

基于混合试验设计生物柴油发动机比油耗优化

楼狄明, 房亮, 胡志远, 谭丕强

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 在一台国V排放高压共轨柴油机上燃用20%生物柴油混合燃料,通过调节共轨压力、主喷定时、预喷定时、预喷油量、后喷定时和后喷油量等6个喷油控制参数,优化标定生物柴油专用发动机的性能。选择混合试验设计方法制定了6因素同时调节的全局优化试验方案,分别针对低、中、高转速下的低、中、高负荷9个工况点进行试验。通过该方法拟合的发动机油耗数学模型需要的数据样本容量较小且精度更高。以油耗最小为单目标,通过混合优化算法求解各工况下的全局最优喷油参数组合。优化后发动机比油耗(BSFC)相比原机各工况点平均降幅2.71%。混合试验设计标定方法弥补了传统发动机优化标定方法单因素逐一优化所导致的局部最优特性。

关键词: 混合试验设计; 喷油参数; 多因素; 全局优化; 柴油机

中图分类号: TP1

文献标志码: A

Brake Specific Fuel Consumption Optimization of Biodiesel-diesel Blends Engine Based on Hybrid Design of Experiment

LOU Diming, FANG Liang, HU Zhiyuan, TAN Piqiang

(College of Automotive Studies, Tongji University Shanghai 201804, China)

Abstract: A national V emission high pressure common-rail diesel engine filled with 20% biodiesel-diesel blends was optimized by adjusting the 6 injection parameters (P_{fin} , T_{fin} , T_{int} , Q_{pre} , T_{inta} , Q_{after}). A multi-factor global optimization plan was designed by using hybrid Design of Experiment (DoE). 9 different operating points with different speeds and torques were tested. Less data of the sample sizes were in need for a better accuracy to fit a engine Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) model by this method. With the goal of minimum BSFC, the global best combination of injection parameters was calculated with the hybrid optimization

algorithm. After the optimization, the BSFC of the biodiesel engine was lessened than before by an average of 2.71%. The hybrid Design of Experiment (DoE) method could cover the shortage of the single factor method of calibration which might cause the local optimum.

Key words: hybrid Design of Experiment (DoE); injection parameters; multi-factor; global optimization; diesel engine

近年来,空气污染一直是困扰影响中国社会发展的重要因素之一。2013年9月12日,国务院发布《大气污染防治行动计划》^[1],又称“空气国十条”,对颗粒物排放进行了严格的限制。2014年4月5日,上海市环境监测中心公开数据表明,以上海市为例,交通方面PM_{2.5}的贡献率达到25%^[2]。面对日益严峻的空气污染和严格的排放法规,高压共轨柴油发动机及其替代燃料技术得到世界的广泛关注。

以生物柴油为代表的替代燃料由于其含氧,可以明显降低发动机的颗粒物排放,但相应的会增加氮氧化物的排放^[3-6];同时由于燃料的热值相对较低,发动机油耗略微增加。因此需要在原有高压共轨控制参数的基础上对生物柴油专用发动机进行合理的优化标定,才可以使得氮氧化物(NO_x)排放得到控制并具有较好的燃油经济性^[7-8]。

国内外现有的发动机优化标定方法多为对各喷油参数依照其重要性进行逐一单因素优化标定,不考虑各喷油参数之间的交互作用,很容易形成局部最优,不能够获得最佳的优化结果^[9-10]。本文在高压共轨柴油机上燃用20%生物柴油混合燃料,在不对原机进行任何结构改造的情况下,通过混合试验设计方法对不同喷油参数的多因素全局优化,以计算确定发动机各性能全局最优点。

收稿日期: 2015-07-07

基金项目: 上海市科技攻关计划(16DZ1203001)

第一作者: 楼狄明(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为发动机替代燃料与性能优化研究。

E-mail: loudiming@tongji.edu.cn.

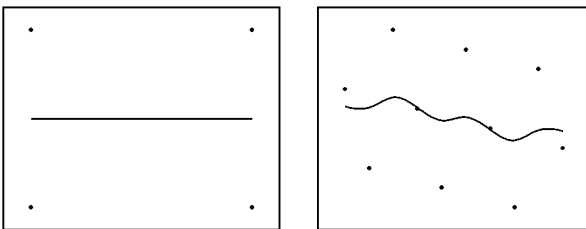
通讯作者: 房亮(1988—),男,硕士,主要研究方向为替代燃料发动机技术及优化。E-mail: fangliang@tongji.edu.cn.

