消耗率或单纯的天然气消耗率不能直观准确地反映双燃料发动机的经济性,本文引入综合油耗率,将其作为双燃料发动机经济性的评价指标,在额定工况下进行仿真研究。综合油耗率 $\varphi_{\text{dual}} = (m_{\text{diesel}} + Hu_{\text{CNG}} * m_{\text{CNG}} / Hu_{\text{diesel}}) / P$ ^[9]。其中: φ_{dual} 为双燃料发动机综合油耗率(g/(kW·h)); m_{diesel} 为发动机单缸每循环消耗的柴油质量(g); m_{CNG} 为发动机单缸每循环消耗的天然气的质量(g); P 为发动机单缸输出的功率(kW); $Hu_{\text{CNG}} = 50.05 \text{ MJ/kg}$ 为天然气的热值; $Hu_{\text{diesel}} = 42.50 \text{ MJ/kg}$ 为柴油的热

值。将消耗的天然气的质量按照放热量折算成柴油的消耗量。

2.2 仿真试验方案

一次回归正交试验设计通过建立精度高、统计性好的回归方程,对评价指标进行预测和优化,可以得到试验范围内的最优方案^[10]。选取天然气替代率(X_1)、EGR(exhaust gas recirculation)率(X_2)、进气压力(X_3)、进气温度(X_4)、喷油提前角(X_5)5个因素进行一次回归正交试验设计,研究各因素的匹配优化对综合油耗率的影响。各因素的水平变化范围如表1所示,各因素水平的编码如表2所示^[11,12]。

Z_i 为自然变量 X_i 的规范变量($i=1,2,\dots,5$)。设因素 X_i 的变化范围为 $[X_{i1}, X_{i2}]$, X_{i1} 和 X_{i2} 分别为 X_i 的下水平和上水平; $X_{i0}=(X_{i1}+X_{i2})/2$, X_{i0} 称为 X_i 的零水平;因素 X_i 的变化间距 $\Delta_i=X_{i2}-X_{i0}$; $Z_i=(X_i-X_{i0})/\Delta_i$, Z_i 为 X_i 的编码,两者一一对应, Z_i 的取值范围为 $[-1,1]$ 。

表1 因素的变化范围

Tab.1 Variation of factors

因素 Factor	$X_1/\%$	$X_2/\%$	X_3/K	X_4/MPa	$X_5/(\text{ }^\circ)$
参数范围 Parameter range	40 ~ 70	0 ~ 12.5	325.15 ~ 355.15	0.173 ~ 0.223	16.6 ~ 22.6

表2 因素-水平编码表

Tab.2 Factor level coding table

规范变量 Canonical variable	$X_1/\%$	$X_2/\%$	X_3/K	X_4/MPa	$X_5/(\text{ }^\circ)$
上水平 Upper level(1)	70	12.50	355.15	0.223	22.6
下水平 Lower level(-1)	40	0	325.15	0.173	16.6
零水平 Zero level(0)	55	6.25	340.15	0.198	19.6
变化间距 Change distance Δ_i	15	6.25	15.00	0.025	3.0

选取正交表 $L_8(2^7)$ 进行一次正交回归试验设计,如表3所示^[13]。双燃料发动机缸内燃烧过程比较复杂,存在着因素间的交互影响作用,所以安排第3、5列为两个交互作用列。在保证试验精度的情况下,尽量减少试验次数,所以,增加三组零水平试验(试验号9~11, $m_0=3$),这样回归分析得到的回归方程更加精确,更接近实际情况。

表3 仿真试验方案及计算结果

Tab.3 Simulation test plan and calculation results

试验号 Test number	$Z_1/\%$	$Z_2/\%$	Z_1Z_2	Z_3/K	Z_1Z_3	Z_4/MPa	$Z_5/(\text{ }^\circ)$	综合油耗率 Comprehensive fuel consumption rate/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)
1	1	1	1	1	1	1	1	181.2
2	1	1	1	-1	-1	-1	-1	190.9
3	1	-1	-1	1	1	-1	-1	179.7
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	173.8
5	-1	1	-1	1	-1	1	-1	180.6
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	179.6
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	183.6
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	170.2
9	0	0	0	0	0	0	0	176.1
10	0	0	0	0	0	0	0	174.3
11	0	0	0	0	0	0	0	175.2

3 运行参数优化

3.1 建立一次回归方程

通过一次回归正交试验设计得到了多组评价指标的仿真数据, 对这些数据进行数学分析处理, 发现它们的内在规律。

利用 Microsoft Excel 2016 对表 3 中数据进行处理, 得到综合油耗率的规范变量的一次回归方程为:

$$Y = 178.65 + 1.45Z_1 + 3.13Z_2 + 1.33Z_3 - 3.5Z_4 - 0.4Z_5 + 1.53Z_1Z_2 - 2.28Z_1Z_3. \quad (1)$$

