

船用双燃料柴油机多参数优化匹配分析

陈坚^{1,2}, 林航³, 叶子皋^{1,2}, 范金宇^{1,2}, 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;
3. 泉州海洋职业学院, 福建 泉州 362700)

[摘要] 为了减少实验次数, 寻找最佳参数匹配, 使用正交实验设计方法, 选取异戊醇掺混比、喷油提前角、进气温度、扫气压力4个参数的各4个水平进行仿真实验, 以NO质量分数和指示功率作为实验的评价指标进行正交设计, 运用数据极差分析寻求最佳参数组合。结果表明, 得到的最优参数为: 异戊醇掺混比为体积分数40%, 喷油提前角为22.6°, 进气温度为315.15 K, 扫气压力为0.233 MPa。在此参数组合下得到最终生成的NO质量分数为0.011 02%, 指示功率为52.10 kW。可见, 在动力性损耗较小的情况下可以实现较高的异戊醇掺混比。

[关键词] 船舶柴油机; 异戊醇; 极差分析; 多参数优化; 性能分析

[中图分类号] U 664.121

Analysis of Multi-Parameter Optimization and Matching for Dual-Fuel Marine Diesel Engines

CHEN Jian^{1,2}, LIN Hang³, YE Zixiao^{1,2}, FAN Jinyu^{1,2}, HUANG Jialiang^{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;
3. Quanzhou Ocean Institute, Quanzhou 362700, China)

Abstract: In order to reduce the number of experiments and find the best parameter matching, this study employed an orthogonal experimental design method, four levels for each of the four parameters, including isoamyl alcohol mixing ratio, injection advance angle, intake temperature, and scavenging air pressure, were selected for simulation tests. The NO mass fraction and indicated power were used as the evaluation indexes of the test, and the orthogonal design was carried out to seek the optimal parameter combinations by using data extreme variance analysis. The results showed that the isoamyl alcohol mixing ratio was 40%, fuel injection advance angle was 22.6°, intake temperature was 315.15 K, and scavenging air pressure was 0.233 MPa. With this parameter combination, the following results were obtained: NO mass fraction was 0.011 02%, and indicated power was 52.10 kW. So higher isoamyl alcohol mixing ratio could be achieved with less power loss.

Keywords: marine diesel engine; isoamyl alcohol; extreme variance analysis; multi-parameter optimization; performance analysis

[收稿日期] 2023-07-29

[基金项目] 福建省自然科学基金项目“甲醇/柴油双燃料发动机燃烧与排放性能优化研究”(2022J01812); 福建省教育厅科技项目“船用双燃料柴油机掺烧甲醇燃烧与排放性能仿真优化”(JAT210237)

[作者简介] 第一作者: 陈坚(1966—), 副教授, 硕士, 从事船舶动力装置故障诊断、节能技术和仿真技术研究。通信作者: 黄加亮(1963—), 教授, 博士, 从事船舶柴油机性能优化与排气测试分析研究。
E-mail: jluang@jmu.edu.cn

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

0 引言

我国消费的可再生能源量不断上升, 煤炭的消费量下降, 其他可再生能源呈现出不同以往的增长趋势^[1]。使用新的替代燃料将会影响柴油机的各项参数, 原有的参数匹配不再是最优的结果, 对此需要进行实验来寻找新的参数匹配^[2]。而多参数组合优化需要大量的实验来累积数据, 这会耗费大量的时间及资源, 因此, 研究者引入仿真手段及数学方法来节省成本, 提高效率^[3]。李云雁等^[4]通过正交实验设计, 将多参数实验所需的几百组实验数精简为十几组, 并且保证了优化结果的准确性。杨立春等^[5]通过极差分析和方差分析确定甲醇装置最佳排放参数, 减少了装置的设计时间。黄加亮等^[6]对 4190Z_LC 发动机燃烧室进行双卷流 (DS) 改造并对喷油提前角、喷孔直径进行优化匹配, 较好解决了因生物柴油黏度过大及低温燃烧导致的燃油雾化、燃烧、性能和排放恶化问题。胡登等^[7]提出柴油-生物柴油结合进气道加湿的方法, 对 4190 柴油机进行仿真, 在保证动力性的前提下能极大地降低 NO_x 排放。宣熔等^[8]研究不同甲醇掺混比对柴油机燃烧及排放特性的影响, 在保证柴油机正常燃烧性能情况下, 得出最佳的甲醇掺混比。叶子泉等^[9]通过对燃烧过程的模拟计算来研究丁醇掺混比、米勒循环度及二者的结合对柴油机动力性能和排放性能的影响, 探索出一条既能保证功率又能降低有害排放的方案。本文将实验台架与仿真软件相结合, 运用正交实验设计方法精简实验次数, 确定最佳参数匹配。