1 试验设计

试验设计(Design of Experiment, DoE)是数理统计学的一个重要分支,是进行科学研究的重要工具.经济、科学、合理的安排试验,有效地控制试验误差干扰并减少试验次数,最大限度地获得丰富而可靠的资料.试验设计方法主要分为以析因设计、正交设计、响应曲面设计、混料设计和均匀设计为代表的经典试验设计方法,和以最优设计、空间填充设计等为代表的现代试验设计方法.

传统试验设计方法算法简单,但相应的试验次数较多,且对试验结果的分析能力有限.随着数学算法和发动机标定技术的发展,以空间填充设计和 V 最优设计为代表的算法逐渐得到重视^[11].谢晖等人^[12]研究了空间填充设计在电控柴油机标定中的应用,试验结果表明使用空间填充法基于输入输出性能数据库建立的响应模型,经验证具有很好的预测精度且满足建模要求.

混合试验设计(Hybrid DoE)是一种新兴的试验设计方法,其原理就是将多种试验方法科学地综合应用,以弥补单一试验设计方法所带来的缺陷和问题.图 1 所示为最优设计(图 1a)和空间填充设计(图 1b)试验点分布图.从图 1 可以看到最优设计试验点分布主要集中在边界点,而空间填充设计的试验点分布均匀,但在边界点的表达能力较弱.美国 Naval Postgraduate School 的学者提出将空间填充设计与最优设计相结合,弥补了空间填充设计的边界点拟合不准切和最优设计在设计空间内部试验点较少的缺陷.



a 最优设计

b 空间填充设计

图 1 最优设计和空间填充设计试验点分布图

Fig. 1 The distribution of V-optimization design and space-filling design points

表 1 为常用 DoE 试验设计方法的比较.本文采用混合试验设计方法,以空间填充设计为基础与 V 最优设计相结合,弥补了各自方法的不足,达到较优模型拟合精度的同时少量增加试验数量.

表 1 常用 DoE 试验设计方法的比较

Tab.1 The comparison of different DoE methods	
DoE 方法	优势及劣势
全因子试验	优势:模型拟合最可靠 劣势:试验次数过多
无交互正交设计	优势:均匀分布,整齐可比 劣势:无交互作用,只适用于分析因素的重要性的选择特定试验组合
有交互正交设计	优势:均匀分布,整齐可比 劣势:只适用于分析因素的重要性的选择特定试验组合
响应曲面设计	优势:能够准确求得最优解 劣势:需要先通过大量试验找出最优区域,局部最优解
空间填充设计	优势:试验点均匀分布在试验空间内 劣势:对边界点拟合效果不佳
V 最优设计	优势:在确定最优模型时可以较好地拟合 劣势:试验点分布不均匀,多适用于线性或非线性的拟合
混合试验设计(空间填充+V 最优设计)	优势:无需确定最优模型的同时能够保证边界点拟合精度 劣势:试验次数略有增加,模型易过拟合

2 试验方案

2.1 试验台架

试验在一台国 V 排放电控高压共轨涡轮增压柴油发动机上进行,采用“转速-转矩”模式控制保证高压共轨燃油喷射系统的总喷油量不变,通过 Schenck 发动机台架试验系统、Horiba 发动机排气采样分析系统和 ELPI 发动机排气颗粒物粒径分布测试系统测量不同喷油参数下的性能及排放特性.

2.2 试验燃油

考虑到中国国情和未来发展需要,实验使用的是由餐厨废油为原料制备的生物柴油.生物柴油发动机所使用的是体积比 80% 的国 V 柴油与体积比 20% 的生物柴油混合燃料(以下简称 B20).所调配的 B20 混合燃料各项理化指标经过检测机构检测,并以此计算生物柴油专用发动机比油耗(BSFC).

2.3 试验方案

本文研究的是高压共轨柴油机燃油喷射系统多次喷射的优化标定,在原有发动机 ECU 喷油控制参数的基础上,主要调节的喷油参数有共轨压力(P_{fm})、主喷定时(T_{fm})、预喷间隔(T_{int})、预喷油量(Q_{pre})、后喷间隔(T_{inta})、后喷油量(Q_{after})这 6 个因素.图 2 所示为高压共轨燃油喷射系统多次喷射示意图^[13].

