

基于模型标定方法在高压共轨柴油机 排放优化中的应用

李 强¹, 李承运²

(1. 宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司, 浙江 宁波 315336;

2. 浙江吉利动力总成有限公司, 浙江 宁波 315800)

摘 要: 采用模型标定方法对某款高压共轨柴油发动机特征工况的排放进行优化。重点介绍了 DOE 试验样本的确定及发动机排放模型的建立, 并基于设定的优化目标和优化方法得到了各工况下满足排放最优的 ECU 参数。与实际台架试验结果的比较表明: 基于模型标定的方法能够更好地模拟真实发动机的排放情况。与常规标定方法相比, 基于模型标定方法能够大幅缩减试验样本量, 且样本取点分布更为合理, 优化效果相对更好。

关键词: 柴油机; 排放; 标定; DOE

中图分类号: TK 421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)04-0009-06

Application of Model Based Calibration to the Emission Optimization of High-Pressure Common Rail Diesel Engines

Li Qiang¹, Li Chengyun²

(1. Ningbo Geely Royal Engine Components Co., Ltd., Zhejiang Ningbo 315336;

2. Zhejiang Geely Powertrain Co., Ltd., Zhejiang Ningbo 315800)

Abstract: Model based calibration method was used on a high pressure common rail diesel engine for emission optimization under characteristic condition. The determination of DOE test samples and the establishment of engine emissions model were introduced in detail. Based on the optimized goals and method, the ECU parameters for optimal emissions were obtained. Compared with bench test results, it shows that model based calibration could better simulate the emissions of a real engine. The comparison between model based calibration and normal calibration indicates that the model based calibration could largely decrease the test samples, the distribution sample points is more rational, thus realizes better optimization result.

Key words: diesel engine; emission; calibration; DOE

0 引言

随着发动机的电气化程度不断提升, 越来越多的电子器件被应用到现代发动机上, 以改善发动机的性能和排放。这种趋势导致 ECU 须标定的变量不断增加, 标定难度呈几何级数增加。以本试验研究的一款样机为例, 为满足国六排放标准, 该发动

机应用了多项先进技术, ECU 内部须同时标定的参数多达 8 个, 传统的标定方法已无法满足项目对时间和成本的要求。ECU 标定参数之间的相关性极强, 即不同标定参数之间具有耦合关系, 所以, 传统的一次更改一个标定参数、固定其他参数不变的标定方法^[1], 由于其功能的局限性, 已无法优化出最佳 ECU 标定变量的组合。

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-06-25

作者简介: 李强(1986—), 工程师, 主要研究方向为发动机性能开发和排放控制, fildlove@163.com。

基于模型标定方法是以 DOE 理论为基础,通过对试验数据的拟合回归,找出数据间的数学关联关系,从而建立发动机的数学模型;然后据此数学模型进行发动机的标定参数优化。

本文试验样机为一款高压共轨电控国六排放柴油机,其基本参数如表 1 所示。

表 1 发动机基本参数

气缸数	4
排量 /L	1.6
EGR 系统	皮尔博格阀体, EGR 中冷器带旁通
增压器	博格华纳 VGT 增压器
点火顺序	1-3-4-2
电控系统	博世 EDC17 高压共轨电控系统
最高共轨压力/MPa	180
设定电控参数	增压压力、主喷正时、EGR 率、轨压、预喷间隔、预喷油量

本次试验采用的基于模型标定方法的流程如图 1 所示。

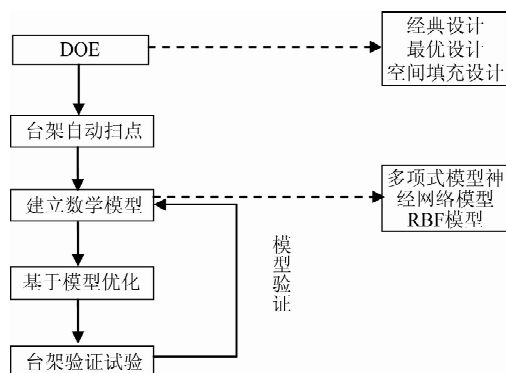


图 1 基于模型标定方法的流程图

1 DOE 试验样本确定

基于模型标定的方法^[2]是基于 DOE 理论发展而来,其核心是建立准确的发动机数学模型来实现性能预测。DOE 的主要任务包括:试验参数及其取值范围确认;试验样本约束边界确认;以及试验样本分布规则、样本容量确认。