1 缸内燃烧室模型的建立与验证

本文以电控改造后的济南柴油机有限公司 4190Z_LC-2 型船舶中速柴油机为研究对象, 其实验平台如图 1 所示。台架测试仪器主要包括 Horiba MEXA-DSEGR 型气体分析仪、PC2210 型智能油耗仪、SG880 型水涡流测功机和 DEWE-2010 型燃烧分析仪。4190Z_LC-2 型船舶柴油机的基本参数见表 1。

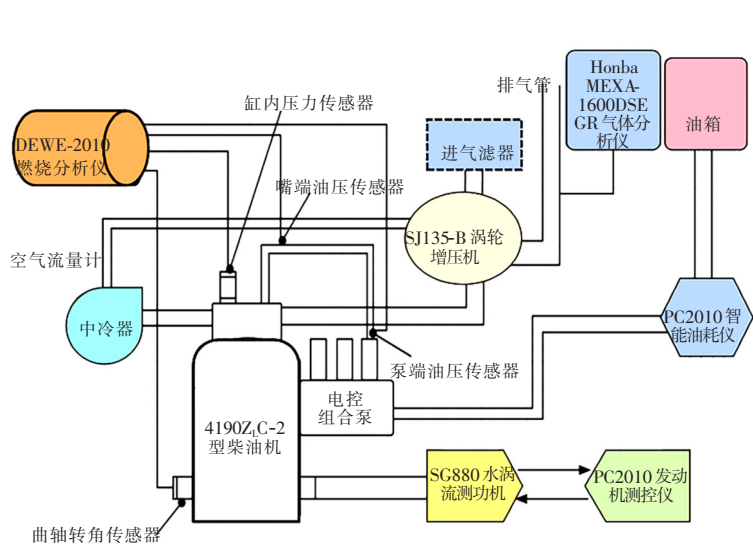


图 1 柴油机性能测试台架装置主要设备及系统
Fig.1 Main equipment and system of diesel engine performance test bench device

表 1 4190Z_LC-2 型船舶柴油机基本参数
Tab.1 Basic parameters of 4190Z_LC-2 marine diesel engine

项目名称	技术参数
机型	四冲程、中冷、直喷、废气涡轮增压
气缸直径×行程/(mm×mm)	190×210
燃烧室形状	直口 ω 型
总排量/L	23.82
压缩比	14:1
标定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
标定功率/kW	220
循环喷油量/g	0.394 88
平均有效压力/MPa	1.109
喷孔数	8
喷雾夹角/(°)	150

4190Z_LC-2 型中速船用柴油机的燃烧室及 8 个喷油器环绕中心对称, 以喷油器位置为中心, 将燃烧室空间平均划分为 8 部分, 取 1/8 燃烧室作为仿真区间, 系统根据燃烧室形状自动划分网格。在实际实验过程中, 进排气阀会对燃烧室容积造成压缩比变化, 在活塞设置中增加补偿容积, 使得压缩比不会变化。划分好模型的网格后, 通过系统检查网格, 使用系统确定没有不规则曲面、负网格等网格质量问题。若存在问题, 可通过手动局部修改, 以保证良好的网格质量。软件最终自动将计算结果乘