使用 Matlab 软件中的 Model-based Calibration (MBC)工具箱^[14],设置实验点分布边界条件.在保证试验精度的前提下,尽可能地减少试验次数,以空

间填充设计为主在实验空间内均匀分布实验点,再以 V 最优设计为辅对实验空间边界点进行补充完善.在一个 6 因素同时变换的 6 维空间中不同实验设计方法均有最低实验点个数要求,经过多次反复尝试,本文分别针对某一工况的 6 个喷油参数进行 64 点的空间填充试验设计和 28 点的 V 最优试验设计,并对极端试验点进行筛选,实验数据点空间分布图如图 3 和图 4 所示.

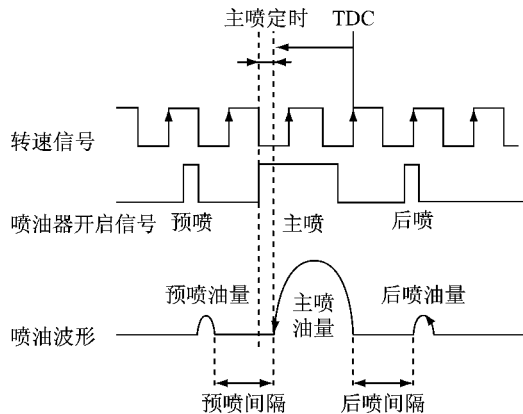


图 2 高压共轨燃油喷射系统多次喷射示意图
Fig.2 The multiple-injection diagram of the high pressure common rail injection system

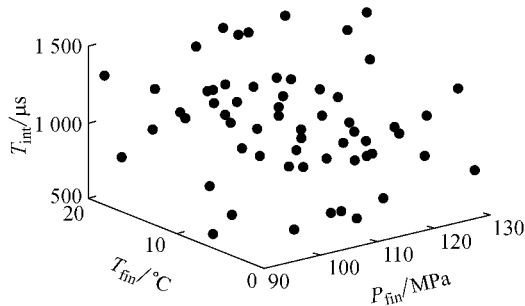


图 3 64 点空间填充设计试验点分布
Fig.3 The distribution of 64 space-filling design points

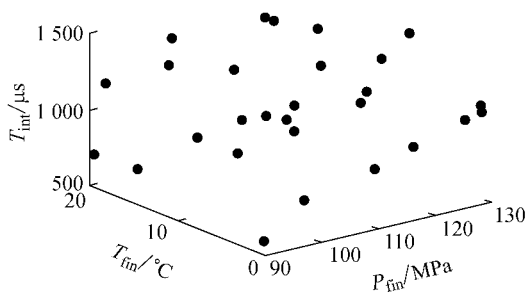


图 4 28 点 V 最优设计试验点分布
Fig.4 The distribution of 28 V-optimize design points

最终将某一工况两种试验方法组合形成 90 个点左右的混合实验设计方案.

欧洲稳态测试循环(ESC)十三工况点是目前发

动机排放稳态测试的常用方法,由于实验点较多且方法类似,因此仅选取 ESC 工况除怠速和 100% 负荷工况以外的低、中、高转速下的低、中、高转矩 9 个工况点进行混合实验设计,最终形成生物柴油专用发动机比油耗优化标定的试验方案,实验工况点如表 2 所示.

表 2 选取 9 个代表工况点的转速、转矩和负荷
Tab.2 The speed, torque and load of the 9 chosen operating points

工况点	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/Nm	负荷/%
1	1337	254	25
2	1337	508	50
3	1337	762	75
4	1657	253	25
5	1657	506	50
6	1657	758	75
7	1976	227	25
8	1976	454	50
9	1976	681	75

3 试验优化

3.1 模型拟合

在试验台架上对试验方案各点进行 2—3 次稳态测试,记录各个工况点下不同喷油参数组合相应的发动机性能数据.

使用 MBC 工具箱的 Model Fitting 工具,建立一个 Point-by-Point 的发动机优化标定模型,利用混合径向基函数神经网络算法 (Hybrid-RBF) 对每个工况点进行模型拟合,通过预测均方根误差、赤池信息量、贝叶斯信息量及广义交叉验证等一系列方法对比筛选出 6 个喷油参数各工况点下发动机各性能的最优响应拟合模型,最大程度上提高模型拟合精

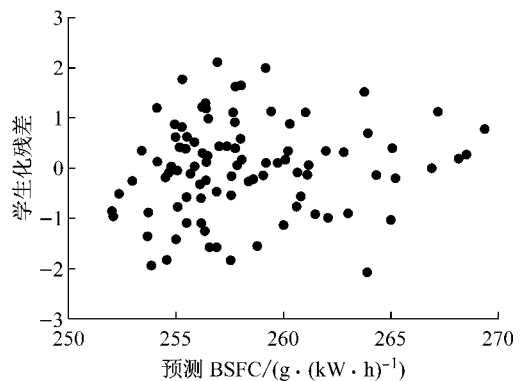


图 5 1 657 r·min⁻¹ 转速 253 Nm 转矩工况下 BSFC 模型残差

Fig.5 The studentized residuals of BSFC under 1 657 r·min⁻¹ and 253 Nm working condition