1.1 试验参数及其取值范围

本次试验选取三个典型工况,如表 2 所示。

表 2 试验工况

序号	平均有效压力/MPa	扭矩/(N·m)
1	0.3	38.2
2	0.65	82.7
3	1	127.2

本次须要调整试验发动机的 ECU 参数范围和对应的水平数如表 3 所示。按照全因子设计方

法^[3],每个工况样本容量达到 24 000 组,如采用常规标定方法,将会消耗大量时间和成本。

表 3 优化试验标定参数范围定义

参数	1 500 r/min @ 0.3 MPa		2 000 r/min @ 0.65 MPa		2 400 r/min @ 1 MPa		水平
	起	止	起	止	起	止	
增压压力/hPa	1 060	1 150	1 300	1 650	1 730	2 350	10
主喷正时/°	-7	0	-7	2	-3	3	6
预喷间隔/μs	400	1 500	900	2 200	400	1 300	5
预喷油量/mg	1	2	1	2	1	2	2
共轨压力/MPa	40	90	90	140	100	149	5
每冲程新鲜气量/mg	220	270	360	460	560	680	8

1.2 试验样本约束边界定义

试验参数的边界约束主要描述发动机试验过程中的物理矛盾。VGT 和 EGR 阀是影响柴油机进气系统最主要的部件,在正式试验开始之前须对进气系统做摸底。摸底试验的标定参数选取参考表 3。在每个工况下分别确认发动机的进气量范围和增压压力范围以及二者间相互约束关系。不同工况下两者对应关系分别如图 2、图 3、图 4 所示,阴影部分即进气系统能够覆盖的有效区域。