以 8, 得出整体模型的仿真结果。图 2 为柴油机燃烧室上止点与下止点 1/8 的网格模型。

在模型选择方面, 湍流流动模型选用 $k-\varepsilon$ 模型; 喷雾模型选取 4 个子模型; 液滴破碎模型选用 KH-RT 模型; 蒸发模型选用 Multi-component 模型; 液滴碰壁模型选用 Walljet1 模型; 湍流扩散模型选用 Enable 模型; 燃烧模型选取 ECFM-3Z 模型; NO、CO 排放模型采用 Extended Zeldovich 模型; Soot 排放模型选用 Frolov Kinetic 模型。

本实验在纯柴油模式下进行模型的验证。实验台架准备完成后, 开启柴油机, 逐步提高柴油机至满负荷工况, 运行 5 min 后, 缸内压力及放热率曲线可由燃烧分析仪等仪器按步长记录数据, 形成曲线后导出, 即可获得实验值。通过建立的燃烧室仿真模型进行纯柴油燃烧仿真, 纯柴油的模型是将异戊醇简化机理中的异戊醇含量设置为 0, 在纯柴油条件下进行仿真, 即可得到仿真值。将实验值与仿真值导入 Origin 软件, 通过软件可以对 2 条曲线进行拟合, 拟合结果如图 3 所示。由图 3 可见, 缸内压力与放热率的仿真值在峰值上略高于实验值, 变化规律相似, 燃烧始点对应的曲轴转角一致, 相同曲轴转角对应的压力相近, 在最大爆发压力上略微不同。产生误差的原因是, 仿真模型部分网格的划分不够精细, 同时, 在实际实验时, 气缸也存在一定的漏气和热损失。

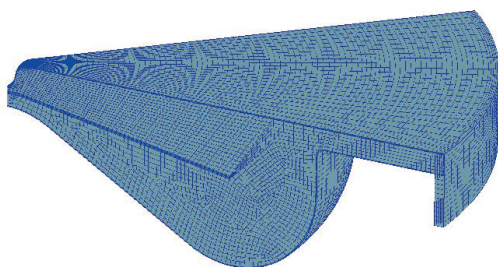


图 2 柴油机燃烧室 1/8 网格模型

Fig.2 Eighth grid model of diesel engine combustion chamber

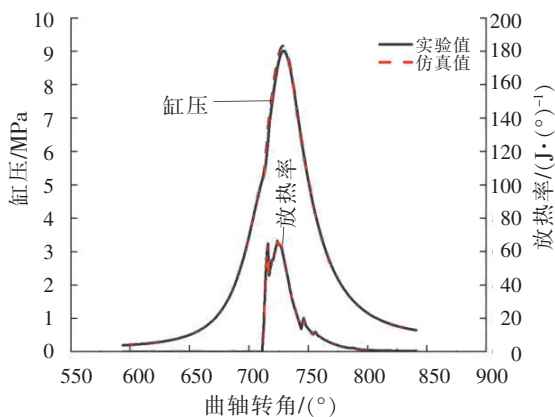


图 3 缸压、放热率的实验值与仿真值

Fig.3 Experimental and simulation values of cylinder pressure and heat release rate

在缸压曲线方面, 仿真值在最大爆发压力上与实验值偏差最大, 偏差为 0.15 MPa, 误差为 1.64%; 在放热率曲线方面, 仿真值在第一峰值上与实验值偏差最大, 偏差为 0.503 J/(°), 误差为 0.77%。2 条曲线的误差均在 5% 以内, 所以仿真的数值与实验的数值基本一致, 可用于后续的仿真计算。