度并避免过拟合情况发生^[15-16]. 图 5 所示为 1 657 r · min⁻¹ 转速 253 Nm 转矩工况下 BSFC 模型学生化残差. 由图 5 可以看出, 模型拟合精度整体较高, 各试验点拟合后内学生化残差均小于 3^[17].

3.2 6 因素经济性分析

分别选取不同工况下的 BSFC 最佳拟合模型, 研究生物柴油发动机比油耗随各喷油参数单因素变化的变化规律. 选取 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况阐述分 6 个喷油参数对发动机比油耗的影响.

图 6 所示为 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下 BSFC 与主喷定时和共轨压力的关系. 在 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下, BSFC 随主喷提前角的增大先减小再增大, 最低点在 $T_{fm} = 5^{\circ}\text{C}$ 左右, 同时当主喷提前角小于 5°C 时, BSFC 随共轨压力 (MPa) 的增加而略微减小, 当主喷提前角大于 5°C 时, BSFC 随共轨压力的增加而逐渐增加. 这是主喷提前角过小时, 发动机最高爆发压力点在上止点之后, 使得燃烧产生的能量没有充分利用, 当主喷提前角过大时使得最高爆发压力点在上止点之前一段时间, 使得燃烧产生的能量做负功影响了发动机的油耗, 而共轨压力升高, 使得主喷提前角对 BSFC 的影响更加明显. 因为 BSFC 随 T_{fm} 和 P_{fm} 的变化是非线性的, 因此模型存在 T_{fm}^2 和 P_{fm}^2 项, 同时 BSFC 的等高线不与坐标轴平行, 因此模型存在 P_{fm} 和 T_{fm} 的二次交互作用项. 由此可见在 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下应采用较小的轨压和较小的主喷提前角以获得较低的 BSFC.

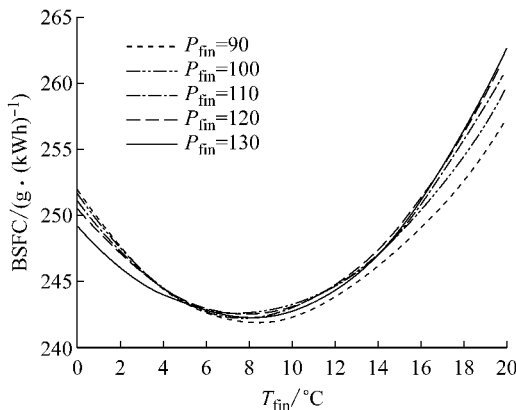


图 6 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下 BSFC 与主喷定时和轨压的关系

Fig. 6 The effect of P_{fm} and T_{fm} on BSFC under 1 337 r · min⁻¹ and 254Nm working condition

图 7 所示为 1 337 r · min⁻¹ 转速 254 Nm 转矩

工况下 BSFC 与预喷油量 Q_{pre} 和预喷间隔 T_{int} 关系. 在 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下, 当预喷油量 ($\text{mm}^3 \cdot (\text{st})^{-1}$) 为 0 时, 随着预喷间隔的增加, BSFC 基本不变, 当预喷油量不为 0 时, BSFC 随预喷间隔的增加逐渐增加. 随着预喷油量的增加, BSFC 先减少在增加. 这是由于预喷间隔逐渐增大会使得主燃烧和预喷射燃烧的间隔增加, 预喷燃烧产生的能量反而会阻碍到发动机的压缩行程造成发动机效率降低, 因此 BSFC 上升, 但是这种现象在预喷油量较少时并不明显, 而随着预喷油量的增加愈发明显; 同时由于预喷射的引入使得发动机缸内燃烧得到改善, 增加了缸内的湍流并缩短了主喷滞燃期, 降低主喷速燃期的温度和压力的急剧上升, 因此降低了 BSFC, 但是过多的预喷油量会使得主燃烧提前因此降低了发动机功率. 这说明在 1 337 r · min⁻¹ 转速 254 Nm 转矩工况下, 靠近主喷射增加少量预喷射可以明显改善发动机的油耗, 发动机高压共轨系统应当采用预喷射.