将 $Z_i = (X_i - X_{i0})/\Delta_i, (i = 1, 2, 3, 4, 5)$, 代入式 (1), 得到综合油耗率的自然变量的一次回归方程为:

$$Y = -12.967 + 3.431X_1 - 0.397X_2 + 0.645X_3 - 140X_4 - 0.133X_5 + 0.016X_1X_2 - 0.01X_1X_3. \quad (2)$$

选取表 3 中的 11 组试验数据, 利用回归方程 (1) 得到综合油耗率的预测值, 与对应的仿真值两两比较, 如图 3 所示, 两者的误差在 3% 以内, 误差较小, 说明以上建立的回归方程较准确, 可用于预测研究。

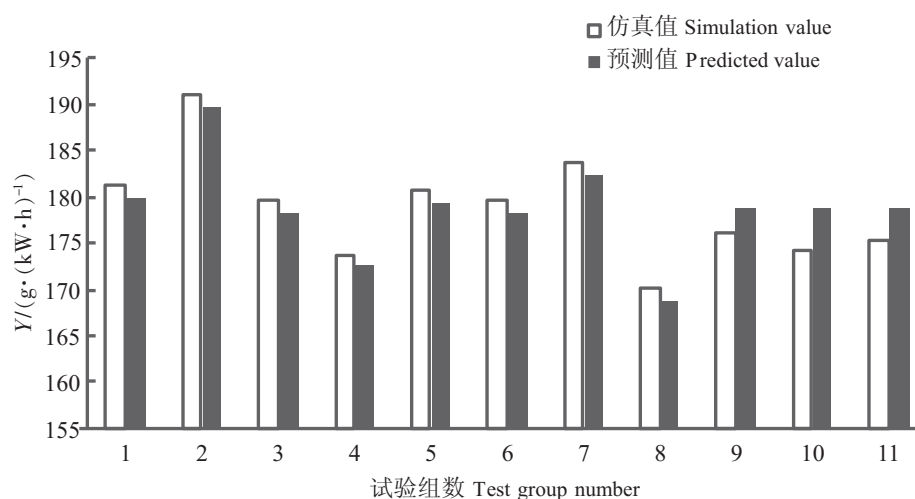


图 3 综合油耗率仿真值与回归方程预测值比较

Fig.3 Comparison of comprehensive fuel consumption rates from simulations and predictions from the regression equation

3.2 显著性检验

为检验各因素对试验结果的可信度, 对得到的回归方程 (1) 进行显著性检验, 结果如表 4、表 5 所示。

表 4 方差分析表

Tab.4 Variance analysis table

差异源 Difference source	SS	df	MS	F	显著性 Significance	差异源 Difference source	SS	df	MS	F	显著性 Significance
Z_1	23.13	1	23.13	2.39	*	Z_1Z_2	25.75	1	25.75	2.66	*
Z_2	107.77	1	107.77	11.13	*	Z_1Z_3	57.18	1	57.18	5.9	*
Z_3	19.46	1	19.46	2.01	*	回归 Regression	369.80	7	52.83	5.46	*
Z_4	134.75	1	134.75	13.92	*	残差 Residual SS_e	29.05	3	9.68		
Z_5	1.76	1	1.76	0.18		总和 The sum	398.85	$n - 1 = 10$			

注 Notes: $F_{0.05}(1,3) = 3.13$; $F_{0.01}(1,3) = 21.12$; $F_{0.05}(7,3) = 1.89$; $F_{0.01}(7,3) = 18.67$; * 代表显著 (* means significance) ($F > F_{0.05}$); ** 代表非常显著 (** means very significance) ($F > F_{0.01}$)

表 5 第二次方差分析表
Tab.5 The second variance analysis table

差异源 Difference source	SS	df	MS	F	显著性 Significance	差异源 Difference source	SS	df	MS	F	显著性 Significance
Z_1	23.13	1	23.13	3.00	*	$Z_1 Z_3$	57.18	1	57.18	7.43	* *
Z_2	107.77	1	107.77	14.00	* *	回归 Regression	368.04	6	61.34	7.97	* *
Z_3	19.46	1	19.46	2.53	*	残差 Residual SS_e	30.81	4	7.70		
Z_4	134.75	1	134.75	17.5	* *	总和 The sum	398.85	$n - 1 = 10$			
$Z_1 Z_2$	25.75	1	25.75	3.34	*						

注 Notes: $F_{0.05}(1,4) = 1.61$; $F_{0.01}(1,4) = 9.26$; $F_{0.05}(6,4) = 1.05$; $F_{0.01}(6,4) = 3.97$; * 代表显著 (* means significance) ($F > F_{0.05}$); * * 代表非常显著 (* * means very significance) ($F > F_{0.01}$)