2 基于正交实验设计的柴油机多参数优化

图 4 为正交实验设计多参数匹配优化流程图, 该流程主要包括确定实验指标, 选择因素和水平数, 选择合适的正交表, 以及进行数据分析和处理。

2.1 正交因素水平表

实验选取异戊醇掺混比、喷油提前角、进气温度、扫气压力 4 个因素, 每个因素对应 4 个水平, 以最终生成的 NO 质量分数和指示功率作为评价指标, 在全负荷工况下进行正交实验。正交因素水平表如表 2 所示。

2.2 正交实验表设计

本实验为 4 因素 4 水平, 选取 L_{16} 型正交表, 正交实验结果如表 3 所示。

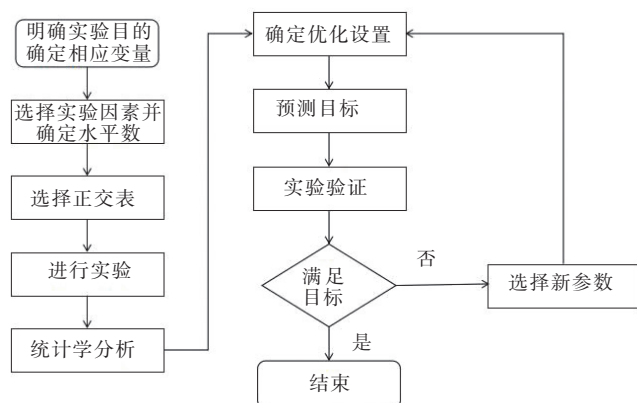


图4 正交实验设计多参数匹配优化流程图

Fig.4 Orthogonal experimental design multi-parameter matching optimization flowchart

表2 正交因素水平表

Tab.2 Level table of orthogonal factors

实验 水平	异戊醇 掺混比 /% (A)	喷油 提前角 /(°) (B)	进气温度 /K(C)	扫气压力 /MPa(D)
1	0	16.6	315.15	0.173
2	30	18.6	325.15	0.193
3	35	20.6	335.15	0.213
4	40	22.6	345.15	0.233

表3 正交实验结果

Tab.3 Orthogonal experiment results

实验组别	异戊醇掺混比/%	喷油提前角/(°)	进气温度/K	扫气压力/MPa	NO 质量分数/%	单缸指示功率/kW
1	0	16.6	315.15	0.173	0.013 80	52.93
2	0	18.6	325.15	0.193	0.014 19	53.96
3	0	20.6	335.15	0.213	0.014 02	55.10
4	0	22.6	345.15	0.233	0.013 95	56.28
5	30	16.6	335.15	0.193	0.008 99	48.51
6	30	18.6	345.15	0.173	0.008 15	46.25
7	30	20.6	315.15	0.233	0.011 94	53.33
8	30	22.6	325.15	0.213	0.010 51	52.06
9	35	16.6	345.15	0.213	0.007 20	48.82
10	35	18.6	335.15	0.233	0.008 41	51.09
11	35	20.6	325.15	0.173	0.010 16	47.51
12	35	22.6	315.15	0.193	0.010 95	50.76
13	40	16.6	325.15	0.233	0.009 41	50.31
14	40	18.6	315.15	0.213	0.010 92	50.20
15	40	20.6	345.15	0.193	0.007 20	47.46
16	40	22.6	335.15	0.173	0.007 85	46.78

3 数据结果的极差分析

极差分析的公式为

$$R_j = \max \{ K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j} \} - \min \{ K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j} \} \quad (1)$$

其中: R_j 表示极差; K_{1j} 、 K_{2j} 、 K_{3j} 、 K_{4j} 分别表示 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 对应行中第 j 列的数字, $j = 1, 2, 3, 4$ 。

3.1 以 NO 质量分数为评价指标

以 NO 质量分数作为评价指标生成的极差分析结果见表4。由表4可知, 极差分析结果为 $R_A >$

$R_C > R_B > R_D$, 说明影响最终生成的 NO 质量分数的因素主次顺序为异戊醇掺混比、进气温度、喷油提前角、扫气压力。 $k_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 大小反映因素的影响大小, 通过比较表 4 的数据可以得出, 较优方案为 $A_4 C_4 B_1 D_1$, 即异戊醇掺混比为 40%, 进气温度为 345.15 K, 喷油提前角为 16.6°, 扫气压力为 0.173 MPa。