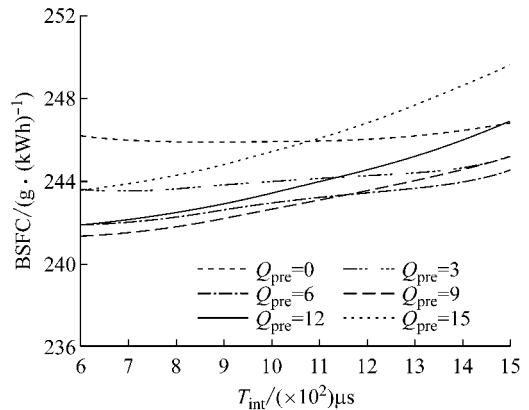


图 7 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下 BSFC 与预喷油量 Q_{pre} 和预喷间隔关系 T_{int}

Fig. 7 The effect of T_{int} and Q_{pre} on BSFC under 1 337 r · min⁻¹ and 254Nm working condition

图 8 所示为 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下 BSFC 与后喷油量 Q_{after} 和后喷间隔关系. 在 1 337 r · min⁻¹ 转速 254Nm 转矩工况下, 当后喷油量为 ($\text{mm}^3 \cdot (\text{st})^{-1}$) 为 0 时, BSFC 基本不变, 随着后喷间隔的增加, BSFC 逐渐减少, 并且随着后喷油量的增加, BSFC 逐渐增加. 这是由于在低转速转矩工况, 发动机喷油量较小, 燃油在主喷射速燃期阶段能够完全燃烧, 同时后喷的引入会减小主喷射油量, 因此相应的减少了缸内的最大爆发压力和最高温度, 再引入近后喷射会使得后喷到缸内的燃油不能充分燃烧, 因此使得发动机的 BSFC 增高; 同时当后喷间

隔较小时,会使得更多的燃油在补燃期进行燃烧,这会使得燃油燃烧的能量利用率降低,BSFC 增加,当后喷间隔较大时,后喷入缸内的燃油可以和与过量的空气继续反应加热使得缸内温度升高以降低颗粒物的形成.这说明在 $1\ 337\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速 $254\ \text{Nm}$ 转矩工况,后喷射起不到改善燃烧的作用,高压共轨系统在满足排温限制的前提下应尽量少用后喷射.

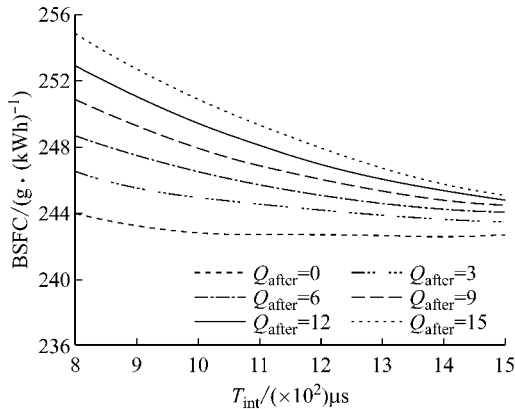


图 8 $1\ 337\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速 $254\ \text{Nm}$ 转矩工况下 BSFC 与后喷油量和后喷间隔关系

Fig. 8 The effect of T_{int} and Q_{after} on BSFC under $1\ 337\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ and $254\ \text{Nm}$ working condition

3.3 优化方程

该试验发动机原机采用单一选择性催化氧化还原技术(SCR)的后处理方式,这是现阶段中国柴油机市场的主流后处理方式.国 V 排放生物柴油发动机就采用催化型颗粒捕集器(CDPF)加单一选择性催化还原技术(SCR)的后处理技术,能够最好的控制 NO_x 和颗粒物的排放,也由于采用了这种先进的后处理技术,发动机高压共轨燃油供给系统也无需将颗粒物排放降至足够低导致 NO_x 排放很高.

由于 CDPF 的颗粒捕集效率高达 90%,因此可以重新标定高压共轨燃油系统使得尽量降低发动机

油耗的同时尽量降低 NO_x 的排放量,发动机颗粒物排在经过后处理装置后能够达到法规要求,进而大大减少了尿素的消耗量,也能减小尿素箱的体积,使得车辆添加尿素的周期变长便于相关部门管理,减少尿素使用量以降低使用成本和氨泄露的风险,减小尿素箱体积使得车辆使用空间更大.