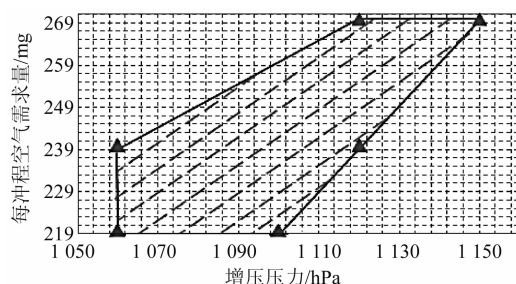


图 2 1 500 r/min@0.3 MPa 参数约束边界

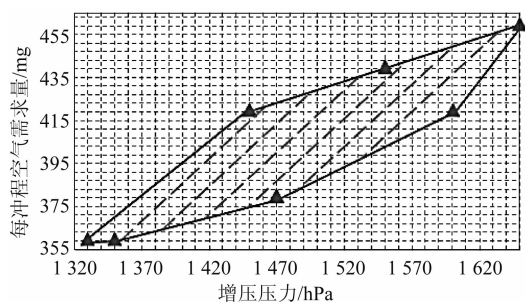


图 3 2 000 r/min@0.65 MPa 参数约束边界

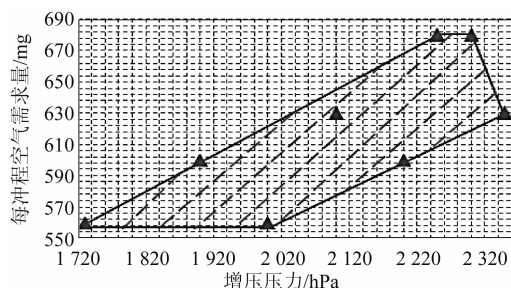


图4 2400 r/min@1 MPa 参数约束边界

另外,通过建立试验参数的边界约束,可以使试验样本点都分布在边界以内,实现有效样本数目最大化,为下一步建立模型提供更多信息量。

1.3 试验样本分布规则和样本容量

目前常用的采样点分布算法^[4-5]包括最优 DOE 设计算法和空间填充 (Space Filling) 算法。最优 DOE 设计算法按优化目标不同又分为 D-Optimal、V-Optimal 和 A-Optimal 算法,这三种算法更适用于多项式建模。最优设计算法强调有目的地去最优化某个统计学参数。而空间填充算法强调在试验次数和建模可靠性之间求得平衡,因此理论上效果不如最优设计算法,但它不须要事先选定模型,不须要对系统有所了解就可以设计试验。空间填充算法依据最大化最小间距 (Maximize Minimal Distance) 原则,利用多维空间的 2 点间距,用扩展勾股定理计算,如式 (1) 所示:

$$\Delta X_{ab} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ai} - X_{bi})^2} \quad (1)$$

式中: n 为空间维度,即参数数目; X_{ai} 和 X_{bi} 为 2 点的第 i 维坐标。用扩展勾股定理计算相邻两点间的距离,使试验空间中两点间距的最小值最大化,从而实现样本的均匀分布。本次试验采用空间填充算法实现试验样本最优分布。

样本容量和试验设计精度紧密相关。体现试验设计精度的参数是标准化方差 (Standardized Variance)。标准化方差与取点数的对应关系^[6]如图 5 所示。平均标准化方差控制在 0.25 左右,设计方差能够降低到测量误差的 1/4,此时样本容量在 120 左右。本次试验的样本容量如表 4 所示。

表4 样本数目分布

样本	数目
建模点	106
重复点	12
总点数	118

选取重复点的目的是验证台架以及发动机在试验过程中工作是否稳定,从而评估所采集的测量数

据是否能够满足建模要求。重复点数目可按照建模点数的 10% 来设定。重复点评价结果见表 5。

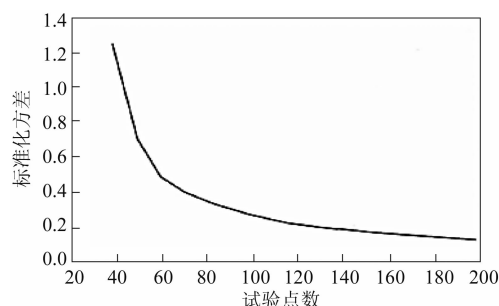


图5 试验取点与标准化方差的对应关系

表5 重复点评价

验证项目		1 500 r/min @ 0.3 MPa	2 000 r/min @ 0.65 MPa	2 400 r/min @ 1 MPa
		CoV / %	CoV / %	CoV / %
试验室环境	大气温度 / °C	5.0	3.8	8.8
	气压 / kPa	0.1	0.0	0.0
	大气湿度 / %	6.0	6.1	8.3
发动机状态	转速 / (r · min ⁻¹)	0.0	0.0	0.0
	扭矩 / (N · m)	0.6	0.2	0.2
	机油温度 / °C	0.4	1.6	0.6
	中冷后温度 / °C	4.5	1.3	1.1
	涡前温度 / °C	0.9	0.8	0.3
	涡前压力 / kPa	3.0	1.7	1.0
	IMEP / MPa	7.6	6.3	4.7
模型输出	比油耗 / (g · (kW · h) ⁻¹)	1.0	0.5	0.3
	CO / (g · h ⁻¹)	9.4	5.9	2.1
	HC / (g · h ⁻¹)	9.4	4.8	8.9
	NO _x / (g · h ⁻¹)	5.3	2.8	1.1
	Soot / (g · h ⁻¹)	8.7	8.2	5.2
	噪声 / dB	0.1	0.2	0.2

2 发动机排放模型建立

2.1 样本点试验数据采集

本次试验采用 AVL 公司的自动化试验数据采集工具 CAMEO 实现试验样本点自动采集和测试。CAMEO 通过对 ECU 中的对应参数 MAP 进行修改,实现对 ECU 数据的更新,从而获取建模所需的样本数据。