表 4 以 NO 质量分数为评价指标生成的极差分析

Tab. 4 Extreme variance analysis of NO mass fraction as an evaluation indicator generation

单位: %

因素	$w(\text{NO})$			
	A	B	C	D
k_1	0.013 99	0.009 85	0.011 90	0.009 99
k_2	0.009 90	0.010 42	0.011 07	0.010 33
k_3	0.009 18	0.010 83	0.009 82	0.010 66
k_4	0.008 85	0.010 82	0.009 13	0.010 93
R	5.15	0.98	2.78	0.94
主次因素	ACBD			

同一因素不同水平对最终生成的 NO 质量分数的影响结果见图 5。由表 4 和图 5 可知, 极差值大和图中点的分散大的, 其影响因素最大。其中, 异戊醇掺混比的极差 5.15 和点分布最大, 故影响最大。进气温度的极差 2.78 和点分布较大, 故为次要影响。喷油提前角和扫气压力的极差较小且点分布较小, 影响最小。

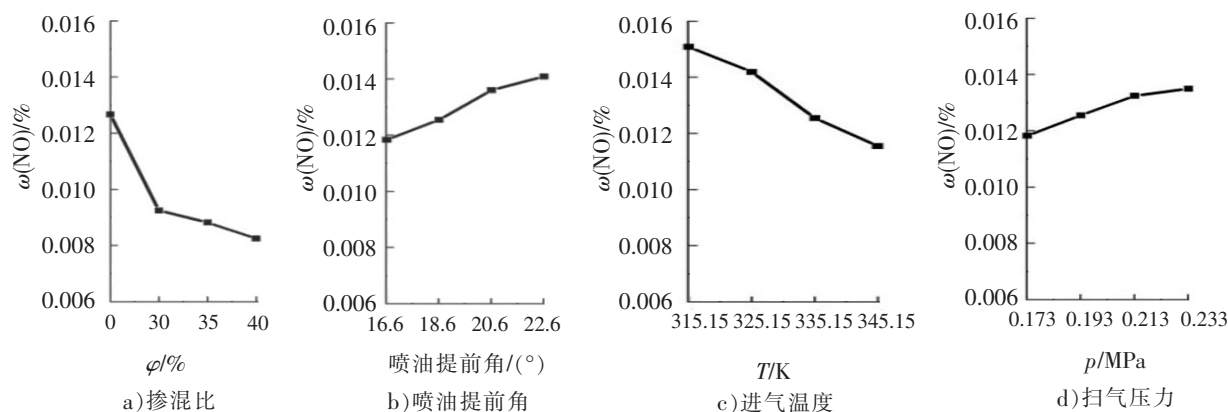


图 5 NO 质量分数趋势图

Fig.5 NO mass fraction trend chart

3.2 以指示功率为评价指标

以指示功率作为评价指标生成的极差分析结果见表 5。由表 5 可知, 极差分析结果为 $R_A > R_D > R_C > R_B$, 说明影响指示功率的因素主次顺序为异戊醇掺混比、扫气压力、进气温度、喷油提前角。通过比较表 5 的数据可以得出, 较优方案为 $A_1 D_4 C_1 B_4$, 即异戊醇掺混比为 0, 扫气压力为 0.233 MPa, 进气温度为 315.15 K, 喷油提前角为 22.6°。

同一因素不同水平对指示功率的影响结果见图 6。由表 5 和图 6 可知, 异戊醇掺混比的极差 5.88 和点分布最大, 影响最大。扫气压力的极差 4.39 和点分布较大, 故为次要影响。进气温度和喷油提前角的极差较小且点分布较小, 影响最小。

表 5 以指示功率为评价指标生成的极差分析

Tab. 5 Extreme variance analysis of indicating power as an evaluation indicator generation