如表 3 所示 CO_{lim} , HC_{lim} , PM_{lim} , PN_{lim} , $\text{SmokeAVG}_{\text{lim}}$ 和 $\text{SmokePeak}_{\text{lim}}$ 分别为为法规要求的颗粒物质量浓度(PM),颗粒物数量浓度(PN),烟度均值(SmokeAVG),烟度峰值(SmokePeak),一氧化碳(CO)和总碳氢(HC)的排放限值.由于所采用 CDPF 的转化率可以达到 90%以上,所以 PM 和 PN 的限制为法规要求的 10 倍.由于 CDPF 和 SCR 的再生和催化氧化还原反应需要一定的排气温度,所采用的后处理装置要求排温在 $230 \sim 600\ ^\circ\text{C}$ 之间,因而要求排气温度限值 $T_{\text{lim}} = 230\ ^\circ\text{C}$.

表 3 优化方程的优化目标及约束条件

Tab.3 The optimal object and constraint conditions of the optimization functions

优化目标	BSFC 最小 NO_x 排放最小
约束条件	PM 排放 $\leq 10\ \text{PM}_{\text{lim}} = 0.2\ \text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ SmokeAVG 排放 $\leq \text{SmokeAVG}_{\text{lim}} = 0.5 \cdot \text{m}^{-1}$ CO 排放 $\leq \text{CO}_{\text{lim}} = 1.5\ \text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ HC 排放 $\leq \text{HC}_{\text{lim}} = 0.46\ \text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 排气温度 $T_{\text{exh}} \geq T_{\text{exh}_{\text{lim}}} = 230\ ^\circ\text{C}$

3.4 优化结果及分析

常用的优化算法有信赖域法、遗传算法、模式搜索法和法线-边界交集算法.本文主要采用混合优化算法,针对 P_{fin} , T_{fin} , T_{int} , Q_{pre} , T_{inta} 和 Q_{after} 这 6 个因素进行优化标定计算,选取最佳组合方案,先根据不同的起点利用 GA 遗传算法选定两个局部最优解,然后利用 fopton 信赖域算法求解 BSFC 最小的全局最优解^[18].

表 4 BSFC 在 9 个工况点的 GA 初步最优解

Tab.4 The GA optimal solution of BSFC under 9 different working conditions

工况	$P_{\text{fin}}/\text{MPa}$	$T_{\text{fin}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{int}}/\mu\text{s}$	$Q_{\text{pre}}/\text{mm}^3 \cdot (\text{st})^{-1}$	$T_{\text{inta}}/\mu\text{s}$	$Q_{\text{after}}/\text{mm}^3 \cdot (\text{st})^{-1}$	原机 BSFC/ $\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	BSFC/ $\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$
1	128.48	1.28	1 028.45	6.83	1 243.45	0	242.63	241.52
2	99.12	7.12	1 467.22	0	1 487.09	15.00	209.84	210.82
3	135.66	5.69	783.86	14.88	1 116.28	0	202.06	202.20
4	122.50	2.75	976.08	9.98	851.67	9.98	252.29	254.36
5	117.13	8.25	1 170.16	0	978.58	9.98	214.88	214.13
6	125.42	9.44	897.35	0	961.40	0	206.27	206.70
7	100.00	3.89	602.90	9.99	1308.87	0	285.30	269.51
8	144.87	8.77	611.90	0	839.72	9.98	231.68	228.53
9	152.10	9.23	1321.41	0	889.51	0	217.35	216.89

表 5 BSFC 在 9 个工况点的 fopton 全局最优解

Tab.5 The fopton optimal solution of BSFC under 9 different working conditions

工况	P_{fm}/MPa	$T_{fm}/^{\circ}\text{C}$	$T_{int}/\mu\text{s}$	$Q_{pre}/\text{mm}^3 \cdot (\text{st})^{-1}$	$T_{inta}/\mu\text{s}$	$Q_{after}/\text{mm}^3 \cdot (\text{st})^{-1}$	原机 BSFC/ $\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	BSFC/ $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$
1	129.95	5.22	730.36	10.06	1 213.52	0.00	242.63	236.84
2	130.00	8.56	1 500.00	0.00	1 450.55	15.00	209.84	208.94
3	145.00	8.70	854.06	15.00	1 500.00	0.00	202.06	199.79
4	129.65	8.93	600.00	9.99	800.00	9.98	252.29	244.70
5	105.00	13.61	1 500.00	0.00	800.00	9.98	214.88	208.40
6	150.00	12.28	1 063.98	0.00	1 499.86	0.00	206.27	197.03
7	100.00	4.24	600.00	9.99	1 499.86	0.00	285.30	268.46
8	147.62	12.88	600.00	0.00	800.00	9.98	231.68	225.99
9	148.50	14.08	1 391.95	0.00	1 025.79	0.00	217.35	213.94