2.2 重复点数据质量验证

建立数学模型之前应对原始测量数据进行校验,考察重点在于重复点量化评价。重复点验证的量化评价指标是波动系数 (Coefficient of Variation)。波动系数计算如式 (2) 所示。其中, σ 为标准差, μ 为样本期望。波动系数代表测量的精确度,波动系数越大,测量效果就越差,反之亦然。

$$\text{CoV} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

通常要求重复点的一致性误差的 CoV 应小于 10%。

2.3 排放模型建立

2.3.1 模型评价指标

本次试验采用的数学模型结构如图 6 所示, 左边变量为模型输入, 右边变量为模型输出, 中间为数学模型。

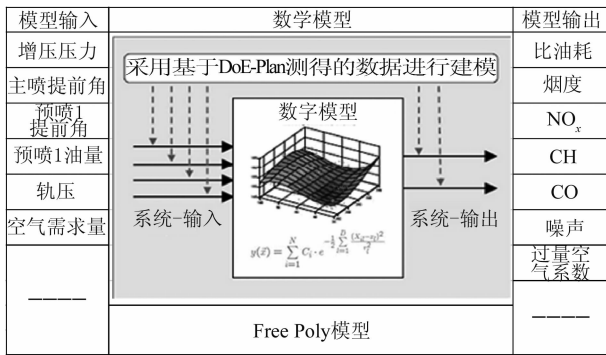


图 6 数学模型结构

发动机排放数学模型在用于优化之前须进行性能评估。常用的评价指标有决定系数 (Coefficient of Determination) γ^2 、自适应确定系数 γ_{adj}^2 、预测确定系数 γ_{pred}^2 及 3σ 指标^[7]。

决定系数 γ^2 表征了模型与测试数据的拟合精确度。

$$\gamma^2 = \frac{SS_{\text{reg}}}{SS_{\text{tot}}} = 1 - \frac{SS_{\text{err}}}{SS_{\text{tot}}} \quad (3)$$

式中: SS_{err} 为残差平方和, 反映随机测量误差对真实值的影响程度; SS_{tot} 为总偏差平方和。 γ^2 越接近 1, 表示模型参考价值越高。通常要求此值大于 0.85。

自适应确定系数 γ_{adj}^2 用于评判模型自由度数目 (模型项数) 是否合适。当 γ^2 与 γ_{adj}^2 的数值相近且接近 1, 表明模型拟合较好, 且模型阶数设置合理。通常要求此值大于 0.85。

$$\gamma_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{SS_{\text{err}}/(n-p)}{SS_{\text{tot}}/(n-1)} \quad (4)$$

式中: n 为测量数据的数目; p 为模型的自由度 (模型项数)。

预测确定系数 γ_{pred}^2 表征模型的预测能力, γ_{pred}^2 越接近 1 表明模型预测能力越强。通常要求此值大于 0.85。

$$\gamma_{\text{pred}}^2 = 1 - \frac{\text{PRESS}}{SS_{\text{tot}}} \quad (5)$$

式中: PRESS (Predictive Residual Sum of Squares) 为预测残差平方和, 表征模型的预测能力。

$$\text{PRESS} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{(i)})^2 \quad (6)$$

式中: n 为测量数据数目; $\hat{y}_{(i)}$ 为第 i 组样本的预测值。具体操作是: 依次将每一个样本测量数据从建模数据中删除, 用剩余的数据按照原有的模型建模, 并预测被去除点处的预测值, 得到位于该点的模型值与实测值的差, 最后求得所有测量点处差值的平方和。该方法保证每一个测量数据都有一次脱离建模的过程, 成为验证数据。该值越小, 表明模型的预测能力越强。

3σ 指标源于正态分布 (Normal Distribution) 原理, 模型的拟合残差 (Residuals) 就符合正态分布, 图 7 为典型正态分布曲线图。