单位: kW

因素	指示功率			
	A	B	C	D
k_1	54.57	50.14	51.81	48.37
k_2	50.04	50.38	50.96	50.17
k_3	49.55	50.85	50.37	51.55
k_4	48.69	51.47	49.70	52.75
R	5.88	1.33	2.10	4.39
主次因素	ADCB			

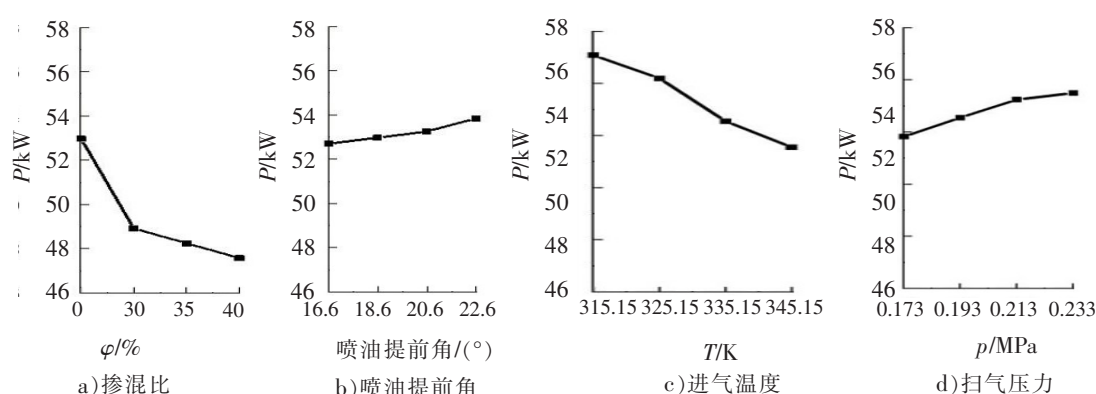


图 6 指示功率趋势图

Fig.6 Indicator power trend chart

3.3 以 NO 质量分数和指示功率共同作为评价指标

以 NO 质量分数和指示功率共同作为评价指标生成的极差分析结果见表 6。

表 6 以 NO 质量分数和指示功率为评价指标生成的极差分析

Tab. 6 Extreme variance analysis of NO mass fraction and indicated power as evaluation indicators generation

因素	NO 质量分数/%				单缸指示功率/kW			
	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	0.013 99	0.009 85	0.011 90	0.009 99	54.57	50.14	51.81	48.37
k_2	0.009 90	0.010 42	0.011 07	0.010 33	50.04	50.38	50.96	50.17
k_3	0.009 18	0.010 83	0.009 82	0.010 66	49.55	50.85	50.37	51.55
k_4	0.008 85	0.010 82	0.009 13	0.010 93	48.69	51.47	49.70	52.75
R	5.15	0.98	2.78	0.94	5.88	1.33	2.10	4.39
较优值	A ₄	B ₁	C ₄	D ₁	A ₁	B ₄	C ₁	D ₄

由前文可知, 对 NO 质量分数, 影响次序为 ACBD, 即异戊醇掺混比最大, 进气温度其次, 喷油提前角再次, 扫气压力影响最小; 对指示功率来说, 影响次序为 ADCB, 即异戊醇掺混比最大, 扫气压力其次, 进气温度再次, 喷油提前角最小。总体来说, 因素 A 处于主要地位, 首先选择 A, 水平数上 NO 质量分数和指示功率的水平数在两个极端, 本文主旨是研究掺烧异戊醇燃烧与排放性能研究, 故选取掺混比最大的水平 A₄, 故 A 确定 A₄; 其次是 C 影响最大, 与 A 相同, NO 质量分数和指示功率的水平数同样处于两个极端。根据前文研究, 掺混异戊醇后指示功率出现大幅下降, 为了提高柴油