由表 4 可以得到回归方程 (1) 较显著, Z_5 对评价指标影响不显著, 将 Z_5 的平方和及自由度并入残差项, 进行第二次方差分析, 结果如表 5 所示。得到各因素对评价指标影响显著, 回归方程 (1) 可以简化为:

$$Y = 178.65 + 1.45Z_1 + 3.13Z_2 + 1.33Z_3 - 3.5Z_4 + 1.53Z_1Z_2 - 2.28Z_1Z_3. \quad (3)$$

选取表 3 中的 11 组试验数据, 利用回归方程 (3) 得到综合油耗率的预测值, 与对应的仿真值两者比较, 如图 4 所示, 两者非常接近, 误差在 3% 以内, 说明简化后的回归方程有预测功能, 得到的数据可信度较高。

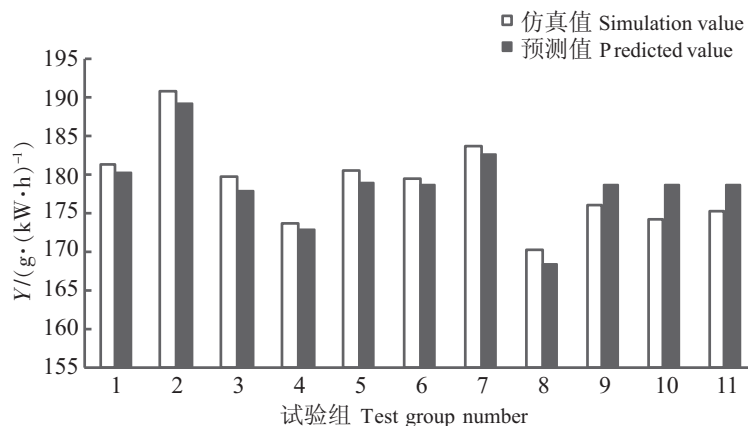


图 4 综合油耗率仿真计算的仿真值与回归简化方程预测值比较

Fig.4 Comparison of simulation values of comprehensive fuel consumption rate and predicted values of regression simplified equations

3.3 失拟性检验

通过前面方差分析检验了建立的回归方程 (1) 在试验点上与试验结果的拟合情况, 以及各因素对评价指标影响的显著性。为了检验简化后的回归方程 (3) 在整个研究范围内的拟合情况, 还要进行失拟性检验^[14]。由表 3 可知, 零水平实验次数 $m_0 = 3$, 进行失拟性检验, 有关计算如下:

重复试验误差为: $SS_{e1} = \sum_{i=1}^{m_0} y_{0i}^2 - (\sum_{i=1}^{m_0} y_{0i})^2 / m_0 = 1.62$, 对应的自由度为: $df_{e1} = m_0 - 1 = 2$;

失拟平方和为: $SS_{lf} = SS_e - SS_{e1} = 27.43$, 对应的自由度为: $df_{lf} = df_e - df_{e1} = 1$;

此时显著性: $F_{lf} = (SS_{lf} / df_{lf}) / (SS_{e1} / df_{e1}) = 33.86 < F_{0.1}(1,2), (F_{0.1}(1,2) = 39.86)$ 。

以上表明, 回归方程 (3) 失拟不显著, 失拟平方和 SS_{lf} 是由随机误差造成的, 所以建立的模型与实际情况拟合良好。

将 $Z_i = X_i - X_{i0}/\Delta_i$, ($i = 1, 2, 4$) 代入简化后的回归方程 (3), 最后得到综合油耗率的自然变量的回归方程为:

$$Y = -15.58 + 3.431X_1 - 0.397X_2 + 0.645X_3 - 140X_4 + 0.016X_1X_2 - 0.01X_1X_3. \quad (4)$$

3.4 综合油耗率最优参数确定

由回归方程 (1) 中各规范变量的回归系数绝对值的大小, 得到各因素对综合油耗率影响的顺序为: $X_4 > X_2 > X_1X_3 > X_1X_2 > X_1 > X_3 > X_5$, 进气压力、EGR 率对综合油耗率的影响大。进气压力增大, 缸内平均压力提高, 相当于缸内增压, 指示功率增大, 从而综合油耗率下降^[15]。随着 EGR 率提高, 缸内惰性气体增多, 热容增大, 燃烧受到抑制不完全, 热效率降低, 使得综合油耗率上升^[16]。

运用 Microsoft Excel 2010 功能, 在 $Y \geq 0$, $-1 \leq Z_1 \leq 1$, $-1 \leq Z_2 \leq 1$, $-1 \leq Z_3 \leq 1$, $-1 \leq Z_4 \leq 1$, $-1 \leq Z_5 \leq 1$ 的约束条件下, 对回归方程 (1) 求解, 得到 $Z_1 = -1$, $Z_2 = -1$, $Z_3 = -1$, $Z_4 = 1$, $Z_5 = 1$, $Y_{\min} = 168.09$ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)。