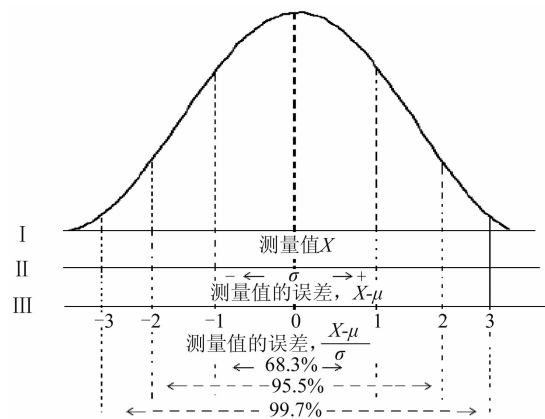


图 7 正态分布

图中: μ 为残差的期望; σ 为残差的标准差。则根据正态分布特点, 理论上残差将有 99.7% 的概率落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 的区间内, 超过该区间的残差就定义为奇异点, 将之删除以改善模型质量。

2.3.2 建立排放模型

根据上述模型评价指标, 在 CAMEO 软件中通过尝试不同种类模型来拟合样本数据, 以挑选出最优模型。本次试验最优模型为三阶自由多项式模型^[8], 模型评价指标如表 6。

2.3.3 基于模型的 ECU 参数优化

对标排量类似的欧 VI 标杆机的排放水平, 定义试验发动机的排放限值, 如表 7 所示, 并基于选中模型进行 ECU 参数优化。

排放优化涉及四种排放物和噪声、油耗指标, 所以必须采用目标优化思想进行折衷优化。由理论及经验可知: NO_x 和 Soot 是一对矛盾量, 是一种此消彼长的变化规律。所以优化过程适合用帕累托思想来实现排放折衷优化。帕累托优化^[9]原理如图 8 所示。

表 6 模型评价指标

模型		评价指标			
		γ^2	γ^2_{adj}	γ^2_{pred}	3σ
1 500 r/min @ 0.3 MPa	比油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	0.90	0.89	0.87	0.98
	CO/(g·h ⁻¹)	0.93	0.93	0.91	0.99
	HC/(g·h ⁻¹)	0.87	0.86	0.83	0.97
	NO _x /(g·h ⁻¹)	0.99	0.98	0.98	0.98
	Soot/(g·h ⁻¹)	0.92	0.92	0.89	0.97
	噪声/dB	0.94	0.93	0.90	0.98
2 000 r/min @ 0.65 MPa	比油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	0.97	0.96	0.95	0.99
	CO/(g·h ⁻¹)	0.96	0.96	0.95	0.98
	HC/(g·h ⁻¹)	0.90	0.88	0.86	0.98
	NO _x /(g·h ⁻¹)	0.98	0.98	0.97	0.98
	Soot/(g·h ⁻¹)	0.91	0.90	0.87	0.98
2 400 r/min @ 1 MPa	比油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	0.99	0.99	0.99	1.00
	CO/(g·h ⁻¹)	0.99	0.99	0.98	0.98
	HC/(g·h ⁻¹)	0.46	0.43	0.40	1.00
	NO _x /(g·h ⁻¹)	0.99	0.99	0.99	0.99
	Soot/(g·h ⁻¹)	0.98	0.98	0.98	0.98
	噪声/dB	0.98	0.97	0.97	0.98

表 7 发动机排放限值

排放物	限值		
	1 500 r/min @ 0.3 MPa	2 000 r/min @ 0.65 MPa	2 400 r/min @ 1 MPa
NO _x /(g·h ⁻¹)	2.7	13.0	35.2
Soot/(g·h ⁻¹)	0.6	1.9	3.8
HC/(g·h ⁻¹)	4.7	3.5	4.5
CO/(g·h ⁻¹)	31.8	27.7	25.6
噪声/dB	83.5	88.0	90.0