机动力性, 本文选取能最大提升指示功率的 C_1 作为最佳; B 和 D 同样选取指示功率最大的水平, 即 B_4 和 D_4 。因为因素 D 在指示功率上存在较大影响, 故作为第三位影响因素; 因素 B 的影响最小。NO 质量分数和指示功率的趋势图如图 5 ~ 图 6 所示, 可见, 点分布与影响基本一致。因此, 确定最佳组合为 $A_4C_1D_4B_4$, 即异戊醇掺混比为 40%, 进气温度为 315.15 K, 扫气压力为 0.233 MPa, 喷油提前角为 22.6°。

4 优化结果

以 NO 质量分数、指示功率及两者共同作为评价指标进行优化, 汇总优化方案结果并进行比较, 结果见表 7。由表 7 可知, 相比于原机数据, 综合分析下, 掺混异戊醇后带来的指示功率的下降, 可以通过调节运行参数来弥补, 达到和原机接近的数值, 同时最终生成的 NO 质量分数略有降低。以 NO 质量分数为评价标准, 可以大幅降低最终生成的 NO 质量分数, 但是指示功率也会大幅降低; 以指示功率为评价标准, 结果则相反, 大幅提高指示功率的同时, 也提高了最终生成的 NO 质量分数。

表 7 优化方案对比

Tab. 7 Comparison of optimization schemes

方案	异戊醇掺混比 /%	喷油提前角 /(°)	进气温度 /K	扫气压力 /MPa	NO 质量分数 /%	单缸指示功率 /kW
原机数据	0	18.6	335.15	0.193	0.012 67	52.97
极差分析(综合)	40	22.6	315.15	0.233	0.011 02	52.10
极差分析 (NO 质量分数)	40	16.6	345.15	0.173	0.007 06	44.48
极差分析 (指示功率)	0	22.6	315.15	0.233	0.015 54	59.53

5 结论

通过正交实验设计, 本文确定了柴油掺混异戊醇后柴油机多参数匹配的最优组合, 即异戊醇掺混比为 40%, 喷油提前角为 22.6°, 进气温度为 315.15 K, 扫气压力为 0.233 MPa。在此参数组合下, 最终生成的 NO 质量分数为 0.011 02%, 指示功率为 52.10 kW。在保证柴油机动力性损耗较小的情况下, 提高了替代燃料异戊醇的掺混比。

[参考文献]

- [1] 碧辟(中国)投资有限公司. BP 世界能源展望(2021 版)[EB/OL]. (2021-07-08)[2023-07-01]. [https://www. bp. com/zh_cn/china/home/news/reports/ statistical-review-2021. html](https://www.bp.com/zh_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html).
- [2] 邓涛, 胡登, 黄加亮, 等. 运行参数对双燃料船用柴油机燃烧和排放性能的影响[J]. 船舶工程, 2019, 41(12): 8-13.
- [3] 宣熔, 张飞飞, 陈坚, 等. 喷油提前角对双燃料柴油机燃烧和排放的影响[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2021, 26(3): 240-245.
- [4] 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.
- [5] 杨立春, 敖世恩, 陈豪立. 结合 AERMOD 模型和正交试验设计研究工业点源最优的排放参数[J]. 环保科技, 2013, 19(2): 14-16.
- [6] 黄加亮, 张飞飞, 林航, 等. 双卷流燃烧系统的双燃料发动机燃烧排放特性[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2022, 27(6): 531-538.
- [7] 胡登, 黄加亮, 邓涛, 等. 双燃料发动机进气道加湿燃烧与排放性能仿真研究[J]. 中国造船, 2020, 61(3): 163-175.
- [8] 宣熔, 牛梦达, 李品芳, 等. 掺烧甲醇对船舶柴油机性能的影响[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(21): 101-104, 109.
- [9] 叶子泉, 李品芳, 黄朝霞, 等. 掺烧丁醇耦合米勒循环降低发动机 NO 和 PM 排放的仿真研究[J]. 中国航海, 2021, 44(2): 114-119.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)