依托选定的发动机各工况 BSFC 模型,根据优化方程,以各因素取值范围中点为起始点,以最小 BSFC 为目标,设置 NO_x 排放量上限在一个较小的范围内,利用 GA 遗传算法在整个试验空间寻找初步全局最优解.表 4 所示为 BSFC 在 9 个工况点的最优解结果,令 Q_{pre} 和 Q_{after} 在小于 1.5 时认为没有喷油.由表 4 可见通过 GA 遗传算法初步优化后,发动机在各工况点下的 BSFC 相比于原机燃用 B20 均有所下降,但幅度较小.

然后再以优化结果点为起始点,依旧以最小 BSFC 为目标,限制 NO_x 排放量较小,利用 fopton 信赖域法,在 GA 遗传算法找到的初步全局最优解附近找到一个单目标优化全局最优点. BSFC 的单目标优化结果如表 5 所示,为 BSFC 在 9 个工况点的 fopton 全局最优解.从表 5 可以看出,在 GA 遗传算法的基础上,再经过 fopton 信赖域算法得到的最优解,其对应的 BSFC 相比于 GA 遗传算法的结果均有略微减小,且对应的预喷射和后喷射策略基本相同,说明 GA 遗传算法可以在全局范围内搜索最优解附近区域,但得到的结果不一定是准确的.

图 9 所示为单目标优化前后 BSFC 的变化情况.从图 9 可以看到,经过 GA 初步优化后,在各工

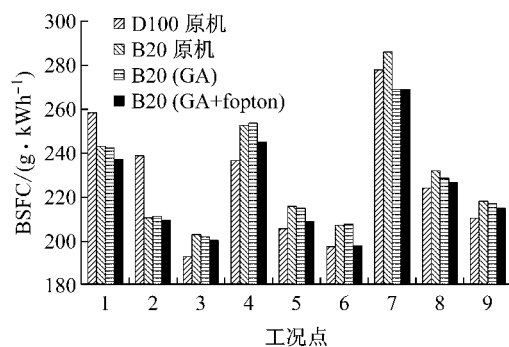


图 9 单目标优化前后 BSFC 的变化情况

Fig.9 The characteristic of BSFC after single object optimization

况下发动机燃用 B20 的 BSFC 略微下降;再经过 fopton 优化后,在第 2、3、7、8 工况点 BSFC 随略有减小但变化幅度很小,而在 1、4、5、6、9 这几个工况点下 BSFC 均有较明显的减少,说明 GA 遗传算法可以在全局范围内搜索最优解并不是全局最优解,而是最优解附近区域或局部最优解.在各工况下发动机燃用 B20 的 BSFC 明显低于发动机燃用 B20 的原机状态,并与发动机燃用 D100 时的 BSFC 非常接近,在低转速的工况点甚至优于燃用 D100 的原机状态.相比于燃用 B20 原机状态,经过单目标组合优化 (GA+fopton) 后,各工况点 BSFC 平均降幅达到 B20 原机的 2.71%.

4 结论

替代燃料是目前缓解石油危机的一种有效途径,生物柴油作为一种的柴油替代燃料,其推广和应用必不可少的要优化设计生物柴油专用发动机.通过对共轨压力、主喷定时、预喷间隔和油量、后喷间隔和油量这 6 个主要的喷油参数进行同时优化标定,可以最大程度上考虑发动机各喷油参数之间的交互作用影响,使得生物柴油发动机在动力性不变的前提下拥有较好的经济性和较低的排放.

(1) 选用空间填充设计和 V-最优设计相结合的混合实验设计方法,可以最大程度上弥补传统试验方法的不足,能够设计出较为合理的发动机多因素同时全局优化试验方案.

(2) 通过混合实验设计不同工况点的试验方案,选取混合径向基函数神经网络模型可以较好的拟合各喷油参数与发动机性能相应的关系,通过各类评价指标选取较准确的模型组合.

(3) 通过对拟合模型的分析可以定性推断出不同工况下发动机为获得不同性能时,各喷油参数标定的大致方向.