上述参数优化组合的仿真值与回归方程的预测值的对比如表 6 所示。由表 6 可知, 综合油耗率的回归方程预测值与仿真计算值比较降低了 0.71%, 与正交试验设计最优组 (表 3 中试验号 8) 比较, 降低约 0.53%。所以一次回归正交设计是更好的优化方法, 有助于缩短研究周期。综合油耗率最小的参数组合为: 综合油耗率 $169.3 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 天然气替代率为 40%; EGR 率为 0; 进气温度为 325.15 K; 进气压力为 0.223 MPa; 喷油提前角为 22.6° 。

表 6 一次回归与正交试验方案比较

Tab.6 Comparison of primary regression and orthogonal test schemes

方案 Project	天然气替代率 Substitution rate of natural gas/%	EGR 率 EGR rate/%	进气温度 Intake temperature /K	进气压力 Intake pressure /MPa	喷油提前角 Injection advance angle/ $(^\circ)$	综合油耗率 Comprehensive fuel consumption rate/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)
一次回归 One regression	40	0	325.15	0.223	22.6	168.09
仿真计算 Simulation	40	0	325.15	0.223	22.6	169.30
正交试验 (试验号 8) Orthogonal test (Test No. 8)	40	0	325.15	0.223	16.6	170.20

4 结论

1) 运用 CFD 软件 AVL-FIRE, 依据 4190Z_LC-2 型柴油机的燃烧室实测几何尺寸, 建立双燃料发动机燃烧室高压循环仿真模型。将原机实验平台实测得到的示功图曲线与仿真计算得到的二维缸压曲线相对比, 两者误差在 5% 以内, 建立的仿真模型较准确, 可用于仿真研究。

2) 选取双燃料发动机的主要运行参数进行一次回归正交试验设计, 建立了各运行参数与综合油耗率之间的回归方程, 预测值与仿真值误差在 3% 以内, 精度较高; 方差分析和失拟性检验表明, 回归方程较显著, 与实际情况拟合良好, 简化后的回归方程预测值与仿真值误差在 3% 以内, 精度较高。从回归方程分析得出: 进气压力、EGR 率对综合油耗率影响大, 天然气替代率和进气温度的交互作用次之。

3) 一次回归正交试验设计最优参数组合为: 综合油耗率最小 $169.3 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 天然气替代率为 40%; EGR 率为 0; 进气温度为 325.15 K; 进气压力为 0.223 MPa; 喷油提前角为 22.6° 。

[参 考 文 献]

- [1] 尧命发, 段家修, 覃军, 等. 双燃料发动机燃烧放热规律分析及燃烧特性研究 [J]. 内燃机学报, 2002, 20(4): 312-316.
- [2] 王忠, 李仁春, 张登攀, 等. 甲醇/柴油双燃料发动机燃烧过程分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 78-83.
- [3] 任川. 船用天然气-柴油双燃料发动机性能数值研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [4] 肖民, 周星星. 天然气分段喷射对双燃料发动机性能影响的研究 [J]. 船舶工程, 2018, 40(2): 1-8.
- [5] 于洪亮, 段树林, 孙培廷, 扫气压力对船用天然气/柴油双燃料发动机燃烧排放的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(3): 393-401.
- [6] 谭小强, 王谦, 何志霞, 天然气-柴油双燃料发动机内部燃料混合模拟研究 [J]. 内燃机工程, 2017, 38(2): 42-47.
- [7] 邹宪, 郑尊清, 王浒, 等. 燃料物性和喷油策略对船用柴油机性能和排放影响的模拟研究 [J]. 内燃机工程, 2017, 38(6): 16-22.
- [8] 孙思远, 徐虎, 黄加亮, 等. 电控柴油机燃油系统参数匹配对油耗率的影响 [J]. 中国航海, 2017, 40(3): 14-19.
- [9] 孙思远. 混燃天然气-柴油机燃烧与排放优化数值仿真 [D]. 厦门: 集美大学, 2018.
- [10] 黄朝霞, 黄加亮, 徐虎, 等. 基于正交设计的船用柴油机燃烧系统参数匹配及优化 [J]. 船舶工程, 2017, 39(8): 55-59.
- [11] 骆婉珍. 船用混合燃料发动机燃烧过程数值模拟 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- [12] 陈杰. 混燃天然气柴油机燃烧室结构优化仿真研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2016.
- [13] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 208-209.
- [14] 李晶欣, 李坚, 梁文俊, 等. 低温等离子体降解甲苯影响因素分析 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(6): 904-910.
- [15] 黄开胜, 张尧, 刘刚, 等. 进气压力对发动机性能的影响研究 [J]. 内燃机工程, 2017, 38(2): 73-78.
- [16] 段加全. EGR 对柴油机燃烧及排放影响的数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)