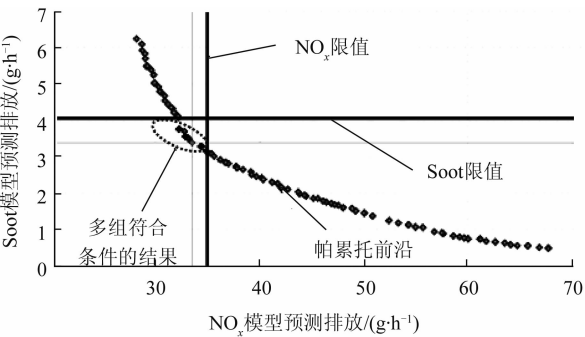


图 8 帕累托优化原理

本次排放将采用遗传算法^[10]进行优化。遗传算法是一种被广泛应用的模型求解方法，具有较快的计算速度和较高的精度。根据设定的优化目标和优化方法得到各工况下满足排放指标最优的 ECU 参数如表 8。

表 8 ECU 参数优化结果

最终折衷优化结果		1 500 r/min @ 0.3 MPa	2 000 r/min @ 0.65 MPa	2 400 r/min @ 1 MPa
ECU 参数	增压压力/hPa	1 070	1 360	1 950
	主喷正时 / (°)	-2.0	-1.0	-1.5
	预喷间隔 / μs	480	1 820	860
	每冲程预喷油量/mg	1.0	1.5	1.0
	共轨压力/MPa	46.4	140	148.5
	每冲程新鲜气量/mg	230	375	575

3 基于模型优化结果的台架验证

3.1 模型预测值与台架实测值对比

对基于模型优化得出的最佳 ECU 参数在台架上开展验证，以检验模型质量。实测结果与模型预测结果对比如表 9 所示。从结果中可以看出：台架实测值与模型预测值吻合度较高，且发动机各项排放指标除 CO 外均满足限值要求，而 CO 后期也可以通过催化氧化器进行处理。噪声指标作为参考，不作为强制优化指标。

表 9 模型预测值与实测值对比结果

优化指标	1 500 r/min @ 0.3 MPa			2 000 r/min @ 0.65 MPa			2 400 r/min @ 1 MPa		
	预测	实测	限值	预测	实测	限值	预测	实测	限值
NO _x /(g·h ⁻¹)	2.5	2.6	2.7	12	10.4	13	34.4	34.9	35.2
Soot/(g·h ⁻¹)	0.6	0.5	0.6	1.6	1.7	1.9	3.3	3.7	3.8
HC/(g·h ⁻¹)	4.4	3	4.7	2.4	2.6	3.5	2.1	4	4.5
CO/(g·h ⁻¹)	25.1	23.6	31.8	51.5	52.8	27.7	37.4	38.4	25.6
噪声/dB	83.3	83	83.5	92.7	92.8	88	91	91	90
比油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	274	273		237	237		235	236	

3.2 基于模型优化与常规优化对比

若采用常规标定方法来选定试验工况，须按照全因子组合调整电控参数以确定最优的参数组合。本文的常规标定有六个输入参数，每个参数还有若干水平数，最终每个工况总的试验次数为 24 000 次，而通过 DOE 却只须进行 118 次试验。由此可见，DOE 能够缩减试验数量，可变参数越多，试验工作量减少越明显。

通过与台架实测值对比，证明模型有很好的预测能力，通过多目标优化算法，能够确定最佳的 ECU 参数组合。相比常规标定最佳 ECU 参数组合必须从试验结果中挑选，基于模型优化得出的最佳参数组合可以是参数范围内的任意组合，所以基于模型优化的结果相对更好。

4 结 论

通过某款电控高压共轨增压中冷国六排放标准的柴油机排放性能的优化实例,介绍了基于模型标定的流程。

针对本试验样机,每个工况只须要 118 组样本数据;样本基于空间填充算法分布、三阶自由多项式模型;通过回归算法拟合样本数据建立数学模型;在此基础上完成了排放优化工作,极大地减少了试验工作量,并达到了预期优化效果。

参考文献

- [1] 姜坤,刘然,杨中华,等.基于 DOE 设计实现 DVVT 的高效台架标定 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44 (1): 60-63.
- [2] 倪计民,杜倩颖,周英杰,等. DOE 在高压共轨柴油机优化设计中的应用 [J]. 内燃机学报, 2009, 27 (3): 231-236.
- [3] 陈佳,徐源俊. 全因子试验设计在变速箱输出轴密封组件试验中的应用 [J]. 企业技术开发, 2014, 18 :

125-129.