(4) 通过 GA 遗传算法与信赖域算法相结合的混合优化算法可以较好的得到全局最优解,避免局部最优结果的产生. 优化后发动机比油耗在不同工况下平均降幅 2.71%.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 大气污染防治行动计划[J]. 环境经济, 2013, 117(9): 6.
The State Council of the People's Republic of China. The plan of atmospheric pollution prevention [J]. Environment Economy, 2013, 117(9): 6.
- [2] 杜希萌. 北上广雾霾元凶已被初步掌握, 环保部不日将发数据[EB/OL]. [2014-04-05]. <http://www.sd.xinhuanet.com/>.
DU Ximeng. The primary cause of haze has been known in Beijing, Shanghai and Guangzhou, the environment protection administration will publish the data soon [EB/OL]. [2014-04-05]. <http://www.sd.xinhuanet.com/>.
- [3] Ng J H, Ng H K, Gan S. Advances in biodiesel fuel for application in compression ignition engines [J]. Clean Technologies & Environmental Policy, 2010, 12(5): 459.
- [4] Tompkins B T, Song H, Bittle J A, *et al.* Efficiency considerations for the use of blended biofuel in diesel engines [J]. Applied Energy, 2012(98): 209.
- [5] 楼狄明, 沈航泉, 胡志远, 等. 基于不同原料生物柴油混合燃料的发动机性能研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(1): 29.
LOU Diming, SHEN Hangquan, HU Zhiyuan, *et al.* Research on performance of diesel engine operating on different biodiesel blends[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(1): 29.
- [6] 楼狄明, 石健, 胡志远, 等. 发动机燃用麻疯树油制生物柴油的非常规排放特性研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(5): 69.
LOU Diming, SHI Jian, HU Zhiyuan, *et al.* Research on unregulated emission in diesel engine fueled with biodiesel from jatropha curse oil [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(5): 69.
- [7] Banapurmath N R, Tewari P G, Gaitonde V N. Experimental investigations on performance and emission characteristics of Honge oil biodiesel (HOME) operated compression ignition engine[J]. Renewable Energy, 2012(48): 193.
- [8] Kaushik Acharya, Mufaddel Dahodwala, Walter Bryzik, *et al.* Effect of different biodiesel blends on autoignition [C]// Combustion, Performance and Engine-Out Emissions in a Single Cylinder HSDI Diesel Engine. [S. l.]: SAE, 2009; 2009-01-0489.
- [9] 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.
NI Jimin, DU Qianying, ZHOU Yingjie, *et al.* Application of DoE in common rail diesel engine optimization design [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(3): 231.
- [10] Murali Manickam, Mithun Kadambamattam, Mathew Abraham. Combustion characteristics and optimization of neat biodiesel on high speed common rail diesel engine powered SUV [C]//SAE. [S. l.]: SAE, 2009; 2009-01-2786.
- [11] Roselinde Kessels, Bradley Jones, Peter Goos, *et al.* An efficient algorithm for constructing bayesian optimal choice designs[J]. Journal of Business & Economic Statistics, 2009, 27(2): 279.
- [12] 谢辉, 陈礼勇. 电控柴油机标定中空间填充试验设计的应用研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37(3): 66.
XIE Hui, CHEN Liyong. Application research on space-filling experiments design in calibration of diesel engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2008, 37(3): 66.
- [13] 房亮. 国 V 排放生物柴油专用发动机性能优化研究[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2014.
FANG Liang. Experimental research on performance optimization of the national V emission biodiesel engine [D]. Shanghai: College of Automotive Studies of Tongji University, 2014.
- [14] 周广猛, 刘瑞林, 李骏, 等. 基于模型的电控发动机标定技术 [J]. 汽车技术, 2011(1): 1.
ZHOU Guangmeng, LIU Ruilin, LI Jun, *et al.* Model-based calibration techniques for electronically controlled engine [J]. Automobile Technology, 2011(1): 1.
- [15] 周家斌, 王允宽, 杨桂英. 关于预测误差平方和最小准则的几点看法[J]. 数理统计与管理 1996, 15(3): 43.
ZHOU Jiabin, WANG Yunkuan, YANG Guiying. A few thoughts about the PRESS and minimum criterion [J]. Mathematical Statistics and Management, 1996, 15(3): 43.
- [16] Burnham, Anderson. Model selection and multimodel inference: a practical information—theoretic approach [M]. 2nd ed. [S. l.]: Springer-Verlag, 2002.
- [17] Kenneth P Burnham, David R Anderson. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach [J]. Ecological Modelling, 2004, 175(1): 96.
- [18] 胡琰, 李国岫, 李少鹏. 发动机匹配优化算法的研究[J]. 北方交通大学学报, 2011, 35(4): 159.
HU Dan, LI Guoyou, LI Shaopeng. Research of engine match optimization algorithm [J]. Journal of Northen Jiaotong University, 2011, 35(4): 159.