- [4] FLINT S, CAWSEY P. Use of experimental design and two stage modeling in calibration generation for variable camshaft timing engines [M]. Germany, Expert Verlag, 2003: 44-49.
- [5] GUERRIER M, CAWSEY P. The development of model based method logics for gasoline IC engine calibration [C]. SAE Paper, 2004.
- [6] HABCHI C, VERHOEVEN D, HUU H C, et al. Modeling atomization and break-up in high pressure diesel sprays [C]. SAE Paper 970881, 1997.
- [7] 郭伟,张宇,张彤. 基于因子分析和 3 西格玛法则的中国能源安全评价 [J]. 西安工程大学学报, 2013, 27 (4): 648-654.
- [8] 李军成. 一类可调控的三次多项式曲线 [J]. 计算机工程与科学, 2010, 32 (4): 52-56.
- [9] 刘一涛,张楠,姜涛,等. 基于帕累托最优配电系统多目标规划研究 [J]. 电力与能源, 2016, 37 (6): 669-673.
- [10] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1999.

(上接第 4 页)

(1) 随海拔的升高,各工况下的最高燃烧压力均呈现下降趋势,且海拔越高,发动机负荷越低时降幅越明显;最高燃烧压力对应相位随海拔的升高而推迟,但变化幅度较小。

(2) 各工况下,燃烧始点和燃烧重心均随海拔的升高而推迟,且燃烧持续期延长;在高负荷工况下,以上特征参数受到海拔的影响较小。

(3) 最大压力升高率和最大瞬时放热率在低负荷工况下随海拔的升高而增大;在高负荷工况下随海拔升高而减小。

参考文献

- [1] 周广猛,刘瑞林,董素荣,等. 柴油机高原环境适应性研究综述 [J]. 车用发动机, 2013 (4): 1-5.
- [2] ZHANG H L, ZHUGE W L, ZHANG Y J. Study of the control strategy of the plateau self-adapted turbocharging system for diesel engine [C]. 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress. 2008: 15910-15919.
- [3] 刘瑞林. 柴油机高原环境适应性研究 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2013: 2-4.
- [4] 朱振夏,张付军,马朝臣,等. 柴油机增压技术在高原环境下的应用 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2014, 43 (4): 73-80.

- [5] YANG H Q, SHUAI S J, WANG Z, et al. Effect of injection timing on PPCI and MPCI mode fueled with straight-run naphtha [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2014, 136 (3): 1-8.
- [6] 利奇. 柴油机可调两级增压系统变海拔自适应控制研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2015: 2-3.
- [7] 姜泽浩,张付军,董长龙,等. 涡轮增压柴油机高原性能试验研究 [J]. 车用发动机, 2014 (6): 59-63.
- [8] HE C, GE Y S, MA C C, et al. Emission characteristics of a heavy-duty diesel engine at simulated high altitudes [J]. The science of the total environment, 2011, 409 (17): 3138-3143.
- [9] 周磊,刘瑞林,刘振明,等. 高压共轨柴油机不同海拔(大气压力)适应性试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37 (12): 2690-2696.
- [10] LIU R L, ZHOU G M, DONG S R, et al. Experimental study on performance of turbocharged diesel engine at high altitude [C]. International Conference on Electric Information and Control Engineering. IEEE, 2011: 4188-4190.
- [11] 许翔,刘楠,刘刚. 高压共轨柴油机高海拔热平衡模拟试验研究 [J]. 车用发动机, 2016 (6): 52-56.
- [12] 周广猛,刘瑞林,董素荣,等. 高压共轨柴油机高海拔燃烧温度特性 [J]. 内燃机学报, 2016, 34 (4): 296-303.